

日本惑星科学会 2026年秋季講演会

プログラム

2026年9月14日-9月17日

日本惑星科学会 賛助会員

NV5 Geospatial 株式会社
株式会社ノビテック

講演会場

朱鷺メッセ 国際会議室

〒950-0078 新潟県新潟市中央区万代島6-1

懇親会会場

ホテル日航新潟 展望室(朱鷺メッセ隣接)

9月16日18:30開始

新潟観光コンベンション協会アンケート



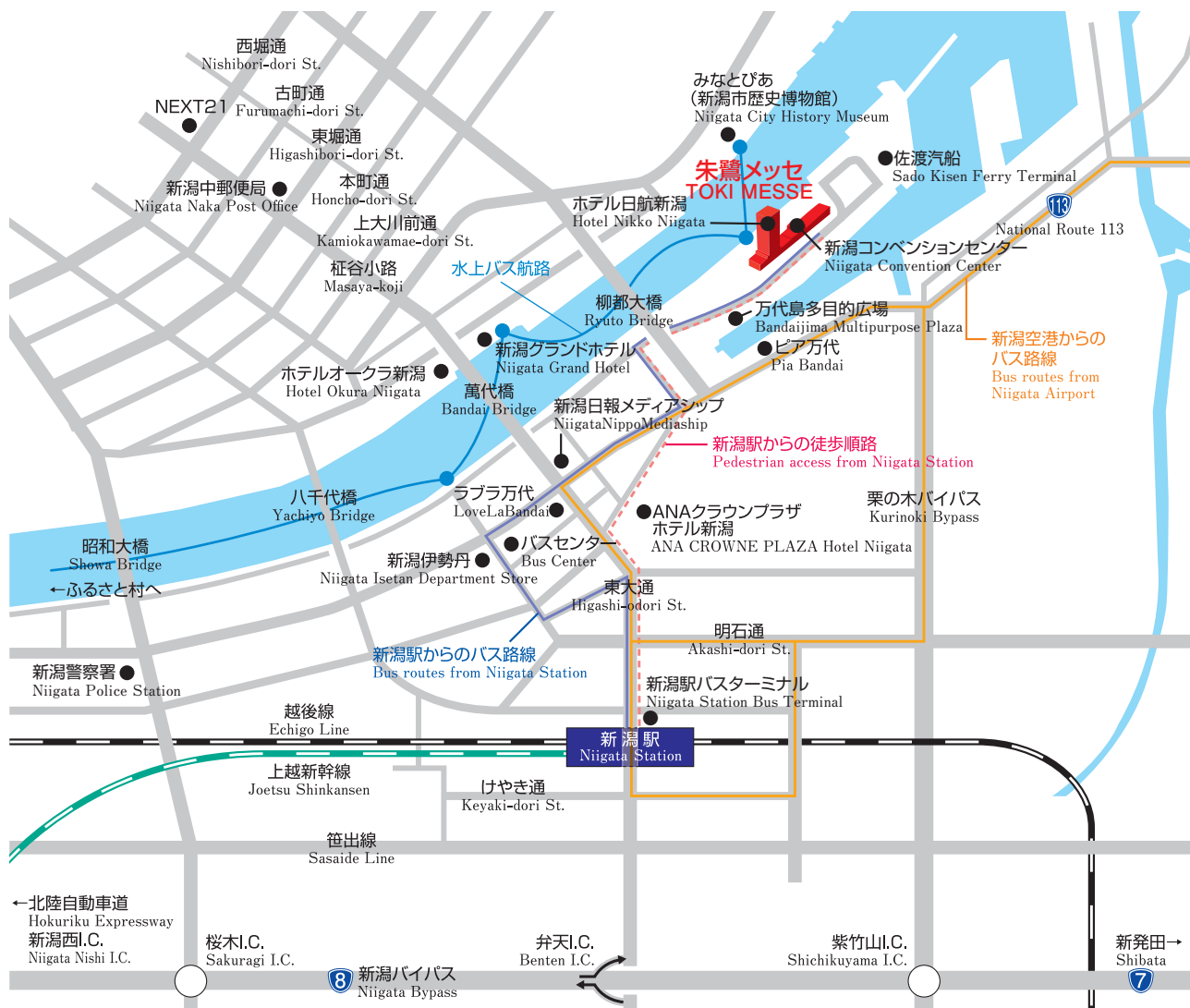
秋季講演会プログラムhtml版





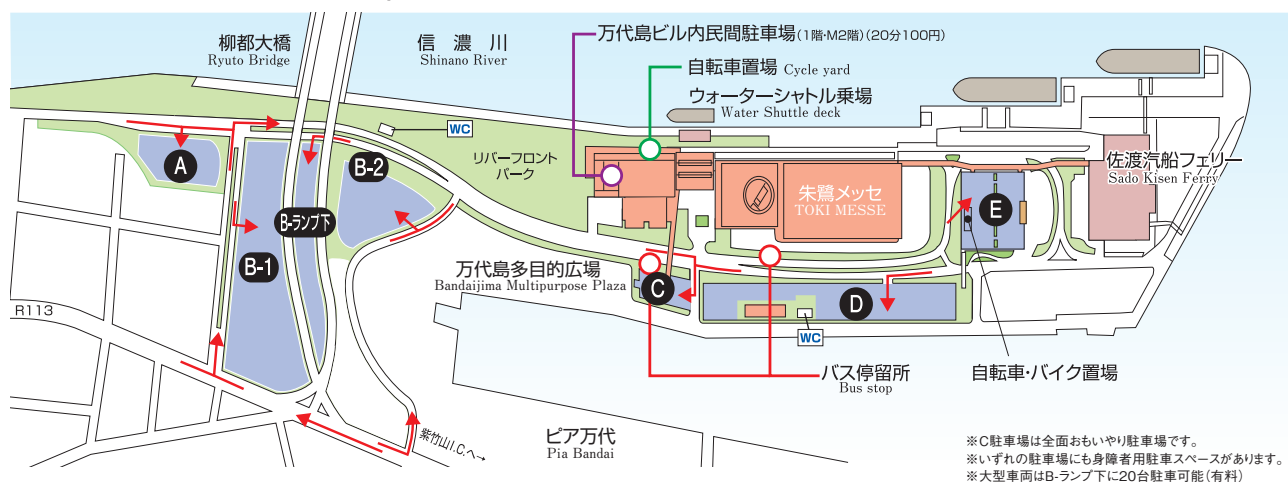
にいがた観光ナビ

Traffic Access 交通アクセス



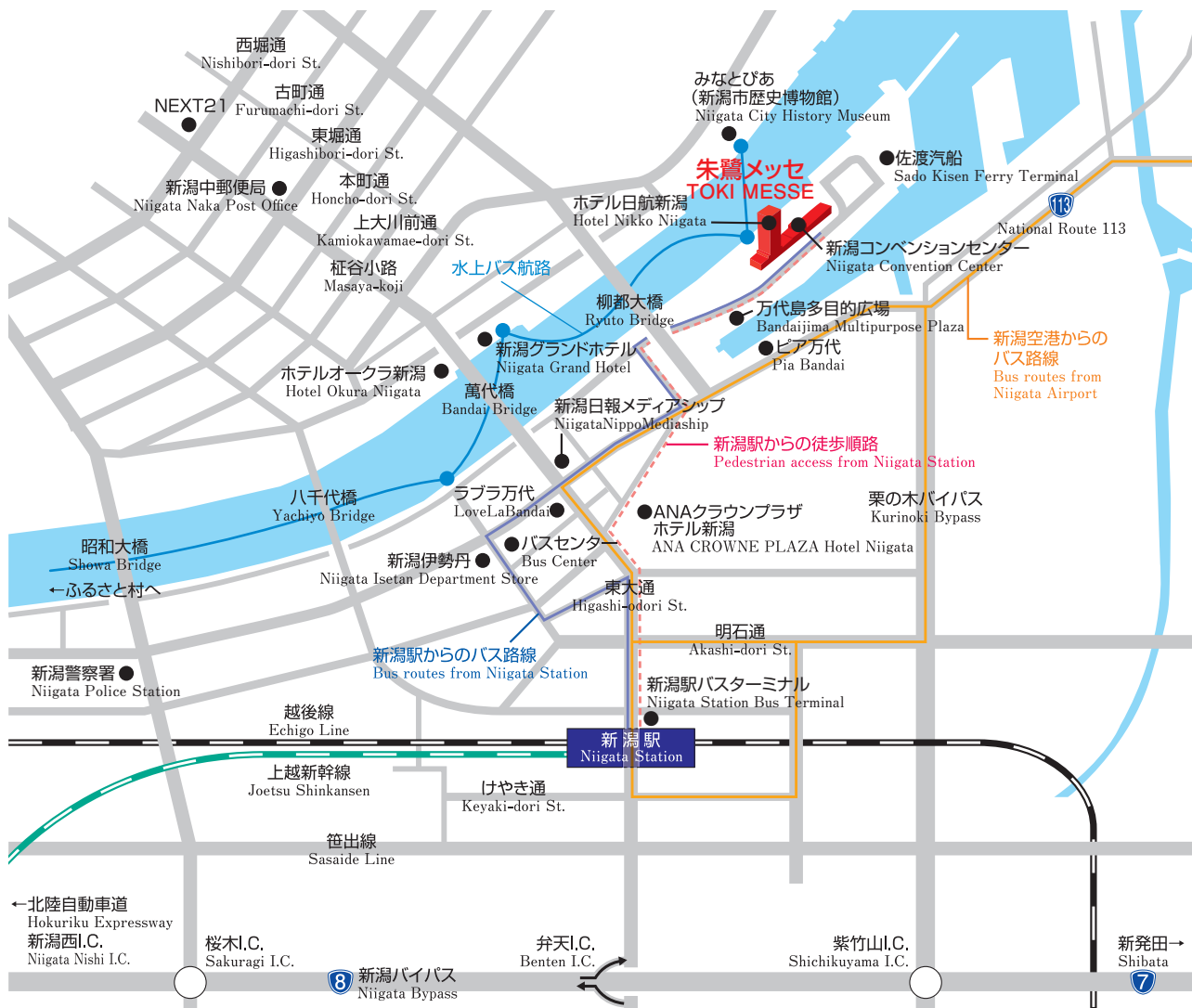
新潟空港 Niigata Airport	タクシー 約20分 Taxi (approx. 20 min.) リムジンバス 約25分 Limousine bus (approx. 25 min.)	新潟駅 Niigata Station	路線バス(佐渡汽船行 朱鷺メッセ下車) 約15分 Bus (approx. 15 min.) タクシー 約5分 Taxi (approx. 5 min.) 徒歩 約25分 Walk (approx. 25 min.)	朱鷺メッセ TOKI MESSE 
北陸自動車道 Hokuriku Expressway 新潟西I.C. Niigata Nishi I.C.	新潟バイパス経由 約12キロ 約20分(紫竹山I.C.を利用) Car (approx. 20 min.)			

■ 朱鷺メッセ周辺案内図 TOKI MESSE Area Map



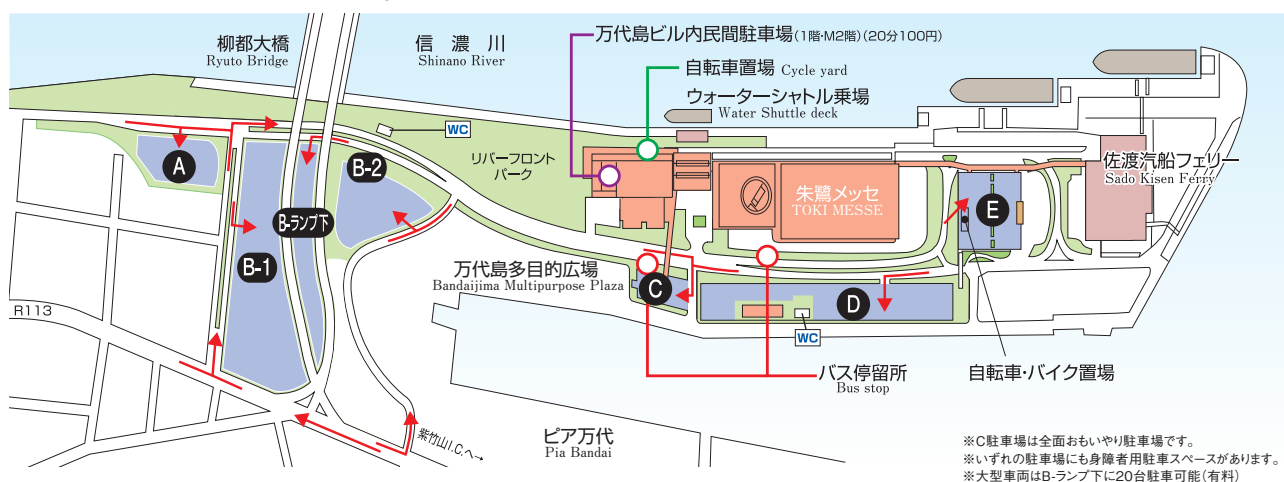
万代島駐車場 (A~E) 約1,800台収容	営業時間: 24時間 料 金: 最初の1時間無料 以降100円/30分 1日 (入場から24時間) 当たり最大1,500円 (佐渡航路利用者は800円)
-------------------------------	--

Traffic Access 交通アクセス



新潟空港 Niigata Airport	タクシー 約20分 Taxi (approx. 20 min.)	新潟駅 Niigata Station	路線バス(佐渡汽船行 朱鷺メッセ下車) 約15分 Bus (approx. 15 min.)	朱鷺メッセ TOKI MESSE
	リムジンバス 約25分 Limousine bus (approx. 25 min.)		タクシー 約5分 Taxi (approx. 5 min.)	
北陸自動車道 Hokuriku Expressway 新潟西 I.C. Niigata Nishi I.C.	新潟バイパス経由 約12キロ 約20分(紫竹山I.C.を利用) Car (approx. 20 min.)		徒歩 約25分 Walk (approx. 25 min.)	

■ 朱鷺メッセ周辺案内図 TOKI MESSE Area Map



万代島駐車場(A~E) 約1,800台収容

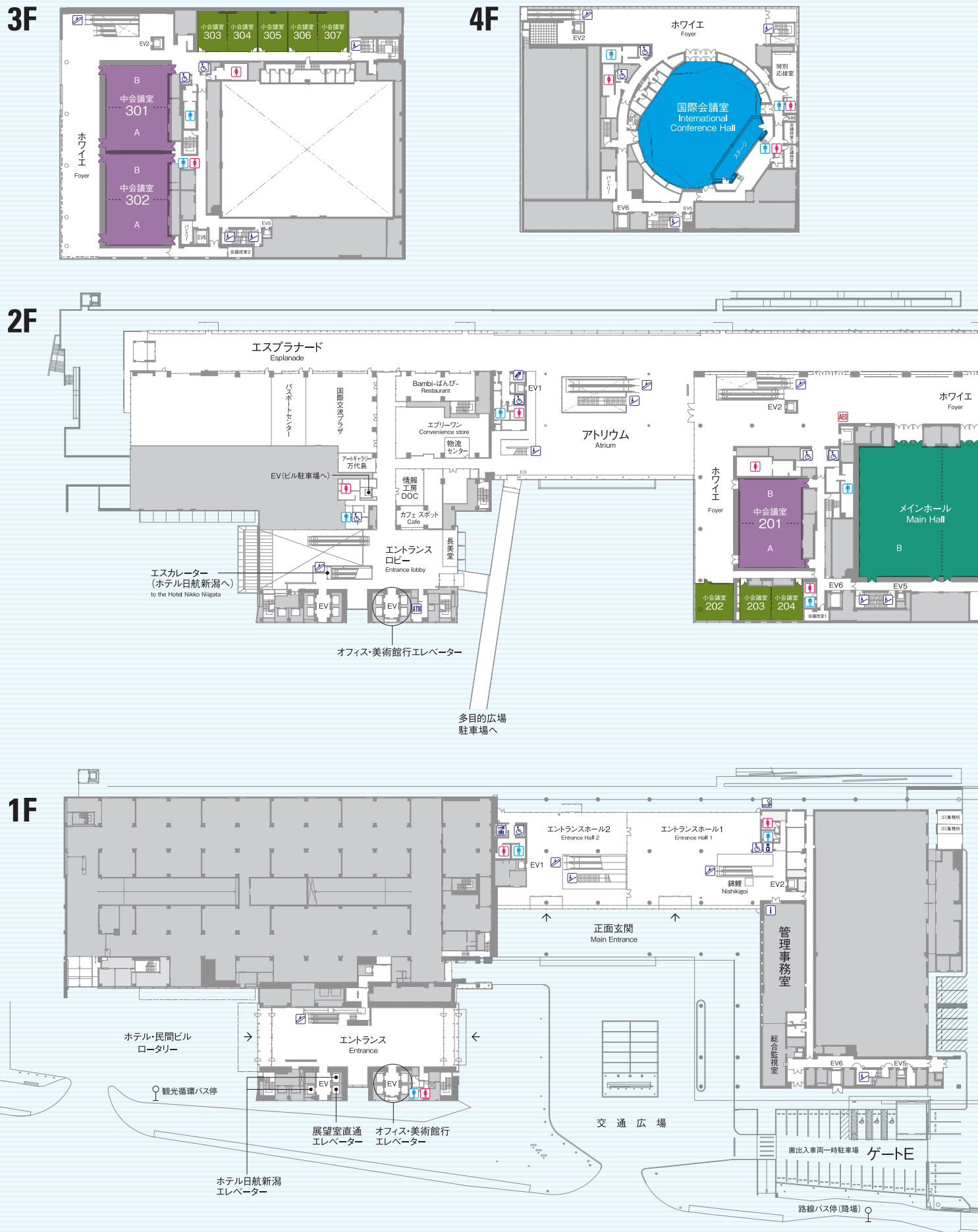
営業時間: 24時間
料 金: 最初の1時間無料 以降100円/30分
1日(入場から24時間)当たり最大1,500円(佐渡航路利用者は800円)

※C駐車場は全面おもしろい駐車場です。
※いずれの駐車場にも身障者用駐車スペースがあります。
※大型車両はB-ランプ下に20台駐車可能(有料)

Layout

自由な発想を形にする、複合一体型コンベンション施設

Free thinking given form -The all purpose convention center



全体スケジュール

9月14日 (月)

13:00-13:30	開場、受付
13:30-14:45	<u>最優秀発表賞特別セッション1</u>
15:00-16:00	<u>最優秀発表賞特別セッション2</u>
16:10-17:22	<u>口頭セッション1-1 氷天体、月</u>
17:30-18:42	<u>口頭セッション1-2 月、水星</u>

9月15日 (火)

8:00-9:00	開場・受付
9:00-10:24	<u>口頭セッション2-1 隕石、惑星大気、火星とその衛星</u>
10:40-11:52	<u>口頭セッション2-2 火星とその衛星</u>
12:00-13:30	昼食
13:30-14:30	ポスターコアタイム1
14:30-16:06	<u>口頭セッション2-3 小天体</u>
16:20-17:56	<u>口頭セッション2-4 小天体、アストロバイオロジー</u>

9月16日 (水)

8:00-9:00	開場・受付
9:00-10:12	<u>口頭セッション3-1 機器開発・将来探査</u>
10:25-11:49	<u>口頭セッション3-2 衝突</u>
12:00-13:30	昼食
13:30-14:30	ポスターコアタイム2
14:30-15:30	<u>口頭セッション3-3 衝突</u>
15:40-16:40	総会
16:40-18:00	<u>最優秀研究者賞受賞記念講演</u>
18:30	懇親会

9月17日 (木)

9:00-10:24	<u>口頭セッション4-1 系外惑星、円盤</u>
10:40-11:52	<u>口頭セッション4-2 円盤</u>
12:00-13:30	昼食
13:30-14:30	<u>口頭セッション4-3 円盤</u>
15:00	閉会

9月14日 (月) 午後

最優秀発表賞特別セッション1

座長 瀧生 有理

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
SA-01	13:30	大城 榛音	微惑星形成の観測的検証に向けて：円盤赤道面におけるストリーミング不安定性が駆動するガスとダストの鉛直大域ダイナミクス
SA-02	13:45	鳥居 尚也	土星リングの形成起源：破片群の力学進化計算を通じた衛星の衝突起源説と近接遭遇天体の潮汐破壊起源説の検証
SA-03	14:00	河合 優悟	楕円軌道のホットジュピターを用いた系外ガス惑星の内部構造の推定
SA-04	14:15	愛敬 雄太	リュウグウ岩塊表面の小クレーター統計から推定される岩塊の剝離速度とサイズ分布進化
SA-05	14:30	山下 光葉	巨大衝突盆地の掘削物の組成解析から探る月の初期火成活動史

最優秀発表賞特別セッション2

座長 瀧生 有理

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
SA-06	15:00	神田 恵太郎	月地下の岩石サイズ-頻度分布の計測による月表層進化過程の制約
SA-07	15:15	余 金霏	リュウグウとペンヌの塩類鉱物が解き明かす母天体内部の液体水の終焉
SA-08	15:30	柿木 玲亜	月面同心円型クレーターの形成条件と基盤層強度の推定：層構造標的に対するクレーター形成実験
SA-09	15:45	戸井田 愛理	高地と海の地質特性を反映した月表層誘電特性モデルの構築

口頭セッション1-1 氷天体、月

座長 芝池 諭人、平田 佳織

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OA-01	16:10	高橋 聖輝	集積完了時点で未分化なガニメデとカリストの熱・構造進化
OA-02	16:22	宮井 孝太郎	エンセラダス後行半球地形のリッジ地形解析
OA-03	16:34	山本 聡	月主要鉱物の混合スペクトルに対する線形混合モデルの実験的検討
OA-04	16:46	日向 輝	近赤外顕微分光計測による鉱物組成推定手法の確立と月隕石を用いた実証実験
OA-05	16:58	大竹 真紀子	SLIM搭載マルチバンド分光カメラによる月面岩石画像の組織評価と地球岩石との比較
OA-06	17:10	三河内 岳	月隕石中斜長石の鉄価数から見積もる各種岩石タイプの酸化還元状態

口頭セッション1-2 月、水星

座長 長岡 央、仲内 悠祐

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OB-01	17:30	仲内 悠祐	月面想定鉱物におけるOH/H ₂ Oの温度安定性
OB-02	17:42	佐伯 和人	異なる作製法による氷付きレゴリスシミュラント中の氷氷形状の比較
OB-03	17:54	寺田 健太郎	月外気圏C・N・Oイオンの生成機構と時間変動：かぐや観測が示す二成分起源と流星雨
OB-04	18:06	平田 佳織	水星表面の揮発性元素量と温度環境の関係：外気圏を介した物質輸送の定量評価
OB-05	18:18	木下 岳	水星表層の核分光データ解釈に向けた観測深度シミュレーション
OB-06	18:30	中村 郁仁	永年共鳴により励起された微惑星の高速衝突による原始水星のマントル剥ぎ取り

9月15日 (火) 午前

口頭セッション2-1 隕石、惑星大気、火星とその衛星

座長 佐々木 洋平、倉本 圭

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OC-01	9:00	篠田 兼伍	高エネルギー現象におけるダスト形成
OC-02	9:12	佐藤 祥太	高速微惑星のダスト層突入によるコンドリュール加熱過程の解析的見積り
OC-03	9:24	高木 征弘	金星大気におけるスーパーローテーションの維持メカニズムについて
OC-04	9:36	東田 拓斗	大陸配置が全球気候および全球凍結突入条件に与える影響
OC-05	9:48	花沢 泰光	CNH 存在量と窒素同位体比による地球への炭素質物質の供給過程の制約
OC-06	10:00	小野寺 圭祐	InSightで観測された火星内部重力波の記載
OC-07	10:12	竹田 有汰	火星大気ネオン同位体比その場測定に向けた小型質量分析システムの開発：ガス分離部・質量分析部の統合と実証実験

口頭セッション2-2 火星とその衛星

座長 鎌田 有紘、田畑 陽久

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OD-01	10:40	鎌田 有紘	温暖な初期火星気候における地下水流動とバレーネットワーク形成
OD-02	10:52	大橋 拓磨	凍土層に形成した衝突クレーター周囲の衝突残留温度の計測
OD-03	11:04	田畑 陽久	火星模擬玄武岩の中性－アルカリ条件における段階的溶解過程
OD-04	11:16	倉本 圭	打ち上げ迫る火星衛星探査計画MMX
OD-05	11:28	内田 雄揮	フォボス最大のクレーター形成時の衝撃加熱が物質に与える影響
OD-06	11:40	松岡 亮	星雲ガス衝撃波加熱の下での火星衛星前駆天体の進化

9月15日 (火) 午後

口頭セッション2-3 小天体

座長 辰馬 未沙子、阿部 新助

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OE-01	14:30	辰馬 未沙子	ダスト付着N体計算によるダスト集合体のせん断強度モデルの構築
OE-02	14:42	佐藤 勲	世界初の4次元ダストトレール理論による流星群の予報計算
OE-03	14:54	阿部 新助	2018・2025年ふたご座流星群の月面衝突閃光観測から得られたサイズ分布・フラックスおよび3色黒体放射温度
OE-04	15:06	大坪 貴文	彗星28P/Neujminの衝効果における強いコヒーレント後方散乱
OE-05	15:18	渡部 潤一	恒星間天体3I/ATLAS：その特異性について
OE-06	15:30	岸 真瞳	Comet Interceptor の探査対象選定に向けた彗星の光度予測計算2：ダスト層形成について
OE-07	15:42	渡邊 紀輪	Comet Interceptor探査機の姿勢変動に基づく彗星ダスト質量分布の推定手法の開発
OE-08	15:54	黒澤 耕介	DimorphosへのDART衝突時の放出物の速度質量分布: 太陽周りの公転軌道変化への応用

口頭セッション2-4 小天体、アストロバイオロ
ジー

座長 中村 勇貴、中川 広務

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OF-01	16:20	マクドナルド 譲治	ドーン探査機の赤外分光器スペクトルの包括的再解析およびセレスでの氷融解の証拠
OF-02	16:32	横田 康弘	Hayabusa2 MINERVA-IIIローバーの小惑星リュウグウにおける移動経路復元
OF-03	16:44	田中 智	はやぶさ2#による小惑星トリフネ超近接フライバイの初期成果
OF-04	16:56	湯本 航生	小惑星トリフネの表層地質・可視スペクトル観測から探る天体進化史
OF-05	17:08	豊嶋 遥名	湿潤天体上の衝突クレーター地下における熱環境に関する実験的研究
OF-06	17:20	中川 広務	電気力学天秤（EDB）による惑星大気研究の新展開：微小液滴が駆動する不均一反応と生命関連分子合成
OF-07	17:32	水木 敏幸	Nancy Grace Roman宇宙望遠鏡とコロナグラフ観測
OF-08	17:44	中村 勇貴	太陽高エネルギー粒子によって駆動される、非還元大気中での前生命化学

9月16日 (水) 午前

口頭セッション3-1 機器開発・将来探査

座長 木村 宏、岩谷 隆光

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OG-01	9:00	黒川 宏之	次世代小天体サンプルリターンミッション検討状況報告
OG-02	9:12	野津 翔太	遠赤外線宇宙望遠鏡PRIMA: 現状報告2026 ー星・惑星形成サイエンスにおける重要性ー
OG-03	9:24	岩谷 隆光	将来惑星探査に向けた加熱脱着ガスクロマトグラフ-質量分析計の開発
OG-04	9:36	木村 宏	DESTINY+サイエンス及びイジェクタ・クラウド形成モデルの構築へ向けた動的引張強度の定式化
OG-05	9:48	高橋 佳佑	小天体用地震観測システム開発に向けた散乱特性解析
OG-06	10:00	亀田 真吾	HWOにむけた紫外線観測技術開発・分光装置の検討状況

口頭セッション3-2 衝突

座長 道上 達広、城野 信一

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OH-01	10:25	豊田 優佳里	氷球の低速度斜め衝突実験：エネルギー散逸と回転エネルギーへの変換
OH-02	10:37	松原 光佑	氷天体由来水のクレーター内残存：薄氷被覆鉄鋼標的への高速度衝突実験
OH-03	10:49	崎村 達也	熱進化した層構造を持つ氷微惑星の衝突破壊強度に関する実験的研究
OH-04	11:01	野口 琴海	氷・岩石混合物からなる多孔質天体上のクレーター形成に関する実験的研究
OH-05	11:13	大坪 晴太郎	含水微惑星を模擬した濡れた石膏標的への衝突実験と衝突残留温度の計測
OH-06	11:25	大川 初音	クレーター形成時における地下ボルダーの放出挙動に関する実験的研究

9月16日 (水) 午後

口頭セッション3-3 衝突

座長 豊田 優佳里、黒澤 耕介

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OI-01	14:30	櫻井 哲志	小惑星表面ボルダーの衝突破壊に対する周囲粒子の影響
OI-02	14:42	道上 達広	大きな亀裂を内部に含む隕石に対する衝突破壊実験
OI-03	14:54	大西 彩華	多孔質小惑星の斜め衝突における角運動量輸送効率の標的強度依存性
OI-04	15:06	生駒 杏	クレーター形成時の衝突体被覆率に関する実験的研究：被覆率分布のモデル化
OI-05	15:18	山口 祐香理	二次クレーター観察に基づく微小高速度エジェクタ特性の評価
OI-06	15:30	篠原 直生	空洞構造を有する標的への天体衝突における背面剥離の影響

最優秀研究者賞受賞記念講演

座長 平野 照幸

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OJ-01	16:40	荒川 創太	太陽系における微惑星形成・進化プロセスの探究
OJ-02	17:20	植田 高啓	円盤観測に裏打ちされた惑星形成理論の構築に向けた歩みと今後の展望

9月17日 (木) 午前

口頭セッション4-1 系外惑星、円盤

座長 野津 翔太、植田 高啓

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OK-01	9:00	小玉 貴則	全球雲解像モデルを用いた潮汐固定された系外地球型惑星の気候
OK-02	9:12	藤澤 卓也	K2-18bはHycean惑星か: CO・CO2に注目した透過スペクトル解析
OK-03	9:24	折原 龍太	影構造に基づく幾何学的制約を取り入れた inner disk の SED モデリング
OK-04	9:36	北出 直也	原始惑星系円盤からのミリ波散乱偏光放射の解析モデル
OK-05	9:48	田崎 亮	元素存在度を考慮した原始惑星系円盤のダスト組成・オパシティモデルの構築
OK-06	10:00	大山 航	後期星間降着が持ち込む角運動量によって恒星降着率が増加する条件
OK-07	10:12	ソフィア リカフィ カパトリック	エッジワース・カイパーベルトの形成史：離散的惑星移動と原始冥王星群の影響

口頭セッション4-2 円盤

座長 桑原 歩、荒川 創太

講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OL-01	10:40	渡邊 太一	多成分ダストの合体成長計算のための高速ツリーアルゴリズム II
OL-02	10:52	瀬川 陽祐	焼結を経たダストアグリゲイトの中心星方向への落下
OL-03	11:04	城野 信一	氷微粒子凝縮による新たなデッドゾーンの形成
OL-04	11:16	岩野 志織	ダスト衝突を考慮したストリーミング不安定性の2流体計算：跳ね返りによる圧縮モデルの導入
OL-05	11:28	宮村 尚典	微惑星の形成・アグリゲイト集積の過程に対する衝突跳ね返りの寄与
OL-06	11:40	塩谷 大成	破壊・摩擦の効果をとり入れた衝突シミュレーションを用いた微惑星サイズでの衝突特性の理論的研究

9月17日 (木) 午後

口頭セッション4-3 円盤			座長 田崎 亮、黒川 宏之
講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OM-01	13:30	神原 祐樹	微惑星リングにおける原始惑星の寡占的成長と軌道構造
OM-02	13:42	桑原 歩	原始惑星エンベロープの流れが形作るダスト分布
OM-03	13:54	石崎 梨理	粘性進化円盤における不可逆化学反応進行と反応ダスト輸送
OM-04	14:06	近藤 克	赤道面乱流が分ける内側岩石惑星の形成経路
OM-05	14:18	奥住 聡	α モデルの先へ：系統的な磁気流体計算に基づく原始惑星系円盤の質量・磁場輸送則

ポスター発表

講演番号	発表者	講演タイトル
P-01	佐藤 勲	標準天体名表記
P-02	市川 治輝	極超音速流れにおける氷アブレーションによるCNバンド発光計測
P-03	西形 みさき	2025年ふたご座流星群の月面衝突閃光の観測による流星体物理量とライトカーブ特性に関する研究
P-04	富永 但	彗星コマにおけるダスト遮蔽効果
P-05	吉田 二美	すばる望遠鏡が明かす木星トロヤ群小惑星の「色の謎」
P-06	荒井 武彦	はやぶさ2搭載TIRの観測による小惑星リュウグウのエジマ岩塊の熱履歴
P-07	平田 成	はやぶさ2#フライバイ観測に基づく小惑星トリフネの形状復元の現状
P-08	千秋 博紀	小惑星Phaethonの表面凹凸と自転周期変動
P-09	岡田 達明	HeraおよびRAMSESによる小惑星の熱赤外撮像
P-10	長足 友哉	はやぶさ2回収試料の付着力測定における塑性変形の可能性に関する検討
P-11	市川 真弓	はやぶさ2観測データを対象とした小天体観測データ解析用QGISプラグインの開発
P-12	平田 成	DESTINY+ミッションにおける小惑星Phaethonの形状復元手法の模擬データを用いた検討：初期報告
P-13	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-14	坂谷 尚哉	はやぶさ2#TIRによる小惑星Torifuneフライバイ観測結果
P-15	吉川 真	太陽系小天体の定義と種別名や用語の整理
P-16	中島 穂乃花	シリカガラス中の水の拡散メカニズム
P-17	木村 友哉	還元的大気をもつ地球類似惑星におけるメタンバイオシグネチャー評価：CO/CH4比と温室効果フィードバックの検討
P-18	塩谷 圭吾	Habitable Worlds Observatory (HWO): 概要および日本の参画の準備状況
P-19	小野寺 圭祐	戦略的火星着陸探査Step1ミッションへの搭載に向けた短周期地震計の開発状況（2025-2026）
P-20	岩田 隆浩	月面天文台TSUKUYOMIの観測計画と要素技術開発
P-21	丹 秀也	将来月面探査でのその場観測に向けた氷混合模擬レゴリスの可視赤外スペクトル分析
P-22	笠原 慧	長周期彗星探査計画コメットインターセプター：フライトモデル開発の終盤戦
P-23	白石 浩章	土星衛星離着陸探査Dragonflyにおける地震観測ミッションの現状報告
P-24	堺 正太郎	将来の火星探査ミッションに向けた検討 ISAS惑星探査ワークショップおよび惑星圏シンポジウムにおける議論から
P-25	石崎 拓也	将来のリターンサンプルの固体物性の体系的分析のための惑星物質固体物性コンソーシアムの推進－XeプラズマFIBによる脆弱隕石試料の加工実証－
P-26	村上 真也	はやぶさ2科学データアーカイブの現状と今後の計画
P-27	坂田 大典	イジェクタカーテン粒子の放出角度解析に基づくはやぶさ2のサンプラーホーン内粒子挙動と採集効率の評価
P-28	鳶生 有理	プラネタリーディフェンスにおける次世代小天体サンプルリターン探査計画の役割
P-29	賀数 健吾	地上試験データを用いた熱赤外カメラTIR校正係数決定における単回帰分析と重回帰分析の比較検討
P-30	小林 正規	DESTINY+搭載用ダストアナライザの開発と地上校正計画2026
P-31	海谷 真生	火星衛星探査機MMX 搭載用分光カメラOROCHI による着陸時3次元観測の検討
P-32	土屋 史紀	高精度紫外線宇宙望遠鏡LAPYUTA計画の検討状況
P-33	神取 知広	加熱を経た含水小惑星模擬表層に対するクレーター形成実験
P-34	宇野 雄登	角礫岩化隕石模擬物の衝突回収実験と強度測定
P-35	黒崎 健二	天体の衝突破壊における破壊モデルの影響
P-36	門野 敏彦	液体標的への固体粒子の衝突：クレーターと液滴の形成
P-37	名和 樹生	原始地球における天体衝突による気加熱のモンテカルロシミュレーション
P-38	西尾 峻人	SPH法による曲率の影響を考慮した小規模破壊衝突のエジェクタ解析
P-39	多門 瞭	土星リングのプロペラ構造形成に関するグローバルN体計算
P-40	木村 淳	ガニメデ金属核熱化学進化モデルによる核磁場強度と内部構造の制約
P-41	中嶋 瑞穂	メタン吸収帯における測光・偏光観測を用いたタイタン大気の時季変動解析
P-42	高木聖子	可視撮像データに基づく木星大赤斑の形状変化解析
P-43	辻 勇吹樹	木星型惑星の内部構造進化における回転の影響
P-44	加藤 龍雅	水蒸気大気を持つ系外地球型惑星の超高層大気構造に対する紫外線放射環境の影響
P-45	平野 照幸	誕生直後の巨大ガス惑星HIP67522bの近赤外線トランジット分光観測
P-46	萱沼 未来	地球近傍に漂う自由浮遊惑星の探査
P-47	谷安 要	クールジュピター移動が形作るハビタブルゾーンの水分供給と保持：HD 170469-A系のN体計算
P-48	桑原 歩	円盤ガスの冷却時間が制御する巨大惑星へのガス降着率
P-49	富永 遼佑	磁気降着円盤に埋もれた惑星による深いギャップの形成と惑星成長への影響
P-50	友膳 涼平	シリカダスト集合体の弾性速度と応力緩和に関する実験的研究
P-51	清水 静	巨大惑星が駆動する衝撃波による円盤加熱とガス降着が引き起こすダスト濃集
P-52	山田 理仁	楕円運動をする原始惑星による摂動を受けた原始惑星系円盤における原始惑星の固体天体集積率の理論的研究
P-53	中澤 風音	原始惑星系円盤の近・中間赤外線散乱光スペクトル：化学モデルに基づく動径方向依存性の予測
P-54	野津 翔太	Class 0 原始星天体 NGC 1333 IRAS 4C 円盤の化学層状構造と電離分布: FAUST
P-55	國友 正信	A型星の組成から惑星落下の痕跡を探る
P-56	多門 瞭	白色矮星の高温進化段階における固体惑星物質の昇華生存可能領域
P-57	渡辺 真帆	Matrix sublimation 法により生成した 高密度アモルファス氷の相転移機構

講演番号	発表者	講演タイトル
P-58	ソフィア リカフィ カバトリック	太陽系外縁部における地球質量惑星の存在証拠（惑星X2シナリオ）
P-59	山下 音緒	New Horizons探査支援を目的としたすばる望遠鏡HSCによる太陽系外縁天体探査と移動天体の自転周期解析
P-60	菊川 涼介	氷衛星上のクレーター形成過程に関する実験的研究：内部海及び氷殻厚さの影響
P-61	高橋 椋太郎	欠陥含有アモルファス氷の構造とダイナミクス
P-62	池田 あやめ	影長法による月面岩塊高推定のための室内実験の精度評価
P-63	横田 勝一郎	外気圏粒子の質量分析による月面組成分布
P-64	荒木 亮太郎	月の高緯度域クレーターの永久影内外における地形劣化プロセスの比較
P-65	木下 真一	SELENE/TCを用いた月極域10 mモザイクマップ作成手法の改良と影内部地形の可視化
P-66	神田 恵太郎	地中レーダー観測による氷検出に向けて：減衰率計測に基づく氷検出可能性の評価
P-67	石井 出海	月面における斜度と宇宙風化度の関係から探る表層物質移動過程
P-68	諸田 智克	月面における水・金属元素の定量と資源活用の可能性
P-69	長岡 央	可視・近赤外分光を用いた月・地球岩石サンプルの岩石組織の取得と評価～SLIM MBCからその先の月探査に向けて～
P-70	木下 岳	放射線シミュレーションを用いた水星表層-宇宙線相互作用の評価
P-71	宮脇 誠一	コンドライトの衝突によって形成される蒸気雲内のクエンチ組成計算における温度圧力履歴のモデル化
P-72	長谷部 聖憲	惑星間ダストからの脱水が火星・金星上層大気に与える影響
P-73	来栖 舞	金星大気における硫酸生成による水蒸気D/H比の上昇
P-74	佐々木 洋平	高速回転球殻内の非弾性熱対流により形成される表層帯状構造の長時間挙動
P-75	飯野 孝浩	タイタン中層大気風速の中期時空間変動の解析
P-76	今村 剛	低速自転惑星の大気の日射応答：金星・潮汐固定惑星・地球赤道大気
P-77	野口 里奈	超小型火山地形ルートレスコーンから炙り出す火星の超近過去：第一報
P-78	庄崎 弘基	地球・火星の蛇行稜における地形解析：断面形状・幾何に基づく反転流路地形とエスカーの識別
P-79	松本 侑士	火星衝突破片の軌道進化
P-80	丹 秀也	閉鎖的な水環境におけるリン挙動の推定：微惑星および初期火星への適用
P-81	小山 俊吾	火星有機物と炭酸塩の炭素同位体比進化: MMXサンプルリターンへの示唆
P-82	千々岩 拓夢	ホワイトサンズにおける硫酸塩鉱物の季節変化：Olympia Undaeの石膏に富む火星の砂丘への示唆
P-83	黒田 剛史	DRAMATIC MGCMへの雲微物理過程導入で再現された現在火星大気の水循環
P-84	三平 舜	火星Medusae Fossae Formation中央部における浸食地形の空間関係から探る 侵食・崩壊過程
P-85	廣田 涼葉	MMX/OROCHIの着陸時分光観測における測光補正手法の検討
P-86	中原 俊平	Hera観測に基づくDeimosストリーマーの特徴と形成モデル

微惑星形成の観測的検証に向けて： 円盤赤道面におけるストリーミング不安定性が駆動する ガスとダストの鉛直大域ダイナミクス

○大城 榛音¹, 富永 遼佑¹, 奥住 聡¹, Elliot Lynch¹

¹東京科学大学

小天体や惑星の材料となる微惑星がいつどこでどのように形成されたかを明らかにすることは、惑星形成論における重要な課題である (e.g., Drążkowska et al. 2023)。近年、ダストとガスの空気力学的な相互作用に起因するストリーミング不安定性 (Youdin & Goodman 2005; Johansen & Youdin 2007) によるダスト濃集を経た微惑星形成が理論上の最有力メカニズムであると考えられている (e.g., Drążkowska et al. 2016)。しかし、この不安定性はダストが沈澱した赤道面における局所的な現象であるために天文観測が困難であり (e.g., Osettag & Flock 2025)、これの観測的検証が大きな課題として残されている。

本研究では、これまで注目されていなかった、ストリーミング不安定性による円盤の大域的なガス擾乱の生成とそれに伴うダストの運動に着目する。先行研究の多くは主に赤道面における局所的なダイナミクスに焦点を当てており (e.g., Li & Youdin 2021)、ガス擾乱の大域的な伝搬機構や上層ダスト分布への影響は明らかになっていなかった。ストリーミング不安定性によって局所的に励起されたガス擾乱が円盤上層における大域的なダスト輸送を駆動すれば、円盤表面を捉える赤外散乱光観測によってその痕跡を検出できる可能性がある。

そこで我々は公開コード Athena (Stone et al. 2008; Bai & Stone 2010) を用いて、先行研究よりも鉛直方向に広いシアリングボックスにおけるダスト-ガス 2 流体シミュレーションを行った。また、ストリーミング不安定性を駆動する成長したダストに加えて、円盤表層の微粒子を模擬したより小さなテスト粒子を新たに導入し、赤道面で局所的に励起されたガス擾乱が上層ダストの大域的な運動へ与える影響を直接調べた。

計算の結果、上層に存在する微小ダストは伝搬するガス擾乱によって円盤観測 (e.g., Rossotti 2023) が示唆する値の範囲内の鉛直拡散をすることが明らかになった。また、詳細な解析により、このガス擾乱は回転流体における非圧縮モードである慣性波として伝搬していることを示した。さらに、長寿命の波束に捕獲された微小粒子がダスト層の厚みを大きく超えて一時的に持ち上がる“噴出”現象を発見した。このような表層粒子の噴出は、円盤表層の微粒子分布を時空間的に変動させ、局所的な散乱光の増光を生じるとともに、その遮蔽効果によって背後に影構造を形成しうる。本講演では、この散乱光観測の特徴と電波多波長観測によるダスト濃集構造の情報 (e.g., Scardoni et al. 2021) を組み合わせることで、ストリーミング不安定性の観測的検証に向けた手法を提案し、その有効性について議論する。

土星リングの形成起源：

破片群の力学進化計算を通じた衛星の衝突起源説と近接遭遇天体の潮汐破壊起源説の検証

○鳥居尚也¹・兵頭龍樹^{1,2,3}・井田茂⁴

¹ 東京科学大学, ² 立教大学, ³ Université Paris Cite, ⁴ Westlake University

土星リングは太陽系で最も目を惹く惑星周りの大規模構造の一つである。リングがいつ・どのようにして形成したのかという問いは惑星科学における根本的な問いであり、これまで長年議論されてきた。現在提案されている形成シナリオは、(a) リングが1億年ほど前に形成したという「若いリング説」に基づくものと、(b) リングが土星形成とほぼ同時期に形成したという「古いリング説」に基づくものに大別される。(a) の代表的なシナリオは、原始衛星同士の衝突で生じた破片からリングを形成する [e.g., Teodoro+, 2023] というもの（以下、衛星衝突シナリオ）で、(b) の代表的なシナリオは、土星近傍を通過する冥王星サイズ天体の潮汐破壊により生じた破片からリングを形成する [e.g., Hyodo+, 2017] というもの（以下、潮汐破壊シナリオ）である。先行研究により、破片を生成する衛星衝突および冥王星サイズ天体の潮汐破壊のシミュレーションは行われてきたが、それらの破片群がその後どのように円軌道化し、最終的にリングへと至るのかはこれまで調べられてこなかった。

我々は、衛星衝突シナリオと潮汐破壊シナリオについて決着をつけるべく、衝突破壊を考慮した N 体シミュレーションと解析的計算を用いて、破片群の衝突力学進化を詳細に調べた。その結果、

- 若いリング説 (a) に基づく衛星衝突シナリオでは、破片群は破片間衝突破壊によるエネルギー散逸によって衝突地点での円軌道に収束し、**Roche 限界半径内に円盤リングを作ることはできないことがわかった** [Hyodo & Torii, 2026]。これは、従来リングとして生き残る破片量の推定に用いられてきた「相当半径 (equivalent radius)」の概念は、衛星衝突後の破片の力学進化には適用できないことを意味している。
- 古いリング説 (b) に基づく潮汐破壊シナリオでは、潮汐破壊の軌道傾斜角 (i_{TD}) と近点距離 (q_{TD}) が力学進化のキーパラメータであることを明らかにした [Torii+, 2026]。リング形成が可能なパラメータ領域を (i_{TD} , q_{TD}) パラメータ空間で制限することに成功し、**広いパラメータ範囲で潮汐破壊によるリング形成が可能であることを示した**。

以上の結果は、現在有力視されている若いリング説に基づく衛星衝突シナリオに対して再考を迫る一方で、古いリング説に基づく潮汐破壊シナリオでは自然にリングを形成しうることを示している。

楕円軌道のホットジュピターを用いた 系外ガス惑星の内部構造の推定

○河合優悟¹ 徳野鷹人² 福井暁彦¹ 成田憲保^{1,3} 田中壺⁴ MuSCAT チーム

¹東京大学 ²大阪大学 ³アストロバイオロジーセンター ⁴国立天文台

ガス惑星の内部構造について、コア集積モデルは重元素コアと水素ヘリウムのエンベロープという二層構造を予測する[1]。一方で、近年の木星や土星の重力場観測からは、広範囲に分布した重元素がガスと混合した、低密度コア(dilute core)の存在が指摘されている[2,3]。

この新しい描像の普遍性の検証には、対象を系外惑星へ拡張する必要がある。しかし、探査機を直接送り込むことができない系外惑星において、内部構造が観測的に制約された例は少ない。その中で、太陽系ガス惑星における重力場に代わる観測量として、系外ガス惑星の「ラブ数」が挙げられる。

ラブ数は、主星から受ける潮汐力に対し、惑星の変形の程度を表す。そしてこの潮汐変形は、惑星の中心に質量が集中するほど小さくなるため、コアの質量や内部の密度分布に依存すると考えられる。したがって、惑星の潮汐変形の観測から、ラブ数を通じて系外ガス惑星の内部構造を間接的に制約できる。

潮汐変形は、惑星の非球対称性に起因する公転運動の微小な変化を検出することで測定可能である。具体的には、楕円軌道において惑星が主星に最接近する「近点」の位置が時間とともに回転する、「近点歳差」と呼ばれる現象の検出が必要である。この検出に必要な観測は、歳差による惑星の公転周期の見かけ上の変化および、楕円軌道の確認である[4]。

このような観測に適したガス惑星は、主星から強い潮汐力を受け、変形が期待される「ホットジュピター」と呼ばれる短周期のガス惑星である。一方で、強い潮汐力を受けた惑星は同時に円軌道に進化すると考えられていたため、近点歳差の観測はこれまで着目されてこなかった。

本講演では、過去のデータに公転周期に減少兆候がみられたホットジュピターWTS-2b の、2024 年から 2025 年の 2 年間にわたる観測の結果を報告する。公転周期の減少の確認には 1-2m クラスの望遠鏡に搭載された MuSCAT シリーズ、楕円軌道の確認には 8m すばる望遠鏡に搭載された MOIRCS の2種類の測光装置を用いた。

観測の結果、この天体の公転周期の減少の兆候を再確認し、さらに 1-2%の楕円軌道を検出した。公転周期の減少率の解には依然として多峰性がみられる一方、最も物理的な解からは、系外ガス惑星では 3 例目となる高精度なラブ数の制限($k_2=0.14\pm0.08$)に成功した[5]。これは、低密度コアをもつホットジュピターにおける理論的な予測とも整合的である[6]。今後は、現在縮退した解を 区別するための追観測をすばる望遠鏡で予定している。

さらに、これまで強い潮汐を受けるホットジュピターでは離心率が残存しないと考えられてきたが、WTS-2b の楕円軌道は、同様の天体が他にも存在する可能性を示している。そこで、短周期ガス惑星を対象とした離心率サーベイから、近点歳差およびラブ数測定に適した天体を系統的に探索することを計画している。

[1] Mizuno 1980 [2] Wahl et al. 2017 [3] Mankovich and Fuller 2020
Ragozzine and Wolf 2009 [4] Kawai et al. under review [5] Wahl et al. 2021

リュウグウ岩塊表面の小クレーター統計から 推定される岩塊の削剥速度とサイズ分布進化

○愛敬雄太¹、諸田智克¹

¹ 東京大学

リュウグウをはじめとするラブルパイル小惑星の表面は多数の岩塊に覆われている。これらの岩塊は、母天体の破壊・再集積によって小惑星が形成された後、微小天体衝突や熱疲労によって破壊・削剥・細粒化を受ける。こうした過程は、大きな岩塊から小さな粒子への質量移動を通じて、岩塊サイズ分布を時間変化させる。そのため、現在観測される岩塊サイズ分布から小惑星形成時の初期分布や表面更新過程の履歴を読み解くには、岩塊の破壊・削剥・細粒化がサイズ分布に与える寄与を定量化する必要がある。しかし、熱疲労による岩塊表層の剥離[1,2]や累積的な微小隕石衝突[3]が、岩塊をどの程度の速度で削剥し、観測されるサイズ分布にどの程度影響するかは十分に制約されていない。岩塊表面に形成された小クレーター[4-6]は、衝突による生成と削剥による消去の競合を記録しているため、岩塊表面の削剥・更新過程を制約する有力な観測指標となる。

本研究では、リュウグウ岩塊上の小クレーターサイズ頻度分布(CSFD)から岩塊表面の削剥速度を推定し、岩塊サイズ分布進化に与える影響を評価した。まず、リュウグウ表面の927個の岩塊から抽出された岩塊上クレーター候補78個のCSFD[6]を解析した。削剥によりクレーターが浅くなり直径が縮小する効果と、衝突によるクレーター生成が平衡すると仮定し、観測CSFDと小クレーター生成率の比較から削剥速度を推定した。さらに、破碎による岩塊の生成・消滅と削剥による岩塊の縮小の効果を組み込んだ、小惑星表面岩塊のサイズ分布進化数値モデルを構築した。このモデルを用いてリュウグウ表面の岩塊サイズ分布の時間発展を計算し、サイズ分布の冪指数変化および岩塊寿命を調べた。

リュウグウ岩塊のCSFDの解析からは、削剥速度が $(0.4-1.5) \times 10^{-7}$ m/yrと推定された。この削剥速度を用いた岩塊サイズ分布進化モデルでは、直径数m以上の岩塊の寿命が地球近傍小惑星の典型的な力学的寿命である10 Myr[7]より長いことが示された。したがって、リュウグウ表面の直径数m以上の岩塊は、地球近傍軌道に移行する以前から存在している可能性がある。また、岩塊サイズ分布の冪指数は小サイズ側ほど緩やかになり、観測される傾向[8]と整合的である。これはリュウグウの小サイズ側の岩塊サイズ分布が、岩塊の削剥による細粒化の影響を受けている可能性を示す。以上から、リュウグウの岩塊サイズ分布は粒径ごとに異なる時間スケールの進化履歴を反映しており、長時間スケールの小惑星表面進化史と短時間スケールの岩塊細粒化履歴の両方を読み解く指標となる可能性がある。

参考文献：[1] Moralo et al. (2020) Nat. Commun., 11, 2913. [2] Sasaki et al. (2021) 52nd LPSC, Abstract #2010. [3] Keller et al. (2025) Nat. Geosci., 18, 825-831. [4] Ballouz et al. (2020) Nature, 587, 205-209. [5] Takai et al. (2021) 52nd LPSC, Abstract #2044. [6] Aikyo et al. (2026) 57th LPSC, Abstract #1452. [7] Gladman et al. (2000) Icarus, 146(1), 176-189. [8] Michikami et al. (2022) Icarus, 381, 115007.

巨大衝突盆地の掘削物の組成解析から探る月の初期火成活動史

○山下 光葉¹, 豊川 広晴¹, 西山 学^{2,3}, 荒木 亮太郎⁴, 諸田 智克¹, Jessica M. Sunshine⁵

(¹東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, ²Institute of Space Research, German Aerospace Center (DLR), ³北海道大学 ³JAXA 宇宙科学研究所, ⁴University of Maryland)

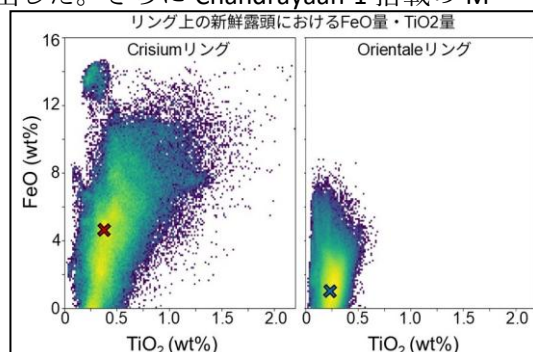
月の初期火成活動の解明は、月内部の熱源分布と内部組成の初期条件を規定し、熱進化史を構築するうえで不可欠である。月は 39~15 億年前に、マントル内の放射性元素の崩壊熱等による再溶融で生じた玄武岩質マグマが生じ、その噴出によって、現在見られる月の海が形成された (e.g., Morota+ 2011)。しかし、月形成直後から約 39 億年前までは大規模な盆地形成を含む多数の衝突が起こったため (Wilhelms+ 1987)、当時の地質記録は大規模に壊変されている。このため、39 億年前以前の月の火成活動の有無やその規模は未解明である。

ここで鍵となるのが、地殻内に保存された太古の貫入岩体等の組成情報である。衝突盆地形成以前は月面に地形的低地が無く、マグマが表面噴出できる環境が構築されていなかったため、初期のマグマは地殻内に貫入した状態で保存されている可能性がある。実際に NASA の GRAIL の観測によって発見された線形重力異常は、39 億年以上前に地殻内の火成作用で形成された貫入岩体に起因すると解釈されている (e.g., Andrews-Hanna+ 2013)。そこで本研究では、衝突盆地形成時に地殻物質が掘削され堆積した構造(リング)に着目し、その組成を調査することで、盆地形成以前に地殻に貫入したマグマの痕跡を評価する。玄武岩質マグマは高い FeO・TiO₂ 量と高 Ca 輝石(HCP)の卓越によって特徴づけられる一方、下部地殻物質は低い FeO・TiO₂ 量と低 Ca 輝石(LCP)が主体である。この特徴に着目し、分光データから玄武岩質貫入物質の含有量と組成を推定した。

本研究では、調査対象としてリングに線状重力異常が交差する Crisium 盆地と (Andrews-Hanna+ 2013)、地殻厚さの異なる表と裏の境界領域に形成された Orientale 盆地を選定した。FeO 量・TiO₂ 量の推定には、Kaguya の Mutiband Imager (MI) データを用いた (e.g., Otake+ 2012)。我々が新規に開発した MI データの測光補正手法を用いて地形の影響によるノイズを減少させた約 60 m/px の MI モザイク画像を作成し、表面成熟度 (Lucy+ 2000) を用いて宇宙風化が最小限の新鮮な小クレーター (直径 300 m~2 km) の放出物のみを抽出した。さらに Chandrayaan-1 搭載の M³ データを用いて LCP/HCP の分類を行った。

その結果、Crisium と Orientale では FeO・TiO₂ 量が大きく異なった。Crisium で FeO 量 0~15 wt%・TiO₂ 量 0~2.2 wt%と広い範囲を示すのに対し、Orientale で FeO 量 0~9 wt%・TiO₂ 量 0~0.75 wt%に収まり、より狭い組成分布を示す (右図)。Crisium の広い組成範囲は、純粋な斜長岩組成から大きく乖離しており、玄武岩質物質の混入を強く示唆する。また、Crisium ではカンラン石由来の吸収特徴が検出され、マントル物質が堆積した可能性を示す。一方、Orientale では組成分布が狭いことから、Crisium で見られるような玄武岩質物質の寄与は相対的に小さいと解釈される。さらに、Crisium では HCP と LCP の中間的特徴を示す領域が存在し、下部地殻物質と玄武岩質岩体との高度な混合が生じていることが示唆された。

純粋な斜長岩と低チタン玄武岩物質を仮定した線形混合モデルにより、リング物質における玄武岩の混合割合は Crisium で 10~25 wt%、Orientale で 5 wt%未満となった。玄武岩物質をすべて貫入岩由来と仮定し、混合割合と盆地形成前の地殻厚さから、地殻内部に保持されていた貫入マグマの有効厚さを見積もったところ、Crisium で 2~9 km、Orientale で 1~3 km 未満となった。これらの値は、後の時代に噴出した海の厚さと同等であることから、衝突盆地形成前においても既に後の海形成期に匹敵する活発なマグマ活動が存在していたことを示す。さらに、両盆地間の貫入量の差は火成活動の時期的な遷移やソースとなるマントルの化学的な不均質性を反映している可能性がある。したがって、本研究の結果は、39 億年前以前の月内部で活発な火成活動が存在し、その規模が地域的に多様であったことを示す。



月地下の岩石サイズ-頻度分布計測による 月表層進化過程の制約

○神田恵太郎¹、熊本篤志¹、石山謙^{2,1}、加藤雄人¹

¹ 東北大学、² 東京国際工科専門職大学

隕石衝突は月面で最も普遍的な表面進化プロセスであり、岩石を破壊してより小さい粒子を生成する表面破碎と、地下の物質を混合するガーデニングを駆動する。隕石衝突によるガーデニングの有効深さはモデルや観測から明らかにされているが、表面破碎の有効深さは知られていない。表面破碎の有効深さは、層序構造の解釈やその形成過程を制約する上で重要な情報となる。表面破碎の有効深さを解明するため、本研究では地中レーダーにより月地下の岩石サイズ-頻度分布(rock size-frequency distribution: RSFD)を計測した。岩石サイズ D と、サイズ D 以上の岩石の累積数 $N(D)$ の関係はべき乗則に従い、定数 r を用いて $N(D) \propto D^{-r}$ という関係が成り立つ。 r が大きいと破碎が進んでいることを意味する。そのため r の深さ方向の変化や月表面の r との違いを調べ、表面破碎の有効深さを評価する。地中レーダーは電波を用いた地下構造計測手法である。Kanda et al., (EPS, Under Review)では Chang'E-4 (CE-4)の Lunar Penetrating Radar (LPR)による観測をシミュレーションし、計測される電場の波形から岩石を検出する基準を構築した[1]。この基準に基づき岩石を検出した。

LPR は深さ約 40 m までを 30 cm 未満の分解能で観測する[2]。CE-4 着陸地域は 30 億年前に堆積した厚さ 12 m のクレーター放出物に覆われており、この放出物層中で 113 個の岩石を検出した。このうちサイズを推定できた 27 個の岩石を用いて、初めて月地下の RSFD を算出した。RSFD の深さ変動を調べたところ、3 m より浅い領域では $r = 1.92$ と、カメラ観測による月表面の RSFD ($r = 1.8 - 2.2$ [3, 4])と同様の値を示した。一方、深さ 3 m 以深の領域では $r = 1.00$ と月面よりも低い値となったことから、隕石衝突による表面破碎の有効深さは 3 m と結論した。レゴリス混合モデル[5]では 30 億年前のレゴリス層が 1 回以上混合される深さは 4 m と推定されており、岩石破碎の有効深さはこれよりも浅い。したがって、月表面と地下を均一に破碎するには 1 回のオーバーターンを引き起こす隕石衝突は不十分で、複数回のオーバーターンに相当する隕石衝突が必要と示唆された。また、3 m 以深は月表面に比べ半分程度の r を示した。破碎が進むほど r が大きくなることから、3 m 以深は月表面のような破碎を経験しておらず、クレーター放出物の始原的な RSFD を保存していると考えられる。これらの観測から、CE-4 着陸地域ではおよそ 30 億年前に、厚さ 12 m のクレーター放出物が短期間に堆積した後、表面および地下 3 m までは隕石衝突の影響で破碎が進んだ一方、地下 3 m 以深は隕石衝突の影響を免れて堆積時の RSFD を保持していたことが明らかになった。このように月地下の RSFD 計測は、カメラ観測など従来の観測手法では到達できなかった層序構造の特徴を定量化し、形成過程を制約する新たな手法である。

参考文献：[1]Kanda et al., submitted to *EPS* (under review) [2]Fang et al., 2014, *Res. Astron. Astrophys.* 14(12), 1607-1622 [3]Shoemaker and Morris, 1970, *Icarus*, 12(2), 188-212. [4]Li et al., *Planets. Space Sci.*, 146, 30-39 [5]Costello et al., 2020, *JGR:Planets*, 125(3)

Salt minerals in returned samples from volatile-rich asteroids reveal divergent final fates of liquid water

リュウグウとベヌの塩類鉱物が解き明かす母天体内部の液体水の終焉

○Jinfei Yu¹, Hiroyuki Kurokawa¹

¹The University of Tokyo

Volatile-rich asteroids are remnants of icy planetesimals formed in the early Solar System. After the accretion, radiogenic heating melted ice and drove extensive water–rock reactions in those planetesimals (Lauretta et al., 2006), producing secondary minerals that preserve important records of early aqueous environments and the chemical pathways relevant to planetary habitability (Meadows et al., 2020). Although liquid water has long disappeared from these bodies, its final stage may be recorded by highly soluble and fragile salt minerals (Sekine 2025).

Returned samples from Ryugu and Benu provide a rare opportunity to access such records with minimal terrestrial contamination. The two samples are broadly CI-like in bulk mineralogy and elemental composition, suggesting similar aqueous alteration (Barnes et al., 2025), yet their salt assemblages are markedly different. Benu contains sodium bicarbonate-bearing minerals such as trona- and nahcolite-like phases (McCoy et al., 2025), whereas the sodium carbonate salts identified in Ryugu are dominated by nearly anhydrous natrite, accompanied by subordinate thermonatrite (Matsumoto et al., 2024). These contrasting salt assemblages may reflect different terminal brine processes. Benu's salts have been interpreted as evaporites based partly on terrestrial analogues (McCoy et al., 2025), whereas the origin of Ryugu's salts remains unresolved.

To resolve this contrast, this study reconstructed late-stage brine evolution using thermodynamic calculations with the FREZCHEM model (Marion et al., 2010) for the Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄-N-P system (Klenner et al., 2025). Starting from alkaline Na-rich brines expected after alteration of CI-like materials (Shibuya et al., 2024), we simulated evaporative water loss and freezing over a range of temperature, pressure, and pH conditions, and compared the resulting precipitation sequences with the salt minerals observed in Ryugu and Benu samples.

Our results suggest that Benu's sodium bicarbonates are best explained by evaporation of mildly alkaline brines (pH ~9) during mild warming, whereas Ryugu's salt assemblage is more consistent with freezing of more alkaline brines (pH ~11) generated by lower-temperature alteration (Zolotov et al., 2011). In this pathway, natron initially formed and was later mildly dehydrated to the natrite-dominated assemblage observed in Ryugu. These different pathways may further reflect differences in the parent bodies from which these two rubble-pile asteroids originated. Benu may sample a larger parent body or deeper source region where liquid water persisted longer, whereas Ryugu may sample a smaller parent body or shallower source region that cooled more rapidly. These distinct terminal conditions for aqueous chemistry on icy planetesimals have implications for the stability of salts and organics and for the form in which water was ultimately carried by carbonaceous material delivered to Earth.

月面同心円型クレーターの形成条件と基盤層強度の推定： 層構造標的に対するクレーター形成実験

○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, ²宇宙科学研究所

月面の小クレーターには、通常のお椀型クレーターに加えて、底に中央ピット（深い孔）を持つ同心円型クレーターが確認されている。先行研究では、レゴリス層と、その地下の強度を持つ基盤層からなる二層構造への衝突実験により、このクレーター形態が再現された[1]。この結果より、月面同心円型クレーターのサイズからレゴリス層厚を推定する手法が提案され、現在でも月面の表層構造の推定に用いられている。一方、基盤層強度は衝突時の掘削や中央ピットの形成を支配する。よって、同心円型クレーターの形態は、レゴリス層厚のみならず、その下に存在する基盤層の強度にも依存すると考えられる。したがって、同心円型クレーターを月面表層構造の指標として用いるためには、レゴリス層厚と基盤強度の双方を考慮した形成条件の定量化が必要である。そこで本研究では二層構造標的への衝突実験を行い、表面層厚さと基盤層強度が、クレーター形態および表面層のクレーターと中央ピットのサイズに与える影響を調べた。

衝突実験には、自由落下と、神戸大の縦型一段式軽ガス銃および宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用い、直径 2-10 mm のアルミ球弾丸を 4.1 m/s-2 km/s の速度で衝突させた。二層構造標的には、混合比を変化させた砂・石膏混合物（引張強度 20.4-364 kPa）を基盤層とし、その上に表面層として石英砂を 0-100 mm の厚さで敷いたものを用いた。

実験の結果、表面層の厚さと基盤層強度に応じて、形成されるクレーター形態はお椀型、平底型、同心円型へと変化した。また、表面層に形成されるクレーターと基盤層に形成されるピットのサイズは、表面層厚さと基盤層強度に対して系統的に変化した。この結果に基づき、レゴリスに覆われた基盤岩標的に対する、表面層のクレーター半径とピット半径の関係を表すスケーリング則を構築した。

このスケーリング則を嫦娥 5 号の月面着陸地点付近に応用し、同心円型クレーターが形成可能となるクレーターサイズを評価した。この地域では、平均レゴリス層厚が 7.15 m と報告されている[2]。岩石質小天体が、砂質レゴリスと玄武岩質基盤からなる月面に、代表的な衝突速度である 20 km/s で衝突したと仮定すると、同心円型クレーターの直径 (D_c) と基盤層強度 (Y) の関係は図 1 のように表される。本研究では、表面層のクレーター半径 (R_c) に対する中央ピット半径 (R_{pit}) の比が $0.1 \leq R_{pit}/R_c < 1$ の間にある場合、同心円型クレーターとして識別可能であるとした。基盤層の強度の値として、玄武岩の引張強度 (10-40 MPa) を与えると、直径約 25~210 m のクレーターが同心円型クレーターの形成条件を満たした。嫦娥 5 号着陸地点周辺で報告されている 958 個の同心円型クレーターの多くは直径約 30-180 m の間に分布しており[2]、予測される形成可能サイズと整合的であった。

次に、本スケーリング則を他の地域の同心円型クレーター (23.455°E, 0.697°N) [3]に適用し、地下の基盤層強度を推定した。このクレーター直下のレゴリス層厚さは 6.1m、表面層クレーター半径、ピット半径はそれぞれ 25.3 m, 12.1 m である。先述の衝突条件を仮定すると、求められた基盤層強度は 2.6-3.1 MPa であった。この値は典型的な玄武岩強度より低く、破碎された玄武岩層およびメガレゴリス層の強度を示していると考えられる。

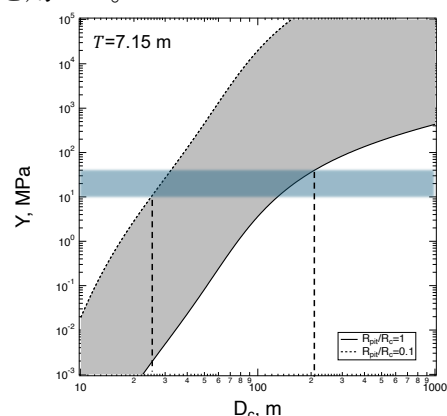


図 1 嫦娥 5 号着陸地点周辺における、クレーター直径と基盤層強度の関係。灰色領域は $0.1 \leq R_{pit}/R_c < 1$ を表す。青色領域は玄武岩質基盤の引張強度 10-40 MPa を示す。

高地と海の地質特性を反映した 月表層誘電特性モデルの構築

○戸井田 愛理¹、宮本英昭^{1,2}、小林真輝人²、竹村知洋²

¹東京大学 地球惑星科学専攻、²東京大学 システム創成学専攻

月の地下層構造は、過去の火山活動や天体衝突に伴う表土の攪拌（ガーデニング）といった地質活動の歴史を反映している[1-5]。地中レーダーをはじめとする電磁波探査は、サンプリングでは保持できない月面上のかさ密度を直接観測できる点で有効な手法である[2-8]。この探査では、電磁波の反射強度から、比誘電率（ ϵ_r ）や誘電正接（ $\tan \delta$ ）を導き、これらと相関を持つかさ密度や鉄・チタン濃度といった地下情報を読み解くことが可能である。しかし、従来の評価式は採取地の異なる多様なアポロサンプルを一括してフィッティングしたような関係式に基づいており、地域（高地・海）ごとの地質的特性の違いに由来するデータのばらつきを十分に反映しておらず、さらなる精緻化の余地が残されていた[1, 9, 10]。

そこで、月の2大地形である高地（斜長岩質）と海（玄武岩質）におけるレゴリスの誘電特性の差異を定量的に評価するため、実験的検討を行った。本研究では、アポロサンプルでは網羅できない多様な組成を再現するため、斜長岩（高地を模擬）および玄武岩（海を模擬）の模擬レゴリスに、イルメナイト（ FeTiO_3 ）の混合比を変化させた試料を調製した。これにより $\text{FeO}+\text{TiO}_2$ 濃度を制御した各試料に対し、かさ密度も複数のパターンに変化させ、空洞共振器法を用いて比誘電率および誘電正接の測定を行った[4]。得られた測定データを解析した結果、比誘電率（ ϵ_r ）は主にかさ密度に、誘電正接（ $\tan \delta$ ）は、かさ密度と $\text{FeO}+\text{TiO}_2$ 濃度の双方に依存するという基本特性を裏付けるとともに、以下の新しい事実が見出された。（1） ϵ_r および（2） $\tan \delta$ のかさ密度への感度が、海と高地の模擬物質間で異なること、さらに、（3）従来は $\text{FeO}+\text{TiO}_2$ 濃度とかさ密度で一意に決まるとされていた $\tan \delta$ について、実際にはイルメナイトの存在量がその変動を左右する要因である可能性を示した。すなわち、同じ $\text{FeO}+\text{TiO}_2$ 濃度であっても $\tan \delta$ が異なるアポロサンプルの先行データに対し、その原因はサンプル中のイルメナイト含有量の違いに起因することを示唆する結果を得た。

本研究は、 ϵ_r から密度、 $\tan \delta$ から $\text{FeO}+\text{TiO}_2$ 濃度を導く解析アプローチに地質背景（海・高地）に応じた補正を導入し、地域特性を反映した新たな解釈モデルを提示した。これにより、Apollo サンプルのデータに見られたばらつきの要因を明らかにし、地下情報（かさ密度・組成）の推定精度を向上させる。

References: [1] Carrier III, W. D. et al. (1991) Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon, 475-594. [2] Xiao, L. et al. (2015) *Science* 347, 1226-1229. [3] Li, C. L. et al. (2020) *Sci. Adv.* 6, eaay6898. [4] Yu, G. et al. (2025) *Sci Rep* 15, 16507. [5] Zhang, Z. et al. (2025) *Commun Earth Environ* 6, 640. [6] Toida, A. et al. *Planet. Sci. J.*, in revision. [7] Miyamoto, H. et al. *Planet. Sci. J.*, in revision. [8] Kobayashi, M. et al. *Planet. Sci. J.*, in revision. [9] Fa, W. et al. (2012) *Icarus* 218, 771-787. [10] Olhoeft, G. R. & Strangway, D. W. (1975) *Earth Planet. Sci. Lett.*, 24, 394-404.

集積完了時点で未分化なガニメデとカリストの 熱・構造進化

○高橋 聖輝¹, 鎌田 俊一¹, 倉本 圭¹

¹北海道大学

木星系巨大氷衛星であるガニメデとカリストは、半径・平均密度・表面温度が類似している一方で、現在の内部構造は大きく異なる。ガニメデは固有磁場を持ち、慣性率からも、内部は金属核、岩石マントル、 H_2O 層からなる分化した内部構造を持つと考えられている (Kivelson et al., 2002)。これに対し、カリストは未分化成分を残す部分分化的な内部構造を持つ可能性がある (Anderson et al., 2001)。この内部構造の違いの起源を理解するためには、ガニメデでは大規模な分化が進行し、カリストでは分化の進行が抑制された要因を明らかにする必要がある。

両衛星における分化状態の違いは、集積時の周木星円盤温度や集積時間に依存するとともに、液体水層の形成や水-岩石相互作用の可能性を左右する。そのため、ガニメデとカリストの分化の程度の違いを明らかにすることは、周木星円盤内での集積環境を制約する手がかりとなり、生命居住可能環境の成立条件を理解する上でも重要である。

これまで、ガニメデとカリストの内部構造の違いは、集積完了時点で両衛星がどのような内部温度や分化状態にあったかという観点から説明が試みられてきた (e.g., Bennacer et al., 2025)。しかし、集積完了後も内部加熱や表面からの冷却により温度構造は変化するため、現在の内部構造の成因を理解するには、集積後の長期的な熱・構造進化も考慮する必要がある。そこで本研究では、集積開始から現在に至るまでの熱・構造進化を連続的に計算する 1 次元熱・構造進化モデルを構築し、集積完了時点で岩石・金属・ H_2O 氷が混合した未分化なガニメデとカリストの熱・構造進化計算を行った。

モデル計算の結果、同一の集積条件でも、ガニメデでは内部温度が H_2O 氷の融点に達し、 H_2O 氷の融解および H_2O -岩石分離が開始する一方、カリストでは内部温度が融点に達せず、大規模な分化は開始しないことが分かった (図 1)。この違いは、カリストではガニメデに比べて岩石質量が小さく、放射壊変熱による内部加熱が弱いことに加え、天体サイズが小さいため集積加熱も小さいことに起因すると考えられる。一方、ガニメデでは一度 H_2O 氷の融解が始まると、液体水と岩石成分の接触により水和反応が進行し、その反応熱がさらなる氷の融解を促進する。その結果、短時間で未分化層中の H_2O 氷が融解することがわかった。以上より、 H_2O 氷の融解開始が両衛星の分化状態を分ける重要な要因であることが示唆される。

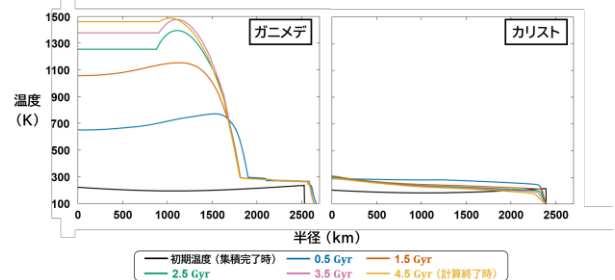


図 1: 集積完了時点で未分化なガニメデとカリストの温度進化。実線の色は集積完了後の経過時間を表す。左右の図で、同一の温度軸を用いている。集積条件は、周木星円盤温度が 160 K、集積開始時刻が CAI 形成後 4.0 Myr、集積時間が 2.0 Myr として計算を行った。

エンセラダス後行半球領域のリッジ地形解析

○宮井孝太郎¹, 諸田智克¹

¹東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

土星の第二衛星であるエンセラダスは、現在でも活発な地質活動を示す氷衛星である。エンセラダス表面はその地形的特徴から主に4つの領域に分類されている：(1)クレータ平原、(2)プリューム噴出など活発な地質活動が見られる南極領域、(3)リッジやトラフなど複雑なテクトニック地形が卓越する後行半球領域(以下 THT と表記)、(4)THT と同様の地形が見られ、THT の反対側に位置する先行半球領域である。

本研究では THT に注目した。THT では過去に大規模な地質活動があったと考えられており、Striated Plain 形成時には $110\text{--}220\text{ mW/m}^2$ と現在の南極域に匹敵する高熱流束を経験したと推定されている[Bland et al. 2007]。THT の地質史を解明することは、エンセラダスの熱進化を明らかにすることに加え、南極域における現在の地質活動の持続期間やメカニズムを制約する上でも非常に重要であると考えられる。

そこで本研究では THT 中央部のリッジ地形に着目した。リッジは圧縮応力による断層運動で形成されたと考えられている[Patthoff et al. 2022]。ただその要因はわかっておらず、氷殻の熱的隆起後の冷却や内部融解による下向きの荷重が候補として考えられている[Pappalardo et al. 2014]。リッジ地形は THT の中で最も新しい地形の一つであり、THT の地質活動終盤の記録を保持する重要な地形であると考えている。

本研究では2つの手法を用いてリッジ地形形成時の熱流束の推定を行った。一つ目は断層の滑り面深さから熱流束を推定するもので、Shenk & McKinnon [2024]の DEM データを用いて測定した69箇所のリッジ高さ、幅、最大斜度を用い、リッジの形成メカニズムを考慮した滑り面深さの推定を行った。二つ目はリッジ周辺の周期的地形に着目し、Bland et al. [2007]の手法を用いて、その地形の卓越波長から形成時の熱流束を推定した。その結果、両方の解析において 100 mW/m^2 以上と Striated Plain 形成時と同程度の高熱流束が推定された。このことはリッジが冷却による氷殻の収縮ではなく内部の融解によって形成されたことを意味する可能性があると考えており、THT の活動期に内部海が局所的にでも存在していた可能性がある。本発表ではリッジ形成時の短縮量や圧縮方向から推定される内部構造についても議論を行う。

さらに、リッジ地形を含む THT 内の複数の領域におけるクレータカウンティングの結果、リッジ地形と Striated Plain、そして THT 南部に位置する transitional 領域の形成年代に顕著な差が見られないことがわかった。このことは熱源が短いタイムスケールで移動した可能性を示唆しており、エンセラダスの熱史の描像に新たな視点を投げかけるものであると考えている。本発表では、THT での地質活動の期間や内部海の持続可能性に関する議論も行う。

月主要鉱物の混合スペクトルに対する線形混合モデルの実験的検討

Experimental Investigation of Linear Mixture Models for Mixed Spectra of Lunar Major Minerals

○山本聡, 松岡萌, 池田あやめ

産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門

月のレゴリスは、さまざまな鉱物やガラス質物質から構成されているため、リモートセンシングデータから鉱物の存在量を推定するには、混合スペクトルの解析が重要となる。混合スペクトルの解析手法は、大きく線形混合モデルと放射伝達モデル(非線形混合モデル)に分類される。線形混合モデルは、センサーの観測視野内に各鉱物の空間的に分離された領域が含まれ、それぞれの反射光が互いに干渉しないと仮定するモデルである。この混合形態は、MIXEL (mixed pixel)あるいはチェッカーボードモデルと呼ばれる。一方、放射伝達モデルは、混合物中の粒子間で起こる多重散乱によって反射光が非線形に混合する状況を扱うモデルである(代表的なモデルとしてHapkeモデルが知られる [1])。

実際の月面の大部分は、多重散乱が支配的なレゴリスで覆われていることから、これまでの月のスペクトルは、主として非線形混合モデルの枠組み内で解釈されてきた。しかし、近年のハイパースペクトル観測により、月面には、ほぼ単一鉱物から構成される岩相(例えば、高純度の斜長岩やカンラン石に富む岩体[e.g., 2, 3])が露出していることが明らかとなっている。このような露頭では、観測されたスペクトルはMIXEL型の混合形態となり、線形混合モデルに従う可能性が高い。したがって、非線形混合のみを前提とした月面の鉱物存在量や岩石組成の推定が常に適切とは限らず、対象によっては、線形混合モデルの方が、スペクトルデータをより適切に記述できる可能性がある。しかし、線形混合モデルと非線形混合モデルによる解釈の違いについて、これまで十分に検討されてこなかった。

本研究では、月主要鉱物の混合スペクトルに対する線形混合モデルを検証するため、新たに混合試料の分光測定システムを構築し、実験的評価を行った。斜長石、輝石およびかんらん石を用いた混合試料の反射スペクトルを取得し、線形混合モデルによる鉱物存在量推定結果を評価した。その結果、特に斜長石存在量の推定では、理論的検討と整合する系統的な偏りが認められた。本研究の結果は、月面における鉱物存在量推定において、対象に応じて線形混合モデルと非線形混合モデルを適切に使い分ける必要性を示すものである。

[1] Hapke, B., Theory of reflectance and emittance spectroscopy, Cambridge University Press, 1993.

[2] Ohtake et al. (2009), Nature, 461, 236, doi: 10.1038/nature08317.

[3] Yamamoto et al. (2010) NGeo, 3:533-536, doi: 10.1038/ngeo897.

近赤外顕微分光計測による鉱物組成推定手法の確立と月隕石を用いた実証実験

○日向輝¹、森晶輝¹、三河内岳²、新原隆史³、長勇一郎¹、杉田精司¹

1. 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, 2. 東京大学総合研究博物館, 3. 岡山理科大学

分光計測は、試料を非破壊かつ遠隔で計測し、スペクトルの形状から鉱物種を特定することが可能である。特に、月は「かぐや」をはじめとする軌道上からの分光観測で全球的に調べられており、月形成初期に生じたと考えられる純粋斜長岩などが発見されている (e.g., Ohtake et al., 2009; Yamamoto et al., 2012)。軌道観測は空間解像度が数 m スケールに制限されるため、観測されるスペクトルは複数の鉱物のスペクトルが混合していると考えられる。月表層に存在する鉱物量比や個々の鉱物形状、衝撃変成の有無を調べるためには、より高い空間解像度の計測が必要である。実際、SLIM に搭載された Multi band Camera は mm スケールでの鉱物推定に成功した (Ohtake et al., 2026, LPSC)。しかし、実際の月試料中は mm 以下の微細な鉱物が占めているため、今後の探査に向けては 100 μm スケールの空間解像度を持つ計測装置が必要である。我々ははやぶさ 2 のキュレーションで用いてきた可視顕微分光計測装置「MICOSHI」(Cho et al., 2022) を近赤外波長域に拡張した装置を開発した (Mori et al., 2025, LPSC)。しかし、近赤外顕微分光データから月試料の複雑な鉱物分布や存在比を、どの程度の精度で定量的に計測できるかは十分に検証されていない。本研究では、複雑な天然組織を有する月隕石をモデルサンプルとして用い、近赤外顕微分光計測がこれらの岩石学的な特徴や衝撃変成度をどの程度識別・定量できるかを検証した。

本研究では、10 種類の月隕石（斜長石質角礫岩および玄武岩の薄片・厚片試料）を、2 $\mu\text{m}/\text{pix}$ の高い空間解像度の光学系を用いて 440 - 1550 nm の 17 バンドで撮影した。高解像度による撮影範囲の狭さを補うため、サンプルステージを電動 XY ステージに換装し、全自動で広い視野を計測できるようにした。データ解析では、スペクトルの吸収特徴に基づいた手動による端成分の抽出を行った。その後、各ピクセルに対して端成分とのコサイン類似度を計算することで数 cm 大の薄片全体で鉱物マップと鉱物存在比を算出した。

粒径が約 50 μm 以上の鉱物相は、EPMA や SEM-EDS による元素マップと最大で 75% 程度の高い精度で一致した。微細組織を有する試料においても、視野全体の鉱物存在比を化学分析の結果と 10% 以内の誤差で再現した。月の海の玄武岩隕石に含まれる輝石のゾーニングや、角礫岩内の輝石のラメラ構造といった鉱物の冷却過程に起因する微細な構造を可視化することに成功した。また、衝撃溶融脈の識別や、斜長石とマスケリナイトのスペクトル形状の違いから、試料が受けた衝撃の程度を推定できる可能性が示唆された。

以上より、本研究で確立した高解像度顕微分光計測は、非破壊で迅速に鉱物学的情報を抽出できる手法であることが実証された。本手法が、月着陸探査におけるその場分析計測技術および、今後の MMX や将来の月探査における非破壊キュレーションにおいても、岩石の形成および衝撃の歴史を解き明かす上で有効な技術であると期待される。

SLIM 搭載マルチバンド分光カメラによる月面岩石画像の組織評価と 地球岩石組織の比較

Rock Texture Evaluation of one Lunar Surface Rock Obtained by the Multiband
Camera on SLIM and Comparison with Terrestrial Rocks

○大竹真紀子^{*1}, 佐伯和人^{*2}, 仲内悠祐^{*2}, 長岡央^{*2}, 西野真木^{*3},
横田 康弘^{*3,4}, 宮崎理紗^{*3}, 佐藤広幸^{*3}, 本田親寿^{*5},
石原吉明^{*3}, 西谷隆介^{*3}, 梶谷伊織^{*3}, 田阪美樹^{*6}

*1 岡山大/*2 立命館大/*3 JAXA/*4 東京科学大/*5 会津大/*6 静岡大

これまでの研究で、小型月着陸実証機 SLIM に搭載したマルチバンドカメラ (MBC) で取得した月面岩石の分光観測データを用いて、Kaiken と名付けた岩石の組織解析の結果を報告した。Kaiken は同量のカンラン石と斜長石を含むトロクトライト (マグマオーシャンの固化過程で地殻に貫入したマントル由来のマグマが地殻と混合して形成した岩石) であり、カンラン石鉱物粒子 (クラスタ) の長軸が最大で約 3cm と大きく、粒子は長く伸びた形状でかつ長軸が一定の方向に並んだ構造を持つ。

Kaiken と同様の岩石組織は、地球上ではプレートの沈み込みなど広域変成作用に伴い、継続的な高い温度・圧力・応力の働きで形成される。これまで月試料中には Kaiken のような組織を持つ岩石は見つかっておらず、月では広域変成作用は起こらないとされている。もし Kaiken が高温・高圧・応力下で形成したのであれば、それは月にも広域変成作用が起こり得た可能性を示唆する。ただし地球岩石の研究から広域変成作用以外にも、マグマ溜まり内部での鉱物の結晶化とそれに続く堆積・圧縮作用、マグマの流動等によって粒子の変形や、配列が起こり得ると報告されており、Kaiken の岩石組織の成因が広域変成作用によるのか、マグマ溜まりの分化によるのか切り分けが必要である。

今回、Kaiken と既存研究で報告されている地球岩石の組織観察結果との比較を試みた。地球岩石の薄片写真を用いた mm から cm サイズまでの組織観察例は多数あるものの、Kaiken の岩石サイズ (cm から数十 cm サイズ) での組織の研究例はほとんど無く、組織評価の方法が確立していないため、薄片の組織に対する評価手法を参考に、円形度やアライメント係数 (配列程度の指標) で比較した。結果、数件の例で比較した範囲では、Kaiken と地球のマグマ溜まりの分化で形成した岩石とはこれらパラメータの値が異なる傾向を持っていた (Kaiken の方が円形度は小さく、アライメント係数は大きい)。ただし、マグマ溜まりの分化の結果として形成される岩石組織には大きなバリエーションがあるのに対し、現状では地球岩石の報告例を多数網羅して比較評価するまでには至っておらず、今後より多くの例と比較する予定である。さらに、岩石サイズでの地球岩石の分光画像による組織観察結果と比較するため、層状構造を持つカンラン岩とマフィック岩 (北海道幌満で採取された岩石) について Kaiken と同様な分光画像をハイパースペクトロメータで取得し、比較した結果についても報告する。

月隕石中斜長石の鉄価数から見積もる 各種岩石タイプの酸化還元状態

○三河内 岳¹・佐竹 渉²・横井 仁菜¹・竹之内 惇志³

¹東京大学・²千葉工業大学・³京都大学

はじめに：これまで我々は、アポロ・ルナ月リターン試料およびいくつかの月隕石に含まれる斜長石／マスケリナイトの鉄価数に着目し、各種月岩石の酸化還元状態を評価してきた。その結果、アポロ計画により得られた斜長岩（例：FAN）中の斜長石が顕著に高い $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比を示し、比較的酸化的な条件下での形成が示唆された。ただし、当初の研究は試料数が限られていたため、本研究では近年サハラ砂漠などから回収された月隕石に重点を置いて斜長石の分析を行ったので、その結果を報告する。

試料と分析手法：分析試料は、サハラ砂漠、オマーンおよび南極で回収された 24 個の月隕石（斜長岩質角レキ岩 17 個、破碎性角レキ岩 2 個、トロクトライト 1 個、玄武質／斑レイ岩質角レキ岩 1 個、斑レイ岩 1 個、海の玄武岩 2 個）で、斜長石の化学組成は東京大学の FE-EPMA（JEOL JXA-8530F）で測定し、鉄価数は高エネルギー加速器研究機構（KEK）フォトンファクトリー BL-4A ビームラインでのシンクロトロン放射マイクロ XANES（Fe K 端、ビーム径約 5 μm ）により決定した。

結果と議論：分析した斜長岩質角レキ岩および破碎性角レキ岩中の斜長石の大部分はアノーサイト成分で An_{95} を超え、FAN 由来と MAN 由来の岩片がほぼ同程度の割合で観察された。これらの斜長石の $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比は 0.03～0.26 の範囲にあり、ほとんどが 0.05 を超えていた。特に、先行研究と一致して、FAN 斜長石は高い $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比（通常 0.10 超、最大約 0.25）を示した。また、MAN 起源と考えられる斜長石は一貫してやや低い $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比（0.05 程度）を示し、以前報告された値（約 0.10）とは異なる傾向を示した。これは、MAN が後期のマグマ活動や地殻再構成によって形成された二次的岩石であり、比較的還元的条件下で生成したためと解釈される。斑レイ岩および海の玄武岩（角レキ岩試料を含む）はアノーサイト成分が一貫して低く（大部分 An_{95} 未満）、 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比も 0.08 未満であった。また、異なる海の玄武岩の岩石タイプ間で $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比に有意な差は見られなかった。

結論：以上の結果は、初期マグマオーシャンの結晶化および早期の斜長岩質地殻形成（FAN）が比較的酸化的な条件下で進行し、その後の地殻再構成（MAN）やマグマ活動（海の玄武岩）がより還元的な条件で支配されたことを示している。このような月の各種岩石タイプにおける酸化還元状態の顕著な不均質の成因についてより詳細な考察を行うためには、さらなる試料の網羅的な分析と酸化的でかつ含水状態のマグマオーシャン固化を模擬する実験的研究が必要である。

月面想定鉱物における OH/H₂O の温度安定性

○仲内 悠祐¹, 丹 秀也¹, 佐伯 和人¹, 長岡 央¹

1 立命館大学 ESEC

月面における OH/H₂O の物理的挙動は、月・惑星の進化過程の理解だけでなく、将来の月面資源利用や有人探査における水資源活用の観点からも重要である。特に月極域における水循環を理解するためには、月面鉱物に吸着した OH/H₂O の温度安定性を明らかにする必要がある。

これまで、月レゴリス模擬物質 JSC-1A を用いた超高真空下での昇温脱離（TPD）実験により、水氷・水クラスター、化学吸着水および解離吸着 OH の脱離特性が評価され、それぞれの脱離エネルギーや脱離速度が導出されている[1]。これらの物理パラメータは、月面における OH/H₂O の分布や移動を再現する数値モデルに利用されている[1,2]。一方、実際の月面はカンラン石、輝石、斜長石など多様な鉱物から構成されているため、JSC-1A のみでは各鉱物固有の吸着・脱離特性を評価することは困難である。鉱物ごとの OH/H₂O の温度安定性を明らかにすることは、月全球における水循環モデルの高度化につながる。

本研究では、近赤外拡散反射分光法を用いて、複数の月面構成鉱物を対象とした常温以上における OH/H₂O の温度安定性を評価した。測定には ThermoFisherScientific 社製 FTIR（Nicolet iS50）および加熱真空拡散反射装置を用いた。大気環境下で測定した San Carlos olivine では、吸着 OH/H₂O 量は 25℃から 125℃への昇温に伴い約 57%減少した。この値は、Hibbitts ら[1]が超高真空下で JSC-1A について報告した約 50%の減少と同程度であった。発表では、複数の鉱物について大気環境および真空環境下で取得した温度安定性データを比較し、鉱物種による OH/H₂O の吸着・脱離特性の違いについて議論する。

[1] C.A. Hibbitts et al., *Icarus*, 2011, vol 213, 64–72

[2] N. Shinohara et al., 57th LPSC, abstract#1375

異なる作製法による 氷付きレゴリスシミュラント中の水氷形状の比較

○佐伯 和人¹、丹 秀也¹

¹立命館大学

月の極域の永久影（PSR）の水氷資源探査にむけ、嫦娥7号、Viper、LUPEXと続々と探査計画が実施される。氷がレゴリスにどのようなサイズや形状で存在しているかは、赤外線分光等の観測の精度や、資源採掘の難易度にも影響する大きな関心事である。著者らはこれまで、さまざまな方法で氷付きレゴリスシミュラントを作成してきた。このうち、（１）液体窒素に水を噴霧してつくった氷をシミュラントと混合する方法、（２）低温シミュラントを湿潤空気の中で落下させ水蒸気を凝華させる方法、（３）真空状態に近い低水蒸気分圧環境下で模擬レゴリスにコールドトラップさせる方法、のそれぞれで、どのようなサイズ、形状の氷が生成したかを、光学顕微鏡や、低温ステージを装備した走査型電子顕微鏡の観察画像等を使って紹介し、結果を元に月永久影での氷の形状について議論する。それぞれの氷付きレゴリスシミュラントの特色について、（１）は篩をつかって粒径を制御できる一方でレゴリスと均質にまぜられているかの確認が必要である。（２）はレゴリス粒の周辺に微量氷を分散して着氷させることができるためレゴリスとの均質な混合という意味では優れた方法であるが、粒径の制御は難しく現状の生成方法では $10\mu\text{m}$ 前後の氷粒径となっている。（３）は着氷速度が極めて遅く、数時間の実験でも水分子が降着する表面付近のレゴリスが0. 数%程度にしか着氷しないことや、深さ方向にグラデーションがつくなど、PSRでの現象の再現としては良いが均質なシミュラントをつくるには問題がある。ところで、（３）の方法で作成した氷の形状の直接観察には現時点で成功していないが、走査型電子顕微鏡に -30°C まで冷却可能な冷却ステージを設置し、その中に氷とレゴリスシミュラントを共存させる方法で、疑似的に永久影地域のレゴリス内部と類似の環境をつくった。その結果、凝華初期は数ミクロン以下の微細な氷粒の集合体が鉱物表面に点在することがわかった。これは永久影では鉱物に膜のように氷がつくのではなく、鉱物表面の欠陥や微細な凹凸等の局所的な活性点で不均一核形成が起きていることを示唆している。今後はそれぞれの手法で生成した氷の時間発展について実験を進める。



図: 走査型電子顕微鏡(日立 TM4000PlusII)に冷却ステージ MK-3 (DEBEN UK Ltd.)を装着

月外気圏 $C^+ \cdot N^+ \cdot O^+$ イオンの生成機構と時間変動：かぐや観測が示す 2 成分起源と流星雨

Temporal Variations of Lunar Exospheric C^+ , N^+ , O^+ Ions: Two-Component Origins and Meteor Shower Effects Revealed by Kaguya Observations

月の外気圏には多様なイオン種が観測されているものの、その滞留時間は数分～数 10 分と短く、外気圏に恒常的に存在するためには継続的な生成・供給メカニズムが不可欠である。金属イオンについては、これまで光イオン化、太陽風スパッタリング、微隕石衝突が主要な生成過程として提案されてきた。しかし、軽元素イオンの生成機構については十分に理解されておらず、その起源や生成効率には未解明の点が多く残されている。

本研究では、月周回衛星「かぐや」による 2008 年 9～11 月のイオン質量分析データを昼夜・位相別に分類し、ピーク分解と組み合わせて C , N , O イオンの挙動を解析した。昼側と夜側、および太陽風からシールドされる地球磁気圏の内外の比較により、生成メカニズムの寄与の分離を可能とした。その結果、 C , N , O イオン強度は太陽風水素密度と強い相関を示し、月外気圏における昼側イオンの主要な生成メカニズムは太陽風のスパッタリングであり、微隕石衝突や光イオン化の寄与は小さいことを定量的に示した。また流星雨直後の夜側で C^+/O^+ 比が上昇する現象を初めて確認し、彗星塵が恒常的に衝突する微隕石よりも高い C/O 比を持つことを明らかにした。さらに N^+/O^+ 比との相関から、月面には「太陽組成よりも N/C 比の高い成分」と「 CO/CO_2 由来成分」という起源の異なる少なくとも 2 種類のリザーバーが存在することが示された。

<参考文献>

Terada K. *et al.* Daily variations of carbon, nitrogen and oxygen ions in a thin lunar atmosphere, *Nature Geoscience* **9**, 419-424 (2026)

水星表面の揮発性元素量と温度環境の関係： 外気圏を介した物質輸送の定量評価

○平田佳織¹, 白井寛裕², Patrick N. Peplowski³, 鈴木雄大^{2,4}

¹レスター大学, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³ジョンズ・ホプキンス大学応用物理研究所, ⁴ボストン大学

MESSENGER 探査機は、爆発的火山活動の痕跡や侵食地形 Hollow の発見に加え、核分光法を用いた化学組成観測により、水星表層に豊富な揮発性物質が存在することを明らかにした。ガンマ線分光計（GRS）の観測では、中揮発性元素である K と Na の表層存在量が K/Th 比=6600±2800^[1]、Na 存在度=2.9±0.1 wt%^[2]と推定された。さらに、K 存在度は最高表面温度と負の相関を示し^[3]、Na 存在度は緯度依存性を示す^[4]ことから、表層の揮発性元素が熱脱離・吸着を繰り返しながら外気圏を介して高温領域から低温領域へ見かけ上移動して濃集する「熱的再分布」仮説が提案され、外気圏 Na もこれに整合的な時空間変動を示すことが明らかになった^[5]。しかし、ガンマ線分光法の広い観測視野および低シグナル/ノイズ比のために K や Na の空間分布を詳細に推定することは困難であり、表層における揮発性元素量と温度環境の関係は詳細に理解されてこなかった。そこで本研究では、逆問題解法を用いた端成分分析手法^[6]を GRS データに応用することで K 存在度と表層温度の関係を定量評価することを目的とした。

本研究で用いた端成分分析手法では、低空間解像度観測データを「端成分物理量の、観測視野内における線型混合」と仮定し、逆問題を解くことにより観測データと混合率から端成分となる物理量を推定する。まず、水星表面各地点の深さ 1 m までの熱伝導を考慮した表層温度モデルを作成し、GRS 観測に主に寄与する表層 5 cm の平均温度に基づいて 3 つの端成分ユニット（低温・中温・高温ユニット）を定義した。次に、GRS 観測時刻および位置から、各観測データに対する地表各地点の寄与係数を幾何学的に計算し、これを端成分ユニットごとに積算することで混合率を算出した。ユニットごとに混合率の大きい観測データを抽出して積算することより合計 43 種類のスペクトルを作成し、K に由来する 1460 keV ピークからスペクトルごとに K 存在度を推定した。最後に、推定された組成とユニット混合率を用いて逆問題を解くことで、端成分ユニットに相当する K 存在度を推定した。

スペクトルごとの K 存在度は端成分ユニットの混合率に応じて系統的に変化し、高温ユニットの寄与が大きいスペクトルほど K 存在度が低くなる傾向を示した。一方で、端成分ユニットの定義に 2 水星年の平均温度を用いた場合には低温ユニットの、観測時点の温度を用いた場合には中温ユニットの寄与が大きいスペクトルが最も高い K 存在度を示した。

熱的再分布仮説は表面温度と K 存在度の負の相関を予測する。本研究の結果は、この傾向が平均温度に基づく分類でより明瞭に見られることを示しており、K の再分布が水星年より短いスケールでの瞬間的な温度変化ではなく、長期間にわたる効果の蓄積を反映している可能性を示唆する。BepiColombo 探査機搭載の X 線分光計（MIXS）では最上層数 nm の K 存在量を測定予定であり、より短いタイムスケールでの一時的な熱脱離・吸着の効果を検出できる可能性があると期待される。

参考文献： [1] Peplowski *et al.*, 2011, *Science*, **333**, 6051, 1850-1852. [2] Evans *et al.*, 2012, *JGR*, **117**, E00L07. [3] Peplowski *et al.*, 2012, *JGR*, **117**, E00L04. [4] Peplowski *et al.*, 2014, *Icarus*, **228**, 86-95. [5] Suzuki *et al.*, 2023, *EPS*, **75**, 174. [6] Hirata *et al.*, 2025, *JGR: Planets*, **130**, 4, e2024JE008788.

水星表層の核分光データ解釈に向けた 観測深度シミュレーション

○ 木下岳¹, ○ 鈴木雄大², ○ 吉岡和夫¹, ○ 木村智樹³, ○ Marco Pinto⁴,
○ 平田佳織⁵, ○ Daniel Heyner⁶, ○ 村上豪²

¹ 東京大学, ² JAXA/ISAS, ³ 東京理科大学, ⁴ Laboratory of Instrumentation and Experimental Particles Physics, ⁵ レスター大学, ⁶ ブラウンシュバイク工科大学

大気や磁気圏による遮蔽効果が小さい水星には高エネルギーの宇宙線が降り注いでいる。宇宙線入射に付随して発生する γ 線、中性子線などの二次放射線は地殻組成の重要な観測手段である。本研究では、これからもたらされる水星探査機 BepiColombo の核分光観測データの解釈に向けて、観測機器はどこで、どれくらいの深度で発生した放射線を観測しうなのか評価する。

まず水星磁場モデルと BepiColombo の観測データを用いて、水星磁気圏が宇宙線の運動に与える影響を評価し、高エネルギーの宇宙線は全球に渡って等方的に降り注ぐことを示した。続いて水星模擬物質のブロックに宇宙線陽子を入射させるシミュレーションを実施し（図 1）、地殻直上に模擬検出器を配置して、核分光模擬観測データを作成した。検出器に入射した放射線の生成深度を記録したところ、地下数 10 mm を中心として、最大で地下 1 m 程度で生成した γ 線・中性子線が検出されていた。

以上により、宇宙線の入射領域と核分光観測深度が明らかになり、BepiColombo の核分光観測データ解釈に際し、特に鉛直方向の制約を与えられる。また X 線などの観測深度が異なる手段と組み合わせて、地殻内の物質輸送の定量化なども期待される。

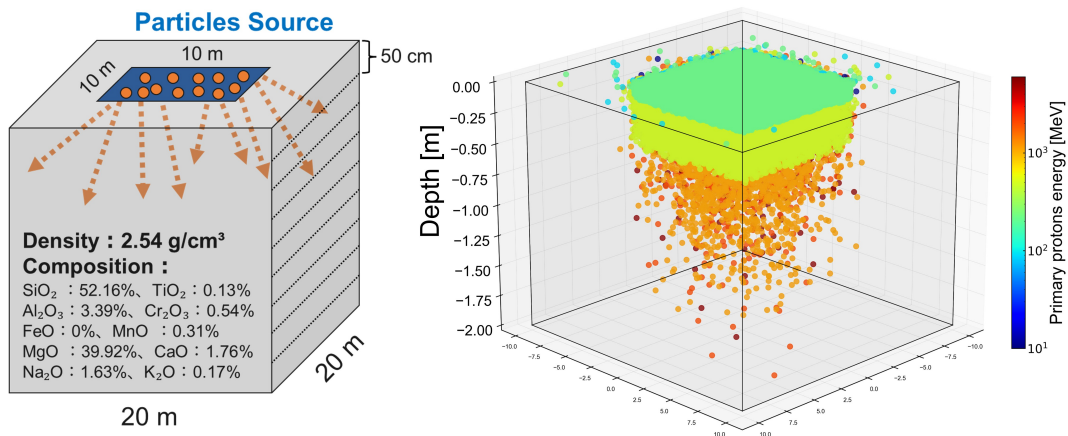


図 1: 水星模擬地殻による放射線シミュレーションのセットアップ

永年共鳴により励起された微惑星の高速衝突による 原始水星のマントル剥ぎ取り

○中村郁仁¹, 井田茂^{2,3}, 兵頭龍樹^{3,4,5,6}, 玄田英典³

¹東京科学大学理学院地球惑星科学系, ²Westlake University, ³東京科学大学地球生命研究所,

⁴Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), ⁵立教大学大学院人工知能科学研究科,

⁶SpaceData Inc.

水星は他の地球型惑星に比べて平均密度が高く、惑星質量の約70%を金属コアが占めていると考えられている(Hauck et al. 2013)。しかし、その成因は未だ明らかになっていない。水星の高いコア質量比を説明する仮説の一つとして巨大衝突説(e.g., Benz et al. 1988)が提案されている。この仮説は、原始水星が月質量程度の原始惑星との衝突によってマントルの大部分を失い、高いコア質量比を獲得したという説である。この仮説に基づき、水星のような高コア質量比の天体を形成する衝突条件が衝突計算によって数多く調べられてきた。しかし、N体シミュレーションによる軌道進化計算では、そのような衝突条件が起こる確率は非常に低いことが示されている(Franco et al. 2022)。

そこで本研究では、惑星形成過程で多数回発生する微惑星衝突に着目した。太陽系では、木星・土星の重力摂動による永年共鳴によって、水星軌道付近で微惑星の離心率が励起されることが理論的に示されている(Murray & Dermott 1999)。本研究では、この永年共鳴によって繰り返し発生する高速微惑星衝突が、原始水星のマントルを徐々に剥ぎ取りコア質量比を増加させるシナリオ(Hyodo et al. 2021)をN体シミュレーションで検証した。

水星形成に関する衝突破壊を考慮したこれまでのN体計算は、主に原始惑星同士の衝突に注目してきた(e.g., Chambers 2013; Clement et al. 2021; Scora et al. 2024)。これに対し、本研究では原始惑星への微惑星によるクレーター衝突に着目した。そのため、従来の研究で広く用いられているLeinhardt & Stewart (2012)の衝突モデルではなく、低質量比の衝突に適したHyodo & Genda (2020)の衝突モデルをN体計算へ組み込み、原始惑星と微惑星の衝突のみを扱った。原始水星と微惑星の総質量はそれぞれ1水星質量に固定し、原始水星数を変化させて計算を行った。

その結果、永年共鳴により原始水星集団の内側・外側の2領域で微惑星の離心率が励起され、高速クレーター衝突の累積効果によって、一部の原始水星ではコア質量比が初期値30%から70%以上まで増加した。一方、多くの原始水星ではコア質量比は30%台に留まり、その後の合体によって高コア質量比の原始惑星と低コア質量比の原始水星が混合されるため、形成された水星全体のコア質量比の増加はわずか(<40%)であった。

以上より、永年共鳴に伴う微惑星衝突は原始水星のコア質量比増加に寄与するものの、それだけでは現在の水星の高いコア質量比を説明するには不十分であることが示唆された。ただし、本研究の結果は、原始水星同士の衝突を完全合体として得られたものである。実際には、原始水星同士の衝突によってもコア質量比が変化する可能性がある。今後は、この効果を考慮した統一的な衝突モデルを用いて、水星の衝突過程を検証する予定である。

突発的・定常質量放出におけるダストのサイズ： 超新星グラファイト形成を例として

○ 篠田兼伍¹, 田崎 亮², 徳野 鷹人³, 諏訪 雄大²

東京大学理学系研究科天文学専攻¹, 東京大学大学院総合文化研究科宇宙地球部会², 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻³

惑星科学では、原始惑星系円盤中に存在するダストが、衝突合体、破壊、沈殿、動径移動を通してどのように進化するかが広く議論されてきた。一方で隕石中には、円盤内で形成・成長したダストだけでなく、太陽系形成以前の恒星風や爆発放出物中で形成されたダストの一部も、プレソーラー粒子として保存されている (Nittler & Ciesla 2016)。したがって、太陽系物質に残された星間・星周ダストの記録を理解するためには、既存ダストの円盤内進化だけでなく、気相ガスから最初のダストがどのような形成環境で生まれるのかを明らかにする必要がある。

プレソーラー粒子は、個々の粒子についてサイズ、組成、同位体比を実験室で直接測定できるため、天文観測だけでは分離しにくいダスト形成環境を制約する貴重な試料である。特に、マーチソン隕石中の低密度プレソーラーグラファイト粒子には、短寿命放射性同位体 ^{44}Ti の崩壊に由来する ^{44}Ca 過剰など、超新星起源を示す強い証拠を持つものが存在し (Nittler et al. 1996)、これらの中にはミクロンサイズ以上の粒子が報告されている。一方、従来の超新星ダスト形成計算では、炭素質ダストの典型的なサイズはサブミクロンに留まることが多く (Todini & Ferrara 2001; Nozawa et al. 2003)、隕石中に見つかっている大きなグラファイト粒子をどのような物理条件で形成できるのかは明らかでなかった。

本研究では、超新星放出物中のグラファイト形成を例として、ガスからダストが凝縮する際のサイズを決める物理を古典核形成モデルを用いて調査した。特に、爆発エネルギー、放出物質量、放射性同位体による加熱の強さ、形成層の違いが、凝縮時のガス密度と冷却時間を通して、最終的なグラファイト粒子のサイズにどのように反映されるかを系統的に調べた。その結果、グラファイト粒子の最終サイズは凝縮が始まる温度 ($\sim 2000\text{ K}$) 付近で、ガスがどれだけ高密度のまま残っているか、ダスト形成に使える炭素がどれだけ含まれているか、そして粒成長がどれだけ長く続くかによってほぼ決まることが分かった。爆発エネルギーが大きい場合、放出物は速く膨張して凝縮前に希薄化するため、大きな粒子は形成されにくい。実際、先行研究で用いられてきた爆発エネルギーが 10^{51} erg の計算では、炭素・酸素に富む内側の層でも最終サイズは半径 $\sim 0.1\text{--}0.2\text{ }\mu\text{m}$ 程度に留まり、ミクロンサイズには達しなかった。一方、爆発エネルギーが 10^{50} erg 程度に低く、さらに超新星で合成される放射性同位体 ^{56}Ni の放出量が $10^{-3}M_{\odot}$ 以下と小さい場合には、放射性崩壊による加熱が弱く、放出物が比較的高密度のまま凝縮温度に達しやすい。その結果、ヘリウムに富む層や炭素・酸素に富む内側の層では、半径 $1\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$ 程度のグラファイト粒子が形成され得る。ただし、水素を多く含む外層では、ダスト形成に使える炭素が少ないため、このような低エネルギー条件でもサイズは高々 $\sim 0.1\text{ }\mu\text{m}$ 程度に留まる。

本研究の意義は、まずダストサイズというもっとも基本的な分析量に対して、理論計算と隕石分析の間にあった不一致を解消する点にある。さらにサイズを支配する局所的な物理量を、超新星では爆発エネルギー、放出物質量、放射性同位体による加熱といった観測可能な巨視的量へ接続できる。この見方は、超新星に限らず、漸近巨星分枝星の星風、ウォルフ・ライエ連星の衝突風、その他の突発的な質量放出現象にも拡張できる可能性がある。ガスから生まれるダストのサイズを、実験室で測定されるプレソーラー粒子、多数の天体観測から得られる巨視的量、そして星間ダストの多様性をつなぐ共通の物理量として位置づけることが、本発表の目的である。

高速微惑星のダスト層突入によるコンドリュール加熱過程の解析的見積り

○ 佐藤祥太¹, 荒川創太², 田中秀和¹

¹ 東北大学理学研究科, ² 海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究開発センター

コンドリュールは太陽系形成初期の急加熱・急冷によって融解し生成されたと考えられているが、その加熱機構について決定的なまだ説はない。最近荒川らによって、高速微惑星がダスト層に突入した際の多数の衝突現象で起こる加熱でコンドリュール加熱を説明しようとする説が提唱されている。通常の微惑星同士の衝突による加熱では主に低温のエジェクタが大量に放出され普遍的なコンドリュールの説明が困難である。荒川らのモデルでは、微惑星とダストとの間の多数の衝突と、さらに発生した破片との間でも起こる多数の衝突から大量の破片が生成され、微惑星の周辺には光学的に厚い破片の「雲」が定常的につくられる。この破片雲による保温効果により破片雲内で効率よく高温にしコンドリュール前駆体を加熱するのが、荒川らのモデルである。

荒川らは高速微惑星のダスト層突入時の衝突現象による破片雲形成の時間進化を数値的に解き、破片雲の密度、温度等を見積もった。また、微惑星に入射したダストの数十%をコンドリュールにすることができるという生成効率を得ている。本研究では、このコンドリュール形成効率の微惑星速度とダスト層密度に対する依存性を解析的に明らかにした。

図に、微惑星速度・ダスト層密度に対するコンドリュール形成効率を示した。破片雲でダスト融解に必要な温度 1500K を実現するためには、ダスト層密度と微惑星速度がある程度高い必要がある。灰色の領域は破片雲が 1500 K に到達できない領域である。コンドリュール形成にはこれより高密度のダスト層が必要である。一方、コンドリュール形成効率の面では、ダスト層密度が高くなると、入射ダストによる破片雲へのラム圧が高くなり、ダストが放出されにくくなる。ダスト層密度が低ければ、入射ダストよりも大量の破片が微惑星から放出されるが、温度条件を満たさなくなる。

このように効率的なコンドリュール形成が可能なダスト層密度の範囲は狭いが、次のダスト層密度の進化により解決される。初期にダスト層密度が低い場合、微惑星の突入時に、入射ダストよりも多くの破片が放出され、ダスト層密度を上昇させる。このダスト放出過程が繰り返されてダスト層密度が徐々に高くなり、入射ダストに対する生成されるコンドリュールの割合が 1 に近づくことになる。

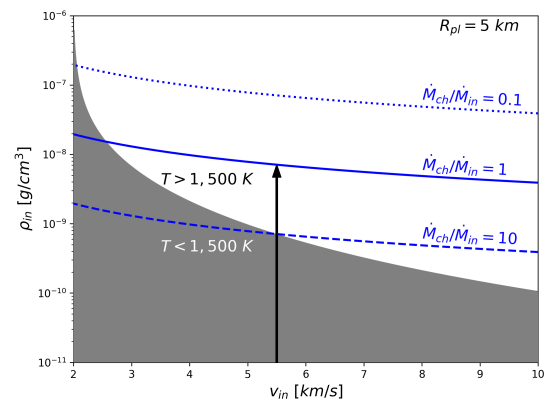


図 コンドリュール形成効率の微惑星速度・ダスト層密度に対する依存性。 $\dot{M}_{ch}/\dot{M}_{in}$ は入射したダストに対する生成されるコンドリュールの割合。微惑星からのダスト放出により、ダスト層密度は上昇する（矢印）。

金星大気におけるスーパーローテーションの維持メカニズムについて

○高木征弘¹, 今井正亮², 安藤紘基¹, 松田佳久³

¹ 京都産業大学理学部, ² 工学院大学先進工学部, ³ 東京学芸大学教育学部

はじめに 金星大気には、固体惑星の自転を大きく上回る高速東西風、すなわちスーパーローテーション (SR) が全球的に存在する。その維持メカニズムとして子午面循環と波の角運動量輸送 (Gierasch, 1975; Matsuda, 1980) および熱潮汐波の鉛直輸送 (Fels & Lindzen, 1974) が有力視されている (Sánchez-Lavega et al., 2017; Horinouchi et al., 2020)。しかし、両者の寄与する緯度・高度領域や相互関係はわかっていない。本研究では、金星大気大循環モデル AFES-Venus (Sugimoto et al., 2014; Suzuki et al., 2022) で再現された SR の角運動量収支を変形オイラー平均 (TEM) の枠組みで解析し、残差平均子午面循環 (RMMC)、熱潮汐波および短周期波が高度 35–90 km の SR 維持に果たす役割を調べた。

モデルと解析方法 AFES-Venus の解像度は T42L120 とし、高度 0–120 km を等間隔に分割した。太陽加熱には Haus et al. (2015) に基づく分布を与え、赤外放射をニュートン冷却で表現した。初期値には赤道上の高度 70 km で 100 m/s に達する東西風と、これに釣り合う温度場を用いた。モデルの詳細については Suzuki et al. (2022) を参照されたい。51 地球年間の時間積分後、準定常状態における 585 地球日間を解析した。周期 10 日以上を熱潮汐波、10 日未満を短周期波として波成分を分離し、TEM 方程式に基づいて RMMC の角運動量輸送と波の Eliassen-Palm (EP) フラックスを評価した。

結果と議論 オイラー平均子午面循環は低緯度のハドレー型循環と中高緯度のフェレル型循環からなる一方、RMMC は赤道から極域まで広がる単一のハドレー型循環となった。この差は、地球対流圏と同様、金星雲層の大循環においても波による南北熱輸送が重要であることを示唆している。

高度 46–90 km では、RMMC が正味の角運動量を上方へ輸送して SR を加速し、波による下向き輸送がそれを相殺する。ただし、熱潮汐波は高度 50–60 km および 67–75 km で角運動量を収束させ、局所的に SR の加速に寄与する。雲層での SR 加速に対する寄与率は、RMMC が約 70%、熱潮汐波が約 30% と見積もられた。

RMMC は低緯度で角運動量を上方へ運び、その大部分を高度 54–73 km で極向きに輸送する。この高度における波の赤道向き角運動量輸送は、RMMC の極向き輸送量の約 15% に過ぎず、両者が直接バランスする古典的な子午面循環メカニズムとは大きく異なる。モデル中では中高緯度における波の下向き角運動量輸送が収支を閉じるうえで重要である。この輸送は主として極向き熱フラックスに対応する EP フラックスによって生じ、熱潮汐波、5.8 日波、7 日波および周期 3 日未満の波が寄与していた。詳細については Takagi et al. (2026) を参照されたい。

波による南北熱輸送については未解明の点が多い。今後、波の熱輸送が雲層の角運動量収支と SR の構造を制御する過程を明らかにする必要がある。本発表では、あかつき観測との比較や熱輸送に寄与する短周期波の起源、熱輸送の観測可能性についても議論したい。

大陸配置が全球気候および 全球凍結突入条件に与える影響

○東田拓斗^{1,2}, 樋口太郎^{1,2}, 小玉貴則^{1,2}, 藤井昌和³, 小長谷貴志⁴, 玄田英典^{1,2}

¹ 東京科学大学, ² 地球生命研究所, ³ 国立極地研究所, ⁴ 海洋研究開発機構

大陸の量やその分布は、惑星気候の多様性を決定する重要な要素として知られている。また、近年の全球気候モデルを用いた研究は、大陸配置の違いが、地表面アルベドだけでなく、大気や海洋による南北熱輸送の変化を通して、全球気候に影響を及ぼすことを示している。しかし、大陸配置が大気・海洋循環の変化を介して気候システムの安定性に与える影響については十分に理解されていない。特に、全球凍結に至る閾値や遷移過程における大陸配置の役割については明らかになっていない。

そこで本研究では、大気海洋結合モデル MIROC4m を用いて、新原生代の全球凍結イベントが発生したスターチアン・マリノアン大陸配置および現代の大陸配置で、気候シミュレーションを行った。具体的には、まず現代の太陽定数の条件下において 3000 年計算を行い、全球気候の定常状態を求めた。その後、現代の太陽定数を 2% 間隔で低下させる感度実験を現代の太陽定数の 100%~90% の範囲で行うことで、大陸配置の違いが全球気候および全球凍結突入条件に至る閾値に与える影響を調べた。

まず現代の太陽定数の条件下において、現在の大陸配置を用いた実験では、全球平均温度は 282.5K となり、極域は寒冷で海氷に覆われる結果となった。一方、新原生代の大陸配置では全球平均温度が 289.2K となり、極域の年平均気温が 5°C を超え、年間を通じて海氷が形成されない温暖な気候場がシミュレートされた。この極域における気候差は、新原生代の大陸配置において、現代よりも強い海洋循環が発達し、その結果として極方向への熱輸送が増大したことに起因している。この新原生代の大陸配置における卓越した海洋循環によって、赤道域から極域に向かって熱が輸送されることで、現代の大陸配置と比べて温暖な気候が形成されている。

次に、これらの大陸配置を用いた全球凍結実験から、現代の大陸配置では現代の太陽定数の 96% で全球凍結に至ることがわかった。一方で、新原生代の大陸配置では現代の太陽定数の 94% で全球凍結に至り、新原生代の大陸配置における全球凍結の閾値がより低くなることが明らかになった。また、部分的に海氷に覆われる平衡気候場が、現代の大陸配置では太陽定数の 100~96% 条件下で、新原生代の大陸配置では太陽定数の 96~94% 条件下でシミュレートされた。これらは、太陽定数の変動に対して、大陸配置による海洋循環や海洋熱輸送の違いが、海氷形成および Ice-Albedo フィードバックを通して、全球凍結に至る閾値に影響を与えることを示している。

本研究は、現代および新原生代の大陸配置を用いた全球凍結実験を通して、大陸配置による海洋循環・海洋熱輸送の違いが、全球気候場に影響を及ぼすことを示した。特に海洋による極方向の熱輸送量が、温暖な気候場の形成および海氷形成において重要である。これは、大陸の量やその分布だけでなく、大陸の形状を通じた海流の変化が海洋の熱輸送に違いを及ぼすことで、最終的に地球の平衡気候場や全球凍結に至る閾値を決めうることを示唆しており、地球型惑星の気候システムの安定性に大陸配置が重要な役割を果たすことを強調するものである。

C-N-H 存在量と窒素同位体比による地球への炭素質物質の供給過程の制約

○花沢 泰光¹、佐々木 貴教¹

¹ 京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室

炭素 (C)、窒素 (N)、水素 (H) は、生命の誕生・維持や惑星表層環境を左右する主要な揮発性元素である。しかし、これらの元素は揮発性を持っている影響で、惑星に供給されたあとのふるまいが複雑で、地球でさえ、C-N-H 存在量を再現する定説がない状況である。

既存モデルでは、衝突天体を炭素質コンドライト (CC) と非炭素質コンドライト (NC) の混合物として扱い、その混合比を一定、または地球成長に伴って規則的に変化させることで、地球の C-N-H 存在量や大気・マントルの窒素同位体比を再現してきた。しかし、標準的な地球形成描像では、地球の大部分は NC 物質から形成され、CC 物質は木星の軌道移動に伴う重力散乱によって一部のみが確率的に地球形成領域へ到達するため、CC/NC 混合比が一定または規則的に変化するとは限らない。

そこで本研究では、9 発の $0.1M_{\oplus}$ 級巨大衝突 (GI) と late veneer からなる地球形成過程を仮定し、各 GI の CC/NC 混合比をパラメータ化した。大気散逸、各リザーバー間の化学平衡、コア形成に伴う元素分配を考慮しながら多数の形成シナリオを探索し、地球の C-N-H 存在量と大気・マントルの窒素同位体比を同時に再現する条件を調べた。

多数のシナリオを統計的に評価した結果、再現シナリオでは CC 成分の主な供給が、地球が現在の質量の 70% から 90% まで成長する段階に集中した (図 1)。供給が早すぎる場合は大気散逸やコア・マントル間分配によって揮発性成分を保持できず、最後の GI に CC 成分が含まれる場合は脱ガスと late veneer だけでは余剰成分を除去できない。したがって、地球の揮発性元素供給は、後期の CC-rich な衝突と、それに続く NC-like な最後の GI という時間構造を要求する。これらの結果は、地球の水の後期供給を示す Rubie et al. (2015) や標準的な月形成論とも整合的である。

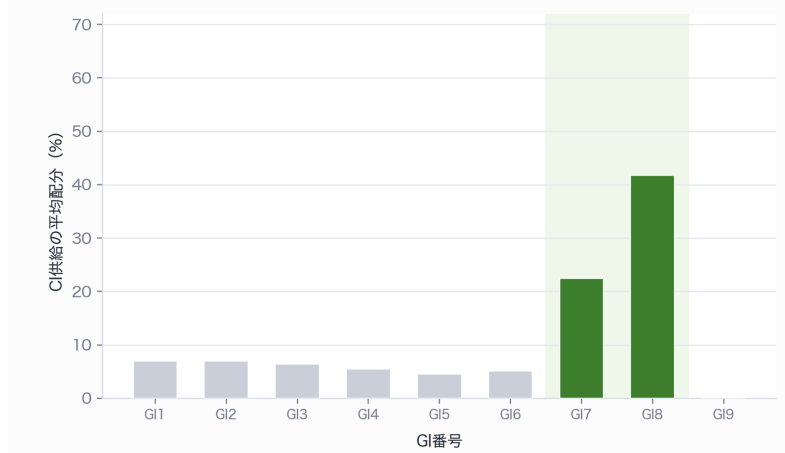


図 1. 再現シナリオにおける各 GI への平均 CC 供給配分。緑色は主要供給段階を示す。

InSight で観測された火星内部重力波の記載

Description of Internal Gravity Waves on Mars as Observed by InSight

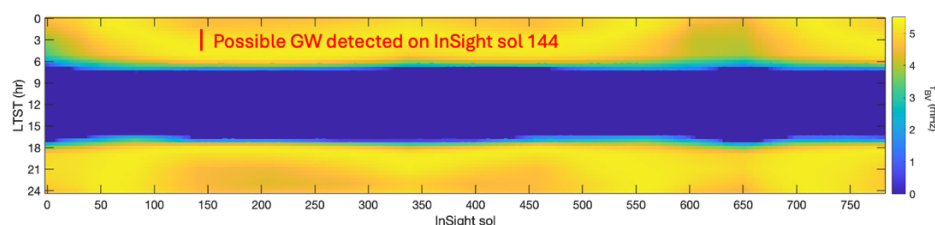
小野寺圭祐¹, 西田究², Rudolf Widmer-Schmidrig³, Philippe Lognonné⁴, Aymeric Spiga⁵, 川村太一⁴, Jorge Hernandez-Bernal⁵, Eleonore Stutzmann⁴, Anna Horleston⁶, Zongbo Xu⁷, Martin Schimmel⁸

¹岡山大学惑星物質研究所, ²東京大学地震研究所, ³Black Forest Observatory, ⁴Université Paris Cité, Institut de Physique du Globe de Paris, CNRS, ⁵Laboratoire de Météorologie Dynamique, Institut Pierre-Simon Laplace, CNRS, Sorbonne Université, ⁶University of Bristol, ⁷Norwegian Geotechnical Institute, ⁸Geosciencias Barcelona – CSIC

2018年に火星に着陸したNASAの探査機InSightは、地震観測を通じて火星の地震活動度や内部ダイナミクスに新たな知見をもたらし、火星科学の発展に大きく貢献した。加えて、InSightによる地動と気象要素（気圧・気温・風速など）の同時観測は史上初の成果であり、火星における大気と固体表面の相互作用に関する新たな研究分野を切り拓いた。本研究では、特に6 mHz以下の周波数帯で観測される内部重力波に着目し、InSightの運用期間を通じたイベント検出と、火星における大気-固体カップリング現象の理解を目的としている。

本発表では、InSightの風向・風速・気圧データを用いた内部重力波の検出手法とその特徴解析について報告する。InSightの初期成果では、火星大気中にmHz帯の内部重力波が存在することが示されており、観測期間における大気構造モデル（Mars Climate Databaseより取得）から推定されるブラント-ヴァイサラ振動数（6 mHz以下）とも整合的である。そこで本研究では、6 mHz以下の周波数帯に着目し、気圧データと風速データ（東西・南北成分）との相互相関係数を計算した。その結果、約780火星日の観測期間中に200~300件程度の高相関イベント（|相互相関係数| > 0.75）が検出された（一例を図1に示す）。さらに、高相関イベントの時間分布、ブラント-ヴァイサラ振動数との対応、および検出時における動圧と気圧変動振幅の比を用いて評価を行い、内部重力波の可能性の高いイベントを抽出した。本発表では、検出手法の概要と抽出された内部重力波の位相速度や波長スケールについて報告するとともに、火星における大気-固体カップリングの解析に向けた今後の展望について紹介する。

(a) Distribution of Brunt-Väisälä frequency



(b) An example of the detected high-correlation signals

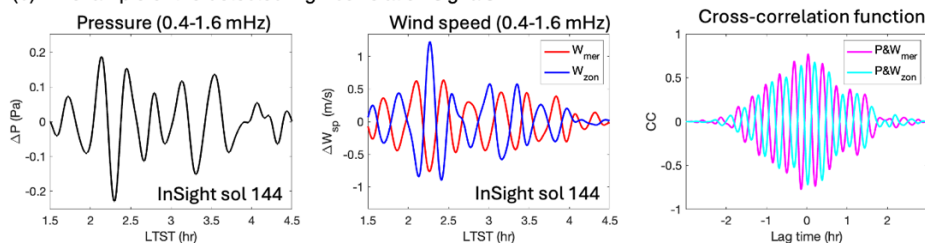


図1. (a) ブラント-ヴァイサラ振動数の時間分布と検出された高相関イベントの分布. (b) 高相関イベントの一例. 左は気圧変動、中央は南北風・東西風の風速、右は気圧変動と各風速データ間の相互相関関数を示す。気圧と風速信号は0.4-1.6mHz帯でのバンドパスフィルターを適用している。

火星大気ネオン同位体比その場測定に向けた小型質量分析システムの開発：ガス分離部・質量分析部の統合と実証実験

○竹田有汰¹、長勇一郎¹、齋藤義文¹、米田匡宏²、

三浦弥生³、岩田尚能⁴、日向輝¹、杉田精司¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、² 京都大学大学院理学系研究科、

³ 東京大学地震研究所、⁴ 山形大学理学部

火星大気中のネオン (Ne) の滞在寿命は約 0.6-1 億年と推定され、火星の年齢 (約 45 億年) と比較して著しく短い。これは、現在の大気 Ne が火山性脱ガスによりマントルから継続的に供給されていることを示唆しており (Kurokawa et al., 2021)、その同位体比 ($^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$) は火星内部揮発性物質の起源 (太陽風起源またはコンドライト起源) を制約する重要な指標となる。しかし、火星大気中の Ne 濃度は極めて低く (約 2.5 ppm)、かつ質量分析計において $^{40}\text{Ar}^{++}$ や CO_2^{++} による同重体干渉が $^{20}\text{Ne}^+$ および $^{22}\text{Ne}^+$ の測定を妨げるため、高精度なその場測定は未だ実現されていない。

本研究グループでは、ポリイミド製透過膜を用いて Ne を選択的に透過させ、干渉成分である Ar や CO_2 を除去したガスを質量分析計に導入する小型測定システムの開発を進めてきた (Miura et al., 2020; Cho et al., 2024)。これまでに実験室用の四重極型質量分析計 (QMS) を用いた透過実験により、火星模擬大気 (CO_2 主成分) 環境下での膜分離機構の有効性と、Ne 同位体比測定の原理的な見通しを得た。今後は将来的な火星探査を念頭に、月極域探査ミッション (LUPEX) の TRITON で実績のある飛行時間型質量分析計 (TOF-MS) を用いた測定を計画しており、分離機構と直結した統合システムとしての同位体比測定の定量的な検証が不可欠である。

そこで本研究では、TOF-MS にガス分離部を直接接続し、将来の探査機搭載を見据えた実証モデルによるシステム全体の性能評価を実施する。最初に Ne 存在度が高く同位体比が既知である地球大気を用いてシステムの基本動作と分離性能を実証する。次に火星模擬大気を用いた透過・測定実験を行い、微量 Ne の検出および同位体比測定の精度を評価する。本発表では、ガス分離部と宇宙用 TOF-MS の統合システムによる測定実験の結果を報告し、将来の火星探査における Ne 同位体比のその場測定の実現可能性について議論する。

Groundwater flow and valley network formation in a warm early Mars climate 温暖な初期火星気候における地下水流動とバレーネットワーク形成

○鎌田有紘¹, 黒田剛史^{2,3}, 小玉貴則¹, 笠羽康正³, 寺田直樹³

¹東京科学大学, ²情報通信研究機構, ³東北大学,

The evolution of the Martian climate and water environment is one of the great mysteries of planetary science. Geomorphic and mineralogical observations imply that Mars once had an active hydrological cycle, including valley networks, deltas, lacustrine basins, and phyllosilicate-bearing terrain. These features imply a long-term interaction between the atmosphere, surface water, and groundwater reservoirs. Further evidence of groundwater sapping and of possible globally connected aquifers suggests that subsurface flow played a key role in redistributing water. Previous GCM studies have reproduced warm and wet conditions on early Mars and, to some extent, the formation of valley networks, under various climatic scenarios. Global and regional groundwater models have also been developed to investigate subsurface flow, groundwater upwelling, and the long-term water redistribution. However, groundwater processes have generally been treated separately from atmospheric and surface hydrology. The objective of this study is to examine whether the formation of valley networks and the distribution of groundwater simulated by a coupled GCM–river–groundwater model are consistent with observations under plausible early Martian conditions.

Here, we developed a coupled global water-cycle model that integrates a three-dimensional Mars global climate model, a global river flow model, and a saturated-unsaturated groundwater flow model. The model calculates the following within a single surface-subsurface hydrological system: rainfall, snowmelt, infiltration, lateral groundwater flow, groundwater discharge, surface runoff, and river flow. We performed numerical simulations under conditions like those of early Mars, assuming a 2 bar CO₂-dominated atmosphere containing 6% H₂. We considered obliquities of 20°, 40°, and 60°; permeable layer thicknesses of 20 and 200 m; and permeabilities of 10⁻⁹, 10⁻¹⁰, and 10⁻¹¹ m². We integrated each simulation until the groundwater distribution approached a quasi-equilibrium state. In the initial state, we assume the presence of a northern ocean and lakes, equivalent to a global layer of water 500 m. We assumed a pre-True Polar Wander topography that represents the early conditions of the Martian surface.

The simulated river systems reproduce approximately 60–80% of the observed valley network regions. This generally improves at low to middle obliquity, suggesting that the spatial distribution of precipitation and snowmelt under these conditions is consistent with the observed valley network distribution. However, groundwater flow modifies this pattern in two distinct ways, depending on subsurface transmissivity. With high transmissivity (a permeability of 10⁻⁹ m² and a permeable layer thickness of 200 m), water infiltrating the highlands and seasonally wet regions is efficiently transported through the subsurface towards low-lying basins, coastal margins and lake margins. Consequently, groundwater tables become shallow near coastal lowlands, including Arabia Terra, where groundwater-related hematite concretions, known as “blueberries”, have been identified. In these regions, groundwater discharge contributes to river formation. Meanwhile, groundwater tables remain deep across much of the southern highlands. This produces a clear, topography-controlled groundwater structure. Under lower transmissivity conditions, however, lateral groundwater redistribution is weaker, and groundwater tables tend to remain shallow over broader regions. The wet subsurface limits further infiltration, meaning that rainfall and snowmelt are more likely to convert directly to surface runoff. In summary, the high-transmissivity scenario is the most consistent with the observed data because it reproduces both the distribution of the valley network and a topographically controlled groundwater system. This system includes shallow groundwater in Arabia Terra and deep groundwater across the southern highlands.

凍土層に形成した衝突クレーター周囲の衝突残留温度の計測

○大橋拓磨¹, 保井みなみ¹, 荒川政彦¹, 大川初音¹, 豊嶋遥名¹, 長谷川直², 大坪晴太郎¹, 野口琴海¹, 大西彩華¹

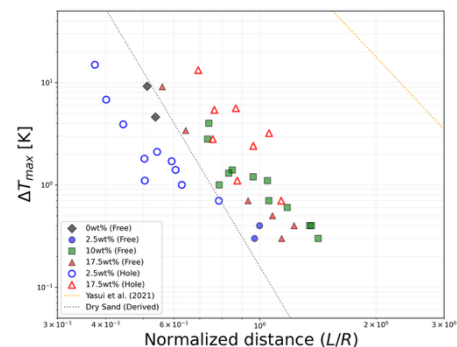
¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙科学研究所

はじめに 火星表層には永久凍土層が広く存在することが、MRO 搭載 HiRISE などの観測から示されている。また、火星表面にはクレーター周囲に花びら状の堆積物を伴うランパートクレーターが多数存在し、衝突時に発生した熱による地下水の融解や流動化がその形成に関与した可能性が指摘されている。衝突に伴う加熱は、一時的な液体水環境を形成する過程として、火星をはじめとする氷を含む惑星・衛星氷層の熱進化を理解する上で重要である。氷や岩石を含む天体表層への衝突では、破碎された物質間の摩擦や塑性変形により衝突残留熱が発生するが、その発生量や空間分布、含水率が温度履歴に与える影響は十分に理解されていない。そこで本研究では、火星凍土層を模擬した氷砂混合標的への高速度衝突実験を行い、衝突後の温度変化およびクレーター形成過程を定量的に調べた。

手法 火星凍土層模擬標的は、粒径 100 μm の石英砂と水を様々な割合(含水率 0~17.5wt.%)で混合し、直径 15cm、深さ 6cm のアクリル容器に充填した後、-20°C で凍結させて作製した。作製した標的の引張強度は、含水率に応じて 0.25~3.3MPa であった。衝突実験には、神戸大学の横型二段式軽ガス銃および宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用い、直径 2mm のアルミニウム球を 2~6km/s 標的に垂直衝突させた。衝突による標的内部の温度変化は、標的內 5 箇所に設置した K 型熱電対(線径 100 μm 、サンプリング間隔 10ms)で計測した。また、標的表面および衝突によるエジェクタの温度変化は高速赤外線カメラ(1000~3000fps)で観測した。衝突実験は、標的表面が自由表面標的に加え、標的表面に開口径 20mm または 30mm の穴を有するアルミニウム製治具を設置し、クレーター成長を制限した条件下でも実施した。これにより、通常は掘削・放出される領域を保持し、クレーター形成過程における温度構造を調べた。

結果 標的内部の温度変化について調べた結果、すべての衝突速度において、衝突による温度上昇量は衝突点からの距離に依存した。クレーター半径で規格化した衝突点からの距離(L/R)と、最高上昇温度(ΔT_{max})の関係は冪乗則に従って減衰した。(図 1)また、含水率が高い標的(10、17.5wt.%)ほど、同一の規格化距離において高い ΔT_{max} を示した。これは、低含水率標的(2.5 wt.%)では空隙による断熱効果によって熱伝播が抑制される一方、高含水率標的では砂粒子間を氷が充填することで熱伝導率が増加したためと考えられる。標的表面に治具を設置してクレーター成長を制限した場合も、自由表面標的と同じ温度減衰則に従うことがわかった。一方で、通常は観測が困難な L/R<1 の領域における温度構造を取得することができ、クレーター形成時にエジェクタとして放出されるはずのエネルギーが衝突点近傍に残留熱として保持されることが示唆された。

クレーター壁面の温度履歴では、乾燥砂標的への衝突実験では、衝突後約 1 秒間 100°C 以上を維持したのに対し、含水標的では 100°C 以上の状態は 0.1 秒以内で消失した。これは、熱伝導による内部への熱輸送と、スポール破片の放出によって高温物質が速やかに失われたためと考えられる。



(図 1)クレーター半径で規格化した衝突点からの距離と最高上昇温度の関係

火星模擬玄武岩の中性－アルカリ条件における 段階的溶解過程

○田畑陽久¹, 井村政博², 吉田聡¹, 深井稜汰¹, 中野有紗¹, 白井寛裕^{1,2}

1. JAXA/宇宙科学研究所

2. 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻

火星では、粘土鉱物や炭酸塩鉱物の発見から、かつて中性－アルカリ性の水環境が存在していたことが示唆されている。Curiosity 探査機により、Gale クレータの Glen Torridon 地域では、主な二次鉱物相が鉄酸化物から粘土鉱物まで多岐にわたることが示された。この多様な二次鉱物相の形成仮説として、熱力学モデルを用いた研究によって、弱酸性であるクレータ湖水とアルカリ性地下水の混合度によるとする仮説が提案されている。しかし、このような中性－アルカリ条件における玄武岩の二次鉱物形成過程における、速度論的效果を検討した研究はこれまで行われていない。そこで本研究では、中性－アルカリ条件において初期火星における玄武岩溶解過程を明らかにすることを目的として、鉱物風化実験を行った。

鉱物風化実験は、低酸素条件に保持したグローブボックス内で行った。出発物質は、Glen Torridon 地域で報告されている結晶質鉱物組成（石英、長石、輝石、鉄酸化物）を、天然鉱物試料を粒径 50 μm 以下に粉碎した粉末を混合することで作成した。Fe 溶解過程における初生鉱物であるカンラン石の役割を調べるため、鉄酸化物をカンラン石に置換した初生的組成の出発物質も用意した。風化溶液は、湖水を模擬した pH 約 7 の炭酸を含む溶液と、地下水を模擬した pH 約 8 の炭酸を含まない溶液を用いた。実験は 7 週間実施し、週 1 回溶液の pH 測定および ICP-MS による溶存元素濃度分析(K, Na, Mg, Ca, Si, Al, Fe, 他)を行った。また、実験前後の固体試料について XRD による鉱物組成分析を実施した。

実験期間中、K, Na, Mg, Ca, Si は最初の 1 週間に溶出し、以降は誤差範囲内で定常である傾向が見られたのに対し、Fe と Al は 4–6 週目で誤差を超える濃度上昇が見られた。溶液条件依存性としては、Al, Ca, Si の濃度変化が pH 8 の地下水条件では pH 7 の湖水条件と比べて約 2 倍高く、この傾向は出発物質によらなかった。Al, Ca, Si を含む鉱物相は斜長石であり、これが pH に依存した溶解を示していると考えられる。また、溶液条件や出発物質によらず K は同程度の濃度上昇を示しており、出発物質で唯一 K を含むアルカリ長石も溶解していることが推定される。XRD 分析でも、実験前後で斜長石のピーク強度低下が見られ、斜長石の溶解が示唆された。これらの結果は、中性－アルカリ条件下における火星玄武岩の風化過程は、速度論に支配された段階的な溶解過程を経て進行する可能性を示唆している。具体的には、第一段階として長石の溶解によるアルカリ金属・土類金属の溶出が進行し、第二段階として鉄酸化物・カンラン石の溶解が進行すると考えられる。このことは、これまで熱力学的に環境指標されてきた鉄鉱物の生成条件や安定性の解釈には、鉱物種毎の溶解速度の違いや生成速度等の速度論的過程を考慮する必要があることを意味する。

打ち上げ迫る火星衛星探査計画 MMX

倉本 圭^{1,2}, 川勝康弘², Maria Antonella Barucci³, 玄田英典⁴, 平田 成⁵, 今村 剛⁶, 亀田真吾⁷, Katharina Otto⁸, 小林正規⁹, 草野広樹¹⁰, David J. Lawrence¹¹, 松本晃治¹², Patrick Michel¹³, 宮本英昭⁶, 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 Uramec⁸, 臼井寛裕², 和田浩二⁹, 横田勝一郎¹⁶

1 北海道大学, 2 JAXA, 3 パリ天文台, 4 東京科学大学, 5 会津大学, 6 東京大学, 7 立教大学, 8 DLR, 9 千葉工業大学, 10 量子科学技術研究開発機構, 11 ジョンズホプキンス大学, 12 国立天文台, 13 コートダジュール大学, 14 東北大学, 15 国立自然史博物館, 16 大阪大学

火星衛星探査計画 MMX の打ち上げが目前に迫っている。MMX 探査機は JAXA 種子島宇宙センターに輸送後、種々の試験・確認を経て、打ち上げに向けた最終準備段階を迎えている。本講演では火星衛星の近接観測、サンプルリターン、火星大気・プラズマ圏観測を実施する MMX の科学目標と期待される科学成果について、探査機、科学観測装置、科学運用、データ処理、サンプル分析などの最新の準備状況を併せて報告する。

フォボス最大のクレーター形成時の衝撃加熱が物質に与える影響

○内田雄揮^{1,2}, 臼井寛裕²

¹東京大学, ²JAXA 宇宙科学研究所

火星の衛星フォボスは、D 型小惑星に似た反射スペクトルをもつが、火星圏その場形成と整合する低離心率・低軌道傾斜角の軌道を取る。火星圏の進化史解明に直結するフォボスの形成起源とその進化史を記録しているフォボス表層は、最大のクレーターであるスティックニークレーター（直径約 9 km）形成時に放出されたイジェクタによって全球的に覆われているとされる [Bruck Syal et al., 2016; Ramsley & Head, 2021; Uchida et al., 2025]。フォボスのような高空隙天体に対する隕石衝突時には、空隙の圧密過程により衝撃加熱が引き起こされる。本研究では、スティックニー衝突に伴う衝撃加熱の空間分布を定量化し、表層レゴリスの熱履歴およびフォボス初生情報の保持状態への示唆を得ることを目指す。

数値計算には iSALE shock physics code [Amsden et al., 1980; Ivanov et al., 1997; Wünnemann et al., 2006]を用いた。標的天体であるフォボスおよび衝突体の状態方程式 (EOS) には Basalt ANEOS [Thompson & Lauson, 1972; Pierazzo et al., 2004]、空隙圧密過程には ϵ - α porosity compaction mode [Wünnemann et al., 2006] を採用し、標的の初期空隙率はフォボスのバルク密度と整合的な 30%に設定した。直径 22 km のフォボスに対して直径 400 m の衝突体が 12.5 km/s で正面衝突するケースを調査した。衝撃圧縮および圧力解放に伴う加熱過程が完了する貫入特徴時間 ($0.4 \text{ km}/12.5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1} = 0.032 \text{ s}$) を十分に経過した、衝突 1 秒後の空間温度分布を図 1 に示す。

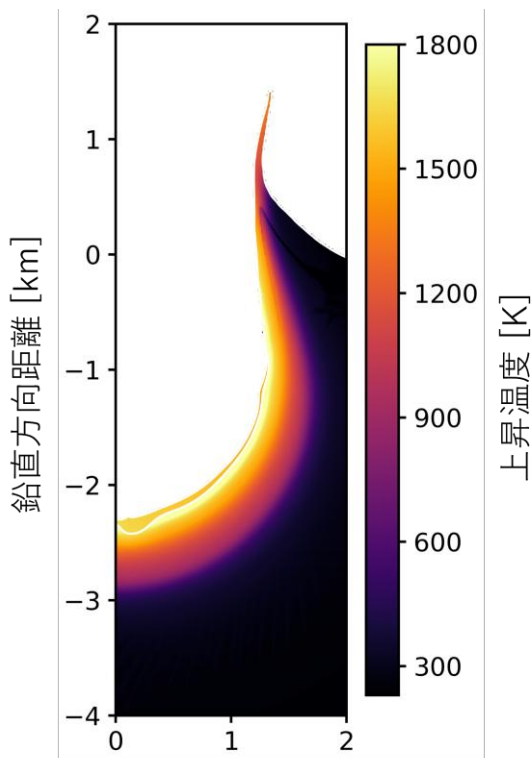


図 1: スティックニークレーター
形成後 1.0 秒後の温度分布

計算の結果、脱水が始まる 500 K や Ar 年代リセットの閾値である 1000 K 超える加熱領域が存在するものの、イジェクタとして放出される表層近くの掘削域は初期温度 (230 K) のまま維持されていた。この加熱領域の局所性は、標的の高空隙構造によって衝撃波エネルギーが空隙圧密へと消費され、衝撃波が伝播距離とともに減衰する効果で説明される [Wünnemann et al., 2006]。本研究で見出された高空隙天体における衝撃加熱の局所性は、多孔質小惑星を対象とした他の探査・サンプル解析結果および理論研究と整合する。例えば、C 型小惑星リュウグウ表層レゴリスが経験した衝撃履歴が総じて軽微であったとする分析結果 [Tomioka et al., 2023]、ならびに多孔質体への衝突加熱シミュレーション [Kurosawa & Genda, 2018; Wakita et al., 2019] は、高空隙天体への天体衝突では、熱変成を受ける物質の割合が限定的であることを示している。

以上より、スティックニー形成時の放出物がフォボス全球に厚く堆積しているにもかかわらず、表層レゴリスの大部分は衝突熱変成を免れたフレッシュな物質で占められていることを強く示唆する。火星衛星探査計画 (MMX) におけるフォボスからのサンプルリターンにあたり、回収される表層サンプルはフォボスの形成起源や進化過程に関する原始的な情報を保持している可能性が高い。

謝辞: iSALE の開発者である Gareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, DirkElbeshausen, Tom Davison の各氏に感謝いたします。

Evolution of Martian moon precursors under solar nebula bow shock heating

○ Ryo N. Matsuoka (松岡 亮)¹ and Kiyoshi Kuramoto (倉本 圭)^{2,3}

¹National Institute of Technology, Matsue College.

²Hokkaido University. ³JAXA/ISAS.

The D-type asteroid-like spectra and low albedos of the Martian moons support the capture theory, which proposes that these moons formed through the capture of planetesimals originating from the outer solar system. Among the variants of this theory, the gas-drag capture theory provides a natural mechanism for achieving capture into orbits consistent with those of Phobos and Deimos in the presence of the protosolar nebula (Matsuoka and Kuramoto, 2025).

A leading mechanism for delivering planetesimals from the outer solar system into the inner solar system region is gravitational scattering by giant planets (e.g., Raymond et al. 2006, 2009; Walsh et al. 2011). Planetesimals subjected to such scattering would have followed highly eccentric orbits within the nebula for 10^3 – 10^4 years. During this period, the relative velocity of a planetesimal with respect to the nebular gas would have exceeded the local sound speed, likely giving rise to a bow shock and significant heating of the planetesimal body (Tanaka et al. 2013). This heating event would likely have significantly affected the retention of volatile components contained within the precursors of the Martian moons.

In this presentation, we numerically investigate the volatile loss of Martian moon precursors under such bow shock heating, and discuss its implications for the pre-scattering interior structure of these precursors and the possible heating history of the Martian moons' material.

ダスト付着N体計算による ダスト集合体のせん断強度モデルの構築

○ 辰馬 未沙子¹, 片岡 章雅², 田中 秀和³

¹ 東京工業高等専門学校, ² 国立天文台, ³ 東北大学

惑星形成の初期段階において、ダストは衝突付着によりダスト集合体を形成する。これらダスト集合体のマクロな力学強度は、微惑星に至る成長過程における衝突破壊条件や、形成される小天体の性質を決定づける要素である。マクロな強度は、構成するダストの粒径や表面エネルギーといったミクロな物性に依存する。我々はこれまで、これらダストミクロ物性を変数として、ダスト集合体の引張強度や圧縮強度などのマクロな物性を定式化してきた (Tatsuuma et al. 2019, 2023, 2024)。しかし、せん断強度に関しては限られたパラメータへの依存性しか明らかにされておらず (Seizinger et al. 2013)、包括的な物理モデルは未だ確立されていない。

本研究では、ダストの付着力を考慮したN体計算 (Dominik & Tielens 1997, Wada et al. 2007) を用い、周期境界条件下で圧縮されたダスト集合体のせん断強度を求めた。せん断強度の体積充填率、構成粒子半径、および表面エネルギーに対する依存性を求め、それらを包括的に説明する理論モデルを構築した。解析の結果、図 1 のように、ダスト集合体のせん断強度は、「引張強度 (Tatsuuma et al. 2019)」および「引張強度と圧縮強度 (Tatsuuma et al. 2023) の相乗平均」のうち、大きい方の値によって記述できることが判明した。低密度なダスト集合体においては、せん断強度が引張強度と等しくなる。これは、せん断変形時に集合体内部で局所的な引張破壊が支配的になるためと考えられる。一方、高密度なダスト集合体においては、せん断強度が引張強度と圧縮強度の相乗平均で表される。これは、せん断変形に伴い内部で引張と圧縮の双方が作用していることを示唆している。この結果は Sirono (2004) において仮定されていた力学関係を数値計算により実証するものである。本研究で構築したせん断強度モデルは、今後の微惑星の衝突計算等において、さらなる物理過程を組み込むための基礎となる。

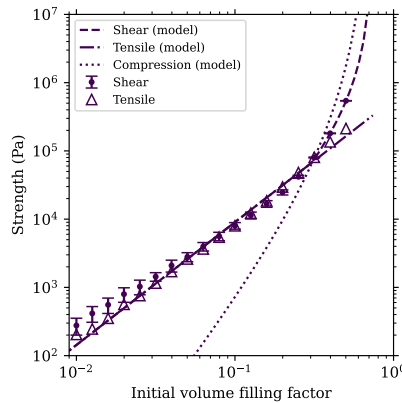


図 1: ダスト集合体のせん断強度の数値計算結果 (丸) とモデル (破線)。比較のため、引張強度の数値計算結果 (三角) とモデル (点破線)、圧縮強度のモデル (点線) もプロットしている。

世界初の4次元ダストトレール理論による流星予報計算

The first calculation of meteors by the 4-D dust trail theory.

佐藤 勲 (Isao SATO) (宇宙用語研究会)

阿部 新助 (Shinsuke Abe) (日本大学)

流星群の予報計算は、2000年前後のしし座流星群の大出現を的中させたことで一気に注目されたが、しし座は最も計算の容易な流星群であり、他の流星群の場合には、うまく当たらないケースがある。その最大の原因は、ダストトレールが木星などに接近して大きな摂動を受けるからである。

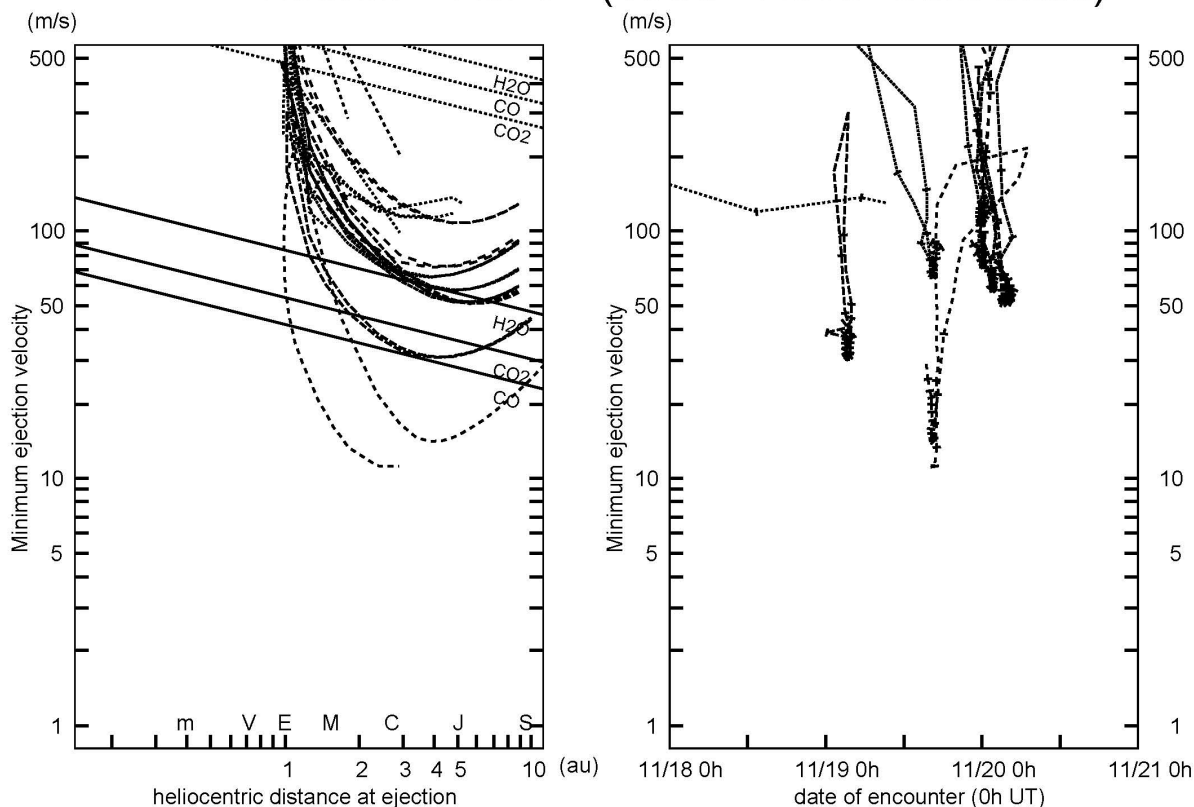
この問題を解決するには、母天体から放出されるダストのタイミングと速度を4次元フルモデルにする必要がある。この時、母天体から放出されたダストは、さまざまな軌道を描いて地球に衝突してくるが、それらの最低放出速度が、水が真空中に噴出する時の上限速度(Zeuner velocity)を下回れば、実際に流星が出現する可能性があることになる。

この4次元計算は、非常に時間のかかる計算であり、これまでに、しし座流星群、ペルセウス座流星群、10月りゅう座(ジャコビニ)流星群、6月うしかい座(ポンス・ビネケ)流星群、ほうおう座流星群などの主な出現年について計算が行ったにすぎない。特に、伝説の1956年のほうおう座流星群の大出現の原因の解明には、20年の計算時間がかかっている。また、1972年のジャコビニ流星群が出現しなかった理由が解明されたのは、大きな成果と言える。

2024年は、10月りゅう座流星群やほうおう座流星群が、4次元理論の計算通りに出現した。特に、ほうおう座流星群については、従来の1次元理論では極大が5日もずれていた。

2026年は、しし座流星群が11月19日に極大を迎える一方、10月りゅう座(ジャコビニ)流星群は出現しない予報となっている。

Leonid 2026 (1600 - 2000 dust trails)



2018・2025 年ふたご座流星群の月面衝突閃光観測から得られたサイズ分布・フラックスおよび3色黒体放射温度

○阿部新助¹・有馬宣明¹・西形みさき¹・青木翼¹・荒木湧斗¹・川端美穂²・有松亘³・
藤井大地⁴・小野寺圭祐⁵・柳澤正久⁶

¹ 日本大学, ² 京都大学, ³ 国立天文台, ⁴ 平塚市博物館, ⁵ 岡山大学, ⁶ 電気通信大学

月面衝突閃光 (LIF) は、小惑星・彗星起源の流星体が大気のない月面へ超高速 (〜20–72 km/s) で衝突した際に生じる継続 0.01〜0.1 秒の短時間発光現象である。月面夜側を巨大な検出器とみなす LIF 観測は、流星 (mm サイズ) と小惑星 (>1 m) を繋ぐ数 cm〜数十 cm の流星体を、単一地点火球観測より約 2 桁高い面積効率で捉えられる。母天体である活動的小惑星 (3200) Phaethon が放出する cm サイズ粒子は、物質放出機構やストリーム形成年代を探る鍵となる。

我々は日本大学口径 40 cm/20 cm 「GUNDAM」望遠鏡で 2018 年・2025 年のふたご座流星群極大期に LIF 観測を行い、それぞれ 11 個・9 個 ($p > 0.7$)、計 20 個を検出した。Gaia DR2 較正測光から両年で無矛盾なフラックス (4.8×10^{-7} , $5.9 \times 10^{-7} \text{ km}^{-2} \text{ h}^{-1}$) を得た。統合サンプル (20 例) はフラックス $5.2 \times 10^{-7} \text{ km}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、質量指数 $s = 1.89 \pm 0.08$ 、サイズ指数 $\beta_1 = 3.67 \pm 0.25$ 、クレータ径指数 $\beta_2 = 3.14 \pm 0.32$ 、等級指数 $r = 2.62 \pm 0.12$ を与え、いずれも NELIOTA より浅く、大粒子超過を示し小惑星起源像と調和的である。さらに史上最も明るい +3 等級の LIF について、LRO/NAC 画像から直径約 40 m のクレーターを同定し、衝突天体を直径約 1.5 m の小惑星と推定した。

一方、多成分発光機構の検証のため、京都大学岡山天文台 3.8 m せいめい望遠鏡の TriCCS で 2025 年 12 月 14 日に g, r, z バンド (98 fps) による世界初の LIF3 色同時検出に成功した (LIF251214A)。単一黒体フィットは各フレームで $\chi^2 \nu = 42.0 \cdot 15.0$ と棄却され、g バンドの系統的超過 (青色超過) はタイミング補正後も残存し、高温蒸気プラズマと低温放出物の多成分放射モデルを支持する初の測光的証拠である。

本講演では、7 年間安定した cm サイズ流星体の空間密度、大粒子超過が示す小惑星起源、および 3 色測光が示す黒体放射からのずれの起源を議論し、LRO 画像によるクレータ同定を介した発光効率較正など今後の展望を述べる。

彗星 28P/Neujmin の衝効果における 強いコヒーレント後方散乱の検出

Detection of Strong Coherent Backscattering in the Opposition Effect of Comet 28P/Neujmin

○ 大坪貴文¹, 河北秀世², 高田唯史³, 古澤順子³, 古澤久徳³, 寺居剛³,
春日敏測^{4,3}, 慶田朗^{5,3}, 新中善晴², 吉田二美^{1,6}, 浦川聖太郎⁷

¹ 産業医科大学, ² 京都産業大学, ³ 国立天文台, ⁴ 兵庫県立大学西はりま天文台,
⁵ 情報通信研究機構, ⁶ 千葉工大 PERC, ⁷ 松江工業高等専門学校

彗星の観測は、彗星そのものの起源と進化を理解するだけでなく、小惑星や太陽系外縁天体 (TNO) との関係を調べるためにも不可欠であり、特に彗星核を直接観測することも重要である。彗星核自体の観測例は少ないため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直接観測できないことが多く、彗星核表面の観測は難しい。我々は、すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) の Public Data Release 3 (PDR3) のアーカイブデータを用いて [1], 観測時の日心距離が遠く活動が弱い彗星を探し、HSC の g, r, y の 3 バンドで観測されている彗星 28P/Neujmin のデータを抽出した。HSC による 28P の観測は太陽からの距離 10 au 以上、位相角 1 度未満という、極めて好条件下で彗星核を観測したデータであった。 g, r, y バンドの撮像観測から得られたカラーは $g-r = 0.67 \pm 0.17$, $r-y = 0.41 \pm 0.19$ であり、スペクトル傾斜 $S' = 8.8 \pm 4.2\%/100 \text{ nm}$ は D 型小惑星に類似する値であった。一方、HSC による位相角 0.33 度のデータと過去の観測 [2] を統合した位相曲線を詳細に解析した結果、28P は低アルベドの C 型・D 型小惑星よりも、S 型・M 型・E 型小惑星に匹敵する大きさの衝効果を示しており、特に衝付近でコヒーレント後方散乱 (coherent backscattering) の寄与が大きいことが判明した。彗星核でこのような強い衝効果が検出されたのは、本研究が初めてである。さらに、彗星 67P/Churyumov-Gerashimenko の Rosetta 探査機による直接観測と比較すると、28P の衝効果はより鋭く狭い増光ピークを示し、67P とは異なる表面散乱特性を持つことが示された。これらの結果は、カラーやスペクトル傾斜は D 型小惑星に類似していても、衝効果という表面微細構造を反映する指標においては彗星核と D 型小惑星が必ずしも同じ性質を持たないことを示している [3]。これは彗星活動による核表面の変化を反映している可能性があり、今後の探査機などで、より詳細な表面状態の観測が重要であることを示唆している。

[1] Aihara, H., et al. 2022, PASJ, 74, 247.

[2] Delahodde, C. E., Meech, K. J., Hainaut, O. R., & Dotto, E. 2001, A&A, 376, 672.

[3] Ootsubo, T., et al. 2026, PASJ, in press.

恒星間天体 3I/ATLAS : その特異性について

Interstellar Object 3I/ATLAS - Its unique characteristics -

○渡部 潤一¹、新中 善晴¹、河北 秀世¹、辻本 倅¹、小林 仁美^{1, 2}、大坪 貴文³

¹京都産業大学、²株式会社フォトクロス、³産業医科大学

恒星間天体の3番目となる3I/ATLAS（アトラス）は2025年に太陽に接近し、活発な彗星活動を示して明るくなり、これまでの恒星間天体（1I/'Oumuamua（オウムアムア）、2I/Borisov（ボリスフ））や太陽系の彗星と様々な点で異なる特異性が見いだされた。

京都産業大学神山宇宙科学研究所・神山天文台の口径1.3m荒木望遠鏡による可視分光観測では、一般的な太陽系の彗星と同様に、CNやC₂に由来する輝線が観測されたものの、NH₂の輝線が極めて弱かった。NH₂はアンモニア（NH₃）が太陽の紫外線で壊れて生成され则认为られており、3I/ATLASの氷中のアンモニアの欠乏を示すものである[1]。さらに国立天文台のすばる望遠鏡などによる観測を行った結果、彗星コマ中の水（H₂O）に対する二酸化炭素（CO₂）の存在比（CO₂/H₂O比）が、太陽最接近（近日点）通過の前後で変化していることがわかった。もともと近日点通過前には宇宙望遠鏡の赤外観測などから極めてCO₂に富むとされていたが、近日点通過後にはCO₂の量は太陽系の平均的な彗星程度に下がっていたのである[2]。このような彗星活動を支配する主要な揮発性成分の組成比の変化は表層と内部で物質組成が異なる可能性を示唆するものである。

ALMAによる観測からは、水分子における水素同位体比（重水素/水素比）が太陽系の彗星の30倍以上であることが見いだされた[3]他、炭素や窒素の同位体比が太陽系の彗星よりも大幅に高いことも判明した[4]。これらの同位体の特徴から、3I/ATLASは金属量が極めて少ない、宇宙の初期段階に誕生した古い星の原始惑星系円盤で生まれたことが示唆されている。一方、コマ中には中性鉄原子および中性ニッケル原子が、太陽系の彗星の数十倍以上と豊富に存在していることもわかった[5]。また、偏光観測から塵の特性も太陽系の彗星とは異なることも示唆されている[6]。本講演では、われわれの観測結果を含めて明らかにした、恒星間天体3I/ATLASの特異性について報告する。

[1] Kawakita et al. (2026), ApJ., 1000, L60. doi: 10.3847/2041-8213/ae4c5b

[2] Shinnaka et al. (2026), AJ., 171, 281. doi: 10.3847/1538-3881/ae578d

[3] Salazar Manzano et al. (2026), Nature Astronomy, 10, 988. doi: 10.1038/s41550-026-02850-5

[4] Cordiner et al. (2026), Nature, 655, 870. doi: 10.1038/s41586-026-10771-6

[5] Mura et al. (2026), A&A, in press

[6] Choi et al. (2026), ApJ., 1000, L29C, doi:10.3847/2041-8213/ae497c

Comet Interceptor の探査対象選定に向けた彗星の光度予測計算 2: ダスト層形成について

○岸 真瞳¹、杉田精司¹、河北秀世²

¹ 東京大学地球惑星科学専攻、² 京都産業大学宇宙物理・気象学科

Comet Interceptor(CI)は、長周期彗星を目標とし彗星活動が盛んな 1AU 程度でのフライバイ観測を行う探査機である。長周期彗星は太陽の熱による昇華をあまり経験しておらず、揮発性物質が残存し非常に始原的な組成情報を保持していると推定される。しかし、長周期彗星は、日心距離 10-20au まで接近しないと存在を確認できないため望遠鏡で発見した後に探査機を製作、打ち上げるのでは間に合わないという問題がある。この問題を解決するために、CI は目標選定前にあらかじめ探査機を打ち上げ、ラグランジュ点近傍のパーキング軌道に待機させておき、地上望遠鏡による観測から探査に適した長周期彗星が見つかり次第フライバイ軌道に遷移させ、近傍観測を行うというアプローチをとる(Snodgrass & Jones, 2019)。

その一方で、CI の探査対象彗星を選ぶため、現在ベラ・ルービン望遠鏡等の望遠鏡を用いて遠方にある彗星の全天サーベイ観測が行われている。2000 年から 2024 年までの観測では年間平均 3.5 個の CI の目標となる軌道条件を満たす長周期彗星が見つかった(Sánchez et al., 2024)。CI の運用上、地上望遠鏡を用いて日心距離 5—10au までの遠方で彗星を発見・選定する必要がある。しかし、この日心距離では典型的な彗星は光量が暗く各種波長での分光観測による組成同定が困難である。そのため彗星の光度変化に基づいて近日点付近(~1au)での活動を予測し、目標を選定することが求められる(Ivanova et al., 2025)。

彗星核内部の水は H_2O 、 CO 、 CO_2 が主であり、これらの氷組成により異なる光度変化が見られる。加えて彗星ではアウトバーストと呼ばれる突発的なガスやダスト放出現象が観測され、近日点付近で突発的な増光現象が見られる。この現象の要因の一つとして考えられるのが、彗星核の氷昇華に伴う核表面でのダスト層形成である。昇華活動により放出されたダストの一部が沈殿し表面にダスト層を形成することで、さらに太陽に接近した時にダスト層下の氷昇華が活発化し、ダスト層下にガスが蓄積される。この蓄積されたガスがダスト層を壊し突発的に放出されることでアウトバーストが引き起こされると考えられている(Ferrellec et al., 2024)。しかし、他にも表面の崖崩れなども要因として考えられており、アウトバーストの詳細なメカニズムはよくわかっていない。CI で長周期彗星のアウトバーストを観測できれば、長周期彗星の活動による表面進化の手がかりになる。しかし、CI の目標選定時ではアウトバーストが起きていないため、あらかじめ遠方の観測から予測しておく必要がある。

本研究ではその前段階として DSMC 法を用いて各日心距離で彗星核表面から放出されるガスの運動を計算し、日心距離に伴うダスト層の形成・発達条件の推定を行なった。ダストに作用するガス抵抗力を算出するために必要な昇華量は Meech et al. (2017)の手法を用いて、 H_2O 、 CO 、 CO_2 の組成を仮定して計算を行なった。この抵抗力からダストの沈殿条件を評価した結果、 H_2O の昇華のみを考慮した場合、近日点 1au 付近で 1mm スケールのダストは放出される一方で、昇華がまだ活発化していない 4au 以遠では $1\mu\text{m}$ スケールでもダストが表面に沈殿する結果となった。今後は、 CO 、 CO_2 を含めてダスト層形成条件について計算し、CI の目標選定に向けた光度曲線計算に結びつけてアウトバーストの発生予測につなげていく予定である。

Comet Interceptor 探査機の姿勢変動に基づく 彗星ダスト質量分布の推定手法の開発

○渡邊 紀輪¹, 笠原 慧¹, 佐々木 貴広², 尾崎 直哉³

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門, ³ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

ESA と JAXA が共同で進める長周期彗星探査ミッション Comet Interceptor (2029 年打上げ予定) では、彗星近傍のダスト環境を解明することが、彗星の活動メカニズムや太陽系の初期進化プロセスを理解する上で極めて重要である。本ミッションの最大の特徴である複数の探査機による同時多点観測の科学的価値を最大化するためには、専用のダスト計測器を持たない探査機子機 B1 の軌道上においてもダスト情報を取得し、三次元的な空間分布の解明に寄与することが望ましい。過去のハレー彗星探査機「すいせい」においては、ダスト衝突時の姿勢およびスピン速度の変化からダスト質量の下限値を推定できることが示されている。しかし、スピン安定方式であった同機に対し、B1 は三軸姿勢制御を採用している。そのため、単なる剛体の運動変化だけでなく、ダスト衝突に伴う外乱トルクと、それを打ち消そうとする姿勢制御系の動的な補償応答を含めた、同機特有の新たな推定モデルの構築が不可欠である。そこで本研究では、姿勢制御系の時系列データに着目し、ダストの質量およびその分布を推定する手法を開発した。想定されるフライバイ条件と B1 の機体モデルに基づき、ダスト分布を仮定したモンテカルロ・シミュレーションを実施し、姿勢制御系の応答挙動を再現した。解析の結果、時系列の姿勢データから衝突ダスト質量の下限値を推定可能であることが確認された。さらに、推定下限値と実際の衝突質量との誤差を低減すべく、ダスト衝突位置の不確定性や角速度変化の挙動が推定精度に及ぼす影響についても考察を行った。本発表では、開発した推定アルゴリズムの概要と、その精度および限界について議論する。本手法が確立されれば、ダストセンサー非搭載の探査機であっても機体の姿勢データを活用した科学観測が可能となり、将来の惑星探査ミッションにおける環境解明やダスト衝突リスク評価への広範な応用が期待される。

Dimorphos への DART 衝突時の放出物の速度-質量分布: 太陽周りの公転軌道変化への応用

黒澤耕介^{1,2}, 高田智史³

¹神戸大学 大学院人間発達環境学研究科,²千葉工業大学 惑星探査研究センター

³東京農工大学 大学院工学研究院

現在, 人類史上初の小天体の軌道変更実証実験 AIDA(Asteroid impact & Deflection Assessment)が進行している. 2022 年 9 月に NASA の DART(Double Asteroid Re-direction Test) 探査機が小惑星 Dimorphos に衝突した [e.g., Daly et al. 2023, *Nature* **616**, 443–447]. Dimorphos は小惑星 Didymos の衛星である. DART 衝突後に Dimorphos の Didymos 周りの公転周期が実際に変化したことが確認された [e.g., Thomas et al. 2023, *Nature* **616**, 448–451; Cheng et al. 2023, *Nature* **616**, 457–460;]. 2026 年 11 月には DART 衝突の結果を観測する ESA の Hera 探査機が到着する見込みである.

DART 衝突から 4 年が経とうとしており, 様々な観測の結果が次々に報告されている. Didymos–Dimorphos 系(以下 D–D 系と書く)の長期に渡る追跡と多数回の恒星掩蔽観測から太陽周りの公転周期が変化したことも確かめられた[Makadia et al. 2026, *Science Advances* **12**, eaea4259]. Dimorphos の Didymos 周りの公転周期変化と, D–D 系の太陽周りの公転周期変化の 2 つの観測結果を利用して, これまで未知であった Dimorphos の密度と質量も推定された. 2 つの軌道変化量の比は Dimorphos の脱出速度(8.7 cm s^{-1})を超えたが, D–D 系の脱出速度(24.5 cm s^{-1})は超えなかった物質が持ち去った運動量の総和, すなわち DART 衝突による D–D 系の太陽周りの運動量変化と Dimorphos の Didymos 周りの運動量変化の比(以下では κ_p と書く)で決まっているはずだが, このような低速放出物が実際にどの程度生じたか?については未解明である. D–D 系の太陽周りの公転周期変化を検出した Makadia et al. (2026)は κ_p は 0.9 程度としてその後の議論を展開し, Dimorphos の密度は $1540 \pm 220 \text{ kg m}^{-3}$ とこれまでの推定値($2400 \pm 300 \text{ kg m}^{-3}$)から大幅に下方修正されることを主張した. しかし, 実際の κ_p の値は Hera 到着で明らかになる, とも注意している.

我々は以前に Maxwell の Z model に掘削流量のエネルギー収支を加えた改良モデル [Kurosawa & Takada 2019, *Icarus* **317**, 135–147]を提案しており, DART 衝突への応用も行なってきた[Kurosawa & Takada 2024, LPSC abstract #1869]. 本モデルではこれまで推定されていなかった κ_p を直接計算できる. そこで本研究では Makadia et al. 2026 による κ_p の推定値の妥当性を検証した. その結果, Dimorphos の Didymos 周りの公転運動量変化を説明するパラメータセット(重力支配領域の衝突掘削)では κ_p は 0.6 程度まで低下し得ることがわかった. Makadia et al. 2026 が行った κ_p の値が Dimorphos 密度に与える影響の感度解析の結果を参考にすると, Dimorphos 密度は $1700 \pm 300 \text{ kg m}^{-3}$ 程度まで上方修正される. この密度は小惑星 Itokawa や, 別の連星小惑星である Moshup の密度に近い.

ドーン探査機の赤外分光器スペクトルの包括的再解析 およびセレスでの氷融解の証拠

○マクドナルド譲治¹, Bryn King¹, Kieran Brown¹, Emmanuel Vu¹, John Lipor¹, Ryan Park²

¹ポートランド州立大学, ²ジェット推進研究所/JPL

セレスは現存する原子惑星である可能性が指摘されている。つまり、セレスの研究は地球系惑星形成に不可欠であった揮発性元素の供給を知る上の手掛かりになる。更に表面に水溶性の塩類を保有し、氷を多く取り組んでいる事で氷衛星と類似している事が指摘されている。NASA のドーン探査機の観測によって地質学的に最近の地下浅部での氷の融解が明らかになってセレスは注目されている。氷の融解の最も説得力のある証拠はオッカトル・クレーター（北緯 19.86 度、東経 238.85 度）に存在する。しかし、氷の融解はセレスで散発的であるか、地質史で頻繁に起きていたかはまだ結論がついていない。本研究では機械科学でのドーン探査機の赤外分光器スペクトルの包括的再解析によって、オッカトルに次ぐ氷の融解の証拠を持つ地質地点を位置付ける。また融解の頻度を決定する事を目的とする。

本研究で利用しているドーン探査機の可視光・赤外分光器 (Visible and Infrared Spectrometer, VIR) のスペクトルには多数の偽迹（ぎせき＝アーティファクト）が見られる。これらの偽迹は VIR チームの分析では修正されたが、修正されたスペクトルは NASA Planetary Data System (PDS、惑星探査データの公開データアーカイブ) には公開されていない。機械学習による分析、又は多くの研究者の利用を可能にするため、本研究で改良された VIR スペクトルの偽迹修正方法を導入している。

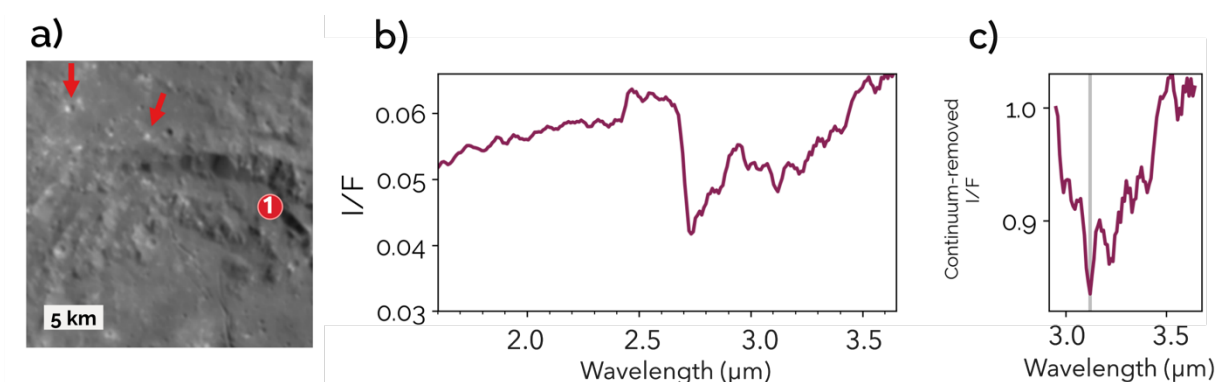


図 1: a) 機械科学による分析でオッカトル・クレーターと類似しているスペクトルの地点(①). 矢印で近くの水溶性の塩類の可能性の高アルベド領域が指摘されている。b) ①の地点の VIR 反射スペクトル。c) コンティニウム除去による同スペクトルのアンモニアおよび炭酸塩に関連する吸収の存在する 3.0~3.5 μm 領域。3.1 μm の吸収はアンモニアと考えられる。

Hayabusa2 MINERVA-II1 ローバーの 小惑星リュウグウにおける移動経路復元

Trajectory Reconstruction of the Hayabusa2 MINERVA-II1 Rovers on Asteroid Ryugu

○横田康弘¹、吉光徹雄²、神山徹³、巽瑛理⁴、藪田ひかる⁵、出村裕英⁶、
矢野創²、道上達広⁷、杉田精司⁸、久保田孝⁹

¹東京科学大、²JAXA、³産総研、⁴IAC、⁵広島大、⁶会津大、⁷近畿大、⁸東京大、⁹明治大

はやぶさ2 ミッションの MINERVA-II1 ローバー (Rover-1A・1B) は、小惑星リュウグウの微小重力環境においてホッピング機構による自律探査を行った。2018 年 9 月 22 日に探査機から高度約 50 m で分離後、Rover-1A は約 113 sol (地球の 35 日間; 1 sol = 7.63 時間)、Rover-1B は約 10 sol (3 日間) にわたり活動した。

両ローバーは搭載カメラで多くの画像 (1A: 530 枚、1B: 35 枚) を取得した。これらのデータの解釈には小惑星上でのローバーの撮像位置情報が重要である。そこで本研究では、ローバーのホッピング中画像と、探査機本体の光学航法カメラ (ONC) が上空から撮像した画像を比較することで、ローバーの位置特定と移動経路の復元を行った。

画像の目視比較の結果、Rover-1A 画像の 22 枚、1B 画像の 6 枚についてリュウグウ上の予備的な位置推定に成功した。これにより Rover-1A は第 89 sol までに約 1.9 km (リュウグウ半径の 4 倍以上) の距離を移動したことが示された。Rover-1A は第 113 sol まで活動したため、総移動距離はさらに長いと予想される。また、Rover-1B は第 10 sol までに約 240 m (リュウグウ半径の半分以上) を移動したことが判明した。現在我々はさらに精度向上のため、Perspective-n-Point (PnP) 法を用いて撮像時のローバー3次元位置・姿勢の推定も進めている。

移動経路を復元することは、直接特定した画像のみならず、その経路中の地表面で取得された数 cm～数 mm 解像度の画像 (ステレオ画像を含む) についても、リュウグウ全球内での位置を制約することにつながる。MINERVA II-1 画像には探査機本体による観測と採取試料との空間解像度ギャップをカバーできる長所があるが、さらに本研究の位置制約が加わることで、リュウグウの地形や地質との関連を論じることが可能な科学的価値の高いデータセットとなる。

はやぶさ 2 #による小惑星トリフネ超近接フライバイの初期成果

○田中 智¹, 三桝裕也¹, 神山徹², 坂谷尚哉¹, 鎌田俊一³, 北里宏平⁴, 平林正稔⁵,
村上真也¹, 岩城拓弥¹, 藤原正寛¹, 早川雅彦¹, 湯本航生¹, 横田康弘⁶, 山田学⁷,
石崎拓也¹, 末次竜⁸, 千秋博紀⁷, 安部正真¹, 平田成⁹,

はやぶさ 2 拡張ミッションチーム

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 産業技術総合研究所, ³ 北海道大学, ⁴ 公立鳥取環境大学,
⁵ ジョージア工科大学, ⁶ 東京科学大学, ⁷ 千葉工業大学, ⁸ 大島商船高等専門学校, ⁹ 会津大学

はやぶさ 2 ミッションは、2020 年に小惑星リュウグウからのサンプルリターンを達成した後、拡張ミッション「はやぶさ 2#」として運用を継続している。その目標の一つとして、2026 年 7 月 5 日に地球近傍小惑星 (98943) トリフネの超近接フライバイ探査を実施した。トリフネは、地上観測によって S_q 型に分類され、自転周期が約 5 時間、細長い形状をもつサブキロメートル級の地球近傍小惑星である可能性が示されていた。一方、詳細な形状、表面地形、熱的性質、表面組成については明らかになっていなかった。サブキロメートル級の S/S_q 型小惑星は、イトカワを除いて近接観測例が極めて限られている。トリフネを詳細に観測することは、このサイズクラスの小惑星の形成・進化過程を理解するとともに、他の小惑星近接探査で得られたデータとの比較を通じて小惑星の多様性を明らかにする上で重要である。

探査機はトリフネに対して約 5.3 km/s の相対速度で飛行し、最接近距離約 1 km の超近接フライバイを実施した。光学航法カメラ (ONC)、熱赤外カメラ (TIR)、近赤外分光計 (NIRS3) およびレーザ高度計 (LIDAR) を用いて観測を行い、探査機の軌道、姿勢制御および観測シーケンスはほぼ計画どおりに実施された。その結果、4 台すべての科学観測機器から観測データを取得することに成功した。取得された ONC 画像と LIDAR 測距データから、トリフネの長径約 860 m のコンタクトバイナリ天体であることが確認され、天体全体の形状や表面地形を高い空間分解能で捉えることに成功した。また、TIR による熱赤外画像、NIRS3 による近赤外スペクトルも取得されており現在、各観測機器によるデータ解析を進めている。本フライバイは、サブキロメートルクラスの S/S_q 型小惑星の貴重な近接観測機会となり、小天体の形成・進化過程や内部構造の理解に資する重要な科学データを取得した。一方、ランデブー探査を目的として設計された探査機を用いて、秒速 5 km を超える高速接近下で天体中心から 800 m 以下まで接近し、限られた観測時間内にすべての科学観測機器による観測を実現した。この成果は、高速で接近する小天体に対する精密な軌道航法、ターゲティング、姿勢制御および短時間観測運用技術の有効性を示すものであり、将来のプラネタリーディフェンスにおいて、衝突リスクを有する小天体へ迅速に接近し、その形状、自転状態、表面特性などを把握する近接偵察ミッションへの応用等が期待される。本発表では、超近接フライバイを実現した航法・姿勢制御および観測運用について報告するとともに、ONC、TIR、NIRS3 および LIDAR による初期観測結果を紹介する。

小惑星トリフネの表層地質・可視スペクトル観測から探る天体進化史

○湯本 航生^{1,2}, 山田 学³, 神山 徹⁴, 横田 康弘⁵, 巽 瑛理^{6,7}, 諸田 智克⁷, 早川 雅彦¹,
松岡 萌⁴, 坂谷 尚哉¹, 平林 正俊⁸, 平田 成⁹, 鎌田 俊一¹⁰, 北里 宏平¹¹, 道上 達広¹²,
村上 真也¹, 矢野 創¹, 楠本 哲也¹, 藤原 正寛¹, 岩城 拓弥¹, 下村 純人¹, 竹内 央¹,
吉川 真¹, 田中 智¹, 三桝 裕也¹, はやぶさ2 チーム

¹JAXA 宇宙科学研究所, ²パリ天文台, ³千葉工業大学, ⁴産業技術総合研究所,
⁵東京科学大学, ⁶カナリア天体物理研究所, ⁷東京大学, ⁸ジョージア工科大学, ⁹会津大学,
¹⁰北海道大学, ¹¹公立鳥取環境大学, ¹²近畿大学

小惑星の約30%は、二つの天体が接触した形状を持つコンタクトバイナリであることが知られている (Virkki et al., 2022)。これらの二天体が合体する際の相対速度や、その後の構造進化を調べることで、小惑星同士が合体成長する際の力学過程が明らかになることが期待される。これまで探査された (25143) Itokawa や (52246) Donaldjohanson もコンタクトバイナリであると考えられているが (Fujiwara et al., 2006; Marchi et al., 2026)、いずれも二天体をつなぐ首構造は比較的太い。一方、地上レーダー観測では、首構造が非常に細く接触面積の小さいコンタクトバイナリも発見されており、二天体が接触して間もない若いコンタクトバイナリである可能性が指摘されている (Magri et al., 2011)。しかし、このような形成初期段階にあると考えられるコンタクトバイナリ小惑星を近接探査した例はない※。

小惑星探査機「はやぶさ2」は2026年7月5日に近地球小惑星(98943)トリフネをフライバイし、このような形成初期の形状を保持したコンタクトバイナリである可能性を明らかにした。地上ライトカーブ観測からは細長い形状であることは示唆されていたものの (Popescu et al., 2025)、コンタクトバイナリであることは判明していなかった。望遠光学航法カメラ (ONC-T) による最高解像度画像 (図1) は、トリフネがほぼ同サイズの二つのローブからなるコンタクトバイナリであることを強く示唆し、頭部 (図1右) が落とす影の長さから、首構造は非常に深く、二天体の接触面積が極めて小さいことも見て取れる。

さらに、表層が複雑な地質構造を有し、活発な表層更新を経験したことも示唆される。例えば、多くのクレーターは細粒物質によって埋積されており、地震動や帯電輸送などによる粒径分級が生じた可能性が高い。また、体部 (図1左) には南北方向に延びるリッジ構造が発達し、その東側にはクレーター密度が著しく低く、比較的表面年代が若いと思われる平野が広がる。このように、トリフネは二天体の合体直後の形状をよく保存する一方で、表層では活発な地質進化を経験した痕跡を残しており、両者を統一的に説明できる形成・進化シナリオの構築が求められる。一方、頭部と体部の可視スペクトルおよび岩塊のサイズ頻度分布はよく似ており、二つのローブが共通の起源を持つという従来のコンタクトバイナリ形成モデルとも整合的である。

本発表では、ONC-T 観測から得られたこのような地質学的・分光学的特徴に基づき、トリフネならびにコンタクトバイナリ天体の形成・進化過程について議論する。

参考文献 : Fujiwara et al. (2006). *Science*, 312(5778); Magri et al. (2011). *Icarus*, 214(1); Marchi et al. (2026). *Science*, 392(6804); Popescu et al. (2025). *PSJ* 6 (42); Virkki et al. (2022). *PSJ*, 3(9).

※ 小惑星(152830) Dinkinesh の衛星にあたる Selam も若いコンタクトバイナリ型天体の探査例として挙げられるが、独立して存在するコンタクトバイナリ小惑星とは異なる形成深化過程を経た可能性が高い。

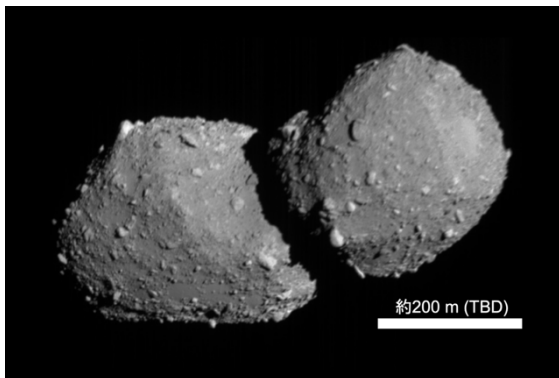


図1. 「はやぶさ2」に搭載され望遠光学航法カメラ (ONC-T) により、最近接約1.5秒前に撮影された小惑星トリフネの最高解像度画像。画像スケールは暫定値である。画像上方はほぼ小惑星の北極方向に対応し、黄道面の北方向ともほぼ一致している。

湿潤天体上の衝突クレーター地下における 熱環境に関する実験的研究

○豊嶋遥名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宇宙科学研究所

火星, セレス, および小惑星母天体の表層から浅部には過去に液体の水が存在したと考えられており, これはハビタビリティを考える上で重要な要素である^[1]. これらの天体では, 放射性元素の崩壊に加えて, 小惑星衝突も主要な熱源の一つであり, 放射性崩壊による加熱が及びにくい表層付近へ熱を供給することができる. Yasui ら (2021) は, 多孔質で乾燥した物質を仮定し, 小惑星母天体において衝突加熱がクレーター地下での水質変質や有機固体形成に必要な熱を供給し得ることを示した^[2]. 火星やセレス, 小惑星母天体の場合は, 表層は粒子層で構成され则认为られているが^{[3][4][5]}, 粒子層における衝突クレーター地下の温度分布に関する研究はほとんどない. さらに, 粒子間の空隙に液体の水が存在する場合には, その比較的高い熱伝導率によりクレーター地下での熱輸送が促進される可能性がある一方, 蒸発に伴う潜熱消費によって温度上昇が抑制される可能性もある. 本研究では, 粒子層において液体の水が衝突クレーター地下の温度上昇に与える影響について調べた.

神戸大学および ISAS (JAXA) の縦型ガス銃を用いて, 乾燥砂および含水砂への衝突実験を行った. 直径 4.7 mm および 7.0 mm のポリカーボネート球を, 衝突速度 1.1~3.5 km s⁻¹ で, 含水率 (0~13 wt. %) を変化させた砂標的へ鉛直に衝突させた. 各実験では, 標的内部の異なる位置に 5 本の熱電対を埋設し, クレーター地下の温度変化を測定した. また, 標的上方に設置した高速赤外線カメラを用いて標的表面を観測し, クレーター壁面に沿った温度分布を取得した.

クレーター地下の温度上昇は, 一般に衝突点から離れるほど小さくなる傾向を示した. しかし, 温度分布はクレーター壁面の熱構造に強く依存していたため, データ整理のために仰角 θ (初期表面を 0°, 衝突点直下を 90° と定義) を導入した. 形成されたクレーターは完全な半球形ではないため, 温度上昇は衝突点からの距離よりも, クレーター壁面からの距離との方が良い相関を示した. 興味深いことに, 含水砂では一部の測定点において急激な温度上昇 (スパイク) が観測されたが, このような挙動は乾燥砂では確認されなかった. これらのスパイクは衝突点近傍だけでなく, 比較的離れた位置でも観測された. また, 含水砂では周囲よりも局所的に高い温度上昇を示す領域も認められた. これらの結果は, 加熱された液体の水と微細粒子が砂粒子間の空隙を通過して移動し, Z-model で予測される流線を越えた領域まで到達して周囲を加熱した可能性を示唆している. すなわち, 液体の水は温度上昇が生じる領域を拡大させる役割を果たす可能性がある. 我々は, クレーター壁面から計測点までの距離をトランジェントクレーター深さで規格化することで, 最大温度上昇と温度計測位置の関係, および温度持続時間と温度計測位置の関係が冪乗則で整理できることを明らかにした. 本講演では, これらの地下温度分布に関するスケーリング則を示すとともに, 湿潤天体におけるクレーター地下の温度上昇領域がどの程度拡大および持続するのかについて議論する.

[1] Cockell, C. S., et al. (2016), *Astrobiology* 16(1), 89–117. [2] Yasui, M., et al., (2021), *Comm. Earth & Environ* 2, 95. [3] Chevrier, V. & Mathé, P. E. (2007), *Planetary and Space Science* 55(3), 289–314. [4] Prettyman, T. H. et al. (2017), *Science* 355, 55–59. [5] Brearley, A. J. (2006), *Meteorites and the Early Solar System II*, University of Arizona Press, Tucson, 943pp, 584–624.

電気力学天秤（EDB）による惑星大気研究の新展開：微小液滴が駆動する不均一反応と生命関連分子合成

New Developments in Planetary Atmosphere Study Using the Electrodynamic Balance (EDB): Heterogeneous Reactions Driven by Microdroplets and the Synthesis of Organic Molecules

著者

中川広務、生方颯真、松本直己、玄正雄、狩生宏喜、青木翔平、村田功、寺田直樹

抄録 5 0 0 0 文字

惑星大気の進化や化学組成の決定プロセスにおいて、気相反応だけでは説明がつかず、雲やエアロゾルを構成する液滴表面での不均一反応（heterogeneous reaction）の重要性が近年指摘されている。しかし、従来の室内実験の多くはバルク溶液を用いたものであり、微小液滴特有の物理化学的特性を十分に再現できていなかった。特に、地球以外の惑星大気研究においては、環境が異なるにも関わらず地球の実験結果を適用することもしばしば見受けられ、惑星環境を模擬した実験系を構築が喫緊の課題であった。我々は東北大学において、単一の浮遊液滴を非接触で空中で保持し、惑星大気環境を模擬可能な電気力学天秤（EDB）実験系を構築した。

本EDBシステムは、Gen et al.(2023)等をもとに構築されている。この装置の中核は、リニア四重極型の電極構造により、静電気力と重力のバランスを利用して、単一の微小液滴を空中に浮遊させる点である。これにより、壁面との接触（壁面効果）を排除した理想的な反応場を実現している。ピエゾ式ディスペンサーで作られた液滴は誘導電極（インダクションプレート）を通過することで、正の電荷を帯びた状態でチャンバーに導入される。これにより半径約数 μm ～30 μm の均一なサイズの液滴を再現性高く生成可能である。EDB小型チャンバー（36mmキューブ）内は、オープンシステムとして連続的なガス流によって惑星環境が再現される。マスフローコントローラー(MFC)を用い、背景ガス（金星模擬の場合はCO₂）に微量の反応ガス（SO₂、NO₂など）を精密に混合して導入する。チャンバー直前のガス配管内に温度・相対湿度（RH）センサーを設置し、実験条件（常温・1気圧、RHを0～80%で調整）をリアルタイムで監視する。

液滴の状態を非破壊・リアルタイムで計測するため、Mie散乱による粒径計測

とラマン分光による組成分析、紫外線照射が可能なシステムとなっている。白色光源を液滴に照射し、その散乱光を分光することでMieスペクトルを取得し、共鳴ピーク間隔から液滴半径を算出することで、粒径成長を調べる。また、レーザー光を照射し、ラマン散乱を測定することで、液滴の化学組成を同定する。

本発表では、この EDB システムを用いて 2 つの主要な研究初期成果を報告する。第一に、金星の大気化学における重要な未解明問題である「雲層での SO₂ の激減」について、硫酸液滴上での NO₂ による SO₂ の反応的取り込みを実証した (Ubukata et al., 2025)。実験の結果、NO₂ の存在下で硫酸液滴が SO₂ を取り込んで成長することを突き止め、その反応速度を定式化した。本結果は、液滴上の反応を伴う取り込みが雲層における SO₂ 減少に重要な役割を果たしている可能性を示唆するものであり、金星大気中の酸化剤に関する今後の観測を要請するものである。

第二に、原始地球や火星における生命の起源に関わる、ホルムアルデヒド

(FA) からの糖生成プロセスを検証した。微小液滴反応場は、バルク溶液と比較して比表面積が飛躍的に大きく、地球全体での雲粒の総面積は惑星表面積の数十倍にも達する。また、この比表面積の大きさから、液滴の蒸発に伴う効率的な濃縮が可能になる。さらに、活性化エネルギーの変化により、バルク溶液を用いた従来の研究ではボトルネックとなっていた反応速度や溶解込み係数が大幅に向上する可能性がある。我々が得た初期成果では、気相から液滴内へ FA が取り込まれることを突き止めた。また、相対湿度 (RH) を低下させることで液滴が収縮し、濃縮されるプロセスを捉えることにも成功した。我々の結果は、同じ湿度条件下でも、塩の種類と濃度が液滴のサイズ（ひいては反応場の維持）を決定する重要な因子であることを示唆している。

本手法は、上記課題に加え、金星雲層における未知の紫外線吸収物質の解明や、火星や金星における CO₂ 安定問題の解明につながるブレイクスルーをもたらすものと期待している。本手法で得られた結果は、我々が独自に開発を進める数値モデルに導入され、さらに中核としてすでに参画している欧州金星探査機「EnVision」といった宇宙探査ミッションでの実証に繋げることで、当該未解明問題に資することを企図する。今後は冷却・減圧機能の拡張により、より多様な惑星環境へ適用を目指す。

Nancy Grace Roman 宇宙望遠鏡とコロナグラフ観測

○ 水木 敏幸¹ 葛原 昌幸¹ 村上 尚史¹ Vanessa Bailey² Schuyler Wolff³ Ramya Anche³
 Ruslan Belikov⁴ Beth Biller⁵ Jessica Gersh-Range⁶ Alexandra Greenbaum⁷ Justin Hom³
 Oliver Krause⁸ Bruce Macintosh⁹ Bertrand Menneson² Max Millar-Blanchaer¹⁰
 Laurent Pueyo¹¹ Tyler Robinson³ Dmitry Savransky¹² Arthur Vigan¹³ Jason Wang¹⁴
 Neil Zimmerman¹⁵ Bijan Nemati¹⁶

¹ アストロバイオロジーセンター ²NASA Jet Propulsion Laboratory ³The University of Arizona
⁴NASA Ames Research Center ⁵The University of Edinburgh ⁶DM Telescopes LLC ⁷NASA IPAC ⁸Max Planck Institute for Astronomy ⁹University of California, Santa Cruz
¹⁰University of California, Santa Barbara ¹¹Space Telescope Science Institute ¹²Cornell University
¹³CNES / Marseille Astrophysics Laboratory ¹⁴Northwestern University ¹⁵NASA Goddard Space Flight Center ¹⁶Tellus1 Scientific, LLC.

ハビタブル領域に存在する地球型系外惑星の直接撮像は、系外惑星科学における最も重要な目標の一つであり、惑星表面における生命の痕跡を探る手段として期待されている。しかし、太陽型星の周囲を公転する地球サイズの惑星は、主星に対して約 10^{-10} と極めて暗く、その検出には超高コントラスト観測技術の確立が不可欠である。Roman 宇宙望遠鏡に搭載されるコロナグラフ装置は、宇宙空間において高度な波面制御とコロナグラフを用いたダークホール生成を実証する技術実証装置であり、575 nm において主星から $6-9 \lambda/D$ の領域で 10^{-7} より深い点源検出コントラストを達成することを主要目標とする。Roman 宇宙望遠鏡は 2026 年 8 月 30 日の打ち上げが予定されており、打ち上げ後の技術実証観測に向けた準備が進められている。さらに、より深いコントラストが達成されれば、木星型惑星の反射光や、太陽系黄道光の数十倍程度の明るさをもつ残骸円盤など、多様な科学観測への展開が期待される。技術実証観測において科学的成果を最大化するため、米国の研究チーム、Roman プロジェクトメンバー、ESA、JAXA、CNES、MPIA からなる Coronagraph Community Participation Program (CPP) が組織されている。本発表では、CPP における観測準備の現状、特に初期 6 か月間の観測計画について報告する。この最初期の観測ターゲットには、若い自己放射惑星、主星からの反射光で観測される木星型惑星、残骸円盤が含まれる。Roman により取得されるデータは専有期間を設けずに公開され、CPP により整備された解析・シミュレーションツールも公開されるため、世界中の研究者が最新データを自らの研究に利用可能である。これらの活動は、Roman コロナグラフ観測の成功に加え、Habitable Worlds Observatory のような将来のより挑戦的な直接撮像ミッションに向けた重要な基盤となる。

Prebiotic Chemistry in a Non-Reduced Early Atmosphere Induced by Solar Energetic Particles

Yuki Nakamura^{1*}, Yoshiaki Endo^{2,3}, Tatsuya Yoshida^{2,3}, Shungo Koyama^{4,5}, Kanako Seki^{1,7}, Naoki Terada⁴, Shotaro Sakai⁸, Kensei Kobayashi^{5,9}

¹Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

²Earth-Life Science Institute, Institute of Science Tokyo

³Earth and Space Sciences, University of Washington

⁴Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

⁵Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Institute of Science Tokyo

⁶Advanced Institute for Marine Ecosystem Change (AIMEC); Tohoku University

⁷Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

⁸Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

⁹Graduate School of Engineering Science, Yokohama National University

Abstract

Hydrogen cyanide (HCN) and formaldehyde (H₂CO) are essential precursors for abiotic synthesis of amino acids, ribose, and nucleic acids. H₂CO could have been photochemically produced in the early atmospheres of Earth and Martian atmospheres under relatively reduced atmospheric composition (Pinto et al., 1980; Koyama et al., 2024), while HCN production is limited to highly reducing atmospheres (Zahnle et al., 1986; Tian et al., 2011). Whereas prebiotic chemistry requires reducing atmospheres, geochemical evidence points to an oxidizing environment on both early Earth and Mars (Armstrong et al., 2019; Noda et al., 2019). The production of organic compounds under such a non-reduced environment remains an unanswered question. This study focuses on the role of solar energetic particles (SEPs) on the production of HCN and H₂CO under non-reduced atmospheric composition. The flare observations of solar-type G stars by the Kepler mission suggested that our Sun should have been much more active, and that intense SEP events could have repeatedly hit planetary atmospheres 4 billion years ago (e.g., Lingam et al., 2018). We focus on new pathways in the SEP-atmosphere interaction: atmospheric ionization leading to the dissociation of water vapor via ion chemistry (Nakamura et al., 2023a) and the complete dissociation of CO₂ into atomic carbon near the surface.

We developed an atmospheric ionization model based on the continuous slowing-down approximation using stopping-power data, and a one-dimensional photochemical model including neutral and ion chemistry, based on PROTEUS (Nakamura et al., 2023b). We found that the surface deposition fluxes of HCN and H₂CO increased sharply with increasing SEP intensity in a CO₂-N₂-H₂O atmosphere, reaching more than 10⁶ cm⁻² s⁻¹, comparable to those previously estimated under a highly reducing H₂-CH₄ atmosphere (Yoshida et al., 2024). HCN production under non-reduced conditions becomes possible due to the formation of atomic carbon in the lower atmosphere, which reacts with nitric oxide (NO) to produce cyano radicals (CN), which then react with H₂ to produce HCN. Enhancement of H₂CO production is due to the depletion of O₂ by enhanced HOx, which inhibits the oxidation of HCO, a precursor of H₂CO. Our results may expand the limit of atmospheric redox states that may have supported the origin of life to more oxidized state than previously thought.

次世代小天体サンプルリターンミッション検討状況報告

○黒川宏之¹, 嵩生有理², 佐伯孝尚², 坂谷尚哉², 深井稜汰², 岡田達明², 癸生川陽子³, 青木順⁴, 熊本篤志⁵, 川村太一⁶, 田中智², 浦川聖太郎⁷, 巽瑛理⁸, 末次竜⁹, 千秋博紀¹⁰, 石崎拓也², 菅原春菜², 湯本航生^{2,11}, 高尾勇輝¹², 菊地翔太¹³, 森治², 津田雄一², 次世代小天体サンプルリターンワーキンググループ

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 東京科学大学, ⁴ 大阪大学, ⁵ 東北大学, ⁶ パリ地球物理研究所, ⁷ 松江工業高等専門学校, ⁸ カナリア天体物理学研究所, ⁹ 大島商船高等専門学校, ¹⁰ 千葉工業大学, ¹¹ パリ天文台, ¹² 横浜国立大学, ¹³ 国立天文台

次世代小天体サンプルリターン（NGSR）ミッションは、はやぶさ・はやぶさ 2・MMX と続く日本の小天体サンプルリターンをさらに発展させ、火星軌道以遠の小天体の試料を地球へ持ち帰ることで、太陽系創生の解明に迫る探査計画である。NGSR は、2026 年 5 月の宇宙理工学委員会において、MMX に続く 2030 年代前半の戦略的中型計画として宇宙科学研究所に推薦された。その後、我々はプロジェクト化を目指した検討を継続している。一方、民間主導で開発される共用性の高い軌道間輸送機（OTV）の活用可能性、打上げ時期、コスト上限などの境界条件には不定性が残る。そこで我々は、複数の目標天体とミッション構成（NGSR-C/D/E）から、条件に応じて最適な案を選択できる形での整理を進めている。

NGSR は、深宇宙航行・通信・電力供給・地球帰還を担う OTV（親機）と、小天体表面への降下・着陸・試料採取を担う小型着陸機（子機）から成る。この 2 機構成により、大型太陽電池を備える親機を表面接触のリスクから切り離しつつ、複数地点からの試料採取を目指す。リモートセンシングによる全球の形状・地形・物質・物性の把握に加え、帰還試料分析では失われ得る低分子揮発性成分の機上その場質量分析、人工震源と設置型地震計による内部構造探査、親機-子機間のバイスタティックレーダー観測という、複数機構成や試料採取運用を活かした新たな科学探査を実現する。

NGSR-C/D/E の 3 案は、はやぶさ・はやぶさ 2・MMX の解明してきた太陽系史の理解を、さらなる過去・遠方・生命惑星という時空間へと拡張する、日本の小天体探査が取り得る科学的方向性を示す。NGSR-C は木星族彗星 289P/Blanpain を目標天体とし、銀河系物質進化と微惑星形成機構の解明を目指す。NGSR-D は D 型小惑星 (162998) 2001 SK162 を目標天体とし、初期太陽系の大動乱の起源と彗星-小惑星のリンクに迫る。NGSR-E は E 型小惑星 (4660) Nereus を目標天体とし、地球型惑星の水と大気の起源および内惑星系の進化史を問う。

今後は、NGSR のプロジェクト化に向け、関係者・関係機関との対話を続け、境界条件等を見定めつつ、フェーズアップを行っていく。

“The far-infrared space telescope PRIMA:

Progress report 2026 and the necessity in star and planet formation sciences”

“遠赤外線宇宙望遠鏡 PRIMA: 現状報告 2026 一星・惑星形成サイエンスにおける重要性—”

○Shota Notsu (野津 翔太)^{1,2}, Yao-Lun Yang (楊 耀綸)², Hideko Nomura (野村 英子)³, Kenji Furuya (古家 健次)²,
Hanae Inami (稲見 華恵)⁴, Tohru Nagao (長尾 透)⁵

¹ Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo
(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻),

² Star and Planet Formation Laboratory, RIKEN (理化学研究所 坂井星・惑星形成研究室),

³ National Astronomical Observatory of Japan (国立天文台),

⁴ Hiroshima University (広島大学), ⁵ Ehime University (愛媛大学)

Understanding the origin of solar-type planetary systems has been one of the persisting questions in astronomy and planetary science. Formed in dense dusty clouds, the high extinction challenges direct observational characterizations of the physical and chemical processes at the onset of star and planet formation. In the last decades, most studies rely on sub-mm and mm interferometric observations using especially ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) to probe the cold dust and gas (~ 10 -100 K), constraining the structures and chemistry of planet-forming disks. In recent years, the JWST (James Webb Space Telescope) provides unprecedented sensitivity at mid-infrared wavelengths, characterizing the hot gas and dust (> 1000 K). However, the bulk energy of protostars and protoplanetary disks lies at far-infrared wavelengths (100 - 1000 K), where we used to have access via ISO, AKARI, SOFIA, and Herschel but not anymore.

The PRoBe far-Infrared Mission for Astrophysics (PRIMA) is a mission concept which is led by NASA and primed to provide a unique access to probe the dominant components of gas and dust in protostellar and protoplanetary systems for the community in the 2030 decade. The concept features a cryogenically cooled 1.8 m diameter telescope, and is designed to carry two science instruments covering the 24 to 264 μm wavelength range: an imaging polarimeter (PRIMAger) and a spectrometer (FIRESS). PRIMA has around 100 times higher line emission sensitivity than that in Herschel, and as one of PI sciences it allows us to conduct survey observations to constrain disk gas masses by HD lines and water gas amounts precisely for around 200 disks spanning a range of ages and stellar types. The majority of PRIMA's time ($\sim 70\%$) will be open to observations proposed by the community (General Observer science / GO), and all of PI science data will be publicly available for archival research (Guest Investigator science / GI). In November 2025, The PRIMA General Observer Science Book Volume 2 has been published (see arXiv:2511.10927), which include 120 new and updated contributed science cases which could be performed within the context of the PRIMA GO/GI program (23 of 120 are submitted from Japanese community). In 2025, the special article featuring PRIMA's sciences have been published from JATIS as well (4 of 28 papers from Japanese community).

In this presentation, we will introduce the summary of PRIMA's concept and discuss the unique science cases on protostars and protoplanetary disks that PRIMA's 24-235 μm imaging and spectral coverage can enable. In addition, on behalf of PRIMA-Japan working group, I will introduce the overview of recent activities in PRIMA-Japan working group and discuss potential unique science cases about star and planet formation: such as locating the water snowline positions by using various water lines and to constrain the gas dispersal processes by using HD and H₂ lines in protoplanetary disks. We also report the current plan of Japan's contribution to level 4 deliverables for PI survey data.

PRIMA mission webpage: <https://prima.ipac.caltech.edu>

PRIMA GO Science Book vol 2: <https://arxiv.org/abs/2511.10927>

Kamp et al. (2021, PASA, 38, e055): <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021PASA...38...55K/>

将来惑星探査に向けた 加熱脱着ガスクロマトグラフ-質量分析計の開発

○岩谷隆光^{1,2}、川島桜也^{3,4}、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、⁴ メリーランド大学

火星は、過去に液体の水が存在したことや、現在も地下水が存在する可能性から、地球外生命探査における有力な探査対象である。生命の痕跡について確固たるコンセンサスは未だ得られていないが、地球生命に関連する分子バイオシグネチャーの探索を目的とした有機物分析は有効なアプローチの一つである。生命活動や有機物の生成・進化過程を理解する上では、分子分布特性を評価することが重要であり、例えば生命活動に由来する有機物では、脂質代謝を反映した炭素数の偶奇による存在量の偏りが生じることが知られている。有機物分析において質量分析計 (mass spectrometer; MS) は有効であるが、質量情報のみで構造異性体を識別することには限界がある。そのため、ガスクロマトグラフ (gas chromatograph; GC) を用いて分子を分離する GC-MS が様々な惑星探査機によるその場分析で利用されてきた (e.g. Mahaffy et al., 2012)。火星探査ローバーの Curiosity は、掘削した泥岩試料を加熱して放出された有機物を GC-MS で分析し、炭素数 10~12 の直鎖飽和炭化水素 (アルカン) を含む様々な分子を検出した (Freissinet et al., 2025)。しかし、これより炭素数の大きい有機物については、十分な感度での検出は実現されていない。分析可能な範囲をより炭素数の大きい側に拡張すれば、脂肪族炭化水素の分子分布特性の評価や、より広範な有機分子の検出が期待できる。このような背景のもと、我々は、将来の惑星探査に向けた炭素数の大きい有機物を測定できる加熱脱着 (thermal desorption TD) GC-MS を開発している。本研究では、TD-GC を試作し、実試料中の直鎖アルカンの偶奇分布の評価を一例として、分子分布情報を取得可能であることを実証した。

TD-GC の開発は、有人宇宙環境の有害ガスモニタリング用に開発された手のひらサイズの GC (Iwaya et al., 2022) を基盤として行った。300°C の試料加熱炉を新たに開発し、試料ガス流路を 200°C 以上に加熱することで高沸点化合物の分析に対応した。標準試料を用いた動作試験では炭素数 20 までの直鎖アルカンの分析に成功した。実試料での実証では、泥岩と類似した成分を含む地球科学標準物質 JSI-2 (スレート) を火星アナログ試料として用いた。商用 GC-MS による分析結果を参照データとし、試作機の分析結果と比較した。参照用システムでは、炭素数 10~16 の直鎖アルカンが検出され、偶数アルカンに対する奇数アルカンのピーク面積比は 0.7 程度で、偶数アルカンが優位であった。試作 TD-GC と市販の四重極型質量分析計 (quadrupole mass spectrometer; QMS) を組み合わせたシステムにおいても、炭素数 10~16 の直鎖アルカンに対応するピークが検出され、その偶奇のピーク面積比は参照データと同程度であった。以上より、試作 TD-GC は、高沸点有機物を含む有機分子の分子分布評価への適用可能性を示した。さらに、当研究グループで開発中の小型 QMS と接続した TD-GC-MS システムについても紹介する。

DESTINY⁺サイエンス及びイジェクタ・クラウド形成モデルの構築へ向けた動的引張強度の定式化

○木村 宏¹、岡本 尚也¹、平井 隆之¹、中村 昭子²、門野 敏彦³、豊田 優佳里⁴、
小久保 英一郎⁴、吉田 雄城⁵、荒川 創太⁶、吉田 二美^{3,1}、洪 鵬¹、和田 浩二¹、
千秋 博紀¹、小林 正規¹、荒井 朋子¹、松井 孝典¹、DESTINY⁺ 理学チーム

¹ 千葉工業大学惑星探査研究センター (PERC)、² 神戸大学、³ 産業医科大学、
⁴ 国立天文台、⁵ 東北大学、⁶ 海洋研究開発機構

JAXA 深宇宙探査技術実証機 DESTINY⁺ は、ESA の RAMSES と H 3 ロケットの相乗りによって、2028年に打上げられる [1]。その後、(3200) Phaethon や (99942) Apophis など複数の地球近傍小惑星にフライバイを行い、探査機搭載カメラ (TCAP 及び MCAP) で小惑星表層を観測する [2]。また、別の探査機搭載機器ダストアナライザ (DDA) では、小惑星周辺に存在すると予測されているイジェクタ・クラウドのダストの組成や質量・速度などをその場分析する [3]。こうして、数年後に得られるイジェクタ・クラウドのその場測定データを読み解くには、イジェクタ・クラウドの形成に関する理論的な知見が大いに役立つと期待されている。そこで、われわれは、小天体周辺でのイジェクタ・クラウド形成に関する一般的な理論モデルの構築を目指している。イジェクタ・クラウド形成モデルの構築へ向けた理論的な取り組みの一環として、ダストの動的引張強度に関する理論的な定式化を行った。われわれの数式は、室内実験結果や分子動力学計算結果と比較すると、どのひずみ速度や空撃率・サイズでも期待された動的引張強度が算出でき、ダストだけでなく小天体一般に適用可能であることが判明した。本講演では、DESTINY⁺ 探査計画の概要とダストの動的引張強度に関する理論的研究の結果を報告する。

参考文献

- [1] Arai, T. et al. Current Status of DESTINY+ Flyby Mission to (99942) Apophis and (3200) Phaethon. 57th Lunar and Planetary Science Conference 3160, 2016 (2026).
- [2] Ishibashi, K. et al. Development status of DESTINY+ two onboard cameras for flyby imaging of (3200) Phaethon. 55th Lunar and Planetary Science Conference 3040, 1750 (2024).
- [3] Simolka, J. et al. The DESTINY+ Dust Analyser - a dust telescope for analysing cosmic dust dynamics and composition. Philos Trans A Math Phys Eng Sci 382, 20230199 (2024).

小天体用地震観測システム開発に向けた散乱特性解析 Analysis of Scattering Characteristics for the Development of a Seismic Observation System for Small Bodies

○高橋佳佑¹, 田中智², 坂谷尚也², 川村太一³, 小野寺圭祐⁴

1. 東京大学, 2. JAXA 宇宙科学研究所,

3. パリシテ大学パリ地球物理研究所, 4. 岡山大学惑星物質研究所

太陽系形成の初期過程を理解するために、小天体の内部構造を解明することは重要である。一部の小天体は、太陽系形成初期の微惑星として、形成当時の物質情報や内部構造を保持していると考えられている。特に、小天体内部を構成する岩塊の大きさや空間分布は、形成・衝突破壊・再集積の履歴を反映していると考えられており、小天体の形成・進化過程を制約する手がかりとなる。現在、日本の次世代小天体サンプルリターン計画では、太陽系創生の解明が大目的の一つとして挙げられており、地震観測による内部構造探査が検討されている。

地震探査において、我々は特に地震波の散乱に注目している。地震波の散乱特性は天体内部の不均質構造を反映するため、対象天体の内部構造モデルを制約する有力な情報となる。地球の地震学では、地球内部の不均質構造を調査するために輻射伝達理論が用いられている[1]。田中ほか[2]では球面上を伝搬する表面波に対する輻射伝達理論[3]を小天体に適用し、レイリー波の直達波成分・単一散乱成分・多重散乱成分を計算することで、散乱によって形成される MS (Mean Squared) エンベロープを数値的に再現した。そして岩塊の大きさを変化させた結果、地震波の波長と岩塊の大きさが同等になると、MS エンベロープがピークを持たない形状を示した。この結果は、地震探査にて取得した地震波から小天体を構成する岩塊の大きさを推定できる可能性を示している。一方、岩塊の大きさの推定に有効な周波数帯は明らかでなく、地震観測システムに求められる設計指針が未確立である。そこで本研究の目的は、小天体の岩塊の大きさを明らかにするために必要なシステムの設計指針を得ること、とした。

先行研究[2]を基に、周波数と岩塊の大きさをパラメータに数値解析を行い、両者の関係が散乱特性に与える影響を調査した。結果、周波数の増加に伴い、直達波および単一散乱成分に対して多重散乱成分の寄与が大きくなることを確認した。また、岩塊の大きさが小さくなると同様の傾向が確認された。本稿ではその結果と開発を進めている小天体用地震観測システムについて報告する。

[1] Aki, K., & Chouet, B. (1975). Origin of coda waves: Source, attenuation, and scattering effects. *Journal of Geophysical Research*, 80(23), 3322-3342.

<https://doi.org/10.1029/JB080i023p03322>

[2] 田中智 et al, (2025). 小天体での地震観測の理学的意義と搭載機器開発について. 第 69 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 講演番号 3I15.

[3] Sato and Nohechi (2001), Envelope formation of long-period Raleigh waves in vertical component seismograms: Single isotropic scattering model. *Journal of Geophysical Research*, 106(B4), 6589-6594.

HWO にむけた紫外線観測技術開発・分光装置の検討状況

○亀田真吾¹、森尾葉月¹、榎木谷海²、桑原正輝¹、村上豪²、山崎敦²、吉岡和夫³

鍵谷将人⁴、土屋史紀⁴、Dmitry Vorobiev⁵、Brian Fleming⁵、Kevin France⁵

¹立教大学、²JAXA、³東大、⁴東北大、⁵コロラド大

Habitable Worlds Observatory (HWO) の主要機器として紫外線多天体分光装置や面分光装置の搭載を想定して設計検討が進められている。またこれらの装置には高分散分光機能を含めることも検討されている。本発表では、日本がこれまでに検討を進めてきた高分散分光器 (HRS) および面分光器 (IFS) の状況とそれらの装置に求められる紫外線観測技術の開発状況を紹介する。

これら装置の主要な科学目的は、地球型系外惑星の上層大気におけるトランジット分光観測、氷衛星の水蒸気プルーム活動のモニタリング、火星・金星・タイタンの上層大気、小惑星の反射分光、彗星活動、さらに銀河やその進化を対象としており、惑星科学から宇宙物理分野まで広い範囲に及ぶものである。これらの観測を可能にするため、現在検討中の遠紫外線宇宙望遠鏡計画「LAPYUTA」等に向けて開発された観測装置用技術として、フォトンカウンティング用の大型・高効率テーパー型マイクロチャンネルプレート検出器、および高反射率コーティングの開発を進めている。

FUV 観測装置の具体的な設計仕様は以下の通りである。

FUV-HRS: コリメーターミラー、エシェル回折格子、クロスディスパーザー、および大型 MCP 検出器で構成され、波長帯 100-180 nm において分解能 $R > 120,000$ を達成する。主要な原子輝線 H, C, N, O およびイオン線 C I, N I などが観測対象となる。

FUV-IFS: 80 枚の回折格子、4 基の MCP 検出器を搭載し、波長範囲は ~100-180 nm である。視野 2.4" x 5"、スリット幅 0.03"、波長分解能 $R \sim 5,000$ を達成する。

さらに、近紫外線 (NUV-IFS, NUV-HRS) および可視光 (VIS-IFS) についても検討中である。本発表では、主要な科学目的や HWO 向け観測装置の検討状況、紫外線技術開発の最新の進捗状況について報告する。

氷球の低速度斜め衝突実験： エネルギー散逸と回転エネルギーへの変換

○豊田 優佳里^{1,2}, 保井 みなみ³

¹ アストロバイオロジーセンター, ² 国立天文台, ³ 神戸大学大学院理学研究科

本研究は、土星 A・B リングにおけるリング粒子間衝突過程の理解を目的とする。A・B リングは dense rings と呼ばれ、幅約 40 万 km、厚さ数十 m の薄い円盤構造を持つ。これらのリングを構成する粒子は数 mm から数十 m サイズの水氷粒子であると考えられており、Cassini 探査機による観測から、粒子は空隙を含む氷粒子集合体である可能性が示唆されている^{[1][2]}。dense rings では粒子密度が高いため、リングの力学進化を理解する上で粒子間衝突過程の理解が重要となる。先行研究^[3]によって、空隙のない氷を用いてリング粒子間での相対衝突速度（数 cm s^{-1} 以下）を再現するような斜め衝突実験が行われた。しかし、氷粒子集合体を対象として低速度での斜め衝突を実施した実験例はなく、衝突角度依存性は統計的に調査されていない。本研究では、将来的な氷粒子集合体の衝突実験に向けて、氷球を用いた斜め衝突実験装置および二次元レーザー変位計を用いた解析手法の開発を行った。

衝突体である氷球は、沸騰させた水道水をシリコン型に注入し、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ の冷凍庫で凍結させることで作成した。標的には鏡面研磨された花崗岩板を使用した。氷球は自由落下によって標的板に衝突させ、衝突前の回転は無視できることを確認した。衝突速度は落下高さを変化させることで制御した（ $v_i = 10\text{--}150\text{ cm s}^{-1}$ ）。衝突角度は標的板の設置角度を変化させることで制御した（ $\theta_i = 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}, 75^{\circ}, 90^{\circ}$ ）。衝突前後における氷球の水平および鉛直方向の運動と回転を測定するため、二次元レーザー変位計を用いて位置および基準面角度の時間変化を取得した。実験はすべて $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ の低温室内で実施した。

衝突速度と反発係数の関係を調べた結果、衝突速度および衝突角度の増加に伴い反発係数が減少する傾向が確認された。法線方向の衝突速度および法線方向の反発係数で整理すると、 $\theta_i > 45^{\circ}$ の場合には衝突角度依存性を統一的に整理することができたが、 $\theta_i < 45^{\circ}$ の場合には衝突角度の増加に伴って法線方向の反発係数が減少する傾向が残った。一方で、接線方向の反発係数は概ね 1 に近い値を示した。また、衝突前後の角速度変化は衝突速度の増加とともに増加したが、明確な衝突角度依存性は確認されなかった。回転運動を引き起こす主な要因は、球中心と重心位置のわずかなずれに起因するトルクであることが分かった。一方で、残差を説明する要因として、摩擦によるトルクおよび衝突時に放出された破片による運動量輸送の寄与が考えられる。本研究では、これらの結果を基に、低速度斜め衝突中に生じるエネルギー散逸と回転運動へのエネルギー変換について議論する。

[1] Zhang et al., 2019 [2] Ferrari et al., 2005 [3] Supulver et al., 1995

氷天体由来水のクレーター内残存： 薄氷被覆鉄鋼標的への高速度衝突実験

○松原 光佑¹, 中村 昭子¹, 長谷川 直², 和田 武彦^{3,4}

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, ⁴総合研究大学院大学

太陽系内では、始原的な小惑星や彗星などの水和したインパクトの衝突によって、天体表面へ水が輸送されてきたと考えられている。しかし、氷は銃による高速度加速に耐える強度を持たないため、他天体への氷を含む小天体の衝突を実験的に再現することは困難である。一方、霜が付着した冷却鉄鋼標的への岩石弾丸の高速度衝突実験 (Libourel et al., 2019) では、クレーター内部に霜由来の水が残存することが示されており、これは霜が氷の薄層を形成し水を供給する点で氷を伴う衝突現象を検討するための実験系と見なせる。そこで本研究では、霜を付着させた冷却鉄鋼標的に対する衝突速度を変化させ、クレーター内部に残存する水について調査した。

二段式軽ガス銃を用いて、無水のカンラン岩およびカンラン石（直径約 3 mm）を鉄鋼標的に 3 ~ 7 km/s で垂直衝突させた。表面に sub-mm スケールの薄い氷層（霜）を形成させるため、標的は実験直前まで液体窒素に浸して冷却した（衝突時温度は -90 °C 程度）。比較のため、常温標的に対する実験も行った。衝突後に形成されたクレーター底面の複数点から近-中間赤外反射スペクトルを FTIR で測定し、残存弾丸物質の水和状態を調査した。

実験条件によらず、クレーターの反射スペクトルは 3 μm 帯に水に由来する広い吸収を示し、常温標的は吸着水による数%の吸収深さを示した。冷却標的においては、3 および 5 km/s の衝突速度では 10% を上回る大きな吸収を示す箇所がみられた一方、7 km/s においてはクレーター内部の顕著な水和は見られなかった。水和した岩石弾丸を用いた高速度衝突実験 (Daly and Schultz, 2018; Matsubara et al., 2026) では、熔融した物質が固化する際に、弾丸物質から放出された水蒸気が捕獲された可能性を示唆する 3 μm 帯の吸収が示されている。本実験の 3 および 5 km/s の衝突においても、クレーター内部の一部に霜に由来する水が残存することが示唆された一方、7 km/s では高い衝突エネルギーのために水蒸気が散逸し、熔融物質による捕獲が困難であったと解釈される。ただし、同一試料においても測定点によって吸収深さは大きく変動し、水和の兆候が認められる箇所とそうでない箇所が混在した。このばらつきの原因として、クレーター表面には弾丸物質が疎らに付着し、特に 3 km/s の衝突では未熔融物質が多く残存するために、スポット径 1 mm の測定では熔融して水を取り込んだ弾丸物質による 3 μm 帯の吸収が周囲の未熔融物質や鉄鋼によって弱められ、明瞭に検出できなかった可能性がある。

本研究から、氷を含む小天体の衝突を模擬した実験において、低速度 (3~5 km/s) の衝突であれば衝突起源の水蒸気が天体表面（クレーター内）に残存する可能性が示された。今後は、氷層の厚さを制御した衝突実験手法の確立と共に、顕微赤外分光による局所分析を行い、衝突条件と赤外線吸収深さの関係の定量的な評価を目指す。

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。

熱進化した層構造を持つ氷微惑星の衝突破壊強度に関する実験的研究

崎村達也¹、保井みなみ¹、荒川政彦¹、中村初音¹、柿木玲亜¹、菊川涼介¹、

大橋拓磨¹、大坪晴太郎¹、長谷川直²、山本裕也²

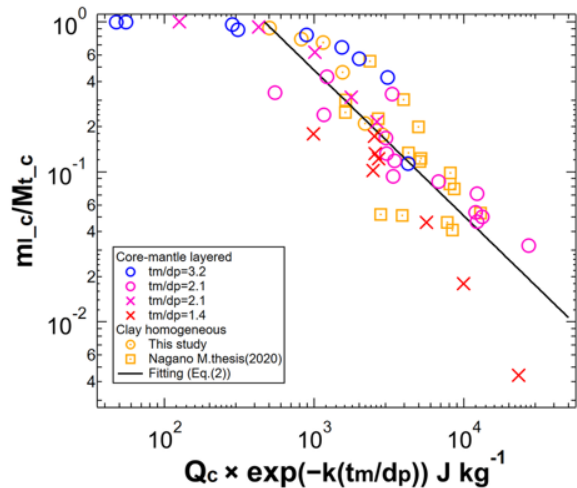
1. 神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻 2. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

はじめに 衝突破壊を経た微惑星の生き残りである小惑星や彗星は、惑星形成初期の情報を保持しており、その起源と進化を理解することは惑星形成過程の解明に重要である。小惑星リュウグウは、有機物と含水珪酸塩鉱物を豊富に含むラブルパイル天体であり、その母天体は放射性崩壊熱や衝突加熱によって氷の融解と水質変成を経験したと考えられている。その結果、粘土質コアと氷マントルからなる層構造を形成した可能性が示唆されている。そこで本研究では、このような熱進化した層構造氷微惑星を模擬した標的への衝突破壊実験を行い、内部構造が破壊強度に与える影響を調べた。

実験手法 標的には、直径 60mm のコア・マントル構造球を用い、コア径 30、40、50mm の 3 種類を作製した。氷の融解を経験した微惑星を模擬するため、マントルには空隙率 40% の多孔質氷、コアにはベントナイト粉末とシリコンオイルからなる粘土を用いた。衝突破壊実験には神戸大学および宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃を用い、直径 2、4.7、7mm のポリカーボネート球を 0.85～7.23km/s で衝突させた。破壊過程は高速カメラで撮影した。

結果・議論 規格化最大破片質量 m_l/M_t (m_l は最大破片質量、 M_t は標的質量) は、エネルギー密度 Q と規格化マントル厚さ t_m/d_p (t_m はマントル厚さ、 d_p は弾丸径) に依存した。同じエネルギー密度では、 t_m/d_p が大きいほど m_l/M_t は大きくなり、マントルが厚いほど標的は破壊されにくくなった。これは、弾丸がマントル中で減速することにより、コアへ伝達される衝突エネルギーが低下するためと考えられる。この効果を考慮するため、弾丸速度の減衰を仮定した有効エネルギー密度 $Q_{c,eff} = Q_c \exp(-k t_m/d_p)$ を導入した (図 1)。その結果、 $k = 0.918$ のとき、コアの規格化最大破片質量は有効エネルギー密度と単一のべき乗則、 $m_{l,c}/M_{t,c} = 10^{2.59 \pm 0.35} Q_{c,eff}^{-0.97 \pm 0.09}$ (図中の Eq.2) で整理することができた。以上より、層構造およびマントルによるエネルギー減衰を考慮した本スケーリング則は、熱進化した層構造氷微惑星の衝突破壊過程を評価する上で有効であることが示された。

図 1 コアの規格化最大破片質量と有効エネルギー密度の関係。色は規格化マントル厚さを示す。橙はコアと同じ物質単体への衝突実験の結果である。



氷・岩石混合物からなる多孔質天体上の クレーター形成に関する実験的研究

○野口琴海¹、保井みなみ¹、荒川政彦¹、大川初音¹、豊嶋遥名¹、菊川涼介¹、
大西彩華¹、大橋拓磨¹、崎村達也¹、大坪晴太郎¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科

[背景]

彗星は太陽系形成初期の情報を保持する始原的な天体であり、多くの探査によってその組成や太陽風による表面変質、表面に多数のくぼ地が存在することが明らかになっている^[1,2]。これらのくぼ地には衝突起源のものが含まれる可能性があり、その形成過程を理解することは彗星核の表層構造や内部物性を推定する上で重要である。また、彗星核の強度は岩石質量含有率や岩石粒径に依存すると考えられており^[e.g., 3]、クレーター形成にも影響を及ぼすと予想される。そこで本研究では、氷・岩石混合模擬標的への高速度衝突実験を行い、クレーター形状およびクレーターサイズの衝突速度依存性を調べるとともに、岩石質量含有率と粒径が強度支配域におけるクレーター形状とスケーリング則に与える影響を調べた。

[実験手法]

試料作製、衝突実験および実験後の解析は、 -15°C の低温室内で行った。彗星核模擬標的として、直径 100mm、高さ 60mm の円柱状氷・岩石混合試料を作製した。試料の空隙率は 40%で一定とし、岩石成分にはモンモリロナイト（粒径 $2\mu\text{m}$ ）およびガラスビーズ（粒径 250, 500 μm ）を用いた。岩石質量含有率は 30, 40, 60wt%とし、60wt%では岩石粒径の影響も調べた。衝突実験には神戸大学の横型二段式軽ガス銃を用い、直径 2mm のアルミニウム球を衝突速度 1~6km/s で標的に衝突させた。衝突の様子は 2 台の高速カメラ（ 10^5fps ）で撮影した。

[実験結果]

クレーター形状は、混合した岩石粒子の粒径に依存した。細粒のモンモリロナイトを混合した標的では、圧縮によって形成されるピット領域と引張によって形成されるスポール領域が明確に分離した。さらに、衝突速度の増加とともに、ピット断面は貫入型からキャロットシェイプ型、さらに高速後では球状へと変化した。一方、粗粒のガラスビーズを混合した標的では、両領域の境界は不明瞭となり、より滑らかなお椀状のクレーターが形成された。

クレーター径は岩石含有率に対して弱い依存性を示した。ただし、圧縮強度は岩石含有率の増加とともに小さくなった。強度が低下するとクレーター径が拡大する傾向があるが、この効果は岩石含有率が高いほど衝撃波が減衰されることにより緩和された可能性がある。

以上より、強度支配域におけるクレーター形成は標的強度だけでなく、岩石質量含有率にも依存し、スケーリング則へ岩石質量含有率を導入する必要性が示唆された。

[1] Keller et al. 2015 [2] El-Maarry et al. 2015 [3] Arakawa et al. 2004

含水微惑星を模擬した濡れた石膏標的への 衝突実験と衝突残留温度の計測

○大坪晴太郎¹・保井みなみ¹・荒川政彦¹・中村初音¹・柿木玲亜¹・豊嶋 遙名¹
菊川 涼介¹・大橋 拓磨¹・大西 彩華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宇宙科学研究所

【背景・目的】

小惑星リュウグウ試料には含水鉱物が主要鉱物として含まれ、母天体で水質変成が生じたことが示されている (Yokoyama et al., 2022)。このことは、母天体内部で液体の水を介した水質変成が生じたことを示している。これまで水質変成の主要な熱源としては短寿命放射性核種の崩壊熱が考えられてきたが、小天体間衝突に伴う局所的な加熱も熱源として寄与した可能性がある。空隙中の水は衝突時のエネルギー散逸や熱輸送に影響すると考えられるが、その影響は十分明らかになっていない。本研究では、乾燥および含水多孔質標的を用いた衝突実験を行い、水の存在が衝突後の温度履歴とクレーター形成に与える影響を調べた。

【実験方法】

標的には、乾燥多孔質石膏と、それを1日以上水に浸漬して作製した含水石膏を用いた。衝突実験には神戸大学および宇宙科学研究所の横型および縦型二段式軽ガス銃を用い、直径4.7 mmのポリカーボネート球を衝突速度2~6 km/sで標的に垂直衝突させた。標的内部に5~6本のK型熱電対を埋設して内部温度を測定した。実験前後に取得したX線CT画像から、熱電対の位置を決定した。標的表面温度は高速赤外線カメラで測定した。また、実験後のX線CT画像から衝突により形成されたクレーター形状および内部構造を解析した。

【結果・考察】

形成されたクレーターは、中央のボウル状領域とその周囲のスプール領域からなる強度支配型クレーターであった。含水標的に形成されたクレーター直径は、同程度の衝突速度における乾燥標的の約1.5~2倍となった。また、含水標的のクレーター底下には剥離層状構造が確認され、空隙中の水が破壊・変形過程に影響を及ぼしたことが示唆された。乾燥標的では、衝突後に標的内部の温度が徐々に上昇し、最大温度に達した後、緩やかに低下した (図1a)。

一方、含水標的では衝突直後に急激な温度上昇が観測され、温度上昇の持続時間は約1.3秒と短かった (図1b)。この違いは、乾燥標的ではクレーター壁付近に残留した熱からの熱伝導が内部温度上昇に寄与する一方、含水標的ではクレーター形成時に移動した高温の間隙水が内部温度上昇に寄与したためと考えられる。

高速赤外線カメラによる表面温度計測の結果、乾燥標的で100°Cを超える高温領域が観測されたのに対し、含水標的の最大温度は約40°Cにとどまった。また、含水標的では、クレーター成長および噴出物の放出に伴って、高温領域が標的表面から速やかに失われた。以上より、水を含む多孔質標的では、乾燥標的とは異なる衝突後の温度履歴が観測され、水の存在が衝突に伴う熱の輸送および保持過程を変化させることが示唆された。

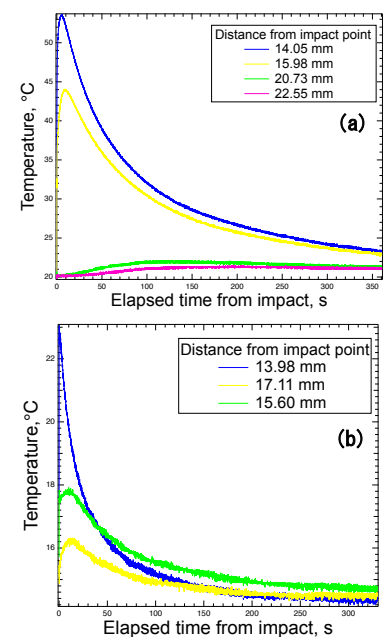


図1：温度の時間変化。(a)乾燥標的、(b)含水標的

クレーター形成時における 地下ボルダーの放出挙動に関する実験的研究

○大川初音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 宇宙科学研究所

小惑星 Ryugu および Bennu の探査により、ラブルパイル天体の表層には幅広い粒径分布を持つ粒子・岩塊が存在することが明らかとなった。一方、これまでの衝突実験の多くは均一な細粒標的を対象としており、粒径が不均一な標的における大粒径粒子の放出挙動は十分に解明されていない。本研究では、粒径および埋設深さがエジェクタ挙動に及ぼす影響を調べるため、100 μm ガラスビーズを充填した細粒標的の中に、直径 5 mm および 10 mm のトレーサービーズを埋設した複合粒径標的を用いて衝突実験を実施した。実験には ISAS/JAXA の縦型二段式軽ガス銃を用い、約 4 km/s に加速した弾丸を標的へ衝突させた。衝突過程を同期した複数台の高速カメラで撮影し、視差法により三次元軌道を再構成した。

エジェクタカーテンの観察から、飛翔中のトレーサービーズは、埋設深さによってエジェクタカーテン内での位置関係が異なることがわかった。トレーサービーズの三次元軌道から、粒径、埋設深さ、放出速度および放出角度の関係を解析した結果、完全に埋没したビーズでは、埋没深さは放出速度に対して顕著な影響を示さなかった（図 1）。一方、ビーズが表面に露出した状態の場合、露出量が多くなると徐々に放出速度が遅くなることが確認された。また、放出角度は埋設深さに強く依存し、埋設深さが深いほど放出角度が小さくなる傾向が認められた（図 2）。これらの結果、埋没したボルダーは比較的クレーター近傍に再堆積しやすい可能性が示唆された。本研究は、ラブルパイル小天体における岩塊の放出挙動を理解するための基礎データを提供する。

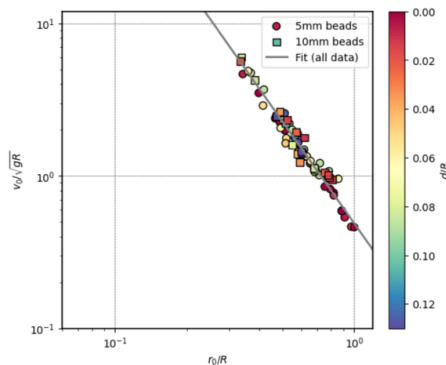


図 1 埋設深さをコントロールした場合のエジェクタ速度分布。横軸は放出位置、縦軸は放出速度を示す。プロットの色はビーズの埋設深さに対応する。

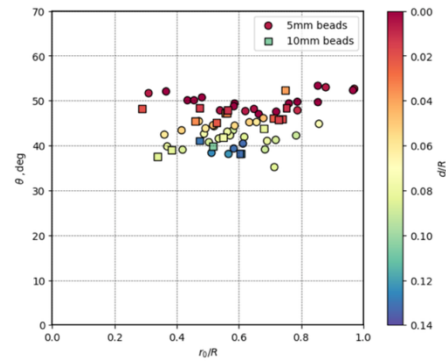


図 2 埋設深さによるエジェクタ放出角度の変化。横軸は放出位置、縦軸は放出角度を示す。プロットの色はトレーサービーズの埋設深さに対応する。

小惑星表面ボルダーの衝突破壊に対する 周囲粒子の影響

○櫻井哲志¹, 中村昭子¹

¹神戸大学大学院理学研究科

ボルダーの衝突破壊過程は、小惑星表面の進化を理解するうえで重要な要素の一つである。この破壊過程は周囲の物質の存在に影響されると考えられているが、その具体的な役割については理解が乏しい。0.6–0.8 mm の珪砂を用いた実験では、岩石標的周囲がレゴリスに埋没している場合に、標的の破壊が抑制されることが示された (Durda et al., 2011)。しかし、近年の探査機による観測は、イトカワ (Fujiwara et al., 2006)、リュウグウ (Watanabe et al., 2019)、ベヌー (Lauretta et al., 2019) およびディモルフォス (Daly et al., 2023) などの小型小惑星表面が微細なレゴリスに乏しく、主にボルダーやペブルなどに覆われていることが明らかにした。したがって、ボルダーの破壊過程に対する周囲の物質の影響を理解するためには、より大きな粒子で構成される粒子層が及ぼす影響の調査が必要である。

そこで、本研究では、様々な粒径の粒子層を用いた系統的な実験を行った。岩石ボルダーを模擬した標的には、粒径 0.1 mm, 1 mm, 3 mm, および 10 mm のガラスビーズ層表面においた直径 11 mm のガラス球、および粒径 1 mm, 10 mm および 50 mm のアルミナビーズ層表面においた直径 50 mm のアルミナ球を用いた。また、基準として、糸で吊るした標的（自由空間条件）の衝突破壊実験も行った。ガラス球標的には直径 3.2 mm のガラス球を速度 200–270 m/s で、アルミナ球標的には直径 15 mm のアルミニウム製半球付き円柱を速度 800–900 m/s で衝突させた。弾丸と標的のサイズ比はいずれも ~ 0.3 である。標的の破壊度合いは、最大破片質量割合（標的の元の質量に対する最大破片の質量割合）として評価した。

自由空間条件の実験では、最大破片質量割合は全ての標的において ~ 0.5 となった。一方で、ビーズ層表面での破壊では、最大破片質量割合はビーズ層粒径に依存して 0.5 から変化した。層を構成する粒子が比較的小さい場合は最大破片が大きくなり（破壊の抑制）、また層を構成する粒子が比較的大きい場合は最大破片が小さくなった（破壊の促進）。小惑星スケールへの応用のためには、破壊の抑制・促進の遷移を決定する要素を特定する必要がある。破壊の促進が現れる粒子層粒径と標的直径の比は、ガラス球標的で ~ 1 、アルミナ球標的で ~ 0.2 であり一致しない。これは、抑制・促進の遷移が標的と周囲粒子のスケール比だけでなく、動的な要素（例えば、弾丸衝突速度、および最大破片の貫入速度）にも影響されることを示唆している。周囲の粉粒体環境によってボルダーの破壊が抑制あるいは促進されるという本研究の結果は、小惑星表面でのボルダーの衝突寿命 (Ballouz et al., 2020) の推定に影響し得る。

謝辞

本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2148 の支援を受けたものです。

大きな亀裂を内部に含む隕石に対する衝突破壊実験

○道上達広（近大）、ハガーマン・アクセル（ルレオ工科大）、吉田大海（近大）、岡庭洸太（近大）、金丸礼（宇宙研）、長谷川直（宇宙研）

小惑星探査機はやぶさ2が持ち帰った炭素質小惑星リュウグウのサンプル粒子内部には、多くのクラックが存在している。リュウグウ粒子と同じ炭素質隕石は一般的に内部に大きな亀裂を持つものが多いが、天体衝突を模擬した室内衝突実験において、大きな内部亀裂を持つ標的に対する衝突実験は少ない。そのため、衝突の際、標的の内部亀裂が破壊にどのように影響するのか、よく分かっていない。衝突破壊の程度は衝突エネルギー密度 Q （弾丸の運動エネルギーを標的の質量で割った単位質量当たりのエネルギー）に依ることが知られている。特に衝突によって標的の質量が半分になるときのエネルギーは、衝突破壊強度 Q^* と呼ばれる。この Q^* は、多くの数値シミュレーションや室内衝突実験によって求められている。しかしながら、小惑星リュウグウのような炭素質小惑星と同じ（内部クラックを持つ）炭素質隕石に対する室内衝突実験は少なく、 Q^* の値はよく分かっていない。そこで本研究では、大きな内部亀裂を持つ炭素質隕石に対して衝突破壊実験を複数回行い、その衝突破壊強度 Q^* を求めることにした。また、衝突前の標的と衝突後の最大破片を X 線 CT 撮像し、内部亀裂の分布を可視化した。衝突前後の隕石を3次元の重ね合わせ（レジストレーション）を行い、亀裂を抽出することで亀裂の成長と破断面の関係を調査した。

衝突実験は JAXA 宇宙科学研究所で行った。標的にはアエンデ隕石（CV3）、マーチソン隕石（CM2）、アグアス・ザルカス隕石（CM2）を用い、大きさは 1-2cm 程度である。弾丸は直径 0.8mm のガラス球（質量 0.0007g）もしくは直径 1.0mm のアルミナ球（質量 0.0027g）を使用した。衝突速度は 2-4km/s である。実験の概要については Michikami et al. (2023, Icarus, 392, 115371) と同様で、詳細に記述している。Michikami et al. (2023) では、衝突による隕石内部のコンドリュール付近のクラック進展に注目したが、本研究では、炭素質隕石の衝突破壊強度 Q^* に注目し実験を行った。実施したショット数は合計 41 回である。

今回の実験では標的が小さいため、弾丸が標的に衝突する位置がショットごとに異なり、標的の表層の一部が壊れるものからカタストロフィック破壊まで、様々な壊れ方をした。それらの壊れ方と衝突エネルギーから衝突破壊強度 Q^* を求めた。アエンデ隕石の Q^* は 1200 J/kg 程度であった。一方、マーチソン隕石、アグアス・ザルカス隕石の Q^* はそれぞれ 1200 J/kg、1600 J/kg 程度であった。これは、大きな亀裂を内部に持つマーチソン隕石、アグアス・ザルカス隕石の Q^* の値は、大きな亀裂を内部に持たないアエンデ隕石と同程度であることを示している。X 線 CT 撮像での衝突前の標的と衝突後の最大破片を調査したところ、衝突前に存在していた大きな亀裂に沿って、最大破片の破断面が形成されていることが分かった。また、マーチソン隕石、アグアス・ザルカス隕石では、相対的に小さな破片は形成されにくいことが分かった。このように炭素質隕石の場合、大きな亀裂の分布と弾丸の衝突点の位置関係によって最大破片が決まり、小さな衝突破片は形成されにくい。炭素質小惑星でセンチメートル以下の粒子が少ないのは、岩塊内部の大きな亀裂が影響している可能性がある。

多孔質小惑星の斜め衝突における 角運動量輸送効率の標的強度依存性

○大西彩華, 保井みなみ, 荒川政彦, 大川初音, 柿木玲亜, 豊嶋遥名, 菊川涼介, 大坪晴太郎,
大橋拓磨

神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻

[はじめに] 地球近傍天体 (NEO) の衝突リスクを回避するため、2022 年、NASA により、探査機衝突により軌道を変化させる DART ミッションが実証された。DART ミッションの手法を他の NEO へ適用するためには、衝突により小惑星の軌道変化に対する衝突条件の影響を理解することが重要である。先行研究では、高強度の物質に対する斜め衝突時の運動量・角運動量輸送効率が実験的に調べられている一方で、Ryugu などの多孔質小惑星を模擬した低強度の標的に対する実験はあまり行われていない。そこで本研究では、強度の低い砂・石膏混合標的への斜め衝突実験を行い、運動量輸送効率および角運動量輸送効率の標的強度依存性を調べた。

[実験手法] 実験には神戸大の横型二段式軽ガス銃を使用し、粒径 $100\mu\text{m}$ の石英砂と石膏を混合した直径 60 mm の球 (引張強度 Y : $34\text{ kPa}\sim 2.1\text{ MPa}$ の 5 種類) を標的とした。弾丸は直径 2 mm のポリカーボネート球とし、約 1 km/s の速度で衝突させた。衝突角度は正面衝突に近い 2° からすれ違い衝突に近い 73° まで変化させた。すべての実験において、衝突の様子を水平方向・垂直方向から高速度カメラを用いて、 10^5 fps で撮影した。

[結果] 弾丸進行方向の運動量輸送効率 (図 1a) は、標的強度が低いほど大きくなった。また、衝突角度が大きくなると 0 に収束した。これは、低強度の標的ほど、衝突時に形成されるクレーターが大きく、エジェクタ量が増加するためと考えられる。従って、弾丸進行方向とは逆向きに大きな運動量を持ち、その反作用として標的を弾丸進行方向へより強く加速させたと考えられる。衝突後の標的角速度 (図 1b) は、衝突角度約 50° で最大となり、標的強度が低いほどそのピークは正面衝突側へ移動した。これは、低強度の標的ほどエジェクタカーテンの開き角が大きく、標的の回転方向へ放出されるエジェクタが増加し、より多くの運動量を持ち去られたためと考えられる。

球面上に形成されたクレーターは、標的強度が低いほど半径・深さともに増加した。また、クレーター深さは正面衝突に近いほど大きくなった一方、クレーター半径に明確な衝突角度依存性は見られなかった。このことから、斜め衝突では標的表面に垂直な速度成分だけでなく、水平成分もクレーター形成に重要な役割を果たすことが示唆された。

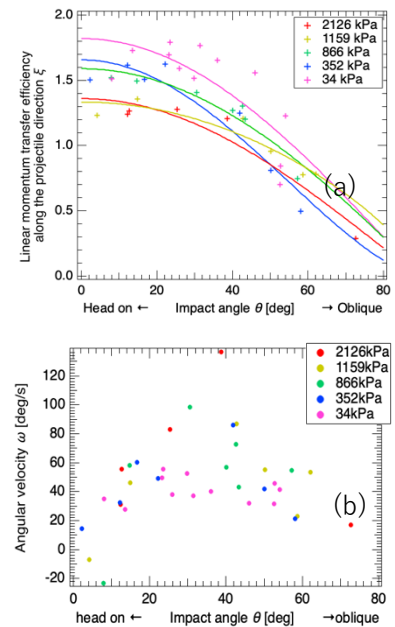


図 1 (a) 弾丸進行方向の運動量輸送効率, (b) 衝突後の標的角速度

クレーター形成時の衝突体被覆率に関する実験的研究： 被覆率分布のモデル化

○生駒杏、荒川政彦、保井みなみ、柿木玲亜

神戸大学大学院理学研究科

〔背景〕月や小惑星表面では、小天体衝突によって形成された無数の衝突クレーターが観測されている。衝突時には標的物質だけでなく衝突体も破碎され、その一部は標的表層に取り込まれ、混合される。この過程はレゴリス・ガーデニングと呼ばれ、近年では「はやぶさ 2」によりリュウグウ表面で S 型小惑星起源の岩片が発見されるなど、その存在が示されている (Tatsumi et al., 2021)。したがって、衝突体物質の空間分布を理解することは、小天体表層の物質循環や組成進化を議論する上で重要である。

近年の探査から、多くの小惑星は高空隙率で力学的に弱いことが明らかになっている。このような低強度の衝突体は、衝突時の破碎や再分配挙動に大きな影響を及ぼすと考えられる。一方、これまでの衝突実験は主に標的物質の破壊やクレーター形成に着目しており、低強度衝突体の空間分布を定量的に記述する手法は確立されていない。そこで本研究では、力学的に弱い衝突体を模擬した弾丸を用いた衝突実験を行い、衝突体被覆率分布のモデル化を試みた。

〔実験方法〕実験には、石英砂と石膏を質量比 10:1 で混合した圧縮強度約 100kPa の石英砂・石膏混合弾丸（直径・長さともに 3 または 10mm の円筒形）を使用した。弾丸には蛍光顔料を混合し、紫外線照射下で撮影した画像から弾丸破片の空間分布を可視化した。標的には石英砂レゴリス模擬物質を用い、神戸大学の縦型一段式軽ガス銃により 17~118 m/s で衝突させた。実験は約 100Pa の減圧条件下で実施し、衝突過程を 2 台の高速カメラで撮影した。

〔結果〕衝突点を中心とした同心円状の円環ごとに弾丸破片面積を求め、円環面積で規格化した弾丸被覆率を算出した。その結果、衝突速度や弾丸サイズによらず被覆率分布はクレーター半径で規格化することで共通の分布として整理できた。そして、そのピークはクレーター内部に位置した (図 1)。この結果は、衝突体物質の再分配過程がクレーター半径によって統一的に記述できることを示している。本モデルにより、クレーター内部および外部への衝突体物質の輸送量を定量的に評価できることを示した。

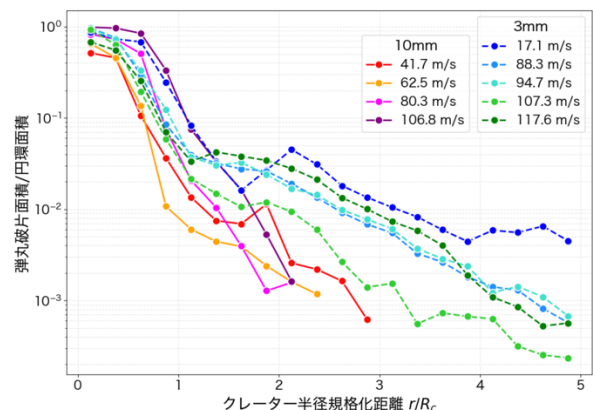


図 1：クレーター半径で規格化した衝突点からの距離と弾丸被覆率の関係

二次クレーター観察に基づく微小高速度エジェクタ特性の評価 Characterization of Micrometer-Scale High-Velocity Ejecta from Secondary Crater Observations

○山口祐香理¹, 中村昭子¹

¹神戸大学大学院理学研究科

近年のサンプルリターン探査の進展に伴い、回収試料に含まれる他天体由来物質の量を評価する重要性が高まっている。そのため、衝突時に脱出速度を超える速度で放出され、他天体へ輸送される破片、すなわちエジェクタの放出量の理解が求められている。我々はこれまで、直径3 mmのアルミニウム球弾丸を衝突速度約7 km s⁻¹で岩石（一次標的）に垂直衝突させ、放出される高速度 (>5 km s⁻¹) エジェクタを二次標的に衝突させて形成された二次クレーターを解析することで、高速度エジェクタの特性を調べてきた (Yamaguchi and Nakamura, 2026)。一方、小惑星リターンサンプル上に観察されるマイクロクレーターが二次クレーターである可能性が指摘されており、エジェクタ特性の把握はその解釈にも直結する。そこで本研究では、先行研究 (Yamaguchi and Nakamura, 2026) で十分に調べられていない微小高速度エジェクタのサイズ分布および放出量を評価することを目的とする。

高速度エジェクタの衝突により二次標的上に形成された直径数 μm の二次クレーターについて、光学顕微鏡画像および電子顕微鏡画像からサイズを測定した。二次クレーターサイズからエジェクタサイズを算出する際には、二次標的の較正実験で得られた経験式 (Yamaguchi et al., 2024) を用いた。経験式に与えるエジェクタの衝突速度は、岩石からのエジェクタ放出速度に対応すると仮定し、二次クレーターの形成位置から求めたエジェクタの放出角度に、先行研究 (Gault et al., 1963) で得られた放出角度と放出速度の関係を適用して推定した。

その結果、エジェクタのサイズ分布には放出角度による顕著な違いは見られなかった。一方で、標的面に対して低角度で、より高速度のエジェクタ (>10 km s⁻¹) が飛来する領域では二次クレーターの個数が少なく、エジェクタの放出量が少ないことが示唆された。

また、本実験で最も高速度 (~12 km s⁻¹) のエジェクタが飛来した領域について、エジェクタサイズの累積個数割合を、エジェクタサイズの歪み速度依存性を仮定したモデル (Grady and Kipp, 1980) による予測と比較した。同モデルをもとに、衝突点近傍の最大歪み速度を経験した領域から放出されるエジェクタのサイズ分布について、ワイブルパラメータ m として、実験で得られた高速度エジェクタの最大サイズに基づき提案された $m \sim 7$ (Yamaguchi and Nakamura, 2026) と、数値計算で典型的に用いられる $m = 9.5$ (e.g., Asphaug et al., 2002) を仮定した。比較の結果、最大サイズに基づく評価とは異なり、分布全体としては $m = 9.5$ の予測分布とより調和的であった。本発表では、エジェクタの形状を反映する二次クレーター形状分布の放出速度依存性についても報告する。

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、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2148 の支援を受けたものです。

空洞構造を有する標的への天体衝突における背面剥離の影響

○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宇宙科学研究所

月面や火星などの大気を持たない固体天体表面で発見されている縦孔は、地下の溶岩洞などの未崩壊の空洞が露出した地形である^[1]。通常の隕石衝突によって形成されるクレーターには、周囲にイジェクタの堆積層が存在する。この開孔の起源としては、薄い天井部への小天体の衝突が有力視されている。しかし、月面で観測された縦孔には、同規模のクレーターに見られるようなイジェクタが見られない^[2]。縦孔周辺のイジェクタなどの地形的特徴を支配する力学的な背景の解明は、地下空洞を有する標的固有の天体衝突プロセスを物理的に理解する上で不可欠である。

従来の研究では、地下に空洞構造を持つ標的に対する衝突実験が行われ、縦孔形成に伴ってイジェクタが放出されないことが定性的に確認されている^[3]。しかし、室内衝突実験では物質の内部的な変位や応力伝播を直接追跡することが困難で、定量的解析には制限がある。一方、天体衝突計算コード iSALE を用いた数値計算により、月面の静の海の縦孔の形成に関する検討も行われているが^[4]、これらは開孔に必要な衝突体の直径や速度条件の制約に主眼が置かれており、周辺地形や破砕メカニズムの解析には至っていない。

そこで本研究では、地下空洞の天井部に対する天体衝突時の物質挙動を定量的に評価するため、衝撃物理解析コード iSALE-2D を用いた数値解析を行った。天井厚 47 m の標的モデルを用いて月面静の海の縦孔形成を計算し、粒子移動を追跡した。これにより、通常のクレーター形成においてイジェクタを作る主因となる掘削流の発達過程を可視化し、流動場を解析した。

図 1 には、天体衝突 0.3 秒後における衝突点付近の粒子の位置と軌跡を示している。左図は空洞なし、右図は空洞ありの結果を、衝突点が原点となる座標で表す。それぞれの粒子の色が初期位置の深さを、軌跡線の種類が水平位置を表す。また、岩盤の色は総塑性歪み ε を臨界歪み ε_f で割った $\varepsilon/\varepsilon_f$ (0 が無傷の岩石、1 が破壊された岩石) を示す。結果から、表面から約 20 m 以深の領域では鉛直上方向へ物質を持ち上げる掘削流の発達が制限され、通常のクレーター形成より掘削領域が浅くなることが明らかになった。さらに、天井裏面では、破壊領域の水平方向の広がりが表層の約 2 倍に達しており、天体衝突によって発生した衝撃波が空洞の天井裏面に到達した瞬間に、裏面の自由表面において、希薄波が反射したと考えられる。すなわち、天井部の岩盤内部では表面へ向かって物質を押し上げようとする「掘削流」と、空洞内へ向かって剥離しようとする「背面剥離流」という相反する 2 つの流れが天井部で生じている。これらの流動場のうち、天井部 20 m 以深では背面剥離が支配的となるため、表面へ放出されるイジェクタが通常のクレーターより少なくなることが示唆される。

さらに本解析により、ユゴニオ弾性限界を超える衝撃圧力によって砂状に粉碎された領域が、衝突点直下 30 m まで及ぶことが明らかになった(図 2)。これらの微細な破砕物質は、天井裏面からのスポール物質が空洞底面へ崩落した後、その上部を被覆するように堆積すると考えられる。実際、縦孔底面には、直径 10 m 程度の岩塊と微細な砂礫が観測されており、本解析結果はこれらの特徴と整合的である。このような特異な破砕・崩落過程は、地下に空隙を有する標的における物質挙動を示しており、惑星科学における天体衝突過程の理解に新たな知見をもたらす。

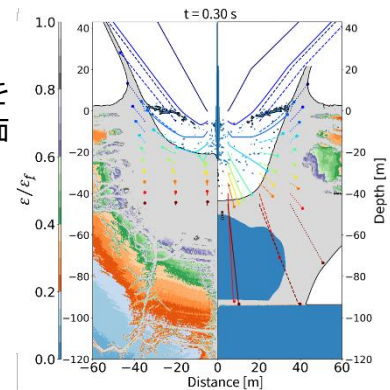


図 1 衝突後 0.3 秒後における衝突点付近の粒子の運動。右図は空洞あり、左図は空洞なしの条件時の結果を示す。

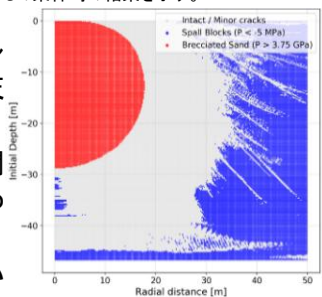


図 2 ユゴニオ弾性限界である 3.75 GPa を超えた領域(赤)。座標は初期位置を基準としてプロットしている。

太陽系における惑星形成・進化プロセスの探究

○荒川創太¹

¹ 海洋研究開発機構

我々の太陽系において、惑星や小天体はどのように形成され、進化してきたのだろうか。これは我々自身の起源を知ることにもつながる根源的な問いのひとつである。現在の標準的な惑星形成理論では、太陽系外の惑星系と同様に原始太陽系円盤内で塵が合体・成長し、それらが集積することで微惑星が形成され、やがて惑星へと成長したと考えられている。しかし、原始太陽系円盤が存在したのは約 46 億年前であり、我々は太陽系における微惑星形成の現場を直接観測することはできない。

一方、太陽系天体の形成・進化の歴史は天体そのものに記録されている。天体から地球へ飛来した隕石や塵を分析したり、探査機によって天体を直接調査したりすることで、その形成過程や進化史を明らかにすることができる。また、太陽系外では観測が困難な小天体についても太陽系内であれば詳細に観測できる。個々の天体の精密観測に加え、多数の天体の観測から得られる統計的情報も天体の形成・進化プロセスを探る重要な手がかりとなる。

こうした分析や観測から得られる多様な情報を理論モデルによって解釈することで、天体の形成・進化プロセスを議論することができる。本講演では、塵の合体成長、原始太陽系円盤における物質・組成進化、小天体の熱進化などの問題について、我々がこれまで取り組んできた研究を中心に近年の理論研究を紹介する。さらに、今後の理論研究において解決すべき課題や、惑星形成・進化プロセスを明らかにするためにどのような観測・分析情報を新たに得る必要があるのかについても私見を述べる。

円盤観測に裏打ちされた惑星形成理論の構築に向けた歩みと今後の展望

○植田高啓¹

¹ 国立天文台

惑星形成は、原始惑星系円盤に含まれるマイクロメートルサイズのダストが衝突・合体し、微惑星、原始惑星へと成長することで進行する。しかし、成長したダストはガスとの相互作用によって中心星方向へ急速に移動し、高速衝突によって破壊される。そのため、ダストがいつ、どこで惑星へと至るかは明らかでない。近年、ALMAをはじめとする高解像度観測によって円盤のリングやギャップが多数発見され、惑星形成の現場を直接調べることが可能になってきた。一方、観測される放射強度は、ダストの量や大きさだけでなく、温度、光学的厚さ、散乱、空隙率、組成などにも左右される。したがって、円盤画像から惑星形成を紐解くには、ダスト進化・輻射輸送に基づいた理論モデルが不可欠である。

私はこれまで、円盤内側の高温領域における岩石惑星形成に取り組んできた。円盤形成初期には、ガス降着によって円盤内側が 1000 K 以上に加熱され、熱電離によって磁気乱流が活性化する。磁気乱流が活発な領域と、乱流の弱い「デッドゾーン」との境界ではガス圧力が極大となり、中心星へ移動する岩石ダストを集積させることができる。私は、ダストの成長・破壊・昇華・移動を取り入れた円盤進化計算から、この場所で円盤形成後約 10 万年以内に、現在の地球軌道付近へ集中した岩石微惑星帯が形成されうること示した。さらに重力多体計算を組み合わせることで、磁気駆動円盤風が惑星の落下を抑え、太陽系に類似した岩石惑星の質量・軌道分布を形成できることを明らかにした。これは、地球型惑星形成が円盤進化のごく初期から、高温環境で始まりうることを示している。

このような円盤内側領域での惑星形成は、外側領域からのダストの質量流入に大きく左右される。そこで私は、円盤多波長観測によるダスト進化・惑星形成論への制約にも取り組んでいる。ミリ波放射からダスト量や粒径を推定する際には、光学的厚さや散乱の影響が大きな不定性となる。TW Hya や CW Tau といった円盤においては、ダスト散乱によって光学的に厚い円盤が暗く見え、固体質量が過小評価されうること示した。これらの成果は、見かけ上小さく暗い円盤であっても、十分な惑星形成材料を保持している可能性を示している。さらに IM Lup では、ガス円盤構造、ダスト進化、輻射輸送を統合し、ミリ波熱放射、ミリ波偏光、近赤外線散乱光を統一的に説明するモデルを構築した。その結果、従来想定されてきたよりも壊れやすいダストを仮定することで、多様な観測を説明できることを示した。これは、効率的なダスト成長を必要とする惑星形成理論の再検討を迫る結果である。

本発表では、これらの研究を紹介するとともに、ALMA や次世代電波望遠鏡 ngVLA などによる将来の円盤観測を見据え、理論と観測を融合した惑星形成研究の展望について議論する。

全球雲解像モデルを用いた潮汐固定された系外地球型惑星の気候

○小玉 貴則¹、高須賀 大輔²

¹東京科学大学 地球生命研究所、²東北大学大学院 理学研究科

潜在的ハビタブル惑星は、将来的な観測ミッションの重要ターゲットとして位置付けられているが、その表層環境や気候場の理解は未だ乏しい。潮汐固定された地球型系外惑星では、恒久的な昼夜面に起因する日射分布の非対称性によって、昼側に形成される厚い雲が惑星アルベドを増加させる雲安定化フィードバックが働き、表面液体水の維持に重要な役割を果たすと考えられている。一方で、雲は系外惑星大気モデルにおける最大の不確実性の一つでもある。従来の低解像度全球気候モデル（GCM）では、積雲対流のパラメタリゼーションや大規模凝結スキームによって雲過程を表現してきた。しかし、これらの手法では雲形成や鉛直水蒸気輸送などのサブグリッドスケールの物理過程を陽に解像することはできない。本研究では、全球雲解像モデル（Global Cloud-Resolving Model; GCRM）である NICAM（Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model）を系外惑星気候シミュレーションに適用する。NICAM は約 10 km の水平解像度で、雲の分布や水蒸気の鉛直輸送を陽に計算できる。本研究では、TRAPPIST-1e を対象の中心とし、様々な公転周期をもつ水惑星（aqua planet）気候実験を実施した。発表では、潮汐固定惑星の全球気候における雲の役割を議論するとともに、全球雲解像モデルが系外惑星気候研究およびハビタビリティ研究に新たな展開をもたらす可能性について紹介する。

潮汐固定された地球型系外惑星では、恒久的な昼夜面による日射分布の非対称性から、昼側の厚い雲が惑星アルベドを増加させる雲安定化フィードバックが働き、表面液体水の維持に重要な役割を果たすと考えられている。一方、雲は系外惑星気候モデルにおける最大の不確実性の一つであり、従来の低解像度全球気候モデル（GCM）では雲形成や鉛直水蒸気輸送を陽に表現できない。本研究では、全球雲解像モデル NICAM（Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model）を用い、約 10 km の水平解像度で TRAPPIST-1e を基準とした水惑星気候実験を実施し、公転周期をパラメータとした系統的な気候シミュレーションを行った。発表では、公転周期に伴う雲分布や大気循環の変化とその気候への影響を示し、全球雲解像モデルが系外惑星の気候・ハビタビリティ研究にもたらす新たな可能性について議論する。

K2-18b は Hycean 惑星か: CO・CO₂に注目した透過スペクトル解析

○藤澤卓也¹、畠田匡志¹、吉田辰哉^{2,3}、倉本圭^{1,4}

1 北海道大学 2 東京科学大学 3 ワシントン大学 4 JAXA/ISAS

K2-18b は、M 型矮星周りのハビタブルゾーンに位置するサブネプチューン型系外惑星である。JWST による透過スペクトルから CH₄ を含有するスケールハイトの大きい大気を保有することが判明し、加えて NH₃ の吸収特徴がなく、バイオシグネチャー候補物質である DMS に類似する吸収特徴がみられることから、K2-18b は NH₃ を吸蔵した深い海洋を薄い水素主成分大気が覆う、いわゆる Hycean 惑星解釈が提案されてきた[1]。一方、DMS の有意な証拠はなく、酸素に乏しい厚い水素大気を持つ海王星型惑星の方が妥当と主張する報告もある[2]。Hycean 解釈における H₂-CH₄-H₂O 大気中では、H₂O の光分解により発生する OH によって CH₄ の一部が CO・CO₂ に酸化されると期待される。本研究では、実際に CO・CO₂ がどのくらい生成されるかを理論的に調べ、これらの分子の存在度を観測スペクトルから改めて制約することで K2-18b の Hycean 解釈の妥当性を明らかにする。

一次元光化学モデルにより各物質の鉛直組成を計算したところ、Hycean 条件下の H₂-CH₄-H₂O 大気では、H₂O の光解離で供給される OH による CH₄ 酸化を通じて CO が 1-2% 程度まで蓄積する。また、高層で CH₄ 濃度の急激な減少が生じる。この鋭い鉛直勾配によりフラットな CH₄ 吸収「プラトー」が見られ、鉛直一様組成を仮定した場合に比べ観測データによりフィットする(図 1)。次に、光化学計算で得られた鉛直プロファイルを用い、2.8-4.0 μm の CH₄ 吸収優勢波長域を用いて JWST の 2 つの分光計 NIRISS-NIRSpec 間のオフセットを制約した。そのオフセットのもとで CO・CO₂ 濃度をその吸収特徴が優勢の 4-5 μm の範囲でリトリーバル解析すると、複数のリダクションデータ[2]に対して光化学モデルが予測するパーセントレベルの CO を含む解も十分に許容される。そして、CO₂ については従来の推定と異なり 10⁻³-10⁻² 程度の混合比をもつ CO₂ リッチな解が好まれる(図 2)。この CO₂ レベルは、成層圏 H₂O 濃度に応じた光化学的 CO₂ 生成フラックスと長期的海洋バッファによる質量収支と整合的であった。なお、一次元放射対流平衡計算からは、約 1 bar の H₂ 大気とボンドアルベド ≈ 0.3 程度の組み合わせで Ts ≈ 320 -330 K の非暴走温室解が存在することが示され、Hycean 的な温暖気候が成立し得ることが明らかになった。以上より、K2-18b の Hycean 解釈は現時点において有力な解釈の一つであると考えられる。

参考文献: [1] Madhusudhan, N. et al. (2023) *ApJL*, **956**, L13.
[2] Schmidt, P. S. et al. (2025) *ApJ*, **170**, 298. 105.

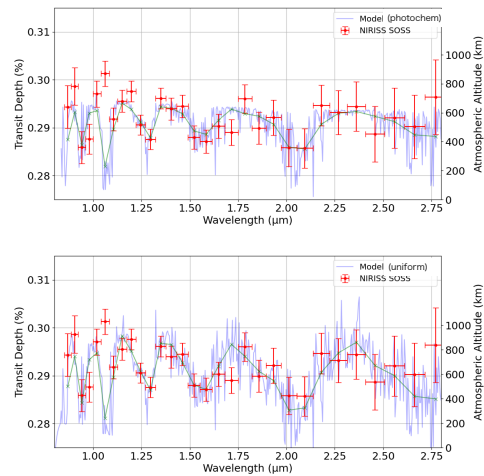


図 1: CH₄ 吸収特徴が優勢の波長域(0.8-2.8 μm)における鉛直プロファイルの違いによる透過スペクトル特徴の違い(上:光化学計算、下:一様)。エラーバー付きの点は観測値[1]を、実線はモデルスペクトルを示す。(緑は観測 bin 平均値)

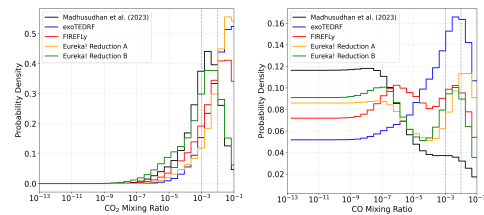


図 2: 各観測スペクトルに対する CO および CO₂ 混合比の事後確率分布

影構造に基づく幾何学的制約を取り入れた inner disk の SED モデリング

○折原 龍太¹, 百瀬 宗武²

¹ 東京科学大学 理学院, ² 国立天文台チリ観測所

近年の多波長観測により、原始惑星系円盤の内側には、半径数 au スケールのコンパクトな inner disk が存在することが明らかになってきた。この inner disk は、岩石惑星の形成が進行する領域に対応しており、我々が住む地球の形成過程を理解する上でも重要な構造である。inner disk では、ダスト昇華、粒成長、降着加熱、円盤風などの様々な物理過程が密接に関わり、観測される円盤放射を大きく左右する。さらに、inner disk の鉛直方向の厚みや傾きは、中心星からの照射を遮蔽・再分配し、outer disk の温度構造や散乱光分布にも影響を与える。そのため、inner disk の物理構造を明らかにすることは、inner disk における惑星形成環境だけでなく、円盤全体の輻射場と進化を理解する上でも重要である。一方で、inner disk は空間的に分解して観測することが依然として難しく、その厚み、サイズ、ダスト性質、加熱機構の寄与は SED のみからは強く縮退する。

こうした inner disk の幾何学的構造に対して、可視・赤外線波長帯の高空間分解能観測は新たな制約を与えつつある。Orihara and Momose (2025) では、散乱光画像に見られる影構造を解析し、inner disk が outer disk に投影する影の幾何から、inner disk の最大アスペクト比を推定できることを示した。ここで最大アスペクト比とは、ガス圧スケールハイトではなく、中心星からの光を遮蔽する inner disk 表面の最大高さを、その半径で割った量を指す。遮蔽表面の高さは、中心星から見た遮蔽角を決め、その遮蔽が outer disk 上に現れる影の形状として反映される。このため、最大アスペクト比は、SED のみでは縮退しやすい inner disk の幾何学的構造を制限する重要な観測量である。

本発表では、影解析から得られた inner disk の最大アスペクト比を固定し、その幾何学的制約とこれまでに観測された SED の双方に整合するような inner disk の物理構造を探索する手法を提案する。具体的には、円盤の密度構造と温度構造を自己無撞着に数値計算する。密度構造は鉛直静水圧平衡に基づいて温度分布と結びつけ、温度構造は恒星照射、降着加熱、ダスト不透明度、ダスト昇華を考慮しながら反復的に求める。この密度・温度構造を入力として、RADMC-3D を用いてダスト散乱を含めた輻射輸送計算を行い、近赤外から中間赤外にかけての SED モデルを作成する。これを観測 SED と比較することで、inner disk の鉛直構造、円盤サイズ、ダスト粒径分布、加熱機構の寄与が観測 SED にどのように反映されるかを調べる。

本手法を HD 100453 に適用し、Orihara and Momose (2025) により制限された最大アスペクト比 0.17 を持つ inner disk モデルの探索を行った。その結果、観測 SED を再現しつつ影解析による幾何学的制約を満たすモデル群が得られた。これらのモデルは、近赤外から中間赤外における HD 100453 の inner disk 放射が、強い降着加熱ではなく、主に中心星からの照射を受けたコンパクトなダスト円盤によって説明できる可能性を示唆する。また、幾何学的厚みを固定しても観測 SED を再現できることから、影解析で推定された最大アスペクト比と、inner disk の熱放射特性が矛盾しないことが示された。

これらの結果は、outer disk 上の影構造と SED を組み合わせることで、空間的に分解することが難しい inner disk の物理構造を制限できることを示している。特に、inner disk の温度構造や固体物質分布は岩石惑星形成環境を左右するため、本研究は円盤内側領域における惑星形成条件を観測的に制限する上で重要である。

原始惑星系円盤からのミリ波散乱偏光放射の解析モデル

○ 北出直也^{1,2}, 田中圭³, 奥住聡³, 片岡章雅^{2,1}

¹ 総合研究大学院大学, ² 国立天文台, ³ 東京科学大学

惑星は原始惑星系円盤内でミクロンサイズのダストが合体成長して形成されるため、ダストのサイズや空隙率といったダスト特性を観測的に制約することが、惑星形成過程解明の鍵となる。近年、ダストの自己散乱によるミリ波偏光は、連続波観測ではダスト特性の制約が難しい光学的に厚い円盤に対しても、ダストのサイズや空隙率に敏感であることから、ダスト特性を探る有力な手がかりとして注目されている (e.g., Kataoka et al. 2015; Tazaki et al. 2019)。しかしこの散乱偏光放射の評価には、これまでモンテカルロ法 (Dullemond et al. 2012) やラムダ反復法 (Kitade & Kataoka 2026) といった数値的な輻射輸送計算が用いられ、その計算コストの高さが問題となっていた。さらにこれらの数値計算は偏光放射の値を与えるものの、その背後にある物理機構までは明らかにしない。偏光観測からダスト情報を効率的に、かつその物理的背景まで含めて引き出す手法が求められている。

そこで本研究では、散乱偏光放射を低コストで評価し、その物理機構を明らかにするため、ダストの吸収・放射・散乱を取り込んだ平行平板円盤に対する散乱偏光放射の解析解を初めて導出した。偏光の輻射輸送方程式は、散乱項が平板内の放射場全体に依存するため一般には解析的に解けない。本研究はこの困難を、偏光放射の角度依存性を $\sin^2 \theta$ (θ は平板法線からの角度) に比例する形で近似することで突破した。この角度依存性は光学的に厚い極限で厳密に成り立つことが知られており、これを近似として円盤全体に適用すると、放射場全体を知らずとも散乱項を書き下せるため、偏光放射の解析解が得られる。

得られた偏光強度の解析解は、平板全体の光学的厚み τ 、ダストのアルベド ω 、円盤傾斜角 i に対する依存性について、先行研究の数値解をよく再現する。数値解との相対誤差は代表的な傾斜角 $i = 45^\circ$ において最大 20% に収まり、これは ALMA 偏光観測の典型的な熱雑音と同程度である。すなわち本解析解は、低コストでありながら観測精度の範囲内で数値解を再現するため、ALMA 偏光観測の解析に有用である。

加えて本解析解は、偏光強度が平板全体の光学的厚み τ に対してピークを持つという非単調な振る舞いの物理的起源を明らかにする。散乱による偏光は、ダストが受ける放射が特定の方向に偏っているほど強くなる。本解析解は $\tau \sim 2$ で放射場の偏りが最大となり、その結果として偏光強度がピークを取ることを定量的に示した。こうして得られた物理的描像は、平行平板を超えたより現実的な円盤構造への応用・外挿の指針ともなる。

以上のように、本研究で導出した解析解は、ALMA 偏光観測からダスト特性を効率的に制約する実用的な道具であると同時に、観測の背後にある物理機構を解き明かす理論的基盤を与えるものである。

元素存在度を考慮した原始惑星系円盤のダスト組成・オパシティモデルの構築

○ 田崎亮^{1,2}

¹ 東京大学

近年、VLT・JWST・ALMA などによる観測の進展により、原始惑星系円盤中の固体微粒子（ダスト）の性質が可視光から近・中間赤外線、さらにミリ・センチ波までの広い波長域で詳細に調べられるようになってきた。これらの観測から固体惑星の材料となるダストの進化や円盤の固体総質量などを理解するためには、ダスト組成を反映した光学特性（オパシティなど）の理解が不可欠である。しかし、ダスト組成やオパシティについては、赤外線・ミリ波など各観測分野で異なるモデルが用いられており、円盤の多波長観測を統一的に解釈するためのダスト組成・光学特性モデルの整備が課題となっている。

本研究ではまず、原始惑星系円盤の観測で広く用いられているダストモデル（DSHARP モデル、DIANA モデル、Ricci モデルおよびその派生モデル）について、炭素、酸素、ケイ素などの主要構成元素がどの程度必要となるかを評価した。その結果、例えば DSHARP ダストモデルの炭素成分をアモルファス炭素で置換したモデルの場合、星間元素存在量から許容される上限に匹敵する炭素量を必要とし、元素存在量制約の観点から課題があることを示した。そこで我々は、星間ガスの観測および JWST による分子雲・原始惑星系円盤中の揮発性氷の観測結果に基づき、星間物質の元素存在量と整合する新たなダスト組成モデルを構築した。本講演では、この新しいダスト組成モデルとその光学特性を紹介するとともに、原始惑星系円盤の多波長観測への応用と今後の観測への示唆について議論する。

後期星間降着が持ち込む角運動量によって 恒星降着率が増加する条件

○大山 航¹, 仲谷 峻平², 細川 隆史¹, 三谷 啓人^{3,4}

¹京都大学,²ミラノ大学,³デュースブルクエッセン大学,⁴東京大学

原始惑星系円盤は惑星形成の母体であり、その進化は形成を左右する。近年、年齢 1 Myr を超える円盤の周囲にも、細長い質量流入構造が検出されており、円盤形成後期にも星間ガスの供給(後期降着)が継続し、円盤進化に影響する可能性が示唆されている。特に Lupus 星形成領域では、周囲のガス密度と中心星降着率の正の相関が報告されており、後期降着が円盤進化を変化させている可能性がある(Winter et al. 2024a)。一方、供給ガスは光蒸発や磁気円盤風で失われる可能性があり実際に中心星降着率を強化できるかは明らかでない。本発表では、この問題を数 Myr にわたる次元長期円盤進化計算により検討した研究(Ooyama et al. 2026, arXiv:2605.26764) について議論する。以前の発表では、後期降着ガスの角運動量の影響を除いて考え、観測される円盤質量・半径を保ち高い中心星降着率の再現には磁気円盤風での効率的な質量輸送が必要であることを示した。しかし、降着ガスの比角運動量が円盤ガスより小さい場合、その差に起因する有効トルクが、円盤の拡大を抑制しつつ中心星降着を促進する可能性がある。

そこで本発表では、有効トルクを組み込んだ次元長期円盤進化計算を行い、後期降着ガスの角運動量が円盤半径、円盤質量、中心星降着率に与える影響を調べる。その結果、有効トルクは円盤の外向き拡大を抑え、同時にガスの内向き輸送を促進することで、中心星への質量降着を高く維持できることが分かった。粘性が強い場合には、後期降着ガスの比角運動量がその位置でのケプラー角運動量の約 30% 以下であれば、粘性拡散による円盤半径の過剰な拡大を抑え、観測される円盤半径・円盤質量と整合しながら高い中心星降着率を維持できる。一方、粘性が弱い場合でも、比角運動量がケプラー角運動量の約 40% 以下であれば、観測と整合する円盤質量を保ちつつ十分な中心星降着率を再現できる(図 1)。これらの結果は、後期降着が円盤ガス環境を変化させる上で、供給質量だけでなく、降着ガスの角運動量が本質的に重要であることを示している。

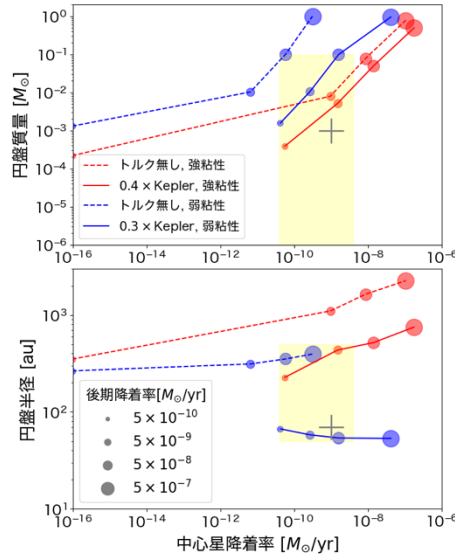


図 1. 降着率と円盤質量、サイズの関係。黄色い領域と灰色の十字は Winter+2024a のシナリオ及び観測と整合する領域(Winter et al. 2024b, Ansdell et al. 2018, Deng et al. 2025, Tabone et al. 2025)

エッジワース・カイパーベルトの形成史： 離散的惑星移動と原始冥王星群の影響

Forming the Kuiper Belt: The Role of Grainy Planetary Migration and Primordial Plutos

○パトリック ソフィア リカフィカ (Patryk Sofia Lykawka)^{1,2,3}, Jonathan Horner³, Pedro Bernardinelli^{4,5}

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 (National Astronomical Observatory of Japan)

³ サザンクイーンズランド大学、オーストラリア (University of Southern Queensland, Australia)

⁴ サンパウロ大学、ブラジル (Universidade de São Paulo, Brazil)

⁵ ワシントン大学、アメリカ合衆国 (University of Washington, USA)

The current architecture of the trans-Neptunian region serves as a fossilized record of the Solar System's dynamical history. We present results from N-body simulations modeling 4.5 Gyr of orbital evolution, incorporating a massive protoplanetary disk, the four giant planets, and a primordial population of 1500 Pluto-class bodies. These “Plutos” were used to drive a realistic grainy migration of Neptune. Our analysis of 67 simulated analog systems demonstrates that while a grainy migration framework effectively reproduces the bulk populations of classical, resonant, and scattered trans-Neptunian objects (TNOs) within 50 au, significant discrepancies persist beyond this distance. Key findings of this work include: (1) Resonant capture strongly favors Neptune's closer mean motion resonances (MMRs; e.g., 3:2 and 2:1), while distant resonances beyond 50 au remain significantly underpopulated. Including a primordial scattered disk enhances capture into distant resonances but leads to an overproduction of scattered TNOs after 4.5 Gyr; (2) The best agreement with observed resonant fractions and the structure of the classical Kuiper Belt is achieved in a scenario that combines a jumping Neptune, self-gravitating Plutos, and an initial outer protoplanetary disk edge at 45–47 au; (3) All models struggle to efficiently generate the detached population (perihelia $q > 40$ au) and high-inclination objects ($i > 45^\circ$). They fail to populate several observed niches, including distant detached objects ($a > 245$ au), low-inclination detached and scattered TNOs ($i < 20^\circ$), and extreme objects with $q > 50$ au or $i > 50^\circ$; (4) Grainy migration effects are strongest during the early phases and rapidly diminish as the Plutos are dynamically removed via gravitational scattering by the giant planets or collisions with them or the Sun. Based on the few Plutos that survive inside 50 au in our simulations, we estimate that the primordial population of such bodies was 150–500 to remain consistent with Pluto's current solitary status. In conclusion, while grainy migration models replicate TNOs within 50 au, they fail to explain detached, high-inclination, or extreme populations. Our results suggest that additional dynamical processes, such as those involving a distant undiscovered planet, are required to resolve the outer Solar System's complexity.

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP23K03482

多成分ダストの合体成長計算のための高速ツリーアルゴリズム II

渡邊太一^{1,2}, 片岡章雅^{1,2}

¹ 国立天文台, ² 総合研究大学院大学 天文科学コース

惑星形成の第一段階であるダストの合体成長は、ダスト数密度の時間進化を表す合体成長方程式によって記述される。この合体成長方程式の数値計算に、ダスト集合体の空隙率など質量以外の衝突結果を大きく左右する特性 (成分) を取り込んだ「多成分ダスト合体成長計算」を行うことが大きな課題となっている。しかしこの数値計算は、直接的に計算するには計算量の大きさから非現実的であった。より精密な惑星形成理論モデルの構築のため、多成分ダストの合体成長を少ない近似で数値計算できる手法が必要とされてきた。

我々は、重力 N 体計算のツリー法を応用した、新しい多成分ダストの合体成長計算アルゴリズムを提案する。ダストの質量や空隙率の分布は、成分の数を d 、軸毎のビン数を N として N^d 個のビンで表される。直接的な計算ではこの全てのビン間の相互作用を考慮し、計算量は $O(N^{\epsilon})$ となる。一方ツリー法を応用した本手法では、質量などの示量的な物理量の比を距離とみなし、衝突相手のビンをまとめて計算することにより、計算量を $O([N^{\epsilon} \log N])$ にまで削減する。

本手法の性能検証のため、1 成分および 2 成分において、解析解の知られている簡単なケースに対して直接法との比較を行い、誤差と計算時間を評価した。1 成分では計算時間において直接法とツリー法はほぼ同等だったが、2 成分ではツリー法により数倍から数十倍程度、計算を高速化できた。

本研究で開発したツリー法ベースの合体成長アルゴリズムにより、原始惑星系円盤内の多成分ダスト集合体の時間進化を少ない近似で数値計算することが可能となった。本講演では、このツリー法の発展として、アルゴリズムの並列化および原始惑星系円盤におけるダスト進化への応用の二点について、最新の状況も報告する。

焼結を経たダストアグリゲイトの 中心星方向への落下

○ 瀬川陽祐 城野信一

名古屋大学大学院環境学研究科

焼結は、粒子同士が結合しより緻密な構造になる現象で、原始惑星系円盤において中心星からの加熱によりダストアグリゲイトで進行すると考えられる。緻密になり硬くなることで、アグリゲイト同士の衝突でいずれ跳ね返ってしまうため、焼結はダストの合体成長を阻害すると示唆されている (Sirono and Ueno 2017)。よって微惑星は、どこかにダストが溜まり、ストリーミング不安定を通して形成されたと考えられる。また、微惑星の形成年代は円盤誕生から 10 万～数 100 万年と推定されており (Morbidelli et al. 2024)、微惑星を形成するにはこれらのタイムスケールでダストがある程度溜まらなければならない。アグリゲイトは最初付着合体で成長していくにつれて、より高空隙率な構造になっていくというシミュレーション結果が示されている (Kataoka et al. 2013) が、空隙率が高いとアグリゲイトの動径方向の落下速度は遅く、ダストがある程度溜まるのが微惑星の形成年代に間に合わないと考えられる。しかし焼結が進むと、緻密な構造になりガス抵抗が和らぐため、落下速度はより速くなる。これらを踏まえ、本研究ではダストが溜まる領域として r 方向に 0.1 au の幅を持つ圧力バンプの存在を仮定し、焼結を経験したアグリゲイトが圧力バンプの外側 1 au から落下してくる時間を計算した (図 1)。その結果、圧力バンプの位置が、焼結が効くおよそ 20 au より内側だと、焼結で落下速度が増加するため落下時間が焼結なしの場合と比較して早くなる。さらに、アグリゲイトのフラクタル次元を 2.4、初期サイズを 1 mm とすると、落下時間が微惑星の形成年代と整合的な結果となった。

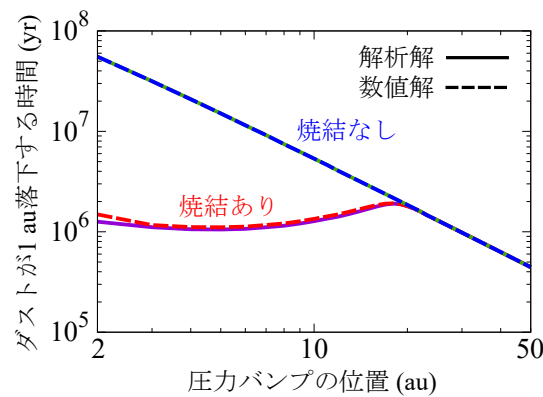


図 1: 圧力バンプの位置を変化させたときのダストが 1 au 落下する時間。アグリゲイトの初期サイズは $0.1 \mu\text{m}$ 、フラクタル次元は 2.4。

氷微粒子凝縮による新たなデッドゾーンの形成

○ 城野信一¹ 伊藤蔵人²

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科 ² 宇宙技術開発株式会社

宇宙線や中心星からの X 線によって原始惑星系円盤のガスは一部電離している。円盤を貫く磁場と電離したガスとの相互作用によって乱流が発生し、ガスは中心星方向に降着する。乱流の強さは電離度によっており、電離度が低下すると磁場による乱流は停止する。このため、比較的中心星に近い円盤の赤道面では乱流が停止しており、「デッドゾーン」と呼ばれる領域が形成される。デッドゾーンの境界においては乱流強度が急激に変化するため、ガスの降着速度も大きく変化する。この効果によりガス円盤に圧力極大が形成され、ダストがトラップされて濃集することにより微惑星が形成される可能性がこれまで多くの研究で指摘されてきた。しかし、デッドゾーンの内縁は中心星に近く、外縁は遠いため、木星の位置 (5 au) からは大きく外れている。デッドゾーンの上空は電離度が高いため、上空ではガスの降着が起こる。一方で上空では温度が高く H_2O 氷は昇華してガスとなり、低温領域に運ばれると再凝縮して H_2O の微粒子が形成される (Sirono 2024)。微粒子は表面に電子を吸着するため電離度を低下させる。ガス降着が起こっている領域と H_2O のスノーラインが重なっていると、その領域内に新たにデッドゾーンが 7–9 au に形成されることが数値シミュレーションの結果明らかとなった。新たなデッドゾーン内ではガス降着速度が遅く、内側では早いために新たなデッドゾーンの内縁にガスの圧力極大が形成されることが期待される。

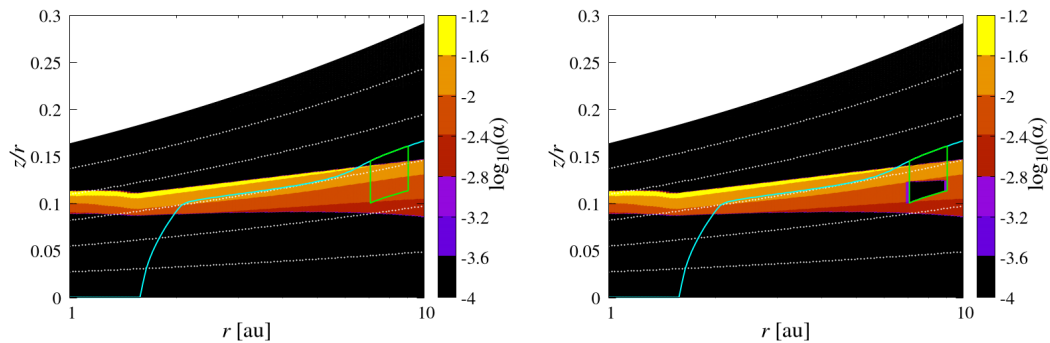


図 1: $r-z$ 平面における乱流強度パラメータ α の分布。黒い領域がデッドゾーン。2 au 付近から始まる曲線は H_2O のスノーライン。7-9 au にある矩形の領域内に H_2O 微粒子が分布する。点線は下からガススケールハイトの 1, 2, 3, 4, 5 倍に対応する。左: H_2O 微粒子が形成されない場合。右: H_2O 微粒子が形成される場合。7-9 au に新たなデッドゾーンが形成される。

ダスト衝突を考慮したストリーミング不安定性の 2 流体計算： 跳ね返りによる圧縮モデルの導入

○岩野志織¹、瀧哲朗¹、黒川宏之¹

¹ 東京大学

ストリーミング不安定性 (Streaming instability; SI) は、原始惑星系円盤内でダストとガスの相互作用によって生じる流体不安定であり、乱流の起源や微惑星形成機構としても着目されている (e.g., Youdin & Goodman 2005; Johansen et al. 2007)。近年、SI によって形成されるダスト濃集領域では、ダストが高い衝突頻度で衝突すること、典型的な衝突速度は破壊速度を下回ることが示されており (Tominaga et al. 2025)、SI がダスト進化を促進する可能性が指摘されている。一方、衝突に伴うダストのサイズや充填率の変化は、ストークス数や衝突応答を変化させ、原始惑星系円盤内における SI の性質にフィードバックを及ぼす可能性がある。

過去の研究では、ダストの反発係数を 0.3 とする非弾性衝突を導入した場合に、衝突を考慮しない計算と比較して、SI の非線形段階におけるダスト濃集が強まることが報告されている (Johansen et al. 2012)。また、我々の過去の研究 (Iwano et al. 2026, JpGU-AGU Joint Meeting) において、反発係数を変化させることで、SI によって形成されるダスト密度分布や衝突速度分布が変化することを確認した。特に、反発係数が大きいほど高密度な濃集領域は形成されにくくなり、ダストの衝突速度は増加する傾向を示した。また、典型的な衝突速度は破壊速度を下回っており、SI 下において跳ね返りや付着成長といったダスト進化が進行することが示唆された。しかし、これまでの計算ではダストのストークス数や反発係数は計算を通じて固定されており、衝突に伴うサイズ・充填率の進化と、それらに依存する反発係数の変化を含めたダストと SI の共進化は、十分に調べられていない。

そこで我々は、ダストの衝突進化モデルを構築し、ダスト-ガス 2 流体計算に導入した。衝突進化モデルは反発係数の導出と衝突圧縮過程の計算からなる。ダスト反発係数は、Johnson (1985) の弾塑性球モデルを元に衝突速度および 2 粒子のダスト充填率から求まる関数として与え、充填率やサイズが異なるダストの衝突に適用可能にした。衝突圧縮過程は、衝突におけるエネルギー散逸量とダストの圧縮強度 (Tatsumi et al. 2023) を用いて、跳ね返りに伴うダストのサイズ、充填率、反発係数の進化を計算する。この衝突進化モデルをダスト-ガス 2 流体計算コード Pencil Code (Pencil Code Collaboration et al. 2021) の衝突モジュールに実装した。

本発表ではダストサイズ・充填率の時間発展を考慮したストリーミング不安定性の計算を行った結果を紹介する。さらに、それらを固定した計算との比較を通じて、ダスト衝突進化が SI の飽和状態における乱流の性質、濃集領域の物理的性質、ダストの充填率分布に与える影響を議論する。

微惑星の形成・アグリゲイト集積の過程に対する衝突跳ね返りの寄与

○宮村 尚典¹, 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

小惑星には始原始的な液滴固化粒子（以下、DSP）である CAI とコンドリュールが含まれており、これらの形成年代差から、2.0 Myr 以上の長期間にわたって微惑星形成が継続しつつ CAI が円盤内に保持されたことが示唆されている[1]。一方で、滑らかな原始惑星系円盤において、0.1 μm の氷モノマーから惑星形成までを質量-動径空間で計算する統一的シミュレーションによれば、微惑星や原始惑星は木星軌道より内側の領域で数十万年以内に形成可能なことが示唆されているが[2]、円盤内での DSP の長期間保持の機構はわかっていない。また、 $\sim 1\text{ mm}$ サイズの DSP は氷モノマーから成るアグリゲイトよりも顕著に跳ね返りやすいため、DSP が微惑星形成を阻害する可能性がある。そこで本研究では、圧力バンプのない滑らかな円盤において、アグリゲイトの衝突跳ね返りに着目し、微惑星の形成可能となる条件を明らかにすることを目的とした。

まず、[2]で開発されたシミュレーションコードに、アグリゲイト間の衝突付着確率分布 P_s を導入した。付着しない場合は跳ね返りが起こり、破壊は起きないとした。ガス抵抗制動時間と Kepler 角速度の積の Stokes 数 τ_s が 1 となるアグリゲイトは最速で落下し（以下、最速落下アグリゲイト）、衝突速度も最速となる。そこで、1 au において、温度が $T_0 = 100\text{ K}$ の円盤で、質量比 1 の最速落下アグリゲイト同士がドリフト速度で衝突する時の付着確率を P_{s0} として与え、衝突速度が遅く、質量比が 1 から離れるほど付着しやすくなる P_s を導入した。そして、アグリゲイトから惑星の質量-動径分布関数の時間進化を求め、微惑星が形成可能な円盤領域を調べた。

完全付着条件（ $P_{s0} = 1$ ）での計算の結果、微惑星は $\sim 50\text{ kyr}$ で $< 6.1\text{ au}$ で形成された（第 1 世代とする）。 $\sim 50\text{ kyr}$ 以降は円盤外側から最速落下アグリゲイトが落下し、第 1 世代より内側の $< 4\text{ au}$ で微惑星に成長した（第 2 世代）。また、微惑星は原始惑星に集積される一方で、最速落下アグリゲイトの供給によって形成・成長が継続的に起こった。ただし、最速落下アグリゲイトの供給が減少すると $< 2.5\text{ au}$ の微惑星は原始惑星へ集積され、形成領域は $2.5 - 6.1\text{ au}$ に縮小した。一方、付着しにくい条件（ $P_{s0} = 0.1$ ）では、微惑星形成領域は $P_{s0} = 1$ と比較して狭くなり、第 1 世代が $3 - 4.5\text{ au}$ となった。これは、付着確率の低下による落下に対する質量成長速度の低下と、 $< 3\text{ au}$ で集中的に形成した原始惑星による微惑星の顕著な集積に起因する。また、第 2 世代の微惑星は、最速落下アグリゲイトが供給によって、 $1.2 - 1.6\text{ au}$ で継続的に形成した。

以上の結果から、アグリゲイト間で衝突跳ね返りが卓越しても、微惑星は、形成領域は狭くなるものの、円盤外側からのアグリゲイト供給により継続的に形成されると考えられる。DSP も円盤内側に形成された微惑星に取り込まれて円盤内に長期的に保持される可能性がある。DSP を含むアグリゲイトの P_s の分布についても考慮し、微惑星の形成・成長・DSP 集積を追うことで、微惑星が長期間 DSP を取り込みつつ円盤内に保持される過程を議論する予定である。

[1] Kita et al. 2012, *Meteorit. Planet. Sci.*, 47, 1108-1119. [2] Kobayashi & Tanaka, 2023, *ApJ*, 954, 158.

破壊・摩擦の効果を取り入れた衝突シミュレーションを用いた微惑星サイズでの衝突特性の理論的研究

○塩谷大成¹, 小林浩

¹ 名古屋大学

惑星は微惑星の衝突・合体により形成されるため、衝突によって天体が成長するのか、あるいは破壊されて小さくなるのかを把握することは、惑星形成論において極めて重要である。微惑星の衝突結果（低速での「衝突合体」、高速での「衝突破壊」、および中間速度で生じる「すれ違い衝突: Hit and Run」）は、衝突速度や角度、質量比などの初期条件に大きく依存する。

火星以上の巨大な天体では重力が支配的であり、包括的な衝突モデルが完成しつつある（Kobayashi et al. 2026）。しかし、微惑星スケールの天体では重力だけでなく、天体内部の破壊や固体間の摩擦によるエネルギー散逸が重要となる（Sugiura et al. 2018）。それにもかかわらず、これらの効果を取り入れた微惑星の包括的な衝突モデルは未だ構築されていない。

そこで本研究では、破壊や摩擦の効果を組み込んだシミュレーションコードを用い、多様な初期条件（衝突速度、角度、質量比、天体の初期の損傷度など）の下で微惑星の衝突シミュレーションを実施した。解析においては、最大破片と2番目に大きな破片（第2破片）の質量に注目した。最大破片が元の天体より大きければ「衝突成長」、最大破片と第2破片が元の2天体と同等の質量であれば「すれ違い衝突」というように、これら2つの破片を評価することで各種の衝突現象を包括的に分類できる。

シミュレーションの結果、最大破片および第2破片の質量といった衝突結果は、衝突エネルギーの散逸と分配によって決定されることが明らかになった。本講演では得られたシミュレーション結果を紹介し、衝突初期条件と衝突結果の依存関係を議論する。

参考文献

Sugiura, K. Kobayashi, H. Inutsuka, S., 2018, *Astron.Astrophys.* 620, A167.

Benz, W., & Asphaug, E. 1995, *Comput. Phys. Commun.*, 87, 253

Benz, W., & Asphaug, E. 1999, *Icarus*, 142, 5

Jutzi, M. 2015, *Planet. Space Sci.*, 107, 3

Iwasawa, M., Tanikawa, A., & Hosono, N., et al. 2016, *PASJ*, 68, 541

Iwasawa, M., Tanikawa, A., Hosono, N., et al. 2015, in *Proceedings of the 5th International Workshop on Domain-Specific Languages and High-Level Frameworks for High Performance Computing, WOLFHPC'15* (New York, NY: ACM), 1:1

Kobayashi, H. Tanaka, H. Hasegawa, Y. Inutsuka, S., 2026, *ApJ* 998:89(11pp).

微惑星リングにおける原始惑星の寡占的成長と軌道構造

○ 神原 祐樹^{1,2} 小久保英一郎^{2,1}

東京大学¹, 国立天文台²

惑星形成の標準シナリオでは、惑星のビルディングブロックである微惑星は原始惑星系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されてきた。この場合、少数の原始惑星が大きく成長する寡占的成長が起こり、その質量の理論値（孤立質量）は軌道長半径 a と固体面密度 Σ に対して $a^3 \Sigma^{1.5}$ に比例する。しかし近年、数値計算によって微惑星が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た (e.g., Izidoro et al. 2022)。また、滑らかな微惑星分布を仮定すると再現できない太陽系地球型惑星の分布が、原始惑星が細いリング状に分布した状態からは再現できることも明らかになっており (Hansen 2009)、惑星形成の初期条件として微惑星リングが注目を集めている。しかし、微惑星リングから原始惑星への進化については研究が進んでおらず、惑星形成理論におけるミッシングリンクとなっている。我々はこのギャップを埋めるために、微惑星リングの進化と原始惑星の質量・軌道分布を調べている。Kambara & Kokubo (2025) では、微惑星リングを初期条件とする N 体計算を実施した。リング幅が拡大しながら原始惑星が寡占的成長し、最終的なリング幅や原始惑星分布は初期幅 w_{init} にほぼ依存せず微惑星の総質量 M_{tot} には依存することを示した。

本講演では、さらに広いパラメータ範囲でのシミュレーション結果から、初期条件依存性および結果のモデル化について発表する。軌道長半径および中心星質量を変化させたシミュレーションでも、リング幅が拡大しながら原始惑星が寡占的成長をする描像は共通していた。加えて、原始惑星の最大質量はリング中心の軌道長半径に依存しないことを発見した。これは、中心星から遠いほどヒル半径が大きいため微惑星拡散による面密度低下が効率的になり、孤立質量の軌道長半径依存性を相殺するためと考えられる。さらに、質量と軌道分布のスケール則を調査した。寡占的成長では原始惑星が軌道反発により一定の軌道間隔を保つため、軌道の広がりや軌道間隔によってスケールされると期待される。最大質量 M_{max} のフィットから経験式 $M_{\text{max,fit}} \simeq 0.42 M_{\oplus} \left(\frac{w_{\text{init}}}{0.1 \text{ au}} \right)^{-0.19} \left(\frac{M_{\text{tot}}}{2.1 M_{\oplus}} \right)^{1.1}$ を得た。図 1 は、原始惑星質量 M を $\mu = M/M_{\text{max,fit}}$ で、リング中心 a_0 からの距離を軌道間隔の理論値 b_{pred} (Kambara & Kokubo 2025) で規格化した $\xi = (a - a_0)/b_{\text{pred}}$ で表した分布であり、モデルに依らず分布がよく重なっている。特に軌道方向のスケールリングは、面密度が時間進化する微惑星リングにおいても原始惑星の軌道分布が軌道反発による軌道間隔保持で決定されることを意味する。講演ではさらに、規格化した分布を経験的にフィットし、微惑星リングから形成される原始惑星の質量と軌道を与える公式を提示する。これにより、初期の微惑星リングから原始惑星系を直接接続することが可能になる。

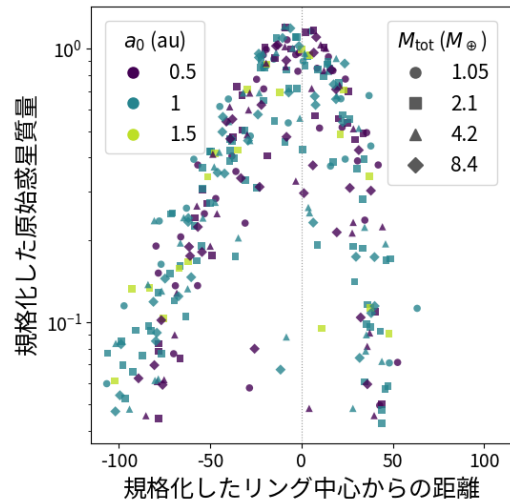


図 1: 規格化した原始惑星質量と軌道分布。色はリング位置、記号の形は微惑星総質量を表す

原始惑星エンベロープの流れが形作るダスト分布

How envelope dynamics shape dust distributions around protoplanets

○桑原歩¹, Michiel Lambrechts¹

¹コペンハーゲン大学 Globe Institute

Planets embedded in protoplanetary disks accrete solids through their gaseous envelopes (pebble accretion [1,2]). The thermal evolution of these envelopes is regulated by opacity, whose dominant source is often small dust grains. The spatial distribution of dust therefore controls the envelope cooling time and the timing of runaway gas accretion. Dust grains can also deliver volatile and refractory material to the core-envelope system, thereby influencing the primordial composition of both the planetary core and its envelope. However, pebble accretion does not directly translate into material delivery to the planet, because the fate of solids depends on how they are transported within the envelope [3].

We present high-resolution three-dimensional multifluid simulations of gas and dust around low-mass planets embedded in protoplanetary disks [4,5]. By combining models of convectively stable and fully convective envelopes, we investigate how envelope dynamics regulate the spatial distribution of dust grains over a broad range of particle sizes.

In convectively stable envelopes, the outer recycling flow remains dynamically separated from the deep envelope. Small grains, with a dimensionless stopping time $St < 10^{-3}$, remain entrained in the recycling flow and are prevented from entering the envelope, whereas larger grains ($St > 10^{-2}$) penetrate the Bondi sphere but rapidly settle toward the core through the midplane. As a result, the dust-to-gas ratio decreases inward by several orders of magnitude, implying a substantial reduction in dust opacity throughout much of the envelope.

When accretion heating drives convection, the dust distribution is instead controlled by the dynamical connection between the convective envelope and the surrounding disk. If convection extends beyond the Bondi radius, the envelope remains connected to the disk flow and can maintain a dust-rich state through continuous material exchange. Conversely, if an inner convective layer is separated from an outer recycling layer, incoming solids are partly excluded from the deep envelope. The dust abundance inside the convective layer is then determined by the competition between convective stirring and gravitational settling: large grains settle rapidly and deplete the envelope, whereas smaller grains are trapped in convective circulation.

These results indicate that the dust and volatile content of planetary envelopes is controlled by envelope dynamics. Whether solids are excluded by recycling flows, mixed by convection, or lost by settling determines where dust and volatile species are deposited between the core and the envelope. Our findings suggest that super-Earths and mini-Neptunes can acquire diverse envelope compositions depending on particle size, cooling efficiency, accretion luminosity, and orbital location.

[1] Ormel, C. W. & Klahr, H. H. 2010, A&A, 520, A43, [2] Lambrechts, M. & Johansen, A. 2012, A&A, 544, A32, [3] Kuwahara & Lambrechts 2026a, A&A, 707, A26 [4] Kuwahara & Lambrechts 2026b (under review), [5] Kuwahara & Lambrechts 2026c (under review)

粘性進化円盤における不可逆化学反応進行と反応ダスト輸送

○石崎梨理¹、橘省吾¹、井田茂^{2,3}

¹ 東京大学、² 西湖大学、³ 東京科学大学 ELSI

Introduction: ダストは進化する原始惑星系円盤の中を運動し、さまざまな化学プロセスを経験することで最終的に形成される惑星の多様性を生み出す。したがって、原始太陽系円盤の進化を理解することは太陽系の歴史を理解する上で非常に重要である。特に不可逆な化学反応は、半永久的にその記録が保存されるという点で重要な情報を持つ。本研究では、粘性進化する原始惑星系円盤におけるダストの不可逆反応の進行と、それを経験したダストの分布進化を調べることで、その分布形成メカニズムを明らかにすることを目的とした。

Methods: 幅広い円盤サイズに適用可能な粘性進化する円盤モデルを開発し、その中を運動するダストの軌跡を追跡するモンテカルロシミュレーションをおこなった。各粒子について、300-1000 K 程度の幅広い温度帯で進行する 5 種の不可逆反応 (組成の異なる 3 種の非晶質ケイ酸塩の結晶化、ケロジェン熱分解、300 K 程度で進行する仮想反応) の進行を実験的に決定された反応速度論を用いて計算し、その反応率の分布進化を調べた。特に彗星形成領域の結晶化率分布を現在の彗星観測データと比較することで、その要求を満たす原始太陽系円盤の円盤条件を調べた。

Results & Discussion: 定常降着円盤に対し開発された「反応ライン」温度予測式 (Ishizaki et al. 2023) を、粘性進化円盤モデルでも適用可能な形に拡張した。粘性進化円盤における、不可逆化学反応を経験したダストの動径分布進化は、反応が効率的に進行する位置である反応ラインと、物質の内向き移流と外向き移流の境目である「移流反転ライン」の位置関係によって支配されることを明らかにした。反応ダストの分布は 2 グループに大別される: (1) 2 つのラインが初期に近接する場合、反応ダストは効率的に外側円盤まで輸送され、円盤全体に広く分布する。(2) 2 つのラインが初期から離れている場合、反応ダストは内側円盤に押し込められ、定常降着円盤的な分布を形成する。

太陽系で見られる高温物質の外側輸送の痕跡は、初期の原始太陽系円盤において各反応ラインと移流反転ラインが近接していたことを示唆する。現在の彗星ケイ酸塩ダストが示す 10-60% 程度の結晶化率と多様な olivine/pyroxene 比は、比較的小さな円盤サイズ、比較的大きな円盤質量、および過度に強くない乱流を持つ原始太陽系円盤と整合的である。

赤道面乱流が分ける内側岩石惑星の形成経路

○近藤克¹, 奥住聡¹, 森昇志^{2,3}

1: 東京科学大学, 2: 清華大学, 3: 東北大学

内側岩石惑星系は、質量・軌道に大きな多様性を持つ。太陽系の内側惑星は 0.4–1.5 au 付近に分布し、質量は 0.1–1 地球質量程度である。対照的に、太陽系外では、数–10 地球質量程度の短周期スーパーアースが軌道周期 100 日以下の領域に多数見つかっている。このような質量・軌道の違いがどのように生じるのかは、惑星形成論における重要な問題である。

この違いに対する形成論的説明として、Lambrechts et al. (2019) は、ペブルフラックスをパラメータとして、岩石原始惑星のペブル集積による成長と軌道移動を計算した。ペブル供給が十分にある場合、原始惑星は地球質量程度まで急速に成長し、Type-I 軌道移動によって円盤内側へ移動した後、衝突合体を経て数–10 地球質量級の短周期スーパーアースを形成する。一方、ペブル供給が限定的な場合、原始惑星は火星質量程度までしか成長せず、惑星の内向き移動も遅いため、0.1–2 au 程度の軌道範囲に残る。この場合、円盤ガス散逸後の軌道不安定と巨大衝突により、地球型惑星が形成されうる。

しかし、Lambrechts et al. (2019) では、ペブルフラックスや、ペブルのガスへの結合度を表すストークス数が簡略化して与えられている。実際には、これらは円盤のガス・ダスト進化に依存して時間・空間的に変化する。特に、赤道面乱流強度はダストの衝突速度を通じてストークス数を変え、ペブル集積効率を左右する。そのため、円盤進化に接続した計算のもとで、同様の内側岩石惑星形成経路の分岐が現れるか、またその分岐が何によって決まるかは明らかではない。

本研究では、磁気風と弱粘性によって駆動されるガス降着 (Tabone et al. 2022) と、ダストの成長・破壊・ドリフト・拡散を計算し、その背景円盤に接続して原始惑星のペブル集積による成長と Type-I 軌道移動を追跡した。ペブル集積率は、惑星周りのガス流れによるペブル捕獲の抑制を考慮した Okamura & Kobayashi (2021) のモデルにより評価した。原始惑星の初期質量を 0.1 地球質量、初期軌道を 0.2–2 au、形成時刻を 0.1 Myr とし、赤道面乱流が比較的強い場合 ($\alpha=3\times 10^{-4}$) と比較的弱い場合 ($\alpha=10^{-5}$) を比較することで、赤道面乱流強度が岩石原始惑星の成長・軌道移動に与える影響を調べた。

その結果、赤道面乱流が比較的強い場合には小さいストークス数のペブルが形成され、原始惑星はペブル集積を通じてほとんど成長しなかった。惑星の内向き移動も遅いため、最終的な到達軌道は最大で約 0.4 au であった。このように原始惑星が内側円盤に残る場合、円盤ガス散逸後の衝突成長を経て地球型惑星形成へとつながる可能性がある。一方、赤道面乱流が比較的弱い場合には、大きいストークス数のペブルが形成され、原始惑星は地球質量程度まで成長した。内向き移動も進み、原始惑星は円盤内縁まで移動した。この場合には、円盤内縁付近での衝突成長を経て近接スーパーアース形成へとつながる可能性がある。

したがって、内側岩石惑星系の形成経路は、赤道面乱流強度によって決まるストークス数により分岐しうる。赤道面乱流強度は円盤ごとに異なりうるため、地球型惑星形成経路と近接スーパーアース形成経路は、いずれも原始惑星系円盤の多様性の中で生じうる可能性がある。

α モデルの先へ：系統的な磁気流体計算に基づく 原始惑星系円盤の質量・磁場輸送則

榎本 晴日¹, ○奥住 聡¹, 森 昇志², 岩崎 一成³

¹ 東京科学大学, ² 清華大学, ³ 国立天文台

惑星形成のあらゆる過程を理解する上で、その母体である原始惑星系円盤のガスの輸送過程に関する正しいモデルは不可欠である。従来の多くの惑星形成研究では、ガス円盤のモデルとして、起源不明の巨視的な粘性を無次元パラメータ α に比例させる「 α 粘性モデル」(Shakura & Sunyaev 1973; Lynden-Bell & Pringle 1974) が用いられている。近年では、磁気駆動風による円盤ガス輸送も同様の無次元パラメータで記述した、より拡張的な「 α モデル」も提案され (e.g., Suzuki et al. 2016; Tabone et al. 2022)、一部の惑星形成研究で使われ始めている。しかし、いずれのモデルにおいても、モデルの根幹をなす無次元パラメータの値に対する理論的・観測的制約は乏しく、ましてやそのパラメータがどのような時空間分布をとりうるのかは全く明らかでない。この大きな不定性のため、今日の惑星形成理論の予言力は著しく制限されている。

我々は、これらの「 α モデル」に代わる円盤モデルの構築を目指し、系統的な磁気流体シミュレーションによって原始惑星系円盤の質量・磁場輸送のモデル化に取り組んできた。磁場によって駆動される円盤ガス流の構造は、円盤を貫く大局的な鉛直磁場の分布に加え、ガスと磁場の結合度合いを決めるガス電離度の分布によって決まると考えられる。この依存性を広いパラメータ範囲にわたって明らかにするには系統的な数値計算が必要だが、計算コストの比較的軽い局所ボックス計算では現実的な磁気駆動ガス流構造が維持できないという技術的問題 (e.g., Bai & Stone 2013) があり、系統的な調査が長らく阻まれてきた。本研究では、局所磁気流体計算に大局的な磁場拡散の効果を模擬的に取り入れ、この効果が局所計算における磁気駆動ガス流構造の崩壊を防ぐことを明らかにした。次に、この計算手法を用いて、円盤ガス流の磁場強度・電離度依存性を系統的に調査した。その結果、円盤の質量分布進化において特に重要となる質量降着率（動径方向の正味の質量フラックス）が、大局的な鉛直磁場および円盤電離度構造を特徴づける2つの無次元量のべき関数として表せることを明らかにした (Enomoto et al., under revision)。このスケーリング則は、局所計算のみならず、大局円盤磁気流体計算 (Iwasaki et al. 2024) の結果も再現する。さらに、鉛直磁場の輸送効率も円盤電離度の関数として表せることを示した。

本研究によって導出された一連の経験則を用いれば、円盤の質量・磁場分布の双方の長期進化を、物理的根拠が不明なパラメータを仮定することなく計算することが可能になる。本講演では、以上の成果を紹介し、惑星形成研究に対する本成果のインパクトについても議論する。

標準彗星名表記

Standard Pronunciations of Comet Names in Japanese

佐藤 勲 Isao SATO (宇宙用語研究会)

30年間にわたるネーティブの外国人への発音の聞き取り調査などによって、彗星名の日本語表記に多くの誤りや不適切な表記があることがわかった。これらの調査結果に基づいて、「標準彗星名表記」を作成して、宇宙用語研究会のホームページに発表した。

1990年代以降、以下の国際会議などでネーティブの外国人に対する発音の聞き取り調査を行い、正確な発音が系統的に調査された。日本語での表記が諸説あるものについては、何度も調査を行い、正確を期した。なお、発見者個人の経歴なども同時に調査し、移民の場合等にも的確に対応している。

宇宙用語研究会のホームページに掲載されている「標準彗星名表記」では、リンクをクリックすると、彗星や発見者のプロフィールが見られたり、発音を聞くことができる。最近ではオンラインの発音サイトが充実してきているが、どれが本人の発音と同じなのかは、実際に外国人に聞き取り調査した結果が欠かせない。

- 1997年 京都 IAU(国際天文学連合)総会
- 2012年 新潟 ACM(小惑星彗星流星会議)
- 2012年 北京 IAU(国際天文学連合)総会
- 2015年 ホノルル IAU(国際天文学連合)総会
- 2018年 ウィーン IAU(国際天文学連合)総会
- 2022年 釜山 IAU(国際天文学連合)総会
- 2023年 フラグスタッフ ACM(小惑星彗星流星会議)
- 2023年 郡山 APRIM2023(アジア太平洋研究会議)

標準彗星名表記

Standard pronunciation of the comet names in Japanese

リンクをクリックすると、発見者や彗星のプロフィール、発音がお聞きいただけます。

同名の彗星が複数ある場合は、最も著名な彗星を紹介しています。

オンラインの発音サイトを検索だけでは、複数の発音が出てきたりしてどれが正しいのかわかりませんが、これまでのネーティブの外国人への発音聞き取り調査をもとに、この発音をしているというサイトを紹介しています。

(本人の発音とは違う発音をしているサイトが多数あります)

プロフィールのない発見者の多くは、アマチュア天文家や観測助手の方です。

正確な情報のため、英語のサイトをメインに掲載していますので、ウィキペディアの場合は日本語を選択してください。。

[周期彗星の一覧](#)

[これまでに出現した彗星の一覧](#)

[小惑星の一覧](#)

[天体名の日本語表記のルール](#)

[天体名のラテン語読みルール](#)

[「固有名詞英語発音辞典」の発音記号](#)

[X\(Twitter\)](#)

確度 AA : 99% (本人又は直接関係者に対する調査が行われた、または日本人)

確度 A : 95% (ネーティブの外国人に対する調査が行われた)

確度 B : 70% (辞書や外国語の教科書、オンライン発音サイトなどによる推定)

確度 J : 日本語での慣用表記

確度 L : ラテン語読み

確度 U : 不明

彗星名	言語	確度	日本語表記	同名彗星の符号
Aarseth-Brewington	ノルウェー語, 英語	B	オーシェット・ブルーイントン彗星	C/1989W1
Abe	日本語	AA	阿部彗星	C/1970N1
Abell	英語	A	エイブル彗星	C/1953T1, C/1955G1

極超音速流れにおける氷アブレーションによる CN バンド発光計測

○市川治輝, 平野裕己, 村松武明, 熊崎大知¹, 嶋村耕平²

¹ 東京都立大学大学院 システムデザイン研究科 航空宇宙システム工学域, ² 東京都立大学

彗星や隕石などの星間物質には有機化合物が存在していることが報告されている。例として、67P/Churyumov-Gerasimenko 彗星はコマからグリシン、メチルアミン、エチルアミンなどが検出されている。これらはタンパク質やアミノ酸の生成に必要な原料となり得るため、地球の生命起源に対して重要な構成要素である。しかし、地球に供給される過程の中で、大気圏突入時に天体の表面ではアブレーションが発生する、これによってシアン化水素、アンモニアなどの分子が生成され、地球上に前生物学的有機物が供給されると考えられている。近年の研究では地球に到達した有機物の解析が行われており、試料に衝撃波処理やレーザー加熱を行った後の生成物を回収して組成解析を行っている。一方で、極超音速流れにある最中の発光特性については触れていない点が多い。本研究では、極超音速流れによる前生物有機物を含む氷試料の発光を観測することで、氷天体がアブレーション時に発する励起種の推定を行う大気圏突入時のアブレーションの際に生じる励起種の観測を目指した。

本実験の試料には精製水に対してグリシンが 1.7wt% になるよう添加した氷を使用し、C, H, N, O を含む励起種が生成されることを狙った。波長範囲は 350nm~450nm とし、相対強度としてデータを出力した。また、有機分子の影響と気流由来の励起種の評価のため、純氷の試料も併せて用いて実験を行った。

分光観測の結果、グリシンを添加した氷試料において、380nm~390nm と 410nm~420nm で CN バンドを同定でき、純氷試料よりも大きい強度を観測することができた。そのため、グリシン由来の CN の励起種を観測できたといえる。しかし、388nm に CN バンドのピークは確認できなかったため、分光器の絶対強度校正が必要だと考えられる。また、370nm~380nm で N₂ バンド、420nm~435nm で CH バンドを、グリシンを添加した氷試料において強く観測することができ、全波長を通して発光が強いことがわかった。これはグリシンの添加によって試料の強度が変化し、フラグメントの増加によって発光面積が増えたことが原因だと考えられる。本発表では、今回とは異なる波長範囲での分光観測の結果を報告するとともに、CN バンドのピーク波長の同定や有機分子を始めとする励起反応やその過程について議論し、実験構築に関する今後の展望について発表する。

2025 年ふたご座流星群の月面衝突閃光の観測による流星体

物理量とライトカーブ特性に関する研究

A Study on the Meteoroid Parameters and Light Curve Characteristics Based on Observations of Lunar Impact Flashes from the 2025 Gemini Meteor Shower

○西形みさき¹, 阿部新助¹, 有馬宣明¹, 青木翼¹, 阿久津正太郎¹, 荒木湧斗¹

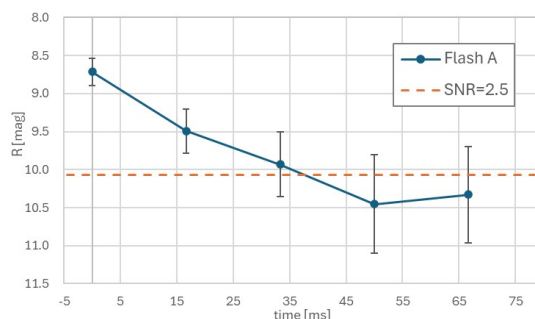
¹ 日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻

月面衝突閃光(Lunar Impact Flash, 以下 LIF)は, 流星体が月面に衝突する際に衝突エネルギーの一部が発光エネルギーに変換されることによって起こる短時間の発光現象である. 特に群流星の活動期間中は月面への衝突頻度が増加し, ふたご座流星群の cm サイズのサイズ分布とフラックスを調べる有効な手段である^[1]. また, 閃光の時間変化(lightcurve)からは衝突の物理的過程や形成されるクレーターなどについても考察の余地がある.

本研究では, 2 台の光学望遠鏡 (口径 40cm/F3.8+20cm/F3.0) を用いて観測された 2025 年ふたご座流星群期間中の月面衝突閃光の観測について報告する. 撮像には 60fps の高速 CMOS カメラ(QHY174GPS_M)を使用し, 観測は 2025 年 12 月 15 日未明(月齢約 24)に日本大学船橋キャンパス(35°43'31.0"N, 140°3'32.0"E)にて実施した. 2026 年現在, 観測データからは Johnson-Cousins R 等級にて最大等級 7.4~9.6 等級の 9 件の LIF イベントが確認されており, これらは神奈川県平塚市または岡山県浅口市, 台湾での同時観測が成立している.

9 件のイベントはいずれも確率パラメータ p ^[2] が 0.70 を超えており, ふたご座流星群を起源とする可能性が高い. 最も明るいイベントを起こした流星体は質量 5.69[g], 直径 1.54[cm] と推定される. ふたご座流星群期間中の衝突頻度は $5.8 \times 10^{-7} [\text{hr}^{-1} \text{ km}^{-2}]$ と求まり, これは 2018 年観測時の $4.8 \times 10^{-7} [\text{hr}^{-1} \text{ km}^{-2}]$ と同オーダーの値である. LIF はいずれも検出閾値 $\text{SNR}=2.5$ を超える発光が複数フレームで確認されており, 発光継続時間はおおよそ 30~100ms となった. 最大等級と発光継続時間および最大等級と流星体質量には, それぞれ中程度の相関($r = -0.41$ および $r = -0.66$)がみられる.

また, 2018 年ふたご座流星群観測時のイベント 6 件を加えた計 13 件の LIF について, ライトカーブの挙動から時間変化特性についても解析を行った. ライトカーブの減衰については衝突角($r = 0.41$)をはじめに複数のパラメータが影響していると考えられる.



Lightcurve of Flash A (2025.12.25 04:14:08 JST)

[1] S. Abe et al., 遊星人, 33巻3号, 262-269, 2024.

[2] Ortiz et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 344-352, 2015.

彗星コマにおけるダスト遮蔽効果

Dust Shielding Effects in Cometary Comae

○富永 但¹、寺田 直樹¹、小山 俊吾^{1,2}、木津 裕人¹、吉田 辰哉^{2,4}、中村 勇貴³

¹東北大学、²東京科学大学、³東京大学、⁴ワシントン大学

彗星は、初期太陽系の始原的な情報を保持する天体として広く認識されている。彗星が太陽に接近すると、揮発性物質が昇華し、ガスとダストの混合物である「コマ」が形成される。ガスとダストの物理的・化学的相互作用については研究が進んでいるものの、太陽放射に対する光学的な遮蔽体としてのダストの役割については、これまで十分に定量化されてこなかった。特に、ダストの遮蔽効果がコマ内の揮発性物質の光化学反応や熱構造に与える影響を包括的に調査した研究は少ない。

近年の観測により、彗星コマ環境におけるナノ粒子（ナノダスト）の存在が明らかになってきた。ナノダストはその大きな総断面積と光学特性により、太陽放射を効果的に減衰させる可能性がある。また、ダストが多孔質な集合体であることや、その化学組成も観測・分析から明らかになりつつあり、これらの性質は散乱・吸収特性を変化させ、放射遮蔽効果に影響を及ぼすと考えられる。さらに、ダストが多くなると放射場が大きく変化し、加熱・冷却過程が著しく変わることで、多くの1次元モデルで仮定されている定常状態が維持できなくなる可能性も考えられる。これらの理由により、ダストによる遮蔽は結果としてコマ内、特に核近傍の化学組成や熱構造を変化させる可能性を秘めている。

本研究は、活動的な彗星におけるダストの遮蔽効果がコマに与える影響について、評価を試みたものである。我々は、単純なダスト消光を組み込んだモデルを開発し、ダストによって太陽放射の透過がどのように影響を受けるかを評価した。初期的な計算結果は、ダストが豊富な彗星において遮蔽効果は無視できないものであり、コマ環境を変化させ得ることを示唆している。ただし、これら複雑なプロセスを解明するには、ダスト散乱や放射伝達のより高度な取り扱いが必要である。本研究が示す遮蔽効果の理解は、今後のコマ観測の解釈や彗星進化モデルの構築に貢献すると考えられる。

すばる望遠鏡が明かす 木星トロヤ群小惑星の「色の謎」

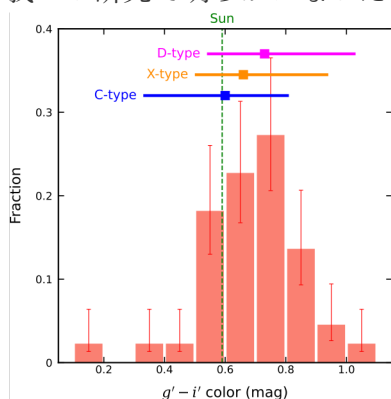
The Subaru Telescope Sheds Light
on the "Color Mystery" of Jupiter Trojan Asteroids

○吉田 二美^{1,2}、寺居 剛³、大槻 圭史⁴

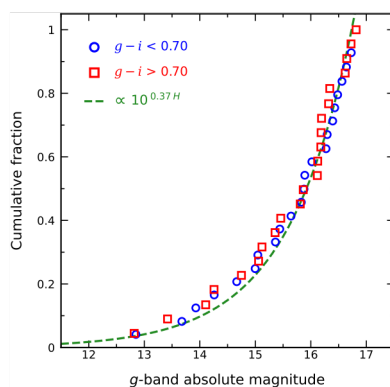
¹産業医科大学、²千葉工業大学、³国立天文台、⁴神戸大学

木星トロヤ群小惑星の可視光の色やサイズ分布を調査するため、すばる望遠鏡とその広視野カメラ「Suprime-Cam」を用いて、 g' ($0.40-0.54 \mu\text{m}$) と i' ($0.69-0.84 \mu\text{m}$) の2バンドで撮像サーベイ観測を実施し、木星のL4 ラグランジュ点周辺の合計 9.2 平方度の領域から120個のトロヤ群小惑星を検出した。これらのトロヤ群小惑星の中から、 g' バンドにおける絶対等級が12.9~16.9等（アルベド0.05と仮定した場合、直径は約3~16 kmの範囲に相当）の44個のバイアスのないサンプルを抽出し、その色分布とサイズ分布を分析した。大きな木星トロヤ群小惑星は、D型小惑星に相当する「red」天体と、P型/C型のようにあまり赤くない「less red」天体の2つの色グループに分類されることが知られているが、我々の検出した小さな木星トロヤ群小惑星においては、色分布にこのような二峰性が認められなかった。これは我々と同じく小さいトロヤ群小惑星を調べた先行研究と一致している。一方、サイズ分布については、先行研究ではこれら2つのグループの絶対等級分布のべき指数が互いに異なることが示されており、これは、衝突崩壊を通じてred天体がless redな破片へと変換されたことによるものと説明されていた。これに対して我々のサンプルを色指数（AB等級）= 0.7でred天体とless red天体に分けてサイズ分布を比較してみたところでは、それらは非常に類似していることがわかり、先行研究とは異なる結果が得られた。

我々の研究で明らかになったのは「(1) 小さなトロヤ群小惑星では「はっきりした色の分かれ方」が見られない」、



小さい木星トロヤ群の色分布



小さい木星トロヤ群のサイズ分布

「(2) 小さなトロヤ群小惑星では「色によるサイズ分布の違い」が見られない」ということである。これら2つの特徴は、今後、木星トロヤ群小惑星の起源や進化を解き明かす上で鍵となるだろう。

本研究は論文 Yoshida *et al.* 2026 *AJ* 171 240

(DOI 10.3847/1538-3881/ae47e4) にまとめられ、以下の
ところでリリースされている。



すばる望遠鏡



神戸大学

はやぶさ 2 搭載 TIR の観測による小惑星リュウグウのエジマ岩塊の熱履歴

○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³, 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

小惑星探査機はやぶさ 2 搭載中間赤外カメラ TIR は, 2018 年から 2019 年にかけて, 小惑星 162173 リュウグウを近接から熱撮像し, 表層の熱慣性や物理状態を明らかにした (Okada et al, Nature 2020; Shimaki et al., Icarus 2020). 本発表では TIR の観測によって発見されたリュウグウ上の高温領域(エジマ岩塊)の解析結果について紹介する. エジマ岩塊は周囲の岸壁からの熱輻射によって恒常的に加熱されており, 周囲よりも熱疲労が進んだ乾燥した地域であると予想されている. エジマ岩塊で起こった熱的な作用を TIR のデータ解析結果から定量的に評価する.

図に 2018 年 8 月 1 日にリュウグウ上空 5km から TIR が観測した輝度温度データと熱物理モデル(Spencer et al, Icarus 1989)を使用して求めたベストフィット熱慣性マップ (RMS Slope=45° 固定)を示す. 中央のウラシマクレータの下の高温領域がエジマ岩塊で, その地域は熱慣性も相対的に低い地域であることがわかる. エジマは岩が互いに向かい合う特異な形状で, 互いの熱輻射によって加熱され, 周囲よりも高温になっている.

エジマ周辺は, Delbo et al., Nature 2015 で提案されている熱疲労によって亀裂や破碎が周囲よりも進み, 低い熱慣性値である可能性がある. 近赤外分光計 NIRS3 の観測では, エジマは強く赤化した領域として報告されており, 乾燥した地域であることが指摘されている(Galiano et al., Icarus 2020). エジマは熱的に特異な経験を経ており, 母天体で起こった熱変成とリュウグウ形成後に受けた熱作用を区別して, 熱進化を議論する必要がある.

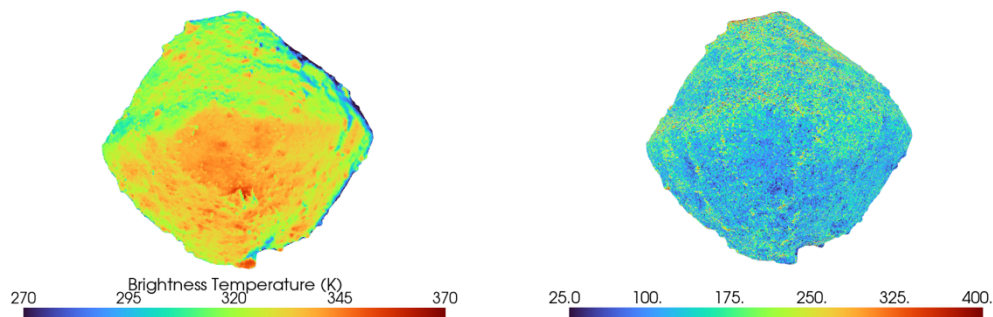


図 2018 年 8 月 1 日の TIR 観測輝度画像(左)と RMS Slope=45° 固定で求めたリュウグウ熱慣性マップ(右)

はやぶさ 2#フライバイ観測に基づく 小惑星トリフネの形状復元の現状 Shape Reconstruction of Asteroid Torifune Based on Flyby Observations by Hayabusa2#: Preliminary Report

○平田成¹、黒岩和貴¹、棚木敦也¹、平林正稔²、神山徹³、湯本航生⁴、横田康弘⁵、
山田学⁶、坂谷尚哉⁴、石崎拓也⁴、鎌田俊一⁷、末次竜⁸、千秋博紀⁶、北里宏平⁹、
安部正真⁴、村上真也⁴、三桝裕也⁴、岩崎拓弥⁴、藤原正寛⁴、早川雅彦⁴、田中智⁴
¹会津大学、²ジョージア工科大学、³産業技術総合研究所、⁴宇宙航空研究開発機構、
⁵東京科学大学、⁶千葉工業大学、⁷北海道大学、⁸大島商船高等専門学校、
⁹公立鳥取環境大学

2026 年 7 月 5 日に実施された、小惑星探査機はやぶさ 2 の拡張ミッションによる地球近傍小惑星(98943)トリフネのフライバイ観測によって取得されたデータに基づく、小惑星トリフネの形状復元の現状を報告する。はやぶさ 2 によるトリフネのフライバイ観測は、探査機の姿勢を固定した状態で、最接近時刻近辺での観測を行う。このため、ステレオ視のための視差は高々搭載カメラの視野程度かそれより小さいものにしかない。また、フライバイ時の小惑星に対する相対速度が大きいので、小惑星を十分な解像度で観測できる撮像回数もごく限られている。実際のフライバイ運用の結果では、予定よりも良質なデータの取得が達成できたものの、限られた量・質のデータから可能な限り小惑星形状の復元を行う必要がある。著者らは、小惑星リュウグウの形状モデル復元で用いられた Structure-from-Motion (SfM) と Stereophotoclinometry (SPC) を可視近赤外カメラ (ONC-T) の画像からのトリフネの形状復元にも適用することを試みるとともに、ONC-T 画像と熱赤外カメラ (TIR) 画像をともに用いた Shape-from-Silhouette (SfS、リムプロファイリング) も活用しようとしている。また、小惑星の測光観測データ (地上観測によって取得されたものと、小惑星へのアプローチ中に ONC-T で観測したもの) によるライトカーブからの形状の逆推定 (ライトカーブインバージョン) も用いる。また、形状復元の初期モデルや、その他の各種解析に簡易的に使用可能な、0 次推定形状モデルも作成しているため、これについても報告する。

小惑星 Phaethon の表面凹凸と自転周期変動

○千秋博紀¹, 野田寛大², 吉田二美³, 伊藤孝士²

¹千葉工業大学, ²国立天文台, ³産業医科大学

3200 Phaethon は、1983 年に発見された小惑星であり、軌道要素からふたご座流星群の母天体と考えられている。発見以来、測光のみならず、偏光、レーダ、掩蔽など多くの観測が行われており、軌道やサイズ、自転周期が良く求まっている。

長期に渡る軌道の追跡から、Yarkovsky 効果（天体が熱輻射の反力として運動量を獲得する効果）を表すパラメタが求められている。観測的に求められる Yarkovsky 効果の大きさは、推定された形状を考慮した熱モデルから求まる Yarkovsky 効果の大きさと整合的である。

一方、長期に渡る測光観測から、3200 Phaethon の自転は加速していることが分かっている。自転周期の変化率は安定しており、天体衝突のような突発イベントで生じたものではなく、YORP 効果（天体からの熱輻射の非等方成分が角運動量を獲得する効果）で変化していることが期待される。しかし推定された形状を考慮した熱モデルの結果から求まる YORP 効果は、地上観測から求まる効果と影響（自転は加速している）は定性的には整合しているものの、定量的には 1 桁程度小さい値となっていた。

本研究では、過去の研究から推定された Phaethon の形状モデルに人工的な凹凸を追加して熱モデル計算をやり直した。表面に凹凸があると、YORP 効果に強く影響することが知られている（T-YORP 効果と呼ばれる）ためである。話を単純化するために、本研究では全球で均質に凹凸を導入した。凹凸の程度を変化させたモデルを複数準備して、凹凸の程度と YORP 効果の変化の関係を求めた。

その結果、表面の凹凸が大きくなるにつれて YORP 効果による自転周期変動は強調される、すなわち地上観測から求められている値に近づいてゆくことを示すことができた。このことから、Yarkovsky 効果を説明できる形状モデルが得られており、かつ地上観測から YORP 効果（自転周期の変化）が求められている場合には、その差分から表面の凹凸状態を推測できる可能性が示唆される。

Hera および RAMSES による小惑星の熱赤外撮像

○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^{2,8}, 石崎拓也¹, Ramon Vilardell-Belles⁵, 古川聡一郎^{1,2},
Ozgur Karatekin⁹, Joris Blommaert¹⁰, Tim Titus¹¹, Hera TIRI チーム¹
¹JAXA 宇宙研, ²東大, ³前橋工大, ⁴千葉工大, ⁵会津大, ⁶北海道教育大, ⁷産総研,
⁸コートダジュール天文台, ⁹ベルギー王立天文台, ¹⁰VITO, ¹¹USGS

プラネタリーディフェンスは太陽系小天体が地球衝突することによって生じる災害を回避するための人類共通の防災活動であり、学際的な応用科学である。地球接近小惑星の検知と地球衝突確率の推定（天文学）、地球接近小天体の物性などの素性の理解（惑星科学）、地球衝突回避の技術蓄積と実践（宇宙工学）、天体地球衝突による影響や災害規模の推定（防災・環境学）、天体地球衝突災害に対する法整備や社会的対策（法学・社会学）などについて、国際的な対応が必要であり、国際社会における喫緊の課題である。

Hera はプラネタリーディフェンスを主目的とする ESA の小惑星探査計画であり、NASA の DART による小惑星 Didymos の伴星である Dimorphos への衝突成功後の状態についての事後観測を担う。2024 年 10 月に打上げられ、2026 年 11 月に到着し、約半年かけて探査する。Hera には日本の熱赤外カメラ TIRI が搭載され、S 型小惑星に対して熱赤外域での全球の熱撮像と多波長分光を史上初めて実施する（Hayabusa2#による S 型小惑星 Torifune のフライバイ観測では単波長で半球のみの観測）。TIRI によって両小惑星の熱物性や組成を調査し、天体の形成過程や進化過程など科学的研究を進めるほか、物性情報の提供によって探査機衝突による小惑星の軌道変更による衝突回避技術の確立に寄与する。RAMSES は日欧共同で行う小惑星 Apophis 探査計画であり、Apophis が 2029 年 4 月 13 日に地球表面から静止軌道よりも近い約 3 万 2 千キロメートルを通過する前後を連続的に観測することにより、地球潮汐による変形や地表変化を観測し、Apophis の硬度などの物性や内部構造について調査する探査計画である。地球近傍遭遇の約 1 年前に JAXA の DESTINY+と H3 ロケットで同時に打上げる予定である。RAMSES は Hera の技術を継承し、熱赤外カメラ TIRI（Hera 用のフライトスペア）を搭載し、Apophis の熱物性や組成の情報を取得し、天体の素性を明らかにする。

熱赤外カメラ TIRI は検出器に非冷却ボロメータを使用し、フィルタホイールを用いた広帯域帯熱撮像による熱慣性分布の調査と、狭帯域多波長分光撮像による組成・物性の探査を行う予定である。現在は Hera の 2026 年 11 月の Didymos 到着に向け、観測運用計画の策定、コマンドの準備、地上データ取得・処理の準備を進めている。TIRI は打上げ直後の地球・月撮像や、火星スイングバイ時の火星や衛星 Deimos の撮像による軌道上実証と較正を進めてきた。その評価の現状や、Hera と RAMSES の観測計画について紹介する。

はやぶさ 2 回収試料の付着力測定における 塑性変形の可能性に関する検討

○長足友哉（工学院大学），中村昭子（神戸大学）

背景：はやぶさ 2 回収試料の物性測定の一環として付着力測定が行われた[1]。隕石粒子の場合，綿棒で適量を取って平板上に落下させて付着させた一方[2,3]，貴重な回収試料の場合，粒子を一つずつ針で取って平板に付着させ[1]，平板と粒子間の付着力が測定された。針の場合，平板に付着させる際に粒子を平板に押し付ける形となるため，粒子の塑性変形が起こり，付着力測定結果に影響した可能性がある。そこで本研究では，粒子を平板に対して様々な遠心力で押し付けた後に付着力測定を実施し，測定付着力に対する押し付けの影響を調べることで，はやぶさ 2 回収試料の付着力測定における塑性変形の可能性を評価した。

実験：強度の弱い試料として，直径 $\sim 0.5\ \mu\text{m}$ のシリカ球（モノマー）からなる $60\text{--}120\ \mu\text{m}$ サイズの凝集体について，重力加速度の $\sim 10\text{--}3000$ 倍の遠心加速度で平板に押し付けた後，付着力を測定した。凝集体は平板の数 cm 上方からふりいでふるうことで作成した。

結果と議論：重力加速度の ~ 30 倍までの遠心加速度で押し付けた後に測定された付着力は，押し付け無しで測定された付着力とおおよそ一致している一方，重力加速度の ~ 100 倍以上の遠心加速度で押し付けた後に測定された付着力は大きな遠心加速度で押し付けるほど大きいことが確認された。これは先行研究[4]で有機物や炭酸カルシウムの粒子で確認された傾向と調和的である。押し付け無しの場合，凝集体は平板とおおよそ 3 つの表面構成モノマー粒子で接触している可能性が高い[3]ことから，重力加速度の $\sim 30\text{--}100$ 倍の遠心加速度による押し付けの力が 3 つのモノマーの断面積にかかる圧力を算出すると，Rumpf の式[5]に基づく凝集体の引張強度と調和的であった。そこで，はやぶさ 2 回収試料のナノインデンテーション試験で得られた硬さ[1]と，炭素質コンドライトの付着力測定から推測される典型的な表面凹凸サイズ[3]にかかる圧力を比較すると，針で取って平板に付着させた際，はやぶさ 2 回収試料は容易に塑性変形を起こしたと考えられる。このことは，はやぶさ 2 回収試料の付着力が炭素質コンドライトの付着力[3]よりも大きく測定された原因となった可能性がある。今後の探査による回収試料などの貴重な試料の付着力測定に向けて，塑性変形を起こさない試料の操作方法を検討する必要がある。

参考文献

- [1] Nakamura T. et al. (2022) *Science* **379**, 6634.
- [2] Nagaashi Y. et al. (2021) *Icarus* **360**, 114357.
- [3] Nagaashi Y. & Nakamura A. M. (2023) *Sci. Adv.* **9**, eadd3530.
- [4] Lam K. K. & Newton J. M. (1991) *Powder Technol.* **65**, 167–175.
- [5] Rumpf H. (1970) *Chem. Ing. Techn* **42**. 538–540.

はやぶさ 2 観測データを対象とした小天体観測 データ解析用 QGIS プラグインの開発

○市川真弓¹, 巽 瑛理², 平田 成³, 長井 雄一郎¹, 村上 真也¹, 佐藤 広幸¹, Hayabusa2 Open

Data Science Working Group

¹JAXA/ISAS, ²Instituto de Astrofisica de Canarias, ³会津大学

はやぶさ 2#国際ビジビリティ事業^[1]では、はやぶさ 2 観測データの利活用促進および利便性向上を目的として、GIS フォーマットによる高次プロダクトの開発・整備を進めてきた。本事業で開発したプロダクトは、汎用的な GIS ソフトウェアでの利用を想定している。しかし、既存の GIS ソフトは主に地球観測データを対象として設計されており、小天体データの解析・可視化にはいくつかの課題がある。例えば、幾何的には楕円体形状を前提としているため、小惑星リュウグウのような不規則形状天体への対応が十分ではない。また機能面でも、スペクトル解析といった惑星科学特有の処理が標準的には備わっていないほか、関連ツールとのデータ互換性が限定的である。

これらの課題に対し、QGIS^[2]のプラグイン機構を活用し、小天体データの取り扱いを容易にするための機能拡張を行った。これにより、はやぶさ 2 観測データの利活用を促進し、新たな科学的成果の創出につなげることを目的とした。

本取り組みでは、上記の課題に対応する全 16 種類のプラグインを開発した。主な機能は以下の通りである。(1) スペクトル解析機能：スペクトルの可視化、スペクトルスロープ計算、吸収量およびキंक位置の算出 (2) 3 次元モデルを用いた可視化・計測機能：3D ビュー表示、断面生成、距離・面積等の計測 (3) 他ツールとの連携機能：各種データフォーマットの相互変換 (4) 高度な可視化・解析機能：散布図表示、クラスタリング解析、主成分分析 (PCA)

これらの機能はいずれも GUI ベースで操作可能であり、GIS フォーマットのデータをそのまま入力として利用できる。このため、一連の解析作業を QGIS 上で完結できるとともに、プログラミングを必要とせず、迅速なデータ確認や解析フローの検討が可能となる。結果として、解析準備および実作業に要するコストの削減が期待される。さらに、GUI の整備により操作性が向上し、GIS やプログラミングに習熟していないユーザでも利用可能となることから、データ利活用の裾野拡大にも寄与する。今後は、開発したプラグイン群を統合的に利用可能なパッケージとして公開するための整備を進めるとともに、ワーキンググループでの共有や議論、解析ワークショップの開催等を通じたユーザ層拡大の方策について検討を進めていく。さらに、本プラグインは他の小天体・惑星データにも応用可能な設計としており、MMX や Hera といった他ミッションデータへの適用も視野に入れつつ、対象に応じた拡張・改修を行うことで適用範囲の拡大を図る。これにより、惑星科学分野におけるデータ利活用の一層の促進を目指す。

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。また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 PMXP0723830458 及び JPMXP0723830458 の助成を受けたものです。

References: [1] Hirabayashi, M. et al., 2021, Advances in Space Research 68, 1533–1555.

[2] QGIS Development Team. (2024). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.org>

DESTINY+ ミッションにおける小惑星 Phaethon の形状 復元手法の模擬データを用いた検討：初期報告 Shape Reconstruction Methods for Asteroid Phaethon in the DESTINY+ Mission Using Simulated Data: Preliminary Report

○平田成¹、黒岩和貴¹、諸田智克²、千秋博紀³、横田康弘⁴、

石橋高³、三浦昭⁵、吉田二美⁴、巽瑛里⁵、荒井朋子³

¹会津大学、²東京大学、²千葉工業大学、³東京科学大学、

⁴宇宙航空研究開発機構、⁵カナリア天体物理学研究所

深宇宙探査技術実証機 DESTINY+は、小惑星 Phaethon のフライバイ観測を行う計画である。著者らは、フライバイ観測時に取得される画像データを用いた、小惑星 Phaethon の形状復元手法の検討を進めている。DESTINY+には駆動鏡を用いた小惑星の追尾撮像が可能な、追尾望遠カメラ（Telescopic Camera for Phaethon, TCAP）が搭載され、フライバイの過程で小惑星の撮像を行う計画になっている。本検討のために、地上観測データに基づく小惑星 Phaethon の形状モデルをベースとして、詳細な地形特徴と、物質種や熱変性、宇宙風化度の地域差を考慮した地質特徴を加えた Phaethon の模擬モデル（模擬 Phaethon）を作成しようとしている。さらに、探査機の運用計画に沿って TCAP で模擬 Phaethon を撮影することを想定した模擬画像を作成し、TCAP 模擬画像を用いて、適切な形状復元の手法や、必要な画像の枚数などを検討している。本発表では、模擬 Phaethon に与える地形・地質特徴、探査機運用計画、画像自体や探査機位置・カメラ指向情報に載せる種々の誤差などの基本的な想定を説明するとともに、試作された模擬画像を用いた模擬 Phaethon の形状復元例やその初期的な評価結果についても紹介する。

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, 宮原剛², 太田方之², 須崎祐多², 細沼貴之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

2028 年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、地球周辺のダスト観測に加え、小惑星(3200) Phaethon およびその他の地球近傍小惑星のフライバイ探査を実施する。

2030 年に計画されている Phaethon のフライバイ観測の理学的目的は、宇宙から地球へ飛来するダストの実態と、その供給源である流星群母天体の性質を解明することにある。Phaethon は岩石質の地球近傍小惑星でありながら、三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、有機物を含むダストを地球へ供給している可能性がある興味深い天体である。これに先立ち、2029 年には小惑星(99942) Apophis のフライバイ観測も予定されている。Apophis は 2029 年 4 月に地球表面から約 32,500 km の距離を通過すると予測され、潜在的に危険な小惑星 (PHA) に分類されていることから、プラネタリーディフェンスの観点でも重要な探査対象である。

DESTINY+には、現在開発中の 2 台のカメラ、TCAP (Telescopic CAmera for Phaethon) および MCAP (Multiband CAmera for Phaethon) が搭載される。TCAP は視線方向を変更可能な駆動鏡を備え、フライバイ中も対象小惑星を継続的に追尾できる。TCAP による表層地形の詳細観測と、MCAP による表層物質分布の解析により、小惑星の特性、特に Phaethon のダスト放出機構に関する新たな知見が得られることが期待される。両カメラは 2027 年 1 月中旬に探査機システムへ合流する予定であり、現在、打ち上げモデルであるプロトフライトモデル (PFM) の製造および検証試験を進めている。

TCAP は、昨年の秋季講演会時点では、エンジニアリングモデル (EM) の検証試験で発生した複数の不具合への対策を進めていた。その後、問題を解決し、詳細設計審査 (CDR) を経て PFM の製造段階へ移行した。現在は組立が完了し、環境試験 (PFT) の準備中である。

MCAP は PFM の製造および PFT を完了している。熱真空試験後に放熱面の銀蒸着テフロンの一部で剥離が確認されたため、貼り直しを行った。最終性能検証試験を実施し、問題がなければ光学校正データの取得および隕石撮像試験を実施する予定である。

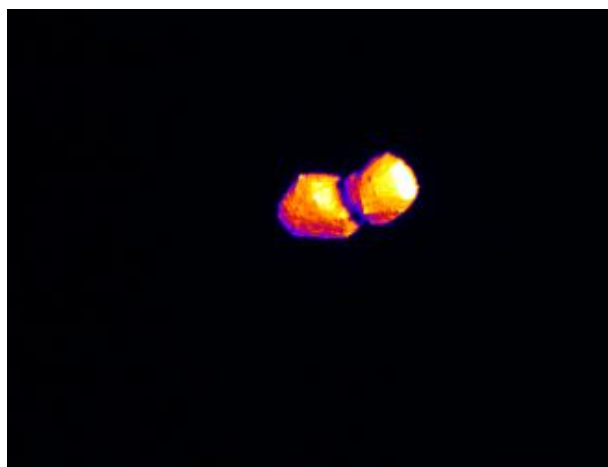
発表では、これら両カメラの最新の進捗状況を報告する。

はやぶさ 2 # TIR による小惑星 Torifune フライバイ観測結果

坂谷尚哉 (1)、岡田達明 (1)、千秋博紀 (2)、荒井武彦 (3)、関口朋彦 (4)、
石崎拓也 (1)、鳶生有理 (1)、出村裕英 (5)、金丸仁明 (5)、神山徹 (6)、
鎌田俊一 (7)、末次竜 (8)、湯本航生 (1)、横田康弘 (9)、山田学 (2)、北里宏平 (10)、
安部正真 (1)、岩城拓弥 (1)、藤原正寛 (1)、村上真也 (1)、平田成 (5)、
平林正稔 (11)、早川雅彦 (1)、田中智 (1)、三樹裕也 (1)

(1) 宇宙航空研究開発機構, (2) 千葉工業大学, (3) 前橋工科大学, (4) 北海道教育大学,
(5) 会津大学, (6) 産業技術総合研究所, (7) 北海道大学, (8) 大島商船高等専門学校,
(9) 東京科学大学, (10) 公立鳥取環境大学, (11) ジョージア工科大学

2014 年 12 月に打ち上げられたはやぶさ 2 は、2018 年 6 月の小惑星リュウグウ探査開始、
2020 年 12 月の地球へのサンプルリターンを完了し、拡張ミッション（はやぶさ 2 #）を開
始した。長い航行の期間を経て 2026 年 7 月 5 日、小惑星トリフネ (2001 CC21) のフライ
バイを実施した。搭載サイエンス機器の一つである中間赤外カメラ TIR は、フライバイ最
接近時刻の約 30 分前から撮像を開始し、徐々に撮像頻度を上げながら最接近時には 0.25
s に 1 回という頻度での撮像を行った。その結果、世界初の S 型小惑星の熱撮像を成し遂げ
ることができた。下の図は最接近予定時刻の約 2 秒前に撮像されたトリフネの熱赤外画像で
ある。本講演では、TIR の画像から分かる表面温度分布を元にして、小惑星トリフネの熱物
性を中心とした解析結果を報告する。



太陽系小天体の定義と種別名や用語の整理

Clarification of Definitions, Classifications, and Terminology for Small Solar System Bodies

○吉川真¹、吉田二美² (Makoto Yoshikawa¹, Fumi Yoshida²)

¹JAXA、²産業医科大学/千葉工業大学 (University of Occupational and Environmental Health, Japan/Chiba Institute of Technology)

小惑星や彗星の発見個数が非常に多くなってきた。2026年6月末の時点で、リストに掲載されている小惑星は約155万個、彗星は約4600個となっている（IAU Minor Planet Centerによる）。30年前（1996年）、小惑星の発見個数が約3万個であったので、50倍以上になった。このような状況の変化に伴って、小惑星や彗星などの太陽系小天体の種別の名称に混乱が見られるようになってきたので、ここでは問題点を整理した上で太陽系小天体の呼び方を再検討してみた。検討の方針は、(1)なるべく現在の名称を変更しない、(2)なるべく英語の名称と対応する、である。広く意見をお伺いしたい。

最初の問題点は、木星軌道から海王星軌道までの間に存在する小天体の名称が無いことである。太陽から木星軌道付近までに存在する小天体は小惑星（asteroid）であるし、海王星軌道の外側にある小天体は太陽系外縁天体（trans-Neptunian object）であるが、これらの間にある小天体の名称が無い。この領域にある小天体の名称として、たとえば「巨大惑星領域天体」はどうであろうか。ここに含まれる天体としては、ケンタウルス族および天王星や海王星のトロヤ群が挙げられる。

二つ目の問題点は、そもそも「太陽系小天体」の定義である。IAUが2006年に惑星の定義を定めたときに、“Small Solar-System Bodies”は、惑星、準惑星、衛星以外の太陽系天体であるとされた。つまり、“Small Solar-System Bodies”には準惑星は含まれない。“Small Solar-System Bodies”を日本語で「太陽系小天体」と訳したときに、準惑星を含まないということにするとかなり不便になるし、直感的に分かりにくい。日本語で「太陽系小天体」と言うときには、準惑星も含めるのがよいのではないか。

三つ目の問題点は、「族」、「群」、「型」という言葉の使い方である。上記の「ケンタウルス族」もそうなのであるが、本来の意味をきちんと理解せずに使われる傾向がある。本来の意味であるが、「族（family）」は以前は一つの天体だったものが分裂したと考えられるもの、「群（group）」は平均運動共鳴にあり文字通り群れをなして動いているように見えるもの、そして「型（type）」は軌道要素やスペクトル型など何かの特徴に注目した分類である。

以上の三点について、議論を進めて行き、太陽系小天体の種別名について整理していきたい。

シリカガラス中の水の拡散メカニズム

○中島穂乃花, 樋口光, 深澤倫子

¹ 明治大学大学院理工学研究科

【緒言】

水は、太陽系における惑星分化や、マグマ活動を支配する重要な揮発性成分である。近年では、かつて無水と考えられていた月や多くの小惑星においても、鉱物中にヒドロキシ基や水分子が存在することが明らかになり、注目されている。また、小天体内部でも水質変性によって蛇紋石やス멕タイトなどの含水層状ケイ酸塩鉱物が形成されたと考えられている [1]。したがって、ケイ酸塩鉱物中の水の存在量や移動挙動を理解することは、宇宙空間における鉱物進化のメカニズムを解明する上で極めて重要である。特に、初期地球や微惑星内部のケイ酸塩鉱物は、放射性元素の崩壊熱に伴う 1200–1500 K 程度までの加熱に起因した熱変性や部分融解が進行したと考えられているため、この温度領域における水の挙動を理解することが重要である [2]。主要なケイ酸塩鉱物の一つであるシリカガラスについては、923–1123 K では水分子の自由拡散が支配的であることが報告されている [3]。また、1400 K 以上の高温領域では Si–O 結合の緩和に伴うネットワーク構造の変化が明らかになっているが [4]、その構造変化が水の挙動におよぼす影響については報告例がない。そこで本研究では、シリカガラス中の水の拡散メカニズムを解明することを目的として、シリカガラス–水共存系の分子動力学 (MD) 計算を実施した。

【計算方法】

MD 計算は LAMMPS プログラムにより、ReaxFF ポテンシャルを用いて行った。バルク状態のシリカガラス相と水相を真空中に共存させた系を初期構造として、0.1 MPa の圧力条件下で、系の温度を 1200–1500 K の範囲で変化させて、各温度で 300 ps 間の NTP アンサンブルによる計算を行った。この計算結果を基に、シリカガラスへの水の侵入および拡散機構を解析した。

【結果と考察】

計算の結果、全ての温度でシリカガラス内部への水の侵入および拡散が観測された。本研究では、シリカガラス中の水の拡散機構を (i) 水分子として空隙を移動する機構と、(ii) シラノール (SiOH) 基、水分子、 H_3O^+ の O–H 結合の切断・再形成に伴うプロトン (H^+) ホッピングの二種類に分類して、溶存量と拡散係数の解析を行った。各拡散種の溶存量の経時変化を解析した結果、溶存量は時間とともに増加し、約 50–100 ps 以降はほぼ一定になった。そこで、200–300 ps 間の溶存量の平均値により各温度の含水率を算出した。この結果、含水率は温度に対する相関は低い一方で、シリカガラスの空隙率に依存する傾向が得られた。各拡散種とシリカネットワーク構造を解析した結果、水の侵入は水–シリカガラス界面の空隙構造に支配されており、空隙が水分子の浸入可能なサイズまで拡大すると水分子が内部へ浸入し、その後 SiOH 基を生成することが確認された。さらに、SiOH 基生成に起因する局所構造の変化がネットワーク全体の空隙サイズを変化させるため、その空隙サイズにより次に侵入する水分子の量が制御されることが分かった。また、各拡散種の拡散係数を算出した結果、含水率と同様に温度に対しての相関が低く、含水率および空隙率に依存することが明らかになった。以上の結果より、シリカガラスにおける水分子の拡散およびプロトンホッピングは、温度よりも局所構造に支配される空隙構造の影響を強く受けることが示唆された。

参考文献

- [1] Martin R. Lee *et. al.*, *Space Science Reviews*, **221** (2025): 11.
- [2] Harry Y. McSween Jr. *et. al.*, *Asteroids III*, **559** (2002) 559–572.
- [3] M. Kuroda *et. al.*, *Am. Mineral.* **103** (2018) 412–417.
- [4] A. Takada *et. al.*, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **345&346** (2004) 224–229.

還元的大気をもつ地球類似惑星におけるメタンバイオシグネチャー評価：CO/CH₄ 比と温室効果フィードバックの検討

○木村友哉¹，遠藤美朗²，渡辺泰士³，尾崎和海¹

¹ 所東京科学大学，² 東北大学，³ 国立環境研究所

メタン（CH₄）は、嫌気性微生物によって生成されることから、還元的大気をもつ地球類似惑星における有望なバイオシグネチャー候補である。一方で、CH₄ は火成活動や水-岩石反応などの非生物的過程によっても生成されるため、CH₄ 単独では生命の存否を判断することはできない。そのため、CH₄ に加えて一酸化炭素（CO）などの共存気体の存在量や軌道長半径、中心星スペクトルを考慮した総合的な評価が必要である。また、CH₄ は強い温室効果気体でもあり、高濃度に存在する場合には気候状態を変化させ、ハビタビリティにも影響を及ぼす可能性がある。

Endo et al. (2026) は、脱ガス、炭素循環、気候、大気光化学を結合したモデルを用いて、無生物条件における地球類似惑星の大気組成を系統的に調べた。このモデルでは大気中 CH₄ 濃度が低い（< 10 ppmv）ため、CH₄ の温室効果は考慮されていない。一方、嫌気性微生物生態系が存在する場合には、メタン生成古細菌の活動により CH₄ 濃度が 1000 ppmv を超える条件が存在すると考えられており（e.g., Kharecha et al., 2005; Ozaki et al., 2018; Akahori et al., 2024）、そのような条件では CH₄ による温室効果が無視できない可能性がある。そこで本研究では、Endo et al. (2026) の枠組みを拡張し、嫌気性微生物生態系を考慮するとともに、CH₄ の温室効果を気候-炭素循環計算へフィードバックさせた大気光化学計算の反復計算によって大気組成と気候状態を自己整合的に求めるモデルを構築した。

構築したモデルを用いて、軌道長半径、脱ガス強度、中心星スペクトル（F 型星、G 型星、K 型星）、および生態系構造（無生物条件と化学合成細菌生態系）を変化させた数値実験を行った。その結果、化学合成細菌生態系を考慮した条件では、微生物による CH₄ 生成に加え、大気化学反応ネットワークの非線形応答によって CH₄ 濃度がさらに増幅され、広い軌道範囲で無生物条件より高濃度となった。この傾向は紫外線が弱く CH₄ の光分解が抑制される K 型星周りで特に顕著であった。一方、CO については、生物条件では微生物による CO 消費によって無生物条件と比べて大気中濃度が低下した。その結果、生物条件では高い CH₄ 濃度と低い CO/CH₄ 比が特徴的に現れることから、CO/CH₄ 比を用いることで、生物活動を伴う大気と非生物的に形成された大気を識別できる可能性が示された。

また、初期地球の典型的な条件について CH₄ 温室効果を気候計算へフィードバックした数値実験を行った結果、CH₄ による昇温は化学風化の促進を通じた CO₂ 低下によって部分的に打ち消され、表面温度や大気組成への影響は限定的であった。したがって、CH₄ 温室効果を自己整合的に考慮した場合でも、生物活動による高 CH₄・低 CO/CH₄ 比という特徴は維持されることが分かった。

以上より、本研究では CH₄ 温室効果フィードバックを含む自己整合的な大気-気候-生態系結合モデルを構築し、その影響を初めて評価した。その結果、本研究の条件では CH₄ 温室効果フィードバックはメタンバイオシグネチャーの解釈を大きく変えず、CO/CH₄ 比は還元的大気をもつ地球類似惑星における有望なメタンバイオシグネチャー指標となる可能性が示された。本研究は、将来の地球型系外惑星大気観測において、CH₄、CO、CO₂、H₂O と軌道長半径・中心星スペクトルを組み合わせた生命探査指標の構築に向けた基礎的知見を提供する。

Habitable Worlds Observatory (HWO): 概要および日本の参画の準備状況

Habitable Worlds Observatory (HWO): Overview and Preparatory Activities for Japan's participation

Habitable Worlds Observatory (HWO)は、米国のディケーダルサーベイ (Astro2020) の提言を受け、NASA がジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡、ローマン宇宙望遠鏡に続く旗艦宇宙望遠鏡として、紫外線から近赤外線にわたる波長域で観測を行う口径 6 m 級の宇宙望遠鏡を 2040 年代に実現しようとする超大型計画である。

HWO には太陽型星を周回する地球型惑星の直接撮像サーベイを行い、さらに分光観測によってその大気や表面の特徴を調べて生命の兆候を探索するコロナグラフ装置や、高解像度撮像装置、紫外線多天体分光器、紫外線面分光器等が搭載される予定である。HWO に対する日本からの寄与としては、コロナグラフ装置および紫外線観測装置の開発への参画、そして科学研究への参画が検討されている。

日本側に関わる programmatic な動きとしては、まず、2025 年 7 月に米国で設立された「HWO Community Science Instrument Team (CSIT)」に対し、NASA からの要請を受け、JAXA からの推薦を経て日本から 1 名のメンバーが選出され、現在、活動を行っている。

NASA からは近い内に装置検討に関する AO が出る予定である。これは米国国内の NASA、大学、研究機関等に対する AO であるため、日本が単独で応募するものではないが、提案チームは国際協力も含めた計画を提案することが求められる見込みである。この AO に関しては 2026 年 5 月 4-5 日にワシントン DC でワークショップも開催された。日本側はこの AO による検討にどう関わるか、検討・準備中である。

また、2024 年 12 月に宇宙研に設置されたタスクフォースを、所内検討チームへとアップグレードするための活動も進められている。

講演では HWO の全体概要（科学目標、観測装置、スケジュールや米国・NASA 側の状況等）および日本の参画の準備状況について示す。

戦略的火星着陸探査 Step1 ミッションへの搭載に向けた短周期地震計の開発状況 (2025-2026)

小野寺 圭祐¹, 白石 浩章², 川村太一³, 山田竜平⁴, 西川泰弘⁵, 田中智²

¹岡山大学惑星物質研究所, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³パリシテ大学パリ地球物理研究所, ⁴会津大学, ⁵大阪教育大学

現在、JAXA では 2030 年代に段階的に火星着陸探査を実施することを計画している。これは戦略的火星着陸探査と呼称されており、三段階に分けて火星への着陸技術の獲得と科学探査を行う予定である。最初のミッションである Step1 は 2030 年頃の実施を見据えており、エアロシェルを搭載したペネトレータによる火星表層へのハードランディングならびに科学観測を実施する。

我々は、LUNAR-A 計画ならびに Dragonfly 計画で培われてきた技術を基盤として、Step1 への搭載を想定した短周期地震計の開発を進めている。火星用短周期地震計は 1Hz 計として製造予定であり、Dragonfly 用地震計(図 1a : DraGMet SEIS)よりも低周波側で高い感度を示す特性となっている。我々の地震計は、既に耐衝撃性や極低温環境への耐性を有しており、今回の開発では、0.3Hz 以上において既存の惑星探査用短周期地震計を上回る感度の実現を目標としている(図 1a)。現在、当地震計は JAXA の技術のフロントローディングの枠組みで開発が進められており、令和 8 年度中に試作機が複数台完成する見込みである。

以上に加え、実際の搭載状況を想定した形で、今秋にペネトレータに受動ジンバル付き地震計を搭載した形でのフィールド試験を実施する(図 1b)。なお、当試験では、観測のシナジーが高いとされるインフラサウンドセンサーもペネトレータテール部に設置し、同時観測を行う計画である。試験の検証事項として、(a)ペネトレータ構体内と地表設置下での環境ノイズの違いの評価、(b)単点での地震・インフラサウンドの同時観測データに基づく地下構造推定の実証、(c)複数点同時観測による地震波干渉法の実証の三つを計画しており、火星での具体的な観測運用の検討に資するデータの取得を目指す。本講演では、2025-2026 年の開発状況およびフィールド試験で得られた初期成果について報告する。

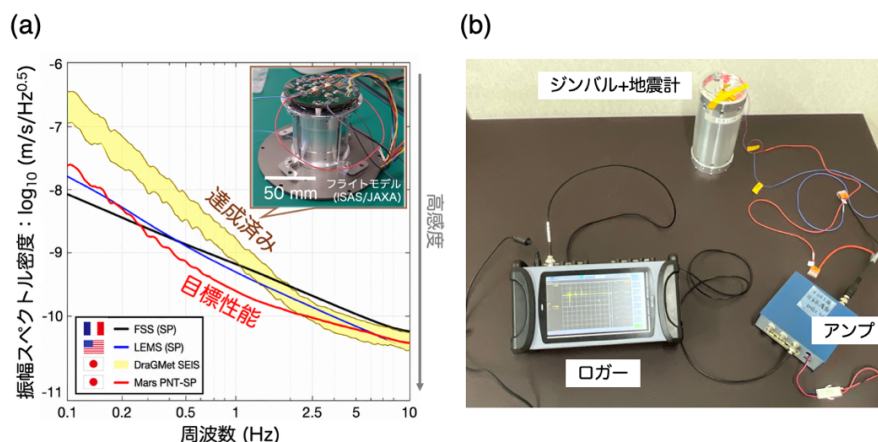


図 1. (a) 惑星探査用短周期地震計の特性比較. Dragonfly 用地震計では 3Hz 弱の固有周波数であったが、火星用地震計では 1Hz に固有周波数を変更し、低周波側でも高感度を実現する. (b) ペネトレータ搭載の受動ジンバル付地震計の動作チェックの様子.

月面天文台 TSUKUYOMI の観測計画と要素技術開発

Observation Plan and Elemental Technology Development of Lunar Observatory - TSUKUYOMI

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

Takahiro Iwata¹, Fuminori Tsuchiya², Toru Yamada¹, Naoki Isobe¹, Yasuyuki Miyazaki¹, Naoto Usami¹, Yutaro Sekimoto¹, Satoru Iguchi³, Yasumasa Yamasaki³, Kazunori Kohri³, Toshikazu Onishi⁴, Takeru Matsumoto⁴, Daisuke Yamauchi⁵, Keitaro Takahashi⁶, and Sho Kajihara⁷.

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. Okayama University of Science, 6. Kumamoto University, 7. Meiji University.

月面は天文台の建設には厳しい環境であるが、地球方向が遮蔽される地点は、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、我々は月面電波干渉計 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、この電波のグローバルシグナル (空間的な平均温度) を、目標感度 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、太陽系科学への寄与も目指す。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。さらに、主星の電波バーストの観測を通じて、系外惑星系のハビタブル環境の理解にもつなげる。一方で、干渉計データの解析に必要な校正データの蓄積は、各アンテナサイトにおける月の電離層・荷電粒子降着などの環境計測の長期モニタリングや、地下の不連続面からの反射波による干渉を利用した月の地下構造の解明も期待される。

2020 年代の打ち上げを目指す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 LOPTA: Lunar Observatory Proto-Type Antenna 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、月面ランダ、小型ローバ、有人と圧ローバへの搭載を想定したアンテナユニットの設計、ならびに伸展式アンテナ機構およびプリアンプの開発、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)。とりわけ本システムは広波長帯域に対応する必要性からアンテナ利得における制約が生じることから、プリアンプの目標感度を $2nV\sqrt{Hz}$ に設定した低雑音化を目指している。

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.

将来月面探査でのその場観測に向けた 氷混合模擬レゴリスの可視赤外スペクトル分析

○丹秀也¹, 長岡央¹, 仲内悠祐¹, 佐伯和人¹

¹立命館大学 ESEC

有人探査などによる将来の月面探査では、その場分析により、マクロからミクロまでの様々な空間スケールで月面物質の種類や存在量の制約をすることが期待されている。月面に存在する物質の中でも、チタン鉄鉱などの一部の金属に富んだ鉱物や水の氷は、科学的・資源的に重要な対象として注目されており、可視赤外域でのリモートセンシング観測によって調べられてきた。これらの光学スペクトルの形状や吸収深さは、周囲を構成するレゴリス粒子の鉱物組成や粒径に大きく依存することが知られている。このため、その検出や定量はローカルな地質条件や物理的状态の影響を受けうる。

本研究では、組成および粒径を制御した模擬レゴリス試料に氷やチタン鉄鉱を混合し、可視赤外スペクトルを測定する。これにより、将来の探査での活用を目的とした定量キャリブレーションデータを取得する。模擬レゴリスは、地球上で採取されたかんらん石、斜長石、輝石を粉砕後、月面で確認されている 100 μm 程度の粒径に制御し、これらの混合率を調整することで作製した。一方で、氷が月面レゴリス中にどのような形態で存在しているかは未だ明らかではない。また、その物理的な状態や粒径によってスペクトル形状や吸収深さが変化する可能性がある。先行研究 [1, 2] では、氷を昇華雰囲気中からレゴリス粒子表面に凝華させることで混合していた。これにより生成される氷は、レゴリスよりも小さい 10 μm 程度の微粒子であった。これに対し、本研究では水を液体窒素中に噴霧して氷粒子を作製し、ふるい分けによって粒径を制御した後にレゴリスと混合させる手法をとった。

予察的な実験としてレゴリスと同程度の 100 μm の氷粒子を作製した。この氷粒子を斜長石レゴリス、斜長石とかんらん石の混合レゴリスにそれぞれ含ませ、可視赤外スペクトルを測定した。その結果、氷に由来する 1.5 μm 付近の吸収帯が、レゴリス組成によらずほぼ同程度の吸収深さで確認された。先行研究の 10 μm の氷粒子をレゴリスに凝華させる実験では、斜長石など近赤外での吸収に乏しい鉱物から成るレゴリスは氷による吸収に大きく影響しない一方で、かんらん石などの近赤外域で吸収を示す鉱物のレゴリスはこれを抑制することが示されていた [2]。これはレゴリス粒子間に存在する微小の氷粒子による吸収が、レゴリス構成粒子に遮蔽されるか否かの違いによると解釈されていた。本研究の結果は、氷粒子がレゴリスと同程度の大きさで存在する場合には、先行研究で想定されたような粒子間を埋める微小の氷粒子が生成されず、そのためレゴリス粒子による遮蔽の効果が顕著に現れなかった可能性を示唆する。ただし低温の試料表面に微小な霜粒子が付着し、レゴリスや氷粒子の表面が被覆された可能性も否定できないため、実験系を改良し、氷の状態によるスペクトルへの影響をより正確に検証した場合の結果も報告する。

[1] Ogishima & Saiki (2021) *Icarus*, 357, 114273.

[2] Araki & Saiki (2025) *Geochemical Journal*, 59, 174.

The Comet Interceptor mission: endgame of the flight model development

*Satoshi Kasahara¹, Kazuo Yoshioka¹, Naoya Sakatani², Shingo Kameda³, Ayako Matsuoka⁴, Hideyo Kawakita⁵, Seiji Sugita¹, Takahiro Sasaki², Naoto Usami², Shintaro Nakajima², Taichi Ito², Ryu Funase²

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 from ground-based observatories have characterized various comets, while in-situ observations by spacecraft have provided much more detailed information on several comets. However, direct observations by spacecraft flybys or rendezvous have been limited to short-period comets, which have neared the Sun many times in the past and thus have lost some (or even most) of their primitive characteristics. The Comet Interceptor mission, led by ESA, aims to encounter a long-period comet or an interstellar object for the first time. JAXA will provide an ultra-small (35 kg) daughter spacecraft (probe B1), whose closest approach will be less than 1,000 km, enabling the first-ever multi-spacecraft flyby observations of a comet. Here we report our recent progress in developing the B1 flight model, including three payloads (Narrow-/Wide-angle cameras, Hydrogen imager, and Plasma suite).

将来の火星探査ミッションに向けた検討 - ISAS 惑星探査ワークショップおよび惑星圏シンポジウムにおける議論から

○堺正太郎¹、野口里奈²、木村駿太³、小池みずほ⁴、益永圭⁵、鎌田有紘⁶、永田靖典⁷、
菅原春菜³、中川広務⁸、関根康人⁶、臼井寛裕³

¹慶應義塾大学、²新潟大学、³JAXA 宇宙科学研究所、⁴広島大学、⁵山形大学、

⁶東京科学大学・地球生命研究所、⁷東京科学大学、⁸東北大学

火星スプリンターセッションは 2020 年以降、年 2 回、ISAS 惑星探査ワークショップ（ISAS PEWS）および東北大学で開催される惑星圏シンポジウムにおいて継続的に開催されている。ISAS PEWS はもともと、将来の探査ミッションに向けた ISAS ワーキンググループやリサーチグループの立ち上げを促進する場として設立され、その取り組みの一環として火星スプリンターミーティングが発足した。本スプリンターセッションは、火星研究を専門とする若手研究者が中心となって運営しており、JAXA の火星探査ロードマップに沿った戦略的な議論を行うためのプラットフォームとして発展してきた。発足当初は、将来の火星探査ミッションにおける科学目標を明確化するとともに、それを達成するために必要な観測・計測手法や探査候補地点について議論を行った。その結果、大気・氷圏・岩石圏相互作用、大気-宇宙空間相互作用、生命・有機地球化学、地下科学の 4 つを主要な科学テーマとして整理し、それぞれに対応する探査手法や探査地点についても詳細な検討を進めた。その後、火星探査計画を取り巻く状況の急速な変化を受け、セッションで扱われる議論もそれに応じて発展してきた。2022 年以降は、特に 3STEP 火星着陸探査プログラムを見据え、上記 4 つの科学テーマとの整合性を考慮した着陸候補地点の選定に重点を置いた議論が行われている。近年では、JAXA が発行した「日本の国際宇宙探査シナリオ案 2025」で示されたミッション案についても活発な議論が行われている。本発表では、これまで 12 回開催された火星スプリンターセッションにおける議論の経緯を概観するとともに、その主要な成果と今後の展望について紹介する。

将来のリターンサンプルの固体物性の体系的分析のための
 惑星物質固体物性コンソーシアムの推進
 – XeプラズマFIBによる脆弱隕石試料の加工実証 –
Astromaterial Physical Properties Measurement Consortium
for Future Returned Samples
 – Demonstration of Processing Fragile Meteorite Samples Using Xe Plasma FIB –

○石崎拓也¹, 小野寺圭祐², 佐藤雅彦³, 榎戸祐馬¹, 金丸礼¹, 黒崎健二⁴, 荒川創太⁵, 田中智¹
¹宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ²岡山大学 惑星物質研究所, ³東京理科大学 理学部第一部, ⁴防衛大学校 応用科学群, ⁵海洋研究開発機構 情報地球科学研究部門

惑星物質の固体物性はその物質が天体上で経験した熱作用や衝突現象などの物質の反応・進化過程を支配するパラメータであり、天体の形成過程や進化環境を推定するのに不可欠である。そして固体物性は物質の元素存在度や鉱物組成だけでなく、空隙率やクラック分布などの物体内部の機械的特性、さらに水分の吸着量などの環境に由来する状態量に至るまで様々な要因に依存して値が変化する。したがって、固体物性は化学組成や岩石学的分類による類推ではなく、対象試料の個体と関連づけた実測値を取得することが重要であり、また同一試料個体を対象にした体系的な物性項目の分析が重要である。はやぶさ 2 ミッションでは小惑星リュウグウからのリターンサンプルについて、国内の大学・研究機関の研究者からなる臨時の固体物性初期分析チームが結成され固体物性の体系的な分析が行われた。これはこれまで前例のなかった地球外物質の固体物性に関する大規模な体系的分析の初の試みであり、この成果がミッションの重要な科学的成果につながった。また、本実績を通してリターンサンプルの固体物性を体系的に分析し、得られる科学的価値を最大化するために取り組むべき課題も可視化された。具体的には、より試料への汚染や破壊の影響が少ない条件で測定するために必要な技術の開発、要求される物性の分析項目や分析に必要な数量や形状などの条件の整理、各分析が試料に与える影響とそれを考慮した分析フローの整備などである。そこで我々はこれらの課題に取り組み、将来のリターンサンプルの固体物性から得られる科学的価値を最大化するために惑星物質固体物性コンソーシアムを 2025 年に発足した。主な活動内容は、体系的分析のための組織体制の整備と、測定技術の研究開発、分析体系の確立である。

リターンサンプルの固体物性を取得する目的は、天体スケールのシミュレーションへの適用や、リモートセンシングで取得したデータとの比較にあるが、天体スケールの物理進化過程を、固体物性を用いて議論する際に考慮する必要がある場合があるものの一つに物性の異方性がある。例えば帯磁率、弾性波速度、熱伝導率などの異方性データから、天体内部の流動、天体表層構造の強度、熱伝導の異方性といったダイナミクスを復元できる可能性があり、形成過程を議論する上でより詳細な描像を提供できる。そこで我々は、固体物性のスカラー値だけでなく異方性も評価できる手法の開発に取り組んでいる。分析する固体物性値の中で特に、弾性波速度は二つのトランスデューサに試料を挟み込んで測定するため、三軸方向の異方性を評価する場合は試料を立方体状に成形する必要がある。しかし、天体の表層から採取したリターンサンプルは力学強度が低い場合も多く、一方で浸透・残留して力学的強度を変化させてしまう可能性のある研削用の潤滑剤を使用できないため、加工時に破損するリスクが高い。例えば、リュウグウ試料の初期分析では、研磨面の研削加工にエタノールを潤滑剤として用いた結果、試料が崩壊してしまった事例が報告されている (Nakamura et al., Science, 2022)。そこで、力学強度の低い物質をより安全に高精度で加工する方法として集束イオンビーム (FIB) を用いることを試みた。そして全長約 3 mm のタギッシュレイク隕石試料に対して、一般的なガリウムイオン源より照射エネルギー大きいキセノンプラズマ (Xe-p) FIB を用いた結果、4 日間の装置稼働で $1 \times 1 \times 0.4$ mm の直方体を切り出すことに成功した。本発表はその結果について報告する。

謝辞：加工実験には中村智樹教授、松本恵助教 (東北大学) より東北大学コアファシリティセンターの Xe-pFIB を使用させていただいた。また、サンプル加工実験で使用したタギッシュレイク隕石は中村昭子教授 (神戸大学) より提供いただいた。ここに感謝の意を表する。

はやぶさ 2 科学データアーカイブの現状と今後の計画

Status and Future Plans of the Hayabusa2 Science Data Archive

○村上真也¹, 山本幸生¹, クロンビィ・ケイト², 石原吉明¹, 長井雄一郎¹, 巽瑛理³, 市川真弓¹, 佐藤広幸¹, 石崎拓也¹, 岩城拓弥¹, 鎌田俊一⁴, 北里宏平⁵, 神山徹⁶, 坂谷尚哉¹, 末次竜⁷, 千秋博紀⁸, 田中智¹, 早川雅彦¹, 平田成⁹, 平林正稔¹⁰, 藤原正寛¹, 三樹裕也¹, 湯本航生¹, 横田康弘¹¹
¹JAXA, ²Indigo Information Services, ³カナリア天体物理学研究所, ⁴北海道大, ⁵公立鳥取環境大, ⁶産総研, ⁷大島商船高等専門学校, ⁸千葉工大, ⁹会津大, ¹⁰ジョージア工科大, ¹¹東京科学大

はやぶさ 2 ミッションで取得された科学データを現在および将来にわたりコミュニティに提供するため、科学データアーカイブを整備・公開を進めてきた。本発表ではこれまでに整備されたアーカイブの概要を紹介するとともに、現在進行中の取り組みおよびトリフネフライバイデータを含む拡張ミッションのアーカイブ計画について報告する。

本アーカイブは、惑星探査データの長期保存と利活用を目的として NASA Planetary Data System (PDS)により策定された PDS4 に準拠している。

これまでにリュウグウ近傍フェーズまでに取得された主要機器データのアーカイブはほぼ完了している。これらは全て PDS が実施するレビューをパスしており、PDS Small Bodies Node, NAIF Node 及び JAXA 宇宙研の DARTS <https://darts.isas.jaxa.jp/missions/hayabusa2/> から公開されている。

現在はリュウグウ近傍フェーズより後に取得されたデータ、形状モデル、電波科学データ、DCAM3 や MINERVA-II のデータについて、各チームと連携しつつ整備を進めている。

また、さらなる高次プロダクトについても作成を進めている。全データは原則として PDS4 準拠形式での提供を基本としつつ、高次プロダクトについてはユーザー利便性向上のため非準拠フォーマットも併せて提供している。例えば NIRS3 L2d データは、PDS4 準拠の FITS 形式に加え、GeoPackage 形式でも提供している。ONC のモザイク画像についても、PDS4 準拠 GeoTIFF に加え、Cloud Optimized GeoTIFF での提供を予定している。

PDS4 では、ラベルによりメタデータおよびデータ構造を記述する。ラベルは検索システムに登録され、ユーザーによるデータ検索に利用される。また、ラベルに記述されたデータ構造により、特定のソフトウェアに依存しないデータ利用が可能となる。一方で、PDS4 標準で規定されるデータ形式は配列やテーブルなどの基本的な構造に限定されており、必ずしもユーザーにとって利便性の高い形式とは限らない。例えば、GIS で広く用いられる Cloud Optimized GeoTIFF や GeoPackage などの複雑なデータ形式は PDS4 標準には適合しない。

このような形式に対応するため、PDS4 ではデータ構造を含まずメタデータのみを記述した External Product の概念が導入されている。これにより非準拠データであっても検索システムへの登録を可能にする。これにより、NASA PDS が開発する PDS Search API や JLPEDA で検討中の検索システムにおいて、ユーザーが効率的にデータへアクセスできる環境を構築できる。

拡張ミッションのアーカイブについても検討を進めている。これまでにトリフネフライバイデータを含むアーカイブ構成について PDS および各機器チームと議論を重ねてきた。現在、データプロダクト一覧の整理に加え、データセット構成および作業スケジュールの策定を進めており、これらの検討状況についても報告する。

イジェクタカーテン粒子の放出角度解析に基づくはやぶさ 2 の サンプラーホーン内粒子挙動と採集効率の評価

○坂田大典¹, 北和真², 高田智史¹

¹東京農工大学 機械システム工学専攻 ²東京農工大学 産業技術専攻

小惑星サンプルリターンは、太陽系形成過程や惑星進化の解明に重要な役割を果たしている。JAXA の小惑星探査機「はやぶさ」および「はやぶさ 2」では、サンプラーホーン内部から弾丸を発射し、天体表層物質を放出させて採集する方式のサンプラーが採用された。弾丸が天体表層と衝突した際に「イジェクタカーテン」と呼ばれる表面物質が飛散してできる逆円錐状の構造が形成される。このイジェクタカーテンは、衝突によって放出された粒子の速度や飛散方向などの情報を含んでおり、天体表層の状態を反映する重要な現象である。イジェクタカーテンおよびイジェクタ粒子の衝突を観察することで、天体表層の物理的性質や内部構造の理解、将来のサンプルリターンミッションにおける機器開発への貢献ができると考える。

本研究では、微小重力条件下におけるレゴリス模擬粒子層への弾丸衝突シミュレーションを実施してイジェクタカーテンの形成を試みた。また、はやぶさ 2 のサンプラーホーンをモデルとしたイジェクタカーテン粒子とホーンの衝突シミュレーションを実施した。シミュレーションにおけるレゴリス模擬粒子については、球形粒子サンプル、球形粒子を複数組み合わせた非球形サンプルを用いた。数値計算には離散要素法 (Discrete Element Method; DEM) を用い、オープンソースシミュレーションソフトである LAMMPS を使用した。また、粒子間接触モデルとして Hertz-Mindlin モデルを採用し、粒子同士の接触に伴う弾性力、散逸力および摩擦力を考慮した。時間積分には速度 Verlet 法を適用し、粒子の位置、速度などを時間発展させた。

シミュレーションの結果、逆円錐状のイジェクタカーテンの形成が確認できた。本発表では、イジェクタ粒子の角度分布、サンプラーによる採集可否に基づいた粒子-ホーンの衝突挙動等について詳しく報告する。

プラネタリーディフェンスにおける次世代小天体 サンプルリターン探査計画の役割

○ 鳶生有理¹, 黒川宏之², 坂谷尚哉¹, 深井稜汰¹, 岡田達明¹,

高尾勇輝³, 菊地翔太⁴, 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 横浜国立大学, ⁴ 国立天文台

地球接近天体への次世代小天体サンプルリターン探査 (NGSR) とプラネタリーディフェンスへの貢献

プラネタリーディフェンス (Planetary Defense) は、小惑星・彗星などの地球接近天体 (NEO) による地球衝突リスクの評価と低減を目的とした国際的活動である。近年、国連の枠組みの下で国際小惑星警報ネットワーク (IAWN) および宇宙ミッション計画諮問グループ (SMPAG) が整備され、NEO の発見・監視から衝突回避策の検討までを国際協力により進める体制が構築されている。また、NASA の DART ミッションによる世界初の小惑星軌道変更実証や、ESA の Hera ミッションによる追跡調査、さらには NEO Surveyor など次世代サーベイ計画によって、プラネタリーディフェンスは観測科学から実践的なリスク低減技術の段階へと進展している。

我が国は、はやぶさ、はやぶさ 2 により小惑星への往復探査と試料回収を世界で初めて成功させ、さらに火星衛星探査計画 MMX を推進している。また、はやぶさ 2 拡張ミッションは小惑星の極近傍をフライバイ観測することに成功した。これらの実績は、小天体への接近・ランデブー・表面探査・サンプルリターン・フライバイに関する世界最高水準の技術基盤を形成しており、国際的なプラネタリーディフェンス活動においても日本に大きな役割が期待されている。

次世代小天体サンプルリターン (Next Generation small-body Sample Return: NGSR) は、はやぶさ、はやぶさ 2、MMX と続く日本の小天体探査をさらに発展させ、火星軌道以遠の原始的な小天体から試料を地球へ持ち帰ることにより、太陽系創生・進化過程の解明を目指す探査計画である。NGSR が取得する科学・工学的知見は、プラネタリーディフェンスに対しても重要な貢献をもたらす。小天体の内部構造、空隙率、力学特性、揮発性成分分布などは、将来の軌道変更ミッションの効果を左右する基礎情報である。本講演では、NGSR 計画の最新検討状況を紹介するとともに、国際的なプラネタリーディフェンス活動における日本の役割と、NGSR が果たし得る科学的・技術的貢献について概説する。

地上試験データを用いた熱赤外カメラTIR校正係数決定における 単回帰分析と重回帰分析の比較検討

賀数健吾(1), 出村裕英(1), 荒井武彦(2)

(1)会津大学, (2)前橋工科大学

非冷却マイクロボロメータ型熱赤外カメラでは、画素ごとの固定パターンノイズに加え、検出器や筐体の温度変化に伴う熱ドリフトが観測DN値へ混入する。本研究では、はやぶさ2 TIRの地上試験黒体データを用い、対象温度のみを説明変数とする校正(単回帰)と、複数の機器温度を同時に扱う多変量内部熱状態モデルを用いた補正(重回帰)を比較した。

はじめに、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ および $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ の黒体画像を基準とする二点NUCを適用した。次に、パッケージ温度、ケース温度、シャッター温度を状態ベクトル

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} T_{\text{pkg},k} \\ T_{\text{case},k} \\ T_{\text{shut},k} \end{bmatrix}$$

として定義した。内部熱状態の時間変化は、機器温度間の相互作用とヒーター温度の影響を同時に扱う多変量モデル

$$\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k = \Delta t_k (\mathbf{A}_g \mathbf{x}_k + \mathbf{b}_{h,g} T_{h,k+1} + \mathbf{c}_g)$$

で表した。ここで、 $\mathbf{A}_g$ は各機器温度間の熱結合、 $\mathbf{b}_{h,g}$ はヒーター温度の影響、 $\mathbf{c}_g$ はペルチェ条件ごとの定常的影響を表す。学習期間で各係数を推定し、未知期間では予測した状態を次時刻の入力とする再帰予測を行った。

二点NUCにより空間的な画素間ばらつきは低減したが、画像平均の時間変動は残存した。多変量内部熱状態モデルでは、パッケージ温度およびケース温度をRMSE $0.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 未満で予測できた。また、予測温度を用いた残差補正により、温度変換RMSEは $37.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $25.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ へ低下した。今後は、対象放射に依存する基準校正誤差と内部熱状態に依存する熱ドリフトを分離し、対象温度変換へ統合する。

謝辞：本研究の遂行にあたり、有益なご助言をいただいたTIRサイエンスチームの方々に深く感謝申し上げます。また、TIR地上試験データの取得および整備にご尽力いただいた関係者の皆様に謝意を表します。

DESTINY+搭載用ダストアナライザの 開発と地上較正計画 2026

Development and Ground Calibration Plan of the Dust Analyzer for DESTINY+: 2026 Update

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、主にシュトゥットガルト大学が開発し、JAXA がシステムレベルのインターフェースを管理している。本講演では、過去 1 年間における DDA のプロトフライトモデル (PFM) の開発および技術調整の進捗状況について報告する。

PFM コンポーネントは厳格な環境試験を受け、いくつかの重大な異常を克服した。ダスト加速器試験中に検出された高電圧異常は、コネクタの交換と故障木解析を通じて解決された。機械試験、熱真空試験、および電磁両立性試験は、個別の免除措置と負荷軽減策により無事に完了したが、DDA-E の温度センサーに関する軽微な異常の調査は継続中である。並行して、電子機器シミュレータを用いた電氣的インターフェースの検証により、コマンドおよびソフトウェア書き換え機能の正常な動作が実証された。打ち上げ段階における太陽光照射の制約、パージ要件、および汚染管理に関する詳細なインターフェースも確定した。

DDA の PFM は 2026 年 5 月に ISAS へ納入されて、現在は DESTINY+探査機システムへの統合のためのインターフェース試験を行っているところである。

火星衛星探査機MMX搭載用分光カメラOROCHIによる 着陸時3次元観測の検討

○海谷 真生¹, 亀田 真吾¹

¹立教大学

火星衛星探査機MMXに搭載される分光カメラOROCHIは、8つのカメラを用いた多波長同時観測によって衛星地表面の全球物質分布の調査および着陸地点の選定を担う。正確な反射スペクトルの導出には、レゴリスなどの反射特性の角度依存性（Hapkeモデル等に基づいた測光特性）を補正する必要がある、そのためには地表面の3次元地形情報が不可欠である。

OROCHIは8つのカメラが並列に配置された複眼構造をしており、着陸時の低高度ではカメラ間の配置差が視差を生むため、ステレオ視による3次元地形復元が可能となる。しかし、高精度なステレオ復元や各バンド画像の重ね合わせのためには、レンズに起因する歪曲、各カメラの視線方向および並進位置関係を予め定量的に把握することが求められる。本研究では、OROCHIによる高精度な着陸時3次元観測に向けた第一段階として、OROCHI FMの地上試験データを用いた幾何パラメータの導出およびキャリブレーション手法の検討を行った。

パラメータ算出のため、以下の3項目について測定および解析を行った。第一に、Circle gridを撮像し、円の重心座標に対して最小二乗法を適用することで、Suzuki et al. (2018)の樽型歪曲補正モデルにおける歪曲係数 ε および光学中心の座標を算出した。第二に、カメラの視線方向を把握するため、無限遠を模擬したコリメータ点光源を撮像し、点像位置のずれから基準カメラに対する各カメラの光軸の相対角度を算出した。第三に、カメラ間の並進位置関係の同定に向けて、歪曲補正済みの点像画像とCircle gridの補正後画像から各カメラの視線ベクトルとターゲット平面との交点を求め、視差を利用して位置関係を導出する手法を検討した。

これらの手法を適用した結果、歪曲係数 ε を用いて画像の歪みを高精度に補正できることを確認した。また、コリメータ点光源を用いた測定により、基準カメラに対する各カメラの光軸の相対角度を算出した。さらに、現在は並進位置関係について、点像とCircle grid画像の重ね合わせによる導出および定量的評価を進めている。

本発表では、これら地上試験データを用いた幾何パラメータの導出過程と評価結果を報告するとともに、OROCHIによるステレオ視を用いた着陸時3次元観測への適用について議論する。

高精度紫外線宇宙望遠鏡 LOPYUTA 計画の検討状況(III)

土屋史紀(東北大), 村上 豪, 山崎 敦(ISAS), 亀田真吾(立教大), 鍵谷将人(東北大), 吉岡和夫(東京大), 古賀亮一(名古屋市大), 榎木谷 海(ISAS), 木村 淳(阪大), 木村智樹(東京理大), 埤 千尋(NICT), 益永 圭(山形大), 堺正太朗(慶應大), 中山陽史(立教大), 生駒大洋(NAOJ), 成田憲保(東大), 大内正己(NAOJ/東大), 田中雅臣(東北大), 桑原正輝(立教大), 榎木谷海(ISAS), 鳥海 森(ISAS), 野津湧太(コロラド大), 行方宏介(京大), LOPYUTA 検討チーム

LOPYUTA は、宇宙科学研究所・公募型小型計画のプリプロジェクト候補として検討を進めている紫外線宇宙望遠鏡計画で、宇宙の生命生存可能環境(目標 1)と宇宙の構造と物質の起源(目標 2)の理解を目指す。目標 1 では、多様な太陽系天体・系外惑星の外圏・電離大気を網羅的に観測し、太陽系内天体の理解の深化と系外惑星大気の特徴づけを行う。目標 2 では銀河周辺物質の構造の観測から、宇宙構造形成の枠組みで予言されたガスの流入による星形成を検証する。また、中性子星合体直後の高温ガスの観測から重元素合成過程を解明する。これらの科学目標に取り組む上で鍵となるのが、水素、酸素、炭素などの物理状態の計測である。これらは宇宙にありふれた元素であるが故に、惑星大気から、恒星、銀河を構成するガスに至る、様々な空間スケールの構造とその進化の理解に関わっており、これらの科学課題に取り組む最適な手段が紫外線分光・撮像観測である。LOPYUTA は「ひさき」と同じ小型科学衛星規模でありながら感度、空間分解能、波長分解能をそれぞれ「ひさき」の 100 倍以上に向上し、真空紫外の波長域でハッブル宇宙望遠鏡 HST に匹敵する解像度と感度の実現を目指す。ミッション部は口径 60cm の主鏡を持つカセグレン望遠鏡と 3 つの焦点面装置、中分散分光器 MRS(分解能 6,000)、高分散分光器 HRS(40,000)、及び紫外スリットイメージャ UVSI からなる。有効面積 350cm² と解像度 0.1 秒角を達成するため、紫外用ミラー成膜、大型高精度検出器、指向擾乱補正機能の 3 つのキー技術開発に加え、望遠鏡構造の概念検討を進めている。LOPYUTA で開発する紫外線観測のキー技術(高感度検出器や高い反射率を実現するミラー成膜技術)は世界的にも重要で、次世代旗艦宇宙望遠鏡 Habitable Worlds Observatory (HWO)への日本の参画の足掛かりともなる。

加熱を経た含水小惑星模擬表層に対するクレーター形成実験

Cratering experiments on simulated hydrated asteroid surfaces after heating

○神取知広¹、中村昭子¹、山口祐香理¹、北里宏平²

¹神戸大学、²公立鳥取環境大学

近地球小惑星は、太陽放射による熱応力や脱水によって表層の微視的構造や力学特性が変化すると考えられている。しかし、このような熱変成がクレーター形成に及ぼす影響は十分明らかになっていない。本研究では、加熱した含水小惑星模擬表層に対して衝突実験を行い、熱変成がクレーター形状とサイズに及ぼす影響を調べた。また、その要因を検討するため、加熱前後の縦波速度と引張強度を測定した。

実験には、半水石膏、パイロフィライト、モンモリロナイト、CM コンドライト模擬物質を用いた。縦波速度測定と圧裂引張試験に用いた試料は、200～700℃、10分～20時間加熱した。衝突実験には、200～700℃で3時間加熱した試料を用い、直径100 μmのガラス球弾丸を約5 km/sで散弾衝突させた。加熱温度は、小惑星フェートンの表面温度を参考に設定した。

その結果、半水石膏では、加熱に伴って縦波速度と引張強度が低下し、それに対してクレーター径と深さが増加した。一方、パイロフィライトでは、加熱に伴って縦波速度は低下したものの、引張強度は増加した。クレーター径には明瞭な変化は認められなかったが、加熱後の試料に形成されたクレーターは不規則形状を示した。モンモリロナイトでは、加熱温度の上昇に伴ってクレーター深さが増加したのに対し、CM コンドライト模擬物質ではクレーター形状に顕著な変化は認められなかった。これらの結果は、熱変成がクレーター形成に及ぼす影響は物質によって異なり、各試料における微視的構造の変化や力学特性の変化に強く依存することを示唆している。

今後は、モンモリロナイト及びCM コンドライト模擬物質についても縦波速度と強度測定を進め、熱変成に伴う力学特性の変化とクレーター形成との関係を明らかにする。

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。

角礫岩化隕石模擬物の衝突回収実験と強度測定

○宇野雄登¹, 松原光佑¹, 長谷川直², 中村昭子¹

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

ほとんどの隕石は小惑星表面への高速度衝突によって形成される。それに伴い、受けた衝撃に応じて衝撃変成作用が働く。本研究では、衝突によって形成された角ばった岩片が固結する角礫岩化作用に着目した。この作用は多くの隕石で確認されており、惑星の表面進化を調べる上で非常に重要な要素であると考え。本研究では、角礫岩化隕石の形成過程を衝突実験で再現するとともに、その実験結果として得られた生成物の強度測定を行い、実際の隕石の強度と比較した。

衝突実験は宇宙科学研究所の2段式軽ガス銃を用いて行った。標的は粒径約1.5 μm と約63 μm のシリカ砂、弾丸は直径約3 mmの玄武岩、ステンレス、アルミナ、カンラン岩を使用して約4.5 km/sで発射した。標的は内径4.4 cm、深さ5 cmの円柱容器に詰め、タコ糸で吊るして弾道に合わせた。また、衝突の様子は高速度カメラとフラッシュX線装置で弾丸進行方向に垂直な方向で撮影を行い、衝突の瞬間と容器内の圧密の様子が分かるようにした。衝突後に回収した生成物の強度測定は神戸大学の圧縮試験機を用いて行った。本研究で得られる生成物は不規則形状かつミリメートルサイズと小さい。したがって独自の治具を使った点載荷圧裂引張強度試験により、強度を測定した。この方法の妥当性を確認するために、様々な大きさの二水石膏で試料の圧裂引張強度試験・点載荷圧裂引張強度試験も実行した。強度のサイズ依存性（ワイブル則）を考慮して、二つの方法の測定結果を比較したところ、そのサイズ依存性の傾向は概ね一致していることが分かった。

衝突中に容器内の試料がどのように圧密されているかを調べるために、X線画像から衝撃を受けたシリカ砂の空隙率を推定した。衝突直下に弾丸と同等の大きさを有する高密度領域（空隙率10%）が存在し、その他の領域の空隙率は一様に減少していることを仮定して、弾丸方向と垂直な線上のX線強度プロファイルを推定した。その結果、衝突後の空隙率は衝突前と比べて3-7%ほど減少していることが分かった。

今回得られた二つの生成物（A、B）にSEM/EDS分析を行ったところ、Aはステンレスとシリカ砂（63 μm ）、Bは玄武岩とシリカ砂（1.5 μm ）からなり、弾丸物質に標的物質が付着したものであることが確認された。また、アルミナとカンラン岩弾丸の場合でも同様のものが回収された。引張強度測定の結果、Aは1.6 MPa、Bは2.2 MPaと求められた。ワイブル則を仮定してこれらの値を隕石のサイズまで外挿すると、実際の隕石よりも低いと推測される。しかし、本研究で用いた標的および弾丸物質の組成・サイズは実際の惑星とは異なるため、今後条件を変えた実験をさらに行う。

天体の衝突破壊における破壊モデルの影響

○ 黒崎 健二¹

¹ 防衛大学校

小天体の衝突破壊は惑星形成過程を理解する上で重要である。小天体の衝突破壊強度は岩石や氷の材料強度に支配されるが、その評価は破壊モデルに大きく依存する。高速衝突ではひずみ速度が極めて大きく、亀裂の成長過程もひずみ速度の影響を受けることが知られている。しかし、動的破壊時の亀裂成長の時間発展を考慮した破壊モデルが衝突破壊強度に与える影響は十分に検討されていない。

本講演では、亀裂成長の時間発展を考慮した動的破壊モデルを導入した衝突破壊の数値シミュレーションモデルを構築した。脆性物質内部に存在する微小な不連続面に応力がかかることによって生成するウイングクラックの影響を考慮した脆性物質の構成則を作成した。得られた構成則を用いて、ソーダライムガラスの衝突破壊実験と比較し、計算手法の妥当性の確認した。その結果、本研究で構築した計算手法は、衝突破壊実験の実時間観測から得られた破壊領域の進展および応力波の伝搬の結果を再現可能であることが確認できた。

今後、玄武岩の衝突破壊実験とも比較し破壊のパラメータを検証したのち、小天体の衝突破壊強度への影響を評価する。

液体標的への固体粒子の衝突：クレーターと液滴の形成 Crater formation and ejecta-curtain breakup in solid projectile impact on liquid target

○門野敏彦¹、荒川創太²、牛久保孝行²、長澤真樹子³、小林浩⁴、田中秀和⁵

¹産業医科大学、²海洋研究開発機構、³久留米大学、⁴名古屋大学、⁵東北大学

荒川ら（2024 惑星科学会秋季講演会；2025 JpGU）は木星形成後の原始太陽系円盤の進化を考慮した新しいコンドルール形成機構を提案している。そこでは、原始太陽系円盤において微惑星がダスト層へ高速突入することで、衝突によって微惑星表面が溶融し、さらなる衝突により溶融物質がダスト層へと放出され、ダストとの二次衝突・冷却・固化等の過程を経てコンドルールが形成される。

表層が融けた状態の天体で衝突が起こった場合、放出されるエジェクタカーテンは時間とともに分裂し液滴が形成される。天体表面での衝突は、低重力・真空で起こるため、今回、真空または重力がかからない状況で液体標的への固体粒子の衝突実験を行い、クレーター形成および液滴がエジェクタカーテンから生じる過程を調べた。クレーター形成過程には重力の有無または大気の有無に依らない表面張力が支配する領域があり、そこではクレーター径は Weber 数に依存すること、液滴形成の特徴的時間はクレーター形成時間程度であることがわかった。液滴のサイズが液滴形成時間によって決まると仮定すれば、実験結果をもとに特徴的な液滴のサイズはたかだか入射粒子のサイズ程度であると評価できる。

惑星科学会予稿

タイトル

原始地球における天体衝突による大気加熱のモンテカルロシミュレーション

東京理科大学 木村研究室 名和樹生

地球は微惑星の衝突・集積を経て形成され、その質量が月や火星程度に達すると、原始太陽系星雲ガスの捕集および地球内部からの脱ガスを通じて大気が形成される。集積の最終段階である約 45 億年前に起きた巨大衝突の後には、マグマオーシャンと水蒸気に富む大質量大気が形成される。マグマオーシャン期の水蒸気大気の進化は、初期地球の水量を規定する主要因の一つである (Hamano et al., 2017)。マグマオーシャン期の原始地球は、現代の地球と比べて天体衝突がより頻繁に起こる環境にあったため、水蒸気大気に対する天体衝突による大気加熱とその変遷の解明は、大気進化を理解するうえで本質的な課題である。特に近年、マグマオーシャンが 1000 万年近く持続する可能性が示されている (Yoshida et al., 2025) が、この長期的な持続を前提に、天体衝突が及ぼす影響を定量的に評価した研究は先例がない。そのため、天体衝突が原始地球の大気および水量の進化に及ぼした影響の全容は未解明である。

そこで本研究では、マグマオーシャン期の衝突天体のサイズ (Marchi et al., 2014) と頻度分布 (Sakuraba et al., 2021) に基づき、原始地球に対して衝突した天体の直径と頻度をモンテカルロ法で統計的に扱うモデルを構築した。さらに、天体の大気突入過程におけるエネルギー減衰を記述する解析モデル (Collins et al., 2005) を組み込み、天体衝突が大気進化に及ぼす影響を定量的に評価した。大気には、Yoshida et al. (2025) により示されたマグマオーシャン期の水蒸気に富む大質量大気を用いた。

モデル計算の結果、加熱率のピークを含む高度 0–200 km における頻発する小規模な衝突による累積的な大気加熱率は全球大気体積 ($\sim 10^{17} \text{ m}^3$) および Marchi et al. (2014) より仮定したマグマオーシャンの持続期間 ($\sim 25 \text{ Myr}$) で平均をとると約 $10^{(-10)} \text{ J m}^{(-3)} \text{ s}^{(-1)}$ にとどまることが明らかになった。これは、同高度における太陽放射による大気加熱率 (約 $10^{(-7)} \text{ J m}^{(-3)} \text{ s}^{(-1)}$) と比べて 3 桁小さい。一方、単発の小天体衝突による大気突入時に衝突天体周辺で生じる局所的・瞬間的な加熱を、衝突天体が通過した大気体積 ($\sim 10^{13} \text{ m}^3$) および衝突時間 ($\sim 43 \text{ s}$) で平均すると、加熱率は約 $10^8 \text{ J m}^{(-3)} \text{ s}^{(-1)}$ に達し、太陽放射による加熱を約 15 桁上回る。このような局所的な加熱は、大気中の化学種を解離させ、非平衡な化学組成をもつ蒸気プルー

ムを形成し、大気組成に顕著な影響を及ぼす可能性がある。

さらに、上記と同一の衝突頻・サイズを仮定し、衝突による大気散逸量(Svetsov et al., 2000) や、衝突天体から供給される物質質量(Broadley et al., 2022)に基づいて、大気中における水量の収支を評価した。その結果、エンスタタイトコンドライトに代表される含水量の少ない(~ 0.1 wt.%)衝突天体では散逸が供給を上回り惑星の水量は減少する一方、炭素質コンドライトに代表される含水量の多い(~ 10.0 wt.%)衝突天体では供給と散逸がバランスし水量がほとんど変化しないことが示された。ただし、小規模天体衝突による水収支の累積値は最大で約 10^{15} – 10^{16} kg にとどまり、Yoshida et al. (2025)のマグマオーシャン期における惑星の全水量約 10^{21} – 10^{22} kg と比べて5–6桁小さい。したがって、マグマオーシャン期の頻発する小規模天体衝突はその組成によって水量を維持する場合も減少させる場合もあるが、惑星全体の水量の進化に対する量的寄与は限定的であることがわかった。

これらの結果より、頻発する小規模天体衝突が水蒸気大気の長期的な熱進化や惑星の水量進化にはほとんど寄与しない一方で、瞬間的・局所的な大気加熱による化学組成の変化を通じて初期地球環境に影響を及ぼした可能性が示唆される。

曲率の影響を考慮した SPH 法による 小規模破壊衝突のエジェクタ解析

○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

地球に飛来する小惑星は、甚大な被害を起こしうる。そのような小惑星衝突を回避する方法として Kinetic Impact と呼ばれる、人工衛星衝突による小惑星の軌道が提案されている。この方法の実証実験のために 2022 年には NASA によって DART (Double Asteroids Redirection Test) ミッションが行われ、小惑星軌道変更に対する人工衝突の有効性が確認された[1-3]。またこのような衝突によって天体が受ける速度変化は、微惑星や小惑星の軌道も変えうる。そのため、衝突による速度変化はこれらの天体の軌道進化を考える上で重要である。DART ミッションに関連して、衝突による速度変化に関する理論研究も多くなされている[4-7]。しかしこれらの研究は DART ミッションの理解を目的としていた。そのため、非常に小さな質量比のインパクターによる小規模破壊の場合に注目して調べられていた。しかし、実際の衝突現象においては、様々な質量比や破壊規模の衝突が起こると考えられる。そこで我々はこれまでに、多様な質量比や破壊規模を持つ衝突により小惑星が受ける速度変化について調べてきた。その結果、小惑星の受ける速度変化は質量比と破壊規模に強く依存することを明らかにした[8]。

本研究ではこの結果と、DART ミッションに関連する先行研究で得られてきた小サイズインパクターによる小規模破壊衝突での理解とを繋げるために、曲率の無視できない質量比を持つインパクターによる小規模破壊衝突に注目する。衝突シミュレーションは、岩石の強度や破片間の摩擦を考慮した SPH 法のコードを用いた[9]。標的には半径 50km の玄武岩標的を用い、衝突による標的の質量損失が 5%程度以下になるような衝突速度・質量比のインパクターを選んで正面衝突シミュレーションを行った。また、その結果放出されたエジェクタの解析を行った。またその結果を用いて、曲率が無視できない質量比の衝突における、エジェクタの質量及び放出角度に関するスケーリングを得た。

参考文献

- [1] Daly, R. T. et al., 2023, Nature 616, 443.
- [2] Thomas, C. A. et al., 2023, Nature 616, 448.
- [3] Cheng, A. F. et al., 2023, Nature 616, 457.
- [4] Holsapple, K. A. and Housen, K. R., 2012, Icarus 221, 875.
- [5] Jutzi, M. and Michel, P., 2014, Icarus 229, 247.
- [6] Stickle, A. M. et al., 2022, Planet. Sci. J. 3, 248.
- [7] Raducan, S. D. et al., 2024, Nature Astron. 8, 445.
- [8] 西尾 他. 2024, 遊星人 33, 254.
- [9] Sugiura, K. et al., 2018, A&A 620, A167.

土星リングのプロペラ構造形成に関する グローバル N 体シミュレーション

○多門 瞭¹ 大槻 圭史¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻

土星リング内にはリングを形成する氷粒子よりも有意にサイズの大きい小衛星が存在する。こうした小衛星はその重力によって周囲のリングに対して摂動を与え、密度構造を作り出す。小衛星の質量が十分に大きい場合、リング1周にわたる溝を作る。エンケの間隙やキーラーの間隙をはじめとするこのようなグローバルな構造をギャップ構造と呼ぶ。それに対して小衛星の質量が小さい場合には、小衛星による摂動の影響が限定的となり、局所的な構造、プロペラ構造を作り出す[1]。プロペラ構造は観測に先立ち、理論的に予測されていたものの[2]、サイズが小さいため、カッシーニによる探査で初めて確認された[3, 4]。しかし、プロペラ構造を形成している小衛星自体はさらにサイズが小さく、未だ確認されていない。リングだけでなく小衛星の形成過程について理解するためにも、プロペラ構造の形成について調べることは重要である。

近年、ギャップ構造に見られる特徴について調べるため、粒子同士の非弾性衝突と相互重力を考慮したグローバル N 体シミュレーションが行われた[5, 6]。一方でプロペラ構造の形成については、従来、局所 N 体シミュレーションが用いられてきた[4, 7, 8]。局所計算は構造について高解像度で詳細に調べることができる一方、グローバル計算ではギャップ構造からプロペラ構造への連続的な変化や小衛星から離れた場所での摂動の影響について調べることができる。

本研究ではプロペラ構造形成についてグローバル N 体計算を行った。コードは牧野淳一郎氏によって作られた“nbody-with-center”[9]を一部改変して使用しており、これは[5, 6]と同様のものである。計算の結果、小衛星の土星に対する質量比 m_s/M_p を減少させるとギャップ構造からプロペラ構造に連続的に変化する様子が確認できた。ポスターでは、小衛星から方位角方向に離れるにつれてリング面密度がどのように変化するかについても議論する。

参考文献

- [1] Spahn, F. et al. (2018) In Planetary Ring Systems (Tiscareno, M. S. & Murray, C. D., eds.), pp. 157–197, Cambridge Univ. Press [2] Sremčević, M. et al. (2002) Mon. Not. R. Astron. Soc. 337, 1139, 1152 [3] Tiscareno, M. S. et al. (2006) Nature, 440, 648 [4] Sremčević, M. et al. (2007) Nature, 449, 1019 [5] Torii, N. et al. (2024) Icarus, 415, 116029 [6] Torii, N. et al. (2025) Icarus, 439, 116608 [7] Lewis, M. C. & Stewart, G. R. (2009) Icarus, 199, 387 [8] Michikoshi, S. & Kokubo, E. (2011) ApJ, 732, L23 [9] Iwasawa, M. et al. (2020) Int. J. High Perform. Comput. Appl., 34, 615–628

ガニメデ金属核熱化学進化モデルによる 核磁場強度と内部構造の制約

○木村淳, 川上稜平, 松尾太郎, 佐々木晶¹

¹ 大阪大学

木星衛星ガニメデは、金属核ダイナモによる固有磁場を持つ太陽系唯一の衛星である。小さな慣性モーメント(Mol)は、中心の金属核、岩石マントル、外殻のH₂O層からなる完全分化した内部構造を示すが、各層の厚さや岩石成分のバルク組成などの推定には大きな不定性があり、取り得る全ての内部構造・組成の中で現在の金属核が磁場を生じ得るかは自明では無い。本研究では、内部熱史と核内の凝固過程を考慮した熱化学進化モデルを構築し、完全分化構造を初期に仮定した46億年間のシミュレーションを行って核双極子磁場の発生を調べた。多様なコンドライト組成と測地学的制約下で許容される内部構造の範囲での多様なケーススタディを行い、見出された磁場強度と表面磁場強度の観測値とを比較することで、各層のサイズ、密度、およびバルク組成の制約を試みた。

まず、Molとバルク組成のみから許容される内部構造は、仮定するH₂O層密度に大きく依存する。低密度H₂O層の場合(1.2 g/cc)の核半径は550–850 kmとなり、Hコンドライト組成以外が許容される。高密度H₂O層(1.3 g/cc)での核半径は600–850 kmとなり、H, L, LL, COコンドライト組成のみが許容される。熱化学進化計算の結果、核内硫黄濃度が共融組成に近い場合は核内全溶融、低濃度ではFe-snow、高濃度ではFeS-layerといった核凝固レジームが生じ、磁場発生はいずれも計算開始後20~30億年後に起こる。その中で比較的大きな核半径(約750 km以上)と、共融組成から外れた核硫黄濃度を持つ場合が、現在の観測磁場強度と概ね整合する。さらに、低密度H₂O層ではLとCIコンドライト的バルク組成が、高密度H₂O層ではHコンドライト組成が整合することを見出した。

以上の推測は、2031年に木星系に到着するJUICEでの重力場や磁場観測によって検証が可能である。Molのさらなる高精度化や、地下海構造の推定を通したH₂O層密度の制約、多重極子成分の磁場観測にもとづく核内流動過程の推定など、本モデルの実証に直結するその場観測が期待される。

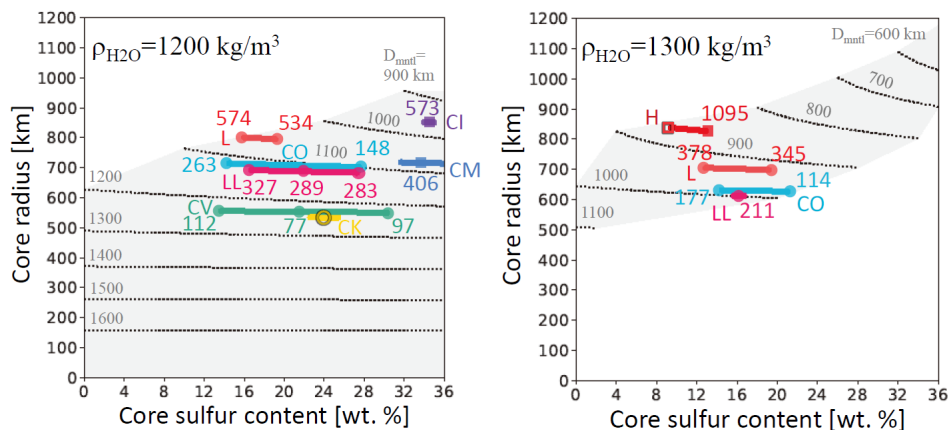


図: Mol が許容する核半径および核硫黄濃度の範囲 (灰色) と各バルク組成が制約する範囲 (各色線) に、現在の推定表面磁場強度を示したもの。磁場生成無し (○), 過去に磁場が生じるが現在は消失 (□), 全溶融核で磁場発生 (●), 核内固化が進み磁場発生 (■)。

メタン吸収帯における測光・偏光観測を用いた タイタン大気の季節変動解析

○中嶋瑞穂¹, 高木聖子¹, 大野辰遼¹, 高橋幸弘¹

¹北海道大学

土星衛星タイタンは分厚い大気を持つ唯一の太陽系衛星である。大気は主に窒素とメタンから構成される。上層大気において紫外線や高エネルギー粒子によって駆動される化学反応により、窒素とメタンから有機物が生成される。これらの有機物は凝縮・成長し、ヘイズ層を形成する。ヘイズ層は地上望遠鏡による偏光観測により示唆され [Zellner, 1973]、ボイジャー、カッシーニにより詳細な構造が観測された [e.g., Koskinen et al., 2011]。継続的な観測により、大気の循環により冬半球のヘイズ層の光学的厚さは増加することが報告されている [e.g., Karkoschka, 2022]。一方で約30年周期の季節変動に対して観測は断続的かつ限定的であり、特にヘイズ層の光学的厚さの増加から推測される偏光度の変化については継続的な観測がなされていない。タイタン大気からヘイズ層が形成し維持されるメカニズムやその時間変動については未だ解明されていない点が多く [Hörst, 2017]、継続的な観測により長期的な季節変動の全容を解明することが重要である。

本研究はタイタンのメタン吸収帯スペクトルおよび偏光度を連続観測することにより、季節変動によるヘイズ層および大気組成の変動を解析することを目的とし、タイタンの観測および放射伝達モデル計算を行った。北海道大学が所有するピリカ望遠鏡を用いて2023年から2026年にかけてタイタンの長期連続観測を実施した。観測データから導出されたメタン吸収スペクトルの等価幅は減少傾向を示した。また偏光度はフィルター帯域により異なり、大気光学的厚さの波長依存性の影響が示唆された。位相角が5度以上における偏光度は2025/6, 7から2025/11にかけて増加傾向を示した。大気放射伝達モデルと比較することにより、ヘイズおよびメタンの光学的厚さの変動を定量的に評価し、それらの時間変動を導出した。放射伝達モデルの結果から、メタン吸収等価幅は、ヘイズ光学的厚さと逆相関の、メタン光学的厚さとは正の相関関係にあることが明らかになった。したがって観測された等価幅の時間変動から、ヘイズ層の光学的が増加またはメタン光学的厚さが減少したことが示唆される。これは2025年に春分点を通過したタイタン南半球の季節変動と整合的である。今後はヘイズ粒子の光学特性の季節変動を考慮した定量的評価を進める予定である。

可視撮像データに基づく木星大赤斑の形状変化解析

○高木聖子¹, 木村淳²

¹北海道大学, ²大阪大学

木星を特徴づける代表的構造である大赤斑は、太陽系内で最も長寿命な大気渦の1つとして知られる。その形状や大きさの時間変化は惑星大気力学の重要課題として継続的に研究されており、近年では長期的な縮小傾向も報告されている。その歴史的記録は、小型望遠鏡による観測が行われていた1800年代半ばにまで遡る [Peek 1958; Rogers 1995]。当時の観測では主として経度方向の長さや通過時刻が記録されており、その後の観測技術の発達により、形状の定量的評価も可能となった。1900年代前半には、経度方向長が約40,000 kmと推定されていたが、その後の観測により徐々に縮小していることが報告されている [Simon et al., 2018]。

ボイジャーやパイオニア探査機による近接撮像データの取得を皮切りに、近年ではハッブル宇宙望遠鏡による継続観測や、ガリレオ、カッシーニ、ニューホライズンズ、ジュノー探査機などによる高空間分解能観測が実施され、大赤斑の形状・構造・時間変動に関する様々な報告がされている [Simon-Miller et al., 2002; Asay-Davis et al., 2009; Shetty and Marcus, 2010; Simon et al., 2014; Simon et al., 2018]。Simon et al. (2018) によれば、1978年から2017年にかけて、大赤斑の経度方向長は約 -0.194° /年、緯度方向長は約 -0.048° /年というほぼ線形速度で減少している。長軸方向の縮小が相対的に速く進行しているこの結果は、単に大赤斑が縮小しているだけでなく、その形状が楕円形から円形に近づいていることを示す。渦力学モデルによる数値シミュレーションでは、大赤斑が周囲の小規模な反渦や嵐と相互作用し、それらを取り込むことでエネルギーを得る可能性が示されている [Asay-Davis et al., 2009; Shetty and Marcus, 2010]。また、大赤斑は強い東西ジェット流に挟まれた緯度帯に存在し、周囲の帯状流との力学的相互作用がその形状に影響し得ることも指摘されている [Marcus 1993; Simon et al., 2014]。さらに、近年の観測は、大赤斑の光学特性も時間変化していることを示している。2014年以降、短波長域(<650 nm)における反射率低下と890 nmにおける明るさの増加が報告されており [Simon et al., 2018]、高高度の雲やヘイズの構造の変動を示唆している。したがって、大赤斑の時間変化は、渦の力学的スケールの変化と雲・ヘイズ構造の変動が重なった現象として理解する必要がある。

しかしながら、既報の縮小速度が現在も同様に持続しているのか、あるいは近年に変化や変曲が生じているのかは十分に検証されていない。同様に、光学特性の変動が単調なトレンドを示しているのか、あるいは形状変化と同期しているのかについても体系的な再評価は行われていない。形状変化と光学特性変動の時間発展を同一基準で比較することは、大赤斑の長期安定性や内部構造変化を理解する上で重要である。探査機や宇宙望遠鏡による観測は高い空間分解能を持つ一方、時間が限られたスポット的な観測である。これに対し地上望遠鏡による観測は、空間分解能は劣るものの長期的に観測を継続できる利点がある。北海道大学大学院理学研究院附属天文台が所有する地上望遠鏡(ピリカ望遠鏡)は太陽系内天体観測用の望遠鏡としては世界最大級の主鏡口径(1.6 m)を持ち、木星の過去約10年間の可視画像アーカイブを所有している。本研究では、それらを統一的に解析し、経度・緯度方向長、形状、および反射率の時間変動を評価する。これにより、既報の線形縮小トレンドが近年も維持されているかを検証するとともに、縮小速度の変化や変曲の有無を定量的に評価することを目的とする。

木星型惑星の内部構造進化における回転の影響

○ 辻勇吹樹^{1,2}、生駒大洋^{1,2,3,4}

¹ 東京大学、² 国立天文台、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

木星質量程度の惑星の自転速度は、近年の高分散分光観測によって測定が可能となり、その質量依存性や進化過程について議論が進められている。Hsu et al. (2026) は、観測された褐色矮星から巨大惑星までの天体について自転速度を解析し、巨大惑星は伴星として存在する褐色矮星と比較して、解離速度に対する自転速度の比が大きいことを示した。このような自転速度の質量依存性は、惑星形成時に獲得した角運動量や、形成過程における周惑星円盤との相互作用の違いに起因する可能性がある。

巨大惑星の自転進化は、形成時のガス降着から現在に至るまで、複数の段階に分けられる。形成初期には、惑星は周囲のガスを降着して質量と角運動量を獲得する。その後、惑星と周惑星円盤が磁場を介して相互作用することで magnetic braking が生じ、惑星は角運動量を失いながら円盤との角速度差を小さくしていくと考えられている (Batygin 2018)。周惑星円盤が散逸した後は、惑星は角運動量を保存しながら熱進化に伴って収縮し、自転角速度は増加する。本研究では、この円盤散逸後から現在に至るまでの自転進化に着目し、観測された現在の自転速度を再現するために必要な円盤散逸時の惑星内部の角運動量分布を明らかにすることを目的とする。特に、惑星質量と円盤散逸時の初期角運動量を変化させて進化計算を行うことで、現在の自転速度の質量依存性が、円盤散逸時の角運動量分布とその後の熱収縮によってどのように形成されるかを調べる。

本研究では、恒星・惑星の内部構造および熱進化を計算するコード MESA (Paxton et al. 2011, 2013, 2015, 2018, 2019; Jermyn et al. 2023) を用いる。計算には木星型惑星に適した状態方程式および不透明度 (opacity) のテーブルを適用する。また、惑星内部の熱進化を正確に記述するためには、回転による対流への影響を考慮する必要がある。そこで本研究では、Augustson & Mathis (2019) の回転依存対流モデル (R-MLT) を MESA に導入する。本モデルは、回転を考慮した流体の線形摂動方程式に基づき、従来の対流モデル (MLT) にロスビー数に依存する補正を加えることで、回転による対流運動の抑制を記述する。

木星質量のモデルでは、R-MLT を導入することによって、従来のモデルと比較して対流速度が中心部で約 1 桁減少し、対流拡散係数 D は約 3 桁減少した。一方、木星質量モデルを現在の木星の自転速度に対応する条件から進化させた場合、対流モデルの違いによる進化への影響は小さかった。これは、現在の木星程度の自転速度では、回転による対流抑制が熱進化全体に与える影響が限定的であることを示唆する。しかし、より大きな初期角運動量を持つ惑星や、異なる質量の惑星では、回転速度やロスビー数が異なるため、回転による対流抑制の影響も変化すると考えられる。

そこで本研究では、惑星質量および円盤散逸時の初期角運動量を変化させて進化計算を行い、R-MLT による回転依存の対流抑制が惑星の熱進化に与える影響を調べる。さらに、円盤散逸時に与えた初期角運動量から現在の自転速度までの進化を追跡し、観測された巨大惑星から褐色矮星にわたる自転速度の質量依存性を再現するために必要な初期角運動量分布を明らかにすることを目指す。

水蒸気大気を持つ系外地球型惑星の超高層大気構造に対する紫外線放射環境の影響

○加藤龍雅¹、中山陽史²、亀田真吾¹

¹立教大学、²東京科学大学地球生命研究所

これまでに主星のハビタブルゾーン(HZ)周辺を公転する地球型惑星が多数発見されており、居住可能性の推定に向けた大気の特徴付けが課題である。大気観測にはトランジット分光観測が用いられ、中でも紫外線分光観測で得られる透過スペクトルは超高層大気の空間分布を反映しており、大気散逸量や流出速度に対する直接的な示唆を得ることができる。これまでに、恒星の近傍を公転するガス惑星から散逸する水素原子の観測から、星間物質(ISM)による吸収を回避するために大気や恒星系の視線速度が必要なことや、超高層大気の構造が恒星の輝線による放射圧やXUV(X線およびEUV)放射といった、紫外線放射強度に依存することが知られている。一方で、水を多量に保持する惑星がHZの内側境界よりも恒星の近傍を公転している場合に、暴走温室効果に伴い海洋は完全に蒸発し、水蒸気大気を形成しうる。そして、水蒸気大気の光解離で生成された水素原子と酸素原子は宇宙空間に散逸する。暴走温室状態の惑星は、地球型惑星における水損失過程の理解において重要であると同時に、大気吸収による大きな減光が期待されるため、観測実現性が高い観測対象である。しかし、観測や理論研究が多く存在する恒星の近傍を公転するガス惑星に比べ、そのような地球型惑星を対象とした超高層大気構造の検討例は乏しく、将来の観測計画に向けて様々な恒星の周囲における超高層大気の定量的な理解が必要である。本研究では、LAPYUTAやHabitable Worlds Observatory(HWO)といった紫外線検出器を搭載した宇宙望遠鏡計画を想定し、暴走温室状態の地球型惑星を対象に、超高層大気構造や検出に必要な観測時間を推定した。

本研究では、質量が異なる恒星(0.1, 0.4, 0.7 太陽質量)において、暴走温室限界から現在の地球が受ける日射量の20倍に対応する軌道を公転する地球質量・地球半径の仮想的な惑星が水蒸気大気を持つと仮定して、3次元粒子モデルを用いた超高層大気シミュレーションを実施した。本モデルでは、惑星および恒星の重力、放射圧、光電離の影響を考慮している。結果として、水素原子の観測においては、いずれの条件においてもISMによる吸収を大気自体の視線速度で避けるには至らず、恒星系自体に-20 km/s程度の視線速度が必要であることがわかった。これは、HZの周囲では放射圧による反恒星向きの加速が弱いためである。また、酸素原子については、小さな恒星の周囲に加え、大きな恒星であっても比較的 inner の軌道であれば、1回のトランジット観測で大気を検出可能であることがわかった。検出までの時間は減光率と恒星の明るさに依存しており、小さい恒星では暗くても大きな減光率が生じるためであり、大きな恒星では減光率が小さくとも恒星自体の明るさで補うことができるためである。本研究の結果は、暴走温室状態の地球型惑星は将来の観測計画において、有望な観測対象であることを示唆するものである。

誕生直後の巨大ガス惑星 HIP67522b の 近赤外線トランジット分光観測

○ 平野 照幸^{1,2}, Yann Carteret³, Eric Gaidos⁴, すばる IRD チーム

¹ アストロバイオロジーセンター, ² 国立天文台, ³ ジュネーブ大学, ⁴ ハワイ大学

HIP 67522b は年齢約 2000 万年の若いホットジュピターであり、軌道進化や大気進化の初期状態を保持している可能性が高い天体である。特に、恒星自転軸と惑星公転軌道のなす角（軌道傾斜角）や、強い高エネルギー放射によって駆動される大気散逸の性質を調べることで、ホットジュピターの形成・進化過程を理解する手掛かりが得られる。本研究では、すばる望遠鏡近赤外線高分散分光器 IRD を用いて HIP 67522b のトランジット分光観測を実施し、ロシター効果による軌道傾斜角測定と、HeI 1083 nm 線を用いた透過分光観測による大気構造の調査を行った。IRD は波長 0.97–1.73 μm を同時にカバーする高分散分光器 ($R \sim 70,000$) であり、同一データからロシター効果とヘリウム吸収線の双方を解析できる。本研究では HIP 67522b の 2 回の部分トランジット観測データを取得した。そのうち S/N 比が十分なデータセットを用いて解析を実施した。まずトランジット中の視線速度変化（図 1）からロシター効果を検出し、射影軌道傾斜角として $\lambda = 11^{+21}_{-22}$ 度を得た。この結果は惑星軌道公転軸が恒星自転軸と良く整列していることを示している。近年、年齢 1 億年未満の若いホットジュピターでは整列した系が多く報告されつつあり、本研究結果も円盤相互作用による移動形成シナリオを支持する結果と解釈される。

次に HeI 1083 nm 三重項線近傍の透過分光解析を行った。その結果、可視光トランジットよりも深い顕著な吸収シグナルを検出した（図 2）。これは惑星半径を超えて広がるヘリウム大気存在を示しており、若いホットジュピターにおいて活発な大気散逸が進行していることを示唆する。若い恒星からの強い放射環境と比較的小さな惑星重力が、このような大気散逸を引き起こしている可能性が高い。さらに、球対称な大気モデル（図 2 茶線）、流出ガスを伴うストリーム状モデル（図 2 緑線）、および非一様密度構造を持つモデル（図 2 青線）を用いて観測データとの比較を行った。その結果、単純な球対称大気モデルでは観測された吸収光度曲線を十分に再現できないことが分かった。一方で、非球対称構造やストリーム状のガス流出を仮定したモデルは観測との整合性が高く、HIP 67522b では複雑な三次元的な大気散逸が発生している可能性が示唆される。

以上の結果は、若いホットジュピターにおける軌道配置と大気進化を同時に調べる上で HIP 67522b が重要なベンチマーク天体であることを示している。今後は JWST 観測等との組み合わせによって、大気散逸構造の詳細な理解が期待される。

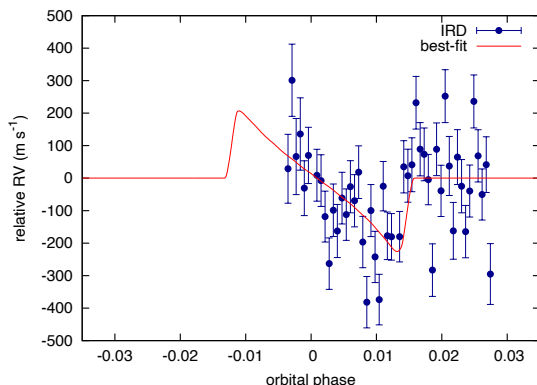


図 1: HIP 67522 のトランジット前後の視線速度変動（青点）。

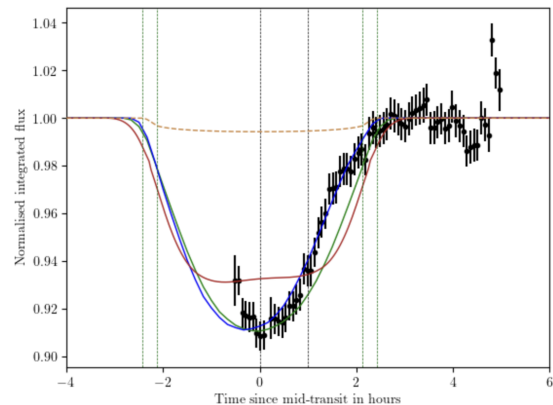


図 2: HeI 1083 nm での光度曲線。破線は可視光トランジット。実線は 3 つの異なるモデル。

地球近傍に漂う自由浮遊惑星の探査

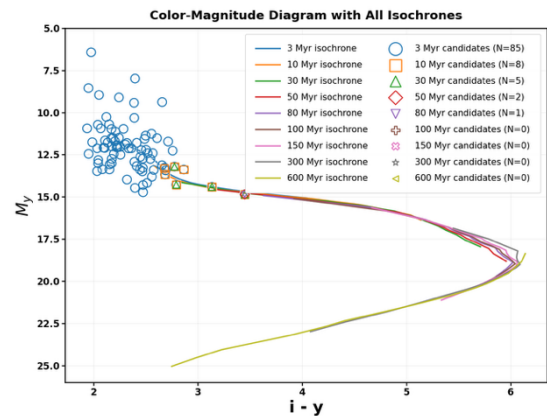
○萱沼 未来 小宮山裕

法政大学理工学研究科システム理工学専攻 先端観測天文学研究室

自由浮遊惑星は恒星に束縛されず銀河中を漂う惑星質量天体であり、主星を持たず、形成後に冷却して暗くなるため観測が難しい。本研究では、広視野かつ深い測光データを用いて天体の色と明るさを理論モデルと比較し、自由浮遊惑星候補天体を抽出することを目的とする。測光データとして Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program (HSC-SSP) の i 、 z 、 y バンドを使用した。また、理論モデルとして、低温褐色矮星や巨大ガス惑星の大気・進化モデルである ATMO2020 を用い、3~600 Myr の各年齢について、HSC バンドに対応する理論等時曲線を作成した。

はじめに、2 色図を作成し、HSC 天体の測光値と ATMO2020 モデルの理論等時曲線を比較した。候補天体の選定では、各バンドの測光誤差から求めた色指数の 1σ 誤差範囲を考慮し、観測天体の誤差範囲が理論等時曲線と重なる場合、その天体を自由浮遊惑星候補として抽出した。その結果、3 Myr で 5203 個、10 Myr で 1208 個、30 Myr で 406 個、50 Myr で 152 個、80 Myr で 50 個、100 Myr で 19 個、150 Myr で 3 個、300 Myr で 27 個、600 Myr で 590 個の候補天体が得られた。しかし、2 色図のみでは天体の距離が分からないため、観測された色が理論モデルと一致していても実際に惑星質量天体に対応する明るさを持つかを判断することは難しい。そこで、2 色図上で抽出した候補天体について Gaia カタログとのクロスマッチを行った。HSC と Gaia では観測時期が異なるため、Gaia 天体の固有運動を用いて座標を補正し、HSC 天体との対応を調べ、5arcsec 以内のものを同一天体とみなした。さらに、Gaia の年周視差から天体までの距離を推定し、HSC で得られた見かけの y バンド等級を絶対等級に変換した。横軸を $i-y$ 、縦軸を y とする色等級図を作成し、観測天体と理論等時曲線を再度比較した。この比較においても測光誤差と距離に由来する誤差を考慮し、 1σ 誤差範囲が理論等時曲線と重なる天体を最終候補とした(下図)。

以上より、HSC-SSP の深い測光データを用いた 2 色図による初期選定に加え、Gaia の年周視差を利用した距離推定と色等級図上での再評価を行うことで、候補天体を段階的に絞り込んだ。一方で、自由浮遊惑星は非常に暗いため、Gaia で検出されない HSC 天体の中にも候補が含まれている可能性がある。今後は、そのような天体についても、多波長測光情報や固有運動などを用いて、自由浮遊惑星候補としての信頼性を高める必要がある。



円盤ガスの冷却時間が制御する巨大惑星へのガス降着率

How the Cooling Time of Disk Gas Controls Gas Accretion onto Giant Planets

○桑原歩¹, Michiel Lambrechts¹, Minghao Zhang², Ruobing Dong³, 野村英子⁴

¹コペンハーゲン大学 Globe Institute, ²中国科学院国家天文台,

³北京大学 カブリ天文・天体物理研究所, ⁴国立天文台

Gas accretion onto forming giant planets is a key process that determines their final masses and produces observable signatures of ongoing planet formation. However, most estimates of gas accretion rates rely on locally isothermal assumptions [1–3], even though the thermodynamic response of gas in the circumplanetary region can strongly affect how material is delivered to the planet [4–6]. In this study, we investigate how radiative cooling regulates gas accretion onto gap-opening planets using long-term, three-dimensional global hydrodynamical simulations [7]. We consider planets with masses of one to three Jupiter masses and systematically vary the dimensionless cooling time, β , from nearly isothermal to nearly adiabatic regimes.

Our simulations show that the gas accretion rate decreases systematically as the cooling time increases. In the slow-cooling regime, where the cooling time is 100 times the local Keplerian time, the quasi-steady accretion rate is reduced by approximately one order of magnitude compared to locally isothermal predictions. This trend is largely independent of planet mass over the range explored here and is described by an empirical scaling relation, $\dot{M}_{\text{acc}} \propto \beta^{-0.18}$, which extends commonly used locally isothermal accretion models by explicitly accounting for cooling effects.

The reduction in gas accretion originates from thermodynamic restructuring of the circumplanetary region. Inefficient cooling weakens bow and spiral shocks, reduces shock dissipation, narrows the accretion bands that feed gas to the circumplanetary disk, and increases the vertical thickness of the circumplanetary disk. These effects lower the gas density around the planet and thereby suppress the supply-limited accretion rate. Our results demonstrate that disk thermodynamics must be included when interpreting observed accretion rates of young planets and when connecting theoretical planet-growth models to observations. They also suggest that cooling-regulated accretion flows may influence the transport of solids into circumplanetary disks, motivating future coupled gas–dust studies.

[1] Choksi, N., Chiang, E., Fung, J., & Zhu, Z. 2023, MNRAS, 525, 2806, [2] Li, Y.-P., Chen, Y.-X., & Douglas NC Lin. 2023, MNRAS, 526, 5346, [3] Li, Y.-P., Chen, Y.-X., & Lin, D. N. 2024, ApJ, 971, 130, [4] D’Angelo, G., Kley, W., & Henning, T. 2003, ApJ, 586, 540, [5] Ayliffe, B. A. & Bate, M. R. 2009, MNRAS, 393, 49, [6] Schulik, M., Johansen, A., Bitsch, B., & Lega, E. 2019, A&A, 632, A118, [7] Kuwahara, A., Lambrechts, M., Zhang, M., Dong, R., & Nomura, H. (under review)

磁気降着円盤に埋もれた惑星による深いギャップの 形成と惑星成長への影響

○ 富永遼佑¹, 奥住聡¹

¹ 東京科学大学

原始惑星系円盤内の惑星の周囲に形成される密度ギャップ構造を明らかにすることは、ガス集積による惑星の成長と最終到達質量を理解するために重要である。これまで粘性降着円盤に基づく広範な研究が行われており、乱流粘性による角運動量輸送と惑星重力トルクを含む角運動量保存則に基づいたギャップ構造の理解が確立されている (e.g., Duffell & MacFadyen 2013; Kanagawa et al. 2015)。これに基づく惑星成長の理論モデルによると、木星質量程度の惑星はその軌道の外側から降着する円盤ガスをほぼ全て集積して急速に成長すると示唆される (e.g., Tanaka et al. 2020)。これは木星サイズの巨大ガス惑星の形成時刻に強い制約を与える。一方、磁気流体力学に基づく最新の理論研究によれば、磁気降着円盤では粘性円盤と比べて桁で密度が低いギャップ構造が形成されるため (e.g., Aoyama & Bai 2023)、惑星のガス集積は従来予想より非効率であることが示唆される (e.g., Nelson et al. 2023)。したがって、円盤の降着機構に応じたギャップ構造の理解が重要である。

本研究では、惑星によって磁気降着円盤に形成されるギャップ構造とその惑星成長への影響を系統的に明らかにするために、2次元数値流体シミュレーションを行った。円盤ガ스에働く磁気トルクを、質量降着率をパラメータとする外力として取り入れることで磁気降着円盤を模擬したシミュレーションを実施した。単位面積あたりのトルクが一定の計算を行った結果、同じ質量降着率の粘性円盤モデルと比べて1桁以上密度が低いギャップが形成されることがわかった。また、二つの円盤モデルにおけるギャップの底の面密度の比は、円盤の降着率にほとんど依存しないことがわかった。得られたギャップ面密度を従来の惑星成長モデル (Tanaka et al. 2020) を用いて惑星成長時間を評価した結果、木星質量の惑星の成長時間は粘性円盤に基づく従来予想より1桁長く、円盤の寿命と同程度になり得ることが示唆された。本発表では、面密度に依存するトルクモデルを採用した計算結果も紹介し、惑星成長に対する磁束輸送の影響についても議論する。

シリカダスト集合体の 弾性波速度と応力緩和に関する実験的研究

○友膳涼平、中村昭子
神戸大学大学院理学研究科

ダスト集合体の弾性定数（ヤング率やポアソン比など）や応力の緩和は、衝突時の変形、圧縮、破碎、反発／付着の閾値を決めるため、微惑星形成の初期段階で成長が続くのか破壊に向かうのかを見積もる基礎になる。実験では、ダスト集合体の引張強度や圧縮特性、低速衝突での破壊閾値はよく測られており、そこから力学的パラメータを推定する研究は進んでいる。しかし、弾性定数やそれを導く縦波・横波速度（以下、音速）を直接測定したデータは少ない。

そこで本研究では、ダスト模擬物として不規則形状のシリカ粒子（体積基準メジアン径 $1.65 \mu\text{m}$ ）を圧縮した試料を対象に音速測定および圧力の緩和に関する実験を行った。音速測定に関しては、直径 6 cm の円筒型圧縮治具を作成し、試料を破壊しないよう圧縮と音速の測定を同時に行った。先行研究 (Meisner et al., 2012) よりも広い充填率範囲で測定を行ったことで、従来報告のなかった S 字カーブの充填率依存性が明らかになった。加えて、上記の先行研究と全く同じシリカ粉末を用いて実験を行ったのにもかかわらず、音速の値が倍以上大きくなった。これは、湿度等の実験環境や、用いている治具などの違いに加えて、センサーに塗布したカプラントの有無が測定値に大きく影響する可能性が示された（カプラントを用いたときのほうが、音速が大きかった）。また、測定で得られた音速から弾性定数の推定を行った。推定されたヤング率は充填率 0.5 でおよそ 0.24 GPa であり、先行研究 (Meisner et al., 2012) の値と比べて約 1 桁大きい。また、ポアソン比は充填率に関わらず常に 0.05 未満と非常に小さい値を示した。

続いて、音速測定では直接得られなかったダスト集合体にかかる圧力と、その緩和について調べるために、同じ治具を用いて一軸圧縮試験を行った。約 20 MPa までの圧力を段階的にかけていき、各段階で 1 分間保持してその間に試料にかかる圧力を測定した。結果として、より大きい圧力を受けた状態から始まる緩和のほうが穏やかであるということが分かり、圧力緩和を 3 つの指数関数の和で表す (Pacheco-Vázquez et al., 2021) ことができた。また、これにより音速測定中に試料が受けていた圧力を推定することが可能となった。今後は今回得られたデータがモノマーのサイズ等のパラメータの影響をどのように受けるかについて詳しく調べ、ダスト集合体の圧縮や緩和の議論につなげる予定である。

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。

巨大惑星が駆動する衝撃波による円盤加熱と ガス降着が引き起こすダスト濃集

○ 清水静¹, 富永遼佑¹, 奥住聡¹, 武藤恭之²

¹ 東京科学大学, ² 工学院大学

地球をはじめとする岩石惑星は、水に枯渇しているという特徴を持っており、原始惑星系円盤のスノーラインの内側で形成されたと広く考えられている。岩石惑星の起源の解明には、原始惑星系円盤の内側領域における温度構造や微惑星形成の理解が重要である。磁気風によって降着が駆動される円盤モデルでは、円盤内部の温度は従来のモデルよりも低温であり、水氷のスノーラインが現在の地球軌道より内側に存在する可能性がある (Mori et al. 2021; Kondo et al. 2023)。このことは、さらなる加熱を引き起こす機構がなければ、現在の地球軌道において岩石惑星の形成が困難であることを示唆している。

近年、これまで考慮されていなかった加熱源として巨大惑星が引き起こす衝撃波加熱が提案されている (e.g., Ziampras et al. 2020; Ono et al. 2025)。円盤中に存在する巨大惑星は円盤との重力相互作用によって密度波を励起し、密度波は伝播する過程で衝撃波となって円盤を加熱する。我々のこれまでの研究では、惑星より内側の軌道で形成される複数の衝撃波 (e.g., Bae & Zhu 2018) に注目し、衝撃波加熱が温度構造に与える影響を調査した。十分に光学的に厚い円盤において、木星質量の3分の1程度の惑星が木星軌道に存在するとスノーラインが現在の地球軌道より外側に後退し得ることを示した (Shimizu et al., submitted)。

岩石微惑星形成の理解には、これまでの我々の研究で着目した衝撃波加熱による温度変化と、衝撃波によって誘起される面密度・圧力構造の変化を統合的に決定することが重要である。衝撃波は角運動量の沈着によってガス降着を引き起こし面密度構造を変化させる。その結果、圧力構造が変化し、局所的にダストが濃集され得る。近年の研究により、ダスト濃集領域の温度が上昇すると、保温効果によってさらなる濃集を引き起こす圧力構造が生じ得ることがわかっている (Kato et al. 2025)。この自律的なダスト濃集が巨大惑星が駆動する衝撃波によって起これば、岩石領域の拡大と岩石微惑星形成が同時に実現される可能性がある。

本研究の目的は、巨大惑星による衝撃波の存在下でダストがどの程度濃集するのかを明らかにすることである。その第1段階として、我々のこれまでの研究で構築した衝撃波加熱モデルを用いて温度と面密度の定常分布を求め、得られた圧力構造からダストの密度上昇率を評価した。その結果、木星質量の惑星が5 au にあり円盤のオパシティが $1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ のとき、温度・面密度ともに波状の構造が得られた。これは、衝撃波加熱率が動径方向に非単調な分布を持つことに由来している。衝撃波加熱率が高い領域ほど強い降着が引き起こされてガスが減少するため、温度と面密度は逆位相の波状構造となった。圧力は極値を持たないものの、波状の構造を持つことがわかった。波状の圧力構造は、ダストに2倍程度の速度差を生じさせ得る。定常降着を仮定すると、この速度差はダスト面密度に同程度の差を引き起こす。2倍の密度差は保温効果によるダスト濃集を引き起こしうるため (Kato et al. 2025)、この結果は衝撃波によってダストの濃集および微惑星形成が自律的に起こり得ることを示唆する。

楕円運動をする固体核による摂動を受けた原始惑星系円盤における固体核への小天体衝突率計算

○山田 理仁¹, 小林 浩¹

¹名古屋大学大学院

木星や土星などの巨大ガス惑星は、地球質量の約 10 倍にまで成長した固体原始惑星（固体核）が、原始惑星系円盤からガスを集積することで形成される。しかし、10 倍地球質量もの重い固体天体は、円盤との相互作用により数十万年程度で中心星へ向かって落下してしまう（I 型惑星移動）。したがって、数十万年という短い時間スケールで固体核を形成する必要がある。

固体核は、周囲の小天体を集積して成長する。現在多くの研究では、1–100km サイズの微惑星を集積する微惑星集積モデルや、1–100cm サイズのペブルを集積するペブル集積モデルが考えられている。小天体の固体核への集積を考えるにあたっては、固体核近傍におけるガス流れやガス密度分布が重要であり、ペブルだけでなく小さな微惑星もこの影響を強く受ける（Okamura & Kobayashi 2021）。固体核近傍には、その重力により、固体核周りの閉じた流れ（大気）や、前後方向での「馬蹄軌道」と呼ばれる、固体核に向かう流体が U ターンする流れ、鉛直方向からの流れ込みが生む、赤道面で固体核から離れていく流れなど、いくつかの特徴的なガス流れ構造が形成される。これらの効果によって小天体の固体核への衝突断面積は有意に変化し得るため、微惑星集積とペブル集積の双方でこのガス流れを正確に取り扱うことが必須となる。

先行研究では木星を想定し、固体核が円軌道で軌道面と赤道面が一致する場合が調べられた。しかし、特に土星などの場合、先に形成された巨大ガス惑星などからの摂動によって、固体核が大きな離心率や傾斜角を持つことは考えられる。加えて、大きな離心率はペブル集積の効率を上げる可能性が示唆されている（Liu & Ormel 2018）。したがって本研究では、傾斜角・離心率を持つ固体核がつくる円盤のガス流れや固体核大気の構造を 3 次元流体シミュレーションにより調べる。そこで、離心率や傾斜角については、固体核の大気半径を特徴付ける Bondi 半径に対して、最大で Bondi 半径/軌道長半径比程度になると仮定してパラメータ値を設定した。これに加え、得られた固体核周りの流れ場およびガス密度場が与える固体核への小天体衝突率への影響についても計算を行い、得られた結果を用いて固体核の軌道離心率や傾斜角が巨大ガス惑星形成へもたらす影響を議論する。

原始惑星系円盤の近・中間赤外線散乱光スペクトル： 化学モデルに基づく動径方向依存性の予測

○中澤風音¹, 田崎 亮¹, 古家 健次², 野津 翔太¹

¹ 東京大学, ² 理化学研究所

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）の高い空間分解能と感度は、近・中間赤外線波長帯における原始惑星系円盤の面分光観測を可能にし、円盤の基本的な構成要素である氷ダストの特性を解明する手がかりをもたらす。これまでの観測および理論モデルは主にエッジオン原始惑星系円盤に焦点を当ててきたが、円盤内におけるさまざまな氷化学種の動径分布を解明するためには、将来的なフェイスオン円盤の観測が重要となる。しかしながら現状では、円盤化学モデルに基づく現実的な氷分布を考慮した場合に、散乱光スペクトルが中心星からの距離に応じてどのように変化するのは十分に検討されていない。

そこで我々はまず、rokko コード(e.g., Furuya et al. 2015, 2017)を用いた化学反応ネットワーク計算により T Tauri 星周りの原始惑星系円盤で C,H,O,N,S を含有する主要な揮発性氷の存在量分布を求めた。次に、得られた氷分布をダスト光学特性に反映させた 3 次元輻射輸送シミュレーションを実施し、近・中間赤外線波長帯における散乱光スペクトルを予測した。

結果として、円盤散乱光スペクトルには円盤で主要となる H₂O, CO₂, CO 氷の吸収特徴が明瞭に確認できた。スペクトルには、難揮発性有機物および H₂CO、¹³CO₂ に由来する弱い吸収特徴も見られる一方で、NH₃ や H₂S, OCS に由来する吸収特徴はアバundanceが小さいために弱く、スペクトルに現れない、もしくは H₂O など主要な吸収特徴に埋没することが分かった。本ポスター発表ではさらに、スペクトルに現れるこれらの吸収特徴について、その中心星からの距離依存性を調査した結果を報告し、将来観測による円盤内の氷分布の決定可能性を議論する。

“Chemically layered structures and ionisation in the disk around a low-mass Class 0 protostar NGC 1333 IRAS 4C: FAUST”

“Class 0 原始星天体 NGC 1333 IRAS 4C 円盤の化学層状構造と電離分布: FAUST”

○Shota Notsu (野津 翔太)^{1,2}, Nami Sakai², Zhang Yichen³, Lopez-Sepulcre Ana⁴, Chandler Claire⁵, Zhang Ziwei²,
Ceccarelli Cecilia⁴, Codella Claudio⁶, Satoshi Yamamoto⁷, FAUST Team members

¹ Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo
(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻),

² RIKEN, ³ Shanghai Jiao Tong University, ⁴ IPAG, ⁵ NRAO, ⁶ INAF, ⁷ SOKENDAI

Recent molecular line observations with high spatial resolutions have revealed vertical chemical stratification in Class I/II disks (i.e. chemical composition changing with height in the vertical direction of the disk), as well as a radial variation of ionisation rates. However, such chemical layered structures in Class 0 disk and envelope systems have been investigated only for limited objects, such as L1527. In the context of the ALMA Large Program FAUST, we report the results of molecular line observations toward the disk and envelope around the low-mass Class 0 protostar NGC 1333 IRAS 4C in the Perseus Molecular Cloud (Notsu et al. 2026 submitted). Previous observations have shown that this object is nearly edge-on with the disk rotation axis tilted almost perpendicular to the line of sight, making it suitable for studying the molecular abundance distribution as a function of disk height. We found that the molecules known as gas density tracers such as C¹⁸O and H₂CO are distributed around the disk midplane. In addition, molecules known as tracers of photochemical reactions such as CCH and c-C₃H₂ are distributed in the low density upper layers of the disk, unlike the distribution in L1527. Moreover, the column density ratio of HCO⁺/CO derived from the H¹³CO⁺ and C¹⁸O line emission suggests that the ionisation degree and the ionisation rate varies with the disk radius and they are larger in the outer region of the disk and envelope.

In our presentation, we investigate the results of our ALMA observations for IRAS4C, and also introduce previous studies on ALMA observations and chemical modeling concerning ionisation in Class 0-II disks, and discuss future prospects including ongoing ALMA Large Programs (such as CHEER).

A型星の組成から惑星落下の痕跡を探る

○ 國友 正信¹, Tristan Guillot², Morgan Deal³

¹ 久留米大学, ² コート・ダジュール天文台, ³ モンペリエ大学

A型星は表面对流層が極めて薄く、その表面組成に惑星の降着の痕跡を強く残すことが期待される (Kunitomo et al. 2018)。例えば難揮発性成分に富むA型星は、過去に岩石惑星が降着した可能性がある。しかし、恒星内部の物理過程も表面組成を変化させることが知られている (e.g., Kobayashi & Osaki 1973, Deal et al. 2018)。特にA型星は輻射流束が大きいために、原子が輻射圧によって浮上する効果 (輻射浮上) が無視できない。吸収断面積が小さい元素は重力によって沈降するが、輻射浮上や重力沈降は巨視的混合によって抑制される。本発表では惑星降着と内部過程の縮退を解く方法を提案する。

まず Cesam2k20 コード (Manchon et al. 2025) を用いて、惑星落下がない場合のA型星の進化を多数計算し、様々な質量、年齢、初期組成において表面組成を预言するモデルを構築した。輻射浮上には不透明度を高速に計算する Single-Valued Parameter 法 (Alecian & LeBlanc 2020) を用いた。乱流混合 (Richer et al. 2000) も考慮した。次に GALAH サーベイ (Buder et al. 2025) に含まれる 5541 個のA型星の表面組成と我々のモデルによる予測を比較した。特に揮発性元素の酸素と、難揮発性成分の鉄とカルシウムと鉄に注目した。

その結果、乱流混合の効果を適切に考慮すると GALAH のほとんどのA型星の組成を自然に再現することがわかった。A型星の表面では、鉄組成は輻射浮上により高く、酸素組成は重力沈降により低くなること、カルシウムは場合によるが沈降しやすい傾向にあること、またそれらの変化量 (~ 0.5 dex, 図1左) も観測と整合的であった。これは今回用いた恒星内部の元素拡散過程の理論モデルを支持する結果である。しかし、14 星の難揮発性成分に富む組成は内部過程だけでは説明できず (図1右)、惑星が降着した可能性が示唆される。つまり、内部過程を考慮した恒星進化モデルと表面組成の観測データを組み合わせることで、A型星まわりの惑星落下の痕跡を探索できることを示している。さらに今後の分光観測 (e.g., Gaia's GSP-Spec DR4) や PLATO (Nascimbeni et al. 2025) による星震学観測と組み合わせることで、将来A型星まわりの惑星系の形成・進化過程の解明につながることを期待される (Kunitomo et al. submitted)。

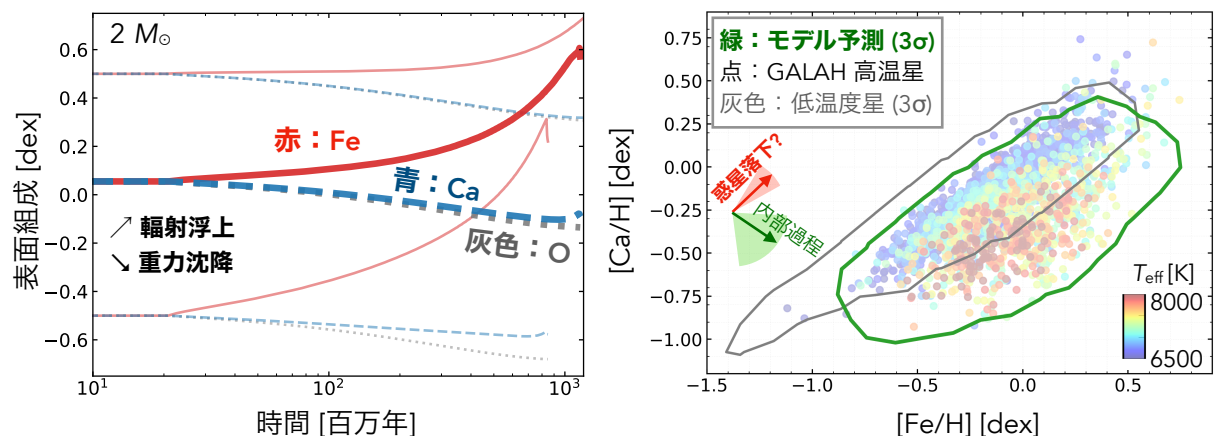


図 1: 左図: $2 M_{\odot}$ の星の表面組成の時間進化。赤, 青, 灰色がそれぞれ鉄, カルシウム, 酸素を表す。初期組成は $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.5, +0.055, -0.5$ の 3 通り。低金属量ほど輻射浮上が強い。右図: 高温星 ($T_{\text{eff}} \geq 6500$ K) の鉄とカルシウム組成についての、モデル予測 (緑線, 3σ) と観測 (点, GALAH) の比較。点の色は有効温度 (T_{eff}) を示す。灰色は GALAH の 46 万個の低温度星の分布を示す。

Where planetary solids survive sublimation around young and hot white dwarfs ^[1]

Dimitri Veras^{1,2,3}, Keiji Ohtsuki⁴, Rafael Martinez-Brunner³, Takato Nishio⁴, ORyo Tamon⁴

¹Centre for Exoplanets and Habitability, University of Warwick, Coventry CV4 7AL, UK

²Centre for Space Domain Awareness, University of Warwick, Coventry CV4 7AL, UK

³Department of Physics, University of Warwick, Coventry CV4 7AL, UK

⁴Department of Planetology, Kobe University, 1-1 Rokkodai, Nada, Kobe 657-8501, Japan

All observed planetary systems orbiting single white dwarfs have lived through the hot stellar transition from an asymptotic giant branch star. In this post-nebular transition period, the initial conditions for planetary system evolution throughout white dwarf cooling are established. The hottest ($\gtrsim 20,000$ K) and youngest ($\lesssim 20$ Myr-old) white dwarf planetary system host stars differ significantly from their canonical older and colder counterparts by failing to support solid body accumulation in the immediate vicinity (a few $R_{\odot}$) of the white dwarf. Here, we analyse the likely locations of both solid-body survival and the sublimated gaseous content during this pivotal epoch, and the consequences. We find that (i) reservoirs of iron-rich, rocky and water-rich asteroids of radius R that later observably enrich, or pollute, the white dwarf need to remain parked for the first tens of Myr of white dwarf cooling beyond critical distances of $(16 \text{ au}) \times \sqrt{1 \text{ km}/R}$ (for iron), $(30 \text{ au}) \times \sqrt{1 \text{ km}/R}$ (for rock) and $(130 \text{ au}) \times \sqrt{1 \text{ km}/R}$ (for snow), (ii) sublimation acts much more quickly than radiatively-driven orbital drifts from Poynting-Robertson drag or the Yarkovsky effect, and (iii) although large asteroids ($R \approx 10 - 1,000$ km) that are kicked on highly eccentric orbits around newly born white dwarfs could survive sublimation, they may fragment into debris which will sublime before the white dwarf cools. These results support, but do not necessitate, dynamical origin scenarios of polluted white dwarfs that feature delayed gravitational instability subsequent to the host star's asymptotic giant branch phase at Kuiper Belt-like distances, and beyond.

[1] Submitted to Mon. Not. R. Astron. Soc.

Matrix sublimation 法により生成した 高密度アモルファス氷の相転移機構

明治大学大学院理工学研究科 渡辺真帆

星間分子雲に浮遊するケイ酸塩鉱物微粒子は、CO、CO₂、NH₃ 等を含むアモルファス氷で覆われている。これらの低分子は光化学反応や表面反応等を経て複雑な有機化合物に分子進化すると考えられているため、反応場となるアモルファス氷の構造や物性を理解することが重要である。

Kouchi ら [1] は、アモルファス氷の生成法としてマトリックス昇華法を提案し、水蒸気と共蒸着した CO を約 35 K で昇華させると、純水の蒸着により生成したアモルファス氷よりも高密度なアモルファス氷が生成することを明らかにした。さらに、第二成分として Ne を使用し、約 12 K で Ne を昇華させた場合には結晶氷が生成することが明らかになっている [2]。アモルファス氷の構造は生成温度に応じて変化するため、生成する氷の構造は第二成分の昇華温度に依存すると予測される [3]。これまで、昇華温度の比較的低い分子種が用いられてきた。そこで本研究では、生成する氷の構造と昇華温度の関係を明らかにすることを目的として、昇華温度の高い CO₂ を第二成分としてマトリックス昇華法により氷を生成し、生成する氷の構造および氷生成後の相転移過程を解析した。氷の構造の解析には、赤外 (IR) 分光法および電子線回折法を用いた。また、CO₂ および水の昇華過程の解析には四重極質量分析法を用いた。

物質質量比 1:48 の水蒸気と CO₂ の混合気体を 5.7 K 共蒸着後、5 K min⁻¹ の速度で昇温した結果、105 K で CO₂ が昇華したことを確認した。IR スペクトルの形状の温度変化より、蒸着直後の水分子は CO₂ マトリックス内でモノマーや小さなクラスターとして存在しているが、昇温に伴って大きなクラスターへ成長することが明らかになった。さらに、100 K 付近で O-H 伸縮振動帯の積分強度が急激に増加する傾向が得られ、CO₂ の昇華に伴ってバルク状態の氷が生成したことが確認できた。生成した氷の O-H 対称伸縮振動の波数が純水から生成した低密度アモルファス (Low-density amorphous: LDA) 氷よりも低波数であることから、LDA 氷よりも秩序度の高いアモルファス氷が生成したと考えられる。

【参考文献】

- [1] Kouchi *et al.*, *Chem. Phys. Lett.*, **658** (2016), 287-292.
- [2] Hama *et al.*, *Phys Chem Chem Phys.*, **19** (2017), 17677-17684.
- [3] K. Kina, Y. Ono, D. Yoshida, T. Ikeda-Fukazawa, *J. Phys. Chem. C* **128** (2024) 7806.

太陽系外縁部における地球質量惑星の存在証拠 (惑星 X2 シナリオ)

Signatures of an Earth-class Planet in the Distant Solar System (Planet X2 scenario)

○パトリック ソフィア リカフィカ (Patryk Sofia Lykawka)^{1,2,3}, Pedro Bernardinelli^{4,5}, Jonathan Horner³

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 (National Astronomical Observatory of Japan)

³ サザンクイーンズランド大学、オーストラリア (University of Southern Queensland, Australia)

⁴ サンパウロ大学、ブラジル (Universidade de São Paulo, Brazil)

⁵ ワシントン大学、アメリカ合衆国 (University of Washington, USA)

Trans-Neptunian objects (TNOs) record the outer Solar System's dynamical history. While Neptune migration models reproduce resonant, classical, and scattered TNOs within 50 au, they consistently fail to explain the detached (perihelia $q > 40$ au), the high-inclination (inclinations $i > 45^\circ$), and the extreme TNO populations ($q > 60$ au). In this work, we use 4.5 Gyr N-body simulations to investigate two distinct scenarios: the influence of primordial scattering planets (Mars- to Earth-mass embryos) initially embedded within 30 au, and the presence of a distant undiscovered Earth-class planet, designated Planet X2. Our models also incorporate grainy Neptune migration driven by a massive primordial disk composed of planetesimals and 1500 Pluto-class bodies.

Our results show that scattering planets are generally short-lived and inefficient at producing the observed detached, high-inclination, and extreme populations. While a few exceptional cases improve agreement with observations, the overall probability of success remains near zero. In contrast, an Earth-class Planet X2 ($m \approx 1\text{--}2$ ME) on a distant, stable orbit ($a = 250\text{--}500$ au, $q = 200\text{--}250$ au, $i = 1\text{--}30^\circ$) profoundly sculpts the region beyond 50 au. This scenario generates a detached population extending to hundreds of au, including low-inclination members at $a > 100\text{--}250$ au. It also creates a significant high-inclination reservoir and a rich extreme TNO population whose orbits match all known members, such as Sedna. Specific configurations for Planet X2, particularly $m = 2$ ME at $a = 500$ au, simultaneously satisfy major observational constraints regarding population fractions and orbital distributions. Furthermore, these models fill the observed orbital $a\text{--}q\text{--}i$ niches that remain unexplained in migration models. Finally, we present comparisons between model results and observations of TNOs discovered by the Dark Energy Survey. The Planet X2 scenario provides a single framework explaining the bulk orbital features of the trans-Neptunian region. These findings support the existence of an undiscovered Earth-class planet in the Solar System and offer specific, testable predictions for ongoing and future wide-field surveys.

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP23K03482

New Horizons 探査支援を目的としたすばる望遠鏡 HSC による 太陽系外縁天体探査と移動天体の自転周期解析

○山下音緒（関西学院大学）、吉田二美（産業医科大学・千葉工業大学）、柳沢俊史（Star Signal Solutions 株式会社）、
伊藤孝士（国立天文台）、黒崎裕久（JAXA）、渋谷雅人（総合研究大学院大学）、吉川真（JAXA）

現在の観測結果に基づくと、カイパーベルトの広がりとは太陽から約 50 AU 付近で突然途切れているように見える。しかし、この距離が原始惑星系円盤の外縁を示すのであれば、約 100 AU 程度の広がりを持つ典型的な原始惑星系円盤と比べて太陽系は非常にコンパクトである。一方で、他の原始惑星系円盤には複数のリング構造が存在する例も報告されており、カイパーベルトのさらに外側に未発見の天体集団が存在する可能性もある。そのため、カイパーベルト以遠の天体探索には大きな意義がある。

我々は NASA New Horizons 探査機による太陽系外縁部探査を支援するため、2020 年から、国立天文台すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いた太陽系外縁天体 (TNO) サーベイを実施している。本研究では、取得したサーベイ画像から JAXA 移動天体検出システムを用いて移動天体候補を抽出した。この際、メインベルト小惑星の混入を防ぐため、見かけの移動速度が 11 arcmin/day 未満の天体のみを選別した。次に、従来は目視で行われていた真・偽天体の判別を効率化するため、2,895 個の候補天体を教師データとして機械学習モデルを構築した。こうして選ばれた TNO 候補について、複数夜にわたる軌道リンクを Find_Orb で行い、軌道が繋がった天体においては、StellaHunter Professional を用いて軌道を推定した。2 夜以上で検出された天体については Minor Planet Center への報告を進めている。

また、2020 年観測データについて移動天体の相対測光を行い、得られた光度曲線を用いて周期解析をして、複数のメインベルト小惑星について自転周期を決定した(図 1)。本発表では、測光および周期解析の手順、光度曲線から推定される天体形状について報告する。本発表は 2020 年度に取得したデータを扱ったが、今後は他の年のデータも同様に分析していく。本研究は限界等級約 26 等級に達し、天の川近傍の星が密集した領域も観測対象としている。そのような星が混雑した領域においても安定して移動天体を検出・解析できるパイプラインを確立することで、どんな領域のデータでも太陽系小天体検出が可能になり、発見数の増加が見込まれる。

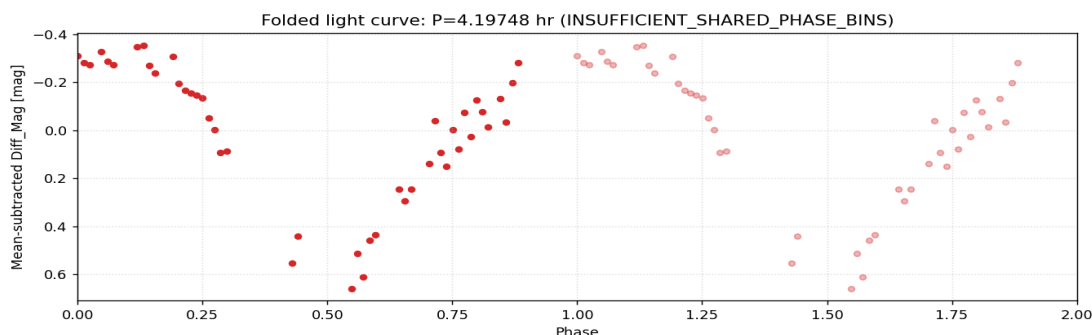


図 1：2015 NT26 (メインベルト天体)のライトカーブ

氷衛星上のクレーター形成過程に関する実験的研究 ：内部海及び氷殻厚さの影響

○菊川 涼介、保井 みなみ、大川 初音、荒川 政彦¹

¹ 神戸大学理学研究科惑星学専攻保井研究室

太陽系には、エウロパやエンセラダスのような内海を有する氷衛星が存在すると言われており、これらの天体はハビタブル天体として注目を集めている。これらの氷衛星ではクレーターの深さ/直径比やカオス地形など、内部構造の影響を受けた地形形成が示唆されている。そのため、これらの地形について理解する上で内海を覆う氷地殻上での衝突クレーター形成と貫通条件を理解することは重要であると言える。

そこで、本研究では内海を模擬した物質(シリコンオイル、食塩水)を用いた氷-液体層構造標的と、背面に液体の無い氷板単体標的への高速度衝突実験を行い、衝突現象に伴い形成される衝突クレーターの形状を調査した。実験には神戸大学の横型二段式軽ガス銃を用い、直径1 mmのアルミ球を衝突速度1 km/s、2 km/sで射出した。標的の温度は氷-液体層構造標的において、液体の温度をシリコンオイル：-10 °C・-15 °C、食塩水：-7 °C・-10 °C・-15 °C、氷板単体標的において、氷板の温度を-15 °Cと変化させて実験を行った。また、氷板の厚みは2.4~20.1 mmである。

その結果、氷板単体標的、氷-液体層構造標的ともに氷板の厚みの増加に伴い表側スポール直径が増加したが、両者の表側スポール直径の間にほとんど差異はないことが分かった。また、内海模擬物質の温度、すなわち氷板の温度が上がると表側スポール直径が増加した。一方、氷-液体層構造標的における裏側スポール直径は、同速度では氷板単体標的より小さくなった。氷板背面に液体がある時、衝突により発生する圧縮の圧力は氷板背面で弱い引張の圧力として反射するが、液体がない時には入射圧縮圧力と同じ大きさの引張波として反射するため、裏側スポールの大きさには違いが生じ、これが標的タイプごとの貫通されやすさを変化させる可能性も示唆された(氷板単体標的の方がより厚い氷板を貫通可能)。

ここで、衝突速度1 km/sでの氷板厚みの変化に伴う表側スポール直径の変化を説明するため π スケールリングを導入すると、 $\pi_r/\pi_{r\infty}=0.21(T/d_p)^{0.56}$ という式で説明することが可能であると分かった($\pi_r=r(\rho/m)^{1/3}$ 、 r :クレーター半径(m)、 ρ :標的密度(kg/m³)、 m :弾丸質量(kg)、 T :氷板の厚み(m)、 d_p :弾丸直径(m)、 $\pi_{r\infty}$:半無限標的での π_r)。先行研究と比較すると、氷に形成されるクレーターは砂上のものに比べ、クレーター形成層の厚み変化に対するクレーター直径の変化の様子は大きく変化しない(π スケールリングの傾きは大きく変わらない)一方で、クレーター形成効率は低い(同じ厚みでは氷上の方が小さいクレーターとなる)ことが示唆された。

欠陥含有アモルファス氷の構造とダイナミクス

○高橋 椋太郎、深澤 倫子¹

¹ 明治大学大学院 理工学研究科

宇宙空間の星間分子雲にはケイ酸塩鉱物を核とする星間塵が存在し、この表面に凝集した元素がアモルファス氷や CO_2 、 NH_3 などの低分子を生成する。これらの低分子は紫外線 (UV) 照射による光化学反応や表面反応等を経て様々な分子へと変化 (分子進化) すると考えられている [1]。したがって、宇宙空間における分子進化のメカニズムを理解するためには、反応場となるアモルファス氷の構造と物性を理解することが不可欠である。

アモルファス氷は密度の違いにより LDA (Low-Density Amorphous) 氷と HDA (High-Density Amorphous) 氷に分類され、昇温に伴って HDA 氷から LDA 氷へ相転移することが知られている [2]。星間分子雲に存在する氷は HDA 氷または LDA 氷であると考えられているが、Tachibana ら [3] によって、UV 照射に伴ってアモルファス氷の粘性が温度 50 K 付近で著しく低下する現象が報告された。アモルファス氷の粘性の低下は、UV 照射に伴う欠陥の形成に起因すると考えられるが、欠陥がアモルファス氷の構造や相転移に及ぼす影響はほとんど明らかになっていない。そこで本研究では、 OH^- 欠陥がアモルファス氷の構造や相転移機構に与える影響を解明することを目的として、分子動力学 (Molecular Dynamics: MD) 計算を行った。

本研究では、HDA 氷に様々な数の OH^- 欠陥を導入して温度 10 K から 210 K までの昇温計算を行い、HDA-LDA 転移温度の欠陥存在率依存性および粘性を解析した。また、欠陥周辺の局所構造の温度変化を調べるために、酸素原子間の動径分布関数 (Radial distribution function: RDF) を計算した。RDF の温度変化の解析結果から、HDA 氷中で水分子が形成する四面体構造は LDA 氷に比べて歪んだ構造をとるが、 OH^- 欠陥には HDA 氷における四面体構造の歪みを緩和する効果があることが明らかになった。このことから、50 K 付近の低温で生じる粘性の減少は、この歪みの緩和にともなう分子の再配置に起因すると考えられる。本講演では、欠陥がアモルファス氷の構造および粘性におよぼす効果について議論する。

【参考文献】

- [1] J. M. Greenberg, J. I. Hage, *Astrophys. J.* **361** (1990) 260.
- [2] K. Kina, Y. Ono, D. Yoshida, T. Ikeda-Fukazawa, *J. Phys. Chem. C* **128** (2024) 7806.
- [3] S. Tachibana, A. Kouchi, T. Hama, Y. Oba, L. Piani, I. Sugawara, Y. Endo, H. Hidaka, Y. Kimura, K. Murata, H. Yurimoto, N. Watanabe, *Sci. Adv.* **3**, eaao2538 (2017).

影長法による月面岩塊高推定のための室内実験の精度評価

○池田あやめ¹、山本聡¹

¹産総研 地質調査総合センター

月クレータ斜面には数メートルから数十メートルの岩塊が多く分布している。これらの岩塊は、熱疲労や天体衝突によって時間をかけて破砕され小さくなっていくと考えられるが^[1]、その具体的な形状進化過程は明らかになっていない。これまでの研究では、月主要鉱物の端成分からなるクレータ中央丘において、母岩組成によって異なる岩塊形状を示す可能性を指摘してきた^[2]。しかし、これまでの議論は主に2次元平面に投影された形状に基づいており、形状進化過程をより詳細に調べるためには、岩塊の3次元的な形状推定が必要である。衛星画像では複数視点からの画像取得に制約があるため、岩塊の高さ推定には影を利用する方法が有効である。先行研究では、単純形状の地物に対する影長法を用いた高さ推定手法が提案されているが^[3]、岩塊のような複雑形状に対する高さ推定手法は確立されていない。そこで本研究では、形状既知の岩石試料を用いた室内実験により、複雑形状を持つ岩塊の高さ推定に適した影長測定法を検討した。

形状が未知の地物の高さを推定するには、影長をどのように定義するかが大きな課題になる。本解析では、影長の測定法として、(1)投影された岩塊の重心から影端までの距離、(2)影と岩塊の明暗境界から影端までの最大距離、(3)岩塊の輝度最大点から影端の距離、の3つを仮定した。本発表では、それぞれの影長から推定した岩塊の高さを実測値と比較し、各手法による推定誤差とその特徴について報告する。

[1] Cambioni et al., 2021. [2] Ikeda and Yamamoto, 2025, JpGU abst. [3] Xie et al., 2021.

外気圏粒子の質量分析による月面組成分布

Compositional distribution on the lunar surface obtained by
mass spectrometry of exospheric particles

○横田勝一郎¹, 齋藤義文², 浅村和史², 西野真木², 益永圭³, 寺田健太郎¹

¹大阪大, ²ISAS/JAXA, ³山形大学

月などの小型天体は大気を持たず日光や太陽風に直接晒されるため、中性粒子及び帯電粒子（二次粒子）が表面から放出され、周囲には外気圏が形成される。外気圏の粒子の放出機構は元素毎に異なり、例えば揮発性元素は太陽光にとって選択的に放出されている。一方で揮発性元素以外の主要元素などは太陽風スパッタリングによる放出が支配的と考えられ、外気圏が表面組成比を反映している可能性が示唆されている。今回我々は月探査機「かぐや」に搭載された質量分析計の観測データを用いて、Mg, Al, Si, Ca, Fe の二次イオンの発生地点を求め、月表面に対する放出量の分布図を作成した。本発表ではこの分布図を紹介し、過去の月面での観測結果と比較した議論を行う。また、火星衛星探査計画（MMX）の質量分析計（MSA）でも、フォボスに対して同様の観測を予定しているため、予定する観測計画についても議論する。

月の高緯度域クレーターの永久影内外における 地形劣化プロセスの比較

○荒木亮太郎¹, 池田あやめ², 市川真弓¹, 木下真一¹, 佐藤広幸¹, 宮崎理沙¹, 村上真也¹,
山本光生¹

¹JAXA 宇宙科学研究所, ²産総研 地質調査総合センター

月面におけるレゴリス形成プロセスは、衝突破碎・攪拌と、日周温度変化に伴う熱応力が寄与している (Basilevsky et al., 2015)。形成年代の異なる複数の若いクレーターの比較から、熱応力はボルダーに特定方向への亀裂を生じさせる一方、ボルダーの破碎自体は衝突が支配的であることが示唆された (Ruisch et al., 2020)。ただし、両プロセスがクレーター斜面の崩壊と、それによる地形の劣化に、それぞれの時間スケールでどの程度影響しているかについては、十分に理解されていない。

我々は日周の熱応力がクレーターの地形劣化に及ぼす影響を調べるため、Schomberger A クレーターに着目した。Schomberger A は 78.6°S, 23.5°E に位置する直径約 29 km のクレーターであり、内部の北半分のみが永久影になっている。形成年代は <350 Ma と制約されており (Basilevsky et al., 2025) 現在も地形の劣化が継続中の若いクレーターである。そのため、同一クレーター内の比較で、日周の温度変化の有無が斜面劣化に及ぼす影響を検討できる。

日照域は LROC NAC, クレーター内は ShadowCam の撮像データを用い、SLDEM2013 地形データと組み合わせて Schomberger A の地形解析を行った。クレーター内斜面では、斜面崩壊によって形成されたマウンドが日照側と永久影側の双方で確認された。しかし、斜面のテクスチャは両者で大きく異なっていた。永久影側では、ボルダーの形成を伴ったひび割れが広範囲に観察され、現在も崩壊が進行していることが示唆された。一方、日照側の斜面は細かいレゴリスに被覆されており、滑らかでひび割れ地形は確認されなかった。

イジェクタ上のクレーター年代測定から、Schomberger A の形成は約 200-280 Ma と推定された。日照側のマウンド表面から得られた年代は約 160-200 Ma であったのに対し、永久影側のマウンドは部分ごとに約 200 Ma から 10 数 Ma までの幅広い年代が示された。

これらの結果は、日照側ではクレーター形成後おおむね 100 Myr 以内に斜面崩壊とマウンド形成が進行したことを示唆しており、日周の温度変化に伴う熱応力が内壁斜面の均質な劣化を促進したと考えられる。一方、温度変化に乏しい永久影内では、衝突に起因する斜面崩壊が局所的かつ断続的に発生し、より時間をかけて地形が劣化している可能性がある。

SELENE/TCを用いた月極域10 mモザイクマップ 作成手法の改良と影内部地形の可視化

Improved 10-m mosaic maps of the lunar polar regions using
SELENE/TC data and visualization of topography in shadowed regions

○ 木下真一¹, 佐藤広幸¹, 宮崎理紗¹, 荒木亮太郎¹, 山本光生¹, 村上真也¹, 市川真弓¹

¹ 宇宙航空研究開発機構

月周回衛星 SELENE（かぐや）に搭載された Terrain Camera（TC）は、10 m の空間分解能で月表面の地形を観測しており、月の地形・地質構造の理解や将来の探査計画において重要なデータを提供している。しかし、月極域を広範囲にカバーする高精度な TC モザイクマップは十分に整備されていない。

著者は、「SELENE/TC データを用いた月極域 10 m モザイクマップの作成検討」（2025 年度秋季講演会，P-012）において、Lunar Reconnaissance Orbiter（LRO）搭載の Lunar Orbiter Laser Altimeter（LOLA）データを基準とした位置ずれ補正処理によって得られた TC 画像の座標情報を用い、月南極および月北極を対象とした 10 m モザイク生成手法の基礎的検討を行った。前回の検討では、画像の重複領域において各画素の最大輝度値を採用していたが、画像間に残存する位置ずれの影響により地形が二重に見える問題があった。本研究ではこの手法を改良し、太陽方位ごとに分類した画像に対してスコアリングを行い、明部率が高く位置ずれ量の小さい画像を優先的に採用する画像選単位でのモザイク作成を実施した。

また、TC 画像影領域に対してトーンマッピング等の画像補正を適用することで、永久影領域を含む多数の領域において、影内部の地形構造の可視化が可能となった。一方で、影内部では画像間の位置ずれやストライプ状ノイズの影響が顕著であり、処理方法の検討が必要である。

本発表では、モザイク処理手順の改良内容とその適用結果、および作成中の月極域モザイクマップの事例について報告する。また、影内部の地形可視化を目的としたプロダクト生成の試みとその課題を整理し、今後の手法改良の方向性ならびに月極域探査への応用可能性について議論する。

地中レーダー観測による水氷検出に向けて： 減衰率計測に基づく水氷検出可能性の評価

○神田恵太郎¹、熊本篤志¹、石山謙^{2,1}

¹ 東北大学、² 東京国際工科専門職大学

近年、月極域で水氷の存在を示唆する観測が相次いで報告されている[1 など]。月の水氷は、その集積機構の解明が月科学の重要課題であると同時に、将来の月面活動を支える資源としても注目されている。日本とインドが推進する月極域探査計画（LUPEX）では、観測機器の一つとして地中レーダー（Water Scouting Surface Penetrating Rader; WaSSPeR）が搭載される[2]。地中レーダーは電波を用いた地下構造計測装置である。地下の2次元断面構造を素早く計測できるため、掘削地点の制約や非掘削地点での水氷分布調査に強みを持つ。

火星では、レゴリスと水氷の誘電率（電波の伝搬速度を決める物性値）の違いに着目した水氷の検出が報告されている[3]。しかし WaSSPeR の観測深度（最大 3 m 程度）では月レゴリスと水氷の誘電率がほぼ等しく、誘電率に着目した水氷検出は難しい。一方、電波の減衰率を決める物性値であるロスタングメントは、水氷がレゴリスより 2 桁程度小さい。またレゴリスの含有イルメナイトに起因して高周波ほど電波の減衰が大きく、伝搬に伴いレーダー信号は高周波成分ほど失われて狭帯域化する。したがって、減衰率やレーダー信号帯域の変化から、純粋な月レゴリスよりも低損失な水氷含有層を同定できる可能性がある。

本研究では、減衰率計測による水氷検出の可能性を数値シミュレーションで検証した。FDTD 法により WaSSPeR の観測を模擬し、誘電率・ロスタングメントの（1）深さ依存性（経験式[4]）（2）周波数依存性（2 極 Debye 分散[5]）（3）水氷混合の効果（Maxwell-Garnett 混合則[6]）（4）ランダム不均一を考慮した地下構造モデルを作成した。深さ 1–3 m に濃度・層厚を変えた水氷層を設定して模擬観測データを作成し、信号帯域の指標として、短時間フーリエ変換を用いて重心周波数の深さ変化を解析した。

水氷 10 vol%（~5 wt%）・層厚 2 m の場合、シミュレーションで得られた重心周波数の深さ変化を、水氷なしの地下構造モデルにおける重心周波数の深さ変化の理論予測と比較しても有意な差は現れず、水氷層は検出できなかった。水氷によるロスタングメント低下（約 10%）が、電波散乱に伴う統計ゆらぎとモデル誤差に埋もれるためだと考えられる。一方、水氷あり/なし地下構造モデルの解析結果の差分をとると、設定した水氷層に対応する遅れ時間で重心周波数の変化が理論予測と整合して現れた。これは実観測では、水氷を含む領域と含まない領域のデータの相互比較により水氷を検出できることを示唆する。本発表では、検出に必要な測線長等の観測条件と、検出可能な水氷濃度・層厚の範囲を議論する。

参考文献： [1]Sanin et al., 2017, *Icarus*, 283, 20-30 [2]Ohtake et al., 2026, *57th LPSC*, 1377 [3]Meng et al., 2026, *EPSL*, 678, 119832 [4]Heiken et al., 1991, *Lunar Sourcebook* [5]Boivin et al., 2022, *JGR:Planets*, 127(10) [6]Garnett, 1904, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 203, 385

月面クレーターにおける斜度と OMAT の関係から探る表層物質移動過程

石井出海、諸田智克

東京大学地球惑星科学専攻

月面では微小天体衝突や衝突振動、熱疲労によって表層物質が移動し、地形緩和が進行すると考えられている (Soderblom, 1970; Ikeda et al., 2022)。地形緩和は高地から低地への物質輸送によって生じるため、斜度と物質輸送量の関係を理解することは月面地形進化を解明する上で重要である。従来、地形緩和は斜度に比例した物質輸送を仮定した拡散方程式によって近似的に表現されてきた (Fassett and Thomson, 2014)。しかし、この仮定が実際の月面に適用可能であるかについては十分な観測的検証がなされていない。

表層物質の露出時間を直接測定することは困難であるため、本研究では表層の露出年代や宇宙風化の進行度を反映する指標である Optical Maturity Parameter (OMAT) を用い (Lucey et al., 2000)、斜度と OMAT の関係から月面における表層物質移動の特徴を検討する。また、熱疲労が表層物質移動を支配する場合には日射条件が重要となることから、複数クレーターを対象に、クレーターの緯度および斜面方向による宇宙風化度の違いについても検討した。

本研究では、日本の月周回衛星「かぐや」の Terrain Camera (TC) ([Haruyama et al., 2008](#)) および Multi-band Imager (MI) データ ([Ohtake et al., 2009](#)) を用いて斜度と OMAT を算出した。解析対象は Tycho, Jackson, King クレーターとし、各クレーターの北部・南部斜面および中央丘から 15 地点ずつデータを取得した。また、北部・南部の OMAT の違いを評価するため、斜度 30° 以下のデータを対象として Welch の t 検定を実施した。

その結果、全クレーターで斜度 30° 以下では OMAT と斜度の相関は弱い一方、 30° 以上では OMAT が急激に増加する傾向が認められた。また、中央丘では周辺斜面より高い OMAT を示す傾向が見られた。さらに、北部・南部間には有意水準 5% で統計的有意差は認められなかったものの、高緯度ほど平均 OMAT 差が大きくなる傾向が確認された。

宇宙風化のタイムスケールが $10^4 \sim 10^6$ 年程度であることを踏まえると、斜度 30° 以上で OMAT が急増することは、 30° 付近を境に表層更新が地質学的に短い時間スケールで活発化している可能性を示唆する。この結果は、従来の地形緩和モデルで仮定されてきた斜度と物質輸送フラックスの単純な比例関係では説明できず、 30° 付近を閾値とする新たな地形緩和モデルの必要性を示している。また、中央丘で高い OMAT が認められたことは、衝突時のリバウンドによって形成された破碎帯で表層崩壊が生じやすく、継続的な表層更新によって新鮮な物質が露出している可能性を示唆する。さらに、高緯度ほど北部・南部間の平均 OMAT 差が大きくなる傾向は、極側斜面と赤道側斜面の日射条件の違いにより熱疲労の進行度や表層更新速度が変化し、宇宙風化の地域差が生じている可能性を支持する。

月面における水・金属元素の定量と資源活用の可能性

○諸田 智克¹, 長 勇一郎¹, 長岡 央², 仲内 悠祐², 榎戸 輝揚³,

辻 直希³, 吉岡 和夫¹, 庄司 大悟¹, 杉田 精司¹

¹東京大学, ²立命館大学, ³京都大学

将来の持続的な月面活動と深宇宙への進出に向けての最優先課題の一つは、月面での資源の確保である。将来の月面開発は段階的に拡大していくことが見込まれており、月面開発の黎明期においては地球からの輸送物は大きくならざるを得ない。しかし、月面で現地調達する物質を徐々に増やしていくことで、持続的な活動へと発展できる。そのため、資源探査は月面活動における成長期だけでなく、成熟期においても主活動であり続けると考えられ、資源探査技術の確立が国際的にも重要とされている。この技術と資源データの早期獲得は日本の国際的プレゼンスの向上に寄与する。

月極域に主に存在すると考えられる水は生命維持に必要なだけでなく、水素と酸素に分解することにより、更なる深宇宙や地球-月面間の移動のための燃料として用いることができる。また月の岩石やレゴリスに含まれる Fe や Mg、Ti、Al、Si などの金属は、長期的な月面活動においては建設材料や太陽電池パネルの材料としての利用が期待される。レゴリスを利用した建材製造においても、建材強度が金属含有量に依存することが知られていることから、元素組成の計測は重要である。

軌道上からの水観測や水分子挙動の理論研究によると (Schorghofer & Taylor, 2007, Sanin et al. 2017)、水は深さ 1m 程度までの地下浅部に存在し、地形や日照条件、レゴリスの物理状態などに依存して水平方向の濃度に分布があると期待される。Fe、Mg、Ti は主にカンラン石や輝石、チタン鉄鉱などの苦鉄質鉱物に含まれており、Al は主に斜長石に多く含まれる。K、Th はレアアースの濃集の指標となる。よって資源探査においては、深さ 1m 程度までの元素や鉱物の面的な分布を測定し、資源濃集領域を特定するための技術が求められる。加えて、資源利用の観点から、濃度・総量の評価、存在形態（どの鉱物にどの元素が濃集しているか）を決定する技術が必要となる。

我々は長期的な月面活動を支えるための資源探査技術確立することを目指し、その場観測装置の検討と、資源探査フローの構築を行なっている。想定する装置は、広角分光カメラ、中性子・ガンマ線センサ、レーザー誘起プラズマ発光分光計 (LIBS)、顕微分光カメラであり、これらを組み合わせて、資源の発見から濃度・総量の評価および存在形態（どの鉱物にどの元素が濃集しているか等）の特定までの手法を確立する。広角分光カメラは可視-近赤外波長帯における苦鉄質鉱物や斜長石のスペクトル吸収を検出可能であり、これにより着陸領域における視野全体 (>数 km) の鉱物や、スペクトル吸収をつくる Fe や Ti の定性的な空間分布を決定することで、資源含有量が有望な露頭を同定する。次に中性子・ガンマ線センサと LIBS により、反射スペクトルのみからは得られない、元素の定量値を得る。中性子・ガンマ線センサは、深さ約 1 m までの平均的な含水率と、深さ約 10cm までの元素量 (K、Th、Fe、Al) を定量する。LIBS はレーザーアブレーションで発生したプラズマの発光スペクトルから表層数 cm の深さまでの H、Fe、Ti、Al、Mg、Ca、Si、K、Na の分布を最高 300 μm の空間分解能で、面的に定量する。両者の観測を組み合わせることで深さ方向の資源分布を決定する。顕微分光カメラは 10 $\mu\text{m}/\text{pix}$ の空間分解能を持ち、レゴリスや岩石中の個々の鉱物を空間分解して連続分光観測することで構成鉱物を特定する。これにより、「どの元素がどの鉱物にどのような純度で含まれているか」を決定でき、資源の抽出方法を検討する上での基礎データとなる。また、本装置は地質や土質の調査、放射線環境の把握にも寄与し、月面インフラ構築に広く貢献する。

可視・近赤外分光を用いた月・地球岩石サンプルの岩石組織の取得

と評価～SLIM MBC からその先の月探査に向けて～

Measurement and evaluation of rock texture of lunar and terrestrial samples using visible/near-infrared spectroscopy ~ from SLIM to future lunar exploration~

○長岡央¹、仲内悠祐¹、佐藤広幸²、大竹真紀子³、丹秀也¹、佐伯和人¹

1)立命館大学、2)宇宙航空研究開発機構、3)岡山大学

可視・近赤外分光法はこれまで月面の鉱物種を特定する手法として幅広く用いられてきた。日本の月探査は、周回機かぐや『SELENE』による全球観測、それに続く小型月着陸実証機 SLIM (Smart Lander for Investigating Moon)は2024年1月に日本初の月面ピンポイント着陸を成功させた。SLIM は周回からかぐやの可視・近赤外分光観測により発見したマントル由来のカンラン石 (Yamamoto et al. 2010, Nature Geoscience) が露出しているネクタリス盆地周辺の組成を調査した。SLIM に搭載された科学観測装置マルチバンド分光カメラ MBC (Multi-Band Camera) はフォーカス機能を搭載することで10m先の対象で1.1mm/ピクセルという高い空間解像度で、10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、月面画像の取得に成功した。10バンドの月面撮像データの解析から、着陸地点周辺に分布する岩体中の鉱物種 (輝石、カンラン石、斜長石) を特定し、岩石種の判別を行った。

我々のチームではこれまで 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、地上での標本サンプルデータを収集してきた。同じサンプルに対して、拡散反射分光装置や蛍光 X 線分析を適用し複数の分析データも合わせて取得することで、同じサンプルに対して分光情報 (→鉱物情報) と元素情報を相互比較可能な分析体制を整えてきた。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データと他の分析手法による分析データの比較結果を示し、MBC-EM での岩石組織や鉱物種の評価結果を議論する。さらに、得られたデータベースをもとに月面 MBC データの解釈や議論、昨今の月面探査の潮流にも合わせた将来探査での分光観測の応用を見据え次世代分光カメラ開発や探査に活用するプランについても言及する。

放射線シミュレーションを用いた 水星表層-宇宙線相互作用の評価

○ 木下岳¹, ○ 鈴木雄大², ○ 吉岡和夫¹, ○ 木村智樹³, ○ Marco Pinto⁴,
○ 平田佳織⁵, ○ Daniel Heyner⁶, ○ 村上豪²

¹ 東京大学, ² JAXA/ISAS, ³ 東京理科大学, ⁴ Laboratory of Instrumentation and Experimental Particles Physics, ⁵ レスター大学, ⁶ ブラウンシュバイク工科大学

大気や磁気圏による遮蔽効果が小さい水星には高エネルギーの宇宙線が降り注いでいる。宇宙線が地殻にどれほどの深度まで貫入し、経路上にどれくらいのエネルギーを残すかは、放射線によるスペクトル変化などを適切に切り離して地質プロセスを理解するうえで重要である。しかし水星においては現在のところ地下サンプルの分析は計画されていない。そこで本研究では、来る 2026 年末に水星周回軌道に投入される水星探査機 BepiColombo の観測データの解釈などを見据え、放射線シミュレーションによって、宇宙線と地殻の相互作用を評価する。

モデル空間に構築した水星模擬物質のブロックに、宇宙線陽子を入射させるシミュレーションを実施した(下図)。入射エネルギー、Deposited Energy (粒子が侵入経路上に残すエネルギー)、最大侵入深度などのパラメータを記録し、それぞれの関係性を調べた。その結果、一次陽子は地下 2 m 程度で停止するものの、二次粒子はさらに深くまで分布し、特に二次電子は最大 6 m まで到達することが判明した。Deposited Energy について、もう一つの主要な入射放射線である太陽風の場合と比較すると、探査機のリモートセンシングの主要な観測深度においては、宇宙線の寄与は小さいことも分かった。これは太陽風のフラックスの方がはるかに大きく、かつ低エネルギーであるため貫入深度が宇宙線よりはるかに浅く、地殻浅部で集中して停止することによると考えられる。

以上より、宇宙線の入射深度は数 m オーダーで極めて大きいものの、浅い深度に残すエネルギーは相対的に小さい。よって太陽風と水星地殻の相互作用を実験的に検証した Caminiti et al. (2024) で議論されているような、太陽風による宇宙風化作用を観測データの解釈にあたってはより重視すべきであると考えられる。

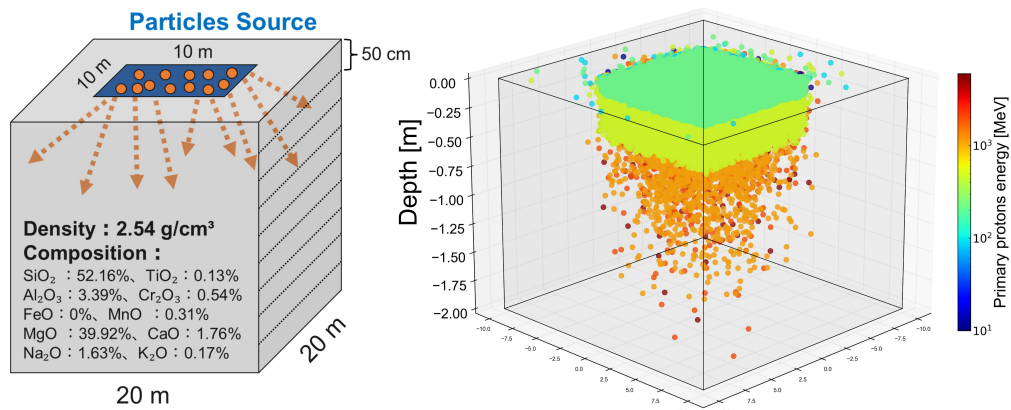


図 1: 水星模擬地殻による放射線シミュレーションのセットアップ

コンドライトの衝突によって形成される蒸気雲内の

クエンチ組成計算における温度圧力履歴のモデル化

○宮脇誠一^{1,2}、玄田英典^{1,2}

¹東京科学大学 地球生命研究所、²東京科学大学 理学院 地球惑星科学系

初期地球では現在よりも高頻度で天体衝突が起こり、それに伴って形成される高温・高圧の蒸気雲が、惑星表層環境の化学進化に影響を与えた可能性がある。蒸気雲は膨張・冷却に伴って化学反応速度が低下し、気相組成が平衡組成に追従できなくなることでクエンチする。そのクエンチ組成を推定するためには、化学反応速度計算だけでなく、衝突蒸気雲の温度・圧力履歴を適切にモデル化する必要がある。

先行研究の平衡計算では、コンドライト質物質の衝突加熱により、 H_2 、 H_2O 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 等を含む大気形成される可能性が示されている (Hashimoto et al., 2007; Schaefer and Fegley, 2010)。一方、衝突時には Si 、 Mg 、 Fe などの岩石形成元素も気相へ取り込まれ、冷却中に凝縮する。凝縮は気相量、平均分子量、酸化還元状態および潜熱収支を変化させるため、蒸気雲の温度・圧力履歴は単純な理想気体の断熱膨張のみでは決まらない。

本研究では、三次元 SPH 衝突計算から得られる初期状態をもとに、半球状蒸気雲の断熱膨張、多相平衡凝縮および $H-C-N-O-S$ 系の気相反応速度計算を組み合わせた。凝縮に伴う気相量、平均分子量および潜熱の変化を温度・圧力履歴に反映するとともに、断熱膨張に用いる比熱比 γ を変化させ、クエンチ組成への影響を調べた。

その結果、クエンチした CO 、 CO_2 、 H_2O 、 H_2 等の主要ガスは γ にほとんど依存しなかった一方、 CH_4 、 NH_3 、 HCN は強い γ 依存性を示した。 γ が大きいほど同じ温度で圧力が高く保たれ、 $\gamma = 1.6$ では $\gamma = 1.2$ に比べて、 CH_4 が約 2 桁、 NH_3 および HCN が約 1 桁増加した。

また、凝縮相と気相の間の放射による熱交換時間は断熱膨張の時間スケールより十分短く、両相がほぼ同じ温度を保つことが示唆された。そこで、凝縮粒子が気相に同伴され、気相・液相・固相が一体となって膨張する一温度混相モデルを検討した。このモデルでは凝縮相も熱容量に寄与するため有効比熱比が小さくなり、温度低下が遅れて、より低圧でクエンチする。その結果、 CH_4 、 NH_3 、 HCN 等の還元的な多原子分子の生成量は気相のみを膨張させる場合より少なくなる可能性がある。このため、気相のみの反応速度計算へ移行する時点の設定は、最終組成を左右する重要な不確定要因となる。本発表では、比熱比 γ 、凝縮相との熱的結合および気相計算への移行条件を比較し、衝突蒸気雲のクエンチ組成計算に適した温度・圧力履歴の扱いについて議論する。

本研究は、国際卓越研究大学制度の助成による、東京科学大学博士支援事業の支援を受けたものです。

The role of IDPs dehydration on the upper atmospheres of Mars and Venus

○長谷部聖憲¹, 吉田辰哉², 中村勇貴³, 小山俊吾², 狩生宏喜², 寺田直樹¹

¹東北大学, ²東京科学大学, ³東京大学

The atmospheric D/H ratios on Mars and Venus are enhanced by ~5 times and ~90 times the value on Earth, respectively. These features suggest that large amounts of water have escaped into space from the planets. Additionally, water-supply processes that enter the atmosphere, such as the dehydration of interplanetary dust particles (IDPs), are considered important for explaining the atmosphere's current isotopic composition. IDPs, containing water as hydrous minerals with a lower D/H ratio than the Martian bulk atmosphere, ablate at high altitudes and supply water directly into the upper atmosphere. Nevertheless, the effect of IDPs' dehydration on the isotopic composition of planetary water is poorly understood.

In this study, we use a 1-D atmospheric photochemical model developed by Nakamura et al. (2023), coupled with a numerical model of IDP decomposition and dehydration, to clarify the effect of water supplied by IDPs on the vertical D/H ratio profile. The photochemical model simulates photochemical reactions, vertical diffusion, atmospheric escape, water-ice cloud formation, and their isotopic fractionation in the atmospheres of Mars and Venus. In the dust dehydration model, we assume a CM chondrite-like composition containing ~20 wt% water as hydrous minerals, with isotopic ratios matching the VSMOW value. The water injection flux of $2.4 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ is for the nominal model, scaled from the observed influx by the Long Duration Exposure Facility on Earth (Love & Brownlee, 1993) to that on Mars and Venus. The dehydration rate is given by the experimental results of Micca Longo et al. (2025). The vertical injection profile is calculated in our dust dehydration model.

Our current results show that the water supply from IDPs regulates the HDO/H₂O ratio in the Martian upper atmosphere. In the nominal model, ice cloud formation causes a strong depletion in the HDO/H₂O ratio from $\sim 5 \times \text{VSMOW}$ to $\sim 0.1 \times \text{VSMOW}$ between the surface and 60 km altitude. Above the ice cloud, however, the HDO/H₂O ratio approaches the IDPs' isotopic ratio with increasing altitude. This change in the HDO/H₂O ratio in the upper atmosphere is driven by the high injection flux of water from IDPs relative to photochemical reaction rates, water condensation/sublimation rates, and the upward transport rate of water. On the other hand, the isotopic ratio of atomic H shows little change even though it is a primary product of H₂O photodissociation. This is because the background atmospheric densities of H and D are several orders of magnitude higher than those of H₂O and HDO, high enough to make the isotopic change caused by the water supply from IDPs negligible.

In the fall meeting, we also plan to present the effects on the ionosphere and the results of the Venus atmosphere. Our current results with the Martian atmosphere imply that the ionospheric D/H ratios are also altered via ion-neutral reactions, changing the D/H ratio of non-thermal escaping hydrogen. Furthermore, on Venus, non-thermal hydrogen escape is considered important for explaining the enriched atmospheric D/H ratio (Chaffin et al., 2024). By comparing the effects of IDPs dehydration on Mars and Venus, we will discuss the importance of IDPs for the long-term evolution of planetary atmospheres.

Enrichment of the Water Vapor D/H Ratio through Sulfuric Acid Formation in Venus' Atmosphere

○Mai Kurusu¹, Tatsuya Yoshida^{2,1,3}, Akinori Hasebe¹, Benjamin Normann Frandsen⁴, Robert Skog⁴, Yo Kawamura^{1,5}, Hiroki Karyu^{2,6}, Naoki Terada¹, Takeshi Kuroda^{1, 7}

¹Tohoku University Graduate School of Science, ²Earth-Life Science Institute (ELSI), Institute of Science Tokyo, ³University of Washington,

⁴Department of Chemistry, University of Helsinki, ⁵LTMOS/IPSL Sorbonne Université, ⁶Belgian Institute for Space Aeronomy (BIRA-IASB), ⁷National Institute of Information and Communications Technology

The D/H ratio of water vapor in Venus' atmosphere is much higher than that of terrestrial ocean water and has been regarded as an important tracer of past water loss. Previous observations also indicate that this ratio increases with altitude across the cloud region, from approximately 120 times VSMOW below the clouds at 26-45 km (De Bergh et al., 1991) to approximately 240 times VSMOW near the cloud top and haze region at 70-95 km (Fedorova et al., 2008), as shown in Figure 1. Although sulfuric acid formation in Venus' clouds can modify the vertical HDO/H₂O ratio by consuming H₂O and HDO at different rates, its quantitative impacts have not yet been evaluated. In this study, we construct atmospheric isotopic fractionation models that consider D/H fractionation associated with sulfuric acid formation as well as photolysis of water vapor while treating the SO₃ + HDO rate coefficient as an uncertain parameter.

We first examined the fractionation using a Rayleigh fractionation framework, applying the rate coefficients reported by Lovejoy et al. (1996) for gas-phase reactions of SO₃ with H₂O and D₂O. The results show that the residual water-vapor D/H ratio can increase owing to the slower consumption rate of HDO than that of H₂O, which is sufficient to reproduce the observed contrast across the cloud layer. We then apply the one-dimensional photochemical model, PROTEUS, to examine the vertical profiles of D/H ratio of relevant species. The model considers D-bearing reactions among HDO, HDSO₄, D, OD, DO₂, HD, and HDO₂, with fixed background profiles such as SO₃ abundance, CO₂ number density, and temperature. These calculations also show that sulfuric-acid formation can produce an approximately factor-of-two D/H increase across the cloud layer, comparable to the observed below-cloud to cloud-top contrast. These findings suggest that sulfuric acid formation plays an important role in shaping the vertical D/H distribution in Venus' atmosphere and may also influence the D/H fractionation associated with hydrogen escape to space.

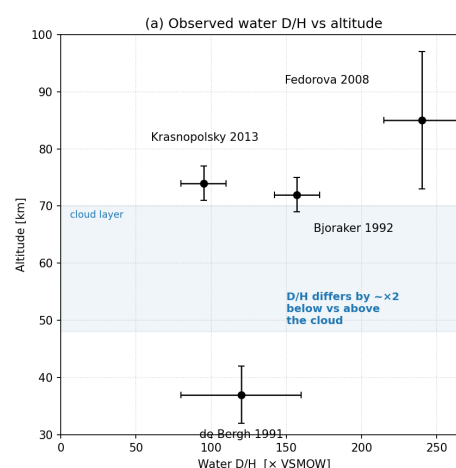


Figure 1. Observed water D/H ratios at different altitudes around Venus' cloud region. The shaded area indicates the cloud layer, where sulfuric-acid formation may modify the HDO/H₂O ratio.

<References>

Donahue et al. (1982), Science, 216, 630-633; De Bergh et al. (1991), Science, 251, 547-549; Fedorova et al. (2008), JGR, 113, E00B22; Lovejoy et al. (1996), J. Phys. Chem., 100, 19911-19916; Cangi et al. (2023), ApJ, 952, 35.

高速回転球殻内の非弾性熱対流により形成される 表層帯状構造の長時間挙動

○ 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 大学院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 大学院理学研究院 地球惑星科学部門, ⁶ 神戸大学 理学研究科惑星学専攻/CPS

木星や土星の大気表層に見られる縞状構造は、赤道域の強い順行流と中高緯度で順行・逆行が交代する多重ジェット構造を伴い、長期間にわたって安定に維持されている。しかし、これらの特徴的な構造とその長期安定性を統一的に説明できる力学的描像は未だ確立されていない。

木星型惑星大気の縞状構造を説明するモデルのうち、本研究ではガス惑星内部の熱対流による角運動量再分配にその起源を求める「深い」モデルに注目する。このモデルでは、赤道域の強い順行ジェットは比較的容易に再現される一方で、中高緯度に見られる交代ジェット群の生成は長らく困難であった。しかしながら、「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十分に薄く設定することで、内球接円筒内部に小規模な対流活動が維持され、その結果として中高緯度にも交代ジェット群が形成され得ることが示されている (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) はわずか 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た。実際、長時間積分を実施したところ、0.1 粘性時間程度の段階で見られた中高緯度の交代ジェット群は時間とともに融合し、16,000 回転後には 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仮定し、非弾性系における最高解像度の計算例である Heimpel *et al.*, 2022 の設定に準拠した回転球殻熱対流の長時間数値積分を行った。焦点は、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である。計算の初期段階では、赤道域の強い幅広の順行ジェットと中高緯度に交代する複数の幅狭ジェットが出現し、木星型大気の表層パターンに似た縞状構造が観察された。しかし時間とともに中高緯度のジェットは融合し、43,800 回転の時点では 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。しかしながら全運動エネルギーは依然として増加傾向にあり、統計的平衡状態には達していない。引き続き時間積分を継続し、縞状構造の遷移や性質を追跡する予定である。

参考文献

Heimpel, M., Aurnou, J., 2007: *Icarus*, **187**, 540–557.

Heimpel, M. H., Yadav, R. K., Featherstone, N. A., Aurnou, J. M., 2022: *Icarus*, **379**, 114942.

Takehiro, S., Sasaki, Y., Ishioka, K., Enomoto, T., Nakajima, K., Hayashi, Y.-Y., 2024: *Icarus*, **420**, 116154.

タイタン中層大気風速の中期時空間変動の解析

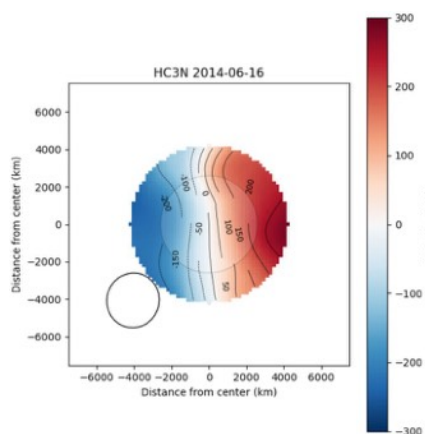
飯野孝浩(1, 2), 佐川英夫(3), 中野渡 勇翔(1)

(1)山梨大学理工農学総合研究部 (2)東京大学情報基盤センター (3) 京都産業大学理学院

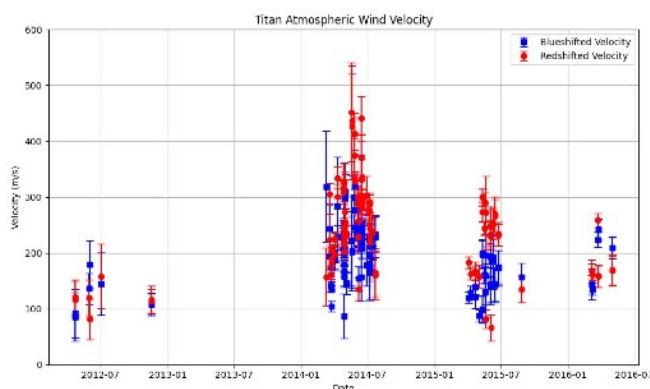
土星衛星タイタンの大気は、自転速度を上回る東西風であるスーパーローテーションの存在によって特徴づけられる。風速の観測手法には、雲・ヘイズの空間構造や、太陽輝線のドップラーシフト解析などが存在する。中でもヘテロダイン法を用いた高分散分光は、分子種のドップラーシフトを高精度に直接検出可能であることから、非常に有力な手法である。さらに、分子種の存在する高度の差異を利用することで、高度方向の風速分布である鉛直シアの導出も可能となる。

ALMAの実用化により、視直径0.7秒ほどのタイタンにおいても風速の空間分布の直接観測が可能となっている。タイタンにおける1年は地球の30年に相当し、ALMAの稼働から現在まで約0.5タイタン年が経過している。タイタンの大気組成は大規模な時空間変動を呈することが知られており、子午面循環の逆転がその駆動源であると考えられる。大気物理においても類似の時間変動が捉えられており、2016年～2017年にかけて、熱圏の風速が1年間で350 m/sから200 m/sへと減速したことが明らかになっている (M. Cordiner et al., 2020, ApJL)。だが観測時期は短く、季節変動を捉えるには不十分であった。

我々はALMAアーカイブの悉皆的なデータ処理により、5000点におよぶ分光データベースを構築、研究に用いている。これを用い、新たに2012年から現在に至る高精度データの解析を通じ、複数の季節をまたぐ風速構造の時空間変動の導出を試みた。解析対象の分子種は HC_3N , CH_3CN , CO , HCN , HNC およびその同位体である。中でも、より高層の大気運動をトレースする分子種である HC_3N 輝線を用いた解析により、先行研究の前後における時間変動の導出に成功しつつある。いっぽうで、ビームサイズや観測遷移といったデータ間の差異に起因する変動の影響は処理しきれず、今後は新たな基準で再処理したデータ群を用いた詳細かつより大規模な解析に発展させる。本発表では、データセットの概要や解析手法、そして得られた時空間変動の初期成果について報告を行う。



HC₃N分子輝線を用いて計測したタイタン大気風速マップの例



HC₃N分子輝線から導出した風速の時間変動。データ間の差異は主にビームサイズの違いに起因しており、全データの再処理を通じて同一環境での再解析を目指す。

低速自転惑星の大気の日射応答：金星・ 潮汐固定惑星・地球赤道大気

○今村 剛¹

¹ 東京大学 新領域創成科学研究科

金星やタイタン、潮汐固定された系外惑星といった、低速自転惑星の大気に多く存在すると考えられている力学状態として、赤道域を中心に大気が固体惑星よりも速く回転するスーパーローテーションが挙げられる(Imamura et al. 2020)。このような運動を引き起こす様々なメカニズムが提唱されているが、その一つに、太陽光加熱の昼夜間コントラストによって惑星規模の擾乱が励起され、これが自転軸まわりの角運動量を赤道方向に運ぶという考えがある(Nicolas and Vallis 2026)。ハドレー循環によって極向きに運ばれる角運動量の一部が、自転軸に対して非対称な擾乱によって赤道向きに運ばれると、赤道域上層大気に角運動量が蓄積され、スーパーローテーションが生成あるいは維持されうる。

近年、金星探査機あかつきによって得られた金星雲頂の風速データから、日射によって励起される熱潮汐波が角運動量の赤道向き輸送をもたらすことが発見された(Horinouchi et al. 2020)。このメカニズムが雲層高度付近のスーパーローテーションの維持に大きく寄与していることが、金星 GCM の結果によっても支持されている。一方、潮汐固定された系外惑星において、中心星による昼側の大気加熱が Matsuno-Gill パターン(Matsuno 1966)と呼ばれる地球熱帯気象で見られる大気循環を引き起こし、赤道向き角運動量輸送をもたらしてスーパーローテーションを引き起こしうるということが、指摘されている(Showman & Polvani 2010)。地球においても赤道大気は惑星自転の低影響化にあるため、そこで生じる力学現象は低速自転惑星と共通する。しかし地球大気では赤道加速はあまり注目されてこなかった。

金星と潮汐固定系外惑星における大気の日射応答はこれまで、それぞれ「熱潮汐波」

「Matsuno-Gill パターン」として別々に研究されており、統一的な議論はされてこなかった。一方で、スーパーローテーションする大気の座標系見るとスーパーローテーションと逆方向に大気中を移動する熱源（昼側で加熱・夜側で冷却）が存在し、その熱源に固定された非軸対称な擾乱が励起され、角運動量を赤道向きに運ぶ、という側面は両者に共通である。そこで本研究では、Matsuno (1966)に準じた強制波の線型解をもとに、両者の潜在的な共通点について議論する。また、金星の下層大気において日射がもたらす昼夜間あるいは地形依存のコントラストが赤道向き角運動量 輸送をもたらしうることを示す。

超小型火山地形ルートレスコーンから炙り出す 火星の超近過去：第一報

○野口里奈¹、小池みずほ²、松岡萌³、菅原春菜⁴、平田佳織⁵、川合慶²、笠原駿佑¹

¹新潟大学、²広島大学、³産業技術総合研究所、⁴宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、
⁵レスター大学¹

地球では、火山由来の熱と地表～地下浅部の水（氷）の相互作用による熱水環境が活発な生命活動領域となることがある。特に、高温溶岩と含水層の爆発的相互作用によって形成される小型火山地形ルートレスコーンは、直径約 100 m の超小型火砕丘であり、噴火当時の火砕物と含水層物質を保存する重要な地形である実際、2014-2015 年のアイスランドのホルフロイン噴火では、溶岩の川床流入により熱水環境が生じ、特異な微生物群集が確認された（Duhamel et al., 2022）。これは、火山活動により形成される熱水環境が、一部の生命にとって好適（ハビタブル）であることの証拠である。

火星の赤道域に位置する中央エリシウム平原は、地質学的に「超近過去」である 250 万年前～現在までに洪水や火山活動を経験した地域であり（Vaucher et al., 2009）、超近過去の火星を知る上で極上のフィールドである。この地域には、多数の洪水地形・洪水状溶岩・ルートレスコーンが分布し、水と隣接した火山活動がごく最近まで活発であったことが示されている（Noguchi and Kurita, 2015; Voigt et al., 2023）。さらに近年、探査機インサイトによる火震その場観測や応力場解析により、ケルベロス地溝帯地下に活動的マントルプルームの存在が示唆された（Broquet and Andrews-Hanna, 2023）。これらの研究は、火星が現在も「生きている」可能性を示す。火星の火山活動が生命にとっての好適環境（ハビタブル環境）にどのように影響するかを調べるのが極めて重要である。

そこで本研究は、火星の超近過去における火山活動と水・氷の相互作用を解明し、火山活動が提供しうるハビタブル環境を検証することを目的とする。中央エリシウム平原に見られるルートレスコーンに着目し、A) 火星リモセンデータ解析、B) アイスランドでのアナログ調査、C) 岩石試料分析を組み合わせ、将来の火星着陸探査に直結する観測シナリオを火山学的視点から構築する。本発表では、本研究構想を紹介し、2026 年 8 月に実施するアイスランド調査結果を速報する。

地球・火星の蛇行稜における地形解析： 断面形状・幾何に基づく反転流路地形とエスカーの識別 Geomorphometric analysis of sinuous ridges on Earth and Mars: Discrimination of inverted fluvial channels and eskers based on cross-sectional geometry

○庄崎弘基¹, Susan J. Conway², Anna Grau Galofre², Nicolas Mangold²,

門屋辰太郎¹, 関根康人¹

¹東京科学大学 ELSI, ²ナント大学 LPG, CNRS

Sinuous ridges are elongate, positive-relief landforms widely distributed on the Martian surface, and serve as an important indicator for deciphering the evolution of ancient Martian surface environments. These ridges include inverted fluvial channels of fluvial origin and eskers of glacial origin; however, discriminating between them based solely on remote sensing data has remained challenging because they can produce similar planform morphologies, despite their different hydraulic conditions.

The present study investigates whether cross-sectional geomorphometry can provide diagnostic criteria for discriminating between inverted fluvial channels and eskers. To assess this possibility, inverted fluvial channels and eskers on Earth were mapped using Digital Terrain Models (DTMs) within a Geographic Information System (GIS) across a range of exposure stages (several decades to tens of millions of years ago). Ridge cross-sectional morphometric parameters—including ridge width, ridge height, cross-sectional area, the V-index (ridge cross-sectional sharpness), and cross-sectional asymmetry—were measured. Power-law fitting and principal component analysis with regression were applied to characterize the cross-sectional geomorphometry of inverted fluvial channels and eskers: the former to evaluate how changes in ridge size are expressed in ridge geometry, and the latter to identify the dominant patterns of cross-sectional shape and geometry.

The analyses revealed a distinct geomorphometric evolution between inverted fluvial channels and eskers. The presence of resistant cap rocks on the crests of inverted fluvial channels systematically produces flat-topped morphology while also suppressing vertical erosion; this promotes lateral erosion and results in width-dominant variation. In contrast, the absence of resistant materials on eskers leads to more variable crest morphologies, ranging from round-crested to sharp-crested forms, with geomorphometric evolution primarily controlled by vertical lowering associated with internal ice loss and thus characterized by height-dominant variation. These contrasting patterns are reflected in the exponent ratio between the ridge height–cross-sectional area and ridge width–cross-sectional area relationships. Taken together with previous ridge erosion models, a value of ~ 1.7 may represent an upper limit for inverted fluvial channels, ridges exceeding this threshold can therefore be interpreted as eskers.

Application to Martian sinuous ridges demonstrates that the morphometric criteria can discriminate between Martian inverted fluvial channels and eskers. Importantly, sinuous ridges in Argyre Planitia, commonly regarded as eskers, are reinterpreted here as inverted fluvial channels based on the criteria together with stratigraphic analyses.

火星衝突破片の軌道進化

○ 松本 侑士¹, 黒澤 耕介^{2,3}, 兵頭 龍樹^{4,5,6,7}, 中村 昭子¹, 伊藤 孝士⁷, 小久保 英一郎⁷

¹ 神戸大学大学院 理学研究科, ² 神戸大学大学院 人間発達環境学研究科, ³ 千葉工業大学 惑星探査研究センター, ⁴ 東京科学大学, ⁵ パリ・シテ大学, ⁶ 立教大学, ⁷ 株式会社スペースデータ, ⁸ 国立天文台

火星は、南北の半球において、地殻の二分性があることが知られている (e.g., Watters et al., 2007). この二分性の説明として、衝突起源が提案されている. SPH 計算により、火星質量の 1% から 5% 程度の天体が 6–10 km/s で原始火星に衝突した際に二分性が再現されることが示された (Marinova et al., 2008). またこの衝突が火星衛星を形成した可能性も指摘されている (e.g., Hyodo et al., 2017).

大規模な衝突は衝突破片を放出する. 火星の二分性を説明する衝突による破片はハンガリア群小惑星の起源である可能性も指摘されている (Minton et al., 2015; Hyodo & Genda 2018). 火星から放出された破片は、火星重力による軌道拡散は弱い一方で、木星による永年共鳴や平均運動共鳴による散乱も受ける. 軌道長半径の拡散には 10^8 年以上の時間がかかるので、地球型惑星とその衛星へ長期にわたって衝突天体を供給しうる. 本研究では、この破片の火星への再集積と他の惑星への集積を N 体計算により調べた. また同様の過程である月形成破片の集積との比較を行った.

火星放出破片は軌道進化を経て、初期の 10^6 年ほどは火星への再集積が卓越する. 火星の集積半径が地球よりも小さいことから、月形成破片の地球集積率に比べて火星放出破片の火星再集積率は低い. このため火星放出破片は月形成破片よりも多くの割合が火星軌道周辺に残存する. 一方で火星放出破片は火星による軌道拡散や木星による永年共鳴や平均運動共鳴によって地球軌道を横切るようになると地球によって軌道拡散されるので、火星放出破片は火星による軌道拡散時間よりは速く拡散する. 地球による重力散乱によって、火星放出破片が地球近傍天体同様の地球に対するティスラン・パラメータ分布に至る. この、火星軌道に残存し長期的に地球を横切ることによって地球による重力散乱を受ける進化過程は、長期的な地球近傍天体への天体の供給可能性を示している.

火星放出破片は、放出後 10^7 年の段階で、初期粒子数の 0.18% 程度とごく一部がハンガリア群小惑星の軌道に入る. この割合は月形成破片では同じ放出後経過時間では 0.013% 程度と 1 桁程度低い. しかし、火星の二分性を形成する衝突での放出物質量が火星の 1% 程度であること (Hyodo & Genda 2018), 月形成時の放出破片の総質量が月質量かそれより少ない程度であること (Canup 2004) を考慮すると、ハンガリア群小惑星には月形成破片と火星放出破片が同程度寄与していた可能性がある.

閉鎖的な水環境におけるリン挙動の推定： 微惑星および初期火星への適用

○丹秀也¹, 北島卓磨², Gankhurel Baasansuren³, 福士圭介⁴, 深谷創⁴,
Davaasuren Davaadorj³, 依田優大⁵, 関根康人⁶, 高橋嘉夫⁷

¹立命館大学, ²埼玉県環境科学国際センター, ³モンゴル国立大学,
⁴金沢大学, ⁵QJサイエンス, ⁶東京科学大学 ELSI, ⁷東京大学

太陽系内の様々な天体において、液体の水の存在が確認され、その化学的な性質や進化についても理解が進んでいる。特に近年では、主な成分だけでなく、ハビタビリティの観点から重要な元素であるリンについても理解が進みつつある。例として、土星衛星エンセラダスで検出された高濃度のリンは、地下海でのリン酸カルシウムの溶解によるものであると解釈されている [1]。

さらに、ここ数年のサンプルリターンやその場分析により、太陽系内の水環境でリンはアパタイト以外の形態でも存在していたことが示されている。リュウグウなどの炭素質小惑星からのリターンサンプルではナトリウムを含んだ溶解度の高いリン酸塩が、火星表面の岩石中では鉄リン酸塩や他の鉱物に吸着したリン酸が発見されている [2, 3 など]。これらの発見は、リンはアパタイトの溶解により制御されるという従来の描像だけでは説明が難しく、多様な惑星環境におけるリンの濃集・析出過程を再検討する必要性を示している。

本研究では、微惑星内部に存在した間隙水や火星表層水と共通するアルカリ性・高炭酸塩環境をもつ地球上の閉鎖的な塩湖群をアナログとして用い、野外調査と数値モデリングを通してリンの挙動を検討した [4]。またこれらはリン酸を吸着する鉄酸化物を含む点でも過去の火星表層環境と共通する。これらの塩湖は季節変動に伴って蒸発や凍結を繰り返しており、水の消失によって成分が濃縮されるとともに、pH が変動することが知られている [5]。

本研究の調査とモデルにより、この pH 変動は水の消失に伴う炭酸の濃縮と炭酸塩の沈殿を考慮することで定量的に再現された。また、この pH 変動に伴ってリン酸の鉄酸化物への吸着特性が変化し、水中でのリン酸濃縮が左右されることも示された。

本研究のモデルに基づき、微惑星および過去の火星の水環境におけるリンの挙動と、岩石・鉱物記録に整合的な水質について検討した。炭素質小惑星サンプルで発見された溶解度の高いリン酸塩の形成については、単なる水の消失だけでなく高い pH が必要であり、これは、水の凍結による炭酸の閉じ込めなど pH が低下する系では説明が難しい。また、その形成には高い濃度のリン酸が必要であることも示唆された。過去の火星表層水への適用では、その場分析で確認された鉄リン酸塩とリン酸を吸着した鉄酸化物が共存する状態は、弱酸性から中性の水中で説明可能であった。この際のリン酸濃度も比較的高かったことが推測された。本研究によりこれらの水環境でのリンについて、その挙動だけでなく比較的高濃度で存在し得ることが示され、リンに富む水環境が太陽系内で広く形成された可能性が示唆された。

[1] Postberg et al. (2023) Nature, 618, 489.

[2] Matsumoto et al. (2024) Nat. Astro., 8, 1536.

[3] Hurowitz et al. (2025) Nature, 645, 332.

[4] Tan et al. (2026) GCA, in press.

[5] Yoda et al. (2021) JGR, 126, e2021JE006972.

Evolution of carbon isotopic ratios in Martian organic matter and carbonates: Implications for the MMX sample return

火星有機物と炭酸塩の炭素同位体比進化: MMX サンプルリターンへの示唆

○小山俊吾^{1,2}, 吉田辰哉^{1,2}, 寺田直樹², 古川善博², 中村勇貴³, 鎌田有紘^{1,2}, 黒田剛史^{2,4}, 坂田遼弥³

¹東京科学大学, ²東北大学, ³東京大学, ⁴情報通信研究機構

Carbon is a fundamental element for life, and its cycle regulates planetary climate systems. Therefore, elucidating the carbon cycle, particularly the interactions between the atmosphere and the surface, is key to understanding planetary habitability. Mars is one of the prime candidates for investigating its potential habitability because geological evidence of past liquid water implies an active carbon cycle. Isotopic signatures provide crucial constraints for reconstructing this cycle. Recently, the Curiosity rover identified carbonates strongly enriched in ^{13}C ($\delta^{13}\text{C} \sim +100\%$) at Gale Crater (Burt et al., 2024). The mechanism responsible for this enrichment remains poorly constrained. Carbonates have been identified across multiple locations on the Martian surface by both orbital remote sensing and surface rover observations (e.g., Niles et al., 2013). These carbonates are suggested to have formed in localized aqueous environments with transient water supply from the late Noachian to the present. However, the ^{13}C -enrichment of carbonates cannot be explained solely by standard equilibrium fractionation between carbonate and CO_2 in such environments. This implies the existence of a heavily enriched carbon reservoir. The fractionation induced by CO_2 photolysis is a potential mechanism for such reservoir evolution. It preferentially dissociates $^{12}\text{CO}_2$, removing the light carbon as CO and leaving the remaining CO_2 enriched in ^{13}C . This mechanism may explain the observed carbon isotopic enrichment.

To test this hypothesis quantitatively, we implemented a new carbonate deposition scheme into a coupled photochemistry-climate evolution model (Koyama et al., 2024). Our model tracks the evolution of the carbon isotope composition of C-bearing species in the early Martian atmosphere. It comprehensively considers carbon isotope fractionation induced by CO_2 photolysis, carbon escape, volcanic outgassing, and the atmospheric deposition of formaldehyde.

Our results show that the atmosphere transitions between a CO_2 -dominated and a CO -dominated state through its evolution. The CO/CO_2 ratio is closely associated with isotopic evolution. This isotopic evolution reproduces the signatures of ^{13}C -enrichment found in Gale Crater carbonates if they formed under a CO mixing ratio of $\sim 50\%$. This enrichment is driven by the high proportion of photolytic CO_2 loss relative to the total CO_2 abundance, which intensifies the fractionation effect. This suggests that the abundance of CO could have been significantly higher than previously assumed for CO_2 -dominated early Mars. Furthermore, we also discuss how the carbon isotope ratios of ancient carbonates and organic matter to be returned by the MMX mission can constrain the atmospheric evolution of Mars.

ホワイトサンズにおける硫酸塩鉱物の季節変化： 火星 Olympia Undae の石膏砂丘への示唆

○千々岩 拓夢¹, 長谷川 精², Trishit RUJ¹, 亀田 純¹, 大竹 真紀子¹,

小松 吾郎³, 菊池 早希子⁴, 森 勝伸², 杉浦 花梨², 佐久間 杏樹⁵, 臼井 寛裕⁶

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, ⁴JAMSTEC, ⁵東京大学, ⁶JAXA

塩湖における季節的な冠水と乾燥は、蒸発鉱物の組み合わせを変化させる可能性があるが、現在も活動している石膏を主要蒸発鉱物とするプラヤ湖において、季節的な水文変化に対する鉱物相の応答は十分に明らかになっていない。米国ニューメキシコ州ホワイトサンズ国立公園には、世界最大級の石膏砂丘が広がっており、火星北極域に広がる石膏砂丘の地球アナログサイトとしても知られている。ホワイトサンズ南西部のルセロ湖は、地下水の湧出と周期的な冠水・蒸発が繰り返されるプラヤ湖であり、東部の石膏砂丘への石膏供給源の一つと考えられている。しかし、ルセロ湖で季節的に形成される蒸発鉱物と石膏砂丘形成との関係は十分に明らかになっていない。そこで本研究では、ホワイトサンズ西部のルセロ湖周辺域から、東部の石膏砂丘にかけて、乾季（2024 年 6 月）に 55 地点、雨季直後（2026 年 3 月）に 87 地点から堆積物試料を採取し、X 線回折分析および近赤外分光分析を行うことで、鉱物組成分布の季節変化を調べた。

その結果、両時期を通じて調査地域全体では石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) が主要鉱物であるのに対し、ルセロ湖周辺に近づくにつれて、半水石膏である Bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)、Halite、そして Na 硫酸塩や Mg 硫酸塩の含有量が増加していた。さらにルセロ湖周辺の鉱物組成の季節変化を見ると、乾季には Bassanite と Halite が卓越するのに対し、雨季直後には Bassanite と Halite の含有量が減少し、石膏の割合が増加していた。

これらの結果から、ルセロ湖周辺域では、雨期直後には蒸発に伴って最初は石膏が析出するのに対し、その後続く乾季の高温・乾燥環境下で石膏の一部が脱水して Bassanite へ相転移した可能性が示唆される。さらに蒸発濃縮が進行すると、Halite や Na・Mg 硫酸塩など高溶解度鉱物が析出したと考えられる。一方、雨季の再冠水後には Bassanite の再水和により石膏の含有量が増加したと考えられる。以上より、ルセロ湖では**石膏の析出→Bassanite への脱水→高溶解度鉱物の析出→Bassanite の再水和と石膏の再析出**という一連の鉱物相変化が季節変動に伴って繰り返されている可能性が明らかとなった。

本研究は、現世プラヤ環境における硫酸塩鉱物の季節的相変化を野外調査に基づいて示したものであり、石膏砂丘の形成プロセスの重要な実例を示したものと言える。またホワイトサンズ以外にも、ニューメキシコ州には石膏を主体とする鍾乳洞が多数見られ、地下の熱水活動を起源とする硫酸塩の供給が関与している可能性が示唆される。他の地球上の石膏を主要蒸発鉱物とする乾燥地域においても、同様な形成プロセスや地下の熱水活動が関与しているかを検証することで、火星北極の石膏砂丘の形成プロセスの理解にも繋がると期待される。

DRAMATIC MGCM への雲微物理過程導入で 再現された現在火星大気の水循環

○黒田剛史^{1,2}, 古林未来^{2,3}, 佐藤礼一², 鎌田有紘^{2,4}, 狩生宏喜^{4,5}, 青木翔平^{2,6}, 杉本憲彦⁷

¹ 情報通信研究機構, ² 東北大学, ³ ソルボンヌ大学, ⁴ 東京科学大学地球生命研究所,

⁵ ベルギー王立宇宙航空研究所, ⁶ 東京大学, ⁷ 慶應義塾大学

現在の火星における水循環と水氷雲の形成過程を、雲微物理モデルを組み込んだ全球気候モデル DRAMATIC MGCM を用いて再現・解析した。研究の目的は、火星大気中の水氷雲の形成メカニズムや粒径分布をより正確に表現し、観測との整合性を向上させることで、火星の水循環および長期的な水の進化過程を理解することである。

火星の水氷雲は、これまで複数の探査機によって紫外線 (320 nm)、近赤外線 (3.4 μm)、赤外線 (約 12 μm) の波長帯で観測されてきた。各波長で得られる雲の光学的厚さには差があり、これらは雲粒子のサイズ分布や放射特性に関する重要な情報を含んでいる。特に EMM (Emirates Mars Mission) の紫外カメラ観測によって雲のローカルタイム変動が初めて捉えられ、従来のダスト粒子や雲粒子を単一粒径で扱ったモデル (Mars PCM) では ACB (Aphelion Cloud Belt) の雲量を過大評価していたことから、既存モデルの課題が顕在化した。また、ナノメートルサイズの流星起源微粒子 (Meteoric Smoke Particles: MSPs) を核とする雲生成は、観測で示唆される粒径分布の二峰性や雲構造の特徴にも影響を与えていると考えられている。

そこで本研究では、地表起源ダストに加えて MSP 由来の微細な雲核粒子を導入した計算を行った。モデル内では 16 nm~4 μm の 9 種類の雲核粒径を設定し、ダストの地表からの供給を通して雲核分布の二峰性を再現した。また雲形成過程については、核生成理論に基づき、過飽和度や臨界半径などを考慮した物理的な雲核活性化計算を実装した。

モデル結果を MRO-MCS (Mars Reconnaissance Orbiter - Mars Climate Sounder) 観測と比較したところ、昼夜の温度差や雲分布が概ね良好に再現された。さらに、モデルから算出される 12 μm 、3.4 μm 、320 nm における水氷雲の光学的厚さは、それぞれの観測波長に対して整合的な結果を示した。雲およびダストの有効半径や分散も時空間的に評価可能となり、EMM 紫外カメラ観測が示したローカルタイム依存性とも定性的・定量的に高い一致が得られた。

雲微物理過程では特に小粒径の雲核ほど高い過飽和度が必要になるため、雲核サイズ分布を適切に表現することが火星大気中の水蒸気・氷雲の再現に不可欠で、それは地下水・地表氷との水蒸気交換や水の散逸とも密接に関係する。本研究では火星の水氷雲形成において、微細な流星起源粒子を含む雲核の粒径分布が重要であることを示し、DRAMATIC MGCM によって従来よりも現実的な水循環の再現が可能になったことを示した。それは火星気候モデルの信頼性の向上につながり、今後は観測データの同化や水の進化史解明へ向けた研究展開への応用を見込んでいる。

火星 Medusae Fossae Formation 中央部における 浸食地形の空間関係から探る侵食・崩壊過程

三平舜^{1,2,3} 白井寛裕²

1 東京大学, 2 JAXA 宇宙科学研究所, 3 会津大学

Medusae Fossae Formation (MFF) は火星赤道域に広く分布する火星最大級の堆積体[1]であり、その形成過程や内部構造、侵食史は現在も十分には解明されていない。MFF 表面には Yardang, Mesa, Fractured terrain, pit 状陥没地形など多様な侵食地形が発達しており[2]、これらは風成侵食や崩壊、揮発性物質の消失など、複数の地質プロセスを反映して形成された可能性が指摘されている。そのため、これらの空間分布や形成関係は、堆積体内部の層構造や物性、形成過程を理解する上で重要な手掛かりとなる。

著者らはこれまで、MFF 中央部の Lucus Planum を対象として CTX 画像を用いた侵食地形マッピングを行い、Mesa および Fractured terrain は北西側の低標高域に、Yardang は南東側の高標高域に卓越することを示した。また、これらの分布は Viking 地質図における地質ユニットとも対応し、侵食地形の地域性が侵食段階あるいは露出する層準の違いを反映している可能性を報告した。

一方で、このような地域性がどのような形成プロセスによって生じたのかは未解明である。特に、Mesa と Fractured terrain は同じ地域に集中して分布するだけでなく、一部では形態的な連続性が観察されることから、両者の形成には何らかの関連がある可能性が考えられる。しかし、これまで両者の空間関係を定量的に評価した研究はほとんど行われていない。

もし Mesa が Fractured terrain に沿った侵食・崩壊によって形成された残丘であるならば、侵食の進行によって Fractured terrain そのものは消失あるいは改変されたとしても、Mesa 間に残る谷地形は侵食前の Fractured terrain 配置を保持している可能性がある。この仮説が正しければ、現在の谷地形と Fractured terrain との間には形状や配向に対応関係が認められることが期待される。本研究ではこの仮説に基づき、Lucus Planum を対象として CTX 画像（約 6 m/pixel）を用いて Mesa および Fractured terrain を詳細にマッピングするとともに、Mesa 間谷地形の中心線と Fractured terrain の形状、配向および連続性との対応関係を定量的に評価する。

これらの解析により，Mesa と Fractured terrain の形成順序や形成過程に対する制約を与えることを目指す。本研究で得られる空間解析結果は，Lucus Planum における侵食・崩壊プロセスの理解だけでなく，MFF 全体の侵食進化および内部不均質性を議論する上で重要な制約条件を与えることが期待される。

[1] Bradley et al., 2002, JGR: Planets, 107(E8), 2-1-2-17. [2] Mandt et al., 2009 Icarus, 204(2), 471-477.

MMX/OROCHI の近距離観測における補正方法の検討

○廣田涼葉¹, Roger Stabbins², 湯本航生^{3,4}, 深井稜汰⁴, 亀田真吾^{1,4}

¹立教大学, ²Natural History Museum, ³LIRA-Observatoire de Paris, ⁴JAXA/ISAS

火星衛星探査計画(MMX)に搭載される衛星表面の地形、物質情報を観測するためのカメラ OROCHI は 7 つのカメラで多波長同時観測を可能とする(Kameda et al. 2021)。地上 80 cm-20 km での観測を想定しており、OROCHI 等の観測結果からサンプル採取地点を決定する。しかし近距離での観測においてはカメラの位置による位相角差が顕著となる。小惑星や衛星の反射スペクトルは太陽と表面、カメラのなす角度である位相角の関数として変化することが知られている。しかし、この位相角依存性の物理的な起源は粒子のサイズや組成、宇宙風化など複雑な相互作用によって、依然として十分に明らかにはなっていない。フォボスでも Phase reddening の傾向が確認されており、その程度は地域によって異なることがわかっている(Munaretto et al. 2025)。位相角条件をそろえたデータを使ってフォボス表面の物質分布を調べるためには、探査中に地域ごとの位相角変化を測定し、それらを基に補正を行う必要がある。

本研究では、小惑星サンプルの反射スペクトル依存性を明らかにし、OROCHI での観測における位相角補正の必要性および実現性を検討する。そのため OROCHI シミュレータを用いて、小惑星ベヌーサンプル(ORX-19000)の反射スペクトルを測定した。近距離観測（衛星地表面から 80 cm を想定）と同様にサンプルから 80 cm の位置に装置を設置し、サンプルと反射率 99% の標準反射板それぞれの画像を撮影し、各波長の反射率を求めた。カメラの位置の違いによるスペクトルの変化を評価するため、バンドパスフィルタは使用せず、モノクロメータ光源を用いた。波長範囲 434 – 739 nm の光を入射角 30° でサンプルに当てて、カメラ 8 個でそれぞれデータを取得した。その結果、本実験での位相角の範囲(22.9 – 37.7°)において、位相角の増大に伴った反射率の減少及び Phase reddening の傾向がみられた。またバンドパスフィルタを装着して測定した場合に得られたと期待されるスペクトルの再現結果は、別装置の単一カメラで実験室での標準的な測光条件である入射角 30°、出射角 0°、位相角 30° で取得したスペクトル(Fukai et al. 2026)と比較すると、位相角増大にともなった反射率の減少および Phase reddening の影響を受けて、その平坦さが失われてしまい、スペクトルの概形は異なるものとなった。これらの結果は、近距離観測における OROCHI 各バンドそれぞれでの補正の必要性を強く示唆するものである。次にカメラ 8 個のデータから出射角の違いを補正したうえで、波長ごとに位相関数を求め、実験室での標準的な測光条件で測定したスペクトルの再現を試みたところ、単一カメラで取得したスペクトル(Fukai et al. 2026)と同等の傾向を示すスペクトルを得ることができた。本発表では、補正に要する位相角のバリエーションについても議論する。

Hera 観測に基づく Deimos ストリーマーの 特徴と形成モデル

○中原俊平¹, 杉田精司¹, Jean-Baptiste Vincent², Michael Küppers³, Patrick Michel⁴

¹ 東京大学, ²DLR, ³ESA, ⁴コートダジュール天文台

Hera 探査では、2025 年 3 月の火星フライバイにおいて、約 900 km の距離からダイモスの接近観測が行われ、これまで観測例が限られていた反火星側半球の高解像度画像が取得された。その結果、向火星側で報告されてきたストリーマー構造 (Thomas, 1980) と類似する、明るい物質が斜面に沿って移動したように見える筋状地形が反火星側でも確認された。向火星側のストリーマーは、浅部に存在する明るい物質が、衝突、斜面崩壊などによって露出し、斜面に沿って流下した痕跡と解釈できる。反火星側でも同様の可能性が考えられる。しかし、両半球のストリーマーは形態と明るさ分布に違いを示す。向火星側では、比較的明瞭なリッジを起点とする細い構造が多く、明るさは起点付近で急激に低下した後、緩やかに背景値へ近づく。一方、反火星側では、起点となる地形が不明瞭で、ストリーマーが幅方向に広がり、明るさが数 km にわたって緩やかに減少する傾向がみられる。

本研究では、Hera および既存の Viking 画像からストリーマーに沿った明るさプロファイルを抽出し、直線、指数関数、べき乗関数等によるフィッティングを行った。各モデルの適合度はベイズ情報量規準によって比較した。その結果、向火星側では多くのプロファイルでべき乗関数が最良となり、局所的な供給源から放出された明るい物質が、移動開始直後に急速に暗いレゴリスと混合した可能性が示された。これに対し、反火星側では多くのプロファイルでロジスティック関数が最良となり、直線モデルも比較的良好に適合した。また、反火星側のストリーマーはピーク輝度が低く、半値距離が長い傾向を示した。

形成過程を検討するため、明るい物質が下流へ移動しながら、各地点で一定深さの暗いレゴリスと混合する単純攪拌モデルを構築した。単発供給の場合、明るい物質の割合は距離とともに一定比率で減少し、指数関数型の明るさプロファイルが形成された。一方、少量の物質を繰り返し供給する場合、上流側に明るい物質が蓄積する。これらのモデルだけでは、反火星側で観測された緩やかな減衰を十分に説明できなかった。

そこで、水平移流と鉛直拡散を考慮した二次元モデルを導入し、表面付近の Bagnold 型輸送層と、その下部の低速なクリープ層からなる速度構造を仮定した。このモデルでは、明るい物質が斜面方向に輸送されると同時に、深さ方向へ混合・希釈される。両半球のプロファイルの差は、斜度や流下速度だけでなく、レゴリスの混合深さ、拡散効率、流動性、供給の継続性が異なる可能性を示している。本研究は、ダイモスにおけるレゴリス移動の力学的性質、表層と内部物質の混合、宇宙風化を受けた物質の再分布過程を制約することを目的とする。