

日本惑星科学会 2025 年秋季講演会
プログラム+予稿集

2025 年 9 月 3 日-5 日

東京大学駒場 I キャンパス 21KOMCEE

日本惑星科学会 賛助会員

NV5 Geospatial 株式会社

株式会社ノビテック

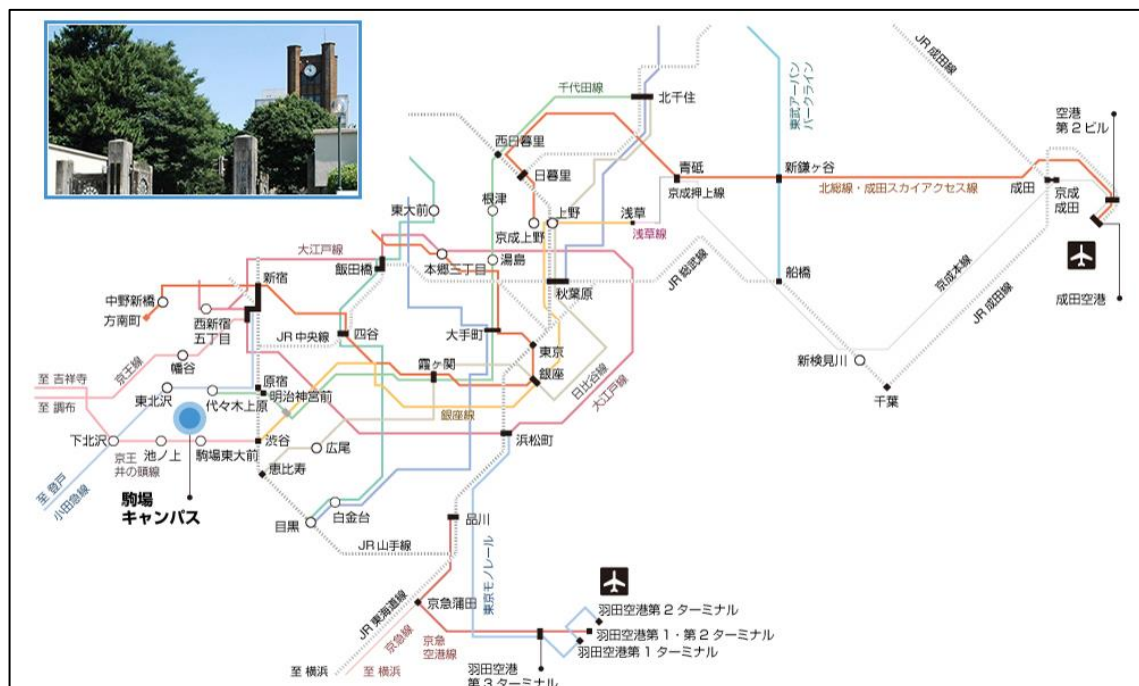
講演会場へのアクセス

会場：

〒153-0041 東京都目黒区駒場 3 丁目 8 - 1

東京大学 駒場 I キャンパス 21KOMCEE

キャンパスへのアクセス



キャンパス内マップ

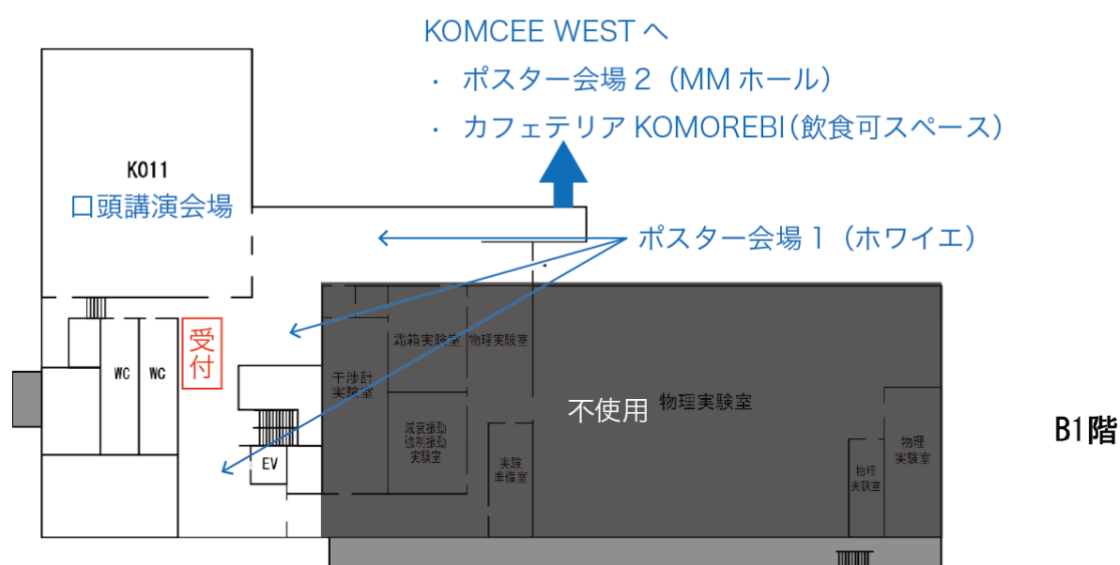
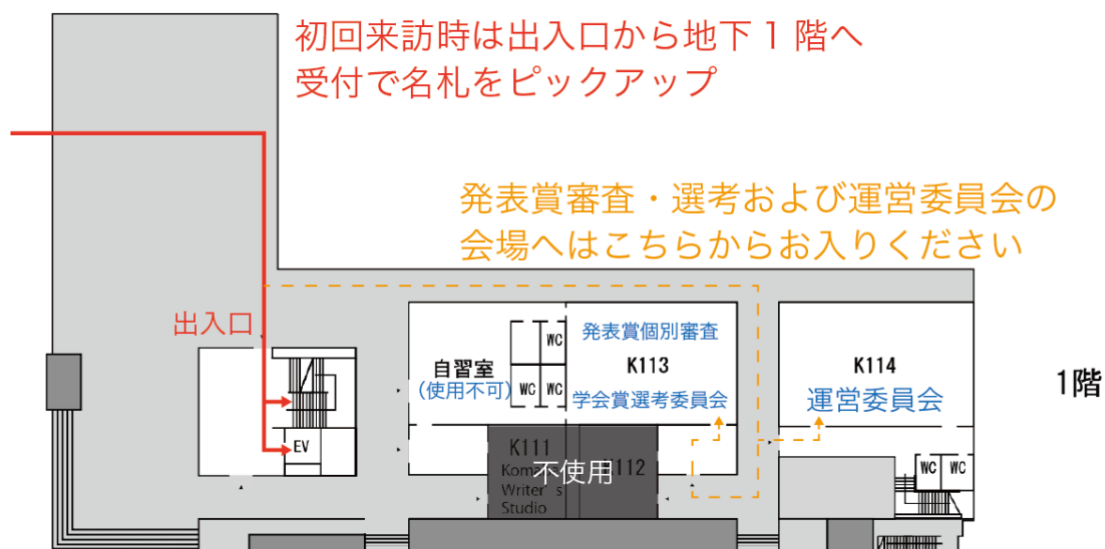


21KOMCEE EAST 外観



会場内マップ

KOMCEE EAST

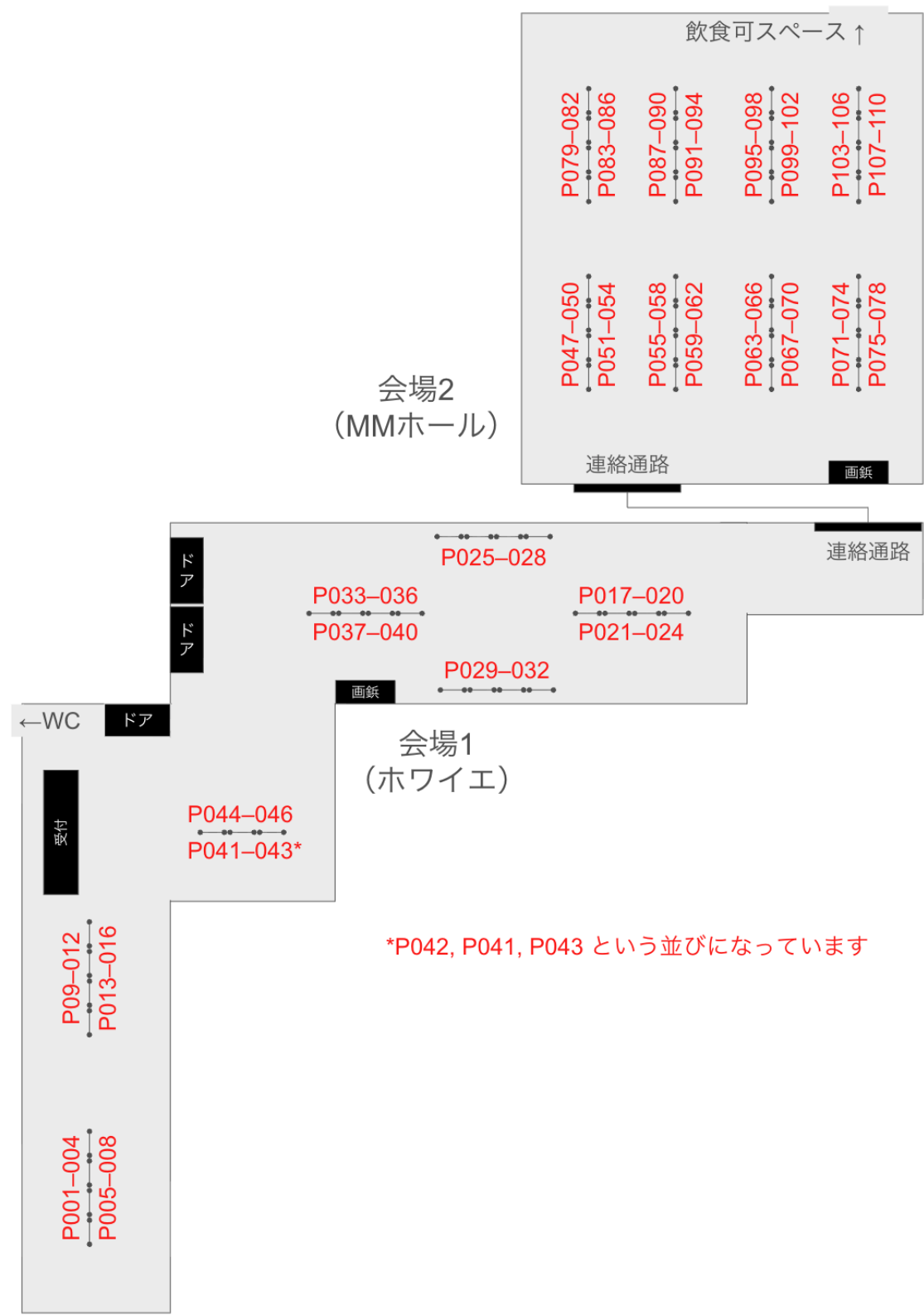


KOMCEE WEST



* 秋季講演会参加者専用ではありません

ポスター配置図



参加の手引き

すべての参加者の皆様へ

- 講演会は現地開催（対面開催）です。オンライン配信は行いません。
- 講演会・懇親会ともに事前の登録と参加費の納入が必要です。現地での参加登録はできません。
- 講演会では多様な価値観・個性・プライバシーを尊重した科学的な議論をお願いします。人格を軽視するハラスメント行為は認めません。
- 講演会の円滑な運営のため、座長や LOC の指示には速やかに従ってください。
- 初回の来場の際、受付にて名札を受けとってください。会場（KOMCEE）内では、常に名札をつけてください。最後に会場を去る際、名札は受付にてご返却をお願いいたします。
- 参加者多数につき、口頭講演会場（KOMCEE East 地下 1 階 K011）での講演の様子を投影するサテライト会場(KOMCEE East 2 階 K211)を用意しています。サテライト会場からは質問ができませんので、ご自身の参加形態に合わせて適宜会場を選択してください。
- 総会はサテライト会場へと配信いたしませんので、出席者は口頭講演会場にお集まりください。
- 口頭講演への質問の際には、挙手をしてお待ち下さい。座長に指名をされたら、マイク係からマイクを受け取って質問をしてください。質問時間は限られているため、必ず質問ができるとは限りません。休憩時間での議論もご活用ください。
- 講演内容の写真・動画撮影、音声録音をすることは原則として禁止します。ただし、発表者をご自身の発表の記録を取る場合はこの限りではありません。
- 会期中、フリースペース会場（KOMCEE East 2 階 212）を自由にお使いいただけます。
- 口頭講演会場・サテライト会場・フリースペース会場内は飲食禁止（ペットボトル等蓋のついた容器による水分補給は可）です。
- ゴミは原則として各自でお持ち帰りいただきます。
- 会場にてインターネット接続環境が必要の方は各自でご用意下さい。Eduroam の使用が可能です。通信速度は保証されません。
- ご不明点などございましたら aloc@wakusei.jp までご連絡ください。

講演者の方へ

口頭発表

- 通常講演は発表 8 分+質疑 2 分の計 10 分、発表賞審査対象の講演は 12 分+3 分の計 15 分です。
- 上記の質疑時間には発表者交代に要する時間（30 秒程度）を含みます。
- 自分の講演の 2 つ前の質疑応答が始まりましたら、会場前方の待機席においでください。
- 講演開始後、通常の講演では第一鈴を 6 分、第二鈴を 8 分、第三鈴を 9 分 30 秒に鳴らします。最優秀発表賞選考特別セッションの講演では第一鈴を 10 分、第二鈴を 12 分、第三鈴を 14 分 30 秒に鳴らします。第二鈴にて直ちに発表を終了してください。第三鈴にて質疑も直ちに打ち切ります。プログラムがタイトなため講演時間枠の厳守をお願いいたします。
- 講演中に何らかのトラブルがあっても、原則として講演時間は延長しません。
- 接続は HDMI です。必要なアダプターは各自でご用意ください。
- 休憩時間に接続テストを行うことが可能です。
- 接続トラブルがあった場合、LOC の用意した PC を使って講演スライドを投影いたします。そのため、講演スライドの pdf ファイルを必ず準備しておくよう、お願いいたします。

ポスター発表

- ポスターは A0 縦もしくはそれに収まるサイズでご用意ください。
- 掲示場所はプログラムまたはポスター会場の案内図にてご確認ください。
- ポスターは指定されたポスターボードに画鋲で固定してください。
- ポスターは 1 日目の開場直後から 3 日目の コアタイム終了まで継続して掲示できます。
- ポスターは可能な限り 1 日目のコアタイム（13:00-14:00）までに掲示してください。また、3 日目のコアタイム（13:10-14:10）終了時に撤去してください。この時刻を過ぎて掲示されているポスターは LOC にて撤去、廃棄します。
- コアタイム以外の時間でも開場中の議論は自由に行っていただけます。

全体スケジュール

9月3日(水)

8:30-9:00	開場, 受付
9:00-11:45	最優秀発表賞選考特別セッション
11:45-13:00	昼食
13:00-14:00	ポスターコアタイム
14:00-15:00	火星とその衛星
15:10-16:20	火星とその衛星
16:30-17:30	月
17:40-18:30	月

9月4日(木)

8:30-9:00	開場, 受付
9:00-9:50	衝突現象
10:00-10:40	衝突現象
10:50-12:00	小惑星・小天体・彗星
12:00-13:00	昼食
13:00-14:00	ポスターコアタイム
14:00-15:00	小惑星・小天体・彗星
15:10-15:50	惑星の形成と進化 / 原始惑星系円盤
16:00-17:00	総会
17:00-17:40	最優秀研究者賞受賞記念講演
18:00-	懇親会

9月5日(金)

8:30-9:00	開場, 受付
9:00-10:00	惑星の形成と進化 / 原始惑星系円盤
10:10-11:00	惑星の形成と進化 / 原始惑星系円盤
11:10-12:10	巨大惑星とその衛星
12:10-13:10	昼食
13:10-14:10	ポスターコアタイム
14:10-15:00	惑星大気・表層環境
15:10-16:20	系外惑星
16:30-17:50	機器開発・将来計画

9月3日(水) 午前

最優秀発表賞選考特別セッション			座長:瀧川 晶
講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
SA-01	9:00	炭谷 拓真	層構造コンドロールの局所酸素同位体分析から探るCV隕石母天体の集積史
SA-02	9:15	篠原 直生	月の地下空洞内における水分子残存の温度条件 :熱脱離を考慮した三次元モデル解析
SA-03	9:30	宮山 隆志	3次元流体計算と化学反応シミュレーションで迫る隕石降着による惑星大気の非平衡進化
SA-04	9:45	所司 歩夢	へびつかい座分子雲に位置する原始惑星系円盤の超解像度サーベイ II: ダスト円盤半径の統計的解析および詳細構造の形成時期に関する考察
SA-05	10:00	神原 祐樹	微惑星リングにおける原始惑星の寡占的成長II
	休憩		
SA-06	10:30	日向 輝	その場年代K-Ar計測装置によるアマゾン代火星隕石の測定: 火星の年代モデル制約の可能性
SA-07	10:45	河合 優悟	円盤移動で形成されたホットジュピターの同定
SA-08	11:00	北出 直也	原始惑星系円盤におけるミリ波連続波・ミリ波偏光を想定した平行平板の輻射輸送数値解
SA-09	11:15	谷口 啓悟	潮汐固定惑星の大気崩壊とハビタビリティ・気候進化への示唆
SA-10	11:30	近藤 克	円盤温度・密度進化と原始惑星進化を繋いだ太陽系地球型惑星形成過程の統一的な理解

9月3日(水) 午後

火星とその衛星			座長:吉田 辰哉, 松岡 亮
講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OA-01	14:00	倉本 圭	火星衛星探査計画MMX:2026年打ち上げへ向けた最新状況
OA-02	14:10	田中 大基	火星衛星探査計画 MMX 搭載ミッション機器に関するシステム総合試験の進捗と課題について
OA-03	14:20	中原 俊平	Hera探査機のAFCカメラによる火星フライバイでのダイモス観測
OA-04	14:30	松岡 亮	赤道面軌道にある火星衛星の捕獲起源シナリオ
OA-05	14:40	Zhou Wenhan	Removal of Phobo’s formation ring by the Eclipse-Yarkovsky effect
OA-06	14:50	内田 雄揮	クレーター分布の経度方向に対する非一様性から示唆されるフォボスの表面更新と公転様式の共進化
	休憩		
OA-07	15:10	山崎 奏次郎	火星マグマオーシャン結晶化モデルから制約する火星マントル深部でのCaペロプスカイト集積層存在の示唆
OA-08	15:20	中村 勇貴	継続的な太陽高エネルギー粒子の降り込みによる初期火星大気中でのホルムアルデヒド生成
OA-09	15:30	吉田 辰哉	二酸化炭素の光分解とオゾンの生成に伴う火星大気酸素同位体分別
OA-10	15:40	竹田 有汰	火星大気ネオン同位体比その場測定のための小型質量分析システム開発
OA-11	15:50	乙部 直人	火星表面の気象観測とそのための気象測器
OA-12	16:00	Salgado Willian	火星の全球ダストストームにおける Halite (NaCl) の酸化
OA-13	16:10	Wang Chang-Chin	Thermochemical Modeling Perspective of the Distribution of Ca/Fe Carbonates on Mars

月			座長:菊地 紘, 大竹 真紀子
講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OB-01	16:30	大竹 真紀子	SLIM搭載MBC観測による月面岩石の組織観察
OB-02	16:40	神田 恵太郎	月表層進化の解明:Chang’E-4 Lunar Penetrating Radarによる月地下岩石サイズ-頻度分布計測
OB-03	16:50	山下 光葉	月の巨大衝突構造掘削物の組成解析による初期火成活動史の復元
OB-04	17:00	佐伯 和人	月永久影領域におけるレゴリス層内の水分子の挙動再現シミュレーション
OB-05	17:10	橋爪 光	月面極域水の濃集過程
OB-06	17:20	ブラート アルヴィン	水素含有率を制御した月レゴリス模擬物質の開発
	休憩		
OB-07	17:40	石原 吉明	月極域探査(LUPEX)の観測運用 --着陸地点候補(CR-1)領域の探査領域候補の再選定--
OB-08	17:50	竹村 知洋	月表層の起伏がTHz帯の偏波観測に及ぼす影響の数値的解析
OB-09	18:00	清末 雅人	模擬月面環境下における月レゴリスからのFe抽出実験
OB-10	18:10	牧野 有里子	宇宙環境を想定したレゴリスの水分測定における空隙率の影響評価
OB-11	18:20	林 悟	近赤外分光カメラによる月隕石(NWA13951, Bechar006)の計測

9月4日(木) 午前

衝突現象			座長:黒澤 耕介, 岡本 尚也
講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OC-01	9:00	黒澤 耕介	天体衝突による炭素質小惑星の内部損傷
OC-02	9:10	中澤 淳一郎	超高速衝突に伴う非平衡プラズマ過程の再現とその応用: 惑星探査における物質分析への示唆
OC-03	9:20	木村 宏	ダストの機械特性に関する理論的研究: イジェクタ・クラウド形成モデルの構築へ向けて
OC-04	9:30	山本 大晟	玄武岩標的への斜め衝突による線状の高速度エジェクタ:衝突角度による変化
OC-05	9:40	澤 みゆう	金星クレーターにおけるエジェクタ堆積地形に対する大気の影響:大気中での高速度斜め衝突実験
	休憩		
OC-06	10:00	菊川 涼介	内海を持つ氷衛星上の貫通クレーター形成メカニズムに関する実験的研究
OC-07	10:10	林 沙樹	分化した微惑星の衝突破壊に対する溶融した金属コアの影響
OC-08	10:20	生駒 杏	クレーター形成における衝突体の混合過程と可視化・定量評価に基づく表層進化の実験的研究
OC-09	10:30	柿木 玲亜	クレーター形態から推測する固体天体内部強度:層構造標的のクレータースケーリング則の表面強度依存性

小惑星・小天体・彗星			座長:道上 達広, 大野 宗祐
講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OD-01	10:50	宮村 尚典	高速自転コマ型小惑星上における非対称クレーター地形の形成シミュレーション
OD-02	11:00	愛敬 雄太	小惑星リュウグウにおける岩塊表面の小クレーター解析に基づく岩塊表面年代と表面更新プロセスの推定
OD-03	11:10	森田 朋代	はやぶさ2複数機器観測データから示唆されるRyugu表層物質進化の多様性
OD-04	11:20	櫻井 哲志	空隙率と内部構造が多孔質ガラス焼結体の熱・弾性特性に及ぼす影響:リュウグウボルダールの空隙率再検討
OD-05	11:30	道上 達広	小惑星ボルダールの空間分布の統計モデルと小惑星エロス、イトカワ、リュウグウへの応用
OD-06	11:40	清水 雄太	自動識別法による小天体表層および帰還サンプルにおける岩石粒子の粒径・形状の解析
OD-07	11:50	磯邊 優奈	小天体の表層進化過程解明に向けた粒子形状の効果に関する実験的・数値的検討

9月4日(木) 午後

小惑星・小天体・彗星			座長:道上 達広, 大野 宗祐
講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OD-08	14:00	ソフィア リカフィカ パトリック	セドナ型新天体「Ammonite」の発見と軌道ダイナミクス:太陽系外縁部への力学的窓
OD-09	14:10	大野 宗祐	炭素質小天体の地球近傍での潮汐破壊やリング形成に伴う生命材料物質の地球への供給
OD-10	14:20	天野 香菜	炭素質隕石および小惑星回収試料中の鉄の酸化還元状態
OD-11	14:30	高橋 茂	ミリ波観測と熱放射モデルによる 1 Ceres 表層下熱放射と複素誘電率の推定
OD-12	14:40	坂谷 尚哉	次世代小天体サンプルリターン計画で目指す小天体内部構造探査戦略
OD-13	14:50	萩原 万里奈	GEMS模擬物質の結晶化実験による彗星スペクトルの再解釈

惑星の形成と進化 / 原始惑星系円盤			座長:城野 信一
講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OE-01	15:10	内海 秀介	弾性体SPH法の新しい定式化:ばね相互作用を用いた応力テンソルの再現
OE-02	15:20	國友 正信	最新の太陽モデルによる原始太陽系組成の改訂
OE-03	15:30	渡邊 誠一郎	太陽系の同位体分布を説明する惑星形成論
OE-04	15:40	市川 修次	原始太陽系円盤のダストおよび難揮発性凝縮物の輸送および微惑星形成が導くCr-Ti同位体二分性の形成

16:00 総会

最優秀研究者賞受賞記念講演			座長:百瀬 宗武
講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
SB-01	17:00	大野 和正	系外惑星大気における雲・ヘイズ形成過程の探究と惑星形成制約への展望

9月5日(金) 午前

惑星の形成と進化 / 原始惑星系円盤			座長:野津 翔太, 國友 正信
講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OE-05	9:00	篠田 兼伍	超新星爆発によるダスト形成の網羅的なパラメータ調査
OE-06	9:10	一村 亮太	炭素同位体異性体比から探る 複雑な有機分子の生成過程
OE-07	9:20	大山 航	後期星間ガス降着は中心星に到達するか?: 円盤内の質量損失VS角運動量輸送
OE-08	9:30	石崎 梨理	粘性進化する円盤におけるダストの酸素同位体組成進化
OE-09	9:40	城野 信一	コンドリュールの形成時間と浮遊時間から探る微惑星サイズとガス円盤の散逸時間
OE-10	9:50	加藤 遼	原始惑星系円盤内側の熱的不安定性と微惑星形成
	休憩		
OE-11	10:10	折原 龍太	原始惑星系円盤の影から探る円盤幾何構造とダストの性質
OE-12	10:20	吉田 有宏	アルマ望遠鏡による時間領域天文学が明らかにした惑星系形成領域の重力不安定性
OE-13	10:30	小林 浩	微惑星帯での衝突カスケードが形成するデブリ円盤におけるシリケートフィーチャー
OE-14	10:40	野津 翔太	PRIMA と GREX-PLUS のシナジー - 原始惑星系円盤の水輝線プロファイル観測
OE-15	10:50	荻原 正博	スーパーアース系の平均運動共鳴形成とその不安定化シナリオ

巨大惑星とその衛星			座長:芝池 諭人, 小林 浩
講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OF-01	11:10	波々伯部 広隆	周惑星円盤への物質供給の解像度依存性と周惑星円盤半径の評価
OF-02	11:20	芝池 諭人	ペブル集積の証拠となりうるカリストの部分分化
OF-03	11:30	鳥居 尚也	小天体の潮汐破壊による土星リング形成: 破壊後のデブリ長期進化のN体シミュレーション
OF-04	11:40	毛呂 彰吾	天王星のリング粒子の熱応力による破壊
OF-05	11:50	水沼 卓也	エンセラダス南極域ブリュームの再堆積によるクレーター消失の評価
OF-06	12:00	土屋 史紀	Hisaki衛星によって観測された衛星イオ大気からのMass loss過程

9月5日(金) 午後

惑星大気・表層環境			座長:門屋 辰太郎, 遠藤 美朗
講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OG-01	14:10	御子 裕治	隕石の惑星大気進入による気流・熱状態への影響のモデリング
OG-02	14:20	関 華奈子	太陽風条件が水星表層のナトリウムスパッタリング領域に与える影響の研究
OG-03	14:30	遠藤 美朗	太陽型星周りの無生物の地球類似惑星におけるCO暴走大気の形成条件
OG-04	14:40	門屋 辰太郎	全球凍結下での水-岩石反応の可能性と表層環境の影響
OG-05	14:50	小林 憲正	太陽高エネルギー粒子による初期地球・火星大気中での霧生成とそのアストロバイオロジー的意義

系外惑星			座長:田中 佑希, 黒崎 健二
講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OH-01	15:10	鶴山 太智	視線速度長周期トレンドを利用した直接撮像によるM型星周りの伴星探査
OH-02	15:20	清水 颯人	デブリ円盤の非対称空間分布と直接撮像による地球質量系外惑星検出への影響
OH-03	15:30	吉田 海渡	地球型系外惑星の硫黄循環: 大気透過光観測によるハビタビリティ制約可能性
OH-04	15:40	吉川 颯真	M 型星を公転する惑星に適用する大気大循環モデル用放射スキームの構築
OH-05	15:50	ソ チャンウル	マグマと大気の相互作用がスーパーアースおよびサブネプチューンの半径分布に与える影響
OH-06	16:00	西岡 知輝	金星型惑星のイオン散逸に対する高温酸素コロナの影響
OH-07	16:10	稲田 栞里	フォルステライト蒸発生成物解明への挑戦

機器開発・将来計画			座長:寫生 有理, 石崎 拓也
講演番号	開始時刻	発表者	講演タイトル
OI-01	16:30	塩谷 圭吾	Habitable Worlds Observatory (HWO): プロジェクトおよび日本の参画の計画概要
OI-02	16:40	荒井 朋子	深宇宙探査技術実証機DESTINY+プロジェクトの現状
OI-03	16:50	寫生 有理	次世代小天体サンプルリターンミッションの科学検討状況報告
OI-04	17:00	熊本 篤志	次世代小天体サンプルリターンミッション - 彗星核内部探査バイスタティックレーダ用広帯域アンテナの検討
OI-05	17:10	石崎 拓也	惑星物質固体物性コンソーシアムの提案
OI-06	17:20	岡田 達明	Hera搭載熱赤外カメラの軌道上実証: 地球月系・火星系観測
OI-07	17:30	秦野 裕輝	深宇宙探査における光学観測カメラの性能評価
OI-08	17:40	臼井 寛裕	火星着陸探査ミッションに向けた理学検討

ポスター講演 P-001-P057

ポスターコアタイム:9月3日 13:00-14:00, 9月4日 13:00-14:00, 9月5日 13:10-14:10

講演番号	発表者	講演タイトル
P-001	野口 里奈	環状ルートレスコーンクラスターのアナログ実験
P-002	ビジョイ ヒラル	クレーターの充填タイプを氷の蓄積と昇華の指標として用いて火星の氷床を推定する
P-003	小林 正規	火星周辺ダスト環境の再評価:新たな観測結果とMMX/CMDMへの期待
P-004	田畑 陽久	火星大気由来の酸素イオン照射がフォボス表面物質に与える影響
P-005	石山 謙	月の多重リング盆地周辺における応力場分布
P-006	小野寺 圭祐	Chandrayaan-3で取得された月震データの解析:ノイズレベルの評価と自然月震候補シグナルの解釈
P-007	池田 あやめ	月の中央丘における岩塊形状のちがひ:斜長岩・マフィック鉱物支配領域での比較
P-008	豊川 広晴	月の火砕丘のアナログサイトにおける3次元ハイパースペクトルデータ解析
P-009	青木 翼	地上望遠鏡観測と LRO データベースを用いた月面衝突閃光と形成クレーターに関する研究
P-010	戸井田 愛理	室内実験にもとづく月面誘電率の鉄チタン濃度依存性の再検証
P-011	藤田 盛之介	嫦娥5号 月レゴリス試料の鉱物組成
P-012	木下 真一	SELENE/TCデータを用いた月極域10mモザイクマップの作成検討
P-013	村上 真也	SLIMマルチバンド分光カメラPDS4アーカイブの設計と実装
P-014	押上 祥子	TSUKIMI観測シミュレータの開発
P-015	横田 康弘	SLIM搭載MBCにおける可動ミラー経由の視線方向計算法
P-016	松原 光佑	高速度衝突実験におけるエジェクタ形状分布の二次標的を用いた解析
P-017	山口 祐香理	岩石からの高速度衝突エジェクタ特性:歪み速度依存性に関する初期成果報告2
P-018	門野 敏彦	液体標的への衝突によって発生する放出物と液滴の形成
P-019	大橋 拓磨	ロードセルを用いたクレーター形成過程の観測;エジェクタカーテンの運動量の見積り、疑似重力の推定
P-020	野口 琴海	氷岩石混合物からなる多孔質天体上のクレーター形成に関する実験的研究
P-021	神取 知広	加熱を経た模擬小惑星表層に対するクレーター形成実験
P-022	大西 彩華	多孔質小惑星の斜め衝突における角運動量輸送効率の標的強度依存性
P-023	崎村 達也	熱進化した層構造を持つ氷微惑星の衝突破壊に関する実験的研究
P-024	西尾 峻人	小規模破壊衝突による小惑星の速度変化
P-025	藤原 大揮	土星リング粒子の衝突過程における微粒子放出のシミュレーション
P-026	豊田 優佳里	氷球の低速度斜め衝突実験:法線方向の反発係数および接線方向の反発係数の衝突速度依存性
P-027	奥田 尚	内部発熱により駆動される温度依存高粘性流体の熱対流の対流構造と表面の可動性
P-028	田井東 大貴	応力履歴依存レオロジーをもつマントル対流数値シミュレーションで得られるリソスフェアの変形様式の解析
P-029	石田 世実	はやぶさ2複数機器データから探る小惑星Ryugu表層のボルダーの特性
P-030	荒井 武彦	小惑星探査機はやぶさ2搭載中間赤外カメラTIRの高次処理データ「リュウグウ表層の熱慣性マップ」の構築
P-031	長井 雄一郎	JAXA ASTEROID DATA EXPLORER 2 (JADE2)を使ったはやぶさ2データの利用
P-032	古川 聡一朗	C型小惑星表層における太陽紫外線風化の模擬と炭素質コンドライトの分光応答
P-033	土井 知也	3.8 mせいめい望遠鏡によるはやぶさ2拡張ミッション (はやぶさ2#) ターゲット小惑星Torifuneの3色同時測光観測結果と今後の観測計画
P-034	千秋 博紀	熱赤外カメラによる小天体フライバイ観測
P-035	安藤 太一	Vesta族との天体衝突が小惑星Vestaのクレーター生成に与える影響の定量評価
P-036	野邊 大貴	次世代サンプリング探査天体289P/Blanpainを起源とする「[ま]おう座流星群」の分光観測
P-037	江橋 新	高周波熱プラズマを用いた太陽組成ガスの非平衡凝縮によるGEMS模擬粒子合成
P-038	岸 真瞳	Comet Interceptorの目標選定に向けた彗星のガス昇華の熱収支モデル計算
P-039	山下 音緒	NewHorizons探査機航行支援を目的としたすばる望遠鏡HSCによる太陽系外縁天体の観測結果
P-040	佐藤 勲	世界初の4次元ダストレーン理論による流星予報計算
P-041	長谷川 蒼	VHFアマチュア無線電波を用いた流星ヘッドエコーの研究
P-042	佐藤 澤央	Allende隕石中コンドリュールの3次元形状の成因と組織との関係
P-043	庄子 欲太朗	ナノインデンテーション法を用いたTagish Lake隕石の力学的特性評価
P-044	多門 瞭	周惑星円盤に捕獲された微惑星の軌道進化
P-045	峰平 政志	Cavity進化とペブル集積を考慮した周惑星円盤での衛星形成シナリオ
P-046	村嶋 慶哉	原始天王星の巨大衝突シミュレーション:状態方程式とSPHスキームが円盤特性に与える影響
P-047	溝田 霧斗	リング粒子の集積に伴う土星小型衛星の形状進化
P-048	川上 稜平	ガニメデの熱進化と磁場強度計算による内部構造とバルク組成の推定
P-049	宮井 孝太朗	二次元フーリエ解析を用いたエンセラダスの表面地形解析
P-050	杉山 耕一朗	木星の雲対流層を想定した雲解像モデルの開発～アンモニア水溶液の雲の導入～
P-051	齊藤 大晶	26Al壊変熱駆動下における微惑星内部の揮発性成分保持量と脱ガス時間スケール
P-052	松本 侑士	月形成巨大衝突破片の地球型惑星・月表層への影響評価
P-053	ソフィア リカフィカ パトリック	初期太陽系における惑星の軌道ダイナミクス: (不)安定な惑星たちの歴史
P-054	和田 航汰	Streaming instabilityにおけるダスト衝突の物理:ダストサイズ分布の効果
P-055	岩野 志織	ダスト-ガス2流体計算へのダスト反発係数進化の導入
P-056	渡邊 太一	ソリー法を応用した多成分ダストの合体成長計算アルゴリズム
P-057	野崎 智仁	原始惑星系円盤から周惑星円盤へのガス降着における初期高度と降着位置の関係

ポスター講演 P-058-P-110

ポスターコアタイム:9月3日 13:00-14:00, 9月4日 13:00-14:00, 9月5日 13:10-14:10

講演番号	発表者	講演タイトル
P-058	富永 達佑	磁気降着円盤における巨大惑星による衝撃波加熱
P-059	大城 榛音	高温凝縮物とダストが共存する原始惑星系円盤内でのストリーミング不安定性
P-060	福原 優弥	影から探る原始惑星系円盤の鉛直構造とダスト進化
P-061	所司 歩夢	最も若いトランジット惑星を持つIRAS 04125+2902の遷移円盤に対するALMA高解像度観測
P-062	百瀬 宗武	ジェット・バブル・円盤相互作用の発見:ジェットによる膨張バブルを介した原始惑星系円盤へのフィードバック
P-063	伊藤 蔵人	原始惑星系円盤のガス凝縮に伴う圧力極大の形成と進化
P-064	田崎 亮	空間的に広がった原始惑星系円盤の中間赤外線放射の起源:PAHの性質と寄与
P-065	中澤 風音	原始惑星系円盤の近・中間赤外線散乱光スペクトル: 非晶質珪酸塩への水分子捕獲の影響
P-066	岡本 珠実	原始惑星系円盤ガスのC/O比に対する有機物の熱分解及び光分解の寄与
P-067	清水 静	巨大惑星が励起する複数の渦巻状密度波での衝撃波加熱の解析
P-068	佐藤 祥太	巨大惑星による円盤ギャップと衝撃波加熱の1次元モデル
P-069	鈴木 慧次	巨大惑星との共進化により制約される原始太陽系星雲の円盤面密度
P-070	武市 智樹	巨大惑星の外側移動に伴う氷微惑星の小惑星帯への供給
P-071	中山 陽史	流出モデルの違いによる地球型惑星大気散逸への影響
P-072	黒崎 健二	衝突合体およびすれ違い衝突における大気流出過程
P-073	草野 百合	3次元多成分イオン電磁流体力学シミュレーションによる初期地球における膨張水素大気の影響モデリング
P-074	長谷部 聖憲	微小隕石からの水供給が火星上層大気の水素同位体比構造に与える影響
P-075	坂田 達弥	多流体MHDシミュレーションに基づいた現在火星における炭素・窒素イオンの散逸
P-076	今村 剛	金星雲層内の大気循環
P-077	佐々木 洋平	高速回転する球殻内の非弾性熱対流と木星型惑星大気の表面帯状構造
P-078	中島 健介	遠地で観測された気圧変動からのツングースカイベントの制約: Pekeris 波と水平運動量の寄与
P-079	丹 秀也	熱水実験による玄武岩からの微量金属の溶出濃度推定:地球外海洋でのハビタビリティへの応用
P-080	井上 太陽	二段式軽ガス銃を用いた高速自転小惑星の起源とスペース デブリの物理特性の解明
P-081	塩谷 圭吾	太陽系探査における地球外生命(微生物)検出法の系統的比較研究
P-082	小木 菜々夏	初期地球・火星大気への太陽高エネルギー粒子照射によるペプチド形成過程における含硫アミノ酸の影響評価
P-083	田中 佑希	原始惑星系円盤内での低質量ガス惑星の軌道長半径と離心率進化
P-084	黒川 宏之	大気散逸による系外惑星 Radius Valley 形成の再検討:惑星内部からの脱ガスの影響
P-085	永田 多朗	系外惑星大気中の雲・ヘイズ粒子の放射平衡温度解析と存在可能領域の制限
P-086	松尾 大輝	希釈核をもつ系外巨大ガス惑星の光度進化
P-087	早川 晴	若い系外惑星TOI-560b, cの質量決定に向けたTTV観測
P-088	宇野 航太郎	進化モデル手法とジャイロ年代学手法を用いた、トランジット惑星を持つ恒星の年齢推定の精度向上
P-089	サティアグラハ アサ	系外惑星のオーロラ検出に向けた磁気圏-電離圏結合過程の汎用モデルの開発
P-090	加藤 龍雅	水蒸気大気を持つ系外地球型惑星における大規模散逸大気の検出可能性
P-091	市川 真弓	はやぶさ2データ解析用QGISプラグインの開発
P-092	岡田 達明	Apophis探査計画RAMSESでの熱赤外カメラ観測
P-093	小野寺 圭祐	土星衛星タイタン離着陸探査計画Dragonfly搭載地震計の開発:フライトモデルの製作と極低温下での初期性能評価
P-094	菅原 春菜	火星衛星探査計画MMXの汚染管理方針とその進捗
P-095	菊地 紘	フォボスの画像データの閲覧・検索システムの開発
P-096	岩田 隆浩	月面天文台TSUKUYOMIの観測計画と概念設計
P-097	杉原 悠太	数値シミュレーションを用いた天体地下探査用アンテナの設計
P-098	田中 智	国際宇宙探査に向けた月震観測と人工震源による月面・内部構造探査
P-099	矢田 達	アルテミス計画月南極域帰還試料を想定した低温帰還試料キュレーションの検討
P-100	仲内 悠祐	月惑星表層探査用顕微分光カメラによる揮発性成分検出可能性検証
P-101	柳澤 正久	月地震学のための月面衝突閃光の観測方法
P-102	横田 勝一郎	太陽風イオンを一次イオンビームとする月・小型天体の二次イオン質量分析
P-103	関 宗一郎	CNOイオンを分離・定量可能な小型質量分析器の開発
P-104	田尾 涼	TOF型イオン分析器を用いたイオン種識別手法の開発とComet Interceptor観測条件下での適用評価
P-105	パルトリニ ラボ	バイスタティックレダによる彗星核サウンディングの数値シミュレーション
P-106	土屋 史紀	高精度紫外線宇宙望遠鏡LAPYUTA計画の検討状況
P-107	石橋 高	DESTINY+搭載小惑星追尾望遠カメラ(TCAP)およびマルチバンドカメラ(MCAP)の開発状況
P-108	小林 正規	DESTINY+搭載用ダストアナライザの開発と地上校正計画2025
P-109	岡本 尚也	DESTINY+搭載MCAPカメラEMの地上光学校正試験で得られた知見のPFM試験への反映と試験準備状況
P-110	佐藤 勲	標準天体名表記

層構造コンドルールの局所酸素同位体分析から 探る CV 隕石母天体の集積史

○炭谷拓真^{1,2}, 福田航平², 牛久保孝行³, 金丸礼⁴, 木多紀子⁵,
筒井皓基⁶, Changkun Park⁷, Hwayoung Kim⁷, Pilmo Kang⁷, 寺田健太郎²

¹東京大学, ²大阪大学, ³海洋研究開発機構, ⁴JAXA 宇宙科学研究所,

⁵ウィスコンシン大学, ⁶東北大学, ⁷韓国極地研究所(KOPRI)

隕石全岩に見られる同位体二分性から、炭素質(CC)および非炭素質(NC)隕石の母天体はそれぞれ原始太陽系円盤の外側と内側領域で形成されたと考えられており、円盤内外の物質混合を妨げた物理的機構の存在が示唆されている(e.g., Warren et al., 2011)。一方、コンドルール(数 mm 径のケイ酸塩物質)のような隕石構成物質では、円盤内側で形成されたにも関わらず、外側起源の天体に混入した事を示す証拠が報告されている(Williams et al., 2020; Fukuda et al., 2024)。このような原始太陽系円盤内での物質輸送・混合過程の詳細を明らかにすることは、太陽系天体の材料物質やその時空間依存性を制約する上で重要である。

本研究では、炭素質隕石の NWA 6991(CV3)の研磨薄片を作成し、試料内のコンドルールの岩石学的特徴を電子顕微鏡 (SEM, EPMA) で調べた。さらに、層構造をはじめとする様々な特徴を示すコンドルールの局所酸素同位体分析を、二次イオン質量分析計(SIMS)で行った。その結果、NWA 6991 に含まれるコンドルール全体(657 個)のうち、およそ 5%が NC コンドルール特有の岩石学的特徴を保持していた。これらの中から選定した 5 個のコンドルールの酸素同位体比は $\Delta^{17}\text{O}$ 値 ($=\delta^{17}\text{O} - 0.52 \times \delta^{18}\text{O}$; ‰) が -0.52‰ から $+0.37\text{‰}$ の範囲を示し、NC 隕石に含まれるコンドルールに典型的な酸素同位体比に類似していた(e.g., Kita et al., 2010)。このような酸素同位体比を持つコンドルールは原始太陽系円盤内側で形成し、その後 CV 母天体が形成した円盤外側まで輸送されたことを示唆する。

一方、層構造を持つコンドルールは、コアとリムで異なる岩石学的特徴を示すことから少なくとも二段階の加熱過程を経験したと考えられ (Krot et al., 2004)、CV 隕石では Cr や Si 同位体においてコアが NC 的でリムが CC 的な同位体ゾーニングを示している(Van Kooten et al., 2021; Onyett et al., 2024)。しかし、本研究による分析の結果、7 個の層構造コンドルールのコアとリムの酸素同位体比は均質かつ CC 的な $\Delta^{17}\text{O}$ 値 ($-6.8\text{‰} < \Delta^{17}\text{O} < -5.9\text{‰}$)を示したことから、コアとリムの形成は共に CC 領域において起こったと考えられる。元素間で異なる同位体的特徴を示すことから、層構造コンドルールは NC 的な組成を持つ前駆物質が CC 領域で ^{16}O に富む H_2O ガスとの同位体交換を経て形成したと考えられる。コンドルールメルト-ガス間での酸素同位体交換率(Rocco et al., 2015)を用いると、層構造コンドルール形成領域に存在した H_2O ガスの $\Delta^{17}\text{O}$ 値は -20‰ から -3‰ と推定される。

本研究により明らかとなった新たな知見は、(1)CV 隕石には NC 的な酸素同位体組成を示すコンドルールが数%含まれること、(2)NC 的な組成を持つ前駆物質が ^{16}O に富むガスとの同位体交換を経験したことである。これらの結果は、CV 隕石の母天体が原始太陽系円盤内の多様な領域で形成した物質を材料源とし、かつその形成領域として H_2O スノーライン近傍のようなダストやガスの酸素同位体比が顕著に変動する環境であったことを示唆している。

月の地下空洞内における水分子残存の温度条件 ：熱脱離を考慮した三次元モデル解析

○篠原直生^{1,2}, 春山純一^{2,1}, 岩田隆浩^{2,1}, 豊川広晴³

¹総合研究大学院大学, ²宇宙科学研究所, ³東京大学

月表面における水の損失プロセスを理解することは、大気の薄い固体天体における揮発性物質の挙動を明らかにする上で極めて重要である。月面では、水分子は太陽風の飛来、微小隕石衝突、熱脱離などによって失われることが知られている^[1,2など]。一方で、縦孔やその先の地下空洞といった外的要因の影響を受けにくい閉鎖的環境においては、水分子がより長く残存する可能性が指摘されている^[3]。このような地下空洞内における水分子の蓄積量を定量的に評価することで、外的要因の影響をほとんど受けない環境下での水の保存状態を明らかにできる。さらに、地下空洞と月面表層で観測される水分子の量を比較することで、表層における損失プロセスが水分子の存在量に及ぼす影響の大きさを定量的に評価する手がかりが得られる。

従来の研究では、地下空洞内の水分子の残存時間を水氷層からの昇華時間に基づいて推定する手法が用いられてきた^[4]。しかし、この手法は、水氷の存在を前提としており、実際の岩石表面に吸着した水分子の脱離挙動を反映していない。岩石表面からの脱離にはより大きなエネルギーを要し、たとえば 200 K では、海領域の岩石表面からの脱離時間は水氷からの昇華と比較して約 10^5 秒長くなる^[5]。このため、昇華モデルでは水分子の滞留時間が過小評価されている。

そこで、本研究では、地下空洞内における水分子の残存可能性を評価するために、海領域岩石表面からの脱離時間を考慮し、水分子が滞留可能な地下空洞の存在を検討した。まず、縦孔に続く地下空洞の三次元モデルを構築し、縦孔底部に供給された水分子が岩石表面に対する吸着・脱離を繰り返しながら縦孔から脱出するまでの挙動を数値解析によって追跡した。これにより、月の 1 日単位の時間スケールで、水分子が地下空洞内に残存できる温度条件を算出した。さらに、温度条件をもとに、LR0 の観測データから実際に水分子が存在する可能性のある縦孔を特定した。

シミュレーションの結果、縦孔直径に対して奥行きが 100 倍となる地下空洞において、内部温度が 225 K 程度であれば、供給された水分子の約 1% が月の一日 (~29.5 地球日) 後にも残存することが確認された。さらに、太陽からの入射熱と月面からの輻射とのエネルギー収支に基づく式^[6]から、月面の緯度 65 度以上に位置する地下空洞であれば、上記の温度条件を満たす可能性がある」と推定した。

これは、水分子の安定的な存在場所がこれまで想定されていた極域に限られず、高緯度域の地下空洞内にも広がる可能性があることを示しており、月面における水分布の理解に新たな視点を提供する知見である。実際に、この緯度条件に基づいて、観測データから高緯度に存在する縦孔のうち、3 つを水分子の残存が期待される候補として特定した(図 1)。

加えて、地下空洞内の水の供給量と損失量が釣りあったときに成立する安定的な水の存在量を明らかにするため、水氷層の被覆率を変えた数値実験を行った。その結果、最も高緯度に位置する Schomberger A1 では、地下空洞内の表面積の約 80% が水氷で被覆されている場合に、水の供給量と損失量が平衡状態に達することが示された。この結果は、地下空洞が長期的な水分子の保存場所となる条件を定量的に示すものである。また、太陽光が当たりやすく水の損失プロセスの影響を受けやすい中高緯度地域においても、水分子が残存しうる可能性を示すものである。

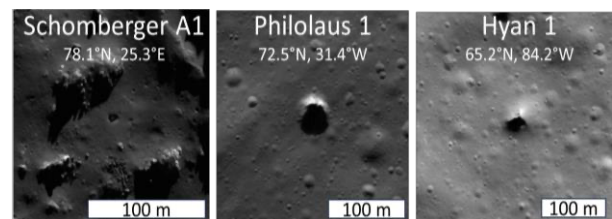


図 1: 水分子の存在が示唆される 3 つの縦孔

3次元流体計算と化学反応シミュレーションで 迫る隕石降着による惑星大気の非平衡進化

○宮山隆志^{1,2}、Laura Schaefer²、小林浩¹、Andrea Zorzi²

¹名古屋大学、²Stanford University

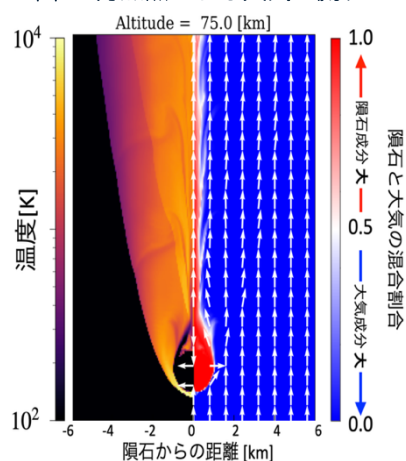
惑星が持つ数多くの特徴の中で、惑星大気の化学組成は生命誕生・生存可能性を左右する最重要要素である。そして、初期大気の形成・進化を決定する最も普遍的な現象が隕石降着である。惑星の重力に引かれ地表へと向かう隕石は、大気中で衝撃波を形成するほどの高速度で落下する。この衝撃波による大気の加熱（空力加熱）は有機物生成等の化学反応を引き起こし、惑星大気の化学進化を促す。さらに、空力加熱で燃焼しない大きな隕石は地表に衝突し、衝撃波を生じさせ、惑星表面を蒸発させる[1]。大気中へ放出されるこの高温衝突蒸気もまた、大気の化学進化に寄与する。そのため隕石降着はこれら一連の過程を通して、生命誕生前の地球を始めとした初期惑星大気の形成・進化に大きな役割を果たす。

空力加熱と衝突蒸気のどちらの過程においても、衝撃波加熱が化学進化を駆動する。この加熱により瞬時に化学平衡が達成されるため、従来の惑星大気の進化は平衡計算に基づいて議論されてきた[2,3]。しかし衝撃波により圧縮・加熱された大気はその後膨張・降温し、反応速度が低下することで化学組成は平衡から逸脱する。そしてある時点で反応が停止し、平衡状態から大きく離れた化学種が残される。したがって、『衝撃波による加熱』と『膨張による降温』という2つの流体力学過程を考慮して初めて、惑星大気の非平衡進化を明らかにできる。

これを受けて我々は、多次元流体計算と化学反応シミュレーションを組み合わせることで、隕石降着による大気の新平衡進化を扱う新たな手法を考案した[4]。これを用いて、土星の衛星タイタンが持つ有機物に富んだ大気の進化において、隕石降着が与える影響を調査した。これにより降着による空力加熱はHCNなどの有機分子の観測量を有意に再現できることが明らかにした。本発表ではタイタンが持つ有機物に富んだ大気の進化について報告する。

また、降着する隕石後方では、空力加熱により蒸発した隕石成分と周囲大気との混合による特異な化学反応が期待される(図)。そこで我々は3次元の流体計算を用いて、隕石の斜め入射が生む非対称な大気の流れがさらなる混合を生むことを示した[5]。さらに、従来の平衡化学計算による予想とは大きく異なり、空力加熱は大気中の水分子を激減させることが示唆されており、惑星が持つ水量に大きな影響を与えうる[4,5]。本発表では、混合による反応や水への影響についても議論し、古地球等にも我々のモデルを適用した惑星大気の非平衡進化についても発表する。

図 空力加熱による大気の流れ



引用文献: [1]Miyayama & Kobayashi 24; [2,3] Schaefer & Fegley 07,10; [4]Miyayama, Schaefer, Kobayashi, Zorzi 25 (under revision in ApJ); [5]Miyayama, Schaefer, Kobayashi 25 (in prep.)

へびつかい座分子雲に位置する原始惑星系円盤の超解像度サーベイ II: ダスト円盤半径の統計的解析および詳細構造の形成時期に関する考察

○所司歩夢^{1,2}, 山口正行², 武藤恭之³, 平野尚美², 川邊良平^{4,5}, 塚越崇⁶, 町田正博¹

1. 九州大学, 2. ASIAA, 3. 工学院大学, 4. 総合研究大学院大学, 5. 国立天文台, 6. 足利大学

惑星形成過程を理解するためには、現場となる若い星周りの原始惑星系円盤の観測が不可欠である。特に、惑星の重力により物質が集積・排除されることで円盤内に生じる円環状や螺旋状などの特徴的な構造（詳細構造）は重要な手掛かりとなり、そのような構造が出現する時期の調査は、惑星形成のタイムスケールに大きな制約を与えることになる。円盤の詳細構造を観測的に明らかにするためには、Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)を用いた円盤に対する高解像度の電波観測が求められる。しかし、ALMAの解像度や天体までの距離を考慮すると、高解像度で観測できる円盤天体には制限があり、十分な統計的調査からその構造のタイムスケールに迫ることは困難であった。

本研究 (Shoshi et al. 2025, PASJ, 77, 572)では、スパースモデリングと呼ばれる統計数理手法を応用した画像復元法に注目した。この手法は、円盤放射分布の疎性と差分を調整する罰則項付きの最小二乗法を解くことで、最大基線長付近のデータも高い忠実度で再現する画像作成が可能である。この手法を既存のALMAの観測データ（空間分解能 42 au）に対して適用した。観測対象は太陽系近傍（140 pc）にあるへびつかい座分子雲に分布する 78 個の原始惑星系円盤である。その結果、従来の手法に比べて約 3 倍以上の解像度の向上に成功し、27 個の円盤で円環状や螺旋状の構造を検出した（日本惑星科学会 2024 年秋季講演会）。

本講演では、得られた高解像度画像を用いて、異なる進化段階における円盤半径の分布とALMA大規模観測プロジェクト eDisk との比較について議論する。解析の結果、円盤半径は 5-179 au にわたって広く分布し、中央値は 27 au、全体の多くが 40 au 以下であった。一方、半径が 100 au を超える円盤は全体の 10%にとどまった。また、全ての進化段階における円盤半径の分布に大きな差が見られず、これは MHD disk wind または radial dust drift を考慮した円盤の進化モデルと一致していることが明らかとなった。さらに、円盤半径とボロメトリック温度との統計解析により、半径 30 au 以上かつボロメトリック温度が 200-300 K 以上の円盤で詳細構造が多く見られる傾向が明らかとなった。ボロメトリック温度は円盤の進化段階を示す指標として使われており、該当する温度の範囲は星が誕生してから数十万年の時期に対応すると考えられる。このことは、星周囲に分子ガスや塵が豊富に残存している、原始惑星系円盤の形成初期段階で、すでに惑星の形成が始まっている可能性を示唆している。これは、従来想定されていた惑星形成の開始時期よりも非常に早い段階である。このような知見は、新たな画像解析手法により、短時間かつ最大基線長が短い観測のデータからも、高い解像度の画像を多数の天体で復元できたことで得られたものである。本研究は、手法の面からもALMAの可能性を大きく広げるものである。

拡散する微惑星リングにおける原始惑星の寡占的成長 II

○ 神原祐樹^{1,2}, 小久保英一郎^{2,1}

¹ 東京大学, ² 国立天文台

惑星形成の標準シナリオでは、惑星のビルディングブロックである微惑星は円盤全体で形成され、雪線以外では半径方向に滑らかに分布すると仮定している。しかし、この仮定の下では太陽系地球型惑星の質量や軌道構造が再現できないという課題がある。近年、原始惑星系円盤でのダストの成長シミュレーションから、微惑星は細いリング状の領域でのみ形成される可能性が指摘されている (Morbidelli et al. 2022, Izidoro et al. 2022)。また、原始惑星が細いリング状に分布した状態からは、太陽系地球型惑星を再現できることが明らかになっており (Hansen 2009)、惑星形成の初期条件として微惑星リングが注目を集めている。微惑星から原始惑星が形成する段階は計算コストが非常に大きいため、微惑星リングに注目する研究はほとんどの場合原始惑星が細いリング領域に分布した状態を初期条件としている。そのため、微惑星リングから形成する原始惑星の質量や軌道、および初期の微惑星分布依存性を解明することは、微惑星リングから形成する惑星の性質解明において重要な要素となる。

Kambara & Kokubo (2025) は、リング状の微惑星分布から原始惑星が形成する過程の N 体シミュレーションを行い、微惑星の拡散によりリング幅が拡大しながら原始惑星が寡占的成長をすること、原始惑星の質量は微惑星拡散後の面密度を用いて計算された孤立質量とよく整合することを発見した。さらに、最終的なリング幅や原始惑星の分布は初期のリング幅にほぼ依存せず、総質量に依存することも発見した。一方、この計算では中心星から微惑星リングまでの距離を固定しており、微惑星リングの位置が異なる場合の原始惑星形成過程は未解明である。微惑星の拡散を考慮しない場合、原始惑星の孤立質量 M_{iso} は軌道長半径 a 、微惑星の面密度 Σ として $M_{\text{iso}} \propto a^3 \Sigma^{3/2}$ である (Kokubo & Ida 2002) が、微惑星リングでは微惑星の拡散により面密度 Σ が時間進化するため、この結果をそのまま適用することは不可能である。

本研究では、微惑星の総質量およびリング幅を固定し、中心星から微惑星リングの中心までの距離を変化させたシミュレーションを実施した。シミュレーションの結果、微惑星リングで形成する原始惑星の最大質量はリング中心の軌道長半径に依存しないことが明らかになった (図 1)。加えて、拡散後の微惑星面密度を使って計算した孤立質量と原始惑星の最大質量はよく一致することから、微惑星の拡散による面密度の低下率には軌道長半径依存性があることが示唆される。これは、中心星から遠いほどヒル半径が大きいため、微惑星拡散による面密度低下の効率が相対的に上がることが原因だと考えられる。本研究で得られた原始惑星の質量・軌道の分布は、原始惑星が成長する段階のシミュレーション研究と組み合わせることで惑星系の起源となる微惑星分布解明につながるものであり、惑星系の起源となった微惑星分布の解明や母天体の形成位置解明、さらには惑星形成初期段階におけるダスト分布やその進化の解明への応用が期待される。

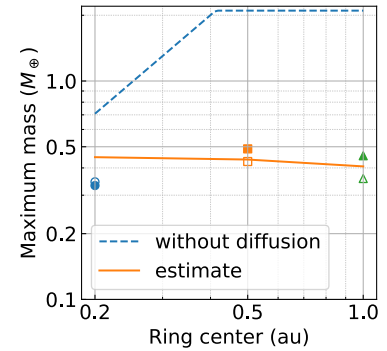


図 1: シミュレーション終了時に形成した原始惑星の最大質量 (各マーカー) とリング中心の軌道長半径。オレンジの実線は微惑星拡散後の面密度から見積もった原始惑星の孤立質量、青い破線は微惑星拡散が起こらない場合の原始惑星の孤立質量である。

その場 K-Ar 年代計測装置によるアマゾニア代の火星隕石 の測定：火星の年代モデル制約の可能性

○日向輝¹、長勇一郎¹、三浦弥生²、三河内岳³、杉田精司¹

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

年代は惑星進化の理解に必要不可欠である。火星表層の年代はクレーター年代に基づいて決定されているが、クレーター年代モデルが放射年代計測によって校正されていないため最大 10 億年の不確実性が存在する[1]。その場年代測定はサンプルリターンに比べコストが低く高頻度の探査を実現できるという利点がある。我々が開発を進めるその場 K-Ar 年代計測装置は、試料に直径数百 μm のレーザーを照射し、レーザー誘起ブレイクダウン分光法 (LIBS) で K 濃度を、質量分析法 (MS) で Ar 量を測定する。同じ岩石の複数箇所でもスポット分析を行うことで内部アイソクロンを生成し、高い確度の年代を得られる[e.g., 2, 3]。スポット分析では測定対象の岩石中の鉱物のサイズや空間的配置によって LIBS で得られる K 濃度の分布幅が決まり、年代精度が決定される。そのため、火星探査への適用可能性を検証するには、実際の火星岩石を測定することが必要である。実際、火星岩石として唯一入手可能な火星隕石は K も Ar も低濃度のため、この LIBS-MS 法での測定が困難であった。Hyuga et al. (MaPS, under review) では 3 種類の火星隕石 NWA 817, Zagami, NWA 1068 の EPMA の元素マップを用いてスポット分析によるアイソクロン年代の精度をシミュレーションし、最適な条件(レーザースポット径、K・Ar 濃度の測定精度) を決定した[4]。本研究では、その結果をもとに装置を改良した上で、火星隕石の年代を測定することで火星その場測定を実証する。

装置の光学系の再設計と測定法の改良によって、レーザースポット径を 250 μm に縮小し、K 濃度の測定精度を 11% まで向上させた。その後 3 種類の火星隕石の年代計測を実施した。NWA 817, Zagami, NWA 1068 のアイソクロン年代はそれぞれ $1351 \pm 337 \text{ Ma}$, $165 \pm 74 \text{ Ma}$, $122 \pm 163 \text{ Ma}$ (2σ) となり、先行研究で報告された年代と誤差の範囲で一致した[5]。また、アイソクロンの y 切片から計算される放射改変由来でない火星や地球大気からトラップされた ^{40}Ar 量はそれぞれ $(2.24 \pm 2.93) \times 10^{-6} \text{ cm}^3\text{STP/g}$, $(0.23 \pm 0.54) \times 10^{-6} \text{ cm}^3\text{STP/g}$, $(2.00 \pm 0.71) \times 10^{-6} \text{ cm}^3\text{STP/g}$ (2σ) であった[5]。Zagami では個々のスポットの ^{40}Ar の総量に占めるトラップ ^{40}Ar の量は 10% 以下であるのに対して、NWA 1068 は平均 75% がトラップ ^{40}Ar であった。これは、Zagami が落下直後に回収された隕石であるのに対して、NWA 1068 が地球上での風化を強く受け、地球大気を多く含む隕石であることを反映している。NWA 817 の年代精度がその場測定で得られた場合、Ivanov(2001)[6]と Hartmann(2005)[7]で提案された二つのクレーター年代モデルを区別し、年代モデルを制約することが可能である。また、Zagami の結果は、アマゾニア代の数億年前の若い火山活動の絶対年代を特定できることを示唆する。

参考文献: [1] Cohen et al., 2021, *PSJ*, 2, 145. [2] Cohen et al., 2014, *GGR*, 38, 421. [3] Cho & Cohen, 2018, *RCMS*, 32, 1755. [4] Hyuga et al., submitted to *MaPS* (under review). [5] Hyuga et al., submitted to *PSJ* (under review). [6] Ivanov, 2001, *SSRv*, 96, 87. [7] Hartmann, 2005, *Icarus*, 174, 294.

円盤移動で形成されたホットジュピターの同定

○河合優悟¹ 福井暁彦¹ 渡辺紀治¹ 成田憲保^{1,2}

¹ 東京大学 ² アストロバイオロジーセンター

主星のごく近くを公転する「ホットジュピター」と呼ばれるような巨大ガス惑星は、「その場」での形成は難しい。よって彼らは太陽系の木星のような外縁部で形成された後に内側へと移動したと考えられている。この移動メカニズムとして、原始惑星系円盤との相互作用により内側に移る「円盤移動」と、伴星や他の惑星との重力相互作用で離心率が励起された後、惑星内部での潮汐散逸によって近点付近で軌道が円形化される「高離心率移動」という二つの仮説が有力である[1]。

二説を区別するため、従来は惑星の軌道傾斜角（惑星公転軸と主星自転軸のずれ）を測定する手法が用いられてきた。しかし大きな傾斜角が高離心率移動の痕跡と解釈される一方で、小さな傾斜角は必ずしも円盤移動を意味しないという問題がある。これは、高離心率移動で形成されたホットジュピターであっても、その後に主星内部の潮汐散逸により軌道が主星と再整列する可能性があるからである[2]。

本研究では、この問題を補う新たな指標として、ホットジュピターが軌道円形化に要するタイムスケールが円盤移動の有力な証拠となることを初めて示した。円形化タイムスケールが系の年齢より長いにもかかわらず、既に円軌道を持つホットジュピターが存在する場合、その円軌道を高離心率移動で達成するには時間が不十分であり、円盤移動を経た可能性が高い。

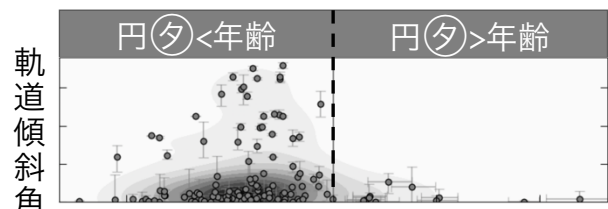
一方で、円形化タイムスケールは、惑星内部における潮汐散逸効率の関数であり、これには数桁にわたる不確定性がある。そこで本研究では、「円形化タイムスケール=系の年齢」となる境界が、実際に観測されている500個以上のホットジュピターの離心率分布を円軌道と楕円軌道に最も良く二分するような潮汐散逸効率を逆問題として探索した。これにより、ホットジュピターの典型的な潮汐散逸効率を統計的に導出することに成功した。この値は衛星との相互作用から推定される太陽系の木星の値とも整合的である[3]。

この結果として「円形化タイムスケール>系の年齢」でありながら円軌道を持つ、円盤移動が示唆される条件を満たすホットジュピターを30個以上同定した。この指標が円盤移動の有力な証拠となり得ることを示す兆候として、同定されたサンプルには、軌道が大きく傾いたホットジュピターが一つも存在しないことが挙げられる（図1 点線より右）。またこれは、原始惑星系円盤の公転軸は主星の自転軸と多くの場合にて揃っていることも示唆する。

高離心率移動と円盤移動を代表するサンプルの同定により、Ariel ミッション[4]の大気観測による惑星の形成位置と移動プロセスの比較も期待される。

文献：

- [1] Dawson & Johnson 2018 *ARA&A* 56 175
- [2] Albrecht et al 2012 *ApJ* 757 18
- [3] Yoder & Peale 1981 *Icarus* 47 1
- [4] Tinetti et al 2018 *Exp. Astron.* 46 1



円形化タイムスケール÷系の年齢
図1：円軌道の惑星における円形化タイムスケールと軌道の傾きの関係

原始惑星系円盤におけるミリ波連続波・ミリ波偏光を想定した平行平板の輻射輸送数値解

○ 北出直也^{1,2}, 片岡章雅¹

¹ 国立天文台, ² 総合研究大学院大学

惑星は原始惑星系円盤の中でミクロンサイズのダストが合体成長することによって生まれる。この成長過程を解き明かすために円盤内のダスト特性、つまりダストの大きさ・空隙率・組成などを観測的に知ることが重要である。これまで円盤内のダスト特性制限は主にミリ波の多波長観測からなされてきた。しかし円盤が光学的に厚い場合、ダストによる散乱が円盤からの放射に大きく影響するため、多波長連続波解析が困難となる。そこでこれまでの観測的研究では、光学的に厚い場合の近似式 (Miyake & Nakagawa 1993, Birnstiel et al. 2018, Sierra et al. 2019, Carrasco-González et al. 2019, Zhu et al. 2019) を用いて光学的に厚い円盤に対する多波長連続波解析を行った。しかし先行研究の近似式がどれほど正確に円盤からの放射を表しているのかは未解明であった。またミリ波偏光観測を用いたダスト特性制限も行われている。従来はモンテカルロ法輻射輸送シミュレーションにより偏光観測を再現し、実際の観測と比較することでダスト特性を制限してきた (e.g., Ueda et al. 2024)。しかし、モンテカルロ法輻射輸送シミュレーションは計算コストが高いため、十分なパラメータサーベイを行うことが難しい。高速に偏光観測からダスト特性を制限するために、偏光度の定式化が求められている。

そこで本研究では、ダストの吸収・放射・散乱を全て取り込み、ダストの散乱による偏光も考慮した、平行平板に対する輻射輸送方程式を解いた。この際、輻射場の異方性を考慮するため平板内の輻射を全方向に分割し、さらに反復法を用いることで数値的に計算した。まず平板から放射されるミリ波連続波強度の正確な値を導出した。その結果、光学的に十分厚い平板において、ダストのアルベドが大きいほどミリ波連続波強度はより小さい値に収束することが分かった。これは先行研究 (e.g., Zhu et al. 2019) で示唆されていた散乱減光の効果によるものである。さらに、連続波強度の数値計算結果を用いてこれまで多波長連続波解析で用いられてきた近似式の正確性を検証した。その結果、どの先行研究の近似式も我々の数値計算結果から 10% ほどずれていることがわかった。ALMA 望遠鏡から得られるミリ波連続波データの精度は 5~10% であるため、先行研究の近似式の精度は ALMA データ解析に不十分であると言える。今後多波長連続波解析を行う際には本数値計算結果を用いることで、より正確にダスト特性を制限することが可能となる。次に、平板から放射される偏光度についても正確な値を計算した。偏光度は平板の光学的厚みが 1 程度で極大値を取り、光学的に十分厚い領域では収束することが分かった。これらの傾向は先行研究 (Yang et al. 2017) と一致しているが、偏光度の絶対値は先行研究に対して 2 倍ほど大きくなっている。これは先行研究で入射光の偏光を無視していたことが原因であり、入射光の偏光が入射光の連続波強度と同程度の偏光を生み出すことが初めて示された。さらに、この平板から放射される偏光度の数値計算結果によくフィットする関数を考案することで、偏光度の定式化に成功した。この偏光度の関数を用いることで、従来の手法と比べて極めて高速に、偏光観測からダスト特性を制限することが可能となる。このように、本研究は円盤のミリ波連続波観測・偏光観測の両方から、正確かつ高速にダスト特性を制限することのできる新たな手法を提案する。

潮汐固定惑星の大気崩壊と ハビタビリティ・気候進化への示唆

○谷口啓悟^{1,2}, 小玉貴則¹, Martin Turbet^{3,4}, Guillaume Chaverot⁵, Ehouarn Millour³, 玄田英典¹

¹ 東京科学大学地球生命研究所, ² 東京科学大学理学院地球惑星科学系, ³ Laboratoire de Météorologie Dynamique/IPSL,

⁴ Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux ⁵ Univ. Grenoble Alpes

系外惑星観測やハビタビリティ研究の観点から、M型星周辺の地球型系外惑星が注目されており、このような惑星は中心星からの潮汐力によって潮汐固定されているとされる。一方、ハビタブルゾーン(HZ)の外側境界付近で惑星が液体の水を保持するためには、高い温室効果とそれを担う高いCO₂分圧が必要だが(Kasting et al. 1993)、潮汐固定惑星の場合、夜面の低い温度によって大気崩壊が発生し、CO₂が凝結し大気から除去されることで、そのような高いCO₂分圧を維持できない可能性がある(Turbet et al. 2018)。しかし、昼面の恒星直下点付近の強い日射によって、局所的に温暖な温度環境を維持できることが考えられるが、大気崩壊後の気候およびハビタビリティはこれまで議論されていなかった。

本研究では、大気崩壊が発生した場合のCO₂分圧や温室効果の変化、そして大気崩壊後の温度分布(ハビタブルな環境を有しているか)について検証するため、全球気候モデル(GCM)を使用して系統的に計算を行った。数値モデルには、系外惑星GCMであるGeneric PCM (Forget in prep)を使用し、N₂, CO₂, 日射量をモデルパラメータとして各ケースに設定することで、各大気・日射条件における大気崩壊の発生や液体の水の有無を調べた。

大気崩壊が発生した場合、CO₂分圧が徐々に減少し温室効果が弱くなる一方で、昼面の恒星直下点付近の温度は維持され、液体の水が保持され続けることがわかった。これは、大気による昼面から夜面への熱輸送効率が下がることで、昼面の日射によるエネルギーが夜面へ輸送されずに留まり続けることに起因する。また、大気崩壊が発生するCO₂分圧および大気崩壊後のCO₂分圧は、非凝結種(N₂)の分圧に依存することがわかった。大気崩壊が発生してもハビタブルな環境が維持されるという結果は、温暖な環境を妨げる要因として考えられてきた従来の大気崩壊の描像と異なるものである。

上記の潮汐固定状態に加え、地球のような非同期回転の場合でも同様の計算を行った。その結果、日射分布や大気循環の違いから、大気崩壊後もハビタブルな環境が維持される描像にはならず、潮汐固定という力学的条件特有のものだとわかった。

HZ外側境界付近の潮汐固定惑星は、高いCO₂分圧・温室効果を有し、昼面-夜面の温度差が小さい大気か、大気崩壊によってCO₂が除去され、その結果大気の熱輸送が弱くなることで昼面-夜面の温度差が大きくなった大気の、2種類の状態が考えられる。また、このような不可逆的な過程は、気候の一時的な変化(恒星活動や火山活動の変化など)によって引き起こされうる分岐点でもあり、長期的な惑星気候進化を考える上で重要なものである。

円盤温度・密度進化と原始惑星進化を繋いだ 太陽系地球型惑星形成過程の統一的な理解

○近藤克¹, 奥住聡¹, 森昇志²

1: 東京科学大学, 2: 清華大学

太陽系地球型惑星の形成過程には様々な未解決問題が残されている。例えば地球では、(1)微惑星集積により形成した原始地球がその後どのように成長したか、(2)原始惑星系円盤で形成した原始地球がどのように現在の軌道に落ち着いたか、(3)水に欠乏した地球の水量がどのような水供給過程を経て実現したのかといった課題が挙げられる。さらに、これらの問題は主に個別に議論されてきたため、地球型惑星形成の包括的な理解には未だ至っていない。ここで、全ての問題が円盤温度構造と密接に関わっている点に着目する。ダストの動径速度やサイズは温度に依存して決まり、ダスト集積効率を通じて質量進化に影響を与える(e.g., Ormel & Klahr 2010)。また、温度勾配は惑星が受けるトルクを通じて軌道移動の方向や速度を決める(e.g., Paardekooper et al. 2011)。さらに、円盤温度は水氷スノーラインの位置を決定し、原始惑星への水供給量を制約する(e.g., Sato et al. 2016)。従来研究の多くは、温度構造を時間的に固定するなど簡略化していたが、我々のこれまでの研究により、磁場と電離ガスの相互作用により降着が駆動する磁気降着円盤において、ダスト成長に整合的な円盤温度進化を導出するモデルを開発した(Kondo et al., in prep.)。本モデルではダスト進化を同時に扱うため、ダスト集積を通じた質量進化・氷ダストによる水供給も円盤進化と整合的に評価できる。これにより、従来は独立に議論されてきた質量・軌道・水量進化の問題を物理的に結びつけた統一的な理解が可能となる。

本研究では、磁気降着円盤形成初期から、原始惑星の軌道移動・ダスト集積までを一貫して計算し、地球型惑星形成過程の包括的な理解を目指した。ダスト粒子の成長と破壊・動径方向の拡散と移流を考慮し、円盤温度はダストに依存するジュール加熱と放射冷却の平衡から決定することで円盤内側へ輸送される水氷ダストフラックスを求めた。原始惑星の形成時刻と初期質量をパラメータとし、デッドゾーン内側境界(~ 0.1 au)で形成した原始惑星の軌道進化とダスト集積による質量進化を計算した。外向きの惑星移動を実現するために、磁気降着円盤の角運動量輸送効率を示す α パラメータは、円盤内側ほど大きくなる分布とした(Ogihara et al. 2018)。集積モデルはOkamura & Kobayashi (2021)の3次元数値計算の結果を基にした解析式を用いた。

その結果、原始惑星は初期質量によらず約0.1地球質量で成長が停止し、岩石質のまま地球型惑星形成領域へ移動することがわかった。この成長停止は、原始惑星が成長するにつれ、惑星が駆動するガス流によるダストへの抵抗が増大し、ダストの集積率が大きく低下することで生じる(Kuwahara et al. 2019)。我々の結果は、以下のような太陽系地球型惑星形成シナリオを示唆する。(1)岩石微惑星集積により形成した原始惑星は、岩石ダスト集積により水星・火星サイズまで成長した。その後、これらの原始惑星同士が巨大衝突を繰り返すことで、金星・地球サイズの惑星へと進化した。(2)原始惑星は水星・火星サイズまで成長した段階で地球型惑星形成領域へと外向きに移動した。(3)スノーラインを外向きに跨ぐ前に、原始惑星の成長によりダストの集積率が大きく低下するため、氷をほとんど獲得せず岩石質のまま組成が保たれた。

火星衛星探査計画 MMX:2026 年打ち上げへ向けた最新状況

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

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

火星衛星からのサンプルリターンミッションである火星衛星探査計画 MMX は、2026 年秋の打ち上げならびに 2031 年の地球帰還に向け、着実にその開発と準備が進められている。MMX の主たる科学目的は、近接観測ならびに Phobos から回収した試料の高度分析を通じて、Phobos と Deimos の起源、初期太陽系における物質輸送と岩石惑星の水と揮発性物質の獲得プロセス、そして、火星の大気と表層環境の進化を解明することである。MMX は当初 2024 年に打ち上げ予定だったが、H3 ロケットの開発遅延により、全体スケジュールが約 2 年延期された。しかし、打ち上げ延期による探査機本体や搭載観測機器の変更はない。現在、推進モジュール、帰還モジュール、探査モジュールからなる探査機システムを結合し、各種の総合試験を順次実施している。並行して、制御、通信、追跡、データ処理、キュレーションなど地上システムの開発・準備が進んでいる。

新たなスケジュールでは、Phobos 上の 2 地点から 10 グラムを超える試料を採取する着陸運用を、3 年間の火星圏滞在の半ばに実施する。着陸前の運用期間は、着陸地点選定のための観測と解析に主に充てる。表面傾斜、太陽照射、地球可視性などの知識に基づき、あらかじめ抽出した複数の着陸候補領域に対し、MMX は近接撮影と分光観測を実施して物質分布を特定し、着陸安全性とサンプルの科学的価値の両方を満たす着陸地点を選択する。

MMX の主ターゲット天体である Phobos の科学観測は、望遠カメラ TENG00、レーザー測距計 LIDAR、広角可視分光カメラ OROCHI、赤外線分光計 MIRS、ガンマ線・中性子分光計 MEGANE、質量分析計 MSA、塵衝突モニターCMDM、およびローバーIDEFIX を用いて実施する。これら地形学的、測地学的、地質学的、物質科学的な近接観測データから、Phobos の起源と進化について、サンプル分析とは独立に制約を与える。Deimos の近接フライバイ観測を火星軌道投入直後と火星軌道離脱前に実施し、取得した撮像、可視・赤外分光データから Deimos の起源と進化を制約する。さらに、MMX は火星大気分光撮像観測を実施し、表層進化の素過程である火星大気中の塵と水の輸送プロセスを解明する。探査機周囲のイオンの質量、運動、流速を測る MSA は、Phobos からの脱ガス由来イオン、太陽風スパッタリングイオンだけでなく火星大気の散逸成分も捉え、その同位体分別の定量により火星大気の色と組成の長期進化を制約する。

火星衛星探査計画 MMX 搭載ミッション機器に関する システム総合試験の進捗と課題について

○田中 大基¹、小川 和律¹、嶋田 貴信¹、相田 真里¹、Maria Antonietta Barucci²、
船津 良平³、今田 高峰¹、岩田 隆浩¹、梶谷 伊織¹、亀田 真吾⁴、加藤 裕基¹、小林 正規⁵、
David J. Lawrence⁶、Patrick Michel⁷、三谷 烈史¹、永峰 健太¹、尾崎 正伸^{1,8}、佐藤 泰貴¹、
澤田 弘崇¹、千秋 博紀⁵、鈴木 俊之¹、舘野 直樹⁹、Stephan Ulamec¹⁰、横田 勝一郎¹¹、
吉川 健人¹、Kris Zacny¹²、大嶽 久志¹、川勝 康弘¹、MMX ミッション機器開発チーム
¹宇宙航空研究開発機構、²パリ天文台 LIRA、³日本放送協会、⁴立教大学、⁵千葉工業大学、
⁶JHU-APL、⁷OCA/CNES、⁸国立天文台、⁹日本宇宙フォーラム、¹⁰DLR、¹¹大阪大学、¹²HBR/BO

火星衛星探査計画(MMX)は、主な科学目的として「火星衛星の起源を明らかにする」および
「火星圏(火星・フォボス・ダイモス)の進化を明らかにする」ことを掲げ、それらを達成する
ために13のミッション機器を搭載する。本発表では、これらのミッション機器を搭載した探査
機システム総合試験について、これまでの経過と現在の状況を述べる。

2025年7月現在、ミッション機器は今後リファビッシュや部品交換などが一部残っている
もののFMとしては完成し、探査機システム側へ合流して総合試験を実施中である。初期電気試
験と熱真空試験が完了し、今後の機械環境試験、音響試験に向けて準備を進めている。

MMX ミッション系は、システムズエンジニアリングとしてのミッション機器全体の開発・運用
の遂行・管理・最適化などが所掌である。その一環の活動として各機器が参加する地上試験の準
備から試験中の機器監視、試験データの評価確認まで担当している。これらの中で、試験におい
て発生したミッション機器に関する問題点の管理が難しいという課題がある。問題の種類は多岐
に渡り、程度や処置の影響範囲も様々である。MMX では、試験中に確認された問題点や気づき事
項を記録し、それらの調査結果・原因から処置および、以降の試験への反映事項まで管理するツ
ールとして「PFT 問題点リスト」と呼ぶ表を使用した。本表により、過去に発生した事象とその
処置までの経緯を可視化し、試験関係者間で情報共有ができるようにした。さらに表中で各事象
のスケジュールやコストへの影響を分類することにより、特に注力すべき課題の抽出など作業最
適化の判断を容易にした。

ミッション機器に関する約200件(総計約400件)の問題点、気づき事項の記録管理活動か
ら、将来の惑星探査プロジェクトの地上試験における問題点管理を最適化するための改善点が幾
つか考えられる。具体的には、発生した事象をタイムリーに記録・分類・共有ができる方法を事
前に構築すること、担当者間で情報の粒度を揃えるために記録ポリシーを予め定めること、記録
した各事象について影響分類や処置担当者の妥当性を確認する場を設定すること、などが挙げら
れる。本発表では、これらの課題と改善点の具体例を示して議論する。

Deimos Observations During Hera's Mars Flyby Using the AFC Camera

Shumpei Nakahara¹, Seiji Sugita¹, Jean-Baptiste Vincent², Michael Küppers³, Patrick Michel⁴

1. University of Tokyo, 2. DLR, 3. ESA, 4. Observatoire de la Côte d'Azur

The Hera spacecraft, launched by ESA in October 2024, performed a Mars flyby in March 2025, its only opportunity to observe a planet other than Earth, before its arrival at Didymos and Dimorphos in October 2026 (Michel et al., 2022). Mars flybys are valuable opportunities not only to observe Mars itself but also to conduct close-range observations of its moons. High-resolution imaging is feasible because the spacecraft passes through the moon's orbital plane, which requires aligning the closest approach with the moon's position. Pre-flyby analysis showed that adjusting Hera's timing would enable a closer approach to Deimos. Based on our proposal, ESA fine-tuned Hera's trajectory and developed a new observation plan for the Mars flyby that allowed Hera to achieve a much closer approach to Deimos—about 300 km instead of the initially planned 4600 km. To assess whether such close observations are feasible for other planetary missions using Mars swing-by, we investigated past missions. In the case of Mariner 7 and Rosetta, had their arrival times been adjusted by a few hours, they could potentially have approached Deimos to within 1000 km. On the other hand, for Dawn, which passed through trajectories nearly perpendicular to the orbital plane, such close-range observations were determined to be infeasible.

During Hera's close approach, the Asteroid Framing Camera (AFC) acquired 50 images of Deimos covering the anti-Mars hemisphere of Deimos, which has not been analyzed extensively before. We analyzed the four highest resolution images, which resolved the Deimos disk into approximately 140 pixels across (100 m/pix). Most images, however, were under 30 pixels in diameter and captured Deimos at low solar phase angles (2–4°), offering useful constraints on the phase function of the anti-Mars hemisphere.

The AFC images revealed several geomorphological features and albedo variations on the anti-Mars hemisphere. Notably, the images identified high-albedo linear features known as “streamers” that are similar to those previously observed on the Mars-facing hemisphere (P. Thomas et al., 1996; N. Thomas et al., 2011). These streamer structures suggest that localized surface renewal has occurred on Deimos. Additionally, the albedo histogram of Deimos showed a sharply asymmetric triangular shape, with a steep rise at low albedo values and a gradual decline at the high-albedo end. This asymmetric distribution is similar to the histograms of space weathering indices (Koga et al., 2018) and albedo (Nakahara et al., 2023) observed on the asteroid Itokawa. The shape of these histograms suggests small-scale, stochastic resurfacing processes occurring on the surface.

In this presentation, we report the initial results of Deimos observations using AFC camera, focusing on the solar phase function and surface features on the anti-Mars hemisphere.

赤道面軌道にある火星衛星の捕獲起源シナリオ

○ 松岡 亮¹・倉本 圭^{1,2}

¹ 北海道大学, ² JAXA/ISAS

火星の衛星 Phobos・Deimos は、小惑星や彗星と類似する分光・偏光特性を有しており、この特徴は微惑星捕獲説を支持している。一方、両衛星の火星赤道面に沿う軌道（軌道傾斜角 2° 未満）は、単純な捕獲メカニズムでは説明困難である。本発表では、赤道面軌道を持つ衛星の形成を自然に説明する捕獲起源シナリオを提示する。

原始太陽系星雲環境下において、火星は星雲ガスを集積し原始大気を形成していたと思われる。この段階で火星に接近した微惑星は、原始大気からのガス抵抗により軌道エネルギーを失い、捕獲される可能性がある。火星に接近する微惑星は円盤ガスの影響によりランダム速度成分が抑制されており、典型的に一時捕獲状態を経て、最終的に完全捕獲状態へと移行する。

このようにして形成された衛星は、絶対角運動量の準保存則により、近点距離が数十火星半径の、火星公転面に沿う軌道を持つ。公転面に対する軌道傾斜角は、高々 $v_0/(r_H\omega_K)$ である（ v_0 ：Lagrange 点での換算初速度、 r_H ：火星の Hill 半径、 ω_K ：火星の Kepler 角速度）。捕獲可能な v_0 の典型値は星雲密度に依存するため、密度が低いほど結果的に小さな軌道傾斜角を持つ衛星が形成される。最小質量星雲密度環境では捕獲可能な v_0 は典型的に 30 m/s 未満であり、星雲密度が 1 桁減少するとこの値は概ね半減する。

捕獲後、衛星は持続的なガス抵抗により徐々に軌道が縮小する。衛星が Laplace 半径（ ~ 10 火星半径）に到達すると、太陽潮汐トルクよりも火星の赤道バルジが及ぼす重力トルクが支配的となり、衛星は火星公転面に沿う軌道から火星赤道面に沿う軌道へと遷移する。散逸しつつある星雲の下で火星への落下を免れたこのような衛星の最終世代は、コンパクトな軌道（ $\sim$ 数火星半径）を持つ赤道面軌道衛星である Phobos や Deimos として生き残ったのかもしれない。

Removal of Phobo's formation ring by the Eclipse-Yarkovsky effect

Wen-Han Zhou¹, Harrison Agrusa², Patrick Michel^{2,3}, Seiji Sugita¹

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

²Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, France

³Department of Systems Innovation, The University of Tokyo, Japan

Planetary rings are key to understanding the formation of satellite systems, especially in the context of terrestrial planets. The Martian moons Phobos and Deimos, with their near-circular and equatorial orbits, are widely believed to have formed from a debris disk generated by a giant impact. However, this scenario presents a well-known paradox: numerical simulations suggest that such a ring should remain dynamically stable for several gigayears, yet no ring is observed today.

Here, we propose a resolution by introducing a novel dynamical mechanism—the *Eclipse-Yarkovsky effect*—which has not previously been included in the ring evolution. This effect arises from asymmetric thermal emission experienced by particles as they undergo repeated eclipses by the planet, leading to a secular drift in their orbits. While it was discovered in the context of binary asteroid dynamics, its role in removing planetary rings has not been explored.

Through numerical modeling, we investigated the angular momentum transport induced by the Eclipse-Yarkovsky effect and found that it consistently delivers a net positive angular momentum flux to the ring. This drives an outward migration of ring material. We show that the timescale of this Eclipse-Yarkovsky effect around Mars is less than 1 Gyr.

By revisiting the ring-satellite model but incorporating the Eclipse-Yarkovsky effect, we successfully reproduce the current Phobos without a co-existing ring. This scenario may be tested by the upcoming Martian Moons eXploration (MMX) mission led by JAXA, which will return samples from Phobos. Precise compositional and isotopic analyses could constrain the moon's formation age and distinguish between competing formation scenarios.

More broadly, our results suggest that the Eclipse-Yarkovsky effect may contribute significantly to the long-term evolution of dusty rings and small moons. This mechanism warrants further investigation in other planetary systems, including exoplanetary ring systems.

クレーター分布の経度方向に対する非一様性から示唆される フォボスの表面更新と公転様式の共進化

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

¹ 東京大学, ² JAXA 宇宙科学研究所

火星衛星も月と同様に、常に同じ面を惑星に向けて公転している。衛星の表層進化に見られる非一様性は、惑星-衛星系の進化史理解に向けて調査されてきた [e.g., Christou et al., 2014]。しかし、フォボスのクレーターサイズ頻度分布(CSFD)に見られる傾きの変化である「キンク」は注目されていない。キンクはクレーター消去などの表面更新を反映するため、本研究ではフォボスの CSFD に見られるキンクをもとに経度方向の非一様性を調査し、フォボスの表面更新と公転様式の共進化の理解を目指す。

まず、天体の北緯・南緯 30°以内の火星側 (0°E)、反火星側 (180°E)、先行半球側 (270°E) および後行半球側 (90°E) の 60°×60°の調査領域についてクレーターカウンティングを行い、CSFD を得た (図 1)。次に各調査領域の CSFD に、フォボスのクレーター生成関数 [Schmedemann et al., 2014] をフィッティングし、クレーター数密度を算出した。CSFD がフィッティングから有意に逸脱する直径をキンク直径として定義した [Platz et al., 2010]。次に、特定したキンク直径を新たなフィッティング範囲の上限とし、再度同様の操作を繰り返すことで、複数のキンクを見出した。

解析の結果、全ての調査領域において、直径 400 m と 800 m に共通してキンクが見つかった。一方で、直径>1 km のキンクは 1.2–1.7 km と調査領域ごとにばらつきを持ち、さらに先行半球側にはこのサイズのキンクは見られなかった。また、火星側は反火星側に比べて全てのサイズのクレーター密度が一貫して低いことが分かった。レゴリス層の厚みは後行半球側と反火星側で 54–61 m、火星側で約 43–47 m であった。一方で、>1 km に及ぶキンクが見られなかった先行半球側は、直径 2 km のクレーターが消去されたと仮定すると、他地域を上回る少なくとも 73 m 以上の厚い堆積層に覆われていることが示唆された。この地域ごとの厚みとフォボスの表面積から、全球の総堆積物量は 52–91 km³ と推定された。

算出されたレゴリス総体積がフォボス最大のクレーターであるスティックニー形成時に放出したレゴリスの推定体積とよく一致する [e.g., Kikuchi, 2021] ことから、フォボスを覆うレゴリス層はスティックニー形成時の放出物堆積層であると考えられる。すなわち、1.2–1.7 km の最大のキンク直径より大きなクレーター群はスティックニー形成以前からの、小さなクレーター群はスティックニー形成以後の表層進化史をそれぞれ反映していると考えられる。

この時代区分で結果を解釈する。まずスティックニー形成時の大量の放出物が、先行半球側で選択的に厚く堆積した。次に、クレーター密度が火星側で一貫して低い観測結果は、火星がフォボスの火星側に対する天体衝突の遮蔽物として働く効果が表層に明確な非一様性をもたらすほど、フォボスが現在の潮汐固定を受けてから十分な時間が経過していることを示唆する。本成果は MMX による探査と組み合わせることで、惑星-衛星系の進化史のさらなる理解に貢献することが期待される。

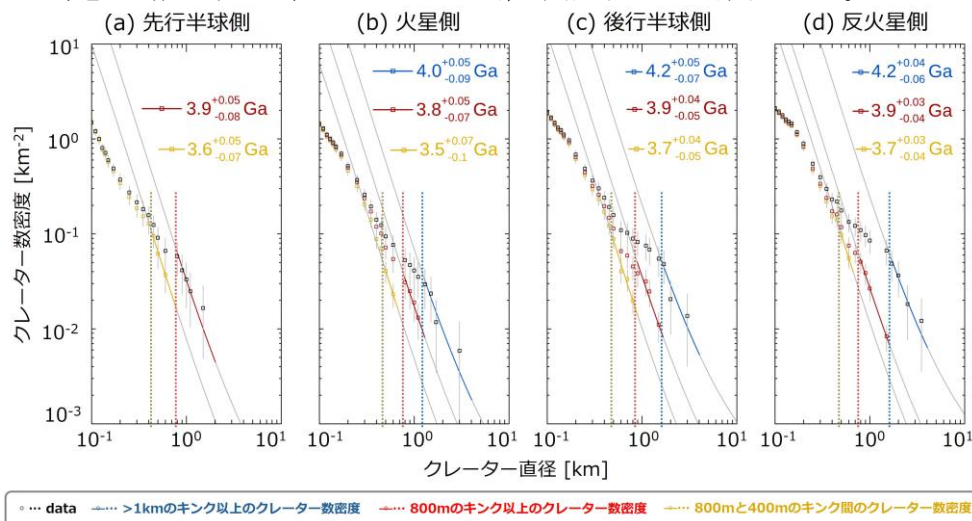


図 1. 各調査領域のクレーターサイズ頻度分布。N(1) は直径 1 km で規格化したクレーターサイズ頻度分布。

火星マグマオーシャン結晶化モデルから制約する 火星マントル深部での Ca ペロブスカイト集積層存在の示唆

○山崎奏次郎¹ 三河内岳^{1,2}

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻 ² 東京大学総合研究博物館

はじめに：火星隕石に記録された $\epsilon^{142,143}\text{Nd}$ 組成は、火星の内部進化の時間スケールおよび内部構造の理解にとって重要である。我々は火星マグマオーシャン(MMO)固化に伴う分別結晶作用および放射壊変を考慮したモデルを提案し、火星マントルの Nd 分布が MMO の結晶化タイミングと晶出鉱物相に強く依存することを示した。このモデルにマントル深部における Ca ペロブスカイトの集積を考慮することで、従来は統合的に説明できていなかったシャーゴットait、ナクライト、シャシナイトの3つの主要火星隕石グループのソース深度と形成タイミングの同時推定を可能とした。

解析手法：本研究では MMO を 10^4 層に分割し、深部から表層に向けた段階的な結晶化を数値計算した(図 1)。このモデルでは結晶分化と崩壊に伴う、メルトと結晶化層の $^{146,147}\text{Sm}$ および $^{142,143}\text{Nd}$ 濃度変化を考慮して計算している。各層の結晶化鉱物モード組成は Yoshizaki et al. (2020) をもとに推定し、火星の Nd および Sm バルク組成は CI コンドライトを仮定した。

結果と考察：MMO 結晶化モデルから、3つのシャーゴットait化学的サブグループ(Enriched、Intermediate、Depleted)のソース深度はそれぞれ~50 km、100 km、400 km と見積もられた。また、ナクライトおよびシャシナイトのソース深度はコア・マントル境界付近の~1800 km と推定された。これは Ca ペロブスカイトの集積によって同位体組成が変化した層に対応すると考えられ、ナクライトの親マグマが Ca に富むこととも整合的である。この層の形成には、Ca ペロブスカイトが安定化するほど高压な条件が必要であり、これは火星が初期にほぼ全溶融していたことを示唆する。我々のモデルでは、コア形成タイミングは CAI 形成から~100 万年後で、MMO の固化時間スケールは~7 千万年と推定された。したがって、半減期約 70 万年の ^{26}Al 崩壊熱が MMO 形成に大きく寄与した可能性が示され、MMO が全球的に溶融していたという説を支持する。

結論：火星隕石のマントルソースは、同一の MMO 結晶化過程において形成されたものであり、本研究では、異なる火星隕石グループのソースを一つの MMO 結晶化モデルで説明することができた。また、火星マントルの内部を構成する鉱物の深度分布および内部進化時間スケールにも新たな制約を与えることができた。

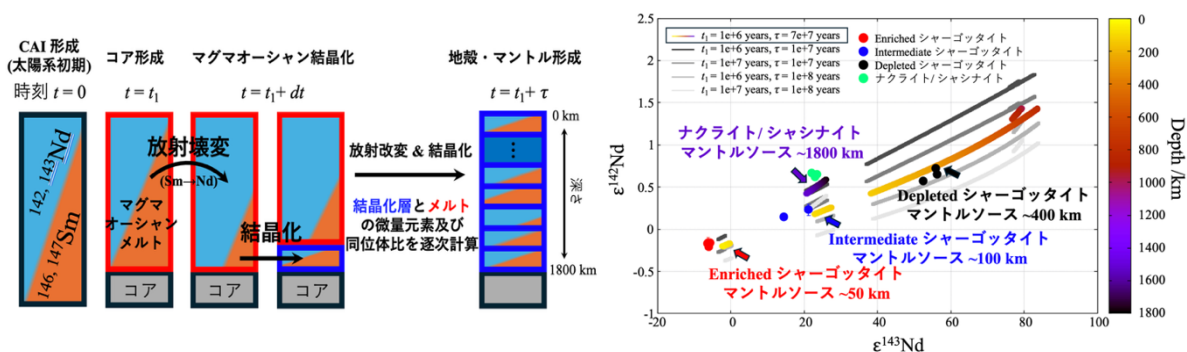


図1: MMO 結晶化モデル(右)と、モデルから推定される深さごとの火星マントル中 Nd 同位体比分布(左)

Production of formaldehyde in the early Martian atmosphere induced by continuous solar energetic particle events

太陽高エネルギー粒子の継続的降り込みによる
初期火星大気中でのホルムアルデヒド生成

○中村勇貴¹, 関華奈子¹, 寺田直樹¹, 小山俊吾², 吉田辰哉², 堺正太郎³

¹ 東京大学, ² 東北大学, ³ 慶應義塾大学

Formaldehyde (H₂CO), an essential precursor for abiotic synthesis of ribose and amino acids, could have been photochemically produced in the early Martian atmosphere under relatively reduced atmospheric composition with higher H₂ or CO partial pressure (Koyama et al., 2024). The Curiosity rover discovered both organic compounds along with manganese oxides in the Gale crater sediments, suggesting highly oxidized surface environment (Noda et al., 2019). The production of organic compounds under such oxidized environment remains an unanswered question. This study focuses on the role of solar energetic particles on the production of H₂CO under oxidized atmospheric composition. The flare observations of solar-type G stars by the Kepler mission suggested that our Sun should have been much more active, and intense SEP events could have hit the planetary atmospheres repeatedly 4 billion years ago (e.g., Lingam et al., 2018). Such continuous precipitation of SEPs into the early Martian atmosphere could have enhanced the dissociation of water vapor and altered atmospheric composition (Nakamura et al., 2023a).

We developed an atmospheric ionization model based on continuous slowing down approximation using stopping power data and a one-dimensional photochemical model including neutral and ion chemistry based on PROTEUS (Nakamura et al., 2023b). We found that the surface mixing ratio of formaldehyde drastically increased when the proton flux intensity was above 10⁴ [cm⁻² s⁻¹ sr⁻¹], even without H₂ degassing flux. Such change in the atmospheric regime stems from the depletion of the surface O₂ mixing ratio. SEP-induced ion chemistry produces atomic hydrogen at high altitudes, which reacts with O₂ to reduce the downward flux of O₂, resulting in an insufficient surface mixing ratio. Conversely, HCO, the precursor of formaldehyde, is enhanced due to the critical depletion of O₂. The remaining OH reduces the CO mixing ratio via HOx catalytic cycle of CO₂ reproduction. Results suggest that SEP-induced chemistry can be important in the photochemical stability of the early Martian atmosphere, and biomolecules can be effectively produced in a more oxidized atmosphere than previously considered.

Koyama, S., et al. (2024). *Sci. Rep.*, 14, 2397.

Noda, N., et al. (2019). *J. Geophys. Res. Planets*, 124, 1282–1295.

Lingam, M., et al. (2018). *Astrobiology*, 853:10.

Nakamura, Y., et al. (2023a), *J. Geophys. Res. Space Physics*, 128, 12.

Nakamura, Y., et al. (2023b), *Earth, Planets and Space*, 75:140.

二酸化炭素の光分解とオゾンの生成に伴う 火星大気の酸素同位体分別

吉田辰哉¹, 青木翔平², 中川広務¹, 寺田直樹¹, 長谷部聖憲¹, 中村勇貴², 小山俊吾¹, 堺正太郎³

¹東北大学, ²東京大学, ³慶應義塾大学

火星大気の構成成分は重い同位体に富んでいることで知られている (e.g., Webster et al., 2013). 大気が宇宙空間へ散逸する際には軽い同位体が優先的に失われるため, この重い同位体の濃集はこれまで火星大気が大気散逸の影響を強く受けてきたことを示唆する (e.g., Jakosky et al., 1994). 一方で, 火星大気の同位体組成は大気散逸のみならず大気化学過程による分別の影響も強く受けていると予想される. 主要構成元素の一つである炭素については, 火星周回機 TGO の観測や理論モデルの推定から, CO₂ の光解離時の同位体分別により光化学生成物である CO が重炭素(¹³C)に著しく枯渇していることが明らかとなってきた (Aoki et al., 2023; Alday et al., 2023; Yoshida et al., 2023). 同じく主要構成元素である酸素についても, TGO の観測から CO に著しい同位体異常が生じていることが示唆されている (Aoki et al., 2023; Alday et al., 2023). ここで, CO₂ の光解離は炭素のみならず酸素の同位体分別も引き起こすことが知られている (Schmidt et al., 2013). 加えて, 地球成層圏においては O₃ が生成される際に重い酸素(¹⁷O, ¹⁸O)が O₃ 中に濃集することが報告されている (e.g., Thiemens, 1999). これらは酸素同位体分別過程の中でも特に顕著な分別をもたらすと考えられるが, 火星大気の同位体組成に与える影響についての定量的評価はなされていない.

本研究では, CO₂ の光分解および O₃ の生成に伴う酸素同位体分別過程を考慮した鉛直一次元大気化学モデルを構築し, 火星大気中の酸素含有種の酸素同位体組成高度分布を推定した. モデル計算の結果, CO₂ の光分解時の分別により, CO は CO₂ と比較し ¹⁷O, ¹⁸O に約 100‰ 枯渇した同位体比を示す. これは TGO の観測結果と整合的であり, さらに炭素同位体組成との整合性を踏まえると, CO の同位体比が CO₂ の光解離時の同位体分別によって特徴付けられていることが明らかとなった. 一方で, O₃ はその生成時の分別により CO₂ と比較し約 100‰ 重い酸素に富む. 以上の二つの分別過程の影響を受け, 酸素原子は CO₂ と比較し最大で約 300‰ 重い酸素に枯渇する. この分別を受けた酸素原子は, さらに上層に輸送された後に宇宙空間に散逸することから, 大気散逸時における酸素同位体分別の度合いは, 本研究で考慮した化学的同位体分別過程によって大きく左右されることが明らかとなった. この大気散逸への影響については火星衛星探査機 MMX の質量分析器 MSA による散逸酸素イオン計測により検証できる可能性がある.

参考文献

- Webster, C. R., et al. (2013). *Science*, 341, 250.
Jakosky, B. J., et al. (2014). *Icarus*, 111(2), 271.
Aoki, S., et al. (2023). *PSJ*, 4(5), 97.
Alday, J., et al. (2023). *Nat. Astron.*, 7(7), 867.
Yoshida, T., et al. (2023). *PSJ*, 4, 53.
Schmidt, J. A., et al. (2013). *PNAS*, 110(44), 17691.
Thiemens, M. H., et al. (1999). *Science*, 283(5400), 341.

火星大気ネオン同位体比その場測定のための小型質量分析システム開発

○竹田有汰¹、長勇一郎¹、齋藤義文¹、米田匡宏²、岩田尚能³、三浦弥生⁴、日向輝¹、杉田精司¹¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、² 京都大学大学院理学系研究科、³ 山形大学理学部、⁴ 東京大学地震研究所

火星大気中のネオン (Ne) は、質量数が小さいために大気散逸の影響を強く受け、その滞在寿命は火星の年齢に比べてはるかに短い約 0.6-1 億年と推定されている (Kurokawa et al., 2021)。この短い寿命は、現在の火星大気の Ne は継続的な供給源 (火山性脱ガス) によって維持されている可能性を示唆しており、その同位体比は火星のマントルにおける揮発性物質の組成を反映していると考えられている。しかし、火星大気中の Ne 濃度は極めて低く、また質量分析計を用いた測定では $^{40}\text{Ar}^{++}$ (二価のアルゴンイオン) による $^{20}\text{Ne}^+$ への同重体干渉が問題となり、これまで高精度な Ne 同位体比のその場測定は実現されていない。この課題を克服するため、先行研究で有効性が示された透過膜 (Miura et al., 2020; Cho et al., 2024) を搭載する質量分析システムの開発を進めてきた。特に探査機搭載を目指した開発では、ポンプの単一化やチャコールトラップの廃止、配管設計の最適化といった工夫により、従来装置から重量を 1/10 (約 7 kg)、設置面積を 85 %削減した小型システムの構築に成功した。本研究では、この先行開発された小型システムを基盤とし、実際の火星探査に向けた実証実験を進めることを目的とする。

本システムに四重極型質量分析計 (QMS) を搭載し、装置全体を排気しベーキングを行った後、装置のバックグラウンド (ブランク) および膜分離を透過させた地球大気の質量スペクトルを計測した。地球大気が分離膜の高真空側へ透過する際、原子半径の小さい Ne が Ar よりも選択的に透過し、 $^{40}\text{Ar}^{++}$ による $^{20}\text{Ne}^+$ への干渉が大きく減少し ^{20}Ne の計測が可能になる。また、 CO_2 の二価イオンである $^{44}\text{CO}_2^{++}$ も $^{22}\text{Ne}^+$ と同じ $m/z=22$ に信号が現れるが、本装置ではゲッターで CO_2 を吸着させることでこの影響を除去し、 ^{22}Ne の計測を可能としている。得られたスペクトルから、 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比は 12.03 ± 0.21 と算出された。この数値は、地球大気の既知の同位体組成 (9.8) に対する確度 23%に相当する。この確度には今後の改善の余地があるものの、火星マントルにおける Ne の起源が太陽風由来かコンドライト由来かを識別するために必要な確度 (10%) に迫るものである。地球大気を用いた実験に続き、火星模擬大気 (CO_2 を主成分とし Ne を 2.5 ppm 程度含む混合ガス) を用いて同様のスペクトル測定を行う。

また、将来の火星探査で用いる飛行時間型質量分析計 (TOF-MS) の性能評価も進め、質量分解能は 100 程度を達成し、検出限界は 2×10^{-12} mol 程度であったことを確認した。

火星模擬大気の透過測定実験により、火星の低圧・ CO_2 環境下でのシステムの性能を評価し、実際の火星環境下での Ne 同位体比測定の実現可能性を検証する。火星マントルの Ne 同位体比を 10%未満の確度で決定し、その起源を識別することで、火星の内部活動や初期大気進化の解明に繋がる技術的基盤の確立を目標に検証実験を進める。

Oxidation of Halite (NaCl) in Global Dust Storms on Mars

Willian P. Salgado¹, Eito Hirai¹, Yasuhito Sekine¹

¹Earth-Life Science Institute, Institute of Science Tokyo.

Abstract

The present-day Martian surface is highly oxidized: multiple-valency elements such as iron (Fe), manganese (Mn), sulfur (S), chlorine (Cl) and bromine (Br) are found in their oxidized states, incorporated into oxidized minerals. Among these, sodium chlorate (NaClO_3) and sodium perchlorate (NaClO_4) are particularly significant, as they offer valuable insights into both the past and present conditions and evolution of Mars. Several proposed mechanisms for chlorate and perchlorate formation on Mars have focused on homogeneous gas-phase photochemistry and electrostatic discharge events. However, these processes alone cannot account for the perchlorate concentrations or the observed $\text{ClO}_4^-:\text{Cl}^-$ ratio measured by in-situ instruments. Additionally, the transient detection of hydrogen chloride (HCl) in the Martian atmosphere — observed by ESA's ExoMars Trace Gas Orbiter during a global dust event — suggests the existence of an efficient and dynamic chlorine exchange between atmospheric gases and dust particles. In this work, we propose that sodium chloride (NaCl) is lifted into the Martian stratosphere and troposphere by dust, as observed by NASA's MAVEN mission, which reported dust transport up to 150 km altitude. There, NaCl may undergo heterogeneous gas-solid reactions with atomic oxygen. To investigate experimentally the heterogeneous reaction between halite (NaCl) and atomic oxygen in the atmosphere of Mars, we irradiate NaCl with atomic oxygen using an O_2 cold plasma discharge. Our results show that chlorate and perchlorate can form on the irradiated surface of NaCl. This finding improves our understanding of the chlorine cycle on Mars and highlights the significant role of dust storms in driving surface and atmospheric chemistry, representing a key advance in Martian geochemical and photochemical studies.

Thermochemical Modeling Perspective of the Distribution of Ca/Fe Carbonates on Mars

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

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

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

³The SETI Institute

Introduction

The composition of carbonate minerals on Mars is related to characteristics of the aqueous environments they formed in, including the potential habitability of such environments. Carbonates detected on Mars to date include two types of compositions: Mg-rich and Ca/Fe-rich [1]. On a global scale, Ca/Fe-rich carbonates appear roughly associated with more felsic rocks, but whether there is a causal link between the felsic rocks and the Ca/Fe-rich carbonates is unknown. In this study, we used thermochemical simulation to investigate whether such a causal relationship exists.

Methods

We conducted 1-D numerical simulations of low-temperature water-rock interaction in a possible ancient Martian near-surface setting ($p\text{CO}_2 = 1$ bar, temperature = 5 °C), with both mafic and more felsic protoliths. Since ancient Mars likely had a global groundwater system [e.g., 2], and surface liquid water likely had been episodic [3], we also considered the effects of groundwater percolation and limited durations of water-rock interaction. For scenarios without significant percolation, we also simulated the loss of the final alteration fluid through evaporation. Simulations were run in PHREEQC Version 3 [4].

Results and Discussion

Our simulations show that protolith composition, duration of alteration, and rate of percolation (which determines whether the alteration fluid is mainly lost through drainage or evaporation) together control the composition of carbonates, the amount of carbonates, and their distribution in the vertical dimension in the crust. Under our simulated conditions, dominantly Mg-rich carbonates can only be produced by a mafic protolith, while Ca/Fe-rich carbonates can be produced either by a more felsic protolith or by a mafic protolith that underwent a brief, percolation-dominated alteration event. We also found that percolation not only greatly enhances the efficiency of carbonate formation but also causes the re-dissolution of surface carbonates and transports dissolved CO_2 deep into the subsurface to re-precipitate, providing a mechanistic explanation for the possibly mostly underground and sometimes deeply buried carbonates on Mars [1, 5]. The different secondary mineralogies produced by different combinations of protolith compositions and durations of alteration can potentially help remote sensing studies identify spectrally undetectable felsic minerals on Mars and distinguish between ancient aqueous environments where liquid water was only present briefly and those with more long-lived liquid water, which may be better targets to search for evidence of past life.

References

- [1] Wray J. J. et al. (2016) *J. Geophys. Res. Planets*, 121, 652–677. [2] Salese F. et al. (2019) *J. Geophys. Res. Planets*, 124, 374–395. [3] Kite E. S. et al. (2025) *Nature*, 643(8070), 60–66. [4] Parkhurst, D. L. & Appelo C. A. J. (1999) *U.S. Geol. Surv. Water Resour. Invest. Rep.*, 99–425. [5] Jakosky B. M. (2019) *P&SS*, 175, 52–59.

SLIM 搭載 MBC 観測による月面岩石の組織観察
Rock texture observed by SLIM MultiBand Camera

○大竹真紀子^{*1}, 佐伯和人^{*2}, 仲内悠祐^{*2}, 長岡央^{*2}, 西野真木^{*3}, 横田 康弘^{*3, 4},
宮崎理紗^{*3}, 佐藤広幸^{*3}, 本田親寿^{*5}, 石原吉明^{*3}, 西谷隆介^{*3}, 梶谷伊織^{*3},
*1 岡山大/*2 立命館大/*3 JAXA/*4 東京科学大/*5 会津大

2024 年 1 月に日本初の月面着陸を成功させた小型月着陸実証機 SLIM に搭載された観測機器であるマルチバンドカメラ (MBC) を用いて、可視から近赤外波長域における 10 バンドでの月面岩石のその場分光観測を行った。MBC の特徴の 1 つが高い空間分解能であり、10 m の距離において約 1.1 mm/pixel を達成する。

我々はこれまでに、観測した岩石の 1 つに粗粒のカンラン石が多く含まれており、岩石に含まれる鉱物種や量比、粒子サイズなど岩石組織、カンラン石の Mg# 推定値などから、この岩石がマントル起源であると考えられることを報告してきたが、今回の研究では、別のカンラン石を含む岩石の組織解析を行った。新しく解析を行った岩石 (Kaiken) はカンラン石と斜長石の両方を含み、リモートセンシングによる SLIM 着陸点周辺の解析結果と統合し、トロクトライトであると推定される。トロクトライトは、月のマグマオーシャンの固化過程で地殻に貫入したマントル由来のマグマが地殻と混合して形成されたと考えられ、月の初期分化過程を理解する上で重要な岩石である。今回、MBC で得られた Kaiken の反射率データを元に、鉱物種ごとに異なる RGB 各色を配色処理した画像をさらに 2 値化し、これに楕円をフィットさせその長軸・短軸を求めることで、カンラン石のクラスタの粒子サイズを求めた他、カンラン石の Mg# ($\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ モル%) を推定した。比較対象として、月試料のトロクトライトで組織観測が可能な大きさを持つ唯一の試料 (アポロ 17 号試料 76535, 重量約 32g, 試料のサイズは最長辺で約 4.5cm) について、同様の手法で組織解析を行った。

両者の結果を比べると、Kaiken は 76535 に比べてクラスタの粒子サイズが優位に大きく (平均値で 5 倍程度)、また両者はカンラン石の組成も異なることがわかった。76535 はこれまでの研究から低い冷却速度 (3.9 °C/Ma) [1] が報告されており、地下深部で形成された岩石であると考えられる。Kaiken は 76535 よりもさらに冷却速度が低く、また両者のカンラン石の組成が異なることから、今回の結果は、マントルオーバーターンに伴うマントル物質の浅部への浮上・熔融と地殻への貫入、それに伴うトロクトライトの形成過程に関して、既存モデルの改訂が必要であることを示す。

[1] Borg et al. GCA, 201, 377-391 (2017).

月表層進化の解明：Chang' E-4 Lunar Penetrating Radar による月地下岩石サイズ-頻度分布計測

○神田恵太郎¹、熊本篤志¹、石山謙²、加藤雄人¹

¹東北大学、²東京国際工科専門職大学

月面を覆う岩石のサイズ-頻度分布 (rock size-frequency distribution: RSFD) は月面の形成年代や進化の過程を反映している。これまで月の RSFD はカメラ観測により調査されてきた (Di et al., 2016; Watkins et al., 2019) が、カメラ観測では現在の月面しか観測できず、地下に埋没した過去の RSFD はこれまで知られていない。そこで、我々は地中レーダー観測に着目した。地中レーダーは電波を用いた非破壊の地下計測手法であり、異なる年代に形成された複数の地下層を観測できる利点がある。

これまでのシミュレーション研究 (Kanda et al., JpGU2025) から、Chang' E-4 (CE-4) 搭載の Lunar Penetrating Radar (LPR, Fang et al., 2014) による観測では、計測されるエコーの波形に基づいて岩石の直径を 3 種類に分類できることがわかっている：直径 6 cm 以下 (グループ 1)、直径 6~9 cm (グループ 2)、直径 9 cm 以上 (グループ 3)。我々はこのシミュレーション結果に基づき CE-4 LPR のデータ解析に取り組んだ。LPR は中心周波数 500 MHz で、深さ 40 m までを分解能 30 cm 程度で観測可能である。CE-4 の探査領域は複数の地層から構成されており、地表から深さ 12 m までのレゴリス層に含まれるエコーを目視で検出した。検出されたエコーは 188 個で、そのうちグループ 1、2、3 いずれかに分類され、岩石由来のエコーと考えられるものは 116 個であった。この結果を元に、我々は初めて月地下の RSFD を得た。他の 72 エコーについては、地中の岩石を観測対象としたシミュレーションで見られた極性とは逆の極性を持つエコーが観測されたことから、レゴリスよりも誘電率が低い地下空洞からのエコーである可能性が考えられる。しかしレゴリス層における空洞の形成過程についてはさらなる議論が必要である。得られた RSFD についてべき乗と指数関数のフィッティングを比較した。50 Ma より若い RSFD はべき乗分布、古い RSFD は指数関数分布に従うと考えられている (Rüsch et al., 2022) が、決定係数はそれぞれ 0.83, 0.81 となり、地下 RSFD が従う分布を決定することはできなかった。また岩石の空間分布を調べたところ、地表から深さ 1.2 m までの領域で得られた岩石エコーは 8 個であったのに対し、深さ 1.2~4.4 m の領域では 63 個の岩石エコーが得られた。Gao et al., (2023) は Mini-RF 計測から地下の岩石は地表の岩石よりも長期間隕石衝突から保護されることを提案しており、CE-4 LPR 観測でも同様の傾向が見られたものと考えられる。また、Zhang et al., (2024) の LPR 解析で報告された 4 つの埋没クレーターと検出された岩石エコーの空間分布を調べ、埋没クレーターの形成順序を推定した。これらの発見は CE-4 着陸地域の進化プロセスをより詳細に明らかにし、月表層進化についての理解を促進するものである。

月の巨大衝突構造掘削物の組成解析による初期火成活動史の復元

○山下 光葉、諸田智克

(東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻)

月は形成直後、マグマオーションの冷却により、斜長石を主成分とする原始地殻とマントルに分化した (e.g., Warren, 1985)。その後、マントル内の放射性元素の崩壊熱により部分的な再融解が起こり、生成された玄武岩質マグマが天体衝突で形成された低地に噴出し、月の「海」を形成した。これらの年代測定から、火成活動は約 39~15 億年前にかけて続いていたことが知られている (Hiesinger+ 2003; Morota+ 2011)。

一方、39 億年前以前の冥王代には激しい衝突が繰り返され、当時の火成活動の痕跡は多くが破壊・改変されており、この時期の火成活動に関する情報は極めて限られている。それに対して近年の高解像度重力データからは、巨大衝突構造下の地殻に高密度物質が存在することが示唆されており (Andrews-Hanna+ 2012; Nishiyama+ 2024)、この時期にも地殻内へのマグマ貫入が起こっていた可能性がある。

本研究の目的は、月の初期マグマ活動を明らかにすることである。特に、39 億年前以前に形成された巨大衝突構造における地殻内マグマ貫入の有無とその分布を検討するため、分光データを用いて玄武岩質マグマの痕跡を解析する。

調査対象には、巨大衝突構造の北側リングに線状重力異常が交差する Crisium 盆地 (Andrews-Hanna+ 2012) を選定した。解析には、Kaguya 搭載の Multiband Imager (MI) データを用い、宇宙風化の影響が比較的少なく、盆地形成以前の組成情報を保持していると考えられるリング上の新鮮クレーターに注目した。新鮮クレーターの選定には、表面の風化度を示す指標である Optical Maturity (OMAT; Lucey et al., 2000) を用い、 $OMAT \geq 0.2$ のピクセルを含むものを抽出した。さらに、Lucey 法 (Lucey et al., 2000; Otake et al., 2012) により FeO および TiO_2 含有量を推定し、 $OMAT \geq 0.2$ かつ $FeO \geq 15 \text{ wt\%}$ 、 TiO_2 が 1~10 wt% の条件を満たすピクセルを玄武岩露頭候補として抽出した。

その結果、リング上の新鮮クレーター内には約 51 万ピクセルの新鮮露頭が確認され、そのうち玄武岩露頭候補に該当するのは 246 ピクセル (約 0.05%) であった。これらの玄武岩露頭候補は直径約 0.3 ~ 9 km のクレーター内に検出され、その内 8 割は直径 1 km 以下のクレーターであった。このことは Crisium 放出物に玄武岩露頭候補が含まれていることを示唆しており、Crisium 盆地の形成以前にマグマが地殻内へ貫入していたことを支持するものである。さらに、新鮮露頭における FeO と TiO_2 の関係を解析したところ、 $FeO \geq 15 \text{ wt\%}$ の領域において TiO_2 と強い正の相関を示すピクセル群が確認され、これらは北側リング上のみ分布していた。この空間的偏りは、現在線状重力異常として観測される構造が、盆地形成以前の大規模な貫入岩体に対応し、それが衝突時に掘削・再堆積された結果として北側リング上に露出している可能性を示唆する。講演では、検出された玄武岩露頭の組成的特徴や空間的偏りについて議論する。

月永久影領域におけるレゴリス層内の水分子の挙動再現シミュレーション

○佐伯和人¹、松島亘志²、鹿山雅裕³

¹立命館大学, ¹筑波大学, ¹東京大学

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呼ばれる領域がある。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層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・凝華の繰り返しが考えられているが、先行研究の計算機シミュレーションモデルはレゴリス層内部に関しては深さ方向の1次元拡散モデルに単純化されている（例えば Schorghofer and Taylor (2007)）。また、昇華時の水分子の運動エネルギーは環境温度をもとに計算されており、水分子がレゴリス表面に衝突した際の運動エネルギーが散逸しきれていない状況は考慮されていない。我々は、レゴリス層内部のシミュレーションをより現実に近づけるために、レゴリスの形状モデルを使った模擬レゴリス層をつくらせて水分子移動の数値シミュレーションを行った。レゴリス形状モデルとして、Matsushima et al. (2008)においてアポロ16号試料の月レゴリスを大型放射光施設 SPring-8 のX線CT装置を使って3次元形状を測定し1粒子につき様々なサイズの球体を組み合わせることで68タイプの複雑形状粒レゴリスを表現したものを用いた。今回は、それらをさらに複製して粒子数を増やした上で個別要素法シミュレーションによって積層してつくられた「ゆる詰め」と「密詰め」のレゴリス層を生成した（図）。レゴリス層に対し、上方から水分子をうちこみ、レゴリス表面で跳躍する際には、粒子表面に対して垂直方向に近づくほど射出確率が高いという余弦則にしたがって跳躍させた。跳躍の回数は初期の運動エネルギーが徐々に散逸するケースを検討した。レゴリスの形状効果や、レゴリス層の空隙率の違い、運動エネルギーの散逸過程の違いが、レゴリス層内の水分子の分布にどのような影響を与えるかについて報告する。

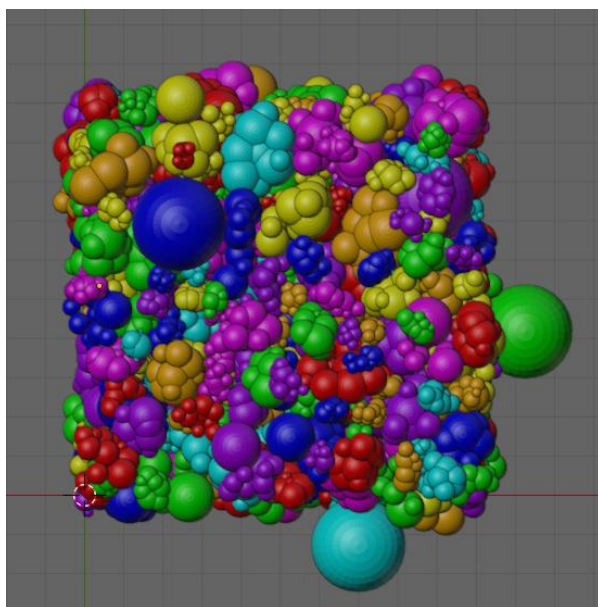


図 密詰めのレゴリス層モデルの例
上方から見た図。水平方向の境界は周期境界条件。

月面極域水の濃集過程

○橋爪 光¹

¹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 (e. g., Sanin et al., 2017)。その観測によると、水濃度 0.1wt%相当量以上の水素が緯度 70 度以上の広範な領域、あるいは、緯度 85 度以上のほぼ全域において見られる。この水は、極域とは限らず月面全領域に降着した様々な起源を持つ水・水素を供給源とし、マイグレーションと呼ばれる月面上空における分子の移動を経て、その一部が冷たい極域月面に捕獲された、と概説される。

しかし、この水素の極域における正確な分布と濃集の仕組みはまだ解明されていない。その可能性として大別して二つの過程が考えられる。一つは永久影領域において表土の最表面に水が凝縮・吸着されるものである。永久影においては 110 Kelvin 以下の極低温が恒常的に維持されるため、確かに水捕獲が可能だと考えられる。この温度域では水の昇華に要する時間が数十億年以上に及ぶためである。ただ、緯度 70 度に至る比較的低緯度の領域まで永久影が広範に形成するかどうかは必ずしも明らかではない (Hayne et al., 2021)。もう一つは、ポンピング効果と呼ばれる過程により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 (e. g., Schorghofer and Aharonson, 2014)。月高緯度域全表面の圧倒的割合の領域においては 1 か月毎に日照が訪れると考えられる。この日照域において卓越する水捕獲相があるとすれば、永久影のみに注目する場合に比べ、月極域に存在する水総量と分布の見積は大きく異なることになる。本研究では、日照域で卓越する後者の効果に関する数値シミュレーションを実施した。講演では、現在までの進捗を紹介する。ポンピング過程では、上空から極域月面に降着した水分子総量の内のごく一部が表土内部に輸送され長年にわたり一定効率で蓄積し続けると推定される。捕獲効率は表土の様々な物性値や日照条件に依存することが考えられる。これまでの評価の結果、緯度や地表の傾斜により総日照量が少ないほど捕獲水濃度が高く、捕獲深度が浅いこと、さらに、捕獲深度はその深度における最高到達温度の関数であることを示唆する結果が得られつつある。

水素含有率を制御した月レゴリス模擬物質の開発

○プラート アルヴィン¹, 宮本 英昭¹, 小林 真輝人¹, 竹村 知洋¹, 清水 雄太¹

¹東京大学

Lunar Prospector (LP) ミッション搭載の Lunar Prospector Neutron Spectrometer (LP-NS)や、Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)に搭載された Lunar Exploration Neutron Detector (LEND) などの中性子分光計は、中性子が銀河宇宙線 (GCR) が月表層物質と相互作用することで生成され、表層から漏れ出たものを月周回軌道上から観測している。中性子は衝突する原子核の質量数が小さいほど効果的に減速されるため、レゴリス中の水素量の増加は熱外中性子束の減少として観測される[1,2]。一方で速中性子束や熱中性子束は、レゴリスの中性子吸収断面積や平均原子量にも依存する[3,4]。したがって、中性子分光計のデータの解釈には、観測領域を構成する物質の化学組成を考慮した数値計算あるいは実験によるキャリブレーションが不可欠であり、実験的検討においては使用する月レゴリス模擬物質 (シミュラント) 中の水分量や化学組成の制御が肝要となる。しかし、水氷や液体水を用いた従来のシミュラントの作製方法では、シミュラント中の水分が容易に揮発するため水分量を長期間一定に保つことは困難である。また中性子観測においては、実際の月表層物質に合わせて平均原子量や中性子の巨視的吸収断面積を調整したシミュラントは報告されていない。

本研究では、(1) 水等価水素量 (Water Equivalent Hydrogen: WEH) を高精度で長期間安定に維持でき、(2) 平均原子量や中性子の巨視的吸収断面積を精密に制御したシミュラントの作製に取り組んでいる。具体的には、シミュラント中に長期間安定的な WEH を保持するために構造水を含有する鉱物を選定した。またその他の材料物質の選択と混合比を工夫することで、中性子の巨視的吸収断面積および平均原子量を制御する手法を編み出した。本講演では月レゴリス模擬物質の検討状況と、今後の展望について議論したい。

参考文献

- [1] Feldman et al. (1998) *Science*, 281(5382), 1496-1500. [2] Mitrofanov et al. (2010) *Science*, 330.6003: 483-486. [3] Elphic et al. (1998) *Science*, 281(5382), 1493-1496. [4] Gasnault et al. (2001) *Grophys. Res. Lett.*, 28(19), 3797-3800.

月極域探査（LUPEX）の観測運用 -着陸地点候補（CR-1）領域の探査領域候補の再選定-

○石原吉明¹・諸田智克^{1,2}・鹿山雅裕²・橋爪光³・井上博夏¹・西谷隆介¹

・大竹真紀子^{1,4}・アウトプットデータ創出チーム¹

¹宇宙航空研究開発機構・²東京大学・³茨城大学・⁴岡山大学

日本とインドの国際共同ミッションである月極域探査（LUPEX）は、月極域に存在可能性が示唆されている水氷について、月周回軌道からの「リモートセンシング観測」ではなく、月表面に降り立ちローバを用いて移動しながら搭載する観測機器システムを用いて、「複数地点におけるその場観測」を行う事で、水の直接的な検出・さらに検出された場合は定量まで行い、月極域の水資源に対するグランドトゥールースたるデータを取得する。また、各観測地点において、環境やその時間変化に関するデータを合わせて取得する。LUPEX ローバの移動・観測範囲における水検出の有無および多寡と、環境条件について複合的に解析することで、月における水の移動・濃集原理に関するモデルを構築・制約する。最終的には、LUPEXの観測データと構築・制約した水移動・濃集のモデルを用いて、月極域全体の水氷量を推定し、将来の月探査・開発における資源としての有用性を評価する事を目的としている。

LUPEXの観測の基本的なコンセプトは、打上げ前にあらかじめ設定した着陸地点近傍の観測領域内について、まずローバに搭載した各種の観測機器による疎観測（スキャン観測）を実施し、取得したデータを基に詳細観測（掘削分析）実施場所を選定したうえで、実際に掘削してレゴリスサンプルの取得および分析を実施するものである。打上げ前に観測領域を選定するうえでは、水氷の存在可能性の観点、また水氷が存在した場合の水氷胚胎層の起源・年代や環境条件について広く情報を得られる地点を選定することが必要である。

LUPEX プロジェクトでは、着陸候補地点の1つである南極点近傍の Shackleton クレータと de Gerlache クレータをつなぐ尾根（Connecting Ridge; CR-1）領域について、既存の月周回探査により取得されている高解像度画像データや地形データを用い、クレータ年代学・エジェクタ分布・厚さ解析・表面および地下温度シミュレーションとその結果を用いて水氷の安定保持深さの解析を行い、ローバでの移動・到達可能性も含め、ミッション成果を最大化する探査候補領域の再選定を進めている。本発表では、再選定の基礎となる各種のデータと、現在議論されている探査領域候補について報告する。

月表層の起伏が THz 帯の偏波観測に及ぼす影響の数値的解析

○竹村知洋¹、宮本英昭¹、小林真輝人¹¹ 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

Lunar Terahertz SURveyor for Kilometer-scale MappIng (TSUKIMI) 計画は、THz 帯において月地下浅部における熱物理的特性や誘電特性を推定し、水氷や金属物質の濃集領域を発見することを目的としている。特に、TSUKIMI は、偏波比の観測から見かけ誘電率を推定し、領域ごとの相対的な誘電特性の差異を見ることによって、水氷や金属物質の濃集領域を特定する。しかし、観測される THz 波の偏波比や見かけ誘電率は水氷や金属物質のみならず、かさ密度や温度をはじめとしたレゴリスの状態によって多様に変化することが知られている (e.g., Heiken et al., 1991; Kobayashi et al., 2023)。中でも、地表面の起伏は、電磁波の放射・散乱挙動に大きな影響を与え、観測される偏波比や推定される誘電率の値を大きく変動させる可能性がある (e.g., Cai & Fa, 2020; Guo et al., 2021)。しかし、月表面における THz 波の波長スケール (数百 μm -数 mm 程度) の起伏が観測に与える影響は明らかにされていない部分が多い。そこで、本研究では月表面の起伏を模擬した室内実験と、起伏に対する THz 波の応答を再現する数値モデルの構築を行い、TSUKIMI の偏波観測に月表面の起伏が与える効果を評価する。特に、月表面の起伏が観測に影響する場合でも、偏波比およびそこから導出される見かけ誘電率に基づいて、水氷や金属物質の濃集領域を特定可能か、初期的な検証を行った。

本研究ではまず、THz 波の波長スケールの起伏が放射や散乱挙動に与える影響を室内実験によって検証した。月表層模擬物質を用いて月表面の起伏を再現し、TSUKIMI 観測で用いられる THz センサの BBM を用いて偏波比の観測を行った。また同時に、Advanced Integral Equation Model (AIEM) を用いた数値モデルを構築することにより月表面の起伏の状態に応じた偏波比の変動を評価した。

実施した室内実験からは、月表層で考えられる mm-cm スケールの起伏が存在した場合でも、偏波比の観測データから水氷や金属資源の濃集領域が区別できる可能性を示した。また数値モデルによる検証から、Chang'E-4 着陸地点の平均的な起伏が存在した場合でも、見かけ誘電率差 0.2 を TSUKIMI 観測で判別することができる可能性を示した。本発表では、今後の展望を含め、実験や数値モデルの詳細について発表する。

参考文献

[1] Heiken et al. (1991), *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*, (No. 1259). Cambridge University Press. [2] Kobayashi et al. (2023), *Earth, Planets and Space*, 75(1), 8. [3] Cai & Fa (2020), *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(8), e2020JE006429. [4] Guo et al. (2021), *Geophysical Research Letters* 48(19), e2021GL094931.

模擬月面環境下における月レゴリスからの Fe 抽出実験

○清末雅人¹，新原隆史²，菊地紘¹，渡邊匡人¹

¹学習院大学，²岡山理科大学

月面における持続可能な探査・開発を実現するうえで，居住施設や研究拠点の建設に必要な不可欠な構造物や，機器の製造・維持，電力インフラの構築に利用できる金属鉄は極めて重要である．しかし，地球から金属鉄を輸送するには，極めて高いコストがかかるため，月表層のレゴリスから資源を直接抽出・利用する「In-Situ Resource Utilization (ISRU)」技術の確立が喫緊の課題となっている．月には様々な岩石の破砕物であるレゴリスが蓄積されており，このほぼ無尽蔵の資源から原料として鉄を抽出できれば探査や居住活動を大幅に加速させることが可能となる．

Show et al. (2022) [1] は，真空熱分解を利用して酸化物から金属を抽出する理論的枠組みを提示し，高真空環境における還元プロセスの可能性を示した．さらに Li et al. (2024) [2] は，純度の高い酸化鉄粉末を用い，ファイバーレーザーによる加熱実験を行い，蒸発して再蒸着した試料中に高純度の金属鉄相が生成されることを示した．しかしながら，こうした実験で用いられた試料は実験室で精製された高純度の酸化鉄であるため，様々な不純物を含む月レゴリスから鉄を抽出できるかよくわかっていない．またもし鉄を抽出できることがわかったとしても，どの手法でどのような鉱物が抽出しやすいのかを理解するには，可能な限り月面環境を模擬した上で，多様な鉱物相や不純物を含む鉱物で実験結果を丁寧に積み上げていくほかない．

本研究では，鉄を多く含む磁鉄鉱から金属鉄を抽出することを目指した．試料には岡山県三宝鉱山で採取した磁鉄鉱を主成分とする鉱物を用いた．試料の形態として粉体およびバルクの二形態に成形し， 10^{-7} pa の高真空下でファイバーレーザーを照射した．照射中は放射温度計によりレーザー照射部の温度を測定するとともに，カメラを用いて熔融の進行度や飛散物の挙動を観察した．

その結果，粉体試料に比べてバルク試料の方がレーザーエネルギーの吸収効率が大きく，温度上昇が顕著であった．これは，粉体試料中の空隙が熱伝導を妨げるために吸収効率が低下し，一方でバルク試料では効率的に熱が伝わるため，急激な温度上昇が生じたと考えられる．また，バルク試料では粉体試料に比べ，レーザー照射部から多量の飛散物が観察され，反応がより活発に進行していることが確認された(図 1)．これらの飛散物には未反応の酸化物微粒子や高濃度の金属鉄微粒子が含まれており，月面における高純度の鉄抽出の有効性を示唆している．

本研究では地球上での磁鉄鉱で，高真空中でバルク試料にレーザーを照射すると高濃度の金属鉄が析出することがわかった．今後は他の試料でも実験を行い，月レゴリスから鉄を抽出する効率的な手法を確立する．

References:

[1] Shaw, M. G., et al. "High vacuum metallurgy: opportunities in lunar resource processing." *5th international future mining conference, AusIMM: Perth, Western Australia*. p. Vol. 463. 2021.

[2] Li, G., et al. "Lunar in-situ ironmaking through laser-assisted flash vacuum pyrolysis of iron oxide." *Vacuum* 230 (2024): 113690.



図 1：高真空下でバルク試料にレーザーを照射

宇宙環境想定下での LIBS によるレゴリス水分量 測定における空隙率の影響評価

○牧野有里子¹、長勇一郎¹、日向輝¹、湯本航生²、杉田精司¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科、² パリ天文台

これまでの探査で月に水が存在する可能性が示されており、その分布と起源の解明は月の形成・進化を読み解くために重要である。D/H 比や C,N,O 等の同位体・元素比の測定によって月・地球型惑星の水の起源を検証でき、氷層の深さからは月が水を獲得した履歴が読み取れる。さらに、表面水量や温度の変動を追うことで月の水の安定性の推定にも寄与する。加えて、水資源利用のための基礎データとなる。従来は中性子分光や赤外分光観測などリモートセンシングが月面水探査の中心だったが(Feldman et al.1998、Pieters et al. 2009)、空間分解能の限界で微細な空間分布や存在深度には不確実性が残っていた。そのため、質量分析装置・レーザー吸収法・近赤外反射分光法等に加えて、レーザー誘起ブレイクダウン分光(LIBS)による現地計測が注目される。LIBS は数 m 離れた対象を高い空間分解能(~300 μ m)で測定し、mm スケールの深さ方向の詳細分布をリアルタイムで取得できる強みを有する。

LIBS による水素計測の先行研究(Yumoto et al. 2023)では、0.4 wt% H₂O 相当の H を添加したレゴリス模擬試料で、非圧縮試料の方が圧縮試料より水素輝線が強いと示唆されたが、試料密度と H 線強度の定量的相関は未解明だった。そこで本研究では、LIBS での水素輝線強度と試料空隙率の定量的関係を解明することを目的とする。月の海の模擬物質(LMS-1)に水酸化マグネシウムを混合して H₂O 4 wt%の粉末を作製し、加圧条件を変えて月面の密度範囲相当の 1200~2200 kg/m³の試料を準備し、真空チャンバー内で LIBS 測定を行った。

牧野ほか(2025, JpGU)で報告した実験では、H 発光輝線強度の試料密度依存性が他元素と異なり、低密度ほど強度が増す可能性が示唆された。一方、レーザー照射回数による強度の変化から、表面吸着水の影響が無視できず、計測成立のためには真空下での試料の熱処理が重要であることも示唆されていた。そこで今回は試料容器をステンレスから銅へ、形状を単一円から二重円へ変更して金属とレゴリス試料との接触面積を拡大し、加熱手法も改良した。結果、従来 4 時間の加熱でも 3 時間以上要した付着水除去指標の 100 °C到達が 1 時間で可能となり、レゴリス試料の吸着水をより確実に除去できるようになった。さらに、検出器を宇宙探査用の耐環境性を持つ CMOS センサーへ切り替え、探査を意識した FPGA で駆動するように改良した。ダークレベルを含む複数パラメータを変更しつつ最適な測定条件の検討を行うことで、探査本番の LIBS スペクトル取得に向けたスループットの確認も行った。今回の成果により、アルテミス計画など月探査で LIBS による微量水分を高精度に解析するために不可欠な、水素輝線強度と密度の関係のデータ取得準備が整った。

可視-近赤外分光カメラによる月隕石(NWA 13951, Bechar 006)の計測

○林悟¹, 森晶輝¹, 長勇一郎¹, 日向輝¹, 諸田智克¹, 杉田精司¹,¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

近年の月・惑星探査の分光計測の空間解像度の向上は目覚ましく、月探査機「かぐや」Multiband Imager (MI)などでは可視光帯 20 m/pix・近赤外光帯 62 m/pix でのマルチバンド分光が実現している(Ohtake et al., 2008)。しかし、軌道上からの観測では、表面物質を構成する個々の造岩鉱物(≦ 1mm)を識別できないため、正確な鉱物の量比を割り出すことは難しい。特に、弱い吸収帯しか持たない斜長石が強い吸収帯を持つ輝石やカンラン石と混合した場合には、斜長石の混合比の推定は難しい。そのため、反射スペクトル観測から下部地殻と上部マントルの物質を区別することは実現していない(e.g., Moriarity et al., 2021)。こうした問題を解決するため、月着陸機 SLIM に搭載された Multi Band Camera (MBC)では、高空間分解能で計測が行われており、cm スケールの鉱物の推定が可能となっている(大竹ほか, 2025 JpGU)。しかし、実際の月隕石においては mm スケール以下の鉱物がほとんどを占めている。したがって、今後の探査に向けて実際の月サンプルをより高い空間分解能(mm 以下)で計測し、岩石の起源の推定可能性を実証することが必要である。

本研究では、この実証のために Mori et al. (2025 LPSC)が開発した装置と同じ設計による高空間分解能(0.6–4 $\mu\text{m}/\text{pix}$)を持つ多バンド近赤外分光カメラを用いて月隕石試料の顕微分光計測を行い、データの取得およびデータ解析の手法についての検討、及び鉱物の量比の推定を行った。本研究では無水珪酸塩岩分析に有効な 17 バンド(440, 560, 700, 750, 810, 850, 900, 950, 990, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200, 1250, 1350, 1450, 1550 nm)のフィルタを装着した。本装置を用いて、月隕石 NWA 13951・Bechar 006 (Feldspathic breccia)の分光計測を行った。

計測の結果、月隕石中に角礫として含まれる輝石、カンラン石、チタン鉄鉱、Fe-Ni 合金について、粒径が 80 μm 以上のものが識別できた。輝石とカンラン石に関しては、それぞれ 950 nm と 1050 nm を中心とする吸収スペクトルが得られた。これらは、950 nm、1050 nm、1250 nm における吸収を色付けした擬似色マップにて可視化できることがわかった。また、チタン鉄鉱に関しては 950 nm に反射率のピークを持つスペクトル、Fe-Ni 合金に関しては近赤外域において平坦な反射スペクトルが得られた。斜長石の粒子については、近赤外の反射スペクトルにおいて比較的平坦な特徴を示したが顕著な吸収は検出されず、擬似色マップにおいても明瞭に識別できなかった。この要因として、長石に特徴的な 1250 nm の吸収が非常に弱いことが挙げられる。本装置で得られた結果と鉱物種の対応は、SEM-EDS による元素組成の点分析の結果および後方散乱電子像を用いて行った。

上記の結果は、80 μm 以上の粒径の輝石およびカンラン石の同定が可能であり、それらの量比を推定できることを示唆している。斜長石は典型的な反射スペクトルによる同定は現状できていないもののマフィック鉱物とは異なる特徴を示し、明確な識別方法を探索することが今後の課題になる。本装置を用いて輝石およびカンラン石、斜長石を明確に区別する方法を実証することで、将来の月面着陸探査において個々の鉱物をその場分析することができる可能性が示される。それにより、観測領域の鉱物の量比を基に月面に露出した下部地殻および上部マントル物質を判別し、マグマオーシャンの分化に関する制約を与えられる。このような科学的な議論を従来の探査よりも高い空間分解能で行える点において、本研究で用いたマルチバンド分光装置には高い有用性があり、今後の惑星探査への広い可能性を示唆するものである。

天体衝突による炭素質小惑星の内部損傷

黒澤耕介^{1,2}, 松本侑士^{3,4}, 松本徹⁵

¹神戸大学 大学院人間発達環境学研究科, ²千葉工業大学 惑星探査研究センター, ³国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト, ⁴神戸大学 大学院理学研究科, ⁵京都大学 白眉センター

炭素質小惑星リュウグウから持ち帰られた試料はその内部に無数のひび割れを含んでいた [e.g., Nakamura et al., 2023, *Science* 379(6634): eabn8671]. 多くの炭素質隕石とリュウグウの引っ張り強度は ~ 10 MPa 程度[e.g., Ostrowski&Bryson, 2019, *P&SS* **165**, 148–178]であり, 過去に ~ 10 MPa 程度の応力波を経験したことが示唆される. 今回我々はこのひび割れが隕石母天体への高速度衝突によって一気に生じたものである可能性に着目し, その規模を推定することを目的として研究を行った.

隕石母天体の典型的な大きさは直径 100 km 程度と考えられている [e.g., Walsh et al., 2013, *Icarus* **225**, 283–297]. またその程度の大きさの天体の内部の微小空隙は潰れきらずに現在まで残っている. 小惑星帯に現存する C 型小惑星の平均空隙率は $\sim 30\%$ である [e.g., Sears, 2015, *Space Sci. Rev.* **194**, 139–235]. 空隙が存在している場合, 天体衝突で発生した衝撃波/応力波の減衰率が大きくなることが知られている[e.g., Wünnemann et al., 2006, *Icarus* **180**, 514–527; 以下 Wo6]. 大規模な内部損傷が起こる衝突の規模を推定するためには空隙圧密の効果も加味して衝突点からの距離の関数として最大圧力分布を求める必要がある.

我々は ϵ - α porosity compaction model [Wo6]が実装されている iSALE shock physics code [Amsden et al., 1980, Los Alamos National Laboratory Report LA-8095; Ivanov et al., 1997, *Int. J. Impact Eng.* **17**, 375–386; Wo6]を用いて初期空隙率に対して圧力減衰率がどのように変化するか系統的に調査した. 初期空隙率は 0–0.5 の範囲で変化させた. 簡単のため標的曲率は無視し, 半無限平板に真球を秒速 5 km s^{-1} で衝突させた. 炭素質小惑星の主成分は含水鉱物なので状態方程式には ANEOS serpentine [Thompson & Lauson, 1972, SC-RR-710714 pp. 119; Brookshaw, 1998, Tech. Rep., working paper series SC-MC-9813]を用いた. 衝突点から見下ろして 45 度方向に Lagrangian 追跡粒子を挿入し, 計算中の最大圧力 $P_{\max}$ を記録し, $P_{\max}$ が衝突点からの距離 r の何乗で減衰するかを調べた. これを減衰指数 n と呼ぶことにする. 今回は物質強度は無視し, 完全流体として計算を実施した.

計算の結果, 空隙を含まない場合は $n \sim -1$ のに対し, 空隙を $\geq 10\%$ 含む場合は衝突点から $n \sim -2.5$ となること, 最大圧力が 10 MPa を下回るのは ~ 10 衝突天体直径を超えたあたりであることがわかった. 直径 100 km の天体に対して, 直径 5 km 程度の天体が 5 km s^{-1} でぶつかけると, 衝突を受けた半球の大規模内部損傷が引き起こされるようである.

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

超高速衝突に伴う非平衡プラズマ過程の再現とその応用： 惑星探査における物質分析への示唆

○中澤淳一郎¹、長友英夫²、矢野創^{3,1}

1 総合研究大学院大学、2 大阪大学、3 JAXA 宇宙科学研究所

宇宙空間を漂う小天体や固体微粒子が、天体表面や宇宙探査機に超高速衝突する際、衝突噴出物が高温となり、電離する場合がある。衝突電離は、月面衝突閃光等の遠方観測^[1]や、外惑星探査機へ衝突した氷衛星噴出物の質量分析^[2]といった地球外生命探査にもつながる極めて有用な現象である。しかし、従来の衝突クレーターの計測等を目的とした衝突計算では、物質の電離に伴う熱力学的過程が重視されていなかった。そのため、質量分析計の校正等を目的とした衝突実験にて、衝突電離プラズマの発生電荷量やエネルギー等の基礎的な物理量の解釈は経験的なものに限られ^[3]、質量分析結果の定量的解釈や電荷生成メカニズムの理解に限界があった。

本研究では、電離に伴う非平衡過程を衝突計算に実装するため、レーザー核融合などの高エネルギー現象の解析に用いられる二次元放射流体コード P4P^[4]を応用して、宇宙空間同様の極超高速での衝突実験^[3]で得られた発生電荷量の定量再現を試みた。P4P は電子とイオンの二温度モデルを採用し、質量・運動量・電子とイオンのエネルギー保存則に加え、熱拡散・輻射輸送方程式及び状態方程式 (QEOS^[5]) を用いてプラズマを含む流体の運動を記述できる。しかし、QEOS は広範な状態を網羅する一方で、固体が衝突により急激に加熱され、部分的に電離する中間状態において、物理精度が不十分であった。この遷移状態をより正確に記述するため、QEOS における電子モデルを拡張し、超高速衝突に伴う電離現象に特化した、衝突計算用 P4P を独自に構築した。

その結果、数 10 nm スケールの鉄弾丸をロジウム箔に 20~80 km/s で衝突させた衝突実験^[3]の条件で、弾丸と標的の接触領域のイオン温度が 100 eV 以上に達し (図 1b)、電子とイオンの温度分布が一致しない非平衡プラズマが形成されることを確認した (図 1c, d)。また計算された発生電荷量 Q は実験値とよく一致し、衝突速度との関係 (β 値) も実験値^[3]と 1%以内の誤差で一致した (図 2)。

以上より本解析ツールは、衝突電離現象を極めて高い精度で再現できることが確認された。原理的には衝突発光や質量分析のスペクトル予測等も可能であり、今後の衝突発光観測データとの比較や次世代探査機によるその場質量分析の校正評価など、太陽系科学の物質科学の道を拓くものである。本発表では、本ツールの構成や適用条件を紹介するとともに、衝突電離の非平衡過程について詳述する。

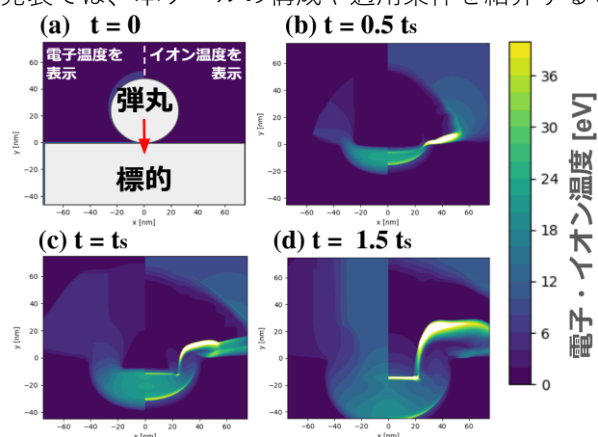


図 1 弾丸直径 $D_p = 53$ nm 衝突速度 $v_p = 44$ km/s での衝突後の電子・イオン温度分布。 t_s は貫入特徴時間 ($t_s = D_p/v_p$)。

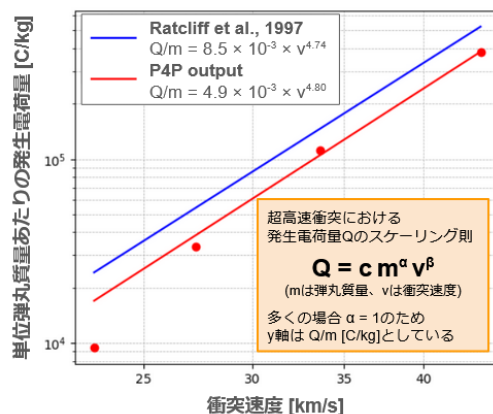


図 2 超高速衝突により発生する電荷量の速度依存性

参考文献 [1] Simpson G. *et al.*, *PNAS Nexus*, 2, 7, pgad214 (2023). [2] Postberg F. *et al.*, *Nature*, 558, 7711, 564–568 (2018). [3] Ratcliff P.R. *et al.*, *Int. J. Impact Eng.*, 20, 6–10, 663–674 (1997). [4] Nagatomo H. *et al.*, *J. Plasma Phys.*, 72, 6, 791–794 (2006). [5] More R.M. *et al.*, *Phys. Fluids*, 31, 10, 3059–3078 (1988).

ダストの機械特性に関する理論的研究 イジェクタ・クラウド形成モデルの構築へ向けて

○ 木村 宏¹、平井 隆之¹、岡本 尚也¹、吉田 二美^{2,1}、洪 鵬¹、和田 浩二¹、千秋 博紀¹、
門野 敏彦²、小久保 英一郎³、吉田 雄城⁴、中村 昭子⁴、荒川 創太⁵、
荒井 朋子¹、小林 正規¹、奥平 修¹、秋田谷 洋^{6,1}、石橋 高¹、山田 学¹、松井 孝典¹

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

小天体表層へのダストの衝突によって放出された破片粒子は、小天体周辺にイジェクタ・クラウドと呼ばれるダスト雲を形成する。ガリレオ衛星や月では、探査機に搭載されたダスト検出器によってイジェクタ・クラウドの存在がこれまで確認されてきた。2028年打上げの DESTINY+ では、(3200) Phaethon や (99942) Apophis など複数の小惑星にフライバイし、探査機に搭載されたダストアナライザ (DDA) でイジェクタ・クラウドのダスト組成や質量などがその場分析される。こうした、今後得られるであろうイジェクタ・クラウドのデータや、過去の探査機搭載機器で得られたデータを読み解くには、イジェクタ・クラウドの形成に関する知見が必須となる。そこで、われわれは、イジェクタ・クラウド形成モデルの構築へ向けて、まずは、ダストの機械特性に関する理論的研究を行った。具体的には、接触力学の Johnson-Kendall-Roberts 理論、破壊力学の Griffith 理論、クラック統計の Weibull 理論に基づいて、ダストの機械特性に関する理論式を構築した。これらの式がアグリゲイトでもモノリスでもダストだけでなく小天体一般に適用可能であり、実験結果や分子動力学計算結果とも整合的であることを確認したので、本講演で報告する。

玄武岩標的への斜め衝突による線状の高速エジェクタ：衝突角度による変化

○山本 大晟¹, 山口 祐香理¹, 松原 光佑¹, 中村 昭子¹

¹神戸大学大学院理学研究科

天体表面への高速度衝突によってエジェクタが形成される。エジェクタの一部は天体表面に再衝突してクレーター周囲に見られるレイなどの衝突地形を形成する(e.g., Kadono et al., 2015)。また、衝突が起こった天体を脱出し、例えば火星からフォボスなど、他天体に到達するものも存在すると考えられる(e.g., Ramsley and Head, 2013)。しかし、エジェクタの天体表面への再衝突および他天体表面への衝突によって形成される衝突地形の実験的研究は多くない。そこで、本研究では、岩石天体から放出されるエジェクタによる他天体表面(レゴリスや岩盤)への衝突を実験で再現する試みを行う。また、それに伴い形成される地形についての調査を行う。

宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃で加速させたアルミニウム弾丸(直径約 3.2 mm)による岩石天体表面を模した玄武岩(1 辺 10 cm 程度の直方体)への衝突を行い、さらにその衝突によって形成されたエジェクタによるレゴリスを模した砂とアルミ板への衝突実験を行った。玄武岩への衝突において、アルミニウム弾丸の衝突速度は約 7 km/s、衝突角度を弾丸の軌道と玄武岩の衝突面のなす角度として、30° から 60° に変えて行った。

衝突角度 30° と 45° では、一次標的への弾丸の衝突(一次衝突)によって岩石から放出されたエジェクタの衝突(二次衝突)によって、砂上に溝状の衝突構造が形成された。また、アルミ板へのエジェクタの衝突によって多数のクレーターが生成され、その中でも比較的大きいものが線状に並び、砂上の溝状構造に連続していることを確認できた。同じ速度のエジェクタの放出角度は、一次標的への衝突角度とともに増加する傾向にあった。砂表面の溝状構造やアルミ板上のクレーター列は、一次標的の衝突地点から放射状に配列していた。溝やクレーター列どうしの間隔を、一次標的衝突地点を基準とした方位角として求めると、概ね 5–15° であり、粉粒体への衝突速度 30–100 m/s の垂直衝突によって生じるエジェクタ中にできるメッシュ間の角度(Kadono et al., 2015)より大きい。

アルミ板上に形成されたクレーターの大きさとエジェクタの放出速度から強度支配域での π スケーリング(Ogawa et al. 2021)によってエジェクタ直径を推定したところ、放出速度が大きいエジェクタは直径が小さいことが分かった。衝突角度が 60° の結果についても講演にて発表する。

謝辞

本研究は JAXA 宇宙科学研究所の超高速度衝突実験施設の共同利用実験として行いました。

金星クレーターのエジェクタ地形形成に及ぼす大気の影響： 大気中での高速度斜め衝突実験

○澤みゆう¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 豊嶋遙名¹, 長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

はじめに：金星のランパートクレーターには、Addams Crater のようにエジェクタ堆積物の一部が欠損した例があり、これは高気圧環境下での低角度衝突によるものだと考えられている。エジェクタの欠損角度は衝突角度に依存しており、衝突角度が小さいほど消失角度が増加すると示唆されている[1]。こうした観測から、大気が存在が衝突後の噴出物の挙動に強く影響する可能性が提案されているが、高速度衝突における大気と弾丸の相互作用やそれらの地表への影響に着目した実験的研究は少ない。

目的：本研究では、金星クレーターにみられるエジェクタ堆積物の欠損が生じる形成過程において、大気が及ぼす役割を明らかにすることを目的とする。特に、大気を有する天体での高速度斜め衝突時におけるエジェクタの挙動や堆積パターンに着目する。

実験方法：衝突実験は、神戸大の横型二段式軽ガス銃と縦型一段式軽ガス銃、宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いた。真空度 350Pa～70kPa で、直径 4.7mm のポリカーボネート球を 2～5km/s で衝突させた。標的には固体天体表面を模擬した粒径 100 μ m の石英砂を使用した。衝突角度は、正面衝突 (90°)、斜め衝突 (60°, 30°) とした。衝突の様子は高速カメラ 3 台と赤外高速カメラで撮影し、一部の実験では空気の密度差を可視化するシャドウグラフ法を用いた。

実験結果：エジェクタカーテンは真空中で同心円状に広がるのに対し、真空度が 30kPa 以上の斜め衝突実験では上流側の弾道付近に大穴が生じ、欠損したエジェクタカーテンとなった。シャドウグラフ法により衝撃波と後続流が観察できたが、それらがエジェクタカーテンの成長に直接的な影響を及ぼしていることは確認できなかった。エジェクタカーテンが途切れる現象を再現するため、垂直衝突実験において衝突点付近からクレーターの半径方向に障害物を設置した実験を行った。 ϕ 5mm のアクリル棒を設置した場合、エジェクタの途切れた部分は時間とともに衝突点から遠ざかり、欠損したエジェクタカーテンを再現できなかった。中心角 90° の扇状アクリル板を設置した場合、欠損したエジェクタの噴出形状が再現された。このことから、金星で見られるようなエジェクタの欠損形状は、地表面に連続した扇状の遮蔽面が存在することによって生じている可能性がある。さらに、一部の大気中の実験では、ランパートクレーターが形成された。これは、大気によってエジェクタの噴出速度が減速され、堆積域がクレーターの近くに集中することで形成する可能性がある。[1] Schultz. (1992) Journal of Geophysical Research, 97, 11623.

内海を持つ氷衛星上の貫通クレーター形成 メカニズムに関する実験的研究

○菊川涼介¹, 保井みなみ¹, 豊田優佳里^{2,3}, 笹井遥⁴, 荒川政彦¹

¹神戸大学理学研究科惑星学専攻実験惑星科学研究室 ²アストロバイオロジーセンター

³国立天文台 ⁴名古屋工業大学

太陽系には、エウロパやエンセラダスのような内海を有する氷衛星が存在すると言われており、この内海は生命の起源に関連する化学進化が起こりうる重要な環境である。生命に必要な代謝エネルギーは酸化剤と還元剤の相互反応により生じ、還元剤の一種である H_2 は内海の海底における熱水活動で生じ得るが、酸化剤の一種である O_2 は氷衛星表面における太陽風の照射等により生じ、内海中に継続的に供給される機構はまだ見つかっていない。したがって、これらの相互反応を内海中で持続的に行うためには、酸化剤を含む氷衛星の表層物質が定期的に内海へと輸送される必要があり、小天体による氷地殻への高速度衝突はその鍵となるメカニズムの1つだと考えられる。特に小天体の衝突に伴う氷地殻の貫通は、表層物質を効率よく内海へと輸送することが出来る機構であると言える。

そこで本研究では、内海を模擬した物質(シリコンオイル、15%食塩水)を覆う氷板への高速度衝突実験を行い、氷板へのクレーター形成に対する内海(液体)・衝突速度・氷板厚さの影響を調査し、クレーター形成に伴い弾丸が氷板を貫通することが出来る境界条件を調べた。

衝突実験は神戸大学の横型2段式軽ガス銃を用いて行った。氷板単体の標的はアクリルボックスで4辺を固定した標的を用意し、氷・液体層構造標的は氷板をアクリルボックスに固定した後、アクリルボックス内を、 $-15^{\circ}C$ の低温室内で凍結しないシリコンオイル、または $-5^{\circ}C$ ・ $-10^{\circ}C$ の15%食塩水で満たして作成した。氷板の厚みは2.4~20.1mmで、弾丸は直径1mmのアルミ球、衝突速度は1km/s、2km/sで実験を行った。

実験の結果、衝突速度1km/sでは氷板単体標的、氷・シリコンオイル層構造標的ともに氷板の厚みの増加に伴い表側スポール直径が増加したが、両者の表側スポール直径の間にほとんど差異はないことが分かった。しかし、内海模擬物質が $-5^{\circ}C$ の15%食塩水である場合には、氷板単体標的、氷・シリコンオイル層構造標的に比べ、表側スポール直径は大きくなった。一方、氷・液体層構造標的における裏側スポール直径は、内海模擬物質の種類を問わず、同速度では氷板単体標的より小さくなることが分かった。この裏側スポール直径の差異により、裏側スポールの掘削領域が大きい氷板単体標的では、氷・シリコンオイル層構造標的よりも厚い氷まで貫通可能となるという違いが生じた。

更に、衝突速度1km/s、2km/sでの氷・シリコンオイル層構造標的の貫通・非貫通境界の氷板厚さはそれぞれ5.52~7.50mm、8.73~10.2mmの間にあることが分かった。衝突点の反対点より放出される破片の速度、すなわち、反対点速度の計測値から算出した反対点圧力をもとに、貫通・非貫通境界に当たる氷板厚さでの反対点圧力を推定すると81~103MPaとなった。これはArakawa *et al.* (2000)により提案された氷の剪断破壊が生じる下限値80MPaと類似していることから、小天体の衝突による氷地殻の貫通は氷地殻裏側まで剪断破壊が達するときに発生すると予想される。一方、1km/sにおける氷・食塩水($-5^{\circ}C$)層構造標的、2km/sにおける氷・食塩水($-10^{\circ}C$)層構造標的の貫通・非貫通境界の氷板厚さはそれぞれ7.37~10.4mm、9.12~11.2mmとなり、貫通可能な氷板厚さは内海模擬物質の温度の上昇により大きくなった。氷衛星内海の温度が氷の融点 $0^{\circ}C$ 近傍であるなら、それと接する氷地殻の貫通可能条件を示す反対点圧力は、81~103MPaよりも小さい可能性があると考えられる。

分化した微惑星の衝突破壊に対する溶融した金属コアの影響

○林沙樹¹、荒川政彦¹、保井みなみ¹、笹井遥²、黒崎健二³、長谷川直⁴

¹神戸大学大学院理学研究科、²名古屋工業大学、³防衛大学校、⁴宇宙航空研究開発機構

小惑星帯の 16 Psyche など M 型小惑星や鉄隕石は、分化した微惑星の鉄コアやその破片から生じたと思われる。Psyche の平均密度は約 4 g/cm^3 であることが知られており、Psyche は、金属と岩石からなる天体、もしくはそのラブルパイル天体の様な空隙率が高い天体の可能性がある。ところで、鉄破片が再集積したラブルパイル天体が形成されるには、鉄コアが破壊されて破片化する必要がある。しかしながら、固体の金属コアをもつコア-マントル天体では、コアがマントルにより保護され、さらに金属は岩石より一桁以上強度が大きいので、コアは破壊されにくいと考えられる。そこで、本研究では溶融したコアをもつ分化した微惑星が破壊されることで、鉄コアの破片が供給されたという仮説を提唱する。本仮説の検証のために、溶融したコアと固体のコアをもつ球状のコア-マントル標的のそれぞれの衝突破壊強度を実験的に決定する。

本研究では分化微惑星の衝突破壊の模擬実験を行うため、球状のコア-マントル二層球標的に対する衝突破壊実験を行った。標的には金属コアとしてビスマス系合金(融点 70°C)、岩石マントルとしてモルタルを用いた。標的の質量は約 100g、直径は 4cm であり、コア直径は 2cm、マントル厚さは 1cm であった。また、二層球の衝突破壊強度を、ビスマス系合金または石膏モルタルのみで作られた球の衝突破壊強度と比較するため、質量約 45g、直径 2cm の合金球標的と、質量約 210g、直径 6cm のモルタル球標的も作製した。標的は、真空チャンバー内で固定具を用いて吊り下げた。二層球標的は、コアが固体のもの、または、標的全体に 300W のハロゲンランプを約 10 分程照射・加熱して、コアを溶融させたものを用いた。弾丸には、直径 7mm もしくは直径 4.7mm のポリカーボネート球を使用し、神戸大学および宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃で衝突速度 1~6 km/s で実験を実施した。そして、衝突破壊後の標的の最大破片質量および質量頻度分布を決定した。また、衝突破壊の様子を高速カメラおよびフラッシュ X 線イメージング法によって観察し、マントルとコアの破片の速度を計測した。

実験の結果、固体コア-マントル二層球標的の最大破片は常に鉄コアであり、 $4 \times 10^4 \text{ J/kg}$ 以上の衝突でコアは破壊され、それ以下では変形するのみであった。一方、マントルはカタストロフィックに破壊されていたことが確認できた。しかしながら、溶融コアを持つ二層球標的への衝突では、最大破片はほとんどがモルタルであり、コア及びマントルの両方が常にカタストロフィック破壊を起こしていた。そして、回収後の破片には、直径 10~100 μm 程度の金属粒子がいくつも集まった、アグリゲイトの様な金属破片も確認された。固体コアおよび液体コアを持つ二層球標的それぞれの映像からは、衝突後にコア-マントル間で速度差が発生し、分離することが確認された。最後に、衝突破壊後の回収破片の中から最大破片を求めて、衝突破壊強度の推定を行った。その結果、固体金属球はモルタル球よりも約 1 桁衝突破壊強度が大きく、さらに固体コアを持つ二層球標的の場合は、金属コアの破壊に必要なエネルギー密度が固体金属球の衝突破壊強度の約 3 倍に増加することがわかった。また、液体の金属コアを持つ二層球標的は、モルタルのみや固体金属コアの二層球標的と比べ、衝突破壊強度は小さくなり、モルタル球と比較して約 1 桁減少することが分かった。この結果、液体金属コアは二層球標的を破壊易くし、さらにモルタル破片よりも小さな金属破片を生成することが分かった。

クレーター形成における衝突体の混合過程と 可視化・定量評価に基づく表層進化の実験的研究

○生駒杏¹、荒川政彦¹、保井みなみ¹、柿木玲亜¹

¹神戸大学大学院理学研究科

背景と目的：月や小惑星などの大気を持たない固体天体の表層は、数多くの衝突クレーターで覆われている。そのクレーターは小惑星や彗星などの小天体の衝突で作られたと考えられており、衝突の度に標的天体の表層は掘り起こされ、衝突体の一部は付加・混合されていると考えられる。この過程はレゴリス・ガーデニングと言われ、様々な種類の角礫岩が形成されることが月の岩石や普通コンドライト隕石などの研究から知られている。一方、小惑星探査から、小惑星リュウグウはC型小惑星であるが、S型小惑星由来と思われるボルダーが発見されており、従って、小惑星表層の衝突進化を明らかにするには、小惑星表面のレゴリス・ガーデニングの研究が必要である。そこで、まずは衝突体の残存率の評価が重要であると考えた。

従来の衝突実験では、クレーター形成や標的の変形・破壊といった現象に注目が集まり、衝突体自身の破壊や破片の残存・混合状態に関する研究は少ない。本研究では、彗星やC型小惑星によるレゴリス・ガーデニングを明らかにするため、それらを模擬した有機物を含む弾丸や弱強度の弾丸を用いて室内衝突実験を行い、衝突実験を行った。そして、弾丸の残存率及びそのレゴリス層との混合過程を明らかにした。

実験方法：本実験では、直径 10 mm、長さ 10 mm の円柱形のパラフィン弾丸および石英砂と石膏を混合した砂石膏弾丸（混合比 20:1、15:1、10:1）を用いた。砂石膏弾丸には、弾丸破片の分布を画像解析により定量化するため、蛍光顔料も混合させた。パラフィン弾丸に対しては、標的として閃緑岩、粒径 500 μm の石英砂、10 mm のガラスビーズを用い、異なる特性をもつ表層環境を模擬した。一方、砂石膏弾丸を用いた実験では石英砂のみを標的とし、石英砂との混合挙動を評価した。実験は神戸大学に設置された縦型一段式軽ガス銃を用いて行い、60~200 m/s の範囲で発射速度を調整した。真空度 100 Pa の低圧環境下で実施し、衝突の様子は2台の高速度カメラによって撮影した。

結果と議論：パラフィン弾丸を閃緑岩標的に衝突させた場合は、衝突速度によって弾丸が破壊する時と破壊が起こらず変形のみがあったが、石英砂標的を用いた場合は変形のみ、ガラスビーズ標的を用いた場合は破壊のみという結果になった。また、パラフィン弾丸の破壊が起こった閃緑岩標的とガラスビーズ標的の場合では、積算個数分布の様子が異なり、衝突破壊強度は一致したが、破片の大きさの変化の様子は異なっていた。さらに、パラフィン弾丸の変形のみが起こった石英砂標的の場合では、運動エネルギーが大きくなるにつれて弾丸の変形量も大きくなった。これは、運動エネルギーが増大すると衝撃圧力が大きくなったことによって、変形量が線形的に増大したためと考えられる。蛍光顔料を混合させた砂石膏弾丸を用いた実験では、弾丸破片は衝突点付近に集中、全方向に対して等方的に飛散していることが定量的に示された。

クレーター形態から推測する固体天体内部強度 ：層構造標的のクレータースケーリング則の表面強度依存性

○柿木玲亜¹，荒川政彦¹，保井みなみ¹，長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科，²宇宙科学研究所

はじめに：はやぶさ 2 探査機が小惑星リュウグウ上に形成した SCI クレーターには、底の中心に深い孔（中央ピット）が確認された。このような形態のクレーターは同心円型クレーターと呼ばれ、その成因として、固体天体表面を覆うレゴリス層の下、圧密されたレゴリス層や硬い基盤岩層の存在が提案されている。一方、探査機の撮像性能の向上により、天体の詳細な表面地形が明らかとなり、小さなクレーターのみならず、高速度衝突に伴う衝突励起振動による天体表面の流動化の痕跡も確認された。これは、小惑星イトカワやエロスでもみられる小惑星上の地形変化を引き起こす主要な原因の一つである。そして、レゴリスで覆われた層構造を持つ小惑星上での衝突励起振動の数値計算により、硬い基盤層上のレゴリスは衝突励起振動により流動化しやすいことが知られている。したがって、クレーター形成に伴う固体天体表層の流動化の程度は、基盤層強度に依存する可能性が高い。

目的：レゴリスや表土に覆われた固体天体の基盤層の力学強度の推定は、その天体表層での衝突励起振動を理解する上で重要である。しかし、従来のリモートセンシングでは、基盤層の構造はわかっても力学強度の評価はできなかった。固体天体の詳細な 3D 表面地形がわかるようになった現在、同心円型クレーターの形態が、基盤層の力学強度を推定する手がかりとなり得る。本研究では、クレーター形態から固体天体の基盤層の力学強度を推定する手法の開発を目標とし、レゴリスや表土に覆われた固体天体表層を模擬した 2 層構造標的へのクレーター形成実験を行った。そこで、本研究ではこの実験において、クレーターサイズやその形態、クレーター形成過程に対して各層の厚さや強度が与える影響を調べた。

実験：実験は、宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて行った。基盤層には、砂・石膏混合物を用いた（強度 20.4-364kPa）。基盤層を覆う表面層として、粒径 100 μ m の石英砂または砂・石膏混合物（強度 0.44kPa）を用いた（層厚 0-100mm）。弾丸は直径 1 または 2mm のアルミ球で、衝突速度は 2km/s とした。実験の様子は標的直上と真横方向から可視光高速カメラ、標的直上から赤外高速カメラで撮影した。

結果：クレーター形態は表面層の厚みの減少に伴い、お椀型（B タイプ）から平底型（F タイプ）、同心円型（C タイプ）へと変化した。F タイプと C タイプの境界となる弾丸直径で規格化した表面層厚さは、基盤層強度の増加に伴い減少したが、F タイプと B タイプの境界は、基盤層強度に依存しなかった。また、表面層が石英砂の場合、トランジェントクレーターは F タイプ、最終クレーターは B タイプとなるようなクレーター（FB タイプ）が確認された。FB タイプクレーターが見られる規格化表面層厚さの範囲は、基盤層強度に依存しなかった。C タイプクレーターにおいて表面層に形成されるクレーターサイズは、F タイプや B タイプに比べて小さく、表面層の厚さに依存した。C タイプクレーターでは、上層の無次元クレーター半径 π_{Rc} と、同じ衝突条件下で均質標的に形成される無次元クレーター半径 $\pi_{R\infty}$ の比は、規格化表面層厚さの減少に伴い減少した。また、F・B タイプクレーターの場合は 1 に近い値となった。基盤層に形成されるピットは、表面層厚さの増加に伴い減少した。すなわち、無次元ピット半径 π_{Rpit} と、同じ衝突条件下で表面層がない場合に形成される無次元ピット半径 π_{R0} の比は、規格化表面層厚さの増加に伴い減少した。表面層が強度を持つ砂・石膏混合物の場合、その減少率は大きくなっており、ピット半径の減少率は、表面層の強度に依存することがわかった。

本発表では、この結果から表面層に形成されたクレーターおよび基盤層に形成されたピットのサイズスケール則を構築し、C タイプクレーターのサイズから基盤層強度を推定するための経験則を提案する。また、この結果を月の C タイプクレーターに応用し、そのクレーター周囲の地域の表層構造について議論する。

高速自転コマ型小惑星上における非対称クレーター地形の形成シミュレーション

○宮村尚典¹, 渡邊誠一郎¹

¹名古屋大学大学院環境学研究科

【背景】地球近傍小惑星(162173)リュウグウのコマ型形状は、過去的高速自転によって形成されたと推定されているが[1]、リュウグウの現在までの自転減速過程は不明瞭である。一方、赤道で遠心力が引力と等しい時の臨界速度(自転角速度で ω_c)に近い高速自転をする小惑星上への天体衝突で形成されるクレーターには、エジェクタがコリオリ力で曲げられることによる東西非対称[2]と、実効的重力(引力と遠心力の合力)下での地滑りによる南北非対称が生じる可能性がある。そこで本研究は、高速自転する小惑星上で形成されるクレーターの非対称地形を数値シミュレーションし、クレーター地形をもとにリュウグウの自転進化史を議論すること目的とした。

【手法】まず、リュウグウの形状モデルに基づく軸対称コマ型天体上で、様々な自転角速度(臨界値に対する値で、 $\tilde{\omega} = \omega/\omega_c$)のもとで、実効的重力場の等ポテンシャル座標における掘削地形を計算し、放出されたエジェクタの軌道と着地点を求めた。さらに、実効的重力下における、エジェクタの継続的な堆積に伴う地滑りと、形成時から現在まで天体が徐々にスピンドウンして実効的重力が変化することで起こる地滑りを経たクレーター最終地形を計算した。

【結果・議論】半径50 mのクレーターの最終地形では、中心が赤道に近く自転角速度が速いほど東西より南北に長い形状のクレーターリムとなった。一方で、緯度 $\geq 10^\circ$ では、自転角速度に関わらず、リム形状はわずかに南北が東西より長くなった。また、中心が赤道で $\tilde{\omega} > 0.85$ に形成されたクレーター地形には東西非対称が見られたが、中心緯度が $5^\circ - 10^\circ$ に形成されると東西非対称は著しく弱まり、実効的重力下の地滑りによる南北非対称が卓越した。その結果、 $\tilde{\omega} < 0.85$ ではリムの極側が赤道側よりも高くなり、 $\tilde{\omega} > 0.85$ では逆に赤道側が極側よりも高くなった。

数値シミュレーションとリュウグウ上のクレーター地形を比較し、リュウグウのクレーター形成時の自転角速度を推定した。まず、隣接する別のクレーター領域を除外してリム形状を近似した。また、リム標高の方位角毎の変化に対してリム面積の重みを付けた波数2までのフーリエ級数展開を行い、長周期変動を求めた。リュウグウ上の#16クレーター(半径約43 m, 5.5°N [3])の例では、リムの東西南北の直径比と方位角方向の標高変動(図1)ともに $\tilde{\omega} = 0.9, 0.92$ での形成シミュレーションに類似し、高速自転下での形成した可能性が示唆される。一方で、ボルダーによるリム標高の過大評価や位相差があり、この影響をより定量的に議論する必要がある。推定したリュウグウ上のクレーター形成時の自転速度をもとに、リュウグウの自転進化史を議論する予定である。

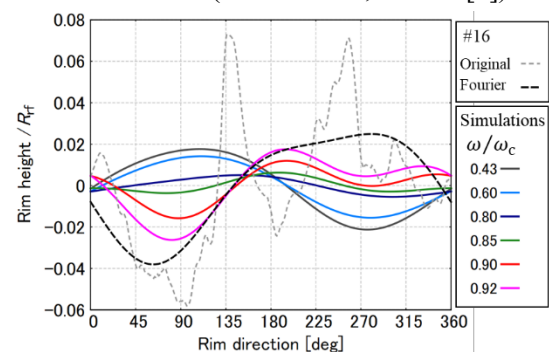


図1 #16クレーターの方位角毎のリム標高

[1] Watanabe et al. 2019, *Science* 364, 268–272. [2] Hirata et al. 2021, *Icarus* 354, 114073. [3] Hirata et al. 2020, *Icarus* 338, 113527.

小惑星リュウグウにおける岩塊表面の小クレーター解析 に基づく岩塊表面年代と表面更新プロセスの推定

○愛敬雄太¹、諸田智克¹、杉田精司^{1,2}、長勇一郎¹、道上達広³、本田理恵⁴、
巽瑛理⁵、坂谷尚哉⁶、亀田真吾⁷、山田学²、横田康弘⁸、松岡萌⁹、本田親寿¹⁰、
神山徹⁹、鈴木秀彦¹¹、早川雅彦⁶、吉岡和夫¹、小川和律¹²、澤田弘崇⁶

¹ 東京大学、² 千葉工業大学、³ 近畿大学、⁴ 愛媛大学、⁵ カナリア天体物理学研究所、⁶ JAXA/宇宙科学研究所、
⁷ 立教大学、⁸ 東京科学大学、⁹ 産業技術総合研究所、¹⁰ 会津大学、¹¹ 明治大学、¹² JAXA/国際宇宙探査センター

小惑星リュウグウやベヌーの表面では、直径数十 m 以上のクレーターのサイズ頻度分布 (crater size-frequency distribution: CSFD) から表面年代の推定が行われている[1-3]。またベヌー表面では直径 30cm 以上のクレーターを持つ岩塊が 258 個発見され[4]、その CSFD は岩塊の破壊や表面更新過程の時間スケールの推定に使用されている。リュウグウにおいても、タッチダウン時の高解像度画像から滑らかな岩塊上に 19 個クレーターが発見され、ベヌーよりクレーター密度が低いことが報告されている[5]。しかし、リュウグウ表面にはゴツゴツした岩も存在しており[1]、岩の種類によってクレーター統計に違いがある可能性もある。

そこで本研究では、高解像度画像を用いてリュウグウ表面岩塊上の微小クレーターの網羅的な探索を実施し、CSFD を測定した。第 1 回・第 2 回タッチダウン時の高解像度画像 (解像度: 3mm/pix~5cm/pix) 14 枚を使用し、画像内で十分な大きさ (面積 2000pix 以上) を持つ岩塊をリストアップした上で、岩塊上の円形の凹みや円形の影をクレーター候補として目視で探索した。多角形で近似し測定した岩塊面積を用いて CSFD を導出し、リュウグウ表面岩塊を対象として構築したクレーター年代学モデルと比較して岩塊表面年代を推定した。

その結果、ベヌー表面岩塊上のクレーター[4]と同様の形態を持つクレーター候補がリュウグウ表面岩塊上に発見された。画像のテクスチャから円形の凹みとして認識されたクレーター候補は 14 枚の画像中に 26 個あり、その一部はステレオ視によって凹みの存在が確認された。また、円形の影として認識されるクレーター候補も多数発見された。

クレーター密度はベヌー岩塊[4]よりやや少ないが、m サイズのクレーターは以前の報告[5]より多く発見された。CSFD からは、岩塊の表面年代の時間スケールがおおよそ $10^5 \sim 10^6$ 年と推定された。これはベヌー岩塊の表面年代(175 万年[4])よりもやや短い。

以前の発表[6]では岩塊強度について議論を展開したが、本発表では岩塊の表面年代から推定される岩塊表面の更新過程、特に熱疲労による表面剥離[7]の影響について議論する。

参考文献: [1] Sugita et al., 2019, Science. [2] Cho et al., 2021, JGR. [3] Walsh et al., 2019, Nature Geoscience. [4] Ballouz et al., 2020, Nature. [5] Takai et al., 2021, LPSC. [6] Aikyo et al., 2024, 日本惑星科学会秋季講演会. [7] El Mir et al., 2019, Icarus.

はやぶさ 2 複数機器観測データから示唆される Ryugu 表層物質進化の多様性

○森田 朋代¹, 巽 瑛理², 市川 真弓³, 筒井 皓基¹, 石田 世実¹, 中村 智樹¹

¹ 東北大学, ² Instituto de Astrofisica de Canarias, ³ JAXA

宇宙空間にさらされた小惑星の表層は、太陽風や微隕石の衝突により宇宙風化が進行し、最表層の物質やスペクトルが変化する[1]。また、クレーター形成や自転に伴う表層物質の移動や分級が起きることが指摘されている[2]。はやぶさ 2 ミッションでは、C 型小惑星 Ryugu の軌道上から観測を行い、2 回のタッチダウンにより計 5.4 g の試料を採取した[3]。回収サンプルの分析から Ryugu は含水ケイ酸塩主体の CI コンドライト的な物質であった[4]。Ryugu 試料の実験室での分光分析と小惑星の軌道観測の結果とを比較すると、観測スペクトルは宇宙風化起因と考えられる脱水の影響が見られ、Ryugu のレゴリスは小惑星表層で物質的・スペクトル的に変化していることが示唆された[1,4]。しかし、これらのスペクトルが変化した物質が Ryugu 表層にどのように分布しているか、地形とどのように関係しているか、物質科学的な知見からの検討は不十分である。本研究では、複数機器の観測データの比較に基づき、Ryugu 表層物質の多様性と物性の不均一性の評価を試みた。

探査機に搭載された ONC, NIRS3, TIR のデータセットから、(1) b-x バンドスロープ、(2) v バンドのアルベド、(3) 2.7 μm 吸収深さ、(4) 2.1-2.5 μm スロープ、(5) 熱慣性[5]の 5 つの特徴量それぞれの全球マップを作成した。その後、Cho et al. (2021) [6] で定義された 126 個のクレーターについて、5 つの特徴量を抽出して検討を行なった。その結果、クレーターは多様なスペクトルの特徴を示した。いくつかのクレーターに共通する特徴として、クレーターの中心部は熱慣性が小さい。また赤道付近には、小さいクレーターが大きなクレーターの中に存在し、内側のクレーターは周りのクレーターよりも熱慣性が小さい。さらに半径数十 m 程度の小さい内側クレーターでは v-band の反射率が低く暗い例も確認された。

これらのクレーターは、Ryugu の平均的なレゴリスとは異なるスペクトル特徴を示すものが存在するため今後詳細に解析する。表層物質の分布の理解には、紫外/可視、近赤外、赤外の波長のスペクトル特徴を総合的に比較することが必要であり、MMX においてもこのような複数機器間解析が表面進化を多角的に捉える上で有効であると考えられる。

引用文献: [1] Matsuoka et al., 2023, *Commun. Earth Environ.*, 4(1), [2] Morota et al., 2020, *Science*, 368(6491), [3] Yada et al., 2022, *Nat. Astron.*, 6(2), [4] Nakamura et al., 2022, *Science*, 379(6634), [5] Shimaki et al., 2021, *Icarus* [6] Cho et al., 2021, *J. Geophys. Res. Planets*, 126(8)

謝辞

はやぶさ 2 #国際ビジビリティ増強事業のご協力のもと本研究を行いました。平田成上級准教授より解析コードを提供いただきました。

空隙率と内部構造が多孔質ガラス焼結体の熱・弾性特性に及ぼす影響： リュウグウボルダーの空隙率再検討

○櫻井哲志¹, 石崎拓也², 中村昭子¹

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

微惑星は、様々な進化の過程(衝突進化, 熱進化など)を経て、小惑星などの天体に至ったと考えられる。小惑星上にはボルダーと呼ばれる岩塊が存在しており、これらは天体の衝突進化時に形成・放出された破片と考えられる。したがって、小惑星上のボルダーは、微惑星の物理特性を保持している可能性がある。小惑星リュウグウ表面の熱赤外観測は、熱慣性が低いボルダーの存在を明らかにした。これらのボルダーの空隙率は、その低い熱慣性から、それぞれ 28–55%[1]および 72–91%[2]と推定されている。しかし、推定された空隙率は、低空隙率(空隙率 20%以下)の普通コンドライトの熱伝導率データ[3]から外挿された熱伝導率と空隙率の経験的關係式[4, 5]に基づく。また、ボルダーの弾性特性は観測からは直接得られず、明らかでない。そこで、本研究ではガラス粒子で構成される多孔質焼結体を作成し、普通コンドライトよりも広い空隙率範囲において、多孔質物質の熱伝導率と弾性波速度を実験的に調査し、得られた結果に基づきリュウグウボルダーの空隙率の再検討を行った。

本研究では、メジアン径が 34 μm で、不規則形状のガラス粒子から構成される多孔質ガラス焼結体を作成した。試料の焼結前の空隙率は~70%であり、作成した焼結体の空隙率範囲は~30%–65%である。焼結体の熱拡散率をロックインサーモグラフィー周期加熱法[6, 7]によって測定し、熱伝導率を算出した。また、弾性波速度をパルス透過法によって測定した。

本研究で得られたガラス焼結体の空隙率と熱伝導率の關係は、線形關係で近似された。このような線形關係は、初期空隙率~35%の球形粒子からなる焼結体の数値シミュレーションの結果としても得られている[8]。熱伝導率の変化率は普通コンドライト[3]の場合よりも穏やかであった。また、ガラス焼結体と普通コンドライト[9]の弾性波速度も異なる傾向を示した。この熱伝導率および弾性波速度の空隙率依存性の違いは、内部空隙の形状に起因する可能性高い[3, 8]。円盤型の空隙(クラック)は、その体積が小さい場合でも、熱あるいは弾性波の伝播を効率的に阻害する。そのため、内部にクラックを含む物質の熱伝導率と弾性波速度は、空隙率に強く依存する。

本研究により新たに得られた広い空隙率範囲におけるデータから導出した線形關係式を用いて、リュウグウボルダー[1]の空隙率を改めて推定した結果、従来の推定値よりも高い可能性が示唆された。この新たな推定値は、ボルダー内部にクラックが含まれない場合の空隙率であると考えられる。ただし、内部にクラックを含まない場合であっても、初期空隙率が低い焼結体の線形關係式[9]に基づく、推定される空隙率は従来の範囲内に収まる。これらの結果は、熱慣性に基づいて推定される空隙率が使用する關係式に大きく依存することを示している。

[1] Grott et al., 2019 [2] Sakatani et al., 2021 [3] Yomogida and Matsui, 1983 [4] Henke et al., 2012 [5] Flynn et al., 2018 [6] Ishizaki and Nagano, 2019 [7] Ishizaki et al., 2023 [8] Henke et al., 2016 [9] Ostrowski and Bryson, 2019, and references therein

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。

小惑星ボルダーの空間分布の統計モデルと小惑星エロス、イトカワ、リュウグウへの応用

○道上達広（近大）、アクセル・ハガーマン（ルレオ工科大学）

探査された小惑星の多くは、数多くのボルダー（岩塊）で覆われており、それらのボルダーの空間分布は、ボルダーの起源、経年変化を知る上で重要な手掛かりになる。ボルダーの起源として主に2つ挙げられる。1つは、隕石が小惑星表面に衝突し、クレーターが形成、そこから飛び出した破片が再び表面に降り積もったもの。もう1つは、過去に小惑星母天体が存在し、その母天体が激しい破壊を受け、その一部が再び集積し小惑星が形成、破片の一部が表面に堆積したものである。例えば、小惑星エロスの大部分のボルダーは前者で形成されたと考えられており、ボルダーの空間的な拡がり、最大クレーターに関して偏りがある（Thomas et al. 2001, *Nature* 413,394-396）。一方、小惑星イトカワ、リュウグウの大部分のボルダーは後者で形成されたと考えられており、ボルダーの空間的な拡がりは一様に見える（Saito et al. 2006, *Science* 312, 1341-1344; Michikami et al., 2008, *EPS* 60, 13-20; Sugita et al. 2019, *Science* 364, aaw0422; Michikami et al. 2019, *Icarus* 331,179-191）。

クレーターの空間的な分布は、過去の研究で Z-スコアと呼ばれる統計量を使って定量的に調査されている（e.g. Squyres et al. 1997, *Icarus* 125, 67-82; Hirata et al. 2020, *Icarus* 338, 113527）。しかしながら、ボルダーの空間分布に関しては、統計量を用いた定量的な研究はされていない。その理由として、ボルダーの場合、クレーターで用いられた Z-スコアをそのまま適用できないからと考えられる。つまり、クレーター形成で用いられている2つの仮定（1つ目は、クレーターは単位面積当たり同じ割合で形成される、2つ目は、形成されたクレーターの位置は、お互いのクレーターの位置に依存しない）が、ボルダーの場合、成り立たない。

そこで本研究では、上記の2つの仮定を改良した Z-スコアを作成し、ボルダーの空間分布を定量的に調査することにした。具体的には、ボルダーの数密度、小惑星の表面積に占めるボルダー総面積の割合をパラメーターとして与え、ボルダー同士が重なり合う場合と重ならない場合で、ボルダーの空間分布（ランダム分布）がどのように変化するかを、数値計算によって明らかにした。そして、それら数値計算によるボルダーの空間分布と、小惑星エロス、イトカワ、リュウグウの観測されたボルダーの空間分布を比較し、Z-スコアを求めることで、小惑星ボルダーの空間的な偏りを調査した。その結果、有意水準 95%で、(i)小惑星エロスのボルダーは観測された 30m 以上のサイズすべてで偏りがあり、空間的にクラスター分布、(ii)小惑星リュウグウとイトカワのボルダーは予想に反して観測された数 m サイズでクラスター分布、数 10m サイズでランダム分布に近いことが分かった。これは、小惑星リュウグウ、イトカワの数 m サイズのボルダーは小惑星形成後、かなりの移動をしたことを示唆している。

本 発 表 の 論 文 : Michikami & Hagermann, 2025, *Icarus* 441, 116693,
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2025.116693>

自動識別法による小天体表層および帰還サンプルにおける岩石粒子の 粒径・形状の解析

○清水 雄太¹、宮本英昭¹、深井稜汰²、西村征洋²、臼井寛裕²

¹東京大学、²JAXA

はやぶさ、はやぶさ 2、OSIRIS-REx、DART ミッションなどで近年探査された数 km 以下の地球近傍小惑星の表面は、未固結で無数の岩石粒子で覆われていることが明らかになった [1-4]。そのような小天体表層に存在する岩石粒子の粒径、粒子形状などの分布、長軸の向きの傾向などは、クレーターや線状構造といった他の地質学的構造と合わせて、天体の形成以後表面がいかに進化してきたかを理解する有用な手掛かりとなる [2,4]。さらに、粒子ひとつひとつを詳細に識別し、粒径や粒子形状を正確に把握することは、リモートセンシングデータの解析だけでなく、帰還サンプルの初期記載やあらゆる詳細分析を実施するうえで、重要な基本的な情報をもたらす。ところが、1 粒子 1 粒子を精密に識別し、解析する過程では、膨大な作業時間と人的労力を要する割に、粒子の解析結果に研究者間でばらつきが生じ、同一の研究者であっても解析の再現性が低いという問題がある。そこで本研究では、深層学習を用いて岩石粒子の自動識別アルゴリズムを確立した [5]。

過去の探査機のデータから手動で岩石粒子の輪郭約 6 万個の教師データを作成し、それにより岩石粒子の自動識別モデルの学習を進めた。確立したアルゴリズムをはやぶさ 2、OSIRIS-REx が獲得した約 1 万枚の画像に適用し、合計約 350 万個の岩石粒子の自動識別に成功し、画像間の重複を取り除いて、約 20 万個の粒子を小惑星リュウグウおよびベヌー上にマッピングした。マッピングしたデータから、両天体上における岩石粒子の粒径、粒子形状の分布、岩石粒子の長軸が傾斜方向とのなす角の傾向が明らかになった。その結果、小惑星リュウグウとベヌーでは、一見天体の形状が酷似していても、自転速度の違いで表層物質が反対に（極から赤道に、あるいは赤道から極に）移動し、異なる表層・形状進化をもたらしたとの示唆を得た [5]。

確立されたアルゴリズムは、小天体からの帰還サンプルの分析でも利用が開始されている。例えば 2023 年に小惑星ベヌーより持ち帰られた OSIRIS-REx の帰還サンプルの画像を詳細に解析し、バルク試料皿 5 枚分、約 3 万個の粒子を迅速に自動識別し、岩石粒子の粒径、粒子形状分布が明らかになった [6,7]。これらの結果から、JAXA に分配されたサンプルは、粒径範囲は異なるものの、粒形分布の特徴（べき乗分布の傾き）は、NASA が有するサンプルと非常に似ており、粒形分布という観点では、ベヌー帰還サンプル全体の特徴を非常によく保持したものであるということが明らかになった。本検討を通して獲得された知見は、その他の様々なサンプル解析で利用される予定であり、例えばはやぶさ 2、MMX の帰還サンプルの解析での利用が検討されている。本講演では岩石粒子の自動識別アルゴリズムによってこれまで得られた成果と、今後の展望について議論したい。

[1] Saito et al., *Science* **312**, 1341-1344 (2006). [2] Sugita et al., *Science* **364**, eaaw0422 (2019). [3] Lauretta et al., *Nature* **568**, 55-60 (2019). [4] Barnouin et al., *Nature Commun.* **15**(1), 6202 (2024). [5] Shimizu et al., *Scientific Reports*, **15**(1), 10284. [6] Fukai et al., *Submitted*. [7] Tahara et al., *Submitted*.

小天体の表層進化過程解明に向けた 粒子形状の効果に関する実験的・数値的検討

○磯邊 優奈¹, 宮本 英昭¹, 清水 雄太¹

¹ 東京大学

複数の探査で訪れた直径数 km 以下の地球近傍小惑星は、表面が未固結の物質で覆われていることが明らかとなっている。特に、小惑星 Itokawa には、数 m サイズの岩塊が多数存在する rough terrain と、数 cm サイズの岩石粒子からなる smooth terrain という、粒子サイズの異なる 2 つの領域が存在する[1]。これらの地形的特徴は、天体衝突に伴う地震動によって表面物質が移動・流動した可能性があることが示唆されている[2]。最近観測された Ryugu や Bennu といった、イトカワと同程度の大きさを持つ小惑星も、多数の岩塊に覆われている[3, 4]。これらの天体でも分級過程が作用している可能性はあるが、イトカワのような明確な地形的差異は見られない。これは、微細粒子の欠如、微細粒子が内部に集中している可能性、あるいは分級を妨げるような材料特性によって説明できるかもしれない。この仮説を検証するためには、まずは外部からのエネルギーに繰り返し曝される粉粒体の挙動について、より深い理解を得ることが必要であると考えられる。

振動などの外力を受けた粉粒体は、対流[5]、偏析[6]、表面波[7]といった多様な現象を示すことが知られている。しかし、これらの現象に関する先行研究の多くは、粒子形状を理想的な球形に単純化して取り扱っており、自然界に広く存在する非球形粒子へ適用できるかについては慎重な検討が求められる。小天体表層を覆う岩石粒子は非常に複雑な形状を有しているが、その中でも特徴的なのが、角張り (Angularity) と細長さ (アスペクト比) である。これらの形状特性は、せん断強度やエネルギー散逸などの巨視的な物理特性に対して顕著な影響を与えることが知られているが (e.g., [8])、地震動のような外力に対する応答への寄与は未だ明らかとなっていない。

本研究では、実験と数値シミュレーションを併用し、粒子の angularity・アスペクト比が垂直振動下での粉粒体の挙動に及ぼす影響を体系的に検討した。直径 140mm の円柱容器に単一粒径の粒子を約 24000 個入れ、振幅 50 mm、周波数 50 Hz で容器全体を振動させた。その結果、角ばった粒子や細長い粒子は流動が継続し、常に対流現象を示したのに対し、球に近い粒子では流動が継続しないことが明らかとなった。すなわち、複雑な粒子形状は振動下での粉粒体の挙動に大きく影響し、これまで頻繁に用いられてきた球形粒子は、非球形粒子の挙動を十分に再現できない可能性がある。このことから、今後小天体の表面物質の移動・流動プロセスをさらに理解するためには、粒子形状の影響を考慮する必要があると考えられる。

- [1] Fujiwara et al., *Science* **312**, 1330 (2006). [2] Miyamoto et al., *Science* **316**, 1011 (2007). [3] Watanabe et al., *Science* **364**, 268 (2019). [4] DellaGiustina et al., *Nature Astronomy* **3**, 341 (2019). [5] Faraday, *Philosophical transactions of the Royal Society of London* **299** (1831). [6] Knight et al., *Physical Review Letters* **70**, 3728 (1993). [7] Pak and Behringer, *Physical review letters* **71**, 1832 (1993). [8] Azéma et al., *Physical Review E* **87**, 062203 (2013).

セドナ型新天体「Ammonite」の発見と 軌道ダイナミクス：太陽系外縁部への力学的窓

Discovery and orbital dynamics of a new Sedna-like object, "Ammonite": A dynamical window to the edge of the outer solar system

○Ying-Tung Chen¹, パトリック ソフィア リカフィカ (Patryk Sofia Lykawka)², Yukun Huang³, and
The FOSSIL Team

¹Institute of Astronomy & Astrophysics, Academia Sinica, Taiwan

²近畿大学 総合社会学部 (School of Social and Human Sciences, Kindai University)

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

Distant trans-Neptunian objects (TNOs), specifically those characterized by perihelion distances (q) greater than 60 au and semimajor axes (a) exceeding 200 au, are invaluable for understanding the early evolution of our solar system. They also provide crucial insights into the potential existence of a distant, undiscovered planet. Due to their immense distance from the Sun, these objects are inherently challenging to detect, making each new discovery a significant event that contributes to refining and validating current models of solar system formation and dynamics.

Here, we present the discovery of 2023 KQ14, nicknamed "Ammonite." This newly identified object is a Sedna-like TNO, a category of objects known for their unusually distant orbits that keep them far from Neptune's gravitational influence. Ammonite's observed orbital parameters include $q = 66$ au, $a = 252$ au, and an inclination $i = 11$ degrees. What makes Ammonite particularly intriguing is that its orbit does not cluster with those of other currently known Sedna-like objects. This result challenges the predictions of the Planet Nine hypothesis—a hypothetical super-Earth massed planet in the outer solar system. Ammonite's orbit also uniquely fills a previously unexplained " q -gap" in the distribution of distant solar system objects. These discoveries suggest a more complex structure in the outer solar system than previously assumed.

Through extensive numerical simulations, we have confirmed Ammonite has remained dynamically stable for at least 4.5 Gyr. Our findings suggest that Ammonite, along with other Sedna-like objects, may have once shared a common orbital clustering approximately 4.2 Gyr ago. This ancient common origin could provide critical clues about the early stages of planetary migration and scattering of planetary bodies within the solar system. Furthermore, the stability of Ammonite's orbit indicates that if Planet Nine exists (despite the point above) and is gravitationally influencing these distant TNOs, it would need to reside in a larger orbit around or beyond 500 au, to avoid disrupting Ammonite's long-term stability.

※研究の成果は Nature Astronomy (2025 July 14) に掲載されました。

<https://doi.org/10.1038/s41550-025-02595-7>

This work is supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP23K03482

生命の材料物質の地球への供給と炭素質小天体の地球近傍での潮汐破壊やリング形成との関係に関する研究

○大野宗祐¹

¹千葉工業大学惑星探査研究センター

地球生命の材料物質が地球外に由来するという説は、生命の起源に関する重要な仮説の一つとして広く認識されている。例えば小惑星リュウグウには、生命の起源と関連する可能性のある有機物等が含まれていることが、はやぶさ2の探査結果から明らかになった。

ただし、直径約1kmのリュウグウ、あるいはさらに大きいと推定されるリュウグウ母天体のような大きな天体が地球大気に直接突入した場合、大気による減速を受けず、超高速で地表あるいは海面に衝突する。超高速の衝突の際には非常に高温になるため、衝突天体中に含まれている有機物の大部分は一度分解されてしまう。従って、リュウグウやその母天体に含まれる構成物質が、そのまま生命材料物質として地球に供給されるためには、大気突入前にメートルサイズの隕石あるいはミクロンサイズの宇宙塵といった、より小さいサイズへと分裂する必要がある。

本講演では、生命材料物質を豊富に含む小天体が地球へ接近し、地球重力による潮汐力で破壊された結果として、これらの物質が効率的に地球にもたらされた可能性を提案する。さらに、その破片の一部が地球周囲にリングを形成した可能性についても検討し、リングから供給される生命材料物質のフラックスを評価することで、地球生命の起源との関係を議論する。

本研究で提案するように、地球重力による潮汐破壊を受けた天体がその後地球大気に突入する場合には、以下のような特徴を持つ。これらが生命誕生のための材料物質供給メカニズムとして、生命誕生のために有利に働いた可能性がある：

- 1) 本来ならば分解されるような大きなサイズの天体に含まれる有機物も、潮汐破壊により断片化されることで、分解を免れ、効果的に生命材料物質として機能する可能性がある。
- 2) 当時の平均的な供給量に比べ、有機物フラックスが一時的に数桁増加した可能性がある。
- 3) 特定の母天体に由来する物質を、地球へ集中して供給することが可能となる。
- 4) 一旦地球周囲のリングとして捕獲されることで、大気突入速度が減少し、その結果、有機物が突入時の加熱による変性を受けにくくなる。

炭素質隕石および小惑星回収試料中の鉄の酸化還元状態 The iron redox variation of carbonaceous chondritic materials

○天野香菜¹, Jean-Christophe Viennet¹, Pierre Beck², François Guyot¹,
Sergey Yaroslavl'tsev³, Dimitrios Bessas³, Aleksandr Chumakov³, Ludovic Delbes⁴,
Olivier Poch², 中村智樹⁵、榎戸祐馬⁶、坂本加奈子⁶、橘省吾⁷, Mathieu Roskosz¹

¹National Museum of Natural History, France, ²University of Grenoble-Alpes,

³European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), ⁴Sorbonne University,

⁵東北大学, ⁶宇宙科学研究所, ⁷東京大学

始原的な隕石（コンドライト）に含まれる鉄の酸化還元状態は、太陽系始原天体の形成・進化における酸化還元環境を復元する手がかりとなる。コンドライト中の鉄の酸化還元状態は通例的に Urey-Craig ダイアグラム[1]という図に示され、惑星科学や天文学などの議論に広く用いられてきた。この図では縦軸に金属鉄及び硫化鉄の量、横軸に酸化铁的な鉄（ケイ酸塩を含む）の量がプロットされ、各隕石タイプは図中の固有の位置を占める。現在よく知られている Urey-Craig ダイアグラムでは CI および CM コンドライトは酸化铁的な端成分としてプロットされており、それらに含まれる還元的な鉄は度外視されている。しかし、近年の探査機回収試料の調査によって CI コンドライト的な物質には多量の硫化鉄が含まれることが明らかとなり、CI 隕石が地球で酸化された結果その鉄のスペシエーションが大きく変化しているということが示唆された[2,3]。そこで本研究では Urey-Craig ダイアグラムにおける各隕石タイプの位置を再検討し、母天体の形成進化環境について考察することを目的とし、さまざまな炭素質隕石および小惑星回収試料の鉄の酸化還元状態を調べた。手法として、X 線回折法および放射光メスバウアー分光法を用いた。

結果として、地球風化を受けていない CI コンドライト的物質（Bennu 試料、Ryugu 試料[2]、近年発見された CI 隕石[4]）には少なくとも 20%Fe 程度が硫化鉄として含まれることが示された。このことから、地球風化を受けていない CI コンドライト的物質は従来の Urey-Craig ダイアグラム上での位置よりも還元的な特徴を持っているということがわかった。また水質変成度の低い CM コンドライト試料（Paris, Asuka 12236 など）からは金属鉄が検出され、CM コンドライトの Urey-Craig ダイアグラム上での位置は従来よりも広がりを持っていることが示された。さらに、鉄のスペシエーションに加えて含水鉱物中の鉄の価数状態を考慮すると、地球風化を受けていない CI コンドライト的物質、CM コンドライト、および Tagish Lake 隕石はそれぞれ固有のクラスターを形成し、それぞれの母天体が異なる酸化還元環境での形成・進化を経たことが示唆される。

参考文献: [1] Urey, H.C., Craig, H., 1953. *Geochim Cosmochim Acta* 4, 36–82. [2] Roskosz, M. et al. 2024. *Meteorit Planet Sci* 59, 1925–1946. [3] Leroux, H. et al. 2024. *Meteorit Planet Sci*. 59, 1947–1965. [4] Gattacceca, J. et al. 2025. *Meteorit Planet Sci*. <https://doi.org/10.1111/maps.14359>

ミリ波観測と熱放射モデルによる

1 Ceres 表層下熱放射と複素誘電率の推定

Subsurface Thermal Emission and Complex Dielectric Constant of 1 Ceres Estimated from Millimeter-Wave Observations and a Thermophysical Model

高橋茂¹ 窪田暉² 佐川英夫^{2,1} 塚越崇^{3,1} 川瀬純也¹ 飯野孝浩¹

1 東京大学 2 京都産業大学 3 足利大学

ミリ波・サブミリ波帯域での小惑星の観測は、表面および表層下の物性を明らかにする上で極めて有用である。特に ALMA は、その卓越した空間分解能により、小惑星表面における熱的構造を詳細に把握する能力を持っている。

本研究グループでは、これまでに ALMA アーカイブに蓄積された 2017 年の 1 Ceres 観測データ (260 GHz、空間分解能 ~ 0.05 arcsec) を再解析し、高分解能の輝度温度マップの作成に成功している。また、我々は、観測結果を再現することを目的として、熱物理モデル (e.g. Spencer et al. 1989) を用いた小惑星の熱放射シミュレーションに取り組んできている。ミリ波帯では、電波がレゴリスに対してある程度透過的であるため、表層下からの熱放射が観測に寄与する。このため、表面のみの放射を仮定した従来のモデルでは、観測を十分に説明することができず、表層下からの放射成分を取り入れたモデルの導入が不可欠である。ここで重要となるのが、複素誘電率でありこのパラメータを用いて熱放射シミュレーションを行う必要がある。

前学会では、熱物理モデルに複素誘電率を導入し、初期的な熱放射シミュレーション結果を報告した。今回はその続編として、より広範なパラメータ空間の探索を実施した。具体的には、熱慣性 $I=1-200$ [tiu] (tiu: 熱慣性単位) および 表面のラフネスパラメータ $\xi=0.0, 0.2, 0.5$ を系統的に変化させ、それぞれのパラメータの組み合わせに対して観測結果と一致する複素誘電率の範囲を推定した。ここで使用したラフネスパラメータ ξ (Davidsson et al. 2009) は、Dawn ミッションによる先行研究 (Rognini et al. 2020) で用いられたものであり、Ceres 表面の凹凸を表現する無次元量である。今学会では、得られたパラメータ探索結果と先行研究とを比較しながら 1 Ceres の表面表層物性について考察する予定である。

References:

- Davidsson et al. Icarus 201, 335 (2009)
- Rognini et al. JGR 125, e2018JE005733 (2020)
- Spencer et al. Icarus 78, 337 (1989)

Keywords: ALMA, Ceres, Asteroid

次世代小天体サンプルリターン計画で目指す小天体 内部構造探査戦略

○ 坂谷 尚哉¹、黒川 宏之²、熊本 篤志³、川村 太一⁴、田中 智¹、鳶生 有理¹、
荒川 創太⁵、岡田 達明¹

¹JAXA 宇宙科学研究所、²東京大学、³東北大学、⁴パリ地球物理研究所（IPGP）、

⁵海洋研究開発機構

原始惑星系円盤内のダストから太陽系内天体に至るまでの集積過程における最大の謎は「微惑星形成」である。マイクロメートルサイズのダストが集積してキロメートルサイズの天体（微惑星）が形成する過程には、円盤ガスの抵抗による中心星（太陽）への落下や付着成長限界といった障壁が存在する。ダストがこれらの障壁を乗り越え直接合体成長を経て微惑星が誕生したのか、もしくはあるサイズで付着成長の止まったダスト集合体（ペブル）が何らかのメカニズムでかき集められて微惑星（ペブルパイル）へと至ったのか、多くの理論モデルが提唱されているが、決定的な物証がなく、結論が出ていない。はやぶさ、はやぶさ2は、惑星の材料となった物質の化学的情報を記録する貴重な試料を地球に持ち帰ったが、リュウグウのような小惑星はより大きな母天体の段階において水岩石分化や水質変成を経験し、微惑星形成の物理的情報の多くが失われている。このような微惑星集積過程の痕跡は、始原的特徴を色濃く残す彗星の内部に眠っていると考えられる。

現在、ワーキンググループとして活動している次世代小天体サンプルリターン計画は、木星族彗星 289P/Blanpain をノミナルターゲットとし、サンプルリターンに加えて、内部構造探査を科学探査の柱の一つとして掲げている。主要観測機器として、周回機を用いたバイスタティックレーダー探査、および表面設置型・長期観測地震計パッケージの開発を進めている。レーダー探査では親機と子機で彗星を挟み込み、親機から送信したレーダーパルスの子機で中継し、再度親機で受信することで彗星内部の誘電率分布やそのコントラスト（反射面 or 間隙）の位置や大きさを調査する。また、地震計観測においては、人工衝突装置 SCI やサンプリング時の弾丸衝突、また地震計自体の人工震源をもちいて、彗星内部の地震波速度構造、散乱特性を明らかにする。

本発表では、次世代小天体サンプルリターンの内部構造探査戦略と機器の開発状況を報告するとともに、次世代小天体サンプルリターン計画に限らず、惑星形成論の実証に向けて如何にして小天体の物理探査を行っていくかを議論したい。

GEMS 模擬物質の結晶化実験による彗星スペクトルの再解釈

○萩原万里奈¹, 瀧川晶¹¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

原始太陽系円盤外側で形成したと考えられている彗星の赤外観測では、非晶質ケイ酸塩だけでなく結晶質ケイ酸塩が見つかった[e.g. 1]. また、彗星由来と考えられている炭素質かつ多孔質な惑星間塵 (CP-IDP) や 81P/Wild 2 彗星からの帰還試料の分析でも、Fe-Ni 合金や硫化物が埋め込まれた非晶質ケイ酸塩 (GEMS) に加えて、結晶質ケイ酸塩が見つかった[2]. このことから、円盤内側の高温領域での結晶化を経験したケイ酸塩が、円盤外側へ輸送されて GEMS と混合した後に彗星に取り込まれたと考えられてきた[3]. GEMS の起源は未だ議論が続いている[2, 4]が、円盤内側の高密度ガスが急冷してできた可能性が実験的に示唆されている[5]. この場合、彗星形成領域である円盤外側へ輸送される前に、GEMS の一部が結晶化を経験する可能性がある. そこで本研究では、結晶化した GEMS で彗星中の結晶質ケイ酸塩が説明できるか検証するため、実験的に合成した GEMS 模擬物質を真空下で加熱する結晶化実験を行い、GEMS 模擬物質の結晶化過程および条件を調べるとともに、彗星の赤外スペクトルを説明する実験条件を制約し、さらにその条件が実現しうる円盤環境を議論する. 誘導熱プラズマ装置 (ITP) で合成した GEMS 模擬物質は、球状のカマサイト $\text{Fe}_{0.97}\text{Ni}_{0.03}$ コアを含んだ球粒状の非晶質ケイ酸塩 ($\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}) \sim 92$) であった[6]. これを 620, 720, 820, 920°C で 0.5-288 時間加熱する結晶化実験を行った. 加熱により、まず非晶質シリカの離溶、次にオリビン ($\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x}$)₂SiO₄ の結晶化の開始、次いで Ca を含んだパイロキシンの結晶化が起こった. 高温で長時間の加熱条件ほど、既存のカマサイトの消費、それに続いてオリビンの Mg# ($=\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}) [\text{mol}\%]=100x$) の減少、さらに非晶質シリカやパイロキシンの消費によりオリビンの生成量の更なる増加が見られた. これまでに行ってきた実験条件のうち、720°C で 0.5 時間加熱した試料の赤外スペクトルが彗星スペクトル[7]に最も合うことがわかった. すなわち、非晶質ケイ酸塩と結晶質ケイ酸塩を線形的に混合するのではなく、GEMS 模擬物質の部分的な結晶化によっても彗星ダストのスペクトルを説明することが可能であることが示唆された.

以上に加え、酸化還元条件を調整した炉での結晶化実験による彗星スペクトルにより近づくような実験条件の制約、そしてそのような熱力学的条件が再現されうる原始惑星系円盤内の加熱イベントについて議論する.

[1] Hanner, M. S., Lynch, D. K. and Russel R. W. (1994) *ApJ* 425, 274. [2] Keller, L. P. and Messenger, S. (2011) *GCA* 75, 5336. [3] Bockelée-Morvan, D. et al. (2002) *A&A* 384, 1107. [4] Bradley, J. and Dai, Z. (2004) *ApJ*, 617, 650. [5] Kim, T. H. et al. (2021) *A&A* 656, A42. [6] Enomoto, H. et al. under review, *A&A*. [7] Lisse, C. M. et al. (2007) *Icarus* 187, 69.

弾性体SPH法の新しい定式化：ばね相互作用を用いた応力テンソルの再現

○ 内海 秀介¹, 犬塚 修一郎¹

¹ 名古屋大学

地球に代表される固体惑星は小天体同士の衝突、合体を繰り返して形成されており、そのうち惑星まで成長しなかった残骸が小惑星である (e.g., Petit et al. 2001; Bottke et al. 2005). 全球が融解した歴史を持つ地球は形成時の情報を失っているため、固体惑星形成過程の歴史を知るためには、衝突現象を伴う小惑星の形成過程を調査する必要がある. このような現象のシミュレーションでは、弾性体力学へ拡張された Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法が有効である. SPH 法は、流体粒子により空間を離散化しラグランジュ的に記述するため、衝突破壊現象の記述に非常に適している.

天文分野に限らず、固体の大変形や破壊を伴う現象を再現するため、弾性体 SPH 法の様々な定式化が開発され続けている (e.g., Gotoh et al. 2025; Wang et al. 2025). しかしながら、既存の定式化では偏差応力テンソルを陽に用いる必要があり、以下の2つの問題点が存在する. (1) 非中心力の導入により、定式化の段階で系の全角運動量を丸め誤差の範囲で保存することはできない. (2) 偏差応力テンソルの発展方程式を時間積分する必要がある、冗長で計算コストが高い.

本研究では、これらの問題点を克服する新たな弾性体力学計算手法を提案する. 具体的には、従来の SPH 法にばねによる相互作用を導入し、応力テンソルの非対角成分の効果を再現する. 本手法は、系の全質量、全運動量、全エネルギー、そして全角運動量を計算機の丸め誤差の範囲で厳密に保存する. さらに、我々の定式化は通常の SPH 法の拡張として見做せるため実装が容易であり、既存の弾性体計算法に対して計算コストを大きく低減する. また、以下に示す様々なテスト計算を行い、本手法の有効性を確認した. (1) 計算コードの設定パラメータを調節することで、等方性を保ちながら、任意の Poisson 比と Young 率を実現可能であることを確認した (図 1). (2) 線形波の伝播を再現可能であること、種々の弾性パラメータに対する縦波と横波の速度が弾性体力学と一貫することを確認した.

今後、ばねの力に高次の項を取り入れることで、非線形な構成則を持つ現実の具体的な弾性体をも再現することができるだろう. 加えて、破壊、摩擦のモデル (e.g., Jutzi 2015) を導入することで、前述した小惑星形成の解析への応用が可能となる. 本発表では、我々の新しい弾性体計算法の定式化および妥当性、そして今後の発展について述べる.

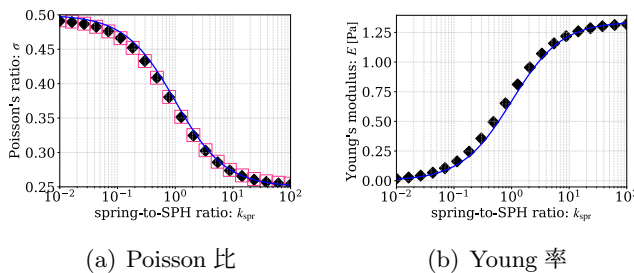


図 1: 新しい定式化のパラメータ k_{spr} と物質の弾性パラメータの関係. (a) は Poisson 比を表す. 図中の青線はモデルの曲線, 黒四角と桃四角は, y 軸, z 軸方向である. (b) は Young 率を表す.

最新の太陽モデルによる原始太陽系組成の改訂

○ 國友 正信¹, Gaël Buldgen², Tristan Guillot³

¹ 久留米大学, ² リエージュ大学, ³ コート・ダジュール天文台

原始太陽系の元素組成は惑星形成過程や惑星内部構造モデルに重要かつ基礎的な要素の一つである (e.g., Guillot 2005)。これは原始太陽組成の推定値と隕石組成から制約されてきた。前者は現在の太陽の光球組成に加えて太陽の進化モデルを用いるため、モデル依存である (e.g., Asplund et al. 2021)。

太陽の進化モデルはこれまで標準太陽モデルが広く用いられてきたが、太陽の日震学観測やニュートリノ観測を再現できず、およそ 20 年にわたり問題となっていた。これまで我々は、オパシティの不定性と原始太陽系円盤から原始太陽への降着を考慮した非標準太陽モデルによりこの問題を解決できることを解明した (Kunitomo et al. 2022)。

さらに近年、太陽表面の軽元素組成に注目が集まっている。3D NLTE 大気モデルを用いた制約から、比較的低温 (~ 250 万 K, $\sim 0.65 R_{\odot}$) で核燃焼する Li は隕石から得られる原始太陽系組成から 2.31 dex 枯渇しているが、高温 (~ 350 万 K, $\sim 0.55 R_{\odot}$) で燃える Be は 0.10 dex しか枯渇していないことがわかった (Wang et al. 2021, Amarsi et al. 2024)。これは対流層下端からある程度の深さまで到達する、太陽内部の混合過程の存在を示唆する (Buldgen et al. 2025)。

本研究では、過去の円盤降着とオパシティの増大を考慮した太陽モデルを発展させ、乱流混合 (Proffitt & Michaud 1991) を考慮した太陽モデルを構築し、表面金属量・音速分布・ニュートリノ流束に加え、Li, Be 組成を再現できるか検討した。MESA コードを使用した恒星進化計算を多数行い、simplex 法を用いて観測を再現するインプットパラメータを探索した (Kunitomo & Guillot 2021)。その結果、乱流混合を考慮したモデルでは、重力沈降の抑制および核燃焼の促進により、表面 Li, Be 組成が自然に再現されることがわかった。さらに、重力沈降の抑制により、原始太陽系のヘリウム組成の推定値がこれまで広く用いられてきた値 (0.278 ± 0.006 ; Serenelli & Basu 2010) に比べて大きく下方修正されることがわかった ($0.2648\text{--}0.2659$)。今後、この新しい原始太陽系組成を惑星科学の諸問題 (例えばガス惑星の内部構造モデルなど) に用いることを提案する。

ただし、乱流混合は重元素の重力沈降も抑制するため、太陽中心部の金属量が下がり、本研究のモデルでは 5 つの観測のうちニュートリノ流束のみ再現できなかった。これは考慮している物理過程の修正や、新たな物理過程を考慮する必要性を示唆する可能性がある。

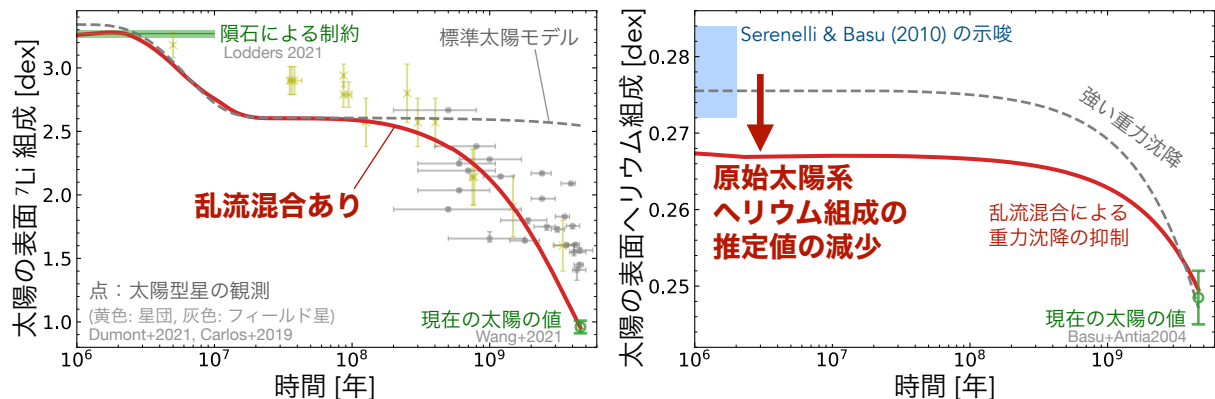


図 1: 太陽表面のリチウム組成 (左図) とヘリウム組成 (右) の時間進化。赤実線が乱流混合 (および原始太陽系円盤から原始太陽への降着, オパシティの増大) を考慮したモデル (Kunitomo et al., submitted)。灰色破線が標準太陽モデル (Kunitomo & Guillot 2021)。

太陽系の同位体分布を説明する惑星形成論

○渡邊 誠一郎¹, 小林 浩², 武市 智樹¹, 宮村 尚典¹

¹名古屋大学 大学院環境学研究科, ²名古屋大学 大学院理学研究科

本研究では、分子雲コア環境の解析、ダストから惑星への統一成長シミュレーション、および巨大惑星の成長・移動に伴う氷微惑星の輸送軌道計算を総合して、はやぶさ2帰還試料などから明らかになった三分性など太陽系の同位体分布の特徴を説明することをめざす。

太陽系初期の短寿命放射性核種 (SLN; ^{26}Al , ^{53}Mn , ^{60}Fe) の存在量と均質性から、太陽系の母体分子雲コアは近傍の超新星もしくは Wolf-Rayet (W-R) 星風の動圧を受け、重力収縮を開始したと考えるのが妥当である (SLN の同位体比の太陽距離依存性が不明確であることから原始惑星系円盤 (円盤) となってから超新星/W-R 星風の照射は考えにくい)。このとき、超新星であれば粒子注入および随伴する 10–100 MeV 宇宙線の照射による核合成、W-R 星風であれば粒子注入が、それぞれ同位体比に影響を与えた。こうした影響は SLN から見積もれば同位体比で 10–100 ppm 程度で、これは安定同位体の三分性を生む変動量と同程度であり、両者は共通の枠組みで説明できる可能性がある。本研究では、太陽が生まれた分子雲 (星団) 環境において分子雲の寿命の間、醸成された同位体分布に重力収縮のトリガとなった同位体注入/生成を加味して、形成される円盤の初期同位体分布を推定した。

次に初期円盤のダストに動径方向に同位体比勾配があったとして、それが惑星や小惑星にどのように配分されるかをダストから惑星までの成長と落下を追う統一シミュレーションで解明している。今回は面密度が外向きに単調減少する円盤を考え、天体衝突による破壊は生じないものと仮定した。計算から、成長したダスト集合体は内側領域から外側へと順に太陽に向かって落下していくが、太陽から概ね 5–10 au 程度の円環領域で、氷微惑星への成長が可能となることがわかった。氷微惑星になると落下が止まり、はじめは同程度の質量の天体どうしの合体で秩序的成長をするが、やがて最大天体の脱出速度がランダム速度 (乱流ガス円盤による重力摂動が主要因) を超えると暴走成長を開始する。このような状況では、当初の動径方向同位対比勾配が氷微惑星サイズによる同位体の違いを生み出すことが明らかになった。つまり、太陽からの距離が同じでも天体サイズによって同位体比が異なる——特に巨大惑星と周辺領域の氷微惑星では同位体比が異なる——可能性があるということである。

最後に土星・巨大氷惑星の成長・移動に伴う氷微惑星の小惑星帯への供給について軌道進化計算で調べた。この場合、小惑星帯への輸送率は、ガス円盤の散逸時間と土星の成長・移動時間との比に強く依存することがわかった。輸送率は大きいため、最小質量モデルに従う固体面密度で氷微惑星を分布させると、それらは小惑星帯に過剰供給されることもわかった。これは前述の統一シミュレーションが示唆する初期氷微惑星の面密度分布と整合的である。

原始太陽系円盤のダストおよび難揮発性凝縮物の輸送 および微惑星形成が導く Cr-Ti 同位体二分性の形成

○市川修次¹, 奥住聡¹, 本間和明¹, 増田雄樹², 荒川創太³, 深井稜汰⁴, 富永遼佑¹

¹ 東京科学大学, ² コペンハーゲン大学, ³ 海洋研究開発機構, ⁴ 宇宙航空研究開発機構

近年の高精度同位体分析により、太陽系物質は非炭素質 (NC) と炭素質 (CC) に大別される同位体二分性を示すことが明らかとなっている (e.g., Warren 2011)。これは、前太陽物質の不均質な分布やその後の物質輸送過程を反映したものであると考えられている

(Nittler et al., 2018) が、その起源には多数の説がある。太陽系物質に見られる同位体二分性は、異なる同位体組成進化をたどった物質が、どのように微惑星に集積されたかを反映していると考えられている。そのため、同位体二分性の起源を解明することは、太陽系形成初期における物質輸送過程や、微惑星の形成条件や集積史を制約する上で極めて重要である。

同位体二分性の起源をめぐっては様々な仮説が提案されているが、その一つに、原始木星が円盤内にギャップを形成し、NC・CC 物質の混合を妨げたとする早期木星形成説がある (Kruijer et al., 2017)。この仮説上で地球の水の乏しさなどを説明でき得ることから

(Morbidelli et al., 2016)、本シナリオをより詳細に検証することは重要である。

Homma et al. (2024) は、Kruijer らの前提条件に基づき、原始木星が存在する円盤においてダストの成長・破壊・移動および同位体異常の輸送を計算した。彼らは、小さいダストがギャップを越えて NC 領域に拡散することで、NC 隕石に見られる $\epsilon^{54}\text{Cr}$ と母天体の集積時期との相関が説明可能であることを示した。一方で、 ^{50}Ti の輸送を担う成分である難揮発性凝縮物 (CAI) が考慮されておらず、Cr-Ti 同位体二分性については未検証であった。

我々は、新たにダストと CAI の 2 成分混合により Cr-Ti 同位体二分性を再現することを試みた(市川ほか: 2024 年秋季講演会)。難揮発性凝縮物が木星ギャップ外縁に蓄積することで、CAI を比較的多く含む CV、CK 隕石の同位体組成は再現可能であった。一方で、難揮発性物質の蓄積を考えるのみでは後期に形成されたと考えられる CI 隕石等の同位体組成および全体のトレンドは再現されなかった。微惑星は、原始惑星系円盤内のダスト密度が高い赤道面上で形成され则认为られており、隕石に含まれる CAI はマトリクスに比べて粒径・内部密度が大きいとため、赤道面へ沈殿しやすい。この性質に基づき、本研究では微惑星形成過程の役割に着目し、微惑星形成による赤道面での難揮発性凝縮物の選択的除去メカニズムを新たに導入し CC 隕石の $\epsilon^{54}\text{Cr}$ - $\epsilon^{50}\text{Ti}$ 二分性の観測的トレンドを一貫して再現することを試みた。

結果として、難揮発性凝縮物がダストに対して 4 倍の効率で微惑星に取り込まれるような条件下では、観測される同位体トレンドの再現が可能となることが示された。時間経過に伴い、木星ギャップ外縁の微惑星形成領域において難揮発性凝縮物の割合が減少し、比較的多く CAI を含む CV、CK 隕石だけでなく、CI 隕石を含む CC 隕石全体の $\epsilon^{54}\text{Cr}$ と $\epsilon^{50}\text{Ti}$ の逆相関のトレンドも再現できる可能性が示された。本結果は、ダスト粒子の拡散・移流などの輸送過程に加え、微惑星形成過程が太陽系物質の同位体二分性という観測的事実に反映されていることを示唆している。

系外惑星大気における 雲・ヘイズ形成過程の探究と惑星形成制約への展望

○大野和正¹

¹ 国立天文台

近年、JWST などによって系外惑星大気に関する我々の理解は急速に進展している。系外惑星大気は中心星近傍という高温・強紫外線環境下にあり、そのような極限環境下における大気物理・化学素過程を理解する上で重要なターゲットである。加えて、惑星の大気組成は惑星形成時に降着した原始惑星系円盤ガスや微惑星の組成を反映していることが期待されており、系外惑星大気観測は“惑星の組成”という新たな次元を惑星形成過程を探る手がかりとして提供してくれる。

系外惑星大気観測を解釈する上で避けて通れないのが大気中の固体微粒子(雲、ヘイズ)の存在である。過去 10 年以上に渡る系外惑星大気観測から、系外惑星は普遍的に曇った大気を持つことが分かっている。雲・ヘイズは観測可能な大気の透過光・放射光・反射光スペクトルの形状を決定付けることに加え、大気温度や化学組成などの大気構造にも多大な影響を与えるため、それらの形成過程を理解する重要性は高い。その一方、系外惑星大気中で雲・ヘイズがどのように形成し、大気観測に影響を与えるかに関しては未だに謎が多い。

我々はこれまで、固体微粒子成長を忠実に考慮した微物理モデルに独自に開発し、系外惑星における雲・ヘイズの形成素過程と観測への影響を調べてきた。本講演では鉱物雲粒子の空隙率進化による高層雲形成過程、散逸大気中における粒子成長と観測半径の増加による超低密度惑星の説明、ダイヤモンドで構成されたヘイズ粒子の形成可能性などといった、我々のこれまでの理論研究から得られた系外惑星の雲・ヘイズ形成に関する知見を紹介する。また、JWST による近年の大気観測結果を踏まえて、我々が現在取り組んでいる惑星大気組成と惑星形成過程を橋渡しする理論研究に関しても紹介する予定である。

超新星爆発によるダスト形成の網羅的なパラメータ調査

○ 篠田兼伍¹, 田崎 亮², 徳野 鷹人¹, 諏訪 雄大²

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

隕石中には、プレソーラー粒子と呼ばれる太陽系同位体比と大きく異なる同位体比を示す固体微粒子が含まれている。プレソーラー粒子の中には最大数ミクロンサイズのグラファイト粒子など、超新星爆発時に形成されたと考えられているものが存在し、超新星ダスト形成を物語る重要な物的証拠となっている。超新星におけるプレソーラー粒子の形成を理解するために、これまで典型的な超新星爆発の爆発エネルギー (10^{51} erg) を想定したダスト形成計算が数多く行われてきた (e.g., Nozawa et al. 2015)。しかし、実際の爆発エネルギーには多様性 ($10^{47} \sim 10^{52}$ erg) があることが知られており、放出される放射線同位体 (^{56}Ni) の質量、放出されるエジェクタ質量も同様に変化するため、超新星でできるダストのサイズやその分布も多様性を持つことが期待される。

本研究では、このような超新星の爆発特性がダストのサイズ、サイズ分布などのダスト物理量にどのような影響を与えるかを古典核形成モデルを用いて網羅的に調査した。その結果、低太陽金属量 ($10^{-4} Z_{\odot}$) の星では、爆発エネルギーが非常に低い場合 ($\lesssim 10^{48}$ erg) および典型値以上の場合 ($\gtrsim 10^{51}$ erg) にはサブミクロンサイズの、また中間的な爆発エネルギー ($\sim 10^{49-50}$ erg) ではミクロンサイズのグラファイト粒子が形成されることが示された。また、太陽金属量の星においては、典型的な超新星以上の爆発エネルギーではサブミクロンサイズ、それ以下の爆発エネルギーではミクロンサイズを超えるグラファイト粒子が形成された。

これらの結果は、ミクロンサイズのプレソーラーグラファイト粒子の形成には、これまで想定されてきた典型的な超新星爆発ではなく、むしろ低エネルギーの超新星爆発が重要な役割を果たす可能性を示唆している。本発表では、これらの結果をもとに、プレソーラーグラファイト粒子の形成シナリオについて議論する。

炭素同位体異性体比から探る 複雑な有機分子の生成過程

○一村亮太^{1,2}, 野村英子^{1,2}, 古家健次³, 羽馬哲也⁴, T.J.Millar⁵

¹総合研究大学院大学, ²国立天文台, ³理化学研究所, ⁴東京大学, ⁵Queen's University Belfast,

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) による星間氷中の複雑な有機分子

(COMs) の観測結果は、これまでの気相における観測結果と合わせて、COMs の合成におけるダスト表面および氷マントル内での化学反応の重要性を改めて示している。本研究では、分子内の¹³C の位置 (例: $\text{H}^{13}\text{COOCH}_3$ と $\text{HCOO}^{13}\text{CH}_3$ など) を区別する新しい化学反応ネットワークを構築し、星形成領域における COMs の形成過程と炭素同位体分別を調査した。気相および氷相の化学反応の両方において、各種分子に含まれる¹³C の位置を考慮することで、星形成領域において形成された COMs の同位体異性体ごとの¹²C/¹³C 比を解像することが可能となった。本モデルでは、氷相の反応として氷表面での熱的拡散によるラジカル-ラジカル反応と、表面およびマントルを含むバルク氷内での非熱的な宇宙線由来のエネルギーによる氷分子の分解の化学反応(radiolysis)を取り扱った。その結果、COMs の官能基における炭素同位体分別は、冷たい環境(10K)における非熱的な radiolysis、あるいは原始星形成後の温かい環境(〜40K)における熱的拡散による反応を通じて生じることが分かった。特に、メチル基を含む COMs では、形成過程や形成環境を反映した同位体異性体の¹²C/¹³C 比の違いが現れることが示された。これらの同位体異性体に特有な分別パターンは、星形成領域における COMs の起源を探る上での有力な診断手段となると考えられる。将来的には、高感度な同位体観測と同位体異性体を区別した本モデルとの比較を通じて、COMs の生成における熱的および非熱的形成プロセスの寄与を制約することが期待される。

後期星間ガス降着は中心星に到達するか？ ：円盤内の質量損失 VS 角運動量輸送

○大山 航¹, 仲谷 峻平², 細川 隆史¹, 三谷 啓人³

¹京都大学,²ミラノ大学,³デュースブルクエッセン大学

従来は、円盤へのガス流入は星形成初期（～数十万年）にほぼ終了し、その後は外部から孤立した状態へ進化すると考えられてきた。しかし、近年の高解像度なガス観測により、年齢が 100 万年以上のクラス II 円盤であっても、星間空間からガスが流入する構造（いわゆるストリーマー）を伴う事例が複数報告されており、後期においても円盤外縁に星間ガスが降着している可能性が指摘されている。

我々は、こうした後期降着が中心星への質量降着に及ぼす影響に着目した。星間ガス密度が高い領域にある円盤において生還ガス降着率は高くなると考えられる。そのため、特に、星形成領域 Lupus において、星間ガス密度の高い環境にあり、円盤が高い中心星降着率を示すという観測的傾向（Winter et al. 2024a）に着目した。しかし、流入ガスは光蒸発などで散逸する可能性もあり、中心星への降着率増加に直結するとは限らない。このような円盤ガス散逸過程を考慮に入れた星間ガス降着の影響を論じるには空間分布を考えた理論計算が必要だが未開拓である。

本研究では、後期星間ガス降着を外縁から明示的に与えた一次元の円盤面密度の進化計算を数值的に行い、長期的(1-10Myr)なガス面密度分布の進化を追跡した。その結果、たとえ外縁（～100 au）に星間ガスが降着しても、円盤内部の角運動量輸送が弱い場合には、流入したガスの大部分は中心に届く前に光蒸発によって失われ降着率が小さくなることがわかった(図の青線)。したがって、後期降着ガスが中心星降着に寄与するためには、円盤内部で十分に強い角運動量輸送が必要である。通常の乱流粘性による輸送では、円盤が大きく広がってしまうため、Lupus で観測されるようなコンパクトな円盤半径（≲100 au）とは両立しない(図の赤線)。一方で、磁気円盤風のように、円盤を広げることなく角運動量を輸送できるメカニズムが強く働く場合には、後期星間ガス降着が観測される円盤質量、サイズを維持した上で中心星降着率を高めることが可能であることが示唆された(図の紫線)。ただし、そのためには従来の理論で仮定されていたよりもさらに 1-2 桁ほど強力なトルクが必要であることも分かった。

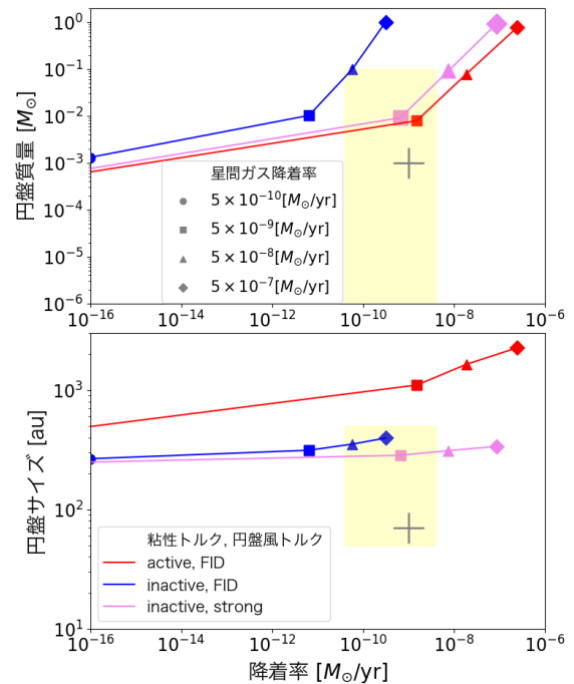


図 1. 降着率と円盤質量、サイズの関係。赤線が乱流粘性のトルクが大きく円盤風トルクが基準モデルの場合。青線が乱流粘性のトルクが小さく円盤風トルクが基準モデルの場合。紫色の線が乱流粘性のトルクが小さく円盤風トルクが大きい場合。黄色い領域と灰色の十字は Winter+2024a のシナリオ及び観測と整合する領域 (Winter et al. 2024b, Ansdell et al. 2018, Deng et al. 2025, Tabone et al. 2025)

粘性進化する円盤におけるダストの酸素同位体組成進化

○石崎梨理¹、橘省吾¹、岡本珠実²、山本大貴³、井田茂⁴

¹ 東京大学、² 上海交通大学 TDLI、³ 九州大学、⁴ 東京化学大学 ELSI

Introduction: 地球をはじめとする太陽系天体は太陽に比べ ^{16}O に乏しいことが知られ (McKeegan et al., 2011)、この違いは原始惑星系円盤における原材料ダスト- ^{16}O -rich CO- ^{16}O -poor H_2O 間の酸素同位体交換の結果であると考えられている (Yurimoto & Kuramoto, 2004)。現在の太陽系物質の酸素同位体組成分布を達成するには、ダストが原始太陽系円盤において ^{16}O に乏しい H_2O が濃集した高温領域で酸素同位体交換を進行した上で、円盤外側まで輸送される必要がある。本研究では H_2O スノーライン内側領域の水蒸気濃集効果 (Cuzzi & Zahnle, 2004; Yurimoto & Kuramoto, 2004) に着目し、高温物質の効率的な外側輸送が期待される粘性進化円盤内でのケイ酸塩ダスト・ H_2O ・CO の酸素同位体組成進化を調べた。

Methods: 内側円盤は粘性加熱が卓越する定常降着解、外側円盤は照射加熱が卓越する自己相似解に従うコンビネーションモデルを採用し、ケイ酸塩ダスト・ H_2O ・CO 超粒子の軌跡を追跡するモンテカルロシミュレーションをおこなった (e.g., Ciesla 2010, 2011; Okamoto & Ida 2022)。 H_2O はスノーライン外側では氷結して移流が卓越し、内側では昇華して水蒸気として運動するものとした。非晶質ケイ酸塩ダスト ($\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$ ~ -60 ‰) と水蒸気 ($\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$ $\sim +220$ ‰)、ならびに CO ガス ($\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$ ~ -220 ‰) との酸素同位体交換反応の挙動は、室内実験により決定された反応速度データ (Yamamoto et al., 2018; Yamamoto, Ishizaki et al., 2024) を基づいたアブラミ式を用いて計算した。また H_2O -CO の気相での直接的な酸素同位体交換は、低温領域において反応速度が極めて遅いため (Alexander, 2004)、起こらないと仮定する。ダストは「結晶化ライン (Ishizaki et al. 2023)」で結晶化し、結晶化時点の酸素同位体組成を保存するものとした。

Results & Discussion: 円盤進化初期はケイ酸塩ダスト- H_2O 交換が可能な領域 ($\sim 600\text{--}850$ K) が空間的に狭いため、ダストは CO とのみ効率的に酸素同位体を交換し、広い領域でダスト初期組成より低い $\delta^{17\&18}\text{O}$ 値を示した。その後円盤進化に伴い、スノーライン外側からの氷供給による内側円盤の H_2O 濃集と、ダスト- H_2O 間の効率的な酸素同位体交換が進行することで、ダストの $\delta^{17\&18}\text{O}$ 値が上昇した。その結果、円盤内側において現在の地球の酸素同位体組成 ($\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$ ~ 0 ‰) に近い値を達成する円盤条件が存在することが明らかになった。

コンドリュールの形成時間と浮遊時間から探る 微惑星サイズとガス円盤の散逸時間

○城野信一¹ 小田中佑樹²

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科 ² 宇宙技術開発株式会社

コンドリュールは直径 0.1-1mm 程度の球状粒子であり、普通コンドライトの体積のうち 80%以上を占めることから、原始太陽系円盤形成時に発生した何らかの加熱イベントにより岩石が溶融し、分裂することで表面張力によって球状になったものと考えられている。形成年代を測定すると CAI 形成後 1-3Myr の幅 (Pape et al. 2019) で形成されていることが明らかとなっている。一方で隕石母天体の熱進化モデリングから母天体の形成時期が制約され、含まれているコンドリュールの形成年代との差から、コンドリュールは形成後 0-0.1 Myr 程度で母天体に取り込まれる必要がある (Gail & Trieloff 2019)。そこで本研究では原始太陽系円盤における微惑星集団の運動を木星形成時から追ひ、衝突頻度と衝突速度からコンドリュール生成量を算出した。さらに、運動している微惑星へのコンドリュール降着速度を算出することで、放出されたコンドリュールの浮遊時間を明らかにした (図 1)。微惑星サイズが小さいと (図 1 左)、生成量と降着量の時間進化にギャップが存在する。この場合、コンドリュールの降着効率が低いために生成したコンドリュールは長期間原始太陽系円盤に漂うことになる。一方で微惑星半径が 500km の場合 (図 1 右)、二つの時間進化の間の差は 0.1Myr 程度になる。ここから、コンドリュール形成時の微惑星半径は 500km 以上であることが示唆される。この場合、生成したコンドリュールは効率的に微惑星に捕獲され、それをもとにして再度コンドリュールが生成される。コンドリュールに多く観察されている複数回の加熱の痕跡とも整合的となる。また、ガス散逸時間が 200 万年程度であると、コンドリュールの年代分布に見られるダブルピークが再現されることもわかった (図 1 右)。

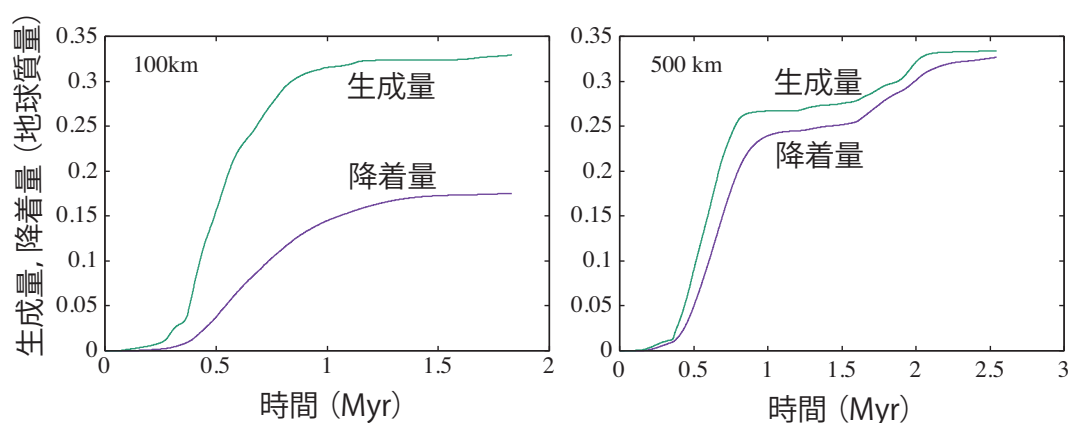


図 1: コンドリュールの生成量と降着量の変化。ガス円盤の散逸時間は 200 万年。左: 微惑星半径 300 km。右: 微惑星半径 500 km。0.1 Myr 程度で微惑星に降着するためには微惑星半径は 500 km 程度であった必要がある。

原始惑星系円盤内側の熱的不安定性と微惑星形成

○加藤遼¹, 植田高啓², 奥住聡¹

¹東京科学大学, ²CfA

太陽系の地球型惑星は、原始惑星系円盤の水氷の昇華ラインより内側で形成されたと考えられる。また、近年の系外惑星探査により、地球半径の数倍程度の惑星が、地球よりも中心星に近い軌道上で数多く発見されてきた。これらの惑星の起源の解明には、原始惑星系円盤内側領域における微惑星形成の理解が必須である。これまでの研究により、円盤の高温領域で磁気乱流強度が急変することで、微惑星形成につながるダスト濃集が起こりうることが示された (e.g., Kretke et al. 2009, Ueda et al. 2019, 2021)。高温の円盤内側領域において磁気回転不安定性 (MRI) が活性化すると、円盤乱流強度が上昇する。この MRI 活性化境界の内側では、外側に比べてガスの降着速度が速く、定常的降着率を仮定すると、ガス密度は低くなる。これにより、MRI 活性化境界に圧力極大が生じてダストが濃集し、微惑星が形成される。

しかし、これまでの研究では、円盤温度の非平衡進化が無視されていた。MRI 活性化境界は熱的に不安定となり (Cecil & Flock 2025)、加熱率と冷却率が釣り合わないような進化 (非平衡進化) をする。このため、MRI 活性化境界における圧力極大は、ダストを十分濃集させるほど安定して存在できない可能性がある。一方我々は、最近の研究 (Kato et al. 2025) において、円盤内側領域における、特別なガス密度構造を必要としない自発的ダスト濃集機構を提唱した。ダスト密度の局所増加が円盤の冷却効率を低下させ、温度極大および圧力極大を形成する。これにより、特別なガス密度構造が存在しなくとも、ダストが自発的に濃集する。我々は、このメカニズムを「熱駆動ダスト濃集」と呼ぶ。

本研究の目的は、熱的に不安定となるような円盤内側領域において熱駆動ダスト濃集が発動し、微惑星形成が起こるのかを明らかにすることである。そのために我々は、ガス・ダストの面密度、ダストのサイズ、微惑星形成、および円盤温度の非平衡進化を同時計算するシミュレーションモデルを構築した。MRI 活性化温度は 1000 K とし、赤道面においてダスト密度がガス密度を超える領域では、ダストの一部が微惑星へと変換されると仮定した。

計算の結果、熱的不安定性により MRI の活性化と非活性化が周期的に起こり、そのなかで微惑星が形成されることがわかった。円盤内側で MRI が活性化すると、その領域外縁にダストが捕捉されて密度が上昇する。MRI 活性化領域では、ガス降着率の上昇に伴いガスやダストの面密度が減少し、温度が低下して MRI 非活性となる。この際、MRI 活性時のダスト密度上昇をきっかけとし、MRI 活性領域の外縁となっていた場所において熱駆動ダスト濃集が発動する。ここで濃集したダストは、内側に移動しながらさらに濃集していく。これに伴って微惑星も外側から内側にかけて形成される。このダスト集団が移動してくることで円盤内側の冷却効率が低下し、温度が上昇して再び MRI 活性となる。この過程が周期的に起こることで、微惑星が特定の領域に繰り返し形成される。

我々の標準的なモデルでは、0.2–1 au ほどの領域にわたり、400–800 K の環境下において数地球質量の微惑星が形成されることが明らかとなった。ここから、形成される微惑星は岩石質であり、短周期岩石惑星の起源である可能性が示唆される。本講演では、微惑星形成領域の位置、幅、形成効率 (流入するダスト質量に対する微惑星総質量の割合) などが円盤パラメータにどのように依存するかを議論し、最終的な惑星配置への示唆を与える。

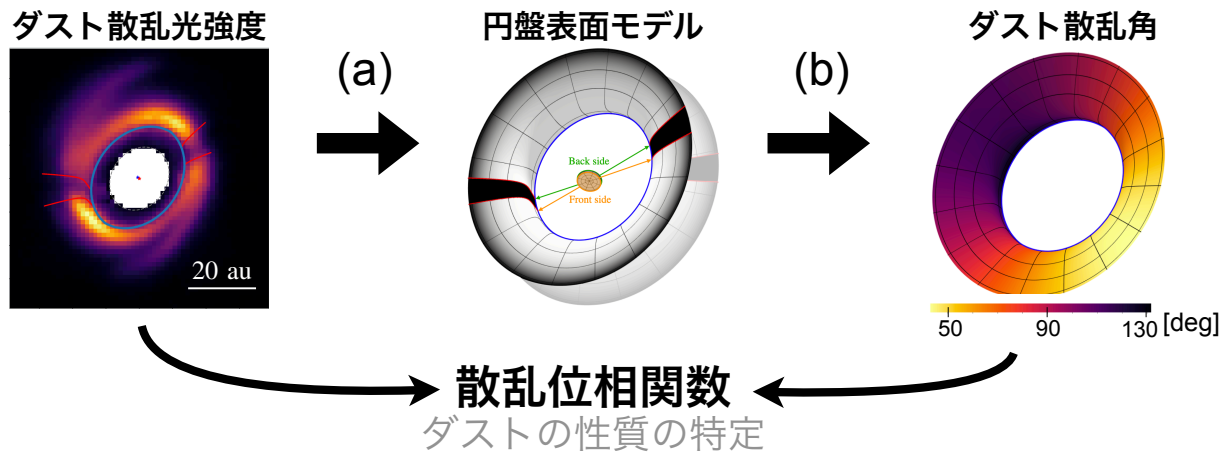
原始惑星系円盤の影から探る円盤幾何構造とダストの性質

○折原 龍太¹, 百瀬 宗武²¹ 東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻² 茨城大学 大学院理工学研究科 理学野 物理学領域

原始惑星系円盤におけるダスト散乱光は、粒子のサイズ・形状・組成を反映するため、散乱角に対する散乱光の強度分布を記述する散乱位相関数 (Scattering Phase Function, SPF) の測定は、ダストの性質を調べる上で有力な手法となる (e.g., Tazaki et al. 2023)。SPF を観測画像から定量的に抽出するには、各位置における散乱強度に加え、対応する散乱角を正確に求める必要があり、そのためには円盤の幾何構造—傾きやダスト散乱表面の高さ分布—の情報が欠かせない。こうした背景のもと、DRAGyS (Roumesy et al. 2025) などの SPF 推定ツールは、輻射輸送モデルに依存せず、散乱光画像から SPF を直接再現可能な手法である。ただし、その適用には正確な円盤幾何構造の情報を入力として与えることが前提となる。

一方で、可視・赤外線波長帯におけるダスト散乱光の高空間分解能観測によっていくつかの原始惑星系円盤に影が確認された。これは外側円盤に対して傾いた内側円盤が存在しており、中心星の光を特定方向のみ遮るためだと考えられる。Orihara et al. (2025) では、影の形から円盤ダスト散乱表面の幾何パラメータを推定する手法が提案されており (下図 a 参照)、中心星と表面の位置関係から各所の散乱角が計算可能である (下図 b 参照)。これは円盤表面における散乱角の空間分布を明らかにし、SPF を抽出する上で独立かつ有効な情報源となる。

本研究では、この手法により導出された円盤散乱表面の形状を利用して、SPF 抽出のさらなる高精度化を図る手法を提案する。解析対象としては、明瞭な影を示す HD 100453 に付随する遷移円盤の VLT/SPHERE 画像を用いた。その結果、外側円盤内縁 (17 天文単位) に近い領域ほど、SPF のピーク角度が 90 度に近づく傾向が確認された。これは、内縁付近では粒子が小さく、衝突破壊が進行していることを示唆する。SPF の半径依存性の定量化は、円盤内におけるダスト進化の空間的不均一性を捉える新たな手法として有望である。



アルマ望遠鏡による時間領域天文学が明らかにした 惑星系形成領域の重力不安定性

○ 吉田 有宏^{1,2}, 野村 英子^{1,2}, 土井 聖明³, Marcelo Barraza-Alfaro⁴, Richard Teague⁴,
古家 健次⁵, 大和 義英⁵, 塚越 崇⁶

¹ 総合研究大学院大学, ² 国立天文台, ³ マックスプランク天文学研究所, ⁴ マサチューセッツ工科大学,
⁵ 理化学研究所, ⁶ 足利大学

惑星系形成のシナリオとして、二つの有力なモデルが提案されている。一つは原始惑星系円盤に存在するダストが合体・成長し惑星に至るボトムアップ的なコア集積モデルである。もう一つは、質量の大きな円盤が自己重力不安定性によって分裂し惑星ができるというトップダウン的な重力不安定モデルである。前者のモデルは主星に比較的近い惑星をよく説明する一方で、後者のモデルは主星から比較的離れた惑星を形成しうるとされる。近年の高空間分解能観測による円盤内におけるダストリング構造の発見など、コア集積モデルと整合的な観測的証拠はいくつも得られている。一方で、重力不安定性が円盤の惑星系形成領域で実際に駆動している観測的証拠にはいまだ乏しい。

円盤で重力不安定性が駆動しているときに見られる顕著な構造として、渦状腕構造が挙げられる。実際、そのような構造は、複数の円盤において高解像度ダスト連続波観測によって検出されている。しかし、円盤内にすでに形成されている惑星と円盤の相互作用によっても渦状腕構造が発生することが知られている。これらの渦状腕は非常によく似た形状を示し、その切り分けは困難を極める。一方、二つの駆動機構において、渦状腕の運動速度には決定的な違いがある。重力不安定性起源の場合には、渦状腕は各点で局所的なケプラー速度を持ち、中心星周りを巻きつくように運動する。惑星起源の場合には、渦状腕の全体が惑星位置のケプラー速度で形状を保ちながら剛体回転する。したがって、時間をおいた複数回の観測によって渦状腕の運動速度を測定できれば、その発生機構を特定することができる。

本研究では、Tタウリ型星 IM Lup 周りの円盤に着目する。この円盤は、質量が約 0.1 太陽質量と見積もられているほか、そのダスト成分に顕著な渦状腕構造を持つことが知られており、重力不安定性が駆動していることが想定される。一方で、渦状腕が惑星起源であると主張する先行研究もある。我々は、2017 年から 2024 年の 7 年間にわたる 4 回のアルマ望遠鏡による観測によって得られた波長 1mm 程度のダスト連続波画像を解析した。その結果、中心星から 50 au 以内程度の領域において、渦状腕の巻きつき運動を検出することに成功した。回転速度の半径プロファイルは、中心星周りのケプラー回転と一致し、この渦状腕が重力不安定起源であることが示された。これは、重力不安定性が惑星系形成領域で実際に駆動していることの初めての観測的証拠である。

IM Lup は年齢が 1 Myr 程度であると推定されている。一方で、理論モデルによれば、重力不安定性は円盤内物質の中心星への降着を促進するため、重力不安定性が起こりうるのは円盤形成からごく初期 (~ 0.01 Myr) の段階に限られると考えられる。ところで、最近の研究によると、星間空間から円盤へ数 Myr 程度にわたって無視できない質量の降着があるということが示唆されている。もしこれが IM Lup 円盤でも起こっているのであれば、本研究で明らかになった重力不安定性も説明できるかもしれない。本研究は、惑星系形成過程において円盤の重力不安定性が実際に重要な役割を果たしていることを支持する。

微惑星帯での衝突カスケードが形成する デブリ円盤におけるシリケートフィーチャー

○ 小林 浩¹、Thomas A. Stuber²、Sebastian Wolf³

¹ 名古屋大学、² アリゾナ大学、³ キール大学

温度 300 K に赤外超過をつくるデブリ円盤の一部には、波長 $\sim 10 \mu\text{m}$ にシリケートフィーチャーが見られるものがある。準定常過程にあるデブリ円盤では、恒星からの放射圧により短時間でふき飛ばされるサイズ $\lesssim 10 \mu\text{m}$ より小さなダストからのシリケートフィーチャーが期待できないと考えられ、これらのフィーチャーを説明のために巨大衝突などの突発的な衝突によって生成されたばかりの小さなダストを観測している可能性が議論されてきた。惑星の巨大衝突を示唆する解釈は魅力的だが、この議論は不十分である。なぜならば、定常的なデブリ円盤における小さなダストの生成率が十分に大きければ、突発的な巨大衝突がなくともシリケートフィーチャーを再現できるほど量の小さなダストが存在している可能性があるからである。

本研究では、シリケートフィーチャーが観測されているデブリ円盤を模擬した微惑星帯において、固体天体の衝突進化をシミュレーションを行い、固体天体のサイズ分布の進化を求めた。このシミュレーションでは、放射圧でふき飛ばされるほど小さなダストの生成量と放射圧による除去量の両方を定量的に考慮して、放射圧で吹き飛ばされる小さいダストも含んだサイズ分布を導出した。衝突進化シミュレーションの結果、デブリ円盤の年齢よりもずっと短い時間でサイズ分布は準定常状態に達し、その後、長い時間スケールでゆっくり進化した。そして、数千万年程度の若く質量の大きい円盤では、小さなダストの生成率が非常に大きく、小さなダストによる観測可能なシリケートフィーチャーが維持される。一方、長い時間スケールでの衝突進化により円盤全体の質量が時間とともに減少する。その結果、小さなダストの生成率も低下し、最終的にはシリケートフィーチャーが観測できなくなる。つまり、多くのデブリ円盤のシリケートフィーチャーは、突発的な衝突がなくても、定常的な衝突進化により説明できる。

“Synergies with PRIMA and GREX-PLUS - Observations of water line profiles from protoplanetary disks”

“PRIMA と GREX-PLUS のシナジー - 原始惑星系円盤の水輝線プロファイル観測”

○Shota Notsu (野津 翔太)^{1,2}, Hideko Nomura (野村 英子)³, Akio Inoue (井上 昭雄)⁴,
Yao-Lun Yang (楊 耀倫)²

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

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

³ Division of Science, National Astronomical Observatory of Japan (国立天文台 科学研究部)

⁴ Faculty of Science and Engineering, Waseda University (早稲田大学 理工学術院)

Understanding the water vapor and ice distribution, including the water snowline position, in planet-forming disks (protoplanetary disks) will provide information on the origin of water in planetary systems, including our Solar System. Water can be delivered to rocky planets, including Earth, through icy pebbles, icy planetesimals, comets, and asteroids, supporting the emergence of life on these planets. Water gas abundance is high ($\sim 10^{-4}$) within the water snowline, and it is relatively high ($\sim 10^{-8} - 10^{-7}$) in the hot surface layer and the photo-desorbed region of the outer disk, compared to its value ($\sim 10^{-12}$) in the regions outside the water snowline near the equatorial plane (e.g., Walsh et al. 2012).

The PRobe far-Infrared Mission for Astrophysics (PRIMA) is a mission concept which is led by NASA and primed to provide a unique access to probe the dominant components of gas and dust in protostellar and protoplanetary systems for the community in the 2030 decade (see e.g., arXiv: 2310.20572). Recently, PRIMA-Japan working group have discussed potential unique science cases about star and planet formation as well. As one of PI Sciences, PRIMA will characterize the main reservoirs of warm and cold water vapor and the far-infrared crystalline and amorphous water ice features for around 200 protoplanetary disks, giving unique access to the time evolution of the water throughout the entire disk. In PRIMA, the spectral resolution of high-resolution mode with Fourier transform module (FTM) is $R \sim \lambda / \Delta\lambda \sim 4400 * (112 \mu\text{m} / \lambda)$, and it is $R > 10,000$ at $\lambda < 40 \mu\text{m}$ and $R \sim 20,000$ at the shortest wavelength coverage ($\lambda \sim 24 \mu\text{m}$) of PRIMA/FIRESS. Thus, PRIMA will expect to resolve line profiles and/or measure the line widths with Keplerian rotation in the shortest wavelength water lines, especially $\lambda < 40 \mu\text{m}$. By obtaining water line profiles and constraining the positions of the water snowline for around 200 disks within PI Science survey, PRIMA will trace the time evolution of the water snowline positions in the planet-forming disks which divide the regions between rocky and gas giant planet formation (see also Notsu et al. 2016, 2017; Kamp et al. 2021; Inoue et al. 2023).

The cooperative observations (such as same target objects) with PRIMA and Japanese future infrared space telescope GREX-PLUS will be useful. GREX-PLUS will expect to obtain high spectral resolution spectra ($R \sim 30,000$) towards 100 disks for $\lambda = 10-18 \mu\text{m}$, where several candidate water lines such as the $17.75 \mu\text{m}$ line are included (Inoue et al. 2023).

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

PRIMA GO Science Book vol 1: <https://arxiv.org/abs/2310.20572>

GREX-PLUS Science Book (Inoue et al. 2023): <https://arxiv.org/abs/2304.08104>

スーパーアース系の平均運動共鳴形成と その不安定化シナリオ

○荻原 正博¹, Antoine Petit², Max Goldberg²

¹上海交通大学, ²コートダジュール天文台

Kepler宇宙望遠鏡の観測により、隣り合うスーパーアースの軌道周期比に特徴的な傾向があることが明らかになった。それによると、隣接するスーパーアースの多くは互いに平均運動共鳴の関係にはないことが判明している。また、TESS宇宙望遠鏡による最新の観測では、より年齢の若いスーパーアース系の観測が進んでおり、形成直後のスーパーアース系は平均運動共鳴状態にある確率が高いことも明らかになってきた。これらの観測結果から、スーパーアースは形成直後には平均運動共鳴に状態にあり、それが1億年程度の進化の過程で共鳴関係が壊されたと考えられる。

本研究では、このようなスーパーアースの軌道周期比の時間進化が惑星形成シミュレーションで説明できるかどうかを調べた。具体的には、中心星から1au付近にリング状に形成された原始惑星からのスーパーアース形成を、原始惑星系円盤中での数百万年の進化と、それに続く円盤散逸後の1億年の進化をN体計算により調べた。使用する円盤モデルとしては、急速な軌道移動を引き起こす従来型のべき分布モデルと、軌道移動が抑制される円盤風の影響下で進化するモデルの2種類を用いた。また、初期の原始惑星の質量をパラメータとして変化させたシミュレーションも行った。

N体計算の結果、ほぼすべての場合で、円盤中での形成段階ではスーパーアースが0.1au付近の軌道で互いに平均運動共鳴に入った状態で形成されることがわかった。そのうち一部の場合では、円盤散逸後の長期進化により系が力学的不安定となり、最終的に平均運動共鳴が破壊されることがあった。このような不安定が生じた場合には、観測されているスーパーアースの軌道周期比の時間進化を再現できる。

この結果を受け、次に共鳴系の不安定を引き起こす要因について調べた。そのために、長時間安定な系と不安定になる系の特徴を比較したところ、スーパーアース形成直後の段階で1au付近の外側軌道に残っている原始惑星の特徴（質量、離心率など）に違いがあることがわかった。これは、外側軌道に残った原始惑星の永年摂動により、1億年スケールで内側軌道のスーパーアースの共鳴関係が不安定化することを示唆している。本研究ではさらに、理論的解析と追加の軌道計算によりこの解釈の妥当性を検証した。

周惑星円盤への物質供給の解像度依存性と 周惑星円盤半径の評価

○波々伯部広隆¹, 瀧哲朗², 小久保英一郎^{1,2}, 町田正博³

¹国立天文台, ²東京大学, ³九州大学

原始惑星系円盤において形成中のガス惑星の周囲では、降着したガスによって周惑星円盤が形成されると考えられている。周惑星円盤は衛星を形成する場であると同時に観測対象としても重要である。したがって衛星形成過程を推測する、または観測結果を解釈する上で周惑星円盤がどのように形成されるかを調べる必要がある。

Tanigawa et al. 2012 では周惑星円盤に降着するガスの流れ場が三次元的であること、およびヒル圏へ流入するガスが衝撃波面を形成することで惑星の公転面近傍からは惑星のヒル圏へ直接ガスが降着できないことが示された。また Maeda et al. 2022 ではそれらの惑星質量に対する依存性が調べられている。いずれの研究でもガスはヒル半径近傍に生じる衝撃波面で上空に曲げられ、惑星上空から周惑星円盤面に落下する。このことは、周惑星円盤の半径や円盤内の流れ場を議論するためには衝撃波面および上空の広い領域を十分に解像する必要があることを示唆しているが、解像度依存性についてはまだ調べられていない。

そこで、本研究では衝撃波面近傍および惑星上空を先行研究の3倍程度の解像度にとった計算を行った。この計算にはGPUに対応するように書き直した `nested_grid` コードを用いた。計算の結果、木星軌道において0.1木星質量程度の計算では先行研究の結果と大きな違いは見られなかったが、質量が大きくなるにしたがって、惑星近傍の流れ場は乱流的になった。このときガスは先行研究よりも離れた位置から周惑星円盤に捕獲されており、原始惑星系円盤の中心面から周惑星円盤へガスが流入する経路も存在することがわかった。また、惑星近傍の流れ線を調べると、ヒル半径の50%程度の位置でも流れ線は惑星を周回する位置に留まっていた。この半径は先行研究で周惑星円盤と考えられているよりも大きく、このことは周惑星円盤を伴う惑星の直接撮像が行われた場合には従来考えられているよりも明るく観測される可能性を示唆している。

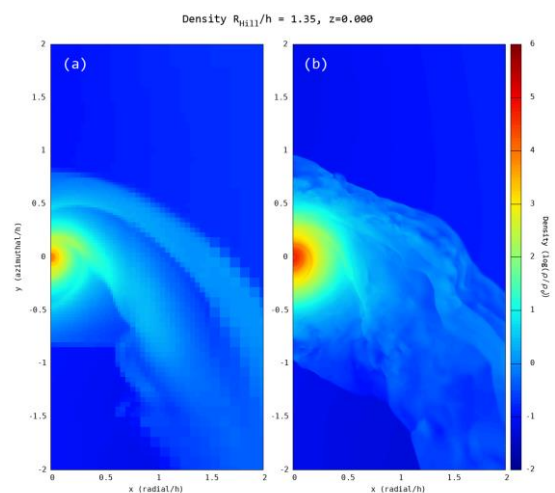


図1: 異なる解像度で計算した中心面の密度分布画像。パラメータは木星軌道木星半径相当。(a)先行研究と解像度を揃えた計算と (b)本研究における計算。

ペブル集積の証拠となりうるカリストの部分分化

Partial Differentiation of Callisto as Possible Evidence for Pebble Accretion

○芝池諭人¹

¹鹿児島大学

「微惑星かペブルか」という問いは、惑星形成理論における最も基本的かつ未解決の問題の一つである。同様に、「微衛星かペブルか」という問いも、巨大衛星の形成について未だ決着がついていない。私はカリストの特異な特徴、すなわち内部が重力場測定に基づいて部分的に分化していると推定されている点に注目する。私は、このような内部状態は、微衛星集積では必然的に著しい内部分化を引き起こし実現不可能である一方、ペブル集積であれば維持可能であることを示した(図1)。ペブルは、衝突エネルギーを衛星の表面で放出するため放射冷却が効率的に働き、また衝突速度も周囲のガス円盤による空気力学的抗力によって低下するためである。もし今後、JUICE (JUpiter ICy moons Explorer) などの探査ミッションによって、カリストが本当に部分分化であることが確認できれば、衛星形成だけでなく惑星形成の枠組みにおいても、ペブル集積メカニズムの最初の観測的証拠となる可能性がある。

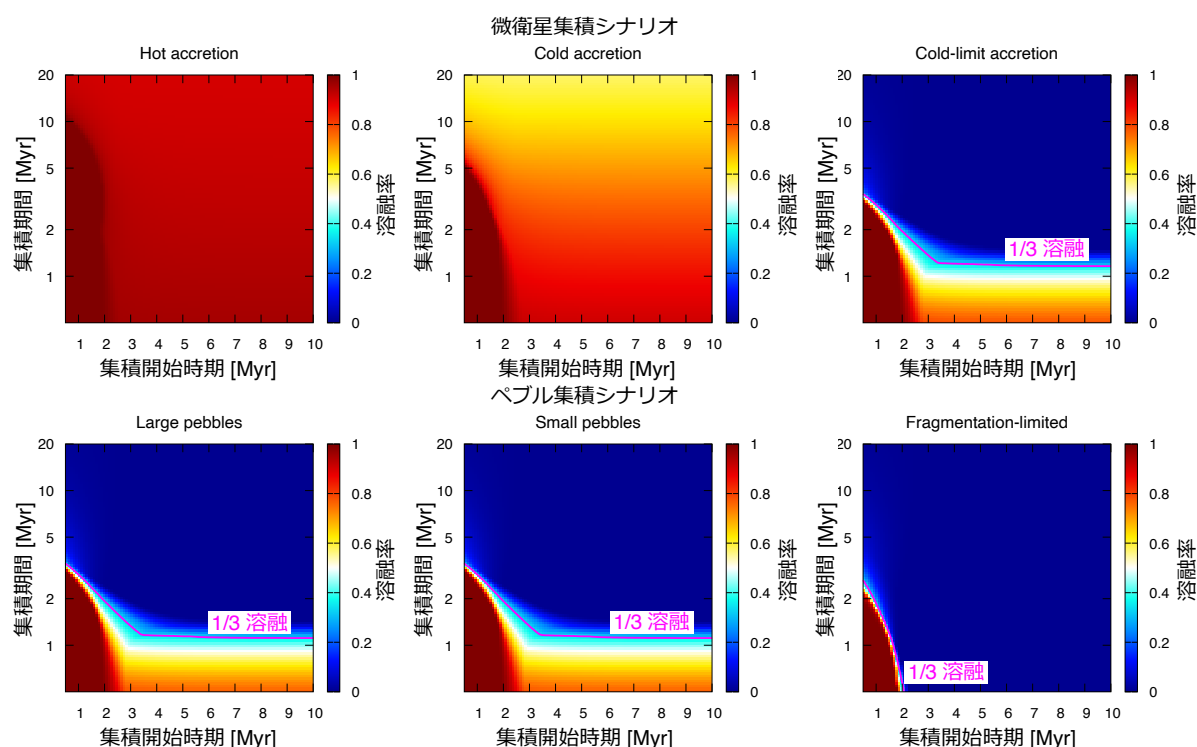


図1. 微衛星集積シナリオとペブル集積シナリオにおけるカリスト内部の融融率。ガリレオ探査機により質量の1/3程度が融融と推定されているが、この融融率を達成可能なのは、(現実的でない設定のCold-limit accretionを除けば)ペブル集積のみである。詳細は Shibaike (2025) (*ApJ*, 988, L32) を参照のこと。

小天体の潮汐破壊による土星リング形成: 破壊後のデブリ軌道進化の N 体シミュレーション

○鳥居尚也・井田茂¹

¹ 東京科学大学

土星リングがいつ、どのようにして形成したのかという問題は、惑星科学における重要な未解決の問題である。土星リングがいつ形成したのかについては、観測・理論両面から詳しく調べられてきたが、その年代については未だ決着がついていない (e.g., Kempf et al. 2023, Estrada & Durisen, 2023, Hyodo et al. 2025)。一方で、土星リングがどのようにして形成したのかについてはいくつかのシナリオが提唱されてきた。ここで着目するシナリオは、土星近傍を通過した小天体が潮汐破壊され、それによって生じたデブリ粒子が円軌道化することでリングが形成されたというものである (Dones et al. 1991)。

Hyodo et al. 2017 は、このシナリオに基づいて小天体の潮汐破壊の SPH シミュレーションを行い、現在のリングと、リングから染み出して形成された (Crida & Charnoz, 2012) と考えられている土星の内側衛星を十分補うことができるくらいの質量が土星に束縛されうること示した。Hyodo et al. 2017 では、潮汐破壊後のデブリ粒子の粒子間の衝突によって離心率・軌道傾斜角が下がり、最終的に円盤状のリングが形成されることを予想したが、潮汐破壊でできたデブリ粒子の衝突や自己重力を考慮したその後の力学進化は詳しく調べられていなかった。しかし、衝突進化の結果どのようなリングが形成されるのか/されないのかを調べることは、土星リングや内側衛星の形成シナリオを制約する上で重要である。

本研究では、潮汐破壊後のデブリ粒子の力学進化を、粒子間衝突を考慮した N 体シミュレーションを用いて詳しく調べた。その結果、Hyodo et al. のシナリオ通りデブリ粒子の離心率・軌道傾斜角が減衰する前に近点がならされると仮定した場合、その後のデブリ間の衝突進化によって最終的に円盤状の薄いリングが形成されることがわかった。また、潮汐破壊の際の近点の値によっては、形成されたリングの面密度のピークがロシュ限界半径近くに位置し、その結果リングと同時にクランプも形成されることがわかった。この結果は、小天体の潮汐破壊によりリングと同時に衛星も形成されうる可能性を示唆している。一方で、粒子間衝突速度に着目すると、以上の結果はカッシーニによる土星リング・衛星の化学組成の観測結果と不整合である可能性があり、今後の更なる検討が必要である。

天王星のリング粒子の熱応力による破壊

○毛呂彰吾¹, 黒川宏之¹, 中澤風音¹

¹東京大学

惑星を取り巻くリング粒子は、惑星や衛星を構成した物質の情報を保持している。天王星には土星と同様にリングが存在し、その組成は天王星-リング系の起源を解明する上で重要である。特に、リング粒子が原始太陽系星雲のどの領域で形成された固体粒子と共通の組成を持つのか、すなわちその材料物質がどのような履歴を辿ったのかは、依然として明らかになっていない。

一方、リング粒子の組成は、ヤング率や引張強度などを決定するため、あるサイズの粒子がリングで働き得る破壊過程に耐えられるかどうかを左右する。材料となった天体(衛星や近接した小天体)が潮汐破壊された後、最終的なリング粒子のサイズは微小隕石衝突、粒子間衝突、そして熱応力による破壊によって決定されと考えられる。これまで熱応力がリング粒子のサイズ進化に与える影響は十分に考慮されてこなかったが、近年Hirataら[1]により土星リングでは熱応力が水氷から成るリング粒子の破壊を引き起こし、粒子サイズ分布に大きな影響を与えうることが示された。

そこで、本研究は熱応力が天王星のリング粒子に与える影響を調べることで、天王星のリング粒子の組成に新たな制約を与えることを目的とした。具体的には、水氷や隕石、小惑星など様々な組成を仮定して熱応力を計算し、熱応力による破壊が現在のリング粒子のサイズ分布に与える影響を評価した。熱応力の計算では、Hirataら[1]による土星リングでのモデルをもとに、天王星の観測データ及び環境条件に応じた改良を加えた手法を用いた。本講演では、組成ごとに導出した破壊されやすい粒子サイズと、観測されている粒子サイズ(<30 m)[2]を比較することで、熱応力による破壊の寄与を評価し、リング粒子の組成についての制約を示す。さらに、微小隕石衝突や粒子間衝突による破壊への寄与を見積り、熱応力との相互作用によって実現される粒子サイズ分布を議論する。

参考文献

[1] Hirata, N., Morishima, R., Ohtsuki, K., & Nakamura, A. M. (2022). *Icarus*, **378**, 114919.

[2] Lane, A. L., Hord, C. W., West, R. A., Esposito, L. W., Simmons, K. E., Nelson, R. M., ..., & Pryor, W. R. (1986). *Science*, **233**(4759), 65–70.

エンセラダス南極域プリュームの再堆積による クレーター消失の評価

○水沼卓也¹, 太田原裕都¹, 中原俊平¹, 諸田智克¹

¹ 東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻

土星衛星エンセラダスは地質活動が活発な天体であり [e.g., Spencer and Nimmo, 2013], 南極域にある「タイガーストライプ」と呼ばれる巨大な裂け目から氷やガスのプリュームが噴出している [e.g., Goldstein et al., 2018]. プリューム粒子の大部分はエンセラダス表面に堆積し, 細粒子層を形成すると考えられており [e.g., Southworth et al., 2019], 直径 2 km 以下の小クレーターを埋没させたことが示唆されている [Kirchoff and Schenk, 2009]. プリュームは内部海由来の可能性が高いため [e.g., Spencer et al., 2018], プリュームの噴出期間を推定できれば, 内部海の持続期間の制約につながる. 内部海はハビタブルな環境である可能性があり [e.g., Postberg et al., 2018], 噴出期間の制約は内部海における前生命化学進化に重要な洞察を与える. そこで本研究では, プリューム粒子の堆積によるクレーター消失の影響を定量的に評価するとともに, 消去されたクレーターのサイズから堆積物の厚さを見積もることで, プリュームの噴出期間を制約することを目的とする.

本研究では, プリューム粒子の堆積による小クレーター消去をモデル化した. 堆積は, Southworth et al. (2019) が数値計算で推定した堆積速度 (単位時間に堆積するプリューム粒子層の厚さ) で定常的に生じ, クレーターは Di Sisto and Zanardi (2013, 2016) によるクレーター生成関数に従って生成すると仮定した. クレーターの体積と等しい量の粒子が堆積するとクレーターは消去されると仮定し, クレーター体積はクレーター直径の関数であるため, クレーターの埋没にかかる時間 t_b はクレーター直径で決まる. よって, 表面年代よりも t_b が短いクレーターは, t_b の間に生成した個数のみ存在することになり, クレーター累積サイズ頻度分布に折れ曲がりが生じる. 表面年代と最大の埋没クレーターの直径の 2 つをパラメータとして観測されたクレーターサイズ頻度分布にモデルをフィッティングしたところ, Cratered Terrain (クレーターが多い地質区分 [Crow-Willard and Pappalardo, 2015]) において堆積速度が約 10^{-4} mm/yr より大きい領域では, モデルが観測データの折れ曲がりの特徴を説明できることがわかった. この領域では約 2 – 3 km 以下のクレーターの消去が起きており, この直径のクレーターを消失させるのに必要となるプリューム噴出期間は約 1 Gyr と見積もられる. これは, プリューム噴出量が 25 kg/s [Southworth et al., 2018] であるとする, 内部海の質量が約 8×10^{17} kg 損失したことを意味し, この質量は現在の内部海の質量約 10^{19} kg [Glein and Shock, 2010] の約 8%に相当する. 一方, Cratered Terrain において堆積速度が約 10^{-4} mm/yr より小さい領域では, 推定された堆積速度では観測された折れ曲がりを見積もることができなかった. さらに, モデルと観測データの差異は, テクトニックな活動などの別の影響でクレーターの消失が起こっていること, または堆積速度が時間変化したことで説明できる可能性がある.

Hisaki 衛星によって観測された衛星イオ大気からの Mass loss 過程

土屋史紀(東北大), 吉岡和夫(東大), 疋田 伶奈(JAXA), 鍵谷将人, 松下奈津子, 佐藤晋之祐(東北大), 木村智樹(東京理大), 古賀亮一(名古屋大), 北 元(東北工業大), 村上 豪, 山崎 敦(ISAS), 吉川一郎(東大)

Mass loading は磁化プラズマ中での異種プラズマの混合による、運動量輸送現象で、無衝突磁化プラズマ中での基本的なプロセスの一つである。木星系では、衛星イオの火山ガスが木星磁気圏のプラズマの主要な供給源であり、イオの大気から散逸した火山性ガスの電離により、Mass loading が生じる。イオの火山活動の変化により、Mass loading 量が 3~4 倍に増加することが知られており (Yoshioka et al.2018; Hikida et al.2020; Roth et al.2025)、イオ軌道で増加したプラズマは外部へ輸送され、氷衛星周辺のプラズマ環境に加え、木星磁気圏の全体の構造とダイナミクスに影響を及ぼす。このため、Mass loading 量は木星系における重要なパラメータである。Mass loading 量の測定は探査機によるその場観測により試みられてきた。例えば、定常状態では磁気圏を流れる電流 J と磁場 B の電磁力 $J \times B$ によるプラズマの加速が、Mass loading によるプラズマの減速と釣り合うため、この釣り合いから Mass loading 量が推定されている (Liu et al. 2023)。しかし、この方法では、プラズマ流や電流の空間分布、つまり複数軌道に渡る測定が必要となり、Mass loading の時間変化をその場観測から導くことは難しい。そこで、本研究では、Hisaki 衛星によるイオ起源プラズマ分布の紫外線観測を用いて、イオ起源プラズマの Mass loading の時間変動を導出する手法を開発することを目的とする。

Mass loading 量はプラズマの生成率なので、プラズマの質量保存則から見積もることができ、イオプラズマトーラス外縁部でのプラズマの外向き輸送速度と質量密度から導出する。2014 年 12 月から 2015 年 5 月におけるプラズマトーラスの観測とプラズマ診断解析から、イオの軌道 ($5.9R_J$ 、 $R_J \sim 71,492\text{km}$) から $7.2R_J$ までの電子密度、電子温度、イオン組成を導出した。このプラズマパラメータから、イオ起源プラズマの外向き輸送速度と質量密度を見積もった。その結果、磁気圏が通常の状態での平均 Mass loading 量は 0.2 ton/s 、イオの火山活動が活発化した時は最大で 1.7 ton/s に増加したことがわかった。また、この Mass loading 量はイオから散逸した物質の全損失量の対し 42%の寄与を持つことがわかった。本研究で開発した Mass loading の推定手法は、現時点では、イオプラズマの Mass loading 量の時間変動を導出する唯一の方法である。私たちはこの方法を、将来の紫外宇宙望遠鏡ミッション「LAPYUTA」によるイオのプラズマ・トーラスの観測に適用することを計画しており、これを通して 2030 年代の木星探査 JUICE や Europa Clipper の探査中に、氷衛星周辺のプラズマ環境と木星磁気圏の動特性の特徴づけを行いたいと考えている。

隕石の惑星大気進入による気流・熱状態への影響 のモデリング

○ 御子 裕治¹, 小林 浩¹

¹ 名古屋大学

隕石衝突は、若い地球型惑星の大気進化において重要な役割を果たしている。小さい隕石の場合、大気との相互作用により、上空に高温・高圧領域が発生、膨張することで、大気の流れや熱状態が大きく乱される。この流れは非常に複雑であり、流体シミュレーションにより調べる必要がある。

本研究では Athena++ を用いて、大気に突入する隕石が及ぼす影響について高解像度 3 次元流体シミュレーションを行った。直径 10-100 m サイズの隕石は大気中で破壊され、上空でエネルギー解放が起こる (Shuvalov & Trubetskaya, 2007)。また、隕石の軌道上に生じる煙突状の希薄領域は、大気の熱状態や気流に大きな影響を与える (Shuvalov & Artemieva, 2002)。そこで、エネルギー解放領域と煙突状の希薄領域に分け、隕石破壊に伴う大気状態の変化のモデル化を行った。地球の温度分布を模した背景大気でシミュレーションを行った結果、エネルギー解放による膨張波が希薄領域で早く伝わることで、爆発領域付近の下層大気はるか上層にまで運ばれることを確認した。

次に、本研究のシミュレーション結果を実際の隕石落下事例と比較した。2013 年 2 月 15 日に小天体 Chelyabinsk が落下したイベントは多くの観測がなされている (Popova et al., 2013)。本研究の計算結果と実際の被害から推測される圧力分布を比較した結果、実際の被害分布を再現可能であり、モデルの妥当性が確かめられた。また、(i) 隕石が大気に与える熱エネルギーと運動エネルギーの分配比率、(ii) エネルギー解放領域の形状、(iii) 背景大気の温度構造の 3 点を与える影響について調査するため、様々なパラメータで計算を行った。その結果、エネルギー解放領域の形状、及び隕石の破壊過程で大気に与える運動エネルギーの比率についても制限を与えることができた。

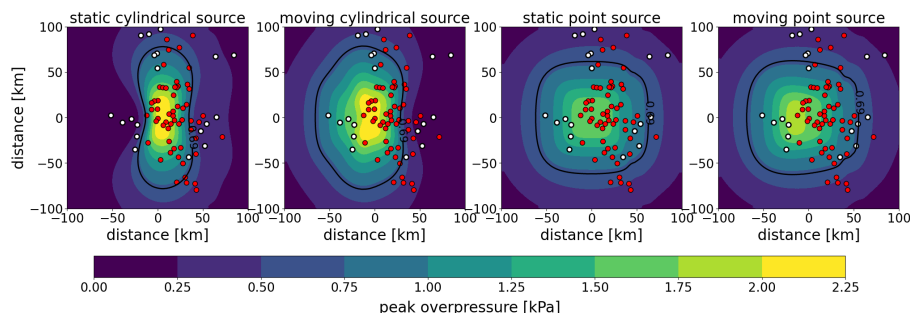


図 1: 地表における衝撃波の最大圧力分布 (左から静止円筒源, 運動円筒源, 静止点源, 運動点源). 縦軸と横軸は隕石の解放エネルギーが最大となる点 (高度 30 km) の真下の点からの距離である。隕石の軌跡は横軸に平行な方向 ($y = 0$) に、図の右から左に進行している。等高線は最大圧力が 0.69 kPa となる範囲を表す。白点は被害なし、赤点は被害のあった箇所を示す (Popova et al. 2013)。

太陽風条件が水星表層のナトリウムスパッタリング領域 に与える影響の研究

Effects of the solar wind conditions on Na sputtering regions on the surface of Mercury

○関華奈子¹, 八木学²

¹ 東京大学先端科学技術研究センター、² Previously at 理化学研究所 R-CGS

Mercury is characterized by the absence of a collisional thick atmosphere, and it exhibits a weak global intrinsic magnetic field [e.g., Anderson et al., Science, 2011]. Consequently, the magnetosphere of Mercury is formed by the interaction between the solar wind and the planetary magnetic field. The sodium ions that originate from the solid planet are one of the important plasma sources [e.g., Yagi et al., JGR, 2010; 2017; Zurbuchen et al., Science, 2011]. Given that Mercury revolves around the Sun at a radial distance of 0.31-0.47 AU, the solar wind density (~ 50 1/cc on average) and interplanetary magnetic field (IMF) strength (~ 35 nT) at the Mercury's orbit are considerably larger than those at Earth. Previous studies have indicated that the configuration of the Mercury's magnetosphere depends on the solar wind conditions and the surface conductivity of the solid planet [e.g., Seki et al., JGR, 2013]. Changes in configuration can cause variations in the location of the cusp in the magnetosphere. The cusp is the source region of exospheric N, which is produced by sputtering from the surface of Mercury [e.g., Raines et al., JGR, 2022]. On the one hand, ground-based telescopes have been utilized to observe the exospheric Na distribution. These observations indicate that the spatial distribution of Na emission is subject to variation over time and can be categorized into eight distinct types. A comparison of in-situ IMF observations by MAG/MESSENGER reveals that Na emission patterns depend on IMF [Mangano et al., PSS, 2015]. However, the mechanisms that cause the IMF dependence remain to be fully elucidated. Consequently, the investigation of the solar wind and IMF effects on the cusp location is important to comprehend the planetary ion source in the Mercury's magnetosphere.

The objective of this study is to investigate how the cusp location changes with solar wind and IMF conditions based on global MHD simulations.. The CIP-based divB-free MHD model, which solves the vector potential instead of the magnetic flux [Yagi et al., JGR, 2017], is utilized for the simulations. A systematic simulation is conducted (24 cases) under Parker spiral IMF configurations with some Bz components added, for three solar wind dynamic pressure conditions. The results indicate that the locations of the high-pressure region in dayside (cusp-like region) systematically change with the IMF Bz and solar wind dynamic pressure under background Parker spiral IMF conditions. The simulation results are categorized into eight types of spatial distributions that were proposed by Mangano et al. [PSS, 2015]. The results indicate that 2P patterns, including 2PN and 2PS, are the dominant patterns. Different By polarity causes opposite longitudinal twist of the cusp location. As the solar wind dynamic pressure increases, the appearance of WP or EP patterns is particularly evident, especially during periods of negative Bz conditions. The results of the study indicate that exospheric Na distribution can systematically change in response to variations in the solar wind conditions.

太陽型星周りの無生物の地球類似惑星における CO 暴走大気の形成条件

○遠藤美朗¹, 渡辺泰士², 尾崎和海¹

¹ 東京科学大学, ² 国立環境研究所

地球型惑星の大気組成はその気候状態や水圏の化学状態と密接に関連しており、惑星のハビタビリティを決定づける重要な要素の一つである。例えば、地球のように炭素循環が機能する惑星（地球類似惑星）では、惑星が中心星から遠いほど、寒冷な気候に対する炭素循環の調節作用の結果として大気 CO₂ 分圧が高くなる傾向にある（e.g., Kadoya and Tajika, 2019）。そのように大気 CO₂ 分圧が高い無生物条件の惑星大気では、大気化学反応による大気一酸化炭素（CO）の収支が閉じなくなり、大気中に CO が暴走的に蓄積する「CO 暴走」と呼ばれる現象が生じる可能性があることが理論的に予測されている（Kasting et al., 1983; Watanabe and Ozaki, 2024）。一方で、CO は原始的な生命の代謝により消費されるため、生命が存在する惑星では大気の CO 分圧は低く抑えられると考えられている。したがって、大気 CO 分圧は生命の存在を示唆する指標となる可能性がある（Catling et al., 2018）。このため、地球類似惑星における大気中の CO₂ や CO の挙動は将来の系外惑星の生命探査においても重要となることが期待される。しかし、それらの大気中の存在量に影響を及ぼす気候や大気化学、炭素循環といった多くの要因を包括的に取り扱う理論的枠組みがなく、地球類似惑星における大気中の CO₂ および CO についての理解が不足していた。

そこで本研究では、火山ガス組成を推定する熱力学平衡計算モデル（Wogan and Catling, 2020）、気候モデル（0 次元エネルギーバランスモデル）、炭素循環モデル（Krissansen-Totton et al., 2018）および鉛直 1 次元の大気光化学モデル（Arney et al., 2016）を組み合わせた理論モデルを構築した。このモデルを用いて、生命誕生前の初期地球および太陽型星（F、G、K 型星）周りの地球類似惑星の大気組成の軌道長半径と火成活動の強さに対する依存性を系統的に調べた。

初期地球のような無生物惑星を想定し、初期太陽の紫外線スペクトル条件で軌道長半径に関する数値実験を行った。その結果、今回開発したモデルにおいても惑星が外側に位置するほど大気 CO₂ 分圧が上昇する傾向にあり、Kadoya and Tajika (2019) と整合的な結果が得られた。想定された初期地球条件では軌道長半径が約 1.0AU より大きい場合に CO 暴走が生じることが分かった。また、火山ガスの供給速度が大きい条件では、より小さな軌道長半径の条件で CO 暴走が生じることが明らかになった。さらに、紫外線が比較的弱い K 型星を周回する惑星においては CO 暴走大気がより発生しやすいことも示された。以上の結果から、K 型星を周回し軌道長半径が大きい無生物の地球類似惑星で CO 暴走大気が存在しやすいことが示唆される。将来的にこのような条件の惑星を観測することで、CO 暴走大気の実在を検証できる可能性がある。

全球凍結下での水-岩石反応の可能性と 表層環境への影響

○ 門屋 辰太郎¹, Mohit Melwani-Daswani²

¹ 東京科学大学地球生命研究所, ² NASA/JPL

地球は、過去に少なくとも3度全球に及ぶ氷河時代（全球凍結イベント）を経験したと考えられている。従来の全球凍結仮説では、大気中二酸化炭素の主要なシンクである大陸上での化学風化が停止することを仮定し、その結果として大気中の二酸化炭素濃度（ $p\text{CO}_2$ ）が上昇したことが全球凍結状態からの脱出の要因であると考えられてきた [e.g., Kirshvink, 1992]。その一方で、近年の研究では全球凍結中に沈殿したドロマイト（ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ）が見つかり、このことから全球凍結中にも大陸風化が継続したことが示唆されつつある [Hood et al., 2022]。そこで、本研究では、全球凍結家における水-岩石反応（i.e., 大陸化学風化）に注目し、数値シミュレーションを通じてこのプロセスを支配するパラメータの解明を行う。またその結果を下に全球凍結状態における炭素循環の描像の更新を試みる。

本研究では、アメリカ地質学会によって開発された地球化学反応計算コード（PHREEQC; Parkhurst & Appelo, 2013）を用いて水-岩石反応のモデリングを行った。温度圧力条件については、氷床底部の融解水（0.01 °C、100 bar）を想定し、初期岩石組成には平均的な大陸地殻組成 [Taylor & McLennan, 1985] を用いた。また、流入する融解水の流量および氷床流動・底面削剥による新鮮な岩石の供給率についてはフリー・パラメータとし、これらについてパラメータ・スタディを行った。

反応開始から一定時間が経過すると、流出水の化学組成や沈殿する鉱物組成は定常状態に達する。定常状態に達する時間スケールは、初期岩石量と新鮮な岩石の供給率に依存する。また、定常状態における水や鉱物各組成は、水の流入率と岩石の供給率の比（Water-to-Rock Flux ratio; WRF）に依存する。こうしたことから、氷床下における水-岩石反応においてはこの WRF が重要なパラメータであると考えられる。定常状態における流出水の組成をみると、WRF が低い場合（ ≤ 10 ）には、供給された陽イオンの大部分が鉱物相に存在する一方、WRF が高い場合（ ≥ 1000 ）にはその大部分が溶脱し、流出水とともに排出される。沈殿する鉱物は、WRF が低い場合（ ≤ 10 ）には沸石が卓越する一方、WRF が高い場合（ ≥ 1000 ）にはス멕タイトが占める。また、WRF が中程度の場合（ ~ 100 ）には炭酸塩鉱物の沈殿も見られた。こうした定常状態の組成は、 $p\text{CO}_2$ にも依存して変化する。

流出水に含まれる Ca^{2+} イオンや炭酸塩の沈殿から、 CO_2 の消費率を見積もることができる。現在の南極大陸における WRF（ ~ 100 ）の値を参照すると、 $p\text{CO}_2 = 100 \text{ mbar}$ の条件で $1 \text{ mmol/kg H}_2\text{O}$ の CO_2 消費が予想される。仮に、全球凍結期の大陸全体において、このような CO_2 消費が起きたと仮定すると、上記の消費率は 10 Tmol/yr の CO_2 消費に想定し、この値は現代の CO_2 供給率に匹敵する。この推定値は最大見積もりに相当し、現実の全球凍結期における大陸風化による CO_2 消費はより少ない値であると考えられる。しかしながらこの結果は、これまで無視されてきた全球凍結状態での水-岩石反応と、その炭素循環への影響を再評価するものである。

太陽高エネルギー粒子による初期地球・火星大気中の靄生成とそのアストロバイオロジー的意義

○小林憲正^{1,2,3}, Vladimir S. Airapetian^{4,5,6}, 梶木屋裕斗², 中島幹二², 池田伊吹¹, 宇土拓海¹,
 癸生川陽子², 柴田裕実⁷, 羽倉尚人⁸

¹ 横浜国立大学, ² 東京科学大学, ³ 理化学研究所, ⁴ NASA Goddard SFC, ⁵ American University,
⁶ 京都大学, ⁷ 神戸大学, ⁸ 東京都市大学

初期地球・火星大気中は、二酸化炭素、窒素を主とし、一酸化炭素を含む弱還元型だった可能性が高いと考えられている。このような大気からは雷や紫外線ではアミノ酸などの有機物生成は限定的である[1]。一方、近年、若い太陽は巨大フレアを頻繁に発生させた可能性が考えられており[2]、その場合に発せられる大フラックスの太陽高エネルギー粒子が大気から有機物を作る重要なエネルギー源となった可能性が示唆されている[3]。われわれは、弱還元型混合気体(二酸化炭素、一酸化炭素、窒素等)にペレット加速器(理化学研究所)からの 3 MeV 陽子線、タンデム加速器(東京都市大学)からの 2 MeV 陽子線、もしくはタンデム加速器(東京科学大学)からの 2.5 MeV 陽子線を照射した。

一酸化炭素・二酸化炭素・窒素(5:45:50)の混合ガス、もしくはこれに水蒸気を加えたものに陽子線照射を行うと、照射直後に靄の生成が認められた。気相では一酸化二窒素が検出された。一酸化二窒素は二酸化炭素・メタンを上回る温室効果ガスであり、その生成は若い太陽のパラドックス[4]の解明のヒントとなる。

靄は固体有機物と考えられ、気相中で直接、固相有機物が生成することが示された。この靄は水に可溶であり、これを酸加水分解すると、多種類のアミノ酸の生成が確認できた。このことは大気中で高分子態の有機物が生成して靄を形成し、その中にアミノ酸前駆体が含まれることを示唆する。なお、一酸化炭素を ¹³C ラベルしたものをを用いた場合、生成したグリシンの α 炭素は ¹³C、カルボニル炭素は ¹²C のものが多かった。このことはアミノ酸前駆体生成において一酸化炭素・二酸化炭素の両者が用いられていることを示す。

メタン・窒素(5:95)の混合ガス、もしくはこれに一酸化炭素を 1-5% 加えたものに陽子線を照射した場合も靄の生成が認められた。土星の衛星のタイタンでは高層大気で生成した有機物が降下しながら成長し靄が生成するとされてきたが、本結果からは低層大気中でも宇宙線もしくは太陽高エネルギー粒子により直接靄が生成していることが考えられる。靄はテトラヒドロフラン、アセトニトリル、水に部分的に溶解した。一酸化炭素を含む場合、水に可溶な親水的な靄の割合が増した。タイタンにはアンモニア水を含む地下海が存在が示唆されており、そこでのハビタビリティを考える上で大気中の微量の一酸化炭素が重要な役割を果たしていることが考えられる。

ペレット加速器の使用においては、池田時浩博士(理研)、東俊行博士(理研)、タンデム加速器(東京科学大)に使用においては福田一志博士(東京科学大)、小栗慶之博士(東京科学大)にお世話になったので、感謝する。GC/MS を使用させていただいた窪田好浩博士(横国大)、稲垣怜史博士(横国大)に感謝する。

文献 [1] Y. Ueno et al., *Nat. Geosci.*, **17**, 503-507 (2024).

[2] V.S. Airapetian et al., *Int. J. Astrobiol.*, **19**, 136-194 (2020).

[3] K. Kobayashi et al., *Life*, **13**, 1103 (2023).

[4] C. Sagan and G. Mullen, *Science*, **177**, 52-56 (1972).

視線速度長周期トレンドを利用した 直接撮像による M 型星周りの伴星探査

○ 鶴山太智¹、葛原昌幸^{2,3}、Charles Beichman^{4,5}、小谷隆行^{2,3,6}、平野照幸²、
Markus Janson⁷、Dimitri Mawet^{8,9}、佐藤文衛¹⁰、田村元秀^{2,3}、
他 Keck/NIRC2、IRD-SSP 観測チーム

¹California State University Northridge、² アストロバイオロジーセンター、³ 国立天文台、⁴ IPAC/Caltech、

⁵NASA Exoplanet Science Institute、⁶ 総研大、⁷Stockholm Univ.、⁸Caltech、⁹JPL、¹⁰ 東京科学大

すばる望遠鏡では 2019 年から 2025 年にかけて近赤外高分散分光装置 IRD を用いて近傍中期・晩期 M 型星をターゲットとした視線速度による系外惑星探査 (IRD-SSP) が進められた。このサーベイの主目的は地球型惑星の検出であり、視線速度トレンドなどの遠く離れた質量が大きな伴星が示唆されると観測ターゲットから外されていたが、今だに解明されていない部分が多い M 型星における連星や褐色矮星、ガス惑星の形成・進化過程を議論する際に重要な観測ターゲットとなる。系外惑星の直接撮像法は視線速度法と相補的な観測手法で主星から離れた天体の検出に有利であるが、M 型星は近傍にあるものでも非常に暗く、技術的な理由で直接撮像観測のターゲットとしては不向きであった。そこで今回我々はケック望遠鏡の補償光学装置: 赤外波面センシング (Keck/NIRC2-pyWFS) を利用して、長周期伴星が示唆される近傍中期・晩期 M 型星のみをターゲットとした世界初の直接撮像探査を行った。2022 年から現在までの観測で多数の新たな伴星の検出に成功し、そのうちの一つは測光結果と軌道フィッティングからこれまでにほとんど検出されていない M 型星周りの褐色矮星であることが判明した (e.g. Uyama et al. 2023, Uyama et al. submitted)。今後 Gaia によるアストロメトリを利用した M 型星における伴星の議論は進むことが期待されるが、Gaia で伴星を分解できないケースでは解けない縮退パラメータが残るため、視線速度や直接撮像を組み合わせた議論が活発となることが見込まれる。本講演では具体的な観測・検出例について説明すると共に、Gaia DR4 以降のアストロメトリを含めた力学的な質量の制限を見据えた将来的な展望にも触れていく。

デブリ円盤の非対称空間分布と 直接撮像による惑星質量系外惑星検出への影響

○清水 颯人¹, 小林 浩¹

¹名古屋大学

直接撮像により系外惑星とデブリ円盤が同時に検出されるようになってきている．これまでは土星のような巨大惑星とデブリ円盤が発見されていたが，将来的には赤外線での地球型惑星とデブリ円盤の検出が期待される．惑星まわりのダストが濃く一様な分布ならば，ダスト熱輻射は惑星からの放射を覆い隠してしまう．一方，惑星重力によって形成される特徴的なダスト分布が顕著に観測されるならば，惑星の存在を示唆する手がかりとなりうる．したがって，惑星の直接撮像による検出を行う上では，惑星周囲のダスト分布，すなわちデブリ円盤の構造や輻射を正確に考慮する必要がある．

太陽系においては，黄道光として知られるように，地球周りにデブリ円盤のようなダストが分布している．本研究では，太陽系の小惑星帯（2-3 au）を模擬した微惑星帯において，衝突カスケードにより定常的に生成されるダストが，ポインティング・ロバートソン効果（P-R 効果）によって内側へ移動し，軌道半径 1 au の地球質量惑星の周りに形成されるダスト分布を調べ，ダストの輻射フラックスを評価する．そのために，まず，中心星の輻射圧および P-R 効果を考慮し，中心星・惑星・ダストの 3 体からなる 3 次元軌道運動を数値計算により求めた．その結果をもとに，惑星周囲のダスト分布を求めた．計算領域を半径方向と方位角方向に分割し，各領域におけるダストの滞在時間を集計することで，円盤内のダストの数密度分布を得た．

次に，中心星光に対するデブリ円盤の赤外輻射フラックス比についても評価を行った．P-R 効果によって主に落下してくるサイズのダストが，典型的なデブリ円盤のダストとなるため，ダストのサイズ分布を微惑星帯での衝突時間と P-R 効果による落下時間から見積もった．この一連の調査の結果，明るいデブリ円盤ではダストの光学的厚みが大きく，惑星からの放射が埋もれてしまう上に，主に小さなダストが中心星へ落下するため，構造は滑らかで惑星検出に不利となる．一方，暗いデブリ円盤ではダストの光学的厚みが小さく，大きなダストが惑星周囲にまで落下して，特徴的な構造が形成されるため，惑星検出に有利になることが分かった．

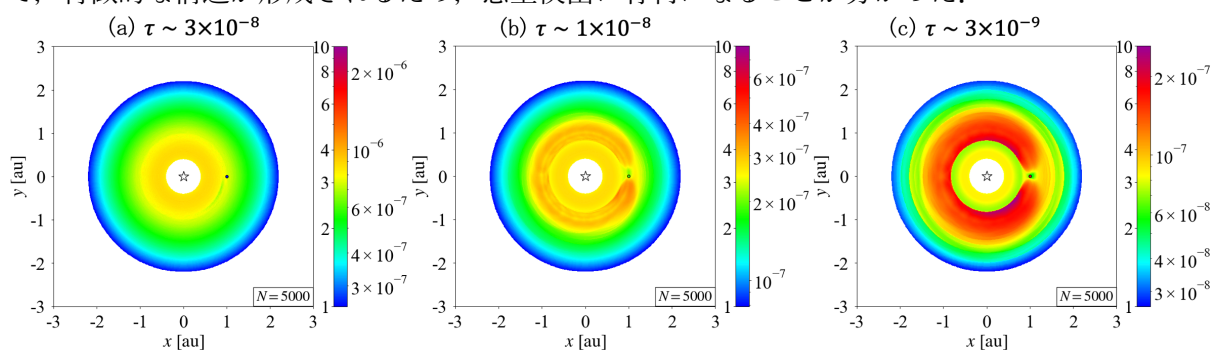


図1 ダスト放射と中心星光のフラックス比

地球型系外惑星の硫黄循環： 大気透過光観測によるハビタビリティ制約可能性

○吉田 海渡¹, 黒川 宏之¹

¹ 東京大学

地球型系外惑星の表層に液体の水が存在するかは、将来的な第二の地球探しや地球外生命探査における根源的な問いである。惑星表層水の診断法としては、大気中の硫黄分子種 (SO_2 ガス, H_2SO_4 エアロゾル) に着目する方法が提案されている (Loftus et al., 2019)。これは、火山脱ガスに由来する硫黄分子種が、地球 (湿潤惑星) では水によって大気中から除去される一方、金星 (乾燥惑星) では大気中に蓄積するという描像に基づいていた。一方、我々の過去の研究では、地球に似た湿潤惑星と極端に乾燥した惑星の硫黄循環を大気化学モデルによって検証した。その結果、後者では大気中での H_2SO_4 生成が効率的に進まず、むしろ H_2SO_4 エアロゾルの存在量は極めて小さくなる可能性が示唆された。しかし、金星のような中間的な乾燥状態の惑星を含めて、大気硫黄存在量の表層水量依存性は系統的に調べられていない。また、惑星のテクトニクス形態に応じて硫黄の脱ガス率は何桁も変わりうる。脱ガス率の違いは、大気硫黄存在量に影響しうるため、表層水量と脱ガス率は観測的に縮退する懸念がある。そこで本研究では、表層水量と硫黄脱ガス率を変化させて硫黄循環のシミュレーションを行い、それぞれが大気硫黄分子種の存在量に与える影響を定量的に明らかにした。さらに、この結果を用いて大気硫黄分子種のフィーチャーを評価した。これにより将来の観測でハビタビリティを診断するための具体的な指標を理論的に提案する。

本研究では、大気光化学モデルと輻射輸送モデルを用いた 2 段階のシミュレーションを実施した。第一に、惑星大気計算コード Atmos (Arney et al., 2016) に含まれる大気光化学モジュール Photochem を用い、表層水量と硫黄脱ガス率を系統的に変化させたパラメータサーベイを行なった。これにより、表層水量と脱ガス率を軸としたパラメータ空間上で、 SO_2 ガスや H_2SO_4 エアロゾルをはじめとする硫黄分子種の存在量がどのように分布するかを明らかにした。第二に、上記で得られた大気組成の計算結果を基に、輻射輸送モデルを用いて理論的な透過光スペクトルを計算し、これらの硫黄分子種のフィーチャーを予測した。

本発表では、惑星の表層水量や硫黄分子種の脱ガス率と、地球型系外惑星大気の観測フィーチャーとの関係性を述べ、将来的な観測への示唆を議論する。

M 型星を公転する惑星に適用する 大気大循環モデル用放射スキームの構築

○ 吉川 颯真¹ 石渡 正樹¹ 高橋 芳幸²

¹ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

² 神戸大学大学院理学研究科

約 6000 個の系外惑星の観測から、系外惑星の多様性が明らかになっている。それらの自転角速度や自転傾斜角は大気循環やエネルギー輸送のパターンを決めるため、生命存在可能性を探る上で極めて重要である。このような背景のもと、自転角速度や自転傾斜角を推定する手法が提案されている。その一つが、表層の不均一性を持った系外惑星を観測し、自転と公転に伴って生じる反射光の時間変動を解析することで、地表面の情報や惑星の自転情報を抽出するという手法である (Kawahara, 2016)。Nakagawa et al. (2020) は、大気大循環モデル DCPAM5 を用いて雲の影響を考慮し、放射伝達計算を組み合わせることで惑星の反射光度曲線を求めることで、自転傾斜角が推定できることを実証した。しかし、彼らが気候計算で使用したモデルの放射スキームは、太陽の入射スペクトルに基づくものであるため、現状では彼らの手法を M 型星を公転する惑星に対してそのまま適用することができない。

そのため、本研究は、M 型星を公転する惑星に対しても自転傾斜角や自転角速度が推定できるかどうかを示すことを目指して、M 型星スペクトルに特化した惑星大気放射スキームの開発を進めている。

現在のところ、M 型星を公転し、地球と同じ大気組成を持つ惑星に対する放射計算用パラメタセットを作成し、一次元放射対流平衡計算を実行した。具体的には、一次元放射伝達モデル (Takahashi et al., 2023) を用いて、TRAPPIST-1 の恒星放射 (Fauchez et al., 2020) が入射する N_2 , O_2 が支配的な大気に対して、 H_2O , CO_2 , O_3 の吸収線パラメタ (HITRAN2012, Rothman et al., 2013) から吸収係数のパラメタセットを作製した。パラメタセットを用いた相関 k 分布法による放射計算の結果は、高精度であるラインバイライン計算と比較し、精度目標 (Takahashi et al., 2023) を満たすことを確認した。それを用いて放射対流平衡計算を行った結果、太陽の入射スペクトルを与えた計算結果と比べて高い地表面温度が得られた。この結果は、地表面温度から惑星放射フラックスを求めるモデル (Copparapu et al., 2013) の結果と整合的であった。今後は、地球流体電脳倶楽部が開発した DCPAM5 を用いて 3 次元気候計算を行い、自転情報推定に向けた入力データの作成を行う予定である。

Effects of the magma-atmospheric interaction on the radius distribution of super-Earth and sub-Neptune

マグマと大気の相互作用がスーパーアースおよびサブネプチューンの半径分布に与える影響

○ソ チャンウル^{1,2} and 藤井友香^{1,2}

1 国立天文台, 2 総合研究大学院大学

Planets with radii between those of Earth and Neptune are among the most common exoplanets. These intermediate-sized worlds have a characteristic bimodal radius distribution: the larger population is known as ‘sub-Neptunes,’ the smaller as ‘super-Earths,’ and the low-frequency range between them is called the ‘radius valley.’ While the inflated sizes of sub-Neptunes imply substantial volatile fractions, the mass-radius relation cannot uniquely distinguish between a thick H/He atmosphere over a small rocky core and an ice-rich interior. These two compositions correspond to different formation pathways. One scenario proposes that ice-rich sub-Neptunes form beyond the snow line and migrate inward, while super-Earths form in situ. In contrast, the classical photoevaporation model posits a common origin of small rocky cores accrete H/He envelopes, which are then sculpted by atmospheric escape into a bimodal distribution.

Most photoevaporation studies assume inert cores, and lead to the inference on the distribution of the initial atmospheric mass fraction as well as that of the core mass, which are crucial for understanding early formation processes. However, a thick atmosphere can melt the silicate core (magma), enabling redox reactions (e.g., oxidizing H_2 to H_2O) and gas partitioning at the magma-atmosphere boundary. It has been shown that the magma-atmosphere reaction changes the atmospheric composition and prolongs atmospheric lifetimes by storing volatiles in the magma. However, the effect of such processes on the interpretation of the radius distribution has not been quantified. A recent population synthesis model demonstrated that incorporating water partitioning between the atmosphere and magma can eliminate the radius valley, although it relies on simplified assumptions about magma solidification and the coupled evolution of the atmosphere-core system, which limits its applicability for interpreting the radius valley in terms of initial conditions.

In this work, we investigate how magma-atmosphere interactions alter the radius distribution compared to the classical photoevaporation models with non-reactive magma and examine the effect on the interpretation of initial conditions of planetary evolution (e.g., core mass distribution and initial atmospheric mass). We developed an evolutionary model for super-Earths and sub-Neptunes composed of a rocky core and an atmosphere, considering thermal evolution, chemical reactions between the atmosphere and magma, and atmospheric escape. As the planet cools and loses its initial atmosphere, dissolved gases (particularly H_2O) continue to be outgassed from the magma into the atmosphere. Our preliminary results suggest that this continuous supply of gas from the interior alters the shape of the radius valley, primarily by hindering the evolution into bare-rock planets. Our result also shows that, due to the much higher solubility of H_2O than H_2 , this effect is highly redox-dependent, with oxidized interiors able to store and release more gas via H_2O outgassing.

金星型惑星のイオン散逸に対する高温酸素コロナの影響 Effects of Hot Oxygen Corona on Ion Escape from Venus-like Planets

○ 西岡知輝¹, 関華奈子^{2,1}, 坂田遼弥², 寺田直樹³,
堺正太朗⁴, 品川裕之⁵, 中山陽史⁶

¹ 東京大学大学院理学系研究科, ² 東京大学先端科学技術研究センター, ³ 東北大学大学院理学研究科,
⁴ 慶應義塾大学環境情報学部, ⁵ 九州大学国際宇宙惑星環境研究センター, ⁶ 立教大学理学部

Since Venus has no significant planetary magnetic field, the fast-flowing solar wind plasma interacts directly with its ionosphere and upper atmosphere. Therefore, thermal atomic oxygen in the thermosphere and hot oxygen in the corona produced by non-thermal processes in the upper atmosphere act as a source of ion pickup loss. In this study, we investigated the effects of hot oxygen corona on the ion escape from Venus-like planets under different XUV environments and stellar wind conditions, assuming scenarios such as ancient Venus or close-in exoplanets around M dwarfs. We developed a Monte Carlo code to calculate the hot oxygen transport in the thermosphere. The hot oxygen density above the exobase is also calculated by using Liouville's equation (Schunk and Nagy, 2009). The hot oxygen density was used as input for the multi-species MHD simulation model REPPU-Planets (Terada et al., 2009; Sakata et al., 2022). We assumed a Venus-like atmospheric composition depending on the stellar XUV flux as the input thermosphere based on Kulikov et al. (2007).

The results show that the pressure balance between the ionospheric thermal and the stellar wind dynamic pressures plays a key role in the escape rate dependence on stellar wind conditions (Figure 1). The contribution of hot oxygen corona to the total escape rate decreases under high XUV radiation or low-density stellar wind. This is due to enhanced thermospheric heating, which causes the thermospheric component to dominate over the non-thermal component, and reduced stellar wind interactions, which reduce ionization processes via charge exchange and electron impact ionization. It suggests that the hot oxygen corona plays a crucial role in the ion escape from close-in exoplanets around inactive M dwarfs.

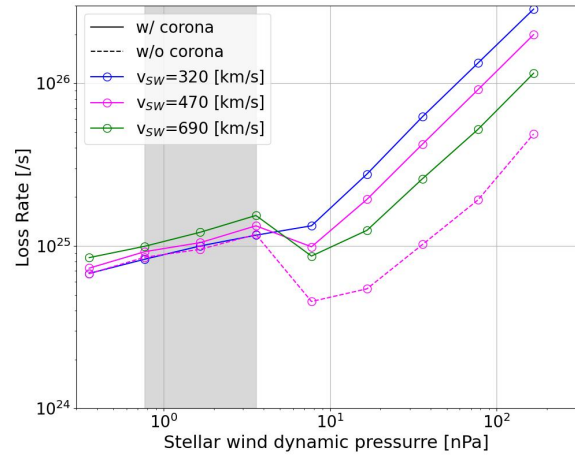


Figure 1 The dependence of O^+ escape rate on the stellar wind dynamic pressure. The gray area indicates the region where the peak plasma pressure in the dayside ionosphere becomes comparable to the stellar wind dynamic pressure.

フォルステライト蒸発生成物解明への挑戦

○稲田栞里¹, 石橋篤季¹, 橘省吾², 羽馬哲也¹

¹ 東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 基礎科学系/先進科学研究機構

² 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻

惑星大気における雲の性質や挙動を理解する上で、雲粒の生成と成長および蒸発による消失に関わる雲微物理の理解が不可欠である。高温の系外惑星大気に存在すると考えられるケイ酸塩などの鉱物雲に対しても、均質/不均質核生成の古典的理論を取り入れたモデル計算に基づいて、鉛直構造や粒子サイズなどの観測の解釈が行われている [1-3]。一方で、そうした理論的取り扱いの妥当性を左右する分子レベルの素過程は、十分に理解されていない。例えば、代表的なケイ酸塩鉱物であるフォルステライト (Mg_2SiO_4) の均質核生成は、Mg や SiO などの安定な化学種からでは非効率であり、より原子数の多い分子から出発する反応経路が提案されている [4]。系外惑星大気においては、フォルステライトを含む Mg ケイ酸塩の蒸発生成物として提案されてきた MgO や SiO_2 分子 [5,6] が、ケイ酸塩雲の核生成率を高める役割を担う可能性がある。しかし、これらの分子の生成は、蒸発に伴う質量依存同位体分別から予測されたものであり、直接的な検証はこれまでほとんどなされてこなかった。

本研究ではまず、遷移状態理論を用いた解析により、蒸発にエネルギー障壁が存在する場合に、同位体分別係数が分子質量比の $-1/2$ 乗よりも 1 に近づく (分別が抑制される) ことを明らかにした [7,8]。このことは、過去の同位体分別実験の結果が、MgO や SiO_2 分子の生成を必ずしも意味しないことを示唆する。さらに、フォルステライトの蒸発生成物を実験により直接確かめるため、新たな装置・手法の開発を行った。この装置では、 $\sim 700\text{--}2000\text{ K}$ の温度制御のもと高真空中で鉱物試料を蒸発させ、生成した気体を質量分析により検出することが可能である。本実験により、主要な蒸発生成物が MgO ではなく Mg ($\text{Mg}:\text{MgO} > 10^2:1$) であることが明らかになった (図 1)。今後、Si を含む化学種や微量に存在する多原子分子も含めて生成物の同定を進め、ケイ酸塩雲粒の核生成への寄与を明らかにすることを目指す。

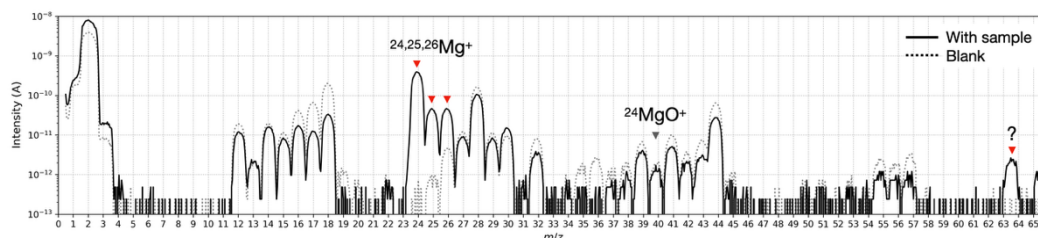


図 1 1400 K におけるフォルステライト蒸発生成物の質量スペクトル。

- [1] Ohno & Okuzumi, 2018, ApJ, 859, 34. [2] Gao et al., 2020, Nat. Astron., 4, 951. [3] Lee et al., 2023, MNRAS, 524, 2918. [4] Flint & Fortenberry, 2024, JPCA, 128, 9263. [5] Davis et al., 1990, Nature, 347, 655. [6] Mendybaev et al., 2021, GCA, 292, 557. [7] Inada et al., 2024, JCP, 160, 154710. [8] Inada et al., in revision.

Habitable Worlds Observatory (HWO): プロジェクトおよび日本の参画の計画概要

○塩谷 圭吾^{1,2}, 亀田 真吾³, 住 貴宏⁴, 山崎 敦¹, 村上 豪¹, 米田 謙太¹, 高橋 葵¹,
山田 亨¹, 河原 創¹, 宮崎 翔太¹, 山崎 典子¹, 近藤 依央菜¹, 東尾 奈々¹, 村上 尚史⁵,
小谷 隆行⁵, 田村 元秀⁵, 葛原 昌幸⁵, 西川 淳^{6,5,2}, 生駒 大洋⁶, 大内 正己^{6,8}, 松尾 太郎⁴,
伊藤 哲司⁷, 成田 憲保⁸, Oliver Guyon^{6,9}, HWO-J チーム

¹宇宙科学研究所, ²総研大, ³立教大学, ⁴大阪大学, ⁵アストロバイオロジーセンター, ⁶国立天文台,
⁷名古屋大学, ⁸東京大学, ⁹アリゾナ大学

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

HWO には太陽型星を周回する地球型惑星の直接観測を行い、その大気や表面の特徴を調べるとともに、そこに生命の兆候を探索するコロナグラフ装置や、高解像度撮像装置、紫外線多天体分光器を搭載する予定であり、更にその他の装置の搭載も検討されている。HWO では 2029 年にミッションコンセプトレビューを予定しており、それまでにコンセプト及び技術の成熟度を高めることが計画されている。HWO に対する日本からの寄与として、コロナグラフ装置および紫外線観測装置の開発、そして科学研究への参画が検討されている。

2024 年 12 月、HWO への日本の参画に向けて、宇宙研にタスクフォースが設立された。宇宙研 HWO タスクフォースが担う役割は、NASA に対する日本側の窓口となること、技術フロントローディングの推進、コミュニティとの連携等である。その前段階では、2023-2024 に 2 名の JAXA representative が活動してきた。

講演では HWO の全体概要(科学目標、観測装置、スケジュールや米国・NASA 予算等のプログラムの状況等)および日本の参画計画の概要を示す。

深宇宙探査技術実証機 DESTINY+プロジェクトの進捗

○荒井朋子¹, 小林正規¹, 石橋高¹, 木村宏¹, 奥平修¹, 山田学¹, 岡本尚也¹, 吉田二美^{2,1}, 和田浩二¹, 千秋博紀¹, 秋田谷洋¹, Ralf Srama³, Harald Kruger^{4,1}, 諸田智克⁵, 佐々木晶⁶, 石黒正晃⁷, 関口 朋彦⁸, 大塚勝仁^{9,1}, 浦川聖太郎¹⁰, 阿部新助¹¹, 巽瑛理¹², 横田康弘¹³, 藪田ひかる¹⁴, 渡部潤一¹⁴, 伊藤孝士^{15,1}, 大坪貴文^{2,1}, 中村智樹¹⁶, 廣井孝弘¹⁷, 平田成¹⁸, 小松吾郎^{19,1}, 紅山仁²⁰, 伊藤元雄²¹, 山口亮²², 松浦周二²³, Sean Marshall²⁴, 矢野創²⁵, 吉川真²⁵, 尾崎直哉²⁵, 山本高行²⁵, 豊田裕之²⁵, 西山和孝²⁵, 今村裕志²⁵, 高島 建²⁵

¹千葉工業大学, ²産業医科大学, ³University of Stuttgart, ⁴Max Planck Institute, ⁵東京大学, ⁶大阪大学, ⁷ソウル大学, ⁸北海道教育大学, ⁹東京流星観測網, ¹⁰日本スペースガード協会, ¹¹日本大学, ¹²カナリア天体物理学研究所, ¹³東京科学大学, ¹⁴広島大学, ¹⁵国立天文台, ¹⁶東北大学, ¹⁷ブラウン大学, ¹⁸会津大学, ¹⁹ダヌンツィオ大学, ²⁰Université Côte d’Azur, ²¹JAMSTEC, ²²国立極地研究所, ²³関西学院大学, ²⁴Univ. of Central Florida, ²⁵JAXA

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

DESTINY+はもともと、2025 年度に Epsilon S ロケットによって打ち上げられる予定だったが、Epsilon S ロケットの静的点火試験で複数の失敗が発生したため、打ち上げロケットが H3 ロケットまたは同等のものに変更され、打ち上げ時期は 2028 年度に、フェイトンのフライバイは 2030 年 11 月に延期された。

ロケットの変更に伴い、理学観測計画が変更された。地球スパイラル軌道上昇と月フライバイが行われなくなり、これにより地球周辺や月周辺の塵の直接測定の手機が無くなった。一方、この遅延は星間塵の観測に好影響を与える。シミュレーションによれば、2030 年に向けて、星間塵の衝突率は最大で 4 倍から 10 倍に増加する可能性があり、これは星間磁場の変化により、小さな ($\leq 0.1 \mu\text{m}$) 星間塵粒子が集中的に引き寄せられるためである。

また、DESTINY+は目的地であるフェイトンに到達する前に、小惑星アポフィスのフライバイを計画している。アポフィスは 2029 年 4 月 13 日に地球に最接近するため、その前にフライバイを行うことで、アポフィスの物理的な形状や表面の地質に関するデータを取得します。これらのデータは、惑星科学や防衛技術に貴重な情報を提供するだけでなく、今後予定されているランデブー・ミッション（OSIRIS-APEX や RAMSES）に向けた偵察データとしても役立つ。さらに、アポフィス周辺の塵の DDA 分析によって得られる化学組成も重要な科学的発見をもたらすと期待される。

次世代小天体サンプルリターンミッションの科学 検討状況報告

○ 瀧生有理¹, 黒川宏之², 坂谷尚哉¹, 深井稜汰¹, 岡田達明¹, 青木順³, 癸生川陽子⁴,
熊本篤志⁵, 田中智¹, 川村太一⁶, 千秋博紀⁷, 末次竜⁸, 浦川聖太郎⁹, 巽瑛理¹⁰,
高尾勇輝¹¹, 菊地翔太¹², 森治¹, 佐伯孝尚¹, 津田雄一¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²東京大学, ³大阪大学, ⁴東京科学大学, ⁵東北大学, ⁶パリ大学, ⁷
千葉工業大学, ⁸大島商船高専, ⁹日本スペースガード協会, ¹⁰IAC, ¹¹横浜国立大学, ¹²国立天
文台

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

本ミッションでは、はやぶさ2の成果と課題を踏まえ、科学目的を(SMG-I)銀河物質進化を辿る太陽系“物質”の起源の解明、および(SMG-II)微惑星形成過程に迫る太陽系“天体”の起源の解明と設定し、ノミナル目標天体として木星族彗星 289P/Blanpainを選定した。ノミナルミッション期間は2034年の打上げ、2040年の到着、2046年の地球帰還であり、約13年の長期ミッションとなる。探査機システムは、地球と彗星間の輸送を担う深宇宙軌道間輸送機(DSOTV)と、彗星近傍でのサンプリングを担う着陸機から構成される。天体近傍運用では、光学航法カメラによる地形・形状観測、LIDARによる重力計測、熱赤外カメラによる表面物性観測を行い、天体バルク密度推定と着陸候補地点選定を行う。着陸機の弾丸/ガス方式サンプリングによるタッチダウン運用によって彗星試料を採取し、超小型質量分析計により揮発性物質・有機物のその分析を行う。彗星活動や宇宙風化の影響を受けていない地下物質試料を採取するため、小型衝突装置等により地下物質にアクセスし、採取する。試料は機上で乾燥凍結した後、DSOTVの小型軽量サンプルリターンカプセルに搬送し、火星以遠からの超高速リエントリとハードランディングにより地球帰還させる(SMG-I)。また、小型衝突装置運用と組み合わせた地震計運用及び複数機探査システムを活用したレーダ探査運用を行い、彗星核の内部構造探査を行う(SMG-II)。

本講演では、理学WGで実施しているミッション機器検討の最新状況を報告する。

次世代小天体サンプルリターンミッション — 彗星核内部探査バイスタティックレーダ用 広帯域アンテナの検討

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

¹ 東北大, ² 東大, ³ 東京国際工科専門職大, ⁴ JAXA, ⁵ NA0J, ⁶ 横浜国大

太陽系形成時から変化を経ていない物質を彗星核地表下から採取するための次世代小天体サンプルリターン（NGSR）ミッションの検討が進められている。このミッションでは、サンプル採取、その場分析に加えて、レーダ・地震計による内部構造探査も検討されている。内部構造から彗星核がラブルパイルであれば、親天体の大規模破壊・再集積を経て形成された彗星核、ペブルパイルであれば、ダスト・ペブルの静かな集積によって形成された彗星核と推定されるので、採取サンプルが経てきた環境変化の想定も変わってくる。ラブルパイル・ペブルパイルの判別には、3 m 以内の分解能で、直径 300 m の彗星核の内部構造を観測できる必要がある。このため、NGSR レーダは、往還機と着陸機（双方、彗星核周回機としても運用可能）の間で送受信を行うバイスタティックレーダとし、運用周波数は、中心周波数 160 MHz、帯域幅 40 MHz とする。帯域幅の逆数から NGSR レーダの時刻分解能は 25 ns で、彗星核地中で誘電率 2 として電磁波速度が 2.1×10^8 m/s となることから、往復伝搬時刻から決定される距離の計測分解能は 2.6 m と見積もられる。広帯域でのレーダ観測に対応するため、NGSR ミッションでは、宇宙機でしばしば利用されてきたダイポールアンテナに代えて、ボウタイアンテナの利用を検討している。運用周波数に対して 0.7×0.2 m のサイズのボウタイアンテナが適していることを、モーメント法によるアンテナ放射特性の数値計算から確かめている。アンテナに対して探査機の構体パネルは、半波長と同等サイズの導体の箱として放射特性に悪影響を与えるが、アンテナを探査機から離すために長いマストを展開すると、サンプル採取のため彗星核接近運用やサンプル受け渡しのためのドッキング運用において運用制約を生じる。構体パネルを考慮に含めたアンテナ放射特性の数値計算から、往還機では 1.0 m 以上、着陸機では 0.6 m 以上のマストでアンテナを展開すれば、リターンロス・等方性の悪化が許容可能な範囲に留まることが確かめられた。アンテナをマストで展開する案に加えて、着陸機の太陽電池展開用薄膜シートにボウタイアンテナを配置する案、ソーラセイルによる軌道制御実験用の分離孫機（cubesat サイズ）にレーダ中継機を搭載して、ソーラセイルにループアンテナを配置する案も検討されており、それらのオプション案の検討状況についても報告する。

惑星物質固体物性コンソーシアムの提案 Proposal for Establishment of Consortium on Solid Physical Properties of Planetary Materials

○石崎拓也¹, 小野寺圭祐², 佐藤雅彦³, 田中智¹

¹JAXA 宇宙科学研究所

²岡山大学 惑星物質研究所, ³東京理科大学 理学部第一部 物理学科

1. 背景

地球外の太陽系内物質である惑星物質の固体物性はその物質が天体上で経験した熱作用や衝突現象などの熱・機械的な物質の反応・進化過程を支配するパラメータであり、天体の形成過程や進化環境を推定するのに不可欠である。そして固体物性は物質の元素存在度や鉱物組成から、空隙率やクラック分布などの機械的特性、さらに雰囲気からの水分の吸着量に至るまで様々な要因に依存して値が変化する。したがって、類似試料からの固体物性値の類推は危険であり、現物試料の直接的な分析、そして試料と測定値が紐づいた体系的な分析が重要となる。はやぶさ 2 ミッションでは小惑星リュウグウからのリターンサンプルについて、国内の大学・研究機関の研究者からなる臨時の固体物性初期分析チームが結成され固体物性の体系的な分析が行われた。これは地球外物質の固体物性に関する大規模な体系的分析の初の試みであり、小惑星リュウグウの形成過程を議論するための根拠となる極めて重要な成果が得られた。

2. コンソーシアムのコンセプト

リュウグウ試料の初期分析では、将来のリターンサンプルの固体物性分析を効果的に行うための重要な経験が得られた。リターンサンプルは試料量が限られることから、試料の破壊を伴う加工を行わず、可能な限り試料への汚染を伴わない方法で高精度な値を取得することが求められる。リュウグウ試料の初期分析を経験したことにより、どのようにすれば不定形状の試料を非加工・非汚染条件で測定できるか、どのようにすればより測定誤差を低減できるかといった求められる理想的な測定条件に近づくための教訓を得ることができた。そこで将来のサンプルリターンミッションに備えてこれらの教訓をフィードバックし、分析技術を改良発展しておくことでリターンサンプルから得られる科学的成果を最大化できると考えられる。しかし、各分析担当者が個々の研究リソースと開発目標に基づいて研究開発を行うと、試料の破壊・汚染管理水準への到達が不揃いになり、体系的な分析が重要な固体物性において開発の成果を十分に発揮できない可能性がある。そこで、各分析項目の担当者が参加するコンソーシアムの設置を提案する。これにより、参加者が要求水準や目標を共有しながら効率的に研究開発を推進でき、また開発資金を分配することで確実な進捗が可能となる。将来的にはコンソーシアムの設置により固体物性分析の代表組織としての役割を明確に示すことで、将来のサンプルリターンミッションにおけるサンプル採取に関わるミッション計画にも貢献することも目指す。

3. コンソーシアムの位置づけとゴール

本コンソーシアムはリターンサンプルのキュレーション (保管・管理・記載・分配) を行っている JAXA 地球外物質研究グループ (ASRG) とは独立したコミュニティである。そもそも ASRG は固体物性を体系的に分析する枠組みは持っていない。本コンソーシアムでは固体物性測定を専門とする国内の大学・研究機関の研究者を接続し惑星物質の分析における知見を集積する組織の形成を目指す。特定の物理的拠点を新たに建設し装置の開発を行うことは現時点では想定しておらず、各研究者が有する測定環境・技術の改善・発展を主に行う。そして得られた知見を整理して、惑星物質の固体物性分析に関する指針を確立し後世に残すのが最終的なゴールである。例えば分析が試料に与える影響の評価とそれを考慮した分析フローの確立を行う。具体的な成果物としては、これらの知見を集約した「惑星物質固体物性ハンドブック」を制作する。

Hera 搭載熱赤外カメラの軌道上実証： 地球月系・火星系観測

○岡田達明^{1,2}, 田中智¹, 坂谷尚哉¹, 鳶生有理¹, 荒井武彦³, 千秋博紀⁴, 出村裕英⁵,
関口朋彦⁶, 神山徹⁷, 金丸仁明^{2,8}, 石崎拓也¹, 古川聡一郎^{1,2}, Ramon Vilardell-Belles⁵,
Ozgur Karatekin⁹, Joris Blommaert¹⁰, Tim Titus¹¹, Hera TIRI チーム¹

¹JAXA 宇宙研, ²東大, ³前橋工大, ⁴千葉工大, ⁵会津大, ⁶北海道教育大, ⁷産総研,

⁸コートダジュール天文台, ⁹ベルギー王立天文台, ¹⁰VITO, ¹¹USGS

ESA の小惑星探査機 Hera は S 型二重小惑星 Didmos と Dimorphos の探査計画であり、日本は熱赤外カメラ TIRI を搭載して科学データを生成、小惑星科学で貢献する。Hera は NASA の DART による Dimorphos 衝突後の表面状態や軌道進化を現地で事後観察する計画である。Hera は Planetary Defense（地球防衛）が主目的であり、小惑星の地球衝突回避技術の開発と衝突効率の検証を目指す。しかし、小惑星の物性情報が不足しており、衝突頻度と災害規模の関係から直径数 10m～数 100m の小惑星の破壊強度や空隙率（密度）、固着力などの物性情報の取得が重要である。これらは初期太陽系の衝突破壊を伴う力学進化過程の解明にとっても重要であり、サンプルリターンに代表される物質科学探査とも相補的である。

Hera 搭載熱赤外カメラ TIRI は、非冷却ボロメータ使用を使用し、フィルタホイール搭載によって広帯域の熱撮像と、狭帯域多波長分光撮像の両機能を持ち、総重量も 4kg 以下と軽量で、今後も多様な探査計画に利用され、熱物性や組成の探査での貢献が期待される。

Hera は 2024 年 10 月 7 日に Space X 社の Falcon9 ロケットによって打上げられた。10 月 10 日より初期動作チェックを実施、TIRI の打上げ後の機能健全性が確認されたほか、地球・月撮像を実施し、輝度較正、幾何補正のための情報を得た。Hera は 2025 年 3 月 12 日に火星スイングバイを成功裏に実施し、2026 年末には二重小惑星系に到達予定である。巡行中も、TIRI は深宇宙の観測を数回実施し、健全性確認と軌道上較正を進める。

火星スイングバイ時の観測では、火星が点光源から TIRI の全視野を覆う大きさになるまで断続的に火星撮像を実施し、それを基に TIRI の輝度較正や幾何較正を進めている。火星衛星、特に Deimos の反火星面について熱撮像と多波長分光撮像を実施しており、熱物性や化学組成に関する新規の情報が期待される。TIRI の観測で得られた知見は、火星衛星の形成過程の解明を目指す火星衛星探査計画 MMX で実施予定の Deimos 探査と連携することによって、より一層の相乗効果が図れるだろう。

深宇宙探査における光学観測カメラの性能評価

Performance Evaluation of Optical Cameras for Deep Space Exploration

○秦野 裕輝¹, 阿部 新助¹, 早川 恭史², 境 武志², 柳澤正久³, 布施綾太⁴,
矢野創⁵, 船瀬龍^{4,5}, EQUULEUS チーム

¹ 日本大学, ² 日本大学量子科学研究所, ³ 電気通信大学, ⁴ 東京大学, ⁵ JAXA

近年, ロケットの低コスト化に伴い, 従来までの地球低軌道だけでなく月軌道や深宇宙へ投入される無人探査機が増加していくと予想されている. しかし, 低軌道と比べて深宇宙における放射線は2~3倍程度強いことが知られており^[1], 大型探査機のような防護が難しい超小型探査機はハードウェア故障などを引き起こすことで観測が不可能になる可能性がある.

本研究では2022年NASAアルテミス計画-1・SLSロケットの相乗りで打ち上げられた6U深宇宙探査機EQUULEUSに搭載された月面衝突閃光観測カメラDELPHINUS^[1]が撮像した画像の解析を行い, Watec T065 CCDカメラの放射線特性を調査した. 画像解析の結果, 放射線由来のノイズであるHot Pixelは打ち上げ後約半年の間に85個と1日当たり約0.5個増加しており地上よりも発生率が高いことが示された. この解析結果の妥当性を検証するため, 同等の性能を持つWatec Wat-100N CCDカメラを用いた放射線曝露実験を実施した. 実験は, 日本大学電子線利用研究施設の電子線形加速器本体室にカメラを設置し, Hot pixel発生数の時間変化を動画記録し, Hot pixel累積数と累積放射線量(Total dose)の関係を調査した. 実験結果から, DELPHINUSで得られた結果と比較する.

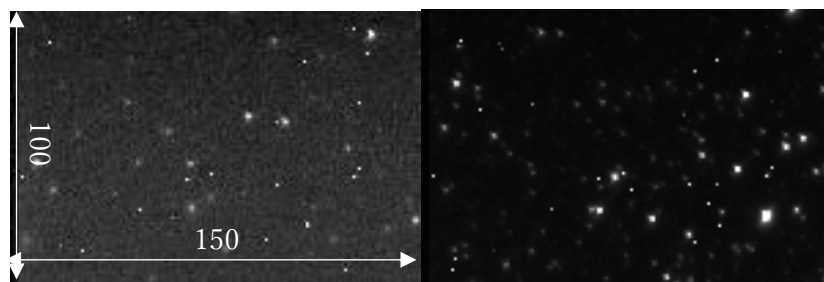


図. 2023/2/8(左)と2023/4/25(右)で検出された
白点の比較

References

- [1] R, Funase et al. (2020) "Mission to Earth-Moon Lagrange Point by a 6U CubeSat: EQUULEUS", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 35(3), 33-34

火星着陸探査ミッションに向けた理学検討

○臼井寛裕¹, 関根康人², 関 華奈子³, 寺田 直樹⁴, 山崎 敦¹, 田中 智¹, 鎌田 有紘² 堺
正太郎⁵, 長谷川 精⁶, 野口 里奈⁷, 山田 和彦¹

着陸機による火星環境探査リサーチグループ

¹宇宙航空研究開発機構, ²東京科学大学, ³東京大学, ⁴東北大学, ⁵慶応大学, ⁶高知大学, ⁷
新潟大学.

JAXA では、宇宙基本計画を受けて提案した段階的な火星着陸探査プログラムにおいて、火星表面の任意の場所（極域・高地を含む）への着陸・輸送を、日本の独自性を生かしたコンパクトな規模で実現することを目指している。これにより、惑星科学会を含む日本の科学コミュニティが定義する第一級の科学的成果の創出を担保するとともに、アルテミス計画が掲げる Moon to Mars 戦略で必須となる要素技術の獲得を図る。また、探査活動の「人類の活動領域拡大」の政策的な目的も見据え、科学的成果や技術を獲得するだけでなく、初期から民間企業・大学との連携を拡大するプログラムとして検討を進めている。本発表では、科学的成果の実現に向けて鍵となる理学検討の最新の状況について報告する。

JAXA では、2040 年頃に実施するローバによる火星着陸探査をゴールに見据え、2020 年代後半の MMX、そして 2030 年代には 3 つの「Step」 からの段階的な火星着陸探査プログラムの実施を検討している。それを踏まえ、火星着陸探査プログラムでは、科学の視点からは水の起源・輸送・供給の解明（MMX）、大気や内部の活動やダイナミクスの解明（Step 1）、水の貯蔵や散逸および物質循環の解明（Step 2）、そして、最終的には火星生命の存否の検証および存在すればその検出（Step 3）を目指す。また、我々は、理学検討のみならず、工学との接点を重視し、火星着陸探査プログラムを月探査やその他の惑星探査ミッションと紐づけ、国際宇宙探査の視点で JAXA 全体の惑星探査ロードマップに組み込まれるよう検討している。例えば、月の水資源探査（SLIM・月極域探査など）で獲得される傾斜地へのアクセス技術・走破技術や掘削・サンプリング技術のみならず、地球周回および月探査でも検討される深宇宙軌道間輸送機（深宇宙 OTV）技術や、通信・測位コンステレーションの発展的利活用を見込んでいる。

このように、科学の枠組みを超え大きな転換期を迎えている火星探査において、我々理学コミュニティは、プログラムの策定当初より、理・エアカデミアの連携のみならず、科学探査と政策探査の相乗効果を狙った活動を進めてきた。果たして、従来、トップダウン型で進められてきた国際探査においても、コミュニティの意向を取り込んだ稀有なミッションであり、火星着陸探査プログラムは、世界的にも新時代の国際科学探査としての試金石と言える。

環状ルートレスコーンクラスターのアナログ実験

Analog experiment for ringed rootless cone clusters

○野口里奈(新潟大学 自然科学系)

高温の溶岩が含水層や氷層を被覆すると、加熱による水の気化・膨張によって爆発が生じることがある。条件によってはこの爆発が連続的に発生し、飛散した岩塊が堆積することで小型の丘状地形(ルートレスコーン)が形成される。ルートレスコーンは火星表層に広く分布しており、火山活動や水の存在、さらにはかつての熱水環境の存在を示唆する地形として注目されている(e.g., Noguchi and Kurita, 2015; Hadland et al., 2024)。

ルートレスコーンは、山体のサイズや形状だけでなく、空間分布にも多様性が見られる。地球における観察から、溶岩の流動様式に応じて、コーンが線状または面状に分布することが知られている(e.g., Hamilton et al., 2009)。さらに、リモートセンシングデータ解析に加え、数値モデルやアナログ実験を通じて、コーンの空間分布は局所的な水の存在状況、さらには溶岩内での火道の奪い合いによってクラスター化・自己組織化されることが示されている(Hamilton et al., 2010; Noguchi et al., 2018)。

火星では、環状に分布するルートレスコーンクラスターが確認されている。これらは、溶岩が衝突クレーターを埋積した際、そのリム上に選択的に形成されたと考えられている(例: Keszthelyi et al., 2010)。環状のコーンクラスターを詳細に観察することで、クレーターサイズや溶岩の厚さとコーン形成との関係性が見いだされ、地球上でも未だ十分に解明されていない形成条件に対する新たな制約が得られる可能性がある。

本研究では、加熱した水あめを溶岩、重曹とケーキシロップの混合物を含水層に見立て、溶岩被覆前の地形の違いが反応に与える影響をアナログ実験により検討した。本発表では、環状ルートレスコーンクラスターの形成過程に関するアナログ実験の進捗と初期的な成果について報告する。

Estimating Martian ice deposits using Crater fill types as proxies for ice accumulation and sublimation

○Hiral Bijoy, Trishit Ruj, Jun Kameda, Takaki Sako

Institute for Planetary Materials, Okayama University, Tottori 682-0193, Japan

Impact craters in the mid-latitudes of Mars are filled with dust, debris, and ice deposits, collectively referred to as crater fills. A common subtype, known as Concentric Crater Fill (CCF), consists of concentrically lineated, ice-related deposits preserved on relatively flat crater floors. These features are crucial indicators of past glacial processes and ice stability. Previous studies, such as Levy et al. (2009, 2010), classified these deposits broadly into ‘classic’ and ‘low definition’ types based on morphological analysis. However, this binary classification does not fully represent the observed morphological variety nor adequately constrain the amount and spatial distribution of preserved ice. To address this, we mapped and classified over 3,000 craters (≥ 2 km in diameter) between $25^\circ - 65^\circ\text{N}$ using high-resolution images from the High-Resolution Imaging Experiment (HiRISE; McEwen et al., 2007), Context Camera (CTX; Malin et al., 2007), and elevation data from the Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA; Smith et al., 2001).

Our classification identifies seven distinct crater fill types reflecting varying degrees of preservation and ice content. Type 1 is high-definition fills with ring-mold craters (HDFR), formed by impacts into ice-rich material; Type 2 is high-definition fills (HDF) with smooth, lineated textures with well-preserved flow features, but lacking ring-mold craters; Type 3 is moderate-definition fills (MDF) with partially filling the crater with concentric features; Type 4 is low-definition fills (LDF) that are confined to southern crater walls; Type 5 is marked by irregular pits, brain terrain, and chaotic terrain indicative of ice loss from the craters; Type 6 is ejecta-preserved fills (EPF), which show shallow infill and intact ejecta blankets; and Type 7 is featuring post-glacial modification such as polygonal cracking and gully formation, consistent with degradation following the retreat of buried ice.

The spatial distribution of crater fill types shows clear latitudinal and longitudinal variations, reflecting past obliquity-driven climate variations and local geological factors, such as topography, thermal inertia, and crater age, combinedly control the migration, deposition, and preservation of water ice over time. Ice-rich, well-preserved fills, particularly HDFR and HDF, are concentrated between 30° and 45°N , especially in the Deuteronilus and Protonilus Mensae region ($0^\circ - 30^\circ\text{E}$), where the complex, dissected topography and climatic conditions create favorable environments for the accumulation and long-term preservation of buried ice. These trends align with climate models (Madeleine et al., 2009; Forget et al., 2006), suggesting that during high obliquity, mid-latitudes acted as cold traps for migrating polar water ice. Our findings enhance understanding of Mars’ cryospheric history and point to mid-latitude crater fills, particularly in Deuteronilus and Protonilus Mensae, as promising targets for future exploration missions such as Mars Ice Mapper, aimed at locating accessible subsurface ice for in situ human exploration.

火星周辺ダスト環境の再評価：新たな観測結果と MMX/CMDM への期待

Reevaluating the Circum-Martian Dust Environment: New Observational Clues and Expectations for MMX-CMDM

小林正規¹, 佐々木晶², 千秋博紀¹, 和田浩二¹

¹千葉工業大学, ²大阪大学

Masanori Kobayashi¹, Sho Sasaki², Hiroki Senshu¹, Koji Wada¹

¹Chiba Institute of Technology, ²Osaka University

これまで火星周辺のダスト環境は、リングの存在が明らかな木星や土星などのダスト環境に比べて注目度が低く、理論的なダストリングの存在仮説はあるものの、実証的な観測は限られていた。黄道面付近の惑星間ダスト観測の例もほとんどない。しかし近年、NASA の探査機 Juno による太陽電池パネルに衝突したダストのイジェクタをスタートラッカーのカメラで撮像するという独創的なダスト観測データによると、火星軌道付近での異常なダスト衝突頻度の増加が報告された。¹⁾ ただし、その観測結果を評価する研究²⁾では、一般的な惑星間ダストモデルと火星起源のダストを仮定したヒル球境界放出モデルでは Juno の観測結果を説明できていない。一方で MAVEN に搭載された LPW による最新の観測では、火星のダストストームに同期して、火星低軌道におけるダストフラックスが増加する兆候がアンテナデータから示唆されている。MAVEN LPW の観測は、火星の大気や衛星から由来するダストが火星周辺空間に広がっている可能性を示唆するものであり、火星圏ダスト環境の見直しを迫るものである。³⁾

現在、JAXA の MMX 探査機に搭載される予定の Circum-Martian Dust Monitor (CMDM) は、圧電センサによって 10 μm 以上の比較的大粒なダストの運動量を直接測定することを目的としており、火星周辺に存在するダストリングや、衛星由来・火星起源の粒子分布の解明に向けて、初の直接観測を担う。

本発表では、火星周辺ダストに関する理論・観測の先行研究をレビューするとともに、CMDM が果たすべき科学的役割について概観する。

1) Jørgensen, J. L., et al. (2021), JGR Planets, 126 (3), e2020JE006509.

2) Petr Pokorný, et al., (2022) *PSJ*, 3 14.

3) Shengyi Ye et al., Dusty Visions 2025, Princeton University, , NJ, June 16 to 18, 2025.

火星大気由来の酸素イオン照射がフォボス表面物質に与える影響

○田畑陽久¹, 金丸礼¹, 臼井寛裕^{1,2}

¹宇宙科学研究所/JAXA, ²東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻

火星の衛星フォボスは、始原始的な D 型小惑星に似た反射スペクトルを示す一方、その場形成を示唆する離心率の低い軌道を取ることから、その起源および形成過程を知ることは火星形成過程を解明するための鍵となると考えられている。先行研究により、フォボスの様な大気を持たない天体の表面物質は、微小天体衝突や太陽風に起因するプロトンおよびヘリウムイオン照射による、宇宙風化過程にさらされていることが分かっている。近年、フォボスはプロトンやヘリウムに加えて火星大気由来の低い運動エネルギー(~ 10 eV)の酸素イオンが照射されていることが分かった(Nénon et al., 2021)。これは、典型的な太陽風($\sim \text{keV}$)と比べて低く、スパッタリングを引き起こすのに必要なエネルギー(~ 100 eV)をも下回っているため、フォボスでは従来調べられてきたものとは異なるプロセスによる宇宙風化が進行していると考えられる。そこで、我々は低エネルギー(~ 0.01 eV)の酸素イオンを照射可能な実験装置を開発し、酸素イオンが可視／近赤外／中赤外およびラマンスペクトルに与える影響を調べた。その結果、鉄酸化物の生成や炭素質粒子の減少など、太陽風に起因する宇宙風化では見られない現象が生じていることが明らかになった(Tabata et al., under review)。本研究では、電子顕微鏡を用いた組織観察および元素分析により、酸素イオン照射による素過程を明らかにし、MMX が持ち帰る予定のフォボス試料の表面風化状態を推定することを目的としている。

分析は、低エネルギー酸素イオンを 30 および 60 時間照射した、カンラン石、玄武岩、フォボスシミュラントの 3 試料に対して実施した。EPMA 分析の結果、カンラン石の $\text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 比の低下が確認され、ラマン分析と一致する化学組成の変化が見られた。また、組織観察では、照射後の試料表面には照射前に見られた滑らかな表面が失われ、ナノ粒子に覆われた様子が観察された。視野によってはミクロンサイズの角ばった粒子の生成や、凹凸構造の出現が確認された。これらの結果は、低エネルギー酸素イオン照射によって鉱物表面に化学的変質が生じることを示し、太陽風由来のイオン照射とは異なる風化メカニズムの存在を示唆している。この様な影響が実際のフォボス環境において見られるかは、太陽風イオンによるスパッタリングやフォボス上の表面更新過程のタイムスケールに依存するため、フォボスの起源および進化を知るためにはこれらのプロセスと合わせた検討が必要となる。

月の多重リング盆地周辺における応力場分布

Stress field distribution around the lunar multi-ring basins

石山 謙¹

1) 東京国際工科専門職大学

太陽系内では惑星間での起動共鳴によって惑星の軌道がずれることで、約 38 億年前に太陽系縁外天体が大きく乱され、惑星への小惑星・彗星の衝突イベントが発生したと考えられている[Gomes et al., Nature, 2005]。月では、その時に形成された多重リング構造をもつ盆地が形成しており、その中で火山活動が発生することで、溶岩（玄武岩）が盆地内を満たしている。この溶岩の荷重は、月の弾性リソスフェア（地殻と上部マントルの部分）を曲げることで、盆地周辺に引張応力場を形成する[e.g., Solomon and Head, JGR, 1979]。一般的に、これを「マスコンテクトニス」と呼ぶ。本研究では、溶岩で盆地内が満たされていない多重リング盆地周辺部の応力場分布を推定することを目的とする。

本研究では、単純なマスコンテクトニクスモデル[Solomon and Head, JGR, 1979]を用いて、多重リング構造をもつ盆地（オリエンターレ盆地、モスクワ盆地、ネクタリス盆地、フンボルト盆地、スミス盆地）の応力場分布を計算する。我々は、クローンの岩石破壊条件に基づくと、盆地周辺部では横ずれ断層が発達しやすいことを示す。月の表側と裏側の境界に位置しているオリエンターレ盆地のリング部分では、横ずれ断層が形成しやすい領域が形成することが予想された。つまり、その断層を通して溶岩が噴火し、Lacus Autumn（秋の湖）と Lacus Veris（春の湖）が形成したと考えられる。また、これらの湖はオリエンターレ盆地の東側に存在しているが、西側には湖が存在していない。これは、オリエンターレ盆地の西側（月の裏側）よりも東側（月の表側）の方が、弾性リソスフェア厚が薄いことを示唆している。つまり、オリエンターレ盆地の東側は PKT 領域に近いと、月の内部熱で、リソスフェアが薄くなっていると考えられ、これは月の熱進化計算モデル[e.g., Laneuville et al., JGR, 2013]とも整合している。このような盆地周辺部の地形学的知見は、月の火山活動の解明に役立つと期待される。

Chandrayaan-3 で取得された月震データの解析： ノイズレベルの評価と自然月震候補シグナルの解釈

○小野寺 圭祐¹, 川村 太一²

¹岡山大学惑星物質研究所,²パリシテ大学パリ地球物理研究所

2023 年 8 月 23 日にインドの月探査機 Chandrayaan-3 は月南半球の高緯度域に着陸し(図 1a)、約 2 週間の科学観測を実施した。観測機器としては、熱流量計(ChaSTE)・アルファ粒子 X 線分光計(APXS)などと共に加速度計(ILSA)も含まれており、アポロ以降初めての月震観測が実施された。ILSA は加速度計の傾斜を計測するための Coarse acceleration と地動を計測するための Fine acceleration の二つのセンサー群(それぞれ三成分搭載)で構成されていた。

我々はアポロ以降初めての自然月震イベントの検出を目標に、昨夏より ISRO Science Data Archive にて公開されている ILSA の Fine acceleration データの解析を行った。解析では、イベントの検出可能性を議論するために確率パワースペクトル密度を計算し、ILSA の観測期間における典型的な背景ノイズレベルを評価した。その背景ノイズモデルを基に 1969~1977 年のアポロ月震観測で検出された月震イベントとの振幅スペクトル密度の比較を行うことで、ILSA の観測期間にアポロと同様の月震が発生した際のイベントの検出可能性を評価した(図 1b)。さらに、ILSA チームより提示された自然月震候補イベントについて周波数解析を行い、その発生起源について議論を行った。

発表では、我々の算出した ILSA の背景ノイズモデルを紹介するとともにアポロで得られた知見に基づく ILSA の自然月震候補イベントの我々の解釈について報告する。

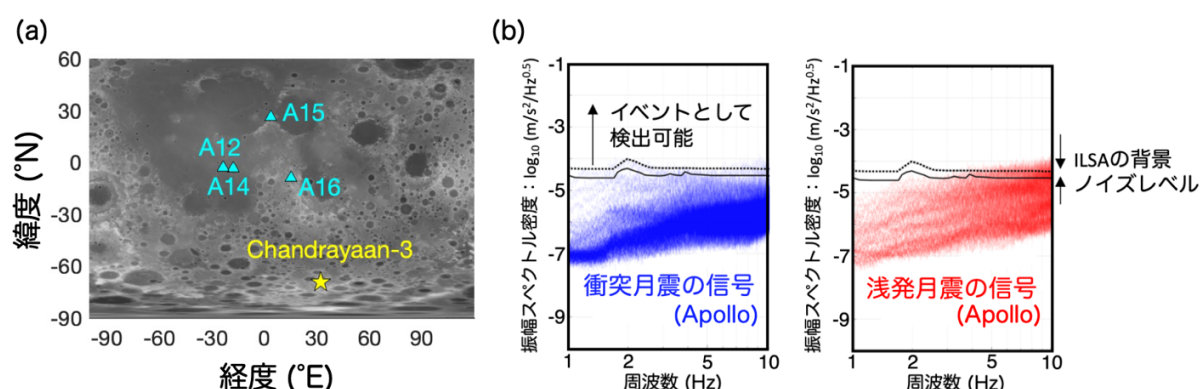


図 1. (a)Chandrayaan-3 着陸点とアポロ月震ネットワークの位置。(b)1969~1977 年のアポロ月震観測で検出された衝突月震および浅発月震の振幅スペクトル信号と ILSA の背景ノイズレベル範囲の比較。

月の中央丘における岩塊形状のちがい：

斜長岩・マフィック鉱物支配領域での比較

○池田あやめ¹、山本聡¹

¹産総研 地質調査総合センター

近年の月周回衛星による高解像度画像によって、月全球で岩塊の分布や岩塊が重力で斜面を移動した物質移動地形が発見されている^[1,2]。斜面の岩塊はクレータ形成時の地下の掘削だけでなく、クレータ形成後も表面に供給されていることがわかってきた^[3]。岩塊は天体衝突や熱疲労によって、より大きい母岩から破碎されて形成され则认为られるが、どちらの影響が大きいかは明らかになっていない。我々は、楕円近似法や多角形近似法を使った岩塊の形状同定、円磨度・球形度の推定結果から、母岩組成のちがいが岩塊形状に影響を与える可能性を指摘してきた^[4]。一方で、解析対象域の年代の違いによる影響についての考察が不十分である。そこで今回の解析では、形成年代が新しいクレーターに対象を絞り、斜長石、かんらん石、輝石などの月主要鉱物の端成分からなるクレータ中央丘の露頭（Jackson crater、Tycho crater、Copernicus crater、Tsiolkovskiy crater、Bullialdus crater）で岩塊形状を多角形近似で取得し、円磨度・球形度を推定し比較した。各露頭内で、かぐやのハイペースペクトルデータを用いて、母岩が主要構成鉱物で構成されていることがより確からしい領域を選定し解析を行った。

図1に Tycho crater と Jackson crater の斜面の様子を示す。これをみると、Jackson crater では直線状の岩塊の破碎が発生し、Tycho crater では表面に多角形のひび割れが生じて表面近くから岩塊が生成されて斜面に供給されている様子が見られる。岩塊の円磨度は、Copernicus crater で小さく、垂角状のものが多く見られた。一方で、Bullialdus crater、Tycho crater では比較的円磨度が大きく、垂円状のものが多く見られた。さらに、Jackson crater は中間的な値を取り、それぞれの組成によって円磨度に異なる傾向が見られることがわかった。今回の結果からは、Tycho crater、Jackson crater、Copernicus crater の形成年代が新しいクレータの中央丘においても、組成による岩塊形状の違いがみられることがわかり、母岩組成によって生成される岩塊の形状が異なる可能性を示唆している。

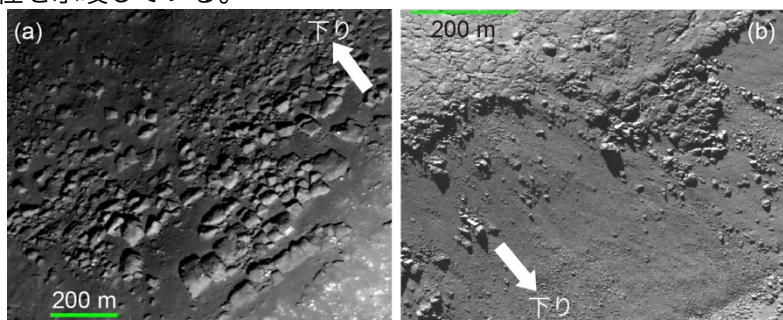


図1. (a) Jackson crater および(b) Tycho crater の中央丘の様子（画像：LROC NAC）。

[1] Xiao et al., 2013. [2] Bickel et al., 2022. [3] Ikeda et al., 2025. [4] Ikeda et al., JpGU2025 abst.

月の火砕丘のアナログサイトにおける 3 次元ハイパースペクトルデータ解析

○豊川広晴¹、Matteo Massironi²、Riccardo Pozzobon²、Bruno Casarotto²、Giacomo Melchiori²、春山純一³、岩田隆浩³¹東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻、²パドヴァ大学、³JAXA 宇宙科学研究所

天体表面の鉱物組成は、天体内部における構造や活動史を理解する上で重要な鍵となる。可視近赤外域の大量の波長バンドで撮影するハイパースペクトルカメラは、各画素に分光スペクトルを格納できるため、物質の組成分布の調査に有用である。また近年、複数の角度から撮影した画像をもとに対象物の 3 次元モデルを作成するフォトグラメトリー技術が発展してきた。これらの技術は、露頭の組成分布と構造の理解に重要であるため、地球・月・火星といった固体天体における今後の地質学のキー技術となることが期待される。しかし、現状これらの技術を用いた地質調査は例が少なく、データの取得・解析手法も確立しているとは言えない。本研究では、これらの技術を用いた地質調査のワークフローを確立することで、今後の固体天体における地質調査の進展に貢献する。また、地球に存在する、他天体の露頭と類似する地形（アナログサイト）で地質調査を実施することで、手法の他天体への汎用性を評価する。

本研究では、月の火砕丘と類似した組成・構造をもつイタリアの Etna 山の Cisternazza 火口で野外調査を実施した。そして可視近赤外分光画像データの取得と露頭の 3 次元モデル作成を行なった。可視近赤外分光画像データの取得には、それぞれ 400–1000 nm と 900–2500 nm の波長範囲を持つ 2 種類のハイパースペクトルカメラを使用した。フォトグラメトリーに基づく露頭の 3 次元モデルの作成には、高解像可視カメラを搭載したドローンを使用し、様々な角度から撮影した露頭の画像を使用した。さらに、取得した近赤外分光画像データを露頭の 3 次元モデルに投影することで、3 次元のハイパースペクトルデータを作成した。このように 3 次元的にハイパースペクトルデータを取り扱うことで、露頭の凹凸や大気を与えるスペクトルへの影響を補正した。そして作成した 3 次元ハイパースペクトルデータをもとに、露頭の組成分布を調査した。

本発表では、このようなハイパースペクトルカメラを用いた野外調査のワークフローや、その有効性について紹介する。また、他天体における探査に対しての本研究手法の適用可能性についても議論する。

地上望遠鏡と LRO データベースを用いた 月面衝突閃光と形成クレーターに関する研究

Lunar Impact Flash Observations and related Craters on the Lunar Surface by LRO

○青木翼¹, 阿部新助¹, 有馬宣明¹, 藤井大地²

1. 日本大学大学院理工学研究科, 2. 平塚市博物館

月面衝突閃光(Lunar Impact Flash : LIF)とは, cm サイズの流星体が秒速数 10 km で月面に衝突した際に, その運動エネルギーの一部が可視光～近赤外線としてごく短時間に観測される発光現象である. 一方で, LIF の発光メカニズムや過程は未解明の部分が多いが, これらを解明するにあたって重要なパラメータの 1 つに, 流星体の運動エネルギーと発光エネルギーの比で表される発光効率 η がある. 室内衝突実験より発光効率の式はモデル化されているが, 観測による発光効率を求めた先行研究は多くない. 本研究では, 地上望遠鏡と NASA が運用する月周回衛星 LRO(Lunar Reconnaissance Orbiter)の月面画像データを用いて解析を行い, 発光効率等の月面衝突閃光の物理特性およびクレーターについての調査した.

2018 年 12 月 15 日に日本大学理工学部船橋キャンパスで観測された 11 件の LIF イベントについて座標特定を行った(Fig 1). しかし, クレータを発見することはできなかった. 2023 年 2 月 23 日に平塚市内で撮影された LIF で同様の解析を行った結果, 長軸約 50m, 短軸約 30m のクレータを発見した. 撮影されたフレームの最初の 2 フレームは飽和してしまっていたので, 可視等級は最低でも 4.04 等級であると見積もられた. また, この際に使用した衝突体の速度と密度は, 流星群の活動期を考慮した結果, 散在流星の可能性が最も高かった. 散在流星という仮定で解析を行った. この LIF の測光結果とクレータを形成した流星体の運動エネルギーより求められる発光効率 η は,

$5.7 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-3}$ となり, 先行研究の結果と一致していた. また, 流星体を球と仮定した場合, 質量は 1120~2483 [kg], 直径は 1.06~1.38 [m]と予測され, 稀に見る非常に大きな流星体であった可能性を示唆している.

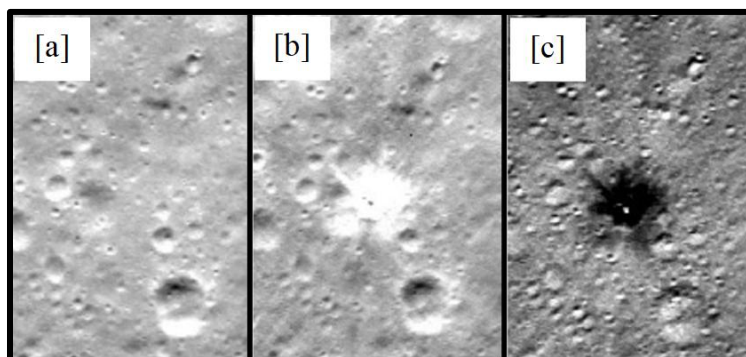


Fig 1. [a]LIF 発生前の画像. [b]LIF 発生後の画像.
[c]発生前後の画像の比を取った画像

〈参考文献〉

- Sheward et al., "PyNAPLE: Lunar Surface Impact Crater Detection" Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2022,2322–2339.

室内実験にもとづく月面誘電率の 鉄チタン濃度依存性の再検証

○戸井田愛理¹, 宮本英昭^{1,2}, 小林真輝人²

¹ 東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻,

² 東京大学大学院工学系研究科 システム創成学専攻

合成開口レーダー（SAR）やレーダーサウンダー、地中レーダーなどの電磁波探査は、非接触で迅速に広範な領域の地下情報を取得であり、月表層進化過程の理解や水氷の存在把握などに有用である。電磁波探査で得られる情報は、物質の誘電率に強く依存する。月レゴリスの誘電率は、かさ密度や温度、組成、そして水氷の存在量と密接に関連することが知られており[1, 2, 3, 4]、これらの要素が誘電率に与える影響を正確に理解することが、観測データを解釈する上で極めて重要となる。組成に関しては、アポロサンプルの誘電率計測結果などからFeO+TiO₂の含有量と誘電率の間に正の相関があると指摘されている[1, 2]。しかし、この相関は密度や温度といった他の要因を分離せずに行われた計測結果の集積に基づいているため、FeO+TiO₂量が誘電率に与える影響の正確な定量化には改善の余地がある。

そこで本研究では、実験室において温度などの要因を厳密に制御した環境下で、FeO+TiO₂濃度を系統的に変化させた月面模擬物質の誘電率を計測した。計測した誘電率値は、供試体ごとのかさ密度差の影響を受けているため、補正式を用いて全ての計測値を同一のかさ密度に規格化した[5]。その結果、かさ密度を規格化する前はFeO+TiO₂量に依存するように見えた誘電率値は、かさ密度を規格化後のデータでは、これまで指摘されてきたFeO+TiO₂濃度と誘電率の間の正の相関は見られず、FeO+TiO₂濃度によらず誘電率はほぼ一定の値を示すことが明らかになった。この事実は、従来の観測データの解析に用いられてきた従来のモデルをそのまま適用すると、誘電率に基づく鉄やチタンの濃集量の過大評価に繋がる可能性を示唆している。本発表では、これらの実験結果について報告する。

[1] Shkuratov, Y. G., and Bondarenko, N. V. (2001). *Icarus*, 149(2), 329-338.

[2] Carrier, W. D., III, et al. (1991). In *Lunar sourcebook* (pp. 475-594). Cambridge Univ. Press.

[3] Kobayashi, M., et al. (2023). *Earth, Planets and Space*, 75(1), 8.

[4] Topp, G.C., et al. (1980). *Water Resources Research*, 16(3), 574-582.

[5] Boivin, A., et al. (2018). *Journal of Geophysical Research*, 123(12), 3088-310

嫦娥 5 号 月レゴリス試料の鉱物組成

○藤田盛之介¹, 寺田健太郎¹, 福田航平¹, 上原佑斗¹, 植原邦佳¹, 安部由朗¹,
藤井英俊¹, 高畑直人², 佐野有司³

¹大阪大学, ²東京大学, ³高知大学

中国・嫦娥 5 号は 2020 年に月の Oceanus Procellarum(嵐の大洋)から 1.7kg のレゴリスサンプルを地球に持ち帰ることに成功した。持ち帰られたサンプルからは～2.0Ga という月玄武岩の中で最も若い放射年代が得られており、アポロ・ルナ試料から考えられていたよりも 10 億年ほど長いマグマ活動の持続を明らかにした[1,2]。しかしながら、月表面では隕石衝突などにより遠方から飛来した岩石片や鉱物粒子がローカルなレゴリスと混合・再結合していることが知られている。そのため正確な年代の測定にはマグマソースの起源同定が不可欠である。一般に、輝石中の Fe/Mg 比(Fe#)および Ti/Cr 比(Ti#)のトレンドはソースマグマの性質や起源の異同を評価する上で有用な指標であり、マグマソースの識別に用いられている[3, 4]。

本研究では大阪大学に配分された嫦娥 5 号サンプル "CE5C0800YJYX014GP"について走査電子顕微鏡-エネルギー分散型 X 線分光装置(SEM-EDS)と電子線マイクロアナライザ(EPMA)を用いて、U-Pb 年代測定の対象となる Ca リン酸塩鉱物、Zr 含有鉱物の元素組成と、それらと共存している輝石の組成について調べた。本講演ではこれらの結果について報告する。

参考文献 [1] Che et al. Science (2021) [2] Li et al. Nature (2021) [3] Nielsen & Drake. Mare Crisium: The View from Luna 24 (1978) [4] Arai et al. M&PS (1996)

SELENE/TC データを用いた月極域 10m モザイク マップの作成検討

Preliminary results of 10-m resolution mosaic maps of the lunar polar
regions using SELENE/Terrain Camera Data

○ 木下真一¹, 佐藤広幸¹, 宮崎理紗¹, 山本光生¹, 南部慎吾¹

¹ 宇宙航空研究開発機構

月周回衛星 SELENE（かぐや）に搭載された Terrain Camera（TC）は、月表面の地形を約 10m の空間分解能で観測しており、そのデータは月の地形や地質構造の理解、さらに将来の探査計画立案において重要な情報源となっている。しかしながら、極域を広範囲にカバーする高精度な TC モザイクマップはこれまでに作成されていなかった。

「月極域の高精度な標高数値モデル（DEM）の作成検討」（2024 年度秋季講演会、P-007）では、Lunar Reconnaissance Orbiter（LRO）搭載の Lunar Orbiter Laser Altimeter（LOLA）データを参照し、TC データとの間の位置ズレを評価・補正した。この処理により、TC L2A 画像データの各ピクセルに対応する PS（Polar Stereographic）座標上での位置情報が得られている。

本検討では、この補正データを活用し、約 15,000 枚の TC L2B0 画像データを用いて、北極および南極における 10 m 解像度のモザイクマップの作成に取り組んだ。具体的には、PS 座標系において X, Y とともに $-950,000\text{m} \sim +950,000\text{m}$ の範囲を対象とし、 $50\text{km} \times 50\text{km}$ のタイル単位で処理を実施した。位置補正済みの各ピクセルの座標に基づき、L2B0 画像を配置することで、高精度なモザイクを作成している。重複領域においては、輝度値が最大となる画像を採用した。

本発表では、これまでに実施したモザイク処理の手順と進捗を報告し、現在作成中のモザイクマップの事例を示す。あわせて、今後の改良方針や科学的・探査的応用について議論する。

SLIM マルチバンド分光カメラ PDS4 アーカイブの設計と実装

Design and Implementation of SLIM Multiband Camera PDS4 Archive

○村上真也¹, 山田善彦¹, 横田康弘², 仲内悠佑³, 西野真木¹, 佐藤広幸¹, 大竹真紀子⁴,
長岡央³, 本田親寿⁵, 石原吉明¹, 宮崎理紗¹, 梶谷伊織¹, 西谷隆介¹, 佐伯和人³
¹宇宙航空研究開発機構, ²東京科学大学, ³立命館大学, ⁴岡山大学, ⁵会津大学

JAXA が 2023 年に打ち上げた小型月着陸実証機 SLIM は 2024 年 1 月 20 日に SHIOLI クレーター付近に着陸し、マルチバンド分光カメラ(MBC)による観測を実施した。この観測によって得られた画像データを国際アーカイブ標準 PDS4 に準拠するアーカイブとして公開する予定である。

本発表では、この SLIM MBC アーカイブの設計と実装について紹介する。特に SLIM MBC の画像データを格納する SLIM MBC バンドルと附帯情報を格納する SPICE カーネルアーカイブバンドルの構成・内容・作成処理について述べ、現在の準備状況について紹介する。

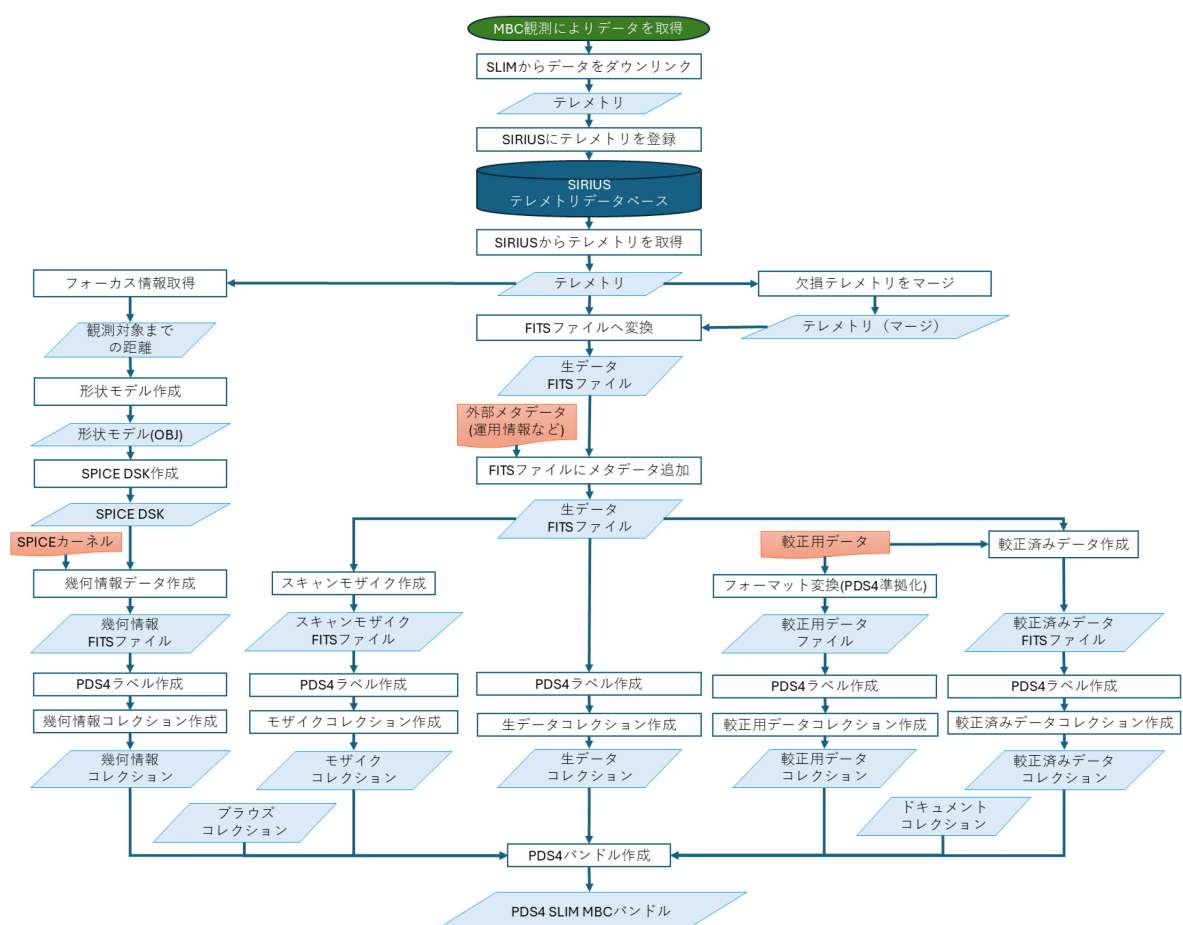


図: PDS4 準拠 SLIM MBC バンドル作成のデータフロー

TSUKIMI 観測シミュレータの開発

○押上祥子¹, 逸見良道^{1,2}, 山田崇貴¹, 鷺和俊¹, 笠井康子^{1,2}

¹情報通信研究機構, ²東京科学大学

TSUKIMI (lunar Terahertz Surveyor for Kilometer-scale Mapping) プロジェクトは、テラヘルツ波受動型リモートセンシングによる月表層の資源探査ミッションである。480–500 GHz と 270–290 GHz の二つの周波数帯の直交偏波を検出するヘテロダイン受信機により月表面及び浅部由来の放射強度を観測することで輝度温度を得る（笠井 他, 2023）。TSUKIMI のミッション要求を満たす観測計画立案や観測運用開始後のデータ処理・解析を迅速かつ効率的に行うためには、観測運用期間中の任意時刻の観測領域や観測条件、観測データを予測可能とするシミュレーションが欠かせない。我々はそのためのシミュレーションツールとして MoonScope (Moon Surface and Celestial Observation Planning Environment) を開発中である（逸見 他, 2023）。これまでに、探査機・観測機器・各天体の軌道暦・座標系・姿勢情報（SPICE kernels）を入力として、指定期間のセンサ footprint 分布及び各センサ footprint 領域内の観測条件（太陽入射角, local time, 領域面積, 衛星位置等）を出力する機能を実装した。また、既存の月探査データに基づく地形・組成・物性等の地表面環境に関するデータベースを構築し、各センサ footprint 領域内の情報を抽出する機能を実装した。尚、MoonScope の開発言語には Python3.x を選択した。API 及びライブラリとして NASA Jet Propulsion Laboratory の NASA's Navigation and Ancillary Information Facility (NAIF) が開発した SPICE Toolkit, 探査機・観測機器・各天体の軌道暦・座標系・姿勢情報等の入力データとしては NAIF SPICE カーネルを使用した。更に、出力データ形式には GeoTIFF（ラスタデータ）, Esri Shapefile（ベクタデータ）, CSV（テキストデータ）を採用した。将来的には放射伝達のフォワードモデルを組み込み、センサ特性及び月の地形・組成・物性等の情報を入力として、各センサ footprint 領域に対して予測される輝度温度の算出を可能とすることで、観測感度検討や逆問題解析に資する機能を実装予定である。本講演では、現在想定されている TSUKIMI の観測軌道・姿勢・視野角・運用シナリオ等の条件を仮定して実行した MoonScope によるシミュレーション結果の詳細についても紹介する。

謝辞

本研究開発は、総務省の「ICT 重点技術の研究開発プロジェクト」（JPMI00316）のうち、「テラヘルツ波を用いた月面の広域な水エネルギー資源探査」（JPJ010777）によって実施した成果を含みます。

SLIM 搭載 MBC における可動ミラー経由の 視線方向計算法

Calculation of line-of-sight via movable mirror of SLIM MultiBand Camera

○横田康弘^{1,2}、佐伯和人³、大竹真紀子⁴、仲内悠祐³、西野真木²、長岡央³、石原吉明²、
本田親寿⁵、佐藤広幸²、村上真也²、宮崎理紗²、梶谷伊織²、山田善彦²、SLIM project team²

¹東京科学大、²JAXA、³立命館大、⁴岡山大、⁵会津大

小型月着陸実証機 SLIM 搭載のマルチバンドカメラ MBC は、2 軸可動のミラーによりカメラ視野よりも広い月面領域を観測できる [1]。ISAS/JAXA の月惑星探査データ解析グループ (JLPEDA) では、MBC データのアーカイブ化支援の一環として画像解析用の視線方向計算法を開発した。本講演ではこの手法と応用を紹介する。

視線ベクトルの 3 次元計算に利用されるピンホールカメラモデルにおいては (a)「光学系主点 (Principal point) の位置」と (b)「光学系の姿勢を表す 3 つ (XYZ) のベクトル」が必要とされる。MBC の場合にはさらにミラー反射の取り扱いが加わるが、我々は「仮想的なカメラの (a)・(b) が鏡に映った世界の側にある」とみなす工夫により、シンプルな視線計算を実現した。ミラーを駆動することは、仮想カメラの (a)・(b) を動かすことに相当する。

2024 年 1 月、SLIM 着陸後 [2] の MBC 実運用においてミラー駆動により最大 333 枚の低解像度画像を取得する「スキャン観測」が 3 回実施された [3]。画像取得直後に我々は、本研究の視線計算法を応用して広視野のモザイクを作成した (図 1)。この画像はクイックな目視用として望遠マルチバンド観測に向けた MBC チーム内議論に用いられ、対象ボルダの選択や優先度決定に重要な貢献ができた。

本講演では現在取り組む以下の解析も紹介予定である：(1)ミラー駆動ギアのバックラッシュに起因するモザイク位置ずれの微修正、(2)モザイク領域内の観測幾何学 (太陽位相角等) や長さスケールの計算。

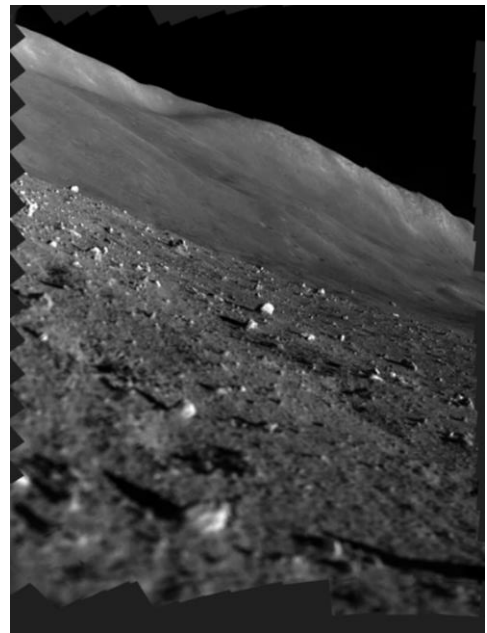


図 1. スキャン画像のモザイク (スキャン
3 回目 750nm バンド、主要部分)

文献: [1] Saiki et al.(2024) 55th LPSC Abstract 1801. [2] Sakai et al. (2025) Acta Astronautica, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.05.047> [3] 仲内ほか (2024) 日本惑星科学会 秋季講演会.

高速度衝突実験におけるエジェクタ形状分布の二次標的を用いた解析

○松原光佑¹, 山口祐香理¹, 中村昭子¹, 長谷川直²¹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

天体衝突によって生じるエジェクタは小惑星やその表面のレゴリスの起源であると考えられており、その形状に着目した研究が行われている (e.g., Fujiwara et al., 1978). また、エジェクタ中に含まれる溶融した物質は地球上の地層に含まれるスフェリュールや一部の隕石中のコンドリュールの起源である可能性が示唆されており (Johnson and Melosh, 2014; Ganino et al., 2019), 衝突実験によって発生したエジェクタのうち、溶融したものを形状に基づいて区別する研究が行われている (Shohet et al., 2021). 本研究では、 μm スケールの微小なエジェクタのサイズや形状を二次標的を用いて解析し、衝突速度や岩石弾丸物質の種類がエジェクタの形状に及ぼす影響を調査した.

宇宙科学研究所の横型 2 段式軽ガス銃を用いて、鉄鋼ターゲットに対して球形 (直径 3 mm) の蛇紋岩およびカンラン石を 3–7 km/s で垂直衝突させた. ターゲット上流側には二次標的としてアルミ箔 (厚さ 1.5 μm) およびエアロゲル (密度 0.06 g/cm³) を設置した. 実験後のアルミ箔を SEM を用いて、エアロゲルを SEM および X 線透視装置を用いて観察した. アルミ箔の SEM 画像について、画像解析ソフトを用いて個々の穴に楕円をフィットさせた. 弾丸がアルミ板を貫通する際に弾丸のサイズと衝突速度が貫通穴のサイズに及ぼす影響を調べた研究 (Hörz, 2012) をもとに、アルミ箔に空いた穴の形状から貫通したエジェクタの直径および軸比を推定した.

エジェクタの直径を 2–10 μm , 10–20 μm , 20 μm 以上の 3 つのグループに分け、それぞれの軸比分布をヒストグラムにプロットした. 2–10 μm のグループにおいては、衝突速度が 3 km/s から 7 km/s にかけて軸比が大きいエジェクタが顕著に増加した. 溶融した物質は表面張力によって球形となるため、衝突速度の増加に伴って、弾丸物質が溶融した液滴の量が増加したと考えられる. 実際に 7 km/s の衝突において、エアロゲルの観察から液滴と考えられる数 μm 程度の球形物質が確認された.

運動エネルギーと表面エネルギーの釣り合いを考慮した液滴分裂モデル (Grady, 1981; Melosh and Vickery, 1991) に基づくと、シリケイトの 7 km/s の衝突によって生じる液滴の直径は約 6 μm であると推定される. 本実験では液滴が直径 2–10 μm のグループに集中したと考えられ、このモデルとオーダー程度で一致することが示唆された. 以上の結果は、Matsubara et al. (2025) において蛇紋岩弾丸について確認されており、本研究でカンラン石弾丸においても同じ結果が示された. ただし、エジェクタの形状分布は岩石種によって有意に異なり、発生した液滴の量の差を反映した可能性がある.

一方、10 μm より大きいエジェクタについては、衝突速度に関わらず同様の形状分布を示し、固体破片が支配的であると考えられる. また、岩石種の違いも形状分布に影響を及ぼさず、固体破片の形状に対する岩石種の依存性は弱いことが示唆された. Itokawa レゴリス (Tsuchiyama et al., 2014) および玄武岩とアルミナの衝突破片 (Nakamura and Fujiwara, 1991 の未発表データ) がランダムな角度で薄膜を貫通した場合に観察される形状分布のシミュレーション結果と比較すると、本衝突実験の固体破片はより球形に近い様子が観察された.

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

岩石からの高速度衝突エジェクタ特性 ：歪み速度依存性に関する初期成果報告 2

○山口祐香理, 中村昭子
神戸大学大学院理学研究科

天体衝突は普遍的な現象であり、それに伴う物質輸送も活発に起こっている。特に、脱出速度の大きな惑星間および惑星衛星間の物質輸送においては、天体衝突によって放出される高速度エジェクタが重要な役割を果たす。しかし、高速度エジェクタのサイズと放出速度と放出角度の関係に関するデータは不足している。そこで我々は、二次標的を用いた実験手法(Nakamura et al., submitted.)を用いて、これらの関係を調べてきた。その結果、エジェクタの放出速度と放出角度の関係および、同じエジェクタ速度での最大エジェクタサイズについて、異なる岩石間で顕著な差は見られなかった。一方で、室内衝突実験結果を天体衝突現象に外挿する際には、スケールの違いによる影響を調べる必要がある。高速度エジェクタが発生する衝突点付近での物理過程において、衝突速度(v_i)と弾丸半径(a)を用いた歪み速度 $\dot{\epsilon} \approx v_i/a$ が重要な指標となる(Melosh et al., 1992)。これは標的の亀裂成長過程に大きく影響する重要なパラメータであり(Grady & Kipp, 1980)、同じ衝突速度であっても、室内実験スケール(衝突体半径数mm)では、天体衝突スケール(衝突体半径数十km)に対して歪み速度は約7桁大きい。

本研究では、歪み速度の違いが高速度エジェクタのサイズと放出速度と放出角度の关系到及ぼす影響を調べるため、宇宙科学研究所の2段式軽ガス銃および神戸大学の火薬銃を用いて、歪み速度を2桁変化させた室内衝突実験を行った。前者では、直径3 mmと2 mmのアルミニウム球弾丸を衝突速度約7 km/sで、後者では直径15 mmのアルミニウム弾丸を約1 km/s で一次標的に対して垂直に衝突させた。また、エジェクタが通過する位置に二次標的としてポリカーボネート板を配置した。弾丸の一次標的への衝突とエジェクタの二次標的への衝突の様子は高速度カメラで 10^5 fps以上で撮影した。一次標的には、蛇紋岩(密度 2.7 g/cm^3 , 静的引張強度18 MPa)とパイロフィライト (2.6 g/cm^3 , 6.5 MPa)を用いた。

火薬銃を用いた実験においては、弾丸に埋め込んだ電磁石がコイル通過時に発生させる起電力を検出することで、コイル間の距離と通過時間差から弾丸速度を高精度に算出する機構(Kondo et al., 1977)を構築した。また、この起電力信号を高速度カメラのトリガとして利用することで、撮影タイミングを正確に制御する機構の構築に取り組んできた。電磁石のサイズやコイルの巻き数を変えながら試行を重ね、十分な信号感度と撮影タイミング精度が得られつつある。エジェクタは一次標的の弾丸衝突点から放出されたとし、エジェクタの速度を二次標的への飛行時間と飛行距離から算出した。エジェクタのサイズは、エジェクタによって二次標的に形成されたクレーター直径から π スケーリング則を用いてエジェクタを球として算出した。エジェクタの放出角度は、弾丸軌道と、エジェクタの衝突位置から求めたエジェクタ放出軌道のなす角度として算出した。

本発表では、火薬銃を用いた実験の初期成果を中心に報告する。

謝辞

本研究は、JAXA 宇宙科学研究所の超高速度衝突実験施設の共同利用実験として行い、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2148 の支援を受けたものです。

液体標的への衝突によって発生する放出物と液滴の形成 Droplet formation in ejecta curtain caused by impact into liquid targets

○門野敏彦¹、荒川創太²、牛久保孝行²、長澤真樹子³、小林浩⁴、田中秀和⁵

¹産業医科大学、²海洋研究開発機構、³久留米大学、⁴名古屋大学、⁵東北大学

荒川らは木星形成後の原始太陽系星雲の進化を考慮した新しいコンドルール形成機構を提案している（2024 惑星科学会秋季講演会；2025 JpGU）。そこでは、原始太陽系星雲において微惑星がダスト層へ高速突入することで、微惑星周囲および表面に溶融したケイ酸塩ダストを多量に生成し、この溶融ダストがダスト層へと放出され、冷却・固化することでコンドルールが形成される。

表層が融けた状態の天体で衝突が起こった場合、放出されるエジェクタカーテンは時間とともに分裂し液滴が形成される。今回われわれは、微惑星表面の溶融層へ衝突によって放出された液体が分裂して液滴が生成される過程を模擬する実験を行った（図1）。衝突条件に対する液滴のサイズ分布や速度分布を計測し、液滴形成過程を考察する。

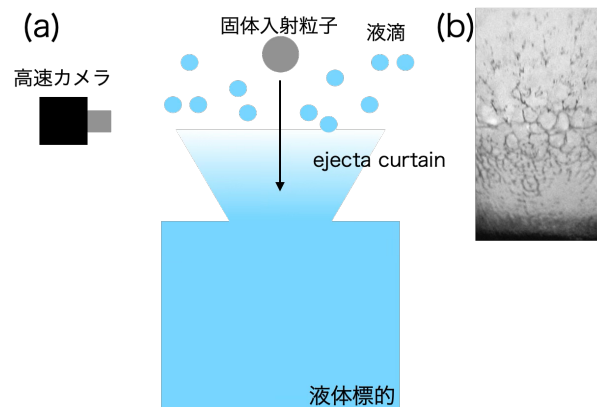


図1. (a) 実験の模式図. 液体標的に固体粒子を衝突させ液滴の生成を高速カメラで撮影した. (b) 実際の画像.

ロードセルを用いたクレーター形成過程の観測： エジェクタカーテンの運動量の見積り、疑似重力の推定

○大橋拓磨¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 横田優作¹, 柿木玲亜¹, 豊嶋遥名¹

¹神戸大学大学院理学研究科

はじめに：太陽系における天体同士の高速度衝突により、クレーター形成や天体間の運動量輸送が起こる。これらの現象の理解は固体天体表層の衝突進化やプラネタリーディフェンスの観点で重要である。衝突クレーターのサイズは、表面重力に強く依存することが知られており、その効果を調べる先行研究では銃身を備えた遠心加速器という特殊な装置が利用された。本研究では、標的表面に孔の空いた板を設置し、孔中心への衝突実験を行うことで、エジェクタの放出を孔内部に制限し、結果的にクレーターの形成を孔直径に制限する。この実験を拘束クレーター実験と命名し、エジェクタを抑制する板にかかる荷重をロードセルで計測する。観測した荷重データから、クレーター成長を孔内部に留めるために発生した垂直応力を推定する。この垂直応力が、標的内部の摩擦応力を増加させてクレーター成長を止めたと仮定し、その応力に相当する静岩圧を発生させる加速度を疑似重力と定義する。この簡便な実験では、見かけ上 1G 以上の高重力をかけたクレーター形成実験が可能であり、室内スケールを超えた大規模クレーターの形成過程を再現できる。また、エジェクタの放出を抑制した板にかかる荷重はエジェクタカーテンの持つ運動量と考えられるため、ラブルパイル天体などの弱強度天体上で起こる運動量輸送効率に対する新たな計測方法となる。

実験手法：標的試料には粒径 100 μm の石英砂を用い、重力支配域でのクレーター形成過程を再現する。本研究は神戸大学の縦型一段式軽ガス銃を用いて大気圧下で行い、荷重受けとして機能する孔の空いた板治具を標的上に設置したのち、孔の中心に弾丸を衝突させる。弾丸にはナイロン弾丸(直径 10mm)を用い、孔直径が 20mm、30mm の板治具を用いた。本研究での衝突速度は 110m/s $\sim$ 234m/s である。標的試料を入れる容器として、直径 28cm、深さ 11cm の容器(たらい)を用いて半無限領域への衝突実験を行った。

実験結果：弾丸の運動量が増加するにつれてロードセルにかかる荷重は大きくなった。本研究では、ロードセルで観測される最大荷重(衝突後の最大荷重から衝突前の荷重を引いた値)から板治具にかかる垂直応力を計算し、その応力から疑似重力を推定した。孔直径が 20mm、30mm のいずれの場合も、疑似重力の推定値は、Schmidt and Housen(1987)のスケーリング則から推定した重力値より数倍小さくなった。しかし、受動的に 1G 以上の高重力を発生させた本研究は、実天体サイズを重力効果で補完して、月や火星の大規模クレーターを室内実験で再現することにより、室内実験で再現が困難である大規模クレーター内部に発生するメルトの挙動の観測という、今後の研究に応用できると考えている。また、観測される荷重の時間変化から計算して求めた力積を、板で抑制したエジェクタカーテンによる運動量と仮定し、衝突に伴う運動量輸送効率($\beta-1$)を見積った。 $\beta-1$ の結果は、石英砂標的への高速度衝突実験を行った先行研究(Chourey et al. (2020))から外挿した値よりわずかに大きくなったが、低速度領域では高速度領域より $\beta-1$ が小さいという傾向には乗った。

氷岩石混合物からなる多孔質天体上の クレーター形成に関する実験的研究

○野口琴海¹ 荒川政彦¹ 保井みなみ¹ 笹井遥² 豊嶋遥名¹

¹神戸大学 ²名古屋工業大学

外惑星領域には、太陽系外縁天体、氷衛星、彗星核など、氷、岩石、有機物等から構成される氷天体が普遍的に存在する。彗星核や小氷衛星は、バルク密度が小さいことから高い空隙率を持つと言われる^[1]。また、氷衛星や太陽系外縁天体の表面は、氷レゴリスにより覆われていると考えられる。これまで、氷天体表面に形成される衝突クレーターのサイズスケール則を構築するため、純氷や多孔質氷へのクレーター形成実験が行われてきた。本研究では、多孔質氷に加えて岩石も含んだ混合標的に対して衝突実験を実施し、ピット半径やスポール半径の衝突速度依存性を調べ、その結果を π スケール則で整理する。さらに、標的のせん断強度や引っ張り強度は、氷単体が氷岩石混合体かで異なると思われるため^[2]、強度支配域におけるクレーター形状と π スケール則に対する岩石含有率の影響を調べた。

実験に用いた標的の準備と実験後の解析は -15°C の低温室内で行った。氷天体表面の模擬標的として氷岩石混合試料を準備したが、その形状は直径 100mm、高さ 60mm の円柱形である。この標的は、 $710\mu\text{m}$ 以下の氷粒子とモンモリロナイト粉末 ($<1\mu\text{m}$) を均一に混ぜ、円筒形アクリル容器に詰めて油圧式ポンプで圧縮して作成した。なお、標的の空隙率は 40%とし、岩石の質量含有率は 30wt%と 40wt%の二種類の試料を準備した。衝突実験は神戸大学の横型二段式軽ガス銃を用いて行った。使用した弾丸は直径 2mm のアルミニウム球であり、衝突速度は 1km/s から 6km/s までの範囲で 1km/s ずつ変化させ、弾丸を円柱の上平面の中央に正面衝突させた。標的を低温室内の実験チャンバーに設置し、200Pa まで真空引きした後に衝突実験を行った。衝突実験の様子は 2 台の高速カメラでチャンバーの真横と上部から撮影し、クレーター形成過程を観測した。また、実験後の標的を回収してスポール半径、ピット半径及び深さを測定した。さらに、標的の圧縮変形試験を実施して、その圧縮強度を調べた。

実験の結果、弾丸運動エネルギーの増加とともにスポール半径とピット半径は、ともにべき関数的に増大した。ピットの形状は、速度の増加とともに縦長の細長い穴から球状に近い形となった。さらに 4km/s 以上の高速度では、弾丸破片が深い突起型のサブピットをクレーター底部に作っていた。スポール領域の形状は速度や岩石質量含有率に依存せず対称性の高い円形であった。また、衝突速度 5km/s、岩石質量含有率 40wt%のクレーター断面の観察から、一度融解して凍結したと思われる氷の層が見られた。衝突の様子を高速カメラで観測すると、クレーター形成後期にピラー型エジェクタが放出された。さらに高速度衝突では、エジェクタとして大型のスポール破片の飛散が観察された。また、圧縮変形試験から、氷岩石混合標的の圧縮強度を求めたところ、岩石質量含有率 30wt%では 158kPa、40wt%では 172kPa であった。これらの結果からピット半径及びスポール半径を π スケール則で解析すると、 $\pi_{R_pit} \propto \pi_Y^{-0.31 \pm 0.02}$ 、 $\pi_{R_spall} \propto \pi_Y^{-0.38 \pm 0.04}$ が得られた。ここで π_{R_pit} 、 π_{R_spall} 、 π_Y は、規格化ピット半径とスポール半径、規格化強度である。さらに、弾丸が完全に破壊された時（衝突速度 2km/s 以上）のスポール半径に対するピット半径の比を調べた。その結果、この比は衝突速度と伴に不連続に小さくなり、また岩石質量含有率が減少すると小さくなることが分かった。衝突速度の増加や岩石含有率の減少と伴にピットの占める割合がクレーター全体で小さくなる特徴は、標的内部での衝撃波の伝播・減衰や標的強度の岩石含有率依存性に起因するものと思われる。

加熱を経た小惑星表層に対するクレーター形成実験 Cratering experiments on asteroid surface after heating

○神取知広¹、中村昭子¹、北里宏平²

¹神戸大学、²会津大学

近地球小惑星は、自転または公転によって周期的な温度変化にさらされるため、熱応力や脱水による表面強度の変化が予想される。本研究は、加熱によって模擬含水小惑星表面がどの程度破碎されるかを確認し、また、加熱によって強度が変化した表面へのクレーター形成の様子を観察した。加熱温度などの実験条件は、今後 DESTINY+ のミッションにおいてフライバイ探査が計画されているフェートンの表面条件を模擬したものである。

まず、試料の強度と縦波速度が加熱の前後でどのように変化するかを測定する実験を行った。実験に用いたブロックは、石膏、砂、水を 10 : 10 : 7 で混ぜて 100 °C で乾燥させた半水石膏試料とパイロフィライトである。半水石膏試料空隙率は約 40 %、直径約 20 mm、厚さ約 11 mm であり、パイロフィライト試料は直径約 11 mm、厚さ約 6 mm である。炉の中で加熱する前後でブロックの縦波速度を測定し、その変化によってどの程度破碎が進行しているかを推定した。また、圧裂引張試験を行うことによって強度を測定した。加熱する温度は 200 °C ~ 700 °C、加熱する時間を 10 分 ~ 20 時間と様々な条件で実験を行い、得られたデータの比較を行った。実験から得られた結果として、半水石膏試料では、晒す温度が高温になればなるほど、また、高温下に晒す時間が長くなるほど、縦波速度が減少、つまりブロック内の亀裂が多く生じた。また、強度についても縦波速度が減少するのと同じく、減少傾向にあることが分かった。270 °C で 20 時間熱したブロックでは、前後で縦波速度が 0.7 倍程度になり、30 分間熱した場合でも 0.9 倍程度に縦波速度が減少するという結果が得られた。パイロフィライト試料においても、高温で熱するほど縦波速度の減少が見られた。しかしながら、パイロフィライトでは加熱前より加熱後の試料の方が強度は大きくなるという半水石膏とは異なる結果が得られた。以上のことから、加熱によってブロックの表面に変化がもたらされることが分かる。

次に、様々な温度で熱されて強度が変化したブロックを用意し、そこに高速度で弾丸を打ち込んでどのようなクレーターが形成されるのかを観察する実験を行った。実験には石膏とパイロフィライトの試料を用い、200 ~ 700 °C で 3 時間加熱したのちに 100 μ m のガラス弾丸を 5 km/s で打ち込んだ。その結果、石膏では、加熱された試料の方がより大きなサイズのクレーターが形成された。また、パイロフィライトでは、試料の加熱温度によるクレーターサイズの変化傾向は見られなかったが、加熱されない試料と比べ、加熱後の試料ではいびつな形のクレーターが形成されていた。

謝辞

本研究は JAXA 宇宙科学研究所も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。

多孔質小惑星の斜め衝突における角運動量輸送効率の 標的強度依存性

○大西彩華¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 黒崎健二², 豊田優佳里³, 横田優作¹, 青木龍一¹, 柿木玲亜¹, 豊嶋遥名¹, 宇都宮忠勝¹, 菊川涼介¹, 澤みゆう¹

¹神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻 ²防衛大学校応用物理学群応用物理学科

³国立天文台アストロバイオロジーセンター

小惑星は、他の天体との衝突を繰り返すことで軌道や自転を進化させてきたと言われている。そのため、小惑星の進化過程を遡るには、1度の天体衝突でどの程度軌道や自転が変化するかを様々な衝突条件下で調べることが重要である。先行研究では高強度の物質に対する斜め衝突時の運動量・角運動量輸送効率が実験的に調べられている一方で、Ryugu や Itokawa のような多孔質小惑星を模擬した低強度の標的に対する実験はあまり行われていない。そこで本研究では、強度の低い砂石膏混合標的に対して衝突実験を行い、各輸送効率の標的強度依存性を調べた。

実験には、神戸大の横型二段式軽ガス銃を使用し、粒径 $100\mu\text{m}$ の石英砂と石膏を混合した直径 60mm の球を標的とした。石英砂と石膏の混合比率は①20:1（引張破壊強度： 59.3 ± 22.0 kPa、ヤング率： 1.4 GPa、ポアソン比： 0.198 ）、②2:1（引張破壊強度： 1.2 ± 0.3 MPa、ヤング率： 7.0 GPa、ポアソン比： 0.067 ）の2種類とした。球標的は標的回収用のアクリル箱に吊るし、その回収箱は真空チャンバー内に設置した。チャンバー内を 20Pa 程度まで真空に引いた後、弾丸である直径 2mm のポリカーボネート球を約 1 km/s の速度で衝突させた。衝突角度は正面衝突に近い 2° からすれ違い衝突に近い 79° まで変化させた。すべての実験において、衝突の様子を水平方向・垂直方向の2方向から高速度カメラを用いて、 10^5fps で撮影した。

衝突後の標的の並進運動を解析すると、弾丸進行方向の運動量輸送効率は斜め衝突になると減少することがわかった。また、エジェクタの噴出によって標的が加速される効果により、正面衝突に近い角度では衝突後の標的運動量が弾丸の運動量を上回った。しかし、標的強度が上がるとエジェクタ量が減少するため、試料②の輸送効率は試料①の 0.8 倍程度に減少した。

次に衝突点の法線方向における運動輸送効率であるが、標的強度が増加するとエジェクタ量の減少により運動量輸送効率は減少した。一方で、衝突点の接線方向の運動量輸送効率は角度と共に減少するが、明らかな強度依存性は見られなかった。

一方、衝突後の標的の角速度は、衝突角度の増加とともに一旦は増加するが、 $\sim 50^\circ$ でピークを迎え、その後、減少して回転しにくくなった。これは、衝突角度が大きくなると標的の回転方向と同じ向きにエジェクタが噴出し、回転を妨げるためだと考えられる。さらに、標的強度が下がると角速度が最大となる衝突角度が小さくなる傾向も見られた。弾丸進行方向の運動量輸送効率とは対称的に、角運動量輸送効率は強度の大きい試料②が、強度の小さな試料①の 1.6 倍程度となった。

熱進化した層構造を持つ氷微惑星の衝突破壊に関する実験的研究

○崎村達也 荒川政彦 保井みなみ 豊田優佳里 笹井遥 横田優作 石井竣基

黒崎健二 長谷川直

神戸大学 理学研究科 惑星学専攻 実験惑星科学教育研究分野

太陽系外縁部での天体形成過程を明らかにするため、氷微惑星の衝突破壊・再集積現象とその衝突破壊強度を知る必要がある。衝突破壊を経た微惑星の生き残りである小惑星や隕石母天体は、惑星形成の記録を未だ保持しており、それらの起源と進化を知ることは、惑星形成過程を紐解くために重要である。なかでも小惑星リュウグウは、衝突破片の再集積で形成されたラブルパイル天体であり、また粘土鉱物を豊富に含んでいる。そのことから、母天体は放射性熱源や衝突加熱によって氷の溶融を経験し、氷の融解と再凍結を経た層と始原始的な多孔質層の二層構造を持つ氷微惑星であったと推測されている。そのような層構造を持つ熱進化した氷微惑星の衝突破壊強度や衝突後に形成されるラブルパイル天体の組成や構造を調べることは重要である。

これまでの衝突破壊実験では、均質構造天体の模擬試料を標的としたものが多かった。そこで本研究では、熱進化した層構造を持つ氷微惑星の模擬試料への衝突破壊実験を行い、コア-マントル層構造が衝突破壊に及ぼす影響を調べた。

標的試料には、直径 60mm のコア-マントル層構造を持つ試料を用い、2 種類のコア質量比 (0.28, 0.52) の層構造球を用意した。なお、天体内部で氷の融解を経験した微惑星を模擬するため、マントル部分には空隙率 40% の多孔質氷、コア部分にはモンモリロナイト粉末とシリコンオイルからなる粘土を用いた。衝突実験には、神戸大学及び宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃を使用した。衝突速度は 1~6km/s とし、弾丸には直径 2mm、4.7mm、7mm のポリカーボネート球を用いた。全ての実験は高速カメラによって観測し、宇宙科学研究所の実験ではそれに加えて、フラッシュ X 線撮影による標的内部の観測も行った。

実験の結果、層構造球の破壊様式は、エネルギー密度と規格化マントル厚み（マントル厚みを弾丸サイズで規格化）によって決まることがわかった。最大破片はエネルギー密度の増加に伴い、(1) コア周囲にマントル部分が残存する破片、(2) コアがクレータリングを受けた破片、(3) コアが破砕した破片、と変化していくことがわかった。また、規格化最大破片質量もエネルギー密度と規格化マントル厚みによって変化することがわかった。エネルギー密度が同程度の場合、規格化マントル厚みが大きくなるほど、規格化最大破片質量は大きくなった。この結果は、弾丸がマントルを通過する際、マントルが厚くなると弾丸速度が急速に減衰し、コアへの衝突速度が低くなることでコアを破砕することができなくなることを意味する。

また、反対点速度はエネルギー密度のべき乗の経験則で表せたが、そのべきの値は 0.48 で、均質構造標的における傾き ~0.7 と比べて小さかった。これは、層構造標的では弾丸の運動量が反対点速度を決めていることを意味する。これは、弾丸が直接コアに衝突して、コアが塑性変形を起こすことと関連しているかもしれない。

小規模破壊衝突による小惑星の速度変化

○西尾峻人¹, 大槻圭史¹, 杉浦圭祐²

¹神戸大大学院理学研究科 惑星学専攻, ²三菱電機先端技術総合研究所

微惑星や小惑星は衝突により軌道が変化し得る。衝突による速度変化はこれらの天体の軌道進化を考える上で重要である。一方、地球に飛来する小惑星は、ときに甚大な被害をもたらし得る。そのような小惑星の衝突を回避する方法として、Kinetic Impact と呼ばれる、人工衛星を衝突させることにより小惑星の軌道を変更する方法が提案されている。この方法の実証実験のために 2022 年には NASA によって DART(Double Asteroids Redirection Test) ミッションが行われ、小惑星の軌道変更に対する人工衝突の有効性が確認された[1,2]。この衝突の理解のために多くの理論研究もなされている[3-6]。これらの研究は、DART ミッションの理解のため、非常に小さな質量比のインパクターによる小規模破壊の場合のみ調べられていた。しかし、実際の衝突現象においては、様々な質量比や破壊規模の衝突が起こる。

そこで我々はこれまでに、多様な質量比や破壊規模を持つ衝突により小惑星が受ける速度変化について調べてきた。その結果、小惑星の受ける速度変化は質量比と破壊規模に強く依存することを明らかにした[7]。

本研究ではこの結果と、DART ミッション関連研究で得られてきた小サイズインパクターによる小規模破壊衝突の結果とを繋げるために、様々な質量比を持つインパクターによる小規模破壊衝突に注目する。衝突シミュレーションには岩石の破壊を扱える SPH 法のコードを用いた[8]。標的には半径 50km の玄武岩標的を用い、衝突による標的の質量損失が 5%程度以下になるような衝突速度・質量比のインパクターを選んで正面衝突のシミュレーションを行った。その結果、小規模破壊時に小惑星が受ける速度変化は、インパクター／標的の質量比が大きいときは衝突速度と質量比に依存するのに対し、質量比が十分小さいときの速度変化の割合は質量比には依らず、衝突速度にのみ依存することが明らかになった。これらの結果の理解のためには、イジェクタ速度分布の解析等が必要である。

参考文献

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

土星リング粒子の衝突過程における 微粒子放出のシミュレーション

○藤原大揮¹, 大槻圭史¹, 田中秀和², 木村亮太¹

¹神戸大学, ²東北大学

探査機と地上での観測の結果、土星リングの粒子サイズ分布は cm～数 m の範囲ではべき乗則に従うことが分かっている。一方、cm 未満の粒子数は、その外挿から推定される量より少なくなっていること、また最小粒子サイズは mm サイズであることも分かっている。cm 未満の粒子が欠乏していることの説明として、粒子間の吸着力が提案されている。小さい粒子は大きな粒子の表面に付着しているので、小さいサイズのままでは存在していないということである。また、大粒子表面に付着した小粒子は大粒子同士の衝突によって表面から放出されうる。このことは mm サイズの粒子の存在を説明しうる。

Bodrova et al. (2012) では JKR 理論に基づき大粒子と小粒子の 2 成分から成るモデルを構築し、小粒子の存在量を見積もっている。また、Ohtsuki et al. (2020) では土星リングでの粒子の衝突速度を評価している。結果、粒子衝突の大部分は 0.1cm/s 以下の低速で起こっていること、ウェイクが形成される高密度リングでは、高速の衝突がまれに起こっていることが分かった。これらの研究の結果は土星リングの粒子サイズ分布と整合的である。

一方、実際の粒子の放出過程については詳しく分かっていない。本研究では衝突による微粒子放出の過程を調べるために、Wada et al. (2007) と同様の手法を用い、表面にサイズの小さな粒子を付着させた粒子同士の衝突シミュレーションを行った。シミュレーションの結果、衝突速度の増加に伴う放出率の増加が確認できた。また、放出可能な小粒子サイズの見積もりに関して、従来の理論モデルの結果とほぼ一致することも確認できたが、従来のモデルでは考慮していなかった粒子の転がりに伴うエネルギー散逸が重要となる場合があることも分かった。

参考文献：

- Bodrova, A., Schmidt, J., Spahn, F., Brilliantov, N. 2012, Icarus 218, 60–68
Ohtsuki, K., Kawamura, H., Hirata, N., Daisaka, H., Kimura, H. 2020, Icarus 344, 113346
Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., Yamamoto, T. 2007, ApJ 661, 320

氷球の低速度斜め衝突実験：

法線方向の反発係数および接線方向の反発係数の衝突速度依存性

豊田優佳里^{1,2}, 荒川政彦,³ 保井みなみ³

1. 自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター, 2. 国立天文台, 3. 神戸大学

背景：A, B リングは光学的に厚い構造であることから、dense リングと呼ばれている。これらのリングを構成する粒子は数 mm-数十 μ m サイズの水氷粒子であることが知られているが、Cassini による観測によってリング粒子の内部構造は空隙を含む氷粒子集合体であることが示唆された [Ferrari et al., 2005; Zhang et al., 2019]。dense リングには粒子が密に存在しているため、リング粒子間の衝突過程を調べるのが重要である。このような背景から、リング粒子間の衝突速度 (数 cm/s 以下) を再現するような氷を用いた低速度衝突実験が行われてきたが、氷粒子集合体を使用した実験例は少ない [Shimaki et al., 2012; Schr pler et al., 2022; Toyoda et al., 2024]。特に、リング間の衝突のほとんどは斜め衝突であることが予測されるが、衝突角度の影響については空隙を含まない氷に対する実験例しか存在せず [Supulver et al., 1995]、氷粒子集合体の低速度衝突過程に対する衝突角度依存性は未解明である。以上より、本研究では氷粒子集合体を用いた低速度斜め衝突実験の実施を目標とし、斜め衝突実験装置及び解析方法の開発を行った。また、予備実験として、空隙を含まない氷球を用いて低速度斜め衝突実験を実施し、法線方向・接線方向の反発係数を実測した。

実験方法：衝突体には氷球 (直径 3cm) を使用し、標的板には市販の花崗岩板 (表面は鏡面仕上げ) 及び氷球と同様の方法で作成した氷板 (霜もない滑らかな表面) を使用した。実験はすべて神戸大の低温室内 (-15°C) で実施し、大気圧下で行った。衝突速度は $\sim 10\text{--}160$ cm/s、衝突角度は $15\text{--}90^{\circ}$ とした。斜め衝突による水平方向・高さ方向の運動を観測するため、二次元レーザー変位計を用いて、衝突前後における氷球の移動 (水平方向・高さ方向) の時間変化を測定した。

実験結果：解析した衝突速度と反発係数の関係を確認すると、花崗岩板・氷板の両方で衝突速度・衝突角度の増加に伴って反発係数が低下することが確認された。この衝突角度依存性は、法線方向の衝突速度と法線方向の反発係数で表すと概ね整理され、それぞれの標的板の正面衝突における衝突速度と反発係数の関係で説明可能であることがわかった。また、接線方向の反発係数はどちらの標的板でも ~ 1 であり、表面の滑らかな氷球の場合は摩擦によるエネルギー散逸がほとんど起こらないことが推測された。以上より、低速度斜め衝突実験の実験装置の開発及び空隙のない氷球を使用した予備実験を行うことができた。今後は多孔質氷球を用いた実験に向けて準備を進める。

内部発熱により駆動される温度依存高粘性流体の 熱対流の対流構造と表面の可動性

○ 奥田 尚¹, 竹広 真一¹, Stéphane Labrosse²

¹ 京都大学数理解析研究所, ²École Normale Supérieure de Lyon

地球などの岩石惑星内部のマントル対流の基本的なモデルとして、粘性が温度に依存する流体の熱対流問題が研究されている。これまでに、古典的な Rayleigh-Bénard 対流と同じ、下側からの加熱により浮力が生じて駆動される熱対流について、温度による粘性変化の大きさをパラメーターとして、熱・流れ場の構造が異なる3つのレジームに分類されることが知られている (e.g. Solomatov, 1995): 対流が全層的に生じるレジーム (Mobile regime), 上側表面付近が高粘性であるために不動となるレジーム (Stagnant lid regime), および表面付近が対流よりも遅い速度で可動である中間的なレジーム (Sluggish lid regime). これらの分類は、惑星上のプレートの有無およびプレートテクトニクスと関連していると考えられている。

一方で、実際の岩石惑星へ応用する上では、マントル内部での発熱により駆動される熱対流問題がより重要である。これまでに、内部発熱駆動の熱対流について、Mobile regime と Stagnant lid regime の対流構造やスケーリング関係はよく調べられている (e.g. Grasset and Parmentier, 1998). しかしながら、中間的な可動性のレジームの存在とその対流解の性質は、下部加熱駆動の熱対流問題に比べてよく調べられていない。

そこで本研究は、内部熱源により駆動される温度依存性粘性流体の熱対流問題の中間レジームに注目する。様々な Rayleigh 数と粘性の温度依存性の強さに対して、ニュートン法により定常熱対流解を計算し、表面の可動性により熱対流解を3つのレジームに分類する。各レジームの対流内部の温度のスケーリング関係を調べると、Mobile regime と Stagnant lid regime の間に、中間的な可動性を持ち、両者とスケーリング関係が異なる Sluggish lid regime が存在することが見出される。Sluggish lid regime の熱対流解は、対流領域上部の熱境界層における温度差が他のレジームより大きいことが特徴的である。この特徴は、中間レジームにおいて上側表面の可動性が変化していく過程で、対流領域上側の実効的な境界条件が応力無し条件から粘着条件へ遷移することに起因する。

応力履歴依存レオロジーをもつマントル対流数値シミュレーションで得られるリソスフェアの変形様式の解析

○ 田井東 大貴¹, 亀山 真典²

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

我々は、マントル対流数値シミュレーションの枠組みでプレートテクトニクスを再現することを究極の目的として、応力履歴依存レオロジー (Ogawa, 2003; Miyagoshi et al., 2020) をもつ流体の熱対流の2次元数値シミュレーションを実施している。その一環として本研究では、惑星表層の低温部分に発達する高粘性のリソスフェアの内部での「ダメージ」の発達と表層テクトニクスの関係をより深く理解することを目的に、モデル領域の表層部分に水平方向の変形 (引張あるいは圧縮) を強制的に与えることが可能なシミュレーションモデルを開発し、予備的なシミュレーションを実施している。特にここでは、リソスフェアの内部で生じる変形の様式やその発達の過程を詳細に追跡することによって、シミュレーション上で「ダメージ」が大きく発達した線状の領域 (=断層) がどのように形成されるか? あるいは「ダメージ」の成長の上限がどのように決まっているのか? という問いに答えることを第一の到達目標としている。

本研究で開発しているモデルは、我々が既に開発・活用してきた2次元部分円環モデル (Taito et al., 投稿中) を出発点とし、計算領域の側面における流体の流入・流出を考慮できるよう改良したものである。また本研究のモデルの最大の特徴の1つは、岩石天体表層付近のレオロジーに顕著な応力履歴依存性を持たせている (Ogawa, 2003) ことにある。ここでいう応力履歴依存性とは、高応力下で「ダメージ」がひとたび進行すれば、たとえ応力が下がってもその部分は周囲より強度が低い状態を保っているということである。この性質は岩石が普遍的にもっているものと調和的であるだけでなく、「局所的に激しく変形する」弱い部分 (プレート境界) と「ほとんど変形しない」強い部分 (プレート) の両者が固体地球表層の近傍で共存することを可能にし、ひいては地質学的な長い時間スケールにわたって安定的なプレートテクトニクスを再現する上で重要である (Ogawa, 2003)。

表層付近に強制的に引張を加えた場合で実施した予備的なシミュレーションによれば、計算開始直後には表層の比較的広い範囲で周期的に「ダメージ」の大きい領域が形成されるものの、それら全ての領域の中で「ダメージ」が継続的に成長する訳ではなく、その後の引張による「ダメージ」の成長はごく少数の領域に選択的に集中する様子が見られた。加えて、「ダメージ」が大きく成長してプレートの拡大境界 (海嶺) にまで至らしめるには、マントル深部からの高温の上昇プリュームによるアシストが非常に有効であり、上昇プリュームが表層に衝突することで変形が促され、「ダメージ」の成長が加速されることが確かめられた。今後はさらに詳細な分析を進め、「ダメージ」の (選択的) 成長の過程やメカニズム、およびそれらが表層のテクトニックな応力状態 (引張や圧縮) の違いによってどう異なってくるかを解明していきたい。さらには、得られた知見を活かすことで、地球とそれ以外の地球型惑星 (特に金星) との表層テクトニクスの違いという比較惑星学の重要な問題の解明に役立つような数値シミュレーション研究につなげていきたい。

はやぶさ 2 複数機器データから探る 小惑星 Ryugu 表層のボルダーの特性

○石田世実¹, 筒井皓基¹, 巽瑛理², 市川真弓³, 森田朋代¹, 中村智樹¹

¹東北大学、²Instituto de Astrofisica de Canarias、³JAXA

小惑星探査機はやぶさ 2 は、2018 年 6 月に地球近傍小惑星 Ryugu に到着し、2019 年 11 月までの約 1 年半にわたって、小惑星 Ryugu 表層のリモートセンシングデータを地球へ送信した[1]。さらに、はやぶさ 2 は小惑星 Ryugu の 2 箇所からレゴリスを採取し、地球に持ち帰ることに成功しており、これらのサンプルは主に物質科学的観点から詳細な分析が行われてきた[2][3]。リモートセンシングと帰還試料分析により、レゴリスの形成過程や進化の理解は大きく進展した。一方で、小惑星 Ryugu 表面に多数存在する岩塊(ボルダー)については、サンプルの持ち帰りが不可能であるため、詳細な分析がなされておらず未解明な点が多い。

はやぶさ 2 に搭載されたリモートセンシング機器の ONC-T、NIRS3、TIR は小惑星 Ryugu の各領域における反射スペクトル、熱慣性といった多様な定量データを取得した[4][5]。これらのデータは、地上分析を行えないボルダーの性質を理解するための現時点で得られる唯一の手がかりである。本研究では、小惑星 Ryugu 表層の 80 個以上のボルダーについて、各リモートセンシング機器のデータから以下の特徴量を抽出し、それらの分布や相関関係を調べた。また、レゴリスが多く分布する領域でも同様の解析を行い、ボルダーと比較した。

ONC-T: (i) v バンドの反射率 (ii) b バンドから x バンドにかけての傾き

NIRS3: (iii) 2.7 μm 吸収深さ (iv) 2.8 μm 吸収深さ (v) 2.1–2.5 μm の傾き

TIR: (vi) 熱慣性

本発表では、はやぶさ 2 複数機器のリモートセンシングデータから読み取れるボルダーとレゴリスの違い・類似性について報告する。小惑星 Ryugu の形成・進化過程を解明するうえで、表層に多数存在するボルダーの存在は無視できない。今後は、リモートセンシングデータからボルダーの特性をより明らかにし、これまでのレゴリスに関する先行研究結果と合わせて複合的に小惑星 Ryugu の形成史を明らかにしていく必要がある。

謝辞

本研究ははやぶさ 2 # 国際的ビジビリティ増強事業の支援を受けて行いました。平田成上級准教授よりご提供いただいた解析コードを使用いたしました。この場を借りてお礼申し上げます。

引用文献: [1] Tsuda et al. (2020) *Acta Astronautica*, **171**, 42–54. [2] Nakamura et al. (2022) *Science*, **379**, eabn8671. [3] Yokoyama et al. (2023) *Science*, **379**, eabn7850. [4] Sugita et al. (2019) *Science*, **364**, eaaw0422. [5] Kitazato et al. (2019) *Science*, **364**, 272–275.

小惑星探査機はやぶさ2搭載中間赤外カメラTIRの
高次処理データ「リュウグウ表層の熱慣性マップ」の構築

Thermal Inertia map of Ryugu constructed by the observed data from the
Thermal Infrared Imager onboard Hayabusa2

○荒井 武彦¹, 岡田 達明², 田中 智², 出村 裕英³, 坂谷 尚哉², 鳶生 有理²,
千秋 博紀⁴, 神山 徹⁵, 関口 朋彦⁶, 金丸 仁明⁷, 石崎 拓也²,

¹前橋工科大学, ²宇宙航空研究開発機構, ³会津大学, ⁴千葉工業大学,
⁵産業技術総合研究所, ⁶北海道教育大学, ⁷Observatoire de la Côte d'Azur

小惑星探査機はやぶさ2搭載中間赤外カメラTIRは、2018年から2019年にかけて、小惑星162173リュウグウのその場観測を行った。TIRはリュウグウのサーモグラフィーを様々な高度・角度から取得し、表層の温度がピクセルスケールよりも微細なラフネスによって均質化されていること、表層が高空隙であること、さらに地球上で採取されている隕石と同等の空隙率の石が存在することなど、様々な新しい知見を得ることができた(Okada et al. 2020)。本研究では、リュウグウ表層の熱物理特性を表すキーインデックスである熱慣性のマップをTIRの公開用高次プロダクトとして構築している。リュウグウ表層の熱慣性マップは、Senshu et al., 2022によって構築された球面上にランダムなポリゴンを配置してラフネスを模擬し、Lommel-Seeligerの式を用いて観測者からの見かけの表層温度をシミュレーションしたモデルが発表されている(Shimaki et al. 2020)。本発表では、その公開用プロダクトを紹介し、そのモデルと新たに構築したリュウグウ形状モデル上のポリゴンを細分割してラフネスを模擬したシミュレーションモデルとを比較した結果を紹介する。また、TIRの高次プロダクトの公開スケジュールを報告する。

はやぶさ 2 データ検索・可視化システム JADE2 の紹介

○長井 雄一郎¹, 巽 瑛理², 横田 康弘³, 庄司 大悟⁴, 市川 真弓¹, 本田 和広¹, 山本 光生¹, 村上 真也¹, 佐藤 広幸¹, Hayabusa2 Open Data Science Working Group
¹JAXA/ISAS, ²Instituto de Astrofisica de Canarias, ³東京科学大学, ⁴東京大学

はやぶさ 2 は、JAXA によるサンプルリターンミッションである。2020 年 12 月に小惑星 (162173) Ryugu から取得したサンプルが地球に帰還した。現在は拡張ミッションが開始され、小惑星 (98943) Torifune と 1998 KY26 に向かっている。はやぶさ 2 に搭載した観測機器による Ryugu の観測データは、Data Archives and Transmission System (DARTS) および Planetary Data System (PDS) にて公開されている。また、ONC カメラ画像データの検索・可視化・ダウンロードのための Web アプリケーションである JAXA Asteroid Data Explorer (JADE) を開発・公開した。本発表では、JADE の機能を拡張し、複数の観測機器からのデータの横断的検索・取得を可能にする、JADE2 という新しい Web アプリケーションについて紹介する。

JADE2 では、ONC (光学航法カメラ) に加え、NIRS3 (近赤外分光計)、TIR (熱赤外線カメラ)、LIDAR (レーザー高度計)、MASCOT (小惑星着陸機) で観測されたデータを、同一画面上で検索・可視化することができる。これらのデータは、JADE2 から直接ダウンロードできるほか、スクリプトによる自動ダウンロード処理にも対応した。また、従来通り DARTS から利用可能である。各データの詳細については、ソフトウェアインターフェース仕様 (SIS) およびその参考文献を参照のこと。

JADE2 は、既存の JADE ユーザーにとってユーザーフレンドリーな機能とインターフェースを維持している。アプリケーションには、一般ユーザーのための「ベーシックモード」と、詳細な機能を備えた「アドバンスモード」の 2 つのモードがある。アドバンスモードでは、ユーザーがそれぞれの観測機器について詳細なフィルターを設定できる機能を追加した。また、フィルタリング後の観測データを分析する機能 (NIRS3 のスペクトルプロファイル表示機能、TIR 温度マップと時系列グラフの表示機能、LIDAR 高度情報の緯度方向/経度方向の横断図表示機能、MASCOT 観測画像表示機能) を開発した。これらの機能により、ユーザーの関心領域における全体的な観測トレンドを把握し、データ分析の準備作業を効率化することができる。

JADE2 は、複数の観測機器からのデータを横断的に検索・可視化できる環境をユーザーに向けて整備した。将来、DCAM や MINERVA-II といった他の観測機器からのデータの追加、さらに高次プロダクトの追加を計画している。また、他のミッションのデータも、JADE2 と同様のシステムに実装することを検討中である。

謝辞：この研究ははやぶさ 2 #国際ビジビリティ事業によりサポートされています。

C 型小惑星表層における太陽紫外線風化の模擬と炭素質コンドライトの分光応答

○古川聡一朗^{1,2}, 岡田達明^{1,2}, 佐々木晶³, 江頭勇介³, 廣井孝弘⁴, 海田博司^{5,6}, 金丸礼², 保田慶直^{2,6}, 石崎拓也², 矢田達², ¹東京大学、²JAXA 宇宙科学研究所、³大阪大学、⁴ブラウン大学、⁵国立極地研究所、⁶総合研究大学院大学

Introduction: 太陽紫外線は小惑星表層に化学的・鉱物学的変質を引き起こし、分光特性に反射率の低下や吸収帯の変化をもたらす可能性がある [Sasaki et al. Journal of Evolving Space Activities 2024; Egashira et al. Master's Thesis 2025; Furukawa et al. Scientific Reports 2025]. 佐々木らはカンラン石や輝石を紫外線照射し、可視域で最大 40 %の反射率低下を観測したが、ナノ鉄粒子の形成は確認されず、太陽紫外線が初期 (1-10 年) の宇宙風化に主要な影響を及ぼすことを示唆した。江頭らは Murchison などの炭素質コンドライトを紫外線照射し、可視-近赤外域でスペクトル傾斜の変化と OH 基に由来する 2.7 μm 吸収帯の弱化と長波長シフトを確認し、数ヶ月の短期間でも有意な変質が起こることを示した。発表者らは Hayabusa2 の帰還試料である炭素質小惑星 Ryugu の表層と表層下の粒子の 2.7 μm 吸収帯の深度とピーク位置の差異解析と、Ivuna 隕石の紫外線照射実験により、現地での短期間の太陽紫外線による影響の可能性を示した。しかし、これらの研究は照射と分析の間や分析時に大気曝露があったり、照射時の環境が真空中でなく窒素下であったなど、紫外線風化の純粋な影響を精密に評価するには不十分であった。本研究では、照射から分光分析までを真空中または窒素下の大気非曝露下で一貫して実施し、炭素質コンドライトの紫外線応答をより厳密に評価する。これにより、炭素質小惑星表層進化の理解やリモートセンシング観測による物質識別の精度向上への寄与が期待される。

Methods: 試料として炭素質コンドライトの Allende (17.7 mg) および Tagish Lake (17.95 mg) を乳鉢で粉碎し、1.5 t $\cdot$ 10 s 加圧して直径 3 mm $\cdot$ 厚さ 1 mm のペレットに加工した。密度は標準的な炭素質小惑星 (2.5 g/cm³) に近く、表面形状と組成の均一化を実現した。宇宙環境模擬には図 1 に示す真空チャンバを製作した。250-385 nm 帯の紫外線を透過する石英窓と熱電対による温度モニタリング機構を備え、内部は約 10⁻⁴ Pa に到る真空状態を維持可能である。照射には朝日分光製 300 W キセノン光源 (MAX-303) を用い、高密度レンズで約 4 mm 径に集光して、250-385 nm 帯で 2.3×10^2 mW/cm² の照度で約 18 時間照射した。累積照射量は 14906 J/cm² であり、これは 1 AU での放射照度 (8.9×10^{-3} W/cm²) に換算すると、約 19.4 日分に相当する。照射時の温度は、試料の反射率に近いカーボンテープに取り付けた熱電対で観測し、試料温度は 80-90 $^{\circ}\text{C}$ に達したと推定された。照射前後の分析は大気非曝露の窒素雰囲気下で実施した。近紫外-可視域にはマルチスペクトルステレオカメラ [Cho et al. Planetary and Space Science 2022] を、近-中間赤外域にはフーリエ変換赤外分光計 (JASCO FT/IR-6100) を使用し、機器間の試料移動には窒素封入密閉容器 (FFTC [Ito et al. Earth Planets Space 2020]) を使用した。

Result & Discussion: Allende および Tagish Lake の近紫外から中間赤外域にわたる分光測定の結果、紫外線照射に起因するスペクトル変化が確認された。まず、近紫外域での反射スペクトルの傾き (UV drop) は減少し、有機物の分解や変質を示唆する結果となった。次に、近赤外域での傾きは緩やかになり (青化)、OH 基に起因する 2.7 μm 吸収帯は照射後にその強度が弱化した (図 2)。2.7 μm 吸収帯の変化は、OH 結合の切断を反映するものと考えられる。さらに、中間赤外域で観測された珪酸塩鉱物に由来する反射帯 (Reststrahlen band) においても、強度の減衰およびピーク位置の長波長シフトが観察された。これは珪酸塩結晶構造における歪みを示唆すると考えられる [Takase et al. Japan Geoscience Union Meeting 2025]。

本研究は、炭素質コンドライトの有機物・OH 基・結晶構造の紫外線照射に対する応答を示し、太陽紫外線が C 型小惑星表層の初期宇宙風化において重要な役割を果たした可能性を裏付ける。今後は、他隕石での実験や他分析手法を用い、紫外線による影響をより詳細に調査する。また、微小隕石衝突や太陽風など他の宇宙風化との競合やタイムスケールの違いを明らかにすることで、宇宙風化全体に対する包括的な理解を進める。

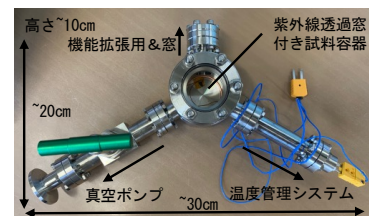


図1 小型真空チャンバ

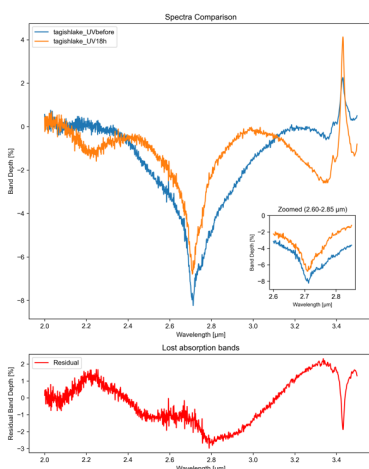


図2 Tagish lakeの紫外線照射前後の近赤外スペクトル (青: 照射前、橙: 照射後、赤: 照射前-照射後)

3.8 m せいめい望遠鏡によるはやぶさ 2 拡張ミッション（はやぶさ 2#）

ターゲット小惑星 Torifune の 3 色同時測光観測結果と今後の観測計画

○土井知也¹, 高木聖子¹, 関口朋彦², 黒田大介³, 浦川聖太郎³, 紅山仁^{4,5}, 石黒正晃⁶, Jooyeon Geem⁷

¹北海道大学, ²北海道教育大学, ³日本スペースガード協会, ⁴東京大学,

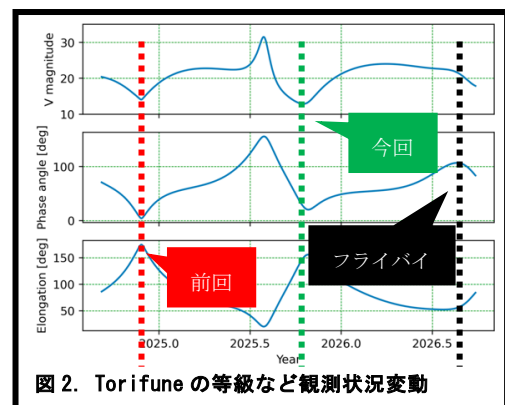
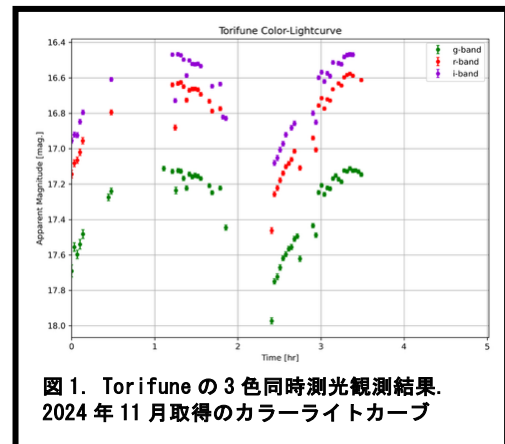
⁵Observatoire de la Côte d'Azur, ⁶Seoul National University, ⁷Luleå University of Technology

小惑星 Ryugu のサンプルを地球に届けた探査機はやぶさ 2 は、2026 年 7 月に小惑星 Torifune を相対速度 5 km/s、最接近距離 1-10 km で高速フライバイし、小惑星 1998 KY26 に向かう。JAXA により延長されたこの探査計画は「はやぶさ 2 拡張ミッション（はやぶさ 2#）」と呼ばれ、Torifune はこのミッションの次なるターゲットである。近年の様々な観測結果から、現在 Torifune は S(Sq)-type 小惑星 (Geem J+, 2023. Popescu M+, 2025)、自転周期は 5.02 時間 (Fatka P+, 2025. Popescu M+, 2025) と推定されており、表面のローカルな（局所的な自転位相における）表面カラー（組成）の違い（異方性）は検出されていない (Popescu M+, 2025)。

2024 年 11 月、位相角（太陽-小惑星-地球のなす角）が 6 度まで小さくなる観測好機であった Torifune を国立天文台の共同利用を活用し観測した。観測計画については昨年秋季講演会にて報告済み（関口ら、2024）。3.8 m せいめい望遠鏡に搭載された 3 色同時撮像カメラ TricCS を用いて、約 3 時間の g, r, i フィルター（Pan-STARRS filter）でのカラーを取得することができた

（図 1）。平均色指数は S-type に典型的な値で、先行研究の結果とも一致したが、測光精度は先行研究 (Popescu M+, 2025) よりも高い。また、観測できた面での色指数の変動は小さく、ローカルな表面カラーの違いが確認できないことで、表面の等方性を支持する結果となった。

この結果は、フライバイ前に事前決定される科学的価値の最も高い観測面（自転位相）と、一瞬のカメラ撮像設定に有用である。しかし、得られたカラーライトカーブは 1 自転周期 5 時間に満たず、全面のカラー情報を取得したいという目的からは十分とは言えない。そのため、2025 年 10 月に再度観測好機となるタイミングを狙い、せいめい望遠鏡での再観測を行う。今回はここ 20 年で最も明るく、フライバイ前に絶対等級 18.8 等の Torifune が 16 等台まで明るくなるラストチャンスであり（図 2）、高い測光精度が期待できる。また、最新の情報が重要視される意味でも、この観測が必要である。昨年の観測結果、今年の観測時の Torifune の幾何情報と観測計画などについて報告する。



熱赤外カメラによる小天体フライバイ観測

○千秋博紀¹, 坂谷尚哉², 岡田達明², 鳶生有理², 関口朋彦³,

荒井武彦⁴, 石崎拓也², 金丸仁明⁵, 出村裕英⁶, 神山徹⁷, 田中智²

¹千葉工業大学, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³北海道教育大学, ⁴前橋工科大学,

⁵コートダジュール天文台, ⁶会津大学, ⁷産業技術総合研究所

我々は、はやぶさ2が行う小天体フライバイを熱赤外カメラによるフライバイ観測の典型例のひとつと捉えて、フライバイで熱赤外観測を行う場合に成果を最大化する戦略を検討している。

はやぶさ2は2026年7月に小天体トリフネをフライバイする予定である。はやぶさ2はもともと高度20kmをホームポジションとして、ターゲットと定常的な位置関係で観測を行うように設計されていたのに対して、トリフネとの相対速度5km/sに達する。このため、たかだか数枚の画像からトリフネの素性に迫らなければならない。

撮像できる画像に限られるのはフライバイ観測一般に言える事である。遠方からの観測を目的とした設計になっていれば通過点を目標天体から遠く離すことで観測できる時間は延ばすことができるが、それでも数分程度である。

はやぶさ2搭載熱赤外カメラは、天体の表面温度分布を観測する。温度履歴から熱慣性を求め、そこから表面を構成する粒子の組成や密度に制約を与えることが熱赤外カメラによる観測の目的のひとつである。しかし数枚の画像しか得られないのであれば、観測の戦略を事前に十分に練っておく必要がある。なぜなら、熱慣性の次元に時間が含まれていることからわかるように、観測から熱慣性を求めるためには、ターゲットとする領域の温度履歴を測定する必要があるためである。

小天体表面の温度は局所的な地形に影響を受ける。小天体の熱進化は太陽光を熱源としているため、表面の傾きが温度の違いとして現れる。トリフネはこれまでの測光観測や掩蔽観測から細長い形状をしていると示唆されている。形状が細長いと、地心経度と測地経度は合致しない。つまり東西方向に傾いていることに相当するため、どの自転位相を観測するのかによって温度分布の見え方が変化し得る。

以上をうけ、我々は細長い天体の表面温度履歴を数値計算で求め、フライバイで得られる熱赤外カメラの模擬画像を様々な条件で作成した。その結果から、熱赤外カメラによるフライバイ観測は理想的な条件があり、それが満たされれば熱慣性と表面ラフネスを精度よく決められること、逆に条件が悪い場合には熱物性に関する情報が得られにくくなることが明らかになった。

Vesta 族との天体衝突が小惑星 Vesta のクレーター生成に与える影響の定量評価

○安藤太一¹、諸田智克¹、豊川広晴¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科

小惑星帯天体 (MBA) のサイズ頻度分布 (SFD) は小惑星帯の衝突破壊進化や小惑星帯からの質量流出の歴史を理解する上で重要であるが、地上から網羅的に観測できるのは直径約 1 km 以上の天体に限られる。それより小さい直径のサイズ分布については衝突破壊と軌道進化を取り入れた数値シミュレーションに基づいた外挿により推定されてきた (Bottke et al., 2005)。これに対し、小惑星 Vesta の表面におけるクレーターのサイズ頻度分布 (CSFD) は、直径 1 km 以下の MBA の SFD を観測的に制約する手がかりとなる。Marchi et al. (2014) は直径 1km 以下の SFD を制約するため、Vesta の Rheasilvia 盆地上の CSFD を調査し、MBA がつくるクレーターの SFD との比較を行った。その結果、直径約 1 km 以下では観測をよく再現できたものの、1 km 以上では観測データがモデルを上回る結果となった。そこで我々はこの違いが平均的な MBAに加えて他の天体群、特に Vesta 族との衝突によってクレーター生成率が上昇しているためではないかと考え、その可能性を定量的に評価した。具体的には、Vesta 族との衝突によってできるクレーター数密度を計算し、それを考慮することで Vesta における CSFD が再現できるのかを検証した。Vesta 族の軌道要素分布は観測データ (Nesvorný et al., 2008) を用いてモデル化して固有衝突確率 (Wetherill 1967) を計算し、Vesta 族の SFD は Broz et al., 2024 のシミュレーションを用いた。

図 1 においてプロットされている点は Vesta における Rheasilvia 盆地周辺の CSFD であり、曲線は固有衝突確率と衝突天体の SFD を用いて Vesta 族形成後にできるクレーター数密度を計算したものである。この図から、MBA との衝突だけを考慮した赤線は直径 1km 以上で観測データより下回っている一方で、Vesta 族との衝突を考慮した黒線はその領域でも観測データと合致していることが分かる。この結果は Vesta 族との衝突が Vesta のクレーター生成において一定の寄与があり、また、衝突破壊シミュレーションにより見積もられた SFD とクレーター統計の間のギャップは Vesta 族との衝突で説明できることがわかった。

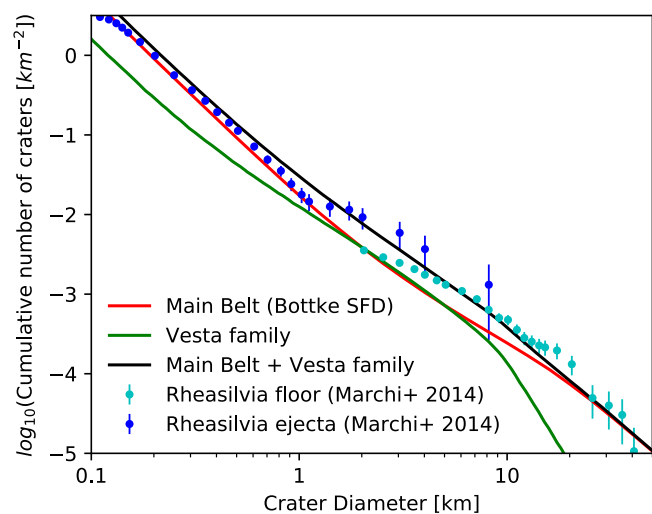


図 1 Vesta において観測されている CSFD と、MBA と Vesta 族との衝突によってできる CSFD の計算結果をプロットしたグラフ。

次世代サンプルリターン探査天体 289P/Blanpain を起源とする 「ほうおう座流星群」の分光観測

○ 野邊大貴¹, 阿部新助¹, 関口孝志², 荒木祥馬¹, 後藤駿介¹, 花山秀和³.

巽 瑛理⁴, 浦川 聖太郎⁵, 鳶生 有理⁴, 岡田 達明⁴, 渡部 潤一⁴

1. 日本大学, 2. 日本流星研究会, 3. 久留米大学

4. 宇宙航空研究機構, 5. 日本スペースガード協会

289P/Blanpain 彗星 ($a=3.045[\text{au}]$, $e=0.685$, $i=5.897[^\circ]$, $q=0.959[\text{au}]$, $P=5.315[\text{yr}]$) は, 秒速 12 km/s 以下という極めて遅い突入速度をもつ「ほうおう座流星群 (Phoenicids)」の母天体と考えられている. 現在の 289P/Blanpain は枯渇した彗星であると考えられているが, 1956 年に南極観測船宗谷で $HR=100$ の突然出現活動が観測され, それから, 2008 年, 2014 年, 2019 年にも突発出現したが, それ以外の年にはほとんど出現していない. 289P/Blanpain は, 次世代 JAXA サンプルリターン探査天体の候補であり, ほうおう座流星群の分光観測から物質科学的調査を行う. Na/Mg/Fe 発光強度比は, 回折格子を通して流星体の発光を撮像することで得られるスペクトルを解析して推定できる. また本流星群は低速であるため, 従来の流星研究とは異なる知見が期待される.

本研究では, 1866 年に放出されたダストにより, 流星群が極大になるという予報に基づき, 国立天文台・石垣島天文台で分光観測を 2024 年 11 月 13 日から 17 日かけて実施した.

その結果, 沖縄県石垣島と埼玉県川越市でそれぞれ 1 ずつの流星スペクトル取得に成功した. 今回は, NaI-1(589[nm]), MgI-2(518[nm]), FeI-15(527, 545[nm]) の 3 種類の原子輝線スペクトル解析を行った. 原子発光強度比, 原子輝線ライトカーブ, 時系列スペクトルを導出し, それらを用いて, 流星体の起源について議論する.

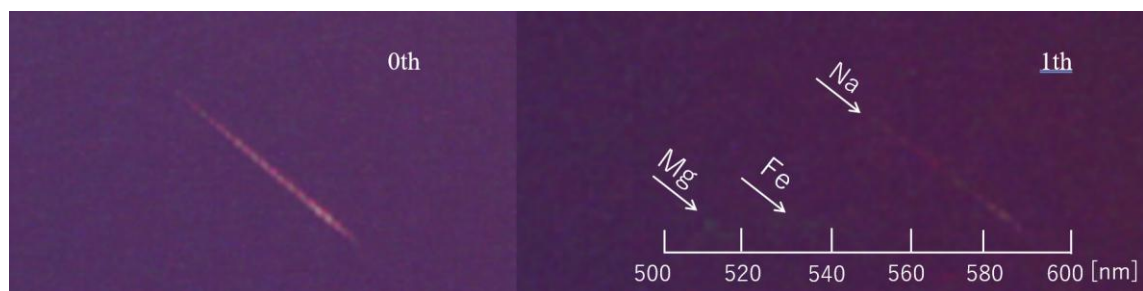


図 1 石垣島で観測された流星の比較明合成図

(トリミングあり, 2024 年 11 月 13 日 22:54:39 (JST), 総フレーム数: 23)

高周波熱プラズマを用いた太陽組成ガスの 非平衡凝縮による GEMS 模擬粒子合成

○江橋新¹, 松野淳也², 田中学², 渡辺隆行²

¹九州大学 工学府 化学工学専攻, ²九州大学 工学研究院 化学工学部門

彗星由来の宇宙塵には, Fe, Ni 金属および FeS 粒子を内包する 100~500 nm サイズの非晶質ケイ酸塩粒子である GEMS (Glass with Embedded Metal and Sulfides) が含まれている. GEMS は太陽系の始原始的な物質であると考えられており, その生成過程を解明することは太陽系の成り立ちを解明する上で重要である. GEMS の形成過程について未だ定説はないが, 初期太陽系に存在した高温ガスの凝縮生成物であること (Keller and Messenger, 2011) が提唱されている.

今回, この仮説を検証するために, 高周波熱プラズマを用いた GEMS 再現実験を行った. 高周波熱プラズマ装置は, 10,000 K の高温と $10^4 \sim 10^5$ K/s の急峻な温度勾配を利用して, 原料粉末を蒸発・急冷させる. これにより, 均一核生成, 不均一凝縮, 粒子間凝集の過程を経て, 通常の合成手法では得られにくい準安定相のナノ粒子を合成することが可能となる.

上記の手法を用いた既往の研究にて, 系の酸化還元雰囲気を調節することで, 金属鉄が非晶質ケイ酸塩中に 1 つまたは複数内包された GEMS 様の微細構造を有する GEMS 模擬粒子が合成された (e.g. Matsuno *et al.*, 2021). しかし, 従来の生成条件では, 宇宙空間に豊富に存在する水素や炭素が含まれておらず, 凝縮時の化学種や凝縮温度が異なっている. そこで, 本研究では, 系に酒石酸 ($C_4H_6O_6$) 粉末と水素ガスを導入し, H_2 , H_2O , CO の存在下で酸化還元雰囲気を制御することで, 天然に近い生成条件において GEMS 模擬粒子の合成を試みた.

本実験で使用した原料は, MgO , SiO_2 , Fe , Al_2O_3 , $CaCO_3$, Na_2CO_3 , Ni , $C_4H_6O_6$ の混合粉末であり, 元素組成比は簡略化された太陽組成に準じている. 水素の流量を変化させることで系の酸化還元状態を調整し, 得られた生成物の相構成や微細構造を比較した. 生成物の分析には, 粉末 X 線回折 (XRD), 透過型電子顕微鏡 (S/TEM), およびエネルギー分散分光法 (EDS) を用いた.

水素流量 4.4 L/min における生成物の STEM-DF 像と元素マッピング像を **Fig. 1** に示した. Fe, Ni 金属粒子を一つまたは複数内包した非晶質ケイ酸塩粒子 (GEMS 模擬粒子) と, 金属を含まない単一のケイ酸塩粒子の双方が観察された. 特に, 水素流量が多い条件では金属内包率が高くなり, 逆に水素流量が少ない場合には, ケイ酸塩中の Fe 含有量が高い傾向が確認された.

本実験では, 水素流量の増加に従い, GEMS 模擬粒子の生成割合が向上した. 本成果は, GEMS が原始太陽系円盤の高温ガスの凝縮生成物である可能性を支持するものであり, その成因解明に資する新たな知見を提供する.

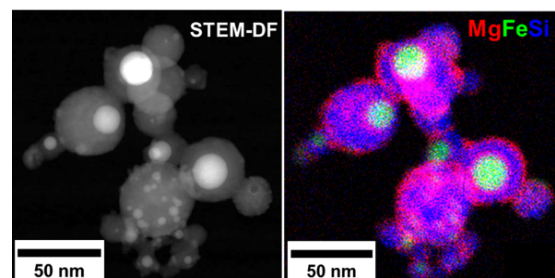


Fig. 1 STEM-DF image and elemental maps of condensates at H_2 flow rate 4.4. L/min

Comet Interceptor の目標選定に向けた彗星のガス昇華のモデル計算

岸 真瞳¹、杉田精司¹、河北秀世²

¹東京大学地球惑星科学専攻、²京都産業大学宇宙物理・気象学科

JAXA が ESA と共同で打ち上げる探査機 Comet Interceptor(CI)は、長周期彗星をターゲットとし、日心距離 1AU 程度における彗星活動が盛んな条件下でフライバイ観測を行う予定である。長周期彗星は、太陽加熱による昇華に伴う揮発性物質の枯渇の影響をあまり受けていないため非常に始原的な組成情報を保持しているという魅力がある一方で、現時点ではターゲットがまだ発見されていないという困難を併せ持っている。そのため、探査に適した長周期彗星が望遠鏡の発見可能距離に到達して軌道の詳細が決定してから探査機を製作・打ち上げたのでは間に合わない問題がある。この問題を解決するため、CI はあらかじめ打ち上げてラグランジュ点近傍のパーキング軌道に待機させておき、探査に適した長周期彗星が見つかり次第フライバイ軌道に遷移させて近傍観測を行うというアプローチをとる(Snodgrass & Jones, 2019)。

このため現在 8m 級の大型望遠鏡による遠方にある彗星の全天サーベイ観測が行われるとともに、新たに発見された天体から CI の探査対象天体を選別するための条件洗い出しの検討が進んでいる。この検討から、一つのジレンマが問題になることが明らかとなった。それは、遠方(3–5 au)での輝度が高い彗星ほど 1 au 近辺にかけての増光率は低く、彗星活動度の成長は頭打ちとなってしまいがちである一方で、遠方での輝度が低い彗星は 1 au 近辺での増光率は高く、彗星活動度の成長率の高い伸びが期待されるという経験則である(Lacerda, 2025)。この経験則にはいくつかの解釈の仕方があるため、どちらのタイプの彗星が CI の探査により適しているかと考えるかは議論の別れるところである。例えば、遠方での輝度が高い彗星は CO や CH₄ は超高揮発性分子を多量に含んでいる可能性があるため、より始原的な物質の探査という観点では魅力が高い。その一方で 1 au 近辺での増光率が高い彗星はガス生成率[分子/s]の絶対値が高い条件で探査できるという観点において魅力が高い。このどちらのタイプの彗星がより CI 探索に適しているかを決めるには、長周期彗星の分子の活動メカニズムを理解する必要がある。ここで、過去の観測から遠方(3–5 au)と 1 au 近辺では彗星核から昇華する主なガス種が CO、CO₂ か H₂O かの違いがあることが推察されている(Biver+, 1998, 2002)。そのため、遠方での CO/CO₂ 昇華と近傍での H₂O 昇華による、彗星活動やダストの放出過程にどの程度の差があるかを定量的に評価することが非常に重要になる。

そこで本研究では、主に CO が昇華する領域と主に H₂O が昇華する領域の両方について、単純なエネルギー収支方程式(EBE)を用いて彗星表面と内部の温度を計算し、その温度に基づいて各領域での単位面積あたりのガス生成率[分子/m²/s] (以降、「ガス生成フラックス」) を日心距離の関数として求めることとした。予備的計算として、観測データが充実している Hale-Bopp 彗星について、H₂O のみの昇華を扱う計算を行った。EBE モデル計算の結果は、H₂O 生成フラックス観測値とは明らかな差を持っている一方で、全体的な傾向は良く再現しているものであった。まず、H₂O の生成フラックス観測値は日心距離が 4.6 au から 0.9 au に近づく際に 150 倍も増加しているが、その区間において EBE 計算値と観測値の差は 1 桁以内に収まっていた。また、EBE 計算値は一貫して観測値より大きい値であるが、我々の EBE モデルではダストによる被覆が昇華を干渉する影響を考慮していないため、この傾向は妥当である。さらに、ガス生成フラックスの観測値の傾きが安定している 1.0 – 4.0 au に限って 1.0 au の値で規格化すると、観測値と計算値は 20%以内で一致することも分かった。本研究で用いた EBE モデルはある範囲では計算に有効であることが示唆される。これらの結果は、本研究で用いた単純な EBE モデルが、彗星のガス生成フラックスの再現に一定程度の有効性も持つ可能性があることを示唆するものである。

これに加え、核に存在するダストの影響を調べるため、その運動に影響を及ぼす希薄なガスの運動を理解する必要がある。核表面付近には Knudsen 層が形成されるため、局所熱平衡流体の近似が通用しない。そのため Boltzmann 方程式の直接計算が必要となる。本研究では、Boltzmann 方程式の直接計算法である Direct Simulation Monte Carlo (DSMC)法を用いてガスの非等方的・非熱的な運動を計算することで、彗星核からのダスト放出に影響を与えるガス抵抗力を評価する。本ポスターでは、この DSMC 計算の結果も報告する。

New Horizons 探査機航行支援を目的とした すばる望遠鏡 HSC による太陽系外縁天体の観測結果

○山下音緒（関西学院大学）、吉田二美（産業医科大学・千葉工業大学）、柳沢俊史（Star Signal Solutions株式会社）、

伊藤孝士（国立天文台）、黒崎裕久（JAXA）、渋谷雅人（総合研究大学院大学）、吉川真（JAXA）

我々は国立天文台ハワイ観測所すばる望遠鏡の超高視野カメラ HSC を使って、NASA の New Horizons 探査機が Arrokoth の次にフライバイするカイパーベルト天体の候補を探している。観測は 2020 年から始まり、初期の解析結果は報告済みである（Yoshida et al. 2024, PASJ, 76, 720, ここでは機械学習なし）。

今回は 2024 年 6 月から 8 月に取得した 0.5×8 夜分の画像データの解析状況を発表する。取得した画像は New Horizons のチームメンバーが一次処理したものを提供していたが、その中から等時間間隔で撮られた 32 枚の画像を選び出して JAXA の移動天体検出システムにかけた。この検出システムは移動天体の速度を仮定し、画像を多方向にシフトしながら重ね合わせ、移動天体を検出する。動きの速い太陽系の内側の小惑星を含めないように、移動速度が約 11 分角/日以下の移動天体候補を抽出した。一つ一つの移動天体候補はこの検出システムが独自に作成した画像パターンに従って一つの fits 画像に出力される。その画像を我々のチームで開発した機械学習プログラムを用いて、真の天体かどうかを自動判定し、真の太陽系外縁天体(TNO)候補を抽出した。この抽出は一夜ごと、1 チップごとに行う。その後、全夜の TNO 候補を合わせて軌道をフィッティングし、軌道が繋がる組み合わせを検討した。2 夜以上の観測で軌道が繋がれば、小惑星センターに報告する。

機械学習の教師データとするために、2024 年 6 月 11 日のデータで検出された移動天体候補を人間の目で本物と偽物の天体に識別した。JAXA の移動天体検出システムが抽出した移動天体候補は 2895 個、そのうち人間の目で真の移動天体だと判別した候補は 1535 個であった。検出限界は 26 等と 27 等の間にあった(図 1 参照)。これらについて見かけの移動速度分布を調べたところ、太陽から 50au にある天体が衝の位置にあるときの見かけの速度は 1 分角/日であるのに対して、これより低速の天体が多数見つかった(図 2

参照)。これらの低速天体がカイパーベルトの外側にある天体か、画像処理段階でマスクからはみ出した星の引き残りかどうかは人間の目でも機械学習でも見た目では区別がつかなかった。ここから先は一連の検出結果から軌道を決定し、更にそれを複数夜に渡り連結する事で、それらが TNO であるか否かを検証する。その作業について本講演では触れないが、ここでは JAXA が開発したソフトウェア(Stella Hunter) およびフリーの Find Orb を用いる。

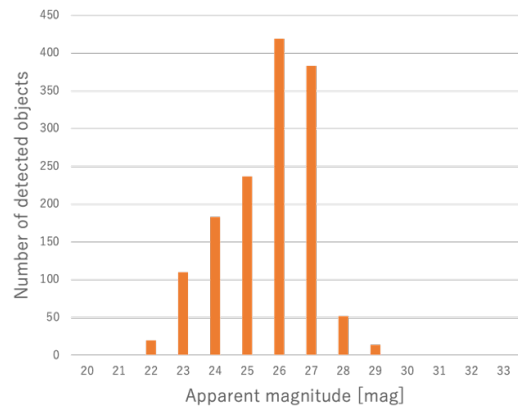


図 1：1535 個の天体の見かけ等級の分布

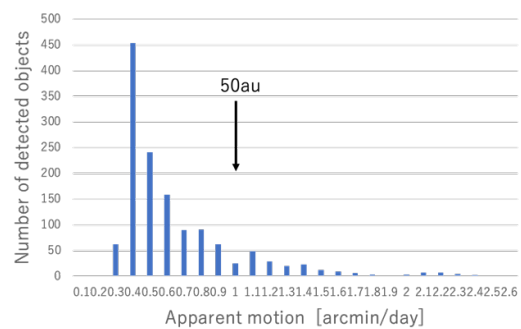


図 2：1535 個のうち低速天体の速度分布

本研究においては、2024 年度に取得したデータについて解析を行ったが、今後は他の年に取得したデータについても JAXA の移動天体検出システム+機械学習を使って解析していく。

世界初の4次元ダストトレール理論による流星予報計算

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

佐藤 勲 (Isao SATO) (宇宙用語研究会)

阿部 新助 (Shinsuke Abe)、渡邊 宏介 (Kosuke Watanabe), (日本大学)

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

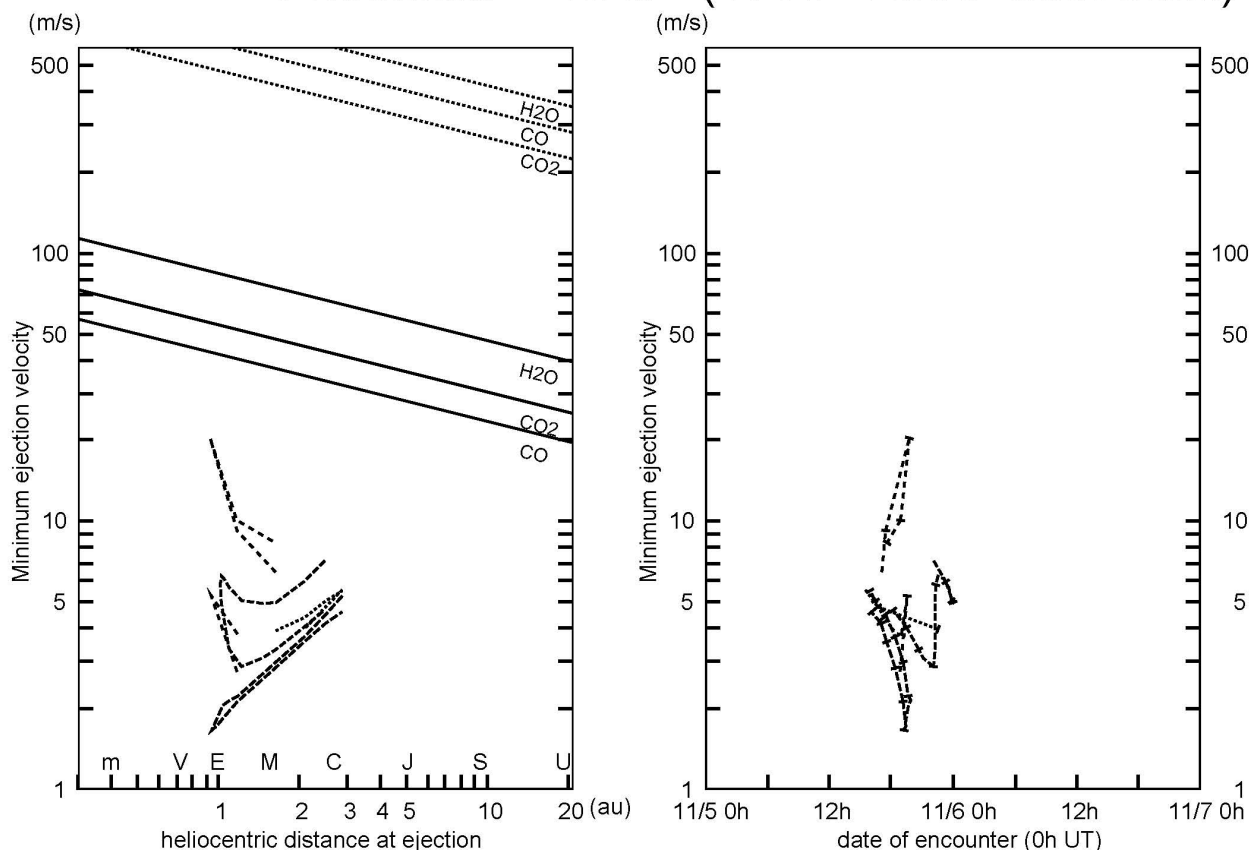
この問題を解決するには、母天体から放出されるダストのタイミングと速度を4次元フルモデルにする必要がある。この時、母天体から放出されたダストは、さまざまな軌道を描いて地球に衝突してくるが、それらの最低放出速度が、水が真空中に噴出する時の上限速度(Zeuner velocity)を下回れば、実際に流星が出現する可能性があることになる。

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

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

2025年は、ほうおう座流星群が11月5日に極大を迎える一方、10月りゅう座(ジャコビニ)流星群は出現しない予報となっている。

Phoenicid 2025 (1700 - 2000 dust trails)



VHF アマチュア無線電波を用いた流星ヘッドエコーの研究

○長谷川蒼¹ 阿部新助¹ 小野祐司² 後藤駿介¹ 小野裕大³

¹日本大学大学院理工学研究科, ²明星学園中学校・高等学校, ³日本大学理工学部

流星の電波観測では、流星の頭部周辺及び流星の飛跡にできる電離領域で反射される電波エコーを観測している。このエコーは反射する位置で散乱の種類が2つに分けられそれぞれ異なる特徴を持つ。流星の頭部プラズマで反射するエコーは後方散乱をするヘッドエコーといい、流星の飛跡プラズマで反射するエコーはトレイルエコーという。ヘッドエコーは散乱強度が低く、一般的に大口径・大出力のレーダーを用いて観測が行われてきたが、近年低出力・低コストで行うことができる VHF アマチュア無線電波を用いた観測でも、検出が報告されている(Suzuki, K. et al. 2021)。また、ヘッドエコーではドップラー効果が顕著に起こるため、ドップラー周波数から流星の視線速度と放射点を仮定した軌道を推定することができる。しかし、VHF アマチュア無線電波を用いる観測では送信局と受信局が離れるためレーダー方程式による速度推定の精度が悪くなることが課題である。

本研究では、送信局と受信局との距離が比較的近い約 67 km 離れた勝浦-船橋間で観測を行った。観測対象は 2024 年 12 月のふたご座流星群と 2025 年 1 月のしぶんぎ座流星群、観測期間は 12 月 7 日 12 時～12 月 15 日 12 時(JST)、12 月 20 日 12 時～2025 年 1 月 10 日 12 時(JST)である。解析の結果、ふたご座流星群では 34 個、しぶんぎ座流星群では 25 個の計 59 個のヘッドエコーの検出に成功した。得られたエコーに対しては、従来のレーダー方程式による速度推定手法以外に送受信局の基線を考慮したドップラー周波数と速度の関係式を導出し、観測データへ適用して考察を行った。

本発表では、新レーダー方程式の物理的意味に加え、実際の観測結果に基づく検証と考察を通じて、その有効性および今後の応用可能性について詳しく議論する。

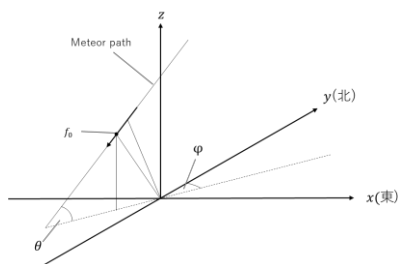


Fig1. 流星の経路図

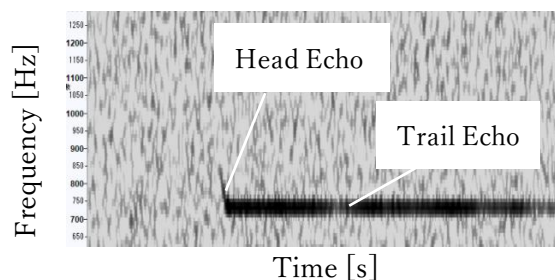


Fig2. ヘッドエコーの周波数解析

参考文献

- [1] Suzuki, K. et al. SAG: Stars and Galaxies Vol. 4 id.1 (2021)

Allende 隕石中コンドリュールの 3 次元形状の成因と組織との関係

○佐藤 澤央¹ 竹田 裕介² 深井 稜汰³ 増田 雄樹⁴ デリン メフメトオグズ⁵ 笹木 慎太郎⁶ 池上 森⁶ 久保田 彩⁷ 植田 知幸⁶ 伊庭 靖弘⁶ 白井 寛裕^{1,3}
¹東京大学 ²公益財団法人高輝度光科学研究センター ³宇宙航空研究開発機構 ⁴コペンハーゲン大学 ⁵モルゲンロット株式会社 ⁶北海道大学 ⁷国立研究開発法人産業技術総合研究所

背景 原始太陽系円盤中のダスト粒子形成・進化過程は、惑星形成における最初期の過程として重要である[1]。始原的隕石に含まれるコンドリュールは、原始太陽系円盤中のダスト粒子が何らかの要因によって加熱・溶融し、急速に冷却することで形成された球状の固体物質であり、微惑星形成のための主要な構成要素であるが、コンドリュールがどのような環境で形成し進化したかは多数の説がある[e.g.,2]。円盤のダスト密度・加熱冷却温度・外部からの衝撃といった物理的条件に依存してコンドリュールのサイズや形状が決定される。コンドリュールの形状には多様性（球状、楕円体状[e.g.,3]、非球状[e.g.,4]）があることが示唆されている。非球状のコンドリュールの成因はダストの加熱・溶融、冷却・固結の過程[2]を反映すると考えられるが、コンドリュールの形成後に母天体上で受けた変形・破壊過程[5]との区別はされていない。そのため、非球状コンドリュールの形状の起源を、コンドリュールの持つ組織情報とあわせて物質科学的に明確化することは重要である。

コンドリュールは、これまでに電子顕微鏡[e.g.,3]やXCT[e.g.,6]などにより観察されてきた。電子顕微鏡では立体形状を推定するのに仮定が必要となる。一方XCTは、隕石のマトリクス部とコンドリュール部でX線の透過強度に差がないために解像度が低いことや、色情報の欠損から、組織を鮮明にとらえられない。本研究では、高解像度の断面明視野画像を3次元に再構成するトモグラフィー法[7]を隕石試料に応用することでコンドリュールの3次元形状を明らかにし、断面画像から得られる組織の情報とあわせて、形状の成因を議論する。

手法 サンプルには、Allende 隕石 (CV3 コンドライト) の隕石片（総体積:1880 mm³）を使用した。隕石片を樹脂に包埋し、厚さ 5 μm を研削する度にデジタルカメラで撮影した[8]。このトモグラフィー法により、計 2343 枚の断面画像を得た。得られた断面画像からコンドリュールを目視で抽出し、3次元可視化用ソフトウェア(Amira; Thermo Fisher Scientific)を用いて積層した。これにより、360度方向から観察可能で、フルカラーのコンドリュール3次元モデルを作成した。本研究では、試料で確認されたコンドリュール 118 粒子中 44 粒子に対して3次元可視化を行なった。それぞれの3次元モデルに対し、観察と形状（球状・楕円体状・非球状）と組織（斑状・非斑状）に基づいた分類を行った。また、非球状の一部に平滑な面をもつ形状を"平板状"として分類した。

結果 球状かつ斑状組織が 11 粒子、非球状かつ斑状組織が 14 粒子、球状かつ非斑状組織が 5 粒子、非球状かつ非斑状組織が 4 粒子（うち、平板状が 3 粒子）、データの不足による分類不能の粒子が 10 粒子見られた。楕円体状の粒子は現在までに見つかっていない。

議論 球状のコンドリュールは非斑状の組織である確率が高い一方、非球状のコンドリュールの大半は斑状の組織を示す傾向があった。組織の違いが、コンドリュール形成時にダスト粒子が経験した溶融の程度を示しており、溶融の程度の違いが3次元形状に影響を与えることを示唆する。球状のコンドリュールは、円盤内部で加熱を受け、高温で完全に溶融したのちに冷却されて形成された[9]一方、非球状のコンドリュールは、円盤内部で加熱を受けたが、組織が完全には溶融しないまま冷却されて形成された[10,11]ことが考えられる。ただし、平板状のコンドリュールで確認できた組織は非斑状の組織のみであり、他の非球状コンドリュールとは異なる起源を持つと考えられる。

引用文献

- [1] Okuzumi et al., 2012, *ApJ*, **752**, 106.
- [2] Miura and Nakamoto, 2007, *Icarus*, **188**, 246-265.
- [3] Hanna et al., 2015, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **171**, 256-282.
- [4] Rubin and Wasson, 2005, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **69**(1), 211-220.
- [5] Nakamura et al., 1992, *Earth Planet. Sci. Lett.* **114**, 159-170.
- [6] Friedrich et al., 2022, *Microscopy research and technique*, **85**(5), 1814-1824.
- [7] Ezaki et al., 2023, *Papers in Palaeontology*, **9**(3).
- [8] Fukai et al., 2025, *Icarus*, **439**, 116648.
- [9] Connolly and Hewins, 1995, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59**, 3131-3246.
- [10] Connolly et al., 1998, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **62**, 2725-2735.
- [11] Lofgren, 1996, *Chondrules and the Protoplanetary Disk*, 1887-1896.

ナノインデンテーション法を用いた Tagish Lake 隕石の力学的特性評価

Mechanical properties of Tagish Lake meteorite measured with nanoindentation test

○庄子歆太朗^{1,2}, 小野寺圭祐³, 田中智^{2,4,5}, 川村太一⁶, 石崎拓也², 金丸礼², 岩田隆浩^{2,5}

¹関西学院大学, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³岡山大学惑星物質研究所, ⁴東京大学大学院新領域創成科学研究科, ⁵総合研究大学院大学, ⁶パリシテ大学パリ地球物理研究所

太陽系を構成する物質の力学的特性は、天体の形状や衝突履歴、表層進化を理解する上で重要な物性値である。隕石やリターンサンプルに関するこれらの特性は、理論計算等の基礎データとしても重要である[1]。原始的天体物質への関心が高まる中、サンプルリターン技術の発展により試料の取得は可能となったが、その脆弱性から加工が困難であり、力学的特性に関する実測データは依然として限られている[2]。本研究では、高い孔隙率と低いバルク密度を有する特異な炭素質コンドライトで、力学的特性がリュウグウサンプルと近いとされる Tagish Lake 隕石[3][4]を対象に、ナノインデンテーション試験を行い、力学的特性を評価する。特に、注目する空間スケールによって力学特性がどのように変化するか、また従来の手法では得られない局所的な弾塑性を明らかにすることを目的とする。

ナノインデンテーション試験は、微小領域に圧子（インデント）を押し込み、得られた荷重-変位曲線（P-h 曲線）から材料の硬度や弾性率などの力学的特性をマイクロメートルスケールで評価する手法である。本研究では、Tagish Lake 隕石（文献[4]で使用された試料 No-4）を対象に、島津製作所製の微小圧縮試験機を用いて負荷-除荷試験を実施した。試料は、ラッピングフィルムを用いて無水研磨処理が施され、平坦な測定面を形成している。測定にはビッカース圧子を用い、最大荷重 50 mN で複数点にわたり試験を行った。得られた荷重-変位データに Oliver-Pharr 法[5]を適用し、ビッカース硬度（HV）および換算弾性率（ E_r ）を算出した。測定結果より、Tagish Lake 隕石の HV は 0.6~7.0 kgf/mm²、 E_r は 0.3~1.1 GPa の範囲に分布し、それぞれ 63% および 39% のばらつきを示した（図 1）。一方、比較対象とした SUS304 では、HV と E_r のばらつきはそれぞれ 8% および 11% にとどまり、Tagish Lake 隕石の方が著しく大きなばらつきを示した。これは、Tagish Lake 隕石特有の、ミクロクラックやマトリクス構造などの影響を強く受け、外観からは判別できない局所的な物性を反映しているためであると考えられる。さらに、最大荷重付近で観察された荷重-変位曲線の頭打ち形状は、粘弾性に起因するクリープ現象を示唆している可能性がある。発表では、Tagish Lake 隕石試料間に見られた力学特性のばらつきの要因について考察し、測定手法の違いが弾性率に与える影響についても議論する。

参考文献： [1] Ostrowski and Bryson (2019), Planetary and Space Science, 165, 148-178. [2] Hanton et al. (2024), *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXXV, 1657. [3] Onodera et al. (2022), *Proc. Hayabusa Symp.*, P-07. [4] Onodera et al. (2023), *Proc. 2023 Autumn Meeting of the Japanese Society for Planetary Sciences.*, P-062. [5] Oliver et al. (1992), *J. Mater. Res.*, 7, 1564-1583.

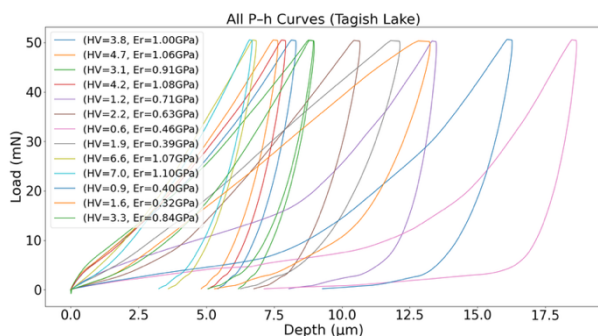


図 1. 測定で得られた荷重-変位曲線

周惑星円盤に捕獲された微惑星の軌道進化

○多門瞭¹, 大槻圭史¹, 末次竜²

¹神戸大学, ²大島商船高等専門学校

木星や土星などの巨大ガス惑星の周りには規則衛星が確認されている。これらの衛星は周惑星円盤内で巨大惑星が形成される際の副産物として形成されたと考えられている。そのため、このような衛星の形成過程は惑星形成過程とも関わり重要である。

従来の衛星形成モデルの一つに、原始惑星系円盤からガスとともに流入したダストの衝突合体成長によるものがある [1]。しかし、この場合、周惑星円盤のダスト-ガス比が十分大きくない限り、ダストがガスからの抵抗力を強く受け、十分成長する前に惑星に落下してしまうという問題がある [2]。一方、周惑星円盤が原始惑星系円盤から微惑星を捕獲し、それらが種となって小粒子を捕獲し、ガリレオ衛星が形成されるというシナリオが提唱されている [3]。

本研究では、衛星の種となる捕獲された微惑星の軌道進化を、ガス抵抗を考慮した惑星-微惑星の系について、数値軌道計算を行うことで調べた。周惑星円盤への微惑星の捕獲には周惑星円盤のガスの回転方向と一致する順行捕獲と反対方向に回転する逆行捕獲がある [4, 5]。そこで、周惑星円盤としては木星系を仮定し、順行捕獲と逆行捕獲のそれぞれについて、捕獲される微惑星のサイズと軌道減衰時間の関係を調べた。その結果、順行捕獲された微惑星の軌道減衰時間は解析解と一致するのに対して、逆行捕獲された微惑星の軌道減衰時間はサイズにより、逆行の場合の解析解から外れることがあることがわかった。これは逆行捕獲された微惑星が軌道減衰により惑星へ近づくことでガスとともに運動するようになり、順行軌道になるためである。これらの結果も考慮して衛星形成過程を検討する必要がある。

参考文献

- [1] Canup, R. & Ward, W. R. 2006, *Nature* 441, 834–839
- [2] Shibaie, Y. et al., 2017, *Astrophys. J.* 846, 81 (10 pp)
- [3] Shibaie, Y. et al., 2019, *Astrophys. J.* 885, 79 (19 pp)
- [4] Fujita, T. et al., 2013, *Astron. J.* 146, 140 (13 pp)
- [5] Suetsugu, R. & Ohtsuki, K., 2017, *Astrophys. J.* 839, 66 (15 pp)

Cavity進化とペブル集積を考慮した周惑星円盤での 衛星形成シナリオ

○ 峰平 政志¹, 佐々木 貴教¹, 芝池 諭人²

¹ 京都大学大学院 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻, ² 鹿児島大学 大学院理工学研究科

太陽系のガス惑星である木星と土星には大小様々な衛星が存在するが、特に巨大なものに着目すると、木星には同程度の質量を持った4つの衛星（ガリレオ衛星）が存在する。一方で土星にはタイタン1つしか巨大衛星が存在しない。これらはいずれもガス惑星の成長期に形成される周惑星円盤内で誕生したと考えられている [1]。周惑星円盤という同種の構造から形成されたものにも関わらず、なぜ衛星系に顕著な差が現れているのか、コンセンサスは得られていない。

従来、周惑星円盤内のダストが凝集・合体し、微衛星を経て衛星にまで成長するシナリオが標準的なものになっていた。このシナリオを基に、Sasaki et al.(2010) は惑星磁場により形成されるガス空洞領域 (cavity) に衛星の migration を妨げる効果があると考え、cavity の有無により両者の衛星系に違いが生じると説明した [2]。

しかし近年の研究により、ダストは円盤ガスとの相互作用によって微衛星サイズ (~km) へと成長する前に cm サイズのペブルとして中心惑星へと落下してしまうことが明らかとなった [3]。これにより微衛星を前提とした従来モデルの成立性が疑問視されており、見直しが求められている。

この背景のもとで、Shibaike et al.(2019) は、原始惑星系円盤から微惑星を捕獲し、それに円盤内のペブルが大量に集積することで衛星にまで成長するというシナリオを提案した [4]。そして位置を固定した cavity の存在下でシミュレーションを行い、木星のガリレオ衛星の再現に成功した。

そこで本研究ではまず初めに、この微惑星捕獲とペブル集積を考慮したモデルを土星系に適用し、周惑星円盤に cavity がない場合にタイタン級の衛星が形成可能であるかを検証した。その結果、現実的な円盤パラメータの範囲では、捕獲された微惑星はタイタン質量へ至る前に土星へと落下してしまい、cavity 非存在下ではタイタン形成が困難であることが分かった。したがって、土星系にも cavity の存在が必要だと考えられるが、単に cavity を導入するだけでは木星系のように系内に多数の巨大衛星が残ってしまう。

そこで本研究は土星磁場の変化や惑星降着率の変化に伴う cavity 半径の時間変化を導入し、より整合的な形成シナリオを検討した。具体的には、円盤内に捕獲された微惑星が migration により Roche 半径内に到達することで潮汐破壊を受け、リングを形成する。このリングから中型衛星が形成される一方、cavity 外縁で migration を止められた微惑星からタイタンが形成される、のような形成過程を想定している。今後は、このシナリオの実現可能性等を評価するため、Population Synthesis により粘性や微惑星の捕獲タイミングなどのパラメータ空間を探索する予定である。

参考文献

- [1] Canup, R. M., & Ward, W. R. 2006, *Nature*, 441, 834
- [2] Sasaki, T., Stewart, G. R., & Ida, S. 2010, *ApJ*, 714, 1052.
- [3] Shibaike, Y., Okuzumi, S., Sasaki, T., & Ida, S. 2017, *ApJ*, 846, 10
- [4] Shibaike, Y., Ormel, C. W., Ida, S., Okuzumi, S., & Sasaki, T. 2019, *ApJ*, 885, 79,

原始天王星の巨大衝突シミュレーション： 状態方程式とSPHスキームが円盤特性に与える影響

Simulation of Proto-Uranian Giant Impacts: The Influence of Equation of State and SPH Scheme on Disk Properties

○村嶋慶哉¹ 佐々木貴教¹

¹京都大学

天王星とその主要な衛星およびリングは、約98度の傾斜角という顕著な特徴がある。この傾きを説明する有力な仮説の一つが、巨大衝突説である。この説では、巨大衝突によって天王星の自転軸が傾き、その衝突で生じた円盤から現在の衛星系が形成されたと考えられている。これまで、Slattery et al. (1992)、Kegerreis et al. (2018)、Reinhardt et al. (2020)といった先行研究で、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を用いた流体数値シミュレーションでこの巨大衝突の特性について調べられてきた。これらの先行研究では、一般的に質量が大きくコンパクトで、岩石成分の割合が低い円盤が予測されており、これは現在の天王星の衛星系の観測結果と矛盾するとされていた。しかし、Ida et al. (2020)の研究は、氷の再凝結を含む円盤の進化を考慮することで、円盤の質量とサイズの矛盾が解消される可能性を示した。それでもなお、形成される円盤に含まれる岩石の量にはシミュレーション間でばらつきがあり、天王星の衛星が天王星本体と比較して岩石に富む組成を持つという問題は依然として未解決である。

このようなシミュレーション結果の違いの要因としては、用いられる状態方程式 (EOS) が考えられる。また、月形成の巨大衝突シミュレーションにおいて、不連続面でのSPH法の課題を解決するために開発された改良版であるDensity Independence SPH (DISPH) 法 (Saitoh & Makino, 2013; Hosono et al., 2013; Hopkins, 2013) を用いると、形成される円盤の特性が異なることが示されている。

本研究では、この問題に対処するため、標準的なSPH法とDISPH法の両方を用いて、3つの異なる状態方程式を適用した天王星系への巨大衝突の数値計算を行った。目的は、状態方程式やSPHスキームの違いが、形成される円盤の特性にどのような影響を与えるかを調査することである。本発表では、これらの計算結果を先行研究の結果と比較し、先行研究の計算結果の違いが生じた原因についての考察を述べる。さらに、これらの知見が天王星の衛星形成理論に与える影響についても考察を行った。

リング粒子集積に伴う土星小型衛星の形状進化

○溝田 霧斗¹, 平田 直之¹

¹神戸大学大学院 理学研究科 惑星学専攻

土星は多種多様な衛星を従え太陽系の縮図の様な姿をしている。土星系には Titan や Enceladus といった主要な衛星から、Janus、Epimetheus、Pan、Atlas、Methone、Pallene といった小さな衛星も存在しており、これら小型衛星の一部は土星の環の粒子を集積した構造を持っていると考えられている。Pan、Atlas は A 環に位置する衛星で非常に扁平な楕円体をしており、特徴的な赤道リッジが確認されている。薄く平面的に存在する周囲の A 環の粒子が衛星の赤道付近に集積した結果、リッジが形成されたと考えられている[1]。

Methone、Pallene は、Anthe とともに Enceladus の内側の軌道に位置している衛星である。Methone は半径約 1.9km の小さな天体で、観測された最高解像度 27m/pixel においてもクレーター未検出の滑らかな表面をもつ卵型の天体である[2]。半径約 2.2 km の Pallene もまた Methone と同様に球に近い形状を持つ。これらの衛星の軌道上にはアークと呼ばれる弧状の環があることが発見されている。Pan や Atlas が位置する A 環とは異なり、Methone、Pallene が位置する E 環は Enceladus から噴出した約 $1\mu\text{m}$ サイズの水氷粒子が空間的に広がって分布している[3]。これらの小型衛星は、Enceladus に由来する E 環粒子によって覆われている可能性がある。

本研究では、Python における N 体シミュレーションパッケージ「REBOUND」を用いて Methone、Anthe、Pallene、Pan、Atlas の軌道・近傍の環などの環境を再現し、周囲の環粒子が衛星のどこに集積しどのような速度で衝突するのかを計算した。集積過程の評価は、小型衛星の形状や表面状態、更には天体の誕生起源といった力学的進化の基礎研究として役立つと期待している。

Methone への粒子集積の計算の結果(図 1)、天体全体に散らばったものの極域に比べ赤道付近への衝突が比較的多く確認された。この結果や計算によって得られた衝突速度によるクレーターサイズを考慮することで、Methone の滑らかな表面を説明しようと試みる。

近傍の中型衛星 Mimas による摂動によって Methone の軌道が乱され集積分布が変わる可能性がある。そのため周辺の中型衛星を考慮した計算も今後議論していく。また、衛星表面の集積後の物質移動の可能性としてマスマーブメントや水氷の焼結作用といった粒子の挙動についても吟味していく必要があると考えている。

文献：[1]S. Charnoz *et al.*, 2007, *Science*, 1148631. [2]P. C. Thomas *et al.*, 2013, *44th Lunar and Planetary Science Conference (2013)*. [3]e.g., Hillier *et al.*, 2007, *Saturn from Cassini-Huygens*; S. Kempf *et al.*, 2008, *Icarus*, 193.

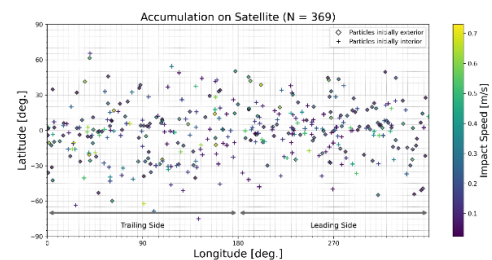


図1 E環粒子の集積分布

ガニメデの熱進化と磁場強度計算による内部構造とバルク組成の推定

○川上 稜平, 木村 淳, 松尾 太郎, 佐々木 晶

大阪大学

木星衛星ガニメデは表面強度約 720 nT の双極子的な磁場を持っており、金属核と核ダイナモの存在が示唆されている。また、重力場測定からも金属核の存在は裏付けられており、ガニメデは外側から H₂O 層、岩石マントル層、金属核の 3 層構造を持つと推定されている。しかしながら、重力場データのみ頼った現状での内部構造の推定は、不定性が非常に大きい。岩石マントルと金属核の体積や組成の違いはガニメデ内部の熱進化や現在の熱状態、つまり核ダイナモ発生の可否や発生する磁場の強さも大きく変えうるため、推定されるすべての内部構造において核ダイナモによる磁場発生が起こりえるかは、自明ではない。そこで本研究では、様々なバルク組成を仮定したガニメデの内部構造を推定し、それぞれの構造における熱進化シミュレーションを行い磁場発生の有無とその強度を見積もることで、観測された磁場を再現可能な内部構造とバルク組成を制約する。

バルク組成には様々なコンドライト組成 (H, L, LL, CI, CM, CO, CV, CK) を仮定し、H₂O, 岩石マントル, Fe-FeS 系金属核が完全に分化した場合の内部構造を想定した。そのために、核-マントル間での硫黄の分配を化学平衡計算で見出した先行研究[1]に倣い、ガニメデの岩石マントルと金属核の大きさ、金属核の硫黄含有率を推定した。その上で、これらの内部構造において誕生から現在までの 46 億年間の熱進化シミュレーションを行った。完全分化構造を持つガニメデは、初期状態で核内温度は融点にあり、岩石マントルは上部境界で 300 K となる線形分布を持つと仮定した。岩石マントルでは伝導と対流による熱輸送と、長寿命放射性同位体 (²³⁸U、²³⁵U、²³²Th、⁴⁰K) の崩壊熱を熱源とした一次元熱輸送方程式を解き、金属核内は断熱温度分布が維持されるとして計算を行った。熱進化に従って、核はマントルでの熱輸送に伴い冷却しつつ、核内では硫黄含有率に従った凝固が生じる。それに伴う潜熱と組成分離による重力ポテンシャル解放を核内の熱源として考慮し、スケーリング則[2]を用いて表面磁場強度を見積もった。

計算の結果、L コンドライト的バルク組成の場合は磁場が発生せず、LL、CO、CV、CK 組成で生じる磁場は観測値より一桁以上小さくなった。また H、CI、CM 組成では、観測値と同程度の強さの磁場が発生した。L コンドライト的組成は核の硫黄含有率が共晶組成に近く融点が高いため、本モデルでの初期温度も低くなる。従ってマントルと核の冷却速度が遅く、核ダイナモが生じない。LL、CO、CV、CK 組成では核の冷却速度が十分に大きく、核内凝固も生じるため核ダイナモが発生する。しかし核が小さくダイナモ領域も小さいため、発生する磁場は弱い。以上から、バルク組成が H、CI、CM コンドライトのような、核が十分に大きく Fe-FeS 系の端成分に近い組成を持つ場合にのみ、観測された磁場を再現できることが分かった。

[1] Bercovici, H. L., Elkins-Tanton, L. T., O'Rourke, J. G., and Schaefer, L. 2022. The Effects of Bulk Composition on Planetary Core Sulfur Content and Size. *Icarus* 380, 114976.

[2] Buffett, B.A., Huppert, H.E., Lister, J.R., Woods, A.W., 1996. On the thermal evolution of the Earth's core. *JGR* 101 (B4), 7989-8006.

二次元フーリエ解析を用いた エンセラダスの表面地形解析

○宮井孝太郎¹, 諸田智克¹, 中原俊平¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

現在も活発な地質活動を示すエンセラダスにおいて、その表面地形を解析し、地質学的な時間スケールでの表面進化を復元することは、エンセラダスの内部構造や熱進化を解明していく上で重要である。

エンセラダス表面はその地形的特徴から主に4つの領域に分類されている。クレータ平原 (Cratered plain) は高いクレータ数密度を有しており、エンセラダスにおいて最も古い領域である。後行半球地形 (THT) はリッジやトラフなど複雑なテクトニック変形が見られ、LHT や SPT より古い領域である。先行半球地形 (LHT) は THT と同様に複雑なテクトニック変形が見られるが、THT よりも若い領域である。南極地形 (SPT) はタイガーストライプと呼ばれる複数の亀裂を代表とする大規模なテクトニック変形に加え、プリューム噴出など活発な地質活動が見られ、エンセラダスにおいて最も若い領域である。LHT や THT では~10 億年前に何らかの表面更新プロセスにより、クレータが消失したと考えられるが、その地質過程や表層の温度構造の履歴はよくわかっていない。

Schenk & McKinnon (2024) は Cassini の ISS データを元にステレオ測量 (SG) と写真測量 (PCN) を組み合わせたエンセラダス全球のデジタル標高モデル (DEM) を新たに作成し、これによりエンセラダスの地形解析が容易となった。本研究では、この DEM データを用いた二次元フーリエ解析 (FFT) により、エンセラダスの km スケールの地形の形成・緩和過程を明らかにすることを試みる。

特に本研究では、Cratered plain と THT、LHT に注目し、2次元のFFT解析を行った。その結果、Cratered plain の各領域で 10km スケールのパワースペクトル密度に有意な差が見られ、領域ごとの表面更新プロセスの違いが示唆された。また、LHT での同スケールにおけるパワースペクトル密度が THT や cratered plain に比べて顕著に小さくなった。

本研究ではこの結果について、粘性緩和やプリューム物質の堆積を含む複数の地形変形プロセスが寄与していると考えた。そこで、それぞれのプロセスが影響を与える地形の波長依存性の違いに着目することで、それらの寄与の大きさについて定量的に評価する。そしてそれを踏まえ、注目した各地質ユニットの地質的進化について議論を行う。

木星の雲対流層を想定した雲解像モデルの開発 ～アンモニア水溶液の雲の導入～

○杉山 耕一郎¹, 中島 健介², 倉本 圭³, 林祥介⁴

¹ 松江高専・情報, ² 九州大学・惑星, ³ 北海道大学・宇宙理学, ⁴ 神戸大学・惑星/CPS

木星は厚い雲に覆われており、その大気構造は十分に解明されていない。我々は雲の生成・消滅が繰り返された結果として形成される準定常状態での大気構造を明らかにするために、木星大気に応用可能な雲解像モデルの開発を行ってきた。これまでの研究においては、木星の大気組成が観測的に定まっていないことを考慮し、大気深部での凝結性成分の存在度を太陽組成の1～10倍に変化させた各ケースについて計算を行ってきた (Sugiyama et al. 2011, 2014)。

凝結性成分が太陽組成の10倍程度存在する場合、鉛直1次元の熱平衡を仮定した理論的検討から、水氷、水、アンモニア氷、アンモニア水溶液の凝結、および硫化水素アンモニウムの生成反応が生じると考えられている。さらに Guillot (1995) は水の凝結に伴う大気安定化作用によって雲対流の発生が抑制される可能性を指摘している。しかしながら、これまでの我々の雲解像モデルでは、水およびアンモニア水溶液の凝結は考慮されておらず、より現実的な雲構造の再現には課題が残されていた。そこで本研究ではこれらの成分の凝結も取り扱い可能な新たな雲解像モデル用の凝結計算モジュールの開発を目的とする。このモジュールを雲解像モデルに導入することで、凝結性成分の多いケースにおける木星大気構造を雲対流の数値シミュレーションを通じてより詳細に調べることを目指す。

今回開発する凝結計算モジュールはギブス自由エネルギー最小化法によって実装することを試みる。ギブス自由エネルギー最小化法は、多成分の凝結・化学反応を伴う大気の平衡組成を高精度で求めることができる手法であり、かつて我々の行った鉛直1次元の熱平衡計算 (Sugiyama et al., 2006) でも採用された方法である。一方で、この方法は計算コストが高いため、対流モデルに組み込む際は計算の効率化の検討も必要となる。本発表では開発中の凝結モジュールの定式化とその雲解像モデルへの組み込み方法、さらに予備的な数値実験によって得られた初期的な結果を紹介する。

^{26}Al 壊変熱駆動下における微惑星内部の揮発性成分保持量と脱ガス時間スケール

○齊藤大晶¹

¹ 公立千歳科学技術大学 理工学部

原始惑星の内部において、水などの揮発性成分がどの程度保持されるか、あるいは脱ガスによって失われるかは、地球型惑星の大気形成史やその後の海洋形成の起源を考察するうえで極めて重要な課題である。特に、短寿命放射性核種である ^{26}Al の放射壊変熱は、原始惑星内部を融解状態に導く可能性があり、この状態では内部に含まれていた揮発性成分が短期間で脱ガスすることが予測される。一方で、集積開始のタイミングが遅れる場合には、 ^{26}Al の崩壊が進行し放射壊変熱が減少するため、内部が融解温度に達しないまま成長を続け、揮発性成分が未分化の状態で大量に内部に残る可能性も考えられる。

本研究では、月サイズの原始惑星を対象とし、集積開始のタイミング（CAI 形成後からの経過時間）、成長速度、および ^{26}Al 放射壊変による熱進化を組み合わせた数値モデルを構築した。また、マグマオーシャン期における揮発性成分の熱化学平衡や対流による影響も考慮し、内部に保持される揮発性成分の量や脱ガスする時間スケールを定量的に解析した。

計算の結果、CAI 形成後約 0.26 Myr 以前に原始惑星の集積が開始されると、惑星内部は急速に融解し、含まれる揮発性成分は約 1000 年という非常に短い時間スケールでほぼ完全に脱ガスすることが明らかになった。これに対して、CAI 形成後 1 Myr 以降に集積が開始されると、放射壊変熱が十分に得られず、惑星内部は融解せず未分化状態を維持し、多量の水や揮発性成分が内部に保持される可能性が高いことが示された。さらに、CAI 形成後 0.26–1 Myr の間に集積が開始される中間的なケースでは、初期には低温で含水鉱物が未分化状態を保つものの、その後の質量増加に伴って部分的に融解が進行し、内部の含水鉱物が熱化学的に分解されることで部分的に脱ガスする複雑なプロセスが予測された。

これらの結果は、月～火星サイズ程度の小型原始惑星において、揮発性成分の残存量および脱ガス時間スケールが ^{26}Al の放射壊変熱と集積タイミングに強く依存することを示唆している。今後は、本研究で得られたモデル結果を火星隕石や他の天体の観測データと比較検証することで、原始惑星形成および進化過程への理解を一層深めることが期待される。

月形成巨大衝突破片の地球型惑星・月表層への影響評価

○ 松本 侑士¹, 黒澤 耕介²

¹ 国立天文台, ² 神戸大学

太陽系地球型惑星領域で最後に起きた巨大衝突が月形成であると考えられる。この巨大衝突によって月質量からこの数分の1程度の合計質量の破片が地球型惑星領域にばらまかれることがわかっている (Canup 2004)。この破片は月軌道速度から地球脱出速度の2倍程度までの幅広い速度領域に分布すると考えられる。これらの破片は既に形成している地球型惑星や月との高速衝突を起こすことで、これらの天体の表層進化に影響すると考えられる。破片の軌道進化については Jackson & Wyatt (2012) や Bottke et al. (2015) で N 体計算が行われ、 > 10 km/s での小惑星との衝突が起きることが示されている。ただ、これらの計算では水星や月といった軌道周期が短い天体は計算コストのために含まれておらず、これらの天体への高速衝突の影響は不明である。

破片の軌道進化については、Ito & Malhotra (2006) がおよそ 2.1 au に存在する ν_6 永年共鳴付近での衝突破片の進化を N 体計算から解いており、この計算では水星から海王星までの惑星を解いている。この結果、7回の計算において 0.37% から 1.38% の破片が 10^8 年以内に水星と衝突を起こしている。破片の半数程度以上が永年共鳴による離心率の上昇を受けて太陽と衝突していることを考えると、地球軌道付近から放出された破片はより多くが水星と衝突を起こすことが期待される。また Ito & Malhotra (2006) でも月の軌道は計算には含まれておらず、太陽-地球-月-破片系の別計算から影響を評価している。

そこで本研究では太陽系惑星 8 天体と月、地球-月系から放出された破片の軌道計算を行い、破片の地球型惑星・月表層への影響を調べた。まず今回は惑星と月は現在の軌道において計算を行った。この結果、破片が水星への 20 km/s 以上の速度での衝突していること、またこの衝突が 10^7 年程度で $> 1\%$ の破片で起きていることを確認した。地球にも 5% 程度の破片が衝突する一方で、月には 1% 以下の破片しか衝突していないことがわかった。

初期太陽系における惑星の軌道ダイナミクス： (不) 安定な惑星たちの歴史

Dynamical evolution of the early solar system:
a history of stable and rogue planets

○パトリック ソフィア リカフィカ (Patryk Sofia Lykawka)¹, Clement Matthew²

¹ 近畿大学 総合社会学部 (School of Social and Human Sciences, Kindai University)

² Johns Hopkins APL, United States

Explaining the current orbital structure of the planets and minor bodies in the outer solar system remains an outstanding problem in planetary sciences. Our current understanding of planet formation, particularly within the early solar system's protoplanetary disk, suggests that it is plausible that multiple giant planets and numerous other planetary bodies initially formed in more spatially compact configurations approximately 4.56 billion years ago.

Motivated by prior research that favors global orbital instabilities as a key mechanism—originating from initial primordial systems thought to contain five or even six giant planets (specifically, the Jupiter-Saturn pair alongside three or four ice giants similar to present-day Uranus and Neptune)—we conducted extensive N-body simulations of analogous systems. Our aim was to gain a more comprehensive understanding of the formation and evolution of the outer solar system. Specifically, our investigations focused on eight distinct, loosely stable initial configurations. We also explored the influence of varying total disk masses and examined the crucial role of additional Earth-mass planets within these systems.

As anticipated, a considerable number of our simulated systems underwent orbital instabilities, often within remarkably short timescales of approximately 10 Myr. These instabilities frequently led to the dynamical ejection of ice giants and Earth-mass planets from the solar system within similar periods. Upon the conclusion of our simulations after 500 Myr, we observed that many of the resulting systems contained precisely four giant planets established on stable orbits. These outcomes resembled the current architecture of our solar system. Furthermore, we present preliminary findings detailing the characteristics and fates of the "rogue" planets (those lost from the system) in the final configurations. These insights contribute valuable information to the ongoing quest to unravel the complex history of our planetary neighborhood.

※研究の成果は解析中です。

This work is supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP23K03482

ストリーミング不安定性における ダスト衝突の物理：ダストサイズ分布の効果

○和田 航汰¹, 富永 遼佑², 田中 秀和¹

¹東北大学, ²東京科学大学

微惑星形成の最も有力な説は、ストリーミング不安定性による高密度ダスト塊の生成である (e. g., Johansen & Youdin 2007)。ストリーミング不安定性は、ガスに対するダストのドリフト運動をエネルギー源としてダストを集積する機構であり、ダスト塊が重力不安定となることで微惑星が形成されると期待されている。しかし、ストリーミング不安定性による微惑星形成にも条件がある。ストリーミング不安定性で十分高密度なダスト塊を効率よく形成するためには、数 cm 以上のダストが必要であり (Carrera & Simon 2022)、そのサイズまでのダスト成長が必要である。最近では、ストリーミング不安定性でつくられるダスト塊中のダスト成長が盛んに研究されるようになってきた (e. g, Tominaga & Tanaka 2025)。そのような研究のために、ダスト塊内におけるダストの衝突速度や衝突率を定量的に求める必要がある。

我々は、ストリーミング不安定性の軸対称 2 次元数値シミュレーションを行い、ダスト塊中のダスト衝突速度や衝突率を調べた。単一ダストサイズの数値計算では、ダスト-ガスの密度比を増加させると、ストリーミング不安定性がドリフト運動を促進し、それがさらにストリーミング不安定性の乱流を強めるという正のフィードバックが働いていることがわかった。一方、サイズ分布を入れた計算では、小さいダストの存在によってドリフト運動の促進が阻害され、この正のフィードバックは働かないことも分かった。従来研究で、ダストサイズ分布はストリーミング不安定性を抑制する効果があることが知られていたが、本研究の結果はこれをうまく説明できる。

我々は乱流速度やダスト衝突速度を表す経験式を求めることに成功した。これはダストドリフト速度で表され、サイズ分布の有無に関係なく適用可能な式になっている。乱流中のダストドリフト速度はサイズ分布の有無で傾向が異なるが、非摂動状態のダスト-ガス比を用いてこれを予測する経験式をそれぞれ求めることができた。また、ダスト密度の確率分布やダスト衝突率もダストドリフト速度を用いて統一的な経験式で表される。求めた衝突率の経験式は、シミュレーションの局所的なダスト密度の関数の形で得られている。この経験式を用いれば、各時刻、各地点におけるダスト成長を流体シミュレーションに組み込むことができる。

さらに、サイズ分布を入れた計算で得られた各サイズのダスト衝突率より、ダストサイズ分布の進化について議論した。小さいダストは比較的短時間で大きいダストに衝突し取り込まれ、これが大きなダストの成長時間よりも短いため、ダストサイズ分布は狭まる傾向がある。このサイズ分布の進化によりストリーミング不安定性がより発達することが期待される。

ダスト-ガス 2 流体計算へのダスト反発係数進化の導入

○岩野志織¹、瀧哲朗¹、黒川宏之¹

¹ 東京大学

惑星形成過程において、 μm サイズのダストから km サイズの微惑星への成長は、衝突破壊や中心星落下といった障壁により困難であることが知られている。その解決策として、ダストが不安定性によって高密度に濃集し、自己重力収縮することで微惑星を形成するシナリオが有力とされている (Lesur et al. 2023; Bae et al. 2023)。

このようなダストの濃集および重力収縮の促進には、ダスト間の非弾性衝突による運動エネルギーの散逸が重要な役割を果たす。過去の研究からは、ダストの反発係数が小さいほど、ダスト集団の離心率や速度分散が抑制されることが明らかになっている (Johansen et al. 2012)。また、ダスト間の非弾性衝突を取り入れた N 体計算から、ダスト集団の重力収縮によって形成される微惑星が Kuiper Belt 天体の観測と整合的な微惑星連星を形成することも明らかになっている (Nesvorny et al. 2010)。これらの計算では反発係数は一定値で扱われてきたが、実際には反発係数は空隙率などのダストの内部パラメータや衝突時の相対速度などに依存することが実験的に知られている (e.g., Beitz et al. 2011; Shimaki & Arakawa 2012)。そのため、ダストのエネルギー散逸が微惑星形成に及ぼす影響を理解するには、内部構造の衝突進化や相対速度の多様性を考慮した反発係数進化を計算に取り入れる必要がある。

そこで本研究では、原始惑星系円盤のダスト-ガス 2 流体計算にダストの反発係数進化を導入し、反発係数進化がダスト集団のふるまいに及ぼす影響を調べた。ダスト-ガス 2 流体計算コードとしては Pencil Code (Pencil Code Collaboration et al. 2021) を用い、既存の衝突モジュールにおいて固定値で扱われていた反発係数を衝突ごとに変化させる形に変更した。本来、反発係数は衝突時の相対速度とダストの内部パラメータ（空隙率、サイズなど）の両方に対する複雑な依存性をもつが、今回は反発係数進化の影響を予備的に調べることを目的とし、2 つの super particle の相対速度に依存する簡易的な関数として実装した。

本発表では、この設定のもと、有力な微惑星形成機構であるストリーミング不安定性 (Youdin & Goodman 2005; Johansen & Youdin 2007) によるダスト集団形成のシミュレーションを行った結果を紹介し、ダストの濃集過程における反発係数進化の影響を議論する。

ツリー法を応用した多成分ダストの 合体成長計算アルゴリズム

渡邊太一^{1,2}, 片岡章雅¹

¹ 国立天文台, ² 総合研究大学院大学天文科学コース

惑星形成では、ダスト集合体の空隙率や帯電など質量以外の特性 (成分) が注目されている。しかし多成分ダストの合体成長の時間進化を追う数値計算は、直接的に計算するには計算量の大きさから非現実的であり、また近似的に計算した場合には空隙率について計算結果が観測と不整合である (Okuzumi et al. 2012; Kataoka et al. 2013; Zhang et al. 2023)。そこで、より精密な惑星形成理論モデルの構築のため、多成分ダストの合体成長を少ない近似で数値計算できる手法が必要である。

我々は、重力 N 体計算のツリー法を応用した、新しい多成分ダストの合体成長計算アルゴリズムを提案する。ダストの質量や空隙率の分布は、成分の数を d 、軸毎のビン数を N として N^d 個のビンで表される。直接的な計算ではこの全てのビン間の相互作用を考慮し、計算量は $O(N^{2d})$ となる。一方ツリー法を応用した本手法では、質量比を距離とみなし、合体前の小さい側のビンについてまとめて計算することにより、計算量を $O(dN^d \log N)$ にまで削減する。

本手法の性能検証のため、1 成分および 2 成分において直接法および解析解との比較を行い、誤差と計算時間を評価した。1 成分では計算時間において直接法とツリー法はほぼ同等だったが、2 成分ではツリー法により数倍から数十倍程度、計算を高速化できた。本ポスターでは、ツリー法による計算の最適なパラメータについても議論する。

本研究で開発したツリー法ベースの合体成長アルゴリズムにより、多成分ダスト集合体の時間進化を少ない近似で数値計算することが可能となった。今後、原始惑星系円盤の物理量と衝突破壊などこれまで無視されてきた物理過程を実装し、円盤内のダスト集合体の時間進化を計算する。

原始惑星系円盤から周惑星円盤への ガス降着における初期高度と降着位置の関係

○野崎智仁¹, 谷川享行², 大槻圭史¹, 前田夏穂¹

1. 神戸大学, 2. 一関工業高等専門学校

巨大惑星は形成時に原始惑星系円盤からガスを獲得し周惑星円盤を形成する。この周惑星円盤を介してガスや固体物質が供給され、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結果を用いて、周惑星円盤に降着するガスの、原始惑星系円盤における初期高度、及び周惑星円盤での降着位置を詳しく解析した。流体計算結果としては、ガスは等温非粘性と仮定し、惑星質量は0.4木星質量とした場合のものを用いている[1, 2]。

解析の結果、周惑星円盤に降着するガスのうち、原始惑星系円盤における初期高度が惑星の公転軌道面に対して比較的高い高度に位置するガスは、周惑星円盤内で二本の腕構造、及び複数の輪の構造のように表れ、降着していることがわかった。また、周惑星円盤のうち、惑星からの距離がガリレオ衛星の現在の軌道付近より外側の領域に降着するガスは、原始惑星系円盤における初期高度が公転軌道面に対して $0.2r_H \sim 3r_H$ の領域に分布しているのに対して、それより惑星に近い領域に降着するガスは、初期高度が $0.5r_H$ よりも高い領域に分布していることがわかった。これらの結果は、衛星材料物質や巨大惑星大気組成を考えるうえで重要となり得る。

参考文献：

[1] Tanigawa et al. 2012, ApJ, 747, 47

[2] Maeda et al. 2022, ApJ, 935, 56

磁気降着円盤における巨大惑星による衝撃波加熱

○ 冨永遼佑¹, 奥住聡¹, 清水静¹, 武藤恭之²

¹ 東京科学大学, ² 工学院大学

原始惑星系円盤の熱構造を明らかにすることは、ダストの熱進化とそこから形成される小天体や惑星の組成の成り立ちを理解する上で重要である。これまでの研究では、円盤ガスの降着に伴う加熱（降着加熱）と中心星からの照射加熱が主な加熱機構として考えられてきた。磁気流体力学計算に基づく最新の研究によると、磁氣的に降着する円盤では表層でのみ降着加熱が起こることがわかっている。このとき円盤深部の温度は照射加熱によって決まり、水氷のスノーラインが現在の地球軌道より内側になるほど低温になることが示唆されている (e.g., Mori et al. 2019, 2021)。

近年、もうひとつの加熱源として巨大惑星が円盤内につくる衝撃波が提案されている (e.g., Ziampras et al. 2020; Ono et al. 2025)。円盤に埋もれた惑星は、重力を通じて密度波を発生させる。この密度波が伝播する過程で衝撃波になると、ガスに角運動量が渡されると同時に非可逆的な加熱が起こる (e.g., Goodman & Rafikov 2001; Rafikov 2016)。先行研究によれば、この巨大惑星による衝撃波加熱は古典的な粘性降着加熱と同程度に強くなり得るため、円盤の熱構造の理解に重要である。

そこで本研究では、磁氣的に降着する円盤を想定した2次元流体シミュレーションを行い衝撃波加熱率を測定した。乱流粘性による角運動量輸送を仮定した先行研究とは異なり (Ono et al. 2025), 磁場による角運動量損失を模擬したトルクを非粘性流体方程式に取り入れてシミュレーションを実施した。このトルクを円盤の質量降着率に比例する形で与え、質量降着率に対する衝撃波加熱の依存性を調査した。その結果、惑星近傍から発生する衝撃波 (第1波) による加熱率は先行研究と比べて数倍程度低くなり得ることがわかった。質量降着率に対する依存性は先行研究と比べて弱く、質量降着率の1/4乗に比例する経験則を求めることができた。また惑星から離れた位置から発生する衝撃波 (第2波) による加熱率は質量降着率にほとんど依存しないことがわかった。これらの結果に基づき衝撃波加熱率と照射加熱率を比較した。その結果、例えば質量降着率が $3 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$ の円盤では、数 au の領域に木星質量程度の巨大惑星が存在すると衝撃波加熱が照射加熱を上回り得ることがわかった。本発表では衝撃波加熱が優勢になる条件についてより詳細に議論する。

高温凝縮物とダストが共存する原始惑星系円盤内でのストリーミング不安定性

○大城 榛音¹、富永 遼佑¹、奥住 聡¹、市川 修次¹

¹東京科学大学

惑星の材料となる微惑星の形成過程を明らかにすることは、惑星形成を理解する上で必要不可欠である。特に太陽系における微惑星形成に関しては隕石分析から理解が得られつつある。近年の高精度の同位体分析は非炭素質隕石 (NC) と炭素質隕石 (CC) が異なる同位体組成及びそのトレンドを持っていることを明らかにしている。この同位体二分性は、例えば早期に形成された木星によるギャップの影響など、原始太陽系円盤内での時空間的な物質の分断を示唆している (Kruijer et al. 2017)。市川ら (JpGU 2025, 及び本講演会) は、木星ギャップを考慮した円盤内で、豊富な壊れやすいダスト (後のマトリックス) と希少成分である高温凝縮物 (後の CAI) の 2 成分系の進化を計算し、円盤の固体成分における Cr-Ti 同位体の空間分布およびその時間進化を明らかにした。しかし、固体粒子から微惑星に成長する過程でサイズの異なる粒子が同じように取り込まれるかは明らかではなく、隕石サンプルと比較する際のボトルネックとなっている。

我々は原始惑星系円盤における微惑星形成機構として現在有力視されている、ストリーミング不安定性 (Youdin & Goodman 2005) に注目する。ストリーミング不安定性はダストとガスの相互作用によって引き起こされる流体不安定性であり、微惑星形成につながる局所的なダスト濃集を引き起こすことが知られている。このストリーミング不安定性はダストのサイズ分布に依存することが知られている (e.g., Matthijssse et al. 2025)。しかし、これまでの研究ではサイズの大きな固体成分が質量で支配的となるサイズ分布や、等質量分布の場合しか考えられていなかった。

本研究では、高温凝縮物のような粒径は大きいが存在度の低い固体粒子と、小さく豊富なダストが共存する環境におけるストリーミング不安定性による集積過程を調べるため、Athena (Stone et al. 2008; Bai & Stone 2010) を用いた 2 次元流体計算を行った。計算ではサイズの異なる 2 種類の粒子を小さなダストが質量的に優勢な設定で考慮し、最大ダスト密度の時間発展や粒子の空間分布を解析した。

その結果、サイズの異なるダストはそれぞれ独立に濃集することが明らかになった。一方で、濃集度合いは固体粒子のサイズに依存しており、特に、 $St=0.01$ と $St=0.1$ の粒子を比較すると、 $St=0.1$ の粒子は約 10 倍濃集しやすいことが分かった。また、ストリーミング不安定性が作る乱流のパワースペクトルを解析し、ダストの濃集が起こるメカニズムについても考察を行った。粒子が独立に濃集する場合、各濃集領域への取り込み量には大きなばらつきが生じることが予想される。本発表では、これらの結果を紹介するとともに微惑星や隕石母天体形成とのつながりについても議論を行う予定である。

影から探る原始惑星系円盤の鉛直構造とダスト進化

○ 福原優弥^{1,2}, 折原龍太^{3,4}, 奥住聡², 武藤恭之⁵

¹ASIAA (台湾), ²東京科学大学, ³東京大学, ⁴茨城大学, ⁵工学院大学

惑星形成は、若い恒星の周囲に存在するガスとダスト粒子で構成された原始惑星系円盤で進行する。その初期段階では、ミクロンサイズのダスト粒子が成長し、キロメートルサイズの微惑星を形成する。これらのダスト成長・微惑星形成は、円盤を構成するガスとダスト粒子の動力学的・空間的構造に依存する。特にガス乱流は、ダストの沈殿や集積を妨げることでダスト成長に強い影響を与える可能性がある。しかし、近年の ALMA 電波干渉計を用いた観測研究の発展にもかかわらず、これらに対する包括的な観測的制約は依然として困難である。また、理論的にも円盤乱流の駆動機構・領域・強度は未だ明らかになっておらず、実際の円盤における乱流の性質に関する理論的制約はほぼ行われていないのが現状である。

本研究では、遷移円盤内の傾いた内側円盤が外側円盤に作る影に注目し、この影を利用して測定された円盤冷却時間と理論を組み合わせることで円盤構造を決定するモデルを構築した。まず初めに、VLT/SPHERE と ALMA における多波長の高空間分解能観測を利用した、影領域における冷却時間を推定する手法を確立した。この推定手法では、近赤外線ダスト散乱光画像から円盤表面及び影領域の立体モデルを生成し、サブミリ波ダスト連続波観測から得られた赤道面付近の温度分布との空間的なずれを見積もることで、影領域に侵入したダストの冷却時間を測定する。次に、この推定された冷却時間とダスト連続波の放射強度を理論的な制約条件として用い、自己整合的なガス・ダスト鉛直構造モデルを構築した。このモデルを用いて、ダスト面密度とダストの最大粒径をパラメータとして、温度・冷却率・乱流強度・ダスト分布を統合的に計算し、観測結果との比較を通じて物理条件を制限した。

本講演では、このモデルを HD 142527 に付随する原始惑星系円盤に適用した結果を紹介する。この天体は、外側円盤に対して傾いた内側円盤を持ち、近赤外線観測で外側円盤の北側と南側に内側円盤が作り出した2つの影が検出されている。また、ダスト連続波観測は円盤北側のダスト熱放射の局所的な強度低下を示しており、影による温度低下が反映されていると解釈される。本モデルの適用により、北側の影領域において公転周期の約 0.02–0.06 倍の時間をかけて冷却が起こっている可能性が示唆された。この冷却時間は、円盤の乱流起源の1つである鉛直シア不安定性 (VSI) が作用するのに十分なほど短い。さらに、VSI による乱流を仮定し冷却率及びダスト分布を計算した結果、影領域において VSI 乱流がダスト鉛直分布を決定づけ、最大ダストサイズはサブミリメートル (およそ 1 mm 以下) であることが示唆された。

本研究で提案した手法は、影による冷却時間という新たな観測的制約を用いて乱流構造を明らかにする点で新規性が高く、惑星形成の理解にとって有用である。本手法は影構造を持つ円盤に広く適用可能であり、今後の高分解能観測と組み合わせることで、より多くの天体に対して円盤進化と惑星形成の過程を系統的に明らかにする手段となることが期待される。

最も若いトランジット惑星を持つ IRAS 04125+2902 の 遷移円盤に対する ALMA 高解像度観測

○所司歩夢¹, 武藤恭之², Quincy Bosschaart³, Nienke van der Marel³, Gijs D. Mulders⁴,
大村充輝¹, 徳田一起^{1,5,6}, 町田正博¹

1. 九州大学, 2. 工学院大学, 3. Leiden University, 4. Pontificia Universidad Católica 5. 国立天文台, 6. 香川大学

最近、牡牛座-ぎょしゃ座星形成領域に位置する T Tauri 型星 IRAS 04125+2902 の周りで最も若いトランジット惑星が発見された (Barber et al. 2024, Nature, 635, 574)。トランジット惑星の検出は惑星の軌道面が視線とほぼ平行 (edge-on)であることを示している。また、この星には軌道半径 640 au 程度の伴星が存在することが示唆されている。一方で、Submillimeter Array (SMA)による空間分解能 $0''.30$ (~54 au)の観測では、この星の周囲の原始惑星系円盤の面が、視線とほぼ垂直 (face-on)に近いことを示唆している (Espaillat et al. 2015, ApJ, 783, 29)。このように、惑星軌道と円盤面の視線方向に対する傾斜が異なる系は、惑星形成初期に傾いた軌道がどのように形成されるかを探る上で重要な研究対象である。しかし、IRAS 04125+2902 系における円盤構造やガスの分布については、これまで詳細な調査は行われていなかった。

本研究 (Shoshi et al. submitted in ApJ)では、Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)の Band 6 観測データ (観測周波数 230 GHz)を用いて、IRAS 04125+2902 系の原始惑星系円盤を詳細に解析した。ダスト連続波放射からは、傾斜角 35.6 度を持つリング・ギャップ構造の遷移円盤が確認された。さらに、スパースモデリングを応用した画像解析法によって得られた 2 次元の超解像画像解析 (空間分解能~16 au)および、それとは独立な 1 次元円盤輝度分布のモデル解析 (空間相関長~8 au)のモデル解析から、リング内側の放射成分の存在が示された。これは内側円盤に由来する可能性があるが、中心星からの自由-自由放射の可能性も否定できない。加えて、本研究で初めて $^{12}\text{CO } J=2-1$ 輝線を用いて、中心星の力学的質量が 0.7-1.0 太陽質量であることを見積もることができた。リング構造の非対称性や中心付近の速度ゆがみは、仮に内側円盤が存在する場合でも、外側円盤に対して大きく傾いていないと考えられる。ダスト連続波の輻射輸送計算によれば、内側円盤と外側円盤は、互いに 10 度程度しか傾いていない可能性が示された。このような小さい傾斜角のずれの検証には、今後のより高解像度・高感度観測が必要である。本研究の結果は、IRAS 04125+2902 の連星軌道・外側円盤・内側円盤・惑星軌道の面が互いにずれている動的に複雑な系であることを示唆しており、若い惑星系の形成と初期軌道進化に関する重要な手がかりを提供するだろう。

Discovery of Jet-Bubble-Disk interaction: Jet Feedback on a Protoplanetary Disk via an Expanding Bubble

Munetake MOMOSE^{1,2}, Masataka AIZAWA¹, Ryuta ORIHARA^{1,3}

1: College of Science, Ibaraki University

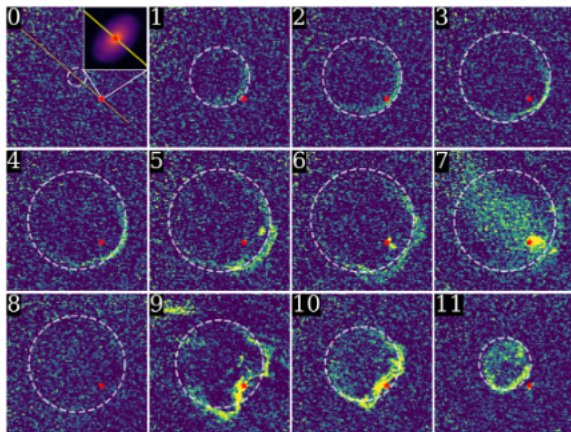
2: NAOJ Chile, National Astronomical Observatory of Japan

3: Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo

Abstract

While stellar jets and outflows are fueled by accretion from disks, their direct influence on disks remain unexplored. Here we revisit ALMA observations of $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ line emission for the young stellar object WSB 52, which were made as a part of the DSHARP project. We identify an expanding bubble that interacts with its protoplanetary disk. Given that the disk axis points toward the bubble center and the kinetic energy of the bubble is roughly 10^{41} erg, we postulate that stellar jets, aligned with the disk axis, have triggered the bubble. The bubble morphology is consistent with uniform expansion with partial concavity, implying the bubble-disk interaction. Correspondingly, the shape and the velocity field of protoplanetary disk appear to be deformed and exhibit high-velocity components, suggesting strong interactions and mass loss from the disk. The discovery of jet feedback onto the disk via the bubble — which we term the jet-bubble-disk interaction — sheds new light on the dynamical processes governing star and planet formation. In this poster, we will explain the physical nature of the bubble found in WSB 52. We will also discuss the remaining questions and potential follow-up observations in the near future.

CO Channel Maps of WSB 52



Conceptual Side View of the Bubble and Star-Disk System

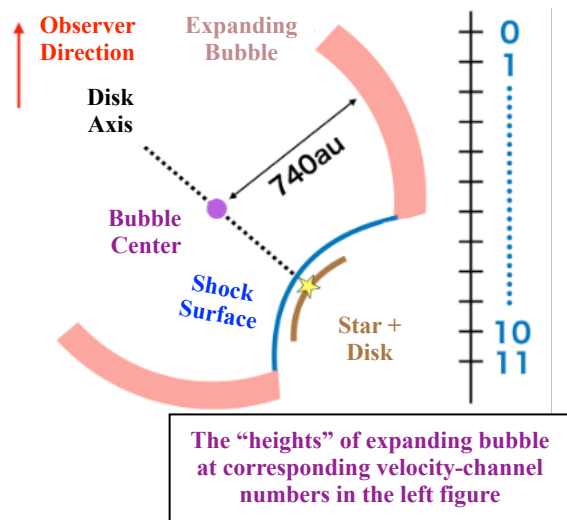


Figure (left): Velocity channel maps of the $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ emission line around WSB 52. The dashed lines represent a model of an expanding bubble, and the red stars indicate the position of WSB 52. Panel 0 also shows an enlarged image of the protoplanetary disk observed with the dust continuum emission at 1.25 mm. Panels 7 and 8 show strong contamination from foreground molecular clouds. *(right)* A conceptual illustration showing a side view of the newly discovered phenomenon. The “heights” of the expanding bubble correspond to the numbers in the figure on the left. Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) and M. Aizawa et al. (ApJ in press)

原始惑星系円盤のガス凝縮に伴う定常圧力バンプ形成

○伊藤蔵人¹ 城野信一¹

¹名古屋大学大学院環境学研究科

原始惑星系円盤のダスト成長過程には不明な点が多い。特に成長初期(m 以下)は、合体成長を妨げる衝突破壊問題や微惑星になる前に落下してしまう落下問題がある。これらは局所的な圧力極大が解決する。ガスは粘性乱流による運動量輸送で降着する。乱流は磁気回転不安定性(MRI)が一般的であり、円盤が適度に弱電離している領域に発生する。中心放射の届かない中心星近傍の赤道面は電離が弱く、乱流がほとんど起こらない Dead zone となっている。Dead zone 外縁に出来る乱流差は圧力バンプを生じる(例: Krekte (2007))。自由電子やイオンはダスト表面に飛来すると吸着する。このため、ダスト表面積が増大すると電離度が下がり、MRI 駆動乱流の構造を変える。

また、Sirono (2024)は上空が中心星照射で高温、赤道面が低温という二層構造円盤を仮定すると、ダストがガス拡散に乗ってスノーラインを上下に横切るとき、上空で蒸発後、再凝縮時に均質核形成で細粒ダストが形成されて総表面積を増加させることを示した。均質核形成したダストがガス拡散で広がることで総表面積が増加する領域が形成される。

円盤のダストが進化し、マイクロサイズのコンパクトダストで成長が止まった状態を仮定し、ガス乱流で巻き上がったダストから細粒ダストが形成され表面積が増加することを考える。スノーラインで形成された細粒ダストが z 方向に拡散するのに十分な時間が経つことで表面積増加帯が形成される。時間経過でダストの成長が進むと、上空に巻き上がるダストが減少するため、ダストガス比 $f_{dg}=10^{-3}$ - 10^{-5} でとった。上空 $2-3 H_{gas}$ にスノーラインがある場合、微粒子形成で数千倍程度の表面積増加が電離度に影響を与え、乱流が弱まることで定常圧力バンプが複数個形成される可能性があることが示された。これは Dead zone 外縁以外にも複数の定常圧力バンプが形成可能であることを示す。

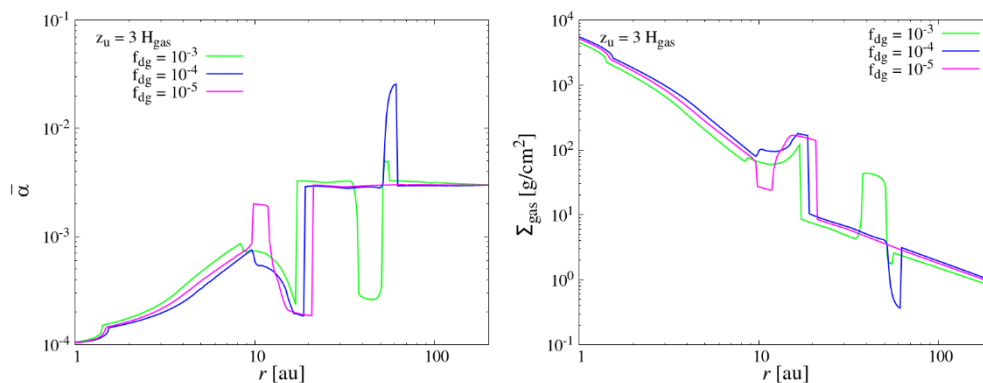


図 Delage et al. (2022) 標準モデルに表面積増加を導入した乱流とガス面密度グラフ。 z_u は z 方向の高温領域下限。異なる曲線は異なるダストガス比 f_{dg} に対応する。10-20 au は H_2O 、30-70 au は NH_3 ガスの細粒ダスト形成で表面積増加、圧力バンプを形成する。

空間的に広がった原始惑星系円盤の中間赤外線放射の起源：PAHの性質と寄与

○ 田崎亮^{1,2}

¹ 東京大学

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）によるエッジオン原始惑星系円盤の近・中間赤外線観測により、円盤上空に広がった中間赤外線放射が発見されている（Duchene et al. 2024, Villenave et al. 2024, Arulanantham et al. 2024, Dartois et al. 2025）。この放射の担い手の一つとして、多環芳香族炭化水素（PAH）が有力視されている。しかし、円盤上空領域における PAH の具体的な性質（サイズ、電離状態、存在量）は未だ明らかでない。

本発表では以下の三点について報告する。（1）PAH の放射モデルで広く用いられる Astronomical PAH モデル（Li and Draine 2001, Draine and Li 2007, Draine et al. 2021）の適用限界を調べるため、第一原理計算によって得られた様々なサイズ・電離状態の PAH に対する赤外線吸収断面積（Boersma et al. 2014, Bauschlicher et al. 2018, Mattioda et al. 2020）と比較し、その妥当性と限界を評価する。（2）Tau 042021 星周囲の原始惑星系円盤上空における中間赤外線放射の再現を目指し、確率的加熱過程を考慮した PAH の温度分布を用いて、放射を担う PAH のサイズに制限を与える。（3）PAH の確率的加熱を考慮したエッジオン円盤の 3 次元輻射輸送計算の初期成果を紹介し、今後の展望を述べる。

原始惑星系円盤の近・中間赤外線散乱光 スペクトル:非晶質珪酸塩への水分子捕獲の影響

○中澤 風音¹, 田崎 亮¹

1. 東京大学 広域システム科学専攻

原始惑星系円盤において最も主要な揮発性化学種である H_2O の形態および分布を解明することは、円盤の化学進化や微惑星形成過程を論じる上で必須である。ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST) の高空間分解能・高感度は近・中間赤外線波長帯における円盤の面分光観測を可能とし、円盤を構成する氷ダストの組成や分布の情報をもたらしている (Strum et al. 2023, 2024; Duchêne et al. 2024, Dartois et al. 2025, Xie et al. 2025)。JWST の円盤観測における重要な発見は、いくつかの円盤で、紫外線照射による氷の破壊が予測される円盤表層においても赤外線散乱光スペクトルに氷のフィーチャーが見られることである。この解釈として、円盤風や鉛直乱流による円盤赤道面からの継続的な氷供給が提案されている一方で、非晶質珪酸塩による H_2O 分子の捕獲がダスト中に H_2O を保持している可能性が原始星周りのダスト観測から示唆されている (Potapov et al. 2021)。

そこで本研究では円盤ダスト中の H_2O フィーチャーの起源を明らかにするため、 H_2O をトラップした非晶質珪酸塩ダストを含む円盤の 3D 輻射輸送シミュレーションを実施した。室内実験で得られた様々な初期氷-珪酸塩比・経験温度を持つ非晶質珪酸塩の光学特性(Potapov et al. 2021)を円盤ダストに適用し、従来の氷マントルを持つダストからなる円盤で得られる赤外線散乱光スペクトルと比較を行った。結果として、非晶質珪酸塩にトラップされた H_2O 分子を持つ円盤では、ダストの経験温度が水の昇華温度を超えていても、 $3\mu\text{m}$ 前後において非対称な減光が生じることが分かった。さらに $6\mu\text{m}$ の H_2O フィーチャーおよび $8\text{-}10\mu\text{m}$ の珪酸塩フィーチャーも初期氷-珪酸塩比やトラップの有無に応じて異なる挙動を示すことが分かった。これらの特徴は円盤氷ダストがどのような形態で存在しているのかを判別する手がかりとなる可能性がある。本発表では上記の結果に加え、軌道傾斜角の異なるさまざまな円盤観測を想定した H_2O フィーチャーの見え方およびその起源の分別可能性について議論を行う。

原始惑星系円盤ガスの C/O 比に対する有機物の熱分解及び光分解の寄与

○岡本珠実¹, 大野和正², 野津翔太³¹上海交通大学, ²国立天文台, ³東京大学

原始惑星系円盤ガス中における炭素の主なキャリアは CO と CO₂ であり、円盤ガス中の C/O 比は酸素の主なキャリアである H₂O が固相に存在する H₂O スノーライン外側で上昇すると考えられていた(e.g., Öberg et al. 2011)。しかし近年の JWST による観測結果から、超低質量星周りの原始惑星系円盤では H₂O スノーライン内側において C₂H₂ などの炭化水素ガスが H₂O の存在量に比べて無視できないほど豊富に存在し、結果として高いガス中の C/O 比を持つことがわかってきた(Tabone et al. 2023; Arabhavi et al. 2024)。この高い C/O 比を説明するため、Houge et al. (2025) では円盤温度が 500 K を超える領域で有機物が熱的に分解し (e.g, Chyba et al. 1990; Nakano et al. 2023) C₂H₂ ガスが放出された場合、熱分解が起こる温度“熱分解ライン”付近から円盤ガス中の C/O 比が上昇し、結果として C₂H₂ スノーライン内側における高い C/O 比を 5 Myr の間維持できることを示した。一方で、固体炭素の脱ガス機構としてアモルファス炭化水素の FUV 照射による光分解反応も考えられる (e.g., Alata et al. 2014; Anderson et al. 2017; Okamoto & Ida 2024)。そこで、本研究では熱分解と光分解、どちらの機構によって脱ガスした炭素ガスがより円盤中の C/O 比に寄与するのか調べる。

我々は Okamoto & Ida (2024) と同様に 3 次元モンテカルロ計算によって難揮発性有機物ダストの軌跡を計算し、その結果から有機物の熱分解反応と光分解反応、及びそれらによって脱ガスする炭素ガスの量を計算した。この放出された炭素ガスについて、1 次元移流拡散方程式を解くことで面密度進化を計算した。これらの計算を異なる乱流強度及びダストの臨界破壊速度で計算し、円盤ガス中の C/O 比がどのように変化するか調べた。

その結果、ダストがガスより速く移流する場合について円盤初期に熱分解反応による脱ガスが優勢となり、熱分解ライン内側で C/O 比が上昇することがわかった。この増加は有機物が熱分解ラインへ流入する期間は維持されるが、有機物の流入が減衰すると C/O の値は減少し始めた。その後円盤全体のダスト量が枯渇すると、円盤が光学的に薄くなり光分解反応が優勢となった。一方で、ダストの移流速度がガスと同等である場合、臨界破壊速度が大きいほど光分解による脱ガスが優勢となることがわかった。

巨大惑星が励起する複数の渦巻状密度波での 衝撃波加熱の解析

○ 清水静¹, 富永遼佑¹, 奥住聡¹, 武藤恭之²

¹ 東京科学大学, ² 工学院大学

地球のように水に枯渇した岩石惑星は、水氷の昇華する温度の軌道であるスノーラインの内側で形成されたと広く考えられている。そのため、原始惑星系円盤の温度構造を明らかにすることは、岩石惑星の形成位置を理解する上で重要である。磁気流体力学的な円盤降着を考慮した近年の円盤温度モデル (Mori et al. 2021; Kondo et al. 2023) によると、円盤内部は従来のモデルの予想よりも低温であり、太陽型星の周囲の円盤のスノーラインは現在の地球軌道より内側に存在する可能性がある。このことは、現在の地球軌道において氷ダストが存在することにより岩石惑星の形成が困難になるという問題を提起する。

本研究では、これまでの円盤モデルで考慮されていなかった加熱源である、巨大惑星の引き起こす衝撃波による加熱に着目する。原始惑星系円盤中に惑星が存在すると、円盤との重力相互作用により密度波を励起する。密度波は円盤中を伝播していくと衝撃波となり円盤を加熱する。衝撃波は古典的な降着加熱と同程度の加熱を引き起こしうするため (Ziampras et al. 2020), 円盤温度の決定に重要である。Ono et al. (2025) では、巨大惑星の軌道付近において衝撃波加熱率を求め、モデル化をした。しかし、Ono et al. (2025) では惑星からより離れた円盤内側領域が調べられていない。

本研究では巨大惑星が引き起こす衝撃波加熱によってスノーラインがどの程度移動するのかを以下の2段階に分けて明らかにする。まず、巨大惑星が存在する円盤の2次元流体計算を行い、衝撃波による加熱率を測定しモデル化をした。次にモデル化された加熱率を用いて円盤温度の動径分布を計算した。Shimizu et al. (2025, JpGU) では衝撃波加熱によってスノーラインが移動することを報告した。本研究ではさらに2次元流体計算について詳細な解析を行う。

2次元流体計算の結果、巨大惑星より内側の領域に5本以上の密度波が形成されることを確認した。第1波から第5波の衝撃波加熱率の総和は、惑星の質量と惑星からの距離のべき関数で近似できる。加熱率が収束する時間は巨大惑星から離れた領域ほど長くなり、第4波、第5波の定常な加熱率を求めるには長時間計算が必要となる。収束後の衝撃波加熱率は、先行研究で示された粘性率の $1/2$ 乗に比例する経験則と整合的になることを確認した。初期面密度の半径の冪を変化させた計算では、音速の違いから第2波以降が衝撃波となる位置が変化した。加熱率の包絡線は大きな変化は見られなかった。円盤温度のモデル計算では、木星質量の10分の1程度の質量を持つ惑星が木星軌道にあるとスノーラインの位置が現在の地球軌道より外側になることがわかった。このことは、原始太陽系円盤において木星が早期に形成されることにより、古典的な降着加熱が起こらなくても現在の地球軌道で岩石惑星の形成が実現した可能性を示唆している。

巨大惑星による円盤ギャップと 衝撃波加熱の1次元モデル

○ 佐藤祥太¹, 田中秀和¹, 辻勇吹樹²

¹ 東北大学理学研究科, ² 東京大学理学系研究科

巨大惑星は原始惑星系円盤の惑星軌道の内側と外側にそれぞれ密度波（衝撃波）を励起し、これらが減衰する際にガス円盤にトルクをかけ、面密度の低下した円盤ギャップを形成する。密度波の減衰は同時に円盤を加熱し、これが固体惑星材料物質の加熱源と考えられている。これらの密度波によるトルクと加熱率の間には密接な関係があることが知られている (Goodman and Rafikov 2001)。本研究では、このトルクと加熱率の関係に着目し、密度波による円盤ガス加熱率を算出した。さらに、その結果を流体計算から得られた従来研究 (小野ら 2025) の加熱率と比較した。金川ら (2015, 2017) は流体計算でみられる円盤ギャップをよく再現する1次元モデルを構築し、密度波によるトルクの動径分布も与えた。本研究では、彼らの円盤ギャップとトルク動径分布の1次元モデルに微修正を加えて用いた。

本研究で得られた加熱率の動径分布は、加熱率が大きい領域で小野らの流体計算結果とおおよそ同程度の結果を得た (下図参照)。また、小野らで得られている加熱率の惑星質量と円盤粘性に対する依存性もよく再現できている。さらに、惑星による密度波の加熱率と円盤粘性による加熱率と比較すると、巨大惑星の質量に依らず両者は同程度の加熱源となることが確かめられた。この両者の関係は円盤粘性の広い範囲で成り立つことも示された。講演ではこれらが同程度になる理由について解析的な説明を試みる。

一方、本研究の密度波による加熱率は惑星に対して円盤ギャップの幅よりも遠方の領域では小野らの流体計算に比べて小さいという課題も明らかになった。これは本研究で局所近似を用いたことが原因と考えられる。ギャップ幅より遠方においても加熱率を再現するためには、今後1次元ギャップモデルにグローバルの効果を取り入れた議論を行う必要がある。

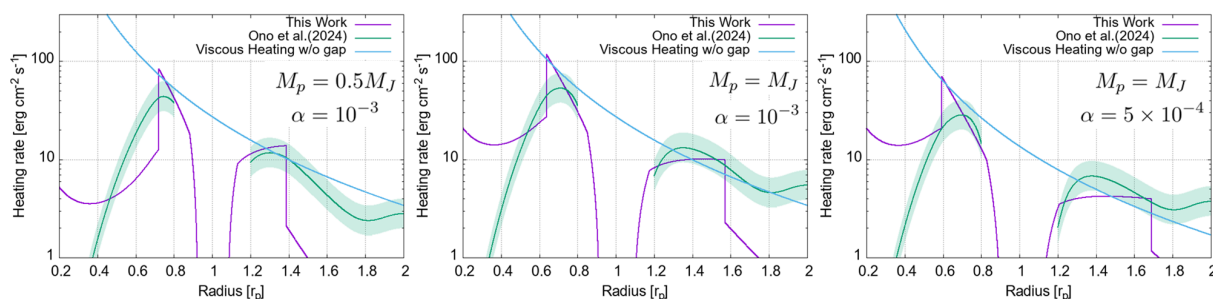


図: 単位面積あたりの密度波の加熱率。左図は0.5木星質量の惑星で $\alpha = 10^{-3}$ の場合、中央は木星質量, $\alpha = 10^{-3}$, 右は木星質量, $\alpha = 5 \times 10^{-4}$ の場合である。紫の線が本研究の加熱率であり、緑の線は小野らの経験式を水色の線はギャップがないときの粘性加熱率を表している。

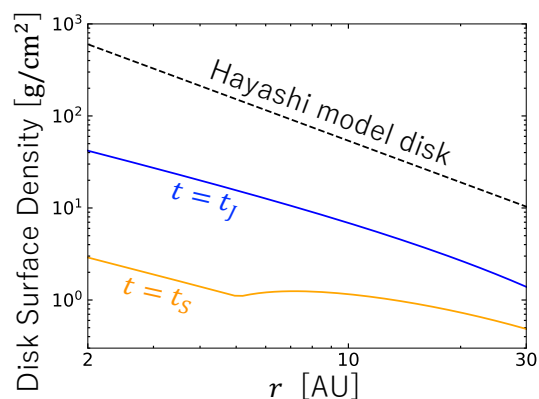
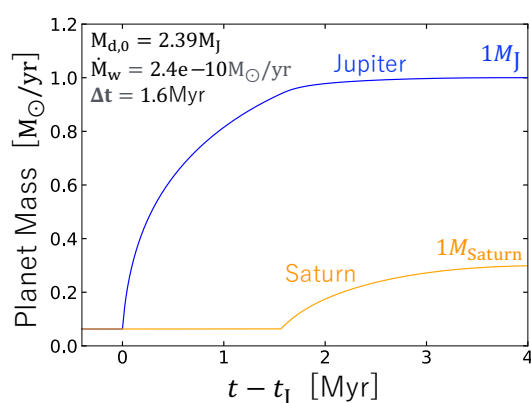
巨大惑星との共進化により制約される原始太陽系星雲の円盤面密度

○ 鈴木慧次¹, 田中秀和¹

¹ 東北大学

原始惑星系円盤の面密度は、惑星形成の様々な素過程に影響を与える。巨大惑星の成長は円盤ガスの降着で進行するため、円盤面密度によって左右される。その他に、ガス円盤との重力相互作用による巨大惑星の移動や、巨大惑星の衛星形成、巨大惑星形成以後の始原物質の衝撃波加熱なども、巨大惑星形成以後の原始惑星系円盤（または原始太陽系星雲）の面密度に強く依存する。これらの研究では、しばしば林モデル円盤のガス面密度が用いられる。しかし、円盤ガスの降着で木星が形成された後に円盤面密度は大幅に減少していると考えられる。巨大惑星と原始太陽系星雲との共進化によって決まる現実的な円盤面密度を用いてこれら諸問題の研究を行う必要があるだろう。本研究では、巨大惑星とガス円盤の共進化を取り入れた最新の木星、土星形成モデルに基づき、巨大惑星形成以後の現実的な円盤面密度を明らかにする。最終的に木星と土星の質量は現在値とならなければならないという制約から、巨大惑星と原始太陽系星雲との共進化計算によって、木星形成以後原始太陽系星雲の円盤面密度に制約を与えることができる。

我々の計算結果によると、木星形成直後の円盤面密度は林モデルの値の1%程度と非常に低いことがわかった。このような軽い円盤は巨大惑星の衛星形成に適している。これより重い原始太陽系星雲が残っている場合には、木星と土星は重くなりすぎてしまう。本発表では、木星固体コアのガス捕獲開始時の円盤質量、円盤半径、光蒸発による円盤ガス消失率などのモデルパラメーターに対し広くサーベイを行い、木星形成直後の円盤密度が非常に低いという結果がどの程度普遍的なものであるかも説明する。



木星のガス降着開始時の円盤質量 $M_{d,0} = 2.39 M_J$, 光蒸発率 $\dot{M}_w = 2.4 \times 10^{-10} M_\odot/\text{yr}$, 土星ガス降着開始までの時間差 $\Delta t = 1.6 \text{ Myr}$ の場合。このパラメータでは木星、土星の質量が再現できる。左図は惑星質量の時間進化、右図は木星と土星のガス降着開始時 ($t = t_J, t_S$) の円盤面密度分布である。 $t = t_J, t_S$ において面密度は林モデル円盤 (黒点線) のそれぞれ 1/10, 1/100 程度になる。

巨大惑星の外側移動に伴う氷微惑星の小惑星帯への供給

○武市智樹¹, 渡邊誠一郎¹

¹名古屋大学環境学研究科

はやぶさ 2 によって探査された C 型小惑星リュウグウは、帰還サンプル分析の結果、CO₂に富む流体包有物が見つかり (Nakamura et al. 2022), 母天体は CO₂ スノーラインの外側で形成された後内側に運ばれたと推定されている。Raymond & Izidoro (2017) は、木星と土星が内向きから外向きに移動する Grand Tack モデルを採用した場合に、土星以遠が起源の氷微惑星の一部が小惑星帯や地球型惑星領域に移動することを数値軌道計算によって示した。しかし、Grand Tack モデルは土星質量が実際より重くなる問題点が近年指摘され、疑問視されている (Tanaka, 2023)。そのため氷微惑星の輸送は、木星ではなく、主に土星と氷惑星の外側への軌道移動によって駆動された可能性を考察する。氷惑星が内向き移動する場合の氷微惑星の小惑星帯への輸送割合は近年, Nesvorný, et al. (2024) によって調べられたが、現在の太陽系に氷惑星の内側移動の証拠はなく、現実的でない。そこで本研究は、氷惑星が現在の位置より内側で形成され、成長しながら外向きに移動するシナリオに注目し、スーパーコンピュータを用いて氷微惑星の大規模な軌道計算を行った。そのうえで、惑星の成長・移動、円盤ガス進化 (粘性降着による指数関数的な散逸と、太陽 X 線照射による光蒸発での消失を考慮) のパラメータ変化に対する、氷微惑星の小惑星帯などへの移動割合の依存性を議論し、初期太陽系進化モデルの範囲を推定している。

計算の結果、初期の土星位置より遠方を起源とした氷微惑星の総質量の内、小惑星帯へ移動した割合 (移動割合) は数%で、現在の C 型小惑星の総質量に対し非常に多く供給されることが分かった。また、移動割合は光蒸発の時刻ではあまり変わらないが、円盤ガスの散逸時間に大きく依存することが分かった (右図)。これは、円盤ガス抵抗が木星より内側に移動した氷微惑星の離心率を低下させ、小惑星帯への輸送に寄与するためと考えられる。さらに、光蒸発の発生が遅いと、外側小惑星帯 (2.5-3.2 au) に分布する氷微惑星のほとんどが、ガス散逸に応じて内側に移動する土星の永年共鳴とガス抵抗で内側小惑星帯や地球型惑星領域に落ちることが分かった。現在の太陽系では C 型小惑星は外側小惑星帯に多い。従って、光蒸発とガス散逸の早いケースが現在と整合的と推定される。

References

- Nakamura et al. (2022) *Science*, 379, abn8671.
 Raymond & Izidoro (2017) *Icarus* 297, 134–148.
 Tanaka (2023) *Japan Geoscience Union Meeting 2023*, PPS07–16.
 Nesvorný, et al. (2024) *Icarus* 626, id.118521.

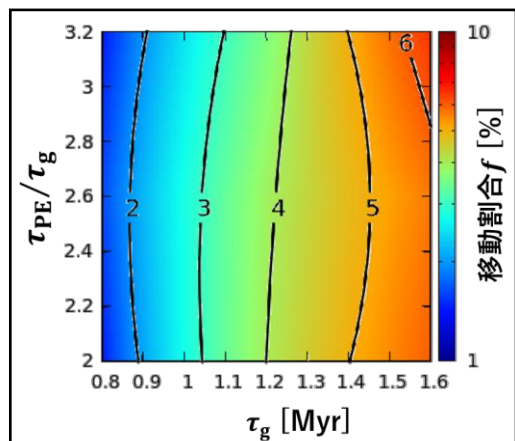


図 横軸を円盤ガス密度が初期の $1/e$ となる時間 τ_g 、縦軸を τ_g に対する光蒸発の時刻 τ_{PE} の比としたときの、氷微惑星の初期の土星位置以遠 (7.5–30 au) から小惑星帯への移動割合 f の等高線図。色はカラーバーに対応。

流出モデルの違いによる 地球型惑星大気散逸への影響

○中山陽史¹

¹ 立教大学

大気散逸は惑星大気進化にとって重要なプロセスである。高層大気を加熱し、大気散逸を促す紫外線強度の観点からは、特に初期地球や低温度星周りの惑星において大気散逸は重要な役割を果たすと考えられる。しかしながら、O、N、Cといったメタルに富むような地球型大気の場合、それらの輝線による冷却の結果、大気散逸が大幅に抑制されることが示唆されている。その結果として、流体力学的散逸のような惑星重力エネルギーを超えて大気全体が脱出する状態ではなく、大気全体は重力的に弱く束縛されながらも、一部のみが流出する状態が比較的強いXUV状態でも達成される。そのため、流体力学的散逸に代表されるような外側境界条件に依存しないモデルとは異なり、大気散逸率は外圏底と呼ばれる大気の外側境界における流出条件に依存する。本研究では、地球大気組成を持つ惑星を対象として、異なる流出モデルを仮定した場合に大気流出率と大気構造がUV強度に対してどのように応答するのかを検討した。特に、ジーンズ散逸のような粒子系から大気全体の運動を追う流体系への推移、イオンと電子の相互作用である両極性拡散に伴う散逸の促進といった中性大気からイオン大気への推移、に着目し地球型惑星でおきる熱的散逸について論じる。

本研究では、これまでに構築してきた熱圏モデルを元に大気散逸率について検討を行う。熱圏モデルには光化学、熱化学反応、放射冷却、熱伝導、組成拡散、移流といった物理プロセスに加えて、外側境界条件をジーンズ散逸、ジーンズ散逸から求めた平均速度を用いて大気散逸率を求めるバルク散逸、バルク散逸に加えて両極性拡散を考慮したイオン散逸の3つの条件を用いて、大気散逸率を求めた。特にイオン散逸では中性、イオン、電子の熱交換を考慮し、大気種によって異なる温度を考慮している。結果として、強いXUV条件下でも外側境界条件によって、2倍程度の違いしか生じないことが分かった。ジーンズ散逸は軽い大気種を優先的に散逸させるため、外圏底においてバルク散逸に比べて高い平均分子量を持つ。しかしながら、高くなった平均分子量を補うように外圏底温度が高くなるため、大気散逸率で見ると大きな違いが生じていない。また、低いXUV環境では組成種間の温度差が大きくなるが、UV強度の増加に応じてイオンの割合が増加すると、ほぼ均一な温度となる。その結果として、バルク散逸とイオン散逸では大きな違いが見られなかった。本発表では大気散逸率に加えて大気組成・温度構造の違いについても論じる。

衝突合体およびすれ違い衝突における大気流出過程

○ 黒崎健二¹, 犬塚修一郎²

¹ 防衛大学校, ² 名古屋大学

現在観測された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。惑星形成過程の後期段階において、惑星の衝突合体は必ず発生する現象である。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うことが予想される。

本研究では大気を持った惑星に対する衝突計算に伴う水素大気損失量を定量的に評価するために、天体衝突現象のSmoothed Particle Hydrodynamics法による数値流体計算を行った。ターゲット天体の大気量は10-30%とし、インパクターの大気量も0-30%として衝突における大気量や衝突天体との質量比、および衝突角度に注目して解析を実施した。

計算の結果、衝突に伴う大気流出の傾向は合体しない場合は大気同士がすれ違った場所が主に流出していることがわかった。特に、合体する場合としない場合では、衝突パラメータに対する流出量の減少量の傾向が異なっていた。今後は、衝突前後における粒子の速度および角運動量の分布から、衝突後の大気量に対する示唆について議論する。

3次元多成分イオン電磁流体力学シミュレーションによる初期地球における膨張水素大気の新熱的散逸モデリング

○草野 百合¹、木村 智樹¹、堺 正太郎²、吉田 辰哉³、前田 優樹⁴、中田 英太郎⁵、
高田 亮馬¹、寺田 直樹³

¹東京理科大学、²慶應義塾大学、³東北大学、⁴東京大学、⁵北海道大学

地球を含む惑星が表層に海洋を保持するためには、大気存在が極めて重要である。集積時に形成された地球の初期大気の一部は、水素とヘリウムを主成分とする星雲ガス由来のものであったと考えられており、地球内部からのガス供給と、宇宙空間への散逸にその収支を制御されながら現代の大気へと進化してきた。先行研究では初期地球の水素大気で主要な役割を果たしたとされる熱的散逸の大きさを、数値シミュレーションを使って全球的に推定してきた。同時に、イオンピックアップ等の非熱的散逸は、影響が非常に小さく、無視できる程度であった可能性が指摘されている(Tian et al., 2005; Johnson et al., 2013)。一方 Lichtenegger et al. (2010) では、44 億年前から現代までの地球の外圏底と磁気圏界面の位置関係を調べ、強い XUV (極紫外線) 放射によって過去の大気は膨張し、磁気圏界面の外側まで広がっていた可能性を示した。これにより、イオンピックアップ等の非熱的散逸が顕著に生じていた可能性が指摘されている。ただし、初期地球の水素大気における非熱的散逸率の定量化は、未だ行われていない(Wang, Zhou and Liu, 2022)。そこで本研究は、現代の 100 倍の XUV フラックスを想定し、形成直後の地球における組成を反映した水素大気

(Yoshida and Kuramoto, 2021, 高度 1000~185000km、最大密度 $3 \times 10^{12}/\text{cm}^3$) を設定した上で、多成分イオン MHD モデル(Terada et al., 2009) を使って大気起源イオンの非熱的散逸率を評価した。本研究では、多成分イオンモデリングの利点を活かし、大気起源の水素と太陽風起源の水素を分離しつつ非熱的散逸率を評価している。初期地球は地磁気反転時等で太陽風の影響が大きいと思われる非磁化の時代を仮定し、太陽風は速度 1800km/s、密度 2100/cm, IMF 強度を 7nT に設定した。その結果太陽風下流 1000 R_p (R_p は地球の半径、地表を 1 R_p とする。) での大気散逸率は H_2^+ が $1.1 \times 10^{31}/\text{s}$ 、 H^+ が $3.5 \times 10^{31}/\text{s}$ と推定された。

これは、Yoshida and Kuramoto (2021) が 30 R_p 以下で推定した水素大気の熱的散逸率

(2.4×10^{32} – $9.2 \times 10^{32}/\text{s}$) の 5–19% に相当する。本研究より非熱的散逸フラックスが最も大きくなる高度は 100 R_p 付近と見積もられた。これは熱的散逸によって上昇してきた大気の一部が、高高度での太陽風との相互作用を受けさらに非熱的過程で散逸していることを示唆している。非熱的散逸率と熱的散逸率の比率から、高度 100 R_p 付近では、5–19% が太陽風との相互作用を受けて非熱的に散逸し、残りの 81–95% が中性粒子のまま熱的に散逸していく可能性がある。今後は、これらの比率に対する IMF の影響と XUV フラックス、太陽風動圧による変化を評価する予定である。発表では、本研究の現状を報告する。

微小隕石からの水供給が火星上層大気の水素同位体比構造に与える影響

○長谷部聖憲¹, 寺田直樹¹, 吉田辰哉¹, 中村勇貴², 狩生宏喜¹, 小山俊吾¹

(1. 東北大学, 2. 東京大学)

The atmospheric D/H ratio on Mars is enhanced by ~5 times the value on Earth, suggesting that large amounts of water have escaped into space. Additionally, water supply processes into the atmosphere, like ablation of interplanetary dust particles (IDPs) and volcanic outgassing, are considered important to satisfy the current isotopic composition. IDPs, containing water as hydrous minerals with a relatively low D/H ratio, ablate at high altitudes and supply water into the upper atmosphere. Nevertheless, the effect of IDP ablation on the isotopic composition of planetary water is poorly understood.

In this study, we use a 1-D atmospheric photochemical model of the Martian atmosphere (Nakamura et al., 2023) coupled with a numerical model of decomposition and dehydration of IDPs (Micca Longo et al., 2025) to clarify the effect of water supply from IDPs on the vertical D/H ratio profile. We assume a carbonaceous chondrite-like composition containing ~1 wt% of hydrogen as interlayer water or phyllosilicates -OH bonds with the same isotopic ratio as the VSMOW value. The water injection flux is given as $0.24 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ for the nominal model, scaled from the observed flux by the Long Duration Exposure Facility on the Earth (Love and Brownlee, 1993) to that on Mars. The vertical injection profile is given by our simple dust ablation model.

Our results show that the water supply from IDPs significantly changes the HDO/H₂O ratio in the upper atmosphere, while other species show little isotopic change. The HDO/H₂O ratio decreases by ~50% above 100 km for the nominal model. The HDO/H₂O ratio change in the Martian upper atmosphere is caused by the high injection flux of water from IDPs compared to photochemical reaction rates and upward transport rate of hydrogen. The isotopic ratios of OH and H show little change even though they are the primary products of H₂O photodissociation. This is because the lifetimes of OH and OD are so short that the isotopic change does not spread into the upper atmosphere. In addition, the background atmospheric densities of H and D are several orders of magnitude higher than those of H₂O and HDO, high enough to make the isotopic change caused by the water supply from IDPs negligible.

We further investigate the sensitivity of the atmospheric isotopic profiles to parameters such as the temporal variations in the dust influx and the D/H ratio of IDPs. The sensitivity test for temporal variations in the dust influx reveals that the isotopic change overcomes the local time variation in the dust influx and persists for several days. This suggests that the water supply from IDPs changes the HDO/H₂O ratio in the Martian upper atmosphere regardless of its local time and longitude. The sensitivity test for the D/H ratio of IDPs is investigated considering the experimental results that the D/H ratio of the dust particles is enriched by hydrogen implantation by the solar wind (Jiang et al., 2024), which will also be presented.

多流体 MHD シミュレーションに基づいた現在火星における炭素・窒素イオンの散逸

Carbon and nitrogen ion escape at current Mars based on multi-fluid MHD simulations

○坂田遼弥^{1,2}, 関華奈子^{1,2}, 寺田直樹³, 堺正太郎⁴, 品川裕之^{5,6}

¹ 東京大学先端科学技術研究センター, ² 東京大学理学系研究科, ³ 東北大学理学研究科, ⁴ 慶應義塾大学環境情報学部, ⁵ 九州大学国際宇宙惑星環境研究センター, ⁶ 情報通信研究機構

宇宙空間への電離大気の散逸（イオン散逸）は太陽 X 線・極端紫外線（XUV）フラックスおよび太陽風と火星上層大気との相互作用によって駆動される大気散逸過程のひとつであり、火星の大気喪失や気候進化において重要な役割を果たしてきたと考えられている。火星におけるイオン散逸過程についてはこれまでに火星周回探査機による観測や数値シミュレーションに基づいた研究が数多く行われてきたが、それらの多くは火星電離圏の主成分である酸素イオン（ O^+ および O_2^+ ）に着目してきた。一方で火星電離圏には C^+ や NO^+ など炭素や窒素を主体としたイオンも多く存在しており[1]、近年になってこれらのイオンの散逸に関する研究がなされるようになってきた[2, 3]。しかしその散逸過程や散逸率、外部条件への依存性などは十分に解明されていない。

本研究では三次元グローバル多流体 MHD モデル MAESTRO [4] を用いて現在火星からの炭素および窒素イオンの散逸過程を検証した。既存モデルに実装されている 5 イオン種（ H^+ , O^+ , O_2^+ , CO_2^+ , H_{SW}^+ ）による多流体 MHD シミュレーションに加えて、光化学反応系および衝突過程に炭素イオン（ C^+ , CO^+ , HCO^+ ）および窒素イオン（ N^+ , N_2^+ , NO^+ ）を新たに追加して 11 イオン種シミュレーションを実施し、イオン種の増加による影響を検証した。また、地殻磁場の位置および惑星間空間磁場（IMF）の polarity の異なる複数のシミュレーションケースを実施し、それらのパラメータへの依存性も検証した。

その結果、イオン種の増加は酸素イオンの分布および散逸率へほとんど影響を与えなかった一方で、 C^+ の散逸率が CO_2^+ と同程度に存在し以前のモデルでは炭素イオンの散逸を十分に捉えられていなかったことを明らかにした。現在火星におけるイオン散逸による炭素および窒素の散逸率はそれぞれ酸素の 7%、4%程度であり、イオン散逸が卓越する太古火星での炭素量や窒素量の時間発展に一定程度寄与しうることを示唆している。また、地殻磁場の存在は概ねイオン散逸の抑制に寄与していたが、地殻磁場の位置および IMF polarity に対してはイオン種ごとに異なる依存性を示した。

Reference

[1] Benna et al., 2015, GRL [2] Pickett et al., 2022, JGR [3] Renzaglia et al., 2024, JGR [4] Sakata et al., 2024, JGR

金星雲層内の大気循環

○今村 剛¹, 松井 龍郎¹, 野口 克行², 安藤 紘基³

¹ 東京大学, ² 奈良女子大学, ³ 京都産業大学

金星の高度 50~70km 付近に存在する硫酸雲は上層の光化学領域と下層の熱化学領域を隔てており、熱化学領域で平衡に近い濃度となった SO_2 や H_2O が大気循環によって雲頂(光化学領域)まで運び上げられると新たな硫酸生成、すなわち雲生成に至る、という見方ができる。生成した雲粒は 3 次元的に輸送されて全球に分布し、いずれ下層へ運ばれると蒸発・熱分解する。このように雲粒のライフサイクルは大気循環にコントロールされると考えられるが、その実態はほとんどわかっていない。雲層下部では硫酸液滴と硫酸蒸気が共存しているため、鉛直輸送は硫酸の凝結や蒸発を引き起こすことによっても雲量に影響する。高温の下層大気からの熱放射を光源とする近赤外雲画像には大きな時空間変動が見られるが、これはそのような凝結雲の反映と思われる。一方雲頂にも対流状の模様をはじめ、時間変動を伴う流体運動を示唆するパターンが多く見られる。鉛直輸送を渦拡散で表現する鉛直 1 次元モデルを用いて、雲の構造が渦拡散係数の変化に敏感であることが示されているが(Imamura and Hashimoto 2001; Karyu et al. 2024)、輸送を担う具体的なメカニズムの解明はこれからである。

この雲層領域の大気運動が、金星探査機「あかつき」をはじめとする新たな金星観測と数値モデリングの進展によって推定されつつある。「あかつき」は低緯度の雲頂に見られる細胞状構造が時間ともに拡大する様子をとらえ、ここから、細胞状構造が水平発散を伴うことがうかがわれる。水平発散は鉛直流が生じていることを示唆しており、細胞状構造が鉛直混合に寄与することがうかがわれる。一方で、電波掩蔽観測によればこの領域の背景大気は地方時を問わず基本的に安定成層であり、対流不安定で駆動される鉛直対流とは考えにくい。一つの可能性として、可視~紫外波長で太陽光を吸収する物質が不均一な水平分布をしていることによって生じる水平温度差が水平対流を駆動することが考えられ、紫外画像と近赤外画像を用いた時系列解析の結果はこのシナリオと矛盾しない。また、子午面循環の構造が熱赤外画像を用いた雲追跡によって推定されており、それによれば高度 65km 付近での平均南北風は極めて弱く(Fukuya et al 2021)、ハドレー循環の極向き流と赤道向き流がこの高度付近で切り替わっていることが示唆される。雲層下部では南北方向に延びる巨大な不連続構造を伴う雲塊が西向きに伝播しており、不連続領域では hydraulic jump (bore) による鉛直混合が生じている可能性がある。本発表では、これらの結果から鉛直循環について与えられる制約と今後の課題を論じる。

高速回転する球殻内の非弾性熱対流と 木星型惑星大気の表面帯状構造

○ 佐々木 洋平¹, 竹広 真一², 石岡 圭一³, 榎本 剛⁴, 中島 健介⁵, 林 祥介⁶

¹ 北海道情報大学 情報メディア学部 情報メディア学科, ² 京都大学 数理解析研究所,

³ 京都大学 大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ⁴ 京都大学 防災研究所,

⁵ 九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門, ⁶ 神戸大学 理学研究科惑星学専攻/CPS

木星型惑星 (木星・土星) 大気表層に見られる縞状パターンは、赤道域の順行ジェットと中高緯度の順行逆行が交互に反転するジェット群という特徴的な東西平均流構造を伴っていることが知られている。この特徴を矛盾なく整合的に説明できる満足な力学的描像と理解は、未だ得られていない。

木星型惑星大気の縞状東西風パターンを説明するモデルカテゴリーのうち、ここで注目するのは「深い」モデルである。表層の縞状構造を自転するガス惑星内部の熱対流がもたらす角運動量再分配に帰するこの「深い」モデルでは、赤道域の順行ジェットは容易に生成することができるものの、中高緯度の交互に反転するジェット群の生成が困難であった。近年、「深い」モデルにおいても、対流球殻の厚さを惑星半径に比べてできるだけ薄くすることで、内球接円筒内に小規模の対流活動を生成維持し、その帰結として中高緯度に交互に反転するジェット群を発現できることが示された (例えばブシネスク流体では Heimpel and Aurnou, 2007, 非弾性流体では Heimpel *et al.*, 2022)。

これに対して我々は、ブシネスク系における既存研究での時間積分 (1600 回転時間) はせいぜい 0.1 粘性時間程度と短く、系が全体としては平衡状態に達していない可能性を指摘し、長時間積分を実施することで、0.1 粘性時間程度の時刻に見られた中高緯度の交互に反転するジェット群は時間とともに融合してしまい、16000 回転時間後は 1 本の順行ジェットとなり、中高緯度の縞状構造は消失してしまうことを見出した (Takehiro *et al.*, 2024)。

本研究では、非弾性系でもブシネスク系と同様な長期時間発展が起こるのではないかと想定し、非弾性系での最も高解像な計算である Heimpel *et al.* (2022) の設定での回転球殻内の熱対流の全球領域での長時間数値計算を試みた。中高緯度において複数ジェットが長時間後に融合し縞状構造が消失していくのか否かが注目点である。初期に赤道域の強い幅広の順行ジェットと中高緯度に交互に向きが入れ換わる複数の幅狭のジェットが出現し、木星型大気の大気表層パターンに似た縞状の帯状風分布が観察された。時間とともに中高緯度のジェットが融合し、32000 回転時間において 2 本の順行ジェットと 1 本の逆行ジェットにまで減少した。しかしながら運動エネルギーはまだ増加しており、統計的平衡状態に達していない。引き続き時間積分を遂行し、縞状構造の遷移や性質を観察していく予定である。

参考文献

Heimpel, M., Aurnou, J., 2007: *Icarus*, **187**, 540–557.

Heimpel, M. H., Yadav, R. K., Featherstone, N. A., Aurnou, J. M., 2022: *Icarus*, **379**, 114942.

Takehiro, S., Sasaki, Y., Ishioka, K., Enomoto, T., Nakajima, K., Hayashi, Y.-Y., 2024: *Icarus*, **420**, 116154.

遠地で観測された気圧変動からのツングースカイベントの制約: Pekeris 波と水平運動量の寄与

○ 中島健介¹

¹ 九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

はじめに

1908 年に起こった天体衝突であるツングースカイベントに際しては、世界各地で顕著な気圧変動が観測され (Whipple, 1930, 1934), この気圧変動はラム波 (大気下層に補足され音速で伝わる) であると推定されている. 中島 (2022 秋季講演会) はこの気圧偏差の符号がマイナスであることに着目し, この特徴は, 天体衝突直後に形成された plume に下層大気が巻き込まれたことにより理解でき, さらに天体衝突のエネルギーは大気の加熱ではなく, plume 中への上向質量輸送に主に使われたと論じた. ここでは, その後に行った流体力学的数値計算等を踏まえた追加的吟味の結果について述べる.

Pekeris 波の励起とその Lamb 波振幅への影響

圧縮性大気の線形波動の流体力学計算を行ってみると, 天体衝突が引き起こす各種の波動源の高度が比較的高い場合には, Lamb 波だけでなく Pekeris 波も励起される. Pekeris 波とは, 高度 100km 程度までの大気に及び Lamb 波よりも遅く 220 m/s 程度の速度を持ち遠距離まで伝播可能な内部重力波であり, 近年では 2022 年のトンガ火山噴火に際して全球的に観測されている. 具体的な詳細は当日に示すが, plume 形成に伴う負の質量源により励起される Pekeris 波の符号は正であり, また, この Pekeris 波の励起に対応して Lamb 波の振幅の絶対値が大きくなることがわかる. 従って, 観測された Lamb 波の振幅から天体衝突のプロセスを推定するには, この Lamb 波振幅の増大を考慮に入れねばならない. ただし, ツングースカイベントでは天体の爆発高度は数キロと見積もられているので, Pekeris 波励起に関連した Lamb 波の振幅は大きくないことがわかった.

天体の水平運動量が励起する Lamb 波

ツングースカイベントの目撃証言によれば天体は斜めに落下したので, その水平運動量が大気を与えられたはずである. Lamb 波は水平運動量強制によっても励起されるので, この寄与も評価する必要がある. 実際に試算してみると, その絶対値は熱源や質量弦の寄与より一桁以上小さく, しかも目撃証言による落下直前の天体の運動 (南東から飛来) に基けば励起される Lamb 波の符号はイギリスの方向では正となり, 観測された負の符号を説明し得ない.

結論

以上を総合すると, ツングースカイベントに関する中島 (2022) の考察は大筋では正しく, 世界各地で観測された圧力変動の励起源は天体衝突直後の plume への下層大気の巻き込みによる負の質量源であり, plume 中の上向き質量輸送に天体衝突エネルギーの相当部分が消費されたとの結論は正当であると考えられる.

熱水実験による玄武岩からの 微量金属の溶出濃度推定： エウロパ熱水環境のハビタビリティへの応用

○丹秀也¹、渋谷岳造¹、齋藤拓也¹、柏原輝彦¹

¹ 国立研究開発法人海洋研究開発機構

木星衛星エウロパは、表面の氷層の下に海が存在するため、地球外生命の存在可能性から注目を集めている。このため、表面物質や内部での化学反応に関する研究から海の水質が推定されている。しかし現状では塩成分や炭素種、硫黄種などの主要成分の推定に限定され、微量成分はほとんど議論されていない。例としてコバルトやニッケル、モリブデンなどの微量金属は微生物の酵素などに利用されるため、水中では微量成分でありながら重要な生命必須成分であることで知られる。近年、同様に地球外生命の観点から注目を集めている、土星衛星エンセラダスの海中での微量金属濃度については推測されつつある (Tan et al., 2025)。

本研究では、エウロパの海底を模擬した熱水実験を行い、岩石からの溶出成分濃度を微量金属も含めて分析した。実験の出発物質として、硫酸を含んだ酸性の模擬海水溶液と、玄武岩質隕石の一種であるユークライト隕石を模擬岩石として反応させた。こうした設定は、エウロパの海水は硫酸イオンを含んでおり、海底では玄武岩質の熱水環境が存在する可能性も示唆されていることに基づいている (Tan et al., 2021)。実験は 1000–4000 時間に渡って行い、300 °C もしくは 400 °C で、50MPa の温度圧力条件に設定した。実験経過中に溶液サンプルを複数回採取、分析し、また実験の前後で固体サンプルを鉱物・顕微分析した。

溶液サンプル分析の結果、いずれの実験でも pH は酸性の 3–4 程度から中性の 6 程度へ上昇する傾向にあり、硫酸濃度は減少し、硫化水素が生成された。また、固体サンプル中では実験後に硫酸塩や粘土鉱物、黄鉄鉱などの二次鉱物が析出していた。こうした二次鉱物の析出により水の性質・組成が支配されたと思われる。

一方、微量金属については、溶液中ではいずれも 10^{-7} – 10^{-6} mol/L 以下で、メタン菌などの微生物に必要とされる濃度下限値と同程度の非常に低い濃度であった。これらは岩石中では磁硫鉄鉱や黄鉄鉱などの硫化鉄に、0.1 wt% 以下の微量の成分として含まれていた。こうした分析から、pH の中性化と硫化水素の生成によって、硫化鉄と含有した微量金属の溶解が抑制された可能性が示唆される。また、玄武岩中に含まれる初期の微量金属量自体が少ないことも、結果的に低い溶出量に影響している可能性が考えられる。

本研究から、エウロパのような硫酸を含む海水は、玄武岩質の熱水環境がある場合、硫酸の岩石中への固定と硫化水素の生成、pH の中性化を受けることが示された。またこうした水質変化と玄武岩中の低い金属量は、微量金属の溶出を抑制する可能性も示唆された。他方、エンセラダスの海底岩石はコンドライト質と考えられており、微量金属は玄武岩よりも多量に含まれるが、低温でアルカリ性の水質のため低い溶出濃度となることが推測されている (Tan et al., 2025)。エウロパの海底岩石の組成は現状では不明であるが、この先行研究と本研究を併せて踏まえると、玄武岩質とコンドライト質の両方の場合で微量金属が溶出しにくい熱水環境となりうる。したがって、エウロパやエンセラダスのような氷衛星の海洋では、少なくとも熱水環境は微量金属の供給源として機能しにくいことが想定される。これらの海と地球の海洋は、大陸からの風化や大気からのダスト、非常に高温の熱水環境など、複数の金属供給源が存在する点で大きく異なると思われる。

二段式軽ガス銃を用いた高速自転小惑星の起源と スペースデブリの物理特性の解明

○井上太陽¹, 谷井祐介¹, 阿部新助¹, 阿久津正太郎¹, 荒木祥馬¹

後藤駿介¹, 野邊大貴¹, 有馬宣明¹, 柳澤正久², 長谷川直³

¹ 日本大学, ² 電気通信大学, ³ 宇宙航空研究開発機構

小惑星のライトカーブ観測において、およそ重力支配領域以下である直径 100m 以下では周期 2.2 時間以下の高速自転小惑星が存在し、直径と自転周期には負の相関関係が確認されている。これは、緩く集積した岩石の集合体(ラブルパイル天体)は遠心力によって崩壊してしまうため、この領域には高い内部強度を持つ単一岩石天体(モノリス天体)しか存在できないことを示唆している。このような高速自転小惑星や地上に落下する隕石などは、小惑星同士の衝突によって形成されたイジェクタであると考えられる。一方、地球周回軌道上のスペースデブリも人工物同士の衝突で発生したイジェクタであり、サイズに応じて高速自転していると考えられている。

これら天然天体(高速自転小惑星、隕石)と人工天体(スペースデブリ)に共通する宇宙環境下での「超高速衝突」と衝突破片(イジェクタ)の「回転特性」の関係性に着目し、実験的なアプローチから衝突が天体やデブリに与える回転特性への影響を検証した。

本研究では、JAXA 宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃を用いて最大約 7[km/s]の速度での衝突実験を行った。プロジェクトイルは $\phi 2$ の SUS304、衝突ターゲットには、小惑星を模擬した玄武岩と、スペースデブリを模擬した各種アルミニウム合金(A6061 など)を用いた。衝突によって発生したイジェクタを、高速度ビデオカメラによって撮像し、各種情報を取得した。得られたライトカーブ(光度の時間変化)から並進速度と回転速度(主軸回転周期とタンブリング周期)を導出し、イジェクタのサイズ分布関数や発生直後のイジェクタの黒体放射温度等も導出したので詳しく報告する。

太陽系探査における地球外生命(微生物)検出法の系統的比較による研究 A Comparative Study of Methods for Detecting Extraterrestrial Life (microorganism) in the Solar System Exploration

○塩谷 圭吾¹, 吉村 義隆², 山岸 明彦³, 小林 憲正^{4,5}, Elizabeth Tasker¹

¹宇宙科学研究所, ²玉川大, ³東京薬科大, ⁴横浜国立大, 東京科学大⁵

太陽系探査における地球外生命(微生物)検出法の系統的比較による研究について紹介する (Enya et al., (2023) *Atrobiology*, 23, 1099)。

地球外生命を探すにあたって、太陽系の惑星を探査することは有望な方針のひとつである。惑星探査において生命検出を目指す際には、まず微生物を対象とすることには相応の合理性があると考えられる。なぜなら、生物進化の方向性を考慮すると、微生物は誕生したが大型生物には進化していないという状況は考えられるが、その逆の状況は起き難く、また微生物の方が数が多く、より様々な場所に存在し得ると考えるためである。

我々は太陽系探査において地球外生命(微生物)を検出することを想定し、検出法の系統的な比較を行った。微生物の示す特徴として、増殖、形状・サイズ、有機物、蛋白質、アミノ酸、核酸、DNA、ATP、異化に注目した。そしてそれらの検出法を列挙し、プロセス、必要な有人操作、感度、サンプルボリューム、装置質量等を調べた。更に、擬陽性・偽陰性の有り様、地球生命に対する検出法としての汎用性、生死の判別性、注目した特徴の死後の長期保存性などについても比較し、結果をマスターテーブルにまとめた。

議論では、あらゆる点で他の検出法に優越する一つの決定版的検出法は無いこと、それゆえ複数の手法の組み合わせが重要であることを結論した。また、Earth life (地球生命) と extraterrestrial life (地球外生命) の 2 分法に代えて、Earth life、Earth-kin life (地球生命と共通祖先を持つ生命)、Earth-independent life (地球生命と独立に発生した生命) を考えることを提唱した。さらに検出以後の分析のフローについて検討した。他方、生命探査では「見つからなかった」という結論に終わる可能性も大いにあることから、実際の探査ミッションを実現するためには、生命が見つからなかった場合にも科学成果がえら得るようミッションを設計することが必要であると考察した。

初期地球・火星大気への太陽高エネルギー粒子照射による ペプチド形成過程における含硫アミノ酸の影響評価

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

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

大気や海洋を有する惑星において、生命が発生する際に必要なアミノ酸やタンパク質の起源は未解明である。特に、タンパク質がアミノ酸から非生物的に合成される過程を理解するうえで、タンパク質の前駆体であるペプチドの起源を解明することは重要な課題である。1950年代より、室内実験で様々なエネルギー源を入射することにより、初期の惑星大気を模擬したガスサンプルからアミノ酸やその他の生命に関する有機物が生成されると報告されてきた[例: Miller & Urey, 1959; Kobayashi et al., 1998; Chyba & Sagan, 1991]。Sakurai et al. [JpGU, 2024] では、約 40–37 億年前の火星の初期大気に火山起源 SO_2 の濃度が高い可能性を考慮し、初期火星大気中で非生物合成されうるアミノ酸組成 [Kobayashi et al., 1989] を模した粉体サンプル（グリシン、アラニン、セリン）に、火山ガスを模擬した含硫アミノ酸（システイン）を新たに加え、太陽高エネルギー粒子（Solar Energetic Particle; SEP）を模擬した水素分子イオン（10keV、7 μA ）を照射した。その結果、硫黄を含むアミノ酸の照射サンプルのみ、ペプチド形成が確認された。これは、照射により含硫アミノ酸が他のアミノ酸の結合を促進させ、ペプチドを生成したと解釈する事ができる。しかし、ペプチド生成に効果的な材料アミノ酸の組み合わせ等の必要条件については未解明な点が多い。そこで本研究では、ペプチド生成の必要条件を探索するため、初期火星・地球大気から合成されるアミノ酸について単純化した組み合わせのサンプルに、水素分子イオン（10keV または 8.5 keV、7 μA ）を照射した。実験には、含硫アミノ酸とその他のタンパク質構成アミノ酸を混合した粉体サンプル 3 種（グリシン 98.23%、システイン 1.77%）（アラニン 98.23%、システイン 1.77%）（セリン 98.23%、システイン 1.77%）と、含硫アミノ酸のみの粉体サンプル（システイン 100%）を用いた。照射後のサンプルの水溶液を高速液体クロマトグラフィー分析した結果、含硫アミノ酸のみのサンプルでは、照射の影響が見られなかった。各アミノ酸に含硫アミノ酸を加えたサンプルでは、照射したサンプルのみ検出できる照射生成物を 4 種類検出した。特にアラニンとセリンなど側鎖に炭素原子を有するアミノ酸とシステインを混合したサンプルにおいて、照射生成物の量が多い傾向が見られた。これらを N 末端アミノ酸配列解析した結果、エドマン分解後の 2 サイクル目以降にもアミノ酸のピークが見られたことから、照射生成物がペプチドである事が示唆された。これらの結果から、初期火星・地球大気において SEP 照射によりペプチドを生成する為には、火山ガスから含硫アミノ酸（システイン）が生成され、他のアミノ酸と組み合わせさせて照射されることが必要条件である可能性がある。特に、側鎖を有するアミノ酸とシステインの両者が存在する場合、アミノ酸同士の結合を効率的に促進され、ペプチドを生成する可能性が高まると考えられる。今後は、照射によって生成されたペプチドのアミノ酸配列を解析し、構造決定を進める予定である。さらに現在、大気分子からペプチドを非生物的に合成する過程の検証を目的として、火山起源の SO_2 が存在する初期火星大気を模擬した混合ガスサンプル (N_2 , CH_4 , SO_2) を調製し、高エネルギー（MeV オーダー）陽子を照射する実験も進行中である。本発表では、その結果についても報告する。

原始惑星系円盤内での 低質量ガス惑星の軌道長半径と離心率進化

○田中佑希¹, 田中秀和²

¹福島高専, ²東北大学

現在までに多数の太陽系外惑星が発見されており、それらの特性は非常に多様性に富んでいる。これらの惑星は原始惑星系円盤の中で形成・進化したと考えられているため、円盤内での惑星の形成過程や周囲の物質との相互作用による質量・軌道進化を明らかにすることは、系外惑星の多様性を理解する上で重要である。特に、巨大ガス惑星は円盤中に物質の低密度領域であるギャップを形成し、円盤と複雑な共進化を起こすため、惑星・円盤相互作用を取り扱う数値流体計算を用いた計算が盛んに行われている。

過去の研究では、円盤中の惑星の軌道離心率は0程度を仮定するものが多かったが、初期に一定の大きさの離心率を持ったガス惑星が円盤中でどのように進化するかに関しては、あまり詳細な研究が行われてこなかった。しかし発見されている惑星の軌道離心率は多様であり、円盤での相互作用によって離心率が励起された惑星もあることが指摘されている。したがって、離心率を持った惑星がどのように円盤中で進化するかを解明することは、惑星形成過程を明らかにする上で必要不可欠である。

これまでの我々の研究では、初期に離心率を持たせた軌道から計算を行い、惑星の軌道長半径や離心率、および惑星が形成するギャップ外縁の離心率は長い時間をかけて複雑に増減することを示した。しかし、その進化を駆動する要因は明確にはなっていなかった。そこで本研究では、楕円軌道にある比較的軽い質量を持つガス惑星による円盤のギャップ形成と軌道進化の数値計算を行った。また、惑星が形成するギャップの深さや離心率などの形状、共鳴の位置での面密度の変化などの解析から、惑星の軌道要素の複雑な進化の要因に関する詳細な調査を行った。

本講演では、惑星質量とギャップ形状の関係や、ガス降着による惑星の質量成長、惑星質量の違いが惑星軌道と円盤の共進化に与える影響について紹介し、ガス惑星の最終的な軌道・質量分布との関連について議論する。

大気散逸による系外惑星 Radius Valley 形成の再検討： 惑星内部からの脱ガスの影響

○黒川 宏之¹

¹ 東京大学

短周期系外惑星の統計分布には、地球半径の約 1.3 倍（スーパー・アース）と 2.6 倍（サブ・ネプチューン）の惑星サイズにピークを持ち、その間に惑星数が少ない、「半径の谷（Radius Valley）」と呼ばれる特徴がある[1]. Radius Valley の成因として、その場で形成したスーパー・アースと、氷雪線以遠で形成し移動してきたサブ・ネプチューンが共存しているという説、主星からの短波長放射などが駆動する大気散逸によって、かつて Radius Valley に位置したサブ・ネプチューンがエンベロープを失い、スーパー・アースとなったという説が提案されている[e.g., 2,3]. 一方、近年の理論研究では、サブ・ネプチューン内部に溶解した水素の脱ガスが惑星進化に影響を及ぼす可能性が指摘されている[4].

本研究では、i) 溶解した水素がエンベロープ水素の質量を上回る一般的な条件の導出、ii) 溶解水素を考慮した場合に観測された統計分布を大気散逸によって再現できるかの検討を目的とした。先行研究[3,4]のモデルを組み合わせることで、惑星の質量・サイズに対してエンベロープ水素質量・溶解水素質量を求める解析的モデルを導出した。このモデルを用いて、簡易な統計分布進化計算を実行した。

結果として、まず、Radius Valley の議論で重要な質量・サイズにおいては溶解水素がエンベロープ水素を上回る範囲が広く存在することがわかった。例えば、平衡温度 1000 K、5 地球質量の惑星では 3 地球半径が閾値となる。次に、溶解水素を考慮しない場合には Radius Valley が形成された一方で、溶解水素を考慮した場合には散逸したエンベロープが再補充されるため、Radius Valley が形成されない可能性を示した。これは、Radius Valley が大気散逸の結果ではなく、異なる惑星形成・進化過程の結果である可能性を示唆する。

参考文献：[1] Fulton, B. J. et al. (2017) *Astrophys. J.*, **154**, 109. [2] Venturini, J. et al. (2024) *Astron. Astrophys. Lett.*, **686**, L9. [3] Owen, J. E. & Wu, Y. (2017) *Astrophys. J.*, **847**, 29. [4] Chachan., Y. & Stevenson, D. J. (2018) *Astrophys. J.*, **854**, 21.

系外惑星大気中の雲・ヘイズ粒子の 放射平衡温度解析と存在可能領域の制限

○永田多朗¹, 大野和正²

¹ 茗溪学園高等学校, ² 国立天文台

雲・ヘイズ粒子が系外惑星大気の解析において重要であり、多くのトランジット分光観測によりその存在が示唆されている。しかし、その構成物質や粒径といった物理的性質には依然として不確定な点が多い。従来の研究は粒子の温度が周囲のガス温度と等しいことを仮定して大気中に存在可能な雲・ヘイズの組成を議論してきた。しかし、観測から探ることができる希薄な大気上層では雲粒子と周囲のガスの温度は必ずしも一致しない。

本研究ではこのギャップを埋めることを目指し、系外惑星の雲・ヘイズ候補物質を対象に、放射平衡下における雲・ヘイズ粒子の温度を調べた。具体的には系外惑星に雲として存在しうる Al_2O_3 , Fe , KCl , Mg_2SiO_4 , MnS , Na_2S , SiO_2 , ZnS の8種類を対象に Mie 理論に基づいて吸収効率の計算を行った。次に中心星照射による加熱と放射冷却のエネルギー収支のバランスを計算することで雲・ヘイズ粒子の放射平衡温度を調べた。

計算の結果、粒子温度は吸収効率の波長依存性に強く依存することが分かった。 MnS , KCl , Na_2S , ZnS は長波長域で吸収効率が低いため冷却効率が低下し、黒体放射を仮定した時の温度よりも遥かに高温になりうることが分かった。一方、 Mg_2SiO_4 , SiO_2 , Al_2O_3 は吸収効率が広い波長域で比較的一様であり、高温条件下でも安定に存在できることが分かった。

これらの結果を蒸発温度と比較したところ、 MnS , KCl , Na_2S , ZnS は恒星有効温度が高い系や近接軌道で急速に蒸発し、特に MnS に関しては恒星からの距離が 1AU だとしたときに有効温度 $\sim 5500\text{K}$ 以下の恒星周りの惑星のみで存在可能だということが分かった。対して、 Mg_2SiO_4 , SiO_2 , Al_2O_3 は惑星が恒星から 1AU 離れているときに有効温度 10000K 以上の星周りでも安定して存在できることが分かった。

本結果は、大気上層に存在する特定の組成の雲・ヘイズは惑星の平衡温度から類推される温度よりも遥かに高温になる可能性を示唆している。本講演では、様々な粒子サイズ、軌道長半径、恒星の実効温度に対して計算を行い、各組成の雲・ヘイズに対して熱的に安定して存在可能な条件も詳細に議論する予定である。

希釈核をもつ系外巨大ガス惑星の光度進化

○松尾大輝¹, 黒川宏之¹, 徳野鷹人²

¹ 東京大学総合文化研究科 ² 東京大学理学系研究科

古典的な巨大ガス惑星モデルは、水素・ヘリウムからなる外層(エンベロープ)と、それ以外の重元素(氷・岩石を構成)から成る固体核の間に明瞭な境界をもつ構造を仮定していた。しかし近年の探査ミッションによる木星・土星の観測結果から、エンベロープと固体核が混ざり合った構造(希釈核)の可能性が示唆された(Wahl et al. 2017, Mankovich & Fuller 2021)。希釈核構造は惑星の内側から外側へと高密度の重元素の存在度が減少していくため、均質な場合に比べて対流効率の抑制をもたらす。また、木星・土星の希釈核構造を長期間維持するには、惑星形成時の低エントロピー、つまり比較的弱い対流による物質混合効率の低下が必要であることが示唆されている(Sur et al. 2025, Müller et al. 2020)。

一方、系外惑星観測では、年齢が数 10～数 100 Myr 程度の比較的若い巨大ガス惑星が直接撮像によって観測されている(Marois et al. 2008 など)。これらの巨大ガス惑星は、現在の木星・土星の数 1000 倍以上にもなる非常に高い光度を示し、惑星内部での強い対流が示唆される。しかし、密度勾配の存在により対流を抑制する希釈核構造と、活発な対流による高光度は相反する可能性がある。すなわち、その強い対流を伴う長期的な惑星進化を通じて希釈核構造が物質混合によって均質化されずに維持されるのかは未解明である。

本研究では、希釈核構造と系外惑星の高光度が両立しうるかを調べた。そのために、恒星進化コード MESA(Paxton et al. 2011, 2013, 2015, 2018, 2019, Jermyn et al. 2023)を惑星用に改変し、MESA に実装されている水素・ヘリウムの状態方程式に加えて、重元素として水の状態方程式 AQUA(Haldemann et al. 2020)を導入した。その後、異なる内部構造(希釈核/古典的な核構造)と多様な初期条件(組成・温度)で進化計算を実施し、観測的制約との整合性を検証した。本発表では、希釈核構造と高輝度の両立可能性に加え、得られた惑星計算結果をもとに太陽系内外の巨大ガス惑星の形成過程への示唆を議論する。

若い系外惑星 TOI-560b, c の質量決定に向けた TTV 観測

○早川晴¹, 福井暁彦², 成田憲保²

¹ 東京大学教養学部 ² 東京大学大学院総合文化研究科

TOI-560 は、2つのトランジット惑星を有する比較的若い (およそ 0.5 Gyr) の K4 型の恒星である。過去の TESS 衛星の観測によりトランジットが検出され、Barragán et al. (2022) によって惑星の存在が確認された。この発見論文では、質量決定に視線速度法が用いられており、 $M_b \approx 10.2 M_\oplus$ 、 $M_c \approx 9.7 M_\oplus$ と決定された。視線速度法では、主星の視線速度のふらつきから惑星の質量を決めることができる一方、主星の活動による誤差を受けてしまうという問題がある。特に TOI-560 は若い恒星であるため、主星の活動が活発であることが知られている。

そこで本研究では、トランジット時刻変動 (TTV) の観測による質量決定を試みた。TTV とは、複数個の惑星が存在することにより、重力摂動を受けて各トランジット中心時刻が理想的な周期からずれる現象である。この TTV を観測することにより、惑星の質量や離心率を視線速度法とは独立に決定することができる。TTV の観測は数年間に渡り、TESS のアーカイブデータと、単色測光装置 Sinistro および多色測光装置 MuSCAT シリーズを使用した。得られた TTV のデータと、TTVfast (Deck et al. 2014) を用いた N 体シミュレーションの結果を MCMC 法により比較することで、質量決定を行った。結果として、質量の上限値は発見論文の値を大きく上回り ($M_b < 116 M_\oplus$ at 3σ 、 $M_c < 128 M_\oplus$ at 3σ)、現在の観測精度 ($\Delta t_c \approx 3$ min) では質量が定まらないことが明らかになった。

さらに、これらの MCMC の遷移過程からランダムにパラメータを抽出し、REBOUND (Rein & Liu 2012) を用いた N 体シミュレーションにより、本惑星系が 1:3 の軌道共鳴に入っているかを調査した。軌道共鳴は、共鳴角 $\phi = 3\lambda_2 - \lambda_1 - 2\varpi_1$ がある角度のまわりに振動しているかで判断することができる。ランダムに選んだ 1000 個のパラメータセットに対してクラスタリングを行ったところ、完全に共鳴に入っているものは見られず、共鳴角が長周期の変動を伴いつつ短周期で強く振動するケースが全体の約 2%、短周期で弱く振動するケースが約 12% 存在した。これらの結果から、本惑星系は共鳴には入っておらず、共鳴からは比較的離れた軌道配置にあると考えられる。

また、TTVfast で得た bestfit パラメータを元に、mock-data を作成し、同様の解析を行ったところ、観測誤差が約 $\Delta t_c \approx 0.3$ min、観測期間が十数年程度であれば、離心率と質量の縮退を解けることが明らかになった。これは、本惑星系の Super Period が約 380 日と 1 年の日数に近く、TTV の全位相を観測するには長期間にわたる観測が必要となるためであると考えられる。本発表では、これらの結果を詳しく紹介するとともに、正確な質量決定に向けた将来の観測展望について議論する。

進化モデル手法とジャイロ年代学手法を用いた 主星年齢推定の精度向上

○宇野航太郎¹、成田憲保¹、福井暁彦¹、De Leon Jerome¹
¹東京大学

恒星の年齢推定は、その進化段階や付随する惑星系の形成・進化を理解する上で不可欠な要素である。これまで、恒星の年齢推定には、有効温度と数バンドの等級といった観測データに最もよくフィットする等年齢線を見つけ出す進化モデル手法が、その手軽さから広く用いられてきた。しかし、その年齢推定には大きな不確実性が伴う。既存の推定値がない、あるいは誤差が大きすぎて実用的な意味をなさないケースも少なくない。さらに、進化モデル手法だけでは若い星の年齢を過大評価する傾向があり、真に若い星が見落とされている可能性がある[1]。1Gyr以下の若い惑星は惑星の軌道や大気進化の解明において極めて重要であり、正確な年齢推定が求められている。

本研究は、複数の年齢推定手法を組み合わせることでその信頼性を向上させ、これまで見過ごされてきた若い星や連星系を発見することを目的とした。今回、幅広い恒星に適用可能でデータ取得のハードルが低い進化モデル[2]とジャイロ年代学[3]の2つの手法を用い、年齢推定精度の向上を試みた。先述の通り進化モデルが年齢を過大評価する可能性はあるが、それでもまだ推定されていない恒星などに対しては有効なデータになるかもしれないため用いた。惑星進化の研究への活用を視野に入れた研究であるため、NASA Exoplanet Archiveに登録されている惑星を持つ恒星の中から、両手法に必要なデータが揃っており、かつ推定に適した有効温度範囲を持つ194天体を選定し、年齢推定を実施した。具体的には、有効温度が3500K～7500Kで、自転周期、BPバンド等級、RPバンド等級、Jバンド等級、Hバンド等級、Kバンド等級、年周視差のデータを持つ天体を対象にした。W1バンド等級、W2バンド等級、W3バンド等級、W4バンド等級、金属量([Fe/H])、表面重力などのデータがある場合は、これらもパラメータに加えた。

年齢推定の結果、推定誤差が十分に小さい($\pm 1\sigma$ が3Gyr以下)という有効な結論を導き出せた43天体について詳細な考察を行った。このうち36天体で進化モデルでの推定値が同手法での先行研究と一致し、さらに18天体でジャイロ年代学とも一致し、信頼性を向上させることができた。一方で、以下のような興味深い天体も得られた。単星モデルと連星モデルの比較からKepler-1643やWASP-92は連星系である可能性が示唆された。また、TOI-2141、TOI-908は進化モデルとジャイロ年代学の推定結果が先行研究より若く一致し、特には 1σ の範囲で1Gyrを下回り、若い可能性が高いことが示された。これらの結果は、複数手法の組み合わせが恒星の年齢推定の精度と信頼性を高め、特異な進化段階にある恒星や未発見の連星系の特定に貢献することを示唆している。今後の展望として、より多くの天体への適用、Li(リチウム存在量)など別手法を用いての信頼性の向上などが挙げられる。

[1] Bouma, L. G. et al. (2024) Kepler and the Behemoth: Three Mini-Neptunes in a 40 Million Year Old Association. *Submitted to Astronomical Journal*.

[2] Morton, T. D. (2015) isochrones: Pythonic stellar model grid access. *Astrophysics Source Code Library*, ascl:1503.010.

[3] Bouma, L. G. et al. (2023) gyrointerp: Gyrochronology via interpolation of open cluster rotation sequences. *Astrophysics Source Code Library*, ascl:2307.026.

Development of a Generalized Analytical Model for Exoplanetary Auroral Radio Emission

*Satyagraha Asa¹, Kimura Tomoki¹, Fujii Yuka², Tao Chihiro³, Hara Ryota¹

¹Tokyo University of Science, ²National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ), ³National Institute of Information and Communications Technology (NICT)

Planetary auroral radio emissions are considered a promising tool for the direct detection of planetary magnetic fields and atmospheres. Their circular polarization (Wu & Lee, 1979) allows them to be distinguished from other radio sources, and their emission frequency is theoretically proportional to the magnetic flux density at the source region. Therefore, auroral radio observations can directly constrain the magnetic field strengths without relying on complex model assumptions. However, auroral radio emissions have not yet been observationally detected from any exoplanet, except for a marginal detection (Turner et al., 2021). Previous modeling efforts have focused on magnetosphere-ionosphere (M-I) coupling (Nichols, 2011) and star-planet interaction (SPI) mechanisms (Saur et al., 2013), but these models have not successfully explained emissions across diverse exoplanetary systems simultaneously.

We present a newly developed simplified analytical model of the M-I coupling that predicts the auroral radio power across various star-exoplanet systems, based on the pioneering exoplanetary M-I coupling model by Nichols (2011). The model uses only magnetospheric velocity distribution, excluding parameters difficult to constrain observationally, such as flux function and mass loading rate. Plasma velocity profiles are used to calculate the dynamo electric field and latitudinal currents, from which total Joule heating is then estimated. Validation against Jupiter and Saturn shows that our model accurately estimates the total auroral energy dissipated via Joule heating in their ionospheres—approximately 450 TW for Jupiter and 15 TW for Saturn. These values agree with observational estimates within an uncertainty of one order of magnitude and are consistent with previous modeling studies. Assuming a 0.01% conversion efficiency from auroral Joule heating to radio emission, our model predicts radio powers of ~ 10 GW for Jupiter and ~ 1 GW for Saturn, consistent with observations (Cowley et al., 2004; Zarka, 2007). When applied to ultracool dwarfs (UCDs), the model suggests that their observed radio emissions—up to ~ 1 TW (Hallinan et al., 2008; Kao et al., 2023)—indicate weak atmospheric ionization, with electric conductance estimated between 0.1 and 10 mho (cf. ~ 0.5 mho at Jupiter; Nichols et al., 2016). We also applied our model to the tentative LOFAR detection of the hot Jupiter Tau Boö b. According to our modeling, the magnetospheric size of Tau Boö b must be approximately 3–23 planetary radii to reproduce the observed signal of 10^{14} - 10^{16} W (Turner et al., 2021). This is significantly more compressed than Jupiter's magnetosphere (extends from 42 planetary radii; Kivelson et al., 2006), which is plausible given Tau Boö b's close orbital distance of 0.0462 AU (Butler et al., 1997). These results support the validity of our model. We plan to apply it to a broader range of UCDs and hot Jupiters, with the ultimate goal of extending it to Earth-like planets. Here, we summarize the current status of our model development and validation.

水蒸気大気を持つ系外地球型惑星における大規模散逸大気の検出可能性

○加藤龍雅¹, 中山陽史¹, 亀田真吾¹

¹立教大学

現在の系外地球型惑星探査においては、M型星やK型星といった低温度星を公転する惑星が主要な観測対象とされている。検出の比較的容易な低温度星周りの惑星においても、半径の小さい地球型惑星の大気は検出が極めて困難であり、ハビタブルゾーン(HZ)付近に存在する惑星でも大気は検出されていない。低温度星は長期間にわたり強いXUV(X線および極端紫外線)放射強度を維持するため、HZ付近に位置する惑星であっても、現在の地球よりも遥かに強いXUV放射を受ける。そのため、上層大気が強く加熱され、大規模な大気散逸が起きると予想される。また、HZの内縁境界よりも恒星に近い位置を公転し、地球のようにH₂Oを多量に保持している惑星では、暴走温室効果に伴って水蒸気大気が形成されうる。高層では、水蒸気は光解離によって水素・酸素原子を生成し、宇宙空間へ散逸する。高い散逸率が実現されれば、その原子によって恒星円盤程度の領域が光学的に厚くなると予想される。観測される減光率は超高層大気における数密度分布、すなわち大気散逸率を反映しており、居住可能性の理解で重要となる大気進化に直接的な示唆を得られる。そのため、次世代の観測計画であるLAYUTAやHWOでは、紫外線トランジット分光法による地球型惑星の大気検出およびその大規模散逸の観測的検証が期待される。そのため、観測実現性の検討や解釈には、低質量星の惑星で予想される強い放射圧や光電離を考慮したモデルが不可欠である。

本研究では、水蒸気大気を持つ地球型惑星を対象に、3次元粒子モデルによる数値シミュレーションを実施した。本モデルでは、惑星重力、恒星重力、水素のLy- α 線およびOI輝線に対応する放射圧を考慮して中性水素・酸素原子の粒子群の軌道追跡を行っている。また、粒子の飛行時間に対応した光電離による数密度の減少も取り入れている。粒子群の位置と視線速度を基に波長毎の光学的厚みを求め、透過スペクトルおよび減光曲線を推定した。シミュレーションの結果、酸素原子の光電離頻度が水素原子よりも1桁大きいため、空間分布が大きく異なることがわかった。空間的な広がりを反映し、トランジット分光観測における減光の継続時間も異なり、OI輝線はLy- α 線より大幅に短い時間となる。また、水素原子はLy- α 線による放射圧を受けて彗星の尾状構造を形成するのに対し、OI輝線による放射圧は加速度が数桁小さく、酸素原子の分布には影響を与えなかった。

本発表では、これらのシミュレーション結果をもとに、上層大気の温度、XUV放射量、放射圧加速度の強度といった物理パラメータが、観測で予想される減光率や透過スペクトルの形状に与える影響を評価する。また、それらを踏まえて、大規模散逸の観測可能性について検討し、検出のために必要な上層大気の条件について議論を行う。

はやぶさ 2 データ解析用 QGIS プラグインの開発

○市川真弓¹, 巽 瑛理², 平田 成³, 本田 和広¹, 長井 雄一郎¹,
村上 真也¹, 佐藤 広幸¹, Hayabusa2 Open Data Science Working Group
¹JAXA/ISAS, ²Instituto de Astrofisica de Canarias, ³会津大学

はやぶさ 2#国際ビジビリティ事業では、はやぶさ 2 観測データの利活用促進と利便性向上を目的として、GIS フォーマットによる高次プロダクトの開発・整備を進めている。現在整備中のプロダクトは、一般的な GIS ソフトでの利用を想定しており、プロダクトの整備と並行して解析に使用可能なツール、特に QGIS プラグインの開発を進めている。

小天体の探査データの可視化・解析向けには、SBMT (Small Body Mapping Tool) や AiGIS 等の既存ツールが存在し、これらは 3 次元形状モデル上で観測データを投影・操作できる強力なツールである。一方、独自形式のデータや専用ビューアに依存するため、他ツールとの連携や機能拡張が難しい。QGIS では、様々な解析機能が標準搭載されているだけでなく、プラグインによる機能拡張が容易である。小天体での解析作業向けのプラグインを用意することで、各種解析作業を一貫して完結させることが可能となり、作業準備および解析にかかる労力を大幅に軽減できるほか、GIS ソフトやプログラミングに不慣れなユーザーでも扱いやすく、データ利用の敷居を下げる効果が期待される。

本発表では、GIS データの解析ツールとして開発を進めている QGIS プラグインについて紹介する。まず、一般的なデータ解析での利用を想定し、以下の 3 種類のプラグインを開発した：①スペクトルプロファイルの可視化、②マップ作成、③スペクトルスロープの計算。これらの機能により、例えば複数地点に分布するボルダーや、クレーターの縁部と内域におけるスペクトル形状の比較、スペクトルスロープの全球マップ作成などが容易に実施できる。

さらに現在、より高度な解析および視覚化への対応を目指し、以下の機能開発にも取り組んでいる。具体的には、小天体の不整形な形状に対応するための 3 次元モデル上での距離・面積計測や断面プロファイル表示、分光データを用いた吸収量の計測、クラスタリング・主成分分析などの解析機能の拡充、ならびに SBMT や AiGIS 等、他の可視化・解析ツールとのフォーマット互換機能の開発である。このような機能を拡充させることで、小天体観測データの利活用の幅を大きく広げることを目指している。

今後、開発したプラグインの配布準備を進めるとともに、プラグインの機能強化に取り組んでいく予定である。また、ユーザー層の拡大およびデータ利活用の促進を目的としたはやぶさ 2 観測データに関する解析ワークショップの開催を含む一連の活動を通じて、はやぶさ 2 観測データのより広範かつ効果的な利活用を推進していく。

謝辞：この研究ははやぶさ 2 #国際ビジビリティ事業によりサポートされています。また文部科学省特色ある共同利用・共同研究拠点支援プログラム PMXP0723830458 の助成を受けています。

Apophis 探査計画 RAMSES での熱赤外カメラ観測

○岡田達明^{1,2}, 田中智¹, 坂谷尚哉¹, 鳶生有理¹, 荒井武彦³, 千秋博紀⁴, 出村裕英⁵,
関口朋彦⁶, 神山徹⁷, 金丸仁明^{2,8}, 石崎拓也¹, 古川聡一郎^{1,2}, Ramon Vilardell-Belles⁵,
Ozgur Karatekin⁹, Joris Blommaert¹⁰, RAMSES TIRI チーム¹
¹JAXA 宇宙研, ²東大, ³前橋工大, ⁴千葉工大, ⁵会津大, ⁶北海道教育大, ⁷産総研,
⁸コートダジュール天文台, ⁹ベルギー王立天文台, ¹⁰VITO

直径約 340m で S 型のアテン群に属する地球接近小惑星 99942 Apophis は、2029 年 4 月 13 日に地球から静止衛星よりも近い距離 32,000km という、ロッシュ限界の約 2 倍の距離を通過することが判明している。この際に小惑星 Apophis は地球潮汐力による形状や自転、あるいは表層状態の変化がみられると期待される。この際に探査機を地球近傍遭遇の前にランデブさせ、地球潮汐力のおよぶ事前～事後まで連続的に観測できれば、変化の様子を調べ、天体の強度や内部構造について制約を与えることができる可能性がある。現在軌道が分かっている 3 万以上の地球接近小惑星のうち、この規模の天体の地球近傍遭遇は今後 1000 年以上起きないとされ、文字通り千載一遇の機会である。現在、欧州宇宙機関 ESA に宇宙航空研究開発機構 JAXA が協力して Apophis のランデブ探査を行う RAMSES 計画が検討されている。2028 年 4～5 月に打上げ、2029 年 2 月にランデブし、3 月から Apophis 事前観測を実施する。最接近前後の 4 月 12～14 日は低高度で連続観測を行い、その後も継続して探査することで、事前～最中～事後の観測を実現する。

RAMSES は短期での確実な開発の実現もミッションであり、Hera の探査機設計の踏襲、搭載機器のスペア品活用や同設計品の再製作で極力対処し、新規開発要素を最小限にとどめることで実現する。日本からは熱赤外カメラ TIRI のスペア品 (TIRI-R) の搭載と、DESTINY+ で開発された薄膜軽量太陽電池のマイナー修正品を提供する。TIRI-R は非冷却ボロメータを搭載した熱赤外カメラであり、フィルタホイール搭載により多波長分光も可能である。Hera で飛翔実証がなされ、地球や月、火星とその衛星の観測を実施し、機能や性能が確認された。TIRI-R を用いることで、小惑星 Apophis の熱物性や組成を調査するほか、地球潮汐による変化として、変形や地滑り、自転軸変化などが観測できると期待される。これらは表層温度、組成、および夜間を含む形状の測定が重要であり、TIRI-R はその目的達成に重要な役割を果たす。これらの表層岩塊の物性や内部構造、密度や固着力などの情報は、地球に大きな災害をもたらし得る 300m 級の小惑星の衝突回避や衝突時の被害推定を行うためのプラネタリーディフェンス的観点と、初期太陽系における微惑星の衝突破壊進化の解明に向けた惑星科学的観点の両面で貴重な情報を得られると期待される。

土星衛星タイタン離着陸探査計画 Dragonfly 搭載地震計の開発： フライトモデルの製作と極低温下での初期性能評価

○小野寺 圭祐¹, 白石 浩章², 田中 智², 三谷烈史², 川村 太一³, 村上 英記⁴, 山田 竜平⁵,
Mark Panning⁶, Kristin Sotzen⁷, Ralph Lorenz⁷

¹岡山大学惑星物質研究所, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³Institut de Physique du Globe de Paris, ⁴高知大学,
⁵会津大学, ⁶Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology,
⁷Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University

2019 年に NASA のニューフロンティアプログラムの 4 番目の計画として採択された Dragonfly は、2028 年 7 月に打ち上げが予定されており、2034~2037 年にかけて土星衛星のタイタンを探索することになっている。本ミッションでは離着陸可能なクアッドコプター型のドローンを用いてタイタンのセルククレータ付近の様々な地点で化学分析・気象観測・地球物理観測を行う。この中には LUNAR-A 計画用の短周期地震計(図 1a)をベースに開発が行われたタイタン地震計(DraGMet SEIS)によるタイタンの地震活動度の評価および内部構造の推定も含まれている(図 1b)。

現在、当ミッションでは科学観測機器のフライトモデル製作が進行しており、日本を含む世界各国の機器が米国に集まりつつある。我々地震計チームは今年の 1 月よりフライトモデルおよびフライトスペアの製作を開始し、2025 年 7 月現在にて製作が完了し(図 1b 左下)、極低温環境下での初期性能評価を実施している。本発表では、フライト品の製作報告を行うとともにその性能の初期評価結果について紹介する。

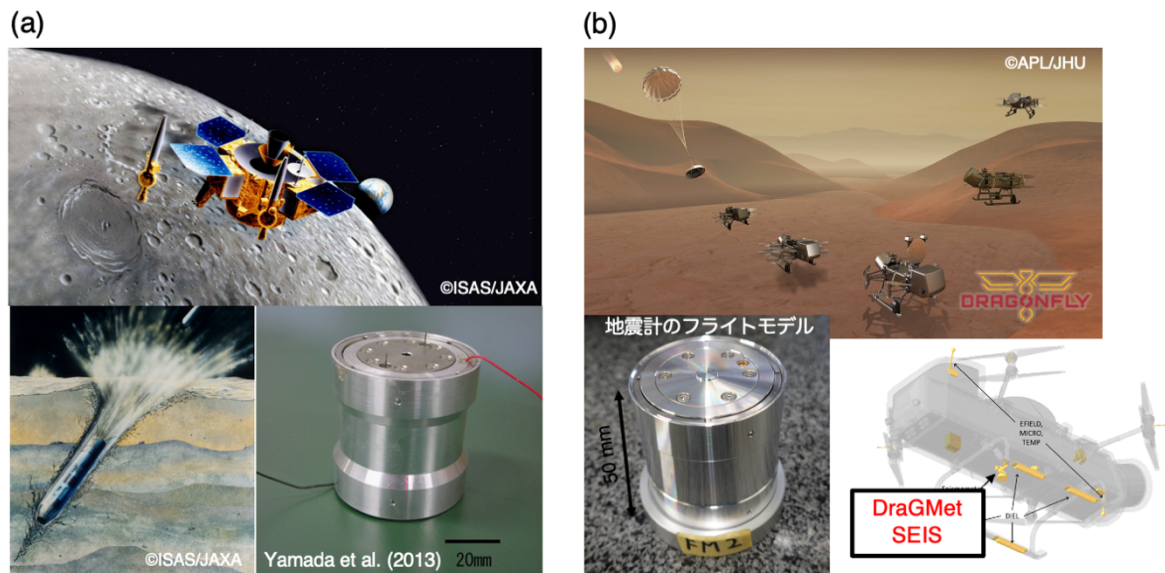


図 1. (a)2007 年にキャンセルされた LUNAR-A 計画のイメージ図と月震観測を想定して開発された短周期地震計。(b) Dragonfly 計画のイメージ図およびタイタン地震計(DraGMet SEIS)のフライトモデルの写真と離着陸探査機への搭載位置。

火星衛星探査計画 MMX の 汚染管理方針とその進捗

○菅原春菜¹, 坂本佳奈子¹, 深井稜汰¹, 臼井寛裕¹, 安部正真¹, 長島加奈¹, 中野有紗¹,
木村駿太¹, 小澤宇志¹, 澤田弘崇¹, 加藤裕基¹, 佐藤泰貴¹, 吉川健人¹, 高野淑識²,
藤谷渉³, 馬上謙一⁴, 橘省吾⁵, 三浦弥生⁵, Michael Zolensky⁶, Carla Gonzalez⁷,
Melissa Rodriguez⁷, Curtis Calva⁷, Emily P. Seto⁸, Natasha Bouey⁸, Loc Troung⁸,
Kris Zacny⁸, Yuka Matsuyama⁸, Dylan Van Dyne⁸, Kathryn Bywaters⁸, Sherman Lam⁸,
Alex Zapata⁸, Robert Espadas⁸

¹宇宙航空研究開発機構 (JAXA), ²海洋研究開発機構 (JAMSTEC), ³茨城大学,

⁴北海道大学, ⁵東京大学, ⁶NASA/JSC, ⁷Jacobs/JSC, ⁸Honeybee Robotics

火星衛星探査計画 MMX は、火星衛星フォボスからのサンプルリターンミッションであり、地球物質の混入を避けるための特有の汚染管理が要求される。その基本は、(1) 汚染物質の混入量を最小限に抑えること、(2) 汚染評価を行うこと、(3) 汚染物質を識別できるようにサンプル片を保管することである。汚染管理の主対象となるミッション機器は、2種類のサンプリング装置（サンプラー）：C（coring）-サンプラーおよびP（pneumatic）-サンプラー（NASA 提供）である。汚染管理は探査機の設計段階から始まり、汚染物質が混入しないような材料の選定をしている。また、組み立ての前にも部品は精密洗浄を施され、組み立て後も常時窒素パージにより陽圧に保つことで、外環境からの汚染物質の混入を防いでいる。

フライトモデル（FM）の組み立てから打ち上げまでの期間は ATLO（Assembly, Test, and Launch Operations）と呼ばれる汚染管理のクリティカルフェーズである。MMX の ATLO 期間では、FM の組み上げ・試験環境の汚染物質の経時環境モニタリングと詳細な汚染評価を実施する。前者でははやぶさ2の際に開発されたコンタミクーポンセットを使用し、常時、FM の側に設置することで FM に混入する汚染物質をサンプリングする[1]。後者では各関連メーカーのクリーンルームや種子島スペースセンターにて、浮遊塵捕集機を用いた大気中の汚染物質のサンプリングと、有機溶媒とシリカウールを用いた集積塵のワイプサンプリングの2種類のサンプリングを実施する。MMX ではさらに OSIRIS-REx でも実施されたような惑星保護の標準法に則った微生物モニタリングも進めている[2]。MMX は現在、ATLO フェーズにあり、2026 年の打ち上げに向け、着実に汚染管理を実施していく。

Reference [1] Sawada H. et al. (2017) Hayabusa2 Sampler: Collection of Asteroidal Surface Material. *Space Science Reviews*, 208, 81–106 [2] Dworkin J.P. et al. (2018) OSIRIS-REx Contamination Control Strategy and Implementation. *Space Science Reviews*, **214**, 19

フォボスの画像データの閲覧・検索システムの開発

○菊地紘¹

¹学習院大学

火星の衛星フォボスは、その特異な起源と進化の歴史、そして将来の火星圏探査における中継拠点としての可能性から、科学・探査の両面で国際的に高い注目を集めている。これまでフォボスは、Viking Orbiter (VO), Phobos 2, Mars Global Surveyor (MGS), Mars Express (MEx), Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) をはじめとする複数の探査機によって観測されてきた。各探査で得られた画像データは、空間解像度、観測波長、観測ジオメトリが異なり、フォボスの多様な地表現象を理解するための相補的な情報源として極めて重要である。しかし、これらのデータはミッションごとに形式や座標系の定義が異なり、横断的な比較・活用には煩雑なデータ変換処理が不可欠で、総合的な科学解析を進める上での大きな障壁となっていた。

この課題を解決するため、私たちは複数の探査機による画像データを一元管理し、直感的に活用できる Web システムの開発を進めている。これまでの研究で MEx の高解像度ステレオカメラ (HRSC) 画像の一部を対象としたプロトタイプを構築した。本研究ではその機能と対象データを大幅に拡張した。ユーザーインターフェースには WebGIS 技術を活用し、地図上で各画像のフットプリントを確認しながら、クリック一つでプレビューを閲覧できるなど、インタラクティブな操作性を実現した。データベースには、公開されている MEx の全画像データと、歴史的に価値の高い VO の画像データを新たに追加統合した。

本システムの構築により、仕様や取得時期の異なるデータを同一プラットフォーム上でシームレスに比較・分析する環境が整った。さらに、この統合データベースは副次的な効果として、異なるデータを組み合わせた高解像度の全球モザイク画像や数値地形モデルといった高次科学プロダクトの創出を加速させる基盤ともなり得る。さらに本システムは、地形形成史の解明や将来の着陸地点選定といった本質的な科学探究に、より専念できる環境を提供することに貢献するものである。今後は MGS や MRO 等のデータ追加を進めると共に、限定公開を通じてコミュニティからのフィードバックを反映させ、日本の火星衛星探査計画 MMX (Martian Moons eXploration) のデータも統合可能な基盤技術へと発展させ、フォボス科学の進展に貢献していく。

月面天文台 TSUKUYOMI の観測計画と概念設計

A Study on Observation Plan and Conceptual Design of TSUKUYOMI

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

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

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

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

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

他方で本観測システムは、太陽系科学への寄与も目指す。木星をはじめとする太陽系内各惑星からの電波を詳細に観測することによって、惑星の電波放射機構を統一的に理解する。アンテナ素子数が増加する最終段階では、例えば AKR タイプの強い放射タイプの、太陽系外木星型惑星からの電波の検出も可能となる。さらに、主星の電波バーストの観測を通じて、系外惑星系のハビタブル環境の理解にもつなげる。一方で、干渉計データの解析に必要な校正データの蓄積は、各アンテナサイトにおける月の電離層・荷電粒子降着などの環境計測の長期モニタリングや、地下の不連続面からの反射波による干渉を利用した月の地下構造の解明も期待される。

2020 年代の打ち上げを目指す本計画のプロトタイプ段階では、伸展式ショートダイポールアンテナのユニット 1 基を設置し、2030 年代の本格観測開始時には 10 素子程度まで増やすことを目指す。これまでに、月面ランダ、小型ローバ、有人と圧ローバへの搭載を想定したアンテナユニットの設計、ならびに伸展式アンテナ (LOPTA: Lunar Observatory Proto-Type Antenna) 機構およびプリアンプの開発、ならびにこれらを用いたシステム設計を行っている (e.g. Iguchi *et al.*, 2024)。とりわけ本システムは広波長帯域に対応する必要性からアンテナ利得における制約が生じることから、プリアンプの目標感度を $2\text{nV}/\text{Hz}$ に設定した低雑音化を目指している。

参考文献:

Iguchi, S., *et al.*, *SPIE Astronomical Telescopes+Instrumentation*, 13092–99, 2024.

Yamauchi, D., *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2022**, id.073E02m, doi: 10.1093/ptep/ptac095, 2022.

数値シミュレーションを用いた天体地下探査用アンテナの設計

○杉原 悠太¹, 宮本 英昭¹, 小林 真輝人¹¹東京大学

月面での水氷の存在やその量、分布、形態、深度、同位体比などの理解は、揮発性物質の地球圏への輸送過程や起源、その後の月面での水分子の輸送過程の解明に繋がる。過去のリモートセンシングでは、月極域の表層～地下浅部に水氷の存在が示唆されているが[1,2]、探査手法ごとの探査深度や深度分解能の違いから、その詳細な分布や埋蔵量には、依然不確実な点が多い[2,3]。そのため、今後は既存リモートセンシング知見に加え、LUPEXなどのローバーによる直接観測による一点（あるいは数点）での精緻な情報の取得と同時に、横方向への展開が容易で地下方向に分解能をもつ情報も有益となる[4]。

このような探査手法の一例として、地中レーダー（GPR）が挙げられる。GPRは、電磁波をアンテナから能動的に送信し、その反射波を検出することで地下の物質境界を可視化する物理探査手法である。用いる方式や周波数によりその分解能は異なり、一般的に広帯域な電磁波を用いるほど分解能は高くなる。広帯域な電磁波を放射するには広帯域アンテナが必要となるが、アンテナ理論一般として、ゲインや指向性が周波数によって変化してしまうという問題がある。また、探査機の限られた電力リソースで効率的に探査を実施するには、高指向性かつ高ゲインなアンテナが不可欠である。これらの問題を惑星探査という限られたリソース内で解決するには平板状のアンテナが有効であるが、その性能は複雑な表面パターンにより決定されるため、曲線や曲面を精緻に再現したアンテナ形状モデリングが必須となる。

そこで本研究では、有限要素法（FEM）を用いた数値シミュレーションにより、広帯域で高いアンテナゲインを持つ低リソースのアンテナの設計を目指している。具体的には、FEMによる高精度な定常状態の電磁界解析により、自由空間での特定方向への放射効率（ゲイン）をパラメータとし、新たなアンテナ設計の最適化を実施した。本講演ではこの結果をもとに、現実的な天体地下探査用アンテナの設計案と、数値シミュレーションによる性能の改善を報告する。

[1] Li et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **115**, 8907–8912 (2018). [2] Sanin et al. *Icarus* **283**, 20–30 (2017). [3] Pieters et al., *Science* **326**, 568–572 (2009). [4] Prajapati, V. et al., Proc. IEEE Space, Aerospace and Defense Conf. (SPACE), 207–210 (2024).

国際宇宙探査における月震計および人工地震源システムによる 月の表面環境および内部構造探査

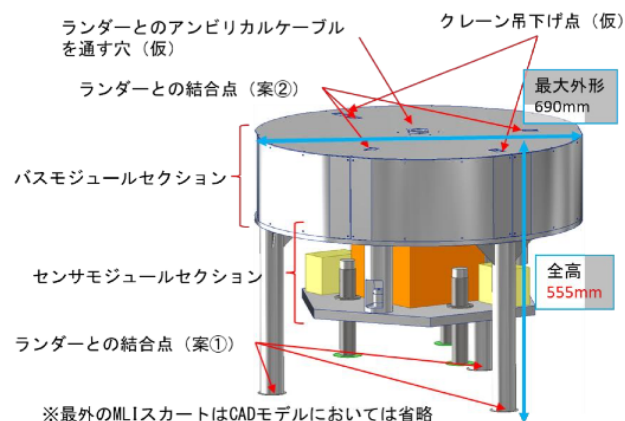
○田中 智¹, 新谷 昌人², 辻 健³, 川村 太一⁴, 小野寺 圭祐⁵

¹JAXA 宇宙科学研究所, ²東京大学地震研究所, ³東京大学大学院工学系研究科,

⁴Institut de Physique du Globe de Paris, ⁵岡山大学惑星物質研究所

現在、国際宇宙探査の枠組みにおいて、月および他天体に対する科学探査および関連技術の実証に関する取り組みが各国で活発に進められている。その中で、月面環境や内部構造の把握は、将来的な有人探査や資源利用、さらには月以遠へのミッションのための基盤情報となることから、その重要性が増している。我々はこうした背景を踏まえ、月の地震活動と内部構造を地震学的手法により調査することを目的として、月震計モジュールおよび人工地震源のシステム開発を進めている。これらは、将来的に複数拠点に展開してネットワーク観測を行うことを想定した地震観測装置であり、月面において安定的かつ高精度な観測を実現するための基盤技術として位置付けられる。アポロ計画では複数の地震計による観測が行われ、月内部に関する初期的知見が得られたが、使用された機器の性能や観測地点の限られた配置により、詳細な内部構造の推定には限界があった。現代のセンサ技術、通信・電源技術、軽量化設計の進展により、より高感度・広帯域・省リソースな観測が可能になっており、再び月震観測を実施する意義は大きい。本技術開発では、まずその第一歩として、民間企業による月面着陸機打ち上げの機会を活用し、月面極域における1地点での観測実証を目指している。この実証では、人工地震源による表層構造の調査と自然月震の観測による広帯域観測の両面を評価対象とし、探査機とのインターフェース設計や環境適応性の確認も含めた総合的な性能検証を行う。月面極域は将来の有人探査の候補地とされており、本観測はその活動基盤構築にも資する。本講演では、我々が進めている観測装置・人工震源の技術的概要、現時点での設計・試験状況、今後の展開構想について報告する。

図1：地震計搭載観測モジュール設計外観



アルテミス計画月南極域帰還試料を想定した 低温帰還試料キュレーションの検討

○矢田達¹、安部正真¹、石崎拓也¹、川崎盛矢¹、下西里奈¹、岡田枝恩¹、臼井寛裕¹

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所地球外物質研究グループ

JAXA はこれまでに小惑星サンプルリターンを実施し、地球外物質研究グループにおいて地球近傍小惑星イトカワ、リュウグウから持ち帰った試料のキュレーションを行ってきた[1, 2]。これらの試料の取り扱いには室温の大気非暴露(真空及び窒素雰囲気)環境で行われてきた。これに対して将来のサンプルリターンミッションでは、例えば、日本も参加することが決まっている、NASA 主導の月アルテミス計画では、2030 年までに月南極域に宇宙飛行士を送り、試料を持ち帰る予定である[3]。月南極域には最高温度が 100K を下回るような永久日陰領域が存在し、これまでの遠隔探査などにより、こういった領域に水氷の存在が確認されている[4, 5]。また、目下検討が進められている次世代サンプルリターン計画では 2046 年にブランパン彗星からのサンプルリターンを想定している[6]。この計画においては、現時点で低温試料の持ち帰りは予定されていないが、今後 JAXA の惑星探査が小惑星帯のスノーライン以遠に及ぶにつれて、このような低温試料のキュレーションは将来のサンプルリターン計画に対応するためには必要な技術である。

JAXA 地球外物質研究グループではこうした低温帰還試料のキュレーションに向けて、低温施設・設備の技術・仕様検討を開始した。既存の低温試料キュレーション設備として、南極氷床コアやグリーンランド氷床コアの保管・記載・管理を行っている国立極地研究所低温室及び北海道大学低温科学研究所低温室を訪問して設備機器の見学、運用等について情報収集・議論を行った。NASA ジョンソン宇宙センターでアルテミス計画試料キュレーション検討を進めているチームともコンタクトを取り、月永久日陰帰還試料を前提とした低温キュレーション技術開発についての議論・情報共有を進めている所である。更に月試料全般や月極域低温試料に関してコミュニティの研究者からの意見・コメント・要求のヒアリングを進めていく予定である。また、低温で保管・ハンドリングするだけでなく、その初期記載として、どのような環境でどのような分析項目が必要かの検討も進めているところである。

参考文献：[1] Yada T. et al. (2014) *Meteoritics Planet. Sci.* 49, 135–153.

[2] Yada T. et al. (2023) *Earth Planets Space* 75, 175. [3] Cohen B. A. et al. (2023) *Lunar Planet. Sci. Conf. LIV*, #1545. [4] Colaprete A. et al. (2010) *Science* 330, 463–468. [5] Lemelin M. et al. (2021) *Planet. Sci. J.* 2, 103. [6] Sakatani N. et al. (2025) *Lunar Planet. Sci. Conf. LVI*, #2280.

月惑星表層探査用顕微分光カメラによる揮発性成分検出可能性検証

○仲内 悠祐¹

¹ 立命館大学 ESEC

近年、月探査が精力的に行われており月面着陸を想定した観測機器の開発も進んでいる。その原動力となっているのが、月極域における水氷や揮発性成分(メタンやアンモニア)の存在であり、これら揮発性成分がどこにどの程度存在しているかの情報が今後の月面開発において重要な情報となる。これらの情報は複数の観測機器で得られたデータを用いて総合的に議論されるべきであり、日本においても様々な月面探査用観測機器の開発が進んでいる。

我々は月・惑星探査用可視・近赤外分光カメラの開発を続けている。可視・近赤外分光法では表面鉱物や水氷の同定が可能であり、月面に露出 and/or レゴリス層から漏れ出した揮発性成分なども観測できる可能性がある。我々は月面において実験室レベルの高空間分解能、高波長分解能なハイパーイメージングデータを取得可能である顕微分光カメラの BBM を開発した(fig-a)。顕微分光カメラ観測では、太陽反射光を観測する広域分光カメラと異なり、観測機器内に搭載したハロゲン光源の光を回折格子により分光し、光ファイバーを用いて観測対象に照射することで分光データを得る。FOV は $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 、空間分解能は $10 \text{ } \mu\text{m}/\text{pix}$ 、波長分解能は 20 nm 以下、観測波長範囲は $700\text{-}1700 \text{ nm}$ 、合焦可能距離は $50\text{-}70 \text{ mm}$ である。

完成した顕微分光カメラ BBM を用いて月隕石中に含まれるカンラン石、地上含水鉱物 Epidote、Water Ice、 CH_4 Gas の測定を行った。隕石中の組織や氷の霜の形状などの情報が精細に得られている(fig-b,c)。画像データは各ピクセルにおいて反射スペクトルが得られており、鉱物および揮発性成分の特徴的な吸収形状を同定した (fig-d)。本発表では、顕微分光カメラを用いた揮発性成分検出可能性検証について概論する。

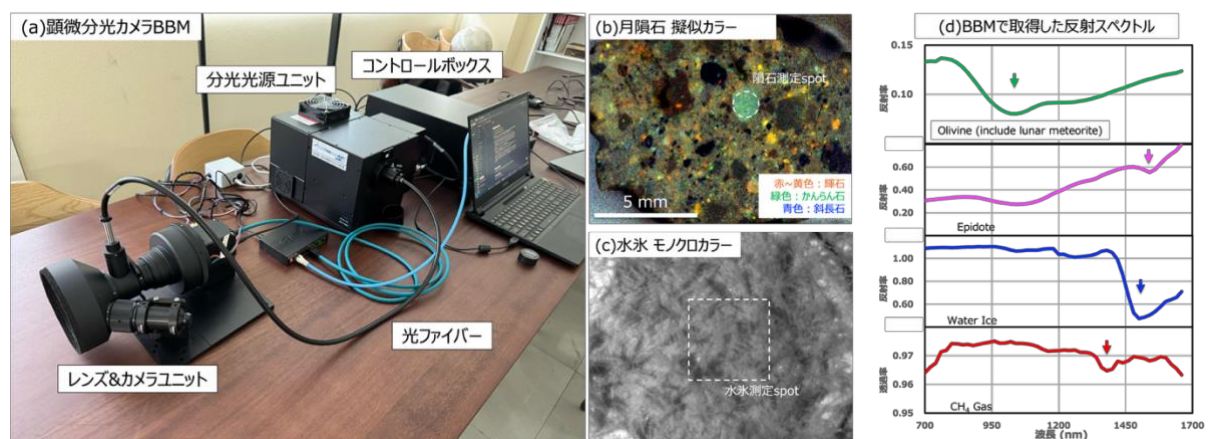


fig. (a) 顕微分光カメラ BBM の外観図。光源とカメラ部は光ファイバで接続されている。(b) 月隕石観測結果から得られる鉱物判定特徴を用いた擬似カラー画像, (c) 顕微分光カメラ BBM を用いた水氷観測結果(モノクロ画像), (d) b,d の測定 spot および Epidote, CH_4 Gas の反射スペクトル

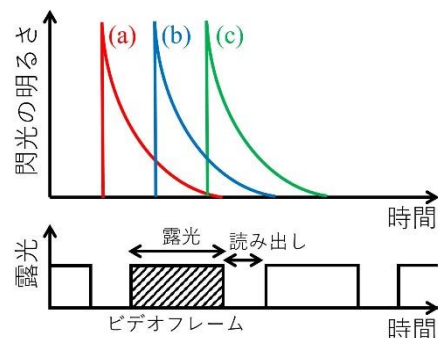
月地震学のための月面衝突閃光の観測方法

○柳澤正久（電気通信大学）

発震時刻と震源が分かっている少数の地震計のデータから月の内部構造についてより多くの情報を得ることが出来る。隕石(厳密にはメテオロイド)の衝突による月震に関しては、発震時刻と震源を月面衝突閃光の観測から知ることが出来る。閃光の明るさから地震の規模を大まかに推定することもできる。現状では衝突閃光の時刻と位置をどのくらいの精度で知ることが出来るかを以下に示す。

(1) 発震時刻

右の図は、突然明るくなり徐々に減光する衝突閃光の明るさとカメラの露光のタイミングの関係を示す。(a),(b),(c)全ての場合で、最初に閃光が現れるのは斜線を付けたビデオフレームである。露光開始時刻は GPS 時計に同期した観測システムを使えば 1 ms の精度で求めることが出来る。しかし、閃光の開始時刻(発震時刻)には露光時間+読み出し時間の不確定性がある。



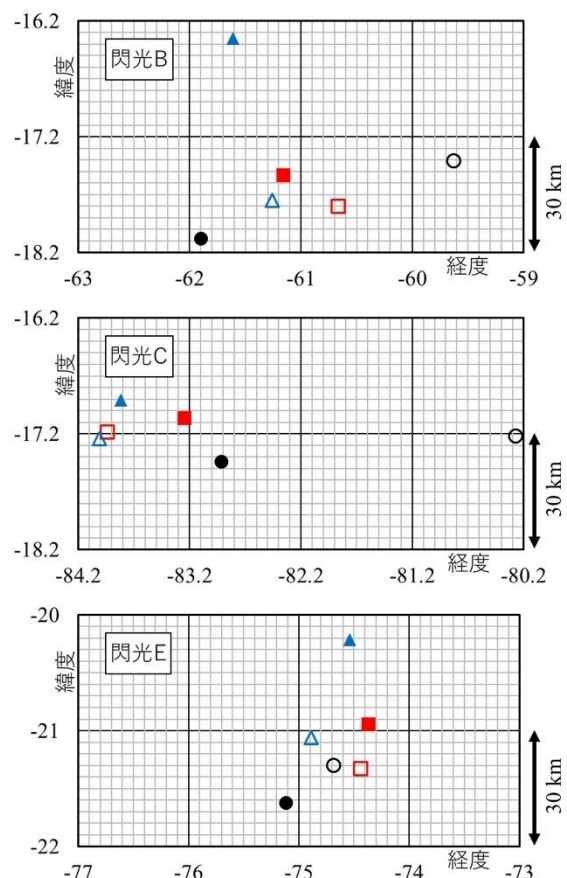
(2) 震源位置

右の図は、日本から観測された 2007 年 12 月のふたご座流星群による衝突閃光の月面上での位置(緯度、経度)を示す。3 台のカメラによるビデオを 2 つの方法によって解析し、合計 6 つの結果が得られた。

●と○：口径 160 mm、焦点距離 530 mm のニュートン反射に取り付けた WAT-100N カメラの DV ビデオデータ(滋賀県、石田正幸氏)。塗りつぶしプロットは月ディスク(円板)上での閃光点の極座標から計算で求めた結果、中抜きプロットは月面図を使って地形との相対位置から目視により求めた位置である(以下でも同じ)。

■と□：口径 450 mm、焦点距離 2025 mm のニュートン反射に取り付けたビームスプリッター透過光口の WAT-100N カメラの DV ビデオデータ(東京都、電気通信大学) ▲と△：同上。ビームスプリッター反射光口の WAT-100N カメラの DV ビデオデータ(東京都、電気通信大学)

緯度、経度で 1° 以上の範囲にバラついている。精度と信頼性をいかに高めるかが今後の課題である。



CNO イオンを分離・定量可能な 小型質量分析器の開発

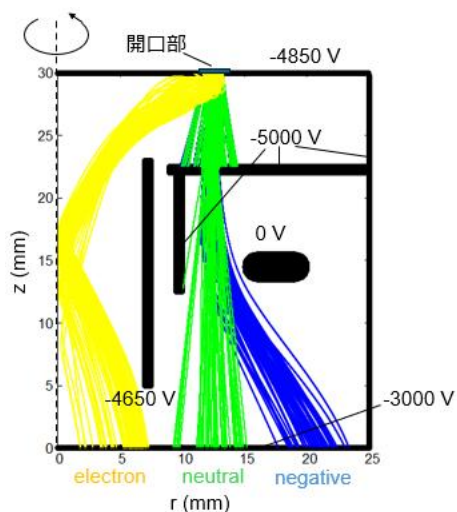
○関 宗一郎¹、笠原 慧¹、田尾 涼¹

¹ 東京大学

惑星や小天体の大気組成を知ることは、その天体の環境や進化・形成過程を理解するうえで重要である。例えば、地球の電離圏からは窒素や酸素が流出していることが知られているが、組成比やその太陽活動度依存性を調べることは地球、ひいては他の惑星の大気進化を理解する手掛かりになる。しかしながら、従来用いられてきた古典的な Time-of-flight (TOF) 型の質量分析器では、質量分解能が 10 以下であり N と O の分離が困難であった。装置形状を大きくして TOF を長くとり N と O を分解できる高分解能を持たせた観測器もあるが、リソースの問題があった。そこで本研究では、CubeSat クラスの探査機に搭載できるサイズを維持しつつ、N と O を分離可能な小型イオン質量分析器を設計した。

N と O を分離するために、本研究では O の負イオンに着目した。入射イオンが質量分析器入り口の炭素薄膜を通過する際に、ほとんどの O⁺ は電荷交換により中性粒子または負イオンになることが知られている。一方、N は電荷交換で生成される負イオンの比率が O に比べて非常に小さい。したがって、負イオンと中性粒子を分離して計測できれば、TOF で分離せずとも N と O の比が求められると考えた。

このアイデアに基づき、数値計算で具体的な装置形状を検討した。数値計算では、まず装置内電極の形状とそこに加える電位を決め、装置内の電位分布を計算した。その後、与えられた電位分布に対して粒子軌道計算を行い、イオンの検出位置を調べた。今回は、動径方向に電位勾配ができるようにしたことで、高さ 30 mm の TOF ユニットで O と O⁻ の検出位置を分離させることができた。電位は、それぞれ入り口が -4.85 kV、検出部が -3.0 kV などとしている。静電分析器及び MCP に用いる高電圧も負極性であるため、この装置では用いる高压素子が 1 種類で済むという利点がある。また、C は負イオンの生成率が O に近いが、TOF のみで O イオンと弁別できるだけの分解能があることも計算で確かめられた。



右図は、装置形状および粒子軌道を表している。黒色は電極で、z 軸を中心に回転対称な形になっている。イオンは上部の開口部から入射し、下部の検出部に到達する。緑色は中性粒子、青色は負イオンの軌道を表している。黄色は開口部通過時に放出される二次電子の軌道を表しており、これは TOF 測定時のスタートシグナルになる。図より、中性粒子、負イオン及びスタートシグナルの二次電子の検出位置が分離できていることが確認できる。

TOF 型イオン分析器を用いたイオン種識別手法の開発と Comet Interceptor 観測条件下での適用評価

○田尾涼¹, 笠原慧¹

¹ 東京大学

彗星は、太陽系の形成初期の情報を保持する天体と考えられ、その組成分析は起源解明において重要である。ESA と JAXA が共同で進める Comet Interceptor ミッションでは、未知の長周期彗星をフライバイ観測する計画であり、彗星コマ中のイオン組成の取得を目的として、小型 TOF 型イオン分析器 CIMS が搭載される。

CIMS は、LEF 経路で $m/\Delta m \approx 45$ 、ST 経路で $m/\Delta m \approx 5$ の質量分解能を有している。一方で、CIMS では飛行時間 (TOF) 計測のスタート信号を得るため、イオンをカーボンフォイルに通過させる方式を採用しており、この過程で分子イオンが原子イオンへと分離する現象が生じる。また、カーボンフォイル通過時には分離や電荷交換が生じ、通過後の電荷状態に応じて LEF 経路または ST 経路で検出されるため、同一の起源を持つイオンでも異なる経路で検出される。しかし、比較的質量分解能の高い LEF 経路で検出されるイオンは分子イオンが分離した状態であり、分子種の直接同定が困難となることが課題である。こうした検出機構と観測条件を踏まえ、本研究では、複数のイオン種を高精度に識別するための解析手法の開発とその有効性の評価を行った。

本研究では、 CO^+ 、 NH_4^+ 、 H_3S^+ 、 H_2O^+ などのイオン 15 種を含む模擬質量スペクトルを構築し、CIMS の分解能を反映したガウス関数で表現した。さらに、実観測を模擬するため、イオン流入量 (約 2×10^5 個/秒) と有効な観測時間や検出効率の低下などを考慮し、LEF で約 210 カウント、ST で約 6000 カウントのデータを想定した。

これらの模擬スペクトルにはポアソン統計に基づく揺らぎを導入し、最小二乗法および非負制約付き最小二乗法を用いた最適化によりイオン種の構成を再構築した。LEF 経路および ST 経路のスペクトルをそれぞれ独立あるいは統合して最適化し、両経路の結果をイオン種ごとに比較することで、再現性の高い成分を選定した。ここでは、ランダムに生成した多数の異なるイオン数密度パターンに対して最適化を実施し、それぞれの復元スペクトルとの平均二乗誤差を算出、誤差の小さい順に再現性が高いと判断した。

こうして選定されたイオン種を前提条件として再度最適化を行う反復的な最適化アルゴリズムを導入することで、特定の検出経路に依存することなく、LEF と ST それぞれの相補的な情報を統合した高精度な同定を可能とした。このアルゴリズムの有効性は、ポアソン誤差の条件を変えても同様の結果が得られることにより確認された。

以上の解析から、CIMS のような低分解能・低カウント環境でも、複数のイオン種を定量的に識別可能であることが示された。今後は、電荷交換効率のイオン種依存性などを実験的に定量評価し、ノイズにも対応した更なる識別精度の向上を目指す。

Numerical Simulation of a Bistatic Radar for the Sounding of Comet Nuclei

OL. Bartolini^{1,2}, A. Kumamoto², Y. Katoh²

¹Department of Information Engineering (DINFO), University of Florence

²Graduate School of Science, Tohoku University

Introduction. Understanding the internal structure of small bodies such as comets and asteroids is crucial for reconstructing their formation history. Distinguishing between rubble-pile and pebble-pile comets can inform us whether they formed through disruption and re-accumulation of debris or gentle accretion of pebbles and dust. As proposed for the Next Generation small-body Sample Return (NGSR) mission, a bistatic radar system on dual orbiters could enable such structural investigations.

Methodology. In this study, we assessed the feasibility of such a radar configuration using full-wave electromagnetic simulations performed with the open-source FDTD software MEEP. The simulated scenario was modeled with realistic parameters derived from the proposed NGSR mission. Such scenario included a 30 m diameter comet and a radar system operating at 160 MHz with a 40 MHz bandwidth. The main orbiter was placed at 5 km while the sub-orbiter was placed at 450 m. Since the two orbiters are far from the comet, a 36x36 m near-field box was set around the comet for simulation purposes, with a plane wave source inside of it modeling the wave transmitted by the main orbiter from a sufficiently large distance. From the simulated near-field, we derived the far-field at 16 sub-orbiter positions: from 0° azimuth (directly on the opposite side of the comet from the main orbiter) to 45° azimuth, in 3° steps. In the rubble-pile model, the base medium had a permittivity of 2, while embedded rocks had a permittivity of 4. In the pebble-pile model, the base medium had a permittivity of 3, with no other media in it.

Results. In both models, the signal intensity across the 16 observation points is similar, within a 10 dB range. However, the measured signal within 9° azimuth differed markedly: the pebble-pile model exhibited a single-peak profile in which single dominant peak with 20 dB larger intensity than the trailing peaks was found, while the rubble-pile model showed a multi-peak profile in which multiple peaks with an intensity difference within 10 dB were found.

Discussion. The multi-peak profile observed in the rubble-pile model indicates strong diffraction due to internal heterogeneity. This contrast with the single-peak signal from the pebble-pile model highlights the potential of bistatic radar observations to discriminate between internal structures. These findings support the viability of using bistatic radar for structural characterization of cometary nuclei within the NGSR mission framework. Ongoing work will assess whether true tomographic imaging can be achieved from far-field measurements alone.

高精度紫外線宇宙望遠鏡 LOPYUTA 計画の検討状況

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

LOPYUTA は、宇宙科学研究所・公募型小型計画のプリプロジェクト候補として検討を進めている紫外線宇宙望遠鏡計画で、宇宙の生命生存可能環境(目標 1)と宇宙の構造と物質の起源(目標 2)の理解を目指す。目標 1 では、多様な太陽系天体・系外惑星の外圏・電離大気を網羅的に観測し、太陽系内天体の理解の深化と系外惑星大気の特徴づけを行う。目標 2 では銀河周辺物質の構造の観測から、宇宙構造形成の枠組みで予言されたガスの流入による星形成を検証する。また、中性子星合体直後の高温ガスの観測から重元素合成過程を解明する。これらの科学目標に取り組む上で鍵となるのが、水素、酸素、炭素などの物理状態の計測である。これらは宇宙にありふれた元素であるが故に、惑星大気から、恒星、銀河を構成するガスに至る、様々な空間スケールの構造とその進化の理解に関わっており、LOPYUTA は紫外線観測によって、これらの科学課題に取り組む。LOPYUTA は性能要求を科学目標に最適化することにより、先行ミッションである「ひさき」と同じ小型科学衛星規模でありながら感度、空間分解能、波長分解能をそれぞれ「ひさき」の 100 倍以上に向上し、真空紫外の波長域でハッブル宇宙望遠鏡 HST に匹敵する解像度と感度の実現を目指す。ミッション部は口径 60cm の主鏡を持つカセグレン望遠鏡と 4 つの焦点面装置、中分散分光器 MRS(分解能 6,000)、高分散分光器 HRS(40,000)、紫外スリットイメージャ UVSI、及び広視野ガイドカメラ FGS からなる。有効面積 350cm²と解像度 0.1 秒角を達成するため、紫外用ミラー成膜、大型高精度検出器、指向擾乱補正機能の 3 つのキー技術開発に加え、望遠鏡構造の概念検討を進めている。LOPYUTA で開発する紫外線観測のキー技術(高感度検出器や高い反射率を実現するミラー成膜技術)は世界的にも重要で、次世代旗艦宇宙望遠鏡 Habitable Worlds Observatory (HWO)への日本の参画の足掛かりともなる。

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

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

2028 年度に打ち上げ予定の深宇宙探査技術実証ミッション DESTINY⁺ (Demonstration and Experiment of Space Technology for Interplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUSt science) は，理工学連携ミッションであり，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する計画である。また，打ち上げロケットの変更に伴う計画の見直しにより，Phaethon に加え，他の複数の地球接近小惑星のフライバイ探査も実施される予定となった。

DESTINY⁺による Phaethon 探査の目的は，宇宙から地球に飛来するダストの実態解明および，その供給源とされる流星群母天体の性質解明にある。Phaethon は岩石質の地球近傍小惑星でありながら，近日点付近でダストを放出していると考えられており，「活動的小惑星」と呼ばれている。三大流星群の一つであるふたご座流星群の母天体としても知られ，地球に有機物を含むダストを供給していると推測される，極めて興味深い天体である。

DESTINY⁺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，小惑星 Phaethon のフライバイ撮像観測を実施する。TCAP は表層地形を，MCAP は表層の物質分布をそれぞれ観測することで，この活動的小惑星の特性，特にダスト放出機構に関する新たな知見の獲得が期待されている。

さらに，DESTINY⁺では，2029 年に地球へ約 32,000km まで接近し，プラネタリーディフェンスの観点からも注目されている小惑星 Apophis を含む，複数の小天体のフライバイ観測も計画している。Phaethon 観測に特化して設計された TCAP および MCAP を用いた，各対象天体に対する観測運用についても，検討を進めている。

2 台のカメラは，2026 年中に探査機システムへの統合が予定されており，開発が進行中である。TCAP については，エンジニアリングモデル (EM) での検証により，小惑星追尾機構である駆動鏡の面精度が当初の想定よりやや低下していることが判明しており，プロトフライトモデル (PFM) での改善を目指している。一方，MCAP は PFM におけるピント調整が概ね完了しており，近日中にプロトフライト試験を実施する予定である。

本発表では，これらカメラの最新開発状況について報告する。

DESTINY⁺搭載用ダストアナライザの 開発と地上校正計画 2025

Development and Ground Calibration Plan of the Dust Analyzer for DESTINY⁺: 2025 Update

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

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

深宇宙探査技術実証機 DESTINY⁺に搭載されるダストアナライザ (DESTINY⁺ Dust Analyser, DDA) は、ダスト粒子の超高速衝突によって発生する二次イオンの電荷量および質量を測定することで、粒子の質量や化学組成を推定する理学観測装置である。質量分析部には飛行時間型マススペクトロメータ (ToF-MS, 測定質量範囲: $m/z \sim 1,000$) を用い、ダストを構成する鉱物および有機化合物のバルク組成の分析を目指している。

2025 年にはいって、DDA のセンサ部およびエレクトロニクス部のプロトフライトモデル (PFM) の製造が完了し、EMC 試験・振動試験・熱真空試験などの環境試験、および観測装置としての基本性能試験を開始したところである。またこれまでに、ドイツ・シュトゥットガルト大学に設置された静電加速器を用い、PFM のセンサ部とエレクトロニクス部を接続して模擬ダスト粒子の加速試験を開始した。今後、DDA が実際に宇宙空間で遭遇する可能性のある鉱物粒子 (例: カンラン石) や有機物粒子 (例: ペリレン) を対象に、質量スペクトルの取得と分析性能の評価を実施する予定である。

本発表では、PFM を用いた校正試験の結果を中心に、DDA の開発進捗と今後の地上校正計画について報告する。

DESTINY⁺搭載 MCAP カメラ EM の地上光学校正試験 で得られた知見の PFM 試験への反映と試験準備状況

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

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

DESTINY⁺(Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUst Science)ミッションでは小惑星(3200) Phaethon を高速フライバイし、天体表面の観測を行う。搭載機器のひとつである MCAP (Multiband Camera for Phaethon) は、可視・近赤外の 4 バンド(425nm, 550nm, 700nm, 850nm)で撮像可能なマルチバンドカメラであり、Phaethon の表層組成や分光特性の空間分布解明が期待されている。本発表では、MCAP のエンジニアリングモデル (EM) を用いた地上光学校正試験の成果と、得られた知見をもとにプロトフライトモデル (PFM) への試験計画への反映状況について報告する。

EM 試験では、バイアス補正、ダーク補正、線形性補正、フラット補正、感度補正、歪曲補正に必要な画像取得および解析手法を検証し、測定系の多くの妥当性を確認した。一方で、課題も抽出され、特にフラットフィールド画像取得、感度補正、および性能の一つであるコンバージョンゲインの導出に関しては、追加対策や解析上の留意点が必要であることが明らかとなった。

積分球を用いたフラットフィールド撮像では、視野上下端に顕著な迷光が観測され、これはプリズム側面での拡散反射に起因することが明らかとなった。この問題にはハードウェア面での対策が必要とされた。また、フラット画像の空間分布が波長によって異なることが確認され、光学系構成要素の入射角依存性に伴うバンドシフトの影響が示唆された。これらの結果は、観測条件に近いスペクトル特性をもつ光源を用いたフラット画像取得が望ましいことを示している。感度補正では、積分球に用いたハロゲン光源と Phaethon の反射スペクトルとの間に、特に 425 nm 帯で最大約 20%の誤差が生じることが判明した。この誤差は、観測バンドが有限の帯域幅をもつため、波長積分時に対象スペクトルの傾きの違いにより生じるものである。したがって、PFM 試験では太陽光スペクトルに近い光源の使用、あるいは光源スペクトルの差異を考慮した補正が必要であることがわかった。また、コンバージョンゲインの導出には Mean-Variance 法(Janesick, 2007)を適用したが、信頼性の高い評価のためには解析において、線形性が保持される範囲でのフィッティング、不偏分散の使用、および使用する画像枚数などの重要性が明らかとなった。

MCAP PFM は現在ピント調整中 (2025 年 7 月末時点) であり、カメラの組み上げ後には性能評価試験を経て、光学校正試験が実施される予定である。発表では、これら EM 試験で抽出された課題への対策と、それに基づく PFM 試験の準備状況の詳細について報告する。

標準彗星名表記

Standard Pronunciations of Comet Names in Japanese
佐藤 勲 Isao SATO (宇宙用語研究会)

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

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

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

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

標準彗星名表記

Standard pronunciation of the comet names in Japanese

リンクをクリックすると、発見者や彗星のプロフィール、発音がお聞きいただけます。
同名の彗星が複数ある場合は、最も著名な彗星を紹介しています。
オンラインの発音サイトを検索だけでは、複数の発音が出てきたりしてどれが正しいのかわかりませんが、これまでのネーティブの外国人への発音聞き取り調査をもとに、この発音をしているというサイトを紹介しています。
(本人の発音とは違う発音をしているサイトが多数あります)
プロフィールのない発見者の多くは、アマチュア天文家や観測助手の方です。
正確な情報のため、英語のサイトをメインに掲載していますので、ウィキペディアの場合は日本語を選択してください。。

- [周期彗星の一覧](#)
- [これまでに出現した彗星の一覧](#)
- [小惑星の一覧](#)
- [天体名の日本語表記のルール](#)
- [天体名のラテン語読みルール](#)
- [「固有名詞英語発音辞典」の発音記号](#)
- [X\(Twitter\)](#)

確度 AA : 99% (本人又は直接関係者に対する調査が行われた、または日本人)
確度 A : 95% (ネーティブの外国人に対する調査が行われた)
確度 B : 70% (辞書や外国語の教科書、オンライン発音サイトなどによる推定)
確度 J : 日本語での慣用表記
確度 L : ラテン語読み
確度 U : 不明

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