

# 日本惑星科学会

## 2022 年秋季講演会予稿集

2022 年 9 月 20 日 - 22 日

ザ・ヒロサワ・シティ会館（茨城県水戸市） + オンライン

(オンライン・ポスターセッションは

2022 年 9 月 26 日 - 27 日も開催)

日本惑星科学会 賛助会員

Harris Geospatial 株式会社

株式会社ナックイメージテクノロジー

株式会社ノビテック

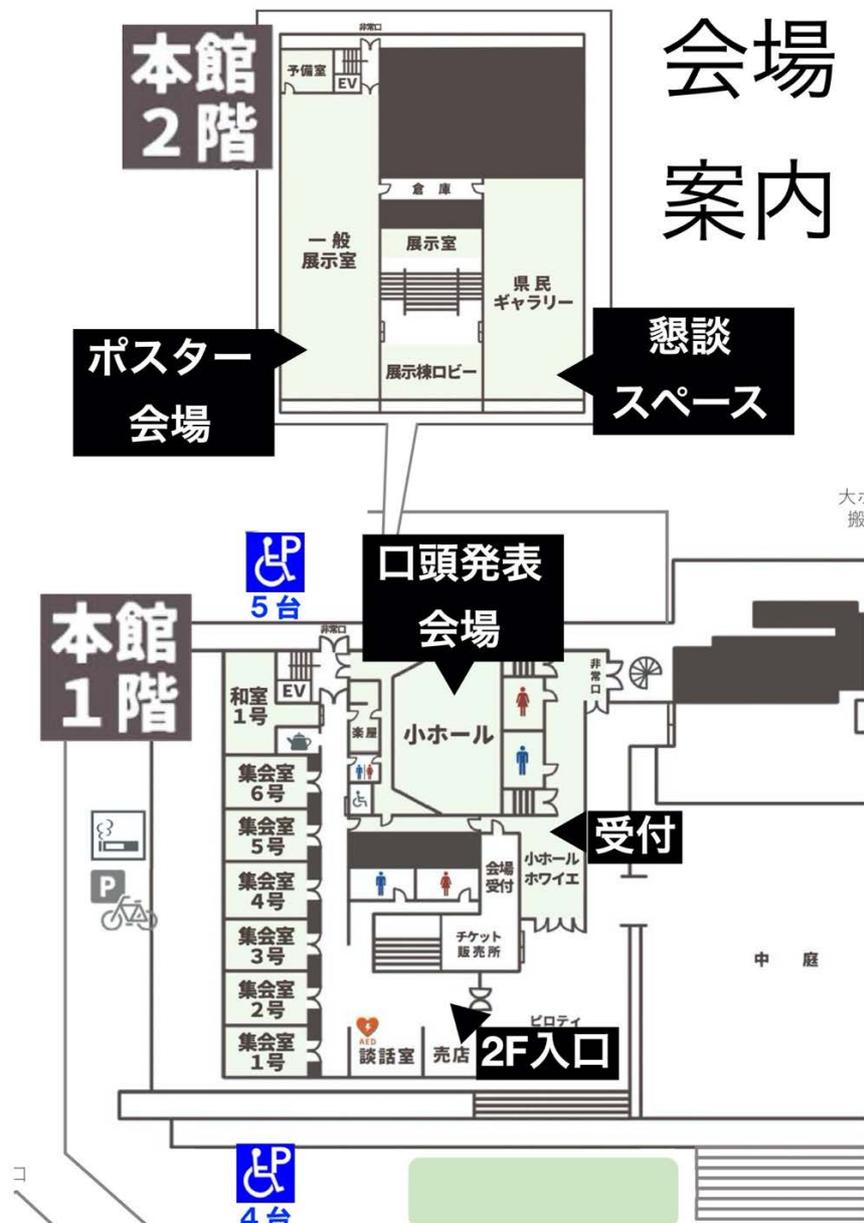
日程（口頭発表） ※9/19(月) 9:00–17:00 Zoom 発表練習部屋を開放

	開始時刻	終了時刻	セッション名
9/20 (火)	9:00	9:30	受付
	9:30	10:45	最優秀発表賞選考特別セッション
	10:45	10:55	休憩
	10:55	12:10	最優秀発表賞選考特別セッション
	12:10	14:10	休憩・ポスターコアタイム
	14:10	15:54	はやぶさ2・小惑星探査
	15:54	16:04	休憩
	16:04	17:48	氷天体・衝突過程
9/21 (水)	9:00	9:20	受付
	9:20	10:56	惑星大気と表層環境
	10:56	11:06	休憩
	11:06	12:34	ダスト・隕石・巨大衝突
	12:34	14:30	休憩・ポスターコアタイム
	14:30	16:14	月探査・月面の水
	16:14	16:30	休憩
	16:30	17:30	総会
	17:30	17:40	休憩
17:40	19:00	最優秀研究者賞受賞記念講演会	
9/22 (木)	9:00	9:20	受付
	9:20	10:48	月面センシングと閃光・月震
	10:48	10:58	休憩
	10:58	12:18	惑星の天文観測と将来計画
	12:18	14:30	休憩・ポスターコアタイム
	14:30	16:06	原始惑星系円盤
	16:06	16:16	休憩
	16:16	18:00	火星探査・宇宙塵の起源と分析

## 日程（ポスター発表・Zoom）

	開始時刻	終了時刻	
9/20 (火)	9:00	17:00	現地・Zoom ポスター会場開放
9/21 (水)	9:00	15:30	現地・Zoom ポスター会場開放
9/22 (木)	9:00	15:00	現地・Zoom ポスター会場開放
9/26 (月)	9:00	18:00	Zoom ポスター会場開放
9/27 (火)	9:00	18:00	Zoom ポスター会場開放

## 会場（ザ・ヒロサワ・シティ会館）案内図



# 口頭発表プログラム

9月20日(火)

SA 最優秀発表賞選考特別セッション (座長: 三浦 均)

講演番号	筆頭著者	開始時刻	講演タイトル
SA-01*	于 賢洋	9:30	マグマの生成・移動を伴う 2 次元円環マントル対流による月の進化モデル
SA-02	豊川 広晴	9:45	純粋斜長岩の露出場所で SELENE が観測した、月形成初期が wet であった証拠
SA-03	吉田 雄城	10:00	分子動力学シミュレーションで探るダストモノマー間相互作用: JKR 付着モデルの拡張
SA-04*	土井 聖明	10:15	原始惑星系円盤 HD 163296 のダストリング形成機構の推定
SA-05*	小山 俊吾	10:30	初期火星大気におけるホルムアルデヒド生成
	(休憩)	10:45	
SA-06*	桑原 歩	10:55	原始惑星が駆動するガス流れ場とダストの運動: 円盤面密度分布と惑星形成への影響
SA-07	坂田 遼弥	11:10	多成分 MHD による太古火星におけるイオン散逸の研究: 固有磁場と太陽 XUV 放射の影響
SA-08	佐々木 優斗	11:25	数値シミュレーションを用いた Dynamically New Comets の判別指標の解明に向けた研究
SA-09*	池田 あやめ	11:40	月面クレータ斜面の岩塊密集領域での急速な地形緩和
SA-10	庄崎 弘基	11:55	機械学習によるカオス地形の識別と分類: 火星地下氷圏の分布と進化への示唆

\* はポスター発表あり。現地掲載場所は『ポスター発表』の項を参照。

9月20日(火)

OA はやぶさ2・小惑星探査(座長:平田 成)

講演番号	筆頭著者	開始時刻	講演タイトル
OA-01	渡邊 誠一郎	14:10	自転変化に伴うリュウグウの表層進化
OA-02	杉浦 圭祐	14:18	小惑星の大規模衝突破壊の数値計算と 形成される集積天体のインパクト混入率
OA-03	安部 正真	14:26	小惑星リュウグウ帰還試料のフェーズ1キュレーションとその後
OA-04	三河内 岳	14:34	小惑星リュウグウ試料に見られる岩相の多様性
OA-05	中村 智樹	14:42	小惑星リュウグウ試料の粗粒粒子分析結果
OA-06	石崎 拓也	14:50	初期分析によるリュウグウ粒子の熱拡散率と熱慣性
OA-07	佐藤 雅彦	14:58	リュウグウ試料の岩石磁気学的・古地磁気学的研究
OA-08	金丸 仁明	15:06	Yarkovsky 効果による小惑星 Ryugu の軌道進化: 起源族と衝突史への示唆
OA-09	紅山 仁	15:14	微小地球接近小惑星 2022 JL の即時モニタリング観測
OA-10	清水 雄太	15:22	岩石粒子の自動識別法を用いた小惑星 Bennu の Tlanuwa Regio における表層プロセスへの示唆
OA-11	小松 睦美	15:30	リュウグウの微粒子と酸不溶性有機物の特徴: ラマン分光法による考察
OA-12	上梶 真之	15:38	放射光 CT で得られるリュウグウ試料の3次元構造
OA-13	猪 裕太	15:46	炭素質コンドライト隕石の弾性波速度の測定と Ryugu サンプルとの比較

9月20日(火)

OB 氷天体・衝突過程(座長: 玄田 英典)

講演番号	筆頭著者	開始時刻	講演タイトル
OB-01	関根 康人	16:04	エンセラダス地下海のリン濃集と太陽系での前生命化学進化の多様性
OB-02	村上 英記	16:12	土星衛星タイタン探査計画ドラゴンフライに搭載する地震計パッケージの開発状況
OB-03	豊田 優佳里	16:20	多孔質氷球の反発係数: 塑性変形を考慮した非弾性衝突モデルの応用
OB-04	平井 英人	16:28	タイタンにおける液体メタンとの相互作用による有機物エアロゾルの急速な変成
OB-05	道上 達広	16:36	炭素質隕石に対する衝突実験~X線CT撮像による隕石内部クラックの3次元分布
OB-06	大村 知美	16:44	階層構造を持つ天体構成粒子塊の圧密挙動に関する実験的研究
OB-07	宮山 隆志	16:52	微惑星衝突に伴う固体蒸発・溶融量の状態方程式依存性
OB-08	豊嶋 遥名	17:00	ハビタブル天体表面を模擬した含水砂標的への斜め衝突実験
OB-09	石田 紗那	17:08	コア・マントル構造を持つ含水小天体の衝突破壊と破片速度分布: 標的内部の粒子速度分布の計測
OB-10	細野 七月	17:16	巨大衝突の数値計算の手法及び状態方程式への依存性
OB-11	中島 健介	17:24	ツングースカイベントによる大気掘削の遠地気圧変動からの制約
OB-12	大野 正和	17:32	レーザー衝撃圧縮を受けたSiO <sub>2</sub> の変成評価
OB-13	黒澤 耕介	17:40	土質力学データを用いた空隙圧密モデルのパラメータ決定方法

9月21日(水)

OC 惑星大気と表層環境 (座長: 大竹 真紀子)

講演番号	筆頭著者	開始時刻	講演タイトル
OC-01	有馬 銀河	9:20	原始地球大気海洋系での NH <sub>3</sub> の持続時間
OC-02	黒川 宏之	9:28	地球マントルの窒素の起源: 惑星形成と地球生命共進化への示唆
OC-03	黒崎 健二	9:36	巨大衝突直後の惑星大気組成への影響と長期安定性
OC-04	宮崎 慶統	9:44	マグマオーシャン固化中・後の脱ガスによる大気形成
OC-05	落合 葉子	9:52	原始地球大気および原始惑星系円盤での紫外線照射によるアミノ酸合成のモンテカルロシミュレーション
OC-06	吉田 辰哉	10:00	火星大気における光解離に伴う炭素同位体分別
OC-07	根岸 昌平	10:08	木星衛星イオの表面環境を模擬した低温 SO <sub>2</sub> 霜の赤外分光イメージング
OC-08	平田 佳織	10:16	表面元素組成の多変量解析による水星の地質ユニットの同定
OC-09	小林 一生	10:24	太陽系外サブネプチューンの進化: 大気散逸と惑星内部からの水素・ヘリウム供給の影響
OC-10	関 華奈子	10:32	M型星まわりの地球型系外惑星におけるプラズマ圏形成に関する考察
OC-11	小玉 貴則	10:40	全球雲解像モデルを用いた高自転軸傾斜角を持った系外地球型惑星の気候
OC-12	種子 彰	10:48	全ての起源、太陽系の地球と月の起源、水生惑星の深海底の起源、プレートテクトニクスを検証する方法

9月21日(水)

OD ダスト・隕石・巨大衝突(座長:田中 秀和)

講演番号	筆頭著者	開始時刻	講演タイトル
OD-01	松本 侑士	11:06	低速衝撃波によるコンドリュールの火成リム集積
OD-02	深井 稜汰	11:14	超高解像トモグラフィ・3D レンダリング技術による隕石中の難揮発性包有物の形状観察
OD-03	茅原 弘毅	11:22	メカノケミカル法による非晶質シリケートの合成
OD-04	辰馬 未沙子	11:30	付着 N 体計算で探るダスト集合体のせん断強度:内部構造変化と太陽系小天体への応用
OD-05	山室 良太	11:38	大質量原始星円盤におけるダスト成長:岩石ダスト付着力への制約
OD-06	二村 徳宏	11:46	タンデム惑星形成論による地球型惑星の起源と進化
OD-07	高岡 航輔	11:54	ペブル集積による原始惑星の自転形成:原始惑星が駆動するガスの流れ場の影響
OD-08	小林 浩	12:02	原始惑星の衝突シミュレーションの衝突破壊モデル構築
OD-09	Leonardo Vasconcellos	12:10	巨大衝突起源のデブリ円盤と短時間フラックス変化
OD-10	國友 正信	12:18	惑星形成が太陽ニュートリノフラックスに及ぼす影響について
OD-11	小久保 英一郎	12:26	巨大衝突によって形成される惑星系の軌道構造

9月21日(水)

OE 月探査・月面の水(座長:黒澤 耕介)

講演番号	筆頭著者	開始時刻	講演タイトル
OE-01	小河 正基	14:30	今更ながら「月探査の意義」再考
OE-02	佐伯 孝尚	14:38	月面の科学とその実現のための活動
OE-03	諸田 智克	14:46	月面サンプルリターンのための月面その場探査と科学
OE-04	佐藤 祐希	14:54	将来月面サンプルリターン探査に向けたネクタリス盆地の衝突溶融岩露頭調査と衝突溶融岩の分化過程への考察
OE-05	春山 純一	15:02	月の非洪水型玄武岩被覆様式とUZUME計画
OE-06	坂井 真一郎	15:10	小型月着陸実証機SLIMの狙いと開発状況
OE-07	麻生 大	15:18	月極域探査機(LUPEX)プロジェクトの現状
OE-08	草野 広樹	15:26	月表層の水探査に向けた中性子生成および輸送シミュレーション
OE-09	加藤 礼也	15:34	月極域探査にむけた着氷月レゴリスシミュラントの近赤外スペクトル測定
OE-10	佐伯 和人	15:42	月の永久影領域における水分子のコールドトラップシミュレーション
OE-11	橋爪 光	15:50	月表土内部における水分子の捕獲過程
OE-12	大竹 真紀子	15:58	月極域で検出された揮発性成分の化学種と分布域の推定
OE-13	西谷 隆介	16:06	月極域で検出された揮発性成分を含むスペクトルの吸収強度評価
	(総 会)	16:30	

SB 最優秀研究者賞受賞記念講演(座長:中島 健介)

講演番号	筆頭著者	開始時刻	講演タイトル
SB-01	兵頭 龍樹	17:40	惑星形成理論と惑星探査に関する取り組み
SB-02	巽 瑛理	18:20	リュウグウはかく語りき

9月22日(木)

OF 月面センシングと閃光・月震(座長:奥住 聡)

講演番号	筆頭著者	開始時刻	講演タイトル
OF-01	小林 真輝人	9:20	将来の月探査に向けたテラヘルツ帯での誘電率に関する検討
OF-02	梁 晨	9:28	月面探査ローバへの応用を想定した3Dライダー地形図の精度評価
OF-03	竹村 知洋	9:36	月表層における微小スケールの起伏の検討
OF-04	野澤 仁史	9:44	LRSデータの地表面クラッター除去および月の地下構造解析
OF-05	山本 聡	9:52	分光リモートセンシングによる地質解析に基づく月上部マントル組成の研究
OF-06	今川 裕喜	10:00	アポロ短周期地震計データの解析による未検出月震イベントの探索
OF-07	山本 幸生	10:08	Apollo月震計データ配信を支える検索技術
OF-08	小野寺 圭祐	10:16	月の地震波散乱環境の定量評価と比較惑星学への貢献
OF-09	柳澤 正久	10:24	月面衝突閃光の低分散スペクトルから分かったこと
OF-10	奥山 純吾	10:32	月衝突閃光の分光学的研究:温度遷移と発光成分が発光に及ぼす影響
OF-11	有松 亘	10:40	PONCOTSによる木星での巨大衝突閃光現象の発見

9月22日(木)

OG 惑星の天文観測と将来計画(座長:佐々木 貴教)

講演番号	筆頭著者	開始時刻	講演タイトル
OG-01	成田 憲保	10:58	MuSCAT シリーズによる TESS トランジット 惑星候補のフォローアップ観測
OG-02	堀 安範	11:06	MuSCATs とすばる望遠鏡 IRD インテンシブ観測から探る M 型星周りの 4 つのサブネプチューンの組成と起源
OG-03	葛原 昌幸	11:14	恒星の固有運動加速を引き起こす巨大惑星や褐色矮星の直接撮像と力学質量の導出
OG-04	蔭谷 泰希	11:22	高金属量 mid-M 型星をトランジットする短周期巨大惑星 TOI-519 b の質量決定
OG-05	井上 昭雄	11:30	次世代赤外線天文衛星 GREX-PLUS 計画概要
OG-06	野津 翔太	11:38	次世代赤外線天文衛星 GREX-PLUS が切り拓く原始惑星系円盤サイエンス
OG-07	大野 和正	11:46	次世代赤外線天文衛星 GREX-PLUS が切り拓く系外惑星大気サイエンス
OG-08	佐川 英夫	11:54	次世代赤外線天文衛星 GREX-PLUS が切り拓く太陽系惑星大気サイエンス
OG-09	寺居 剛	12:02	次世代赤外線天文衛星 GREX-PLUS が切り拓く太陽系小天体サイエンス
OG-10	平林 賢人	12:10	系外惑星大気観測にむけた紫外線検出器の量子効率推定

9月22日(木)

OH 原始惑星系円盤 (座長: 野村 英子)

講演番号	筆頭著者	開始時刻	講演タイトル
OH-01	高橋 実道	14:30	原始惑星系円盤形成過程における自己重力的分裂過程
OH-02	瀧 哲朗	14:38	原始惑星系円盤の面密度進化における円盤風トルクの影響について
OH-03	中澤 風音	14:46	原始太陽系円盤におけるアンモニウム塩の輸送と木星の窒素濃縮
OH-04	安田 郁斗	14:54	木星の氷微惑星散乱による雪線内側への水供給についての理論的研究
OH-05	古家 健次	15:02	原始惑星系円盤ガスにおける炭素・窒素・酸素元素の非一様な枯渇
OH-06	田中 佑希	15:10	惑星への質量降着過程を考慮した超木星質量惑星のギャップ形成とパラメータ依存性
OH-07	青山 雄彦	15:18	磁気円盤風降着円盤における惑星周りの円盤ギャップ構造の形状の三次元磁気流体計算
OH-08	芝池 諭人	15:26	Type I 移動する惑星によってできる帯状の微惑星形成領域
OH-09	小野 歩	15:34	円盤温度構造の進化に対するダスト臨界破壊速度の影響: 木星の影形成シナリオの検証に向けて
OH-10	大橋 聡史	15:42	クラス 0 原始星まわりの原始星円盤におけるダスト塊の形成と影領域の発見
OH-11	折原 龍太	15:50	SY Cha に付随する遷移円盤の ALMA Band6 観測
OH-12	吉田 有宏	15:58	TW Hya まわりの原始惑星系円盤内縁部のガス構造

9月22日(木)

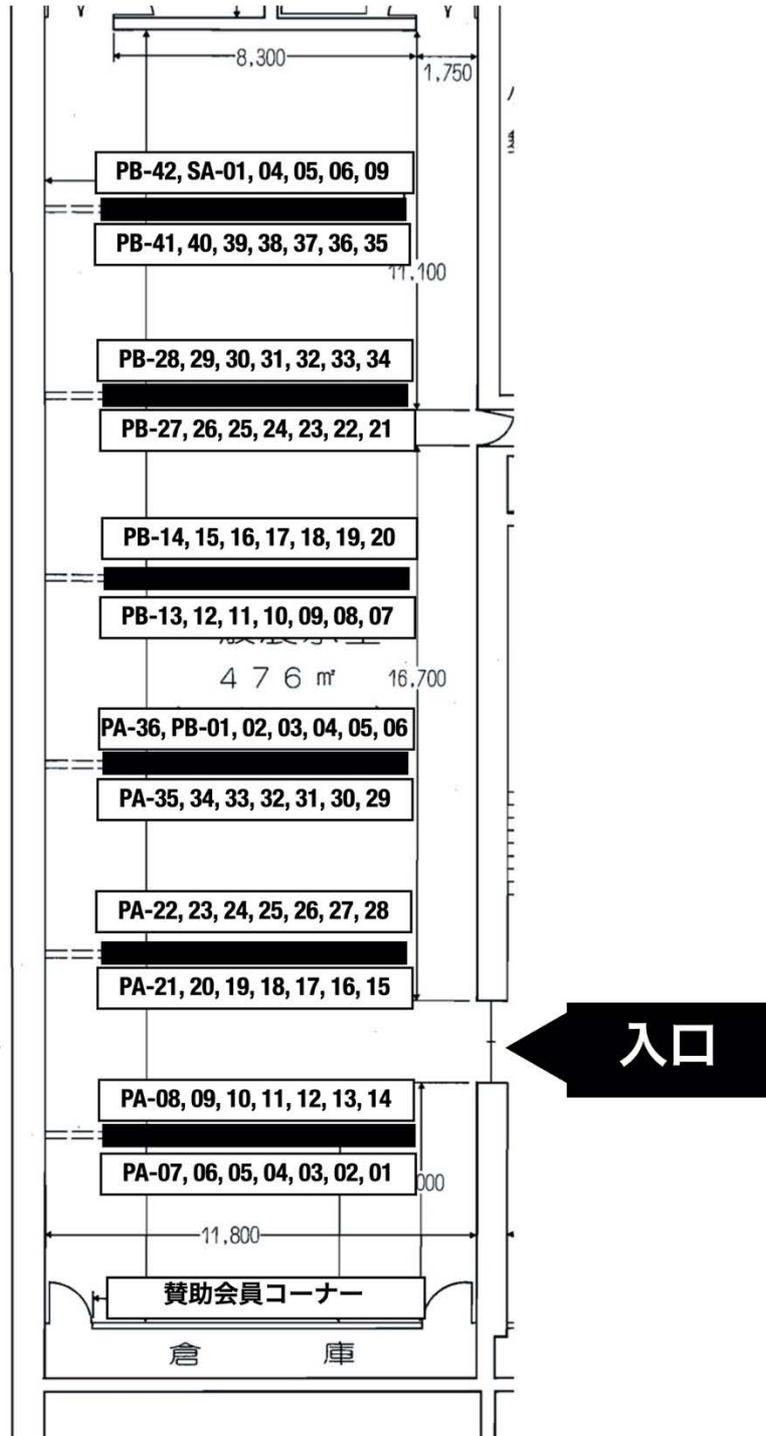
O1 火星探査・宇宙塵の起源と分析(座長: 國友 正信)

講演番号	筆頭著者	開始時刻	講演タイトル
OI-01	倉本 圭	16:16	火星衛星探査計画 MMX の進展と科学 2022
OI-02	玄田 英典	16:24	火星衛星の起源におけるフォボス・ディモス分裂説の検討
OI-03	益永 圭	16:32	火星への彗星大気成分の輸送についての観測的研究
OI-04	大塚 亮治	16:40	火星探査機インサイトの地震および気象データからみるダストデビルの特徴
OI-05	川村 太一	16:48	InSight が明らかにした火星の描像
OI-06	境橋 凌	16:56	炭素質コンドライトの反射分光特性とその入射角依存性
OI-07	日向 輝	17:04	レーザー局所分析法による火星隕石の K-Ar 年代測定の装置改良と精度向上について
OI-08	長 勇一郎	17:12	MMX ローバ搭載用ラマン分光器 RAX: FM 開発報告
OI-09	西村 風紋	17:20	MMX 搭載望遠カメラ TENG00 性能評価のための平行光源の開発
OI-10	渡部 潤一	17:28	ヘルクレス座 $\tau$ 流星群の 2022 年の出現について ー分裂彗星核からの流星群ー
OI-11	宇田 天音	17:36	室内実験を用いた有機物や鉄を含む人工流星の分光学的研究
OI-12	木村 宏	17:44	ふたご座流星群母天体 Phaethon 小惑星からのダスト放出メカニズムの解明
OI-13	石橋 高	17:52	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

# ポスター発表・現地配置図（一般展示室）

## ポスター 会場 配置図

(各パネルに2枚、  
ただし、入口反対側の  
スペースは1枚分あける)



# ポスター発表 (PA 会場・その 1)

講演番号	筆頭著者	講演タイトル
PA-01	清水 翼	惑星探査用キューブサット MAEBASHI-SAT の開発 ～地上系の開発報告～
PA-02	菊地 啓太	鉄流星の分光観測と発光メカニズムに関する研究
PA-03	荒井 朋子	DESTINY+計画の進捗とサイエンス
PA-04	安田 匠	彗星核からの氷の昇華による小惑星形成：核内部の温度分布の推移を考慮した数値モデル
PA-05	角田 竜規	オープンソース物理エンジンを利用したラブルパイル小惑星形成シミュレーション
PA-06	春山 純一	月火星有人/無人探査を念頭にした岩相の特徴量自動認識による火山性露頭その場調査手法の研究
PA-07	木内 真人	クォータースペース法による低重力下でのクレーター形成過程の観察
PA-08	横田 優作	起伏表面に適用可能なクレータースケール則とクレーターの崩壊に関する実験的研究
PA-09	平田 直之	小惑星ヴェスタの赤道トラフ形成に関する考察
PA-10	岡田 達明	二重小惑星探査計画 Hera 搭載熱赤外カメラの開発：EM 開発試験の現状
PA-11	金丸 仁明	二重小惑星探査計画 Hera に向けた小惑星の熱物理計算モデルの開発
PA-12	奥村 真一郎	木曾観測所 Tomo-e Gozen カメラと「重ね合わせ法」による高速微小 NEO 観測計画の進捗
PA-13	菊地 紘	はやぶさ 2 画像データ閲覧・検索システム JADE のアップデート
PA-14	永吉 司	Jupyter Notebook による小惑星探査データの対話型解析・可視化ツール AiGIS2
PA-15	大坪 貴文	「あかり」遠赤外線観測でとらえた黄道面付近ダストバンドと供給源の小惑星族
PA-16	寺居 剛	木星トロヤ群 L4・L5 間のサイズ分布比較
PA-17	荒井 武彦	小惑星はやぶさ 2 搭載中間赤外カメラ TIR によって観測された小惑星 162173 リュウグウの日中の影領域
PA-18	愛敬 雄太	はやぶさ 2ONC 画像から構築したリュウグウ表面ローカル三次元地形モデルの精度評価と微小地形の計測
PA-19	大杉 歩	小惑星探査機 はやぶさ 2 の低高度運用で観測された 小惑星リュウグウに点在する岩塊の温度分布変化並びに熱物性解析
PA-20	吉田 二美	(3200)Phaethon の偏光・測光・掩蔽観測

## ポスター発表 (PA 会場・その 2)

講演番号	筆頭著者	講演タイトル
PA-21	千秋 博紀	小惑星の公転が表面温度進化に与える影響
PA-22	齊藤 大晶	原始火星マントル・コアに分配される揮発性成分
PA-23	内田 雄揮	Phobos 捕獲年代を考慮したクレーター年代関数の導出
PA-24	ソフィア リカフィカ パトリック	遠いカイパーベルトの軌道構造の究明：未知の惑星の存在？
PA-25	野崎 舜介	ガスハイドレート置換によるタイタンの湖地形の成因
PA-26	種子 彰	プレートテクトニクスの駆動力の起源メカニズム
PA-27	奥住 聡	CAI 粒子の合体成長：付着理論からの検討
PA-28	荒川 創太	ダストアグリゲイトの衝突成長と破壊
PA-29	野津 翔太	H <sub>2</sub> O スノーライン以遠に影構造を持つ原始惑星系円盤の赤道面化学構造 II. 有機分子組成 & 電離度・初期化学組成依存性
PA-30	近藤 克	ダストと温度構造が共進化する磁気降着円盤のスノーライン進化
PA-31	芝池 諭人	PDS70c の周惑星円盤内でのダストの進化と熱放射
PA-32	森 昇志	大局的非理想磁気流体シミュレーションから探る原始惑星系円盤の温度構造
PA-33	前田 夏穂	巨大惑星の周惑星円盤へのガス降着：3次元数値流体計算を用いた質量降着率の惑星質量依存性
PA-34	田畑 陽久	初期火星水環境の水質復元のためのナノ秒時間ゲートラマン分光装置の開発
PA-35	樫村 博基	火星大気の全球非静力学高解像度計算
PA-36	深井 稜汰	火星衛星探査計画 MMX・SAWT による帰還試料の初期記載・初期分析の検討

※PA 会場には、最優秀発表賞応募者でポスター発表を希望した人のものも掲示されます。

## ポスター発表 (PB 会場・その 1)

講演番号	筆頭著者	講演タイトル
PB-01	小野寺 圭祐	InSight で観測された火星の局所低気圧の地震学及び気象学的記載
PB-02	野口 里奈	露頭画像中における柱状図作成箇所の自動検出の試行
PB-03	城野 信一	球状鉄コンクリーションのサイズ分布と形成時間
PB-04	岩田 隆浩	MMX 搭載赤外線分光計 MIRS の観測計画と詳細設計結果
PB-05	川村 太一	InSight SEIS の地震データと地震カタログの公開
PB-06	梶谷 伊織	フォボスの低緯度領域におけるクレーター分布
PB-07	今村 翔子	火星衛星探査に向けたラマン分光を用いた合成苦鉄質ガラスの特性評価
PB-08	土屋 史紀	惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画 (LAPYUTA) : 計画の現状報告
PB-09	吉田 二美	深広視野サーベイの画像解析を通じて探る太陽系氷天体の軌道分布
PB-10	江口 裕樹	氷・雪クレーター形成実験: クレーターサイズ・スケール則と運動量輸送に対する空隙の影響
PB-11	鶴海 達大	地上望遠鏡によるエウロパ大気組成の可視近赤外観測と地球大気補正法
PB-12	SEO, Chanoul	サブネプチューンの大気: マグマの影響
PB-13	石山 謙	嵐の大洋におけるリッジの形成史
PB-14	長岡 央	月・惑星の水資源探査を目指す中性子ガンマ線測定装置 MoMoTarO の開発
PB-15	荒木 亮太郎	月極域氷の含水量を推定するためのレゴリス反射率から水氷検量線を求める手法の開発
PB-16	熊本 篤志	地震波およびレーダ観測から示唆される Apollo 17 着陸地点の地下構造の比較
PB-17	笠原 慧	コメットインターセプターミッション: ESA および JAXA におけるアップデート
PB-18	長谷川 まり	MU レーダーと Tomo-e Gozen を用いた 2020 年ふたご座流星群の同時観測
PB-19	遠藤 未頼	観測装置 DIMS の性能評価と系外流星の観測
PB-20	岡本 珠実	原始惑星系円盤内でのダストの運動のモンテカルロシミュレーションによる彗星中の結晶質シリケートの割合の推定

## ポスター発表 (PB 会場・その 2)

講演番号	筆頭著者	講演タイトル
PB-21	佐古 洸也	衝突クレーター形成に伴う地下からのポルダール放出に関する実験的研究
PB-22	山口 祐香理	蛇紋岩と 2 種類の玄武岩標的からの速度 1km/s 以上の衝突イジェクタ
PB-23	柿木 玲亜	レゴリスに覆われた基盤岩へのクレーター形成実験：衝突励起振動による物質移動との関連
PB-24	門野 敏彦	中空弾丸の衝突における放出物のパターン
PB-25	小田中 佑樹	微惑星衝突によるコンドリュールの生成率と集積率の円盤ガス散逸モード依存性
PB-26	谷安 要	惑星系におけるハビタブルゾーン周りの粒子安定性
PB-27	伊藤 祐一	平坦なスペクトルを持つスーパーアースの特徴づけ
PB-28	川島 由依	すばる望遠鏡 IRD による褐色矮星 Gl 229B の高分散分光観測とスペクトル計算コード ExoJAX を用いた大気特性の調査
PB-29	奥谷 彩香	揮発性蒸気を含む周白色矮星円盤の進化：氷天体を起源とする汚染可能性の検討
PB-30	川島 桜也	月極域探査 LUPEX 搭載用 REIWA/TRITON に資する、高イオン化効率をもつ中性粒子質量分析用イオン源の開発
PB-31	岡本 尚也	DESTINY+搭載カメラの地上・機上光学校正計画
PB-32	洪 鵬	DESTINY+探査機搭載小惑星追尾駆動鏡の EM 予備試験
PB-33	鳶生 有理	次世代小天体サンプルリターン探査の理学検討
PB-34	平井 隆之	DESTINY+搭載用ダストアナライザの開発と地上校正計画 2022
PB-35	並木 則行	惑星科学コンソーシアムの準備状況報告
PB-36	川島 桜也	太陽系探査を目指したイオントラップフーリエ変換型質量分析器の開発
PB-37	犬山 文孝	ティティウス・ボーズ法則の証明
PB-38	犬山 文孝	土星のリングは最大 31 個 (含む メインリング 最大 9 個)
PB-39	田中 智	国際共同ミッションとしての月地震観測ネットワーク構築フィジビリティスタディ
PB-40	坂谷 尚哉	Hera 搭載赤外分光カメラ TIRI の地上校正試験
PB-41	長野 剛流	M 型矮星ハビタブルゾーン内に存在する GJ832c は水素大気を持つか

マグマの生成・移動を伴う 2 次元円環マンテル対流による月の進化モデル  
 (The evolution of two-dimensional annular model of the lunar mantle caused  
 by convection, magma generation and migration)

○于 賢洋<sup>1</sup>, 亀山 真典<sup>2</sup>, 小河 正基<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院総合文化研究科, <sup>2</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

「月内部の長期的な進化過程の解明」は月-地球系の形成や岩石惑星の進化、さらには今後の月探査を視野に入れた惑星科学において重要な課題である。その解明に向けて、本講演では 2 次元円環マンテルモデルを用いた数値シミュレーションの結果を報告する。

従来のモデルでは月探査によって確認された複数の観測事実の要因を統合的かつ明確に説明できていない。例えば、地質学・測地学的観測から、(1)月は全球で約 38 億年前までに膨張が起こっていたこと、(2)月のマグマ噴出は月形成から数億年は活発ではなかったものの、徐々に活発化し、38-36 億年前に活動のピークを迎え、その後約 20 億年-10 億年前まで継続していたことが知られている。我々が最近開発した月内部の 1 次元球対称モデルの結果から、これらの特徴がマグマの生成・移動によって駆動されることが示された。そこで本研究では、多次元的な形状や固体マンテルの対流の効果を含めたより高度なモデルの構築に向けて、新しくマグマの生成・移動とそれに伴うエネルギー及び元素（例えば、Th, K や主要構成元素）の輸送を結合させた 2 次元円環マンテル対流モデルを用いて月内部の進化を調べた。

初期温度は、深部・中部マンテルで 1550K から 1650K とし、浅部マンテルでは初期に部分溶融していると仮定した。マグマの生成は温度がソリダス温度を超えた地点で発生するとし、その移動は液相・固相間の密度差によって駆動される浸透流としてモデル化した。マグマの組成は high-Ti 玄武岩組成を想定し、内部熱源となる放射性元素に濃集すると仮定した。加えて、放射性元素は時間とともに減衰していくとした。

その結果、マンテル対流によってマグマの生成・移動が促進されることが明らかになった。マンテル深部で発生したマグマが上部マンテルへと移動する過程で発熱によりさらに融解が起こり、それによる体積変化は月の初期膨張を十分説明できる程度の膨張を駆動することがわかった。加えて、計算されたマグマ生成量の時間変化は月の火山活動史の頻度の時間変化と類似しており、最も溶融した時期は海の火成活動極大期とおおよそ一致していた。このように、得られた計算結果は月の観測事実と整合的である。さらに将来、このような計算で仮定された初期条件は月形成過程への制約与えると期待される。

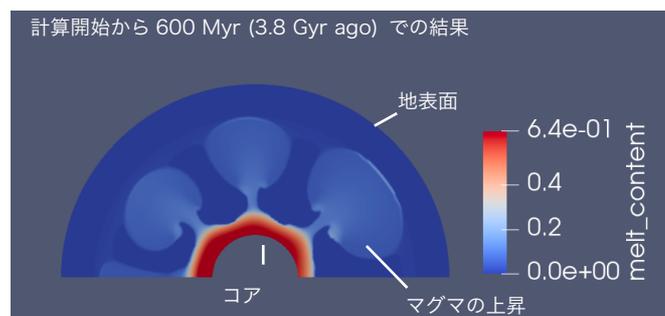


図 1. 2 次元円環モデルにおけるマグマ上昇の描画

## 純粋斜長岩の露出場所で SELENE が観測した、 月形成初期が wet であった証拠

○豊川広晴<sup>1,2</sup>、春山純一<sup>2,1</sup>、岩田隆浩<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>総合研究大学院大学、<sup>2</sup>宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構

月周回探査機 SELENE やチャンドラヤーン 1 号機によって、月表面での純粋斜長岩の露出が確認されている[Yamamoto et al. 2012; Hanna et al. 2014]。純粋斜長岩は、マグマオーシャンの進化に由来すると考えられているため、月形成初期の情報を含んでいる可能性が高い。チャンドラヤーン 1 号機に搭載された可視・近赤外線分光撮像装置 Moon Mineralogy Mapper (M<sup>3</sup>)によるデータを解析した先行研究では、水（ここでは OH 基と H<sub>2</sub>O を総じて指す）の特徴を示す 2.8 μm 帯の検出が純粋斜長岩の露出場所において報告されている[Li & Milliken 2017]。しかし、M<sup>3</sup>による 3 μm 帯の調査には、月表面の熱補正の不確かさが大きいということが問題視されている[Honniball et al. 2020]。また、月に存在する水の起源の解明には、観測される水の安定性を理解することが重要であるため、水の存在量と月面のローカル時刻の関係を詳しく知る必要がある。しかし、M<sup>3</sup>は観測期間が限定されたため、朝方から夕方までの複数のローカル時刻においてスペクトルデータが取得された場所は全球の内ごく一部しかない[Li & Milliken 2017]。これらのことから、先行研究では、純粋斜長岩で検出された 3 μm 帯が真に水の存在を示すのかどうかは不確かなままであり、また例えばそれが水の存在を示す場合においてもその起源は不明瞭である。

そこで本研究では、水の吸収特徴 1.5 μm 帯に注目することで、熱放射の影響を受けない明確な水の存在を確認することを目的とする。一般に、1.5 μm 帯は 3 μm 帯よりも吸収が微弱で検出が困難であるため、月周回探査機によって得られた近赤外線スペクトルデータで最も SN 比の大きい、SELENE 搭載の可視・近赤外線連続分光装置スペクトルプロファイラ(SP)によるデータを使用した。また、SP は月全球において様々なローカル時刻でのデータを取得しているため、水の起源を議論することも可能である。

結果として、純粋斜長岩の存在を示す SP データのうち 1 割程度のデータが 1.5 μm 帯を示すことが明らかになった。それら 1.5 μm 帯の吸収を示した場所は M<sup>3</sup>によって 3 μm 帯が確認されている場所と整合的であった。また、本研究で確認された 1.5 μm 帯は、1.58 μm 付近に吸収のピークを持つものが多く、これは地球上で見られる含水鉱物の 1.4 μm 付近での吸収よりも長波長側に吸収ピークがシフトしていることがわかった。さらに、ローカル時刻と 1.5 μm 帯吸収の間に特に相関は見られなかった。

以上のことから、純粋斜長岩の露出場所で検出された 1.5 μm 帯が水の存在を示し、またそれらが比較的安定的に存在できる内部由来の水であることが示唆された。純粋斜長岩に内部由来の水が存在することは、月形成初期のマグマオーシャンが比較的 wet であったことを示す可能性が高い。

本発表では上記を紹介し、また、検出された水の全球空間分布や、1.5 μm 帯の吸収波長の長波長側へのシフトから推定される水の存在形態についても議論する。

# 分子動力学シミュレーションで探る ダストモノマー間相互作用: JKR 付着モデルの拡張

○吉田雄城<sup>1,2</sup>, 小久保英一郎<sup>2,1</sup>, 田中秀和<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京大学, <sup>2</sup>国立天文台, <sup>3</sup>東北大学

惑星の主な材料であるダストは、微惑星、原始惑星を経て惑星へと成長する。ダストの最小構成単位はモノマーと呼ばれる大きさが  $\sim 0.1 \mu\text{m}$  の球であると考えられている。モノマーは分子間力により衝突合体成長して  $\text{cm}$  サイズまで成長すると考えられているが、その成長過程は明らかではない。衝突合体による成長過程は、室内実験や数値計算によって研究されている。数値計算では、モノマー間に働く付着や回転、滑り、ひねりの相互作用を与える JKR 理論がモノマー間相互作用として用いられている。しかし、実際のモノマーでは分子運動による粘性が生じ、衝突時にモノマーの運動エネルギーの一部が分子の運動エネルギーに転換していることが示唆されている (Tanaka et al. 2015)。従って、モノマー間相互作用を正しく与えるために、ミクロな物理に基づいた衝突現象を調べて、JKR 理論を拡張する必要がある。

本研究では、分子の運動を解いてマクロな振る舞いを再現する分子動力学シミュレーションを行い、付着の相互作用を明らかにするため、モノマーの正面衝突現象を調べた。我々はまずモノマー衝突研究の第一歩として、レナード・ジョーンズポテンシャルという方向依存性がない近似分子ポテンシャルを用いた。このポテンシャルを用いると、物理量は分子種類に依存する結合エネルギーと固有の距離で規格化される。そして、我々はまず、モノマーサイズや温度、衝突速度を変えシミュレーションを行い (表 1)、反発係数  $e$  を求めた。

主な結果として、衝突速度がある値より大きい場合や温度が高い場合に、反発係数が下がり合体しやすくなることが分かった (図 1)。これはモノマーが変形しやすくなり、モノマー運動エネルギーが散逸しやすくなったことを示している。また、高速度衝突ほど JKR 理論と比べ反発係数が著しく低くなっており、モノマー衝突の物理と JKR 理論は定性的に異なることが分かる。そこで我々は、Krijt et al. (2013) の散逸モデルを用いて JKR 理論の修正を試みた。散逸モデルは、接触半径  $a$  と相対速度  $v$ 、ヤング率  $E$  に比例する抵抗力  $F = -2AEav$  が与えられる。比例係数  $A$  は物性値に依存すると考えられているが、どのような性質を持つのかは不明である。そこで本研究は比例係数  $A$  の衝突速度依存性を調べることにした。図 2 は衝突速度と  $A$  の関係を表しており、図から  $A$  は衝突速度とともに増加する振る舞いが見られた。また、低温では  $A$  は衝突速度と線型の関係に近似できる様子が見られ、高温ほど  $A$  が大きくなることが分かった。本発表ではこれらの結果について詳しく紹介し、JKR 理論の新しい拡張理論を提案する。

半径: $R/\sigma$	88.2
温度: $T/T^*$	$10^{-6}$ , 0.05, 0.10, 0.20
衝突速度: $v/v^*$	0.04 ~ 0.30
結晶向き	ランダム

表 1: モノマーモデル。  
結晶向きはランダムに 20 通り変えて、反発係数はそれらの平均を計算した。

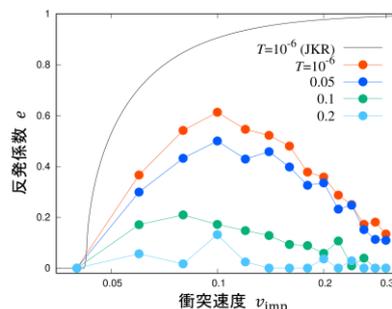


図 1: 反発係数の衝突速度依存性。高速度衝突ほど、JKR 理論と大きく異なることが分かる。

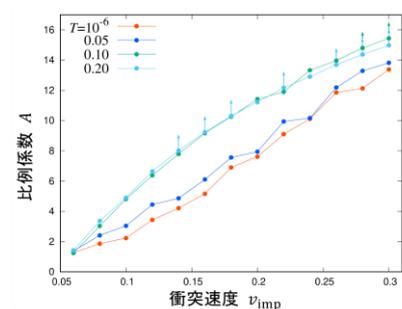


図 2: 比例係数  $A$  の衝突速度依存性。  $A$  の値は衝突速度とともに増加している。

# 原始惑星系円盤 HD 163296 のダストリング形成機構の推定

○ 土井 聖明<sup>1,2</sup>、片岡 章雅<sup>1,2</sup>、植田高啓<sup>2,3</sup>

Pablo Benítez-Llambay<sup>4</sup>、Sebastian Stammerl<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 総合研究大学院大学 物理科学研究科 天文科学専攻、<sup>2</sup> 国立天文台 科学研究部

<sup>3</sup>Max-Planck Institute for Astronomy

<sup>4</sup>Niels Bohr Institute、<sup>5</sup>Ludwig Maximilian University of Munich

惑星形成は、原始惑星系円盤 (以降、円盤) 内で、固体微粒子であるダストの合体成長から始まると考えられており、円盤内のダストの分布やダストサイズの解明は惑星形成過程解明の鍵となる。近年の ALMA による高空間分解能での観測により、多くの円盤でダストがリング状に分布していることが明らかとなった。これらのリング構造の成因は複数提案されてきたが、観測されているリングがどの機構により形成されたのかは未だ議論の渦中である。リングの形成機構によってリング内での微惑星形成の起こりやすさは異なるため、観測されたリングの形成機構の解明は惑星形成過程の解明につながる。

本研究では、円盤ダストの動径、鉛直分布の両方が観測から制限された天体である HD 163296 のリング形成機構を明らかにする。これまでの我々の研究から、この天体の2つのリングのうち、内側リングではダストが巻き上がっているのに対し、外側リングではダストが沈殿していることが明らかとなった (Doi & Kataoka 2021)。本研究では、代表的なリング形成機構である 1. 惑星によるダストトラップ 2. 焼結によるダスト破壊の促進 の2つの機構を取り入れたシミュレーションを行った。まずはガスの流体計算により惑星存在下でのガス面密度分布を求め、そのガス面密度を背景場として焼結を考慮したダストの移流成長シミュレーションを行った。その結果を観測から制限されたダストの動径、鉛直分布と比較することで、この円盤のリング形成機構を推定した。結果、この円盤では内側リング、外側リングの両方に惑星によるダストトラップが作用し、さらに内側リングのみに焼結によるダスト破壊の促進が作用していることが明らかとなった。ダストリングによって異なる形成機構が作用しているという結果は、リングによって内部で惑星が形成されやすいものと形成されにくいものが存在することを示唆する。

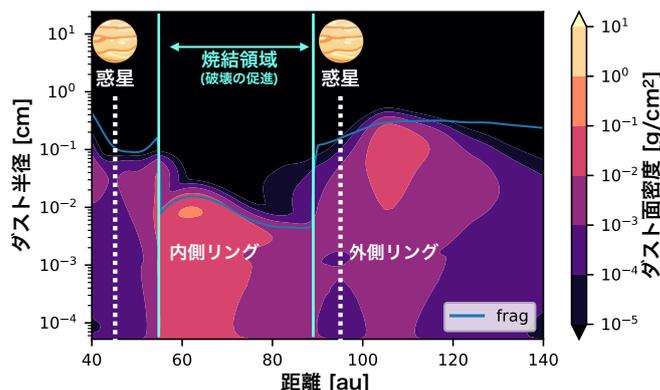


図 1. 観測を再現するモデルのダストサイズ分布。横軸は中心星からの距離、縦軸はダスト半径、カラーはサイズごとのダストの面密度を表す。内側リングでは外側リングと比べダストサイズが小さいため、ダストは鉛直方向に巻き上がる。

## Production of Formaldehyde in the Early Martian Atmosphere

### 初期火星大気におけるホルムアルデヒド生成

○小山俊吾<sup>1</sup>, 鎌田有紘<sup>1</sup>, 古川善博<sup>1</sup>, 寺田直樹<sup>1</sup>, 中村勇貴<sup>1</sup>, 吉田辰哉<sup>1</sup>, 黒田剛史<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東北大学

The RNA world is a widely known hypothetical idea to explain the origin of life (Walter, 1986). In this hypothesis, RNA consisting of ribose, phosphate, and nucleobases serves as information storage carriers and catalysts in organisms. Thus, the abiotic formation of RNA is an essential step toward the origin of life. Ribose, one of the building blocks of RNA, could be formed from formaldehyde (H<sub>2</sub>CO) via a reaction known as the formose reaction (Furukawa et al., 2019). The formation of formaldehyde from an N<sub>2</sub>-dominated atmosphere on prebiotic Earth has been estimated previously. It is crucial to clarify whether the surface environments on early terrestrial planets are suitable for the production of ingredients of RNA to understand the prebiotic chemical evolution linked to the emergence of living organisms.

Geomorphological evidence, such as valley networks, indicates the active hydrological cycle on early Mars from the late Noachian (3.8 Ga) to the early Hesperian (3.6 Ga) (Carr and Head, 2010). A CO<sub>2</sub>-dominated atmosphere containing a few percent of H<sub>2</sub> is proposed for the warm climate of early Mars (e.g., Ramirez et al., 2014). Such a weakly reduced environment is a promising site for the photochemical production of prebiotic molecules such as formaldehyde. However, the precipitation rate of formaldehyde and its concentration in the sea on early Mars remain highly uncertain.

Here we calculate the photochemical production of formaldehyde in the early Martian atmosphere to estimate the precipitation rate of formaldehyde into the sea. We use a 1-D photochemical model (Nakamura et al., in prep) under a 2-bar CO<sub>2</sub> atmosphere with additional H<sub>2</sub> gas with global mean inputs calculated by a 3-D paleo-Mars global climate model (Kamada et al., 2021; 2022).

We first calculated the H<sub>2</sub> mixing ratios with various outgassing rates of H<sub>2</sub> to investigate the plausibility of a CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> atmosphere. H<sub>2</sub> outgassing rates of  $> 5 \times 10^{11}$  and  $2 \times 10^{12}$  cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> are required to reach 3% and 6% H<sub>2</sub>, respectively, which is determined by the balance with the hydrogen escape to space. These values could have been episodically achievable by accretion of reduced materials enriched in metallic iron or episodic volcanic outgassing (Haberle et al., 2019; Ogawa, 2021).

We next calculated the production of formaldehyde under a 2-bar CO<sub>2</sub> atmosphere with various H<sub>2</sub> mixing ratios. Formaldehyde is dominantly produced via a reaction of HCO + HCO → H<sub>2</sub>CO + CO. The production of formaldehyde increases with the amount of H<sub>2</sub> because atmospheric O<sub>2</sub>, which converts HCO back to CO, conversely decreases. The precipitation rate of formaldehyde is estimated to be  $\sim 10^8$  cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> with  $> 3\%$  H<sub>2</sub>. This value is comparable to that of primitive Earth's atmosphere (Pinto, 1980).

Finally, we estimate the ocean mean formaldehyde concentration using the precipitation rate of  $2 \times 10^8$  cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> for the case of a 6% H<sub>2</sub> mixing ratio. Given that the 500-mGEL ocean covered the entire northern hemisphere (Di Achille and Hynek, 2010), the formaldehyde concentration in the ocean would reach 2 mM (M = mol/L) in 10<sup>7</sup> years. The minimum concentration of formaldehyde from which the synthesis of ribose was confirmed experimentally is  $\geq 1$  mM (Ono, 2022, Master thesis). Thus, ribose can be formed at this estimated concentration. On the other hand, one intermittent warm period would last for  $\sim 10^5$  years estimated from the calculated hydrogen escape rate, though, in total, the warm climate period for 10<sup>4</sup>~10<sup>7</sup> years is required to reconcile the observed geological evidence from geomorphic and geochemical analyses (Wordsworth et al., 2021). Further, we neglect the destructive processes of formaldehyde in water. Therefore, 2 mM is the upper limit for the estimated mean concentration in the ancient Mars ocean. Rather, the lakes or ponds where efficient concentration processes are likely to occur could be preferable for the higher formaldehyde concentration.

## 原始惑星が駆動するガス流れ場とダストの運動： 円盤面密度分布と惑星形成への影響

○桑原 歩<sup>1,2</sup>, 黒川 宏之<sup>2</sup>, 谷川 享行<sup>3</sup>, 奥住 聡<sup>1</sup>, 井田 茂<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学, <sup>2</sup>東京工業大学 地球生命研究所(ELSI), <sup>3</sup>一関工業高等専門学校

近年の観測から、多くの原始惑星系円盤(以下、円盤)において中心星から遠方の領域(>10 au)のダストの空間分布にリング・ギャップ構造が普遍的に存在していることが明らかになった[e.g., 1]。ダストのリング・ギャップ構造は、円盤内における動径方向のダストの運動と深く関わっている。また、惑星は円盤内において~mm—cmサイズのダスト(ペブル)を集積することで効率的に成長するというモデルが昨今注目を集めているが[2]、リング・ギャップ構造はペブル集積による惑星成長にも影響を及ぼすはずである。円盤内においてダストがどのように運動・分布しているかを知ることは、円盤観測の結果や惑星成長過程を理解する上で重要である。

ダストのリング・ギャップ構造の起源として、円盤内に存在する惑星の影響が議論されている。従来研究は、木星質量程度の大質量惑星によるガスとダストのギャップ形成を仮定する[e.g., 3]。しかし、観測的にはガスとダストのギャップ位置は必ずしも一致しない[4]。また、大質量惑星の存在頻度は恒星 1 個あたり~10%程度と推定されており[5]、ダストのリング・ギャップ構造が普遍的に存在する事実に合致しない。

我々は、これまでダストのリング・ギャップ構造形成が困難であると考えられてきた地球質量程度の小質量惑星に着目する。我々の過去の研究から、小質量惑星が重力によって周囲の円盤ガスの流れを乱し、複雑なガス流れ場を駆動する様子の詳細が明らかになった[6–8]。円盤内に存在する小さなダストはガスからの抵抗を強く受けるという性質を持つため、ガスにギャップを開けない小質量の惑星であっても惑星近傍のダストの運動に大きな影響を及ぼす [7, 8]。

本研究では、(1)ガスギャップを形成しない小質量惑星を想定した円盤ガス流れ場の 3 次元高解像度流体計算を実施した。(2)次に、流体計算データを元に惑星近傍におけるダストの運動を計算し、局所的なダスト空間分布に関するスナップショットを得た。(3)最後に、得られたダスト分布のスナップショットからダストの動径方向速度を求め、円盤動径方向 1 次元の移流拡散方程式に導入することで大局的なダスト面密度を計算した。

その結果、ガスにギャップを開けない小質量惑星でも大局的なダストのリング・ギャップ構造形成が可能であることを明らかにした[9]。たとえば、10 au において 7 地球質量程度の惑星を想定した場合、惑星軌道外側に向かって吹き出すガスの流れにより、惑星軌道の外側では~mm—cmサイズダストの中心星方向への移動が阻害される。一方、惑星軌道の内側に向かって吹き出すガスの流れにより、ダストの中心星方向への移動が加速される。両者の影響が組み合わさることで、惑星軌道付近にダストのリング・ギャップ構造が形成される。本研究結果から、リング・ギャップ構造を持ち、かつガスとダストの空間分布が一致しない円盤は、従来考えられていた木星質量程度の惑星ではなく、スーパーアース質量程度の小質量惑星の存在を示していることが示唆される。また、ガス流れ場によるペブルの大局的なギャップ形成と惑星近傍におけるペブルの運動への影響により、ペブル集積による惑星成長が抑制される。これによって、大質量惑星より小質量惑星の存在頻度が高いという観測事実も説明できる可能性がある。

[1] Andrews, S. M., Huang, J., Pérez, L. M., et al. 2018, *Astrophys. J. Lett.* 869, L41 [2] Ormel, C. W. & Klahr, H. H. 2010, *Astron. Astrophys.* 520, A43 [3] Rice, W., Armitage, P. J., Wood, K., & Lodato, G. 2006, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 373, 1619 [4] Jiang, H., Zhu, W., & Ormel, C. W. 2022, *Astrophys. J. Lett.* 924, L31 [5] Johnson, J. A., Aller, K. M., Howard, A. W., & Crepp, J. R. 2010, *Publ. Astron. Soc. Pac.* 122, 905 [6] **Kuwahara, A.**, Kurokawa, H., & Ida, S. 2019, *Astron. Astrophys.* 623, A179 [7] **Kuwahara, A.** & Kurokawa, H. 2020a, *Astron. Astrophys.* 633, A81 [8] **Kuwahara, A.** & Kurokawa, H. 2020b, *Astron. Astrophys.* 643, A21 [9] **Kuwahara, A.**, Kurokawa, H., Tanigawa, T., & Ida, S. 2022, *Astron. Astrophys.* accepted.

## 多成分 MHD による太古火星におけるイオン散逸の研究: 固有磁場と太陽 XUV 放射の影響

### Multispecies MHD study of ion escape at ancient Mars: Effects of an intrinsic magnetic field and solar XUV radiation

○坂田遼弥<sup>1</sup>, 関華奈子<sup>1</sup>, 堺正太郎<sup>2,3</sup>, 寺田直樹<sup>2</sup>, 品川裕之<sup>4</sup>, 田中高史<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東北大学理学研究科地球物理学専攻, <sup>3</sup> 東北大学大学院理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター, <sup>4</sup> 国立研究開発法人情報通信研究機構, <sup>5</sup> 九州大学国際宇宙天気科学・教育センター

Escape of the ionized atmosphere to space, ion escape, is one of the important processes responsible for the loss of the atmosphere and climate change at ancient Mars. Intense solar X-ray and EUV (XUV) radiation and strong solar wind from the young Sun enhanced ion escape from the planet. On the other hand, the presence of a global intrinsic magnetic field at ancient Mars is suggested by the distribution of the crustal magnetic field on the surface. Ion escape at ancient Mars should be different from present Mars due to different conditions of solar XUV radiation, solar wind, and planetary magnetic field, but the details are still in debate. Our previous study (Sakata et al., 2020) conducted multispecies magnetohydrodynamics (MHD) simulations to investigate the effects of a dipole field on ion escape at Mars under the extreme solar XUV and solar wind conditions at 4.5 Ga. The presence of a weak dipole field induces molecular ion ( $\text{O}_2^+$  and  $\text{CO}_2^+$ ) escape, while it decreases escape of  $\text{O}^+$  and molecular ions when the magnetic pressure of the dipole field at the equatorial surface is comparable to or higher than the solar wind dynamic pressure.

In this study, we investigated the ion escape dependence on the dipole field strength under 50 times higher solar XUV radiation and strong solar wind conditions during coronal mass ejection (CME)-like events at 3.5 Ga. We also conducted the simulations under 10 times higher solar XUV condition to see the effects of the solar XUV radiation. The ion escape rates show two different dependences on the pressure ratio of the magnetic pressure of the dipole field at the equatorial surface to the solar wind dynamic pressure. The escape rates of molecular ions are increased by a factor of up to six, but the  $\text{O}^+$  escape rate does not change if the pressure ratio is below 0.1. The escape rates of  $\text{O}^+$  and molecular ions are decreased by more than one order of magnitude if the pressure ratio is above 0.1. The threshold pressure ratio can be described by the pressure balance between the dipole field and the solar wind at high latitudes where the ionospheric outflow occurs in the no dipole field cases. The effects of the dipole field are larger in the lower XUV cases, which may be due to smaller contribution of ion pickup on the extended oxygen corona. Ion escape can contribute to a large part of the atmospheric loss in the no dipole field cases, but it would be much smaller under the presence of a strong dipole field.

#### References

- Sakata, R., et al. (2020). Effects of an intrinsic magnetic field on ion loss from ancient Mars based on multispecies MHD simulations. *J. Geophys. Res.*, 125, e2019JA026945. doi:10.1029/2019JA026945
- Sakata, R., Seki, K., Sakai, S., Terada, N., Shinagawa, H., & Tanaka, T. (2022). Multispecies MHD study of ion escape at ancient Mars: Effects of an intrinsic magnetic field and solar XUV radiation. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030427. <https://doi.org/10.1029/2022JA030427>

## 数値シミュレーションを用いた Dynamically New Comets の判別指標の 解明に向けた研究

○佐々木 優斗<sup>1</sup>、鈴木 雄大<sup>2</sup>、吉岡 和夫<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>東京大学大学院 新領域創成科学研究科、<sup>2</sup>東京大学大学院 理学系研究科

太陽系の形成以降、初めて太陽に接近する彗星を Dynamically New Comet (DNC) と呼ぶ。DNC は太陽による宇宙風化の影響が少ないため、太陽系形成時の情報が保たれている。したがって、DNC の詳細な調査は太陽系の進化過程を探る上で重要である。しかし、長周期彗星はその進化の過程で太陽による引力以外の力も受けて大きく近日点距離が変化する。そのため、初めて近日点距離が snow line 以下となる彗星、すなわち、DNC を選別する必要がある。しかしながら、ある彗星が DNC である可能性を評価するための定量的な指標は未だに確立されていない。これは観測的な制約から長周期彗星の軌道の長期間にわたる正確な追跡が困難であることが要因である。そこで、本研究では、数値シミュレーションを用いて DNC を特徴づける軌道要素の解明を試みた。今回は計算開始時の軌道長半径（以下、計算初期軌道長半径）と近日点距離の関係、軌道傾斜角の継続期間について着目し、それぞれ解析した。

彗星に働く力が太陽による引力のみであれば、近日点距離は変化しない。しかし、実際には銀河潮汐力や恒星遭遇の影響を受け、大きく変動している。そこで、異なる計算初期軌道長半径をもつ彗星について、これらの影響を考慮した運動方程式の時間発展を計算し、近日点距離が 10 億年の間に 5 au を下回る回数を調べた。ここで、この 5 au は H<sub>2</sub>O の snow line を十分に超える距離として設定した。

その結果、計算初期軌道長半径が 70,000 au 以上になると過去に 5 au 以下まで接近した可能性が有意に低くなることが明らかになった。また、この傾向は計算初期軌道傾斜角に依存しなかった。これは長周期彗星の中でも計算初期軌道長半径が 70,000 au を超えると推定されるものを探査対象とする方が DNC の可能性が高くなることを示唆している。

また、軌道傾斜角についても DNC 特有の傾向の有無を調べた。昇降点黄経と近点引数が異なる 49 通りの軌道について、10 億年間における軌道傾斜角の時間発展を解き、30 度ずつの領域における滞在時間をそれぞれ計算した。ここでは、軌道傾斜角の計算初期軌道長半径への依存性も調べるために、20,000 au から 80,000 au まで 10,000 au ごとに変化させた。

結果は、計算初期軌道長半径が小さい場合はすべての軌道傾斜角バンドの滞在時間の割合がおおむね均一であるが、大きくなるにつれて 60 deg から 120 deg の領域への滞在時間が顕著に長くなることが明らかになった。このことから、計算初期軌道長半径が 70,000 au を超えると推定され、かつその軌道傾斜角が 60 deg 以上 120 deg 以下である彗星は DNC である可能性が高いと言える。

## 月面クレータ斜面の岩塊密集領域での急速な地形緩和

○池田あやめ<sup>1</sup>、熊谷博之<sup>1</sup>、諸田智克<sup>2</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学、<sup>2</sup>東京大学

クレータの形成と緩和過程、レゴリスの生成過程、それらの時間スケールの解明は、惑星や小天体の表層進化を理解するうえで重要である。月は Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) や SELENE (かぐや) などの探査機によって高解像度の画像が取得されており、表面状態や標高を詳細に解析することができる。その結果、クレータ斜面に岩塊 (ボルダー) が密集したボルダーソースやボルダーが斜面を転がったボルダー崩れが発見されている (例えば Bickel et al., 2020; Kumar et al., 2016)。しかし、ボルダーソースや崩れがクレータ斜面の地形緩和にどのように影響を与えるかはわかっていない。そこで本研究では、月周回衛星の画像を用いて斜面の状態を詳細に解析するとともに、拡散モデルを用いて斜面の形状を再現することでクレータの緩和とボルダーソースと崩れの関係を調べた。

本研究ではシュレディンガー盆地 (月の裏側の南極付近) の南側リムの斜面と、ヒルベルト W クレータ (月の裏側の低緯度) の斜面で解析を行った。まず、LRO の Narrow Angle Camera (NAC) の画像から小クレータとボルダーソースの分布と、Diviner から得られた夜間の気温差のデータから Rock Abundance (RA) (Bandfield et al., 2011) を推定した。さらに、かぐやの MI 画像から新鮮度を表す OMAT (Lucey et al., 2000) の分布、地形カメラのステレオ画像から作成された数値地形モデルを用いて斜度の分布を算出し、これらの関係を比較した。

これら 2 箇所解析領域の斜面に存在する直径 5 m 以上の小クレータ密度から斜面のクレータ年代を推定すると、それぞれ 5 Ma と 1 Ma となり、非常に新しい年代が推定された。また、地形モデルから得られた斜面の断面を多項式関数でフィッティングした平均的な斜面と比較したところ、概ね平均的な斜面と一致するものの、ボルダーソースが斜面上方で存在する領域では斜面の中腹にへこみとふくらみを持つ特徴的な地形が見られることがわかった。斜度の分布と比較すると、このへこみとふくらみはボルダーソースの直下と中腹の斜度の変化の大きい領域に対応している事がわかった。また、ボルダーソース・OMAT・RA を比較すると高 OMAT 領域とボルダーソースは対応しているだけでなく、RA も大きいことから、ボルダーソースは周辺と比べて新鮮な岩盤が露出しており、熱疲労の影響を強く受けていることが示唆された。次に拡散方程式を用いて、クレータ年代から推定された概ね 1 Ma までの期間における斜面の標高の変化を計算した。拡散係数の値とその範囲を変えて計算を行ったところ、斜面全体の拡散係数をおよそ  $10^4 \text{ m}^2/\text{Ma}$  とし、さらに斜面上方で 1-3 倍程度拡散係数を大きくすることによって、上記のへこみとふくらみをもつ地形が再現されることがわかった。この拡散係数は Fasset & Thomson (2014) で推定された値の 1000 倍程度であり、クレータ全体の緩和を考えた時に、長期間ではクレータの緩和が進みすぎてしまう。したがって、この大きな拡散係数は斜面上方に岩盤が露出している限定的な領域かつ短期間 (Ma オーダー) の間で成り立っていることが示唆される。これらの結果から、次のような斜面緩和のモデルを考えることができる。斜面上方で岩盤が露出すると熱疲労によってボルダーとレゴリスが効率よく生成され、斜面に供給されるため拡散係数はクレータ全体の平均より大きくなるが、Ma オーダーで緩和が進み、岩盤が露出なくなると拡散係数は小さくなる。本研究の結果は、クレータ斜面の緩和が一様に進むのではなく、斜面の物理状態によって短いタイムスケールで急激に緩和が進行する領域があることを示している。このような表面構成物質の状態に依存したレゴリス生成・地形緩和過程は、天体間で多様な表面状態を示す小天体の表面進化を体系的に理解する上でも重要である。

# 機械学習によるカオス地形の識別と分類： 火星地下氷圏の分布と進化への示唆

○庄崎弘基<sup>1</sup>, 関根康人<sup>1</sup>, Nicholas Guttenberg<sup>1,2</sup>, 小松吾郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学地球生命研究所, <sup>2</sup>GoodAI, <sup>3</sup>ダヌンツィオ大学

カオス地形は、火星、エウロパ、冥王星などの天体表層に普遍的にみられる破碎された陥没地形で、天体の地殻活動や地下圏に関する重要な情報を提供する。特に火星では、35–33 億年前を境に液体の水の活動は地表から地下へ移っていったと考えられているため、火星地下水/氷圏を把握することは火星の水変遷史の理解や、将来の探査で利用可能な水資源の探索において重要である。火星カオス地形は大洪水地形であるアウトフローチャネルの源流域に位置していることから、帯水層や地下水の崩壊と大規模な噴出によって形成されたと考えられている。したがって、これらの地形は過去の火星の地下水/氷の分布及びそのダイナミクスを理解するための手がかりになる可能性がある。一方で火星カオス地形の中にはカルデラ崩壊のような地下のマグマ溜まりの活動によって形成されたと考えられているものも報告されている。火星カオス地形やカオス類似地形は火星全球で約 450 地点認定されており、その全てで成因別の分類は行われていないため、どこに地下氷圏に関連するようなカオス地形が分布するかは明らかになっていない。

本研究では、機械学習による画像認識を行い、形成メカニズムに基づいた火星カオス地形の全球的な認識と分類を試みた。まず既存の学習済みモデルの転移学習に基づいて、カオス地形のブロック形態を識別・分類するモデルを構築した。画像データは、Context Camera (CTX)によって撮像された可視の地形画像を使用した。分類カテゴリーは先行研究に基づいて、地下水/氷関連のカオスブロック、火山活動由来のカオスブロック、非カオスブロック、を設定した。学習の結果、構築したモデルは90%以上の精度でカオス地形を識別できた。

このモデルを成因未推定の 128 地点の火星カオス地形に適用したところ、地下水/氷関連と火山活動由来のカオスブロックが1つのカオス地形内に共存する複合的なカオス地形と、地下水/氷関連のカオスブロックのみが存在するカオス地形に大別された。複合的なカオス地形は、circum-Chryse 域と呼ばれるアウトフローチャネルが多く存在する領域に集中して分布する一方で、地下水/氷関連のカオスブロックのみが存在するカオス地形は火星の南北二分境界の Arabia Terra 北部を除いた領域に分布していた。

カオスブロックの分布や亀裂帯の解析から、複合的なカオス地形は、マグマ上昇とそれに起因した地下水の融解の組み合わせによって形成されたと考えられる。地下水/氷関連のカオスブロックのみのカオス地形のある地域は、ヘスペリア紀の火星の地下水湧昇域と推定されており、過去に地下水/氷が存在していたことを強く示唆している。

## 自転変化に伴うリュウグウの表層進化

渡邊誠一郎<sup>1</sup>, 山田理央奈<sup>1</sup>, 諸田智克<sup>2</sup>, はやぶさ2サイエンスチーム

<sup>1</sup>名古屋大学, <sup>2</sup>東京大学

はやぶさ2の近傍探査により、リュウグウは自転速度変化に伴う表層進化を経験してきたことがわかってきた。衝突装置 SCI による人工クレーター生成実験に基づくリュウグウの表面年代は1000万年程度と推定される (Morota et al., 2020)。一方、表面反射スペクトルの類似性からは今から5億年以前に生成された衝突族である Polana-Eulalia 族の破片が集積したラブルパイル天体の可能性が高いとされている (Watanabe et al., 2019; Sugita et al., 2019)。両者を受け入れると、リュウグウは母天体の衝突破壊で形成された後かなり時間が経過してから、表層の大部分が更新されてクレーターを消去したイベントがあったことを意味する。自転軸対称に近いコマ型形状とあわせ、高速自転による全球的な表層地滑りがあったことが強く示唆される。実際、粉体 SPH 計算によって、内部が100 Pa程度の強度を持てば、地滑りによりコマ型形状が再現されることが示されている (Sugiura et al., 2021)。また、形状モデルに基づく熱放射による自転変化 (YORP 効果) の計算から、現在、リュウグウはスピンドウンしていて、数百万年程度の過去には自転崩壊の臨界角速度に近い高速自転をしていた可能性が指摘されている (Kanamaru et al., 2021)。

こうした自転速度変化とそれに伴う表層変化をさらに研究するため、われわれはリュウグウ表面の大型のクレーターに着目し、その東西と南北のリムの高さを精密な地形補正をして求めた。最大級の大きさのクレーターのいくつかで西のリムが東に比べて高いとの報告 (Hirata et al., 2021) はあるが、衝突前の広域地形の傾きが推定されていないため、そのリムの高さの差がただちに高速自転によるコリオリ力によるものとは断定できない。また調査されたクレーターも少数であった。そこで、われわれは、クレーターの外側周辺地形平均傾斜面に対して、クレーターリムの比高を求める手順を開発し、Hirata et al. (2020) のリュウグウのクレーターリストのうち、直径75 m以上で標高データの信頼度・解像度が高い11個のクレーターについて、この手順を適用して、リムの東西および南北の比高差を求めた。その結果、4個のクレーターではリムが明確に西高東低であり、うち3個は赤道側リムが極側のリムに比べて有意に高かった。これは高速自転時の遠心力の効果で極側のリムがクレーター形成中に崩れて低くなったことで説明できる。そこで、自転周期が3.7時間の時に放出されたとして、放出時のクレーターエジェクタに作用するコリオリの力を実効的重力 (万有引力と自転遠心力の合力) によって規格化した無次元量  $\alpha_{3.7}$  に対して、リムの東西高低差および赤道極高低差をプロットすると、正の相関が見られ、 $\alpha_{3.7}$  が小さいクレーターではリムの東西高低差は見られなかった。講演では、ボルダーの観測やクレーター層序などの状況証拠について議論し、この過去のリュウグウの自転変化に関する新たな制約条件を加味して、リュウグウの自転変化に伴う表層進化を考察する。

# 小惑星の大規模衝突破壊の数値計算と 形成される集積天体のインパクト混入率

○杉浦圭祐<sup>1</sup>, 小林浩<sup>2</sup>, 杉田精司<sup>3</sup>, 玄田英典<sup>1</sup>, 巽瑛理<sup>4</sup>, 諸田智克<sup>5</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学 地球生命研究所, <sup>2</sup>名古屋大学大学院 理学研究科, <sup>3</sup>東京大学大学院 新領域創成科学研究科, <sup>4</sup>カナリア天体物理学研究所, <sup>5</sup>東京大学大学院 理学系研究科

最近 JAXA の探査機はやぶさ 2 が半径 500 m 程度の小惑星リュウグウを訪れ、詳細なその場観測及び表面物質の採取を行った。リュウグウのスペクトルの特徴と太陽系天体の軌道進化の知見から、リュウグウはオイラリア族かポラナ族の一員であったと考えられている (Sugita et al. 2019)。これら族の総質量から考えて、リュウグウ及びリュウグウが含まれていた族の母天体の半径はだいたい 50 km 程度だと見積もられている (Walsh et al. 2013)。

はやぶさ2の探査によってリュウグウの表面のどの場所もほぼ一様にC型のスペクトルを持ちアルベドの低い岩石で構成されていることがわかった (Kitazato et al. 2019)。一方でONC-Tによる高解像度の観測によって一部の岩塊はアルベドが高くS型のスペクトルを持つこともわかった。これらS型岩塊はC型のリュウグウ母天体の大規模衝突破壊を引き起こしたS型のインパクトの破片が混入したものであると考えられている (Tatsumi et al. 2021)。リュウグウ全体の体積とS型岩塊全体の体積の比は $10^{-5}$ 程度であると見積もられている (Sugimoto et al. 2021)。そのため、このような少量のインパクトの破片を含むような集積天体を生成する大規模衝突破壊の衝突条件を制約することで、リュウグウ母天体の衝突史を明らかにすることにつながると期待される。

そこで我々はSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法を用いた小惑星の大規模衝突破壊の数値計算を実施した。我々が用いたSPH法には岩石の破壊モデル (Benz and Asphaug 1995) と粉々になった破片間の摩擦モデル (Jutzi 2015) が実装されており、固体小天体間の衝突現象を再現することに適している。まずはリュウグウの出身族であるオイラリア族もしくはポラナ族形成衝突に着目し、その結果形成される集積天体に含まれるインパクト破片の量の衝突条件依存性を調べた。

オイラリア族もしくはポラナ族の総質量とそれぞれの族の最大天体の質量から、その族形成衝突は半径50 kmのターゲット天体にインパクトが衝突し、最大天体の質量がターゲット天体質量の0.1倍程度になるようなものであったと考えられる。我々は衝突角度 $15^\circ - 60^\circ$ 、ターゲット/インパクト質量比4 - 64の範囲の計20通りのパラメータに対して最大天体/ターゲット天体質量比が0.1程度になる衝突速度を求めた。またそれらのパラメータの衝突の高解像度計算を粒子数300万程度で実施し、集積天体に含まれるインパクトの質量割合を調べた。その結果、衝突角度が $15^\circ$  もしくは $30^\circ$  の正面衝突に近い衝突ではどの集積天体にもほぼ一様に $10^{-1}-10^{-3}$ のインパクトが混ざってしまうことがわかった。また衝突角度を上げていくとインパクト混入率は急激に下がり、衝突角度 $50^\circ$  と $60^\circ$  では $5 \times 10^{-6}$ 程度のインパクトを含む集積天体の形成を確認することができた。従って、リュウグウのS型岩塊の量を説明できるインパクトがオイラリアもしくはポラナ族形成衝突で混入することは可能かもしれない。

## 小惑星リュウグウ帰還試料のフェーズ1キュレーションとその後

○安部正真<sup>1</sup>, 岡田達明<sup>1</sup>, 鈴木志野<sup>1</sup>, 橘省吾<sup>2</sup>, 菅原春菜<sup>1</sup>, 深井稜汰<sup>1</sup>, 石崎拓也<sup>1</sup>,  
矢田達<sup>1</sup>, 西村征洋<sup>1</sup>, 坂本佳奈子<sup>1</sup>, 宮崎明子<sup>1</sup>, 与賀田佳澄<sup>1</sup>, 長島加奈<sup>1</sup>, 金丸礼<sup>1</sup>,  
田原瑠衣<sup>1</sup>, 熊谷和也<sup>3</sup>, 畠田健太郎<sup>3</sup>, 副島広道<sup>3</sup>, 人見勇矢<sup>3</sup>, 杉山由香<sup>1</sup>,  
MicrOmega チーム<sup>4</sup>, ONC チーム<sup>2</sup>, 臼井寛裕<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JAXA 宇宙科学研究所, <sup>2</sup>東京大学, <sup>3</sup>マリン・ワーク・ジャパン, <sup>4</sup>IAS

はやぶさ2が2020年12月に持ち帰った、C型小惑星リュウグウ試料は、JAXA 相模原キャンパスのキュレーション設備で受け入れた後、6カ月間にわたってフェーズ1キュレーションを実施した。

フェーズ1キュレーションの実施内容としては、具体的には、帰還試料の真空環境での開封と一部試料の取り出し及び保管、帰還試料の全体量の把握（重量測定）、サンプル収納容器からの試料の取り出し（バルク試料の回収）、バルク試料の秤量、分光測定、光学顕微鏡撮影を実施し、約200粒の試料を個別ピックアップ実施し（個別試料の回収）、それらの初期記載を行うと同時に、その後の詳細分析への分配試料の選定を行った。

帰還6か月後の2021年6月には、初期分析チーム6チームとフェーズ2キュレーションチーム2チームへの試料分配を予定通り実施した。その後、NASAとのMOUの取り決めに従い、2021年12月までに帰還試料の10%に相当する約500mgをNASAに分配し、第1回国際研究公募で選定された研究者に対して、2022年6月より配布作業を開始している。2023年1月までには、第2回国際研究公募の選定を終え、配布作業を開始する予定で、現在、分配対象試料の選定中である。

個別試料のピックアップ作業と初期記載作業は、フェーズ1キュレーション期間終了後も継続中で、2021年12月時点で約400個、2022年7月時点で約550個のピックアップが実施されている。

相模原キャンパスでのキュレーション作業では、帰還試料は原則大気非暴露環境下で取り扱っている。また地球物質による試料汚染を極力避けるため、試料に触れる物質の種類の制限や洗浄による汚染物除去を行うと同時に、試料を取り扱っているクリーンチャンバーやその周囲の環境評価も実施している。

キュレーションで得た分析情報は試料データベースに登録して一般に公開すると同時に、試料のハンドリング履歴などのトレーサビリティも管理している。

地球外物質研究グループでは、はやぶさ初号機が持ち帰った小惑星イトカワの帰還試料のキュレーション作業も継続中で、OSIRIS-RExが持ち帰る小惑星ベンヌの帰還試料を受入れる施設の整備も進行中である。またMMXが持ち帰る火星衛星フォボス試料の受入れについても検討が始まっている。

## 小惑星リュウグウ試料に見られる岩相の多様性

○三河内 岳（東大）、吉田英人（東大）、中村智樹（東北大）、松本恵（東北大）、Michael E. Zolensky（NASA）、中嶋大輔（東北大）、萩谷健治（兵庫県大）、菊入瑞葉（東北大）、森田朋代（東北大）、天野香菜（東北大）、加川瑛一（東北大）、塚本尚義（北大）、野口高明（京大）、岡崎隆司（九大）、藪田ひかる（広大）、奈良岡浩（九大）、坂本佳奈子（JAXA）、橘省吾（東大）、渡邊誠一郎（名大）、津田雄一（JAXA）

JAXA「はやぶさ 2」探査機によりサンプルリターンされた小惑星リュウグウ試料は、Mg-Fe 層状ケイ酸塩から主に成る mm-サブ mm サイズの角レキ岩であることが初期分析結果として最近報告されている。我々は、初期分析の「石の物質分析」チームとして合計 18 粒子の岩石・鉱物学的分析を行った。1 回目のタッチダウンで採取された Chamber A 粒子が 7 個、2 回目のタッチダウンで採取された Chamber C 粒子が 11 個で、これらの粒子から作成した合計 52 個の樹脂埋め研磨試料の分析を行った。分析には FE-EPMA（JEOL JXA-8530F @東大・地惑）を用いた。その結果、リュウグウ試料の角レキには、水質変成の度合いや変成環境が異なると考えられる多様な岩相が存在していることが明らかになった。本研究で、これらの岩相に存在する鉱物の違いを主に考慮して、岩相のタイプ分けを試みた。その結果、全部で 7 種類の岩相に分けることができた。特に注目した点は、カンラン石の有無、炭酸塩鉱物の種類であった。カンラン石は水質変成度が小さいと考えられる岩相にのみ存在していた。また、炭酸塩鉱物は、Ca 炭酸塩（カルサイト）、CaMg 炭酸塩（ドロマイト）、MgFe 炭酸塩（含 Fe マグネサイト）の大きく分けて 3 種類が存在していた。カンラン石が存在する岩相では炭酸塩には Ca 炭酸塩しか含まないものがあり、水質変成のシミュレーションと合わせて、これらがリュウグウ試料中で最も水質変成の度合いが弱い岩相であり、Ca リン酸塩ではなくリン化合物が存在している点も特徴である。一方で、カンラン石が存在しない水質変成が進んだと考えられる岩相がリュウグウ試料では一番多くみられ、主要な岩相であった。これらの主要岩相は、炭酸塩鉱物の組み合わせで、CaMg 炭酸塩のみの岩相と、CaMg 炭酸塩に加えて MgFe 炭酸塩も存在する岩相に分けることができ、水質変成環境の違いを反映していると考えられる。また、カンラン石の主要、微量元素分析の結果、組成的特徴からアメーバ状カンラン石集合体（AOA）的な特徴を持つもの、およびコンドロール的特徴を持つものの 2 種類が存在することが明らかになった。以上の結果は、CI コンドライトと酷似しており、先行研究で報告されている観察結果を補強する結果であった。また、Chamber A の試料は比較的水質変成の度合いの進んだ岩相を含む粒子が多いのに対して、Chamber C の試料は、水質変成を免れたと考えられるカンラン石を含むような比較的水質変成度合いの弱い岩相も含み、岩石的多様性により富んでいることが明らかになった。このことは、2 回のタッチダウンで異なる特徴の試料が採集されたことを示唆している。

## 小惑星リュウグウ試料の粗粒粒子分析結果

○中村智樹<sup>1</sup>, 松本恵<sup>1</sup>, 天野香奈<sup>1</sup>, 榎戸祐馬<sup>1</sup>、マイケル ゾレンスキー<sup>2</sup>,  
三河内 岳<sup>3</sup>, 初期分析石チーム, 初期分析コアチーム  
1 東北大学, 2 NASA/JSC, 3 東京大学

総勢約 150 名（日、米、仏、英、スペイン、ベルギー）からなる初期分析石チームで、小惑星探査機 Hayabusa2 がリュウグウから回収したミリ～センチメートルサイズの粒子を 18 粒子分析した。その結果、リュウグウ母天体は水や CO<sub>2</sub> の雪線以遠の低温の太陽系星雲内部で、無水、および非晶質ケイ酸塩、硫化物、金属鉄と氷、有機物が集積して形成された。形成年代は CAI 形成からおよそ 2 百万年後と推定される。全岩組成は CI コンドライトに近かったと Muon 測定から得られた元素存在度から推定される。短寿命核 <sup>26</sup>Al の崩壊熱で天体内部がたためられ、CAI 形成からおよそ 3~5 百万年後に天体内部で水質変成が進行したと考えられる。リュウグウの母天体には水が水/岩石重量比 < 1 で含まれており、その水は塩水で CO<sub>2</sub> や有機物が含まれていることが分かった。回収サンプルの多くは、水岩石反応の結果生じた含水鉱物や炭酸塩鉱物を主とする岩石であるが、水岩石反応の影響が低い水岩石比で形成された岩片も多数発見された。これらの岩片は、母天体の表層近くの低温、低い水岩石比の環境で形成された可能性がある。リュウグウサンプルの物性測定を行い、この結果を考慮した衝突破壊のシミュレーションこれらの結果から、リュウグウは衝突地点から離れた領域の欠片が集まって形成されたと考えられる。以上の結果から、リュウグウの母天体は天体内部で多様な水岩石反応が進行し、後に大規模衝突で破壊され、母天体の異なる部位の岩片が再集積してできたと考えられる。発表では最新の解析結果を含めて紹介したい。

## 初期分析によるリュウグウ粒子の熱拡散率と熱慣性

○石崎拓也<sup>1</sup>, 長野方星<sup>2</sup>, 田中智<sup>1</sup>, 坂谷尚哉<sup>1</sup>, 中村智樹<sup>3</sup>, 藤田涼平<sup>2</sup>,  
Abdulkareem ALASLI<sup>2</sup>, 岡田達明<sup>1</sup>, 森田朋代<sup>3</sup>, 菊入瑞葉<sup>3</sup>, 天野香菜<sup>3</sup>, 加川瑛一<sup>3</sup>,  
坂本尚義<sup>4</sup>, 野口高明<sup>5</sup>, 岡崎隆司<sup>6</sup>, 藪田ひかる<sup>7</sup>, 奈良岡浩<sup>6</sup>, 坂本佳奈子<sup>1</sup>, 橘省吾<sup>8, 1</sup>,  
渡邊誠一郎<sup>2</sup>, 津田雄一<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>宇宙研, <sup>2</sup>東北大, <sup>3</sup>名大, <sup>4</sup>北大, <sup>5</sup>京大, <sup>6</sup>九大, <sup>7</sup>広大, <sup>8</sup>東大)

はやぶさ2は小惑星リュウグウを探索し2020年に約5.4gの試料を持ち帰ったが、そのうち15wt%について初期分析が行われた。本研究では石の物質分析チームに分配された試料のうちC0002から切断されたサンプル2試料とC0025, C0033, A0026, A0064の5種類のサンプルについて、熱拡散率の異方性分布を測定しさらに熱慣性を評価した。測定には微小不定形状試料評価のために開発したロックインサーモグラフィ(LIT)式周期加熱法を用いた。本手法は試料をレーザースポットで周期的に加熱し、温度応答をLITで検出することで、伝播する温度波の位相遅れから局所的な熱拡散率を測定する。加熱周波数は試料サイズに応じて上記順にそれぞれ、2, 1, 4, 4, 4, 20 Hzで測定を行った。また、C0002-P3, C0002-P4, A0064は真空雰囲気下、C0002-P4, C0025, A0026, C0033は大気圧下で測定を行った。

得られた熱拡散率分布と別途測定した密度・比熱から熱慣性の分布を解析した結果(図1)、熱慣性が異方的に分布することが明らかとなった。また、その分布の異方性は大気圧下の測定より真空下の方が顕著な傾向であったが、A0064は真空下の測定でも異方性が小さかった。熱慣性の平均値は748-1475 J/(s<sup>1/2</sup>m<sup>2</sup>K)の範囲で試料間の差異が大きかったが、本結果では密度と熱拡散率には有意な相関は見られず、密度に依存して熱慣性が大きくなる傾向にあった。はやぶさ2に搭載された熱赤外カメラによる小惑星表面の熱慣性観測結果(300±100 J/(s<sup>1/2</sup>m<sup>2</sup>K) [1])と比較すると、本測定で得られた結果は有意に大きい値であった。この差異の原因は明らかでないが、異方性の大きい試料では観測結果に相当する値も見られた。異方性を生じる原因はまだ明らかでないが、本測定より大きいスケールのクラックに起因する可能性が考えられる。すなわち、小惑星表面の物質において宇宙風化やマイクロ隕石の影響でクラックが発達し、熱慣性の低下につながった可能性が考えられる。

参考文献: [1] T. Okada et al., Nature, 579(7800), 518-522, 2020.

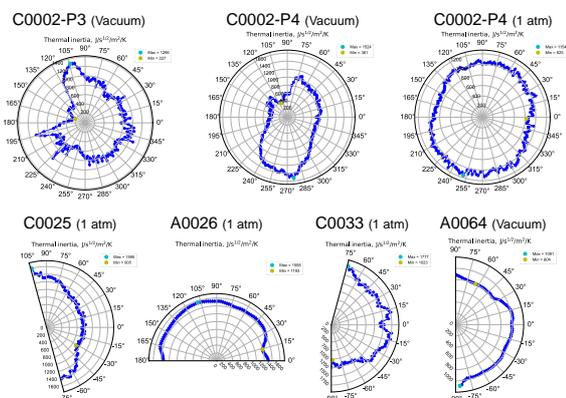


図1 リュウグウ試料の熱慣性異方性分布

## リュウグウ試料の岩石磁気学的・古地磁気学的研究

○佐藤雅彦<sup>1</sup>, 木村勇氣<sup>2</sup>, 田中智<sup>3</sup>, 畠山唯達<sup>4</sup>, 杉田精司<sup>1</sup>, 中村智樹<sup>5</sup>, 橘省吾<sup>1</sup>, 奥住聡<sup>6</sup>, 渡邊誠一郎<sup>7</sup>, 塚本尚義<sup>2</sup>, 野口高明<sup>8</sup>, 岡崎隆司<sup>9</sup>, 藪田ひかる<sup>10</sup>, 奈良岡浩<sup>9</sup>, 坂本佳奈子<sup>3</sup>, 矢田達<sup>3</sup>, 西村征洋<sup>3</sup>, 中藤亜衣子<sup>3</sup>, 宮崎明子<sup>3</sup>, 与賀田佳澄<sup>3</sup>, 安部正真<sup>3</sup>, 岡田達明<sup>3</sup>, 臼井寛裕<sup>3</sup>, 吉川真<sup>3</sup>, 佐伯孝尚<sup>3</sup>, 照井冬人<sup>11</sup>, 中澤暁<sup>3</sup>, 津田雄一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京大学, <sup>2</sup>北海道大学, <sup>3</sup>宇宙科学研究所, <sup>4</sup>岡山理科大学, <sup>5</sup>東北大学, <sup>6</sup>東京工業大学, <sup>7</sup>名古屋大学, <sup>8</sup>京都大学, <sup>9</sup>九州大学, <sup>10</sup>広島大学, <sup>11</sup>神奈川工科大学

原始惑星系円盤の進化において、円盤内磁場が重要な役割を果たしていると考えられている[1]。円盤内磁場は電離した円盤ガスの運動により生成・維持されているため、円盤内磁場の時間・空間変化に関する知見は円盤内の物質ダイナミクスの進化を理解するための重要な情報である。太陽系においては、円盤磁場の情報を記録している岩石試料を分析する事で、円盤内磁場の時間・空間変化を復元することが可能となる。本研究では、はやぶさ2プロジェクトによりC型小惑星リュウグウ(162173)から回収された岩石試料を用いて[2]、岩石磁気分析・古地磁気分析に基づく太陽系の円盤内磁場強度の復元を試みた。岩石磁気分析の結果、強磁性鉱物として、粗粒な磁鉄鉱、フランボイド状磁鉄鉱、ピロータイトがリュウグウ試料に含まれる事が明らかになり、保磁力(=磁場擾乱に対する残留磁化の安定性)の違いから、それぞれ残留磁化の低保磁力成分、中保磁力成分、高保磁力成分を担っている事が明らかになった[3]。古地磁気分析の結果、複数のリュウグウ粒子において、フランボイド状磁鉄鉱が担う中保磁力成分が安定な残留磁化を記録している事が明らかになった。この安定残留磁化成分について、REM'法[4]に基づいて残留磁化記録時の磁場強度を推定した結果、磁場強度は90 $\mu$ T程度と算出された[5]。リュウグウの形成史[6]を考慮すると、リュウグウ母天体での水質変性時に粒成長したフランボイド状磁鉄鉱が90 $\mu$ T程度の円盤磁場強度を記録していると考えられる。90 $\mu$ T程度の強い円盤磁場の記録は、原始太陽系円盤の中において、円盤内磁場がホールシア不安定などの磁気流体现象によって強く増幅されていたことを示唆する[1]。円盤内磁場強度と質量降着率の関係式[7]から、リュウグウ母天体での水質変性時における質量降着率の下限値を推定した結果、恒星系の観測から推定されている質量降着率時間変化の経験式[7]と調和的な結果が得られた。本発表では、リュウグウ試料の磁気分析結果および円盤磁場強度の報告に加えて、過去の研究から得られている普通コンドライト[8]・炭素質コンドライト[9,10]の円盤磁場強度記録に基づいて、円盤内の物質ダイナミクスに関する議論を行う。

引用文献 [1] Weiss et al. (2021), Sci. Adv. 7, eaba5967. [2] Tachibana et al. (2022), Science 375, 1011-1016. [3] Sato et al., under review. [4] Gattacceca & Rochette (2004), Earth Planet. Sci. Lett. 227, 377-393. [5] Sato et al., in prep. [6] Nakamura et al., under review. [7] Hartmann et al. (2016), Annu. Rev. Astron. Astrophys. 54, 135-180. [8] Fu et al., Science 346, 1089-1092. [9] Fu et al. (2021), AGU Adv. 2, e2021AV000486. [10] Borlina et al. (2021), Sci. Adv. 7, eabj6928.

# Yarkovsky 効果による小惑星 Ryugu の軌道進化： 起源族と衝突史への示唆

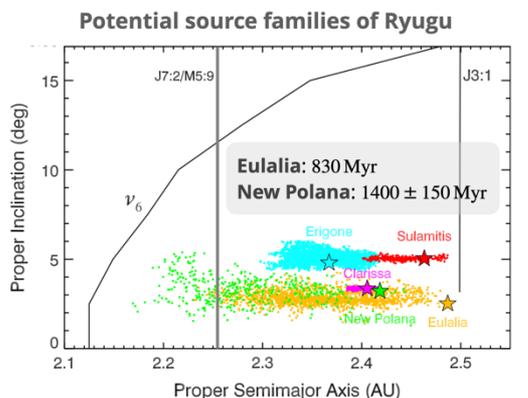
○金丸仁明<sup>1</sup>、杉田精司<sup>1</sup>、諸田智克<sup>1</sup>、長勇一郎<sup>1</sup>、白井寛裕<sup>2</sup>、岡田達明<sup>2</sup>、兵頭龍樹<sup>2</sup>、坂谷尚哉<sup>2</sup>、寫生有理<sup>2</sup>、田中智<sup>2</sup>、石崎拓也<sup>2</sup>、千秋博紀<sup>3</sup>、荒井武彦<sup>4</sup>、関口朋彦<sup>5</sup>、巽瑛理<sup>6</sup>、佐々木晶<sup>7</sup>、出村裕英<sup>8</sup>

<sup>1</sup>東京大学、<sup>2</sup>ISAS/JAXA、<sup>3</sup>千葉工業大学、<sup>4</sup>前橋工科大学、<sup>5</sup>北海道教育大学、  
<sup>6</sup>カナリア天体物理学研究所、大阪大学<sup>7</sup>、会津大学<sup>8</sup>

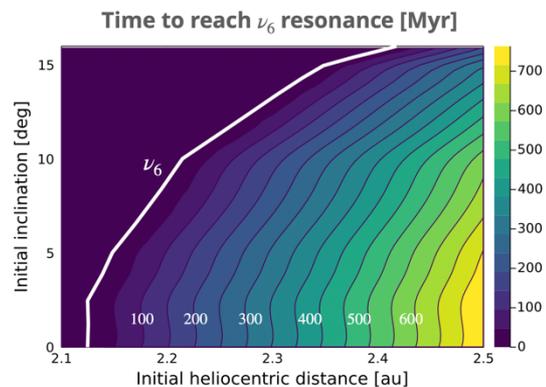
小惑星 Ryugu から持ち帰った試料の分析が進む中、Ryugu やその母天体が経験した地質過程や力学進化を明らかにして、試料のコンテキストを理解する必要が高まっている。特に、小惑星 Ryugu の起源となる小惑星族を特定し、メインベルトから地球近傍に至る軌道進化の道筋を明らかにすることが重要である。

本研究では、小惑星の熱物理計算をもとに、Ryugu のメインベルトにおける軌道進化の時間スケールを見積もった。メインベルト小惑星の軌道進化を引き起こす主要なメカニズムの一つが、熱放射の異方性に起因する Yarkovsky 効果である。はやぶさ 2 の観測によって得られた Ryugu の物理パラメータを用いると、メインベルトの内側領域 (2.1-2.5 au) を通過するのに 7 億年ほどの時間がかかることが見積もられた。

この時間スケールを Ryugu の起源となる小惑星族の形成年代と比較すると、Eulalia 族 (8.3 億年) は同程度の形成年代をもち、New Polana 族 (14 億年) は更に古い年代をもつ。ここから示唆される Ryugu の進化史として、(1) Eulalia 族の形成と同時に Ryugu が形成し、そのまま土星との永年共鳴まで運ばれた、あるいは (2) New Polana 族の形成時に、Ryugu の母天体が形成し、現在の Ryugu は第 2 世代以降のラブルパイル天体である、といった可能性が考えられる。今後は、帰還試料の分析結果と比較しながら、Ryugu 進化史の解明を試みる。



[Bottke+2015]



## 微小地球接近小惑星 2022 JL の即時モニタリング観測

○ 紅山仁<sup>1</sup>, 酒向重行<sup>1</sup>, 大澤亮<sup>1,2</sup>, 瀧田怜<sup>1</sup>,  
奥村真一郎<sup>3</sup>, 浦川聖太郎<sup>3</sup>, 吉川真<sup>4</sup>, 白井文彦<sup>4</sup>, 吉田二美<sup>5,6</sup>, 前原裕之<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター, <sup>2</sup> 国立天文台, <sup>3</sup> 日本スペースガード協会,  
<sup>4</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, <sup>5</sup> 産業医科大学, <sup>6</sup> 千葉工業大学惑星探査研究センター

近日点距離が 1.3 au 未満の小惑星を地球接近小惑星 (near-Earth asteroids, 以下 NEA) という。NEA の多くは火星-木星間の小惑星帯の小惑星が Yarkovsky 効果 (太陽の輻射に起因する軌道変化) により軌道変化した後に、巨大惑星との軌道共鳴を経て地球近傍にやってきたと考えられている[1,2]。この軌道進化過程において NEA の自転状態は YORP 効果 (太陽の輻射に起因して生じるトルクによる自転状態の変化) により変化する[3]。Yarkovsky 効果、YORP 効果は共に直径が小さい天体により強く作用するため、天文観測により微小小惑星の自転状態 (自転周期、自転軸の向き) を推定することで両効果が実際にどの程度作用しているのかを観測的に検証することができる。しかし小さく暗い微小小惑星は地球接近時に明るくなる短期間しか観測できない。一般に複数の光度曲線を合わせて小天体の自転軸の向きを推定するには複数回帰の観測が必要となるが、メインベルト小惑星に比べて軌道離心率や軌道傾斜角が大きい NEA は複数回帰での観測が難しい。故に自転軸の向きが推定された直径 150 m 以下の小惑星は (54509)YORP と 2021 DW<sub>1</sub> の 2 天体のみに限られる[4,5]。発見直後の NEA を即座にモニタリング観測すれば、一回帰で微小小惑星の自転軸の向きを推定できる可能性がある。

我々は2022年5月3日に木曾広視野カメラ Tomo-e Gozen [6]の観測により推定直径150 m 以下の微小 NEA 2022 JL から周期50秒の高速自転を検出した。複数の光度曲線を組み合わせることによる2022 JL の自転軸推定を目的として Tomo-e Gozen を用いた6日間 (5月3日から8日) の測光観測および岡山せいめい望遠鏡[7]と TriCCS を用いた1日間 (5月6日) の多色同時測光観測を実施した。せいめい望遠鏡の g、r、i バンドの観測から 2022 JL の色指数は  $g-r = 0.360 \pm 0.005$ 、 $r-i = 0.182 \pm 0.005$  と求めた。色指数は 2022 JL のスペクトル型が C 型であることを示唆する。計7つの測光結果を合わせた位相曲線から 2022 JL の絶対等級 H、スロープパラメタ G はそれぞれ  $H = 23.03 \pm 0.07$ 、 $G = 0.12 \pm 0.04$  と求めた (図)。本発表では 2022 JL の観測と導出した物理量 (自転周期、色指数、スロープパラメタ、直径) について報告し、自転軸の向きを推定を目的とした形状推定の試みについても述べる。

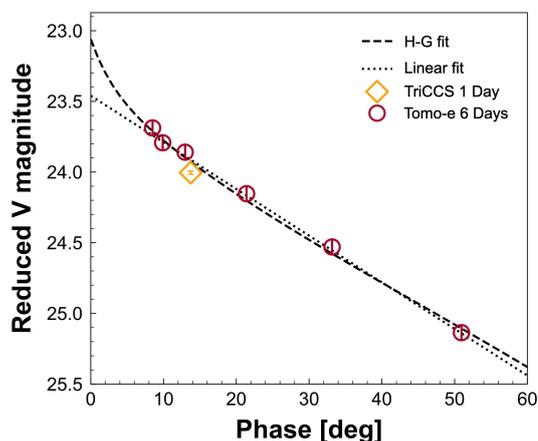


図. 2022 JL の位相曲線。約40度にわたる広位相角の測光データを合わせることで絶対等級 H とスロープパラメタ G を推定した。

### 参考文献

- [1] Bottke, W. F. et al., 2002, Icarus 156, 399. [2] Granvik, M. et al., 2018, Icarus 312, 181. [3] Rubincam D.P. 2000, Icarus 148, 2. [4] Lowry et al., 2007, Science, 316, 272. [5] Kwiatkowski et al., 2021, A&A, 656, A126. [6] Sako S. et al. 2018, Proceeding of SPIE, 10702, 107020J. [7] Kurita et al., 2020, PASJ, 72, 48.

## 岩石粒子の自動識別法を用いた

## 小惑星 Benu の Tlanuwa Regio における表層プロセスへの示唆

○清水 雄太<sup>1</sup>, 宮本 英昭<sup>1,2</sup>, 逸見 良道<sup>2</sup>

1. 東京大学工学系研究科システム創成学専攻

2. 東京大学総合研究博物館

近年の様々な探査により、小天体表層は大量の岩石粒子で覆われていることが判明した [e.g. 1]。岩石粒子の粒径や空間、形状の分布は小天体表層が経験した地質学的プロセスを反映していると考えられ、小惑星 Itokawa や Ryugu、Benu など調べられてきた [2, 3, 4]。ところが、岩石粒子の解析には様々な困難が存在する。例えば、細粒粒子の数密度の高さや、反射率の似た粒子同士の重なり合い等の影響により、個々の粒子の外形や粒子間の境界を客観的に抽出することは、手動の解析では困難である場合が多い。それゆえ天体の表面状態の正確な理解が妨げられている可能性がある。そこで本研究では、小惑星表面の岩塊に特化した粒子の自動識別法を開発し手法の妥当性を検証する。加えて、実際に小惑星 Benu の画像に応用して調査領域の表層プロセスを議論する。

岩石粒子の自動識別手法として、本研究では畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いた画像の特徴抽出結果を基に、粒子をポリゴンで自動識別する手法を開発した。教師データとしては、OSIRIS-REx ミッション [5] の OCAM [6] で撮影された Benu の高解像度画像から岩石粒子の輪郭のみを手動でポリゴンとして抽出し、>40,000 個の粒子からなるデータベースを作成した。その結果、学習したモデルによりおおよそ 80% の精度で自動識別できることが確認された。

このモデルを用いて、Benu において最も岩石粒子の数密度の高い領域 [5]、Tlanuwa Regio の OCAM 画像 (~3 cm/pix) 80 枚から、合計で>100,000 個の岩石粒子を自動識別した。さらに画像処理で得られる岩石粒子の輪郭の空間座標を Benu の 3 次元形状モデル上に投影し、個々の粒子の粒径、形状、空間、長軸の向きの分布を調査した。岩石粒子の累積サイズ頻度分布は傾き-2.6 のべき数を持ち、この結果は全球での調査結果 (-2.9 $\pm$ -1.9) [4, 7] と整合的である。また長軸の向きについては、全体的には東西方向が卓越 (>70%) しており、高緯度域から低緯度域の方向に岩石粒子が転倒 (回転) により移動した可能性が高いと考えられる。より詳細には、長軸の向きは Tlanuwa Regio の東西間で反対の傾向があり、東側では赤道と平行の方向から ~10° 反時計回り、西側では時計回りに回転している。ここから、Benu 最大の Minokawa クレーターに向かって物質が移動したという示唆を得た。この結果は、Tlanuwa Regio 西側の線状構造や、Minokawa クレーター内の大規模な堆積物 [8] の存在と整合的である。

[1] Sugita et al., *Science* **364**, eaaw0422 (2019). [2] Mazrouei et al., *Icarus* **229**, 181-189 (2014). [3] Michikami et al., *Icarus* **331**, 179-191 (2019). [4] DellaGiustina et al., *Nat. Astron.* **3**, 341-351 (2019). [5] Lauretta et al., *Space Sci. Rev.* **212**, 925-984 (2017). [6] Rizk et al., *Space Sci. Rev.* **214**, 55 (2018). [7] Burke et al., *Remote Sens.* **13**, 25 (2020). [8] Jawin et al., *Icarus*, 114992 (2022).

## リュウグウの微粒子と酸不溶性有機物の特徴：ラマン分光法による考察

○小松睦美<sup>1,2</sup>, 藪田ひかる<sup>3</sup>, 癸生川陽子<sup>4</sup>, Bonal Lydie<sup>5</sup>, Quirico Eric<sup>5</sup>, 坂本尚義<sup>6</sup>, 中村智樹<sup>7</sup>, 野口高明<sup>8</sup>, 岡崎隆司<sup>9</sup>, 奈良岡浩<sup>9</sup>, 坂本佳奈子<sup>10</sup>, 橘省吾<sup>10,11</sup>, 渡邊 誠一郎<sup>12</sup>, 津田雄一<sup>10</sup>, はやぶさ2初期分析 IOM チーム

<sup>1</sup> 埼玉県立大学, <sup>2</sup> 早稲田大学, <sup>3</sup> 広島大学, <sup>4</sup> 横浜国立大学, <sup>5</sup> グルノーブルアルプ大学, <sup>6</sup> 北海道大学, <sup>7</sup> 東北大学, <sup>8</sup> 京都大学, <sup>9</sup> 九州大学, <sup>10</sup> JAXA, <sup>11</sup> 東京大学, <sup>12</sup> 名古屋大学

JAXA の小惑星探査機はやぶさ2は、2020年12月にC型小惑星リュウグウの試料帰還に成功した。これまでの帰還試料の分析からは、リュウグウ粒子は炭素質コンドライトの中でも始原的なCIコンドライトに最も似ていることが明らかになっている。また、密度が小さい( $1,282 \pm 231 \text{ kgm}^{-3}$ ), 反射率が低い等( $\sim 0.02$  at  $0.55 \mu\text{m}$ ), CIコンドライトとは異なる特徴も併せ持つことが示された[1, 2]。

初期分析 固体有機物分析チームは、小惑星リュウグウ試料に含まれる固体有機物の分子・同位体組成と形態およびそれらの分布を明らかにすることを目的としている [3]。チーム研究の一環として、リュウグウの微粒子および酸処理により得られた酸不溶性有機物の顕微ラマン分光分析を行った。分析に際しては、精度の確保及び多角的な議論のため、フランスのグルノーブル・日本の早稲田大学の2つの分析施設を利用して実施した。

ラマン分光法は、隕石中に含まれる有機物の分子構造の情報を評価することができる非破壊分析手法である[4,5]。本研究の分析では、リュウグウ微粒子のラマンスペクトルは、CO, CM, CVコンドライトよりも高い蛍光バックグラウンドを示し、高い蛍光の強度は、CIコンドライトやTagish Lake隕石のものと類似している。酸不溶性有機物は、未加工の微粒子に比べると低い蛍光強度ではあるが、同条件下のCMコンドライトの分析との比較でも、より高い蛍光強度を示す。また、炭素の結合状態に起因するDバンド ("disordered",  $\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$ ), Gバンド ("graphite",  $\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$ ) の解析からは、リュウグウ試料が経験した加熱の度合いは著しく低いことが示唆された。

隕石中の有機物分析における蛍光の要因としては、炭素の結合状態や化学組成が関連するとされるが、完全には説明されていない[e.g., 6]。我々のチームの分析では、リュウグウ試料にナノスケールの有機物が多く存在することが確認されており[7]、高い蛍光の一因として、極細粒有機物が光子の再吸収を制限している可能性も考えられる。

**References:** [1] Yada T. et al. (2022) *Nat. Astron.* 6, 214–220. [2] Yokoyama T. et al. (2022) *Science* 10.1126/science.abn7850. [3] Yabuta H. et al. *Submitted to Science*. [4] Bonal L. et al. (2006) *GCA* 70, 1849–1863. [5] Quirico E. et al. (2018) *GCA* 241, 17–37. [6] Busemann H et al. (2007) *MaPS* 48, 1800–1822. [7] Stroud R. (2022) *LPSC LIII*, abstract no. 2052.

## 放射光 CT で得られるリュウグウ試料の 3 次元構造

○上相真之<sup>1</sup>, 伊藤元雄<sup>2</sup>, 松本恵<sup>3</sup>, 土山明<sup>4</sup>, 中村智樹<sup>3</sup>, 平原佳織<sup>5</sup>, 富岡尚敬<sup>2</sup>, 上杉健太郎<sup>1</sup>, 山口亮<sup>6</sup>, 今栄直也<sup>6</sup>, 白井直樹<sup>7</sup>, 大東琢治<sup>8</sup>, 木村真<sup>6</sup>, Ming-Chang Liu<sup>9</sup>, Richard Greenwood<sup>10</sup>, 中藤亜衣子<sup>1</sup>, 与賀田佳澄<sup>1</sup>, 竹内晃久<sup>1</sup>, 安武正展<sup>1</sup>, 湯沢勇人<sup>12</sup>, 兒玉優<sup>13</sup>, 櫻井郁也<sup>14</sup>, 岡田育夫<sup>14</sup>, 唐牛譲<sup>11</sup>, はやぶさ 2 キュレーションチーム<sup>11</sup>, 渡邊誠一郎<sup>14</sup>, 津田雄一<sup>11</sup>  
<sup>1</sup>JASRI, <sup>2</sup>JAMSTEC, <sup>3</sup>東北大学, <sup>4</sup>立命館大学, <sup>5</sup>大阪大学, <sup>6</sup>NIPR, <sup>7</sup>神奈川大学, <sup>8</sup>KEK, <sup>9</sup>UCLA, <sup>10</sup>オープン大, <sup>11</sup>JAXA, <sup>12</sup>UVSOR, <sup>13</sup>東陽テクニカ, <sup>14</sup>名古屋大

小惑星探査機「はやぶさ 2」は、C 型小惑星であるリュウグウの表面からレゴリス粒子を直接採取し、2020 年 12 月に帰還、カプセルを地球に届けることに成功した。回収試料は JAXA の地球外試料キュレーションセンターでの初期記載を経て、CI タイプの炭素質コンドライト隕石との類似性がある事がわかった[1]。その後、初期分析チームおよび Phase2 キュレーションにおいて試料の詳細分析が始まり、その化学組成や同位体組成を含む、リュウグウ試料のより詳細な分析が行われている[2-4]。

本研究では、この詳細分析で行われた、放射光 CT によるリュウグウ試料の 3 次元組織および構造の分析から、リュウグウの鉱物組織の進化過程について調べる事を目的とする。CI コンドライトは非常に強い水質変成を受けていることが知られているが、その内部に存在する水質変成鉱物は均質に分布しているわけではなく、試料や組織によって偏りが見られる。例えば、水の通り道である亀裂に沿って炭酸塩鉱物が分布する傾向が CI コンドライトに見られるなど、水質変成鉱物の分布はその形成過程を反映していることが指摘されており、放射光 CT で得られる三次元組織・構造は、リュウグウを構成する水質変成鉱物同士の相関をより詳細に観測することが可能である。

発表では、硫化鉄、酸化鉄、および炭酸塩鉱物の三次元的な形状分布、空間分布およびその存在度と、母岩の三次元組織および構造との関連性を調べ、同様の手法で調べた CI コンドライト隕石と結果と比較し、小惑星リュウグウおよび CI コンドライト隕石の母天体の水質変成による岩石鉱物の進化過程を議論する。

Reference: Yada et al. (2021) Nat. Astron., 6, 214-220. [2] Yokoyama et al. (2022) Science, 10.1126/science.abn7850. [3] Nakamura et al. (2022), Proc. Japan Acad. B, 98, 227-282. [4] Ito et al. (2022) Nat. Astron. (in press),

## 炭素質コンドライト隕石の弾性波速度の測定と Ryugu サンプルとの比較

○猪裕太<sup>1,2</sup>, 小野寺圭祐<sup>3</sup>, 田中智<sup>2,3,4</sup>, 川村太一<sup>5</sup>, 石崎拓也<sup>2</sup>, 深井稜汰<sup>2</sup>, 金丸礼<sup>2</sup>, 岩田隆浩<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>関西学院大学, <sup>2</sup>JAXA 宇宙科学研究所, <sup>3</sup>東京大学, <sup>4</sup>総合研究大学院大学, <sup>5</sup>Université Paris Cité/IPGP

太陽系を構成する固体物質は、密度・空隙率・ヤング率・弾性波速度などの弾性的性質を用いてその特徴を記述することができる。特に弾性波速度・ヤング率は、惑星形成時の衝突プロセスやその後の進化過程を理解する上で重要なパラメータである。しかし、弾性波速度の測定は、希少サンプルを測定に適した形状に加工する必要があり、測定のハードルが高く、先行研究が少ないというのが現状である。また、これまでは微小サンプル (<mm スケール) を想定した実験はあまり実施されていないが、Ryugu サンプルでの測定を行うために Ino et al. (2022, JpGU) では、1mm 厚の微小試料の弾性波速度をパルス透過法で測定する装置 (図. 1) を開発し、Ryugu サンプルの弾性波速度を測定した。

次のステップとして、Ryugu に近い性質を持つ C 型隕石との比較を検討した。しかし、このタイプの隕石の弾性波速度は測定された前例が少なく [1]、サンプルを自分たちで用意し、測定する必要があった。本研究では比較対象の一つである Ryugu と同様に水質変成の経験がある Tagish Lake 隕石 [2]、Tarda 隕石 [3] の弾性波速度を前述の装置を用いて測定した結果を報告する。

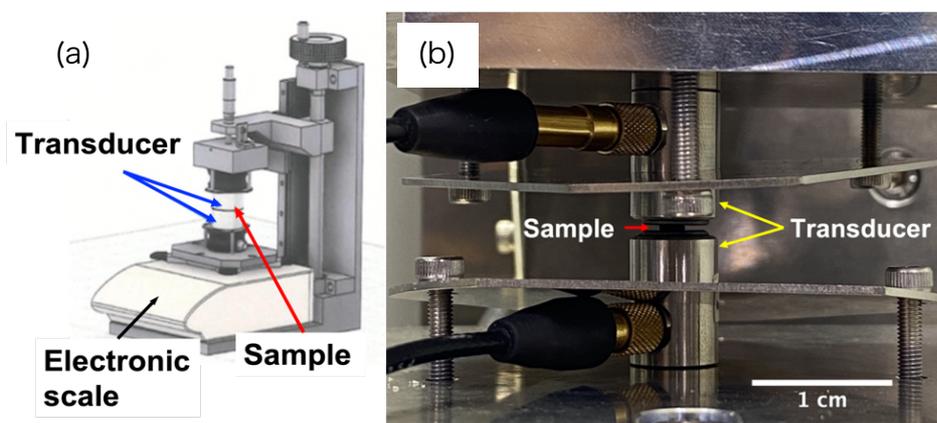


図 1. (a) 実験装置の概念図 (電子秤で測定荷重をモニタリングする)  
(b) 20MHz の圧電素子 2 個を使用しパルス透過法で測定

### 参考文献

[1] Osrtowski and Byson (2019), Planet. Space Sci., 165, 148. [2] Hildebrand et al. (2006), Meteorit Planet Sci, 41, 407. [3] Marrocchi et al. (2021), Astrophys. J. Lett, 913, L9.

# エンセラダス地下海のリン濃集と太陽系での前生命化学進化の多様性

○関根康人<sup>1</sup>, フランク・ポストバグ<sup>2</sup>, 丹秀也<sup>1</sup>, 渋谷岳造<sup>3</sup>, 齋藤拓也<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学, <sup>2</sup>ベルリン自由大学, <sup>3</sup>海洋研究開発機構

土星の衛星エンセラダスには氷で覆われた地下海が存在する。探査機カッシーニは、その地下海水がプルームとして宇宙に噴出していることを発見し、それを分析することで水環境を明らかにしてきた。主な発見でも、海水 pH が 10 付近のアルカリ性であること、コンドライト質の岩石コアで熱水活動が現在進行中であること、多様な有機物が存在していることなどがある。また、カッシーニの宇宙塵分析装置 (CDA) によって、噴出したプルーム粒子には、塩分が豊富に含まれているものも存在することが明らかになり、それらの化学分析から海洋の主要な溶存成分が Na、Cl、 $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$  であることも判明している。

本研究では、エンセラダスから放出された、Na、Cl、 $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$  塩などの塩分に富むプルーム粒子に加え、リン酸塩に富む新たなタイプの粒子を発見した。リン (P) は、地球生命に不可欠な CHNOPS 元素であるが、これらの中でも地球上の水環境では最も存在量が少ない。地球史全体を見ても、リンは生物生産を律速してきた元素であり、天然では常に枯渇した成分である。過去の研究では、エンセラダスなどの地下海では、地球海洋よりもさらにリンが劇的に枯渇する可能性が示されており、陸地による溶存元素の濃縮が起きないため、地下海は地球生命のような構成分子を持つ生命の誕生には不向きであるという考えもある。

カッシーニ探査機 CDA の追加分析の結果、上記の予想に反して、我々はエンセラダス地下海のリン酸濃度が、地球の海洋よりも少なくとも 1000 倍以上も高いことを明らかにした。このようなリン酸の異常濃集の原因を明らかにするため、我々は熱水反応実験と地球化学モデリングを行った。その結果、冷たい海底または熱水環境のどちらにおいても、高濃度の溶存  $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$  を含む pH 10 程度のアルカリ海水では、炭酸カルシウム鉱物に比べて、リン酸カルシウム鉱物が熱力学的に不安定となることがわかった。その結果、大量のリン酸カルシウムが海水に溶脱することで、リンの異常濃集が生じることを明らかにした。

このように  $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$  に富んだアルカリ性の水環境は、 $\text{CO}_2/\text{NH}_3$  雪線より遠方の太陽系氷天体 (セレスなど冥王星の氷準惑星、天王星・海王星の氷衛星、リュウグウ母天体など氷微惑星) において広く普遍的に成立し、リンや窒素に富んだ水中でこれら元素を利用した化学進化が生じる。地球生命は RNA、DNA、ATP、脂質など多くの構成分子になぜかリンを使っており、一つの可能性として、リンに濃集した水環境で地球生命が誕生したのかもしれない。エンセラダスのようなリンに異常に富む高  $\text{CO}_2$  アルカリ環境 (厚い  $\text{CO}_2$  下のアルカリ熱水) が原始地球でも成立すれば、そのような場が地球生命誕生場の有力候補となるかもしれない。

## 土星衛星タイタン探査計画ドラゴンフライに搭載 する地震計パッケージの開発状況

○村上英記<sup>1</sup>, 白石浩章<sup>2</sup>, 田中 智<sup>2</sup>, 川村太一<sup>3</sup>, 三谷烈史<sup>2</sup>, 山田竜平<sup>4</sup>, 鎌田俊一<sup>5</sup>, 木村 淳<sup>6</sup>,  
黒川宏之<sup>7</sup>, 西田 究<sup>8</sup>, 関根康人<sup>7</sup>, 辻 健<sup>8</sup>, 小野寺圭祐<sup>8</sup>, Ralph LORENZ<sup>9</sup>

<sup>1</sup>無所属, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>3</sup>Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) /  
Universite de Paris, <sup>4</sup>会津大学, <sup>5</sup>北海道大学, <sup>6</sup>大阪大学, <sup>7</sup>東京工業大学, <sup>8</sup>東京大学,  
<sup>9</sup>Johns Hopkins Univ.

2019年にNASAのニューフロンティア計画の4番目として採択された土星衛星タイタン離着陸探査ミッション「Dragonfly」に宇宙科学研究所が開発した地震計を搭載する計画が、2022年4月に宇宙科学研究所の部門内プロジェクトとして承認され本格的に始動を始めた。Dragonflyミッションはタイタンにドローン型の離着陸機を投入し、複数の着陸地点で化学分析、気象観測、及び地球物理的観測をおこない生命前駆物質とそれらを進化させるにおよんだ環境を調査する。Dragonflyは2027年に打ち上げ、2034年頃にタイタン大気に突入し離着陸探査を約3年間実施する予定である。

地球物理観測項目の一つである地震動を観測するための地震計パッケージ(DraGMet SEIS)の主要部分を構成する地震計、プリアンプ、風除けカバーを日本側が担当する。地震計は、月面表層中の-20°C環境での動作を想定して開発してきたものを改修し、タイタン表層環境(1.5気圧、-180°C)で動作する地震計を開発する。そのためにタイタン表層環境を模擬した環境で試験が可能な装置を開発し、予備的ではあるが地震計及びプリアンプの動作が確認できている。また、大気の影響を小さくするために地震計を収める風除けカバーと本体とのインターフェースの基本設計を概ね固定した。

地震計開発チームとは別に、地震計によるサイエンスを考える3つのWG(浅部構造探査WG、物質循環/大気運動WG、深部構造WG)を立ち上げ、サンプリング用ドリルによる振動を使った浅部探査、大気励起による地震動による地下探査、潮汐等による氷震を使った地下探査についての検討やイベント検出や評価方法に関する検討を日本側独自に開始した。今後、米国チームと交流を行いながら検討を進めてゆく予定である。

Dragonflyミッションに関する直近のイベントとしては8月2-4日にiPDR(機器基本設計審査会)が開催され審査を通過した。日本担当分については2023年にEM品を米国に納入、iCDR(機器詳細設計審査会)を経て2024年にFM品を納入というスケジュールになっている。

## 多孔質氷球の反発係数：塑性変形を考慮した非弾性衝突モデルの応用

神戸大学理学研究科 ○豊田優佳里 荒川政彦 保井みなみ

背景：土星リングは非常に薄い円盤状（幅数万 km, 厚さ数十 m）であり、サイズ数 cm から数十 m までの水氷粒子で構成されており、その粒子は数 cm/s 以下の低速度で互いに衝突している。土星リングが薄い円盤状を保っているのは、リング粒子が非弾性衝突を起こし、エネルギーを効果的に散逸しているためであると数値シミュレーションによって推測されている。惑星探査機カッシーニの観測から高空隙率の水氷粒子集合体であることが予測されているが、多孔質氷の反発係数はこれまで詳しく調べられていない。そこで、多孔質氷の衝突過程について詳しく調べる必要がある。本研究の目的は、多孔質氷の空隙率に着目し反発係数を実測すること、そして非弾性衝突におけるエネルギー散逸メカニズムを明らかにすることである。更に、その結果を応用することで土星リング粒子の内部構造を推定する。

実験方法：本研究では球を板へ自由落下させて低速度衝突実験を行い、レーザー変位計によって反発係数、変形量、接触時間を測定した。多孔質氷球（半径 1.5 cm, 空隙率 47, 53, 60%）は氷粒子（平均粒径 10  $\mu$ m）を球形に押し固めて作成した。また、標的板は花崗岩板、氷板、多孔質氷球と同様に作成した多孔質氷板（半径 1.5 cm, 高さ 2 cm の円盤状, 空隙率 43 ~ 62%）を使用した。多孔質氷球と多孔質氷板はどちらも 1 週間程度焼結させたため、多孔質氷の強度は焼結期間に依存せず、空隙率依存性のみを考慮することができた。衝突速度範囲は  $v_i = 0.88 \sim 97$  cm/s であった。

結果：多孔質氷球の反発係数は、境界速度  $v_c$  を境に衝突速度によらず一定の値になる準弾性領域と衝突速度の増加に伴って反発係数が低下する非弾性領域に分かれることが明らかになった。非弾性領域の反発係数  $\epsilon$  は弾性変形と塑性変形を考慮した Andrews' model (Andrews, 1930; Dillely, 1993) に準弾性領域における反発係数  $\epsilon_{qc}$  を導入することによって説明できた。更に、複数回衝突の場合は、Andrews' model で予測される反発係数よりも小さくなることが明らかになった。この反発係数の低下は多孔質氷を構成する氷粒子同士の焼結による結合が切れることで強度が下がり、エネルギーを散逸しやすくなるためであると考えられる。次に、多孔質氷の変形量及び接触時間について Andrews' model との比較を行なった。その結果、Andrews' model だけでは説明できず、粘弾性の効果を考慮した追加のメカニズムが必要であることが示唆された。更に、多孔質氷のヤング率は測定方法によって様々な値を取ることが知られており、多孔質氷の低速度衝突における変形量及び接触時間を考慮する際には、今回採用した音速測定によるヤング率 (Shimaki & Arakawa, 2021) ではなく見かけのヤング率を採用する必要があることが示唆された。

# タイタンにおける液体メタンとの相互作用による 有機物エアロゾルの急速な変成

○平井英人<sup>1,2</sup>, 関根康人<sup>1,2</sup>, 張乃忠<sup>2</sup>, 野田夏実<sup>1</sup>, 高橋嘉夫<sup>3</sup>, 鍵裕之<sup>4</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学地球生命研究所, <sup>2</sup>東京工業大学理学院地球惑星科学系, <sup>3</sup>東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>4</sup>東京大学理学系研究科地殻化学実験施設

土星衛星タイタンの厚い大気中では、光化学反応によって窒素やメタンから有機物エアロゾルが生成している。これらの有機物エアロゾルは、液体メタンの降雨が生じている地表へ最終的に堆積し、変成・変質される可能性がある。しかし、ほとんどの先行研究では有機物エアロゾルと液体メタンの相互作用は無視されてきた。

本研究では、タイタン表層温度において、タイタンソリン（有機物エアロゾル模擬物質）を液体メタンに浸し、溶解させる室内実験を行った。タイタンソリン粒子を 90~100 K の液体メタンへ数時間溶解させ、溶解成分と溶存しない非溶解成分にわけてそれぞれを回収した。回収サンプルの表面構造と化学構造を、電子顕微鏡、顕微赤外分光器、顕微ラマン分光器、X 線吸収分光法によって分析した。

その結果、低温であるにも関わらず、数時間という短い時間で、タイタンソリン粒子は液体メタンへ一部溶解することが分かった。赤外分光などの微小分析から、非溶解成分に比べ、溶解成分の蒸発残存物は芳香族化合物に富み、ニトリルに乏しいということが分かった。また、タイタンソリン粒子は、溶解を経験して、溶解成分の再凝結によってネックをもつアグリゲイトになることがわかった。

これらの結果は、実際のタイタン表層において、短期間の液体メタン降雨によって、有機物エアロゾルが急速に変成・変質され、表層での物質進化や地形形成に影響を与えている可能性を強く示唆する。具体的には、乾燥—湿潤サイクルによる有機物エアロゾル粒子のアグリゲイト化は、対流圏に存在する小さな有機物エアロゾル(0.1~1 μm)から、大きな有機物砂丘粒子(100~1000 μm)へ成長するメカニズムとなり得る。また、有機物エアロゾルから液体メタンに溶脱した芳香族化合物に富む成分は、湖の蒸発などによって地表に観察されるメタンの蒸発岩として残ると期待される。実際、タイタンの一部の蒸発岩にはベンゼンが見つかっており、この特徴を本研究はよく説明することができる。

## 炭素質隕石に対する衝突実験～X線CT撮像による隕石内部クラックの3次元分布

○道上達広（近大）、土山明（立命館大）、ハガーマン・アクセル（ルレオ工科大）、武田旭生（近大）、宍戸克樹（近大）、長谷川直（宇宙研）

隕石の物質強度は、小惑星の歴史を知る上で有用な情報である。しかしながら、隕石内部は不均質であるため、隕石の強度を一意に決定することは難しい。例えば、圧縮強度試験において、1つの試料でも、加える力の方向によって、圧縮強度は大きく変わる。これは隕石内部の複雑な岩石組織、つまり構成する鉱物粒子の強度の違いが影響していると考えられる。

本研究では、隕石を構成する鉱物粒子間の強度の違いを定性的に理解するために、炭素質隕石に対して高速度衝突実験を行い、衝突前後の隕石内部をX線CT撮像（解像度 $\sim 10\mu\text{m}/\text{voxel}$ ）することによって、衝突によって生じたクラックの進展を調査した。実験では、標的として、大きさが1-2cmのアエンデ隕石（CV3）、マーチソン隕石（CM2）、アグアス・ザルカス隕石（CM2）を用いた。弾丸として、CV隕石に対しては、直径1mmのアルミナ球を秒速2.0kmで、CM隕石に対しては、直径0.8mmのガラス球を秒速4.0kmで衝突させた。弾丸の軌道は若干ずれるため、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。解析した標的の数は、アエンデ隕石で7個、マーチソン隕石、アグアス・ザルカス隕石で各2個ずつである。今回、壊れた標的の最大破片について、生じたクラックの3次元分布を調査した。

衝突によって生じた多くクラックは、標的の表面もしくは破断面に平行に形成されていた。このため、クラックは主に稀薄波によって形成されたと考えられる。また、CM隕石では、いくつかのクラックが衝突前の隕石内部に存在し、そのクラックが成長していくつかの破断面が形成されていた。今回、前者によって生じたクラック沿いのコンドリュールに注目し、コンドリュールとクラックの関係を調査した。調査したコンドリュールの数は、アエンデ隕石で66個、マーチソン隕石で28個、アグアス・ザルカス隕石で14個である。その結果、標的の壊れ方に依らず、CV隕石では、半数以上がコンドリュール境界（もしくは付近）を沿うようにクラックが進展していることが分かった。これは、熱疲労で形成されるクラックの進展と同じ傾向を示している。一方、CM隕石では、半数以上がコンドリュール境界に関係なく、コンドリュール内部をクラックが貫通していることが分かった。このCV隕石とCM隕石の違いとして、CM隕石は水質変成していることが挙げられる。マーチソン隕石の薄片を作製し、光学顕微鏡観察したところ、コンドリュール内部の水質変成している部分の強度が弱くなっていることが分かった。そのため、CM隕石では、コンドリュールとマトリックスの強度の違いが小さく、クラックはコンドリュール内部を貫通したと考えられる。

2023年に地球に持ち帰られる予定のベンヌ粒子は、CM隕石と同様の物質と考えられている。そのため、ベンヌ粒子内部におけるクラック進展の解析結果と今回の実験結果を比較することで、ベンヌ粒子が、熱疲労で形成されたのか、衝突によって形成されたのか類推できるかもしれない。

## 階層構造を持つ天体構成粒子塊の 圧密挙動に関する実験的研究

○大村知美<sup>1</sup>, 桂木洋光<sup>2</sup>

<sup>1</sup>大阪産業大学, <sup>2</sup>大阪大学

はじめに：微惑星の強度はその後の天体進化を左右する重要なパラメータのひとつである。微惑星が重力不安定説・小石降着説で唱えられるような過程で形成された場合、構成粒子は小さな粒子(一次粒子)の凝集体(二次/高次粒子)が集合したような構造(以下、階層構造ダスト塊)を持つと考えられる。しかし、現在得られている階層構造ダスト塊の物性に関する知見は微惑星強度を推測するためには不十分である。本発表では階層構造ダスト塊物性を理解するための第一歩として、階層構造ダスト塊の変形過程を特徴づける値と二次粒子物性の関係を明らかにすることを目的に、階層構造ダスト塊の圧密挙動を調べた結果を報告する。

**実験手法**：一次粒子には直径 4.2  $\mu\text{m}$  のガラスビーズ(Potters-Ballotini, EMB-10)を用いた。二次粒子は、一次粒子に水を添加して「だま」にすることで作成した(図 1 内挿入画像)。各二次粒子は造粒時の水分量や、その後の保管期間等によって強度が異なる。サンプルは直径 1–2 mm の二次粒子を円筒容器に流し込んで作成した。また、サンプル毎に二次粒子強度の測定も行った。比較のため、一次粒子を容器にふり入れたサンプルも用いた。実験ではサンプルを万能試験機に取り付けたピストンで圧密し、ピストンの変位と荷重を記録した。

**結果**：試料の充填率と試料に働いていた圧力の関係(圧密曲線)の一例を図 1 に示す。サンプルの圧密が始まって以降、ある充填率からさらに圧密する際に必要な圧力は二次粒子サンプルの方が大きかった。圧力・充填率の増加と共に圧密曲線の差は小さくなり、最終的には二次粒子サンプルの圧密曲線と一次粒子サンプルの圧密曲線はほぼ重なった。このことは、二次粒子サンプルの圧密挙動ははじめ二次粒子の物性を反映するが、圧密がある程度以上に進むと二次粒子の影響は失われることを示している。また、圧密に必要な圧力は二次粒子の強度と共に増加した。この圧力差は粒子強度を考慮すると説明できることもわかった。

発表では二次粒子の影響が失われる圧力・充填率が二次粒子強度とどのように関連するかについても議論する。

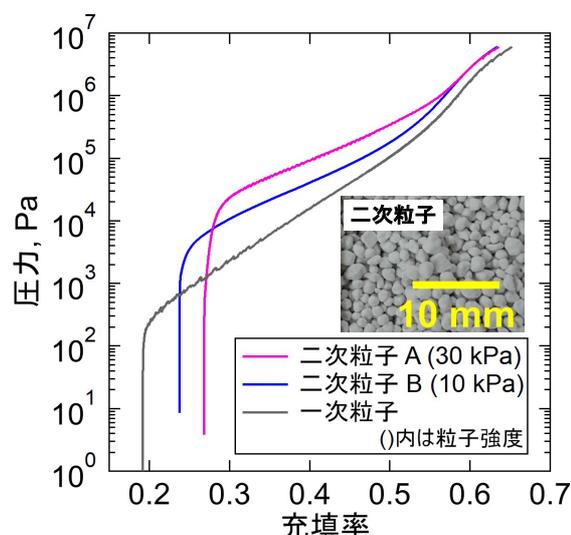


図 1 実験結果の一例

# 微惑星衝突に伴う固体蒸発・溶融量の状態方程式依存性

○宮山隆志<sup>1</sup>, 小林浩<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学

惑星形成後期、固体天体の衝突に伴う蒸発・溶融は、惑星の表層環境に影響を与える。この過程は、主に衝突シミュレーションにより調べられるが、固体蒸発・溶融量は仮定する状態方程式に強く依存する(e.g., O'Keefe & Ahrens 1982; Kraus et al., 2011)。本研究では、衝突による蒸発・溶融を適切に評価するために、最低限の物理を失わず、なおかつ高速計算に適用可能な状態方程式を調査した。

そのため、惑星衝突分野で広く用いられている2つの状態方程式を用いた。一つ目のANEOS(Thompson & Lauson 1972)は数多くのパラメータを用いて室内実験を詳細に再現できるようにチューニングされているが、長い計算時間も必要となる。一方、もう一つのTillotson EOS (Tillotson 1962)では少ないパラメータで最低限の固体物理が表現できる状態方程式だが、計算時間も短い。この二つの状態方程式を用いて、数値衝突計算コードiSALE2D(e.g., Amsden et al., 1980; Ivanov et al., 1997; Wunnemann et al., 2006)を用いて衝突シミュレーションを行なった。

衝突に伴う衝撃波の発生により物質の沸点を超えるようなエントロピーの上昇が引き起こされると蒸発・溶融が起こる (Ahrens & O'Keefe 1972)。そのため、衝撃波によるエントロピーの上昇を精度良く解けることと、蒸発の条件を適切に評価する状態方程式が重要である。そこで、まずは1次元衝撃波管問題における衝撃波通過後の圧力がANEOSの結果と整合的になるようにTillotson EOSの状態方程式のパラメータを選んだ。また、Tillotson EOSは蒸発や溶融を起こす内部エネルギーを定義しているが、これをANEOSの相転移から推測されるエネルギーを与えた。

Tillotson EOS と ANEOS を用いて、iSALE コードを用いて衝突シミュレーションを行なった。そして、衝突に伴う蒸発量や溶融量を求めた。簡易なTillotson EOSでも適切にパラメータ設定を行ったことにより、エントロピー上昇は比較的精度良く解くことができた。そしてその結果起こる衝突蒸発・溶融量は、Tillotson EOSでも、ANEOSの場合に比べ誤差30%の精度で求める事ができた(図1)。つまり取り扱いの容易なTillotson EOSでも、適切にパラメータを選ぶことで、ANEOSをこの程度の誤差で再現できる。

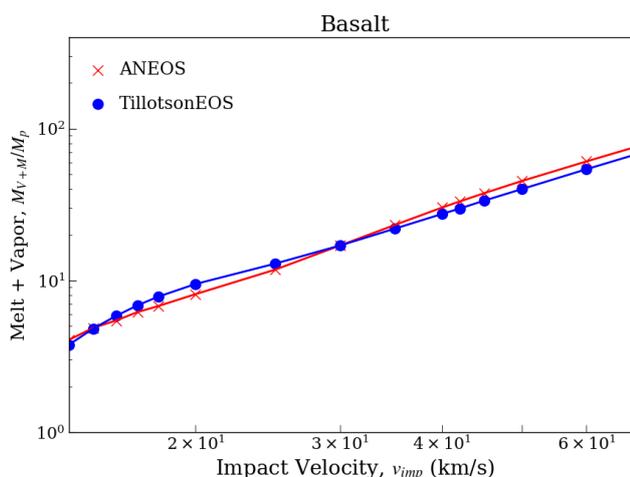


図1 衝突速度と蒸発・溶融量の比較

# ハビタブル天体表面を模擬した 含水砂標的への斜め衝突実験

○豊嶋遥名<sup>1</sup>, 荒川政彦<sup>1</sup>, 保井みなみ<sup>1</sup>, 笹井遥<sup>1</sup>, 長谷川直<sup>2</sup>

<sup>1</sup>神戸大学大学院 理学研究科

<sup>2</sup>宇宙科学研究所 宇宙航空研究開発機構

**はじめに：**最も代表的なハビタブル天体の条件は表面における液体の水の保持であり、その痕跡が天体衝突に伴う衝突水蒸気雲からの堆積物やクレーター地形に残される場合がある。例えば過去表面に液体の水を保持していた火星では、地下や地表面の水や氷などの揮発性物質が衝突エジェクタを流動化させることによって形成されたと考えられているランパートクレーターが観測されている (Suzuki & Kurita, 2016)。また、小惑星探査機はやぶさ2の打ち上げ前に行なった S C I 地上試験では、湿った砂へ高速度衝突実験を行なった際、水蒸気雲とみられるプルームが観測されている (Wada, et. al, 2014)。これら二例のように水で湿った地表面への衝突現象を理解することは、ハビタブル天体上での衝突現象の理解に向けて重要なプロセスである。しかしながら、水で湿った地面からの衝突による水蒸気放出過程については理解が進んでいない。本研究では様々な含水率を持つ石英砂標的を用いて水の三重重点近傍条件下における高速度衝突クレーター形成実験を行い、クレーター形状とそのサイズ及び水蒸気放出に対する水の影響を調べた。

**手法：**実験には神戸大学の横型2段式軽ガス銃を用いて、水平面から30°傾斜させた含水砂標的(0-12wt.%)に、2km/sもしくは4km/sでアルミ弾丸(d=2mm)を衝突させた。全ての実験は室温約20°C、真空度600-1000Paのもとで行い、試料中の水が液体の状態で行なった。実験時の様子は高速カメラ(1.0×10<sup>5</sup>fps)で2方向から撮影し、クレーター形状やそのサイズ、放出物の観測を行う。宇宙科学研究所での実験では、これら2台のカメラに加えて高速赤外線カメラ(3000 fps)での温度観測も行なった。

**結果：**弾丸が標的に衝突した瞬間には、衝突方向へ高速度で放出するジェットや弾丸の蒸発によるプラズマが観察された。衝突速度4km/s以上では、それとは別に標的表面の垂直上方向への白いプルームも確認された。この噴出物は、衝突点付近から蒸発した水蒸気が凝縮した雲の可能性があり、高速赤外線カメラで確認したところ、可視高速カメラでははっきりと視認できない標的上方に高温(100°Cを超える領域を含む)があることが分かった。これは高温の水蒸気や雲の発生を示唆している。一方、一軸圧縮貫入試験で計測された標的の貫入強度は、含水率0%から12%の範囲では増大するため、含水率の増加とともにクレーター成長は抑制され、その直径は減少すると予想される。しかし、クレーター直径は含水率6%を超えると増加し始めることがわかった。この増加は、含水率の増加と共に衝撃波の減衰が抑えられるために起こることが推測される。

## コア・マントル構造を持つ含水小天体の衝突破壊と破片速度分布 ：標的内部の粒子速度分布の計測

石田紗那<sup>1,○</sup>, 荒川政彦<sup>1</sup>, 保井みなみ<sup>1</sup>, 白井慶<sup>1</sup>, 長谷川直<sup>2</sup>, 長野巧<sup>1</sup>

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

背景：氷を含む微惑星は、熱進化の結果、水質変成コアと多孔質マントルの層構造を持ったと言われ、衝突破壊と再集積を繰り返し、小惑星や氷衛星へと成長したと考えられている。このような天体の衝突破壊現象を理解するために、衝突破壊強度 $Q^*$ が用いられてきた。この $Q^*$ は、サイズが100mを超える天体では、重力による破片の再集積で決まるといわれており、重力支配域の衝突破壊強度 $Q_D^*$ と呼ばれている。本研究では、これまで室内実験で調べるのが困難であった衝突破壊強度 $Q_D^*$ を求めめるため、氷微惑星を模擬した層構造試料を用いた衝突破壊実験を行った。そして、フラッシュX線を利用したトレーサー法と半球標的を用いたデジタル画像相関法(DIC)により、衝突破片の質量-速度分布を調べた。

実験方法：衝突実験は神戸大学と宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸は直径4.7mmと7mmのポリカーボネート球を用い、衝突速度 $V_i$ は1.5-6.0 km s<sup>-1</sup>とした。熱進化を経た氷微惑星を模擬するため、マントルには砂と石膏を質量比2:1で混合したもの(空隙率37%)、コアにはベントナイトと粘性率10Pa・sのシリコンオイルを質量比3:1で混合したものを用いて層構造標的を作成した。コア直径は30mm、マントル直径は60mmの完全球標的と半球標的を作成した。層構造標的との比較のため、マントル物質のみからなる均質構造標的も作成した。DIC法による解析のため、半球標的の表面にはランダムに点模様をつけた。完全球標的には12個の鉄球(直径3mm)を単一平面上に配置し、衝突直後のフラッシュX線撮像画像を用いて、鉄球の移動を解析した。

結果：DIC法を用いることで、標的内部の粒子速度の2次元分布とその時間変化を決めることができる。その結果、粒子速度は衝突後1msまでに一定の速度となることが分かった。この時の標的内部の速度分布を解析した結果、層構造標的では $V_i = 3.1$  km s<sup>-1</sup>以上の時、粘土コアが周囲のマントルよりも高速度で移動することで、反対点を含む半球のマントルを押し出す効果があることが分かった。また、マントル中では粒子速度の減衰が小さいように見えた。一方、衝突点を含む半球では、コアとマントルの境界から反射してきた衝撃波の影響で、コアとマント

ルの分離が促進された。次に、フラッシュX線画像を解析して鉄球の移動量から標的内部速度を決定し、鉄球速度と鉄球の近傍領域の破片質量を対応づけることで破片速度の積算質量分布を調べた。積算質量が元の質量の1/2になる時の破片速度(中間速度 $V^*$ )を求め、エネルギー密度 $Q$ との関係を調べた(図1)。その結果、 $V^*$ は $Q$ に比例して増加し、層構造標的が均質構造標的と比べて中間速度が大きくなることが分かった。これはコアがマントルを押し出す効果のためと考えられる。また、砂石膏試料はエネルギー密度が小さい時、先行研究<sup>(1)</sup>の石膏試料(空隙率52%)よりも中間速度が小さくなることから、均質石膏試料より石膏部分でのエネルギー損失の効率が高いと考えられる。(1) Arakawa et al. (2021), Icarus 373, 114777.

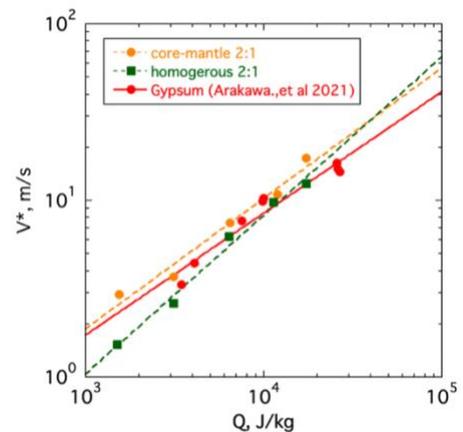


図1. 中間速度とエネルギー密度の関係

# 巨大衝突の数値計算の手法及び状態方程式への依存性

○ 細野 七月<sup>1,2</sup> 小久保英一郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学 <sup>2</sup>JAMSTEC<sup>3</sup> 国立天文台

巨大衝突とは、2つの原始天体間の衝突現象の事であり、もともと地球の月の起源として提唱された。実際にこのシナリオが月形成を形成されるかどうかを確かめるため、これまでに多くの巨大衝突の数値計算が Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法と呼ばれる流体数値計算手法を用いて計算されてきた。その結果、このシナリオは月形成が可能であると結論付けられた。一方で、近年この数値計算の結果は、数値計算スキームや状態方程式の選択に依存する可能性が指摘されてきた。例えば、標準 SPH 法には接触不連続面が正しく計算出来ないという問題点がある事が知られている。巨大衝突ではコアマントル境界が接触不連続面になっている事から、この問題点を解決する事は正しい数値計算結果を得るためには重要であると考えられる。近年では、例えばこの問題点を解決した Density Independent SPH (DISPH) などがあり、それらでの数値計算が好ましいと言える。また、状態方程式の影響を調べる事も重要である。巨大衝突の数値計算では、Tillotson EoS と呼ばれる状態方程式か、M-ANEOS と呼ばれる状態方程式のどちらかがこれまで用いられてきた。標準 SPH 法に関しては、これらの状態方程式の依存性は議論され、結果は大きく変わらない事が示されているが、DISPH に関してはまだそのような議論はあまりなされていない。そこで、本研究では、巨大衝突の数値計算が数値計算スキームや状態方程式にどの様に依存するか、詳細に調べることを目的とした。具体的には、同じパラメータの巨大衝突の数値計算を、スキームを標準 SPH 法か DISPH 法か、状態方程式を Tillotson EoS か M-ANEOS かと変化させて計算した。これにより、同じパラメータの巨大衝突の数値計算結果が、どの程度分散するかについて、調べた。本公演ではそれを紹介するとともに、可能であれば解像度依存性に関しても議論したい。

# ツングースカイイベントによる大気掘削の遠地気圧変動からの制約

○中島健介<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

2022年1月に起こったトンガの海底火山爆発では顕著な気圧パルスが発生し、地表面に捕捉されてほぼ音速で伝播する大気ラム波として地球を数回にわたって周回した。このような大振幅のラム波は過去、1960年前後の大規模な大気圏内核実験、1883年のクラカタウ火山の噴火に加えて、1908年にシベリア東部に隕石または彗星（以下、単に隕石と呼ぶ）が落下して下部対流圏で爆発した「ツングースカイイベント」でも発生している。

ツングースカイイベントに伴って英国で観測されたラム波の波形（Whipple, 1930, Q.J.R.Meteorol. Soc.）の顕著な特徴は、主要な気圧偏差の符号がマイナスであることである。これは、今年のトンガ火山やクラカタウ火山の噴火や核実験に伴ったラム波の気圧偏差が概ね正であったことと著しい対比を成す。ラム波は分散性が弱く、遠地の波形も波源の性質を素直に反映していることを考えると、隕石が対流圏下部で爆発した結果、全体として負の気圧偏差が生じたことを示唆する。しかし、隕石の爆発地点の近傍では樹木が外側に向かって倒れたことが良く知られており（Jenniskens et al, 2019, ICARUS など）、爆発直後の地面圧力偏差は正であったと考えるのが自然である。

隕石爆発が火山や核実験と大きく異なるのは、隕石が爆発に先立って大気中を通過した領域が超高温で低密度の wake となり、爆発後に隕石および下層大気の相当の質量が、この wake を通って上昇して上層大気に至る plume を形成した後、数千キロの範囲に飛散し降下することである（例えば Artemieva et al, 2019, ICARUS）。このような plume の形成は、1994年のシューメーカー・レヴィ第9彗星の木星衝突の際にも観測され、またツングースカイイベントでも、その直後にヨーロッパの広い範囲で「真夜中にもかかわらず夕方のように明るくなった」との記録からも支持され得る（Whipple, 同上）。この plume の形成から消滅に至る過程を総合すると、隕石の爆発地点近傍の大気下層（高度数キロ）に集中した負の質量源が存在し、大気上層には数千キロの範囲に拡散した正の質量源が存在することになるだろう。このうち前者は、爆発直後の衝撃波などの短い時間スケールの消散・調節過程が終わって、大気が静水圧平衡に戻った後（例えば Bannon, 1995, J. Atmos. Sci.）には、爆発地点付近の数十 km スケールに広がる負の大気下層気圧偏差として落ち着くと考えられ、これがラム波として水平伝播したことにより、遠地で観測された遠地気圧変動の負偏差を生じる。ただし、隕石爆発は大気を加熱することも推定され、この加熱は、火山や核実験と同様に正の気圧偏差を作ることも考慮せねばならない。

本発表では、隕石落下のエネルギーが、plume 形成と加熱に分配されると考えて、励起されるラム波の振幅（と符号）を定量的に見積もる。その結果、観測された圧力変動の様相は、隕石落下のエネルギーの8割程度が plume の形成に使われたと考えると説明できることが分かった。観測波形にはラム波以外の波動の情報も含まれているので、さらに詳細な分析によりツングースカイイベントの再構成、また、隕石衝突イベント全般の解明に資する可能性もある。詳細は当日に示す。

## レーザー衝撃圧縮を受けた SiO<sub>2</sub> の変成評価

○大野 正和<sup>1</sup>, 近藤 忠<sup>1</sup>, 境家 達弘<sup>1</sup>, 重森 啓介<sup>2</sup>, 弘中 陽一郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>大阪大学大学院理学研究科, <sup>2</sup>大阪大学レーザー科学研究所

### はじめに

小天体の衝突現象は惑星形成・進化の素過程の一つとして重要な現象であり、我々が入手できる最も一般的な地球外物質である隕石の中には様々な衝撃変成を受けた鉱物が発見されている。我々は SiO<sub>2</sub> 衝撃変成の凍結回収を目的として出発試料に SiO<sub>2</sub> 粉末を用いたレーザー衝撃回収実験を行い、100 GPa 以上の衝撃圧縮を受けた粉末試料を、ほとんど位置情報を保持した状態で回収することに成功した。そこで本研究ではレーザー衝撃回収試料の変成分布を光学顕微鏡、微小領域 X 線回折、走査型電子顕微鏡によって観察を行ったので、その結果を報告する。

### 実験方法

分析を行ったのは、初期粒径数  $\mu\text{m}$  程度の合成石英粉末を大阪大学レーザー科学研究所の激光 XII 号レーザー(HIPER)によって衝撃圧縮して回収した試料であり、試料表面での圧力は約 80-130 GPa 程度であったと考えられる。衝撃点から深さ方向の分布を観察するために、回収後の試料は中央部付近で切断し、試料断面の薄片試料を作製した。薄片試料の分析としては反射光及び透過光での光学顕微鏡観察の後、微小領域 X 線回折測定を行った。X 線照射には  $\phi 30 \mu\text{m}$  と  $\phi 100 \mu\text{m}$  のコリメーターを用いた。得られた回折プロファイルから、SiO<sub>2</sub> 高压相の探索及び分布の評価、各測定点の石英結晶内に生じている不均一歪み及び格子体積の評価を行った。また、試料の薄片化後、偏光顕微鏡及び走査型電子顕微鏡による組織観察を併せて行った。

### 結果と考察

試料断面の光学顕微鏡観察からは、白色部・黒色部などの変成組織が衝撃点直下から概ね同心円状の層構造を形成しており、光学観察に基づくと回収試料は 4 つの領域に区分できることがわかった。X 線回折測定の結果、衝撃直下の白色部には石英以外にスティショバイトが急冷凍結されていることがわかった。回収試料中の石英については、衝撃点に近い場所ほど回折線の半値幅と格子体積は大きくなっており、深さとともに出発試料の半値幅と格子体積に近づいていくことがわかった。SEM 観察の結果、揮発条件に達した痕跡と思われる発泡組織や石英粒子同士の焼結または溶結の痕跡、石英粒子内に生じたクラックなどの複数の衝撃変成組織が観測された。発表ではこれらの観察結果をもとに試料の変成分布を検討した内容について詳細を報告する。

## OB-13

### 土質力学データを用いた空隙圧密モデルのパラメータ決定方法

黒澤耕介<sup>1</sup>, 松島亘志<sup>2</sup>, 荒川創太<sup>3</sup>, 辰馬未沙子<sup>4</sup>, 中村昭子<sup>5</sup>, 長足友哉<sup>6</sup>, 高田智史<sup>7</sup>, 吉井究<sup>8</sup>

<sup>1</sup>千葉工業大学, <sup>2</sup>筑波大学, <sup>3</sup>JAMSTEC, <sup>4</sup>東京工業大学, <sup>5</sup>神戸大学, <sup>6</sup>東北大学, <sup>7</sup>東京農工大学, <sup>8</sup>大阪大学

天体衝突は小天体の表層進化を引き起こす主要な駆動力の一つである。太陽系の小天体の多くは空隙を $>10\%$ の含んでいることが知られている。また地上で発見される隕石の多くも同程度の空隙を持つ。媒質に空隙が含まれている場合、衝撃圧縮時の仕事( $P\Delta V$ )が大きくなり、運動エネルギーから熱エネルギーへの変換効率がよくなる。小天体上での衝突過程を検討する上で空隙圧密の影響を理解することは必須であるといえる。近年では $\varepsilon$ - $\alpha$  porosity compaction model が提案され、数値流体計算に微小かつ均質な空隙を取り入れることが可能になった[Wünnemann et al., 2006, *Icarus*, **180**, 514-527]。このモデルは数値流体計算を行う上で毎タイムステップで計算可能な体積歪 $\varepsilon$ と Distension  $\alpha$ (粒子密度とバルク密度の比, 逆数は 1-空隙率)を結びつけ、圧縮波の伝播による空隙の圧密を表現するものである。理想的には Distension は体積歪の指数関数として表現されるが、実在の粉体を圧密する場合には空隙が潰れきるには、粒子の変形や破壊が起こり隙間を埋めるということが起こる。 $\varepsilon$ - $\alpha$  model ではこの非理想性を表現するべく指数関数的圧密領域からべき乗関数圧密領域に移るようになっており、4つの入力パラメータを調整することで様々な圧密曲線を作ることができる。ところが、この入力パラメータの決定方法が確立されていないことが問題であった。

土質力学分野では砂を圧密し、垂直圧力  $p$  と空隙比  $e(=\alpha-1)$  の関係を調べるという実験が行われており、 $\log p$ - $\log e$  plot 上で直線で表されることが知られている。我々はこのデータを利用し、 $\varepsilon$ - $\alpha$  model の入力パラメータを決定する方法を考案し、主に石英からなる川砂、山砂について実験データとの比較を行った。 $\log p$ - $\log e$  plot の直線関係は指数関数的圧密からべき乗関数的圧密への切り替えの閾値を適切に設定することで概ね再現できることが明らかになった。求めたパラメータセットで数値衝突計算が破綻なく実行できることも確認した。現在、空隙圧密の物理をより理解するべく検討を進めている。

### 謝辞

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

原始地球大気海洋系での NH<sub>3</sub> の持続時間

○有馬銀河, 倉本 圭

北海道大学

太古の地球における暗い太陽のパラドックスを解決する仮説の1つとして、極めて強力な温室効果ガスである NH<sub>3</sub> による温室効果が提唱されている (Sagan and Mullen, 1972). 原始大気中の NH<sub>3</sub> の存在は、地球表層でのアミノ酸の生成に寄与した可能性があることから (Bada and Miller, 1968), 地球上での生命誕生の観点からも注目される. 大気中の NH<sub>3</sub> は光化学的に不安定であり、晴天大気中では速やかに N<sub>2</sub> に転換されるが (Kasting, 1982), Sagan and Chyba (1997) は CH<sub>4</sub> 由来の有機物へイズによる紫外線の遮蔽を考慮すると、十分な温室効果をもたらす大気 NH<sub>3</sub> (10<sup>-5</sup> bar) の寿命は 5000 年程度に達すると推定した. なお、NH<sub>3</sub> の光分解で生じた H は宇宙空間に脱出する. 他方、NH<sub>3</sub> は非常に高い水溶性を持つため、原始地球大気に NH<sub>3</sub> が含まれていた場合、海洋中には大量の NH<sub>3</sub> が溶解する. 原始海洋の NH<sub>3</sub> の貯蔵と放出を考慮すると、原始地球表層における NH<sub>3</sub> の寿命は地質学的タイムスケールまで延びる可能性がある. 原始地球における NH<sub>3</sub> の持続時間は、始生代初期の地球上で化学進化に適した温暖湿潤で還元的な環境がどのくらいの期間続いたかを知るうえで重要である.

そこで本研究では、原始海洋が NH<sub>3</sub> の長期的貯蔵庫として機能し得たか明らかにするために、大気に有意な濃度の NH<sub>3</sub> を含む大気海洋系について、温度に鋭敏な NH<sub>3</sub> の大気海洋間の溶解平衡と、原始地球大気の放射対流平衡を同時に満たす同時平衡解を数値モデリングによって求め、そのときの温室効果の強さと、大気海洋間の NH<sub>3</sub> 分配、NH<sub>3</sub> の持続時間について推定と理論的検討を行った.

モデルは、一次元放射対流平衡大気モデルと、炭酸塩に飽和した一様水温の海洋を仮定した大気海洋間溶解平衡モデルを組み合わせたものである. 海洋については、海水中のアルカリ元素イオンと塩素、硫酸イオンの濃度を現在の海水と同様とし、NH<sub>3</sub> の溶解平衡と NH<sub>4</sub><sup>+</sup>イオンの生成を考慮している. 大気については、現在の 0.75 倍の太陽光度、現在の地球と同じアルベド、0.8 bar の N<sub>2</sub> を主成分とする無酸素大気を仮定する. 温室効果ガスとして水蒸気および NH<sub>3</sub> のみを考慮すると、地表 NH<sub>3</sub> 分圧が 2.4 × 10<sup>-5</sup> bar 以上のときに、地表面温度が 273 K を上回る同時平衡解が得られた. これらの同時平衡解は、地表面温度の摂動に対し、海洋からの NH<sub>3</sub> の放出(吸収)に伴う温室効果の強化(弱化)による摂動の成長が抑制された安定なものである. 大気に CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> を加えると、より小さな NH<sub>3</sub> 分圧で、地表面温度が 273 K を上回る安定同時平衡解が得られる. 制約に乏しい NH<sub>3</sub> 貯蔵量をパラメータとし、NH<sub>3</sub> が光分解によって徐々に N<sub>2</sub> に転換される環境を想定する. ここで NH<sub>3</sub> の再供給は無視した. 一例として、NH<sub>3</sub> の初期貯蔵量として 1.0 × 10<sup>20</sup> mol (N<sub>2</sub> 分圧換算で 0.2 bar 相当) を与えると、へイズによる紫外線遮蔽を考慮した場合、NH<sub>3</sub> の温室効果のみで温暖湿潤な環境が 1.7 億年持続する解を得た. これは、原始地球において化学進化に適した温暖湿潤で還元的な環境が数億年にわたって持続し得たことを示唆している. さらに、大気モデルに組み込まれていないへイズによる反温室効果を考慮すると、水温が低下して大気 NH<sub>3</sub> 分圧が減少し、それにもなって光分解率も低下するため、NH<sub>3</sub> およびその温室効果による温暖湿潤環境の持続時間は、より長くなる可能性がある.

## 地球マントルの窒素の起源： 惑星形成と地球-生命共進化への示唆

○黒川 宏之<sup>1</sup>, Matthieu Laneuville<sup>1</sup>, Yamei Li<sup>1</sup>, Naizhong Zhang<sup>1</sup>,  
藤井 友香<sup>2</sup>, 櫻庭 遥<sup>3</sup>, Christine Houser<sup>1</sup>, H. James Cleaves<sup>1,4,5</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学 地球生命研究所, <sup>2</sup>国立天文台, <sup>3</sup>東京工業大学,

<sup>4</sup>Blue Marble Space Institute of Science, <sup>5</sup>Carnegie Institution of Washington

地球のマントルは大気と同程度の窒素を保持している。マントル中の窒素は、地球形成期に取り込まれたという説（始原説）、プレートの沈み込みによって供給されたものであるという説（循環説）が提案されているが、その起源は明らかにされていない。本研究（Kurokawa et al. 2022, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **23**, e2021GC010295）では、アルゴンと窒素同位体をトレーサーとして、地球形成後のマグマオーシャン段階での窒素の分配と、その後の地球史における表層とマントル間の元素循環のモデルを構築した（図 1）。分配モデル計算の結果、地球マグマオーシャンに相当する酸化的条件下では窒素のマグマへの溶解度が低く、鉱物への分配係数が小さいため、固化マントルには全窒素量の10%程度しか分配されないことがわかった。したがって、始原説においては、形成直後の地球は現在の約 10 倍以上の窒素を有していた必要がある。この過剰な窒素は、後期集積の天体集積によって除去された可能性がある。また、元素循環モデル計算の結果、初期地球による窒素の堆積物埋没率が現在と同程度であれば、マントル窒素は沈み込みに由来する可能性があることが示された。このような高い埋没率を実現するには、生物による効率的な窒素利用が必要である。最後に、我々の研究から、今後の表層およびマントルの窒素同位体比の分析によって、2つの可能な起源を区別するための方法論を提供する。

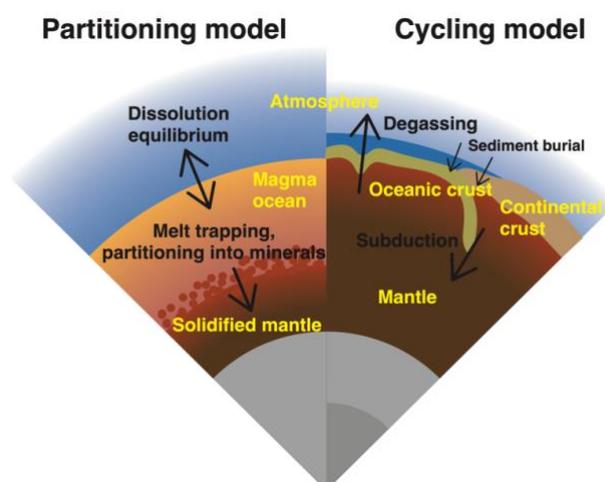


図 1：本研究で構築した分配・循環モデルの概念図

# 巨大衝突を経験したスーパーアースの大気組成と 長期進化

○ 黒崎健二<sup>1</sup>, 堀安範<sup>2</sup>, 荻原正博<sup>3</sup>, 國友正信<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学, <sup>2</sup>NAOJ/ABC, <sup>3</sup> 李正道研究所, <sup>4</sup> 久留米大学

系外惑星の中には地球質量の数倍から数十倍程度ある一方で、惑星半径が地球半径よりも大きな天体も多く確認されている。これら惑星半径が大きな天体は惑星大気を多く持っている天体であることを示唆し、その大気量は惑星質量の1%から30%程度と多様性に富んでいることがわかっている。このような惑星大気量の多様性は原始惑星系円盤内における形成過程での大気獲得量の違いによるものだけでなく、円盤が消失したあとの形成後期過程における衝突合体や惑星の進化プロセスにも影響を受けている。このとき、天体が原始惑星系円盤由来の大気を持っていた場合、天体衝突に伴いその原始大気を失い、天体の岩石コアが蒸発して水素大気と混合することが考えられる。このとき、大気と岩石蒸気が反応することによって、円盤由来の大気成分と変化する可能性が考えられる。

本講演では水素大気と岩石蒸気が混合した場合を仮定し、混合大気的主要組成を調べた。混合大気組成を化学反応計算を用いて調べた結果、衝突直後の高温な場合では岩石組成由来の大気をもつが、冷却に伴い主要な大気組成は水素、ヘリウム、水の三種類になることがわかった。その後、水素・ヘリウム・水の主要三成分からなる大気を持つ天体が、長期間大気を安定して保持できるか調べるために、光蒸発を考慮した長期進化計算を行った。その結果、水素・ヘリウムのみが流出し、水大気のみ取り残されるような大気量と軌道長半径の組み合わせが存在することがわかった。最後に、現在惑星が持っている大気組成がどのようになるかを検討し、衝突直後から現在までの惑星大気進化を議論する。

# マグマオーシャン固化中・後の脱ガスによる 大気形成

○宮崎慶統<sup>1</sup>

<sup>1</sup>カリフォルニア工科大学 地質惑星科学部

地球型惑星は形成最後期に全球規模のマントルの融解を経験したと考えられている。溶融によってマントルと大気間で揮発性物質が分配されたため、マグマオーシャンを覆う大気は現在と大きく異なった成分であることが予想される。従来は、この時点での大気は後の固化プロセスによって修正されると考えられていたが、本研究では、マグマオーシャンの固化プロセスを再検討し、マグマオーシャン固化中には大きく大気量・成分が大きく変化しないことを提案する。その場合、地球型惑星の初期は、大気は二酸化炭素で占められており、水の大部分は惑星内部に留められていたと考えられる。即ち、多くの惑星で表層の水の量はかなり限られていた可能性があり、更に、その後の対流モードが滞留リッド (stagnant lid) によって、マントルの対流運動が制限されていた場合、数十億年にわたって9割以上の水が内部に存在し続けることが推定される。この場合は海の形成が阻まれ、金星のような惑星が生まれると考えられる。

金星のような惑星にならないためには、初期からプレートテクトニクスが必須と考えられる。その場合、マグマオーシャンの分化の結果としてプレート運動がかなり活発であることが推定され、水の内部からの脱ガス、および、二酸化炭素の地球内部への除去が速やかに行われた可能性がある。特に初期地球においては冥王代の中頃までには地球の表層環境が現在と似たものとなっていたことが示唆しているため、そのことと整合的である。

# Monte Carlo simulation of amino acid synthesis driven by UV irradiation in protoplanetary disks and primitive Earth atmosphere

○Yoko Ochiai<sup>1</sup>, Shigeru Ida<sup>1</sup> and Daigo Shoji<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup> Institute of Space and Astronautical Science

**Introduction:** Electric discharge or UV/gamma-ray irradiation experiments and analyses of carbonaceous chondrites suggest that amino acid synthesis can have happened on icy dust surface in molecular clouds or a protoplanetary disk, but the mechanism is still undiscovered. Although a large part of amino acids detected in these studies are suggested to exist in the form of precursors, their structures are not clear at the present, either. Not only the experiments but also the theoretical simulations will be effective to examine the synthesis mechanism of the amino acid and the structures of the precursors and their generation processes. However, in order to perform simulations that produce complex organic matters such as those detected in experiments and meteorites, the chemical kinetic method by rate equations with assumed reaction network and the ab-initio quantum chemistry calculation with high computational cost may not be the best tools. In this study, we adopted the Monte Carlo chemical reaction simulation without the assumed network developed by Takehara et al. [1], which is computationally accelerated by simplifications but enables us to grasp the global synthesis paths of formation of complex organic compound. While the previous work [1] focused on sugar synthesis, we here explored the amino acid synthesis driven by UV irradiation that could have taken place in molecular clouds and protoplanetary disks by the Monte Carlo simulation.

**Method:** Modifying the classical graph-theoretic matrix model for chemical reactions [2] to be applied for UV photosynthesis of complex organic molecules, Takehara et al. [1] developed a numerical scheme to forwardly explore chemical reaction sequences from simple molecules with Monte Carlo approach. By representing chemical bonds of reactant molecules as a matrix, all the possible chemical reactions are derived automatically. We choose one from them under the probability weighted with the Arrhenius' equation. The products are assumed to be new starting materials, and the next reaction is chosen by the same operation again. We can proceed with a chemical reaction pathway by repeating this process. This novel simulation enables us to forwardly explore complex reaction pathways without preparing any reaction networks. Consequently, we can access the global picture of not only amino acid synthesis, but also the formation of any compounds. Takehara et al. [1] utilized this method and clarified new reaction pathway to form sugars which is different from the conventional formose reaction. They also succeeded to reproduce relative production rates between sugars and sugar alcohols and between sugars and deoxysugars that were obtained by experiments [3, 4]. Now, we applied their method to the simulation of amino acid and its precursor syntheses.

**Results and discussion:** The result showed rapid increase of amino acids after UV irradiation phase stopped. They include various kinds of amino acids that are also detected in experiments such as glycine, alanine, serine and so on. These are formed in the decomposition process of relatively large unstable molecular species that are formed by UV irradiation. Therefore, we may need to take account of not only the bottom-up mechanism by UV irradiation, but also decomposing processes after that. We also focused on the formation of amino acid precursors and found that the amide group that could be a part of the precursors survived relatively stably. In contrast to the process of increasing amino acids, the bonds formed during UV irradiation remained dominant in the production of amide group. Hence, it is suggested that amino acid precursors may form mostly independently of the synthesis of amino acids. At the same time, our result indicates the complex organic matter formed by UV irradiation would randomly contain the structure that could provide amino acids by hydrolysis.

**References:** [1] Takehara H., Shoji D., and Ida, S. (2022) *Astronomy and Astrophysics*, in press. [2] Dugundji, J. and Ugi, I. (1973) *Computers in Chemistry -Topics in current chemistry*: 19. [3] Meinert, C., Myrgorodska, I., de Marcellus, P., et al. (2016) *Science* 352: 208. [4] Nuevo, M., Cooper, G., and Sandford, S. A. (2018) *Nature Communications* 9: 5276

## 火星大気における光解離に伴う炭素同位体分別

○吉田辰哉<sup>1</sup>, 青木翔平<sup>2</sup>, 上野雄一郎<sup>3</sup>, 寺田直樹<sup>1</sup>, 中村勇貴<sup>1</sup>, 塩原輝満恵<sup>1</sup>, 吉田奈央<sup>1</sup>,  
中川広務<sup>1</sup>, 堺正太郎<sup>1</sup>, 小山俊吾<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>東北大学, <sup>2</sup>東京大学, <sup>3</sup>東京工業大学

火星大気中炭素同位体比は火星大気進化史や火星上有機物起源を制約する上で重要なトレーサである。大気中  $\text{CO}_2$  の光解離は  $\text{CO}_2$  と  $\text{CO}$  等光化学生成物間に強い炭素同位体分別を誘起することで知られている。一方で、その同位体分別効果が火星大気中の炭素同位体組成にどのような影響を及ぼすかは明らかでない。本研究では  $\text{CO}_2$  の光解離に伴う炭素同位体分別を考慮した 1 次元大気光化学モデルを構築し、火星大気中の  $\text{CO}_2$  と  $\text{CO}$  の炭素同位体組成高度分布を推定した。計算結果から、光解離に伴う同位体分別の影響で各高度で  $\text{CO}$  は  $\text{CO}_2$  と比較し  $^{13}\text{C}$  に枯渇することが明らかになった。 $\text{CO}$  中  $\delta^{13}\text{C}$  の最小値は  $-170\text{‰}$  にも達する。火星探査機キュリオシティによって近年発見された  $^{13}\text{C}$  に枯渇した火星堆積物中有機炭素の同位体組成は、大気中  $\text{CO}$  からホルムアルデヒド等の有機分子が生成され地表面に堆積したことで堆積物中有機炭素が生成されたと考えることで説明することができる。また、大気中  $\text{CO}$  の炭素同位体分別を加味すると、従来の推定よりも  $\text{CO}$  光解離を介した光化学的炭素散逸時の同位体分別度合いが高まると予想される。分別を受けた大気中  $\text{CO}$  の炭素同位体組成は火星周回機 ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) や地上望遠鏡によって観測され得る。加えて、 $\text{CO}$  同位体分別の影響を受けた宇宙空間へ流出する炭素イオンの同位体比も火星衛星探査計画 (MMX: Martian Moons eXploration) の観測によって将来捉えられる可能性がある。

# 木星衛星イオの表面環境を模擬した低温 SO<sub>2</sub> 霜の赤外分光イメージング

○根岸 昌平<sup>1</sup>、古賀 亮一<sup>1</sup>、趙 彪<sup>1</sup>、平原 靖大<sup>1</sup>、李 源<sup>1</sup>、伊藤 文之<sup>2</sup>、笠羽 康正<sup>3</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学 環境学研究科、<sup>2</sup>産業技術総合研究所、<sup>3</sup>東北大学 理学研究科

木星のガリレオ衛星イオは太陽系内で最も火山活動が活発な天体であり、この火山活動によって二酸化硫黄 (SO<sub>2</sub>) を主成分とする希薄な大気 (約 10<sup>-3</sup> Pa) と表面の広域に SO<sub>2</sub> の霜が形成されている。表面温度が昼 (約 120 K) から夜・木星蝕中 (約 90 K) にかけて急激に変化するのに応じて SO<sub>2</sub> は昇華と凝縮を繰り返し、大気と表面で SO<sub>2</sub> の気相-固相循環が成立している。Voyager 1 号によるイオ表面の赤外観測以降、表面環境を模擬した赤外分光実験による実験室スペクトルの取得が数例行われてきた。Nash and Betts (1995) では、SO<sub>2</sub> の相状態の違いによる赤外反射吸収スペクトルの振動バンドの変化と目視観察による霜の形態の多様性を報告しているが、微粒子の形成と霜の成長メカニズムの詳細については不明である。霜を構成する微粒子のサイズや空隙率の違いは、イオ表面における霜の熱・光学特性を変化させる要因となる。

そこで、本研究では低温固体試料生成用クライオスタットと准共通光路波面分割型位相シフト干渉法に基づく 2 次元フーリエ変換赤外分光器 (2D FT-IR) から構成される分光撮像システム (図 1) を新たに構築し、イオ表面の低温低圧の環境を再現して SO<sub>2</sub> 霜の堆積およびそのイメージング分光測定を行う。動作検証のため、より安全かつタイタンや冥王星のヘイズの成分であるエチレン (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, 凝縮温度~104 K @ 1 atm) のガス試料による凝縮実験を行った。サンプルホルダーの温度を液体窒素冷媒によって 83 K に冷却した後、真空減圧したチャンバー内に C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> を約 1000 Pa 導入し、25 分間の凝縮過程の前後に赤外透過吸収イメージングスペクトルを測定した。その結果、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> の相変化にともなうスペクトル形状の変化と、準安定結晶相の生成を確認した (図 2, Hudson *et al.* (2014))。本発表では、同様の手順によって様々な形態の SO<sub>2</sub> 霜を堆積し、そのイメージングスペクトルを *in-situ* 測定することで SO<sub>2</sub> 微粒子・霜の形成および成長過程について議論する。

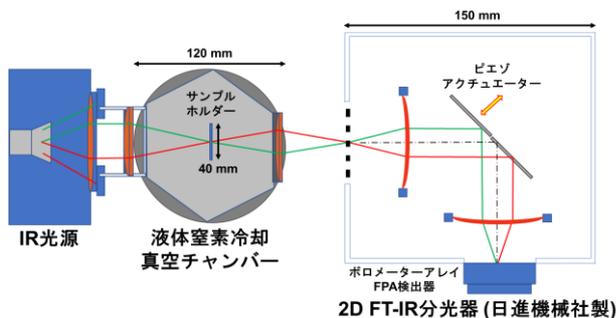


図 1 分光撮像システムの光学系。

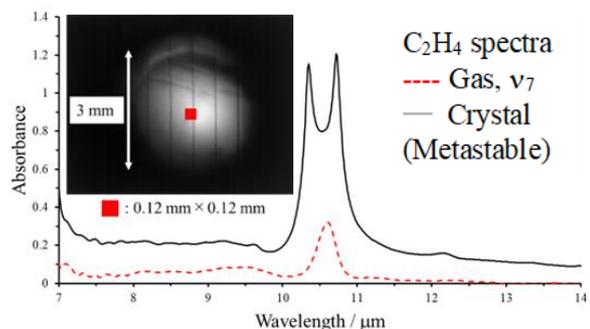


図 2 凝縮前後の C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> の透過吸収イメージングスペクトル (赤外線画像中■の領域)。

# 表面元素組成の多変量解析による 水星の地質ユニットの同定

○平田佳織<sup>1,2</sup>, 臼井寛裕<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東京大学, <sup>2</sup>JAXA 宇宙科学研究所

太陽系の中で最も内側に位置する水星では、他の地球型惑星よりも相対的に高い濃度の揮発性元素の存在が確認されている[1 など]。この、現在水星表面に存在する揮発性元素が「惑星形成初期から存在するもの」なのかあるいは「後期集積に伴って供給されたもの」なのか区別するためには、天体衝突の履歴と揮発性元素の分布との空間的な比較が効果的であると期待される。しかし、水星探査機 MESSENGER 搭載のガンマ線分光計により得られた揮発性元素存在度のデータを用いた詳細な議論は未だなされていない。これは、ガンマ線分光法の低空間分解能という特徴により、天体衝突の履歴を残す地質ユニットと直接比較することが難しいためである。そこで、まずは、より高空間分解能で得られている主要元素組成データ[2, 3]と組み合わせることにより揮発性元素の空間分布を高解像度化する必要がある。本研究は、その第一段階として、MESSENGER 探査機搭載の X 線分光計 (XRS) による観測で得られた主要元素組成データを用いて、水星表面の元素組成ユニット区分を決定することを目的とする。

本研究では、XRS の観測から推定された水星表面各地点での元素比データ (Mg/Si 比、Al/Si 比、S/Si 比、Ca/Si 比、Fe/Si 比) を多変量変数として主成分分析を行い、表面元素組成の空間不均質を特徴付ける指標 (主成分) を抽出した。第 1 主成分 (PC1) は Mg/Si 比を (主成分係数: 93.9%)、第 2 主成分 (PC2) は Al/Si 比を (主成分係数: 95.9%) 最も大きく反映した指標であり (図 1)、水星表面の元素組成の多様性は主に PC1, PC2 により説明可能である (PC1 の寄与率: 87%、PC2 の寄与率: 6%) ことが明らかになった。水星表面の元素組成を最もよく特徴づけると示唆された Mg/Si 比は地質年代と相関があることが報告されており[4 など]、マンツルの部分熔融度の変化に伴うマグマソースの組成変化を反映している可能性がある。

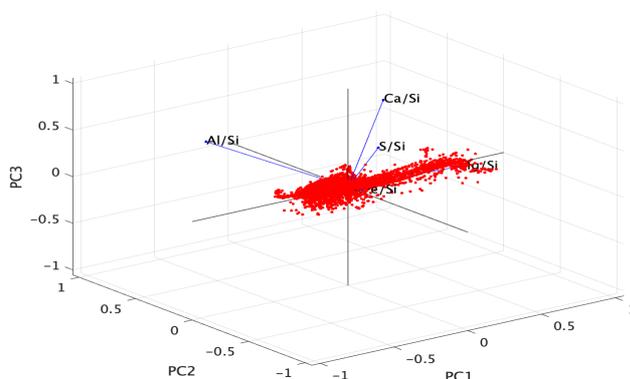


図 1. 第 1-3 主成分と入力した主要元素比データの関係

参考文献: [1] Peplowski et al. (2012) *JGR*, **117**, E00L04. [2] Weider et al. (2015) *EPSL*, **416**, 109-120. [3] Nittler et al. (2020) *Icarus*, **345**, 113716. [4] Wang et al. (2022) *JGR: Planets*, **127**, e2022JE007218.

# 太陽系外サブネプチューンの進化：大気散逸と惑星内部からの水素・ヘリウム供給の影響

○小林一生<sup>1</sup>, 黒川宏之<sup>2</sup>, 奥住聡<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学 理学院地球惑星科学系, <sup>2</sup>東京工業大学 地球生命研究所

サブネプチューンは地球と海王星の間の大きさを持つ、最も多く確認されている太陽系外惑星である。これらの惑星は従来、原始惑星系円盤のガスを取り込み、水素ヘリウム主体の大気を保持していると考えられていた（一次大気；Fulton et al. 2017）。しかし、最近の研究では強い主星の放射に晒されている短周期サブネプチューンから散逸するヘリウムが検出されなかった（Kasper et al. 2020）。この観測結果は、サブネプチューン大気の円盤ガス起源説と相反する。さらに、従来の大気散逸・進化モデルでは現在でも大気を保持している一部の短周期ホットサブネプチューンの存在を説明できない。

そこで本研究では、マグマオーシャンや金属核に溶け込む水素とヘリウムが、サブネプチューン大気を補充している可能性を探った。大気の質量散逸と供給を考慮した1次元内部構造モデルを用いて、サブネプチューンの進化を計算した。モデルでは拡散律速散逸と、マグマオーシャンおよび金属コア中に溶解する水素とヘリウムを考慮した。その結果、大気散逸率の大きい惑星の大気は、内部から供給される水素がヘリウムより多いため、ヘリウムの存在度が減少することが分かった。さらに、各惑星質量・軌道長半径について、惑星形成から50億年経過した後のヘリウムの存在度を調べた。その結果、特に短周期・低質量の惑星について、ヘリウム存在度が惑星形成時と比べ著しく低くなることがわかった。このことは、短周期サブネプチューンから散逸するヘリウムが検出されなかった観測結果を説明する可能性がある。

これらの結果から、恒星に近い、強い照射を受けるサブネプチューンは、内部から脱ガスされた水素を含む二次大気を持つ可能性が示唆された。また、主星から離れた軌道を回るサブネプチューンは、大気の入替わりが起こらないため、一次大気を持っていると考えられる。本研究の仮説は、サブネプチューン大気中のH/He比の観測から検証が可能である。

## M 型星まわりの地球型系外惑星におけるプラズマ圏形成に関する考察

*On plasmasphere formation at terrestrial exoplanets around M-Dwarf stars*

○Kanakano Seki<sup>1</sup>, Akifumi Nakayama<sup>2</sup>, Ryoya Sakata<sup>1</sup>, Takeshi Imamura<sup>3</sup>, Shotaro Sakai<sup>4</sup>, Naoki Terada<sup>4</sup>, Kunihiro Keika<sup>1</sup>, Kevin France<sup>5</sup>, and David Brain<sup>5</sup>

1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Rikkyo University,  
3. Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 4. Graduate School of Science, Tohoku University, 5. LASP, University of Colorado Boulder

Many terrestrial exoplanets or super-Earth have been found around low mass stars such as M dwarfs. A red dwarf (M type star) has comparatively narrow habitable zone, which is very close to the host star, and exoplanets are considered to be exposed to extreme levels of X-ray and ultraviolet (UV) radiation [e.g., France+, 2020]. Classic equilibrium tide theories predicts that K or M-type stars induce strong tidal effects on potentially habitable exoplanets, and tidal locking is possible for most planets in the habitable zones of K and M dwarf stars [e.g., Barnes, 2017].

When a planet has dipole magnetic field and rapid rotation, superposition of the stellar wind induced and corotation electric fields results in the tear-drop-shaped region of the closed drift, where planetary ionized atmosphere can fill the magnetic flux tubes along the field lines. The region is characterized with cold dense planetary plasma and called as the plasmasphere. In this study, a simple estimation method of the size of terrestrial exoplanetary plasmasphere is shown based on the knowledge of the solar system planets. We considered the role of rapid rotation of the atmosphere (superrotation) in the formation of the plasmasphere of tidally-locked exoplanets. Many GCMs of exoplanets show that the circulations of typical tidally locked terrestrial exoplanets can become superrotation [e.g., Showman+, 2013]. However, the horizontal circulation in the thermosphere is far from understood [e.g., Machado+, 2017]. As for the planetary atmosphere, we assumed the Venus-like composition and thermospheric and ionospheric density altitude profiles of various species are estimated based on newly developed 1-D thermosphere model [Nakayama and Seki, in preparation]. As representative stellar radiation inputs of inactive and active M dwarf stars, we used XUV radiation of the Bernard's star (Bernard) [France+, 2020] or Proxima Centauri (PC) [France+, 2016], respectively. As a result, the model estimates ionospheric densities for  $\text{CO}_2^+$ ,  $\text{CO}^+$ ,  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{N}^+$ , and  $\text{C}^+$  for imaginary exoplanets with the intrinsic dipole strength as strong as that of Earth and Venus-like atmospheric composition.

In both cases (Bernard and PC), the results indicate that the main ion species become  $\text{C}^+$ , and it is different from current Venusian ionosphere whose main ion species is  $\text{O}^+$ . The results of plasmasphere estimation show that Earth/Venus-like magnetized exoplanet can have a plasmasphere with a size of 4-6 times of the planetary radius. The size of the plasmasphere depends on the superrotation speed of the thermosphere, ionospheric conductance, stellar wind dynamic pressure, and IMF cone angle. If the exoplanet has a  $\text{CO}_2$ -rich atmosphere, the results suggest the FUV absorption of plasmaspheric  $\text{C}^+$  ions can cause a few to several percent of the transit depth and might be observable by space telescopes. Since the plasmasphere formation requires the existence of both the thick atmosphere and global intrinsic magnetic field, the observation of plasmasphere can provide possible evidence and clues of the exoplanetary atmosphere and intrinsic magnetic field.

# 全球雲解像モデルを用いた高自転軸傾斜角を持った系外地球型惑星の気候

○小玉貴則<sup>1</sup>, 高須賀大輔<sup>2</sup>, シェリフ多田野サム<sup>3</sup>, 黒田剛史<sup>4</sup>, 宮川知己<sup>5</sup>, 阿部彩子<sup>5</sup>,  
佐藤正樹<sup>5</sup>

<sup>1</sup>東京大学先進科学研究機構, <sup>2</sup>JAMSTEC, <sup>3</sup>リーズ大学, <sup>4</sup>東北大学大学院理学研究科, <sup>5</sup>東京大学大気海洋研究所

多くの系外惑星が検出され、その中にはハビタブルゾーン内に位置している地球に似たバルク組成を持つ岩石惑星もある。ハビタブルゾーンとは、惑星表面に長期的に液体の水を維持することのできる、中心星からの範囲である。宇宙望遠鏡において、それら系外惑星の大気の特徴付けをすることが期待され、ハビタブル系外惑星は重要なターゲットとして検討されている。近年、その様なハビタブルゾーン内に位置している系外惑星の気候が3次元大気大循環モデルを用いて検討されている。

地球型惑星気候は、惑星の軌道パラメタに大きく影響を受けることが知られている。地球史においては、氷期-間氷期サイクルはミランコビッチ日射強制により支配されていた。太陽系内惑星も様々な自転軸傾斜角を持っている。月がない場合、地球の自転軸傾斜角は $0^\circ$ から $90^\circ$ まで変化することが示されている。したがって、系外惑星系において、系外惑星は様々な自転軸傾斜角を持つことが考えられ、高自転軸傾斜角を持つ惑星は、日射分布の季節変化により強い季節変動を持つことが想定される。

我々は、全球雲解像モデルとして知られている、NICAM(Non-hydrostatic ICosahedral Atmospheric Model)を用いた。NICAMは雲分布と水蒸気の鉛直輸送を陽に扱うことができ、スーパーコンピュータ富岳上で高解像度気候実験が可能である。我々は、背景大気として1barの地球空気を持った海惑星設定を仮定し、4パターンの自転軸傾斜角( $0^\circ$ ,  $23.5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ )を考慮した。ここでは、2種類の実験を行った: 1) 低解像度+雲形成に関するパラメタリゼーション(約220km格子, GCMの標準解像度)、2) 高解像度+雲微物理(約14km格子)。

結果として、雲微物理を考慮した高解像度シミュレーションは、低解像度のものと比べ、温暖な気候を示した。その原因として、大気中の雲分布が変化したことと水蒸気の量が多くなったためだと考えられる。

本研究の一部は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」(JPMXP1020200305)の一環として、理化学研究所のスーパーコンピュータ「富岳」および(資源提供機関名)のHPCIシステムを利用して得られたものです(課題番号: hp210166, hp220167)。

## 全ての起源、太陽系の地球と月の起源、水惑星の深海底の起源、プレートテクトニクスを検証する方法

How to verify All Origins, Origins of Earth and Moon in our Solar System, Origins of Deep Sea Floors of Aquatic Planet, and Plate Tectonics.

○種子 彰・AKIRA TANEKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SEED SCIENCE Labo. 銀河系・惑星・地球月起源研究室

私達は一度限りの地球進化の結果に存在しており、仮説検証には自然との一致が評価方法として相応しい。即ち、「創造的な仮説で、自然の進化を統一的に無矛盾で、何項目説明できるか」で評価する方法です。太陽系の地球と月の起源では、「Multi-Impact Hypothesis<sup>[3]</sup>」であり、約 25 項目の特徴を説明できた。

具体的には、●月の特徴だけで 9 件、①2km 偏芯<sup>[1]</sup>したマントルだけの月射出。②月の隕石重爆撃期、③月の海[兎模様]表側の形成。④月表面が常に地球を向く理由(:地球と偏芯した月の巴回転)、⑤必然衝突したインパクトの起源は小惑星帯軌道位置の CERRA 潮汐断裂したマントル片、⑥射出月成分は地球マントルのみ、⑦理論衝突速度と角度は 12.4km/sec と 36.4°、⑧射出速度は第二次宇宙速度 11.2km/sec 以下で、月軌道エネルギー約 60×Re(:現状の月軌道). cf.Re≐6400Kkm [地球半径]、⑨必然衝突:太陽系公転円盤上の CERRR ガインパクトの起源であり、軌道偏平と地球軌道交差、●太陽系の惑星関係の特徴で 6 件、⑩小惑星帯の起源、⑪地球への分化した隕石の起源更に、⑫イトカワやリュウグウの石質集合小惑星の起源や、⑬最初の木星でのフライバイの地殻に近い比重の冥王星の起源や、⑭木星の大赤斑の起源(マントル断裂片の木星へ衝突による)、⑮水星のコアリッチの起源 ●地球進化の起源の特徴で 10 件、《地球への固体マントル衝突による》⑯深海洋底(平均深さ約 4km)起源、⑰地球衝突時のマントル亀裂=プレート境界の起源、⑱プレート・テクトニクスの起源として、駆動力の説明[\*今年のポスター発表による]、⑲キンパーライトパイプ(隕石衝突のエネルギーは地震波として伝搬し地球の対極に⇒同時刻到達と集中し噴き出す圧力)の起源、⑳プレート相互に重なる起源メカニズム(凹プレートの下に凸プレート潜り込み初め)、㉑+1 ティチス海の起源:高緯度衝突⇒偶力発生⇒地軸傾斜の起源(23.5°)、㉑+2 大太平洋プレートの移動方向急変の起源、㉑+3 南極大陸の移動⇒停止の原因(地軸のセンターに収まる:駆動力 0 ゼロ:駆動力の実証)、㉑+4 環大太平洋弧状列島と背弧凹海盆の起源、㉑+5 橄欖岩の岩峯が 1000m 級の峯に約垂直にそそり立つ理由=凹海盆のエッジ 等である。此の様に、約 25 項目の特徴を説明できるのは、Abduction で進化の結果を統一的に説明し検証ができた証である。

そして、倉本圭氏の成績表に「Multi-Impact Hypothesis<sup>[3]</sup>」を加える<sup>[5]</sup>と、画期的な検証となる。

[1] Bills B. G. and Ferrari A. J. (1977) Icarus, 31, 244-259. [5]種子彰 2022-0044 PT 駆動力の起源

[2]The Giant Impact and the Formation of the Moon P46.Des.1-3, 1998 ONTEREY,LIFORNIA

[3]種子彰 月形成仮説(マルチインパクト仮説) Sep.2014 P1-22 日本惑星科学会 秋季講演会

[4] Benz W. et al. (1986) Icarus, 66, 515-535., Benz W. et al. (1987) Icarus, 71, 30-45.

## 低速衝撃波によるコンドリュールの火成リム集積

○松本 侑士<sup>1</sup>, 荒川 創太<sup>2</sup><sup>1</sup> 国立天文台, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構

コンドリュールはコンドライト隕石の主要構成物質であり、 $\sim 0.1 - 1$  mm 程度のサイズの球状粒子である。コンドリュールの中にはリムと呼ばれるより小さなダスト粒子に覆われた構造を持つものがある。リムの中には溶融を経験したダストによるものがあり、これらは igneous リム (火成リム) と呼称される (e.g., Krot & Wasson 1995)。火成リムの形成過程として、先駆体がコンドリュールに集積した後何らかの加熱過程を経て溶融し形成した可能性が指摘されていた (Rubin 2010)。しかし集積によると考えられるリムと火成リムを比べると火成リムはより厚く、何らかの別過程の存在が指摘されている (Matsumoto et al., 2021)。

火成リムの形成には先駆体ダストの溶融とコンドリュールへの集積の 2 つの過程が必要である。我々は火成リム先駆体ダストの溶融過程として、コンドリュールの溶融過程として提案されている衝撃波加熱に着目した。衝撃波によるダストの溶融についてはコンドリュール形成の研究で調べられており (Miura & Nakamoto 2005)、コンドリュールが形成するような速度の衝撃波 ( $\geq 10$  km/s) においては火成リムのダストのサイズに対応する  $10 \mu\text{m}$  のダストは蒸発してしまうが、これよりよりも低速の衝撃波 ( $\sim 10$  km/s) には、コンドリュールは溶融せず、 $\sim 10 \mu\text{m}$  サイズのダストが溶融する衝撃波が存在する。我々は衝撃波によって溶融したダストがコンドリュールに集積されるのかを調べた。

我々は衝撃波後面のコンドリュールとダストの運動及び熱進化を、コンドリュール形成のダストの衝撃波加熱研究 (Miura et al., 2002; Miura & Nakamoto 2005) を同様に解いた。加えてダストの温度進化においては過冷却を考慮した。衝撃波後面のガスの構造はシンプルなガス構造モデル (Arakawa & Nakamoto 2019; Arakawa et al., 2022) を基にコンドリュール形成の衝撃波加熱研究をおおよそ再現するようにアップデートした。

衝撃波後面で溶融したダストは、ダストとコンドリュールの相対速度がついているために、すぐにコンドリュールに付着はしない。ダストの集積はダストがガスと運動がカップリングした過冷却中に始まり、凝固後も継続する。この結果、コンドリュールは 2 層のリムを集積する。我々の計算で求められたリムの厚みはコンドリュールが大きいほど厚い。これは集積半径に加えて、より大きなコンドリュールほどガスとの制動距離が長く、より長距離でダスト集積が起きるためである。この火成リムとコンドリュールの関係は隕石中のものと一致する。我々の結果から、コンドリュールが 10 回程度の低速衝撃波による集積イベントを経験した場合に、隕石中の火成リムの厚みを説明することができる。

## 超高解像トモグラフィ・3D レンダリング技術による隕石中の難揮発性包有物の形状観察

○深井稜汰<sup>1</sup>、竹田裕介<sup>2</sup>、増田雄樹<sup>3</sup>、伊庭靖弘<sup>2</sup>、笹木慎太郎<sup>2</sup>、池上森<sup>2</sup>、山本大貴<sup>3</sup>、臼井寛裕<sup>1,4</sup>、星野健<sup>1</sup>、山崎雅起<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JAXA、<sup>2</sup>北海道大学、<sup>3</sup>東京工業大学、<sup>4</sup>東京大学

コンドライト隕石中に数%程度存在する CAI (Calcium-Aluminum rich inclusions) は、太陽系の最初期に高温のガスから凝縮し形成したことが知られている。CAI は高温凝縮物であるにも関わらず、比較的遠方で形成したと考えられる炭素質コンドライト隕石に比較的豊富に含まれる (Hezel et al. 2008)。また Wild2 彗星にもその一部が確認される事 (Zolensky et al. 2006) からも、CAI は内側領域から外側領域へ、大規模な動径方向移動を経験した固体物質と言える。CAI は凝縮・輸送、最終的に隕石母天体に取り込まれるまでに、付着成長・破壊・圧縮など様々な物理過程を経験している。結果として CAI の形状は当初形成した状態から何らかの変形を受けるはずであるが、CAI の形状研究は一部の X 線 CT 研究に留まっており (Zhang et al. 2021 など)、一般的な知見は得られていない。

本研究では、超高解像フルカラートモグラフィ技術を用いたアエンデ隕石の連続撮像を行った。連続画像から三次元形状の可視化を行い、アエンデ隕石中に存在する CAI の色・形状・体積・表面積などのデータを抽出した。また、連続画像中のインクリュージョンを CAI であると判定するために、参考資料として別途複数個の樹脂包埋されたアエンデ隕石を用意し、電子顕微鏡像と明視野画像を比較して特徴を抽出した。結果として、1875 mm<sup>3</sup> のアエンデ隕石の岩片から、我々は現在までに 31 個の CAI を抽出・可視化した。現時点での CAI の存在量は 1.6 vol. % である。

CAI は溶融メルトからの結晶化を経験した粗粒 CAI、溶融を経験していない細粒 CAI に分類される。粗粒 CAI の形状観察によると、結晶化を経験したにも関わらず、その大部分が不規則形状をしていることがわかった。不規則形状の原因は、粗粒 CAI 形成後の衝突破壊と見られる。Wark-Lovering (W-L) リムの有無や周囲のインクリュージョンの接触の形跡から、粗粒 CAI は (1) 形成環境における衝突破壊 (破壊された断面に W-L リムが集積した例)、(2) 輸送・集積時における衝突破壊 (W-L リムの一部が欠損した例)、(3) 母天体形成時の圧力による破壊 (周囲のインクリュージョンと接触している例) を経験したものに大別された。また、抽出した粗粒 CAI はサイズ頻度分布においてピークを持たず、コンドリュールとは異なる結果を示した。この結果は、形成・輸送過程がコンドリュールと異なる粗粒 CAI が、より強く破壊の影響を受けた結果を反映していると考えられる。本講演中では、細粒 CAI の結果についても考察する。

## メカノケミカル法による非晶質シリケートの合成

○茅原弘毅<sup>1</sup>、小池千代枝<sup>1</sup><sup>1</sup> 大阪産業大学

非晶質シリケートは宇宙塵(特に星間塵)の主要な構成物質であり、10  $\mu\text{m}$ と20  $\mu\text{m}$ 付近のブロードなピークを持つスペクトルとして観測される。実験室で非晶質物質を作成するには、融点以上に加熱したメルトを急冷させる方法が良く知られるが、比較的低温での液相反応であるゾルゲル法や、高エネルギー粒子を結晶に衝突させる方法などもある。

本研究では、メカノケミカル法として知られる方法で、非晶質シリケートの合成を試みた。これは、遊星ボールミルと呼ばれる粉砕攪拌機を用いる方法で、容器の中に粉砕ビーズと出発物質を封入し、ミルを高速回転させることにより生じる力学的なエネルギーを用いて化学反応を促進させるというものである。出発物質は非晶質シリカ( $\text{SiO}_2$ )、結晶質のMgOおよび $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 試薬を、enstatite( $\text{MgSiO}_3$ )とforsterite( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ )のモル比で混合したものを用意した。遊星ボールミルの回転数は生じるエネルギーの指標となり、回転数や時間を変えて合成を試みた。試料は一定の時間毎に取り出し、X線回折(図1)と赤外線吸収スペクトル(図2)の測定を行い、化学反応の進行具合と構造の時間変化を追跡した。

回転数にもよるが、enstatite組成ではおおむね300時間程度以上、forsterite組成では1250時間以上の攪拌時間ののち化学反応が完了し、それぞれの非晶質物質を得ることに成功した。

さらに、これらを1100  $^{\circ}\text{C}$  10時間の加熱をし、結晶化した鉱物種をXRDおよび赤外吸収から特定した。forsterite組成の非晶質からはforsteriteが結晶化し、MgOを使用したenstatite組成の非晶質からはenstatiteが結晶化した。しかし、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ を使用したenstatite組成の非晶質からは、回転数が大きい場合はenstatiteが結晶化したが、小さい場合はforsteriteが結晶化し $\text{SiO}_2$ のアモルファス成分が残った。

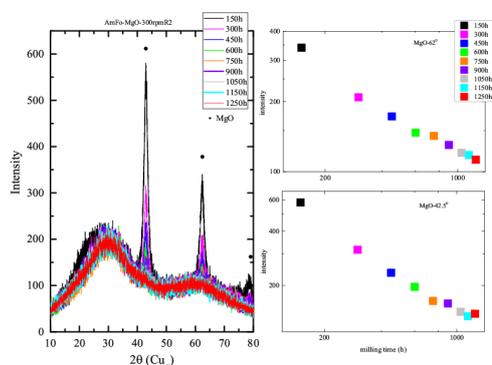


図 1\*: (左)  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 組成の時間毎のXRD  
(右) MgO 結晶ピークの減少の様子

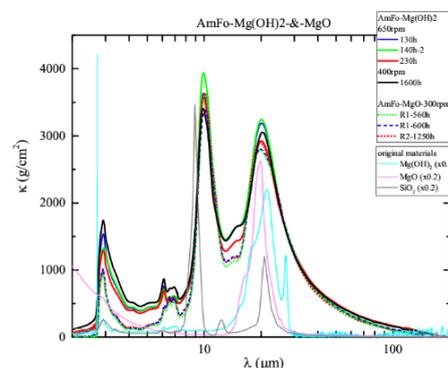


図 2\*:  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 組成の非晶質の  
赤外吸収スペクトル

\* Koike & Chihara, ApJ submitted (2022)

# 付着N体計算で探るダスト集合体のせん断強度： 内部構造変化と太陽系小天体への応用

○辰馬 未沙子<sup>1</sup> 奥住 聡<sup>1</sup> 片岡 章雅<sup>2</sup> 田中 秀和<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 <sup>2</sup> 国立天文台 <sup>3</sup> 東北大学

ダスト粒子が集合したダスト集合体の内部構造は、ダスト集合体やさらに成長した小天体の強度や熱伝導率を決める要因であり、ダスト集合体や小天体の衝突結果や熱進化に影響を与える。ダスト集合体の内部構造が変化する要因として、ダスト集合体同士の斜め衝突などでせん断力がはたらく場合が挙げられる。しかし、せん断力がはたらいたときのダスト集合体の内部構造変化についてはよくわかっていない。また、ダスト集合体同士の斜め衝突では、せん断力による破壊が起きるせん断強度が衝突結果に影響を与えるが、ダスト集合体のせん断強度を実験により求めることは難しい。そこで、ダスト集合体の数値計算を用いてせん断強度が求められているが (Seizinger et al. 2013)、実際の天体への応用には至っていない。

そこで我々は、ダスト集合体にせん断力がはたらいたときの挙動を調べるため、ダスト粒子の付着力を考慮したN体計算 (Wada et al. 2007) を用いてダスト集合体のせん断計算を行った。初期条件としては、形成過程を模擬して等方的に圧縮した構成粒子半径0.1 ミクロンの氷ダスト集合体を用いた。また、境界条件としては周期境界を用い、一对の周期境界を反対向きにずらしていくことでせん断の動きを与え、せん断の動きを与え続けたときの挙動を調べられるようにした。このN体計算の結果、せん断ひずみが増加するにつれてせん断応力が増加し、あるところで最大値をとることが見られ、せん断強度を得ることに成功した。このせん断強度は、ダスト集合体の引張強度 (Tatsuuma et al. 2019) と同程度であり、彗星 67P のせん断強度のほうが低いことが明らかとなった (図 1)。すなわち、彗星 67P はダスト集合体よりも脆いと言える。また、せん断応力が最大値をとった後もせん断の動きを与え続けると、ダスト集合体内部の裂け目が空隙となり、内部構造の変化が見られた。本発表では、この内部構造変化を定量的に評価した結果も紹介する。

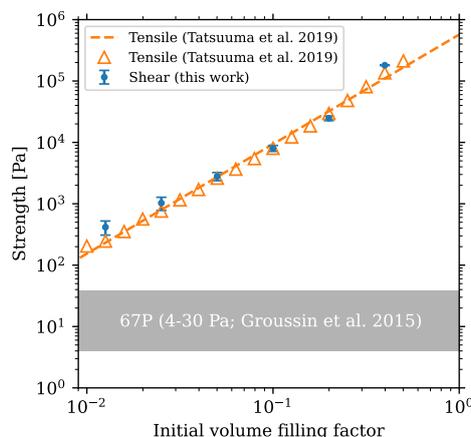


図 1: 構成粒子半径 0.1 ミクロンの氷ダスト集合体のせん断強度 (青) と引張強度 (橙)。

# 大質量原始星円盤におけるダスト成長： 岩石ダスト付着力への制約

○山室良太<sup>1</sup>, 田中圭<sup>2,3</sup>, 奥住聡<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 地球惑星科学系,<sup>2</sup> コロラド大学ボルダー校,<sup>3</sup> 国立天文台

原始惑星系円盤における岩石ダストの合体成長を理解することは、地球をはじめとする岩石惑星の形成を解明するための重要な課題である。岩石ダストが付着合体できる限界の速度には大きな不定性があり、理論モデルや室内実験によって 1-50 m/s と様々な値が示されている (e.g., Dominik & Tielens 1997; Blum & Wurm 2000; Kimura et al. 2015; Steinpilz et al. 2019)。この不定性は、岩石微惑星形成のメカニズム特定において大きな妨げとなっている。

我々は岩石ダストの付着力を、大質量原始星周囲の電波観測と円盤理論モデルから制約するという新しいアイデアを提案する。低質量星まわりの原始惑星系円盤では、既存の電波干渉計で撮像できる領域はほとんどの場合スノーラインの外側に限られるため、氷に覆われていない岩石ダストの成長過程を電波観測から探ることは困難である。これに対し、光度が約  $10^3$ – $10^5 L_{\odot}$  にも及ぶ大質量星の周囲の円盤であれば、岩石ダストが支配する領域は中心星から  $\sim 100$ – $1000$  au の距離にまで広がるため、岩石ダストの熱放射を撮像観測することが可能である。

本研究では、円盤-ダスト進化計算を行い、大質量原始星円盤 GGD27-MM1 のミリ波偏光波観測 (Girart et al. 2018) と比較することで、岩石ダストの付着限界速度の制約を試みた。我々は、エンベロープから円盤に定常的に流入する岩石ダストの合体・破壊・落下とガス円盤構造を統合的に解き、岩石ダストの最大サイズの動径分布をダスト付着限界速度の関数として計算した。その結果、付着限界速度が 10 m/s 程度のとき、GGD27-MM1 偏光観測から示唆される最大ダストサイズ 50-500  $\mu\text{m}$  が再現されることがわかった。この付着限界速度は、低質量星まわりの原始惑星系円盤におけるダストの最大衝突速度 20-50 m/s より低い (Johansen et al. 2014)。したがって、本研究から導かれた付着限界速度が原始惑星系円盤の岩石ダストにもあてはまると仮定すると、岩石微惑星の形成はダスト付着合体以外の固体集積過程も必要とすることを我々の結果は示唆する。

## タンデム惑星形成論による地球型惑星の起源と進化

○二村徳宏<sup>1</sup>、戎崎俊一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>日本スペースガード協会、<sup>2</sup>理研

タンデム惑星形成論 (Imaeda and Ebisuzaki, 2017; Ebisuzaki and Imaeda, 2017) をもとに地球型惑星の起源と進化について明らかにした。タンデム惑星形成論とは標準モデル (*e.g.*, Safranov, 1969; Hayashi *et al.*, 1985) の枠組みに磁気回転不安定 (Balbus and Hawley, 1991; Hawley and Balbus, 1991)、多孔性粒子成長理論 (Okuzumi *et al.*, 2012; Kataoka *et al.*, 2013)、中心星の電離放射線の影響などの物理要素を導入し構築したモデルである。その結果、原始太陽系円盤は、太陽に近い方から乱流領域、静穏領域、そして再び乱流領域という構造を持ち、2つの乱流領域と静穏領域の境界では、効率的に固体粒子が集積し、太陽に近い境界付近では岩石惑星、遠い方ではガス惑星が形成される。Imaeda and Ebisuzaki (2017) および Ebisuzaki and Imaeda (2017) では、この境界における微惑星形成までの過程が精密に議論されているが、その後の惑星形成に至る過程については精密な議論は行われていない。よって本研究では、2つの惑星形成領域のうち、岩石惑星形成領域の惑星の進化について明らかにする。

太陽に近い方の乱流領域と静穏領域の境界付近では、その境界から雪線までの固体粒子が効率的に集積する (Imaeda and Ebisuzaki, 2017; Ebisuzaki and Imaeda, 2017)。そして、固体粒子の円盤中央面における密度が、重力不安定を起こす密度に達し、この境界に微惑星が形成される。この微惑星は周囲の固体粒子を取り込み成長しながら、円盤からの重力トルク (*e.g.*, Lyra *et al.*, 2010; Paardekooper 2014) の影響で動径方向外側へ移動する。この惑星移動の時定数を見積もると、中心星の質量降着率変化の時定数と比較して短く、この効果は岩石惑星の質量進化を議論する上で重要な要素であることを明らかにした。移動により、惑星がその重力の影響を及ぼす範囲以上に境界から離れると、境界に存在する密な小石が惑星へ降着することができなくなる。境界に集積する固体粒子の総質量が、太陽系の地球型惑星の総質量と同じになる条件では、この境界から離れる際の惑星の質量は地球質量程度となった。

地球型惑星は、タンデム惑星形成論により原始太陽系円盤の太陽に近い側の静穏領域と乱流領域の境界付近を起源として、その後の質量・軌道進化により地球質量程度の惑星になる。

# ペブル集積による原始惑星の自転形成：原始惑星が駆動するガスの流れ場の影響

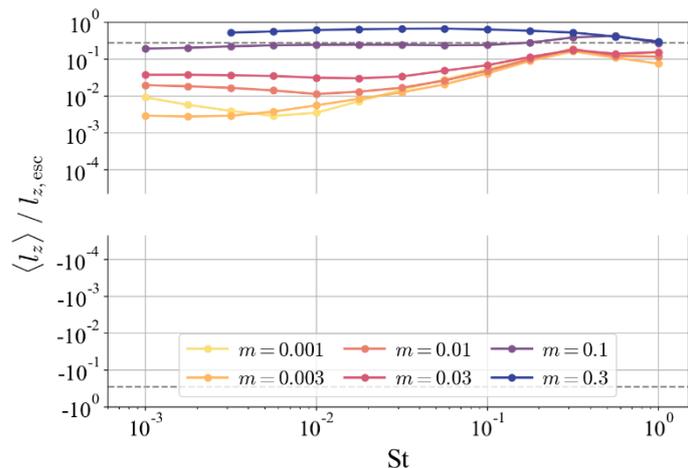
○高岡航輔<sup>1,2</sup>, 桑原歩<sup>1,2</sup>, 井田茂<sup>2</sup>, 黒川宏之<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学 理学院 地球惑星科学系, <sup>2</sup>東京工業大学 地球生命研究所

太陽系内の惑星や直径  $D > 150$  km の小惑星の多くは、自転方向と公転方向が一致している（順行自転）。また、それらの自転軸の傾きは統計的に非等方であることがわかっている。自転の起源に関する説明は様々な試みが成されているが、微惑星集積モデルでは原始惑星は十分な回転量を得ることができず、巨大衝突モデルでは自転軸の非等方性を説明できないという課題があった。一方、ペブル集積モデルであれば、小惑星などの小さな質量の天体に限り、観測事実を十分説明できることがわかっている[1]。

しかし、原始惑星系円盤内に埋没した  $\geq 1,000$  km サイズの原始惑星は重力によって周囲のガスの流れを乱し、複雑なガスの流れ場を形成する[e.g. 2]。この流れ場がペブルの衝突軌道を変化させ、ひいては輸送される自転角運動量にも影響を及ぼす可能性がある。比較的大きな質量を持つ天体の自転形成過程をペブル集積モデルに基づいて議論するためには、このようなガスの流れ場を考慮しなければならない。

本研究では、円盤ガス流に影響を及ぼすような質量（月-スーパーアース質量程度）の原始惑星を想定した3次元流体計算、及び流体計算結果を使用したペブルの軌道計算を実施し、ペブルから原始惑星に輸送される正味の自転角運動量を計算した。数値計算の結果、ガスの流れ場を考慮することで、原始惑星は強い順行回転を得ることが明らかとなった。また、惑星質量  $m$  が大きくなるにつれて順行に対する寄与が大きくなることも判明した。これらの原因は、ペブルが原始惑星の周りを順行回転する大気に影響を受け、大気と同様に順行方向に回転しながら螺旋状に降着するためである。大気の大きさやガス速度は惑星質量が大きくなるほど増大するため、惑星質量依存性が顕著にあらわれた。本研究結果から、太陽系内惑星の自転の特徴や、高速自転による月形成シナリオへの示唆も議論を行う。



▲原始惑星に輸送される自転角運動量  
グラフの上半分・下半分がそれぞれ順行・逆行を表す。

[1] Visser et al., 2020, Icarus, 335, 113380

[2] Ormel et al., 2015, MNRAS, 447, 3512

# 原始惑星の衝突シミュレーションの衝突破壊モデル構築

○小林浩

名古屋大学

惑星は衝突をくりかえし形成されるが、衝突に伴い合体だけでなく、破壊も起こす。そのため、惑星形成を考える上で、衝突モデルは非常に重要である。本研究では、自己重力が支配的な天体に対する衝突モデルの構築のために、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法による衝突シミュレーションをおこなった。

火星質量のターゲットに、衝突体質量 (1/30-1 火星質量) や衝突角度 (30,45,60 度)、衝突速度 (1.1-8 脱出速度) をパラメータとして、シミュレーションを行なった。衝突シミュレーションの結果、衝突パラメータに応じて「合体」、「hit-and-run」、「大規模破壊」が起きることが知られていたが、本研究でも同様の結果が得られた。これらの物理が理解できるように、「最大破片」だけでなく、「2 番目に大きな破片」にも注目してシミュレーション結果の解析を行なった。また、結果の解析は、衝突結果を衝突角度について重みをつけて平均したものを用いた。

「最大破片」質量  $m'_1$  は、低速では合体が起こるため、元のターゲット天体の質量  $m_1$  より大きくなる ( $m'_1 > m_1$ )。中速度では、合体は起きないので元々ターゲット質量よりも小さくなるが、ほとんど質量の損失はない ( $m'_1 \sim m_1$ )。そして、十分に速度が大きくなると質量損失が大きくなる ( $m'_1 \ll m_1$ )。

「2 番目に大きな破片」質量  $m'_2$  は、低速では、元々の衝突体質量  $m_2$  に比べずっと小さくなる ( $m'_2 \ll m_2$ )。これは、合体によって、最大破片が大きくなっているためである。2 倍の脱出速度よりも大きな速度では、「2 番目に大きな破片」の質量は衝突速度が高速になるにつれてなだらかに小さくなる。衝突体がターゲットと同程度の場合は、 $m'_2 \sim m_2$  だが、衝突体  $m_2$  が小さくなるにつれて、 $m'_2/m_2$  が小さくなる。これは、ターゲットに比べ、衝突体の重力が小さいので、衝突後の再集積がしにくくなるためである。

最後に「1 番 2 番以外の破片」の質量  $m_{\text{eje}} = m_1 + m_2 - m'_1 - m'_2$  について調べた (図 1)。この破片の質量は、衝突速度が脱出速度の 2 倍より大きければ、Kobayashi et al. (2010) でモデル化された破片の質量と整合的である。このとき、破壊のエネルギーは重力エネルギーの 9 倍として与えた。一方、低速領域では、破片の質量はモデルにずっと比べて小さくなる。これは、合体が起こるためである。モデルは、合体を考慮するときは破片の質量を過剰見積りしている。

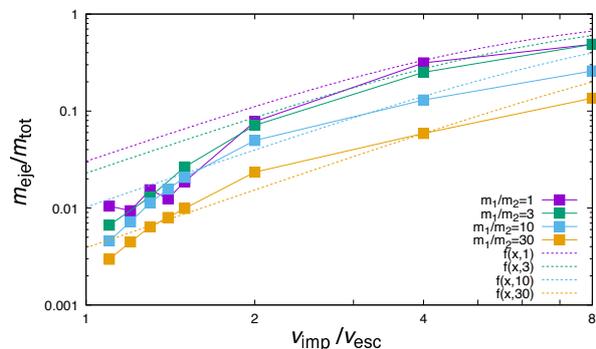


図 1: 「1 番目と 2 番目以外の破片」の質量  $m_{\text{eje}}$  をターゲットと衝突体の質量の和  $m_{\text{tot}}$  で割ったものを衝突速度  $v_{\text{imp}}$  と脱出速度  $v_{\text{esc}}$  の比の関数として著した。四角と実線はシミュレーション結果。点線は、Kobayashi et al. (2010) に基づくモデル。

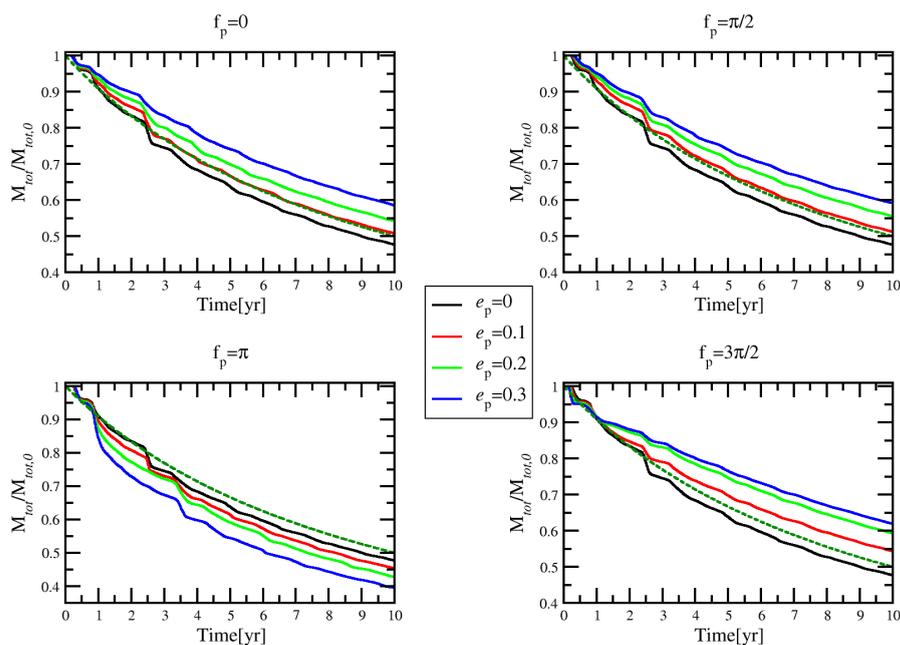
## Short Term Evolution of Debris Disks Originated from a Single Giant Impact

Leonardo M. V. Teixeira\*, Hiroshi Kobayashi

In the late stages of planet formation, it is expected that collisions among terrestrial protoplanets, called giant impacts, occur. Giant impacts generate both large rock fragments and rocky vapor. The rocky vapor expands rapidly and condenses into pebble-sized fragments. Those fragments generated by giant impact evolve into debris disks, whose luminosity flux is governed by the mass evolution of fragments. The mass depletion of the vapor condensates happens in timescales at which the debris disk is still asymmetric, which affects its collisional fragmentation, thus a closer inspection of the short term evolution of a debris disk after a giant impact is necessary.

We carried out N-body simulations with an imbued collisional cascade routine to study the orbit and mass evolution of the vapor condensates. We consider a system with a single protoplanet, and a swarm of vapor condensates resulting from a giant impact. We consider the fragments to be ejected uniformly from the source protoplanet. The simulations are performed for a total of 100 yr. At such timescale, the influence of other protoplanets can be safely ignored. We consider different orbital parameters for the parent protoplanet at the time of ejection, and study their influence on the resulting evolution timescale.

For a planet in a circular orbit, the evolution timescale of the disk, taken as the time needed for the total mass of the debris disk to reduce to half its initial amount, shows a reasonably simple dependence on the ejection velocity. The overall evolution roughly follows the expected collisional cascade. However, the vapor condensates are very sensitive to the surface density changes due to the orbital asymmetry at such timescale, and as a result we can observe modulations on orbital timescales for times  $\lesssim 10$  yrs. On the other hand, the orbital eccentricity and orbital phase of the parent protoplanet at the moment of ejection has a big impact on the timescale and the evolution pattern of the disk. For a planet with an eccentricity  $> 0.1$ , the pile-up of vapor condensates around the orbital phase of the ejection point triggers the collisional fragmentations, inducing a rapid decay of the total mass of vapor condensates, which may explain the short term variations observed in some warm debris disks.



# 惑星形成が太陽ニュートリノフラックスに及ぼす影響について

○ 國友 正信<sup>1</sup>, Tristan Guillot<sup>2</sup>, Gaël Buldgen<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 久留米大学, <sup>2</sup> コート・ダジュール天文台, <sup>3</sup> ジュネーブ大学

太陽内部構造は恒星進化計算を用いた理論モデルと、分光、日震学、ニュートリノによる観測の双方から調査されてきた。これまで我々は惑星形成が太陽内部構造へ及ぼす影響について理論研究を行ってきた。昨年の秋季講演会において、惑星形成過程を考慮すると、音速分布への影響は限定的であるものの、太陽中心部の金属量が高くなることを報告した (図1左)。原始太陽系円盤内におけるダストの合体成長や落下などに伴い原始太陽へ降着するガスの組成が時間変化し、太陽内部に組成勾配が生じるためである。また音速分布についてはオパシティの不定性が大きく影響することも報告した。本講演ではニュートリノフラックスに注目する。これまで、Asplund et al. (2009) の組成を用いた標準太陽モデルでは、観測されたフラックスを再現できないことが問題となっていた。本研究では、降着流の組成の時間進化を考慮し、原始星段階から太陽年齢までの太陽の進化を追う計算を多数行い、太陽年齢での計算結果と観測データを用いて Simplex 法により最適化を行った。その結果、惑星形成を考慮した太陽モデルでは従来のモデルに比べ、中心金属量が高いために中心温度が高く、ニュートリノフラックスにも影響が及ぶことがわかった。温度依存性の高い  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{B}$ , CNO の反応によるニュートリノフラックスと中心金属量の間には正の相関があり、逆に  $pp$ ,  $pep$  では負の相関が見られ、惑星形成を考慮したモデルではニュートリノフラックスの観測値をよく再現することがわかった ( $\lesssim 1.3\sigma$ ; 図1右)。つまり、惑星形成およびオパシティの増大を考慮した太陽内部構造モデルは、分光、日震学、ニュートリノの観測値を全て再現することがわかった (Kunitomo et al., submitted)。太陽物理の課題を惑星形成が解決するとともに、現実的な太陽モデルの構築は惑星科学の諸問題においても重要であると期待される。

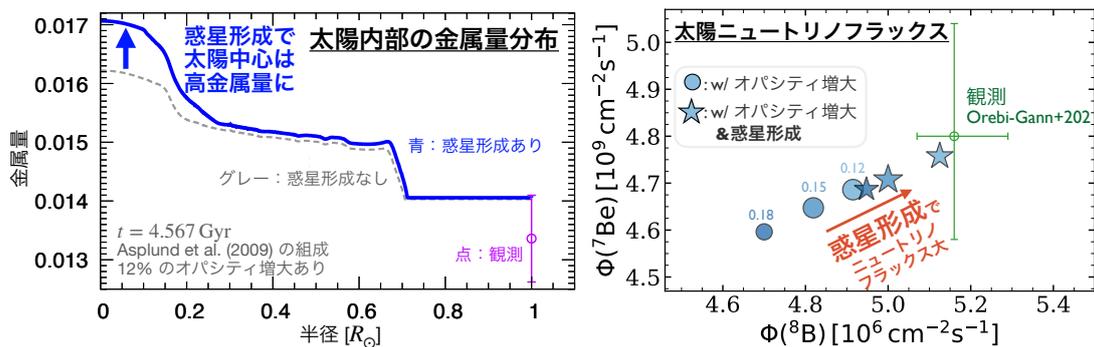


図 1: (左) 太陽内部の金属量分布。青・グレーの線はそれぞれ惑星形成あり・なしの結果。Kunitomo & Guillot (2021, A&A) の図を改変。(右)  ${}^7\text{Be}$  および  ${}^8\text{B}$  の反応による太陽ニュートリノフラックス。緑点が観測の制約 (Orebi-Gann et al. 2021), 丸が 12–18% のオパシティの増大を考慮した結果, 星印が惑星形成およびオパシティの増大を考慮した場合の結果。Kunitomo et al., submitted の図を改変。

## 巨大衝突によって形成される惑星系の軌道構造 II

○ 小久保英一郎<sup>1,2</sup>, 星野遥<sup>1,2</sup>, 松本侑士<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台, <sup>2</sup> 東京大学

太陽系形成の標準モデルでは、地球型惑星形成の最終段階は月から火星程度の質量の原始惑星どうしの衝突だと考えられている。また、系外惑星系でも、近接 (短周期) スーパーアース (大型地球型惑星) 形成の主要なモデルでは、最終段階は原始惑星どうしの衝突と考えられている。これらの過程は巨大衝突段階と呼ばれ、原始惑星系円盤のガスの散逸後に、原始惑星どうしの重力散乱によって軌道交差が起こり、衝突合体して惑星へと成長していく。

本研究の目的は、原始惑星の重力散乱と衝突合体によって形成される惑星系の軌道構造に関する基本的なスケールリング則を得ることである。そのため巨大衝突段階の  $N$  体シミュレーションを行う。原始惑星系の初期条件パラメータを系統的に変えて、どのパラメータがどのように惑星系の軌道構造に影響するのかを調べる。惑星系の軌道構造の指標として、隣接惑星間の軌道間隔と惑星の軌道離心率の系での平均量を計算する。巨大衝突段階での原始惑星の基本的な軌道進化は、(1) 重力散乱によって軌道離心率・傾斜角が増加する、(2) 衝突によって軌道間隔が広がり軌道離心率・傾斜角が減衰する、である。シミュレーションの結果、巨大衝突によって形成される惑星系の軌道間隔と軌道離心率をヒル半径で規格化した値は、現実的なパラメータ範囲では、原始惑星の全質量、質量分布、軌道間隔、軌道離心率・傾斜角にほぼ依存しないことがわかった。一方、これらは惑星系の平均軌道長半径と惑星の平均密度には正の依存性を示す。この依存性は、惑星の二体表面脱出速度とケプラー速度で説明できる。系が重力散乱と衝突合体で進化する場合、惑星の平衡軌道離心率は二体表面脱出速度をケプラー速度で規格化した値程度になり、これは惑星の軌道長半径と平均密度が大きいほど、大きくなる。発表では、原始惑星系から惑星系への軌道進化を示し、上記の軌道構造依存性の物理を説明する。

## OE-01

今更ながら「月探査の意義」再考

The significance of lunar exploration: revisited after all this time

月は我々の太陽系における岩石惑星の中でも独特の位置を占める。巨大衝突説によると、月の形成時間 $t_{pf}$ は数年からせいぜい数百年程度と予想されている。他方、月では惑星サイズや重力加速度が小さいため、対流や火成活動などマントル・ダイナミクスが働き始めるのに必要な時間 $t_{md}$ は数億年程度と予想される。マグマ・オーシャンの冷却・固化（および引き続き起こったとされるオーバーターンの時間） $t_{MO}$ はよくわかっていないが100 Myr程度と見積もられ、 $t_{pf} \ll t_{MO} \ll t_{md}$ の関係が成り立つと期待される。この関係は、月の内部進化は、(1) 惑星形成期 (2) マグマ・オーシャン期 (3) マントル・ダイナミクスに支配される時期と三つの時期に明確に区分できることを意味する。これに対し、火星・金星・地球のような太陽周りを周回するより大きな惑星では、 $t_{pf}, t_{MO}, t_{md}$ はどれも100万年のオーダーであり、この三つのプロセスが同時に進行することが期待される。従って、月はマグマ・オーシャンによる物質分化を実証的に解明する上で最適の天体であると同時に、月の初期史を今後の探査によりその理解が大きく進展すると期待される火星の初期史と比べることは、惑星サイズがマグマ・オーシャンに及ぼす影響を解明するうえで特に重要な意味を持つ。さらに月探査は、地球への「レイト・ベニア」の実態解明やクレーター年代の時間スケールの確立にとっても必須である。本発表ではこれらの話題についても触れる。

## 月面の科学とその実現のための活動

○佐伯孝尚, 森治, 吉光徹雄, 田邊宏太, 山田享, 田中智<sup>1</sup>, 諸田智克<sup>2</sup>

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup>東京大学

2022 年は日本および世界の月面探査にとって重要な年である。米国主導の月面探査プログラムであるアルテミス計画は、ゲートウェイや月面拠点の建設と人類の月における持続的な活動を目指している。その最初の一步として、2022 年中に、SLS 初号機で打ち上げられるアルテミス 1 号ミッションが予定されている。SLS 初号機には、JAXA や東京大学が開発した OMOTENASHI, EQUULEUS といった超小型探査機が相乗りすることになっている。また、JAXA の小型月着陸実証機 SLIM も 2022 年度中の打ち上げを目指し、開発が行われている。

日本は、2019 年 10 月にアルテミス計画への参加を表明し、日本はゲートウェイ居住棟への機器の提供、補給、探査機による月面データの共有、与圧ローバーの開発を中心に月探査に協力することとなっている。一方で、国際協力を行いつつも、日本が独自の戦略に基づいてプレゼンスの向上を行うことが不可欠である。そのような中、宇宙政策委員会宇宙科学・探査小委員会で議論がなされ、宇宙政策委員会基本政策部会の「月面活動に関する基本的な考え方」において、「アルテミス計画への参画により我が国の月面活動の機会が拡大していくことを念頭に、当該機会を活用して新たな知の創造につながる世界的な科学の成果を創出することを目指す」と示された。これは、月面において世界的な科学成果を出すことともに、当面の間は科学が月面探査を牽引することが求められていると解釈できる。

このような背景を受け、JAXA 国際宇宙探査センターは、「月面活動に関する基本的な考え方」で示された 1) 月面からの天体観測、2) 重要な科学的知見をもたらす月サンプルの選別・採取・地球帰還、3) 月震計ネットワークによる月内部構造の把握という世界をリードする成果の創出が期待される月面科学を対象テーマとして、フィジビリティ検討(FS)の募集をおこなった。著者らは 1)-3) の 3 科学それぞれで応募するのではなく、3 科学をあわせた検討チームを組織し応募後採択された。これは、継続的な月面活動の方向性を議論するためには、プログラムの視点が必要であるという観点からである。

現在 FS 検討チームは、個別科学の FS 向上の検討とともに、月面活動のキー技術の獲得と一級科学の実現を両立させるためのシナリオ検討を実施中である。その中で、日本独自の月面輸送機会として検討されつつある月探査促進ミッション(LEAD)を最大活用することを議論している。LEAD は H3 ロケットで打ち上げ可能な月面着陸探査機であり、まとまった量のペイロードを輸送できる貴重な機会として期待されている。

発表では、現在の FS 検討チームの検討内容を中心に示すと共に、月面探査活動を盛り上げ拡大することについて議論を行う予定である。

## 月面サンプルリターンのための月面その場探査と科学

諸田 智克<sup>1</sup>, 長 勇一郎<sup>1</sup>, 長岡 央<sup>2</sup>, 杉田 精司<sup>1</sup>, 仲内 悠祐<sup>3</sup>, 田畑 陽久<sup>1</sup>,  
月面の科学 FS SR チーム

<sup>1</sup>東京大学, <sup>2</sup>理化学研究所, <sup>3</sup>宇宙航空研究開発機構

月の地質活動は比較的早い段階で終了しており, その表面には固体天体の初期進化履歴, 特に, マグマオーシャンからの原始地殻形成過程やその後の火成活動の記録をよく保存している. また, 月は太陽系初期から現在までの太陽系内側における天体衝突の良い記録媒体でもあり, 月面の衝突クレータ記録は太陽系初期の大動乱期を観測的に制約できる数少ない情報源である. 太陽系の力学的進化史の復元や, 月の初期進化の理解といった第一級科学の達成には, 適切に選別された月面露頭からのサンプルリターン (SR) が必須である.

各国の無人月面着陸探査が複数計画される中, 日本も月面着陸実証機 SLIM や, インド宇宙研究機関との協力で進めている月極域探査 LUPEX が 2020 年代前半から中頃に予定されている. また, 米国が中心として進めているアポロ計画以来の有人月面探査プログラム・アルテミス計画に日本も参画している. そのような背景下で, 国際的な月面探査における日本の存在感をさらに高めるためにも, 今後拡大すると期待される月面活動の機会を利用した科学探査の検討は急務である. 宇宙政策委員会基本政策部会の「月面活動に関する基本的な考え方」では, 1) 月面からの天体観測, 2) 重要な科学的知見をもたらす月サンプルの選別・採取・地球帰還, 3) 月震計ネットワークによる月内部構造, の 3 つが重要な科学テーマとして挙げられている. 我々は宇宙研工学研究者を中心とした 3 科学を推進するためのチームを組織し, 昨年に JAXA 国際宇宙探査センターが募集した「2021 年度月面での科学研究・技術実証ミッションにかかるフィジビリティスタディテーマ」に採択され, 検討を進めてきた. その中でも我々 SR チームは月面 SR 探査による第一級の科学成果の導出を目指し, 段階的な技術・科学成果獲得のためのシナリオ策定とともに, リモートセンシングデータ解析による将来探査領域の調査・選定, その場試料選別機器の検討・開発を進めている. 本講演では, 月面からの SR 探査の科学的意義とともに, 将来 SR 探査に向けた月面探査シナリオと観測技術の検討状況について報告する.

# 将来月面サンプルリターン探査に向けたネクタリス盆地の衝突溶融岩露頭調査と衝突溶融岩の分化過程への考察

佐藤 祐希<sup>1</sup>, 諸田 智克<sup>1</sup>, 長 勇一郎<sup>1</sup>, 杉田 精司<sup>1</sup>, 田畑 陽久<sup>1</sup>, 笠原 慧<sup>1</sup>,  
長岡 央<sup>2</sup>, 仲内 悠祐<sup>3</sup>, 鹿山 雅裕<sup>4</sup>, 新原 隆史<sup>5</sup>, 佐伯 孝尚<sup>3</sup>, 吉光 徹雄<sup>3</sup>, 森 治<sup>3</sup>

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、
2. 理化学研究所開拓研究本部榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム
3. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
4. 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻
5. 岡山理科大学理学部基礎理学科

月にある約 50 個の衝突盆地の大部分は、層序学的関係やクレータ数密度、形状の崩壊具合から相対年代が推定されている。一方で、地質年代の境界を規定しているいくつかの衝突盆地の絶対年代は、岩石の未採取や地質イベントとの対応の不明瞭さのために確定しておらず、これらが月の初期の天体衝突史の復元における障壁となっている。衝突盆地の形成年代を決定するためには、形成の際に年代がリセットされた衝突溶融岩を持ち帰り、精密な同位体分析を行うことが望ましい。そのような探査のためには、衝突溶融岩が露出しており、探査が可能な領域を事前に特定する必要がある。月表側の南東部に位置するネクタリス盆地は先ネクタリス代とネクタリス代の境界となっており、その形成年代の決定は、先ネクタリス代の約 30 個の衝突盆地の形成年代の制約と、それによる後期重爆撃期の有無と規模、期間の解明に重要である。特に、ネクタリス盆地の形成後に衝突頻度の上昇があったとする説 (Michael et al., 2018; Morbidelli et al., 2012) の検証も可能になると期待されることから、今回はネクタリス盆地を調査した。

本研究では、将来の衝突盆地からのサンプルリターン探査候補領域を選定するために、月周回衛星 SELENE(かぐや)に搭載されたマルチバンドイメージャ(MI)データや、地形カメラ(TC)の画像データ、標高データ(DTM)、さらに Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)搭載の Narrow Angle Camera の高解像度データを用いた。衝突溶融岩の多くは衝突盆地の内側リング内に成層すると考えられていることから (Cintala and Grieve 1998; Vaughan et al. 2013)、ネクタリス盆地内環の内側の地形と地質を解析し、衝突盆地形成後に噴出した海の玄武岩とそれ以前に形成された地形を区別した。その結果、ネクタリス盆地内環の内側にある 3 つのクレーター (Fracastorius, Bohnenberger, Beaumont) のリムにおいて、ネクタリス盆地形成時の衝突溶融岩が露出している可能性が高いことが分かった。これら 3 つの中規模クレーター周辺の新鮮領域を網羅的に抽出して岩石種の推定を行うことによって、衝突溶融岩の露頭の可能性が高い地点を絞り込んだ。また推定された岩石種は斜長石とノーライトの間で多様性があることが分かった。この岩石種分布と、中規模クレーターの大きさから推定される掘削深さとの関連性、さらには内環の内側のインパクトメルトシートの分化について議論する。

## 月の非洪水型玄武岩被覆様式と UZUME 計画

UZUME, aiming to understand lunar surface emplacement by non-flood type basalt

○春山純一<sup>1</sup>

月の縦孔・地下空洞直接探査ワーキンググループ

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構

月の表面の二次地殻は、月への隕石衝突後の洪水型溶岩被覆といった一元的な描像から、非洪水型溶岩被覆が月の重要な進化過程として認識され始めている(e.g. Spudis et al. 2014, Head and Wilson 2017)。前世紀においても、洪水型では無い溶岩被覆が局地的に見つかっていた。しかし、非洪水型溶岩被覆様式は多様で有り、かつ、間欠性、繰り返し、長い継続時間といった特徴を持っていそうである。その詳細を調べるには、特に、大規模楕状火山の存在確認、その調査が必要である。マリウス丘や、リユンカー山のような、明らかな楕状火山はともかく、ホルテンシウス領域や、コーシー領域などは楕状火山というのには、まだ議論の余地がある。一方で、コーシー領域には、マリウス丘と同様に縦孔が存在し、それは溶岩チューブに開いた孔であると仮定される(Haruyama et al. 2009)。層流で発達する溶岩チューブは、乱流を発生する洪水型溶岩被覆では形成されず(Kerber et al. 2019)、その存在は非洪水型溶岩被覆の一つの証左となる。また、縦孔の底に広がる空洞が溶岩チューブであると分かれば、コーシー領域が楕状火山であることにつながり、またこのような低い山体が今後楕状火山であることになってくれば、月の海形成での非洪水型溶岩被覆が、より重要な形式として考えられていくことになる。

一方で、マリウス丘の縦孔、月のマリウス丘の縦孔(Marius Hills Hole: MHH)や、賢者の海の縦孔(Mare Ingenii Hole: MIH)は孤立している(Haruyama et al. 2010)。こうした孤立した縦孔の成因としては、溶岩チューブに開いたものと考える以外に、火山火口において、マグマが噴出あるいはガス成分を放出した後、減圧収縮してドレインバック(逆流)してできたものであることも考えられる。マグマの地下へのドレインバックにより形成された縦孔構造であるならば、その壁面は火口近傍の堆積物で構成されていると期待される。火口内では噴火終了後にも地下のマグマからの脱ガスによる噴気活動が継続していた可能性があり、壁面凹部には火山ガスなどの揮発性成分から沈殿した昇華物が残存している可能性がある。そのような昇華物を発見できれば、将来その採取を行うことにより月面の火山ガスに含まれていた揮発性成分の種類や量比などを復元することが可能となる。

縦孔の底にそもそも、空洞が広がっているのか、それは溶岩チューブであるのかドレインバックでできたものであるのかを決定するデータ取得を目指し、さらに、地下空洞や縦孔の壁からの将来の試料回収のために有益になる月の縦孔・地下空洞の内部の環境情報の取得を目指して、UZUME ミッションを現在、JAXA/宇宙科学研究所の公募型小型計画で実現しようとしている。

【参考文献】Spudis et al. (2013) JGR-planets 118,1063-1081. Head and Wilson (2017), Icarus 283, 176-223. Haruyama et al. (2009), GRL,36, L21206, Kerber et al. (2019), 50th Lunar and Planetary Science Conference 2019, #1163. Haruyama et al. 2010, 41th Lunar and Planetary Science Conference 2019 41st Lunar and Planetary Science Conference, #1285.

## 小型月着陸実証機 SLIM の狙いと開発状況

○坂井 真一郎<sup>1</sup>, 櫛木 賢一<sup>1</sup>, 澤井 秀次郎<sup>1</sup>, 福田 盛介<sup>1</sup>, 古川 克己<sup>1</sup>  
友枝 久夫<sup>1</sup>, 下地 治彦<sup>2</sup>, 佐伯 和人<sup>3</sup>, 大竹 真紀子<sup>1,4</sup>, 仲内 悠祐<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構、<sup>2</sup>三菱電機株式会社、<sup>3</sup>大阪大学、<sup>4</sup>会津大学

小型月着陸実証機 SLIM(Smart Lander for Investigating Moon)は、小型・軽量の探査機によりピンポイント着陸の技術実証を行う計画である。従来の月着陸機が数 km～数 10km 程度の着陸精度であったのに対して、SLIM では 100m 精度の着陸（ピンポイント着陸）の実現を目指しており、画像照合航法や着陸誘導制御技術などの開発を行ってきた。また、三次元積層造形による衝撃吸収材や二段階着陸方式など、小型軽量の機体で傾斜地などの非平坦地に軟着陸するための技術開発も行っており、これらにより、「降りやすい所に降りる」から「降りたい所に降りる」着陸へのパラダイムシフトを、今後の重力天体探査にもたらすことが期待される。

SLIM 計画の主目的は上記の通り技術実証にあるが、月面着陸後にもいくつかの活動を予定しており、その 1 つが近赤外分光カメラによる科学観測である。これは、ボルダーを観測して月マントル物質の Mg# の推定を試みる地質探査計画であるが、このような観測を行うためには、月マントルに由来されると考えられるボルダーの近傍から観測を行う必要がある。そのようなボルダーが分布していると考えられる領域は、既に月周回衛星 SELENE のデータ解析から特定されており、SLIM が「降りたいところに降りる」技術を実現することで、ターゲットとなるボルダー近傍に着陸して観測を行うことができるようになる。具体的な着陸候補地点としては、「神酒の海」付近の SHIOLI クレータ近傍を予定している。

SLIM 探査機は現在、フライトモデルを組み上げて各種の試験を実施しているところである。本発表では、SLIM の狙いととも、これらの開発状況についても紹介する。



図 1 システム試験中の SLIM 探査機

# 月極域探査機（LUPEX）プロジェクトの現状

○麻生大<sup>1</sup>，星野健<sup>1</sup>，大竹真紀子<sup>2</sup>，石原吉明<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構（JAXA），<sup>2</sup>会津大学

**1. 緒言：**LUPEX は月極域に着陸してローバによるその場観測を行い，水氷の存在量や形態，分布などを調査し，それらの将来の資源としての可用性を評価するためのデータを取得するインド宇宙研究機関（ISRO）等との国際協力ミッションである。2022年7月，LUPEXはプロジェクトとして正式に国に了承され，成果創出を担うアウトプット創出チーム（Output Data Creation Team：ODCT）も立ち上げられた。

**2. LUPEXの観測機器：**ローバに搭載される観測機器は①水資源分析計（REIWA），②近赤外画像分光装置（ALIS），③中性子検出器（NS），④地中レーダ（GPR），⑤表層分圧計（EMS-L），⑥中間赤外画像分光装置（MIR）である。①②JAXA，④⑥ISRO，③NASA，⑤ESA 開発。

**3. ODCT活動内容：**ODCTは探査機が取得する観測機器データを処理・解析し，それらを統合した成果物の作成を担う。加えて，それに必要な観測・データ処理の計画立案，データアーカイブ，成果論文の計画立案，プロジェクトが行う着陸地点検討の支援なども行う。

ODCT活動により作成するアウトプットプロダクトの範囲

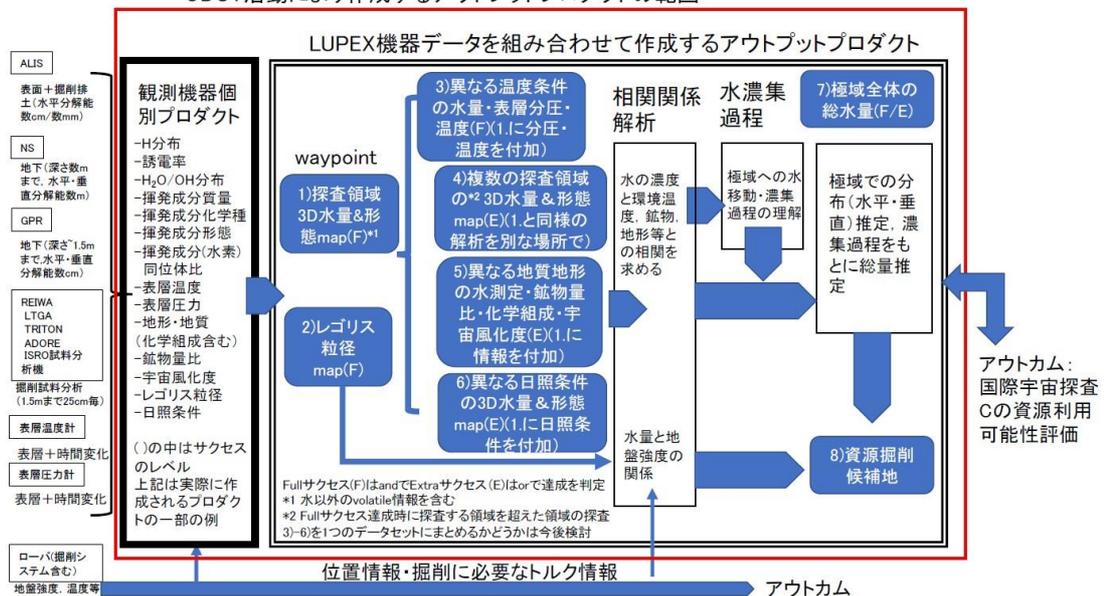


図. JAXA ODCT 活動により作成するアウトプットプロダクト

**4. 結言：**LUPEXの含水率の直接定量計測，高精度な垂直方向の探査，多様な環境の水平方向の探査，サバイバビリティは他国の月極域探査機に対して有する優位性であり，他国に大きく遅れなければ，LUPEXの意義価値は維持される。LUPEXで獲得したデータ・技術・知見等を次期月面探査フェーズの表面探査機開発に活用することが期待される。

# 月表層の水探査に向けた中性子生成および 輸送シミュレーション

○草野広樹<sup>1</sup>、長岡央<sup>2</sup>、榎戸輝揚<sup>2</sup>、晴山慎<sup>3</sup>

<sup>1</sup>量子科学技術研究開発機構、<sup>2</sup>理化学研究所、<sup>3</sup>聖マリアンナ医科大学

月の水は有人宇宙活動の資源の候補であり、利用可能性を探るために存在量と分布の把握が重要な課題と認識されている。月では過去の探査で極域に水の濃集が示唆される観測データが得られており[e. g. 1, 2]、現在、世界各国で着陸ローバによる水探査計画が推進されている。地下の水の存在量を測定する有力な方法の一つが中性子分光である。月面では、銀河宇宙線により土壤中で生成された中性子が地下で散乱を繰り返し、一部が表面から放出されている。水素原子核は中性子を効果的に減速させるため、表面の中性子エネルギーおよび強度は地下の水分量を反映している。従って、周回衛星や着陸ローバから中性子を計測することで、地下の水分量の推定が可能である。

本研究では、月面における水探査のための中性子分光計の開発に向けて、銀河宇宙線による月表層での中性子の生成・輸送をモンテカルロシミュレーションにより計算し、地下の水による影響の評価を行った。先行研究[e. g. 1, 3]により、水分量に対して特に熱外中性子の感度が高く、土壤中に一様に水を含む場合は水分量の増加に伴って熱外中性子強度が減少することが知られている。しかし、月土壤中の水の分布は未知であり、狭い領域の観測を行う着陸探査では局所的な分布状態の影響を受けることが予想される。本研究では、これまでに研究例[3, 4]が少ない水の存在形状の影響に注目した。月地下の含水層の水分量、深さ、厚さを変化させて計算した結果、表面中性子の強度やエネルギースペクトルは、水分量だけでなく含水層の深さや厚さに依存していることが分かった。一例として、表層 1.5 m 以内に含まれる水の総量を一定とした場合の熱外中性子強度は、一様な水分布を仮定した場合と比較して、含水層が深さ約 10 cm 以内に存在する場合は増加し、20-50 cm 程度の深さに存在する場合は減少する傾向を示した。同様に、含水層が深さ約 30 cm 以内に存在する場合、熱中性子強度は大きく増加し、高速中性子強度は減少する傾向を示した。これらの結果は、表面から放出される各エネルギー帯の中性子が土壤中で生成・減速される深さと関連している。従って、表面の中性子強度は地下の水の深さ分布の影響を受けるため、中性子分光計による観測データの解釈には注意を要する一方、熱中性子から高速中性子まで幅広いエネルギー範囲の計測を行うことで、水分量と存在深さの情報を得ることが可能であると考えられる。

参考文献：[1] A. B. Sanin et al., *Icarus* 283 (2017) 20-30. [2] S. Li et al., *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115 (2018) 8907-8912. [3] D. J. Lawrence et al., *J. Geophys. Res.* 111 (2006) E08001. [4] D. J. Lawrence et al., *J. Geophys. Res.* 116 (2011) E01002.

# 月極域探査にむけた着氷月レゴリスシミュラントの近赤外スペクトル測定

○加藤礼也<sup>1</sup>、佐伯和人<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大阪大学 理学研究科 宇宙地球科学専攻

月の自転軸の傾きが太陽に対して1.5度と小さいため、極付近にクレーターなどのへこみが存在するとその領域には一年を通して日が当たらない。このような領域を永久影とよぶ。永久影領域内部は110K以下であると推測されており、そのためどこからか供給されたH<sub>2</sub>O分子が氷となり長期間保存されていると考えられる。永久影に存在する水氷の具体的な量や分布はまだ明らかになっていない。それらを調査するための月極域探査LUPEXが計画されており、この調査では近赤外画像分光装置ALISを用いて月極域表面土壌の近赤外反射スペクトルを測定する予定である。本研究は、この極域探査に適用可能な水氷の検量線を様々な種類のレゴリス模擬物質から集める活動の一環である。

今回は月の海のレゴリスシミュラントとして清水建設製のFJS-1を、月の高地のレゴリスシミュラントとして東京大学の宮本英昭教授が試作したものを使用した。試料はふるいにかける粒径をそろえた(75-125 $\mu$ m、125-180 $\mu$ m)。先行研究(Ogishima and Saiki, 2021)で作成された着氷装置を用いて試料表面に微量の氷をつけ、近赤外領域の反射スペクトルを求めた。着氷率を変えて実験を行い、波長1500nm付近にある水氷の吸収の深さと着氷率の検量線を求めた。結果、着氷率が大きくなると水氷の吸収が深くなるという検量線が得られた。先行研究(Ogishima and Saiki, 2021)で行った斜長石・かんらん石単体を用いた実験の結果と比較すると、シミュラント試料の反射率は低く、水氷による吸収深さも小さく検量線の傾きも小さいものとなった。透明鉱物単体と比べて低い反射率、および小さい検量線の傾きはシミュラント試料中に含まれるイルメナイトや磁鉄鉱といった不透明鉱物が原因だと考えられる。実験で用いた試料の組成を調べると、海のシミュラント中には約4vol.%、高地のシミュラント中には約5vol.%の不透明鉱物が含まれている。アポロ計画により月の海で採取されたレゴリスには採取場所によって1%から20%程度の不透明鉱物が含まれ、高地で採取されたアポロ16号のサンプルには~4%程度の不透明鉱物が含まれており、全体として不透明鉱物量が多いと反射率が低くなるという相関がある。本研究で用いた海のレゴリスシミュラントの波長1500nmでの反射率は約6%と低く、水氷による吸収の検出が困難であった。これ以上に不透明鉱物を多く含む領域では検量線を求めることは難しいかもしれない。高地のシミュラントの反射率は不透明鉱物を5vol.%も含んでいるにも係わらず約40%で実際の月の高地よりも明るかった。反射率が高いと水氷による吸収も検出しやすく、検量線の傾きも大きくなった。

# 月の永久影領域における水分子の コールドトラップシミュレーション

○ 佐伯 和人<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大阪大学 理学研究科

月には太陽光の直達光が入射せず極低温に保たれる永久影と言われる領域がある。この領域では水のような揮発性物質を捕獲するコールドトラップが行われていると考えられている。コールドトラップやその後の水分子のレゴリス空隙内の移動のメカニズムとしては、レゴリス粒表面での昇華・凝華の繰り返しと考えられているが、レゴリス温度から推測される昇華・凝華速度では多くの水分子がまだ地下に移動できないうちに隕石衝突によって四散してしまう。そこで、最初に跳んできた水分子がすぐには凝華しないでレゴリス間隙を何度か跳躍しながら運動エネルギーを失った後、凝華するという水分子移動モデルを考えた。このような移動をする可能性を実証する室内実験を始めているが、その結果と比較するためのモンテカルロシミュレーションも併行して始めた。本発表では、この数値シミュレーション部分の結果を発表する。水分子が飛来した際、レゴリスと衝突し、ある確率で凝華し、ある確率で再放出するというシンプルなモデルを考える。その確率を付着率とした。レゴリスの形状はまずは単純な球体とし、六方最密構造で積み上げた。さらに、この球体の半径を小さくすることで、空隙率を変化させた。なお、シミュレーションプログラムは水分子とレゴリス球の集合体との衝突判定を行うので、将来的には複雑な形状のレゴリスも、複数の直径の異なる球の集合体とすることで表現可能である。衝突した水分子の再放出方向確率密度分布は真空下で起こりうる現象として余弦則に従うと仮定し、水分子が跳躍した軌跡を追跡することで水濃度初期深度グラフを作成した。結果、空隙率の増加や、付着率の低下に伴って、より下層のレゴリス球まで到達するという予想通りの結果となった。アポロ試料のごく表層のレゴリスの空隙率は、74~87%であるとする情報があるが、ここで、興味深いのは、今回、3次元的にレゴリスを配置した中で立体的な跳躍モデルを試したが、空隙率90%のケースと、Schorghofer and Taylor (2007) でやられているレゴリス形状を考慮しない1次元拡散モデルによる水分子深度分布シミュレーションで使われていた、跳躍距離をレゴリス粒径程度とする仮定による1次元ランダムウォークシミュレーションの結果と比較してみたところ、跳躍距離の近似としてオーダーの範囲であっていることがわかった。今後は、実際の月レゴリスをX線CTで3D形状計測したデータをもとにつくったレゴリス形状球体集合近似モデルを使って、より本物に近いモデル月土壤の中でのシミュレーションを試したり、単純な吸着率ではなく、高速運動する分子がコールドトラップされた直後の凝華や昇華の物理モデルを取り入れたシミュレーションに進化させて、室内実験結果と比べることを計画している。

## 月表土内部における水分子の捕獲過程

○橋爪 光<sup>1</sup>

<sup>1</sup>茨城大学理学部

近年、月極域において水素が濃集していることが、中性子分光法などのリモートセンシング手法により観測されている。しかし、この水素濃集の仕組みはまだ解明されていない。この水素濃集が水の濃集を見ているとして、その可能性として大別して二つの過程が考えられている。一つは永久影領域において月面の最表層に水が凝縮・吸着されるもの、もう一つは、日照域において表土の内部に水が浸透し、内部のある深さに水が捕獲されるものである。本研究では、後者の過程に関する数値シミュレーションを実施し、その結果を紹介する。

日照光が直接入射する領域では、たとえ高緯度域であっても、昼間には相当な温度まで昇温する。例えば、緯度 85 度の平坦な月面においては、昼間の最高到達温度は 190 Kelvin 以上と見積もられる。この温度では、月面に凝縮した水氷は速やかに昇華し失われてしまう。しかし、この昇華し生成された水蒸気はすべてが月面上空に失われるのではなく、一部が表土の内部に浸透し、内部のある深さに固定・蓄積される、という Schorghofer & Aharonson (2014) が提案したポンピング効果と呼ばれる過程である。

この過程は、月面上空を飛行し月面に降着し一旦表土最上面に捕獲された水分子が、日照と共にその一部が月表土内部に向けて拡散することに伴い進行する。日照熱も水蒸気も拡散方程式に従い伝搬されるが、月表土のような多孔質物質内では熱より水蒸気の方が拡散が速いことによりこの効果が発生する。表土内部で、水分子の蒸発・移動・鉱物表面への吸着または凝縮を繰り返し、わずかずつ表土内部に水が運ばれ蓄積する仕組みである。

本研究では、表土内の 1) 熱伝導、2) 水蒸気拡散、3) 鉱物表面への水分子の吸着や凝縮の結果表土内各所で実現する水蒸気圧、4) 凝縮・吸着に伴う蒸発潜熱、の見積を組合せた数値シミュレーションを実施した。各緯度で期待される含水層の深さ、厚み、などを紹介する。現時点までに、緯度と月面に到着する水フラックスの二つのパラメータに対する応答を調べた。

ポンピング効果により、水は、表土内の特定の深度に固定・蓄積される。ポンピング効果は、表土内温度が日照に伴い上下することを駆動力に進むため、温度の上下がない表土深部には、この効果単独で水は運ばれない。一方、ガーデニング効果は表土を攪拌するので、ポンピング効果により一定深度で固定された水の一部を、攪拌に伴い、より深い深度に運ぶ役割を担うことが期待される。本研究では、ポンピング効果とガーデニング効果を組み合わせた場合に、表土内の水分分布が長期間の間にどのように進化するのか、その簡単なテストケースの評価を行ったので、講演において紹介する。

### 月極域で検出された揮発性成分の化学種と分布域の推定

Composition and distribution of the detected volatile materials  
at the lunar polar region

○大竹真紀子（会津大），田中智（宇宙研），仲内悠祐（宇宙研），  
小野寺圭祐（東大地震研），長岡央（理研），西谷隆介（会津大）

近年のリモートセンシング手法による複数の観測データから，月極域に水が存在することが報告されている．これら水は高緯度ほど濃度が高いとの観測事実から，月面上で低温領域への水分子の輸送による濃集があったと推定されている．一方，月面上の水の主な起源は彗星など衝突天体による供給，または太陽風により水素として供給された外来性の水であると考えられている．ただし，先行研究では，中性子分光観測による報告では水素原子の検出であり直接水氷を同定できていない，赤外分光観測の報告では水酸基なのか水分子なのかの識別ができていない，など課題があり，月極域の水氷の有無や起源については現在も議論が続けられている．

これまでの研究で我々は，月周回衛星「かぐや」に搭載されたスペクトルプロファイラ (SP) による可視・近赤外波長域の分光観測データの解析により，月極域で水氷の存在を同定した．該当のデータには水氷以外の揮発性成分に起因すると考えられる吸収も存在するが，吸収の波長・形状が単一の化学種では説明が困難であるなど理由から，吸収の起源物質の同定には至っていなかった．

今回の研究では水氷以外の吸収について，想定される揮発性成分の化学種毎の吸収強度モデル計算や既存の実験室データとの詳細比較により，起源物質の同定を試みた．結果，水氷以外にも水蒸気，メタン (g)，アンモニア (g) を同定した．また，それら吸収の強度分布を調べることで，化学種毎に極域内の分布域を把握した．LCROSS による人工物の月面衝突実験にともなう放出物の観測を除き，月極域における自然環境下でのメタンやアンモニアの検出は，今回我々が初めて報告するものであり，この発見は月極域に存在する揮発性成分の起源を推定する上で非常に重要な情報となる．科学的な観点に加え，今後の揮発性成分の資源利用の観点でも意義は大きい．発表では化学種毎のスペクトル特徴や分布域を紹介し，月極域における揮発性成分の挙動について議論する．

## 月極域で検出された揮発性成分を含む スペクトルの吸収強度評価

Evaluation of the spectral absorption intensity of volatile materials  
observed at the lunar polar regions

○西谷隆介<sup>1</sup>, 大竹真紀子<sup>1</sup>, 田中智<sup>2</sup>, 仲内悠祐<sup>2</sup>, 小野寺圭祐<sup>3</sup>, 長岡央<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>会津大学, <sup>2</sup>JAXA 宇宙科学研究所, <sup>3</sup>東京大学地震研究所, <sup>4</sup>理化学研究所

近年、複数の月探査機によるリモートセンシング観測から月極域には水氷が存在する可能性が示唆されている。しかし、これら観測データは水素原子の濃集 (Mitrofanov et al., 2010) や水または OH 基に起因する 3 μm 付近での吸収 (Pieters et al., 2009) を示すもので直接的に水氷の存在を示すものではなかった。もしくは衝突体を月面に衝突させた際の放出物中に含まれる揮発性物質を観測したもの (Colaprete et al., 2010) で、普遍的な水氷の存在を示すものではなかった。そのため、水氷の存否や分布についてはまだ結論が出ていない。

我々はこれまでに、月周回衛星「かぐや」に搭載されるスペクトルプロファイラによる可視・近赤外スペクトルの解析から月極域における水氷の存在を明らかにしてきた。さらに今回の講演までに、水氷以外の吸収として新たに水蒸気・メタン・アンモニアなどの揮発性成分の存在も同定している。これらの揮発性成分を同定したスペクトルの特徴や月極域での分布については大竹らの講演で紹介予定である。

本研究では、気体の吸収線データベースである HITRAN (Gordon et al., 2022) を用いて観測された各揮発性成分についてさまざまな分圧・光路長での吸収スペクトルを作成し、観測スペクトルとの比較を行った。その結果、揮発性成分にも依るが、観測スペクトルと同程度の吸収強度を得るためには  $10^{-10}$ - $10^{-11}$  気圧程度の揮発性成分と数十 km 程度の光路長が必要であることが分かった。このことから、観測された揮発性成分は鉛直方向にある程度の空間的広がりを持って分布している可能性がある。発表では、以上の結果の詳細を紹介するとともに月極域での揮発性成分量やその空間的広がりについて先行研究と比較をしながら議論する。

SB-01

## 惑星形成理論と惑星探査に関する取り組み

○兵頭龍樹

JAXA

これまで、衛星、リング、小天体、微惑星などの形成と進化に関して、解析的手法と数値計算を用いて、その理解の深化を理論的に図ってきた。また、Cassini 探査計画、はやぶさ 2、MMX 計画、BepiColombo 探査計画、次世代 SR 計画、日本初の外惑星探査×メインベルト小惑星マルチフライバイ計画（通称 OPENS 計画）などに参加している。

本講演では、発表者のこのような惑星形成理論と惑星探査におけるこれまでの活動を紹介させてもらう。

## リュウグウはかく語りき

## Thus spoke Ryugu

○ 巽 瑛理<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). <sup>2</sup> 東京大学

Hayabusa2 delivered the samples from the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu in Dec. 2020. Currently the samples are analyzed by the researchers all over the world. Ryugu has been revealed to be compositionally similar to the CI chondrites from laboratory-based analyses (Yokoyama et al. 2022). As a next step, we need to integrate our understandings from remote-sensing observations to sample analyses to obtain a new perspective on our Solar System. Especially, the asteroids similar to Ryugu can be a possible carrier of water and organics to the Earth. In this talk, we will review the remote-sensing observations to summarize the understandings of the evolution of Ryugu from the parent body to the date and discuss the context of Ryugu in the Solar System according the ground-based observations.

The crater distribution allows us to estimate the surface age of Ryugu. Based on the laboratory experiments, the large craters on Ryugu were anticipated to be formed by the gravity dominant cratering (Tatsumi & Sugita, 2019). Thus, the surface age of Ryugu was estimated as young as several Myr (Sugita et al. 2019). We have found several surface features which relate to the evolution of the asteroid from the remote-sensing observations, such as bright exogenous boulders, fresh areas around polar regions and small craters. The bright exogenous boulders imply the collisional disruption between Ryugu's parent body and S-type asteroid(s) (Tatsumi et al. 2021a). Small craters and fresh areas of polar regions imply the surface spectral evolution caused by space weathering and the possible original blueish material of Ryugu (Morota et al. 2020, Tatsumi et al. 2021b). Moreover, the bi-modal color distribution of small craters suggests the close approach of Ryugu to the Sun in recent history (Morota et al. 2020).

Looking at the macroscopic characteristics of Ryugu, the NUV to VIS spectrum of Ryugu can be classified into the F type in Tholen's taxonomy, which is characterized by flat NUV reflectance spectra (Tatsumi et al. 2022). By analyzing the photometric surveys, ECAS and SDSS, we found that the distribution of F types is peculiar in the current Solar System, i.e., they concentrate mostly in the inner main belt (Tatsumi et al. in revision). Assuming that the typical F type composition is tagged with CI chondritic materials like Ryugu, they might formed relatively far from the Sun among other carbonaceous chondrites, but had been displaced into the current relatively close orbits to the Sun. This dynamical evolution can be addressed by future model calculations.

**References:** Yokoyama et al. (2022) *Science* DOI:10.1126/science.abn7850. Tatsumi & Sugita (2018) *Icarus* 300, 341-359. Sugita et al. (2019) *Science* 364, 252. Tatsumi et al. (2021a) *Nature Astronomy* 5, 39-45. Morota et al. (2020) *Science* 368, 654-659. Tatsumi et al. (2021b) *Nature Communications* 12, 5837. Tatsumi et al. (2022) *A&A* 664, A107. Tatsumi et al. (in revision) *A&A*.

# 将来の月探査に向けた テラヘルツ帯での誘電率に関する検討

○小林 真輝人<sup>1</sup>, 宮本 英昭<sup>1</sup>, 山田 崇貴<sup>2</sup>, 王 蘇芸<sup>2</sup>, 笠井 康子<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東大 <sup>2</sup>NICT

近年の月探査により特に極域における水氷の存在が示唆されてきた[e.g., 1]。この水氷の存在・存在量・分布の解明は科学的・資源的な観点で今後の探査の最重要課題の一つである。特に資源的な観点からは、有人・無人探査でアクセスが比較的容易な地下数十 cm までの情報を得ることこそがその場利用可能な宇宙資源として今後の月面開発に重要となるであろう。そこで我々はこの地下数十 cm までの水氷や金属資源の存在・分布・存在量の解明を主目的としたテラヘルツセンシングを用いた広域資源探査 Lunar Terahertz SURveyor for Kilometer-scale Mapping (TSUKIMI)を計画・進行中である。

我々が計画中のテラヘルツセンシングでは、物質からの放射エネルギーをパッシブ観測することで輝度温度を計測すると同時に偏波観測を行うことで FOV 中の地下数十 cm までの平均誘電率を推定する予定である。周囲の誘電率と比べて局所的に誘電率のアノマリーが観測された場合、この誘電率差を定量することで水氷や金属資源の分布や存在量解明につながると考えている。そのため、月表層付近に存在するレゴリスそのものの誘電率及びその中に水氷や金属資源が存在した際の誘電率変化に関する知見が月表層資源の分布や存在量解明に重要な役割を持つであろう。

しかし、月レゴリスのテラヘルツ帯での誘電率は不明な点が多いのが現状である。特に、UHF 帯などで重要となるさまざまな依存パラメータがテラヘルツ帯でも同様な挙動をうむかはわからないため、これらの検討なしには実際に観測で得られる誘電率を用いた資源量の定量は不可能である。

そこでまず、発表者らがこれまでに取得した UHF-SHF 帯での月シミュラントの誘電率測定結果を利用し、物理モデルを導入することで任意の周波数・温度下での月シミュラント誘電率推定手法を検討した。これによると、テラヘルツ帯での月レゴリス誘電率は UHF 帯などと異なり、低温下では誘電率は温度依存性を持たないことが示唆された。また、テラヘルツ帯での誘電率は UHF 帯での誘電率よりも低いことが予想され、水氷の誘電率と差が大きくなることから、テラヘルツセンシングによる観測が水氷検出に有用であることが示唆された。さらに、月地下の密度構造や熱拡散モデルを導入することで地下数十 cm までの誘電率構造を計算し、テラヘルツセンシングで得られると期待される誘電率の制約を行った。本発表ではこれらのテラヘルツ帯での誘電率推定手法とそこから得られた結果について紹介し、TSUKIMI での観測時に得られる誘電率について議論を行う予定である。

Reference: [1] Colaprete et al. (2010) *Science*.

# 月面探査ローバへの応用を想定した 3D ライダー地形図の精度評価

<sup>1</sup>梁 晨 <sup>1</sup>大竹 真紀子 <sup>1</sup>山田 竜平

1) 会津大学

これまでの惑星表面探査において、ローバの走行に必要な周囲の地形や障害物等情報の取得には主にカメラなどの光学センサーが用いられている。ただし、月極域など太陽光が十分に届かない領域の探査においては、3D ライダー手法を用いた周辺地形図の作成など、能動的な手法による情報収集が有効である。また太陽光が十分に届く領域であっても、光学センサーに加えて 3D ライダー手法を組み合わせることで、取得する地形情報の精度向上が期待できるなど、将来の惑星探査において 3D ライダー手法を用いる意義は大きい。

本研究では月表面探査ローバでの使用を想定し、屋外の不整地で 3D ライダーを用いた周辺地図生成実験を行い、作成した地形図の水平・垂直位置精度を評価した。

実験では福島ロボットテストフィールドの不整地エリアにコーンなど人工物を数メートルおきに設置し、その周囲を台車に搭載した 3D ライダーを移動させ、得られたデータを LOAM (Laser Odometry and Mapping) アルゴリズムで処理し、実験エリアの地形図を作成した。作成した地形図内において、設置した人工物間の距離を求め、それと実空間での距離実測値を比較し、両者の差分を誤差として評価を行った。結果、例として、平均走行速度 0.29m/s、最大表面凹凸が 0.12m の時に、2m~8m の距離にある物体で誤差約 0.3m であり、平坦地（平坦地での地図生成精度：約 0.1m）での成果と比べて悪い結果となった。また同じ表面凹凸状態のエリアにおける実験でも走行ルートによっては物体までの距離が取得できない場合もあった。加えて、走行ルートの表面凹凸の微妙な違いにより、物体の輪郭が三次元地図内で不明瞭であり、識別できない事も見られた。

物体の輪郭が識別できない原因として、不整地の凹凸とレーザー照射部の地面からの高さや、台車の走行速度に依存して 3D ライダーから照射されるレーザー光の出射方向が時間変動するため、これらが作成される地形図の精度に影響する可能性が考えられる。そのため表面凹凸を人工的に制御した状態で各パラメータの依存性についても調査を行った。発表では、比較対象になる平坦地でのデータを取得したのち、人工的に作成した傾斜台を用いて、地面の凹凸を変換させ、レーザー照射部の地面からの高さ、走行速度を制御し、そこから作られる地形図の精度を評価した結果についても紹介する。

## 月表層における微小スケールの起伏の検討

○竹村知洋<sup>1</sup>, 吉岡航輝<sup>2</sup>, 宮本英昭<sup>1</sup><sup>1</sup>東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻<sup>1</sup>東京大学工学部システム創成学科 C コース

月表層に存在する起伏はクレーターやボルダーといった全球に普遍的な地質学的特徴をはじめリッジ等の地域的な地質構造に至るまで、様々なスケールにおいて介在する地質学的プロセスの痕跡を色濃く反映している。特に月表層におけるマイクロメートルスケールからセンチメートルスケール程度の微小スケールの起伏は、過去に介在した地質学的プロセスに関する情報に加え、地表面の起伏を構成する物質やその粒径等の特徴をより直接的に反映していると考えられる。このような微小スケールの起伏についての解析は、表面状態の観測から地質学的プロセスやレゴリスの性質に関するさらなる情報を得るための端緒となる可能性があり、非常に重要である。また同時に、月表面における微小スケールの起伏はレーダー散乱に支配的であることも指摘され、その性質を把握すること自体が今後の観測において月表層物質の特性を正確に理解するために重要であると考えられる。

月表層では過去の探査機による観測から高解像度な標高データが獲得され、サブミリメートルスケールからキロメートルスケールまでの起伏に関して様々な解析が行われてきた。しかし、ミリメートルスケール以下の微小スケールの標高データは、月地表面に近接した状態で取得する必要があり、限られた地点でのデータ獲得、その解析のみしか行われていない[1, 2]。そこで本研究では様々な性質を持つ月表層模擬物質によって作製した模擬月地表面の解析をミリメートルスケール以下で行うことによって、月表層における様々な微小スケールの起伏の性質を推定する。また、推定された起伏の性質から、地表面の構成物質や堆積状態との関連を検討した。

本研究では数通りの物質、粒径分布を持った月表層模擬物質を作製し、それらを様々な方法で堆積させた模擬月地表面の三次元モデルを作成した。作成した三次元モデルについて様々な指標(RMS height, RMS slope, Local fractal dimension)を用いて評価を行った。評価の結果、特に月表層模擬物質の粒径分布をアポロ試料でみられる最も粗いものから最も細かいものへと変化させた際、マイクロメートルスケールにおける RMS slope に 5-10°程度変化が生じることがわかった。本講演では起伏の評価結果の詳細について報告する予定である。

## ■ 参考文献

[1] Helfenstein & Shepard. *Icarus* **141**(1), 107-131 (1999).[2] Guo et al. *Geophysical Research Letters* **48**(19), e2021GL094931 (2021).

## LRS データの地表面クラッター除去および月の地下構造解析

○野澤仁史<sup>1,2</sup>、春山純一<sup>2</sup>、熊本篤志<sup>3</sup>、岩田隆浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>総合研究大学院大学、<sup>2</sup>宇宙科学研究所、<sup>3</sup>東北大学大学院

月の地下構造は表面地形から十分に読み取ることでできない月の火山地形の形成メカニズムや熱進化史を理解する上で重要な鍵である。SELENE(かぐや)に搭載された月レーダーサウンダー(LRS)は、月の上空約 100km から電磁波を送信し、地下からの反射信号を受信することで地下構造に関する情報を得ることができる(Ono et al., 2010)。これまでの LRS 観測により、月の多くの海領域において異なる溶岩層の間に形成したレゴリス層からの反射と考えられる数十～数百 km にわたる地下エコーが発見されている(Ono et al., 2009)。これは従来、月における溶岩噴出メカニズムとして考えられている洪水玄武岩型の溶岩噴出と整合的であり、月の地下浅部が比較的単純な成層構造を取っていることを示している。一方、静かの海では地球上の楕状火山によく似た火山地形が複数見つかっており (Spudis et al., 2013)、放射性熱源やマグマ中に取り込まれた揮発性物質によって、同じ火山口から間欠的な溶岩噴出が起こった可能性が考えられる(Qiao et al., 2017)。このような楕状火山領域の地下では、地下深部から表層へマグマを輸送するダイク構造や表層付近でマグマを水平方向に輸送するシル構造が複雑に形成していることが考えられる(Head and Wilson, 2017) (Head and Wilson, 2020)。ダイク構造やシル構造は水平スケールが数 km 程度の局所的な地形であると考えられるが、局所的な地下エコーは側方地形からの地表面散乱クラッターと区別することが難しく(Kobayashi et al., 2020)、これまでの LRS 解析からは発見されていない。

本研究では、SELENE/TC カメラ画像から作成された高分解能数値標高データ(DTM)を用いて地表面散乱シミュレーションを行い、LRS 観測データと比較することで LRS データ内に含まれる地表面散乱クラッターを除去することを試みた。これにより、静かの海の楕状火山領域におけるダイク構造およびシル構造の存在や分布を調査する。

調査の結果、地表面散乱シミュレーションの結果は LRS 観測データに存在する地表面散乱クラッターをよく再現できていることがわかった。さらに、静かの海の 3 つの LRS 側線に表面地形では説明できない点状のエコーが確認された。複数側線に存在するエコーは同程度の深さに位置していることから、東西方向に伸びるシート状のダイク構造または、シル構造である可能性を示した。本公演では、識別した地下エコーに対して、FDTD 法を用いた電磁伝搬シミュレーションを用いて、より詳細な地下構造の推定結果について報告する。

## 分光リモートセンシングによる地質解析に基づく月上部マントル組成の研究

## Study of the composition of the lunar upper mantle based on geological analysis using spectroscopic remote sensing

○山本聡<sup>1</sup>, 大竹真紀子<sup>2</sup>, 長岡央<sup>3</sup>, 鹿山雅裕<sup>4</sup>, 唐牛讓<sup>5</sup>, 石原吉明<sup>5</sup>, 春山純一<sup>5,6</sup>

1) 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 2) 会津大学 コンピューター理工学部 3) 理化学研究所 4) 東京大学 総合文化研究科 5) JAXA 国際宇宙探査センター 6) JAXA 宇宙科学研究所

月の上部マントル組成について議論を行う上では、巨大衝突盆地の周囲でどのような鉱物組成の岩体が分布しているかを知ることが重要である。これまで、月周回衛星が取得したハイパースペクトルデータから、カンラン石に富む岩体が巨大衝突盆地の周辺にのみ分布していることが明らかとなった[1]。これらのカンラン石に富む岩体の詳細な層状解析などから、カンラン石に富む物質が月の上部マントルを支配していると提唱されている。特に、カンラン石に富む岩体は、地殻厚がほぼゼロになっているモスクワの海（盆地）や危難の海（盆地）の周辺に集中しており、上部マントルに含まれるカンラン石に富む物質が盆地形成により月面に撒き散らされた可能性が示唆されている[2]。一方、マントル全体を大規模に掘削したと考えられる南極エイトケン（South Pole-Aitken; SPA）盆地の北部放出堆積物領域がスペクトル的にCaに乏しい輝石（LCP）に支配的であることから、上部マントルはカンラン石ではなく、LCPが支配的であるという主張もなされている[3]。しかしながら、上部マントルがLCP支配であるという主張の根拠となる分光データは、レゴリス混合層の平均スペクトルについてであり、LCPに富む岩体を対象としたものではない。特に注意が必要なのは、LCPは分光学的に強い鉱物であり、他の月主要鉱物との混合物質では、わずか10%程度存在するだけで、平均スペクトルとしてはLCP支配として観測されることである。つまり、[3]による主張はSPA周囲のレゴリスには、様々な鉱物に加えてLCPがある程度含まれていたという話に過ぎない。また、月マントル形成に関する熱力学計算[4]や高温高压実験[5]によれば、マントル形成直後において~100km以深までpigeonite（LCPに対応）が支配的であり、上部マントルはカンラン石に乏しいが、形成直後の成層構造は上位ほど高密度であるため、重力的に安定状態への転倒（マントルオーバーターン）が起これると考えられている。この場合、SPA形成時の上部マントルにLCPに富む層が残っていたかは不明である。その為、月の上部マントルがLCPに支配的であったかどうかを議論する上では、巨大衝突盆地周辺のLCPに富む岩体の分布や層状についての詳細解析が必要である。

そこで本研究ではカンラン石岩体で行ったものと同じ解析方法により、LCPに富む岩体のSPA周囲の分布について、マルチバンドデータを使った分光学的地質解析を行った。本発表では、得られた結果に基づき月上部マントルの組成についての議論を行う。

[1] Yamamoto et al., Nature Geoscience, 3, 533-536, 2010. [2] Wieczorek et al., Science, 339, 671, 2013.

[3] Melosh et al., Geology, 45, 1063, 2017. [4] Longhi, Geochimica et Cosmochimica Acta, 70, 5919, 2006.

[5] Charlier et al., Geochimica et Cosmochimica Acta, 234, 50, 2018.

## アポロ短周期地震計データの解析による未検出月震イベントの探索

○ 今川裕喜<sup>1,2</sup>, 小野寺圭祐<sup>3</sup>, 田中智<sup>1,2</sup>, 川村太一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻, <sup>2</sup>JAXA 宇宙科学研究所,

<sup>3</sup>東京大学地震研究所, <sup>4</sup> Université Paris Cité / IPGP

現在までに月震のイベントカタログには約 12,000 の月震が記録されている。カタログの中には深発月震が 7,000 例程度、衝突月震が 1,700 例程度記録されている。一方で、浅発月震は、28 例と深発月震や衝突月震と比べて観測例が少ない。Nakamura [1]によれば、現在の月震のイベントカタログの大部分は長周期地震計(感度ピーク: 0.45Hz)で取得されたデータに基づいて制作されている。一方、短周期地震計(感度ピーク: 7Hz)で取得されたデータについては、人工ノイズが多く、現在までに大部分が解析されていない。

上記三種の月震のうち、浅発月震は、深発月震や衝突月震と比べて高周波(>2Hz)にエネルギーを持つ点を特徴とし[2], 断層活動に起因しているとされている[3]。他のイベントとは異なり、月内部の活動を強く反映していると考えられるため、浅発月震は、月の地震活動の指標として用いられている[4]。

しかし、実際のところ、浅発月震の卓越周波数帯に感度を持つ短周期地震計で取得されたデータは、十分に解析が行われていないため、未だ発見されていないイベントが存在していると考えられ、今までのカタログだけでは、月の地震活動を過小見積りしている可能性がある。

本研究では、波形の炮烙線や指数加重移動標準偏差を用いたノイズ除去手法を確立し[5], 短周期地震計のデータをイベント検出解析が可能な状態にした(図 1)。また、ノイズ除去後のデータに対して解析を行い、長周期計だけでは検出できなかった新しい月震イベントを発見した(図 2 に一例を示す)。その中には、浅発月震と似た特徴を持つイベントも複数確認されている。このこ

とは、月の地震活動度が過小評価されていた可能性を示唆する。

本発表では、イベントの検出手法と新しく検出された月震の特徴を紹介するとともに、月の地震活動度に関する考察を行う。

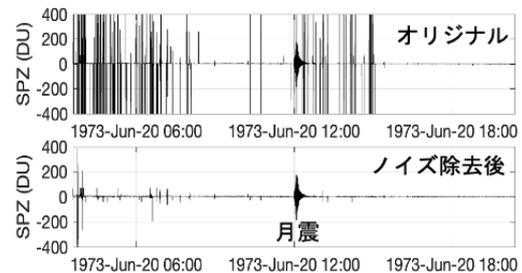


図1. ノイズ除去前のデータとノイズ除去後のデータの比較

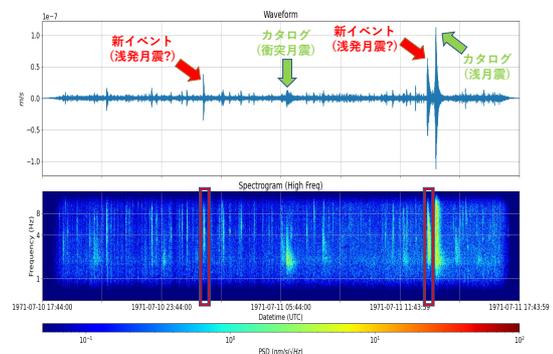


図2. ノイズ除去後の速度波形データ(上)とスペクトログラム(下)

## 参考文献

- [1] Nakamura, 2021.6, *pers. comm.*
- [2] Nakamura, 1977, *Phys. Earth Planet Inter.*, 14, 217
- [3] Watters et al., 2019, *Nature Geosci.*, 12(6), 411
- [4] Banerdt et al., 2020, *Nature Geosci.*, 13, 183-189
- [5] 小野寺他, 2021, 日本惑星科学会秋学会, p02-07

# Apollo 月震計データ配信を支える検索技術

Search technology to distribute Apollo lunar seismic dataset

○山本幸生<sup>1</sup> 平田成<sup>2</sup> 古庄 晋二<sup>3</sup> 飯沢篤志<sup>4</sup> 生座本義勝<sup>3</sup> 佐藤悠<sup>3</sup>

星野達也<sup>3</sup> 成川絃太<sup>3</sup> 伊藤秀典<sup>3</sup> 長尾正

<sup>1</sup>JAXA <sup>2</sup>会津大学 <sup>3</sup>株式会社エスペラントシステム <sup>4</sup>リコーITソリューションズ

Apollo ミッションで取得した月震データは約 7 年半の活動を経て継続的に取得された時系列データである。この膨大な時系列データを扱うために、過去には汎用のリレーショナルデータベースを用い、専門家によるチューニングを通して高速化を行った。今回私たちは新しいシステムの開発に伴い、バックエンドとして新たに D5A と呼ばれるカウンティングソートをベースとしたファイルフォーマットを採用し検索エンジンとして用いた。その結果、チューニングレスでオーバーヘッドの少ない高速なシステムの実現を可能とした。本講演では、新しい Apollo 月震データシステムの紹介と、それを支える巨大時系列データの検索技術について報告する。



図 1 新しい Apollo 月震計データ配信システム。

## 月の地震波散乱環境の定量評価と比較惑星学への貢献

小野寺圭祐<sup>1</sup>, 川村太一<sup>2</sup>, 田中智<sup>3</sup>, 石原吉明<sup>4</sup>, 前田拓人<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> Université Paris Cité/Institut de Physique du Globe de Paris,

<sup>3</sup> 宇宙科学研究所, <sup>4</sup> JAXA Space Exploration Center, <sup>5</sup> 弘前大学

月の内部構造は、地球-月系の形成過程やその後の進化過程の制約に必要な情報であり、近年では次世代月探査の最重要科学テーマの一つとして明示されている。地球でも用いられているように、地震波観測は内部構造を推定する上で有効であり、月に関しては、アポロ計画(1969-1977)にて地震観測が実施された[1]。現在までに、月震(月の地震)データを用いた研究により、複数の次元内部構造モデルが提案されているものの、各モデルの誤差範囲が大きく、未だ不確定な状況にある[2]。内部構造探査における一番の問題点として、月の強散乱環境が挙げられる。地震波が強い散乱を受けると観測波形がパルス形状のものから紡錘形に変化し、P波やS波などの読み取り精度が低下し、結果として得られる内部構造も不確定になる。当問題は、月に限らず、火星でも観測されている(図1)ことから、惑星地震学における共通の課題であり、重要なテーマの一つと言える。

本研究では、月における地震波散乱メカニズムならびにそれを生み出す地下の不均質構造の解明を目的に研究を行ってきた。概要としては、月環境を想定した複数のパラメータセットの下で三次元地震波シミュレーションを実施し、アポロデータを再現することで、順問題的に散乱構造を推定した。また、その結果をもとに地球・火星・月間での地震波散乱環

境の定量評価を行い(図2)、新しい視点での比較惑星学を開拓した。

本講演では、月の散乱環境の定量評価方法ならびに三天体間での比較から見えてくる各々の天体の地下不均質構造の違いについて紹介する。

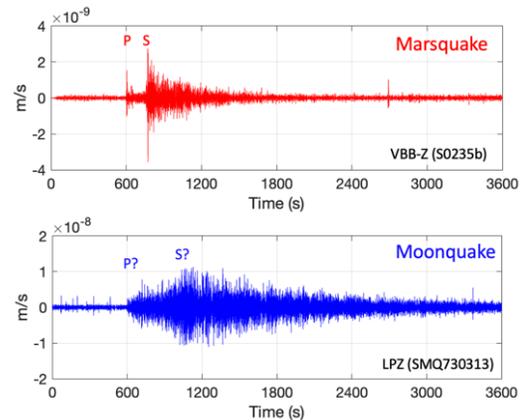


図1. 火震(上)と月震(下)の波形比較。

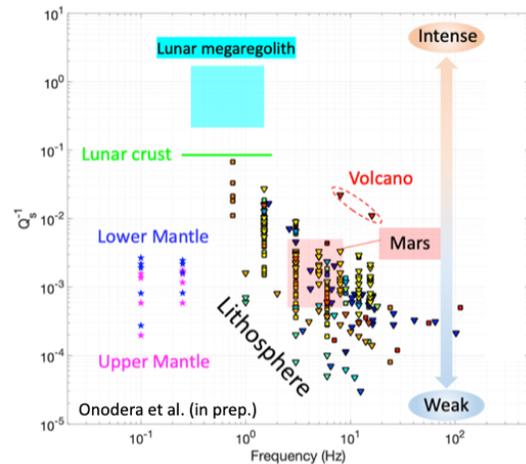


図2. 三天体間での散乱減衰率の比較。

### 引用文献

- [1] Latham et al. (1969), *Science*, 165, 3890.
- [2] Garcia et al. (2019), *Space Sci. Rev.*, 215:20.

## 月面衝突閃光の低分散スペクトルから分かったこと

○柳澤正久<sup>1</sup>、阿部新助<sup>2</sup>、小野寺圭祐<sup>3</sup>

<sup>1</sup>電気通信大学、<sup>2</sup>日本大学理工学部、<sup>3</sup>東京大学地震研究所

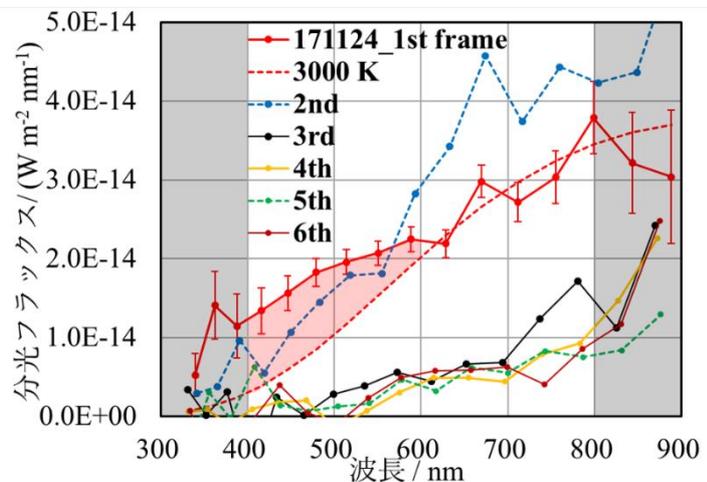
太陽系内の衝突は 10 km/s を越える速度で起こるものが多いが、このような高速度衝突では、固体惑星の主な構成物質であるシリケートや鉄等の熔融、蒸発、プラズマ化が起こる。これらの過程を伴う高速度衝突の理解は惑星科学にとって重要な課題であるが、10 km/s 以上の衝突速度は実験室での再現が難しいため、実際にどのような現象が起こるのかは十分には分かっていない。小天体の月面への衝突による閃光(月面衝突閃光)の観測はこの問題にアプローチする一つの有効な手段である。また、月面への衝突は地震波を励起し、その観測から月の内部構造を調べることができる。この場合、衝突閃光の観測は発震時刻と震源位置の情報を提供することができ、多くの地震計を設置することが難しい月震観測においても重要な役割を果たす。

高速度衝突現象の解明には月面衝突閃光のスペクトル観測が有用であるが、スペクトルに関する報告はごくわずかである。2016~2018年に電気通信大学(東京都調布市)から、低分散の簡易スペクトルカメラ(可視光)による月面衝突閃光のスペクトル観測が行われた。カメラは口径 450 mm のニュートン式反射望遠鏡に取り付けられた。波長分解能は約 40 nm と低い。

2地点以上からの観測で月面現象であることが確認された 18 の閃光についてスペクトルが得られた。光り始めを除いては 2000~4000 K の単一温度の黒体放射スペクトルでよく近似できること、光り始めには 400-600 nm の波長域で余剰の放射がある場合があることが明らかになった。これらの特徴をよく表している 2017 年 11 月 24 日の閃光のスペクトルについて説明する。

閃光が最初に現れた第 1 ビデオフレームから 6 フレームにわたっての地球で観測された分光フラックスの時間変化を図に示す。フレーム間隔は 16 ms である。ピンク色に影を付けた部分が余剰の放射である。余剰部分のエネルギーは、時間積分した 400-800 nm での全放射の 5% である。おそらく、ドロマイトなどを標的とした蒸発を伴う室内衝突実験で観測され、理論的にも予

測されている衝突初期の蒸気雲フレームからの放射によるものである。波長分解能を上げた観測をすれば、鉄やマグネシウムからの線スペクトルが見える可能性を示唆している。残りの 95% は高温の衝突放出物からの黒体放射と考えられる。黒体温度は約 3000 K であり、月震観測に寄与するための観測は、赤外カメラを使わなくても、可視光カメラで十分効率良く行えると思われる。



# 月衝突閃光の分光学的研究： 温度遷移と発光成分が発光に及ぼす影響

○奥山純吾<sup>1</sup>，阿部新助<sup>1</sup>，柳澤正久<sup>2</sup>，長谷川直<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 日本大学，<sup>2</sup> 電気通信大学，<sup>3</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

彗星や小惑星より放出された塵などの流星体は、地球大気に突入することで流星発光として観測が可能となる。しかし、質量が数 g（直径 cm）以上の流星体は地球への突入頻度が少ないため、より効果的な観測方法として期待されているものが月面衝突閃光（Lunar Impact Flash: LIF）である<sup>[1]</sup>。これは流星体が月面に衝突することによっておこる極短時間の発光現象である。地球と異なり大気の無い月では流星体は数十 km/s で減速することなく月面に衝突し、クレーター形成とともに砕けた地表成分と共に超高温・高圧化により熔融・昇華したガスや液滴を含むプルームが放出されると考えられている。分光観測された閃光の黒体に近似され温度はおおよそ 6000~2000K ほどとされている<sup>[2][3]</sup>。その「スペクトル」からは、衝突初期には短波長域に黒体からの超過が見られ、輝線発光が示唆される。そのため、室内実験において閃光を模擬し超高速撮影による分光計測に取り組み、流星体を模した弾丸を標的に衝突させることで、疑似閃光を発生させる。これでは再現可能な衝突エネルギーに限界はあり、既存のものでは衝突によるガス雲は流星体由来の発光と黒体成分が占めているとされている<sup>[4][5]</sup>。我々が行っているものでは、露光時間を 200ns にまで高速化させたことにより衝突直後の詳細な結果が得られた。特に水氷を標的とした場合においては衝突体由来の発光だけでなく、標的から電離した水素と水酸基が確認された。それぞれの発光成分はスペクトルにおいて突出した輝線となって検出され、それらを除き黒体近似により算出した温度はおおよそ 5000K から減少することが確認された。ただし、これは標的を設置したチャンバー内の大気圧が高い場合（2000Pa ほど）であり、大気圧力をさらに下げた場合（3Pa ほど）では、全体の発光強度や最高温度は低下し、衝突直後の輝線強度も低下した（Figure 1）。これにより室内実験では残留空気によるアブレーション量の増減が発光強度に影響していると考えられる。今後は試行回数を増やし、結果の精度を高めるのと共に衝突点に着目し、衝突エネルギーと温度・発光強度の相

関性について検証していく。

参考文献：[1] Suggs et al., 2013. [2] Liakos et al., 2017. [3] Yanagisawa et al., 2020. [4] J. Tandy et al., 2020. [5] Fuse et al., 2019.

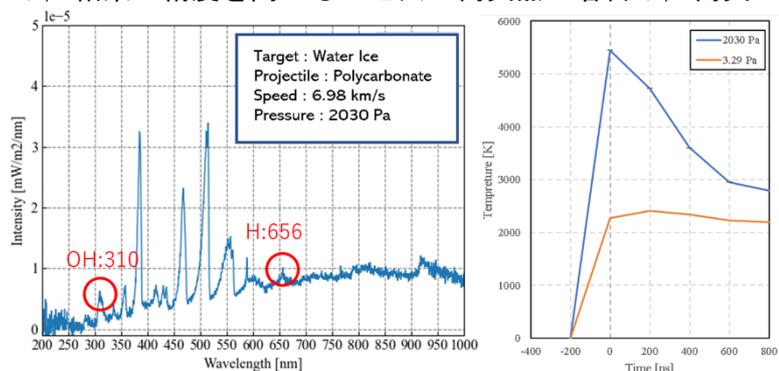


Figure 1. Flash Spectrum and Temperature Transition

## PONCOTSによる木星での巨大衝突閃光現象の発見

○有松 亘<sup>1</sup>, 津村 耕司<sup>2</sup>, 白井 文彦<sup>3</sup>, 渡部 潤一<sup>4</sup><sup>1</sup> 京都大学, <sup>2</sup> 東京都市大学, <sup>3</sup> ISAS/JAXA, <sup>4</sup> 国立天文台

2021年10月15日(UT)の木星衝突閃光現象の発見および史上初めて成功した多波長同時動画観測(Arimatsu et al., 2022)について報告する。2010年以降、アマチュア天文家によって直径数10 m程度の小天体が木星表面に大気圏突入する際に発生する可視閃光現象が偶然観測される事例が相次いでいる。こうした閃光の観測的研究は巨大惑星領域での小天体のサイズ頻度分布や、小天体の大気圏突入時の発光プロセスの理解につながる貴重な機会であると考えられている。しかし極めて短い継続時間(1-2秒)をもつ極めて稀な現象であるこうした木星閃光現象の詳細な観測例はなく、閃光の検出から次のステップに進む観測的研究の実現には至ってなかった。

こうした状況を打破するため、我々は木星閃光の検出および詳細観測に特化した、口径0.28 mの可視超小型多波長動画観測システム、Planetary ObservatioN Camera for Optical Transient Surveys (PONCOTS、『ポンコツ』)を開発し、観測開始からわずか1ヶ月というタイミングで件の閃光現象を発見した(観測動画 url: [https://www.youtube.com/watch?v=j1\\_YQ7cXEJk](https://www.youtube.com/watch?v=j1_YQ7cXEJk))。木星閃光を『狙った』観測で閃光検出に成功したのは、本件が史上初である。なお本件発覚後Twitter([https://twitter.com/OASES\\_miyako/status/1449028895454367757](https://twitter.com/OASES_miyako/status/1449028895454367757))で情報提供を呼びかけた結果、この閃光は国内外3名のアマチュア天文家によって同時観測されていたことが判明している。PONCOTSによって取得された3波長動画観測データから推定される木星閃光の衝突エネルギーはおよそ2 Mt TNTであり、過去に観測された閃光と比較して1桁程度大きく、地上から観測された木星閃光のなかで最大である。またこの衝突エネルギーは、1908年に地球で発生したツングースカの大爆発の衝突エネルギーに匹敵する。今回の観測成功によって、これまで未解明だった木星表面での衝突閃光現象の発光特性、および巨大惑星領域での数10 mクラスの天体のサイズ頻度分布についての知見を拡充しただけでなく、こうしたサイズの小天体が大気圏突入した際のリスク評価にとって貴重な観測的知見を得たといえる。

参考文献: Arimatsu et al. 2022 ApJL 933 L5



図 1: PONCOTS 観測システムによって 2021 年 10 月 15 日 (UT) に撮影された木星衝突閃光。

# OG-01

## MuSCAT シリーズによる TESS トランジット惑星候補のフォローアップ観測

○成田 憲保<sup>1,2</sup>, 福井 暁彦<sup>1</sup>, 日下部 展彦<sup>2,3</sup>, 生駒 大洋<sup>3</sup>, 田村 元秀<sup>1,2,3</sup>,  
MuSCAT チーム

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> アストロバイオロジーセンター, <sup>3</sup> 国立天文台

2018 年 4 月に打ち上げられた NASA のトランジット惑星探索衛星 TESS は、4 台の超広視野カメラ(1 台あたりの観測視野 24 度四方)を搭載し、Kepler で探索されたよりも太陽系の近傍にある全天のトランジット惑星の探索を行なっている。

TESS はこれまでの 4 年間の観測で 5,800 個を超えるトランジット惑星の候補を発見しているが、その中で惑星として発表されたものはまだ 230 個程度(割合として約 4%)に過ぎない。これは、トランジット法によるサーベイで発見される周期的減光は、宇宙に多数存在する食連星によっても生じてしまい、発見されたトランジット惑星候補の中に混入してしまうためである。そのため、この食連星による偽検出を取り除き、本物のトランジット惑星であることを確認する「発見確認」というプロセスが必要である。

この発見確認の代表的方法として、多色で減光を観測し、その波長依存性を調べることが行われている。この発見確認の観測を迅速に行うため、我々は北半球の 3 台の 1.5-2m 望遠鏡に多色同時撮像カメラ MuSCAT シリーズを開発・搭載し、TESS で発見されたトランジット惑星候補のフォローアップ観測を遂行している。

これまでに 350 個以上のトランジット惑星候補の観測を実施し、TESS の公式なフォローアップ観測プログラムである TESS Follow-Up Observing Program (TFOP)と連携して、50 個あまりの新しいトランジット惑星の発見を行った。

本講演ではこれまでに行ってきた MuSCAT シリーズによるフォローアップ観測と、そこで発見されてきた新しいトランジット惑星の概要、特に代表的な惑星として赤色矮星周りの将来の大気調査に適した地球型惑星 TOI-1827.01 と、ハビタブル地球型惑星 TOI-4306.02 について紹介する。

## OG-02

### MuSCATsとすばる望遠鏡 IRDインテンシブ観測から探るM型星周りの4つのサブネプチューンの組成と起源

○堀 安範<sup>1,2</sup>, 福井暁彦<sup>3</sup>, 平野照幸<sup>1,2</sup>, 成田憲保<sup>3</sup>, 小谷隆行<sup>1,2</sup>, 田村元秀<sup>1,3</sup>  
MuSCAT/IRDインテンシブ観測/IRD装置チーム

<sup>1</sup> アストロバイオロジーセンター, <sup>2</sup> 国立天文台, <sup>3</sup> 東京大学

短周期惑星のサイズ頻度分布は地球半径の約1.5倍 – 2倍（半径谷）を境目とした二峰性を持つことが知られている。半径谷より大きな惑星は大気を保持しており、一方で半径谷よりも小さい惑星は大気をほとんど持たない岩石主体の惑星と考えられている。岩石惑星と分厚い大気に覆われた海王星・木星サイズの惑星をつなぐ短周期サブネプチューン（地球半径の約2倍 – 3倍の大きさの惑星）は、惑星形成と大気進化（大気の獲得および散逸）を紐解く上で重要な天体である。

Kepler宇宙望遠鏡の成功に続き、現在、トランジット系外惑星探索衛星（TESS）が太陽型星そしてM型星周りの（短周期）惑星の全天探査を実施している。我々のグループはTESSによって報告されたM型星周りの4つの惑星候補に注目した。これら4つの惑星候補天体に対して、MuSCAT2, 3を用いた多色同時測光のフォローアップ観測、そしてすばる望遠鏡を用いたIRDインテンシブ観測による近赤外視線速度測定を実施した。その結果、4つの惑星はすべて短周期サブネプチューン（地球半径の2 – 3倍、公転周期 およそ3 – 8日）であることがわかった（詳細な物理量は表1を参照）。

表1 M型星周りの4つの短周期サブネプチューン

Parameters	Values			
Radius ( $R_{\oplus}$ )	$2.61 \pm 0.09$	$2.72 \pm 0.09$	$2.19 \pm 0.07$	$2.80 \pm 0.09$
Period (days)	8.02	8.11	5.80	3.08
Eccentricity ( $e$ )	$0.26^{+0.12}_{-0.09}$	$< 0.43$	$0.17^{+0.08}_{-0.06}$	$0.23^{+0.13}_{-0.09}$
Mass ( $M_{\oplus}$ )	$10.7^{+5.4}_{-5.1}$	$< 26.8$	$< 15.4$	$< 61.9$

本発表では、上記の観測で得られた（上限）質量 – 半径関係そして軌道要素（とりわけ、離心率）に基づいて、M型星周りの4つの短周期サブネプチューンの内部組成と軌道進化について議論する。

## 恒星の固有運動加速を引き起こす巨大惑星や褐色矮星の直接撮像と力学質量の導出

Title in English: Directly Imaging and Determining Dynamical Masses of Giant Planets and Brown Dwarfs Causing Proper Motion Accelerations of the Host Stars

葛原昌幸<sup>1, 12</sup>, Thayne Currie<sup>2, 6</sup>, Timothy Brandt<sup>3</sup>, Guyon Olivier<sup>1,4,6</sup>, Jeffrey Chilcote<sup>5</sup>, Julien Lozi<sup>6</sup>, 鶴山 太智<sup>7</sup>, Tylor Groff<sup>8</sup>, Markus Janson<sup>9</sup>, 田村 元秀<sup>1,10,12</sup>, 堀 安範<sup>1,12</sup>, 寶田 拓也<sup>1,12</sup>, 佐藤 文衛<sup>11</sup>, SCEXAO/CHARIS post-SEEDS チーム

所属機関 1: アストロバイオロジーセンター, 2: テキサス大学サンアントニオ校, 3: カリフォルニア大学 サンタバーバラ校, 4: アリゾナ大学, 5: ノートルダム大学, 6: ハワイ観測所, 7: カリフォルニア工科大学, 8: アメリカ航空宇宙局, 9: ストックホルム大学, 10: 東京大学, 11: 東京工業大学, 12: 国立天文台, Post-SEEDS/SCEXAO/CHARIS チーム

軌道の大きな惑星や伴星の検出に直接撮像法は適している。さらに、直接観測から得た測光や分光データはそれらの天体の大気を調べることも可能にする。実際に近年の大望遠鏡による直接撮像探査において、大軌道巨大惑星の探査が精力的に行われてきた。それらの探査は超補償光学を利用することで、中心星からおおよそ 10 au 以遠の距離で木星の数倍以上の質量の惑星を検出する能力がある。それにもかかわらず、実際に検出された巨大惑星の例は非常に限られており、さらに質量が大きく明るい褐色矮星の伴星の検出頻度も低かった。結果として、そのような巨大惑星や褐色矮星の存在頻度は 10%以下と推定されている (例: Nielsen et al. 2019)。したがって、そのような伴天体の検出を進めるためにはより効率的な検出方法を採用する必要がある。それにより、巨大惑星や褐色矮星を一般的に特徴づけるためのサンプルを増加させることが可能になる。

そこで我々は Gaia と Hipparcos 衛星により測定された固有運動を伴天体探査に利用することに着目した。伴天体を保持する場合にその主星は二つの天体の共通重心を公転し、結果として固有運動が加速する。また、その固有運動の加速は上記の二つの位置天文衛星による固有運動データを比較することで測定可能である。したがって、固有運動加速のデータを利用することで巨大惑星や褐色矮星の伴天体を保持する可能性が高い恒星を事前に選定することが可能になる。我々は実際に、加速する固有運動を示す複数の太陽近傍恒星に対してすばる望遠鏡の超補償光学装置 SCEXAO と面分光器 CHARIS を適用して、伴天体の直接撮像探査を進めてきた。さらに、それらの高コントラスト撮像分光観測から太陽型星 HD 33632A を公転する褐色矮星伴星 (HD 33632Ab; Currie et al. 2020)やヒアデス星団の F5 型星を公転する褐色矮星の伴星 HIP 21152 B(Kuzuhara et al. 2022)を発見することに成功した。また、固有運動加速のデータに、直接撮像法と視線速度法による観測から得たデータを組み合わせることで、それらの伴天体の軌道を推定した。この軌道推定は、最終的に伴天体の力学的質量を得ることに結びつく。実際に HIP 21152 B の力学的質量は木星の 27.8 (-5.4, +8.4)倍として導出された。特筆すべきは、力学的に導出された質量を測光・分光学的に導出されたモデル依存する質量推定と比較することで、後者の方法論の検証が可能になることである。HIP 21152 B の力学的質量推定値はそのモデル依存した質量推定値よりもわずかに低いことがわかった。

本講演では、このように我々が進めている固有運動加速を利用した巨大惑星や褐色矮星の探査によって得られた成果や進捗について発表する。中でも、ヒアデス星団の主系列星を公転する褐色矮星として初めて確認された HIP 21152 B についてその詳細を説明する。

# 高金属量 mid-M 型星をトランジットする 短周期巨大惑星 TOI-519 b の質量決定

○蔭谷泰希<sup>1</sup>、成田憲保<sup>1</sup>、福井暁彦<sup>1</sup>、生駒大洋<sup>2</sup>、木村真博<sup>1</sup>、小玉貴則<sup>1</sup>、  
平野照幸<sup>3</sup>、石川裕之<sup>3</sup>、堀安範<sup>3</sup>、小谷隆行<sup>3</sup>、田村元秀<sup>1,3</sup>、  
IRD インテンシブチーム、IRD 装置チーム、IRTF チーム

<sup>1</sup> 東京大学、<sup>2</sup> 国立天文台、<sup>3</sup> アストロバイオロジーセンター

短周期巨大惑星の形成のためには、主星質量と主星金属量が重要であるとされており、質量が小さい M 型星周りで短周期巨大惑星を形成することは非常に困難であると考えられてきた (Laughlin et al. 2004, Ida & Lin 2005)。しかし、2018 年に打ち上げられたトランジット系外惑星探索衛星 TESS の活躍により、近年 M 型星周りでも徐々にその存在が確認されるようになってきており、2022 年 8 月現在その数は 10 個となっている。この短周期巨大惑星の形成過程を明らかにするためには、観測によって惑星半径、惑星質量、そして主星の有効温度、金属量などを明らかにしていく必要がある。

TOI-519 b は TESS による観測と多色同時撮像カメラ MuSCAT シリーズによる地上からのフォローアップ観測から、M 型星を短周期( $P \sim 1.26$  d)で公転する木星サイズ( $R \sim 1.06 R_{\text{Jup}}$ )の天体であることが確認されている (Parviainen et al. 2021)。しかしながら、位相光度変化から導出された天体の質量上限値は  $14 M_{\text{Jup}}$  であり、この天体が巨大惑星か褐色矮星かを判断するためには視線速度観測を用いたより厳しい質量の制約が不可欠な状況であった。

本研究では、すばる望遠鏡に搭載された近赤外高分散分光装置 IRD を用いたインテンシブ観測の中で TOI-519 b の視線速度観測を行った。この観測から質量が木星質量の半分程度であることを発見し、この天体が褐色矮星ではなく巨大惑星であることを初めて実証した。また、IRD に加え近赤外中分散分光装置 IRTF/SpeX を用いた分光観測から主星の半径、質量、有効温度、金属量を導出した。これらの結果から TOI-519 は短周期巨大惑星を持つ恒星の中で最も温度が低く、また、金属量が高いことを発見した。

本講演では質量決定までの解析結果と主星の特徴を考慮した惑星形成のシナリオ、そしてこの系を含めた短周期巨大惑星を持つ惑星系の特徴について議論を行う。

## 次世代赤外線天文衛星 GREX-PLUS 計画概要

○井上昭雄<sup>1</sup>, 野村英子<sup>2</sup>

<sup>1</sup>早稲田大学物理学科, <sup>2</sup>国立天文台

GREX-PLUS (Galaxy Reionization EXplorer and PLanetary Universe Spectrometer) は、口径 1.2m、温度 50K の冷却宇宙望遠鏡に、波長 2-10 ミクロン帯の広視野撮像カメラと波長 10-20 ミクロン帯の高分散分光器を搭載する宇宙望遠鏡計画である。私たちは、JAXA 宇宙科学研究所の戦略的中型計画の 2030 年代の打ち上げ枠を目指し、GREX-PLUS のミッション概念検討を進めている。GREX-PLUS は、JAXA 宇宙科学研究所の宇宙科学・探査ロードマップに掲げられた天文学・宇宙物理学の大目標「宇宙の空間と物質の起源の理解」「宇宙における生命の可能性の探求」の両方に対して、さまざまな具体的科学的テーマを切り口としてアプローチする計画である。中でも、初代銀河の探査と、原始惑星系円盤スノーライン位置の時間進化の解明を 2 大テーマとしている。搭載する 2 つの装置のうち、広視野カメラは視野 0.4 平方度を擁し、これを波長 2-5 ミクロン帯 3 バンド、5-10 ミクロン帯 3 バンドの合計 6 バンドに分割した構成を考えている。また、高分散分光器は、波長分解能 30,000、つまり速度分解能 10 km/s を達成する予定である。望遠鏡は 50K を予定しており、SPICA の熱数学モデルを利用して、放射冷却により達成できる見込みである。装置検出器を冷却するシステムは、SPICA で検討開発され、今も宇宙科学研究所の技術のフロントローディングで開発が順調に継続されている機械式冷凍機を利用する。また、高分散分光器は SPICA/SMI で検討された高分散チャンネルをそのまま利用する。広視野カメラと望遠鏡システムには、戦略的中型候補として以前検討された WISH の検討資産を利用する。したがって、GREX-PLUS は JAXA 宇宙科学研究所のこれまでの技術開発検討のヘリテージを存分に活用する計画である。本講演では、GREX-PLUS の科学目標、装置仕様、開発検討状況の概要を紹介する。

“次世代赤外線天文衛星 GREX-PLUS が切り拓く原始惑星系円盤サイエンス”

“Sciences of protoplanetary disks expected by the next-generation infrared astronomical satellite GREX-PLUS”

○野津 翔太 (Shota Notsu)<sup>1</sup>, 野村 英子 (Hideko Nomura)<sup>2</sup>, 井上 昭雄 (Akio Inoue)<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 理化学研究所 坂井星・惑星形成研究室 (Star and Planet Formation Laboratory, RIKEN),

<sup>2</sup> 国立天文台 (National Astronomical Observatory of Japan),

<sup>3</sup> 早稲田大学 (Waseda University),

GREX-PLUS (Galaxy Reionization EXplorer and PLanetary Universe Spectrometer) は 2030 年代中頃の打ち上げを目指し日本主導の計画として検討が進む口径 1.2m の赤外線天文衛星である。銀河形成進化および惑星系形成進化が 2 大サイエンステーマであり、観測装置として近中間赤外線広視野カメラと波長分解能 R=30000 を達成する中間赤外線高分散分光器を搭載する。本講演では発表者らが主導する形で検討が進められてきた、GREX-PLUS で実現が期待される原始惑星系円盤・惑星形成のサイエンスのレビューを行う。

まず 1.原始惑星系円盤の H<sub>2</sub>O スノーライン位置特定という観測テーマについて紹介する。原始惑星系円盤において H<sub>2</sub>O スノーラインは、岩石惑星と巨大ガス惑星の形成領域境界であり、その位置を観測的に同定する事は微惑星・惑星形成過程や地球への水の供給過程を解明する上でも極めて重要である。GREX-PLUS の中間赤外線分光観測では波長分解能 R=30000 で波長 17.75μm の水輝線の速度プロファイルを多数の円盤で観測し、ケプラー運動の分解から円盤赤道面の H<sub>2</sub>O スノーライン位置を同定する(図 1)。比較的近傍の大小質量星形成領域の原始惑星系円盤約 100 天体のサーベイ観測を通じ、H<sub>2</sub>O スノーライン位置の進化や惑星形成過程・水供給過程の理解に繋げる。

その他、中間赤外線高分散分光観測を通じた 2. 原始惑星系円盤の有機物・C/O 比空間分布の理解、3. 円盤ガスの散逸過程の解明 といった観測テーマについても、期待される観測成果や惑星形成過程の解明への寄与などの観点も含め紹介する。

GREX-PLUS サイエンス検討会 資料：<http://www.obsap.phys.waseda.ac.jp/grex-plus-sws-220324-25.html>

1.H<sub>2</sub>O 輝線の高分散分光観測: 円盤 H<sub>2</sub>Oスノーライン位置の検出

原始惑星系円盤：(ほぼ)ケプラー回転

輝線のドップラーシフトの解析から、輝線放射領域の中心星からの距離の情報が得られる

高温赤道面から放射される H<sub>2</sub>O 輝線を高分散分光観測し、H<sub>2</sub>O スノーライン位置を同定する

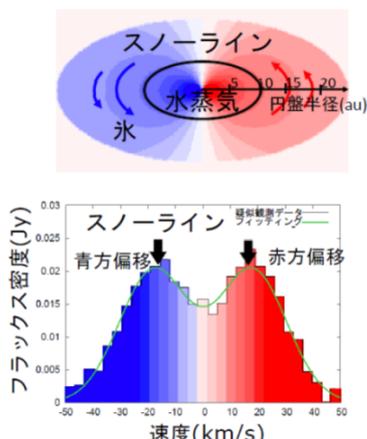
$$\Delta v = \sqrt{\frac{GM_s}{r}} \sin i \quad i: \text{傾斜角}$$

円盤からの赤外線輝線の速度幅 ~ 30km/s

→速度構造の解析には

R~30,000 の波長分解能が必要

→GREX-PLUS



Notsu et al. (2016, 2017, 2018, 2019)

図 1: 円盤 H<sub>2</sub>O スノーライン位置同定観測の概念図

## 次世代赤外線天文衛星 GREX-PLUS が切り拓く 系外惑星大気サイエンス

○大野和正<sup>1</sup>、川島由依<sup>2</sup>、藤井友香<sup>3</sup>、松尾太郎<sup>4</sup>

<sup>1</sup>カリフォルニア大学サンタクルーズ校 <sup>2</sup>理化学研究所 <sup>3</sup>国立天文台 <sup>4</sup>名古屋大学

GREX-PLUS(Galaxy Reionization Explorer and Planetary Universe Spectrometer)は2030年代打ち上げを目指して提案されている、波長2—10  $\mu\text{m}$  帯の広視野カメラと波長10—20  $\mu\text{m}$  帯で波長分解能30000を持つ高分散分光器を搭載した赤外線天文衛星である。SPICAによって蓄積された宇宙望遠鏡冷却技術を活用し、望遠鏡を温度50 Kまで冷却することで、地上からは到達できない高感度を達成する。GREX-PLUSは銀河・惑星系形成論を革新することを目指しており、またSPICAによって検討されてきたサイエンスを実現するという意義もある。

GREX-PLUSによる重要なサイエンステーマの一つとして、系外惑星大気の特徴付けが検討されている。系外惑星大気を調べることは、多様な惑星表層における大気物理・化学過程を理解することに加えて、惑星の形成・進化過程を探る上でも極めて重要な手掛かりを提供する。特に、GREX-PLUSに搭載される10—20  $\mu\text{m}$  帯の高分散分光器は、従来大気観測が難しかった低温惑星に対する高感度観測や、JWSTによる低中分散観測では発見が困難なHCNやC<sub>2</sub>H<sub>2</sub>などのマイナー分子の検出を可能とし、系外惑星大気への理解を大きく進展させることが期待されている。

本講演では、我々がこれまで検討を進めてきたGREX-PLUSによる系外惑星大気サイエンスの紹介を行う。具体的には、相互相関法を用いた高分散分光観測による大気分子の検出可能性、惑星放射光の視線速度観測による軌道傾斜角・惑星質量の推定可能性および系外衛星・連惑星の発見可能性に関して紹介を行う予定である。

# 次世代赤外線天文衛星 GREX-PLUS が切り拓く 太陽系惑星大気サイエンス

Observations of the solar system planetary atmospheres  
by the next-generation infrared astronomical satellite GREX-PLUS

○佐川 英夫<sup>1</sup>, 青木 翔平<sup>2</sup>, 笠羽 康正<sup>3</sup>

<sup>1</sup>京都産業大学 理学部, <sup>2</sup>東京大学 大学院新領域創成科学研究科, <sup>3</sup>東北大学 大学院理学研究科

惑星大気の観測的研究では、大気組成や気温構造、風速分布などの観測を通して、惑星の表層で生じる大気物理や大気化学を理解するとともに、その惑星の形成や大気進化の過程を制約する。太陽系には多様な惑星大気を有する天体が存在し、それらを精緻に観測することは系外惑星大気を研究する際のリファレンスを得るという意味でも重要である。今後 2030 年代にかけて、JWST や E-ELT といった大口径望遠鏡による惑星観測の実現や、JUICE や Europa Clipper による木星・氷衛星大気の探査ミッションに加えて、Dragonfly 小型飛行機探査（タイタン）や DAVINCI プローブ探査（金星）など、周回軌道からのリモートセンシング一辺倒ではない惑星探査が次々と実施され、太陽系惑星科学は大きな新展開を迎える。

そうした中で、現在ミッション検討が進められている次世代の赤外線天文衛星 GREX-PLUS は、惑星大気の研究においても重要な役割を担う。GREX-PLUS に搭載予定の赤外線高分散分光器を利用することで、(1) 赤外線波長域に存在する  $H_2$  の四重極放射や連続吸収のスペクトルを観測することができ、 $H_2$  を大気主成分に持つ巨大ガス・氷惑星の気温鉛直構造を導出可能となる。また、(2) タイタン大気中の微量成分を網羅的に観測することで、複雑な有機分子生成の化学反応を有するタイタン大気化学の解明に大きく貢献することが期待される。さらには、GREX-PLUS の具体的な観測可能波長域に依存するものの、(3) HD や  $CH_3D$  といった分子の観測から、各天体の大気中の D/H 同位体比を制約し、太陽系における D/H 同位体比分布を包括的に議論することが可能となる。本講演では、上記のテーマの他に、火星大気観測や他の望遠鏡・探査機との連携観測の可能性なども含めて、GREX-PLUS による惑星大気観測のフィージビリティを述べる。

# 次世代赤外線天文衛星 GREX-PLUS が切り拓く 太陽系小天体サイエンス

○ 寺居 剛<sup>1</sup>, 大坪 貴文<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台

GREX-PLUS は 2030 年代打ち上げ予定の口径 1.2 m 冷却宇宙望遠鏡計画で、近赤外線広視野カメラと中間赤外線高分散分光装置の搭載が構想されている。我々は GREX-PLUS での近赤外撮像観測（波長 2–10  $\mu\text{m}$ ）によって切り拓かれる太陽系小天体サイエンスについて検討を進めている。本計画により地上望遠鏡では難しい波長 2.5  $\mu\text{m}$  以上での広域高感度観測が実現されれば、これまでは観測が困難だった分子・鉱物のスペクトル吸収を捉えることができ、より遠方／小型の小天体を対象とした組成調査を大規模に展開することが可能になる。それにより初期太陽系の環境・物質分布や、微惑星の熱履歴・化学進化に関する重要な知見が得られるとともに、地球へ水や有機物をもたらした供給源天体の解明にも大きく貢献し得ると期待される。本講演では以下の 3 項目の研究テーマについて議論する。

## 1. 小惑星上の含水鉱物検出

含水鉱物を含む小惑星は波長 2.7  $\mu\text{m}$  に特徴的な吸収帯を持つことが知られており、かつてその天体（あるいはその母天体）に含まれる水氷が加熱されて起きた水質変成の痕跡を示している。そのような天体は地球に水を運んだ候補として有力であることに加え、小惑星の熱史を探る手掛かりとしても大変重要である。上記波長帯は地上からの観測が難しいためスペースからの観測が有効で、赤外線衛星「あかり」による分光観測では直径 40 km 以上の小惑星 27 天体から含水鉱物が検出されている (Usui et al. 2019)。GREX-PLUS による近赤外撮像は直径  $\sim 10$  km までのより小さな小惑星上に存在する含水鉱物を効率的に捉えることができ、様々な天体サイズ、スペクトル型、力学特性の小惑星から含水鉱物量を調べられるため、小惑星と水の関係性への理解に大きな進展が見込まれる。

## 2. 外縁天体表層の水氷量測定

海王星軌道以遠の低温領域に分布する外縁天体のうち、大型天体の表面には水（もしくはメタン）氷が豊富に存在していることが確認されている一方、直径  $\sim 800$  km より小さな天体では微量もしくは非検出の場合が多い。不純物によって水氷のスペクトル吸収が隠されている可能性もあり、それらの表層には本当に水氷が欠乏しているのか、もしそうならその原因は何なのか、不明な点が多い。これまでの観測では主に波長 1.5  $\mu\text{m}$  および 2  $\mu\text{m}$  に見られる吸収帯によって水氷が検出されてきたが、より吸収強度が大きい 3  $\mu\text{m}$  吸収帯を観測できれば、格段に高い精度で水氷量分布を調べられる。GREX-PLUS はまさにそのような観測に最適で、直径  $\sim 200$  km までの多数の外縁天体に対して高精度の水氷量測定を実現する能力を持つ。これを用いて詳細な統計的研究を実施し、外縁天体表層における熱進化・化学進化に関する理解を深めたい。

## 3. 彗星に含まれる氷分子・有機物観測

彗星氷の主成分である  $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2/\text{CO}$  の存在比を正確に決定することは太陽系初期における外惑星領域での分子進化を探るうえで重要である。赤外線衛星「あかり」による彗星 18 天体の近赤外分光観測では、 $\text{CO}_2$  が  $\text{H}_2\text{O}$  に次いで彗星氷の主要な成分を占める可能性が高いことが示された (Ootsubo et al. 2012)。GREX-PLUS の近赤外線カメラに搭載が検討されているフィルターのうち、F303 は  $\text{H}_2\text{O}$ 、F397 は  $\text{CO}_2$ 、F520 は  $\text{CO}$  の彗星氷から昇華したガスの分子振動放射検出に適しており、観測天体数をさらに増やして統計的な議論を行うことができるようになる。特に  $\text{CO}_2$  と  $\text{CO}$  の分子輝線は Spitzer/IRAC の撮像観測では切り分けられなかったが、GREX-PLUS は上記 3 分子をそれぞれ異なるフィルターで測定することが可能であることから、高感度撮像性能を生かしてそれらの強度比を精度良く測定することも強みである。

## 系外惑星大気観測にむけた 紫外線検出器の量子効率推定

○平林 賢人<sup>1</sup> 亀田 真吾<sup>1</sup> 村上 豪<sup>2</sup> 桑原 正輝<sup>1</sup>

<sup>1</sup>立教大学 <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構

現在多くの太陽系外惑星が発見されており、その中には地球サイズでハビタブルゾーン(HZ)にある可能性の高いものも存在している。

我々は、低質量星周りのハビタブルゾーンにある地球型惑星大気の紫外線分光観測のための技術開発を行なっている。

観測方法はトランジット分光観測、観測ターゲットはK型やM型の低質量星を想定している。K型やM型の低質量星のHZに位置する系外惑星は強いXUV放射(10-100 nm程度の紫外線)を受ける。このとき惑星が、地球のような大気を持っていた場合、大気はXUV放射により加熱され、高高度まで膨張すると考えられており、これによりトランジット分光観測での大気の検出が可能となると考えられる。

しかし観測対象となる低質量星による、紫外領域の光は弱いため、高感度の紫外線検出器が必要となる。紫外線検出器であるMCPアセンブリは光電面、マイクロチャンネルプレート(MCP)、蛍光面の3要素からなり、光電面上に結像された光は光電面で電子に変換され、電子はMCPの各チャンネルに入射し、チャンネルの内壁に衝突することで二次電子を放出する。電位勾配で加速された電子はMCPの出力端から放出され、蛍光面に衝突し電子数に応じた光が出力される。これにより高感度の検出が可能となる。

本研究の目的はMCPの量子効率の推定である。量子効率とは検出器の性能指標の一つで、入射光子のうち信号として取り出せる電子に変換されるものの割合である。

本発表ではMCPの量子効率の推定のためのMCPアセンブリの蛍光面におけるスポット計数の方法を主に発表し、最後に量子効率の結果と、その結果を用いてUVSPEXによる酸素原子検出に必要なトランジット観測の回数を考察し、今後の課題について発表する。

### [参考文献]

[1]村上 豪(2021), WSO-UV 搭載 UVSPEX に向けた紫外線検出器の開発

[2]村岡 徹(2021), 修士論文

[3] 浜松ホトニクス株式会社, MCP アセンブリ技術資料

# 原始惑星系円盤形成過程における自己重力的分裂 過程

○ 高橋実道<sup>1</sup>、小久保英一郎<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台

原始惑星系円盤の自己重力不安定による分裂は、観測で発見されている遠方巨大ガス惑星の形成メカニズムの候補として注目されている。このような惑星はダストの合体成長では形成に時間がかかりすぎるため、短時間で形成可能な自己重力による分裂が有力視される。また、ALMAによる観測で見ついている若い円盤のギャップ構造を惑星と円盤の相互作用で説明する場合にも、その惑星の形成メカニズムとして自己重力による分裂が有力な候補となる。

自己重力不安定による分裂は観測された惑星や円盤構造の形成メカニズムとして注目されている一方、分裂に至るための条件については未だ十分に理解されていない。Takahashi et al. (2016)では、自己重力による分裂条件は、円盤の大局的な重力不安定性によって渦状腕が形成された後、「渦状腕構造自体が自己重力に対して不安定になる条件」で与えられることを明らかにした。この結果から、円盤分裂が起こるかどうかを予言するためには、重力的に不安定な渦状腕構造を形成する条件を明らかにすれば良いことがわかる。特に原始惑星系円盤が重力的に不安定になり分裂しやすいのは、円盤形成過程で円盤に外からのガス降着がある場合である。そこで、本研究では、2次元流体計算を行い、円盤形成期における円盤の分裂条件について調べる。円盤の大局的な自己重力不安定で形成される渦状腕構造は、重力トルクによる角運動量輸送を通して円盤のガス降着率と密接に関わっている。本発表では、円盤構造の自己重力による分裂と、円盤へのガス降着率などの物理量の関係をシミュレーションによって調べた結果を示し、円盤分裂条件との関係について議論する。

# 原始惑星系円盤の面密度進化における 円盤風トルクの影響について

○ 瀧哲朗<sup>1</sup>, 小林浩<sup>2</sup>, 小久保 英一郎<sup>1,3</sup>, 鈴木建<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台, <sup>2</sup> 名古屋大学, <sup>3</sup> 東京大学

近年の非理想磁気流体力学計算の進展によって原始惑星系円盤進化の描像は単純な粘性降着円盤から大きく変わりつつある。円盤進化を駆動するメカニズムが異なると、円盤の中で起こる固体物質の進化も影響を受ける。これは惑星形成過程の理解や円盤の観測的特徴の解釈も従来とは大きく変わりうるということを意味している。しかしながら現行の計算機能力の限界から(3次元)非理想磁気流体力学計算では、円盤全域の長時間進化を追うことはできていない。そのため、非理想磁気流体力学計算の結果と統合的な円盤大局構造の1次元モデルを構築することは重要である。

磁気流体力学の非理想効果は主に円盤乱流を抑制する方向に働くことが知られている。磁気乱流が円盤の大部分で抑制された弱乱流円盤においては、磁場を介した円盤表層からのガスの流出(磁気駆動円盤風)と、流出の際の角運動量の抜き取り(円盤風トルク)が円盤進化を駆動する有力なメカニズムであると考えられている(e.g., Suzuki et al., 2010; Bai 2013, 2016, 2017; 他多数)。

原始惑星系円盤が前述した「円盤風駆動」の進化をするとき、古典的な粘性降着円盤とは以下のような違いが現れると考えられている(e.g., Suzuki et al., 2016; Chambers 2019; Taki et al., 2021; Tabone et al., 2021): (1) 円盤外縁が外向きに広がっていく効果が弱い、あるいは無い、(2) 定常降着を仮定したときに実現される面密度の「べき」の値が変わる、(3) 円盤の内側領域と外側領域で面密度の「べき」が異なる場合がある。

本講演では、磁気駆動円盤風を考慮した弱乱流円盤進化の1次元モデルにおける円盤風トルクの影響について報告する。その際、前述した「粘性降着円盤との違い」を理論的に見通しよく解釈し、解析的な見積もりからその振る舞いを定量的に予言することを目指した。

昨年講演会で、我々はすでに円盤風による質量損失が存在する状況において円盤が実現する準定常な面密度分布とそのパラメータ依存性について紹介している。今回はその結果をさらに一般化し、乱流粘性・円盤風質量損失・円盤風トルクが同時に存在する場合の面密度進化を幅広いパラメータ範囲で明らかにし、単に粘性降着する場合との振る舞いの違いを詳しく調べた。特に固体物質進化に重要であることから面密度の「べき」の値に注目し、その値を定量的に予言することにも成功した。得られた結果は様々な状況で有効であり、定常降着的な問題設定に限らず、自己相似的な進化をするカットオフのある円盤においても同様に適用できることを確認している。また、解析的に得られる面密度の「べき」が円盤進化の過程で自然に現れるメカニズムを明らかにし、その面密度分布の性質についても議論する。

# 原始太陽系円盤における アンモニウム塩の輸送と木星の窒素濃縮

○中澤 風音<sup>1</sup>, 奥住 聡<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学 理学院 地球惑星科学系

木星の大気は、太陽に比べて軽元素(O, C, N など) や希ガスに一樣に富むという著しい特徴を持つ(e.g., Fletcher et al. 2009; Li et al. 2020)。この特徴は、木星がどこで・どのようにできたかを明らかにする重要な鍵として注目されている。

木星大気の高い軽元素濃度は、原始太陽系円盤の遠方や影領域といった極低温領域(< 30 K)でダスト上に凍結した高揮発性分子を濃集することで説明されてきた(e.g. Bosman et al. 2019, Ohno & Ueda 2021)。しかし、遠方形成説では同位体二分性から示唆される木星形成時期と遠方からの木星軌道移動を整合させることが難しいという問題がある(e.g. Bitsch et al. 2019)。影領域説においても影領域の維持と木星形成が両立するか明らかでないという課題がある。

上記2説とは異なり、極低温環境での木星コア形成を必要としない元素濃縮機構として、揮発性物質を閉じ込めた非晶質氷が円盤外側から木星形成領域へ移動した可能性が提案されている(e.g., Monga & Desch 2015; Mousis et al. 2019)。この機構は殆どの軽元素の濃縮を説明可能であるが、N<sub>2</sub>が非晶質氷に閉じ込められにくいこと(Bar-Nun et al. 2007)、始原的組成を持つ彗星の放出ガスが窒素に欠乏していること(Pontoppidan et al. 2014) から、木星大気の窒素濃縮の説明に難点がある。

本講演では、揮発性物質に加え、揮発性のより低い塩などの物質が木星の窒素濃縮に寄与した可能性を検討する。近年、探査機 Rosetta による彗星 67P の複数の観測は、従来円盤内側で最も主要な窒素キャリアとされていたNH<sub>3</sub>よりもはるかに豊富な半揮発性のアンモニウム塩が彗星に含まれている可能性を示している(Altwegg et al. 2020; Poch et al. 2020)。

我々は、原始太陽系円盤の氷ダストの主要な窒素キャリアがアンモニウム塩であったと仮定し、円盤内側領域(< 3 au) からの窒素供給に伴う円盤窒素分布の時間進化を計算した。得られた組成のもとで惑星へのガス降着を計算し、形成する惑星大気の窒素存在量を求めた。その結果、アンモニウム塩と従来の揮発性窒素キャリアを組み合わせることで、内側軌道で形成する惑星が木星相当の窒素濃縮を達成可能であることが分かった。この結果は、非晶質氷による軽元素輸送機構に加え、アンモニウム塩の輸送を考慮することで、窒素を含めた木星大気の軽元素濃縮が説明可能であることを示している。また本研究結果は、従来考慮されてこなかった塩や有機物といった揮発性の低い物質が、円盤における元素輸送の重要な役割を担っていた可能性を示唆している。

## 木星の氷微惑星散乱による 雪線内側への水供給についての理論的研究

○ 安田 郁斗<sup>1</sup>, 小林 浩<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学理学研究科

地球は生命を育む水惑星であるが、海洋の質量は全地球質量の 0.02% 程度と、地球の水含有率は非常に低い。つまり地球は水を集積しない雪線の内側で形成され、形成後に少量の水が供給されたと考えるのが自然である。リュウグウをはじめとする C 型小惑星は水を多く含んでいたと考えられており、はやぶさ 2 ミッションの成果からも、木星や土星よりも外側で形成し、小惑星帯そして、地球近傍へと移動したことが示唆されている。氷微惑星の移動は木星形成後に期待される。木星形成直後には、固体核材料である氷微惑星とガス集積を可能にするガス円盤が残っていると考えられる。従ってガス集積した木星の強い重力により微惑星は太陽系の内側にも外側にも散乱され、原始惑星系円盤によるガス抵抗で軌道が安定化する。このような水の輸送過程について様々な先行研究があるが (e.g., Raymond & Izidoro 2017)、初期条件や仮定への依存性が強いとも考えられる。よって本研究では水の輸送過程を解析し、輸送メカニズムの解明を目指す。

本研究では  $N$  体シミュレーションにより、ガス抵抗を考慮した制限三体問題として木星と微惑星の軌道進化を計算し、軌道進化のパラメータ依存性をはじめとする様々な解析を行なった。軌道進化を遠日点距離の変化で見ることで、太陽系の内側への輸送は、木星重力によって遠日点がほとんど変化せず離心率が上昇し、ガス抵抗によって遠日点が木星から遠ざかり、内側に移動することで木星重力の影響を受けなくなり、ガス抵抗のみによって離心率が減少して安定な軌道に落ち着くことを明らかにした (図 1)。さらに、雪線の内側にまで輸送される際、木星重力散乱による離心率の上昇とガス抵抗による離心率の低下が混在する軌道進化段階では、離心率がほとんど一定で進化する事がわかり、その値が予測できれば主要な輸送先を推定できるという示唆が得られた。

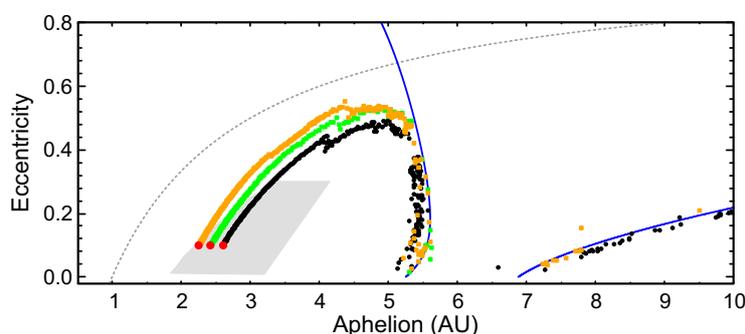


図 1 3 体の微惑星の軌道進化の様子を横軸を遠日点距離で示す。黄、緑、黒のプロットはそれぞれ異なる微惑星軌道の時間進化を、赤の点は計算を終了した時点での軌道を表す。灰色の領域は小惑星帯を模しており、破線は近日点距離が 1 AU の軌道を、青の実線はヤコビ積分の値が初期値と等しくなる軌道を表す。

# 原始惑星系円盤ガスにおける炭素・窒素・酸素の非一様な枯渇

○古家健次<sup>1</sup>, Lee Seokho<sup>2</sup>, 野村英子<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国立天文台, <sup>2</sup>韓国天文研究院

原始惑星系円盤の元素組成の理解は、円盤内で形成される惑星の表層組成やバルク組成を理解する上で重要である。近年の CO 輝線などの観測研究から、円盤ガス中の炭素と酸素の量は、星間空間と比べ 1-2 桁少ないことが明らかになってきた。円盤ガスから炭素と酸素量を減らすメカニズムとして現在考えられているものは主に 2 つある。第一に、炭素の多くが CO<sub>2</sub> 等の CO より揮発性が低く、より酸素を多く含む分子に円盤中の化学反応で変換され、ダスト上に氷として存在している可能性がある。第二に、円盤内の乱流によって円盤上空のガスが赤道面にもち込まれると、赤道面の低温ダストに分子が凍結する。つまり赤道面の低温ダストが分子をガス中から取り除くフィルターのような働きをする可能性がある。これら 2 つのプロセスは排他的ではなく、むしろどちらも重要と考えられている。

一方、円盤ガス中の窒素量に関する観測研究は限られているが、いくつかの先行研究によると窒素は炭素・酸素ほど枯渇しておらず、円盤ガス中に長時間存在できる可能性が示唆されている。本研究では、円盤ガス中での炭素、窒素、酸素組成の長期的(1 Myr)な振る舞いを理論的に明らかにすることを目的に、赤道面のダストによるフィルター効果とガス中及びダスト表面での化学反応の両方を考慮したモデルを構築した。その結果、炭素と酸素は 1 Myr 程度でガス中の存在量が 1-2 桁減少しうるのに対し、窒素の減少量は 1 桁以下に留まることが分かった。これは炭素と酸素は比較的揮発性の低い CO<sub>2</sub> や H<sub>2</sub>O として主に存在するのに対し、窒素は揮発性の高い N<sub>2</sub> として存在するため、相対的に赤道面付近の低温ダストによるフィルター効果が効きづらいためである。窒素は円盤ガス中から枯渇しづらいため、1 Myr 程度で炭素と酸素よりもガス中での存在量が大きくなりうることが分かった。講演ではパラメータ依存性や円盤ガス中の元素の枯渇が赤道面の氷組成に与える影響についても議論したい。

## 惑星への質量降着過程を考慮した

### 超木星質量惑星のギャップ形成とパラメータ依存性

○田中佑希<sup>1</sup>, 金川和弘<sup>2</sup>, 谷川享行<sup>3</sup>, 田中秀和<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東北大学, <sup>2</sup>茨城大学, <sup>3</sup>一関高専

原始惑星系円盤内で形成された巨大ガス惑星は、その軌道に沿ったガスの低密度領域であるギャップを形成し、ギャップを介した質量降着によって成長する。また、周囲の物質との相互作用によって軌道進化も起こす。これまでに発見されている太陽系外惑星の質量は多様性に富んでおり、木星の数倍以上の質量を持つ惑星、いわゆる超木星質量惑星も多数発見されている。惑星質量が木星の数倍ある場合、惑星が形成するギャップの外縁が非定常となって離心率を持つため、それに伴ってギャップ内の面密度分布などの特徴は軽い惑星の場合とは大きく異なるものとなる。しかし、その結果として惑星への質量降着率や惑星に働くトルクなどがどのように変化するかについては、詳細な理解が進んでいない。従って、重いガス惑星の形成・進化過程を知るためには、広い質量範囲でのギャップ形成や質量降着過程の検証が必要である。

本研究では、2次元数値流体計算を用いて、巨大ガス惑星と円盤の相互作用によるギャップ形成、および惑星への質量降着率のパラメータ依存性について、惑星への質量降着過程を考慮した上で調査を行った。ギャップ形成を扱うためには円盤の大局的な計算が必要だが、惑星への降着過程は惑星近傍での局所的な現象であるため、降着過程をモデル化して計算に取り入れた。まずはこのモデル化の妥当性を検証するための計算を行い、降着半径および惑星の重力スミージング長を適切な値に取った場合、過去の高解像度局所計算と整合的な一定の質量降着率が得られることが判明した。

この結果を元に様々な惑星質量で数値計算を行い、形成されるギャップの特性や惑星への質量降着率の依存性について調査を行った結果、ギャップに離心率が生じることにより惑星への質量降着率が増加することを確認した。また、ギャップが非定常になっている際の惑星に働くトルクの依存性についても調査を行った。これらの結果について、特に超木星質量惑星の形成・進化過程について議論する。

## 磁気円盤風降着円盤における惑星周りの 円盤ギャップ構造の形状の三次元磁気流体計算

○青山雄彦<sup>1</sup>、Xuening Bai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北京大学、<sup>2</sup>清華大学

原始惑星系円盤の観測は近年盛んに行われており、ギャップやリングなどの円盤内構造が発見されている。検出されたギャップの一部は惑星の重力によって形成されていると考えられており、惑星質量とギャップの構造の関係を研究した先行研究は多くある。しかしこれらの研究では、原始惑星系円盤は粘性降着円盤であると仮定してきた。一方近年の磁気流体計算は、特に円盤外縁部では、乱流粘性ではなく磁気円盤風が降着を駆動すると明らかにした。主星近傍の観測は比較的困難であるため、現状観測対象となっているのは円盤外縁部である。従って、観測された円盤構造を理解するには、惑星重力による円盤ギャップ形成を磁気円盤風降着円盤において研究する必要がある。

我々は Athena++ コードを用いて3次元磁気流体計算を行い、磁気円盤風降着円盤における惑星重力による円盤ギャップの形成を研究した。鉛直磁場が惑星近傍へ集中し、乱流強度が動径方向に強い勾配を持つことを確認した。その結果乱流トルクが円盤を広げる方向に働き、磁場を考えなかった先行研究に比べ、ギャップは広く深くなることがわかった。

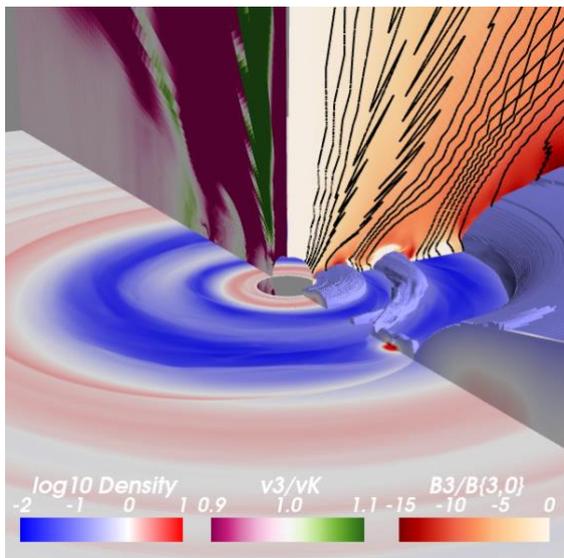


図 1: ガス密度・回転速度・トロイダル磁場強度と磁力線

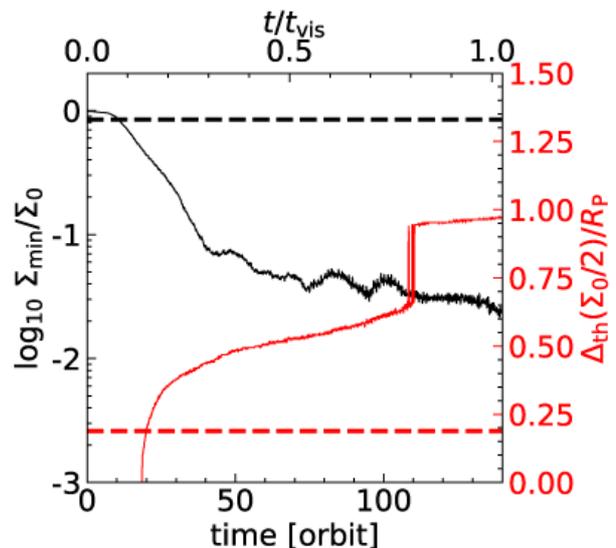


図 2: ギャップの深さ (黒) と幅 (赤)。点線は  $\alpha=6 \times 10^{-3}$  の粘性円盤での値 (Kanagawa et al. 2016)

# Type I 移動する惑星によってできる 帯状の微惑星形成領域

## Belt-like planetesimal formation regions made by Type I migrating planets

○芝池諭人<sup>1</sup>, Yann Alibert<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ベルン大学

微惑星落下問題を回避する多くのシナリオがこれまでに提案されてきたが、これらの多くは円盤の特定の場所での微惑星形成を考えている。一方で、ポピュレーションシンセシスなどの惑星形成モデルでは、微惑星が円盤全体に分布することが仮定されている。我々は、これらとは異なり、幅を持った帯状の微惑星形成領域が Type I 移動する惑星によってできることを発見した。惑星が作るガス圧バンプでストリーミング不安定により微惑星が形成されるが、その環状の形成領域は惑星の移動とともに円盤内側に移動する(Shibaie & Alibert 2020)。ダストの合体成長と円盤内での移動を考慮すると、内側はスノーラインで外側は惑星がペブル孤立質量となる軌道位置の、帯状の微惑星形成領域ができると新たにわかった。これは、Ataiee et al. (2018)で調べられた、ペブル孤立質量の、円盤乱流の強さ依存性とよく一致した(図 1, Shibaie & Alibert in prep.)。

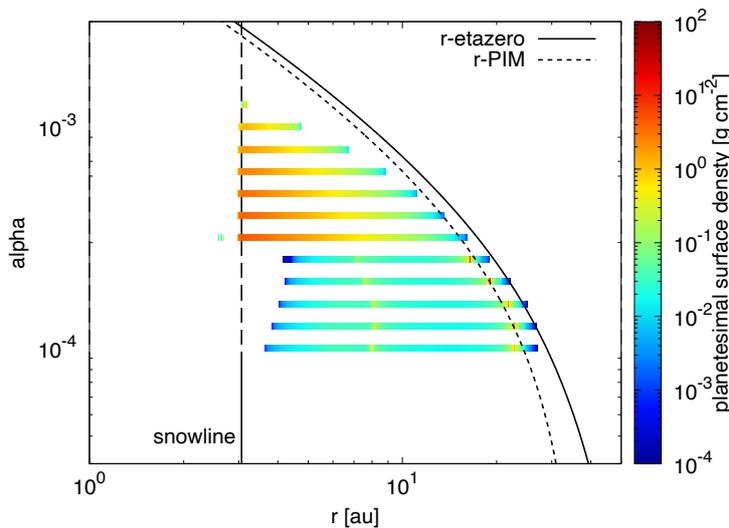


図 1. 乱流の強さ  $\alpha$  (縦軸) を変化させた場合の、形成される微惑星の面密度分布。黒の実曲線は、20 地球質量の惑星によるガス圧勾配がゼロになる軌道位置を、黒の点線は、惑星がペブル孤立質量となる軌道位置を、それぞれ示す。また、黒の縦線はスノーラインを示す。

## 円盤温度構造の時間進化に対するダスト臨界破壊速度の影響：木星の影形成シナリオの検証に向けて

○小野歩<sup>1</sup> 奥住聡<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学

惑星が持つ大気の組成は、惑星の形成位置や移動過程など惑星形成に関する様々な情報を与える。木星は、観測によるとさまざまな揮発性元素および希ガスの大気組成が太陽組成に比べて一様に2~4倍程度に濃縮されていることがわかっている(Niemann et al.,1996 Atreya et al.,2016,2020)。このことは、木星が極低温の環境で形成したか、あるいは揮発性物質を閉じ込めた物質を大量に捕獲して形成したことを示唆する(Bosman et al.,2019)。

本研究では、Ohno & Ueda (2021)が提唱する木星の影形成シナリオに注目し、木星形成を議論する。影形成シナリオではまず、スノーラインの前後でダストの堆積が起これ、その後に中心星からの照射光が当たらない影ができる。この影領域は30K以下の極低温のため、高揮発性元素や希ガスが固体として存在でき、これらが惑星コアに取り込まれて大気中に放出されることで、木星大気の濃縮が実現できるというシナリオである。しかし、木星軌道付近の影はダスト進化に伴って維持されるのかどうかは明らかではない。ここで、円盤内に影ができるためにはダストの堆積が起こる必要があり、ダストの壊れやすさを決める臨界破壊速度がダストの堆積に影響することから重要なパラメータであると考えられる。

そこで本研究では、臨界破壊速度の違いによって、温度構造がどのように進化するのか計算し、極低温領域が維持されうるか調べることを目的とする。ダスト進化に関して、岩石ダストと氷ダストの臨界破壊速度をパラメータとして与え、Okuzumi et al.,2022の計算モデルを用いて、ダスト成長と温度構造の同時進化計算を行った。

その結果、氷の臨界破壊速度が大きいほど、円盤のダスト分布の時間変化が大きく、温度分布も大きく変化し、極低温領域はより内側に移動することがわかった。さらに、スノーラインのより内側への移動も見られた。次に、氷ダストに対する岩石ダストの臨界破壊速度の比を変化させたところ、その比が大きいほど極低温領域はより内側に移動するという結果であった。これは、岩石・氷ダスト間に臨界破壊速度の差があることにより、スノーラインの前後でダストが壊れ、ダストが堆積することで、以遠で極低温の影領域が実現されることが関係する。以上より、氷ダストの臨界破壊速度の大小に加え、岩石ダストと氷ダストの臨界破壊速度の差が円盤の温度分布により大きな変化を及ぼすことがわかった。さらに、臨界破壊速度の与え方によっては30K以下の極低温領域が現在の木星軌道付近でも実現できることが示され、影形成シナリオの実現可能性を示唆している。本発表では、円盤の温度構造と臨界破壊速度との関係性と、影形成シナリオの議論に向けて得られた示唆を紹介する。

# Class 0 原始星 L1527 周りに形成する円盤中のダスト塊と影領域の形成

○大橋聡史<sup>1</sup>, 仲谷峻平<sup>1</sup>, Liu Baobab Hauyu<sup>2</sup>, 小林浩<sup>3</sup>, Zhang Yichen<sup>1,4</sup>,  
花輪知幸<sup>5</sup>, 坂井南美<sup>1</sup>

<sup>1</sup>理化学研究所, <sup>2</sup>ASIAA, <sup>3</sup>名古屋大学, <sup>4</sup>バージニア大学, <sup>5</sup>千葉大学

近年、ALMA 望遠鏡のダスト連続波観測によって、原始惑星系円盤にリングやスパイラルといった様々な構造が発見されている(例えば Andrews et al. 2018)。さらに周惑星円盤の発見などあり、原始惑星系円盤ではすでに惑星が形成されている可能性が示唆されている。そこで我々は、惑星形成がいつ、どのように開始するかを調べるために、Class 0/I 原始星周りの円盤形成初期段階に着目し、観測から星間ダストの成長過程を調べている(例えば Ohashi et al. 2021, 2022b, 2022c)。

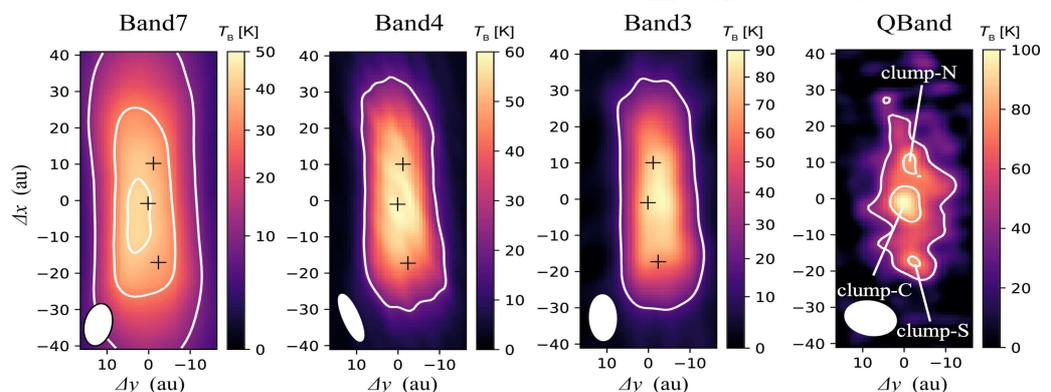
本講演では Class 0 原始星 L1527 周りの原始星円盤の観測結果を報告する(Ohashi et al. 2022c, ApJ in press)。L1527 原始星は 0.45 太陽質量で半径 74 au 程度の円盤が形成最中であることが知られている(Aso et al. 2017)。そこで、ALMA 望遠鏡と VLA を用いて波長 0.87 mm から 1.3 cm までの幅広い波長帯で高分解能観測(3-13au)を行った。

その結果、0.87 mm と 2.1 mm では、円盤半径 50 au 以内では光学的に厚いことがわかった。3.3 mm と 6.8 mm では、ダストオパシティのべき乗指数( $\beta$ )が 50 au 付近で  $\beta \sim 1.7$  となり、星間ダストと同じ値であることから、まだサイズ成長が始まっていないことが示唆される。一方でダスト温度は VLA で発見されたダスト塊の外側で急降下していることが確認された。さらに、この円盤はダスト塊の領域で重力的に不安定であることが、Toomre  $Q$  パラメータ値( $Q < 1.0$ )によって示唆される。

これらの結果は、VLA のダスト塊が重力不安定性によって形成され、外側に影を作り、その結果、温度が急激に低下したことを示唆する。また、ダスト塊の質量は 0.1 木星質量以上であった。

このことから、クラス 0/I の円盤は重力的に不安定になるほどの質量を持ち、それが半径 20 au のガス巨星惑星の起源である可能性が示唆された。さらに、原始惑星系円盤はシャドウイングにより低温である可能性もある。

図 : ALMA と VLA による L1527 円盤の観測イメージ。



## SY Cha に付随する遷移円盤の ALMA Band6 観測

折原龍太

遷移円盤とは中心領域のダスト放射が弱い空隙状の構造を持つ円盤であり、進化の進んだ原始惑星系円盤と考えられているが、その形成メカニズムは分かっていない。遷移円盤はスペクトルエネルギー分布 (SED) において、赤外超過が少ない天体として同定される。しかし、ALMA 望遠鏡による多種多様な円盤構造の高空間分解能観測がなされ、遷移円盤最内域の詳細構造の理解は SED のみでは困難であることが明らかになってきた。

本研究では ALMA 望遠鏡を用いた遷移円盤サーベイの選出天体の 1 つである SY Cha (距離: 180.7 pc, 質量:  $0.78M_{\odot}$ , 年齢: 300 万年) の 225GHz ダスト連続波と CO 分子輝線の高空間分解能データ (40 mas) の解析を行った。ダスト連続波からは、半径およそ 100au リング構造に加え、SED から判別できなかった中心点源が検出された。低解像度での撮像は過去に ALMA でなされていたが、中心部の空隙と中心点源がはっきりとイメージ上で確認されたのは初めてである。これに加え、ダスト連続波のビジビリティから軸対称モデル (幅  $\sim 100$  au のリング (動径方向の放射強度分布がガウシアン) と幅  $\sim 30$  au のリングの和) を差し引くと、最大で 15% 程度の引き残りが確認され、ダストリングの明るさの非軸対称性が明らかになった。

今回の観測では  $^{12}\text{CO}(2-1)$ ,  $^{13}\text{CO}(2-1)$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}(2-1)$  も検出され、光学的に薄い  $^{13}\text{CO}(2-1)$  においてはダストリング付近にピークを持つような構造が見られた。 $^{12}\text{CO}(2-1)$  輝線の速度構造の解析からは円盤の中心付近で速度場の歪みが確認された。この原因の一つとして、warp が考えられる。先行研究では内部円盤の傾きにより中心星からの放射を遮り、外部円盤に影を作る効果が提案されている。内部円盤の傾きによって中心星の照射を遮ることでダストリングの明るさの非軸対称性を説明できる可能性がある。

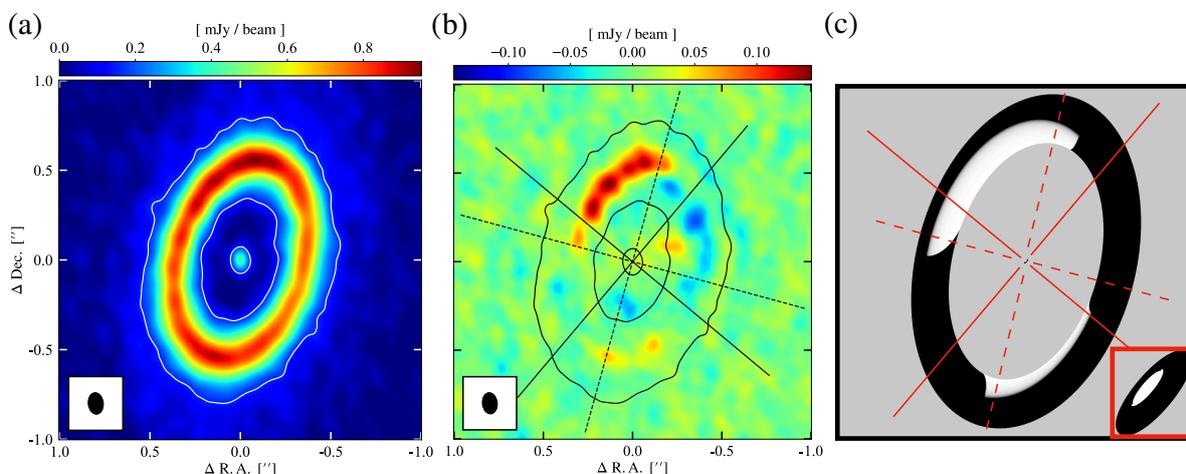


図 1 (a): SY Cha の 225GHz ダスト連続波画像。(b): 軸対称モデルを (a) から差し引いた残差マップ。(c): 残差マップを説明する inner disk による影投影モデル。

# TW Hya まわりの原始惑星系円盤内縁部のガス構造 CO 輝線における圧力広がり の発見とガス面密度の制約

○ 吉田 有宏<sup>1,2</sup>, 野村 英子<sup>1,2</sup>, 塚越 崇<sup>3</sup>, 古家 健次<sup>2</sup>, 植田 高啓<sup>4,2</sup>

<sup>1</sup> 総合研究大学院大学 物理科学研究科 天文科学専攻, <sup>2</sup> 国立天文台, <sup>3</sup> 足利大学, <sup>4</sup> マックス・プランク天文学研究所

原始惑星系円盤のガス面密度分布は、惑星系形成に関わるあらゆる物理・化学過程を議論する上で極めて重要であるにも関わらず、その観測的制約は未だ不十分である。円盤の質量の大部分を占める水素分子は、ごく高温部を除いて検出可能な放射を出さない。したがって、面密度分布の制約には他のトレーサーが検討されてきた。例えば、ダスト連続波は観測が比較的容易であり、よく用いられている。しかし、ダスト面密度分布をガス面密度分布へ変換するには、ダスト-ガス比の仮定が必要である。また、円盤内縁部では、ミリ波でも放射が光学的に厚くなり、ダスト面密度自体の不定性も大きくなる。ダスト-ガス比に依存しない手法としては、一酸化炭素同位体輝線が用いられている。しかし、光学的に薄い同位体種を選ぶ必要があるほか、一酸化炭素分子の水素分子に対する存在度は円盤内で時間的・空間的に大きく変化することが示唆されている。現在までに最もロバストだとされているトレーサーは、重水素分子 (HD) 輝線である。しかし、放射強度の温度依存性が大きいことに由来する不定性は残る。さらに、HD の主要な輝線は遠赤外線領域にあり、ハーシェル宇宙望遠鏡によって数天体でのみ検出されているものの、現在は新たな観測を行うことができない。

TW Hya 円盤は、地球に最も近く、よく研究されている原始惑星系円盤である。この円盤では HD  $J = 1 - 0$  輝線の検出があるにも関わらず、質量の推定に 1 桁以上にわたる不定性がある。我々は今回、この円盤の ALMA 観測アーカイブデータを解析したところ、円盤内縁部の  $^{12}\text{CO } J = 3 - 2$  輝線スペクトルが線中心から  $\sim 10 \text{ km/s}$  程度にまで広がった光学的に薄いウィングを持つことを発見した。さらに、この放射は空間的に円盤中心から半径数 au 程度まで広がっていた。詳細な検討の結果、この放射はガスの温度分布や非ケプラー運動、円盤風などとは整合的でないことがわかった。一方、水素分子と CO 分子の衝突による、CO 輝線の圧力広がりを考慮するとうまく説明できた。これは、原始惑星系円盤の輝線スペクトルにおける圧力広がり の初検出であり、TW Hya 円盤内縁部に高密度なガスが存在することの直接的証拠である。

圧力広がりによって生じるウィングの輝度は CO の光学的厚みと中心面付近でのガス密度に比例する。我々は、既存の  $^{13}\text{C}^{18}\text{O}$  観測の結果も考慮しつつ観測ビジビリティへのパラメータフィッティングを行うことで、半径 5 au 以内のガス面密度プロファイルを求めることに成功した。その結果、円盤内縁部のガス面密度は、先行研究で得られていた円盤外側でのプロファイルを外挿したものと比較して 30 倍程度大きく、半径 5 au 以内に 7 木星質量のガスが存在することがわかった。さらに、半径 5 au での CO/H<sub>2</sub> 比は、スノーラインの十分内側であるのにも関わらず、星間空間での値より 2 桁程度低く、円盤外側や内縁部のキャビティでの値と整合的であった。これは化学反応により CO が揮発性の低い物質に変換されているためであると考えられる。加えて、これまでに得られているガスとダストの面密度プロファイルを総合すると、半径 20 au 程度には 2 桁にわたる面密度のジャンプがあることが示唆された。この位置は、磁気回転不安定性のデットゾーン外縁に対応する可能性がある。

## 火星衛星探査計画 MMX の進展と科学 2022

○倉本 圭<sup>1,2</sup>、川勝康弘<sup>2</sup>、藤本正樹<sup>2</sup>、Maria Antonella Barucci<sup>3</sup>、玄田英典<sup>4</sup>、Jörn Helbert<sup>5</sup>、平田 成<sup>6</sup>、  
今村 剛<sup>7</sup>、亀田真吾<sup>8,2</sup>、小林正規<sup>9</sup>、草野広樹<sup>10</sup>、David J. Lawrence<sup>11</sup>、松本晃治<sup>12</sup>、Patrick Michel<sup>13</sup>、  
宮本英昭<sup>7</sup>、中川広務<sup>14</sup>、中村智樹<sup>14</sup>、小川和律<sup>2</sup>、大嶽久志<sup>2</sup>、尾崎正伸<sup>2</sup>、Sara Russell<sup>15</sup>、佐々木 晶<sup>16</sup>、  
澤田弘崇<sup>2</sup>、千秋博紀<sup>9</sup>、寺田直樹<sup>14</sup>、Stephan Ulamec<sup>5</sup>、白井寛裕<sup>2</sup>、和田浩二<sup>9</sup>、横田勝一郎<sup>16</sup>

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

2024 年の打ち上げに向け、火星衛星探査計画 MMX の開発は詳細設計段階 (Phase-C) から制作試験段階 (Phase-D) へ移行しつつある。MMX 計画の主たる科学目的は、第 1 に火星衛星の起源を明らかにし、内外太陽系接続領域 における惑星形成と物質輸送の過程に制約を与えること、第 2 に火星圏変遷の駆動メカニズムを解明し、火星圏進化史に新たな知見を与えることである。そのための一連の科学観測装置 (望遠カメラ TENGGOO、可視多バンド広角カメラ OROCHI、近赤外分光計 MIRS、ガンマ線・中性子分光計 MEGANE、レーザ測距計 LIDAR、イオン質量分析計 MSA、ダストモニタ CMDM、ローバー MMX Rover ならびに二つのタイプの試料採取装置 コアサンプラ C-SMP、気流式サンプラ P-SMP の開発が、科学運用計画や地上データ処理系等の詳細化と併せ進展している。

MMX計画の始動後も、Mars Reconnaissance OrbiterやMars Expressなど火星周回探査機や地上望遠鏡による火星衛星の観測が実施されてきたが、空間分解能や波長帯被覆に制約があり、衛星の起源の同定に至るデータは未取得である。MMXによる高品質かつ多角的な観測と回収試料分析は、衛星原物質の組成の決定とそれに基づく起源推定を初めて可能にする。火星周回探査機データの複合解析による、ダストストームによる火星大気からのH<sub>2</sub>O散逸促進過程の近年の発見を受け、撮像装置群と大気散逸イオンも検出できるMSAを併せ持ったMMXの火星大気観測の重要性が増している。隕石研究ならびに炭素質小惑星Ryuguの帰還試料の分析からは、外惑星領域で形成された揮発性成分に富む小天体が、内惑星領域へ輸送されてきている証拠が蓄積しつつある。これを受け、MMXが目指す「初期太陽系における揮発性輸送過程」の解明は、40億年以上前に遡るであろう生命生存可能惑星の形成の理解に向け、より重要性を増している。Ryuguの地上・機上観測と試料分析の照合からは、宇宙風化による炭素質小天体の分光特性の変化を理解することの重要性が示された。MMXは、高空間解像度の可視近赤外分光に加え元素存在度を求める観測 (MEGANE、MSA) を行いつつ、Phobosの最表層とやや深部の試料を併せて取得する。これにより、Phobosの固有物質組成と起源を確定するだけでなく、分光に基づく太陽系の小天体組成の多様性と分布の解釈と理解を前進させることが可能である。理論研究からは、火星に近い軌道を周回するPhobos の表土には数億年より若い火星衝突クレータからの放出物が混入し、もし火星地下浅部に微生物が生息していれば、その遺骸を帰還試料から検出しうることが示されている。MMXは、火星圏からの世界初のサンプルリターンとなる見込みであり、有人探査も見据え活性化しつつある火星探査の国際的潮流の中で、その地位は揺るぎないものとなっている。

# 火星衛星の起源における フォボス・ディモス分裂説の検討

○玄田英典<sup>1</sup>、兵頭龍樹<sup>2</sup>、関口凌介<sup>1</sup>、Gustavo Madeira<sup>3</sup>、Sébastien Charnoz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学・地球生命研究所、<sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所、

<sup>3</sup>パリ地球物理研究所

火星には2つの小さな衛星（フォボスとディモス）が回っている。JAXAの火星衛星探査（MMX）計画により、火星衛星に関する研究が、近年盛んに行われるようになってきている。現在、火星衛星の起源として有力視されている仮説が2つある。2つの小天体が火星に捕獲され衛星となった「捕獲説」と、火星に天体が衝突し、火星周回上にばら撒かれた破片から2つの衛星が形成されたとする「衝突説」である。そして、最近、火星の周りを回っていた1つの大きな衛星が数十億年前に2つに分裂し、それらが現在のフォボスとディモスとなったという可能性が発表された（Bagheri et al. 2021 Nature Astronomy）。もし、この可能性が正しければ、火星衛星の起源に関して、1つの大きめな衛星の起源だけを考えればよく、従来の「捕獲説」もしくは「衝突説」に大きな修正が加わる。

Bagheriら（2021）は、フォボスとディモスの現在の軌道を、火星との潮汐相互作用を考慮して時間をさかのぼる計算を行い、フォボスの遠点とディモスの近点が、数十億年前に交差する可能性があることを示した。このことから、現在のフォボスとディモスが共通の1つの衛星から分離してできたのではないかと考えた。分離のプロセスとしては、衛星への天体衝突を候補に挙げているが、そもそも、単純に2つの天体に綺麗に分離するとは限らない。さらに、一度は分離したとしても、2つの衛星は軌道が交差しているため、ごく短期間で再度衝突してしまう可能性がある。

そこで、本研究では、分離直後の2つの衛星の軌道進化を、火星本体の扁平による歳差運動を考慮して数値計算し、2つの衛星が再衝突するまでの時間を求めた（Hyodo, Genda et al. accepted to PSJ）。その結果、ほとんどの場合で、1000年以内に2つの衛星が再衝突してしまうことがわかった。この1000年というタイムスケールは、2つの衛星が火星との潮汐相互作用で離れていくタイムスケール（100万年以上）よりかなり短い。さらに、再衝突時の衝突速度は、100-300 m/s程度であり、2つの衛星の脱出速度の10-30倍となることがわかった。そのような衝突は破壊的な衝突であり、共回転半径付近（約6倍の火星半径）にデブリ円盤が形成される。このようなデブリ円盤からは、多数の小さな衛星が形成されることがわかっており、現在のような2つの火星衛星となる可能性は極めて低い。以上のことから、フォボスとディモスが、過去に1つの共通の衛星から分離してできた可能性は、極めて低いことがわかった。

## OI-03

### 火星への彗星大気成分の輸送についての観測的研究 (On delivery of cometary atmosphere to Mars)

益永圭<sup>1</sup>、寺田直樹<sup>2</sup>、堺正太郎<sup>2</sup>、横田勝一郎<sup>3</sup>、原田裕己<sup>4</sup>、原拓也<sup>5</sup>、白井寛裕<sup>1</sup>

1. JAXA/ISAS, 2. 東北大学, 3. 大阪大学, 4. 京都大学, 5. カリフォルニア大学バークレー校

2014年10月に Comet Siding Spring が火星に接近し、約14万キロメートルまで近づき通過した。この際、火星探査機 MAVEN により、火星超高層大気中の彗星ダスト由来の物質 (Mg や Fe 及びそれらのイオン) の増加が観測され、彗星から火星超高層大気へダスト由来の物質が輸送されたと考えられている (Schneider et al., 2015, Crismani et al., 2018)。一方、彗星の水由来の物質(H や O など)についての目立った増大は観測されず、火星超高層に既に存在する量に比べ無視できる量しか輸送されなかったと考えられてきた。

近年、我々は火星探査機 MAVEN のプラズマ観測データを用い、ピックアップイオンの起源である外気圏大気の数密度分布をリトリバルする手法を開発している。本手法を彗星通過時のデータに用いたところ、火星超高層に広がる外気圏酸素原子の数密度が彗星の通過前後で数倍増大していることに気がついた。また、同時期にひさき衛星が地球軌道から観測した火星の水素・酸素大気光も通常時よりも増光傾向であった。これらの観測結果より、我々は彗星から水由来の物質が火星へ輸送され、火星外気圏大気に変化が起きていると考えた。ただし、彗星の火星接近時には、Coronal Mass Ejection (CME) と呼ばれる太陽フレアに伴った強烈な太陽風が火星へ到来し、火星地上ではダストストームが偶然にもほぼ同時に発生していたため、何が原因で火星外気圏に変化を及ぼしているのかを考える必要がある。

本研究では、MAVEN の太陽風観測データや火星探査機 Mars Reconnaissance Orbiter の大気観測データも解析し、太陽風やダストストームの影響についても考慮した上で彗星が火星外気圏へ及ぼす影響について議論する。

## 火星探査機インサイトの地震および気象データからみるダストデビルの特徴

○大塚亮治<sup>1,2</sup>, 小野寺圭祐<sup>3</sup>, 田中智<sup>1,2,4</sup>, 川村太一<sup>5</sup>

<sup>1</sup>東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻, <sup>2</sup>JAXA 宇宙科学研究所, <sup>3</sup>東京大学地震研究所, <sup>4</sup>総合研究大学院大学, <sup>5</sup>Université Paris Cité/IPGP

火星探査機インサイトは、2019年2月より地震並びに気象観測(圧力、気温、風速など)を行っている。火星で見られる一般的な気象現象の一つにダストデビル(移動局所低気圧)がある。ダストデビルは、火星の局所的な大気活動を反映しているため火星の気象現象の理解に役立つ。また、気圧変動に伴い地面の変動を引き起こすため、圧力と地震データを組み合わせることで地下構造の推定にも利用できる[1][2]。

上述のように、ダストデビルは火星の気象現象・地下構造を調べる上で有用であるものの、ダストデビルという現象自体には未だ謎が多い。例えば、インサイトによる観測データでは、ダストデビルと思われるイベントが約13000程度観測されている、これらは圧力降下と地面変動の特徴から、いくつかの種類に分けることができる。しかしながら、異なる特徴のイベントが検出される原因は未だ特定されていない。

本研究では、ダストデビルという現象をより多角的に理解することを目的として、インサイトの地震および気象観測データの解析ならびに統計処理を行っている。

本発表では、過去の研究で主に使用され

てきた地震・圧力データに加え、気温・風速・風向データを解析に組み込むことでより体系的にイベント発生前後の傾向を調査した結果について報告する。

まず我々は、ダストデビルが観測点を通過する前後10分間の地動・圧力・気温・風速・風向の傾向を見るため、時系列データの可視化を行った。また、バックグラウンドの傾向との比較を行うため、1火星日スケールでも可視化を行い、約3年分のデータの大局的な傾向について調査した。

火星には1火星日スケールでの圧力・気圧・平均風速において季節変動が存在することが知られている。ダストデビルについても通過に伴う圧力降下の大きさ、圧力降下の継続時間などを調査した結果、季節によって有意な差が見られることがわかった。

### 参考文献

[1] Banerdt et al. (2020), *Nature Geosci.*, 13, 183-189.

[2] Kenda et al. (2020), *JGR Planets*, 125, 6, e2020JE006387.

## Mars as Seen by InSight SEIS after 1200 sols of seismic monitoring

○T. Kawamura<sup>1</sup>, W. B. Banerdt<sup>2</sup>, P. Lognonné<sup>1</sup>, D. Giardini<sup>3</sup>, M. P. Panning<sup>2</sup>, W. T. Pike<sup>4</sup>, S. Smrekar<sup>2</sup>, D. Antonangeli<sup>5</sup>, D. Banfield<sup>6</sup>, E. Beucler<sup>7</sup>, E. Bozdag<sup>8</sup>, J. Clinton<sup>3</sup>, G. Collins<sup>4</sup>, I. Daubar<sup>9</sup>, R. Garcia<sup>10</sup>, J. Irving<sup>11</sup>, S. Kedar<sup>2</sup>, B. Knapmeyer-Endrun<sup>12</sup>, L. Margerin<sup>13</sup>, C. Michaut<sup>14</sup>, D. Mimoun<sup>10</sup>, F. Nimmo<sup>15</sup>, N. Schmerr<sup>16</sup>, N. Teanby<sup>11</sup>, R. Weber<sup>17</sup>, M. Wieczorek<sup>1</sup> and the InSight SEIS Team

<sup>1</sup>Université Paris Cité, Institute de physique de globe de Paris, CNRS, <sup>2</sup>Jet Propulsion Laboratory, <sup>3</sup>Institute of Geophysics, ETH Zurich, Zurich, School of Earth Sciences, University of Bristol, <sup>4</sup>Imperial College London, <sup>5</sup>Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie/Sorbonne Université, <sup>6</sup>Cornell University, <sup>7</sup>Nantes Université, <sup>8</sup>Colorado School of Mines, <sup>9</sup>Brown University, <sup>10</sup>ISAE-Supaero, <sup>11</sup>University of Bristol, <sup>12</sup>University of Cologne, <sup>13</sup>L'Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, <sup>14</sup>École Normale Supérieure de Lyon, <sup>15</sup>University of California, Santa Cruz, <sup>16</sup>University of Maryland, <sup>17</sup>NASA Marshall Space Flight Center

Successful landing of NASA InSight lander has opened a new frontier in Mars science and planetary seismology. SEIS has detected more than 1000 seismic events which were then deeply investigated to uncover the internal structure of Mars. We would like to review the latest achievements made with SEIS observation and the new view of Mars as seen by InSight SEIS.

- Mars has a rich seismicity with variety of different types of seismic events.
- Most of the Low Frequency family events is coming from Cerberus Fossae region.
- Upper 10 km below the landing site has a significant seismic anisotropy and low seismic velocity.
- A Martian crust/mantle discontinuity either at  $20 \pm 5$  km ( $< 2700$  kg/m<sup>3</sup>) or  $38 \pm 8$  km ( $< 3100$  kg/m<sup>3</sup>).
- A Martian mantle has a thick thermal lithosphere of  $500 \pm 100$  km generating a low shear velocity zone at the base of that lithosphere but relatively constant P velocities and with a broad transition zone between 800–1100 km
- A relatively large liquid core of  $1830 \pm 40$  km implies a low density, confirming a volatile rich accretion scenario.
- Certain seismic events were confirmed to be impact through orbital imaging.

# 炭素質コンドライトの反射分光特性と その入射角依存性

○境橋凌<sup>1</sup>、亀田真吾<sup>1</sup>、中村智樹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>立教大学大学院理学研究科、<sup>2</sup>東北大学大学院理学研究科

MMX は、火星衛星 Phobos の赤い領域と青い領域からのサンプルリターンを目的とする計画であり、2024 年に打ち上げが予定されている。この計画の主な目的は、Phobos から持ち帰ったサンプルを分析することで火星衛星 Phobos と Deimos の起源を決定することである。これによって、火星圏の進化の過程にも制約を与えることができると期待されている。

この探査機には広角分光カメラ(OROCHI)が搭載される。このカメラは、バンドパスフィルターによって 390nm、480nm、550nm、650nm、730nm、860nm、950nm の 7 波長を分光観測し、火星衛星からの距離 20km の場所で衛星表面に焦点が合うように調整されている。

OROCHI によってサンプル採取地点を決定する際に、その場所の反射スペクトルを事前に捉え、赤い領域か青い領域か判別する必要がある。しかし先行研究[Potin et al., 2019]では、CM2 炭素質コンドライトを、位相角(光源-CM2 炭素質コンドライト-カメラがなす角度)を固定しながら入射角を大きくしていくと、赤化したスペクトルが観測されるという結果が示されている。つまり実際の観測のように、観測領域の傾きによって入射角と反射角が変わるような状況では、観測されるスペクトルも変化してしまうということになる。このような影響が起きる場合、本来青い領域を赤い領域として観測してしまう等の問題が生じ、サンプル採取ターゲットである赤い領域と青い領域それぞれを正確に決定することができなくなり得る。よって、鉱物の表面状態と観測されるスペクトルの変化の仕方の関連性を解明しておくことが、サンプル採取を成功させる上で重要となる。

そこで本研究でも同様に、位相角(光源-CM2 炭素質コンドライト-カメラ)を固定しながら入射角を大きくしていき、CM2 炭素質コンドライトを分光観測して得られるスペクトルの変化の有無の確認を行った。その結果、青化したスペクトルが観測され、先行研究とは異なる結果が得られた。本発表では、この変化の原因と変化量の評価、今後の展望を中心に報告する。

## レーザー局所分析法による火星隕石の K-Ar 年代測定の 装置改良と精度向上について

○日向 輝<sup>1</sup>、長 勇一郎<sup>1</sup>、三浦 弥生<sup>2</sup>、田畑 陽久<sup>1</sup>、湯本 航生<sup>1</sup>、杉田 精司<sup>1</sup>

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 東京大学地震研究所

**研究背景:** 火星で探査機が複数の地質ユニットの放射年代測定を行うことは、火星の層序年代に絶対年代スケールを付与できるため、非常に重要である。絶対年代の測定は NASA の火星探査機キュリオシティが行った[1]が、結晶格子内部の Ar を十分に抽出できない可能性や K と Ar を独立に測定するため厳密に同じサンプルで測定されていないなど改善の余地が指摘されている[2]。それらの問題を解決するための新しい年代測定装置の開発が進んでいる[3-5]。レーザー局所分析法は Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) と質量分析計を組み合わせた方法で、試料に数百  $\mu\text{m}$  のスポット径のパルスレーザーを照射することで岩石の K 濃度の局所分析を行うと同時に質量分析計で Ar 量を測定することでアイソクロンを得る手法である。この測定方法を用いて K に富む地球の岩石や玄武岩などの分析結果が報告されている[6]。著者らのこれまでの研究で、形成年代が約 700 Ma のシャーゴッタイトに対しても K-Ar アイソクロン年代が測定可能であるという予備的な結果を得た(Hyuga et al. 2022, JpGU)。しかし同研究では、(1)火星隕石の全岩カリウム濃度 1600 ppm[7] に対して検量線の低 K 濃度領域( $< 1000$  ppm)では精度が著しく低下すること、(2) アイソクロンに用いるカリウム濃度のばらつきが 1.9 倍程度と狭く、アイソクロンフィッティングの精度が低い(誤差 18 %)こと、が問題になっていた。前者の原因は、 $\text{K}_2\text{O}$   $< 1000$  ppm 程度の低 K 濃度では、766.5 nm に出現する K 輝線と重なる他元素の輝線強度が相対的に無視できなくなり、検量線のばらつきを生んでいたことにある。しかし過去の LIBS 研究から、プラズマの温度圧力状態やプラズマの観察角度によって出現する輝線の種類や太さが変わることはよく知られていた。また後者のアイソクロンのカリウム濃度幅を広くとれない原因は、火星隕石内のカリウム分布の空間スケールに対して、レーザービーム径が大きいことであると考えられた。

**研究目的:** そこで本研究では、(1) カリウムに重なる輝線の生成が阻害される実験条件を見出すこと、(2)火星隕石内部のカリウム分布の空間スケールを実測し、得られるカリウム濃度幅とレーザービーム径との関係を調べることを目的とした。

**実験結果:** まず、火星隕石であるシャーゴッタイト NWA1068 とナクライト NWA817 の 2 つについて、EPMA で含まれる鉱物種と各鉱物における K 濃度を測定し、そこから K 濃度のマップを作成した。LIBS によって測定される K 濃度はレーザー径内部の K 濃度の平均値としてあらわれることが期待される。そこで、得られた K 濃度マップに対してレーザー照射の領域に含まれるピクセルの K 濃度の平均を計算することで、照射するレーザーの直径を変化させたときに測定されるであろう K 濃度の分布を計算した。一方、Bogard (2009)ではアイソクロン上のデータ点における K 濃度の最大値/最小値の比が 4 以上であれば、十分な精度のアイソクロンを引くために必要な K 濃度のばらつきが得られるとしている[8]。本研究においてレーザービーム径が NWA1068 で 600  $\mu\text{m}$  以下、NWA817 で 500  $\mu\text{m}$  以下であればその条件を達成できることが分かった。

次に、これまでの測定においてはレーザーの照射軸に対してプラズマ光を斜め方向から観測していたが、レーザーと観測光路を同軸にすることによってプラズマ光を真上から観測するように装置を改良した。この結果、斜めから計測していた時には 766 nm の K の輝線に別の輝線が重なってしまい K 輝線のみの強度を求めることが困難だったが、同軸にしたことで重なっていた別の元素の輝線が現れなくなり K の輝線強度だけを測ることができるようになった。今後新たに検量線を構築して実証する必要があるものの、このことはカリウムの濃度が低い領域でもばらつきの少ない検量モデルを作れることを示唆する。

以上の検討から、レーザービーム径を 500  $\mu\text{m}$  以下に絞り、かつ同軸の光学系でプラズマを観察する改良によって、火星隕石において必要な低 K 濃度( $< 1000$  ppm)領域でのアイソクロン年代計測の精度が向上する可能性があることが分かった。

**参考文献:** [1] Farley+ 2014 Science 343:1247166, [2] Vasconcelos+ 2016 JGR, 121:2176, [3] Cohen+ 2014 Geostand Geoanal Res, 38:421, [3] Cho+ 2016 PSS, 128:14, [5] Devismes+ 2016 GGR, 40:517, [6] Cho & Cohen 2018 RCMS, 32:1755, [7] Barrat+ 2002 Geochimica et Cosmochimica Acta, 66(19):3505, [8] Bogard 2009 MaPS, 44, Nr 1, 3-14

# MMX ローバ搭載用ラマン分光器 RAX: FM 開発報告

○長 勇一郎<sup>1</sup>, 森晶輝<sup>1</sup>, 湯本航生<sup>1</sup>, 田畑陽久<sup>1</sup>, 佐藤泰貴<sup>2</sup>, 剣持伸朗<sup>2</sup>, 小川和律<sup>2</sup>, 杉田精司<sup>1</sup>, 亀田真吾<sup>3</sup>, 臼井寛裕<sup>2</sup>, Ute Böttger<sup>4</sup>, Conor Ryan<sup>4</sup>, Maximilian Buder<sup>4</sup>, Till Hagelschuer<sup>4</sup>, Selene Routley<sup>4</sup>, Enrico Dietz<sup>4</sup>, Emanuel Kopp<sup>4</sup>, Heinz-W. Hübers<sup>4</sup>, Andoni Moral<sup>5</sup>, Fernando Rull<sup>6</sup>, Yuri Bunduki<sup>4</sup>, Martin Pertenais<sup>4</sup>, Gisbert Peter<sup>4</sup>, Olga Prieto-Ballesteros<sup>5</sup>, Steve Rockstein<sup>4</sup>, Thomas Säuberlich<sup>4</sup>, Susanne Schröder<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup>JAXA, <sup>3</sup>立教大学, <sup>4</sup>Institute of Optical Sensor Systems/DLR, <sup>5</sup>Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, <sup>6</sup>Universidad de Valladolid

日本の火星衛星探査計画 Martian Moons Exploration(MMX)には、フォボス地表を走行して探査する小型ローバが搭載される予定である。ローバに搭載されるサイエンス機器の一つに、ラマン分光装置 RAX(Raman Spectrometer for MMX)がある。RAX は、フォボス表面の鉱物組成を決定し、フォボスの起源や物質分布の不均質性を明らかにすることを旨とする。

RAX はラマン散乱光励起用の CW レーザモジュール(波長 532 nm)と分光計モジュール(波長範囲 532~680 nm)から構成され、両者は光ファイバで接続される。ローバ内の極めて限られた体積に全てを収納する必要があり、RAX 全体の大きさは、レーザモジュールが 61×51×19 mm, 分光器モジュールが 105×98×83 mm で、合計重量は 1.5 kg である。日本とドイツ DLR が分光器モジュールを、スペイン INTA がレーザモジュールを分担して開発した。日本側は微弱なラマン散乱光を大きな立体角で集める集光光学系(Light Shuttle Objective, LSO)と、そのレンズを移動させてレーザのピントを試料に合わせる焦点調節機構(Autofocusing Subsystem, AFS)を担当した。レンズの対物距離は 78 mm, 移動可能距離は 14 mm である。

AFS は小型軽量(65×62×45 mm, 238 g, うちレンズが 135 g)でありながら NA 0.2 の明るい光学系と駆動部を併せ持ち、レンズ位置制御の分解能が 0.8  $\mu\text{m}/\text{step}$ 、バックラッシュ 20  $\mu\text{m}$  以下という性能を持つ。高い耐環境性能を持ち、環境温度が-50°Cでもレンズを上下駆動でき、30 Grms のランダム振動および 1000 G@1000 Hz の衝撃に耐える。このような高い耐環境性を持つ駆動部付き光学系は、今後の着陸探査でも広く活用できる技術である。レーザの合焦位置は、試料に対して照射されるレーザの反射光強度と CMOS 検出器面に投影されるスリット像のコントラストを最大化するアルゴリズムによって決定される。

AFS の開発は 2019 年 4 月に開始され、2021 年 12 月には日本での認定試験(QT)とプロトフライト試験(PFT)が完了した。2022 年 1 月には AFS のプロトフライトモデル(PFM)がドイツにある RAX 本体に組み付けられた。2022 年 5-7 月には RAX 全体の FM 統合試験が行われ、マイナス 40°C、0°C、および 40°C の熱真空環境におけるピント調整動作や、カンラン石や赤鉄鉱といった鉱物試料のラマンスペクトル取得が End-to-End で確認された。2022 年 8 月には RAX のフライトモデルが完成してフランス CNES のローバチームへ引き渡され、RAX としての開発が完了した。

## OI-09

### [表題]

MMX 搭載望遠カメラ TENG00 性能評価のための平行光源の開発

### [内容]

火星にはフォボスとダイモスという2つの衛星が存在する。これら2つの衛星は小惑星が火星の引力により捕獲されたものなのか、火星に巨大な天体が衝突し、周囲に飛び散った破片が再集積して形成されたものなのかまだ解明されていない。火星衛星探査計画（MMX）において、この謎を解き明かすことにより惑星の形成過程や、地球型惑星への水の運搬過程に対する新たな知見を得ることが期待される。MMX ではサンプルリターンの他にカメラを使用したリモートセンシングも行われる予定である。

MMX において探査機に搭載されるカメラの1つである望遠カメラ（TENG00）は、探査機の着陸地点の安全性の確認に使用される。そのため TENG00 の性能を評価することはこの計画の成功において非常に重要となる。TENG00 の性能は平行光を入射させた時の結像面での点像分布関数(PSF)または、線像分布関数(LSF) から評価する。本研究では TENG00 よりも高い結像性能を持つ屈折式望遠鏡を用いて平行光源を作成した。平行光源は、まず点光源を作成する装置を製造し、この装置で作成した点光源をコリメータ(屈折式望遠鏡)の焦点位置に配置することで作成する。ここで、平行光源の拡がりとは焦点位置に配置したカメラの検出面で観測される点像の大きさを用いて解析を行う。結果として本実験では 1.18 秒角のビーム拡がりを持つ平行光源を作成することができた。これは TENG00 の瞬間視野である 1.2 秒角よりも小さい値のため、作成した平行光源を TENG00 に入射させた時、検出面が焦点位置に正確に配置されていると仮定すると1画素以内に集光することになる。また、実際に作成した平行光源を TENG00 の試作機に入射させる実験も行った。本発表では実験方法、作成した平行光源のビーム拡がりの大きさ、実際に平行光源を TENG00 の試作機に入射させた時の実験結果について報告する。

## ヘルクレス座 $\tau$ 流星群の 2022 年の出現について — 分裂彗星核からの流星群 —

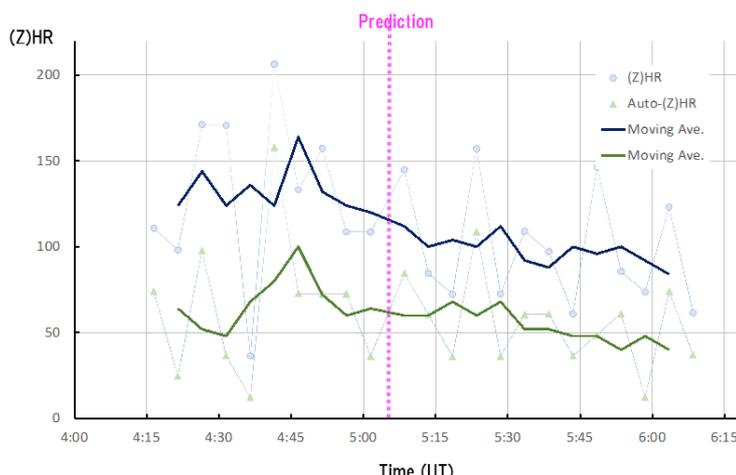
○渡部潤一<sup>1</sup>、佐藤幹哉<sup>1</sup>、土屋智恵<sup>1</sup>、長谷川均<sup>2</sup>、蓮尾隆一<sup>2</sup>、NHKコズミックフロント  
取材班<sup>3</sup>

<sup>1</sup>自然科学研究機構国立天文台、<sup>2</sup>国立天文台太陽系小天体ゼミ、<sup>3</sup>日本放送協会

ヘルクレス座  $\tau$  流星群は 73P/Schwassmann-Wachmann 彗星を起源とする流星群である。1930 年に発見された周期 5.4 年の短周期彗星で、初期から流星群出現の可能性が指摘された。実際同年に花山天文台で微光流星の出現が記録された[1]。その後、彗星は行方不明となり、流星群も出現しなかった。1979 年に再発見された彗星は 1995 年 9 月に大規模なアウトバーストを起こし、肉眼等級に達すると共に、彗星核は少なくとも A~D 核の 4 個に分裂した。分裂後の彗星は雲散霧消する例も多いが、B と C 核は 2000 年の回帰時にも生き残り、2006 年には地球に接近し、多数の破片が観測された[2]。

激しい分裂を経た彗星起源の流星群は 19 世紀の 3D/Biela 彗星に伴うアンドロメダ座流星群の例があるだけである。我々は 1995 年の分裂時を起源とする流星体が流星群として出現する計算・予測を行い[3]、秒速 26-7m の放出速度なら 2022 年 5 月 31 日に出現する可能性を指摘した。通常の流星体の放出速度としてはかなり早く、否定的な意見もあったが、分裂現象の激しさから、この速度はあり得ると考え、予測極大時刻に観測条件の良い米国に遠征観測を試み、非常に暗い流星が増加する様子を捉えた（図：肉眼（上）および自動検出

（下）による 5 分毎の出現数変化）。予報時刻よりも早めにピークとなり、Influx は  $5.9 \times 10^{-3}$  [km<sup>2</sup>/hr]であった。いずれにしろ、彗星核分裂時には通常より高速で流星体が放出されることが確かめられた。これは今後の流星群の予報に役立つだけでなく、彗星の分裂現象への新たな知見を与える貴重な現象である。本発表では、本遠征観測の経緯と結果を紹介する。



参考文献：[1] Nakamura K. (1930) MNRAS, 91, 204-209. [2] Fuse et al. (2007) PASJ, 59, 381-386. [3] Horii, S., Sato, M., Watanabe, J. (2008) EMP, 102, 1-4, 85-89.

## 室内実験を用いた有機物や鉄を含む人工流星の分光学的研究

○ 宇田天音<sup>1</sup>, 阿部新助<sup>1</sup>, 長谷川直<sup>2</sup>

<sup>1</sup>日本大学大学院理工学研究科, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

アブレーションに伴い後部に伸びる流星尾(wake)は、数値モデルでも再現できていない非平衡プラズマであり、流星頭(head)と空間的に分解できる室内実験は、流星アブレーションの物理過程を知る上で重要である。しかし、従来の流星アブレーション実験では、アーク加熱風洞を用いた実験が主流であり(e.g., S. Loehle et al., 2017, B. Helber et al., 2019), サンプル供試体を支える支持棒の影響などで、wake プラズマの挙動に関しては、正確な計測が行われていない。

我々は、JAXA 宇宙科学研究所・超高速衝突実験施設の横型 2 段式軽ガス銃と複数のプロジェクタイトルを用いた流星アブレーション実験を行った。射出部から短距離(窓 1: 5.4m, 窓 2: 6.7m)で十分な流星アブレーションを発生させるため、チャンバー内の圧力を 3kPa~300Pa に設定し、(1) ポリカーボネイト球( $\phi$  7.14mm)を用いた有機物(C2)発光, (2) ステンレス球( $\phi$  1.0mm)を用いた Fe 発光, (3) チェリャビンスク隕石(LL5:  $\phi$  1.0mm)を用いた隕石火球を模擬した実験を行った。

分光計測は、可視超高速分光(波長 400-800nm, 露光 1.7 $\mu$ s), 可視高速分光(波長 400-900nm, 露光 14.3 $\mu$ s), 紫外・可視分光(波長 200-1000nm, 露光 10ms)を行い、カラーの高速度撮像も併用している。また、アブレーション原子の化学反応(特に酸化反応)が発光強度や発光効率等にどのように影響を及ぼしているのかを明確にするために、標準大気と窒素大気中の比較実験を実施した。窒素大気中での流星アブレーションは、窒素を主成分にもつタイタンなどの他の惑星や原始地球環境の模擬といった応用研究も考えられる。本発表では、初期成果を報告する。

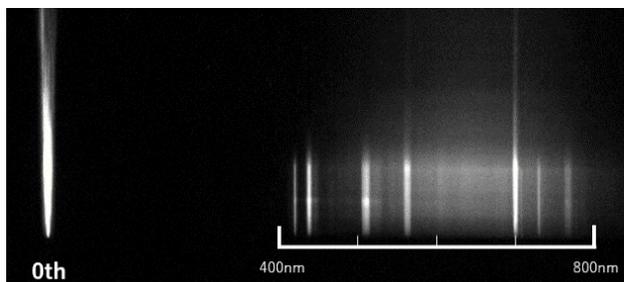


図 1. 可視高速分光  
ステンレス球( $\phi$  1.0mm)



図 2. 可視高速撮像  
チェリャビンスク隕石( $\phi$  1.0mm)

## ふたご座流星群母天体 Phaethon 小惑星からの ダスト放出メカニズムの解明

○木村 宏<sup>1</sup>、大塚 勝仁<sup>2</sup>、菊地 翔太<sup>3,1</sup>、大槻 圭史<sup>4</sup>、荒井 朋子<sup>1</sup>、吉田 二美<sup>5,1</sup>、  
平田 直之<sup>4</sup>、千秋 博紀<sup>1</sup>、和田 浩二<sup>1</sup>、平井 隆之<sup>1</sup>、洪 鵬<sup>1</sup>、小林 正規<sup>1</sup>、  
石橋 高<sup>1</sup>、山田 学<sup>1</sup>、岡本 尚也<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 千葉工業大学惑星探査研究センター (PERC)、<sup>2</sup> 東京流星観測網、<sup>3</sup> 国立天文台、  
<sup>4</sup> 神戸大学、<sup>5</sup> 産業医科大学

地球近傍小惑星 (3200) Phaethon は DESTINY+ 探査計画におけるフライバイターゲットになっている。Phaethon はふたご座流星群の母天体であるが、彗星のような氷の昇華によるダスト放出は確認されてはいない。それにもかかわらず、Phaethon の近日点付近 (日心距離～約 0.14 天文単位) で彗星に見られるダストの尾のようなものが STEREO-A 探査機搭載カメラ SECCHI により観測されてきた。SECCHI グループが行った観測データの解析によると、ミクロンサイズのダスト放出が約 1 日程度に亘り継続して尾が形成されたと推測される。しかし、ふたご座流星群として観測されるミリメートルサイズのダスト同様、どのようにして小惑星がミクロンサイズのダストを放出できるのか？その問いにこれまで誰も明確な答えを見出せなかった。本発表では、ミクロン～ミリメートルサイズのダストが観測と矛盾なく放出されるメカニズムを理論的に解明したのでそれを報告する。

我々が提案するダスト放出メカニズムでは、Phaethon 表層の昼夜境界付近で近日点通過時の約 24 時間程度だけミクロン～ミリメートルサイズのダストに働く静電反発力が付着力および重力を上回る状況が生じる。これは、Phaethon 表層において層状ケイ酸塩に含まれるナトリウムイオンの拡散率が近日点付近でピークとなり、ダスト表面の電気伝導度を上げる効果と表面エネルギーを減らす効果が同時に起こり、昼夜境界付近でダスト放出に十分な強電場が作られることに起因する。我々の理論では、このメカニズムでのダスト質量放出率がダストサイズに反比例する。したがって、ミリメートルサイズのダスト質量放出率はミクロンサイズのものより 3 桁大きい。ミクロンサイズのダスト質量放出率が観測データから得られたように 3 kg/s 程度であるなら、ミリメートルサイズのダスト質量放出率は約 3000 kg/s となり、これがふたご座流星群の年齢である 2000 年間継続したとすると、ふたご座流星群の軌道上にあるミリサイズのダストは総質量が  $4 \times 10^{11}$  kg であるが見積もることができる。これは、ふたご座流星群の軌道上にあるミリサイズのダストを撮像した Parker Solar Probe 探査機搭載カメラ WISPR によるデータ解析から得られたダスト総質量に匹敵する。

## DESTINY<sup>+</sup>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<sup>1</sup>, 洪鵬<sup>1</sup>, 岡本尚也<sup>1</sup>, 山田学<sup>1</sup>, 奥平修<sup>1</sup>, 須崎祐多<sup>2</sup>, 宮原剛<sup>2</sup>, 太田方之<sup>2</sup>,  
石丸貴博<sup>2</sup>, 荒井朋子<sup>1</sup>, 吉田二美<sup>1,3</sup>, 鍵谷将人<sup>4</sup>, 亀田真吾<sup>5</sup>, 高島健<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>千葉工大, <sup>2</sup>JAXA, <sup>3</sup>産業医科大, <sup>4</sup>東北大, <sup>5</sup>立教大

2024 年に打ち上げ予定の深宇宙探査技術実証ミッション DESTINY<sup>+</sup> (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUst science) は, 理工学連携ミッションで, イプシロンロケットで打ち上げる小型探査機により地球周辺のダスト観測および小惑星(3200) Phaethon のフライバイ探査を実施予定である。DESTINY<sup>+</sup>の理学目的は, 宇宙から地球へ飛来するダストの実態解明および地球飛来ダストの特定供給源である流星群母天体の実態解明である。Phaethon は岩石質の地球近傍小惑星でありながら, 近日点付近ではダストを放出することが知られており, 活動小惑星と呼ばれている。3 大流星群の一つであるふたご座流星群の母天体として知られており, 地球へダストによる物質供給を行っている天体としても非常に興味深い天体の一つである。

DESTINY<sup>+</sup>探査機には 2 台のカメラ, 小惑星追尾望遠カメラ TCAP (Telescopic CAmera for Phaethon) およびマルチバンドカメラ MCAP (Multiband CAmera for Phaethon) が搭載され, 探査機が Phaethon を相対速度約 35 km/s, 最接近距離約 500 km という高速フライバイ条件 (最大相対角速度約 4 deg/sec) でフライバイする間に Phaethon の撮像を行う。TCAP は可視波長域の望遠カメラで, Phaethon を追尾しながら, Phaethon のライトカーブ観測, グローバル形状観測, 日照域の 3 次元形状観測, および詳細地形観測を, Phaethon までの距離に応じて実施する。MCAP は可視から近赤外にかけての観測波長を持つマルチバンドカメラで, Phaethon 日照域の物質観測を実施する。これらの観測により, TCAP による詳細地形観測と MCAP による表層スペクトル分布を合わせて理解することにより, Phaethon からのダスト生成・放出機構についての知見が得られると期待されている。

DESTINY<sup>+</sup>では, 小天体フライバイ探査史上, 最高角速度下かつ最高空間解像度での撮像を目指しており, 視野から外すことなくぶれずに撮像を行うのは, 技術的に非常にチャレンジングである。そのため, 打ち上げ前の追尾撮像性能検証が必須である。

現在, TCAP と MCAP はフライトモデル (FM) の一段階前の検証モデルであるエンジニアリングモデル (EM) の製造フェーズに入っている。本発表では 2 台のカメラの開発状況および追尾撮像性能検証の準備状況について報告する。

## 惑星探査用キューブサット MAEBASHI-SAT の開発 ～地上系の開発報告～

○清水 翼<sup>1</sup>, 荒木関 駿斗<sup>1</sup>, 佐々 健太郎<sup>1</sup>, 曾我 晃暉<sup>1</sup>, 細谷 優希<sup>1</sup>, 荒井 武彦<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>前橋工科大学 工学部 システム生体工学科

次期惑星探査では，母船による惑星表層の遠隔探査と着陸機による地表の直接探査が主流になると考えられる．未知の惑星へ着陸は危険を伴うため，斥候として，子機による事前調査が有効となる．前橋工科大学では微小重力天体へ着陸して科学観測を行うキューブサット「MAEBASHI-SAT」の開発を進めている．着陸したい地域にピンポイントで着陸して，熱プローブで地中の温度を測定したり，レーザによる加熱や赤外分光イメージングなど行なったり，独立した探査を行うことができるキューブサットを目指している．現在，キューブサットのデザインやブレッドボードモデルの開発と並行して，地上系の開発も進めている．学内にアマチュア無線帯のアンテナを搭載した赤道儀による衛星の自動追尾機能が設置され，キューブサットとのテレコマ通信が可能になった(図 1)．地球周回を行なっているキューブサットや月面に貫入する JAXA の OMOTENASHI 探査機などのテレメトリの受信を試みている．本発表では，開発を進めている地上系によるテレメトリの受信状況と「MAEBASHI-SAT」の開発状況を報告する．



図 1 前橋工科大学内に設置された UHF 帯域(144MHz)と VHF 帯域(430MHz)の無線用アンテナ．天体望遠鏡の自動赤道儀に搭載されており，PC 制御で衛星を追尾して，テレコマ通信する．

## 鉄流星の分光観測と発光メカニズムに関する研究

○菊地啓太<sup>1</sup>, 阿部新助<sup>1</sup>, 前田幸治<sup>2</sup>, 長谷川直<sup>3</sup>

<sup>1</sup>日本大学大学院理工学研究科, <sup>2</sup>宮崎大学工学部, <sup>3</sup>宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

鉄を豊富に含む流星を鉄流星と呼び, その起源である母天体は鉄やコンドライト質を多く含む小惑星(M型小惑星)であると考えられている. 鉄流星は, 落下した隕石のうち4%を占め<sup>[1]</sup>, Vojáčekらが行った流星の分光観測では, mmサイズの流星152個のうち15個が鉄流星であり, Abeらが行ったふたご座流星群149個のうち2個が鉄流星であった<sup>[2][3][4]</sup>. 火球を生成するような鉄流星の割合は1%程度と小さい傾向にあるが, 1cm以下の流星においては鉄流星の割合が増加する<sup>[5]</sup>.

鉄流星は小さく発光が暗い傾向にあるため, 通常の流星観測においては鉄流星の観測数は少ない. よって, 鉄流星の観測のためには通常の流星観測よりも暗い6等級以降の領域まで観測する必要があり, 統計的議論のために多くのデータが必要であると考えられる. また, 鉄流星の詳細な発光効率なども分かっておらず, 観測だけでなく, 室内実験や理論モデルとの比較から, 鉄流星のサイズ分布を, 2点観測から鉄流星の軌道と起源が明らかになる.

本研究では, 高感度のカメラを用いた天然の流星の分光観測の初期成果および, 直径1mmの鉄流星体をISASの横型二段式軽ガス銃で7km/sで3kPaの標準大気とN<sub>2</sub>大気中に射出した際の超高速分光計測の初期成果を報告する.

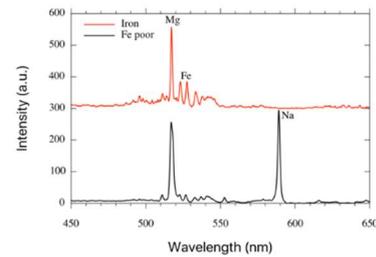
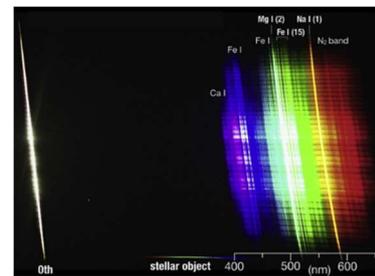


図1 観測によるスペクトル

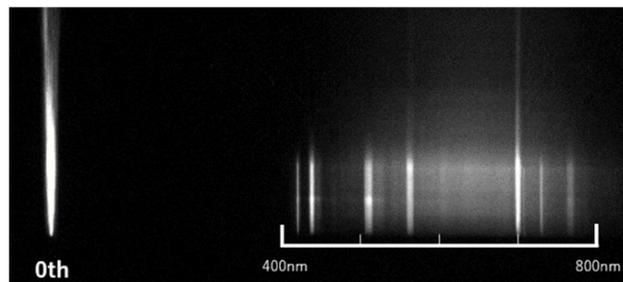


図2 実験によるスペクトル

- [1] Borovička J., et al., “Meteoroids: Sources of Meteors on Earth and Beyond”, Cambridge University Press, p.37, 2019, [2] Vojáček V., et al., “Catalogue of representative meteor spectra”, A&A, 580, 2015, [3] Vojáček V., et al., “Meteoroids studied by meteor video observations”, Astron. Astrophys., 621, 2019, [4] S. Abe, et al., “Sodium variation in Geminid meteoroids from (3200) Phaethon”, Planet. Space Science 194, id. 105040, 2020 [5] Borovička J., et al., “Physical and chemical properties of meteoroids as deduced from observations”, Proceedings of the International Astronomical Union. Cambridge University Press, Cambridge, p 249–271, 2006,

## DESTINY+計画の進捗とサイエンス

○荒井 朋子<sup>1</sup>, 小林 正規<sup>1</sup>, 石橋 高<sup>1</sup>, 吉田 二美<sup>2, 1</sup>, 木村 宏<sup>1</sup>, 平井 隆之<sup>1</sup>, 洪 鵬<sup>1</sup>, 山田 学<sup>1</sup>, 岡本 尚也<sup>1</sup>, 千秋 博紀<sup>1</sup>, 和田 浩二<sup>1</sup>, Ralf Srama<sup>3</sup>, Harald Kruger<sup>4</sup>, 佐々木 晶<sup>5</sup>, 藪田 ひかる<sup>6</sup>, 石黒 正晃<sup>7</sup>, 渡部 潤一<sup>8</sup>, 伊藤 孝士<sup>8</sup>, 大坪 貴文<sup>8</sup>, 大塚 勝仁<sup>9</sup>, 阿部 新助<sup>10</sup>, 中村 智樹<sup>11</sup>, 廣井 孝弘<sup>12</sup>, 中村メッセンジャー圭子<sup>13</sup>, 小松 睦美<sup>14</sup>, 関口 朋彦<sup>15</sup>, 浦川 聖太郎<sup>16</sup>, 木下 大輔<sup>17</sup>, 橘 省吾<sup>18</sup>, 三河内 岳<sup>18</sup>, 諸田 智克<sup>18</sup>, 野口 高明<sup>19</sup>, 金田 英宏<sup>20</sup>, 小松 吾郎<sup>21, 1</sup>, 出村 裕英<sup>22</sup>, 平田 成<sup>22</sup>, 伊藤 元雄<sup>23</sup>, 山口亮<sup>24</sup>, 松浦周二<sup>25</sup>, 紅山仁<sup>18</sup>, 巽瑛理<sup>26</sup>, 秋田谷洋<sup>1</sup>, 柳沢 俊史<sup>27</sup>, 黒崎 裕久<sup>27</sup>, 矢野 創<sup>27</sup>, 吉川 真<sup>27</sup>, 尾崎 直哉<sup>27</sup>, 豊田 裕之<sup>27</sup>, 西山 和孝<sup>27</sup>, 今村 裕志<sup>27</sup>, 高島 建<sup>27</sup>  
<sup>1</sup>千葉工業大学, <sup>2</sup>産業医科大学, <sup>3</sup>University of Stuttgart, <sup>4</sup>Max Planck Institute, <sup>5</sup>大阪大学, <sup>6</sup>広島大学, <sup>7</sup>ソウル大学, <sup>8</sup>国立天文台, <sup>9</sup>東京流星観測網, <sup>10</sup>日本大学, <sup>11</sup>東北大学, <sup>12</sup>ブラウン大学, <sup>13</sup>GITAI, <sup>14</sup>総埼玉県立大学, <sup>15</sup>北海道教育大学, <sup>16</sup>日本スペースガード協会, <sup>17</sup>台湾中央大学, <sup>18</sup>東京大学, <sup>19</sup>京都大学, <sup>20</sup>名古屋大学, <sup>21</sup>ダヌンツィオ大学, <sup>22</sup>会津大学, <sup>23</sup>JAMSTEC, <sup>24</sup>国立極地研究所, <sup>25</sup>関西学院大学, <sup>26</sup>カナリア天体物理研究所, <sup>27</sup>JAXA

深宇宙探査技術実証機デスティニープラス DESTINY+は、開発中の小型ロケット「イプシロン S」を利用して打ち上げられる小惑星探査計画である。2020年6月1日にプリプロジェクト、2021年5月1日にプロジェクトとなった。2022年7月現在、基本設計審査を受けており、2024年度の打上げを目指している。理工連携により、小惑星の近傍を通過して観測を行う「フライバイ」探査技術を獲得し、小天体探査の機会拡大を目指す。工学ミッションは ISAS が、理学ミッションは千葉工業大学が中心となり計画を進めている。理学ミッションでは、ふたご座流星群の母天体である活動的小惑星 Phaethon の高速フライバイ撮像を行うと共に、1au 付近の惑星間ダスト・星間ダスト、Phaethon 周辺ダスト粒子の質量、軌道、化学組成を直接分析する計画である。また、エクストラミッションとして、Phaethon から分裂したと考えられている小惑星 2005UD のフライバイを検討している。高速追尾機能を有する望遠カメラ (TCAP) 及び可視マルチバンドカメラ (MCAP) は千葉工大が中心となり開発を進めている。ダストアナライザ (DDA) はドイツとの国際協力でシュツットガルト大学が開発を行い、地上校正はドイツと日本の共同チームで進めている。

2017年12月には Phaethon の国際観測キャンペーン、2018年10月には小惑星 2005UD の国際観測キャンペーンを行った。また、2019年7月29日米国南西部で行われた Phaethon による恒星食観測は歴史的な成功を収め、天体サイズに係る新たな情報が得られた。同年8月22日には北海道渡島半島で、10月26日には宮城県及び山形県でも Phaethon による恒星食観測を行った。これらの地上観測により Phaethon 及び 2005UD の物理化学特性について理解が進んだ。さらに自動追尾観測の確実な成功には、Phaethon のアルベドとサイズの不定性をさらに小さくするため、2021年10月3日に中国四国地方及び韓国南部で Phaethon による恒星食観測を行った。また、太陽位相角が小さくなる10月から12月にかけて、京都大学せいめい望遠鏡で測光・分光観測を、西播磨天文台及び東広島天文台にて偏光観測を行った。さらに、これまでの熱赤外観測データを統合し、再解析を行った。これらの観測及び解析結果を用いて、Phaethon の形状モデルの改訂を進めている。また、理学チームでは、Phaethon フライバイ時の撮像計画やダストアナライザの地上校正計画の検討を進めている。

DESTINY+が取り組むサイエンスへの理解と協力を仰ぐ目的で、2019年より DESTINY+ジャーナルクラブというオンライン論文セミナーを定期的に開催している。また、2018年から年一回「地球飛来ダストとその母天体に関する国際シンポジウム PERC International Symposium on Dust & Parent Bodies (IDP)」を開催し、国内外の惑星科学・天文学コミュニティの研究者と Phaethon 観測やダスト研究の最新成果や知見を共有し、課題やその解決策について議論を行っている。これらの活動を通じて、DESTINY+ミッションの成果最大化を目指すと共に、ミッション要求以外の理学観測のニーズを把握し、ミッション機会の活用に繋げる狙いである。本講演では DESTINY+計画の進捗と理学チームの活動について報告する。

# 彗星核からの氷の昇華による小惑星形成：核内部の温度分布の推移を考慮した数値モデル

○安田 匠<sup>1</sup>、三浦 均<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋市立大学大学院理学研究科

小惑星探査機「はやぶさ2」により、小惑星リュウグウがラブルパイル構造を持った独楽型形状の天体である事、そして、その組成が有機物に富んでいる事が明らかとなった。近年、リュウグウの起源として、氷と岩が混在する彗星核から氷のみが昇華し、残った岩石が集積する事によりリュウグウが形成されたという「彗星起源説」が提唱された [1, 2]。三浦ら [3] は彗星起源説に基づく理論モデルを提案し、多孔質な彗星核からの氷の昇華に要する時間、及び岩石の集積に伴う自転速度の加速を推定した（以下、三浦モデルと呼ぶ）。その結果、典型的な彗星核の物理量を初期条件として想定すると、氷は数万年程度で昇華し、その過程で自転速度が独楽型形状を獲得するに足る値まで上昇しうることを示した。しかし、三浦モデルでは彗星核内部の温度が一様かつ一定だと仮定していた。本研究では彗星核が太陽光によって表面から加熱されたという想定に基づいて、彗星核内部の温度分布とその時間変化を考慮した彗星起源説の数値モデルの開発を行った。

リュウグウ母天体として、水氷と岩石塊からなる球状の多孔質な彗星核様の天体を考えた。母天体表面においては、太陽光の照射によるエネルギーの供給と、母天体表面からの熱放射によるエネルギーの損失を考慮した。内部の温度場が球対称だと仮定し、母天体表面でのエネルギー収支を境界条件として熱伝導方程式を数値的に解き、内部の温度分布の時間変化を求めた。得られた温度分布を用いて内部の水蒸気圧分布を数値的に導出し、これを用いて母天体内の各場所ごとに氷の体積割合の時間変化を計算した。この際、氷の体積割合が減少（氷が昇華）して空隙率が初期値よりも増加した場合は、初期空隙率と等しくなるまで母天体全体が収縮すると仮定した。一方、氷の体積割合が増加（水蒸気が凝結）して空隙率が減少した場合は、母天体のサイズに影響しないとした。

温度分布の時間変化を考慮した事による影響を調べるため、内部温度が一様かつ一定である場合（三浦モデルと同様）と、熱伝導を考慮した場合の計算結果を比較した。内部温度が一様かつ一定である場合は、昇華が進行しても水蒸気圧は常に内側から外側へ向けて単調減少する分布となっており、水蒸気は外側にしか流れない。一方、熱伝導を考慮した場合は、母天体表面から加熱されることで内部に温度勾配が生じ、内側から外側へ向けて水蒸気圧が増加する領域が現れるようになった。この領域では、水蒸気が内向きに流れ、内部のまだ温度が低い部分で水蒸気が再凝結する事で、空隙が氷によって埋まっていく事が確認された。この空隙が埋められた層をアイスクラストといい、多孔質な彗星核に関する先行研究 [4] などで存在する可能性が指摘されている。講演では、アイスクラストが形成した事による氷の昇華への影響等について議論する。

## References

- [1] E. Nakamura et al. In: *Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci* 95.4 (2019), pp. 165–177.
- [2] C. Potiszil et al. In: *Astrobiology* 20.7 (2020). PMID: 32543220, pp. 916–921.
- [3] H. Miura et al. In: *The Astrophysical Journal Letters* 925.2 (2022), p. L15.
- [4] D. Prialnik et al. In: *The Astrophysical Journal* 366 (1991), pp. 318–323.

# オープンソース物理エンジンを利用した ラブルパイル小惑星形成シミュレーション

○角田竜規<sup>1</sup>, 平田成<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>会津大学大学院コンピュータ理工学研究科,

<sup>2</sup>会津大学宇宙情報科学研究センター (ARC-Space)

ラブルパイル小惑星の全体形状は天体によって様々である。Ryugu や Bennu は回転対称に近いコマ型であり、Itokawa は細長い。ラブルパイル構造を構成する母天体の破片のサイズ頻度分布や、比較的に大きい破片の形状やその配置などが全体形状を決めていると推測されるが、それらの要素がどのように影響しているのか、詳細は明らかにはなっていない。ラブルパイル小惑星の形成過程はしばしば SPH など流体力学的手法で再現されているが、前記のような着眼点でのラブルパイル形成過程の研究には剛体力学的手法の方が適している。

Ferrari et al. (2020) は破片を剛体として扱ったラブルパイル小惑星形成シミュレーションの研究を行っている[1]。この問題に関する明確な回答は示されていない。

本研究の目的は、剛体力学的なラブルパイル小惑星の集積過程をシミュレートすることで、集積時の諸条件と最終的な小惑星の形状の関係を明らかにすることにある。本研究ではオープンソースの物理エンジンである Chrono[2] を利用して、破片同士の重力、接触、摩擦、回転などの種々の物理過程の再現を実装することにした。Chrono は様々な形状の物体間の物理的な相互作用を取り扱うことができる。また、多くのゲーム向け物理エンジンが単精度演算を行なっているのに対し、Chrono は倍精度演算が可能である。先に挙げた先行研究[1]でも Chrono が利用されている。

本研究では先行研究に倣って Chrono によるシミュレータの実装を行い、破片のサイズ頻度分布や最大サイズ、最小サイズと破片の総数、個別の破片の形状、初速度、初期角速度、破片同士の動摩擦、静止摩擦、反発、転がり抵抗係数などをパラメータとしたシミュレーションを行うことを目指す。今回の発表ではシミュレータの実装結果と予備的なシミュレーション結果を報告する。

## 【参考文献】

[1] Ferrari, F. et al. (2020). The role of fragment shapes in the simulations of asteroids as gravitational aggregates. *Icarus*, 350, 113871.

[2] Tasora, A. et al. (2015). Chrono: An open source multi-physics dynamics engine. In *International Conference on High Performance Computing in Science and Engineering* (pp. 19-49). Springer, Cham.

月火星有人/無人探査を念頭にした岩相の特徴量自動認識による  
火山性露頭その場調査手法の研究

Study on volcanic outcrop in-situ survey method by automatic recognition for lithological features, considering manned/unmanned exploration on the Moon and Mars

春山純一(JAXA)、下司信夫(産総研)、庄司大悟(JAXA)、  
野口里奈(新潟大)、藤本圭一郎(JAXA)

本研究では、属人的な知識と経験および人力踏査に頼っていた露頭(地層の累積構造が露出している壁)の記載・層序分類に対して、岩相の特徴量自動認識と可視化を行い、効率的なその場調査手法の開発を目指す。具体的には、1)聞き取りやワークショップにより、専門家の火山性露頭での岩相判断プロセスや基準を整理分類、それをもとに2)岩相の特徴的な地質テクスチャを認識、分類する岩相の特徴量自動認識アルゴリズムを開発、3)開発されたアルゴリズムを国内の露頭調査に適用検証し改良を行う。そして、このアルゴリズムを可搬型計算機に搭載し、計算機上で岩相判断を行うことで、野外調査における岩相判断のための情報取得の効率化(迅速化、高精度化、自動化)を図ることを目指す。図1に本研究の概要を示す。本研究は、来る有人を含む月火星のその場探査への適用も念頭に置いている。本講演では、現在の研究の取り組み状況を発表し、学会員からの様々な面からの意見を求めたい。

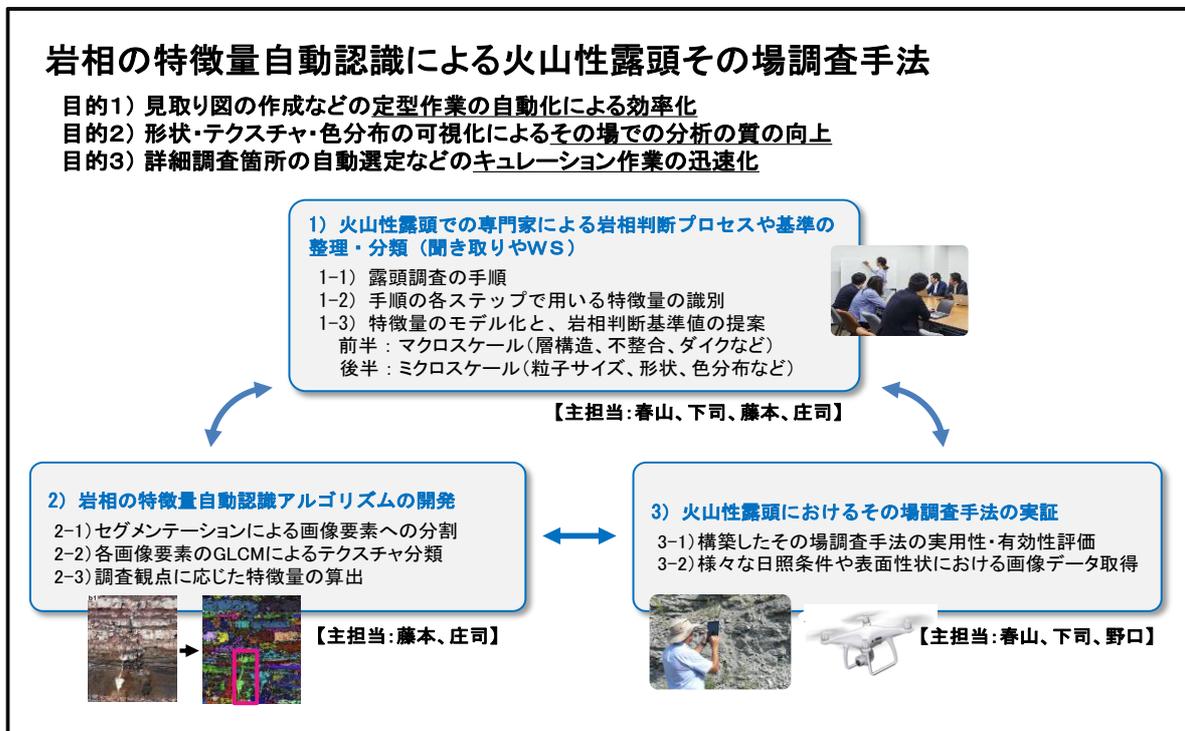


図 1: 本研究の概要図

## クォータースペース法による低重力下での クレーター形成過程の観察

○木内真人<sup>1</sup>, 岡本尚也<sup>2</sup>, 長足友哉<sup>3</sup>, 山口祐香理<sup>4</sup>, 長谷川直<sup>1</sup>, 中村昭子<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup>千葉工業大学惑星探査センター, <sup>3</sup>東北大学大学院理学研究科, <sup>4</sup>神戸大学大学院理学研究科

小天体上のクレーターの観測から表面物性や表面進化の過程を推定するためには, 微小重力下でのクレーター形成過程を理解することが重要である. 低重力下および高重力下で様々な速度域 ( $1 \text{ m s}^{-1} \sim 6.6 \text{ km s}^{-1}$ ) での衝突実験がこれまで行われている. 粒径数  $100 \text{ }\mu\text{m}$  の粉体標的ではクレーター直径は重力の  $-0.15 \sim -0.19$  乗に比例するという結果が得られている (Gault and Wedekind, 1977; Schmidt and Housen, 1987; Cintala et al. 1989; Kiuchi et al., 2019). 一方, 粒径数  $10 \text{ }\mu\text{m}$  の比較的固着力の強い粉体標的ではクレーター直径の重力依存性はほとんど見られず, クレーター直径は粉体強度で決まると考えられる (Kiuchi et al., 2021, JpGU). これらの実験では, クレーター形成過程は標的の上方向からの観察が主であり, クレーター直径に関するデータは得られているが, クレーター深さ方向のデータはほとんど得られていない. 微小重力下でのクレーター形成過程を詳しく理解するためには, クレーター直径だけではなくクレーターキャビティの成長を観察する必要がある.

本研究では, クォータースペース法を用いて, 低重力下でのクレーター形成過程を断面的に観察するための装置の開発を行った. 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 施設内にある縦型式二段銃の真空チャンバー内に簡易な落下装置を構築することで, 秒速数キロメートルの衝突速度での低重力衝突実験を行うことができる (木内他, 2020, 惑星科学会). 実現できる模擬的な重力は  $0.04 \pm 0.03 \text{ G}$  であり, 低重力継続時間は約  $0.4 \text{ s}$  である. 標的容器は縦横  $30 \times 30 \text{ cm}$ , 高さ  $15 \text{ cm}$  のステンレス製容器の内部を厚さ  $5 \text{ mm}$  のアクリル板で鉛直方向に設置して仕切り, 仕切られた片方の空間に標的粒子を充填する. また, もう片方の空間にデジタルカメラおよび光源を設置し, 標的粒子層をアクリル板越しに横から撮影する. 弾丸を仕切りのアクリル板近傍に衝突させることで, クレーターキャビティの成長過程の断面的な観察を行った. 発表では, ポリカーボネート弾丸 (円柱形, 直径  $4.7 \text{ mm}$ , 高さ  $5 \text{ mm}$ ) を硅砂 (粒径  $\sim 450 \text{ }\mu\text{m}$ ) および微小アルミナ粒子 (粒径  $\sim 40 \text{ }\mu\text{m}$ ) に  $1.2 \text{ km s}^{-1}$  で衝突させたときの観察結果について報告する.

## 起伏表面に適用可能なクレータースケール則と クレーターの崩壊に関する実験的研究

○横田優作<sup>1</sup>, 荒川政彦<sup>1</sup>, 保井みなみ<sup>1</sup>, 山本裕也<sup>1</sup>, 長谷川直<sup>2</sup>, 大川初音<sup>1</sup>

<sup>1</sup>神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup>宇宙科学研究所

【背景】近年、はやぶさ2や OSIRIS-REx などの探査によって、小惑星リュウグウやベヌは赤道域に巨大なバルジ地形を有していることがわかった。リュウグウのバルジ上には大クレーターが集中しており、他の地域とは異なる表面特性や表面年代を示している可能性がある。また、ベヌの大クレーター周囲には、斜面下方向に伸びる滑らかな領域が観測されており、クレーター形成時のエジェクタが表面に衝突したことによって雪崩れが起きたことが示唆されている。しかし、そのような起伏表面上のクレーター形成過程はほとんど解明されていない。そこで本研究では、小惑星表面の起伏地形を模擬した標的に対してクレーター形成実験を行い、起伏地形上のクレーターに適用可能なスケール則を構築することで、天体表層の力学物性や表面年代の推定精度の向上を目指す。

【実験方法】クレーター形成実験は、神戸大学の縦型一段式軽ガス銃と宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸は直径 3 mm と 2 mm のアルミナ球、標的は直径 100  $\mu\text{m}$  の石英砂を使用した。標的は、小惑星表面の起伏地形を再現するために山脈型に作成し、その山頂付近に弾丸を衝突させた。標的の傾斜角  $\theta$  は 30° と 20° とし、山頂から衝突点までの距離  $d$  (衝突点距離) を 1~22 mm と変化させ、衝突の様子は高速カメラで衝突方向と稜線方向から撮影した。また、実験後のクレーターを多方向からデジタルカメラで撮影し、ソフトウェア Metashape を用いてそれらの画像からクレーターの3次元形状を再構築した。その形状モデルで、稜線方向の直径  $D_{\text{ma}}$ 、斜面方向の直径  $D_{\text{mi}}$ 、深さ、クレーター体積を計測した。

【実験結果】クレーター体積は  $d/D_{\text{ma}}$  に依存しており、 $d/D_{\text{ma}} > 0.3$  では遷移クレーターが山頂を越えておらず、斜面方向の崩壊でクレーターが埋まるため、体積が著しく小さくなった。また、 $d/D_{\text{ma}} < 0.3$  では遷移クレーターが山頂を越えるため、稜線方向は遷移クレーターの最深点に向かって崩れるが、斜面方向はクレーターの外側へ崩れるので、クレーターの埋没は限定的で体積はあまり小さくならなかった。その結果、稜線方向の直径  $D_{\text{ma}}$  と斜面方向の直径  $D_{\text{mi}}$  の比 (アスペクト比) やクレーターの深さ直径比 ( $h/D_{\text{ma}}$ ) は  $d/D_{\text{ma}}$  に依存する。アスペクト比と衝突点距離の関係は、 $D_{\text{ma}}/D_{\text{mi}} = -0.41 d/D_{\text{ma}} + 1.32$  と表せる。深さ直径比との関係は、 $h/D_{\text{ma}} = -0.20 d/D_{\text{ma}} + 0.11$  となった。なお、ウラシマクレーターが持つ小さな深さ直径比 0.07 を再現するには、実験結果から  $d/D_{\text{ma}} = 0.2$  となり、これは稜線方向の崩壊がこのクレーターを浅くした可能性を示している。また、実験で再現された  $d/D_{\text{ma}} = 0.2$  のクレーターが持つクレータープロファイルの非等方性は、ウラシマクレーターの特徴と良く一致した。直径  $D_{\text{ma}}$  を用いて計算した規格化クレーター直径  $\pi_R$  は傾斜角  $\theta$  と衝突位置  $d/D_{\text{ma}}$  に依存し、いずれの傾斜角でも平面に形成されるクレーターより大きくなった。この結果はバルジの表面年代を過大評価している可能性を示唆している。

# 小惑星ヴェスタの赤道トラフ形成に関する考察

○平田 直之<sup>1</sup>

<sup>1</sup>神戸大学理学研究科惑星学専攻

小惑星ヴェスタには、赤道に沿うように大規模なトラフ（溝状の地形）が平行に存在している（図1 赤線）。そのトラフの中でも最大のものを Divalia Fossae と呼び、465 km の長さ、10 km の幅を持ち、ヴェスタをほぼ一周している。このトラフ構造は南極にある Rheasilvia クレーター（ヴェスタ最大のクレーターでもある）に対して同心円状に広がっているように見えることから、Rheasilvia 形成時における衝撃波によってできたテクトニクス地形だと一般的には考えられている。本研究はこのトラフが、Rheasilvia から二次クレーターによって作られたという仮説を提唱する。Rheasilvia から放出されたエジェクタ粒子の軌道は、ヴェスタの早い自転が引き起こすコリオリ力によって曲げられ、緯度線に沿うような形で分布する（図2）。仮に、射出粒子が初速度約 270–360m/s、発射角 25° で発射されたすると、実際に観測される赤道トラフの分布を、二次クレーターで適切に説明できることがわかった（図2c）。

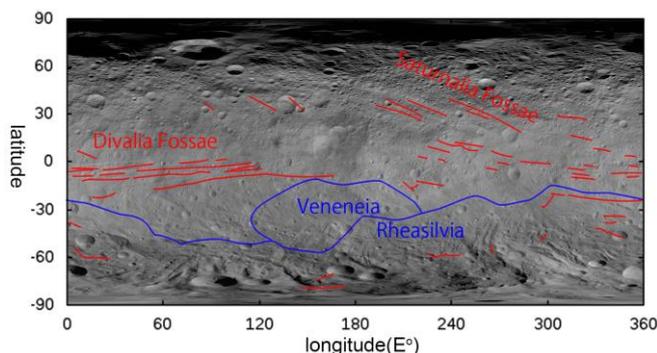


図1 ヴェスタの全球マップ。トラフの分布を赤線で、Rheasilvia クレーターと Veneneia クレーターのリムを青線で示す。USGS にて公開されているモザイク [Roatsch et al. 2012] を加工した。

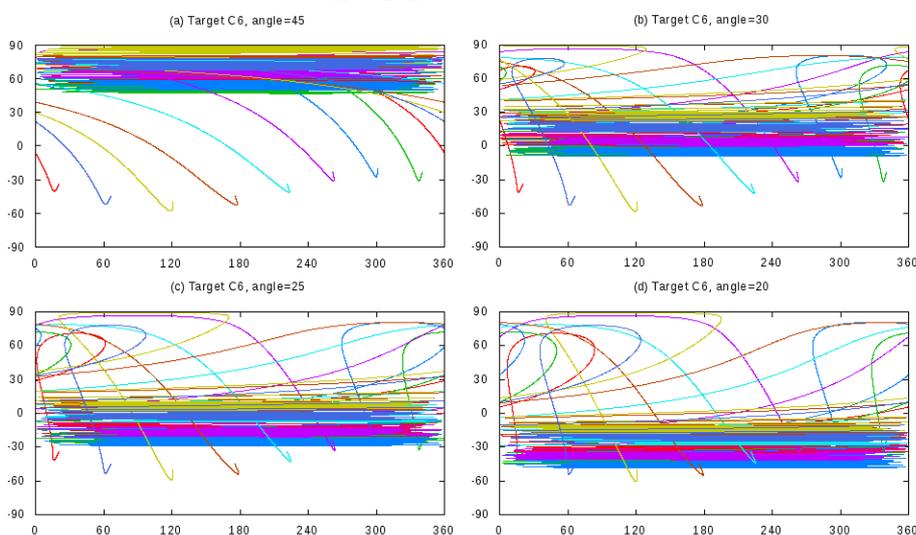


図2 Rheasilvia クレーターからある方向に放出されたエジェクタ粒子の落下地点を、線をつないだもの。射出速度が小さいものはリムの近くに、大きいものは赤道に沿うように落下することがわかる。発射角はそれぞれ (a) 45° (b) 30° (c) 25° (d) 20° としている。

## 二重小惑星探査計画 Hera 搭載熱赤外カメラの開発: EM 開発試験の現状 Development of Thermal Infrared Imager on Hera - Status of EM Test

○岡田達明<sup>1,2</sup>, 田中智<sup>1</sup>, 坂谷尚哉<sup>1</sup>, 嵩生有理<sup>1</sup>, 荒井武彦<sup>3</sup>, 千秋博紀<sup>4</sup>, 出村裕英<sup>5</sup>, 関口朋彦<sup>6</sup>, 神山徹<sup>7</sup>, 金丸仁明<sup>2</sup>, 石崎拓也<sup>1</sup>, 金野龍史<sup>5</sup>, 斎藤啓仁<sup>5</sup>, 李正林<sup>1,2</sup>, 古川聡一朗<sup>1,2</sup>, Hera TIRI チーム  
<sup>1</sup>JAXA 宇宙科学研究所, <sup>2</sup>東京大学, <sup>3</sup>前橋工科大学, <sup>4</sup>千葉工業大学, <sup>5</sup>会津大学,  
<sup>6</sup>北海道教育大学, <sup>7</sup>産業技術総合研究所

**Hera計画:** Heraは、小惑星65803 Didymos (S型、直径約780m)と衛星Dimorphos (直径約160m)からなる二重小惑星系を探査する欧州宇宙機関 (ESA) の小惑星探査計画であり、主目的は小天体の地球衝突を回避する宇宙防災技術 (Planetary Defense) の実証であるが、同時に惑星科学研究も推進する[1]。惑星の形成過程で起きてきた天体の衝突・破壊・再集積は現在も継続しており、数10m以上の小天体が地球に衝突すると人類社会に甚大な災害をもたらす。最近の例では2013年のチェリヤビンスク隕石が知られる。この潜在的な危険に対し、惑星科学の知識と宇宙工学の技術によって対策する。Heraは、NASAのDART計画と2機連携によって史上初の実証実験AIDA (Asteroid Impact & Deflection Assessment) を構成する。DARTは2022年9月26日にDimorphosに衝突し、地上観測によって衝突前後の公転周期の変化やダスト噴出の様子を調べ、衝突の効果を評価する[2]。Heraは2024年10月に打ち上げ、2027年1月に二重小惑星系にランデブし、両小惑星の形状や物質・物性的特徴や自公転軌道などの力学的状態、DART衝突痕を詳細に観測する。日本からは、熱赤外カメラTIRIを提供し[3]、小惑星の熱物性の調査を行うほか、小惑星の地形・地質学、衝突科学、ダイナミクスなど「はやぶさ2」の知見を活かして科学的検討で協力する。

**熱赤外カメラTIRIと開発試験:** 「はやぶさ2」に搭載された中間赤外カメラ (TIR) [4]によって、C型小惑星Ryuguの全球熱撮像観測を行い、表層物質が低熱慣性であることなど新たな知見を得た[e.g., 5-7]。TIRIはTIRの発展型の装置であり、画素数の多い非冷却ボロメータ (Lynred PICO1024: 1024 x 768画素) を採用、明るい赤外レンズ光学系 (F/1, f=75mm) を装着し、二重小惑星の全景撮像が可能な広い視野角 (13.3° x 10.0°) でTIRの4倍以上の高い解像度 (0.013°/pix) を有する。8点式フィルタホイールを搭載し、熱赤外撮像 (8-14μm) で熱物性の計測、多波長撮像 (7-14 μm で6波長バンド) で物質の調査も実施する。温度範囲は150~450Kで、夜側領域も含めた熱撮像や、太陽距離が2auでも撮像を可能とする。S/N向上のため画像積算機能も有する。画像データの大量伝送のために差分後に画像圧縮する機能も有する。TIRIはエンジニアリングモデル (EM) を製作し、試験・評価中である。本稿執筆の段階では、全機能の動作や温度応答性は確認済みであり、今後は回路系ノイズの低減、パラメータのチューニング、較正試験を行う。さらに電磁適合性試験、機械環境試験、熱真空試験などの耐環境試験を実施し、最終的な性能評価や較正を実施する。取得した較正データは開発中の較正・可視化ツールHEAT[8]にデータベースとして取り込み、プロダクト生成に役立てる。TIRIのEMはESAに搬入し試験を実施した後、フライトモデル (FM) の製作が開始される。基本的にFMはEMと同設計の予定であり、EMと探査機側との噛み合わせによって確認された改善策のみをFMに処置する予定である。本報告ではEM試験の状況を紹介する。

**参考文献:** [1] Michel P. et al. (2022), *PSJ*, 3, 160. [2] Cheng A.F. et al. (2018) *PSS* 157, 104-115, [3] Okada T. et al. (2022) *LPSC*, 53, #1319, [4] Okada T. et al. (2017) *SSR* 208, 225-286, [5] Okada T. et al. (2020) *Nature* 579, 518-522. [6] Shimaki Y. et al. (2020) *Icarus* 348, 113835, [7] Sakatani N. et al. (2021) *Nat. Astron.* 5, 766-774. [8] Saito H. et al. (2022) *JpGU2022*, PPS03-P06.

## 二重小惑星探査計画 Hera に向けた 小惑星の熱物理計算モデルの開発

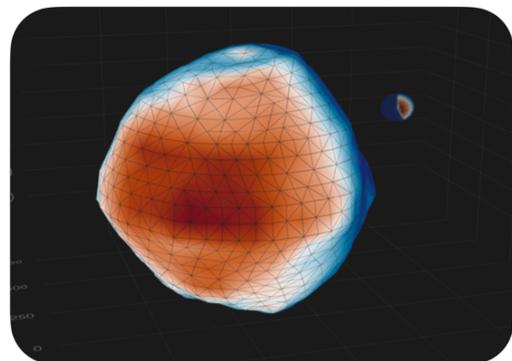
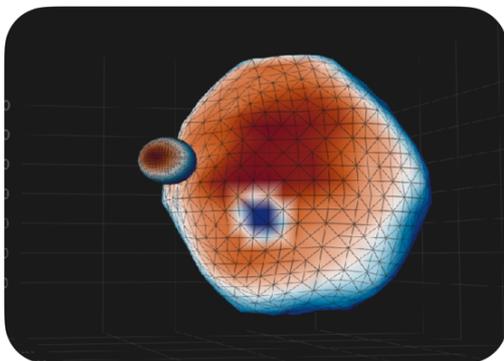
○金丸仁明<sup>1</sup>、Tommei Giacomo<sup>2</sup>、岡田達明<sup>3</sup>、坂谷尚哉<sup>3</sup>、寫生有理<sup>3</sup>、田中智<sup>3</sup>、  
石崎拓也<sup>3</sup>、千秋博紀<sup>4</sup>、荒井武彦<sup>5</sup>、関口朋彦<sup>6</sup>、出村裕英<sup>8</sup>

<sup>1</sup>東京大学、<sup>2</sup>ピサ大学、<sup>3</sup>ISAS/JAXA、<sup>4</sup>千葉工業大学、<sup>5</sup>前橋工科大学、  
<sup>6</sup>北海道教育大学、<sup>7</sup>会津大学

NASA と ESA は、二重小惑星探査計画 DART/Hera を進行中である。探査機 DART が二重小惑星 Didymos の衛星 Dimorphos に衝突して軌道変更を施した後、探査機 Hera がランデブーして接近観測を行う予定である。探査機 Hera には、JAXA が提供する熱赤外カメラ (thermal infrared imager; TIRI) が搭載される。Didymos-Dimorphos の熱物性を観測して、プラネタリー・ディフェンスに資する基礎データの取得を担う。

TIRI が取得する熱画像と比較するため、二重小惑星に適用可能な熱物理計算ライブラリ Astroshaper を開発中である (<https://github.com/MasanoriKanamaru/Astroshaper>)。小惑星表面の温度分布を予め計算しておくことで、TIRI の観測条件の事前検討や本番観測における熱物性値の測定に貢献する。二重小惑星の熱物理計算では、主星や衛星がもう片方の影に入る「蝕」が温度分布に大きく影響するため、主星と衛星の相互作用を考慮した計算モデルを開発した (下図)。

また二重小惑星の長期的な力学進化においては、熱放射によって生じる微小な圧力が大きな影響を及ぼす。熱放射に起因する軌道進化は「Yarkovsky 効果」、主星の自転進化は「YORP 効果」、さらに、潮汐固定された衛星の軌道進化は「binary YORP (BYORP) 効果」と呼ばれる。我々が開発した熱物理計算モデルを用いて、これらの非重力効果による摂動を予測し、探査機 Hera による小惑星の軌道決定のデータと比較することで、非重力効果の検出を目指す。



二重小惑星における表面温度の分布。衛星の影が主星に差す時 (左) と衛星が主星の影に隠れる時 (右) のスナップショット。

## 木曾観測所 Tomo-e Gozen カメラと「重ね合わせ法」による 高速微小 NEO 観測計画の進捗

○奥村真一郎<sup>1</sup>、柳沢俊史<sup>2</sup>、大澤亮<sup>3,4</sup>、吉川真<sup>2</sup>、吉田二美<sup>5</sup>、  
酒向重行<sup>3</sup>、紅山仁<sup>3</sup>、高橋英則<sup>3</sup>、浦川聖太郎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>日本スペースガード協会、<sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構、<sup>3</sup>東京大学、  
<sup>4</sup>国立天文台、<sup>5</sup>産業医科大学

東京大学木曾観測所の広視野 CMOS カメラ Tomo-e Gozen [1] に「重ね合わせ法」[2] を適用することにより、高速移動する小天体を大量発見するための観測計画を 2018 年より進めている。10m サイズまたはさらに小さい小天体に関するサイズ分布に制限を与え、太陽系小天体の軌道進化やその起源の解明に迫ることが本研究の目的である。

地球に接近する天体（地球接近天体 Near Earth Object; NEO）は、地球に近づけば近づくほど明るくなる一方で、移動速度が大きくなるため露出中に天体が移動してしまうことによる「トレイルロス」によって検出限界が浅くなり、大望遠鏡+CCD カメラといった通常の観測手法ではサイズの小さいものは見逃してしまう。Tomo-e Gozen カメラはピクセルスケールが大きく、また高速読み出しが可能なのでトレイルロスの影響を受けにくく移動天体の観測に適している。検出限界は 17 等程度であるが 2018 年の試験観測開始以降で 40 個以上の 10m 前後～数十mクラスの微小 NEO を発見している[3]。一方「重ね合わせ法」は短時間露出の画像を様々な方向・様々な移動速度を仮定してずらしながら足し合わせるものであり、同様にトレイルロスの影響を受けずに深い感度を達成できる解析手法である。Tomo-e Gozen によりサンプリングレート 2Hz で取得される撮像データは、この「重ね合わせ法」を適用するのに極めて適している。本研究ではこれら二つの要素を組み合わせる効果により口径 8m クラスの大望遠鏡を使用しても見逃してしまうような、直径 10m よりさらに小さい高速移動 NEO の大量発見を目指している。

コロナの影響を受けて遅れながらも進めてきた本計画であるが、「重ね合わせ法」を用いた検出システムを 2019 年度から 2020 年度にかけて木曾観測所に導入、2021 年より美星スペースガードセンターの望遠鏡を使用した追跡観測も含めたテストを実施、検出した既知天体について美星スペースガードセンターの望遠鏡を使用して即時追跡観測する試験に成功した。講演では現時点までの進捗状況と今後の課題について報告する。

### 参考文献

- [1] Sako, S. et al. (2018), Proceeding of SPIE, 10702, id.107020J.
- [2] Yanagisawa, T., et al., (2005), Publications of Astronomical Society of Japan, 57, 399.
- [3] 紅山他,(2020), 2020 年日本惑星科学会秋季講演会講演.

はやぶさ 2 画像データ閲覧・検索システム JADE のアップデート

○菊地紘<sup>1</sup>, 山本光生<sup>1</sup>, 横田康弘<sup>1</sup>, 佐藤広幸<sup>1</sup>, 大嶽久志<sup>1</sup>, 本田理恵<sup>2</sup>, 杉田精司<sup>3</sup>, 諸田智克<sup>3</sup>, 逸見良道<sup>3</sup>, 宮本英昭<sup>3</sup>, 山本幸生<sup>1</sup>, 平田成<sup>4</sup>, 平田直之<sup>5</sup>, 佐々木晶<sup>6</sup>, 小松吾郎<sup>7</sup>, 出村裕英<sup>4</sup>, 本田親寿<sup>4</sup>, 山田学<sup>8</sup>, 亀田真吾<sup>9</sup>, 巽瑛理<sup>10</sup>, 村上真也<sup>1</sup>, 長勇一郎<sup>3</sup>, 吉岡和夫<sup>3</sup>, 澤田弘崇<sup>1</sup>, 坂谷尚哉<sup>1</sup>, 早川雅彦<sup>1</sup>, 松岡萌<sup>11</sup>, 神山徹<sup>11</sup>, 鈴木秀彦<sup>12</sup>, 小川和律<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JAXA, <sup>2</sup>愛媛大学, <sup>3</sup>東京大学, <sup>4</sup>会津大学, <sup>5</sup>神戸大学, <sup>6</sup>大阪大学, <sup>7</sup>ダヌンツィオ大学, <sup>8</sup>千葉工業大学, <sup>9</sup>立教大学, <sup>10</sup>カナリア天文学物理学研究所, <sup>11</sup>産業技術総合研究所, <sup>12</sup>明治大学

小惑星探査機「はやぶさ 2」により小惑星リュウグウのデータを質・量ともに最大限の獲得に成功し、リュウグウのサンプルも予想以上に採取されて大きな成果を挙げている。現在「はやぶさ 2」は次の小惑星に向けて進行中である。この成果を最大化するために、私たちは、小惑星探査機「はやぶさ 2」が搭載した ONC 画像データを、一般のユーザが Web ブラウザ上で容易に閲覧・検索できるシステム JAXA Asteroid Data Explorer (JADE)を開発している[1]。小天体の 2D と 3D の地図を、システム内での切り替えが可能な地図表示を行うことができることでユーザは画像の位置をリュウグウの地図空間上で認識しながら自分の利用したいデータを入手することができる。昨年度から主に以下のデータ更新・追加とシステムの改修を行った。

- ・ 検索項目で緯度経度を指定するとき、Min, Max を指定するスライダーでは指定できない領域に対応するため、円形スライダーを用いた
- ・ 大量のデータを一気にダウンロードしないようにするために、ダウンロード前に選択画像数を表示するようにした
- ・ 表示中の画面のキャプチャ画像の出力機能の追加を行った

今年度は一般公開に向けて、主に以下の改修と機能の追加をすることを予定している。

- ・ 画像データのフットプリントの修正  
2D 地図上で経度が 0° と 360° を跨ぐところでも画像の外縁部として表示されるようにし、ユーザが範囲を指定したポリゴンと交差判定を実行して検索できるようにする
- ・ 2D と 3D 地図上に画像データを張り付けて表示する機能

本講演では、現状の JADE (図 1) について紹介する。

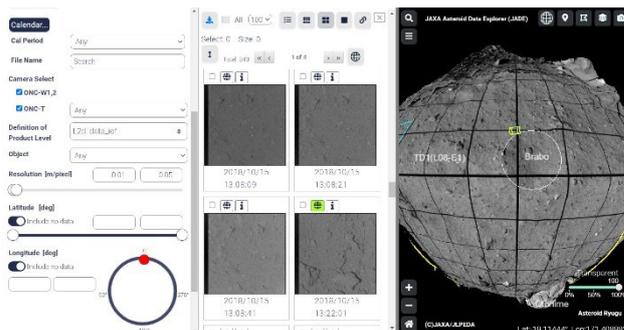


図 1. JADE の表示画面. 左から検索部, 結果表示部, 地図部に分かれている。

[1] 菊地ほか：はやぶさ 2 画像データ検索システム JADE の進捗, 日本惑星科学会 2021 年秋季講演会, P02-12 2021.

# Jupyter Notebook による小惑星探査データの対話型解析・可視化ツール AiGIS2

○永吉 司<sup>1</sup>, 平田 成<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>会津大学大学院コンピュータ理工学研究科,

<sup>2</sup>会津大学宇宙情報科学研究センター (ARC-Space)

AiGIS[1]は、不規則な形状を持つ天体の探査データを解析するために開発された三次元地理情報システムであり、天体のポリゴン形状モデルを可視化するGUIを備えている。ポリゴンごとの地理情報を色分けして表示できるほか、マウス操作により、形状モデルを自由に回転、拡大縮小、平行移動を行うことで、天体の形状と地理情報を多視点で調べることができる。しかしAiGISはモデルや地理情報などの表示機能や限定的な解析機能しか持っておらず、あらかじめ実装された機能を超えた利用はできない。読み込んだ形状モデルデータや地理情報データの加工、新規データの作成や、研究者の自由な発想に基づく多様な解析を柔軟にサポートするためにはCUIでの対話的な解析環境が有用である。

本研究の目標は、近年インタラクティブな操作性をもち、多様な解析を実現可能な環境として注目されているJupyter Notebookを採用した新たな三次元地理情報システムAiGIS2を開発することにある。AiGIS2ではJupyter Notebook内でPythonによる可視化、解析のための関数を用意し、それに加えて研究者自身のコードを追記することができる。可視化のためのモジュールとしてPyVistaを採用している。PyVistaは3DコンピュータグラフィックスのためのオープンソースソフトウェアであるVTKのヘルパーモジュールである。現在までに現行のAiGISのもつ可視化機能の多くをPyVistaで実装することに成功している。また、可視化機能と連動した新たな解析機能として、形状モデルをスライスした断面情報の取得、選択した長方形領域の表面情報の取得を行えるようにした。これらの可視化、解析を行うための関数はPythonモジュール中に記述される。利用者はこのモジュールをインポートすることでAiGIS2の機能を使用できるようになる。今後はデータ解析機能として緯度経度からポリゴン番号への変換などを追加するほか、可視化可能なオブジェクトとして重力場などを表現できるベクトル場を追加する。発表を通じてAiGIS2のアーキテクチャや今後の発展性についてユーザと議論するとともに、必要な機能についての意見を聴取したい。

## 【参考文献】

[1] Hirata N. et al. (2018) AiGIS: A 3D-GIS for Visualization of Map and Shape of Irregular-Shaped Small Bodies, LPS XLIX, Abstract #1849.

# 「あかり」遠赤外線観測でとらえた 黄道面付近ダストバンドと供給源の小惑星族

○大坪 貴文<sup>1</sup>, 土井 靖生<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台, <sup>2</sup> 東京大学

太陽系内に広く分布する惑星間塵からの熱放射である黄道放射は中間赤外線波長域 ( $\sim 20 \mu\text{m}$ ) にその放射のピークを持つが、銀河面付近をのぞけば  $\sim 50\text{--}100 \mu\text{m}$  の遠赤外線波長域でも空の明るさの大きな部分を占めている。過去の赤外線衛星 IRAS などの全天サーベイ観測は、黄道放射の分布に様々な空間的微小構造があることを発見し、黄道面付近の黄緯  $\pm 1.4^\circ$ ,  $\pm 2.1^\circ$ ,  $\pm 10^\circ$  付近に小惑星ダストバンド構造が見られることを明らかにした。2006 年打ち上げの赤外線天文衛星「あかり」は 65, 90, 140, 160  $\mu\text{m}$  の 4 バンドで遠赤外線全天観測をおこない、特に 90  $\mu\text{m}$  で小惑星ダストバンド構造を明確にとらえることに成功した。あかりの 90  $\mu\text{m}$  全天画像では、空間的にブレンドした黄緯  $\pm 1.4^\circ$  と  $\pm 2.1^\circ$  の構造、および黄緯  $\pm 9.3^\circ$  の構造が見られ、バンド構造の FWHM 幅は  $\sim 5^\circ$ 、表面輝度は数 MJy/sr レベルであった (Ootsubo et al. 2016, PASJ, 68, 35)。

小惑星ダストバンドはメインベルト内での小惑星族同士の衝突がダストの供給源であり、Poynting-Robertson 効果などにより太陽方向内側へダストが落ちこんでくることで、動径方向にも広がったトーラス状構造をしていることが示唆されている。我々は「あかり」の遠赤外線全天画像に対して黄緯方向にハイパスフィルタなどの画像処理を施すことにより、小惑星ダストバンド中のより微細な幅  $\sim 2^\circ$  以下のバンド構造を抽出した。この画像強調処理によって、黄道面付近のダストバンドである黄緯  $\pm 1.4^\circ$  と  $\pm 2.1^\circ$  の明確なピークを分離して検出することができた。

地球周回軌道をとり観測視線方向が太陽離角  $90 \pm 1^\circ$  に制限された「あかり」の場合、地球の公転により見かけのダストバンド構造は黄経方向  $360^\circ$  に渡ってピークの黄緯が sinusoidal な変化を見せるが、その見かけの黄緯変化から地球-ダストバンド間 (および太陽-ダストバンド間) の距離を推定することができる。抽出した幅  $\sim 2^\circ$  以下の黄緯  $\pm 1.4^\circ$  と  $\pm 2.1^\circ$  バンドは、それぞれ太陽から  $\sim 2.8 \text{ au}$  と  $\sim 3.2 \text{ au}$  の距離にある細いリング構造を見ていると考えられる。この日心距離はそれぞれのダスト供給源とされている Karin 族, Beagle 族の軌道長半径に対応しており、「あかり」の遠赤外線観測により、これまで提案されていた小惑星族によるダスト供給が起こった軌道付近に残存するダストを初めてとらえることができたと考えられる。 $\pm 1.4^\circ$  ダストバンドに対応する小惑星族としては Beagle 族が提唱されているが、これまでの観測では一部の黄経領域でしかその構造は検出されていなかった。「あかり」の観測は幅広い黄経領域に渡って  $\pm 1.4^\circ$  のダストバンド構造を検出し Beagle 族起源を強く支持するものである。

## 木星トロヤ群L4・L5間のサイズ分布比較

○ 寺居 剛<sup>1</sup>, 上畑 琴美<sup>2</sup>, 大槻 圭史<sup>2</sup>, 吉田 二美<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台, <sup>2</sup> 神戸大学, <sup>3</sup> 産業医科大学

木星軌道 Lagrange 点 L4・L5 周辺に群集する木星トロヤ群天体は、L4 群のほうが数が多いことが観測研究から指摘されている。両者の起源は同一と考えられることから、木星トロヤ群軌道への捕獲時あるいはその後何らかのメカニズムで非対称性が生じたと推測され、近年の理論研究では木星の成長と内側への移動によって L4 群でより多くの天体が捕獲されたとするモデルが提案されている (Pirani et al. 2019)。そのように個数差が力学的作用に起因したものであれば両者のサイズ頻度分布 (天体直径 vs. 個数) の形状は一致するはずであり、もしそうでなければサイズ依存性のある別の効果が関与していることになる。それを観測的に検証する必要があるが、L4 群に比べて L5 群は数 km サイズの小型天体まで観測された例に乏しく、また両者は異なるサイズ分布を持つとの先行結果はあるものの、サンプル数が少なく精度には限界があったため、決着が付いたとは言い難かった。

我々は口径 8.2 m のすばる望遠鏡に搭載された超広視野撮像装置「Hyper Suprime-Cam」を使用して、木星軌道 L5 点に近い天域 ~15 平方度をサーベイする観測を実施した。それに先行して同装置によって行った L4 群天体のサイズ分布測定 (Yoshida & Terai 2017) と同じ観測・解析方法を適用した結果、検出限界 24.1 等級 ( $r$  バンド; 直径 ~2 km の木星トロヤ群天体に相当) のデータから 189 個の木星トロヤ群天体を検出した。それらから無バイアスサンプル 87 個を抽出して得られた直径 ~2-10 km の範囲のサイズ分布は、べき指数  $\alpha = 0.37 \pm 0.01$  の単一べき乗則 ( $dN/dH \propto 10^{\alpha H}$ ;  $N$  は天体数、 $H$  は絶対等級) で近似でき、L4 群で測定されたサイズ分布形状と高い精度で一致することが確認された (Uehata et al. 2022)。

さらに既知小惑星カタログと組み合わせたところ、L4・L5 群のサイズ分布形状は観測されている全てのサイズ範囲 (直径 ~2-100 km) にわたってよく一致している、すなわちどのサイズ域でも両者の個数比は一定であることが示された。この結果から、L4・L5 群は (少なくとも直径 2 km までは) 同一のサイズ分布形状を持つことが明らかになった。L4 群の L5 群に対する天体数比は  $1.40 \pm 0.15$  と決定された。また、直径 > 2 km の木星トロヤ群天体の総数は約  $2.6 \times 10^5$  個と見積もられ、メインベルト小惑星のそれ (~ $2 \times 10^6$  個; Maeda et al. 2021) より 1 桁少ないことが分かった。

## 小惑星はやぶさ2搭載中間赤外カメラTIRによって観測された 小惑星162173リュウグウの日中の影領域

○荒井 武彦<sup>1</sup>, 岡田 達明<sup>2</sup>, 田中 智<sup>2</sup>, 出村 裕英<sup>2</sup>, 坂谷 尚哉<sup>2</sup>, 鳶生 有理<sup>2</sup>,  
千秋 博紀<sup>4</sup>, 神山 徹<sup>5</sup>, 関口 朋彦<sup>6</sup>, 金丸 仁明<sup>7</sup>, 石崎 拓也<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>前橋工科大学, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>3</sup>会津大学,  
<sup>4</sup>千葉工業大学, <sup>5</sup>産業技術総合研究所, <sup>6</sup>北海道教育大学, <sup>7</sup>東京大学

2018年から2019年にかけて、小惑星探査機はやぶさ2搭載中間赤外カメラ(TIR)が小惑星162173リュウグウのサーモグラフィーを取得した(Okada *et al.*, 2020). TIRの観測データをリュウグウ形状モデル(Watanabe *et al.*, 2019)に射影したデータを解析することによって、ローカルな地域への太陽光の入力や周囲からの熱輻射の入出力とTIRの観測温度との関係が明らかになった(Arai *et al.*, 2021). リュウグウ上の大きなボルダーによって、特に極域などは日中を通して影になっている領域が存在していた(図1左の白矢印). ラフネスモデルを含んでいないリュウグウの熱モデル(Takita *et al.*, 2017)で温度プロファイルを構築した場合、日照のない極域は極めて低温のプロファイルで求められた(図1右). しかし、特殊運用時にTIRで極域を熱撮像できたデータでは、TIRの観測の下限値(150K)よりも大きな値の極域が観測されていた(図2左). 現在、ラフネスモデル(Senshu *et al.*, 2022)を実装した熱解析ソフトウェアHEAT(Endo *et al.*, 2017; Suko 2020; Saito *et al.*, 2022)の開発が進んでおり、より確からしいリュウグウの温度プロファイルの再現が期待される.

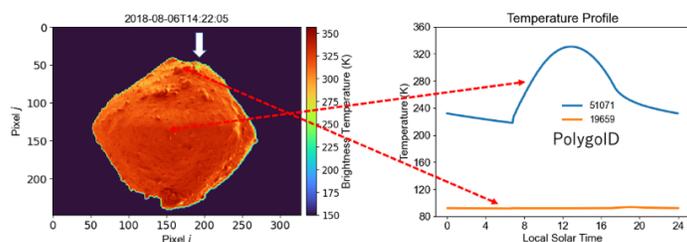


図1 TIR観測熱画像(白矢印が北極付近)と予想温度プロファイル(ラフネスモデルなし).

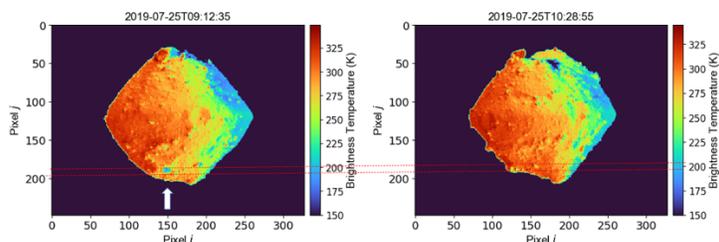


図 2 極域の低温領域が見える TIR 熱画像(白矢印が北極付近). 図 1 とは上下逆.

## はやぶさ 2 ONC 画像から構築したリュウグウ表面ローカル三次元地形モデルの精度評価と微小地形の計測

○愛敬雄太<sup>1</sup>、諸田智克<sup>1</sup>、杉田精司<sup>1,2</sup>、長勇一郎<sup>1</sup>、平田成<sup>3</sup>、本田理恵<sup>4</sup>、  
巽瑛理<sup>1,5</sup>、坂谷尚哉<sup>6</sup>、亀田真吾<sup>7</sup>、山田学<sup>2</sup>、横田康弘<sup>6</sup>、松岡萌<sup>6</sup>、本田親寿<sup>3</sup>、  
神山徹<sup>8</sup>、鈴木秀彦<sup>9</sup>、早川雅彦<sup>6</sup>、吉岡和夫<sup>1</sup>、小川和律<sup>10,11</sup>、澤田弘崇<sup>6</sup>  
<sup>1</sup> 東京大学、<sup>2</sup> 千葉工業大学、<sup>3</sup> 会津大学、<sup>4</sup> 愛媛大学、<sup>5</sup> カナリア天体物理学研究所、  
<sup>6</sup> JAXA/宇宙科学研究所、<sup>7</sup> 立教大学、<sup>8</sup> 産業技術総合研究所、<sup>9</sup> 明治大学、  
<sup>10</sup> JAXA/国際宇宙探査センター、<sup>11</sup> 神戸大学

微小隕石の衝突や熱疲労による天体構成粒子の破壊・細粒化は大気のない天体では普遍的であり、その物理素課程と時間スケールの制約は天体表面の多様性と表層進化史を理解するために重要である。炭素質小惑星表面における岩塊の細粒化過程の体系的な理解に向けては、リュウグウ表面岩塊のサイズ頻度分布と帰還試料粒子の物理特性を合わせて考えることが重要である。リュウグウ表面岩塊のサイズ分布はすでに画像データに基づいて測定されてきたが [1]、正確なサイズ頻度分布を得るには岩塊の三次元形状を計測する必要がある。

そこで本研究では、写真測量ソフトウェア Metashape による structure-from-motion(SfM)法を用いて、はやぶさ 2 探査機の光学航法カメラ(ONC)で撮影されたリュウグウ表面の高解像度画像からローカルな三次元地形モデルを構築した。第 2 回タッチダウン前の降下時に 7 つの波長帯で撮影された高解像度画像 4 セット(高度 74~460m)から三次元地形モデルを構築し、それをベースに数値標高モデル(DEM)を作成した。これらによる岩塊の三次元形状測定の有効性を検討するため、本研究では三次元地形モデルの精度評価を実施した。また構築された三次元地形モデルを用いて岩塊高さの計測を行った。

その結果、Metashape が画像上に検出する特徴点における元々の位置と三次元形状モデルから投影された位置との差から推定される SfM 法処理に起因する相対位置誤差は 1cm 程度であった。対して画像内の 2 点間について画像から測定された長さとモデル内での長さの差から推定される三次元地形モデルのスケーリングに起因する水平方向の誤差は最大で約 6%になり、SfM 法による三次元形状モデル構築に起因する相対位置誤差より大きいことが分かった。また DEM から傾斜を計算しマッピングすることで岩塊の輪郭の識別が行いやすくなる可能性が示唆された。画像から岩塊の輪郭を目視で識別する際には影により岩塊の輪郭が識別しにくくなる問題点があるが、本研究の方法では複数地点から撮影された画像の視差から高さの情報を得るため影の影響を受けにくくなるという利点がある。発表では上記に加えて、岩塊の高さ計測結果についても議論する。

## 小惑星探査機はやぶさ 2 の低高度運用で観測された小惑星リュウグウに点在する岩塊の温度分布変化並びに熱物性解析

○大杉 歩<sup>1,2</sup>, 坂谷 尚哉<sup>2</sup>, 嵩生 有理<sup>2</sup>, 金丸 仁明<sup>1</sup>, 石崎 拓也<sup>2</sup>, 千秋 博紀<sup>3</sup>, 荒井 武彦<sup>4</sup>, 出村 裕英<sup>5</sup>, 神山 徹<sup>6</sup>, 関口 朋彦<sup>7</sup>, 田中 智<sup>1,2</sup>, 岡田 達明<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> JAXA 宇宙科学研究所, <sup>3</sup> 千葉工業大学, <sup>4</sup> 前橋工科大学, <sup>5</sup> 会津大学, <sup>6</sup> 産業技術総合研究所, <sup>7</sup> 北海道教育大学

**研究背景:** 小惑星探査機はやぶさ 2 に搭載されたリモートセンシング機器の一つである中間赤外カメラ (Thermal Infrared Imager: TIR) [1] は, 2018 年から 2019 年にかけて C 型小惑星 162173 リュウグウの観測を行った. TIR はリュウグウからの熱放射画像を取得し, リュウグウ表面の熱物性を把握することができた [1-2]. 全球的な熱画像解析から, リュウグウ表面を覆う岩塊は典型的な炭素質コンドライトと比較すると多孔質な物質と推定されており, その熱慣性は  $200\sim 400 \text{ (J m}^{-2} \text{ s}^{-0.5} \text{ K}^{-1})$  (以下 tiu) と、典型的な炭素質コンドライト ( $600\sim 1000 \text{ tiu}$ ) に比べて低いことが明らかになっている [1-5].

**目的と観測条件:** 本研究では, 小惑星リュウグウの下記領域への降下運用中に, 高度 500 m 以下で撮像した高解像度の熱画像 (level 2) を使用した: 1) 2018 年 9 月 21 日の MINERVA rover の投下時の降下運用 MNRV, 2) 2018 年 10 月 3 日の MASCOT lander の投下時の降下運用 MSCT, 3) 2019 年 2 月 21 日の 1st タッチダウン TD1-L08E1, 4) 2019 年 3 月 8 日のタッチダウン候補エリア探索 DO-S01. 当該領域は先行研究[5]でも言及されているが, 岩塊の温度分布変化など, 詳細な調査は行われていない. そこで対象領域において, 岩石表面の温度分布を調査し, 物理的な解釈を行うとで, リュウグウ表面に存在する岩塊のより詳細な状態を推定することを本研究での目的とした. TIR 画像は  $328 \times 248$  ピクセルで得られ, 空間解像度は 1 ピクセルあたり約  $0.051^\circ$  である [1]. 今回は各画像内において 100 ピクセル超で撮像された岩塊, つまり有効直径が数十 m から数 m に相当する岩塊を統計的に有意な数抽出し, 解析を行った.

**結果と考察:** 100 ピクセル超で検出された岩塊の総数は 355 個 (MNRV) と 312 個 (MSCT) と 368 個 (TD1-L08E1), 267 個 (DO-S01) であり, 抽出した際の標本誤差は Wald の不等式 [6] によって  $\pm 5.2\%$  (MNRV),  $\pm 5.5\%$  (MSCT),  $\pm 5.1\%$  (TD1-L08E1),  $\pm 5.6\%$  (TD1-R1A),  $\pm 6.0\%$  (DO-S01) と算出された. 本研究で同定した岩塊は, その幾何学的形状や小惑星上における様々な方向性の違いから, 互いに異なる温度を持ち, また表面にも温度分布があることがわかった. しかし, 今回調査したすべての領域において, 解析対象の岩塊の表面温度帯はガウス分布をしており (図参照), これは各エリアの岩塊のほとんどが類似の熱特性を持ち, その平均温度は典型的な熱特性を反映していることを示している. また, 岩塊表面の最高温度帯を用いた熱慣性の算出では, 各領域の熱慣性を 194~299 (tiu) と算出した. この結果は, リモートセンシングによる全球平均の熱慣性と一致している [4]. 本発表では, さらなる値の精査, 並びに考察を考慮したうえで, より詳細に議論する予定である.

**参考文献:** [1] Okada T. *et al.*, SSR, **208**, 255 (2017), [2] Watanabe S. *et al.*, Science **364**, 268 (2019), [3] Okada T. *et al.*, Nature **579**, 518 (2020). [4] Shimaki Y. *et al.*, Icarus **348**, 113835 (2020). [5] Sakatani N. *et al.*, Nat. Astron. **5**, 766 (2021). [6] Kurihara, S., Ohmsha Ltd., pp.336 (2011), ISBN 978-4-274-06855-3

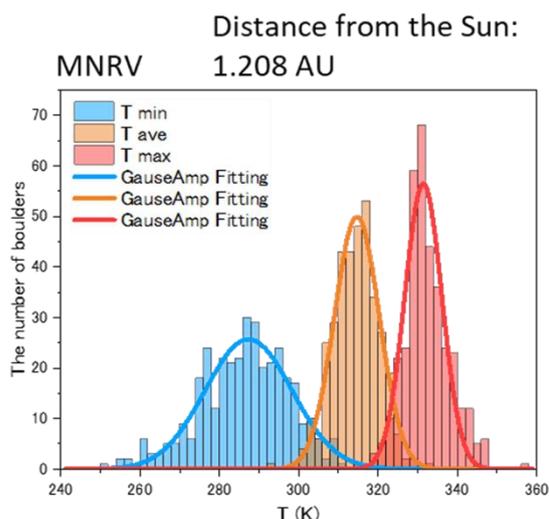


図: 各領域の温度変化分布の一例 (MNRV). 回帰線は全てガウスアンプを用いた正規分布曲線を示しており, T min, T ave, T max は岩塊表面の温度帯をそれぞれ示している.

## (3200)Phaethon の偏光・測光・掩蔽観測

○ 吉田二美<sup>1,2</sup>, 荒井朋子<sup>2</sup>, 石黒正晃<sup>3</sup>, 関口朋彦<sup>4</sup>, 秋田谷洋<sup>2</sup>, 紅山仁<sup>5</sup>, 長谷川直<sup>6</sup>, 池田優二<sup>7</sup>, 石橋高<sup>2</sup>, 川端弘治<sup>8</sup>, 黒田大介<sup>9</sup>, 中岡竜也<sup>8</sup>, 大澤亮<sup>10</sup>, 大坪貴文<sup>10</sup>, 酒向重行<sup>5</sup>, 千秋博紀<sup>2</sup>, 新中善晴<sup>7</sup>, 高橋隼<sup>11</sup>, 瀧田怜<sup>5</sup>, 今澤遼<sup>8</sup>, 森文樹<sup>8</sup>, Jooyeon Geem<sup>3</sup>, Sunho Jin<sup>3</sup>, Yoonsoo P. Bach<sup>3</sup>, Hangbin Jo<sup>3</sup>, Mikael Granvik<sup>12</sup>, Lauri Siltala<sup>12</sup>, Anlaug A. Djupvik<sup>13</sup>, Anni Kasikov<sup>13</sup>, Viktoria Pinter<sup>13</sup>, Emil Knudstrup<sup>13</sup>

<sup>1</sup>産業医科大学, <sup>2</sup>千葉工業大学, <sup>3</sup>Seoul National University, <sup>4</sup>北海道教育大学, <sup>5</sup>東京大学, <sup>6</sup>JAXA, <sup>7</sup>京都産業大学, <sup>8</sup>広島大学, <sup>9</sup>京都大学, <sup>10</sup>国立天文台, <sup>11</sup>兵庫県立大学, <sup>12</sup>University of Helsinki, <sup>13</sup>Aarhus University

DESTINY+ミッションの科学チームは、フライバイターゲットである (3200) Phaethon をより詳しく知るために様々な地上観測を実施してきた。2019年12月に Phaethon が地球に最接近した時、DESTINY+科学チームは Phaethon 観測キャンペーンを実施し、世界中の研究者に集中的かつ多角的な観測を呼びかけた。その結果、Phaethon の物理特性が徐々に明らかになった。これらの観測により推定された Phaethon の反射率は、観測や熱モデルによって、0.041 (McAdams et al. 2018) から 0.22 (Harris et al. 1998) まで幅があり、これではフライバイ時のカメラの露出時間を決めかねる。そこで、Phaethon の反射率の不確かさを低減するため、2021年の観測好機に Phaethon の測光・偏光・掩蔽観測を実施した。Phaethon の反射率の不確かさは、第一に Phaethon の直径の推定誤差に起因する。小惑星の直径は通常、絶対等級から推定するが、太陽と地球と Phaethon の軌道の幾何学的な関係から、絶対等級を求めるために必要な太陽位相角 0 度での観測ができないため、正確な絶対等級を得ることができていない。しかし、2021年11月に Phaethon の太陽位相角が 10 度以下になる機会があり、これは小さな推定誤差で絶対等級を求めることとチャンスだと判断し、2021年10月下旬から11月にかけて、せいめい望遠鏡で Phaethon の絶対等級を求める測光観測を行った。また、小惑星の最小偏光と、負の偏光から正の偏光に変化する時の偏光位相角曲線の傾きから小惑星のアルベドを推定することができるため、偏光観測を西はりま天文台と東広島天文台で行った。偏光観測は約2ヶ月間(2021年10月-12月)にわたって実施され、Phaethon のアルベドを推定するための偏光位相角曲線を得ることができた。Phaethon の直径を直接測定する方法はもう一つある。それは、掩蔽観測である。この方法は熱モデルや経験的な手法に頼らず、比較的小さな誤差で Phaethon の断面の大きさを決定することができる。掩蔽観測チームは、2021年10月3日に12等星 UCAC4 646-021974 = GSC 2894-00131 を Phaethon が隠した時地上にできた Phaethon の影の大きさを測定した。本発表ではこれら3種の観測結果を報告する。

## 小惑星の公転が表面温度進化に与える影響

○千秋博紀<sup>1</sup>, 坂谷尚哉<sup>2</sup>, 諸田智克<sup>3</sup>, 横田康弘<sup>2</sup>, 鳶生有理<sup>2</sup>, Hamm, Maximilian<sup>4</sup>,  
田中智<sup>2</sup>, 岡田達明<sup>2</sup>, 荒井武彦<sup>5</sup>, 金丸仁明<sup>3</sup>, 竹内央<sup>2</sup>

<sup>1</sup>千葉工業大学惑星探査研究センター, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所,

<sup>3</sup>東京大学大学院理学系研究科, <sup>4</sup>ドイツ航空宇宙センター, <sup>5</sup>前橋工科大学工学部

小惑星の表面温度進化は、太陽光の入射と表面からの熱輻射、地下からの熱流量のバランスで決まる。地下からの熱流量の影響は熱慣性として知られており、太陽光の入射が最大となる時刻（局所時間で正午）と表面温度が最高となる時刻のずれとして現れる。季節変化についても同様に、日平均温度が最高になる日と太陽光入射が最大となる日はずれている。

日変化に伴う表面温度の温度変動に対して季節変化を要因とする温度の変動はごくわずかであり、低緯度領域の表面温度分布を求める目的では無視できる。このため Takita et al (2017) や Senshu et al. (2022) では、慣性座標空間に固定した小惑星位置自転させ、熱平衡に達したものを表面温度としてきた。しかしこうして求めた表面温度分布は低緯度領域では良い近似になっているが、高緯度では逸脱する可能性がある（右下）。

Shimaki et al. (2020) は Senshu et al. (2022) にあるモデルの結果と実際にはやぶさ2搭載熱赤外カメラ(TIR)によって得られた表面温度分布を比較し、リュウグウ表面の熱慣性分布を求めた。南半球は数値モデルの結果と良い整合性を示し、熱慣性を求めることができたものの、北半球では数値モデルの結果と観測結果が合わないケースが散見される。これは、リュウグウのようなコマ型の小惑星の場合、実効的には表面のほとんどが中～高緯度であり、季節変化に伴う温度変動が原因である可能性がある。

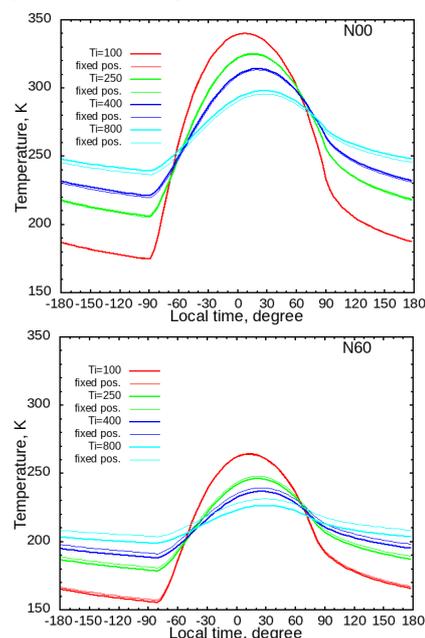
そこで本発表では、季節変動を考慮したモデルと小惑星を慣性空間に固定したモデルとの結果の違いの程度、傾向について考察し、紹介する。

### References:

Senshu, H. et al. *Int. J. Thermophys.* 43, 102 (2022).

Shimaki, Y. et al. *Icarus* 348, 113835 (2020).

Takita, J. et al. *Space Sci. Rev.* 208, 287–315 (2017).



リュウグウと同じ軌道を持つが完全球の天体の、2018年10月3日の表面温度の日変化。上は赤道、下は北緯60度。天体を固定した場合（細線）と長年にわたって軌道を追跡し、季節変化も考慮した場合（太線）。高緯度ほど、また熱慣性が大きいほど差が大きい

# 原始火星マントル・コアに分配される揮発性成分

○齊藤大晶, 倉本圭

北大・理

近年の火星隕石の分析によると, 火星内部には現在でも相当量の水 ( $7.2 \times 10^{18}$ - $1.9 \times 10^{20}$  kg, 水濃度 14-380 ppm) が存在しているらしい (e.g., McCubbin et al., 2012, 2016, Taylor et al., 2010, Gross et al., 2013, Taylor, 2013). さらに火星探査による火星地震の最新の分析によると, 火星コア半径は従来考えられていたよりも大きく, その密度は小さい. そして, コア内部には相当量の S, C, H といった軽元素が含まれている可能性が高いと予想されている. これら水や軽元素の火星内部への供給機構の候補の 1 つに, マグマオーシャンを通じた原始大気成分の分配がある. これまでの我々の研究によると (Saito & Kuramoto, 2018), 集積時間が 300 万年以内で, なおかつ揮発性成分濃度が 2 - 4 wt% 超の材料物質が集積すれば, 脱ガス大気の保温効果によってマグマオーシャンが形成され得ることが示されている. しかしながら, このとき内部に分配される揮発性物質量は求められていない. コア・マントルへの揮発性成分の分配は, 惑星内部物質の相関係や流動特性を変え, ダイナモ作用による固有磁場の発生, やマントル対流・火成活動に影響する.

そこで本研究では, 星雲ガス成分および微惑星衝突脱ガス成分 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ) で構成される混成型原始大気から, マグマオーシャンを介して内部に分配される揮発性成分量を数値モデリングにより調べた. 2 - 4 wt% 以上の揮発性成分濃度をもつ材料物質が集積率 1/3 火星質量/Myr で集積する場合, 原始惑星が 0.4 火星質量以上に成長するとマグマオーシャンが形成し, 最終的にはマントルへ  $\sim 4 \times 10^{21}$  kg の水が, コアへは  $\sim 10^{19}$  kg の C が,  $\sim 10^{20}$  kg の H が分配される. マグマオーシャンの冷却に伴ってどの程度水が失われるかによるが, 本結果は, 火星隕石から推定された火星マントルの含水量を十分に説明し得る. また, InSight による地震波観測から推定されたコア中の各軽元素の質量濃度は, S (10-15 wt%), O (<5 wt%) H および C (< 1wt%) であるのに対し, 上記のモデル計算結果は, S (14-20 wt%), H ( $\sim 0.01$  wt%), C ( $\sim 0.3$  wt%) であった. H, C の質量濃度は比較的近い一方で, S 濃度が高い傾向にある. 材料物質中の S の大部分は核に分配されることから, これは材料物質に仮定した S/金属 Fe がそもそも高すぎることを示すかもしれない.

## Phobos 捕獲年代を考慮したクレーター年代関数の導出

○内田雄揮<sup>1,2</sup>、白井寛裕<sup>2</sup>、豊川広晴<sup>3,2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学、<sup>2</sup> JAXA 宇宙航空研究開発機構、<sup>3</sup> 総合研究大学院大学

火星衛星 Phobos の起源には、メインベルトから飛来した小惑星が火星引力により現在の軌道に捕獲されたとする小惑星捕獲説と、火星への天体衝突による副産物とする天体衝突説の主に 2 つの仮説が提唱されている。火星衛星探査計画 MMX では、それら二説に代表される火星衛星の起源の解明を科学目標の一つに掲げている[1]。Phobos の起源が捕獲説によって説明される場合、火星圏捕獲年代に関する制約が求まれば太陽系の進化における天体運動の描像をより詳細に得られると考えられる。そこで本研究ではクレーター年代学に基づいた理論予測を行い、サンプル分析から得られるクレーター形成年代から Phobos 捕獲年代を決定できるような着陸候補地点（＝サンプル採取地点）の鑑別に必要な判断材料の提供を目指す。

クレーター年代学に基づいた理論予測では 4.5 Ga から 0 Ga の範囲で複数の捕獲年代を仮定し、それぞれの単位時間、単位面積あたりのクレーター形成率から、捕獲年代ごとにクレーター数密度  $N$  と地質年代の関係を表すクレーター年代関数を求めた（図 1）。本研究で得られたクレーター年代関数は、捕獲年代が 4.5 Ga のものは天体衝突説を仮定した際のクレーター年代関数を表す一方、0 Ga のものはメインベルト小惑星のクレーター年代関数を表す。また、捕獲年代の違いによりクレーター年代関数に差異が生じることが示された。特に  $N \sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ km}^{-2}$  においては捕獲年代に対する地質年代が大きく異なることが明らかになった（図 1 ①）。一方、 $N \geq 10^0 \text{ km}^{-2}$  付近では捕獲年代によるクレーター年代関数の変化が小さい（図 1 ②）。また、この  $N$  が大きい②領域ではクレーターの飽和平衡が著しく、 $N$  の判別が難しいことが知られている[2]。MMX では、Phobos 試料の年代測定により着陸地点のクレーター形成年代がクレーター年代関数とは独立に得られる[3]。つまり、 $N \sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ km}^{-2}$  の領域からの試料採取により、捕獲説の場合における捕獲年代の決定が期待される。

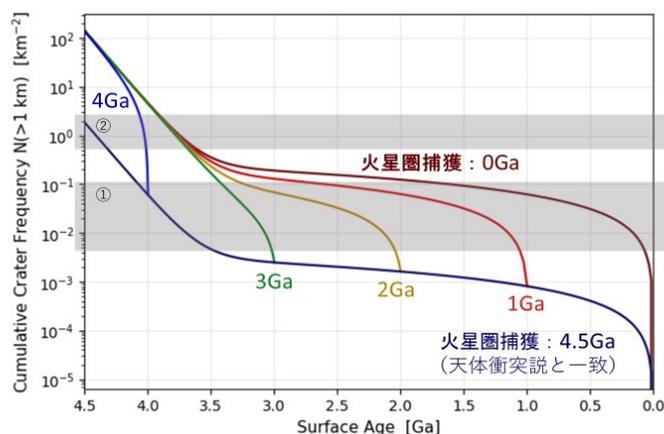


図 1 Phobos 捕獲年代を考慮したクレーター年代関数。  
プロット上の 0, 1, 2, 3, 4, 4.5 Ga は捕獲年代を表す。

[1]Kuramoto *et al.* (2022), *Earth, Planets and Space* **74**, 12. [2]Hartmann *et al.* (1984), *Icarus* **60**, 56-74. [3]Usui *et al.* (2020), *Earth, Planets and Space* **216**, 49.

## 遠いカイパーベルトの軌道構造の究明： 未知の惑星の存在？

### Investigating the orbital structure of the distant Kuiper Belt: Evidence for an undiscovered planet?

○ソフィア リカフィカ パトリック(Patryk Sofia Lykawka)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 近畿大学 総合社会学部 (School of Interdisciplinary Social and Human Sciences, Kindai University)

Do the orbits of trans-Neptunian objects (TNOs) indicate the existence of an undiscovered planet in the distant Kuiper Belt beyond  $\sim 100$  au? Previous research without considering hypothetical Kuiper Belt planets (KBP) cannot explain three important observed properties: 1) A large population of TNOs with orbits too distant from Neptune's gravitational influence (i.e., with perihelia  $q > 40$  au); 2) TNOs with very high orbital inclinations ( $i > 45$  deg); 3) The existence of extreme TNOs possessing peculiar orbits difficult to explain (e.g., Sedna).

Here, I performed N-body computer simulations of the outer solar system to investigate the effects of a hypothetical planet on the orbital structure in the distant Kuiper Belt. First, I identified the stable distant resonant populations based on observational data from the AstDys database. These resonant TNOs exhibit orbital motion locked in mean motion resonances with Neptune over Gyr-timescales. I also considered a model of distant TNOs beyond 50 au based on the intrinsic CFEPS L7 model with appropriate inclination corrections. Finally, I tested several combinations of masses (Mars to Earth-like) and orbits of potential KBPs that could satisfy the aforementioned constraints.

First, I identified the best KBP candidates by constraining their orbits and masses that would preserve the identified stable resonant TNOs. KBPs more massive than a few tenths of Earth mass were capable of producing a population of detached TNOs easily. In particular, Earth-like KBPs produced large detached populations and objects with wider ranges of inclinations. Overall, a KBP is likely to be more massive than 0.5 (1) Earth masses and to be located beyond  $\sim 150$  (200) au in order to explain properties 1 and 3, while more massive and slightly more distant planets are needed to explain property 2. I will also show orbital distributions of new populations of TNOs that would exist due to the putative KBP's gravitational perturbations. The discovery of new TNOs belonging to these populations would tell us about the possible orbits and masses of the postulated KBP. In short, both the existence of a KBP and hypothetical TNO populations located in the trans-Neptunian region are predictions observationally testable. These results will likely inspire future astronomical surveys in Japan and abroad.

## ガスハイドレート置換によるタイタンの湖地形の成因

○野崎舜介<sup>1,2</sup>、関根康人<sup>1</sup>、Yunfeng Liang<sup>3</sup>、Wuge Cui<sup>3</sup>、玄田英典<sup>1</sup>、辻健<sup>3</sup>、増田昌敬<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学 地球生命研究所、<sup>2</sup>東京工業大学 理学院地球惑星科学系、

<sup>3</sup>東京大学 大学院工学系研究科

土星の衛星タイタン表層の極域には数百の湖が存在する。うち北極域に存在する深さ数百m、幅数十kmの小さな湖の多くは急峻な崖に囲まれ、数百m程の高さの小高いリムを持つ (Hayes, 2016)。この地形の形成時期・要因は明らかではなく、その解明は極域の地表・地下環境進化の理解に繋がる。これまで、カルスト、サーモカルスト、地下帯水層の液体窒素の爆発、氷火山噴火などによる形成が提唱されてきた (例: Mitri et al., 2019; Solomonidou et al., 2020; Wood and Radebaugh, 2020)。しかし小高いリムの形成、リムの残存が示唆する年代の若さ、北極域に集中して存在するといった特徴を全て説明することは難しい。

そこで本研究では、地下に存在し得る窒素ハイドレートが、地下に染み込んだ液体炭化水素によって置換され、窒素分子が放出されることで窒素主体のガスが生じ、それが地下で蓄積し加圧・爆発するという新たな湖地形形成仮説 (Nozaki et al., 2022, *LPSO*) を検討する。まず、ガスが生成されるタイムスケールを議論するために、窒素ハイドレートとエタン液体の置換の分子動力学シミュレーションを 3 MPa, 130~260 K の定温・定圧条件下で数マイクロ秒行った。結果としてすべての温度条件下で窒素ハイドレートの置換が起こり、窒素ハイドレート中の窒素が拡散で溶液中に放出されると仮定した場合、その活性化エネルギーは  $31 \pm 7$  kJ/mol と推定された。

タイタン地下の地温勾配・ハイドレート層の粒径・空隙率を仮定し、任意の深さにおける窒素ハイドレート置換によりエタン液体が窒素で飽和するタイムスケールを推定した。その際、過去に求められたエタン中の窒素の溶解度 (Hartwig et al., 2017)、および本研究のシミュレーションで得た窒素の拡散の活性化エネルギー (31 kJ/mol) を用い、窒素ハイドレートの粒径 0.1 mm、空隙率 20% を仮定した。その場合、地下約 100 m においてタイムスケールは極大となり約 10 万年、地下 2000 m では約 10 年でハイドレート置換によりガスが生じることが分かった。

この結果は、タイタンの地下に窒素ハイドレートが存在すれば、液体炭化水素との相互作用による窒素ガス生成が効率的に進行することを示唆する。これによって、地下の不透水層下におけるガスの蓄積・加圧により、湖地形を形成するような爆発に至る可能性がある。この場合、爆発により飛び散った物質の堆積で、小高いリムの形成を説明しうる。またガスの蓄積のタイムスケール次第で近年の爆発を可能とするため、リムが浸食をほぼ受けずに残っている、すなわち湖地形の形成から時間があまり経っていないことも説明可能である。また、液体炭化水素が極域に集中していることから、湖地形の分布とも整合的である。

# プレートテクトニクスの駆動力の起源メカニズム Origin mechanism of Driving Force of Plate Tectonics

○種子 彰・AKIRA TANEKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SEED SCIENCE Labo. 銀河系・惑星・地球月起源研究室

まとめ 月と地球深海洋底とプレート境界割れの全てを統一する形成メカニズム(マルチインパクト仮説による検証)と其のストーリーを下記に示す。2022-44

46 億年前に太陽系が形成されて ⇒マルチインパクト仮説[1]で、太陽系の複数の謎を全て説明。

◎木星摂動による SCERRA の潮汐破砕 軌道変遷に約 6 億年掛った？

①小惑星星帯の起源 (断裂は約 40 億年前), ②隕石(分化と未分化混在)の起源,

◎地球への Muntle 破片の複数時間差衝突 =マルチインパクト仮説[1]

③月の起源 Fig.1, ④月(マントル)偏芯=常に地球に表面を向ける理由, ⑤月軌道  $60 \times R_e$

◎太平洋ダーウィン隆起の起源, ⑦プレート境界亀裂の起源,

●複数破片の時間差衝突で, ウェゲナー大陸移動説の証明が可能 ◎深海洋底形成の起源起

◎生物種大絶滅, ⑩プレート駆動力[2] [駆動力=慣性モーメント偏芯と最少化]の起源 Fig2.,

●地軸傾斜  $23.5^\circ$  と衝突痕跡と磁気異常への理解 ⑪同比重プレートが重なる理由は凸凹[2],

⑫高緯度衝突による地軸傾斜の起源, ⑬キンバーライト・パイプの起源, ⑭コア偏芯で磁気異常の起源,

⑮地殻と固体コアが独立回転し, 間の流体コア回転方向が交互に逆転し単震動⇒地磁気逆転現象,

⑯水星と冥王星の起源, ⑰木星の大赤斑の起源, ⑱水星のコアリッチの起源

全てを統一的に説明できる, 月と地球のマルチインパクト新起源仮説を提案した[2].

◎プレート駆動力の起源, [旧説]熱対流によるプレート移動説⇒プレート移動方向の急変説明不能, マントルは流体, 熱源により比重の差で浮力の合計でマントルが上昇し, 地表のプレートを移動させる.

・X上昇流は軸流, ・プレート潜り込みは相流 ・Xプレート相互重なり始めの説明が不可能.

⑩プレート駆動力 [駆動力=慣性モーメント偏芯と最少化]の起源で説明, 《新しい視点》を下記に示す。

⑳共通重心の回りで[地球と月の巴回転]⇒地球自転とく月偏芯で自転中止=常に表面を地球に向ける。

◎内力の変形で移動や変形(流動)が起きるのか⇒起きない, Xプレート動かず潜り込まない,

◎惑星衝突でマントル欠損⇒欠損では隆起しか起こらない! , ⇒(ダーウィンの隆起[現実の結果])

◎アイソスタシー⇒ダーウィンの隆起, ⇒プレート相互の移動[現実の結果](マントルは熱対流し無い),

◎ティチス海形成と地軸傾斜の効果⇒移動方向の急変化⇒X熱対流説(内力)では説明が不可能,

◎現実の惑星の動き⇒公転と自転(共重芯の周りで~~の~~巴回転)⇒プレート駆動力発生と慣性能率最小,

●プレートテクトニクスの駆動力[誰も挑戦しない!]⇒解明され掛けた最後の謎に, 貴方も挑戦して下さい。

[1] 種子彰 月形成仮説(マルチインパクト仮説) Sep.2014 P1-22 日本惑星科学会 秋季講演会

[2] 種子彰 海洋底と Plate Tectonics の起源の謎が・2021 P01-04 日本惑星科学会 秋季講演会

## CAI粒子の合体成長: 付着理論からの検討

○奥住 聡<sup>1</sup>, 増田 雄樹<sup>1</sup>, 深井 稜汰<sup>2</sup>, 荒川 創太<sup>3</sup><sup>1</sup> 東京工業大学, <sup>2</sup> ISAS/JAXA, <sup>3</sup> JAMSTEC

原始惑星系円盤の固体微粒子(ダスト)の合体過程を理解することは、惑星形成の解明のために必須の課題である。ダストの合体は、主として粒子表面の分子間力によって起こると考えられている(Chokshi et al. 1993; Dominik & Tielens 1997)。しかし、鉱物の表面エネルギー(分子間力の大きさを表す量)は鉱物組成、周囲のガスの組成、測定方法の違いに起因する大きな不定性がある(Miller et al. 2012; Kimura et al. 2015)。このため、円盤ダストが分子間力だけでどの程度まで合体成長できるのかは明らかになっていない。

円盤ダストの合体効率をより良く制約する上で、円盤の天文観測や隕石の分析から得られる情報は貴重である(円盤観測から得られる制約については、山室の本講演会発表を参照)。本研究では、隕石に含まれるCAI (Ca-Al-rich inclusions) から円盤ダストの合体を理解することを目指す。CAIは大きさが1-10 mmに及ぶ難揮発性物質の包有物であり、太陽系最古の物質としてよく知られる。CAIには溶融を明確に経験している粗粒のものと、そうでない細粒のものがある。このうち後者は、10 μm前後の鉱物粒子から成るアグリゲイトであり(e.g., Krot et al. 2004)、原始太陽系円盤の形成初期かつ高温の領域で粒子の合体成長によって形成されたと考えられている(e.g., Charnoz et al. 2015)。円盤の理論に基づけば、CAIが形成するような温度1000 K以上の円盤領域は、磁気回転不安定性(Balbus & Hawley 1991)由来の乱流が存在していた可能性が非常に高い(e.g., Gammie 1996)。このように、CAIについては、アグリゲイトの衝突合体を大きく左右する構成粒子サイズや円盤乱流強度をある程度の範囲に絞り込むことが可能である。このことを利用すれば、CAI構成粒子の合体過程に対してある程度確実な情報を引き出すことができるのではと我々は考えている。

そこで本研究では、細粒CAIが形成したと想定される形成直後の原始太陽系円盤の高温・乱流領域における鉱物アグリゲイトの衝突過程をモデル化し、細粒CAIが分子間力による付着合体を通じて形成されるために必要な条件を探った。その結果、最大アグリゲイトサイズが数mm(Chaumard et al. 2014)に及ぶ細粒CAIが形成されるためには、構成粒子の表面エネルギーが0.1-1 J m<sup>-2</sup>以上でなければならないことがわかった。この値は、構成分子の極性相互作用が大きい鉱物の表面エネルギーに相当する(Miller et al. 2012)。このことは、細粒CAIの構成粒子が鉱物のなかでも比較的付着しやすい粒子であったことを示唆する。溶融を経験した粗粒CAIの形成過程についても議論を行う予定である。

## ダストアグリゲイトの衝突成長と破壊

○荒川創太<sup>1</sup>, 田中秀和<sup>2</sup>, 小久保英一郎<sup>3</sup><sup>1</sup>海洋研究開発機構, <sup>2</sup>東北大学, <sup>3</sup>国立天文台

サブミクロンサイズのダスト粒子からなるアグリゲイトの衝突合体成長は惑星形成のファーストステップであり、ダストアグリゲイトの衝突の物理を理解することは重要である。ダストアグリゲイトの斜め衝突において、接触している粒子間の接線方向の運動（転がり、滑り、ねじれ）における摩擦が主要なエネルギー散逸機構であることが最近示された [1]。よって、ダストアグリゲイトの衝突成長条件は転がり摩擦の強さに依存すると期待される。しかし、転がり摩擦の強さは室内実験 [e.g., 2] や分子動力学計算 [e.g., 3] によって調査されているものの、粒子サイズや組成に対する依存性は未だ明らかでない。また、転がり摩擦の強さを変えた場合にダストアグリゲイトの衝突成長条件がどう変化するのかも調べられていない。

そこで、本研究では、等質量のダストアグリゲイト同士の衝突について、さまざまな衝突速度及び衝突角度で数値シミュレーションを行い、さらに転がり摩擦の強さを粒子間接触理論 [4, 5] から期待される上限値と下限値のあいだで系統的に変化させた [6]。計算コード及び初期のダストアグリゲイトは我々の以前の論文 [1] と同一のものを使用した。数値シミュレーションの結果、ダストアグリゲイトの成長・破壊の閾値となる衝突速度は転がり摩擦の強さにはあまり依存しないことがわかった。また、斜め衝突において、滑りとねじれを加えた接線方向の摩擦によるエネルギー散逸の総量は転がり摩擦の強さを変えてもほとんど変化しないことを確認した。つまり、転がり摩擦の強さは全エネルギー散逸量を変えないため、衝突成長条件も変化しなかったのだと推測される。

[1] Arakawa, S., Tanaka, H., and Kokubo, E., 2022, *Astrophys. J.* 933, 144.

[2] Heim, L.-O., Blum, J., Preuss, M., and Butt, H.-J., *Phys. Rev. Lett.* 83, 3328.

[3] Umstätter, P. and Urbassek, H. M., 2021, *Sci. Rep.* 11, 14591.

[4] Johnson, K. L., Kendall, K., and Roberts, A. D., 1971, *Proc. R. Soc. Lond. A* 324, 301.

[5] Dominik, C. and Tielens, A. G. G. M., 1995, *Philos. Mag. A* 72, 783.

[6] Arakawa, S., Tanaka, H., and Kokubo, E., submitted.

“H<sub>2</sub>O スノーライン以遠に影構造を持つ原始惑星系円盤の赤道面化学構造

II. 有機分子組成 & 電離度・初期化学組成依存性”

“The molecular composition of the protoplanetary disk midplanes with shadow structures beyond the H<sub>2</sub>O snowline  
II. Abundances of organic molecules & dependance on ionization rates and initial chemical abundances”

○野津 翔太 (Shota Notsu)<sup>1</sup>, 大野 和正 (Kazumasa Ohno)<sup>2</sup>, 植田 高啓 (Takahiro Ueda)<sup>3,4</sup>,  
野村 英子 (Hideko Nomura)<sup>4</sup>, Catherine Walsh<sup>5</sup>, Christian Eistrup<sup>3</sup>,

<sup>1</sup> 理化学研究所 坂井星・惑星形成研究室 (Star and Planet Formation Laboratory, RIKEN),

<sup>2</sup> カリフォルニア大学 サンタクルーズ校 (University of California, Santa Cruz, USA),

<sup>3</sup> マックス・プランク天文学研究所 (Max Planck Institute for Astronomy, Germany),

<sup>4</sup> リーズ大学 (University of Leeds, UK), <sup>5</sup> 国立天文台 (National Astronomical Observatory of Japan),

原始惑星系円盤 (以下、“円盤”) の化学構造の理解は、円盤観測や惑星大気観測、さらには彗星や小惑星などの太陽系小天体の観測結果を解釈する上でも重要である。近年の円盤輻射輸送計算 (e.g., Ueda et al. 2019, ApJ, 871, 10) によると、ダストが動径方向に濃集する領域が存在する場合、中心星からの放射が遮られる事で影構造が形成され、円盤内側領域においても低温な領域が形成される可能性が示唆されている。最近 Ohno & Ueda (2021, A&A, 651, L2) は、T Tauri 円盤 (原始太陽系円盤) において H<sub>2</sub>O スノーライン (= 1.3 au) 前後で 30 倍程度以上のダスト面密度差があれば、その外側 (現在の木星軌道付近) では影になる事で温度が 30K を下回り、N<sub>2</sub> や希ガスなどがダスト上に凍結可能である事を示した。

そこで発表者らは同じ円盤物理構造モデルの下で詳細なガス・ダスト化学反応ネットワーク計算を実施し、主要分子の組成や元素組成比の分布を調べた (Notsu et al. 2022, ApJ in press: arXiv: 2208.06005)。その結果、影構造を持つ円盤では HCN, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>CO など先行研究(Ohno & Ueda 2021)では考慮されていない分子も豊富に存在する事、2 au 以遠で CO<sub>2</sub> や CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> などがダスト上に凍結する事、円盤ガス C/O 比が広範囲で均質(概ね 1)になる一方 N/O 比が影領域で著しく増加する事などが分かった。この事から、N/O 比が円盤影構造の指標として使用できる可能性が示唆された(図 1)。

また有機分子に着目すると、影領域では H<sub>2</sub>CO や CH<sub>3</sub>OH, NH<sub>2</sub>CHO などの飽和有機分子の存在量が増加する一方、不飽和有機分子 (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>, HCOOCH<sub>3</sub> など) の存在量が減少する事などが分かった。これは前者の生成には冷たいダスト上の水素付加反応が重要である一方、後者の生成にはガス中での反応や暖かいダスト上でのラジカル同士の衝突反応が重要である点に関わっていると考えられる。その他、化学進化にとって重要なパラメーターである初期化学組成や電離度を変えた円盤での計算も進め、O<sub>2</sub> 組成などへの影響を議論した。

本発表ではこれらの結果の詳細を紹介した上で、ALMA などを用いた円盤分子輝線観測への示唆や、太陽系外惑星大気組成、彗星や小惑星の組成との関係などについて議論を行う予定である。

論文情報 : Notsu, S., et al. 2022, ApJ, in press. (preprint: <https://arxiv.org/abs/2208.06005>)

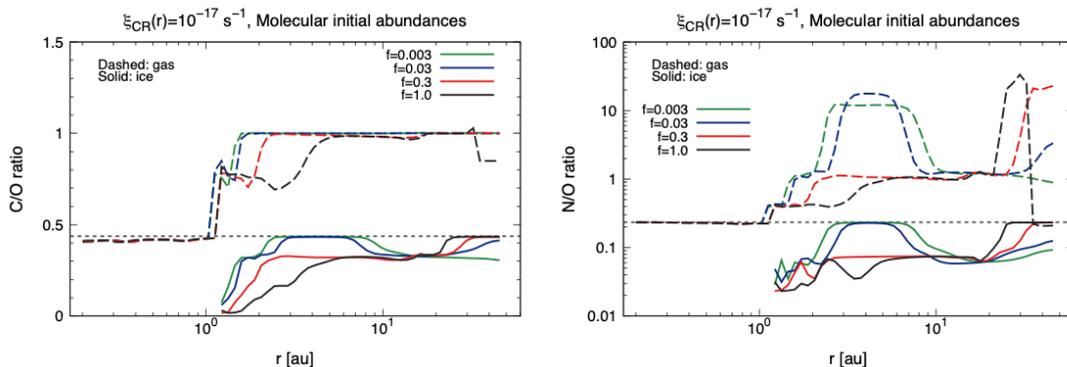


図 1: 円盤内ガス・氷 C/O 比 (左), N/O 比(右) の半径分布

# ダストと温度が共進化する 磁気降着円盤のスノーライン進化

○近藤克<sup>1</sup>、奥住聡<sup>1</sup>、森昇志<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学、<sup>2</sup>東北大学

惑星は、地球のような岩石惑星や木星のような巨大ガス惑星、海王星のような氷惑星など、その組成に多様性を持つ。この多様性を明らかにするためには、惑星形成の場である原始惑星系円盤の温度構造、特に水氷が昇華する境界軌道であるスノーラインの理解が重要である。近年、ガスと磁場の相互作用(磁気流体力学)に着目した原始惑星系円盤の研究が盛んである(e.g., Hirose & Turner 2011; Bai & Stone 2013a)。磁気流体力学に基づく円盤では、磁場によるガスの降着が円盤上層で起こるため、従来のモデルよりも降着による加熱が非効率であることがシミュレーションで明らかになった(Mori et al., 2019)。非効率な加熱の結果、スノーラインが現在の地球軌道を早期(<1 Myr)に通過するため、地球形成が時間的に大きく制約されることが示唆された(Mori et al., 2021)。我々はこれまでの研究で、磁気流体力学に基づく円盤の温度構造はダストサイズ分布に依存するという結果を示した(Kondo et al., submitted, arXiv: <https://arxiv.org/abs/2205.13511>)。この結果はダストの最大サイズが 10–100  $\mu\text{m}$  の時にスノーラインの地球軌道到達が 1 Myr よりも遅延するというものであり、岩石惑星形成の時間制約の緩和を示唆している。しかし、実際にどの程度の最大サイズが実現されるかは不明であった。原始惑星系円盤中のダストは、ダスト同士の衝突による合体成長・中心星への落下を通じて時間とともにそのサイズ・空間分布は変化する。

そこで本研究では、ダストの移動・合体成長によるダストサイズ進化を考慮し、磁気降着円盤におけるスノーラインの移動を明らかにする。計算には我々がこれまでに構築した円盤温度モデルに、円盤内でのダストの合体成長・破壊と中心星方向の落下を取り入れる。ダスト成長の計算では、円盤の鉛直拡散係数  $\alpha_D$  とダストの臨界破壊速度  $v_{\text{frag}}$  をパラメータとして、スノーラインの移動が最も遅延するパラメータセットを探索した。

ダストの移流がなく合体成長のみの計算の結果では、 $v_{\text{frag}} < 1 \text{ m/s}$  かつダストの鉛直拡散がある程度効果的( $\alpha_D > 10^{-4}$ )であるとき、ダストの最大サイズが 10–100  $\mu\text{m}$  ほどになり、円盤が効率的に暖まることが分かった。またこれまでの計算で分かったように、円盤中のダストガス比が 0.01 よりも高くなると、ダストの最大サイズが cm サイズのときにスノーラインの移動が最も遅延する(Kondo et al., submitted)。そのため、そのような高いダストガス比であれば、 $v_{\text{frag}} \sim 10 \text{ m/s}$  でも最大サイズが cm 程度となり、効率的な加熱によってスノーラインの移動が遅延することもわかった。本発表では、ダストの落下を含めた結果も紹介する予定である。

# PDS70c の周惑星円盤内でのダストの進化と熱放射

## Dust evolution and emission in the circumplanetary disc of PDS70c

○芝池諭人<sup>1</sup>, Christoph Mordasini<sup>1</sup>, and Yann Alibert<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ベルン大学

我々は、原始惑星系円盤で用いられてきた手法を周惑星円盤に応用し、合体成長と移動を考慮した場合のダストからの熱放射を推定するモデルを構築した。また、惑星のガス集積過程とその様々な観測結果が反映されるような、より詳細な周惑星円盤モデルを構築した。そして、ガス集積過程とダストの進化によるダスト放射への影響を調べ、PDS70c 自身とその周惑星円盤の特性を ALMA の 855 $\mu\text{m}$  の観測データとの比較から制約可能か検証した。

その結果、観測データを我々のモデルで説明するためには、PDS70c の周惑星円盤に流入するガスが従来の 3D 流体シミュレーションや解析的な予測 (e.g., Ward & Canup 2010) よりも非常に大きい角運動量を持っている必要がある、とわかった(図 1)。これは、1) 流入するガスが実際に非常に大きな角運動量を持っている、2) 周惑星円盤内に円盤外向きのガス流が存在しダストを円盤外縁部に運んでいる、3) ダストの合体成長と内側方向への移動が推測より起きずダストが周惑星円盤内に溜まっている、4) 円盤が構造を持つ、という四つの可能性を示唆している(Shibaïke et al. in prep.)。

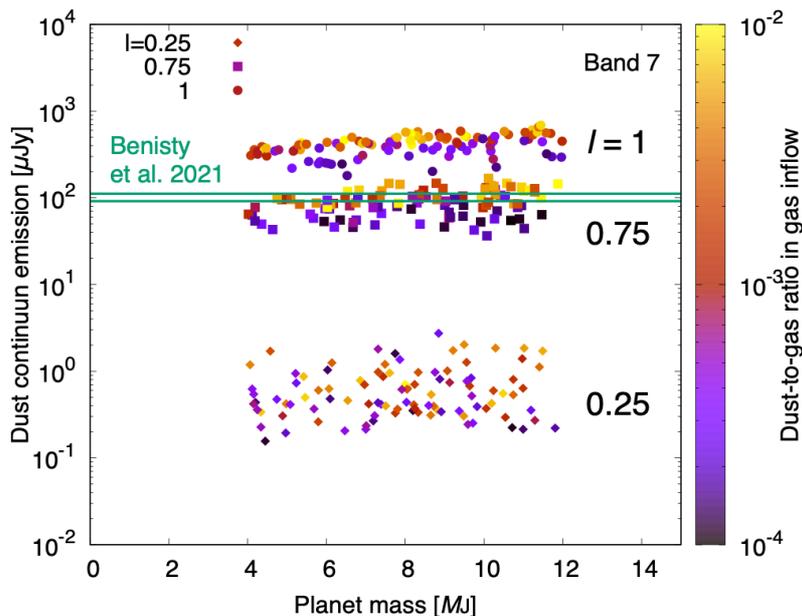


図 1. PDS70c の周惑星円盤のダストからの熱放射の推定。流入するガスの持つ角運動量のバイアス  $i$  が 0.75 の時に観測結果を再現できたが、これは非常に高い値である。また、流入するガスのダスト/ガス比(色)及び惑星質量(横軸)による依存性は見られなかった。これは、他の特性の依存性についても同様であった。

# 大局的非理想磁気流体シミュレーションから探る 原始惑星系円盤の温度構造

○森昇志<sup>1</sup>, 富田賢吾<sup>1</sup>, Xuening Bai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東北大学, <sup>2</sup>清華大学

太陽系の地球型惑星は水に枯渇した惑星であるため、原始太陽系円盤の水スノーラインの内側で形成したと考えられる。スノーラインは氷の昇華境界であり、その半径より内側では氷は水蒸気として存在する。そのためスノーラインの位置とその時間進化を知ることで、地球型惑星の形成時期と場所を制約することができる。これまでスノーラインの位置は、円盤中の磁場を伴う乱流がガス降着と円盤加熱を駆動するという古典的な円盤モデルの下で研究されてきた。しかし近年の磁気流体シミュレーションを用いた研究によって、原始惑星系円盤のような弱電離環境では磁場が円盤降着を駆動するものの、磁気乱流は抑制されることが分かった。この磁氣的に降着する層流円盤における惑星形成はまだ不明な点が多く、温度構造でさえ未解明である。

これまで我々は局所磁気流体力学シミュレーションを用いて、層流円盤におけるガス降着時の加熱過程を調べてきた。その結果、加熱は円盤の上層で起き、従来のモデルよりも低温な円盤になりうることがわかった。本研究ではこれまでの研究を発展させ、大局的な計算領域における非理想磁気流体シミュレーションを行い、ガス降着による加熱分布を調べた。大局的な計算領域を考慮することで、大局的な磁場構造やそれに伴う強い電流層の加熱を取り扱うことが可能となり、より正確な円盤温度を調べることができる。計算の結果、円盤上層のFUVによる電離面で、大局的な磁場の折れ曲がりによって強い電流層が発生することが分かった。こうした光学的に薄い領域中の電流層は加熱にほとんど寄与しないと考えられるため、やはり大局的計算でも低温な円盤となる傾向にあることが分かる。

## 巨大惑星の周惑星円盤へのガス降着：

## 3次元数値流体計算を用いた質量降着率の惑星質量依存性

○前田夏穂<sup>1</sup>，大槻圭史<sup>1</sup>，谷川享行<sup>2</sup>，町田正博<sup>3</sup>，末次竜<sup>4</sup>

1. 神戸大学，2. 一関工業高等専門学校，3. 九州大学，4. 大島商船高等専門学校

巨大惑星は形成時に周囲からガスを獲得する際に周惑星円盤を形成する。周惑星円盤を介してガスや固体物質が供給され、これらは惑星や衛星の材料となり得る。従って、周惑星円盤へのガスや固体物質の供給過程を調べることは、惑星形成・衛星形成双方の理解において重要である。本研究では、惑星まわりの局所領域について3次元高解像度数値流体計算を行った。流体は等温非粘性と仮定し、惑星質量が0.05–1木星質量の様々な場合について数値流体計算を行い、周惑星円盤へのガス降着の惑星質量依存性を調べた[1]。

先行研究[2]より、ガスは鉛直方向から周惑星円盤に3次的に降着することがわかっており、本研究でも同様の降着が見られた。周惑星円盤に降着するガスの源流となる領域（ガス降着帯）の動径方向の幅は惑星質量が大きいほど広くなり、その惑星質量依存性は、惑星質量が0.2木星質量以下では惑星質量の1/6乗に、0.2木星質量以上では惑星質量に比例することがわかった。また、周惑星円盤への質量降着率と惑星Hill圏への質量降着率の比は惑星質量に依らず0.4であることがわかった。この結果を用いれば、周惑星円盤への質量降着率が惑星Hill圏への質量降着率から概算可能であり、今後原始惑星系円盤のグローバルな領域を考慮した流体計算を行う際、惑星Hill半径スケール程度の解像度があれば周惑星円盤への質量降着率が推定できると考えられる。

質量降着率の惑星質量依存性については、先行研究[3]で半解析式が得られているが、それは2次元流体計算の結果[4]に基づいていた。そのため、本研究の3次元流体計算で得られた結果を用いて、3次元の場合における質量降着率の惑星質量依存性の半解析式の再検討を行った。その結果、3次元の場合、質量降着率の惑星質量依存性は2次元の場合と同じである一方、その絶対値は2次元の場合の60%程度であることがわかった。すなわち、流れの構造自体の2次元近似は全く成り立たないにも関わらず、質量降着率の惑星質量依存性は2次元近似と大きく変わらないと言える。

参考文献：

- [1] Maeda et al. 2022, ApJ, 935, 56
- [2] Tanigawa et al. 2012, ApJ, 747, 47
- [3] Tanigawa & Tanaka 2016, ApJ, 823, 48
- [4] Tanigawa & Watanabe 2002, ApJ, 580, 506

## 初期火星水環境の水質復元のためのナノ秒 時間ゲートラマン分光装置の開発

○田畑陽久<sup>1</sup>, 長勇一郎<sup>1</sup>, 湯本航生<sup>1</sup>, 森晶輝<sup>1</sup>, 日向輝<sup>1</sup>, 杉田精司<sup>1</sup>, 松木篤<sup>2</sup>, 福士圭介<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 <sup>2</sup> 金沢大学 環日本海域環境研究センター

火星表層にはかつて液体の水が存在していたことが、近年の鉱物学・地球化学にフォーカスした着陸探査および周回衛星観測によって明らかになった。昨年、三角州地形の残る Jezero クレーターに着陸した NASA の火星探査機 Perseverance に搭載された SuperCam と呼ばれる観測装置群には、鉱物・有機物の組成分析が可能な時間ゲートラマン分光計が惑星探査機として初めて搭載されており、新たな知見の獲得が見込まれている。ラマン散乱光は蛍光と比べて強度が微弱だが、レーザー照射から発光までのタイムスケールが短いという性質を持つため、時間ゲート機能は蛍光の強い岩石・鉱物試料の測定において重要な役割を果たすと考えられている。しかしながら、Jezero クレーター三角州の堆積時の水環境を復元する上で重要となる粘土鉱物のラマンスペクトル、特に層間イオン組成に対する依存性はほとんど調べられていない。そこで本研究では、火星粘土鉱物のラマンスペクトルから過去の水質を復元するため、SuperCam と同等以上の機能および性能 (ex. 時間ゲート機能、波長解像度、SN 比) を持つラマン分光装置を開発し、ラマンスペクトルにおける粘土鉱物の層間陽イオン組成依存性を明らかにすることを目的としている。

本研究で開発したラマン分光装置は、波長 532 nm のパルスレーザーを約 10 mJ の強度で試料にビーム径約 3–10 mm にて照射する照射光学系と、生じたラマン散乱光を分光器を経てインテンシファイア搭載 CCD カメラ (ICCD) にて撮像する集光光学系から成る。照射光学系の諸元は基本的に SuperCam と同様だが、ビーム径に関してはより大きい径でも測定可能な設計とした。ICCD の時間ゲートは、信号発生器を用いてレーザー照射および撮像のタイミングを同期させることで行い、両者のタイミングをオシロスコープでモニタすることにより、100 ns の時間ゲートを  $\pm 1$  ns の精度で実現可能なことを確認した。測定は 535–675 nm の波長範囲で 100 回積算を行い、得られたスペクトルに対してはダークスペクトルを減算し、Ne ランプを用いた波長校正および校正ハロゲン光源を用いた感度補正を実施した。

開発した装置を用いて標準試料としてアセトアミノフェン試薬を測定したところ、得られたスペクトル形状は文献ラマンスペクトルと良く一致することが確認された。また、蛍光の強い炭酸塩鉱物カルサイト ( $\text{CaCO}_3$ ) について時間ゲート幅を変化させて測定を行った結果、露光時間 100 ns 以下であれば蛍光が抑制できること確かめられ、波長半値幅および SN 比についても SuperCam と同程度の性能を達成できていることが確認された。この結果は、一般に蛍光が強い粘土鉱物試料においてもラマン分光法が適用できる可能性を示唆する。

## 火星大気のグローバル非静力学高解像度計算

○檜村 博基<sup>1</sup>・八代 尚<sup>2</sup>・西澤 誠也<sup>3</sup>・富田 浩文<sup>3</sup>・小郷原 一智<sup>4</sup>

黒田 剛史<sup>5</sup>・中島 健介<sup>6</sup>・石渡 正樹<sup>7</sup>・高橋 芳幸<sup>1</sup>・林 祥介<sup>1</sup>

<sup>1</sup>神戸大学, <sup>2</sup>国立環境研究所, <sup>3</sup>理化学研究所, <sup>4</sup>京都産業大学

<sup>5</sup>東北大学, <sup>6</sup>九州大学, <sup>7</sup>北海道大学

### 1. はじめに

火星ではダストデビル (塵旋風) からグローバルダストストームまで, 大小様々な規模の砂嵐が観測されているが, これらのスケール間相互作用は解明されていない. また火星は大気が薄く海がないため昼夜間の寒暖差が大きく, 地表付近で鉛直対流が成長し卓越すると考えられる. さらに火星の地表面は非常に起伏に富んでおり, 地形の影響も大きいと想像される.

我々は, 火星で観測されている水平数 km 規模の鉛直対流を全球的に再現し調べるために, 全球非静力学の火星大気モデルを開発し, 高解像度計算を試行してきた. 開発は, 全球非静力学コア「SCALE-GM」に, 既存の汎惑星全球大気モデル「DCPAM」の火星大気放射やダスト過程を移植する形で進めてきた. 大型計算機「京」により, 全球 1.9 km 格子の高解像度計算を実現したが, 観測されている鉛直対流を表現するには 1 km 未満の水平解像度が必要であることが示唆された. また, 火星地形の導入を試行したところ, 斜面風の発達にともない容易に計算不安定化することと, 鉛直高階粘性を導入することでこれを安定化させられることを見出してきた.

今回は, 大型計算機「富岳」を用いて実現した全球 900 m 格子の計算結果を紹介する.

### 2. モデル・計算設定

SCALE-GMは3次元運動方程式系を正20面体準一様格子上で有限体積法で解くモデルである. 今回は水平格子間隔 15 km でスピニアップ計算をした後に, 1.9 km での1火星日の計算を経て, 900 mの高解像度計算に至った. 鉛直層数は100層とした. 簡単のため, ダストの光学的厚さは地表面で0.2の固定分布とし, 地表面アルベドも全球で0.2とした. 土壌は1.5層で表現し, 地表面温度変化が再現されるように熱容量を調節した.

### 3. 結果

図a-cは, 水平格子間隔 900 m の計算で得られたモデル高度 15 km の鉛直風の水平分布を表す. 北半球春分から 63 日後, 経度  $0^\circ$  が正午の時刻である. おもに昼間午後の領域に無数の鉛直対流が発達している. 対流の水平スケールは数 km から 10 km 程度であり, 観測されている鉛直対流 (図d) のスケールと同程度である. 発表では, 再現された鉛直対流の全球気象の影響や地域や地方時に依存した特徴を詳しく紹介したい.

謝辞: 本研究は, 文部科学省ポスト「京」萌芽的課題3「太陽系外惑星 (第二の地球) の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明」および「富岳」成果創出加速プログラム「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」の一環として実施しました. 本研究は JST 創発的研究支援事業 JPMJFR212R の支援を受けたものです. 数値計算には, HPCIシステム利用研究課題 (課題番号: hp200124, hp210164, hp220173) のもと, 理化学研究所のスーパーコンピュータ「富岳」を使用しました.

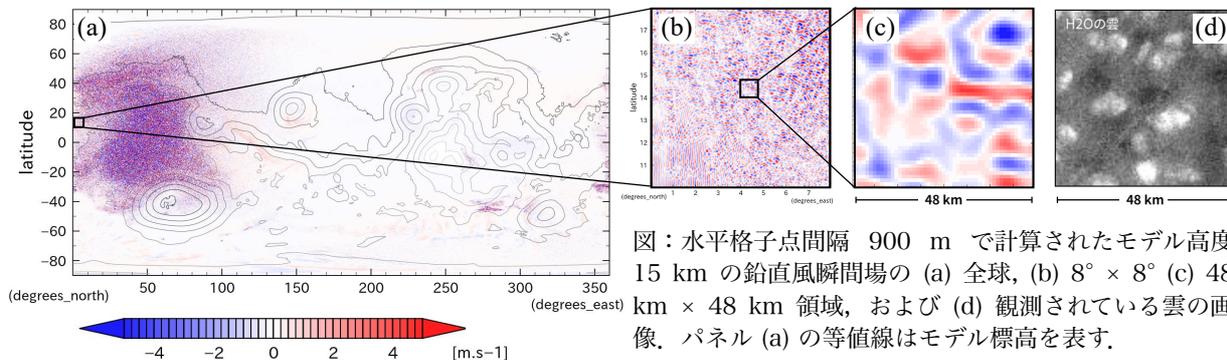


図: 水平格子点間隔 900 m で計算されたモデル高度 15 km の鉛直風瞬間場の (a) 全球, (b)  $8^\circ \times 8^\circ$  (c)  $48 \text{ km} \times 48 \text{ km}$  領域, および (d) 観測されている雲の画像. パネル (a) の等値線はモデル標高を表す.

## 火星衛星探査計画 MMX・SAWT による帰還試料の 初期記載・初期分析の検討

○深井稜汰<sup>1</sup>、臼井寛裕<sup>1,2</sup>、藤谷渉<sup>3</sup>、高野淑識<sup>4</sup>、馬上謙一<sup>5</sup>、小池みずほ<sup>6</sup>、三浦弥生<sup>2</sup>、  
玄田英典<sup>7</sup>、古川善博<sup>8</sup>、松岡萌<sup>9</sup>、菅原春菜<sup>1</sup>、橘省吾<sup>1,2</sup>、坂本佳奈子<sup>1</sup>、安部正真<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>JAXA、<sup>2</sup>東京大学、<sup>3</sup>茨城大学、<sup>4</sup>海洋研究開発機構、<sup>5</sup>北海道大学、<sup>6</sup>広島大学、<sup>7</sup>東京工業大  
学、<sup>8</sup>東北大学、<sup>9</sup>産業技術総合研究所

火星衛星探査計画 (Martian Moons eXploration; MMX) は、火星衛星の一つであるフォボスからのサンプルリターンミッションである。Sample Analysis Working Team (SAWT) は、2029 年に帰還するリターンサンプルの分析プロトコルの設計を行なっている。本発表では、帰還直後のサンプルの取り扱いから初期分析に至るまでのプロトコルの検討状況を紹介する。

帰還したサンプルコンテナに対して、まずコンテナ内のガスを回収し、コンテナへの地球大気のリーク状況を確認するための簡易分析 (Quick Analysis) を行う。サンプラーがクリーンチャンバーに接続された後には、速やかに試料の秤量を行い、MMX 搭載観測機器 (MIRS, OROCHI など) と対応した分光観測機器を用いたバルク試料の最初期記載 (Pre-basic Characterization) が行われる。科学成果の早期創出・サンプリングシステムの評価や汚染管理・今後の試料分配への情報提供のために、最初期記載の直後に一部の試料はクリーンチャンバー外に移動し、初期分析チームによって予察的研究 (Preliminary Examination) が行われる。ISAS キュレーションチームは予察的研究と並行し、クリーンチャンバー内粒子の初期記載 (Basic Characterization) を行う。最終的には、初期記載を終えた粒子が初期分析チームに追加配分され、ミッション目的解明のための初期分析 (Initial Analysis) が始動する。初期分析の後には、公募による試料分配が予定されている。

最初期記載において最も重要視されるのは、バルク試料の正確な記載である。この後の行程において試料は細分化・分配がなされるため、探査機によるフォボス表面の比較対象としてバルクデータが得られる最後の機会となる。初期分析チームによる予察的研究は、採取目標量が 100 mg であったはやぶさ 2 ミッションでは想定されていなかった研究フェーズである。クリーンチャンバー内では達成が難しい化学組成・同位体組成の分析などを通して、ミッション目的の早期達成を目指す。一方で、初期記載では基礎的な形状データ (形状・色・粒子サイズ) を統計的に得ることが主な科学目的となる。予察的研究と初期記載を並行して行うことが、起源によって物質の特徴が大きく異なり、採取量の多い MMX におけるキュレーションの鍵となる。

# PB-01

## InSight で観測された火星の局所低気圧の地震学及び気象学的記載

### Seismological and meteorological description of Martian convective vortices observed by InSight

○Keisuke Onodera<sup>1</sup>, Taichi Kawamura<sup>2</sup>, Kiwamu Nishida<sup>1</sup>, Naomi Murdoch<sup>3</sup>, Ryoji Otsuka<sup>4,5</sup>, Satoshi Tanaka<sup>4,5</sup>, Clément Perrin<sup>6</sup>, Grégory Sainton<sup>2</sup>, Sebastian Carrasco<sup>7</sup>, Mélanie Drilleau<sup>3</sup>, Ralph Lorenz<sup>8</sup>, Takefumi Mitani<sup>5</sup>, Sébastien Rodriguez<sup>2</sup>, Martin Schimmel<sup>9</sup>, Eleonore Stutzmann<sup>2</sup>, Philippe Lognonné<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ERI/The University of Tokyo, <sup>2</sup>IPGP/ Université Paris Cité, <sup>3</sup>ISEAE-SUPAERO/Université de Toulouse, <sup>4</sup>Department of Complexity Science and Engineering/The University of Tokyo, <sup>5</sup>ISAS/JAXA, <sup>6</sup>Nante Université/Université d'Angers/Le Mans Université, <sup>7</sup>University of Cologne, <sup>8</sup>APL/Johns Hopkins University, <sup>9</sup>Geosciences Barcelona

#### Abstract

Over the past three years, InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) has performed seismological and meteorological observations (such as atmospheric pressure, air temperature, wind speed, and wind direction) [1]. The unprecedented high-sampling and quasi-continuous observation allowed us to improve our knowledge of the current Martian seismicity, the internal structure, and atmospheric activities (e.g., [2]-[7]).

In this study, we pay particular attention to “convective vortex” or “dust devil”, which is one of the most common phenomena on Mars caused by diurnal variation of the thermodynamical structure in the atmosphere. The past three years of observation permitted us to identify about 13,000 transient pressure drops and most of which are interpreted as the passage of vortices (or dust devils) in the vicinity of the InSight lander.

The vortices directly reflect the behavior of the Martian atmosphere on a local scale and also can contribute to evaluating the subsurface elastic structure by measuring the ground deformation at their encounter with the lander. Thus, it is important to understand this phenomenon through both meteorological and seismological aspects.

The motivation for this research comes from the fact that while we have detected 13,000 events (corresponding to a ten times larger

number of the detected marsquakes), a detailed description has not been performed yet. As a first step to deepening our understanding of the observed events, we collect all available seismic and meteorological data and characterize them. Moreover, by looking into the correlation between respective observations, we aim to reveal what is going on during the encounter of the vortices and what makes the differences in the signal characteristics between the detected events.

In the presentation, we will show the first description of the Martian convective vortices from both seismological and meteorological aspects using all available events. Especially, we will discuss how we can interpret a wide variety of characteristics observed through seismic and pressure monitoring, based on the parameters we obtained so far (e.g., cross-correlation between seismic and pressure data, the temporal change in frequency content of wind speed).

#### References

[1] Banerdt et al. (2020), *Nature Geosci.*, 13, 183-189. [2] Lognonné et al. (2020), *Nature Geosci.*, 13, 213-220. [3] Giardini et al. (2020), *Nature Geosci.*, 205-212. [4] Banfield et al. (2020), *Nature Geosci.*, 13, 190-198. [5] Khan et al. (2021), *Science*, 373, 6553, 438-443. [6] Knapmeyer-Endrun et al. (2021), *Science*, 373, 6553, 438-443. [7] Stähler et al. (2021), *Science*, 373, 6553, 443-448.

# 露頭画像中における柱状図作成箇所の 自動検出の試行

Trial of automatic extraction of stratigraphic column drawing areas in  
outcrop images

○野口里奈<sup>1</sup>

<sup>1</sup>新潟大学 自然科学系

Rina Noguchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Science, Niigata University

火星で露頭スケールの地質調査が行われる時代が到来している。多量の探査画像データが得られ、火星探査を続々と控える今、画像データに基づいた露頭調査手法を確立する必要がある。一般的に、地球上で行われる地質調査では、地層の分厚さ（層厚）や構成物の種類や粒径などの基本的なデータを統合した表現方法である柱状図を最初に作成する。柱状図の作成には、1) 作成対象箇所の選定、2) 地層の認識・分割、3) 層厚の測定、4) 構成物の判別が必要であるが、データの収集には人的・時間的コストがかかる。そこで本研究では、画像解析・機械学習手法を適用し、地球上のフィールドでの人間による観察とすり合わせていくことで、柱状図を画像から自動的に作成する手法を検討する。自動化できれば、人間では不可能な同一基準からなる柱状図を短時間で多量に作成することが可能になる。これにより、探査データからの科学データ抽出の最大化が期待できるのみならず、今後の火星探査で基本的な地質調査をどのように進めるかの迅速なプロセス検討に貢献することができる。

第一段階として、本研究では、露頭画像中から地層露出のある部分を自動的に抽出する手法の開発に取り組んだ。試行には、google-image-download を用いて入手した画像（非営利での再利用・改変が可能なもの）および手持ちの露頭画像、計 71 枚を用いた。マスク画像作成後、水平・並行移動、回転・反転等により画像を 14,024 枚に増やした。得られた画像を u-net（画像中の全ての画素に対してラベル付けを行うアルゴリズムであるセマンティックセグメンテーション用の学習モデル）を用いて 300 ステップ・30 エポックで学習させ、モデルの作成、予測精度の検証を行った。本発表では、試行プロセスの詳細と学習・予測精度検証結果を速報的に紹介する。

## 球状鉄コンクリーションのサイズ分布と形成時間

○城野信一<sup>1</sup>, 田村美紗樹

<sup>1</sup>名古屋大学環境学研究科

アメリカ・ユタ州のエスカランテ国立公園やモンゴル・ゴビ砂漠で発見される球状鉄コンクリーションは、その形態や組成が火星で発見されたブルーベリーと類似しているためこれまで多くの研究が行われてきた。Yoshida et al. (2018)によって、球状炭酸カルシウムコンクリーションが前駆体であることが明らかとなり、炭酸カルシウムと鉄イオンを含む酸性の地下水が反応することで球殻状の酸化鉄層が形成される。しかし前駆体である球状炭酸カルシウムコンクリーションがどのようにして形成されたのかは全く不明である。そこで本研究では、球状鉄コンクリーションの空間分布とサイズ分布を画像解析により明らかにし、数値シミュレーションを行うことで炭酸カルシウムコンクリーションの形成環境に制約を与えることを試みた。画像解析の結果、空間分布は基本的にはランダムであるが、一部ランダム分布からずれてクラスター化していることがわかった。またサイズ分布の計測から、平均サイズとサイズ分布の標準偏差が比例していることがわかった。平均サイズと平均間隔が比例していることもわかり、ここから炭酸カルシウムコンクリーションの成長過程において炭酸カルシウム量が一定に保たれていることがわかった。ここから、炭酸カルシウムの沈殿だけでなく溶解も必要であることが示された。この事実を基にしてモデルを構築し数値シミュレーションを行った。サイズ分布の標準偏差と平均サイズの関係がよく再現され、パラメータ依存性が非常に小さいことがわかった。直径 30mm 程度の比較的大きなコンクリーションの形成環境としては、pH=5 程度でかつ炭酸カルシウムの溶解速度が小さい ( $Mn^{2+}$  イオンが存在すると小さくなる) と制約された。直径数 mm 程度の小さいコンクリーションに対しては制約が弱くなる。サイズ分布が進化するために必要な全溶解量もパラメータ依存性が小さいことが明らかとなり、全溶解量から形成時間に制約を与えられることがわかった。

# MMX 搭載赤外線分光計 MIRS の観測計画と 詳細設計結果

## Observation Plan and Design Results of MIRS: MMX Infrared Spectrometer

○岩田隆浩<sup>1</sup>, 中川広務<sup>2</sup>, 土屋広務<sup>2</sup>, 中村智樹<sup>2</sup>, 青木翔平<sup>3</sup>, 黒川宏之<sup>4</sup>, 松岡萌<sup>5</sup>,  
Maria Antonietta Barucci<sup>6</sup>, Jean-Michel Reess<sup>6</sup>, Pernelle Bernardi<sup>6</sup>,  
Alain Doressoundiram<sup>6</sup>, Sonia Fornasier<sup>6</sup>,  
Michel Le Du<sup>7</sup>, Eric Sawyer<sup>7</sup>, and Veronique Tyrou<sup>7</sup>

<sup>1</sup>JAXA宇宙研、<sup>2</sup>東北大、<sup>3</sup>東大、<sup>4</sup>東工大ELSI、<sup>5</sup>産総研、  
<sup>6</sup>LESIA, Observatoire de Paris、<sup>7</sup>CNES

MIRS (MMX InfraRed Spectrometer)は、火星衛星探査機MMXに搭載予定の0.9~3.6  $\mu\text{m}$ 帯の赤外線分光計であり、現在フランスと日本の共同グループにより開発を行っている。MIRSは、主に2.7~3.2  $\mu\text{m}$ の波長範囲で火星衛星PhobosおよびDeimos表面の水酸化物または水和鉱物の吸収を観測し、そのグローバルな分布を明らかにする。スペクトルの形状を分析することにより、含水ケイ酸塩鉱物中の構造水と水氷粒子を区別する。MIRSはまた、3.3~3.5  $\mu\text{m}$ の波長範囲で有機物による吸収の検出を試みる。これらの結果と火星との比較から、火星衛星の起源の解明を目指す。MIRSはさらに、火星大気を長期間・短い時間分解能でモニタ観測することにより、雲、塵、水蒸気などの空間的および時間的変化を明らかにする。

MIRSの観測装置は、これまで詳細設計を完了させるとともに地上試験モデル(EM)による設計検証ならびに性能試験を行っている。基本設計段階において、波長分解能、空間分解能、感度(S/N比)などのサイエンス要求を満足することを確認した。続いて機械試験モデル(MTM)・熱試験モデル(TTM)を製造し、単体環境試験での検証を行うとともに、システム試験の供試体として提供して、環境条件の妥当性確認を行った。また、シミュレータを用いたMDP(探査機側ミッションデータ処理系)とのインタフェース試験(写真)を実施し、基本的な通信機能を確認した。試験用モデル(EM)を製造し、機能・性能を確認するとともに、一次噛合せ試験で、電気・通信・データに関するインタフェースの確認を実施している。その結果、MIRSは文頭に述べた科学目標に満足する設計を有することを確認した。これらの観測計画と詳細設計結果について報告・討議する。

## Data Release and the Seismicity Catalog Publication of InSight SEIS

OT. Kawamura<sup>1</sup>, C. Pardo<sup>1</sup>, V. Conejero<sup>1</sup>, T. Gabsi<sup>1</sup>, G. Sainton<sup>1</sup>, S. Slavney<sup>2</sup>, J. Ward<sup>2</sup>, R. Weber<sup>3</sup>, C. Nunn<sup>4</sup>, J. Clinton<sup>5</sup>, S. Ceylan<sup>5</sup>, A. Horleston<sup>6</sup>, N. Dahmen<sup>5</sup>, C. Duran<sup>5</sup>, D. Kim<sup>5</sup>, S. Stähler<sup>5</sup>, M. Plasman<sup>1</sup>, G. Zenhäusern<sup>5</sup>, C. Charalambous<sup>5</sup>, F. Euchner<sup>5</sup>, K. Onodera<sup>7</sup>, D. Giardini<sup>5</sup>, P. Lognonné<sup>1</sup>, W. T. Pike<sup>8</sup>, M. Panning<sup>4</sup>, S. Smrekar<sup>4</sup>, W. B. Banerdt<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Université Paris Cité, Institute de physique de globe de Paris, CNRS, <sup>2</sup>Washington University in St. Louis, <sup>3</sup>NASA Marshall Space Flight Center, <sup>4</sup>Jet Propulsion Laboratory, <sup>5</sup>Institute of Geophysics, ETH Zurich, Zurich, School of Earth Sciences, <sup>6</sup>University of Bristol, <sup>7</sup>Earthquake Research Institute/University of Tokyo, <sup>8</sup>Imperial College London

Since the successful landing of the NASA InSight lander, the Seismic Experiment for Interior Structure (SEIS) has realized a quasi-continuous monitoring of Martian seismicity for more than 1200 Martian sols. The obtained seismic data are released to the scientific community with a 3 months delay and data until March 2022 is already available to the community. The data is archived and distributed by data center of IPGP and the data is also available from IRIS and NASA PDS (<http://dx.doi.org/10.18715/SEIS.INSIGHT.XB.2016>). The data are in seed format, which is widely used in the seismology community.

Seismicity catalogs made by members of InSight Science team are also released with the data. Marsquake Service (MQS) is responsible of closely examining the continuous data flow from the red planet to identify seismic events hidden in the data. Today, MQS Martian seismicity catalog included almost 1000 distant marsquakes and more than 1000 high frequency signals, which is likely to be associated with thermal cracking on the Martian surface. The catalog includes in addition to general information on the event (e.g. event time, event location, phase picks, magnitudes), the catalog also includes event types and event location quality that MQS assigned to the events. Event types are classified depending on the frequency content of the events and we currently have 6 types (Super High Frequency, Very High Frequency, High Frequency, 2.4 Hz, Broadband, Low Frequency). MQS assigned a location quality to each event varying from A to D, where the quality A refers to events with distance and back azimuth. Quality B lacks either plausible multiple phases or back azimuth, quality C has suspicious phase picks without back azimuth and quality D are suspicious events where we cannot identify phases. Here, we will present the data and the catalog release of InSight data and describe the data we obtained.

## フォボスの低緯度領域におけるクレーター分布

○梶谷伊織<sup>1</sup>, 菊地紘<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JAXA/ISAS

火星衛星フォボスの低緯度領域には Blue units, スティックニークレーター, グループといった特徴的な地形が存在しており, これらはクレーターの形成に関連した地形であると考えられている. また各領域で相対的な年代を比較することは, フォボスの表面進化への理解を深める上で重要である. 過去にクレーター検出アルゴリズムを用いたフォボス全球のクレーターカウンティングが実施された[1]が, フォボスを球形に仮定した 2 次元地図を用いてカウントされたため, クレーターの直径を正確に測定できていなかった. そこで本研究では, 高精度の 3 次元数値形状モデルに対し既存の高解像度画像を用いてフォボスの低緯度領域 ( $\pm 30$  度) におけるクレーターを丁寧に手動でカウンティングすることで, クレーターの位置と直径の正確なデータベースを作成し, いくつかの等しい緯度経度間隔で分割した領域間での比較を行った.

マッピングには Small Body Mapping Tool (SBMT) [2]を用い, Mars Express 搭載の Super Resolution Channel により取得された高解像度画像 (解像度 4.4–36.8 m/pixel) をフォボスの 3 次元数値形状モデルに貼り付け, クレーターカウンティングを実施した. これにより作成したクレーターのリストから, Craterstats [3]を用いて解析を行った.

測定の結果, クレーターの累積サイズ頻度分布の冪数の絶対値は, 多くの領域でこれまで報告されている結果[4]よりも高い傾向にあった. 火星側の代表領域として経度 0–30 度, 南緯 30 度–北緯 30 度の範囲(図 1a), 反火星側の代表領域として経度 150–180 度, 南緯 30 度–北緯 30 度の範囲(図 1b)におけるクレーターカウンティングの結果を図 1 に示す. これら 2 つの領域では 0.04–1.3 km のクレーターを測定した. 両者を比較したところ, 50–200 m のクレーターの累積頻度分布は類似した傾向にあるが, それ以上のクレーターについては火星側領域の方がクレーター数密度は小さいことが分かった. 本講演では, フォボス球を仮定した場合と 3 次元形状モデルを用いた場合でのクレーターカウンティングの結果の差異性を明らかにし, 各領域におけるクレーターカウンティングの結果を示すことに加え, 特徴的な地形との関連性についても議論する.

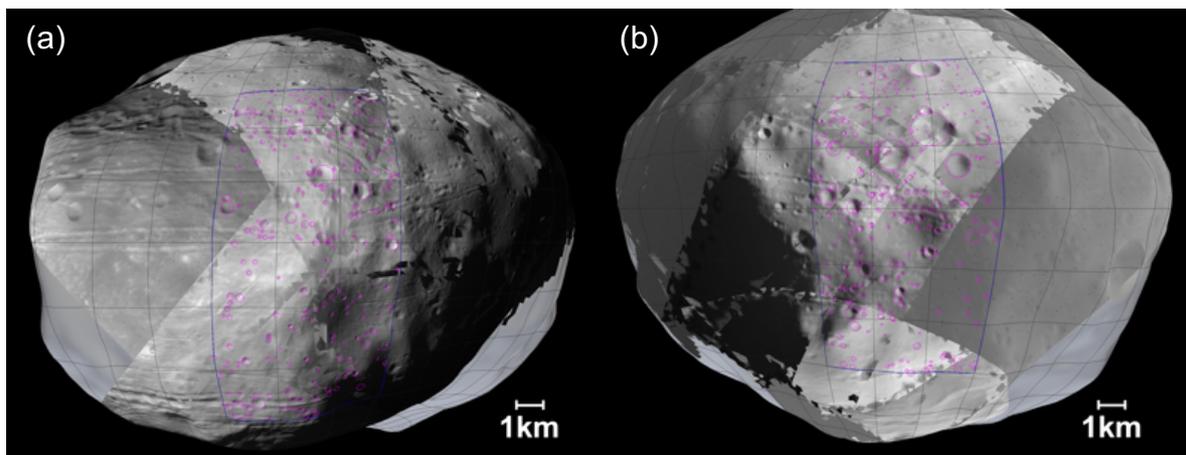


図 1. フォボスのクレーターカウンティングの結果. 火星側代表領域(a)と反火星側代表領域(b).

[1] Karachevtseva et al. (2014), *Planetary and Space Science*, 102, 74-85. [2] Ernst et al. (2018), In *49th Annual Lunar and Planetary Science Conference* (Abstract No. 2083, p. 1043). [3] Michael G.G. & Neukum G. (2010), *Earth and Planetary Science Letters*, 294(3-4), 223-229. [4] Salamunicka et al. (2014), *Advances in Space Research*, 53(12), 1798-1809.

# 火星衛星探査に向けた ラマン分光を用いた合成苦鉄質ガラスの特性評価

○今村翔子<sup>1,2</sup>、関根康人<sup>1</sup>、河野義生<sup>3</sup>、長勇一郎<sup>2</sup>、田畑陽久<sup>2</sup>、森晶輝<sup>2</sup>、鍵裕之<sup>4</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学 地球生命研究所、<sup>2</sup>東京大学大学院 理学系研究科、<sup>3</sup>愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター、<sup>4</sup>東京大学大学院 理学系研究科 地殻化学実験施設

火星の月フォボスとダイモスは、火星および地球型惑星の起源と初期進化に対して重要な知見をもたらすことが期待されている (Usui et al., 2020; Kuramoto et al., 2022)。JAXA の計画する火星衛星探査計画 (Mars Moons eXploration: MMX) の主目的の1つは火星の月の起源を明らかにすることである (Usui et al., 2020)。

火星の月の起源について、有力な形成仮説のひとつとして巨大衝突説が支持されている。巨大衝突説においてフォボスとダイモスの構成物質は、初期火星 (マントル) とインパクターがおおよそ 1:1 の質量比で混合し、2000 K 程度の高温を経験したものであることが示唆されている (Hyodo et al., 2017)。この場合、構成物質は 2000 K 程度の高温を経験した後に急冷し生成された、超苦鉄質の非晶質 (ガラス) である可能性が高い。MMX ミッションでは、鉱物分析のためのラマン分光器 (通称 RAX) をローバーに搭載予定 (Cho et al., 2021) である。ラマン分光計は、結晶質の鉱物 (カンラン石、輝石など) の同定には適しているが、非晶質物質に対する評価はほとんどない。過去には、ラマン分光計を用いた、地球上の非晶質火山灰の同定・組成推定は行われているが (González-García et al., 2020)、測定対象はケイ素質 ( $\text{SiO}_2$ ~50 wt.%) な試料に限られており、巨大衝突により形成された場合に期待される火星衛星物質 (超苦鉄質非晶質ケイ酸塩) の評価はなされていない。

そこで本研究では、超苦鉄質非晶質ケイ酸塩のラマンスペクトルから組成を制約するプロトコルの開発を目的とし、この合成とラマン分光計による分析を行った。用いた非晶質粒子は、火星マントルと小惑星の混合物の化学組成範囲を広くカバーする、異なる主要元素組成の混合粉末から合成した。非晶質粒子の合成は、愛媛大学に設置された浮遊ガス  $\text{CO}_2$  レーザー加熱装置を用いて、混合粉末のペレットを 1800~2600 K に加熱して行った。合成された非晶質粒子のラマンスペクトルは、東京大学に設置されたマイクロラマン分光器を用いて収集された。また、合成された非晶質粒子の組成は、東京工業大学に設置された電子プローブマイクロアナライザー (EPMA) により取得した。

マイクロラマン分析の結果、非晶質粒子のラマンスペクトルに特徴的なブロードな二峰のピークが現れることがわかった。EPMA による試料の組成分析結果と合わせると、このピークの強度比は、非晶質粒子の Fe/Si モル比と高い正相関を持つことが明らかになった。この相関関係を用いれば、試料中の Fe/Si 比を±約 10%の精度で制約し、Fe/Si 比の低いマントル物質とこれの高い小惑星物質の混合比率に対して示唆を与えられる可能性がある。

## PB-08

惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画（LAPYUTA）：  
計画の現状報告

土屋史紀[1], 村上豪[2], 山崎敦[2], 木村智樹[3], 吉岡和夫[4], 鍵谷将人[1], 古賀亮一[5],  
木村 淳[6], 成田憲保[4], 亀田真吾[7], 生駒大洋[8], 大内正己[8,4], 田中雅臣[1],  
益永 圭[2], 堺正太郎[1], 埜千尋[9], 桑原正輝[7], 鳥海森[2], LAPYUTA WG  
[1]東北大, [2] ISAS, [3]東京理科大, [4]東大, [5]名大, [6]阪大, [7]立教大, [8]NAOJ, [9]NICT

LAPYUTA 計画は、「宇宙の生命生存可能環境」と「宇宙の構造と物質の起源」の理解を大目標に、4つの科学課題に取り組む紫外線宇宙望遠鏡計画である。現在、5,000個以上の太陽系外惑星が発見され、惑星系における生命生存可能環境の普遍的な理解が課題となっている。生命生存可能環境にどのような形態が存在し、それがどのように進化するのかを明らかにする上で、詳細な観測が可能な太陽系内天体、特に巨大惑星の氷衛星と地球型惑星の大気進化は探査の焦点となる。氷衛星には地下海が存在し、地球とは異なる生命生存可能環境を持つ天体として注目されている。土星の衛星エンセラダスでは、表面から噴き出す水の発見により地下海が存在が明らかになった。木星の氷衛星は次の探査対象である（課題 1-1）。現在の火星や金星は地球とは大きく異なる環境を持つが、過去に大量の水を持っていた証拠が見つかっている。初期の火星には、地表に液体の水や温暖な環境を維持する大気が存在した可能性があり、惑星大気の進化を解明することは、地球型惑星の生命生存可能環境の形成の理解につながる（課題 1-2）。太陽系外惑星における生命生存可能環境の探査は、太陽系科学と天文学の双方で進められている。太陽系天体の詳細な知見を系外惑星大気の特徴づけに拡張する試みも進めることより（課題 2-1）。太陽系天体の詳細な知見と多数の系外惑星観測から将来得られる統計的情報から、生命生存可能環境の普遍的理解が進むことが期待される。惑星の生命生存可能環境は、中心星が惑星系に及ぼす影響とも密接に関連する。系外惑星の環境に影響を与える恒星活動の探査も重要である（課題 2-2）。惑星系や恒星の形成過程の理解の背景には、宇宙そのものの構造がどのように形成され、進化を経て現在の姿になったのかという根本的な興味がある。宇宙の構造形成に残る基本的な問題のひとつが銀河の形成である。銀河の大規模構造は冷たい暗黒物質モデルの標準的な枠組みで説明されるが、銀河形成に関わるバリオン過程は宇宙史の中で十分に理解されているとは言えない。理論的な研究によって銀河形成のシナリオがいくつか提案されている一方、その背後にある物理過程の解明のために欠落している観測的証拠を得る必要がある（課題 3）。宇宙の物質進化においても基本的な課題が残されており、特に鉄より重い重元素の起源は十分に理解されていない。中性子星合体や超新星爆発に伴う重元素合成過程の解明には、現象の発生直後の高温ガス中の重元素イオンの観測が不可欠である（課題 4）。これらの科学課題に取り組む最適なプラットフォームとして、我々は紫外線宇宙望遠鏡を選択し、ISAS 公募型小型計画 WG の中で検討を進めている。講演ではその検討の状況について紹介する。

# 深広視野サーベイの画像解析を通じて探る太陽系 氷天体の軌道分布

○ 吉田二美<sup>1</sup>, 柳沢俊史<sup>2</sup>, 伊藤孝士<sup>3</sup>, 黒崎裕久<sup>2</sup>, 吉川真<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 産業医科大学, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>3</sup> 国立天文台

本研究は、すばる望遠鏡とその広視野カメラ（HSC）で行った太陽系小天体のサーベイ観測画像から、JAXAで開発したFPGAによる解析パイプラインを使って、既存のサーベイより数等暗い微小天体を検出し、今までは検出できていなかった太陽系外縁部の微小氷天体の軌道分布を調べることが目的としている。

微小天体の検出に使用するのには、共著者がサイエンスチームメンバーとして取得したNASAのニューホライズンズミッションのKBO（カイパーベルト天体）ターゲット探しのためのサーベイデータである。このデータセットは同一視野を恒星追尾にて、半夜かけて連続撮像している。専用FPGAの仕様上32枚のデータしか解析できないので、氷天体の領域（ケンタウルス族以遠）の天体をより効率的に検出できるようにデータセット中から32枚の画像セットを選び出し、氷天体の移動速度範囲を設定して、その速度範囲内でさまざまな方向に32枚の画像をずらしながら重ねていく。天体がそこにあれば、一枚の画像では見えなかった微光天体を検出することができる（図1）。海外でも同じような検出手法が考案されているが、ここではJAXAで開発し、スペースデブリや近地球小惑星の検出で既に実用化されているFPGAによるデブリ等検出解析パイプラインを改良して、微小KBO天体検出に応用する。

実験的に取得したHSC 1視野分で半夜分のデータから移動天体を検出してみると、27-28等までの微光移動天体が検出できていることがわかった（図2）。本発表では検出方法と解析の進捗状況について述べる。

すばる望遠鏡とHSCの組み合わせで撮った1枚の画像での典型的な移動天体の検出限界等級は24-25等である。本研究により、27-28等までの微光移動天体が天体が検出できれば、これまで50auで直径150-230kmのKBOが限界だった検出限界を直径40-60kmのKBOまで拡張することができ、より微小氷天体を含めた太陽系外縁部天体の軌道分布を明らかにすることができる。

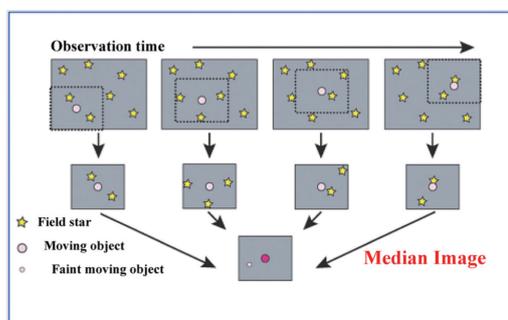


図1 複数枚の画像を重ね合わせて微光天体を検出する方法  
KBOの移動速度を仮定して、画像を切り出し、medianを取って重ねる。すると動かない恒星は消えて移動天体が残る。

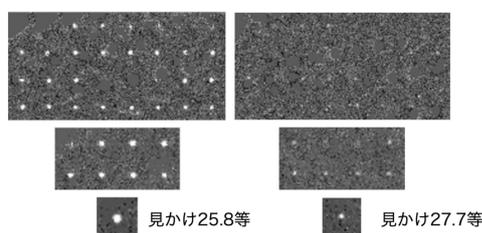


図2 2つの検出例。一段目が検出に使った32枚画像。移動天体の周辺を切り出して、並べてある。二段目は切り出した画像を4枚ずつ重ね、三段目は32枚重ねたもの。右の天体は一枚の画像ではほぼ見えていなかったが、32枚重ねれば明確に天体だとわかる。見かけの速度から、どちらの天体もケンタウルス領域の天体だと思う。

## 氷・雪クレーター形成実験：クレーターサイズ・スケール則と

## 運動量輸送に対する空隙の影響

○江口裕樹、荒川政彦、保井みなみ、白井慶  
神戸大学大学院理学研究科

外惑星の惑星探査により、木星以遠の氷衛星表面にも数多くの衝突クレーターが存在することが分かっている。直径 100 キロメートル以下の多孔質氷衛星上でクレーターが形成されると、その天体表面は衝撃圧縮や加熱で空隙率が減少し、表層はより低空隙率となる。小氷衛星では重力による圧密よりもこのような衝突による密度進化が重要だと考えられる。また、そのクレーターの形成過程では、標的の物質強度がクレーターの成長を妨げるため、強度支配域のクレーターと呼ばれる。強度支配域のクレーターサイズは、標的強度、初期衝撃圧力、衝撃圧力の減衰率によって理論的に記述され、それらは空隙率に依存する。そのため強度支配域のクレーターサイズは空隙率によって複雑に変化するとされている。

2022 年 9 月、DART 計画により小惑星への人工衝突実験が行われる。その目的は、衝突された小惑星の軌道偏向を調べるためであり、その予測のために天体衝突時に起こる衝突天体間の運動量輸送の研究が進んでいる。その際に用いられるのが、衝突前後の標的天体の運動量増加と衝突前の衝突体の運動量の比( $\beta$ )であり、室内衝突実験で衝突条件と運動量輸送効率 $\beta - 1$ の関係が調べられている。本研究では、低空隙率から高空隙率の雪標的に適応可能なクレーターサイズに関するスケール則と、運動量輸送効率 $\beta - 1$ の空隙率依存性を調べるため、氷衛星表層を模擬した雪標的を用いたクレーター形成実験を行った。

標的は、市販氷を砕いて作成した直径  $710 \mu\text{m}$  以下の雪粒子を油圧式プレスで圧縮して作成した。空隙率は 10~50%の間で調整した。この標的に対して直径 1mm のアルミニウム球弾丸を、衝突速度 1~5km/s で衝突させ、クレーターの形状・サイズ、および衝突後の標的移動速度を調べた。

形成されたクレーターは、中心にピットを持ち、周囲をスポール領域で囲まれた典型的な強度支配域のクレーター形状であった。また、衝突速度 3km/s の場合、クレーターのスポール直径 $D$ と空隙率 $\phi$ は、 $D/d_{\text{impactor}} = (36.1 \pm 11.7)(1 - \phi)^{1.71 \pm 0.84}$ という関係があることがわかった。 $d_{\text{impactor}}$ は弾丸直径である。また、図 1 に運動量輸送効率 $\beta - 1$ と充填率 $1 - \phi$ の関係を示している。衝突速度 3~5km/s の場合、充填率の増加とともに運動量輸送効率も一次関数的に増加し、 $\beta - 1 = -0.96 + 3.28(1 - \phi)$ という関係があることが分かった。一方、衝突速度 1km/s の場合、充填率 0.7 以上では運動量輸送効率が極短に大きくなることが分かった。これは低空隙率の場合、衝突速度が低い場合のみ、高い確率でコリメートされたエジェクタが発生して、運動量を効率良く衝突の反対方向に輸送するためだと考えられる。ただし、コリメートされたエジェクタの成因は今のところ不明である。

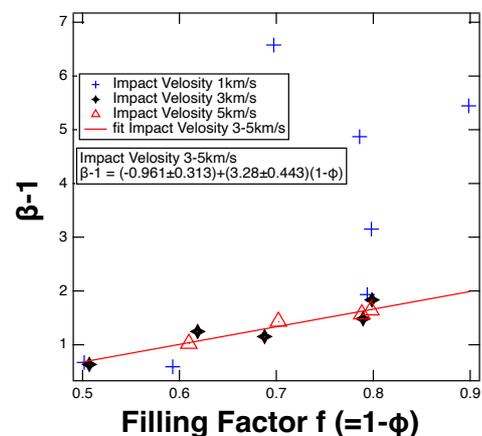


図 1: 運動量輸送効率と充填率の関係性

# 地上望遠鏡によるエウロパ大気組成の 可視近赤外観測と地球大気補正法

○ 鶴海 達大<sup>1</sup>, 木村 淳<sup>1</sup>, 高木 聖子<sup>2</sup>, 濱田 築<sup>2</sup>, 佐藤 佑樹<sup>2</sup>,  
太田 峻介<sup>3</sup>, 松尾 太郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup>大阪大学, <sup>2</sup>北海道大学, <sup>3</sup>名古屋大学

木星の衛星の一つであるエウロパは、表面が氷の層で覆われており、液体の地下海を有すると考えられている。表面には、カオス領域をはじめとする内因性の地形的特徴が数多く存在し、表面に存在が示唆されているいくつかの物質の分布には、こうした地形との相関が見られる。例えば、ハッブル宇宙望遠鏡による観測からは、塩化ナトリウムが Tara Regio と呼ばれるカオス領域に濃く存在することが示唆されている。このような物質は、地下海に溶け込んだ物質が表出したと考えられている。一方、衛星イオの火山活動を起源とするナトリウムや硫黄化合物が、エウロパ表面に漂着することも考えられる。こうした表面物質は、内因性、外因性を問わず木星磁気圏の高エネルギー粒子によるスパッタリングや、加熱による昇華によって、エウロパの希薄大気を形成するため、大気組成やその時変動を把握することは、衛星形成の材料物質や進化過程、衛星間の物質輸送過程の解明に資するものと期待される。しかし、その調査はいまだ限定的であるとともに、地上望遠鏡による観測では微弱なシグナルを捉えるために、大気補正の高精度化が必須となる。

本研究では北海道大学大学院理学研究院附属天文台に設置されている光学赤外線天体望遠鏡「ピリカ」を用い、5ヶ月間のうちの14夜にわたり、可視光マルチスペクトル撮像観測装置 (MSI) によるエウロパの撮像観測を行った。撮像データの解析には、python の天文データ解析パッケージである Astropy を用い、測光、大気補正、太陽スペクトルの影響除去などを行った。大気補正には標準星の観測データを用いたが、エアマスの不一致により地球大気中の酸素分子による吸収 (760 nm) などが除去しきれなかった。そこで、大気補正の改善案として2つの方法を考えた。1つ目は標準星のエアマスと光子数の関係を用いる方法である。光子数のエアマス依存性を調べ、エウロパと標準星のエアマスが一致する場合の近似的な光子数を用いて大気補正を行った。2つ目は放射輸送計算プログラム libRadtran によって生成した地球大気の透過率を用いる方法である。これら2つの方法で大気補正を行った結果、いずれの方法においても地球大気中の酸素吸収が減じられ、590 nm におけるナトリウム輝線を複数の観測日で確認することができた。さらに講演では、メタンやアンモニアによる吸収についても評価を行う。

# Atmospheres of sub-Neptune-sized exoplanets in contact with magma ocean

## サブネプチューンの大気：マグマの影響

○Chanoul Seo<sup>1,2</sup>, Yuichi Ito<sup>2</sup>, and Yuka Fujii<sup>2</sup>

<sup>1</sup>総合研究大学院大学, <sup>2</sup>国立天文台

Sub-Neptunes are small exoplanets (Planetary radius = 1.6~3 Earth radius) with voluminous atmospheres and are important targets of future recent and upcoming transit spectroscopy. However, the framework to relate their atmospheric properties to their hidden interior and the formation pathway has not been well established. As the mass of sub-Neptunes is dominated by the silicate core, their atmospheres are likely to be affected by the reaction with the underlying magma (i.e., molten rock) if they exist. Thus, we study the atmospheric composition of sub-Neptunes in the presence of magma ocean using an equilibrium model of the Fe-Si-Mg-H-C-O system with Fe-FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> magma redox buffer. We find the nebula-origin atmospheres can be highly oxidized to form H<sub>2</sub>O-dominated atmospheres when the accreted amount of volatile is moderate and(or) the iron core fraction is small. We show how the two observable atmospheric parameters, H<sub>2</sub>O fraction and atmospheric C/H ratio, in the combination of the measurement of mass and radius, can infer the initial magma redox state and composition of accreted volatiles (nebula gas and pure ice). The high solubility of H<sub>2</sub>O into magma and the small solubility of C-bearing species enrich C-bearing species in the atmosphere, which could be used as an indicator of the presence of magma-atmospheric reaction. Such properties of atmospheres may also provide a way to distinguish several suggested formation scenarios of small planets around M-type stars.

# 嵐の大洋におけるリッジの形成史

○石山 謙<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 鶴岡工業高等専門学校

かぐや衛星に搭載された地下レーダサウンダー（LRS）は、月全球で地下構造探査をすることに成功し[1]、嵐の大洋の北部領域においては、見かけ深さで約 400~1200m に反射面を検出することに成功している[2]。LRS で検出された地下反射面は月面地形と並行する地質学的特徴を有していることから、多く海の領域に存在するリッジ（山脈）は褶曲構造をしていることが明らかとなった[1]。近年では、嵐の大洋におけるリッジに関して、先行研究により詳しく表面地形が調査されたが[3]、LRS で検出された褶曲構造をしたリッジとの比較・検討ができていなかった。本研究では、月周回衛星 LRO に搭載された Wide Angle Camera (WAC) によるモザイク画像と DTM 及び LRS データを用いて、嵐の大洋における褶曲で形成したリッジの場所の特定を行なった。LRS で地下構造が検出された場所は嵐の大洋の北側であり、そこでは、地下反射面が褶曲している。つまり、嵐の大洋の北側のリッジは褶曲によるものと言える。褶曲によってできたスケールの小さなリッジの大部分は、先行研究[3]で報告されたものであったが、一部のスケールの大きな褶曲は先行研究で見逃されていたことが明らかとなった。これらの褶曲由来のリッジは、嵐の大洋の外縁部の地形（海と高地の境界地形）と平行しており、海全体に応力がかかったことで形成したことを示唆している。クレータ年代学[4]に基づくと、これらのリッジは約 34.4 億年前以降に形成している。この年代を考慮すると、褶曲構造は、海を構成する玄武岩荷重によるたわみ（マスコンテクトニクス）[5]か、月半径の収縮[6]と言える。

[1] Ono et al., Science, 2009

[2] Oshigami et al., GRL, 2009

[3] Yue et al., JGR, 2015

[4] Hiesinger et al., JGR, 2003

[5] Solomon and Head, JGR, 1980

[6] Watters et al., Science, 2010

## 月・惑星の水資源探査を目指す中性子ガンマ線測定装置 MoMoTar0 の開発

○長岡央<sup>1</sup>, 榎戸輝揚<sup>1</sup>, 加藤陽<sup>1</sup>, 谷口絢太郎<sup>1</sup>, 辻直希<sup>1</sup>, 大竹淑恵<sup>1</sup>,  
藤田訓裕<sup>1</sup>, 若林泰生<sup>1</sup>, 岩本ちひろ<sup>1</sup>, 高梨宇宙<sup>1</sup>, 玉川徹<sup>1</sup>, 晴山慎<sup>2</sup>,  
小林泰三<sup>3</sup>, 草野広樹<sup>4</sup>, 池永太一<sup>5</sup>, 中野雄貴<sup>5</sup>, 塚本雄士<sup>5</sup>,  
星野健<sup>6</sup>, 唐牛譲<sup>6</sup>, 上野宗孝<sup>6</sup>

<sup>1</sup>理化学研究所, <sup>2</sup>聖マリアンナ医科大, <sup>3</sup>立命館大学, <sup>4</sup>量子科学技術研究開発機構,  
<sup>5</sup>ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社, <sup>6</sup>JAXA

月極域には一年を通して太陽光が全く届かない日陰領域（永久影）がある。永久影は極低温環境のため、長期的に供給された水を含む揮発性物質が長い期間をかけて蓄積されてきたと考えられている。これまでの月探査により、月極域では中低緯度と比較して、明らかに水の強い濃集を示すデータが数多く報告されてきた。[e. g., 1-4]。月極域の水は、ロケットの推進剤や生活用水として月面有人活動における重要な宇宙資源として考えられている。日本を含め世界各国が極の水資源を求め、月探査計画を精力的に推し進めている。これからの資源探査では、その量や分布に関するデータを取得し、資源としての利用可能性を評価する必要がある。

水の分布やその量を測定する有力な手段の一つが、中性子分光法である。大気のない月のような天体表層には銀河宇宙線が降り注ぎ、月土壤中で中性子を発生させる。土壤中に水が多く存在する場合、中性子は自身の運動エネルギーを大きく失い月面から漏れ出してくる[5]。これを周回機もしくは月面ローバーに搭載した中性子測定器で測定することで、非接触での水資源探査が可能である。我々のチームでは月惑星探査用の中性子測定装置の検討をこれまでも進めており、加えてガンマ線も同時測定できるように一体化した中性子ガンマ線測定装置 Moon Moisture Targeting Observatory (MoMoTar0)を開発している。我々は、月ガンマ線や宇宙放射線の観測、中性子の加速器技術、放射線源の土木工学分野での活用と様々な分野で活躍してきた複数の研究チームが連携し、月面での中性子観測から水資源探査を目指す。

MoMoTar0は、中性子検出用のシンチレーション検出器とガンマ線検出用のシンチレーション検出器を積層構造に組み上げた放射線検出機である。大きさは縦横高さそれぞれ10cmに収まる1Uサイズとなっており、小型のため周回機、着陸機、探査車、と様々な搭載機会を視野に入れた開発を進めている。中性子用検出器には、比較的安価で手に入るもので、バックグラウンドとなるガンマ線を波形弁別で中性子と区別して検出できるリチウム添加プラスチックシンチレータを使用した。我々の検出器は、既存の放射線検出器と比較して、小型省電力、かつ安価で耐振動性にも優れたものである。本発表では、MoMoTar0の開発状況と目指す月面資源探査について議論する。参考文献: [1] D. J. Lawrence, et al. (2006) JGR, vol. 111, E08001. [2] A. Colaprete, et al. (2010) Science, vol. 330, 463-468. [3] A. B. Sanin, et al. (2017) Icarus, vol. 283, pp. 20- 30. [4] H. M. Brown, et al. (2022) Icarus, 377, 114874. [5] 長岡央(2019) 日本惑星科学会誌, vol. 28, pp. 37-44.

## 月極域氷の含水量を推定するためのレゴリス反射率から水氷検量線を求める手法の開発

○荒木亮太郎<sup>1</sup>, 佐伯和人<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大阪大学 理学研究科

これまでの探査結果から、月の極域永久影には水が存在する可能性が指摘されており、日本とインドは共同で月極域着陸探査 (LUPEX) を計画している。LUPEX 計画ではローバに搭載した近赤外面像分光装置 ALIS を用いて月面土壤に含まれる水氷を検出する予定である。

本研究では月表面の近赤外反射スペクトルから氷を定量する検量線を求めるために、月面土壤を模擬した複数種の粒径と鉱物種からなる着氷鉱物粉体を作成して、近赤外スペクトルを測定した。月レゴリスの模擬試料として、Dog Lake 産透輝石、Casas Grandes 産斜長石、San Carlos 産かんらん石と、それら 3 種を質量均等に混合した粉体の 4 種類を対象に、篩を用いてそれぞれ 75–125 $\mu\text{m}$  および 180–250 $\mu\text{m}$  の粒径に調整し、計 8 通りの試料を準備した。先行研究 (Ogishima & Saiki, 2021) で用いられた落下式の着氷装置を用いて月極域永久影の凍土レゴリスを再現した。この着氷模擬試料を、開発した近赤外面像分光装置 (Saiki et al., 2021) を使用して 900–1640 nm の波長範囲で観測した。

水氷が付着した試料には波長 1.5  $\mu\text{m}$  位置に吸収帯が生じるが、着氷率に対する吸収深さの検量線は、着氷させた鉱物粉体の種類と粒径に大きく影響されると分かった。具体的には、同一鉱物であれば粒径が大きい場合に検量線の傾きが大きくなる。粉体鉱物種間の比較では、かんらん石 < 混合粉体 < 斜長石 < 透輝石の順に検量線の傾きが大きくなり、これは着氷前の鉱物粉体の 1500 nm 反射率の大きさの傾向と一致する。

粒径や鉱物種によって検量線の傾きが異なるという事実は、実際の月レゴリスを分光観測した際にスペクトルから推定される含水量が一意に決定できないことを意味する。そこで我々は得られた

実験結果を、検量線傾き、鉱物粒径、乾燥粉体反射率の 3 パラメータを軸に三次元プロットし、これらがひとつの平面に乗ることを発見した (図 1)。この平面を用いれば、粉体粒径と乾燥反射率の情報のみから検量線を決定でき、吸収深さから水氷の量を高精度に求められるようになる。

さらに、実際の探査データに適用可能か検討した。周回軌道上から月極域の 1.5  $\mu\text{m}$  吸収帯を検出した Li et al. (2018) の追試を行い、含水量の定量評価を試みた。結果の一例を挙げる。南極 Cabeus クレーター内影領域で、中央丘付近の二次反射光に照らされた領域に吸収深さ  $\sim 0.19$  のシグナルが観測された。レゴリス粒径を 90  $\mu\text{m}$ 、乾燥反射率を 0.55 と仮定すると平面式から  $m \sim 1.04$  となり、氷の存在量は 18.2wt% となる。この数値は LCROSS による衝突プルームから当初報告された  $5.5 \pm 2.9\text{wt}\%$  (Colaprete et al., 2010) を大きく上回る値で、Luchsinger et al. (2021) のモデルを踏まえると表層と地下 5m 以深に  $\sim 20\text{wt}\%$  の水氷が濃集し、中間層が乾燥しているという解釈を支持する結果となる。発表では平面の適用可能な範囲や条件について詳しく議論する。

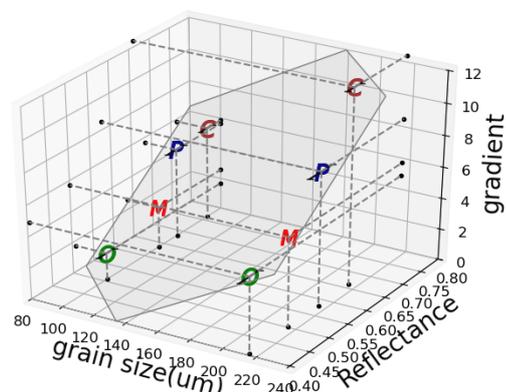


図 1. 粒径、反射率、検量線の傾きを軸にプロットした三次元グラフ。

C: 透輝石 P: 斜長石 O: かんらん石 M: 混合

## 地震波およびレーダ観測から示唆される Apollo 17 着陸地点の地下構造の比較

Comparison of subsurface structures around Apollo 17 landing site  
suggested by seismic and radar observations

○熊本 篤志<sup>1</sup>, 石山 謙<sup>2</sup>, 野澤 仁史<sup>3</sup>, 春山 純一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>東北大, <sup>2</sup>鶴岡高専, <sup>3</sup>総研大, <sup>4</sup>JAXA

A. Kumamoto<sup>1</sup>, K. Ishiyama<sup>2</sup>, H. Nozawa<sup>3</sup>, and J. Haruyama<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Tohoku U., <sup>2</sup>NIT, Tsuruoka C., <sup>3</sup>Sokendai, <sup>4</sup>JAXA

SELENE 月レーダサウンダ (Lunar Radar Sounder, LRS) の観測から得られた Apollo 17 着陸地点付近の地下構造を, Apollo 17 Lunar Seismic Profiling Experiment (LSPE) から得られた地下構造と比較した. A17/LSPE の地震波観測からは, 400 m, 1400 m の深さに地震波速度が変化する境界面があることが示唆されていた [Cooper et al., 1974]. 一方で, 最近の A17/LSPE データの再解析からは, 地下境界面の深さの異なる推定結果 (96 m, 773 m) も報告されている [Heffels et al., 2017]. いずれの推定が確からしいか議論するため, 本研究では SELENE/LRS [Ono et al., 2010] の観測データを解析した.

A17/LSPE の geophone array 中央 (20.19085°N, 30.76510°E) [Haase et al., 2019] 付近の上空を通過する 4 パス (それぞれ 30.340°E, 30.667°E, 30.823°E, 30.890°E) で観測された SELENE/LRS データを選び, 高地領域ではクラッタが多く混入することから, それらを抑圧するため, Doppler filter, 合成開口処理を適用して, 直下の地表・地下からの反射成分を選択的に強調したレーダグラムを得た. 得られたレーダグラムでは, A17 着陸地点の表面エコーから約 2000 ns 遅れて到来する地下エコーが確認された. 月表層の物質のバルク誘電率を 4~9 と仮定すると, 反射面の深さは 100~150 m と推定される. この深さは, 400 m よりは 100 m に近く, A17/LSPE の再解析 [Heffels et al., 2017] を支持する結果となった.

### 参考文献

- Cooper et al. (1974). *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 12. doi:10.1029/RG012i003p00291  
Haase et al. (2019). *Earth and Space Science*, 6. doi:10.1029/2018EA000408  
Heffels et al. (2017). *Planetary and Space Science*, 135, doi:10.1016/j.pss.2016.11.007  
Ono et al. (2010). *Space Science Review*, 154. doi:10.1007/s11214-010-9673-8

## PB-17

The Comet Interceptor mission: updates from ESA and JAXA

○S. Kasahara<sup>1</sup>, H. Kawakita<sup>2</sup>, K. Yoshioka<sup>1</sup>, N. Sakatani<sup>3</sup>, S. Kameda<sup>4</sup>, A. Matsuoka<sup>5</sup>, N. Murata<sup>3</sup>, Y. Harada<sup>5</sup>, R. Funase<sup>3</sup>, and Comet Interceptor team

1: The University of Tokyo, 2: Kyoto Sangyo University, 3: JAXA, 4: Rikkyo University, 5: Kyoto University

Comets are pristine small bodies and thus provide key information about the solar system evolution. Remote observations by ground observatories have characterized various comets, while in-situ observations by spacecraft have brought much more detailed information on several comets. However, the direct observations by spacecraft fly-by or rendezvous have been limited to the short-period comets, which neared the sun many times in the past and thus lost some of their primitive characteristics. The Comet Interceptor mission, led by ESA, aims at a long period comet or an interstellar object. JAXA will provide an ultra-small (24 U) daughter spacecraft (probe B1), whose closest approach will be less than 1,000 km, allowing the first-ever multi-spacecraft fly-by observations of a comet. Here we report our recent programmatic progress as well as hardware development status.



©Geraint Jones, UCL Mullard Space Science Laboratory

## MU レーダーと Tomo -e Gozen を用いた 2020 年ふたご座流星群の同時観測

○長谷川まり<sup>1</sup>, 野中康輝<sup>1</sup>, 阿部新助<sup>1</sup>, 大澤亮<sup>2</sup>, 酒向重行<sup>2</sup>, Johan Kero<sup>3</sup>, Daniel Kastinen<sup>3</sup>,  
西村耕司<sup>4</sup>, 中村卓司<sup>4</sup>, 藤原康徳<sup>5</sup>, 渡部潤一<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 日本大学大学院理工学研究科 航空宇宙工学専攻, <sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科 附属天文学教育研究センター, <sup>3</sup> Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden, <sup>4</sup> 国立極地研究所,  
<sup>5</sup> 日本流星研究会, <sup>6</sup> 国立天文台

直径 10 $\mu$ m~数 10cm のメテオロイド(meteoroid)のうち, 直径 10 $\mu$ m~数 100 $\mu$ m(質量  $\mu$ g~mg 程度)の微小メテオロイドのサイズ分布は明らかになっていない. 本研究では, 電波(波長: 6.4m, 周波数: 46.5MHz)と光学(波長: 400-800nm)の異なる 2 つの電磁波領域の観測を同時に行うことで取得される物理パラメーターの関係から特定の流星群のサイズ分布の導出だけでなく, 流星発光の物理メカニズムの理解にも繋げることを考えている. ターゲット(流星ヘッド・プラズマ)が完全導体球の場合は, 照射された電波エネルギーが 100%等方的に散乱される. この完全導体球の断面積に換算したものがレーダー反射断面積(RCS: Radar Cross Section)であるが, 流星ヘッド・エコー観測の RCS はターゲットの大きさだけでなく, 突入速度, 形状, 構成物質などに複雑に関連すると考えられている.

京都大学生存圏研究所が滋賀県信楽に所有する Middle and Upper Atmosphere レーダー(MU レーダー: 330Hz)と東京大学木曾観測所の Tomo -e Gozen (2Hz)を用いた「ふたご座流星群」の極大を含む同時観測を 2020 年 12 月 12 日~14 日(20:00~30:00)のうち合計 16 時間実施した. 天候に左右されない MU レーダー単体では, 散在流星 6392 個, ふたご座流星群 347 個を検出した. 一方, ふたご座流星群極大前後は, 木曾観測所が悪天候であったため, MU レーダーとの同時観測が成立した散在流星は 98 個, ふたご座流星群は 53 個にとどまった. 質量範囲 10<sup>-4</sup>-10<sup>-2</sup>g (流星の可視等級: 4-11)での「2020 年」ふたご座流星群の質量分布関数  $s = 1.92 \pm 0.04$  が得られた. ふたご座流星群母天体・活動小惑星 Phaethon フライバイ探査 JAXA「DESTINY+」のダスト観測にフィードバックする重要なデータとなるため, 今後も「ふたご座流星群」の同時観測データの取得を継続して質量分布関数の経年変化にも注目する.

参考文献: Ohsawa et al., “Relationship between Radar Cross Section and Optical Magnitude based on Radar and Optical Simultaneous Observations of Faint Meteors”, Planet. Sci., 194, 2020.

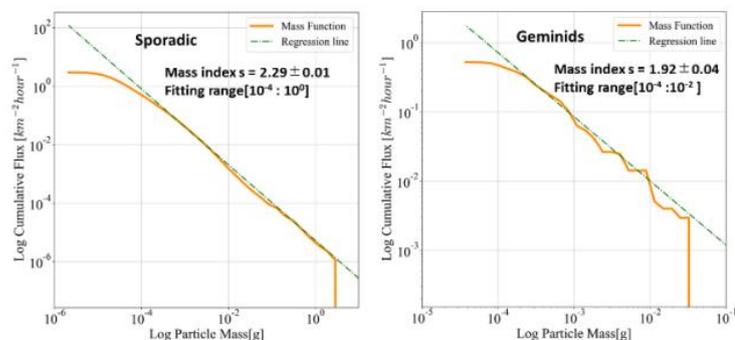


図1 散在流星(左)とふたご座流星群(右)の累積質量分布

## 高感度 2 点観測システム DIMS を用いた流星観測

○遠藤未頼<sup>1</sup>, 菊池啓太<sup>1</sup>, 長谷川まり<sup>1</sup>, 阿部新助<sup>1</sup>, 梶野文義<sup>2</sup>, 小林尚人<sup>3</sup>, 高橋英<sup>3</sup>, 森由貴<sup>3</sup>, 佐川宏行<sup>4</sup>, 多米田裕一郎<sup>5</sup>, 森瑞希<sup>5</sup>, 岩見祐吾<sup>5</sup>, 神藤大輝<sup>5</sup>, 藤岡桃歌<sup>5</sup>, 篠崎健<sup>6</sup>,  
Vrabel Michal<sup>6</sup>, Przybylak Marika<sup>6</sup>, DIMS チーム

1. 日本大学理工学, 2. 甲南大学自然科学, 3. 東京大学木曾観測所, 4. 東京大学宇宙線研究所,  
5. 大阪電気通信大学, 6. ポーランド国立原子核研究センター(NCBJ)

DIMS(Dark Matter and Interstellar Meteoroids Study)は, 暗黒物質候補や太陽系外流星などの微光で高速な発光現象を捉えることを目的に, 超高感度 CMOS カメラシステムを用いて 2 地点以上から立体観測することで検出と軌道決定を行う国際プロジェクトである. 我々は, 東京大学木曾観測所(長野県)と東京大学宇宙線研究所明野観測所(山梨県)の 2 地点に DIMS 試験機を設置し, 2022 年 3 月から定常観測を行っている. カメラのゲインやガンマ特性などのパラメータを変えながら取得した試験観測データを用いて, S/N を考慮した恒星と流星の限界等級を求め, 米国ユタ州で実施する本観測での推奨パラメータを導出した.

極短時間の流星発光から太陽系外から双曲線軌道で地球に到来する星間流星(Interstellar Meteoroids)の精密な軌道決定を行うことは困難である. 星間流星の探査は四半世紀以上に渡って様々な観測手法で行われてきたが, 多くの貴重な成果を上げたにもかかわらず星間流星の確実な根拠となるものは 1 つもない<sup>[a]</sup>. この理由の一つに観測装置の測定精度がある. 太陽系外由来の流星は速度が速く測定誤差が大きくなる. このため楕円軌道を描く太陽系内流星が, 双曲線軌道を描く太陽系外流星と誤認識されることがある. 本研究の目的は, 観測装置 DIMS の測定精度(位置精度, 時間精度)を上げ, 統計的に優位な太陽系外流星候補を複数検出することが目的である. そのためまず使用するカメラの性能を評価する. 本発表では流星観測によって, 流星に対する限界等級を導出し, 太陽系外流星検出フィージビリティを示す.

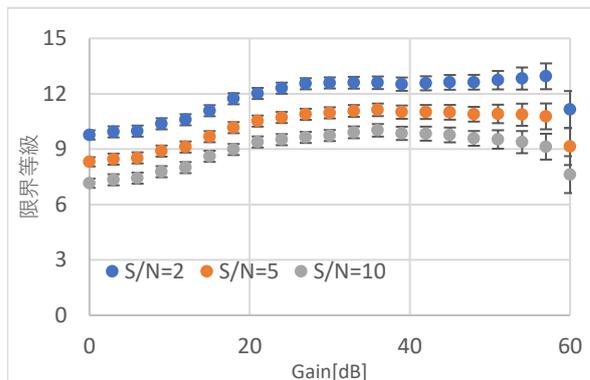


図 1. 恒星の限界等級

約 70 個の恒星を用いた SAO J2000 より DIMS カメラ(Canon ME20F)の限界等級.  $\gamma$  特性(Norma-1), 10.0 V 等級(S/N=10)であった. 限界等級で S/N が最大になるゲインは 36[dB]である.

### ・参考文献

[a] The challenge of identifying interstellar meteors, Maria Hajdukova et al.(2020)

# 原始惑星系円盤内でのダストの運動のモンテカルロシミュレーションによる彗星中の結晶質シリケートの割合の推定

○岡本珠実<sup>1</sup>、井田茂<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学地球生命研究所

結晶質シリケートは、原始惑星系円盤（以下、円盤）の太陽近傍の高温領域 ( $T \gtrsim 1000$  K) で、非晶質シリケートがアニーリングされることで形成されたとされている (e.g., Wooden 2008)。一方で、分光観測結果から彗星中に含まれているシリケートのうち、10–60% は結晶質であることがわかっている (e.g., Shinnaka et al. 2018)。彗星は円盤外側で形成されると考えられていることから、円盤内側で形成された結晶質シリケートが遠方へ運搬される必要がある。

本研究では、惑星形成論で考えられているペブル降着モデルに基づいて、非晶質シリケートダストは氷の層が覆われる形で氷ペブルとして円盤外側領域に存在し、スノーライン内側で氷が昇華することにより内部のシリケートダストが放出され、より内側のアニーリングラインで結晶化されると仮定し、円盤内のシリケートダストの運動を追跡した。その結果、氷ペブル流が定常である場合は彗星中の結晶質シリケートの割合は5%となることが数値的・解析的に示された。一方で、氷ペブル流が減衰する場合は結晶化率が最大25%まで上昇することが示された。

## 衝突クレーター形成に伴う地下からのボルダー放出に関する実験的研究

○佐古洸也<sup>1</sup>, 荒川政彦<sup>1</sup>, 保井みなみ<sup>1</sup>, 白井慶<sup>1</sup>, 山本裕也<sup>1</sup>, 大川初音<sup>1</sup>

1. 神戸大学大学院理学研究科

**背景:** 固体天体には普遍的にクレーターが存在し、クレーター形成の際にエジェクタ粒子が放出され、一部は天体外へ、残りは天体表面に堆積する。小惑星リュウグウ上で行われたSCI衝突実験では、クレーター形成の際に、大きなボルダーがクレーター内部に取り残されて、1m程度の比較的小さなボルダーが放出されているのが確認されている。レゴリス表面のボルダーの放出については、Okawa et al. (2022) [1] が、エジェクタ速度分布のスケール則に対するボルダーサイズ依存性の研究を行っている。そして、エジェクタ速度分布が、エジェクタの粒径に依存することが示唆されている。しかし、地下にあるボルダーの放出速度が、表面と同じように振る舞うかどうかは分からない。そこで、本研究では、地下に埋まったボルダーの放出速度を実験的に調べ、先行研究と比較した。またそのために、ボルダーに見立てたガラスビーズ（以後これを、トレーサー粒子と呼ぶ）を任意の深さに埋める方法および地下から放出されるトレーサー粒子の可視化の方法を確立した。

**実験方法:** 任意の深さにボルダーを埋める方法として、表面ならし器具を製作した。また地下から放出されるトレーサー粒子はエジェクタカーテンの内側に隠れて認識が困難であるため、エジェクタカーテンの内側を可視化する方法を開発した。その方法は、クレーターの成長を半分だけ基盤岩により遮るというもので、その結果、エジェクタカーテンが半分だけ成長し、内側を可視化できる。衝突実験は、自由落下での低速衝突実験と、神戸大学の縦型銃を用いた高速衝突実験を行った。弾丸は直径3mmのSUS球を用いた。標的には100 $\mu$ mのガラスビーズを用いた。そしてトレーサーとして直径3mmと5mmのガラスビーズを使用した。トレーサー粒子の埋没深さは、自由落下実験では、直径3mmビーズは深さ1.5mm、直径5mmビーズでは深さ2.5mmとした。縦型銃の実験では、直径3mmビーズは深さ1.5, 3mm、直径5mmビーズは深さ2.5, 5mmとした。実験の様子は2台の高速カメラを用いて撮影し、これらの動画からトレーサー粒子の三次元放出軌道を求めた。

**結果:** トレーサー粒子の三次元軌道解析により、トレーサー粒子の放出速度と放出角度を求めた。放出速度と放出位置の関係を調べたところ、トレーサーの粒径や埋め込み深さとの強い相関は見られなかった。しかしながら、標的表面上にトレーサー粒子を置いた先行研究の結果 [1] と比較すると放出位置と速度の関係は異なっており、地下にトレーサー粒子を埋めた方が、速度が大きくなる傾向にあることが分かった。本研究ではトレーサー粒子が、エジェクタカーテンのギャップの上側に位置することがある（図1）。先行研究 [1] では必ず下側にあるのと対照的である。この場合、トレーサー粒子は周囲の標的粒子より速度が大きいことを示している。

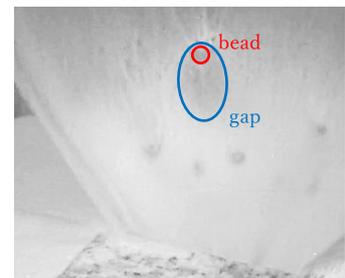


図1 エジェクタカーテンのギャップ

参考文献：[1] Okawa et al. (2022) *Icarus* 387, 115212

## 蛇紋岩と 2 種の玄武岩からの 1 km/s 以上の衝突エジェクタ

○山口祐香理<sup>1</sup>, 中村昭子<sup>1</sup>

<sup>1</sup>神戸大学理学研究科

### 背景と目的

火星衛星表面には、火星での衝突によって放出された火星物質が存在すると考えられており(Ramsley & Head, 2013), MMX ミッションによる火星衛星フォボスからのサンプルリターンで、火星についての情報も得ることが期待されている。火星から放出される高速度エジェクタのサイズと速度と放出角度の関係は、衛星に到達するエジェクタ量を推定するために重要である。そこで、火星表面のさまざまな物質に対して推定を行うために、一次標的に弾丸を衝突させて二次標的へのエジェクタ衝突を高速度カメラで撮影する方法(野村他, JpGU2021 など)を用い、2種類の一次標的に対して実験を行った。先行研究の豊岡産玄武岩(2.7 g/cm<sup>3</sup>/ 12 MPa)とは密度と圧裂引張強度が異なるモンゴル産玄武岩(3.2 g/cm<sup>3</sup>/ 21 MPa)と蛇紋岩(2.7 g/cm<sup>3</sup>/ 18 MPa)を使用した。

### 実験手法

宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて、直径 3 mm のアルミニウム球弾丸を、衝突速度約 7 km/s で一次標的に対し垂直および斜め 45° で衝突させた。エジェクタが通過する位置(一次標的から~ 300 mm)に二次標的(縦 50 - 70 mm 横 150 - 200 mm)を配置した。垂直衝突の場合  $\theta \sim 40 - 70^\circ$  , 斜め衝突の場合  $\theta \sim 0 - 30^\circ$  の範囲(放出角  $\theta$  は一次標的面の接線方向からの角度)に、二次標的としてガラス板やポリカ板を設置した。ガラス板はポリカ板よりもクレーターが大きくなるので、ガラス板はより小さなクレーターの観察、ポリカ板はクレーターの重複防止のために用いた。弾丸の一次標的への衝突とエジェクタの二次標的への衝突の様子は 10<sup>5</sup> fps 以上の高速度カメラで撮影した。エジェクタの二次標的への飛行時間と飛行距離から速度を、エジェクタによって二次標的に形成されたクレーター直径から  $\pi$  スケーリング則を用いてエジェクタを球としてサイズを算出した。クレーターの輪郭をなぞって計測したクレーター面積から、クレーターを等価円と仮定して、クレーター直径を算出した。

### エジェクタの放出角 $\theta$ と速度

垂直衝突の場合、同じエジェクタ速度で、一次標的がモンゴル産玄武岩の  $\theta$  は豊岡産玄武岩の約 2 倍となった。つまり、玄武岩どうしても、密度または強度が異なるとエジェクタの放出パターンも異なると考えられる。また、速度に対する  $\theta$  の変化は、蛇紋岩の場合と豊岡産玄武岩の場合で同様であるが、同じエジェクタ速度での  $\theta$  は蛇紋岩の場合が大きかった。斜め 45° 衝突の場合、モンゴル産玄武岩、豊岡産玄武岩、蛇紋岩の場合の  $\theta$  の分布に大きな差はみられなかった。

本発表では、以上の結果とエジェクタのサイズと速度の結果も含めて考察を行う予定である。

### 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。

## レゴリスに覆われた基盤岩へのクレーター形成実験 ：衝突励起振動による物質移動との関連

○柿木 玲亜, 荒川 政彦, 保井 みなみ, 山本 裕也  
神戸大学大学院理学研究科

レゴリスで覆われた小惑星のクレーター形成は、重力により支配されている。これまで均質な標的に対するクレーター形成実験は多く行われてきたが、実際の天体のような層構造を持つ標的に対する実験は少ない。特に、レゴリスで覆われた層構造標的に対する重力支配域のクレータースケール則は、未解明である。衝突励起振動は天体上の高速度衝突により発生し、この振動が天体内部や表面を伝播してレゴリスを流動化することにより、天体表面の地形の緩和が起こる。室内実験での衝突励起振動の研究では、Yasui et al. (2015) では粒径  $200\ \mu\text{m}$  のガラスビーズ、Matsue et al. (2020) では粒径  $500\ \mu\text{m}$  の石英砂を用いて、加速度の計測が行われた。しかし、レゴリスで覆われた層構造を持つ標的での衝突励起振動は未解明である。

本研究では層構造表層を模擬した標的へのクレーター形成実験を行い、基盤がクレーター形成過程に与える影響を調べた。また、標的表面や基盤を伝播する加速度波形を計測し、振動波形や距離減衰過程に対する基盤の影響を調べた。衝突実験は、自由落下による低速度衝突から、縦型軽ガス銃を用いた高速度衝突まで広い速度範囲 ( $3\sim 171\text{m/s}$ ) で行った。高速実験での弾丸は、直径  $3\text{mm}$  の鉄球を使用した。層構造標的の基盤には、閃緑岩の岩盤または砂と石膏の混合物の板を使用した。この基盤の上に粒子層（粒径  $500$  または  $100\ \mu\text{m}$  の石英砂、粒径  $100\ \mu\text{m}$  のガラスビーズ）を  $0\sim 30\text{mm}$  の厚みで敷いた。標的表面や基盤に加速度計を設置し、衝突励起振動の計測を行った。また、直径  $5\text{mm}$  の鉄球を自由落下させた衝突実験では、加速度波形の計測と同時にレーザー変位計による粒子層表面もしくは基盤表面の変位の観測を行った。

実験の結果、クレーター半径と粒子層の厚さに関して、以下のことが分かった。クレーター半径は、平底クレーターでは均質標的に形成されるクレーター半径より小さくなり、平底型とお椀型の境界付近では均質標的に形成されるクレーター半径より大きくなった。そして粒子層の厚みがクレーター深さより十分に大きくなると、均質標的に形成されるクレーター半径と一致した。加速度に関しては、以下のことが分かった。低速度衝突では、粒径  $100\ \mu\text{m}$  の砂層を厚み  $1\text{mm}$  で敷いた場合、基盤に発生する加速度の最大値は、砂層なしの場合と比べて  $10$  分の  $1$  程度まで減衰することが分かった。そして、レーザー変位計により、砂が鉛直方向に振動する様子を観測することができた。計測した砂層表面の最大変位は  $50\ \mu\text{m}$  程度であり、基盤の振動より高い周波数で振動していた。また、基盤の加速度波形は  $10\text{ms}$  ほどでほぼ減衰するのに対し、砂層の変位波形は  $200\text{ms}$  以上振動を継続していることがわかった。これは基盤のパルス的な振動が表面の砂層の振動を励起し、その振動が比較的長期間継続することを意味していると思われる。

【参考文献】 Yasui et al. (2015) *Icarus*, 260, 320–331; Matsue et al. (2020) *Icarus*, 338, 113520.

## 中空弾丸の衝突における放出物のパターン

○門野敏彦<sup>1</sup> 前田琉成<sup>1</sup> 宮路仁衣奈<sup>1</sup> 村山綾弥香<sup>1</sup> 渡邊竜也<sup>1</sup> 吉田二美<sup>1</sup>

樋口有理可<sup>2</sup> 長谷川直<sup>3</sup> 鳶生有理<sup>3</sup> 鈴木絢子<sup>4</sup> 末次竜<sup>5</sup>

<sup>1</sup>産業医科大学 <sup>2</sup>京都産業大学 <sup>3</sup>宇宙科学研究所 <sup>4</sup>東洋大学 <sup>5</sup>大島商船高等専門学校

近年, Deep Impact, LCROSS, Hayabusa2 など, 惑星探査で衝突実験が行われるようになった. そこで使われたインパクターは, これまでの室内実験で用いられてきたインパクターとは異なり, たとえば Deep Impact は制御できる小型衛星(A'Hearn et al. 2005), LCROSS はロケットの使用済み燃料タンク(Colaprete et al. 2010), Hayabusa2 は殻が銅で中身が空洞の「中空」弾丸 (Saiki et al. 2017)である. インパクターが中身の詰まった「中実」ではない構造を持っていても, 形成されるクレーターサイズはインパクター密度として「バルク密度」を設定すれば重力域でも強度域でも従来のスケーリング則で記述可能であった(Arakawa et al. 2020; Kadono et al. 2022).

中実のインパクターを粉粒体標的に高速度で衝突させるとクレーター形成の際に標的表面から約 45 度で放出される「エジェクタカーテン」が観測される(たとえば Kadono et al. 2020). ところが LCROSS の衝突を模擬するために中空アルミニウム弾丸(殻がアルミニウム製)を使った約 2.5km/s での衝突実験では, エジェクタカーテンに加えてターゲット表面に垂直に飛び出す高角度の「高角プルーム」の発生が確認された(Schultz et al. 2010; Hermalyn et al. 2012). しかし高角プルーム発生のメカニズムは解明されていない.

もし, 高角プルームの発生メカニズムが解明されエジェクタの量や方向をインパクターの形状で制御することができれば, 将来の惑星探査への応用が期待できる. たとえば, はやぶさ 2 では探査機本体が小惑星表面まで降下しサンプル採取用ホーンを接地させなければならなかった(たとえば Kikuchi et al. 2022). 降下せず上空で採取できるようにエジェクタの放出方向を制御できればこのような危険な運用は避けることができるだろう. また, DART や HERA(たとえば Cheng et al. 2018; Michel et al. 2018)のように地球に落下する危険がある小惑星にインパクターを衝突させて軌道を変える計画でも, エジェクタの速度と質量の制御が効率のよい軌道変更につながるだろう.

そこで, 高角プルーム発生機構の解明を行うためにガラスビーズ標的に対して中空のインパクターを用いた衝突実験を行い, 高速カメラでエジェクタの様子を撮影した. その結果を報告する.

### References

- A'Hearn et al. (2005) *Science* **310** 258.  
Arakawa et al. (2020) *Science* **368** 67.  
Cheng et al. (2018) *Planet. Space Sci.* **157** 104.  
Colaprete et al. (2010) *Science* **330** 463.  
Hermalyn et al. (2012) *Icarus* **218** 654.  
Kadono et al. (2020) *Icarus* **339** 113590.  
Kadono et al. (2022) *Earth Planet. Sci.* in press.  
Kikuchi et al. (2022) *Planet Space Sci* **219** 105519.  
Michel et al. (2018) *Adv. Space. Res.* **62** 2261  
Saiki et al. (2017) *Space Sci. Rev.* **208** 165.  
Schultz et al. (2010) *Science* **330** 468.

## 微惑星衝突によるコンドリュールの生成率と集積率の円盤ガス散逸モード

○小田中 佑樹<sup>1</sup>, 城野 信一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学大学院 環境学研究科

地球で回収できる隕石である普通コンドライト隕石中にはコンドリュールと呼ばれる mm サイズの球状物質が体積のほとんどを占めている。コンドリュールは固体が初期の原始太陽系円盤の中で加熱されて溶融したケイ酸塩が速やかに冷却されて形成されたと考えられている。隕石の年代測定から太陽系の形成とほぼ同時期に形成されたことがわかっている。つまり、太陽系が形成される過程で固体が溶融するような加熱イベントが多数発生していたと考えられる。

Nagasawa et al. (2019) では木星形成後、軌道共鳴などで周囲の微惑星の軌道を大きく乱し、原始惑星系円盤に対して大きな相対速度を持つことが示された。これにより、原始惑星系円盤内で微惑星同士の衝突が起こることがわかった。しかし、Nagasawa et al. (2019) ではコンドリュールが形成される期間が数百万年であることが示されたが、コンドリュールの生成量やコンドリュール生成後の微惑星によって集積される集積量については議論されていない。一方、他の先行研究では微惑星同士が衝突した際に生成されるコンドリュールの体積を求めている。この結果とガス円盤中での微惑星同士の衝突頻度を求めることによって衝突によって生成されるコンドリュール質量を計算することができる。

本研究では、上記の計算によって生成されたコンドリュールを微惑星が集積するシミュレーションを行うことでコンドリュールの生成から集積までの一連の過程を統合的に計算を行った。

シミュレーションの結果、コンドリュールを集積できる微惑星は存在するもののガス抵抗によって長時間経過すると小惑星帯の内側まで移動してしまうという結果になった。

また、ガスの散逸時間を変更すると、ある期間のみコンドリュールを集積した微惑星が小惑星帯内に存在することができるとわかった。

よって、コンドリュールを集積した微惑星が小惑星帯に残るかどうかはガス散逸が重要なプロセスなのではないかと考えられる。

# 惑星系におけるハビタブルゾーン周りの粒子安定性

○谷安 要<sup>1</sup>, 佐々木貴教<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻

近年の観測によって発見された系外惑星の中には、地球より中心星近傍に位置しかつ質量の大きい惑星が多く存在する。また、観測により複数の惑星が発見されている系もあるため、一つの巨大ガス惑星を持つ系にさらに地球型惑星などが存在する可能性がある。

Agnew et al.(2018) ではそのような木星型惑星を少なくとも一つ持つような系に対し、ハビタブルゾーンにおける動的な安定領域を求めている。そこでは幾つかの系でハビタブルゾーンでの粒子安定性があることが求められており、地球型惑星が存在する可能性を示している。

本発表では TESS 等により新規で発見された巨大惑星を持つような系に対し、動的な安定領域を求めた。Kopparapu et al.(2013) のモデルを利用してハビタブルゾーンを計算したのち、その周囲にテスト粒子を配置し、 $10^6$  年数値積分を行った。計算コードは REBOUND(Rein and Liu (2012)) を使用した。

計算し図示した結果は図 1 の通りである。この結果を基にして解析を行うことで、ハビタブルゾーン周辺における地球型惑星の存在可能性を求める。

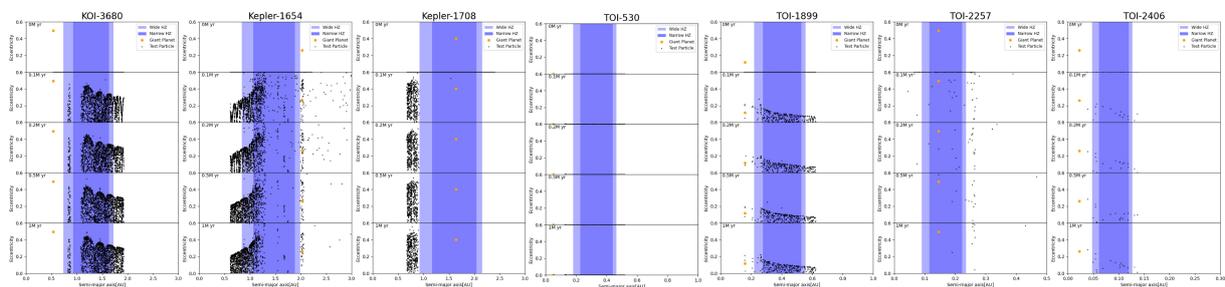


図 1: 各系におけるシミュレーション結果。縦軸は離心率、横軸は軌道長半径、青い領域はハビタブルゾーン、黒点はテスト粒子を示す。

## 参考文献:

M.T.Agnew et al.,2018,MNRAS,481,4680-4697,Prospecting for exo-Earths in multiple planet systems with a gas giant

R.K.Kopparapu et al.,2013,ApJ,765,131,Habitable Zones Around Main-Sequence Stars:New Estimates

H.Rein & S.-F.Liu, 2012,A&A,537,128,REBOUND:an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics

# 平坦なスペクトルを持つスーパーアースの特徴づけ

## Characterization of super-Earths with near-featureless spectra

○伊藤祐一<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>国立天文台、<sup>2</sup> University College London

これまで、1000個に及ぶスーパーアースと呼ばれる1から4倍の地球半径を持つ系外惑星が発見されている。そして、観測技術の発展に伴い、トランジット分光観測は、木星型だけでなく地球型の系外惑星またそれらの大気を詳細に理解する効果的な方法となってきている。しかしながら、一部のスーパーアースのスペクトルは平坦である可能性がある（スペクトル特徴がないもしくは弱い）。例えば、大気自体を持たない惑星や大気中の雲、また平均分子量が大きい大気を持つ惑星は平坦なスペクトルを持つと考えられている。特に、主星近傍のスーパーアースは大気散逸によって大気を失いやすく、トランジット観測から惑星の化学組成を知ることは困難な可能性がある。

本発表では、大気を持たないが地表面にマグマオーシャンを持つ主星近傍のスーパーアースのボンドアルベドの導出式 (Modirrousta-Galian, Ito, Micela 2021) を用いて、アルベドのマグマ組成依存性を示す。多くのマグマ組成では小さいアルベドを持つのに対し、酸化鉄に富むマグマはアルベドが大きい。そのため、仮にスペクトルが平坦な場合でも平衡温度またはアルベドの観測は、主星近傍のスーパーアースの表面酸化鉄の割合を制約することにつながる可能性があることがわかった。また、雲によって部分的に平坦化された大気スペクトルについて、現在開発中であるリトリーバル解析手法の紹介・議論する。

# すばる望遠鏡 IRD による褐色矮星 Gl 229B の 高分散分光観測とスペクトル計算コード ExoJAX を 用いた大気特性の調査

○川島由依<sup>1</sup>、河原創<sup>2</sup>、笠木結<sup>3</sup>、石川裕之<sup>4, 5</sup>、増田賢人<sup>6</sup>、小谷隆行<sup>4, 5</sup>、工藤智幸<sup>5</sup>、  
平野照幸<sup>4, 5</sup>、葛原昌幸<sup>4, 5</sup>、Stevanus Nugroho<sup>4, 5</sup>、John Livingston<sup>4, 5</sup>、田村元秀<sup>4, 5, 7</sup>、

IRD チーム

<sup>1</sup>理化学研究所、<sup>2</sup>宇宙科学研究所、<sup>3</sup>総合研究大学院大学、

<sup>4</sup>アストロバイオロジーセンター、<sup>5</sup>国立天文台、<sup>6</sup>大阪大学、<sup>7</sup>東京大学

恒星と惑星の中間質量を持つ天体である褐色矮星は、太陽系外の巨大惑星と同様の組成や温度を有している。そのため、比較的観測精度の得やすい褐色矮星大気の観測を通し、大気循環や大気の化学反応、雲形成などの大気の物理・化学過程の理解を確立したり、分子種の検出に重要な役割を果たす吸収線リストの観測的検証を行ったりすることは、系外惑星大気の特徴付けにとっても重要である。褐色矮星のスペクトルは、これまで主に低・中分散分光で観測されて来た。吸収線一本一本のプロファイルを分解可能な高分散観測ではスペクトルから温度構造や分子種の存在量をより詳細に求めることが可能であると期待されるが、これまで、褐色矮星の高分散分光観測はごく一部の天体についてのみ、狭い波長領域でしか行われていなかった (Smith et al. 2003; McLean et al. 2007; Rice et al. 2010; Reiners et al. 2007; Crossfield et al. 2014; Tannock et al. 2022)。

我々は、すばる望遠鏡の近赤外高分散分光器 IRD (Y, J, H バンド; R-70,000) を用いて、初めて発見された T 型褐色矮星である Gl 229B (有効温度約 900 K) の大気スペクトルの観測を行った。得られたスペクトルに対し、我々が最近開発した自動微分可能な高分散スペクトル計算コード ExoJAX (Kawahara et al. 2022) を用いたフィットを行い、温度構造や各分子種の存在量などの大気特性を制約した。加えて、観測されたスペクトルとモデルスペクトルとの比較から、系外惑星大気の観測でも使われているメタンや水蒸気の吸収線リストについて、観測と不一致を示す波長領域があることがわかった。

## 揮発性蒸気を含む周白色矮星円盤の進化： 氷天体を起源とする汚染可能性の検討

○奥谷彩香<sup>1</sup>, 井田茂<sup>2</sup>, 兵頭龍樹<sup>3</sup>

<sup>1</sup>国立天文台, <sup>2</sup>東工大 ELSI, <sup>3</sup>ISAS/JAXA

約半数の白色矮星の大気中にはFe, Si, O, Cなどの重元素が観測されており、その周囲にはダストと蒸気の円盤が観測されている(e.g. Zuckerman et al. 2010)。これらはかつて星周りに存在した惑星・小惑星を起源とし、星近傍で潮汐破壊された(小)惑星が降着円盤を形成して星に重元素を供給していると考えられる。したがって、これらの重元素の観測から、その起源である惑星のバルク組成や、恒星進化を経た最終段階の惑星系の構造を明らかにできる可能性がある(e.g., Harrison et al., 2018)。

本研究では、重元素の観測から上記の情報を読み出す第一歩として、周白色矮星円盤モデルの構築を行った。特に、(1) 円盤が観測されている白色矮星の大半はPoynting-Robertson効果によって実現される質量降着率よりも桁で高い降着率を持ち、(2) 星大気は岩石構成元素に富んだ組成を示す、という2点の観測事実の再現可能性に着目してモデルを構築する。2021年秋季講演会(A01)では、(2)に整合的な岩石天体を起源とする岩石ダスト/蒸気円盤について移流・拡散・昇華・凝縮を解いて星表面への降着率を求め、岩石蒸気の再凝縮がおこることで、Metzger et al. (2012)が提案した岩石蒸気からのガス抵抗による降着率上昇が抑制されることを示した。これは、岩石のみからなる円盤では(1)が実現困難であることを意味する。

一方、微惑星帯近傍に惑星の存在を仮定したN体計算に基づく、惑星からの重力散乱によって、小惑星は数auから数10 auにわたる幅広い軌道領域から白色矮星近傍へと供給されうる(e.g., Mustill et al. 2018; Li et al. 2022)。したがって、上記で仮定したS型小惑星のような乾いた岩石小惑星だけでなく、C型小惑星のような10%程度水を含む小惑星やカイパーベルト天体のような氷に富んだ小惑星も供給される可能性がある。本講演では、そのような天体が供給する揮発性蒸気と岩石ダスト間の角運動量交換を組み込んで、揮発性ガスおよび岩石ダスト/蒸気の移流・拡散・昇華・凝縮を新たに計算した。その結果、ロシュ限界内において揮発性ガスは凝縮せず岩石ダストと共存するため、揮発性ガスからのガス抵抗によって岩石成分の降着率が上昇し、(1)が再現可能であることを明らかにした。揮発性ガスの初期質量が大きければ大きいほど、岩石成分の降着率は上昇する。さらに、岩石ダストからのバックリアクションによって、揮発性成分の降着率は岩石成分の降着率より1桁程度低下することを明らかにした。特に、C型小惑星を起源とするような少量の揮発性ガスが含まれる円盤であれば、降着進化の全時刻においてこの1桁低下が維持され、(1)と(2)を同時に再現する可能性を見出した。一方、ここで得られた降着フラックス中には約10 wt%の揮発性元素が含まれることになる。この理論予測値と観測から制約されている様々な揮発性元素の含有量について比較を行い、現在の観測との整合性をさらに議論する。

## 月極域探査 LUPEX 搭載用 REIWA/TRITON に資する

## 高イオン化効率をもつ中性粒子質量分析用イオン源の開発

- 川島 桜也<sup>1</sup>, 柳瀬 菜穂<sup>1</sup>, 沖津 由尚<sup>1</sup>, 平原 聖文<sup>2</sup>, 齋藤 義文<sup>1,3</sup>,  
唐牛 讓<sup>3</sup>, 山本 直輝<sup>1,3</sup>, 横田 勝一郎<sup>4</sup>, 笠原 慧<sup>1</sup>  
1. 東京大学, 2. 名古屋大学, 3. JAXA, 4. 大阪大学

過去の LCROSS impact plume の観測やリモートセンシング観測によって、月極域には、水氷の形で水素原子が濃集する可能性が強く示唆されている (e.g., e.g., Feldman et al., 1998; Mitrofanov et al., 2010; Fisher et al., 2017; Li et al., 2018) . その分布や化学組成を精査することは、地球-月系における揮発性物質の起源の理解という観点で惑星科学的に重要であり、また将来の人類月面活動における資源の定量化という観点で工学的にも重要である。このような背景で現在、JAXA/ISRO 連携の月極域ローバー探査が計画されている (LUPEX: Lunar Polar Exploration mission) .

LUPEX に搭載されるモジュールの一つに、水資源分析計 REIWA (Resource Investigation Water Analyzer) がある。REIWA はいくつかの科学分析装置からなっており、その中には熱重量分析計 LTGA (Lunar thermogravimetry analysis) や、本発表と関連のある TRITON (Triple-reflection Reflectron) が含まれる。TRITON は LTGA から供給される中性ガス (=月極域で採取したレゴリスから熱脱離した揮発性物質) を測定するための中性粒子質量分析器である。質量分析器は、質量の測定に電磁気力を用いる装置であり、中性粒子を測定するには、事前に試料のイオン化を行うイオン源を組み込むことが必須となる。TRITON のイオン源においては、H<sub>2</sub>O など揮発性物質の定量分析に向けて高いイオン化効率が求められるため、本研究では Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> コーティング Ir フィラメントという素材を新たに用いた高イオン化効率の電子衝突法イオン源開発に取り組んできた (図 1a, Kawashima et al. accepted, PSS) . これまでの試作機の性能試験により、従来用いられてきた惑星探査用電子衝突法イオン源に比べて、高いエミッション電流値 (>1 mA) および高いイオン化効率 (~1×10<sup>4</sup> nA/Pa, 図 1b) が確認できている。今回の発表では、これまでの開発動向に加えて、現在実施している月面上での利用を想定したイオン源の環境試験の結果について発表する。

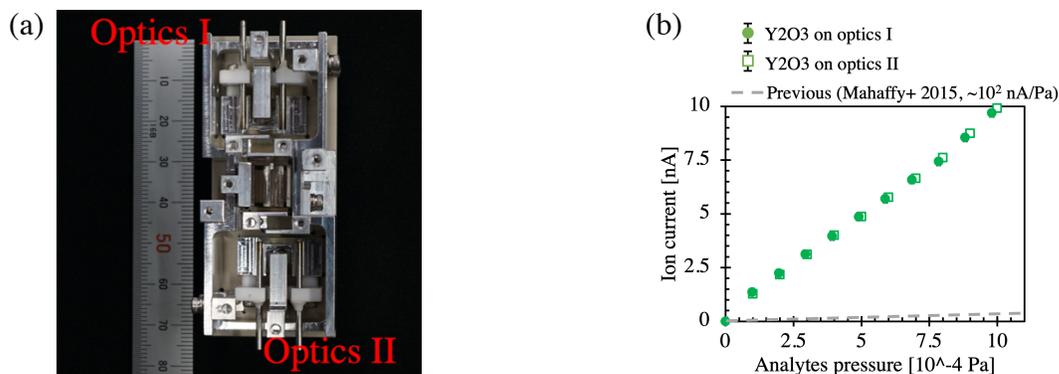


図 1 (a) 開発した BBM の実機写真, (b) イオン化性能を確認する試験の結果。

## DESTINY+搭載カメラの地上・機上光学校正計画

○岡本 尚也<sup>1</sup>, 石橋 高<sup>1</sup>, 山田 学<sup>1</sup>, 石丸 貴博<sup>2</sup>, 洪 鵬<sup>1</sup>, 吉田 二美<sup>3,1</sup>, 荒井 朋子<sup>1</sup>,  
太田 方之<sup>2</sup>, 宮原 剛<sup>2</sup>, 高島 健<sup>2</sup>

<sup>1</sup>千葉工業大学惑星探査研究センター, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, <sup>3</sup>産業医科大学

DESTINY+探査機には小惑星追尾望遠モノクロカメラ TCAP(Telescopic CAmera for Phaethon)とマルチバンドカメラ MCAP(Multi-band CAmera for Phaethon)が搭載され, 小惑星(3200) Phaethon を高速フライバイし, カメラ観測によって以下の4つの科学目標を達成することを目指している: Phaethon の輪郭撮像とライトカーブ観測, Phaethon 表層の比較的大きなクレーターや崩壊した地形などの日照域の3次元形状観測, ガスト放出孔などの特徴的な Phaethon 表層の詳細地形観測, マルチバンドカメラによる Phaethon 表層の物質分布観測. これらの科学目標を達成するには, 観測の生画像から科学的に意味のあるデータへと焼き直すための校正が必要となる.

TCAP, MCAP で撮像された生の画像は以下の順序によって校正される予定である: (1) バイアス補正 → (2) ダーク補正 → (3) リニアリティ補正 → (4) フラットフィールド補正 → (5) 感度補正 → (6) 歪曲補正. それぞれの補正を行うには, 以下の校正データが必要となる. (1) 露光時間ゼロ(あるいは最小露光時間)で光入力がない状態で撮像したバイアス画像の取得. (2) 天体の画像を取得したときと同じ露光時間, 温度で, 光入力がない状態で撮像したダーク画像の取得. (3) 撮像素子の感度が線形に保たれている領域を確認するためのデータ取得. もし, 入力に対する応答が線形でない場合は, その補正式を得る. (4) 撮像素子とレンズの両方に起因する視野内の大局的な感度ムラや, 画素間の感度のばらつきといった非均一性を補正するフラットフィールド画像の取得. (5) 撮像素子で観測されるカウント値と放射輝度との対応関係を把握するためのデータ取得. (6) レンズ等の影響で生じる光学的な歪み(歪曲)を補正するためのデータ取得.

これらの校正データ取得は全て機上観測時と同じ条件で行うのが望ましい. 機上での校正データ取得は, 実際の環境で測定できるが, 地上での測定に比べると制約が多い. そのため, 必ずしも取得したいデータが得られなかったり, 精度の良いデータを得るのが難しかったりする. 一方, 地上では光源などの環境を制御した条件下で精度の高いデータ取得が可能であるが, 必ずしも機上での環境を再現できない. 加えて, 機上で光学特性や校正パラメータに変化が生じる項目については, 地上で取得したデータが理学観測画像の校正に利用できない場合もある. そこで我々は, 機上で光学特性が劣化する要因を挙げ, 地上と機上で校正データに変化が見込まれる項目を整理し, それらを地上と機上のどちらで重点的にデータ取得すべきかについてまとめた. 本ポスター発表では, これに加え, 地上・機上においてそれらの校正データをどのように取得するかについて報告する.

# DESTINY+探査機搭載小惑星追尾駆動鏡の EM 予備試験

○洪鵬<sup>1</sup>、石橋高<sup>1</sup>、須崎裕多<sup>2</sup>、宮原剛<sup>2</sup>、太田方之<sup>2</sup>、細沼貴之<sup>3</sup>、尾崎直哉<sup>2</sup>、豊田裕之<sup>2</sup>、  
西山和孝<sup>2</sup>、大槻真嗣<sup>2</sup>、奥平修<sup>1</sup>、佐藤峻介<sup>2</sup>、高島健<sup>21</sup>

<sup>1</sup>千葉工業大学 惑星探査研究センター、<sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、

<sup>3</sup>東京大学大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻

深宇宙探査技術実証機 DESTINY+ (Demonstration and Experiment of Space Technology for INTERplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUst Science) はふたご座流星群の母天体と考えられている小惑星 Phaethon を近接フライバイし、望遠カメラ TCAP (Telescopic CAmera for Phaethon) を用いて地表面の高解像度撮像 (最大 3.5 m/px) を行う。DESTINY+は Phaethon を約 36 km/s という非常に速い相対速度で通過し、その時の視線方向の最大相対角速度は 4 deg/s 以上に達するが、一般的に相対角速度が 1 deg/s を越えると探査機の姿勢制御により追尾することは不可能となるため、TCAP には 1 軸で回転する駆動鏡を搭載し、フライバイ中も自律的に小惑星を視野内に収め続ける。駆動鏡を搭載して小天体の高速フライバイ追尾観撮像に成功した過去のミッション (例えば Stardust-NExT では最大角速度 3.5 deg/s、最高空間解像度 11 m/px) と比較すると、TCAP の駆動鏡には高い追尾性能を要求される。

駆動鏡は Phaethon フライバイ観測成否の鍵となる重要なコンポーネントであるが、このように高性能な駆動鏡は新規開発要素であるため、私たちは試作による検証を実施してきた。これまでに、民生品のステッピングモーターと減速機を組み合わせた試作機 (BBM/BBM2) を製作し、マイクロステップ駆動による指向精度や指向安定度の評価を行った。試作機の評価試験を通じて、微小角度測定において角度検出器 (エンコーダ) のアライメントずれによって検出器由来のバイアス誤差が生じて、指向性精度の評価が難しくなる問題に直面した。そこでエンジニアリングモデル (EM) の製造前に、EM と同じ機械設計で、アクチュエータ部品のみ民生品を用いた、試作機 (BBM3) を開発し、BBM で生じた課題を解決し、さらに EM の試験スケジュールを短縮するため EM の予備試験として供することを計画している。BBM3 では高精度で角度校正されたエンコーダを用い、さらにポリゴンミラーとオートコリメータを用いた光学的な角度測定とも組み合わせることで、エンコーダのアライメントずれを評価し、アクチュエータ由来の角度誤差を抽出する。本発表では BBM3 を用いた試験計画と各サブ試験の目的や概要、および EM 初期試験の見通しを報告する。

## 次世代小天体サンプルリターン探査の理学検討

○ 寫生有理<sup>1</sup>, 坂谷尚哉<sup>1</sup>, 深井稜汰<sup>1</sup>, 兵頭龍樹<sup>1</sup>, 巽瑛理<sup>2</sup>, 脇田茂<sup>3</sup>, 浦川聖太郎<sup>4</sup>,  
末次竜<sup>5</sup>, 岡田達明<sup>1</sup>, 田中智<sup>1</sup>, 渡邊誠一郎<sup>6</sup>, 森治<sup>1</sup>, 佐伯孝尚<sup>1</sup>, 津田雄一<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup>カナリア天体物理学研究所, <sup>3</sup>マサチューセッツ工科大学,  
<sup>4</sup>日本スペースガード協会, <sup>5</sup>大島商船高等専門学校, <sup>6</sup>名古屋大学

はやぶさ2とMMXに続く小天体サンプルリターン(SR)探査ミッションを検討する「次世代小天体サンプルリターンWG」は、2022年5月にJAXA宇宙工学委員会によって設置が認められた。惑星科学会・来る10年の月惑星探査に提案された「親機・子機探査システムを用いた次世代サンプルリターン探査」は、2022年2月に小天体パネルから次期中型候補として太陽系GDIに推薦された。SR目標天体は、これまでの次世代SR勉強会等での議論から、E型/D型小惑星、活動的小惑星、木星族彗星(JFC)が有望視されてきた。我々は、WG理学コアメンバーでの議論を経て、目標天体として活動性の低いJFC、つまり準枯渇彗星を提案する。

本ミッションの大目標は、彗星と小惑星のミッシングリンクを埋めることである。彗星と小惑星は彗星活動性の有無と軌道要素によって観測的に分類される。彗星と小惑星の間の特徴を示す天体として、彗星軌道の小惑星(ACO)がある[1]。ACOは木星とのTisserand parameter  $T_1$ が $2 < T_1 < 3$ の小惑星と定義され、揮発性物質を失ったJFC(枯渇彗星)と地球型惑星で散乱された小惑星から構成されると推定される[2]。TNOの近日点が巨大惑星摂動により減少することでJFCは形成し、 $3 \times 10^3$ - $3 \times 10^4$ 年で枯渇彗星化すると推定される[3](JFCの力学的寿命は $\sim 1.5 \times 10^5$ 年と推定[4])。はやぶさ2で得られたCb型小惑星Ryuguのリターンサンプルは始原的な隕石(CIコンドライト)に類似し、太陽系外縁部(海王星以遠)で形成されたことを示唆した[5,6]。しかしながら、Cb型小惑星/CIコンドライトの揮発性物質・有機物量は、彗星/彗星物質・IDPのそれより著しく少なく、両者の中間組成の天体/地球外物質の理解は乏しい。彗星と小惑星の中間天体である準枯渇彗星は、彗星が進化して小惑星となるのか、両者の起源と進化が異なるのかという、太陽系小天体の起源と進化の理解に繋がる。

探査機性能と打上年等の前提・制約条件から、候補天体として近日点 $1.0 \pm 0.1$ au、傾斜角 $< 10^\circ$ の3個のJFCと3個の枯渇彗星候補(ACO)を抽出した。このうち、289P/Blanpainは準枯渇彗星であり[7]、ほうおう座流星群の母天体である[8]。

ミッション機器は、着陸地点選定用のリモセン機器(光学カメラ、測距計、近赤外分光計、熱カメラ)および複数地点からの低リスクでの試料採取システム(親機・子機探査システム、サンブラ、機体間試料受渡機構、常温サンプルリターンカプセル)が必須であると考え。準枯渇彗星の表層は、彗星と同様な低熱慣性の難揮発性物質[9](年周熱浸透深さ $\sim 1$ m)と予想されるため、人工衝突装置(SCI)やペネトレータによる表層下の数m掘削により、揮発性物質を含む地下物質にアクセスできる可能性がある。揮発性物質の化学・同位体分析を実施するため、その場分析装置の搭載が検討されている。

[1] Jewitt and Hsieh (2022) *arXiv:2203.01397*. [2] Simion et al. (2021) *MNRAS*, 508(1), 1128-1147. [3] Levison and Duncan (1997) *Icarus*, 127(1), 13-32. [4] Fernández et al. (2002) *Icarus*, 159(2), 358-368. [5] Yokoyama et al. (2022) *Science*, eabn7850. [6] Ito et al. (2022) *Nature Astronomy*, 1-9. [7] Jewitt (2004) *The Astronomical Journal*, 131(4), 2327. [8] Sato et al. (2014) *Planetary and Space Science*, 143, 132-137. [9] Marshall et al. (2018) *Astronomy & Astrophysics*, 616, A122.

## DESTINY<sup>+</sup>搭載用ダストアナライザの 開発と地上較正計画 2022

○平井 隆之<sup>1</sup>, 小林 正規<sup>1</sup>, 荒井 朋子<sup>1</sup>, 木村 宏<sup>1</sup>,  
佐々木 晶<sup>2</sup>, 藪田 ひかる<sup>3</sup>, 天野 翠<sup>3</sup>, 小林 幸雄<sup>4</sup>, 伊藤 元雄<sup>4</sup>, 山口 亮<sup>5</sup>, 矢野 創<sup>6</sup>,  
Tomas Ludwig<sup>7</sup>, Winfried Schwarz<sup>7</sup>, Jens Hopp<sup>7</sup>, Trieloff Mario<sup>7</sup>,  
Hillier Jon<sup>8</sup>, Khawaja Nozair<sup>8</sup>, Eckart Lisa<sup>8</sup>, Postberg Frank<sup>8</sup>,  
Simolka Jonas<sup>9</sup>, Krüger Harald<sup>10</sup>, Garsten Henselowsky<sup>11</sup>, Srama Ralf<sup>9</sup>,  
DESTINY+チーム

<sup>1</sup> 千葉工業大学, <sup>2</sup> 大阪大学, <sup>3</sup> 広島大学, <sup>4</sup> JAMSTEC, <sup>5</sup> NIPR, <sup>6</sup> JAXA,  
<sup>7</sup> ハイデルベルク大学, <sup>8</sup> ベルリン自由大学, <sup>9</sup> シュトゥットガルト大学,  
<sup>10</sup> マックスプランク太陽系研究所, <sup>11</sup> DLR

深宇宙探査技術実証機 DESTINY<sup>+</sup>に搭載されるダストアナライザ (DESTINY<sup>+</sup> Dust Analyser, DDA) は、ダスト粒子の超高速衝突により発生するイオンの電荷量計測や質量分析から、ダスト粒子の質量や化学組成を推定する理学観測装置である。質量分析部は飛行時間型 (計測質量範囲:  $m/z \sim 1,000$ ) を用い、ダストを構成する有機物と鉱物のバルク化学組成の同定を目指している。DDA は地球周回フェーズから運用を開始し、巡航中には惑星間ダストや星間ダストの計測を行う。また、活動的小惑星 (3200) Phaethon とのフライバイ時には、小惑星由来のダスト計測を実施する。

装置開発については、探査機バスシステムとのインタフェース条件が概ね確定し、部品納期の長期化に大きく影響を受けたエンジニアリングモデル (EM) の製造と試験についても急ピッチで進めている。探査機システムとの電気噛み合わせを早期に実施するための電気シミュレータ (ESIM) については、ドイツチームのエンジニアも来日した上でミッションデータ処理部 (MDP) との噛み合わせ試験を順調に進めてきた。

質量スペクトルを解釈するための地上較正については、ドイツ・シュトゥットガルト大学で整備を進めてきたダスト静電加速器が定常運用に移行し、いよいよ DDA での超高速微粒子衝突を用いた較正実験が始まろうとしている。本発表ではこれらの進捗状況を報告する。

## 惑星科学コンソーシアムの準備状況報告

## Progress report of planetary science consortium

○竝木則行<sup>1</sup><sup>1</sup> 国立天文台 RISE 月惑星探査プロジェクト

日本の宇宙探査は構想段階から始まって、いわゆるフェーズ A(概念検討), B(開発研究), C(開発), D(運用)を経た後に、獲得データを使った成果創出に至る。JAXA は『実行機関』として、フェーズ A~D に責任を持ってプロジェクトを実施するが、最初の構想段階と最後の成果創出は、原則として、個別の研究グループや個人研究者の自助に委ねられている。しかしながら、宇宙探査プロジェクトでは、多様なミッション提案、機器提案を JAXA がゼロから評価することはあり得ず、『コミュニティの合意』というフィルタを通して事前の選別が行われる。成果創出の段階においては、プロジェクト内データ利用と外部公開のバランスをコミュニティが調整して科学成果の最大化を図らなければならない。このように、プロジェクトの入口と出口において、コミュニティは重い責任を負っている。

コミュニティはミッション構想段階において、ミッション案をブラッシュアップして、コミュニティ内での優先順位をつける責任がある。その後、ミッション案がプロジェクトと発展するにつれて、コミュニティと宇宙研メンバーは緊密に協力して搭載機器開発やミッション定義を行う。同時に、コミュニティは現実的なシミュレーション研究によって、宇宙研による概念検討・プロジェクト化準備を支援する。千葉工業大学と宇宙研は DESTINY+において、時限付きの連携拠点を設立し、コミュニティの強化に取り組んでおり、そのような連携の活動を今後さらに拡充させる必要がある。

一方で、アルテミスに代表されるトップダウン型のプロジェクトでは、公募等を通して個別の研究グループが直接 JAXA プロジェクトに組み込まれる。安全保障や産業振興といった多様な目的で実施されるトップダウンプロジェクトにおいて、惑星科学コミュニティが一貫した科学戦略を保つためには、多様な搭載機器の選択肢を常備していなければならない。そのためには惑星科学コミュニティに戦略的機器開発と情報流通を統括する指令塔が必要となる。アルテミス計画への社会的な期待は昨今急速に膨れ上がっており、科学コミュニティも対応を急がなければならない。

ボトムアップとトップダウン、いずれの方式においても宇宙研とともに惑星探査プロジェクトを実現していくため、惑星科学コミュニティは以下の役割が求められる。(1) ミッション構想~概念検討段階において、宇宙研と連携しうる責任体制を構築する。搭載機器開発を促進し、ミッション提案のブラッシュアップを実行するとともに、シミュレーション研究を通して概念検討やプロジェクト化準備を支援する。(2) トップダウンのプロジェクトに即応できる体制を構築する。積極的な情報流通により、戦略的な機器開発を統括する。(3) 宇宙医学や農学、人文社会学にわたる広い視野をもつ人材を育成する。(4) データの管理・公開に責任を持つ体制を構築する。研究目的で開発されたオープンソフトウェア群と、それにより高次処理されたデータを維持する。(5) コミュニティ内の将来計画提案を具体的で実現性の高いロードマップへ蒸留する中核研究所を構築する。このような役割を担う体制として惑星科学コンソーシアムを提案する。

## 太陽系探査を目指した

## イオントラップフーリエ変換型質量分析器の開発

○川島 桜也<sup>1</sup>, 笠原 慧<sup>1</sup>, 平原 聖文<sup>2</sup>, 齋藤 義文<sup>1,3</sup>, 横田 勝一郎<sup>4</sup>, 杉田 精司<sup>1</sup>

1. 東京大学, 2. 名古屋大学, 3. JAXA, 4. 大阪大学

惑星探査のその場観測において、質量分析器は重要な役割を果たしてきた。特に高分解能質量分析器 ( $m/\Delta m > 10,000$ ) から得られる同位体組成の情報は、太陽系天体の進化を議論する上で不可欠である。ただし過去に探査機搭載実績のある高分解能質量分析器は長辺が 1m 程度の大型装置であり、リソースの問題から搭載機会が強く制限される。そこで本研究では、近年、室内実験で用いられるようになってきたイオントラップフーリエ変換型質量分析の原理に着目し、この高質量分解能 ( $m/\Delta m > 10,000$ ) を手のひらサイズで実現するような開発に取り組んでいる。このようなイオントラップフーリエ変換型の装置では、従来の装置に比べて S/N 比を良くすることが容易ではなく、さらにイオン軌道についても、他種の装置に比べて長い飛翔距離にわたって制御していく必要があり、開発要素が数多くある。

本開発ではこれまで、測定する中性粒子 (= 惑星大気などの中性ガス試料) をイオン化し、位相を揃えてイオントラップ電極に投入するためのイオン源の開発に取り組んできた。その結果、イオントラップ電極に ~10,000 粒子程度のイオンを <1 usec 以内の時間幅で投入することが可能となるようなイオンストレージデバイスを試作完了した。また現在は質量スペクトルを取得するための確認試験として、イオンのエネルギーと軌道を設計通りに制御できていることを確認するための試験 (= イオントラップ電極に流れこむイオン電流の実機による計測と、既定のエネルギーを持つイオンの軌道計算結果との比較) を進めている段階である。本発表では、これまでの開発の経緯に加えて、現在行なっている軌道制御試験とその結果について紹介する。

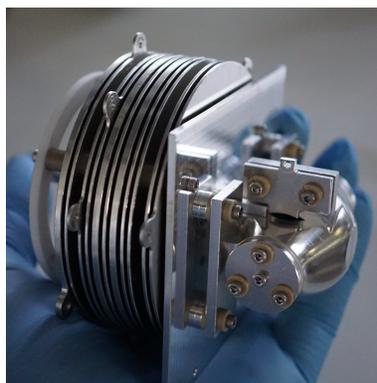


図 1 開発している BBM の実機写真。

## ティティウス・ボーデ法則の証明

犬山 文孝 元 九州電力(株) 火力部

一般相対性理論のアインシュタイン方程式の厳密解であるカー・ニューマン解（ブラックホールの唯一性定理が認められている）から時空場のエネルギー方程式を算出する。そして変分原理とエネルギー最小原理に基づいて、宇宙の安定回転惑星系等の配列に関する次の微分方程式が導出された<sup>1)</sup>。

微分方程式の判別式に従って 惑星軌道の配列および土星リングの個数はカー・ニューマン解（1965年発見）によって初めて理論解明できるテーマである。

$$\begin{aligned} dS/dR &= 2e^2(e^2 + 2m^2)/SR + (4a\delta m + S)/R + 6a\delta m S^2/R^5 & S &= R\sqrt{2\epsilon R^2 + 2mR + e^2} \\ m, e, a &\text{は中心核星の質量・電荷・回転要素} & E^4 &= e^2(e^2 + 2m^2) \\ \delta &= \pm 1 \text{ (中心核星の回転方向)} & \theta &= 3S_0^2/2R_0^4 \quad (S_0^2, R_0^4 \text{ は重心点 } S^2/3, R^4/5) \end{aligned}$$

太陽の自転は緩やかで、判別式  $\Delta = E^4 - 2a^2 m^2(1+\theta)^2 > 0$  として微分方程式を解く。

$$\frac{S^2 + 4a\delta m(1+\theta)S + 2E^4}{R^2} \cdot \text{EXP} \left[ \frac{-4a\delta m(1+\theta)}{\sqrt{2E^4 - 4a^2 m^2(1+\theta)^2}} \arctan \left( \frac{S + 2a\delta m(1+\theta)}{\sqrt{2E^4 - 4a^2 m^2(1+\theta)^2}} \right) \right] - K = 0$$

上式を関数  $f(\theta)$  として、マクローリン級数展開し  $\theta^2$  以上の高次項は無視する。

$$f(\theta) = \frac{3mr}{2} \cdot \text{EXP} \left[ \frac{-4a\delta m}{\sqrt{2E^4 - 4a^2 m^2}} \arctan \left( \frac{r\sqrt{3mr}}{2\sqrt{E^4 - 2a^2 m^2}} \right) \right] \times \left[ 1 - \frac{30a\delta m^2 E^4}{r[2E^4 - 4a^2 m^2]^{\frac{3}{2}}} \times \arctan \left( \frac{r\sqrt{3mr}}{2\sqrt{E^4 - 2a^2 m^2}} \right) \right] - K = 0$$

$r$  が充分大きいとして  $\arctan \left( \frac{r\sqrt{3mr}}{2\sqrt{E^4 - 2a^2 m^2}} \right) = \frac{\pi}{2} + \pi N - \frac{2\sqrt{E^4 - 2a^2 m^2}}{r\sqrt{3mr}}$  となるので、

$$f(\theta) = \frac{3mr}{2} \cdot \text{EXP} \left[ \frac{-2a\delta m\pi(1+2N)}{\sqrt{2E^4 - 4a^2 m^2}} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{30a\delta m^2 E^4}{r[2E^4 - 4a^2 m^2]^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{\pi(1+2N)}{2} \right] - K = 0$$

積分定数  $K$  は中心核星に属する全ての惑星に共通であるので、基準惑星を  $r_1, N_1, N - N_1 = n - 1$ 、基準惑星との遠日点  $F$ ・近日点  $C$  距離比を  $\xi = (r_F + r_C)/(r_{1F} + r_{1C})$  とすると

$$\xi = \frac{60a\delta m^2 E^4 \pi N_1}{(r_{1F} + r_{1C})[2E^4 - 4a^2 m^2]^{\frac{3}{2}}} + \left[ 1 - \frac{60a\delta m^2 E^4 \pi N_1}{(r_{1F} + r_{1C})[2E^4 - 4a^2 m^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \cdot \text{EXP} \left[ \frac{4a\delta m\pi(n-1)}{\sqrt{2E^4 - 4a^2 m^2}} \right]$$

一方、楕円軌道の長径比で表示されるティティウス・ボーデ法則  $\xi_{SOLAR}$  は  $\xi$  と同一関数形である。

$$\xi_{SOLAR} = 0.4 + 0.3 \times 2^n = 0.4 + (1 - 0.4) \times 2^{n-1} \quad (\text{地球が } n=1)$$

ここで  $\delta = \pm 1$  は軌道回転方向に関わるものである。中心核星の回転方向と惑星軌道の回転方向が同じ場合  $\delta = +1$  であるので、ティティウス・ボーデ法則と一致し、法則が証明される。

なお、 $\delta = -1$  のように一部の太陽系外惑星には中心核星と逆回転方向の惑星系が理論的に存在する。

1) 犬山文孝 日本惑星科学会 2019 年秋季講演会予稿集 P105、web「犬山文孝」で検索

土星のリングは最大31個（含むメインリング最大9個）

犬山 文孝 元九州電力(株) 火力部

一般相対性理論のアインシュタイン方程式の厳密解であるカー・ニューマン解(1965年発見)  $ds^2 = -\frac{R^2 \Delta}{\rho^2} (dt - a \sin^2 \theta d\phi)^2 + \frac{\rho^2}{R^2 \Delta} dr^2 + \rho^2 d\theta^2 + \frac{R^4 \sin^2 \theta}{\rho^2} (d\phi - \frac{a}{R^2} dt)^2$  によって中心核星回転の遅い時空場のエネルギー方程式  $E = \frac{1}{\sqrt{1-2\epsilon}} = \Gamma(\rho, \theta, \phi, t, -m, a, e)$ ,  $\frac{1}{r^2} = \left(\frac{ds}{cdt}\right)^2$  を算出する。そして変分原理とエネルギー  $\epsilon$  最小原理に基づいて、宇宙の成熟回転惑星系等の配列に関する次の微分方程式が導出された<sup>1)</sup>。微分方程式の判別式に従って安定惑星軌道の配列および土星リングの個数はカー・ニューマン解によって初めて理論解明できる。

$$dS/dR = 2e^2(e^2 + 2m^2)/SR + (4a\delta m + S)/R + 6a\delta m S^2/R^5 \quad S = R\sqrt{2\epsilon R^2 + 2mR + e^2}$$

$m, e, a$  は中心核星の質量・電荷・回転要素,  $\delta = \pm 1$  (中心核星の回転方向)  $\theta = 3S_0^2/2R_0^4$

土星の自転は速く、判別式  $\Delta = E^4 - 2a^2 m^2(1+\theta)^2 < 0$  として微分方程式を解く。  $E^4 = e^2(e^2 + 2m^2)$

$$K = \log \left[ \frac{\frac{S^2 + 4a\delta m S(1+\theta) + 2E^4}{R^2}}{\left[ \frac{S + 2a\delta m(1+\theta) - \sqrt{4a^2 m^2(1+\theta)^2 - 2E^4}}{S + 2a\delta m(1+\theta) + \sqrt{4a^2 m^2(1+\theta)^2 - 2E^4}} \right]^{\frac{2a\delta m(1+\theta)}{\sqrt{4a^2 m^2(1+\theta)^2 - 2E^4}}}} \right]$$

分母  $\left[ \frac{S + 2a\delta m(1+\theta) - \sqrt{4a^2 m^2(1+\theta)^2 - 2E^4}}{S + 2a\delta m(1+\theta) + \sqrt{4a^2 m^2(1+\theta)^2 - 2E^4}} \right]^{\frac{2a\delta m(1+\theta)}{\sqrt{4a^2 m^2(1+\theta)^2 - 2E^4}}}$  を級数展開し  $(1-\lambda)$  で表す。  $\lambda$  は非常に小さい ( $\neq 0$ )。

$$K = \frac{S^2 + 4a\delta m S(1+\theta) + 2E^4}{r^2} \cdot \frac{1}{(1-\lambda)}$$

積分定数  $K$  は全てのリングについて共通であり、基準リングを  $r_1$ 、基準の  $K$  を  $F$  とすると  $S$  の多項式になる。

$$S^4 - 2S^2[F(1-\lambda)r^2 - 2E^4 + 8a^2 m^2(1+\theta)^2] + [F(1-\lambda)r^2 - 2E^4]^2 = 0$$

エネルギー  $\epsilon$  極小軌道の条件から導かれる  $S, \theta$  を  $P(r), Q(r)$  に整理して 軌道半径  $r$  の多項式で表す。

$$Qr^2 (Pr^2 - Q[F(1-\lambda)r^2 - 2E^4])^2 - 4a^2 m^2 P(2Qr^2 + 5P)^2 = 0$$

$$P = -mr^2/2 [r^4(r^2 - 8mr + 4e^2 + 12m^2)^2 - 4a^2(2mr + e^2)(2r^2 + 2mr - e^2 - 12m^2)^2] + (2mr + e^2) \times Q \quad [10 \text{ 次式}]$$

$$Q = r^5(r^2 - 8mr + 4e^2 + 12m^2)(r^2 - 6mr + 4e^2 + 8m^2) \quad [9 \text{ 次式}]$$

$$-4a^2(2mr + e^2)(2r^2 + 2mr - e^2 - 12m^2)(3mr^2 - 2e^2r - 6m^2r + 7me^2) - 2a^2mr^2(2r^2 + 2mr - e^2 - 12m^2)^2$$

上式は、第1項  $Qr^2 P^2 r^4$  の次数が最も高く  $r$  の 35  $[9+2+10 \times 2+4]$  乗の多項式であるので、35個の根があるが、大きな係数  $F \sim nr_1$  に関わり微小解4個を除くとリングは最大31個存在する。更に  $F^2$  に関わり微小解・遠方解の項を省略すると  $Q \sim 0$ 。この結果、メインリングは最大9個である。  
( $r$  の複素数根・マイナス根・重根、中心核星の膨らみによって、実際の有効な  $r$  のプラス根は減る)  
なお、 $\delta = \pm 1$  はリング回転方向に関わるものである。 $\lambda$  及び  $F$  は  $\delta = \pm 1$  を含んでいるので、 $\delta = -1$  つまり中心核星の回転方向と逆回転リングのリング星が存在することを意味する。

1) 犬山文孝 日本惑星科学会 2019年秋季講演会予稿集 P105、web「犬山文孝」で検索

## 国際共同ミッションとしての月地震観測ネットワーク構築フィジビリティースタディー

○田中智<sup>1</sup>, 川村太一<sup>2</sup>, 新谷昌人<sup>3</sup>, 辻健<sup>4</sup>, 小野寺圭祐<sup>3</sup>,  
(<sup>1</sup>宇宙研, <sup>2</sup>フランス地球物理研究所, <sup>3</sup>東大地震研, <sup>4</sup>東大工)

月震観測による内部構造探査は 1970 年代に遂行されたアポロミッションにて約 6 年間のデータが収集された。解析は今でも続行されているが月震の規模の小さいことや強い散乱特性が原因で解析が困難であり、一次元的な速度構造においても未だ不確実性が大きい。月震ネットワーク観測は宇宙科学研究所に固体惑星分野が創設されて以来の積年の夢であり、これまでいくつかのミッション提案が繰り返されてきたが実現には至っていない。

近年の月惑星探査は中国の探査機が着陸機を成功させ、我が国においても月着陸実証機 SLIM が打ち上げを控えているなど直接探査へシフトしている。現在、国際共同探査のフレームワークで月探査計画が進められており、重要なサイエンス課題の一つとして地震観測による内部構造探査が位置付けられた。我々は将来の月震観測ネットワーク構築を目指し最初のステップとして無人着陸機による月震観測システムのフィジビリティースタディ(FS)を開始した。基本的には過去に検討した SELENE-2 や InSight ミッションと同様に観測装置をアームなどで着陸機近傍に観測システム(パッケージ)を設置する構想である。

これと同様の検討や地震観測ミッションは我が国だけでなく諸外国のミッションでも進められており、例えば米国では Farside ミッションで InSight がミッションも搭載実績のある広帯域地震計(VBB)の搭載検討が進められている。他国とのミッションの実施時期や成功率において競争的な面もあるが、相互協力を実現することで地震観測ネットワークを効率的に構築することが可能となる。この場合、同時観測が求められるために運用時期や観測時期などの点で協調する努力が望まれる。

月地震観測の際にキーポイントとなるのは地震計の感度や周波数帯域の課題である。InSight で搭載した VBB では火星の地震を十分な S/N で観測することに成功したが、月地震は火星のそれに比べても小さく散乱も大きいことからさらに広帯域での性能が望まれる。これらの点をふまえ、新たなセンシング技術を導入した地震計の開発が我が国でも進められており試験的に着陸機に搭載することも検討している。

今回の機会ではこれまで蓄積してきた技術開発の成果、月地震学の科学的成果、さらに最新の地震観測技術を踏まえた上で最大の科学成果を実現するシステムを検討している。本講演では現在考えているシステムとその特徴、期待されるサイエンスについて報告する。

## PB-40

### Hera 搭載赤外分光カメラ TIRI の地上校正試験

#### Radiometric calibration for thermal infrared imager TIRI onboard Hera mission

坂谷尚哉<sup>1</sup>, 岡田達明<sup>1</sup>, 田中智<sup>1</sup>, 千秋博紀<sup>2</sup>, 荒井武彦<sup>3</sup>, 出村裕英<sup>4</sup>, 寫生有理<sup>1</sup>,  
関口朋彦<sup>5</sup>, 石崎拓也<sup>1</sup>, 金丸仁明<sup>6</sup>, 神山徹<sup>7</sup>

<sup>1</sup>JAXA 宇宙科学研究所, <sup>2</sup>千葉工業大学, <sup>3</sup>前橋工科大学, <sup>4</sup>会津大学, <sup>5</sup>北海道教育大学,  
<sup>6</sup>東京大学, <sup>7</sup>産業技術総合研究所

Hera ミッションは ESA が計画している S 型小惑星 Didymos およびその衛星 Dimorphos の探査ミッションであり、2024 年後半に打ち上げが計画されている。JAXA は Hera に対して、はやぶさ 2 中間赤外カメラ TIR をベースとした赤外分光カメラ TIRI を提供する予定である。TIRI は検出器として 1024 x 768 pix のボロメータアレイを用いて、視野角 13.3 x 10.0 度の視野角、および 7-14  $\mu\text{m}$  の波長域でのマルチバンド撮像を行う。はやぶさ 2 TIR 同様の小惑星の熱慣性の推定および表面状態の把握に加えて、分光撮像による物質的な情報を得る。現在 TIRI はエンジニアリングモデル (EM) の開発中であり、その中で 2022 年 8 月初旬に (機能・性能が一部制限された状態ではあったが) 地上校正試験を実施した。今回行った地上校正試験での主要な評価項目は以下であり、地上校正試験で取得されたデータとこれらの解析結果について報告する。

- (1) 被写体熱放射に対する感度
- (2) 感度のピクセル毎の分布 (感度ムラ)
- (3) 面積効果 (被写体の大きさによる出力値の変動効果)
- (4) 歪曲
- (5) 機器温度依存性



地上校正試験の様子。左がターゲットとして用いた赤外コリメータ、右が真空チャンバ内に設置された TIRI EM である。

## M型矮星ハビタブルゾーン内に存在する GJ832c は水素大気を持つか

○長野剛流<sup>1</sup>, 吉田辰哉<sup>2</sup>, 倉本圭<sup>1</sup><sup>1</sup>北海道大学,<sup>2</sup>東北大学

近年 M 型矮星のハビタブルゾーン内を周回するスーパーアースが相次いで発見されている。しかしながら、これらのスーパーアースが地球同様の表層環境を持つかは自明ではない。表層環境の状態を決定する重要な要素に、大気散逸の効果が挙げられる。スーパーアースは惑星形成時に円盤ガスの重力的捕獲により大量の水素主体大気を獲得し、分厚い大気に覆われた灼熱の惑星となる可能性が指摘されている。一方で、主星の前主系列期に強烈な恒星 XUV 放射による流体力学的大気散逸が促進され、獲得した大気が全て散逸してしまう可能性もある。M 型矮星 GJ832 のハビタブルゾーン内を周回するスーパーアースである GJ832c は、主星の XUV スペクトルが観測され、また地球から比較的近距离にあることから、将来の直接撮像観測の対象として期待されている。GJ832 は質量  $0.45 \pm 0.05 M_{\odot}$ 、GJ832c は半径  $> 1.7 \pm 0.5 R_{\oplus}$ 、質量  $> 5.40 \pm 0.95 M_{\oplus}$ 、公転半径  $0.163 \pm 0.06$  au である。本研究では、Yoshida and Kuramoto (2021) によって開発された 1 次元流体力学的散逸モデルを用い、GJ832c から失われる大気量を調べた。

本計算で用いる 1 次元流体力学的散逸モデルは、XUV 放射伝達、光化学反応、放射冷却過程を考慮した球対称多成分 1 次元流体方程式を時間積分し、与えた XUV フラックスに応じて定常流を求めるものである。今回、大気組成は  $H_2$  及びその光化学生成物である  $H$ 、 $H^+$ 、 $H_2^+$ 、 $H_3^+$  を考慮した。 $H_3^+$  は放射冷却剤として働く。計算において GJ832c の半径と質量は  $1.7 R_{\oplus}$ 、 $5.4 M_{\oplus}$  とした。GJ832 の XUV スペクトルには、観測により得られたスペクトル (Peacock et al., 2019b) を用い、前主系列期の XUV 強度はこのスペクトルの全波長帯を現在の値の 100 倍、200 倍、500 倍にして与えた。

計算の結果、散逸フラックスは概ね XUV 強度に比例し、波長帯ごとに異なる増幅率を仮定した計算でも、波長積分した XUV フラックスの増大率を当てはめると、ほぼ同じ関係に乗った。吸収 XUV エネルギーのうち、散逸流の重力ポテンシャルエネルギーに転換される割合は概ね 20~30 % であり、大気成分の光分解や放射冷却で消費されるエネルギーは無視できない。XUV 強度が 100 倍、200 倍、500 倍の場合に GJ832 に予想される強 XUV 継続期間の 10 億年間で失われる水素量はそれぞれ  $1.38 \times 10^{23}$  kg、 $2.57 \times 10^{23}$  kg、 $5.64 \times 10^{23}$  kg であった。 $5 M_{\oplus}$  の惑星は、惑星形成の段階において  $2.60 \times 10^{22}$  kg~ $1.62 \times 10^{25}$  kg の水素を獲得すると考えられており (Lammer et al., 2014)、惑星が形成期に獲得する水素が  $10^{23}$  kg のオーダー以下の場合には水素が全て散逸してしまうこともあり得る。一方で、GJ832c が暴走温室状態にある初期 1 億年間では水素大気が完全には散逸しない。そのため、仮に大気中に  $H_2O$  が含まれていた場合、暴走温室状態の終了時に  $H_2O$  を含む水素大気が残存する可能性がある。上記の計算では考慮していない水蒸気およびその光分解生成物による放射冷却を考慮すると、暴走温室期の散逸フラックスはさらに低下する可能性もある。したがって、初期の大気量や XUV 強度によっては、GJ832c が海を保有する可能性は十分にあると考えられる。