

日本惑星科学会
2024 年秋季講演会 講演要旨集

2024 年 9 月 24 日～26 日
九州大学医学部百年講堂

日本惑星科学会 賛助会員

NV5 Geospatial 株式会社

株式会社ナックイメージテクノロジー

株式会社ノビテック

講演会場へのアクセス

九州大学医学部百年講堂 〒812-8582 福岡市東区馬出 3-1-1



馬出（まいだし）九大病院前より
百年講堂まで徒歩8分

【地下鉄から百年講堂まで】



福岡空港より



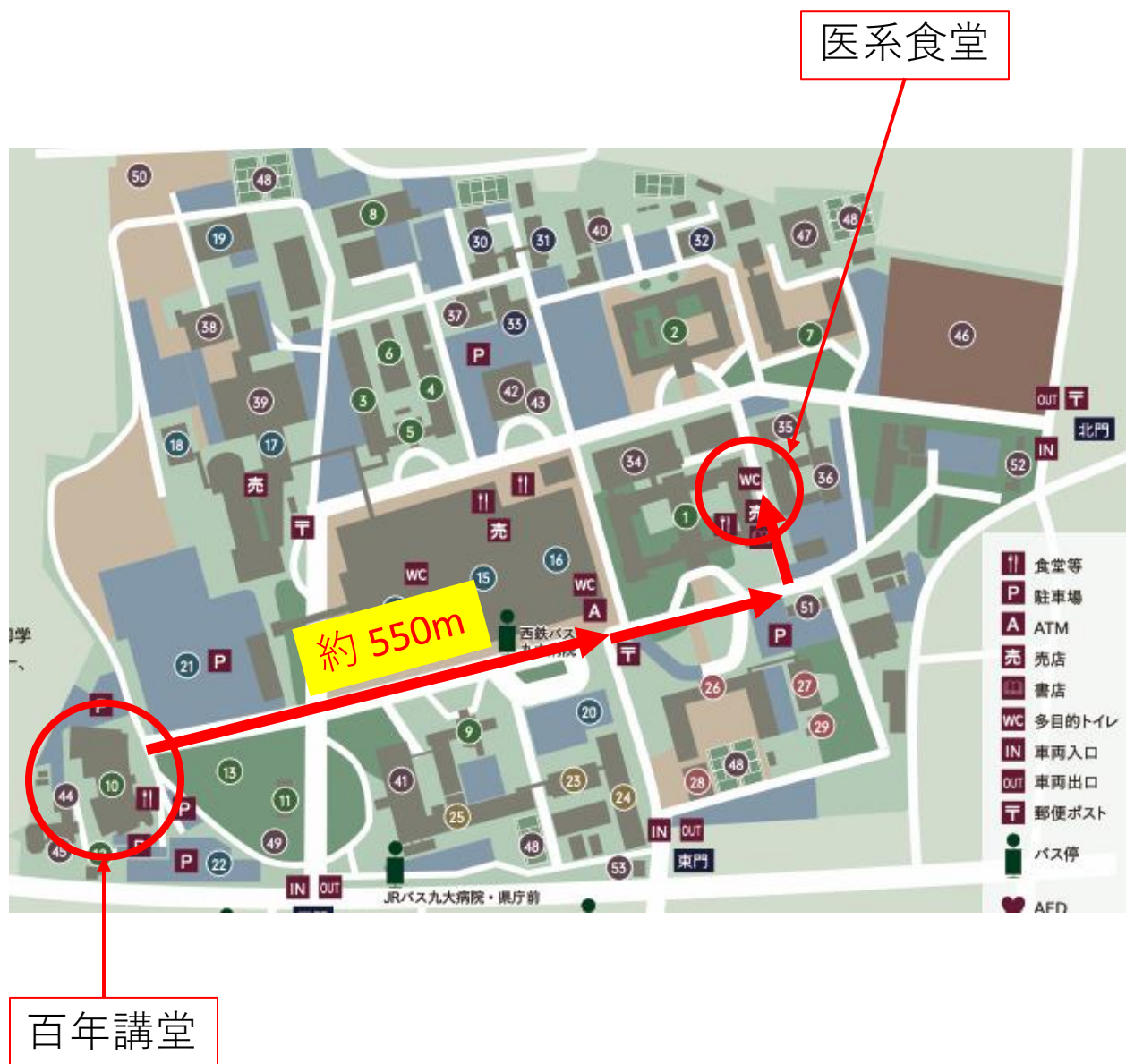
天神より



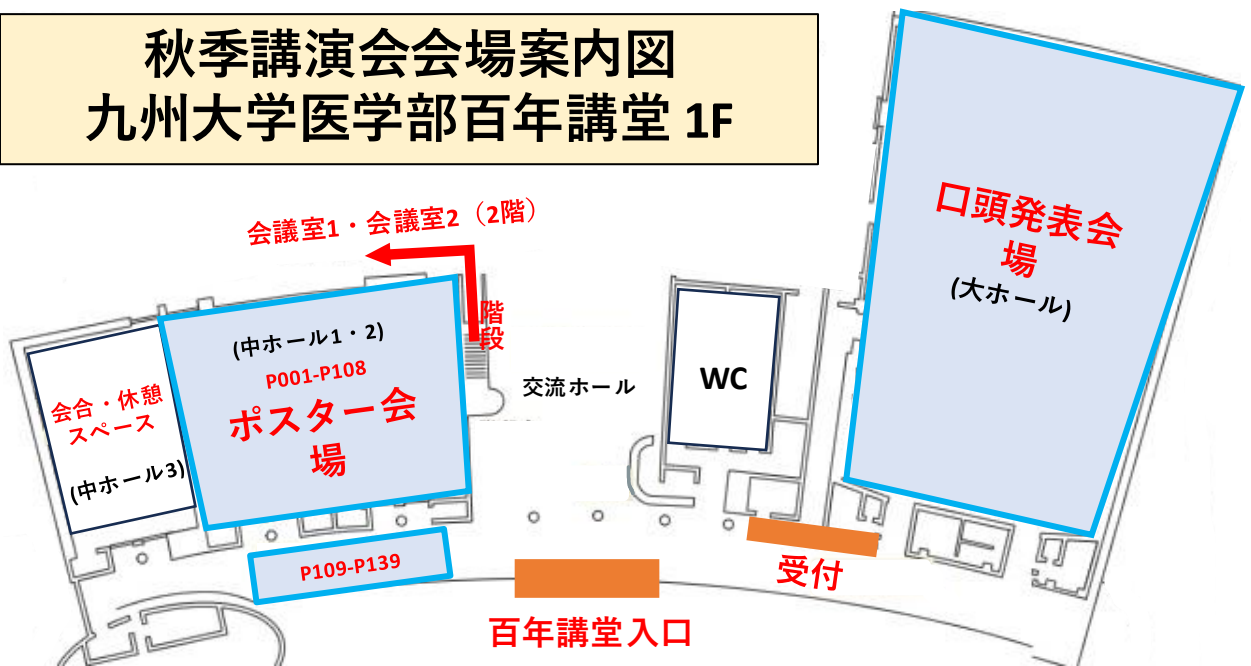
JR博多駅より



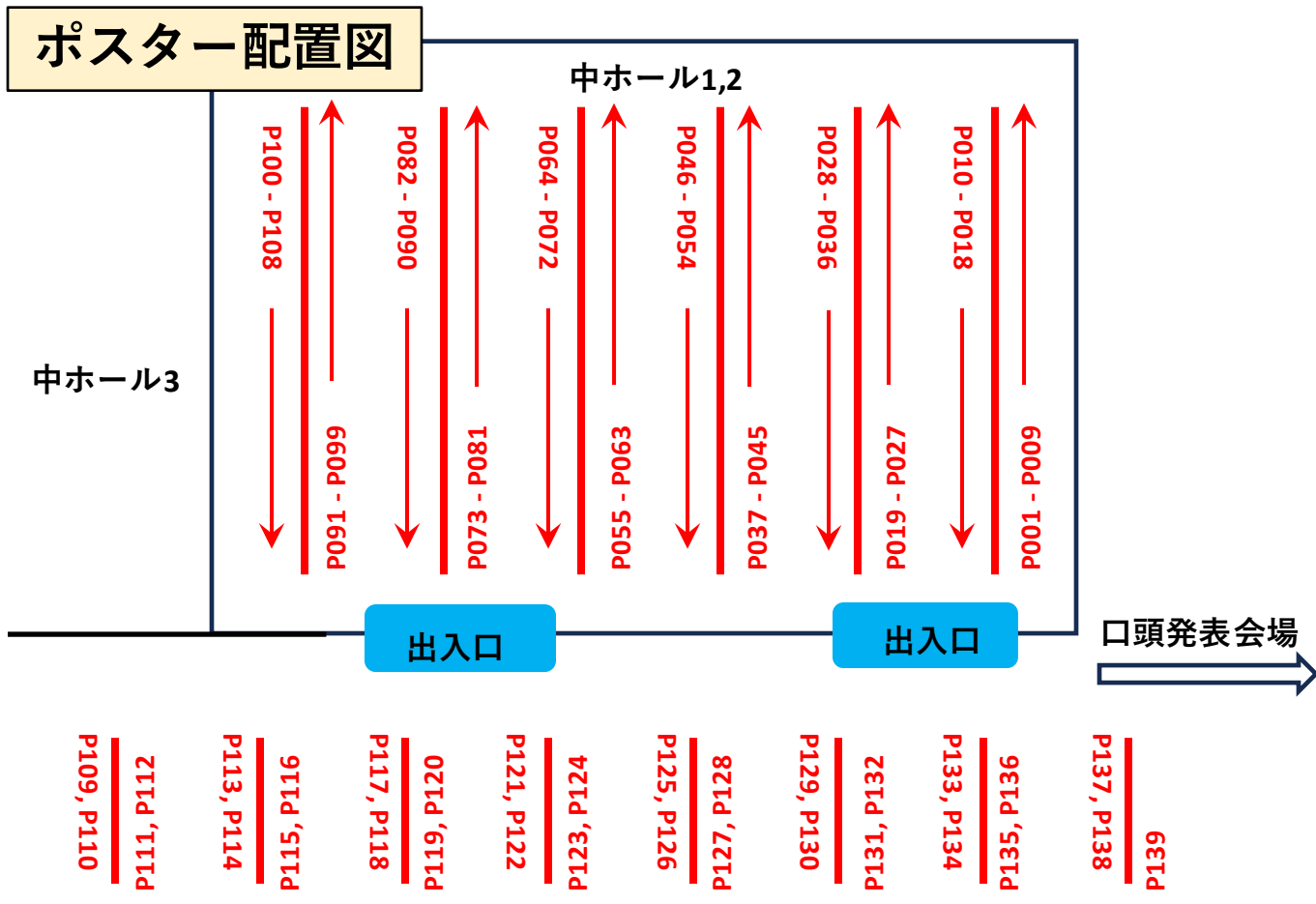
懇親会場： 九大生協医系食堂



秋季講演会会場案内図 九州大学医学部百年講堂 1F



ポスター配置図



全体スケジュール

9月24日（火）

8:35	～	9:00	開場、受付
9:00	～	12:00	最優秀発表賞選考特別セッション
12:00	～	13:00	昼食
13:00	～	14:00	ポスターコアタイム 1
14:00	～	15:20	惑星大気・表層環境
15:30	～	16:30	火星とその衛星
16:40	～	17:30	火星とその衛星
17:40	～	18:40	巨大惑星とその衛星 / 彗星・流星

9月25日（水）

8:35	～	8:50	開場、受付
8:50	～	9:40	小惑星・小天体
9:50	～	10:50	小惑星・小天体 / 太陽系外縁天体
11:00	～	12:10	機器開発・将来計画
12:10	～	13:10	昼食 / 太陽系RFI説明会
13:10	～	14:10	ポスターコアタイム 2
14:10	～	15:20	惑星内部 / 衝突現象
15:30	～	16:30	衝突現象 / 水星
16:30	～	17:30	総会
17:30	～	18:10	最優秀研究者賞受賞記念講演
18:30			懇親会

9月26日（木）

8:35	～	8:50	開場、受付
8:50	～	9:30	アストロバイオロジー / 隕石
9:40	～	10:40	惑星の形成と進化 / 系外惑星
10:50	～	11:40	原始惑星系円盤
11:40	～	12:40	ポスターコアタイム 3
12:40	～	13:40	昼食
13:40	～	14:30	原始惑星系円盤
14:40	～	15:30	原始惑星系円盤
15:40	～	16:50	月
17:00	～	18:10	月
18:10			閉会

最優秀発表賞特別セッション以外は
口頭講演の持ち時間は10分（発表8分+質疑2分）です

口頭講演 9月24日（火） 午前

最優秀発表賞選考特別セッション 座長： 鎌田俊一

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
SA-01	9:00	于 賢洋	火成活動とマントル対流による月内部進化の3次元部分球殻モデル
SA-02	9:15	土井 聖明	PDS 70 の ALMA Band 3 観測が明らかにした惑星外側での非軸対称なダスト集積
SA-03	9:30	平井 英人	有機物エアロゾル模擬物質の表面エネルギーと弾性率の温度依存性
SA-04	9:45	岡本 珠実	太陽系内側天体の炭素枯渇問題に対する有機物燃分解の影響
SA-05	10:00	吉田 有宏	一酸化炭素分子輝線の圧力広がりを用いた原始惑星系円盤ガス面密度分布の精密測定
	休憩 (15分)		
SA-06	10:30	所司 歩夢	質量降着段階における原始惑星系円盤の詳細構造形成：へびつかい座分子雲の円盤の超解像度サーベイ
SA-07	10:45	神野 天里	大規模惑星形成N体シミュレーションで探る氷惑星の起源
SA-08	11:00	中澤 風音	短周期系外惑星大気における窒素と硫黄の濃集：塩の熱解離の影響と観測可能性
SA-09	11:15	平田 佳織	水星カロリス盆地周辺の地殻元素組成の分解解析：火成活動史とマントル不均質への示唆
SA-10	11:30	折原 龍太	遷移円盤最内域の傾いたinner diskが作る影を利用した円盤幾何構造の推定
SA-11	11:45	福原 優弥	原始惑星系円盤の鉛直シア不安定性とダストの共進化：微惑星形成と円盤観測への示唆

口頭講演 9月24日（火） 午後

惑星大気・表層環境 座長： 今村 剛、濱野 景子

講演番号	開始時刻	筆頭著者	講演タイトル
0A-01	14:00	滝川 有希	金星の紫外アルベドと大気大循環の長期変動(2)
0A-02	14:10	小泉 海翔	TGO搭載分光器NOMADを用いた火星中間圏水氷雲における核生成機構の研究
0A-03	14:20	根岸 昌平	中間赤外線イメージング分光による木星衛星イオ表層を模擬した二酸化硫黄固体の変性実験
0A-04	14:30	檜村 博基	金星大気の全球非静力学計算
0A-05	14:40	今村 剛	大気波動による金星下層雲の不連続的生成
0A-06	14:50	瀧 哲朗	地球型惑星大気における非温室効果ガスの温室効果：水蒸気分布と断熱温度勾配の影響
0A-07	15:00	濱野 景子	溶融鉄・ケイ酸塩メルト間の元素分配条件とマグマオーシャンの酸化還元状態
0A-08	15:10	吉田 辰哉	原始地球における富水素大気とマグマオーシャンの共進化

火星とその衛星 座長： 田畑 陽久、野口 里奈

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
0B-01	15:30	杉本 佳祈	ランパートクレーターの形態分類・分布に基づく火星地下氷分布の探索
0B-02	15:40	Courteney Summer Monchinski	火星衛星の起源：水蒸気の効果を考慮した周火星円盤の進化
0B-03	15:50	ワン チャンチン	母岩組成および流体の移流過程を考慮した火星炭酸塩の組成および分布の支配要因の研究
0B-04	16:00	竹村 知洋	岩石質固体天体表層におけるマルチスケールの起伏解析
0B-05	16:10	鬼頭 蓮	デルタ地形の水槽実験から復元する太古火星の海水準変動
0B-06	16:20	三平 舜	Slope streak形成過程における粒子間固着力の影響
	休憩 (10分)		
0B-07	16:40	内田 雄揮	Phobosのクレーター分布の異方性が示す表層進化過程
0B-08	16:50	鎌田 有紘	過去数百万年間の火星地下氷進化モデル
0B-09	17:00	田畑 陽久	火星散逸大気由来の酸素イオンがフォボス表面スペクトルに与える影響
0B-10	17:10	野口 里奈	超小型火山地形ルートレスコーンからアクセスする火星表層浅部探査の提案
0B-11	17:20	沖山 太心	モンテカルロシミュレーションとMAVEN観測に基づく火星ディフューズオーロラに対する磁場の影響に対する研究

巨大惑星とその衛星 / 彗星・流星 座長： 荒川創太

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
0C-01	17:40	太田原 裕都	エンセラダスの亀裂間隔に基づく過去の熱流束推定
0C-02	17:50	木村 淳	すばる望遠鏡での近赤外分光観測によるエウロパ水噴出の探索
0C-03	18:00	高橋 聖輝	分化を考慮したガニメデの熱進化モデル：核形成と衛星半径変化
0C-04	18:10	村嶋 慶哉	巨大衝突による原始天王星系円盤形成シミュレーション：状態方程式とSPH法のスキーム依存性
0C-05	18:20	藤井 悠里	土星と木星の巨大衛星系の形成：惑星磁場強度と周惑星円盤の構造
0C-06	18:30	辰馬 未沙子	ペブル同士の衝突付着による接触面半径モデルの構築とダスト付着N体計算による検証

口頭講演 9月25日（水） 午前

小惑星・小天体 / 太陽系外縁天体 座長： 吉川 真、金丸 仁明

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OD-01	8:50	渡邊 誠一郎	はやぶさ2の探査と帰還試料分析から得られた制約条件を満たす太陽系形成論
OD-02	9:00	巽 瑛理	はやぶさ2#の小惑星サイエンス
OD-03	9:10	安藤 太一	メインベルトにおける小惑星リュウグウの衝突進化史
OD-04	9:20	中原 俊平	小惑星における表面更新と宇宙風化頻度分布の関係
OD-05	9:30	吉川 真	地球・月・火星への小惑星接近
休憩 (10分)			
OD-06	9:50	岡田 達明	二重小惑星探査計画Heraの熱赤外カメラ観測
OD-07	10:00	金丸 仁明	二重小惑星に働くYarkovsky効果
OD-08	10:10	古川 聡一郎	Ryugu試料の宇宙風化による近赤外分光学的不均一性 ～太陽紫外線による短時間宇宙風化作用の唯一の天然証拠～
OD-09	10:20	磯邊 優奈	小天体表面を覆う岩石粒子の挙動に対する粒子形状の効果
OD-10	10:30	有松 亘	TNO恒星掩蔽観測キャンペーンTABASCOの初期成果
OD-11	10:40	池谷 蓮	カロンの双子クレーター

機器開発・将来計画 座長： 仲内 悠祐、倉本 圭

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OE-01	11:00	倉本 圭	火星衛星探査計画MMX：2026年打ち上げに向けて
OE-02	11:10	寫生 有理	次世代小天体サンプルリターンミッションの検討状況報告
OE-03	11:20	日向 輝	火星探査に向けたその場K-Ar年代測定装置による火星隕石の年代測定実験
OE-04	11:30	関 宗一郎	惑星探査用イオン質量分析器のグラフェンによる感度・質量分解能の向上
OE-05	11:40	熊本 篤志	次世代小天体サンプルリターンミッションにおける小天体内部構造探査のためのレーダシステム検討
OE-06	11:50	仲内 悠祐	SLIM搭載マルチバンド分光カメラ(MBC)の月面着陸後観測
OE-07	12:00	岩谷 隆光	惑星探査用ガスクロマトグラフ-質量分析計(GC-MS)のためのGC-MSインターフェイスの開発

口頭講演 9月25日（水） 午後

惑星内部 / 衝突現象 座長： 黒澤 耕介、黒崎 健二

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
0F-01	14:10	菖蒲迫 健介	最小二乗SPH法の定式化と実装
0F-02	14:20	松井 亮介	GHz-DAC音速法による氷天体弾性研究の提案
0F-03	14:30	田井東 大貴	応力履歴依存粘性を採用した2次元円環マントル対流計算によるプレートテクトニクス再現の試み
0F-04	14:40	黒澤 耕介	隕石の衝撃変成度2分性の成因
0F-05	14:50	豊嶋 遥名	液体の水を含む表面でのクレーター形成に伴う温度上昇：大気存在下での湿った砂標的に対する高速度衝突実験
0F-06	15:00	落合 葉子	天体衝突による複雑有機分子合成のモンテカルロシミュレーション
0F-07	15:10	横田 優作	小惑星起伏地形に起因するクレーター形状の多様性に関する実験的研究

衝突現象 / 水星 座長： 黒澤 耕介、黒崎 健二

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
0G-01	15:30	松原 光佑	高速度衝突による蛇紋岩インパクトの水和状態の変化
0G-02	15:40	内海 秀介	弾性体力学シミュレーション手法の新しい定式化
0G-03	15:50	黒崎 健二	砂標的への衝突実験と数値流体シミュレーションの比較
0G-04	16:00	笹井 遥	氷天体上の高速斜め衝突により発生するホットスプリング
0G-05	16:10	中澤 淳一郎	超高速衝突におけるクレーターのスケーリング則 「終段階有効エネルギー」の改良とその評価
0G-06	16:20	中村 郁仁	小天体の軌道進化とその衝突による原始水星のマントル剥ぎ取り

16:30 総会

最優秀研究者賞受賞記念講演 座長： 黒川 宏之

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
SB-01	17:30	田崎 亮	原始惑星系円盤のダスト赤外線観測の最前線

口頭講演 9月26日（木） 午前

アストロバイオロジー / 隕石 座長： 癸生川 陽子

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OH-01	8:50	癸生川 陽子	熱分解ガスクロマトグラフィー質量分析法を用いた炭素質コンドライトの有機物の直接検出
OH-02	9:00	宮脇 誠一	岩石天体の衝突によって生成された蒸気雲内の化学反応計算
OH-03	9:10	安部 隼平	隕石母天体内部の水質変質模擬実験での糖の生成におけるガンマ線とアンモニアの影響
OH-04	9:20	荒川 創太	新しいコンドルール形成モデル：木星形成後のダスト層への高離心率微惑星の高速突入

惑星の形成と進化 / 系外惑星 座長： 小林 浩、長沢 真樹子

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OI-01	9:40	小林 浩	衝突モデルの構築と衝突進化
OI-02	9:50	小久保 英一郎	巨大衝突によって形成される惑星系の軌道構造II
OI-03	10:00	神原 祐樹	拡散する微惑星リングにおける原始惑星の寡占的成長
OI-04	10:10	平野 照幸	近赤外マルチバンド視線速度観測による若い系外惑星の質量推定
OI-05	10:20	リヴィングストン ジョン	若いコンパクトな多惑星系V1298 Tauにおける低密度、離心率、エントロピー
OI-06	10:30	長沢 真樹子	惑星-惑星散乱のもととなる近接惑星系の形成

原始惑星系円盤 座長： 富永 遼佑

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OJ-01	10:50	石崎 梨理	原始太陽系円盤におけるケイ酸塩ダストおよび円盤ガスの酸素同位体組成進化シミュレーション
OJ-02	11:00	伊藤 蔵人	原始惑星系円盤でのガス凝縮に伴う圧力バンプの形成
OJ-03	11:10	大城 榛音	衝突シミュレーションで探るダストアグリゲイトの跳ね返り障壁
OJ-04	11:20	マノラジ イヴァン ジュダ	原始惑星系円盤における有機物の紫外線合成に対する中心星と近傍大質量星の影響
OJ-05	11:30	余 金霏	小惑星の多成分揮発性物質による氷ペブル集積モデルの検証

口頭講演 9月26日（木） 午後

原始惑星系円盤 座長： 野津 翔太、城野 信一

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
0J-06	13:40	和田 航汰	ストリーミング不安定性でつくられるダスト集積領域でのダスト衝突速度
0J-07	13:50	加藤 遼	ダスト・円盤温度共進化が駆動する自発的ダスト濃集と微惑星形成
0J-08	14:00	長谷川 幸彦	ダスト間の衝突結果にダストの物性が与える影響
0J-09	14:10	鈴木 慧次	原始惑星系円盤の降着に対する巨大惑星による抑制効果
0J-10	14:20	近藤 克	多様な中心星と加熱機構を考慮した原始惑星系円盤内のスノーライン移動：ハビタブル惑星への影響
休憩（10分）			
0J-11	14:40	富永 遼佑	原始惑星系円盤におけるダストの流体力学的な集積と衝突進化
0J-12	14:50	城野 信一	アモルファス氷粒子の焼結による成長
0J-13	15:00	森 昇志	質量損失を伴う磁気的な原始惑星系円盤の長期温度進化：スーパーアース形成に与える影響
0J-14	15:10	関口 瑞希	原始惑星系円盤のギャップイメージング手法としての深層学習モデル開発
0J-15	15:20	野津 翔太	ALMA 観測による FU Ori 型星 V883 Ori の円盤における 13C17O 輝線の検出

月 座長： 小林真輝人、小野寺圭祐

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OK-01	15:40	大竹 真紀子	月マントル組成の推定：小型月着陸実証機SLIMによる月面岩石の観測と軌道上観測データを組み合わせたカンラン石露出域の解析
OK-02	15:50	長岡 央	SLIMマルチバンド分光カメラEMによる月・地球岩石サンプルの岩石組織の比較と評価
OK-03	16:00	坂井 優大	月周回衛星かぐやLRS観測に基づくMare Frigoris西中央部の埋没凹地形成過程の解明
OK-04	16:10	荒木 亮太郎	かぐやマルチバンドイメージャが明らかにした月の火砕堆積物の分布：火砕物の被覆範囲と揮発性成分量の関係について
OK-05	16:20	野間 光葉	月のImbrium盆地の放出物厚さとSPA盆地内部のTh異常との関係
OK-06	16:30	小野寺 圭祐	アポロ短周期月震計データの解析によりもたらされた月の地震活動の新たな描像
OK-07	16:40	吉村 洋一	月形成円盤における角運動量輸送の解像度依存性
休憩（10分）			
OK-08	17:00	阿部 広也	地球風による月面への40Arの供給：アポロサンプルと月隕石の対比
OK-09	17:10	篠原 直生	月の地下空洞において揮発性分子は存在するのか
OK-10	17:20	豊川 広晴	SELENEが観測した月の様々な緯度の影領域における水氷粒子
OK-11	17:30	西谷 隆介	月極域探査機（LUPEX）プロジェクトの検討状況：水資源分析計（REIWA）の開発と詳細観測運用計画
OK-12	17:40	戸井田 愛理	LDA計測に向けた検討：模擬物質を利用した実験的検討
OK-13	17:50	竹倉 駿也	LDA計測に向けた検討：共振と定在波の周波数に関する数値シミュレーション
OK-14	18:00	小林 真輝人	THz帯での月シミュラントの放射強度計測

ポスター講演 P-001 ～ P-030

コアタイム1: 9月24日 13:00-14:00、コアタイム2: 9月25日 13:10-14:10、コアタイム3: 9月26日 11:40-12:40

講演番号	発表者	講演タイトル
P-001	長 勇一郎	月面探査に向けたレーザー誘起プラズマ発光分光計の開発
P-002	岩田 隆浩	月面メートル波電波干渉計TSUKUYOMIの概念検討
P-003	田中 智	日本における月地震観測ネットワーク構築にむけた開発状況
P-004	戸井田 愛理	軽量・小型X線撮像分光装置を用いた月面蛍光X線探査の検討
P-005	豊川 広晴	3次元地形モデルとハイパースペクトルデータの融合による露頭調査
P-006	諸田 智克	月面サンプルリターン探査の実現に向けた科学検討と機器開発の状況
P-007	宮崎 理紗	月極域の高精度な標高数値モデル(DEM)の作成検討
P-008	神田 恵太朗	Chang' E-4 Yutu-2ローバー搭載地中レーダー観測による地下岩石分布の推定
P-009	森田 里咲	無水鉱物への重水素イオン照射実験による月表層におけるH2O生成過程の解明
P-010	石山 謙	Marius HillsとMare Tranquillitatisの溶岩に対する鉱物的類似性
P-011	寺戸 聖菜	自転する粘弾性天体の扁平化に関する数値シミュレーションと月の化石バルジについての検討
P-012	宝本 航大	月周回衛星ARTEMISで観測されたダスト衝突に起因する電圧信号の解析
P-013	川崎 稜平	月面探査ローバへの搭載を目指したステレオカメラの基礎実験
P-014	寺菌 淳也	超小型ローバー「YAOKI」を応用した科学観測類型の提案
P-015	柳澤 正久	月面衝突閃光の低分散スペクトル
P-016	本田 親寿	小型月着陸実証機SLIM着陸地点周辺のボルダーサイズ頻度分布
P-017	長坂 奏汰	月惑星画像のMFD高精細化処理のための前処理の検討
P-018	石原 吉明	月極域探査機 (LUPEX) プロジェクトの検討状況: 近赤外画像分光装置 (ALIS) の開発と疎観測運用計画
P-019	池田 あやめ	月クレータにおける岩塊分布と組成の関係
P-020	春山 純一	月惑星の縦孔・地下空洞探査 (UZUME) プログラムのシナリオ
P-021	嶋田 和人	月面ヒト滞在の鍵となる縦孔火成地形
P-022	鈴木 雄大	極端紫外領域における水星の反射スペクトルの位相角・経度依存性
P-023	永峰 健太	火星衛星探査計画 MMX 搭載ミッション機器の開発と探査機システム総合試験の状況
P-024	横田 勝一郎	火星衛星探査計画MMX搭載イオンエネルギー質量分析器MSAの較正試験
P-025	松岡 亮	集積期の火星への水供給率: Phobosの存在からの制約
P-026	野口 克行	火星極夜域における大気主成分(CO2)の過飽和に関する研究
P-027	千々岩 拓夢	リモートセンシング解析から探る火星北極周辺の石膏砂丘の成因
P-028	菊地 紘	Mars Expressの画像データの検索・閲覧システムの開発
P-029	池田 伊吹	星間起源有機物の小天体内部における安定性と新規アミノ酸生成への影響
P-030	櫻井 悠貴	初期の火星・地球大気における太陽高エネルギー荷電粒子照射によるペプチドの非生物合成

ポスター講演 P-031 ～ P-060

コアタイム1: 9月24日 13:00-14:00、コアタイム2: 9月25日 13:10-14:10、コアタイム3: 9月26日 11:40-12:40

講演番号	発表者	講演タイトル
P-031	小木 菜々夏	初期地球・火星大気下でのアミノ酸への太陽高エネルギー粒子照射によるペプチド形成に対する含硫アミノ酸の影響評価
P-032	坂谷 尚哉	次世代小天体サンプルリターン計画で目指す小天体内部構造探査
P-033	佐々 健太郎	キューブサットの太陽輻射圧を利用した小天体着陸シミュレーション
P-034	田中 智	次世代小惑星サンプルリターンミッションにおける地震観測装置の開発
P-035	荒井 朋子	深宇宙探査技術実証機DESTINY+プロジェクトの進捗
P-036	平井 隆之	DESTINY+搭載用ダストアナライザの開発と地上校正計画2024
P-037	石橋 高	DESTINY+搭載小惑星追尾望遠カメラ (TCAP) およびマルチバンドカメラ (MCAP) の開発状況
P-038	岡本 尚也	DESTINY+搭載カメラの地上光学校正の実施状況
P-039	千秋 博紀	Phaethon熱モデルー形状・公転軌道・自転軸傾斜角の相乗効果
P-040	高橋 茂	小惑星表層下からの熱放射を考慮したモデルによる1 Ceres の物性パラメータ値の推定
P-041	塩谷 圭吾	JUICE搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA): 概要および月フライバイを利用した測距試験の完了報告
P-042	川上 稜平	Ganymede金属核の熱進化モデル計算にもとづくダイナモ磁場発生と核サイズ・組成の推定
P-043	門屋 辰太郎	CO ₂ の移動時間スケールから推定されるエウロパでのCO ₂ の継続的供給
P-044	高木 聖子	エウロパ大気における発光輝線の探索:地上望遠鏡による可視・分光観測
P-045	小野寺 圭祐	土星衛星タイタン離着陸探査計画Dragonflyでの地震観測に向けたサイエンス検討状況の報告 (2023-2024)
P-046	中嶋 瑞穂	地上望遠鏡観測で探るタイタン大気の時間変動
P-047	飯野 孝浩	タイタン中層大気におけるシアノジアセチレン (HC ₅ N) 分子の探索
P-048	丹 秀也	微量金属濃度によるエンセラダスでの生命活動の制限
P-049	水沼 卓也	エンセラダス南極域プルームの再堆積によるクレーター消失の評価
P-050	大坪 貴文	すばる Hyper Suprime-Cam がとらえた 28P/Neujmin の彗星核とその衝効果
P-051	吉田 二美	すばる望遠鏡で行ったNASA のNew Horizons ミッションのフライバイターゲット探しサーベイの画像解析
P-052	浦川 聖太郎	COIASによる太陽系小天体の探索状況
P-053	笠原 慧	コメットインターセプター計画: 観測器エンジニアリングモデルの開発
P-054	田尾 涼	Comet Interceptor搭載イオン分析器開口部の設計と彗星イオン検出量の推定
P-055	種子 彰	月と地球海洋底の起源、小惑星帯と小惑星の起源、水星の起源、月形成インパクトの起源、生命の起源と進化、キンバーライトパイプの起源、地軸傾斜の起源、プレート移動方向急変の起源、南極大陸移動停止の起源、月が常に地球を向く起源、月の表側だけに海が有る起源、プレートが重なる起源、環太平洋弧状列島と背弧海盆の起源、地球の海洋底1パーミル深さの起源、パンアレン帯1割偏芯の起源、地磁気極性反転の起源、木星大赤斑の起源、CERRA断裂の起源、隕石重爆撃期の起源、月偏芯の起源、とその検証方法
P-056	種子 彰	起源[宇宙・銀河・太陽系・地球と月・プレートテクトニクス・駆動力・地震・生命の誕生と進化etc]の探究方法、起源の検証方法
P-057	井上 昭雄	赤外線天文衛星GREX-PLUS計画:進捗報告2024
P-058	田崎 亮	JWSTによるedge-on原始惑星系円盤の近・中間赤外線撮像観測
P-059	芝池 諭人	惑星候補AB Aurigae bの潜在的周惑星円盤からのダスト連続波放射の予測
P-060	堀 安範	直接撮像観測された太陽系外ガス惑星の衛星系とその将来観測

ポスター講演 P-061 ～ P-090

コアタイム1: 9月24日 13:00-14:00、コアタイム2: 9月25日 13:10-14:10、コアタイム3: 9月26日 11:40-12:40

講演番号	発表者	講演タイトル
P-061	成田 憲保	MuSCATシリーズによって発見された新たなトランジット惑星：2023-2024
P-062	伊藤 祐一	サブネプチューンのマグマオーシャンリトリバル法の開発
P-063	渡辺 紀治	高温星TOI1355周辺の楕円軌道ホットジュピターの発見
P-064	大野 和正	JWST-NIRSpecによる曇ったサブネプチューンGJ1214bの大気透過分光観測
P-065	Gabriel Teixeira Guimaraes	コンパクト惑星系の軌道不安定性
P-066	黄 宇坤	星団内における連星惑星のダイナミクス
P-067	玄田 英典	機械学習を用いた微惑星衝突の結果の推定
P-068	二村 徳宏	半解析的な地球質量の導出
P-069	ソフィア リカフィ カパトリック	木星・土星カオス励起モデルにおける4つの地球型惑星の同時形成と惑星への水供給
P-070	小嶋 一生	分子輝線データの主成分分析で探る大小マゼラン雲における原始星の化学的多様性
P-071	吉田 有宏	TW Hya円盤における空間的に局在したS0放射の発見：原始惑星アウトフロー仮説
P-072	田中 佑希	離心軌道を持つ巨大ガス惑星の原始惑星系円盤内での軌道進化
P-073	鳥居 尚也	土星リング内小衛星が作るギャップ端構造：小衛星の離心率と軌道傾斜角の影響
P-074	近藤 克	ダスト・温度が共進化する磁気降着円盤内側領域への水輸送：岩石惑星形成時期・位置への示唆
P-075	市川 修次	原始太陽系円盤の木星ギャップの外側に堆積する難揮発性凝縮物が太陽系の同位体二分性に及ぼす影響
P-076	奥谷 彩香	白色矮星周りの氷天体を起源とするダスト・ガス円盤の遠赤外スペクトル
P-077	奥住 聡	巨大惑星による原始惑星系円盤のギャップ形成と衝撃波加熱の同時モデリング
P-078	岡本 珠実	木星大気中の貴ガス濃縮問題に対する円盤光蒸発の影響
P-079	Fang Han	原始惑星系円盤内のストリーミング不安定による雷の生成
P-080	吉田 雄城	分子動力学シミュレーションで探るダストモノマー間相互作用：回転とねじれ運動
P-081	瀧 哲朗	原始惑星系円盤における微視的スケール乱流のモデル化
P-082	榎本 晴日	原始惑星系円盤中の磁気降着構造：大局的磁場進化を考慮した新しい局所非理想MHD計算の開発
P-083	萩原 正博	単一の枠組みを用いた太陽系地球型惑星とスーパーアースの形成
P-084	田中 圭	散乱も考慮した円盤ダスト放射の解析解
P-085	江原 一輝	揮発性元素の拡散から見るコンドリュールの形成条件
P-086	櫻井 哲志	熱進化している微惑星の物性：多孔質焼結体の充填率に対する機械特性の変化の測定
P-087	鈴木 政紀	隕石母天体の水質変質を模したホルムアルデヒド・アンモニア及びヘキサメチレンテトラミンからの不溶性有機物形成
P-088	江頭 勇介	炭素質コンドライトへのUV照射による宇宙風化模擬実験
P-089	三浦 均	コンドリュールに見られる棒状カンラン石凝固組織形成過程の数値計算
P-090	ソ チャンウル	大気と内部の化学的相互作用を考慮した惑星種族合成モデルに基づく短周期サブネプチューンの大気組成の理論予測

ポスター講演 P-091 ～ P-120

コアタイム1: 9月24日 13:00-14:00、コアタイム2: 9月25日 13:10-14:10、コアタイム3: 9月26日 11:40-12:40

講演番号	発表者	講演タイトル
P-091	黒川 宏之	上層大気の水素・重水素比が反映する大気散逸の律速過程
P-092	中山 陽史	強XUV環境における地球型惑星の大気散逸：CO ₂ 大気と地球大気
P-093	遠藤 美朗	地球類似惑星における大気CO暴走：火成活動と恒星からの距離の影響
P-094	齊藤 大晶	高層大気の加熱源としての超低周波音
P-095	草野 百合	3次元多成分イオン磁気流体力学シミュレーションによる初期地球における膨張水素大気の非熱的散逸モデリング
P-096	寺田 直樹	微小隕石衝突蒸気雲による水星ナトリウム外圏大気の衝突加速：電離の効果
P-097	西野 真木	アルフヴェン・マッハ数が低い太陽風条件下における火星マグネトシースでの強いプラズマ加速
P-098	藤井 友香	スーパーアース及びサブネプチューンの大気構造と進化におけるアルカリ金属蒸気の影響
P-099	福井 暁彦	大気分光観測に適した系外金星の発見
P-100	前田 悠陽	金星の初期表層進化に基づく海洋獲得の可能性の検討
P-101	川村 陽	金星における紫外遮蔽による水損失効率の抑制とマグマオーシャン寿命の長期化
P-102	小玉 貴則	全球雲解像モデルを用いたトラピスト1eの気候
P-103	天田 航	大気大循環モデルを用いた地球型惑星の海洋形成過程における水量・恒星日射量依存性
P-104	高橋 航	熱対流を取り扱うためのラグランジュ的流体シミュレーションSPH法コードの開発
P-105	瀬野 泉美	対流不安定性の数値的線形解析
P-106	佐々木 洋平	高速回転球殻内の非弾性熱対流と木星型惑星大気表面帯状構造
P-107	中島 涼輔	木星内部安定成層中の磁気流体波の線形固有値解析
P-108	西尾 峻人	破壊を伴う衝突による小惑星速度変化
P-109	山本 大晟	岩石斜め衝突エジェクタによって砂標的に形成される溝状構造
P-110	山口 祐香理	4種類の岩石からの1 km/s以上の高速度衝突エジェクタ：放出速度と角度の関係
P-111	門野 敏彦	エジェクタパターンの解析：ターゲット粒子サイズ分布との定量的関係
P-112	櫻井 諒太	大気圧下および真空中での付着性レゴリス層から受ける抵抗力の実験的推定
P-113	宇都宮 忠勝	ボルダーへの衝突におけるアーマリング効果に対するボルダーの深さ依存性：ボルダーの強度がクレーター形成に及ぼす影響
P-114	山田 理央奈	微惑星衝突物理の理解に向けて：微惑星の衝突シミュレーションと小惑星リュウグウのクレーター
P-115	愛敬 雄太	小惑星リュウグウにおける岩塊表面の小クレーター解析に基づく岩塊衝突破壊強度の推定
P-116	柿木 玲亜	基盤岩を覆うレゴリス層のクレーター成長過程：基盤岩が掘削流に及ぼす影響
P-117	松阪 竜希	鉄・岩石ラブルパイル天体模擬試料への衝突破壊実験及び三次元起軌道解析
P-118	菊地 翔太	はやぶさ2分離カメラ画像を用いたSCI衝突イジェクタの非対称分布復元
P-119	菊川 涼介	内海を覆う氷地殻上のクレーター形成実験
P-120	石井 竣基	氷微惑星の層構造が及ぼす衝突破片の質量速度分布への影響

ポスター講演 P-121 ～ P-139

コアタイム1: 9月24日 13:00-14:00、コアタイム2: 9月25日 13:10-14:10、コアタイム3: 9月26日 11:40-12:40

講演番号	発表者	講演タイトル
P-121	御子 裕治	小天体衝突が系外惑星の大気運動に与える影響
P-122	三桝 裕也	はやぶさ2の拡張ミッションの状況
P-123	佐伯 孝尚	次世代小天体サンプルリターンを実現する探査システムと軌道間輸送機
P-124	矢田 達	オシリス・レックス帰還試料のJAXAキュレーションにおける受入状況
P-125	金丸 礼	はやぶさ2クリーンチャンバー内の微粒子とその起源
P-126	巽 瑛理	始原的小惑星族の分類
P-127	横田 康弘	はやぶさ2# 広角カメラ ONC-W2による彗星C/2023 A3の観測速報
P-128	関口 朋彦	せいめい望遠鏡によるはやぶさ2#フライバイ目的天体（98943）2001 CC21の可視光分光観測計画
P-129	市川 真弓	NIRS3観測データの高次プロダクト開発とGISソフトウェアでの利用検討
P-130	荒井 武彦	小惑星探査機はやぶさ2搭載中間赤外カメラTIRの高次処理データの公開～リュウグウの温度・熱慣性マップ～
P-131	平田 成	PyAiGIS/AiGIS2: PythonとJupyter Notebook上で動作する不規則形状小天体探査データの対話的可視化・解析環境
P-132	平田 直之	リュウグウ全球・局所モザイク画像作成
P-133	竝木 則行	小惑星リュウグウのアルベドデータ公開
P-134	古川 聡一朗	組成と変成度を反映するChristiansen FeatureとReststrahlen Feature ～熱赤外分光撮像: TIRIによる組成と変成度の推定に向けて～
P-135	平田 成	剛体物理シミュレーションによるRubble-pile小惑星集積過程の再現と形状・内部構造の研究
P-136	佐藤 龍成	集積成長する氷微惑星の熱進化: リュウグウおよびCIコンドライト母天体への示唆
P-137	宮村 尚典	高速自転コマ型小天体における衝突クレーターの非対称形状の数値解析
P-138	道上 達広	Z-スコアを用いた小惑星エロス、イトカワ、リュウグウのボルダー空間分布
P-139	佐古 貴紀	ポリゴン地形から推定する火星表層環境～アメリカ実地調査の知見から～

火成活動とマントル対流による月内部進化の3次元部分球殻モデル (Evolution of Lunar Interior Inferred from 3-D Regional Spherical Model of a Coupled Magmatism-Mantle Convection System)

○于 賢洋¹, 亀山 真典^{2,3}, 宮腰 剛広³, 柳澤 孝寿³, 小河 正基¹

1 東京大学大学院総合文化研究科, 2 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, 3 海洋研究開発機構

地質学・測地学的観測から、月は全球で約38億年前までに0.5-5 kmの膨張が起こり、その後徐々に収縮していたことが明らかになっている (e.g., Andrews-Hanna et al., 2013, 2014)。また、月の火山活動は月形成後から徐々に活発化し、40-35億年前に活動のピークを迎え、その後約20億年-15億年前まで継続していた (e.g., Hiesinger et al., 2000, 2003)。特に Procellarum KREEP Terrane、PKT と呼ばれている地域では約20億年前にこの火山活動は再度活発化したことが知られている (e.g., Morota et al., 2011)。このような観測事実から制約される月内部の進化過程を解明するため、これまで我々はマントル対流に火成活動の効果を結合させた2次元円環数値モデルを構築し、その内部進化について調べてきた (U et al., 2023)。しかし、マントルの冷却効率はその幾何学形状に強く依存するため、進化の定量的な評価のためには3次元球殻モデルを用いた計算が必要である。我々は今回、高精度計算を可能にする3次元マントル対流計算コード (Kameyama et al., 2005) に火成活動の効果を反映することで、現実的な形状における月の内部進化を検討した。温度がソリダス温度を超えた地点で発生したマグマの移動は液相・固相間の密度差によって駆動される浸透流としてモデル化した (e.g., McKenzie, 1984)。マグマの移動に伴って液相濃集物質 (例えば放射性元素) は輸送されると考えた。また、PKTに見られる局所的な火山活動を再現するため、最上部マントル中に局所的な放射性元素濃集域を仮定したケースも併せて計算した。

その結果、連続的な部分溶融プルームの上昇により、火山活動史および半径変化史のどちらも定量的に説明することができた。マントル深部で発生したマグマが部分溶融プルームとして上部マントルへと移動する過程で減圧融解によりさらにマグマが生じ、約38億年前に1 km程度の半径膨張を引き起こすと同時に40-35億年前頃にピークを迎える火山活動を引き起こす。このとき上部マントルに生成された玄武岩質ブロックは高密度であるため深部マントルに向けて沈み込み、その沈み込みが次のプルームの成長を促す (図1)。このプルームの再活性化によって火山活動は再び活発になり長期間持続する。3次元球殻モデルでは、マグマの浮力が引き起こすプルーム上昇の場所が熱史を通してほぼ固定されているため、2次元円環モデルと比較して、マントルは冷えやすいにも関わらず全期間を通じてマグマ噴出量は約3倍に及ぶ。この量は月の海の玄武岩を説明するには十分である (Broquet & Andrews-Hanna, 2023)。また、このような長期的なマグマ上昇は局所的な放射性元素濃集域が形成する薄いリソスフェア下にて特に顕著であった。このマントル進化モデルから推定される形成直後のマントルの初期温度は1400-1800 Kであり、1200 K以下という従来の見積もり (e.g.,

Solomon & Chaiken, 1976; Kirk & Stevenson, 1989) より有意に高い。

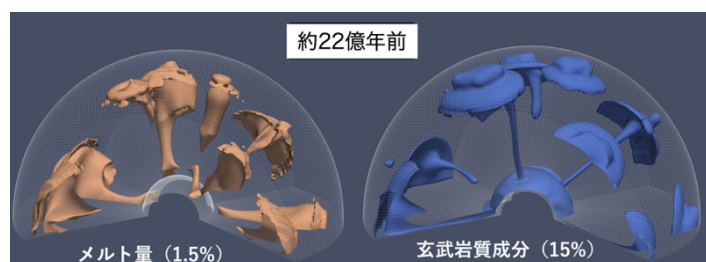


図1. 3次元モデルにて示された玄武岩質ブロックの沈み込みとそれに伴う部分溶融プルームの上昇

PDS 70 の ALMA Band 3 観測が明らかにした 惑星外側での非軸対称なダスト集積

○ 土井 聖明^{1,2}、片岡 章雅^{1,2}、Hauyu Baobab Liu^{3,4}、吉田有宏^{1,2}
Myriam Benisty^{5,6,7}、Ruobing Dong⁸、大和義英⁹、橋本淳^{2,10}

¹ 総合研究大学院大学、² 国立天文台、³ 国立中山大学 (台湾)、⁴ 国立台湾師範大学

⁵ Max Planck Institute for Astronomy、⁶ Observatoire de la Côte d'Azur、⁷ Université Grenoble Alpes

⁸ University of Victoria、⁹ 東京大学、¹⁰ アストロバイオロジーセンター

固体惑星やガス惑星コアは、原始惑星系円盤中の固体微粒子であるダストが成長・集積することで形成される。近年の ALMA による高解像度電波観測は、多くの円盤でダスト分布に構造を持つことを示しているが、これらの構造の成因や惑星形成への影響は十分に理解されていない。

PDS 70 は、円盤中の惑星が円盤構造や次の惑星形成に与える影響を検証する上で最適な対象である。過去の赤外線撮像観測は、円盤中に、降着中の惑星 PDS 70b、PDS 70c をそれぞれ 22 au、34 au の軌道位置に発見した (Keppler et al. 2018, Haffert et al. 2019)。また、過去の ALMA Band 7 (0.87 mm) 観測は、惑星の外側に、ほぼ軸対称なダストリングを示した (Keppler et al. 2019)。このリングは惑星によるダストのトラップにより形成されたと考えられ、この円盤の特徴づけから惑星の円盤構造への影響の理解を進めることができる。一方、過去の高解像度電波観測は Band 7 に限られており、円盤ダストの特徴づけには他の波長での高解像度観測が必要である。

我々は、PDS 70 の ALMA Band 3 (3.0 mm) での高解像度 (0.07 arcsec = 8 au) 観測を実施した (PI: K. Doi, H. B. Liu)。この波長は過去の観測よりも光学的に薄いため、ダストの面密度の分布をより直接捉えることができる。結果、Band 3 観測画像は、リングが明瞭な非軸対称性をもち、北西ピークでは他の方向と比べ 2.5 倍程度の強度を示した。この天体の惑星の存在と、その外側リングの非軸対称性をふまえると、円盤中の惑星はその外側にダストを動径方向のみならず方位角方向にも集積させ、次の惑星形成を促進する可能性を示唆する。

また、Band 3 観測は、中心星位置に対応する電離ガスからの free-free 放射を検出した。外側リングの位置と free-free 放射の位置から、外側リングの離心率を $e < 0.04$ と制限した。シミュレーションから重たい惑星は外側リングに離心率を駆動することが知られており (Kley & Dirksen 2006, Tanaka et al. 2022)、観測された PDS 70 リングの低い離心率から、PDS 70c の惑星質量を 4.9 木星質量以下と制限した。このように、長波長での高解像度観測から、円盤中のダスト集積の描像に加え、円盤中の惑星の特徴づけにも成功した。

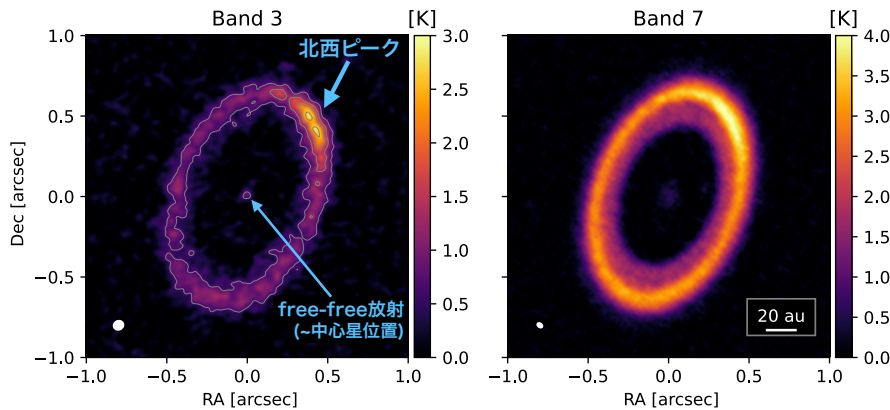


図 1: PDS 70 の Band 3 (3.0 mm、左) と Band 7 (0.87 mm、右) 観測画像。

有機物エアロゾル模擬物質の表面エネルギーと弾性率の温度依存性

○平井 英人¹、関根 康人¹、筒井 智嗣²、肥後 祐司²、井藤 浩志³、奥住 聡¹、安井 勇気⁴、伊藤 万喜子¹、中嶋 健¹、
杉本 宜昭⁴、門野 敏彦⁵、粕谷 素洋⁶

¹東京工業大学、²高輝度光科学研究センター、³産業技術総合研究所、⁴東京大学、⁵産業医科大学、⁶公立小松大学

還元的惑星大気では、紫外線や高エネルギー粒子によって有機物エアロゾルが作られる[1]。これらエアロゾルは、太陽光を吸収することで大気構造を決定し[2]、タイタンの有機物砂丘のように、表層の風成地形の形成にも寄与する[3]。エアロゾルの合体成長や風成地形形成を支配するパラメータとして、表面エネルギーと弾性率がある[4,5]。過去の研究では、エアロゾル組成の違いが、これらパラメータに及ぼす影響が調べられてきた[6,7]。一方で、大気から表層にかけて温度は広範囲で変化し、また系外惑星においてエアロゾル生成領域の温度は、軌道要素により大きく異なる。しかしながら、有機物エアロゾル模擬物質の表面エネルギーや弾性率は、これまで室温で測定されているのみであり、その温度依存性は調べられていない。

本研究では、先行研究[8,9,10,11]と同様の手法を用いて、窒素とメタンの混合ガスに低温プラズマ照射を行うことで有機物エアロゾル模擬物質を作成した。また、それらを液体メタンに浸すことで変性を受けたエアロゾル模擬物質を作成した[11]。それぞれのサンプルに対して、原子間力顕微鏡を用いて表面エネルギーを測定した。また、有機物エアロゾル模擬物質の弾性率は、ペレット化した粉末試料の X 線非弾性散乱スペクトルから得られるフォノン分散から導出した。

実験の結果、エアロゾル模擬物質の表面エネルギーと弾性率は、アレニウスの式に従う温度依存性があることが明らかになった。得られた活性化エネルギーを使うと、室温に比べタイタン表層温度(93 K)では、表面エネルギーは約 1/6 に減少し、弾性率は約 2.5 倍増加する。液体メタンによる変性をうけたエアロゾルの表面エネルギーは、変性前に比べて 1.2 倍程度大きくなる。

過去の研究[12]では、室温の表面エネルギーに起因する高い固着力によって、タイタン表面でエアロゾル粒子が跳動されるためには、嵐のような特別な気象条件を必要とすることが示唆されていた。一方で、本研究は、低温のタイタン表面における低い表面エネルギーと固着力のため、通常の風速場の範囲でも跳動が生じ、砂丘のような風成地形が形成しやすくなることを示唆する。

さらに、本研究の結果は、高温ほど有機物エアロゾルの固着力が高くなること、また、先行研究[6,7]の結果と比較して、エアロゾルの表面エネルギーはエアロゾル組成よりも温度に大きく依存する可能性があることを示唆する。もし温度の上昇に伴う固着力の増加によってエアロゾル同士の衝突合体が促進されれば、エアロゾルの数密度は減少する可能性がある。その結果、太陽光の吸収が抑制され、温度が低下する可能性がある。このように、温度とエアロゾル層の数密度を調整する負のフィードバックが存在する可能性がある。

参考文献：[1]Khare & Sagan, 1973, [2]McKay et al., 1991, [3]Lorenz et al., 2006, [4-6]Yu et al., 2017; 2018; 2021, [7]Li et al., 2022, [8]Khare et al., 1984, [9]Imanaka et al., 2004, [10]Sekine et al., 2008, [11]Hirai et al., 2023, [12]Comola et al., 2022
本研究の一部は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業（課題番号 JPMXP1222AT5000）の支援を受けた。

太陽系内側天体の炭素枯渇問題に対する 有機物燃分解の影響

○岡本珠実¹, 井田茂¹

¹ 東京工業大学地球生命研究所

地球は太陽や星間物質と比べて 3-4 桁ほど炭素量が枯渇している (e.g., Hirschmann 2018)。また隕石も同様に星間物質に比べて 1-2 桁ほど炭素が枯渇しており、その度合いは隕石の種類に依存しない (Alexander et al. 2007)。一方で、惑星間塵の分析結果や Rosetta ミッションによる 67P 彗星の分析結果から、彗星中の炭素量は星間物質とほぼ同様であることがわかっている (e.g., Matrajt et al. 2005)。つまり、太陽系天体の炭素量は図 1 で表されるように彗星・隕石母天体・地球の 3 段階の分布があると想定される。

彗星中に含まれる炭素の多くは難揮発性の有機物で構成されていると推測されている。Li et al. 2021 や Binkert & Birnstiel 2023 では、これらの有機物が原始惑星系円盤内側領域において熱分解され、全てガスへ変換されることで隕石や地球の炭素量を説明可能であると示した。しかし、実際には有機物は熱分解によって全てガスへ変換されるのではなく、質量の一部は固相に残る。この燃え残りの量は未だに解明されていない。

また Okamoto & Ida 2022 では、氷がシリケイトよりも付着しやすい場合、円盤低温領域から流入する氷ペブルの量が減少することで、1000 K を経験した粒子の割合が相対的に増加するという結論を得た。有機物の熱分解も 500 K 程度で起きると考えられるため (e.g., Li et al. 2021)、氷ペブル流の減衰によって有機物の熱分解を経験した粒子の割合も増加すると推測される。

そこで、本研究では固体炭素が全て有機物で構成されており、かつ氷の付着力が有機物及びシリケイトよりも強いと仮定した上で、この有機物粒子の円盤中の運動を追跡した。そして有機物の熱分解タイムスケールがアブラミ式で与えられると仮定した上で Ishizaki et al. 2023 と同様の手法で熱分解反応を追い、太陽系内側天体の炭素分布を説明可能か調べた。その結果円盤中の炭素分布は、有機物が熱分解する半径（熱分解ライン）内側、熱分解ラインとスノーラインの間、スノーライン外側の大きく 3 段階に別れる結果が得られた。特にスノーライン内側の炭素量はスノーライン前後でのダスト面密度比に強く依存し、その値を見積もることで炭素量の解析的な推測値の導出に成功した。最終的に、太陽系の炭素分布を再現するためには有機物の燃え残りが質量全体の 1% 未満であること、スノーライン前後の面密度比を 50 倍程度にできるような円盤パラメータが必要であることがわかった。

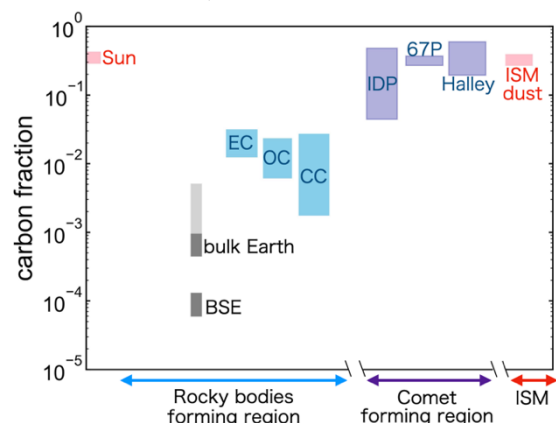


図 1 太陽系の炭素分布(Okamoto & Ida in prep.)

一酸化炭素分子輝線の圧力広がりを用いた 原始惑星系円盤ガス面密度分布の精密測定

○ 吉田 有宏^{1,2}, 野村 英子^{1,2}, Enrique Macías³, Stefano Facchini⁴, 古家 健次⁵,
塚越 崇⁶, Elena Viscardi³, exoALMA collaboration

¹ 総合研究大学院大学, ² 国立天文台, ³ ヨーロッパ南天天文台, ⁴ ミラノ大学, ⁵ 東京大学, ⁶ 足利大学

惑星系の形成過程を理解するにあたり、原始惑星系円盤におけるガスの面密度分布は極めて重要な物理量である。しかし、円盤ガスを主に構成する水素分子 (H_2) は直接には観測不可能であることから、ガス面密度分布の制約にはダスト連続波や一酸化炭素 (CO) の希少同位体分子の輝線など他のトレーサーが用いられてきた。これらの手法では、観測量からガス面密度を求める際にガス・ダスト比や H_2 ・CO 比を仮定する必要があるが、これらの値には数桁以上の不定性があり、惑星系形成理論を検証するにあたり重大な障壁となっている。

この問題を解決する新たな手法として、我々は CO と H_2 の衝突により起こる CO 輝線の圧力広がり注目した。圧力広がりによる輝線ウィングの放射強度は CO 柱密度と H_2 密度の積に比例する。したがって、ウィングの観測に加えて、CO 柱密度を CO の希少同位体の観測から決定することで、円盤中心面近くのガス密度を直接的に測定することができる。さらに、円盤鉛直構造を考慮することでガス面密度も導出できる。この手法では、 H_2 ・CO 比などの変換係数を仮定しないため、従来よりも桁違いに高い精度でガス面密度を決定できる。圧力広がりには惑星大気でしばしば観測されるものの、原始惑星系円盤分野では無視されてきた。しかしながら、我々は TW Hya 円盤でその影響を観測的に実証し、ガス面密度分布を制約することに成功した (Yoshida et al. 2022)。

本講演では、TW Hya 円盤に加えて、RX J1604.3-2130 A (以下 J1604) と HD 169142 周りの円盤における、圧力広がりによる輝線ウィングを用いたガス面密度分布の測定結果を議論する。いずれの円盤もダストリング・ギャップを持つ遷移円盤である。我々は ALMA 観測データを利用して、両天体の ^{12}CO 輝線スペクトルに圧力広がりによるウィングを検出することに成功した。さらに、円盤半径ごとのスペクトルに対してモデルフィッティングを行い、ガス面密度の動径プロファイルを抽出した。その結果、TW Hya, J1604, HD 169142 円盤の中心星からそれぞれ 3, 82, 64 au に存在するダストリング付近に、ガス面密度分布が極大値を取るガスバンプが存在することがわかった。これはダストがガス圧力の極大値付近でトラップされていることの直接的証拠である。しかし、ダスト集積の兆候があるにもかかわらず、ダストリングのピークにおけるガス・ダスト面密度比は、すべての円盤で 80-100 程度であり、星間空間での値と同程度であることがわかった。これは、ガスバンプより中心星方向へのダストの漏れ込みがあるか、リング内にミリ波観測が感度を持たない微惑星が既に形成されていることを示唆する。また、J1604 円盤と HD 169142 円盤に関しては CO の希少同位体の観測が無いことに起因する不定性が多少残るものの、すべての円盤で、ガス面密度の極大値は円盤の重力不安定性の閾値にほど近く、質量降着が自己重力により制御されている可能性があることがわかった。さらに、ガスバンプの総質量は、TW Hya, J1604, HD 169142 円盤でそれぞれ 7, 30, 60 木星質量程度と見積もられた。3 天体の年齢はいずれも 3 Myr よりも高いことが知られているが、この結果は高年齢円盤においても惑星系形成に十分な材料物質が存在する場合があることを示している。以上のような議論は 3 桁もの不定性がある従来手法ではなしえなかったが、本手法により初めて可能になったもので、本研究は惑星形成論に重要な観測的制約を与えるものである。

質量降着段階における原始惑星系円盤の詳細構造形成： へびつかい座分子雲の円盤の超解像度サーベイ

○ 所司歩夢¹, 山口正行², 川邊良平³, 平野尚美², 武藤恭之⁴, 塚越崇⁵, 町田正博¹

¹ 九州大学, ² ASIAA, ³ 国立天文台, ⁴ 工学院大学, ⁵ 足利大学

太陽系を含む多くの惑星系はいつ誕生したのか？これを探る上で惑星形成の現場と考えられている若い星周りの円盤（原始惑星系円盤）の理解が必要不可欠である。近年、電波干渉計 Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) では多くの原始惑星系円盤の観測が行われている。特に、へびつかい分子雲に位置する 147 天体の若い星に付随する原始惑星系円盤 (Class I/Flat/II 円盤) の大規模な観測 (観測波長 1.3 mm および空間分解能 42 au) が行われた (ODISEA, Cieza et al. 2019, MNRAS, 482, 698)。観測された円盤のうち、10 個の比較的に進化した円盤 (Class II 円盤) に対して高空間分解能 (3-8 au) で観測が行われ、惑星によって規制されたと考えられるリング・ギャップのような特徴的な構造 (以降、詳細構造と呼称する) が存在しており、Class II 円盤よりも若い進化段階 (Class I/Flat 段階) で急速に形成していると明らかになった (Cieza et al. 2021, MNRAS, 501, 2934)。惑星形成の初期環境と時期を探索上で詳細構造の形成時期を解明することは重要であるが、比較的若い Class I/Flat 円盤に対して、3-8 au の高空間分解能の観測は行われていない。加えて、新規で複数の円盤の高い空間分解能と感度を備えた大規模なデータを取得するには何年もかかってしまう。

そこで、本研究では ALMA の空間分解能 42 au の観測データにスパースモデリングという統計数理学を応用した画像復元法を適用した。スパースモデリングは円盤の放射強度と輝度分布の勾配を調整する罰則項付きの最小二乗法を解くことで、最大基線長のデータが持つ高空間分解能の成分を有効活用する手法である (Honma 2014, PASJ, 66.95)。ALMA の観測データにスパースモデリングを適用した結果、従来法 CLEAN に比べ、空間分解能が向上し、新たな詳細構造を確認した例も報告されている (Yamaguchi et al. 2021, ApJ, 93, 121)。

その結果、従来法である CLEAN と比較して空間分解能が 2-10 倍程度向上した 67 天体 (Class I 14 天体、Class Flat 20 天体、Class II 33 天体) の連続波画像を取得し、35 個の円盤で詳細構造を確認した。詳細構造を持つ円盤が各進化段階の 50% を占めているため、各進化段階で詳細構造が普遍的に存在している可能性がある。それらの内、17 個の円盤は先行研究 (Andrews et al. 2018, ApJL, 869, L41; Cieza et al. 2021, MNRAS, 501, 2934) と一致している。さらに、残りの 18 個の円盤でリング構造や非対称構造などの新たな詳細構造を発見した。Class I/Flat 円盤はそのうちの 13 個を占めているだけでなく、そのうちの 2 天体 (WL 17 や ISO-Oph 51) では詳細構造を持つ円盤から駆動する質量放出 (原始星アウトフロー) が存在していることを確認している (e.g., van der Marel et al. 2013, A&A, 556, A76; Shoshi et al. 2024, ApJ, 961, 228) これは質量降着段階から円盤の詳細構造が形成されていることを意味しており、すでに惑星が存在する可能性を示唆している。

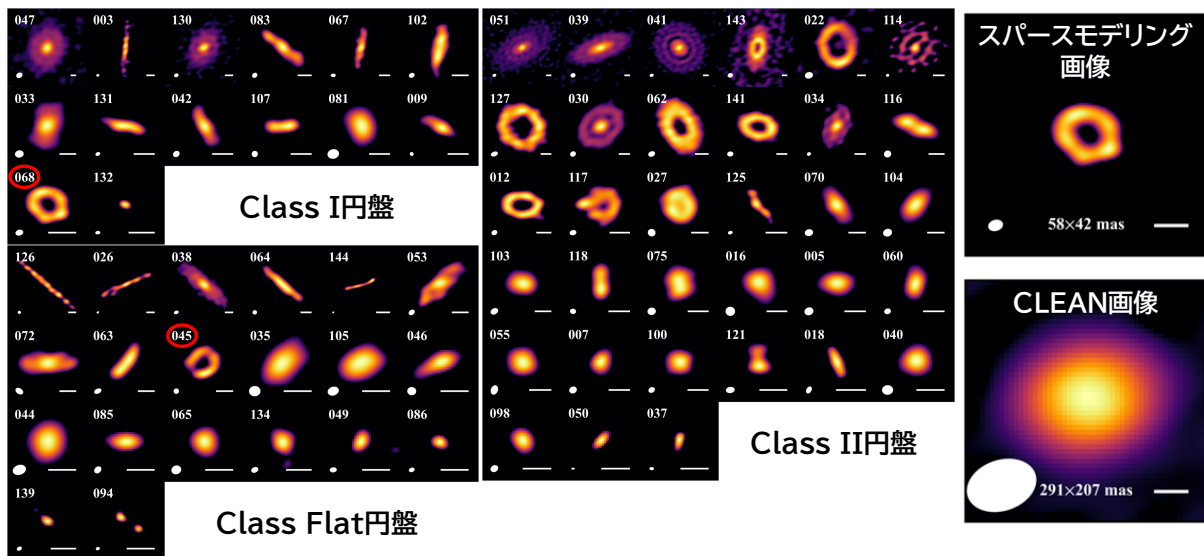


図 1. (左) スパースモデリングによって得られた 1.3 mm 連続波ギャラリー。赤い円は Class I 原始星 WL 17 と Class Flat 原始星 ISO-Oph 51 の原始惑星系円盤を表している。(右) 本研究で使用したスパースモデリングと従来法 CLEAN によって得られた Class I 原始星 WL 17 の星周円盤の連続波画像。

大規模惑星形成 N 体シミュレーションで探る 氷惑星の起源

○神野 天里¹, 斎藤 貴之¹, 船渡 陽子², 牧野 淳一郎¹

¹神戸大学大学院 理学研究科 惑星学専攻, ²東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻

京都モデル[1]に始まる標準的な惑星形成理論では、惑星は現在の軌道周辺で「その場」形成されると考えられてきた。しかし、惑星の「その場」形成を仮定すると天王星や海王星などの形成時間が太陽系年齢を超えてしまうことが古くから指摘されている[2]。さらに、近年の太陽系外惑星の観測から、惑星の動径方向移動を考慮しなければ説明することができない多様な惑星系の存在が明らかになってきた[3]。惑星移動の有力なメカニズムの一つとして、微惑星-惑星間の重力相互作用によって惑星が移動する Planetesimal-Driven Migration (以下、PDM) が存在する[4]。PDM による惑星移動は、惑星が角運動量を微惑星から受け取ることで中心星方向だけでなく、外側方向へも普遍的に生じることが指摘されており、この PDM による惑星のダイナミックな移動は、氷惑星の外側移動や系外惑星の多様性を説明し得ると期待されている[5,6,7,8]。

本研究ではスーパーコンピュータ「富岳」を用いて、世界初の微惑星間重力や惑星-円盤ガス間相互作用、さらに微惑星からの惑星成長過程の全てを組み込んだ自己無撞着な大規模惑星形成 N 体シミュレーションを行った (図 1.a-c)。その結果、円盤内側で形成された原始惑星は、成長しながら PDM によって円盤外側へと大きく移動することがわかった (図 1.b-c)。さらに、円盤内側で形成された原始惑星は、自身よりも外側に存在するより小さな原始惑星を共鳴捕獲することで、複数の原始惑星が円盤外側へと移動することが明らかになった (図 1.c)。

我々の行った微惑星円盤からの自己無撞着な大規模惑星形成 N 体シミュレーションの結果は、惑星がその成長過程で原始惑星系円盤内をダイナミックに移動することを示唆しており、氷惑星の起源を説明し得るだけでなく、海王星の外側移動によって生じると考えられている「海王星移動による Plutinos 捕獲メカニズム」[5,6]の理論的なバックアップとなることが期待される。

文献：[1]Hayashi,C. 1981, *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 70. [2]Levison & Stewart.2001, *Icarus*, 153. [3]Zhu & Dong. 2021, *ARA&A*, 59. [4]Fernandez & Ip. 1984,*Icarus*,58. [5]Malhotra,R. 1993, *Nature*,365. [6]Levison & Morbidelli. 2003, *Nature*, 426. [7] Ida *et al.*, 2000, *ApJ*, 534. [8] Kirsh *et al.*, 2009, *Icarus*. 199.

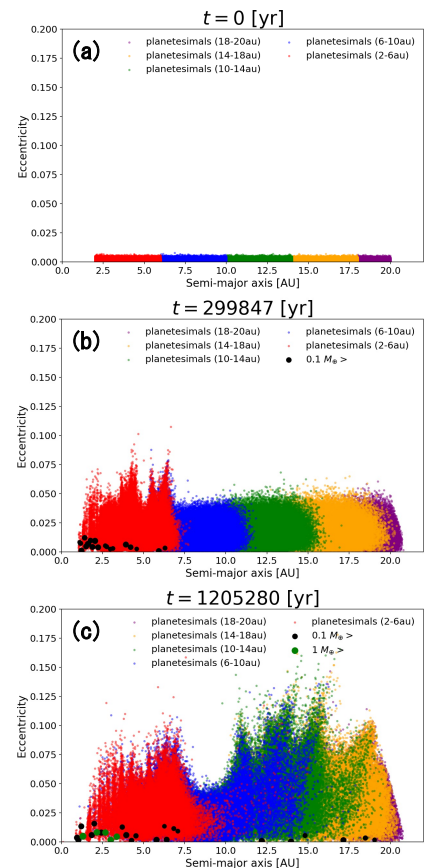


図 1 惑星形成シミュレーション画像

(a) 2~20 AU にわたる大規模な微惑星円盤

(b) 複数の原始惑星の形成と外向き移動の開始

(c) 6体の原始惑星が円盤外側へと大きく移動

短周期系外惑星大気における窒素と硫黄の濃集: 塩の熱解離の影響と観測可能性

○中澤 風音¹, 大野 和正², 奥住 聡¹

¹東京工業大学 地球惑星科学系, ²国立天文台 科学研究部

惑星の大気組成はその形成過程や、原始惑星系円盤における元素輸送の歴史を保持している。高温巨大惑星 WASP-107b は JWST による観測で NH_3 および SO_2 が検出され、窒素と硫黄の双方に超太陽的な濃集(≥ 5 solar)が見られる特徴的な系外惑星である(Dyrek et al. 2024)。円盤で主要な硫黄キャリアが FeS のような難揮発性物質であることから、惑星の高い硫黄濃度は微惑星降着など固体降着プロセスに由来するとされてきた。一方、円盤で主要な窒素キャリアの N_2 は昇華温度が 30 K の高揮発性物質であり、固体から容易に失われる。そのため、従来硫黄濃縮の起源として考えられていた固体降着では、窒素と硫黄の同時濃集を説明できないという問題がある。

円盤内側において窒素・硫黄濃縮の新たな起源になりうるのが彗星や分子雲で検出が進むアンモニウム塩である。この塩は約 200 K で熱解離する半揮発性物質であり、我々はこれまで、窒素に富む木星大気の起源として、アンモニウム塩の熱解離に伴う円盤ガスの窒素濃集を提案してきた(Nakazawa & Okuzumi submitted)。ここで注目すべきは、彗星では NH_4SH が最も豊富な塩であると示唆されている点である(Altwegg et al. 2022)。この塩の解離する軌道近傍では気相中で窒素に加え硫黄濃度も上昇するため、惑星はガス降着によって窒素と硫黄の双方に富む大気を獲得できる可能性がある。

高温巨大惑星における窒素・硫黄濃縮過程を明らかにするため、本研究では揮発性成分に加えアンモニウム塩を含む円盤の物質輸送過程を計算した。粘性円盤におけるガス・ダスト進化に氷の昇華・再凝縮、塩の解離を組み込み、各軌道・時刻における円盤元素組成を求めた。結果として NH_4SH 解離軌道の近傍では円盤の窒素・硫黄濃度の双方が太陽値の数倍となることが明らかになった。この軌道は水雪線の近傍に位置し、水雪線の内側では N,S,O が、外側では N,S が超太陽的な濃度となる。これらの結果は、大気中の硫黄が微惑星降着のトレーサーとなるという従来の解釈を大きく変えるものである。得られた元素比を元に惑星大気中での光化学計算を行った結果、水雪線内側で形成する惑星大気では NH_3 や H_2S 、NS に加え豊富な SO_2 が生成し、WASP-107b における観測値に匹敵する体積混合率となることが分かった。さらにこの大気構造をもとに透過光スペクトルの理論計算を行ったところ、 NH_3 、 H_2S 、 SO_2 による顕著な吸収が見られることが分かった。塩による窒素・硫黄濃縮が起きない場合と比べ、これらの分子による吸収はランジット深さに JWST および次世代宇宙望遠鏡 Ariel で検出可能な違いを起こすことが分かった。本結果は、系外惑星観測による NH_3 、 H_2S 、 SO_2 の検出から、半揮発性アンモニウム塩の太陽系外における普遍性に迫れる可能性を示している。

水星カロリス盆地周辺の地殻元素組成の分解解析： 火成活動史とマントル不均質への示唆

○平田佳織^{1,2}, 白井寛裕², Emma Caminiti³, Jack Wright⁴, Sebastien Besse⁴

¹東京大学, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³パリ天文台 LESIA, ⁴ESA 欧州宇宙天文学センター

水星探査機 MESSENGER により水星表面の元素組成観測が行われ、全球で主に Mg 存在度により特徴付けられる化学的多様性が見られることが報告されてきた^[1,2 など]。中でも両極端な組成を示すのが、特異的に高い Mg 存在度により特徴付けられる高 Mg 領域 (HMR) と低 Mg・高 Al 組成により特徴付けられるカロリス盆地内部平原 (CIP) である。HMR は古い形成年代を示し、初期の二次地殻を形成した一連の火成活動に関連すると考えられる^[3]一方、CIP はカロリス盆地形成後に局所的に起こった火成活動により形成されたと考えられている^[4]。地殻組成不均質を通じて惑星の内部組成や熱進化史を理解するためには、地殻元素組成を、地殻の形成過程や岩相といった地質背景と対応づけて理解する必要がある。

従来、水星の地殻組成不均質を説明するためにはマントル組成不均質^[5,6]や部分溶融度・溶融深度の不均質^[7]が必要であると考えられてきた。しかし、これらの議論に用いられてきた元素組成データの空間解像度は極めて低く、地質背景を反映した地質・スペクトルデータとの詳細な比較が困難であった。例えば、カロリス盆地外部には、高反射率スペクトルを示す CIP と類似した地質であるがスペクトルの異なる低反射率平原 (CEP) が^[8]、さらに外側には HMR に相当する古い年代の地殻 (IcP) が広がっており、CIP・CEP・IcP はそれぞれ異なる岩相の物質で構成されていると考えられる。しかし、互いに近接した空間分布のため従来の低空間解像度の元素組成マップではこれらの組成の区別・比較は困難であった^[9]。

そこで本研究では、カロリス盆地とその周辺領域において、異なる地質背景を持つ地殻の元素組成を区別して決定することを目的とした。まず、地質・スペクトルデータ^[8]に基づいて、特徴的な地質背景を持つ領域を区分し、端成分ユニットとして定義した。次に、表面元素組成観測データを「これらの端成分地殻組成が観測視野内で混合した平均値」として表現するモデルを考案し、逆問題を解くことにより端成分組成を算出した。

本研究の結果、異なる地質背景に対応した以下の 5 種類の端成分組成が明らかになった：1) 盆地以前に形成された初期二次地殻、2) 盆地形成時の衝突堆積物、盆地形成後に堆積した 3) 高反射率平原および 4) 低反射率平原、5) 盆地から離れた高反射率堆積物。

CEP に相当する低反射率平原は、CIP に相当する高反射率平原と類似するがわずかに高 Mg・低 Al の組成をもつことがわかった。両者の組成の違いはマグマだまり中での結晶分化に伴うマグマ進化によって説明できることが岩石溶融実験^[10]との比較から明らかになった。盆地形成衝突イベントで活性化されたマグマ活動により盆地直下にマグマだまりが形成され、まずは低反射率物質マグマが盆地内外に噴出し、地質学的に短い期間を経て結晶分化を経験した高反射率物質マグマが盆地内部のみに噴出した、という描像が得られた。一方で、盆地形成以前の初期二次地殻は、平原とは系統的に異なり HMR に近い高 Mg 組成を示した。これは、初期二次地殻における HMR の化学的特異性が従来の理解よりも小さい可能性があることを意味する。これらの結果は、異なる岩相組成の空間的混合という観測バイアスや結晶分化による組成変化の影響を除去することで、現在観測される地殻組成不均質を比較的均質なソースマントル組成や溶融条件によって説明できる可能性があることが示唆された。

文献 [1] Weider *et al.* (2015) *EPSL*, **416**, 109-120. [2] Vander Kaaden *et al.* (2017) *Icarus*, **285**, 155-168. [3] McCoy *et al.* (2018), in *Mercury: The View After MESSENGER*, 176-190. [4] Ernst *et al.* (2015) *Icarus*, **250**, 413-429. [5] Charlier *et al.* (2013) *EPSL*, **363**, 50-60. [6] Mouser *et al.* (2021) *JGR: Planets*, **126**(11), 2021JE006946. [7] Namur *et al.* (2016) *EPSL*, **439**, 117-128. [8] Caminiti *et al.* (2023) *JGR: Planets*, **128**, e2022JE007685. [9] Nittler *et al.* (2020) *Icarus*, **345**, 113716. [10] Namur & Charlier. (2017) *Nat. Geosci.*, **10**, 9-13.

遷移円盤最内域の傾いた inner disk が作る影を利用した円盤幾何構造の推定

○折原 龍太¹, 百瀬 宗武¹

¹ 茨城大学大学院

原始惑星系円盤に含まれるダストの本性を明らかにすることは、惑星形成を紐解く上で重要である。遷移円盤と呼ばれるダスト分布内域に空隙が見られる円盤は、惑星との重力相互作用によって作られた可能性があり、その多波長観測は惑星の起源に関する手掛かりを我々に与えてくれるだろう。遷移円盤の中にはその本体 (outer disk) に加えて半径数 au の領域にダストを含む inner disk を持つものもあり、外側からの inner disk へのダスト供給が続いているか、ダストを中心星近傍でトラップする何らかのメカニズムが必要である。一方、赤外散乱光やダスト連続波で確認される outer disk 上の非軸対称な影や、ガス分子輝線の速度場解析により検出される円盤中心付近の歪みは、inner disk が outer disk に対して傾いていることを示唆している。inner disk が傾く原因は解明されていないが、円盤に対して軌道が傾いた大質量惑星や伴星との重力相互作用や、角運動量の異なる物質の降着がその候補として検討されている。

半径数 au の惑星形成を明らかにするためには inner disk の直接分解を目的とした多波長観測が考えられるが、このようなコンパクトな構造を分解する観測は現在の観測装置では困難である。とりわけ赤外線観測ではコロナグラフで星近傍をマスクするため、多くの場合 inner disk そのものが隠されてしまう。そこで本講演では、赤外線におけるダスト散乱光画像で outer disk 内に確認されている非軸対称な影を利用して inner disk の幾何学的構造を推定する方法を提案する。

この方法は、大きく分けて2つの情報を赤外散乱光画像から抽出する。一つは outer disk 表面上の日向と日陰の境界線である。これは outer disk のダスト散乱表面と inner disk が作る日射遮蔽領域の表面の間の交線を解く問題として扱う。従来の方法 (Min et al. 2017) では考慮されていなかった円盤間の中心ずれや inner disk の厚みをパラメータに含め、outer disk 表面の高さを半径依存する形に拡張した。もう一つの情報は outer disk 表面の「水平線」である。内縁を持つ outer disk の表面高さが有限である場合、画像上の内縁は円盤赤道面上にある実際の内縁からずれる。我々が確認できる円盤表面が、表面の法線ベクトルの視線方向の射影が我々に向くものだけである点を踏まえると、表面法線ベクトルの視線成分が0になる条件式を解くことで得られる曲線を水平線として定義できる。これら2つの曲線を同時に最適化することで、inner disk と outer disk 及び影の立体構造を得ることが可能となる。

本研究では、Very Large Telescope (VLT) で撮像された赤外散乱光画像から影が検出されている天体 (HD100453, HD142527) を対象に、この手法を利用してそれらに付随する円盤の傾き、厚みを推定した。どちらも inner disk がガスの圧力スケールハイトよりも厚く、円盤最内域での乱流などによるダストの強い巻き上げが示唆された。さらに、outer disk に対して inner disk が非常に大きく傾いており、Nealon et al. (2020) で提案されているような大質量惑星と伴星が共存する系がこの状態を維持している可能性がある。HD142527 においては、赤外線画像内の影と電波画像内の放射強度低下が検出されており、互いの位置が僅かにずれていることが分かった。この小さなずれから見積もられた円盤冷却時間は十分短く、outer disk 内で乱流を駆動しうる鉛直シア不安定性が発生している可能性を示唆する。

原始惑星系円盤の鉛直シア不安定性とダストの共進化： 微惑星形成と円盤観測への示唆

○ 福原優弥¹, 奥住聡¹

¹ 東京工業大学

惑星形成は、原始惑星系円盤においてミクロンサイズのダスト粒子が合体成長しキロメートルサイズの微惑星を形成することから始まる。この微惑星の形成効率や形成場所を決定付けるのは、円盤ガスの乱流運動である。この乱流運動は、近年の電波高解像度観測により、様々な駆動領域や強度を持つことが明らかになりつつある。例えば、二つのダストリングを持つ HD 163296 周りの円盤では、内側リングはダストが鉛直拡散し乱流が強く、外側リングはダストが沈澱し乱流が弱い可能性が指摘されている (Doi & Kataoka 2021)。しかし、この多様性を生み出す要因や乱流生成機構、及びダスト成長との関連は未だ謎に包まれている。

近年、これらの多様性を説明する乱流生成機構として、鉛直シア不安定性 (vertical shear instability, VSI; Nelson et al. 2013) が注目されている。VSI は円盤ガスの回転速度の鉛直勾配によって起こる流体力学的不安定性である。VSI はガスが効率よく冷却する場合に乱流を駆動するため、冷却効率が良い円盤外側領域 (> 5 au) における主要な乱流駆動源である。VSI 乱流は鉛直方向の運動に卓越しており、そのためダストを強く拡散する。

我々は、微惑星形成に影響を与えうる VSI とダストの共進化に注目し研究を行ってきた。我々の過去の研究から、冷却率の空間分布はダストの大きさや空間分布に依存し、その結果 VSI が乱流を駆動しうる領域が変化することを解明した (Fukuhara et al. 2021)。また、数値流体計算を行い、VSI 乱流の強度が冷却率分布に依存することも明らかにした (Fukuhara et al. 2023)。ダスト分布は乱流により変化することを考慮すると、この結果は VSI とダストは相互作用することを示唆している。しかしこれにより、どのような乱流とダストの分布が実現するかは未解明である。

そこで本研究では、互いに影響し合う VSI 乱流とダストの分布を解明するため、VSI 乱流による拡散と沈澱が釣り合う平衡なダスト鉛直分布を探索する自己整合的なモデルを構築した (Fukuhara & Okuzumi 2024)。このモデルでは、仮定したダスト分布と、ダストが制御する冷却率分布下での VSI 乱流の強度を比較することで、両者が整合的になるダスト分布を探る。このモデルを用いて、VSI 乱流とダスト分布の平衡状態に対するダストの大きさの依存性を明らかにする。

その結果、VSI 乱流がダストを鉛直に強く拡散する状態 (拡散状態) と、VSI 乱流が駆動せずダスト沈澱を止められない状態 (暴走沈澱状態) の二つの状態があることがわかった。例えば、中心星から 10 au 離れた領域では、最大ダストの大きさが 0.1 mm 以下の場合に拡散状態になる。このときの鉛直拡散係数は 10^{-3} に達する。一方で、ダストが 0.1 mm より大きい場合は暴走沈澱状態になる。また、中心星から離れると拡散状態を実現できるダストの大きさは小さくなる。

さらにこのモデルを、観測により乱流強度が制限されている複数の円盤に適用した。その結果、観測から示唆されているダスト沈澱具合の多様性を VSI 乱流で統一的に説明できることがわかった。特に、HD 163296 円盤の二つのダストリングの沈澱具合の違いを本研究の拡散状態と暴走沈澱状態で説明可能であることがわかった。これらの結果は、VSI とダストの共進化が原始惑星系円盤において普遍的な現象であり、微惑星形成を決定付けている可能性を示唆している。

金星の紫外アルベドと大気大循環の長期変動(2)

○滝川有希¹, 高木征弘², 安藤紘基², 佐川英夫², 杉本憲彦³, 神山徹⁴, 松田佳久⁵

¹京都産業大学大学院理学研究科, ²京都産業大学理学部, ³慶應義塾大学日吉物理学教室,

⁴国立研究開発法人産業技術総合研究所, ⁵東京学芸大学教育学部

金星探査機や宇宙望遠鏡の観測結果から金星の紫外アルベドが数十年スケールで変動している可能性が指摘されている (Lee et al., 2019)。この変動に伴い、太陽光吸収による大気の加熱率が上部雲層 (高度 66 km 付近) の昼面において大きく変化すると考えられる。さらに、このアルベド変動に同期するように雲頂付近 (高度 70 km 付近) の平均東西風 (大気スーパーローテーション) が 80-110 m/s の範囲で変化することが示唆されている。このような金星大気の大規模な気候変動のメカニズムを理解するために、本研究では金星大気大循環モデル (GCM) を用いた数値実験を行っている。時間変化しない太陽加熱を用いて 50 地球年ほど時間積分した後、太陽加熱を 12 地球年周期で変化させて大気循環の変化を調べたところ、太陽加熱の変化にほぼ同期した平均東西風の変化がみられた。この変化に寄与するのは主に熱潮汐波による運動量輸送であることが分かったが、子午面循環の寄与が明確ではなかった (惑星科学会 2023 年度秋季講演会)。そこで今回は、太陽加熱を東西一様成分 $\bar{Q}$ (子午面循環を励起する成分) と東西一様成分からのズレ Q' (熱潮汐波を励起する成分) の 2 つに分け、(a) $\bar{Q}$ のみを変化させた場合、(b) Q' のみを変化させた場合、(c) 両方を同じように変化させた場合、という 3 つケースについて計算を行い、子午面循環と熱潮汐波の寄与を調べることにした。いずれの場合も太陽加熱の変化は標準値の 0.65 倍から 1.35 倍の範囲である (Lee et al., 2019)。

計算の結果、(a) (b) (c) の各ケースで、平均東西風の時間変化の特徴が高度によって異なることがわかった。高度 65 km においては、(b) の場合は太陽加熱の変化に伴って風速も変動していたが、(a) の場合はあまり風速変動が見られなかった。高度 65 km では $\bar{Q}$ よりも Q' の方が風速変動に関係している。高度 70-75 km では、(a) (b) のどちらケースも太陽加熱が強くなると風速は速く、弱くなると遅くなった。高度 80 km 以上では、(b) の風速変動の位相に遅れが見え始め、(a) とほぼ逆位相の関係になった。これは上層に伝播した熱潮汐波の減速効果のためと考えられる。また、熱潮汐波と残差子午面循環による平均東西風の加速・減速についても調べた。熱潮汐波による加速・減速は、(a) (b) の両方に低緯度で同じような加減速の分布が見られ、東西風の変動に寄与していた。残差子午面循環による加速・減速は、(a) (b) とともに赤道付近・高度 55-72 km において東西風は減速されている。加熱が強くなるにつれ、減速の効果は大きくなるが、(a) の場合、雲頂付近で (b) の場合よりもやや強い減速が見られた。

TGO 搭載分光器 NOMAD を用いた火星中間圏水氷雲 における核生成機構の研究

○小泉海翔¹, 中川 広務¹, 田中 今日子², 藤原 均³, 津田 卓雄⁴, 木村 勇気⁵, 青木 翔平⁶, 寺田 直樹¹, 笠羽 康正¹, Ann Carine Vandaele⁷, Ian Thomas⁷, Bojan Ristic⁷, Frank Daerden⁷, Zachary Flimon⁷, Yannick Willame⁷, Jonathon P. Mason⁸, Manish R. Patel⁸, Giuliano Liuzzi⁹, Giancarlo Bellucci¹⁰, José Juan López- Moreno¹¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ² 東北大学大学院理学研究科天文学専攻, ³ 成蹊大学サステナビリティ教育研究センター/理工学部, ⁴ 電気通信大学大学院情報理工学研究科情報・ネットワーク工学専攻, ⁵ 北海道大学低温科学研究所, ⁶ 東京大学大学院新領域創成科学研究科, ⁷ Royal Belgian Institute for Space Aeronomy (BIRA-IASB), School of Physical Sciences, ⁸ The Open University, School of Engineering, ⁹ University of Basilicata, ¹⁰ Institute di Astrofisica e Planetologia Spaziali (IAPS/INAF), ¹¹ Instituto de Astrofisica de Andalucia (IAA/CSIC)

地球と火星の中間圏では氷粒子からなる雲が観測されている。この粒子の生成には、2つのメカニズムが提案されている。一つは、水蒸気から凝結核が生成される均質核生成である。もうひとつは、大気中の不純物が核となって相変化を起こす不均質核生成である。本研究は、火星探査衛星によって得られた中間圏雲観測結果と競合過程を加味した Tanaka et al.(2022)の手法を火星に適用した理論結果を比較し、火星中間圏雲の核生成メカニズムを明らかにすることを目的としている。

我々はこの目的のために、2018/4/22-2022/4/30の期間に火星探査衛星 TGO が得た 9249 個の透過率スペクトルと大気大循環数値モデル Mars Climate Database (MCD)を使用する。まず透過率スペクトルから 320nm と 600nm の視線方向上の光学的厚さ(slant opacity)を導出して、320 nm における光学的厚さが高度 40~100 km において 0.01 以上、320 nm と 600 nm の光学的厚さ比が 1.5 以上であるという条件で水氷雲の有無を判定する。さらに、背景大気場の水蒸気圧などを MCD から推定し、Tanaka et al. (2022)の理論に当てはめることで均質・不均質核生成の可能性を検討する。

上述した閾値に従うと、9249 個中 966 個の高度分布で火星中間圏水氷雲が検出された。これらの雲と背景大気場の関係を調べた結果、水蒸気圧が 10^{-5} Pa 以上温度が 200K 以下、過飽和度が 0.01 から 1000 の範囲という大気条件において雲が発生しやすいことが明らかになった。また核生成については背景大気水蒸気圧が 1.56×10^{-5} 以上(150 K の飽和水蒸気圧)の時は、火星中間圏における水氷雲形成には不均質核生成が卓越することが明らかになった。一方、水蒸気圧が 9.40×10^{-7} Pa 以下(140K の飽和水蒸気圧)の時は、均質核生成が生じる大気条件を取りうることが示唆された。この均質核生成の可能性のある雲の多くは高高度(70km 以上)で観測され、過飽和度が高く約 1000 に達しており、また下層の雲とは遊離しているなど、いくつかの特徴が得られた。

中間赤外線イメージング分光による木星衛星イオ表層を模擬した二酸化硫黄固体の変性実験

○根岸 昌平¹、古賀 亮一²、趙 彪¹、李 源¹、平原 靖大¹、伊藤 文之^{3,4}、笠羽 康正⁵

¹名古屋大学、²名古屋市立大学、³産業技術総合研究所、⁴東京電機大学、⁵東北大学

最新の赤外線観測用宇宙望遠鏡 James Webb Space Telescope (JWST) をはじめとした、天体望遠鏡や探査機による高感度での赤外分光観測により、太陽系内外の様々な天体の大気および表層の化学組成や物理化学性質が明らかになりつつある (e.g. Pater *et al.* (2023))。とりわけ、太陽系内で最も火山活動が活発な木星衛星イオでは、表層の広域に霜状の二酸化硫黄 (SO₂) の固体が存在しており、火山噴火によって供給される 10⁻³ Pa 程度の希薄な大気 (SO₂~90%) に起源を有することが従来の赤外分光観測の結果から分かっている。イオ表層は、夜や木星蝕中では約 90 K まで冷却され、大気中の SO₂ ガスが凝華 (凝縮) することで SO₂ 固体が表層に堆積する。一方で、昼になると太陽光によって表層が約 120 K まで加熱されることで表層の SO₂ 固体の一部は昇華する。これまでに、SO₂ 固体の物性の解明を目的とした模擬赤外分光実験が過去に少数行われてきたが (e.g. Nash and Betts (1995))、イオ表層環境下における熱や紫外線による SO₂ 固体の変性メカニズムとスペクトルとの対応関係の詳細は明らかにされていない。

我々はこれまで、低温低压の天体環境を再現可能な液体窒素冷却クライオスタットを開発し、エチレンや亜酸化窒素など多様な化学種の固体微粒子に適応した赤外分光撮像システムの構築に成功した (Koga *et al.* (2024); 高間ほか, 日本天文学会 2024 年春季年会, P311a)。本研究ではこの装置に改良を加え、自作のクライオスタットでイオ表層の低温低压な環境を再現して SO₂ 固体を堆積し、表層の昼夜の昇降温 (アニーリング) や、太陽光を想定した紫外線照射の過程を実験室で再現し、*in-situ* での分光イメージング測定による SO₂ 固体の変性メカニズムの解明を目指した。分光器には、准共通光路波面分割型位相シフト干渉法 (Qi *et al.* (2015)) に基づく、イメージングフーリエ変換赤外線分光器 (2D FT-IR) を用い、空間分解能 $\geq 36 \mu\text{m}$ 四方の 2 次元赤外透過吸収スペクトルを取得した。また、SO₂ 分子の ν_1 および ν_3 基準振動にともなう高強度の遷移が現れる中間赤外線領域に着目し、波長域 7 μm –14 μm を波長分解能 $\sim 0.7 \mu\text{m}$ で測定した。本実験では以下の操作を行った。(1)クライオスタットの真空チャンバー内を加熱脱水ののち 10⁻³ Pa 程度まで減圧、(2)サンプルホルダーに取り付けたセレン化亜鉛 (ZnSe) 基板を 90 K 程度まで冷却、(3)真空チャンバー内に SO₂ ガスをパルス噴出して冷却 ZnSe 基板上に SO₂ 固体を堆積、(4)スペクトル測定を行いながら、 $\sim 90 \text{ K}$ – 120 K のアニーリングや、重水素ランプの紫外線 ($\sim 115 \text{ nm}$ – 400 nm , ピーク波長 $\sim 160 \text{ nm}$) の照射をした。 $\sim 7.5 \mu\text{m}$ (SO₂ ν_3 領域) に強いバンドが、 $\sim 8.7 \mu\text{m}$ (SO₂ ν_1 領域) に弱いバンドが観測されていたが、アニーリングを 1 回行うと ν_1 領域のバンド強度が温度に対して不可逆的に増強した (根岸ほか, 本会 2023 年秋季講演会, OF-02)。本実験では実際のイオ表層に近い環境の実現のため、多数回アニーリングを行い、 ν_1 領域のバンドの不可逆的増強とアニーリング試行回数との相関を報告する。また、紫外線照射によって 7.2 μm 付近に新たなピークが現れ、三酸化硫黄 (SO₃) の生成を同定した。SO₂ 分子の結合解離エネルギーが 218.7 nm であることから、解離・再結合反応と、電子励起 (B $\leftarrow$ X バンド) に随伴する項間交差で獲得した余剰エネルギーで進行する協奏反応 (Ito *et al.* (2023)) との競合反応で SO₃ は生成したと考えられる。そこで、カットオン波長 250 nm のロングパスフィルターを介した紫外線照射も実施し、SO₂ 固体の紫外線変性における協奏反応の寄与を考察する。

金星大気の全球非静力学計算

○樫村 博基¹, 八代 尚², 西澤 誠也³, 富田 浩文³, 高木 征弘⁴, 杉本 憲彦⁵,
小郷原 一智⁴, 黒田 剛史⁶, 中島 健介⁷, 石渡 正樹⁸, 高橋 芳幸¹, 林 祥介¹

¹神戸大学, ²国立環境研究所, ³理化学研究所, ⁴京都産業大学,
⁵慶應義塾大学, ⁶東北大学, ⁷九州大学, ⁸北海道大学

金星は全球が濃硫酸の分厚い雲で覆われており、大気の循環構造や内在する諸現象の全貌は明らかになっていない。しかし近年、金星探査機「あかつき」によって、惑星規模の弓状構造[1]や筋状構造[2]など様々な大気現象が発見されている。また、これらの現象を全球大気モデルで再現し、メカニズムに迫る試みも活発に行われている。なかでも、地球シミュレータに最適化された全球大気モデル「AFES」をもとに開発された AFES-Venus[3]によって、高解像度シミュレーションが実現され、様々な構造が解析されてきた[2,4-6]。

しかし、AFES は静力学平衡を仮定したモデルであり、雲層の対流活動を陽に扱うことはできない。雲層の対流活動は、それ自身が興味深いだけでなく、対流の結果として生じる中立あるいは低安定度の層が、惑星規模の弓状構造や筋状構造の成因に深く関わっており、金星大気大循環を理解する上で重要だと考えられる。これまでに、非静力学の領域大気モデルによって雲層の対流活動やそこから生じる重力波などが研究されてはいる[7 など]が、大規模場や大規模現象に対する影響を調べることは出来ていない。

そこで我々は、雲層の対流活動を陽に表現した金星大気の全球シミュレーションを実現すべく、非静力学の全球金星大気モデルの開発を進めている。力学コアには完全圧縮方程式系を正 20 面体準一様格子[8,9]上で有限体積法で解く「SCALE-GM」を利用する。これに、AFES-Venus の放射加熱冷却の強制を加え、諸定数を変更して、金星 SCALE-GM を開発した。

まずは、AFES-Venus と同じ静力学モデル用の強制のもとで、同様の循環場・温度場が得られるかを確認した。次に、低安定度層の高度 (55–60 km) の強制を静的不安定化の強制に変更することで、鉛直対流を陽に表現した全球計算を実現した。計算の結果、高度 50–60 km 付近で鉛直対流が生じることが確認された。ただし、表現された鉛直対流の水平規模は、 $dx \sim 52$ km で 500 km 程度、 $dx \sim 3.3$ km で 50 km 程度と解像度に依存する。講演では、平均東西風をはじめとした基本的な循環構造や温度構造を紹介した後、鉛直対流の出現場所、形態、および熱・運動量の鉛直輸送への寄与を議論する。

謝辞：本研究は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統合的描像の構築」および「シミュレーションと AI の融合で解明する宇宙の構造と進化」の一環として実施しました。数値計算には、理化学研究所のスーパーコンピュータ「富岳」を使用しました。本研究は JSPS 科研費 JP19H05605, JP20K04062, JP24H00021 及び JST 創発的研究支援事業 JPMJFR212R の支援を受けました。

参考文献

1. Fukuhara *et al.* (2017) *Nat. Geosci.*, **10**, 85–88.
2. Kashimura *et al.* (2019) *Nat. Commun.*, **10**, 23.
3. Sugimoto *et al.* (2014) *J. Geophys. Res. Planets*, **119**, 1950–1968.
4. Takagi *et al.* (2018) *J. Geophys. Res. Planets*, **123**, 335–352.
5. Sugimoto *et al.* (2021) *Nat. Commun.*, **12**, 3682.
6. Takagi *et al.* (2022) *J. Geophys. Res. Planets*, **127**, e2021JE007164.
7. Baker *et al.* (1998) *J. Atmos. Sci.*, **55**, 3–18.
8. Tomita *et al.* (2001) *J. Comput. Phys.*, **174**, 579–613.
9. Tomita *et al.* (2002) *J. Comput. Phys.*, **183**, 307–331.

大気波動による金星下層雲の不連続的生成

○今村 剛¹, 前島康光², 杉山耕一朗³

¹ 東京大学新領域, ² 神戸大学海事科学研究科, ³ 松江工業高等専門学校情報工学科

金星の全球をおおう硫酸雲は、放射エネルギー収支や物質輸送への影響を介して金星の気候システムにおいて中核的な役割を果たしている。この雲のうち上層雲は光化学反応により生成する硫酸エアロゾルであり、中層・下層雲領域では大気運動が引き起こす硫酸の凝結と蒸発が支配的と考えられている。下層雲はとりわけ変動が大きい、その力学過程は謎に包まれている。1980年代から近赤外線の窓波長で観測されるようになった雲の光学厚みの水平構造は変化に富み、その多くは下層雲領域に位置すると考えられている。

近赤外線の窓波長で観察される特徴として、周期 5 日程度でスーパーローテーション方向に伝播する惑星規模の雲構造が挙げられる[Crisp et al. 1991]。金星探査機「あかつき」の IR2 カメラはこの現象を詳細に観測し、赤道付近で比較的大きな振幅を持つこと、雲層下部の背景風よりも速く伝播すること、そして境界が南北方向に延びる惑星規模の雲量の不連続を伴うことを発見した[Satoh et al. 2017; Peralta et al. 2020]。伝搬特性は赤道ケルビン波を示唆するが、雲量の不連続的な変化の理由はわかっていない。McGouldrick ら[2021]は Venus Express 搭載 VIRTIS による分光データを用いてこの現象を分析し、雲粒子の微物理的特性や微量気体の密度が不連続部分で変化することや、これらの変化が下層雲領域で起こることを示した。不連続的な変化の要因として、非線形ケルビン波に伴う前線面の形成が示唆されているが[Peralta et al. 2020; McGouldrick et al. 2021]、金星の条件下でそれが生じうることは示されていない。

これまでに金星大気大循環モデルでケルビン波の伝播に伴い周期 5~6 日の雲量の変動が見られているが[Peralta et al. 2020; Ando et al. 2021]、観測されているような不連続的な変化は再現されていない。そこで本研究では、ケルビン波の風速場が引き起こす hydraulic jump (bore) に注目し、簡略化した力学モデルと雲物理モデルで不連続的な雲生成を再現して、メカニズムを考察する。

CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) を用いて東西-鉛直の 2 次元設定で金星大気を模擬し、雲層内の対流を駆動する放射加熱強制に加え、下端からケルビン波を強制すると、ケルビン波は雲層下部の弱安定層で不安定化して hydraulic jump を引き起こす。ジャンプ面では東西風の急激な変化とともに上昇流が生じ、雲層の下に滞留している硫酸蒸気が運び上げられて断熱冷却により不連続的に凝結する。モデルは観測された特徴をよく再現する。この結果から、金星の下層雲がケルビン波に伴う hydraulic jump で生成している可能性が示唆された。また、突発的な鉛直流は運動量や物質の鉛直混合に寄与することが考えられる。ジャンプ面での東西風の急激な変化はケルビン波の減衰過程とみなすことができ、この過程で生じる赤道加速がスーパーローテーション維持に働くことも考えられる。

地球型惑星大気における非温室効果ガスの温室効果: 水蒸気分布と断熱温度勾配の影響

○ 瀧哲朗¹, 黒川宏之¹, 藤井友香², 青木紘介³

¹ 東京大学, ² 国立天文台, ³ 東京工業大学

地球型惑星の地表面温度は惑星がもつ大気の影響を強く受けている。大気中の温室効果ガスが地表面からの熱放射を吸収することで表層環境の温暖化に直接的に寄与する一方で、非温室効果ガスもまた温暖化と寒冷化のそれぞれに寄与する効果を持つと考えられている (e.g., Goldblatt et al. 2009; Wordsworth & Pierrehumbert 2013)。非温室効果ガスの存在は、大気全圧を上昇させるという形で温室効果ガスの吸収線幅の圧力広がり寄与して、間接的に表層環境の温暖化を引き起こす。他方、非温室効果ガスは大気による中心星放射の Rayleigh 散乱の起源となるため、寒冷化にも寄与する。特に非温室効果ガスが大量に存在する環境では、非温室効果ガスによる温暖化と寒冷化のいずれもが起こりうるということが理論計算によって示されており、その理由は圧力広がり Rayleigh 散乱の効果の差し引きによって定性的に説明されてきた (Wordsworth & Pierrehumbert 2013)。

このように、非温室効果ガスもまた惑星表層環境の決定に対して重要な役割を果たすということが知られる一方で、いつどのようなときに非温室効果ガスによる温暖化・寒冷化が切り替わるのかという定量的な条件はいまだ十分には明らかにされていない。そこで我々は、様々な量の二酸化炭素 (温室効果ガス) と窒素 (非温室効果ガス) を含む大気の温度構造を、1次元放射対流平衡モデル (e.g., Kasting 1988) を用いて求め、大気量と大気組成の変化に対する地表面温度の応答を調べた。

我々は地表面温度の決定に対して、従来から知られていた効果 (圧力広がりおよび Rayleigh 散乱) に加えて、2つの重要な効果が存在することを明らかにした。

1つ目は地表面温度に連動して変わる大気中の水蒸気分布である。水蒸気は強力な温室効果ガスであると同時に、背景大気との比熱の違いおよび凝縮時の潜熱の解放を介して後述する断熱温度勾配にも影響を与えるため、大気温度構造の決定において重要である。我々は、非温室効果ガスを増やしたときの地表面温度の応答が、大気中の水蒸気の有無によって定性的に異なることを発見した。水蒸気を含む大気では、非温室効果ガスを増やすことで地表面の温暖化が見られる一方で、水蒸気なしの大気の場合は顕著な温暖化傾向が見られなくなる。これは、大気中の非温室効果ガスを増やした際に、圧力広がり単体では Rayleigh 散乱の効果に打ち勝つことができず、むしろ水蒸気の鉛直分布の方が非温室効果ガスによる温暖化傾向を生み出す要因として重要であることを示唆している。

2つ目は大気組成が変わることによる断熱温度勾配の変化である。対流圏の断熱温度勾配が乾燥断熱温度勾配に従う場合と湿潤断熱温度勾配に従う場合とでは地表面温度は大きく異なる。我々は、非温室効果ガスを増やした際の地表面温度の温暖化傾向が、断熱温度勾配の切り替わりによって生み出されている場合があることを明らかにした。断熱温度勾配の切り替わりの起こり方は、二酸化炭素量・窒素量の組み合わせと、それに応答して決まる水蒸気量によって異なることも分かった。

本講演では、地表面温度の決定に関するこれらの発見をふまえて温暖化・寒冷化が起こる条件をあらためて整理すると共に、地球型惑星の表層環境進化への示唆についても議論したい。

溶融鉄・ケイ酸塩メルト間の元素分配条件と マグマオーシャンの酸化還元状態

Oxygen fugacity in a magma ocean as a function of metal-silicate equilibrium conditions

○濱野景子, George Helffrich

東京工業大学 地球生命研究所

The oxygen fugacity in a magma ocean would control the gaseous speciation of the overlying atmosphere and influence the formation of C-bearing minerals (graphite/diamonds). We considered the partitioning of rocky elements on an entirely molten planet, where a deep magma ocean is in chemical equilibrium with a molten iron core at the boundary, in order to investigate how the oxygen fugacity in a magma ocean varies as a function of pressure and temperature at the magma-ocean-core boundary.

Considering the composition of volatile-free EL chondrites, the oxygen fugacity at the boundary is as low as IW-5 at low pressures and increases by about 3-4 orders of magnitude at the Earth's core-mantle pressure (~136 GPa). The Fe content in the core decreases with pressure due to Si dissolution, whereas the FeO content in the magma ocean increases. With enhanced O abundance, the oxygen fugacity in a shallow magma ocean becomes higher, simply reflecting the difference in O abundance. As the equilibration pressure and temperature increase, however, the difference in the oxygen fugacity due to the varying O abundance becomes less pronounced. Additional O is consumed by the oxidization of Si dissolved in metal and the increase of ferric iron via disproportionation reaction.

On the assumption of a constant $\text{Fe}^{3+}/\text{total Fe}$ ratio in a convective magma ocean, we calculated the oxygen fugacity gradient with the use of different Fe^{3+} - f_{O_2} models. The surface also tends to become more oxidizing with increasing the magma-ocean-core pressure, i.e. the planetary size (mass). The surface oxygen fugacity can reach as high as or higher than IW+2, depending on the model employed. At IW+2, the primary C-bearing gas is CO, due to the elevated surface temperature. The subsequent cooling will result in a shift in gaseous speciation from CO-rich to CO₂-rich.

原始地球における富水素大気とマグマオーシャンの共進化

○吉田辰哉¹, 有馬銀河², 寺田直樹¹, 倉本圭²

¹東北大学, ²北海道大学

集積期の地球は衝突脱ガスや星雲ガスの捕獲により H_2 に富む還元的原始大気を獲得したと予想される(e.g., Kuramoto and Matsui, 1996; Shaefer and Fegley, 2010; Zahnle et al., 2020). この時期に巨大衝突によって深いマグマオーシャンが形成された場合には, 下部マントル圧力下で二価鉄(Fe^{2+})が不均化反応によって金属鉄と三価鉄(Fe^{3+})に分かれ, 金属鉄のコアへの分離とマントル対流による三価鉄の均質化を経てマグマオーシャン全体が酸化されることが指摘されている(e.g., Armstrong et al., 2019; Kuwahara et al., 2023). マグマオーシャンの酸化に伴い原始大気も酸化されると予想されるが, 原始大気とマグマオーシャンの化学反応効率及びそれらの熱的・化学的共進化過程の詳細は調べられてこなかった.

本研究では, 大気中での惑星放射と太陽放射の伝達と収支を考慮した大気-惑星内部間結合熱進化モデルと気体-マグマ間反応拡散モデルを構築し, マグマオーシャンの固化過程とその間の富水素原始大気の組成進化を推定した. 放射伝達計算では放射吸収源として H_2O の線吸収と連続吸収, H_2 - H_2 衝突誘起吸収を考慮し, 散乱源として H_2O と H_2 によるレイリー散乱を考慮した. 反応拡散モデルでは H_2 と Fe^{3+} のマグマ中での拡散輸送と酸化還元反応を考慮した.

放射伝達計算の結果, 総大気質量が地球海洋質量程度以上の高圧 H_2 - H_2O 大気では H_2O の放射吸収と H_2 - H_2 衝突誘起吸収に加えて, レイリー散乱の影響で大気外に射出される惑星放射フラックスが著しく抑制されることが明らかとなった. レイリー散乱が $\sim 1 \mu m$ 以下の惑星放射に作用することで, 地表面温度が 2000 K 以上の場合には散乱を考慮しない場合と比べて惑星放射フラックスが 1 桁以上低下する. また気体-マグマ間反応拡散モデル計算から, H_2 の酸化率は大気-マグマオーシャン間境界層における H_2 の拡散率によって律速されることが明らかとなった. マグマオーシャンの粘性率が低く境界層の更新が頻繁な場合には H_2 酸化率は最大で $\sim 10^3$ bar/Myr となる一方, 粘性率の高い硬いマグマオーシャンに遷移すると H_2 酸化率は $\sim 10^{-2}$ bar/Myr まで抑えられる. 以上の結果から, 巨大衝突直後の粘性率の低いマグマオーシャンが維持される間は富水素原始大気との反応と H_2O の生成が効率的に進み, 大気中 H_2 分圧が低下することでマグマオーシャンの冷却が加速, 硬いマグマオーシャンに遷移した段階で大気とマグマオーシャンの化学的相互作用がほぼ絶たれるという進化を辿ると推定される.

参考文献

- Kuramoto, K., & Matsui, T. (1996). *J. Geophys. Res.*, 101(E6), 14909.
Schaefer, L., & Fegley Jr, B. (2010). *Icarus*, 208(1), 438.
Zahnle, K. J., Lupu, R., Catling, D. C., & Wogan, N. (2020). *Planet. sci. j.*, 1(1), 11.
Armstrong, K., et al. (2019). *Science*, 365(6456), 903.
Kuwahara, H., et al. (2023). *Nature Geoscience*, 16(5), 461.

ランパートクレーターの形態分類・分布に基づく 火星地下氷分布の探索

○杉本佳祈^{1, 2}, 出村裕英³, 臼井寛裕²

¹東京大学, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³会津大学

近年の火星探査により、かつて火星の表層に液体水が存在していたことを示す観測証拠が多く得られている。現在は、その表層水の多くが消失し、その主要因として、火星史を通じた宇宙空間への散逸および地下へ輸送が提案されている。火星隕石の分析や大気観測からは宇宙空間への水の散逸過程および散逸量が理解されつつある一方で、散逸した水と現存する表層氷の量の合計が古海洋の水の量を大幅に下回ることが指摘され、未発見の水氷貯蔵層の存在が示唆されている。

火星表層には過去の液体水の存在や、揮発性物質の存在を示唆するような地形が見られる。そのうちの一つに流動化イジェクタクレーター（ランパートクレーター）があげられ、クレーター形成時に放出された地下物質が流動し堆積している。この堆積物を“流動化イジェクタ”といい、イジェクタの終端はランパートと呼ばれるリッジになっているものが存在する。流動化イジェクタの形成要因の一つに地下の揮発性物質が衝突による高エネルギーで溶融しイジェクタを含み流動したことが考えられている。

本研究ではこの仮説に基づき火星に見られるランパートクレーターと非ランパートクレーターの形態分類を機械学習により行なった。赤外夜間画像をRバンド、可視画像をGバンド、熱赤外昼間画像をBバンドに割り当てたRGB統合画像作成し、各分類クラスに100枚ずつ用いた。RGB画像では、ランパートの有無に関わらず、イジェクタ堆積物は周囲の地形と比較して異なる色合いであり、色の見え方には多様性が見られた。また、イジェクタ堆積物が厚く、また終端が急勾配なランパートクレーターでは、高い熱赤外放射が確認された（図1）。これはランパートのように周囲と比較し、起伏の激しい地形が特徴として現れたと解釈できる。

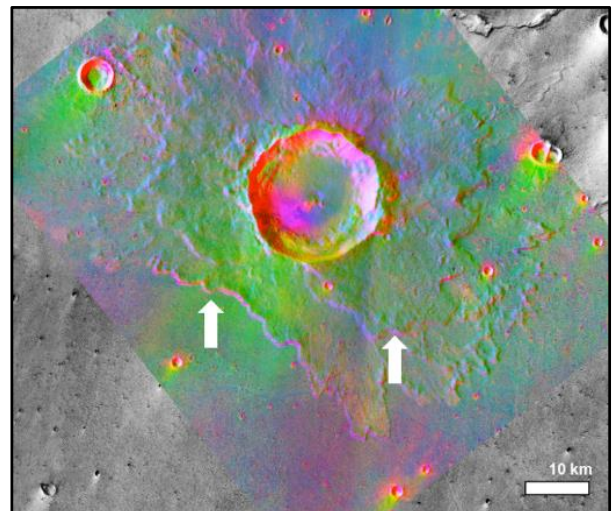


図1 ランパートクレーターのRGB画像。急勾配なランパートが特徴として現れている（白矢印）。

火星衛星の起源：水蒸気の効果を検討した周火星円盤の進化

Icy Origins of Martian moons: Effects of water vapor on the evolution of impact-generated disk around Mars

Courteney Monchinski¹, Hidenori Genda¹, Shigeru Ida¹

¹ Earth-Life Science Institute, Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8550, Japan

The origins of the Martian moons, Phobos and Deimos, are still heavily debated. There are currently two leading theories surrounding their origin: giant impact or asteroid capture. While the asteroid capture theory can straightforwardly explain the moons' observed spectral features, the giant impact theory can straightforwardly explain the moons' orbital characteristics. However, it is extremely difficult to capture two objects into the orbits that the moons are currently in, and there is not enough tidal dissipation to move them into their current orbits (Rosenblatt et al., 2016). Previous giant impact studies can create an impact-generated disk large enough to recreate the moons in their current positions (Craddock, 2011; Rosenblatt and Charnoz, 2012; Citron et al., 2015; Canup and Salmon, 2018), but this large disk also creates a massive moon within Phobos' orbit, which later would need to fall back to Mars (Rosenblatt et al., 2016). This study proposes the use of an impactor containing mostly water-ice for the following three reasons: (1) The moons' compositions, density, and possible porosity can result by adding ice to the system, as the vaporization of water will also help to protect carbonaceous materials that partly form the moons from being altered during impact, as well as bring water to the Martian system. (2) The water would also be key for forming Deimos beyond the synchronous orbit, as the viscous interaction between rock grains and vapor would help extend the impact-generated disk (Ida et al., 2020; Woo et al., 2022). (3) The extra disk mass could be abolished by an ice-dominated impactor also through this viscous interaction, causing most of the inner disk to be accreted back to Mars (Ida et al., 2020; Woo et al., 2022). Our previous study focused on (1) using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) simulations to model the impact of Mars and an impactor of varying water ice-rock ratios. We showed that disk temperature changes before and after impact were decreased through the effect of the ice-mantle of the impactor absorbing most of the impact energy. This allowed for the survival of chondritic materials within the impactor so that they may subsequently form the moons. This study continues where the previous study left off: with the impact-generated disk directly after impact. The impact-generated disk consists of water-vapor and a small amount of rock components from both Mars and the impactor, where the ratios of water vapor to rock depend on the impactor's original water-rock ratio. This study uses the 1-D viscous diffusion equation to solve for the evolution of this impact-generated disk. Because of the disk's water-vapor component, the gaseous disk should expand, and, depending on the size of the rock grains, the rock grains should couple with the gas motion and expand, as well. This extension of the disk is pivotal to forming Deimos without the large disks of previous studies (Craddock, 2011; Rosenblatt and Charnoz, 2012; Citron et al., 2015). This extension of the disk is the result of accretion onto Mars and the loss of angular momentum of the disk, which also will allow a large portion of the inner impact-generated disk to be accreted onto Mars, preventing the formation of a large inner moon (Rosenblatt et al., 2016). This study shows that enough mass is delivered to the orbits of Phobos and Deimos in the correct water-rock ratios to subsequently accrete the moons we see today.

Control of Carbonate Composition and Distribution on Mars by Protolith Composition and Advective Transport

Chang-Chin Wang¹, Tomohiro Usui^{1,2}, Mohit Melwani Daswani³

¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

²Department of Solar System Sciences, Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

³Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology

Introduction

Carbonates on Mars are important because they may be a major sink of ancient atmospheric CO₂ [1]. The surface of Mars is predominantly basaltic [2], and many carbonate outcrops studied by orbital and landed missions are rich in Mg and associated with mafic rocks [e.g., 3, 4]. However, over the past decade, both Ca/Fe carbonates [5] and feldspathic rocks [e.g., 6] have been detected on Mars, and they appear to be spatially associated on a regional scale [5]. In this study, we tested whether there may be a causal relationship between feldspathic protolith and Ca/Fe carbonates on Mars.

Methods

Using the PHREEQC software [7], we conducted 1-D thermochemical simulations of low-temperature aqueous alteration of mafic and feldspathic protoliths by groundwater under possible ancient Martian environmental conditions (pCO₂ = 1 bar, temperature = 5 °C). Since advective transport may have been important on ancient Mars [8], simulations were run both with diffusive transport only or with both advective and diffusive transport. Kinetically inhibited phases at low temperatures were manually suppressed, and dissolution rates were considered for protolith phases in simulations with advective transport.

Results and Discussion

The mafic protolith produced dominantly Mg/Fe carbonates similar in composition to those measured in the Séítah Formation, Jezero Crater [3], and similar byproducts as observed in Nili Fossae [4], while the feldspathic protolith produced Ca/Fe carbonates, showing that different protolith compositions can explain the compositional difference between Mg-rich and Ca/Fe carbonates on Mars. Low temperature and high water-to-rock ratios (W/R) have been proposed as possible reasons for Ca/Fe carbonates [5], but we favor feldspathic protolith as the most likely explanation because our results show that a mafic protolith still produces Mg carbonates at a low temperature of 5 °C, and a very high W/R (~5000) that is unlikely to have happened on a large scale on ancient Mars is needed to produce only Fe carbonates from a mafic protolith.

We also show that compared to diffusive transport only, advective transport greatly accelerates the delivery of dissolved CO₂ into the protolith and the rate of carbonate formation, potentially suggesting that long-term presence of liquid water is not required for the formation of some of the carbonates observed on Mars. Advection also reduces surface pH and effectively transports CO₂ deep into the crust, so it can explain the lack of surface carbonates and the possible presence of deeply buried underground carbonates on Mars.

References

- [1] Jakosky B. M. (2019) *P&SS*, 175, 52–59. [2] Ehlmann B. L. & Edwards C. S. (2014) *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 42, 291–315. [3] Clavé E. et al. (2023) *J. Geophys. Res. Planets*, 128, e2022JE007463. [4] Ehlmann B. L. et al. (2009) *J. Geophys. Res.*, 114, E00D08. [5] Wray J. J. et al. (2016) *J. Geophys. Res. Planets*, 121, 652–677. [6] Phillips M. S. et al. (2022) *Geology*, v. 50, 1182–1186. [7] Parkhurst, D. L. & Appelo C. A. J. (1999) *U.S. Geol. Surv. Water Resour. Invest. Rep.*, 99–425. [8] Shadab M. A. et al. (2024) *LPSC LV*, Abstract #1383.

岩石質固体天体表層におけるマルチスケールの起伏解析

○竹村知洋¹、宮本英昭¹、小林真輝人¹

¹ 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

岩石質固体天体表層の起伏は過去にその天体が経験した表層の進化過程に応じて多様に変化する可能性がある。既存の探査によって様々な天体における起伏の様相が明らかになり、マルチスケールの起伏の性質はクレーターや岩塊の数密度、レゴリスガーディング、宇宙風化などに依存して天体ごとに異なる挙動を示すことが確認された (e.g., Cai & Fa, 2020; Guo et al., 2021)。各天体において地質現象との関連が示唆される起伏の状態は、天体の表層進化プロセスを明らかにする鍵となる可能性がある一方、レーダー観測や輝度温度観測、測光観測をはじめとした科学観測に支配的な要素でもある。起伏の状態に依存して複雑に変化する天体表面の放射・散乱特性等は観測値に大きく寄与する (e.g., Fa et al., 2011; Bandfield et al., 2015)。そのため、特に探査対象天体におけるスケールの小さい微地形の起伏の性質については、探査前に可能な限り制約し、科学観測の実証を実施することが望ましい。しかし、探査前に得られる天体の起伏モデルの解像度は限られている場合がほとんどであり、探査の実施前により大規模なスケールの起伏の特性をもとに微地形の状態を制約する必要がある。そこで、本研究では様々な直径をもつ岩石質固体天体の表面起伏についてマルチスケールでの分析を実施し、スケールごとに起伏の性質を比較することによって大規模なスケールの起伏から微地形の様相を推定する手法を確立した。特に本研究では、火星衛星探査計画 MMX の探査対象天体であるフォボスに注目し、起伏の解析を実施した。

本研究では二次元フーリエ解析によって岩石質固体天体表層の起伏モデルにおけるパワースペクトルを推定し、cm から km スケールに渡って様々な岩石質固体天体表層の起伏の解析を実施した。解析の結果、フォボスはエロスや月表層のような起伏とマルチスケールに渡って類似した起伏の性質を示すことがわかり、スケールの小さな微地形においてもこれらと類似、またはより小さな起伏を示すことが示唆された。本発表では各天体の起伏の解析結果や、起伏解析に基づいて推定された微地形についてさらに詳細に報告する。

◆ 参考文献

- [1] Cai & Fa (2020) *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(8), e2020JE006429.
- [2] Guo et al. (2021) *Geophysical Research Letters* 48(19), e2021GL094931.
- [3] Bandfield et al. (2015) *Icarus*, 248, 357-372.
- [4] Fa et al. (2011) *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116(E3).

デルタ地形の水槽実験から復元する太古火星の海水準変動

○鬼頭蓮¹, 長谷川精², 武藤鉄司³, Trishit Ruj¹, 小松吾郎⁴, 庄崎弘基⁵

¹岡山大学惑星物質研, ²高知大学, ³長崎大学, ⁴ダヌンツィオ大学, ⁵東京工業大学 ELSI

Reconstructing past sea-level change on ancient Mars from flume-tank experiments of delta morphology

○Ren Kito¹, Hitoshi Hasegawa², Tetsuji Muto³, Trishit Ruj¹, Goro Komatsu⁴, Hiroki Shozaki⁵

¹IPM, Okayama Univ., ²Kochi Univ., ³Nagasaki Univ., ⁴Università d'Annunzio, ⁵ELSI, Tokyo Tech

火星表層にはバレーネットワークやアウトフローチャネルといった流水地形や、デルタ(三角州)、津波堆積物、海岸線地形などの痕跡が認められること(Di Archille *et al.*, 2010; Ehlman *et al.*, 2016; Rodriquez *et al.*, 2016; Fawdon *et al.*, 2018; Kite *et al.*, 2022)や、火星隕石の水素同位体比の証拠(Kurokawa *et al.*, 2014; Scheller *et al.*, 2021)などから、約 40~35 億年前の火星には北半球に広大な海があったと考えられている。この太古火星の海は 35 億年前頃に大規模な海退と共に消失したと考えられている(Fawdon *et al.*, 2018; Kite *et al.*, 2022)が、約 36~32 億年前に海水準が約 1000m 上昇したことを主張する研究もある(Duran & Coulthard, 2020)。このように、太古火星の海洋の存在時期や消失過程に関しては未だに統一見解が得られていない。また、デルタは年代と標高分布に明確な関係が見られないことから海の消失過程を反映していない可能性も指摘されている(De Toffoli *et al.*, 2021)。そこで本研究では、海水準上昇・下降に伴うデルタ地形の変化を検討した水槽実験の知見(Muto & Steel, 2001, 2004; Muto *et al.*, 2016)に基づき、火星デルタの形成過程の解明を試みた。そして水槽実験の結果に類似する形状のデルタ地形の分布と年代を調べ、太古火星の海水準変動と表層環境史の解明を試みた。

本研究ではまず、長崎大学の実験水槽を用いて、水位変動に応じたデルタの形態変化を調べた。その結果、(1)水位上昇時には段々地形である「ステップ状デルタ」、(2)比較的遅い下降時/停滞時には分流チャネルが発達した「チャネル分岐型デルタ」、(3)比較的速い下降時には分流系を発達させずに、海側へ線的に伸びていく「ロブ伸長型デルタ」が形成されることが明らかになった。

次に、衛星画像から火星表面のデルタ地形の観察を行い、水槽実験で形成された上記 3 種類の形態に類似したデルタの分布を調べた。さらに地形的特徴だけではなく、デルタの存在場所に基づいて平野/開放型クレーター内、閉鎖型クレーター内、流出チャネルを持つクレーター内、の 3 つにより細かく分類し、標高 500m ごとにグループ化した。そしてクレーターの数密度から各デルタの形成年代を推定した。その結果、水位下降で形成される「ロブ伸長型デルタ」と「チャネル分岐型デルタ」は標高-1960~-3121m の古海岸線付近の平野や開放海盆内に存在することが分かった。また 35~33 億年前の年代を示し、標高の低いデルタほど新しい年代を示した。一方、水位上昇で形成される「ステップ状デルタ」は標高 2727~-4995m と幅広い標高分布を示すのに加え、クレーター内や閉鎖盆地内でのみ見られ、その形成年代は約 20~約 5 億年前と著しく若い年代を示した。

以上の結果から、水位下降で形成されるデルタ地形に関しては古海洋の消失を反映しており、約 33 億年前に標高-3121m 付近まで海水準の下降が起こった可能性が明らかとなった。また 33 億年前以降には平野や開放型海盆に位置するデルタが見られないことから、これ以降には広大な海や大規模な海水準変動は存在しなかったと考えられる。一方、クレーター内や閉鎖盆地内でのみ水位上昇で形成されるデルタ地形が約 20~5 億年前に形成されていることは、火山活動起源の水融解による短期的な水の流れがアマゾン紀後期にも存在したとする先行研究の解釈(Broz & Hauber, 2012; Vijayan & Sinha, 2017)と整合的である。

Slope streak 形成過程における粒子間固着力の影響

○三平舜^{1,2} Trishit Ruj³ 臼井寛裕²

¹東京大学, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³岡山大学惑星物質研究所

Slope streak は火星の中低緯度地域の斜面に形成される, 暗いアルベドを持つ細い筋状の地形である. Slope streak は現在も形成が進んでいるアクティブな地形であり[1], その形成および進化は, 火星における現在進行中の地質学および大気学的プロセスに関する知見をもたらす貴重な証拠である. これまでに, slope streak の分布の不均質性に基づいて, 複数の形成過程仮説が議論されている[2, 3, 4]. しかし, 個々の slope streak の分布と比較するには, 中性子分光計などの広域を観測するデータは空間解像度が不十分であり[5], slope streak の分布を制御する要因は現時点では未解明である. 本研究では, 熱慣性及び水素データと比較可能な範囲における slope streak の密度を算出することで, 個々の slope streak の分布を反映しながら熱慣性分布, 水素分布との比較を可能にする.

火星中低緯度地域において最も多くの slope streak が観測される地域の一つである Medusae Fossae Formation とその周辺地域において, 中性子分光計から得られる水素マップの 1 pixel に相当するエリアを 91 カ所抽出し, 各エリアにおける slope streak の密度を算出した. さらに, エリア内に位置する 317 カ所のクレータの slope streak 密度を算出し, 各クレータの斜面の熱慣性値と比較した.

調査の結果, 熱慣性が $160 \text{ m}^2 \text{ K}^{-1} \text{ s}^{-0.5}$ を超える地域では slope streak の存在率が顕著に減少することが確認された. 熱慣性 $160 \text{ m}^2 \text{ K}^{-1} \text{ s}^{-0.5}$ という閾値は, 表層物質の挙動様式において, 重力の影響を粒子間の固着力が上回る境界値を示しており[6], slope streak の形成には, 表層物質の挙動を粒子間固着力が支配している必要があることが示唆された. また, 熱慣性 $160 \text{ m}^2 \text{ K}^{-1} \text{ s}^{-0.5}$ 以下の地域において slope streak 密度と水素量の間に明瞭な負の相関関係があることが明らかになった. 水分の存在は粒子間固着力を増加させる働きがあるため, 表層に水分が存在する領域では, 表層粒子の移動が制御され, 結果として slope streak の形成が抑制されている可能性が考えられる. これらの結果は, slope streak が表層物質の単純な重力降下の結果として生じる現象ではなく, 粒子間の固着力による物理的相互作用が重要な役割を果たしていることを示唆している.

[1] Kreslavsky & Head, (2009) Icarus, 201 (2), 517-527. [2] Sullivan et al. (2001) JGR Planets, 106 (E10), 23607-23633. [3] Schorghofer et al. (2002) GRL, 29 (23), 41-1. [4] Bhardwaj et al. (2017) Sci reports, 7(1), 1-14. [5] Wilson et al. (2018) Icarus, 299 148-160. [6] Lumay G. et al. (2012) Powder Technol. 224, 19-27.

Phobos のクレーター分布の異方性が示す表層進化過程

○内田雄揮^{1,2}、豊川広晴^{2,3}、臼井寛裕²、鈴木雄大²、田畑陽久²

¹ 東京大学、² JAXA 宇宙科学研究所、³ 総合研究大学院大学

フォボスの形成起源解明にとって表層進化史の解明は重要である。クレーター数密度とレゴリス堆積量の異方性は、惑星環境下における衛星の進化史を反映する [Ramsley & Head, 2021]。これまで、月以外の天体のクレーター生成関数は月と同じ衝突体のサイズ頻度分布と表面更新によるクレーター消去過程が仮定されてきた [Schmedemann et al., 2014 など]。本研究では、フォボス表層進化の異方性解明と、実際のクレーターサイズ頻度分布とクレーター生成関数モデル間の差異の解明を目指す。

まず緯度 $\pm 30^\circ$ 以内の火星側 (0°E) および反火星側 (180°E)、先行半球側 (270°E) および後行半球側 (90°E) の $60^\circ \times 60^\circ$ の領域についてクレーターサイズ頻度分布を求めた (図1)。次に先行研究 [Platz et al., 2010] に倣い、フィッティングしたクレーター生成関数モデルが実測値と 3σ の精度で一致しなくなる直径サイズをキンク直径と定義した。最大のキンク直径からはレゴリス堆積量の異方性を調査した。クレーター数密度の相違性は、クレーター年代が誤差範囲で一致するか否かで判断した。

その結果、4調査領域間でクレーター数密度とキンクの大きさに相違点を見出した。全ての調査領域が 400 m と 800 m にキンクを示した一方で、先行半球側のみ 1 km 以上のキンクを示さなかった。最大直径から 400 m のキンク間のフィッティングから得られた3つのクレーターの数密度は、反火星側で火星側の2倍を示した。800 m と 400 m のキンク間のクレーター数密度のみ、先行半球側は後行半球側より小さく、誤差範囲で一致しなかった。

まず、最大のクレーター (Stickney, 0°N , 310°E) 形成時に放出されたイジェクタの堆積によって先行半球側では全てのクレーターが消去され、1 km 以上のキンクを示さなかった可能性が考えられる。他の領域と同様に先行半球側にも 3 km のクレーターが存在していたのにも拘らずイジェクタの堆積によって消去されたと仮定すると、先行半球側は他領域のイジェクタ堆積量の2倍を示す。

次に、800 m のキンクはフォボスへのクレーター形成時に放出されたイジェクタ同士が火星周回軌道で衝突破壊を行うことで、800 m 以下のクレーターを作る衝突体がクレーター生成関数モデルより少ない可能性を示唆する。400 m のキンクは、表面更新によるクレーター消去の効果がクレーター生成関数モデルよりも大きいことを示す。クレーター数密度の異方性からは、火星が火星側のクレーター形成の遮蔽物となった描像が考えられる。更に、先行半球側のクレーター形成時に放出されるイジェクタがもつ相対速度は小さく、先行半球側に再降着することで 400 m 以下のクレーターが消去された可能性を見出した。

本研究ではクレーター分布の異方性から、火星重力環境下でのフォボスの表層進化の描像を明らかにした。更に、衝突体サイズ頻度分布が火星圏特有の進化を行う可能性を示唆した。

クレーター分布の異方性は表面更新と公転様式の共進理解に直結する。本研究は火星衛星探査計画 (MMX) と合わせて、形成起源解明やクレーター生成関数モデルの再構築に繋がる。

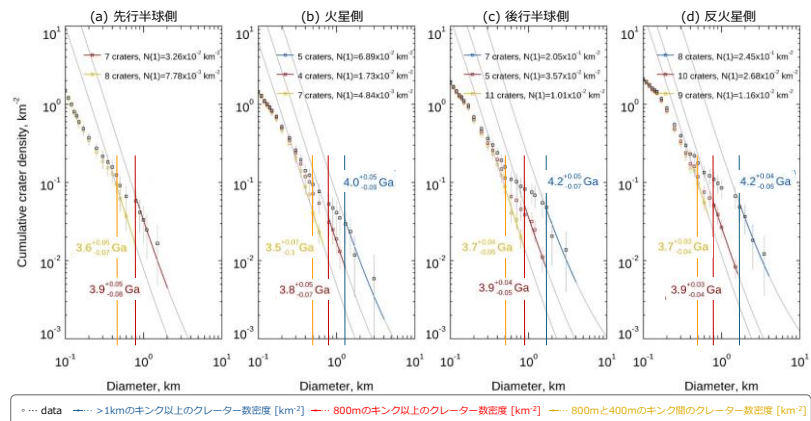


図 1. 4調査領域のクレーターサイズ頻度分布。N(1) は直径 1 km で規格化したクレーターサイズ頻度分布。

Modeling the evolution of Martian subsurface ice over the past millions of years (過去数百万年間の火星地下氷進化モデル)

○鎌田有紘¹, 黒田剛史¹, 渡辺泰士^{2,3}, 古林未来¹, 小玉貴則⁴, グレーベ・ラルフ^{5,6},
中川広務¹, 笠羽康正⁷, 寺田直樹¹, 関根康人⁴

¹ 東北大学 大学院理学研究科 地球物理学専攻 ² 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

³ 気象庁 気象研究所 ⁴ 東京工業大学 地球生命研究所 ⁵ 北海道大学低温科学研究所

⁶ 北海道大学 北極域研究センター ⁷ 東北大学 理学研究科附属惑星プラズマ・大気研究センター

○A. Kamada^{1*}, T. Kuroda¹, Y. Watanabe^{2,3}, M. Kobayashi¹, T. Kodama⁴, R. Greve^{5,6}, H. Nakagawa¹, Y.
Kasaba^{1,7}, N. Terada¹ and Y. Sekine⁴

¹ Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai, Japan

² Department of Earth and Planetary Science, the University of Tokyo, Tokyo, Japan

³ Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Tsukuba, Japan

⁴ Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan

⁵ Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

⁶ Arctic Research Center, Hokkaido University, Sapporo, Japan

⁷ Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Tohoku University, Sendai, Japan

Mars is an extremely cold planet with limited surface water, but exploration missions have revealed significant subsurface water. Instruments such as HiRISE, SHARAD, and MARSIS have detected extensive ice deposits, particularly in the polar regions and mid-latitude regions. Recent studies, including the Mars Subsurface Water Ice Mapping (SWIM) project, have mapped possible subsurface ice in the northern mid-latitudes. Advances in Mars observations and global climate models suggest that subsurface ice at low and mid-latitudes is unstable under current conditions and is likely to be a remnant of past periods of high obliquity. Quantification of subsurface ice requires long-term environmental simulations.

Here, we developed a fully coupled global water circulation model between the atmosphere, hydrosphere, and cryosphere down to a few kilometers in the subsurface. Using the Laskar et al. (2004) dataset, we performed a long-term time series simulation that includes changes in Martian obliquity, eccentricity, and perihelion longitude over the last few million years. Our model implemented a water exchange scheme between the atmosphere and the regolith/crust, considering depth-dependent porosity, grain size, and thermal properties.

Our simulations show that during epochs of obliquity greater than 30°, significant water transport from the polar caps to the subsurface occurred, forming porous ice even at mid-latitudes above 30°. Water in the regolith gradually diffused into deeper layers, accumulating about 105 km³. This effect was most pronounced when the northern hemisphere summer solstice coincided with perihelion, increasing atmospheric water vapor and water transfer to the regolith. The near-surface layers were strongly influenced by the 120,000-year cycle of obliquity variations. However, deeper underground, beyond these near-surface changes, our results indicate that ice deposited in low to mid-latitudes remained relatively stable over long periods of time.

火星散逸大気由来の酸素イオンがフォボス 表面スペクトルに与える影響

○田畑陽久¹, 湯本航生¹, 川島桜也¹, 臼井寛裕¹

¹宇宙科学研究所/JAXA

火星の衛星フォボスは、火星周回衛星の可視／近赤外分光観測により表面反射スペクトルの特徴が二分性を示すことが報告されており、二分性に対応する物質の違いやその起源が議論されている(e.g., Fraeman et al., 2014)。本研究では、火星から現在も散逸を続ける大気に由来する成分がイオン風としてフォボスに照射されている点に着目した。火星大気由来のイオン風は火星大気中の二酸化炭素に由来する酸素イオンを多く含むため、フォボス表面物質を酸化することでスペクトルを変質する可能性が考えられる。しかしながら、酸素イオンの照射が惑星物質のスペクトルへ与える影響はまだ調べられていない。そこで本研究では、3 種のフォボス模擬物質に対し酸素イオンを照射する実験を行い、酸素イオンの照射が可視／近赤外領域の反射スペクトルに与える影響を調べた。

実験では模擬フォボス試料として、カンラン石玄武岩(ハワイ産)、カンラン石(パキスタン産)、反射スペクトルを観測結果に合わせた合成フォボスシミュラント(Miyamoto et al., 2021)を用いた。フォボスシミュラントは 0.4–20 μm の範囲で約 4%以下の低い反射率を持つ。酸素プラズマは、真空容器に 10–100 Pa の純酸素ガスを導入し、マイクロ波を照射することにより生成した。マイクロ波プラズマは、フォボスに照射されているイオン風と同程度の温度(~ 10 eV)を持つ。照射は 30 時間行い、累積の酸素イオン照射量はフォボス環境における 2 万年分に相当する。実験試料の可視／近赤外領域の反射スペクトルはバンド型紫外可視分光計(測定範囲: 400–900 nm)と近赤外分光計(測定範囲: 1.3–30 μm)を用いて測定した。

実験の結果、酸素イオンの照射によって玄武岩とカンラン石においては可視スペクトルの青化傾向が観察された。またフォボスシミュラントにおいては可視域全体において最大 30% 程度まで反射率の上昇が見られた。赤外スペクトルにおいては、玄武岩とカンラン石はピーク強度の低下と反射率の低下(青化)が観察され、フォボスシミュラントでは反射率が 2.5–20 μm の範囲で最大 10%程度までの反射率の上昇が見られた。

フォボスの表面スペクトルの内、短波長(400–600 nm)において比較的高い反射率を示す「青い」領域は、火星側($0 \pm 45^\circ\text{E}$)のやや先行側($290\text{--}10^\circ\text{E}$)に分布している。カンラン石・玄武岩のスペクトルが酸素イオンの照射によって青化するという結果は、酸素イオンの照射によってフォボス表面スペクトルが変質し得ることを示し、フォボス表面反射スペクトルの二分性が火星大気由来の酸素イオンの照射量の違いによって生じている可能性を示唆する。

超小型火山地形ルートレスコーンからアクセスする火星表層浅部探査の提案 Exploration of the shallow subsurface world on Mars accessing through rootless cones

○野口里奈(新潟大学 自然科学系)

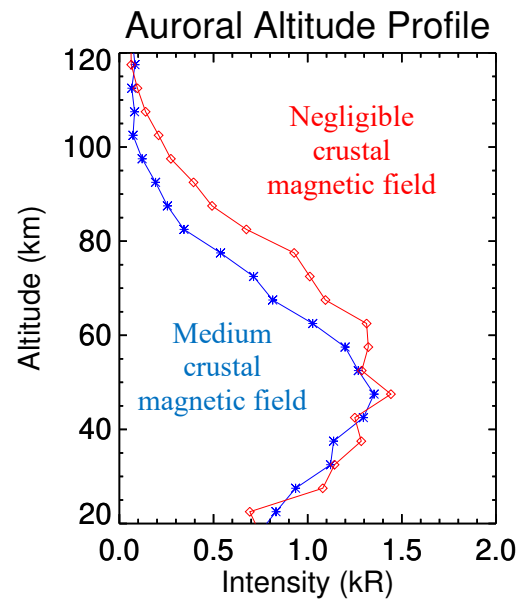
高温溶岩が含水/氷層を被覆すると、加熱された水の気化・膨張により爆発が生じることがある。条件によってはこの爆発が連続して発生し、飛散した岩石片が降り積もることにより小型の丘(ルートレスコーン)が形成される。ルートレスコーンは火星表層に広く分布しており、火山活動や水の存在のみならず、かつての熱水環境を示すものとして注目を集める地形である(例えば、Noguchi and Kurita, 2015; Hadland et al., 2024)。ルートレスコーンを構成する岩石片には、溶岩片のみならず形成当時含水層であった基盤岩も含まれている。通常、溶岩が被覆すると下位層にはアクセス困難であるが、ルートレスコーン構成物を調べることで、掘削することなくかつての含水層にアクセスすることが可能となる。そこで本研究では、ルートレスコーン構成物からかつての含水層の物理・化学特性を明らかにする手法を開発するため、火星ルートレスコーンのアナログ地形が多く分布するアイスランドにおいて現地調査を2024年8月に実施した。アイスランドでは5箇所(ミーヴァトン、コーパスケール、ランドブロット、ショルサルダルア、ランドブロット)において、ルートレスコーン山体露頭の記載・岩石試料採取を実施した。このうち、ミーヴァトンとコーパスケールでは、ルートレスコーン内部に基盤岩が顕著に認められた。基盤岩をより多く含むコーンの判断基準が設定できれば、火星への適用、すなわち溶岩下位層への容易なアクセスも視野圏内となる。本講演では現地調査の速報とルートレスコーンを用いた火星表層浅部探査への展望を述べる。

Effects of magnetic field structure on the Martian diffuse aurora based on Monte Carlo simulations and MAVEN observations

Taishin Okiyama¹, Kanako Seki¹, Yuki Nakamura¹, Robert J. Lillis², Ali Rahmati²,
 Davin E. Larson², Gina A. DiBraccio³, Nicholas M. Schneider⁴, Sonal K. Jain⁴, and Shannon Curry⁴
¹ University of Tokyo, Tokyo, Japan, ² The University of California, Berkeley, USA
³ NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, USA,
⁴ The University of Colorado at Boulder, Boulder, USA

Martian diffuse auroras are global ultraviolet emissions including CO_2^+ ultraviolet doublet (UVD) on the nightside, caused by solar energetic particles (SEPs) including electrons and protons (Schneider et al., 2015; Schneider et al., 2018; Nakamura et al., 2022). The auroral emissions caused by the electrons are expected to vary with nightside magnetic fields around Mars because Larmor radii of electrons are smaller than those of protons, however, the effect of nightside magnetic fields on the electron-induced Martian diffuse auroras are far from understood. Mars does not have a global intrinsic magnetic field, and there are crustal magnetic field regions in parts of the southern hemisphere. In such an environment, solar wind magnetic fields drape around Mars and form induced magnetosphere, whose nightside structures during extreme solar events are not well understood. The observational diffuse auroral emissions can be useful to infer the unknown nightside induced magnetic field structures during extreme solar events. Since the nightside magnetic field structures affect the atmospheric ion escape processes, they are essential to understand Martian atmospheric evolution. It is thus important to understand effects of the magnetic fields on diffuse auroral emission profiles.

We estimated the magnetic field effects based on a newly developed Monte Carlo model including electron cyclotron motions and MAVEN observations. The model results suggest that the magnetic field direction plays a dominant role compared to the magnetic field strength in uniform magnetic field assumptions. Comparison between horizontal and vertical magnetic field structures indicate that the horizontal magnetic field results in the broader limb-integrated auroral altitude profiles than the vertical case, and the broader limb-integrated auroral altitude profiles enhance the auroral intensities at high altitudes (>75 km). The observational results also infer the effects of magnetic fields on auroral emissions. We find the event where the auroral intensity in higher altitude is enhanced during decreasing phase of SEPs. The narrow auroral altitude profiles correspond to the medium crustal magnetic field region. These results imply that magnetic field structures in the nightside Martian ionosphere can change the altitude profiles of diffuse auroral emissions. This study implies the possibility that nightside magnetic field structures will be inferred from observations of the limb-integrated diffuse aurora emissions.



CO_2^+ UVD emission altitude profiles observed by Imaging Ultraviolet Spectrograph onboard MAVEN spacecraft. The colors represent the different timings, and blue line is ~ 3 hours prior to red line. About the observational points, blue and red lines are located in medium and negligible crustal magnetic field regions, respectively.

エンセラダスの亀裂間隔に基づく 過去の熱流束推定

○ 太田原 裕都¹、諸田 智克¹、平田 直之²

1. 東京大学大学院理学系研究科、2. 神戸大学大学院理学研究科

土星の氷衛星エンセラダスの表面は、年代や地形の異なる 4 種の領域に区分される (Crow-Willard & Pappalardo, 2015)。北半球の大部分を占める cratered plain は、多くのクレーターが残っておりエンセラダスで最古の領域 (~Gyr) と考えられている。Leading Hemisphere Terrain (LHT) と Trailing Hemisphere Terrain (THT) はトラフやリッジにより多くのクレーターが消去されており、かつてテクトニックな活動があったとされる領域である。South Pole Terrain (SPT) はプルームの噴出が見られるなど現在でも活発な熱活動が見られ、最も年代の若い領域 (~Myr) とされている (Porco et al., 2006)。現在見られるような熱活動が過去にも起きたのかといった熱史を論じるには cratered plain のような古い領域の地形に着目する必要がある。エンセラダスの地形をもとに過去の熱流束を推定した研究 (Bland et al., 2007; Giese et al., 2008; Bland et al., 2012) では $\sim 100 - 300 \text{ mW m}^{-2}$ と現在の南極域と同等の値が得られており、過去のエンセラダスで局所的・一時的な熱流上昇が起きていた可能性が示されていた。しかし熱流束の推定が行われた領域は限られており、熱流上昇が起きた年代の推定もあまり行われていなかった。

本研究ではエンセラダスの亀裂地形の間隔をもとに氷地殻の brittle layer の厚さを推定し、これをもとに亀裂が形成された時点の過去の熱流束を新たな領域についても推定した。全球図 (Becker et al., 2016) を用い cratered plain 低中緯度の全ての亀裂、THT の一部の亀裂のカウントを行い 18 個の領域について亀裂の平均間隔を求めたところ $1.3 - 8.2 \text{ km}$ となった。地球での観測事例 (Narr & Suppe, 1991; Gross, 1993; Soliva et al., 2006) から亀裂間隔は亀裂が存在する層の厚さに比例することが知られており、有限要素法による計算 (Bai & Pollard, 2000) や SPT を仮定した力学的計算 (Yin et al., 2016) では比例定数が 1 に近いとされるため、brittle layer の厚さは亀裂の平均間隔と同程度の $1.3 - 8.2 \text{ km}$ と考えられる。氷地殻の brittle/ductile layer の境界で脆性破壊強度と延性破壊強度が等しくなることから境界での温度を求めることが可能で、これとエンセラダスの表面温度 (Spencer et al., 2006) を用いて、亀裂形成時点の過去の熱流束が求められる (Ruiz & Tejero, 2000; Ruiz, 2005)。亀裂形成時の歪み速度と氷の粒径というパラメータの範囲を仮定し、 $40 - 370 \text{ mW m}^{-2}$ の熱流束が得られた。18 のうち 12 の領域で 100 mW m^{-2} を超える高い熱流束が見られ、先行研究で指摘されていたような局所的・一時的な熱流上昇が、より広範な領域で起きた可能性が示された。本講演では熱流束の推定結果に加えて、亀裂を切っているクレーターのカウントを行い、そのような熱流束の見られた年代についても議論する予定である。

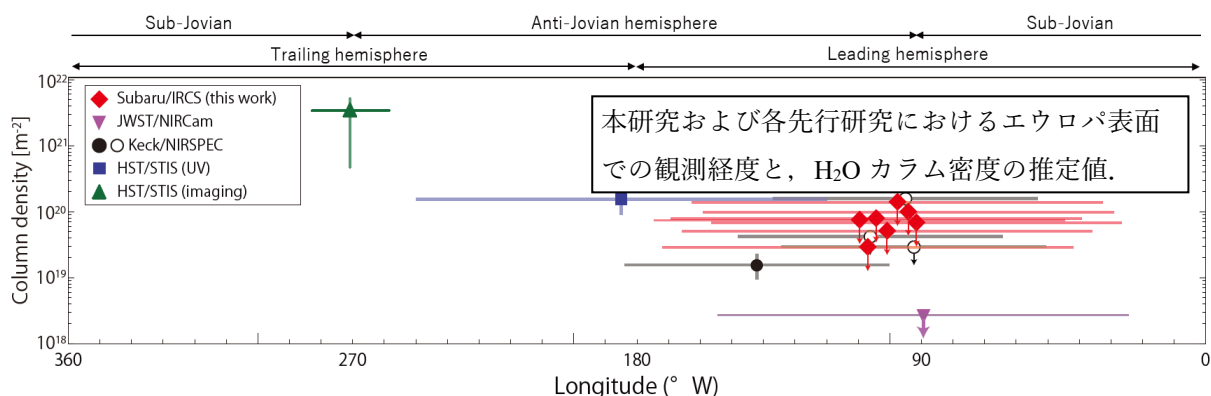
すばる望遠鏡での近赤外分光観測による エウロパ水噴出の探索

○木村 淳¹, 松尾 太郎², 小林 仁美³, 池田 優二^{4,5}, 吉岡 和夫⁶, 高木 聖子⁷, 井田 茂⁸

¹大阪大学, ²名古屋大学, ³株式会社フォトクロス, ⁴フォトコーディング,

⁵京都産業大学, ⁶東京大学, ⁷北海道大学, ⁸東京工業大学

エウロパの水噴出活動は、2014 年のハッブル宇宙望遠鏡 (HST) による水素と酸素原子の輝線検出報告以来、様々な研究者と測器による数十回の観測が行われたが、数例の検出報告しかない上に検出/不検出の傾向にも未だ合理的な解釈がない。噴泉の存在は、同様の活動を持つエンセラダスから我々が学んだように、地殻構造やテクトニクス、内部の物質や環境を知るための貴重な鍵となる。しかしエウロパ噴泉はいまだその有無すらも判然としないため、詳細な観測でそれを見極め、噴泉が存在する場合には噴出域の特定や活動期間、噴出量、それらの空間/時間的変化を把握し、さらに H₂O 以外の物質を同定することが、エウロパの氷殻テクトニクスや内部環境の理解に重要である。またエウロパ固有の環境の理解のみならず、エンセラダスとの対比を通して木星系と土星系の差異を知る点でも意義は大きい。我々は 2020~21 年にかけて、すばる望遠鏡近赤外分光撮像装置 (IRCS) を用いた高分散分光観測を計 3.5 夜行い、うち 2021 年 7 月 17 日の 1 夜においてデータを取得した。観測では、視直径約 1.03 秒のエウロパに対して幅 0.14 秒のスリットを南北方向に当て、NGS/AO188 を用いることによって L バンドで約 20,000 の波長分解能を実現した。エウロパ上の経度 (スリット中心経度) 90~109 度の領域において積分時間 720~960 秒の観測を 7 回行い、スリット内のピクセルを空間方向に足し合わせたものと 5 分割したものとでそれぞれ得たスペクトルについて、hot-band 輝線やメタンなど炭化水素分子による吸収の有無を探索した。解析の結果、いずれのスペクトルにおいても有意な輝線や吸収のシグナルを得ることはできなかったため、hot-band 輝線フラックスの 3 σ 上限値を導出した。H₂O 分子の回転温度を 50 K と仮定した場合、スリット内を空間分割した各領域におけるカラム密度の上限値は $(0.95\text{--}5.92) \times 10^{20} \text{ m}^{-2}$ 、スリット内全体を足し合わせた場合の上限値は $4.61 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$ となった。これは、HST の紫外観測から推定された $1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-2}$ や、Keck 望遠鏡の近赤外観測による $(1.4 \pm 0.4) \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$ などと調和的であり、すばる望遠鏡 IRCS が噴泉の検出に有用であることが示された。



分化を考慮したガニメデの熱進化モデル：

核形成と衛星半径変化

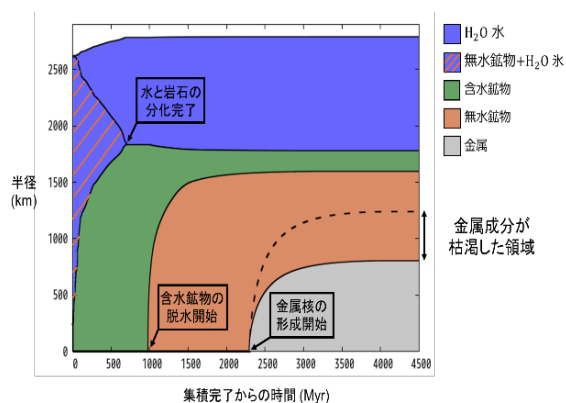
○高橋 聖輝¹, 鎌田 俊一¹, 倉本 圭¹

北海道大学大学院理学院 宇宙理学専攻

太陽系最大の大きさを持つ木星系氷衛星ガニメデは、その小さな慣性率から、内部は分化していると考えられる。また、太陽系の衛星で唯一固有磁場を持つことから、導電性の液体金属の核が存在し、金属核内で対流が発生していると考えられる。衛星表面は明るさの異なる二つの領域に分かれており、明るい領域は複雑な溝状地形に覆われている。さらに、内部海を持つ可能性があるため、アストロバイオロジーの観点でも注目されており、木星系氷衛星探査計画 JUICE の探査対象となっている。

このような、複雑な内部構造や地質を持つガニメデの進化過程やダイナミクスは十分に理解されていない。従来のガニメデ進化モデルは金属核、岩石マントル、H₂O 層に完全に、または、部分的に分化した状態を初期条件としている。しかし、集積加熱と放射壊変熱のみを考慮した場合、形成直後は未分化である可能性がある。進化の過程で分化が発生すると、内部の層構造や密度構造が大きく変化するため、衛星半径も大きく変化する可能性がある。特に衛星半径が増大する場合、伸張応力によって溝状地形が形成すると思われる。また、集積直後が未分化の場合、金属核が形成されるかという点は不明である。そこで、本研究では、集積後に天体の分化が発生することを考慮したガニメデの一次元の熱・構造進化モデルを構築した。簡単のため、分化後の H₂O は液体であると仮定し、熱輸送は熱伝導のみを仮定した。

モデル計算の結果、水と岩石の分化に数億年を要することが分かった。この時、衛星半径は ~160 km 増大するが、これは水が高圧氷よりも密度が小さいためである。その後、集積後 10–15 億年頃には、含水鉱物が脱水することによって衛星半径は ~6 km 増大する。さらに、岩石マントルと金属核の分化は集積後 20 億年頃に発生することが分かった。また、岩石マントルの



温度が高くなり、金属核へ熱が輸送され続けるため、金属核の温度が上昇し続けることが分かった。

これらの計算結果から、溝状地形は多段階にわけて形成されたことが示唆される。また、金属核が冷えないということは 45 億年間を通し、対流による磁場を生成することはできないことを意味する。そのため、固有磁場の存在は岩石マントルで固相対流が発達していることを示唆する。

巨大衝突による原始天王星系円盤形成 シミュレーション： 状態方程式 とSPH法のスキーム依存性

○村嶋慶哉¹ 佐々木貴教¹

¹京都大学

現在の天王星、その主要な衛星とリングはおおよそ98度の傾斜角を持っている。この特徴を説明する仮説の一つとして、巨大衝突説が考えられている。これは、巨大衝突によって天王星の自転軸が傾けられ、そして衝突によって生成された円盤から衛星が形成されたという説である。この仮説に則って、これまでSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法による、巨大衝突の流体数値シミュレーションが行われてきた(例、Slattery et al. 1992; Kegerreis et al. 2018; Reinhardt et al. 2020)。これらのシミュレーションからは、一般的に重くコンパクトで岩石成分の比率が小さい円盤が予測された。これは現在の天王星の衛星系と矛盾していると思われていたが、Ida et al.(2020)の研究により、氷の再凝結までの円盤の進化によって円盤の質量とサイズの矛盾を解決されることが示された。しかし、円盤に含まれる岩石の量はシミュレーションごとに差があり、天王星の衛星が天王星と比較して岩石に富んだ組成をしている問題の完全な解決には至っていない。

この違いの理由として考えられるのは、状態方程式の違いである。また、月形成の巨大衝突のシミュレーションにおいて、不連続面上でのSPH法の取り扱いの難しさを解決するために改良されたDensity Independence SPH法 (Saitoh & Makino, 2013; Hosono et al., 2013; Hopkins, 2013) で計算すると、形成される円盤の性質が異なることが分かっている。そこで、標準的なSPH法とDISPH法の両方で3つの状態方程式を用いた天王星系の巨大衝突の数値計算を行い、状態方程式やスキームの違いが形成される円盤の特性に与える影響を調べた。その結果、岩石に対してはANEOS、氷に対してはSESAME EOSを用いてDISPHで計算を行った場合、岩石に富む円盤が形成されることがわかった。これらの計算結果とその原因についての解析を示す。

土星と木星の巨大衛星系の形成： 惑星磁場強度と周惑星円盤の構造

○藤井悠里¹, 荻原正博², 堀安範³

¹京都大学, ²TDLI, ³ABC/国立天文台

土星衛星は、その総質量の95%以上をタイタンが占める一方、木星には4つのガリレオ衛星があり、そのうち内側3つのイオ、エウロパ、ガニメデはラプラス共鳴に入っている。土星と木星の半径の違いは2割程度であるが、質量は3倍以上異なる。本研究では、この質量差による惑星内部構造の違いが、惑星表面における磁場強度の差を生み、両者の巨大衛星系の違いを説明可能であることを示す。

我々は、若い土星および木星の熱進化からその表面における磁場強度を計算し、惑星磁場が周惑星円盤の構造に与える影響を調べた。そして、我々が提案する円盤モデルにおいて、N体計算により衛星の軌道進化を調べた。木星の周惑星円盤では、惑星近傍では熱電離により惑星磁場と円盤ガスがカップルし、惑星近傍のガスが取り除かれる。よって、円盤ガスに角運動量を抜かれた衛星の移動は円盤内縁で止まるため、複数の衛星がラプラス共鳴に捕獲される。土星は低質量のため、深部の磁場生成領域から表面までに距離があり、磁場生成領域では木星の数分の1あった磁場強度が表面では100分の1程度まで落ちてしまう。よって、土星の場合は、周惑星円盤は常に土星に接続し、内側に軌道移動してきた衛星は土星に落下してしまう。タイタンは、氷やダストによる急峻な円盤温度勾配の影響で移動が緩やかな領域に滞在し、落下を免れたと考えられる。また、同様の効果がカリストの共鳴捕獲を妨げた可能性がある。

ペブル同士の衝突付着による接触面半径モデルの構築とダスト付着 N 体計算による検証

○辰馬 未沙子¹, 奥住 聡², 片岡 章雅³, 田中 秀和⁴

¹ 理化学研究所数理創造プログラム, ² 東京工業大学, ³ 国立天文台, ⁴ 東北大学

惑星形成過程を明らかにするため、微惑星の生き残りと考えられている太陽系の彗星の探査が行われている。彗星はその強度などから、サブミクロンサイズのダストが密に集まった、ミリメートルサイズのペブルの集合体であると考えられている (例: Blum et al. 2022)。ペブル同士が付着すると接触面が形成され、その接触面半径がペブル集合体の強度や熱伝導率を決定する。接触面半径は、ペブルサイズ、ペブル内部密度、衝突速度、圧力などに依存する。彗星探査によって得られた強度や熱伝導率から接触面半径やペブルの性質を逆算することができ、これは惑星形成過程の解明につながる。しかし、これまでのペブル間接触面半径のモデル (Weidling et al. 2012) は、ペブルの物性パラメータに対する依存性を完全には記述できていなかった。

本研究では、ダスト集合体の圧縮強度 (Tatsuuma et al. 2023) を用いて、ペブル同士の衝突付着による接触面半径のモデルを構築した。このモデルは、ペブルの接触面付近の圧縮に必要なエネルギーとペブルの運動エネルギーが等しいと仮定して導出した。また、ダスト付着 N 体計算によるペブルの衝突シミュレーションを行い、モデルと比較した。その結果、氷ダストで構成された氷ペブルについては、モデルとシミュレーションが一致することを確認した (図1)。より脆い岩石ペブルに関しては、ペブル内部の体積充填率が0.3以下であればモデルとよく一致したが、体積充填率が0.4の場合は内部の変形よりも破壊が卓越し、接触面半径のモデルが過小評価となった。本講演では、このモデルの応用として彗星の性質との比較も行い、彗星を構成するペブルの性質や、モデルが応用できる範囲についても議論する。

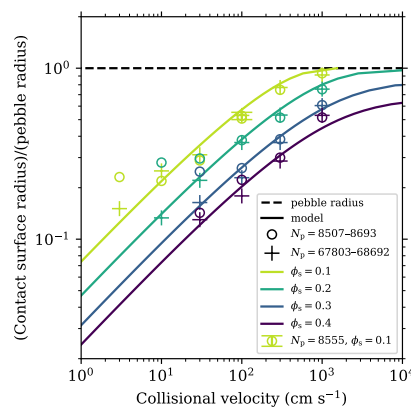


図 1: 氷ペブルのペブル半径で規格化した接触面半径と、衝突速度の関係。破線と実線はそれぞれペブル半径と本モデル、丸と十字はシミュレーション結果を示す。ペブル内部の体積充填率は薄い色から 0.1、0.2、0.3、0.4 である。

はやぶさ 2 探査と帰還試料分析から得られた制約条件を満たす太陽系形成論

○渡邊誠一郎¹、小林浩²

¹名古屋大学大学院環境学研究科, ²名古屋大学大学院理学研究科

はやぶさ 2 の探査と帰還試料分析によって、太陽系形成に関わる多くの情報が得られている。重要なものは以下である：(a) リュウグウは元素比・鉱物学的特徴が CI コンドライト的性質を示し、同位体的にも NC, CC と並ぶ第 3 のリザーバーCI を構成する ([1], [2]など)。(b) 二次鉱物結晶中の炭酸水包有物の発見や、微小な CAI やコンドリユールの少量の含有[3]、NH₃ 氷の原存在を示唆する化学的特徴[4]などから、母天体が土星以遠の低温領域で氷微惑星として形成された。(c) ²⁶Al の崩壊熱が熱源なら、母天体形成／水質変成進行が、それぞれ太陽系形成後 2 Myr/5 Myr 前後と推定される[3]。(d) 水質変成で生じた磁鉄鉱二次粒子には、析出当時の強い外部磁場を記録しているものが発見され ([3], [5])、その時点までに、リュウグウ母天体は十分な磁場を保持しうる原始惑星系円盤ガスが残る小惑星帯まで移動していた可能性が高い。なぜなら、質量降着率 $\dot{M}$ の低下した太陽系形成後~5 Myr の円盤の木星以遠 ($r > 5$ au) の領域での磁場強度 ($B_z \propto \dot{M}^{1/2} r^{-4/5}$) では、このリュウグウ粒子の残留磁化を説明するのは不十分だからである[6]。

これらは、太陽系形成論に強い制約を与える。試料中の水質変成の影響が弱い領域から直径 $< 30 \mu\text{m}$ の細粒 CAI が見つかったことは、 > 1400 K の高温で ¹⁶O に富む太陽近傍で生成された CAI の一部が土星以遠まで運ばれたことを意味しており、円盤形成期のコンパクトな初期状態からの急速な拡大、および持続的な外向きの円盤子午面流の存在を示唆する。一方で、CAI が、その後、母天体形成までの~2 Myr の間、微惑星に成長せず、また太陽に落下したり、他の同位体リザーバーと混合することもなく円盤内に保持された環境を説明しなくてはならない。通常、これは木星など巨大惑星のガス捕獲による円盤ギャップの形成と、それに伴うギャップ外隣の圧力バンプによって説明されることが多い (e.g., [7], [8])。しかし、ガス捕獲した木星は、自身の軌道より内側のガス円盤を短期間で散逸させてしまうはずで、上記の証拠(d)、すなわち太陽系形成後 5 Myr 前後まで木星内側領域にガスが存在して磁場を保持していたとの証拠と矛盾する。さらに木星の内側のガス円盤中でペブルが太陽に落下せずに地球型惑星の材料となるための保持メカニズムも要請される。これらは惑星形成過程と太陽系同位体三分性の成因への強い制約となる。

本講演では、従来の太陽系形成の素過程や理論計算結果がリュウグウ試料および隕石試料の制約条件と整合するかを吟味し、既存の太陽系形成シナリオを評価を展望する。そして、その評価のために開発している微惑星形成と成分変化を追跡する数値モデルについて説明する。

[1] Yokoyama+ 2022, *Science* **379**, abn7850. [2] Hopp+ 2022, *Sci. Adv.* **8**, add8141. [3] T. Nakamura+ 2022, *Science* **379**, abn8671. [4] Matsumoto+ 2024, *Nat. Astron.* **8**, 207–215. [5] Sato+ 2022, *JGRE* **127**, 10.1028/2022JE007405. [6] Sato+ 2024, in preparation. [7] Kruijer+ 2017, *PNAS* **114**, 1704461114. [8] Desch+ 2018, *ApJS* **238**, 11.

はやぶさ 2 #の小惑星サイエンス

○巽瑛理¹、平林雅稔²、田中智¹、三桝裕也¹、津田雄一¹、はやぶさ 2 #サイエンスチーム

¹JAXA 宇宙科学研究所、²ジョージア工科大学

2020 年のはやぶさ 2 のサンプルリターンからはや 4 年、現在ははやぶさ 2 は次なるターゲットに向かって航行を続けている。はやぶさ 2 拡張ミッション（はやぶさ 2 #）ではまず、2026 年 7 月に(98943) 2001 CC21 をフライバイし、その後、2031 年に 1998 KY26 にランデブー探査を行う予定である。はやぶさ 2 #のサイエンス目標は、小天体の形成や進化プロセスを明らかにすること、プラネタリディフェンスに資する運用を行い天体の特徴づけを行うことである。本発表では特に、はやぶさ 2 #のターゲットに関して、地上観測などから現在わかっていること、さらにははやぶさ 2 #におけるサイエンス目的について報告する。

(98943) 2001 CC21

2022 年から 2023 年にかけての観測好機においてさまざまな観測が行われ、自転速度や自転軸の方向、スペクトル型、形状などの情報が高精度化された。特に、2004 年の観測で Binzel et al.(2004)では L 型と推定されたが、近年の観測により 1, 2 μm の吸収があり S 型である可能性が高いことがわかっている(Geem et al. 2023, Popescu et al. submitted)。さらに、多くのライトカーブ観測や掩蔽観測から 2001 CC21 は細長い形状 ($b/a \sim 0.37\text{--}0.6$, Arimatsu et al. 2024, Fornasier et al. 2024, Popescu et al. submitted) であることがわかっている。つまり、フライバイのタイミングによって観測される小惑星のジオメトリや照明条件が大きく変化する。現在、この最適化を行う議論がなされている（三桝、本会議 P-122）。

1998 KY26

1998 KY26 は直径が約 30m 自転周期が約 10 分程度の高速自転天体である（Ostro et al. 1999）。このような高速自転天体は遠心力が重力よりも大きくなる状態にあるため、リュウグウやイトカワのようなラブルパイルではなく一枚岩のような物質で構成されていると考えられている。2024 年 5 月は、この発見時以来の観測好機であり、20 等級程度まで明るくなった。カナリア諸島にある口径 10.4m での分光観測が行われた結果、赤いスペクトルを持つことが明らかになり、特に L 型、D 型に近いことが明らかになった。組成を推定するためには、アルベドの推定精度が鍵となる。

参考文献：Binzel et al. (2004) *MARS* **39**, 351-366. Geem et al. (2023) *MNRAS* **525**, L17-21. Popescu et al. (submitted) *PSJ*. Arimatsu et al. (2024) *PASJ*, psae060. Fornasier et al. (2024) *A&A* **688**, L7. Ostro et al. (1999) *Science* **285**, 557-559.

謝辞：本発表ははやぶさ 2 # プロジェクト国際ビビリティ事業のサポートを受けています。

メインベルトにおける小惑星リュウグウの衝突進化史

○安藤太一¹、諸田智克¹、金丸仁明¹、杉田精司¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科

はやぶさ 2 が探査した地球近傍小惑星リュウグウは、メインベルト内帯の New Polana 族または Eulalia 族と呼ばれる C 型小惑星族に由来すると考えられている (Bottke+ 2015, Sugita+ 2019)。リュウグウはメインベルトにおいて起源族の天体や他の小惑星との衝突を経験しており、メインベルト全体の平均の衝突確率を用いて衝突年代等の計算が行われてきた (Sugita+ 2019, Morota+, 2020, Cho+ 2021)。しかし、メインベルトにおいてリュウグウは起源族と類似した軌道要素をもっていたことから、それらとの衝突頻度はメインベルト平均よりも高いと予想される。本研究ではメインベルトにおけるリュウグウの衝突頻度を計算し、この可能性を定量的に検証した。また、天体衝突は岩石の供給・混合という点でも重要であり、Bright boulders (Tatsumi+ 2021, Sugimoto+ 2021) のような異なる特徴を持つ岩石が供給された可能性がある。ここでは衝突頻度を用いて、天体衝突によって供給される体積を計算した。

まず、リュウグウの過去の軌道変化を仮定し、起源族の軌道要素分布 (Walsh+ 2013, Vokrouhlický 2016) やサイズ頻度分布 (Bottke+ 2015) を用いて、天体間の衝突確率 (Wetherill 1967, Bottke 1993) を算出することで、メインベルトにおける衝突頻度を計算した (図 1)。その結果、リュウグウの起源族である New Polana 族との衝突頻度は族形成初期が最も高く、族以外のメインベルト天体との衝突頻度と比べて約 100 倍高かったということがわかった。また、隣接する Eulalia 族との衝突頻度も形成初期は高く、メインベルト平均の約 10 倍であった。

衝突頻度を用いると、衝突天体の総体積がリュウグウの体積に対して占める割合は最大でメインベルト由来が 5×10^{-5} 、New Polana 族由来が 5×10^{-4} 、Eulalia 族由来が 6×10^{-5} であると見積もられた。この結果から、起源族である New Polana 族だけでなく隣接する Eulalia 族やメインベルトに存在するその他の族からも衝突によって天体が混合したということが示唆される。

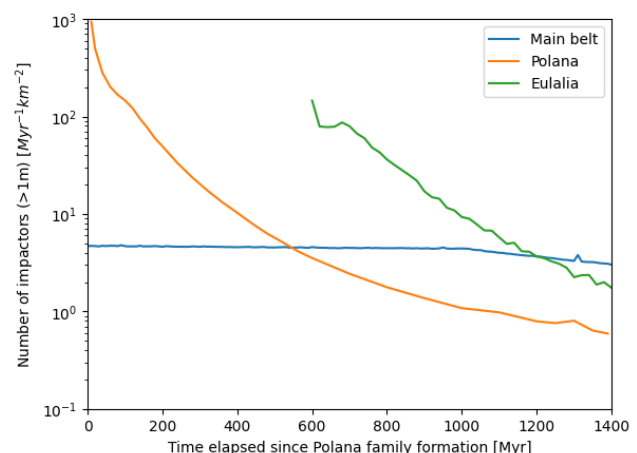


図 1 Polana 族、Eulalia 族、メインベルトの天体との衝突頻度。族形成初期の衝突頻度が高く、Polana 族は約 100 倍、Eulalia 族は約 10 倍となっている。

小惑星における表面更新と 宇宙風化頻度分布の関係

○中原俊平¹, 杉田精司¹, 諸田智克¹, 平田成², 長勇一朗¹, 巽瑛理³, 湯本航生³

¹ 東京大学, ² 会津大学, ³ 宇宙航空研究開発機構

今年 10 月打ち上げ予定の Hera は小惑星ディモルフォスへの DART 探査機衝突の影響を調査することを目的とする ESA のミッションである。DART 探査機による衝突においては、その衝突の大きさから全球的な変形が引き起こされ、古典的なお椀型クレーターが出来ていない可能性が高い(Raducan & Jutzi, 2024 *Nat. Astr.* :)。よって、地形のみによって新規に放出したイジェクタを同定することは困難であり、宇宙風化のような表面暴露年代指標が必要である。この宇宙風化度を高解像度で得るために、Nakahara+(2023, JpGU)においては衝観測から得られたアルベドマップに基づいて宇宙風化マップを作成できることを示した。

こうした宇宙風化度マップは小惑星表面における宇宙風化の進行以外にも、小天体の衝突による地震動やイジェクタの放出といった要因による表面更新の影響を受けると予想される。実際、S 型小惑星イトカワの宇宙風化分布のヒストグラムが得られており、このような複合効果を反映している可能性がある(Koga+, 2018 *Icarus*)。しかし、このようなヒストグラムから表面状態に関する情報を定量的に抽出する方法は確立されていない。そこで、宇宙風化分布が表面再形成過程および宇宙風化進行とどのように関係しているかを明らかにすることを目的として研究している。我々は、宇宙風化の進展と表面更新による宇宙風化度のリセットの競合をシミュレートする単純な 2 層モデルをラブルパイル小惑星上で構築した。その最も単純なケースとして小天体衝突による表面更新が全て同じサイズで生じる場合については、Nakahara+(2024, JpGU)で報告したように解析解が得られる。しかし、現実の小惑星では、様々なサイズのユニットで表面更新が起きる。本研究では、表面更新の頻度が表面更新サイズのべき関数に従うというより現実に近い仮定を用いてモデルを構築した。

このモデル計算の結果は、イトカワにおける宇宙風化のヒストグラムをよく再現し、特に分布をよく再現するのは表面年代が 1 Myr の場合であることを示していた。本値はイトカワ試料年代と調和的であり、モデルの妥当性を示唆するものである。講演では解像度に対する年代精度の依存性などを調査した結果も併せて報告し、Hera 探査機の観測への示唆についても検討を加える。

地球・月・火星への小惑星接近

Asteroid approach to Earth, Moon, and Mars

○吉川真¹

Makoto Yoshikawa¹

¹JAXA

2024年7月現在、発見され軌道が推定されている小惑星の数は138万個を越え、地球接近小惑星（NEA、Near Earth Asteroid）の数も35,000個を越えている。これらの小惑星の軌道計算を行い、地球、月、火星への接近状況を確認した。

2024年初めの時点で軌道が算出されていた小惑星134万個余りより、まずMOID（Minimum Orbit Intersection Distance）が地球ないし火星について0.05au以下になる小惑星を抜き出してみると、地球については17,721個、火星については12,660個であった。これらの小惑星について、8惑星、冥王星、月の摂動を考慮してN体問題の数値積分を行い、地球、月、火星へ0.01au以下に接近を調べた。地球への接近の様子を図に示す。

明らかに2000年頃から現在にかけての地球接近が多くなっている。これは、2000年くらいから地球接近小惑星の発見観測が活発になってきたことによると考えられる。また、月への小惑星の接近も同様な傾向にあるが、火星についての小惑星接近については、このような傾向は見られない。また、接近距離が特に小さいケースについて、地球と月への小惑星接近を比較してみると月への接近の方が地球よりも接近距離が大きい傾向にある。これらの結果は、小惑星の観測が地球から行われているためであろう。ここでは、これらの結果について報告する。

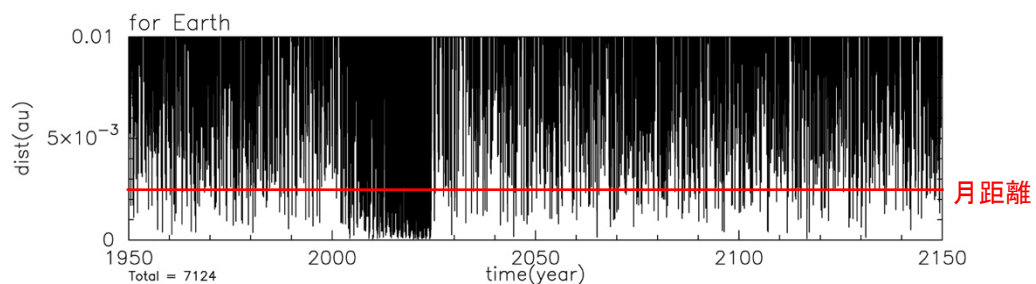


図 地球への小惑星の接近

横軸が西暦の年で縦軸が地球中心からの距離を示す。各縦線が地球への小惑星の接近を示し、縦線が下の横軸に近いほど、地球に近い接近であることを示している。

二重小惑星探査計画 Hera の熱赤外カメラ観測

○岡田達明^{1,2}、田中智¹、坂谷尚哉¹、鳶生有理¹、荒井武彦³、千秋博紀⁴、出村裕英⁵、
関口朋彦⁶、神山徹⁷、金丸仁明²、石崎拓也¹、Ramon Vilardell-Belles⁵、古川聡一郎^{1,2}、
Ozgur Karatekin⁸、Joris Blommaert⁹、Hera TIRI チーム¹

¹JAXA 宇宙科学研究所、²東京大学、³前橋工科大学、⁴千葉工業大学、⁵会津大学、
⁶北海道教育大学、⁷産業技術総合研究所、⁸ベルギー王立天文台、⁹フランドル技術研究所

欧州宇宙機関 ESA が主導する小惑星探査計画 Hera は、米国航空宇宙局 NASA の小惑星衝突機 DART と連携するプラネタリーディフェンス計画である。DART によって 2022 年 9 月 26 日に実施された小惑星 Didymos の衛星 Dimorphos への衝突によって生じた軌道速度の減速、大量のイジェクタの放出、形成された衝突痕の状態について、現地を訪れて詳細に観測し、探査機衝突による軌道修正の効果を評価することを主目的とする。また、その評価の過程で取得される観測データは唯一無二のものであり、惑星科学的にも貴重かつ重要である。Hera では、多くの史上初が実現される。史上初の二重小惑星の探査の実現、史上最小の天体の現地探査の実現、史上初の小天体内部構造のレーダ探査の実現、史上初の S 型小惑星の熱物性探査の実現、などである。それに加えて、その他の多数の観測や実験が計画されている。Hera にはリモセン用の観測機器として、可視カメラ AFC、25 色連続分光カメラ HyperScout-H、レーザ高度計 PALT、と熱赤外カメラ TIRI の他、通信系を用いた電波科学が実施される。さらに 2 機の 6U サイズの CubeSat を用いた観測が実施される。Juventas は主に物理探査を担い、HF レーダ JURA や重力計 GRASS などが搭載され、もう一方の Milani は物質探査を担い、可視近赤外分光 ASPECT やダスト計測 VISTA などが搭載される。

搭載観測機器のうち、熱赤外カメラ TIRI は小惑星探査機「はやぶさ 2」に搭載された中間赤外カメラ TIR の実績が評価され、日本が開発して提供する。TIR は有効 328 x 248 画素の非冷却ボロメータ搭載の装置であり、C 型小惑星 Ryugu の表層熱物性探査に成功し[1]、太陽系小天体の熱撮像による熱物性科学を開拓し、小天体探査の新たな定番機器となった。一方、TIRI では 1024 x 768 画素の非冷却二次元ボロメータを搭載し、熱撮像による輝度温度や熱物性情報を取得するのに加えて、8 点式フィルタホイールを搭載して多色分光撮像の機能をもつ熱赤外カメラである。TIRI の広帯域バンドの観測波長域は 8-14 μm 、狭帯域バンドの中心波長は 7.8、8.6、9.6、10.6、11.6、13.0 μm であり、短波長側の 3 バンドによる Christiansen Feature、長波長側の 3~4 バンドによる Reststrahlen Band の強度や深さの特徴から、物質の組成や結晶状態などを調査することができる。TIRI の観測視野角は 13.0° x 9.9° であり、近傍から Didymos 二重小惑星系の全景を観測可能であり、熱撮像や物質推定だけでなく、形状モデルや軌道のダイナミクスについても観測が可能である。TIRI は小型で軽量 (≤ 4 kg) であり、他のミッションへの搭載も検討中である（小惑星 Apophis の探査計画 RAMSES でも搭載される方向で検討されている）。

Hera は 2024 年 10 月に SpaceX Falcon9 ロケットで打ち上げ、数日後に電源 ON、さらに初期動作確認と、月・地球の撮像観測を初期観測として実施する予定である。2025 年 3 月には火星スイングバイで火星（及び時期が良ければ衛星 Deimos）の観測を行い、2026 年 12 月から Didymos に到着し、二重小惑星の観測を開始する予定である。

[1] Okada, T. et al. (2020) Nature 579, 518-522.

二重小惑星に働く Yarkovsky 効果

○金丸仁明¹、杉田精司¹、Giacomo Tommei²、Maddalena Mochi²、Roberto Paoli²、
Giacomo Lari²、³Wenhan Zhou、岡田達明⁴、坂谷尚哉⁴、畠生有理⁴、田中智⁴、
石崎拓也⁴、千秋博紀⁵、荒井武彦⁶、関口朋彦⁷、神山徹⁸、出村裕英⁹、平田成⁹

¹東京大学、²ピサ大学、³コートダジュール天文台、⁴ISAS/JAXA、⁵千葉工業大学、⁶前橋工科大学、
⁷北海道教育大学、⁸産業技術総合研究所、⁹会津大学

米国の DART と欧州の Hera から成るプラネタリー・ディフェンス計画 AIDA が進行中である。2022 年 9 月に DART 探査機は、二重小惑星 Didymos の衛星 Dimorphos に衝突する実験を成功させた (Daly et al., 2023)。続く Hera ミッションは、2026 年 12 月に Didymos-Dimorphos に到着し、DART が形成した人工クレーターを詳細に観測する予定である。日本が開発する熱赤外カメラ (TIRI) も Hera 探査機に搭載され、熱慣性・空隙率・表面粗さといった小惑星表層の熱物性を明らかにする。小惑星の軌道や自転の進化は、太陽や惑星の重力だけでなく、熱放射に起因する圧力すなわち非重力効果による影響も受ける。我々は、二重小惑星に働く非重力効果の理論・数値モデルを構築し、Hera ミッションで実証することを目指している。

二重小惑星の衛星の軌道進化は、主に潮汐と binary YORP (BYORP) によって起こる。多くの二重小惑星では、主星が比較的高速な自転をしており、潮汐進化によって衛星の軌道長半径が増加する。一方、BYORP 効果は同期回転する衛星の熱放射によって生じるトルクであり、衛星の不規則な形状によって軌道長半径を変化させる (Ćuk & Burns, 2005)。

我々は新たに、二重小惑星の衛星に働く Yarkovsky 効果に着目した。特に、Yarkovsky-Schach 効果は、土星のリング粒子の軌道進化として研究されてきたメカニズムであり、二重小惑星の衛星にも同様に作用すると考えられる (Rubincam, 2006; Vokrouhlický et al., 2007)。我々は、二重小惑星の衛星に働く Yarkovsky-Schach 効果を解析的および数値的にモデル化した (Zhou, Vokrouhlický, Kanamaru, et al., 2024)。衛星に働く非重力効果を求める数値シミュレーションには、二重小惑星にも適用できる小惑星の熱物理計算ライブラリ AsteroidThermoPhysicalModels.jl^{*}を用いた。その結果、頻繁に蝕を経験する（順行自転の）衛星は、Yarkovsky-Schach 効果によって潮汐固定した軌道に向かうことがわかった。こうした衛星の軌道進化メカニズムは、二重小惑星の統計や力学寿命を解釈する上でも重要な示唆を与える。

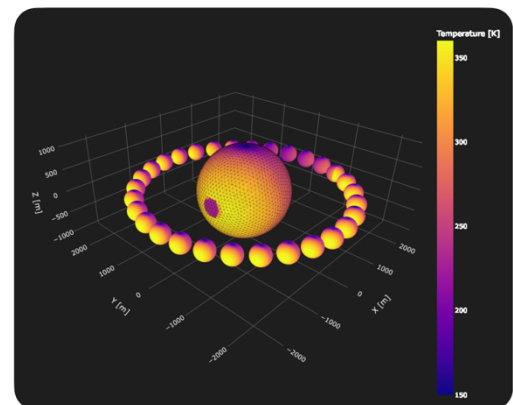


図 1：二重小惑星の熱物理計算の一例

^{*}AsteroidThermoPhysicalModels.jl — <https://github.com/Astroshaper/AsteroidThermoPhysicalModels.jl>

Ryugu 試料の宇宙風化による近赤外分光学的不均一性 ～太陽紫外線による短時間宇宙風化作用の唯一の天然証拠～

○古川聡^{1,2}, 岡田達明^{1,2}, 与賀田佳澄², 畠田健太郎^{2,3}, 矢田達², 宮崎明子², 長島加奈², 田原瑠衣², 杉山由香², 中野有紗², 小嶋智子², 人見勇矢^{2,3}, 熊谷和也^{2,3}, 西村征洋², 安部正真², 臼井寛裕², Jean-Pierre. Bibring⁴, Cedric Pilorget⁴, Vincent Hamm⁴, Rosario Brunetto⁴, Damien Loizeau⁴, Lucie Riu⁴, Tania Le Pivert-Jolivet⁴, 金丸礼²

¹東京大学, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³マリンワーク・ジャパン, ⁴仏パリ・サクレ大学 IAS

Introduction: 太陽系の形成と進化過程は、太陽系始原天体：小惑星のリモセン観測や帰還試料の分析を基に理解されてきた。小惑星は組成が多様で、主に分光観測により得られた反射スペクトルの特徴を基に分類されている。特に、C 型小惑星は水と有機物に富むため、地球の生命や水の起源の候補の 1 つである。一方で、大気の無い小惑星表面は、形成時から、微小隕石衝突や太陽風、太陽紫外線による宇宙風化作用により変質しており、それに伴い反射スペクトルの特徴も変化している。したがって、小惑星本来の組成情報の取得には、宇宙風化による反射スペクトルの変化とその要因、メカニズムの理解が必要である。小惑星本来の組成情報の取得は、太陽系始原物質の同定を通して、太陽系の形成と進化過程の理解へ繋がる。

C 型小惑星リュウグウでは、Hayabusa2 によるリモセン観測（ONC による可視分光と NIRS3 による近赤外分光）と、2 回のタッチダウン：TD（試料採取）が実施された。2 回の TD ではそれぞれ、表層試料を chamber A に、SCI による人工クレーター形成後の ejecta blanket（表層下試料を含む）を chamber C に回収した。これら試料は、宇宙科学研究所にて、近赤外分光顕微鏡（0.99-3.65 μm , 22.5 $\mu\text{m}/\text{pix}$ ）により初期記載されている^{1,2}。

リュウグウ試料に共通する近赤外域分光特徴である OH 基に由来する 2.7 μm 吸収帯は、宇宙風化による脱水素化により深度低下、特に微小隕石衝突により Mg/Fe 減少に伴う長波長シフトもする可能性が示唆されている³⁻⁵。これは、地球の水の起源の候補である小惑星に、水が少なく観測（地上望遠鏡観測等）されている要因の 1 つであるかもしれない。また、リュウグウにおいて、宇宙風化は可視光域の連続体の傾きを急にする（赤化）⁶。一方で、近赤外域の連続体の傾きの変化はあまりよく分かっていない。本研究では、リュウグウ試料の 2.7 μm 吸収帯の位置と深度、2.0 μm 連続体の傾きを定量的に算出・相関を調査し、また chamber A と C（表層と表層下試料）の比較から、リュウグウ試料における宇宙風化による分光特徴の変化とメカニズム、その要因を明らかにする。

Methods: 使用した試料と分光データは、MicroOmega-Curation DARTS Server 内の 207 個（chamber A: 119, C: 88）。分光特徴解析では、2.7 μm 吸収帯は複数のガウス関数 fitting 解析、2.0 μm 連続体は一次関数 fitting を実施した。

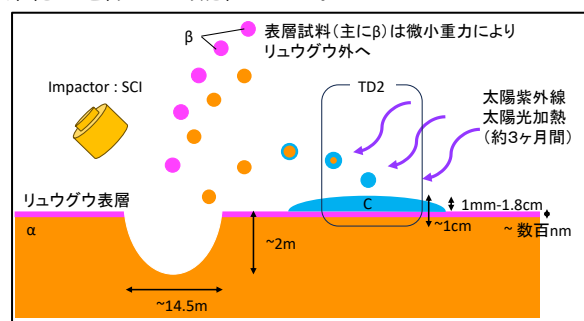
Results: 2.7 μm 吸収帯は主に 6 つの吸収帯（短波長側から f1-f6）で構成されることが分かった。2.7 μm 吸収帯の位置と深度の関係では、位置が長波長シフトするとともに深度低下する傾向が見られた。特に、chamber A 試料は chamber C 試料：C とは異なり（C を隔てて）、短波長且つ深度大： α と長波長且つ深度小： β の 2 領域に分布する傾向が見られた。これら 3 グループの 2.0 μm 連続体の傾きは、 α : 5.82 > C: 5.57 $\approx$ β : 5.57 [%/cm⁻¹ $\times 10^{-5}$] である。

Discussion: NIRS3 観測より、“Surface”は“Subsurface”より、小さい 2.2/2.6 μm 反射率比且つ 2.7 μm 吸収帯深度が小さい傾向である⁷。また、試料分析より、“SpWe-rich: space weathering rich”は“SpWe-poor”より、2.7 μm 吸収帯が長波長にある傾向である⁵。したがって、本研究における 3 グループは、 $\alpha < C < \beta$ の順に宇宙風化の影響をより大きく受けている可能性がある。宇宙風化による表面形態の分類⁸との相関も確認している。

2.7 μm 吸収帯を構成する吸収帯 f1 と f2 は、それぞれの位置から Mg-OH と Fe-OH に対応すると考えられる^{5,9}。一般的に、長波長に位置する結合の方が結合エネルギーが小さいため、f2 がより切れやすい。2.7 μm 吸収帯の位置と f1/f2 深度比の関係では、長波長シフトに伴い α から C へは f1/f2 深度比が増加、C から β へは f1/f2 深度比が減少する傾向が見られた。 α から C は太陽紫外線等による f2 の優先的な脱水素化、C から β は微小隕石衝突による表面融解による Mg/Fe 減少³（f1/f2 減少）と更なる脱水素化が進行した可能性がある。

リュウグウ試料の宇宙風化による不均一性の要因を提唱する（右図）。Chamber A の α と β は、宇宙風化（微小隕石衝突）深度よりサンプリング深度の方が深いことから、存在深度が異なっていた可能性がある³。Chamber C 試料の多くは、SCI により舞上がった粒子が 2 回目の TD までの 3 ヶ月間に太陽紫外線による脱水素化を受けた可能性がある。太陽紫外線による短時間宇宙風化については、CM2 隕石に対する先行研究¹⁰があり、現在共同でリュウグウ試料や CI 隕石に対する実験・検証を計画している（結果も発表する可能性有）。

最後に、Chamber C 試料の多くは、太陽紫外線による短時間（数時間～数ヶ月）での宇宙風化の影響を保持する唯一の天然試料（証拠）であるかもしれない。



References: 1. Yada, T. *et al. Nat. Astron.* **6**, 214–220 (2021)., 2. Pilorget, C. *et al. Nat. Astron.* **6**, 221–225 (2021)., 3. Noguchi, T. *et al. Nat. Astron.* (2022) doi:10.1038/s41550-022-01841-6., 4. Hiroi, T. *et al. Icarus* **406**, 115755 (2023)., 5. Le Pivert-Jolivet, T. *et al. Nat. Astron.* (2023) doi:10.1038/s41550-023-02092-9., 6. Sugita, S. *et al. Science* **364**, eaaw0422 (2019)., 7. Matsuoka, M. *et al. Commun. Earth Environ.* **4**, 335 (2023)., 8. Nakato, A. *et al. Earth Planets Space* **75**, 45 (2023)., 9. Clark, R. N. *et al. J. Geophys. Res. Solid Earth* **95**, 12653–12680 (1990)., 10. Kaiden, H. *et al. LPSC2019* id. 2630.

小天体表面を覆う岩石粒子の挙動に対する粒子形状の効果

○磯邊 優奈¹, 宮本 英昭¹, 清水 雄太¹

¹ 東京大学

近年の探査ミッションによるリモセン観測・サンプル解析により太陽系小天体の理解は飛躍的に進み、小天体が太陽系の形成・進化に重要な役割を果たしたことが分かってきた。ただ小天体は太陽系に 500 万個以上存在するとされ、これまで探査できた数十個の天体はその一部に過ぎない。太陽系全体における小天体の描像をつかむには、地上観測および静止軌道上からの観測も非常に重要であり、近赤外波長領域の反射スペクトルによる表面組成の制約と天体の分類 [1]、測光観測による軌道要素の制約 [2]、レーダー観測による形状の把握 [3] などが鍵となる。しかし天体表面での反射や散乱は、物質固有の反射率や伝搬する領域の空隙率をはじめ様々な要素で定まる複合的なものである。特に、用いる波長と同スケールの表面粗度（ラフネス）に強く依存し、遠隔観測のデータを一意に解釈することは難しい。そこでいかに小天体表面が形作られ、表面粗度が定まるかを理解すれば、遠隔観測から得られる情報を最大化できると考えられる。小天体表面は未固結の岩石碎屑物で覆われている。表面は微小重力環境であり、断続的に天体衝突で揺らされ、自転速度の変化により斜度が変化しうることを考慮すれば、表面物質は頻繁に移動・流動していると予想される。天体表面の粗度はこの移動・流動プロセスが集積した結果である。すなわち、いかなる移動・流動プロセスで表面粗度がどのように変化するかを理解が重要である。

小天体の表面物質は多数の固体粒子の集合体である粉粒体であり、粉粒体は振動等の外力を与えると対流や偏析などの複雑な現象を示すことが知られている [4]。先行研究では実験や数値計算におけるモデル化の容易さから主に球形粒子で検討が進められてきた。一方、天体表面物質をはじめとする実世界の粒子は基本的には非球形であり、粒子形状が粉粒体の機械的特性を変化させるため [5]、小天体表層の物質の挙動は、粒子形状の影響を強く受ける可能性が高い。そのため、天体表面での移動・流動プロセスを理解するためには、粉粒体の挙動における粒子形状の効果を知っておく必要がある。そこで本研究では、特に小天体表層で最も頻繁に起きているとされる天体衝突による地震動に着目し、振動下の粒子の挙動に対する粒子形状の効果を調査する。特に表面物質の角張った形状に着目し、球と多面体を用いて、angularity (=真球度/多面体の頂点の数) の違いによる粉粒体の挙動の差異について調査する。室内実験で粒子形状以外のパラメータを一定に保つのは困難であるため、離散要素法 (DEM) による数値シミュレーションにて検討を行う。

直径 100mm の円柱容器に単一粒径の粒子を約 5000 個入れ、振幅 2 mm、周波数 20 Hz で容器全体を振動させた。その結果、angularity の高い角ばった粒子は流動が継続し、常に対流現象を示したのに対し、球や angularity の低い粒子では流動が継続しなかった。この現象は angularity が低いと振動により粒子が最密に充填される「結晶化」が起こり、流動性が著しく低下するため生じるとわかった。すなわち、複雑な粒子形状は振動下での粉粒体の挙動に大きく影響し、これまで頻繁に用いられてきた球形粒子は、非球形粒子の挙動を十分に再現できない可能性がある。このことから、今後小天体の表面物質の移動・流動プロセスと表面粗度の変化をさらに理解するためには、粒子形状の影響を考慮する必要があると考えられる。また、複雑形状の粒子で構成される小天体表面では、移動・流動が生じやすく、表面粗度が激しく変化している可能性も示唆される。

[1] Vilas et al., *The Astronomical Journal* **135**(4), 1101 (2008). [2] Ishiguro et al., *The Astrophysical Journal* **792**(1), 74 (2014). [3] Nolan et al., *Icarus* **226**(1), 629-640 (2013). [4] Knight et al., *Physical review letters* **70**(24), 3728 (1993). [5] Cho et al., *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, **132**(5), 591-602 (2006).

TNO 恒星掩蔽観測キャンペーン **TABASCO** の初期成果

○有松亘¹, 吉田二美^{2,3}, 早水勉⁴, 瀧田怜⁵, 渡部潤一⁶

¹ 京都大学, ² 産業医科大学, ³ 千葉工業大学, ⁴ 佐賀市星空学習館, ⁵ 東京大学, ⁶ 国立天文台

一部の太陽系外縁天体 (TNO, 本講演ではケンタウロス族小惑星も含む) の周囲には、恒星掩蔽観測によって大気・衛星もしくはリングの存在が確認されている。TNO の形成・進化メカニズムを反映したこうした周天体環境を恒星掩蔽観測によって解明することは、太陽系外縁部の起源と特性を知るうえで新たな知見を与えると期待される。しかし掩蔽観測のおこなわれている TNO は限られており、我々の観測的知見は周天体環境の統計的議論ができる段階には至っていない。本研究では TNO およびその周天体環境の包括的な探査を実現するため、国内の小・中型光学望遠鏡が参加している光・赤外線天文学大学間連携ネットワーク (OISTER)、および東アジアのアマチュア掩蔽観測家を中心に観測体制を構築している国際掩蔽観測者協会東アジア (IOTA/EA) の枠組みを利用し、さらに本研究グループが所有する小型観測システム (SoCoSoCo-PONCOTS および OASES) を使用した掩蔽観測キャンペーン、Trans-neptunian Atmospheres and Belts Analysis through Stellar-occultation Coordinated Observations (**TABASCO**) を実施している。**TABASCO** は事前に予報された恒星掩蔽イベントについて、国内のメートルクラスの望遠鏡を含む複数の観測装置を用いた多点同時動画観測を実施し、その天体の本体のサイズ・形状だけでなく周囲の大気・衛星・リングの観測的研究に挑戦するものである。本講演では 2023 年度から開始した **TABASCO** キャンペーン観測の最新の進捗状況を報告するとともに、本観測で得られた TNO の表面大気に関する極めて重要な成果を速報として紹介する。

カロンの双子クレーター

○池谷 蓮¹, M.R. Kirchoff²

¹神戸大学, ² Southwest Research Institute

太陽系外縁天体(TNO)の多くがバイナリであることが知られており、微惑星形成過程とその後の惑星移動や衝突進化といった太陽系の進化について多く示唆を与えている (e.g., Nesvorný et al., 2018, 2019)。しかし、TNO は地球から遠くに存在するため、観測されているバイナリは数十 km 程度の大きさに限られており (e.g., Thirouin and Sheppard, 2019)、km サイズの TNO におけるバイナリーの割合や特徴は不明である。

双子クレーターとは、同程度のサイズで隣接し、ほぼ同時に形成されたクレーターペアである。双子クレーターは、バイナリーの衝突によって形成されると考えられている (Melosh & Stansberry, 1991; Bottke & Melosh, 1996)。冥王星系で見られるクレーターを形成した TNO は km サイズであるとされるため、冥王星系において双子クレーターを探ることで観測が難しい km サイズの TNO のバイナリーに関する情報が得られると期待される。

本研究では、カロンの Vulcan Planitia (VP) で双子クレーターを調べた。VP はクレーター密度が低く、テクトニクスによるクレーターの劣化が少ないため、双子クレーター探しに適している。カロンのクレーターデータ (Robbins & Dones, 2023) から、双子クレーター候補となるクレーターペアを抽出後、クレーターとエジェクタの層序関係からそのペアがほぼ同時に形成したかどうかを JMARS (Christensen et al., 2009) で観察した。VP にある 483 個のクレーターのうち、40 ペア (約 8%) で明らかな層序関係が見られず双子クレーターの可能性があるという結果が得られた。Miljković et al. (2013) は数値計算を通して、バイナリー衝突のうち約 15% が双子クレーターになるという結果を得た。この 15% を用いると、km サイズで似たサイズの構成天体をもつバイナリーが、カロンのインパクトの最大約 55% を占めうることが示唆された。

双子クレーターはバイナリーによってではなく、二つの衝突イベントが偶然近くで同時期に起きて形成される可能性もある。そのため、本発表では VP におけるクレーター空間分布のランダム性についての考察を紹介する。また、力学・衝突進化の観点から、km サイズのバイナリーが数十%存在しうるのかについて議論する。

火星衛星探査計画 MMX：2026 年打ち上げに向けて

○倉本 圭^{1,2}、川勝康弘²、藤本正樹²、Maria Antonella Barucci³、玄田英典⁴、Jörn Helbert⁵、平田 成⁶、
今村 剛⁷、亀田真吾^{8,2}、小林正規⁹、草野広樹¹⁰、David J. Lawrence¹¹、松本晃治¹²、Patrick Michel¹³、
宮本英昭⁷、中川広務¹⁴、中村智樹¹⁴、小川和律²、大嶽久志²、尾崎正伸¹²、Sara Russell¹⁵、佐々木 晶¹⁶、
澤田弘崇²、千秋博紀⁹、寺田直樹¹⁴、Stephan Ulamec⁵、臼井寛裕²、和田浩二⁹、横田勝一郎¹⁶

1. 北海道大学、2. JAXA/ISAS、3. Paris Observatory、4. 東京工業大学、5. DLR、6. 会津大学、7. 東京大学、8. 立教大学、
9. 千葉工業大学、10. 量子科学技術研究開発機構、11. The Johns Hopkins University、12. 国立天文台、
13. Côte d'Azur Observatory、14. 東北大学、15. Natural History Museum、16. 大阪大学

火星衛星の近接観測とフォボスからのサンプルリターンを基軸とする火星衛星探査計画 MMX は、H3 ロケットの開発の遅延を受け、その打ち上げ予定年度を当初計画の 2024 年から 2026 年に延期した。改良 H3 ロケットの飛行は、その後これまでに 2 度連続して成功している。しかしながら、滞留している他の打上げ計画や、H3 の開発状況も踏まえた総合的な判断の結果、MMX の打上げ年度を変更することとなった。地球と火星の会合周期は約 2 年であるため、MMX の新たな打ち上げは 2026 年 10 月ごろとなる。また地球への帰還時期もその分先になり、2031 年となる。

MMX は、火星圏から世界初のサンプルリターンを行うことを狙ってきた。打ち上げを 2 年延期しても、NASA や ESA などの火星本星からのサンプルリターン計画より、約 2 年以上先に試料を持ち帰ることができる。また火星衛星を主ターゲットとする探査計画が、MMX に先んじて実施される予定もない。したがって、火星衛星の本格的な近接観測の実現と併せて、MMX が有する火星圏探査における進取性には変わりはない。

打ち上げ延期を受け、MMX プロジェクトでは、火星圏到着後の運用計画の見直しを現在重点的に進めている。探査機が火星圏に約三年間滞在し、滞在期間のほぼ中央にあたるタイミングで地球-火星間距離が最短となることは、2024 年打上の場合と変わらない。新たなスケジュールでも、このタイミングの付近で 2 度の着陸を行う方向で検討が進んでいる。ただし、地球から見て火星が太陽の背面に来る合の発生のタイミングの移動が主要因となって、観測と通信に実質的に利用可能な期間はやや狭まってしまった。現在、着陸点選定に必要な低高度観測を、滞在期間の前半でやり遂げるための運用計画の検討を進めている。また、科学観測の運用順序にも更新が必要であり、これを踏まえた観測準備、データ取得、科学成果創出の計画改変を予定している。

2024 年打ち上げを目途に開発されてきた MMX 計画は、母船と搭載観測機器のフライトモデルの製造・組み上げを、通信・データ処理・運用など地上系の整備と並行して行う段階にすでに移行している。打ち上げ延期によって新たに得られた準備時間は、探査機とミッション全体の完成度の向上に役立てる。

次世代小天体サンプルリターンミッションの検討 状況報告

○ 塙生有理¹, 黒川宏之², 坂谷尚哉¹, 深井稜汰¹, 岡田達明¹, 青木順³, 癸生川陽子⁴,
熊本篤志⁵, 田中智¹, 川村太一⁶, 千秋博紀⁷, 末次竜⁸, 浦川聖太郎⁹, 巽瑛理¹,
高尾勇輝¹⁰, 菊地翔太¹¹, 森治¹, 佐伯孝尚¹, 津田雄一¹

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 東京大学, ³ 大阪大学, ⁴ 東京工業大学, ⁵ 東北大学, ⁶ パリ大学, ⁷
千葉工業大学, ⁸ 大島商船高専, ⁹ 日本スペースガード協会, ¹⁰ 九州大学, ¹¹ 国立天文台

次世代小天体サンプルリターンミッションは、はやぶさ2・MMX に続く小天体サンプルリターン探査として、2030年代の戦略的中型計画としての実現を目指している。本ミッションの目的は、太陽系誕生以前から存在する鉱物・有機物を解明し、銀河系における太陽系と生命の起源に迫るため、遠方の小天体を探査しサンプルを地球帰還させるとともに、新たな深宇宙往復探査方式を実証することにある。

本ミッションでは、はやぶさ2の成果と課題を踏まえ、科学目的を(SMG-I)銀河物質進化を辿る太陽系“物質”の起源の解明、および(SMG-II)微惑星形成過程に迫る太陽系“天体”の起源の解明と設定し、ノミナル目標天体として木星族彗星 289P/Blanpain を選定した。ノミナルミッション期間は 2034 年の打上げ、2040 年の到着、2046 年の地球帰還であり、約 13 年の長期ミッションとなる。バックアップウィンドウおよびバックアップ天体は複数設定可能であるが、2030年代前半の 289P 探査が最適である。

探査機システムは、地球と彗星間の輸送を担う深宇宙軌道間輸送機(DSOTV)と、彗星近傍でのサンプリングを担う着陸機から構成される。天体近傍運用では、光学航法カメラによる地形・形状観測、LIDAR による重力計測、熱赤外カメラによる表面物性観測を行い、天体バルク密度推定と着陸候補地点選定を行う。着陸機の弾丸/ガス方式サンブラによるタッチダウン運用によって彗星試料を採取し、超小型質量分析計により揮発性物質・有機物のその分析を行う。彗星活動や宇宙風化の影響を受けていない地下物質試料を採取するため、小型衝突装置等により地下物質にアクセスし、採取する。試料は機上で乾燥凍結した後、DSOTV の小型軽量サンプルリターンカプセルに搬送し、火星以遠からの超高速リエントリとハードランディングにより地球帰還させる(SMG-I)。また、小型衝突装置運用と組み合わせた地震計運用及び複数機探査システムを活用したレーダ探査運用を行い、彗星核の内部構造探査を行う(SMG-II)。

本講演では、JAXA 宇宙科学研究所の理工ワーキンググループ活動にて検討され、2024 年 7 月末に太陽系 GDI に対して提出されたミッション提案書を基に、ミッションの検討状況を概説する。

火星探査に向けたその場 K-Ar 年代測定装置による火星隕石の年代測定実験

○日向輝¹、長勇一郎¹、三浦弥生²、三河内岳³、湯本航生⁴、田畑陽久⁴、杉田精司¹

¹ 東京大学地球惑星科学専攻、² 東京大学地震研究所、³ 東京大学総合研究博物館、

⁴ JAXA 宇宙科学研究所

現在の火星表層の年代はクレーター年代に基づいているが、サンプルの放射年代による校正がなされていないため、最大で 10 億年程度の不確実性が存在している[1]。片道探査であるその場年代測定は、サンプルリターンに比べコストが低く高頻度の探査を実現できることや、移動しながら複数の地質ユニットで測定が可能であるという利点がある。我々が開発を進めるその場 K-Ar 年代測定装置は、サンプルに数百 μm のレーザーを照射し、レーザー誘起ブレークダウン分光法によって K 濃度を、質量分析法によって Ar 量を測定する。同じ岩石の複数箇所ですポット分析を行うことで内部アイソクロンを生成し、得られた年代の不確実性を減らすことができる。この測定法では K 濃度が高い地球の岩石や年代が古く Ar 量が多いコンドライトの測定が先行研究で報告されている[2, 3]。しかしながら、火星隕石は一般的に K 濃度と Ar 濃度がどちらも低いため、測定が困難であった。Hyuga+ (2023) JpGU[4] では、3 種類の火星隕石 NWA 817, Zagami, NWA 1068 の EPMA による元素マップを作成し理想的なアイソクロンをシミュレーションすることによって、試料中の鉱物径とレーザースポット径の関係がアイソクロン年代の精度を決定していることを定量的に示した。そこでは、NWA 1068 が、鉱物径が他の二つと比較して小さく、現在の装置条件では高精度な年代測定が困難であることが明らかとなった。我々はこの装置を改良することによって、低 K、低 Ar 濃度の高精度な測定を可能とし、2 種類の火星隕石 NWA 817, Zagami について先行研究で報告された値と誤差の範囲で一致する年代を得た[5]。これはレーザー局所分析による火星岩石のその場年代測定が可能であることを初めて実証的に示した結果である。そこで本研究では、NWA 1068 の年代測定を実施するとともに、アイソクロンのシミュレーションによって年代精度を定量的に推定した結果と比較することで、探査機搭載に向けた課題を同定する。

NWA 1068 については、先行研究で報告されている Sm-Nd 年代が $185 \pm 11 \text{ Ma}$ [6] であるのに対し、本研究では $141 \pm 236 \text{ Ma}$ (2σ) と測定された。年代誤差の原因として、K が濃集している相が小さく、現在の装置のレーザースポット径 ($\sim 300 \mu\text{m}$) ではアイソクロン上のデータ点の広がり狭くなってしまいうこと、隕石の表面にある亀裂内に地球上での風化によって炭酸カルシウムが形成されておりそこに地球大気由来の過剰 Ar がトラップされて測定データがアイソクロンの直線状に載っていないことが考えられる。また、シミュレーションによる結果との比較から、質量分析計で測定された Ar 量を濃度に変換するために必要となるレーザースポットの掘削体積の測定精度が年代精度を律速しており、レーザースポット体積の測定精度を向上させることで更なる年代の高精度化が可能であることも明らかとなった。

参考文献：[1] Doran et al., 2004, *ESR* 67(3):313–37. [2] Cho & Cohen, 2018, *RCMS* 32(20):1755–65. [3] Cattani et al., 2023, *MaPS* 58(4):591–611. [4] Hyuga et al., 2023, JpGU. [4] Hyuga et al., 2024, JpGU. [5] Shih et al., 2003, LPSC.

惑星探査用イオン質量分析器のグラフェンによる 感度・質量分解能の向上

○関 宗一郎¹⁾, 笠原 慧¹⁾, 杉田 精司¹⁾, 川島 桜也²⁾, 田尾 涼¹⁾, 吉田 恵実子³⁾,
陶 由未加¹⁾

東京大学¹⁾, 宇宙科学研究所²⁾, 読売新聞社³⁾

惑星や小天体の大気組成を知ることは、その天体の形成・進化過程を知るうえで重要である。大気の組成を調べる際に、探査機に搭載したイオン質量分析器 (MS) が用いられている。代表的な MS の一つに、入射イオンの飛行時間から質量電荷比を測定する Time-of-Flight (TOF) 型がある。TOF では質量分析部の入り口に炭素超薄膜が設置されており、そこをイオンが通過する際に二次電子を放出する。この二次電子は飛行時間のスタート信号として用いられる。イオン透過時のエネルギー損失や角度散乱はそれぞれ MS の質量分解能および検出感度に影響を与え、薄膜がより薄い方が好ましい。

これまで多くのイオン質量分析器に用いられてきたアモルファス炭素超薄膜の厚みは 50 Å 程度である。一方、グラフェンの厚さはアモルファス炭素に比べて 10 倍程度薄く、薄膜通過時のイオンのエネルギー損失や角度散乱が小さくなるため、質量分解能や検出感度の向上が期待できる。また、従来のアモルファス炭素では分子イオン通過時に分子間結合が切れて原子イオンの状態で測定せざるを得なかった一方で、グラフェンでは分子イオンの状態のまま分析ができ、より正確な大気組成分析が可能になる。これらの理由から、グラフェンのイオン質量分析器への搭載が期待されている。ところが、グラフェンはその薄さゆえに取り扱いが難しく、世界的にもフライト実績がない。特に、グラフェンを MS の入り口に転写する際にグラフェンの破損が生じることが分かっている。具体的には、グラフェンを分析器のホルダーに転写する際に保持のためにアクリル樹脂でグラフェン表面をコーティングする。その状態でホルダーに転写した後にアセトンに浸してアクリルコート进行溶かすのが一般的な手順である。しかし、その時にグラフェンの破損が起こることがよく知られている。

そこで本研究では、破損の少ないグラフェンの転写方法の確立、および打ち上げを模擬した振動をグラフェンに加えた際の耐久性の実証を行うことを目的とした。結果としては、新たに複数層からなるグラフェンを用いて同様の手順で転写を行った際にグラフェンの高い面積カバー率 (>90%) を実現できることが確認できた。また、転写したグラフェンに対して打ち上げ環境を模擬した振動を加えた結果、振動によるグラフェンの破損状況に顕著な変化は見受けられず、グラフェンの耐振動環境性が実証できたといえる。

次世代小天体サンプルリターンミッション における小天体内部構造探査のための レーダシステム検討

○熊本 篤志¹, 宮本 英昭², 石山 謙³, 坂谷 尚哉⁴, 鳶生 有理⁴, 黒川 宏之², 岡田 達明⁴,
佐伯 孝尚⁴, 津田 雄一⁴, 菊地 翔太⁵, 杉原 アフマッド清志⁴, 高尾 勇輝⁶

¹ 東北大, ² 東大, ³ IPUT, ⁴ JAXA, ⁵ NAOJ, ⁶ 九大

彗星核地中に保存された太陽系形成時の始原的物質の採取と微惑星形成過程の解明を目的として、次世代小天体サンプルリターンワーキンググループ (NGSR-WG) では、彗星核地中からのサンプルリターンミッションの検討が進められている。このミッションでは、289P/Blanpain 彗星地中からのサンプルリターン・その場分析に加えて、彗星核が、ペブルの静かな集積によって形成されたペブルパイル天体か、衝突・破碎・再集積のイベントを経て形成されたラブルパイル天体かを判別するため、レーダ・地震計による内部構造探査が検討されている。現段階でのレーダのベースライン案は、往還機にレーダ送受信機、着陸機にレーダ中継機を搭載し、双方が直径 300m の彗星核を周回する方式のバイスタティックレーダで、彗星核から 5km の往還機と彗星核から 500m の着陸機の間で中心周波数 160MHz、帯域幅 50MHz のチャープパルスの送受信を行って、様々な経路で彗星核の内部を透過させ、その伝搬時間を計測することで、彗星内部の電波伝搬速度・誘電率の分布を 3m 以下の分解能で決定し、彗星核のペブルパイル・ラブルパイル判別、彗星核内部のバルク密度分布推定に貢献することを想定している。Rosetta ミッションでも周回機・着陸機双方にレーダが搭載されバイスタティックレーダ観測が実施されたが、着陸機が彗星核表面に着陸した状態での観測だったため、トモグラフィ解析が可能な相互に交差する測線での計測は不可能^[1]で、成層を仮定した深さ方向1次元の誘電率分布導出が成功基準とされ、その導出は達成された^[2]。NGSR バイスタティックレーダは、親子機双方が周回し、測線が相互に交差するので、軌道面内2次元の誘電率分布のトモグラフィ解析が可能なデータセットを得ることができる。

加えて、NGSR-WG 理工学チーム合同の検討、アイデア交換から、小天体地形マッピングのために検討されている超小型分離機のソーラーセールの表面にアルミ蒸着のループアンテナ・給電ラインを形成して、分離機本体にレーダ中継機を搭載することで、高度 500m を周回する着陸機よりさらに小天体に近接した好条件でレーダトモグラフィ観測を実施する案の検討も進められている。実現のためには、3U サイズの分離機にレーダ中継機を搭載する必要があり、レーダ中継機の大幅な小型軽量化が課題となる。

参考文献 [1] Grimm, R. E., (2015), ASR, 55, 2166-2176, doi:10.1016/j.asr.2015.01.038. [2] Kofman, W. et al. (2020), MNRAS 497, 2616-2622, doi:10.1093/mnras/staa2001.

SLIM 搭載マルチバンド分光カメラ(MBC)の月面着陸後観測

Post lunar landing observations by Multi-Band Camera (MBC) onboard SLIM

*仲内 悠祐¹、佐伯 和人¹、大竹 真紀子²、西野 真木³、長岡 央¹、石原 吉明³、佐藤 広幸³、本田 親寿²、宮崎 理沙³、梶谷 伊織³、横田 康弘³、西谷 隆介³、SLIM プロジェクトチーム

*Yusuke Nakauchi¹, Kazuto Saiki¹, Makiko Ohtake², Masaki N Nishino³, Hiroshi Nagaoka¹, Yoshiaki Ishihara³, Hiroyuki Sato³, Chikatoshi Honda², Risa Miyazaki³, Iori Kajitani³, Yasuhiro Yokota³, Ryusuke Nishitani³, SLIM project team

1. 立命館大学、2. 会津大学、3. 宇宙航空研究開発機構

2024 年 1 月 20 日 0:20 (JST)、小型月着陸実証機 SLIM は月面への 100m 精度のピンポイント着陸に成功した。SLIM は工学実証衛星であるがサイエンス観測もエクストラミッションとして掲げ、マルチバンド分光カメラ(MBC)を搭載していた。SLIM は、SELENE で発見されたマントル由来と考えられる物質が分布している SHIOLI クレーター周辺に着陸し、MBC を用いて未知の岩相の同定と、観測領域の中でマントル物質だと考えられる場合にはその主要鉱物 (カンラン石)の $Mg\# [=Mg/(Mg+Fe)原子比]$ を推定し地球のマントル組成と比較することを試みる計画であった。

MBC は日本の探査機搭載分光カメラでは初めて、指向用ミラーとオートフォーカス機能を搭載した。指向性ミラーにより着陸地点周辺の観測対象に視野を向け、オートフォーカス機能によりフォーカスを合わせ高精細な画像データの取得が可能である。空間分解能は、10m の距離にある観測対象に対して 1.1 mm/pixel である。検出器には 750 nm 付近まで感度のある Vis-InGaAs の半導体イメージングセンサを用い、10 枚のバンドパスフィルターをフィルターホイールにより切り替えながら撮像することでマルチバンド画像データを得る。MBC の観測波長は 700 nm – 1700 nm の範囲内で 10 バンドを観測し、月面の代表的な鉱物であるカンラン石や輝石などの同定し反射スペクトルの吸収形状が推定可能である。バンドパスフィルターの波長分解能は 30 nm である。

SLIM が着陸した場所は、予定地点から約 55m 東側であった。SLIM の着陸姿勢が計画通りではなく、太陽光電池による電力発生が行われていなかったため、残された運用時間は搭載されているバッテリー残量と機体の温度で律速された。SLIM プロジェクトチームは、ピンポイント着陸シーケンスに関わる全データのダウンリンク後、残されたわずかな時間でマルチバンド分光カメラ(MBC)による月面理学観測を試みた。最初に MBC 駆動機構などが正常に動くようロンチロックを解除し、その後に周辺環境を把握するためスキャン撮像を実施した。ミッション期間を通して、MBC は 3 回のスキャン観測および 13 箇所の 10 バンド分光観測に成功した。本発表では、MBC 観測運用の詳細と、観測結果について報告する。

惑星探査用ガスクロマトグラフ-質量分析計 (GC-MS) のための GC-MS インターフェイスの開発

○岩谷隆光^{1,2}, 菅原春菜³, 浅村和史³, 齋藤義文^{3,1}

¹ 東京大学, ² ボールウェーブ, ³ JAXA

太陽系における物質進化の理解や生命の痕跡の探索のため、有機物は惑星探査における主要な分析対象である。有機物のその場分析には質量分析計 (MS) が用いられるが、同じ質量数でも多種の異性体を持つ有機分子を質量数の情報のみで同定することは困難であるため、ガスクロマトグラフ (GC) で分子種ごとに分離することが有用である。これに対して我々は、将来の惑星探査を目指した小型 GC-MS の開発を進めている。GC と MS の接続では、入口圧 10^5 Pa 程度の GC から 10^{-3} Pa 以下で動作する MS へ 10^8 倍近い圧力差で膨張しながら導入されるキャリアガスを排気する必要がある。地上の GC-MS では、排気速度が数 100 L/s レベルの大型の真空ポンプを利用できるが、探査機への搭載は現実的ではない。そこで我々は、GC-MS インターフェイスとして、Rosetta ミッションで 67P/Churyumov-Gerasimenko に着陸したランダー (Philae) に搭載された GC-MS (COSAC)¹ でも利用された、図 1 に示すジェットセパレーター (JS) に着目している。JS は、GC と MS を繋ぐ配管を分断する構造で、軽い分子のキャリアガス (H_2 や He) が拡散して排気され、分析対象の重い分子は直進して MS に移動する。JS 内の圧力は数 $10^2 \sim$ 数 Pa 程度であり、GC から流入するガスの膨張率は比較的小さいので、探査機に搭載可能な排気速度が数 L/s 程度の小型のポンプが利用できる。さらに JS から MS 側に流入するガスが制限されるので、MS 側のポンプも同様に小型化できる。また、JS は分析対象分子を濃縮する作用があり、分析感度の向上も期待できる。本研究では、GC-MS インターフェイスの設計を検討するため、JS を試作し、その濃縮効果について評価した。

実験では市販の四重極型質量分析計 (QMS, M-200QA-M/キャノンアネルバ) と可搬型 GC (Sylph SY-402/ボールウェーブ) を用い、試作した JS を評価した。まず、キャリアガス (H_2) を背景ガスとして、分析対象の有機分子を既知の濃度に調整したサンプルガスを複数作製し、有機分子に対応する質量数の QMS の応答から検量線を作成した。次に、試作した JS

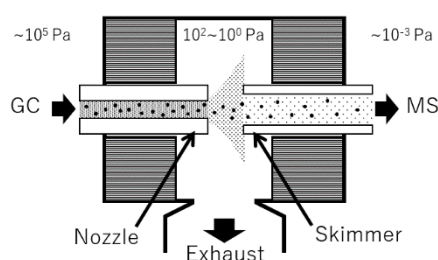


図 1 ジェットセパレーター

を用いて GC と QMS を接続し、サンプルガスの分析を行い、先の実験で得られた検量線より MS 側に導入されたガスの濃度を推定した。その結果、GC 出口で計算されるガスの濃度に対して、インターフェイスを通したガスの濃度は約 3 倍高かった。以上より、JS がインターフェイスとして有効であることが確かめられた。

¹Goesmann et. al; Space Sci. Rev., 128 (2007) 257.

最小二乗 SPH 法の定式化と実装

Formulation and implementation of the least squares SPH method

○ 菖蒲迫健介¹, 吉田茂生², 川田佳史³, 中島涼輔⁴

¹九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻

²九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

³東京大学 大学院理学系研究科

⁴九州大学大学院理学研究院

惑星科学において、物体の合体・分裂・大変形を伴う現象は数多く存在する。例えば、月や火星サイズの天体が衝突する巨大衝突現象、その後、重い金属が惑星中心に沈降してゆく惑星コア形成現象などが挙げられる。このような流体的現象の数値的取り扱いにはメッシュフリーな粒子法が有効である。そのうち、星形成問題を解くために開発された Smoothed Particle Hydrodynamics method (SPH 法 [1]) は高い有用性と汎用性から、惑星科学分野に留まらず、ダム決壊などの激流計算 [2] や地すべり現象 [3] といった工学的な実践的問題にも広く使用されており、現代における粒子法の代表格となっている。

一方、従来の SPH 法は重み関数の厳密な規格化性や粒子配置の対称性を仮定して導出されるため、境界付近で粒子欠損が起こったり粒子配置に乱れが生じたりすると、その空間離散精度が劇的に悪化する。そこで、我々は Yamamoto and Makino (2017) [4] によって提案された最小二乗法を用いた高精度な粒子法を基盤とし、これに計算工学の領域で培われた幾つかの安定的スキームを加えた最小二乗 SPH 法を開発した。具体的には、リッジ正則化や、粒子数密度に基づく粒子のシフト効果などを導入し、計算の大幅な安定化を目指した。

本発表では、開発した最小二乗 SPH 法による幾つかの数値テストの結果を報告する。

本研究は JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2136 の支援を受けたものです。

■ 参考文献

[1] Lucy, *Astron. J.*, **82**, 1013-1024, 1977.

[2] Marrone *et al.*, *Comput. Methods in Appl. Mech. Eng.*, **200**, 13-16, 1526-1532, 2011.

[3] Morikawa and Asai, *Computers and Geotechnics*, **148**, 104815, 2022.

[4] Yamamoto and Makino, *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **69**, 2, 35, 2017.

GHz-DAC 音速法による氷天体弾性研究の提案

○松井亮介¹, 米田明¹, 近藤忠¹,¹大阪大学

我々は音速測定手法の1つであるGHz法と高圧発生装置のダイヤモンドアンビルセル（DAC）を組み合わせた試料中の弾性波速度測定手法（GHz-DAC 音速測定法）の開発・改良を進めている。本研究ではこの手法を用いて、H₂O-塩系の水溶液、およびその高圧固体相のGPa条件に至る圧力下での音速測定を目指した測定技術の開発を進めた。これらは将来的な氷衛星の地下探査計画において重要な基本情報になると考えられる。また、圧力下の液体を対象とした音速測定は前例が限られており、実験室で測定が可能な圧力下液体相の音速手法開発としても重要性が高い。発表では将来的な水溶液系の試料に対する、アンビル素材やガスケットサイズなどの実験条件を最適化するために、純粋なH₂Oの液体・高圧氷（VI相）を対象とした1 GPa付近でのGHz-DAC 音速測定法による信号の取得を試みた。今回の発表ではGHz-DAC 音速測定法の現状、有用性と、実際の水溶液試料の測定結果などについて報告する。

応力履歴依存粘性を採用した2次元円環マントル対流計算によるプレートテクトニクス再現の試み

○田井東 大貴¹、亀山 真典²

¹ 愛媛大学大学院 理工学研究科、² 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター

プレート運動を再現することは、マントル対流シミュレーション研究の最大の目標の1つである。そのためには、ほぼ変形しない「硬い」プレート内部と、顕著に変形する「柔らかい」プレート境界という、力学的特性の異なる2つの状態を同時に表現しうる高度なレオロジーモデルが重要である。そこで本研究では Ogawa らによる先行研究 (Ogawa, 2003; Miyagoshi et al., 2020) で提案されている「応力履歴依存レオロジー」に注目し、我々の研究室で開発した2次元半円環状領域内マントル対流計算プログラムへ導入して地表面付近の挙動を検討した。

本研究では、地球のマントル領域 (厚さ約 2900 km、外径比 0.55) を模した2次元半円環形状内における、ブシネスク近似のもとでのマントル物質の下部加熱のみによる熱対流を考える。マントル物質の粘性率は温度や圧力 (深さ) に依存するものとし、特に強い温度依存性ほど地表面沿いの低温の部分に高粘性の「硬い板」(リソスフェア) を発達させる。さらに、粘性率は応力履歴にも依存するものとし、具体的には流体にはたらく応力 σ がある範囲内 ($\sigma_m < \sigma < \sigma_p$) であると、粘性率は「無傷で硬い」状態 (プレート内部に相当) と「壊れて柔らかい」状態 (プレート境界に相当) に対応する2つの値をとり得るが、そのどちらをとるかは過去の応力状態 (「無傷」か「壊れた」か) によって定まるものとしている。

シミュレーションの結果、ある条件下においては「プレートらしい」挙動が2次元円環モデルでも発現することを確認できた。具体的には、リソスフェアはいくつかの硬い「プレート」に分かれ、それぞれのプレートが極めて剛体的 ($|\partial v_\theta / \partial \theta| \approx 0$) に動いている。その際、隣り合うプレート間の相対運動により引き起こされるリソスフェアの変形は、ごく狭い「プレート境界」に集中して起こっている。これに加えて粘性率温度依存性の強さを系統的に変化させ同様の計算を実施したことにより、本研究で採用した応力履歴依存レオロジーが「プレートらしい」挙動の発現に極めて重要な役割を果たすことを見出した。具体的には、プレートに働く力の源としてそれ自身のもつ負の浮力 (いわゆる「海嶺押し力 (ridge push force)」) を想定し、表層の「硬い」リソスフェア内に発生する応力レベル σ_{cTBL} を見積ると、「プレートらしい」挙動を示す対流構造 (以下 PL 型) が発現するのは粘性率に応力履歴依存性がもたらされる場合 (つまり $\sigma_m < \sigma_{cTBL} < \sigma_p$) に限られることが分かった。さらに先行研究 (Ogawa, 2003) の2次元箱型モデルとの比較を行い、PL 型対流が発現する条件がモデル形状の「丸い」効果の有無によらずほぼ不変であることも分かった。この原因として、モデル形状の「丸い」効果によって低温熱境界層の厚さやそれが上下に支える温度差の点ではそれぞれ確かに変化 (前者は増加、後者は減少) がある一方で、両者の積などから見積られる σ_{cTBL} については「丸い」効果の有無によらずほぼ同じであったことが挙げられる。

現在は PL とそれ以外の対流様式の違いについてより詳細な解析を継続しており、さらに今後は3次元球殻状モデルや2次元全円環モデルを含めた (側面境界のない) より高度なシミュレーションの実現と、その計算結果の定量的な解析、形状による再現結果の差異の検討を並行して進めたい。

隕石の衝撃変成度 2 分性の成因

黒澤耕介^{1,2}, Gareth Collins³, Thomas Davison³, 岡本尚也², 石橋高², 松井孝典²

¹ 神戸大学 大学院人間発達環境学研究科 人間環境学専攻, 千葉工業大学 惑星探査研究センター, ³Impact and Astromaterials Research Centre, Department of Earth Science and Engineering, Imperial College London

地上で発見される隕石の多くは程度の差はあるが、過去に天体衝突を受けた痕跡(衝撃変成)を有している。多くの隕石は薄片に加工され、偏光顕微鏡を用いた観察により、衝撃変成度ごとに分類されている[e.g., Stöffler+18, *MaPS* 53, 5–49]。その結果わかってきたことは炭素質隕石(Carbonaceous chondrites, CC)の衝撃変成度は普通隕石(Ordinary chondrites, OC)に比べて低く、「衝撃変成度 2 分性」がある、ということである。近年では Cr と Ti の同位体図上でも CC 天体とそれ以外(Non-carbonaceous chondrites, NC)で 2 分されることが明らかにされている。OC は NC に属しているため、「衝撃変成度 2 分性」の起源は「同位体 2 分性」の成因とも関連しているという魅力的な仮説を立てることも可能かもしれない。

炭素質隕石は有機物を多く含むため、衝撃波が作用した際の機械的、熱力学的、化学的挙動が異なることだろう。有機物は系の酸素分圧を引き下げ、共存する鉱物の熱分解を誘引することが容易に想定される。珪酸塩鉱物を元にした炭素質隕石の衝撃変成分類ではこのような効果は考慮されていない。そこで我々は模擬隕石基質(matrix)標的を用いて高速度衝突実験を実施し、発生する気体を分析することにした。水質変成を受けた炭素質隕石、無水のその模擬基質として磁鉄鉱粉末、石英粉末を用いた。また基質に含まれる隕石有機物の模擬物質として黒鉛粉末を使用した。比較のために黒鉛を含まない試料も用意した。実験は千葉工業大学惑星探査研究センターの二段式水素ガス衝撃銃(現在は神戸大学に移設)を用いて行った。結果、(1)試料由来の CO, O₂, CO₂ を検出し、今回の衝突条件で磁鉄鉱および石英の分解/蒸発が起こること、(2)試料が炭素を含んでいる場合、同じ衝突速度での共存する鉱物(磁鉄鉱 or 石英)の分解量が最大で 2 桁上昇すること、(3)発生ガスの温度は衝突速度に依存せず ~2,000 K という高温であること、がわかった。

衝突時に発生する高温領域は衝突孔の内壁に集中する[Kurosawa+21, *Communications Earth & Environment* 2: 146]。2,000 K の高温ガスは真空に向かって膨張するだろう。このとき衝撃変成を受けた物質は流出するガス流によって宇宙空間へむかって加速されると期待される。そこで衝突実験結果とエネルギー保存則から脱出速度を超えて加速される質量を推定したところ、3–7 km s⁻¹ の範囲で高い衝撃変成度の物質を宇宙空間へ吹き飛ばすのに十分な高温ガスが発生していることがわかった。我々は衝撃変成度 2 分性は、NC, CC 母天体の衝突環境の違いではなく、高い衝撃変成度の物質が炭素質小惑星から高温ガスの膨張によって失われてしまったことによって生じた「みかけの 2 分性」とであると提案する。

謝辞: iSALE の開発者である Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausen の各氏に感謝致します。

液体の水を含む表面でのクレーター形成に伴う温度上昇：湿った砂標的に対する高速度衝突実験

○豊嶋遥名¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 笹井遥¹, 長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

火星表面のクレーターに関する形態学的かつ鉱物学的研究から、ノアキアン期(>3.7Ga)には少なくとも深さ7 km以上の泥層が存在したことが推測されている^[1]。衝突クレーター形成は表層付近の温度上昇を伴うイベントの一つであり、数 km/s の衝突では表層物質の温度が衝突直後 1000°C 以上に加熱され大気中へ放出される^[2]。また多孔質石膏標的に対する衝突実験からは、クレーター地下の加熱は半径 100m サイズで数日、半径 1 km サイズで2 万年もの期間持続することが示唆されている^[3]。すなわち、火星表層で衝突クレーターが形成された当時には、高温のエジェクタや表層内の水の気化によるプリュームが大気中へ放出されることによって大気に熱が供給されたり、クレーター地下での熱伝導により表層中に一定期間温水が貯蔵されたりしたことが予想される。

本研究では、過去の火星泥層における衝突クレーター形成に伴い、クレーター地下および周辺大気で引き起こされる温度上昇を調べるため、大気存在下における湿った砂標的に対するクレーター形成実験を行った。衝突装置には神戸大学および I S A S の二段式軽ガス銃を用いて、直径 4.7mm のポリカ球を 2-6 km/s で衝突させた。標的には含水率 0-13 wt. % に調合した石英砂(粒径 500 μ m)と水の混合試料を用い、真空度 2000-30000Pa, 気温約 20°C の真空チャンバーに設置して実験を行った。温度観測について、赤外線カメラ(600~3000fps)を標的の真上もしくは真横に設置して放出物およびクレーター壁面の温度観測を行った他、標的の内部数カ所に熱電対を埋め込みクレーター地下の温度変化を計測した。さらに、衝突点直上に異なる高度で設置した熱電対で標的の周辺大気の温度変化を計測した。なお衝突実験の様子は2 台の高速ビデオカメラ(3000-10⁵fps)を用いて観測した。

結果、高含水率の標的(≥8 wt. %)では鉛直上向きに噴出する可視光で白いプリュームが視認された。含水率の増加に伴い濃度が高くなっていたことから、このプリュームの主成分は水蒸気である可能性がある。またクレーター内部の標的物質は 250°C 以上まで温度上昇し、そのうちのほとんどが高温のエジェクタとしてクレーター外部に放出されることが明らかになった。しかし一部はクレーター形成時間以降もクレーター壁面に残存しており、地下の温度上昇に寄与した可能性がある。周辺大気の温度変化は高温のエジェクタの温度変化と一貫性があったことから、周辺大気の主要な熱源となっているのは、衝突直後に噴出する水蒸気プリュームではなく高温のエジェクタであると予想される。

[1] Vivian Z. & Sun, Ralph E. Milliken (2015)

[2] Gareth S. Collins, et al. (2012)

[3] Yasui M., et al. (2021)

天体衝突による複雑有機分子合成のモンテカルロシミュレーション

○落合葉子¹, 井田茂¹, 庄司大悟²

¹東京工業大学 地球生命研究所, ²JAXA 宇宙化学研究所

天体衝突によって生じる衝突蒸気雲では、衝突直後の高温状態(～数千 K)から、断熱膨張に伴う急速な冷却によって化学反応がクエンチすることで、高温での活性状態を保持した非平衡組成が生じることが予想されている (Ishimaru et al. 2010)。実際に、隕石衝突を模擬した室内実験では、生体分子であるアミノ酸や核酸塩基が生成されることが報告されており (e.g. Furukawa et al. 2015)、初期地球における天体衝突イベントは、前生命化学において重要な役割を果たした可能性がある。しかし、これらの生体分子をはじめとする複雑な有機分子が衝突蒸気雲内において、どのような反応過程で生成されるのかは明らかではない。

これまで衝突蒸気雲内の化学反応に関する理論的研究は、第一原理計算などが用いられてきた (e.g. Goldman et al. 2010)。しかし、第一原理計算は、計算コストの高さから、非常に短いタイムスケール(～数ピコ秒)の反応しかシミュレーションすることができない。そのため、衝突後の一連の反応過程を調べることは難しい。

そこで本研究では、実験生成物の一つであるアミノ酸の生成に注目し、Ochiai et al. (2024) で提案された複雑有機分子合成反応のための化学反応シミュレーションを使い、蒸気雲内でのアミノ酸合成過程を明らかにすることを目的とした。Ochiai et al. (2024) のモデルは反応速度を近似的に見積もることで計算コストを大幅に抑えた手法であり、それにより衝突後からクエンチまでの化学反応を包括的に調べることが可能となる。

本研究の計算結果は、衝突が起きてから反応がクエンチするまでの過程を通して、アミノ酸の生成率は非常に低く、最終的なクエンチ組成にはアミノ酸は含まれないことを示す。一方で、反応生成物には、アンモニア、アルデヒド、及びイミンが含まれる。これらの分子は前生物的なアミノ酸の合成機構として提案されているストレッカー反応やホルモース型反応の前駆物質である。本研究の結果は、天体衝突によって合成されるアミノ酸は、気相反応ではなく、蒸気雲内で生成されたアミノ酸前駆物質が、冷却に伴って凝縮した水滴中などに濃集し、ストレッカー反応やホルモース型反応などを通じて合成されることを示唆する。

小惑星起伏地形に起因するクレーター形状の 多様性に関する実験的研究

○横田優作¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 白井慶¹, 長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙科学研究所

【背景】近年の小惑星探査機はやぶさ 2 や OSIRIS-REx による調査で、小惑星リュウグウやベヌスは赤道域に巨大な起伏地形（赤道リッジ）を持つことがわかっており、リッジ上のクレーター形状は表面起伏の影響を受けて非円形になっていることが知られている。また、小惑星探査機 Dawn が調査した小惑星ベスタは、その表面が一面クレーターで覆われているが、リッジやトラフを持ち非常に起伏に富んでいることが知られている。このベスタでは、表面起伏や雪崩の影響を受けて形成されたと思われる非円形クレーターが多く発見されている。このように、表面起伏と雪崩の影響でクレーターの形状は多様性を持つことになるが、その研究は斜面上のクレーターを除いてほとんど進んでいない。ところが、斜面に対するクレーター形成実験では再現できない形状のクレーターが天体の起伏上に存在する。そこで本研究では、小惑星表面の起伏地形を模擬した粉粒体標的に対してクレーター形成実験を行い、最終クレーターの形状と遷移クレーターの崩壊様式を調べることで、クレーター形成過程に対する起伏地形の影響を明らかにする。

【実験方法】クレーター形成実験は、神戸大学の縦型一段式軽ガス銃と宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸は直径 3mm と 2mm のアルミナ球、標的は石英砂（直径 100 μ m、安息角 31°）とガラスビーズ（直径 100 μ m、安息角 23°）を使用した。標的は、小惑星表面の起伏地形を模擬するために山脈型に作成し、その山頂付近に弾丸を衝突させた。標的の傾斜角 θ （水平面と斜面の成す角度）は、石英砂では 20°と 30°、ガラスビーズでは 20°に設定した。また、平面標的（ $\theta=0^\circ$ ）も用意した。また、衝突点から山頂までの水平距離 d を 0.7mm から 56.8mm の範囲で変化させた。衝突速度 v_i は、低速度衝突実験では 3~202m/s、高速度衝突実験では 1.2~4.2 km/s の範囲とした。クレーター形状を解析するために Metashape を利用してクレーターを撮影した写真から 3次元形状モデルを作成した。この形状モデルを用いて、クレーターの稜線方向の長さ D_{ma} 、斜面方向の長さ D_{mi} を測定した。また、高速カメラを用いてクレーターの成長と崩壊の観測を行った。

【実験結果】最終クレーターの形状は d に依存していた。山頂付近に形成された場合はレモン型、山頂から離れた位置で一部が山脈にかかって形成された場合は貝殻型、完全に斜面上に形成された場合は舌状のクレーターとなった。最終クレーターのアスペクト比 D_{ma}/D_{mi} と衝突位置 d/D_{ma} の関係を調べたところ、アスペクト比は粒子の種類と傾斜角毎に d/D_{ma} に依存しており、石英砂（ $\theta=30^\circ$ ）ではレモン型クレーターと貝殻型クレーターは $d/D_{ma} \sim 0.25$ で遷移し、貝殻型クレーターと舌状クレーターは $d/D_{ma} \sim 0.62$ で遷移することがわかった。それぞれの粒子におけるアスペクト比と衝突位置の関係は次の通りである。石英砂（ $\theta=30^\circ$ ）では $D_{ma}/D_{mi} = 1.6 \exp(-1.03 d/D_{ma})$ 、石英砂（ $\theta=20^\circ$ ）では $D_{ma}/D_{mi} = 1.2 \exp(-0.56 d/D_{ma})$ 、ガラスビーズ（ $\theta=20^\circ$ ）では $D_{ma}/D_{mi} = 1.5 \exp(-0.87 d/D_{ma})$ 。このことから、標的の傾斜角が安息角付近であれば同じ衝突位置でほぼ同じアスペクト比を示し、安息角に対して傾斜角が小さくなるにつれてアスペクト比が小さくなることがわかった。また、石英砂（ $\theta=30^\circ$ ）では遷移クレーターの半径と最終クレーターの斜面上側の長さの比 R_{up} は d/D_{ma} の増加に伴って増加することがわかった。石英砂（ $\theta=30^\circ$ ）について得られた R_{up} と d/D_{ma} の関係は $R_{up} = 2.09 d/D_{ma} + 0.65$ である。一方、遷移クレーターの半径と最終クレーターの斜面下側の長さの比 R_{down} は衝突速度の増加に伴って減少することがわかった。さらに、遷移クレーターの直径と最終クレーターの稜線方向の長さの比 R_{rd} は d/D_{ma} と衝突速度に依存せず、その値は 0.9~1.3 であることがわかった。

高速度衝突による蛇紋岩インパクターの 水和状態の変化

○松原光佑¹, 山口祐香理¹, 中村昭子¹, 長谷川直², 和田武彦³

¹神戸大学大学院理学研究科 ²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 ³国立天文台

月や小惑星の表面には水酸基や水が存在することが観測によって確認されており (Li and Milliken 2017; Arredondo et al., 2024), その一部は含水物質を含む小天体の衝突によってもたらされた可能性がある. 天体の衝突による含水インパクターの脱水過程の実験的研究は複数行われているものの (e. g., Sekine et al., 2015), その多くは実際の天体衝突を模擬したものではなく, ターゲット天体上にもたらされる水の量や形態はほとんど研究されていない. 本研究では蛇紋岩を弾丸として鉄鋼ターゲットに異なる速度で衝突させ, 形成されたクレーター内部を分光測定することで, 衝突後の弾丸物質の水和状態を測定した.

二段式軽ガス銃を用いて, 直径約 3 mm の蛇紋岩弾丸を鉄鋼キューブ (1 辺 15 mm) に 3~7 km/s で垂直衝突させた. インピーダンスマッチング法により, このような条件では 40~130 GPa の圧力が生じると推定される. また, 比較のために含水鉱物を含まない物質であるカンラン岩弾丸も衝突させた. 衝突後, 鉄鋼ターゲット上に形成されたクレーターの内部には溶融した弾丸物質が付着した. クレーター底面の法線方向から 30° の角度で光を入射させ, 法線方向の反射光のスペクトルを波長範囲 0.7~15 μm において 4 cm^{-1} の分解能で FTIR を用いて取得した.

水酸基が吸収を示す 1.4 μm においては, いずれのクレーターの反射スペクトルも吸収を示さず, クレーター内に残存した弾丸物質はほぼ完全に脱水したことが示唆される. また, 全ての衝突圧力において, 水酸基と分子水の吸収が隣接する 3 μm 帯において吸収を示し, その吸収深さは衝突圧力の増加に伴って減少する傾向を示した. 衝突圧力が約 100 GPa を超えると, 3 μm 帯における吸収深さはカンラン岩を衝突させたクレーターと同程度であり, クレーター表面の付着水のみが測定に影響を与えることが示唆される. 一方, 低い衝突圧力においては分子水の吸収を示す 6 μm 帯の吸収がみられ, その吸収深さは 3 μm 帯の吸収とともに増加する傾向が見られた. ここから, クレーター内には蛇紋石由来の水酸基はほぼ保存されず, 蛇紋石の分解によって放出された水蒸気がメルト内に捕獲されたことが示唆される. このようなプロセスは, 軽石に対して蛇紋岩を衝突させた実験的研究 (Daly and Schultz, 2018) でも確認されている. 衝突圧力が低いほど分子水による吸収が顕著であり, メルト内への分子水の捕獲作用が効率的に働いた可能性がある. およそ 80 GPa を超える衝突では, カンラン石による 5.6 μm 付近の吸収が確認され, 衝突圧力に伴って吸収深さが増加した. カンラン石は蛇紋石が分解することで生じると考えられ (Viti, 2010), より高圧力が生じる衝突において, カンラン石の形成が促進された可能性がある.

本研究は, JAXA 宇宙科学研究所の超高速度衝突実験施設および宇宙放射線装置の共同利用実験により行いました.

弾性体力学シミュレーション手法の新しい定式化

○内海 秀介¹, 犬塚 修一郎¹, 小林 浩¹

¹ 名古屋大学大学院 理学研究科

小惑星は様々な幾何的形狀を持ち、その形成は小天体同士の衝突と合体によるものであると考えられている。また、類似の過程である微惑星の衝突は、固体惑星形成の最終段階において重要である。この大規模な現象の実験は困難なため、数値シミュレーションによる解析が広く用いられている。このような現象のシミュレーションでは、弾性体力学へ拡張された Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法が有効である。SPH 法は、流体粒子により空間を離散化しラグランジュ的に記述するため、衝突破壊現象の記述に非常に適している。そして Sugiura & Inutsuka (2017) による Godunov 法を拡張した定式化により、従来の弾性体 SPH 法の問題であった張力不安定性が解決されるなど、弾性体 SPH 法は発達している。しかしながら、未だに解決すべき種々の課題が存在する。例えば上記論文では以下の2つの問題点が指摘されている。(1) 非中心力の導入により、定式化の段階で系の全角運動量を丸め誤差の範囲で保存することはできない。(2) 偏差応力テンソルの発展方程式を時間積分する必要があるが、冗長で計算コストが高い。本研究では、これらの問題点を克服する新たな弾性体モデルを提案する。具体的には、伸びた距離に対して線形な復元力を与えるばねで繋がれた多体系で弾性体を記述する。様々なテスト計算を行い、本手法の有効性を確認した。本モデルは、計算コードの設定パラメータを調節することで、等方性を保ちながら、任意のポアソン比とヤング率を実現可能である。さらに、ばねの力に高次の項を取り入れれば、非線形な構成則も実現できるため、現実の具体的な弾性体を容易に再現することができる。このモデルに衝突破壊、および摩擦の効果を加えることで、前述した小惑星形成の解析への応用が可能となる。本発表では、我々の新しい弾性体モデルの定式化および妥当性、そして今後の発展について述べる。

砂標的への衝突実験と数値流体シミュレーションの比較

○黒崎 健二¹, 荒川 政彦¹, 保井 みなみ¹

¹神戸大学

リュウグウへのSCI クレーター形成実験やDimorphousのDouble Asteroid Redirection Test missionで行われた衝突実験から、小天体は主に凝集力が弱いレゴリスで構成されていることがわかっている。特に、砂への衝突クレーターの形成過程とその放出物の速度分布・放出角度は、衝突地点での物性に強く依存していると考えられる。これまでの砂標的への衝突現象に対する室内実験と数値シミュレーションの比較は、1 km/sを超える高速度衝突を対象に行われてきていた。それらの数値シミュレーションでは、砂の構成粒子となる石英の状態方程式と標的の空隙率を考慮した計算をおこなって、室内実験との比較してきた。しかし、先行研究で使用されていた状態方程式では、空隙を持った一枚岩を想定したモデルとなっており、実際の砂標的の音速（～100 m/s）よりも速い音速（～1 km/s）を持つ物質への衝突を考慮しているため、砂標的への衝突に伴う衝撃波伝播や音波の伝播を再現できていない可能性がある。したがって、砂標的の衝突クレーターや、その周囲で発生する衝突励起振動を議論するためには、砂標的に用いられる状態方程式を適切に取り扱う必要がある。本講演では、ガラスビーズへの衝突実験と比較するために、砂標的の状態方程式の再考および弾性体を記述できるSmoothed Particle Hydrodynamics法を用いた数値実験を行い、衝突クレーター形成の再現計算およびクレーター形成中の圧力分布や放出速度分布の解析を行った。200 μm のガラスビーズから構成される砂標的が、ソーダ石灰ガラスの球体からなる粉粒体であると仮定し、実効的な体積弾性率およびせん断弾性率を計算することで、実験データと整合的な音速を持つ砂標的の状態方程式を作成した。さらに、作成した状態方程式を用いて、弾性体SPHを用いて砂標的への衝突現象の数値シミュレーションを行った。計算の結果、室内実験によって得られたクレーターサイズとよく一致することがわかった。本研究の成果はクレーター形状および放出速度と標的物性の関係を理解する新しい知見をもたらすことが期待される。

氷天体上の高速斜め衝突により発生する ホットスプリング

○笹井 遥¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙航空研究開発機構

背景

小惑星リュウグウからのリターンサンプルの分析から、リュウグウの母天体が水の氷と揮発性物質を主成分とする氷天体である可能性が示唆されている。さらに、リターンサンプルの分析では、30°Cまでの有機物とケイ酸塩鉱物に関連する水質変成作用の証拠が見ついている。従って、加熱されてリュウグウ母天体の氷天体の水の氷が溶け、液体の水と有機物や他の鉱物との間で熱変成を起こした可能性がある。本研究では、表面の水氷を溶かす熱源として氷天体間の高速衝突に着目した。衝突は残留熱をクレーター周囲に残し、その熱が水氷を温めることで、クレーターの底に温泉を形成する可能性がある。このクレーター底部に形成された一時的な温泉は、クレーターの大きさに比例してある程度の期間維持される可能性があり、クレーターの大きさと衝突残留熱の関係は、高速衝突の水質変成への寄与を調べる上で非常に重要である。Sasai et al., 2024 では、多孔質水氷上のクレーター周辺の衝突残留温度分布の計測を行ない、その結果からクレーター底部が 0°Cを超えている可能性があると推測した。本研究では、氷微惑星の模擬物質である、多孔質氷標的に対する斜め衝突実験を行い、赤外線高速カメラによるクレーター底部の温度測定を行った。

手法

高速衝突実験は、神戸大学と宇宙航空研究開発機構 (ISAS/JAXA) の 2 段式軽ガス銃を用いて行った。多孔質氷標的の作成は直径 710 μm 以下の氷粒子を用いて行ない、標的空隙率は 40–60%である。弾丸には直径 4.7mm と 7mm の PC 球を用い、衝突速度は 3.0km/s から 6.2km/s とし、衝突角度は 30°, 45°, 90° とした。衝突後、数 10ms で標的周囲に高温ガスが流入することを防ぐため、標的の前方にアクリル板を設置した。これにより高速赤外線カメラによる衝突直後のクレーター底面の温度計測が可能になった。

結果

衝突直後に、クレーター底部に 70–140°C 程度の高温のホットスポットが数点確認された。ホットスポットとして観測された高温の粒子の一部は、衝突から数 10 ms までにクレーターから放出された。高温粒子が放出された後のクレーター壁面全体の平均温度は、高温粒子がクレーターから放出される量が少なく、クレーター内部に多く残留するほど、高温であった。特に斜め衝突では高温粒子がダウンレンジ側に多く飛び出し、高温粒子放出後のクレーター壁面の温度は低かった。衝突後に回収した標的の x 線 ct 撮像により、氷が完全に融けたのち再凍結した層が確認できた。この証拠は、温泉のような温水層がクレーター底部に形成され、維持されたことを意味している。従って、斜め衝突により、クレーター底部に一時的な温泉が存在する可能性があり、有機物やケイ酸塩の水質変成の熱源の候補の一つになる可能性がある。

超高速衝突におけるクレーターのスケーリング則 「終段階有効エネルギー」の改良とその評価

○中澤淳一郎¹、長友英夫²、矢野創^{3,1}

1 総合研究大学院大学、2 大阪大学、3 宇宙科学研究所

太陽系内の大気が希薄な固体天体の表面には、大小様々なクレーターが発見されている。クレーターは小天体から宇宙塵までの様々なサイズの衝突物により形成される。それらの衝突現象は、各天体の化学進化や軌道進化を駆動する自然現象の一つであり、それにより天体表面および内部構造が多様化したと考えられる。従って、どのような質量の天体がどのような速度で衝突したのかを理解することは、各天体の進化史を語る上で重要である。故に、クレーター形成の物理素過程や、クレーターの大きさ・形状から衝突条件を特徴づけるパラメータを抽出する、衝突クレーターのスケーリング則について、これまで活発な研究がなされてきた。

スケーリング則の一つとして、衝突標的中の「衝撃圧力」と「衝撃波圧力の減衰が少ない領域である『等圧核(図1)』の体積」との積である「終段階有効エネルギー(LE)」が提唱されている[1,2]。Mizutani et al. (1984)[1]では、アルミ弾丸を砂標的に高速(100–800 m/s)で射出する実験を行い、LEとクレーター直径が一对一で対応することを示している。しかし、アルミ弾丸を氷標的に高速(60–300 m/s)で射出した実験[3,4]と、超高速(1–7 km/s)で射出した実験[5]にて得られたクレーター直径については、LEのみでは統一的に説明できなかった(図2)。

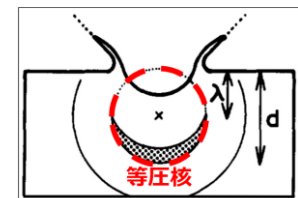


図1 等圧核の概要図
(Mizutani et al. 1990[2]より改変)

そこで本研究では、砂標的と氷標的の物質強度の差異を考慮し、数値流体計算コード iSALE により、LEを再定義したLE'を提案する。従来のLEは、衝撃圧力がクレーター形成に実効的に寄与する領域として「等圧核」を抽出し、その体積と等圧核の平均圧力の積で定義される。これは、重力が支配的な領域でのクレーター形成を模擬可能な、砂等の物質強度が無視できる標的に対して適用可能であった[1,2]。一方本研究では、物質強度が支配的な条件でのクレーター形成には剪断破壊が重要であるという先行研究[6]から着想し、氷標的に対し、氷の剪断破壊強度以上の圧力を経験した領域を抽出した。その後、領域内の計算格子毎に、衝撃圧力に格子体積を乗じて、その総和を計算してLE'とした。こうして得られたLE'に対し、クレーター直径の実験値をプロットしたところ、二つの系統の実験データが同一のべき級数で説明された(図3)。これにより、クレーター形成に関わる剪断破壊強度の重要性や衝突エネルギーの分配等の物理素過程に対する新解釈が導かれる。

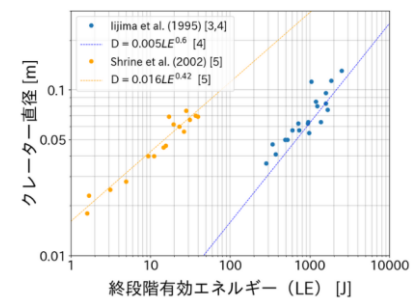


図2 従来のLEとクレーター直径の関係

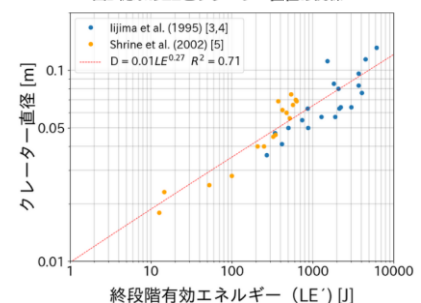


図3 本研究が提案するLEとクレーター直径の関係

本発表では上記の新解釈に加えて、将来的に、LE'を用いて砂標的と氷標的(すなわち模擬重力支配域及び物質強度支配域)のクレーター形成を統一的に理解できる可能性についても議論を行う。

[1] Mizutani et al.(1984)JGR:Solid Earth,88(S02),A835-A845.[2] Mizutani et al.(1990)Icarus,87(2):307-326.[3]Kato et al.(1995)Icarus,113(2),423-441.[4]Iijima et al.(1995)GRL,22(15),2005-2008. [5]Shrine et al. (2002) Icarus,155(2),475-485.[6]Housen et al.(2018), Icarus, 300, 72-96.

小天体の軌道進化とその衝突による 原始水星のマントル剥ぎ取り

○中村郁仁¹, 井田茂², 兵頭龍樹³

¹東京工業大学 理学院地球惑星科学系, ²東京工業大学 地球生命研究所, ³ISAS/JAXA

水星は平均密度が高く、太陽系の他の岩石惑星に比べてコア質量比が2倍程度高いと推定されている(Hauck et al. 2013)。しかし、その起源は未だに明らかになっていない。水星の高いコア質量比に対する説明の一つとして、巨大衝突シナリオがある。このシナリオは、原始惑星との衝突によって原始水星のマントル層の大部分が剥ぎ取られたというものである。これまでに巨大衝突シナリオに基づいた衝突計算がいくつか行われ、水星のような質量とコア質量比をもつ惑星を形成する衝突条件が調べられてきた (e.g., Benz et al. 2007; Chau et al. 2018)。その一方で、N 体シミュレーションを用いた近年の研究によると、惑星形成過程において、水星に似た惑星を形成する先行研究の衝突条件は、発生確率が非常に低い(<1%) ことが報告されている(e.g., Franco et al. 2022)。

そこで我々は巨大衝突ではなく、惑星形成過程で多数発生する小天体衝突に着目した。本研究では、多数の小天体衝突によって水星の材料となった微惑星のマントルが少しずつ剥ぎ取られ、それらの合体で最終的にコア質量比の高い水星のような惑星が形成される可能性を検証した。小天体衝突でそれよりも十分に大きい天体のマントルを剥ぎ取るには、高速衝突が必要となる(Hyodo & Genda 2020, 2021)。この点について、水星軌道付近では、永年共鳴と呼ばれる力学現象で天体の軌道が歪められるため、天体同士の相対速度が高い。さらに、水星の材料となる半径数百 km 程度の天体であれば衝突速度に比べて表面脱出速度が小さいため、比較的容易にマントルを剥ぎ取れると考えられる。

本研究では、N 体シミュレーションを用いて、水星を除いた太陽系に複数の原始水星(半径 100~1000km 程度)と多数の小天体(テスト粒子)を配置して軌道進化を計算した。また、小天体衝突による天体の質量変化およびコア質量比変化を追跡するために、シミュレーション内で発生する衝突条件をもとに、衝突による原始水星の質量およびコア質量比変化の計算を随時行なった。衝突による質量変化の計算には、Hyodo & Genda (2020)が衝突計算から導いたスケーリング則を用いている。本研究の結果、水星軌道付近の永年共鳴によって、半径数百 km 程度の小さな原始水星のマントルを剥ぎ取るのに十分な高速衝突が起こることが分かっている。発表では、上記の計算について詳しい結果を紹介する。

原始惑星系円盤のダスト赤外線観測の最前線

○ 田崎亮^{1,2}

¹ IPAG/Université Grenoble Alpes, ² 東北大学

今日までに 5000 を超える系外惑星の存在が確認され、銀河系における惑星の存在はごくありふれたものとなった。しかし、こうした惑星系誕生の背景には未だ多くの謎が残されている。惑星系は、生まれたばかりの星の周囲に形成される原始惑星系円盤から誕生する。このことは近年、地上大型望遠鏡が原始惑星系円盤内で形成中の惑星の存在を直接捉えたことで決定的となった。一方で、固体惑星の材料物質であり、初期にたかだかマイクロメートル程度の大きさしか持たない固体微粒子（ダスト）が、いつ・どこで・どのように惑星へと成長したのかはよくわかっていない。これを明らかにするには、原始惑星系円盤に含まれるダストの物理・化学・鉱物学的性質、そしてその来歴や進化の様子を理解することが必要不可欠である。

これまで原始惑星系円盤のダストに由来する放射（熱放射や散乱光）が可視光・赤外線・電波といった様々な波長帯で観測されてきた。しかし、観測結果からダストの性質を抽出するためには、電磁波に刻まれたダストの性質を適切に読み取る方法が必要である。その一つがダストと電磁波の相互作用を記述するダスト光学特性の理論である。我々はこれまで、ダスト光学特性の理論と原始惑星系円盤の様々な波長における観測を組み合わせ、円盤ダストのサイズや内部構造、組成、空間分布に迫る研究を行ってきた。本講演では赤外線観測に関する話題を中心に、近年我々が得た研究成果のハイライトを紹介したい。特に、（１）Very Large Telescope が明らかにした初期ダスト凝集の様子、（２）すばる望遠鏡による揮発性氷探査、（３）Hubble Space Telescope と James Webb Space Telescope による Edge-on 原始惑星系円盤の可視光・近・中間赤外線でのダスト光学特性や空間分布について紹介する。最後に、これらの研究によって浮かび上がった新たな課題や今後の展望を述べる。

熱分解ガスクロマトグラフィー質量分析法を用いた炭素質コンドライトの有機物の直接検出

○癸生川陽子¹, 茂木優斗², 小林憲正^{1,2}

¹東京工業大学, ²横浜国立大学

始原的な小惑星を起源とする隕石である炭素質コンドライトには、低分子から高分子まで多種多様な有機物が含まれている。炭素質コンドライトの分析は、従来は溶媒で抽出可能な比較的 low molecular weight の化合物 (可溶性有機物) と溶媒に溶けない複雑な高分子有機物 (不溶性有機物) に分けて行われることが多い。不溶性有機物は、フッ酸などにより鉱物成分を溶かした残渣として得られる。しかし、不溶性有機物の精製には多くの試料が必要であることや、一部失われる成分があるといった問題がある。熱分解ガスクロマトグラフィー質量分析法 (Py-GC/MS) は、炭素質コンドライト隕石から抽出した不溶性有機物の分析手法の 1 つとして古くから使われてきた。本研究では、Py-GC/MS による有機物の直接検出を目指し、未処理の炭素質コンドライト隕石粉末を用いた分析を行った。様々な炭素質コンドライトの Py-GC/MS 分析を通して、これらに含まれる有機物やその熱的特性を評価し、母天体における変成過程との関係を明らかにすることを目指す。

低温の水質変質を経験した炭素質コンドライトの Murchison 隕石、熱変成を受けた炭素質コンドライトの Allende 隕石、やや特殊な炭素質コンドライトであり太陽系外縁部を起源とする可能性のある Tarda 隕石などについて段階加熱による Py-GC/MS 分析を行った。未処理の隕石には多様な沸点や熱分解温度の成分を含むと考えられ、これらを分離するため、熱分解温度を段階的に変化させる手法 (段階加熱) を用いた。各温度で検出される熱分解生成物は、National Institute of Standards and Technology (NIST) のライブラリを用いて同定した。

未処理の炭素質コンドライトからは様々な有機化合物が検出された。比較的低温での熱分解では脂肪族化合物が多く検出され、高温では芳香族化合物が多く検出された。低温で検出される化合物は比較的 low molecular weight の化合物がそのまま気化したものや高分子化合物の弱い結合部分が切れて気化したものと考えられる。また、中～高温で検出されるものは主に、高分子化合物の結合が熱に弱い部分から切れていったものと考えられる。また、多量の含硫化合物 (有機および無機) が検出された。検出された化合物の種類や量は隕石間で大きな違いがみられた。隕石に含まれる有機物の熱分解生成物と熱分解温度は熱的安定性などを反映しており、母天体における変成の程度や経験温度の指標となることが期待される。また、このような前処理の少ない分析法は、惑星探査等におけるオンサイト質量分析にも有用であることが期待される。

岩石天体の衝突によって生成された蒸気雲内の化学反応計算

○宮脇誠一¹、玄田英典¹

¹東京工業大学 地球生命研究所

生命の起源に関する研究において、生命前駆物質がどのようにして地球で生成されたのか、もしくはどのように供給されたかを解明することは重要である。地球上で生命が誕生したと考えられる時代、すなわち地球誕生から約 38 億年前までの期間において、地球は CO₂ に富む中性的な大気組成を有していた可能性が高い。このような大気組成は、CH₄ や CO に富む還元的な大気組成と比較して、生命前駆物質の合成にとって一般的には不利な条件であったと考えられる。したがって、初期地球においては局所的に還元的な環境が存在していたならば、生命の起源の観点から見て都合が良いかもしれない。そういった局所的に還元的な環境を生み出す過程の一つとして、天体衝突に伴って発生する衝突蒸気雲内の化学反応が注目されている。衝突蒸気雲は高温・高圧の環境を生み出し、これにより様々な化学反応が促進され、かつ非平衡状態が達成しうる。

本研究は、初期地球に対して岩石天体が衝突した際に形成される衝突蒸気雲内の化学反応を解析し、還元的な大気や生命前駆物質が生成されたかどうか明らかにすることを目的としている。衝突蒸気雲は、小天体の地球への高速度衝突 (> 15km/s) によって形成され、高温状態から低温状態へと急速に断熱膨張する過程を経る。この過程において、蒸気雲内の化学組成は高温状態では平衡状態を維持するが、低温になるにつれて化学反応のタイムスケールが膨張の冷却タイムスケールよりも長くなることで、化学組成は非平衡状態に移行して凍結（クエンチ）される（Ishimaru et al., 2010）。このような物理・化学的過程によって、高温・高圧で安定であるような非平衡な化学組成が生じ、惑星表層平均場では生じ得ないような化学種が表層に放出された可能性がある。

本研究では、iSALE 衝突計算コードを使用して、天体衝突時に発生した衝突蒸気雲の温度および圧力の時間変化を計算する。その結果得られたデータを基に、多相平衡計算とガス相の化学反応計算を組み合わせた解析を行う。このアプローチにより、衝突蒸気雲内でどのような化学種が生成されるかを明らかにすることを目指している。特にアミノ酸や核酸塩基などの生命の基本構成要素の生成に焦点を当て、これらの前駆体となる CH₄、NH₃、HCN 等の化学種が衝突蒸気雲内で形成されるかどうかについて議論する予定である。

隕石母天体内部の水質変質模擬実験での糖の生成におけるガンマ線とアンモニアの影響

○安部隼平^{1,2}, 癸生川陽子², 依田功², 小林憲正^{1,2}

¹ 横浜国立大学、² 東京工業大学

RNAの構成要素であるリボースに代表される糖類は生命に必須である。リボースを含む糖類が隕石中から発見されている[1,2]ことから、宇宙空間で生成した糖類が隕石などを介して原始地球に運ばれて生命の材料となった可能性がある。前生物的な糖類の生成反応として塩基性触媒下でアルデヒドから様々な糖類が生成するホルモース反応が注目されている。

宇宙空間での糖類の生成の場として隕石母天体[2]が考えられている。ここにはホルモース反応の原料であるHCHOが含まれていると推測され、²⁶Alなどの放射線核種の崩壊熱で誘発される水質変質[3]に伴ってホルモース型反応が促進された可能性があるからである。また放射性崩壊によって生じるγ線がアミノ酸の生成に関与したことが示唆されている[4]。そこで本研究では、隕石母天体内部を模擬した系にγ線照射を行い、糖類の生成の検証と、加熱実験との比較を行った。またNH₃はホルモース反応による糖類の生成速度を上昇させる[5]が、模擬原始大気中での火花放電による糖類の生成実験において含窒素化合物により糖の生成が阻害されることが示唆されている[6]。そこで本研究では出発物質にアンモニアを加え、その比率を変化させることで含窒素化合物の影響を検証した。

隕石母天体内部の水質変質の模擬として、(1) HCHO : CH₃OH : NH₃ : H₂O = 5:0.83:x:100 (この混合物をFAWと呼称)、(2) HCHO : CH₃OH : NH₃ : Glycolaldehyde : H₂O = 5:0.83:x:1:100 (この混合物をFAGWと呼称)のモル比率で混合した溶液(200 μL)を調整し、加熱(50 °C, 72 h)またはγ線照射(⁶⁰Co線源、@東京工業大学, 1.5 kGy/h×60 h)を行った。ただし、xはいずれも0-5の間で変化させた。この試料をアルドノニトリル酢酸エステル誘導体化[6]の後にガスクロマトグラフィー質量分析法(GC/MS)により分析した。分析対象は3-6炭素のアルドースであり、対照実験として加熱/γ線照射を行わないサンプルを用意し、同様に分析した。

【熱とγ線の比較】FAWでは、加熱よりもγ線照射によってアルドースが多く生成した。一方FAGWでは、加熱とγ線照射の両方で同程度の糖の生成量・種類であった。つまりFAWのγ線照射サンプルでは、ラジカル反応によりグリコールアルデヒドが生成された[7]ために、ホルモース型反応が進行しやすくなり、糖の生成が増加したと考えられる。

【出発物質の影響】FAGWで多量のアルドースが生成したことから、グリコールアルデヒドの存在は糖類の生成に重要であるといえる。NH₃の影響については、NH₃/HCHO = 0.1-0.2程度であるときにアルドースの生成量が最大となり、以降NH₃の量が増加するにつれて生成量は減少傾向となった。これらの結果よりNH₃は反応を触媒すると同時に、アミノ酸の生成[8,9]やメイラード型反応による糖の消費[10]など、糖の生成を阻害または生成した糖を別の物質へ変換する働きがあると推測される。

[1] G. Cooper *et al.*, *Nature*, 2001, **414**, 879-883. [2] Y. Furukawa *et al.*, *PNAS*, 2019, **116**, 24440-24445. [3] A. J. Brearley, *In Meteorites and the Early Solar System II*, 2006, **943**, 584-624. [4] Y. Kebukawa *et al.*, *ACS Cent. Sci.*, 2022, **8**, 1664-1671. [5] A. L. Weber, *Orig. Life Evol. Biosph.*, 2001, **31**, 71-86. [6] 小林 憲正他, *分析化学*, 1989, **38**, 608-612. [7] A. López-Islands *et al.*, *Int. J. Astrobiol.*, 2018, **18**, 420-425. [8] T. Koga *et al.*, *Sci. Rep.*, 2017, **7**, 636. [9] Y. Kebukawa *et al.*, *Sci. Adv.*, 2017, **3**, e1602093. [10] V. Vinogradoff *et al.*, *Icarus*, 2018, **305**, 358-370.

新しいコンドルール形成モデル： 木星形成後のダスト層への高離心率微惑星の高速突入

○荒川創太¹、田中秀和²、牛久保孝行¹、長澤真樹子³、門野敏彦⁴、小林浩⁵

¹海洋研究開発機構、²東北大学、³久留米大学、⁴産業医科大学、⁵名古屋大学

コンドルールはコンドライト隕石の主要な構成要素であり、太陽系における微惑星・惑星形成の理解には、コンドルールの形成および集積プロセスの解明が不可欠である。これまでに多くのコンドルール形成機構が提案されてきたが、コンドルールの存在量、形成時期、物質的特徴といった様々な制約を同時に満たすことは困難であった。特に、従来有力な説とされてきた高離心率微惑星による弧状衝撃波加熱モデル（e.g., Weidenschilling et al. 1998）は、木星形成後に原始太陽系星雲のガス密度が低下する（Tanigawa & Tanaka 2016; Tanaka et al. 2020）ことを考慮すると、コンドルール前駆体のダストを十分に加熱できないことが明らかになりつつある。

そこで、我々は、木星形成後の原始太陽系星雲の進化を考慮した新しいコンドルール形成機構を提案する。木星形成後、原始太陽系星雲の木星軌道より内側の領域はガスが枯渇し、幾何学的に薄いダスト層が形成される。また、木星との平均運動共鳴等によって小惑星帯付近に存在する微惑星の離心率が上昇し、微惑星がダスト円盤へ数 km/s の高速度で突入する状況が実現される（Nagasawa et al. 2019）。微惑星がダスト層へ高速突入することで、微惑星周囲および表面に溶融したケイ酸塩ダストを多量に生成することができる。この溶融ダストがダスト層へと放出され、冷却・固化することでコンドルールが形成される。微惑星によるダスト層の加熱効率を見積もると、数十万年程度の期間でダスト層全体を加熱することができ、これはコンドルール形成年代の幅とも矛盾しない。本講演では、モデルの概要およびコンドルール形成量や熱史の見積もりについて紹介する。

衝突モデルの構築と衝突進化

○ 小林 浩¹

¹ 名古屋大学大学院理学研究科

惑星は衝突をくりかえし形成されるが、衝突に伴い合体だけでなく、破壊も起きる。惑星形成を考える上で、衝突モデルは非常に重要である。本研究では、自己重力が支配的な天体に対する衝突モデルの構築のために、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法による衝突シミュレーションをおこなった。火星質量のターゲットに、衝突体質量 ($1/30$ - 1 火星質量) や衝突角度 ($30, 45, 60$ 度)、衝突速度 (1.1 - 32 倍の脱出速度) をパラメータとして、シミュレーションを行なった。衝突シミュレーションの結果、衝突パラメータに応じて「合体」、「すれ違い (hit-and-run)」、「大規模破壊」が起きることが知られていたが、本研究でも同様の結果が得られた。これらの物理が理解できるように、「最大破片」だけでなく、「2 番目に大きな破片」にも注目してシミュレーション結果の解析を行なった。衝突天体は衝突時に強く相互作用する部分とすれ違うだけで相互作用が小さい部分がある。そのため、衝突天体同士が弾丸軌道でまっすぐに移動する時に重複する部分の質量に注目した。その結果、重複する質量により衝撃波に使われるエネルギー E_s が計算でき、それ以外の残余エネルギー E_r と分けて考えることで、衝突結果を理解できることがわかった。 E_r が重力エネルギー程度より大きくなると、「合体」から「すれ違い」に衝突結果が変化する。また、 E_s と重力エネルギーの比の関数として、破壊の度合いが決められることもわかった。この結果をもとに、衝突結果を解析的に記述する衝突モデルの構築に成功した。この衝突モデルを用いて、衝突進化を考えた場合についても議論する。

巨大衝突によって形成される惑星系の軌道構造 III

○ 小久保英一郎^{1,2}, 星野遥^{1,2}, 松本侑士¹, Re'em Sari³

¹ 国立天文台, ² 東京大学, ³ ヘブライ大学

太陽系の地球型惑星の標準形成モデルでは、形成の最終段階は月から火星程度の質量の原始惑星どうしの衝突、巨大衝突、だと考えられている。また、近年、ケプラー宇宙望遠鏡等によって多数発見されている近接 (短周期) スーパーアース (大型地球型惑星) 形成の主要なモデルでも、最終段階は原始惑星どうしの巨大衝突と考えられている。巨大衝突段階は原始惑星系円盤のガスの散逸後に始まり、原始惑星は重力散乱によって軌道交差を起こし、衝突合体して惑星へと成長していく。

本研究の目的は、原始惑星の重力散乱と衝突合体によって形成される惑星系の軌道構造の基本的なスケーリング則を得ることである。そのため巨大衝突段階の N 体シミュレーションを行う。原始惑星系の初期条件パラメータを系統的に変えて、惑星系の軌道構造のパラメータ依存性を明らかにし、スケーリングを試みる。惑星系の軌道構造パラメータとして、隣接惑星間の平均軌道間隔と惑星の平均軌道離心率に注目する。解析の結果、巨大衝突によって形成される惑星系の軌道間隔と軌道離心率は、惑星の二体表面脱出速度 v_{esc} とケプラー公転速度 v_K の比 $k = v_{\text{esc}}/v_K$ でスケールされることがわかった。惑星系の軌道長半径を a とすると、平均軌道間隔は約 $2.2ka$ 、平均軌道離心率は約 $0.3k$ となり、これらの値は現実的なパラメータ範囲では、原始惑星の全質量、質量分布、軌道間隔、軌道離心率・傾斜角にほぼ依存しない。そして、惑星の質量はこの平均軌道間隔から見積もられる孤立質量となる。このスケーリングは惑星のヒル半径によるスケーリングの拡張になっている。

発表では、原始惑星系から惑星系への軌道進化を示し、上記のスケーリング則の物理を説明する。

拡散する微惑星リングにおける原始惑星の寡占的成長

○ 神原 祐樹^{1,2}, 小久保英一郎^{2,1}

¹ 東京大学 ² 国立天文台

惑星形成の標準シナリオでは、微惑星は円盤全体で形成され、雪線以外では半径方向に滑らかに分布すると仮定している。微惑星の成長過程についても、半径方向に滑らかな分布を仮定し、微惑星の拡散が起こらない範囲で研究がされており、暴走的成長や寡占的成長といった成長過程が知られている。微惑星の拡散が起こらない場合、寡占的成長をする原始惑星は軌道反発により軌道間隔を保ち、その質量は原始惑星の軌道周辺に分布していた微惑星を全て吸収した場合の質量（孤立質量）で見積もられる (Kokubo & Ida 2000)。近年、原始惑星系円盤でのダストの成長シミュレーションから、微惑星は細いリング状の領域でのみ形成される可能性が指摘されている (Morbidelli et al. 2022, Izidoro et al. 2022)。また、原始惑星を細いリング状に配置すると太陽系の性質を良く再現するというシミュレーション結果 (Hansen 2009) や、原始惑星系円盤におけるリング状の構造の観測など、惑星形成過程におけるリング状の構造の存在を支持する結果も数多く存在する。微惑星がリング状に分布する場合は微惑星が拡散するため、拡散が起こらないなめらかな分布の場合とは成長過程が異なると考えられるが、リング状に分布した微惑星の進化は詳細には調べられていない。

本研究では、微惑星リングにおける微惑星の進化を N 体シミュレーションによって調べ、微惑星リングでの微惑星の成長過程、および形成する原始惑星の物理的性質を解明する。初期のリング幅、微惑星の総質量を変化させ、初期条件依存性を調べる。シミュレーションの結果、リングの幅が徐々に拡大しながら原始惑星が寡占的成長する様子が見られた (図 1)。原始惑星が軌道反発により軌道間隔を保つことも確認され、軌道間隔は拡散後の面密度を寡占的成長モデルに代入して得られた予測値とよく一致することから、軌道反発による軌道間隔の保持は微惑星がリング状に分布している場合も起こることがわかる。一方、原始惑星は初期のリング幅 (0.2 au) よりはるかに広い範囲 (~ 1 au) に分布する。原始惑星の質量は拡散後の局所的な面密度を用いて計算した孤立質量とよく一致し、リングの中心に近いほど大きく、リングの中心から遠ざかるほど小さい。これは初期の質量分布とは大きく異なり、微惑星の拡散による質量分布の変化が重要であることが示唆される。初期のリング幅や微惑星の総質量を変えた場合も、リングが拡大しながら原始惑星が寡占成長するという枠組みは変化しなかった。微惑星の総質量を固定すると、初期のリング幅が狭いほどリング幅が速く拡大し、最終的には初期のリング幅に依らずリング幅が似た値を取った。さらに、原始惑星の質量分布も初期幅への依存性は低い。初期のリング幅を固定した場合、大質量のリングほど速く拡大し、形成される原始惑星の質量も大きくなる。発表では、成長過程の物理的な解釈についても詳しく議論する。

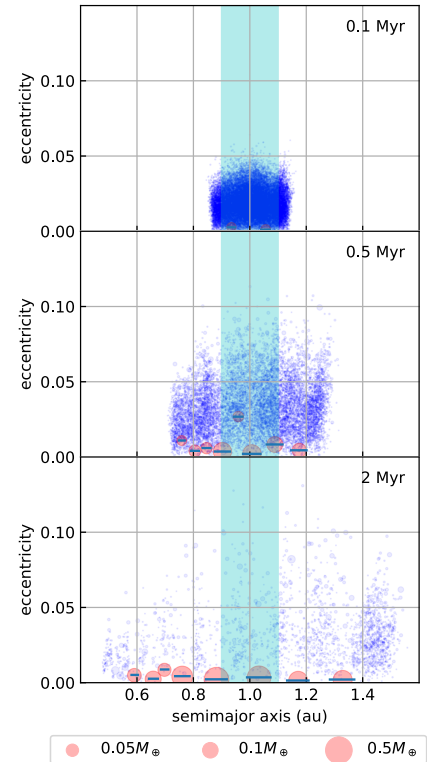


図 1: 各時刻での微惑星の軌道長半径と離心率。青い点が微惑星、赤い円が原始惑星を表しており、円の半径比は惑星の半径比に対応する。原始惑星に描かれた横線はヒル半径の 10 倍の長さである。背景が水色の部分は初期に微惑星が分布していた領域である。

近赤外マルチバンド視線速度観測による若い系外惑星の質量推定

○平野 照幸^{1,2}, 葛原 昌幸^{1,2}, 田村 元秀^{3,1,2}, 小谷 隆行^{1,2}, 大宮 正士^{1,2},
原川 紘季², 宮川 浩平⁴

¹ アストロバイオロジーセンター, ² 国立天文台, ³ 東京大学, ⁴ 宇宙科学研究所

誕生して間もない若い系外惑星（年齢がおよそ1億年程度以下）は惑星形成時の原始的な情報を保持していると考えられており、その物理的性質や軌道・大気等の特徴を調べることで惑星の形成・進化に関する理論シナリオをより直接的に検証することが可能である。特に惑星の最も基本的な物理量である質量や半径は、惑星の内部組成の推定において不可欠であり、それらを誕生直後の若い惑星で調査することで惑星の形成環境、ガス大気の獲得プロセス、形成後の大気散逸等を知る手がかりが得られる。一方、年齢が若い恒星は一般に表面活動度が高く、時間的に変化する黒点等の影響で見かけ上の視線速度変化（「RV ジッター」と呼ばれる）が生じる。そのため、視線速度法によって特に若い恒星の周りで惑星を発見、特徴付けるのは一般に困難とされてきた。

本研究では、究極的に RV ジッターと惑星運動による恒星の視線速度変動を分離することを目的として、視線速度の波長依存性を調査した。黒点・白斑等の表面活動領域では光球に対する連続光コントラストが波長に依存し、一般に長波長側ほどコントラストが改善することから RV ジッターも近赤外線などの長波長領域で軽減すると考えられてきた。ただし、RV ジッターは厳密には活動領域のスペクトルの吸収線の形状に依存し、磁場（ゼーマン効果）や対流の影響も強く受けることが指摘されており (Reiners et al. 2013, A&A, 552, A103), その正確な波長依存性はこれまであまり調査されていなかった。そこで本研究では、RV ジッターを記述する理論モデルを整備し、光球および活動領域のスペクトルを精密にモデル化しつつ、恒星自転や乱流・磁場の影響を取り入れた新しい RV ジッターの計算式を解析的に導出した。その結果、我々は RV ジッターの大きさが活動領域のスペクトルの連続光コントラストのみならず、吸収線の深さの変化に敏感であることを明らかにした。

さらに我々は、RV ジッターの理論モデルを実際の観測と比較するため、いくつかの若い（活動度の高い）恒星をすばる望遠鏡・近赤外分光器 IRD を用いて観測し、それらの恒星の視線速度変化の波長依存性を精査した。その結果、特に K2-33 と呼ばれる年齢 1000 万年程度の若い M 型星では、波長域ごとの RV ジッターの大きさの違いが顕著に観測され（図 1）、理論計算から予想されるように RV ジッターは波長の短い Y, J バンドよりも、波長の長い H バンドの方がより顕著であった。さ

らにその変動の振幅比は、恒星表面の活動領域がそれ以外の光球面よりも 200 K 程度低温度であると仮定した場合の理論計算による予測とほぼコンシステントであった。この結果を用いて我々は、RV ジッターが極小となる YJ バンドの波長域の視線速度変化をモデル化することで、K2-33 を周期約 5.4 日で公転するトランジット惑星の質量に対しても新たな制限を加えた ($M_p < 12M_{\oplus}$)。

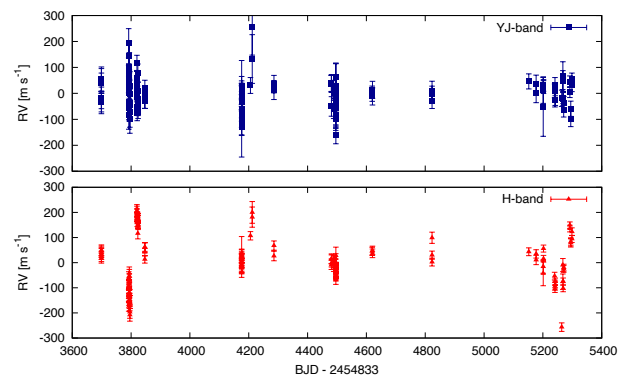


図 1: IRD による K2-33 の視線速度。

Low densities, eccentricities, and entropies in the young, compact multi-planet system V1298 Tau

○John Livingston^{1,2}, Erik Petigura³, Trevor David⁴,
Jerome de Leon⁵, Akihiko Fukui⁵, Norio Narita⁵,
Yasunori Hori^{1,2}, Eiichiro Kokubo², Motohide Tamura^{5,1}

¹ABC, ²NAOJ, ³UCLA, ⁴Flatiron, ⁵UTokyo

Close-in planetary systems are ubiquitous in the Galaxy, with constituent planet sizes that rarely exceed four times the size of Earth. The discovery of four large (5-10 $R_{\oplus}$) planets transiting the young (20-30 Myr) solar-type star V1298 Tau hinted that close-in, gaseous planets start off larger and with lower densities than the typical systems observed at mature stages. This interpretation is supported by planet formation models which predict larger sizes and lower densities for planets at young ages. Here we report the results of a campaign to measure planet masses in the V1298 Tau system through transit-timing variations. We measure low eccentricities of $\lesssim 1\%$ and masses in the range of 4-20 $M_{\oplus}$, corresponding to densities of 0.1-0.3 g cm^{-3} . These low planetary densities are compatible with the substantial contraction and/or loss of H/He envelopes over timescales of at least tens of millions of years, and suggest the occurrence of rapid mass-loss during disk dispersal and a corresponding decrease in entropy known as “boil-off”. We discuss the system’s implications for formation theories, its atmospheric and dynamical evolution, and ongoing observing campaigns with *JWST*.

惑星-惑星散乱のもととなる近接惑星系の形成

○長澤真樹子¹, 田中秀和²

¹ 久留米大学, ² 東北大学

ホットジュピターの起源として考えられている木星型惑星の惑星-惑星散乱は、複数の木星型惑星が軌道不安定になることを基本とする現象であり、そのためにはこれら木星型惑星が数ヒル間隔以内に並んで形成される条件が必要と考えられている。しかしどのようにすれば木星型惑星が近接して形成できるのかについてはあまり議論がなされてきていない。今回、木星型惑星コアが複数個形成され、コアがガス捕獲を開始し順次成長していくことが、近接した木星系を導けるのかどうか、数値計算から調べることにした。

まず最初の段階として、寡占成長の最終段階を想定し、5つの木星型惑星のコアを10ヒル間隔から20ヒル間隔の間で並べ、一番内側の惑星がガス捕獲を開始したとして質量を木星型惑星へと成長させた。そして残りのコアが近い距離に安定に残って成長を始められる条件となるかどうかを軌道計算した。

計算の結果、初期の軌道間隔が16ヒル間隔以上の場合、ほとんどの場合、外側の惑星コアとの軌道反発が緩やかに進行し、内側のコアが成長しても、互いの距離の調整が行われ、系は不安定にならないことが判明した。このようなケースでは、次の惑星コアが成長してガス捕獲を開始しても、同じような調整がはたらき、最終的には離れた木星系となってしまう、惑星惑星散乱を起こすような系にはなれないと推測される。

初期の軌道間隔が14ヒル間隔以下の場合、内側の惑星の成長に伴って、激しい不安定が生じ、残りのコアはほぼ系外に失われてしまう結果となった。残ったコア同士の平均の軌道間隔も20ヒル間隔を超えてしまっており、この場合も近接木星型惑星系は作られない。

求めるような複数の惑星が近接して成長できそうな場合は、一番内側の惑星の場所にもよるが、典型的には、初期の軌道間隔が15ヒル間隔の付近のごく狭い領域にとなっていた。初めの原始惑星間隔が15ヒル間隔の場合、4つ以上の原始惑星が10ヒル程度で残るケースが50%程度見られるようになる。この状況であれば、原始惑星が続けて木星が成長して近接した木星型惑星の系を作れる可能性がある。外側のコア同士が衝突してガス捕獲ができる質量となり、速やかに複数の木星型惑星が近接して形成されるような条件を生むケースはほぼ見られなかった。いずれの軌道間隔であっても衝突が起きるのはガス捕獲をして質量が大きくなっている途中の惑星とコアとであり、コア同士が衝突して系内に残るのは極めてまれである。次段階としては、15ヒル間隔の場合で実際に次の惑星を成長させて安定性を調べることに、またガス円盤からの抵抗の効果を入れ安定性を増した上での同様の計算をおこなうことが考えられる。

原始太陽系円盤におけるケイ酸塩ダストおよび円盤ガスの 酸素同位体組成進化シミュレーション

○石崎梨理¹、橘省吾¹、岡本珠実²、山本大貴³、井田茂²

¹ 東京大学地球惑星科学専攻、² 東京工業大学地球生命研究所、³ 九州大学地球惑星科学部門

背景・目的: 地球などの太陽系天体は、太陽に比べ ^{16}O に乏しい酸素同位体組成を持つことが知られている (e.g., [1])。これは原始太陽系円盤において、太陽組成と同じ酸素同位体組成を持つ材料ケイ酸塩ダストが、主に ^{16}O に乏しい H_2O ガスと酸素同位体交換をおこなった結果だと解釈されてきた [2]。ダストの酸素同位体組成進化に関して、非晶質ケイ酸塩と H_2O または CO 間の酸素同位体交換速度論は室内実験から定量的に決定されてきたが ([3-5])、ダストのダイナミクスを考慮した理論研究はほとんどおこなわれていない。そこで筆者らは、定常降着円盤内を運動する非晶質ケイ酸塩ダストと $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{CO}$ ガス間の酸素同位体交換の進行を調べ、いずれも限られた温度帯で反応が急速に進行することを示した [5,6]。また ^{16}O に富んだ CO ガスとの酸素同位体交換が原始惑星系円盤において効果的に起こることから、現在の太陽系天体の組成を達成するためには、 CO ガスに対して H_2O ガスが濃集された環境が必要であることが示された [5]。本研究では、これらの研究で考慮されていなかったダストとの同位体交換に伴う $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{CO}$ ガスの同位体組成変化を考慮した上で、定常降着円盤内を運動するダストが経験する酸素同位体交換反応の進行を計算し、現在の同位体組成を説明する円盤条件を調べることを目的とした。

手法: 粘性加熱および中心星照射加熱を熱源とする定常降着円盤内を移流・拡散するケイ酸塩ダストや H_2O 超粒子の軌跡を追跡する 3D モンテカルロシミュレーションをおこなった [6-9]。 H_2O はスノーライン内側では水蒸気、外側では固体氷として運動する (移流が卓越)。ケイ酸塩ダストはスノーライン内側ではガスによく馴染んで運動し、外側ではある確率で氷ペブルに付着する [9]。軌跡から各粒子の温度履歴・位置関係等を取得し、室内実験 [3, 5] から決定された反応速度を用いて、各粒子の酸素同位体組成進化をシミュレーションした。非晶質ケイ酸塩、 H_2O の初期酸素同位体組成は、それぞれ太陽 ($\delta^{17}\text{O} = -60\text{‰}$ [1])、宇宙シンプレクタイト ($\delta^{17}\text{O} = 180\text{‰}$; 原始太陽系円盤 H_2O ガスの酸素同位体組成を反映していると考えられる [10]) の組成で与えた。非晶質ケイ酸塩ダストは結晶化の反応速度論 [11] に基づいて決定された「結晶化ライン」で結晶化するものとし、これにより酸素同位体交換が著しく阻害され、結晶化時点で同位体組成が固定される効果も考慮した [6]。

結果・議論: 本モデルで得られた円盤内側領域のダスト・ H_2O の酸素同位体組成 ($\delta^{17}\text{O} \sim 105\text{‰}$) は、ダストのダイナミクスを考慮していない酸素同位体組成進化シナリオ [2] で期待される値 ($\delta^{17}\text{O} \sim 130\text{‰}$) に比べ ^{16}O に富み、ダストが現在の酸素同位体組成を達成するには H_2O 濃集が不十分である可能性が示唆された。原始太陽系円盤で起こる酸素同位体交換を包括的に理解し、現在の太陽系の組成を再現し得る円盤条件を定量的に理解するには、ダスト・ H_2O ガスに加え CO ガスの存在を導入したモデルで検証する必要がある。

本講演では、 CO ガスの存在も考慮した酸素同位体進化の結果も紹介する。筆者らの先行研究 [5] で得られている反応速度を用いて、ダストとの酸素同位体交換反応モデリングをおこなう。 $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{CO}$ 双方の存在下で、ダストが現在の太陽系天体の酸素同位体組成を達成する条件および存在領域を調べ、議論する。

参考文献: [1] McKeegan et al. 2011, *Science*, 332, 1528. [2] Yurimoto, H., & Kuramoto, K. 2004, *Science*, 305, 1763. [3] Yamamoto, D. et al. 2018, *ApJ*, 865, 98. [4] Yamamoto, D. et al. 2020, *Meteorit. Planet. Science*, 55, 1281. [5] Yamamoto, D., Ishizaki, L. et al. 2024, *GCA*, 374, 93. [6] Ishizaki, L. et al. 2023, *ApJ*, 957, 47. [7] Ciesla, F. J. 2010, *ApJ*, 723, 514. [8] Ciesla, F. J. 2011, *ApJ*, 740, 9. [9] Okamoto, T., & Ida, S. 2022, *ApJ*, 928, 171. [10] Sakamoto, N. et al. 2007, *Science*, 317, 231. [11] Yamamoto, D., & Tachibana, S. 2018, *ACS Earth Space Chem.*, 2, 778.

原始惑星系円盤でのガス凝縮に伴う 圧力バンプの形成

○伊藤蔵人¹ 城野信一¹

¹ 名古屋大学大学院 地球環境科学専攻 地球惑星物理学講座

原始惑星系円盤下での惑星形成はダスト落下問題や衝突破壊問題といった障壁がある。問題解決の1つが圧力バンプ形成である。円盤のガスは乱流で中心星に降着する。圧力バンプはこのガス乱流の偏在が生み出す可能性がある。しかし、定常乱流強度分布を求めた Delage (2022) の 1+1D モデル計算では、Dead zone 外縁の乱流の局所性でのガスの圧力バンプが形成されなかった。

乱流は磁気回転不安定性が原因とされており、これは電離度に依存する。電離度はダスト表面に電離した電子やイオンが吸着されることで減少するため、ダスト表面積量に依存する。また、Sirono (2024) は円盤の高さ方向の温度差がスノーラインを生み出し、スノーライン近傍でのガス乱流で氷が再凝縮を生じ、ダストの表面積が増加する可能性を示した。

本研究は Delage (2022) モデル計算に Sirono (2024) のダスト表面積増加を導入し、圧力バンプが出来るかどうかを検証した。

計算の結果、 H_2O ガスの再凝縮によるダスト表面積増加は電離度を下げ、乱流が減少することで圧力バンプを形成した。また、高さやダストのサイズによっては H_2O ガスだけでなく、 NH_3 ガスや H_2S ガスによる表面積増加で複数の圧力バンプを形成することを明らかにした。

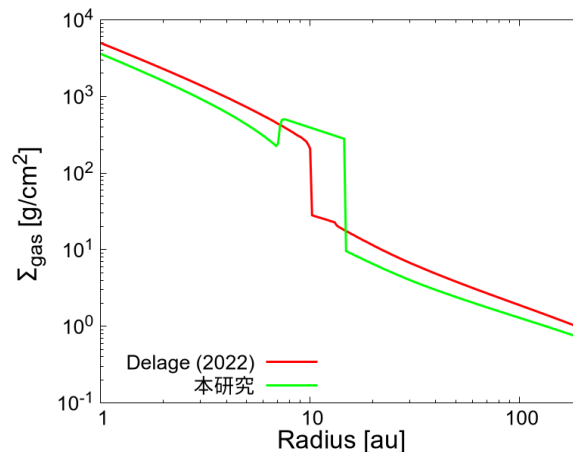


図1 ガス面密度分布 赤線は Delage (2022) の結果、
緑線は本研究結果 (スノーラインの高さ 5 ガススケールハイト、ダストサイズ $100 \mu\text{m}$)

衝突シミュレーションで探る ダストアグリゲイトの跳ね返り障壁

○大城榛音¹, 辰馬未沙子², 奥住聡¹, 田中秀和³

¹ 東京工業大学, ² 理化学研究所, ³ 東北大学

原始惑星系円盤における微惑星形成は、ダストアグリゲイトの合体成長から始まる。円盤のミリ波偏光観測から、充填率が0.1を超える高密度なダストアグリゲイトの存在が示唆されている(e.g., Tazaki et al. 2019)。このような高密度なアグリゲイト同士が衝突すると、付着や破壊だけではなく、跳ね返りが起こることが知られている。跳ね返りは原始惑星系円盤における固体成長に影響を与えうる(e.g., Windmark et al. 2012)ものの、その条件については未だ議論の中にある。

ダストアグリゲイトの跳ね返りについては室内実験及び数値シミュレーションの両方から研究されているが、得られた跳ね返り条件は異なっている。室内実験では、大きなアグリゲイトほど低速で跳ね返ることが示されている(e.g., Guttler et al. 2010; Kothe et al. 2013)。特に Kothe et al. (2013) は、アグリゲイト質量が衝突速度の $-4/3$ 乗に比例するという跳ね返り条件を得た。一方、数値シミュレーションでは、粒子数を増やした欠陥最密充填球(CPE球)の衝突シミュレーションを行い、跳ね返り条件の質量依存性が確認されたものの、明らかな衝突速度依存性は確認されなかった(Arakawa et al. 2023)。しかし、CPE球は現実のダストアグリゲイトの構造を模擬しているとは限らない。実際、CPE球は最密充填球の構造を反映し、接触点数の高い領域に至るところに持つ。

そこで我々は、圧縮したアグリゲイトによる衝突シミュレーションを行い、跳ね返り条件の速度依存性を検証した。円盤におけるダスト成長を想定し、空隙率の高いアグリゲイト(BCCA)を等方圧縮(Tatsuuma et al. 2023)した圧縮BCCAを用いた。アグリゲイトの構成粒子は $0.1\ \mu\text{m}$ の氷球で表面力を持った弾性球として扱い、構成粒子に対する運動方程式を解いた(Wada et al. 2007)。アグリゲイトの充填率、アグリゲイト質量、衝突速度をパラメータとし、成長効率を求めた。

その結果、跳ね返りが起こる最小の衝突速度は、アグリゲイトの質量に依存することがわかった。この依存性は衝突速度が $10\ \text{m s}^{-1}$ 以下の範囲で、室内実験(Kothe et al. 2013)と整合的であった(図1)。また、衝突速度を固定したときの跳ね返りに必要なアグリゲイト質量は、充填率に強く依存していた。具体的には、充填率の変化0.05に対して質量は1桁程度変化していた。我々は、この強い充填率依存性は高密度アグリゲイトの圧縮強度(Tatsuuma et al. 2023)に由来するものであると考えている。

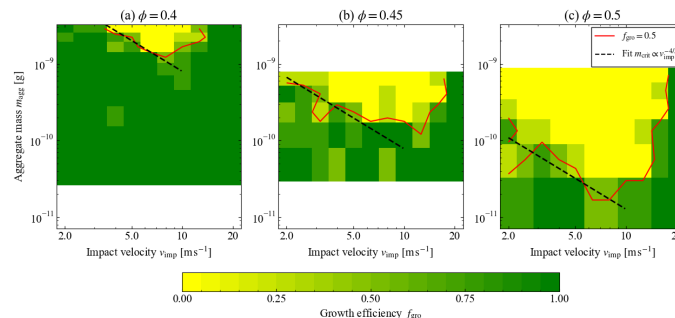


図 1: 成長効率 f_{gro} の衝突速度 v_{imp} 、アグリゲイト質量 m_{agg} 、充填率 ϕ 依存性。赤線は付着と跳ね返りの境界である $f_{\text{gro}} = 0.5$ の等高線を、破線は等高線に対する $-4/3$ 乗のフィッティングを表す。

Central Star and Nearby Massive Star Influence on UV Synthesis of Organics in Protoplanetary Disks

○Ivan Judah Manoraj¹, Satoshi Okuzumi¹, Kazuaki Homma¹

¹Tokyo Institute of Technology

The process through which planets form remains an important question in the field of planetary science. Planets are thought to form in protoplanetary disks, disks of gas and dust surrounding young stars, from micron-sized dust grains that eventually grow into full-sized planets. Dust grains within protoplanetary disks are subject to dynamical processes such as turbulence and vertical settling, which leads to collisions with other dust particles. Outside the snow line, dust grains are often mantled by an ice layer that can contain simple starting molecules. If grains are exposed to UV radiation, radicals are formed within the ice mantle, and once the grains drift inward (inside the snow line), the warming and sublimation of ices can trigger organic synthesis on the grains (Ciesla & Sandford, 2012). The beginning stages of planet formation, where micron- and sub-micron-sized dust grains grow into larger aggregates, is still inefficient in the outer parts of the disk where the grains are not sticky.

Grains must be exposed to UV radiation for radicals to form in the ice mantle, a condition naturally realized in most protoplanetary disks. Experimental studies irradiating C-, H-, O-, and N-bearing astrophysical ice analogs in the laboratory have found a host of complex organic molecules to be produced after the sublimation of the ice, with the most important factor being the photon dosage. However, most studies have only considered the contribution from the interstellar medium (ISM) as the sole radiation source.

Two other sources, irradiation from the central star of a disk, and nearby massive stars, play an important role in facilitating organic synthesis. As the average disk is also irradiated by these two additional sources, previous works neglecting to account for them have underestimated the amount of organic matter that can be produced in the disk. We perform a vertical dust size evolution simulation, including the effects of fragmentation, and calculate the abundance of radicals inside icy grains produced by UV irradiation. Additionally, the radiation from the central star can be categorized into two types: FUV continuum photons, and Lyman-alpha photons, each characterized by different transport mechanisms in the disk.

We find that, due to the enhancement in flux via the additional radiation sources, radicals are formed both at a higher quantity, and at a faster rate than in the case where radiation from the ISM is the only source. While previous work suggested that it takes upwards of 1 Myr for dust grains to have enough radicals in their mantles to form sufficient organic matter once within the snow line to overcome the fragmentation barrier, we find that this time requirement can be reduced once irradiation via the central star and nearby massive stars are accounted for. Additionally, we find that the Lyman-alpha emission of the central star plays a significant role in forming radicals in the disk due to its scattering by the atomic hydrogen layer on the disk surface. The characteristic transport mechanism of Lyman-alpha in the disk allows the photons to penetrate deeper into the disk interior.

Our results suggest that as grains drift inward (inside the snowline), the burst of organic synthesis triggered by the warming of the irradiated ices can lead to rapid growth in the inner disk, possibly quicker and more efficiently than previously thought.

小惑星の多成分揮発性物質による氷ペブル集積モデルの検証

Testing icy pebble accretion model with multiple volatile species on Large main-belt asteroid

○Jinfei Yu¹, Hiroyuki Kurokawa¹, Tetsuo Taki¹

¹The University of Tokyo

Volatile elements are crucial ingredients for formation and evolution of habitable planets like Earth. Some theories suggest these volatiles are delivered by small bodies implanted from the outer part of the protoplanetary disk due to giant planet instability (Raymond and Izidoro 2017). Others propose that the inward migration of snowlines in the disk could also allow rocky embryos to acquire volatile components through the pebble accretion process (Sato et al., 2016).

In this study, we evaluate the latter hypothesis via theoretically quantifying the amounts of volatiles delivered to bodies in the asteroid belt through multi-volatile (H_2O , NH_3 and CO_2) icy pebble accretion. In contrast to planets, these asteroids preserve a primordial record of volatile migration and accretion processes occurred in the early solar system (Nara 2019; Broadley et al., 2022). Notably, numerous large asteroids (diameter >120 km) in the outer main-belt, including the dwarf planet Ceres (De Sanctis et al., 2015), share a similar spectral feature with $3.1 \mu\text{m}$ absorption which suggests the presence of ammonium-bearing minerals on their surfaces (Kurokawa et al., 2021; Rivkin et al., 2022).

By using a simplified disk model to describe radially-inward drift of icy pebbles and employing an analytic expression to calculate the pebble accretion rate (Visser & Ormel 2016), we tested a scenario where those volatile-bearing large asteroids formed in situ and accreted icy pebbles which originated from the outer solar system. We investigated the effects of dust size (parameterized with the dimensionless stopping time, called the Stokes number, St), pebble radial flux and disk turbulence strength on the final icy layer thickness of asteroids with different orbital distances and sizes (radius, R).

We first constrained the parameter space using conditions applicable to Ceres's formation by rocky embryo, with a moderate pebble radial flux ($\sim 15 M_{\text{Earth}}/\text{Myr}$) and a turbulence strength ($\alpha \sim 10^{-3}$). Under constrain allow Ceres's formation, we examined the efficiency of pebble accretion in delivering volatiles to large asteroids ($R > 60$ km). We found that only with a small Stokes number ($\text{St} \sim 0.5 \times 10^{-4}$) permits planetesimals ($R \sim 60\text{--}100$ km) to acquire an icy layer a few kilometer-thick that covers the surface which align with observational constraints on thicknesses of volatile-rich material layers on asteroids. Further accretion to form enough NH_3 and CO_2 -rich icy layer on those planetesimals require a very small value of St ($\lesssim 10^{-5}$). However, during the disk evolution, pebbles beyond the snowline are believed to have larger size than silicate particles on the inner side, characterized by a higher St ($\gtrsim 10^{-2}$, Birnstiel et al., 2024; Yap et al., 2024). We also found that the pebble accretion rate of smaller planetesimals (e.g., $R \sim 80$ km) is sensitive to the initial density; only high density ($\sim 3 \text{ g/cm}^3$) allowed them to sufficiently accrete icy pebbles, which is inconsistent with the observed low densities of most similarly-sized asteroids that exhibit $3 \mu\text{m}$ band hydrated feature (Usui et al., 2018; Kretlow et al., 2020, Rivkin et al., 2022).

In conclusion, our results suggest that icy pebble accretion is not a major contributor of formation of large main belt volatile-rich asteroids.

ストリーミング不安定性でつくられるダスト集積領域でのダスト衝突速度

○和田 航汰¹ 富永 遼佑² 田中 秀和¹¹東北大学 ²東京工業大学

惑星形成の標準的理論では、km サイズの微惑星の形成過程については不明な点が多く未解決問題として残されている (Weidenschilling & Cuzzi 1993)。微惑星形成問題の解決策としては、ストリーミング不安定性が有力である (Johansen & Youdin 2007)。ストリーミング不安定性は、ダストとガスの 2 流体で生じる不安定性で、その不安定性で密なダスト塊がつくられ、重力不安定性を起こすと期待される。しかし、ストリーミング不安定性による説にも問題がある。重力不安定性を起こす高密度ダスト塊の形成を通常のダストガス比で実現するには、ダストが数 cm 以上に成長する必要があり、そこまでダストが成長できるのか問題視されている。また、ストリーミング不安定性による高密度ダスト塊の形成には一定時間が必要であり、特にダストが小さい場合には長時間を要する (Li & Youdin 2021)。このため、自己重力的には安定な中程度の密度のダスト塊内でのダスト成長が注目されている (Tominaga & Tanaka 2023; Ho et al. 2024)。

本研究では、ダスト成長において重要であるダストの衝突速度や衝突頻度を、ストリーミング不安定性の数値流体計算を多数行うことで詳細に調べた。図 1 左は、高密度領域を主につくるストークス数 0.3 のサイズのダストの平均衝突速度と密度の関係を、各計算に対し示している。例えば R30Z3 の計算は、ダストサイズがストークス数が 10^{-3} から 1 までの分布をもち、ダストガス面密度比が 0.03 である計算である。この図から、ダスト密度がガスの 10 倍以上の領域ではダストの衝突速度は破壊を起こす速度 ($\sim 5\text{m/s}$) よりも十分小さく、密度に対しべき関数で減少することがわかる。図 1 右には、衝突頻度から求まる各密度領域のダスト成長率の寄与を示した。各数値計算において、ダスト成長時間は 0.3-10 ケプラー周期と短く、ダストは主に高密度領域で落下時間よりも短時間で成長することがわかった。今後はさらに広いパラメータ範囲で同様の計算を行い、衝突速度や成長率の経験式を導出することを目指す。

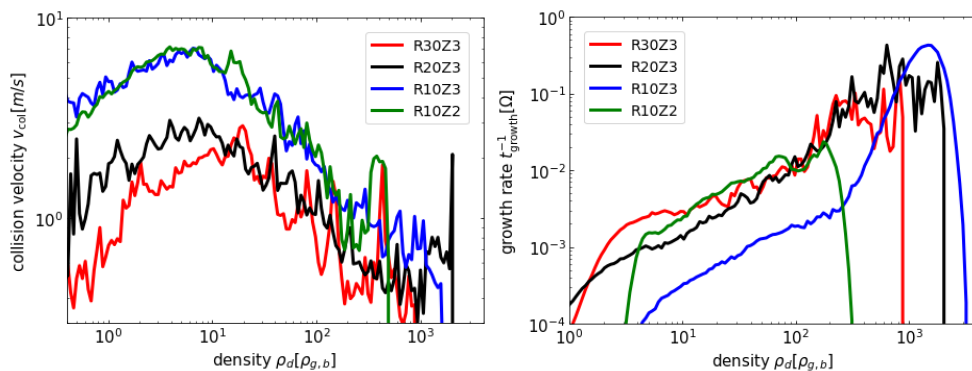


図 1: (左) ストリーミング不安定性の各計算における $\text{St}=0.3$ のダストの平均衝突速度と密度の関係。(右) 各密度での $\text{St}=0.3$ のダスト成長率 (t_{growth}^{-1})。

ダスト・円盤温度共進化が駆動する 自発的ダスト濃集と微惑星形成

○加藤遼¹, 植田高啓², 奥住聡¹

¹東京工業大学, ²Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

微惑星形成過程の解明は、それに続く惑星形成を考えるうえで重要である。微惑星形成の困難として、ダストが微惑星へ成長する段階で中心方向に急速に落下してしまう問題が知られている(e.g., Whipple 1972)。この問題の解決策として、円盤ガス圧力の動径分布の極大点におけるダスト濃集シナリオが提案されている。従来、圧力極大の主要な要因として、惑星が作るギャップや乱流強度の変化に伴うガス面密度極大が注目されてきた。しかし、圧力構造は温度構造にも依存する。さらに、円盤温度構造そのものは、ダスト分布に依存する。特に、地球型惑星が形成されるような円盤内側領域では、円盤の加熱効率がダスト面密度やサイズに依存する。これは、円盤内側領域ではガスの降着に伴い円盤赤道面が加熱されると予想され、この熱の輸送効率がダストの面密度やサイズに依存するためである。本研究では、このような効果をダストの保温効果と呼ぶ。

我々の最近の研究により、ダストの保温効果を考慮することで、いったん生じた圧力極大が維持され、ダスト濃集が自己促進しうることが示唆された(加藤ほか: 2023年秋季講演会口頭発表)。しかし、この研究では、ガス乱流強度の動径方向の変化に伴うガス面密度極大を考慮しており、ダストの保温効果とガス面密度極大のどちらがダスト濃集を駆動しているのかが不明であった。

本研究の目的は、特別なガス面密度構造を仮定せずとも、ダストの保温効果のみでダスト濃集が促進されうのかなかを明らかにすることである。そのために、地球型惑星形成領域に注目し、これまでは考慮されてこなかったダスト・円盤温度共進化の系統的な数値シミュレーションを初めて実施した。ダストの初期空間分布に摂動を与え、円盤乱流強度とダストの臨界破壊速度をパラメータとし、ダストの空間分布・サイズと円盤温度構造の共進化数値シミュレーションを行った。これにより、初期のダスト摂動が温度構造および圧力構造に影響を及ぼし、ダスト濃集が自発的に起こるのかについて調べた。

計算の結果、条件によっては、ガス面密度極大がなくとも、ダストの保温効果によって熱的に維持される圧力極大が生じ、ダスト濃集が自発的に起こることがわかった。ダスト面密度が高い領域では、その他の領域に比べて冷却効率が低下し、温度が上がる。これにより温度極大が生じ、圧力極大が熱的に形成され、ダストが濃集する。その場合、赤道面のダスト対ガスの質量密度比が1を超え、重力不安定によって微惑星が形成されうる領域(e.g., Sekiya 1998; Youdin & Shu 2002)が生じる。この結果は、ガス面密度極大を生じる特別な円盤条件がなくとも、ダストの保温効果によってダスト濃集および微惑星形成が自発的に起こりうることを示している。本発表では、これらの結果を紹介するとともに、我々のダスト・温度共進化計算によって得られる岩石微惑星および地球型惑星の形成・進化に対する示唆についても議論する。

ダスト間の衝突結果にダストの物性が与える影響

○長谷川幸彦¹、田中秀和¹、鈴木建²、小林浩³、和田浩二⁴

¹ 東北大学、² 東京大学、³ 名古屋大学、⁴ 千葉工業大学

惑星形成の初期段階であるダストの成長はダスト同士の衝突付着の過程である。ダスト間の衝突速度はダスト成長とともに速くなるが、ダストを大きく破壊するほど速くなれば成長は止まってしまうだろう。成長するか破壊するかを分ける臨界衝突速度はダストの物性に依存すると考えられる。しかしながら、この衝突破壊の臨界速度（以下、破壊速度）を調査した数値計算の先行研究では、計算コストのため主に水氷の場合について計算が行われてきた。そのためシリケートダストに対しては破壊速度は付着エネルギーの $1/2$ 乗に比例すると仮定し推定することがよく行われていた^[1]。

本研究では、水氷ダストとシリケートダストの二つの場合について実際に衝突破壊の数値計算を行い、破壊速度の付着エネルギー依存性を調査した。数値計算は、先行研究で用いられているN体計算コードを用いて行った。計算パラメータは物性、衝突する二体の質量比、衝突速度の三つであり、破壊速度のこれらに対する依存性を調べた。また、破片の質量分布についても水氷とシリケートとで比較した。

破壊速度は、水氷ダストの場合質量比3程度の衝突で最小値を持つことが我々の従来研究から分かっている^[2]。これは、大きい標的から小さい衝突体への質量輸送が衝突の際に起こるためである。一方、シリケート製ダストの場合、そのような質量輸送はみられず、質量比によって破壊速度はあまり変化しないことが本研究の数値計算より明らかになった。また、等質量衝突における破壊速度についても、付着エネルギーの $1/2$ 乗のスケーリングからファクター2ほどずれることが分かった。これらの結果から、ダストの衝突破壊の様子は、ダストの付着エネルギーや弾性定数などの物性値が変わることで定性的に異なっており、付着エネルギーによる単純なスケーリング則は正確でないことが示された。

破片の質量分布については、水氷とシリケートとで付着エネルギーの $1/2$ 乗でスケーリングされた衝突速度と質量比が同じ場合で比較すると、シリケートダストの方が水氷ダストよりも、最大破片は大きくなり、第2破片やさらに小さなべき質量分布をもつ破片の割合は小さくなった。一方でモノマーサイズ程度の破片の割合はシリケートダストの場合で大きくなることが示唆された。

参考文献：

[1] Wada, K., Tanaka, H., Okuzumi, S., Kobayashi, H., et al. 2013, A&A, 559, A62

[2] Hasegawa, Y., Suzuki, T. K., Tanaka, H., Kobayashi, H., & Wada, K. 2021, ApJ, 915, 22

原始惑星系円盤の降着に対する 巨大惑星による抑制効果

○ 鈴木 慧次¹, 田中 秀和¹

¹ 東北大学

惑星は、主系列以前の恒星の周囲に存在する原始惑星系円盤と呼ばれるガスとダストからなる降着円盤の中で形成されたと考えられている。Manara et al.(2019) は、原始惑星系円盤の中心星への降着率に対する巨大惑星形成が与える影響を調べた。巨大惑星へガスが降着するとその分中心星へ降着するガスは減少する。彼らは、Mordasini et al. (2012) の巨大惑星形成モデルを用い、巨大惑星の効果で中心星への降着率が何桁も減少することを示した。これは中心星への降着率が測定された円盤には巨大惑星が存在していないことも示唆している。

しかし、彼らのモデルには巨大惑星への降着率を過大評価している可能性がある。Mordasini et al.(2012) では、円盤からの惑星へのガス供給は十分速いと仮定し、惑星への降着率について円盤降着率を超えないという上限のみを与えている。一方、Tanigawa & Tanaka (2016) は、巨大ガス惑星へのガス降着の数値流体計算結果をもとにし惑星への降着率の正確な経験式を作成しているが、その降着率は Mordasini et al. (2012) よりも低いのである。

本研究では、Tanigawa & Tanaka (2016) の降着率モデルを用いて巨大惑星による中心星への降着の抑制を再計算した (図 1)。その結果、巨大惑星形成による中心星への降着率の減少は高々 1 桁以内であることが明らかになった。この低い抑制効果は、巨大惑星が周辺に低面密度領域のギャップを作ることで惑星自身への降着率も減少することによるものである。我々の結果は、中心星への降着率が測定されている円盤にも巨大惑星が形成されている可能性があることを示している。

Transition disk の内側の穴は巨大惑星形成によってつくられた可能性があり、また、中心星への円盤降着率の観測では、内側に穴をもつ Transition disk とその他の円盤との間で大幅な差は見られていない (図 2)。よって、巨大惑星による中心星への降着の抑制が弱いという我々の結果は、Transition disk の穴を巨大惑星形成起源だとする説と調和的である。

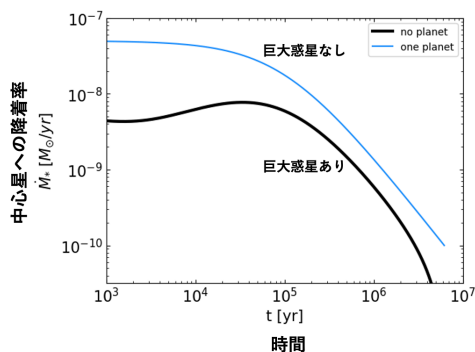


図 1: 中心星への降着率の時間進化。青が巨大惑星がない場合、黒が巨大惑星がある場合の結果。巨大惑星への降着により中心星への降着は減少する。

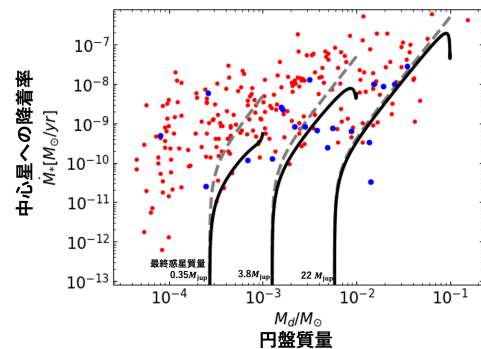


図 2: 円盤質量に対する中心星への降着率。Transition disk の観測データは青で表した。灰色の点線が巨大惑星なし、黒の実線が巨大惑星ありの結果。

多様な中心星と加熱機構を考慮した原始惑星系円盤内の スノーライン移動：ハビタブル惑星への影響

○近藤克¹, 奥住聡¹, 國友正信^{2,3}, 森昇志⁴

1: 東京工業大学, 2: 久留米大学, 3: コートダジュール天文台, 4: 清華大学

生命を持つ惑星が地球の他に存在するか、という問いは惑星科学分野の重要な問いのひとつである。近年数多くの系外惑星が発見されているが、この問いの答えは未だ明らかになっていない。生命を持つ惑星を探す手掛かりとなるのがハビタブルゾーン(HZ; Kasting et al. 1993)である。HZとは惑星の表面に液体の水を保持できる軌道領域で、その領域内に位置する惑星では、水中で生命の誕生に必要な化学反応が促進されると期待されている。しかし惑星が過剰な水量を持つ場合、生命の進化に悪影響を及ぼす可能性があることに注意しなければならない。分厚い海洋層が存在すると、高圧環境に伴うプレートテクトニクスの阻害や陸地が存在しないことによる化学反応の抑制など、生命誕生の阻害につながるものが示唆されている(e.g., Kite et al. 2009)。したがって、生命探索に向けてHZ内惑星の水量を把握することは重要である。

惑星がどれだけの水を持っているかを理解するためには、スノーラインの位置を知ることが重要である。スノーラインとは、原始惑星系円盤内で水氷が昇華する境界軌道である。現在の太陽系ではスノーラインはHZよりも太陽から遠い軌道にあるため、地球の組成が岩石に富み、水に乏しいことは自然であると考えられる。しかし、地球形成時にスノーラインがHZ領域の外側に位置していたかは定かではない。惑星形成段階では円盤が光学的に厚く、中心星の光が円盤内部まで届かずに円盤が冷えるため、スノーラインは現在の軌道よりも内側に位置する可能性がある(e.g., Oka et al. 2011)。早期にスノーラインがHZ領域よりも内側に位置していた場合、HZ内の惑星は多量の水氷を獲得し、生命の誕生に不利な過剰な水量を持った惑星になってしまう。したがって、HZ内にある適当な量の水を持つ惑星がどの程度の頻度で存在しうるかを知るためにも、惑星形成時のスノーラインの位置を把握することが必須である。

本研究では、中心星タイプや加熱機構の違いを考慮し、様々な円盤進化過程におけるスノーラインとHZの位置関係を明らかにする。中心星は0.1及び1太陽質量とし、光度進化を考慮した(Feiden 2016)。加熱機構は中心星の照射加熱のみ、照射+粘性加熱、照射+円盤磁気流体力学起源のジュール加熱(Mori et al. 2019)の3通りを考慮してスノーラインの移動を計算し、HZの位置と比較した。スノーラインの移動は、円盤中のガス、温度、ダストの同時進化を考慮した計算(Kondo et al., in prep.)により導出した。

計算の結果、ジュール加熱は低質量星において非効率であることがわかった。0.1太陽質量星の場合、照射加熱のみとジュール加熱を加えた場合でスノーラインがHZの内側境界に到達する時刻に差は出ない。一方1太陽質量星の場合、ジュール加熱の寄与により、スノーラインのHZ内側境界到達時刻が照射加熱のみの場合と比べて約50万年遅れることがわかった。本講演では粘性加熱入りの結果も紹介し、HZ内にある適当な量の水を持つ惑星の形成時期・位置の中心星及び加熱機構依存性について議論する。

原始惑星系円盤における ダストの流体力学的な集積と衝突進化

○ 富永遼佑¹, 田中秀和²

¹ 東京工業大学, ² 東北大学

原始惑星系円盤におけるダストの成長と微惑星形成は惑星形成の第一歩として重要な過程である。ダストの衝突成長には衝突破壊や中心星への落下などの障壁があることが知られており、それが微惑星形成を阻む大きな問題となっている (e.g., Blum & Wurm 2008)。その解決策としてストリーミング不安定性によるダスト集積が検討されてきた (e.g., Youdin & Goodman 2005)。ストリーミング不安定性はガス円盤中でダストがドリフトすることによって駆動される不安定性であり、乱流運動や、ダスト密度が 100 倍以上も上昇するほど強力な集積を引き起こすことがわかっている。そのようにして形成されたダストクランプは自己重力的に収縮するほど重く、中間的なダストサイズを経由せずに微惑星が形成されると期待されている (e.g., Johansen et al. 2007)。

この過程で形成されるクランプ (微惑星) の総質量や形成効率は、ダストのサイズに依存している。先行研究によれば、ストークス数が 0.1-1 程度と大きいダストの場合、形成されるクランプの総量は最も多いことがわかっている (Johansen & Youdin 2007; Bai & Stone 2010)。一方ダストが小さい場合には、クランプの総量が少ないだけでなく、集積に長い時間がかかってしまうことがわかっている (e.g., Yang et al. 2017)。これは微惑星形成にとって致命的な問題となる可能性がある。実際、不安定性が起こりやすい領域であっても、微惑星が形成される前にその領域を通過してしまうことが最新のシミュレーションで指摘されている (Carrera & Simon 2022)。付着成長によってダストがどこまで大きくなるかは未だ明らかでないが、効率的な微惑星形成に必要なダストは標準的なモデルから期待されるサイズよりも大きい。したがって、衝突破壊などの問題を乗り越えてダストが大きく成長する何らかの機構がやはり必要である。

本研究では、ストリーミング不安定性による乱流中でダストが成長する可能性を検討した。乱流中のダスト成長については先行研究でも議論されていたが (Johansen et al. 2009; Balsara et al. 2009; Bai & Stone 2010)、本研究では数値流体計算で得られたダスト粒子の軌跡を考慮し、統計的な解析を行うことで衝突率をより正確に評価した。その結果、乱流運動に伴ってダストが数倍から 10 倍程度集積されると衝突が起こり、ケプラー周期の 10 倍程度と短い時間で成長することがわかった。これはダストの動径移動時間よりも短いため、中心星に到達する前にダストが成長すると期待される。また典型的な衝突速度はガス音速の 0.3 パーセント程度以下と小さく、大規模な破壊を回避してダストが成長し得ることがわかった。したがって、乱流中のダスト成長により微惑星形成が効率的になると期待される。

アモルファス氷粒子の焼結による成長

○ 城野信一¹

¹ 名古屋大学環境学研究科

原始惑星系星雲の氷粒子は主にアモルファス H_2O 氷で構成されており、 H_2O 分子の移動 (焼結) によって成長します。焼結による成長速度は H_2O 分子の拡散定数に強く依存します。分子動力学シミュレーションによって求められたアモルファス氷の拡散定数 (Ghesquière et al. 2015, Phys. Chem. Chem. Phys., **17**, 11455) に基づいて、焼結時間の関数としてアモルファス氷の粒子のサイズを推定しました。成長は広い円盤領域 (~ 20 AU) で進行し、スノーラインの近傍では粒が $\sim 10^{-3}$ cm まで成長する可能性があることがわかりました。粒子サイズが大きくなるとダストアグリゲイトの破壊強度は低下するため氷の粒子の成長は、原始惑星系円盤内の氷ダストアグリゲイトの進化に影響を与える可能性があります。

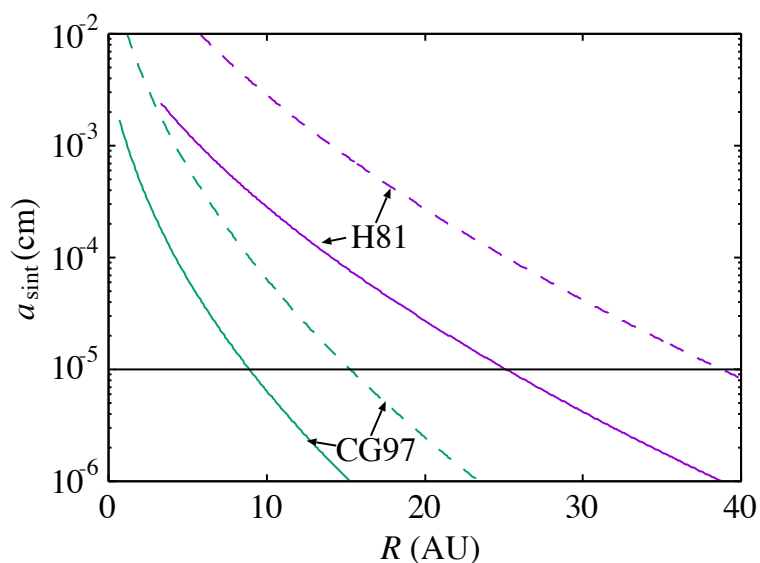


図 1: 中心星からの距離 R の関数としての焼結時間経過後の氷粒子半径 a_{sint} . H81, CG97 はそれぞれ Hayashi (1981) および Chiang and Goldreich (1997) の温度分布に対する結果。実線と破線はそれぞれ焼結時間がケプラー周期の場合とその 10^3 倍の場合。実線は 10^{-5} cm.

質量損失を伴う磁気的な原始惑星系円盤の 長期温度進化：スーパーアース形成に与える影響

○森昇志¹、國友正信²、荻原正博³

¹中国清華大学、²久留米大学、³中国上海交通大学

原始惑星系円盤の温度構造とその進化は惑星形成過程の解明において極めて重要である。円盤の温度構造は惑星形成時のダストの組成を決定づけ、形成する惑星の組成に強い影響を及ぼす。さらに原始惑星の成長や軌道進化などの過程が円盤の温度構造に依存する。

円盤の正しい温度構造を得るには円盤の力学に基づく必要がある。本研究では特に、円盤の主要な加熱機構である降着加熱に着目する。降着加熱の強度は円盤の力学に強く依存する。原始惑星系円盤は磁気流体力学によって支配されている。近年では、原始惑星系円盤は乱流的というより、円盤に存在する磁場によって層流的に降着するモデルが支持されている。このような層流的な円盤では加熱が光学的に薄い表層で起き、効率的に冷却されるため、円盤温度への影響が抑制される。さらに円盤風による質量損失は円盤ガスの降着率および降着加熱に影響を与える可能性がある。本研究ではこれらの効果を考慮して、円盤風を伴う磁気降着円盤の長期的な温度構造の進化を調べた。特に円盤風による質量損失の効果に着目し、降着加熱がいつ・どの領域に影響を及ぼすかを調べた。

一次元円盤進化計算の結果、円盤風の質量損失により円盤内側領域の降着率が低下し、1au 以内の降着加熱を抑制することが分かった。この効果に加えて、円盤表層で加熱が起こることにより、円盤風を伴う磁気降着円盤では非効率な降着加熱となる。例えば本研究の代表的なモデルでは、早期段階の円盤であっても降着加熱は ~ 0.1 au より内側でしか円盤温度に影響しない。本研究から、磁気駆動円盤では定常降着円盤を仮定せず、自己整合的な計算から現実的な降着率分布を用いることが重要であると言える。講演では本研究結果に基づき、乱流円盤と磁気駆動円盤においてスーパーアースの軌道移動と含水率にどのような違いが生じるかについても議論する。我々はそれぞれの典型的な円盤モデルで原始惑星の成長と軌道移動の計算を行った。その結果、磁気駆動円盤はスーパーアースに多様な含水率をもたらす可能性があることが分かった。これは系外惑星の観測結果から得られる傾向とも整合的である。

原始惑星系円盤のギャップイメージング手法としての深層学習モデル開発

関口瑞希¹, 奥住聡¹, 塚越崇², 百瀬宗武³, 武藤恭之⁴, 田中圭¹

¹東京工業大学, ²足利大学, ³茨城大学, ⁴工学院大学

原始惑星系円盤は、若い星を取り囲むガスやダストから成る回転円盤であり、惑星形成の舞台である。近年、ALMA 望遠鏡による観測分解能の向上により、惑星形成に関与している可能性があるダストのリングやギャップなどの構造が詳細に観測できるようになった。しかし、ALMA のような電波干渉計で得られるデータは、天体の放射分布を構成するフーリエ成分の一部である。そのため、欠損したデータから放射分布をより正確に復元する手法が必要となる。

画像復元の手法には従来 CLEAN 法が広く用いられてきたが、近年、CLEAN とは異なる様々なアルゴリズムでの画像復元が着目されつつある。本研究では、医療画像解析で高い性能を示している深層学習モデル U-Net をベースに、観測から直接得られる不完全な画像 (dirty image) からリング・ギャップ構造を復元する新たな深層学習モデル「Disk-Net」を開発した。

本手法の性能を実証するため、以下の実験を行った。まず同心円状のギャップ構造を持つ円盤モデルを複数作成し、それを模擬観測することで電波干渉計の観測量(ビジビリティ)を作成した。この観測量を逆フーリエ変換することで得られる dirty image を用いて Disk-Net を訓練した。訓練後、Disk-Net と CLEAN の両方でデータセットと異なる円盤モデルの画像を復元し、再現したギャップの幅、深さを評価した。その結果、Disk-Net は CLEAN よりも浅く狭いギャップを高い確度で復元できることが確認できた (図 1)。特にギャップ部分の端や広がった構造を CLEAN より正確に再現している点が重要である。

本手法は、惑星形成研究において円盤構造の詳細な分析を可能にする新たな手法である。これにより、リング・ギャップ構造の起源やリング・ギャップを構成するダストの集まり方、成長メカニズムの理解が深まることが期待される。また、分解能の向上により地球形成領域の詳細な観測が可能になり、岩石惑星の形成メカニズムの解明にも寄与するだろう。さらに、過去の観測データに対し本手法を適用することで、これまで見えなかった円盤内の構造が明らかになる可能性もある。

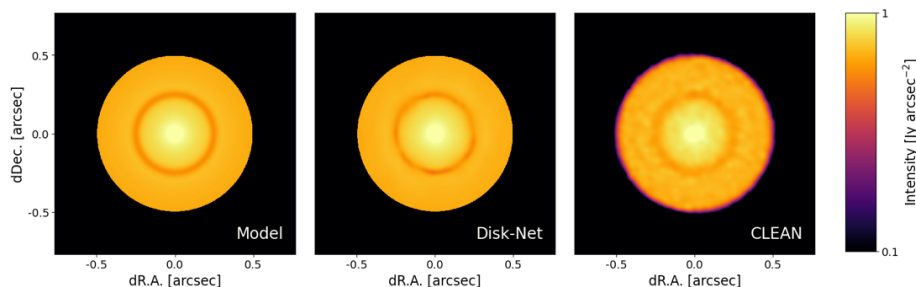


図 1 性能実証実験にて原始惑星系円盤モデルの幅 0.05 秒角のギャップを再現した例。左から正解の円盤モデル、本手法 Disk-Net による復元イメージ、CLEAN による復元イメージ。観測ビームサイズは 0.04 秒角ほど。

“ALMA 観測による FU Ori 型星 V883 Ori の円盤における $^{13}\text{C}^{17}\text{O}$ 輝線の検出”

“Detection of $^{13}\text{C}^{17}\text{O}$ line emission in the disk around FU Ori type protostar V883 Ori using ALMA”

○野津 翔太 (Shota Notsu)^{1,2}, 塚越 崇 (Takashi Tsukagoshi)³, 野村 英子 (Hideko Nomura)⁴,
 廣田 朋也 (Tomoya Hirota)⁴, 本田 充彦 (Mitsuhiko Honda)⁵, 秋山 永治 (Eiji Akiyama)⁶, Alice S. Booth⁷,
 Catherine Walsh⁸, Tom J. Millar⁹, Seokho Lee¹⁰, Jeong-Eun Lee¹¹, 大和 義英 (Yoshihide Yamato)¹²,
 相川 祐理 (Yuri Aikawa)¹², 大小田 結貴 (Yuki Okoda)², 坂井 南美 (Nami Sakai)²

¹ 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 地球惑星システム科学講座,

² 理化学研究所 坂井星・惑星形成研究室, ³ 足利大学, ⁴ 国立天文台, ⁵ 岡山理科大学, ⁶ 新潟工科大学,

⁷ Harvard/CfA, ⁸ University of Leeds, ⁹ Queen's University Belfast, ¹⁰ KASI, ¹¹ Seoul National University,

¹² 東京大学 大学院理学系研究科 天文学専攻

原始惑星系円盤ガスの空間分布・質量の進化の理解は、惑星系の形成・進化過程の解明に欠かせない。そこで ^{13}CO , C^{18}O 輝線を用いた円盤ガス分布の統計的観測が多数実行されている (e.g., Miotello et al. 2017)。一方でこれらの輝線が光学的に厚い場合、円盤ガス質量を過小評価する可能性がある。ここで、一酸化炭素の同位体分子種の中で最も量が少なく、より光学的に薄い $^{13}\text{C}^{17}\text{O}$ 輝線を用いる事で、円盤赤道面も含め精度の高いガス質量測定が可能となる。近年の ALMA 観測で、 $^{13}\text{C}^{17}\text{O}$ 輝線が原始惑星系円盤において初めて検出され (HD 163296: Booth et al. 2019; HL Tau: Booth & Ilee 2020)、従来の C^{18}O 輝線観測と比較し 2-10 倍程度重い円盤ガス質量の見積もりが得られた。本講演では ALMA 望遠鏡を用いて我々が実施した、典型的な FU Ori 型星である Class I 原始星 V883 Ori 周りの円盤における $^{13}\text{C}^{17}\text{O}$ $J=3-2$ 輝線 (Band 7, 空間分解能 0.4") の観測結果を報告する。解析の結果 $^{13}\text{C}^{17}\text{O}$ 輝線放射は、過去観測で得られた C^{17}O 輝線放射 (Tobin et al. 2023) と同様に、原始星近傍の光学的に厚いダスト放射を囲む様に円盤内でリング状の分布を持つ事、 H_2O や CH_3OH と比べより円盤外側まで広がった分布を持つ事が分かった。講演では柱密度分布・質量の見積もりを元に、円盤ガス分布の進化過程などについて議論を行う。

月マントル組成の推定：小型月着陸実証機SLIMによる月面岩石の観測と軌道上観測データを組み合わせたカンラン石露出域の解析

Lunar mantle composition estimated by landing site observation
by SLIM and previous orbiter observation of olivine exposures

○大竹真紀子^{*1}, 佐伯和人^{*2}, 仲内悠祐^{*2}, 長岡央^{*2}, 宮崎理紗^{*3}, 西野真木^{*3}
佐藤広幸^{*3}, 本田親寿^{*1}, 石原吉明^{*3}, 西谷隆介^{*3}, 梶谷伊織^{*3}, 横田 康弘^{*3}

*1 会津大/*2 立命館大/*3 JAXA

地球と月を作った巨大衝突過程の理解のためには、月の全球組成（特に鉄量）を把握し、地球のコアを除いたシリケート部（Bulk Silicate Earth: BSE）と比較することが重要である。月の全球鉄量の把握には、月の体積の 90%以上を占める月のマントル組成を推定することが鍵となる。ただしこれまでにマントル由来の月試料は見つかっておらず、また既存の軌道上観測によるデータだけからマントル由来の岩石を同定することが困難なため、月の全球鉄量値はよくわかってない（BSE と等倍から 2 倍までの幅広い推定値が報告されている）。この課題解決を目指し、小型月着陸実証機 SLIM では月のマントル組成の推定を目的に、マントル物質が天体の衝突による掘削、放出により露出した可能性があると考えられる、カンラン石に富む岩石の露出地域に着陸した。

本研究では、SLIM に搭載したマルチバンド分光カメラ (MBC) を用い、周辺岩石の高空間分解能かつ可視から近赤外波長帯での分光画像と、月周回探査機「かぐや」(SELENE) のマルチバンドイメージャ (MI) とスペクトルプロファイラ (SP) による分光データを統合的に解析し、SLIM 着陸点で見つかったカンラン石に富む岩石の起源やその組成（特に Mg#）推定から、全球としての月マントル組成の推定を行った。

MI および SP による SLIM 着陸点周辺の岩相解析と SLIM 着陸点で見つかったカンラン石に富む岩石の組成および組織等比較から、該当の岩石は月マントル由来である可能性が高いことがわかった。また SP による月全球のカンラン石に富む岩石のスペクトルから推定される鉱物量比、Mg# ($\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ モル%) などから、検出されたカンラン石に富む岩石の露出点の約 25%がマントル由来と推定された。またこれらマントル由来の岩石は広く複数の盆地で検出されており、かつ Mg#がほぼ等しいことから、今回 MBC データから推定したマントルの組成は、盆地の掘削深度から推定される月マントルの浅部における平均的な組成を示すものであると考えられる。今回、初めてとなる月のマントル物質の直接観測からマントル組成を求め、これと月マグマオーシャンの固化モデルの比較から、月全球組成は BSE に比べて鉄に富むかどうか評価を行った。

SLIM マルチバンド分光カメラ EM による月・地球岩石サンプルの岩石組織の比較と評価

Comparison and evaluation of rock texture based on analysis data of lunar and terrestrial rock samples using SLIM multiband camera engineering model

○長岡央¹、佐伯和人¹、仲内悠祐¹、大竹真紀子²、本田親寿²、西野真木³、佐藤広幸³、宮崎理紗³、梶谷伊織³、横田康弘³、石原吉明³、西谷隆介³

1) 立命館大学、2) 会津大学、3) 宇宙航空研究開発機構

日本初の小型月着陸実証機 SLIM (Smart Lander for Investigating Moon) は、月惑星探査に必要な高精度着陸技術を小型探査機により実証する計画で、2023 年 9 月 7 日に打ち上げられ、2024 年 1 月 20 日に月面へのピンポイント着陸に成功した。科学観測装置マルチバンド分光カメラ MBC (Multi-Band Camera) は、月周回衛星「かぐや」が発見したマントル由来のカンラン石 (Yamamoto et al. 2010, Nature Geoscience) の組成を調査するため SLIM に搭載された。

月は形成時、全球が熔融したマグマ大洋(マグマオーシャン)から地殻とマントルの分化を経験したと考えられており、マントル物質はカンラン石を多く含んだ岩相で構成され则认为されている(e.g., Elkins-Tanton et al. 2011, EPSL)。衝突クレーターの周辺で、かぐやが発見したカンラン石は、大きな隕石衝突によって地殻より深い場所にあるマントル物質が掘削された結果、表層に露出したものと解釈できる (Yamamoto et al. 2010)。MBC は 10m 先の対象で 1.1mm/ピクセルという高い空間解像度で、10 バンドのバンドパスフィルター (750, 920, 950, 970, 1000, 1050, 1100, 1250, 1550, 1650 nm) を使い月面の画像を取得できる。MBC はそれにより岩石に含まれる鉱物種を同定し、特にカンラン石の化学組成 Mg# (= molar Mg/(Mg+Fe)) を決定し、得られたデータは地球のマントル組成と比較することを観測目的としている。

月面で得られた撮像データの解析により求められた岩体の鉱物種や組成と比較するために、SLIM に搭載された MBC とほぼ同等の性能をもつエンジニアリングモデル (EM) を用いて、月隕石や地球の岩石を撮像した。得られた MBC-EM データは、拡散反射分光装置により得られたスポット分析の測定結果と比較することで、両者のスペクトルで良い一致を示した。画像フォーカスの合う最近傍 (撮像対象までの距離 1m 程度) で得られた 10 バンドの画像データから主要な鉱物種 (輝石、カンラン石、斜長石) を分類し、岩石種の判別を行った。本発表では、月隕石や地球の岩石に対して MBC-EM を用いて取得した観測結果を報告し、岩石組織や鉱物種の評価結果を議論し、月面観測での結果や解釈に反映する。

月周回衛星かぐや LRS 観測に基づく

Mare Frigoris 西中央部の埋没凹地形成過程の解明

○坂井優大¹, 熊本篤志¹, 加藤雄人¹, 石山謙²

¹東北大学理学研究科地球物理学専攻, ²東京国際工科専門職大学

Frigoris は、西部・西中央部・東中央部・東部の 4 領域に分けられ^[1], いずれもかぐや(SELENE) Lunar Radar Sounder (LRS)による地下構造の解析が行われてきたが^[2], 詳細な解析の結果, 西中央部で大規模断層と見なせる地下構造が明らかになった^[3]. この地下構造の成因として Imbrium マスコンによる応力が考えられる. Imbrium 内では Solomon & Head, (1979)と Freed et al. (2001)によって lithosphere を弾性体, 堆積した溶岩を荷重と見なすモデルを適用して地表のリッジ・グラーベンの解釈が進められた^{[4][5]}. 一方 Frigoris では, 地表のリッジ・グラーベんと Imbrium マスコンの関係は不明確と結論されていた^[6].

そこで本研究では, まず, LRS 観測データの解析から, Frigoris 西中央部で発見されていた地下構造の形成過程の推定を進めた. 地表が平坦な西経 10~20 度, 北緯 55~60 度において LRS データを解析したところ, 西経 14~18 度, 北緯 55~60 度の範囲で深さ 200 m 前後の反射面が確認された(地表からこの反射面までを第 1 層と呼ぶ). 加えて, 西経 14~18 度, 北緯 58~60 度の範囲に限定して, さらに下方の深さ 1000 m 前後の反射面が確認された(この反射面までを第 2 層と呼ぶ). これらの解析結果から, 少なくとも西経 14~18 度・北緯 58~60 度の範囲に, 幅 30 km の大規模な凹地が, かつて形成されていて, その後の火山活動で噴出した溶岩が凹地内側を部分的に埋めることで第 2 層が堆積, その後さらに大規模な溶岩噴出(表面の年代決定から 3.48~3.53 Ga^[7])で第 1 層が堆積したことが示唆される.

続いて, LRS で凹地が観測された位置(Imbrium 中心から 740 km)に, Imbrium マスコンの影響で, 凹地が形成されうるかどうかを確かめるために, Solomon & Head, (1979), Freed et al. (2001)と同様の弾性体モデル^{[4][5]}で Imbrium の溶岩荷重が lithosphere に生じる応力分布の計算を行った. 計算では, 弾性体とみなす lithosphere の厚みを 50, 100, 150 km^{[4][5]}とした. また Imbrium 内に堆積した溶岩層を半径 670km の円盤状の荷重と見なして, 円盤中央での厚みは最近の重力場観測に基づくシミュレーション研究の報告をもとに 9.25km^[4]から 1.0 km^[8]に修正した. 計算の結果, 各パラメータで変位量の変化は見られたが, いずれのパラメータでも Imbrium 中心からおおよそ 740 km の位置に Radial 方向, Azimuth 方向とも伸長応力場が分布し, 正断層による凹地が形成されうることを確認された. 一方で, 同じく正断層が形成されうるはずの同心円周上では, どの領域も地表で大規模な正断層が確認されていないため, Frigoris 西中央部同様 LRS で埋没凹地の有無を確認する必要がある. 但し LRS の観測に適さない高地, 高 Ti の海領域^[2]の割合が多いため, 低 Ti の海領域を選んで LRS データの探索を進める.

参考文献 [1] Kramer et al. (2015), J. Geophys. Res. Planets, 120, 1646–1670, [doi:10.1002/2014JE004753](https://doi.org/10.1002/2014JE004753) [2] Pommerol et al. (2010), *Geophysical Research Letters*, Vol. 37, L03201, [doi:10.1029/2009GL041681](https://doi.org/10.1029/2009GL041681) [3] Y. Sakai et al. (2023), 日本惑星科学会予稿集. [4] Solomon and Head, J. Geophys. Res., 84, 1667–1682, 1979. [5] Freed et al. (2001), J. Geophys. Res. 20, 603–620. [6] Williams et al. (2019), Icarus 326, 151–16, [doi:10.1016/j.icarus.2019.03.002](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.03.002) [7] Hiesinger et al. (2010), J. Geophys. Res. 115, E03003, doi: 10.1029/2009JE003380 [8] Gong et al. (2016), J. Geophys. Res. Planets, 121, 854–870, doi: 10.1002/2016JE005008.

かぐやマルチバンドイメーajaが明らかにした月の火砕堆積物の分布： 火砕物の被覆範囲と揮発性成分量の関係について

○荒木 亮太郎¹, 佐伯 和人², 大竹 真紀子³

¹大阪大学 ²立命館大学 ³会津大学

Procellarum KREEP Terrane (PKT) は月の表側に位置する特殊な組成を持つ領域である。この領域は、月の表面積の約 10% を占めるが、月地殻中の Th の約 40% が集中しており、ほかの不適合元素も同様に高濃度で存在していることがリモートセンシング分析から確認されている (Jolliff et al., 2000)。PKT の組成は、月のマグマオーシャンの最終残液に由来すると考えられるが、なぜこの領域にのみ集中しているのかは不明である。マグマオーシャンの残液が月全体の深部に広がっており PKT 領域でのみ表層に露出しているのか、あるいは何らかのプロセスによって現在の PKT 領域にのみ最終残液が集中したのかは分かっておらず、月の内部進化を理解する上で重要な課題である。

本研究は、月の火砕堆積物 (Lunar pyroclastic deposits; LPDs) の分布傾向に基づき、PKT とそれ以外における火成活動の違いを通じて、PKT 領域内外の地下の組成を制約することを試みた。LPD の少なくとも一部は下部地殻~マントルの組成を反映した、深部由来のマグマが急冷した火山ガラスに富む火砕物である (Jawin et al., 2015)。真空の月面の噴火で破碎された火砕物は、ベントから一定距離まで火山ガスの運動エネルギーを得て弾道飛行するため、ソースマグマに含まれる揮発性成分が多い、および/または分子量の小さいガス成分が多いほど、火砕物の飛散距離は大きくなる (Wilson & Head, 2017)。我々は、かぐや Multiband Imager (MI) および Chandrayaan-1 Moon Mineralogy Mapper (M³) の可視近赤外スペクトルデータを用いて火山ガラスのスペクトル特徴に注目し、月全球データを用いてガラスに富む LPD の分布をサーベイした。発見されたガラスに富む LPD のうち、火砕堆積物に対応する火口が判別できたものを対象に、その火口中心から最も遠い飛散距離 (割目噴火の場合は割目と直交する方向に最も遠い距離) を計測した。

結果、ベントを伴う LPD は 63 地点が同定され、29 か所が PKT 領域内、34 か所が PKT 領域外 (そのうち 5 か所は SPA 盆地内) だった。63 地点すべての最大飛散距離は、一部を除きほとんどが 1 km ~ 8 km の範囲に単峰的に分布する。しかし、PKT 内外で飛散距離のピークが異なり、PKT 内では最頻値 3 km に対して PKT 外 (かつ SPA 盆地外) では 7.5 km と、PKT 領域内に有意に大きい (Mann-Whitney U 検定で $p \sim 0.029$)。火砕物粒径を 300 μm 、火山ガスの組成を CO 100% と仮定すると、Wilson & Head (2017) のモデルから飛散距離 7.5 km であれば 1580 ppm, 飛散距離 3 km では 701 ppm となり、2 倍以上の差となる。この差異は LPD のソースマグマが形成された深部において、PKT 領域とそれ以外の領域で残液層の組成が大きく異なる可能性を示唆している。

月の Imbrium 盆地の放出物厚さ分布と SPA 盆地内部の Th 異常との関係

○野間 光葉、諸田 智克、杉田 精司

東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

月表層における液相濃集元素の分布は、月の初期の地殻-マントル分化過程やその後のマグマ活動史を理解する上で重要である。Th は月の表側北西部の Imbrium 盆地及びその周囲に濃集しており、月の裏側の赤道より北側ではほとんど分布がない一方で、裏側の南極エイトケン（SPA）盆地北西部の Imbrium 盆地の対蹠点近くに Th の中程度の濃集が見られる [Wieczorek et al., 2001; Zhang et al., 2023]。Imbrium 盆地は直径 1160 km の大規模なクレーターであり、衝突時に大量の物質を放出し月面を覆ったと考えられるため、この裏側の Th 異常は Imbrium 盆地放出物が起源である可能性がある。

しかし、Imbrium 盆地の対蹠点と Th 異常の見られる地域には位置的に微妙なずれがあり、距離として 100 km ほど離れている。このずれについて、放出物堆積の数値シミュレーションでは、Imbrium 盆地近くの Serenitatis 盆地の放出物が堆積した結果であると結論づけられているのに対し [Wieczorek et al., 2001]、Th 分布計測の結果や GRAIL の重力データ解析に基づいて地殻厚さが薄い地域において後のクレーター形成時の掘削により Th が露出しているとの説が提案されている [Kobayashi et al., 2012; Zhang et al., 2023]。

本研究の目的は、Imbrium 盆地からの放出物の厚さ分布をクレーターサイズ頻度分布によって推定し、その結果と Th 異常分布との関係を明らかにすることである。我々は月で最も新しい盆地である Orientale 盆地からの放出物堆積厚さを測定しその分布について議論してきた。その結果、Orientale 盆地の対蹠点周辺では Orientale 盆地からの放出物堆積が 209~660 m 存在することが分かった [Noma and Morota, JpGU, 2024]。また、対蹠点から距離約 100 km 離れた地点では、放出物厚さが約 100 m 以下であり、対蹠点に Orientale 盆地放出物が集中して堆積していることが判明した。同じ手法を用いて、Imbrium 盆地からの放出物分布と、特に対蹠点における放出物厚さと Th 異常が見られる地域における放出物厚さを計測した。

計測の結果、Imbrium 盆地対蹠点では Imbrium 放出物が 200~300 m の厚さで堆積していることが推定された一方で、対蹠点から 100 km ほど離れた Th 異常の見られる Oresme クレーター周辺では、Imbrium 盆地による放出物堆積は 50 m 以下の厚さであることがわかった。これは、対蹠点で放出物が集中して堆積していることを示し、放出物の組成に偏りがない場合、SPA 盆地内の Th 異常は Imbrium 盆地の放出物が起源である可能性は低く、地殻が薄い地域においてクレーター形成の掘削によって Th が露出している可能性が高い説を支持する。また、Imbrium 盆地近傍の比較的古い盆地における Imbrium 放出物の厚さを計測すると、Pike(1974)モデルで計算される厚さの 2~3 倍の厚さの放出物が堆積していることがわかった。講演ではさらに、Imbrium 盆地の放出物厚さの分布と Th 濃度との相関関係から、SPA 盆地内の Th 濃集起源について議論する。

アポロ短周期月震計データの解析によりもたらされた月の地震活動の新たな描像

○小野寺圭祐¹

¹ 東京大学地震研究所

アポロ計画にて実施された月の地震観測(月震観測)は、地球以外の地震活動や内部構造に関する研究分野を開拓した。アポロの月震観測には長周期計と短周期計の二種類の地震計が用いられていたが、後者は人工ノイズが多く、現在に至るまでその大部分が未解析のままであった。本研究では、アポロ 14, 15, 16 号で取得された短周期月震データにクリーニング処理を施し、過去には検出されていなかった月震イベントの搜索を試みた。その結果、約 22,000 もの新しいイベントを検出した。

新しい月震カタログには、月面の過酷な温度変化に伴う岩石の熱疲労由来の月震(熱月震)や隕石衝突由来の月震(衝突月震)、断層活動由来の月震(浅発月震)が含まれており、本研究では特に浅発月震に焦点を当てた。

浅発月震は断層活動由来であることが過去の研究で指摘されており、地球の地震に最も類似したイベントとして認識されてきた。また、典型的な月震がマグニチュード 1~2 であるのに対し、浅発月震はマグニチュード 4~6 を記録しており、月のエネルギー放出率の推定や将来の月面有人探査においては無視できない現象である。しかしながら、他の月震が数千程度見つかったのに対し、浅発月震は 8 年間の観測で 28 例しか検出されていなかったため、震源メカニズムや時空間分布には大きな不確実性を抱えていた。今回新たに 46 個の浅発月震が見つかったことで、今までは議論することができなかったテクトニック月震活動の地域性やそのメカニズムに関する理解を進めることができた。例えば、図 1 に示すように浅発月震はアポロ 15 号でより多く検出されており、南半球に比べて北半球の地震活動度が高いということがわかってきた。発表では、新しく検出された月震の特徴とともに、特に月のテクトニック活動に対する新たな描像について紹介する。

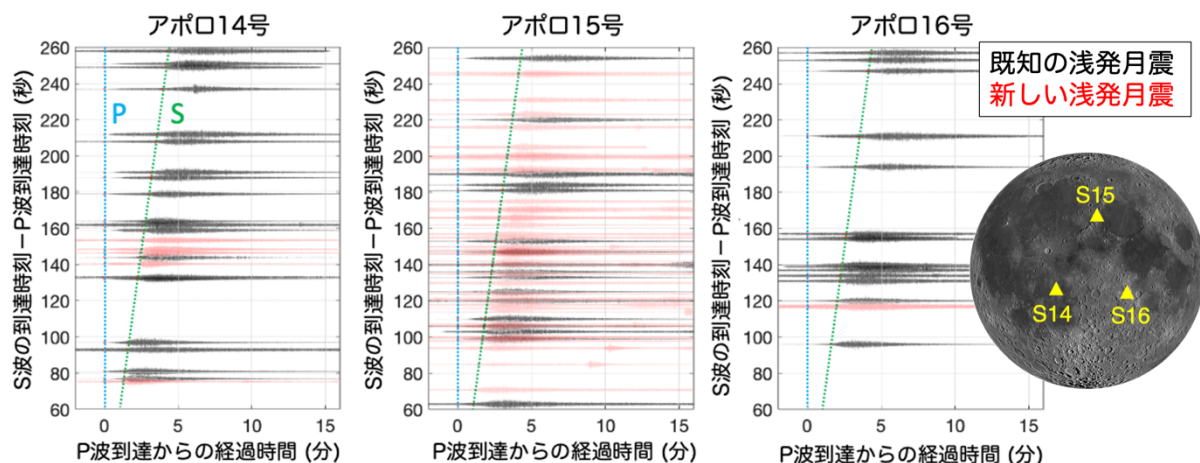


図 1. アポロ 14, 15, 16 号着陸地点の短周期月震計で検出された浅発月震の波形。横軸は P 波到達からの経過時間を示し、縦軸は S 波と P 波の到達時間の差を示す。各月震計の位置を黄色三角印で月面マップに示す。これらの図からアポロ 15 号(月の北半球側)で多数の浅発月震が検出されていることが読み取れる。

月形成円盤における角運動量輸送の解像度依存性

○ 吉村洋一¹, 斎藤貴之¹, 牧野淳一郎¹

¹ 神戸大学 理学研究科 惑星学専攻

現在、最も有力と考えられている月形成シナリオにジャイアントインパクト仮説というモデルがある。ジャイアントインパクト仮説とは、月は原始地球に火星サイズの天体が衝突した際に生成された周地球円盤が集積し形成されたという仮説である。この仮説では、周地球円盤はロッシュ限界半径内で高温のガスが冷え固まって形成されるため、非常に小さな岩石粒子からなる可能性があり、月形成過程の粒子数依存性の理解は重要である。

従来の月形成過程のシミュレーションは周地球円盤を1万粒子程度でモデル化しており、約1か月でロッシュ限界半径の外側に月が形成されると考えられている（例えば、Kokubo et al. 2000 など）。Sasaki and Hosono (2018) では、周地球円盤を1万粒子から1000万粒子まででモデル化し解像度が月集積過程に与える影響を調べた。彼らは解像度が月の成長速度や形成過程に影響を与えると結論している。また、山岡他 (2023 年 JpGU MGI30-04) では、高解像度のシミュレーションで円盤の地球半径の1.6倍よりも内側の領域にリーディングスパイラルが現れ、これが viscous overstability によるものであることを見いだした。

本研究では、このリーディングスパイラル構造が月形成過程、特に円盤内側の角運動量輸送に与える影響に注目する。我々は周地球円盤を10万粒子から1000万粒子まででモデル化しシミュレーションを行った。まず、円盤の密度構造の進化のタイムスケールを比較した。粒子数が大きいと、円盤の密度構造の進化が明らかに遅くなり、月形成までの時間も長くなっていた。次に、円盤内側のリーディングスパイラル構造がある領域で、角運動量の輸送率を Takeda and Ida (2001) の理論式と比較した。理論式は円盤の密度が一定と仮定して求められている。この時に、輸送率は粒子数の $-1/6$ 乗と推定されている。一方、シミュレーション結果では、これに比べて大粒子数で輸送率が小さくなることがわかった。これは、リーディングスパイラル構造のため密度が低い領域が発生したためと考えられる。

月形成過程への粒子数の影響は従来考えられていたより大きい可能性があることがわかった。今後はリーディングスパイラル構造の影響をより詳細に調べる。

地球風による月面への ^{40}Ar の供給

:

アポロサンプルと月隕石の対比

○阿部 広也¹、中山 陽史²、坂田 遼弥³、関 華奈子⁴、堺 正太郎³、

品川 裕之⁵、寺田 直樹³、橋爪 光⁶、玄田 英典¹

¹東京工業大学、²立教大学、³東北大学、⁴東京大学、⁵九州大学、⁶茨城大学

月は大気を持たず、表面更新が活発な天体でないため、月面のレゴリスは宇宙空間から飛来する物質の影響を受け、その歴史を記録している。特に、レゴリスに保存されている揮発性物質の起源を明らかにすることは、太陽系物質進化史を紐解く上で重要である。アポロ計画で持ち帰られた月のレゴリスサンプル(アポロサンプル)を分析すると、30~40億年前の期間に表面曝露を経験したサンプルは $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比が12程度でまとまっていることが知られている(e.g. Joy et al. 2011)。一方で、月から地球に降ってきた隕石(月隕石)は同時期に表面曝露されているにも関わらず $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比が1~15の間でバラついた値を示すことが分かっている(Korochantesiva et al. 2017)。アポロサンプルと月隕石における $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比の違いの原因は、未だ明らかにされていない。

本研究では地球大気の宇宙空間への流出(地球風: Ozima et al. 2005, Terada et al. 2017)、そしてその一部が月表面に打ち込まれることによってアポロサンプルと月隕石における $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比の違いを説明できるかどうかを検証する。月は潮汐固定によって常に同じ面を地球に向けているため、地球風に多く含まれる ^{40}Ar は月の表面に優先的に供給され、裏面にはあまり供給されないことが予想される。一方、 ^{36}Ar は太陽風によって月全球に供給される。アポロサンプルは月の表面のみから採取されたのに対して、月隕石は表面と裏面どちらからも飛来してくる。地球風がもたらす ^{40}Ar 供給の異方性によって、アポロサンプルと月隕石の $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比のふりまいの違いは自然と説明できるかもしれない。

我々は、30~40億年前の地球大気と太陽放射条件における地球からの大気散逸によって ^{40}Ar が月面へどの程度供給されるかを推定した。手法としては、1-D高層大気モデル(Nakayama et al. 2022)によって大気構造を求めた。そして電離圏界面より高い高度で生成された ^{40}Ar イオンが太陽風によって剥ぎ取られ散逸したという仮定の下、月面へ供給される ^{40}Ar フラックスを調べた。

その結果、30億年前を想定した条件では十分な ^{40}Ar が月面へ供給され、アポロサンプルと月隕石における $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比の違いを説明しうることが分かった。一方で40億年前を想定した条件では ^{40}Ar がほとんど月面に供給されないことが明らかになった。本発表ではこれらの計算結果を紹介し、大気のCO₂混合比と太陽放射条件を慎重に検討する必要性についても議論する。

月の地下空洞において揮発性分子は存在するのか

○篠原直生^{1,2}、春山純一^{2,1}、岩田隆浩^{2,1}

¹ 総合研究大学院大学、² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

月には地下空洞が存在していると考えられており、その上に開いたとされる縦孔も確認されている[Haruyama et al. 2009]。地下構造内部では、温度が安定しやすく、太陽光や第一次宇宙線による揮発性分子の分解反応が起こりにくいため、水などの揮発性物質の存在が示唆されている。しかし、地下空洞内では揮発性物質が昇華し空洞から脱出する可能性もある。月の地下空洞内において、揮発性分子は安定して存在できるのだろうか。

先行研究において、月の地下空洞内の温度環境モデルを基に地下空洞内での水分子の消失率が示されており、極域や永久影のクレーター内部などの条件を除いて、水氷は安定して存在できないとされた[Wilcoski et al. 2023]。これは、高緯度の永久影領域以外では日照の影響で空洞内部が高温で安定し、水氷の昇華率が高くなるためである。

しかし、月の地下空洞内で揮発性分子が存在する可能性は十分に考えられる。その理由は二つある。まず、(1)揮発性分子の中でも水氷よりも昇華率の低い分子種であれば、高緯度地域のような低温環境でなくとも揮発性分子が存在できること、である。例えば、硫化水素は水氷よりも昇華率が低く、低温環境下でなくとも地下空洞内に残存する可能性がある。理、(2)地下空洞の奥行きが深いものがあること、が挙げられる。空洞は地球からの類推で奥深く、数 10 km に渡って延びているものがある。空洞の奥行きが深くなればなるほど、水分子は、より長時間、地下空洞内に滞在し、縦孔から脱出する確率が低くなるであろう。

そこで、先行研究において、二次元の地下空洞と縦孔を模擬した構造内で奥行きを変化させ、分子の挙動のシミュレーションが行われた[Saito et al. 2007]。鉱物に吸着している揮発性分子は、熱速度を持つことで、鉱物表面から脱着し、空洞内を弾道飛行する。空洞に開いた縦孔から脱出するまでこれを繰り返し、鉱物に吸着した回数が計算された。その結果、二次元の空洞において奥行きが長くなるほど、吸着回数が増えることが示唆された。

本研究では、このシミュレーションを三次元に拡張させた。地下空洞の構造は、静の海の縦孔と同サイズ(孔直径 100m/孔深さ 107m/天井厚さ 47m)の縦孔から東西の両側に孔直径と同じ幅の空洞が伸びていく構造とした。空洞の奥行きについてはまだ不明だが、空洞の成因が溶岩流の跡が冷え固まってできた溶岩チューブであるとする、数 km 以上の奥行きが予想される。そこで、本研究では孔の奥行きを 100m から 10km まで変化させた。シミュレーションでは、分子が太陽風と月面の鉱物との反応によって生成されると仮定し、縦孔側面や空洞底面の日照域から粒子の拡散を開始させ、脱着と吸着を脱出するまで繰り返す。この時、算出される吸着回数に揮発性分子種の違いによる吸着時間を考慮し、分子の生成から脱出までの吸着時間を算出した。

結果として、先行研究に比べ、揮発性分子が空洞から脱出する時間に増加が見られた。これは、三次元では二次元より吸着回数が増加する影響と分子種による吸着時間の考慮という二つの要因によるものである。本研究の結果はより現実に即した値であると考察できる。

以上のように、本件研究では、地下空洞の奥行きと揮発性分子種の違いによる月の地下空洞内での分子挙動を示し、従来考えられていたよりも揮発性分子が長時間空洞内に滞在することが示唆された。本発表では上記研究内容成果を紹介するとともに、揮発性分子が空洞内に供給される過程の一つとして、太陽風による揮発性分子の生成についても議論する。

SELENE が観測した月の様々な緯度の影領域における水氷粒子

○豊川広晴^{1,2}、春山純一^{1,2}、岩田隆浩^{1,2}、野澤仁史^{1,2}¹総合研究大学院大学、²宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構

月における水（ここでは OH と H₂O を区別しない）の移動過程は、大気の薄い固体天体における水環境の進化を理解する上で重要である。これまで、理論モデルや近年のリモートセンシング観測から、様々な緯度から水が移動し極域の永久影領域に蓄積することが提案されてきた[e.g. Watson et al., 1961; Fisher et al., 2017]。しかし、移動する水の分子構造や月面で吸着・拡散される水の量など、詳細な移動過程は未だ不明瞭である。

これらを理解するためには、様々なローカル時刻と緯度における水の吸着・拡散の特性を調査することが重要である。理論モデルでは、夜側に近いほど、また緯度が高いほど多くの水が月面に吸着されることが予測され、このような傾向は日照域では様々な探査機によって観測されてきた[e.g. Li & Milliken, 2017]。しかし、中低緯度を含む様々な緯度の影領域における表面吸着水の特性に関する観測研究はほとんどない。理論モデルでは、移動する水は様々な緯度で一時的に表面温度の低い影領域に蓄積する可能性が示唆されている[Schörghofer, 2014; Tucker et al., 2019]。影領域の表面温度は赤道地域でも 100 K 程度であるため、水氷が形成された場合は安定して存在でき、また地表面からの水の拡散は日照域よりはるかに起きにくくなる。したがって、影領域における水分布を理解することは、移動する水の吸着・拡散過程を評価する上で重要である。

そこで本研究では、月の様々な緯度における影領域に水氷粒子が存在するかどうかを調査することで、月面での水の吸着と拡散の特性に関して新たな制約を見つけることを目的とする。本研究では、他データと比較してノイズが小さく、波長解像度の高い、月周回探査機 SELENE のスペクトルプロファイラ（SP）の可視・近赤外分光データを使用することで、光量の少ない影領域での反射スペクトルを詳細に評価した。

結果として、様々な緯度の影領域で、水氷の吸収特徴である 1.25 μm 帯と 1.5 μm 帯を示すデータを検出した。また、影領域で観測されたスペクトルの形状から、「(a)水氷が月面に氷霜層を形成している」、あるいは「(b)水氷が空中浮遊している」可能性が示唆された。さらに、放射伝達方程式を用いたスペクトルシミュレーションを実施したところ、観測されたスペクトルを説明するためには、0.1–1 μm サイズの水氷が 10^{-4} – 10^{-3} kg/m² 程度存在する必要があることがわかった。この水量は、チャンドラヤーン 1 号搭載の分光撮像装置 Moon Mineralogy Mapper で観測された、朝・夕・昼間で変化した水量と整合する。したがって、日中に地表面が高温になることで拡散された水が影領域に一時的に水氷として蓄積している可能性がある。

これらは、月において移動する水の吸着・拡散過程に対して新たな制約を与える結果である。本発表では、以上の議論を紹介する。

月極域探査機（LUPEX）プロジェクトの検討状況： 水資源分析計（REIWA）の開発と詳細観測運用

○西谷隆介¹，石原吉明¹，井上博夏¹，相田真里¹，神崎千沙子¹，須藤真琢¹，水野浩靖¹，
若林幸子¹，星野健¹，麻生大¹，大竹真紀子^{1,2}，橋爪光³，齋藤義文¹，山中千博⁴

¹JAXA, ²会津大学, ³茨城大学, ⁴大阪大学

月極域探査機（LUPEX）プロジェクトは、将来の宇宙探査活動に向け月極域における水の存在量や資源としての利用可能性を確認することを目的としたインド宇宙研究機関（ISRO）・アメリカ航空宇宙局（NASA）・欧州宇宙機関（ESA）との国際共同ミッションであり、月南極における水の量と質および水の濃集場所と濃集メカニズムに関するデータを探査ローバによるその場観測によって取得する予定である。また、このミッションでは JAXA として重力天体表面探査に関する技術の獲得も目指している。

上記目的達成のため LUPEX ローバに搭載される観測機器として水資源分析計（REIWA）・近赤外画像分光装置（ALIS）・中性子検出器（NS）・地中レーダ（GPR）・表層分圧計（EMS-L）・中間赤外画像分光装置（MIR）・誘電率・熱物性計（PRATHIMA）の計7つが選定されている。これら観測機器のうち JAXA は REIWA および ALIS の開発を担当する。

LUPEX ローバの観測運用は、予め選定された観測領域（ウェイポイント）内をローバで移動しながら、表層の水（氷）探索、地下構造の推定、水素のマッピング等を行う「疎観測」と疎観測結果から選定された水資源の存在が期待される地点における 1.5 m 深さまでの月土壌サンプルの掘削採取およびその分析を行う「詳細観測」に分けられる。本講演では詳細観測時に観測運用が行われる機器であり採取された月土壌サンプルの分析を担う REIWA の現在の開発状況および詳細観測の概要について紹介する。

REIWA は、ローバ搭載の掘削採取機構により採取された月土壌サンプルについて、加熱しながら重量計測を行うとともに加熱により発生した揮発成分について質量分析および微量水分計測を行うことができる統合パッケージ型分析装置である。REIWA はサンプルの加熱および重量計測を担う熱重量計測部（LTGA）、揮発成分の質量分析を担う質量分析部（TRITON）、微量水分計測を担う微量水分計測部（ADORE）等から構成され、それぞれ質量 6–10 g のサンプルの加熱（100 K から 500 K まで）および 9.8×10^{-6} N の分解能での重量計測、 m/z : 1–200 の質量範囲の分子・原子の測定（質量分解能は最大 $m/\Delta m > 120$ ）、サブナノグラム精度で微量水分計測が可能である。加えて、REIWA には ISRO 開発のラマン分光装置である ISRO 試料分析装置（ISAP）も搭載される。REIWA は以上の各分析部によって、月土壌に含まれる水の存在量を 0.1 wt% の精度で測定するとともに月極域における水の存在形態・他揮発性成分の存否について明らかにする。

LDA 計測に向けた検討： 模擬物質を利用した実験的検討

○戸井田愛理¹，宮本英昭^{1,2}，小林真輝人²，竹倉駿也²

¹ 東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻，

² 東京大学大学院工学系研究科 システム創成学専攻

アルテミス計画や LUPEX 計画などによる着陸探査が予定される月極域付近のレゴリスには、水氷が含まれている可能性がある[1, 2]が、その存在量や形態、分布については未解明である。月面上での水氷の濃集は、理論的には地下数十 cm から数 m 程度の深さが効率的[2, 3]とされているため、浅部地下の探査が重要である。この深度までを天然の状況に擾乱を与えることなく観測する手法の1つとして、地中レーダーなどの電磁波探査法が挙げられる。電磁波探査法は地下の誘電率構造に依存するため、その解釈において誘電率に関する情報が重要となる。この情報を得るには、リターンサンプルや模擬物質（シミュラント）の誘電率計測は重要である一方で、誘電率はレゴリスの組成やかさ密度などで決定されるため、1点であっても in-situ で高精度な誘電率の測定を行っておくことは有用である。

私達は月面で誘電率を高精度に計測することのできる月面誘電率計 Lunar Dielectric Analyzer (LDA)を開発している。LDAは2種類のセンサーを搭載し、それぞれの帯域や方式の違いを利用してごく表層と地下浅部という異なる深度の誘電率を計測するよう設計され、アルテミスⅢで宇宙飛行士により月面に展開される予定である。浅部地下の誘電率計測には広帯域アンテナの一種である Vivaldi アンテナを用い、このアンテナが持つ共振周波数や、地下界面が存在した際に生じる定在波の周波数を利用する。レゴリスの誘電率の地下方向の変化によってこれらの周波数は変化するため、誘電率やその地下構造と計測される周波数変化を対応付けることにより誘電率推定が可能となる。本発表では、LDA で計測されるデータの解析手法の確立に向け、レゴリスの誘電率や地下第一層の厚みと周波数変化の関係について模擬物質を用いた実験に基づく検討結果を報告する。

[1] Li et al. (2018) Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(36), 8907-8912.

[2] Spudis et al. (2013) Journal of Geophysical Research, 118(10), 1955-2261.

[3] Nozette et al. (1996) Journal of Geophysical Research, 66(9), 2607-3082.

LDA 計測に向けた検討：共振と定在波の周波数に関する数値シミュレーション

○竹倉駿也¹, 宮本英昭¹, 小林真輝人¹, 戸井田愛理¹

¹東京大学

アルテミス III での運用を目指している Lunar Dielectric Analyzer (LDA) は、月面でレゴリスの誘電率を測定する。誘電率は組成やかさ密度、水氷含有量などの情報をもつため、正確な誘電率計測は、これらの情報を取得する上で重要である。リターンサンプルの分析や、合成開口レーダー等のリモートセンシング、地中レーダー等の着陸探査により、これまでも月面の誘電率が推定されてきた^[e.g., 1,2]が、リターンサンプルは地球重力下で圧密された供試体を計測しているため、月面本来の誘電率を推定することは困難であるし、リモートセンシングデータから表面付近の誘電率を算出する手法^[2]は、表面ラフネスによる不確定性が強いモデル依存であるため、正確な誘電率推定は実施できなかった。LDA は一点であっても正確な誘電率を計測できるため、これを Ground truth としてモデルを改良することで、リモートセンシングによる全球的な誘電率推定への貢献が期待できる。また、水氷と岩石の異なる誘電率の温度依存性を利用すると、水氷に起因する誘電率差を観測することができる可能性が指摘されている^[3]ため、誘電率計測の高精度化が可能となれば、月地下浅部の水氷濃集量やその時間変化をモニタリングすることで、月表層における揮発性物質の輸送過程解明に向けた重要な情報が得られる。

LDA は、合成開口レーダーや地中レーダーにおいて利用されている UHF 帯において、月レゴリスの表面および地下浅部の誘電率を計測する。計測には異なる 2 種類のセンサーを用い、それぞれの特性を利用して異なる深度の誘電率を計測する。地下浅部（数十 cm まで）の測定には Vivaldi アンテナと呼ばれる広帯域アンテナを用い、その共振周波数や地下界面が存在した際に生じる定在波の周波数を計測する。レゴリスの誘電率の地下方向の変化によってこれらの周波数は変化するため、誘電率やその地下構造と周波数変化を対応付けることにより誘電率推定が可能となる。本発表では LDA で計測されるデータの解析に向け、数値計算を用いた検討結果について報告する。

[1] Olhoeft & Strangway (1975) *Earth and Planetary Science Letters*, **24**(3), 394-404.

[2] Gao et al. (2023) *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **197**, 56-70.

[3] Kobayashi et al. (2023) *Earth Planets Space*, **75**(8).

THz 帯での月シミュラントの放射強度計測

○小林真輝人¹、山田崇貴²、宮本英昭¹、笠井康子³

¹ 東京大学、² NICT、³ 東京工業大学

TSUKIMI (Lunar Terahertz SURveyor for KIlometer-scale Mapping) 計画は月周回衛星からのテラヘルツ波帯 (280 GHz 帯及び 490 GHz 帯) のパッシブ観測により、月広域にわたる地下浅部の物理特性の制約及び水氷や金属鉱物などの濃集可能性領域のマッピングを目指している。これらを達成するために、TSUKIMI ではマルチ周波数での偏波観測を実施し、放射輝度計測から輝度温度と偏波比 (RPR) 及び見かけ誘電率 (ABP) を定量する。

テラヘルツ波は波長が <1 mm 以下と短く表層の微小なラフネスの影響を受けるため、表層からの放射輝度の偏波成分の絶対値を単純なフレネル反射で記述するのは難しい。一方で、偏波比 (水平・垂直偏波の強度比) として扱うことで、ラフネスや温度の不均一分布などの各偏波成分強度に均一に影響を与える影響要素がキャンセルアウトされることが期待される。そこで我々はこの偏波比を同等のラフネス、組成、温度などをもつ同一地質区分内において相対的に扱う、Relative Polarization Ratio (RPR) を定義した。この RPR は鏡面である場合は複素誘電率実部と 1 対 1 で対応付けることができるが、mm スケールでの月表層状態は一部領域を除き未知であるため、RPR に基づき計算される誘電率を Apparent Bulk Permittivity (ABP) と定義し、領域ごとの ABP を相対的に扱うことで同一地質区分内における局所的なアノマリーを検出する戦略をとることとした。すなわち、もし同一地質区分内において有意に高い ABP を示す領域があれば、その領域の地下浅部には水氷や金属などが濃集している可能性が示唆されることになる。

ただし、月レゴリスの組成の範囲内程度で、かつ月表層程度のラフネスを持つ際に ABP 差が生じるのか検証された例はこれまで存在しなかった。そこで本発表では、TSUKIMI のセンサーBBM を用いた実験系により、海及び高地の模擬物質 (シミュラント) の放射輝度計測を実施した結果を紹介する。また、TSUKIMI 観測により得られるデータから、TSUKIMI 計画で導出する物理量とその解析手法についても検討したため、合わせて紹介する。

月面探査に向けた レーザー誘起プラズマ発光分光計の開発

○長 勇一郎¹, 諸田智克¹, 湯本航生^{1,2}, 田畑陽久^{1,2}, 相田真里², 与賀田佳澄²,
杉田精司¹, 牧野有里子¹, 日向輝¹, 吉岡和夫¹, 仲内悠祐³, 長岡央³,
大竹真紀子⁴, 川上結生⁵, 三宅亮太⁵, 月面 SR 検討チーム

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 立命館大学, ⁴ 会津大学, ⁵ 株式会社トプコン

有人および無人の月面探査機会の拡大が見込まれる中で、著者らのグループは、月面からのサンプルリターンや地質の特徴づけに向けた科学のおよび技術的検討を進めている。特に重要視される試料として、衝突溶融岩や始原地殻が挙げられる。しかし、これまでに持ち帰られた月試料の多くから、月面の物質は水平および鉛直方向に激しく攪拌されていることが確認されている。そのため、特に科学的価値の高い試料を選別するための分析機器が不可欠である。

Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)は、試料にレーザーパルスを照射し、プラズマ化した試料からの元素固有の輝線発光を分光器で計測することで元素分析を行う技術である。多数の岩石を迅速に測定でき、前処理が不要であり、対象物に接近せずとも計測が可能である強みをもつ。昨年度までに実施された月模擬試料を用いた実験では、月面での水素の定量や純粋斜長岩の識別が可能であることが示唆されている(Yumoto et al. 2023, 2024, Spectrochim. Acta B)。今年度は、特に放射線耐性を持つ特注の小型分光器(Tabata et al. 2024 JAXA RD Report)、月面観察用イメージャ、ジンバル式ミラーを用いてレーザーを任意の岩石に指向する装置、および FPGA ベースの制御回路を結合させた小型 LIBS 装置を構築した。試作結果から、共軸の CMOS カメラ（ピクセル分解能 30 $\mu\text{m}/\text{pix}$ ）により計測対象の状態や組織を撮影できる機能、スキャンミラーによって視野や照射位置を変更できる機能、そして岩石にピントを合わせてレーザーを照射し、LIBS スペクトルを取得できることが確認された。今後は、早期に技術成熟度(TRL)6 を達成することを目標に、光学系および検出器の改修、これらを統合動作させるための FPGA プログラミング、機構部の統合を進めていく。

月面メートル波電波干渉計 TSUKUYOMI の概念検討

A Conceptual Study on Lunar Meter-Wave Radio Interferometer: TSUKUYOMI

○岩田隆浩 (JAXA宇宙研)、土屋史紀 (東北大)、山田亨、磯部直樹、関本裕太郎、宮崎康行、宇佐美尚人 (JAXA宇宙研)、井口聖、山崎康正 (国立天文台)、大西利和、松本健 (大阪公大)、高橋慶太郎 (熊本大)、山内大介 (岡山理科大)

Takahiro Iwata¹, Fuminori Tsuchiya², Toru Yamada¹, Naoki Isobe¹, Yutaro Sekimoto¹, Yasuyuki Miyazaki¹, Naoto Usami¹, Satoru Iguchi³, Yasumasa Yamasaki³, Toshikazu Onishi⁴, Takeru Matsumoto⁴, Keitaro Takahashi⁵, and Daisuke Yamauchi⁶.

1. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2. Tohoku University, 3. National Astronomical Observatory of Japan, 4. Osaka Metropolitan University, 5. Kumamoto University, 6. Okayama University of Science

月面は天文台の建設には厳しい環境であるが、月の裏側は、観測天文学最後のフロンティアとされ、特に周波数約 10MHz 以下 (波長 30m 以上) の電波天文学にとって非常に適した観測サイトである。この環境を利用した月面天文台として、我々はメートル波電波干渉計 TSUKUYOMI: Lunar (=TSUKU in Japanese)-Yonder Meter-wave Interferometric array の設置を提案し、要素技術の開発を行っている。この実現により、地上ならびに地球周回軌道上では得られない、メートル波・デカメートル波の高感度・高空間分解能観測が可能となる。

TSUKUYOMI の主たる観測対象は、宇宙論最後の未開拓分野である宇宙進化初期の「暗黒時代」である。波長 21cm、周波数 1420MHz の中性水素線は、物質分布の情報を提示する。宇宙初期の放射の波長は、宇宙膨張に伴う赤方偏移 z によって引き伸ばされるため、暗黒時代に相当する $z = 30\sim 1000$ の中性水素線は周波数 47~1.4 MHz の電波となる。我々の観測システムの主たる目標は、この電波を空間分解能 0.3 mrad (周波数 10 MHz において)、感度 8mK で観測して、宇宙初期の物質の分布を検出することを目指す。この時代の物理状態の解明は、ビッグバン以前のインフレーションモデルを制約する可能性が指摘されている (Yamauchi, 2022)。

他方で本観測システムは、太陽系科学への貢献も目指す。木星をはじめとする太陽系内各惑星からの電波を詳細に観測することによって、惑星の電波放射機構を統一的に理解する。アンテナ素子数が増加する最終段階では、例えば AKR タイプの強い放射タイプの、太陽系外木星型惑星からの電波の検出も可能となる。また、干渉計データの解析から正確な情報を獲得するためには、観測サイトの環境計測に基づく多くの校正が重要であることから、月面各サイトにおいて、月の電離層、塵などの環境計測の長期モニタリングや、直接波と地下反射波との干渉を利用した地下構造のデータが得られる。

本計画のプロトタイプ段階では、伸展式ショートダイポールアンテナのユニット 1 基を設置し、2030 年代の本格観測開始時には 10 素子程度まで増やすことを目指す。これまでに、月面ラング、小型ローバ、有人圧ローバへの搭載を想定したアンテナユニットの設計、アンテナ伸展機構および低雑音プリアンプの開発、ならびにこれらを用いたシステム設計を行っている (e.g. Iguchi *et al.*, 2024)。これらの観測目標と概念検討結果について報告する。

参考文献：

Iguchi, S., *et al.*, *SPIE Astronomical Telescopes+Instrumentation*, 13092–99, 2024.
Yamauchi, D., *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2022**, id.073E02m, doi: 10.1093/ptep/ptac095, 2022.

日本における月震観測ネットワーク構築にむけた 開発状況

○田中智¹, 川村太一², 新谷昌人³, 辻健³, 小野寺圭祐³,

¹宇宙航空研究開発機構, ²パリ地球物理学研究所 (IPGP), ³東京大学

JAXA を中心に検討、開発が進められている将来の月科学探査の一環として月震ネットワーク構築がある。2022 年度からフィージビリティスタディーを経て 2023 年度からフロントローディング (FL) 開発を遂行している。アポロミッション以来実現されていない月震観測ネットワークは月内部構造解明するための強力な観測システムであり、ネットワークの規模や設置場所、設置個数によって解明できる深さや解像度が異なる。また、人工震源を用いることによって、表層付近の詳細構造を解明可能にするなど、科学だけでなく将来の月利用にとっても重要な観測手段である。しかしながら観測システムの設置技術、長期間運用技術など技術的ハードルは低くない。

我々は開発の主眼として第一に、最高性能の広帯域地震計の開発を挙げており、レーザー干渉方式を採用した地震計開発に本格的に着手した。レーザーの周波数ノイズの低減化などを達成し、アポロミッションで行った長周期地震計のノイズレベル程度を実現することに成功した。現時点ではすでに月探査用として宇宙機搭載用として開発済みの地震計 (固有周波数 $\sim 1\text{Hz}$) と組み合わせることさらに高感度化にむけた開発を続行している。

一方、地震観測システムを設置するハウジングの基本設計についても検討を進めている。フィージビリティスタディー開始当初は観測センサーのみを地面に設置させ、レーザー駆動回路やデータ処理装置、および通信装置は着陸機に搭載するコンフィギュレーションで検討を進めていたが、FL では、より汎用性を高めることも目的として観測データ収集からデータ通信までを搭載した月震観測モジュールに変更した。極域に設置すること、電力リソースは別のパワーステーションから供給される事を前提に基本設計を進めている。

人工地震源についても小型軽量 (直径 $\phi 50$, 高さ 50mm 程度) でかつ月面環境でも稼働できるボイスコイル型起震源の開発を進めている。本装置をローバーに搭載して地震計設置地点周辺で駆動させることにより地下 50–100m 程度の地下構造を明らかにすることが可能になると見込んでいる。

軽量・小型 X 線撮像分光装置を用いた 月面蛍光 X 線探査の検討

○戸井田愛理¹, 江副祐一郎², 伊師大貴³, 沼澤正樹², 石川久美²

¹ 東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻,

² 東京都立大学理学研究科 物理学専攻, ³ 宇宙航空研究開発機構

月表層の元素の分布や全体量を知ることは、月惑星の地質学的進化を理解する上で重要である。近年発展しつつある着陸探査活動においても、月表層の情報は、科学・資源的価値のある着陸地点を選定する上で重要な指標となる。月表層の情報を得る手法として、太陽 X 線に照らされた月面の元素が放つ蛍光 X 線分析が挙げられる。しかし、過去の月周回衛星による蛍光 X 線探査において、月全球にわたる高解像度マッピングが行われた例はない。そこで本研究では、月面での蛍光 X 線スペクトルを見積もり、観測装置の応答を考慮し、月全球の撮像分光観測について検討した。

まず、太陽 X 線の月面での反射について、先行研究[1]を参考に蛍光 X 線、レイリー散乱、コンプトン散乱を計算し、月面の元素分布を考慮した X 線発光モデルを作成した。次に、本発光モデルを用いて、月周回衛星からの撮像分光観測を模擬した。観測装置には、我々が現在開発している、超小型衛星にも搭載可能な軽量かつ小型の X 線撮像分光システム（3U サイズ程度）[2]を用いる。光学系として、Wolter 型と Lobster-eye 型の 2 種類を仮定し、太陽 X 線の入射・反射角度、さらに軌道高度に対する依存性も含めて検討した。M フレア 1 回の継続時間を 1000 s とした場合、高度 4000 km の地点において、M クラスフレアが 1 回生じると O-K, Fe-L, 10 回生じると Mg-K, Si-K, Al-K といった低エネルギー側の蛍光 X 線を 25 km × 25 km の空間分解能で検出できることがわかった。また、高度 75000 km 地点からは、M クラスフレアが 1 回生じた場合、O-K, Fe-L, 10 回生じた場合、Si-K を観測でき、100 回生じた場合に Mg-K, Al-K の蛍光 X 線を 700 km × 700 km の空間分解能で観測できることがわかった。これらの結果より低高度での観測が優位であることが明らかになった。本講演では、以上の月面蛍光 X 線探査の検討について報告する。

[1] K. Ogawa et al. (2008), “Numerical estimation of lunar X-ray emission for X-ray spectrometer onboard SELENE”, Earth, Planets and Space, 60, 283.

[2] M. Numazawa et al. (2024), “Development of ultra-lightweight X-ray telescopes fabricated with MEMS technologies for GEO-X”, Proc. SPIE, 13093, 13093E.

3次元地形モデルとハイパースペクトルデータの融合による露頭調査

○豊川広晴^{1,2}、Matteo Massironi³、Riccardo Pozzobon³、Bruno Casarotto³、
Giacomo Melchiori³、春山純一^{1,2}、岩田隆浩^{1,2}

¹総合研究大学院大学、²宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構、³パドヴァ大学

可視近赤外域の分光スペクトルは、天体表面の鉱物組成を理解する上で重要な鍵となる。大量の波長バンドで画像データを同時取得するハイパースペクトルカメラは、各画素ごとに分光スペクトルを調査することを可能にし、物質の組成分布を解明する上で注目されている。また近年、複数の角度から撮影した画像をもとに対象物の3次元モデルを作成するフォトグラメトリー技術が発展してきた。これらの技術は、地球上の露頭における組成を構造的に理解することを可能にするため、今後地球の火山学・地質学の理解を進める上で重要となることが期待される。また、地球のみならず、月・火星のような他天体におけるその場観測でもこれらの技術の適用が期待でき、今後加速する他天体への着陸探査による地質調査にも有効な手法となる可能性がある。しかし、現状これらの技術を用いた地質調査は例が少なく、データの取得・解析手法も確立しているとは言えない。したがって、現時点でこれらの技術を用いた地質調査の解析フローを確立することは、今後の地球科学分野の発展や惑星探査の進展のために重要である。

本研究では、月と類似した組成をもつイタリアの Lessini 山・Etna 山における玄武岩質露頭で野外調査を実施した。そして可視近赤外分光画像データの取得と露頭の3次元モデル作成を行なった。可視近赤外分光画像データの取得には、それぞれ 400–1000 nm と 900–2500 nm の波長範囲を持つ2種類のハイパースペクトルカメラを使用した。フォトグラメトリーに基づく露頭の3次元モデルの作成には、高解像可視カメラを搭載したドローンを使用し、様々な角度から撮影した露頭の画像を使用した。さらに、取得した近赤外分光画像データを露頭の3次元モデルに投影することで、3次元のハイパースペクトルデータを作成した。この3次元ハイパースペクトルデータは、露頭の凹凸による分光データへの影響を考慮した測光補正を可能にした。そして作成した3次元ハイパースペクトルデータをもとに、主要鉱物の吸収帯波長や吸収率の分布を調査した。

本発表では、これらの野外調査による結果を紹介する。また、他天体における探査に対しての本研究手法の適用可能性についても議論する。

月面サンプルリターン探査の実現に向けた科学検討と 機器開発の状況

○諸田 智克¹, 長 勇一郎¹, 長岡 央², 仲内 悠祐², 杉田 精司¹, 大竹 真紀子³,
田畑 陽久⁴, 相田 真里⁴, 与賀田 佳澄⁴, 宮崎 理紗⁴, 鹿山 雅裕¹, 新原 隆史⁵,
吉光 徹雄⁴, 森 治⁴, 佐伯 孝尚⁴, 月面科学 FL SR チーム

¹東京大学, ²立命館大学, ³会津大学, ⁴宇宙航空研究開発機構, ⁵岡山理科大学

月は地球型惑星の初期進化履歴や太陽系の力学的進化の記録をよく保存している。それらを読み解くためには、適切に選別された月面露頭の地質調査とサンプルリターンが必須である。国際的な月面探査が活発化している状況下で、それらの機会を利用した科学探査の検討は急務である。宇宙政策委員会の「月面活動に関する基本的な考え方」では、1) 月面からの天体観測、2) 重要な科学的知見をもたらす月サンプルの選別・採取・地球帰還、3) 月震計ネットワークによる月内部構造、が重要な科学テーマとして挙げられている。我々は3科学を並行して推進するためのチームを組織し、JAXA 国際宇宙探査センターが募集した「2021 年度月面での科学研究・技術実証ミッションにかかるフィジビリティスタディテーマ」に採択され、検討を進めてきた。その中でも我々、サンプルリターン (SR) チームは月面 SR 探査による第一級の科学成果の導出を目指し、段階的な技術・科学成果獲得のためのシナリオ策定とともに、リモートセンシングデータ解析による将来探査領域の調査・選定、その場試料選別機器の検討・開発を行ってきた。フィジビリティスタディの活動は 2022 年度で一旦終了したが、2023 年度からはフロントローディング活動へと拡大を行いつつ、科学ロードマップの検討と観測装置開発を進めている。

我々が目指す科学目標は、(1) 太陽系初期の天体衝突史の復元、(2) 月のマグマオーシャン (LMO) のバルク組成の決定による月形成条件への制約、の2つに大別される。太陽系初期の天体衝突史を解明するためには、巨大衝突で作られた衝突溶融岩の年代決定が必要となる。近年の軌道上から観測された高解像度データから衝突盆地内部の衝突溶融岩露頭の探索が可能となった。特に 39 億年前の衝突頻度の集中があったか否かを決定するための鍵となるネクタリス盆地については、盆地形成時につくられた衝突溶融岩の大部分は盆地内部のフロアに溜められていると考えられるが、それらの岩体はその後のマグマ噴出により覆われてしまっている。一方で、溶融岩体の一部はその後のクレータ形成によって掘り起こされ、岩塊として表面に露出していると考えられ、そのような領域の検出を進めてきた。このような最近のクレータ形成によって露出した岩塊は宇宙風化作用や様々な変成を受けていないという利点があり、新鮮岩塊の露出領域が次世代の SR 探査のターゲットとなる。LMO のバルク組成を決定するためには、LMO から直接固化したと考えられる始原的な地殻岩石の SR が必要である。地殻岩石の同位体比や揮発性物質質量から、月の材料物質の形成時の到達温度を推定することで、月形成仮説を強く制約することが可能となる。LMO から直接固化した岩石の最有力候補はかぐやの観測により月高地に普遍的に発見された純粋斜長岩 (PAN) である (Ohtake+ 2009, Yamamoto+ 2012, Nagaoka+ 2023)。始原地殻が残る月裏側高地に存在するジャクソンクレータの中央丘には PAN が広く露出している。それらの PAN は、マグマの結晶化において最初期に固化した地殻である可能性が高く、最も始原的な情報が期待できるため、最重要探査領域の一つに挙げられる。

上記の重要岩石を月面その場で選別・分析するための観測装置として、探査領域の地質把握とリモートセンシングデータとの接続を目的とした元素・鉱物組成把握のためのガンマ線・中性子分光計、広域分光カメラ、詳細地質把握と試料の元素・鉱物組成、岩石組織観察のための、研削機構、顕微分光カメラ、レーザー誘起絶縁破壊発光分光計 (Laser-induced breakdown spectroscopy; LIBS)、ラマン分光計、その場年代測定のための LIBS-質量分析計による K-Ar 年代計測装置の開発を進めている。また、月試料や模擬物質の選定及び各機器での分析も進めている。

月極域の高精度な標高数値モデル (DEM) の作成検討

Preliminary results of High-Resolution Digital Elevation Models in Lunar Polar Regions

○宮崎 理紗¹, 原 誠一², 山本 光生¹, 井上 博夏¹, 隈 汐莉南², 黒澤 和臣², 佐藤 広幸¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²株式会社 NTT データ CCS

月面の高解像度なデジタル標高モデル (DEM) は、地形データを必要とする月の地質学的研究や将来の探査ミッションにおける着陸地点の選定などにおける基盤データとして重要である。特に極域 DEM は、水氷の存在可能性や地球との通信条件の観点で、研究及び探査における需要は高い。本検討では、Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) に搭載された Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) と SELENE 搭載の Terrain Camera (TC) のデータを用いて、月極域の高精度 DEM を作成した。レーザー高度計である LOLA による DEM は、高さ方向の解像度に優れ、一方ステレオ視観測による TC DEM は、全域にわたる均一なデータセットに強みがある。LOLA DEM と TC DEM の特徴を活かし、より高品質な DEM を作成するため、今回は特に「LOLA DEM と TC DEM のズレ量評価とその補正」と「LOLA RDR データ内挿手法」に焦点を当てて改良を行なった。

まず、LOLA DEM と TC DEM との比較で見られた数 m~数十 m の位置ズレを補正するため、LOLA RDR データを用いて TC データの観測ライン単位でのズレ量評価と補正手法の検討を行なった。また、LRO の極軌道観測に由来する測線に沿った筋状のアーティファクトを軽減するため、我々が従来採用してきた中点逐次線形内挿方法 (以下、従来内挿法) を改良し、各測点での傾斜平面を考慮した新しい内挿手法 (以下、新内挿法) を検討した。

本検討結果として、LOLA DEM と TC DEM の水平方向のズレ量では、補正前は多くが ±60m の範囲でのズレがあったが、補正後はシーンによっては高さの傾きや局所的な誤差があるものの、両者間の水平方向のズレ量が効果的に補正されていることが確認できた。また高さ方向のズレ量については、水平方向のズレ量評価において TC DEM における CT 方向の傾きが見られたことから、観測ラインごとの高さの傾きを補正した。その結果、補正前では ±15m の範囲での差が、補正後は 0.5m 程度の差となり、CT 方向の傾きによるズレがほぼ解消された。

LOLA 内挿手法の検討結果としては、公開されている LOLA DEM (GDR) および従来内挿法で作成した DEM と比較して、新内挿手法で作成した DEM は側線に沿った筋状のアーティファクトが軽減されていることが確認できた。また緯度帯ごとの評価から、この新内挿手法は低緯度ほど効果が大きいことがわかった。

高精度な月極域 DEM 作成に向けて、今回は特に LOLA DEM と TC DEM とのズレ量評価及びその補正、また LOLA RDR データの内挿手法の改良を実施した。SELENE の軌道データまたは姿勢データの精度に主に起因すると考えられる LOLA DEM と TC DEM のズレを補正し、LOLA データの測線に起因する低緯度域での筋状のアーティファクトが改善した。本発表では、高精度な月極域 DEM 作成に向けた活動の現状について報告する。

Chang'E-4 Yutu-2 ローバー搭載地中レーダー観測による地下岩石分布の推定

○神田恵太郎¹, 熊本篤志¹, 石山謙², 加藤雄人¹

¹ 東北大学, ² 東京国際工科専門職大学

月面は厚さ 5~10 m 程度のレゴリスに覆われている。レゴリス中に含まれる岩石のサイズ分布は月面の成熟度を示し、アポロ計画で採取されたコアサンプルの分析[1]や軌道上からの光学観測[2]などから調査されてきた。近年では中国の Chang'E ミッションにおける地中レーダー観測からもレゴリスの探査が進められている[3]。Chang'E-4(CE-4)は 2019 年 1 月に南極エイトケン盆地内の Von Kármán クレーターに着陸した[4]。CE-4 の Yutu-2 ローバーには月面地中レーダー Lunar Penetrating Radar (LPR) が搭載されている。LPR による観測からレゴリス中に含まれる岩石 (15 cm 以上) の空間分布が調べられてきた[5]が、それぞれの岩石のサイズは区別されておらずサイズ分布については過去の研究では十分に理解されていない。本研究の目的は LPR の観測データからレゴリス中に含まれる岩石のサイズを推定する手法を開発することである。

まず FDTD シミュレーションにより岩石サイズの違いによる反射エコーの位相特性の変化を調べた。電磁波は誘電率が高い媒質から低い媒質に入射した場合は同位相で反射され、低い媒質から高い媒質に入射した場合は逆位相で反射される。LPR の高周波チャンネルと同じ 500 MHz (分解能 15 cm) の電波を使用してレゴリス (誘電率 3) 中に埋没した、大きさ 5, 10, 15,...,30 cm の岩石 (誘電率 9, 円形) に対する地中レーダー観測のシミュレーションを実施した。その結果、分解能以上の岩石 (10~30 cm) の計測では送信波と逆位相のエコーが一对確認された(タイプ A とする)。先に到来するエコーは岩石上端で反射された成分で、誘電率から期待される逆位相になっている。一方後に到来するエコーは岩石下端で反射された成分だが誘電率から期待される同位相とはなっていない。これは下端で反射された成分と側面で反射された成分が重畳して位相がずれて逆位相となったものと考えられる。一方分解能未満の岩石 (5 cm) の計測では岩石上端・下端からのエコーは分解されず、送信波と同位相のエコーが単体で確認された (タイプ B とする)。これは 10~30 cm の岩石では分解されていた上端のエコーと下端のエコー (共に逆位相) が分解能以下の計測で一部重複した結果、同位相のエコーが 1 つだけ生成・反射されるものと考えられる。

次に LPR データに含まれる地下エコーの位相特性を分類した。基礎的なデータ処理としてリサンプリング、バンドパスフィルター処理、ゼロ時刻補正、背景ノイズ除去、ゲイン補正を行い、得られたレーダープロファイルのうち最初の 500 m の経路内に含まれるエコー 39 例について位相特性を調べた。その結果タイプ A に分類されたエコー対が 2 組見つかり、岩石サイズを推定したところそれぞれ 38 cm, 17 cm と推定することができた。また、タイプ B に分類されるエコーが 17 例見つかった。しかし、残り 18 例についてはタイプ A, B どちらにも該当しない、送信波と逆位相のエコーが 1 つだけ得られた。そのため、今後より詳細な位相特性の分類法を確立する必要があると考えている。

参考文献

- [1]McKay et al. (1991), Lunar Source Book [2]Di et al. (2016), doi: 10.1016/j.pss.2015.11.012
[3]Su et al. (2014), doi:10.1088/1674-4527/14/12/010 [4]Li et al. (2021), doi:10.1126/sci-adv.aay6898 [5]Zhang et al. (2021), doi:10.1016/j.epsl.2021.116912

無水鉱物への重水素イオン照射実験による 月表層における H₂O 生成過程の解明

○森田里咲¹, 木村智樹¹, 仲内悠祐², 西野真木³, 寺田健太郎⁴, 福田航平⁴

¹ 東京理科大学理学研究科, ² 立命館大学, ³ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ⁴ 大阪大学
大学院理学研究科

月表層における水の生成・維持の過程は、有人探査の資源確保や地球の水の起源解明にとって非常に重要である。赤外天文台 SOFIA による観測 (Reach et al., 2023) では水分子特有の $6.1\mu\text{m}$ 輝線スペクトルが月の高緯度の表層で検出されている。また、嫦娥 5 号の 11-32 億年前の地域からのリターンサンプルからは隕石衝突で形成されたガラスビーズ内に水和の痕跡が発見されている (He et al., 2023)。LCROSS ミッションにより、南極の永久影でも水の氷が発見されている (Colaprete et al., 2010)。月表層の水の起源として、隕石衝突による水の供給と (Watson et al., 1961)、内因性起源の水 (Saal, 2008)、太陽風中の水素イオンと表層岩石の化学反応 (Zeller et al., 1966) が提案されている。三つ目のプロセスでは、水素イオン照射を受けた表層岩石が OH 基を形成し、さらに水素イオンが照射されることによって、H₂O が生成される反応だとされている。しかし、太陽風照射による水生成は、表層の複雑な物理化学反応を含むため、理論モデルによる再現は不可能であり、寄与が定量化できていない。そこで本研究は、月表層鉱物を模したサンプルに重水素イオンを照射する実験を行い、太陽風照射による水生成率の定量化を試みた。実験の結果、照射によってサンプルの反射スペクトルにおいて、 $3.8\mu\text{m}$ の吸収構造が新たに形成されたことが確認され、Ichimura et al., 2012 の OD 基の吸収特徴と類似していることが明らかになった。また、質量分析器により照射中の D₂O 放出を確認し、照射粒子 1 個ごとに対する D₂O 生成率は $0.02/\text{incident ion}$ と見積もられた。サンプル中に形成された OD 基と照射による D₂O 放出の双方を検出したのは本実験が初であり、太陽風による水生成を実験で再現し、その生成率を定量化できた。実験で得られた D₂O 生成率に基づき、太陽風照射説による月極域の H₂O の堆積量の定量化を行うと、31.5 億年で $3.0 \times 10^{14}\text{kg}$ となった。今後は月表層の主要鉱物である斜長石への照射実験をする予定である。発表では、本研究の現状を報告する。

Marius Hills と Mare Tranquillitatis の溶岩に対する鉍物的類似性

石山 謙¹

1)東京国際工科専門職大学

月には PKT (Procellarum KREEP Terrane) と呼ばれる放射性元素に富んだ領域が存在しており、この熱源が月の火山活動を引き起こしたと考えられている [e.g., Hiesinger et al., 2000; 2003]。PKT の内側と外側では溶岩組成が違っていることがわかっており、チタン (TiO₂) 含有量は、PKT 外側では~3.6Ga よりも新しい時代で時間と共に低下する傾向、PKT 内側では~2.3Ga にチタン含有量が急激に増加する傾向があり、月のマグマ源がこの時代に変化した可能性を示した[Kato et al., 2017]。Marius Hills は PKT 領域内の Oceanus Procellarum という領域に存在する火山であり、Mare Tranquillitatis は PKT 領域外に存在する海 (玄武岩領域) である。両者の領域は地理的に約 2400km も離れており、これまで両者の関連性は考えられてこなかった。本研究では、Marius Hills と Mare Tranquillitatis の鉍物的な類似性を調査することを目的とした。

本研究では、鉍物の類似性を調査するため、SELENE に搭載された Multiband Imager (MI) に基づいた鉍物マップ (Plagioclase, Olivine, FeO, Clinopyroxene, Orthopyroxene) [Lemelin et al., 2019]を用いて、Marius Hills と Mare Tranquillitatis の溶岩ユニットの組成を調査した。溶岩ユニットに関して、Mare Tranquillitatis は先行研究の結果[Hiesinger et al., 2000]を利用した。一方で、Marius Hills の溶岩ユニットは未分類のため、鉍物マップから分類を行ない、4つの溶岩ユニットに分類した。Marius Hills と Mare Tranquillitatis の鉍物を比較した結果、両者には、鉍物的な類似性があることが明らかとなった。

Marius Hills は、地理的には Oceanus Procellarum 内部にあるが、それらの間に鉍物的な類似性を確認することはできなかった。Marius Hills と Mare Tranquillitatis の溶岩組成の時系列変化を調べるため、クレータ年代学[Neukum, 1983]に基づき、Marius Hills の年代を推定した。Mare Tranquillitatis は先行研究の結果[Hiesinger et al., 2000]を利用した。Marius Hills の各鉍物組成の時系列変化は、Mare Tranquillitatis の時系列変化と似た傾向を示した。つまり、Marius Hills は、Mare Tranquillitatis と似たマグマ源が地下に形成しており、Mare Tranquillitatis よりも分化が進んだ溶岩が噴火していると推察される。これまでは、PKT 領域内外でのマグマ源の違いが指摘されていたが[Kato et al., 2017]、本研究結果は類似するケースもあることがわかった。このような発見は、月の火山活動の複雑性の解明に役立つと期待される。

自転する粘弾性天体の扁平化に関する数値シミュレーションと月の化石バルジについての検討

○寺戸 聖菜¹、亀山 真典¹

¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

「化石バルジ」とは、静水圧理論から導き出される理論上の形状よりも逸脱した、月の赤道域の過剰な膨らみを意味する。これは、月の公転軌道半径が現在よりも小さかった過去に獲得された形状が、現在まで維持された結果であると解釈されている。本研究の究極の目標は、化石バルジに表わされる月の大局的な形状を鍵にして、月地球の軌道進化や月自身の進化を理解することにある。この最終目標の達成に向け、我々は自転する岩石天体が遠心力の影響を受けて時間とともに形状を変える過程を追跡するプログラムの開発を行っている。

本研究で開発したプログラムでは、核とマントルの2層から構成された岩石天体の内部および境界面（地表、CMB）が、自転による遠心力と潮汐力、自らの重力を受けて変形する様子を数値的に解く。その際、天体の内部構造は、核の大きさと密度、およびマントルの密度およびレオロジー（粘性あるいはマクスウェル粘弾性）によって特徴づけられるものとしている。天体の変形を記述する基礎方程式は変数分離法により解く。具体的には、基礎方程式を水平方向に球面調和関数展開することによって変形の鉛直方向分布を記述する連立常微分方程式に変形し、得られた方程式を propagator matrix 法あるいは有限体積法を用いて解く。

ここで開発したプログラムの検証の第一歩として、岩石天体マントルを（弾性をもたない）高粘性流体と仮定したシミュレーションを行った。ここでは、マントル内部の粘性構造をさまざまに変更することによって、形状の変化する時定数がどう変化するか注目して解析した。その結果、平衡な形状に達するまでの時定数はマントル全体の粘性率、あるいは「地殻」に相当する表面付近の薄い層内の粘性率に比例して増加するものの、その時定数が数十億年程度の長さになるには 10^{27} Pa・s 程度の粘性率を必要とすることが分かった。

次に、岩石天体マントルのレオロジーをマクスウェル粘弾性に変更することにより、弾性変形の効果に注目した予備的なシミュレーションを実施した。外力（遠心力、潮汐力）の時間変化がなく、マントルの粘性率が空間的に一様であると仮定した簡単な場合で検証したところ、粘弾性の効果が正しくモデル化できていることが確認できた。具体的には、外力を加えた直後には弾性による変形が卓越するが、十分長い時間が経過した後は弾性の値によらず、静水圧理論で与えられる形状に到達した。また先行研究のベンチマーク計算の結果とも比較したところ、本研究のプログラムが変形量の時間変化を正しく追跡できていることも確認できた。

さらに現在は、天体表層の低温部分が弾性優位で変形する効果を取り入れたシミュレーションを目指して、マントルの粘性率が空間的に一様でない場合の取り扱いを可能とするようなプログラムの改良を進めている。これと並行して、月の軌道進化を模した外力項の時間変化やマントル内部のレオロジー構造の時間変化の効果の導入、とりわけ後者については地殻やマントル内部に分布する放射性元素による発加熱の効果も考慮した月の熱史を反映したモデル化の実現に向けた機能の追加も試みている。本発表ではその成果についても触れる予定である

月周回衛星 ARTEMIS で観測されたダスト衝突に 起因する電圧信号の解析

The Analysis of Voltage Signals Caused by Dust Impacts Observed by the Lunar
Orbiter ARTEMIS

宝本 航大¹、栗田 怜¹、小嶋 浩嗣¹

¹京都大学 生存圏研究所

ナノメートルサイズのダスト粒子は宇宙空間に存在し、これまでの観測からこれらの粒子が高速($> 1\text{km/s}$)で衛星と衝突する際に、衛星周囲にプラズマ雲が生成されることが確認されている。ダスト衝突によって発生するプラズマ雲は衛星による電場観測の解釈に影響を与える可能性があり、この衝突の痕跡がパルス信号として現れることが知られている。これらの信号は、ボイジャー、カッシーニ、Wind、STEREO、MMS など多くの衛星ミッションで過去に観測されている。本研究では ARTEMIS 衛星に搭載された電場計測器(EFI)から得られたデータを解析し、月周回軌道におけるダスト衝突と考えられる信号の特定を進めた。ダスト粒子が衛星本体に衝突した際には衛星上の全てのプローブで同じ特徴を有したパルス信号を同時に検出する。ARTEMIS 衛星に搭載された EFI は 6 つの電場プローブで個別の計測を可能とするため、ダスト衝突の信号の検出に適している。ARTEMIS では高時間分解能の波形データを 1 日に 3~5 回、1 回あたり約 8 秒間取得する。本研究ではダスト衝突によって入力されるパルス信号に対し、対となるプローブのパルス信号の和は強めあい、差が殆どゼロになるという特性を利用して詳細な解析を実施した。また、プローブ間の位相差も殆どゼロであることも確認しイベントの信頼性を検証した。その結果、観測されたパルス信号の特徴に基づき、イベントを二つの主要なグループに分類した。特に強度の高い信号が確認されたイベントグループにおいて、信号の到来方向と信号の大きさの詳細な解析からダストの粒径と速度関係を推定し、これらのグループのダスト粒子が衛星本体に衝突したインターステラダスト(ISD)である可能性が高いと示唆された。また、もう一方のグループでは特定のプローブでのみ強い信号が観測されており、衛星本体ではなくプローブに衝突したダストによる信号を表している可能性が示唆される。

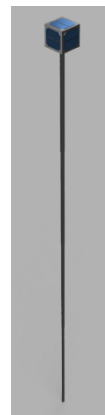
月面探査ローバへの搭載を目指したステレオカメラの基礎実験

Basic Study of 3D Stereo Camera for Moon Rover

○川崎稜平¹, 佐々健太郎¹, 清水翼¹, 荒井武彦¹

¹前橋工科大学大学院 システム生体工学専攻

月の進化過程を明らかにするには、内部の熱流量の測定が重要である。我々の研究室では、アポロの宇宙飛行士が熱プローブを月面に突き刺して熱流量を計測した実験と同じように、ロボットローバ（右図：熱プローブローバ）を用いて熱流量を自律的に測定することを目指している。本研究では、熱プローブローバに搭載する地形や表層の物理状態を確認するためのステレオカメラの



開発状況について報告する。我々が開発している熱プローブローバは、熱プローブを軸とする一本足ロボットで、リアクションホイールによる3軸姿勢制御で倒立する。下面にTOFセンサを4つ搭載し、32bitマイコンを用いたオンボードのリアルタイム処理で地表面との角度を求め、姿勢を制御する。経験的な物理モデルとして人間が熱プローブを砂に突き刺す動作を構築し、無人での熱流量測定の精度を高める。熱プローブローバに搭載するステレオカメラは二つのカメラを用い、両者をキャリブレーション、平行化することによってステレオマッチングを行うことで視差マップと三次元座標を取得する。取得した視差を距離に変換することでDEM (Digital Elevation Map)を作成する。

本発表では、熱プローブローバの首振り動作によって360°の周囲をステレオカメラで撮影し、DEMを作成する手法とその精度について紹介する。

超小型ローバー「YAOKI」を応用した 科学観測類型の提案

中島紳一郎¹、石原幸一¹、○寺菌淳也²

¹株式会社ダイモン、²合同会社ムーン・アンド・プラネッツ／株式会社ダイモン

scitech@terakin.com

株式会社ダイモンでは、超小型ローバー「YAOKI」(ヤオキ)[1]の開発を進めている。YAOKI は月面で移動する機能を持つ超小型ローバーであり、大きさは 15cm×15cm×10cm、重量は 498g である。

YAOKI は 2024 年 11 月～2025 年 1 月、NASA CLPS の一環である Intuitive Machines 社の着陸機 IM-2 に搭載され月面へ到達する予定である。

以下写真のように、大きな二輪を両側に備えていることが形状上の特徴で、この中央にカメラを搭載し、月面の様子を撮影することが可能である。

YAOKI は超小型でありながら、月面のレゴリスや岩石にも耐える高走破性、落下などの衝撃に耐える高耐久性、小型軽量であることからくる低価格などの優れた特徴を持つ。これらの特徴は、将来の月面科学探査にも大いに役立つと思われる。

本発表では YAOKI に搭載できる科学探査類型を提案し、将来の月面科学探査への有効性・可能性を議論する。

参考文献 [1] <https://dymon.co.jp/yaoki>

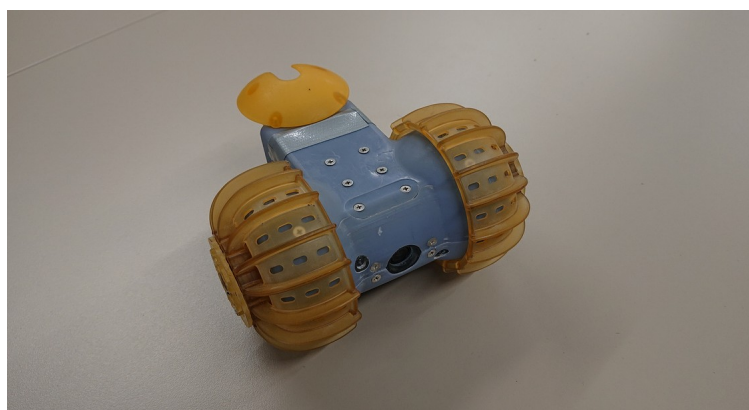


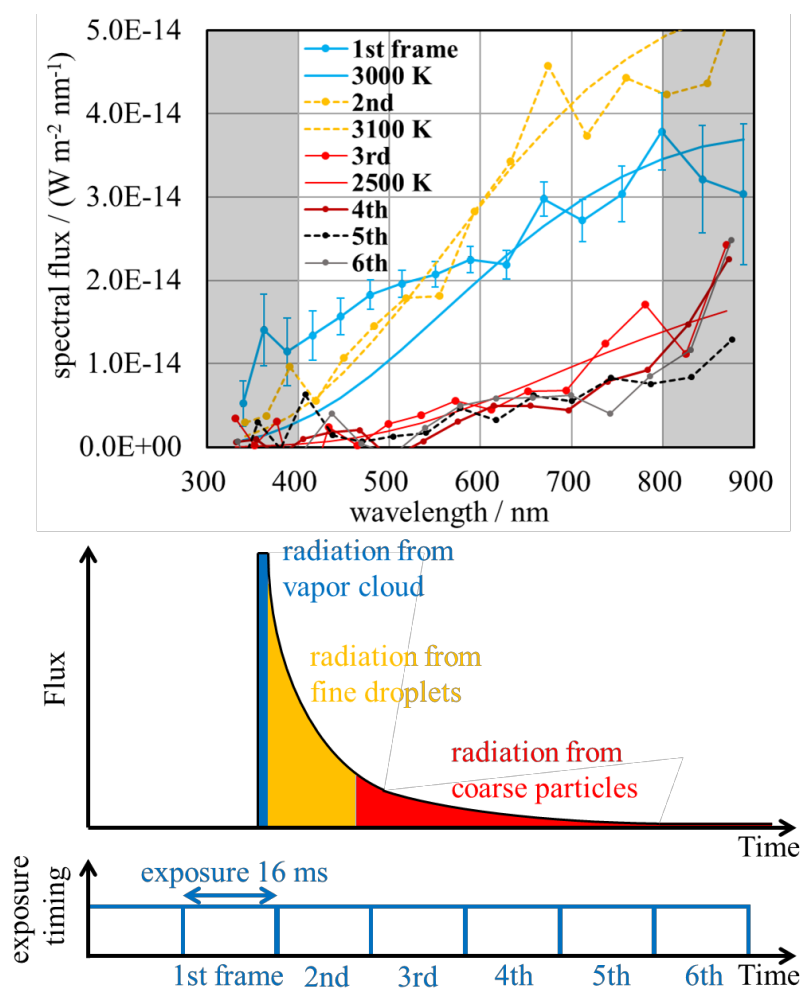
図1 YAOKI の形状 ※フライトモデルではない

月面衝突閃光の低分散スペクトル

○柳澤正久¹、阿部新助²、小野寺圭祐³

¹電気通信大学、²日本大学理工学部航空宇宙工学科、³東京大学地震研究所

メテオロイド(通常 おにぎり程度の大きさ)の月面への衝突による閃光は月面衝突閃光と呼ばれている。2 観測点以上からの同時観測で月面の現象であると確認された衝突閃光のうち低分散スペクトル(波長分解能約 40nm)が得られているものは 16 イベント存在する。その一つ(Flash 171124、観測日は 2017/11/24)は R 等級が 7 と明るく 6 フレームにわたってスペクトルが得られ、また露光のタイミングも良かったらしく、時間変化をもっともらしいシナリオで説明することができる(下図)。



1st frame は、約 3000 K の黒体放射と約 6000 K の黒体放射あるいは 400 – 600 nm の線スペクトル群の重ね合わせを示しているようである。露光のタイミングが良かったために継続時間 1 ms 以下と考えられる衝突蒸気雲からの放射が見えているようである。2nd frame から 3rd frame への減光は、大きさ数 10 μm の溶融液滴の冷却で説明できる。月のレゴリス中のガラスビーズの生成過程を見ていると思われる。3rd frame 以降の約 2000 K でのゆっくりした冷却は、溶融物と固体破片が混じった 1 mm 以上の比較的大きな粒子からの放射を見ている

可能性がある。すべての閃光のスペクトルをこのようなシナリオで説明できるとは限らないが、それは明るさが十分でなく、露光のタイミングにも恵まれなかったためかも知れない。

小型月着陸実証機 SLIM 着陸地点周辺の ボルダーサイズ頻度分布

Boulder size-frequency distribution around SLIM's landing site

○本田親寿¹, 佐藤広幸², 横田康弘², 宮崎理紗², 梶谷伊織², 大竹真紀子¹,
仲内悠祐³, 長岡央³, 佐伯和人³, 西野真木², 西谷隆介², 石原吉明², 坂井真一郎²

¹会津大学, ²宇宙航空研究開発機構, ³立命館大学

2024 年 1 月 20 日（日本時間）、日本初の小型月着陸実証機 SLIM（Smart Lander for Investigating Moon）は、月面でカンラン石の多い領域の 1 つである Shioli クレーターの東側エリアに着陸した。今回のミッションの最終目的地である Shioli クレーター周辺はそのクレーター形成時に飛散したレゴリスや岩塊が多い。この領域について月周回衛星かぐや搭載の MI/SP の観測データの解析からこの領域の存在するレゴリスや大きな岩塊はかんらん石に富むことが予想され、かんらん石の Mg# や粒径を調査する目的の MBC（Multi-Band Camera）の観測対象に選ばれた。観測対象となる岩塊に接近することと相反する安全な月面着陸という要求を両立させるため、最終着陸地点は事前に慎重に選定された。SLIM は実際の着陸過程では航法カメラ（CAM）が撮影した画像をもとに最終段階までほぼ完全に自立的に制御されていた。最終段階で最終着陸地点に対して SLIM は東南東に逸れたものの、予定していた着陸精度は達成された。

着陸地点から MBC で観測した着陸地点周辺のスキャン画像からは、月面に多くの転石が存在することがわかった。MBC の重要な機能の一つであるオートフォーカスにより、カメラのレンズ位置から撮影対象までの距離を推定することができる。この機能とカメラ画角あたりの画素数を利用することで、観測する転石のスケールを決定することができた。その結果、視野内のほとんどの岩塊のスケールは、見かけの大きさが約 30 cm 以下であった。月周回衛星による最高解像度であるチャンドラヤーン 2 搭載の OHRC（Orbiter High Resolution Camera）によって撮影された当地点の空間分解能は 28 cm/px であるため、月周回衛星の画像上で MBC が観測したボルダーの位置を特定することは困難である。我々は、MBC スキャン画像と OHRC 画像のボルダー間に対応関係が付きそうな限られた岩塊と、SLIM の最終着陸段階にて撮像された CAM 画像の解析結果を統合して、着陸地点周辺の岩塊のスケール範囲 1 cm から 1 m についてのボルダーサイズ頻度分布について報告する。

月惑星画像の MFD 高精細化処理のための 前処理の検討

○長坂 奏汰¹, 春山 純一², 田中 真¹, 横田 康弘²

¹東海大学, ²宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構

月惑星画像の限られた画像を高精細化する手法は重要である。実際、小惑星探査機はやぶさ 2 搭載のカメラ ONC-T により撮像された小惑星 Ryugu の複数の重なりのある画像に対して、Richardson-Lucy 法[1][2]に基づいた Multi Frame Deconvolution (MFD) 処理の適用による、高精細化が試みられた例がある。

MFD 処理の適用対象は、複数画像中にある被写体の重複部分のみであるため、画像準備の段階で、各画像中の重複部分のみを抽出し、基準となる画像に対してサブピクセル単位で画像位置合わせをすることが必要である。そのため、位置合わせの前処理として、横田らは既存の方法ではバイリニア補間を用いた画像拡大平滑化処理を行った[3]。一方で、画素補間処理の方法としては、様々な種類があり、平滑化に加えて鮮鋭化効果を加えた、画像拡大モザイク低減処理といった技術も存在する。

そこで、本研究では、こうした画像位置合わせの前処理における画素補間方法の違いによって、MFD 処理後の高解像度化画像に差異がどのように生じるかの検討を行った。

MFD 処理の既存の画像拡大平滑化処理には、濃淡変化を滑らかにし、ノイズを低減する効果がある。画像処理には、対象の画像ごとに適切な処理があるため、小惑星画像に対しては既存の平滑化効果のみの手法が適当であることは十分に考えられる。

しかし一方で、画像拡大モザイク低減処理を用いる事で鮮鋭化効果を加え、被写体のエッジ部を強調しつつ画像補間が可能であれば、それも有効であるとも考えられる。なぜなら、画像のエッジ部は被写体の輪郭や形状を示すことから、天体表面を撮像する場合、地表面の微小な肌合いを認識可能にするからである。

本講演会では、画像拡大モザイク低減処理を前処理に用いた MFD 処理を行い、その処理結果の精細度の向上を検討した結果を報告する。

【参考文献】

[1] Richardson, W. H., 1972. Bayesian-based iterative method of image restoration. J. Opt. Soc. Am. 62, 55-59. [2] Lucy, L. B., 1974. An iterative technique for the rectification of observed distributions. Astron. J. 79, 745-754. [3] Ishiguro, M., et al., 2010. The Hayabusa spacecraft Asteroid Multi-and Imaging Camera (AMICA). Icarus 207, 727-729.

月極域探査機（LUPEX）プロジェクトの検討状況 ：近赤外画像分光装置（ALIS）の開発と疎観測運用計画

○石原吉明¹・西谷隆介¹・井上博夏¹・大竹真紀子^{1,2}・須藤真琢¹・水野浩靖¹

若林幸子¹・星野健¹・麻生大¹・仲内悠祐³・佐伯和人³

¹宇宙航空研究開発機構 ²会津大学 ³立命館大学

月の高緯度域（極域）のクレータ内等の太陽光の直接照射が無いような低温領域（コールドスポット）に、外部から月に供給されたと考えられる水が、氷（もしくは霜、吸着水）として存在する可能性が、これまでの月周回探査機による「リモートセンシング観測」データから示唆されている。しかしながら、月極域の水の有無や存在量、存在形態、水平・垂直分布等の観点で、多くの研究者が納得する直接的・確定的な情報は得られていない。

月極域探査機（LUPEX）プロジェクトは、この状況を打破する為に実施される JAXA とインド宇宙研究機関（ISRO）との国際共同ミッションであり、月周回からの「リモートセンシング観測」ではなく、月面へ着陸し「その場観測」により、探査領域内の水の存否・存在量・存在形態に関し、直接的・確定的なデータを取得し、将来探査における資源としての利用可能性を評価することを目的としている。LUPEX の探査機構成は ISRO が開発・運用を所掌する着陸機と、JAXA が開発・運用を所掌するローバからなり、ローバには JAXA 開発の観測機器（水資源分析計（REIWA）・近赤外画像分光装置（ALIS））および掘削採取機構の他、ISRO の観測機器、さらには NASA および ESA の観測機器も搭載される。

ALIS は波長 750 ～ 1,650 nm の反射スペクトルを取得するライン観測型の連続分光撮像装置であり、視野変更の為に可動ミラー、影領域観測の為に連続光源を有している。ALIS は分光学的にレゴリスや岩石を構成する造岩鉱物の同定や、水氷の存在の確認・定量することで、水の分布や地質との関係の把握、掘削地点選定の為にデータを提供する。

LUPEX ローバの観測運用の基本戦略は、予め選定された観測領域内の広範囲の移動を行いながら表面及び地下の水（氷）/水素分布の観測を行う「疎観測」と、「疎観測」で識別された水の存在可能性の高い領域において、最大 1.5m までの複数の深さの土壌を掘削採取し分析する「詳細観測」の 2 段階の観測を行うというものである。ノミナル運用期間は着陸後 3.5 カ月であるが、実際の観測運用は地球からの可視（直接通信可能）期間に限られる。14 日間の連続運用のあと 14 日間の非運用期間を挟み、14 日の運用を繰り返す形となる。各運用期間では、「疎観測」と「詳細観測」をセットで実施する。非可視期間には、その場観測で得られた情報から運用に必要な月面パラメータを抽出しフィードバックすることで、「疎観測」時のローバ走行運用や、「詳細観測」時の掘削運用の制約を徐々に緩和し、運用の自由度を向上させていく計画である。

本発表では、JAXA 開発の観測機器のうち、ALIS の開発状況と、ALIS が主として活躍する疎観測運用の現在の検討状況について報告する。

月クレータにおける岩塊分布と組成の関係

○池田あやめ¹、山本聡¹

¹産総研地質調査総合センター

近年の月周回衛星探査により、月のクレータ地形では岩塊が不均一に分布し、それらの一部が落石として斜面を転がっている様子が確認されている^[1, 2]。これまでの研究で、岩塊密集領域の存在するクレータ斜面では、斜面内の小クレータ密度が減少すること示し、岩塊や岩塊の破碎で生成されるレゴリスが斜面を移動していることを示してきた^[3]。また、斜面への岩塊供給過程は、天体衝突による岩盤層の破碎だけでなく、熱疲労による岩盤の破碎の影響を考慮する必要があることを示してきた^[4, 5]。このように、クレータ地形の変化過程は従来考えられてきたような天体衝突によるレゴリスの移動だけではなく、岩塊の生成・破碎と移動過程を検討する必要がある。岩塊の形状は岩塊のもとになる母岩の組成に依存する可能性が考えられるが、これまでの研究では組成と岩塊の関係はよくわかっていない。そこで我々は月面上において斜長石、かんらん石、輝石などの月主要鉱物の端成分からなるクレータの露頭 (Copernicus crater、Tsiolkovskiy crater、Bullialdus crater の中央丘、Orientale basin の massif) において、岩塊の空間的分布とその大きさの解析に基づき、クレータの崩壊過程における組成の影響を調べた。

図 1 に Copernicus crater と Tsiolkovskiy crater の斜面の様子を示す。これを見ると、崖地形ならびに岩塊が密集して分布している様子がみられ、一部が落石となり斜面下に落下していた。崖地形の分布は一樣ではなく、かんらん石露頭では明瞭な崖線からなる崖地形が見られたが(図 1a)、斜長石露頭では不明瞭であった(図 1b)。次に、岩塊を楕円で近似し、長軸 a と短軸 b の比 (b/a) をとり、それぞれのクレータで比較した。Copernicus crater の中央丘では軸比が 1 に近く、まるい岩塊が多いが、Tsiolkovskiy crater の中央丘などの斜長石がみられる露頭では軸比が比較的小さく、扁平した岩塊が多いことがわかった。長軸の大きさを比較すると、Copernicus crater は相対的に大きな岩塊が多いことがわかった。これらの結果は母岩の組成によって生成される岩塊の大きさや形状が変化する可能性を示唆している。一方、年代の違いによる岩塊の風化度の違いを見ている可能性も否定できず、今後さらに他の領域との比較を行う必要がある。

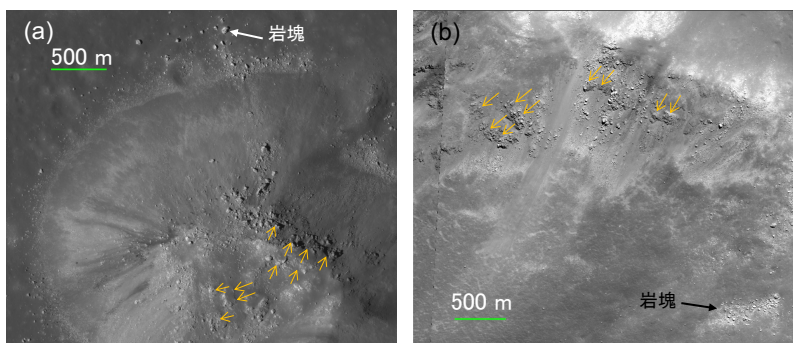


図 1. (a) Copernicus crater および (b) Tsiolkovskiy crater の中央丘の様子。黄色矢印は崖地形の分布を示す(画像: LROC NAC)。

- [1] Bickel et al., 2021. JGR Planets.
- [2] Kumar et al., 2016. JGR Planets.
- [3] Ikeda et al., 2022. JGR Planets.
- [4] Ikeda et al., 2023. JpGU 2023 Abstract #PPS06-08.
- [5] Ikeda et al., 2024. JpGU 2024 Abstract #PPS09-05.

月惑星の縦孔・地下空洞探査（UZUME）プログラムのシナリオ

○春山純一¹、UZUME-WG¹

¹ 宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究所

地球の月は、地球に最も近い天体であり、また、惑星・衛星の中では小さい側の端成分であり、その理解は、宇宙の科学、すなわち地球を含む太陽系の起源と進化、その現在と未来の理解のために、そして、これから人類が宇宙へと本格的に活動を広げるために、有意義かつ必須である。

科学面では、前世紀に行われた探査により、月の古典的描像的なものが得られてきたが、今世紀に入って SELENE（かぐや）などによる様々な探査で、そうした古典的描像では不十分であり、たとえば、以下の可能性についての調査があらためて必要となってきた。

- 1) 単純なコア・マントル・地殻といった成層構造ではなく、空間的に複雑な内部進化を辿った可能性があること
- 2) 月の海は、大規模な洪水型玄武岩に留まらず、間欠的な溶岩噴出を行うような火山活動が広く存在している可能性があること
- 3) 月は、水に枯渇した天体ではなく、地球のマントル程度に水を有している可能性があること

新しい月の描像の理解のために、縦孔・溶岩チューブは多くの鍵を提供する。というのも、

- ・ 縦孔の壁は、過去の火山活動やレゴリス層形成を顕わにする「露頭」を与え、
 - ・ 地下の空洞は、月面とは異なり隕石衝突・宇宙放射線被曝から遮断された「新鮮な岩体」を提供する
- からである。

現在、JAXA 宇宙科学研究所の諮問機関である宇宙理学委員会の下に、国内の理工学研究者により、この月の縦孔・地下空洞の探査にむけたミッション検討を行う「月の縦孔・地下空洞直接探査」（Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration: UZUME）が設置され、プロジェクトに向けて検討が行われている。本講演会では、本 WG で実現を目指すミッションについて紹介し、講演会での議論をもって、ミッション内容の周知と向上を目指したい。

月面ヒト滞在の鍵となる縦孔火成地形

○嶋田 和人¹ 春山 純一²

¹筑波航研 ²JAXA ISAS/太陽系科学研究系

米国の Artemis 計画を筆頭に月面有人着陸の論議が盛んである[NASA2024]。月面でヒトが居住するためにはまず最初に 1) 大気の閉じ込めと供給による与圧空間の形成、2) 適度な温熱環境の維持、3) 電離放射線と非電離放射線（紫外線）の遮蔽、の機能が居住構体に求められる。機能 3)のために土壌（レゴリス）を利用する案が多数あるが[ESA2002]、被覆の厚さが薄いと遮蔽後の二次放射線で被曝量は増す[大橋,奥村 1992, Naito et al. 2022]。防護に適した数 m 厚の土壌積み上げ作業には重機作業が必要となり機材の開発・輸送コストが莫大で非現実的である。機能 2)は月面の昼には太陽光発電が使えるが 2 週間の夜の電力が問題となる。夜は低温になるため必要とされる化学電池の輸送が高コストとなる。NASA は核分裂発電を提唱している[NASA2024]。

JAXA の SELENE 「かぐや」により 2009 年に月面に発見・報告された大口径(60~100m)の縦孔 3 つはこれらの問題をほぼ解決する居住箇所である。その底から水平方向には地下空洞の存在も予想される[e.g. Haruyama2012]。これらの縦孔は深く(48~107m)宇宙放射線の人体影響は無視できる。上記機能 2)について平均して-20℃程度の内部温度は極めて有利である[Horvath et al. 2022]。火成の空間であるため床面が平滑なことも期待される。大深度のため地表からのアクセスにエレベータを要することが課題であるが、月面に垂直に着陸する Starship 用に 40m 程度の高さの低 G 用エレベータの試作・試験が開始されており孔に応用できるであろう[SpaceX2024]。上記機能 1)のための与圧モジュールは JEM の実績から国内で製作可能であるが、表面で輸送できる設計が必要である。これは建築分野で既に試行されている[佐藤 2024]。孔は巨大であるので多数の政府・民間プロジェクトが並行利用できるであろう[庄司,村瀬,出口 et al.2022]。

月南極地帯は着陸にも越夜にも困難な課題が多く、多人数の長期滞在には不適である。一方、縦孔は大規模滞在に適する。月面に縦孔を世界で初めて発見した日本が先陣切って縦孔・横孔の無人探査（UZUME）を開始することが今までの日本の探査成果を活かし、月研究・開発にてプレゼンスを示すために強く望まれる。

- | | |
|----------------------|---|
| 大橋,奥村 1992 | http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/1992/47-06-0498.pdf |
| 佐藤 2024 | https://junsato.k.u-tokyo.ac.jp/LunarMarsBaseCamp-WebRelease20231231.htm |
| 庄司,村瀬,出口 et al. 2022 | https://www.taisei.co.jp/tact/tr/2022/paper/A055_041.pdf |
| ESA2002 | https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/Lunar_Base_Design_Workshop |
| Haruyama2012 | doi.org/10.1007/978-3-642-27969-0_6 |
| Horvath et al.2022 | 10.1029/2022GL099710 |
| Naito et al.2020 | doi.org/10.1088/1361-6498/abb120 |
| NASA2024 | https://www.nasa.gov/feature/living-and-working-on-the-moon/ |
| SpaceX2024 | https://www.youtube.com/watch?v=GjU9Fm4aENc&t=217s |

極端紫外領域における水星の反射スペクトルの 位相角・経度依存性

Dependence of Mercury's EUV reflectance on phase angles and central longitudes

○ 鈴木 雄大^[1], 平田 佳織^[2,1], 臼井 寛裕^[2], 村上 豪^[1],
吉岡 和夫^[2], 土屋 史紀^[3], 山崎 敦^[1], 木村 智樹^[4], 吉川 一朗^[2]

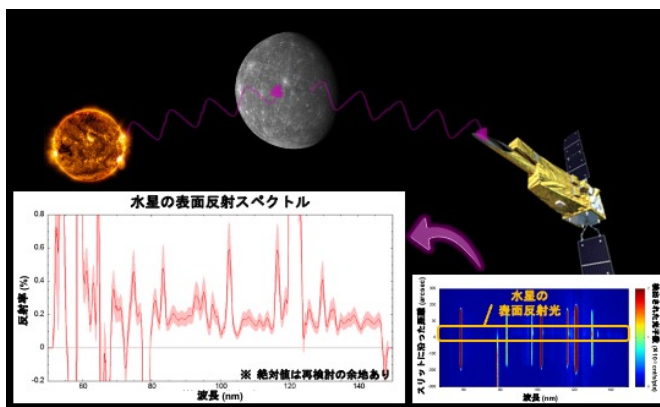
^[1] JAXA/ISAS, ^[2] 東京大学, ^[3] 東北大学, ^[4] 東京理科大学

天体表面の反射スペクトルは表面組成および宇宙風化の進行度合等の様々な天体表層環境を反映している。水星の場合、極端紫外領域の反射率が月の半分程度の低さであることが指摘されており、これはFeOに乏しいことや非晶質SiO₂の存在に起因するとされている。しかし、水星の探査機会の乏しさや太陽離角の小ささ、

そして極端紫外線領域の観測の難しさが相まって、水星の極端紫外領域における反射スペクトルの測定例は、Mariner 10号とBepiColomboによる水星スイングバイ時の観測の2例のみに留まっている。従って、観測期間が非常に限られており、これまでに極端紫外領域における反射スペクトルの位相角や経度に対する依存性が議論されたことは無かった。

そこで本研究では、紫外線分光観測衛星ひさきによる水星観測データに着目した。ひさきは地球周回軌道から、のべ1ヶ月以上にわたって水星を観測した実績がある。波長範囲はMariner 10号搭載UVSやBepiColombo MPO搭載PHEBUS (EUVチャンネル) と同じ約50–150 nmであり、観測期間は位相角約50°–100°、中心経度約20°E–250°Eという広い範囲をカバーしている。解析の結果、これまでの観測例と整合的なスペクトル形状が得られた。また、位相角依存性とは別に、反射スペクトルの中心経度に対する依存性が見られた。これは表層のレゴリス等の物理特性のみならず、経度による化学特性や宇宙風化の進行度合の異方性が極端紫外領域の反射スペクトルに表れていることを示唆している。

本発表では、ひさき衛星による水星の観測データを用いて極端紫外領域における反射スペクトルを取得し、Mariner 10号/UVSやBepiColombo MPO/PHEBUSによる同波長帯の観測結果との比較を通して、反射スペクトルの位相角・中心経度依存性について議論する。また、同じひさき衛星による月の観測データとの比較を行い、極端紫外領域から見た水星表層物質の物理的・化学的特徴について議論する。



火星衛星探査計画 MMX 搭載ミッション機器の開発 と探査機システム総合試験の状況

○永峰 健太¹、小川 和律¹、澤田 弘崇¹、舘野 直樹²、田中 大基¹、三谷 烈史¹、
梶谷 伊織¹、峰松 拓毅¹、嶋田 貴信¹、今田 高峰¹、大嶽 久志¹、川勝 康弘¹

¹宇宙航空研究開発機構、²日本宇宙フォーラム

火星衛星探査計画 (MMX) は、主な科学目的として「火星衛星の起源を明らかにする」および「火星圏（火星・フォボス・ダイモス）の進化を明らかにする」ことを掲げ、それらを達成するために 13 のミッション機器を搭載する。これらの機器に対して、全体の科学目的の達成に必要な観測要求に基づき、それぞれに仕様要求を設定している。本発表では、これらのミッション機器の開発と、探査機システムへの合流、および探査機システム総合試験の準備・実施に向けた取組について、これまでの経過と現在の状況を述べる。2024 年 8 月現在、今後リハービッシュや部品交換等を予定する一部機器を除き、全ミッション機器の開発は概ね完了し、探査機システム側へ合流して試験を実施中である。

MMX ミッション系は、システムズエンジニアリングとしてのミッション機器全体の開発・運用の遂行・管理・最適化、理学関係者や探査機システム等との横断的な調整（技術、情報、契約等を含む）を担当している。これらの中では、特に探査機システムとのインタフェース調整作業が最も難航した。インタフェースに関わる各文書類（インタフェース管理仕様書 ICS、インタフェース管理文書 ICD、納入文書パッケージ等）や、機器本体等に係る技術調整項目は多岐にわたり、日々確認され優先度・緊急度も様々である。MMX では、それらの質問を探査機システム・JAXA・機器間で漏れなく記載し、回答や調整結果を解決まで共有管理するツールとして、QA リストと呼ぶ表を使用した。本表により調整状況と期日をタイムリーに可視化し、催促を繰り返すことで調整作業を加速させた。さらに、QA リストのような書面の往復だけでは期日までに収束しない・あるいは効率的な調整が難しい項目については、関係者による Face to Face 調整会等を設定・開催し、合流までに必須である技術的調整を抜け漏れ無く遂行できるようにした。

総計約 1700 件の QA と付随する調整活動の結果から、将来の惑星探査プロジェクトの探査機インタフェース調整を効率化する改善点が幾つか考えられる。具体的には、QA リストのような関係機関・メーカー間の技術調整を行うフォーマットと関連文書の最新版をタイムリーに共有できる方法を事前に構築しておくことや、各メーカーの選定段階からそれらの方法の利用について合意しておくこと、各メーカーのセキュリティポリシーや契約条件が調整の妨げとならぬよう配慮した作業要求を設定しておくこと、などが挙げられる。本発表では、これらの課題と改善点の具体例を示して議論したい。

火星衛星探査計画 MMX 搭載イオンエネルギー質量分析器 MSA の較正試験

○横田勝一郎¹, 北村悠稀¹, 齋藤義文², 浅村和史², 笠原慧³

¹大阪大学大学院, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³東京大学大学院

火星衛星探査計画 MMX 搭載イオンエネルギー質量分析器 MSA の性能試験結果について報告する。MMX 計画では科学観測やサンプル分析によって、(1) 火星衛星の起源を明らかにして内外太陽系接続領域における惑星形成過程と物質輸送に制約を与え、(2) 火星圏変遷の駆動メカニズムを明らかにして火星圏進化史に新たな知見を加えるという理学目標に主に取り組まれる。MMX 計画の理学目標を担う観測機器の一つである MSA は、3 次元速度分布関数と質量を計測するイオン分析器と、3 次元磁場計測を行う磁力計で構成される。MSA は火星圏にて、太陽風イオンと磁場を計測しながら、火星大気やフォボス表面を起源とするイオンの観測を行う。2026 年の打ち上げに備え、我々は MSA フライトモデルを開発し較正用の性能試験を実施したので、MSA の性能及び観測概要と合わせて試験結果について報告する。

MSA のイオン分析器は、かぐやミッションのイオンエネルギー質量分析器 (IMA) やベピコロポ/MIO の質量スペクトル分析器 (MSA) とほぼ同じ計測手法を採用している。センサー部は円筒対称の形状をしており、エネルギー分析部と質量分析部にて構成される。センサートップ付近の 360 度の開口部と、隣接する視野角偏向電極により、半球立体角の視野を実現している。エネルギー分析部は、トップハット型静電分析方式によりエネルギー/電荷を測定する。質量分析部では飛行時間 (TOF) 法が採用されている。質量分析部の入り口では、極薄膜カーボンが金属グリッド上に取り付けられ、スタート信号用の二次電子を放出する。質量分析部は従来のもよりも長く、高い質量分解能 ($m/dm \sim 100$) を達成するために最適化されている。質量分解能を向上させるため、質量分析器内には線型に増大する電場 Linear Electric Field (LEF) を配位している。

MSA のイオン分析器の較正試験は 2022 年秋から 2024 年冬に亘って JAXA 相模原キャンパスにて実施した。複数種類のイオンビームを用いて一通りの較正データを取得した。較正データの詳細を取得する際は、エネルギー分析部と質量分析部に分離させて、それぞれの性能試験を実施した。一連の試験を通して、全ての性能要求が満たされていることを確認した。

集積期の火星への水供給率: Phobos の存在からの制約

○松岡 亮・倉本 圭
(北海道大学大学院理学研究院)

地球型惑星は、火星サイズの原始惑星同士の巨大衝突を経て形成されたと考えられている。火星は、そのような原始惑星の生き残りである可能性が高い。したがって、火星の揮発性元素獲得過程を理解することは、地球型惑星における大気圏・水圏・生物圏の起源と進化の解明に重要である。この観点から、火星の衛星の起源を探ることは、火星の形成過程や初期状態を解明する上で重要な糸口となる。

火星の衛星 Phobos と Deimos は、分光学的観測により始原的炭素質組成を持つことが示唆されている。この特徴は、両衛星がスノーライン以遠から火星への微惑星集積の名残である可能性を示唆し、周太陽軌道にある微惑星が火星衛星になるとする捕獲起源説と整合する。捕獲起源説の一つである抗力捕獲説は、原始太陽系星雲ガスが火星重力に捕われて生じた原始大気を、捕獲のための力学的エネルギーの散逸媒体とする。Matsuoka & Kuramoto (2023, JpGU) は、一時捕獲を経由して抗力捕獲される軌道に着目し、スノーライン以遠の微惑星が自然に火星衛星様の軌道へと捕獲されることを説明した。

この起源シナリオに基づき、火星の両衛星がスノーライン以遠に由来する微惑星集団の集積の帰結であるとするならば、捕獲と衝突の頻度比を決定することで、衛星形成に必要な微惑星集団の集積率を推定できる。本研究では、この考え方に基づき、集積期の火星への水供給率の推定を試みた。

捕獲と衝突の頻度比を決定するために、各星雲密度条件において約 600 万通りの火星接近微惑星の軌道を、Hill 近似された円制限三体問題の枠組みで解析した。微惑星の初期軌道は Rayleigh 分布に従う離心率・傾斜角分布を持つと仮定し、微惑星は Phobos に類似した質量・半径を持つとした。星雲密度については、最小質量星雲条件に加え、火星の衛星の軌道傾斜角を再現する希薄な星雲条件も考慮した。これらの星雲密度条件は、原始火星大気の密度分布と軌道要素の Rayleigh 分布のパラメータとして組み込んだ。

本発表では、数値計算の結果に基づき、Phobos の起源となった微惑星集団の集積率と、火星への水供給における当該集団の寄与を報告する。そして、Phobos の存在が形成直後の火星の水量に与える制約について議論する。

火星極夜域における 大気主成分 (CO₂) の過飽和に関する研究

○野口 克行、下村 真生、高橋 菜乃花、橋本 智香子¹

アルミン・クラインブール、デービッド・カス、シルバン・ピコー²

¹ 奈良女子大、² ジェット推進研究所・カリフォルニア工科大学

火星では、寒冷な気候のために極夜域で大気主成分の二酸化炭素 (CO₂) が過飽和・凝結する。電波掩蔽観測は気温の高度分布を高分解能 (高度 1km 以下) かつ高精度 (1K 以下) で得る観測手法であり、火星大気中の CO₂ 過飽和を研究するのに適している。本講演では、電波掩蔽観測にて火星極夜域の熱構造を探る際の 2 つの問題点を改良する手法を提案する。

1 つ目の問題点は、電波掩蔽観測の気温導出では大気組成が必要となる点である。先述したように、火星大気の主成分は CO₂ であるが、微量成分としてアルゴンや窒素が存在する。極夜域で凝結するのは CO₂ のみであり、これらの微量成分は凝結しない。そのため、CO₂ の凝結に伴い CO₂ 濃度が 95% から 70% 台にまで減少する一方、非凝結成分の濃度は見かけ上増加する。つまり、極夜域では大気組成比が局所的に変化する。そこで、米国の火星探査機 Mars Odyssey 搭載のガンマ線分光器 GRS によるアルゴン (Ar) 濃度の観測データを利用することにした。極夜域でも Ar と窒素 (N₂) の濃度の比 (2.7% : 1.6%) は変わらないと仮定することで Ar 濃度から N₂ 濃度を得て、さらに残りが CO₂ であると仮定することで大気組成比を推定した。

2 つ目の問題点は、電波掩蔽観測の気温導出では最上端高度 (火星では約 40km) の気温値の仮定が必要な点である。従来の火星電波掩蔽データでは、いくつかの固定値が用いられていた。この仮定による誤差は、高度が下がると共に急速に小さくなる (地表付近では 0.1K 程度)。そのため、従来は高高度では気温の絶対値に関わるような議論、例えば気温が CO₂ の飽和曲線を下回っているかどうかを判定することが難しかった。しかし、この最上端高度での気温をよりもっともらしい値、例えば気候値に置き換えれば、より現実的な気温の導出が可能になる。そこで、米国の火星探査機 MRO 搭載の熱赤外センサ MCS による長期間の気温観測データを用いることで解決した。熱赤外観測による気温データは電波掩蔽観測と比べて鉛直分解能は粗いが、平均場を計算するには十分な正確度を持っている。そこで、MCS データを用いて季節・緯度毎の平均気温を作成し、最上端高度の気温値とした。

上記の二つの問題点を改良した上で、米国の火星探査機 MGS による電波掩蔽観測データを利用し、南半球極夜における CO₂ 過飽和の鉛直構造の季節変化を調べた。その結果、過飽和する領域は火星南半球の冬至 (Ls=90 度) 付近で最大で高度 15km・南緯 65 度程度まで広がり、それ以降は急速に縮小することが明らかになった。一方で、春分以降も地表面付近 (高度 2-3km) では凝結温度に近い低温が維持されていた。これらの描像は、上述した電波掩蔽観測の問題点を改良することで初めて信頼性の高い結果として示されたと言える。

リモートセンシング解析から探る火星北極周辺の石膏砂丘の成因

Origin of gypsum dune formation on Martian circum-polar region

○千々岩 拓夢¹, トリット ル¹, 長谷川 精², 小松 吾郎³, 庄崎 弘基⁴, 菊池 早希子⁵, 佐久間 杏樹⁶, 臼井 寛裕⁷

¹ 岡山大学惑星物質研究所, ² 高知大学, ³ ダヌンツィオ大学, ⁴ 東京工業大学地球生命研究所, ⁵ JAMSTEC, ⁶ 東京大学, ⁷ JAXA

現在の火星表層は低温低圧環境であり、真水は液体状態で存在できない。一方、高濃度塩水であれば-50°Cでも液体状態を持続できるため、熱力学的な計算から火星高緯度域には液体塩水が存在する可能性が示唆されている。また、北極氷冠周辺の周極砂丘フィールド周辺には硫酸塩（石膏）の分布があり、過去に北極氷冠の氷底湖から液体塩水が浸透して形成された可能性がある。もし火星表層に液体塩水が現存すれば、そこに生命が棲息している可能性もあり、将来の地球外生命探査の上でも極めて重要である。しかし、液体塩水の存在を証明する実測データは未だ得られていない。火星高緯度域には **Dark Dune Spot (DDS)** という春から夏に出現する暗色領域が分布しており、気温上昇に伴って液体のような挙動を示す。そこで本研究は、リモートセンシングデータを用いて DDS における鉱物組成の季節変動を解析したところ、北半球では夏至に石膏塩水や H₂O ice が、晩夏には石膏が存在することを示唆する結果が得られた。火星の砂丘地域が高緯度域に集中して分布していることから、この結果は晩夏に DDS から析出した石膏が周極砂丘フィールドを形成したことを示唆している。

一方、晩夏の石膏反応は元々存在していた石膏砂丘由来である可能性がある。そこで次に火星 DDS と類似した環境が米国ニューメキシコ州のホワイトサンズ国立公園の石膏砂丘及びルセロ湖において現地調査を行った。ホワイトサンズでは、乾季にルセロ湖が蒸発した際に塩が析出し、その後、風に運搬されて砂丘が形成される。また、ホワイトサンズ内の塩湖の水質は、地下深部熱水が影響した地下水起源とされており、火星でも南極氷冠の地下に氷底湖の存在が示唆され、北極氷冠周辺には火山性熱水活動の証拠もある。そのため、地球アナログサイトの塩湖と同様に、氷底湖や地下深部熱水起源の地下水が DDS の形成に関与している可能性がある。今後は乾季に析出した塩や鉱物試料を対象に XRD 分析及びスペクトル解析することで、砂丘石膏と塩湖石膏でスペクトルや結晶構造などの差異を調査し、それが火星の石膏砂丘と DDS にも見られるか検証することで、石膏砂丘と DDS の類別を試みる。また、採取した地下水の組成と析出した鉱物組成との関連性を調べることによって、火星地下水の組成の推測を試みる。

Mars Express の画像データの検索・閲覧システムの開発

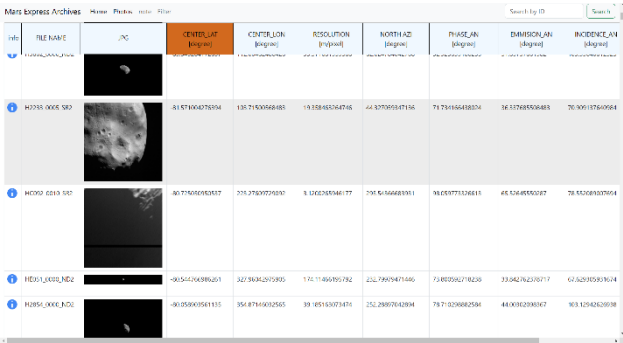
○菊地紘¹, 山本臨太郎¹, 平田成², 渡邊匡人¹

¹学習院大学, ²会津大学

1971 年に Mariner 9 探査機によって火星衛星フォボスの近接画像が得られて以降, 多数の探査機によってフォボスの画像データが取得されている[1,2]. 現在, フォボスの起源を解明するために, フォボスからのサンプルリターンを目指す火星衛星探査計画「Martian Moons eXploration (MMX)」が JAXA により進行中であり, 2026 年に打ち上げが予定されている. MMX によってフォボスの新たな画像データが取得された場合, 科学者がこれらのデータを効率的に閲覧・検索するシステムが必要となるが, 現時点ではそのようなシステムは整備されていない. 私たちはこれまでに, はやぶさ 2 のデータを web 上で検索・閲覧システム「JADE」を開発し[3], 公開中である(<https://jade.darts.isas.jaxa.jp/>). 同様のシステムは, MMX の運用時においても重要な役割を果たし, データの科学利用を促進することが期待される. そこで将来的に MMX データを Web 上で閲覧・検索できるシステムを構築するために, 既存のフォボスの画像データを整理し, 新たな閲覧・検索システムの開発に取り組むことにした. これまでの探査機の中で, フォボスに関する最大の画像データ数を持つのは Mars Express (MEx) であり, このデータは MMX でも有用であると考え, まずはこのデータを対象とすることにした.

開発の手順は以下の通りである. (1) MEx のデータを, SPICE データとソフトウェア ISIS を用いて, 画像の撮像日時, 画像の中心位置, 太陽位相角情報などを抽出した. (2) これらの情報とサムネイル画像を基にリレーショナル・データベースを作成した. (3) システムの構築には Python の Web アプリケーションフレームワークである Flask を使い, web ブラウザ上で表示可能な形にした. (4) 上記の項目によってデータをフィルタリングできる機能を実装した.

その結果, スタンドアローンで MEx のデータを閲覧・検索できるアルファ版システムの開発に成功した (図 1). 今後は, Web ブラウザ上に限定公開し, MMX データ用を対象としたシステム開発を進める予定である.



FILE NAME	CENTER_LAT (deg)	CENTER_LON (deg)	RESOLUTION (m/pixel)	NORTH_AZ (deg)	PHASE_ANGLE (deg)	DISTANCE (km)	INCIDENCE_ANGLE (deg)
MEX_0000_000	41.671004270504	130.719300680000	19.328482347416	44.577055471104	71.751556438074	34.378685506483	70.901876409648
MEX_0000_001	40.771605093057	130.719300680000	19.328482347416	44.577055471104	71.751556438074	34.378685506483	70.901876409648
MEX_0000_002	40.544104488601	132.703620159000	17.171460705792	232.799594715460	73.8020962718230	33.04276230717	67.562055030704
MEX_0000_003	40.055001591155	134.876160325000	18.165153074401	252.28870642804	79.71020682504	44.010102090067	90.121426200000

図 1. MEx のデータを閲覧・検索できるアルファ版システムのフロントエンド.

謝辞: 本研究は文部科学省特色ある共同利用・共同研究拠点支援プログラム JPMXP072830458 の助成を受けたものです.

参考文献: [1]Thomas, 1979, Icarus 40, 223-243.[2]Murchie et al., 1999, JGR 104, 9069-9079. [3] Kikuchi H. et al. (2022) LPSC, Abstract #1779.

星間起源有機物の小天体内部における安定性と新規アミノ酸生成への影響

○池田伊吹^{1, 2}、癸生川陽子²、小林憲正^{1, 2}、依田功²
(1 横浜国立大学、2 東京工業大学)

初期地球上で生命誕生以前にアミノ酸などの生体関連有機物が供給された可能性として、隕石などによる地球外有機物の搬入が考えられている。実際に隕石や小天体中に多種類のアミノ酸が存在していることが分かっているが、その起源や供給量については不確定である。

分子雲の星間塵アイスマントルは生命の材料となる有機物の形成に適した場所の一つとして挙げられる。分子雲を構成する星間塵の核の周りに水や一酸化炭素などの分子が凍結したアイスマントルへ宇宙線が照射することでアミノ酸前駆体等が生成したと考えられる。先行研究の分子雲模擬実験では、高分子態アミノ酸前駆体が非生物的に生成することが示された¹⁾。分子雲で生成したアミノ酸前駆体は太陽系誕生時に始原的な小天体内部に取り込まれ、²⁶Al の放射性崩壊によるガンマ線や熱の影響を受けた可能性がある。さらに、小天体内部における水質変質時には液体の水の他、ホルムアルデヒド、アンモニアなどが存在したことが想定され、これらからガンマ線によってアミノ酸前駆体が新たに生成することが示されている²⁾。

これらを考慮して、本研究では分子雲起源のアミノ酸やアミノ酸前駆体¹⁾の隕石母天体内部を模した水環境下でのガンマ線に対する安定性を比較した。隕石母天体内部環境の模擬として、HCHO, NH₃, H₂O (5:1:100 の比率に調整) の混合溶液に高分子アミノ酸前駆体、グリシン、アラニン、ヒダントインなどを加えたものを調整し、ガンマ線照射 (⁶⁰Co 線源、@東京工業大学、約 2.5 kGy/h × 10–1143 h) を行い、陽イオン交換高速液体クロマトグラフィー (IE-HPLC) と誘導体化後にガスクロマトグラフィー質量分析法 (GC/MS) を用いてアミノ酸分析を行った。対照実験としてガンマ線照射を行わないサンプルを同様に分析した。

実験結果として、分子雲由来の高分子態アミノ酸前駆体は、隕石母天体内部を想定したガンマ線に対して遊離アミノ酸より安定であることが示唆された。また、ホルムアルデヒドやアンモニアから新たに生成するアミノ酸は、出発物質に含まれるアミノ酸前駆体やアミノ酸の種類により異なった。隕石母天体内部を模擬した環境下では、ホルムアルデヒドやアンモニアの他に共存する有機物が新規に生成するアミノ酸の多様性に寄与することが示唆された。

参考文献

- [1] Takano, Y. et al, *Appl. Phys. Lett.*, 85, 1633-1635 (2004).
- [2] Kebukawa, Y. et al., *ACS Cent. Sci.*, 8, 1864-1871 (2022).

初期の火星・地球大気における太陽高エネルギー荷電粒子照射によるペプチドの非生物合成

Abiotic synthesis of peptides driven by the solar energetic particles in early Martian and terrestrial atmospheres

○櫻井悠貴¹, 木村智樹¹, 鳥越秀峰¹, 小林憲正², 奥村宣明³, 吉村弥生¹, 寺田直樹⁴, 福井康祐¹, 小木菜々夏¹ (¹東京理科大学, ²横浜国立大学大学院工学研究院, ³大阪大学蛋白質研究所, ⁴東北大学大学院理学研究科)

大気や海洋を有する惑星において、生命の発生に必要なアミノ酸やタンパク質の起源は未解明である。タンパク質の基礎となるペプチド、アミノ酸や、その前駆体の起源を解明することは、生命の起源や発生条件の理解をする上で最重要の課題である。これらの生命前駆物質が、大気へのエネルギー入射により大気分子から非生物的に合成されたとする説があり、様々な初期惑星大気とエネルギーの組み合わせで非生物的合成実験が行われてきた[e.g. Miller, 1953]。初期の火星や地球の大気は主に弱還元型(CO または CO₂, H₂O, N₂)と強還元型(CH₄, H₂O, NH₃)の2種類が提案されているが、いずれの場合も太陽高エネルギー粒子(Solar Energetic Particles, SEP)を模した陽子照射室内実験により大気分子からアミノ酸や、構造が一定でないソリンと呼ばれる高分子の物質[Sagan and Khare, 1979]が生成されることが分かっている[Kobayashi et al., 1989, 2023]。しかし、先行研究はアミノ酸とソリンの合成までにとどまっており、アミノ酸の重合によるペプチド形成や、タンパク質への非生物的進化は未検証である。

そこで本研究は、初期の火星・地球の火山周辺に豊富に存在し、反応性の高い硫黄ガスに注目した。硫黄を含むアミノ酸が、他のアミノ酸と同様に SEP により大気中で非生物的に合成されたと仮定し、それらを母物質としたペプチドの非生物的合成をプラズマ照射実験で検証した。実験室において初期の火星・地球大気から生成されるアミノ酸組成(グリシン 74.6%、アラニン 19.9%、セリン 5.49%, Kobayashi et al., 1989)を模した粉体サンプルと、含硫アミノ酸(システイン)を含む粉体サンプル(グリシン 73.3%、アラニン 19.6%、セリン 5.39%、システイン 1.77%)へ、水素分子イオン(10keV, 7μA)を1時間照射した。高速液体クロマトグラフィー分析の結果から、含硫アミノ酸を含む照射サンプルのみから検出されるピークが確認された。検出されたピークを分取し、N 末端シーケンス解析をした結果、生成物質はペプチド結合を複数持ち、構成物質としてアラニンが含まれている可能性が示唆された。アラニン以外のペプチドの構成物質について精密質量分析した結果、タンパク質合成アミノ酸に合致する値は観測されなかった。このことから、含硫アミノ酸はアミノ酸同士からのペプチド形成を促進することが明らかになった。また、生成したペプチドは、アラニンと非タンパク質構成アミノ酸から成ると考えられる。これらは、初期火星・地球の火山付近の大気中において、ペプチドが SEP により非生物合成されていることを示唆する。今後は、ペプチドのさらなる構造分析や、硫黄を含む大気分子への高エネルギープロトン照射実験により、気体からペプチドやタンパク質の非生物合成に取り組む予定である。

Kobayashi, K., Tsuchiya, M., Oshima, T. and Yanagawa, H.: 1990, Origins of Life and Evolution of the Biosphere 20, 99-109.

Kobayashi, K., Ise, J., Aoki, R., Kinoshita, M., Naito, K., Udo, T., Kunwar, B., Takahashi, J., Shibata, H., Mita, H., Fukuda, H., Oguri, Y., Kawamura, K., Kebukawa, Y. and Vladimir, S. A.: 2023, Life 2023, 13, 1103. Miller, S. L.: 1953, Science 117, 528. Sagan, C. and Khare, B. N.: 1971, Science 173, 417.

初期地球・火星大気下でのアミノ酸への 太陽高エネルギー粒子照射による ペプチド形成に対する含硫アミノ酸の影響評価

○小木菜々夏¹, 木村智樹¹, 鳥越秀峰¹, 小林憲正², 奥村宣明³, 福井康祐¹,
櫻井悠貴¹, 吉村弥生¹, 寺田直樹⁴

¹東京理科大学, ²横浜国立大学大学院工学研究院, ³大阪大学蛋白質研究所, ⁴東北大学大学院理学研究科

大気や海洋を有する惑星において、生命が発生する際に必要なアミノ酸やタンパク質の起源は未解明である。特に、タンパク質がアミノ酸から生成される過程を理解するうえで、タンパク質の前駆体であるペプチドの起源を解明することは重要な課題である。1950年代より、室内実験で様々なエネルギー源を入射することにより、初期の惑星大気を模擬したガスサンプルからアミノ酸やその他の重要な有機物が生成されると報告されてきた[Miller & Urey, 1959; Kobayashi et al., 1998; Chyba & Sagan, 1991]。Sakurai et al. [JPGU2024]では、火星の原始大気の火山起源 SO₂ の濃度が高い可能性を考慮し、初期火星大気中で合成されうるアミノ酸組成を模した粉体サンプル（グリシン、アラニン、セリン）に、火山ガスを模擬した含硫アミノ酸（システイン）を新たに加え、太陽高エネルギー粒子(Solar Energetic Particle; SEP)を模擬した水素イオン分子を照射した。その結果、硫黄を含むアミノ酸の照射サンプルのみ、ペプチド形成が確認された。これは、照射により含硫アミノ酸が他のアミノ酸の結合を促進させ、ペプチドを生成したと解釈することができる。しかし、ペプチド生成に効果的な材料アミノ酸の組み合わせ等必要条件については未解明な点が多い。そこで、本研究では、ペプチド生成の必要条件を探索するため、初期火星・地球大気より合成されるアミノ酸について単純化した組み合わせサンプルに、水素イオン分子（10.0keV または 8.5keV、7μA）を照射した。照射実験には、含硫アミノ酸を混合した粉体サンプル3種（グリシン 98.23%、システイン 1.77%）（アラニン 98.23%、システイン 1.77%）（セリン 98.23%、システイン 1.77%）と、含硫アミノ酸のみの粉体サンプル（システイン 100%）を用いた。照射したサンプルの水溶液を高速液体クロマトグラフィー分析した結果、含硫アミノ酸のみのサンプルでは、照射の影響が見られなかったが、各アミノ酸に含硫アミノ酸を加えたサンプルでは、照射したサンプルのみ検出できる照射生成物を数種類検出した。特に、アラニンとセリンなど側鎖にメチル基を含むアミノ酸サンプルのほうが照射生成物が生成されやすかった。Sakurai et al. [JPGU2024]のように、この照射生成物がペプチドだった場合、これらの結果から、初期火星・地球の火山付近において、SEPによりペプチドを形成する為には含硫アミノ酸(システイン)と側鎖にメチル基をもつアミノ酸が組み合わせることが必要条件であり、またこの含硫アミノ酸(システイン)のみでは照射生成物の検出が不可能であることから、Sakurai et al. [JPGU2024]の実験で用いられたような他のアミノ酸とシステインの両者が存在する場合のみ、アミノ酸同士の結合を促進させ、ペプチドを生成する可能性が示唆される。今後は、サンプルに含まれる含硫アミノ酸の濃度を増やし照射生成物の収率を上げたうえで照射実験を行い、シーケンス分析で高分子中のペプチド結合の有無やアミノ酸配列を調べ高分子の構造を決定していく。

Miller, S.L. & Urey, H.C. Organic compound synthesis on the primitive earth. *Science*. 1959, 130, 245-251.

Kobayashi, K., Kaneko, T., Saito, T. & Oshima, T. Amino acid formation in gas mixtures by particle irradiation. *Orig. Life Evol. Biosph.* 1998, 28, 155-165.

Chyba, C. & Sagan, C. Endogenous production, exogenous delivery and impact-shock synthesis of organic molecules: an inventory for the origins of life. *Nature*. 1992, 355, 125-132.

櫻井悠貴, 初期の火星・地球大気における太陽高エネルギー荷電粒子照射によるペプチドの非生物合成, (JPGU2024)

次世代小天体サンプルリターン計画で目指す 小天体内部構造探査

○坂谷 尚哉¹, 黒川 宏之², 熊本 篤志³, 川村 太一⁴, 田中 智¹, 鳶生 有理¹, 岡田 達明¹

¹JAXA 宇宙科学研究所 ²東京大学 ³東北大学 ⁴IPGP

次世代小天体サンプルリターン計画は 289P/Blanpain 彗星からのサンプルリターンミッションであり、サンプル採取に加えて、微惑星形成機構の解明を大目的の一つとして掲げている。惑星に至る天体集積過程における最大の謎は、その最初のステップである微惑星形成である。マイクロメートルサイズのダストが集積してキロメートルサイズの天体（微惑星）が形成する過程には、円盤ガスの抵抗による中心星（太陽）への落下や付着成長限界といった障壁が存在する。ダストがこれらの障壁を乗り越え直接合体成長を経て微惑星が誕生したのか、もしくはあるサイズで付着成長の止まったダスト集合体（ペブル）が何らかのメカニズムでかき集められて微惑星へと至ったのか、多くの理論モデルが提唱されているが、決定的な物証がなく結論が出ていない。

次世代小天体サンプルリターン計画では、微惑星形成過程の物理的証拠を得るために、地震計ユニットおよびバースタティックレーダーによる内部トモグラフィ探査を実施する。地震計では、2 台以上の地震計を表面に設置し、人工衝突装置 SCI やサンプリング時の弾丸衝突、また地震計自体の人工震源をもちいて、彗星内部の地震波速度構造、散乱特性を明らかにする。バースタティックレーダー探査では、親機と子機で彗星を挟み込み、親機から送信したレーダーパルスの子機で中継し、再度親機で受信することで彗星内部の誘電率分布やそのコントラスト（反射面）の有無を調査する。本研究はこれらの観測情報から彗星を含む小天体の内部構造を如何にして解明できるかを整理することを目標とし、その状況を報告する。

キューブサットの太陽輻射圧を利用した小天体着陸シミュレーション

○佐々 健太郎¹, 荒井 武彦¹, 清水 翼¹, 川崎 稜平¹¹前橋工科大学大学院 システム生体工学専攻

小天体の熱・物理特性を明らかにすることで、小天体の起源や形成過程、過去や将来の軌道を推定できるようになる。太陽光による熱の地下内部への染み込み深さ(skin depth)が直接測定できれば、表層物質の粒径や空隙、熱物性を推定できるため、小天体に着陸して熱プローブを貫入し、温度分布を直接測定する装置の開発が期待される。

我々は小天体に着陸して、熱プローブによる熱測定を行う超小型衛星の開発を行っている。本研究では、超小型衛星に反射体の翼（ソーラーウィング）を搭載し、姿勢を変化させることによって、太陽輻射圧の反発力を受動的に制御して軌道を変化させ、目的地に誘導するシステムを開発している。

太陽光子が物体の平面に当たった場合、透過/吸収/鏡面反射/拡散反射が起こる(Rodriguez *et al.*, 2019)。これらの事象の確率をそれぞれ τ, α, s, d とすると、

$$\tau + \alpha + s + d = 1 \quad (1)$$

が成り立つ。ここで、 P_{srp} を太陽光のエネルギーが 100%の効率で生じた圧力、 A を照射面積、 $\vec{n}$ を法線ベクトル、 $\vec{r}_s$ を反射光ベクトルとすると、太陽の輻射による圧力 $\vec{F}_{srp}$ は、

$$\vec{F}_{srp} = \alpha [P_{srp} A (\vec{n} \cdot \vec{r}_s)] \left[(1-s) \vec{r}_s + 2 \left(s (\vec{n} \cdot \vec{r}_s) + \frac{d}{3} \right) \vec{n} \right] \quad (2)$$

と書ける。鏡面反射のみ起こると仮定した場合、式(2)は、

$$\vec{F}_{srp} = -2 P_{srp} A (\vec{n} \cdot \vec{r}_s)^2 \quad (3)$$

となる。

太陽輻射圧を制御するには、圧力を受ける面の傾きが重要である。本研究では、キューブサットの微小重力天体への自由落下 3 次元シミュレーションを行い、筐体が太陽輻射圧を受ける面の傾きと着陸降下軌道の変化との関係を明らかにする。

次世代小惑星サンプルリターンミッションにおける 地震観測装置の開発

○田中智¹, 川村太一², 小野寺圭祐³, 西山学³, 辻健³,

坂谷尚哉¹, 鳶生有理¹, 岡田達也¹, 黒川宏之³

¹宇宙航空研究開発機構, ²パリ地球物理学研究所 (IPGP), ³東京大学

現在、検討が進められている次世代小惑星探査計画では彗星へのサンプルリターンが検討されており、内部構造は天体の起源を制約する上で重要な情報と考えられている。我々はこれまでの地震計や観測システムの開発ヘリテージをベースにして地震観測システムの検討を行っている。地震計は月探査計画や Dragonfly ミッションなどを通して開発を進めている高耐久小型短周期パッシブ地震計(固有周波数1Hz, 感度 6.3×10^6 (V/m/s))を採用する。地震計はデータ収集装置および通信機とともに断熱性の高いハウジングに収められ所定の高度から投下設置する。「はやぶさ2」で実施したインパクターやサンプル収集時に使用されたプロジェクタイトルを振動源として利用することにより人工地震探査を実現し内容構造を探査する計画である。本システムの技術的な重要課題は天体設置後の観測運用継続性と天体の地震動を正確に観測できるかどうかの2点である。

「運用継続性」については本システムの熱数学モデルを作成し、第一候補と考えているターゲット天体(P289/Blanpain)上に設置された設定で熱設計を実施した。地震計センサーは広い温度範囲(-190~100degC)での耐久性を有しているが、搭載電子機器や電源電池の動作温度の制約で使用温度範囲が制約されるためできるだけ断熱性の高い2重シェル構造を採用した。その結果、天体距離が3AU 以内の太陽距離であれば常時運用可能であることがわかった。

「設置性」の課題としては微小重力下で地動を正確に観測するためには適切なアンカリングや全体を埋設させることが望ましいが、リソースや技術的な観点から我々はこれらの機能を有せず探査機から投下設置された状態で観測する方針を採用した。この状況では 10^{-6} G 程度の加速度で地震計は浮上してしまう。Ryugu でのインパクター実施時の周囲のボルダーの変異などから推定されたエネルギー変換効率や小惑星内部の減衰率(Q 値)を設定し、はやぶさ2と同等のインパクターを想定した衝突時のシミュレーションを実施した。この場合に励起される振動レベルでは地震観測システムは設置場所によらず振幅の大きな表面波では観測装置が浮上する可能性が高い結果となったが表面波より振幅の小さな実体波(P、S 波)は観測可能であり、内部一次元速度構造を制約することは可能と思われる。また、サンプル回収に使用されたプロジェクタイトル程度のインパクターでは浮上する可能性は低く、人工震源として有効であることがわかった。

今後、観測システム(データハンドリング系や通信系)の概念設計や探査機との分離機構、熱構造モデルの妥当性検証などを進める予定である。

深宇宙探査技術実証機 DESTINY+プロジェクトの進捗

○荒井 朋子¹, 小林 正規¹, 石橋 高¹, 吉田 二美^{2,1}, 木村 宏¹, 平井 隆之¹, 山田 学¹, 岡本 尚也¹, 秋田谷 洋¹, 千秋 博紀¹, 和田 浩二¹, Ralf Srama³, Harald Kruger^{4,1}, 佐々木 晶⁵, 薮田 ひかる⁶, 石黒 正晃⁷, 渡部 潤一⁸, 伊藤 孝士⁸, 大坪 貴文^{2,1}, 大塚 勝仁^{9,1}, 阿部 新助¹⁰, 中村 智樹¹¹, 廣井 孝弘¹², 中村メッセンジャー 圭子¹³, 小松 睦美¹⁴, 関口 朋彦¹⁵, 浦川 聖太郎¹⁶, 諸田 智克¹⁷, 紅山 仁¹⁷, 橘 省吾¹⁷, 三河内 岳¹⁷, 野口 高明¹⁸, 金田 英宏¹⁹, 小松 吾郎^{20,1}, 出村 裕英²¹, 平田 成²¹, 伊藤 元雄²², 山口亮²³, 松浦周二²⁴, 巽 瑛理²⁵, Sean Marshall²⁶, 矢野 創²⁵, 吉川 真²⁵, 尾崎 直哉²⁵, 山本 高行²⁵, 豊田 裕之²⁵, 西山 和孝²⁵, 今村 裕志²⁵, 高島 建²⁵

¹千葉工業大学, ²産業医科大学, ³University of Stuttgart, ⁴Max Planck Institute, ⁵大阪大学, ⁶広島大学, ⁷ソウル大学, ⁸国立天文台, ⁹東京流星観測網, ¹⁰日本大学, ¹¹東北大学, ¹²ブラウン大学, ¹³ExLabs, ¹⁴埼玉県立大学, ¹⁵北海道教育大学, ¹⁶日本スペースガード協会, ¹⁷東京大学, ¹⁸京都大学, ¹⁹名古屋大学, ²⁰ダヌンツィオ大学, ²¹会津大学, ²²JAMSTEC, ²³国立極地研究所, ²⁴関西学院大学, ²⁵JAXA, ²⁶Univ. of Central Florida

深宇宙探査技術実証機 DESTINY+は、開発中の固体燃料ロケット「イプシロン S」により 2025 年度以降に打ち上げ予定の小惑星探査計画である。理工連携により小惑星の近傍を通過して観測を行う「フライバイ」探査技術を獲得し、小天体探査の機会拡大を目指す。工学ミッションは ISAS が、理学ミッションは千葉工業大学が中心となり計画を進めている。ふたご座流星群の母天体である活動的小惑星 Phaethon の高速フライバイ撮像を行うと共に、1au 付近の惑星間ダスト・星間ダスト、Phaethon 周辺ダスト粒子の質量、軌道、化学組成を直接分析する計画である。高速追尾機能を有する望遠カメラ (TCAP) 及び可視近赤外域のマルチバンドカメラ (MCAP) は千葉工大が中心となり開発を進めている。ダストアナライザ (DDA) はドイツとの国際協力でシュツットガルト大学が開発を行い、地上校正はドイツと日本の共同チームで進めている。TCAP 及び MCAP は 2022 年度に基本設計審査を完了し、詳細設計を進めている。DDA は 2023 年 7 月に詳細設計審査を実施し、開発を進めている。

高速 (秒速 36 km) フライバイによる Phaethon の自動追尾撮像の確実な成功には、Phaethon のアルベドとサイズの不定性をできる限り小さくする必要がある。2021 年及び 2022 年の国内での Phaethon による恒星食観測を行い、形状モデルの改訂を行った。今年 11 月 16 日にも西日本で恒星食観測を行う予定である。また、太陽位相角が小さくなる 2021 年 10 月から 12 月にかけて、京都大学せいめい望遠鏡で測光・分光観測を、西播磨天文台及び東広島天文台にて偏光観測を行った。さらに、これまでの熱赤外観測データを統合し、再解析を行った。今年 11 月 11 日にはすばる望遠鏡 FOCAS により近紫外域の観測を行う予定である。Phaethon の最接近フライバイ時の撮像計画やカメラデータによる論文テーマの議論を行っている。ダストアナライザについては、静電加速器を用いた地上校正実験や地上校正に用いる試料の準備を進めている。

DESTINY+が取り組むサイエンスへの理解と協力を仰ぐ目的で、2019 年より DESTINY+ジャーナルクラブというオンライン論文セミナーを定期的に開催している。また、2018 年から「地球飛来ダストとその母天体に関する国際シンポジウム PERC International Symposium on Dust & Parent Bodies (IDP)」を毎年開催し、国内外の惑星科学・天文学コミュニティの研究者と Phaethon 観測やダスト研究の最新成果や知見を共有し、課題やその解決策について議論を行っている。これらの活動を通じて、地上研究・観測と DESTINY+の機上観測の連携による科学成果の最大化を目指すと共に、ミッション要求以外の理学観測のニーズを把握し、ミッション機会の活用につなげる狙いである。本講演では DESTINY+計画の進捗状況とサイエンスチームの活動について報告する。

DESTINY⁺搭載用ダストアナライザの 開発と地上校正計画 2024

○平井 隆之¹, 小林 正規¹, 荒井 朋子¹, 木村 宏¹,
佐々木 晶², 薮田 ひかる³, 伊藤 元雄⁴, 山口 亮⁵, 矢野 創⁶,
Trieloff Mario⁷, Postberg Frank⁸, Krüger Harald⁹, Srama Ralf¹⁰,
DESTINY+チーム

¹ 千葉工業大学, ² 大阪大学, ³ 広島大学, ⁴ JAMSTEC, ⁵ NIPR, ⁶ JAXA,
⁷ ハイデルベルク大学, ⁸ ベルリン自由大学, ⁹ マックスプランク太陽系研究所,
¹⁰ シュトゥットガルト大学

深宇宙探査技術実証機 DESTINY⁺に搭載されるダストアナライザ (DESTINY⁺ Dust Analyser, DDA) は、ダスト粒子の超高速衝突により発生するイオンの電荷量計測や質量分析から、ダスト粒子の質量や化学組成を推定する理学観測装置である。質量分析部は飛行時間型 (計測質量範囲: $m/z \sim 1,000$) を用い、ダストを構成する有機物と鉱物のバルク化学組成の同定を目指している。DDA は地球周回フェーズから運用を開始し、巡航中には惑星間ダストや星間ダストの計測を行う。また、活動的小惑星 (3200) Phaethon とのフライバイ時には、小惑星由来のダスト計測を実施する。DDA のプロトフライトモデル (PFM) 設計は、今夏実施中の ΔCDR を経てもうまもなく確定される予定である。シュトゥットガルト大学のダスト加速器による校正試験では、導電性物質でコーティングされた鉱物 (カンラン石など) や有機物 (ペリレンなど) の粒子を加速し、DDA のエンジニアリングモデル (EM) に衝突させることが可能となった。本発表ではこれらの進捗状況を報告する。

DESTINY⁺搭載小惑星追尾望遠カメラ（TCAP） およびマルチバンドカメラ（MCAP）の開発状況

○石橋高¹，岡本尚也¹，山田学¹，奥平修¹，須崎祐多²，宮原剛²，太田方之²，
石丸貴博²，洪鵬¹，荒井朋子¹，吉田二美^{1,3}，鍵谷将人⁴，亀田真吾⁵，高島健²
¹千葉工大，²JAXA，³産業医科大，⁴東北大，⁵立教大

2025 年以降に打ち上げ予定の深宇宙探査技術実証ミッション DESTINY+ (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUSt science) は、理工学連携ミッションで、イプシロン S ロケットで打ち上げる探査機により地球周辺のダスト観測および小惑星(3200) Phaethon のフライバイ探査を実施予定である。

DESTINY+の理学目的は、宇宙から地球へ飛来するダストの実態解明および地球飛来ダストの特定供給源である流星群母天体の実態解明である。Phaethon は岩石質の地球近傍小惑星でありながら、近日点付近ではダストが放出されていると考えられており、活動的小惑星と呼ばれている。3 大流星群の一つであるふたご座流星群の母天体として知られており、地球へ有機物を含むダストの供給を行っている天体として非常に興味深い天体の一つである。

DESTINY+ 探査機には現在開発中の 2 台のカメラ、小惑星追尾望遠カメラ TCAP (Telescopic CAmera for Phaethon) およびマルチバンドカメラ MCAP (Multiband CAmera for Phaethon) が搭載され、小惑星 Phaethon のフライバイ撮像観測を実施する。TCAP による表層地形の観測と、MCAP による表層物質分布の観測により、この活動的小惑星の素性、特に Phaethon からのダスト放出機構についての知見が得られると期待されている。

本稿執筆時点で、TCAP はプロトフライトモデル (PFM) の一つ前の段階の検証用モデルであるエンジニアリングモデル (EM) の評価フェーズである。昨年中に環境試験を開始していたが、衝撃試験において駆動鏡のミラーに不具合が発生したため、ミラーの保持機構を改良し、再度組立て、環境試験を再開するところである。MCAP は、既に EM での検証を終え、PFM を製造中である。EM の環境試験でいくつかの問題点が発覚したが、それらを解決し、結果を PFM の設計に反映した。近日中に PFM の組立てが完了し、環境試験を開始予定である。本発表では、上記の 2 台のカメラ TCAP, MCAP の開発状況の詳細と、フライバイ検証試験の準備状況を報告する。

DESTINY⁺搭載カメラの地上光学校正の実施状況

○岡本 尚也¹, 石橋 高¹, 近藤 洸大², 山田 学¹, 太田 方之³, 宮原 剛³, 須崎 祐多³,
石丸 貴博³, 中村 智樹⁴, 福田 佳乃⁴, 廣井 孝弘⁵, 関口 朋彦⁶, 洪 鵬¹, 秋田谷 洋¹, 奥平 修¹,
荒井 朋子¹, 吉田 二美^{7,1}, 高島 健³

¹千葉工業大学, ²明星電気, ³JAXA, ⁴東北大学, ⁵ブラウン大学, ⁶北海道教育大学, ⁷産業医科大学

DESTINY⁺(Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUst Science)探査機にはモノクロ望遠カメラ TCAP (Telescopic CAmera for Phaethon)とマルチバンドカメラ MCAP (Multiband CAmera for Phaethon)の2台のカメラが搭載され、小惑星(3200) Phaethon 表層の画像データを取得する。両カメラが得る生の画像から科学的に意味のあるデータへと焼き直すには校正作業が必須である。打ち上げ前には、カメラの光学特性を把握し、校正のためのデータを取得する。これを地上光学校正と呼ぶ。DESTINY⁺搭載カメラでもこの校正データを取得するため、これまで我々は「撮像素子の恒温槽試験 (光学系が必要ない、あるいは光学系の影響がない撮像素子の特性を把握するためのデータ取得)」、「コリメータ試験 (コリメータを用いて結像の位置やその性能を評価する試験)」、「積分球試験 (分光放射輝度が空間的に一様かつ高い精度で絶対値校正された積分球を撮像する試験)」の3種の地上光学校正試験を計画してきた。現在(2024年9月)、TCAPはEM (Engineering Model)の製造を終え、各種環境試験を実施した後に光学校正試験を開始予定である。一方MCAPは2023年度にEMの製造・光学校正試験を終了し、現在はPFM (Proto Flight Model)の組み立てを行っている。本発表では、組み立て前に実施されたMCAP PFMの「撮像素子の恒温槽試験」について報告する。

本試験に入る前の準備として、実際のPhaethon撮像における推定生成電子フラックスに対応する光量の実現、撮像素子に内蔵されたオンチップ温度センサの校正、撮像条件(ゲイン設定、露光時間条件、撮像枚数)の決定を行った。撮像条件の決定において、特にPGA (Programmable Gain Amplifier)ゲイン、ADC (Analog to Digital Converter)ゲインの選択に注意を払った。非線形領域を含めて信号量の補正を正しく行うには、飽和電荷に向かうまでの線形領域と非線形領域のデータを細かく取得しておく必要がある。しかし、本撮像素子は飽和電荷量が光量に依存するため、様々な光量ごとにこのデータを全て取得するのは困難である。そこで、軌道上での素子の劣化も考慮して、線形領域のみをADC(12bit: 0-4095 DN)に割り当てられるよう最適なPGA&ADCゲインの組み合わせを決定した。

本試験は、恒温槽内に設置した小型積分球に光を導入して撮像素子への光照射を行い、温調を制御し40, 20, 0°Cの条件下で実施した。恒温槽試験は校正データ取得を目的としているが、取得したデータを用いて撮像素子の特性を把握するための性能評価も兼ねられるため、その評価も併せて行った。バイアスレベル、暗電流、読み出しノイズ、線形性、コンバージョンゲイン、PRNU、飽和電荷量、欠損画素の評価を行ったところ、素子の個体差による違いはあまり見られず、撮像素子メーカーの公表するカタログ値と概ね同等の実測値が得られた。本発表では、測定における注意点や、それぞれの評価項目の解析方法と結果の詳細について報告する。

Phaethon 熱モデル

形状・公転軌道・自転軸傾斜角の相乗効果

○千秋博紀¹, 野田寛大^{2,3}, 吉田二美^{1,4}, 伊藤孝士^{1,5,6},
Hamm, Maximilian^{7,8}, Marshall, Sean⁹

¹千葉工業大学惑星探査研究センター, ²国立天文台 RISE 月惑星探査プロジェクト,

³総研大, ⁴産業医科大学, ⁵国立天文台天文シミュレーションプロジェクト,

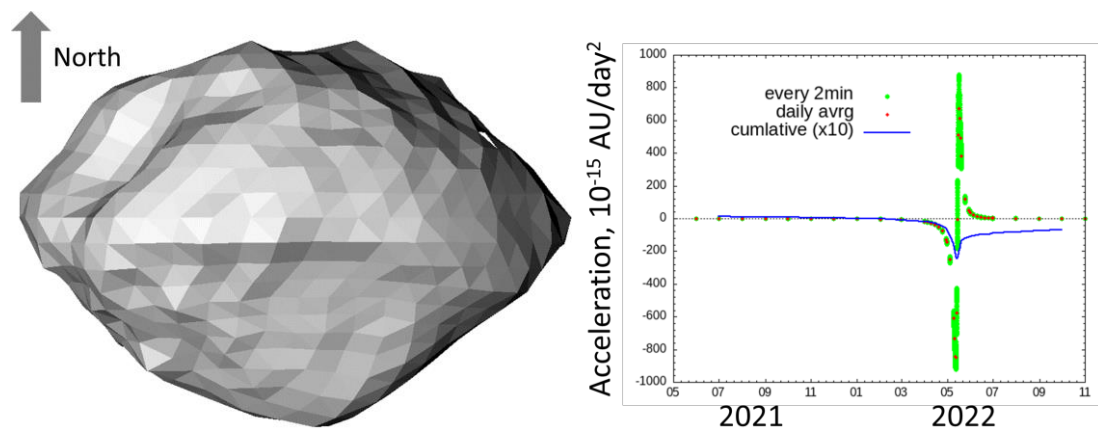
⁶中部大学, ⁷ベルリン自由大学, ⁸ドイツ航空宇宙センター惑星研究所,

⁹セントラルフロリダ大学フロリダ宇宙研究所

小惑星 3200 Phaethon は離心率・軌道面傾斜角が共に大きな小惑星である。近日点距離は 0.14 au で水星軌道よりも内側まで太陽に近づく。太陽最接近時には質量放出を起こすことがあり、ふたご座流星群の母天体だと考えられている。遠日点距離は 2.4 au で小惑星帯にある。

Phaethon は測光観測やレーダ観測が行われている。そこから推定された天体形状は、赤道が膨らみ、円錐形の南半球と、円錐台の北半球が組み合わさった、ブリリアントカットのようになっている（下図）。自転軸は公転面に対して傾いており、近日点付近で北半球が夏至を迎える。その時の太陽直下点の地心緯度は北緯 30 度である。南半球は円錐形をしているためあまり陽が当たらない。このように Phaethon は形状と軌道、自転軸方向の相乗効果によって、大きな温度不均質を持つ。これは結果として、熱モメント（Yarkovsky 効果）や熱トルク（YORP 効果）が顕著になる事を示唆している。

我々は数値計算によって、Phaethon の表面熱進化を求め、そこから熱モメント・トルクの履歴を計算した。その結果、熱モメントやトルクは従来の簡易モデルの予測とは異なり、近日点通過前後で符号が入れ替わるなどが明らかになった。



図：Phaethon 形状モデル（左）とそこから計算される熱モメント（右）

小惑星表層下からの熱放射を考慮したモデルによる 1 Ceres の物性パラメータ値推定

○ 高橋茂¹ 飯野孝浩¹ 川瀬純也¹ 塚越崇² 窪田暉³ 佐川英夫³

¹ 東京大学 ² 足利大学 ³ 京都産業大学

ミリ波・サブミリ波での太陽系天体の観測は、彗星、小惑星などの化学組成や表面物性を知る上で有用である。特に ALMA はその高い空間分解能によって地表の物性を詳細に捉えることが可能である。

ALMA による 1 Ceres の先行研究として、2015 年および 2017 年の 256GHz における平均輝度温度および電波ライトカーブの研究 (Li et al., 2020) があるが、この研究では 1 Ceres のディスク平均での議論に止まっていた。

一方、我々は ALMA アーカイブから 2017 年に観測された 250 GHz 帯での 1 Ceres の高空間分解能イメージ (空間分解能 0.05 arcseconds) を生成し、研究に取り組んでいる。

前学会では作成したイメージから、1 Ceres 表面の輝度温度分布から温度ピークの位置が太陽直下点ではなく午後側 (およそ午後 1-2 時) にドリフトしていること、熱物理モデル (TPM) として Spencer et al. 1989 (SP89) を用いて、熱慣性値 60-110 tiu が観測されたドリフト値をよく再現することを示した。しかしながら、SP89 モデルでは輝度温度を十分に再現できず、観測値よりも 30-40 K ほど高い結果となった。これはミリ波・サブミリ波における熱放射量の導出に、表層下からの熱放射を考慮していないためと考えられる。電波の波長領域では、電波が物質に対してある程度透過的であるため、表面だけでなくより温度の低い表層下からの熱放射も観測される。この透過深さの目安は、物性パラメータである複素誘電率で記述され、観測結果と数値シミュレーションとを比較することで、表層下における複素誘電率を推定することが可能であると考えられる。

今学会では、TPM としてランベルト的な SP89、および表面地形の凹凸 (ラフネス) を考慮したモデル (例えば Davidsson et al. 2009) を用いながら、表層下の熱放射も考慮した 1 Ceres の熱放射モデルシミュレーションおよび物性パラメータの推定結果を報告する予定である。

参考文献

Davidsson et al. Icarus 201, 335 (2009)

Li et al. AJ 159, 215 (2020)

Spencer et al. Icarus 78, 337 (1989)

JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計(GALA): 概要および月フライバイを利用した測距試験の完了報告

○塩谷 圭吾^{1,2}, 小林 正規³, 荒木 博志^{4,2}, 木村 淳⁵, 野田 寛大^{4,2}, 竝木 則行^{4,2}, 押上 祥子⁶,
東原 和行¹, 齋藤 義文¹, リンゲナウバー カイ⁷, スターク アレクサンダー⁷, フスマン ハウケ⁷,
GALA チーム

¹宇宙科学研究所, ²総合研究大学院大学, ³千葉工業大学, ⁴国立天文台, ⁵大阪大学,
⁶情報通信研究機構, ⁷ドイツ航空宇宙センター

ガニメデレーザ高度計 (Ganymede Laser Altimeter: GALA) は、欧州宇宙機関(ESA)が主導する木星氷衛星探査機 (JUICE) に搭載されている科学観測機器のひとつである。JUICE は 2023 年 4 月に仏領ギアナ宇宙センターから打上げられた。打上げ後の GALA の初期チェックアウトの結果はすべて正常であった。さらに、2024 年 8 月に予定されている JUICE の月フライバイの機会に、GALA は月面を利用した測距試験を行う。この試験は GALA 実機の機能実証に残された最後のピースであり、GALA にとって重要な節目となる。本講演では、GALA の概要および月フライバイ試験について報告する。

ガニメデレーザ高度計 (Ganymede Laser Altimeter: GALA) は、欧州宇宙機関(ESA)が主導する木星氷衛星探査機 (JUICE) に搭載されている科学観測機器のひとつである。GALA は氷天体に適用される初めてのレーザ高度計である。GALA の科学目標の柱は(1)地形情報にもとづく氷テクニクスの理解、(2)潮汐応答の測定を通じた内部構造の理解(地下海の存否確認や特徴把握を含む)、(3)表面の小規模粗度と反射率の理解、である。地下海を含むサイエンスは、アストロバイオロジーの観点からも意義が大きい。

これらの科学目標のため、GALA は軌道上から氷衛星表面への距離測定(測距)を高密度・高精度で繰り返す。特にガニメデについては全球にわたって、地形情報だけでなく潮汐変形および回転変動、さらに小規模粗度と反射率を計測する。測距においてはノミナル高度 500 km から送信レーザパルス(17 mJ, 波長 1064 nm, ノミナル 30 Hz/最大 50 Hz)を氷衛星表面に照射し(ノミナルスポットサイズ 50 m, スポット間隔 50 m)、反射パルスを受信して、送受信パルスの時間差から距離を求める。小規模粗度と反射率の情報は、受信パルスの強度やパルス幅の時間的広がりから得る。

GALA の開発はドイツを中心に、日本、スイス、スペインのチームによる国際協力によって行った。日本チームは心臓部とも言える受信部の 3 つのモジュール(後置光学系モジュール(BEO)、焦点面機器モジュール(FPA)、アナログエレクトロニクスモジュール(AEM))の開発を担当している。そのほか日本チームは GALA 全体の機能性能をシミュレートするソフトウェアであるパフォーマンスモデルの開発も行っている。

JUICE の打ち上げ後、2023 年に行った初期チェックアウトにおいて、GALA は生成したレーザの一部を GALA 内部の光路を経て検出器に照射して出力された信号を電氣的に処理する経路(スタートパルス経路)を通貫しての試験に成功している。一方、初期チェックアウトでは探査機の付近に天体が存在しないため、生成したレーザを天体に照射してその反射波を受信して検出器で受ける経路(リターンパルス経路)を通貫しての試験は未完であった(ただし、スタートパルス経路とリターンパルス経路の多くは共通しているので、後者についてもかなりの部分は既にテストされている)。したがって、この月フライバイにおける GALA 全体を通貫しての測距試験は、GALA 実機の軌道上機能実証に残された最後のピースと言えるものであり、GALA にとって重要な節目となる。なお、今回の月フライバイでは、GALA が月面に照射したレーザスポットを JUICE 搭載カメラ JANUS で撮像して、GALA と JANUS の指向方向の関係を確認する実験も行う。

Ganymede 金属核の熱進化モデル計算にもとづく ダイナモ磁場発生と核サイズ・組成の推定

○川上 稜平¹, 木村 淳¹, 佐々木 晶¹

¹大阪大学

木星衛星ガニメデでは、1996 年におけるガリレオ探査機の磁場観測によって全球的な固有磁場の存在が発見された。この磁場が赤道付近の表面強度が約 720 nT の双極子で良く近似できることから、ガニメデは金属核と核内ダイナモを持つ。金属核の存在は、重力場観測で得られた慣性率因子 (0.3156 ± 0.0125) の小ささによっても裏付けられている。核ダイナモが発生し磁場が維持されるためには、(1) 核の少なくとも一部が融解しており、(2) 核が十分な速度で冷却され、(3) 融解核内の流速 (磁気レイノルズ数) が磁場を維持できるよう十分大きい、という条件を満たす必要がある。ガニメデ内部は慣性率の制約にもとづいて最外部の H₂O 層、岩石マントル層、中心の金属核の 3 層構造を持つと予想され、その熱状態は、主要な熱源である放射性同位体を含む岩石マントルとダイナモを生む金属核の体積や物性に大きく依存する。しかしながら、慣性率のみに頼った現状での内部構造推定は不定性が大きく、例えば核半径は Fe-FeS 系組成を仮定した核密度に従って 660-1110 km の範囲をとり得る。こうした内部構造の違いは現在の熱状態を大きく変えることから、仮定される内部構造の範囲における熱進化を計算し、上記の条件にもとづいて磁場が発生可能な内部構造の範囲を特定することが必要である。

本研究では、慣性率を満たす様々な内部構造に対して 46 億年間の熱進化シミュレーションを行い、現在の熱状態を上記の 3 条件で評価することで、核ダイナモによる磁場発生が可能な内部構造の範囲を探索する。具体的には、岩石マントルでの伝導と対流による熱輸送を考慮した修正混合距離理論による一次元エネルギー方程式を解き、金属核内では断熱温度分布を仮定した。ガニメデ内部分化完了直後の全溶融核を初期状態とし、初期の核内温度は仮定した核密度 (硫黄含有量) での融点、マントル温度は上部を 300 K とし核への線形分布とした。岩石は CI コンドライト的なバルク組成を仮定し、長寿命放射性同位体 (^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K) の崩壊熱をマントル中の熱源とした。また、内部温度構造の変化と硫黄含有量に従った核内での凝固過程を考慮し、硫黄含有量が Fe-FeS 系の共晶組成より少ない場合は中心から固体 Fe 内核が成長し、共晶組成より多い場合は核マントル境界から固体 FeS 外核が成長する。さらに、その際に発生する潜熱と重力エネルギーを核内の熱源として考慮した。

結果として得られた磁場発生を可能にする内部構造は、核の硫黄含有量が 0 wt.% の場合は核半径 500-800 km、8 wt.% では 600-800 km、15 wt.% では 850 km、36 wt.% では 750-1050 km と見出された。一方で、22, 29wt.% (共晶組成付近) ではいかなる核半径でも磁場発生の条件を満たせないことが分かった。核組成が Fe-FeS 系の端成分に近い場合は、融点 (初期温度) が高く初期から強い冷却が進み、核内での凝固にともなう潜熱や重力エネルギーの解放により磁場発生の条件が満たされやすいためである。一方、核組成が共晶組成に近い場合は融点 (初期温度) が低いことによってマントルによる冷却効率が低く、冷却条件が満たされにくい。

CO₂の移動時間スケールから推定される エウロパでの CO₂の継続的供給

○門屋辰太郎¹, 関根康人¹, 小玉貴則¹

¹ 東京工業大学地球生命研究所

Recent observations by the James Webb Space Telescope have revealed the concentration of CO₂ ice around Tara Regio, a chaos terrain on Europa, suggesting an active endogenic source of CO₂. To estimate the timescale of CO₂ supply, we investigated the time evolution of CO₂ distribution by conducting Monte Carlo simulations on the transport and lifetime of CO₂. The CO₂ transport on Europa was modeled by including release via sublimation of CO₂ ice, ballistic flight within the tenuous atmosphere, and subsequent adsorption on the surface. The lifetime of CO₂ on Europa's surface was determined by photoionization via UV sunlight. Additionally, we located a hypothetical source of CO₂ at 10°S, 75°W, corresponding to the center of Tara Regio. The relatively high surface temperature around the equatorial region of Europa enables CO₂ to sublime rapidly, leading to quick transport. In contrast, the low surface temperature around the poles causes CO₂ to settle down. Hence, CO₂ gradually shifts from the equatorial source to the polar regions. The timescale of the transport was ~ 10 days, much smaller than the lifetime of CO₂ via photoionization (~1500 days) suggested by the previous studies. As a result, we obtained the concentration of CO₂ around the poles in its steady state, which is inconsistent with the JWST's observations. This discrepancy can be resolved if the lifetime of CO₂ is 100 times shorter than the estimates above. Impact-induced ionization, which would produce O₂ on Europa, could also contribute to the rapid loss of CO₂. Accordingly, the CO₂ distribution observed by JWST would result from quick transport with rapid loss of CO₂, indicating an ongoing supply of CO₂ on Europa.

エウロパ大気における発光輝線の探索 ：地上望遠鏡による可視・分光観測

○高木聖子¹, 鶴海達大², 佐川英夫³, 長谷川龍³, 窪田 暉³, 木村淳²,
太田峻介⁴, 松尾太郎⁴, 吉岡和夫⁵

¹北海道大学, ²大阪大学, ³京都産業大学, ⁴名古屋大学, ⁵東京大学

大気中の原子は太陽光共鳴や電子衝突により励起され、特定波長の輝線を発することから、発光輝線の観測により大気成分の推定が可能である。エウロパにおいては、ナトリウム原子とカリウム原子による発光輝線(波長 590, 767 nm)が検出されたことから、それらの存在が明らかになった [Brown and Chaffee, 1974; Brown, 2001]。このような大気成分は、氷地殻に存在する物質との関連が示唆されている。エウロパ上には、ナトリウム・カリウム・マグネシウム・カルシウム等の硫酸塩や炭酸塩などの水和物といった塩類の存在が木星探査機ガリレオの赤外分光観測から推測されている [e.g., McCord et al., 1999]。また、地殻褐色化の原因とされてきた塩化ナトリウムの存在もハッブル宇宙望遠鏡の可視分光観測から明らかになった [e.g., Trumbo et al., 2019]。氷地殻に存在が示唆されるそれらの物質は、地下海からの物質表出を伴うと思われる地形に集中して存在することから、岩石質のマントルと接する海底には岩石と液体水との相互作用が行われる環境が存在し、液体水に溶出した塩分が氷地殻に取り込まれ対流運動などに伴って表出、あるいはプルームとして地下海から直接に噴出する内的要因がその起源として考えられている。また、イオの火山活動に起因する木星ナトリウム雲と呼ばれる巨大構造やイオ周辺大気、彗星などからエウロパ表面へもたらされる外的要因も考えられている。エウロパに大気が形成される機構は、塩類の存在が示唆される表面に木星磁気圏の高エネルギー粒子が衝突し、地殻から原子が叩き出される(スパッタリング)過程や、太陽光加熱により表面物質が昇華する過程が提案されている。そのような機構によりマグネシウム原子による発光も予想されたがこれまで検出には至らず [Horst and Brown, 2013]、現在検出されているのはナトリウム原子とカリウム原子の発光輝線のみである。衛星大気中の発光輝線の検出とその時変動の調査は、衛星内部-表層間や衛星間の物質輸送過程を知る手順であり、衛星形成時の材料物質やその後の進化過程を知ることにも繋がる。しかしながら、過去の探査機によるスナップショット的な観測や時間が限られた宇宙望遠鏡による観測で捉えた輝線は僅かであり、衛星における物質調査は不十分と言わざるを得ず、物質の起源や衛星の進化過程について理解は停滞している。

北海道大学大学院理学研究院附属天文台は北海道名寄市にあり、地上望遠鏡(ピリカ望遠鏡)を所有している。主鏡口径は 1.6 m であり、その大きさは太陽系内天体観測用の望遠鏡としては世界最大級である。本研究では、衛星内部から、あるいは、衛星間の物質輸送過程を明らかにすることを目的とし、ピリカ望遠鏡に搭載されたスペクトル撮像装置 MSI [Watanabe et al., 2012] を用いて、2020 年から 2023 年にかけて数十夜の多波長撮像観測(500–900 nm)を行った。また、京都産業大学神山天文台の荒木望遠鏡(主鏡口径 1.3 m)に搭載された可視光高分散偏光分光器 VESPoIA [Arasaki et al., 2015]を用いて、2023 年から 2024 年にかけて分光観測(400–850 nm)を行った。本講演では、地上望遠鏡を用いたエウロパ大気における発光輝線の探索について報告を行う。

土星衛星タイタン離着陸探査計画 Dragonfly での地震観測 に向けたサイエンス検討状況の報告 (2023–2024)

○小野寺圭祐¹, 川村太一², 白石浩章³, 田中智³, 三谷烈史³, 村上英記⁴, 山田竜平⁵,
西田究¹, Lorraine Delaroque², Antoine Lucas², Sébastien Rodriguez², 鎌田俊一⁶,
木村淳⁷, 黒川宏之¹, 関根康人⁸, 辻健¹, Mark Panning⁹, Ralph Lorenz¹⁰

¹東京大学, ²Institut de Physique du Globe de Paris/Univ. Paris Cité, ³JAXA 宇宙科学研究所, ⁴高知大学, ⁵会津大学, ⁶北海道大学, ⁷大阪大学, ⁸東京工業大学地球生命研究所, ⁹Jet Propulsion Laboratory/Caltech, ¹⁰Applied Physics Laboratory/Johns Hopkins Univ.

NASA のニューフロンティア計画の一つである Dragonfly ミッションは 2030 年代に土星衛星タイタンを探査する。本計画では、離着陸可能なクアッドコプター型のドローンを用いてタイタンのセルククレータ付近の様々な地点での化学分析・気象観測・地球物理観測を行う。その中でも我々は JAXA が開発する短周期地震計 (DraGMet SEIS) を用いたタイタンにおける地震活動やその内部構造の把握に注力している。

2023–2024 年のサイエンス検討では、ノイズモデルの評価およびタイタン地震の理論計算に注力した。地震観測を行う上でノイズレベルの評価は基礎行程の一つであり、取得される地動時系列データのクオリティを左右する重要な要素の一つである。ここでのノイズとは、機器ノイズ(地震計およびその周辺機器由来)と環境ノイズ(気象などの外部由来)のことを示す。特に本検討においては、Fig1 に示すような地震計由来のノイズ・プリアンプ由来のノイズ・乱流由来の環境ノイズに焦点を当て、初期ノイズモデルの作成を行った。

また、カッシーニ・ホイヘンス探査機により取得されたデータを基にタイタン上で地震活動が期待される地域を選定し、地震波伝搬シミュレーションを行った。本発表では、初期結果を紹介するとともにノイズモデルとの比較からタイタン地震の検出可能性について議論する。

Instrumental noise		Environmental noise
Seismometer	Pre-amplifier	Pressure perturbation due to random turbulence (> 1Hz) under different surface rigidity conditions
• Thermal noise	• Thermal noise	
• Suspension noise	• Voltage noise • Current noise	

Fig1. Instrumental and environmental noises focused on in this presentation.

地上望遠鏡観測で探るタイタン大気の時間変動

○中嶋瑞穂¹、高木聖子¹、有馬銀河¹

¹北海道大学

土星衛星タイタンの大気は主に窒素とメタンで構成される。地球大気と同様に層構造（対流圏、成層圏、中間圏、熱圏）を持ち、成層圏には光学的に厚いヘイズ層が存在する。タイタンは、約 16 日で土星の周りを公転し、公転中に土星磁気圏のプラズマシート内を通過する。カッシーニ探査機は、プラズマシート内の高エネルギー粒子による熱圏加熱を観測した（e.g., Westlake et al., 2011）。高エネルギー粒子は、大気中の窒素・メタンを電離し、からヘイズ粒子を生成する（Sagan et al., 1984）。したがって、タイタンのプラズマシート通過に伴うメタン濃度及びヘイズ層の光学的厚さ変動も予想される。地上望遠鏡の観測によれば、ヘイズ層の光学的厚さは数週間で 5 - 10 %変動する（Nichols-Fleming et al., 2021）。しかしながら、その変動は土星系の太陽公転（約 30 年周期）による季節変動の一部であると解釈されており、タイタンの公転運動とメタン濃度・ヘイズ層の光学的厚さ変動との関連性は不明である。

本研究は北海道大学が所有するピリカ望遠鏡（口径 1.6 m）のマルチスペクトル撮像装置（MSI）（Watanabe et al., 2012）を用いて、2021 年から 2024 年にわたりメタン吸収波長（727, 889 nm）を含む多波長撮像観測を実施した。得られた観測データからメタン吸収波長付近の反射率を導出し、反射率とタイタン公転運動との関連性を調査した。解析の結果、メタン吸収波長の反射率は公転運動に関係し、近土点で小さく、遠土点で大きい傾向が示唆された。この要因として、高エネルギー粒子フラックス変動・太陽光フラックス変動・ヘイズ層高度変動の 3 つの仮説を検討した。

本発表では、公転運動とタイタン大気変動の関連性を示すために必要な観測手法、大気放射伝達モデルを用いたメタン濃度・ヘイズ層の光学的厚さの定量的評価について議論する。

タイタン中層大気におけるシアノジアセチレン (HC₅N) 分子の探索

○ 飯野孝浩¹, 谷口琴美², 佐川英夫³, 高橋茂¹, 山田崇貴⁴

¹ 東京大学 情報基盤センター, ² 国立天文台, ³ 京都産業大学, ⁴ 情報通信研究機構

The atmospheric composition of Titan is characterized by the presence of complex nitriles and haze layers and the related atmospheric chemistry. Nitriles condensed or accreted on haze particles undergo photochemical reactions to form complex polymers, including prebiotic molecules. Among them, photochemical reactions involving cyanodiacetylene (HC₅N) are important as reaction pathways that lead to the production of amines and aromatic molecules (Couturier-Tamburelli, I. et al., A&A 578, 81-90). Although HC₅N has already been detected in the ionosphere of Titan by the Cassini spacecraft, in the middle and lower atmosphere, where the main haze layer is present, only an upper-limit abundance was obtained in a previous study (Vuitton, V. et al., Icarus, 191(2), 722-742.).

We carried out a new comprehensive search for HC₅N in Titan's atmosphere using 200 GHz-band spectroscopic archival data of the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). To detect a faint spectral line of HC₅N, we used a spectral stacking method that integrates different transition data. Integrating 28 independent observation data, we attained an emission spectrum of HC₅N with $\sim 4\sigma$ significance. Using the radiative transfer analysis and employing the most plausible vertical distribution, we derived the column density of HC₅N to be 0.9% of the column density of middle-atmospheric HC₃N, the simplest cyanopolyne. The value of the derived abundance ratio lies between those observed in Titan's ionosphere and those obtained in laboratory experiments under conditions simulating Titan's stratosphere. Because the employed profile corresponds to the same altitude as the main and detached haze layers, the results indicate that HC₅N might be incorporated into haze particles and result in the production of complex molecules.

微量金属濃度による エンセラダスでの生命活動の制限

○丹秀也¹、関根康人²、渋谷岳造¹

¹ 国立研究開発法人海洋研究開発機構, ² 東京工業大学地球生命研究所

土星の氷衛星エンセラダスでは、表面から噴出する水プルーム成分の観測により、内部海にはメタン生成菌のような生命にとってのエネルギー源となる水素と二酸化炭素、栄養塩となるリン酸塩が多量に含まれていることで知られ、ハビタビリティの観点から最も注目を集める天体のひとつである (e.g., Waite et al., 2017; Postberg et al., 2023)。しかしながら、これらの成分は非常に多量であり、生命が生息している場合にはその活動が活発ではない可能性も同時に示唆する。地球におけるメタン生成菌の活動は、エネルギー源の量以外にも酵素の活性に必要な微量金属の濃度にも左右されることで知られる。しかしこうした微量金属の濃度は水プルームの観測だけでは議論できないため、まだ明らかではない。

そこで本研究では、エンセラダス海底での海水-岩石間の化学反応を室内実験と熱力学平衡計算により模擬することで、岩石から溶解する微量元素の濃度を推測した。エンセラダス海底の水岩石反応を模擬した熱水実験 (Postberg et al., 2023) での水溶液サンプルおよび岩石サンプルについて、微量金属の溶存濃度と含まれる鉱物をそれぞれ分析した。この熱水実験はエンセラダスの模擬海水として炭酸成分を含むアルカリ性の水溶液、海底岩石の模擬物質として炭素質コンドライトを使用し、150°C, 30 MPa の条件で行った。実験の水溶液サンプル分析の結果、微量金属の溶存濃度は元素ごとに異なり、モリブデンは $10\text{--}10^2 \mu\text{mol/kg}$ 、ニッケルと亜鉛は $0.1\text{--}1 \mu\text{mol/kg}$ 、コバルトと銅は $0.1 \mu\text{mol/kg}$ 以下であった。また岩石サンプル中において、微量金属は実験の前後を通して pyrrhotite や pentlandite といった硫化鉄鉱物に含まれていた。

さらに、pentlandite に含まれるニッケルとコバルトの水溶液への溶解について、実験と同じ条件下で熱力学平衡計算を行ったところ、これらの実験での溶存濃度を説明できることが示された。この pentlandite の溶解についての熱力学平衡計算を、エンセラダスでの海水-岩石間の反応において推測される幅広い温度・海水組成の条件へ適用した。その結果、ニッケルの濃度はエンセラダスの熱水環境で $0.1\text{--}1 \mu\text{mol/kg}$ 程度となりうる一方で、コバルトは条件によらずそれより低い濃度となった。これは海水がアルカリ性かつ還元的な組成であるために、硫化金属鉱物の一種である pentlandite の溶解が抑制されることにより生じる。

地球に生息するメタン生成菌の活動には、これらの微量金属の溶存が $0.1\text{--}1 \mu\text{mol/kg}$ 程度の濃度で必要とされていることで知られる (e.g., Glass & Orphan, 2012)。本研究の室内実験と計算により、エンセラダスではコバルトや銅といった、一部の微量金属がこれを満たさない可能性が示された。したがって、エンセラダスで検出されている多量のエネルギー源となる成分や栄養塩成分は、コバルトなどの微量金属が低濃度であるために生命活動が制限され、結果として海洋中に残留したものと考えられる。エンセラダスを始めとした太陽系外側の天体では、水環境が存在する場合、推定される天体の初期組成からアルカリ性で還元的な環境となることが示唆されている。このため、仮に生命にとってのエネルギー源や栄養塩成分がエンセラダスと同様に豊富であったとしても、アルカリ性の還元的な水組成によって生命必須の微量金属については低濃度となるために、生命活動が抑制される可能性が考えられる。

エンセラダス南極域プルームの再堆積によるクレータ消失の評価

○水沼卓也, 太田原裕都, 中原俊平, 野間光葉, 諸田智克

東京大学理学系研究科

土星衛星エンセラダスはテクトニックな地形が多く確認されており, 地質活動が活発な天体である (e.g. Spencer & Nimmo, 2013). 南極域にはタイガーストライプと呼ばれる巨大な裂け目があり, そこから氷やガスのプルームが噴出している (e.g. Goldstein et al., 2018). プルーム粒子の一部は宇宙空間へ放出されるが, 大部分はエンセラダス表面に堆積し, レゴリスを形成していると考えられている (e.g. Kempf et al., 2010). 数値計算により推定されたプルーム粒子の堆積速度分布は, 反射スペクトルデータから推定されているエンセラダス表面の未変質の水氷の分布と概ね整合的であることが報告されている (Southworth et al., 2019). もし, プルームの噴出が地質学的タイムスケールで継続しているならば, プルーム粒子の堆積により小さいクレーターが選択的に消失していることが期待される. プルーム物質は内部海から直接的に輸送されている可能性が高いため (e.g. Spencer et al., 2018), 堆積物の厚さからプルームの噴出期間の情報が得られれば, 内部海の持続期間を制約することができる. 本研究では, km サイズの小クレーターに着目し, その消失の程度を評価して堆積物の厚さを見積もることで, プルームの噴出期間に制約を与えることを目的とする.

本研究では Cassini 画像データを用いて同定されたクレーターのデータベース (Kirchoff, 2020) を使用した. プルーム粒子の再堆積の数値計算研究 (Southworth et al., 2019) から, 堆積速度の高い領域とされている南緯 45°西経 45°付近の領域におけるクレーターサイズ頻度分布を調べたところ, 3 km 以下の直径範囲における傾きが 4 km 以上の直径範囲における傾きより小さくなっていることがわかった. この結果は 3 km 以下の小クレーターがプルーム粒子の堆積によって消失している可能性を示唆している. そこで, 小クレーターの消失の程度を定量的に表すために, 直径 1 km 以上と 3 km 以上のクレーターの数密度比及び, 直径 2 km 以上と 4 km 以上のクレーターの数密度を算出し, 数値計算研究による堆積速度分布 (Southworth et al., 2019) との相関関係を調査した. その結果, 堆積速度が $10^{(-5)}$ mm/yr より大きい領域ではクレーターの数密度比と堆積速度に弱い正の相関関係があることがわかった.

すばる Hyper Suprime-Cam がとらえた 28P/Neujmin の彗星核とその衝効果

○大坪貴文¹, 河北秀世², 新中善晴²,
寺居剛³, 高田唯史³, 古澤久徳³, 古澤順子³, 春日敏測³, 吉田二美^{1,4}

¹ 産業医科大学, ² 京都産業大学, ³ 国立天文台, ⁴ 千葉工大 PERC

彗星のコマや核の観測は、彗星そのものの起源と進化を理解することだけでなく、小惑星や太陽系外縁天体 (TNO) との関係性を調べるためにも不可欠である。過去の観測からは、彗星核は TNO や D 型小惑星に近い起源を持っている可能性が示唆されてきた。またいくつかの彗星では、彗星核の色は TNO やケンタウルス族天体の平均よりも青く、多くの D 型トロヤ群天体に近いことが分かってきている。ただし、これまで彗星核そのものの観測例は非常に少ない。観測サンプルを増やすことが望まれるが、彗星はコマに隠れてしまい直接観測できないことが「彗星核表面」の観測を難しくしている。そこで我々は、コマの影響をできるだけ小さくするために、すばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam (HSC) の公開アーカイブデータである Public Data Release 3 (PDR3)¹ から、観測時の日心距離が遠く活動が弱い彗星を探した。その結果、HSC の g, r, y の 3 バンドで観測されている彗星 28P/Neujmin のデータを抽出することができた。28P は公転周期 18.4 年、軌道傾斜角 14.3° の短周期彗星で、これまでの観測では、直径約 10 km、自転周期約 12.75 時間、アルベド 0.026 の彗星であると考えられている^{2,3}。今回のすばる HSC データの解析結果は、28P の色は、他の彗星同様に TNO より青く D 型小惑星に近い値を示していた。また、彗星核の地上観測で初めて小さな位相角 ($< 3^\circ$) で衝効果を確認した。衝効果の強さ (等級換算) は、位相角 0.334° で 0.33 ± 0.03 であり、彗星 28P の衝効果は C 型や D 型小惑星よりもかなり急峻であることがわかった。すばる望遠鏡による 28P の観測では、核のカラーは D 型小惑星と似ているものの、C, D 型彗星では見られない衝効果が見られ、彗星核表面の物理特性は C, D 型小惑星とは異なっている可能性が高いことが示唆される。この矛盾を解決するには、衝付近での観測、分光観測、宇宙探査機によるその場観測などさらなる研究が必要である。

参考文献

- [1] Aihara, H., et al. 2022, PASJ, 74, 247. (<https://hsc-release.mtk.nao.ac.jp/doc/>)
- [2] Lamy P. L., Toth I., Fernandez Y. R., Weaver H. A., 2004, Comets II, 223.
- [3] Delahodde, C. E., Meech, K. J., Hainaut, O. R., & Dotto, E. 2001, A&A, 376, 672.

すばる望遠鏡で行ったNASA のNew Horizons ミッションのフライバイターゲット探しサーベイの画像解析

A deep analysis for New Horizons' KBO search images collected by Subaru telescope

○ 吉田二美^{1,2}, 柳沢俊史³, 伊藤孝士⁴, 黒崎裕久³, 吉川真³, 神谷 浩紀³, Jiang Ji-an^{5,4}, Alan Stern⁶, Wesley Fraser^{7,8}, Susan Benecchi⁹, Anne Verbiscer⁶, Kelsi Singer⁶, Joel Parker⁶, Pontus Brandt^{6,10}

¹ 産業医科大学, ² 千葉工業大学惑星科学探査センター, ³ 宇宙航空研究開発機構,
⁴ 国立天文台, ⁵ 中国科学技術大学, ⁶ Southwest Research Institute, ⁷ University of
 Victoria, ⁸ Herzberg Astronomy and Astrophysics, ⁹ Planetary Science Institute,
¹⁰ Johns Hopkins University, APL

すばる望遠鏡のHyper Suprime-CamでNASAのNew Horizonsミッションのフライバイターゲット探しのために収集した観測データを、JAXA 移動天体検出システムで解析した。この検出システムは同一視野を連続撮像した数十枚の画像をずらしながら重ね合わせ、一枚の画像では検出できない暗い天体の検出を行うためのものである。もともとスペースデブリや地球近傍小惑星のような高速移動天体検出に適用されてきたが、我々が初めて、動きの遅いカイパーベルト天体(KBO)の検出に使用した。このシステムの特徴は、多数の画像を一度に扱うので、(1) 高速な画像処理のために画像をFPFAを使う、(2) 星の多い領域の画像でも暗い天体を検出できるように、あらかじめ画像中の光源の位置を正確に決定し、画像の2値化を行う、という2つの特殊処理である。

すばる望遠鏡での観測は2020年5月に開始され、現在は検出した天体の追跡観測が行われている。ここでは、現在公開されている2020年5月から2021年6月までに取得されたデータセットを解析した。我々の検出ではミッションチームが別の方法で発見したKBOsとは別に、7個のKBOsを発見した。そのうちの2つは、小惑星センターによって仮符号が与えられた(2020 KJ60と2020 KK60)(Yoshida et al. PASJ 2024, 76, 720–732, web リリース (日本語) <https://subarutelescope.org/jp/results/2024/06/25/3416.html>, (English) <https://subarutelescope.org/en/results/2024/06/25/3417.html>)。どんなKBOsも見逃さないようにするためには、今回行ったように複数の検出方法を用いてKBO候補を確認することが推奨される。

JAXAの移動天体検出システムは改良が続いており、これまで一次処理後のすばる画像に対して移動天体検出アルゴリズムを適用してきたが、新たにDIFF画像(画像中の恒星像を除去した画像)に適用できるように改良し、検出を行ったところ、KBOの検出数が大幅に増加した。また、恒星をマスクした画像から移動天体が目でわかる画像を作成し、KBO候補の検出位置と動きを確認したところ、JAXA 移動天体検出システムから自動的にピックアップされる移動天体とは別に、新たに検出される移動天体があることがわかった。それらの天体をシステムで検出できなかった原因を調査中である。

これまで移動天体の確認は目視で行っていたが、データ量が増えるにつれ、確認作業を人間が行うことが難しくなってきた。そこで、機械学習を用いて重ね合わせ画像を分類し、誤検知か否かを判断する方法を構築中である。現在、16枚および32枚の重ね合わせによる計5枚の画像を入力としたモデルを構築し、正答率は92%程度となっている。今後、入力やモデルの調整を行い、さらなる正答率の向上を目指す。

COIAS による太陽系小天体の探索状況

○浦川聖太郎¹, 杉浦圭祐², 伊東健一³, 大坪貴文⁴, 北里宏平⁵, 小池美知太郎⁶,
臼田-佐藤功美子⁶, 前田夏穂⁷, 宇野慎介⁸, 木下大輔⁹, 関口朋彦¹⁰

¹ 日本スペースガード協会, ² 三菱電機先端技術総合研究所, ³ Diver-X 株式会社

⁴ 産業医科大学, ⁵ 会津大学, ⁶ 国立天文台, ⁷ 神戸大学,

⁸ 理化学研究所, ⁹ 台湾国立中央大学, ¹⁰ 北海道教育大学

COIAS (Come On! Impacting Asteroids)は、我々が開発した、すばる望遠鏡の画像を用いて、未発見小惑星をはじめとする太陽系小天体の探索(検出・位置測定・測光・報告)を行うことができるウェブアプリケーションである。COIASによって、直径数100mクラスの小惑星の軌道分布の解明・地球接近天体検出によるプラネタリーディフェンスへの貢献・太陽系外縁天体、彗星、活動的小惑星の発見といった成果が期待される。また、COIASのUI(ユーザーインターフェース)は、太陽系小天体の探索を研究者のみならず市民や学生が行うことができる、使いやすさを実現しており、シチズンサイエンスの分野でも大きな貢献をもたらす。

COIASは2023年7月末に完成し一般公開を行っている。2024年7月時点でおおよそ1000人のユーザー(シチズンサイエンティスト)によって、15万を超える新天体候補を検出しMPC(Minor Planet Center)へ報告を行っている。このうち、1898天体に対しては複数夜以上の検出に成功し仮符号を取得している。この中には、地球接近天体(4天体)、火星横断軌道天体(14天体)、木星トロヤ群天体(94天体)、太陽系外縁天体(288天体)が含まれている。特に、約4100天体(2023年理科年表)であった太陽系外縁天体の数を、COIASによってわずか1年で5%程度増加させたことは特筆に値する。仮符号を取得した天体の中には多バンド測光を実施できたものもあり、今後は直径・軌道・反射スペクトルの相関といった太陽系小天体の物理特性の解明にも取り組む。さらに、1つのメインベルト小惑星に対して確定番号(697402)を取得しIAU(国際天文学連合)への命名提案権も得ることができた。小惑星への命名活動を通じた教育普及活動も併せて実施していく。

The Comet Interceptor mission: development of payload engineering models

○S. Kasahara¹, K. Yoshioka¹, N. Sakatani², S. Kameda³, A. Matsuoka⁴, N. Murata², Y. Harada⁴, Y. Sato², Y. Sato², H. Shiratori², Y. Miyazaki², H. Kawakita⁵, S. Sugita¹, R. Funase^{1,2}, and Comet Interceptor project team²

1: The University of Tokyo, 2: JAXA, 3: Rikkyo University, 4: Kyoto University, 5: Kyoto Sangyo University

Comets are pristine small bodies and thus provide key information about the solar system's evolution. Remote observations by ground observatories have characterized various comets, while in-situ observations by spacecraft have brought much more detailed information on several comets. However, the direct observations by spacecraft fly-by or rendezvous have been limited to the short-period comets, which neared the sun many times in the past and thus lost some of (or even most of) their primitive characteristics. The Comet Interceptor mission, led by ESA, aims at a long-period comet or an interstellar object. JAXA will provide an ultra-small (24 U) daughter spacecraft (probe B1), whose closest approach will be less than 1,000 km, allowing the first-ever multi-spacecraft fly-by observations of a comet. Here we report our recent progress on the development of engineering/qualification models in 2024.

Comet Interceptor 搭載イオン分析器開口部の設計と 彗星イオン検出量の推定

○田尾涼¹, 笠原慧¹

¹ 東京大学

過去に彗星探査は行われてきたが、彗星の中でも長周期彗星を直接探査した例はない。長周期彗星の起源はオールトの雲にあると考えられており、太陽系形成初期の始原的な特徴を留めている可能性が高い。これを理解することは、太陽系の起源を知る上で重要な手がかりとなることが期待される。ESA と JAXA が共同で計画している Comet Interceptor Mission は、長周期彗星あるいは恒星間天体を直接探査するミッションで、2029 年に打ち上げ予定である。この Comet Interceptor に搭載するイオン分析器は、コマ中に含まれる彗星イオンの質量・エネルギー・飛来の方角を計測する。しかし、最も重要なフライバイ観測時のコマ中にはダストも含まれ、探査機を保護するため進行方向の側面にダストシールドを設置し機器の損傷を防ぐ必要がある。本研究では、適切な入射口付きのダストシールドを設計することで、衝突ダストを防ぎつつ彗星イオンを計測可能にし、その検出量を推定する。

入射口のサイズと位置を決定する上で、長周期彗星のイオンやダストの数密度分布を推定してイオン分析器への流入量を見積もることが必要である。彗星ガスの光化学反応モデルを用いた数値計算(Heritier et al., 2017)により、長周期彗星を想定したガス生成率のもとコマのイオン数密度プロファイルを導出した結果、彗星との最接近距離において最大イオン数密度が $\sim 100 \text{ cm}^{-3}$ と求まった。さらに、探査機と彗星の相対速度 $10 - 70 \text{ km/s}$ 、彗星イオンの温度やバルク速度などからイオン分析器への流入量を推定し、イオン分析器内部でのイオン軌道シミュレーションより、適切な検出量となるよう $\phi 1 \text{ mm}$ サイズの入射口を複数設置した。また、彗星ダスト分布は(Marschall et al., 2022)を元に決定し、衝突確率 0.05 のダストサイズに対して保護可能な形状を条件として設計した。

この開口部設計を施した上で、検出イオンのイオン種ごとの内訳を把握するために、彗星イオン種の模擬データをもとに検出されるイオン質量スペクトルを推定した。LEF-TOF 型質量分析器で計測する際に、イオン分子が分離して原子単位で検出されるため、取得データの解釈に必須である。分子イオンの存在比や分離率の違いに応じた推定結果を示す。

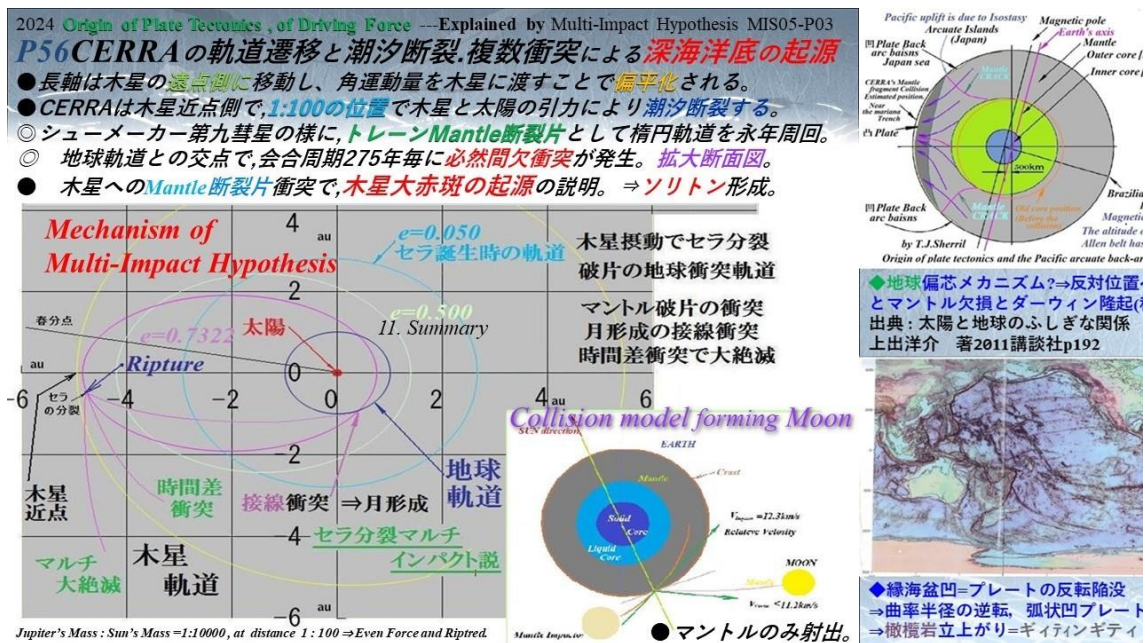
このように、イオンの入射から検出ないしイオン種を同定するプロセスにおいて、イオンの挙動を掌握し流入量から計測データまで予測することで、イオン分析器を用いた長周期彗星まわりのイオン観測が成立する。また、彗星ガスの光化学反応モデルによって推定されたイオン数密度プロファイルは、実際に彗星イオンの計測後のデータ解析にも有用である。Comet Interceptor ミッションは単一のフライバイ探査であるため、得られた軌道上のデータを境界条件に計算モデルを用いて彗星表面までのイオン数密度プロファイルを推定し、粒子種ごとの生成率を求めることができる。

月と地球海洋底の起源, 小惑星帯と小惑星の起源, 水星の起源, 月形成インパクトの起源, 生命の起源と進化, キンバーライトパイプの起源, 地軸傾斜の起源, プレート移動方向急変の起源, 南極大陸移動停止の起源, 月が常に地球を向く起源, 月の表側だけに海が有る起源, プレートが重なる起源, 環太平洋弧状列島と背弧海盆の起源, 地球の海洋1%深さの起源, バンアレン帯1割偏芯の起源, 地磁気極性反転の起源, 木星大赤斑の起源, CERRA断裂の起源, 隕石重爆撃期の起源, 月偏芯の起源, 駆動力の起源とその検証方法

○種子彰11 SEED SCIENCE LABO. 銀河系・惑星・地球月起源研究所

私達は一度限りの地球 進化の結果に存在しており, 仮説検証には自然との一致が評価方法として相応しい。即ち, 「創造的な仮説で, 自然の進化を統一的に無矛盾で, 何項目説明できるか」で評価する方法です。 「Multi-Impact Hypothesis[3]」は, 太陽系の地球と月の起源であり, 約25項目の特徴を全て説明できた。

タイトルに挙げた起源は, 二つの仮説に基づいた「Multi-Impact Hypothesis[3]」の特徴で有り成果でも有る。そして, 夫々進化の結果と一致して統一的に無矛盾で説明できる事と, 更にプレートテクトニクスと駆動力の起源も全て説明出来る事は, 総合的に検証できたと考える。⇒起源仮説が海洋底とプレートテクトニクスと駆動力の起源まで全て説明できた。



更に, 帰納と演繹だけでは辿り着け無い太陽系のミッシング・リンクを創造的な仮説とアブダクションで補い, 太陽系の起源を完成させた。⇒木星大赤斑の起源, CERRA断裂の起源, CERRA軌道の偏平化, 隕石重爆撃期の起源, フィーデングゾーンの起源, 水星の起源, 小惑星帯と小惑星の起源, 冥王星の起源等。この仮説は拡張性が有り全て検証できた。

起源[宇宙・銀河・太陽系・地球と月・プレートテクトニクス・
駆動力・地震・生命の誕生と進化 etc]の探究方法, 起源の検証方法

How to explore and verify the origins (universe, galaxies, solar system, Earth and Moon,
plate tectonics, driving forces, earthquakes, birth and evolution of life, etc.)

○種子彰¹ ¹SEED SCIENCE Labo. 銀河系・惑星・地球月起源研究所

私達は一度限りの地球進化の結果に存在している。仮説検証には自然との一致が評価方法として相応しい。

即ち、「創造的な仮説で、自然の進化を統一的に無矛盾で何項目説明できるか」で評価する方法です。
太陽系の地球と月の起源では、「Multi-Impact Hypothesis^[3]」であり、約 25 項目の特徴を説明できた。

◎マルチインパクト仮説^[3]では、セレス位置に誕生した分化した原始惑星 CERRA が、後からできた巨大質量惑星 JUPITER による摂動で軌道が扁平化した。終焉軌道の遠点位置で潮汐断裂して、トレーンマントル断裂片となり、軌道交差位置で会合周期の時に地球と衝突する。軌道計算で衝突角度と速度は 36.4° と 12.4km/sec と仮説で計算できた、射出速度は第二次宇宙速度 10.2km/sec より当然低いが加速メカニズムは不要である。マントルだけの月サイズのインパクトと地球外周は共にマントルなので、マントルだけの月が必然で形成された。 ○惑星は内側程密度が高いので[その射出された月が偏芯する。]⇒偏芯した月は、月と地球の共通重心の回りを互いに巴回転しながら、位置エネルギーを最小にする様に、常に地球に[玄武岩に富む]重い側を向けている。Cf. 隕石重爆撃により月の海として表側に示されている。

1,月の起源論: 倉本圭氏の成績表に「Multi-Impact Hypothesis^[5]」を加える[1]と、画期的な検証となる。太陽系と地球と月とプレートテクトニクスの起源の検証結果と成った。

2024 Origin of Plate Tectonics, of Driving Force —Explained by Multi-Impact Hypothesis P-056 AKIRA TANeko.

1.太陽系の起源論:成績表(MIH追加)
自然は宇宙から生命まで連続である。

月と深海洋底とプレートテクトニクスの起源を、マルチインパクト仮説で
進化の結果を利用してアブダクションで検証
TABLE 3. A "Report Card": The Author's Opinion of How Well Five Models
of Lunar Origin Satisfy Seven Constraints. Wood (1986)に 倉本圭氏 加筆 倉本圭氏の図に種子彰 加筆

仮説モデル→	Intact Capture	Coaccretion	Earth Fission	Collisional Ejection	Disintegrative Capture	マルチインパクト仮説
↓進化の結果項目						
Lunar Mass, (Mechanism of lunar Eccentricity) B, (F)		B, (F)	D, (F)	I⇒, (F)	B, (F)	A, <月偏芯の形成モデル>
Earth-Moon angular momentum角運動量C		F	F	B⇒3×Re	C	A, 月半径≒60×6400km
Volatile element depletion 速度成分枯渇C		C	B	B⇒	C	A, マントル衝突と射出, 溶融
Fe depletion 月成分での鉄の枯渇F		D	A	I	B	A, マントルだけの衝突体
Oxygen isotopes 酸素同位体比, (地球一致) B		A	A	B⇒	B	A, 月マントルは地球マントル
(Similarity of mantle trace element patterns) (C)		(D)	(A)	(C)	(C)	(A, 地球から射出された月)
Magma ocean 月表面の熔融被覆		C	A	A	B	A, 地球一部射出と溶融被覆
Physical plausibility 必然衝突メカニズムの起源仮説	D	C	F	I⇒	F	A, 必然の衝突メカニズム
必然衝突メカニズムの起源仮説	F	F	F	F	F	A, マルチインパクト仮説
月が常に地球を向く理由	F	F	F	F	F	A, 地球と偏芯した月が, 共通重心の回りを互いに巴回転
地球深海洋底の起源	F	F	F	F	F	A, マルチインパクト仮説
プレート境界亀裂の起源	F	F	F	F	F	A, 地球衝突の対極への亀裂形成
プレートテクトニクスの起源, 駆動力	F	F	F	F	F	A, 地球慣性モーメントの最小化
環太平洋弧状列島と背弧海盆	F	F	F	F	F	A, 衝突欠損とアイソスタシー
地軸傾斜, 駆動方向の急変	F	F	F	F	F	A, 高緯度衝突, 側力で地軸傾斜, プレート駆動メカニズムの急変

*For readers unfamiliar with the U.S. educational system: A is the best grade; F (failing) is the worst; I (incomplete) means all assignments have not been completed and a grade cannot yet be awarded. F: Model is limit, impossible.

左側の3説は月形成の提案, 4列目は**惑星時衝突**, 右端は**太陽系起源を提案する仮説**に, 対して**地球へ衝突**.

創造的推論によるマルチインパクト仮説は月起源から海洋, Plate Tectonics, 駆動力起源を検証

[1]月譚起源論:成績表 [加筆]
倉本圭 (2016.01/08) GIH説
月譚起源と進化 CPS探査ミ
ッション立案スクール

[2] Origin of the Earth and
Moon 1988 G. Jeffrey Taylor
Hawai'i Institute of
Geophysics and Planetology

[3]種子彰 月形成仮説
(Multi-Impact Hypothesis)
Sep.2014 P1-22 日本惑星
科学会 秋季講演会

[4] Benz, W., Slattery, W.L.
and Cameron, A.G.W.
(1986) The Origin of the
Moon and the Single-
Impact Hypothesis I.
Icarus, 66, 515-535.
(シミュレーション仮説)

[5] 種子彰 2022-MIS05-P03
プレートテクトニクスの起源
[月・地球の公回転の外力]

○プレートテクトニクスの起源としては、マルチインパクトにより月の射出欠損とアイソスタシーによるダーウィン解脈の形成や、[周囲のプレートの陥没=凹プレートの起源], 欠損周囲の凹プレートの連結=環太平洋弧状列島と背弧海盆の起源と成った。⇒マルチインパクトは海と地球生命の起源と成った。

○駆動力の起源⇒月と地球の巴回転による回転モーメントと自転による回転モーメントとの合成。

赤外線天文衛星 GREX-PLUS 計画:進捗報告 2024

○井上昭雄¹野村英子²、野津翔太³

¹早稲田大学物理学科

¹国立天文台科学研究部

¹東京大学地球惑星科学専攻

JAXA 宇宙科学研究所が戦略的に進める中型計画は、GDI (Groupe de Discussion Intensive; 戦略的中型創出グループ) とコミュニティが協力して作り上げるようになった。本講演では、宇宙物理学 GDI のもとに設置された銀河進化・惑星系形成観測ミッション時限 WG で検討されている Galaxy Reionization Explorer and Planetary Universe Spectrometer (GREX-PLUS) 計画の進捗状況について報告する。GREX-PLUS は、口径 1.2m、温度 50K の冷却宇宙望遠鏡に波長 2~8 μm 帯 5 バンドの広視野カメラと波長 10~18 μm 帯で分解能 30,000 の高分散分光器を搭載する計画である。それぞれの装置に対応する「初代銀河」と「スノーライン」の探査という二大科学目標に加え、他の計画には無いユニークな観測機能を活用した合計 18 テーマにもおよぶさまざまな科学目標を達成することができる (GREX-PLUS Science Book; arXiv:2304.08104)。主な技術的課題は、擾乱伝達抑制による高安定指向制御技術、観測系と衛星姿勢系の協調による絶対指向制御技術、放射冷却系の試験検証技術、低温下での光学性能検証技術、そして、高分散分光器に用いるイメージングレーティングの開発である。今年度前半の最大の成果として、ミッションコンセプト提案書を取りまとめて宇宙科学研究所へ提出した。講演では、提案書の概要を説明し、その評価結果と今後の展望について報告する。また、惑星科学に関する GREX-PLUS を利用したサイエンスの展望について特に焦点を当てる。

JWST による edge-on 原始惑星系円盤の 近・中間赤外線撮像観測

○ 田崎亮^{1,2}, F Ménard¹, G Duchêne^{1,3}, M Villenave^{4,6}, Álvaro Ribas⁵,
KR Stapelfeldt⁶, SG Wolff⁷, MD Perrin⁸, C Pinte⁹, DL Padgett⁶

¹ IPAG, Université Grenoble Alpes, ² 東北大学, ³ UC Berkeley, ⁴ Università degli Studi di Milano, ⁵ University of Cambridge, ⁶ NASA/JPL, ⁷ Univ of Arizona, ⁸ STScI, ⁹ Monash University

近年, ALMA 望遠鏡による原始惑星系円盤の観測によって赤道面に幾何学的に薄いダスト層を持つ天体の存在が明らかになってきた (Pinte et al. 2016, Villenave et al. 2022). この結果は, ダストの沈殿や鉛直方向の空間構造に関する我々の理解に大きな進展をもたらしている. しかし, すべての天体がこのような幾何学的に薄いダスト層を持つわけではないことも明らかになってきており, ダストの鉛直空間分布がどのような物理過程によって決まるのかは依然として不明である. これを明らかにするためには, より多くの天体における鉛直構造に関する観測的知見を積み重ねていくことが肝心である. これまで我々は, Edge-on 原始惑星系円盤をターゲットに据えた観測を行ってきた. Edge-on 円盤とは, 観測者から見て円盤がほぼ真横に見えるような天体のことであり, そのユニークな見込み角によって我々は円盤の鉛直構造を直接観測によって調べることができる.

本講演では, ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) の近赤外線カメラ (NIRCam) および中間赤外線観測装置 (MIRI) を用いて得られた, HH 30 周りの edge-on 円盤の近・中間赤外線撮像観測の結果を報告する. そして, ALMA Band 6 で得られた HH 30 のダスト連続波の高解像度観測 (ビームサイズ 0.029×0.02 秒角) の結果も併せて報告する. 本講演ではまず, HH 30 周りの原始惑星系円盤の姿 (特にその円盤の幾何学的厚み) が可視光 (HST) から近・中間赤外線 (JWST), そしてミリ波 (ALMA) にかけてどのように変化するかという観測事実をまとめる. 次に, 公開輻射輸送計算コード RADMC-3D (Dullemond et al. 2012) を用いて, HH 30 円盤モデルの多波長模擬観測画像や SED を作成し, 得られた結果と実際の観測データとの比較を行った. その結果, 観測された中間赤外線における円盤の形態やフラックス強度を説明するためには, 少なくとも半径 $10 \mu\text{m}$ のダストが円盤表層部に存在していなければならないことが明らかになった. 一方で, ミリ波連続波観測画像は, ミリメートルサイズのダストが約 5 au のスケールハイト (中心星から 100 au の位置) を持つモデルでよく再現できることもわかった. 本講演ではさらに, 得られた結果の解釈や, これまでに JWST によって得られたその他の edge-on 円盤の観測的性質との比較について議論を行う.

惑星候補 AB Aurigae b の潜在的周惑星円盤からの ダスト連続波放射の予測

Predictions of Dust Continuum Emission from the Potential Circumplanetary Disk of AB Aurigae b

○芝池諭人^{1,2}, 橋本淳^{1,3,4}, Ruobing Dong⁵, 深川美里¹, Christoph Mordasini², 武藤恭之⁶

1. 国立天文台, 2. ベルン大学, 3. アストロバイオロジーセンター, 4. 総合研究大学院大学,
5. ビクトリア大学, 6. 工学院大学

近年相次いで発見されている形成中のガス惑星は、ガス集積過程で惑星周囲に小さなガス円盤(周惑星円盤、CPD と呼ぶ)を作る。これまでに PDS 70 b、c、そして AB Aurigae b (以下 AB Aur b)から H α 輝線が観測され、ガス集積中の惑星(候補)とされているが、CPD に含まれるダストのミリ波の熱放射は PDS 70 c のみからしか検出されていない。我々は、惑星候補 AB Aur b について、Currie et al. (2022)にて近赤外の SED フィッティングから推定された惑星質量とガス集積率の値(9MJ, 1.1MJ/Myr)を使い、Shibaike & Mordasini (2024)にて開発されたダストの進化・放射モデルを改良し AB Aur b に適用することで、波長 1.3mm での CPD の熱放射のフラックス密度を予測した。その結果、これまでの ALMA Band 6 (1.3mm)による観測の 3 σ レベルを超えることはなく、非検出と整合的であった。一方で、Currie et al. (2022)ではミクロンサイズのダストによる減光がきちんと考慮されておらず、惑星質量とガス集積率が小さく推定されてしまっている。そこで、この減光を考慮し、かつ近赤外線および H α 輝線強度も利用して、より確からしい惑星質量とガス集積率を推定したところ、従来よりも大きな値となった(20MJ, 8.9MJ/Myr)。この値を用いて、再度 1.3mm のダスト連続波放射フラックス密度を推定すると、典型的な CPD へのダスト/ガス流入質量比を仮定した場合、AB Aur b 周囲の CPD からの放射が検出可能であった可能性が示唆された。これは、1) AB Aur b 近傍に供給されるダスト量が少ない、2) CPD ではなくエンベロープが形成されている、3) AB Aur b は惑星ではない、の三つの可能性を示唆する。また、AB Aur b が惑星であるかどうか、より強力な手がかりを得るためには、より短波長の ALMA Band 7 (870 μ m)での観測が望ましいことがわかった。

参考文献

Currie T. et al., 2022, *Nature Astronomy* 6, 751

Shibaike Y. and Mordasini C. 2024, *Astronomy & Astrophysics*, 811 687, A166.

直接撮像観測された太陽系外ガス惑星の衛星系とその将来観測

堀 安範 (アストロバイオロジーセンター／国立天文台), 藤井悠里 (京都大学), 荻原正博 (上海交通大学)

太陽系の巨大ガス惑星の周りには衛星系が存在する。木星には平均運動共鳴の軌道配置に比較的大きな衛星が複数個存在するのに対して、土星では離れた位置の大きな衛星タイタンが支配的な衛星系となっている。我々の衛星系形成に関する理論研究 (講演OC-05参照) から、これらのガス惑星周りで形成される衛星系の力学的な違いは形成直後のガス惑星の磁場強度と周惑星系円盤の共進化が影響している可能性が高いことがわかった。大きな表面磁場強度 ($>100\text{G}$) を持つ若いガス惑星 (例. 若い木星) は磁気圏降着に伴って、周惑星系円盤に磁気圏空隙を形成する。その結果、形成される衛星の軌道移動が抑制／制止されることでガリレオ衛星のように(軌道共鳴関係にある)複数衛星系が生き残る。逆に、磁場強度 ($\sim 1\text{G}$) の若いガス惑星(例. 若い土星)では磁気圏空隙が形成されないために、遠方で形成される衛星しか落下を免れて最終的に生き残ることができない。

我々はガス惑星の衛星形成シナリオを直接撮像観測された木星より重い遠方系外ガス惑星(例. HR8799系, 51 Eri b, β Pic b)に適用した。図1はそれぞれの遠方ガス惑星ライクな惑星の表面磁場強度の時間進化を示している。推定された系の年齢 (β Pictoris, 51 Eridani $\sim 10\text{-}20\text{Myr}$, HR8799 $\sim 30\text{-}60\text{Myr}$) を採用すると、いずれのガス惑星も強力な双極子磁場 (数 $100\text{-}1000\text{G}$ 程度) を持つと予想される。したがって、直接撮像されたガス惑星は衛星形成段階には磁気圏降着を経験し、大きな複数衛星系が形成した可能性が高い。本発表ではこれらの結果を踏まえて、現在までに系外衛星の発見報告はトランジット惑星周りでの懐疑的な2例しかないが、直接撮像で発見された若いガス惑星周りで理論的に予想される系外衛星系の今後の検出可能性を惑星の公転運動に対する視線速度変動およびアストロメトリ観測の側面から議論する。

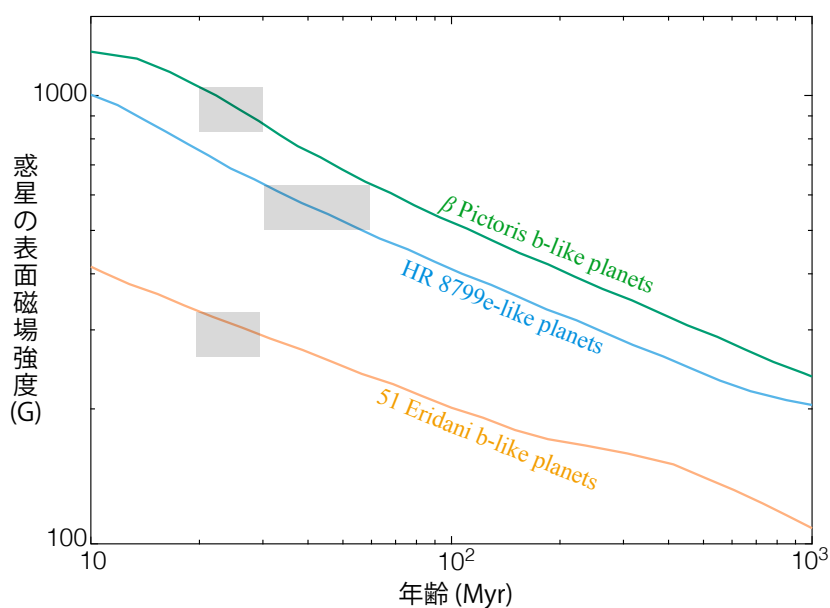


図1 直接撮像で発見された3つの遠方ガス惑星系 (β Pictoris, HR8799, 51 Eridani) ライクな惑星の表面磁場強度の時間進化。灰色領域は各惑星系の年齢を表している。

MuSCAT シリーズによって発見された新たなトランジット惑星:2023-2024

○成田憲保^{1,2}, 福井暁彦¹, ほか MuSCAT チーム¹ 東京大学, ² アストロバイオロジーセンター

我々は 2013 年度から多色同時撮像カメラ MuSCAT シリーズを開発し、これまでに日本・岡山、スペイン・テネリフェ島、アメリカ・マウイ島にある北半球の 3 台の 1.5-2m 望遠鏡と、オーストラリア・ニューサウスウェールズにある南半球の 1 台の 2m 望遠鏡に搭載・運用してきた。

MuSCAT シリーズは、光路上に設置したダイクロイックミラーにより天体の光を複数の波長帯に分け、複数の CCD カメラで独立あるいは同期して撮像観測を行うことが可能な観測装置である。岡山の MuSCAT は 3 色、それ以外の MuSCAT2/3/4 は 4 色で同時に観測が可能であり、4 つの波長帯は天文観測用フィルターの g (400nm-550nm), r (550nm-700nm), i (700nm-820nm), z_s (820nm-920nm) バンドに相当する。

MuSCAT シリーズの主要なサイエンスのひとつは、トランジット惑星のサーベイで発見されたトランジット惑星候補が本物の惑星かどうかを判別するための発見確認観測を行うことである。特に現在は、NASA のトランジット惑星探索衛星 TESS で発見されたトランジット惑星候補の発見確認観測に取り組んでいる。

このポスターでは、MuSCAT シリーズで発見確認観測を行って 2023-2024 年にかけて発表された新たなトランジット惑星について紹介する。

サブネプチューンのマグマオーシャン リトリバル法の開発

Development of retrieval techniques to characterize magma ocean of sub-Neptunes

○伊藤祐一^{1,2}、Quentin Changeat^{2,3}

¹国立天文台、²University College London、³Space Telescope Science Institute

現在、JWST などの大型望遠鏡を用いた高精度な大気スペクトル観測により、サブネプチューンや主星近傍岩石惑星の大気組成を制約することが行われ、これらの惑星の詳細な特徴づけを行う新たな時代がおとずれている。そして、JWST だけに留まらず、2029 年に打ち上げ予定である宇宙望遠鏡 Ariel: Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey (ESA M4 Mission) が、木星型から地球型の惑星まで高精度かつ広い波長領域での系外惑星大気観測サーベイを行う予定であり、今後系外惑星大気への理解は飛躍的に進むことが期待される。また、これら観測された大気組成から、サブネプチューンについては質量半径のみからは定まらない惑星バルク組成への制約に向けた検討、主星近傍岩石惑星については岩石中の揮発性成分量の制約に向けた検討が行われ始めている (e.g., Madhusudhan et al. 2023, Shorttle et al. 2024, Hu et al. 2024)。これら惑星の大気にとどまらず内部組成理解に向けた検討は、惑星の材料物質や岩石惑星の多様性理解に繋がると期待される。しかし、現在、観測スペクトル誤差を直接反映した大気組成への制約がリトリバル法により定量的に行われているのに対して、大気スペクトルから内部組成を同様に制約する手法がない。

本研究では、マグマオーシャンを地表面に持つサブネプチューンに焦点を当て、そのマグマの酸化還元度や揮発性元素の割合を大気スペクトルから直接制約可能なリトリバル法の開発を行なった。そのために、マグマと大気間の化学平衡及び揮発性元素(H, C, O, N)のマグマへの溶融を考慮したマグマ大気モデルを作成し、公開リトリバルコード、TauREx3 (Al-Refaie et al. 2019)、と組み合わることを行なった。本発表では、本リトリバル法のモデルフレームワークと性能テストの結果を紹介する。

高温星 T0I1355 周辺の楕円軌道ホットジュピターの発見

○渡辺紀治¹、成田憲保^{1,2,3}、福井暁彦¹、佐藤文衛³、磯貝佳祐^{1,4}、John Livingston^{2,5}
Jerome de Leon¹、河合優悟¹、大宮正士^{2,5}、泉浦秀行⁵、田實晃人⁵、
日下部展彦^{2,5}、田村元秀^{1,2,5}、MuSCAT チーム、Las Cumbres Observatory スタッフ

¹ 東京大学、² アストロバイオロジーセンター、³ 東京工業大学、⁴ 京都大学、⁵ 国立天文台

主星の極近傍で公転する巨大ガス惑星、すなわちホットジュピターは、その場での形成が困難である。そのため、主星から遠い場所で形成された巨大ガス惑星を中心方向に移動させる軌道進化モデルが提唱された。巨大ガス惑星の軌道進化モデルとして主に、円盤との重力相互作用によって軌道が主星自転と揃ったまま内側に移動する円盤相互作用モデル、伴星の重力作用で離心率と軌道傾斜角が大きくなり軌道が主星自転に対して傾いたまま円軌道化で内側に移動する高離心率移動モデルが挙げられている。表面温度が 7000K 以上の恒星(高温星)の表面には対流層がほぼないため、潮汐効果によって主星自転が軌道の向きと揃うことがなく、軌道進化直後の惑星軌道傾斜角を維持する。よって、高温星周辺のホットジュピターは、惑星軌道進化の調査に最適であると言える。

本研究で我々は、高温星である T0I1355 (A 型星) に対して、宇宙望遠鏡 TESS によるトランジット探査と、高分散分光器 GAOES-RV や多色撮像カメラ MuSCAT3 などを用いた地上フォローアップ観測を行った。T0I1355 周辺で重いホットジュピターを 1 つ発見した。高温星周辺においては初めての高い離心率($e \sim 0.29$)をもつホットジュピターの発見であり、高離心率移動モデルに沿って軌道進化をしている最中である可能性を示した。また、主星中心からトランジット軌道までの見かけの距離インパクトパラメーターの変化も確認した。これが惑星軌道歳差(惑星公転軸が主星自転軸を中心に歳差運動する現象)による変化であれば極軌道で公転をする可能性があり、高離心率移動モデルによる軌道進化をさらに支持することとなる。さらに、西暦 2028 年にはこのホットジュピターが恒星の前を通過しなくなり、それ以降トランジット観測ができなくなる可能性を示した。

今後、北半球の望遠鏡に設置されている MuSCAT1/2/3、昨年南半球のオーストラリアの望遠鏡に設置された MuSCAT4 や、GAOES-RV などの高分散分光器などを使用して、全天に対して高温星周辺の巨大ガス惑星の発見確認と調査を行う。

JWST-NIRSpec による 曇ったサブネプチューン GJ1214b の大気透過分光観測

大野和正¹, Schlawin Everett², Bell Taylor³, Murphy Matthew², Thomas Beatty⁴,

Luis Welbanks⁵, Greene Thomas³, Fortney Jonathan⁶

(1:国立天文台, 2:スチュワード天文台, 3: NASA エイムズ研究センター, 4: ウィスコンシン大学マディソン校, 5:アリゾナ州立大学, 6:カリフォルニア大学サンタクルーズ校)

サブネプチューンは銀河系で最も普遍的な系外惑星であり、その起源と進化過程を理解することは今日の惑星科学における最重要課題の1つである。惑星の起源を調べる上で、惑星大気の化学組成は過去の形成・進化過程を探る重要な手がかりを提供する。この文脈において、代表的なサブネプチューンの一つである GJ1214 b は近傍の小型 M 型星周りを公転していることから、大気観測における絶好のターゲットである。ところが、過去 10 年以上にわたってハッブル宇宙望遠鏡などによる大気透過分光観測が行われてきたが、GJ1214b は光学的に厚い雲・ヘイズに覆われていることが分かっている(Kreidberg et al. 2014)。GJ1214b は系外惑星における雲・ヘイズ形成の微物理過程を調べるベンチマークとして機能してきたが(e.g., Kawashima & Ikoma 2018, Ohno & Okuzumi 2018)、一方でその大気組成は未だに明らかではない。雲・ヘイズは長波長ほど光学的に薄くなる傾向があり、近年打ち上げられた JWST による赤外観測によって大気組成に迫れる可能性がある。

我々は、JWST の GTO プログラムである MANATEE の一環として、JWST-NIRSpec G395H を用いて GJ1214b の 3–5 μm 帯の大気透過光スペクトルを新たに観測したため、その結果と解釈を報告する。観測されたスペクトルは、他の波長帯での観測スペクトルと異なり、微弱ながらも識別可能な波長依存性を示すことが分かった。従来の GJ1214b における雲・ヘイズ形成を調べた理論研究(e.g., Ohno, Okuzumi & Tazaki 2020, Gao et al. 2023) は、3–5 μm 帯にメタン(CH_4)および二酸化炭素(CO_2)の吸収特徴が現れることを予言していた。それに対して、観測されたスペクトルは理論予測と整合的な二酸化炭素の吸収を示す一方で、メタンの吸収は微弱であることが分かった。

次に我々は、様々な大気組成、渦拡散係数に対して輻射対流平衡計算、光化学計算、微物理モデルによるエアロゾル形成の計算を行い、観測スペクトルを説明可能な大気組成を調べた。その結果、本惑星は大気の金属量が太陽組成の 1000 倍以上と極めて重元素に富んだ大気であること、大気の C/O 比がおおよそ太陽組成程度であること、またこのような超重元素リッチ大気では従来予言されていなかった硫化カルボニル(COS)の顕著な吸収が見えることが分かった。本観測では硫化カルボニルを検出できる精度は達成できなかったが、JWST による追観測において硫化カルボニルを発見できれば超重元素リッチ大気の決定的な証拠、更には大気中の硫黄量を探る手がかりとなり得る。本講演ではその他にも GJ1214b の内部構造や形成過程に関しても議論を行う予定である。

Orbital instability of compact planetary systems

○Gabriel Teixeira Guimarães^{1,2}, Eiichiro Kokubo²

¹Graduate Institute for Advanced Studies — SOKENDAI,

² National Astronomical Observatory of Japan — NAOJ

Compact protoplanet systems are a natural outcome of runaway and oligarchic growth of planetesimals. In such systems, low-mass protoplanets orbit around the central star with a mean orbital separation $K = a_{i+1} - a_i$ of the order of 10 unities of their mutual Hill Radius $R_{Hill}^{i+1,i}$ and can only further grow to earth-like masses through giant impacts between the protoplanets.

Close encounters or orbit crossings between those protoplanets would trigger chaotic phenomena that will lead to the dynamical sculpting of those protoplanet systems into those we are able to observe nowadays (Pu & Wu, 2015), and the timescales τ_{inst} for those catastrophic events to happen is exponentially dependent on the value of K , on the form $\log \tau_{inst} \propto bK + c$ (Chambers et al., 1996).

Those instability times are not dependent only on initial orbital separation between pairs of planets, though. Different parameters, such as protoplanetary masses, initial eccentricities and inclinations can also impact the lifetimes of similar systems (Yoshinaga et al., 1999; Zhou et al., 2007; Wang et al., 2019; Dietrich et al., 2023), and fluctuations of such parameters are expected to affect the dynamical stability of those planetary systems.

In this context, we numerically integrated a number of distinct orbital configurations for compact planetary systems, while adding statistical inhomogeneities in the surveyed parameter space, like protoplanets masses, initial eccentricities and inclinations, as means of understanding the effects of such small deviations on the instability times of those systems.

In this work, through the systematic survey of the parameter space, we find that inhomogeneities σ_K in the distribution of initial orbital separation between planets K_{mean} within a system induce interesting phenomena, such as changes in the linear relationship $\log \tau_{inst} \propto bK_{mean} + c$ found by Chambers et al. (1996) (Figure 1) and more diverse dynamical architecture.

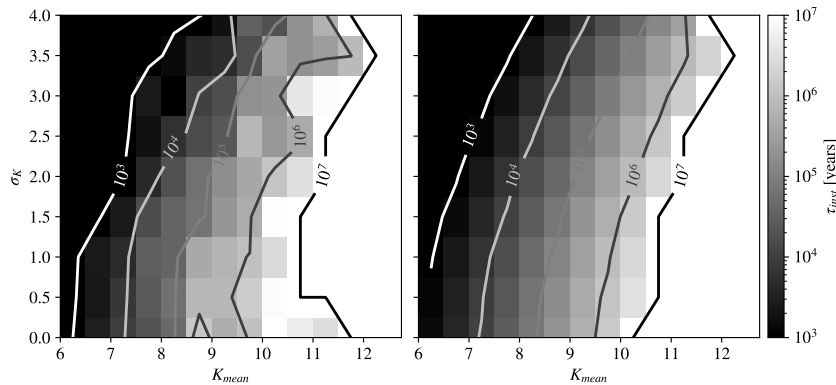


Figure 1: Gray scale map and contour plot showing the relationship between the average initial orbital separation K_{mean} , the standard deviation in this orbital separation σ_K and the instability times τ_{inst} . Left plot: numerical data obtained from the median of τ_{inst} from 64 runs for each data point. Right plot: non-linear least squares fit.

星団内における二重惑星のダイナミクス

○ 黄 宇坤¹、祝 偉²、小久保 英一郎¹

¹ 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト、² 清華大学天文学部

Jupiter-Mass Binary Objects (JuMBOs), recently discovered by the James Webb Space Telescope (JWST) in the Trapezium Cluster, present a significant challenge to existing models of planetary formation. These binary planetary systems, characterized by wide separations and a relatively young age, do not align with the expectations set by conventional theories. To address this, we developed a comprehensive analytical framework and conducted three-body simulations to explore the dynamics and stability of binary planets within dense stellar environments. A key insight from this research is that the stability of a binary planet is largely determined by its orbital period, with critical stellar flybys playing a crucial role in altering the orbits of these systems. These interactions can either expand or contract the orbits, potentially leading to the formation of wide binary systems like those observed by JWST.

Central to this study is the hypothesis that JuMBOs may have initially formed as tight binary systems near the cores of star clusters. Over time, interactions with passing stars could have expanded their orbits, resulting in the wide configurations observed today. Our simulations support this idea, showing that a primordial population of tight JuMBOs could evolve into wide binaries with semimajor axes ranging from 25 to 400 AU, which is consistent with the observations made by JWST. This hypothesis has broad implications for our understanding of planet formation, star cluster dynamics, and binary system evolution. By suggesting that JuMBOs could have formed as tight binaries and then evolved through stellar interactions, this research offers a new perspective on the processes governing planetary system formation in dense clusters, challenging traditional views and highlighting the critical role of cluster environments in shaping planetary architectures.

The findings of this study underscore the need for further observational and theoretical research to refine our understanding of binary planet dynamics within clusters. Upcoming JWST observations and other high-resolution surveys will be essential for testing the predictions of these models and for exploring the prevalence and characteristics of binary planetary systems across various stellar environments. This work represents a significant advancement in our understanding of planetary dynamics within star clusters, providing a foundation for future research into the complex interplay between planetary systems and their stellar environments.

機械学習を用いた微惑星衝突の結果の推定

玄田英典¹、本田雅亮^{1,2}、杉浦圭祐³

¹東京工業大学、²東京ガス、³三菱電機

多数の微惑星や原始惑星の軌道進化や合体成長の過程を調べるため、これまで多くの N 体計算が行われてきた。その研究のほとんどは、天体同士が衝突した際、質量欠損などを起こさずに、完全に合体するという仮定がなされてきた(e.g., Morbidelli et al. 2009)。しかし天体同士の衝突は多様であり、そもそも合体せずにすれ違いになる衝突や、大規模な破壊を生じる衝突などの結果をもたらす場合が多々ある(Leinhardt&Stewart 2012)。

この完全合体の仮定を取り払うために、天体同士が衝突する度に衝突計算をし、その結果をその後の N 体計算に反映させるという手段がある。巨大天体衝突ステージでは衝突回数が数十回程度のため、この方法で研究が行われることもあったが(Genda et al. 2017)、衝突回数が増えると(例えば、暴走成長ステージ)、計算量が膨大となり現実的ではない。これを回避するために、あらかじめ多数の天体衝突を計算しておき、その結果をスケーリングしたモデルを構築し(e.g., Leinhardt & Stewart 2012)、そのモデルを N 体計算に組み込むことで、衝突の多様性を考慮する方法がとられている。しかし、スケーリングモデルを構築するためには、衝突パラメータの数と範囲を限定する必要があり、そもそも、衝突後の天体の位置や速度のスケーリングが出来ていないという現状がある。 N 体計算では衝突後の天体の質量だけでなく、位置や速度も重要となってくる。

近年では、原始惑星同士の衝突について、その衝突の結果を推定する機械学習モデルを構築する研究が行われるようになってきた(e.g., Cambioni et al. 2019)。衝突後の天体の位置や速度についての予測も行われている(Emsenhuber et al. 2020)。一方で、微惑星同士の衝突についてはまだ機械学習を用いた推定が行われていない。

本研究では、微惑星同士の衝突の結果を機械学習で推定することを試みる。微惑星同士の衝突プロセスを詳細に計算することのできる衝突計算コード(Sugiura et al. 2018)を用いて、4400 通りの衝突計算を行った。衝突パラメータとして、2 天体の質量比、ターゲットの半径、衝突速度、衝突角度、物質強度の 5 つのパラメータを考慮した。これら衝突計算の結果から、衝突後に生き残った天体のうち、質量の大きい 2 つの天体の質量、速度、角度(位置の計算に必要)を解析し、衝突結果として求めた。これによって、機械学習モデルを鍛える 4400 通りの教師データを作成した。

まずは、衝突の種類を 4 つに定義し、ニューラルネットワークとサポートベクターマシンという手法で分類するモデルを作成したところ、3500 通りの教師データを用いた場合、分類の正答率は約 90%となった。各分類に対して衝突後の天体の質量・速度・角度をニューラルネットワークで推定したところ、質量と速度は誤差~15%で予測できた。一方、角度については衝突の種類に左右され、すれ違い衝突なら誤差~15%だが完全合体衝突なら誤差~100%となることがわかった。

Leinhardt & Stewart (2012)のスケーリングモデルを用いて衝突後の一番大きい天体の質量の予測について、本研究の機械学習モデルと比較したところ、スケーリングモデルの誤差の分散は 0.02、本研究のモデルは 0.005 となり、本研究のモデルの方が誤差は小さくなり、有用であることがわかった。さらにスケーリングモデルでは、そもそも衝突後の天体の速度と位置についてはモデル化されていないため、スケーリングモデルを組み込んだ N 体計算の結果がどこまで衝突の多様性を組み込んでいるか疑問が残る。一方、本研究で構築した現状の機械学習モデルでは、一部の位置予測に大きな誤差を含んでしまうが、質量・速度・位置の多様性をより現実的な範囲で N 体計算に組み込むことが可能である。

半解析的な地球質量の導出

○二村徳宏¹、戎崎俊一²

¹ 日本スペースガード協会、² 理研

タンデム惑星形成論をもとに地球質量を半解析的に導出した。タンデム惑星形成論（*e.g.*, Ebisuzaki & Imaeda 2017）は、惑星形成の標準モデル（*e.g.*, Safronov 1969; Hayashi et al., 1985）の枠組みに磁気回転不安定（MRI : magneto-rotational instability）（Balbus & Hawley 2000）、多孔性粒子成長理論（Okuzumi et al., 2012; Kataoka et al., 2013）などの物理過程を導入した惑星形成論である。この原始惑星（太陽）系円盤は、中心星に近い方から乱流領域、MRI 不活発領域、そして、再び乱流領域という構造を持ち、2 つの乱流領域と MRI 不活発領域の境界では、効率的に固体粒子が集積し、重力不安定の条件を満たすと、惑星へと成長する。中心星に近い境界において、惑星が地球質量まで成長するとガス円盤との重力相互作用（重力トルク）によって、動径方向外側へ移動する（Lyra 2010; Paardekooper 2010, 2011）。上記より、円盤の構造、小石の（相対）速度および成長率、惑星の成長率、重力トルクなどを考慮すると、固体惑星（地球）の質量（ M_{planet}^* ）が以下のように導出できることを示した。

$$M_{\text{planet}}^* = \left(\frac{\pi^{19}}{2^{73} 3^{22}} \right)^{1/30} \left\{ \ln(10) \log_{10} \left(\frac{m_p^*}{m_0^*} \right) + \frac{2 \cdot 3}{5} \right\}^{-3/5} \left\{ \frac{D^9 f^{18} \dot{M}^4 \beta_K^2 k_B^7 T_m^{1/2} M_*^9}{\alpha_{\text{act}}^2 (\mu m_H)^7 \sigma^2 G^6} \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_0} \right)^{-9} \right\}^{1/15}$$

$$= 3.03 \times 10^{28} \left\{ \ln(10) \log_{10} \left(\frac{m_p^*}{m_0^*} \right) + \frac{2 \cdot 3}{5} \right\}^{-3/5} \left(\frac{D}{5} \right)^{3/5} \left(\frac{f}{1.25 \times 10^{-3}} \right)^{6/5} \left(\frac{M_*}{1 M_\odot} \right)^{3/5} \left(\frac{\dot{M}}{10^{-7.08} M_\odot/\text{yr}} \right)^{4/15} \left(\frac{T_m}{1050 \text{ K}} \right)^{1/30} \left(\frac{\Gamma}{1.35 \Gamma_0} \right)^{-3/5}$$

$$\log_{10}(m_p^*/m_0^*) = 8.73 + 3 \log_{10} \{ f / (1.25 \times 10^{-3}) \}$$

D: 惑星重力の影響範囲（ヒル半径の D 倍）、 f : ダスト/ガス比、 $\dot{M}$: 質量降着率、 β_K : 岩石惑星形成領域の吸収係数および温度の関係における比例定数（ $2.13 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-3/4}$ ）、 k_B : ボルツマン定数、 T_m : 中央面温度、 M_* : 中心星質量、 α_{act} : 乱流領域の α 値（ 1×10^{-2} ）、 μ : ガスの平均分子量、 m_H : 水素原子の質量、 σ : ステファン・ボルツマン定数、 G : 万有引力定数、 Γ/Γ_0 : 規格化された重力トルク

また、岩石惑星形成領域の全固体粒子質量も導出することができることから、この原始惑星（太陽）系円盤から形成される岩石惑星の個数も導出することができる。中心星質量が太陽質量（ $1 M_\odot$ ）で、質量降着率が $10^{-7.08} M_\odot/\text{yr}$ 、およびダスト/ガス比が 1.25×10^{-3} のとき、質量 $0.83 M_\oplus$ の惑星が 2 つ（小さいものを含め計 3 つ）形成されることを示した。これは太陽系の地球および金星に近い値である。

木星・土星カオス励起モデルにおける4つの地球型惑星の同時形成と惑星への水供給

Forming simultaneously the four terrestrial planets and water delivery to the planets in the Jupiter–Saturn chaotic excitation model

○ソフィア リカフィカ パトリック (Patrik Sofia Lykawka)¹, 伊藤 孝士 (Takashi Ito)²

¹ 近畿大学 総合社会学部 (School of Social and Human Sciences, Kindai University)

² 国立天文台天文シミュレーションプロジェクト (National Astronomical Observatory of Japan)

The solar system's terrestrial planets formed by accretion of several small objects within the inner protoplanetary disk ~4.5 Gyr ago. However, simultaneously replicating the orbits and masses of the four terrestrial planets and the inner solar system properties remains elusive. Previously, we found that the chaotic excitation of disk objects generated by a near-resonant configuration of Jupiter–Saturn can create a narrow disk, allowing the formation of the terrestrial planets and the asteroid belt consistently. Our simulations demonstrated that adding an inner region disk component within ~0.8–0.9 au yielded several terrestrial planet systems that could approximately reproduce the four terrestrial planets (Mercury, Venus, Earth, and Mars) in orbit–mass space with unprecedented detail. In addition, our model asteroid belt explained for the first time three critical properties of the asteroid belt simultaneously: orbital structure (including the puzzling concentration at $i < 20$ deg), tiny mass, and taxonomy (S-, C- and D/P-types). Therefore, the Jupiter–Saturn chaotic excitation (JSCE) scenario offers a plausible explanation for several observed properties of the inner solar system, including replicating the four terrestrial planets' orbits/masses, the asteroid belt's main properties, and other inner solar system constraints.

In a follow-up work of the JSCE scenario, we focused on the simultaneous formation of the four terrestrial planets and their formation evolution. A comprehensive analysis of 37 optimally formed terrestrial planet systems allowed us to constrain the planets' building blocks, accretion history, and other fundamental properties. An optimal terrestrial planet system always contained exactly four terrestrial planets (i.e., a single planet analog of Mercury, Venus, Earth, and Mars in the same system). The terrestrial planets acquired orbits and masses very similar to those observed in our solar system. In addition, other key results include Moon-forming giant impacts occurring within ~60 Myr, terrestrial planets' bombardment of late impactors represented by disk objects formed within 2 au, and bulk water acquired during the first 10–20 Myr of Earth's formation. In particular, achieving Earth's estimated bulk water content required the disk to initially contain sufficient water mass in objects beyond ~1–1.5 au. This requirement implies that Mercury, Venus, and Mars acquired water similar to the amount on Earth during their formation.

※研究の成果は Icarus 416, 116098 (2024)に掲載されました。

<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2024.116098>

分子輝線データの主成分分析で探る大小マゼラン雲における原始星の化学的多様性

○小嶋 一生¹, 田中 圭¹, 奥住 聡¹, Yichen Zhang²

¹ 東京工業大学, ² 上海交通大学

近傍矮小銀河である大小マゼラン雲は、重元素量が太陽系近傍の約 1/5 から 1/2 と低く、初期宇宙に似た環境を保持しています。そのため、大小マゼラン雲の星間分子化学とその多様性を理解することは、宇宙史を通じた銀河物質の進化を理解する鍵となりえます。特に、近年、大小マゼラン雲における原始星ホットコアの分子輝線観測から、有機分子が極端に枯渇したような天体が多数存在することがわかってきました（Shimonishi et al. 2023 等）。一方、銀河系内の低質量原始星円盤における分子輝線観測データに対しては、発展が著しい機械学習を用いた解析により、有機分子を含む多様な星間分子進化が議論され始めています（Okoda et al. 2021 等）。

本研究では、主成分分析（PCA）を用いて、大小マゼラン雲における金属量や紫外線強度が異なる大質量原始星の分子輝線データを解析しました。特に、天体の中心部と周縁部を分離し、それぞれに対して PCA を実施しました。これは周縁部の調査によって、輝線強度が天体の光度依存性に影響される要因を除去することを目的としています。本研究を通じて、大小マゼラン雲の原始星における有機物存在度の多様性や、小マゼラン雲における CO 分子アウトフロー強度が弱いことの要因の究明を目指します

TW Hya 円盤における空間的に局在した SO 放射の 発見: 原始惑星アウトフロー仮説

○ 吉田 有宏^{1,2}, 野村 英子^{1,2}, Charles Law³, Richard Teague⁴, 芝池 諭人², 古家 健次⁵,
塚越 崇⁶

¹ 総合研究大学院大学, ² 国立天文台, ³ バージニア大学, ⁴ マサチューセッツ工科大学, ⁵ 東京大学, ⁶ 足利大学

コア降着シナリオによると、巨大ガス惑星は原始惑星系円盤における原始惑星へのガス降着により形成されると考えられている。しかし、その過程の観測的検証は未だ不十分である。一方、ガス降着に伴って、原始惑星付近からアウトフローが駆動される可能性があることが予言されている。この「原始惑星アウトフロー」はガス降着の定性的な証拠となり得るだけでなく、アウトフローの速度や質量放出率から、降着メカニズムに定量的に迫ることもできるかもしれない。原始惑星アウトフローは、原始星アウトフローから類推すると、一酸化硫黄 (SO) などのショックトレーサーで観測されうるだろう。実際、いくつかの円盤において、原始惑星アウトフローと解釈できるものが既に発見されている。

本発表では、アルマ望遠鏡のアーカイブデータを用いた TW Hya 円盤における SO 輝線の検出を報告する。SO 輝線放射は円盤の南東部に局在しており、弧状の分布を示す。また、放射の端は中心星から 42 au の位置に存在するダストギャップに位置している。さらに、輝線中心は天体の系統速度から 5 km s^{-1} ほど離れている。我々はこの放射をその埋没した原始惑星が駆動する原始惑星アウトフローであると解釈した。実際、簡単な弾道軌道モデルを用いて、SO 輝線放射の空間分布がうまく説明できることを見出した。これがアウトフローだとすれば、その終端速度から、駆動源は 4 地球質量程度の質量を持つと見積もられる。興味深いことに、この質量はダストギャップの深さから見積もった先行研究の結果と一致している。また、アウトフローの長さや速度から、原始惑星からアウトフロー先端までの力学的タイムスケールは約 100 年であった。このタイムスケールに加えて SO/H₂ 比を仮定することで、アウトフローによる質量放出率は、 $3 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-6} M_{\text{Jup}} \text{ yr}^{-1}$ ほどと見積もられた。原始星アウトフローの研究によれば、質量放出率は質量降着率の 10% 程度であることが知られている。この関係を原始惑星アウトフローに対しても仮定すると、質量降着率は $3 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-5} M_{\text{Jup}} \text{ yr}^{-1}$ になる。この値は TW Hya 円盤の諸物理量を考慮した上でのこの位置 (42 au) における 4 地球質量の原始惑星に対する質量降着率の理論予測に一致しており、この原始惑星が主質量降着期にあることを示唆する。一方で、以上の結果は周惑星円盤の存在を示唆するが、4 地球質量の軽い原始惑星が周惑星円盤を形成できるかは明らかではない。加えて、アウトフローの放出軸は円盤垂直方向に対して 50 度程度傾いていることも示唆された。この原因は不明であるが、原始惑星の自転軸の傾きと関連しているかもしれない。本研究は、今後、原始惑星アウトフローが円盤に埋没した原始惑星への質量降着過程を観測的に明らかにするための鍵となる可能性を示す (Yoshida et al., 2024, ApJL, 971, L15)。

離心軌道を持つ巨大ガス惑星の 原始惑星系円盤内での軌道進化

○田中佑希¹, 田中秀和²

¹福島高専, ²東北大学

現在までに 5000 個を超える多数の太陽系外惑星が発見されており、それらの特性は非常に多様性に富んでいる。巨大ガス惑星を例に挙げると、中心星に極めて近い軌道を公転するホットジュピターや、大きな離心率を持つエキセントリックプラネットなどが発見されている。これらの惑星は原始惑星系円盤の中で形成されたと考えられているため、円盤内でのガス惑星の形成や周囲の物質との相互作用による質量・軌道進化を明らかにすることは、系外惑星の多様性を理解する上で重要である。

円盤内でのガス惑星の振る舞いを知るためには、惑星・円盤相互作用を取り扱う数値流体計算がよく用いられる。過去の研究では、惑星の初期の軌道離心率は 0 程度の非常に小さい値を仮定しているものが多かった。しかし発見されている巨大ガス惑星の軌道離心率は多様であり、これらのなかには円盤との相互作用によって離心率が励起されたものもあることが指摘されている。初期に一定の大きさの離心率を持ったガス惑星が円盤内でどのように振る舞うのかはあまり詳細な研究が行われていない。そこで本研究では、初期に離心率を持たせた軌道から計算を開始し、惑星の軌道要素および惑星質量の時間進化を、円盤へのギャップ形成とともにシミュレーションした。

その結果、一定の割合で軌道長半径・離心率が減衰すると思われていた過去の研究とは異なり、これらの量は長い時間をかけて複雑に増減する場合があることを見出した。これは惑星が離心軌道にあることによって惑星が形成するギャップの形状は対称な形から大きくずれ、外縁に顕著な離心率を持ったギャップが形成されることに起因していると考えられる。また、惑星の軌道要素とギャップ外縁の離心率の時間変化には一定の相関が見られることも判明した。したがって、巨大ガス惑星の最終的な分布を明らかにするためには、ギャップ形成・惑星の軌道および質量の進化などの複数の要素を長時間計算する必要があることが分かった。

土星リング内に埋め込まれた小衛星が作るギャップ端構造： 小衛星の離心率と軌道傾斜角の影響

○鳥居尚也¹，井田茂¹，小久保英一郎²，道越秀吾³

¹東京工業大学 地球惑星科学系

²国立天文台

³京都女子大学 現代社会学部

土星のリングに埋め込まれた小衛星ダフニスとパンは、リング内にギャップを開けていることで知られている (Porco et al. 2005). ボイジャーやカッシーニによる観測によって、ギャップ端の satellite wake や鋭く断ち切れたギャップ端、鉛直構造など、ギャップ構造のさまざまな特徴が明らかにされてきた。我々の最近の研究 (Torii et al. 2024) では、すべてのリング粒子と衛星の重力相互作用や非弾性衝突を考慮し、埋め込まれた小衛星によるギャップ形成の高分解能 N 体シミュレーションを行った。その結果、上述の satellite wake, 鋭く断ち切れたギャップ端、垂直構造が、小衛星-リング粒子間の相互作用によって同時に再現した。特に、ギャップ端での鉛直構造の形成を定量的に説明する新しいメカニズムを提案した。粒子間衝突によって、小衛星との会合によって誘起された離心率(面内のエピサイクル運動)が、粒子間衝突によって軌道傾斜角(鉛直方向の運動)に転化されることで必然的に鉛直構造が形成されうることを見出した。

しかし、我々の先行研究 (Torii et al. 2024) では、小衛星の軌道を面内の円軌道に固定していた。一方で、ダフニスやパンの軌道はギャップ幅に対して無視できないほどの離心率や傾斜角を持っていることが知られており (Weiss et al. 2009), それに伴うエピサイクル運動や鉛直運動は satellite wake や鉛直構造に大きな影響を与える可能性がある (SeiB et al. 2010).

本講演では、小衛星の軌道を離心率や傾斜角がゼロでない軌道に固定した場合のギャップ形成のシミュレーション結果を示し、円軌道からずれたことによる satellite wake とその鉛直構造への影響について議論する。従来は軌道傾斜角を持った小衛星からの鉛直方向の摂動により鉛直構造が形成されると考えられていたが、観測されているような影を落とす鉛直構造の形成には、軌道傾斜角ではなく離心率が重要である可能性を示す。

ダスト・温度が共進化する磁気降着円盤内側領域への水輸送： 岩石惑星形成時期・位置への示唆

○近藤克¹, 奥住聡¹, 森昇志²

1: 東京工業大学, 2: 清華大学

太陽系の岩石惑星は水に欠乏しているため、水氷が昇華する境界軌道であるスノーラインよりも内側で形成したと考えられている。地球のような水に枯渇した惑星の形成過程を理解するためには、スノーラインが惑星軌道を通じた後に岩石惑星がどれだけの水氷ダストを捕獲したかが重要である。Kondo et al. (2023)では、磁場とガスの相互作用によって降着が駆動する原始惑星系円盤(磁気降着円盤)において、ダスト成長が円盤温度進化とスノーライン移動に与える影響を調べた。その結果、ジュール加熱で決まる温度構造は、ダストのサイズ・空間分布に依存して非単調に変化することがわかった。しかし、ダストのサイズ・空間分布をフリーパラメータを用いて決定していたため、ダストの時間進化に伴う温度構造の変化や、スノーラインが惑星軌道を通じた後に地球型惑星形成領域に輸送される水氷ダストの量を評価できていなかった。

本研究では、磁気降着円盤における岩石惑星形成領域への水輸送を、ダスト・温度時間進化を数値的に解くことによって明らかにする。ダスト進化はダスト粒子の成長と破壊・動径方向の拡散と移流を考慮した(Sato et al. 2016; Okuzumi et al. 2016)。円盤温度はダスト依存性を考慮したジュール加熱と放射冷却の平衡から決定した(Mori et al. 2021; Kondo et al. 2023)。中心星への質量降着率が観測によって求められた値(Testi et al. 2022)と整合的になるように、磁気風による角運動量輸送の効率を表す α パラメータを決定し、ガス面密度の時間進化も数値的に解いた(Tabone et al. 2022a)。スノーラインが岩石惑星軌道を内側に通過した後、0.1 地球質量の惑星に降着する水氷ダストフラックスを用いて最終的に惑星が持つ水量を計算した(Sato et al. 2016)。ダストの臨界破壊速度と岩石惑星軌道をフリーパラメータとした。

ダスト・温度進化計算の結果、円盤内のダストが枯渇し始めると放射冷却が効率的になり、スノーラインは急速に内向きへと移動することがわかった。ダストの臨界破壊速度が小さいほどダスト枯渇時間スケールは長くなり、スノーラインの到達時刻も遅くなる。ダストの臨界破壊速度が0.1, 1, 10 m/s の場合のスノーライン 1 au 到達時刻はそれぞれ~ 0.5, 1, 2 Myr であった。

さらに、惑星への水供給計算の結果、現在の地球軌道に位置する岩石惑星は臨界破壊速度の値に関わらず、スノーライン通過後に多量の水氷ダストを獲得して水に富む(~ 10 wt%)惑星に成長することがわかった。スノーラインが時刻~ 1 Myr で現在の地球軌道を通過するため、円盤外側に残っている水氷ダストが数 Myr に渡って円盤外側から内側領域に供給されるためである。岩石惑星が地球のような水に枯渇した惑星に成長するためには、より太陽に近い軌道(< 0.7 au)で、ダストの臨界破壊速度が小さい(< 1 m/s)条件が好ましい。この条件下では、スノーラインの到達時刻が比較的遅く、かつダストサイズが小さいために岩石惑星へと降着する水氷ダストフラックスが抑制されるためである。

原始太陽系円盤の木星ギャップの外側に堆積する 難揮発性凝縮物が太陽系の同位体二分性に及ぼす影響

○市川修次¹, 奥住聡¹, 本間和明¹, 増田雄樹¹, 荒川創太², 深井稜汰³

¹ 東京工業大学, ² 海洋研究開発機構, ³ 宇宙航空研究開発機構

近年、隕石の Cr や Ti などの高精度同位体分析により、隕石が非炭素質・炭素質(NC,CC)の 2 つのグループに分けられることが明らかとなっている(e.g. Warren 2011)。この隕石の同位体二分性は、太陽系形成初期において、隕石母天体集積領域の時間的・空間的な分断が存在した可能性を示唆する。この現象を説明する一つの仮説は早期木星形成説である (Kruijer et al. 2017)。この説は、太陽系形成初期に原始木星が誕生し、原始太陽系円盤内にギャップを作ったとの仮定に基づく。このギャップが内側・外側の物質の均質化を妨げ、それにより太陽系物質の同位体二分性が形成されたと考えられている。

しかし、NC 隕石の ^{54}Cr 濃度は、隕石母天体の集積時刻が遅いほど CC 隕石の ^{54}Cr 濃度に近づく (Sugiura & Fujiya 2014)。Homma et al. (2024)は、この起源を明らかにするため、ギャップのある円盤におけるダストの破壊・成長・移動・同位体異常輸送を計算した。その結果、小さなダストがギャップの外側から内側へすり抜けることを考慮すると、NC 領域での隕石に見られる ^{54}Cr 濃度の時間変動が再現できることを明らかにした。しかし、 ^{50}Ti のキャリアを考慮していなかったため、Cr-Ti 同位体二分性の再現可能性は未検証である。

我々は、隕石に見られる Cr 及び Ti 同位体組成の両方を再現するために、Ca, Al に富む難揮発性凝縮物(CAI)のギャップの外側への堆積を新たに考える。CAI は CC 隕石により多く含まれ、かつ、 ^{50}Ti 濃度の強い同位体異常を示す (Trinquier et al. 2009)。我々はこの点に着目し、ギャップ内外での難揮発性物質の存在量の違いによって、太陽系物質の NC,CC に見られる同位体二分性のトレンドを説明できるかを検証した。具体的には、Homma et al. (2024)のシミュレーションモデルを用いて、 ^{54}Cr を運ぶダスト（隕石のマトリックスに相当）と、 ^{50}Ti を運ぶ難揮発性凝縮物（CAI に相当）の 2 種類の固体物質の円盤内輸送を計算した。ダストは付着力に応じたサイズのアグリゲイトを形成し、難揮発性凝縮物は粗粒のため衝突合体・破壊を経験しないと仮定した。木星ギャップの内側と外側におけるこれらの固体の混合比を計算し、それぞれの場所での $\epsilon^{54}\text{Cr}$ - $\epsilon^{50}\text{Ti}$ をプロットすることで、難揮発性凝縮物が固体の同位体異常に及ぼす影響を定量的に評価した。

結果として、ダストの付着力が弱く(臨界破壊速度 1 m/s)、かつ難揮発性凝縮物の粒径が 0.2 mm 程度のとき、ギャップの内側・外側に存在する固体 Cr-Ti 同位体組成がそれぞれ NC, CC 隕石の組成のトレンドを部分的に再現しうることが明らかになった。本発表ではこの結果を紹介するとともに隕石母天体が最終的にどのような同位体組成を持ちうるかを議論する。

白色矮星周りの氷天体を起源とする ダスト・ガス円盤の遠赤外スペクトル

○奥谷彩香¹, 野村英子¹

¹ 国立天文台

約 25-50%の白色矮星の大気中には重元素が観測されており、これらはかつて星周りに存在した惑星や小惑星を降着していると考えられている(Zuckerman et al. 2010)。そのため、白色矮星はその大気の重元素観測から、系外(小)惑星の内部組成を明らかにしうる系として注目を集めている。白色矮星の大気の重元素組成は、揮発性元素に枯渇しており岩石天体と類似のパターンを示す(Jura & Young 2014)。一方で、力学シミュレーションからは、むしろ太陽系外縁天体に相当するような遠方の氷天体が重元素の主要な質量供給源となることが示されており(e.g., Li et al. 2021)、重元素の起源がどのような天体であるのかは大きな謎である。

本研究では、光球面における揮発性元素の欠乏の説明として、(1) 遠方の氷天体の存在頻度は低く白色矮星近傍に真に供給されていない可能性と、(2)氷天体は白色矮星近傍に落下しているものの揮発性元素は光球面まで到達していないという二つの可能性を考える。(2)の場合、揮発性元素は白色矮星周りに形成される円盤中に氷粒子や水蒸気などの形で含まれるはずである。そこで、(2)の仮説を検証するため、白色矮星周りの氷粒子および揮発性元素のガス円盤の観測可能性を明らかにすることを目指す。具体的には、白色矮星周りのダスト・ガス円盤に関する理論・観測の先行研究(e.g., Reach et al. 2009)に基づいて円盤の構造を仮定し、氷粒子円盤および H₂O, OH, O 原子などを主成分とする揮発性ガス円盤についてそれぞれ輻射輸送計算を実施することで、理論放射スペクトルを求めた。本発表では PRIMA などの将来の宇宙望遠鏡による観測を想定し約 20 μ m から 300 μ m の遠赤外波長帯における放射スペクトルの計算結果を報告し、氷粒子・揮発性元素のガス円盤の検出可能性を議論する。

巨大惑星による原始惑星系円盤のギャップ形成と衝撃波加熱の同時モデリング

○奥住 聡¹, 武藤 恭之², 小野 智弘³

¹東京工業大学, ²工学院大学, ³プリンストン高等研究所

原始惑星系円盤の中を公転する巨大惑星は、円盤に密度波を励起する。惑星軌道の内側と外側に励起される密度波は、それぞれ負と正の角運動量を運ぶ。巨大惑星の周囲に形成される円盤ギャップは、密度波が衝撃波化する際にその角運動量が円盤に受け渡されることの結果として理解できる (e.g., Rafikov 2002; Duffel 2015; Kanagawa et al. 2015, 2017)。また、密度波が衝撃波化する際に円盤ガスのエントロピーが上昇し、円盤を不可逆的に加熱することも知られている (e.g., Rafikov 2016)。しかし、惑星による密度波が引き起こすギャップ形成と衝撃波加熱を統合的に表現する解析モデルまたは経験モデルは、意外にも存在していない。

本発表では、我々の最近のシミュレーション研究 (Ono, Okamura, Okuzumi, & Muto, submitted) で得られた円盤衝撃波加熱の経験公式を用いて、衝撃波加熱とギャップ形成を同時に扱うことが可能なモデルを構築した。我々はこれまで、惑星をもつ原始惑星系円盤の流体シミュレーション（動径・方位角の2次元）を複数の円盤および惑星パラメータに対して系統的に実施し、惑星によって励起される密度波のエントロピー生成率分布が単純なスケーリング則で表現できることを発見した。本研究では、この研究で得られた衝撃波加熱率分布の経験公式と、惑星のつくる波が運ぶエネルギーと角運動量の関係 (Goodman & Rafikov 2001) を組み合わせ、衝撃波によって誘導される円盤の動径方向の移流速度の公式を導出した。この移流速度は惑星軌道より内側と外側でそれぞれ負と正であり、ギャップを開く流れをたしかに表現する。さらに、この移流速度の式と粘性円盤の進化方程式（動径1次元）を組み合わせ、定常状態における円盤の面密度の動径分布を決定する微分方程式を導いた。この1次元方程式の解は、2次元流体シミュレーションから得られる円盤の面密度ギャップの幅を過小評価するが、面密度勾配をよく再現する。本発表では、以上の成果を紹介するとともに、この統合的モデルを組み込んだ原始惑星系円盤のガス・ダスト長時間進化計算の例を紹介する。

Accounting for Jupiter's Noble Gases: Investigating Disk Photoevaporation

Tamami Okamoto^{1,2}, Tristan Guillot², Raphael Marschall², Alessandro Morbidelli², Masanobu Kunitomo^{2,3}, Shigeru Ida¹

¹Earth-Life Science Institute, ²Observatoire de la Côte d'Azur, ³Kurume University

The data from the Galileo probe's direct measurements showed that the abundances of noble gases such as argon, krypton, and xenon in the Jovian atmosphere are approximately three times higher than solar levels. This enrichment has puzzled scientists, given the wide range of condensation temperatures for noble gases. Owen et al. (1999) suggested that the Jovian core formed beyond the ice lines for noble gases. This scenario implies significant planetary migration, which raises concerns about its compatibility with the current dynamical conditions of the solar system. In an alternative scenario, Guillot & Hueso (2006) proposed a model involving disk photoevaporation in the outer disk region, where noble gases could condense on dust surfaces. They suggested that the removal of hydrogen gas through photoevaporation would result in relatively higher abundances of other molecules. However, their model did not account for the different ice lines of noble gases. In our study, we aim to develop a disk model that can explain the noble gas abundances in the Jovian atmosphere, incorporating disk photoevaporation, radial drift of species, and the different ice lines. We found that the desorption energies from amorphous solid water surfaces result in more distant ice lines (19–35 K) and near-solar abundances of noble gases. On the other hand, recent laboratory experiments simulating the conditions of comet 67P suggest higher desorption energies. These new values can lead to closer ice lines (40–50 K) and explain the observed noble gas enrichments in the Jovian atmosphere.

Generation of Lightning by Streaming Instability in Protoplanetary Disks

○Fang Han¹, Taishi Nakamoto¹, Tetsuo Taki²

¹Tokyo Institute of Technology, ²The University of Tokyo

Does lightning occur in protoplanetary disks? If it does, the resulting lightning could have significant implications for the formation of chondrules—small, spherical dust particles found in meteorites that provide crucial clues about the early solar system. These dust particles are believed to have formed through rapid heating in regions of high dust density, but the exact mechanisms remain a subject of intense study (Alexander et al., 2008; Desch et al., 2012). The dust-rich environment where chondrules form is considered conducive to lightning, as it promotes frequent collisions between dust particles (Muranushi, 2010). Therefore, once dust-rich regions are formed, lightning could be generated, potentially leading to the formation of chondrules. However, whether these dust-rich regions and subsequent lightning are indeed generated remains unanswered. In our investigation, we examine whether lightning can be generated in protoplanetary disks following the dust density enhancement caused by the streaming instability.

Using the ATHENA code (Stone et al., 2008; Bai & Stone, 2010), we simulate the dynamics of gas and dust within the midplane of protoplanetary disks which are subject to the streaming instability, focusing on the interactions between differently sized dust particles. In turbulence driven by streaming instability, particles frequently collide, leading to charge separation and the formation of electric fields strong enough to reach the breakdown threshold, thereby triggering lightning discharges. This study explores the potential for lightning to arise from streaming instability, reaching the breakdown field and overcoming the neutralization current, and assesses its role in heating precursor silicate materials to the temperatures necessary for chondrule formation.

We find that in environments with high dust density, frequent collisions between dust particles lead to significant charge separation, creating electric fields strong enough to reach the breakdown field. Thus, lightning is highly likely to occur in such environments. Lightning discharges can happen immediately after the dust density reaches the Roche density. This suggests a possible link between planetesimal formation and chondrule formation. The potential mass of precursor materials that could be heated by these lightning events is significantly higher than the current total mass of chondrules in the solar system, indicating that lightning triggered by streaming instability may be a major heat source for chondrule formation.

分子動力学シミュレーションで探る ダストモノマー間相互作用: 回転とねじれ運動

○ 吉田 雄城¹, 小久保 英一郎², 田中 秀和³

¹ 神戸大学 惑星科学研究センター, ² 国立天文台, ³ 東北大学

ダストはサブミクロン粒子 (モノマー) の集合体であり、惑星形成はダストの衝突合体成長から始まると考えられている。衝突条件は衝突結果に影響を与え、例えば衝突速度が数十 m/s を超えると衝突時にダスト破壊が起こる可能性が指摘されている。ダスト成長を理解するために、これまでに多くのダスト衝突数値計算が行われている (e.g., Wada et al. 2007, 2008, 2009, 2013; Suyama et al. 2008, 2012)。ダスト衝突数値計算は、モノマーの N 体計算を行っており、モノマー間の接触相互作用を計算している。相互作用には弾性球接触理論の一つである JKR 理論や Dominik & Tielens らのモデルが用いられている。JKR 理論は法線方向の相互作用を記述し、Dominik & Tielens のモデルは接線方向の相互作用を記述する。

前回の発表では、JKR 理論では記述されない分子運動による散逸の大きさを評価して、新モデルの提案を行った。本発表では、接線方向の相互作用に着目し、Dominik & Tielens のモデルとの比較を行う。我々は、分子の運動を解いて物理過程を解析する分子動力学 (Molecular Dynamics; MD) 計算を用いて、モノマーの回転運動とねじれ運動のシミュレーションを行い、回転やねじれの性質を調べた。回転やねじれ運動の初期状態は、2 球が接触している状態である。この時、球の重心が接線方向に動けば回転に関する相互作用が働く。重心の変位が微小である場合には、接触面が固定された状態で抵抗トルクによる復元力が働き、ばねのような運動が起こる。変位がある距離を超えると、接触面も移動し 2 球が互いの表面上を回転し始め、この変位を臨界変位と呼ぶ。ねじれ運動にも同様の物理で記述でき、ねじれの角度がある値以下であればばねのように振動し、ある角度 (臨界角度) を超えればねじれ運動が始まる。臨界変位や臨界角度は、理論的に予測される値が存在するが、その正当性の確認は不十分である。

本研究は、回転角速度の時間進化から、臨界変位と臨界角度の時間進化を調べた (図 1)。その結果、臨界変位の大きさは 2-3 Å 程度、臨界角度は 0.04 程度であることを明らかにした。これらの結果は、Dominik & Tielens のモデルと整合的であり、モデルの正当性を確認した。本発表は、以上の結果を発表し、ダスト成長へ与える影響を議論する。

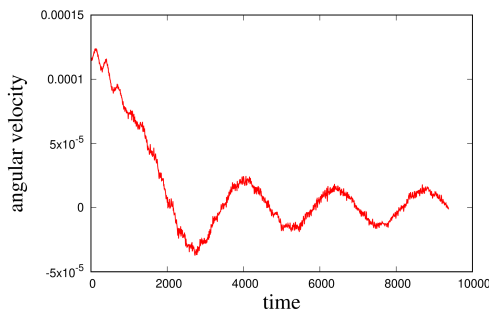


図 1: 半径 50 nm のモノマーを用いた回転角速度の時間進化. 最初は互いの表面上を回転し、その後接触面が固定され振動する.

原始惑星系円盤における微視的スケール乱流のモデル化

○ 瀧哲朗¹, 谷川享行²

¹ 東京大学, ² 一関工業高等専門学校

原始惑星系円盤ガスの流れ場は極めて高いレイノルズ数を持ち、乱流的であると思われる。しかしながら、原始惑星系円盤のような高レイノルズ数流れの乱流を完全に解像して取り扱うことは、事実上不可能である。そのため我々は普段、巨視的な平均流の支配方程式に微視的な現象の効果をモデル化して取り入れることで、原始惑星系円盤における流体（ガスおよびダスト）の進化を計算している。その際には“直接”計算することが出来ない微視的な現象をどのようにモデル化するのかということが重要になってくる。

特にガスの流れに関する微視的スケール乱流のモデル化として有名なものは、いわゆる α モデル (Shakura & Sunyaev, 1973) のような乱流粘性モデルであろう。 α モデルでは微視的スケールの乱流によって生じる巨視的なシア応力を実効的な粘性（運動量の輸送現象）として表現している。一方、ダストの流れに対しては乱流拡散と呼ばれる過程が考慮されることが多い。これは、微視的スケールのガス乱流が駆動するダスト粒子のランダムな運動に由来して、ダストの空間密度勾配に比例したダスト質量フラックスが生じるというものである（質量拡散モデル; e.g., Cuzzi et al., 1993）。

このように微視的スケールの乱流の効果は、ガス・ダストそれぞれに対して主に乱流粘性・乱流拡散として別々にモデル化され、それぞれに研究が進展してきた。しかし、これらの現象の背景にあるのは同一の原始惑星系円盤乱流であり、巨視的な描像における取り扱いもガス・ダストの両者に対して整合的に組み立てられていることが望ましいはずである。

今回我々は、微視的スケールでのランダム運動に由来する輸送現象の巨視的な取り扱いを再検討し、ダスト-ガス二流体系として整合的な定式化を提案した。一般的な流体力学で用いられている速度の定義に則ると、微視的なランダム運動による質量および運動量の輸送現象を表現する項は、ストレステンソル（特に平衡熱力学に従う流体の場合は圧力と粘性ストレス）として運動方程式の中に含まれるのが自然である。すなわち、微視的乱流の効果が存在すると、形式上はダスト-ガス共に（連続の式ではなく）運動方程式のみに修正項が加わる。本講演では独立の考察から類似の定式化を提案している Binkert et al. (2023) および Binkert (2023) との比較を交えつつ、原始惑星系円盤における微視的乱流モデルの目指すべき方向性についても議論する。

また、我々の定式化の適用先についての検討結果についても紹介する。例えば惑星系形成過程の研究においては、惑星ギャップ近傍でのダスト濃集過程や流体不安定性によって作られるダスト塊の進化過程など、通常の原始惑星系円盤に比べてダスト-ガス比が高い状況を考えなくてはならない場面が多い。そのような場合には、ダスト-ガス間での微視的効果の取り扱いの整合性が特に問題となりうるため、我々の定式化の適用先として有力であると考えている。

原始惑星系円盤中の磁気降着構造：大局的磁場進化を考慮した新しい局所非理想 MHD 計算の開発

○ 榎本晴日¹, 森昇志², 奥住聡¹

¹ 東京工業大学, ² 清華大学

原始惑星系円盤の進化過程において、磁場は円盤物質の降着に多くの影響を与える。円盤を貫く磁場が引き起こす力は円盤降着を引き起こす。したがって、円盤内の物質の降着過程に基づいて惑星形成を議論するには、円盤磁場による降着構造を理解することが必要である。磁氣的に降着する円盤では大局的な磁場が円盤表面で曲がり、降着流が円盤表面に集中することが示されている (e.g. Bai 2013)。しかし、降着層の詳細な鉛直構造は円盤の電離度分布に依存するため数値シミュレーションに基づく系統的な調査が必要である。

円盤の進化に関する磁気流体数値シミュレーションは幅広く行われてきたが、大規模な放射状構造を無視した局所近似計算は大局的な磁場進化を理解するには不十分な設定である。Turner & Sano (2008) の解析的予言式からは、円盤の差動回転によって方位磁場が生成されると、方位磁場強度に半径方向の勾配が生じ、方位磁場が半径方向に拡散することが指摘されている。この半径方向の拡散は大局計算では確認されている一方 (e.g. Dzyurkevich et al. 2010)、通常のシアリングボックスの中では周期的な境界条件のために起こり得ない。

本研究では、大域的誘導方程式に従った方位磁場を除去する super-box-scale diffusion と呼ばれる手法 (e.g. Gressel et al. 2012) を用いて、大局的な磁場進化を考慮した円盤進化計算手法を構築した。そして、大局的な磁気流体力学シミュレーションで見られるような降着速度の鉛直分布を局所シアリングボックスで維持できるかどうかを調べた。結果、本モデルでは円盤の典型パラメータの元で 10 公転周期以上安定して計算することが可能になった。また、降着層における降着速度と鉛直磁場は関係式で表せ、この式は本手法での磁場の除去具合によらず一定であることが示された。この発表ではモデルの詳細と初期成果を紹介し、非理想 MHD 効果に依存する降着速度についても議論を行う。

単一の枠組みを用いた 太陽系地球型惑星とスーパーアースの形成

○荻原 正博¹, Alessandro Morbidelli^{2,3}, 國友 正信^{3,4}

¹上海交通大学, ²コレージュ・ド・フランス, ³コートダジュール天文台, ⁴久留米大学

太陽系の地球型惑星の起源については、太陽から約1auの位置に形成された固体リングから惑星が形成され、それらがほとんど軌道移動を経験しなかった場合が望ましいとされている。一方、スーパーアースは軌道周期が10-100日の近接軌道で発見されており、恒星から1auの位置に形成された固体リングからの惑星形成シナリオでは、惑星がある程度内向き軌道移動を経験することが必要とされる。これらの異なる惑星形成シナリオを実現するためには、それぞれ異なる原始惑星系円盤モデルを使用せざるを得なかった。本研究では、単一の枠組みを用いて異なる惑星形成シナリオが実現可能かを調べた。具体的には、磁気駆動円盤風の影響下で進化した結果として1au付近に密度ピークを形成する原始惑星系円盤ガスモデルを使用し、1au付近に形成された固体リングからの惑星形成と軌道進化をN体シミュレーションで追った。

シミュレーションの結果、低質量の固体リングから形成された惑星は、ガス円盤中でも内向き軌道移動をせず、1au付近に軌道が集中した状態を維持した（図1a）。一方、高質量の固体リングから形成された惑星は、円盤中をゆっくりと内向きに移動し、結果として軌道周期が10日程度の軌道に移動した（図1c）。我々のシミュレーション結果は、太陽系およびスーパーアース系の様々な特徴（例：質量分布、離心率、軌道間隔）も再現する。すなわち、単一の枠組みで異なる惑星形成シナリオが実現されることがわかった。さらに我々のモデルは、軌道周期が約10日の軌道には地球および地球以下の惑星の存在頻度がスーパーアースよりも小さいことを予測している。これは将来の系外惑星観測によって検証可能である。

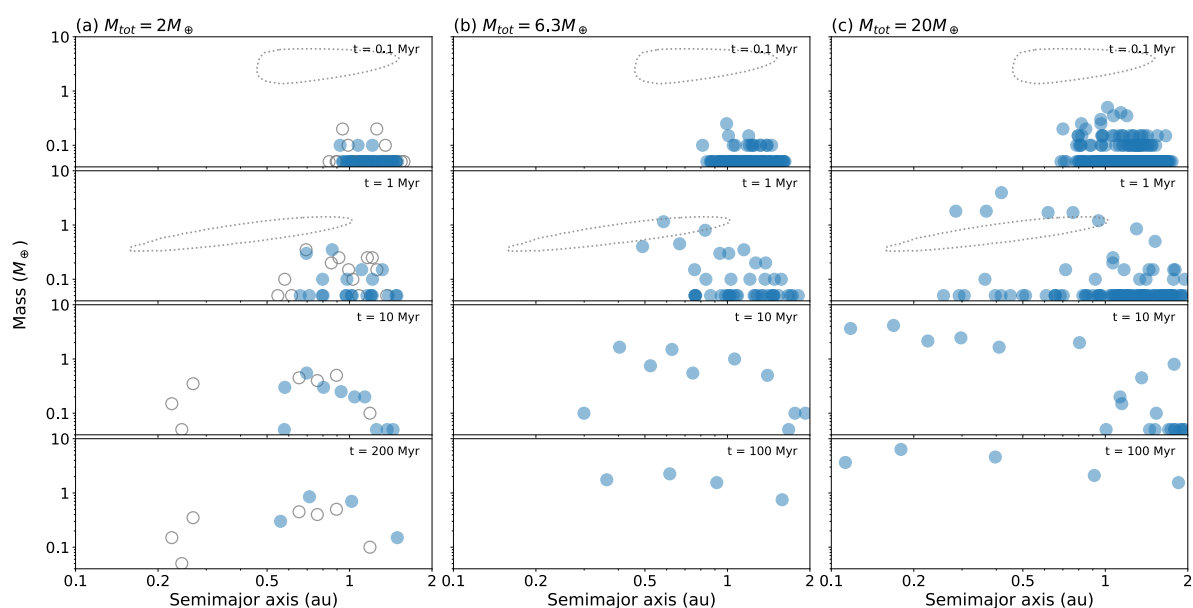


図1. N体計算の典型的な結果のスナップショット。青丸がそれぞれの時刻での惑星を表す。(a) 総固体質量が小さい場合で、太陽系地球型惑星が形成する。(b)(c) 総固体質量が大きい場合で、短周期スーパーアースが形成する。（Ogihara et al., ApJ, in pressより引用）

散乱も考慮した円盤ダスト放射の解析解

○田中圭¹, 山室良太¹, 武藤恭之², 奥住聡¹

¹東京工業大学, ²工学院大学

近年、ALMA望遠鏡による高分解能観測の進展により、一般的な原始惑星系円盤のみならず、FU Ori型星、Class 0/I原始星、大質量原始星などの円盤の詳細観測が盛んに行われるようになっていきます。これら多様な円盤の連続波強度分布からガス密度・温度構造やダスト粒径などの物理情報を読み解くためには輻射輸送計算が必要ですが、特に光学的に厚い場合やダスト散乱が優勢な場合には計算コストが高く、多くの物理パラメータを広く探査することは困難です。鉛直等温円盤に対する簡便な散乱ありの円盤放射モデルは良く知られていますが (Miyake & Nakagawa 1993; Zhu et al. 2019など)、降着加熱や表面照射が有効な円盤にも適用可能なモデルの必要性が高まっています。

本講演では、平行平板近似・二流近似を用いて新たに導出した「円盤放射の解析解」を紹介します(式1)。この解析解により、2回の簡単な積分を行うだけで、任意の鉛直温度分布、吸収・散乱係数、円盤傾斜角 (edge-onを除く) に対する円盤連続波強度を得ることができます。降着加熱円盤などを想定したテスト計算では、二流近似を用いない数値解との誤差が数%以下に抑えられることを確認しました。これは、過去に提案されていた鉛直等温円盤の平均輻射強度を利用した近似モデル (D'Alessio et al. 2001) よりも低計算量かつ高精度です(図1)。今後は、この汎用かつ簡便な円盤放射の解析解を用いた理論モデルからの観測予測や、円盤観測への物理パラメータフィットなど、様々な研究への応用が期待されます。

式1：円盤放射の解析解

$$I_{\text{out}} = \frac{\epsilon}{\mu} \frac{1 - 3\mu^2}{1 - 3\epsilon\mu^2} \int_0^t B(\tau) e^{-\tau/\mu} d\tau + \frac{\sqrt{3}\epsilon(1 - \epsilon)}{1 - 3\epsilon\mu^2} \frac{(1 + \sqrt{3}\mu) - (1 - \sqrt{3}\mu)e^{-\sqrt{3}\epsilon t}}{(1 + \sqrt{\epsilon}) + (1 - \sqrt{\epsilon})e^{-\sqrt{3}\epsilon t}} \int_0^t B(\tau) e^{-\sqrt{3}\epsilon\tau} d\tau$$

円盤傾斜角: $\mu = \cos i$
鉛直光学的厚み: $t = (\kappa_{\text{abs}} + \kappa_{\text{sca}})\Sigma$
散乱アルベド: $1 - \epsilon = \frac{\kappa_{\text{sca}}}{\kappa_{\text{abs}} + \kappa_{\text{sca}}}$

note: 簡単のため、周波数依存性は陽に表記していない

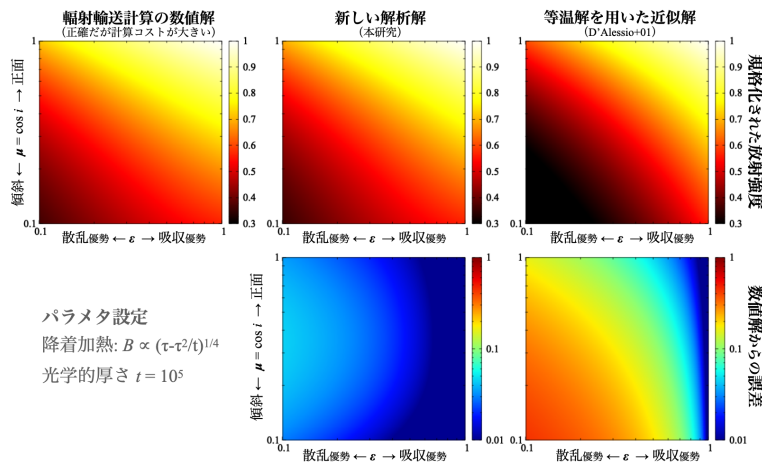


図1：降着加熱円盤放射の数値解(左), 新しい解析解(中央), 先行研究の近似解(右)の比較。上段は規格化された円盤放射強度、下段は数値解からの誤差を示す。

揮発性元素の拡散から見るコンドリュールの形成条件

○江原 一輝¹, 中本 泰史¹, 山本 大貴², 西脇 瑞紀³

¹ 東京工業大学, ² 九州大学, ³ 滋賀県立大学

コンドリュールは太陽系初期に生成された物質であり、その成因を知ることは太陽系物質の進化をもたらした高温プロセスなどを知るための重要な手がかりになる。コンドリュールはミリメートルサイズの球状組織で、その形状から形成時に溶融したと考えられている。しかし、コンドリュールは揮発性成分を含んでおり、さらに揮発性元素のメルトからの蒸発に伴う質量依存同位体分別は極めて小さいことが指摘されている (Davis et al., 2005)。その要因として Cuzzi & Alexander (2006) は、コンドリュールの前駆体が多数存在することにより蒸発した揮発性成分の高い蒸気圧が実現され、前駆体 1 つあたりの蒸発が抑制されたことを指摘している。本研究ではこの影響を考慮し、前駆体が十分量の Na を保持するための条件 (以降「形成条件」と表記する) を、先行研究のモデルをさらに発展させ調査した。

Cuzzi & Alexander (2006) ではコンドリュール形成が起こる領域を球対称なものと仮定して形成条件を解析的に求めている。彼らは、前駆体からの揮発性元素が蒸発し拡散する領域を拡散スケールで概算し、形成領域の端から拡散スケール分内側までの領域は蒸気圧が十分に高くないとして、それより内側にあたる、十分高い蒸気圧に達する領域が形成領域の体積の 99% 以上となることを形成条件の基準とした。しかし、前駆体の数密度の違いが揮発性元素の蒸発にどの程度影響したかは考慮されていない。そこで本研究では形成領域全体の揮発性ガス密度分布の時間変化を数値的に計算することで、数密度依存性を調べた。また、最終的にコンドリュール中に Na を保持する割合が重要であることから形成条件の基準を「全体の 99% 以上の前駆体が溶融前に保持していた揮発性元素の 90% を保持したまま固化する」として、この基準を満たす形成領域を、前駆体の数密度と形成領域の半径をパラメータにとって調べた。(この保持の割合は Alexander et al. (2008) から、また今回設定する飽和蒸気圧は Fedkin & Grossman (2013) のものを採用した。)

計算の結果、前駆体の数密度が約 $3 \times 10^3 \text{ m}^{-3}$ 以上である場合は先行研究で得られた結果より小さい半径の形成領域でも形成条件を満たすことが分かった。これは、数密度が十分大きい場合は単位体積に存在する揮発性元素の質量が多くなり、蒸気の拡散速度を上回る、形成領域の境界付近での蒸発速度が実現されるためだと考えられる。さらに、数密度が約 $3 \times 10^3 \text{ m}^{-3}$ 以下である場合は条件を満たす形成領域半径の下限が数密度に依らないということも分かった。これは、前駆体中に保持されていた揮発性元素が全て蒸発しても飽和蒸気圧に到達しないことで蒸発を抑制されないためであると考えられる。これまで雷加熱モデルにおける形成領域の半径は小さいため、揮発性成分を十分保持できず同位体的特徴を再現できないとされてきた (Cuzzi & Alexander, 2006)。本研究の結果は、コンドリュールの雷モデルによる加熱の可能性をより詳細に議論する必要性を示す。

熱進化している微惑星の物性： 多孔質焼結体の充填率に対する機械特性の変化の測定

○櫻井哲志¹, 中村昭子¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科

本研究の目的は、熱進化中の微惑星、あるいはその破片の機械特性を推定するための基礎を提供することである。

微惑星は熱進化時に焼結過程を経験すると考えられている(e.g., Henke et al., 2012). 微惑星内部の焼結は、微惑星の充填率増加、および構成粒子間でのネック形成を引き起こす。焼結に起因するこれらの内部構造の変化によって、微惑星の機械特性は変化する。実際、氷粒子から構成される多孔質焼結体(焼結人工雪)の機械特性が充填率に依存することが示されている(Shimaki & Arakawa, 2021). しかし、氷以外の物質から構成される低充填率の多孔質焼結体の調査は乏しい。そこで、本研究ではソーダライムガラス粒子からなる焼結体を作成し、その充填率と機械特性の関係を実験的に調査した。ソーダライムガラスの軟化点は約 730°Cであり、室温では焼結は進行しない。そのため、焼結の進行度合いが様々な多孔質試料を作成できる。

本研究では、以下の手順で実験を行った。(1)実験には、多分散不規則形状でメジアン径が 34 μm , 多分散球形でメジアン径 22 μm の粒子を使用した。試料充填時に、ふるいを用いてランダム疎充填試料、タッピングによってランダム密充填試料を作成した。(2) 試料をオープン内で加熱した。ピーク温度を 620°Cから 650°Cの範囲で変更する、あるいはピーク温度の維持時間を変えることで様々な充填率をもつ焼結体を作成した。作成された焼結体の充填率範囲は~0.3-0.7であり、これは焼結人工雪と同様の充填率範囲である。(3) パルス透過法によって焼結体の弾性波速度を測定し、三点曲げ法によって曲げ強度を測定した。

測定結果に対する最小二乗法フィットから、ガラス焼結体の弾性波速度が充填率の対数に比例し、曲げ強度が充填率のべき乗に比例して増加する傾向が示された。本研究のガラスの測定値を充填率が 1 のときの値で規格化し、同様に規格化した完全に焼結した人工雪の結果と比較した。ガラス焼結体の規格化弾性波速度は、焼結が進行すると、人工雪と似た増加傾向を示した。また、ガラス焼結体の規格化曲げ強度に対するべき乗則フィットから得られたべき指数は 3.6 ± 0.6 であり、この指数は人工雪の規格化引張強度のべき乗則経験式と誤差の範囲内で一致した。よって、多孔質焼結体の規格化曲げ強度は物質に依存しない経験式で表すことができると考えられる。

本研究の横波速度測定は、JAXA 宇宙科学研究所の超高速度衝突実験施設の測定装置を利用して行いました。

隕石母天体の水質変質を模したホルムアルデヒド・アンモニア 及びヘキサメチレンテトラミンからの不溶性有機物形成

○鈴木政紀^{1,2}, 癸生川陽子², 小林憲正^{1,2}, 山下翔平³, 高橋嘉夫⁴

1. 横浜国立大学, 2. 東京工業大学, 3. 高エネルギー加速器研究機構, 4. 東京大学

隕石に含まれる有機物の大部分は不溶性有機物 (Insoluble organic matter, IOM) と呼ばれる複雑な高分子有機物である。IOM の起源については諸説あるが、一つの説として、隕石母天体における水質変質過程でホルムアルデヒド (HCHO) やアンモニア (NH₃) を出発物質としたホルモース型反応によって生成したことが考えられている^[1]。一方、加水分解によりホルムアルデヒドとアンモニアを生成するヘキサメチレンテトラミン (C₆H₁₂N₄) も隕石などに含まれる有機物の前区物質として知られている^[2]。そこで、本研究では IOM の起源解明に向けて、ホルムアルデヒドとアンモニアなどを出発物質とした場合とヘキサメチレンテトラミンなどを出発物質とした場合に形成される IOM 様物質の構造を調べた。

H₂O : HCHO : CH₃OH : NH₃ : ヘキサメチレンテトラミン : グリコールアルデヒド (C₂H₄O₂) のモル比率が(1)100 : 4 : 2 : 1.5 : 0 : 0.5, (2)100 : 4 : 2 : 0 : 0 : 0.5, (3)100 : 4 : 2 : 0 : 0.375 : 0.5, (4)100 : 0 : 2 : 0 : 0 : 0.375 : 0.5 の溶液を調製した。これらの試料に触媒として水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) を添加し、隕石母天体の水質変質を模して 150 °C で 72 時間加熱した。加熱後、生成物を固相と液相に分離した。固体生成物を塩酸、純水、メタノール、ジクロロメタンで洗浄し、乾燥した。出発物質に水酸化カルシウムを添加しない、またはグリコールアルデヒドを添加しない条件でも同様の実験を行った。そして、顕微 FT-IR を用い、固体生成物の赤外スペクトルを測定した。さらに、走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM) を用い、固体生成物の C-および N-K 吸収端 X 線近傍構造 (C-および N-XANES) スペクトルを測定した。いくつかの隕石から抽出された IOM について同様の分析を行った。赤外スペクトルと C, N-XANES スペクトルを解析し、条件の異なる生成物間での比較や、生成物と隕石から抽出された IOM との比較を行った。

赤外分光分析と C, N-XANES 分析について、出発物質にアンモニアが含まれる場合(1)の解析結果は、出発物質にヘキサメチレンテトラミンが含まれる場合(3)のそれと多くの点で類似していた。そのため、ヘキサメチレンテトラミンとアンモニアは IOM 様物質の形成に対して同様の役割をになう可能性がある。出発物質にアンモニアもヘキサメチレンテトラミンも含まれない場合(2)では、N-XANES スペクトルにおいて 395-405eV 付近にほとんどピークがなく、赤外スペクトルにおいて (C=O のピーク高さ) / (C=C のピーク高さ) の値が比較的大きかった。そのため、C=C に対する C=O の割合が比較的大きく、窒素を含む官能基をあまり持たない IOM は、アンモニアやヘキサメチレンテトラミンがあまり反応に関与しない環境で生成した可能性がある。

文献

[1] G. D. Cody et al., PNAS 2011, 108, 19171-19176.

[2] V. Vinogradoff et al., Icarus 2018, 305, 358-370.

炭素質コンドライトへの UV 照射による宇宙風化模擬実験

○江頭勇介¹、佐々木晶¹、海田博司²、廣井孝弘³、

藪田ひかる⁴、馬上謙一⁵、巽瑛理⁶、盛満眞一¹

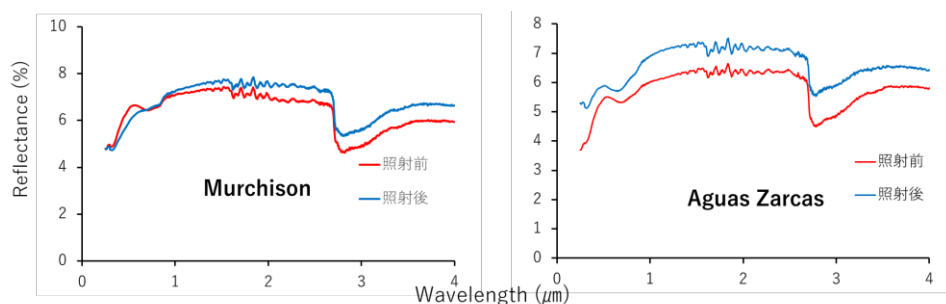
¹大阪大学、²国立極地研究所、³ブラウン大学、⁴広島大学、

⁵北海道大学、⁶宇宙航空研究開発機構

宇宙風化作用とは、大気を持たない岩石天体が宇宙空間に長期間さらされることでその表面の光学特性が変化する現象である。月や S 型小惑星においては、3 つの典型的な変化が知られており、それは赤色化（スペクトルの傾きの増加）、暗色化（全体的な暗さ）、反射スペクトルの吸収帯の減衰である。天体の探査において、反射スペクトルは重要なデータのひとつであり、それを変化させる宇宙風化作用は物質の同定に大きく影響を与えることから、多くの研究が行われてきた。しかし、C 型小惑星における宇宙風化作用については、前述した変化とは逆の変化も確認されており、いまだ明確な結論は得られていない。また宇宙風化模擬実験は、太陽風照射を模擬したイオン照射実験と高速ダスト衝突を模擬したレーザー照射実験が主であり、紫外線照射を用いた実験はほとんど行われていない。

本研究では、紫外光ランプを用いて、紫外線による C 型小惑星での宇宙風化を模擬する実験を行った。サンプルとして 3 種の炭素質コンドライト（Murchison、Aguas Zarcas, Allende）を 125 μm 以下の粉末にしたのち、加圧してペレットにしたものを用いた。これらにおよそ $1.0 \times 10^{-3} \text{Pa}$ の気圧下において、紫外線（250~400nm）を照射した。

結果として可視域や近赤外域での反射スペクトルの傾きに変化が見られ、3 μm 吸収帯の弱化が確認された。これらの変化は数ヶ月ほどの短いタイムスケールで起きており、初期での宇宙風化においては UV が強く影響することが示唆された。また、照射前後の試料に対しラマン分光測定を行ったところ、照射後に蛍光が増大していることがわかった。これは結晶の格子欠陥に起因していると考えられる。UV 照射が格子欠陥を増やしたことにより、吸収帯がブロードになることで、反射スペクトルの形状に変化をもたらしていることが示唆された。



UV 照射前後の反射スペクトル

コンドリュールに見られる 棒状カンラン石凝固組織形成過程の数値計算

○三浦均¹, 森田朋代², 中村智樹², 渡邊華奈², 土山明³, 木村勇氣⁴, 小山千尋⁵

¹ 名市大・理, ² 東北大・理, ³ 立命館大, ⁴ 北大・低温研, ⁵ JAXA

コンドリュールは始原的な隕石に多く含まれる mm サイズの球状ケイ酸塩粒子であり, 初期太陽系において mm サイズまで成長したダスト集合体になんらかのメカニズムによって加熱・溶融した証拠だと考えられている。その形成メカニズムの解明は, 太陽系における物質進化の謎を解く鍵となる。これまで実施されてきた多くの再現実験により, コンドリュールが持つ特徴的な凝固組織を再現するための熱史に関する条件が明らかにされた。これを「観測的制約条件」という [e.g., 1]。そして, コンドリュール形成に関する従来の理論研究の主眼は, 観測的制約条件を満足する形成プロセスを見出すことであった。しかし, 観測的制約条件すべてを満足する形成プロセスは提案されておらず, コンドリュールの成因に関しては現在も議論が続いている。

コンドリュールの成因が特定できていない原因のひとつとして, 溶融コンドリュールの凝固過程が理論的に十分に理解されていないことが挙げられる。例えば, 棒状カンラン石 (barred-olivine, 以後 BO と略記) と呼ばれる凝固組織は, 全溶融状態から急冷することで形成したと考えられている [e.g., 2]。BO 組織におけるカンラン石は, 平行に並んだ多数の棒状パターン (バー) と, それら全体を取り囲む球殻状パターン (リム) が, 結晶学的方位を揃えて接続しているという特徴的な形状を示す。急冷する溶融コンドリュール内部において, このような特徴的な形状のカンラン石単結晶がどのように成長したのかは明らかになっていない。急冷液滴内部におけるカンラン石の結晶成長過程の数値計算も試みられている [3,4] が, 単成分系を想定しており, コンドリュールのような多成分系にはそのまま適用できない。再現実験の結果を土台としてコンドリュール形成プロセスを議論するには, コンドリュール凝固過程そのものを理論的に理解することが重要である。

そこで我々は, BO 組織の形成過程を現実的な多成分系を考慮した数値計算によって再現することにより, 観測的制約条件を理論的に検証するという世界初の試みに取り組んでいる。数値モデルには, 金属凝固の分野で活用されているフェーズフィールドモデルを採用し, 孤立した多成分ケイ酸塩液滴内におけるカンラン石の結晶成長過程を扱うための数値計算プログラムを新たに開発した [5,6]。加えて, 真空中での加熱を想定し, 液滴表面からの蒸発・内部組成変化を考慮した。完全溶融した液滴を過冷却状態とし, 液滴表面の一ヶ所に種結晶を導入したことを想定した数値計算を実施した結果, BO 組織に極めてよく似た特徴を持つ凝固パターンの再現に成功した。これにより, BO 組織形成における重要な要因を初めて理論的に特定した。この成果は, 従来の観測的制約条件と対をなす, 新しい理論的な制約条件の提案と言える成果である。

参考文献: [1] Jones, R. H. et al., 2018, in Chondrules: Records of Protoplanetary Disk Processes (Cambridge University Press), pp. 57. [2] Rubin, E. R. et al., 2023, Meteorit. Planet. Sci., 1. [3] Miura, H. et al., 2010, J. Appl. Phys. 108, 114912. [4] Miura, H. et al., 2011, Earth Planets Space 63, 1087. [5] Miura, H., 2023, Materialia 31, 101860. [6] Miura, H., submitted to Icarus (under review).

Predicting the atmospheric composition of hot/warm sub-Neptunes based on planetary population synthesis models with atmosphere-interior chemical interaction
大気と内部の化学的相互作用を考慮した惑星種族合成モデルに基づく短周期サブネプチューンの大気組成の理論予測

○ソ チャンウル^{1,2}, 木村真博^{3,4}, 伊藤祐一^{1,5}, 藤井友香^{1,2}, and 生駒大洋¹

¹ 国立天文台, ² 総合研究大学院大学, ³ 東京大学 大学院理学系研究科附属宇宙惑星科学機構,

⁴ フローニンゲン大学, ⁵ ユニヴァーシティ・カレッジ・ロンドン

Sub-Neptunes are among the most common exoplanets, characterized by radii between Earth and Neptune and lower densities than Earth. However, radius and mass alone allow for two distinct compositions: a thick H-He atmosphere with a rocky core or an H₂O-rich interior. These two compositions also correspond to different formation pathways: the former represents in-situ formation within the H₂O snowline, while the latter implies the migration of H₂O-rich solids from beyond the H₂O snowline. Spectral characterization of the atmosphere is anticipated to resolve this compositional degeneracy, given that the sub-Neptune atmosphere is significantly influenced by internal chemistry due to the large mass fraction of the planetary core. In this work, we combine the planetary population synthesis model result by Kimura & Ikoma (2022) with an atmospheric-magma H-C-O chemical equilibrium calculation code. Using this combined model, we demonstrate the range of atmospheric H-C-O compositions of sub-Neptunes and their dependence on stellar type, orbital radius—a crucial observational parameter—as well as the redox state of the rock, which varies with different solid accretion scenarios. We identify a negative trend between the atmospheric O/H and C/O ratios, driven by redox reactions and gas dissolution between the H₂-rich atmosphere and molten rocky core (e.g., Seo, Ito & Fujii 2024), which dominates the atmospheric composition of in-situ formed sub-Neptunes. This relationship causes the atmospheric composition to depend on the rock's redox state, with two extreme rocky composition scenarios—reducing rock with pure Fe and oxidizing rock with FeO—emerging as distinct compositional groups within the O/H-C/O parameter space. Furthermore, our analysis suggests that migrated planets exhibit a different population with a more oxidized atmosphere compared to in-situ planets. We also explore the observability and distinguishability of these two extreme in-situ scenarios using the Ariel mission, incorporating the Ariel noise model. We expect that our predictions can be used to distinguish the origins of sub-Neptunes, test the hypotheses about rocky composition, validate planet formation theory through large population surveys, and help in target selection for future missions like Ariel.

上層大気の水素・重水素比が反映する 大気散逸の律速過程

○黒川 宏之¹, 中川 広務², 寺田 直樹², 中村 勇貴¹, 青木 翔平¹, 臼井 寛裕³

¹東京大学, ²東北大学, ³宇宙航空研究開発機構

大気散逸による水素の損失は惑星の大気と表層環境の進化を駆動する。水素散逸の律速過程を理解することは、惑星の歴史を通じた散逸率の変化や、水の損失の積算量を求めるのに用いられる水素散逸の同位体分別係数の見積もりにおいて重要となる。しかしながら、律速過程の理論予想に対する観測的証拠は乏しい。本研究では、上層大気の水素・重水素比 (D/H) の観測が律速過程の区別に有効であることを示した。まず光化学を考慮しない解析的なモデルを用いて、Case I: H, D とともに散逸律速, Case II: H が拡散律速, D が散逸律速, Case III: H, D とともに拡散律速という 3 つのケースに応じて、非均質圏の原子 D/H が以下のような異なる鉛直分布となることを示した。Case I: 高度とともに減少。Case II: 高度とともに下部で増加し上部で一定値。Case III: 高度とともに下部で一定値をとり上部で増加。次に、光化学を考慮した数値モデル(bluejay, Cangi & Chaffin 2022)を用いて、この振る舞いを確認した(図 1)。太陽系の天体の上層大気のパラメータを用いると、金星と火星は Case I と II の境界に位置し、地球とタイタンは Case III に分類される。非均質圏 D/H の複数の高度もしくは異なる時期の観測により、この理論予想を検証できる。

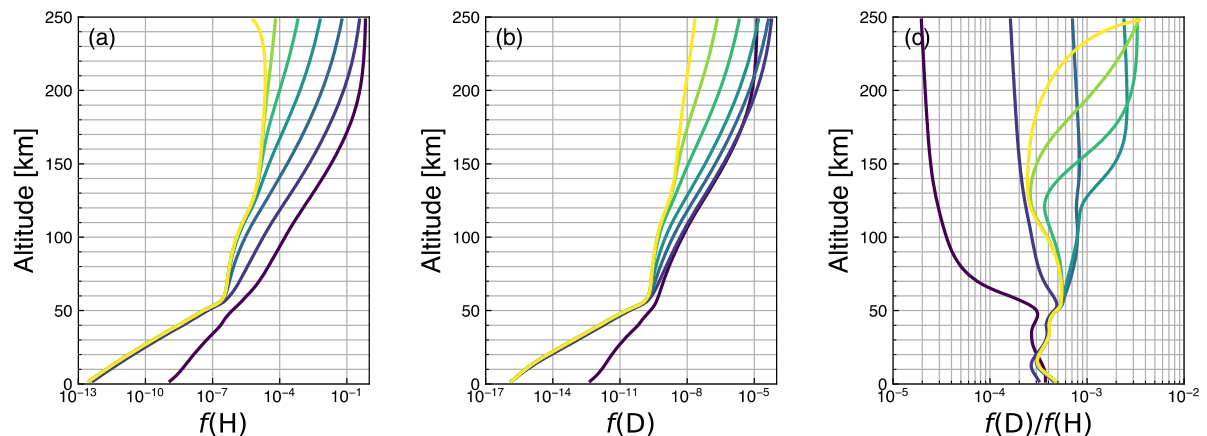


図 1: 大気散逸率に対する (a) 水素存在度, (b) 重水素存在度, (c) 水素・重水素比の応答。紫から黄の線にかけて水素・重水素流出速度をノミナル値の $10^{-2}, 10^{-1}, 10^0, 10^1, 10^2, 10^3, 10^4$ 倍している。

強 XUV 環境における地球型惑星の大気散逸： CO₂ 大気と地球大気

○中山陽史¹、関華奈子²、堺正太郎³、寺田直樹³、品川裕之⁴

¹立教大学、²東京大学、³東北大学、⁴九州大学

恒星からの UV 放射によって駆動される惑星の大気散逸過程は大気進化に大きく影響を与える。特に UV 強度が長期的に強い低温度星や恒星活動度の高い初期太陽系においては地球型惑星が持つ重たい 2 次大気においても大規模な大気散逸が期待される。加えて、大気散逸率や大気構造を決める放射冷却率は高層大気の大気組成に強く依存し、惑星が持つ大気組成と UV 強度の進化は密接に関連している。そういった中、地球型惑星が持ちうる可能性が高く、炭素循環などによって大気量が大きく変動する CO₂ は赤外波長において効率的に冷却を行うことが示されている (e. g. Kulikov et al., 2007)。しかしながら、強い紫外線環境では CO₂ が光解離によって壊されてしまうため、その冷却過程への寄与は弱くなってしまう。一方で現在地球に比べ強 UV 環境では原子やイオンによる輝線放射冷却が効率的に働くことで、地球類似惑星の高層大気の高温化を抑制し、大規模な大気散逸が抑制されることが示唆されている (Nakayama et al., 2022)。輝線放射冷却過程は温度以外にも原子やイオンが取りうる電子のエネルギー状態や衝突励起をもたらす他の気体種や電子がどの程度存在するかに依存するため、考慮する大気組成に応じて効率は変わりうる。

そこで本研究では、強 UV 環境において重要となる原子・イオンによる輝線放射冷却と低 UV 環境において重要な分子による赤外放射冷却の両方を考慮した高層大気モデル (Nakayama et al., 2022) を用いて、現在太陽系のような低 UV 環境から初期太陽系や系外惑星に相当する強 UV 環境までを一貫して計算を行い、放射冷却過程を含む高層大気の振る舞いについて議論する。特に、現在地球のような N₂-O₂ 大気と金星・火星のような CO₂ 主体の大気を例として、大気散逸率の UV 依存性、そして地球型惑星の進化について論じる。CO₂ 大気の場合、低 UV 環境では分子の放射冷却が効率的に働くため、高層大気の膨張率や外圏温度の UV 強度の依存性が現在地球型の大気に比べて弱い。しかしながら現在地球の 20 倍程度以上の UV 環境からは輝線放射冷却が CO₂ 大気でも効率的に働き、大気散逸効率は鈍化することが分かった。現在地球型の大気では 5 倍程度の UV 強度で輝線放射冷却が効率的に働くことに比べて、CO₂ 大気では分子放射冷却によって、比較的強い強度まで輝線放射の寄与が弱い。さらには、強い UV 強度における CO₂ 大気では、輝線放射冷却によって高層大気構造が縛られ、UV 強度に対する応答が鈍化することが分かった。これは主なイオンとして再結合速度の遅い C⁺ が多量に生成されることによって生じた電子によって衝突励起、そして輝線放射冷却が効率的に働くためである。これらのように放射特性に加えて化学的特性によっても大気温度構造、そして大気散逸効率が変わりうることが分かった。

地球類似惑星における大気 CO 暴走: 火成活動と恒星からの距離の影響

○遠藤美朗¹, 渡辺泰士^{2,3}, 尾崎和海¹

¹ 東京工業大学, ² 東京大学, ³ 気象庁気象研究所

大気組成は惑星表層環境のハビタビリティを左右する重要な因子の一つである。海洋が存在しプレートテクトニクスが働いている無生物の地球型惑星の大気組成は、火成活動、大気光化学反応、化学風化作用などによって影響されると考えられる。特に、大気中の一酸化炭素 CO は光化学反応でホルムアルデヒドなどの有機物を合成するため、その分圧は前生物化学において重要である。大気の CO は、効率的に消費され微量の状態と、大気光化学反応での収支が閉じず高濃度になる CO 暴走状態の 2 つが存在することが知られている。最近の理論的研究 Watanabe and Ozaki (2024) は、大気 CO₂ 分圧と還元ガスの脱ガス速度を系統的に境界条件を設定し光化学計算を行い、例えば 40 億年前の太陽光スペクトルの条件では高 CO₂ 分圧 (0.2 bar 以上) かつ還元ガスの大きな脱ガス速度 (44 Tmol/yr, H₂ 換算以上) の条件で CO 暴走が実現されることを明らかにした。

しかし、例えば、大気 CO₂ 分圧は脱ガス速度や恒星からの距離 (恒星から受け取る放射エネルギーフラックス)、また、還元ガスの脱ガス速度は惑星内部の酸化還元状態といった、より本質的な惑星の性質によって決まる。本研究では火山ガス組成を求める熱力学平衡計算 (Wogan and Catling, 2020)、気候安定化フィードバックを考慮した炭素循環モデル (Lehmer et al., 2020; Watanabe and Tajika, 2021)、鉛直 1 次元大気光化学モデル (Arney et al., 2016) を用い、マグマの酸素 fugacity と恒星からの距離に応じてどのような惑星大気組成が形成されるのかを調べる理論研究を行った。現在の太陽-地球間距離、FMQ バッファの酸素 fugacity、現在の地球と同様の地殻熱流量、40 億年前の太陽光スペクトルを仮定した場合、約 0.1 bar の高い大気 CO₂ 分圧によって温暖な気候が形成され、大気 CO 分圧は約 10 Pa 程度と推定された。さらに、上記の標準状態から (i) 惑星を恒星から 0.2 AU 程度遠ざけた場合、(ii) 酸素 fugacity を 2 桁程度低下させた場合、(iii) 地殻熱流量を 2 倍 (火山ガスフラックスは 4 倍) に増加させた場合には、CO 暴走状態が実現されることが明らかになった。CO 暴走状態はハビタブルゾーンの中で恒星から遠い惑星でより起きやすく、例えば初期の火星がその候補である可能性がある。

引用文献: Watanabe & Ozaki (2024). ApJ, 961(1), 1. Wogan & Catling (2020). ApJ, 892(2), 127. Lehmer et al. (2020). Nat. Commun., 11(1), 6153. Watanabe & Tajika (2021). Earth, Planets and Space, 73, 1-10. Arney et al. (2016). Astrobiology, 16(11), 873-899.

高層大気の加熱源としての超低周波音

○齊藤大晶¹

¹ 函館大谷短期大学

本研究は、地球の超高層大気における超低周波音波（インフラサウンド）の伝播と、その周波数依存減衰特性を評価することを目的としている。熱圏と呼ばれるこの領域は、約 85 km から数百 km の高度に広がる複雑なシステムであり、地球内部および外部の多様な要因に影響される。インフラサウンドは、地震、火山噴火、津波といった大規模な音源から発生し、非常に長い距離を伝播する特性を持つ。音波の大気中での減衰とエネルギー散逸のメカニズムを理解することは、大気科学、リモートセンシング、災害検知などの分野において重要である。しかし、従来の研究は持続的に生成される音波の影響に主に焦点を当てており、瞬間的な自然現象による音波の加熱効果については十分に検討されていなかった。

本研究では、インフラサウンドの減衰挙動を解析するために、粘性と熱伝導による古典的な吸収メカニズムに基づく簡易モデルを構築した。このモデルは、垂直に伝播する単色平面波のエネルギー密度とエネルギーフラックスを計算し、音波が大きなエネルギー散逸を伴わずに到達できる最大高度を推定するものである。モデルの特徴として、観測データに依存せず音圧をパラメータとして設定し、自然現象によって励起される音波の影響を評価できる点が挙げられる。

その結果、音波の周波数に応じて異なる高度でエネルギーが急速に散逸することが確認された。特に、高周波数の音波は低い高度で急速にエネルギーを散逸させる一方、低周波数の音波はより高い高度まで到達可能であることが示された。具体的には、1 Hz 以上の音波は約 100 km の高度でエネルギーフラックスが急激に減少し、0.1 Hz の音波は 250 km 以上の高度で散逸することがわかった。

これらの結果は、インフラサウンドがどのように大気中でエネルギーを散逸させ、大気を加熱するかを明らかにしている。低周波数の音波は高高度まで伝播し、エネルギーフラックスの減衰が遅いため、より効率的に大気を加熱することができる。この加熱効果は音波の周波数と音圧に依存し、音圧の増加に伴って加熱率も増加する。数十 Pa の音圧が発生した場合、地球上層における太陽紫外線（EUV）フラックスと比べて数 10～数 100 倍以上の加熱率が達成される可能性が示された。このことは、ペブル集積などの比較的小さな微惑星の集積によって火星サイズの原始惑星が形成される場合、新たな大気散逸機構やそれに伴う同位体分別に対する影響について新たな見解を提供する可能性がある。

3次元多成分イオン磁気流体力学シミュレーションによる 初期地球における膨張水素大気の非熱的散逸モデリング

○草野 百合¹、木村 智樹¹、堺 正太郎²、吉田 辰哉²、前田 優樹³、中田 英太郎⁴、
高田 亮馬¹、寺田 直樹²

1. 東京理科大学、2. 東北大学、3. 東京大学、4. 北海道大学

地球その他の惑星が表層に海洋を保持するために最も重要な要素は大気である。大気は、地殻からのガス供給と、宇宙空間への散逸にその収支を制御されながら進化してきた。宇宙空間への大気散逸の中でも主要なプロセスの1つである、イオンピックアップ等の非熱的散逸は、惑星の固有磁場、太陽風、太陽からの XUV フラックスに依存する。各過程の定量評価や長期変動の理解は進化の解明の上で重要だが、各惑星ともに散逸領域のその場観測等が不足しており、未解決の大問題である。先行研究では火星、金星などの惑星大気からの非熱的散逸率を、数値シミュレーションを使って全球的に推定している。例えば過去の火星を想定した大気のシミュレーションでは、XUV フラックスが現代と比較して 100 倍になると、大気の温度(Kulikov et al., 2007)とイオン生成率が上昇し、散逸率も 10^{4-5} 倍増加する(Terada et al., 2009)ことが明らかになっている。しかしこれらの研究では現在の中性大気の組成をもとに推定されており、過去の火星大気も CO_2 主体で温室効果が低く乾燥していたという仮定の元で成り立っている。一方、実際の過去の大気は現代と異なり水素が有意に含まれている組成であった可能性がある(Yoshida and Kuramoto., 2021)。地球においても同様の点が未解決のままである。そこで本研究は、現代の 100 倍の XUV フラックスを想定し、過去の地球における組成を反映した水素大気(Yoshida and Kuramoto., 2021, 高度 1000~185000km、最大密度 $3 \times 10^{12}/\text{cm}^3$)を仮定し、多成分イオン MHD モデル(Terada et al., 2009)を使って大気起源イオンの非熱的散逸率を調べた。原始地球は地磁気反転時等で太陽風の影響が大きいと思われる非磁化の時代を仮定し、太陽風は速度 1800km/s、密度 2100/cc、IMF 絶対値を 7nT に設定した。その結果夜側 200Rp (Rp は地球の半径、地表をRpとする。)での大気散逸率は H_2^+ が $4.0 \times 10^{28}/\text{s}$ 、 H^+ が $5.0 \times 10^{33}/\text{s}$ という結果が得られた。また昼側約 60Rp でバウショックが形成され、その内側で高密度の(最大プラズマ密度 $\sim 5.4 \times 10^6/\text{cc}$)膨張した電離圏が形成された。散逸の大きい高度は膨張した電離圏に対応している。太陽風磁場が昼側の膨張電離圏に浸透・堆積し、IMF の磁束密度が 300 倍に増幅されて最大磁束密度 2000nT の誘導磁気圏が形成された。またこの非熱的な散逸率によって、初期の水素大気(Yoshida and Kuramoto., 2021)は 850 万年で枯渇すると見積もられた。これは過去有意であると考えられていた熱的散逸(Yoshida and Kuramoto., 2021)による枯渇時間の 50 分の 1 の時間である。つまり、過去の水素大気について、熱的散逸だけではなく非熱的散逸も無視できない可能性が示唆された。今後は、IMF の影響と XUV フラックス、太陽風強度による変化を調べる予定である。発表では、本研究の現状を報告する。

微小隕石衝突蒸気雲による 水星ナトリウム外圏大気の衝突加速： 電離の効果

○寺田直樹¹、寺田香織¹、三宅洋平²

¹東北大学、²神戸大学

水星の大気は希薄で、分子間の衝突は基本的には無視できる。しかしながら、微小隕石が衝突したときに生じる蒸気雲中では、大気密度が局所的に高くなり、分子間の衝突を無視できなくなる。微小隕石衝突蒸発フラックスの理論見積りによると、メインベルト小惑星や木星族彗星を起源とする微小隕石の衝突に加えて、水星軌道で非常に速い相対速度（～50–100 km/s）をもつハーレー型彗星やオールト雲彗星を起源とする微小隕石の衝突により、水星の朝側に高密度で高温の蒸気雲が形成されることが予測されている（e.g., Pokorný et al., 2018）。

本研究では、水星大気分子の軌道と衝突を追跡する DSMC (Direct Simulation Monte-Carlo) モデル (Terada et al., 2016) を用いて、微小隕石衝突により生じる高密度・高温の蒸気雲中における分子間の衝突が、水星ナトリウム外圏大気の数密度・空間分布に及ぼす影響を評価した。その結果、蒸気雲中の衝突加速の影響は、高度 1000 km 以上の高高度におけるナトリウムの密度分布に現れ、太陽輻射圧による加速と同程度の影響を及ぼすことが分かった。蒸気雲による衝突加速を経験する背景ナトリウム原子の割合は、典型的な場合は 0.1% 程度と少ないが、衝突加速を経験した原子は背景大気のものよりも高いエネルギーを持つため、高高度において支配的な成分となる。より大きな隕石衝突イベントでは、高高度ナトリウム密度の急激な増加が期待される。一方で、非常に速い相対速度をもつ隕石が衝突する際には、蒸気雲中のガスの大部分は電離する可能性が指摘されている。蒸気雲中の電離ガス及び電子衝突によって電離したナトリウムイオンが水星磁気圏内に捕捉される効果も重要となりうる。本発表では、電離の効果を含めた水星ナトリウムの分布について探査機観測との比較を交えて議論し、水星への揮発性元素の供給・輸送・消失経路について議論する。

参考文献

- Pokorný, P., et al. (2018). ApJ, doi:10.3847/1538-4357/aad051.
Terada, K., et al. (2016). JGR, doi:10.1002/2015JE004961.

アルフヴェン・マッハ数が低い太陽風条件下における火星マグネトシースでの強いプラズマ加速

○西野真木¹、原田裕己²、関華奈子³、Jasper Halekas⁴、Jared Espley⁵、Gina DiBraccio⁵

¹宇宙航空研究開発機構、²京都大学、³東京大学、⁴アイオワ大学、⁵NASA

火星周辺の衝撃波下流の領域（マグネトシース領域）の性質を知ることは、太陽風、電離圏、および誘導磁気圏の相互作用の理解のために重要である。火星マグネトシースの太陽風アルフヴェン・マッハ数 (M_A) への依存性は統計的には研究されてきたが (Halekas et al. 2017)、非常に低い M_A イベントの詳細な研究はまだ行われていない。そこで本研究では、NASA の火星周回探査機 MAVEN による「その場観測」のデータに基づいて、太陽風の M_A が 2 から 3 程度という条件下において電離圏界面付近のマグネトシースで観測されたプラズマの加速について報告する。

本研究で解析した低 M_A イベントでは、上流の太陽風速度は約 400 km/s、定在衝撃波のすぐ下流側で 250 km/s であったものが、マグネトシース内の加速流の速度は 550 km/s に達した。このときの惑星間磁場はパーカー・スパイラルであり、加速流は誘導電場の向きと反対側の半球（-E 半球）で観測されており、向きはマグネトシースのその場での磁場に対してほぼ垂直方向であった。最近の先行研究でも、-E 半球で 100–200 km/s のプラズマ加速が見えることが報告されているが (Dubinin et al. 2024)、そこで解析されているイベント群の M_A は通常値の範囲内 (6–13 程度) であった。それらと比べて本研究で調査した低 M_A のときにはプラズマ加速が顕著になると言える。このような火星マグネトシースでのプラズマ加速は、地球磁気圏周辺のマグネトシースで低 M_A 太陽風条件下において観測されるプラズマ加速と対応している可能性がある。すなわち、観測された強いプラズマ加速は、磁気圧力勾配と張力の両方に起因するものかもしれない。火星型の太陽系外惑星においても、恒星風の M_A が低い場合には同様のプラズマ加速が起きる可能性がある。

一方で、Dubinin et al. (2024) によれば -E 半球のマグネトシースでプラズマ加速が起きているときに +E 半球のマグネトシースではプラズマ減速が起きている。この減速を磁気圧力勾配と磁気張力のみで説明することは難しく、地球磁気圏周辺では見られない他の何らかのメカニズムが作用しているものと考えられる。

スーパーアースおよびサブネプチューンの大気構造と 進化におけるアルカリ金属蒸気の影響

○藤井 友香^{1,2}、伊藤 祐一^{1,3}、黒崎 健二⁴、Seo Chanoul²

¹国立天文台、²総合研究大学院大学、³University College London、⁴神戸大学

サブネプチューンと呼ばれる 1.6-3 地球半径程度の惑星が多数見つかったが、内部構造や起源についてはよく分かっていない。それらを理解するための手がかりとして、一部のサブネプチューンで JWST による大気の透過分光が行われている。平衡温度 300 K 程度のサブネプチューン K2-18b や TOI-270d では、水素に富む大気の中にメタンや二酸化炭素などが検出され、太陽組成の 100 倍程度の O/H 比が示唆される一方、アンモニアは検出されなかった (e.g., Madhusudhan et al., 2023, Benneke 2023, 2024)。これらの特徴は、高温の岩石層 (マグマ) との反応による大気の酸化、および窒素のマグマ中への溶解で説明できる可能性がある (e.g., Shorttle et al., 2024)。平衡温度 600 K 程度以下のサブネプチューンの大気深部でマグマの融点を越えるには、主星からの入射フラックスのみでは足りず (Selsis et al., 2023)、十分な内部熱フラックスが必要である。そのため、サブネプチューンの大気組成の議論において、惑星の熱進化、そして大気の下層の岩石層の温度圧力状態を制約することが重要である。

これまでのサブネプチューンの大気構造の議論では、ある内部熱フラックスのもとで大気中の金属量を太陽組成の 10 倍、100 倍等と変化させて得られた温度構造モデルか、等温の成層圏と断熱勾配の対流圏を接続した簡略化された温度構造が用いられてきた。しかし、一般に大気の温度構造は大気組成に依存し、特に、アルカリ金属 (特にナトリウム) による光学的厚みは温度構造を大きく左右する。大気中のナトリウムの量は、(大気が岩石層に接している場合は、) 大気下端の温度圧力状態に依存した岩石層との平衡状態で決まると考えられる。これらの依存性を首尾一貫して考慮した大気構造モデルが必要である。大気の温度構造は惑星の冷却史にも影響し、現在の内部熱フラックスを見積もる上でも重要である。

そこで我々は、大気の放射対流平衡構造を求める公開コード HELIOS (Malik et al., 2017, 2019) を用いて、内部熱フラックスを境界条件として鉛直一次元大気の温度構造のアルカリ金属の存在量への依存性を調べた。その結果、アルカリ金属がない場合と太陽組成程度ある場合とでは温度構造が大きく異なった。一方、(大気圧を固定した場合の) 大気下端部の温度構造のアルカリ金属の混合比への依存性は穏やかであることが分かった。また、これらの大気構造を境界条件とし、岩石層の温度に依存したアルカリ金属蒸気の存在量を考慮して岩石コア+大気層の冷却を考えると、アルカリ金属の効果を無視した場合に比べてマグマの存在時間が桁で変わることが示唆された。講演では、10 億年のタイムスケールでマグマを維持できる惑星パラメータの範囲や、Ariel などの大気分光将来観測への示唆を議論する。

大気分光観測に適した系外金星 Gliese 12 b の発見

○ 福井暁彦¹、葛原昌幸²、John Livingston²、Jerome de Leon¹、
平野照幸²、笠木結³、成田憲保¹、大宮正士²、原川紘季⁴、堀安範²、
MuSCAT チーム、IRD チーム、CARMENES チーム、
TESS チーム、TFOP コントリビュータ

¹ 東京大学、² アストロバイオロジーセンター、³ JAXA、⁴ 国立天文台

近年、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）を用いた系外惑星の大気観測の研究が大きく進展している。しかし、その観測対象の大半は水素主体の大気をもつガス惑星、あるいは超高温の岩石惑星である。惑星のハビタビリティを議論する上でより重要である、地球や金星のような揮発性成分主体の大気を保持する温暖岩石惑星については、大気分光観測が可能な惑星系の数自体がまだごく限られている。さらに、その限られた系の一つとして知られている TRAPPIST-1 は、恒星の活動性が高いことが惑星の大気観測を行う上で大きな妨げとなっている。本講演では、大気分光観測に適した新たな地球サイズの系外惑星 Gliese 12 b の発見を報告する。この惑星は最初、NASA の系外惑星探索衛星 TESS によってトランジット惑星の候補として検出された。その後、多色撮像装置 MuSCAT シリーズを用いた追観測により惑星シグナルを確認するとともに、すばる望遠鏡の赤外分光器 IRD による事前観測データなどを組み合わせた解析から惑星系の物理量を決定した (Kuzuhara & Fukui et al. 2024, ApJL, 967, L21; 図 1)。惑星は半径が地球の 0.96 倍、平衡温度（アルベド=0.3 を仮定）が 288K であり、金星とよく似た半径・温度条件をもつ。また、(1) 主星が M 型星のためトランジットの減光率が比較的大きい、(2) 太陽系の近傍（12 pc）に位置し主星が明るい、かつ (3) 主星の活動性が弱い、という好条件が揃っているため、Gliese 12 b は TRAPPIST-1 惑星と比べて大気の観測により適していると考えられる。

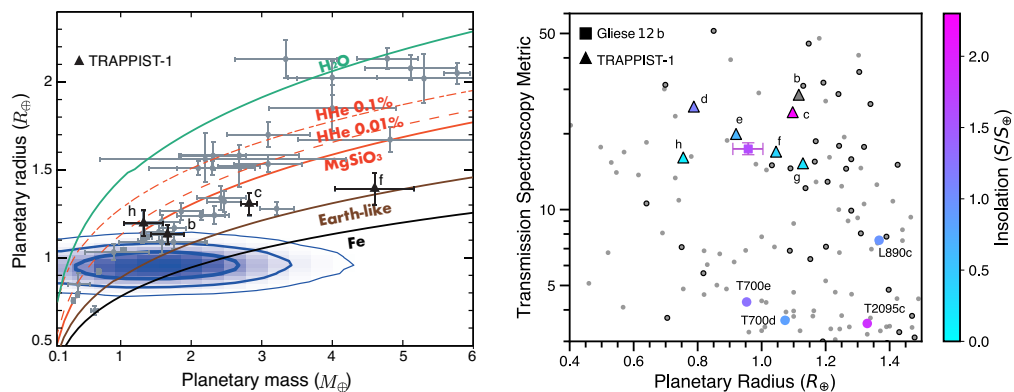


図 1: (左図) トランジット測光観測および視線速度観測により制約した Gliese 12 b の半径および質量範囲（コントア）。(右図) これまでに発見された地球型系外惑星の半径および透過分光光メトリック（TSM）の分布。色付きの惑星は日射量が地球の 2.3 倍以下の惑星。Gliese 12 b（四角）は Trappist-1 惑星（三角）に匹敵する TSM を有しており、JWST を用いた大気分光観測の有望天体である。（Kuzuhara & Fukui et al. 2024 より転載。）

金星の初期表層進化に基づく海洋獲得の可能性の検討

○前田悠陽¹, 佐々木貴教¹

¹京都大学大学院 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻

太陽系は、地球と同じく岩石主体の岩石惑星として、水星、金星、火星を持つ。このうち、金星は地球のすぐ内側(軌道長半径：約0.72AU)を周回しており、他の2つの惑星に比べて地球と近い質量(地球質量の約0.82倍)を持つ。このような、惑星の形成環境と質量の類似性にも関わらず、地球と金星は形成過程、あるいはその後の初期進化のある時点で進化の経路を分ち、現在では極めて異なる姿に落ち着いた。地球は冷却に伴い海洋を獲得し、この海洋を起点に多様な生命を生み出した。一方で金星は海洋はおろか、二酸化炭素主体の分厚い大気による温室効果のために、地表は現在も700 Kを超える高温の環境を維持するなど、その表層環境は地球と似ても似つかない。

その一方で、金星の過去の姿については、先行研究において相異なる描像が指摘されている。暴走的な温室効果のために、金星は一貫して海洋を持ち得なかった説(e.g. Hamano et al., 2013)と、対照的に、表面に一定期間は海洋を維持した説(Warren and Kite, 2023)である。海洋の存在が、生命の誕生に限らず、地球の初期進化において極めて重要な役割を果たしたことを踏まえると、過去の金星における海洋の有無を解き明かすことは、惑星科学の重要な課題である。

この課題に先行して、発表者は原始惑星における化学平衡計算(Young et al., 2023)を惑星形成過程に拡張することで、惑星の化学組成(水の生成量や、鉄コアの密度、酸化加減状態)の見積りを行なった。原始惑星から惑星への成長過程をN体計算で追跡し、原始惑星同士の巨大衝突に伴い惑星内部と大気の間で物質のやり取りが起こり、化学組成が決定される様子を計算した。その結果、惑星の化学組成の決定において、原始惑星が原始惑星系円盤中の水素ガスを重力的に捕獲すること、およびその捕獲量が重要な役割を果たすことを明らかにした。

本発表では、この結果をもとにして、さらにその後の惑星初期進化を考慮することで、金星の海洋獲得の可能性について検討する。金星の初期表層進化を取り扱った先行研究(Warren and Kite, 2023)を参照しつつ、惑星形成過程と接続した、大局的な時間進化の計算を目指す。特に、惑星形成の段階で金星にもたらされた水蒸気、あるいは液体の水の化学進化に注目する。金星の表層では、液体の水よりも水蒸気の方が、周囲の物質との化学反応に強く寄与すると考えられる。この水の状態と量に応じて、金星がたどった進化の経路の可能性を提示し、その検証に向けた概略を議論する予定である。

金星における紫外遮蔽による水損失効率の抑制と

マグマオーシャン寿命の長期化

○川村陽(1), 吉田辰哉(1), 寺田直樹(1), 中村勇貴(2), 小山俊吾(1), 狩生宏喜(1), 堺正太郎(1), 黒田 剛史(1)

1. 東北大学 2. 東京大学

金星の非常に乾燥した表層環境は、金星が地球とは全く異なる水進化を経験したことを示唆している。金星の水進化を解明することは、汎惑星的な水進化の理解を促進し、さらにハビタブルな地球型惑星の形成条件の解明に繋がる。

金星は形成初期にマグマオーシャン状態を経験し、同時に形成された水蒸気 (H_2O) に富む大気を構成する水素が宇宙空間へ散逸することで、大部分の水を失った可能性がある (e.g., Kasting, 1988)。惑星放射の射出限界が正味太陽放射を下回る場合、マグマオーシャンの固化時間はこの水損失の効率に律速される (Hamano et al., 2013)。Kawamura et al. (2024) は、 O_2 による紫外遮蔽が水損失効率を抑制し得ることを示した。同様に、 H_2O と並んで初期金星大気的主要成分だったと考えられる CO_2 の紫外遮蔽は、水損失効率をさらに抑制する可能性を持つ。したがって、 O_2 と CO_2 による紫外遮蔽は、マグマオーシャン状態を長期化させる可能性を持つが、これまでその影響の詳細については調べられてこなかった。

そこで本研究では、Hamano et al. (2013) を参考にしたマグマオーシャンモデルと 1 次元光化学モデルを統合し、 O_2 と CO_2 による紫外遮蔽が水損失効率およびマグマオーシャン固化時間に与える影響を評価するとともに、金星の初期水量についても検討を行う。1 次元光化学モデルでは、 H_2O と CO_2 およびそれらの光化学生成物 (e.g., O_2) を含めた計 13 成分と、それら化学種間の計 51 反応を考慮した。水損失効率を得るために、拡散律速に従う水素の散逸を考慮した。大気とマグマオーシャンの間の水蒸気の分配は、Schaefer et al. (2016) に基づく溶解平衡を仮定した。

大気中の $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比が 10 を超えると、地球海洋質量に相当する水損失に 10 億年以上かかる。一方で、 CO_2 の紫外遮蔽は、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比が 100 を超える場合にのみ有意に働く。この結果は、水損失に伴って酸素が大気中へ蓄積する場合、マグマオーシャンの寿命が長期化することを示唆する。

全球雲解像モデルを用いたトラピスト 1e の気候

○小玉 貴則¹, 高須賀 大輔², 樋口 太郎³, 黒田 剛史²

¹地球生命研究所 東京工業大学, ²東北大学, ³大気海洋研究所 東京大学

多くの系外惑星が検出され、その中にはハビタブルゾーンに位置している地球型惑星も含まれている。そのような潜在的なハビタブル惑星は、大きな注目を集め、将来観測計画の中でも重要なターゲットとして認識されている。慣例的にハビタブル惑星の気候状態は鉛直1次元気候モデルによる推定が行われてきたが、近年は3次元大気大循環モデルによる気候推定が行われている。

近年、地球気候学の分野では、計算資源の増大における追い風もあり、雲微物理を考慮した全球解像モデルによる高解像度気候シミュレーションが大きな成果を挙げている。Kodama+(2022)では、様々な自転軸傾斜を持った海惑星に対して、雲形成パラメタリゼーションを用いている慣例的な3次元大気大循環モデルと全球雲解像モデルと気候的な特徴を比較した。彼らは、慣例的な大気循環モデルに比べ、全球雲解像モデルが低い雲被覆率と大きな水蒸気量、より温暖な気候を示した。

そこで、本研究では、地球気象分野において大きな成果を挙げている全球雲解像モデルを用いて、系外地球型惑星(トラピスト 1e)の気候がどのようなものを調べた。全球雲解像モデルでは、従来の大気大循環モデルより高解像度かつ雲微物理も考慮することができるため、詳細な雲と水蒸気分布を得ることが可能となった。講演では、従来のモデルと本研究との気候的な特徴の差を比較検討する。

大気大循環モデルを用いた地球型惑星の海洋形成過程における水量・恒星日射量依存性

○天田航¹, 小玉貴則¹, 鎌田有紘², 黒田剛史², 玄田英典¹

¹ 東京工業大学

² 東北大学

惑星表層における海洋の存在は、惑星気候を特徴づける重要な要素の一つである。その原始海洋が初期の惑星において形成可能か否かは、恒星からの日射量と大気中の水蒸気量に強く依存すると考えられている。大気大循環モデルを用いた先行研究である Turbet et al. (2021)によれば、10–30 bar (全球平均 100–300 m)程度の多量の水蒸気を含む大気を有する惑星における海洋形成の可否は、全球水量に依らず恒星日射量のみ依存することが明らかになった。一方で Abe et al. (2011)は、0.02–0.06 bar (全球平均 20–60 cm)と少量の水蒸気しか有さない大気においては、全球水量が増加するほど海洋形成可能な恒星日射量が低下することを示した。しかし、どのように水蒸気が凝結するのか、なぜ海洋形成に全球水量が依存するかの具体的なメカニズムはわかっていない。

そのため本研究では、全球水量を 0.06–0.9 bar と変化させた時に、惑星表層での海洋形成が可能な恒星日射量を解明することを目的とし、大気大循環モデルを用いた気候実験を実施した。本気候実験では、大気は全圧 1 bar 固定の 0.06–0.9 bar の水蒸気と窒素の混合大気とした。地球と同程度の惑星半径・重力加速度・自転周期・自転傾斜角を有する惑星を想定し、初期条件として 1000 K の等温静止大気を仮定した。気候実験パラメータとして、大気中の水蒸気量 0.06/0.5/0.9 bar、恒星日射量 1200/1400/1600/2000 W/m²を与えた。

本気候実験の結果の一部として、大気中の水量が 0.06 bar と少量の時には、全球的に一樣に海洋が形成されるのではなく、極域が冬季の降雨と夏季の蒸発を繰り返しながら徐々に冷却され、降雨域が高緯度領域に限定されることが明らかとなった。本発表では、その他の気候実験パラメータにおける詳細な結果を示すとともに、海洋形成可能時の全球における降雨や水分布の季節変動について議論する予定である。

熱対流を取り扱うためのラグランジュ的流体シミュレーション SPH 法コードの開発

○ 高橋航¹ 小林浩¹ 瀬野泉美¹ 犬塚修一郎¹

¹ 名古屋大学

対流は惑星における熱輸送や物質の攪拌に寄与する重要な過程である。対流は流体シミュレーションによりよく調べられているが、主にオイラー的な流体方程式に基づくメッシュ法で行われている。メッシュ法では格子状に空間を離散化するため移流によって分布がならされてしまい、数値計算によって生じる熱拡散より小さな熱拡散での計算が困難である。そこで、ラグランジュ的な流体方程式に基づく Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法で対流現象を調査する。SPH 法では、流体を粒子で離散化することで移流による分布の平滑化が起こらず、数値計算による熱拡散を非常に小さくすることができる。

本研究では、SPH 法を用いた熱対流シミュレーションを行う。運動方程式に一様重力を加えた標準 SPH では十分に対流不安定な条件でも対流が生じず、安定化されてしまった。そこで、静水圧平衡からのずれが小さく、流体素片が断熱的に移動すると仮定し、浮力をより働きやすくした Boussinesq 近似を用いて対流の計算可能性を調べた。

上部と下部に等温壁境界、左右に周期境界の二次元 Rayleigh-Bénard 対流系において、レイリー数が 10^2 から 10^6 についてシミュレーションを実行した。Rayleigh-Bénard 対流では熱境界層と対流層の層構造を取り、熱輸送が定常である場合、熱境界層の熱輸送を調べることで熱輸送効率を評価することができる。シミュレーション結果をレイリー数と全熱流から計算した熱輸送効率とを比較することで、その妥当性を評価した。本発表ではその結果を報告する。

対流不安定性の数値的線形解析

○ 瀬野 泉美, ○ 犬塚 修一郎, ○ 小林 浩

¹ 名古屋大学

本発表では、非圧縮近似および Boussinesq 近似を用いない対流不安定性の線形解析について議論する。地球は過去に惑星同士の巨大衝突を経験し、その結果、マグマオーシャンが形成された。マグマオーシャンは対流的に不安定であり、その対流構造によって異なる化学組成の物質が混合され、現在の組成分布が実現されたと考えられている。また、地殻下にあるマントル層の対流は、プレートテクトニクスの動力学やマントル内の化学組成の決定において重要な役割を果たしている。さらに、地球大気における対流現象も同様に重要であり、大気対流は気象現象や気候システムの形成に深く関わっている。特に、大気の対流は雲の形成や降水現象に直結し、これらのプロセスは地球のエネルギーバランスや水循環に影響を与える。このように、対流現象は地球進化を考える上で非常に重要である。ところで、これまでの対流現象を扱う線形解析では簡単のために各高さ毎に非圧縮として取り扱う Boussinesq 近似や鉛直方向の構造を無視する方法が取られてきた。しかし、これらの近似を行わない線形解析は未だ報告されておらず、Boussinesq 近似がどの範囲で有効かは明らかにされていない。本発表では、Boussinesq 近似を行わない数値的な線形解析の手法について紹介する。加えて、本解析によって得られた温度のスケールハイトに対する分散関係の変化についても議論する。これにより、Boussinesq 近似の適用限界を明確にし、地球内部および大気の対流現象の理解を深化させることを目指す。

高速回転球殻内の非弾性熱対流と 木星型惑星大気の表面帯状構造

○ 佐々木洋平¹, 竹広真一², 石岡圭一³, 榎本剛⁴, 中島健介⁵, 林祥介⁶

¹ 北海道情報大学 情報メディア学部 情報メディア学科, ² 京都大学 数理解析研究所, ³ 京都大学 理学研究科 地球惑星科学専攻,

⁴ 京都大学 防災研究所, ⁵ 九州大学 理学研究院 地球惑星科学部門, ⁶ 神戸大学 理学研究科 惑星学専攻/CPS

木星型惑星 (木星・土星) 大気表層に見られる縞状パターンは、赤道域の順向ジェットと中高緯度の順向逆向が交互に反転するジェット群という特徴的な東西平均流構造を伴っていることが知られている。この特徴を矛盾なく整合的に説明できる満足な力学的描像と理解は、未だ得られていない。

木星型惑星大気の縞状東西風パターンを説明するモデルカテゴリーのうち、ここで注目するのは「深い」モデルである。表層の縞状構造を自転するガス惑星内部の熱対流がもたらす角運動量再分配に帰するこの「深い」モデルでは、赤道域の順行ジェットは容易に生成することができるものの、中高緯度の交互に反転するジェット群の生成が困難であった。近年、「深い」モデルにおいても、対流球殻の厚さを惑星半径に比べてできるだけ薄くすることで、内球接円筒内に小規模の対流活動を生成維持し、その帰結として中高緯度に交互に反転するジェット群を発現できることが示された (例えば ブシネスク流体では Heimpel and Aurnou 2007, 非弾性流体では Heimpel et al, 2022)。

これに対して我々は、ブシネスク系における既存研究での時間積分 (1600 回転時間) はせいぜい 0.1 粘性時間程度と短く、系が全体としては平衡状態に達していない可能性を指摘し、長時間積分を実施することで、0.1 粘性時間程度の時刻に見られた中高緯度の交互に反転するジェット群は時間とともに融合してしまい、16000 回転時間後は 1 本の順行ジェットとなり、中高緯度の縞状構造は消失してしまうことを見出した (Takehiro et al. 2024)。

本研究では、非弾性系でもブシネスク系と同様な長期時間発展が起こるのではないかと想定し、非弾性系での最も高解像な計算である Heimpel et al. (2022) の設定での薄い回転球殻内の熱対流の全球領域での長時間数値計算を試みた。中高緯度において複数ジェットが長時間後に融合し縞状構造が消失していくのか否かが注目点である。いずれの場合も初期に赤道域の強い幅広の順行ジェットと中高緯度に交互に向きが入れ換わる複数の幅狭のジェットが出現し、木星型大気の表層パターンに似た縞状の帯状風分布が観察された。時間とともに中高緯度のジェットが融合し、20000 回転時間において 2 本の順行ジェットと 1 本の逆行ジェットにまで減少した。しかしながら運動エネルギーはまだ増加しており、統計的平衡状態に達しておらず、引き続き時間積分を遂行し、縞状構造の遷移や性質を観察していく予定である。

参考文献

- Heimpel, M. H., Aurnou, J. M., 2007 : Turbulent convection in rapidly rotating spherical shells: A model for equatorial and high latitude jets on Jupiter and Saturn. *Icarus*, 187, 540–557.
- Heimpel, M. H., Yadav, R. K., Featherstone, N. A., Aurnou, J. M., 2022 : Polar and mid-latitude vortices and zonal flows on Jupiter and Saturn. *Icarus*, 379, 114942.
- Takehiro, S., Sasaki, Y., Ishioka, K., Enomoto, T., Nakajima, K., Hayashi, Y.-Y., 2024: Asymptotic profiles of mean zonal flows generated by thermal convection of Boussinesq fluid in a rapidly rotating thin spherical shell. *Icarus*, 420, 116154.

木星内部安定成層中の磁気流体波の線形固有値解析

Magnetohydrodynamic waves in a stably stratified region of Jupiter's interior

○ 中島 涼輔¹, 堀 久美子²

¹ 九州大学 大学院理学研究院, ² 核融合科学研究所

探査機 Juno の磁力計測により, 木星固有磁場の詳細かつ全球的な構造とその永年変化の存在が明らかになってきた. この永年変化は主に, 内部ダイナモ領域上端部の帯状流による磁力線の移流に由来すると考えられてきた (Moore *et al.*, 2019, *Nat. Astron.*; Bloxham *et al.*, 2022, *J. Geophys. Res. Planets*). しかし近年, この移流効果だけでは説明しがたい数年周期の磁場変動が見つかってきた (Bloxham *et al.*, 2024, *Nature*). この周期的磁場変動の原因として内部ダイナモ領域を伝播するねじれアルヴェン波 (Hori *et al.*, 2023, *Nat. Astron.*) が検討されたものの, 複数の点で疑問が残る.

本研究では, 木星内部の水素が金属化する深度付近に安定成層が存在する可能性 (e.g. Stevenson, 2020, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*; Christensen *et al.*, 2020, *Astrophys. J.*) に注目し, その成層領域を伝播する磁気流体波により, 木星磁場の数年変動を説明できるかどうかを検証する. このような安定成層を伝播する磁気流体波の中でも, 特にローレンツ力とコリオリ力, 浮力の三者が復元力として競合する波は MAC (Magnetic-Archimedes-Coriolis) 波と呼ばれ, これまでは主に地球磁場の数十年変動の起源として議論されてきた (Braginsky, 1993, *J. Geomag. Geoelec.*; Buffett, 2014, *Nature*).

本発表では, 木星内部の安定成層領域を伝播する磁気流体波の線形固有値計算の初期結果を示す. 簡単のために, 波の構造の緯度方向の広がりはいと仮定して, f 平面近似を用いる. ここで, 浮力振動数は, 薄い遷移領域を除き一定とする. この電気伝導性の成層薄層を貫くように大域的な磁場が存在すると仮定して, 鉛直上向きに一律な背景磁場を印加する. 本研究では, この薄層の電気伝導度構造を新たに考慮する. これらを定式化し, チェビシェフ選点法により構成した一般化固有値問題を QZ 法で, 数値的に解いた. その結果, そのような安定成層では水平波数に応じて数年から数十年周期の MAC 波が存在しうることがわかった. ただし, MAC 波は電気伝導度の大きさに敏感であるため, 電気伝導度が非常に小さくなる安定成層の上部では, 波の振幅が小さくなる. この結果は, 木星内部 MAC 波に起因する磁場変動を, 木星表面付近では観測しがたいことを示しているかもしれない.

本研究は JSPS 科研費 (JP24K00694) の助成を受けたものです.

破壊を伴う衝突による小惑星速度変化

○西尾峻人¹, 大槻圭史¹, 杉浦圭祐²

¹神戸大大学院理学研究科 惑星学専攻, ²三菱電機先端技術総合研究所

将来、地球に衝突する可能性のある小惑星から地球を防衛する方法の一つとして、小惑星に人工的な衝突を起こし運動方向を変えろというものがある。2022年9月26日にはその有効性の実証のために探査機 DART を用いた宇宙衝突実験が行われ、小規模な衝突による標的天体の速度変化が確認された ([1], [2])。一方、衝突による速度変化は、微惑星や小惑星の力学進化を考える上でも重要な基礎過程である。これまでに行われてきた衝突による小惑星の速度変化に関する理論研究では、主に DART ミッションのような小惑星への人工衝突現象の理解を目的としていた。そのため多くの場合では km サイズ以下の小惑星に小さなインパクターを衝突させ、小さな破壊が起こる小規模な衝突を想定していた ([3], [4], [5])。その上で、より一般の衝突現象を理解するために、破壊規模や衝突体の質量比などより幅広いパラメータ範囲での理解が必要となる。

そこで、本研究では小惑星の正面衝突における速度変化をシミュレーションによりした調べた ([6])。コードには摩擦や強度などの岩石の効果を組み込んだ SPH 法のコードを用いた ([7], [8])。標的天体には半径 50km の密度一様玄武岩球を使用し、インパクターには質量比 (インパクター質量/標的天体質量) が $\gamma = 1/8, 1/64, 1/128, 1/256$ となるような天体を使用した。その結果、衝突後に形成される最大破片天体の受ける速度変化は衝突する二天体のサイズ比及び破壊規模に大きく依存することが分かった。質量比が小さく、破壊規模が小さなきには衝突点付近から放出されるエジェクタの効果により最大破片天体が受ける衝突速度方向への速度変化は完全非弾性合体時よりも大きな速度変化を受けることが分かった。一方で、破壊が大きな場合には衝突速度方向への質量流出が大きくなるため、最大破片天体は衝突速度方向に完全非弾性合体時よりも小さくなる。また、質量比が大きくなるほど衝突点付近から衝突速度の反対方向に飛ぶ粒子は見られなくなるため、衝突により最大破片天体が受ける衝突速度方向の速度変化は小さくなる。微惑星や小惑星の速度変化においては、これらの依存性を考慮する必要がある。

参考文献

- [1] Thomas, C. A. et al. 2023, *Nature* 616, 448.
- [2] Cheng, A. F. et al., 2023, *Nature* 616, 457.
- [3] Holsapple, K. A. and Housen, K. R., 2012, *Icarus* 221, 875.
- [4] Jutzi, M. and Michel, P., 2014, *Icarus* 229, 247.
- [5] Raducan, S. D. et al., 2022, *Icarus* 374, 114793.
- [6] 西尾峻人ほか, 2024, 遊星人 33, 印刷中.
- [7] Sugiura, K. et al., 2018, *A&A*, 620, A167.
- [8] Sugiura, K., 2020, *Development of a Numerical Simulation Method for Rocky Body Impacts and Theoretical Analysis of Asteroidal Shapes* (Springer, Singapore).

岩石斜め衝突エジェクタによって砂標的に形成される溝状構造

山本 大晟, 山口 祐香理, 松原 光佑, 中村 昭子

神戸大学大学院理学研究科

天体表面への高速度衝突で放出されるエジェクタは、天体表面に再衝突して二次クレーターを形成し、また、一部は、他天体表面に衝突すると考えられる。例えば、火星の衛星であるフォボス表面には、小天体の火星への衝突によって生成されたエジェクタが到達したと考えられており (Ramsley and Head, 2013)、これらのエジェクタの衝突によって、フォボスの表面(レゴリス)にグループが形成されたという説が提案されている (Murray and Heggie, 2014)。しかし、エジェクタがレゴリス表面につくる地形に関する実験的研究が少ない。そこで、本研究は、岩石天体から放出されるエジェクタがレゴリス表面に衝突する様子を衝突実験によって再現し、形成される地形を調査することを目的とする。

上記の目的のため、弾丸を玄武岩に衝突させた際に放出したエジェクタを砂に衝突させる実験を行った。玄武岩への衝突は、宇宙科学研究所の二段階軽ガス銃を用いて、7km/s の高速度かつ、弾丸の弾道と衝突面の間のなす角度(衝突角度)を 45° に設定して行った。弾丸として、直径 3 mm のアルミニウム球を用いた。実験は周囲の圧力が $<3.5\text{Pa}$ のチャンバー内で行った。エジェクタが砂に衝突する様子をハイスピードカメラで撮影し、エジェクタの弾道と衝突面の間のなす角度(放出角度)およびエジェクタが放出される速度を求めた。砂表面に形成された地形はレーザープロファイラを用いて調べた。

エジェクタによって、砂表面に複数の並走するリムを持つ溝状の構造が形成された。ハイスピードカメラによって撮影された画像から、この溝状構造は、エジェクタの放出速度の減少(約 10 km/s から 3 km/s)と放出角度の増加に伴って砂への衝突位置が変化していくことによって形成されたことが分かった。また、形成された溝の幅(リムどうしの間隔)をエジェクタによって形成された「クレーターの直径」とみなして、 π スケーリングを用いて衝突したエジェクタの大きさを求めたところ、 $100\text{ }\mu\text{m}$ 程度と推定された。一方、リムの頂点から溝の最も深い点までの距離を「クレーター深さ」に相当する値に修正したところ、クレーターの直径/深さ比は 10^1 のオーダーであった。これは単独の弾丸ではなく、複数の破片から成るクラスター弾丸を砂に衝突させてできるクレーターに見られる直径/深さ比 (Schultz and Gault, 1985) に相当する。よって、溝状の構造は、クラスター状のエジェクタによる衝突で形成されたと考えられる。

本研究は JAXA 宇宙科学研究所の超高速度衝突実験施設の共同利用実験として行いました。

4 種類の岩石からの 1 km/s 以上の高速度衝突エジェクタ：放出速度と角度の関係

○山口祐香理¹, 中村昭子¹

¹神戸大学大学院理学研究科

背景と目的

衝突エジェクタは、惑星や小天体間の物質輸送において重要な役割を持つ。MMX 計画でサンプルリターンを行う火星衛星フォボスの表面には、火星からのエジェクタが存在する可能性がある (Chappaz et al., 2013; Ramsley & Head, 2013; Hyodo et al., 2019)。サンプル物質が探査天体由来かどうかを判断するには、他天体から輸送された可能性を検討する必要がある。高速度エジェクタのサイズと速度と放出角度の関係が重要となる。これらの関係が物性に依存するかどうかを確かめるため、4 種類の岩石の高速度エジェクタについて調べた。

実験手法と解析手法

宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて、直径 3 mm のアルミニウム球弾丸を衝突速度約 7 km/s で（火星を模擬した）一次標的に対して垂直に衝突させ、エジェクタが通過する位置に、エジェクタの速度とサイズを測定するための二次標的としてポリカ板を配置した。弾丸の一次標的への衝突とエジェクタの二次標的への衝突の様子は高速度カメラで 10^5 fps 以上で撮影した。本実験では、先行研究 (Nakamura et al., in prep.) の豊岡産玄武岩 (2.7 g/cm³, 12 MPa) とは密度や圧裂引張強度が異なる、粗粒玄武岩 (3.2 g/cm³, 21 MPa) と、蛇紋岩 (2.7 g/cm³, 18 MPa) と、パイロフィライト (2.6 g/cm³, 6.5 MPa) を一次標的として用いた。

エジェクタは一次標的の弾丸衝突点から放出されたとし、エジェクタの速度を二次標的への飛行時間と飛行距離から算出した。エジェクタのサイズは、エジェクタによって二次標的に形成されたクレーター直径から π スケーリング則を用いてエジェクタを球として算出した。エジェクタの放出角度は、弾丸軌道と、エジェクタの衝突位置から求めたエジェクタ放出軌道のなす角度として算出した。

結果

すべての岩石で、エジェクタ速度が大きいほど、最大エジェクタサイズは小さくなるという傾向がみられた。同じ速度の最大エジェクタサイズは、4 種類の岩石間で大きな差は見られなかった。また、エジェクタ速度が ~ 2 km/s より大きな範囲では、エジェクタ速度が大きいほど、エジェクタの放出角度は大きくなったが、 $0.4 \sim 2$ km/s の範囲では逆の傾向がみられた。このエジェクタ速度と放出角度の関係についても、玄武岩のエジェクタ速度と放出角度の関係を調べた先行研究 (Gault and Heitowit, 1963) でみられた傾向と類似し、岩石間で大きな差は見られなかった。

謝辞

本研究は、JAXA 宇宙科学研究所の超高速度衝突実験施設の共同利用実験として行いました。

エジェクタパターンの解析：ターゲット粒子サイズ分布との定量的関係

Analysis of pattern in ejecta curtain

○門野敏彦¹, 大坪貴文¹

¹産業医科大学

粉体標的が同一サイズの粒子で構成されている場合は、衝突により逆円錐形のエジェクタカーテン中に網目状のパターンが生じることが示されている [1,2]. それに対し、標的粒子にサイズ分布がある場合にはこれとは異なりエジェクタカーテン全体に及ぶ大規模なパターンを示すことがわかってきた [3,4]. つまりエジェクタのパターンは標的粒子のサイズ分布を反映しているということである.

近年、小惑星探査で衝突実験が行われるようになり、その場観測されたエジェクタのパターンはこれまでに実験室で観測されていた同一サイズ標的粒子の場合のパターンとは異なっていた [5-7]. 小惑星表面の画像からは多様なサイズの岩塊の存在が示されており、この表面の岩塊のサイズ分布が反映されていると考えられる.

本研究では、エジェクタカーテン中のパターンと標的粒子のサイズ分布の定量的な関係を求めることを目指して、これまでに実験室で行ってきたいろいろなサイズ分布の場合のエジェクタカーテンのパターン解析を行った. われわれはパターンを天文学の分野で開発された分子雲中のフィラメント構造を解析するツールを用いて調べた. パターンを定量化してサイズ分布との関係を紹介する予定です.

参考文献

1. Kadono et al. (2015) Icarus 250, 215-221, doi:10.1016/j.icarus.2014.11.030
2. Kadono et al. (2020) Icarus 339, 113590. doi:10.1016/j.icarus.2019.113590
3. Kadono et al. (2019) APJL 880, L30. doi:10.3847/2041-8213/ab303f
4. Kadono et al. (2022) EPS 74, 128. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01672-9>.
5. Arakawa et al. (2020) Science 368, 67-71. doi:10.1126/science.aaz1701
6. Kadono et al. (2020) APJL 899, L22. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aba949>
7. Dotto et al. (2024) Nature 627, 505-522. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06998-2>

大気圧下および真空下での付着性レゴリス層から受ける抵抗力の実験的推定

○櫻井諒太¹、中村昭子¹

¹神戸大学大学院理学研究科

粉粒体層への衝突・貫入挙動の解明は、小天体の表面レゴリス層への衝突・貫入挙動を理解するうえで重要である。この物理的メカニズムは未解明のものが多く、特に粉粒体から受ける抗力と粉粒体層の特性の関係は確立されていない。サブミリ～ミリサイズの粒子層に対してセンチサイズの円柱や球を弾丸として鉛直方向に 0 ～ 4 m/s の速さで衝突させた実験から、弾丸にはたらく貫入抵抗について、慣性力と深さ依存の抵抗力が独立して作用しているとし、内部摩擦角と関連付けた比例係数がそれぞれ導出されている (Katsuragi and Durian, 2013)。しかし、付着性粉粒体の場合は構成粒子サイズによって空隙率が異なる。異なる雰囲気圧下で、数種類の異なる空隙率のミクロンサイズの粉粒体に対してセンチサイズの球を鉛直方向に約 2.5 m/s の速さで衝突させた実験では、雰囲気圧や空隙率の違いによって最終貫入深さが大きく異なることが示されている (Clark and McCarty, 1963; Royer et al., 2011)。以上より、抵抗力に粉体の内部摩擦角だけでなく、雰囲気圧や空隙率が影響する。そこで本研究では、大気圧下および真空下で、付着性粉粒体層に対して地球重力下で自由落下させたセンチサイズの弾丸が衝突・貫入する様子を観測し、粉粒体から受ける抗力を定める比例係数を推定した。

レゴリス模擬試料として 4 種類の粒径 (5, 15, 31, 59 μm) のアルミナ粒子を容器に充填し (空隙率 52 ～ 66 %)、様々な間隔で配置したコイル 5 つの内側に設置した。容器直径の 1/10 のネオジム磁石円柱を弾丸として、初速度約 1.7 m/s で粒子層に貫入させ、磁石が各コイルを通過する際に発生する誘導起電力が弾丸の減速とともに小さくなる様子を大気圧下および真空下で記録した。また、フラッシュ X 線照射装置を用いて、同じ条件での貫入最中および貫入停止後の試料と弾丸をイメージングプレートに撮影し、貫入深さを測定した。これらの様子を再現するように磁石に作用する慣性力と深さ依存の抵抗力の無次元比例係数をそれぞれ C_D と k^* として求めた。

その結果、すべての粒子層における大気圧下での貫入深さは、真空下での貫入深さの 1.5 ～ 2 倍程度であった。また、5 μm の粒子層では大気圧下での C_D と k^* はサブミリ～ミリサイズの粒子層を用いた先行研究で得られた経験則からの予測よりも小さい値を示したが、真空下では C_D と k^* とともに大気圧下の 3 倍程度であり、上記予測より大きい値を示した。

ポスターでは、空隙率の異なる他の粒子層による C_D と k^* についての結果も示し、空隙率や雰囲気圧が抵抗力に及ぼす影響についてさらに議論をする。

本研究は、JAXA 宇宙科学研究所の超高速度衝突実験施設の共同利用実験として行いました。

ボルダーへの衝突におけるアーマリング効果に対するボルダーの深さ依存性と

ボルダーの強度がクレーター形成に及ぼす影響

*宇都宮 忠勝 1, 荒川 政彦 1, 保井 みなみ 1, 長谷川 直 2, 山本 裕也 2,

横田 優作 1, 柿木 玲亜 1(1. 神戸大学、2. 宇宙科学研究所)

探査機はやぶさは、小惑星イトカワの表面が数センチから数メートルの小石や巨礫(ボルダー)で覆われているのを観測し、ラブルパイル天体の直接的観測として初の例となった。またイトカワは、月と比較して小さなクレーターが非常に少ないことや、ボルダー上に穴や割れ目があることも明らかになり、このことからイトカワのクレーター形成過程にはアーマリング効果が働いていることが示唆された。ボルダーで覆われた小惑星表面模擬物質を用いたこれまでの室内衝突実験ではアーマリング効果が検証されているが、使用されている標的粒子の粒径が同じであったため、1つのボルダーに着目し、ボルダーに衝突した際のクレーター形成に伴うボルダーの挙動については不明な点が多い。また、小惑星上のボルダーの強度については、幾つか推定がされている。例えば、小惑星ベヌスのボルダー上のクレーターの解析から、ボルダーの衝撃強度は 0.44-1.7 Mpa と推定されている(Ballouz et al., 2020)。また、熱慣性のデータから、リュウグウ上のボルダーの引張強度は 0.20-0.28Mpa と制約されている(Grott et al., 2019)。しかし、これまでの粗粒標的を用いた先行研究ではそれよりも1桁以上大きな強度の粒子を使っており、実際の小惑星のボルダー強度範囲での検証は行われていない。そこで本研究の目的は、ラブルパイル小惑星表面模擬物質を用いたクレーター形成実験を行い、地表面上や表面下のボルダーへの衝突が及ぼすクレーター形成過程への影響を調べることである。特に、ボルダーの埋没深さや強度、衝突速度に対するアーマリング効果に着目する。

ボルダー模擬物質は、石膏のみと直径 $100\mu\text{m}$ の石英砂と石膏を質量比 1:1~20:1 で混合して作成した。その強度は 2:1 で 770kPa, 8:1 で 140 kPa, 20:1 で 19kPa である。混合球の直径は低速度では 40 mm, 高速度では 60 mm とし、 $100\mu\text{m}$ の石英砂を敷き詰めたたらいの中心に設置した。その際、混合球の設置深さとボルダーの直径比 d/DB を定義し、 $d/DB=0$ (砂表面上) ~ 1 (砂表面下) の範囲で変化させた。また、石英砂のみ(ボルダーなし)の標的も比較のために用意した。低速度の実験は、神戸大学の縦型一段式軽ガス銃を使用し、弾丸は直径 10 mm のナイロン球を用いた。高速度の実験は、宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を使用し、弾丸は直径 4.7 mm のポリカーボネート球を用いた。衝突速度は約 150 m/s(低速度)と約 1.8 km/s(高速度)である。衝突の様子は高速カメラで撮影し、衝突点位置の確認とエジェクタカーテンの形状観察、ボルダーの破壊の様子を観察した。

ボルダーを設置した場合、深さによってクレーター形成過程に大きな違いが見られた。 $d/DB=0$ ではクレーターは形成されず、衝突で破壊されたボルダーの破片が放射状に飛び散り、衝突点を中心とした放射状の跡が砂表面に形成された。 $d/DB=0.5$ ではクレーターは形成されたが、その周囲に放射状の小さくいびつなクレーターが観察された。クレーター中心にはボルダーの最大破片が埋まっており、エジェクタカーテンは非常に薄かった。 $d/DB=1$ では石英砂のみの場合と同様に、円錐型のクレーターが形成され、ボルダーの破壊は非常に小さく、最大破片は埋まったままに残っていた。埋没深さによるクレーター形状は、ボルダーの強度により変化が見られた。ボルダーの強度が高く破壊されなかった場合、 $d/DB=0$ で円形のクレーターが形成され、ボルダーは半分以上埋没した。 $d/DB=1$ ではクレーターは形成されなかった。このようにボルダーが破壊された場合とは逆の傾向を示した。それに対し、強度が低い場合ではクレーター形状は大きく変わらなかった。しかし、強度が低下するほどボルダーの破壊の程度は大きく、破片サイズが小さくなり数が増加した。そのため、強度が低下するほど、クレーターリム上に見られる凹凸が多くなり、よりいびつな形状となった。

微惑星衝突物理の理解に向けて： 微惑星の衝突シミュレーションと 小惑星リュウグウ

○山田理央奈¹, 小林浩¹

¹名古屋大学

JAXA のはやぶさ2探査機によって小惑星リュウグウの3次元地形データが得られた。この地形データの解析により、リュウグウクレータのうち東西方向に非対称なリム高さをもつクレータを複数発見した。非対称なクレータリムの成因は主に2つ挙げられる。一つは衝突体の斜め衝突による影響、もう一つは小惑星の自転による影響である。本研究では、Sugiura+ 2018により開発されたSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法による惑星衝突シミュレーションコードを用いて、小惑星衝突によるクレータ形成をシミュレーションした。ターゲット小惑星をリュウグウと同程度のサイズの半径500 mの球として、5万SPH粒子で表現した。一方、衝突体は1,000粒子で表現した。この衝突体は半径136 mの球となり、リュウグウ表面のクレータを形成した小惑星よりもずっと大きくなってしまう。そのため、衝突速度を実際より遅くすることでクレータ形成をシミュレーションした。まずは、自転しないターゲットに対して、斜め衝突による効果を調べた。次に、自転するターゲットに対してもシミュレーションを行った。結果、衝突条件に応じて非対称なエジェクタ軌道が確認された。発表ではそれぞれのパラメータごとのエジェクタの非対称性について議論する。

小惑星リュウグウにおける岩塊表面の小クレーター 解析に基づく岩塊衝突破壊強度の推定

○愛敬雄太¹、諸田智克¹、杉田精司^{1,2}、長勇一郎¹、道上達広³、本田理恵⁴、
巽瑛理⁵、坂谷尚哉⁵、亀田真吾⁶、山田学²、横田康弘⁵、松岡萌⁷、本田親寿⁸、
神山徹⁷、鈴木秀彦⁹、早川雅彦⁵、吉岡和夫¹、小川和律^{10,11}、澤田弘崇⁵

¹ 東京大学、² 千葉工業大学、³ 近畿大学、⁴ 愛媛大学、⁵ JAXA/宇宙科学研究所、⁶ 立教大学、
⁷ 産業技術総合研究所、⁸ 会津大学、⁹ 明治大学、¹⁰ JAXA/国際宇宙探査センター、¹¹ 神戸大学

微小天体衝突による小惑星表面岩塊の破壊・細粒化は、小惑星の質量損失や惑星への物質供給に寄与すると同時に、岩塊を圧密し物性を変化させる。岩塊の衝突破壊プロセスを理解する上では、岩塊を破壊するために必要な単位質量あたりのエネルギーである衝突破壊強度が重要である。小惑星リュウグウ表面の岩塊物性については熱赤外観測による強度・空隙率推定[1-2]や帰還試料強度の測定[3]が行われている。しかし、衝突破壊は複合的なプロセスであるためリュウグウ表面岩塊の衝突破壊強度は定量的には評価されていない。

そこで、本研究はリュウグウ表面岩塊の衝突破壊強度推定を目的として、リュウグウ表面の高解像度画像内で岩塊上の微小クレーターを探索し、形態とサイズを測定した。測定されたクレーターサイズに対してクレータースケーリング則を用いることで、衝突破壊強度の推定を行った。

その結果、リュウグウ表面岩塊上にはベヌー表面岩塊上のクレーター[4]と同様の形態を持つクレーター候補が観測された。第1回・第2回タッチダウン時に撮影された高解像度画像14枚の中から、以前に同じ領域で行われたクレーター測定[5]で発見されなかったものも含めて40個のクレーター候補を発見した。クレーター直径の岩塊直径に対する比率の最大値はおおよそ0.5となり、これは同サイズのベヌー岩塊におけるクレーター観測[4]とほぼ整合的であった。従って、ベヌー岩塊とリュウグウ岩塊の衝突破壊強度には大きな差はないと考えられる。

本発表では、岩塊上のクレーターサイズから推定された衝突破壊強度とカタストロフィック破壊された岩塊の存在比率から推定された衝突破壊強度[6]を比較するとともに、岩塊強度から推定される岩塊破壊タイムスケールと天体表面進化について議論する。

参考文献:[1] Grott et al., 2019, Nat. Astron. [2] Hamm et al., 2020, MNRAS. [3] Nakamura et al., 2023, Science. [4] Ballouz et al., 2020, Nature. [5] Takai et al., 2021, JpGU. [6] Aikyo et al., 2024, JpGU.

基盤岩を覆うレゴリス層のクレーター成長過程：基盤岩が掘削流に及ぼす影響

○柿木玲亜¹，荒川政彦¹，保井みなみ¹，長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻，²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

2019年、はやぶさ2探査機が小惑星リュウグウ上にSCIクレーターを形成した。SCIクレーターの底にはピットと呼ばれる小さな孔の存在が確認された[Arakawa et al. (2020)]。このピットの存在から、リュウグウには結合強度を持たないレゴリス層の下に、強度の大きいレゴリス層および基盤岩が存在すると考えられている。このように小惑星の表層構造や内部構造は、その起源や進化の理解のために必要不可欠な情報であり、クレーター形態は内部構造を推定するための重要な手段として現在注目されている。

以上より、本研究ではクレーター形態の特徴から小惑星の内部構造を推定する手法の開発を最終目標と定める。しかしながら、これまでに室内実験で層構造標的におけるクレーター形成過程を調べた研究は少なく、特にクレーターサイズに対する各層の強度と層厚の影響は未解明である。そこで、本研究では、レゴリスに覆われた基盤岩を持つ小惑星のクレーター形成過程を調べることを目的として、層構造を持つ小惑星を模擬した標的へのクレーター形成実験を行い、レゴリス層の厚みと基盤岩強度がクレーター形成過程に与える影響を調べた。実験は宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて行った。標的には基盤岩として砂と石膏の混合物を用い、砂と石膏の混合比を変えることにより基盤岩の引張強度を変化させた(20.4~364 kPa)。この上に粒子層として粒径100 μ mの石英砂を0~100 mmの厚みで敷いた。衝突弾丸には直径1 mmおよび2 mmのアルミ球を用い、衝突速度は2 km/sとした。クレーター形成の様子は標的の真横および真上から可視光カメラで撮影した。さらに、赤外線カメラを用いてクレーター形成時の標的の温度変化の様子を標的の真上から観測した。

実験の結果、クレーター形態は粒子層の厚みが減少するにつれてお椀型から平底型、同心円型クレーターへと変化した。また、基盤層の強度が大きくなると、平底型と同心円型クレーターの境界となるような粒子層の厚みが減少した。クレーターサイズに関しては、平底とピット半径は粒子層の厚みが減少するにつれて増加し、粒子層に形成されるクレーターリム半径は、同心円型クレーターが形成される場合に同じ衝突条件で均質砂標的に形成されるクレーターリム半径より小さくなった。

標的の真上方向から撮影した可視光カメラにより、平底半径の時間変化を観測した。平底型クレーターができるような粒子層の厚み領域では、平底部分が時間の経過とともに成長したのち、クレーター壁面が崩れることにより縮小する様子が見られた。また、赤外線カメラでは、衝突点近傍で圧縮加熱された石英砂の粒子移動の様子が確認できた。お椀型クレーターが形成される場合、この加熱された石英砂はクレーター中心付近に残った。平底型クレーターが形成される場合、加熱された石英砂は平底部分の外縁部となってクレーターの底面に環状に広がっていた。同心円型クレーターの場合、加熱された石英砂がクレーター外部に放出されたと同時に、基盤層のイジェクタが高温プルームとして鉛直上向き方向に放出される様子が確認された。

この結果より、粒子層と基盤層からなる層構造標的における、クレーターの形成時に発生する掘削流の挙動について考察した。例えば、平底クレーターが形成されるような粒子層の厚み領域では、掘削流は基盤層にまで達した後に、それ以上基盤を掘削できないために基盤層と粒子層の境界部分を沿うように動径方向へ進む掘削流へと変化すると考えられる。このようにして平底部分の形成が終了した後、クレーター壁面の角度が粒子層の安息角と等しくなるようにクレーター壁面が崩れていると考えられる。

鉄・岩石ラブルパイル天体模擬試料への衝突破壊実験及び三次元軌道解析

○松阪竜希¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 白井慶¹, 横田優作¹, 笹井遥¹, 宇都宮忠勝¹

(1. 神戸大学大学院理学研究科)

太陽系には多くの小惑星の存在が確認されており,それらは太陽系形成初期の始源的な状態を現在まで保持しているとされている。そのため,太陽系天体の形成と進化過程を解明するために小惑星が経験した衝突・再集積過程を研究することは重要である。天体の衝突破壊・再集積により小惑星はラブルパイル構造を有すると考えられている。つまりラブルパイル天体の衝突破壊現象についての研究は,惑星形成過程を解明する鍵となる。また小惑星はその構成物質から数種類に分類されるが,岩石と鉄コアの二層に分化した微惑星の衝突破片もしくは再集積過程によって形成された M 型小惑星は S 型や C 型と比べて少ない。先行研究では玄武岩標的に対する衝突破壊実験が行われている。玄武岩標的の衝突破片の運動を計測して,弾丸の運動エネルギーから玄武岩破片の運動エネルギーへのエネルギー分配効率を推定すると 1%程度であることがわかっている。しかし鉄ラブルパイル天体を模擬した研究は多くはない。本研究では鉄ラブルパイル天体を模擬した標的試料に対して衝突破壊実験を行い,標的試料である鉄球間の接着剤強度の違いが飛散する鉄球にどのように影響するのかに着目して研究を進めた。また対照実験として岩石質ラブルパイル天体を模擬したガラス球構成標的にも同様の実験を行い比較した。

ラブルパイル天体を実験室規模で模擬するために標的試料の構成粒子として直径 6mm,10mm の鉄球とガラスビーズを用いた。接着剤には石膏と瞬間接着剤を用いた。標的試料は最密充填になるように組んで紡錘型にした。標的試料サイズは 30~140g の範囲で用意した。神戸大学の縦型一段式軽ガス銃を用いて衝突実験を行い,標的は真空チャンバーにセットし,1000 Pa 以下に排気した。弾丸には直径 10mm のナイロン球を使用し,衝突速度 v_i は 60~250m/s の範囲で実験を行った。解析では構成粒子の三次元速度データを得るために,二台の高速カメラを用いて同期撮影した。撮影した画像は,カメラキャリブレーションにより,実空間の 3次元位置データに変換し,弾丸衝突後の構成粒子の軌道を再現して解析した。

接着剤の強度により運動エネルギー変換効率に多少の違いは出たもののガラスビーズで 12~13%程度,鉄で 20%程度となった。この結果は先行研究で示された玄武岩の 1%と比較して大きな値となった。本来は岩塊同士に結合力を持たないラブルパイル構造を有する標的の構成粒子は,粒子間結合の破壊にエネルギーを必要としないために弾丸の運動エネルギーが構成粒子に効率よく伝わっていることがわかる。中間速度(構成粒子を遅いものから並べたときに,粒子の積算質量が元の標的質量の 1/2 になるときの粒子の速度)は凍結粘土標的,多孔質石膏標的と比較して鉄ラブルパイル標的では大きくなった。鉄ラブルパイル天体は衝突破壊後に他の天体と比較して構成粒子の速度が大きくなることを示唆している。構成粒子が 10mm の標的試料では,6mm のものと比較して同程度のエネルギー密度の衝突において中間速度のばらつきが小さくなり,中間速度も大きくなった。このことから 10mm 球によって構成されている標的試料の方が作成試料ごとの実験再現性が高くなっており,結合強度の影響も小さいことがわかった。10mm 球構成試料において,ガラス標的より鉄標的の方が,中間速度が大きいことが判明した。ガラスよりも鉄の方が,エネルギー分配効率が高いという結果になった。

はやぶさ 2 分離カメラ画像を用いた SCI 衝突イジェクタの非対称分布復元 Asymmetric Distribution of SCI Impact Ejecta Observed by Hayabusa2's Deployable Camera

○菊地翔太¹、和田浩二²、白井慶³、石橋高²、門野敏彦⁴、杉田精司^{5,2}、横田康弘⁶、
黒澤耕介^{3,2}、鳶生有理⁶、坂谷尚哉⁶、小川和律⁶、澤田弘崇⁶、荒川政彦³

¹国立天文台、²千葉工業大学、³神戸大学、⁴産業医科大学、⁵東京大学、⁶JAXA

天体衝突により掘削されるイジェクタは、天体の表層進化や惑星間での物質輸送を担うため、その力学的特性を正確に把握することは重要なテーマである。衝突イジェクタの挙動は多くの地上実験や数値計算で特徴づけられている反面、実際の宇宙環境における振る舞いについての理解は限定的である。数少ない宇宙実証の 1 つが、はやぶさ 2 が 2019 年に小惑星リュウグウで行った、Small Carry-on Impactor (SCI) による衝突実験である[1]。はやぶさ 2 の分離カメラ (DCAM3) によって SCI イジェクタカーテンの成長過程が捉えられ、イジェクタカーテンの形状が非対称だったことも分かった[2][3]。イジェクタ堆積厚の非一様性は、はやぶさ 2 の望遠光学航法カメラ (ONC-T) による SCI 衝突前後の地表観測からも示唆されている[4]。従前の研究で、DCAM3 の画像からカメラ自身の軌道-回転運動および画像歪みを決定した[5]。本研究では、この幾何学情報を用いることで、3 次元的な SCI イジェクタカーテン形状の経時変化の復元を試みた。

まず、DCAM3 画像を用いて、比較的鮮明に観測された北側のイジェクタカーテンの形状変化から、イジェクタ速度スケールリング則や Z モデルに係る物理パラメータを推定した。これにより、衝突点からの距離ごとのイジェクタ放出速度や放出角を表すモデルを構築した。次に、人工クレータ付近における SCI 衝突前後の ONC-T 輝度変化マップを用いて、衝突点から見た方位角ごとの放出効率（実際のイジェクタ質量と理想的質量（既存の理論による推定値）との比）を求めた。DCMA3 画像から求めたイジェクタ速度スケールリング則と、ONC-T 画像から求めた放出効率の方位角依存性ことから、テスト粒子の軌道を数値積分することで、時刻ごとの 3 次元的な SCI イジェクタ分布を求めた。このイジェクタの面密度プロファイルは、実際の DCAM3 による観測結果とよく整合しており、復元したイジェクタ非対称放出モデルが概ね妥当であることを示唆している。

DART の Dimorphos への衝突でも、同様の非一様なイジェクタカーテンが観測されている[6]。本研究は、DART ミッションでの観測結果の解釈や、衝突後の Didymos-Dimorphos を近接観測すべく 2024 年 10 月に打ち上げ予定の Hera の観測計画立案にも貢献しうる。

- [1] Arakawa et al. (2020), *Science*, 368, 67–71.
- [2] Wada et al. (2021), *Astronomy and Astrophysics*, 647, A43.
- [3] Kadono et al. (2020), *The Astrophysical Journal Letters*, 899, L22.
- [4] Honda et al. (2021), *Icarus*, 366, 114530.
- [5] Kikuchi et al. (2024), *Advances in Space Research*, 74, 899–936.
- [6] Dotto et al. (2024), *Nature*, 627, 505–509.

内海を覆う氷地殻上のクレーター形成実験

○菊川涼介¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 豊田優佳里¹, 笹井遥¹, 白井慶¹, 石井竣基¹

¹神戸大学理学研究科惑星学専攻実験惑星科学研究室

木星の衛星エウロパや土星の衛星エンセラダスなどは地下に内海を有する氷衛星であると言われており、内海における生命の存在の可能性が指摘されるなど、注目を集めている。これらの氷衛星は衝突現象によると考えられるクレーター地形など、さまざまな表面地形を持つが、内海を有する氷衛星における衝突の物理には、いまだ解明されていない点も多い。

このような氷衛星の表面地形に関して、氷地殻・内海を模擬した標的を用いた研究が行われてきたが、これまでの研究では表面の氷上に形成した地形に着目したものが多く、衝突時の内海に着目した研究はなかった。そこで本研究では、内海を覆う氷地殻を再現した標的への衝突実験を行い、内海の有無や氷の厚みの変化がクレーター形成や内海にどのような影響を及ぼすのかについて研究を行った。

標的は、主に内径 7.4cm×7.4cm×7.4cm のアクリルボックスに厚みを変えた氷板をはめ込み、その下に、内海を模擬したシリコンオイル(粘度 10cSt)を充填することで作成した。また、比較のため厚みを変えた純粋な氷板標的も作成した。標的の氷板の厚みは約 2.5-22mm であり、標的は全て-15℃の低温室内で作成した。実験は、神戸大学の-15℃の低温室に設置された横型二段式軽ガス銃を用いて、直径 1mm、2mm のアルミ球を衝突速度約 1km/s、3km/s で衝突させることにより行った。全ての実験は高速ビデオカメラを用いて撮影し、内海の観察を行った。また、回収破片の解析も行った。

実験の結果、氷板上のクレーター形状に関しては氷の厚み T (mm) の増加に伴いクレーター直径 d (mm) が $d=0.94T+7.2$ で大きくなり、また、シリコンオイルの有無によりクレーター直径は概ね変化しないことが分かった。次に、内海の様子に関しては、シリコンオイル上の氷板試料では、氷板のみの試料に比べて、衝突点の反対側から放出される破片の速度(反対点速度)が減少し、氷の厚み T (mm) の増加に対し反対点速度 V_a (m/s) が $V_a=1560T^{-2.3}$ で変化し、最大約 200MPa の圧力が氷-シリコンオイルの境界で発生することがわかった。また、氷板の一部や弾丸がシリコンオイルへと輸送されることなどが分かった。以上の結果から、内海上の氷地殻にクレーターが形成した場合、地殻を貫通するクレーター孔ができることがあり、表層物質が内海へと輸送されることがわかった。さらにクレーター形成に伴い発生した衝撃圧は、地殻・内海の境界面で約 200MPa に達し、その後、徐々に内海へと減衰しながら広がっていくことがわかった。また、氷の厚みとクレーター直径の関係から、実際の天体において観測されるクレーターのサイズが、氷の厚みを反映している可能性があることがわかった。

氷微惑星の層構造が及ぼす衝突破片の質量速度分布への影響

石井竣基¹、江口祐樹¹、保井みなみ¹、荒川政彦¹、豊田優佳里¹、長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科、²宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構

彗星やカイパーベルト天体は氷微惑星の生き残りであると考えられており、「惑星形成を明らかにする鍵」である。この氷微惑星の高速衝突は、太陽系外縁部の惑星形成過程で最も重要な素過程と言える。氷微惑星は、そのサイズに従って内部が熱進化し、サイズの大きな氷微惑星では層構造を形成していると考えられているが、そのような層構造を持つ氷微惑星を模擬した実験的研究はほとんど行われていない。

本研究の目的は、氷微惑星の重力支配域における衝突破壊強度を研究することでその再集積過程への内部構造の影響を明らかにすることである。そのために均質構造と層構造の2種類の標的を用意し、強度支配域の衝突破壊強度と破片の質量-速度分布を求めた。その結果を用いて、再集積過程を推定することで重力支配域での衝突破壊強度を明らかにした。

均質構造の標的は、直径 60mm, 100mm の雪球と氷球の二種類を用意した。氷と雪の空隙率はそれぞれ $3 \pm 0.5\%$, $50 \pm 1.0\%$ である。層構造標的では、コア直径 30mm + マントル厚さ 15mm とコア直径 50mm + マントル厚さ 25mm の二種類を用意した。コア、マントルの空隙率もそれぞれ $3 \pm 0.5\%$, $50 \pm 1.0\%$ である。衝突実験は、神戸大学と宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃を使用し、衝突速度は 0.8~3.5km/s で実験を行った。神戸大学では、衝突破壊の様子を標的眞横・眞上の2方向から撮影した。また、均質構造と層構造ともに半球を準備し、その断面にランダムパターンを黒砂で塗布して高速カメラで撮影した。その画像をデジタル画像相関法(DIC)で解析することにより、断面の速度分布を求めた。宇宙科学研究所の実験では、標的内部にトレーサー粒子を12個均等に配置し、衝突後 1ms 以内にフラッシュ X 線撮影を行うことで、トレーサー粒子の移動速度を求めた。その解析結果から、試料の破片速度分布を推定した。

実験の結果、均質構造を持つ雪球の強度支配域の衝突破壊強度は 315J/kg と求められた。一方、層構造標的の強度支配域の衝突破壊強度は 63J/kg と求めることができ、均質構造標的よりも小さい値となった。一方、反対点速度は層構造の方が均質構造よりも速くなった。このことから、同一エネルギー密度の衝突を比較した場合、均質構造を持つ雪天体は、熱進化した氷コア・雪マントル天体よりも再集積しやすいと考えられる。DIC 解析及びフラッシュ X 線画像の解析では、ともに層構造の場合はコアがマントルを押し出しており、破壊した氷コアの破片によって雪マントルが押されて加速していることが分かった。DIC 解析から、このように破壊した氷コアの破片は、雪マントルよりも速い速度を持ち、雪マントルを加速するが、衝突後約 3.5ms 経過すると雪マントルと同じような速度となることが明らかになった。また、フラッシュ X 線画像の解析から、ある速度より遅い破片の積算質量が、標的質量の 1/2 となる速度（中間速度）を求めると、層構造試料は均質構造試料の中間速度と同程度か速い速度を持っていることが分かった。これは、熱進化して氷コアと雪マントルを持つ天体は、均質天体よりも再集積が起り難いことを示しているのかも知れない。

小天体衝突が系外惑星の大気運動に与える影響

○ 御子 裕治¹, 小林 浩¹

¹ 名古屋大学

惑星大気の形成や進化には衝突過程が大きな鍵を握っている．小惑星や彗星といった小天体が惑星に衝突する際に生じる蒸気プルーム内は高温・高圧になり，内部では窒素といった二次大気形成を促すだけでなく，生命の誕生に欠かせない有機分子を生成する化学反応が進行する．一方，惑星大気は地表からの熱による対流運動が存在しており，小天体衝突による大気の擾乱と相互作用することで，対流の強さや形状などに大きな影響を与える可能性がある．そこで，衝突後の大気の運動と熱状態をシミュレーションして，これらの相互作用を明らかにする必要がある．

本研究では公開コード Athena++ を用いて大気の運動をシミュレーションする．通常，対流現象を考える際は非圧縮近似が用いられることが多いが，まずは圧縮性流体を扱うコードである Athena++ で熱対流が取り扱えるかを調査した．上下の二つの熱源に挟まれた流体の熱対流はレイリー数と呼ばれる無次元量によって特徴づけられ，流体の上下の境界が剛体境界の場合，系のレイリー数 R が臨界レイリー数である $R_c \sim 1.7 \times 10^3$ を上回ると対流不安定となる (Chandrasekhar 1981)．本研究では，一様重力が働く二次元領域内の上部に低温熱源，下部に高温熱源を設置し，一定の温度勾配を持つ流体層で対流が発生するか，レイリー数を変化させて確認した．下部を剛体境界，上部を滑りなし境界，左右を周期境界として， $R \sim 10^1$ から $R \sim 10^7$ までの範囲で数値計算を行った結果，系のレイリー数が臨界レイリー数を超えると対流が起こることを確認した．

次に，地表温度を 300 K とし，高度 10 km までは一定の温度勾配 (10 K/km) で温度が低下する層，高度 10 km 以上では 200 K の等温層となるような鉛直構造を持つ大気を用いて地表付近の対流圏を再現した．その後，対流が発生している地表付近に衝突蒸気雲が発生した状態を初期条件として，シミュレーションを実施した．これに伴い，左右の境界は流出境界に変換した．衝突体は衝突の瞬間に同質量の衝突蒸気雲に変化したものと考え，衝突体の持つ運動エネルギーがすべて蒸気雲の内部エネルギーに変換されたと仮定して，蒸気雲の初期状態を決定した．本発表では，この結果をもとに衝突が対流運動に与える影響についてを議論する．

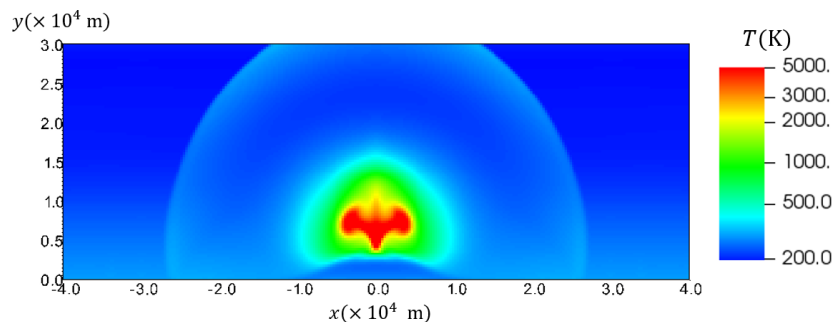


図 1: 質量 $3.7 \times 10^8 \text{ kg}$ (球状の玄武岩の場合，直径はおよそ 60 m) の小天体が衝突速度 20 km s^{-1} で衝突した際の温度 T の分布． x, y はそれぞれ水平方向と鉛直方向の座標を表す．地表付近のレイリー数は $R = 3 \times 10^7$ である．衝撃波とともに高温の衝突蒸気雲が生成される様子が読み取れる．

はやぶさ 2 の拡張ミッションの状況

○三榎裕也、田中智、佐伯孝尚、吉川真、津田雄一¹

¹ 宇宙航空研究開発機構（JAXA）

2014 年 12 月に打上げられた小惑星探査機はやぶさ 2 は、2018 年 6 月に目的の小惑星リュウグウに到着し、約 1 年半の近傍運用の間、数々の成果をあげた。その後、リュウグウで得られたサンプルは再突入カプセルへと格納され、2020 年 12 月 6 日に地球帰還を果たした。この際、再突入カプセルを分離した探査機本体は大気圏突入を避ける軌道変更を行い、再び深宇宙の旅へと飛び立っており、探査機は現在も運用を継続している。予定されていた地球帰還までのメインミッションを全て順調に終えた探査機には十分な燃料が残っており、新しい天体への旅が可能となった。残された燃料によって到達可能な天体を探索し、理学的・工学的な評価の末、1998 KY26 という超小型の高速自転小惑星を拡張ミッションの最終目的地として選択した。また、この拡張ミッションでは、小惑星 1998 KY26 へのランデブー探査のみに留まらず、その過程で複数のミッションを計画している。2026 年 7 月には小惑星 2001 CC21 にフライバイを行い、そのおよそ 1 年半後の 2027 年 12 月に地球スイングバイ、さらに半年後の 2028 年 6 月に地球に再会合して、より太陽から遠ざかる方向へと大きく軌道を遷移させ、2031 年 7 月に最終目標天体 1998 KY26 に到着予定である。本ミッションの意義として、以下の 3 点を掲げている。

- (1) 太陽系長期航行技術の進展
- (2) 高速自転する小型小惑星探査の実現
- (3) Planetary defense に資する科学と技術の獲得

本稿では、これらの拡張ミッションに関する計画と、地球帰還以降現在まで進行中の、はやぶさ 2 の運用状況について紹介する。

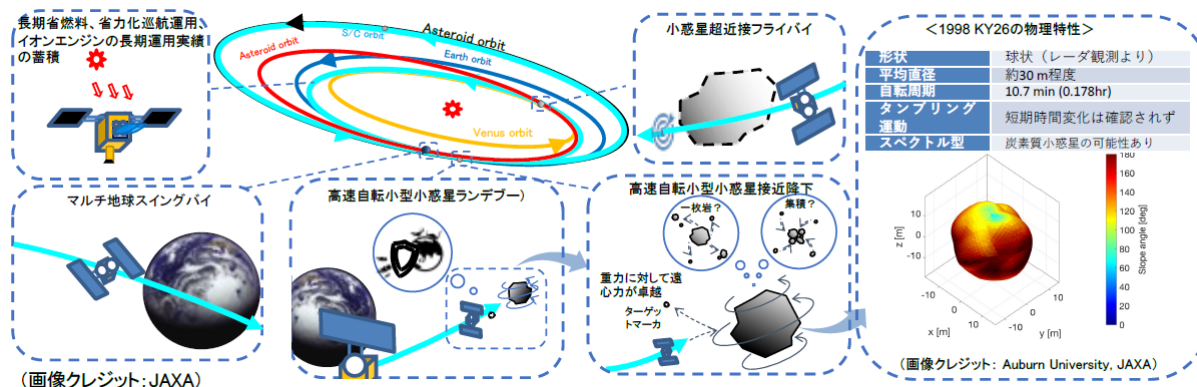


図1 はやぶさ 2 拡張ミッション概要図

次世代小天体サンプルリターンを実現する 探査システムと軌道間輸送機

○佐伯孝尚¹, 津田雄一¹, 森治¹, 相子康彦¹, 松本純¹, 伊藤琢博¹,
高尾勇輝², 菊地翔太³, 黒川宏之⁴, 鳶生有理¹, 坂谷尚哉¹,
深井稜汰¹, 岡田達明¹, 田中智¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²九州大学, ³国立天文台, ⁴東京大学

小惑星探査機「はやぶさ2」は、小惑星「リュウグウ」における2回のタッチダウンによって採取したサンプルの入った再突入カプセルを2020年12月6日に地球に帰還させた。サンプルは現在世界中で分析が行われている。

このような状況の中、現在2030年代の打ち上げを想定した、次世代小天体のサンプルリターンミッションの検討が進められている。理学的観点からは、イトカワ(S型)、リュウグウ(C型)より始原的な天体を探査し、太陽系の起源に迫るサイエンスを展開することを目指している。目標天体としては、木星族彗星289P/Blanpain等が候補に挙げられている。

工学的には、太陽系探査の目標である「より遠くへ」、「より自在に」を実現するべく、日本が未経験である木星圏の飛行を実現しつつ、重力天体を含む将来の多様な天体のミッションに繋げることを目指している。

探査システムとしては、探査の自在性を向上させるため、複数探査機システムを導入し、深宇宙航行を受け持つ「往還機」と、現地での着陸探査を受け持つ「着陸機」の構成を考えている。目標天体到着後、着陸機は往還機から分離し、サンプルを採取し、往還機に再結合し、採取サンプルの引き渡しを行う。このような複数探査機システムとすることで、巨大な探査機では困難で非効率な着陸探査を実現可能とする。また、はやぶさ2の教訓である複数回タッチダウンのリスクを下げるのが可能である。さらに、往還機と着陸機を独立に設計でき、効率的な開発が可能となる。

上記の利点に加え、往還機を複数ミッションで共通的に利用可能な深宇宙輸送機(DSOTV, Deep Space Orbit Transfer Vehicle)とし、DSOTVにミッション特化のペイロードを組み合わせることで、コストや開発期間を抑えて探査ミッションを実現し、太陽系探査の高頻度化と予見性の確保を行うことが可能となる。

発表では、探査システムの検討状況を中心に示す。現時点での探査システムの構成やシステム成立性の検討結果を示すとともに、ミッションを実現するためのキー技術およびその検討状況を示す。また、DSOTVとして、実現可能なミッションの例について示すことで、小天体サンプルリターンだけでなく、日本の太陽系探査の将来についての議論を促したい。

オシリス・レックス帰還試料の JAXA キュレーションにおける受入状況

○矢田達¹、安部正真¹、深井稜汰¹、西村征洋¹、岡田達明¹、畠田健太郎²、与賀田佳澄¹、宮崎明子³、榎戸祐馬¹、田原瑠衣¹、川崎盛矢¹、石崎拓也¹、小嶋智子¹、長島加奈¹、金丸礼¹、中野有紗¹、古川聡一郎³、熊谷和也²、人見勇矢²、副島広道²、中田彩子¹、嶋内由利子¹、玉野井健¹、ピロージュ・セドリック⁴、ハム・ヴァンサン⁴、ローリー・リオネル⁴、ロイゾー・ダミアン⁴、ブルネット・ロザリオ⁴、ビブリン・ジャンピエール⁴、森将輝³、湯本航生¹、長勇一郎³、杉田精司³、スタビンズ・ロジャー⁵、亀田真吾⁵、橘省吾^{1,3}、臼井寛裕¹

¹宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、²マリンワーク・ジャパン、³東京大学宇宙惑星科学機構、⁴仏パリ・サクレ大宇宙物理研究所、⁵立教大学理学部

今夏、JAXA は NASA 探査機 OSIRIS-REx が B タイプ小惑星ベヌーから帰還した試料のうち 0.55 wt%、重量にして約 660mg を受け入れる予定である。JAXA キュレーションでは、ベヌー試料専用のクリーンルーム(ISO クラス 6)、クリーンチェンバー(CC)を準備し、窒素封入されて届く試料容器を高純度窒素環境下の CC に導入して、リュウグウ試料と同様に初期記載を実施する。

まず、CC5-1 に導入した NASA 試料容器の開封とバルク試料・容器の取り出しをそのチェンバー内で行った後、バルク容器ごと CC5-2 に移動し、CC5-2 内設置のマイクロ電子天秤 A&D AD-4212D で秤量を実施する。次にチェンバー上部に設置されているデジタル光学顕微鏡 Keyence VHX-8000 で顕微鏡写真撮影を実施する。初期記載として赤外スペクトル分析を CC5-2 付属チェンバー上に設置した μ FT-IR JASCO IRT-5200 及び CC5-1 付属チェンバー上に設置した MicrOmega により行う。前者は、リュウグウ試料初期記載で使用されていた FT-IR より空間分解能力が 10-100 倍高く、スペクトル範囲も 2-5 μ m から 2-13 μ m と広がった。後者はリュウグウ試料初期記載に用いられていたもので、同一装置によるリュウグウ・ベヌー試料の測定による比較が出来ると考えている。可視領域の分光測定として、リュウグウ試料初期記載と同様の ONC-T(6 波長フィルター付きデジタル光学顕微鏡)分析に加え、将来ミッションである火星衛星探査(Martian Moons eXploration, MMX)探査機の周回・着陸機に搭載される 7 波長光学分光カメラ OROCHI による分析も行い、MMX 探査機搭載機器の実小惑星試料による機器校正が出来ると考えている。

上記の分析機器によるバルク試料の初期記載を終えた後、CC5-2 に設置されている真空ピンセットにより 1mm 以上の個別粒子ピックアップを実施し、バルク試料と同様に初期記載を実施する予定である。これらの初期記載データは「ベヌー試料データベース」として、JAXA キュレーションのホームページに 2025 年初頭を目処に公開され、JAXA による第 1 回ベヌー試料研究国際公募を開始する予定である。同じ時期に第 6 回リュウグウ試料研究国際公募も実施する予定で、JAXA キュレーションは、リュウグウ試料との類似が指摘されているベヌー試料の相互比較研究を推進し、太陽系物質科学研究の進展に貢献していく所存である。

はやぶさ 2 クリーンチャンバー内の微粒子とその起源

○金丸 礼¹、榎戸 祐馬¹、西村 征洋¹、深井 稜汰¹、菅原 春菜¹、矢田 達¹、中野 有紗¹、
与賀田 佳澄¹、畠田 健太郎²、熊谷 和也²、人見 勇矢²、坂本 佳奈子¹、安部 正真¹、岡
田 達明¹、臼井 寛裕¹

¹JAXA 宇宙科学研究所、²マリンワークジャパン

JAXA 地球外物質キュレーションセンターに輸送された小惑星帰還試料は、地球上での汚染・風化を防ぐために、純窒素ガス環境のクリーンチャンバー（以下、CC）内での保管・ハンドリングが実施されている。CC では試料の汚染を防ぐために、従来から素材の制限や持ち込み品の洗浄手法の開発、そして環境モニタリングによりその清浄度をコントロールしている[1]。例えば、水分、酸素、二酸化炭素およびメタン量は、API-MS により常時モニタリングされている。また、有機・無機物質については、主にウエハ放置法によるサンプリングと質量分析法に基づく環境評価を年数回実施している[2, 3]。一方、数十 μm から数百 μm サイズの微粒子そのものに着目した環境モニタリングはこれまで系統的には実施されていない。

今回、CC 内、特にはやぶさ 2 帰還試料の保管・ハンドリングを行う CC4-1, 4-2、の微粒子に関する調査を行うため、CC から搬出された直後の物品に付着している微粒子を回収した。これにより CC 内を汚染することなく、間接的に CC 内に存在する微粒子の特定が可能である。これら微粒子の観察・同定には、EDS 検出器を搭載した FE-SEM (SU6600 : 日立ハイテク) を用いた。

回収された微粒子は数十 μm サイズのものが多く、SEM-EDS 分析によりこれはアルミ合金、SUS304 およびシリケートと同定された。アルミ合金、SUS304 は CC 本体および CC 内で使用するツール類の主要構成物である。シリケートはタルクに類似する組成を示し、グローブの添加物と一致する。これらの結果は、CC 構成物同士が摩擦などで発塵し、発生した微粒子が CC 底面に堆積、静電気でグローブに付着、などの形で CC 内に存在することを示唆している。一方で、今回観察された微粒子がリュウグウ粒子に付着しているという報告はない。これは、試料ハンドリングの際に異物混入の可能性を低減させる工夫として、1) リュウグウ粒子は分取作業や分析時以外は蓋つき容器内で保管、2) リュウグウ粒子に触れる物質は試料容器（サファイアガラス）および試料分取用ツール（真空ピンセット・スパチュラ、材質:SUS304）のみ、3) ハンドリング時に試料上面をグローブが通過しない運用を実施していることに起因すると考えられる。現状、これら微粒子による帰還試料への直接的な影響は認められないが、今後これら CC 内微粒子監視プロトコルを確立するとともに、微粒子発生頻度低減方法の検討を行う。

参考文献 [1] Yada et al. Earth, Planets and Space (2023). [2] Hitomi et al. JAXA Special Publication (2023). [3] 中野ほか, 地球化学会 第 71 回要旨 (2024)

始原的小惑星族の分類

○巽瑛理¹、Vilas Faith²、de León Julia³、Popescu Marcel⁴、長谷川直¹、De Prá Mario⁵、
Tinaut-Ruano Fernando³、Licandro Javier³

¹JAXA 宇宙科学研究所、²Planetary Science Institute、³Instituto de Astrofísica de Canarias、
⁴Astronomical Institute of Romanian Academy、⁵Florida Space Institute

はじめに：始原的小惑星は主に層状ケイ酸塩や有機物でできていると考えられている。これらの物質は特に近紫外域（NUV）に大きな反射率変化があることが室内実験から示唆されている[1]。特に、層状ケイ酸塩は小惑星・微惑星形成時の水分布、温度、圧力などの情報を反映していると考えられ、層状ケイ酸塩の有無や構造により太陽系初期の状態を制約することにつながる。小惑星族は一つの大きな微惑星が衝突破壊されることにより形成される小惑星群であり、この小惑星族の組成は、微惑星内部の構造を知る手掛かりとなる。

手法：本研究では 38 の始原的小惑星族に属する小惑星の近紫外～可視（NUV-VIS）の反射率をフィルター分光カタログ、Eight Color Asteroid Survey（ECAS）[2]と Sloan Digital Sky Survey（SDSS）[3]から収集し、Tholen 分類[4]により小惑星をスペクトル型に分類した。それぞれの小惑星族のスペクトル型構成比率により、小惑星族を 10 個のタイプに分類した。また、それぞれの小惑星族の平均アルベド、VIS スペクトル傾斜、NUV 吸収度、0.7 μ m 吸収度、近赤外（NIR）スペクトル傾斜も同時に調べた。

結果と考察：NUV 吸収度と 0.7 μ m 吸収度にはやや強い相関が見られた。このことから、NUV 吸収度が Fe に富む層状ケイ酸塩の良い指標になることが示唆された。また、NUV 吸収度はアルベドと相関し、VIS スペクトルスロープはアルベドと逆相関することがわかった。つまり、Fe に富む層状ケイ酸塩を主な構成要素とする小惑星族は比較的明るく、VIS 域では青く見えるということが示唆された。唯一 Pallas 族だけ、非常に明るく、このトレンドに全く乗らないため、Pallas 族は特有の形成条件もしくは形成領域である可能性がある。

スペクトル型で分類すると、Pallas は唯一 B 型が半数以上を占める小惑星族であった（Pallas タイプ）。さらに、リュウグウや Bennu の母天体として注目される Polana-Eulalia 族は 90%程度が F 型であった。このように F 型が過半数を占める小惑星族は他に、Clarissa 族、Hoffmeister 族、Mitidika 族、Theobalda 族がある（Polana-Eulalia タイプ）。Clarissa 族は特に内側小惑星帯、低い傾斜に位置しており、リュウグウや Bennu の母天体である可能性がある。F 型は NUV 吸収が小さいことが特徴であり、Mg に富む層状ケイ酸塩及びマグネタイトの存在が示唆される[5]。NUV 域は宇宙風化の影響を受けることも示唆されていたが、衝突破壊年代が 7Myr[6]と非常に若い Theobalda 族も F 型を主に構成していることから、単純に宇宙風化により F 型になるというシナリオでは説明がつかない。G 型小惑星は対照的に非常に NUV 吸収度が大きく、Fe に富む層状ケイ酸塩を主とすると考えられる。G 型小惑星が過半数を占める小惑星族には Veritas 族や Inarradas 族が見つかった。

参考文献：[1] Hiroi and Zolensky (1999), *Antarct. Meteorite Res.*, **12**, 108-116. [2] Zellner et al. (1985), *Icarus*, **61**, 355-416. [3] Segeyev and Carry (2021), *A&A*, **652**, A59. [4] Tholen (1984) PhD Thesis, Arizona Univ. [5] Tatsumi et al. (2023), *A&A*, **672**, A189. [6] Novaković (2010), *MNRAS*, **407**, 1477-1486.

はやぶさ 2# 広角カメラ ONC-W2 による 彗星 C/2023 A3 の観測速報

Preliminary report of observation of comet C/2023 A3 by
Hayabusa2# Wide-angle Camera ONC-W2

○横田康弘¹、神山徹²、諸田智克³、坂谷尚哉¹、杉田精司³、山田学⁴、巽瑛理¹、松岡萌²、
早川雅彦¹、湯本航生¹、河北秀世⁵、新中善晴⁵、本田親寿⁶、長勇一郎³、亀田真吾⁷、
鈴木秀彦⁸、吉岡和夫³、澤田弘崇¹、小川和律¹

¹JAXA、²産総研、³東京大、⁴千葉工大、⁵京都産業大、⁶会津大、⁷立教大、⁸明治大

深宇宙を航行中の はやぶさ 2# は、約 2 年後の 2026 年に小惑星 2002 CC21 をフライバイし、2031 年に小惑星 1998 KY26 へ到着予定である。長い航行期間の活用として、光学航法カメラ ONC[1]の理学チームでは望遠カメラ ONC-T を用いた黄道光観測[2]と系外惑星観測[3]を継続している。他方、我々はさらに ONC の活用を探り、広角カメラ ONC-W2 の軌道上で確認された性能[4]により 2024 年 8 月頃に彗星 C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) を 1au 以内から観測可能と見出した。2023 年 1 月に発見されたこの彗星は、今年 2024 年 9 月 27 日には近日点を通過し、10 月の地球からの観測好機には明るい肉眼彗星になると考えられていた。しかし、2024 年 5 月ごろ増光が予想よりも低くなったことから、JPL の Zdeněk Sekanina は既に分裂していると予測するプレプリントを今年 7 月に投稿している[5]。他方でその後は順調に明るさが増しているとの報告もあるなど、継続的な観測が世界中で実施されている。ここでこの彗星は 8~9 月には地球からみて太陽の向こう側にあるため、地上観測が困難である。そのため、C/2023 A3 を視野に収められる はやぶさ 2# の宇宙望遠鏡としての価値は非常に高いものとなる。

C/2023 A3 を はやぶさ 2# で観測する利点は以下の 3 点にまとめられる。(1) 地上観測のできない期間を埋めるデータが得られる。(2) 地球からとは異なる観測角度のため地上観測を立体的に補完できる。(3) 天候に左右されない 2~3 週間の連続観測が可能である。

パンクロマチックの広角カメラ ONC-W2 は高光量が期待される小惑星近傍観測向けの設計であるため、遠方の暗い対象の観測へ活用するにあたり、我々は迷光対策、感度を補うスタッキングを想定した観測計画、探査機姿勢計画ツールの準備、などを検討した。ONC は彗星 C/2023 A3 の集中観測を 2024 年 8 月 13 日に開始し、1~3 日に 1 回程度の頻度で 8 月末現在も観測継続中である。得られた画像からは低光量ながら彗星像が写っていることが確認できた。ONC による初の彗星撮像の成功である。本発表では観測計画検討の紹介と取得画像の速報を行う。

[謝辞] 計画を議論し実現いただいた はやぶさ 2# システム・SOWG チームに感謝いたします。

[1] Sugita et al. (2019) Science 364, eaaw0422. [2] Tsumura et al. (2023) Earth Planets Space 75, 121. [3] Yumoto et al. (2024) 55th LPSC, Abstract 1774. [4] Tatsumi et al. (2019) Icarus, [5] Zdenek Sekanina (2024) <https://arxiv.org/abs/2407.06166v1>

せいめい望遠鏡によるはやぶさ 2#フライバイ目的天体 (98943) 2001 CC21 の可視光分光観測計画

○関口 朋彦¹, 土井 知也², 高木 聖子², 黒田 大介³, 石黒 正晃⁴, 紅山 仁^{5,6},
Jooyeon GEEM⁴

¹北海道教育大学, ²北海道大学, ³日本スペースガード協会, ⁴ソウル大学, ⁵東京大学,
⁶コートダジュール天文台

はやぶさ 2#フライバイ目的小惑星 (98943) 2001 CC21 が地球に再接近し最も明るくなる 2024 年 11 月 27-28 日, 京都大学せいめい望遠鏡 (岡山県) を用いて可視光分光観測を実施することを計画している(前半夜 2 晩)。天候不順や装置の不具合などがなければ (共同利用観測), 今年度最新のスペクトルデータが得られることが期待される。これまでの 2001CC21 の分光観測では S 型または Sq 型の表面反射スペクトル特性を示すことが報告されている(e.g. Geem+, 2023)。一方小惑星 Phaethon などでは可視光 (特に $0.5\ \mu\text{m}$ 以下の短波長側) でのスペクトル時間変動 (自転位相による表面カラーの非均一性) が報告されており (Lazarrin+, 2019), フライバイ実施前まで継続的に地上からの分光観測を行うことが望まれる。せいめい望遠鏡搭載の可視光測光分光装置 TriCCS は, 3 波長 (フィルター) 同時の高速読み出し撮像が可能であり, かつ $0.4\text{--}1.05\ \mu\text{m}$ 帯を波長分解能 ~ 700 で分光観測することが可能である。本観測計画について報告する。



図 1: 京大 3.8m せいめい望遠鏡 (岡山)

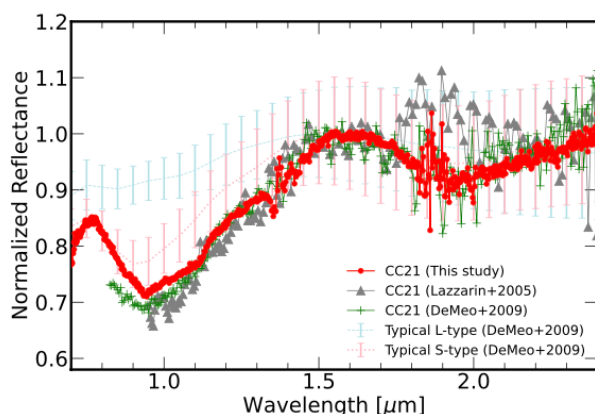


図 2: 先行分光観測結果の例 (Geem+, 2023)

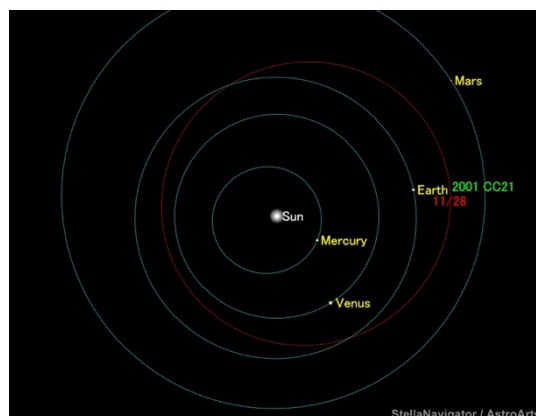


図 3: 2024 年 11 月 28 日の天体配置

NIRS3 観測データの高次プロダクト開発と GIS ソフトウェアでの利用検討

○市川真弓¹, 巽 瑛理¹, 横田 康弘¹, 庄司 大悟¹, 本田 和広¹, 村上 真也¹,
佐藤 広幸¹, 北里 宏平², Riu Lucie³, Deborah Domingue⁴

¹JAXA/ISAS, ²会津大学, ³European Space Astronomy Centre, ⁴Planetary Science Institute

はやぶさ2には様々な種類のセンサ機器が搭載されており、その観測成果はプロダクト化・一般公開され誰でも利用することができる。一方、高次レベルのプロダクトの整備状況や公開形式はプロダクト毎に異なり、特に複数の観測機器データを用いた分析を行うためにはデータに関する専門的な知識が必要となるといった課題がある。

今回、データの利用促進・利便性向上を目的として、はやぶさ2搭載の近赤外分光計(NIRS3)の観測データの高次プロダクト検討を行った。プロダクト検討にあたり、特に次の点を考慮した。①観測箇所など空間的な分布を把握することが容易にできる、②他の観測データと並列で扱うことができる、③一般的なGISソフトウェアで扱うことができる④汎用性があり他の探査機データにも応用が可能である

本発表では、NIRS3の観測データ可視化検討及び開発検討中のプロダクトについて紹介する。プロダクト開発にはSPICEカーネルを用いて計算される観測位置の座標情報とDARTSに公開されているL2プロダクトを使用する。データフォーマットはラスタ形式(GeoTIFF)とベクトル形式(GeoPackage)の2種類を検討した。ラスタ形式のデータは1観測日分の観測情報を平均化したもので、全球の観測傾向を視覚的に確認することができる。ベクトルデータは観測単位の観測範囲と観測結果を個別に確認することができ、ローカルな分析、観測単位の詳細を把握することが可能である。どちらも一般的なGISソフトで利用可能な形式のデータで、ファイルの表示や編集可能な既存ソフトウェアが複数存在する。惑星科学分野以外でも一般的に使われる形式である。いずれも座標情報を持った形式で、同一箇所の他観測日データとの比較や同じく座標情報を持った他の観測機器データとの比較といった空間的な解析が容易に可能となる。また、既存GISソフトのツール群(ラスタ演算、空間統計等)の機能を利用した簡易的な解析が可能であり、ツールの開発やコーディングの手間が省略できるといった利点がある。

今後、NIRS3については併せて検討している熱補正の結果を用いた高次プロダクトの整備を進めていく予定である。また、他の観測機器データについても同様の検討を行い、はやぶさ2の科学的成果の利用促進を図っていく。

謝辞：この研究ははやぶさ2 #国際ビジビリティ事業によりサポートされています。

小惑星探査機はやぶさ2搭載中間赤外カメラ TIR の高次処理データの公開 ～リュウグウの温度・熱慣性マップ～

Data Achieves of Thermal Infrared Imager onboard Hayabusa2

○荒井 武彦¹, 岡田 達明², 田中 智², 出村 裕英³, 坂谷 尚哉², 鳶生 有理²,
千秋 博紀⁴, 神山 徹⁵, 関口 朋彦⁶, 金丸 仁明⁷, 石崎 拓也²,

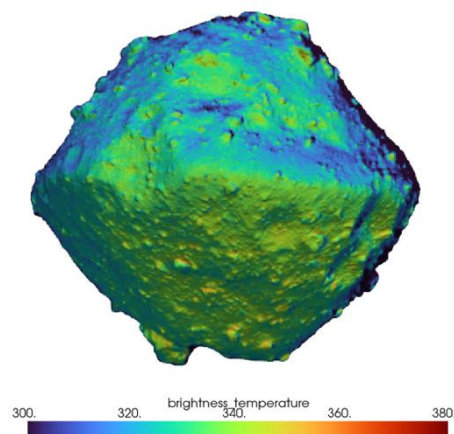
¹前橋工科大学, ²宇宙航空研究開発機構, ³会津大学,

⁴千葉工業大学, ⁵産業技術総合研究所, ⁶北海道教育大学, ⁷東京大学

小惑星探査機はやぶさ2は、小惑星162173リュウグウのその場観測を2018年から2019年にかけて行い、2020年に表層のサンプルを地球に持ち帰った。はやぶさ2搭載中間赤外カメラ(TIR)は、ランデブー時にリュウグウを様々な高度・角度から熱撮像して、表層温度がピクセルスケールよりも微細なラフネスによって均質化されていること、表層が高空隙であること、さらに稀に地球上で採取されている隕石と同等の空隙率の石(冷たい石)が存在することなど、様々な新しい知見を得ることができた(Okada *et al.*, *Nature*, 2020)。本研究では、それらの科学データの源泉としての高次プロダクトデータの構築・公開を目的とする。

TIRの観測データは既に、輝度温度に変換された熱撮像画像(Level1・Level2)がNASA/PDSで公開されており、輝度温度データをリュウグウの形状モデルに投影したマップデータ(Level3)がJAXA/DARTSで公開されている(下図)。現在、高次処理データである表層の熱慣性マップを公開準備中である。リュウグウ表層の熱慣性マップはShimaki *et al.*, *Icarus* (2020)によって明らかにされ、地域毎の物理特性の差異が小さいことが報告されている。表層の熱慣性値を求めるには、表層の熱入出力シミュレーションと観測データを比較解析する必要がある。表層のラフネスモデルを含んだ再現性の高い熱シミュレーションモデルがSenshu *et al.*, *International Journal of Thermophysics* (2022)によって開発されている。熱解析ソフトウェアとして、会津大学の大学院生らが開発しているHEAT(Endo *et al.*, *IEEE Aerospace Conference* (2017)が公開され、TIRのデータ解析機能が充実してきている。

局所地域における熱慣性を精度良く求めるには、地形形状による輻射熱交換の影響を再現する必要があるため、空間解像度の高い形状モデルとラフネスモデルを用いた大規模計算が必要である。現在、ハイスペックコンピュータを用いることによって、最終的な熱慣性マッププロダクトを構築している。



PyAiGIS/AiGIS2: Python と Jupyter Notebook 上で動作する不規則形状小天体探査データの対話的可視化・解析環境

○平田成¹, 永吉司¹, 遠藤威¹

¹会津大学 コンピュータ理工学部

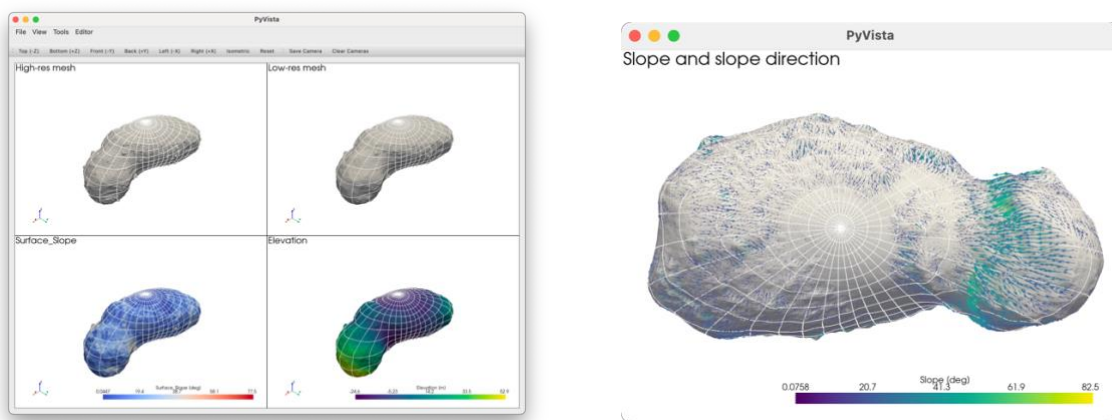
不規則形状小天体探査データの可視化・解析のために、我々はこれまでに三次元地理情報システム AiGIS を開発し、コミュニティに提供してきている。AiGIS はスタンドアロンで動作するアプリケーションであり、不規則形状小天体の形状モデルや形状に関連づけられた地理情報の可視化と解析を行うことができる。しかし、アプリケーションに実装された定型的な機能を利用するだけでは、多様化するデータ種や可視化・解析の方法に対応できない。

この問題を解決するための新たなツールとして、PyAiGIS/AiGIS2 を提案する。PyAiGIS/AiGIS2 は Jupyter Notebook 上で動作する Python ベースの不規則形状小天体探査データの対話的可視化・解析環境である。基盤技術として Visualization Toolkit (VTK) の Python ラッパーである PyVista を活用し、そのほかに Pandas など Python で利用可能な各種のモジュールも組み合わせている。

PyAiGIS/AiGIS2 を用いることで、Python、PyVista に知識のあるユーザは自由に、かつ対話的にデータの読み込み、加工、可視化を行うことができる。また、初心者でも定型的な作業であれば簡単に行えるように、Notebook の雛形を準備して提供している。さらに、将来的には各種処理の手順の関数化、モジュール化を行うことを目指している。

PyAiGIS/AiGIS2 公式ウェブサイト: <https://arcspace.jp/doku.php?id=aigis2:top>

コード例・雛形公開先 GitHub リポジトリ: <https://github.com/AiGIS-PyAiGIS/PyAiGIS-examples>



PyAiGIS/AiGIS2 による小惑星 Itokawa のデータ可視化例 2 種

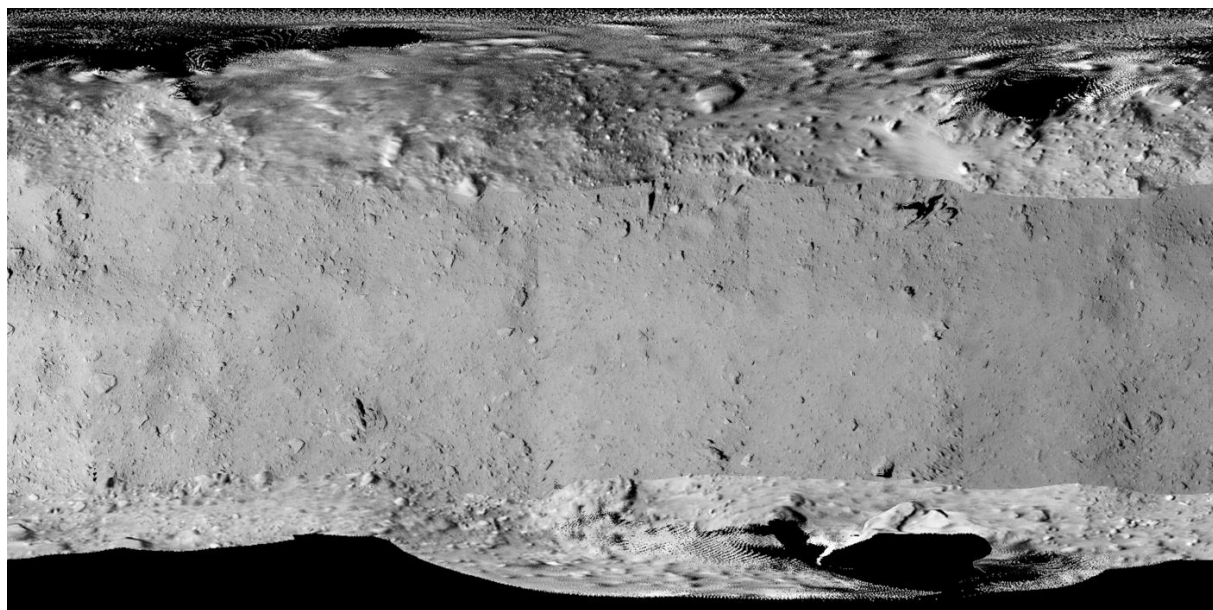
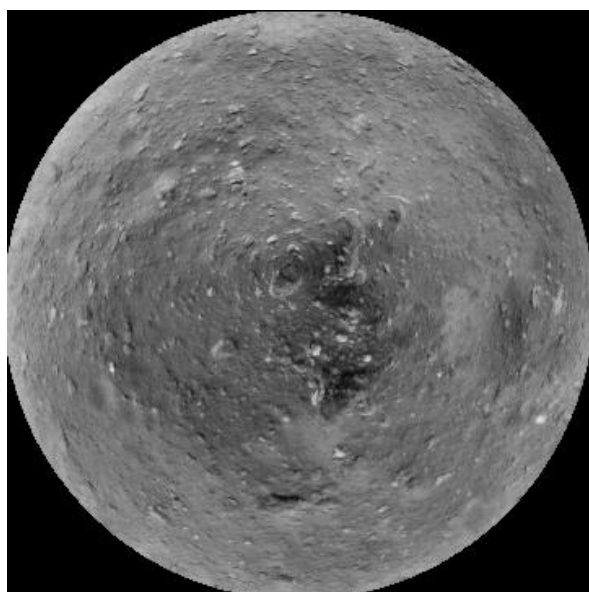
リュウグウ全球・局所モザイク画像作成

○平田 直之¹, 巽 瑛理²

¹神戸大学, ²宇宙科学研究所

小惑星探査機はやぶさ2によって、8000枚を超えるリュウグウの画像データが撮影された。これらの画像を統合し、リュウグウの地図（Global モザイク）を作成することを目指している。地図は地質調査の基盤となるデータで、特に単純円筒座標表示での全球モザイク画像は最も重要であり、すべての宇宙探査ミッションで作成がされている。同様に、リュウグウでもこういったモザイク画像を作成し、研究に生かしてもらうことを期している。同じBOX-C画像であってもミッションの各シーケンスで、日照条件が異なるなど微妙に異なるモザイクが作製できる。また、局所的に撮影されている高解像度画像から local モザイクも作成することも目指している。こういった取り組みは、より多くの画像データが撮影される予定の火星衛星探査計画（MMX）でも生かすことができるかもしれない。現状の成果と課題について講演する。

→リュウグウ北極域・正距方位図法
↓リュウグウ単純円筒図法（中高度画像まで）



小惑星リュウグウのアルベドデータ公開

Albedo data publication of the asteroid Ryugu

○竝木則行¹, 山田竜平², 押上祥子³, 山本圭香¹, 荒木博志¹, 松本晃治¹, 柳沼篤拓⁴

¹国立天文台, ²会津大学, ³情報通信研究機構, ⁴ミシガン州立大学

○Noriyuki Namiki¹, Ryuhei Yamada², Shoko Oshigami³, Keiko Yamamoto¹, Hiroshi Araki¹,
Koji Matsumoto¹, Atsuhiro Yaginuma⁴

¹National Astronomical Observatory of Japan, ²Aizu University, ³National Institute of Information and Communications Technology, ⁴Michigan State University

Yamada et al. (2022; 2024)で公表されている小惑星リュウグウのアルベドデータを ISAS DARTS 並びに NASA PDS から公開する準備を進めている。そのデータ処理プロセスを報告する。使用したデータは「はやさぶさ 2」レーザ高度計の送受光データと距離データ、機器情報である。データ処理手法は、基本的には Yamada et al. (2022; 2024)を踏襲しているが、2つの相違点がある。第一に、レーザフットプリント内からの反射強度計算において、Yamada et al. (2024)は微地形まで考慮した反射パルスシミュレーションを実施しているが、公開データでは簡略化した手法を用いる。これは、Yamada et al. (2024)において、小惑星 Ryugu の表面反射特性が Lambert 反射法則よりも Lommel-Seeliger 反射法則によってより適切に表現されることが分かったためである。なお、簡易計算ではフットプリント内の面素ごとのレーザ光往復距離の差異による強度変化を無視しているがその影響は十分小さい。また、Yamada et al. (2024)では受光パルスに約 400 秒周期の変動が現れていることを見出し、レーザダイオード温度との強い相関を指摘している。本研究ではこの相関性について、検証を行う。最後に受光データには所々に外れ値が現れるので、その原因について議論する。

Albedo data of the asteroid Ryugu will soon be published via ISAS/DARTS and NASA PDS. We report its data processing procedures. The source data are transmittance and receiver pulse intensities, range, and ancillary datasets. Basically, we follow the procedures described by Yamada et al. (2022; 2024); however, there are two major differences. First, the return pulse intensity calculation has been simplified compared with the simulation by Yamada et al. (2024) who consider the local topography, because the surface reflection of Ryugu is better explained by the Lommel-Seeliger law than the Lambert law (Yamada et al., 2024). They also discovered a correlation between received pulse intensities and laser diode temperatures. We verify this correlation quantitatively, then discuss other outliers.

組成と変成度を反映する Christiansen Feature と Reststrahlen Feature
～熱赤外分光撮像：TIRI による組成と変成度の推定に向けて～

○古川聡一朗^{1,2}, 岡田達明^{1,2}, 李正林^{1,2}, 嶋生有理², 坂谷尚哉², 千秋博紀³, 関口朋彦⁴, 出村裕英⁵, 荒井武彦⁶, 神山徹⁷,
金丸仁明¹, 石崎拓也², 金野龍史⁵, 田中智^{1,2}, 山口亮⁸, 今栄直也⁸, 小嶋智子², 金丸礼²,

¹東京大学, ²JAXA 宇宙研, ³千葉工業大学, ⁴北海道教育大学, ⁵会津大学, ⁶前橋工科大学, ⁷産業技術総合研究所, ⁸国立極地研究所

Introduction: 太陽系の形成と進化過程は、太陽系形成初期の情報を保持する始原天体：小惑星のリモートセンシング観測と、隕石との比較分析をもとに理解が進められてきた。小惑星は、最も一般的な観測手法の1つである分光観測により取得される反射スペクトルに基づき、分類されている。一方、小惑星は形成初期から放射性崩壊熱による熱変成により変質している。小惑星形成初期の物質的情報を得るためには、熱変成による反射スペクトルの変化を理解する必要がある。特に、中間赤外域は大気による吸収がほとんど無いため、地上望遠鏡観測による「真に始原的な天体（未変成天体）」の発見と探査に向けた準備に有用である。本研究では、以下を実施する。

- 1. 熱変成度の違いに伴う中間赤外スペクトルの変化を明らかにする。
- 2. ESA 主導の S 型小惑星探査計画 Hera 搭載観測機器である熱赤外分光カメラ TIRI¹ による目標天体の組成と変成度の推定に向けた準備、特に分光撮像による組成推定を模擬的に検証をする。

Background 1: 鉱物や岩石、隕石に見られる中間赤外域の指標として、Christiansen Feature: CF (7-9 μm の放射率極大値) と Reststrahlen Feature: RF (9-12 μm の放射率極小値) がある。これらの位置は主に SiO_2 量に依存する。特に、 SiO_2 量が多いほど CF の位置は短波長へシフトする²。また、 SiO_4 四面体の結合構造にも依存する (CF 位置: 斜長石: 7.91, 輝石: 8.12, カンラン石: 8.47 μm)³。

Background 2: 中間赤外分光観測による CF の推定例として、Diviner Lunar Radiometer による月面観測が挙げられる。3 バンド分光データを二次関数で fitting 解析することで、珪酸塩鉱物の CF 値マップが作成されている⁴。

Methods 1: 国立極地研究所にて、組成や変成度の異なる 200 個以上の隕石試料 (Table 1) の中間赤外分光データを、可搬型 FTIR (波長範囲: 2.5-15 μm , 分解能: 8 cm^{-1} , 標準物質: Coarse Silver) を用いて測定した。CF と RF の推定では、それぞれ多項式と複数のガウス関数による fitting 解析により算出した。組成や変成度の違いによる CF と RF の位置や深度の変化を調査した。

Methods 2: 13 個の試料 (Table 2) の中間赤外分光データを、TIRI PFM (6 バンド: 7.8, 8.6, 9.6, 10.6, 11.6, 13.0 μm) を用いて撮像・取得した。RF の推定では、二次関数による fitting 解析により算出した。FTIR の結果と比較することで、TIRI による分光撮像で試料の組成や変成度を推定可能かを検証した。

Table 1: Samples used in Method 1.		Table 2: Samples used in Method 2.	
minerals	olivine, pyroxene, quartz, plagioclase	olivine, pyroxene, quartz, plagioclase	
rocks	anorthosite, hypersthene-augite andesite, olivine basalt, peridotite, obsidian	anorthosite, hypersthene-augite andesite, olivine basalt, peridotite, obsidian	
meteorites	petrologic types 3-7 ordinary chondrites (H, L, LL), primitive achondrites (acapulcoites, lodranites, ureilites, winonaites), differentiated achondrites (diogenites, eucrites), carbonaceous chondrites (CM2, CO3, CR2)	NWA 7676 (LL3.5), NWA 7187 (L3.6), Chelyabinsk (LL5), NWA 5490 (L3.7)	

Results & Discussion 1: 隕石種ごと CF と RF の位置が異なる傾向が見られた。例えば、普通コンドライトにおいては、 $H < L < LL$ の順に CF と RF が長波長シフトしている。また、 SiO_2 量との比較では、 SiO_2 量が多いほど CF と RF の位置の差が広がる傾向が見られた。これは、CF と RF の間に Si-O 結合による吸収帯が存在する可能性を示唆している。以上より、CF と RF の位置を推定することで、隕石種 (組成、特に SiO_2 量) を推定することが可能である。RF の深度 (ピーク強度) は、炭素質コンドライト $< H < L < LL < \text{エコンドライト}$ の順に大きい傾向が見られた。また、熱変成度と正に相関する傾向も見られた。これらは、RF の深度が組成と熱変成度に依存する可能性を示唆している。特に、石英や花崗岩などにおいて粒径が小さいほど RF の深度が浅くなることが報告されている⁵ことから、RF の深度は結晶化度つまりは熱変成度を反映する指標として有用であると考えられる。

Results & Discussion 2: FTIR と TIRI PFM により得られた RF の位置は概ね一致することが確認された。したがって、TIRI による分光撮像によって目標天体の組成や変成度に関する情報を取得できると予想される。一方、隕石試料においては必ずしも一致しなかった。原因の1つとして、両機器の測定場所が異なることによる測定場所の組成の違いが起因している可能性が考えられる。

Way Forward: 顕微 FTIR や単体鉱物を用いて CF と RF を推定することで、CF と RF の物理的由来を理解する。特に、Si-O 結合による吸収帯がどの波長位置に存在するか、また SiO_4 四面体の結合構造との関係について調査する。今年 10 月に打ち上げ予定の Hera 搭載観測機器 TIRI による地球や月の観測から、RF の推定 (組成と変成度の推定) を実証する。

References: 1. Okada, T. *et al.* *LPSC2024* id. 1777 (2024)., 2. Zeng, X. *et al.* *J. Geophys. Res. Planets* **124**, 3267–3282 (2019)., 3. Lucey, P. G. *et al.* *J. Geophys. Res. Planets* **126**, e2020JE006777 (2021)., 4. Greenhagen, B. T. *et al.* *Science* **329**, 1507–1509 (2010)., 5. Kamata, H. & Tsukimura, K. *地質ニュース* **311**, 30-43(1980).

剛体物理シミュレーションによる Rubble-pile 小惑星集積過程の再現と形状・内部構造の研究

○平田成¹, 角田竜規¹, 小林拓斗¹, 佐藤優多¹

¹会津大学 コンピュータ理工学部

小惑星 Itokawa、Ryugu や Bennu など、Rubble-pile 構造を持つ小惑星の存在は広く知られている。これらの Rubble-pile 小惑星は、母天体の衝突破片の集積によって形成された、という共通する形成過程を持っているはずでありながら、外見には大きな多様性がある。小惑星形状の多様性は探査機による直接探査のほか、地上または宇宙望遠鏡によるライトカーブ観測からも示唆されている。また、過去には Itokawa のように大きなマクロ空隙率を保つことが Rubble-pile 小惑星の特徴であるとみなされていたが、近年になって Ryugu や Bennu の大きなバルク空隙率はむしろミクロな空隙に由来する可能性が指摘されている。つまり、Rubble-pile 小惑星はバルク空隙率にも多様性があるということになる。

本研究の目的は、Rubble-pile 小惑星の全体形状、内部構造の多様性がどのような要因で生じるのかを調べることである。オープンソースの物理計算エンジンである Chrono を用い、Rubble-pile を構成する母天体の衝突破片を剛体と見做し、破片の集積・合体による Rubble-pile 小惑星形成過程を再現するシミュレーションコードを開発した。

このコードを用いて Rubble-pile 小惑星の形成シミュレーションを多数回試行し、得られた Rubble-pile 小惑星の三軸比や空隙率の統計学的な特徴を観測値と比較した。個別の破片形状は、衝突破壊実験で形成される破片や小惑星表面に存在する岩塊の典型的な軸比である $2:\sqrt{2}:1$ として、冪乗則（冪指数-2.5）に従った衝突破片のサイズ頻度分布モデルを同サイズの最大破片が四個存在する寡占ケースと、ただ一つの最大破片が存在する独占ケースの二種類準備した。このモデルに沿った破片をランダムな順番で集積させるシミュレーションを各ケースにつき 300 回試行した。

Ryugu や Bennu のような三軸比が 1 に近い形状を持つ rubble-pile 小惑星は寡占ケース、独占ケースのいずれの場合もごく自然に形成される。しかし、試行全体で得られた軸比の分布範囲は、探査機による観測やライトカーブ観測から推定される小惑星の軸比の分布範囲より球形に近い方に偏っている。さらに、Itokawa のような極端に細長い形状を持つ小惑星が形成される結果は全く発生しなかった。これは、集積過程の中で小さい破片が小惑星上の低地に移動することで、より三軸比が 1 に近い形状になろうとする物理が働いていることによる。この傾向は衝突破片のサイズ頻度分布モデルの種類を問わず生じている。一方、マクロ空隙率は常に Itokawa のように大きい値を取ることがわかった。

集積成長する氷微惑星の熱進化： リュウグウおよび CI コンドライト母天体への示唆

○佐藤龍成, 木村淳, 寺田健太郎, 佐々木晶
大阪大学

初期太陽系ではダストから微惑星が形成し、スノーライン以遠では水に富む氷微惑星として存在したと考えられている。氷微惑星は地球の水の起源となった可能性もあり、その進化を明らかにすることはアストロバイオロジーの観点からも重要である。はやぶさ 2 によるリュウグウサンプルの分析から、リュウグウ化学組成や同位体比は CI コンドライトと似ており、有機物や水に富んでいると分かった。これは水に富み大きな昇温を経験していない環境下にあったことを意味し、リュウグウや CI コンドライトの母天体が氷微惑星であったことを示唆する。しかし、母天体は現在存在していないと考えられており、母天体のサイズや成長履歴、それに伴う内部熱史を明らかにするためにはサンプルの分析結果に根差したモデル計算が必要である。McCain et al., 2023 はリュウグウサンプルから推定された低温環境から母天体半径を 20 km 程度と推定し、Nakamura et al., 2023 は Walsh et al., 2013 が推定した Eulalia 族母天体のサイズを基に半径 50 km の天体を仮定した熱進化モデル計算を行っている。しかし、微惑星集積の開始時期や成長モードの違い、水質変成後の対流熱輸送などの影響を考えると、母天体は半径 100 km を超えた可能性もある。

そこで本研究では、リュウグウや CI コンドライト母天体の物理量を推定し直すために、成長する微惑星の内部熱進化モデル計算を行った。数値モデルでは短・長寿命放射性核種 (^{26}Al , ^{238}U , ^{235}U , ^{228}Th , ^{40}K) の崩壊熱と集積時の衝突加熱を熱源とし、伝導および対流による熱輸送を考慮した修正混合距離理論による 1 次元球対称エネルギー方程式を解く。母天体は、CAI 形成と同時期に岩石と氷の混合物（密度 $2,500 \text{ kg/m}^3$ ）からなる半径 1 km の微惑星と仮定し、集積に伴う半径成長や内部加熱に伴う水質変成と脱水も考慮した。最終半径を 1-1000 km、集積期間を 100-500 万年、成長モードのべき乗を 0（寡占的）と 2（暴走的）とし、CAI 形成から最大 1 億年にわたる計算を行い母天体内部の熱史を調べた。リュウグウのサンプル分析から、水質変成が太陽系誕生から 520 万年前後 (Mn-Cr 同位体測定) に、 $37 \pm 10^\circ\text{C}$ で生じたことや、サンプルの経験温度が最大 100°C であることがわかっている。これらの制約条件を満たす母天体熱進化探索した結果、寡占的成長の場合、最終半径 15 km 以下では水質変成が起きず、最終半径が 30 km を超えると表面付近の数%半径程度でのみ水質変成し、 100°C 未満の条件を満たすことが分かった。暴走的成長の場合、天体サイズが有意に成長する頃には ^{26}Al が枯渇するため最終半径 100 km でも昇温が小さく、全球的に制約条件を満たすことが分かった。一連のパラメタスタディを通して、CI コンドライト母天体が寡占的成長をする場合は母天体半径が先行研究と調和的な半径 10 km オーダーとなった一方、暴走的成長をする場合は半径 100 km オーダーでも条件を満たすことが判明し、CI 以外のコンドライト母天体半径も 100 km を超える可能性が見出された。また、天体半径 300 km 以上では柔らかい含水鉱物の対流熱輸送が有意となり、伝導のみによる熱進化モデルよりも内部の昇温が抑えられる一方、衝突加熱によって表層のみが有意に昇温することも分かった。

高速自転コマ型小天体における衝突クレーターの非対称形状の数値解析

○宮村尚典¹, 渡邊誠一郎¹

¹名古屋大学大学院環境学研究科

地球近傍小惑星(162173)リュウグウのコマ型形状は、過去の臨界角速度 ω_c (赤道で遠心力が自己重力と等しくなる時の自転角速度)に近い高速自転下で形成されたと考えられている[1]。高速自転している小天体で天体衝突が起こると、放出したエジェクタがコリオリ力を受け、形成されるクレーターリムに東西非対称性が発生することが示唆された[2]。また、小天体では実効的重力(重力と遠心力の合力)により天体表面が実質的に斜面となるため、地滑りによってクレーターリムに南北非対称性が発生することが考えられる。そこで本研究では、高速自転するコマ型天体での実効的重力を考慮したクレーターの非対称地形の解析を行った。

まず、リュウグウに近似な軸対称コマ型天体の形状とその重力場を計算した。次に、クレーターの天体表面に対して球面で近似して掘削することで計算した。さらに、自転角速度 $\tilde{\omega} = \omega/\omega_c$ の下で、クレーターから放出するエジェクタの軌道を計算し、天体表面への着地点を求めた。最後に実効的重力下で、自転角速度 $\tilde{\omega}$ でのエジェクタ堆積での地滑り緩和、現在のリュウグウの自転角速度 $\tilde{\omega} = 0.43$ への減速による地滑り緩和の解析を経て、クレーターの安定地形を計算した。

軸対称コマ型天体の実効的重力による天体表面の傾斜を計算した結果、低緯度では、高速自転下では高緯度側から低緯度側へ低くなる傾斜となるのに対して、現在の自転速度 $\tilde{\omega} = 0.43$ (自転周期 ~ 7.6 h)では逆に低緯度側から高緯度側へ低くなる傾斜となった。

この軸対称コマ型天体の下で、リム半径 $R_r = 50$ mのクレーターの、 $\tilde{\omega} = 0.9$ での形成から $\tilde{\omega} = 0.43$ への自転減速を経た地形変化の計算例を示す(図 1)。赤道のクレーターでは、エジェクタが着地する境界が東に凸の放物線状になることで、東側に局所的に高く幅の広いリムが形成され、東西非対称性がクレーター地形に強く現れた(図 1(a))。一方、緯度 10°N の低緯度のクレーターでは、東西非対称は弱まり、実効的重力による地滑り方向の南北非対称性が卓越し、高緯度側から低緯度側への地滑りでクレーターの南側に幅が広く高いリムが形成された(図 1(b))。自転減速により南側の高いリムが北側へ崩れたが、南側リムが北側より高くなる傾向は保持された。

このようなクレーター数値計算結果をリュウグウのクレーター地形解析や先行研究の室内衝突実験結果と比較し、周辺地形の勾配やボルダーの影響、解析方法・パラメーターの妥当性を検証する予定である。リュウグウのクレーター地形と本研究でのクレーター解析地形の比較から、リュウグウのクレーター形成時の自転状態推定ができることが期待される。

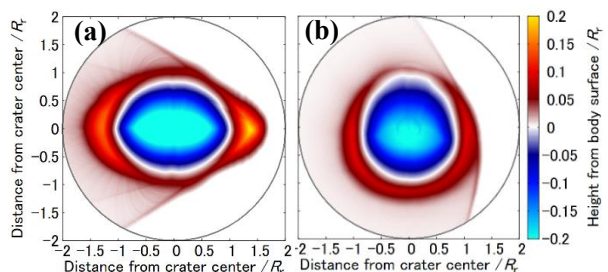


図 1 $\tilde{\omega} = 0.9$ で形成される $R_r = 50$ mのクレーター地形解析結果。赤道(a)と北緯 10° (b)のクレーター地形

[1] Watanabe et al. 2019, *Science* 364, 268–272. [2] Hirata et al. 2021, *Icarus* 354, 114073.

Z-スコアを用いた小惑星エロス、イトカワ、リュウグウのボルダー空間分布

○道上達広（近大）

近年、探査機によって探査された小惑星の多くは、数多くのボルダー（岩塊）で覆われていることが分かった。それらのボルダーの起源として主に2つ考えられる。1つは、隕石が小惑星表面に衝突し、クレーターが形成、そこから飛び出した破片が再び表面に降り積もったもの。もう1つは、過去に小惑星母天体が存在し、その母天体が激しい破壊を受け、その一部が再び集積し小惑星が形成、破片の一部が表面に堆積したものである。例えば、小惑星エロスの大部分のボルダーは前者で形成されたと考えられており、ボルダーの空間的な拡がり、クレーターに関係したクラスター分布になっている（Thomas et al., 2001）。一方、小惑星イトカワ、リュウグウの大部分のボルダーは後者で形成されたと考えられており、ボルダーの空間的な拡がり、比較的、小惑星全体に満遍なく分布（ランダム分布）しているとされている（Saito et al, 2006; Michikami et al., 2008; Sugita et al. 2019; Michikami et al. 2019）。

クレーターの空間的な分布は、過去の研究でZ-スコアと呼ばれる統計量を使って定量的に調査されている(e.g. Squyres et al., 1997; Hirata et al., 2020)。しかしながら、ボルダーの空間分布に関しては、統計量を用いた定量的な研究はされていない。その理由として、ボルダーの場合、Z-スコアをクレーターのようにそのまま適用できないからと考えられる。つまり、クレーターに対してZ-スコアを用いる場合の2つの仮定（1つ目は、全面積に占めるクレーターの総面積が比較的小さい、2つ目は、形成されたクレーターの位置は、お互いのクレーターの位置に依存しないこと）が、ボルダーの場合、成り立たない。

そこで本研究では、上記の2つの仮定を改良したZ-スコアを作成し、ボルダーの空間分布を定量的に調査することにした。具体的には、ボルダーのサイズ分布のべき指数、対象領域の面積に占めるボルダーの総面積の割合をパラメーターとして与え、ボルダー同士が重なり合う場合と重ならない場合で、Z-スコアがどのように変化するかを、数値計算によって明らかにした。そして、小惑星エロス、イトカワ、リュウグウのボルダーの空間分布の観測データと、数値計算によるランダム分布の計算結果を比較し、それぞれの小惑星ボルダーの空間的な偏りを調査した。その結果、(i)小惑星エロスのボルダーは観測された30m以上のサイズすべてで、偏りがあり、空間的にクラスター分布、(ii)小惑星リュウグウのボルダーは予想に反して観測された5-10mでクラスター分布、20m以上でランダム分布、(iii)小惑星イトカワのボルダーも予想に反して観測された5-10mでクラスター分布、12m以上でランダム分布であることが分かった。これは、小惑星リュウグウ、イトカワの5-10mのサイズのボルダーは小惑星形成後、かなりの移動をした可能性を示している。

ポリゴン地形から推定する火星表層環境～アメリカ実地調査の知見から～

○佐古 貴紀¹, 長谷川 精², トリット ルシ¹, 小松 吾郎³, 庄崎 弘基⁴

¹ 岡山大, ² 高知大, ³ IRSPS, ダヌンツィオ大, ⁴ ELSI, 東工大.

Estimation of subsurface environment on Mars using by polygonal landforms ~ From the results of the field survey of USA~

○Takaki SAKO¹, Hitoshi HASEGAWA², Trishit RUJ¹, Goro KOMATSU³, Hiroki SHOZAKI⁴

¹ Okayama Univ., ² Kochi Univ., ³ IRSPS, Università d'Annunzio, ⁴ ELSI, TokyoTech.

火星中緯度域の浅部地下には地下氷が存在しており, その凍土の表面には低温収縮作用で形成される多角形の地形(以下, 凍土ポリゴン)が見られる(Levy et al., 2009; Soare et al., 2005). 一方で, 火星中緯度域にはヘスペリアン紀に形成されたと考えられている乾燥収縮性のポリゴン地形(以下, 乾燥ポリゴン)も見られる(El-Maarry et al., 2014; Chang et al., 2021). 前者は地下氷の存在を示唆(Marchant and Head, 2007)し, 後者は液体環境の存在を示唆する(Lasser et al., 2020)ため, これらを区別することは火星の過去および現在の表層環境を理解する上で重要である. しかし, 現状では両者を明確に分類するための手法が確立されていない.

本研究では, 特に乾燥ポリゴン地形に着目し, 地球上で火星と類似した地形が見られるアメリカ南西部を対象に, ドローンを用いた詳細な実地調査とデジタル標高モデル(DEM)構築に基づく3次元地形解析, そして Sentinel 衛星画像の観察に基づき, ポリゴン地形の地形発達過程や卓越する環境との関係性を調べた. また, 我々は昨年モンゴルにて, 凍土ポリゴン地形実地調査を行っており, 今回のアメリカ調査で得られた結果とも照らし合わせ, 乾燥作用と凍土作用の両者によって形成されるポリゴン地形の特徴を比較した.

調査の結果, Raised rim polygon, Compound polygon, Low rim polygon の3種類のポリゴン地形を認定した. Raised rim polygons は, 10m 程の小さなポリゴンであり, ポリゴン縁部が盛り上がってジグザクに曲がりくねった形状を持つ. Compound polygon は, 10m 程の大きなサイズのどのような形状のポリゴンの中に, 1m 程の小さなサイズのどのような形状のどのような形状が共存しているポリゴン地形である. Low rim polygon は 30~50m 程の大きであり, 縁部の一部には水が流れたような跡や植生が見られる. この3種類が分布するサイトの Sentinel 衛星画像を調べた結果, Raised rim polygon は1年を通して水が表面にあり, Compound polygon は雨期にのみ湖水があることが明らかとなった. つまりこの2タイプは現生で発達している乾燥ポリゴン地形である可能性が高い. 一方, Low rim polygon は衛星画像を観察した過去5年間, 1度も湖水が表面に存在していないという結果となり, 過去の乾燥作用で形成されたレリクト地形である可能性がある.