

日本惑星科学会
2023 年秋季講演会予稿集

2023 年 10 月 11 日～13 日

広島市文化交流会館 3F 大会議室「銀河」（口頭発表）

JMS アステールプラザ 市民ギャラリー（ポスター発表）

日本惑星科学会 賛助会員

Harris Geospatial 株式会社
株式会社ナックイメー ジテクノロジー
株式会社ノビテック

後援

広島大学 理学部

広島大学 プレート収束域の物質科学研究拠点

会場までのアクセス：

広島バス 24 号線

- ・ 講演会会場（広島市文化交流会館、アステールプラザ）最寄りバス停：加古町
- ・ 懇親会会場（メルパークホテル 6F「瑞雲」）最寄りバス停：紙屋町

平和記念公園バス停、周辺ホテル最寄りの路面電車駅からもアクセス可能です。



- ・ 加古町バス停
広島バス 24 号線（吉島線）
加古町⇄本通り：5 分
加古町⇄紙屋町：8 分
加古町⇄八丁堀：10 分
加古町⇄広島駅：23 分

※運賃は 200 円定額、日中は 10 分おきに運行

- ・ 平和記念公園バス停
広島バス 24 号線（吉島線）
広島バス 25 号線（草津線）

- 平和記念公園⇄本通り：3 分
平和記念公園⇄紙屋町：6 分
平和記念公園⇄八丁堀：8 分
平和記念公園⇄広島駅：21 分

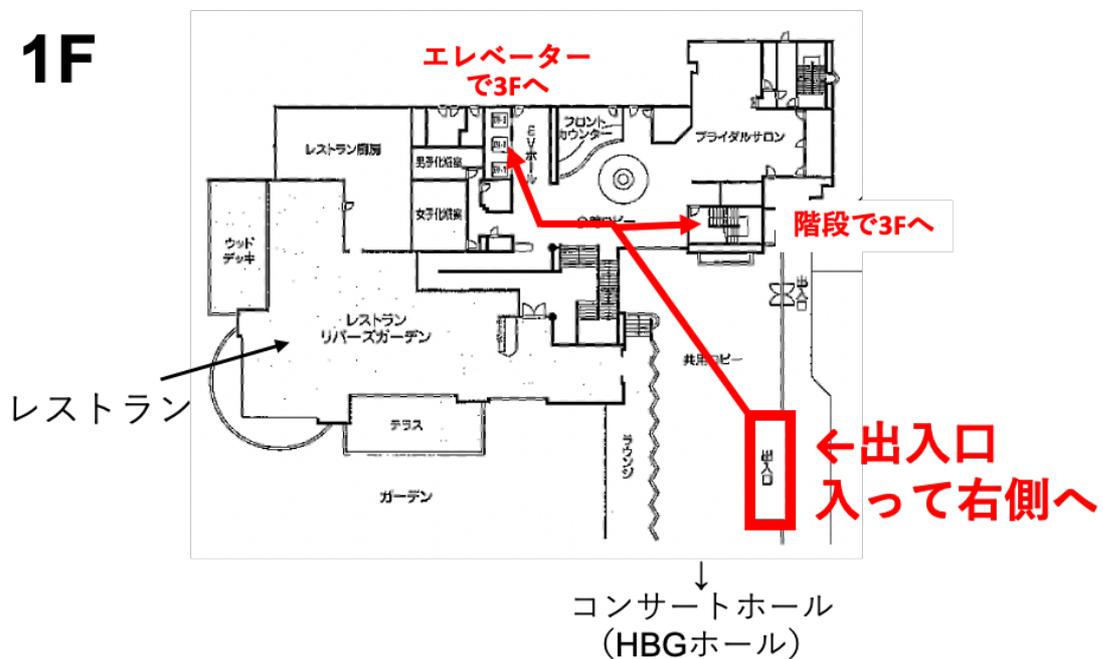
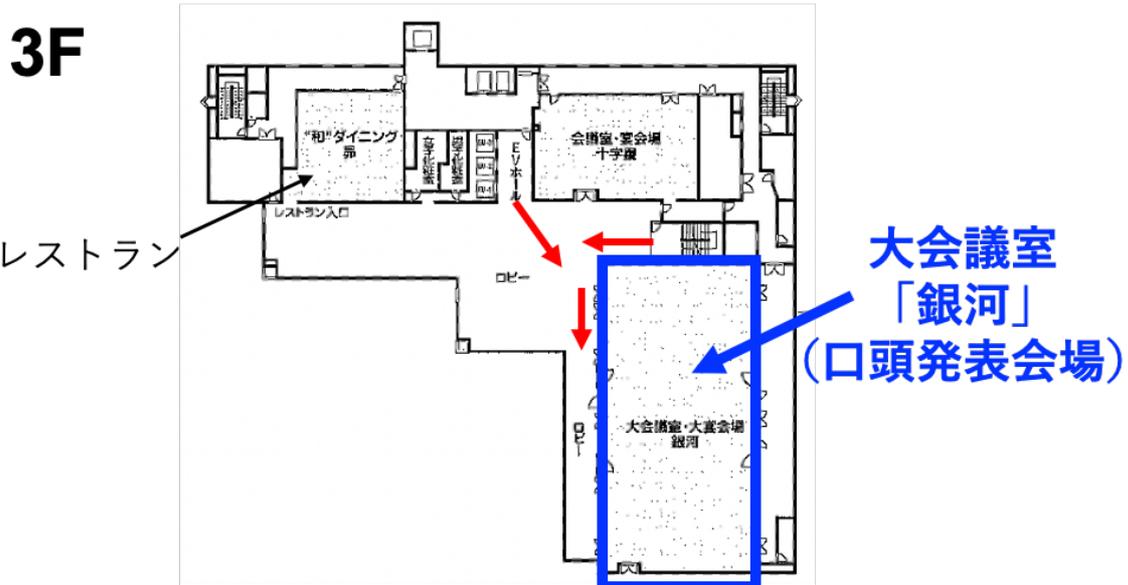
※運賃は 200 円定額、日中は 6 分おきに運行

会場までのアクセス（拡大図）



会場案内図：

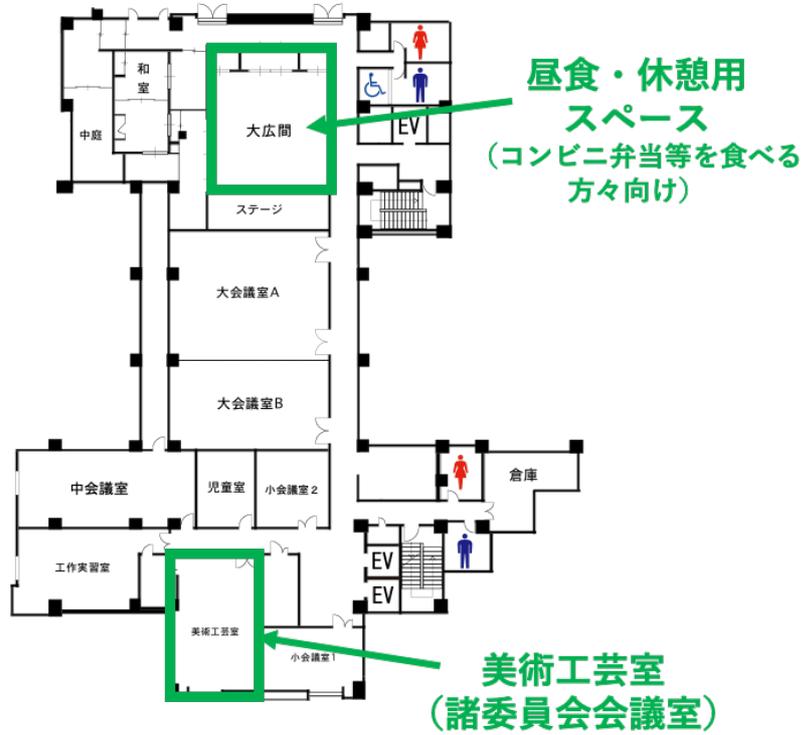
広島市文化交流会館（口頭発表会場）



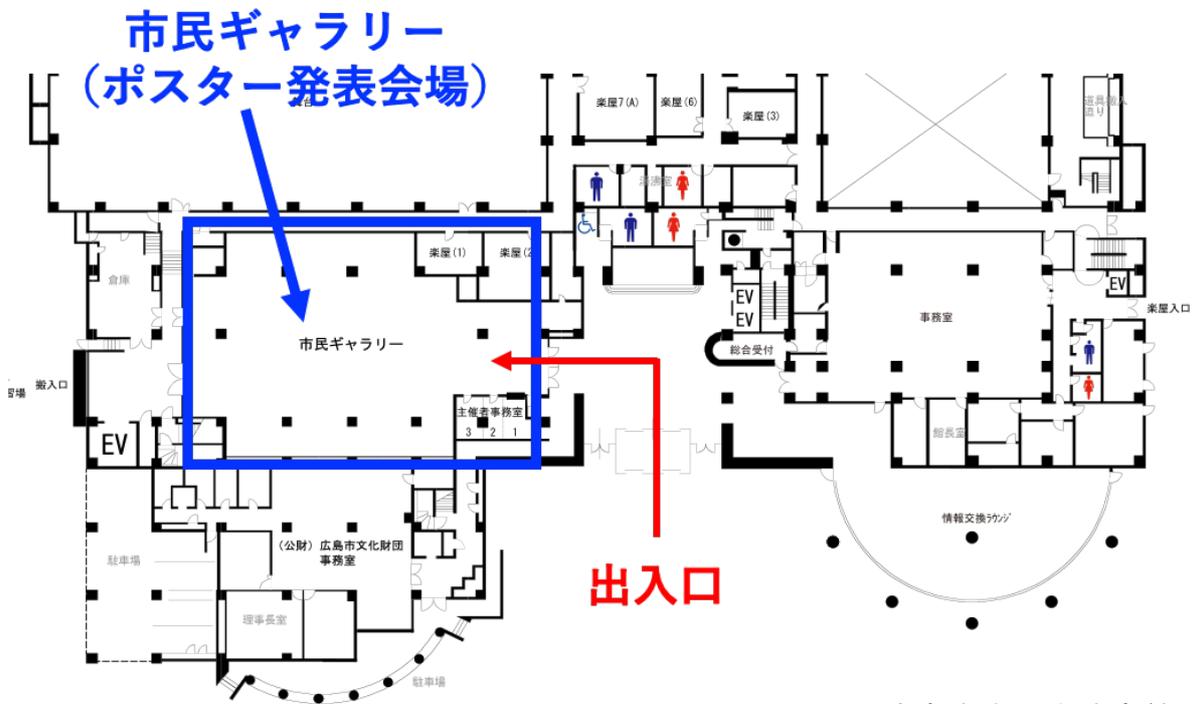
会場案内図：

アステールプラザ（ポスター発表会場、その他）

4F

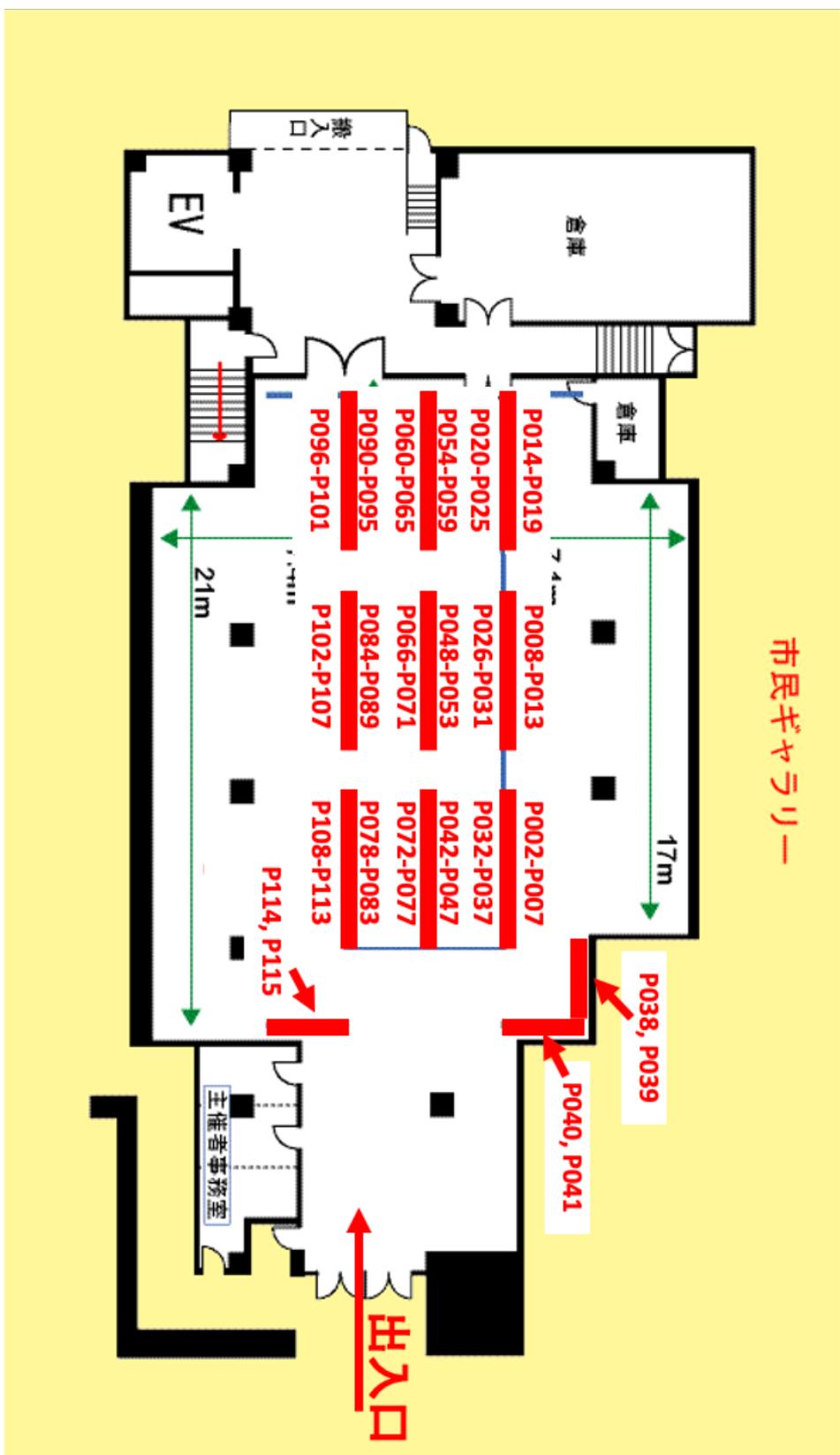


1F



広島市文化交流会館
(口頭発表会場) →

アステールプラザ（ポスター発表会場）
ポスター配置図



地下空洞構造から見る月の静かの海におけるマグマ上昇過程

○野澤仁史^{1,2}、春山純一^{2,1}、熊本篤志³、岩田隆浩^{2,1}

¹総合研究大学院大学、²宇宙科学研究所、³東北大学大学院

固体天体のマグマ上昇過程は、マグマの温度、供給率、揮発性物質含有量を制約するものであり、固体天体の進化の根幹をなす。近年の月における膨大な探査データから、月のマグマ上昇過程に関する研究は新たな時代を迎えている。1990年代の「月は揮発性物質が枯渇している」というドライ史観に基づいて、隕石衝突による上部地殻の除去やPKT領域の放射性熱源によるマグマの温度上昇などがマグマ上昇の要因として提唱されてきた(Head and Wilson, 1992; Wicczorek et al., 2001)。しかし、地殻が厚く、放射性熱源が確認されていない静かの海東部におけるマグマ上昇の駆動源は不明であった。20世紀に入り、アポロサンプルの再解析やリモートセンシング観測による水の発見が相次ぎ(Saal et al., 2008; Milliken and Li, 2017)、月がウェットであったというウェット史観が台頭している。一方で、リモートセンシング観測で検出した水は太陽風起源のものであり、必ずしも月がウェットであることを支持しない可能性もある。月がウェットかドライかという命題は、月や地球の形成史につながる惑星科学の重要課題である。この命題への一つの鍵は、マグマ上昇過程の理解である。月がウェットである場合、マグマ中の揮発性物質の発泡によりマグマ密度が減少し、マグマが上昇する新たなモデルが提案されている(Head and Wilson, 2017)。この理論モデルでは、マグマの通り道であるダイクの先端に発泡ガスによる空洞の形成が予想される。すなわち、このガス空洞を観測的に明らかにすることは、月で揮発性物質がマグマ上昇の駆動源であり、月がウェットであることを強く支持する証拠となる。

本研究は、SELENE 搭載月レーダーサウンダー(LRS)を使用して、静かの海における地下空洞を調査する。LRS はビーム幅が広いと、衛星直下の地下構造だけでなく、側方表面地形からの散乱波も同時に受信する(e.g. Kobayashi et al., 2001)。そのため、標高データを用いた地表面散乱シミュレーションによって、地表面散乱効果を独立に評価し、観測データから減算することで、地下エコーのみを抽出する。

その結果、LRS データから抽出した地下エコー(LRS 地下エコー)は、地溝の延長上領域の深さ約 200 m に連続的に存在することがわかった。地溝は地下ダイクによって形成されることが知られており(Head and Wilson, 1993)、地溝幅とダイク先端の深さの関係式から、ダイクの深さは約 200~300 m と推定された。LRS 地下エコーの深さと地溝から推定されたダイク先端の深さがほぼ一致することから、LRS 地下エコーはダイク先端からの反射であると考えられる。さらに、レーダー方程式解析の結果、ダイクの幅が 70 ~ 300 m であり、ダイク先端の誘電率が 1 ~ 3 の条件下で LRS 地下エコーの強度(-25 dB 以上)を説明することが可能であった。

以上のことから、LRS 地下エコーはダイク先端の空洞もしくは空隙率の高い物質からの反射を示していると考えられる。これは、揮発性物質によるマグマ上昇モデルで提案されているガスによる空洞もしくは空隙率の高い領域の観測的証拠である可能性があり、月の海領域ごとのマグマ上昇過程を理解する鍵として期待される。本発表では、静かの海東部に加え、隕石衝突によって形成されたと考えられる西部の地下空洞分布も調査し、静かの海全域でのマグマ上昇過程についても議論する。

分子動力学シミュレーションで探る ダストモノマー間相互作用：JKR 理論の拡張

○吉田 雄城¹, 小久保 英一郎², 田中秀和³

¹東京大学, ¹国立天文台, ³東北大学

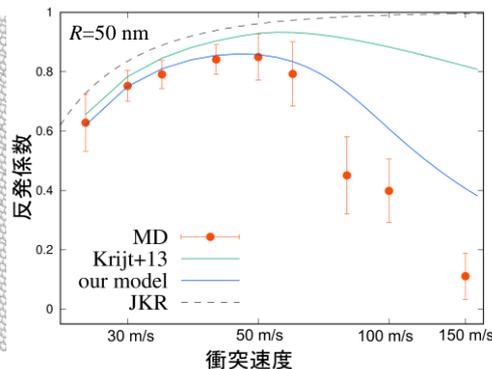
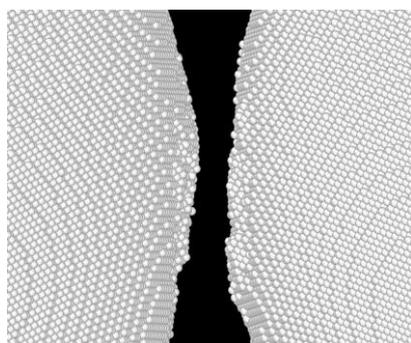
惑星材料であるダストは、モノマーと呼ばれるサブミクロン粒子の集合体と考えられている。ダスト集合体の初期成長過程は衝突による合体である。しかし衝突速度が数十 m/s を超えると衝突時に破壊が起こる可能性が指摘されており、ダストの成長を妨げる深刻な問題である。この問題を議論するには、衝突破壊の臨界速度を理解する必要がある、これまでに多くの数値計算が行われてきた (e.g., Wada et al. 2007, 2008, 2009, 2013; Suyama et al. 2008, 2012)。

ダスト集合体の衝突数値計算は、多数のモノマーを用いた N 体計算であり、モノマー間の接触相互作用を計算している。相互作用は弾性球間の接触理論の一つである JKR 理論を用いているが、JKR 理論は分子運動や変形の効果を考慮していない。しかし、これらはエネルギー散逸を引き起こし、付着を促すと考えられる (Krijt et al. 2013; Tanaka et al. 2012)。したがって、分子の運動や変形を考慮したモノマー間相互作用を調べる必要がある。

我々は、分子の運動を解く分子動力学 (Molecular Dynamics; MD) 計算を用いて、多数の分子からなるモノマーの正面衝突シミュレーションを行い (図 1)、反発係数のモノマー半径 (10-100 nm) と衝突速度 (20-150 m/s)、温度 (0-80 K) に対する依存性を調べた。その結果、MD 計算の反発係数は JKR 理論値より小さいことが分かった。パラメータ依存性については、モノマー半径が小さいほど反発係数は減少し、衝突速度が 50 m/s 程度で反発係数は最大値を持つことが分かった (図 2 赤点)。JKR 理論ではこの反発係数のピークが存在しないが、塑性変形の降伏応力によって説明できる。また温度依存性について、高温ほど反発係数の減少が見られた。

次に我々は、MD 計算結果を再現する JKR 理論の拡張モデルの構築を試みた。まず接触面の応力による散逸モデルを提案している Krijt et al. (2013) と MD 計算結果を比較すると、30 m/s 程度以下でしか一致しないことがわかった。そこで、圧縮されるほど散逸が大きくなるモデルを考えたところ、60 m/s 以下の衝突速度で MD 計算結果の再現に成功した (図 2 青線)。

我々の MD 計算は JKR 理論や Krijt のモデルよりモノマー接触でのエネルギー散逸が大きいことを示しており、モノマー合体の可能性を高めることが予想される。ダスト集合体の衝突破壊臨界速度を上昇させることが期待でき、ダスト集合体の破壊問題の解決に貢献すると考えられる。



左図: 跳ね返り後の接触面付近のシミュレーション画像。白い粒は分子を表す。

右図: 反発係数の衝突速度依存性。MD 計算の結果 (赤点)、及びモデルの検証 (緑、青線)。

はやぶさ2 搭載光学航法カメラと OSIRIS-REx 搭載 MapCam の相互校正による小惑星 Ryugu・Bennu のスペクトル進化の比較分析

○湯本航生¹, 巽瑛理^{1,2,3}, 長勇一郎¹, 神山徹⁴, D. R. Golish⁵, 亀田真吾^{6,7}, 佐藤広幸⁷, B. Rizk⁵, D. N. DellaGiustina⁵, 横田康弘⁷, 鈴木秀彦⁸, J. de Leon^{2,3}, H. Campins⁹, J. Licandro^{2,3}, M. Popescu^{2,3,10}, J. L. Rizos^{2,3}, 本田理恵¹¹, 山田学¹², 諸田智克¹, 坂谷尚哉⁶, 本田親寿¹³, 松岡萌⁴, 早川雅彦⁷, 澤田弘崇⁷, 小川和律^{14,15}, 山本幸生⁷, D. S. Lauretta⁵, 杉田精司^{1,12}.

¹東京大, ²カナリア天体物理研究所, ³ラ・ラグーナ大, ⁴産業技術総合研究所, ⁵アリゾナ大, ⁶立教大, ⁷ISAS/JAXA, ⁸明治大, ⁹セントラルフロリダ大, ¹⁰ルーマニアアカデミー天文研究所, ¹¹愛媛大, ¹²千葉工大, ¹³会津大, ¹⁴JSEC/JAXA, ¹⁵神戸大.

これまで地上望遠鏡によって 1000 を超える小惑星の可視スペクトルが観測され[1,2]、母天体物質の多様性を推定するための観測データとなっている。しかし、小惑星の表面は太陽風や微隕石衝突に晒されることで宇宙風化し、スペクトルが進化するため、母天体物質の知見を得るにはこの影響を切り分ける必要がある。特に C 型小惑星のスペクトル進化は複雑なため、切り分けが困難である[3,4]。実際、はやぶさ2 と OSIRIS-REx が探査した地球近傍 C 型小惑星 Ryugu と Bennu はスペクトル進化が逆であることが報告されている(Ryugu では赤化[5]、Bennu では青化[6])。

そこで、どのような天体条件が C 型小惑星のスペクトル進化を支配しているかについて一般的な示唆を得るには、Ryugu と Bennu が逆方向にスペクトル進化した要因を実地データから特定することが重要になる。例えば、Ryugu と Bennu が風化する前の初生スペクトルを比較分析することで、全く異なる初生物質から進化したかを推定できる。そのためには、両天体のスペクトル進化を同じ座標空間で直接比較する必要があるが、二つの探査機に搭載されているマルチバンドカメラは別々の観測対象を用いて校正されたため、装置間で最大 15% の系統誤差が存在していた。この誤差は両天体のアルベド差より大きく、上記のような比較分析を難しくしていた。

本研究ではこの問題を解決するため、両探査機のマルチバンドカメラ(はやぶさ2/光学航法カメラと OSIRIS-REx/MapCam)を相互校正した。観測装置は、高精度の校正を行って初めて正確なデータを得られるようになる。本研究では両天体の正確な比較を可能にするために、月面観測画像を用いて装置間の系統誤差を解消する新たな校正値を開発した。次に、相互校正後のデータを用いてクレーターのスペクトルを統計解析し、両天体で (I) 風化を受ける前の初生スペクトルが一致しているか、(II) 宇宙風化による反射率・色の変化率が一致しているか、を調べた。

本研究の結果、両探査機の観測装置間には 13.2% という大きな系統誤差があると分かり、相互校正によってこの誤差を 1.5% まで低減させた。この相互校正を適用した結果、両天体の初生スペクトルは非常に類似している(相互校正の誤差の範囲で区別できない)ことが初めて明らかになった。更に、両天体の宇宙風化による反射率・色の変化は逆方向ながらも、変化率は同じトレンドに従っていることが分かった。これらをまとめると、Ryugu と Bennu は似た初生スペクトルから、同一のトレンドに沿って正反対にスペクトル進化したという、新たな描像が得られた。

宇宙風化の多様性を生む要因として、物質の化学組成や風化作用によって多様な化学変性が起こり得るからだと考えられてきた。例えば、ナノ鉄粒子が生成される条件ではスペクトルが赤化し、マイクロカーボン粒子が生成される条件では青化する[7]。しかし、異なる宇宙風化生成物によるスペクトル進化は独立に生じるため、Ryugu と Bennu が同一のトレンドに沿ってスペクトル進化したという本研究の観測結果を説明しにくい。そこで、本研究結果を説明するための仮説として、小惑星表面に存在する細粒の量や粒径が時間進化するという宇宙風化プロセスを提案する。岩塊表面温度の日変化観測から Ryugu 表面に厚い細粒の堆積層は存在しないことが指摘されている[8]ものの、10 μm スケールの非常に薄い細粒層でも本研究で明らかにしたスペクトルの変化量を説明できることが室内実験[9]との比較から分かった。この仮説は、今後の望遠鏡データ解析や帰還試料分析で検証すべきであるが、化学組成だけでなく、表面重力や岩塊の破壊強度など、天体の物理的な特性が宇宙風化によるスペクトル進化を支配している可能性を示唆する。

文献： [1] Bus & Binzel, 2002, *Icarus*, 158(1). [2] Ivezić et al., 2001, *AJ*, 122(5). [3] Lantz et al., 2017, *Icarus*, 285. [4] Thomas et al., 2021, *AJ*, 161(3). [5] Sugita et al., 2019, *Science*, 364(6437). [6] DellaGiustina et al., 2020, *Science*, 370(6517). [7] Kaluna et al., 2017, *Icarus*, 292. [8] Grott et al., *Nat. Astron.*, 3(11). [9] Kiddell et al., 2018, *JGR: Planets*, 123(10).

土星リング内に埋め込まれた小衛星が作るギャップ構造のN体シミュレーション

○鳥居尚也, 井田茂¹

¹ 東京工業大学 理学院 地球惑星科学系

カッシーニ探査機の土星リングの観測により, リング内の小衛星が作る様々な構造が明らかになった。特に, A リング内に埋め込まれた小衛星ダフニスとパンは, ギャップ端がシャープに切れた特徴的なギャップ構造を形成していることが知られている (e.g. Porco et al. 2005)。また, それらのギャップ端では密度波構造も観測されている。

先行研究の解析的な議論によって, 密度波形成のメカニズムやシャープに切れたギャップ構造を維持するメカニズムが提案されている (e.g. Borderies et al. 1982)。一方で, N体シミュレーションはこうした土星リング内で起こっている物理を理解する上で強力なツールである。先行研究 (e.g. Lewis & Stewart, 2000) では, local な N体シミュレーションを行い, 解析的に提案されたギャップ形成メカニズムの妥当性も示唆している。しかし, 先行研究における N体シミュレーションはいずれも local な領域での計算に限られており, 非弾性衝突や自己重力などの粒子間相互作用を全て考慮した global な N体シミュレーションはこれまで行われてこなかった。local な N体シミュレーションでは計算領域の境界条件を仮定しており, そのような局所領域内での計算だけでは衛星によるギャップ形成を十分に記述し切れない可能性がある。また, 粒子間相互作用はリング内の粘性を決め, 衛星のギャップ構造に大きな影響を与えることから, これらの効果を考慮することは重要である (Daisaka et al. 2001)。

そこで我々は, これまで local な計算領域で個別に議論されてきた土星リング内の物理を統一的に再現することを目的に, 衛星が作るギャップ構造の global な 3次元 N体シミュレーションを実施した。公開 N体計算コード `n-body-with-center` を用い, リング粒子間の自己重力・非弾性衝突を全て考慮して, 衛星との重力相互作用によるリング粒子群の構造形成を, 衛星質量・光学的厚さなどを様々に変えて計算した。リング粒子数として 100 万-500 万体の粒子を用い, ギャップ形成と衛星の軌道進化を分離して議論するため衛星の軌道を固定して, 形成されるギャップ構造について調べた。

その結果, シャープに切れたギャップ端や衛星とリング粒子の重力相互作用によって誘起された密度波の構造を再現したばかりでなく, ギャップ端の密度波面の部分に山脈のようにそそり立つ鉛直構造も再現することに成功した。また, 衛星の周囲には特徴的な形状をした粒子のクラスターが形成されることもわかった。さらに, 個々の粒子の軌道を解析することで, 密度波面で頻繁に起こる粒子間の非弾性衝突による粒子の離心率減衰によって, 最終的に粒子がギャップの端に留まることがわかり, それによりシャープに切れたギャップ端が形成されることが明らかになった。本講演ではこれらのシミュレーションの結果を紹介し, 円盤質量や光学的厚さなどのパラメータのギャップ構造への依存性についても議論する。

線状重力異常から探る月の初期内部進化

○西山学^{1,2}, 諸田智克¹, 竝木則行^{1,2,3}, 井上和輝¹, 杉田精司¹

¹東京大学地球惑星科学専攻, ²国立天文台 RISE プロジェクト, ³総合研究大学院大学

これまでの月探査により、月はその熱進化の初期段階に体積膨張を経験したことを示唆する証拠が見つかってきた。近年の NASA の GRAIL ミッションの高解像度月重力場観測により、数十もの正の線状重力異常が全球的に観測されている。これらの細長い線状重力異常は、全球規模の引張応力下で形成された貫入岩体と解釈されており、月が進化初期段階に体積膨張を経験したことを示唆している[1]。このような膨張は熱進化数値計算からも示唆されており、マントルオーバーターンで運ばれた放射性元素の壊変熱等が月内部の昇温を引き起こし、膨張の原因となると考えられている[2,3]。これまで PKT 領域内のチタン含有量の年代別変化が示してきたように[3]、マグマ組成はその当時の内部進化を反映すると考えられる。しかし、初期膨張時のマグマ組成はこれまで制約されておらず、線状重力異常を形成する貫入岩体の組成の制約は月の初期熱史の解明の鍵となる。

本研究では、このような地下の貫入岩体の組成推定をスペクトルデータと重力異常データから試みた。貫入岩体は地表に噴出していないが、隕石衝突により掘削・放出された貫入岩体が見つかる可能性があるため、線状重力異常上に存在するクレーターに着目した。このようなクレーター内部では線状重力異常値が外部よりも弱く、クレーター形成時に貫入岩体が掘削・放出された可能性がある。このような貫入岩体は玄武岩質であると考えられるため、まず「かぐや」の Multiband Imager データから海領域外かつ輝石に富む露頭を調査・組成推定し、さらに Chandrayaan 1 号搭載の Moon Mineralogy Mapper のハイパースペクトルデータから輝石の種類を判別することで、その露頭が玄武岩物質であるか判定した。次に、発見された露頭が貫入岩体の由来である可能性を、クレーター掘削による重力低下から検討する。衝突数値計算コード iSALE を用い、衝突後の線状重力異常値の数値計算と GRAIL データを比較し、線状重力異常の貫入岩体が掘削されたかを判定した。

これまでの解析により、月裏側に位置する Roche クレーター周辺で貫入岩体由来と考えられる玄武岩質の露頭が見ついている。反射率比から得られる FeO 含有量[5]は見つかった露頭のほとんどで 8 wt.% を超え、ハイパースペクトルデータから玄武岩と同様に高カルシウム輝石に富むことが分かった。また、線状重力異常データと数値計算は一致し、貫入岩体が掘削された可能性と整合的であった。本解析では海の玄武岩の誤検出を避けるべく、平らな低地領域は除外している。また、クレータースケージング則からインパクトメルトや海領域クレーターからのエジェクタによる誤検出の可能性は排除できる。したがって、このような玄武岩露頭は貫入岩体由来と解釈でき、その組成から貫入岩体の TiO₂ 含有量は 0.5-1.5 wt.% であると推定される。同様の結果が Edison クレーター周辺の解析でも得られており、このような低チタンマグマが月の膨張時に生じていたことが初めて示された。以上の結果は、オーバーターン時に沈み込んだイルメナイト層からのマントルプルームがマグマを供給しておらず、当時のマントル物質がチタンに枯渇していた可能性を示唆する。

[1] Andrews-Hanna J. C. et al. (2013), *Science*, 339, 675–678. [2] Zhang N. et al. (2013) *JGR: Planets*, 118, 1789–1804. [3] Zhang N. et al. (2013) *GRL*, 40(19), 5019–5023. [4] Kato S. et al. (2017) *Meteoritics & Planet. Sci.*, 52, 1899–1915. [5] Lucey, P. G. et al. (2000). *JGR: Planets*, 105(E8), 1039–1039.

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

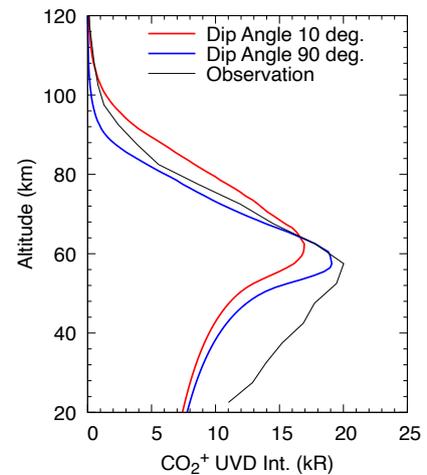
Taishin Okiyama¹, Kanako Seki¹, Yuki Nakamura¹, Robert J. Lillis², Ali Rahmati²,
Davin E. Larson², Gina A. Dibraccio³, and Shannon Curry²

¹ The University of Tokyo, Tokyo, Japan, ² The University of California, Berkeley, USA,

³ NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, USA

The diffuse aurora emission at Mars consists of significant global CO_2^+ ultraviolet doublet (UVD) emission and having peak below 100 km altitude (Schneider et al., 2015; Schneider et al., 2018). Diffuse aurorae on Mars are caused by solar energetic particles (SEP) including high energy electrons around hundreds keV and protons around a few MeV. Relative contributions of the SEP electrons and protons to the diffuse auroral emissions are still unclear. If diffuse auroras are caused by the electrons, the auroral emission altitude profiles are expected to vary with changes in the induced magnetic fields by the solar wind, because the electrons are expected to be magnetized and precipitate into Martian atmosphere along the magnetic field lines. However, effects of the magnetic fields on the diffuse auroral emission profiles are far from understood. The purpose of this study is to estimate the magnetic field effects based on a newly developed Monte Carlo model and MAVEN observations.

We have developed a Monte Carlo model that calculates the emission altitude profile of CO_2^+ UVD. Our model used similar methods to the model by Bhardwaj & Jain (2009), which calculates the energy degradation of electrons below 1000 eV through collisions between CO_2 and electrons. The energy range of our models is expanded up to hundreds of keV by including the cross sections for collisional reactions between electrons and neutral atmosphere used in the model by Gérard et al. (2017), which reproduces vertical emission profiles of Martian diffuse aurora. A difference of our model from the previous models (e.g., Schneider et al., 2015, Gérard et al., 2017, and Nakamura et al., 2022) is to trace the trajectory of each electron in the given magnetic field structure including its cyclotron motion to investigate the effect of the draped magnetic field. We use MAVEN observational data, such as electron flux and magnetic fields, during the diffuse auroral event observed in September 2017 as inputs to our model. The model results show that effects of the dip angle of the magnetic field from the horizontal direction are greater than those of the magnetic field strength, and the smaller dip angle makes the broader auroral altitude profile. This auroral altitude profile variations will be roughly distinguishable by the observations, and the results imply that magnetic field structures in the Martian ionosphere might be inferred from observations of the altitude profiles of diffuse aurora emissions. As for the integrated auroral intensity over 50-100 km altitude range, the magnetic field dip angle effects on the auroral intensity are about 13% under the simple uniform magnetic field assumptions. It should be noted that the effects can be larger when one takes account of a non-uniform magnetic field structure in the vicinity of the planet and future works include application of the developed model to the more realistic magnetic field structure such as the global MHD simulation results.



CO_2^+ UVD limb integrated emission altitude profiles calculated by our model with dip angle 10 degrees (red line) and 90 degrees (blue line) during orbit 5729 and MAVEN IUVS observation during orbit 5730 shown in Schneider et al. (2018) (black line)

原始惑星系円盤のダストアルベドの観測的制限と ダスト組成への示唆

○ 吉田 有宏^{1,2}, 野村 英子^{1,2}, 塚越 崇³, 古家 健次², 土井 聖明^{1,2}

¹ 総合研究大学院大学 物理科学研究科 天文科学専攻, ² 国立天文台, ³ 足利大学

惑星系を構成する地球型惑星や巨大ガス惑星のコアは原始惑星系円盤に存在するダスト粒子の集積によって形成される。ダスト粒子の集積過程はその物質的性質に依存するため、それを天文観測によって特徴付けることには大きな意義がある。ダスト粒子の性質を知るには、例えば、赤外線領域の放射強度スペクトルにみられる物質に固有なフィーチャーを用いることができる。しかし、惑星系天体の形成に最も重要だと考えられる円盤中心面近くは、赤外線では光学的に厚く観測することができない。一方、円盤赤道面近くをトレースできるサブミリ波より長い波長では放射強度スペクトルには特徴がほとんど無い。

ところで、近年のアルマ望遠鏡等による観測的研究の進展により、サブミリ波・ミリ波において、円盤ダストの散乱アルベドが無視できない値を持つことが示唆されている (e.g., Zhu et al. 2019, ApJL, 877, L18)。アルベドはダストの組成や空隙率、サイズ分布等に依存するため、ダストの性質を探る鍵となる可能性がある。しかし、円盤からの光学的に厚いダスト熱放射は散乱により減光する (Miyake & Nakagawa, 1993, Icarus, 106, 20) ため、ダスト放射面の温度と独立にアルベドを求めることはできない。そのため、アルベドをダストや温度のモデルに非依存な形で観測的に制限した研究はこれまで無い。

本研究では、この問題を解決するため、分子輝線を用いる新たな手法を提案する。ある分子の異なる遷移の光学的に薄い輝線放射の強度比は、円盤赤道面近くのガス温度のみの関数となる。また、円盤赤道面近くでは、ダスト温度とガス温度は一致している。したがって、同じ分子の複数の遷移を用いることで赤道面近くのガス・ダスト温度を決定することができれば、ダスト放射の強度からダストのアルベドを温度とは独立に求めることができると考えられる。一方、この手法を実際に適用するためには、用いる分子輝線放射には光学的に薄いと同時に十分な S/N 比が達成できるフラックスを持つことが求められる。これらの条件を満たすものとして、我々が最近初めて検出した円盤中心部の一酸化炭素輝線に見られる圧力広がりによるウィング (Yoshida et al. 2022, ApJL, 937, L14) がある。

我々は、TW Hya 円盤の CO J=2-1, 3-2 輝線のアルマ望遠鏡による観測アーカイブデータを解析し、中心星から 6 au 以内程度の円盤中心部において、両方のスペクトルに圧力広がりによるウィングを確認した。さらに、放射モデルを構築し、2つのスペクトルに同時にフィッティングすることで、その温度をダストのアルベドと独立に決定することに成功した。また、波長 0.45 mm から 3.1 mm に至る多波長連続波観測データを併せて用いることで、アルベドのスペクトルを初めて得た。アルベドは ~ 0.8-0.9 程度と高い値を示し、Birnstiel et al. (2018, ApJL, 869, L45) で提案されている、炭素が不揮発性有機物として含まれるダストモデルにおいて、ダスト最大サイズを 300 μm とした場合と整合的であった。一方、炭素が、Zubko et al. (1996, MNRAS, 282, 1321) で提案されているようなアモルファス炭素として含まれるダストモデルでは説明できない。講演では、空隙率やサイズ分布等の他の性質についても議論したい。

原始惑星系円盤 HD 163296 のダストサイズ推定 ダストリング幅の観測波長依存性からの制限

○ 土井 聖明^{1,2}、片岡 章雅^{1,2}

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

惑星形成は、固体微粒子であるダストの合体成長による微惑星形成から始まる。ダストが連続的に合体成長を繰り返すことで、もしくはダストがある程度の大きさに達した際に不安定性を駆動することで微惑星が形成される。したがって、円盤内のダストサイズの観測的推定は微惑星の形成過程を議論する上で不可欠である。従来の研究では、ミリ波強度の観測波長依存性 (スペクトル指数) からダストサイズの推定が行われてきた。しかし、ダストの光学特性や観測強度の不確定性により、推定されるダストサイズにはサブミリサイズからセンチメートルサイズまでの幅が存在し、ダストがどの程度成長しているのかは明らかではない。

本研究では、ダストの円盤中での力学的な挙動を考慮し、ダストの空間分布からダストサイズ分布を推定する新しい手法を提案する。近年の ALMA による高解像度観測により、多くの円盤でダストはリング状に分布していることが明らかになった。これらのダストリングは、ダストがガスリングに捕獲されることで形成されていると考えられている。ガスリングへのダストの捕獲効率はダストサイズに依存し、より大きいダストほどより幅狭のリング状に分布するという特性がある。長波長での観測ほど、より大きいダストからの放射に感度があるため、リング幅はより幅狭に観測される。この波長間のリング幅の比を利用して、ダストサイズ分布を推定することが可能であることを提案する。

上記の手法を実際の観測データに適用し、HD 163296 円盤の 2 つのリング (67 au、100 au) 内のダストサイズ分布 (最大ダストサイズ a_{\max} 、サイズ分布の冪指数 $-p$) を推定した。ALMA 望遠鏡を用いた 2 波長 (1.3 mm、2.1 mm) の高解像度観測画像の解析から、内側リングではリング幅は 2 つの波長でほぼ同じである一方で、外側リングでは 2.1 mm では 1.3 mm と比べリング幅は 0.8 倍程度と幅狭であるとわかった。これらの結果を上記のモデルと比較することで、内側リングでは $0.9 \text{ mm} < a_{\max} < 5 \text{ mm}$ かつ $p < 3.3$ 、外側リングでは $a_{\max} > 3 \times 10^1 \text{ mm}$ かつ $3.4 < p < 3.7$ という制限を得た。外側リングよりも内側リングの方がダストサイズが小さいという結果は、外側リングではダスト成長が進行しており、微惑星の形成に有利な状況である一方で、内側リングではダストの成長が抑制され、微惑星形成が進行しにくいことを示している。

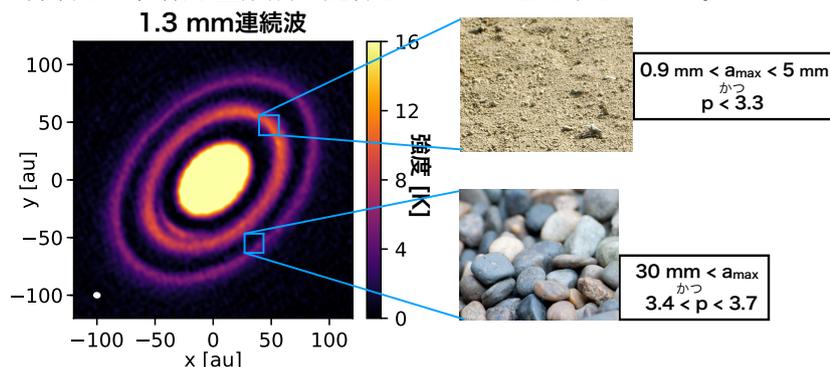


図 1: 対象天体の観測画像と制限されたダストサイズ概念図。

原始太陽系円盤形成段階のガス・ダスト進化による

同位体不均質の形成・維持

○本間和明¹, 奥住聡¹, 荒川創太², 深井 稜汰³

¹東京工業大学 ²海洋研究開発機構 ³宇宙航空研究開発機構

近年、隕石の Cr や Ti などの高精度同位体分析により、隕石が非炭素質・炭素質の2つのグループに分けられることが明らかとなっている (e.g., Warren 2011)。この同位体二分性は、原始太陽系円盤が同位体的に不均質であったことを示唆する。同位体不均質は原始太陽系円盤進化の初期 (CAI 形成から 1 Myr 以内) に形成された鉄隕石及び、後期 (CAI 形成から~3 Myr 後) に形成された未分化隕石のそれぞれに見られる (Kruijer et al., 2017)。したがって、同位体不均質は原始太陽系円盤の形成段階から存在し、その後の数 Myr に渡って維持されていたと考えられる。

原始太陽系円盤の同位体比は円盤物質(ガス・ダスト)の進化で決まるため (荒川, 深井, 本間, 遊星人 2022)、どのように不均質が形成されたかを明らかにすることは太陽系形成の理解に重要である。同位体不均質の起源として有力視されるのは、分子雲から円盤へ降着する物質の同位体比が時間と共に変化し、円盤物質が急速に外側拡散したとする説である (e.g., Nanne et al., 2019, Jacquet et al., 2019)。しかし、円盤物質の拡散がどの程度素早い必要があるかは明らかではない。また、急速な拡散が要求される一方で、拡散が同位体比を均質化する可能性もある。更に、円盤形成段階で生じる重力不安定による円盤物質拡散の加速や、円盤外側へのダストの輸送効率を決めるダストサイズの進化が、同位体不均質の形成へどのように影響するかも不明である。

本研究の目的は、円盤形成段階からのガス・ダストのダイナミクスにより、同位体不均質が形成される条件を解明することである。この目的を達成するため、本研究では新たに、分子雲からの物質降着、円盤物質の拡散、円盤の重力不安定、円盤でのダスト成長・破壊、衝突・移動に伴うダストの同位体キャリアの輸送を統合的に組み込んだモデルを構築し、円盤の同位体比の時空間進化を求めた。パラメータサーベイの結果、同位体不均質の達成には、粘性拡散による円盤半径の拡大が、分子雲から円盤へ物質が降着する領域の拡大よりも素早い必要があることが分かった。一方で、初期に粘性による円盤半径の拡大が降着領域の拡大より遅い場合であっても、重力不安定が円盤半径の拡大を加速し、数十 au スケールで同位体不均質が形成されることも新たに示された。加えて、ダストが大きく成長し円盤外側への輸送が非効率となる場合でも、同位体不均質が形成されることも明らかとなった。

また本研究の結果、円盤形成から数 Myr の間、ダストの落下により同位体比の異なるダストが円盤外側数十 au 以遠から数 au に流れ込むこともわかった。この結果は、ダストの落下による同位体比の変動が隕石の同位体不均質を生むとする説 (Liu et al., 2022, Onyett et al., 2023) を支持するものである。発表では本研究の結果に基づき、同位体不均質の維持のシナリオである早期木星形成説 (e.g., Kruijer et al., 2014) や 2 段階微惑星形成説 (Lichternberg et al., 2021) の実現可能性も議論する。

系外惑星 TOI-700 d からの電離大気散逸の研究: 金星アナログ
Study of atmospheric ion escape from exoplanet TOI-700 d: Venus analogs

○ 西岡知輝¹, 関華奈子¹, 山本和弘¹, 坂田遼弥², 堺正太郎²,
寺田直樹², 品川裕之³, 中山陽史⁴

¹ 東京大学大学院理学系研究科,² 東北大学大学院理学研究科,
³ 国立研究開発法人情報通信研究機構,⁴ 立教大学理学部

Terrestrial planets around M dwarfs in the habitable zone (HZ) are easy to observe because of frequent transits and their relatively large planet-to-star area ratio. Therefore, they are important observational targets for seeking signs of life. However, close-in exoplanets around M dwarfs are expected to experience strong ion loss because the X-ray and EUV (XUV) radiation from M dwarfs is substantially larger than Sun-like stars. TOI-700 system is one such target, with an Earth-sized planet (TOI-700 d) in the HZ of M2 star (Gilbert et al., 2020; Rodriguez et al., 2020). Dong et al. (2020) investigated the feasibility of atmospheric retention for exoplanets at the TOI-700 d location based on global MHD simulations. It was revealed that a Venus-like exoplanet can retain an atmosphere for a long time under the same XUV as present-day Venus.

We investigate the effect of stellar XUV, the interplanetary magnetic field (IMF) orientation, and the intrinsic magnetic field on ion escape from exoplanets, specifically considering TOI-700 d as a representative exoplanet in the HZ around M dwarfs. We use multi-species MHD simulations model, REPPU-Planets (Terada et al., 2009; Sakata et al., 2022), assuming a Venus-like atmospheric composition that depends on the stellar XUV flux (Kulikov et al., 2007).

In unmagnetized cases, the escape rate of atmospheric ions is suppressed by the interplanetary magnetic field nearly parallel to the stellar wind velocity, which may be typical as the planet and the host star get closer (red lines in Figure 1). The unmagnetized exoplanet would have difficulty retaining its atmosphere for a time comparable to the age of host star (blue line in Figure 1) under extreme conditions where XUV is 30 times stronger than at the current Earth. However, black symbols in Figure 1 show that the strong intrinsic magnetic field of $B_{\text{eq}}=1000$ nT suppresses ion escape, allowing atmosphere to be retained even when XUV is 50 times of the current Earth.

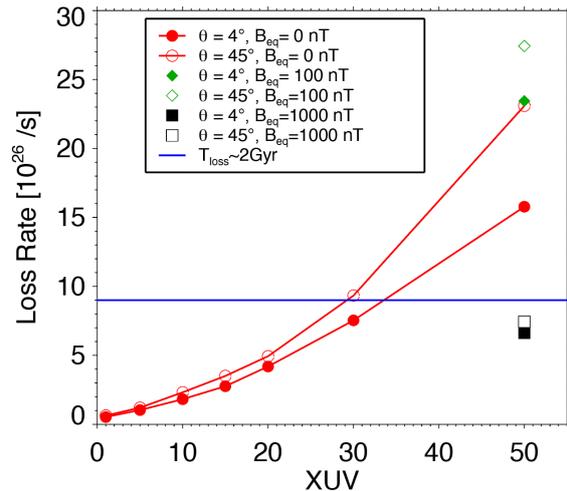


Figure 1 The dependence of ion escape rate on the XUV flux. The blue line shows the timescale of atmospheric loss is 2 Gyr.

はやぶさ 2 から見えてきた太陽系形成過程の制約

○渡邊誠一郎¹, はやぶさ 2 サイエンスチーム²

¹名古屋大学大学院環境学研究科, ²はやぶさ 2 プロジェクト

C型小惑星リュウグウに対する「はやぶさ 2」ミッションでは、その場観測・衝突実験と帰還試料分析から多くの成果が出た^[a.g., 1]。現在リュウグウ試料の初期分析結果が出揃い、リモートセンシング観測の結果も併せて、太陽系形成に関して得られた制約や解明すべき課題を整理すべき段階にある。本講演では、以下の3点に絞って、その整理を試みる。

(I) リュウグウ試料の化学／鉱物学／同位体的な性質は、CIコンドライトと類似性が高く、いくつかの差異は隕石の大気圏突入後の風化で説明できる^[2, 3]。試料の元素存在度は太陽系存在度を保持する一方で、その多くは強い水質変成を経験していて、層状珪酸塩や磁鉄鉱、硫化物、炭酸塩などの二次鉱物が体積の大部分を占める^[3]。リュウグウ母天体において、どのような条件で、マクロな元素比を変えずに水質変成のみが進行したのか、あるいは、CIコンドライトやリュウグウの元素存在度は水質変成を受ける前の太陽系の初源的な値から何らかのずれがあるのかを明らかにする必要がある。そのために100 kmスケールの氷微惑星が、放射性熱源によって氷が融解した環境下での低温水質変成反応が進行していった過程で、数 cm スケールでも元素移動がほとんど起こらないための制約条件を議論する。

(II) 太陽系形成過程を解剖するためには、同位対比はきわめて重要な情報源である。プレソーラー粒子を除き、サブミクロンスケールに至るまで太陽系物質の同位体比に空間的なばらつきが見られないことは、同位対比の異なる太陽系起源物質が、単に機械混合されたのではなく、昇華・凝縮を繰り返すことで同位体的な均質化を経てきたと考えるべきである。太陽系内では太陽近傍を除いてそのような均質化は望めない一方、リュウグウ母天体のように太陽系外側領域で形成された天体の試料でも均質化されている。よって、同位体比の均質化は、宇宙線等の照射で分子雲において既に起こっていたか、あるいは原始惑星系円盤形成期に太陽近傍で生じた後に円盤外側まで輸送されたかのいずれかと考えられるが、両者を弁別する戦略について議論する。

(III) 同位体的に均質な太陽系主要物質にいくつかの異なる源のプレソーラー粒子が円盤の領域に応じて加わることで、現在の隕石などの太陽系物質に見られる同位体分布、特にNCとCC, CIの三分性が説明できるかも大きな課題である。リュウグウ試料（やCIコンドライト）の水素、炭素、窒素の同位体異常^[4]をどのようなプレソーラー粒子の混合で説明できるかという問題は、これと密接に関係している。この点についても議論したい。

[1] Watanabe, S., et al. 2023, “Exploration-Based Reconstruction of Planetesimals”, Chapter 27, in *Protostars & Planets VII*. [2] Yokoyama, T., et al., 2022, *Science* **379**, abn7850. [3] Nakamura, T., et al., 2022, *Science* **379**, abn8671. [4] Yabuta, H., et al., 2023, *Science* **379**, abn9057.

リュウグウサンプル表面の微小クレータ分布

○中村智樹¹, 岡崎隆司², 上田雅美¹, 渡邊桂介¹, Cecile Engrand³, Jean Duprat⁴, 菊入瑞葉¹, 中藤亜衣子⁵, Mike Zolensky⁶, はやぶさ2初期分析コアチーム
¹東北大, ²九州大, ³Univ. Paris-Saclay, ⁴CNRS-MNHN-Sorbonne Univ., ⁵極地研,
⁶NASA/JSC

はやぶさ2探査機が回収したミリメートルサイズの粒子には、ナイフで切断したような非常に平らな表面を持つサンプルが存在する。初期分析「石」チームが分析した17粒子中、このような平らな面を持つサンプルが5粒子（A0064, A0067, A0094, C0025, C0061）存在した。我々はこの5試料の平らな面を大気遮断型電子顕微鏡を用いて観察した。その結果、2つのA試料（A0064, A0067）の平らな面が、小惑星リュウグウの表面に露出していた証拠を見出した。

本発表では、A0067サンプルの平らな面の観察結果を紹介する。この面は面積が約1.3 mm²で、電子顕微鏡FE-SEMを用いて、倍率x3000（空間分解能<0.1ミクロン）で約1000枚の画像を撮像し解析した。さらに、平らな面の複数の個所からFIB超薄切片を作成し、TEMを用いて観察した。詳細な観察をしたのちに、平らな面を厚さ約0.2mmでカミソリの刃を用いて切断し、九州大学で段階加熱法による希ガス同位体分析を行い、太陽風希ガス濃度からこの平面の惑星間空間への暴露時間を求めた。

平らな面から切り出した超薄切片の観察の結果、この平らな表面は結晶性のよい数ミクロンの厚みのサポナイトレイヤーで覆われていることが分かった（Nakamura et al. 2022）。つまり、この面は非常に平らで、熱に敏感な層状ケイ酸塩で覆われていることから、平面上の小さな構造変化や熱変化を検出することができる。したがって、この平らな面は、小惑星リュウグウのレゴリスの環境や惑星間空間との相互作用の記録を残していると期待される。

この平らな表面を電子顕微鏡で観察した結果、数多くの微小クレータ（>1000個）を発見した。多くのクレータは直径1ミクロン以下で、クレータのリムは溶融しており、似た構造を示す。また、クレータの底のサポナイトは発泡し、脱水しているものも観察された。さらに、この平らな面に多くのメルトスプラッシュ（多くは近い方角に伸びている）を発見した。つまり、この粒子の近くで衝突現象が発生し、微小メルトが固化しないうちにこの平らな面に到達したことを示す。Neの太陽風成分の濃度から、この粒子の小惑星最表層での滞在時間は短く、100年以内であることが推定された。この短い暴露期間のうちに、どうして多数の微小クレータができたのか、その環境について考察を進めている。

リュウグウ試料のドロマイトから探る 母天体の熱史

○藤谷 渉¹、牛久保 孝行²、菅原 慎吾¹、山口 亮³、

福田 航平⁴、Martin R. Lee⁵、寺田 健太郎⁴、Phillip A. Bland⁶、Bryan J. Travis⁷

¹茨城大学 理学部、²海洋研究開発機構 高知コア研究所、³国立極地研究所、⁴大阪大学、

⁵University of Glasgow、⁶Space Science and Technology Centre, Curtin University、

⁷Planetary Science Institute

探査機はやぶさ 2 が回収した小惑星リュウグウの試料は最も化学的に始原的な隕石である CI コンドライトに類似している (Yokoyama et al., 2022; Nakamura E. et al., 2022; Ito et al., 2022)。リュウグウ試料および CI コンドライトには母天体における水質変成作用の痕跡が見られ、水-岩石-有機物の相互作用により多様な二次鉱物が形成されている (Nakamura T. et al., 2022; Yamaguchi et al., 2023)。ドロマイトはそのような水質変成作用で形成された二次鉱物であり、リュウグウ試料および CI コンドライトの主要な炭酸塩鉱物である。その酸素同位体比からドロマイトが晶出したときの温度を制約でき、また、マンガン・クロム年代測定によってドロマイトの形成年代を推定できる (Yokoyama et al., 2022; McCain et al., 2023; Fujiya et al., 2023; Kita et al., submitted)。したがって、それらを組み合わせることで、年代と温度の関係を復元することが可能である。これまでの分析により、ドロマイト-マグネタイト間の酸素同位体平衡温度は 40-80 °C と推定されている。一方、その形成温度は最高到達温度を記録しているのか、あるいは水質変成作用の初期に温度が上昇しているとき (前進変成作用) もしくはその後の温度が下降しているとき (後退変成作用) のスナップショットなのか、はあまり理解されておらず、リュウグウ母天体の熱史を制約するには至っていない。

本研究ではリュウグウ試料 A0203 および C0192 中のドロマイトの酸素同位体比を測定し、その $\delta^{18}\text{O}$ 値と $\Delta^{17}\text{O}$ 値に逆相関があることを見出した。水-ドロマイト間の酸素の平衡同位体分別 (水-ドロマイト間の $\delta^{18}\text{O}$ 値の差異) は低温ほど大きく、常に $\delta^{18}\text{O}$ (ドロマイト) $>$ $\delta^{18}\text{O}$ (水) の関係が成り立つため、低温で形成されたドロマイトほど大きな $\delta^{18}\text{O}$ 値を示す。また、もともと $\Delta^{17}\text{O} > 0$ の水と $\Delta^{17}\text{O} < 0$ の岩石が反応することにより、水の $\Delta^{17}\text{O}$ 値は水質変成作用が進むほど小さくなると考えられる ($\delta^{18}\text{O}$ 値も同様)。したがって、今回の分析結果は、ドロマイトが後退変成作用において温度下降中に形成したと考えなくては説明できない。したがって、ドロマイトの形成年代は水質変成作用の初期ではなく、ピーク温度に達した後の時間を記録していると考えられる。

リュウグウ粒子に含まれる有機物質-粘土凝集体の観察

○松本 徹¹, 野口 高明², 荒木 暢³, 大東 琢治⁴, 伊神 洋平², 三宅 亮².

¹京都大学白眉センター, ²京都大学理学研究科, ³分子科学研究所, ⁴高エネルギー加速器研究機構

C型小惑星リュウグウの試料は、含水珪酸塩やその他の水質変成鉱物と有機物に富み、CIコンドライト隕石の特徴と一致する(e.g., Yokoyama et al. 2022, Nakamura et al. 2022)。これまでのバルク試料への分光分析と X線回折分析によって、リュウグウの層状珪酸塩はその層間に有機物が存在することが示唆されている(Viennet et al. 2023)。またこの層間の有機物は赤外測定で示唆された NH 化合物(Pilorget et al. 2022)に対応する可能性もある。こうしたリュウグウ試料における層状珪酸塩と有機物との共存状態を知ることは、始原的な小天体内部における無機鉱物と有機物の相互作用を理解する上で重要である。しかし、サブミクロンメートルの空間スケールで有機物を含む可能性のある層状珪酸塩の特徴と有機物との分布・形態の関係はよく調べられていない。そこで本研究では、リュウグウ試料の中でも特異的に炭素に富む領域に注目し、層状珪酸塩の高空間分解能での観察と有機物の化学構造の分析を行った。

本研究では、国際公募分析によって配布された A 室から回収されたリュウグウ粒子(A0142)を試料として用いた。走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて粒子表面に分布する有機物の濃集箇所を探索後、集束イオンビーム装置を使って、有機物が含まれる箇所から 150nm の厚さの切片を切り出した。この切片に対して、走査型透過 X線顕微鏡(STXM)を用いて、X線吸収端近傍構造分析(XANES)を行った。STXM 測定は炭素の吸収端(C-XANES)の領域で行った。その後、透過型電子顕微鏡(TEM)を使って、層状珪酸塩の形態と面間隔を調べた。

SEM 観察によって、約 $17 \times 10 \times 9 \mu\text{m}$ の領域で炭素が濃集する領域を確認した。STXM 分析の結果、炭素の濃集領域には、芳香族炭素(C=C)とカルボキシル基(COOH)の吸収ピークが含まれていた。この C-XANES の特徴は、初期分析で報告されたリュウグウ試料の不溶性有機物の特徴と似ている(Yabuta et al. 2023)。TEM 観察の結果、炭素の濃集領域には層状珪酸塩が微細に入り混じっていることがわかった。炭素の濃集領域とそのごく近傍のマトリックスでは、0.67-0.76 nm (serpentine)と 1.0-1.1 nm (saponite)の間隔をもつ層状珪酸塩が最も典型的に見られた一方で、1.23-1.35 nm の広い面間隔をもつ繊維状の層状ケイ酸塩も確認された。

こうした広い面間隔をもつ層状珪酸塩の層間には、有機分子が取り込まれていると予想されている(Viennet et al. 2023)。また、有機物質と層状ケイ酸塩が共存する炭素質コンドライトのマトリックスにおいても、有機分子が層状珪酸塩に取り込まれた可能性が指摘されている(Guillou et al. 2014, Garvie and Buseck, 2007)。本観察において、通常の間隔の serpentine, saponite と広い面間隔をもつ saponite が密接に共存していたことから、層状珪酸塩への有機分子の流入や流体の化学状態はミクロンメートルの範囲で不均一であったかもしれない。

ロックインサーモグラフィ周期加熱法に基づく
リュウグウ粒子と炭素質コンドライトの熱拡散率の比較
Comparison of Thermal Diffusivity between Ryugu Samples and Carbonaceous
Chondrites by Using Lock-in Thermography Periodic Heating Method

○石崎拓也¹, 深井稜汰¹, 金丸礼¹, 小野寺圭祐², 保田慶直³,
矢田達¹, 安部正真¹, 岡田 達明¹, 白井 寛裕¹

¹JAXA 宇宙科学研究所, ²東京大学 地震研究所, ³関西学院大学大学院 理工学研究科

太陽系小天体を構成する物質の熱物性を知ることは、太陽系形成初期の微惑星の進化の解明に重要である。C型小惑星リュウグウは未分化小天体の一つで、太陽系形成初期の情報が保存されていると考えられる。「はやぶさ2」は小惑星リュウグウを探索し2020年に約5.4gの試料を持ち帰り、詳細な物理・化学的分析が行われた結果、リュウグウ粒子は元素組成的にはイブナ隕石に最も近く (Nakamura et al., 2022), また弾性的性質はタギッシュレイク隕石に近い可能性がある (Onodera et al., 2023 (preprint)) ことが明らかになった。一方で隕石の熱物性は粒子ごとにバリエーションが大きく、小惑星母天体の熱史を知る上で最重要のパラメータであるにも関わらずその原因が明らかになっていない。そこで本研究では、リュウグウ粒子の初期分析にも用いられたロックインサーモグラフィ周期加熱法 (Ishizaki et al., 2023) でリュウグウ粒子および炭素質コンドライト試料を測定し比較することで熱的な性質は他の炭素質コンドライトとどのような関係があるかについて評価を行ったので報告する。

リュウグウ3粒子 (A0172, A0308, C0054) 及び、炭素質コンドライト (Ivuna × 3 (CI), Murchison × 1 (CM2), Tarda × 1 (C2-ungrouped), Tagish Lake × 3 (C2-ungrouped), Allende × 2 (CV3)) の熱拡散率とバルク密度を計測した。バルク密度は電子天秤で重量を測定し、3D X線顕微鏡 SKYSCAN 1272 を用いたトモグラフィ像から試料体積を取得することで求めた。試料内部に存在するクラックは熱拡散率に大きな影響を与えるため、温度画像及び X 線 CT 像の事前観察により、クラックを避けて熱拡散率を測定した。

測定の結果、リュウグウ粒子の熱拡散率は $(1.5\text{--}3.7) \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ であり A0308 のみ有意に低い値が得られた。5種の炭素質コンドライトの熱拡散率は $(1.5\text{--}5.1) \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ であり、Allende に有意に大きい値を有する試料が見られ、Tagish Lake 隕石に有意に小さい値を有する試料が見られた。そのほかの隕石の結果は誤差の範囲で一致した。

図1に熱拡散率とバルク密度を比較した結果を示す。同図中に初期分析で得られたリュウグウの測定結果 (Ishizaki et al., 2023), Soini et al. (2020) と Opeil et al. (2010) による測定結果も示した。その結果、熱拡散率とバルク密度には正の相関がみられ、Opeil らによる Jbilet Winselwan と NWA 7309 を除いて先行研究例とも調和的な傾向であった。特にリュウグウ粒子は化学組成が類似する CI コンドライトの Ivuna 試料よりも、Tagish Lake 試料に類似した熱拡散率-バルク密度分布を示すことが分かった。これは Onodera らによる弾性的性質の測定結果と調和的な結果であり、岩石学的分類が1または2の炭素質コンドライトにおいては、熱機械的物性は試料内部のマトリックス及び内包物と空隙からなる機械構造的特性が支配的である可能性を示唆する。またリュウグウ及び Tagish Lake 試料に見られた有意に低い熱拡散率を示す試料は、一方でバルク密度については相関して他の同種粒子より小さい値を示してはいない。さらに熱拡散率分布解析の結果から熱拡散率の低下がクラックに起因するものである可能性は低いことが明らかとなった。従って、同一試料内の熱拡散率のバリエーションは、マトリックスの結晶粒界で熱抵抗が大きくなるような空隙分布構造などに起因する可能性が考えられる。

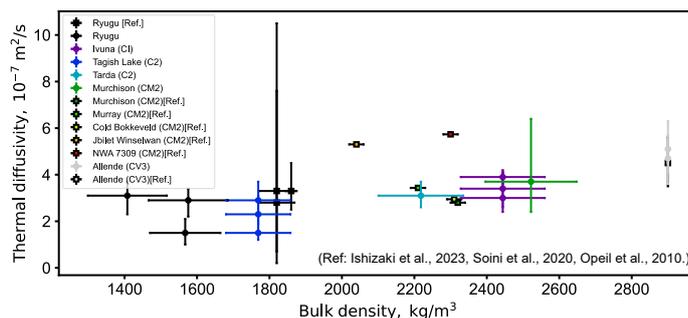


図1 リュウグウ及びCコンドライトの熱拡散率とバルク密度の関係

Ryugu 試料にみられる近赤外域の特徴と宇宙風化の影響：MicrOmega 測定と Fitting 解析

○古川聡一朗^{1,2}, 岡田達明^{1,2}, 与賀田佳澄², 畠田健太郎^{2,3}, 矢田達², 宮崎明子², 長島加奈², 田原瑠衣², 杉山由香², 中野有沙², 小嶋智子², 人見勇矢^{2,3}, 熊谷和也^{2,3}, 西村征洋², 安部正真², 臼井寛裕², Jean-Pierre. Bibring⁴, Cedric Pilorget⁴, Vincent Hamm⁴, Rosario Brunetto⁴, Damien Loizeau⁴, Lucie Riu⁴,

Tania Le Pivert-Jolivet⁴,

¹東京大学, ²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ³マリンワーク・ジャパン, ⁴仏パリ・サクレー大学宇宙物理学研究所

【はじめに】：はやぶさ2は、2020年にC型小惑星 Ryugu から約5.4gのRyugu試料（A室：表層試料、C室：掘削試料）を持ち帰り、JAXA宇宙研のキュレーションセンターで帰還試料の初期記載が行われている[1][2]。初期記載では、赤外分光顕微鏡：MicrOmegaによる測定とスペクトルの解析が進められており、私たちは非対称な吸収帯に対するフィッティング解析手法を開発した[3]。

MicrOmegaは、フランス宇宙天体物理学研究所（IAS）が開発した赤外分光顕微鏡であり、その特徴は約5mm角の領域を22.5μm/pixの解像度で、0.99-3.65μmのスペクトルを取得可能な点にある[4]。これまでの測定結果から、Ryugu試料の大部分に共通する特徴として、OH基由来と考えられる2.7μmの比較的深い吸収帯と2.0μm付近の傾きが確認されている[2]。

【方法】：本研究では、Ryugu試料に特徴的な2.7μm吸収帯に対して、ベースライン推定と複数のガウス関数によるフィッティング解析を適用した[3][5]。また、Ryugu試料に特徴的な2.0μm付近の傾きに対して、一次関数をフィッティングさせることにより、傾きの大きさを求めた。

使用した分光データは、MicrOmega-Curation DARTS Server内のデータ（A:100個、C:63個）である。

【結果】：Ryugu試料 A0007の2.7μm吸収帯に対するフィッティング解析の結果（各ガウス関数、合成波形、残差）を図1に示す。また、各ガウス関数は短波長側からf1~f4とした。

同様に、2.0μm付近の傾きに対する一次関数フィッティング解析の結果を図2に示す。

【考察】：2.7μm吸収帯のピーク波長と深度の関係から、図3に示すようにA室試料はαとβに2分されることが確認された。2.7μm吸収帯に対する別の解析結果でも同様の傾向が見られる[6]。βはαに比べて、ピーク位置が長波長で、深度も小さいことから、宇宙風化によるOH基に関連する結合の切断の影響を受けていると考えられる。

また、2.0μm付近の傾き解析の結果、標準誤差範囲内ではあるがβはαより傾きの絶対値が大きい傾向である（α:0.564±0.021[%/μm], β:0.571±0.026[%/μm]）。スペクトルの傾きは宇宙風化の影響を反映していると考えられていることから、βはαに比べて大きな宇宙風化の影響を受けている可能性がある[7]。

【参考文献】：[1] Yada, T. et al. 2022 Nature Astronomy 6(2): 214–20. [2] Pilorget, C. et al. 2022. Nature Astronomy 6(2): 221–25. [3] Furukawa, S. et al. 2023. JpGU2023, Abstract #PPS03-10. [4] Bibring, J.-P. et al. 2017. Space Science Reviews 208(1–4): 401–12. [5] Eilers, P.H.C. & Boelens, H.F.M. 2005. Leiden University Medical Centre report 1, 5. [6] Le Pivert-Jolivet, T. et al. 2022. MetSoc2022, Abstract #6255. [7] Morota, T. et al. 2020. Science 368(6491): 654–659.

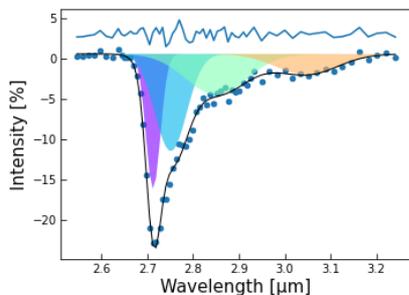


図1：2.7μm吸収帯に対するフィッティング解析結果

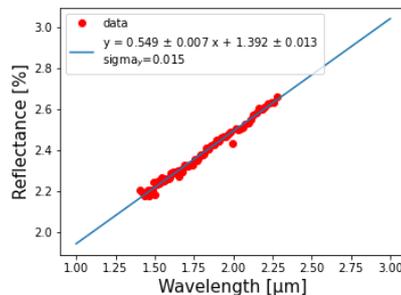


図2：2.0μm付近の傾きに対する一次関数フィッティング解析結果

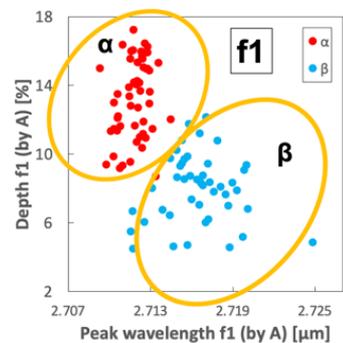


図3：2.7μm吸収帯のピーク波長と深度の関係（A室試料）

小天体表面を想定した宇宙曝露および紫外線照射による隕石有機物とその模擬物質の変化

○清水 航介¹, 古賀優志¹, 左近樹³, 小林憲正¹, 三田肇⁴,
矢野創², 癸生川陽子¹

1. 横浜国立大学, 2. JAXA, 3. 東京大学, 4. 福岡工業大学

小惑星などの表面では、宇宙風化が起きていることが知られている。しかし、宇宙風化は高エネルギー粒子などによる鉱物への長期的な影響が主な対象をなっており、比較的短期的な影響が見込まれる紫外線による有機物への影響はほとんど考慮されてこなかった。そこで国際宇宙ステーション(ISS)上でのアストロバイオロジー実験計画「たんぽぽ2」のサブテーマの一つとして、小天体表面における有機物の変成の検証を目的として、炭素質コンドライト中の不溶性有機物(IOM)やその模擬物質の宇宙曝露を行い構造変化を調べた。

「たんぽぽ2」は2019年8月19日(JST)にきぼう実験棟 ExHAM 1号機で軌道上曝露実験を開始し、2020年10月23日(JST)に431日間の宇宙曝露を終えた。本研究では「たんぽぽ2」の試料分析および隕石有機物の模擬物質の紫外線照射実験を行い、両者の比較・検討を行った。宇宙曝露による原子状酸素の影響についても検討するため、筑波宇宙センターに設置されている真空複合環境試験設備を用いて原子状酸素照射実験を行った。「たんぽぽ2」においてはMurchison隕石、Tagish Lake隕石、Murchison隕石に含まれるIOM、フミン酸(IOMと比較的似た構造を持つ腐食物質の一種)、模擬隕石有機物[1]を用いた。紫外線照射実験ではフミン酸、原子状酸素照射実験ではフミン酸およびMurchison隕石のIOMを用いた。各試料は、減衰全反射赤外分光法(ATR-FTIR)およびラマン分光法によって構造分析した。

フミン酸に紫外線照射を行った結果、24 h以内にATR-FTIRスペクトルの脂肪族 C-H 結合の割合が減少し、脂肪族 C-H 結合の短期間での減少が確認された。「たんぽぽ2」で宇宙曝露されたフミン酸においても脂肪族 C-H 結合のピーク比の減少がみられ、紫外線照射実験の結果と同様なものとなった。原子状酸素照射試料については試料の設置方向によらず C=O 結合の割合の減少がみられた。一方、各試料のラマンスペクトルについて L-BWF モデル[2]によりフィッティングを行い、芳香族構造の秩序化やグラファイト化度の検討をおこなった。宇宙曝露により D-band および G-band の中心波数が増加する傾向が見られ、芳香族化および芳香族骨格の秩序化がすすむ方向と逆の傾向が見られた。このことから、宇宙曝露によって芳香族骨格自体が変化している可能性が考えられる。

[1] Kebukawa Y. et al. (2013) *Astrophysical Journal*, 771, 19

[2] Ferrari A. C. and Robertson J. (2000) *Physical Review B*, 61, 14, 095-14, 107.

超高解像トモグラフィ・3Dレンダリング技術を用いたアエンデ隕石中の難揮発性凝縮物の形状観察

○増田雄樹¹、竹田裕介²、深井稜汰³、伊庭靖弘²、笹木慎太郎²、池上森²、臼井寛裕³、奥住聡¹、荒川創太⁴

¹東京工業大学、²北海道大学、³宇宙航空研究開発機構、⁴海洋研究開発機構

溶融による分化過程を経験していないコンドライト隕石は、様々な温度履歴を経験した数mm大の包有物と数 μm 大のマトリクス物質で構成された集積岩である。特に Calcium-Aluminum-rich inclusion (CAI)は原始太陽系星雲のガスから凝縮した太陽系最古の岩石であり、初期太陽系で起こった化学過程を知る上で重要な包有物である。一方、CAIは太陽近傍の高温領域で形成されたにも関わらず、雪線より外側領域で形成されたと考えられる炭素質コンドライト中に多く含まれる。この観察事実から、CAIは初期太陽系円盤における外側領域への輸送と隕石母天体への集積を通して、鉱物粒子の付着成長・破壊・圧縮の情報を記録していることが期待される。しかし、従来の薄片による2次元観察ではCAIの3次元形状を把握できず、X線CTでは隕石に含まれる多様な包有物の種類を識別することは困難であった。

本研究では、超高解像フルカラートモグラフィ技術を用いたアエンデ隕石の連続撮像を行った。連続画像から三次元形状の可視化を行い、隕石中に存在する包有物の色・形状・体積・表面積などの基礎データを抽出した。また、連続画像中の包有物を識別するために、参考試料として樹脂包埋されたアエンデ隕石中の包有物を各種数試料用意し、電子顕微鏡像と明視野画像による観察から特徴を抽出した。昨年度の惑星科学会では溶融・再結晶を経験した粗粒CAIの予察的データを紹介した(深井ほか 2022)が、本発表では星雲ガスからの凝縮後、溶融を経験していない細粒CAI及び、CAIと関連した凝縮物である Amoeboid olivine aggregate (AOA)の抽出・可視化の結果を中心に紹介する。

高解像度カメラで得られた明視野画像では、細粒CAIとAOAは容易に識別可能であった。細粒CAIとAOAの輪郭形状は電子顕微鏡像とは大きく異なっており、従来の電子顕微鏡観察では包有物サイズを過小評価していた可能性がある。得られた各包有物の三次元形状データから、断片化の証拠が見られた粗粒CAIとは異なり、細粒CAIとAOAは塑性変形の影響によると考えられる扁平構造が見られた。アエンデ隕石中の細粒CAIとAOAに見られた形状的特徴は、円盤における付着や円盤または母天体内における圧縮過程を反映していると考えられる。

JAXA 地球外物質研究グループの現状と 今後の帰還試料受入準備状況

○安部正真¹, 岡田達明^{1,2}, 鈴木志野¹, 橘省吾^{1,2}, 菅原春菜¹, 深井稜汰¹, 石崎拓也¹, 矢田達¹, 西村征洋¹, 坂本佳奈子¹, 与賀田佳澄¹, 宮崎明子¹, 長島加奈¹, 金丸礼¹, 田原瑠衣¹, 中野有紗¹, 小嶋智子¹, 熊谷和也³, 畠田健太郎³, 副島広道³, 人見勇矢³, 杉山由香¹, 中田彩子¹, 臼井寛裕^{1,2}

¹JAXA 宇宙科学研究所, ²東京大学, ³マリン・ワーク・ジャパン

JAXA 地球外物質研究グループでは、2010 年にははやぶさが持ち帰った小惑星 Itokawa 試料、2020 年にははやぶさ 2 が持ち帰った小惑星 Ryugu 試料を受入れ、保管管理をすると同時に、国際 A0 などを通して、試料利活用研究を進めている。Itokawa 試料については、これまで 1000 粒子以上の試料を個別にピックアップし、その初期記載情報をデータベースで公開すると同時に、公募研究に供している。また将来の長期試料保管に備えて、試料の個別容器への移動作業も進めている。Ryugu 試料についても、これまで 1000 粒子程度の個別試料をピックアップし、初期記載情報をデータベースで公開すると同時に、初期分析や Phase2 キュレーションで分析後に返却された試料についても、取得情報を整理しデータベースに登録し、公募研究へ供する活動を進めている。Ryugu 試料については、個別試料以外に集合体試料としても初期記載情報を取得しており、集合体試料としての公募研究への提供も進めている。

また、今年 9 月 OSIRIS-REx が小惑星 Bennu から持ち帰る試料の一部を受入れる準備として、新しく、クリーンルームとクリーンチャンバの整備、初期記載用の分析機器や各種ハンドリン装置の準備を進めている。さらに来年度打ち上げ予定の MMX が 2029 年ごろに持ち帰る予定の火星衛星フォボスの試料の受入設備の整備の検討も開始した。

地球外物質研究グループでは、キュレーション技術の向上として、汚染評価・管理技術の取得を目指し、ガスクロマトグラフ-質量分析計 (GC-MS) や誘導結合プラズマ-質量分析計 (ICP-MS) 等の化学分析装置の導入・整備を進めている。また、これまで、非破壊、非汚染での初期記載を前提として進めてきたが、一部試料について、記載項目拡張の検討を進めている。これらの活動を通し、グループのスキルアップと人材育成やコミュニティーへのさらなる貢献を目指している。

本講演では、Itokawa、Ryugu 試料のキュレーション活動の現状と、Bennu 試料の受入準備状況およびフォボス試料の受入設備の検討状況を中心に、JAXA 地球外物質研究グループの活動状況を報告する。

深層学習によるリュウグウのボルダーサイズ頻度分布の導出

○関すおみ^{1,2}、神山徹²、Xuanchao Fu^{1,2}、Wenhao Shen^{1,2}、本田親寿³、
吉川一朗¹

¹東京大学、²産業技術総合研究所、³会津大学

小惑星のボルダーについて大きさ・形状の地域特性を比較することにより、小惑星が経験した地質学的プロセスが明らかになる。たとえば、小惑星リュウグウではボルダーの累積サイズ頻度分布、長軸・短軸比、長軸の角度から数 cm 以下のボルダーが高緯度地域から赤道域に移動したという示唆が得られている[1, 2]。リュウグウは東西非対称な形状をしており、現在の姿に至る過程に地域差があると考えられるが、この先行研究で用いられた統計データは全体の面積のわずか数%にすぎない。全球規模での解析は地域差の定量化に不可欠であり、効率的な解析手法が求められた。

本研究では、深層学習手法を用いて解析を効率化する。ボルダーを一つ一つ検出し、その大きさを計測できる Mask R-CNN [3]という深層学習手法をもとに、リュウグウのボルダー検出に特化したアルゴリズムを構築した。「はやぶさ2」の光学航法カメラが撮影した 275 枚の近接画像からボルダー10,000 個の教師データを作成し、先行研究[2]の結果を再現することでアルゴリズムの有効性を確かめた。教師データをもとに学習を行い、先行研究[2]と同一の近接画像からボルダー検出・サイズ計測を行った。検出したボルダーの累積サイズ頻度分布の傾きは $-2.67 \sim -1.49$ で、同じ地域での調査結果 $-3.13 \sim -1.80$ [2]とは開きがあるが、それぞれの地域依存性は類似的だった。

参考文献

[1] Michikami *et al.* (2019) *Icarus* 331: 179-191. [2] Michikami *et al.* (2022) *Icarus* 381: 115007. [3] He *et al.* (2017) Proceedings of the IEEE international conference on computer vision.

地球近傍小惑星表面における 岩塊サイズ分布進化数値シミュレーション

○愛敬雄太¹、諸田智克¹

¹東京大学

微小天体衝突や熱疲労による小惑星表面岩塊の破壊は、小惑星進化の最終段階でその質量損失に寄与する。岩塊破壊の理解は、観測[1-3]からサイズ分布進化の履歴を理解し初期条件を制約する上で重要であるとともに、太陽系形成から現在に至るまでの小惑星帯の質量変化を調べる上でも重要である。1m以下の粒子サイズ分布進化の数値シミュレーションはすでに行われている[4]ものの、実際の観測データと比較可能な1mより大きい岩塊のサイズ分布進化の研究と、それらの破壊による細粒化の定量的評価はなされていない。また小惑星リュウグウ表面の岩塊強度に関して、熱赤外観測による岩塊強度推定[5]や帰還試料の強度測定[6]が行われているが、複合的なプロセスである衝突破壊における実効的な岩塊強度は定量的には評価されていない。

そこで本研究では、小惑星の衝突破壊によるサイズ分布進化モデル(e.g., [7])の考え方を天体表面岩塊サイズ分布進化に適用し、天体衝突によるカタストロフィック破壊とクレータリングのプロセスを取り込んだ数値モデルを構築した。構築したモデルを用いて、地球近傍小惑星表面におけるcm~mサイズ粒子についてサイズ分布進化の数値シミュレーションを実施した。

その結果、小火球の観測から推定された地球近傍の衝突体フラックス[8]を用いた場合には、地球近傍小惑星の典型的な寿命である 10^7 年間ではmサイズ以上の岩塊サイズ分布が初期状態からほぼ変化しないことが分かった。またmサイズ以上の岩塊の破壊においてはカタストロフィック破壊が重要であり、破片はmサイズ以下の岩塊サイズ分布の変化に寄与することから、[4]で調査されているmサイズ以下のサイズ分布進化を議論する場合でも1m以上の岩塊のカタストロフィック破壊の効果を取り入れる必要があることが分かった。さらに、カタストロフィック破壊を経験している岩塊の割合を探査画像から測定することで衝突破壊に対する実効的な岩塊強度を推定できる可能性が示唆された。

本発表では、岩塊強度や衝突体フラックスが岩塊サイズ分布進化シミュレーションの結果に与える影響を調査し、シミュレーション結果と実際の地球近傍小惑星での観測量を比較し議論を行う。

文献:[1] Sugita et al., 2019, Science. [2] Michikami et al., 2019, Icarus. [3] Michikami et al., 2022, Icarus. [4] Hsu et al., 2022, Nat. Astron. [5] Grott et al., 2019, Nat. Astron. [6] Nakamura et al., 2023, Science. [7] O'Brien et al., 2005, Icarus. [8] Brown et al., 2002, Nature.

DESTINY+計画の進捗とサイエンス

○荒井 朋子¹, 小林 正規¹, 石橋 高¹, 吉田 二美^{2, 1}, 木村 宏¹, 平井 隆之¹, 山田 学¹, 岡本 尚也¹, 秋田谷 洋¹, 千秋 博紀¹, 和田 浩二¹, Ralf Srama³, Harald Kruger⁴, 佐々木 晶⁵, 藪田 ひかる⁶, 石黒 正晃⁷, 渡部 潤一⁸, 伊藤 孝士⁸, 大坪 貴文⁸, 大塚 勝仁⁹, 阿部 新助¹⁰, 中村 智樹¹¹, 廣井 孝弘¹², 中村メッセンジャー 圭子¹³, 小松 睦美¹⁴, 関口 朋彦¹⁵, 浦川 聖太郎¹⁶, 諸田 智克¹⁷, 紅山 仁¹⁷, 橘 省吾¹⁷, 三河内 岳¹⁷, 野口 高明¹⁸, 金田 英宏¹⁹, 小松 吾郎^{20, 1}, 出村 裕英²¹, 平田 成²¹, 伊藤 元雄²², 山口亮²³, 松浦周二²⁴, 巽 瑛理²⁵, Sean Marshall²⁶, 矢野 創²⁷, 吉川 真²⁷, 尾崎 直哉²⁷, 山本 高行²⁷, 豊田 裕之²⁷, 西山 和孝²⁷, 今村 裕志²⁷, 高島 建²⁷

¹千葉工業大学, ²産業医科大学, ³University of Stuttgart, ⁴Max Planck Institute, ⁵大阪大学, ⁶広島大学, ⁷ソウル大学, ⁸国立天文台, ⁹東京流星観測網, ¹⁰日本大学, ¹¹東北大学, ¹²ブラウン大学, ¹³ExLabs, ¹⁴埼玉県立大学, ¹⁵北海道教育大学, ¹⁶日本スペースガード協会, ¹⁷東京大学, ¹⁸京都大学, ¹⁹名古屋大学, ²⁰ダヌツィオ大学, ²¹会津大学, ²²JAMSTEC, ²³国立極地研究所, ²⁴関西学院大学, ²⁵カナリア天体物理研究所, ²⁶Arecibo Observatory / Univ. of Central Florida, ²⁷JAXA

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

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

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

Tomo-e Gozen と MU レーダーおよび可視分光による「ふたご座流星群」の同時観測

○長谷川まり¹, 野中康輝¹, 阿部新助¹, 大澤亮², 酒向重行², Johan Kero³, Daniel Kastinen³,

西村耕司⁴, 中村卓司⁴, 藤原康德⁵, 渡部潤一⁶

¹ 日本大学大学院理工学研究科, ² 国立天文台,

³ 東京大学大学院理学系研究科 附属天文学教育センター, ⁴ Swedish Institute of Space Physics,

⁵ 京都大学生存圏研究所, ⁶ 国立極地研究所, ⁷ 日本流星研究会

地球大気圏に流入するメテオロイドの中で大多数を占める直径数 10 μm – 数 100 μm の微小メテオロイドのサイズ分布は明らかになっていない. Brown et al. (2017) によって Radar Cross Section (RCS) と流星等級の関係が示唆されており, Ohsawa et al. (2020) による MU レーダーと Tomo-e Gozen を用いた流星の同時観測から, 6 等級より暗い流星でも同様の傾向が得られ, 質量分布が示されている. いずれも散在流星をターゲットとしており, 流星群での傾向は未だ分かっていない. そのため本研究は, 電波(周波数: 46.5 MHz) と光学(波長: 400-800nm) の異なる 2 つの波長を用いた観測から「ふたご座流星群」のサイズ分布の導出と, 分光スペクトルデータを加味した流星ヘッドエコーのメカニズムの理解を深めることが目的である.

京都大学生存圏研究所が所有する MU (Middle and Upper Atmosphere) レーダーと東京大学木曾観測所の口径 1.05m シュミット望遠鏡搭載の Tomo-e Gozen カメラを用いた同時観測を「ふたご座流星群」の極大日時を含む 2022 年 12 月 14 日 – 15 日の計 14 時間実施した. MU レーダーでは, 散在流星 6,036 個, ふたご座流星群 180 個が検出され, 2022 年 12 月 14 日において MU レーダーと Tomo-e Gozen で同時観測が成立したふたご座流星群は 28 個であった. 2022 年および 2020 年の観測からふたご座流星群の RCS - 等級関係と質量分布関数および分光スペクトルと比較を報告する.

参考文献:

[1] Brown et al. (2017) “Simultaneous optical and meteor head echo measurements using the Middle Atmosphere Alomar Radar System (MAARSY): Data collection and preliminary analysis”, *Planetary and Space Science* 141, 25-34.

[2] Ohsawa et al. (2020) “Relationship between Radar Cross Section and Optical Magnitude based on Radar and Optical Simultaneous Observations of Faint Meteors”, *Planetary and Space Science* 194, 105011.

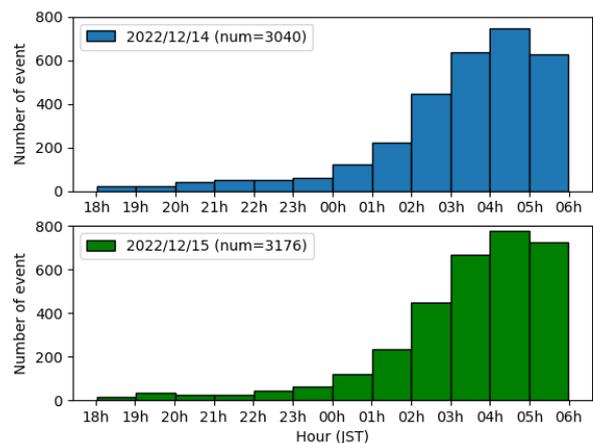


図 1 MU レーダーにおける時間帯別観測数

2010 XC15の測光および偏光観測 ——E型地球接近小惑星ペアの発見

○ 紅山 仁¹, 酒向 重行¹, 大塚 勝仁², 関口 朋彦³, 石黒 正晃⁴, 黒田 大介⁵, 浦川 聖太郎⁵, 吉田 二美^{6,7}, 匠 あさみ^{8,9}, 前田 夏穂¹⁰, 高橋 隼¹¹, 高木 聖子¹², 齊藤 大晶¹², 中岡 竜也¹³, 斎藤 智樹¹¹, 大島 誠人¹¹, 今澤 亮¹³, 鍵谷 将人¹⁴, 瀧田 怜¹

¹ 東京大学, ² 東京流星観測網, ³ 北海道教育大学, ⁴ ソウル大学校, ⁵ 日本スペースガード協会, ⁶ 産業医科大学, ⁷ 千葉工業大学, ⁸ 国立天文台, ⁹ 放送大学, ¹⁰ 神戸大学, ¹¹ 兵庫県立大学, ¹² 北海道大学, ¹³ 広島大学, ¹⁴ 東北大学

二つの小惑星が互いに重力束縛された二重小惑星はその特徴を利用して他では難しい質量密度の推定を可能にするユニークな天体である[1]。太陽系小天体の物理特性を知る上で格好の対象である二重小惑星は地球接近小惑星の15%の割合を占め、決して少数派ではないことが知られている。重力束縛されていないが類似した軌道を持つ天体を小惑星ペアという。地球接近小惑星における二重小惑星の存在割合、二重小惑星の進化経路を考えると地球接近小惑星ペアも数多く存在することが期待されるが、これまでに5例しか報告されていない[2-6]。これは惑星との近接遭遇により軌道が比較的容易に変化してしまうという地球接近小惑星の特徴を反映した結果と考えられている。これまでに観測および理論の両面から数多くの研究がなされているものの、二重小惑星および小惑星ペアの形成機構は完全に理解されていない。中でもわずかに5例しか報告されていない地球接近小惑星のペアに関する理解は乏しく、その発見自体に大きな意義がある。

我々は地球接近小惑星ペアの形成機構に関する知見を深めるべく、これまでに発見された約30,000天体の地球接近小惑星の中から軌道が類似した1998 WT24-2010 XC15というペア候補を見出した。そして2022年12月下旬に微小小惑星2010 XC15 (推定直径約100 m)が地球に対して地球、月間距離の二倍の距離まで接近し観測好機を迎えることに着目し、国内4つの望遠鏡を用いた観測キャンペーンを実施した。連続測光観測から、2010 XC15の自転周期が数時間から数十時間であると推定した。可視光4バンドの反射スペクトルは1998 WT24のスペクトルとよく一致しており、2010 XC15がE、M または P 型小惑星であることが示唆された(図)。国内3地点で行った可視偏光観測から、2010 XC15の直線偏光度は幅広い位相角範囲で数%程度と求められた。我々は軌道要素、可視光反射スペクトル、偏光度の類似性から、1998 WT24と2010 XC15は6例目かつ初の E 型地球接近小惑星ペアであることを発見した。1998 WT24の丸みを帯びた形状および周期3.7時間の高速自転[8]から、二天体の成因は母天体の自転破壊現象であると考えられる。1998 WT24および2010 XC15が地球接近小惑星では数%程度しか存在しない E 型小惑星であることから母天体は内側メインベルトまたはハンガリア群由来であると推測される。

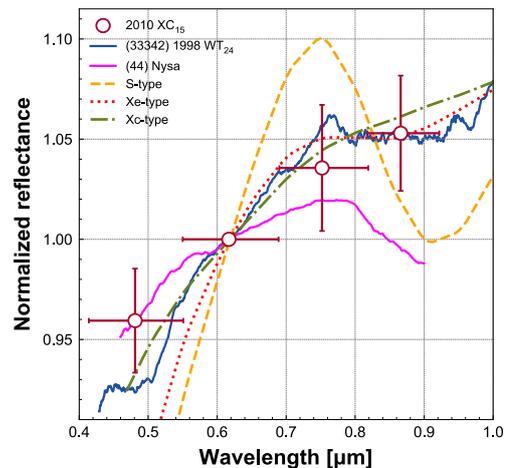


図. 2010 XC15の可視反射スペクトル。1998 WT24や E 型小惑星のプロトタイプ Nysa と類似した反射スペクトルをもつことがわかる。[7]より引用。

参考文献

- [1] Pravec et al. 2010, Nature, 466, 1085. [2] Ohtsuka et al. 2006, A&A, 450, L25. [3] Ohtsuka et al. 2007, ApJL, 668, L71. [4] de la Fuente Marcos & de la Fuente Marcos 2019, 453, 1288. [5] Moskovitz et al. 2019, Icarus, 333, 165. [6] Fatka et al., 2022, MNRAS, 510, 6033. [7] Beniyama et al., 2023, ApJ, in press. [8] Busch et al., 2008, Icarus, 195, 614.

彗星核からの氷の昇華による小惑星形成:公転軌道要素が水氷の昇華に与える影響

○安田 匠¹、三浦 均¹

¹名古屋市立大学大学院理学研究科

近年、リュウグウの起源として、氷と岩が混在する彗星核から氷のみが昇華し、残った岩石が集積する事によりリュウグウが形成されたという「彗星起源説」が提唱された [1, 2]。三浦ら [3] は彗星起源説に基づく理論モデルを提案し、多孔質な彗星核からの氷の昇華に要する時間、及び岩石の集積に伴う自転速度の加速を理論的に算出した (以下、三浦モデルと呼ぶ)。その結果、典型的な彗星核の物理量を初期条件として想定すると、氷は数万年程度で昇華し、その過程で自転速度が独楽型形状を獲得するに足る値まで上昇しうることを示した。三浦モデルは彗星核内部の温度分布を考慮していなかったが、我々は彗星核が表面から太陽放射によって加熱されることを想定し、内部の温度分布の時間変化を考慮した数値モデルを開発した。この数値モデルでは彗星核が太陽を中心とした円軌道上を公転していると仮定しており、彗星核が受ける太陽放射エネルギーは一定値としていた。しかし、同様の過程を他の彗星核に適用するには、リュウグウのような円に近い公転軌道だけでなく、より多様な楕円軌道上を想定する必要がある。そこで、本研究では彗星核が楕円軌道上を公転運動することを想定し、太陽放射エネルギーの時間変化を考慮した数値計算を行った。

小惑星の母天体として、水氷と岩塊からなる球状の多孔質な彗星核様の天体を考えた。天体内部の構造が球対称であると仮定し、熱伝導方程式を解いて温度分布を求め、母天体内部の水蒸気圧分布を導出し、氷の体積割合の時間変化を計算した。この際、氷の体積割合が減少 (氷が昇華) して空隙率が初期値よりも増加した場合は、初期空隙率と等しくなるまで母天体全体が収縮すると仮定した。この母天体が太陽を焦点の1つとする楕円軌道を公転していると考え、太陽からの距離を計算し、天体表面における太陽放射によるエネルギーの供給量を決定した。このエネルギー供給と天体表面からの熱放射によるエネルギー損失を境界条件とした熱伝導方程式を数値的に解くことで内部の温度分布の時間変化を求めた。熱伝導方程式では、母天体内部での水氷の相変化による潜熱を考慮した。この数値モデルの計算例として、近日点距離が 1 au、遠日点距離が 4 au、離心率が 0.6 である軌道を周期 4 年で公転する場合について計算を行った。この条件では、氷の昇華は主として母天体が太陽に接近する時に大きく進行し、それ以外の時にはほとんど氷が減少しないという結果になった。また、周回数が増えるごとに、一度の接近で昇華する氷の量が減少していく傾向も確認された。講演では、軌道要素を変化させた場合の母天体が辿る経過の違いについて議論したい。

References

- [1] E. Nakamura et al. In: *Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci* 95.4 (2019), pp. 165–177.
- [2] C. Potoszil et al. In: *Astrobiology* 20.7 (2020), pp. 916–921.
- [3] H. Miura et al. In: *ApJL* 925.2 (2022), p. L15.

飛翔体搭載の紫外線撮像装置の迷光抑制に関する研究

○松本樹希¹、鈴木雄大²、吉岡和夫¹

¹東京大学、²JAXA 宇宙科学研究所

カメラや分光器などの内壁や光学素子で反射・散乱し、設計意図とは異なる経路で検出器に到達する光を迷光と呼ぶ。迷光は画像の SN 低下につながるため、光学装置の開発においては適切に制御・抑制する必要がある。

われわれは、欧州との協力で長周期彗星の近接探査をおこなう Comet Interceptor Mission (CI) に参加し、彗星の水素コマの輝線を観測する装置 Hydrogen Imager (HI) を開発している CI/HI は彗星の水素輝線 (Lyman-alpha: 121.6nm) の観測を目的としており、太陽のような光量の多い天体が発する紫外線は迷光源になり得る。視野外の明るい光源が迷光として検出される可能性は、反射面での反射率と光学設計に依存する。そのため本発表では、CI/HI における 1) 鏡筒内壁での反射率を低減させるための表面処理の評価実験と、2) 迷光路の把握と鏡筒設計の最適化のための光線追跡について議論する。

1) では、以下の要件を満たすことを期待して 3 通りの表面処理基板を用意し、実験結果をもとに最適なものを選定した。具体的な要件として、低反射率と低散乱性に加え、表面帯電を防ぐための電気伝導性と、長期間のミッションを想定した放射線耐性が求められる。さらに入手性と加工性の高さを考慮し、3 通りの黒色処理を施した基板を制作した。具体的には、低温黒色クロム、黒クロム、黒無電解ニッケル (梨地加工) の3つである。本研究ではこれらの基板に対して紫外線の反射率と散乱特性を調べた。

実験装置における光量の不足と検出器位置のずれに起因する不具合を解消するために、反射率と散乱特性を定量的に評価する手法を考案した。まず、反射率が既知の鏡を黒色板と同じ治具上に設置することで、幾何学的に同じ条件のもとで測定した鏡と黒色板との相対反射率を評価した。さらに、光量が最大となるように検出器の角度を微調整し、適切な位置に設置した。

2) では、CI/HI の視野外にある光源からの光が、鏡筒内壁で複数回反射して検出器に到達する経路と割合を具体的に計算する。さらに、飛翔体搭載時に飛翔体本体 (親機) の外壁表面 (ブラックカプトン) が、CI/HI の浅い視野角に位置することがわかっているため、外壁表面での反射光の影響も評価する。

本発表では、実験をもとにした表面処理の反射率と光線追跡の結果をもとに CI/HI の迷光抑制の最適化について議論する。より信頼性の高いシミュレーションの構築のために、黒色板の反射率測定の実験結果を確認し、それらの実験結果を反映した光学追跡を行う。

次世代小天体サンプルリターンミッションと深宇宙軌道間輸送機に関する活動

○佐伯孝尚¹, 津田雄一¹, 森治¹, 高尾勇輝², 菊地翔太³, 黒川宏之⁴, 岡田達明¹,
 嶋生有理¹, 深井稜汰¹, 坂谷尚哉¹, 田中智¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²九州大学, ³国立天文台, ⁴東京大学

小惑星探査機「はやぶさ2」は、小惑星「リュウグウ」における2回のタッチダウンによって採取したサンプルの入った再突入カプセルを2020年12月6日に地球に帰還させた。サンプルは現在日本だけでなく世界中で分析が行われている。このはやぶさ2の成功により、我が国の未知小天体サンプルリターン探査技術が世界をリードしていることを示すことができた。それとともに、サンプル分析で得られる成果が膨大であることから、サンプルリターン探査の有用性が改めて認識され、今後の日本の太陽系探査の重要な形態でありつづけることが予想される。

このような状況の中、現在 JAXA 宇宙科学研究所のワーキンググループ(WG)の活動として、次世代小天体サンプルリターンミッションの検討が進められている。はやぶさ2に続く未知小天体サンプルリターン探査は、はやぶさ2をより発展させたミッションにする必要がある。理学的な観点からは、イトカワ(S型)、リュウグウ(C型)とは異なるスペクトルタイプでより始原的な天体を探査することが求められる。また、工学的には、1)より遠くへ、2)より自由に、3)より高頻度に というキーワードを設定し、探査システムの検討を実施している。1)については、日本が未経験である“木星圏”の飛行を実現することを目指しつつ、2)、3)においては複数探査機システムを導入し、複数ミッションで共通的に利用可能な深宇宙輸送機(DS-OTV)と、ミッション特化の探査機を組み合わせた探査システムの検討を進めている。このようなシステムによって、太陽系探査の高頻度化と予見性の確保を行うだけでなく、現在進歩してきている超小型機の活動とも親和性を確保することが可能であり、太陽系探査の裾野を大きく広げることができると考えている。

WGにおいて理工一体のチーム内やコミュニティでの議論を重ねた結果、木星族彗星289P/Blanpain等为目标天体として検討を進めることとなった。現在まで、理学チームにおいてミッション目標や観測機器の具体化を行うとともに、工学チームでは往復軌道の成立性や、探査システムの概念検討を進めてきている。

発表では、現在のWGの活動状況を中心に示す。特に上記の探査システムの概要について現在までの検討状況を共有し、小天体サンプルリターンだけでなく、日本の太陽系探査の将来についての議論を促したい。

火星衛星探査計画 MMX の進展と科学 2023

○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、白井寛裕²、和田浩二⁹、横田勝一郎¹⁶

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

2024 年の打ち上げを目途とする火星衛星探査計画 MMX の開発は、現在、制作試験段階 (Phase-D) のさなかにある。Phobos からのサンプルリターンをミッションの基軸とする MMX の主たる科学目的は、第 1 に火星衛星の起源を明らかにし、内外太陽系接続領域 における惑星形成と物質輸送の過程に制約を与えること、第 2 に火星圏変遷の駆動メカニズムを解明し、火星圏進化史に新たな知見を与えることである。そのための一連の科学観測装置 (望遠カメラ TENGOO、可視多バンド広角カメラ OROCHI、近赤外分光計 MIRS、ガンマ線・中性子分光計 MEGANE、レーザ測距計 LIDAR、イオン質量分析計 MSA、ダストモニタ CMDM、ローバー IDEFIX ならびに二つのタイプの試料採取装置 コアサンプラ C-SMP、気流式サンプラ P-SMP 等のフライトモデル (FM) 開発と試験、Deimos および火星観測を含む科学運用計画や地上データ処理系等の具体化が、運用訓練と併せて進んでいる。

科学観測装置は、FM 開発に至るまでの試験を経て、一部に当初設計から仕様等の見直しが行われたものの、科学目標の達成に求められる性能が現時点でほぼ達成されている。今後の FM 開発によって、これをさらに盤石にする。サンプル分析に向け、キュレーションシステム要求の策定を進めた。はやぶさ 2 の経験をもとに、キュレーションと初期分析の手順を整理し、初期分析にスムーズに移行できる設備と体制を整備する。MMX による近接観測結果とサンプルの特性を紐づけるために、探査機に搭載する可視、近赤外、およびラマン分光装置ならびに試料分析計と同等の性能を持つ装置を本システムに導入し、地上でのガス成分の quick analysis (回収直後に実施) やバルク試料の pre-basic characterization を行う。

MMX は近接観測によってサンプル分析とは独立に火星衛星の起源に制約を与える。はやぶさ 2 のその場分光観測と試料分析の結果の対比や、複数の火星衛星の形成シナリオに依存する火星衛星物質の組成などの知見・予測を念頭に、近接観測データを正しく解釈するための検討が進んでいる。最終的な着陸点は、地形、地質、分光特性など近接観測データに基づいて決定する。着陸への工学・理学要求を整理し、科学運用と併せて着陸点選定の訓練にも着手しつつある。

The Icy Origins of the Martian Moons

火星衛星の起源：氷天体衝突説の検討

Courteney Monchinski¹, Hidenori Genda¹, Shigeru Ida¹

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

The origins of the Martian moons, Phobos and Deimos, are still heavily debated. There are currently two leading theories surrounding their origin: giant impact or asteroid capture. While asteroid capture theory can only explain their observed physical characteristics, the giant impact theory can only explain the moons' orbital characteristics. However, it is extremely difficult to capture two objects into the orbits that the moons are currently in, and there is not enough tidal dissipation to move them into their current orbits (Rosenblatt, 2011). Previous giant impact studies can create an impact-generated disk large enough to recreate the moons in their current positions, but this large disk also creates many massive moons within Phobos' orbit, which later would need to fall back to Mars (Craddock, 2011; Rosenblatt and Charnoz, 2012; Citron et al., 2015). This study proposes that the extra disk mass could be abolished by an impactor containing mostly ice, allowing some mass to vaporize on impact and escape the system (Ida et al., 2020). The moons' compositions, density, and possible porosity can result by adding ice to the system, as the vaporization of water will also help to protect carbonaceous materials that partly form the moons from being altered during impact, as well as bring water to the Martian system. The water would also be key for forming Deimos beyond the synchronous orbit, as the interaction between dust and vapor would help extend the impact disk (Ida et al., 2020; Woo et al., 2022). For this study, Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH) simulations of giant impacts with impactors of varying ice content were performed to create an impact-generated disk, from which Phobos and Deimos would form. We used the Tillotson Equations of State to model both the iron-rock Mars and the water-ice and basalt impactor. Initially using previous studies as a framework, we started with an impactor $\sim 3\%$ the mass of Mars, $\sim 10^5$ total SPH particles, impacting at escape velocity at an angle of 45 degrees, with compositions of the impactor varying from 0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, and 1.0 fraction of water-ice mantle to basalt core. From the SPH simulation data, we determined each particle type (planet, disk, or escape) based on orbital and energy parameters. The final disk masses were compared to understand the effect of the impactor's water-ice content on the system. We found that, compared to previous studies, the disk mass produced by an impactor with any amount of ice was larger. We found there were several reasons this was the case, including lower disk temperatures and lower material strength of the impactor. We also found that the disk mass decreased with increasing basalt content of the impactor, but the masses were still larger than from the complete basalt impactor. Therefore, the moons could possibly be formed from an icy impactor less massive than previous studies' completely rocky impactors, as more of the impactor would stay in the disk compared to the rocky impactor. There is also a possibility that less water-ice is needed in the impactor to make sure that water-ice ends up in the impact-generated disk.

Phobos と Deimos の起源: 一時捕獲天体のガス抵抗による捕獲

○松岡 亮・倉本 圭

(北海道大学大学院理学院 宇宙理学専攻)

火星の衛星 Phobos と Deimos が炭素質小惑星に類似したスペクトル・アルベドを有することは、両衛星が微惑星を捕獲したものであるとする捕獲説を支持する。捕獲のためのエネルギー散逸機構は、星雲ガスが重力束縛されて生じる原始大気によるガス抵抗が有望視される(抗力捕獲説)。抗力捕獲説は、衛星形成を火星集積の中に位置づける自然なシナリオであり、このシナリオが正しい場合、両衛星は地球型惑星集積の直接の物証となる可能性がある。このことは、火星衛星探査計画 (MMX) の動機の一つとなっている。

抗力捕獲説には、火星の両衛星の軌道傾斜角 i が小さいこと ($i < 2^\circ$) を説明できないように見えるという問題がある。本研究では、この問題に対し、火星 Hill 圏に長期間滞在するにもかかわらず完全に束縛されていないという一時捕獲状態に着目した。一時捕獲は、火星に永久に束縛されていないという点から、捕獲とは区別される。

Higuchi & Ida (2017)によれば、一時捕獲は火星 Hill 圏に進入する微惑星のうち 0.02% を占め、火星と微惑星の質量比を考慮すると珍しくない現象である。また、Sasaki (1990)では、原始大気を伴う火星に一時捕獲された天体が、比較的遠方で捕獲を達成しうることが示されている。この例は、エネルギー散逸率が低い状態で捕獲を達成するため、火星に著しく接近して捕獲される場合と比較して 2—3 桁長い衛星寿命となる。

しかしこれまで、一時捕獲を経由した捕獲は系統的に調べられておらず、その条件や捕獲率、軌道傾斜角分布はわかっていない。本研究では、一時捕獲を経由する効力捕獲シナリオの検証を目的として、一時捕獲天体の捕獲率、捕獲条件、軌道傾斜角分布を解析的・数値的に調べた。数値計算は、Lagrange 点からの低速進入という初期条件で、大気ガス抵抗を含めた円制限三体問題を解いた。大気モデルとして静止大気の密度分布を想定し、火星の自転軸傾斜角は 0 であるとした。

本発表では、一時捕獲天体の捕獲が珍しくないこと、一時捕獲を経由して捕獲された衛星の軌道傾斜角が小さいことを数値的・解析的に示し、一時捕獲を経由する捕獲が両衛星の分光学的特徴と軌道特徴の両方を自然に説明する形成シナリオであることを述べる。また、このような捕獲が潜在的に可能である微惑星の前捕獲史についても議論する。

クレーター年代学に基づく Phobos 捕獲年代決定可能性の評価

○内田雄揮^{1,2}、豊川広晴^{2,3}、白井寛裕²

¹ 東京大学、² JAXA 宇宙科学研究所、³ 総合研究大学院大学

火星衛星探査計画 MMX で解明を目指す Phobos の起源説の 1 つに、小惑星が火星引力に捕獲されたとする小惑星捕獲説がある [Kuramoto *et al.* 2022, EPS]。Phobos の起源が捕獲説によって説明される場合、捕獲年代の制約は火星への天体衝突史への理解に直結する。そこで筆者らは Phobos 火星圏捕獲年代の決定を目指し捕獲年代を考慮したクレーター年代関数を導出した [内田ほか 2022, 惑星科学会]。その結果、クレーター数密度 $N(D>1\text{km}) \sim 10^{-2}\text{-}10^{-1} \text{ km}^{-2}$ の地質から MMX が試料採取しその放射年代が得られた場合、捕獲年代の決定に繋がること示された。

一方、Phobos は天体衝突による 2 次的な表面更新の影響が大きい天体である。例えば、最大の直径 ($D \sim 9\text{km}$) を持つスティックニークレーター (Stickney, 310°E , 0°N) は周辺のボルダーサイズやグループの分布に基づく研究から形成時期が 150 Ma と新しく、またその規模の大きさから、Stickney 飛散物が全球的に 30 m 以上堆積したとする推定がある [Ramsley & Head *et al.* 2021, SSR]。こういった表面更新による影響を排除するために、リモートセンシングによるクレーター年代学とサンプル分析による放射年代測定では表面更新の堆積層より層序が下の古い地質について着目する必要がある。そこで本研究では、Phobos の 2 次的な表面更新の影響を考慮し MMX 着陸候補地点 (= 試料採取地点) の提案を目指す。そのために、表面更新の堆積層が薄い領域を特定し、かつ $N(D>1\text{km}) \sim 10^{-2}\text{-}10^{-1} \text{ km}^{-2}$ の領域を明らかにした。

まず Phobos 赤道から $\pm 30^\circ$ の低緯度領域について火星 (0°E) および反火星 (180°E) 側、先進 (270°E) および後進 (90°E) 球側の $60^\circ \times 60^\circ$ 領域と、Stickney 内側の計 5 つの範囲についてクレーターサイズ頻度分布 (CSFD) を求めた。次にそれぞれの領域の CSFD について、約 1 km を閾値としその大小で Phobos における年代ごとの CSFD モデルであるクレーター生成関数 [Schmedemann *et al.* 2014 PSS] をフィッティングした。CSFD のうちクレーター消去の効果を比較的受けやすい 1 km 未満へのフィッティングからは、表面更新の堆積層が他の領域より相対的に薄い領域を調査した。そして比較的消去されにくく 2 次クレーターが少ない閾値以上の大きな CSFD からクレーター数密度 $N(D>1\text{km})$ を導出し、捕獲年代を制約可能な着陸候補地点を調べた。

その結果、反火星側の低緯度領域は他の領域より 1 km 以下の CSFD が 1.9 倍以上あった。そのため反火星側の低緯度領域は表面更新による消去の影響が小さく、他の領域より相対的に表面更新の堆積層が薄い場所であることが考えられる。加えて、反火星側の低緯度領域に $N \sim 10^{-2}\text{-}10^{-1} \text{ km}^{-2}$ となる領域が確認された(図 1)。

この領域は Phobos の赤道から $\pm 30^\circ$ の低緯度領域にあり、着陸に適していることが考えられる。この領域からの試料採取により、捕獲説の場合における捕獲年代の決定が期待される。

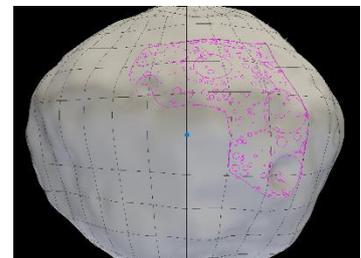


図1 捕獲年代決定可能性のある着陸候補領域: 反火星(180°)側。中央の青い点は 180°E , 0°N

**Numerical Modeling of the Evolution of Water Ice inside Phobos
(フォボス内部の水氷の進化に関する数値モデリング)**

○鎌田有紘¹, 古林未来¹, 黒田剛史¹, 寺田直樹¹, 中川広務¹, 宮本英昭²

¹ 東北大学 大学院理学研究科 地球物理学専攻

² 東京大学 大学院工学系研究科 システム創成学専攻

○A. Kamada¹, M. Kobayashi¹, T. Kuroda¹, N. Terada¹, H. Nakagawa¹, and H. Miyamoto²

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

² Department of Systems Innovation, School of Engineering, The University of Tokyo

Phobos, one of the Martian moonlets, has been the focus of long-standing scientific investigation, particularly regarding its origin (a giant impact or a captured asteroid). In this study, we investigated the long-term evolution of the surface water flux and internal water content of Phobos over a period of 4.3 billion years using a newly developed 3-dimensional heat and water transport model called ASTRA (Asteroid and Satellite internal water TRANsport model). We implemented a) thermal diffusion including reflected visible light and infrared radiation from Mars, b) water transport including adsorption of water vapor on rock surfaces and condensation of water vapor, and suppressed permeability due to the surface dust layer, c) variations in the eccentricity and obliquity of Mars (Fanale and Salvail, 1990), d) time-dependent solar insolation (Gough, 1981), and the falling orbit of Phobos (Szeto, 1983). Simulations were performed for grain particle sizes between 1 and 1000 μm , adsorption coefficients between 1 and 100 kg m^{-3} , initial water contents of 0.1, 1, and 10 wt.%, and surface dust layer thickness up to 1cm. Following Fanale and Salvail (1990), our model assumed the simple obliquity and eccentricity cycles and the Tharsis loading event before 3.5 billion years ago.

We found that without the effect of water vapor adsorption, situations with initially depleted water content situations of 0.1 wt.%, assuming the giant impact hypothesis, would imply a complete loss of water from Phobos several billion years ago. However, considering the effect of water vapor adsorption, even with a limited initial water content of 0.1 wt.% and a relatively large grain size of 100 μm , water can be retained on Phobos to the present day. There is a possibility that a water flux of up to $1.32 \times 10^{-2} \text{ g s}^{-1}$ could still be continuously released into space. In addition, Phobos with an initially high-water content more than 1 wt.%, assuming captured asteroid, could still have subsurface condensed water ice in the high latitudes at a depth of several kilometers below. We also found that the influence of the surface dust layer on the permeability is limited and does not induce significant changes, especially for realistic dust thicknesses up to 1 cm. Water-related molecules escaping from the interior ice of Phobos could form a gas torus with a peak flux of more than $10^3 \text{ ions cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ at a water content of 0.1 wt.% and highly adsorptive rock surfaces, allowing the outgassing water flux to be measured by MSA in the MMX mission. This study emphasizes the importance of evaluating various parameters such as grain size, specific surface area, and dust layer thickness, providing important insights for future exploration missions such as MMX. The combination of numerical modeling and in-situ observations will reveal whether Phobos was formed by a giant impact or a captured asteroid.

MMX 搭載カメラ TENG00/OROCHI 地上光学試験手法

—フラット特性および迷光検定手法

○村上泰志¹, 辻井秀斗¹, 鈴木秀彦¹, 亀田真吾², 尾崎正伸³, 塩谷圭吾⁴, 神山徹⁵, 布施綾太⁶,
合田雄哉⁷, 村尾一⁷, 坂谷尚哉⁴, 宮本英昭⁸, 吉岡航輝⁸, 佐藤理桜², 西尾郁哉²

¹ 明治大学, ² 立教大学, ³ 国立天文台, ⁴ JAXA, ⁵ 産総研, ⁶ 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻, ⁷ 明星電気, ⁸ 東京大学大学院工学系研究科システム創生学専攻

MMX (Martian Moons eXploration) 探査機には TENG00 (望遠カメラ) と OROCHI (多波長広角カメラ) の2つの光学カメラが搭載され、火星衛星の表面構造および物質分布の情報を得ることで、サンプルリターンの採取領域の決定に必要な情報を提供したり、含水鉱物や有機物の存在を明らかにしたりすることを目標としている[1]。

打ち上げ前の地上光学試験の項目は多岐にわたるが、過去のミッションの類似の機器に対して適用されてきた手法では十分に性能を評価できない項目もある。本研究では光学系の特性による周辺減光による感度の非一様性と素子の各画素がもつ感度のばらつき (画素間相対感度) を独立に計測し、それらの結果を統合することで総合的なフラット特性を得る方法を試みた。具体的には周辺減光特性を自作の積分球により作り出した一様面光源の像を視野内で移動させることにより取得した画像を複数枚合成することにより取得し、広帯域光源と拡散板を組み合わせた治具により測定した画素間相対感度と統合することで総合フラット特性を得た。また、視野内および視野外の光源が原因で生じる迷光は1%程度の吸収帯を検出することを目的とする OROCHI にとっても、精密な形状モデルの作成に必要なデータを取得するために必要な TENG00 にとっても十分に抑制すべき雑音である。本研究ではカメラに対しあらゆる方位、入射角で光束を照射可能な迷光光源装置を製作した (写真)。この装置による計測結果を用いると迷光源となる面光源が任意の分布で存在した際にどの程度の迷光成分が画像データに重畳するかを定量的に推定することが可能である。

本発表では地上光学検証試験の全容について概観するとともに、多波長広角カメラのフラット特性の計測手法及び迷光の検定手法について紹介する。また、模擬カメラによる実験や、エンジニアリングモデル (EM) を用いた実験結果を示しそれら光学試験の検証精度について報告する。



図 1, 迷光光源装置の全体像

[1] Kameda, Shingo, et al. *Earth, Planets and Space* 73 (2021): 1-14.

戦略的火星探査：国際宇宙探査と連動した火星 宇宙天気・気候・水環境探査(MIM)計画の現状報告

○関 華奈子¹, 臼井 寛裕², 山崎 敦², 関根 康人³, MACO 計画検討ワーキンググループ²,
火星表層氷分布観測ミッション定義チーム⁴

¹ 東京大学大学院理学系研究科, ² JAXA 宇宙科学研究所, ³ 東京工業大学 ELSI,

⁴ JAXA 国際宇宙探査センター

本計画の目的は、生命生存可能(ハビタブル)惑星成立の条件は何なのか、という人類の根源的な問いに対し、国際協働による火星探査によって挑むことにある。火星は、過去にハビタブルな環境を保持し進化の過程でそれを失った太陽系内天体として、今後の太陽系探査の中で国際的にも重要な探査対象である。火星がハビタブル環境を失った際の大規模な気候変動を引き起こすには、多量の水とCO₂大気が地下に貯蔵もしくは宇宙空間に流出して表層環境から取り除かれる必要がある。その中で、過去の激しく変動する太陽条件下での宇宙空間への水や大気の散逸機構の解明が、喫緊の要請となっている。また、アルテミス計画など国際宇宙探査が活発化する中、火星の放射線環境や気象の理解が人類のフロンティア拡大の関連から重要課題となっている。一方で、将来の有人探査に向けた事前探査としてのMIM計画の達成目標は、基地の候補地となりうる中低緯度域の表層から深さ10m以内に存在する氷床のマッピングであり、そのための主要搭載機器は合成開口レーダー(SAR)、衛星軌道は高度約300kmの太陽同期低軌道で高軌道傾斜角に設定されている。こうした軌道とSARの特性を活かして、科学と探査の相乗効果を高めるため、本計画では、水の貯蔵と散逸過程に着目し「惑星大気進化に重要な大気上下結合、宇宙環境影響の理解」と「地下浅部を含めたH₂Oの動態と揮発性物質の起源の制約」に着目した科学観測を実施し、ハビタブル惑星環境の持続性の理解に貢献することを目指している。この目的実現のため、国際 Mars Ice Mapper (MIM) 計画において、周回機に搭載する2つの科学機器パッケージと小型着陸実証機を担当することを計画している。

国際宇宙探査と連携した戦略的火星探査の中で本計画は、工学的には次の本格着陸探査に向けた探査技術実証を達成するという目的も持つ。国際宇宙探査と連携した戦略的火星探査の重要なステップとして位置づけられており、我が国の宇宙基本計画の太陽系探査のプログラム化の方針とも合致している。宇宙放射線環境や表層・地下浅部水環境など、将来探査に不可欠な知見を提供することで、人類の活動域拡大にも貢献する計画である。なお、国際MIM計画への日本の貢献については、日本学術会議の未来の学術振興構想に学術研究構想として、日本惑星科学会と地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS)の支持を得て提案されており、本講演では検討の現状についてご報告したい。

MEx/OMEGA で観測された火星高緯度域における 高解像度水蒸気分布

○青木翔平¹、風間暁^{1,2}、今村剛¹、岩中達郎¹、中川広務²、笠羽康正²

¹ 東京大学、² 東北大学

火星では、季節変化に応じた水の循環があることが知られている。夏季において、極域表層に存在する極冠の昇華によって水蒸気が大気中に放出され、子午面循環で冬半球へ輸送される。しかし、このような惑星規模の水循環の理解は進む一方で、局所的な水の輸送はよくわかっていない。そこで、私達は欧州火星探査機 MarsExpress (MEx) に搭載された近赤外分光撮像装置 (OMEGA) の観測データを用いて、水蒸気の高解像度分布の導出を試みている。本研究ではまず、多くの観測データを処理するために、解析アルゴリズムの作成を行なった。水蒸気量、観測ジオメトリ、大気温度、エアロゾル量、地表面アルベドの各パラメータを、想定される範囲の離散的な点において $2.6\mu\text{m}$ の水蒸気吸収帯の計算スペクトルを予め作成し、多次元線形補間することで、観測スペクトルの水蒸気吸収帯の深さから水蒸気量を高速に導出する手法を確立した。次に、同手法を用いて OMEGA の全観測スペクトルを解析した。解析された水蒸気の高解像度水平分布のうち、浅部地下に氷が存在する可能性がある高緯度極域において導出された水蒸気水平分布に着目した。先行研究では、南半球の高緯度域において、蛇状の局所的な水蒸気の分布がみついている (Melchiorri et al., 2009)。本解析結果でも、同様の構造がみられることを確認した (図 1-5)。さらに、南半球夏時の期間において、同地域の高解像度水蒸気水平分布にみられる蛇状構造が時間変動しており、異なる地方時で描像が変化することがわかった (図 1)。本講演では、大気中のエアロゾル量や地表面温度や水量との比較とともに、その変動要因を議論する。

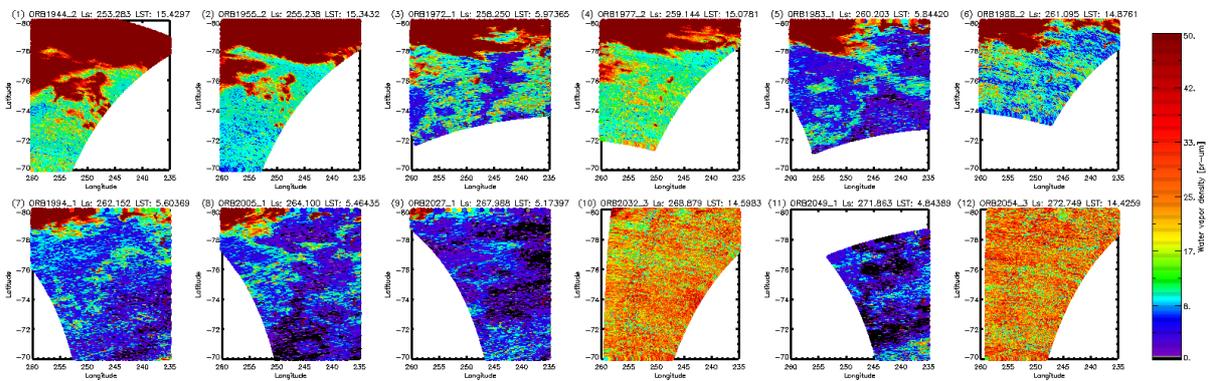


図 1. MarsExpress/OMEGA の観測データから得られた、火星年 27 年における、南緯 70-80 度、東経 235-260 度の南半球夏時 (Ls=253-272 度) の水蒸気水平分布の時間変動。

Discovery of Brain Terrains on Earth, a key for decoding Martian subsurface ice

トリシット ルシ¹, 長谷川 精², 小松 吾郎³, 佐古貴紀², 庄崎弘基¹

¹ ELSI, TokyoTech, ² 高知大, ³ IRSPS, ダヌンツィオ大.

Sub-surface water ice is the target for future human exploration on Mars. For that purpose, patterned grounds (Korteniemi and Kreslavsky, 2013) formed by subsurface ice (Mangold et al., 2004) in the Martian mid-latitudes are the current talking points of the planetary geologists (MDT report 2022). Among the other patterned grounds, Brain Terrain (BT) is the most frequently occurring (Levy et al., 2009), and the RADAR data also confirmed trapped ice beneath these BTs (Levy et al., 2014). Therefore, information about their formation and internal structure is needed to decode the full story regarding the depth of the ice and the volume of the reserve. The only solution for that is the study of their terrestrial analogs and relate it to Mars. However, the BTs were never reported from Earth, because of their bare minimum trough depth, which made it hard to find from the satellite images, and occurrence in the flat terrains made it unrecognizable even from the grounds.

Here, for the first time, we report the presence of BTs through high-resolution images and DEMs from the southern limits of the permafrost regions of north and central Mongolia. We found that these BTs are morphologically different (length of the ridge, width, and depth of the trough) from each other, based on the depth of the permafrost layer. In our preliminary investigation, we were able to make a trench and have a sectional view. This suggested the origin of the BTs are more or less similar to the polygonal landforms, where seasonal melting and thawing produced cracks and ice was trapped as wedges in those cracks. With time, the region in between two cracks broadened and became troughs. Sedimentation from the surroundings on those troughs was congruous to their development and pure ice remained just below those deposited sediments. As a result, we observed seasonal lamination and deposition of finer grained sediments on the troughs. Also, as ice was trapped just below these trough sediments, their seasonal melting kept these sediments moist and possibly more organic rich (we found it darker) than the surroundings. On the surface, we saw higher vegetation (grass in this case) density on those troughs. This discovery opens a window for constraining the relationship between surface topography, subsurface ice distribution, preservation of astrological materials and its formation process.

ナノ秒時間ゲートラマン分光法による火星 Jezero クレーターの古環境推定

○田畑陽久¹, 長勇一郎¹, 湯本航生¹, 森晶輝¹, 日向輝¹, 杉田精司¹, 関根康人^{2,3},
松木篤³, 野路陽平³, 福士圭介³

¹ 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻 ² 東京工業大学 地球生命研究所

³ 金沢大学 環日本海域環境研究センター

火星はかつて表層に液体の水を保持していたことが近年の探査により明らかになった。当時の表層環境を明らかにすべく、2021年に Jezero クレーターに着陸した NASA の火星探査機 Perseverance は、2023年2月にクレーター内の古三角州地域に到達し、時間ゲート型ラマン分光装置などを用いて露頭や岩石のその場化学分析を行っている。水との関連が示唆される古三角州は、周回衛星からの分光観測によりスメクタイトと呼ばれる粘土鉱物が分布していることが報告されている。スメクタイトは層状の粘土鉱物の分類の一種であり、液体の水が存在する環境で生成する。その具体的な鉱物組成 (ex. サポナイト、モンモリロナイト) や層間の陽イオン組成 (ex. Na, K, Mg, Ca) は、水の pH や化学組成を記録している。スメクタイトの非時間ゲートラマン分光分析を行った先行研究では、長時間露光により強い蛍光とともにいくつかのピークが見られることが報告されている。しかしながら、スメクタイトの時間ゲートラマン分光分析を行った研究はまだない。そこで本研究では、Perseverance のラマン分光測定データから Jezero クレーターの水環境を推定することを目的として、独自に開発した模擬 Perseverance 時間ゲート型ラマン分光装置を用いて、層間陽イオン組成を変えたサポナイトとモンモリロナイトのラマン分光分析を行った。

開発した時間ゲート型ラマン分光装置は、波長 532 nm のパルスレーザーを、0.1–40 mJ の強度、3–10 mm のビーム径にて照射し、生じたラマン散乱光をグレーティングにより分光して ICCD カメラにて撮像する。これら装置諸元は Perseverance と同一だが、ビーム径やレーザー強度など一部は可変な設計になっている。時間ゲートと呼ばれる、レーザー照射タイミングと露光時間の制御については、信号発生器を用いてレーザー照射および撮像のタイミングを同期させることで行った。レーザー照射および撮像の信号をオシロスコープを用いてモニターすることにより、露光時間を ± 1 ns の精度で実現可能なことを確認した。

開発した装置を用いて層間陽イオン組成を変えたサポナイトとモンモリロナイトの時間ゲートラマン分析を行った結果、時間ゲートにより蛍光が抑制され、先行研究の非時間ゲートラマン分析では報告がない波数領域にピークが検出された。ピーク形状や中心波長は層間陽イオン組成依存性を示した。この結果は、Perseverance の時間ゲートラマン分光データから Jezero の過去の水化学組成が制約できる可能性を示唆する。

Medusae Fossae Formation における スロープストリークの起源と火星地表面の水素量および熱慣性との関係

○三平舜^{1,2}, Trishit Ruj³, 白井寛裕²

¹東京大学, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³東京工業大学地球生命研究所

火星表層で観測されるいくつかの地形は過去の火星の液体の水の分布や変遷を記録しており、火星水圏分布を理解するうえで重要である。Slope streak は火星斜面に観測される筋状の地形[1]で、現在も尚、新たな slope streak が形成されることが観測されており、現在の火星の水環境を示す地形として注目されている。Slope streak の形成メカニズムについては、液体の水が関与する Wet メカニズム[2, 3, 4]と、ダストなどの細粒物質の斜面降下によって形成されるとする Dry メカニズム[1, 5]が提案されているが、いまだ明らかにはなっていない。Bhardwaj et al. (2017) は、slope streak の全球的な分布が Mars Odyssey に搭載されている中性子分光計によって観測された水素量の高い領域[6]と一致することを報告した。しかし、水素原子の存在が slope streak の形成にどのように影響を与えているのかについては明らかでない。本研究は、slope streak と水素の物理的な関係を明らかにし、その形成メカニズムを解明することを目的としている。

本研究では、火星赤道域に広がる Medusae Fossae Formation (MFF) と呼ばれる地質帯とその周辺領域において、ExoMars に搭載された中性子分光計[7]によって得られた高解像度の水素存在量マップを作成した。また、水素存在量マップ 1 ピクセルに相当する領域を 91 エリア抽出し、各領域の slope streak をマッピングした。91 エリア内で 11,697 個の slope streak を同定し、各エリアの slope streak の密度を測定した。

調査の結果、MFF 周辺地域における slope streak の密度は水素存在量に対して負の相関関係を示すことが明らかとなった。この結果は Bhardwaj et al. (2017) で報告された全球的な slope streak と水素の分布が一致する結果とは逆の関係である。先行研究と比べてより高い空間解像度で局所的に観測した本研究の結果は、slope streak 形成における水素の本質的な役割を示しており、slope streak の Wet メカニズムを支持しない。一方で本研究の結果は、水素の存在が slope streak の形成を阻害している可能性を示唆している。火星全球で水素が豊富に観測される地域は比較的熱慣性の値が高く、高度の低い傾向がある。このような地域は大気中の水蒸気が効率的にレゴリスに吸着することが予想される。また、砂丘に存在する H₂O は粒子間固着力を増加させ、粒子の始動に必要なせん断速度を増加させる働きがある[8]。このことから、本研究で得られた slope streak の密度と水素存在量の間に見られる負の相関関係は、MFF 表層に存在する H₂O がレゴリス間の粒子間固着力を増加させ、slope streak の形成を阻害するためと解釈される。本研究の結果、MFF 周辺地域で見られる slope streak は粒子間固着力の少ない乾燥した地域におけるレゴリスの斜面降下によって形成されると解釈した。

[1] Sullivan et al. (2001) *JGR Planets*, 106 (E10), 23607-23633. [2] Schorghofer et al. (2002) *GRL*, 29 (23), 41-1. [3] Kreslavsky & Head, (2009) *Icarus*, 201 (2), 517-527. [4] Bhardwaj et al. (2017) *Sci reports*, 7(1), 1-14. [5] Lange et al. (2022) *JGR Planets*, 127(4), e2021JE006988 [6] Wilson et al. (2018) *Icarus*, 299 148-160. [7] Mitrofanov I. et al. (2018) *Space Sci Rev*, 214 (5), 1-26. [8] Belly P. Y. (1962) CALIFORNIA UNIV BERKELEY INST OF ENGINEERING RESEARCH.

火星南半球におけるローブ状地形の分布

鈴木 留名¹、小口 高^{1,2}

¹東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、²東京大学空間情報科学研究センター

火星では小規模ローブと呼ばれる舌状の地形が見られる。これらは地球上のソリフラクシオンローブと類似している。ソリフラクシオンローブは土壌水分の凍結融解に伴う緩慢な速度の物質移動によって形成される。火星の小規模ローブは数百万年前に形成され、地球のソリフラクシオンローブとの類似性から地形形成に水が関与した可能性が高いと指摘されている。これまで、火星の小規模ローブは北緯 30 度～北緯 80 度、南緯 40 度～南緯 80 度で調査され、両半球の中・高緯度で発見されている。南半球での分布は、北半球での分布に比べて低緯度に達しており、南北で分布が非対称であると指摘されている。また、小規模ローブの多くがクレーターの内部やその周辺に存在している。小規模ローブに関する既存研究は、北半球を調査したものが多く、南半球を調査したものは少ない。

小規模ローブの分布を明らかにし、形成過程や形成に関与したであろう液体の組成や供給源を推定することは、火星の過去環境やハビタビリティを理解する上で重要である。さらに水や氷の分布指標として検討することで、将来の有人火星探査の資源探査に活用できる可能性がある。本研究では、これまで調査されていない地域を含む南緯 30 度～南緯 80 度の小規模ローブの分布を明らかにし、その分布の要因を考察することを目的とする。

25 cm/pix の解像度を持つ High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) で取得された画像を用いて、解析を行った。画像の選択には Mars Orbital Data Explorer (ODE) を使用し、数値地形モデル (DTM) が作成されている範囲を中心に南緯 30 度～南緯 80 度の画像を抽出した。得られた画像と HiRISE 画像を探索することに特化したアプリケーションの HiView を用いて、表面の特徴を観察した。分布図の作成や解析には、地理情報システム (GIS) のソフトウェアを用いた。

検討の結果、これまで小規模ローブが調査、発見されていた緯度帯よりもさらに低い南緯 30 度台で、小規模ローブの特徴を持つ地形を複数発見した。発見された小規模ローブは、いずれもクレーターの内部に位置しており、先行研究を支持する結果となった。また、小規模ローブの長さ、幅、標高、緯度の各パラメータの間に相関関係があるかを調べたところ、ローブの幅と長さ、標高とローブの幅、緯度とローブの長さの間に相関が認められた。緯度と長さの相関は、火星における小規模ローブの分布に関わってくるため、特に重要と考える。

以上から、南半球では北半球に比べてより低い緯度まで凍結融解作用が活発であった可能性がある。したがって、地形形成環境を規定する要因について、検討する必要がある。

本発表では、火星の南半球に存在する小規模ローブの分布と特徴について、新発見のものを含めて報告する。

アエンデ隕石に対する衝突実験～X線CT撮像によるサブミリメートルサイズの衝突破片の形状と岩石組織

○道上達広（近大）、土山明（立命館大）、ハガーマン・アクセル（ルレオ工科大）、松野淳也（立命館大）、長谷川直（宇宙研）

近年、炭素質小惑星であるリュウグウ、ベヌ表面に多くの岩塊が存在することが分かり、それらの岩塊は天体衝突によって形成された衝突破片である可能性が高い。一般に衝突破片は、物質に依らず同じような形状分布になることが知られており、リュウグウ粒子でも同様の形状分布になっている。しかしながら、過去の衝突実験において、炭素質隕石のように強度の弱い標的に対する衝突実験は、ほとんど行われていない。そこで今回、炭素質隕石であるアエンデ隕石に対して衝突実験を行い、飛び出したサブミリメートル以上の破片の形状と岩石組織をX線CT撮像で調査した。

衝突実験はJAXA宇宙科学研究所で行った。標的の大きさは1-2cmで、弾丸は、直径1mmのアルミナ球と直径0.8mmのガラス球を、それぞれ速度約2.0km/sと約4.0km/sで衝突させた。弾丸の軌道は若干ずれるため、標的に衝突する位置がショットごとに異なり、標的の表層の一部が壊れるものからカタストロフィック破壊まで、様々な壊れ方をした。今回、7shotの実験データを解析した。そのうち、5shotの実験は、Michikami et al. (2023, Icarus, 392, 115371)で既に実施済みで、追加で2shotの実験を行った。Michikami et al. (2023)では、衝突後の最大破片の内部のみをX線CT撮像した。本研究では、残りの0.25mm以上の破片を解像度0.15 $\mu\text{m}/\text{voxel}$ でX線CT撮像した。得られた破片の立体画像データから、プログラムを組んで、各破片(0.41mm以上)の3軸長、コンドリュールの割合を測定した。

解析の結果、Michikami et al. (2023)と同様に、コンドリュール境界に沿った破片断面が多く観測された。また、これらの破片は、これまで観測された衝突破片形状よりも丸い傾向が見られた。コンドリュールのサイズはサブミリメートルなので、コンドリュールの形状が影響したと考えられる。しかしながら、コンドリュールを多く含む破片の総数は比較的小さいため、破片全体の形状分布は、強度が弱いにも関わらず、過去の衝突破片形状と同じであることが分かった。以上のことから、サブミリメートルサイズの衝突破片でも、強度の強い標的の衝突破片と同じ形状分布になっていることが分かった。この知見は、小惑星表面のレゴリス層、イトカワ粒子、リュウグウ粒子、地球帰還予定のベヌ粒子の形成過程を理解する上で役に立つだろう。

3種類の岩石からの1 km/s以上の高速衝突エジェクタ：実験とモデルの比較

○山口祐香理¹, 中村昭子¹¹神戸大学大学院理学研究科

背景と目的

衝突エジェクタは、惑星や小天体間の物質輸送において重要な役割を持つ。MMX計画でサンプルリターンを行う火星衛星フォボスの表面には、火星からのエジェクタが存在する可能性がある (Chappaz, L., et al., 2013; Ramsley & Head, 2013; Hyodo et al., 2019)。サンプル物質が探査天体由来かどうかを判断するには、他天体から輸送された可能性を検討する必要がある。高速エジェクタのサイズと速度と放出角度の関係が重要となる。これらの関係が物性に依存するかどうかを確かめるため、3種類の岩石の高速エジェクタについて調べた。

実験手法と解析手法

宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて、直径3 mmのアルミニウム球弾丸を衝突速度約7 km/sで(火星を模擬した)一次標的に対して垂直に衝突させ、エジェクタが通過する位置に、エジェクタの速度とサイズを測定するための二次標的としてポリカ板を配置した。弾丸の一次標的への衝突とエジェクタの二次標的への衝突の様子は10⁵ fps以上の高速カメラで撮影した。本実験では、先行研究 (Nomura et al., in prep.) の豊岡産玄武岩(2.7 g/cm³, 12 MPa)とは密度と圧裂引張強度が異なるドレライト(粗粒玄武岩)(3.2 g/cm³, 21 MPa)と蛇紋岩(2.7 g/cm³, 18 MPa)を一次標的として用いた。

エジェクタの速度は、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の直径から 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。

エジェクタのサイズと速度

同じ速度のエジェクタサイズは、引張強度が大きいドレライト、蛇紋岩、豊岡産玄武岩の順に大きいという結果を得た(図1)。エジェクタサイズが歪み速度に依存するモデル (Grady and Kipp, 1980; Melosh et al., 1992) から予想されるサイズ範囲は、玄武岩と蛇紋岩の場合は実験結果のサイズ範囲と一致したが、ドレライトの場合は実験結果のサイズ範囲の10分の1程度だった。一方、エジェクタサイズがエジェクタ速度や引張強度に依存するモデル (Melosh et al., 1984) から予想される最大サイズは、エジェクタ形状による効果を加味すると、どの岩石の場合も実験結果と概ね一致する可能性が高い。

本発表では、エジェクタ速度-サイズ関係のワイブルパラメーター依存性やエジェクタサイズの累積個数分布について発表する。

謝辞

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

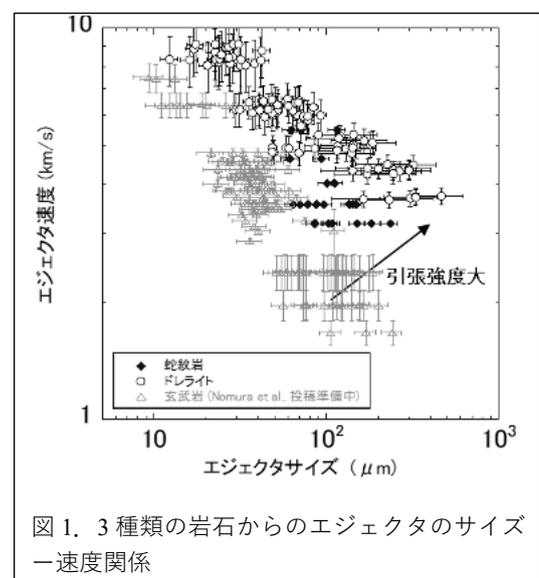


図1. 3種類の岩石からのエジェクタのサイズ-速度関係

付着性レゴリス層から受ける抵抗力の実験的推定

○櫻井諒太¹、中村昭子¹

¹神戸大学大学院理学研究科

粉粒体層への衝突・貫入挙動の解明は、小天体の表面レゴリス層への衝突・貫入挙動を理解するうえで重要である。例えば、レゴリス層からなるフォボス表面に、クレーターからの噴出物が衝突しレゴリス層からの抵抗力を受けながら表面を移動することでグループが形成されると仮定してグループの長さを推測することが行われている (Wilson and Head, 2014)。

この物理的メカニズムの研究の歴史は浅く、粉粒体から受ける抗力と粉粒体層の特性の関係は確立されていない。サブミリ～ミリサイズの粒子層に対してセンチサイズの円柱や球を鉛直方向に 0～4 m/s の速さで衝突させた際の貫入抵抗について、慣性力と深さ依存の抵抗力が独立して作用しているとし、内部摩擦角への比例係数をそれぞれ導出している (Katsuragi and Durian, 2013)。しかし、付着性粉粒体の場合は構成粒子サイズによって空隙率が異なるため、抵抗力に内部摩擦角だけでなく、空隙率が影響する可能性がある。そこで本研究では、付着性粉粒体に対して、地球重力下で自由落下させたセンチサイズの弾丸が衝突、貫入する様子を観測し、粉粒体から受ける抗力を決める比例係数を推定した。

レゴリス模擬試料として粒径 5 μm と 15 μm のアルミナ粒子を容器に充填し(それぞれ空隙率 70%と 66%)、等間隔で配置したコイル 5 つの内側に設置した。容器壁の影響を評価するために容器直径の 1/12、1/6、1/3 の直径の相似なネオジム磁石円柱を弾丸として、初速度約 1.5～2 m/s で粒子層に貫入させ、磁石が各コイルを通過する際に発生する誘導起電力が磁石の減速とともに小さくなる様子を記録した。この様子を再現するように磁石に作用する慣性力と深さ依存の抵抗力の無次元比例係数をそれぞれ C_D と k^* として求めた。

その結果、弾丸/容器直径比 3 種類のいずれの場合も、サブミリ～ミリサイズの粒子の層を用いた先行研究で得られた経験則からの予測よりも C_D と k^* がそれぞれ小さくなり、この傾向は空隙率の大きい試料の方が顕著であった。これは、今回の実験で用いたレゴリス模擬粒子層の初期空隙率が先行研究の粒子層よりも高いため、弾丸が試料に衝突・貫入する際に、圧縮された部分の粒子が周囲の粒子の空隙を充填するように動いて圧密し、周囲の粒子が摩擦の影響が顕著に表れるほどには大きく移動していない、すなわち粒子の流れがあまり生じていないためと考えられる。

講演では、空隙率の異なる他の粉粒体層による結果も示し、抵抗力への空隙率の影響についてさらに議論をする。また、エアロゲル等などの高空隙率の固体標的へのダスト貫入抵抗 (Niimi et al., 2011 など) との比較も行う。

衝撃回収実験により形成された石英中の Feather Features の特徴

○ 多田 賢弘¹, 黒澤 耕介², 富岡 尚敬³, 永冶 方敬⁴, 伊佐 純子², Christopher Hamann⁵, 大野 遼^{2,6}, 新原 隆史⁷, 岡本 尚也², 松井 孝典^{1,2}

¹千葉工業大学 地球学研究センター,²千葉工業大学 惑星探査研究センター,³海洋研究開発機構 高知コア研究所,⁴東京学芸大学 教育学部,⁵Museum für Naturkunde, Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung,⁶立命館大学 総合科学技術研究機構,⁷岡山理科大学 理学部

石英の衝撃変成組織の一種である Feather Features (FFs)は、平板割れ目 (Planar fractures:PFs)と、PF から1方向に伸びる長さ10~100 μm ,程度 間隔2~10 μm 程度の微細なラメラ (Feathre feature lamellae: FFL)から構成される組織である。FFL が衝撃波の伝播方向に平行に形成されるという仮定に基づき、その方向から衝撃波到達時の最大主圧縮軸方向を推定する手法が提案された(Ebert et al. 2020, 2021)。しかし、実験的に FFs の形成が確認された例は1つの衝撃回収試料のみ(Poelchau and Kenkmann 2011)に限られており、FFs の形成圧力範囲や、衝撃波伝播方向との関係は十分明らかにはなっていない。また、FFL は割れ目であると考えられてきたが、電子顕微鏡を用いたサブミクロンスケールでの観察例は少なく、その実態は不明確である。

そこで我々は、FFs の形成圧力範囲、FFL がどのような構造であるのか、FFL の方向と衝撃波の伝播方向との関係を明らかにすることを目的とし、最近開発された減衰衝撃波を用いた衝撃回収実験手法 (Kurosawa et al. 2022; Ono et al. 2023; Hamman et al. 2023) を、花崗岩に適用した。ターゲット内の圧力分布及び衝撃波の伝播方向は、iSALE を用いた衝突物理計算により推定した。回収試料の薄片を作成し、石英中に形成された FFs について、光学顕微鏡と電子顕微鏡 (SEM、SEM-EBSD、TEM)による微細組織観察、およびユニバーサルステージ顕微鏡を用いた面方位測定を行った。

衝撃回収試料の光学顕微鏡観察の結果、計34個のFFsが見つかった。12 GPa以下の圧力で形成されたFFLの方向は衝撃波伝播方向におおよそ平行であり、FFLの形成方向から衝撃波伝播方向をよく復元できることが分かった。一方で、12 GPa以上の圧力で形成されたFFLの方向は衝撃波伝播方向と40°以上異なることが明らかになった。

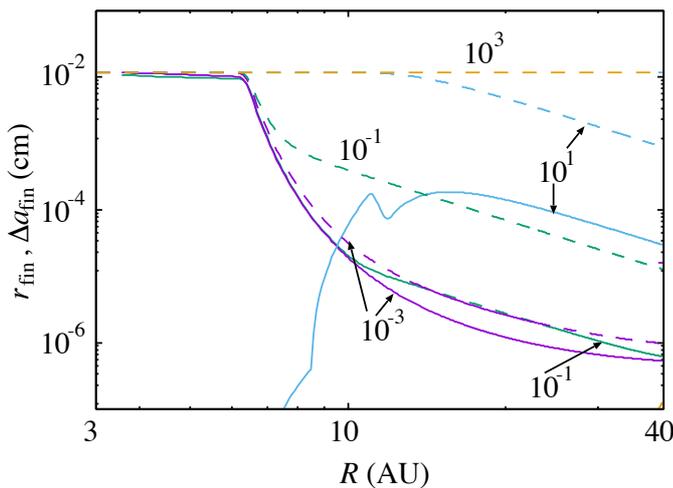
また、SEM観察の結果、14 GPa以下の圧力で形成されたFFLはいずれも、PFsよりも微小な割れ目であることが分かった。14 GPa以下の圧力で形成されたFFLは、{10-11}面と{11-22}面に卓越する。一方で、SEM観察及びTEM観察の結果、16 GPa以上の圧力で形成されたFFLは、非晶質SiO₂であることが分かった。16 GPa以上の圧力で形成されたFFLは、いずれも{10-14}{10-13}面であった。本発表では、形成衝撃圧力によるFFsの特徴の違いを詳しく紹介し、その形成過程について議論する。

原始惑星系円盤における加熱イベントにともなう 氷粒子のサイズ変化

○城野信一¹ 古田岳¹

¹名古屋大学大学院環境学研究科

原始惑星系円盤では、中心星のアウトバースト等により一時的な加熱イベントが発生していたものと考えられる。スノーライン外側の領域を考えると、加熱イベントにより H₂O 氷が昇華し、冷却にともなって再凝縮する。加熱イベント時において氷ダストアグリゲイトがある程度のサイズまで成長していたとすると、アグリゲイトの数密度は氷ダストが孤立して存在していた場合に比べて大きく低下している。この状況では昇華した水蒸気はアグリゲイト表面に凝縮するとは限らず、均質核形成により凝縮する場合もある。均質核形成では、最終的に形成される微粒子のサイズが通常仮定される 0.1 ミクロンから変化する可能性がある。微粒子サイズはダストアグリゲイトの力学的強度を大きく変化させるため、本研究では 1 : 昇華した水蒸気を取り残されたシリケートダストアグリゲイトに再凝縮するのか、それとも均質核形成して微粒子を作るのか 2 : 均質核形成の場合の最終サイズ 3 : シリケートダストアグリゲイトに凝縮した氷の層厚 の 3 点を数値計算により求めた。その結果、シリケートダストアグリゲイトに凝縮した氷の厚みおよび均質核形成での最終サイズは多くの場合で 0.1 ミクロンよりも大きくなることがわかった。一方で、冷却時間スケールが 0.1 年よりも短い場合は 0.1 ミクロンよりも小さくなる可能性があることが明らかとなった。



図：均質核形成後の微粒子半径（実線）およびシリケートダストアグリゲイト表面（半径 0.1mm）に凝縮した氷の層厚（破線）。数値は冷却時間スケール（年）を示す。10³年では均質核形成は進行しない。

質量輸送を伴うダストアグリゲイト間の 衝突と衝突エネルギーの関係

○長谷川幸彦¹、田中秀和¹、鈴木建²、小林浩³、和田浩二⁴

¹東北大学、²東京大学、³名古屋大学、⁴千葉工業大学

惑星は原始惑星系円盤の中で形成される。その形成過程の初期段階の解明にはダスト微粒子同士の衝突時の付着成長と破壊に対する理解が必須であるが、これらの現象に対する詳細な理解にはさらなる研究が要求されている。

我々は、大量の水氷製サブミクロンサイズダスト微粒子から成る二体のダストアグリゲイトの衝突成長と衝突破壊の様子を、先行研究^[1]でも用いられた N 体コードを用いて数値計算を実行して調べた。本発表では、二体の総質量 $M_{\text{tar}} + M_{\text{pro}}$ （ただし、 M_{tar} は標的の質量、 M_{pro} は衝突体の質量）で規格化された二体の衝突エネルギー^[2, 3]

$$Q_R = \frac{1}{2} \frac{M_{\text{tar}} M_{\text{pro}}}{(M_{\text{tar}} + M_{\text{pro}})^2} v_{\text{col}}^2$$

（ただし、 v_{col} は二体の衝突速度）と衝突結果（成長と破壊）の関係に関して、衝突前の二体の質量比 $M_{\text{tar}}/M_{\text{pro}}$ への依存性に焦点を当てた発表を行う。

特に、衝突前の大きい標的から小さい衝突体への質量輸送^[4, 5]が起こる可能性がある質量比に関して、標的の質量が衝突前よりも小さくなるために必要な臨界衝突破壊エネルギー Q_{fra} は質量比に依存せず一定である事が示唆された。高質量比では標的の衝突点付近はほぼ平面として扱えるようになるため、この場合は標的の質量比には依存せず、逆に質量比には依存するはずである。これが質量比に依存しないという事は、つまり高質量比での質量輸送が衝突点付近での局所的な現象ではなく標的全体と関連する現象である事を示唆する。

質量輸送は斜め衝突で一旦付着した全体が回転した後に硬くなった部分が他からちぎれる事によって起こる現象であり、これはつまり、衝突後の標的を含めた全体をある程度速く回転させる事が必要である。この事が前述の臨界衝突破壊エネルギーが一定となる理由であるかもしれない。

[1] Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., & Yamamoto, T. 2009, ApJ, 702, 1490

[2] Dominik, C., & Tielens, A. G. G. M. 1997, ApJ, 480, 647

[3] Suetsugu, R., Tanaka, H., Kobayashi, H., & Genda, H. 2018, Icar, 314, 121

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

[5] Hasegawa, Y., Suzuki, T. K., Tanaka, H., Kobayashi, H., & Wada, K. 2023, ApJ, 944, 38

衝撃波後面でのダスト衝突によるコンドリュールの破壊

○松本 侑士¹, 黒澤 耕介², 荒川 創太³

¹ 国立天文台, ² 千葉工業大学, ³ 海洋研究開発機構

コンドリュールは隕石中に存在する 0.1 mm から 1 mm 程度のサイズの球状粒子であり、コンドライト隕石の主要な構成物質である。コンドリュールはガス円盤中で瞬間的な加熱現象を経験し形成した。この加熱源の候補の1つが衝撃波である (e.g., Hood & Horanyi 1991; Iida et al. 2001)。これは衝撃波により生じた円盤ガスとダストの間の相対速度によって、ダストが摩擦を受けて加熱される仕組みにあたる。

隕石中にはコンドリュール以外にも熔融を経験したダストが含まれている。この1つが火成リム (igneous rim) を構成するダストである。火成リムはコンドリュールや CAI を覆う熔融を経験した 10 μm サイズ程度の粒子の集合である。火成リムの形成過程の1つとして、コンドリュール同様の加熱を経験したダストの集積が考えられる (Matsumoto & Arakawa 2023)。1 mm 程度のサイズのコンドリュールと 10 μm 程度のサイズのダストが衝撃波により熔融した場合、制動距離の違いからコンドリュールとダストに相対速度が生じるため、コンドリュールに熔融したダストが集積される。コンドリュールとダストの衝突速度は最大で衝撃波速度程度にもなる。ダストが熔融したり、コンドリュールが形成する場合、衝撃波速度は 10 km/s 以上になるため、コンドリュールとダストの衝突時にはコンドリュールの掘削、破壊が起こる可能性がある。

我々はコンドリュール (先駆体) とダストの衝突をクレータスケーリング則を基に考慮し、衝撃波後面での衝突のコンドリュールへの影響を調べた。衝撃波後面でのコンドリュールの進化は、そのサイズと衝撃波速度によって3つに分類されることがわかった。

- サイズが大きなコンドリュールが低速衝撃波を経験する場合、コンドリュールは熔融せず、ダストの高速度衝突によってコンドリュールは質量の一部を失う。
- サイズが大きなコンドリュールが高速度衝撃波を経験する場合、コンドリュールの熔融中にダストがコンドリュールに衝突する。熔融中のコンドリュールに 10 km/s 程度でダストが衝突するため、コンドリュールは破壊される。
- サイズが小さいコンドリュールは制動距離が短いため、ダストとの相対速度が短期間で下がり、ダストとの衝突が起こらない。

この結果は、ダストとの衝突を考えるとコンドリュールを衝撃波後面で形成することは困難であることを示している。

原始惑星系円盤内に埋没した惑星が駆動するガス流れ場が ダスト運動に及ぼす影響: 解析モデルの構築

○桑原歩^{1,2,3}, 黒川宏之^{4,3}, 谷川享行⁵, 奥住聡², 井田茂³

¹GLOBE Institute, ²東京工業大学, ³地球生命研究所(ELSI), ⁴東京大学, ⁵一関工業高等専門学校

原始惑星系円盤に埋没した成長途中の惑星の周りには複雑なガス流れ場が形成される[e.g., 1,2]. 近年の高解像度3次元流体計算から、円盤ガスが惑星の重力圏に流入・流出することが明らかになった。惑星重力圏からのガス流出は、惑星軌道の内外(円盤動径方向)に向かって生じる。このガス流出が円盤外側から移動してくる小さなダストの運動に影響を及ぼし、大局的なダストの空間分布にリング・ギャップ構造(ダストが円環状に濃集・枯渇した領域)を形成する可能性がある[3]。円盤内における惑星・ガス・ダストの相互作用を調べることは、円盤観測結果や惑星成長過程の理解において重要である。

惑星周りのガス流れ場がダストの運動に及ぼす影響を調べるためには、計算コストのかかる高解像度の3次元流体計算を実施する必要がある、広範囲に渡るパラメータサーベイを行うことは難しい。我々は過去の研究において、惑星周りのガス流れ場に関する解析モデルの構築を行った[4]。この解析モデルは幅広い惑星質量や円盤パラメータに対して適用可能であり、惑星が駆動するガス流出の円盤動径・鉛直方向の速度分布を与える。ガス流出に関する解析モデルを用いることで、3次元流体計算を実施することなく惑星軌道付近におけるダストの運動を計算できる見込みがある。

本研究では、以下に示す手順に従い、ガス流れ場の影響を受けたダストの運動を表す解析モデルを構築した。ダストの軌道半径は惑星と会合する際に大きく変化する。先行研究[5]で得られたダストの軌道半径変化に関する解析式に、惑星が駆動するガス流出によってダストが受けるガス抵抗を表す項を新たに追加した。そして、惑星軌道付近におけるダストの動径方向の移動速度を表す解析式を導出した。さらに、得られたダストの移動速度に関する解析モデルを動径方向1次元の移流拡散方程式に組み込むことで、惑星軌道付近におけるダストの面密度変化も計算した。

その結果、ダストの移動速度に関してシミュレーション結果と整合的な解析モデルを得た。惑星が駆動するガス流出によってダストの速度分布が大きく変化する。さらに、ダストの運動が変化することにより、惑星軌道付近におけるダスト面密度も変化する。例として、1 auにおいて0.7地球質量の惑星を想定した場合、惑星軌道の外側では動径方向外向きに吹き出すガス流出によってダストの中心星方向への移動は妨げられる。一方、惑星軌道内側では、動径方向内向きに生じるガス流出によってダストの中心星方向への移動が促進される。ダストの拡散に寄与する乱流強度が弱いとき($\alpha < 10^{-4}$)、惑星軌道付近における1mmサイズダストの面密度は10万年以内に1桁以上低下することがわかった。本研究結果と円盤ダストの観測結果を組み合わせることで、将来的には円盤内に存在し得る惑星の質量や円盤ガスの乱流強度の推定が可能になると期待される。

[1] Ormel, C. W. et al., 2015, MNRAS 447, 3521. [2] Fung, J. et al., 2015, ApJ 811, 101. [3] Kuwahara, A. et al., 2022, A&A 665, A122. [4] Kuwahara, A. and Kurokawa, H., in revision. [5] Muto, T. and Inutsuka, S.-i., 2009, ApJ 695, 1132.

粘性降着円盤のダスト・温度共進化によるダスト濃集

○加藤遼¹, 奥住聡¹, 植田高啓²

¹東京工業大学, ²Max-Planck Institute for Astronomy

原始惑星系円盤におけるダストの濃集と重力不安定は微惑星形成の有力な機構の1つである。円盤赤道面において、ダスト密度がガス密度を超えると、重力不安定によって微惑星が形成されることが示されている(e.g., Sekiya, 1998, Youdin & Shu, 2002)。これまでの研究により、磁気乱流強度の空間的变化が生じる円盤高温領域で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で磁気回転不安定性(MRI)が作用すると、円盤の磁気乱流強度が上昇する。この領域では、ガスの降着率が増加し、ガス面密度が低下する。その領域の外縁部にガス圧力極大が生じ、ダスト濃集が起こる。しかし、過去の研究では、ダストの成長や集積による円盤温度進化への影響が無視されてきた。実際には、ダストの面密度とサイズが変化すると円盤の光学的厚みも変化する。光学的厚みが増加すると、粘性降着によって円盤赤道面付近で解放される熱エネルギーの輸送効率(保温効果)も変化する。したがって、ダスト進化は温度進化に影響を与えうる。

本研究の目的は、MRIが作用するような円盤内側領域において、ダストと円盤温度がどのように共進化し、それによって微惑星形成にどのような影響が及ぶのかを明らかにすることである。そのために、ガス・ダストの面密度、ダストのサイズ、および円盤温度の非定常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。密度進化は、ガスとダストの移流拡散、岩石ダストの付着成長および昇華を計算し、オパシティはダストサイズと円盤温度の関数とした。円盤温度進化は、中心星照射と粘性加熱、放射冷却、熱拡散などを考慮した。MRI活性化温度は1000 Kとした。

計算の結果、ダストの濃集が一旦起こると、ダストの保温効果による温度上昇でガス圧力の極大点形成され、ダストの濃集が自律的に維持されることがわかった。円盤降着により円盤内側領域が加熱されMRI活性となると、その領域の外縁でガス圧力極大が生じ、そこにダストが濃集する。ダストが濃集した領域では、ダストの保温効果によって冷却が抑えられる。したがって、ダストの濃集領域は周囲に比べて温度が下がりにくく、温度極大が生じる。温度の高い領域ではガス圧力も高くなるため、温度極大によってガス圧力極大が維持される。これによって、MRI非活性となった後もガス圧力極大の消失が妨げられ、ダスト濃集領域が維持される。太陽質量の中心星を仮定し、Tタウリ型星円盤の典型的なガス降着率を仮定した場合、ダスト濃集領域が1 auより内側に生じる。その領域のダスト総質量は地球質量の数倍程度、温度は600-800 Kとなる。これは、ダスト濃集によって現在の地球軌道付近に岩石微惑星が形成されうること示唆する。

粘性進化する原始惑星系円盤内を運動する 非晶質ケイ酸塩ダストの酸素同位体交換と結晶化

○石崎梨理¹、橘省吾¹、井田茂²、岡本珠実²

¹東京大学地球惑星科学専攻、²東京工業大学地球生命研究所

背景・目的: 原始惑星系円盤はダストの化学進化の場として働き、惑星材料の化学的多様性をもたらす。原始惑星系円盤におけるダストの化学反応進行の理解は、惑星形成に至る物質進化を理解する上で非常に重要である。

太陽系天体は太陽に比べ ^{16}O に乏しい酸素同位体組成を持つことが知られている [1]。これは、太陽系の原材料となった ^{16}O に富むケイ酸塩ダストが、 CO 自己遮蔽効果によって ^{16}O に乏しくなった円盤 H_2O ガスと酸素同位体交換をおこなったことに起因すると考えられている [2]。一方で、非晶質ケイ酸塩ダストの結晶化が酸素同位体交換を著しく阻害することが、円盤環境を模した低圧実験により示された [3, 4]。したがって、現在の太陽系の酸素同位体組成分布を達成するには、原始太陽系円盤において非晶質ケイ酸塩の酸素同位体交換反応が結晶化反応よりも早く進行する必要がある。この条件は原始太陽系円盤の円盤環境の制約に繋がる可能性があるため、両反応の進行を理解することは非常に有用である。そこで本研究では、円盤内を移流・拡散により運動するダスト粒子の両反応の進行ならびにその分布を計算し、酸素同位体交換が結晶化に先立つ条件を調べた。

手法: 原始惑星系円盤内を動き回るダスト粒子の軌跡に基づき、非晶質ケイ酸塩ダスト (フォルステライト Mg_2SiO_4 , エンスタタイト MgSiO_3 組成) の結晶化および円盤 H_2O ガスとの酸素同位体交換反応の進行を追跡した。円盤モデルとしては、①定常降着円盤 と、②分子雲崩壊による初期円盤へのガス・ダストの降着に起因するインサイドアウト進化を考慮した粘性降着円盤 の 2 通りについて検討する。原始惑星系円盤内をガスによく馴染んで運動するダスト粒子の軌跡を追跡する 3D モンテカルロシミュレーションにより [5-7]、各ダスト粒子が経験する温度履歴を調べた。各反応の進行は、アブラミ式を微小反応進行度について解いた式を積算することで計算した。化学反応パラメータ (活性化エネルギー、頻度因子、アブラミ指数) には、結晶化速度は低圧下での実験データ (e.g., [8]) を、酸素同位体交換速度は拡散律速反応速度 [3, 4] をアブラミ式で近似し求めた値を用いた。

結果: 定常降着円盤においては、両反応についてそれぞれ特定の温度帯で反応が進行・完了することがわかった [9]。また、円盤物理パラメータ (質量降着率、乱流粘性係数) に依らず常に酸素同位体交換は結晶化に先立って完了し、両反応が競合することはない。これは、前述した太陽系物質の酸素同位体分布を説明しうる。

本発表では、分子雲崩壊による初期円盤への物質降着に起因するインサイドアウト進化を考慮した場合の反応進行・分布と併せて議論をおこなう。

<参考文献>

[1] McKeegan, K. D., Kallio, A. P. A., Heber, V. S., et al. 2011, *Science*, 332, 1528 [2] Yurimoto, H., & Kuramoto, K. 2004, *Science*, 305, 1763 [3] Yamamoto, D., Kuroda, M., Tachibana, S., Sakamoto, N., & Yurimoto, H. 2018, *ApJ*, 865, 98 [4] Yamamoto, D., Tachibana, S., Kawasaki, N., & Yurimoto, H. 2020, *Meteorit. Planet. Science*, 55, Nr 6, 1281 [5] Ciesla, F. J. 2010, *ApJ*, 723, 514 [6] Ciesla, F. J. 2011, *ApJ*, 740, 9 [7] Okamoto, T., & Ida, S. 2022, *ApJ*, 928, 171 [8] Yamamoto, D., & Tachibana, S. 2018, *ESC*, 2, 778 [9] Ishizaki, L., Tachibana, S., Okamoto, T., Yamamoto, D., & Ida, S. 2023, *ApJ*, in press.

観測ロケットによる微小重力実験で見られた 非古典的核生成経路のダスト形成

○木村勇氣¹、稲富裕光²、田中今日子³、齋藤史明¹、千貝健¹、森章一¹、中坪俊一²、竹内伸介²、Coskun Aktas⁴、Jürgen Blum⁴

¹北海道大学低温科学研究所、²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、³東北大学大学院理学研究科、⁴Institute for geophysics and extraterrestrial physics

ダストの形成過程を理解するために、海外の観測ロケットを用いて得られた微小重力環境を利用して、シリカ、シリケート、炭化チタンなどのダスト類似物を気相から合成する実験を行ってきた。微小重力実験では、蒸発源をガス中で加熱した際に生じる密度差対流を抑えることができ、密度揺らぎなどが小さくなることから、核生成環境を乱すことなくダストを生成することができる。また、精製したダストは長時間真空装置内を漂うため、その間のスペクトル変化をその場計測することもできる。

これまでに5回の観測ロケット実験を行った。その結果、ダスト形成の理解には非古典的核生成を考慮する必要があることが分かってきた。非古典的核生成は、近年結晶成長分野で話題の結晶化の初期過程である。従来、気相から生成する微結晶は、原子や分子から直接その種となる結晶が核生成すると考えられてきた（古典的核生成）。非古典的核生成は、多形が競合したり、結晶核同士が融合したりと、従来の核生成の描像を超えた核生成過程である。

例えば、隕石中で見つかっているプレソーラー粒子の一つである、炭化チタンをコアに持つ炭素質粒子の合成実験では、炭化チタンが先に凝縮する必要はなく、炭素の均質核生成、炭化チタンの不均質核生成、結晶核同士の融合、チタンの拡散という多段階のステップで炭化チタンコア-カーボンマントル粒子が形成することが分かった（図1）[1]。これは、炭化チタンの均質核生成と成長がまず起こり、その上に炭素が不均質核生成する必要があるという直感とは完全に異なる。発表では、多段階核生成過程の一般性を含めて議論する。

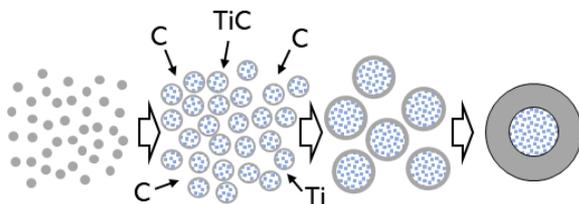


図1. コア-マントル粒子の生成過程を示す模式図。超高過飽和状態でカーボンの均質核生成が起こる。その表面で炭化チタンの不均質核生成が起こりつつ、結晶核同士が融合することで、粒子は大きくなって数は減る。分子の内部拡散により、炭化チタンのコアが形成する。

[1] Y. Kimura et al. *Science Advances*, 9 (2023) eadd8295

地球外模擬有機物の付着力： 遠心法と衝撃分離法による測定

○長足 友哉¹, 古川 善博¹, 中村 昭子²

¹東北大学大学院理学研究科, ²神戸大学大学院理学研究科

はじめに

原始惑星系円盤ダストの付着力は、自己重力が効かない惑星形成初期のダストの衝突付着成長を理解する上で重要である。特に円盤内側のケイ酸塩ダストは低付着力とされることが原因で、破壊や跳ね返り、中心星への落下が成長の障害になると考えられている。惑星間塵は有機物に覆われていることが確認され、それが付着力に影響した可能性がある (Flynn et al., 2013)。しかし、地球外有機物の付着力は十分に評価されていない。そこで、小惑星内部やダスト表面で起こると考えられるホルモース型反応 (Cody et al., 2011; Furukawa et al., 2021) で合成される有機物の付着力を測定した。

実験手法

先行研究 (Furukawa et al., 2021) と同様の条件でホルムアルデヒド・グリコールアルデヒド・アンモニア・水酸化カルシウム (触媒) を 80°C で加熱、もしくは、触媒を含まずに 200°C で加熱することで有機物を合成し、水に溶ける成分を除去した試料と除去しなかった試料を作成した。付着力は、遠心法 (Nagaashi et al., 2018; 2021; Nagaashi & Nakamura, 2023) により、常温常圧環境で測定した。また、遠心法は測定時間がかかることが難点で、測定条件を自在に変更できないことから、今後行う予定の温度や真空条件を変えた測定に向け、圧縮ばねにより加速した平板を衝突させることで発生した加速度を用いた付着力測定 (衝撃分離法) を実現し、遠心法との比較測定を実施した。

結果・議論

80°C と 200°C で合成した水に溶けない有機物の付着力はそれぞれ 0.3–0.6 μN , 200°C で合成した水に溶けない有機物の付着力は 0.6–1.2 μN で、炭素質コンドライト破片の測定付着力 0.03–0.1 μN (Nagaashi et al., 2021; Nagaashi & Nakamura, 2023) よりも大きかった。しかし、顕微鏡観察から、合成有機物は主にサブミクロンからミクロンサイズの球形に近い粒子からなる凝集体であり、JKR 理論 (Johnson et al., 1971) に基づくと、その表面エネルギーはシリカよりも大きいとは言えないことがわかった。

一方、同種の粒子を同様の湿度条件で、衝撃分離法と遠心法で測定することで、同様の結果が得られることを確認した。現在、潮解性がある常温常圧環境では測定困難な水溶性成分を含む合成有機物の付着力測定の実現に向け、衝撃分離法による温度や真空条件を変えた測定装置の開発を進めている。

星形成コアにおける COMs の炭素同位体分別の化学反応モデル計算

○一村 亮太^{1,2}, 野村 英子^{1,2}, 古家 健次²¹総合研究大学院大学, ²国立天文台

星形成コアの水分子の同位体組成の理解は、太陽系内天体の有機分子の起源を調べる上で有効な手段である。近年の ALMA による高感度観測によって、Class0 低質量原始星天体 IRAS16293-2422B において、複雑な有機分子 (Complex Organic Molecules; 以下 COMs) の炭素同位体組成($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比)が測定されている。その値は星間空間の平均的な値(~69)と同程度か、 ^{13}C が分子に濃集して、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ が低い値を示すことが知られている。しかしながら、COMs の炭素同位体分別のモデル計算はほとんど無く、その起源はよくわかっていない。

本研究では、重力収縮する星なしコアの物理モデルを用いた。そして、星形成前に塵表面の反応を通して生成し、星形成後に気相へ昇華するまでの COMs の炭素同位体組成進化を、気相、星間塵表面、氷マンツルの 3 相を考慮した化学反応ネットワーク計算で系統的に調べた。

計算した結果、200K 程度の気相に存在する COMs の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比は、基本的に塵表面から熱的に昇華した分子の組成を示し、また以下のような過程で COMs の炭素同位体分別が起こることが分かった。一般的に、COMs は比較的小さい分子から生成されるが、この小さい分子は、低温の気相の同位体交換反応によって、同位体分別することが分かっている。例えば、 ^{13}C が少ない CH_4 と ^{13}C が多い CO が生成される (Furuya et al. 2011; Colzi et al. 2020; Loison et al. 2020)。今回のモデル計算では、これらの小さい分子が、気相や星間塵表面で反応して COMs を生成し、昇華前の COMs の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比を決定することがわかった。具体的には、気相に C^+ や C 原子が豊富で同位体交換反応が顕著な環境では、 ^{13}C に枯渇した COMs ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 100 - 150$) が生成される。一方で、炭素が主に CO として存在する場合は、同位体交換反応が非効率になり、星間空間の平均値に近い $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比を持つ COMs ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C} \sim 60$) が生成される。この計算結果と観測値を比較したところ、モデル計算では、COMs の炭素同位体分別の程度が大きくなった。

この差異を解消する方法として、本研究では、実験で示唆されている炭素原子の Eley-Rideal 反応(以下 ER 反応) (Molpeceres et al. 2021; Potapov et al. 2021; Fedoseev et al. 2022) をモデル計算に組み込んだ。ER 反応は気相の化学種が塵表面の氷の化学種と直接衝突して起こる反応である。ER 反応を組み込んだ結果、より観測値に近い炭素同位体分別の程度が小さい COMs が生成することが分かった。本講演では、COMs の炭素同位体分別における ER 反応の重要性や、初期条件等のパラメーター依存性について議論したい。

原始惑星系円盤内の氷ダスト表面での複雑有機分子合成シミュレーション

○落合葉子¹, 井田茂¹, 庄司大悟²

¹東京工業大学 地球生命研究所, ²JAXA/ISAS

これまで、多数の隕石試料や小惑星リュウグウのサンプルから豊富な有機物が発見されている。また、ALMAをはじめとする高性能望遠鏡によって、星間空間に存在する有機分子も観測されている。それらの中には、多くの複雑有機分子さえも含まれており、我々の想像を遥かに超える多様な化学過程が宇宙で起きていることを示唆している。それゆえ、これらの有機物の形成過程を解明することは、宇宙における化学進化や地球外生命の可能性を理解するための重要な鍵となる。

そのような複雑有機分子が合成される場所の一つは、分子雲や原始惑星系円盤に存在する氷ダストの表面である。ダストに紫外線や宇宙線が照射すると、表面に凍っていた炭素や酸素を含む分子の結合が切れて、化学反応が駆動される。このような状況を模擬した実験や量子化学計算はこれまでに多く行われており、様々な種類の有機物の生成が確認されている。一方で、これら従来のアプローチでは、反応に関わる分子の数の多さや反応過程の複雑さゆえに、反応ネットワークの全容を明らかにすることは難しい。本研究の目的は、そのような複雑な化学反応経路を探索し、氷ダスト表面で合成される複雑有機物の種類及びそれらの合成過程を明らかにすることである。本研究では、Takehara et al. (2022)で提案された化学反応シミュレーションの計算モデルをプロトタイプとして使用する。彼らのモデルではモンテカルロ法を用い、考えられる反応経路の候補の中から確率的な経路選択を繰り返すことで反応を進行させる。各反応が選ばれる確率は、近似的に計算された活性化エネルギーを用いて重み付けされる。したがって、本手法は高い計算精度を大胆に切り捨てることで計算コストを軽減し、これまで扱えなかった複雑な有機分子へつながる反応ネットワークを探索することを目指す。また、本研究では先行研究で提案された計算モデルに、新たに紫外線照射によるラジカル反応や、反応のタイムスケールを取り入れたことでモデルの改良を行なった。

本講演では、原始惑星系円盤内の氷ダスト表面を模擬したシミュレーションの計算結果を発表する。初めに、メタノールや水、アンモニアなどの単純な分子からなる初期物質がUV照射によって複雑な有機分子へと進化する過程を示す。これらの合成メカニズムとして、初期物質の継続的なラジカル化、そして生成されたラジカル同士によるランダムな再結合によって、分子種の多様性が生じることが明らかとなった。また、このような反応によってアミノ酸や糖などの生体分子も同時に合成されることがわかった。最後に、実験結果との比較を行い、本計算結果の整合性及び課題について議論する。

原始惑星系円盤 C/O 比分布の再検討: 難揮発性有機物のドリフト及び燃焼の影響

大野和正 (国立天文台)

近年、JWST などによる系外惑星の大気分光観測により、系外惑星大気のエレメント比を観測的に制約することが可能となった。惑星形成の舞台となる原始惑星系円盤では、ガス・ダスト中のエレメント比が軌道によって異なることが予想され、惑星大気のエレメント比は過去の形成場所を探る有望な手がかりとして期待されている。急速に進展する系外惑星大気観測から過去の形成過程を探る上で、円盤の組成構造を理解する重要性が高まっている。

惑星大気のエレメント比は形成場所を探る有力な指標として長年議論されてきた。原始惑星系円盤 C/O 比の時空間分布に関して、H₂O や CO といった揮発性分子の凍結・昇華の影響がこれまで幅広く調べられてきている。一方、円盤形成期には約 60%の炭素が難揮発性の有機物として存在することが、星間ダスト及び彗星の観測から示唆されている。この難揮発性有機物が円盤内でどのように移動・破壊を経験し、円盤 C/O 比に影響を与えるかはあまり理解されていない。

本研究で、我々は難揮発性有機物を含むダストの動径移動および燃焼が円盤 C/O 比分布に与える影響について調べた。まず、原始惑星系円盤におけるダストの動径移動・衝突成長・破壊・揮発性分子の昇華と凍結を考慮した 1 次元円盤組成進化モデルを構築し、加えて燃焼による不可逆的な有機物の破壊とそれに伴う炭化水素生成を考慮した。計算の結果、幅広い乱流強度・ダスト臨界破壊速度のもとで、H₂O 雪線内側の円盤ガス C/O 比が中心星 C/O 比以上の値となることが分かった。これらの結果は、「雪線内側では H₂O 蒸気の濃集によって円盤ガスが酸素リッチになる」という従来の理解を大きく塗り替えるものである。本講演では、大気降着及び軌道移動を考慮したガス惑星形成モデルを用いて、実際のガス惑星大気組成への影響についても議論を行う予定である。

白色矮星周りのダスト熱放射スペクトルから探る ダスト円盤と星表面の組成間のリンク

○奥谷彩香¹, 奥住聡²

¹国立天文台, ²東京工業大学

約 25-50%の白色矮星の大気中には重元素が観測されており、その周囲にはダスト円盤が観測されている (e.g. Zuckerman et al. 2010)。これらはかつて星周りに存在した惑星・小惑星を起源とし、星近傍で潮汐破壊された (小) 惑星が降着円盤を形成して星に重元素を供給していると考えられている。したがって、白色矮星はその大気中の重元素や周囲のダストの観測から、系外 (小) 惑星の内部組成を明らかにしうる系として注目を集めている。特に、円盤中のダストの組成は元素レベルに分解される前の惑星の鉱物組成により近いと見られるため、星大気表面の観測から得られる重元素組成の情報と組み合わせれば、降着する (小) 惑星の内部組成に対してより強力な制約を与えられる可能性がある。

この方法論の有効性を検討するため、本研究ではダスト円盤が放射する赤外スペクトルに注目して、白色矮星表面の元素組成と円盤中のダスト組成との関連を調べた。まず、星表面の (Fe+Mg)/Si 比に基づいてダスト粒子の鉱物組成の候補を仮定し、鉛直構造を二層近似した円盤放射モデル (Chiang et al. 2001) を用いてダスト円盤の熱放射スペクトルを理論計算した。この仮定に基づくと、星表面の (Fe+Mg)/Si 比が 2 より大きい場合は、ダスト粒子中にシリケートに加えて金属鉄または酸化鉄が含まれると予想される。これらはダスト粒子の波長 5 μm 付近のオパシティを増加させるため、金属鉄が含まれる場合の赤外スペクトルは、波長 10 μm 付近のシリケートフィーチャーに対して波長 5 μm 付近の熱放射が大きくなる傾向を示す。続いて、この波長 5 μm 付近の熱放射の傾向が、実際に観測された星表面の重元素組成と整合的であるかどうかを調べた。今回は、重元素の沈降時間が非常に短い 4 つの白色矮星 (Jura et al. 2009) について解析を行なった。その結果、星表面の (Fe+Mg)/Si 比が 2 より大きい 2 つの白色矮星の赤外スペクトルは、シリケートに加え多量の金属鉄または酸化鉄が含まれるダスト円盤の熱放射スペクトルでよく再現される一方、星表面の (Fe+Mg)/Si が 2 より小さい残り 2 つの白色矮星の赤外スペクトルは、シリケート粒子のみからなるダスト円盤の熱放射スペクトルで再現されることが明らかになった。以上の結果は、星表面の元素組成と円盤中のダスト組成間の関連を初めて示唆するものである。さらに、本講演では各系で制約されたダストの鉱物組成についても議論する予定である。

Gaia 天体を用いた大規模デブリ円盤サンプルの構築と 頻度算出

○水木敏幸¹、百瀬宗武¹、逢澤正嵩²、小林浩³

¹茨城大学、²李政道研究所、³名古屋大学

デブリ円盤とは主系列星等の比較的年老いた天体に付随する星周構造であり、微惑星（小天体）同士の衝突等で二次的に生成されたダストが主成分であると考えられている。恒星のエネルギー分布における赤外線以遠での超過：赤外超過を用いることで数百のデブリ円盤が検出されてきた。先行研究によって、デブリ円盤は重く・若い星で検出されやすいことが知られている一方で、近傍星の大半を占める軽く・年老いた星における定量的な理解は乏しい。低質量星に付随するデブリ円盤の検出頻度は10%を有意に下回ることが、観測的な理解を難しくする主な要因である。2000年代には Spitzer や WISE を始めとする高感度赤外線宇宙望遠鏡が多数の赤外線天体を検出しており、この中にはデブリ円盤を始め多くの希少天体が含まれているはずであるが、これらの多くは天体までの距離といった基本的な情報が不足していたため利用されてこなかった。

本研究では、Gaia 衛星による新たな近傍星カタログを基に Spitzer 及び WISE の中間赤外線アーカイブデータを調査することで、12、22、24 μm （120—240 K）において赤外超過を示す天体を合計で約14000天体発見した。この赤外超過天体の中には背景天体との混同等による、デブリ円盤由来ではないものも含まれている。比較的明るい約500天体のみを使用することでこの弊害を克服し、A型星（～2太陽質量）からM型星（～

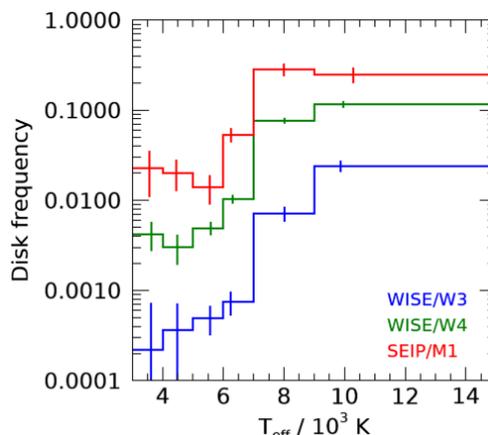


図 1 円盤頻度

0.5太陽質量)にかけて連続的にデブリ円盤の検出頻度を得た。24 μm の円盤頻度を例に挙げると、A-G型星に関してはおおまかに先行研究と一致し(30–5%)、M型星のような低質量星では円盤を持つ星は非常に少数(～2%)であることが定量的に判明した。

多数の円盤サンプルを用いて高精度に円盤頻度を得たことで、円盤頻度の中心星温度依存性が恒星の年齢が取り得る範囲(～主系列寿命)に対応する可能性が示唆される。若い天体のみが円盤を持つことを仮定すると、明るいデブリ円盤は系が誕生してからおよそ約3–6億年まで存在することになり、このタイムスケールは太陽系における後期重爆撃期とおおまかに一致する。仮に、デブリ円盤を持つ系の多くが若いとすれば、後期重爆撃期のようなイベントは様々な恒星において普遍的であるかもしれない。

原始星形成段階における円盤構造の観測的特徴について

○ 高橋 実道^{1,2}、高桑 繁久¹、塚本 裕介¹、城戸 未宇¹、西合 一矢¹、富田 賢吾³、大橋 永芳⁴

¹ 鹿児島大学、² 国立天文台、³ 東北大学、⁴ ASIAA

本研究では、形成過程にある若い星周円盤の観測的特徴について研究を行った。近年の観測から、比較的若い原始惑星系円盤にリングーギャップ構造が発見されている。このような構造は惑星形成との関係が期待されており、この観測結果はこれまで考えられていたよりも早い段階から惑星形成が進んでいる可能性を示唆している。しかし、円盤形成進化のどの段階から惑星形成が進んでいるかは、明らかになっていない。そのため、より若い円盤について詳細な観測を行い、その構造について理解を進める必要がある。

近年、ALMA の large program である eDisk による観測で、より若い円盤に注目した多数の高分解能観測が行われた。eDisk で観測された天体の一つである CB68 の原始星円盤では、円盤の輝度分布に (1) 形成過程の円盤に期待される自己重力不安定性による渦状腕構造が明確には見えない (2) 長軸に沿った非対称性や、輝度分布の勾配が緩やかになる shoulder の構造が見える、という特徴があることがわかった。このような非対称な輝度分布は、他の原始星円盤においても確認されている。(1) については、観測された円盤が実際に自己重力的に安定であった場合、円盤を安定に保つための未知のメカニズムが必要となり、円盤形成過程の理解に大きな修正が迫られる可能性があるという点で、非常に重要な結果となっている。そのため、(2) の非対称な構造と合わせて、若い円盤の観測的特徴の起源を理解することが必要となる。

そこで、本研究では、2次元流体計算コードである FARGO と輻射輸送計算コードである RADMC-3D を用いて、若い自己重力円盤に対する輻射輸送計算を行い、観測結果を説明可能な円盤構造について調べた。その結果、(1) 円盤に自己重力不安定性による渦状腕構造が形成された場合でも、輝度分布に明確な渦状腕構造を作らないことが可能であり (2) 円盤に one arm spiral の構造があれば長軸に沿った輝度分布に非対称性が実現可能であることを明らかにした (図 1)。本講演では、シミュレーションを用いた模擬観測の結果と、eDisk による CB68 の円盤の観測結果の比較について議論を行う。

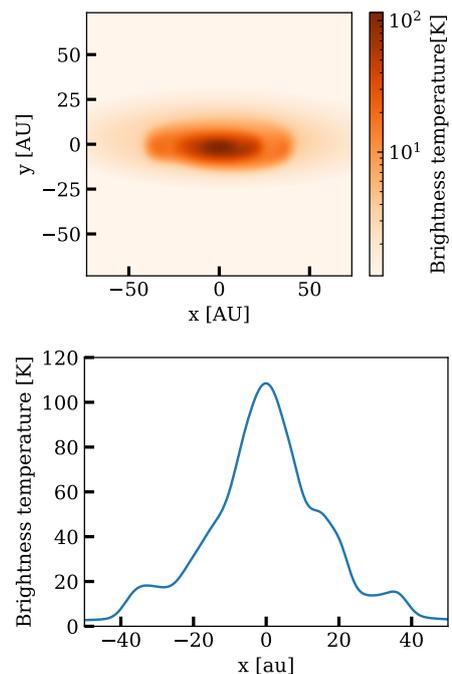


図 1: 上図: 本研究で得られたシミュレーション結果の模擬観測。シミュレーションでは自己重力不安定性による渦状腕が形成されているが、模擬観測では明確には現れない。下図: 模擬観測の長軸上の輝度温度分布。片側に勾配が緩やかな shoulder 構造が再現できている。

原始惑星系円盤内側の温度構造：輻射輸送入り大局的 非理想磁気流体力学シミュレーション

○ 森昇志¹, Xuening Bai², 富田賢吾¹

¹ 東北大学大学院理学研究科天文学専攻, ² 清華大学, 中国

地球型惑星の形成過程を解明するには、原始惑星系円盤の内側領域 (中心から数 au の領域) における物理構造の理解が必須である。円盤の降着過程は、円盤の基礎的な物理状態を定める上で重要である。円盤内側領域では弱電離であることで磁場が拡散し、磁気的な乱流は安定化される。そのような円盤では乱流粘性に基づく、古典的な粘性降着円盤モデルは成り立たないと考えられる。また大局的な磁場による円盤風が円盤ガスの降着を駆動するため、大局的な磁場構造も重要である。そのため、弱電離度の効果 (非理想磁気流体力学効果) や円盤風駆動降着を考慮して、磁気流体力学に基づく円盤内側領域の基礎的な描像を確立することが求められている。

本講演では円盤内側領域の温度構造に着目する。温度構造は形成される惑星の組成を支配するなど極めて重要な物理構造である。我々は輻射輸送を考慮した大局的な計算領域における非理想磁気流体力学シミュレーションを行った。今回の計算の結果、これまで我々が行った局所領域の磁気流体力学計算で示唆していたように、降着加熱は非効率であることを確認した。今回新たに大局的な磁場構造を考慮されており、そのような磁場は円盤の上層に加熱層を作るが、光学的に薄い領域での加熱となるため円盤赤道面の温度には影響を及ぼさない。そうした理由から、今回のシミュレーションの場合、比較的若い原始惑星系円盤であっても円盤内側での温度は照射加熱によって決まる。一方で、円盤の中心近くから高密度の円盤風が吹くことで、中心星からの光が吸収される面の構造が影響を受ける。そのため、照射加熱の強さが磁気流体力学的な円盤風の構造に依存することが分かった。このことは、円盤の磁気流体力学的な振る舞いを考慮して円盤の温度モデルを構築する必要性を示唆している。

原始惑星系円盤の化学進化とスノーライン - 水・有機分子の起源

Chemical Evolution and Snowlines in Protoplanetary Disks - Origin of Water and Organic Molecules

○ 野津 翔太 (Shota Notsu)¹

¹ 東京大学 大学院理学系研究科 天文学専攻 (2023年4月~)

(Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo)

(2023年3月までは、理化学研究所 開拓研究本部 坂井星・惑星形成研究室に所属)

発表者は、スノーラインを軸に原始星天体・原始惑星系円盤・太陽系外惑星大気の化学構造を理論・観測の両面からそれぞれ探索・比較する研究を行う事で、星・惑星形成過程の理解の深化を目指してきた。本講演ではこれまで発表者が行ってきた研究の中から、円盤でのH₂Oスノーライン位置検出可能性に関する理論・観測研究、H₂Oスノーライン以遠に影響を持つ円盤の化学進化計算研究の内容などを紹介した上で、星・惑星形成過程におけるアストロケミストリー研究の現状と今後の展開についても触れる予定である。

月面上のチタン鉄鉱に富むサイトの分光学的および地質学的研究

A spectroscopic and geological study of ilmenite-rich sites on the lunar surface

○山本聡¹, 松岡萌¹, 長岡央², 大竹真紀子³

1) 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 2) 立命館大学 総合科学技術研究機構 3) 会津大学 コンピュータ理工学部

チタン鉄鉱(イルメナイト)は、月の玄武岩に豊富に含まれる酸化鉱物である。月面上におけるイルメナイトの分布を明らかにすることは、月のマグマオーシャンにおける分化過程の解明だけでなく、月資源探査戦略の観点からも重要と考えられており、例えば月における酸素供給源の候補物質としてや月面基地建設などを想定した月資源鉱物の候補の一つとして注目されている。一方、リモートセンシングデータからイルメナイトの月全球分布を明らかにする上では、アルベドが相対的に低いイルメナイトをいかに精度よく検出できるかが課題となる。過去のリモートセンシングデータの解析では、TiO₂の持つ紫外波長域の青化特徴(0.3~0.4 μ mにかけて波長が短いほど反射率が上がる特徴)に着目し、マルチバンド画像の比演算解析から、相対的にチタン量の多い玄武岩を明らかにすることでイルメナイトの間接的な推定が行われていた。一方、イルメナイトの可視~近赤外波長の分光特性として、1 μ mのピークおよび2 μ mにかけて反射率上昇(Ti³⁺およびTi⁴⁺に起因する0.5~0.6 μ mにかけてのブロードな吸収と、Fe²⁺による1.3 μ m~1.6 μ mのブロードな吸収によって作られる特徴)が挙げられる[1-3]。これらの特徴は月主要鉱物であるカンラン石、輝石や斜長石の反射分光特性とは異なることから、イルメナイトの分光学的同定に活用できると考えられる。そこで本研究では、月探査衛星「かぐや」搭載のハイパースペクトルセンサであるスペクトルプロファイラのデータを使って、イルメナイトの持つ1ミクロン帯および2 μ mの反射分光特性に着目したスペクトル抽出データマイニングを行った。その結果、イルメナイトに富む

サイトは、月の火砕堆積物で覆われた Dark Mantle Deposit (DMD)[4]に集中的に見つかることがわかった(例として図1に、湿りの海のDoppelmayrと呼ばれるDMD周辺の分布を示す)。また、これらの検出点のほとんどが月の表側のDMDに集中して見つかるが、月の裏側の南極エイトケン盆地では検出されることがわかった。本発表では、これらのイルメナイトに富む露頭の分光学的特徴と、「かぐや」搭載のマルチバンドイメージャおよび地形カメラのデータを用いた地質層序解析結果の報告を行う。

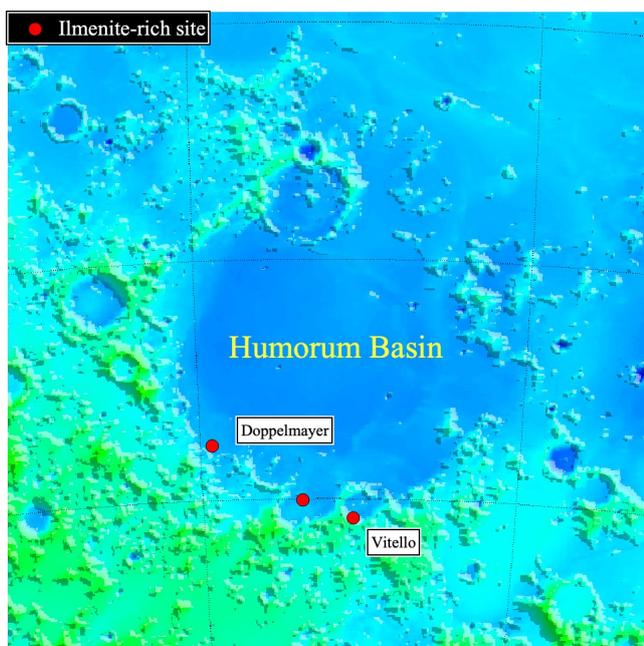


図1: 湿りの海周辺で見つかったイルメナイトに富むサイトの分布(赤点)。

[1] Izawa et al. (2021) Icarus, 362, 114423. [2] Riner et al. (2009) GRL, 36, L02201. [3] Isaacson et al. (2011) MAPS, 46, 228. [4] Gaddis et al. (2003), Icarus, 161, 262.

月サウスポール・エイトケン (SPA) 盆地の詳細な 地質解析から推定する月内部構造

Detailed Geological Analyses of the South Pole-Aitken Basin on the Moon

○大竹真紀子（会津大），佐藤広幸（JAXA/JLPEDA）

月裏側のサウスポール・エイトケン (SPA) 盆地は、南緯 15° より南極までに達する直径 2000km を超える月面最大の衝突盆地であり、衝突による掘削深度も最大であると推定されることから、月内部の化学組成を観測データから得るのに適した領域であると考えられる。そのような理由から、これまでもこの盆地に関しては多くの研究が行われている。特に、盆地の南側約 1/3 の領域はチタン量が少ない傾向にあることや、この領域だけにカンラン石が分布するなど、それより北側の領域と比べて異なる化学組成を持つことが報告されている。ただし、この領域は緯度が高いため太陽光高度が低く、十分な観測信号が得られないことや、影の影響等により、従来、詳細な地質解析を行うことが困難であった。

我々は、これまでに月周回衛星「かぐや」に搭載したマルチバンドイメージャの観測データを用い、SPA 盆地の南側 1/3 領域を含めて、月南極域全体の詳細な可視から近赤外波長域をカバーする分光画像データを再処理し、影領域を極力減らしたデータセットの作成に成功している。

本研究では、この新しいデータセットを用いて SPA 盆地内部の詳細な地質解析を行った結果、これまで詳細な解析が困難であった南側約 1/3 領域において、マントル起源もしくは地殻深部起源の物質であるカンラン石に富む岩石の分布域を新たに複数箇所発見した。またカンラン石と同じく、これまでにマントル起源の物質であると推定されている Low-Ca 輝石の中にも、場所による化学組成（鉄含有量）のバリエーションが見つかるなど、新しく月内部構造の推定につながる地質情報を多数得ることができた。発表ではこれら新しく見つかった地質ユニットについて紹介するが、重要な知見として、SPA 盆地の南側約 1/3 の領域においては、それより北側には見られない岩石が分布することが、今回の研究によって、より明確に示されたことが挙げられる。この盆地内の領域による化学組成の違いが、月マントルの水平方向の不均一性に起因するのか、もしくは例えば斜め衝突など、SPA 盆地の形成に伴う掘削深度の水平方向での不均一性により、掘削されたマントル物質の起源深さが異なることに起因するのかを、各岩相の空間分布から考察する。

月の嵐の大洋におけるラコリス地形

○石山謙¹

¹東京国際工科専門職大学

ラコリスは、地下へのマグマ貫入によって隆起して形成する地形である [Turcotte and Schubert, Geodynamics, 2020]. 月においては、ラコリスと思われる地形も報告されているが [e.g., Wohler et al., Icarus, 2009], ラコリス地形か否かは明確に特定されていない. 本研究では、月における嵐の大洋における有名な 3 つの領域（リュムケル山, アリスタルコス台地, マリウス丘）がラコリス地形であることを示す. ラコリス地形モデル [Michaut, JGR, 2011] に基づいて、リュムケル山, アリスタルコス台地, マリウス丘の平均地形に、モデルを適用した結果、モデルは平均地形にフィッティングさせることができたため、これらはラコリス地形であることがわかった. リュムケル山では半径約 50km で高さ約 1.4-1.6km, アリスタルコス台地では半径約 120km で高さ約 0.85km, マリウス丘では半径約 80km で高さ約 2.8km と求められた. マグマの貫入深さを推定すると、月における岩脈の幅を仮定することにより、リュムケル山では 2-5km, アリスタルコス台地で 20-50km, マリウス丘で 3-7km と推定された. したがって、月の嵐の大洋付近では、活発な火山活動が行われており、それが要因になって、比較的大きなラコリスが形成したと考えられる.

可視近赤外分光手法を用いて発見した月 Arago クレーター近傍のトリウム異常を伴う分化した火成活動の研究

○荒木亮太郎¹, 佐伯和人², 大竹真紀子³

1. 大阪大学 理学研究科
2. 立命館大学 宇宙地球探査研究センター
3. 会津大学 コンピュータ理工学部

月面には Dark mantle deposits (DMD) と呼ばれる火砕堆積物が 100 ヶ所以上発見されている (Gustafson et al., 2012). DMD は周囲の海物質より反射率が低く, 一部は火口のような地形の凹みを伴う. これらは揮発性成分の放出でしぶきを上げるようにマグマが飛散することで, 急冷された火山ガラスを主な成分として含むと考えられている. 一部の DMD について, ガラスの特徴である波長 1 μm 吸収帯の幅の増大が報告された (Jawin et al., 2015). 我々はこの手法をさらに改良し月の火山性ガラス物質の分布を調べるため, 1 μm 吸収帯の幅を示すパラメータとしてバンド面積を吸収深さで割った値を考案した. そして, かぐやの Multiband Imager のデータを用いて, 1 μm 吸収帯幅の全球マッピングを行った.

その結果, これまでに報告されたほぼすべての DMD を 1 μm バンド幅増大域として明確に区別することが可能となった. 加えて, 静かの海西部にある Arago 地域に DMD とは明らかに特徴が異なる 1 μm 吸収帯幅の増大領域を発見した (図). この領域は, 珪長質鉱物ほど短波長に特徴が生じる Christiansen 特徴が周囲の海玄武岩より短波長であることや, 可視反射率が DMD とは逆に若干の明化傾向を示すことから, 周囲の海物質より相対的に分化が進んだマグマによって形成された火砕物と考えられる. 火砕物の東西に直線リルが横切っており, これが噴出時の火道として機能した可能性がある.

発見された火砕物は, Procellarum KREEP Terrane (PKT) 領域外における 10ppm を超える Th 異常濃集域として記載された地域 (Lawrence et al., 2003) の中心でもある. 火砕物の北西には ϕ ~26km の Arago クレーターがあり, 近傍に ϕ ~20km の Arago 2 および Arago 3 ドームが見つかる. ふたつのドームのアスペクト比からは, 比較的高粘性の溶岩で形成されたと考えられる (Schnuriger et al., 2020). これは火砕物と同じく分化が進んだマグマで形成されたことを意味する. 今回発見された火砕物はふたつのドームと関連して, 多量の揮発性成分を伴った火山活動によって火山性ガラスが堆積した領域と思われる. また, その分布からふたつのドームとともに当該領域の Th 異常の正体であると考えられる. PKT 領域外では, Th 異常を伴う分化した火成活動は稀である. しかし最近, Arago 地域から大きく離れた Th 異常濃集域の Compton-Belkovich Volcanic Complex (CBVC) に珪長質組成の岩体が発見されており (Sieglar et al., 2023), 月には分化の進んだ大規模な火成活動は存在しないという既存の理解に一石を投じた. Arago 地域が, PKT 領域外にある分化した組成を持つ火成活動として, CBVC に続いて 2 例目の存在なのであれば, 月の内部進化シナリオに大きな影響を与える発見となる.

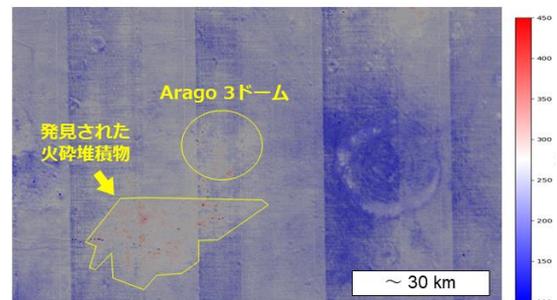


図. 1 μm バンド幅指標が大きいほど青から赤に変化する図. 火砕堆積物が分布する領域が赤い斑としてマッピングされた.

月周回衛星かぐや LRS の地下構造観測による Mare Frigoris のリッジ形成年代検討
Formation age of ridges in Mare Frigoris suggested by subsurface structures observed by Kaguya/LRS

○坂井優大¹, 熊本篤志¹, 加藤雄人¹

¹ 東北大学理学研究科地球物理学専攻

月周回衛星かぐや搭載の Lunar Radar Sounder(LRS)の観測データを解析し, Mare Frigoris でみられるリッジの地下構造を調べ, リッジ形成時期について検討した.

Williams et al. (2019)では Mare Frigoris で見られるリッジについて形成時期や形成原因が議論された^[1]. Mare Frigoris 西部では, 直線状に分布するリッジ, 南側の高地と境界付近でグラーベンとともに分布するリッジが見られるが, いずれも局所的な重力異常と分布の対応がないと見なされ, 直線状のリッジについては玄武岩層の堆積 (3.6~3.4Ga^[2]) 後に月全球の熱収縮 (開始時期 3.6Ga^[3]) や月震, 潮汐力により形成されたものと考えられた^[1].

本研究では, 探査機が Mare Frigoris 西中央部を西経 15.422 度で縦断し, 北緯 61.32 度でリッジ (以下「リッジ 1」と呼ぶ) 上空を通過したパスに注目した. リッジ 1 は Mare Frigoris 西側で見られる直線状に分布するリッジに該当している. 地表では, リッジ 1 は溶岩ユニット WCF4^[4] (形成年代 3.43Ga^[2]) 上に分布し, WCF4 と WCF1^[4] (形成年代 3.53Ga^[2]) の境界は, 北緯 61.13 度付近に位置する^[4]. 北緯 63 度より北側では WCF4 の 150m 下層が高地の基盤岩であることが, 小クレータ周辺の ejecta 分光解析から確認されている^[4]. このパスの LRS データを解析した結果, WCF1 から WCF4 にかけて北緯 55~58.8 度, 60.5~62.8 度の範囲では見かけ深さ約 400m の地下反射層が観測された. 地下反射層は WCF1 の下層とさらに古い溶岩層, または基盤岩層の間の古レゴリス層で, 南側の火口から噴出した溶岩が北緯 62.8 度まで北上・堆積して WCF1 が形成 (~3.53Ga) され, その後, 北側の火口から噴出した溶岩が北緯 61.13 度まで南下・堆積して WCF4 が形成 (~3.43Ga) されて, 地下の断層によってリッジ 1 が隆起がしたと解釈される. 地下反射面 2 は, WCF1 が堆積する以前に北緯 58.5 度~60.2 度の断層間に形成されたグラーベン表面の古レゴリス層と解釈されるが, 地下反射面 3 の解釈は不明で, 更なる検討を要する. これらの解釈から, リッジ 1 が 3.43Ga 以降隆起したことが示唆されるが, 3.6Ga 以降の全球収縮によって形成されたとする解釈とは矛盾しない. 一方で, Mare Frigoris 西中央部へのマグマ貫入^[5]を示唆する重力場マップも解析の進展で更新されており, この領域の同心円状でない荷重がリッジ形成に与えた影響についても検討が必要である.

参考文献 [1]Williams et al. (2019), Icarus 326, 151–16. [doi:10.1016/j.icarus.2019.03.002](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.03.002) [2]Hiesinger et al. (2010), Journal of Geophysical Research, VOL. 115, E03003 [doi:10.1029/2009JE003380](https://doi.org/10.1029/2009JE003380)[3]Hiesinger et al. (2003), J. Geophys. Res. 108, E75065.[4]Kramer et al. (2015), J. Geophys. Res. Planets, 120, 1646–1670, [doi:10.1002/2014JE004753](https://doi.org/10.1002/2014JE004753) [5]Andrews-Hanna et al. (2014) Nature, 514, 68–71. [doi:10.1038/nature13697](https://doi.org/10.1038/nature13697)

月のマントル対流モデルにおける深部からのマグマの移動 (Migration of Magma from Deep Mantle in a Mantle Convection Model of the Moon)

○于 賢洋¹, 亀山 真典², 小河 正基¹

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

「月深部におけるマグマの挙動」は月のみならず、岩石惑星の内部ダイナミクスを理解する上で重要である。本研究ではマグマの生成・移動の効果を考慮した2次元円環マントルモデルを用いて数値シミュレーションを行い、マグマが月内部進化に及ぼす影響を調べた。

月の進化に関して特に重要だと考えられる観測事実として半径変化史と火山活動史が挙げられる。地質学・測地学的観測から、月は全球で約38億年前までに膨張が起こっていたこと、月のマグマ噴出は月形成から数億年は活発ではなかったものの、徐々に活発化し、38-36億年前に活動のピークを迎え、その後約20億年-10億年前まで継続していたことが知られている。我々が昨年度開発した月内部の2次元円環マントル対流モデルの結果によると、これらの特徴がマグマの生成・移動によって説明可能である。ここでは、深部で生成されたマグマの地表面への上昇によって火山活動を、それに伴う部分溶融領域の拡大によって半径膨張を再現できることが示された。このモデルでは簡単のため、マグマの密度はマントルよりも常に軽いと仮定し、マントルの粘性率は温度のみに影響されるとしていた。本研究ではこれを発展させ、いくつかの文献で指摘されているような(1) 周囲のマントルより高密度のマグマや (2) マグマによるマントルの粘性率低下を仮定することによって、従来のモデルによる結果がどのような影響を受けるのかを調べることを目的としている。

構築したモデルにおいてマグマの生成は温度がソリダス温度を超えた地点で発生するとし、その移動は液相・固相間の密度差によって駆動される浸透流としてモデル化した。(1) 高密度なマグマ組成を考慮したケースでは、最近の文献 (Xu et al., 2022) を基にコア・マントル境界付近において、生成されたマグマは周囲のマントルより $\sim 100 \text{ kg m}^{-3}$ 密度が高いと仮定した。また、(2) メルトによる粘性率低下を考慮したケースでは液相体積分率に応じて最大4桁の粘性率が低下する (Mei et al., 2002) と仮定した。

計算の結果、(1, 2) どちらのケースにおいても、深部からマグマが上昇し、それによってこれまでのモデルと同様に月の半径変化と火山活動を説明できることがわかった。(1) 高密度なマグマを想定したとしても、深部マントルにて温度が上昇し、マグマが生成されることによる密度低下がマントル対流を引き起こし、それによってマグマが上昇する様子が見られた。(2) マグマによってマントルの粘性率が低下する場合でも、マグマは部分溶融プルームとしてマントルとともに上昇することがわかった。このことから、(1, 2) で考慮した効果は月全体の内部進化に与える影響は少ないことが予想される。今後は計算を3次元球殻に拡張することが課題として挙げられる。

計算開始から640 Myr (約3.8 Gyr ago)での結果

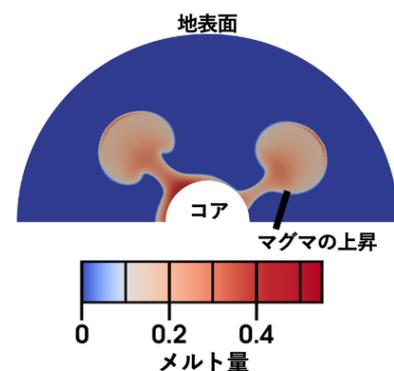


図1. マグマ・マトリックス密度逆転がある場合のプルームによるマグマ上昇の様子

月の衝突盆地放出物の厚さ分布の推定

○野間 光葉, 諸田 智克

東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

月面で発見されている約 50 個の衝突盆地(直径 300km 以上の巨大衝突クレーター) [Werner, 2014] は形成時に大量の放出物を生成し、水平・垂直方向に月表層物質の攪拌を起こし、月全球に数 km 以上の厚さの「メガレゴリス」層を形成した。アポロ計画により持ち帰られた岩石試料などの大部分が盆地で形成された放出物起源のものであると解釈されているが [Haskin et al., 2010]、試料採取地域における各盆地からの放出物や割合は依然議論されている状況であり [e.g., Haskin et al., 1998; Hurwitz et al., 2016]、試料の由来の不確実性は、試料の年代や組成情報から読み解かれる月の表層進化史の構築を困難にしている。このように、月の初期につくられた衝突盆地の放出物の厚さ分布を理解することは、月表層構造の理解と、アポロや将来探査による試料の起源の理解において重要である。また、放出物厚さの分布は盆地形成時の掘削量と掘削角度によって決まるため [Wünnemann et al., 2016; Luther et al., 2018]、巨大衝突過程と当時の月表層構造の理解においても重要である。

月全球の盆地放出物の厚さ分布はこれまでクレータースケーリング則などの実験的・理論的モデルを用いて推定されてきたが [Petro and Pieters, 2008]、それらのクレータースケーリング則を天体規模の巨大衝突に外挿して適用可能かは不明であり、衝突盆地からの距離と放出物厚さの関係を観測から決定することが必須である。また、近年月探査データの充実により、特定の盆地についてクレーター形態計測により衝突盆地近辺の放出物の平均厚さが調べられているが [e.g., Fassett et al., 2014; Xu et al., 2020]、クレーターの放出物厚さの分布やそのモデルを制約するためには、衝突盆地から様々な位置での厚さ推定も必要である。

本研究では、近年の月探査により蓄積されてきた高解像度画像データ、及び地形データの解析により、個々の衝突盆地中心からその衝突盆地の直径長さ以上に離れた位置での放出物厚さを計測し、巨大衝突における放出物厚さモデルを構築することと、それによって得られたモデルを用いて、盆地放出物厚さ分布を決定することを目的とする。複数盆地からの堆積の影響も考慮するため、クレーターサイズ分布を行い統計解析から放出物厚さを決定し、距離の関数とした厚さモデル [e.g., Pike 1974; McGetchin et al., 1973] と比較した。今回は月で最も新しい Orientale 盆地や Imbrium 盆地周辺において、Hertzsprung 盆地や Mendel-Rydberg 盆地などの盆地、その他溶岩流が見られない地域でクレーターカウントを行い、放出物厚さを計測した。その結果 Hertzsprung 盆地では放出物厚さ $\sim 129.0 \pm 0.5$ m、Mendel-Rydberg 盆地では ~ 60 m 以下であった。発表ではこれらの結果をもとに Orientale 盆地からの距離としての厚さ分布とモデルとの比較について議論する。

月面の科学とその実現のための活動の状況

○吉光 徹雄¹, 佐伯 孝尚¹, 森 治¹, 田中 智¹, 諸田 智克², 山田 亨¹,
古賀 勝¹, 目黒 裕章¹, 田邊 宏太¹, 狩谷 和季¹,
大槻 真嗣¹, 國井 康晴³, 前田 孝雄⁴, 宇佐美 尚人¹

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 東京大学, ³ 中央大学, ⁴ 東京農工大学

現在、月探査は新たな時代を迎えようとしている。2022年終わりにアメリカ合衆国によるSLSロケットの初号機が打ち上げられ、アルテミス計画による有人月探査活動が始動した。一方、無人の月面着陸機も各国で検討されており、2023年8月にインドが月面着陸、月面探査ローバミッションを成功させた。アメリカ合衆国予算を用いた商業月面輸送サービス(CLPS)による無人探査機も2023年中には初号機が打ち上がる予定となっている。日本においても2023年9月初めに小型の無着陸機SLIMが打ち上げられ、ようやく日本国産技術を用いた月面着陸が行われる。

月面は世界一級の成果を創出することが期待できる科学の場であるため、直近では科学が日本の月面探査を牽引することが期待されている。このことから、JAXA国際宇宙探査センターによる「月面での科学研究・技術実証ミッションにかかるフィジビリティスタディ(FS)」へ応募し、世界的な科学的成果と月面活動に必要な技術の双方の獲得を目指す活動を2022年度に実施した。この活動では、(1)月面からの天体観測、(2)重要な科学的知見をもたらす月サンプルの選別・採取・地球帰還、(3)月震計ネットワークによる月内部構造の把握、という世界をリードする成果の創出が期待される月面科学を対象テーマとし、それらの科学ミッションを2030年代に実施させるために必要なシナリオに関して、理学、工学双方の観点からの検討した。

これと同時に、有人探査を補強するための無人着陸機LEAD1号機の検討も始まった。LEAD1号機は、2030年までに日本の打ち上げロケットで日本の着陸機を月面の南極に着陸させるミッションであり、

- SLIMをベースとした重力天体ピンポイント着陸技術を用いて、搭載ペイロードを拡充させ、月面で長期間活動すること
- 表面探査ローバやロボットアームなどのロボティクス技術、自律化技術の本格的な実証をすること

を主眼に置いている。

フィジビリティスタディの活動は2022年度末にいったん終了したが、LEAD1号機も見据えて検討を継続することとなった。また、そこに搭載する探査ローバなどのロボット技術をどのように開発し、科学・工学コミュニティで活用・運用していくかという議論もスタートした。

本発表では、これら月面の科学実現に向けた活動について現在の状況について述べる。

月永久影領域の水分子の コールドトラップにおけるレゴリス形状の影響

○佐伯和人¹、松島亘志²、鹿山雅裕³

¹立命館大学 ESEC、²筑波大学 システム情報系、³東京大学 大学院総合文化研究科

月には太陽光の直達光が入射せず極低温に保たれる永久影と言われる領域がある。この領域では水のような揮発性物質を捕獲するコールドトラップが行われていると考えられている。コールドトラップやその後の水分子のレゴリス空隙内の移動のメカニズムとしては、レゴリス粒表面での昇華・凝華の繰り返しが考えられているが、レゴリス温度から推測される昇華・凝華速度では多くの水分子がまだ地下に移動できないうちに微小隕石衝突によって四散してしまう。そこで、最初に跳んできた水分子がすぐには凝華しないでレゴリス間隙を何度か跳躍しながら運動エネルギーを失った後、凝華するというモデルを考えた。この可能性を実証する室内再現実験を昨年度より始めているが、その結果を説明するためのモンテカルロシミュレーションも始めている。本発表はその数値シミュレーション部分である。昨年度は水分子が飛来した際、レゴリスと衝突し、完全に凝華して動かなくなるまでの跳躍回数を一定の回数とするというシンプルなモデルのシミュレーションを行った。レゴリスの形状を単純な球体とし、六方最密構造で積み上げ、さらに、この球体の半径を小さくすることで、空隙率を変化させた。また、衝突した水分子の再放出方向確率密度分布は真空下で起こりうる現象として余弦則に従うと仮定し、水分子が跳躍した軌跡を追跡することで水濃度初期深度グラフを作成した。結果、従来のレゴリス形状を考慮しない1次元拡散モデルによる水分子深度分布シミュレーションで使われていた、跳躍距離をレゴリス粒径程度とする仮定は近似としてそれほど悪くないことがわかった。3D球モデルは、空隙率90%（月レゴリス表層と同程度）の時、1次元拡散モデルと分布がオーダーではあうが、3D球モデルは1次元拡散モデルよりも宇宙に戻る分が多く地中に潜る分子は5分の1程度に減った。今回はレゴリスの形状として、Matsushima et al. (2008)においてアポロ16号試料の月レゴリスを計測して様々なサイズの球体を組み合わせることで74個の複雑形状粒レゴリスを表現し、それらを複製・積層してつくられた仮想レゴリス層を用いた。結果、空隙率を仮想レゴリスゆる詰めモデル（空隙率42%）と同じ空隙率の3D球モデルと比較したところ、水分子の残存率や到達深度はオーダーでは同等であったが、複雑形状を持つ仮想レゴリスの方が、より多くの水分子がより深いところに移動できる傾向があった。ただし、対称性が高い3D球モデルに比べて、複雑形状をした仮想レゴリスモデルでは、初期入射位置のランダム性の確保が難しいので、発表までに試行回数・パターンを増やしてより定量的に報告したい。また、跳躍の回数にも凝華温度や凝華率、潜熱などの熱力学的な考察を加え、単純なモデルと結果を比較し、より現実に近いモデルを提案する。

月極域探査機プロジェクトの検討状況： 水の存在量および存在形態の推定に向けた 水資源分析計 (REIWA) の開発

○西谷隆介¹, 下村琢磨¹, 石原吉明¹, 野村麗子¹, 水野浩靖¹, 大竹真紀子^{1,2}, 橋爪光³,
齋藤義文¹, 山中千博⁴, 小野涉⁵, 江崎和之⁵, 市田啓希⁵

¹JAXA, ²会津大学, ³茨城大学, ⁴大阪大学, ⁵千代田化工建設株式会社

日本を含む各国の月周回衛星のリモートセンシングデータから、近年、月極域に水が存在する可能性が示唆されている。しかし、これら観測データは水素原子の濃集 (e.g. Sanin et al. 2017) や水または OH 基に起因する 3 μm 付近での吸収 (Pieters et al. 2009) など水の存在を直接示すものではない、もしくは衝突体が月面に衝突させた際の放出物中の揮発成分 (Colaprete et al. 2010) で、普遍的な水の存在を示すものではなかった。そのため、水の存否や存在した場合の分布および存在形態についてはまだ結論が得られていない。これら月の水資源に関する情報は将来の宇宙探査活動において月の水資源が可用かを判断するために必要不可欠なものである。

月極域探査機 (LUPEX) プロジェクトでは、月極域における水の存在量や資源としての利用可能性を確認することを目的として、水の量と質に関するデータおよび水の濃集場所と濃集メカニズムに関するデータをリモートセンシングではなく探査ローバによるその場観測によって取得する予定である。

ローバに搭載される観測機器の1つである水資源分析計 (REIWA) は、ローバの掘削機構より受け取った月土壌サンプルについて、加熱をしながら重量計測を行い、発生した揮発成分について質量分析および微量水分測定を行うことができる統合パッケージ型分析装置である。サンプルの加熱および重量計測を担う熱重量計測部 (LTGA) は質量 6-10 g のサンプルを 100 K から 500 K まで 30 分で加熱することが可能であり、 9.8×10^{-6} N の分解能で重量計測 (質量 6 g のサンプルの場合、月重力下で 0.1 wt% 精度) が可能である。揮発成分の質量分析を担う質量分析部 (TRITON) は反射型 TOF 質量分析器であり、 m/z : 1-200 の質量範囲の分子・原子の測定が可能である。飛行経路長の異なる 3 つの分析モードがあり、質量分解能が最大 $m/\Delta m > 120$ となる。揮発成分中の微量水分測定を担う微量水分計測部 (ADORE) は、キャビティリングダウン分光装置である。揮発成分を導入した ADORE のサンプルセル (光共振器) 内にレーザー光を入射し共振させた後、レーザーを遮断する。遮断後に光共振器から漏れ出る光の減衰時間から、共振器中の水による吸収を質量にしてサブナノグラムの精度で定量可能である。レーザー光の波長を操作すれば、HDO/HHO など同位体比の定量も可能である。また、REIWA にはインド宇宙研究機関 (ISRO) が開発するラマン分光装置である ISRO 試料分析装置 (ISAP) も搭載される。REIWA は以上の各分析部によって、月土壌に含まれる水の存在量を 0.1 wt% の精度で測定するとともに月極域における水の存在形態・他揮発性成分の存否について明らかにする。

REIWA の現在のステータスは基本設計審査会 (PDR) を終え、詳細設計および開発モデル (EM) 製造に入った段階である。本講演では、REIWA の現在の開発状況、各試験の結果を報告するとともに、観測精度向上に向けた取り組みについても紹介する。

月永久影における H₂O コールドトラップ再現実験

○小山真矢¹ 佐伯和人²

¹大阪大学理学研究科、²立命館大学 ESEC

月面永久影領域は低温のため H₂O が長時間凝華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。H₂O の総蓄積量を推定するため、深度分布推定の研究が多数ある。代表的な研究として、H₂O のレゴリスへの凝華、昇華過程を深さ方向のみの 1 次元ランダムウォークに見立て、拡散過程をモデル化したものがある (Shorghofer, et al. 2007)。このモデルでは移動する H₂O 分子の温度を周辺レゴリス温度と仮定しているが、最初に永久影に到達する H₂O 分子は日照域から力学的エネルギーを持って弾道飛行で飛来するものが多いはずである。H₂O がエネルギーを持つ場合にはすぐに凝華せずに短時間の間に何度も跳躍する可能性があると考え、そのような過程が可能かを確認するために、月面を模した真空環境でレゴリス模擬ガラスビーズに H₂O を凝華させる実験を行った。実験装置は、ガラスビーズ封入試験管と H₂O 供給試験管、金属管コールドトラップ、排気ポンプの 4 つを管で繋げたものを使用した (Fig. 1)。ガラスビーズを液体窒素で冷やし H₂O を捕えるコールドトラップとした。排気ポンプで粗引きした後、金属管コールドトラップでさらに減圧し、その後 H₂O 供給試験管の温度を制御することで H₂O 供給の水蒸気分圧を制御した。H₂O を供給してガラスビーズ層にコールドトラップさせたのち、H₂O の存在深度分布を見るためガラスビーズを深度方向に分割し、それぞれの質量変化を測定して、各深さと水の存在量の関係を明らかにした。

H₂O 供給試験管を -20°C、配管温度を 30°C に保った実験の結果は、1 次元ランダムウォークのシミュレーション結果で得られる示唆と似た傾向を持ち、上部により多数の H₂O が存在している分布を再現できた。一方で H₂O を 0°C、配管温度を 30°C に保った実験の H₂O 深さ分布は、深さによらずほぼ均一な密度分布となった。H₂O の配管内

圧力が温度によって変わり、それに従い密度分布に違いが生じることを確認できた。H₂O 分子は、-20°C 時は分子流、0°C 時は中間流となっていることが示唆される。

上部に存在が偏る分布は分子流特有のものである。一方、3 分割した時の単位ガラスビーズ質量あたりの H₂O 密度に関して上 >> 底 > 中と、底層と中層の密度の逆転が見られるケースがある。現在、原因究明中だが、H₂O がガラスビーズの底部まで到達し底部で蓄積している可能性が考えられる。

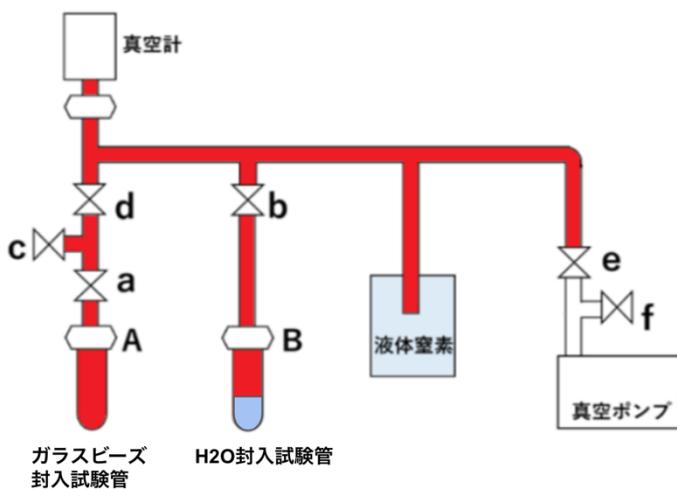


Fig. 1: コールドトラップ時の実験装置模式図。赤は同気圧のブロック。

H₂O 氷をターゲットにした 超高速衝突閃光の分光学的研究

○駒井一英¹, 加藤圭将¹, 菊地啓太¹, 阿久津正太郎², 秦野裕輝², 村田拓真²
阿部新助^{1,2}, 柳澤正久³, 長谷川直⁴

¹ 日本大学大学院理工学研究科, ² 日本大学理工学部, ³ 電気通信大学,
⁴ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

これまでの探査結果から、月の極域永久影には水氷の存在が示唆され、将来の月面有人活動における重要な宇宙資源として考えられている。NASAの探査機LCROSSでは、分離した2.2tのロケットを南極永久影に2.5km/sで衝突させ、近赤外線の吸収バンドや紫外線のバンド輝線からの分光観測を行い水由来と考えられるOHを検出した^[1]。また、月周回探査機LADEEでは、流星体が水分子や水酸基鉱物を有するレゴリス層への衝撃で月大気中に拡散したと考えられる水蒸気を複数の流星群の極大日に同期して検出した^[2]。このように月面に天然あるいは人工の物体が高速衝突した際、水氷の存在を示唆できる可能性があることから、地上実験においてH₂O氷にプロジェクタイトルを高速衝突させ分光データを取得することで、ターゲット由来の成分を検出できるか検証した。

Tandy et al. (2020)が行った氷(H₂O, CO₂)衝突実験の分光学的研究では、ターゲット由来の発光は検出されていない^[3]。これは低圧化における氷の昇華を抑えるためチャンバー内圧力を約5000Paに設定し、カメラの露光時間も10μsとしていたことで、プロジェクタイトル由来の酸化物が蒸気雲として強く光り、弱輝線が埋もれた可能性などが考えられる。我々の実験では、H₂O氷を-80°Cで過冷却後-50°Cほどに保冷することで昇華を防ぎ、チャンバー内を標準大気と窒素大気で圧力を1桁Paまで下げることが可能にした。また、連続撮影の露光時間を200nsにまで高速化させ、衝突直後の標的由来の水素輝線の検出を行うとともに、OH輝線発光を検出する紫外線分光計測も同時に実施した。その結果取得したスペクトルから黒体成分([a] 4600 K, [b] 2289 K)を減算し、JAXA放射計算パッケージ「SPRADIAN」を用いることで、水素輝線とOH輝線を同定した(Figure 1(窒素大気))。本発表ではH₂O氷ターゲット由来の衝突発光物理についての考察を行う。

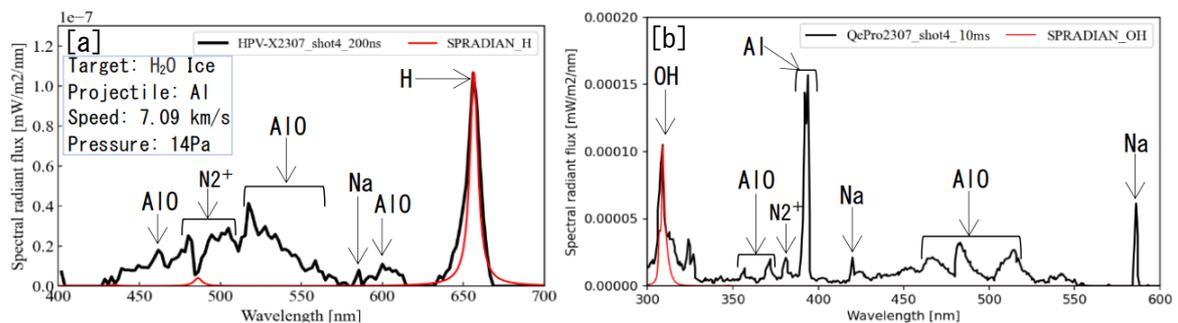


Figure 1. Identified H₂O related emissions. [a] H- α by HPV-X(Exp=200ns), [b] OH by QePro(Exp=10ms)

<参考文献>

- [1] A. Colaprete et al., "Detection of Water in the LCROSS Ejecta Plume", *Science* 330, 6003, 463-468, 2010.
- [2] M. Benna et al., "Lunar soil hydration constrained by exospheric water liberated by meteoroid impact", *Nature Geo science* 12, 333-338, 2019.
- [3] Jon D. Tandy et al., "Impact flash evolution of CO₂ ice, water ice, and frozen Martian and lunar regolith simulant tar gets", *Meteoritics & Planetary Science* 55(10), 2301-2319, 2020.

イオにおけるマグマオーシャン及びその内部構造について

○宮崎慶統¹, David J. Stevenson¹¹カリフォルニア工科大学 地質惑星科学部

イオ表面には、激しい潮汐加熱による活発な火山活動が観測されているが、その内部構造については完全に解明されていない。近年、ガリレオの磁力計データの再解析 (Khurana et al. 2011) により、イオ内部には、厚さ 50 km 以上の大部分が溶融している層が存在する可能性が提唱されている。ところが、この層がいわゆる液体的な「マグマオーシャン」なのか、それとも固体中にパーシャルメルトを含む「マグマスポンジ」のような層なのかは分かっていない。50 km 以上の厚さを持つこの層が固体的・液体的のどちらに振る舞うかによって、イオの内部ダイナミクスは大きく変わり得るので、この層の理解はイオ全体の理解にとっても重要な問題であると考えられる。

Juno 延長ミッションではイオの tidal Love 数の観測も予定されており、その観測結果はこの高い溶融率を持つ層がマグマオーシャンかどうか判別できることも予想されている。そこで、この研究では延長ミッションによる観測に先立ち、この層がマグマオーシャンかマグマスポンジかどうかの予測を行った。私たちは、この層が、固体的なマグマスポンジが定常状態を保っていると仮定して、この層を維持するために必要な内部加熱量の推定を行った。イオ内部での潮汐加熱の量 (約 100-200 TW) は、広範囲のパラメータにおいて、マグマスポンジを維持するに不十分であることが分かり、メルトの浸透によって速やかに二相に分離してしまうことを示した。イオのマグマの粘性が地球上の値よりかなり高い値になっていない限り、「マグマスポンジ」は不安定であり、したがって、イオ内部にはマグマオーシャンが現存していると考えられる。

現にマグマオーシャンが現存している場合、固体である表層の地殻層の方が、内部のマグマオーシャンより重く、上下で密度が逆転している構造を保っている可能性がある。我々は、このような構造が安定かどうかについて、様々な安定性解析を行った。イオのようなヒートパイプを通して大部分の熱を放出する天体の場合、冷たく硬い地殻が厚くなり、地殻とマグマオーシャンの境目で急速に温度が上昇することが予想される。その結果として、地殻最下部以外では粘性率が高くなるため、密度逆転が 40 億年程度の時間スケールでは重力不安定が必ずしも発展しないことを明らかにした。このような密度が逆転した構造はイオ以外のガリレオ衛星を含む他の天体でも現存している可能性があり、その理解は惑星地質の理解に重要になる可能性がある。

中間赤外分光イメージングによる木星衛星イオ環境を模擬した低温二酸化硫黄固体の変性実験

○根岸 昌平¹, 古賀 亮一¹, 趙 彪¹, 李 源¹, 高間 大輝¹, 平原 靖大¹, 伊藤 文之², 笠羽 康正³

¹名古屋大学, ²産業技術総合研究所, ³東北大学

イオは、エウロパとガニメデおよびカリストとともにガリレオ衛星を構成する木星の衛星であり、ガリレオ衛星の中で最も木星の近くを公転している。木星とエウロパおよびガニメデとの相互作用によって、イオ内部には大きな潮汐熱が発生しており、それを熱源としてイオは太陽系内で最も活発な火山活動を有する。この火山活動によって 10^{-3} Pa– 10^{-4} Pa 程度の希薄な大気が形成されており、その主成分は二酸化硫黄 (SO_2) である。イオは夜や木星蝕中において表面が約 90 K まで冷却され、大気中の SO_2 ガスが凝華（凝縮）することで霜状の SO_2 固体が表面に堆積する。一方で、昼になると太陽光によって表面が約 120 K まで加熱され、 SO_2 固体は昇華する。以上のように、イオでは昼夜の周期（~42 時間）に応じて、大気と表面の間で SO_2 の気相-固相循環が成立している。

イオにおける SO_2 の大気および固体の実態については、多種の波長帯域での観測により様々な知見が得られてきた。電波領域では原理的にガスしか観測できないのに対し、赤外領域ではガスに加えて固体の情報についても同時に得ることが可能である。Voyager I 探査機は大気の熱赤外スペクトルを観測し、~8.7 μm に SO_2 分子の基準振動モードである ν_1 振動（対称伸縮振動）の弱いバンドを、~7.4 μm に同じく基準振動モードである ν_3 振動（逆対称伸縮振動）の強いバンドを取得した（Pearl *et al.*, 1979）。表面の SO_2 固体については、Galileo 探査機による観測で大きさや疎密がイオ表面の場所によって異なることが明らかになっている（Douté *et al.*, 2001）。一方で、 SO_2 固体の物性の解明を目的とした模擬赤外分光実験が過去に数例行われてきた。Nash and Betts (1995) では、イオ表面環境を模擬して様々な相状態における SO_2 の赤外拡散反射吸収スペクトルを測定している。彼らは相状態によって中間赤外線波長域のバンド形状が大きく異なることなどを報告したが、イオ環境下における熱や紫外光による SO_2 固体の変性メカニズムとスペクトルの対応関係はこれまでに解明されていない。

本研究では、実験室でイオの低温低圧の環境を再現して SO_2 固体を堆積し、その中間赤外線スペクトルを *in-situ* 測定することで、イオ表面の SO_2 固体の変性プロセスの解明を目指した。液体窒素クライオスタットの真空チャンバー内 (≥ 80 K, $\geq 10^{-4}$ Pa) にパルスノズルを用いて SO_2 ガスを噴出し、冷却されたヒーター付サンプルホルダーの貫通穴上 ($\phi 3$ mm) に固定した ZnSe 基板に SO_2 固体を堆積した。そこへ中間赤外線を垂直照射させ、ミクロンオーダーの微小領域を観測可能なイメージングフーリエ変換中間赤外線分光器 (2D FT-MIR) を用いて透過吸収イメージングスペクトルを取得した。分光撮像の結果、~7.4 μm (SO_2 ν_3 領域) に強いバンドが、~8.7 μm (SO_2 ν_1 領域) に弱いバンドがそれぞれ観測された。バンド強度比 $I(\nu_1)/I(\nu_3)$ の値が SO_2 ガス分子と比べて 5 倍程度大きく観測され、凝縮相中の SO_2 分子間の相互作用の強さを反映していると考えられる。堆積した SO_2 固体に対し、ヒーターによる温度フィードバック制御機構を用いてサンプルホルダーの温度を昇降し、イオの昼夜の表面温度変化を想定したアニーリングを行った。また、イオ表面に到達する太陽光を想定し、 SO_2 固体に重水素ランプの紫外光を照射した (~190 nm–340 nm)。本発表では、これらのイオ環境を想定した物理化学条件下における SO_2 固体の変性プロセスをスペクトルのバンド構造の変化から考察する。

木星表面構造の色度変動と形状および ドリフト速度変動との関係

Relationship between fluctuations in the color of Jovian surface structures, apparent features, and the drift motion.

○茂原健太郎¹, 伊藤颯¹, 鈴木秀彦¹, 田部一志²

¹ 明治大学, ² 月惑星研究会 (ALPO-Japan)

木星の大気構造には、帯 (Zone)・縞 (Belt) と呼ばれる縞構造や大赤斑 (GRS)・永続白斑 BA(Oval BA) と呼ばれる渦構造など、様々な特徴的構造がある。これらの大気構造の色や形は長年の研究観測により、様々なタイムスケールで変動していることが確認されている。これらの変動は木星上層大気で起こる大気ダイナミクスを反映していると考えられるが、未だにそのメカニズムは解明されていない。これらの変動メカニズムを解明するためには、探査機や宇宙望遠鏡からのスポット的な集中観測に加えて地上からの連続的な観測が有効である。

本研究では地上からのマルチバンドイメージング観測により木星表面構造の色の時系列変化を色度値として測定し、表面構造の形状変化との関係を調査した。大気透明度による影響は観測時の木星に近い標準星の測光データを用いて補正を行った。特に 2021 年と 2022 年の観測結果から赤道帯 (EZ)、北赤道縞 (NEB)、南熱帯 (STrZ)、大赤斑 (GRS) において色度値の時間変動を調べた。その結果、EZ と NEB では 2021 年から 2022 年にかけて赤みが薄くなり (図(a),(b))、GRS では赤みが濃くなっていることが分かった (図(c))。また STrZ では明確な変化がなかった (図(d))。また、GRS の色の変化の原因については、月惑星研究会 (ALPO-Japan) が提供する GRS とその周囲の形状を比較することで、周辺構造の変化 (GRS 周りの灰青色のアーチの発生) と関係していることが確認された。また、90 日振動などの GRS のドリフト速度変動と GRS の色度の変化には明確な関係は見いだせなかった。

本発表では主に 2021 年と 2022 年に得られた地上観測の結果に基づき得られた木星表面の各構造の色度変化と形態変化の関係について示し、その連動メカニズムについて考察した結果を報告する。

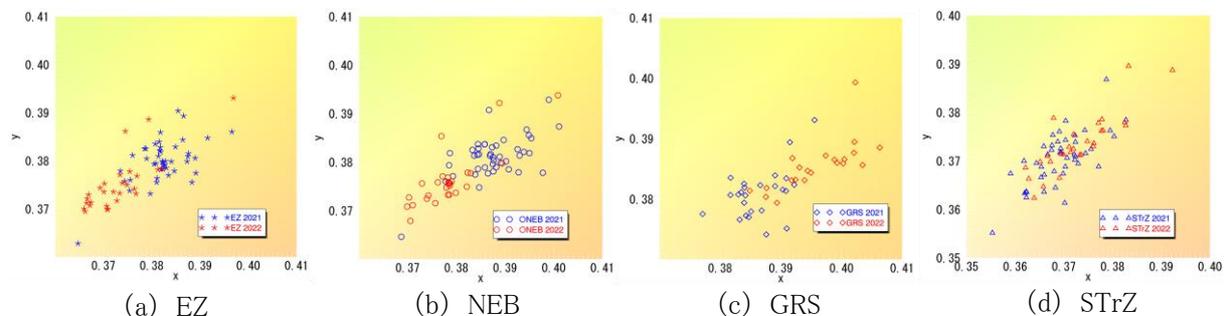


図 2021 年と 2022 年の観測シーズンにおける木星表面構造の色度値の分布

JUICE 木星氷衛星探査計画

○関根康人¹，齋藤義文²，浅村和史²，塩谷圭吾²，笠井康子¹，笠羽康正³，春山純一²，松岡彩子⁴，JUICE 日本チーム
¹JAXA，²東京工業大学，³東北大学，⁴京都大学

2023年4月14日，フランス領ギアナから，JUperiter ICy moons Explorer - JUICE 探査機を載せたアリアン5ロケットが打ちあがった。JUICEには日本からも200名近い科学者が参加しており，日本の惑星科学のコミュニティとして，巨大ガス惑星と氷衛星の科学に船出する。JUICE探査機には，日本が国際共同で開発に関わった4つの観測装置（電波・プラズマ波動観測器（RPWI），プラズマ環境観測パッケージ（PEP），レーダー高度計（GALA），サブミリ波分光計（SWI））も，他の6つの装置に加えて搭載されている。

ESAが主導するJUICE全体の科学目標は，「巨大ガス惑星周りの生命生存可能性（ハビタビリティ）の調査と特徴づけ」とされ，そのための木星系氷衛星の総合探査を行う。最大の目標は，木星系最大の衛星であるガニメデの地下海の特徴づけにある。ガニメデの周回機となり，内部構造や表面物質を明らかにしていく。日本として，この中でどのような独自のサイエンスと強みを発揮できるかを，本発表では議論する。

まずは，惑星形成論があるだろう。いったい，木星や土星は，太陽系のどこでどのようにできたのであろうか。惑星形成理論は，急速な原始木星の成長を助ける機構としてペブル集積理論を提案した。しかし，これはあくまで理論に過ぎない。実証レベルまで，理解を高めるには観測が必要となる。例えば，ペブル集積で木星が形成した場合，ガリレオ衛星にその痕跡が残らないだろうか。ペブルで衛星ができた場合，集積熱は衛星表面のみにしか与えられず，内部は未分化のまま形成するのではないか。その後，放射性熱源で内部が暖められた場合，ガニメデやカリストはどのような内部構造を呈するであろうか。惑星形成論が生まれ，「はやぶさ2」が成功した今の日本だからこそ，地球にとって「水の送り手」と形容される木星を，太陽系全域を含む新しい視点で探査できるだろう。

別の日本の強みは，氷衛星の内部の海，その化学や生物学にもある。日本ではいち早く惑星科学と地球化学が協力・融合し，土星氷衛星エンセラダスの地下海の化学や水環境を明らかにしてきた。ヨーロッパでは，氷衛星の海の化学に関する研究グループはまだ生まれておらず，JUICEによる氷衛星表面物質から，地下海の化学や生命に迫るという点に関しては，日本が主導できるだろう。

最後の強みとして，木星系磁気圏のサイエンスも挙げられよう。木星は極めてダイナミックな惑星であり，大気のみならず，強力な磁場も高速で回転している。この強力な磁場が，太陽風を始めとする木星周辺のプラズマを加速する。加速されたプラズマは，木星大気に降り注いでオーロラとなるだけでなく，エウロパなど氷衛星の表面にも降り注いで化学反応を誘発する。さらに，木星氷衛星ガニメデは，固有磁場を持っている。小さな固有磁場をもつガニメデと巨大な木星磁気圏との相互作用など，宇宙プラズマ物理にとって未開拓で豊かなフロンティアが広がっている。

ガニメデのような小さな衛星の磁気圏と木星の巨大磁気圏の探査に加えて，「ベピコロンボ」による水星磁気圏，「あらせ」など地球磁気圏の理解を繋ぐことで，惑星磁気圏と恒星プラズマとの相互作用について，個別論を超えた，統一的な視点を獲得できよう。このような視点は，今後さらなる隆盛期を迎えるだろう系外惑星の科学，特に惑星大気や地表環境の理論に実証を加え，日本独自の強みにもつながるに違いない。

エンセラダスのクレーター分布を元にした 内部海の活動史の推定

○ 太田原 裕都¹、諸田 智克¹、平田 直之²

1. 東京大学大学院理学系研究科、2. 神戸大学大学院理学研究科

土星の衛星エンセラダスの南極域からはプルームの噴出が確認されている。このプルームは氷の地殻の下にあると考えられる内部海が起源であるとされている。内部海では生命が存在可能な環境が構築されている可能性があり、この可能性を議論する上で内部海やプルームの存続期間・活動史を制約することが重要である。本研究ではエンセラダスのクレーター分布や地形ユニットの調査を行い、内部海やプルームの活動史を推定した。

Crow-Willard & Pappalardo (2015) によりエンセラダス表面はいくつかの地形ユニットとして区分されている。北半球の大部分はクレーターの多く見られる領域で占められており cratered plain (cp1, cp2) として分類されている。しかし実際には cp1 や cp2 といったユニットはさらに細かいサブユニットに区別できると考えられる。土星探査機カッシーニの撮影した画像を見ると、cp1 や cp2 の中でも浅いクレーターが多く、地形緩和が進行していると思われるサブユニットや、形成以降に緩和や地殻変動などをあまり受けていないサブユニットなどが見られる。そこで本研究ではカッシーニ画像を用いて、cratered plain において大クレーター(>~3km)の緩和が進行していると思われるサブユニットとそうでないサブユニットを抜き出し、それぞれについて直径 1 km 以上のクレーターをカウントしてクレーターサイズ頻度分布(CSFD)を作成した。クレーターカウントの結果、緩和があまり進んでいないと見られるサブユニットに比べ、緩和が進行していると思われるサブユニットでは直径~3km 以下の小クレーターが欠如していることが判明した。

さらに、サブユニットとクレーターの相関関係についてより全球的な調査を行った。緩和が進行していると思われるサブユニットには谷状の地形(trough)が多く存在する。この trough の数密度とクレーター密度の比較を行った。エンセラダス表面を緯度 9°×経度 9°のグリッドに区分し、それぞれのグリッドにおける trough 密度と直径 1~3km の小クレーターの密度を散布図にしたところ、相関係数が-0.55 となり負の相関が見られた。このことから緩和が進行していると思われるサブユニットほど小クレーターが欠如していると言える。

小クレーターを選択的に消去する過程としてまず南極域で噴出したプルームからのダスト堆積が考えられる。Zahnle et al. (2003) によるエンセラダスのクレーター生成率をもとに、プルームからの堆積によりクレーターが消去されていた場合の CSFD を作成し、今回の CSFD と比較したところ、CSFD の折れ曲がり方が異なっていることがわかった。そのため、南極プルームからの堆積とは異なる過程により小クレーターの消去が起きたと考えられる。例えば trough のような地形から過去にプルームや氷のマグマが噴出して局所的に小クレーターを消去した可能性が示唆される。

巨大衝突による原始天王星系円盤形成 シミュレーションの状態方程式依存性

○村嶋慶哉¹ 佐々木貴教¹

¹京都大学

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

そこで、本研究では、先行研究で用いられている3つの異なる状態方程式 (ANEOS/SESAME、Tillotson EOS、およびHubbard & MacFarlane(1980)のモデル) を使用して、氷の巨大惑星である天王星に対する巨大衝突のシミュレーションを実施した。シミュレーションの手法としては、Density Independent SPH(Saitoh & Makino, 2013; Hosono et al., 2013)を用いた。本発表では、特に形成される円盤の氷：岩石の質量比や岩石の総質量に注目して、状態方程式の違いによる影響を報告する。

土星リングは、なぜ若く見えるのか？

○兵頭龍樹¹

¹ISAS/JAXA

土星リングの99%以上が水氷で構成されているという観測結果は、土星リングが最近形成された（若い）という結論を導いた。その理由として、土星のリングが形成された後も、non-icy material を含んだ微小隕石が絶えず降り注ぎ続けるため、時間の経過とともにリング内の non-icy material の割合が増えていくはずである。従って、大部分が水氷でできている土星リングを説明するには、リングが比較的最近形成されたと考えるのが自然となる。この点はNASAのカッシーニ探査による一つの重要な発見として挙げられ、カッシーニの研究チームも「土星のリングは約1億年前に形成された」との見解を示している。

一方、理論的な観点から見ると、土星リングのような大規模な構造を約1億年前（地球上で恐竜が繁栄していた時代）に形成するのはなかなか困難だとされる。太陽系の形成史を振り返ると、約1億年前は既に安定した時期であり、土星リングを生み出すほどの大きなイベントが発生する可能性は低いと一般的に考えられている。

本研究は「土星リングは本当に若いのか？」「若く見えているだけなのではないか？」というスタンスで行った研究である。具体的には、微小隕石が土星リングに降り注ぐプロセスを理論と数値計算を用いて詳細に調べた。従来、微小隕石は土星のリングに次々と降り積もると考えられていたが、本研究の結果、微小隕石はリングと衝突した際に蒸発、その後凝縮し、電荷を帯び、土星の磁気圏に捕獲され、最終的に土星の大気に吸収されることが分かった。つまり、土星リングが(例えば)約40億年前にほぼ水氷だけで形成されても、微小隕石による影響で「汚れず」「若く見える」状態を保ちうることを示唆された。

存在頻度推定による短周期巨大惑星形成の 主星質量依存性の調査

○蔭谷泰希¹、成田憲保^{1,2}、福井暁彦¹、小玉貴則¹、

¹東京大学、²アストロバイオロジーセンター

巨大惑星は惑星系において恒星を除いて最大の天体であり、巨大惑星形成の有無がその他の惑星の形成、進化の可否に大きな影響を与える。この観点から、巨大惑星の形成進化過程の解明は、惑星系全体の形成、進化、多様性を理解する上で非常に重要である。これまで太陽型星周りの短周期巨大惑星の発見数は400個を超えており、その存在頻度は約1%であることがわかっている。太陽型星周りの巨大惑星の存在頻度は主星金属量との相関が確認されており(e.g., Fischer & Valenti 2005; Johnson et al. 2010)、コア降着モデルによる形成が有力であると考えられてきた。一方、コア降着モデルでは、原始惑星系円盤における物質の量が十分でないという点から低質量星(M型星)周りでの巨大惑星形成は困難であると考えられてきた(e.g., Laughlin et al. 2004; Ida & Lin 2005, Burn et al. 2021)。しかし、2018年に打ち上げられたトランジット系外惑星探査衛星TESSによって非常に低質量な恒星の周りでも短周期巨大惑星が発見され始めている(e.g., Kanodia et al. 2023; Hobson et al. 2023; Kageyama et al. 2023)。短周期巨大惑星を有する太陽型星とM型星の比較から短周期巨大惑星形成の主星質量依存性を観測的に制約することは非常に重要であるが、異なる条件下における発見数を用いる場合には注意が必要である。

本研究では、M型星周りの短周期巨大惑星について存在頻度を推定した。存在頻度は発見数に対してトランジット確率と観測装置の検出感度を考慮した補正を施すことで、同一条件下での比較を可能にする。これまでM型星周りの短周期巨大惑星に対して存在頻度の推定を行った研究は2つ存在する(Gan et al. 2023; Bryant et al. 2023)が、本研究では先行研究において考慮されていなかった恒星パラメータ空間に対して存在頻度を推定することで、先行研究と相補的な推定を行った。

本講演では、存在頻度推定までの解析過程と結果を報告するとともに、それらを用いた短周期巨大惑星形成の主星質量依存性について議論を行う。

地上からの惑星 2 次食観測による超高温惑星 KELT-9 b の昼面温度推定

○林優哉¹, 成田憲保¹, 福井暁彦¹

¹東京大学

系外惑星の 2 次食は公転によって惑星が恒星の背後に隠れることによって起きる、一時的な減光現象である。その減光幅は惑星の明るさと対応しており、主に惑星による熱放射と見なすことができるため、2 次食観測から惑星の昼面の温度を推定することができる。

現在までに TESS や Spitzer, CHEOPS 等の宇宙からの測光観測によって得られた 2 次食深さから、多くのホットジュピター(主星に近接して公転するガス惑星)の昼面温度が求められているが、これらの観測はいずれも広い観測波長域で積分された値であり、2 次食深さの波長依存性にほとんど言及できていない。惑星の熱放射はその波長によって放射している大気の光学的深さが異なるため、その波長依存性を調べることは、惑星の鉛直温度構造を調べることにつながる。

本研究の対象とした KELT-9 b は TESS や CHEOPS によって昼面温度が約 4600 K と見積もられており(Wong et al. 2020d, Jones et al. 2022), 現在最も高温な惑星として知られている。また、ハッブル宇宙望遠鏡の近赤外カメラで温度逆転構造(高度が上がるにつれて温度が上昇する構造)が確認されている。

本研究では独自に地上から KELT-9 b の可視から近赤外の波長の多色 2 次食観測を、1.52 m 望遠鏡に搭載された MuSCAT2 (g-band: 400–550 nm, r-band: 550–700 nm, i-band: 700–820 nm, z-band: 820–920 nm) と、1 m 望遠鏡に搭載された Sinistro (Y-band: 950–1060 nm) で行った。得られた光度曲線の変化をモデルフィットさせたところ、BIC の上では観測した全バンド 2 次食ありモデルが最も整合的であった。このうち i-band と z-band の減光幅は~4000 K の黒体放射と整合的であったが、他バンドは 4000 K の黒体放射より大きな減光幅を示した。

本講演では解析手法と結果の詳細について報告し、先行研究との比較を通して KELT-9 b の温度構造についての議論を行う。

種族合成モデルによる微惑星リングからの コールドジュピター形成

○Kangrou Guo¹, Masahiro Ogihara¹, Yasunori Hori², Shigeru Ida³, Fabo Feng¹, Kaiming Cui¹,
Dong Lai^{1,4}

¹李政道研究所 ²アストロバイオロジーセンター ³地球生命研究所 ⁴コーネル大学

近年の系外惑星観測により、遠方軌道にある巨大惑星に関する情報が豊富に得られてきている。これらの惑星をコールドジュピターと呼び、ここでは質量が 0.3 木星質量以上かつ軌道半径が 1au 以上の巨大惑星を指す。コールドジュピターの軌道分布や質量分布はそれらの形成史を制約する際に重要である。これまでの視線速度法観測により、巨大惑星の存在頻度は中心星からの軌道距離とともに増加し、およそスノーラインに対応する軌道位置で減少に転じることが明らかになってきている。また、視線速度法とアストロメトリ法を組み合わせた系外惑星観測によって、軌道長半径-惑星質量平面における詳細な分布も明らかになってきている。本研究では、観測されたコールドジュピターの存在頻度や軌道長半径-惑星質量平面分布の理論的解釈を導き出し、また将来の系外惑星観測への理論的予測を行うことを目的とする。具体的な方法として、種族合成モデルを用いて生成した惑星分布を観測結果と比較する。本研究では特に、初期の固体面密度分布として古典的なべき乗分布を用いるのではなく、リング状に形成した微惑星から惑星が集積する状況を考える。研究の結果、初期に微惑星リングの存在を考えることで、巨大惑星の大部分は軌道半径が 1au 以遠に形成することがわかった。また惑星移動を考慮した場合においても、形成した巨大惑星が長周期軌道に留まることが可能であることもわかった。生成した巨大惑星の存在頻度は軌道半径が大きくなるにつれて増加し、2-3au 付近でピークに達する。最大の惑星質量は軌道半径が 3au 以内において軌道距離とともに増加し、その増加の傾きは従来の種族合成モデルの結果よりも急峻である。これらの特徴は最新の観測結果と一致している。以上の研究結果は、微惑星がリング状に形成された場合、そこがコールドジュピター形成の理想的な場所となることを示唆している。

複数惑星系の巨大衝突進化に関する半解析的モデルの開発

○ 木村真博¹, 星野遥¹, 小久保英一郎¹, 生駒大洋¹

¹ 国立天文台

現在の近接惑星系形成の描像では、円盤内で成長・軌道進化を経た複数の惑星が中心星の近傍領域に比較的狭い軌道間隔で並び、その後巨大衝突や軌道散乱を経験して、最終的な惑星の質量や軌道構造が決まると考えられている。しかし、こうした進化を追うために用いられるN体計算は膨大な計算コストがかかり、観測との統計的比較に十分な惑星種族合成計算などを行うには適さない。こうした計算コストを削減するため、先行研究のIda & Lin (2010)では、巨大衝突や軌道散乱に伴う惑星の軌道要素の変化を半解析的に記述するモデルを開発した。一般に巨大衝突進化プロセスはカオス的なものであるが、その結果得られる最終的な惑星の軌道や質量の分布には統計的な特徴があることが知られている。先行研究では特に1太陽質量星周りの1au付近の領域において、そのような統計的特徴量を再現することに成功している。一方で現在多くの系外惑星が発見されている中心星近傍の領域(0.1au付近)においては、巨大衝突進化の様子は質的に異なり、先行研究のモデルでは十分に表現できない。そこで本研究では、より中心星近傍領域や、異なる質量の星まわりにも適用できるような新しい半解析的モデルを開発した。そしてN体計算の結果と比較を行い、モデルの検証を行った。その結果、我々のモデルは、1太陽質量星まわりの0.1-1 auの幅広い領域と、M型星(0.2太陽質量)まわりの0.1au付近の領域において、N体計算から得られる最終的な質量や軌道の分布をよく再現できることがわかった。このモデルをその他の惑星形成素過程と組み合わせることによって、複数惑星系の相互作用を考慮しつつ、計算コストを非常に低く抑えた惑星種族合成モデルを開発することができる。そのようなモデルは今後の系外惑星観測データとの統計的な比較に向けて重要となる。

2m 望遠鏡 Faulkes Telescope South 用の 4 色同時撮像カメラ MuSCAT4 の開発とそのサイエンス

○成田憲保^{1,2}, 福井暁彦¹, 渡辺紀治¹, 森万由子¹, 河合優悟¹, 林優哉¹,
川内紀代恵³, 日下部展彦^{2,4}, 田村元秀^{1,2,4},
ほか MuSCAT チーム, Las Cumbres Observatory スタッフ

¹ 東京大学, ² アストロバイオロジーセンター, ³ 立命館大学, ⁴ 国立天文台

Faulkes Telescope South (FTS)はオーストラリアの Siding Spring Observatory (SSO)内で Las Cumbres Observatory (LCO)が運用する口径 2m の自動望遠鏡である。SSO は南緯 31 度 16 分 23.88 秒、東経 149 度 4 分 15.6 秒、標高 1,116m の地点にある。

我々は FTS2m 望遠鏡用の 4 色同時撮像カメラ MuSCAT4 を開発している。MuSCAT4 は 3 枚のダイクロイックミラーにより天体の光を 4 つの波長帯に分け、4 台の 2k CCD カメラで独立あるいは同期して観測を行う。4 つの波長帯は SDSS の g (400nm-550nm), r (550nm-700nm), i (700nm-820nm), z_s (820nm-920nm)バンドに相当する。CCD のピクセルスケールは 0.27 秒/ピクセルで、観測視野は 9.1 分角である。装置の基本的な仕様は 2020 年にマウイ島の Faulkes Telescope North (FTN) 2m 望遠鏡でファーストライトを迎えた MuSCAT3 と同一であるが、高温でダストが多いオーストラリアの環境での長期的運用のため、水冷 CCD カメラを導入した。

また、新たにフィルター交換機構を導入し、g, r, i, z_s バンドの各ブロードバンドフィルターを遠隔操作でナローバンドフィルターと交換できるようにした。r バンドのナローバンドフィルターはナトリウム D 線付近(589.3nm±6nm)を選択的に観測することができる。このナローバンドフィルターを用いて主星が明るいホットジュピターを観測することで、雲の影響をあまり受けておらずナトリウムの超過吸収が見られる惑星(トランジット分光観測に適した惑星)を探すことができる。このナローバンドフィルターを用いて系外惑星大気赤外線分光サーベイ衛星計画 Ariel の観測に適したターゲットを選定するスクリーニング観測を計画している。

また、MuSCAT4 は MuSCAT シリーズの中で初めて南半球の望遠鏡に搭載される。これにより、これまでアクセスできなかった南天のトランジット惑星候補の発見確認観測に参入することができる。特に南半球からは若い星団の多くが観測可能であるため、MuSCAT4 は TESS で発見された若いトランジット惑星候補の発見確認観測に適している。

本講演では、以上の MuSCAT4 の開発経過と仕様、サイエンスについて紹介する。

赤外線天文衛星 GREX-PLUS 計画の進捗報告

Progress report of space infrared telescope mission GREX-PLUS

○井上昭雄¹

¹早稲田大学物理学科

JAXA 宇宙科学研究所が戦略的に進める中型計画は、GDI (Groupe de Discussion Intensive; 戦略的中型創出グループ) とコミュニティが一緒になって作り上げることになった。本講演では、宇宙物理学 GDI のもと、2022 年 12 月に設置された銀河進化・惑星系形成観測ミッション時限 WG で検討されている Galaxy Reionization Explorer and Planetary Universe Spectrometer (GREX-PLUS) 計画の進捗状況について報告する。GREX-PLUS は、口径 1.2m、温度 50K の冷却宇宙望遠鏡に波長 2-8 μm 帯 5 バンドの広視野カメラと波長 10-18 μm 帯で分解能 30,000 の高分散分光器を搭載し、「初代銀河」と「スノーライン」の探査を二大科学目標としている。科学検討においては、30 名の執筆者の協力を得て、GREX-PLUS により実現可能な 18 個のサイエンスケースを取りまとめた Science Book を発行した(arXiv:2304.08104)。また、戦略的中型計画として相応しい科学的価値を維持するための Threshold Science 案の策定を行なった。システム検討においては、コスト抑制を重視しながら、全般的な仕様の見直し、技術課題の抽出を行なった。特に衛星システム全体の軽量化、望遠鏡の光学系と構造の検討、指向制御の成立性確認、冷却系の最適化などに重点的に取り組んでいる。国際協力については、検出器提供から広視野カメラ製作を含む貢献をアリゾナ大学など米国のグループと議論している。講演では 2024 年春のミッション提案に向けた最新の検討状況について報告し議論したい。

高密度コントラストを伴う現象を記述するための Volume-based Smoothed Particle Hydrodynamics

○ 瀬野 泉美¹, 犬塚 修一郎¹

¹ 名古屋大学理学研究科理学専攻

原始惑星は水素を主体とした一次大気を持つと考えられている。その後、大気を持った天体同士が衝突合体すると、衝突によって惑星大気を失うだけでなく惑星に大量の熱が供給され、惑星大気は衝突エネルギーによって膨張することが期待されている。Kurosaki & Inutsuka (2022) では、巨大衝突後の惑星大気の安定性について議論するために、数値流体計算法の一種である Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH 法) を用いて解析・議論を行なった。SPH 法とは、有限の大きさに離散化した流体粒子をラグランジュ的に追跡して流体を記述する手法の一種で、その大変形を伴う現象を記述できるという利点から天体衝突シミュレーションで頻繁に用いられている。しかし、従来の SPH 法には、大気と岩石のような密度の大きく異なる状態を含む問題を扱う際に、相の境界面で精度が悪くなる、という問題が存在する。これは、系全体を等質量粒子で離散化していることが原因で発生する問題であるが、非等質量粒子を用いた SPH 法の詳しい精度検討と開発・改善は未だ成されていない。本講演では、Inutsuka (2002) をもとに各粒子の質量が非一様な SPH 粒子を扱う新たな計算法として Volume-based SPH 法 [Seno & Inutsuka (2023) submitted to *JCP*] を開発した成果について発表する。また、従来の SPH 法が抱えていた、接触不連続面で圧力に揺らぎ (wiggle) が生じる問題についても改善法を提案する。

1次元光化学モデルを用いたM型星周りの暴走温室状態にある陸地惑星の水蒸気大気における水損失の推定

○川村陽(1), 吉田辰哉(1), 寺田直樹(1), 中村勇貴(2), 小山俊吾(1), 狩生宏喜(1), 寺田香織(1)

1. 東北大学 2. 東京大学

Estimating water loss from H₂O-dominated atmospheres on terrestrial planets in the runaway greenhouse phase around M dwarfs by a 1D photochemical model

○Yo Kawamura (1), Tatsuya Yoshida (1), Naoki Terada (1), Yuki Nakamura (2),

Shungo Koyama (1), Hiroki Karyu (1), Kaori Terada (1)

1. Tohoku University 2. Tokyo University

Terrestrial planets currently in the habitable zone around M dwarfs are expected to have a temperate surface environment. Such planets are estimated to have been in a runaway greenhouse condition up to ~1 Gyr and have lost significant portions of H₂O during this phase owing to the photolysis of H₂O followed by hydrogen/oxygen loss to space (e.g., Luger and Barnes, 2015). However, the efficiency of the reproduction of H₂O (e.g., $\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}(^1\text{D})$) that would reduce the photolysis-induced water loss is yet to be estimated.

To estimate the efficiency of the reproduction of H₂O, we calculated an H₂O-dominated atmosphere on an Earth-like planet in a runaway greenhouse condition using a 1D photochemical model based on PROTEUS (Nakamura et al., 2023) under the stellar properties of TRAPPIST-1. We consider 40 photochemical reactions for 10 chemical species (H₂O, H, H₂, O, etc.), assuming all of which are produced from the photodissociation of water vapor. As for the upper boundary conditions, the diffusion-limited escape of hydrogen is supposed. The calculated atmospheric structure is different from previous studies. Particularly, as shown in Fig. 1, the reproduction of H₂O occurs as efficiently as the photolysis of H₂O, although the previous studies assumed that hydrogens generated from the photolysis of H₂O efficiently escaped to space. The estimated photolysis-induced water loss rate is several to several tens of times lower than the previous estimates. Our results give more positive suggestion to the habitability of the exoplanets around M dwarfs than previous studies.

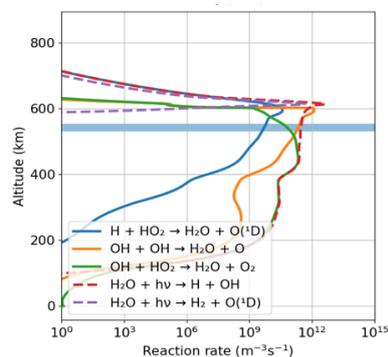


Fig 1. The profiles of H₂O-related reaction rates in an H₂O-dominated atmosphere of a planet in a runaway greenhouse condition. Solid lines indicate production reactions, while dashed lines loss reactions.

原始大気-マグマオーシャン相互作用に基づく岩石惑星の形成シナリオ

○ 前田悠陽¹, 佐々木貴教¹

¹ 京都大学大学院 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻

地球に海洋をもたらした水の起源は、生命の起源にとどまらず、惑星形成のシナリオを探るという点で、惑星科学における重要な課題のひとつである。

岩石惑星の形成過程において、原始惑星の形成後の環境は現在と大きく異なる。第一に、降着に伴う重力エネルギーの解放により、原始惑星の表面は熔融状態にあった(マグマオーシャン)。第二に、0.2地球質量程度を超える岩石惑星は、その形成途中で原始惑星系円盤のガスを捕獲し、水素に富む原始大気を獲得する。

本発表では、岩石惑星の形成過程を地球の形成に絞り、この原始惑星形成後の特徴的な表層環境を通して明らかにすることを旨とする。すなわち、原始惑星までは成長したものとして、その後の進化に注目する。

先行研究として、Young et al.(2023)では、原始地球を原始大気、マグマオーシャン、内部のコアの3相でモデル化し、系の化学平衡を数値的に計算した。その結果、水の生成やコアの低密度化、金属元素の酸化が起こり、現在の地球の化学的特徴が再現されることを示した。

しかし、この結果はコア-マントル境界まで全熔融したマグマオーシャンの存在と、適当な量の原始大気を捕獲したことを前提として計算を行っている点に注意が必要である。

コア-マントル境界まで全熔融したような深いマグマオーシャンは、原始惑星同士の巨大衝突によって形成することが期待される。また、水素に富む原始大気は、巨大衝突後に周囲の円盤ガスを重力捕獲することで獲得する。そのため、Young et al.(2023)のモデルはそれ単体で計算するのではなく、原始惑星が互いに巨大衝突を起こし、地球サイズまで成長してゆく一連の過程の中に組み込む必要がある。

このとき、原始惑星系円盤のガスは時間に伴って散逸する。そして、巨大衝突時のガス散逸度は、原始大気の獲得量を決定し、最終的な地球の化学組成に大きく影響する。

本研究では、Kominami and Ida(2002)をベースに、円盤ガスにより原始惑星が受ける抵抗力を考慮したN体計算を行い、時間に応じてガス面密度を下げることで、巨大衝突時のガス散逸度を計算した。また、巨大衝突時に残っている円盤ガスに応じた量の水素を初期大気量として与えて、Young et al.(2023)のモデルを組み込むことで、最終的に地球に相当する惑星がどのような化学組成を持つか評価した。そのさい、ガスの散逸は時間に対して指数関数的な散逸を仮定し、散逸時間(ガス面密度が $1/e$ になる時間)や、原始惑星まで成長した時点でのガス面密度をパラメータとして振ることで、どのような条件であれば地球の化学組成の再現ができるかを検証した。その結果、古典的な描像において地球の化学組成を再現しうることを示した。

本発表では、この結果を紹介し、岩石惑星の形成シナリオとしての妥当性を議論する。さらに、円盤ガスの散逸や大気の獲得過程、軌道移動の効果などについて、より詳細な議論を行う予定である。

SiH₄ : スーパーアース大気中におけるマグマ由来の化合物

SiH₄: Magma-derived component in super-Earths' atmospheres

○伊藤祐一^{1,2}、木村真博¹、大野和正¹、藤井友香¹、生駒大洋¹

¹国立天文台、²University College London

これまでの系外惑星探査から、発見されたスーパーアースは1000個以上に及んでいる。そして、昨年から運用が始まった宇宙望遠鏡 James Webb Space Telescope (JWST) を用いたスーパーアースの大気観測 (Kempton et al. 2023) に代表されるように、今、スーパーアースの詳細な特徴づけを行う新たな時代がおとずれている。また、JWST だけに留まらず、2029年に打ち上げ予定である宇宙望遠鏡 Ariel: Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey (ESA M4 Mission) が、木星型から地球型の惑星まで高精度かつ広い波長領域での系外惑星大気観測サーベイを行う予定であり、今後スーパーアースの理解は飛躍的に進むことが期待される。

観測されたスーパーアースの軌道-半径分布を再現する惑星形成・進化モデルは、水素を大気散逸で失った岩石惑星と、多量の水素大気と岩石コアを持つ惑星がスーパーアースの主な種類であることを示唆している (Owen & Wu 2017; Jin & Mordasini 2018)。後者のようなスーパーアースは、分厚い水素大気があるために岩石コア表面が溶融・蒸発するほど高温となり、揮発した岩石蒸気が水素大気の組成を変えることが期待される。そのため、このマグマ由来の大気組成を、観測から検出することは、分厚い水素大気を持つスーパーアースが岩石コアを持つ証拠となりうる。また、マグマ組成・酸化還元度の制約につながる可能性もある。しかしながら、酸化铁的な（酸化鉄を含む）マグマは水素と反応することで多量の水を生成することが知られている (Ikoma & Genda 2006, Kite et al. 2020) が、還元的な（酸化鉄を含まない）マグマを持つ場合は水素とどのように反応するか明らかにはなっていない。

本研究では、スーパーアースが還元的マグマと水素大気を持っている場合を想定し、それらが化学的に相互作用しどのように大気組成が変質するかを、化学平衡計算を用いて調べた。本化学平衡計算では、マグマから蒸発した SiO と H₂ の反応で SiH₄ が生成するパスが重要となる。その際、SiO と H₂ の反応で生成するもう一つの分子である H₂O のマグマへの溶け込みが起こる場合には、H₂O 量の減少によりさらに多くの SiH₄ が生成することを明らかにした。本発表では、多量の SiH₄ が生成する条件を紹介し、その場合のスーパーアースの大気スペクトルについて議論したい。

還元的初期地球大気の光化学的進化

○吉田辰哉¹, 小山俊吾¹, 中村勇貴², 寺田直樹¹, 倉本圭³

¹東北大学, ²東京大学, ³北海道大学

地球マントル物質と各種始原的隕石の同位体組成の比較から、地球集積物質の大部分は後期集積物質を含め始原的隕石の中で最も還元的なエンスタタイトコンドライトに酷似していたことが示唆されている (Dauphas, 2017). この場合、同時に集積する揮発性物質が集積物質中金属鉄による還元作用を受けることで、原始地球上に H₂ や CH₄ に富む還元的大気が形成されたと予想される (Kuramoto and Matsui, 1996; Schaefer and Fegley, 2010). 還元的環境下では光化学過程等によりアミノ酸や核酸の構成要素となる多種多様な有機化合物が生成されやすいため、還元的初期大気が前生命的化学進化の主要場として機能していた可能性がある一方 (e.g., Miller, 1953), 水素散逸や光化学反応に伴う酸化剤供給により酸化的組成への変化も同時に進行すると予想される (Zahnle et al., 2020; Wogan et al., 2023). この大気進化過程は CH₄ 等の大気成分のみならず光化学的生成物である炭化水素をはじめとした有機化合物による UV 遮蔽の影響を受けるはずだが、これまでその影響の詳細については調べられてこなかった.

そこで本研究では H₂ と CH₄ から主に成る還元的初期地球大気の鉛直 1 次元光化学モデルを構築し、CH₄ から生成される有機化合物と酸化物の生成率を推定し、さらにその結果を元に還元的初期大気の大気組成の推定を行った. モデルでは H₂, CH₄, H₂O, N₂ に化学生成物を加えた計 61 成分と、それら化学種間の化学反応の計 342 反応を考慮した (Tian et al., 2011). 各化学種の光解離率を求めるため約 44 億年前の初期太陽の UV スペクトル推定結果を入力した (Claire et al., 2012). 化学過程に加え乱流拡散と分子拡散に伴う各化学種の鉛直輸送を考慮した.

H₂ 混合比が大きいほど CH₄ の再生成反応 (CH₃+H+M→CH₄+M) が効率的に働くことにより正味の CH₄ 分解が抑えられ、CH₄ は光化学的に安定となる. CH₄ 混合比が約 10 %以上の場合には CH₄ から生成される C₂H₆ 等の炭化水素が UV を効率的に吸収し、相対的に H₂O の光分解とそれに続く CH₄ の酸化が抑制される. その結果、CH₄ の大部分がより分子質量の大きい炭化水素をはじめとした有機化合物に変換されることになる. 本研究で得られた結果は、大部分の水素が散逸した後大気中での有機化合物生成が急速に進行、それらが原始海洋に堆積し、さらに海洋中での有機化合物の加水分解反応や重合反応を経て生命前駆物質生成が進んだことを示唆する.

参考文献

- Dauphas, N. (2017). *Nature*, 541(7638), 521.
Kuramoto, K., & Matsui, T. (1996). *J. Geophys. Res.*, 101(E6), 14909.
Schaefer, L., & Fegley Jr, B. (2010). *Icarus*, 208(1), 438.
Zahnle, K. J., Lupu, R., Catling, D. C., & Wogan, N. (2020). *Planet. sci. j.*, 1(1), 11.
Wogan, N. F., Catling, D. C., Zahnle, K. J., & Lupu, R. (2023). *arXiv preprint*.
Tian, F., Kasting, J. F., & Zahnle, K. (2011). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 308(3-4), 417.
Claire, M. W., Sheets, J., Cohen, M., Ribas, I., Meadows, V. S., & Catling, D. C. (2012). *ApJ*, 757(1), 95.

潮汐固定された惑星における 大気崩壊とハビタビリティ

○谷口 啓悟^{1,2}, 小玉 貴則³, Martin Turbet⁴, 玄田 英典¹

¹東京工業大学地球生命研究所, ²東京工業大学理学院地球惑星科学系, ³東京大学総合文化研究科
先進科学研究機構, ⁴Laboratoire de Météorologie Dynamique, IPSL, Sorbonne Universités

ハビタブルな惑星とは、地表面に水を液体として保持可能な惑星を指す (Kasting et al., 1993)。液体の水を維持するには、適切な温度・圧力条件を満たした気候を有している必要があり、大気中の CO₂ および CO₂ の温室効果はそのような気候を考えるにあたって重要な要素である。

一方で、系外惑星観測の観点から M 型星周辺の系外惑星が着目されている。このような M 型星周辺の惑星は、中心星からの潮汐力によって潮汐固定されている可能性が高い。潮汐固定された惑星は常に同じ半球を中心星に向けている一方で、夜面は温度が低くなる。夜面の地表面温度が十分低い場合、大気中の CO₂ が地表面で凝結・トラップされ大気中から除去される、大気崩壊と呼ばれる現象が発生する (Turbet et al., 2018)。大気崩壊が発生した場合、大気中の CO₂ 分圧および温室効果は減少するため、気候の寒冷化に寄与するが、昼面の強い日射によって恒星直下点付近に液体の水が維持されている可能性が考えられる。先行研究である Turbet et al. (2018) では、Trappist-1 の惑星に着目し、各惑星に対し大気崩壊が発生する条件について検証されていたが、大気崩壊によって大気中の CO₂ が減少した後の液体の水分布およびハビタビリティについては議論されていなかった。

そのため本研究では、潮汐固定された地球型惑星を対象とし、全球気候モデルを用いて惑星の大気全体を 3 次元的に計算することで、大気崩壊による CO₂ の凝結が液体の水分布およびハビタビリティに与える影響を、理論的・系統的に検証した。数値シミュレーションには、Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) が開発した全球気候モデル Generic PCM を使用した。N₂、CO₂ の混合大気を有した地球サイズの仮想的な惑星を仮定し、N₂・CO₂ 分圧と日射量をそれぞれモデルパラメータとして設定した。

結果として、大気崩壊が発生した場合、ある CO₂ 分圧に到達するまで大気中の CO₂ は除去され続ける。しかし同時に全圧も減少することから、昼面から夜面への大気の熱輸送が減少し、昼面の日射によるエネルギーが夜面へ分配されにくくなることで、恒星直下点付近の温度が上昇する可能性があることが分かった。これまでは、大気崩壊は温室効果を減少させ温暖な環境を妨げる要因として考えられていたが、潮汐固定された惑星では大気循環にも作用することで寧ろ局所的にハビタブルな環境を維持させるといふ、従来とは異なる役割を示すことが分かった。これらの結果は、潮汐固定された惑星のハビタブルゾーンにおいて、新たな制約を示唆するものである。

金星の紫外アルベドと大気大循環の長期変動

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

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

⁴国立研究開発法人産業技術総合研究所, ⁵東京学芸大学教育学部

金星探査機や宇宙望遠鏡による紫外線観測の結果から、金星のアルベドが最近 10 年で数十%も変動し、それに伴って、金星上層大気の太陽光吸収による加熱率が上部雲層 (高度 59–72 km) で大きく変化していることが発見された (Lee et al., 2019)。推定された加熱率の変動は、高度 66 km・緯度 15 度・正午において 27–50 K/day の範囲である。このような太陽光吸収量の変動は地球では考えられない大きさであり、大規模な気候変動を、特に太陽光吸収量の多い雲層においてもたらすものと予想される。実際、Lee et al. (2019) は雲頂の平均東西風 (大気スーパーローテーション) の風速が、アルベドの変化に同期するように 30–40% も変動していることを指摘している。Venus Express やあかつきの観測 (Khatuntsev et al., 2013; Kouyama et al., 2013; Hueso et al., 2015) によると、雲頂での東西風速はアルベドが大きいとき 80–90 m/s まで遅くなり、アルベドが小さいとき 110 m/s 程度まで速くなる。本研究では太陽光加熱の変化に対して大気大循環がどのように応答するか、大気大循環モデル (GCM) を用いて明らかにしていきたい。

本研究で用いた金星 GCM は AFES (AGCM for the Earth Simulator) (Ohfuchi et al., 2004; Enomoto et al., 2008) に基づく AFES-Venus (Sugimoto et al., 2014a, b; Suzuki et al., 2022) である。積分開始から 50 地球年のあいだは加熱強度を変化させず、準定常状態を求めた。積分開始後 51 年以降は、Lee et al. (2015) に基づき、高度 59–72 km の領域で加熱強度を 12 年周期で変化させた。加熱強度の変化率は最大 (高度 65 km) で 0.65 倍から 1.35 倍である。これ以外の領域では加熱強度は時間的に一定とした。

時間積分の結果、平均東西風は概ね 95 m/s から 130 m/s の範囲で変化し、加熱率が大きくなると速くなり、加熱率が小さくなると遅くなる。この結果は観測事実と整合的である。風速の変化は加熱率の変化とほぼ同期しているが、1–2 地球年ほど遅れるようである。初期解析の結果によると、加熱率の変化にもなって熱潮汐波の振幅だけでなく、運動量輸送の分布 (平均東西風の加速・減速の分布) が変化する。加熱率が大きいときには加速率が大きくなり、広い領域で平均東西風が加速されるようになることから、平均東西風の変化は熱潮汐波の変化によって説明できる可能性がある。講演では、熱潮汐波の運動量輸送の分布が変化する原因や、短周期擾乱・平均子午面循環の寄与などについても議論し、平均東西風の変化のメカニズムを明らかにしたい。

TSUKIMI テラヘルツ波観測による 偏波比と推定誘電率に基づく水氷濃集領域の判別

○小林真輝人、宮本英昭、竹村知洋、吉岡航輝¹

¹東京大学

TSUKIMI 計画 (Lunar Terahertz SURveyor for Kilometer-scale Mapping) はテラヘルツ波を用いたパッシブ観測により、月広域にわたる地下浅部の水氷や金属などの濃集可能性領域のマッピング及び表層付近の物理特性の制約を目指している。これを達成するために、TSUKIMI ではマルチ周波数を用いた偏波観測を実施し、放射輝度及び偏波比を定量する。

テラヘルツ波は波長が <1 mm 以下と短く表層の微小なラフネスの影響を受けるため、表層からの放射輝度の絶対値を単純なフレネル反射で記述するのは難しい。一方で、偏波比 (水平・垂直偏波の強度比) として扱えば、ラフネスの効果が系統的にキャンセルアウトできることに気がついた。そこで我々はこの偏波比を同等のラフネス、組成、温度などをもつ領域において相対的に扱う、Relative Polarization Ratio (RPR) を定義した。この RPR は現実的にどの程度絶対値として議論できるか不明瞭であるため、これに基づき計算される誘電率を Apparent Bulk Permittivity (ABP) と定義し、領域ごとの ABP を相対的に扱うことでアノマリーを検出する戦略をとることとした。このアノマリーは、地下の水氷や金属などが地下浅部に濃集した場合に生じる可能性がある。そこで、本発表では、偏波比に影響を与える RPR に着目し、水氷が濃集する領域が存在した場合に生じうる ABP 差を、テラヘルツ帯における月シミュラントの誘電率計測値に基づき制約する。

月周回衛星「かぐや」による 月外気圏のプラズマ観測

○寺田健太郎¹・西平龍成²・横田勝一郎¹・福田航平¹

¹大阪大学, ²京都大学

「かぐや」は、2007年に打ち上げられた日本で2番目の月周回衛星である。これまで「かぐや」に搭載されたイオン質量分析器(Ion Mass Analyzer)により、月由来のナトリウムイオンやカリウムイオン(Yokota et al. 2009, 2014)、太陽風によって地球から剥ぎ取られた地球由来の酸素イオン(Terada et al. 2017)、全球規模で月から放出される炭素イオン(Yokota et al. 2020)を検出してきた。本発表では、これらの成果を紹介するとともに、月の外気圏に関する新たな知見を報告する。

参考文献

- 1) S. Yokota *et al.* Geophysical Research Letters **36**, L11201 (2009)
- 2) S. Yokota *et al.* Geophys. Res. Planets **119**, 798–809 (2014)
- 3) K. Terada *et al.* Nature Astronomy **1**, 0026 (2017)
- 4) S. Yokota *et al.* Science Advances **6**, eaba1050 (2020)

月のクレータ斜面の微地形と岩石存在率分布から推定される 熱疲労による風化と物質移動過程

○池田あやめ¹、熊谷博之¹、諸田智克²

¹名古屋大学、²東京大学

近年、月周回衛星による探査から、月のクレータ斜面では岩塊崩れやレゴリス流など様々な地形の特徴が発見されている (Xiao et al., 2013)。これらの地形を形成する原因としてこれまで天体衝突によるレゴリスの再配置が考えられてきた (e.g., Ross, 1968; O'Brien and Byrne, 2022) が、熱疲労による影響も近年指摘されている (e.g., Bickel et al., 2021)。岩石はレゴリスより熱慣性が大きく熱浸透深さが大きいいため、岩石存在率分布 (RA; Bandfield et al., 2011) が大きい領域は特に熱疲労によって地形が変化する可能性がある。本研究では、地形変化の多様性の要因を調べるために、Lunar Reconnaissance Orbiter および「かぐや」のデータを用いて、RA の大きい領域が存在している Flamsteed クレータ (315.7–315.9°E, 4.14–4.83°S) で解析を行った。このクレータ斜面では RA が大きい領域から小さい領域まで不均一に分布している。北～西側斜面の中腹では周辺と比較して黒い岩塊が舌状に密集して分布し、その上端はリムから一定の距離に帯状に分布している様子が見られた。南側でも黒い岩塊が存在するものの、密度や規模は減少していた。クレータ斜面の断面を多項式関数でフィッティングした平均的な斜面と比較すると、特徴的な凹凸をもつ微地形がみられ、この微地形と RA の大きい領域には対応があることがわかった。これらの微地形のうち、リムに近い領域での最大凹みの大きさを Δh とすると、特にクレータ南西部の比較的 RA の小さい領域において Δh と RA の大きさに正の相関がみられた。このような微地形は一定の拡散係数では再現できないため、場所によって拡散係数が変化する次元拡散モデルを用いて計算を行った。その結果、微地形は斜面の途中で拡散係数をステップ状に大きくすることで再現でき、観測された Δh の大きさ (< 20 m) を再現する拡散係数と時間の積 (κt) は 10^5 m^2 以上必要であることがわかった。RA の大きい領域と微地形が対応することは、岩塊の破碎で生成されたレゴリスで微地形が形成されたことを示している。岩塊の残存時間 (岩塊が 99% 破碎されるまでにかかる時間) を 300 Ma (Basilevsky et al., 2013) とすると、 κ はおよそ $10^3 \text{ m}^2/\text{Ma}$ 以上となった。これは Fassett and Thomson (2014) で推定された月面クレータの平均的な拡散係数 ($5 \text{ m}^2/\text{Ma}$) より 2 桁以上大きい。黒い岩塊の密集領域の上端にある帯状の領域は高チタン含有量を示すことから、過去のマグマ活動による溶岩層であると解釈できる。この層から天体衝突のみで選択的に岩塊を破碎することは難しく、さらに RA が大きい領域では熱慣性が大きいことから、熱疲労によって効率的に岩塊を破碎しレゴリスを生成することで、斜面へ岩塊供給と微地形の形成が起こっていると考えられる。これらの結果は熱疲労がクレータ斜面の地形変化に大きな役割を果たしていることを示している。

Mini-RF と Diviner の観測に基づく月表層誘電率と表層温度の関係

○孫辰浩¹、宮本英昭²、小林真輝人²、吉岡航輝²

¹東京大学工学部システム創成学科

²東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

近年、月極域付近のレゴリス中での水氷の存在可能性が注目を集めている (e.g., Feldman et al., 1998; Li et al., 2018)。しかし、極域における水氷の存在量や形態、またその濃集機構については依然として不明点が多く、さらなる検討が必要とされている。特に、月極域の水氷の濃集機構の解明には、数 cm から数 m スケールの深度における水氷の垂直構造を広い領域で把握することが重要となる。しかし、既存の探査で取得された分光観測データは観測深度が表層数 mm の程度であり、また 1 m ほどの観測深度をもつ中性子分光計のデータは必ずしも水氷の存在を示していない。私たちは、数 m 程度までにおける水氷の垂直構造を広い領域で解析するためには、数十 cm-数 m ほどの観測深度をもつ合成開口レーダー等の観測データの解析が重要と考えている。合成開口レーダーの観測により推定される誘電率は、水氷の有無やその濃集形態を理解する上で有用であるが、同時に波長スケールのラフネスやレゴリスの組成等多様な要素による影響を受ける。そのため、誘電率から水氷の濃集を評価する場合、水氷の濃集以外の要素の誘電率への寄与を適切に評価することが非常に重要となる。特に、月レゴリスの誘電率の温度依存性は近年実験的に初めて示唆されたが (Kobayashi et al., 2023)、実際に月表層の観測データから推定された誘電率とその温度依存性を検討した例はない。そこで本研究では、Lunar Reconnaissance Orbiter に搭載された合成開口レーダー Mini-RF と赤外輝度温度計 Diviner の観測から推定された誘電率と表層温度を比較し、月面での誘電率の温度依存性を検討した。

本研究ではラフネスの影響が小さいと考えられる月表層のクレーター地表面を選定し、誘電率の温度変化を検討した。選定したクレーター地表面における誘電率は Mini-RF の観測データより計算されたストークスパラメータから推定を行った (Gao et al., 2023)。この際、ラフネスや組成が同様である条件下で誘電率の温度依存性を確認するため、同一の観測領域に関して複数の観測時刻における誘電率推定を行った。各観測時刻における地表面の温度は、Diviner の観測データから推定された月表層における輝度温度 (e.g., Williams et al., 2019) を採用した。誘電率の推定に用いた Mini-RF データの観測時刻に対応する時刻の温度を比較し、選定したクレーターの地表面における誘電率と温度の関係を検討した。本発表では、月表層における誘電率の温度依存性に関連して詳細を報告する。

■ 参考文献

- [1] Feldman et al., *Science*, 281(5382), 1496-1500, 1998.
- [2] Li et al., *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(36), 8907-8912. 2018.
- [3] Kobayashi et al., *Earth, Planets and Space*, 75(1), 1-9, 2023.
- [4] Gao et al., *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 197, 56-70, 2023.
- [5] Williams et al., *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124(10), 2505-2521, 2019.

小型月着陸実証機 SLIM 搭載の近赤外マルチバンド分光カメラ（MBC）の現況と運用計画

○西野真木¹、佐伯和人²、仲内悠祐²、大竹真紀子³、佐藤広幸¹、石原吉明¹、
長岡央²、本田親寿³、山中千博⁴、前田孝雄⁵、西谷隆介¹、荒木亮太郎⁴、
坂井真一郎¹、澤井秀次郎¹、福田盛介¹、櫛木賢一¹、石田貴行¹

¹宇宙航空研究開発機構、²立命館大学、³会津大学、⁴大阪大学、⁵東京農工大学

JAXA の小型月着陸実証機 SLIM は月面へのピンポイント着陸を行うとともに、着陸地点では搭載の近赤外マルチバンド分光カメラ（MBC）による科学観測を実施する予定である。SLIM の着陸予定地点である SHIOLI クレーター近傍では月マントル物質の露出が期待されており、MBC の近赤外波長域での撮像により月マントル物質を構成するカンラン石などの鉱物を同定し、月マントル組成の推定をおこなう。我々のグループでは 2022 年度までに MBC の開発を完了し、SLIM 探査機本体に搭載した。

SLIM 探査機を載せた H2A ロケット 47 号機は、2023 年 9 月に種子島宇宙センターから打ち上げられる予定である。打ち上げ後早い段階で、MBC の初期チェックアウトとして地球撮像およびダーク撮像をおこなう予定である。その後、数ヶ月間の深宇宙クルーズを経て探査機を月周回軌道に投入した後、月面の日照領域を撮像し較正観測をおこなう。通常の科学観測は着陸後に実施する。

地球撮像・月撮像をおこなうパスは、画角のなるべく多くの領域を地球もしくは月面明部が占める時間帯が望ましい一方で、システム側に影響を与えない時間帯とする必要があり、打上予定日ごとの予測軌道に基づいて撮像パスを検討した。

月面で観測を開始するまで MBC の可動部にロンチロックがかかっており、チェックアウト観測では波長 750 nm に固定、フォーカスを無限遠に固定した撮像をおこなう。一方で、露光時間は初期チェックアウトの時点で可変であり、3 種類の露光時間を試すとともに、オート露光の動作確認をおこなう予定である。波長の変更（フィルタホイール動作）とフォーカスを変更する撮像は、月面でロンチロック解除後におこなう。

月面への着陸後は、1 枚撮像（撮像機能の確認）、ロンチロック解除、1 シーン撮像（10 枚で 1 シーン）、スキャン撮像、ダーク撮像、スキャン結果に基づいた詳細撮像観測（約 10 シーン）の順におこなう予定であり、これらが成立するようにダウンリンク期間・冷却期間・地上局切替期間・その他システム運用の期間を設定する。

講演では SLIM プロジェクトおよび MBC の概要を述べるとともに、初期チェックアウトを含めた MBC の観測計画を紹介する予定である。

月の新たな描像に迫る UZUME ミッションの検討

○春山純一¹、UZUME-WG

¹JAXA/宇宙科学研究所

これまで、月の海の多くは、一気に噴き出た(洪水型)玄武岩溶岩が支配的とされてきた。一方、嵐の大洋のマリウス丘は、火山噴火を繰り返して形成された楕状火山であることはほぼ明らかである。マリウス丘が位置する嵐の大洋は、PKT 領域と呼ばれる放射性元素に富む領域であり、地下の熱源がそうした繰り返し噴火を駆動したのであろうことが示唆される。しかし、SELENE 搭載の高度計による標高データと地形カメラの立体視データから、水平解像度、標高解像度ともに高い月面標高モデルが求められると、楕状火山らしき地形が、静の海(の北東のコーシー領域)や、豊の海(の北西部)といった PKT 領域以外にも確認されてきた。これらの領域の地殻厚さは、GRAIL データからは 50km 程度以上である。もし、これらの地域が楕状火山であるならば、繰り返して噴火をもたらす要因について疑問が生じる。PKT 領域とは異なった領域に、楕状火山を生み出す要因として可能性があるのは、水の寄与である。今世紀になって、アポロサンプルの再解析により、また嫦娥 5 号のサンプルによりマグマに水が含有されるとの証拠も見つかっている。インドの探査機チャンドラヤーン 1 号に搭載された多バンド分光画像機器 M3(エム・キューブ)により、月の低中緯度表面にさえ水が見つかることも整合する。しかしながら、楕状火山「らしい」とはいわれるものの、火口が無い、標高が低い、などから、必ずしも楕状火山とは確実視されていない。そこで、PKT 領域でも無く、地殻も厚いコーシー領域が楕状火山かどうかの証拠の鍵として、コーシー領域にある縦孔の壁に見られる薄い層構造と、縦孔の底の下に広がる地下空洞が溶岩チューブであることを確認することが重要であり、UZUME の重要なミッション項目の一つとなっている。このミッションにより、月の溶岩被覆を理解し、また月の火成活動の新しい描像としての「水の寄与」の理解を得ようとしている。

UZUME の目指す課題として他に、月の古代磁場形成の確認がある。月サンプルや、月隕石から、40 億年前の月表面には、100 マイクロテスラーを越えるような磁場もあったとされ、月の古代において地球のダイナモ磁場のような固有磁場を生じていた可能性が指摘されていた。ところが、最近になって、こうしたサンプル、隕石の磁場計測は誤りでは無いか、という指摘も生じており、月の古代磁場については、固有磁場があったのかも含めて、解決すべき課題が残されている状況である。月の縦孔、地下空洞は、月の残留磁化計測にとっては最適な場所である。その理由の一つは、縦孔の壁が端部(エッジ)となっており、溶岩層が磁化しているならば、磁場の漏れ出しが観測できるからである。地下の洞窟を作っている溶岩も磁化しているならば、ローバやプローブによって、空洞内の床や壁から残留磁化を確認できると考えている。古代の月固有磁場の形成には月の内部に何かしら金属物質の流動を生む機構がなければならない。月の古代磁場の解明は、月の内部進化をあらためて理解する上で重要な制約条件を与える。

本講演では、これまでの検討などを踏まえて、月の新たな描像に迫るために、UZUME—WG で検討まとめ上げてきた科学目的、それを達成する探査ミッション案を紹介する。また時間が許せば、月の縦孔・地下空洞の将来利用についてのミッション検討状況や、火星の縦孔上空で行うミッション案を紹介する。

月の縦孔・地下空洞内側での地下レーダー探査の 数値シミュレーション

○神田恵太郎¹、熊本篤志¹、春山純一²、加藤雄人¹

¹東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、²JAXA, ISAS

SELENEの地形カメラやLunar Reconnaissance Orbiter(LRO)の高分解能カメラの画像から月の縦孔やその奥にある地下空洞の存在が知られるようになった[1][2]。現在までの月の縦孔・地下空洞探査は全て月軌道からのリモートセンシングによるもので、縦孔や地下空洞の詳細についてはまだ不明点が多い。そこで、縦孔内部に直接探査機を送り込む月の縦孔・地下空洞の直接探査が検討されており、我々は地下レーダーによる縦孔・地下空洞周辺の地下探査を検討している。

本研究では、縦孔底部を走行するローバーに地下レーダーを搭載して空洞周辺の地下探査を行うことを想定し、FDTD法による電波伝搬シミュレーションと模擬観測データの解析を行った。FDTD法の計算はgprMax[3]で行い、マリウス丘の縦孔(直径50 m、深さ43 m[2])での観測を想定し、空洞・溶岩・レゴリスの誘電率をそれぞれ1、6、4として地形モデルを作成した。マリウス丘の縦孔は幅500 mのリルの中央に位置し、リルの中を流れた溶岩によって溶岩チューブが形成されチューブの天井が崩落したことで縦孔が形成されたと考えられている[1]。

縦孔底面に、リル方向とは垂直に50 mの範囲内に設置した地下レーダーから地下空洞を取り囲む幅500 m、深さ250 m(リルを作った溶岩の火口の深さ[1]より推定)のリルの断面形状推定を試みた。観測に用いるレーダーは以下の2ケースを考えた。1組の送受信点在一定間隔(0.4 m)を保ちながら移動するモノスタティックレーダーと、1個の受信点を測定経路の中央に固定し1個の送信点が50mを1m間隔で移動するバイスタティックレーダーによる観測(周波数50 MHz、縦穴底面から1 mの高さに設置)をシミュレーションし、得られた模擬観測データに対し地下の溶岩層の誘電率が6で一定と仮定してキルヒホッフマイグレーション処理を施した。結果を比較したところ、モノスタティックレーダー観測ではマイグレーション画像上でリルの壁面や底部からのエコーの広がりが生じており正確な形状推定が困難であったが、バイスタティックレーダー観測ではエコーの広がりを抑制できており比較的精度良く(±10 m程度)リルの形状を推定することができた。地下レーダー観測からリルの形状や大きさが分かればリルを流れた溶岩の量や厚みを推定することができる。空洞周辺の溶岩流の量や厚み、溶岩が噴出した回数を調べることで、縦孔周辺の火成活動の歴史や地下空洞の形成過程等の解明に繋がると期待できる。

参考文献

- [1]Haruyama et al. (2009) *Geophys. Res. Lett.*, 36, doi:10.1029/2009GL040635 [2]Robinson et al. (2012) *Planet. Space Sci.*, 69, doi:10.1016/j.pss.2012.05.008 [3]Warren et al. (2016) *Comput. Phys. Commun.*, 209, doi:10.1016/j.cpc.2016.08

TSUKIMI テラヘルツ波観測において 月表層のマルチスケールの起伏がもたらす影響

○竹村知洋¹、宮本英昭¹、小林真輝人¹、吉岡航輝¹

¹東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

月表層における水資源や金属資源の濃集領域を判別する目的で TSUKIMI 計画 (Lunar Terahertz SURveyor for KIllometer-scale MappIng) の打ち上げが企図されている。本計画では特に、テラヘルツ波帯における誘電率や輝度温度に注目し、地下数 cm-数十 cm におけるアノマリの存在可能性を推定することによって、月表層における資源の濃集領域を判別する。そのため、水資源や金属資源等のアノマリに起因する誘電率や輝度温度の差と、アノマリの存在に関連の低い要素に起因する誘電率値の差や輝度温度差を明瞭に区別し、観測値を解釈することが重要となる。中でも、月表層におけるマルチスケールの起伏はテラヘルツ波の放射・散乱特性や輝度温度の変動に影響を与え (e.g., Bandfield et al., 2015)、アノマリの存在に関連の低い要素に起因する誘電率値の違いや輝度温度差の主たる要因であると考えられる。そのため、探査機打ち上げ前に月表層の起伏の観測値への寄与を十分に検討し、またその影響を抑制するような探査機の運用を検討することが重要である。本研究では、特に月表層における μm から km スケールの起伏が誘電率値や輝度温度の観測にもたらす影響を定量的に解析し、TSUKIMI 計画の実施する探査への寄与や、適切な探査機の運用方法に関して検討を行った。

本研究では誘電率値や輝度温度の観測に対して起伏がどのように寄与するか制約するため、特に (1) フットプリント内で起伏等に遮蔽されず観測可能な領域の変動、(2) フットプリント内の影領域の変動、(3) 観測角に応じた表面放射率の変動に注目した。各項目の検討は起伏の存在に応じた影領域や表面放射率の変動に関する経験的なモデル (e.g., Smith, 1967; Chen et al., 2003) を使用して実施した。また、起伏の存在が実際の TSUKIMI 観測に与える影響を評価するため、月表層における μm スケールから km スケールにおける起伏の特性を広い領域で評価した。解析には月表層におけるマルチスケールの高解像度 DEM を使用し、評価指標には RMS slope や RMS height 等を用いた。検討の結果、マルチスケールの起伏が誘電率や輝度温度にもたらす影響は、TSUKIMI 計画における探査機の観測角を 40 deg 付近に設定することで軽減できることが示唆された。本発表では観測値に対して月表層の起伏が与える影響をより詳細に報告する予定である。

■ 参考文献

[1] Bandfield et al., *Icarus*, 248, 357-372, 2015.

[2] Smith et al., *Journal of Geophysical Research*, 72(16), 4059-4067, 1967.

[3] Chen et al., *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(1), 90-101, 2003.

テラヘルツ波帯における月表層輝度温度の検討

○吉岡航輝¹, 宮本英昭¹, 竹村知洋¹, 小林真輝人¹, パール・ベルナデット¹, 逸見良道²

1 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻, 2 情報通信開発機構 テラヘルツ研究センター

月面の水氷の濃集領域も含め資源の存在を判別するためにテラヘルツ波を用いた月表層の広域な水資源探査 TSUKIMI 計画 (Lunar Terahertz SURveyor for Kilometer-scale Mapping) が検討されている。本ミッションの観測値である輝度温度は、観測周波数帯に対応する深さまでのレゴリスの熱的特性・放射特性を反映するため (e.g., Bandfield et al., 2011)、そのアノマリの調査は深さ数 cm-数十 cm において水氷が濃集する有望領域を判別する鍵となる。これまでマイクロ波や赤外線といった波長領域で輝度温度が観測は実施されてきたが (e.g., Paige et al., 2010)、極域の永久影領域において水氷の濃集が指摘される深度数 cm-数十 cm (e.g., Schorghofer et al., 2014) に感度の最大値を持つ輝度温度の観測例は乏しい。そのため、当該波長の輝度温度が反映する月レゴリスの熱的特性・放射特性についてはよく理解されていないのが現状である。そこで本研究は、数値モデルを用いた解析により月表層の熱的特性・放射特性の違いがテラヘルツ波帯における輝度温度に与える影響を評価し、水氷の検出可能性について検討を行った。

本研究では一次元の熱伝導モデル (Hayne et al., 2017) 並びに放射伝達モデル (Feng et al., 2020) を用いて月表層の熱的特性・放射特性の観測輝度温度への寄与を解析した。ここで、観測される輝度温度に寄与する要素として、レゴリスのかさ密度、比熱、熱伝導率及び誘電率を規定した。これらの要素を離散モデルの各深度に応じて変化させることで、異なる密度構造・水氷の垂直構造を持つレゴリスで観測され得る輝度温度の日変化を推測した。また、水氷がレゴリスに含まれている場合の輝度温度変化を、先行研究で示唆されている水氷の存在濃度 (e.g., Colaprete et al., 2010) を仮定した上で検討した。モデル計算を実施した結果、月において平均的な熱物性値 (Hayne et al., 2017) を設定の下で観測領域に水氷が 5 wt% の濃度で表面に濃集していた場合、夜間において観測される輝度温度に 15 K 程度の温度上昇が生じる可能性が示唆された。本発表では、観測され得る輝度温度から解釈できる月表層の熱的特性・放射特性について、より詳細な検討結果を紹介する。

参考文献

[1] Bandfield et al., *Journal of Geophysical Research-Planets*, 116, 2011. [2] Schorghofer et al., *Astrophysical Journal*, 788(2), 2014. [3] Paige et al., *Science*, 330(6003), 479-482, 2010. [4] Hayne et al., *Journal of Geophysical Research-Planets*, 122(12), 2371-2400, 2017. [5] Feng et al., *Journal of Geophysical Research-Planets*, 125(1), 2020. [6] Colaprete et al., *Science*, **330**(6003), 463-468, 2010.

月面での試料分析のための レーザー誘起プラズマ発光分光装置(LIBS)の開発

○長 勇一郎¹, 湯本航生¹, 田畑陽久¹, 吉岡和夫¹, 相田真里², 与賀田佳澄², 水野貴秀²,
岡本篤², 諸田智克¹, 杉田精司¹, 仲内悠祐³, 新原隆史⁴, 大竹真紀子⁵, 唐牛讓⁶,
宮崎理紗², 石原吉明², 山本聡⁷, 鹿山雅裕¹, 草野広樹⁸, 佐竹渉⁹, 佐伯和人³,
吉光徹雄², 森治³, 佐伯孝尚²

¹東京大学, ²宇宙航空研究開発機構, ³立命館大学, ⁴岡山理科大学, ⁵会津大学, ⁶大阪大学, ⁷産
業技術総合研究所, ⁸量子科学技術研究開発機構, ⁹千葉工業大学

近年, 有人および無人の月面探査機会の拡大が見込まれる中で, 著者らのグループは月面サンプルリターンの実現に向けた科学的および技術的検討を進めている。特に価値が高いとされる試料として, 衝突溶融岩や始原地殻の探査が挙げられる。しかし, 月面からは既によくの試料が持ち帰られ, 物質が水平・鉛直方向ともに激しく攪拌されていることが確認されている。このため, 特に科学的価値の高い試料を選別する分析機器が重要である。

Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)は, 多数の岩石を迅速に診断でき, 前処理が不要で, 対象物に接近せずとも計測できる性能を持つ。試料にレーザーパルス照射してプラズマ化し, 元素固有の輝線発光を分光器で計測することで元素分析を行う。当グループで開発している LIBS 装置は, 380-800 nm の波長領域で分光測定し, 高い空間分解能(約 500 μm)を持つ。短時間で遠距離物質(1-5 m)の化学組成分析が可能であり, レーザーアブレーションにより試料を掘り進めつつ mm スケールで深さ方向に分析することができる。これにより, 表面を覆うレゴリスや宇宙風化層を取り除いた上で, 岩石の化学組成データを取得できる特長を有する。

現在ランダないしローバへの搭載を向けて光学設計・機構設計・熱設計を進めている LIBS 装置は, 共軸の CMOS カメラ(ピクセル分解能 30 $\mu\text{m}/\text{pix}$)によって計測対象の状態や組織を撮影するほか, レーザー照射のピントを合わせる機能も持ち, スキャンミラーによって視野や照射位置を変更し, 地表の広範囲を分析することができる。装置は宇宙実績のある Nd:YAG レーザ, CMOS カメラ, 放射線や温度変化への耐性を持つ光学系を用いる前提で設計を行なっている。焦点調節機構とスキャンミラーシステムは, 火星衛星探査計画 MMX ローバおよび小型月着陸実証機 SLIM に搭載される技術の開発実績を活用する。これまで実績のなかった小型可視分光計については, 環境耐性を意識した設計に基づく試作と実証実験を行い, 岩石の LIBS スペクトルが得られることがわかった。さらに, 全体重量が約 5 kg という見積もりを得た。以上の検討を通じ, 月面探査用 LIBS 装置の全体像が明らかになった。

月面サンプルリターンのための月面探査とその科学

諸田 智克¹, 長 勇一郎¹, 長岡 央², 仲内 悠祐², 田畑 陽久¹, 杉田 精司¹,
大竹 真紀子³, 相田 真里⁴, 与賀田 佳澄⁴, 宮崎 理紗⁴, 唐牛 謙⁵, 亀田 真吾⁶,
笠原 慧¹, 鹿山 雅裕¹, 新原 隆史⁷, 水野 貴秀⁴, 石原 吉明⁴, 山本 聡⁸,
草野 広樹⁹, 佐竹 渉¹⁰, 佐伯 和人², 吉光 徹雄⁴, 森 治⁴, 佐伯 孝尚⁴

¹東京大学, ²立命館大学, ³会津大学, ⁴宇宙航空研究開発機構, ⁵大阪大学, ⁶立教大学, ⁷岡山理科大学,
⁸産業技術総合研究所, ⁹量子科学技術研究開発機構, ¹⁰千葉工業大学,

国際的な無人・有人月面探査が活発化している状況下で日本の存在感をさらに高めるためにも、月面活動の機会を利用した科学探査の検討は急務である。宇宙政策委員会基本政策部会の「月面活動に関する基本的な考え方」では、1) 月面からの天体観測、2) 重要な科学的知見をもたらす月サンプルの選別・採取・地球帰還、3) 月震計ネットワークによる月内部構造、の3つが重要な科学テーマとして挙げられている。我々は3科学を推進するためのチームを組織し、2021年にJAXA国際宇宙探査センターが募集した「2021年度月面での科学研究・技術実証ミッションにかかるフィジビリティスタディテーマ」に採択され、検討を進めてきた。その中でも我々、サンプルリターン (SR) チームは月面 SR 探査による第一級の科学成果の導出を目指し、段階的な技術・科学成果獲得のためのシナリオ策定とともに、リモートセンシングデータ解析による将来探査領域の調査・選定、その場試料選別機器の検討・開発を行ってきた。フィジビリティスタディの活動は2022年度で一旦終了したが、現在は更なる活動拡大を行いつつ、検討を進めている。我々が目指す科学目標は下記の2つに大別される。

(1) 太陽系初期の天体衝突史の復元と巨大惑星大移動仮説の検証

(2) 月のマグマオーシャンのバルク組成の決定による月形成条件への制約

(2) の詳細な科学目標については長岡ほか (2023, 本講演会) で紹介されるため、本発表では特に科学目標(1)について中心に概説し、目標達成のために必要なその場観測技術・運用についての検討内容を紹介する。

太陽系初期の天体衝突史を解明するためには、巨大衝突で作られた衝突溶融岩の年代決定が必要となる。衝突溶融岩はアポロ試料や月隕石にも見つかっているが、それらは“転石”であるため、月面の地質との対応関係が不明であり、起源となる衝突盆地がわかっていない。これが現状で太陽系初期の天体衝突史を復元できない最大の原因である。そのため、将来探査では衝突盆地形成時につくられた衝突溶融岩帯の露頭から試料を直接採取することが重要である。近年の軌道上から観測された高解像度データから衝突盆地内部の衝突溶融岩露頭の探索が可能となった。特に39億年前の衝突頻度の集中があったか否かを決定するための鍵となるネクタリス盆地については、盆地形成時につくられた衝突溶融岩の大部分は盆地内部のフロアに溜められていると考えられるが、それらの岩体はその後のマグマ噴出により覆われてしまっている。一方で、溶融岩体の一部はその後のクレータ形成によって掘り起こされ、岩塊として表面に露出していると考えられ、そのような領域の検出を進めてきた。このような最近のクレータ形成によって露出した岩塊は宇宙風化作用や様々な変成を受けていないという利点があり、新鮮岩塊の露出領域が次世代のSR探査のターゲットとなる。

月極域探査機プロジェクトの検討状況

: ミッション目標達成のためのローバ運用・観測計画の具体化

○石原吉明¹・西谷隆介¹・井上博夏¹・大竹真紀子^{1,2}
・勝又雄史¹・水野浩靖¹・若林幸子¹・星野健¹・麻生大¹
¹宇宙航空研究開発機構、²会津大学

近年、日本・米国・インドなど各国の月周回探査により得られた観測データの解析により、月の高緯度領域（極域）のクレータ内部（壁面／底面）等の太陽光の照射が恒常的に無いような極低温領域（永久影）に、外部から月に供給されたと考えられる水が、氷や霜もしくは吸着水として存在する可能性が示唆されている。また、日照・日陰を繰り返す領域であっても、水の存在が示唆されており、水の存在量が時間変化している（現在の水の移動を示唆する）と解釈できるデータが得られている。月への水の供給・月面での移動・濃集過程が重要な科学テーマであることは論を待たないが、水からは電気分解によりロケットエンジンの燃料（水素）及び酸化剤（酸素）を得ることが出来、十分な水があれば将来の探査や持続的人間活動の月面展開に向けた現地調達可能な資源の観点としても重要であり、月の水に関する情報の重要度は非常に高い。しかしながら、これまでの観測の限界等により、月極域に果たして本当に水があるのか、さらに資源利用可能性に関連する存在総量や形態、並びに空間分布の観点で、多くの研究者が納得する直接的・確定的な情報は現時点では得られていない。

JAXA は状況を打破するため、先日、月への軟着陸に成功したインド宇宙研究機関（ISRO）との国際共同ミッションとして、月周回からの「リモートセンシング観測」ではなく、月面へ着陸し着陸地点近傍や周辺領域の「その場観測」により、探査領域における水の存在有無・存在量・存在形態に関する直接的・確定的なデータを取得し、将来の探査において資源としての利用可能性を評価することを主目的とした「月極域探査機（LUPEX）プロジェクト」を進めている。LUPEX の探査機構成は ISRO が開発・運用を所掌する着陸機と、JAXA が開発・運用を所掌するローバからなる。月面展開されたローバは、その後 3.5 カ月間（ノミナル）にわたり、事前に設定された着陸地点近傍の探査領域内を移動しながら観測を行う。なおローバには JAXA 開発の観測機器および掘削装置の他、ISRO の観測機器、さらに NASA および ESA の観測機器も搭載される。

LUPEX ローバの観測運用の基本戦略は、広範囲の移動を行いながら、月の表面及び地下の水または水素の分布の観測を行う「疎観測」と、「疎観測」で識別された水の存在可能性の高い領域において、深さ 1.5m 程度まで掘削を行い、一定深さごとに土壌を採取し分析を行う「詳細観測」の 2 段階の観測を行うというものである。特に「疎観測」を含むローバ移動の際には、水資源探査の為に観測装置の運用以外にも、ステレオ航法カメラによるビジュアルオドメトリと電波航法（RARR&DDOR）との複合航法によりローバ位置を必要精度で決定し、さらに探査領域の詳細地形モデルの作成を行う必要があり、電力・通信等のリソースや機上・地上系での処理時間を含めた運用シナリオ・成立性の解析が必要である。現在、ミッション目標達成のためのローバ運用・観測計画の具体化を進めている。また、観測領域のデータから月極域全体の月水資源総量・分布に迫る為、水の移動・濃集モデルの高度化に資する「疎観測」「詳細観測」の 2 段階の観測を超えたオプション観測（例えばある詳細観測で水が検出された地点に時間をおいて違う日照・温度状態で再訪し再観測）の可能性や有効となる前提条件等について検討を行っている。

本発表では、ローバ運用を含めた「疎観測」「詳細観測」の観測計画の具体化状況と、水の移動・濃集モデルの高度化の為にオプション観測についての検討状況を紹介する。

月面サンプルリターン：近赤外顕微分光カメラと研削機構の開発

○仲内 悠祐¹、長岡 央¹、大竹 真紀子²、前田 孝雄³、諸田 智克⁴、深井 稜汰⁵
伊庭 靖弘⁶、佐伯 和人¹、吉光 徹雄⁵、森 治⁵、佐伯 孝尚⁵

1. 立命館大学、2. 会津大学、3. 東京農工大学、4. 東京大学、5. JAXA、6. 北海道大学

月は形成時に全球が溶融したマグマオーシャンから地殻とマンツルの分化を経験した後、地質活動が比較的早い段階で終了したため、月系形成初期(約 45-40 億年前)の情報が残されていると考えられる。実際に、JAXA が 2009 年に打ち上げた月探査衛星 SELENE のデータから、月高地に純粋斜長岩“Purest Anorthosite (PAN)” (98%以上が斜長石で構成)が普遍的に存在していることが報告された[Ohtake et al. 2009]。発見された PAN は、天体衝突により形成されたクレーターの中央丘(最大経験温度:400°C程度)に露出しており、マグマオーシャンから直接形成された始原地殻の主要構成成分であると考えられている[Ohtake et al. 2009, Yamamoto et al. 2012, Nagaoka et al., 2023]。この PAN を詳しく調べ、月始原地殻の組成・物理情報を決定し、月形成時の組成情報を得ることは、地球-月系形成条件および地球型惑星の初期進化過程の解明につながる。月面活動での無人・有人探査が拡大しつつある昨今、PAN の露頭にアクセスし角礫化や変成が進んでいない新鮮な PAN 岩塊を調査・選別することが可能になる。新鮮な岩塊から組成・物理情報を得るためには、組成及び岩石組織の情報が得られる小型なその場分析観測機器の開発が必要である。

我々は、岩塊中の岩石組織を露出させ、岩石組織と組成情報を同時に得られるその場観測システムの原理実証に着手した。その場観測システムは、乾式研削機構と赤外顕微イメージング分光カメラで構成する。研削機構と分光カメラを同じ構体に設置し、試料を移動レールでスライドさせ乾式研削と顕微イメージング分光を一連の動作で実現する。

我々は、月面での岩石組織観察のキーポイントとなる乾式研削実験を実施した。月面探査中に複数地点で研削分析を行うため、比較的硬い金属でダイヤモンドを固定した砥石とカンラン岩を用い、大気圧・低真空環境での連続研削実験を実施した。研削深さは両環境で違いは見られなかったが、連続研削を実施したことで研削深さが2回目以降大幅に低下した。連続研削による研削能力の低下が課題として抽出された。使用後の砥石観察結果から、「効率的な砥粒更新がなされないことによる砥面突起の低下」および「砥粒表面が摩耗し平滑化されている」ことが判明した。原因は、月探査を想定した低い押付け圧力(2N程度)と砥石設計(マウント素材の硬さなど)が最適化されていないためであることがわかった。本発表では、上記実験結果に加えて顕微分光カメラの要求仕様や、運用コンセプトの検討状況について報告する。

月始原地殻サンプルリターン：科学的意義とサンプリングサイト、サンプル選別方法

Scientific objectives, sampling sites and sample selection methods for lunar primordial crust sample return

○長岡央¹、大竹真紀子²、諸田智克³、仲内悠祐¹、長勇一郎³、杉田精司³、田畑陽久³、酒井理紗⁴、相田真里⁴、与賀田佳澄⁴、唐牛謙⁵、石原吉明⁴、山本聡⁶、鹿山雅裕³、新原隆史⁷、草野広樹⁸、佐竹渉⁹、佐伯和人¹、吉光徹雄⁴、森治⁴、佐伯孝尚⁴

1) 立命館大学、2) 会津大学、3) 東京大学、4) 宇宙航空研究開発機構、5) 大阪大学、6) 産業技術総合研究所、7) 岡山理科大学、8) 量子科学技術研究開発機構、9) 千葉工業大学

月は形成時、全球が溶融したマグマ大洋(マグマオーシャン)から地殻とマンツルの分化を経験したと考えられており、形成初期の情報を残す非常に古い岩石が残されている。地球や火星といった大型な天体ではすでに消失した地球型惑星の初期進化過程を明らかにするためには、地球型惑星の最初期の物質情報を残している月を調べる必要がある。月周回機「かぐや」による全球的な月面探査により、月表面にはマグマオーシャンから直接作られたと考えられる始原的な地殻が残されていることが明らかとなった。我々はこの始原地殻岩をサンプルリターンし、地上での詳細な化学分析による月のバルク組成決定により地球-月系形成条件の解明を目指す。アポロ回収試料や月隕石といった既存の斜長岩サンプルは、月表層での隕石衝突による溶融・角礫化の影響を強く受けており、得られた年代や岩石組織が本当にオリジナルのものであるかどうか検証が不可能であるため、衝突変成の影響が非常に少ない試料を新たに回収する必要がある。回収対象となる始原地殻岩は、98%以上の斜長石により構成される純粋斜長岩“Purest Anorthosite (PAN)”である(Ohtake et al. 2009)。高地領域に分布する衝突クレータの中央丘に PAN は普遍的に露出しており、月斜長岩地殻の主要構成成分であると考えられる(Ohtake et al. 2009; Yamamoto et al. 2012)。かぐやの全球観測によると、月裏側高地の赤道域は Th が最も枯渇し、Mg# (=モル比 $100 * Mg / (Mg + Fe)$) が最も高い特徴を持つ(Kobayashi et al. 2012; Ohtake et al. 2012)。この領域に存在するジャクソンクレータ(22.4° N、163.1° W)の中央丘には PAN が広く露出しており、中央丘の麓に比較的最近崩落したであろう大きな PAN の岩塊も確認できる(Nagaoka et al. 2023)。Mg# と Th 量との反相関の関係から、ジャクソンクレータの中央丘に分布する PAN は、マグマの結晶化において最初期に固化した地殻である可能性が高く、最も始原的な情報が期待できるため、最重要探査領域として選定した。中央丘に見えている PAN 露頭から比較的最近崩落した衝突変成の影響が少ない新鮮な PAN 岩塊へアクセスし、その場分析による岩相判定に基づき、コアリングなどによりサンプル回収することで、科学目標を達成する。本発表では、始原地殻サンプルリターンの科学的意義、月裏側始原地殻からサンプル回収を達成するのに必要な“着陸地点、探査領域の検討”に加えて、“その場分析によるサンプル選別システム”について紹介・議論する。

月惑星探査データ Web-GIS システム 「JAXA Virtual Planet」

○押上祥子¹, 佐藤広幸¹, 山本光生¹, 南部慎吾¹, 山本幸生¹, 宮崎理紗¹

¹宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

JAXA 月惑星探査データ解析グループ (JLPEDA) において開発中の JAXA Virtual Planet (以後 VP) について紹介する。VP は ESRI 社の ArcGIS 製品群をベースとする Web-GIS システムであり、月周回衛星「かぐや」統合解析データ配信システム KADIAS

(<https://kadias.selene.darts.isas.jaxa.jp/>) の次期版として 2020 年度から開発をスタートさせた。KADIAS が 2D 表示のみに対応しているのに対し、VP はグローバル (球体) 3D 表示 (図 1) の他、北/南極域 2D/3D 表示、中低緯度域 2D/3D 表示に対応しており、各 3D 表示時には視点変更により bird's-eye view が可能なシステムとなっていることが大きな特徴である。VP には、Easy 版 (一般向けの操作性の高いシステム) と Advanced 版 (研究者向けの高度な解析機能を持ったシステム) の 2 つがあり、Easy 版はモバイルにも対応している。搭載データには、かぐやの主要な公開 PDS データプロダクト

(https://darts.isas.jaxa.jp/planet/pds/pds_kaguya.html.ja) の他、かぐやデータに基づく非公開の高次処理データプロダクト (MI FeO/TiO₂ 含有量鉄/チタン含有率マップ、海の年代区分図等) も含まれる。VP の主要機能として、(1) 距離及び面積計測、(2) 画面状態再現 URL 表示、(3) レイヤー属性情報表示ポップアップ、(4) カスタム表示 (RGB 合成/四則演算/カラーマップ)、(5) 断面図表示/ダウンロード (3D 表示時のみ)、(6) 地名検索、(7) 太陽・地球直下点表示、(8) 図形描画/メモ入力、(9) 印刷、(10) 選択領域データダウンロードが挙げられる ((4)~(10) は Advanced 版のみに搭載)。 (1)~(2) 及び (5)~(9) は KADIAS にはない機能であり、KADIAS と比べて機能、ユーザビリティ、データ解像度等が飛躍的に向上している。VP の web アプリケーション開発に使用している ArcGIS API がサポートしているグローバル 3D 表示の座標系は現時点では地球、月、火星の座標系のみだが、今後サポート対象の天体座標系が増えることが期待されることから、将来的には本システムを拡張し、MMX 等のデータプロダクトを搭載することも計画している。2020 年度の試作版開発では実際に月/Phobos 切替機能を実装し、既存の Phobos 探査データに基づく高次処理データプロダクトを搭載してその実現可能性を確認した。現在は公開に向けた最終的なシステム改修中であり、今年度中の公開を予定している。

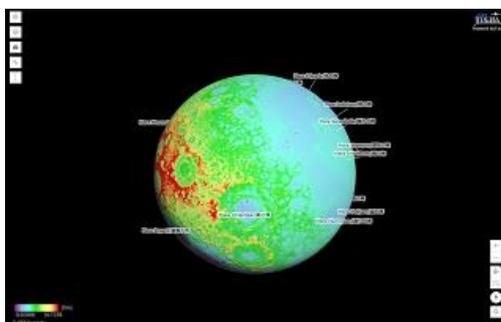


図 1. VP でのグローバル 3D 表示

メートル波電波干渉計の実現に向けた月面天文台の概念検討

A Conceptual Study on Lunar Astronomical Observatory to Realize a Meter-Wave Radio Interferometer

○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 (国立天文台)、高橋慶太郎 (熊本大)、
大西利和 (大阪公大)、山内大介 (岡山理科大)

月面は天文台の建設には厳しい環境であるが、月の裏側は、観測天文学最後のフロンティアとされる、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。そこで最大基線 100km 以上の約 100 素子のアンテナを備えたメートル波電波干渉計を建設することによって、宇宙初期の暗黒時代の解明を目指す。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。そ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 $z=140\sim 30$ の中性水素線は周波数 1~45 MHz の電波となる。我々の観測システムの主たる目標は、この電波を空間分解能 0.3 mrad (周波数 10 MHz において) 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。

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

本計画のプロトタイプ段階では、3 素子の伸展式ダイポールアンテナのユニットを設置し、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、有人与圧ローバへの搭載を想定したアンテナユニットの設計、ならびにアンテナ伸展機構の開発を行っている。これらの観測目標、ならびに本計画の実現に向けた概念検討結果について報告する。

乱れの少ない火山性露頭に対する 地層の特征量自動認識アルゴリズムの初期適用

○藤本圭一郎¹, 野口里奈², 下司信夫³, 白尾元理⁴, 春山純一¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²新潟大学, ³産業技術総合研究所, ⁴惑星地質研究所

本研究では従来の露頭の記載・層序分類プロセス中の属人的な知識と経験に依存した手順を岩層特徴量の自動認識アルゴリズムによる計算機処理に置き換え、効率的なその場調査手法の開発を行う。第一に地球での地質調査を効率化し、第二に月や火星の地下空洞に対する自律探査システムを実現させる。乱れの少ない伊豆大島火山の地層大切断面露頭に露出する降下火砕物からなる露頭の科学特徴量の認識結果を図1に示す。微視的な色斑を除去し巨視的な層構造だけを抽出するBilateral filter等の画像強調を行い、絶対値が大きなセグメントについて輝度勾配方向分布を算出する(1-b)ことで地層の向きの分布の定量評価(1-a)ができる。まだ地層境界線の自動抽出はできていないが輝度勾配により根拠のある境界線の明瞭度の算出が可能となった(2-c、2-d)。地層厚み分布(2-b)やGLCM等のテクスチャ情報により地層種類を識別することもできる(2-e)。今後は本アルゴリズムの堅牢性を広く検証し、広大な範囲の地層構造を統一的な基準で解析できる手法の構築を進める。

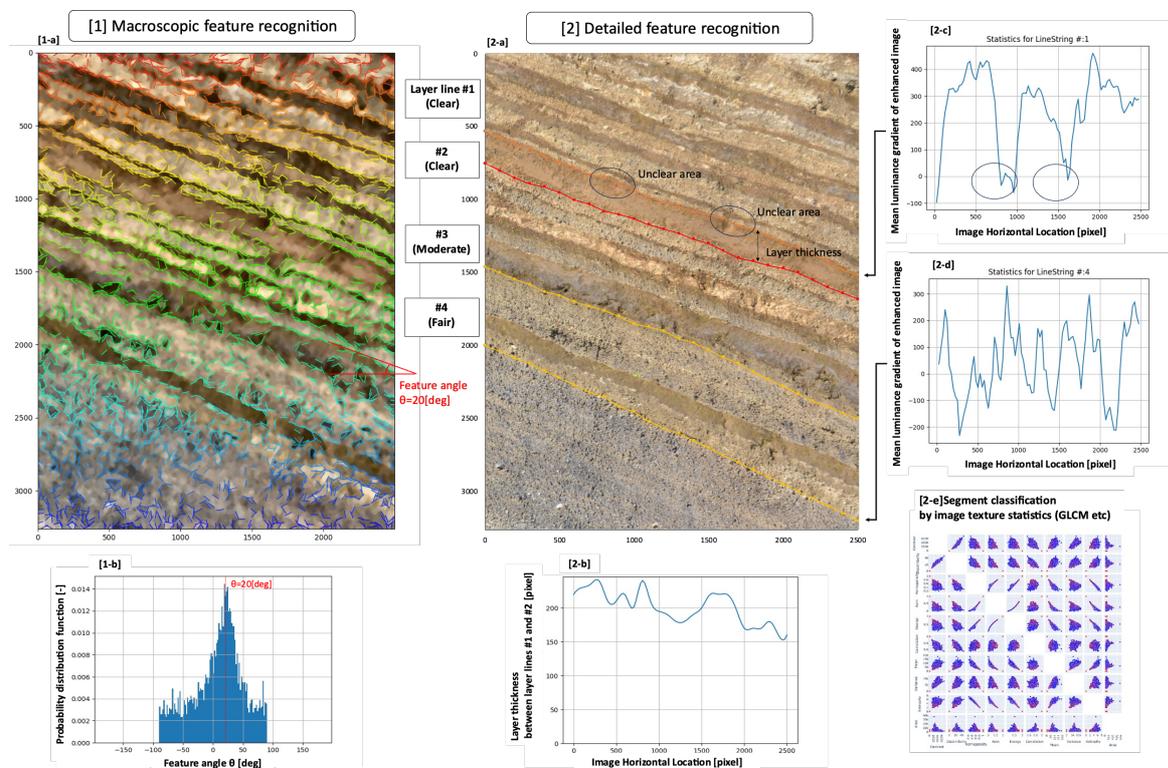


図1 地層の特徴認識アルゴリズムによる巨視的及び微視的な科学特徴量の算出結果。

MMX 探査機搭載用イオン質量分析器(MSA)の装置性能評価

○北村悠稀¹, 横田勝一郎¹, 寺田健太郎¹, 齋藤義文², 浅村和史², 笠原慧³

¹大阪大学大学院理学研究科

²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ³東京大学大学院理学系研究科

MMX ミッションは、JAXA が主導する火星衛星探査ミッションである。2024 年打ち上げ予定の探査衛星にはイオン質量分析器(MSA)が搭載される。MSA によってフォボス表面から放出される難揮発性イオンや水関連イオン、火星大気からの散逸イオン、太陽風からの供給イオンといった火星圏におけるイオン環境の観測を行い、火星衛星の起源や火星大気流出機構が解明することが期待される。

MSA は、電圧を印加することで入射してきたイオンの軌道を変更する Deflector とイオンのエネルギー範囲を絞るための Toroidal Top-Hat 型静電分析器とによって構成されるエネルギー分析器(EA)と、TOF チャンバー及びアノードによってイオンの質量と入射位置を特定する質量分析器(MA)、粒子検出を行う MCP(Micro Channel Plate)によって構成されている。TOF チャンバーには LEF(Linear Electric Field)が配位されており、分解能 $\Delta m/m \sim 100$ の高精度な質量分析が可能である。これは流入する火星大気的主要成分(O⁺, C⁺, N⁺, Ar⁺)の同位体比を十分に測定可能なである。

本研究では、我々が開発したこの MSA のフライトモデルの特に EA について、ミッションにおいて要求される装置性能(Yokota et al. 2021)が確保できているかどうかについての検証を行った。具体的な検証方法としては、真空チャンバー内に EA を MCP と組み合わせた状態で設置し、方位角方向に 16 分割した EA の各セクターに対して Deflector への印加電圧及びビームの EA への入射極角を変更しながら N₂⁺ビームを照射し、得られたカウントデータを解析する手法を取っている。

検証の結果として、EA 全体で 2π [sr]以上の視野角、各セクターについて 8.015 - 13.227[%]のエネルギー分解能、 $3.817 - 8.371 [10^{-4} \text{ cm}^2\text{sr eV/eV par channel}]$ の装置感度を持ち、要求水準性能を十分に満たしていることが確認された。

MMX/MSA のイオン同位体比観測に向けた 火星大気光化学モデルの開発

○長谷部聖憲¹, 吉田辰哉¹, 寺田直樹¹

¹東北大学大学院理学研究科

火星にはかつて豊富な大気と液体の水が存在していたことが複数の観測から示唆されており、その痕跡の一つとして、大気分子の同位体比が挙げられる。Curiosity ロバーによる観測では、火星大気中の CO₂に含まれる炭素の同位体比は地球に比べて 1.05 倍程度大きく、炭素 13 に富んだ重い大気組成となっている [Webster et al., 2013]。これは火星大気が大規模な大気散逸を経験し、強い同位体分別が生じた証拠と考えられている。

大気散逸に伴う同位体組成の変化は火星の歴史を考察する上で非常に重要になる。一方でこの変化を定量的に計算するためには、同位体ごとの化学反応の違いや大気上層への星間ダスト流入などさまざまな要素を考慮した、複雑な大気光化学モデルが必要となる。また観測の視点から見ても僅かな質量の違いを区別することは難しく、大気同位体観測は限定的な範囲にとどまっている。これらの要因から同位体を考慮に入れた大気光化学モデルの開発や、観測との比較をおこなった研究は未だ少数となっている [e. g., Yoshida et al., 2023]。

これらの課題に対して、MMX 搭載の質量分析器 MSA による観測が大気同位体組成の理解に大きな手がかりをもたらすと期待される。MSA は大気起源イオン流出の観測を目的の一つとしており、また高い質量分解能による同位体分析も視野に入れている [Yokota et al., 2021]。MSA の観測により流出大気や上層大気同位体組成の情報が入手できれば、大気光化学モデルとの比較も可能となり、大気同位体組成の研究も大きく進展すると考えられる。

本発表では MMX/MSA による観測に先立つ火星大気光化学モデルの開発状況について発表する。同位体による化学反応や外部からの供給量の違いなどを考慮して作成したモデルについて、大気組成の変化やその要因について考察する。

フォボス・ダイモス起源の火星のダストリング： MMX-CMDM による直接検出を目指して

○佐々木晶¹、小林正規²、奥平修²、藤井雅之³、柴田裕美⁴、中本朝子¹、Hal Krüger⁵

¹大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

²千葉工業大学惑星探査センター

³ファムサイエンス

⁴大阪大学産業科学研究所

⁵マックスプランク太陽系科学研究所

Soter (1971) 以来、火星の衛星起源のダストリングの存在が考えられている。太陽光圧と火星の扁平度のため、フォボス起源の粒子は軌道離心率が大きくなり円盤状に、ダイモス起源の粒子は軌道離心率／傾斜角ともに大きくなりトーラス状に分布していると考えられている。また、ダストの分布には季節変化もあると予想されている。

一方で、ダストリングの存在は光学的にダストサイズ・密度が制限されている。だすとの直接、間接測定を試みもある。1998年に打ち上げられた「のぞみ」探査機には、衝突電離型ダスト計測 MDC (Igenbergs, et al., 1998) が搭載されていたが、(宇宙空間では 100 個以上のダストを計測したものの) 「のぞみ」は火星到着前に運用を終了したため、火星周回ダストの検出はできなかった。

2013年に打ち上げられた MAVEN はラングミュア・プローブ・ウェーブ (LPW) 装置によりダストの衝突を間接的に検出することができる (Andersson et al., 2015)。粒子が高速 (通常、毎秒数～数十 km) で宇宙機に衝突したときに形成されるプラズマ雲による電流パルスと、それに伴う宇宙機の電位の変化を観測することができる。MAVEN の表面全体が検出器として機能するため、非常に低いダストフラックスを記録することができるが、リング粒子に多い相対的に低速 (毎秒 1km 以下) の粒子への感度は低い。実際にリング粒子の衝突から予想される緯度依存性は観測されていない。ほとんどの検出粒子は惑星間ダストと考えられる。

火星周回ダストの研究は続いており、最近では火星の高次重力場 (3 次以上) や火星の影の効果などを考慮した計算もされている (Lin and Schmidt, 2021; Liang and Hyodo, 2023)。一方、2024 に打上げ予定の MMX (Mars Moons Exploration) 探査機には大面積ダスト計測器 CMDM が搭載され、相対速度数 100m/s 以下の低速衝突にも感度があります。QS0 (擬周回) 軌道により長期間フォボス近傍でのダスト観測を行うことが可能である (Kobayashi et al., 2018)。これまでの理論研究に基づき、MMX に搭載されるダスト検出器 CMDM による検出を予測する。

フォボスでみられるマスマーブメント

○菊地紘¹, 平田成², 宮本英昭³, 逸見良道⁴, 和田浩二⁵

¹JAXA, ²会津大学, ³東京大学, ⁴NICT, ⁵千葉工業大学

フォボスの表面では地すべりなど物質が移動した痕跡を残す地形が観測されている。これをフォボスのマスマーブメントと呼ぶことにする。これらは火星側と反火星側の地域で観測されていたため、火星の潮汐力により誘発されて形成されたと解釈されてきた[1,2]。

一方でフォボスの先行面や後行面でのマスマーブメントはあまり報告されていない。そこで私たちは様々な探査機で得られている高解像度画像を用いて、フォボス全域でマスマーブメントを精査することにした。

その結果、こうした地形はフォボスの先行面や後行面でも多数みつけることができた(図 1)。これらがみられる領域で共通していることはフォボス表面の重力を計算すると、現在のフォボスの軌道半径で急な勾配付近であることであることがわかった。

こうした観測結果から、フォボスのマスマーブメントはフォボスの全球的に生じるようなイベントによって生じたのではないかと考えられる。その一つのアイディアとしてフォボスに物体が衝突したときによって引き起こされる振動によりマスマーブメントが形成した可能性があり、物理モデル[3]とクレーターのスケーリング則[4]を用いると、形成年代は約 100 万年程度と推定できた(図 2)。つまりこれらはフォボスで最も若い地形の一つであることになる。またこれらの領域では宇宙風化の小さい新鮮な情報を保持しているとも考えられ、今後の近接観測やサンプル採取のターゲットになりうると考えられる。

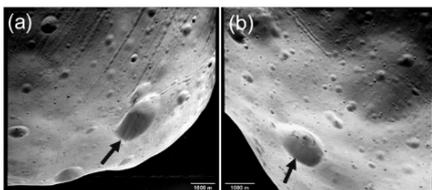


図 1 (左上). フォボスの後行面(a, b)や先行面(c, d)でみられるマスマーブメント。

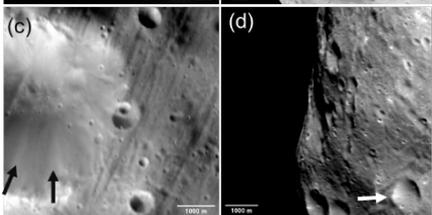
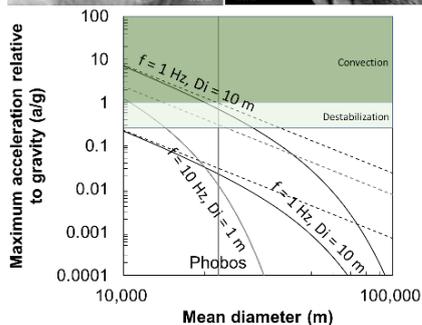


図 2 (左下). フォボスへの衝突によって引き起こされる振動の最大加速度と表面重力と天体の大きさの関係。フォボスに 10m 級の衝突があれば、フォボス全球でマスマーブメントが生じる程度の振動をすることを示唆する。



参考文献

- [1] Shi X. et al. (2016) *Geophys. Res. Lett.*, 43, 12,371-12,379. [2] Ballouz R. L. et al. (2019) *Nature Geo*, 12, 229-234. [3] Miyamoto H. et al. (2007) *Science* 316.5827, 1011-1014. [4] Nayak M. (2018) *Icarus*, 300, 145-149.

将来の本格着陸探査に向けた戦略的火星探査計画の概要および取り組み状況

○臼井寛裕¹・関根康人²・関華奈子³・山崎敦¹・長谷川精⁴・福士圭介⁵・田中智¹・山田和彦¹・永田靖典¹・森治¹・吉光徹雄¹・佐伯孝尚¹・鈴木宏二郎¹・津田雄一¹・藤本正樹¹
¹宇宙航空研究開発機構・²東京工業大学・³東京大学・⁴高知大学・⁵金沢大学

国際宇宙探査の枠組みで、火星有人探査に向けた火星探査計画の検討が各国で行われている。日本は、火星衛星探査計画（MMX）に続き火星無人探査を計画し、国際宇宙探査におけるメインプレーヤーとしての役割を果たすことが求められている。そのためには、国際的な競争と協力の環境下で日本が果たすべき役割を明確に認識し、その中でプログラム戦略をもってミッションを構築してゆくことが必要となる。そこで、将来の火星探査戦略を構築するにあたり、JAXA 国際宇宙探査専門委員会の下に火星探査計画の科学探査タスクフォースが設置された。タスクフォースチームは、検討の過程で広くコミュニティからの提言を求めたうえで、その結果を戦略的火星探査プログラム（JSMEP）としてまとめた [1]。

JAXA では、JSPMEP での検討をもとに、2020-2030 年代に行う戦略的火星探査プログラムを以下のように整理した。すなわち、（1）火星衛星からのサンプルリターンを目指す MMX (Martian Moons eXploration) [2] を端緒に、（2）周回機による地下水分布の調査を目的とした International Mars Ice Mapper (I-MIM) [3]、そして（3）着陸機による地下圏探査をマイルストーンとする。これら 3 つのミッションは、工学および観測装置の技術開発の観点において、月探査やその他の惑星探査ミッションと紐づけられ、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策定した。また、国際協働の枠組みを利用しながら、ミッション間での技術的連続性を意識し、戦略的に配置されることが特徴である。特に、最終目標である着陸探査に関しては、日本の置かれている現状との技術的ギャップが大きいことから、事前に複数回の小型での着陸実証探査を検討している。着陸実証探査は工学主導のミッションになるが、その飛翔機会をとらえ、惑星科学コミュニティとしても理学検討を開始しつつある。本講演では、戦略的火星探査プログラムの全体像に加え、現在の検討状況を報告する。

引用文献：[1] 宇宙理学・工学委員会国際宇宙探査専門委員会「火星探査計画の科学探査タスクフォース（中間報告書）」、[2] Kuramoto et al. (2022) *EPS*, **74**, 1-31. [3] I-MIM MDT (2022) *Final Report of the International Mars Ice Mapper Reconnaissance/Science Measurement Definition Team*. 239 pp.

火星の表層環境・地下氷分布の推定に向けた 地球アナログサイトの調査

○長谷川精¹, 佐古貴紀¹, Trishit Ruj², 小松吾郎³, 庄崎弘基², Niiden Ichinnorov⁴,
Davaadorj Davaasuren⁵, Baasansuren Gankhurel⁶, 関根康人², 福士圭介⁶, 小林真輝人⁷,
宮本英昭⁷, 田村亨⁸

¹高知大, ²東工大 ELSI, ³ダヌンツィオ大, ⁴モンゴル科学アカデミー, ⁵モンゴル国立大,
⁶金沢大, ⁷東大, ⁸産総研

約 38 億年前に厚い大気を持ち温暖湿潤な環境であった火星は、地球外生命体が存在した可能性が最も高い惑星である。一方で現在の火星は薄い大気と極寒乾燥な環境であり、太古に存在した液体の水の大部分は、約 35 億年前の磁気圏の消失と共に宇宙空間に散逸したと考えられている。しかし、液体水の一部は極冠や中緯度域の浅部地下に氷として現存していると考えられ、現生生命が存在する可能性も示唆されている。つまり火星は、ハビタブル環境の持続性や進化を明らかにすることができる、太陽系探査の中で唯一の対象である。

本研究では、現在および近過去における火星の表層・浅部地下の環境推定に向け、地下氷の存在により形成される周氷河地形 [凍土ポリゴン (多角形土), ピンゴ (凍結丘), ブレインテレーン (脳みそ地形)] と、蒸発作用により形成される蒸発性ポリゴン地形に着目する。凍土ポリゴンとピンゴは地球の永久凍土地帯 (シベリア, アラスカ, 北極圏, 南極) に発達することが知られている。一方、蒸発性ポリゴンは砂漠乾燥帯の塩湖環境に発達する。本研究では、永久凍土帯 (北部) と砂漠乾燥帯 (南部) とが近接するモンゴルを地球アナログサイトとし、表層地形から火星中緯度域の表層・浅部地下環境を推定する方法の構築を試みている。

2023 年 6~7 月に実施した 3 週間の現地調査の結果、連続永久凍土の分布するモンゴル北部では、火星中緯度域に見られるものと類似形状の周氷河地形が見られた。また火星特有と考えられていたブレインテレーン地形もモンゴル北部の数か所で発見した。さらに永久凍土帯南限に当たる孤立的永久凍土の分布域では、地下氷の消失に伴って形成されたと考えられる relict 凍土ポリゴン地形を発見した。またモンゴル南部のゴビ砂漠北縁部には、蒸発性ポリゴン地形が幅 100km に渡って分布しており、過去においてゴビ砂漠に巨大な塩湖が存在した可能性も明らかになった。今後は地中レーダを用いた地下構造探査や、表層地形の形成過程の検証を併せて行うことにより、火星中緯度域の近過去から現在にかけての表層・浅部地下の環境変遷の復元を試みる。

地球の球状炭酸塩コンクリーションの成因毎の分類： 火星ゲールクレーターの球状コンクリーションの成因 究明に向けて

○長谷川精¹, 渡辺隼生²

¹高知大, ²北海道大

世界各地の堆積岩の地層中には、様々なサイズや形状、組成からなる球状コンクリーションが見られる。その形成メカニズムは、堆積直後に生物遺骸の腐食起源で形成されるもの (Yoshida *et al.*, 2015)、初期続成作用のマンガン還元 (Liu *et al.*, 2019) や硫酸還元 (Loyd *et al.*, 2014) で形成されるもの、メタン生成菌の影響 (Loyd *et al.*, 2012) や埋没続成に伴う熱分解起源 (Dale *et al.*, 2014) などバリエティに富んでいる。また NASA の着陸探査ローバー (*Opportunity* と *Curiosity*) により、火星のメリディアニ平原 (Chan *et al.*, 2004; Yoshida *et al.*, 2018) やゲールクレーター (Stack *et al.*, 2014; Wiens *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2019) の地層からも球状コンクリーションが発見されている (長谷川ほか, 2023)。最近では *Perserverance* によりジェゼロクレーターの地層からも球状コンクリーションらしきものが見つかっている (Williams *et al.*, 2023)。

地球の球状コンクリーションの多くは生物が関与して形成されるため、仮に火星の球状コンクリーションが生物起源のものを含んでいれば、太古火星の生命痕跡を保存している可能性があり、地球外生命のハビタリティを探る上で極めて重要な探査対象となる。そこで本研究では、北海道羽幌町、富山県八尾町、高知県竜串海岸の地層から採取した球状コンクリーションに対して、元素マッピングや同位体比分析による検討を行った。その結果、P が内部に濃集し極めて軽い炭素同位体比 (-20~-17‰) を持つもの、中心部に P が、外側に Mn や FeS の濃集が見られ、中心部に向かって炭素同位体比が軽くなる (-15~-8‰) もの、そして Mn や FeS の濃集が見られ、軽い炭素同位体比を持つもの (-10~-5‰) の 3 つのタイプに分類でき、それぞれ堆積直後の生物遺骸腐食や初期続成過程のマンガン還元や硫酸還元の影響で形成されたと解釈される。

火星のコンクリーションの成因を検討した研究は少ないが、ゲールクレーターのものは球状、平板状、不規則型、樹状突起型など様々な形状を持つ (Sun *et al.*, 2019)。また高い P の濃集が見られる層準もある。またゲールクレーター地層の一部層準は、軽い硫黄同位体 (-10~-20‰) や軽い炭素同位体値 (-30~-40‰) を持ち、太古火星の硫酸還元菌やメタン生成菌の存在可能性も指摘されている (Franz *et al.*, 2017; House *et al.*, 2022)。今後コンクリーション部を対象とした同位体比測定が行われれば、その成因についての議論も可能になると期待される。

火星の氷河堆積物のマッピングおよび数値標高モデルの作成による解釈

○杉本佳祈^{1, 2}, 臼井寛裕²

¹東京大学, ²JAXA 宇宙科学研究所

火星は地球のように大きな衛星を持たないため地軸の傾きや離心率といった軌道要素の変動が激しく、それに伴い表層に氷として安定に存在することのできる緯度帯も変化する。このような環境変化の激しい火星史とともに過去に存在したと考えられている液体の水は宇宙空間に散逸し、現在の乾燥・寒冷化した表層環境へ変遷したと考えられている。現在、表層水は極域に氷堆積物として存在する。この現存する氷堆積物の総量と火星史を通じて宇宙空間に散逸した水量は、過去に火星が保持していた水の総量を大きく下回り、まだ未検地の水の貯蔵層の存在を示唆している[1]。近年火星にも氷の存在を示唆される地形や氷が直接観測され[2 など]、これらはかつて存在した表層水が地下へ輸送されて形成された可能性を示唆している。ゆえに火星の水や氷の進化を理解するうえで、地下水の存在量や存在状態（液体・固体など）を理解することが必要不可欠である。

Lobate debris apron (LDA), Concentric Crater Fill (CCF), Lineated Valley Fill (LVF) は南北両半球の30-50°の中緯度帯に多く見られる岩屑物に覆われた氷河地形である [3]。Subsurface Water Ice Mapping (SWIM) プロジェクトではLDA, CCF, LVFに加え小規模な氷河の流れの形状を持つものや、地形的に地下内部に氷が存在する可能性のある場所を火星全球で示している [4]。一方、SWIMによると低緯度帯では地形的には氷の存在がないとされている。本研究では、理情報システム (GIS) の ArcGIS と Google Earth を用い、Mars Reconnaissance Orbiter に搭載されている Context Camera (CTX) の画像データから中緯度と低緯度で LDA を探した。結果、LDA の特徴を持つ地形を中緯度と低緯度の両方で確認した。これは低緯度でも地下に氷が存在する可能性があることへの示唆となる。GIS の JMARS を用い、中緯度帯と低緯度帯の LDA を地形的に解析し比較したので、これを報告する。

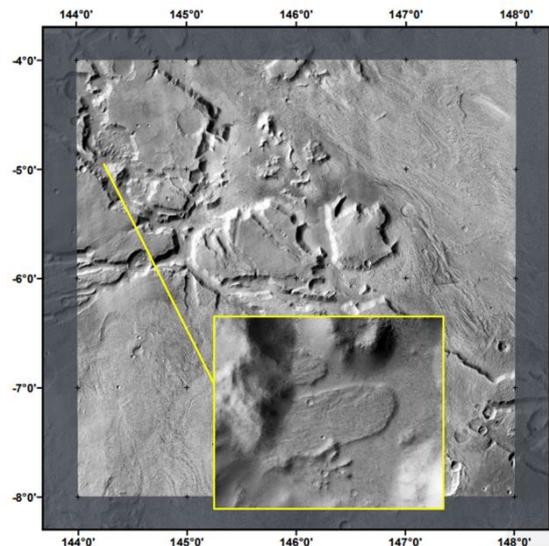


図1：低緯度で発見した LDA の特徴を持つ地形 ©murray-lab.caltech.edu/CTX/ NASA/JPL/MSSS/Murray Lab

参考文献：[1] Kurokawa et al. *Geochemical Journal* 50.1 (2016): 67-79. [2] Dundas et al. *Science* 359.6372 (2018): 199-201. [3] Levy, et al. *Journal of Geophysical Research: Planets* 119.10 (2014): 2188-2196. [4] Putzig & Morgan et al. (2023, in press) Handbook for Space Resources Chapter

周氷河地形から探る火星中緯度の地下氷分布

○佐古 貴紀¹, 長谷川 精¹, Trishit Ruj², 小松 吾郎³, 関根 康人²

¹ 高知大, ² 東工大 ELSI, ³ ダヌンツィオ大

2040 年代に火星有人探査が計画されている。火星の浅部地下に存在する水氷は、有人探査の際の水資源となることから、探査候補地の火星中緯度域における地下氷分布の正確な推定が求められている。衛星観測データなどに基づいて地下氷分布を推定する Subsurface Water Ice Mapping (SWIM) プロジェクトが行われているが、同プロジェクトでは過去の氷床拡大期に形成された氷河地形を主に対象としており (Morgan *et al.*, 2021)、現存する地下氷分布を反映していない可能性がある。そこで我々は、地下氷の存在により形成される 3 種類の周氷河地形「ポリゴン、ピング、ブレインテレーン」に着目し、火星中緯度域の地下氷分布の推定を試みた。

30°~42°N の全経度領域で、超高解像度衛星画像 (HiRISE: 30cm/pixl 解像度) 約 6500 枚を用いて周氷河地形を探索した結果、3 つの周氷河地形が類似の分布を示し、33°~42°N の緯度、0°~40°E, 60°~100°E, 160°~210°E の経度の、一部領域に偏って分布することが明らかとなった。またポリゴンに関しては、形状の違いに基づき 7 種類のタイプに分類し、形状毎の分布調査も行った。その結果、33°~42°N 領域に分布するポリゴン地形のほとんどが中央上昇型ポリゴン (High centered polygon; HCP) であった。一方、中央低下型ポリゴン (Low centered polygon; LCP) は、より高緯度側の 38°~42°N 領域に限定的に分布することが明らかになった。更に大小混合型ポリゴン (Large-sized Mixture Polygon: LMP) が、60°~95°E 領域にのみ特徴的に分布することも明らかになった。

周氷河地形の分布の要因を考察するため、火星の気候モデルに基づく降雪分布の推定結果 (Madeleine *et al.*, 2009) と比較すると、周氷河地形の分布は年間降雪量の多い領域と一致していた。また LMP の分布領域は、過去の高地軸傾斜期において降雪量が多い一方、現在の地軸傾斜角では降雪量が少なくなる場所と対応していた。これは LMP タイプのポリゴン形状は、地下氷の消費を示すという地球アナログの北極圏バイロット島の先行研究 (Fortier *et al.*, 2006; Costard *et al.*, 2016) の解釈とも整合的である。以上の結果から、緯度 33°~42°N、経度 0°~40°E, 160°~210°E の領域が、将来の有人探査候補地として有望な、現存地下氷量が多い地域であることが示唆された。

火星大気で観測された水氷雲と水蒸気の関係

○松本唯希¹, 野口克行², 青木翔平³, 今村剛³, Armin Kleinböhl⁴

¹奈良女子大学大学院人間文化総合科学研究科化学生物環境学専攻環境科学コース, ²奈良女子大学自然科学系, ³東京大学大学院新領域創成科学研究科, ⁴Jet Propulsion Laboratory / California Institute of Technology

地球大気と比べて低温・低圧である火星大気では、水は固相（水氷雲）または気相（水蒸気）として存在する。水氷雲や水蒸気の時空間分布は、火星における水循環や熱収支を議論するうえで重要である。しかし、水氷雲と水蒸気双方の観測データを用いた研究は少ない。Poncin et al. (2022) は、火星年 34 の遠日点付近に着目した複数の事例解析によって、火星探査機 ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) に搭載された分光計 Nadir and Occultation for Mars Discovery (NOMAD) による水蒸気混合比の観測結果と、火星探査機 Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) に搭載された赤外放射計 Mars Climate Sounder (MCS) による水氷雲消散係数の観測結果との比較を行った。その結果、NOMAD で観測された水蒸気混合比を用いて計算された水蒸気飽和度のピーク高度は、MCS で観測された水氷雲のピーク高度よりも高いことが示された。この結果から、Poncin et al. (2022) は「高高度では低温のために水蒸気の過飽和が起こりやすく、水氷雲の粒子が生成する。生成した粒子は成長とともに重力によって沈降することで、それよりも少し低高度側に水氷雲のピーク高度が現れる。」という仮説を示した。本研究は、解析対象期間を火星年 36 にまで拡張し、水氷雲と水蒸気飽和度のピーク高度の関係を統計的に調べた。

解析手法としては、まず NOMAD と MCS の観測が時空間的に接近している事例を探した。MCS 観測の方が時空間的に密であるため、NOMAD の観測点付近（経度 15 度以内、緯度 5 度以内、ローカルタイム 1 時間以内）に存在する MCS 観測データを抽出した。次に、MCS データに含まれる各高度の気温と気圧から、その高度における飽和水蒸気体積混合比を求めた。また、NOMAD の水蒸気数密度と MCS の大気数密度から実際の水蒸気体積混合比を求め、これを飽和水蒸気質量混合比で割ることで飽和度を求めた。そして、飽和度と水氷雲消散係数がそれぞれ最大となる点をピーク高度とした。

図に火星年 35 における結果を示す。飽和度のピーク高度が水氷雲のピーク高度よりも高くなっている事例が約 80% を占めた。これは、先行研究で提案された仮説と整合的であると言える。今後、季節や緯度に対するピーク高度の依存性も調べたいと考えている。

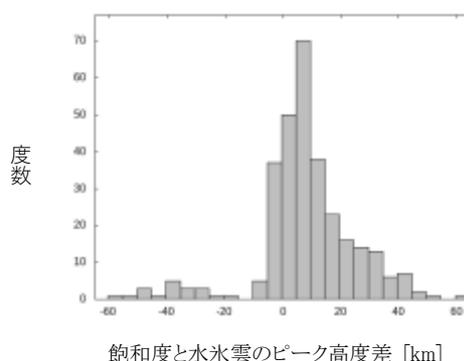


図 火星年 35 における飽和度と水氷雲のピーク高度の差のヒストグラム。飽和度のピーク高度の方が高い場合を正とする。

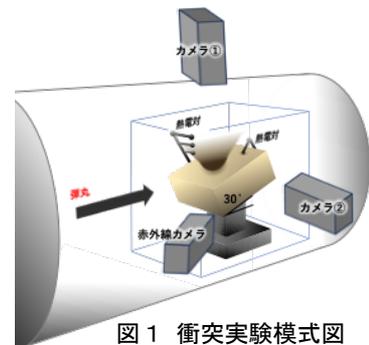
クレーター形成に伴う周辺大気の温度変化

○豊嶋遥名¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 笹井遥¹, 長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所,

太陽系において最も代表的なハビタブル環境は 液体の水を保持した天体表面であり^[1]、火星は過去にその条件を満たした天体として注目されている。しかし現在の大気圧は約 600Pa と水の三重点に近い環境であるため、液体の水は安定して表面に存在できない。一方、春から夏になり表面温度が暖かくなると (-20~+20°C)、火星斜面もしくはクレーター壁面に地下の氷が溶けて染み出したような黒い筋模様が現れることが知られている^[2]。このように、季節変化をはじめ表層付近の温度上昇を伴うイベントが起こる場合、一時的に表層に液体の水が存在する可能性がある。したがって、そのようなイベントによって表面や周辺大気の温度がどの程度まで上昇し、どれくらいの期間温度が持続するのかを明らかにすることは、一時的なハビタブル環境の存在の有無を議論する上で重要である。小惑星衝突は、火星において普遍的に発生し表層付近の温度上昇に寄与するイベントの一つである。これまで、水を含む表面におけるクレーター形成は数値シミュレーションや実験によってサイズや形状の多様性が調べられてきたが、クレーター形成に伴う温度変化に関する研究はほとんど行われていない。

本研究では、クレーター形成に伴う表面・地下の温度上昇と、周辺大気の温度上昇を定量的に調べるため、火星大気圧下において湿った砂標的に対するクレーター形成実験を行った。衝突装置には神戸大学の横型二段式軽ガス銃を用いて、直径 4.7mm のポリカ球を高速度 (~km/s) で衝突させた。標的には粒径 500 μm の石英砂と水を様々な割合 (0-13wt.%) で混合した試料を用い、標的含水率に対する温度変化の依存性を評価した。



温度観測については、衝突実験の様子を赤外線カメラ (350fps) で撮影し、標的内部に熱電対を設置して標的内部及び表面の温度計測を行った。さらに、衝突点直上に様々な高さで熱電対を設置し、標的周辺の大気の高さにおける温度を観測した。また、衝突実験の様子は 2 台の高速ビデオカメラ (10 万 fps) を用いて観測した。

その結果、衝突後約 100ms でもクレーター内部に 30°C 以上の温かい領域が残存していることが分かった。エジェクタの温度から推測される標的表面が経験する最高温度は標的の含水率が高いほど低く、+110~+200°C で変化した。周辺大気の最高温度は含水率が高いほど高く、表面高さ 5cm では +0.6~+11.3°C で変化した。さらに、衝突によって温められた周辺大気の冷却速度は、含水率が高いほど遅く、その温度上昇は衝突点からの距離に依存した。本発表では、特にエジェクタ・周辺大気の温度と標的含水率の関係を議論する。

[1]小玉貴則. 天文月報 114.10 (2021), 638-647.

[2]L. Ojha, et al. Icarus 231 (2014), 365-376.

Carbon isotope composition of formaldehyde in the early Martian atmosphere inferred from CO₂ photolysis

CO₂ 光解離から推定された初期火星大気中ホルムアルデヒドの炭素同位体組成

○Shungo Koyama¹, Tatsuya Yoshida¹, Naoki Terada¹, Yoshihiro Furukawa¹, Yuki Nakamura², Arihiro Kamada¹, Takeshi Kuroda¹

○小山俊吾¹, 吉田辰哉¹, 寺田直樹¹, 古川善博¹, 中村勇貴², 鎌田有紘¹, 黒田剛史¹

¹ 東北大学 (Tohoku university), ² 東京大学 (The University of Tokyo)

Organic matter in sediments on a planetary surface may provide a key to understanding prebiotic chemistry and habitability. The Sample Analysis at Mars (SAM) instrument onboard the Curiosity rover discovered several organic matters in the early Martian sediment (e.g., Eigenbrode et al., 2018). However, its origin is unknown. The carbon isotopic analysis detected an anomalously depleted ¹³C ranging from -137 to 22 ‰ in methane released from pyrolyzed samples at Gale crater (House et al., 2022). The potential source of these carbons is the deposition of formaldehyde (H₂CO) generated through the photochemical reduction of CO₂ in the atmosphere (House et al., 2022; Ueno et al., 2023). The measurements by NOMAD and ACS, both onboard ExoMars Trace Gas Orbiter, suggested ¹³C-depletion in CO in the present-day Martian atmosphere (Aoki et al., 2023; Alday et al., 2023). A photochemical model study also shows that ¹³C in CO is strongly depleted by CO₂ photolysis in the present-day Martian atmospheric condition (Yoshida et al., 2023). However, this CO₂ photolysis-driven carbon isotope fractionation has not been investigated in the dense atmosphere of early Mars. Here we implement photochemical reactions involving ¹³C in the photochemical model of the early Martian atmosphere and estimate the carbon isotopic composition in H₂CO to investigate whether atmospheric H₂CO could be a source of the ¹³C-depleted organic matter in the early Martian sediment detected by Curiosity.

We first investigate the carbon isotopic composition in the equilibrium state of 0.5–2-bar CO₂ and CO atmospheres. The CO₂ and CO ratios are varied from 0 to 1 for each atmospheric surface pressure. The temperature profile is assumed to follow the adiabat in the troposphere and be constant at the skin temperature above the tropopause (Catling and Kasting, 2017). Water vapor is assumed to follow the saturation vapor in the troposphere and be fixed at 1 ppm in the stratosphere. We find that the carbon isotopic ratio in H₂CO is strongly depleted with $\delta^{13}\text{C} < -200$ ‰ for all assumed atmospheric conditions. As a trend, the $\delta^{13}\text{C}$ in H₂CO increases with increasing CO₂ mixing ratio. The $\delta^{13}\text{C}$ decreases with increasing atmospheric surface pressure. However, these carbon isotopic ratios are lower than the minimum observation value (House et al., 2022). This result implies that the atmosphere producing the $\delta^{13}\text{C}$ consistent with the observation may have existed only temporarily during the atmospheric evolution.

Next, we compute the time evolution of the carbon isotopic composition assuming a 1-bar CO-dominated initial atmosphere with $\delta^{13}\text{C}$ of -25 ‰ (Wright et al., 1992). The $\delta^{13}\text{C}$ decreases with time because the initial CO is replaced by ¹³C-depleted CO originating from CO₂ photolysis. The period of $\delta^{13}\text{C}$ below -137‰ lasts for several million years. When we assume a ten times smaller amount of water vapor, the period lasts tens of millions of years. The effect of CO volcanic degassing will also be discussed.

InSightで観測された旋風の特徴:機械学習に基づく分類とその解釈

大塚亮治^{1,2}, 小野寺圭祐³, 田中智^{1,2,4}, 川村太一⁵

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

火星探査機InSightは、2019年2月から2022年12月にかけて地震並びに気象観測(圧力、気温、風速など)を行っていた。InSightでは火星で見られる一般的な気象現象の一つである旋風もしくはダストデビルを観測している。ダストデビルは火星の局所的な大気活動を反映している一方で、一時的な圧力降下に伴う地面の変動を引き起こす。観測されたデータでは、このようなイベントが約13,000件程度観測されており、その特徴は多岐にわたる。特に圧力や地動の観測データにおいては特徴の違いが顕著に現れている。しかしながら、その特徴を生み出す原因は未だ特定されていない。

本研究は、地震計、圧力計のデータに加え、風や気温データに対して機械学習などのデータマイニング手法を用いて相関を調べることで、より多角的にダストデビルという現象を理解することを目的としている。

機械学習手法の一つである時系列クラスタリングを使用することで地震・圧力データを多次元的に分類し、大きく4つの特徴を持つクラスに分けることができた。

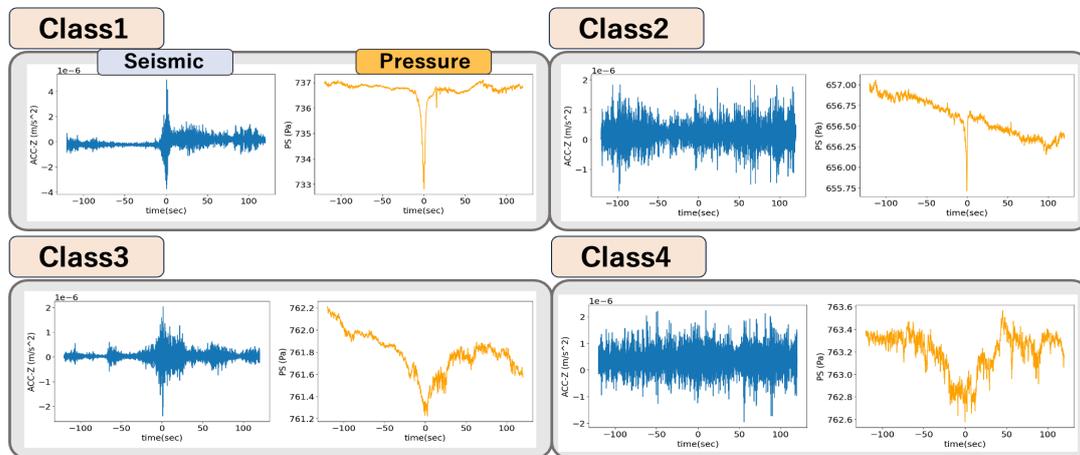


図 1 : 地震動・圧力の 4 分類(例)

局所移動低気圧の理論モデルを使用した解析により、圧力データの違いは観測点とダストデビルの距離に大きく起因していることが示された。また、圧力と地震動に気象データを加えたデータの分析により、地震動の違いは観測時の大気状態に大きく起因することが示された。さらに、旋風で励起された地震波が観測された可能性があることも示唆された。

本発表では、分類モデルや分析の詳細に加え、励起された地震波を使用した火星の内部構造解析の可能性についても議論していく。

惑星地質学の新着論文セミナーとアーカイブ化の取り組み -若手研究者間の連携強化に向けて-

(Report of a New Papers Seminar in Planetary Geology and the Importance of its Archiving: Towards Strengthening Collaboration among Young Researchers)

○于 賢洋¹, 池谷 蓮², 西山 学¹, 清水 雄太¹, 竹村 知洋¹

¹ 東京大学, ² 神戸大学

本発表では、コロナ禍中に若手を中心に発足した惑星地質学の新着論文セミナーとこれまでの取り組みを紹介する。

持続的な惑星科学コミュニティの活性化のためにも、様々な研究に取り組む若手研究者同士の交流を図り、多岐にわたるトピックについて議論を交わす場は重要である。しかしながら、コロナ禍以降3年にわたり学会や研究会がオンライン化したことにより、特に他大学の大学院生同士の交流の場は失われてきた。そのような状況を鑑み、2020年10月より東京大学の学生を中心に新着論文を紹介し合うセミナーが隔週オンラインで企画・開催されている。本セミナーは徐々に規模を広げ、現在では国立天文台・宇宙研・大阪大・名古屋大・神戸大・早稲田大・会津大・東工大など多岐にわたる研究機関から総勢20名以上が参加するようになった。最近では参加者の年代が広がり、修士からポスドク、教授まで幅広い年代の研究者が参加しつつある。

本セミナーでは、発表日から過去2週間分の新着論文を発表者が紹介し、その上でその内容について議論を行う形式となっている。発表に用いたスライドはドライブ上でアーカイブ化されており、過去3年分の全新着論文の各内容がスライド一枚で確認できるような仕様となっている。対象は主に惑星地質学に関する論文であるが、全天体が対象となるため、特に若手にとっては自身の研究の視野を広げる機会となっている。また、オンラインで気軽に参加できるセミナーであり、議論や交流も容易に行うことができる。加えて、論文内容のアーカイブは将来にわたって利用可能であり、先行研究の確認の手助けとなるため、日本の惑星科学コミュニティの発展につながる。今後も規模を拡大する予定であるので、以上のような取り組みに興味のある方は本発表にてご意見をいただきたい。

はやぶさ 2 ONC による Normal Albedo データから 求めた着陸地点の反射スペクトルと 帰還資料反射スペクトルの比較検討

Comparison between the Ryugu return sample reflectance spectra and the landing site spectra obtained from Hayabusa2 ONC Normal Albedo data

○横田康弘¹、本田理恵²、湯本航生³、杉田精司³、神山徹⁴、巽瑛理⁵、松岡萌⁴、
諸田智克³、坂谷尚哉¹、本田親寿⁶、長勇一郎³、亀田真吾⁷、山田学⁸、早川雅彦¹、
鈴木秀彦⁹、吉岡和夫³、澤田弘崇¹、小川和律¹⁰

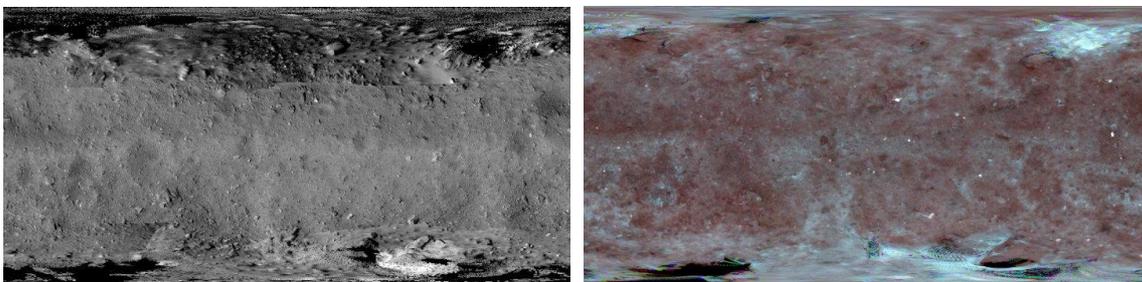
¹ISAS/JAXA、²愛媛大、³東京大、⁴産総研、⁵カナリア天体物理研究所、⁶会津大、
⁷立教大、⁸千葉工大、⁹明治大、¹⁰JSEC/JAXA

太陽位相角ゼロ度で計測する反射率「Normal albedo」では、地形の影が視界に入らない等の理由からノイズの少ない良好な反射スペクトルが得られる。小惑星リュウグウにおいては「はやぶさ2」光学航法カメラ(ONC)の観測データから、全球のNormal albedo マルチバンドマップが作成された(Yokota et al. 2021)。

ただし、このNormal albedo スペクトルを実験室で計測される隕石試料スペクトルと比較するためには、計測条件や校正手法の違いについて考慮する必要がある。

リュウグウについては帰還試料が存在するため、その実験室スペクトルが橋渡しとなる可能性がある。帰還試料の可視光反射スペクトルは、これまでにYada et al. (2022)やNakamura et al. (2022)により計測・報告されており、さらに報告は増え続けている。

本研究では、試料採取地点のONC Normal albedo を帰還試料の室内計測スペクトルと比較検討する。また、両者の比を変換係数として用いた場合に、地図上の他の地域がどのようなスペクトル形状になるかも検討する。



図：位相角約 20° のモザイク(左)と地形影響が少ない Normal Albedo 疑似カラー(右)
(Yokota et al. 2021)の比較。(検索システム JADE <https://jade.darts.isas.jaxa.jp/>)

小惑星リュウグウの熱データ解析ソフトウェアのベンチマーク

Benchmark of Thermal Analysis Software for Asteroid Ryugu

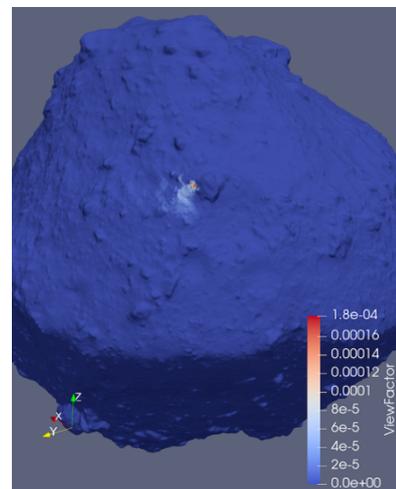
○荒井 武彦¹, 岡田 達明², 田中 智², 出村 裕英³, 坂谷 尚哉², 寫生 有理²,
千秋 博紀⁴, 神山 徹⁵, 関口 朋彦⁶, 金丸 仁明⁷, 石崎 拓也²,

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

はやぶさ2搭載中間赤外カメラ(TIR)による小惑星162173リュウグウの熱撮像が行われ, リュウグウの表層が高空隙であること, 表層温度がピクセルスケールよりも微細なラフネスによって均質化されていること, 地球上で採取されている隕石と同等の空隙率の石(冷たい石)が存在することなど, 様々な新しい知見を得ることができた(Okada *et al.*, *Nature* 2020; Shimaki *et al.*, *Icarus* 2020; Sakatani *et al.*, *Nature Astronomy*. 2021).

熱解析ソフトウェアHEAT (Endo, *IEEE Aerospace Conference*, 2017)が開発され, Senshu *et al.*, *International Journal of Thermophysics* (2022)のラフネスモデルを含んだ熱物理モデルシミュレーションによって, リュウグウの全球的な温度分布を再現し, 熱慣性分布を推定することに成功した. しかし, 局所地域の表層温度モデルは地形の形状による輻射熱交換が寄与するため, 解像度の高い形状モデルを使用した大規模な計算が必要となり, 全地域に対して構築できていない. 本研究では, リュウグウの熱物理モデルと熱解析ソフトウェアの精度に対して計算時間の検証を行い, 要求されるサイエンスを達成できるだけのトレードオフとして適切で現実的なコンピュータのリソースと計算時間を検討する.

右図に輻射熱交換の計算に必要な形態係数を既存のリュウグウ形状モデル(Watanabe *et al.*, *Science* 2019)に対して計算した結果(Polygon番号1に対してペアになるポリゴンの形態係数の値)を示す. 空間解像度の高い300万ポリゴンモデルを使用する場合, 1つのポリゴンに対して形態係数のペアとなるポリゴン数はおよそ1万で, 全球を計算する場合, 300万x1万の計算が必要になる. この形態係数を使用して熱物理モデルを計算するにはスーパーコンピューターを用いることが現実的だが, 観測条件や熱物理パラメータを変化させる必要があるため, 局所地域に対する計算では小規模な計算機を使用する. 本発表では, 局所地域に対する高空間解像度の熱シミュレーションを行い, TIR観測データを高精度で再現した結果を示す.



Ryugu 粒子の宇宙風化作用と地球での変質 ：赤外分光スペクトルへの影響

○金丸礼¹、深井稜汰¹、石崎拓也¹、矢田達¹、小野寺圭祐²、保田慶直³、安部正真¹、岡田達明¹、臼井 寛裕¹

¹JAXA 宇宙科学研究所 地球外物質研究グループ(キュレーション)

²東京大学地震研究所、³関西学院大学

小惑星リュウグウから採取された粒子は、CI コンドライトに類似する特徴を持つ[例えば 1, 2]。これらリュウグウ粒子は JAXA キュレーション施設において、純窒素ガス雰囲気クリーンチャンバ内でハンドリングされ、地球上での風化や汚染の影響を受けず、初期記載分析から国際公募研究へと提供されている。先行研究ではリュウグウ粒子表面に宇宙風化組織が存在することが報告されている[3]。Nakato et al. [4]は、光学顕微鏡観察に基づき、リュウグウ粒子を 4 タイプ(Dark、Glossy、Blight、White タイプ)に区別した。さらに SEM 観察からこれらタイプ分類は、宇宙風化作用の程度の違いを反映していることを示した。

本研究では 3 つリュウグウ粒子(A0172、A0308、C0054)を用いて、赤外分光スペクトルに対する宇宙風化作用および地球大気暴露の影響を評価した。赤外分光スペクトル測定は、窒素置換グローブボックス内に設置した FTIR (IRT-5000 + FT/IR6100 : JASCO) で実施した。また、最初の赤外分光スペクトル取得後、リュウグウ粒子をクリーンルーム内(温度 : 22 °C、湿度 : 50%) で 9 日間大気暴露させ、再びグローブボックスに戻し 2 度目の分析を実施した。

使用したリュウグウ粒子は、赤外分光スペクトル取得後に光学顕微鏡および SEM 観察が行われ、Dark (A0308、C0054) および Glossy タイプ (A0172) に区別された。これら 3 粒子は、2.71 μm の位置に最大吸収深度(OH 吸収)を示す。吸収深度は、A0172、A0308、C0054 でそれぞれ 8、12、10%であった。Noguchi et al. [3]は、宇宙風化作用に起因する粒子表面のフィロシリケートの脱水や無水メルトの形成によって OH 吸収深度が低下することを指摘しており、本結果はそれら考察と調和的である。大気暴露後の赤外反射スペクトルは、大気暴露前のスペクトルと比較し系統的に長波長側の吸収深度が増加した。この特徴は ~ 3.0 付近に吸収中心を示す吸着水(H_2O)と一致する。さらに大気暴露後の粒子は、大気暴露前に比べ $\sim 5\%$ 以上の重量増加を示した。これら結果はリュウグウ粒子は地球大気によって容易に変質することを示唆し、リュウグウ粒子の大気暴露でのハンドリングはその後の分析に影響を与える可能性があることを示している。

参考文献 : [1] Yada et al., 2021. *Nat. Astron.* 6, 214-220 [2] Yamaguchi et al., 2023. *Nat. Astron.* 7, 398-405 [3] Noguchi et al., 2023. *Nat. Astron.* 7, 170-181 [4] Nakato et al., 2023. *Earth Planets Space.* 75, 45.

季節変化を考慮した小惑星の熱モデル

○千秋博紀¹, Hamm, Maximilian², 寫生有理³, 坂谷尚哉³, 荒井武彦⁴,
関口朋彦⁵, 金丸仁明⁶, 田中智³, 岡田達明³

¹千葉工業大学惑星探査研究センター, ²ドイツ航空宇宙センター,

³宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所,

⁴前橋工科大学工学部, ⁵北海道教育大学, ⁶東京大学大学院理学系研究科

小惑星の表面温度進化は、太陽光の入射と表面からの熱輻射、地下からの熱流量のバランスで決まる。これまでに提案されてきたモデルの多く（例えば Takita et al (2017) や Shimaki et al. (2000), Senshu et al. (2022)）では、日変化に伴う表面温度の温度変動に対して季節変化を要因とする温度の変動はごくわずかであり、低緯度領域の表面温度分布を求める目的では無視できると考え、慣性座標空間に固定した小惑星位置自転させ、熱平衡に達したものを表面温度としてきた。

しかし我々は、従来のように自転の影響だけを考慮したモデルと、公転に伴って太陽距離と太陽直下点緯度が変化する影響を考慮して天体表面の温度変化を追跡したモデルの結果を比較することで、①従来の仮定は低緯度、低熱慣性の場合には悪くないこと、②逆に高緯度や高熱慣性の場合、また冬半球においては得られた温度分布に大きな差異が生じうることを明らかにしてきた。

温度分布が従来のモデルと異なるという事は、熱輻射によって生じる熱トルクも違いうることを意味している。そこで本発表では、慣性空間に固定された小惑星の熱進化モデルと、小惑星の公転も追跡した熱進化モデルの両方から熱トルクを求め、その違いについて紹介する。

References:

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

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

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

高速自転小天体におけるクレーターの非対称性の解析

○宮村 尚典, 渡邊 誠一郎
名古屋大学大学院環境学研究科

【研究背景と目的】 地球近傍小惑星リュウグウのようなコマ型形状は、過去の臨界角速度 ω_c (天体の赤道において、天体重力と遠心力がつり合う時の自転角速度)に近い高速自転下で形成されたと考えられている[1]。このような小天体の高速自転時に衝突クレーターから放出されるエジェクタは、コリオリ力で軌道が西に曲げられてクレーターの西側に積もり易くなり、形成されるクレーターリムに東西非対称性が生じることが指摘されている[2, 3]。そこで本研究では、臨界角速度 ω_c に近い角速度 ω ($\tilde{\omega} \equiv \omega/\omega_c$)で自転する小天体上で、赤道に近い緯度 β_c に形成されるクレーターについて、最終的に安定化したクレーター地形の非対称性を明らかにすることを目的とした。

【解析方法】 本研究の第一段階として、高速自転する球形天体を仮定し、エジェクタの軌道を積分計算することでエジェクタの着地点を求め、クレーター近傍でのエジェクタの厚さ分布を求めた。また、エジェクタの継続的な降り積もりで形成されるクレーター地形の傾斜角から地滑りに対する安定性を調べ、不安定(傾斜角 $\geq 31^\circ$)なら地滑りによって斜面が安息角(30°)になるような緩和過程を入れた数値解析を行い、クレーターの最終地形を求めた。

【結果と考察】 赤道上クレーターについて $\tilde{\omega}$ を変えて解析を行った結果、 $\tilde{\omega} \geq 0.8$ では、エジェクタ着地域が東に凸の放物線状になり、リムの厚みは西側が東側より概ね高くなった。しかし、 $\tilde{\omega} = 0.9$ になると着地域の東側境界付近に第2の厚さのピークが現れ、 $\tilde{\omega} = 0.95$ で2つのリムが融合し、 $\tilde{\omega} = 0.9-0.95$ では東側のリムが西側リムより厚くなった。一方で、 $\tilde{\omega} = 0.9-0.95$ での傾向は中心緯度 $\beta_c \geq 1^\circ$ のクレーターでは見られず、これはクレーターが赤道上で無くなるとエジェクタ着地域がクレーターに対して南西に移動する南北非対称性が生じるためである。また、エジェクタの降り積もりで形成されたクレーターリム地形の傾斜は急で崩れることが予想されたため、赤道上クレーターについて緩和過程解析を行い、安定化したクレーター最終地形を求めた。 $\tilde{\omega} = 0.8$ では放物線状の着地限界が緩和後も薄く残り、 $\tilde{\omega} = 0.9$ では、東側では第2のピークが緩和されたことによって西側と比べて幅広なりムとなった。 $\tilde{\omega} = 0.95$ では、真東方向のみ融合したピークが緩和後も西側リムより高くなったが、平均的には西半分のリムの方が高くなった。このように、最終的なクレーター地形は地滑りによる高さ軽減があるが、特徴的な非対称性が残ることがわかった。

【今後の展望】 本研究の第二段階では、実効的な重力を考慮したコマ型天体下でのクレーター最終地形数値解析を行っている。クレーターの地滑り緩和は、天体自己重力と遠心力の合力(実効的重力)の下で計算する必要があるため、天体形状の安定性を考慮すると実際のリュウグウのようなコマ型天体を仮定してクレーター形状解析を行う必要があるためである。コマ型天体の重力場の計算や、それを用いたエジェクタ軌道計算等についても報告する予定である。

【参考文献】 [1] Watanabe et al. 2019, *Science* 364, 268–272. [2] Hirata et al. 2021, *Icarus* 354, 114073. [3] Yamada, 2022, Master Thesis, Nagoya U.

実験と数値シミュレーションによる 岩塊の移動・流動プロセスに関する検討

○磯邊 優奈¹, 宮本 英昭^{1,2}, 清水 雄太²

1. 東京大学工学部
2. 東京大学工学系研究科

近年の探査により、多くの小天体がラブルパイル構造を持ち、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た(e.g. [1-2])。小惑星を覆う表面物質は、圧縮強度や付着力が小さく、移動・流動が容易であると推測され、その痕跡がこれまで様々な小惑星で確認されている(e.g. [3-4])。岩石碎屑物の移動・流動プロセスを理解することは、小惑星表面が天体形成以後の進化を理解する上で重要と考えられる。移動・流動の駆動力は、YORP 効果による傾斜の変化[5]など、様々なものが考えられるが、有力なものの一つとして天体衝突などによる地震動が挙げられる。例えば小惑星 Itokawa には smooth terrain と rough terrain の2つの特徴的な領域が存在し、その分布は表面の重力および自転による遠心力を考慮したポテンシャルの大小領域と一致することから、表面物質が天体衝突で生じた地震動によって移動・流動し、その結果偏析したと考えられている[6]。

しかし、探査ミッションでこれまで獲得したデータとしては、探査機及びローバーが天体表面に接しながら貴重なデータを獲得したとはいえ、主として光学的手法による天体表面に関するものに限られ、小惑星表面の物質が移動・流動する際の天体内部および表層地下浅部の物質の挙動や構造に関する理解は、いまだに不足している。そこで本研究は、実験的および数値的手法により、振動による天体表層の岩塊の移動・流動プロセスを、特に表層物質内部から理解することを目指している。

実験的検討としては、表層レゴリスの形状および粒径分布を模擬した岩石セットを作成した上で振動を与え挙動を観察した。この際、X線CTを用いて岩石サンプル内部の様子も観察することとした。その結果、振動により岩石粒子が内部で対流を起こすこと、表面の粒径分布に偏りが生じることが分かった。また離散要素法を用いた数値シミュレーションにより振動を与えた際の粒子の挙動を観察し、粒子の性質に関するパラメータや振動の条件による粒子の挙動の変化を検討した。実験では検討が難しい微小重力・真空条件下における粒子の挙動についても数値的解析を行っている。本講演ではこうした結果をもとに、岩塊の振動に対する挙動の詳細と、天体の表層進化に関する理解に与える示唆について報告したい。

[1] Fujiwara et al., *Science* **312**(5778), 1330-1334 (2006). [2] Watanabe et al., *Science* **364**(6437), 268-272 (2019). [3] Sugita et al., *Science* **364**(6437), eaaw0422 (2019). [4] Dombard et al., *Icarus* **210**(2), 713-721 (2010). [5] Vokrouhlický et al., *Nature* **425**(6954), 147-151 (2003). [6] Miyamoto et al., *Science* **316**(5827), 1011-1014 (2007).

X線CTによる振動下における粉粒体の挙動の可視化

○清水 雄太¹, 宮本英昭¹, 高田泰至¹, 増岡健太郎²

¹東京大学

²大成建設株式会社

近年様々な小天体探査が実施され、小天体表層が未固結の岩石粒子および細粒から成るレゴリスで覆われていることが明らかになった [1-3]。それらの表層物質は、岩石粒子の分級・偏析・alignment・一部埋没などを示し、天体の形成以後なんらかの物質の移動・流動を伴ってきたことが推測される [4, 5]。この表層物質の移動形態や原因を明らかにすることは、小天体表層の進化過程を理解するうえで、重要な示唆を与えうる。そこで本研究では、小天体表層で頻繁に生じている天体衝突、およびそれにより引き起こされる地震動に着目し、粉粒体の振動下における挙動を実験的に把握することを目指す。

複数の先行研究が、室内実験 [6] や数値計算 [7]などで、振動下における粉粒体の挙動の把握を試みてきた。しかし、実際の天体表層の条件を考慮すれば、岩石サンプルの粒子形状や粒形分布、サンプル容器の壁面の存在が粉粒体の挙動に大きく寄与する可能性がある。そこで本研究において用いるサンプルとしては、実験中の破壊や摩耗を防ぎ、サンプルの粒形分布の変化を抑制できることを期待し、比較的高い圧縮強度をもつホルンフェルスを準備した。また、各粒径ビンにおいて粒子数を決定し、岩石サンプルの粒形分布が全体として傾き-3のべき乗分布となるようにした。サンプル容器は底面の中心にのみ振動機からの振動が伝わるようにし、壁面周辺の岩石サンプルの振動を抑制して、壁面が粉粒体の挙動になるべく影響を及ぼさないようにした。

以上の実験装置を用いて、振幅~1 mm、振動数 50 Hz の振動を与えたところ、壁面の効果がなくとも粉粒体が対流することが判明した。一方、振幅をより小さくした場合には対流は生じず、サンプル表面に粗粒が、内部に細粒が移動し分級して、ブラジルナッツ効果が卓越する可能性が示唆された。また、本実験過程を高出力の X線 CT を用いて撮影することで、各時刻における岩石サンプルの内部構造を、高い空間解像度 (~0.1 mm/pix) で可視化することに成功し、より詳細に粉粒体の挙動をサンプル容器の内部から観察することができた。本発表では対流下における岩石粒子の長軸の推移と、小惑星イトカワ・リュウグウ・ベヌー表層における岩石粒子の長軸の傾向との比較などを通じて、小天体の衝突現象による表層進化について議論したい。

参考文献

[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] Miyamoto et al., *Science* **316**, 1011-1044 (2007). [5] Jawin et al., *JGR: Planets* **125**, e2020JE006475. [6] Knight et al., *Physical Review Letters* **70**, 3728 (1993). [7] Maurel et al., *MNRAS*, stw2641.

はやぶさ 2 拡張ミッション (はやぶさ 2#) で観測した黄道光の日心距離依存性

○津村耕司¹, 松浦周二², 佐野圭³, 岩田隆浩^{4,5}, 矢野創^{4,5}, 北里宏平⁶, 瀧本幸司³, 山田学⁷, 諸田智克⁸, 神山徹⁹, 早川雅彦⁴, 横田康弘⁴, 巽瑛理¹⁰, 松岡萌⁹, 坂谷尚哉⁴, 本田理恵¹¹, 亀田真吾¹², 鈴木秀彦¹³, 長勇一郎⁸, 吉岡和夫⁸, 小川和律⁴, 白井慶¹⁴, 澤田弘崇⁴, 杉田精司^{8,7}

¹ 東京都市大学, ² 関西学院大学, ³ 九州工業大学, ⁴ 宇宙航空研究開発機構, ⁵ 総合研究大学院大学, ⁶ 会津大学, ⁷ 千葉工業大学, ⁸ 東京大学, ⁹ 産業技術総合研究所, ¹⁰ ラ・ラグーナ大学, ¹¹ 愛媛大学, ¹² 立教大学, ¹³ 明治大学, ¹⁴ 神戸大学

惑星間塵は太陽系内を浮遊する小さな塵(ダスト)であり、それらがどこで形成され、太陽系内をどのように移動しながら分布しているのかを探ることは、太陽系の進化史を探る上で重要である。惑星間塵による太陽光の散乱を黄道光として観測することで惑星間塵について調べることができるが、黄道光は太陽散乱光の視線方向の積分として観測されるため、従来の地球からの黄道光観測では、惑星間塵の空間分布を求めることは困難であった。

我々は、小惑星探査機「はやぶさ 2」が地球帰還後、別の小惑星へ向かう「はやぶさ 2 拡張ミッション (はやぶさ 2#)」の航行中の 2021 年から 2022 年にかけて、日心距離 0.76 au から 1.06 au の範囲で黄道光を観測し、太陽系の内惑星領域における惑星間塵の分布を計測した。この観測は「はやぶさ 2」搭載の光学航法望遠カメラ (ONC-T) の wide-band (400-850 nm) により、黄道面内の反太陽方向に対して実施された。これは、地球近傍からの黄道光観測では得られない惑星間塵の分布情報の取得に成功したのものであり、惑星間空間を航行する「はやぶさ 2」だからこそ成し得た成果である。また、このような惑星間空間からの黄道光観測は 1970 年代に Pioneer 探査機、Helios 探査機による測定以来、約半世紀ぶりの成果であり、当時と比べて観測装置の性能は格段に向上しており、恒星の除去、天の川銀河や銀河系外起源の背景光の推定と除去など、解析手法も洗練されている。

惑星間塵の数密度 (n) は、日心距離 (r) のべき関数として $n(r) \sim r^{-\alpha}$ の形でかけられるが、本研究によって $\alpha = 1.30 \pm 0.08$ という結果が得られ、過去の Pioneer や Helios の結果とよく一致した。また、0.9 au 付近にべき関数からの超過の兆候もみられ、今後も継続する「はやぶさ 2#」での黄道光観測での検証課題となった。

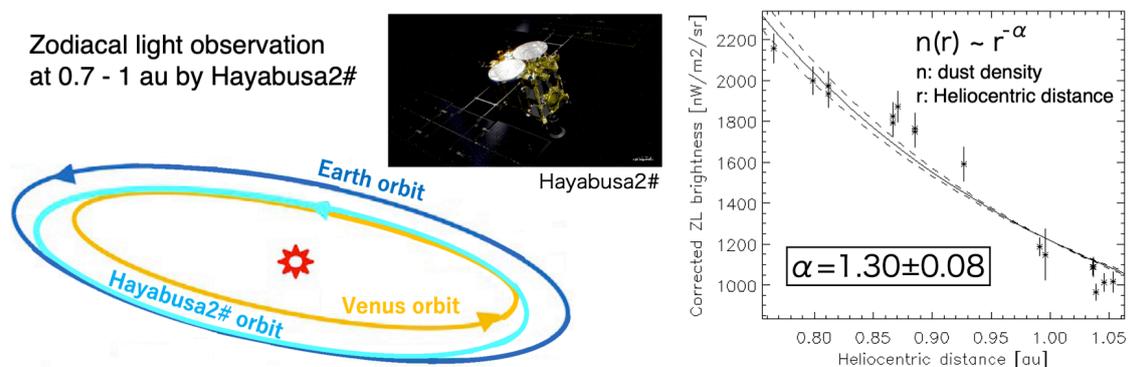


図 1: はやぶさ 2# の探査機軌道と、得られた黄道光の日心距離依存性

DESTINY+搭載用ダストアナライザの 開発と地上較正計画 2023

○平井 隆之¹, 小林 正規¹, 荒井 朋子¹, 木村 宏¹,
佐々木 晶², 藪田 ひかる³, 伊藤 元雄⁴, 山口 亮⁵, 矢野 創⁶,
Ludwig Tomas⁷, Schwarz Winfried⁷, Hopp Jens⁷, Trieloff Mario⁷,
Hillier Jon⁸, Khawaja Nozair⁸, Eckart Lisa⁸, Postberg Frank⁸,
Simolka Jonas⁹, Krüger Harald¹⁰, Henselowsky Carsten¹¹, Srama Ralf⁹,
DESTINY+チーム

¹千葉工業大学, ²大阪大学, ³広島大学, ⁴JAMSTEC, ⁵NIPR, ⁶JAXA,
⁷ハイデルベルク大学, ⁸ベルリン自由大学, ⁹シュトゥットガルト大学,
¹⁰マックスプランク太陽系研究所, ¹¹DLR

深宇宙探査技術実証機 DESTINY+に搭載されるダストアナライザ (DESTINY+ Dust Analyser, DDA) は、ダスト粒子の超高速衝突により発生するイオンの電荷量計測や質量分析から、ダスト粒子の質量や化学組成を推定する理学観測装置である。質量分析部は飛行時間型 (計測質量範囲: $m/z \sim 1,000$) を用い、ダストを構成する有機物と鉱物のバルク化学組成の同定を目指している。DDA は地球周回フェーズから運用を開始し、巡航中には惑星間ダストや星間ダストの計測を行う。また、活動的小惑星 (3200) Phaethon とのフライバイ時には、小惑星由来のダスト計測を実施する。

装置開発については、PFM 設計を確定する CDR フェーズに突入した。また、システムレベルでの熱構造成立性を確認する TTM/MTM 試験に参加すべく、DDA-S の熱構造モデル STM1 が日本に到着している。EM 品を用いたダスト加速器実験から、DDA の質量分解能は土星探査機 Cassini に搭載された CDA よりも 10 倍程度高いことが示された。

質量スペクトルを解釈するための地上較正については、ドイツ・シュトゥットガルト大学で整備を進めてきたダスト静電加速器は、少なくとも 2023 年中は DDA の基本的機能・性能を確認するために用いられるため、地上較正を目的とした利用は 2024 年明け以降になる見込みである。

本発表ではこれらの進捗状況を報告する。

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

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

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

DESTINY⁺探査機には 2 台のカメラ、小惑星追尾望遠カメラ TCAP (Telescopic CAmera for Phaethon) およびマルチバンドカメラ MCAP (Multiband CAmera for Phaethon) が搭載され、探査機が Phaethon を相対速度約 36 km/s, 最接近距離約 500 km という高速フライバイ条件 (最大相対角速度約 4 deg/sec) でフライバイする間に Phaethon の撮像を行う。TCAP は可視波長域の望遠カメラで、Phaethon を追尾しながら、Phaethon のライトカーブ観測、グローバル形状観測、日照域の 3 次元形状観測、および詳細地形観測を、Phaethon までの距離に応じて実施する。MCAP は可視から近赤外にかけての観測波長を持つマルチバンドカメラで、Phaethon 日照域の物質観測を実施する。これらの観測により、TCAP による詳細地形観測と MCAP による表層スペクトル分布を合わせて理解することにより、Phaethon の素性、特にのダスト生成・放出機構についての知見が得られると期待されている。

現在、TCAP は、エンジニアリングモデル (EM) が完成し、各種検証試験を実施するところである。MCAP は、EM での検証および光学校正用データ取得が完了し、いくつかの問題点を確認されたが、原因究明および対策を講じ、その結果をフライトモデル (FM) の設計へ反映しているところである。本発表では、本発表では MCAP EM の検証試験結果を中心に、2 台のカメラの開発状況を報告する。

2017-2022 年—ふたご座流星群の分光観測による Na の経年変化

○菊地啓太¹, 阿部新助¹, 前田幸治², 荒井朋子³

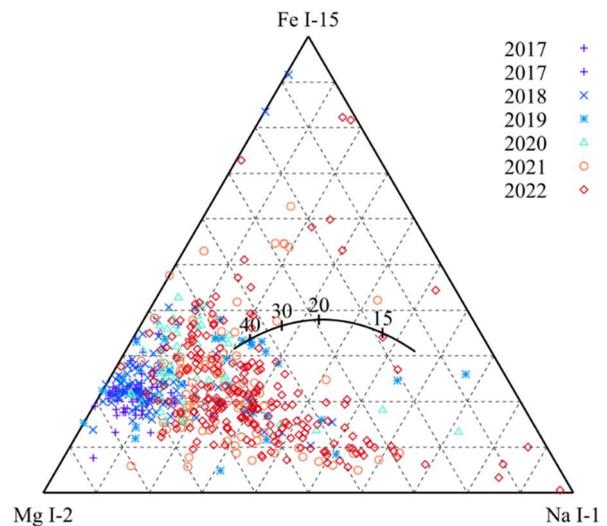
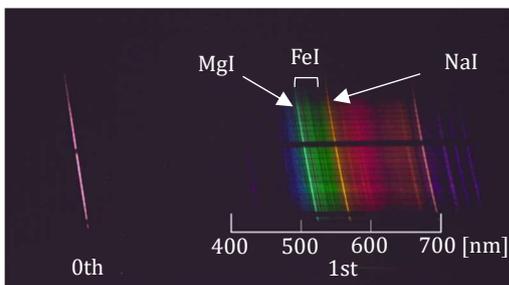
¹日本大学大学院理工学研究科, ²宮崎大学工学部, ³千葉工業大学惑星探査研究センター

地球近傍小惑星(3200)Phaethon はふたご座流星群の母天体であり, 近日点付近において増光が見られる^[1]. その増光は一般的な彗星で見られる氷の昇華によるものではなく, 探査機 STEREO-A の HI1 カメラの観測によって Na の昇華によるものと判明した^[2]. しかし, Phaethon からいつどのようにふたご座流星群のダストトレイルが形成されたのか, 放出されたダストから Na などの揮発性物質がどのように失われていったのかについてはまだ解明されていないため, 探査機 DESTINY+によるダスト計測と近接撮像が実施される計画である.

流星体の組成(発光強度比)は, 流星の発光を回折格子などを用いて分光撮像することで得られるスペクトルを解析して推定することができる. 2017 年と 2018 年の 149 個の分光観測から, ふたご座流星群の Na 含有量が強いサイズ依存性を有することが示された^[3]. 本研究では, 高感度カメラを用いて得られたふたご座流星群の分光観測結果から, Na の変動について調査を行った.

スペクトルの分類は, 流星の発光でよく見られる NaI-1(589 [nm]), MgI-2(518 [nm]), FeI-15(527-545 [nm])の 3 種類の輝線を用いて行った. 結果として, 2021 年は 84 個, 2022 年は 216 個のふたご座流星群の分光撮像が得られ, スペクトル解析からふたご座流星群における Na 含有量が増加傾向にあることを裏付けるデータを得ることができた.

	Na free (~10%)	Na poor (10%~20%)	Na enhanced (60%~80%)	Na rich (80%~)
2017	56	9	0	0
2018	52	21	0	0
2019	2	7	6	1
2020	19	21	1	0
2021	8	37	1	0
2022	16	54	4	4



左上表: 観測年ごとの Na 量の変動. 年を経るごとに Na free の割合が減少している.

左下図: 分光観測によって得られたふたご座流星群のスペクトル. (2022/12/15 03:29:22 JST)

右図: ふたご座流星群の発光強度比. (三角形の頂点に向かうほどその物質の発光が大きいことを示す.)

中央の曲線は, 太陽系の物質がとある速度で突入してきた際のスペクトルの分布を表す.

<参考文献>

[1] Jewitt David, et al., "The Dust Tail of Asteroid (3200) Phaethon", The Astrophysical Journal Letters, Volume 771, Number 2, L36, 2013

[2] Qicheng Zhang et al., "Sodium Brightening of (3200) Phaethon near Perihelion", The Planetary Science Journal, Volume 4, Number 4, 70, 2023

[3] S. Abe, et al., "Sodium variation in Geminid meteoroids from (3200) Phaethon", Planetary and Space Science, Volume 194, p1-9, 2020

Hera 搭載熱赤外カメラ TIRI の開発状況報告

Development status of thermal infrared imager TIRI onboard Hera spacecraft

○坂谷尚哉¹, 岡田達明¹, 鳶生有理¹, 千秋博紀², 関口朋彦³, 荒井武彦⁴, 石崎拓也¹,
金丸仁明⁵, 神山徹⁶, 出村裕英⁷, 金野龍史⁷, 古川総一郎^{1,5}, 田中智¹

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

Hera は小惑星 65803 Didymos と衛星 Dimorphos からなる二重小惑星系を探索する欧州宇宙機関 (ESA) の小惑星探査計画である。Dimorphos へは先行する NASA DART 探査機が 2022 年 9 月に衝突し、大規模なエジェクタ放出が観測された。Hera は 2024 年 10 月に打ち上げ、2027 年 1 月に二重小惑星系にランデブし、両小惑星の形状や物質・物性的特徴や自公転軌道などの力学的状態、DART 衝突痕を詳細に観測する。日本からは、熱赤外カメラ TIRI を提供し、小惑星の熱物性の調査を行うほか、小惑星の地形・地質学、衝突科学、ダイナミクスなど「はやぶさ 2」の知見を活かして科学的検討で協力する。

TIRI は「はやぶさ 2」に搭載された中間赤外カメラ TIR を発展させたものであり、1024x768 pixel の非冷却ボロメータを搭載し、視野角 13.3° x 10.0°、ピクセル解像度 0.013 °/pix の光学系を有する。また、フィルターホイールを搭載し、温度計測用の wide バンドフィルター (8-14 μ m)、分光用の narrow バンドフィルター 6 波長、および校正用の黒色板を有する。2023 年 5 月には TIRI のエンジニアリングモデル (EM) を ESA に納入し、現在 TIRI チームではフライトモデル (PFM) の製造・試験中である。本講演では、TIRI EM および PFM の開発状況、特に 2023 年 6 月に実施した PFM の地上校正試験の結果を中心に紹介する。

DART 探査機の衝突前後で捉えた二重小惑星系 Didymos-Dimorphos の偏光観測

○関口 朋彦¹, Geem, Jooyeon², 石黒 正晃², 内藤 博之³, Bach, Yoonsoo P.²,
高木 聖子⁴, 大野 辰遼⁴, 出村 裕英⁵

¹北海道教育大学, ²ソウル大学, ³なよろ市立天文台, ⁴北海道大学, ⁵会津大学

AIDA	DART	Hera
運用	NASA	ESA
打上	2021年11月24日	2024年10月予定
到着	2022年9月26日	2027年1月予定
備考	衛星 Dimorphos に衝突	TIRI (熱赤外カメラ) を JAXA が提供

二重小惑星系 Didymos-Dimorphos に向かう
小惑星探査ミッション AIDA (Asteroid Impact
& Deflection Assessment) は NASA の DART と
ESA の Hera ミッションによるプラネタリ・デ
ィフェンスプロジェクトである。

このうち DART 探査機は 2022 年 9 月 26 日 11:55 (UTC) に
衛星小惑星 Dimorphos への衝突に成功している。

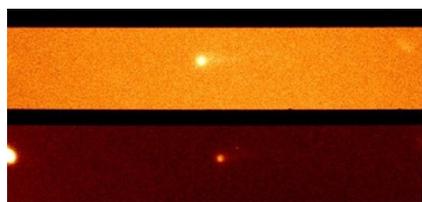


図 1: 北大 1.6m ピリカ望遠鏡+MSI に
よる可視偏光撮像画像 (R_c バンド)
上の明るい視野と下の暗い視野はそれ
ぞれ偏光常光成分の画像と、偏光異常
光成分の画像。ともに微かな放出塵の
尾を伴う Didymos 系 (衝突後)。
小惑星系は空間分解されていない。

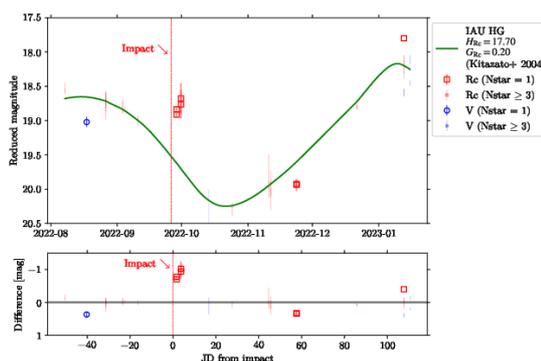


図 2: Didymos 系の等
級変化 (横軸年月)
上パネルは地心・日心
距離補正済み測光値。
緑色曲線は位相角依存
性を考慮し、フィット
した予想等級値。
下パネルは、予想等級
と実測値との差。衝突
直後に明るくなったこ
とを示した。

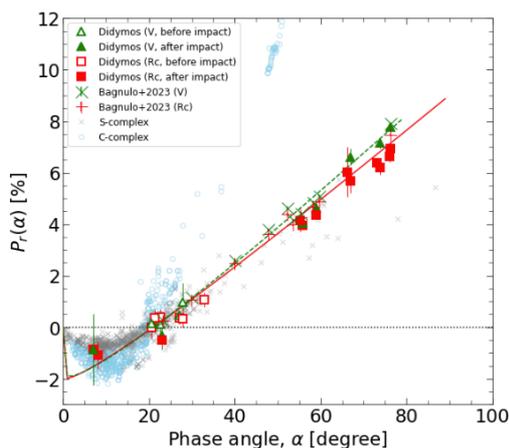


図 3: 太陽位相角-偏光度関係
Vバンド R_c バンドともに全位相角にわたって S 型小惑星の偏光度の特性を示す。我々のデータでは、衝突の前後で有意な偏光度の変化は見られなかった

我々は北大 1.6m ピリカ望遠鏡+MSI (名寄市) を用い
て、衝突前の 2022 年 8 月から衝突後の 2023 年 1 月
にわたって長期間の偏光・撮像のモニター観測を行
った。Didymos / Dimorphos 系の公転周期は 11.9 時
間であるため、両者は空間分解されないが、衝突後
には、Dimorphos からの塵放出によるとみられる「彗
星の塵の尾状」の物質放出が確認された (図 1)。測光
値でも、衝突後の急増光が確認された (図 2)。また広
範囲位相角での偏光度を解析した結果 (図 3)、偏光度
- 位相角関係では S 型小惑星の特徴を示し、また求め
られた小惑星系の幾何学アルベドは $P_v = 0.21$ と、S
型小惑星の典型値を得た。我々のデータでは衝突の前
後で偏光度には有意な変化は見られていない。

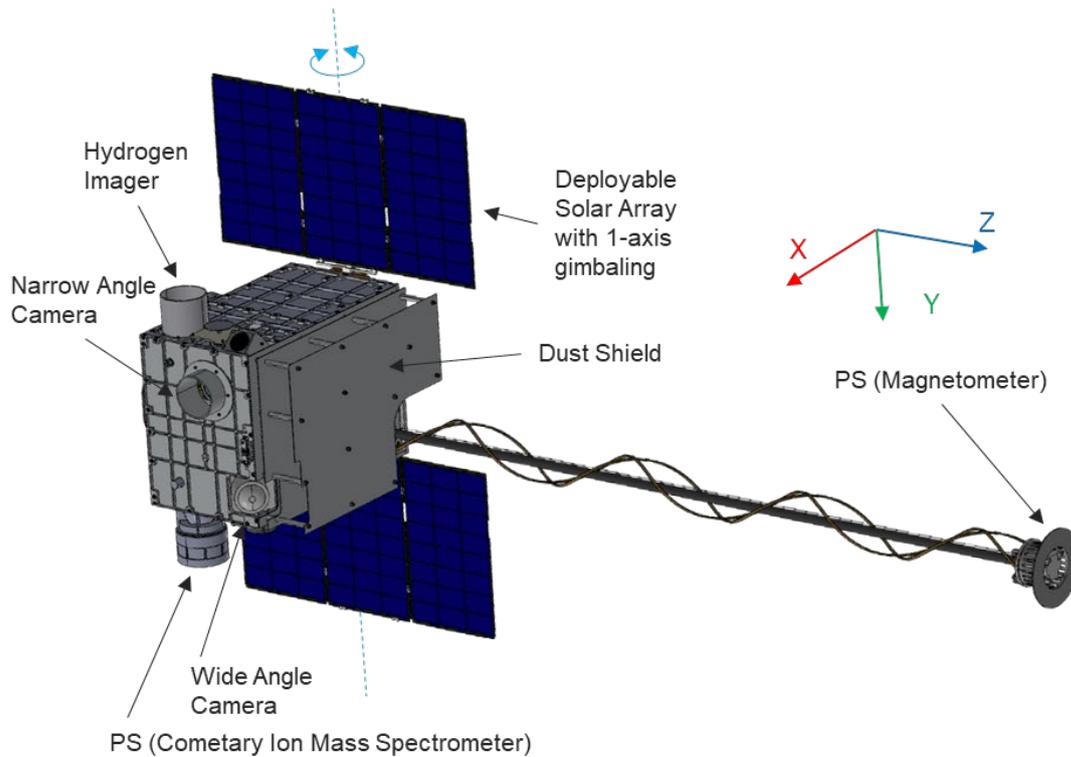
P-046

The Comet Interceptor mission: Preliminary design

○S. Kasahara¹, R. Funase^{1,2}, K. Yoshioka¹, N. Sakatani², S. Kameda³, A. Matsuoka⁴, N. Murata², Y. Harada⁴, H. Kawakita⁵, S. Sugita¹ and Comet Interceptor project team²

1: The University of Tokyo, 2: JAXA, 3: Rikkyo University, 4: Kyoto University, 5: Kyoto Sangyo University

Comets are pristine small bodies and thus provide key information about the solar system's evolution. Remote observations by ground observatories have characterized various comets, while in-situ observations by spacecraft have brought much more detailed information on several comets. However, the direct observations by spacecraft fly-by or rendezvous have been limited to the short-period comets, which neared the sun many times in the past and thus lost some of (or even most of) their primitive characteristics. The Comet Interceptor mission, led by ESA, aims at a long-period comet or an interstellar object. JAXA will provide an ultra-small (24 U) daughter spacecraft (probe B1), whose closest approach will be less than 1,000 km, allowing the first-ever multi-spacecraft fly-by observations of a comet. Here we report our recent progress in the study toward preliminary design reviews both in probe system levels and instrument levels.



Comet Interceptor ミッションで計測される彗星イオンの推定と 搭載されるイオン分析器用ダストシールドの設計

○田尾涼¹, 笠原慧¹

¹ 東京大学

過去に彗星探査は行われてきたが、彗星の中でも長周期彗星を直接探査した例はない。長周期彗星の起源はオールトの雲にあると考えられており、太陽系形成初期の始原的な特徴を留めている可能性が高い。これを理解することは、太陽系の起源を知る上で重要な手がかりとなることが期待される。ESA と JAXA が共同で計画している Comet Interceptor Mission は、長周期彗星あるいは恒星間天体を直接探査するミッションである。彗星探査機 Comet Interceptor は、彗星の表面組成、形状、構成、コマの組成などの特性評価することを科学目標に掲げ、2029 年に打ち上げられる予定である。探査機はラグランジュ点で一旦待機し、地上観測によりターゲットとなる彗星が決定された後にアプローチしてフライバイ探査を行う。この Comet Interceptor に搭載するイオン分析器は、コマ中に含まれる彗星イオンの質量・エネルギー・飛来の方向を計測する。これらのデータは、彗星探査機がターゲットとなる彗星のコマをフライバイによって通過する際に得られる。一方で、コマ中にはダストも含まれている。そこで探査機を保護するために進行方向の側面にダストシールドを設置し機器の損傷を防ぐ。このシールド形状の決定には衝撃解析ソフトウェア Autodyn を用いたシミュレーションで枚数や厚みなどの条件を探り、サイズや重量の制限を考慮して軽量で頑強な設計を施す。しかし、イオン分析器の開口部に対しても進行方向側を完全に塞いでしまうと、流入する彗星イオンも防がれ、得られるデータが減少してしまう。そこで、ダストシールドに適切なサイズの入射口を開け、ダストを防ぎつつ彗星イオンの流入を確保する。

この入射口のサイズと位置を決定する上で、長周期彗星のイオン数密度を推定してイオン分析器への流入量を見積もることが必要である。そのために、彗星ガスの光化学反応モデルを用いた数値計算によってコマのイオン数密度プロファイルを導出する。ただし、ターゲットとなる天体は打ち上げ後に決定されるので、ここではガス生成率が高い場合 $\sim 10^{31} \text{ s}^{-1}$ から低い場合 $\sim 10^{25} \text{ s}^{-1}$ まで考える。この不定性の範囲において、イオン分析器で検出されるイオン数密度の時間変遷をイオン種ごとに見積った結果、彗星との最接近距離において最大イオン数密度が $\sim 100 \text{ cm}^{-3}$ と求まった。このイオン数密度に加え、探査機と彗星の相対速度、彗星イオンの温度やバルク速度、イオン分析器の観測範囲などを考慮し、見積もったイオン分析器への流入量から適した入射口の形状を設計する。また、彗星ガスの光化学反応モデルによって推定されたイオン数密度プロファイルは、実際に彗星イオンの計測後のデータ解析にも有用である。Comet Interceptor ミッションはフライバイ探査であるため、得られた軌道上のデータを境界条件に計算モデルを用いて彗星表面までのイオン数密度プロファイルを推定し、粒子種ごとの生成率を求めることができる。

次世代小天体サンプルリターンミッションの目指すサイエンス

○黒川宏之¹, 鳶生有理², 岡田達明², 佐伯孝尚², 津田雄一², 森治², 坂谷尚哉², 深井稜汰², 青木順³, 癸生川陽子⁴, 熊本篤志⁵, 田中智¹, 川村太一⁶, 浦川聖太郎⁷, 巽瑛理¹, 高尾勇輝⁸, 菊地翔太⁹, 瀧川晶¹, 奥住聡¹⁰, 古家健次⁹, 金丸仁明¹, 荒川創太¹¹,

次世代小天体サンプルリターンワーキンググループ

¹東大, ²JAXA, ³阪大, ⁴横国大, ⁵東北大, ⁶IPGP,

⁷日本スペースガード協会, ⁸九大, ⁹NAOJ, ¹⁰東工大, ¹¹JAMSTEC

現在, JAXA 宇宙科学研究所のワーキンググループ (WG) 活動として, 次世代小天体サンプルリターン (SR) ミッションの検討が進められている。次世代小天体 SR 工学 WG および理学 WG では, 本ミッションの次期戦略的中型ミッションとしての実現を目指している。次世代小天体 SR ミッションでは, はやぶさ 2 で達成した小天体往復探査の技術を発展させ, より自在性の高い複数機での探査システムを構築するとともに, 火星軌道以遠への到達を実現する。そして, 始原的な彗星からの SR によって, 太陽系の起源に迫るサイエンスを展開する。目標天体としては, 木星族彗星 289P/Blanpain 等が候補に挙げられている。本講演では, WG 活動状況について理学面を中心に概説する。

次世代小天体 SR ミッションは, 大目的 I : 太陽系物質の起源の解明, 大目的 II : 太陽系天体の起源の解明, を掲げている。これらの大目的の下に, I-1 : 太陽系の親星の種類と割合を解明する, I-2 : 彗星有機物の起源を解明する, II-1 : 彗星がラブルパイル天体 (破壊再集積天体) かペブルパイル天体かを明らかにする, II-2 : 彗星の形成環境を解明する, という 4 つの科学目的が設定されている。次世代小天体 SR 理学 WG では, これらの科学目的を達成するための探査要求項目を科学トレーサビリティマトリックスとして整理した。

これらの科学目的の実現のため, 次世代小天体 SR ミッションでは Small Carry-on Impactor (SCI) による彗星地下物質の掘削と SR, 揮発性物質のその場分析を検討している。Stardust ミッションを大幅に上回る 1 g 以上の試料を採取し, プレソーラー粒子を含む試料の同位体分析から, 太陽系物質の供給源となった親星の種類と割合を解明し, さらに原始太陽系における彗星材料物質の制約を得る。未踏の地下物質へとアクセスし, 宇宙風化や彗星活動の影響を受ける前の彗星材料物質に含まれていた有機物の種類と存在度を明らかにする。

これらの無機・有機化学的情報にコンテキストを与えるため, 光学的リモセン観測に加え, 次世代小天体 SR ミッションでは内部構造探査の実施を検討している。はやぶさ・はやぶさ 2 ミッションでは, 天体表面におけるボルダーの存在等から探査天体 (イトカワ・リュウグウ) がラブルパイル天体であると結論づけられた一方, Rosetta ミッションにおけるレーダー・地震計の内部構造探査では, 探査天体 (67P/C-G) がマクロな空隙をもたないペブルパイル天体である可能性が示唆された。本ミッションでは, 複数機構成を活かした全球的なレーダートモグラフィや, SCI 衝突・弾丸式サンプリングという震源を利用した地震計測を行うことで, 彗星の全球的な内部構造の情報をはじめ得る。これを通じて, 集積後の天体の進化史を制約する。

次世代小天体サンプルリターン(NGSR)ミッションにおける彗星核内部レーダ探査の検討

Conceptual studies of the internal radar sounding of the comet nucleus in Next Generation Small Body Sample Return (NGSR) Mission

○熊本 篤志¹, 宮本 英昭², 坂谷 尚哉³, 鳶生 有理³, 黒川 宏之²

佐伯 孝尚³, 津田 雄一³, 菊地 翔太⁴

¹東北大学, ²東京大学, ³JAXA, ⁴国立天文台

次世代小天体サンプルリターン理工学WGにおいて、彗星核地下物質のサンプルリターンを行うミッションの提案に向けて検討が進められている。このミッションでは、彗星活動の影響を免れて彗星地下に保存された太陽系初期の物質をサンプル・その場分析するための観測機器に加えて、探査対象とする彗星核が、穏やかな集積を経て形成されたペブルパイルか、母天体の衝突・再集積を経て形成されたラブルパイルかの判別のため、レーダ・地震計による内部探査の実施も検討されている。

本研究では、彗星核全体の内部構造を探査可能なレーダシステムを検討する。レーダパルスが数100mの彗星核を透過できるような観測周波数は100~300MHzの範囲で設定する。観測周波数が高いほど電磁波の減衰率は高くなる。送信電力・媒質が異なるので一概には比較できないが、彗星探査ミッション Rosetta のレーダシステムでは100MHz前後の周波数帯で彗星核内部200~900mの距離を透過したレーダパルスを検出できた例がある^[1]。真空中で1.5m、誘電率2の媒質中で1mの分解能を得るために帯域幅は100MHzとする。彗星核がペブルパイルの場合、内部の密度コントラストが小さく、明確なレーダエコーを確認しにくい可能性がある。このため従来の探査で多く用いられてきたモノスタティックレーダ(同じ1点から送受信)ではなく、バイスタティックレーダ(異なる2点間で送受信)を選択する。Rosettaのレーダシステムもバイスタティックレーダだったので、透過波の遅延から誘電率絶対値を導出できた反面、1点が周回、もう1点が天体表面固定で、交差した複数の伝播路の遅延情報を活用できない点ではモノスタティックレーダと同様だったため、内部構造の2・3次元イメージングの実現には至らなかった。成層構造が必ずしも想定できない小天体に対しては、送受信点双方が可動なバイスタティックレーダが有利である(図1)。講演では、上記のレーダシステムの構成・仕様案に加えて、(i) FDTD法を用いた彗星核の電波伝搬シミュレーションによる内部反射面・誘電率分布の導出手法の検討・観測運用プランの明確化、(ii) モーメント法を用いたアンテナ特性シミュレーションによる、計測分解能・搭載性を両立可能な小型・広帯域アンテナの設計の進捗状況についても報告を行う。

参考文献 [1] Ciarletti et al (2018), *MNRAS*, 469, S805–S817.

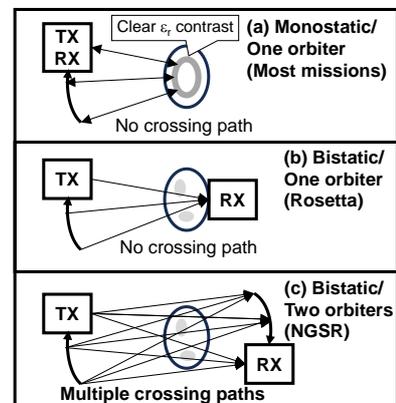


図1. レーダシステムの比較

ALMA Images of 1 Ceres in 2017

(ALMAによる小惑星 1 Ceres の連続波画像の解析)

Shigeru Takahashi¹, Takahiro Iino¹, Takashi Tsukagoshi² and Hideo Sagawa³

1. The University of Tokyo, 2. Ashikaga University, 3. Kyoto Sangyo University

Millimeter and submillimeter-wave observations are known to be a powerful tool to investigate the surface and atmospheric properties of solar system bodies (e. g., Takahashi et al. 2010, Iino et al. 2020). In particular, the high spatial resolution capability of the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) has been enabled us to study disk resolved surface properties of asteroids; e.g. 3 Juno (ALMA Partnership et al. 2015) and 16 Psyche (Shepard et al. 2021). For the dwarf planet 1 Ceres, Li et al. (2020) showed that the disk-averaged brightness temperature and a rotational light curve at ~ 265 GHz continuum during 2015 and 2017 seasons and obtained a disk-averaged brightness temperature between 170 and 180 K in 2017. On the other hand, we have re-processed the 2015 and 2017 data from the common archival science data model (ASDM) and succeeded to calibrate and image 9 ASDM files with high spatial resolutions, much finer than the apparent diameter of Ceres, 0.45 to 0.50 arcseconds in the observed period.

In this meeting, we will show the results of these disk-resolved ALMA data of 1 Ceres in 2017. We will present the distribution of the surface temperature and the peak position. By comparing the thermophysical model and produced continuum images, some surface properties such as the thermal inertia will be deduced and discussed. Past radiometric data and in-situ observations by Dawn spacecraft will also be discussed. These new data would be of interesting in studying Ceres in the post Dawn period.

References:

- ALMA Partnership et al. ApJL 808, L2 (2015)
- Iino et al. ApJ, 903, L1 (2020)
- Li et al. AJ 159, 215 (2020)
- Shepard et al. PSJ 2, 125 (2021)
- Takahashi et al. PASJ, 62, L17 (2010)

Keywords: ALMA, Ceres, Asteroid

小天体着陸探査用の熱プローブの開発検討

○清水 翼¹, 佐々健太郎¹, 荒井武彦¹, 川崎稜平²

¹前橋工科大学大学院システム生体工学専攻,

²前橋工科大学工学部システム生体工学科

次世代の惑星探査では、母船による遠隔探査と着陸機による直接探査が主流になると考えられる。未知の惑星への着陸は危険を伴うため、斥候として、子機による事前調査が有効である。そのため、超小型衛星の惑星探査への応用が期待されている。

我々は2翼の回転するセイルで太陽輻射圧の影響をコントロールし、微小重力天体の着陸したい地域にピンポイントで着陸する超小型衛星の開発を進めている。微小重力天体の表層に着陸して熱プローブを固定することは困難なため、地表でホバリングしながら3軸姿勢制御で姿勢の揺らぎを安定させて表層の温度を測定する機構を開発している。また、着陸時にバウンドしても姿勢を崩さずに、熱プローブを地表に垂直に貫入させる制御方法を開発している。

本発表では、これまで開発したレーザー測距計とリアクションホイールを使用した姿勢のリアルタイム制御手法を紹介し、熱プローブによる温度の測定精度の実験結果を報告する。



図 熱プローブによる温度計測実験（雰囲気：大気圧中、地球重力下）：1Uキューブサット相当の筐体の下部にある熱プローブで倒立するように、リアクションホイールで姿勢を保ちながら氷の温度計測を行った。姿勢の揺らぎによる温度変化の影響は小さく、小天体表層の温度測定を実現するための一歩を踏み出すことができた。

小天体着陸用超小型衛星の太陽輻射圧を利用した軌道制御方法の検討

○佐々 健太郎, 荒井 武彦, 清水 翼, 川崎 稜平,
前橋工科大学 工学部

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

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

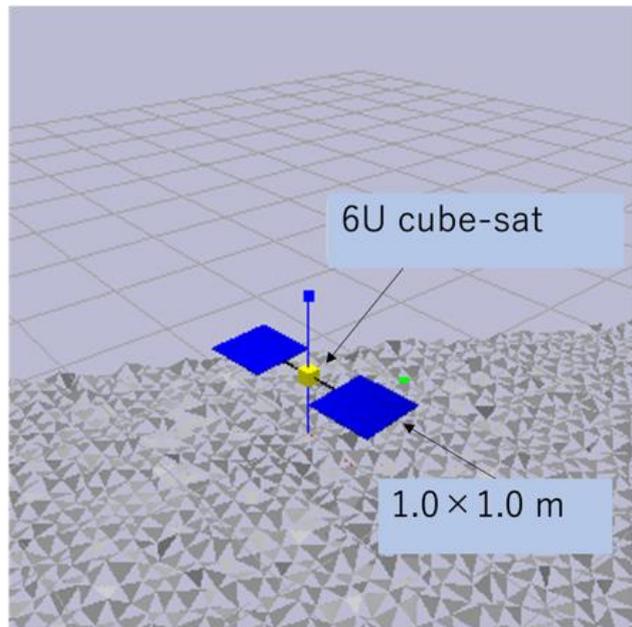
太陽光の入射エネルギーが 100%の効率で圧力を生じるとして、衛星に作用する力を平面で考えると、

$$F_{//} = \frac{S}{cR^2} A \cos^2(\beta - \alpha) \sin(\beta)$$

$$F_{\perp} = -\frac{S}{cR^2} A \cos^2(\beta - \alpha) \cos(\beta)$$

と書ける。ここで、 $F_{//}$ は小天体座表に対して水平方向に働く力で、 F_{\perp} は鉛直方向（自由落下方向）に働く力、 S は太陽定数、 R は太陽距離、 c は光の速さとして、 α を太陽光の入射角、 β を探査機の法線（+Z方向）の傾きとする。太陽輻射圧を制御するには、圧力を受ける面の傾きが重要であることがわかる。

本発表では、小天体への着陸を想定した微小重力下における機体の物理シミュレーション結果(右図)を示し、目的地に誘導するために必要なパラメータを示す。



6U 超小型探査機 EQUULEUS 搭載・月面衝突閃光観測カメラ DELPHINUS の性能評価

○阿部新助¹, 柳澤正久², 布施綾太³, 五十里哲⁴, 駒井一英⁵, 加藤圭将⁵,
阿久津正太郎¹, 秦野裕輝¹, 近藤宙貴⁶, 筒井真輝⁶, 川端洋輔³, 松下将典³, 石川晃寛³,
中島晋太郎⁷, 三好航太⁷, 秋山茉莉子⁷, 矢野創⁷, 船瀬龍^{3,7}

¹日本大学理工学部, ²電気通信大学, ³東京大学, ⁴明星大学,

⁵日本大学大学院理工学研究科, ⁶東京大学大学院, ⁷JAXA

直径 cm~数 10cm のメテオロイドが月面に衝突すると, 0.01~0.1 秒程の短時間発光である月面衝突閃光 (Lunar Impact Flash; 以下 LIF) が可視から近赤外線波長領域で発生し, 約 5~11 等級の点光源として地上望遠鏡で観測される. LIF 観測は, 地球-月圏へ流入する微小天体のうち未解明領域である流星と小惑星を繋ぐ cm サイズのメテオロイドのサイズ分布, 衝突頻度と季節・時間変動を統計的に調べることができる新たなツールといえる. しかし, 地上からの LIF 観測は, 月齢による限られた観測期間, 天候, 大気, 地球照の影響などにより, 安定した長時間モニターは困難であり, 月周回軌道や地球-月ラグランジュ第 2 点などからの連続観測が理想的である.

東京大学・JAXA の超小型探査機「EQUULEUS」¹⁾ のオプション機器として月面衝突閃光観測カメラ「DELPHINUS」が搭載され, 2022 年 11 月 16 日に NASA アルテミス計画-1・SLS 相乗りで打ち上げられた. ファーストライト恒星撮像を通したヘルスチェックを経て, 月フライバイ時のタイムラプス撮影, 地球撮影, 長周期(星間)彗星 ZTF (G/2022 E3) の連続撮像, ゲイン・露光時間を変化させた恒星撮像データの取得を行ってきた²⁾. 本発表では, 打ち上げ後に得られた画像および地上試験で得られたデータを比較した性能評価を報告し, 現状と今後の計画等についても可能な範囲で紹介する.

References

- 1) R. Funase et al., "Mission to Earth-Moon Lagrange Point by a 6U CubeSat: EQUULEUS", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 35(3), 30-44, 2020.
- 2) 阿部新助 et al., "超小型探査機 EQUULEUS 搭載・月面衝突閃光観測カメラ DELPHINUS の初期運用結果", 宇宙科学シンポジウム, P-066, 2023.



図 1. 月フライバイ時に撮影した月裏のターミネーター(昼夜境界領域). 高速シャッターモード(露光 1/4000 秒, 0dB)

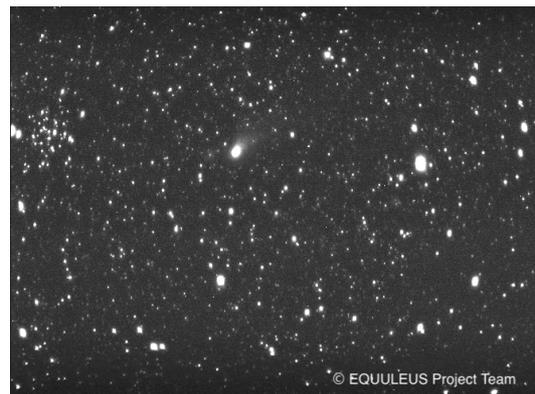


図 2. ZTF 彗星(G/2022 E3) 2023/02/12 17:36 - 21:36 (UT) 10 分間隔露光 16 秒, 探査機-彗星~6,945 万 km, 探査機-地球~34 万 km

未発見小惑星検出アプリ COIAS の開発

○浦川聖太郎¹, 杉浦圭祐², 小池美知太郎³, 前田夏穂⁴, 伊東健一⁵, 宇野慎介⁵,
大坪貴文^{3,9}, 北里宏平⁶, 服部晃大⁶, 関口朋彦⁷, 木下大輔⁸, 臼田-佐藤功美子³

¹日本スペースガード協会, ²三菱電機先端技術総合研究所, ³国立天文台, ⁴神戸大学,
⁵東京大学, ⁶会津大学, ⁷北海道教育大学, ⁸台湾国立中央大学, ⁹産業医科大学

Hyper Suprime-Cam(ハイパー・シュプリーム・カム, HSC)は口径8.2mのすばる望遠鏡に導入された視野直径1.5°の広視野カメラである。2014年から2022年にかけて、HSCを用いた大規模なサーベイ観測(すばる戦略枠プログラム-HSC)が行われた。取得された画像はアーカイブ化され公開されている。この公開された画像には未発見の小惑星をはじめとする膨大な数の太陽系小天体が撮像されているが、それらの天体の検出・位置測定・測光・報告を効果的に行うことができていなかった。COIAS(Come On! Impacting Asteroids)は、我々が開発した、すばる望遠鏡の画像を用いて、未発見小惑星をはじめとする太陽系小天体の検出・位置測定・測光・報告を一元的に行うことができるウェブアプリケーションである。COIASによって、直径数100mクラスの小惑星に対する軌道分布の解明・地球接近天体検出によるプラネタリーディフェンスへの貢献・太陽系外縁天体、彗星、活動的小惑星の発見といった成果が期待される。

COIASのユーザーは会津大学に設置したCOIAS用のサーバー(<https://web-coias.u-aizu.ac.jp>)にウェブブラウザを介してアクセスし、未発見の太陽系小天体の探索を行う事ができる。この作業の多くはクリック操作で行うこととなる。さらに、すばる望遠鏡の画像から小惑星探索に適した画像をあらかじめ選別し、その画像のみをCOIAS用のサーバーに保存している。ユーザーが自ら画像の選別を行う必要はない。このような工夫を行ったことにより、COIASは未発見の太陽系小天体の探索を研究者のみならず市民や学生が行える環境を実現しており、シチズンサイエンス(市民天文学)の分野での貢献も期待できる。COIASは、2023年7月末に完成し、一般公開を行なった。これまで、研究者と市民・学生の協力の下、1万個程度の未発見小惑星候補を検出しMPCへ報告を行なった。本講演では、COIASの完成に至るまでの開発経緯と今後の展望について報告する。

ニューホライズンズミッションのための TNOサーベイ画像の分析

○ 吉田二美¹, 柳沢俊史², 伊藤孝士³, 黒崎裕久², 吉川真²

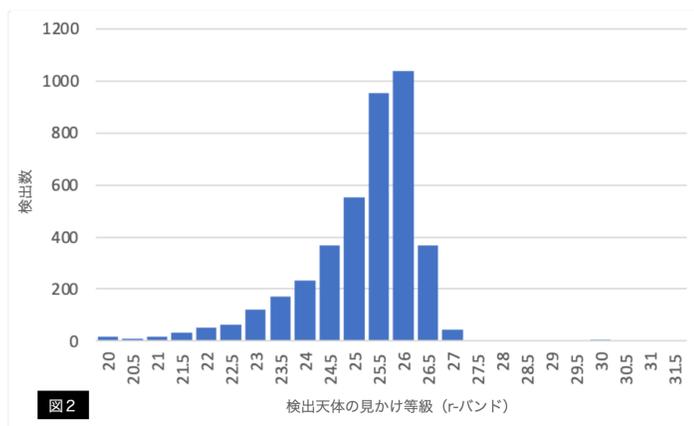
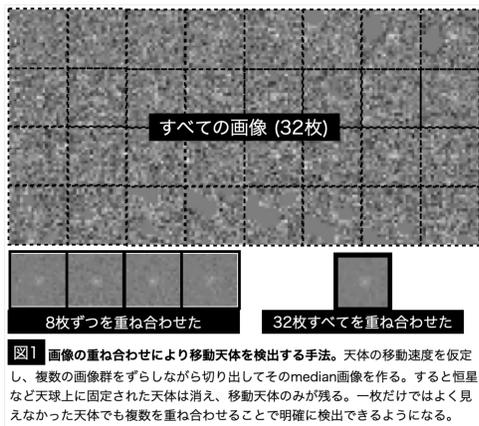
¹ 産業医科大学, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 国立天文台

我々は、NASAのニューホライズンズミッションチームが第二のフライバイ天体候補探しのために2020年から行っているすばる望遠鏡とその広視野カメラ (Hyper Suprime-Cam(以降 HSC)) によるサーベイ観測で得られたデータ (以降「NH データセット」と呼ぶ) を使って太陽系外縁天体探しを行った。移動天体検出には柳沢と黒崎らが開発したFPGAを使った移動天体検出方法を使用した。この方法は微小スペースデブリや近地球小惑星の検出に使われており、すでに多くの実績がある。

この検出方法では、同一視野を連続撮像した多数枚の画像を、小天体の移動速度を仮定してずらし (shift) ながら重ねる (stack)(shift & stack 法)。すると移動天体からの光子を拾った素子のピクセルでは S/N 比が上がり、一枚の画像では見えない天体でも検出できる (図1 参照)。NH データセットは、ニューホライズンズ探査機の進行方向の視野が連続撮像されており、上述の shift & stack 法を適用するには最適である。吉田と伊藤はニューホライズンズ拡張ミッションのサイエンスメンバーなので、2020年以降のデータセットが入手可能であり、観測は今後も継続されるのでデータは増え続ける。本発表では2020年の解析結果を示す。

現時点に於いては、NH データセットを使うと ~ 26 等より明るい移動天体検出が可能であることを確認している (図2 参照)。すばる望遠鏡と HSC の組み合わせで撮った1枚の画像での典型的な移動天体の検出限界等級は 24-25 等であるので、NH データセットでは 1-2 等ほど暗い天体まで検出できていると言える。つまり、このデータセットは既存の移動天体サーベイの中では最も深いサーベイデータセットである。

NH データセットで検出された天体は、数年にわたって追跡観測されており、正確な軌道を決めることが可能であることも重要な点である。このデータセットを用いればより微小な太陽系外縁部天体の軌道分布を決定でき、さらに遠方の天体発見の可能性もある。我々はこのデータセットを用いて、カイパーベルトの外縁の構造 (カイパークリフの有無) やカイパーベルトよりさらに遠くにある天体の軌道分布を明らかにする。



トレイル・エコーと光学による流星の同時観測

○後藤駿介¹, 荒木祥馬¹, 長谷川まり², 菊地啓太², 小野祐司², 阿部新助²

¹日本大学理工学部航空宇宙工学科, ²日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻

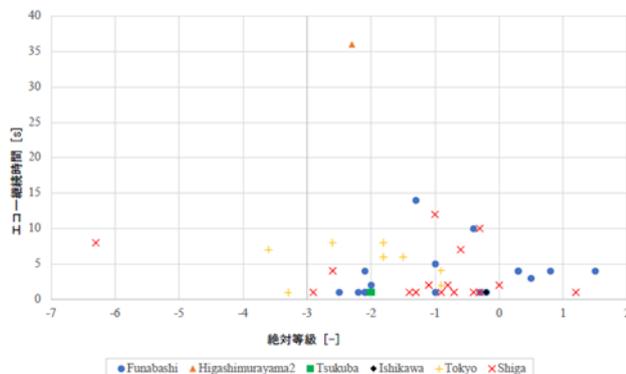
流星の電波観測は、流星飛跡上に形成される電子密度の濃い電離柱によって前方散乱された送信局からの電波を受信局で捉える「トレイル・エコー」手法が一般的である。送信局と受信局と流星の位置関係が、流星飛跡に対して、入射角＝反射角を満たすような条件で観測が成立するトレイル・エコー観測領域は、必ずしも観測者の頭上に来るわけではないため、トレイル・エコーと光学撮像の同時観測を成立させるためには、複数地点からのネットワーク観測が有効である。本研究では、関係が明らかになっていない流星のトレイル・エコー観測で得られる情報（電波エコー強度、エコー継続時間、エコー成立条件等）と流星体の大気圏突入速度、突入角度、発光等級（サイズ・質量）、発光継続時間、発光組成等の物理量の相関を調べ、昼夜・天候問わず観測可能なトレイル・エコー観測の単独データから物理量を導出することが目的である。

連続電波送信局を福井県立大学の送信電波 53.755 MHz, 50 W, 受信局を日本大学理工学部船橋キャンパスとする電波観測を、2022 年 10 月 1 日から 12 月 31 日の期間に行った。電波観測による流星観測数を増加させるため、新たに千葉県勝浦市に 100 W 送信局を設置し、「ふたご座流星群」の極大日時を含む 2022 年 12 月 13 日から 12 月 16 日の計 44 時間は勝浦一船橋およびアマチュア観測網の協力を得て観測を行った。福井一船橋では期間中に 10,374 個、勝浦一船橋では 3,167 個の流星エコーを受信した。また、同時期に船橋キャンパスで観測した流星の総数は 22,548 個である。2022 年度から開始した本観測の初期成果では、勝浦送信局による観測数は増加や同時観測の成功はしたものの、エコー継続時間と発光等級には相関が見られなかった[1],[2]。

今後は、対地速度が既知のふたご座流星群などの主要流星群を中心に同時観測データの取得を継続して行い、光学観測データとの相関を調査していく計画である。

参考文献

- [1] 長谷川まり 「光学と電波による流星の同時観測と等級分布の導出に向けて」, 2021 年度・日本大学理工学部航空宇宙工学科卒業論文
- [2] 佐藤祐太, 佐藤怜 「電波と光学による流星の同時観測 日本大学船橋校舎における電波観測システムの設置と利用」, 2022 年度・日本大学理工学部航空宇宙工学科卒業論文



二段式軽ガス銃を用いた流星アブレーションの分光学的研究

○久本尚輝¹, 菊地啓太¹, 松本健伸¹, 後藤駿介¹, 阿部新助¹, 長谷川直²

¹ 日本大学大学院理工学研究科 航空宇宙工学科専攻 阿部新助研究室,

² 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

一般的な流星は、彗星や小惑星起源の流星体と呼ばれる 1mm 程度の物質が対地速度約 12~72 km/s で地球大気圏に突入した際のアブレーションに伴うプラズマ発光現象である。流星発光は、頭部プラズマと尾部プラズマに大別できる。尾部は、アブレーションにより周辺に流星物質を含んだガス雲が形成され、流星体後方にガス雲と地球大気との相対速度により生じる数十~数百 m に及ぶプラズマの尾で、密度が低く非平衡プラズマと考えられているため、温度や密度などの物理状態や発光メカニズムについて未だ分かっていないことが多い^[1]。また、生命は有機物から成っているが、有機物がどのように原始地球にもたらされたのかは解明されていない。この過程の1つとして小天体（流星体や小惑星）によって地球外から来たとする説がある。初期の地球大気は窒素に富んでいた^[2]ことから、窒素大気での流星現象を再現できれば原始地球での発光を模擬していると言える。

本研究では、(1) 酸素の有無による流星発光の違いを明らかにする、(2) 流星尾部を局所的熱平衡と仮定して流星頭部との比較から流星尾部の発光メカニズムを実験的に明らかにすることを目的とする。

実験は、JAXA 宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃を用いて、射出したプロジェクタイトル (Ti, SUS304, 直径: 1 mm, 速度約 7 km/s) の発光を圧力と気体種を変化させたチャンバーに射出し、超高速カメラ HPV-X に回折格子(波長: 400~800nm)を取り付けて分光計測を行った。チャンバー圧力は約 3 kPa (高度約 24 km^[3]の成層圏に相当)、チャンバー内の気体は標準大気 (N₂: O₂=78%: 21%)と窒素大気(N₂≈99.99%)の2条件下で実験を行った。

実験結果の一例として、取得した分光画像から得た両条件下での Ti と TiO スペクトルを波長範囲内で積分した時間変化結果を以下に示す。Fig. 2(t=0 s)は、流星が画角に収まった時刻を示している。また、窒素雰囲気下でのアブレーションにおいて、流星頭部中心の発光強度は、大気下の約 1/7 倍と暗く、大気中では酸化反応が流星の発光強度に大きく寄与していることが分かった。本発表では、これらの結果を踏まえて考察を行う。

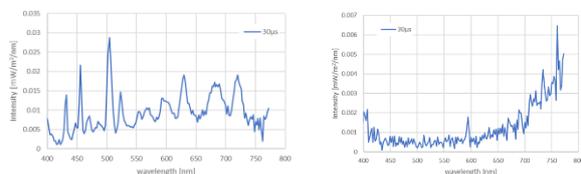


Fig1. スペクトル比較 (標準大気(右), 窒素大気(左))

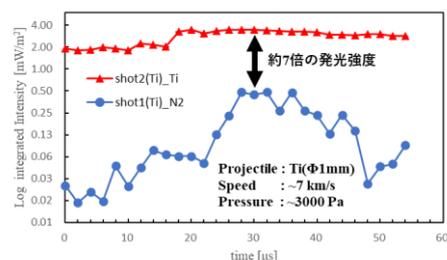


Fig2. 積分発光強度の比較

・参考文献

- [1] G.O.Ryabova et al., "Meteoroids: Sources of Meteors on Earth and Beyond", Eds.; , Cambridge Planetary Science Book, 25, pp19-xx, 2019.
- [2] P. A. Sossi et al. : "Redox state of Earth's magma ocean and its Venus-like early atmosphere", *At Redox state of Earth's magma ocean and its Venus-like early atmosphere | Science Advances*, Science Advances Vol.6, Issue48, 2020, 1-8
- [3] United States. National Oceanic and Atmospheric Administration, United States Committee on Extension to the Standard Atmosphere. U.S. Standard Atmosphere: 1976. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration.

超高感度カメラ観測システム DIMS を用いた太陽系外流星の調査

○遠藤未頼¹, 菊地啓太¹, 阿部新助¹, 梶野文義², 多米田裕一郎³, 森瑞希³, 篠崎健児⁴, 佐川宏行⁵, 冨田孝幸⁶, 小林尚人⁷, 高橋英則⁷, 森由貴⁷, Maria Hajdukova⁸, Silvia Durisova⁸, DIMS collaboration

¹日本大学大学院理工学研究科, ²甲南大自然科学, ³大阪電通大工, ⁴NCBJ, ⁵東大宇宙線研, ⁶信州大工, ⁷東大木曾観測所, ⁸Astronomical Institute, Slovak Academy of Sciences, Slovakia

流星は、ダストや流星体が大気圏に突入した際のアブレーションに伴う発光現象である。太陽系外流星は星間流星とも呼ばれ、Baggaley(1998)の電波観測によって初めて報告された^[1]。1天文単位付近での日心速度 V_h が42.1[km/s]を超える高速で、質量が小さい微光流星であると考えられており、統計的に有意な光学2点観測は皆無である。一方、星間粒子(ISP: Inter Stellar Particle)は、探査機 Ulysses によって木星付近で直接検出されている^[2]。太陽系外から双曲線軌道で地球に到来する太陽系外流星の精密な軌道決定を極短時間(典型的には0.5秒以下)の流星発光から行うため、軌道誤差が大きくなり統計的に優位性を示すことが困難である。

太陽系外流星の探索は四半世紀に渡って様々な観測手法で行われてきたが、光学2点観測による太陽系外流星の速度誤差や放射点誤差、また解析手法による精密さを考慮した確実な根拠はない^[3]。太陽系外流星は高速で微光だが、近年のCMOSカメラやEMCCDセンサーの感度向上に伴い10等級程度の暗い流星を観測できるようになり太陽系外流星の観測が期待されている。本研究では、2022年度に国内(東大・木曾観測所-東大宇宙線研・明野観測所)で実施した「DIMS(Dark matter and Interstellar Meteoroids Study)」の試験観測期間に検出した太陽系外流星候補4個について報告する。

図1は、地球向点と見かけの放射点のなす角と大気突入速度の関係を表し、軌道長半径ごとの分布線とDIMSで得られた分布点を示す。一番上側が双曲線軌道となっており、地球との交差条件から低速流星でも太陽系外流星となることが分かる。今回検出した4個の太陽系外流星候補も示す。図2は、日心速度 V_h のヒストグラムであり、 V_h が42.1[km/s]を超える太陽系外流星候補が、全体の1.0%であった。

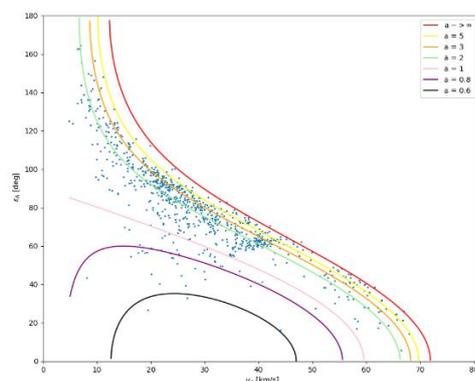


Fig.1 Kresak's diagram

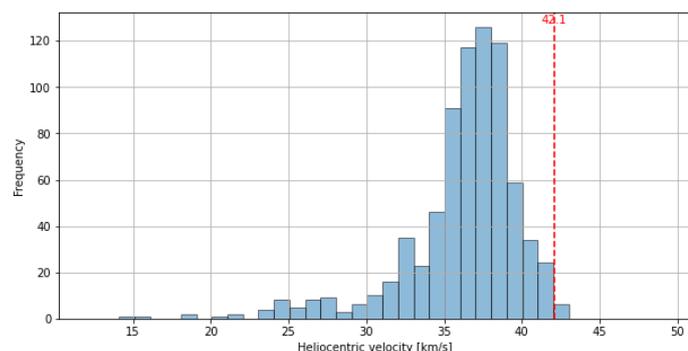


Fig.2 Heliocentric velocity's Histogram

参考文献

1. Baggaley, W.J. (1998) The Interstellar Particle Component Measured by AMOR. Proceedings *Meteoroids 1998*. Ed. V. Porubcan and A. Hajduk, Comenius University Press Bratislava, Slovakia. 265-273.
2. Grun et al., "Discovery of Jovian dust streams and interstellar grains by the Ulysses spacecraft", *Nature*, 362, 428, 1993
3. Maria Hajdukova et al., "The challenge of identifying interstellar meteors", *Planetary and Space Science Volume 192*, 105060, 2020

コンドリュールメルト凝固過程の理論的解明に向けた数値計算法の開発

○三浦 均¹

¹ 名古屋市立大学 大学院理学研究科

石質隕石の多くには、コンドリュールと呼ばれる 1 mm 程度の珪酸塩からなる球粒が含まれている。コンドリュールは、原始太陽系星雲において、mm サイズの珪酸塩ダストがなんらかのメカニズムによって融解し、表面張力で丸くなったのち、急冷凝固したものだと考えられている。コンドリュール形成過程を理解することは初期太陽系における固体物質進化の解明に繋がることから、その凝固組織の形成条件や、その形成条件を実現しうる天体物理学現象について調べられてきた。凝固組織の形成条件は、コンドリュール模擬物質を温度制御された炉内で熔融・凝固させるという、いわゆる「再現実験」によって調べられてきた。対して、理論的研究の主眼は、「再現実験によって得られた形成条件を満足するような天体物理学現象はどのようなものか？」という点にあり、再現実験の結果そのものを定量的に検証しようとする試みはほぼ皆無であった。再現実験は必ずしも初期太陽系の環境を再現できているとは限らないため、凝固過程そのものを理論的に検証し、初期太陽系の環境においても同様の結果が得られるかどうかを確認することは重要であろう。私は、コンドリュール凝固組織を数値計算によって再現することを目指し、フェーズフィールド (PF) モデルに基づいた計算手法の開発に取り組んでいる。これまでに、結晶化潜熱の放出を考慮した単成分系モデル [1,2] や、 $Mg_2SiO_4-SiO_2$ 二成分メルトからの forsterite の結晶成長モデル [3] を発表した。だが、例えば凝固組織内のカンラン石の組成累帯構造を表現するには、少なくとも $MgO-FeO-SiO_2$ 三成分系への拡張が必要である。多成分系メルト凝固過程を扱える PF モデルはすでに提案されているが [e.g., 4], カンラン石のような定比組成化合物はほとんど想定されていなかった。本研究では、PF モデルにおいて定比組成化合物を扱う新しい方法論を提案する。

結果の一例として、図 1 に樹枝状結晶の成長過程の数値計算結果を示す。固相中の SiO_2 (成分 2) の定比組成からのずれは、モル分率にしてわずか 10^{-6} 以下に抑えられており、定比性が高い精度で再現できることを確認した。一方で、固相中の FeO (成分 1) については、樹枝状結晶の中央部において種結晶の初期組成が保持されており、組成累帯構造が表現できることを確認した。計算結果は計算メッシュサイズや界面幅などのモデルパラメータを変えてもほとんど影響を受けないことも実証した。提案手法はすでに発表済である [5]。

講演では、数値計算手法の詳細や樹枝状結晶成長の計算結果、コンドリュール研究への応用に向けた今後の展望について紹介する。

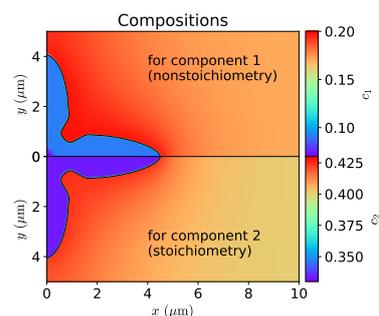


図 1: 樹枝状結晶の計算例 [5]。

参考文献: [1] H. Miura et al., 2010, J. Appl. Phys. 108, 114912. [2] H. Miura et al., 2011, EPS 63, 1087. [3] H. Miura, 2018, Phys. Rev. E 98, 023311. [4] S. G. Kim, 2007, Acta Mater. 55, 4391. [5] H. Miura, 2023, Materialia 31, 101860.

コンドリュール形成と円盤内物質輸送による 酸素同位体組成の進化

○金子寛明¹ 中本泰史¹

¹東京工業大学

未分化の母天体から来た始原的隕石は、コンドリュールと呼ばれる火成岩質の球形状粒子を豊富に、かつ、普遍的に含んでいる。このコンドリュールは原始太陽系星雲中での急激な加熱現象により材料物質が一度溶融し、その後固化して作られたと考えられている。

コンドリュールの内部は均一な酸素同位体組成を持ち、これは溶融中に背景のガスと効率的な同位体交換を経験したためだと解釈できる (Ushikubo et al., 2012)。従って、コンドリュールの酸素同位体組成は加熱領域の組成を示している。一方、隕石全岩の酸素同位体組成は母天体の集積領域の組成を示している。

原始太陽系星雲中の同位体二分性の中で共に非炭素質のグループに属する普通コンドライト (OC) と R(Rumuruti)コンドライト (RC) は、全岩の酸素同位体組成が異なる (OC; Clayton et al., 1991, RC; Bischoff et al., 2011) 一方で、コンドリュールの組成は似た分布を示す (OC; Kita et al., 2010, RC; Miller et al., 2017)。本研究ではこの隕石からの情報について、乱流粘性円盤の移流と拡散による動径方向の物質輸送から解釈を試みた。

粘性円盤モデルに、加熱現象による材料物質 (マトリックスと仮定) からコンドリュールへの変換とそれに伴うローカルな同位体交換を取り入れた。OC と RC はコンドリュール・マトリックス比が異なる (Alexander 2019)。本研究ではコンドリュール・マトリックス比から OC と RC の母天体の集積領域を決定し、それぞれの位置での全岩物質とコンドリュールの平均的な酸素同位体組成を比較した。

結果、コンドリュール形成が移流と拡散の釣り合う長さスケールよりも短いスケールで起きていた場合、OC と RC のコンドリュール・マトリックス比、全岩とコンドリュールの酸素同位体組成を再現可能であると分かった。

未分類炭素質コンドライト (Chwichiya 002, Tarda) の分光分析に基づく有機物分析

○富永 宇¹, 癸生川 陽子¹, 小林 憲正¹, Mike Zolensky², 山下 翔平³, 高橋 嘉夫⁴

¹横浜国立大学, ²NASA ジョンソン宇宙センター, ³高エネルギー加速器研究機構, ⁴東京大学

炭素質コンドライトはCI, CM, CRなどに分類されているが、類似した特徴を持たず未分類の炭素質コンドライトも少なくない。Chwichiya 002隕石(C3.00-ung)は2018年に西サハラで発見された未分類の炭素質コンドライトである。熱変成および水質変質の影響が小さい非常に始原的な炭素質コンドライトであるとされており[1]、太陽系における有機物の形成初期に関連する重要な情報源となりうる。また、Tarda隕石(C2-ung)は同じくC2の未分類隕石とされているTagish Lake隕石と強い類似性を持ち、D型小惑星に由来するコンドライトである可能性が高い[2]。このように未分類の炭素質コンドライトには、これまで見つかった隕石では確認されていない、かつ重要な特徴を持つ隕石が含まれる。

本研究では、Chwichiya 002とTarda中に含まれる有機物の分子構造や分布の解明を目的として、走査型透過X線顕微鏡(STXM)を用いた炭素X線吸収端近傍構造(C-XANES)分析を行いその特徴を詳細に調べた。STXM-C-XANES分析は空間分解能が20~100 nm程度であり、微小な組織における有機物の空間分布を観察することができる。また、有機物の熱変成の程度を調べるため、顕微赤外分光および顕微Raman分光を用いた分析を行った。

比較のため、CM2コンドライトであるMurchison隕石の分析も行った。また、試料分析の際の汚染の確認のため、500℃にて5時間焼成することで有機物を完全に分解したAntigorite (蛇紋石の一種)も同様に分析を行った。収束イオンビーム(FIB)を用いて試料を厚さ100 nmの薄片に加工し、高エネルギー加速器研究機構, Photon Factory (PF), BL-19AのSTXMを用いてC-XANESスペクトルを得た。得られたC-XANESスペクトルについてスムージングを行ったのちに、Le Guillou et al. [3]の手法を用いてガウス関数によるフィッティングを行った。

STXM分析の結果、薄片加工したAntigoriteの一部についてC-XANESスペクトルの287.3~287.7 eVと288.3~288.7 eVに汚染とみられるピークが検出された。これらの原因については今後検討を進める。隕石のSTXM分析の結果はこのような汚染とみられるピークがみられないものを用いた。Chwichiya 002の酸素を含む官能基(ケトン, フェノール)炭素の比率はMurchisonのものに比べて低くなったのに対し、脂肪族炭素の比率はほぼ同程度であった。この結果はChwichiya 002が水質変質による酸化をあまり受けていないことを反映している可能性がある。またTardaの芳香族炭素の比率はMurchisonのものに比べて低かったことから、TardaはMurchisonに比べて熱変成の影響が小さい可能性がある。

Raman分光分析ではChwichiya 002のDバンドとGバンドの強度比がMurchisonのものに比べやや大きかった。また、赤外吸収スペクトルからは1630 cm⁻¹に芳香族の吸収が見られたが、2900 cm⁻¹付近の脂肪族C-Hによる吸収はほとんど見られなかった。これよりChwichiya 002の有機物はMurchisonより加熱されている可能性がある。

これらの結果は、未分類の炭素質コンドライトであるChwichiya 002やTardaの有機物が受けた変質過程の推定につながることを期待される。

参考文献

- [1] Meteoritical Bulletin Database (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/>)
- [2] Y. Marrocchi et al. (2021) *The Astrophys. J. Lett.*, **913**, 1.
- [3] C. Le Guillou et al. (2018) *Analytical Chemistry*, **90**, 8379-8386.

Tagish Lake 隕石の弾性的性質の記載とリュウグウサンプルとの比較 Description of Elastic Properties of Tagish Lake Meteorites and Comparison with Ryugu Samples

小野寺圭祐¹, 石崎拓也², 金丸礼², 深井稜汰², 田中智², 川村太一³,
矢田達², 安部正真², 岡田達明², 白井寛裕²

¹東京大学地震研究所, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³IPGP, Université Paris Cité

2020年12月に小惑星探査機はやぶさ2により小惑星リュウグウのサンプルが地球に持ち帰られ、現在に至るまでに化学的・鉱物学的・熱力学的・電磁気学的・弾性的観点など様々な視点から記載が行われてきた(例えば, [1]-[5])。我々の研究では弾性的性質に焦点を当てている。太陽系小天体の弾性的性質は、天体の形状や表面の地形、過去の衝突履歴、表層進化などを理解する上で最重要パラメータの一つであり、隕石や小惑星サンプルの測定結果は理論計算への基礎データを与える。また、他の測定結果(化学分析や鉱物学的記載など)と組み合わせ、多角的に対象サンプルへの解釈を深めることで、母天体での化学的・力学的進化の理解につながる事が期待される。

Onodera et al. [5] では、リュウグウサンプルの弾性的性質の初期記載が行われ、重要な帰結として「リュウグウサンプルの化学的・鉱物学特徴はCI (Ivuna型) コンドライト隕石に類似しているが、力学的性質はTagish Lake (TL)隕石と似た特徴を示す」という点が示された。しかし、CI コンドライトやTL隕石の弾性的性質は測定例が少なく、上記結果も暫定的となっている。本研究では、TL隕石について、サンプル数を増やして弾性的性質(弾性波速度・ヤング率・密度など)の追加測定を実施し、よりロバストな形でリュウグウサンプルとの比較を行うことを目的としている。

図1に今回測定に使用した隕石サンプルを示す。それぞれ厚みが1mm程度になるように平板加工を施した。弾性波の測定には、地震学分野で一般的に用いられているパルス透過法[6]を採用し、1MPaの一軸圧縮下にて実験を行った。図2にてTL No-4, 5, 8のP波速度とOnodera et al.[5]で得られたTL, Ivuna, Ryuguサンプルの測定結果を比較している。注目すべき点として、TL No-0とNo-5は1.8~2.0 km/sとRyuguの結果と同様のP速度を示す一方で、TL No-4とNo-8は1.3~1.5 km/sと有意に低い値が得られたことである。TLサンプル間のばらつきが鉱物組成に由来するの

クランク構造などの力学的特徴に由来するものなのかについては、CT画像データ等を用いて検証する予定である。いずれにせよ、今回の測定結果は、測定例の少ないTLやIvuna隕石については、代表的な弾性的性質は未だ不確定であり、今後の継続的な測定が必要であることを示唆している。

発表では、他の弾性パラメータを示すとともに、TLサンプル間での弾性的性質のばらつきの要因について議論し、今後の測定計画等について紹介する。

謝辞: 本研究では、JAXA 宇宙科学研究所の地球外物質研究グループおよび超高速衝突実験施設の分析装置・測定機器を使用させていただいた。また、測定対象であるTL隕石は中村昭子さん(神戸大)に提供していただいた。ここに感謝の意を示す。

参考文献: [1] Yada et al. (2022), *Nat. Astron.*, 6, 214-220. [2] Nakamura et al. (2022), *Science*, 379, 6634, 784-785. [3] Sato et al. (2022), *JGR Planets*, 127, 11, e2022JE007405. [4] Ishizaki et al. (2023), *IJT*, 44, 51. [5] Onodera et al. (2023), *ESSOAr*. 10.22541/essoar.168500248.80647094. [6] Birch (1960), *JGR*, 65, 1083-1102.

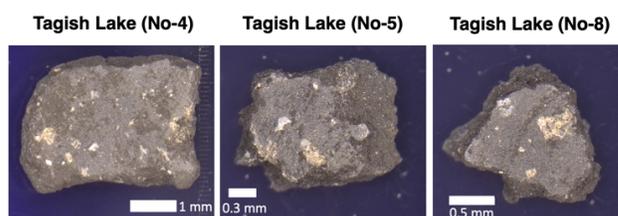


図1. 測定した Tagish Lake 隕石

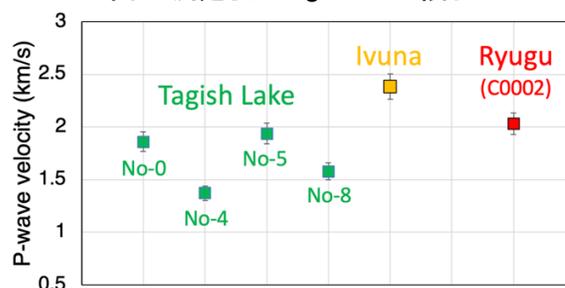


図2. P波速度の比較. Tagish Lake No-0, Ivuna, Ryuguの測定結果はOnodera et al. [5]から引用。

地球外物質の新たな物性分析法開発に向けた樹脂包埋試料の弾性的性質の評価

**Evaluation of elastic properties of resin-embedded samples
to develop a new analytical method for extraterrestrial materials**○保田慶直^{1,2}, 小野寺圭祐³, 金丸礼², 田中智^{2,3,4}, 深井稜汰², 石崎拓也²,
川村太一⁵, 辻 健³, 岩田隆浩^{2,4}¹関西学院大学, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³東京大学, ⁴総合研究大学院大学,
⁵ Université Paris Cité / IPGP

隕石やリターンサンプルの機械物性値は、そのサンプルの母天体が経験してきた衝突、破壊イベントをシミュレーションする際の制約条件となり、小天体の進化過程を理解するうえで重要である。機械物性の中でも、今まで様々な炭素質コンドライト[1] やリュウグウ粒子[2] で、非破壊で実験的に得られる弾性波速度という物性値が測定されてきた。しかし、隕石の中でも特に始原的とされる CI コンドライトやリュウグウサンプルはその希少性と力学的強度の低さから、データ数が少ない。従来の主な測定手法であるパルス透過法[3]では、測定前の平板加工や測定時において、人為的にクラックが増えたり、サンプルが破損したりするリスクをはらんでいる。こうした課題に対し、本研究ではサンプルをエポキシ樹脂で包埋し、保護した状態で弾性波速度を測定する新しいパルス透過法の開発を行う。

測定手法の開発は三段階に分けて行う。

- サンプルを埋める樹脂の選定し、その弾性波速度の測定を行う。
- 弾性波速度が既知のサンプルを平板加工してから樹脂に埋めるというシンプルな条件下で、本手法を適用し、得られた結果の妥当性を評価する。
- 不定形状のサンプルを樹脂埋めした状態で測定を行い、弾性波速度を数値シミュレーションと組み合わせて推定する。

今回は第二段階の検討として、サンプルを樹脂に埋めた状態でも埋める前の正確な弾性波速度の値を再取得できるかを単純な系で確かめるべく、後述するサンプルに対し樹脂に包埋する前後で弾性波を透過させ、測定値を比較した。また、測定の前で X 線 CT 撮影をすることでクラックの増加を観察し、問題となっていた測定時のクラック増加や破損についても合わせて評価する。

アルミニウム合金、玄武岩(玄武洞)、アエンデ隕石(CV3)の平板サンプルをエポキシ樹脂 (EPOXY RESIN CY 232, N-(2-Aminoethyl)piperazine, 1,8-Diamino-p-menthane, mixture of cis and trans isomers 3 液混合熱硬化樹脂) で包埋した。従来のパルス透過法で得た測定値と、包埋後に弾性波を透過させ、取得した波形から、エポキシ樹脂中の透過時間を差し引くことでサンプルの弾性波速度を算出した値を表 1 に示す。

アルミニウム合金、玄武岩においては二つの手法による測定値の差が 10% よりも小さく、再現性が得られたと考える。アエンデ隕石は 10% を超えてしまっている

が、サンプルのサイズが他の 2 つと比較して小さいことから値の差が大きくなったと考える。加えて CT データによるクラックの増加や樹脂の浸透の影響も合わせて議論する。発表では横波を含めた得られた結果についてまとめ、報告する。

参考文献[1] Ostrowski & Bryson (2019), *Planetary and Space Science*, 165, 148. DOI:10.1016/j.pss.2018.11.003[2] Nakamura et al. (2022), *Science*, 379. DOI:10.1126/science.abn8671

[3] Ibrahim (2012), Master's thesis, University of Calgary, Calgary, Canada, DOI:10.11575/PRISM/28122

謝辞 本研究では、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 超高速衝突実験共同利用施設と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の物品を利用しました。厚く御礼申し上げます。

表 1. 樹脂包埋前後の弾性波速度の比較

	弾性波速度 (縦波) [m/s]	
	従来の手法	樹脂包埋後
玄武岩(玄武洞)	5037 ± 37	5097 ± 58
アルミニウム合金	6121 ± 58	6542 ± 118
アエンデ隕石(CV3)	3538 ± 92	4061 ± 203

火星の表層環境史解明に向けた 火星隕石の局所窒素化学種解析

○大西健斗¹、中田亮一²、黒川愛¹、住谷優太¹、白井寛裕³、菅原春菜³、小池みずほ¹

¹広島大学大学院 先進理工系科学研究科、²海洋研究開発機構 高知コア研究所、

³宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

かつての火星は厚い大気と豊富な表層水を保ち、生命誕生にも適した環境であったと指摘されている[1]。火星の表層環境史を解明するうえで、生命や環境と密接に関わる窒素(N)の挙動は重要な指標となりうる。本研究では火星の長期的な環境史の解明を目的に、火星隕石(シャーゴット、ナクライト)の衝撃溶融急冷組織および水質変成相(iddingsite)に着目し、これらに記録されている窒素の化学種を局所 X 線吸収微細構造(μ -XAFS)解析にて調べた。

3種類のシャーゴット隕石(Tissint、Northwest Africa (NWA) 13367、NWA 2975)およびナクライト隕石(Yamato 000749)を本研究の対象とした。これらのインジウム包埋試料をアルミナ研磨粉と超純水を用いて研磨した後、走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS; JSM-6390A) による組織観察と電子プローブマイクロアナライザ (EPMA; JXA-iSP 100)による主要元素の定量分析を行った。さらに集束イオンビーム装置(FIB; NX2000)にて試料表面のクリーニング処理・微細加工を施した後、大型放射光施設 SPring-8 軟 X 線ビームライン BL27SU にて μ -XAFS 分析を実施した。

SEM-EDS 観察の結果、Tissint と NWA 2975 から 2mm サイズの衝撃溶融急冷組織 (衝撃ガラス) が観察された。Tissint の衝撃ガラスの中には、数 μm —数 10 μm サイズの多数の気泡がみられた。NWA 13367 ではモザイク状の衝撃ガラスが観察された。また Yamato 000749 からはカンラン石中に水質変成の痕跡である iddingsite の脈が観察された。この iddingsite は脈の中で組成の違いがみられた。

これらの試料に μ -XAFS 分析を施した結果を図 1 に示す。その結果、シャーゴットの衝撃ガラスの XANES スペクトルからは硝酸塩、有機窒素化合物、 N_2 に特徴的なピークがみられた。火星隕石の衝撃ガラスに火星大気成分が含まれているとの報告があり[2]、今回みられた N_2 に起因するピークは隕石の放出時に捕獲された火星大気由来であると考えられる。一方、硝酸塩と有機窒素化合物に起因するピークは隕石の放出時以前に火星の表層付近の流体や堆積物から取り込まれたものだと考えられる。これは火星探査機キュリオシティのゲールクレータの調査により、後期ノアキス紀~ヘスペリア紀の堆積物から硝酸塩等の窒素化合物が発見されていることとも整合的である[3]。またナクライトの iddingsite の XANES スペクトルからは有機窒素化合物に特徴的なピークがみられた。これは iddingsite 形成時に火星の流体からとりこまれた有機窒素化合物だと考えられる。

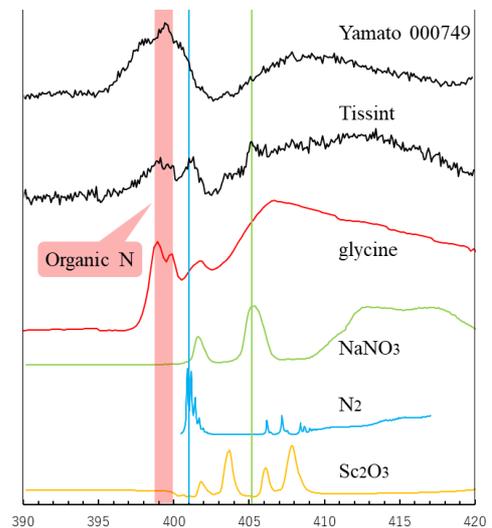


図 1: 参照試料と隕石の XANES スペクトル

[1]: Carr, M. H., and Head III, J. W. (2010). *EPSL*, 294(3-4), 185-203 [2]: 三河内岳. (2014). *日本惑星科学会誌遊星人*, 23(3), 278-282 [3]: Stern et al., (2015). *PNAS*, 112(14), 4245-4250.

Winonaite 隕石の岩石鉱物記載による始原的分化 天体の進化史推定

○酒井 亮輔¹, 小池 みずほ², 住谷 優太², 黒川 愛², 大西 健斗²

¹広島大学理学部地球惑星システム学科, ²広島大学大学院先進理工系科学研究科

背景:始原的分化隕石とは、コンドライト隕石に類似した化学組成と溶融分化組織を持つ隕石グループの総称である。これらの母天体の形成プロセスや熱進化史は未解明の点が多い。特に winonaite は還元的な鉱物組成と酸素同位体比に特徴づけられ、鉄隕石の 1 グループである IAB と共通の母天体を起源とする始原的隕石である [1][2]。本研究では winonaite 母天体の熱進化史を明らかにすることを目的に、近年発見された winonaite 隕石 Northwest Africa (NWA) 13679 の詳細な岩石鉱物観察を行った。

試料・観察条件: NWA 13679 の研磨薄片に対して、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS; JSM-6390A) にて組織観察を行い、得られた後方散乱電子 (BSE) 像を元に疑似カラーマップを作成し、試料全体の均質性や鉱物分布を評価した。さらに、主要なケイ酸塩鉱物 (olivine, low-Ca pyroxene, high-Ca pyroxene, plagioclase) と、金属脈 (Fe-Ni)、硫化物 (troilite)、および微量の窒化物 (schreibersite) とリン酸塩鉱物 (apatite) の元素組成を電子プローブマイクロアナライザ (EPMA; JXA-iSP 100) を用いて測定した。

結果・考察: 疑似カラー-BSE マップ (図 1) に示されるとおり、鉱物の粒子サイズや組成が異なる複数のリソロジーが認められた。粗粒領域の olivine は中心部ほど Fa# ($\text{Fe}/[\text{Fe}+\text{Mg}] \times 100$) が高いパターン (図 2; inverse variation) を示す。これは鉱物形成後に Fe^{2+} が還元された痕跡だと考えられる。またリン酸塩鉱物は無水の fluoro-apatite であり、Fe-Ni または troilite 粒子と隣接して二次的に成長していた。こうした特徴は NWA 13679 が還元的环境下で顕著な熱変成を受けたことを示唆する。Winonaite 母天体は、コンドライト的な前駆物質の部分溶融による形成後、大規模な天体衝突および直後の再集積に伴う物質混合と熱変成を経験したと考えられる。

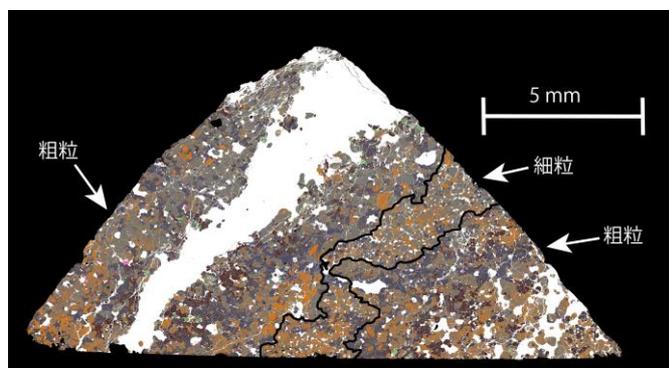


図 1) NWA 13679 疑似カラー-BSE マップ。

(赤: Mg-rich olivine 青: plagioclase 橙: Mg-rich pyroxene.)

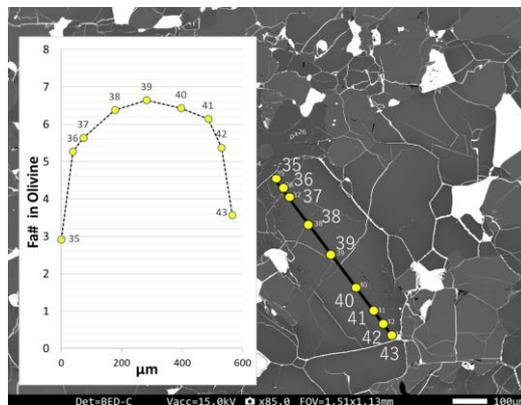


図 2) 粗粒な olivine にみられた Fa# のパターン

Ref : [1] Benedix et al. (1998) GCA 62:2535-2553. [2] Benedix et al. (2000) MaPS 35:1127-1141.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代に基づくユークライト隕石の熱史

○ 岡崎隆司¹, 原口絢名¹

¹九州大学

天体進化を理解するためには、その天体で起こった様々な地質学的イベントの物理化学条件だけでなく、その年代を決定することが重要である。そのためには、特定の鉱物や微小領域の年代測定が重要である。我々は、京都大学複合原子力科学研究所の関本俊博士、稲垣誠博士、神奈川大学の白井直樹博士らとともに、中性子放射化分析と Ar-Ar 分析を数マイクログラム以上の地球外物質に対して行う手法を開発した(Okazaki et al. 2022)。本研究では、7つの eucrite から分離した斜長石粒子を用いて Ar-Ar 年代を測定した。標準試料には、orthoclase (461Ma: Wartho et al., 1999; Nägler & Villa, 2000; Flude et al., 2014)と wollastonite を用いた。各試料粒子は、サファイアディスク (φ5.5、厚さ 1.5mm) の円錐形のくぼみ (φ1、深さ~0.5mm) に個別に入れ、サファイアディスク (φ5.5、厚さ 0.3mm) で蓋をした。それぞれのサファイア容器は純アルミニウム箔で包み、Hyd 照射ポートで中性子照射を行った (5 MW6 時間 + 1 MW47 時間の連続照射)。照射から数ヶ月後、希ガス同位体分析に必要な試料を九州大学に輸送した。

分析に用いた eucrite は、unbrecciated eucrite (Y-983366, Agoult)、monomict brecciated eucrite (HaH262, Y-792510)、cumulate eucrite (Y-980318, Y-980433)、polymict brecciated eucrite (Y-792769)である。これらの試料に対して、200~1600度を5~6の温度分画でガスを抽出した。Y-983366、HaH262、Agoult は約45億年、Y-792510 は38-40億年、Y-792769 は40-42億年の年代を示した。一方で、cumulate eucrite である Y-980318 と Y-980433 からは20-30億年の年代が得られた。Y-980433 は maskelynite を含んでおり強い衝撃の痕跡を示す(Kanemaru et al., 2020)。また、全岩試料についても34億年が報告されている(Takenouchi et al., 2021)。したがって、maskelyneite を含むような強い衝撃を受けた eucrite の Ar-Ar 年代は衝突変成による若返りを記録していることがわかった。

表：ユークライトの分類

Sample	Agoult	HaH262	Y-792510	Y-792769	Y-980318	Y-980433	Y-983366
Classification	Basaltic		Basaltic		Cumulate	Cumulate	Basaltic
Texture	Recrystallized	Monomict	Monomict	Polymict		Unbrecciated	Unbrecciated
Shock degree	A		C			D	B

エジェクタカーテン中のパターンと 標的粒子のサイズ分布

Pattern in ejecta curtain generated by the impact into granular targets of various sized particles

○門野 敏彦（産業医科大学）

上記のテーマは以下の方々との共同研究です。感謝申し上げます。（敬称略）

荒川 大（産医大）、荒川 政彦（神大）、笠木 祥喜（産医大）、黒澤 耕介（神大）、
 寫生 有理（宇宙研）、末次 竜（大島高専）、杉田 精二（東大）、鈴木 絢子（東洋大学）、
 中 惇太（産医大）、中村 昭子（神大）、永山 秀一（産医大）、長谷川 直（宇宙研）、
 春山 純一（宇宙研）、松村 倫太郎（産医大）、山本 聡（産総研）、和田 浩二（千葉工大）

これまで衝突実験では粉体標的として同一サイズの粒子が用いられてきた。この場合はコーン状のエジェクタカーテン中に網目状のパターンが生じることが示されている^{1,2}。それに対し、粒子にサイズ分布があるときにはエジェクタカーテン全体におよぶ大規模なパターンを示す場合もあることがわかってきた（図1）^{3,4}。つまりエジェクタ中のパターンは標的粒子のサイズ分布を反映している。



図1. サイズ分布があるときのエジェクタパターン³

近年の小惑星探査で得られた小惑星表面の画像からは多様なサイズの岩塊の存在が示されており、これに基づいてサイズ分布を持つ粉体標的を用いた室内衝突実験が行われ始めている³⁻¹⁰。また、小惑星探査で衝突実験が行われるようになり（Hayabusa2, DART など）、その場観測されたエジェクタ中のパターンはこれまでに実験室で観測されていた同一サイズ粒子の場合のパターンとは異なっていた^{11,12}。これは表面の粒子サイズ分布が反映されていると考えられる。

本発表では、いろいろなサイズ分布を持つ粉体標的に対してこれまでに実験室で観測されたエジェクタ中のパターンをまとめて紹介し、今後、標的サイズ分布との定量的な相関を求めるためのパターン解析の方向性について議論する。

なお、エジェクタカーテンの動画は参考文献 2) および 4) の Supplementary Files として取得可能である (open access)。

参考文献

- 1) T. Kadono et al. (2015) *Icarus* **250**, 215-212
- 2) T. Kadono et al. (2020) *Icarus* **339**, 113590
- 3) T. Kadono et al. (2019) *ApJ. Lett.* **880**, L30
- 4) T. Kadono et al. (2022) *EPS* **74**, 128
- 5) M. J. Cintala et al. (1999) *Meteor. Planet. Sci.* **34**, 605-623
- 6) C. Güttler et al. (2012) *Icarus* **220**, 1040-1049
- 7) E. Tatsumi and S. Sugita (2018) *Icarus* **300**, 227-248
- 8) O. S. Barnouin et al. (2019) *Icarus* **325**, 67-83
- 9) M. Yasui et al. (2022) *JGR Planets* **127**, e07172
- 10) H. Okawa et al. (2022) *Icarus* **387**, 115212
- 11) T. Kadono et al. (2020) *ApJ. Lett.* **899**, L22
- 12) J-Y. Li et al. (2023) *Nature* **616**, 452-456



衝突クレーター形成に伴う地下から放出されるボルダーの速度スケール則

○佐古洸也¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 白井慶¹, 大川初音¹, 山本裕也², 長谷川直²

1. 神戸大学大学院理学研究科 2. 宇宙科学研究所 宇宙航空研究開発機構

背景：固体天体で衝突クレーターが形成される時、クレーターからエジェクタ粒子が放出され、一部は天体外へ、残りは天体表面に堆積する。小惑星リュウグウ上で行われた SCI 衝突実験では、クレーター形成の際に大きな岩塊（ボルダー）はクレーター内に取り残され、1m 程度の比較的小さなボルダーが放出されたのが確認された(Honda et al., 2021)。小惑星上のレゴリス表面のボルダーの放出過程について、Okawa et al. (2022) がエジェクタ速度分布のスケール則に対するボルダーサイズ依存性について調べた。その結果、エジェクタ速度分布が放出粒子の粒径に依存し、衝突点からの放出位置と粒子の半径を足した距離を用いると、放出速度をうまく説明できることがわかった。しかし、ボルダーの放出速度に対する深さ依存性については調べられていない。本研究では、ボルダーの放出速度に対する深さ変化を実験的に調べた。そのために、ボルダーを模擬したガラスビーズ（トレーサー粒子と呼ぶ）を任意の深さに埋める方法を確立した。

実験方法：任意の深さにボルダーを埋めるために、表面ならし治具を製作した。衝突実験は、神戸大学の縦型一段式軽ガス銃を用いた低速度衝突実験と、宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いた高速度衝突実験を用いた。弾丸はステンレス鋼球を用いて、直径は低速度衝突では 3mm、高速度衝突では 2mm である。標的は粒径 100 μ m のガラスビーズを用いた。トレーサー粒子もガラスビーズを用いて、その直径 d_t は低速度衝突では 3mm と 5mm、高速度衝突では 5mm と 10mm とした。トレーサー粒子の埋没深さ d はその粒径で規格化した値 d/d_t を用いて、-0.5（標的表面上）、0, 0.5, 1 とした（直径 3mm は 0.5, 1 のみ）。高速度衝突では、0.5, 1 とした。実験の様子は 2 台の高速度カメラを用いて撮影し、その動画からトレーサー粒子の三次元放出軌道を求めた。

結果：トレーサー粒子の三次元軌道解析から、トレーサー粒子の放出速度を求めた。その結果、低速度衝突ではトレーサー粒子サイズの依存性は見られなかったが、埋め込み深さが大きいほど、同じ放出位置でも放出速度が大きくなった。特に、トレーサー粒子を地下に完全に埋めた場合と表面に置いた場合では、顕著に差が見られた。一方、高速度衝突ではトレーサー粒子の粒径が小さくなると、同じ放出位置でも速度が小さくなった。また、低速度衝突と同様に、埋め込み深さが大きいほど、速度が大きくなる傾向が見られた。この深さ依存性は、トレーサー粒子があることで周囲の標的粒子の放出が妨げられ、そのためにエジェクタカーテンに見られる穴（ギャップ）とトレーサー粒子の位置からも示唆される。地下に完全に埋めた場合、トレーサー粒子はギャップの上側に位置するが多い（図 1b）。これは、完全に埋めていないトレーサー粒子（図 1a）では、必ずギャップの下側に位置する傾向とは対照的である。これは、完全に埋めたトレーサー粒子が周囲の標的粒子より放出速度が大きいことを示している。

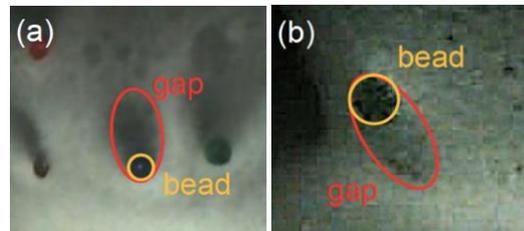


図1 エジェクタカーテンのギャップとトレーサー粒子。(a)地下に完全に埋めていない場合。(b)完全に埋めた場合。

レゴリスに覆われた基盤岩標的へのクレーター形成実験：クレーター形態と衝突励起振動の計測

○柿木玲亜¹，荒川政彦¹，保井みなみ¹，長谷川直²，山本裕也²

¹神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻，²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

小惑星の表層や内部構造はその起源や進化の理解に必要な不可欠な情報であり、その推定のために 2 つの特徴が注目されている。1 つは小惑星 Ryugu の SCI クレーターで観測された、中央ピットの存在である。この観測結果より、Ryugu の表層は結合強度を持たないレゴリス層と、その下部の強度の大きいレゴリス層や基盤層からなることが示唆された。このように、クレーター形態は小惑星の内部構造を推定する手がかりとなる。2 つ目は衝突励起振動である。この振動は天体内部や表面を伝播しレゴリスを流動化させ、表面の地形を緩和させる。これは小惑星上の地形を変化させる最も重要な効果の一つである。層構造を持つ小惑星で起こる衝突励起振動の数値モデルの結果から、基盤岩上のレゴリスは流動化しやすいことがわかっている。したがって、小惑星表層の流動化による地形緩和の程度は、層構造等の内部構造に依存することが示唆される。以上より、本研究ではクレーター形態の特徴や衝突励起振動による緩和地形の有無から内部構造を推定する手法を開発することを最終目標と定める。しかし、クレーターサイズや衝突励起振動に対する層構造の影響を調べた研究は少なく、特に層厚と各層の強度の影響は未解明である。そこで本研究では、レゴリスで覆われた基盤を持つ小惑星のクレーター形成過程と、衝突励起振動による地形緩和を調べるため、層構造を持つ小惑星表層を模擬した標的へのクレーター形成実験を行い、基盤がクレーター形成過程に与える影響や、標的表面や基盤を伝播する衝突励起振動を計測して震動波形の距離減衰に対する基盤の影響を調べた。

実験は(A)自由落下による低速度実験(衝突速度 3m/s)、(B)神戸大の縦型一段式軽ガス銃による中速度実験(100-200m/s)、(C)宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃による高速度実験(2km/s)を行った。(A)と(C)では石膏・砂混合物(引張強度 130kPa)、(B)では閃緑岩(引張強度 6.7MPa)を基盤に使い、この上に石英砂またはガラスビーズを 0-30mm の厚みで敷いた。弾丸は、(A)と(B)では鉄球、(C)ではアルミ球を用いた。この際、基盤表面の複数箇所に加速度計を設置し、加速度を測定した。また、(A)では 1 次元レーザー変位計を標的表面上に設置し、粒子の変位を波形として計測した。

層構造標的では粒子層の厚みの減少に伴い、クレーター形状がお椀型から平底型、同心円型へと変化した。粒子層に形成されるクレーターのリム半径は、クレーターが平底型または同心円型の場合、粒子層の厚みの減少に伴って減少した。また、基盤上の平底クレーター半径と基盤に形成されるピット半径は、粒子層の厚みの減少に伴って増加した。(C)の結果より、基盤に形成されるピットの体積は、弾丸直径で規格化した粒子層の厚みの増加に伴い、減少した。この体積の減少率は、モルタル層に覆われた玄武岩に形成されるクレーターの体積減少率(Dohi et al., 2012)より小さいことから、体積の減少率は基盤強度に依存する可能性が示唆された。

基盤が存在する場合、均質砂と比較して高周波数の加速度波形が励起された。また、最大加速度とリム半径で規格化した衝突点からの距離の関係から、最大加速度は均質砂より 5~1000 倍大きくなった。そして、粒子層の厚みの増加に伴って最大加速度は小さくなった。

P-070

高速度衝突によって溶融・噴出する岩石弾丸物質の調査

松原光佑¹, 山口祐香理¹, 中村昭子¹, 長谷川直²

¹神戸大学理学研究科, ²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

天体衝突を模擬した超高速衝突実験では、エジェクタが飛散する。エジェクタ中に含まれる溶融した物質がコンドリュールの起源となり得ることを実験的に示した研究 (Ganino et al., 2019) や、地球への大規模衝突によるスフェリュール生成についての数値計算研究 (Johnson and Melosh, 2012) が行われている。衝突によって溶融・噴出する物質は惑星科学的に興味深い研究対象であると考えられる。本研究では、弾丸物質や衝突速度の条件が噴出する液滴物質のサイズや個数密度分布に及ぼす影響に着目した。

二段式軽ガス銃を用いて蛇紋岩およびカンラン岩円柱(直径 3 mm, 高さ 2.3 mm)を弾丸として鉄鋼ターゲットに約 3-7 km/s で垂直衝突させた。チャンバー内は 1 Pa 程度に減圧している。ターゲット上流側にアルミニウム板を二次標的として設置した。二次標的は 3 箇所を設置し、噴出角度の異なるエジェクタを観察した。走査型電子顕微鏡を用いて二次標的に付着した液滴物質の面積を測定した。

二次標的には多数の付着物があり、円形状であることから衝突により溶融して噴出した液滴物質であると考えられる。その個数密度は物質が飛散した角度によって異なっていた。液滴物質が二次標的に付着する厚さを 1 μm (Ganino et al., 2019) と仮定すると、飛散した際の液滴物質の直径は 15-20 μm 程度であり、衝突速度や噴出角度、岩石の種類への依存は見られなかった。カンラン岩を鉄鋼に約 5 km/s で衝突させた実験 (Ganino et al., 2019) では、厚さ 1 μm の仮定のもとで平均直径が約 8 μm の液滴物質が形成された。また、銅球を蛇紋岩に約 6 km/s で衝突させた実験 (Mokhov et al., 2022) では直径が 1 μm 未満の球状物質が二次標的に付着している。付着厚さの仮定が妥当であるとする、本実験ではこれらの先行研究よりも大きな液滴物質が形成されたことになる。

本実験の液滴物質のサイズは、衝突エネルギーによって新たな界面が生じ弾丸が断片化するというモデル (Grady, 1982) からの予測値とオーダーで一致した。一方、ガスによる動圧により液滴が分裂するというモデル (Kadono et al., 2008) での分裂片サイズの予測値は観察されたものよりも数桁大きくなる。すなわち、本実験では、衝突で噴出した液滴物質が十分に小さいため、これが二次標的まで飛行する間に実験チャンバー内の残留ガスから受ける動圧がその表面張力を上回することは起こらず、液滴物質のさらなる分裂が生じなかったことが示唆される。

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

粉体層への物体衝突による応力伝播シミュレーション

○田中蒼大, 佐藤瑤介, 高田智史
東京農工大学機械システム工学専攻

粒状媒質への物体衝突は惑星科学だけでなく機械工学や土木工学など様々な場面で見られる現象であり, その際に見られる衝突・破壊現象を理解することが重要である. 衝突物体が粉体層に達すると, 粒子間の接触を介して粉体層内部へ応力が伝播する. 3次元系においては粉体層表面に着目した実験的研究[1]などが報告されているものの, 粉体層内部については応力の可視化が実験的には困難となる. そのため, 数値シミュレーションによる相補的な理解が重要となる.

それを踏まえ本研究においては, 物体を落下させ粉体層に衝突した際に起こる現象について離散要素法[2]を用いたシミュレーションにより調べることにする. 具体的には粉体層を構成する粒子の物性値や球の衝突速度を変化させた際に, 粉体層内部の応答や応力波の伝播速度のパラメータ依存性がどのように変化するかについて報告する.

衝突直後には粉体層内部には図1のような球状の応力波面が現れ, 減衰しながら伝播していくことを確認した. この応力の伝播速度は粉体層を構成する粒子のヤング率 E の平方根に比例する. 粉体層全体を弾性体と仮定した際に縦波速度から見積もられる粉体層の有効ヤング率 E_{eff} の結果を図2に示す. この結果は, 粉体層は構成粒子の 1/500 程度の硬さの弾性体とみなせることを示唆している.

参考文献

- [1] S. J. de Vet and J. R. Bruyn, Phys. Rev. E **76**, 041306 (2007).
- [2] P. A. Cundall and O. D. L. Strack, Géotechnique **29**, 47 (1979).

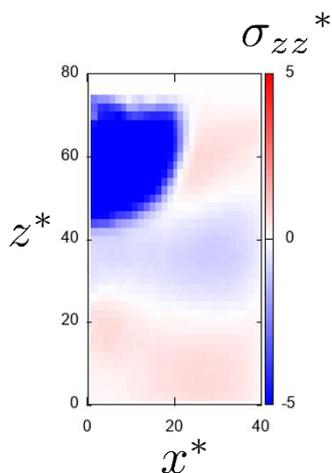


図1 物体衝突後の粉体層内部の応力分布.

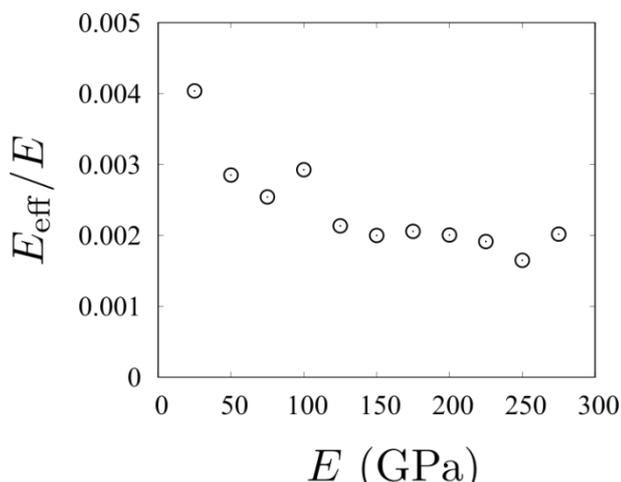


図2 粒子のヤング率 E と応力波から見積もった粉体層のヤング率 E_{eff} .

超高速衝突実験から探る氷由来の閃光物質

○加藤圭将¹, 駒井一英¹, 阿久津正太郎², 秦野裕輝², 村田拓真², 阿部新助^{1,2},
柳澤正久³, 長谷川直⁴

¹ 日本大学大学院理工学研究科, ² 日本大学理工学部, ³ 電気通信大学,

⁴ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

NASA・LCROSS ミッションでは、使用済みロケットの一部を永久影に衝突させ、衝突時の閃光の分光計測から水由来と考えられる OH を検出し、月の永久影クレーターに H₂O 氷が存在する可能性が示唆された。その後、月周回探査機 LADEE や赤外線観測航空機 SOFIA で得られた結果より、月面における水の存在が確実なものとなった。

氷衝突閃光に関する先行研究として、J. D. Tandy et al. (2020) では、H₂O 氷をターゲットとした衝突実験を実施しているが、チャンバー内圧力が約 5000 Pa と高く、蒸気雲由来の発光が支配的であることや、H₂O が解離した際に発光すると考えられる中性水素輝線(波長 656.3 nm) や水酸基分子バンド(波長 310 nm 付近)の発光波長を分光検出することができないなどの問題点があった。

これらの問題点を踏まえて本研究では、H₂O 氷由来の発光現象についての理解を深めるため、低圧(数 Pa 程度)の標準大気及び窒素大気で、波長域(400~800 nm)での超高速分光計測(露光 200 ns)と、近紫外・可視・近赤外波長域(250~1000 nm)での高速分光計測(露光 10 ms)を行った。計測したスペクトルから黒体成分を減算し、JAXA 再突入体幅射加熱予測コード「SPRADIANT」を用いて発光成分の推定を行い、中性水素輝線を同定した(Figure 1)。

本発表においては H₂O 氷ターゲット由来の発光成分について、中性水素に加えてその他の成分についても推定した結果を報告する。

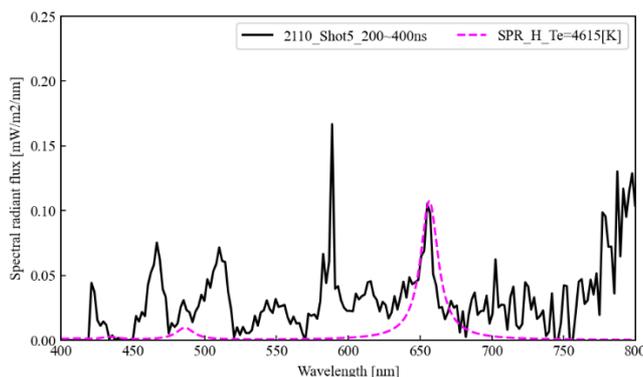


Figure 1. Identified H₂O related emissions (H- α by HPV-X(Exp=200 ns))

<参考文献>

- [1] A. Colaprete et al., "Detection of Water in the LCROSS Ejecta Plume", Science 330, 463-468, 2010.
- [2] M. Benna., "Lunar soil hydration constrained by exospheric water liberated by meteoroid impacts", Nature Geoscience 12, 333-338, 2019.
- [3] C. I. Honniball et al., "Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA", Nature Astronomy 5, 121-127, 2020.
- [4] J. D. Tandy et al., "Impact flash evolution of CO₂ ice, water ice, and frozen Martian and lunar regolith simulant targets", Meteoritics & Planetary Science 55, 2301-2319, 2020.

Hellas impact and the consequences

トリット ルシ¹, 真典 亀山², 黒澤 耕介³, 吾郎 小松⁴

1 ELSI, TokyoTech, 2 GRC, 愛媛大学, 3 PERC, 千葉工業大学, 4, IRSPS, ダヌンツィオ大

Giant Hellas impact shaped the morphology of Mars. Such impacts and related processes are also important for the planetary scale heat loss evolution. Here, we calculated the temperature distribution of Hellas impact induced mantle, through iSALE-2D shock physics code (Elbeshausen et al., 2009; Wünnemann et al., 2006; Collins et al., 2004; Ivanov et al., 1997; Amsden et al., 1980). Then, we used the temperature and used to a time-dependent thermal convection of a fluid with an infinite Prandtl number and a temperature-dependent viscosity under the Boussinesq approximation in a cylinder, assuming shallow asymmetries in the thickness of cold Thermal Boundary Layers (TBLs).

Our results showed that the Hellas impact induced mantle can trigger volcanism and extensional tectonism even 200 Ma after the impact. This observation is consistent with the present-day geomorphology of the Hellas impact basin and the surrounding regions, where we can find volcanism and extensional tectonism 200 Ma after the Hellas impact (Ruj et al., 2022).

機械学習を用いた微惑星衝突の結果推定について

本田雅亮 杉浦圭祐 玄田英典

惑星は原始惑星系円盤の中でダスト、微惑星、原始惑星の順番に合体成長する事で形成される。この過程を調べる上で有力な手法の一つとしてN体計算がある。N体計算とは多数の天体を恒星の周りに配置し、それらの相互重力作用の運動方程式を解いていくことで惑星形成がどのように進行していったのか調べる事ができる。これまでのN体計算を用いた研究では、天体衝突について、どんな衝突であっても必ず完全合体するという仮定の元で行われる事が殆どであった(例えば Wetherill and Stewart, 1993, Kenyon and Bromley, 2004, Morbidelli et al. 2009)。しかし天体同士の衝突はただ単純に合体するだけではなく、天体が削られる結果や2天体が合体せずにすれ違う様な結果(ヒットアンドラン)も起きる事があり、天体衝突の結果は多様である。

原始惑星同士の衝突ステージ(巨大天体衝突ステージ)では衝突を1つ1つずつ計算しながらN体計算を行う試み(Genda et al. 2017)や、衝突過程をスケールリングした結果を用いたN体計算(Chambers 2013)が行われている。その一方で微惑星から原始惑星へのステージでは衝突回数が多くなるため、衝突過程をスケールリングした結果を用いる事が多い(Movshovitz et al. 2016)。微惑星同士の衝突は、原始惑星同士の衝突と比べて、調べるべき衝突パラメータが多く(例えば物質強度、空隙率など)、そしてパラメータの範囲も広くなる(例えば2天体のサイズ比)。従って、微惑星同士の衝突のスケールリングについて上手くいっていないように思われる。

そこで、本研究では、微惑星同士の衝突に関して、スケールリング則を作成するのではなく、大量の衝突計算の結果を機械学習にかけることで、微惑星同士の衝突のモデルを作成する事を試みた。既に原始惑星同士の衝突に関しては、数例、そのような研究がなされており(Emsenhuber et al. 2020, Timpe et al. 2020)、うまくいっているようである。

本研究では、これまで小惑星衝突に用いられてきた衝突計算コード(Sugiura et al. 2018)を用いて、2つの微惑星についてターゲットの半径を5~500kmとして、サイズ比を0.01~1、衝突角度、衝突速度を50m/s~1000m/sとして設定し、衝突によって出来た破片の内大きな2つについて質量と速度を取得して、それを機械学習のニューラルネットワークでまとめていく。N体計算において、衝突後の天体の質量(破片の質量なども)、天体の位置と速度のデータが必須である。本機械学習では、衝突後の天体の質量と速度を求めるモデルを作成した。天体の位置については、等速直線運動を仮定することで求める事が可能であるため省略した。本研究では2000個のデータを元に機械学習する予定であり、ここでは途中成果の200個での機械学習の結果を発表する。質量および速度についておよそ15%未満の誤差に収まっているものが殆どであった。

謝辞

この数値計算は、国立天文台計算天体物理学センターのCray XC50で行われた。Cray XC50の開発及び管理して下さる各氏に感謝致します。

JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) : 概要および軌道上初期チェックアウトの報告

The Ganymede Laser Altimeter (GALA) for JUICE: Overview and initial checkout in orbit

○塩谷圭吾^{1,2}, 小林正規³, 木村淳⁴, 荒木博志^{5,2}, 野田寛大^{5,2}, 並木則行^{5,2}, 押上祥子¹,
東原和行¹, 齋藤義文¹, フスマン・ハウケ⁶, GALA チーム
¹宇宙科学研究所, ²総合研究大学院大, ³千葉工業大学, ⁴大阪大学,
⁵国立天文台, ⁶ドイツ航空宇宙センター

ガニメデレーザ高度計 (Ganymede Laser Altimeter: GALA) は、欧州宇宙機関 (ESA) が主導する木星氷衛星探査機 (JUICE) に搭載されている科学観測機器のひとつである。JUICE は 2023 年 4 月に仏領ギアナ宇宙センターから打上げられた。打上げ後の GALA の初期チェックアウトの結果はすべて正常であった。

GALA は氷天体に適用される初めてのレーザ高度計である。GALA の科学目標の柱は (1) 地形情報にもとづく氷テクトニクスの理解, (2) 潮汐応答の測定を通じた内部構造の理解 (地下海の存否確認や特徴把握を含む), (3) 表面の小規模粗度と反射率の理解, である。地下海を含むサイエンスは、アストロバイオロジーの観点からも意義が大きい。

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

GALA の開発はドイツを中心に、日本、スイス、スペインのチームによる国際協力によって行った。日本チームは心臓部とも言える受信部の 3 つのモジュール (後置光学系モジュール (BE0), 焦点面機器モジュール (FPA), アナログエレクトロニクスモジュール (AEM)) の開発を担当している。そのほか日本チームは GALA 全体の機能性能をシミュレートするソフトウェアであるパフォーマンスモデルの開発も行っている。

本講演では GALA の科学目標と装置の概要、軌道上チェックアウト、および期待されるパフォーマンスについて報告する。

Ganymede の True Polar Wander についての考察

○平田直之¹

¹神戸大学

Ganymede には様々な時代に作られた構造が存在しているが、その中で層序的に最も古いと考えられているのが Furrow と呼ばれる構造である。Furrow は溝状のくぼみが平行に並ぶ形態を成しており、Ganymede の中でも Dark Terrain と呼ばれる地域の中にしかなく、直径 10 km 以上のクレーターすべてに対して切られている。この Furrow 全体の分布を調べると、ある一点 (180W, 20S) に対して同心円状に分布している。形態的特徴と分布から、Callisto の Valhalla basin や Asgard Basin の周囲を取り巻くように分布する多重リング構造と同質的なものであり、Ganymede における古い時代の巨大衝突の痕跡であると提案されている。

興味深いことに、Furrow の中心は経度 180 度の地点にぴったり位置しており、衛星の潮汐軸方向にかなり近い。このことは衛星の姿勢が変化した (True Polar Wander) ことを示唆していると考えられる。巨大衝突盆地の中心が天体の潮汐軸に対応している例として冥王星が挙げられる。冥王星最大の衝突クレーター盆地、スプートニク平原はカロンのほぼ正反対側にあることが知られている。このスプートニク平原は、クレーター形成時に氷殻が薄くなる効果と盆地形成後の固体窒素の堆積によって、正の質量異常を作り出しており、その重力異常によって衛星の姿勢が変化したと考えられている。冥王星と同様に、Furrow 周囲の衝突構造も、Ganymede の姿勢変化を引き起こした可能性がある。

本研究では、Furrow 形成時のエジェクタによって、Ganymede の姿勢変化を引き起こすことができる程度の正の質量異常を作り出すことができることを示す。また、エジェクタの軌道を計算し、エジェクタの全球分布を求め、それらエジェクタ分布が作り出す慣性テンソルを計算することで、実際にどのような Ganymede の姿勢変化が起きるか求めた。その結果、特定の条件では現在の Ganymede の姿勢と一致しうることを示した。また、Ganymede の反対側にエジェクタが降り積もり、高さ数km程度の山ができることも明らかになった。これらは、近年になって DEM データの解析によって発見された Ganymede の 1.5° E, 0.5° N に位置する地点にある丘 (Schenk et al. 2021; Ravine et al, 2022) に対応することも明らかとなった。この一連の予想は JUICE Mission などの観測でも確かめることができるかもしれない。これらの成果について講演で発表する。

エウロパ大気の地上望遠鏡可視観測による 軽金属元素の探索

○木村 淳¹, 鶴海 達大¹, 高木 聖子², 太田 峻介³, 松尾 太郎³

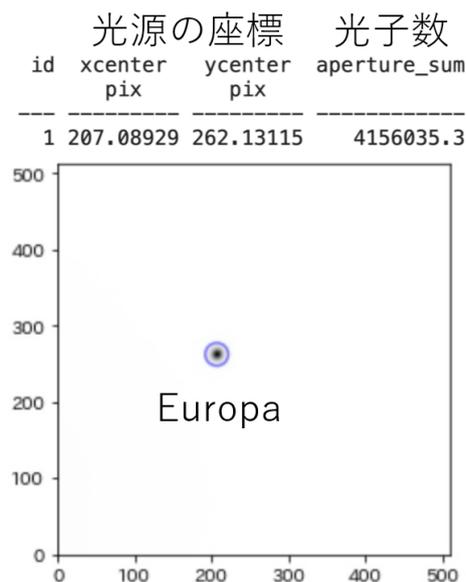
¹大阪大学, ²北海道大学, ³名古屋大学

木星衛星エウロパの表面には、主体である H₂O 氷の他にアルカリ系元素の硫酸塩/炭酸塩や塩化物の存在が分光観測によって示唆されている。例えば、低中緯度先行半球域の局所崩壊（カオス）地形に依存した分布で存在する塩化ナトリウムや、全球広範に存在する線状地形やカオス地形への濃集が示唆されるアルカリ系軽金属の硫酸塩や炭酸塩などである。これらの物質は、地下海からの噴出や、衛星イオからもたらされた物質の表面反応などがその起源とされている。また、これらは日射による昇華や木星磁気圏内の高エネルギー粒子の衝突によって解離し、エウロパ周囲に希薄な大気を成しているため、大気の組成や分布、それらの時変動を把握することが、エウロパ表層物質の起源や輸送過程の解明に重要である。しかしそうした調査は、限られた表面領域に対するフライバイ探査や数夜のみ地上望遠鏡観測など未だ限定的である上、地上望遠鏡による可視領域の観測はほとんど存在しない。

そこで我々は、北海道大学が所有する Pirka 望遠鏡（主鏡径 1.6 m）のマルチスペクトル撮像装置（MSI）を用いて、過去 3 年間計 30 夜以上にわたるエウロパの可視波長領域（約 400～700 nm）における多波長撮像観測を行った。撮像データの開口測光には Python/Astropy を用いたツールを構築し、計 4,500 以上の撮像データを測光解析することで簡易的な分光を行い、ナトリウムやマグネシウム、カルシウム原子といったアルカリ系軽金属元素の輝線探索を行った。地球大気補正には、測光標準星を用いる方法と、放射輸送計算による地球大気モデルを用いる方法の 2 通りを採用した。Pirka/MSI においてエウロパは点光源として観測されるため空間分解できないが、多数夜観測によってエウロパの様々な観測経度をカバーし、輝線探索の領域依存性も調べた。その結果、波長 445, 559, 644 nm に中性カルシウム輝線と思われる徴候を 2σ を超える強度で得た。これらの徴候は、エウロパ表面の先行半球～反木星側半球にかけての領域を観測した際に限定して得られて

おり、これは塩化ナトリウムの存在を示唆する先行観測での報告や、先行半球で電子密度が低いとする観測結果と整合的な傾向である。本観測ではナトリウム原子の有意な輝線は認められなかった点は追観測による再検証を要するが、同様の領域にカルシウム化合物が存在することを意味するのかもしれない。

本観測は撮像観測であり、分光解析における波長分解能が低いため、今後はより高分散の分光観測を行うことによって、本観測で示唆されたカルシウム輝線の再検証や、先行観測で存在が確認されているナトリウム原子の追観測を行い、これらの原子のエウロパ大気における定量とその時間変化を推定する予定である。



Pirka/MSI で撮像（図は波長 650 nm）したエウロパの、Astropy による開口測光の例。

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

○村上英記¹, 白石浩章², 田中智², 三谷烈史², 川村太一³, 小野寺圭祐⁴, 山田竜平⁵, 鎌田俊一⁶, 木村淳⁷, 黒川宏之⁴, 西田究⁴, 関根康人⁸, 辻健⁴, Ralph Lorenz⁹

¹高知大, ²宇宙航空研究開発機構, ³パリ地球物理学研究所 (IPGP), ⁴東京大学, ⁵会津大学, ⁶北海道大学, ⁷大阪大学, ⁸東京工業大学, ⁹ジョンホプキンス大学

2019年にNASAニューフロンティア計画の4番目として土星衛星タイタン離着陸探査ミッション「Dragonfly」が選定された。このミッションはタイタンにドローン型の離着陸機を投入し、複数の着陸地点で化学分析、気象観測、及び地球物理観測をおこない生命前駆物質とそれらを進化させるにおよんだ環境を調査する。Dragonflyは2027年に打ち上げられ2034年頃にタイタンに到着して離着陸探査を約3年間実施する予定である。内部構造探査の重要な機器として位置付けられる地震計として宇宙科学研究所が開発した地震計をベースとしたものを搭載する計画が、2022年4月に宇宙科学研究所の部門内プロジェクトとして承認され、開発を続行している (<https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/developing/dragonfly.html>)。

地球物理観測項目の一つである地震動を観測するための地震計パッケージ (DraGMet SEIS)の主要部分を構成する地震計、プリアンプ、風除けカバーを宇宙科学研究所が担当する。地震計は月面表層中の-20°C環境での動作を想定して開発してきたものを改良し、タイタン表層環境 (1.5気圧、-180°C)で動作する地震計を開発している。

米国側のiPDR (機器基本設計審査会)は2023年8月にすでにパスしていたが、国内でのiPDRについては遅れていた。これはJAXAプロジェクト開始タイミングや米国側のシステムPDRのタイミングなどを考慮したためであるが、このほど (2023年8月)に通過することができ、本格的なEM (エンジニアリングモデル)の開発をスタートさせている。これまでの開発の結果、極低温から大気突入時の広い温度範囲 (-180~+100°C)での耐性は確認されているものの十分な信頼性を得られるまでには至っておらず、さらに細かい製造方法の管理を検討している。

ハードウェア開発とは別に地震計によるサイエンスを考える3つのWG (浅部構造探査WG, 物質循環/大気運動WG, 深部構造WG)を構築し、サンプリング用ドリルによる振動を使った浅部探査、大気励起による地震動による地下探査、潮汐等による氷震を使った地下探査についての検討やイベント検出や評価方法に関する検討を独自に行っており、米国側とのチームとも情報交換を開始している。

ALMA を用いた土星衛星 Titan 大気同位体比観測

○ 飯野孝浩¹, 佐川英夫², 谷口琴美³, 高橋茂¹, 塚越崇⁴

東京大学情報基盤センター¹, 京都産業大学², 国立天文台³, 足利大学⁴

ALMA は太陽系内天体の大気化学・物理や地表物性研究においてブレイクスルーをもたらす革新的な地上観測測器である。その重要な観測対象は土星衛星タイタンである。

タイタンの大気中では、中層大気・上層大気での N_2 と CH_4 を起点とする光化学により、複雑な炭化水素や窒素化合物が生成される。さらに地表近くでは重合と固相化によってヘイズやソリンが生成されるため、気相と固相を接続した複雑な化学反応が生じていることが重要である。ALMA を用いた観測では、大気中に複雑な窒素化合物の検出 (C_2H_3CN , C_2H_5CN , CH_3C_3N , $c-C_3H_2$) や、同位体比の導出等が行われてきた。

我々は科学観測・較正観測双方の ALMA アーカイブデータの悉皆的なキャリブレーションとイメージングを行い、論文化に取り組んできた。特に土星衛星タイタンについては、3000 個のスペクトラルウィンドウを生成、未決定の同位体比の決定に取り組み、タイタン大気の複雑な大気化学過程の理解を目指してきており、これまでに、アセトニトリル (CH_3CN) やシアノアセチレン (HC_3N) の ^{15}N および ^{13}C 同位体の決定に成功した。

タイタン大気中の主要な窒素化合物である HCN や HC_3N の同位体比は N_2 と大きく異なっていることが観測的に示されており、紫外線の自己遮蔽による分別が強く示唆されている。いっぽうで CH_3CN 中の窒素同位体比は N_2 に近く、 CH_3CN は HCN などを経ずに生成されていること、すなわち中層大気に貫入した銀河宇宙線が N_2 を解離することが生成の起点である可能性を示した (Iino et al., ApJ, 2020)。

一部の分子雲において、 HC_3N の 3 種の炭素同位体比が異なる値を示すことが観測的に知られている。我々は同時・同観測設定で観測された HC_3N の観測データを用い、 HC_3N の 3 種の炭素同位体比を導出、分子雲と異なり同位体比は一様であり、分子雲で見られるような濃集は検出されなかった。これはタイタン大気における HC_3N の寿命が短く、前駆体における同位体比濃集が生じないことを示している (Iino et al., PSJ, 2021)。

本発表ではこれまでの進捗や隣接領域とのシナジー、そして他天体を含む太陽系電波天文学の今後の展望について紹介する。

タイタン表層有機物アナログ物質の弾性波速度 測定方法の検討

○平井英人^{1,2}、関根康人^{1,3,4}、小野寺圭祐⁵、田中智⁶、辻健⁷、肥後祐司⁸、筒井智嗣⁸、西澤修

¹東京工業大学 地球生命研究所、²東京工業大学 理学院、³金沢大学 環日本海域環境研究センター、⁴東北大学 大学院理学研究科、⁵東京大学 地震研究所、⁶宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、⁷東京大学大学院 工学系研究科、⁸高輝度光科学研究センター

土星衛星タイタンの大気中では光化学反応によって主成分である窒素とメタンから複雑な有機物が生成している。一方で、タイタン表層に見られる有機物の砂丘や蒸発岩等は、大気中で生成した有機物が様々な表層プロセスによる変成を受けて堆積したものである可能性がある[1]。2027年に打ち上げ予定のNASA Dragonfly 探査機は、小型ドリルによって発生する人工振動を利用した浅部地下構造地震波探査を行う予定であり、タイタンの風成/河川堆積物の構造や物質を理解するための実証的な証拠が初めて得られる可能性がある[2]。

地震波探査によって地下構造を明らかにするためには、弾性波速度に関する情報が必要である。弾性波速度は物質の弾性定数（ヤング率とポアソン比）と密度によって決定される。先行研究[3, 4]ではタイタン表層の有機物模擬物質（タイタンソリン）の密度と室温におけるヤング率を測定している一方で、ポアソン比は測定されていない。また、タイタンソリンの類似の低密度有機物ポリマーの中には、低温において物質の弾性的な挙動が大きく変化するものがあり[5]、これら物性値は温度に依存する可能性が高い。

本研究では、いくつかのタイタン表層有機物模擬物質を合成し、弾性波速度の温度依存性を測定すると共に、異なる周波数帯における弾性波速度を測定して減衰率の周波数依存性を求めることを目的とする。これによって、実際のタイタンでの地震波探査による浅部地下構造が定量的にどこまで制約可能かを議論する。

本研究では、先行研究[1, 6]と同様の手法で、いくつかの表層有機物模擬物質を作成した。次にこれらの有機物を押し固めて作成したペレットを、超音波パルス透過法[7, 8]及びX線非弾性散乱法[9]を用いて異なる周波数帯での室温における弾性波速度を測定し、減衰率の周波数依存性を求めた。また、低温における弾性波速度測定のための実験装置を開発し、弾性波速度の温度依存性を求めた。本発表では、これらの進捗状況と低温での弾性波速度測定方法について報告する。

参考文献:[1] Hirai et al., (2023), *Geophys. Res. Lett.*, 50, 12, e2023GL103015 [2] Barnes et al., (2021), *Planet. Sci. J.*, 2, 130 [3] Hörst and Tolbert, (2013), *ApJL*, 770, L10 [4] Yu et al., (2018), *JGR Planets*. 123, 9, 2310-2321 [5] Greene, (2021). *Automotive Plastics and Composites: Materials and Processing*. William Andrew. [6] Sekine et al., (2017), *Nat. Astron.* 2(1), 0031 [7] Higo et al., (2018), *Rev. Sci. Instr.*, 89, 014501 [8] Onodera et al. *JGR Planets*, in prep. [9] Nakajima et al., (2015), *Nat. Comm.* 6, 8942

エンセラダスプルーム粒子の化学的多様性の起源

○古賀 実¹, 関根 康人¹

¹東京工業大学地球生命研究所

土星の衛星であるエンセラダスは氷地殻で覆われ、内部に地下海が存在していると考えられている。エンセラダスの南半球ではその海水がプルームとして噴出している。このプルーム粒子には、炭酸/重炭酸ナトリウムや塩化ナトリウムを含むもの、リン酸ナトリウムを含むものなど、化学的な多様性があること指摘されている。しかし、なぜこのような異なる化学組成の粒子が海水の噴出によってできるのか、そのメカニズムは明らかでない。

本研究では、この化学組成の違いが、プルーム噴出時の脱ガスおよび凍結の過程で生じる可能性を実験的に調べた。プルーム噴出時には、海水に溶存していた溶存二酸化炭素などのガス種が、減圧に伴い脱ガス・発泡する。このような発泡が空間的に不均一に生じれば、その有無によって、液滴ごとに空間的な溶存二酸化炭素濃度の濃淡が生じ、プルーム粒子の化学的多様性を作り出す可能性がある。このような減圧脱ガスおよび凍結過程を再現するため、減圧脱ガス実験と凍結実験を行った。減圧脱ガス実験では、真空チャンバー内に模擬エンセラダス海水(NaCl, NaHCO₃, Na₃PO₄の混合溶液)(pH~10)を設置し、チャンバー内の圧力を急激に減少(10⁵ Pa/min)させて氷粒子を生成した。塩を回収し、電子プローブマイクロアナライザーを用いて、化学組成と粒子の形態の違いを調べた。

その結果、減圧脱ガス実験では、減圧速度や模擬海水組成など実験条件を変化させたものの、基本的には、各実験において単一の化学組成の粒子が生成された。一方で、噴出実験とは別に液滴を急冷させたところ、同じように1つの液滴の中に組成の違う領域が確認されたが、急冷してできた粒子は突沸させてできた粒子よりも炭素に富んでいた。これは突沸させてできた液滴ではCO₂が脱ガスしているが、急冷させた場合には脱ガスは起こらず、炭素が液滴中に残存していることによる。このことは、プルーム粒子間の化学組成の違いは、プルームの脱ガス過程では起こりにくいことを示唆する。一方、凍結実験では、凍結速度が遅い場合には、粒子内で析出する塩物質の不均一が生じることがわかった。凍結過程によって、プルーム粒子の化学的な多様性が生じるのであれば、これによって凍結速度や壁への衝突速度といった海水噴出のダイナミクスを制約できる可能性がある。

エンセラダス海洋における 生命必須元素濃度の実験・数値的推測

○丹秀也¹、関根康人²、渋谷岳造¹

¹国立研究開発法人海洋研究開発機構, ²東京工業大学地球生命研究所

土星の氷衛星エンセラダスは、表面の氷の下に海洋が存在し、生命存在可能性の観点から注目を集めている。探査機カッシーニのデータの解析により海水の主要組成や化学的性質、熱水環境の存在について理解が進んでおり、近年では生命にとっての栄養塩となるリン酸が多量に含まれることも明らかとなった (Postberg et al., 2023)。特に海水には多量の二酸化炭素と水素が含まれるため、これらを用いたエネルギー代謝を行うメタン菌に類似の生命の存在が推測されている (e.g., Waite et al., 2017)。さらなる議論には亜鉛やニッケル、コバルト、銅、モリブデンといった酵素活性中心となりうる、生命必須の金属元素の情報が必要となる。こうした金属元素は海底で岩石から海水に溶存しうするため、本研究では室内実験および地球化学計算をもとに海底での反応を再現し、エンセラダス海洋の金属元素濃度を推定する。

エンセラダス海底での水-岩石反応を微量元素に関して模擬するために、本研究ではエンセラダス海水の模擬溶液と、海底岩石に類似した組成と推定される炭素質コンドライトを用いて熱水実験を行った。150 °C、300 気圧の条件で実験を行った結果、注目する金属元素はおおよそ 10^{-6} mol/kg 以下の低い溶存濃度を示した。これらの金属元素は実験に使用した岩石中では硫化物に含まれ、実験後も微小化した硫化物に濃集していた。こうした硫化物は熱力学的に非常に安定であり、低い溶存濃度は硫化物の溶解平衡により支配されたと考えられる。

さらに、エンセラダスでの水岩石反応をより現実的に推定するために地球化学計算を行った。対象の金属元素を含む鉱物として実験から示唆された難溶鉱物を仮定し、海底で推測されている熱水環境に相当する温度 (150 °C) と海底の低温部に相当する温度 (0°C) での岩石からの元素の溶存濃度、共存鉱物を計算した。その結果、条件によらず対象の金属元素濃度はいずれも非常に低く、 10^{-8} mol/kg 以下となった。これは難溶鉱物の溶解度が上記の温度では低く、また炭酸を含んだ溶液とカンラン岩質の海底岩石によって弱塩基性かつ還元的な系となるために、硫化物からの金属元素の溶出が抑えられることによる。

地球においても、アルカリ性の低温熱水環境では金属元素に乏しい流体が噴出していることで知られる (e.g., Seyfried et al., 2015)。一方で、300 °Cを超える高温の弱酸性・弱還元的流体が噴出する玄武岩質の熱水環境では難溶鉱物も容易に溶解し、さらに海水中の豊富な塩化物イオンが錯体生成により溶存を促進している。このため最高で 10^{-4} mol/kg に達する高い金属濃度となっている (e.g., Metz et al., 2000)。エンセラダスと同様に生命の存在が期待される木星の氷衛星エウロパにおいても、高温の弱酸性・弱還元的熱水環境や高い塩化物イオン濃度の海水が存在する場合には、高い溶存金属濃度の熱水流体が生じる可能性が考えられる。

こうした金属元素のメタン菌の活動に必要な濃度は 10^{-7} mol/kg 程度と見積もられている (e.g., Glass & Orphan, 2012)。本研究の室内実験・地球化学計算から推測されるエンセラダス海水中での濃度はこれと同程度、あるいは以下であった。したがって、エンセラダス海洋では溶存金属濃度が低いために生命活動が制限されており、結果としてエネルギー源の水素と二酸化炭素、栄養塩のリン酸が多量に残留している可能性が考えられる。これは熱水活動の規模と流体の pH・酸化還元状態に依存しており、太陽系水環境における普遍的な生命存在可能性のさらなる理解へつながりうる。

Extraterrestrial life detection microscope 地球外生命探査顕微鏡

○Keigo Enya¹, Yoshitaka Yoshimura², Satoshi Sasaki³, Sohsuke Ohno⁴, Shunta Kimura¹, Hajime Mita⁵, Akihiko Yamagishi⁶, Atsuo Miyakawa⁶, Eiichi Imai⁷, Kensei Kobayashi⁸

1. ISAS, 2. Tamagawa University, 3. Tokyo University of Technology, 4. Chiba Institute of Technology, 5. Fukuoka Institute of Technology, 6. Tokyo University of Pharmacy and Life Science, 7. Nagaoka University of Technology, 8. Yokohama National University

We consider that it is one of the most important issue of space science to detect and analyze extraterrestrial life by planetary exploration of the solar system. Pioneering life detection experiments on Mars were conducted in the 1970s by the Viking mission, but could not conclude the existence of life. Since then, multiple Mars exploration missions have been carried out, but their astrobiological programs have focused primarily on the search for life-related materials and environments. It looks one of reasonable way to focus on microorganisms rather than large organisms as a starting point of extraterrestrial life search in planetary exploration. The reasons are, the fact that the first life forms are thought to originate as microorganisms but not necessarily evolve into large organisms, as well as the density and wide distribution of microorganisms.

Considering these backgrounds, we have proposed a microscope for detecting extraterrestrial microorganisms. In particular, fluorescence microscopy using fluorescence pigments and excitation light is effective. Fluorescence pigments applied to terrestrial microorganisms exhibit fluorescence corresponding to the features of intracellular organic matter, cell membranes (including the identification of life and death activity), and catalytic reactions, which are the basis of life activity for terrestrial life. Microscopic observation of the fluorescence enables us to detect the shape of cells and to understand their biological and chemical characteristics. SYTO24, Propidium iodide (PI), SYPRO Red, etc. are selected as fluorescent dyes for this purpose.

In this presentation, we will show an introduction for fluorescence microscopy for extraterrestrial life exploration and a proto-type of the microscope.

巨大惑星の周惑星円盤へのガス・ダスト供給の惑星質量依存性

○前田夏穂¹, 大槻圭史¹, 末次竜², 芝池諭人³, 谷川享行⁴, 町田正博⁵

1. 神戸大学, 2. 大島商船高等専門学校, 3. 国立天文台, 4. 一関工業高等専門学校, 5. 九州大学

巨大惑星は形成時に周囲からガスを獲得する際に周惑星円盤を形成する。ガリレオ衛星などの巨大ガス惑星まわりの巨大衛星は、周惑星円盤内で固体物質が集積することで形成されたと考えられる。従って、周惑星円盤への固体物質の供給過程を調べることは、衛星形成過程の解明において重要である。本研究では、周惑星円盤にガスとともに流入する固体粒子(ダスト)に着目する。巨大ガス惑星まわりの局所領域についての3次元高解像度数値流体計算(Maeda et al. 2022)と、それを用いたダストの軌道計算を行い、周惑星円盤へのガス・ダストの降着とその惑星質量依存性を調べた。

近年の研究により、周惑星円盤へのダスト・ガス降着率比が周惑星円盤内での微衛星や衛星形成において重要なパラメータであることがわかってきた(Shibaike et al. 2017; 2019)。そこで、本研究ではダスト・ガス降着率比を求める際の元となる周惑星円盤へ降着するガスの「ダスト保持度」に着目し、その惑星質量依存性を数値計算結果と解析的アプローチにより求めた。惑星質量が小さいとき、高度が十分でないダストは降着流に乗りにくいだが、惑星質量が大きい場合はダストスケールハイトが小さくても降着流に乗り周惑星円盤に降着しやすくなる。よって、降着流のダスト保持度は、原始惑星系円盤内でのダストスケールハイトが一定と仮定すると、惑星質量とともに増加する。定量的には、ダストスケールハイトがガススケールハイトの10%の場合、惑星質量が0.2木星質量のときは、周惑星円盤に降着できるダストの量は降着帯での面密度の1/1000-1/100であるが、惑星質量が木星質量のときは降着帯での面密度の1/10が周惑星円盤に降着できる。本研究の結果から、周惑星円盤へのダスト・ガス流入率比を求めることで、今後の衛星形成モデルの構築の際により定量的に詳細な議論が可能となる。

参考文献：

[1] Maeda et al. 2022, ApJ, 935, 56

[2] Shibaike et al. 2017, ApJ, 846, 81

[3] Shibaike et al. 2019, ApJ, 885, 79

離心軌道にある巨大ガス惑星による

原始惑星系円盤へのギャップ形成

○田中佑希¹, 田中秀和²

¹福島高専, ²東北大学

現在までに 5000 個を超える太陽系外惑星が発見されており, これらの軌道や質量などの特性は非常に多様性に富んでいることが分かっている. 例えば木星型惑星の場合, 主星に極めて近い軌道を持つホットジュピターや, 大きな軌道離心率を持つエキセントリックプラネットなどが発見されている. これらの惑星は原始惑星系円盤の中で形成されたと考えられている. そのため, 円盤内で惑星がどのように周囲のガスと相互作用し, 軌道および質量が進化したかを明らかにすることは, 多様な系外惑星の成り立ちを理解する上で重要である.

これまでの数値流体計算を用いた惑星・円盤相互作用の研究では, 惑星の軌道離心率は非常に小さいことを仮定しているものが多かった. しかし, 発見されている巨大ガス惑星の軌道離心率は多様であり, これらの中には惑星と円盤の相互作用によって離心率が励起されたものもあることが指摘されている. 離心軌道にあるガス惑星が円盤とどのように相互作用し, どのようなギャップを形成するのかについては, あまり詳細な研究は行われていない. そこで本研究では, 初期に一定の軌道離心率を持たせた軌道から計算を開始し, 軌道要素および惑星質量の時間進化を, 円盤へのギャップ形成と共にシミュレーションした. 数値計算には, 回転するガス円盤の移流を高速に解くことに特化したコードである FARGO を用いた.

その結果, 惑星軌道が初期にわずかに離心率を持っていた場合, 惑星が形成するギャップの外縁に顕著な離心率が生じ, それによって惑星自身の軌道進化にも複雑な影響を及ぼすことが分かった. 特に, 惑星の軌道長半径および軌道離心率は単調には減少せず, 長期的には増加する場合もあることが判明した. この傾向は円盤のガス面密度が小さいほど顕著であるため, ガス面密度が現象した円盤進化の後期段階において特に重要になると考えられる. 従って, 巨大ガス惑星の最終的な質量や軌道要素の分布を明らかにするためには, 惑星軌道・惑星質量・惑星が形成するギャップ特性の共進化を長時間追う必要があることが示唆された.

天王星の熱進化とリング粒子組成への制約

○黒崎健二¹

¹ 神戸大学

本研究では天王星が持つリング粒子組成に注目し、天王星の放射強度の進化によってリング軌道に存在するリング粒子組成の制約を行う。天王星は自転軸が98度とほぼ横倒しの自転傾斜角を持ち、さらに衛星系やリングもその自転軸に沿って順行している。このような特徴から、天王星は過去に巨大衝突を経験し、衛星系もその巨大衝突に伴って形成したと考えられている。天王星の衛星系は衝突に伴う円盤によって形成した場合、形成した衛星が落下して潮汐破壊されたのちにリングが形成されると考えられている。天王星が高温だったときにリングが形成した場合にはリング粒子に氷成分がほとんど含まれない可能性があり、逆に天王星が低温になってから形成すればリング粒子は氷成分に富むことが予想される。したがって、リングの構成粒子の組成は衛星系の組成は天王星の形成過程を知る上で重要な情報を持つと考えられる。そこで本研究では天王星の大気量・大気中重元素量をパラメータとして放射強度の時間進化を計算し、氷成分が凝結する距離の時間進化を計算した。惑星放射に由来する温度を計算した結果、最長で 10^8 年ごろまでリングがある領域が150Kを超えていることがわかった。巨大氷惑星のリング物質は周辺の lesser satellites からの供給が主体と考えられているため、lesser satellite が形成が速すぎる場合には lesser satellite も氷成分を失ってしまうため、リングも氷成分がほとんどないことが示唆された。

OPENS: 超小型探査機による 外惑星領域探査プログラム構想

○兵頭龍樹¹、船瀬龍 (JAXA/ISAS)、矢野創 (JAXA/ISAS)、
尾崎直哉 (JAXA/ISAS)、中島 晋太郎 (JAXA/ISAS)、
OPENS ワーキンググループ
¹ISAS/JAXA

OPENS 探査プログラム (OPENS: Outer Planet Exploration with Novel micro-Spacecraft) とは、「従来の海外主導の外惑星探査とは異なる Novel なゲームのやり方を創造すること」で、「日本独自の探査機で外惑星探査ミッションが持続可能に実行できる世界を切り拓く」ことを目指して、2019 年より ISAS 宇宙工学委員会の元で現在宇宙工学委員会のもとでワーキンググループ活動を推進している。エコクラス公募 RFI に対して提案を行い、ISAS 主導のエコクラス先行スタディチームに 2022 年度に採択された。

外惑星探査ミッションにおける後発隊である日本が、外惑星探査分野において存在感を発揮するためには、H3 ロケットを用いた外惑星探査ミッションは、質量リソースの観点では実現性が高い。一方で、多彩な太陽系探査の中の一分野である『外惑星探査』に使える H3 ロケットを用いた中型クラスの枠は、現状を外挿する限り、約二十年に一回程度の頻度にならざるを得ない。そうした低頻度・低リソース (資金・質量リソース) で、日本が存在感を発揮し続けるのは非常に困難である。

そこで、OPENS ミッションでは、イプシロン S ロケットを用いて超小型探査機による外惑星探査ができる世界を切り拓くことで、イプシロン S・H3・相乗り打上げ等の幅広い打上げ機会を活用した高頻度な外惑星探査プログラムを展開することを目指す。イプシロン S ロケットを用いた外惑星ミッションでは、最大輸送可能質量が 100~200kg 程度に制限される。そのために超小型衛星バスの活用が不可欠であり、外惑星探査という長期ミッションの特性を考慮すると、新設されたエコクラス検討において、リスク許容度を一段緩和した挑戦的な探査機システムの開発とならざるを得ない。OPENS プログラムの零号機では現在、独立型探査機による「土星圏探査ミッション」の概念設計および開発計画の具体化を進めている。

原始惑星系円盤の表層ガス降着が駆動する微惑星形成

○奥住 聡¹

¹ 東京工業大学

微惑星形成のメカニズムは惑星形成論における長年の謎である。現代の主流の微惑星形成シナリオは、ストリーミング不安定 (Youdin & Goodman 2005) によって形成されるダストのクランプが自己重力で収縮して微惑星を形成するというものである。しかし、ストリーミング不安定が効率よく起こるためには、ダスト濃度 (ダスト/ガス比) の高い円盤領域がストリーミング不安定に先立って形成されている必要がある (e.g., Johansen et al. 2009)。

本講演では、近年の円盤磁気流体シミュレーションの結果から着想を得た、円盤の表層降着によるダスト濃度上昇メカニズムを提案する。磁気流体計算 (e.g., Bai & Stone 2013; Gressel et al. 2015; Bai 2017; Lesur 2021) によると、円盤ガスの中心星への降着は電離度の比較的高い円盤表面付近で起こる傾向にある。この表面降着流はガスを中心星方向へ運ぶが、ある程度沈殿しているダストを運ぶことはできない。したがって、表面降着によってダストの円盤内濃度は上昇するはずである (図1)。本研究では、表層で降着する原始惑星系円盤のガス・ダスト輸送を記述する理論モデルを定式化し、さらにダストの合体まで考慮した数値シミュレーションを実施した。その結果、ダストの付着力が比較的低い場合では、ダストの暴走沈殿 (Sekiya 1998) やストリーミング不安定が引き起こされるのに十分な円盤内ダスト濃度上昇 (赤道面でのダストガス比 > 1) が生じることを明らかにした (図2)。ダスト濃縮は100万年程度の時間スケールで進行し、中心星から数10天文単位以内の場所なら微惑星形成につながるダスト濃縮が起こりうる。また、表面ガス降着を仮定したダスト進化モデルは、近年の円盤電波観測から得られている円盤のダスト熱放射スペクトルの冪 (スペクトル指数) の統計もよく再現することを明らかにした。

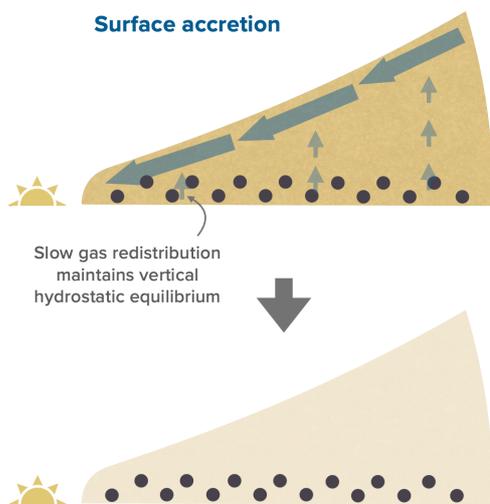


図1: 表面降着円盤でのダスト濃度上昇の概念図。ガスが表面で降着すると (太矢印)、ダスト粒子 (黒丸) は円盤に取り残される。

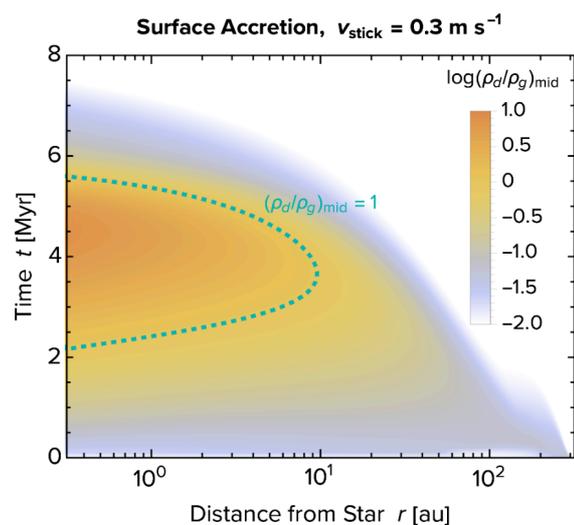


図2: 表面降着円盤での赤道面ダスト/ガス密度比の時空間プロット。点線より内側の時空間領域では、ダスト密度がガス密度を上回る。

大質量原始星円盤における 岩石ダスト成長の観測的兆候

○山室良太, 田中圭, 奥住聡¹, 大橋聡史², 松木場亮喜³

¹ 東京工業大学 ² 国立天文台 ³ 京都大学

地球をはじめとした岩石惑星とその前駆体である岩石微惑星は、原始惑星系円盤において水氷が昇華し、ダスト主成分が岩石であるスノーライン内側で形成されたと考えられている。これらの形成過程を理解するためには岩石ダスト領域を観測することが重要となる。しかし、原始惑星系円盤においてスノーラインの半径は約 3 au と狭い。これは既存の電波望遠鏡による観測が困難となるほどの狭さである。そこで、我々は約 10 太陽質量以上の大質量原始星周囲の降着円盤に着目した。大質量原始星円盤は原始惑星系円盤と比較してはるかに高温なため、空間分解観測が十分可能な半径 100 au 以上のスノーラインを持つと考えられている。そのため、大質量原始星円盤の観測とその結果を活用した理論研究から、原始惑星系円盤における岩石微惑星形成に示唆を与えられる可能性がある。

このような研究の一環として、我々は大質量原始星円盤 GGD27-MM1 における偏光観測 (Girart et al. 2018) から示唆された岩石ダストの最大サイズと、岩石ダスト成長の理論研究の結果を比較することで、岩石ダストの付着力を制約することに成功した (Yamamuro et al. 2023)。得られた付着力から考察すると、原始惑星系円盤における岩石微惑星形成は単純な岩石ダストの衝突合体成長のみでは困難だと考えられる。しかし、大質量原始星円盤におけるダストの観測的兆候の研究例は未だに少ないため、理論と観測をつなぐ模擬観測的研究の必要性が高まっている。

本研究の目的は大質量原始星円盤におけるスノーライン内側の観測から、原始惑星系円盤における岩石微惑星の形成過程を制約することである。そのために、大質量原始星円盤における岩石ダストの観測的兆候を理解することが重要である。そこで、本研究では輻射輸送計算コード RADMC3D を用いた大質量原始星円盤の (サブ) ミリ波模擬観測を行いダスト成長とその観測的兆候を調べた。本発表ではダスト成長を考慮した大質量原始星円盤の放出する連続波観測から期待されるスペクトル指数、また動径方向分布の関係について議論する。

周惑星円盤のダスト熱放射による PDS70b 及び c の制約 Constraints on PDS70 b and c from the dust thermal emission of the CPDs

○芝池諭人¹, Christoph Mordasini¹

1. 国立天文台, 2. ベルン大学

近年相次いで発見されている形成中のガス惑星は、ガス集積過程で惑星周囲に小さなガス円盤(周惑星円盤と呼ぶ)を作る。PDS70 系には二つ形成中のガス惑星、PDS70b と c が見つかっており、c からは周惑星円盤内のダストの熱放射が ALMA の $855 \mu\text{m}$ で観測されたが、b からは観測されていない。我々は、ダストの合体成長と移動を考慮した周惑星円盤からのダスト熱放射の強さを推定するモデルを構築した。そして、ダスト熱放射の強さが惑星質量とガス集積率に依存することから、実際の観測結果を用いて、惑星 b 及び c のそれら二つの特性を制約した。特に惑星 c について、惑星質量: 10-12 MJ (木星質量) 及びガス集積率: $0.8\text{-}2.2 \times 10^{-7} \text{ MJ/yr}$ と制約することができた(図 1)。本発表では、制約された惑星特性を説明できる PDS70 系全体の解釈についても議論する。

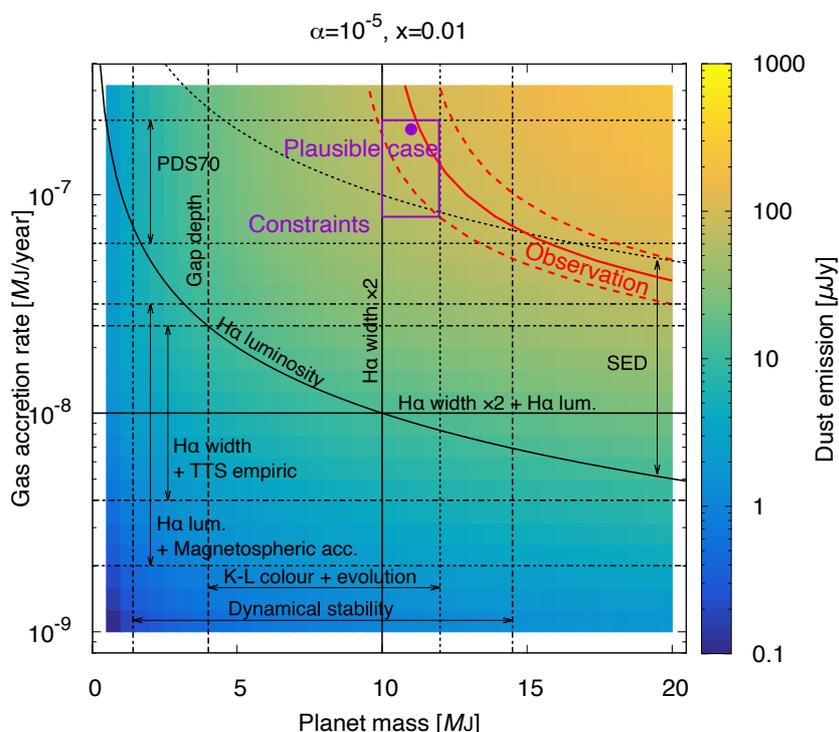


図 1. 惑星質量とガス集積率から予測される PDS70c の周惑星円盤のダスト放射の強さ

紫の四角は今回得られた惑星特性の制約紫の丸は、もっともらしい惑星特性を示す。赤線は観測結果 ($86 \pm 16 \mu\text{Jy}$) を再現する範囲、黒線はこれまでの他の観測方法による惑星特性の推定を示す。

(Shibaike & Mordasini in prep.)

原始太陽系星雲での雷発生： 微惑星周囲のダストの運動と衝突帯電

○西澤諒¹，中本泰史

¹東京工業大学

未分化隕石の多くには、珪酸塩組成の球状の組織であるコンドリュールが含まれている。コンドリュールは、珪酸塩ダスト粒子が急速に加熱されて熔融した後、再度冷え固まって形成されたと考えられているが、加熱の具体的なメカニズムは未だに明らかにされていない。

私たちは、コンドリュール加熱源として雷モデルに注目した。コンドリュールは内部にNaなどの揮発性物質を含むことから、ダスト密度が非常に高い環境で形成されたと考えられている (Alexander et al., 2008)。このようなダストリッチな環境は、ダスト同士の頻繁な衝突帯を促すため、雷の発生に適していると考えられている (Muranushi, 2010)。

例えばダスト層のようなダスト密度が非常に高い領域では、ダスト層の自己重力によって重力不安定が発生し、微惑星が形成される。成長する微惑星には周囲からダストが降り積もるが、その過程でダストにはサイズに応じたガス抵抗力が生じる。このため、サイズの異なるダスト同士は異なる軌道を辿り、衝突する可能性がある。異なる大きさや性質を持つダストが衝突すると、電子を交換し、帯電することがある。衝突後、異符号に帯電したダストがそのまま空間的に分離されると、電場が形成される。ダスト密度が高く、ダスト同士の衝突電荷分離が頻繁に行われる場合、電場が絶縁破壊を起こすまで成長し、雷が生じる可能性がある (Desch & Cuzzi, 2000)。

本研究では、原始惑星系円盤のダスト密度が高い環境として、ダスト層の微惑星形成過程に注目し、雷の発生可能性について調査した。ダストのサイズに応じて働くガス抵抗力を考慮し、微惑星のヒル半径外から流れてくるダストの三次元軌道を計算した。ダストの衝突状況から、ダスト衝突帯電によって生じる電荷密度分布と電場分布を求めた。また、衝突交換電荷量、中心星距離、ガス・ダスト面密度をパラメータとして変化させ、雷が発生する条件を確認した。その結果、重力不安定が生じるダストリッチな環境では十分に雷が生じる可能性があることが分かった。雷は微惑星の近傍で発生するため、微惑星に衝突せずに通過するダストは雷のエネルギーで加熱され、コンドリュール形成に関与することが予想される。

遷移円盤内域に付随する傾いた inner disk が作る影

○折原 龍太¹, 百瀬 宗武¹

¹茨城大学大学院理工学研究科

遷移円盤とはダスト分布内域に空隙が見られる原始惑星系円盤であり、これまで電波や赤外波長での観測から多種多様な構造が明らかになった。これらの天体の中には半径数 au の領域に inner dust disk を持つものもあり、これは外側からのダスト供給が続いているか、ダストを中心星近傍でトラップする何らかのメカニズムで説明できる可能性がある。

一方、赤外散乱光やダスト連続波で確認されている outer disk 上の影や、ガス分子輝線の速度場解析から検出された中心付近の歪みは、inner disk が outer disk に対して傾いている可能性を示唆している。inner disk が傾く原因は解明されていないが、円盤とそれに対して軌道が傾いた大質量コンパニオンの重力相互作用や、角運動量の異なる物質の降着によるものと考えられている。

しかし、中心星近傍の inner disk を分解する観測は現在の観測装置では困難であり、inner disk の幾何学的構造や物理量を抽出し円盤内域の進化を議論するには限界がある。そこで我々は、inner disk が傾くことで outer disk 上に作られる影に注目し、この影を利用して inner disk の幾何学的構造を推定する方法を提案する。この方法は outer disk 上の日向と日陰の境界線が、inner disk が作る影領域の表面と outer disk 表面が交わることでできる曲線と一致することを利用しており、従来の方法 (Min et al. 2017) では考慮されていなかった inner disk の厚みをパラメータに含めることで、outer disk 上の影の 3次元領域を評価できる。

この手法を用いて、赤外散乱光画像から影が検出されている天体を選出し、それらに付随する円盤の傾き、厚みを推定した。選出天体の中には、outer disk よりも inner disk の方が幾何学的に厚いものがあり、円盤最内域で乱流によるダストの強い巻き上げなどが起こっている可能性がある。本発表では inner disk の立体構造の推定結果を報告するとともに、inner disk, outer disk それぞれの厚みとずれの成因について議論する。

移動し成長する惑星が作るギャップの端 における微惑星形成 Planetesimal formation at the gap edge made by a migrating and growing planet

○芝池諭人¹, Yann Alibert²

1. 国立天文台, 2. ベルン大学

微惑星形成におけるダスト落下問題を回避する数多くのシナリオがこれまでに考えられてきた。我々は、新たに、移動する惑星が作るギャップ端(ガス圧バンプ)での微惑星形成を提案し、研究してきた。惑星が作るガス圧バンプにて、主にストリーミング不安定により微惑星が形成される。そして、その環状の形成領域は惑星の移動とともに円盤内側に移動する。これまでの我々の研究では、微惑星形成領域の外側は惑星がペブル孤立質量となる軌道位置、内側はスノーラインになると考えていた。しかし、惑星の成長とそれに伴う Type I 移動から Type II 移動への移行による惑星の減速を考慮すると、乱流が強い場合を除いて、惑星の作るガス圧バンプは円盤散逸までにスノーラインに到達せず、微惑星形成領域もスノーラインに届かないとわかった(図 1)。また、ギャップを作る惑星が円盤の形成初期から存在すると、形成される微惑星の総質量は 30 から 100 地球質量にもなるが、惑星の形成タイミングが遅いと、ダストが先に落下して形成される微惑星総質量が小さくなる、とわかった(図 1)。

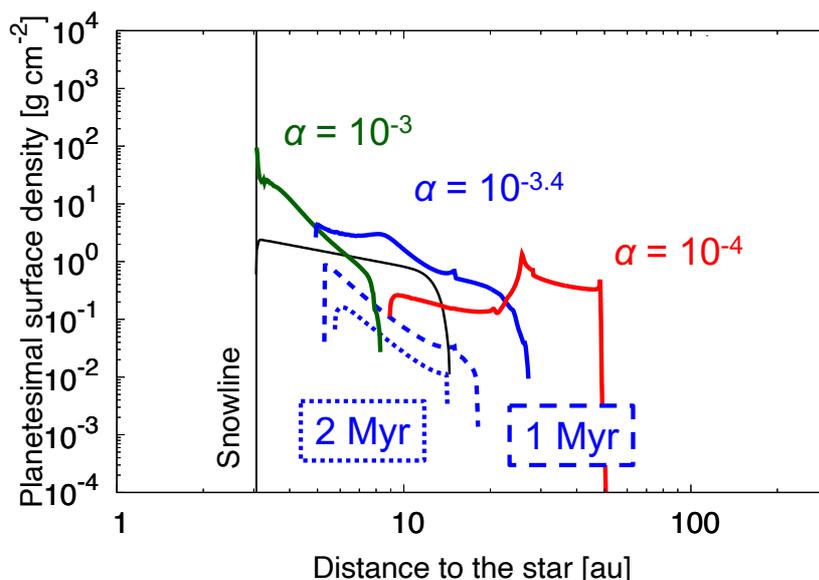


図 1. 形成される微惑星の面密度分布

各色は、円盤の乱流の強さを示す。点線は、ギャップを作る惑星が形成されるタイミングが遅れる場合を示す。

(Shibaike & Alibert accepted.)

熱対流を取り扱うためのラグランジュ的流体シミュレーション SPH法コードの開発

○高橋航¹ 小林浩¹ 瀬野泉美¹ 犬塚修一郎¹

¹名古屋大学

対流は惑星における熱輸送や物質の攪拌に寄与する重要な過程である。対流は流体シミュレーションによりよく調べられているが、主にオイラー的な流体方程式に基づくメッシュ法で行われている。メッシュ法では格子状に空間を離散化するため移流によって分布が均されてしまい、数値計算によって生じる熱拡散より小さな熱拡散で計算ができない。そのため、現実的な熱拡散のパラメータでシミュレーションを行うことは困難である。

そこで、我々は、ラグランジュ的な流体方程式に基づく Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法で対流現象を調査するコードを開発する。SPH 法では、流体を粒子で離散化することで移流による分布の平滑化を起こらず、数値計算による熱拡散を非常に小さくすることができる。そのため、現実的な小さい熱拡散を実現するシミュレーションが可能になると期待されるためである。

本研究では、数値不安定性を回避するために人工粘性を加えた標準 SPH を用いる。熱拡散項及び粘性項は、Cleary and Monaghan [1999] に基づいて定式化を行い、コード開発をした。ここで、一様重力を加え、上下が剛体境界、左右が周期境界の 2 次元領域内で計算する。様々なレイリー数における数値計算を行い、その結果を発表する。

ニューラルネットワーク U-Net を活用した、原始惑星系円盤の電波干渉計画像構成法の検討

○関口瑞希¹, 奥住聡¹, 塚越 崇², 百瀬 宗武³, 武藤 恭之⁴

¹東京工業大学, ²足利大学, ³茨城大学, ⁴工学院大学

原始惑星系円盤とは、若い星を取り巻くガスやダストから成る回転円盤であり、惑星系形成の場であると考えられている。近年、ALMA による観測では 0.05asec スケール(およそ 6-7au)の解像が行えるようになり、木星形成領域における円盤構造が明らかになりつつあるが、地球形成領域に迫るにはさらに解像度を上げる必要がある。しかし、干渉計による観測では輝度の空間分布に対応するビジビリティが完全には取得できず、不完全なデータから真の輝度分布を復元する必要がある。この復元には、従来から用いられている CLEAN を含む様々な手法が存在するが、各手法はそれぞれの前提条件に基づき結果が影響を受けるため、複数の手法を用いて検討することが必要である。

本研究では、原始惑星系円盤の電波干渉計観測データから円盤の詳細構造を検出する新しい手法として、画像処理に特化した深層学習モデルである U-Net を採用した。U-Net は元々医療画像解析などで用いられている手法である。我々は、その強力な特徴抽出と画像復元能力を活かし、原始惑星系円盤の観測データから円盤の内部構造を高精度で復元することを目標としている。手法の性能を確認するために、我々は次のような実験を行った。初めに、同心円状のギャップ構造を持つ模擬円盤モデルを作成し、そのモデルを観測シミュレーションして得た dirty image と組み合わせて U-Net を訓練した。訓練が完了したのち、この訓練済み U-Net を用いて、ビームサイズの 2分の1 程度の大きさのギャップ構造を持つ模擬円盤モデルを復元し、CLEAN により復元された円盤モデルと比較した。比較の主な指標として、復元された円盤のギャップの位置や深さ、そして幅の指標として分布の標準偏差を用い、それぞれモデルをどの程度再現するかを評価することで U-Net と CLEAN の性能を比較した。

その結果、U-Net はビームサイズよりも浅いギャップや、幅の狭いギャップにおいて、従来の CLEAN 手法では解像できないギャップ構造を検出できることを確認した(図 1)。さらに、U-Net は学習データに含まれない多重ギャップやスパイラル構造に対しても高精度な復元が可能であることを示した。

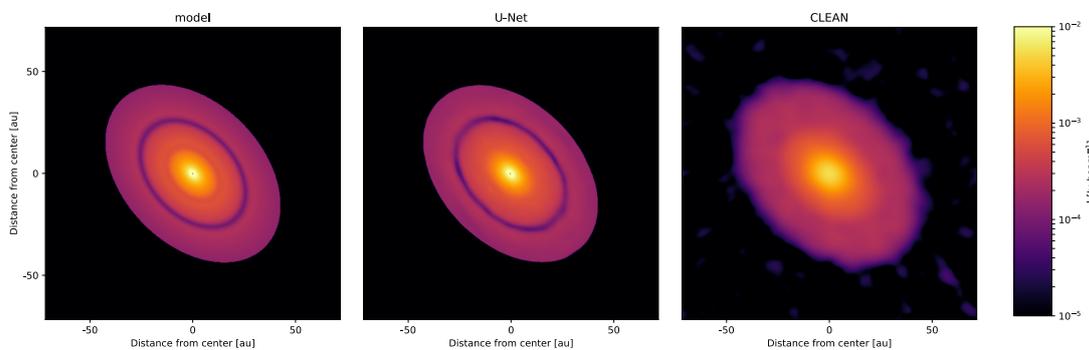


図 1 ビームサイズの 2分の1 程度のギャップ構造を持つ円盤を復元した例。左から正解の模擬円盤モデル、U-Net によって復元した円盤輝度分布、CLEAN によって復元した円盤輝度分布

第一原理計算によるドップラー幅を考慮した一酸化炭素同位体分子種の光吸収断面積

○ダニエラチェ セバスティアン¹、藤原 綾香¹、南部 伸孝¹

¹上智大学

太陽系の始原的隕石にはごく少量に同位体異常を持ったプレソーラー粒子が含まれている。一方で太陽系固体物質中の主要元素の同位体組成は極めて一様である。太陽系を作った元素はもともと同位体的に不均質な状態にあったものが太陽系形成時やそれに先んじて著しく拡販したと考えられている。地球での大部分の同位体交換反応に伴う同位体分別は質量差に依存しており、 $\delta^{18}\text{O}$ は $\delta^{17}\text{O}$ の約 2 倍変化する。また、火星大気における炭素同位体比は大気進化史や表層有機物の起源を制約するための重要なトレーサーとして提案されている。 CO_2 の光解離による同位体分別効果の影響も強く受けることが Schmidt et al.¹ の理論計算で示されている。強い紫外線大気で CO 分子も光かい離反応も生じると考えられる。一方で一酸化炭素分子の光吸収断面積は実験で得られているデータが多くない。

一酸化炭素分子について、電子基底状態および励起状態について結合距離に対する大域的ポテンシャルエネルギーと、基底状態と各励起状態の一酸化炭素分子について、電子基底状態および励起状態について結合距離に対する大域的ポテンシャルエネルギーと、基底状態と各励起状態の遷移双極子モーメントを計算した。電子状態計算には MRCI/AVDZ 法を用いた。ポテンシャルエネルギー曲線の計算のため 1.5-8.1 a0 の間の 158 の座標について電子状態計算を行った。光吸収断面積は、この電子状態を用いて非断熱遷移を考慮し R-matrix 伝播法を用いて波動関数を数値的に得ることで算出した。過去に得られた実験測定値から Voigt プロファイルを用いることで波長ごとのドップラー幅を算出した。このドップラー幅を自然幅光吸収断面積に与えて最終的な光吸収断面積とした。

電子状態は $X^1\Sigma^+$ 、 $A^1\Pi$ 、 $D^1\Delta$ について得られた。これらの状態を用いて光吸収断面積を得た。ドップラー幅に関しては Chan et al.² による実験の低波長側のデータから波長ごとの数値を得た。波長とドップラー幅には指数関数的関係がみられた。比較のため、Chan et al.² の用いた実験装置の分解能 (0.048 eV FWHM) をドップラー幅として与えた計算と比較し計算結果の妥当性を検討しました。

[1] Schmidt et al., PNAS., 110(44), 17691-17696 (2013), [2] W.F. Chan et al., Chem. Phys., 170, 123-138 (1993)

初期地球のハビタビリティに及ぼす 太陽エネルギー粒子の影響

○宇土拓海¹, 小林憲正^{1,2}, 癸生川陽子², V. S. Airapetian^{3,4,5}, 羽倉尚人⁶, 福田一志²,
小栗慶之^{2,7}

¹ 横浜国立大学, ² 東京工業大学, ³ NASA Goddard SFC, ⁴ American Univ., ⁵ 京都大学,
⁶ 東京都市大学, ⁷ NAT リサーチセンター

生命が誕生する以前、地球上ではアミノ酸などの生体関連有機化合物が生成または供給されたとはいえない。近年、原始地球の大気は、種々の有機物が生成したミラーの実験で用いられたような強還元性雰囲気ではなく、わずかに還元性の雰囲気であったと考えられており、そのため雷や紫外線などのエネルギーではアミノ酸を生成することが困難とされていた。しかし、原始地球の大気に CO が含まれていれば、宇宙線等によってアミノ酸を生成できることが示された[1]。近年、若い太陽は巨大なフレアを頻繁に起こし、大量の太陽高エネルギー粒子 (SEPs) が放出され、惑星大気中で様々な化学反応を引き起こした可能性が示唆されている[2]。

本研究では、N₂、CO₂、H₂O を主成分とし、CO を副成分とする微弱還元性混合ガスにタンデム加速器 (東京工業大, 東京都市大) からの 2 - 2.5 MeV 陽子線を照射して有機化合物が生成される可能性を調べた。使用した混合ガスは、(i) CO₂ と N₂ (モル比 50 : 50) (ii) CO₂、CO、N₂ (モル比 42 : 8 : 50) であり、全圧は 700 Torr で、これに液体の水 5 mL からの水蒸気約 20 Torr を加えた。一部の実験では、CO の代わりに ¹³C を使用した。

CO₂、N₂、H₂O の混合物に陽子を照射すると、微量のアミノ酸しか検出されなかったが、気相生成物からは CO と N₂O が検出された。N₂O は CH₄ や CO₂ よりもはるかに効果的な温室効果ガスであり、「暗い若い太陽のパラドックス」を解決するかもしれない[2]。CO₂、CO、N₂、H₂O の混合物に 2 mC の陽子線を照射した後、生成物を加水分解すると、

1.6 μmol のグリシンなど、数種類のアミノ酸が検出された。アミノ酸が実験生成物であることは、CO₂、¹³C、N₂、H₂O の混合物のプロトン照射によって ¹³C 原子で標識されたアミノ酸が、GC/MS によって検出されたことにより確認された。グリシンの G 値は 0.044 である。SEPs のエネルギーフラックスを $3 \times 10^{24} \text{ eV m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ [3] と仮定する。この値を用いて推定したグリシンの年間生産量は $8.4 \times 10^9 \text{ kg yr}^{-1}$ であり、隕石から運ばれるグリシンの量 [3] よりもはるかに大きい。なお、同様な組成の混合ガスへの紫外線照射実験ではアミノ酸は検出されなかった。

このことから、SEPs は微弱な還元性大気からアミノ酸を含む生物有機化合物を生成するための有効なエネルギー源であることが示唆された。前生物的合成における SEPs の役割の可能性を検討するためのさらなる研究が進行中である。また、加水分解前の「アミノ酸前駆体」の特徴を調べ、反応機構を推定することも計画中である。

[1] S. Miyakawa et al., *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **99**, 14628 (2002).

[2] V. S. Airapetian et al., *Nat. Geosci.*, **9**, 452 (2016).

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

マントル対流計算を目指した弱圧縮性 SPH 法の開発

Development of a weakly-compressible SPH method for simulating planetary mantle convection

○ 菖蒲迫健介¹, 吉田茂生², 川田佳史³, 中島涼輔⁴

¹九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, ²九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門,

³国立研究開発法人海洋研究開発機構海洋機能利用部門, ⁴九州大学大学院理学研究院

地球形成史を明らかにするためには、地球形成およびコア形成から現在に至る 46 億年の間に起こった地球内部のダイナミクス諸過程を連続的に理解することが極めて重要である。形成期を代表する巨大衝突計算では複数相や大変形を扱うことができる Smoothed Particle Hydrodynamics method (SPH 法[1]) が広く用いられる。このことから、SPH 法を惑星内部計算、特にマントル対流計算に応用したいと考えた。通常の SPH 法は圧縮性流体を扱うため陽解法を用いる。しかし、音速が大きく粘性率が高いマントル対流計算では、可能なタイムステップの上限が非常に短く陽解法では解きがたい。このため音速低減法を適用した弱圧縮性 SPH 法[2]および慣性変化法[3]によりタイムステップの上限を緩和するのが有効であると考えた。一方、従来の弱圧縮性 SPH 法では人為的な音速の低減が、熱対流で本質的な浮力項を変化させてしまい、圧縮性を伴うマントル対流を正しく計算できない。そこで、この欠点を含まない計算法を新たに構築した。

本研究で新たに提案する方法は、弱圧縮性近似で柔らかくする密度と浮力に関する重力密度を物理的な考察に基づき分離するという方法(重力密度分離法)である。この手法の妥当性と有効性を検証する目的のもと、空気とマントルのブシネスク熱対流に関するベンチマークテストとの比較を行った。本発表ではその結果および実際のマントルの状態方程式を用いて得られた結果を報告する。

[1] Lucy, L. B., 1977, *Astron. J.*, **82**, 1013-1024. [2] Monaghan, J. J., 1994, *J. Comput. Phys.*, **110**, 399-406. [3] Takeyama, K., et al., 2017. *New Astron.*, **50**, 82-103

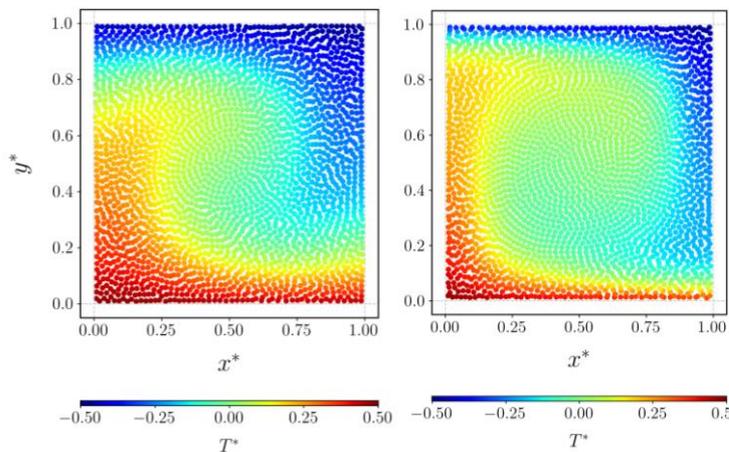


図1. 重力密度分離法および慣性変化法を用いた弱圧縮性 SPH 法によるブシネスク熱対流の結果。図は定常状態を表す($Ra = 10^4$)。 (左)空気の熱対流 ($Pr = 0.71$) (右)地球マントル対流 ($Pr \sim \infty$) Ra はレイリー数, Pr はプラントル数である。色は温度を表す。

何故、この碧い地球にだけ、生命が誕生したのか？

…SCIENCEの探究への原駆動力は、"何故"と素直な疑問を持ち続けて、進化のストーリーを追い求めて現状との一致で評価する。

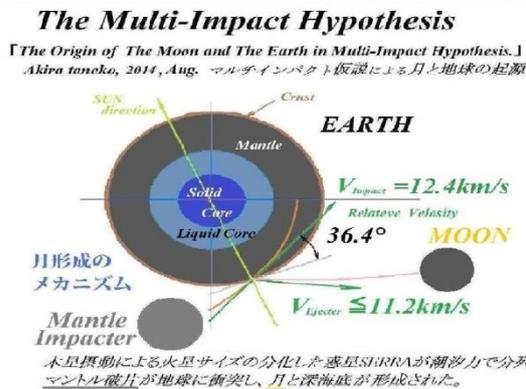
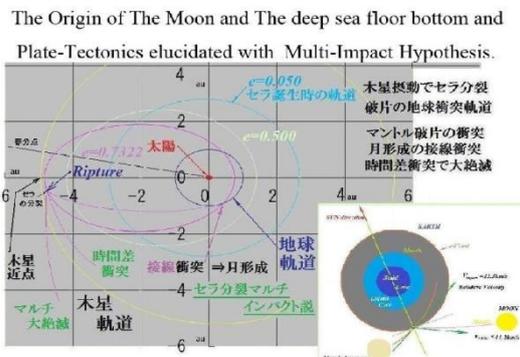
"何故"という探究を忘れた専門家は細分化した学会[学ぶ会]と研究の自己目的化に成り易い。

Why did Life emerge only on this blue Earth?

The driving force behind SCIENCE's research is to continue to ask "why?" honestly, pursue the story of evolution, and evaluate it by matching it with the current situation.

Experts who forget the question of "why" tend to become subdivided societies [learning groups] and self-purposes of research.

12月の起源論 <成績比較表> 種子彰 TANEKO AKIRA SEED SCIENCE Lab, 2023-10



8. 人間の受精卵から出産まで「進化の経過を再現する」

チベット医書が描く受胎の神秘 メンデル以前に生物の進化系統を受胎〜誕生の経過を経て出生して居る。

The Origin of The Moon and The Earth in Multi-Impact Hypothesis, with Abduction, P-D2-A44, 2020 11-13

12.月の起源論:成績表 Origin of Moon with Abduction by Evolution. Origin of Plate Tectonics, Ocean floor.

TABLE 1. A "Report Card": The Author's Opinion of How Well Five Models of Lunar Origin Satisfy Seven Constraints. Wood (1986)に合本市民 加藤 合本市民の関心や期待

Hypothesis Model ⇒ Evolution results & Items	Intact Capture	Coaccretion	Earth Fission	Collisional Ejection	Differentiative Capture	Multi-Impact Hypothesis by Abduction with Evolution
Lunar Mass, <Mechanism of lunar eccentricity>	B	B	D	I=	B	A, <A→ eccentricity formation>
Earth-Moon angular momentum	C	C	R	B=	C	A, Remnants of Re-44mK
Volatile element depletion	C	C	D	B=	C	A, Collision and ejection, melted
Fe depletion	C	D	B	I	B	A, Impactor is only Mantle.
Oxygen isotopes	B	D	A	B=	B	A, Moon Mantle is Earth's one.
(Similarity of mantle trace element pattern)	(C)	(D)	(A)	(C)	(B)	(A, Earth's Mantle has been ejected into Moon)
Magma ocean	D	C	A	A	B	None, Irrespective of Moon Formation
Physical plausibility	D	C	D	I=	B	A: Perfection Good
Inevitable Mechanism of Collision	F	F	F	F	F	A, Multi-Impact Hypothesis
Moon always faces to Earth	F	F	F	F	F	A: Eccentric Moon rotates with Earth at common center
Origin of plate boundaries	F	F	F	F	F	A, Multi-Impact Hypothesis
Origin of plate tectonics, driving force	F	F	F	F	F	A, Opposite crack by mantle impactor
Circular Pacific arc islands and back-arc basin	F	F	F	F	F	A, Minimization of eccentricity
Inclusion of the Earth's rotation axis	F	F	F	F	F	A, Earth deficiency
Sudden change in moving direction	F	F	F	F	F	A, High latitude collision, Formation of 70's Sea, Initiation of Plate Movement

*For readers unfamiliar with the U.S. educational system: A is the best grade; F (failing) is the worst; F (Incomplete) means all assignments have not been completed and a grade cannot yet be awarded.

Signature: AKIRA TANEKO
P: Models & Math, Impossible.

Abduction to The Origin of the Moon and the Earth in Multi-Impact Hypothesis.

人間は、受精してから誕生するまでに母体の中で、進化の系統樹を辿って誕生してくる。これは古いチベット医学典に記載されていた。つまり、人間の染色体の発見以前に、生物の進化と発展は地球環境の進化と一体のものであった。

- [1] Bills B. G. and Ferrari A. J. (1977) Icarus, 31, 244-259.
- [2] The Giant Impact and the Formation of the Moon P46.Des.1-3, 1998 MONTEREY, CALIFORNIA
- [3] 種子彰 月形成仮説(マルチインパクト仮説) Sep.2014 P1-22 日本惑星科学会 秋季講演会
- [4] Benz W. et al. (1986) Icarus, 66, 515-535., Benz W. et al. (1987) Icarus, 71, 30-45.
- [5] Tony Z Jia1 (2021) M-IS10 P-03 日本地球惑星科学連合 春季講演会

宇宙起源の探究方法,空間量子赤方偏移仮説の探究⇒宇宙論も探究可能.

“何故”万有引力の法則が成立する宇宙空間が実在して,更に質量 vs 慣性質量,作用 vs 反作用が“何故”実在するのかを真摯に探究せずに,・・・赤方偏移と背景輻射を同時に整合したメカニズムで説明できない為,世界中の研究者がBIG-BANGやDARK-MATTER等を導入して空想世界に向かうのか?

Investigation method of cosmic origin, investigation of spatial quantum red-shift hypothesis ⇒ cosmology can also be explored. Without a serious inquiry into "why" it exists.

・・・Because red-shift and background radiation cannot be explained by a coherent mechanism at the same time, do researchers all over the world introduce BIG-BANG, DARK-MATTER, etc. and go to the fantasy world? 種子彰 TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab.2023-10.

万有引力の法則が成立する宇宙空間とは,物質間の相互作用に距離の事で一義性と独立性と重ね合わせの原理と,距離の概念として見込む立体角に比例する事で説明できる.慣性質量が全ての宇宙の反力として解釈すると,作用と反作用として理解可能である. <空間量子赤方偏移仮説[1]>

- (1). 宇宙が閉じて且つエネルギー保存則が成り立つと仮定すると,ランバートの法則で光(拡散進行波)エネルギーが希釈されエネルギー保存則と(周波数保存則)は両立し無い.
- (2). この時,エネルギー保存則を優先すれば,波長が赤方(低エネルギー)側にズレて観測される.地球中心の赤方偏移等方性は,観測地点が地球である事と宇宙が閉じていれば説明可能である.この様に,ハッブルの法則と背景輻射はビッグ・バン仮説以外でも解釈できた.
- (3). 宇宙が閉じているならば,宇宙の彼方に進んだ光が逆方向から地球に向かって来ると考えて,太陽(平均的な恒星)光エネルギー密度が閉じた宇宙半径だけ希釈された時,地球(観測地点)中心の赤方偏移が観測される. ⇒地球中心の赤方偏移の理由の説明.
- (4). 宇宙が閉じて居れば,エネルギー保存法則と $E=h \cdot v$ を考慮すると,希釈されて波長がズレ始める距離 R_s の α の位置では,波長は α^2 倍にずれる.[2017-9Abduction 背景輻射]
- (5). 慣性質量は宇宙全ての(引力の合力)の反作用であり,宇宙が潰れない理由でもある.
- (6). 膨張し無いでハッブルの赤方偏移観測結果を全て説明できる新定常宇宙論が完成した.

比較項目 ＼ 仮説名称	赤方偏移 の原因	地球中心で赤方 偏移の周波数の偏 移が	3° K背景輻射の 説明(証明?) その理由	その他 メリット デメリット
量子赤方偏移 仮説 The Quantum Red Shift Hypothesis	・拡散進行波の エネルギーが空 間で希釈される と,量子効果で波 長が伸びて観測	・観測地点が地 球である ・宇宙が宇宙原 理を満たし等方 均質であるから	閉じた宇宙仮定 ・空間量子赤方 偏移による平均 恒星のスペクト ラムピーク波長 が3° Kにシフト	・宇宙空間が 計算可能 ・膨張による 宇宙距離不変 ・コペルニク ス的大転換
ビッグ・バン 仮説 The Big Bang Hypothesis	・光のドップラ ー効果で波長が 伸びる ・光源の後退速 度に波長が正比 例する	・ビッグバン時 の超高压で空間 が均等に膨張を 続けるため ・地球中心の説 明のため	閉じた宇宙仮定 ・ビッグ・バン 時のなごりで空 間膨張が遠方光 源のドップラー ー効果により波 長がシフトする	・空間が膨張 するメカニズ ムとエネルギー の説明が困難 ・暗黒物質の 仮定が必要

[1]Space Quantum Red-Shift Hypothesis&NewTheory of Non-Expansion Universe 種子

LAPYUTA 計画の検討状況

土屋史紀[1], 村上豪[2], 山崎敦[2], 木村智樹[3], 古賀亮一[4], 木村 淳[5], 埜千尋[6], 益永 圭[2], 堺正太郎[1], 中山陽史[7], 亀田真吾[7], 生駒大洋[8], 成田憲保[9], 鳥海森[2], 鍵谷将人[1], 吉岡和夫[9], 桑原正輝[7], 大内正己[8,9], 田中雅臣[1], LAPYUTA 検討チーム

[1]東北大, [2] ISAS, [3]東京理科大, [4]名大, [5]阪大, [6]NICT, [7]立教大, [8]NAOJ, [9]東大

LAPYUTA (惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡) 計画は、2030 年代初頭に ISAS 公募型小型計画での実現を目指す紫外線宇宙望遠鏡計画である。宇宙での「生命生存可能環境」と「構造と物質の起源」の理解を目指し、4つの科学課題の達成を目的としている。課題1では、宇宙で最も詳細な観測が可能な太陽系内天体のうち、木星の氷衛星の地下海環境と地球型惑星の大気進化に焦点を当て、太陽や磁気圏からのエネルギー流入により時々刻々と変化する惑星・衛星大気の観測を通して、惑星大気・衛星表層の環境と進化の知見を獲得する。課題2ではハビタブルゾーン内にある系外惑星を対象に外圏大気の広がり検出することによって大気の特徴づけを行い、惑星表層環境の推定を目指す。課題3,4の宇宙論・天文学では、銀河周辺物質の構造の観測を通して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し(課題3)、中性子星合体直後の高温ガスの紫外線放射の観測から重元素合成過程の解明(課題4)を目標とする。2023年4月に公募型小型計画の6号機候補に選定され、2023年度内に予定されているプリプロジェクト候補移行に向けた準備を進めている。太陽系内天体では、木星の衛星エウロパの表層から噴出する水ブルームの検討に加え、衛星表層の変性や表層物質の散逸の理解に必要な磁気圏プラズマと表層の相互作用を、金星・火星では、炭素イオン発光を用いた電離圏撮像とD/H観測の検討を進めている。系外惑星の検討では、酸素原子と炭素イオンの観測に加え、表層に海洋を持つハビタブルゾーンの内縁の惑星が経験すると考えられている水蒸気の暴走温室を水素・酸素原子の観測から検出する検討を実施している。科学検討に加え、これまで実施してきた望遠鏡構造や主鏡の検討結果を焦点面装置の設計にフィードバックする作業を進めている。主要な変更点は、系外惑星や暗い銀河を0.5"程度の解像度で観測するために必要となるガイドカメラの視野要求から、望遠鏡をF60からF32に変更したことと、紫外分光器に高分散分光部を追加したことの2点である。高分散分光部では、分散素子にエシェル回折格子を用いることによって、これまで検討してきた中分散分光部(波長分解能0.02nm)の3~5倍の高波長分散を実現し、短期間で大気を検出を可能とするほか、金星・火星大気D/H観測での使用を検討している。LAPYUTAの軌道は、酸素原子や水素原子の観測におけるジオコロナの影響を回避するため、当初は遠地点7,500km、近地点500kmの楕円軌道とすることを検討していたが、地球の放射線帯による影響を回避するため、現在は遠地点2,000km、近地点1,000kmに変更する。ジオコロナと放射線帯の影響を再評価し、放射線シールドや望遠鏡構造設計へ反映させる作業を進めている。

惑星探査を目指した小型ガスクロマトグラフ-質量分析計 (GC-MS) の開発

○岩谷隆光^{1,2}, 菅原春菜³, 浅村和史³, 齋藤義文^{3,1}

¹東京大学, ²ポールウェーブ, ³JAXA

月・惑星・小天体における有機物の分析は、太陽系天体における有機分子進化の理解や生命の痕跡の探索において重要である。Hayabusa2のようなサンプルリターンミッションによって持ち帰られた地球外試料の地上分析は、探査天体についてより詳細な情報をもたらす。一方で、惑星探査においてその場分析が可能となれば、探査対象をより遠方の天体へと広げることができる。このような有機物の直接分析には、ガスクロマトグラフ(GC)によって化合物ごとに分離して質量分析計(MS)によって検出するガスクロマトグラフ-質量分析計(GC-MS)が有用である。GC-MSは一般的に機構が複雑かつ大型で、必要電力量も高いため、探査機への搭載が制限されるが、これまでにVikingやCassini-Huygens、Rosetta、MSL(Mars Science Laboratory)-Curiosityで搭載実績がある。一方で、日本においては探査機搭載用のGC-MSの実績はない。そこで我々は、JAXA宇宙探査イノベーションハブで開発してきた手のひらサイズのGC(図1)にMSを接続する研究に取り組んでいる。

小型GC-MS開発のポイントの一つは、MS測定に必要となるMS内部の高真空を保ちながら、GCから送られてくる分析対象の化合物を効率的にMSに導入することであり、GCとMS接続部(インターフェース)の設計が重要である。本研究では、GC-MSインターフェースの設計指針を得るために、スペースチャンバーに設置した月探査用中性粒子質量分析計(TRITON)に小型GCの出カラインを接続し、インターフェースにおける圧力やMSに導入される化合物量の関係性を評価した結果について報告する。

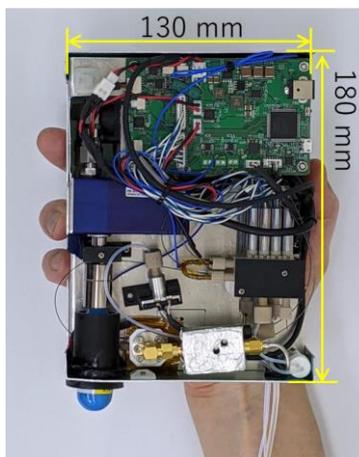


図1 手のひらサイズのスクロマトグラフ

金星の下層雲の形成におけるケルビン波の役割

○今村 剛¹

¹東京大学 新領域創成科学研究科

金星の硫酸の雲はこの惑星の気候システムにとって重要である。雲層は高度約 48~70 km に存在し、上層の雲は光化学的に生成するエアロゾル粒子と考えられ、下層の雲は硫酸蒸気が大気の運動によって運び上げられて凝結したものが多くを占めると考えられている。この下層の雲は変動が大きく、その生成過程はよくわかっていない。

近赤外波長域でのリモートセンシングにより、雲層下部の雲量の大きな変動が観測されている。まず地上観測により、惑星スケールの雲量変動が 4.9-5.5 日の周期で西向きに伝播していることが明らかとなった (Crisp et al. 1991)。その後金星探査機「あかつき」に搭載されている IR2 カメラでこの現象が詳細に観測され、南北に伸びる不連続な雲構造が安定して伝播していることが判明した (Satoh et al. 2017; Peralta et al. 2020)。赤道付近で比較的大きな振幅を持つことと、背景大気より速く西向きに伝播することから、この伝播構造は基本的に赤道ケルビン波によって引き起こされていると考えられる。金星大気大循環モデルにおいて、ケルビン波の伝播に伴って下層雲の雲量が 5.5 日の周期で変動する様子が再現されている (Ando et al. 2021)。しかし観測されているような雲量の不連続構造は再現されておらず、まだ考慮されていない物理プロセスの存在が示唆される。

本研究では、簡略化された雲微物理モデルを用いてケルビン波に伴う大気振動の中での雲粒子の核生成と凝結過程を調べ、雲形成におけるケルビン波の役割を探求する。ここでは特定の空気塊内部の時間発展を解くボックスモデルを用いて、ケルビン波の位相構造の中を東西方向に流れる空気塊が波動がもたらす温度と圧力の変動によって変質する過程を解く。計算された時系列における時刻は、波とともに動く座標系では東西方向の座標に変換される。複数の高度を流れる空気塊について時間発展を計算し、高度方向に並べることにより、緯度-高度断面を構成する。個々の空気塊の中では、波にともなう上昇流によって断熱膨張・温度低下が起こり、これが硫酸蒸気の過飽和をもたらし、核生成に到る。核生成過程としては不均質核生成を考え、雲層の上下にわたって存在することが知られている何らかの未知の微粒子へ硫酸が付着すると仮定する。このとき核生成の自由エネルギー障壁は微粒子上で成長する液滴の接触角に依存し、この値は未知パラメータとなる。過飽和を経て凝結が開始するために雲量には不連続な変化が生じる。鉛直変位による雲生成は波の位相に対する水平移流の過程で生じるため、雲量の不連続な変化は雲量の水平構造として観測される。これが観測された雲の不連続構造の成因である可能性がある。

金星大気における揮発性物質の組成・同位体比 時間進化の推定

○天田航¹、玄田英典¹

¹東京工業大学 地球生命研究所

金星は地球と同じ岩石惑星で、大きさはほぼ同じであるが、表層環境は大きく異なっている。これは惑星形成後の進化過程の差異を表している。したがって、現在の金星大気の組成・同位体比は金星形成時の状態や、現在に至るまでの散逸・供給史を表す重要な指標である。特に金星の地球より約100倍高い、D/H(水素と重水素の比)は過去の金星において大規模な水素散逸が発生したことを示唆している(e.g. Donahue et al. 1982)。また、この水素散逸にともない希ガスの同位体比も変化すると考えられており、今後の探査の対象になっている(e.g. Garvin et al. 2022; Gillmann et al. 2009)。しかし、水素散逸・供給の過程は難解であり、先行研究においてもパラメータ(分別係数や脱ガス率)を恣意的に用いている感が否めない(e.g. Grinspoon 1993)。

したがって、本研究では物理過程がよくわかっている熱的散逸の一種である流体的散逸に注目した。具体的には水素の散逸過程として流体的散逸を、水素の供給過程として隕石による供給を用いて、金星形成時から現在に至るまでの水素散逸・供給過程を計算した。そして、現在の金星大気における水蒸気量とD/Hを説明するような散逸・供給過程を満たすようなパラメータ(大気温度・水の総供給量)が存在するのかを調べた。また、求めたパラメータを用いて希ガスについても同様の計算を行った。

計算の結果、現在の金星の条件を満たすような金星の散逸・供給史を再現できた。この時の水素の時間進化を見てみると、形成時から大規模散逸し、金星形成時に獲得した水は全て散逸することがわかった。また、D/Hは水素の大規模散逸時はほとんど変化せず、形成時の水がなくなった後変化し、現在の散逸と供給の釣り合いによって決定されることがわかった。希ガスについてはNeとArは初期物質の約3割が散逸し、KrとXeはほぼ散逸しないことがわかった。同位体比の変化については約3%と限定的であることがわかった。これより現在の金星の同位体比を満たすためには、金星形成時の物質として太陽由来物質のような希ガス同位体比が高いものが必要であることが示唆される。

これらの結果から水素ではなく、希ガスの現在の大气組成や同位体比を調べたとき、形成時からの金星大気の進化をより具体的に理解することができるのではないかと期待される。

金星大気の短周期波動と大気大循環

○高木 征弘¹, 安藤 紘基¹, 今井 正堯², 杉本 憲彦³, 松田 佳久⁴

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

⁴東京学芸大学教育学部

紫外線を用いた雲の観測により, 金星大気の雲頂上端付近 (高度約 70 km) で, 東西波数 1, 周期約 4 地球日 (以下, 地球日を日と表記する) および 5 日をもつ惑星規模波動の存在が示唆されている (Del Genio and Rossow, 1990)。4 日波の東西位相速度は東西風より速く, 5 日波のそれは東西風より遅いため, それぞれ赤道ケルビン波・中緯度ロスビー波と呼ばれる。周期性からケルビン波と雲の Y 字模様との関連が指摘され, Venus Express や「あかつき」の観測により波に伴う水平風分布が明らかにされつつある (Kouyama et al., 2013; Imai et al., 2019)。東西風が遅い (速い) 時期にケルビン波 (ロスビー波) が出現しやすい傾向があることから, 地球の成層圏 QBO に似た東西風変動のメカニズムが提案され (Kouyama et al., 2015), 大気スーパーローテーションとの関連も指摘されているが, 波の成因や空間構造についてはほとんどわかっていない。

本研究では, 大気大循環モデル AFES-Venus (Sugimoto et al., 2014; Suzuki et al., 2022) を用いて, これらの短周期惑星規模波動の生成メカニズムと力学的性質を調べた。赤道域における東西風の周期解析をおこなった結果, 高度 65-80 km に 3.3 日, 25-80 km に 5.7 日のシグナルがみられた。中高緯度の 40-70 km では約 7 日のシグナルも顕著であった。周期 3-4 日の帯域フィルタで 3.3 日周期の擾乱を取り出し, 赤道 70 km の東西風を用いてコンポジット解析を行った。位相速度と空間構造から, 3.3 日波の低緯度の構造は東西波数 1・鉛直波長約 8 km のケルビン波で, 観測される 4 日波に対応すると考えられる。中緯度にはロスビー波的な渦が存在し (中緯度での位相速度は平均東西風より遅い), 臨界緯度をまたぐ顕著な赤道向き運動量輸送がみられることから, 3.3 日波は RK 不安定によって雲頂付近で励起されていることが示唆される。周期 5.7 日の擾乱についても同様の解析を行ったところ, 赤道ケルビン波と中高緯度ロスビー波の RK 不安定によって励起される東西波数 1 の波であることが示唆された。ケルビン波は臨界高度によってブロックされるため雲頂では観測されない。一方, 中高緯度ロスビー波は高度 45-70 km の広い領域で傾圧不安定波的な構造をもち, 顕著な極向きの運動量と熱の輸送を伴う。ロスビー波の高度 70 km での水平風速は 10-15 m/s で, 水平構造は 5 日波の観測結果と整合的である。

講演では他の周期の擾乱についても解析結果を示し, それらの励起メカニズムや力学的性質, 観測との対応, 5.8 日波と 7 日波によって作られる下部雲層の赤道ジェットおよびその準周期的な時間変動などについても議論したい。

気象衛星ひまわり 8 号の月惑星科学利用

○西山学^{1,2}, 宇野慎介^{1,3}, 竝木則行^{1,2,4}, 杉田精司¹, 鈴木雄大⁵, Thomas Müller⁶

¹ 東京大学, ² 国立天文台, ³ 天文学教育研究センター, ⁴ 総合研究大学院大学, ⁵ 宇宙科学研究所, ⁶ Max Planck Institute for extraterrestrial Physics

近年、日本の静止気象衛星ひまわり 8 号が宇宙望遠鏡として天文学・惑星科学的に有用であることが示されている。ひまわり 8 号はその地球観測の際に西から東へスキャンを行い、その際に地球外に僅かに伸びたスキャン範囲内に月をはじめとした様々な天体が写り込むことが知られている。ひまわり 8 号の観測では、10 分に 1 度の頻度で地球全体をスキャンしており、その高頻度観測により天体の変光が観測されている。例えば、変光星であるベテルギウスの大減光がひまわりデータから測定され、その赤外スペクトルからベテルギウス周辺で塵の量が増加したことが、その大減光イベントの一因になったことが明らかになった[1]。また、月惑星も頻繁に観測され、例えば、2015 年の運用開始以来 900 回以上も月が写り込んでいる。ひまわり 8 号搭載可視赤外放射計(AHI)は地球赤道上で 2 km 以上もの高空間分解能をもち、赤外バンドにおいては解像度が月面上で 23 km/pix に及ぶ。更に、AHI は 6-14 ミクロンの赤外波長帯を 9 バンドでカバーしており、これまでの宇宙空間での月周回探査では用いられていない波長を含み、月科学の新たなデータとして有用である。その上、他の太陽系天体も撮像されているため、今後の深宇宙惑星探査機のキャリブレーション用データとしても活用できる可能性もある。そこで本研究では、AHI で撮像された赤外月惑星画像をアーカイブ化し、それらを用いた惑星科学的研究を試みた。

これまでの研究ではまず月データを抽出し、月表層環境の解析に応用した[2]。まず、2021 年末までの全ひまわり標準データ(HSD)から月画像を抽出し、その輝度値から月面上での輝度温度を推定した。NASA の月周回探査衛星 Lunar Reconnaissance Orbiter 搭載の放射計 Diviner での観測値と比較したところ、AHI のバンド 11 (8.40–8.78 μm) と Diviner のチャンネル 5 (8.38–8.68 μm) での輝度温度が非常によく一致した。月の正午前後はカウントが飽和しているものの、AHI のデータが他の探査機との比較に十分利用可能であることが示された。さらに、観測値と月の岩石・砂の温度シミュレーションの比較から、月表面の凹凸や岩石量の制約を行った。朝・夕面においては、HSD の解像度以下のスケールの凹凸によって太陽入射角が不均一になり、輝度温度の波長依存性が生じる。実際にアポロ着陸地点で観測された平均凹凸傾斜角を用いたシミュレーションを行ったところ、数値計算結果は HSD と 10 %以内で一致することが分かった。一方、夜面においてレゴリスは岩石より熱慣性が小さく、両者の温度差は夜面では 100 K に及ぶ。岩石と砂の混合モデルと観測値の比較から、赤道(緯度 $\pm 10^\circ$ 以下)と Tycho クレーターの岩石量が推定でき、従来の月観測値とも一致した結果が得られている。

更に現在、2015 年から 2021 年末までの太陽系天体データのアーカイブ化を行っている。全データ解析の結果、水星・金星・火星・木星のスペクトルが各 100 回以上取得できることが明らかとなった。これにより太陽位相角や時期に応じた天体の赤外スペクトルの変化を観測できることが示唆された。特に金星においてはバンド間の放射輝度の差も十分議論可能な S/N 比での観測が可能である。これらのデータは BepiColombo の MERTIS などの赤外放射計の機器較正に十分利用可能である。本発表では、更なる惑星科学への応用も含めた AHI の惑星科学的有用性についても議論する。

[1] Taniguchi D. et al. (2022), The Great Dimming of Betelgeuse seen by the Himawari-8 meteorological satellite. *Nat Astron* 6, 930–935 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01680-5> [2] Nishiyama G. et al. (2022) Utilization of a meteorological satellite as a space telescope: the lunar mid-infrared spectrum as seen by Himawari-8. *Earth Planets Space* 74, 105 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01662-x>

木星・土星のカオス励起による地球型惑星と小惑星帯の形成：太陽系内部の包括的な力学モデル Terrestrial planet and asteroid belt formation by Jupiter-Saturn chaotic excitation: A comprehensive dynamical model for the inner solar system

○ソフィア リカフィカ パトリック(Patryk Sofia Lykawka)¹, 伊藤 孝士(Takashi Ito)²

¹ 近畿大学 総合社会学部 (School of Interdisciplinary Social and Human Sciences, Kindai University)

² 国立天文台天文シミュレーションプロジェクト (National Astronomical Observatory of Japan)

The solar system's terrestrial planets formed by accretion of several small objects within the inner protoplanetary disk ~4.5 Gyr ago. Although previous works have found that the formation of Venus and Earth was common in this paradigm, forming a small-mass Mars requires the disk mass to be concentrated within ~1.5 au. There is a consensus that such a narrow disk was needed; otherwise, too massive Mars would form. The asteroid belt also holds crucial information about the origin of this narrow disk. Several scenarios may produce a narrow disk, such as Jupiter's inward-then-outward migration during the disk gas phase, giant planets' instability, and planetesimal-embryo pile-up. However, simultaneously replicating the orbits and masses of the four terrestrial planets and the inner solar system properties remains elusive. Here, we found that the chaotic excitation of disk objects generated by a near-resonant configuration of Jupiter-Saturn can create a narrow disk, allowing the formation of the terrestrial planets and the asteroid belt consistently. Our simulations demonstrated that this mechanism could typically deplete a massive disk beyond ~1.5 au on a 5–10 Myr timescale. The resulting terrestrial systems reproduced Venus, Earth and Mars in orbit-mass space with unprecedented detail. Adding an inner region disk component within ~0.8–0.9 au boosted Mercury formation, allowing several terrestrial systems to form analogs of the four terrestrial planets simultaneously. Our terrestrial systems also often satisfied additional constraints in the inner solar system: Moon-forming giant impacts occurring after a median of ~30–55 Myr, late impactors represented by disk objects formed within 2 au, and effective water delivery during the first 10–20 Myr of Earth's formation. Finally, our model asteroid belt explained for the first time three critical properties of the asteroid belt simultaneously: orbital structure (including the puzzling concentration at $i < 20$ deg), tiny mass, and taxonomy (S-, C- and D/P-types).

※この研究成果は Scientific Reports 13, 4708 (2023)に掲載されました。

<https://www.nature.com/articles/s41598-023-30382-9>

遠方のカイパーベルト軌道構造の究明：地球クラス の未知の惑星は存在する？

Investigating the orbital structure of the distant Kuiper Belt: Is there an Earth-like planet out there?

○ソフィア リカフィカ パトリック(Patryk Sofia Lykawka)¹, 伊藤 孝士(Takashi Ito)²

¹ 近畿大学 総合社会学部 (School of Interdisciplinary Social and Human Sciences, Kindai University)

² 国立天文台天文シミュレーションプロジェクト (National Astronomical Observatory of Japan)

The solar system has eight planets. However, it is likely that more than eight planets formed during the early solar system ~4.5 Gyr ago. Although these primordial sub-Earth-to-Earth-like planets were probably lost via collisions with other forming planets or ejected from the solar system, we examine the hypothesis that at least one of such planets has survived in the outskirts of the outer solar system today. The orbits of trans-Neptunian objects (TNOs), small bodies located beyond Neptune, can indicate the existence of such an undiscovered planet. Here, we used extensive N-body computer simulations to investigate the effects of a hypothetical Kuiper Belt planet (KBP) on the orbital structure of TNOs in the distant Kuiper Belt beyond ~50 au. We used observations to constrain model results, including the well-characterized Outer Solar System Origins Survey (OSSOS) and its Survey Simulator. Our best results indicate that an Earth-like planet (an object with mass ~1.5–3 Earth masses) located on a distant (semimajor axis $a \sim 250\text{--}500$ au, perihelion $q \sim 200$ au) and inclined ($i \sim 30$ deg) orbit can explain three fundamental properties of the distant Kuiper Belt: a prominent population of TNOs with orbits beyond Neptune's gravitational influence (i.e., detached objects with $q > 40$ au), a significant population of high- i objects ($i > 45$ deg), and the existence of some extreme objects with peculiar orbits (e.g., Sedna). It is worth noting that these properties are difficult to explain in current models of the solar system and Kuiper Belt formation. Furthermore, the proposed KBP is compatible with the existence of identified Gyr-stable TNOs in the 2:1, 5:2, 3:1, 4:1, 5:1, and 6:1 Neptunian mean motion resonances (i.e., resonant timescales comparable to the age of the solar system). Here, we considered the constraint of these stable populations, often neglected in other studies. Finally, we predict the existence of an Earth-like planet and several TNOs on peculiar orbits in the outer solar system. These new TNOs can serve as observationally testable signatures of the putative planet's perturbations.

※この研究成果は The Astronomical Journal 166, 118 (2023)に掲載されました。

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/aceaf0>

地球型惑星大気における 非温室効果ガスの温室効果の再考

○ 瀧哲朗¹, 黒川宏之¹, 藤井友香², 青木紘介³

¹ 東京大学, ² 国立天文台, ³ 東京工業大学

温室効果ガスは惑星表層や大気が放射する赤外線を吸収することで惑星気候の温暖化に寄与するが、 N_2 , CO , O_2 などの非温室効果ガスは赤外線に対して透明なので温暖化に直接は寄与しない。しかしながら、大量の非温室効果ガスが存在する環境では大気全圧が上昇し、温室効果ガスの吸収線の線幅が広がる。このとき大気はより広い波長域の赤外線を吸収するようになるため、非温室効果ガスが間接的に温暖化を引き起こすことになる。例えば、現在よりも高い N_2 分圧が初期地球を温暖に保っていたという説が提案されている (Goldblatt et al., 2009)。

一方で、大気中の非温室効果ガスが増えるとガス分子が主星からの可視光を散乱する効果も強まる。これは大気に供給されるエネルギーを減らすことを意味するので、惑星気候の寒冷化につながる。すなわち大量の非温室効果ガスは、大気全圧を上昇させることで気候を温暖化させる効果と、惑星のアルベドを上昇させることで気候を寒冷化させる効果の両方をもつ。実際に、非温室効果ガスによって惑星気候が寒冷化するというケースも報告されている (Wordsworth & Pierrehumbert, 2013)。

しかし Goldblatt et al. (2009) と Wordsworth & Pierrehumbert (2013) を比較すると、類似のパラメータ設定において非温室効果ガスが温暖化と寒冷化に寄与する結果をそれぞれ示しており、両者の計算結果には乖離が見られる。この乖離は計算モデルの中で使われている主星光度や相対湿度プロファイル、輻射輸送計算手法の違いなどによって生じている可能性があるが、その機構はまだ明らかではない。そのため、非温室効果ガスの惑星気候への寄与も正確には理解されていないというのが現状である。本研究では1次元の惑星気候モデルを用いて異なる計算設定での結果の比較を行うことで非温室効果ガスが気候に与える影響をあらためて評価し、惑星気候の温暖化および寒冷化が起こる条件を再考する。

水素・ヘリウム・水蒸気大気を纏った系外岩石惑星の進化：大気散逸と脱ガスの効果

○小林一生¹, 黒川宏之², 奥住聡¹

¹東京工業大学 理学院地球惑星科学系,

²東京大学 総合文化研究科広域科学専攻広域システム科学系

トランジット観測によって、地球と海王星の間の質量を持ち、軌道周期が短く、惑星半径が 1.5 地球半径以上の低密度低質量惑星 (LMLD 惑星) が多数確認されている。これらの惑星は、初期に水素・ヘリウム主体の原始惑星系円盤ガスを取り込んで、大気として保持していると考えられてきた (一次大気; Fulton et al. 2017)。さらに短周期 LMLD 惑星の大気は、水素とヘリウムの拡散分離による選択的な水素散逸を経て、ヘリウムが支配的となる可能性が示唆されていた (Hu et al. 2018)。しかし、最近の研究では強い主星の放射に晒されている短周期 LMLD 惑星から、散逸するヘリウムが検出されなかった (Kasper et al. 2020)。この観測結果は、短周期 LMLD 惑星大気の円盤ガス起源説と矛盾する。

そこで本研究では、惑星内部に選択的に溶解する円盤ガス由来の水素が、短周期 LMLD 惑星の大気を補充する可能性を探った。マグマオーシャン中の酸化鉄と水素の反応による水の生成が、初期に惑星が取り込む水素原子の総量や大気の散逸フラックスに与える影響も調べた。1次元内部構造モデルを用いて、恒星からの XUV 照射によって引き起こされる大気散逸と惑星内部からの脱ガスの効果を考慮した、惑星の進化計算を行った。

本講演ではまず、水素とヘリウムのみを考慮した場合のモデル計算結果を紹介する。計算の結果、短周期 LMLD 惑星の大気は、一次大気から大気散逸過程を経て脱ガス水素主体の二次大気に変化することが分かった。さらに、惑星内部に溶解するヘリウムが水素より少ないため、脱ガス主体の二次大気では一次大気と比べて、大気中のヘリウム存在度が低くなることが分かった。このことは、短周期 LMLD 惑星から散逸するヘリウムが検出されなかった観測結果を説明する可能性がある。

さらに、水を含んだモデル計算に基づいた惑星大気進化の計算結果を紹介し、惑星から散逸するヘリウムの観測結果と本研究の計算結果を比較して議論を行う。短周期 LMLD 惑星の形成と進化についても議論する。

系外惑星大気赤外線分光サーベイ衛星計画 *Ariel-Japan* 活動報告

○生駒大洋¹、塩谷圭吾²、成田憲保³、伊藤祐一¹、大野和正¹、木村真博¹ + *Ariel-Japan*

¹国立天文台、²宇宙科学研究所、³東京大学

Kepler や TESS 等の系外惑星サーベイによって数千個もの惑星が太陽系外に発見され、惑星系の存在の普遍性が実証された。それだけでなく、半径・質量・軌道周期といった惑星の物理的特性に関する多様性が明らかになり、惑星系の形成および進化に関する我々の理解に大きな影響をもたらした。系外惑星科学の次なるマイルストーンは、そのような物理的特性に加えて、化学的・物質科学的特性に関する情報を観測的に集約し、惑星および惑星系の多様性の実態をより正しく把握することである。

そのために期待されるのが系外惑星大気赤外線サーベイ衛星計画 Ariel (ESA-M4 ミッション) である。Ariel は、トランジットする系外惑星に対して赤外分光観測 (波長範囲は 1.1 μ m - 7.8 μ m) を行い、主に惑星大気の特徴を明らかにすることを目的としている。打ち上げは 2029 年を予定している。汎用望遠鏡であるジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) とは対照的に、Ariel は系外惑星観測専用の分光観測宇宙望遠鏡である。その専用性を活かして、約 1000 個もの系外惑星に対して大気特性を調査する計画である。多様な系外惑星の特徴および形成/進化過程を明らかにするには、多数の惑星に対する統計的な調査によって法則性を見つけ出し、それを理解することが必要であり、この専用望遠鏡が威力を発揮すると期待される。また、競争的に観測時間を取得する JWST と異なり、Ariel では長い観測時間の確保も可能であり、科学的に興味深い系外惑星に対して詳細な特徴づけを行うことも可能となる。

サイエンス提案・検討および赤外線分光器の光学素子の開発・提供、地上望遠鏡観測による貢献を条件に日本が Co-PI 国として参入することが認められることになっており、すでに、JAXA 宇宙科学研究所の所内事業として正式に承認された。本講演では、Ariel-Japan の活動状況および検討しているサイエンスケースについて紹介する。

P-112

Impact of Magma Redox States on Super-Earth Atmospheres: Unveiling the Connection with Atmospheric Composition スーパーアースの大気へのマグマの影響：岩石の酸化還元状態と大気組成との関係

○Chanoul Seo^{1,2}, Yuichi Ito², and Yuka Fujii²

¹ 総合研究大学院大学, ² 国立天文台

Super-Earth is one of the most common exoplanets with a few Earth radii. Its mass and size can correspond to two internal structures: a thicker atmosphere on the silicate core and a thinner atmosphere with an H₂O-rich interior. The chemical reaction between the core and atmosphere affects the atmospheric composition significantly because the core dominates the mass of super-Earth. Therefore, spectral observation can give us information on their interior, which helps us to resolve the bulk composition degeneracy through atmospheric characterization. For the super-Earth with a thick atmosphere and silicate core, previous works have found that if the surface temperature is high enough to maintain the molten silicate (i.e., magma), the reaction between the atmosphere and magma produces atmospheric H₂O (Kite et al. 2020). However, the atmospheric H₂O also can be present in the H₂O-rich case through the accretion. Other radiatively active elements, like carbon, may give a better clue to the bulk compositions. To spectrally handle the degeneracy problem, we study the atmospheric compositions of magma-bearing super-Earths with diverse magma redox states and other planetary parameters (Mass, Radius, Equilibrium temperature, Atmospheric structure) by assuming the chemical equilibrium state and nebula gas accretion. In addition to the atmospheric H₂O fraction - carbon fraction relation that was the focus of our last presentation, we focus on how the atmospheric H-C-O ratio varies with the redox states and planetary parameters. We show the atmospheric H₂O fraction (i.e., O/H ratio) can reach a few tens of percentages depending on the magma redox state. The atmospheric C/H ratio shows a mild (~ few tens of times) increase from the nebula value and is proportional to a few powers of the atmospheric H₂O fraction. We discuss the role of solubility differences among C and H-bearing species as the origin of this trend. The atmospheric C/O ratio is small (up to one-hundredth) and decreases with the increasing atmospheric O/H ratio. We also discuss the mechanisms other than the solubility that can affect the carbon distribution in super-Earths.

地球型系外惑星大気観測に向けた、外圏酸素原子数密度分布と検出可能性の検討

岸田 真於¹, 中山 陽史¹, 桑原 正輝¹, 小玉 貴則², 村上 豪³, 成田 憲保², ○亀田 真吾^{1,3},
生駒 大洋⁴, 寺田 直樹⁵, 塩谷 圭吾³

¹立教大学, ²東京大学, ³JAXA, ⁴国立天文台, ⁵東北大学

現在まで数多くの太陽系外惑星が発見されており、中にはハビタブルゾーン(液体の水が惑星表面に存在可能な領域)に位置する地球型惑星も存在する。2021年に打ち上げられた James Webb Space Telescope (JWST)は、赤外線観測により地球型系外惑星の下層大気理解を広げると期待されている。一方で紫外線による高層大気観測は地球型惑星において実績がなく、地球型惑星大気の進化の理解に向けて、重要な課題として残されている。

低質量星は進化が遅く、長い時間スケール(~Gyr)で強い XUV を放射するため、低質量星周りのハビタブルゾーンに位置する系外惑星は地球以上の XUV 放射を受ける。この強い XUV を受けて系外惑星大気中の原子分子が反応すると、電離熱や解離熱による加熱で高層大気は大きく膨張すると考えられる。膨張した大気は紫外線を多く吸収散乱するため、トランジット分光観測を行うと恒星からの紫外線放射は大きく減光して見える。

我々は、低質量星周りのハビタブルゾーンにある地球型系外惑星の高層大気観測を目的とした、紫外線分光器を開発し、検出可能性を検討している。この分光器では、酸素が地球大気的主要な成分であることから、酸素原子輝線(約 1305 Å 付近の三重線)でトランジット分光観測を行う。酸素原子輝線の減光が検出された場合、惑星大気中に酸素原子が存在すると推定できる。また、外気圏の酸素原子数密度は大気の組成や温度、力学的状態に強く依存するため、トランジット深さを調べることで、外気圏の加熱・冷却過程を知ることができる。このように紫外線によるトランジット分光観測は、惑星大気の組成や進化の理解に繋がる。

本研究では、実際に地球型惑星が発見されている M 型星 TRAPPIST-1 周りのハビタブルゾーンに、地球と同じ下層大気組成と質量・半径をもつ惑星が存在する場合を仮定し、強い XUV によって広がる外気圏における酸素原子数密度分布推定と、トランジット分光観測時の酸素原子輝線のトランジット深さを見積もった。数密度分布の計算には Johnstone et al.(2019), Tian et al.(2008)の 1次元熱圏大気モデルを使用し、大気は球対称であると仮定した。外気圏における酸素原子数密度は、Johnstone et al.(2019)では熱圏における惑星中心からの距離と数密度の関係を外挿し、Tian et al.(2008)ではチェンバレンモデルを用いて求めた。その結果、トランジット中心における酸素原子輝線 3 波長分の減光率は、Johnstone et al.(2019)のモデルと Tian et al.(2008)のモデルで大きく異なることが分かった。また紫外線分光器の性能を考慮し、系外惑星大気中の酸素原子の検出可能性と観測から得られる大気散逸モデルへの示唆を議論する。

表面水分布を考慮した TRAPPIST-1d と e の気候

○小玉 貴則¹、Martin Turbet²

¹東京大学、²CNRS LMD/IPSL

太陽型星周りにおいて、惑星表面の水分布によりハビタブルゾーンは大きく影響を受けることがわかっている。TRAPPIST-1 のような低質量星周りに関して、ハビタブルゾーン付近に位置している地球型惑星は潮汐固定状態になっていると考えられ、恒久的な昼面と夜面を持つことが予想される。それら潮汐固定惑星の気候状態は、太陽型星周りのハビタブル惑星の気候状態と大きく異なり、恒星直下点付近における雲の存在が潮汐固定地球型惑星のハビタビリティに重要であると先行研究より示されている。

雲の存在と表面の水分布は密接に関係していることは、これまでの太陽型周りの地球型惑星における気候においてわかっている。よって、低質量星まわりの潮汐固定惑星における、水分布と惑星気候システムの間関係を明らかにするために TRAPPIST-1 d と e を例に、3次元大気大循環モデル(LMD GCM)を用いて、気候数値実験を行った。主星として TRAPPIST-1 のスペクトルを用いて、Agol et al. (2021)に基づいた惑星パラメータと 1 [bar]の N₂ 背景大気を仮定した TRAPPIST-1 d と e を模し、恒星直下点を中心に様々な表面水分布を仮定した。

気候数値実験の結果として、TRAPPIST-1 e に関して、水を安定に維持できる領域が昼面のかなり限られた領域に限定されることがわかった。加えて、大きな惑星放射を放つことのできるような乾燥した惑星であっても、TRAPPIST-1 d の環境では安定に液体の水を維持することができないことがわかった。このことから、TRAPPIST-1 周りのハビタブルゾーンの内側境界は d と e の間に位置しており、今後の TRAPPIST-1 d の観測において、水の流体的散逸や観測的なハビタブルゾーンの検討ができる可能性があることが示唆された。

高温星周辺のホットジュピターTOI-1518bの 軌道歳差観測

○渡辺紀治¹、成田憲保¹、堀安範²

¹東京大学、²アストロバイオロジーセンター

表面温度が 7000K 以上の恒星(高温星)周辺を短周期で公転する巨大ガス惑星(ホットジュピター)は、今現在まで約 20 個発見確認されており、主星自転軸に対して惑星公転軸(惑星軌道傾斜角)が傾いている傾向である。また、高温星は早く自転する傾向があり、扁平しやすい。このような惑星系は、惑星公転軸が主星自転軸を中心に歳差運動する現象、即ち、惑星軌道歳差が生じる。この惑星軌道歳差により、恒星面の前を通る惑星トランジット軌道がずれ、恒星面中心から惑星トランジット軌道の見かけの距離(インパクトパラメーター) b が変化する。

晩期 A 型星(表面温度約 7300K)周辺を公転するホットジュピターTOI-1518b は、高温星周辺のホットジュピターの中でも恒星面の端をトランジットする数少ない惑星系である。中心星の自転速度が速く($\sim 85\text{km/s}$)、主星自転軸に対してほぼ極軌道($\sim 120\text{deg}$)であるため、惑星軌道歳差が起きうる。この惑星軌道歳差により、トランジット軌道がさらに恒星面の端の方に移動し、TOI-1518b のトランジットが十数年後に観測できなくなる可能性がある。

本研究では、宇宙望遠鏡 TESS で 2019 年と 2022 年に取得した TOI-1518b の測光トランジットデータと、2020 年に高分散分光器 CARMENES と EXPRES で取得した TOI-1518b の分光トランジットデータから、各年の b の値を算出し、TOI-1518b に対する軌道歳差モデルを作成した。その結果、TOI-1518b のインパクトパラメーターの値が減少する傾向となり、トランジット軌道が恒星面中心の方向に移動していることを明らかにした。

惑星軌道歳差を捉えた惑星系は本研究の TOI-1518b で 4 例目である。本講演では、TOI-1518b の軌道歳差の挙動、及び、軌道歳差モデルから得たパラメーターについて議論を行う。

2023 年秋季講演会実行委員会 (LOC)

藪田ひかる (実行委員長)、宮原正明、小池みずほ

2023 年秋季講演会プログラム委員会 (SOC)

道上達広、百瀬宗武、諸田智克、木村淳、阿部新助、玄田英典、小池みずほ (LOC 兼任)、宮原正明 (LOC 兼任)、藪田ひかる (LOC 兼任)