

日本惑星科学会
2021年秋季講演会予稿集

2021年9月16日-18日

名古屋市立大学田辺通キャンパス宮田専治記念ホール*
+オンライン

主催：日本惑星科学会

* COVID-19 の感染拡大を受けて、オンラインのみの実施に変更されました。

周白色矮星円盤の重元素降着率から探る惑星残骸物質の組成と起源

○奥谷彩香^{1,2}, 井田茂², 兵頭龍樹³¹東京工業大学 地球惑星科学系, ²東京工業大学 地球生命研究所, ³ISAS/JAXA

白色矮星は、元素レベルという先例のない詳細さで系外惑星/小惑星のバルク組成に迫ることを可能にする観測ターゲットとして、近年注目を集める。その約半数は、大気にFe, Si, O, Cなどの重元素を含む(Zuckerman et al. 2010)。さらに、その周囲におけるダストと蒸気の円盤の存在が赤外超過や輝線観測から分っている。これらはかつて星周りに存在した小型惑星を起源とし、星近傍で潮汐破壊された小型惑星が降着円盤を形成していると考えられている(e.g., Farihi 2016)。

従って、白色矮星の観測から小型惑星の物理・化学情報を引き出すためには、降着円盤についての理論モデルが不可欠である。円盤から星表面への降着率の観測値は、 10^6 – 10^{11} g/sをとる。一方で、Poynting-Robertson (PR) 効果による降着率には $\sim 10^8$ g/sという理論上限値(Rafikov 2011)が存在し、高い降着率を説明できていない。そこで、Metzger et al. (2012) はダストとその昇華から生じる蒸気の共存に注目した。昇華がおこると、ある軌道半径で瞬時にダストが蒸気となるのではなく、両者が共存する領域が現れる。観測からもこの共存が示唆されており、共存を利用して蒸気からのガス抵抗によってダストの降着を加速させることで、高降着率の再現可能性を示した。しかし、厳密な共存の取り扱いが数値計算的に困難であるため、Metzger et al. (2012)ではある軌道半径で固体が瞬時に昇華すると単純化し、凝縮を無視することで「共存」する系を取り扱った。この暫定的な仮定ゆえ、現実的な周白色矮星円盤モデルは未完成である。

本研究ではこの問題解決に挑み、厳密に昇華/凝縮を解いてダストと蒸気の整合的な共存下における円盤進化および降着率を調べた。具体的には、Hyodo et al. (2019; 2021)の手法をもとに、ダスト及び蒸気の移流・拡散方程式に蒸気圧と飽和蒸気圧に基づく昇華/凝縮計算を組み込み、周白色矮星円盤中での相変化を整合的に解くことを初めて可能にした。また、正確な降着率評価に向けて、ダストのback-reactionや蒸気中のダスト拡散の効果も考慮した。

新たに構築したモデルを用いて計算した結果、昇華ライン外側での蒸気密度は飽和蒸気圧で決まるごく低い値をとることから、シリケイト1成分で構成される円盤では、先行研究で提案された暴走降着は全く起こらないことがわかった。また、昇華ライン近傍で蒸気は局所的に円盤外側へと流れて、昇華ラインすぐ外側で再凝縮しダストとして蓄積していく。このため、シリケイト1成分の円盤からの降着率は、PR効果による降着率の上限値よりもさらに1桁程度減少する($\sim 10^7$ g/s)ことを明らかにした。さらに、シリケイトよりも低い昇華点をもつ成分(たとえば氷など)の定常的な蒸気円盤をシリケイト円盤に加えた場合についても降着率を調べた。その結果、ガス抵抗や拡散によってダストの降着が促進されることで、高い観測値を再現できることを示した。特に、水蒸気量に依存して降着率は多様な観測値を再現可能である。以上の結果は、 $\sim 10^7$ g/s以上の降着率が観測されている多数の白色矮星系において、円盤の起源となった小型惑星に水氷などの揮発性物質が含まれていた可能性を示唆する。揮発性物質の存在は、小型惑星のバルク組成のみならず形成位置の貴重な手がかりとなる。ひいては、白色矮星の起源である中質量星まわりの小惑星帯や惑星系の空間分布にも示唆を与えうることが期待される。

木曾 105 cm シュミット望遠鏡 Tomo-e Gozen を用いた 微小地球接近小惑星の高時間分解撮像観測

○ 紅山仁¹, 酒向重行¹, 大澤亮¹, 瀧田怜¹, 小林尚人¹,
奥村真一郎², 浦川聖太郎², 吉川真³, 臼井文彦³, 吉田二美^{4,5}

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

近日点距離が1.3 au 未満で定義され地球に接近する軌道をもつ天体を地球接近小惑星 (Near-Earth Objects, NEO) という。NEOの多くは火星-木星間のメインベルトから軌道進化したと考えられており、その過程においては太陽や惑星の重力に加え、太陽輻射に起因して小惑星の軌道や自転状態を変化させる非重力効果が重要となる。非重力効果の一つであるYORP効果は直径100 m 以下の微小天体に強く作用し、軌道進化に比べて短いタイムスケールで自転周期を変化させる[1]。高速自転小惑星には強い遠心力が働くため、YORP効果により自転加速され構造を維持できなくなる臨界自転周期に達した天体は変形や破壊を経験する。すなわち非重力効果や強度を反映した微小天体の自転周期は、小天体の力学史を理解する上で重要な物理量である。しかし小さく暗い天体の観測は難しく直径100 m 以下のNEO (微小NEO) を観測した先行研究では長時間露光による高速自転の見逃しを危惧している[2]。微小天体の真の自転周期分布を得るためには、系統的な高時間分解観測が不可欠である。

我々は東京大学木曾観測所105 cm シュミット望遠鏡に搭載されたTomo-e Gozenカメラ[3]を用いた2 fps 観測により、推定直径3 – 86 m の51天体の微小NEOの高時間分解撮像観測を実施した。取得した光度曲線から周期1分以下の高速自転小惑星11天体を含む32天体の微小NEOの自転周期の推定に成功した(図)。本研究で得た自転周期分布は先行研究に比べて周期1分以下の高速自転小惑星の割合が高く、先行研究では高速自転を十分に検出できていないことが示された。一方、本研究で得た自転周期分布を外挿すると51天体観測した場合に9天体で周期10秒以下の高速自転が期待されるが、2 fpsの高時間分解観測を行っても周期10秒以下の高速自転は1天体でしか検出されなかった。系統的な高速観測により高速自転する微小NEOの欠如を示したのは本研究が初めてである。さらにYORP効果による自転加速モデルを用いて微小NEOの自転周期変化を計算し、本研究で得た微小NEOの自転周期分布を説明しうるか検証を行った。(i)高速自転するNEOが臨界自転周期に達して自転破壊している、(ii)微小隕石の衝突によりYORP自転加速が抑制される、という二つの説では観測で得た自転周期分布をうまく説明できず、微小NEOの自転加速を選択的に抑制するプロセスの存在が示唆される。小惑星の強度や力学史に関する議論において微小NEOの高時間分解観測が有用な手段であることを示した。

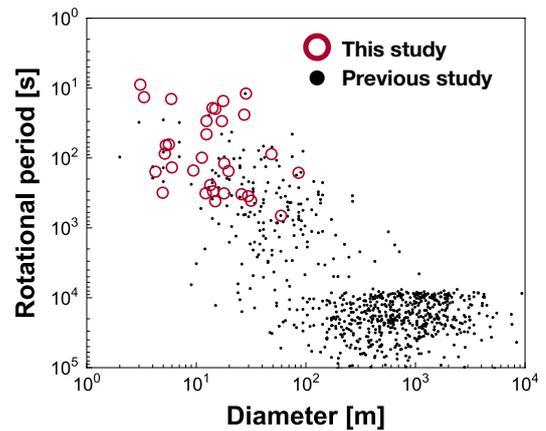


図. 小惑星の直径-自転周期関係 [4]。
本研究(赤丸)では既知の天体(黒丸)が少ない
微小高速自転小惑星の多数発見に成功した。

参考文献

[1] Rubincam D.P., 2000, Icarus 148, 2 [2] Thirouin A. et al., 2018, The Astrophysical Journal Supplement Series, 239, 4 [3] Sako S. et al., 2018, Proceeding of SPIE, 10702, 140 [4] Warner B. D. et al, 2009, Icarus, 202, 134

ダスト集合体の物質強度で探る 太陽系小天体形成過程

○辰馬 未沙子^{1,2} 片岡 章雅² 田中 秀和³ Tristan Guillot⁴

¹ 東京大学 ² 国立天文台 ³ 東北大学 ⁴ コートダジュール天文台

太陽系小天体の形成過程は直接付着成長やペブル集積、不安定性など諸説ある。この形成過程を探るため、我々はその物質強度に着目した。数百 m を超える大きさの天体の内部密度は自己重力と圧縮強度のつりあいでは決まると考えられている。本研究ではミクロンサイズのダストの集合体の圧縮強度をダスト付着 N 体計算で求めた。その結果、氷ダスト集合体とシリケートダスト集合体について、体積充填率 0.1 以下から高密度まで、圧縮強度を連続的に求めることに成功した。さらに、ダスト集合体の自己重力と圧縮強度がつりあうと仮定して内部密度構造を求め、実際の天体の内部平均密度と比較した (図 1)。その結果、太陽系外縁天体 (TNOs) は氷とシリケートのダスト集合体で説明できることがわかった。一方、67P/Churyumov-Gerasimenko を含む彗星は構成粒子半径が $r_0 = 0.1 \mu\text{m}$ の典型的なダスト集合体では説明できず、その半径を大きくしなければ説明できないことがわかった。さらに、小惑星リュウグウや小惑星イトカワ、小惑星ベンヌの密度は、本研究のようなダスト集合体では説明できないほど高密度であることがわかった。このような高密度な天体を形成するには、まず数十 km 以上の大きさの天体を形成する必要がある。すなわち、リュウグウやイトカワ、ベンヌは破片の集合体であり、その母天体の大きさは数十 km 以上であることを確認した。

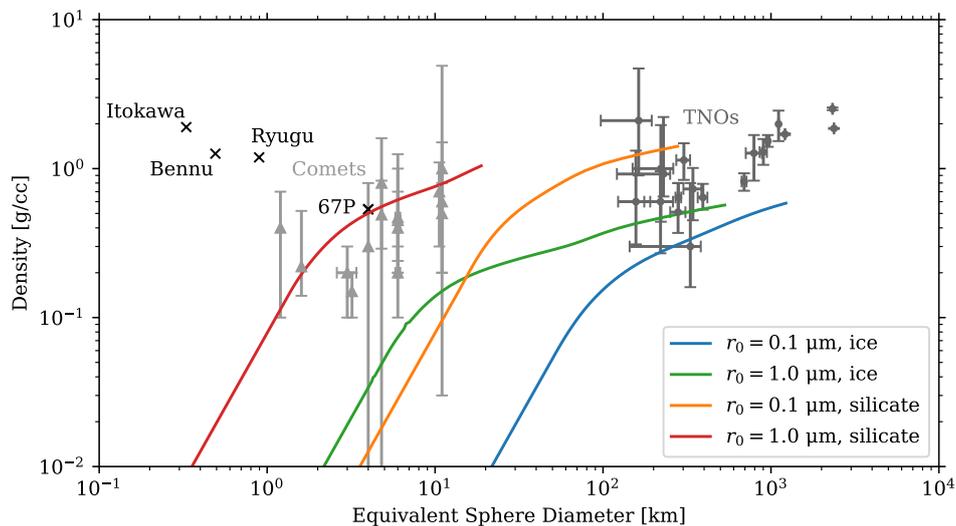


図 1: 太陽系外縁天体 (TNOs) や彗星、小惑星の直径-密度図に、数値計算から求められたダスト集合体 (氷、シリケート) の密度曲線を重ねたもの。 r_0 はダスト集合体の構成粒子半径を示している。

ラブルパイル天体上の衝突クレーターからのボルダー放出過程

○大川 初音¹ 戸田 瑞乃² 荒川 政彦¹ 保井 みなみ¹ 長谷川 直³

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

背景：小惑星探査機「はやぶさ2」が行った小惑星 Ryugu での SCI 衝突実験では、小惑星上でのクレーター形成の様子を撮影することに成功した。Ryugu 表面は大小様々な岩塊に覆われており、小型分離カメラ DCAM3 が撮影したエジェクタカーテン中には、直径数十 cm の岩塊が含まれていた[1]。また、衝突実験の前後で Ryugu 上空から撮影されたクレーター周辺の画像から、エジェクタとして放出されたものより大きな岩塊も移動したことが確認されている[2]。しかし、そのような岩塊がクレーター形成過程に及ぼした影響やそれ自身の移動過程の特徴は未解明である。本研究では、クレーターが形成される領域に岩塊が存在する状態を想定した衝突実験を行い、それらの岩塊の放出過程や移動について解析し、Ryugu 表面で起きた岩塊の放出・移動過程について議論した。

実験：神戸大学と宇宙科学研究所に設置された縦型銃を用いたクレーター形成実験を行った。標的には直径 100 μm のガラスビーズを使用し、その表面に岩塊を模擬した直径 3~30mm のガラスビーズ（以下、トレーサー粒子と呼ぶ）を半分標的に埋まるように配置した。実験の様子は2台の高速ビデオカメラを用いて撮影し、これらの動画からトレーサー粒子の三次元放出軌道を解析した。

結果と議論：トレーサー粒子の解析から得られた放出軌道を用いて、その放出角度と放出速度を求めた。放出角度はトレーサー粒子の直径に依存せず平均約 53 $^\circ$ となり、先行研究の結果 (40 $^\circ$, [3]) と比較してやや大きくなった。放出速度はクレーター半径で規格化した初期位置（弾丸の衝突点からトレーサー粒子中心までの距離）を用いて整理した。その結果、同じ規格化初期位置でも、クレーター半径に対するトレーサー粒子の半径（規格化粒子径）が大きいほど、放出速度が遅くなった（図 1）。一方、この放出速度分布について、衝突点からトレーサー粒子の外側の端までの距離を用いて規格化初期位置を再定義して整理すると、速度分布には規格化粒子径の依存性が見られなくなった。本研究で得られたトレーサー粒径と放出速度の関係から、クレーター外に放出される最大のボルダーサイズを求めることが可能となった。その結果、クレーターから放出されるボルダーの最大半径は、クレーター半径の約 0.3 倍であることがわかった。これを SCI クレーターに適用すると SCI クレーターから放出されたボルダーの最大半径は約 2m となる。一方、SCI クレーター内部には、長さ 6m のイイジマ岩が残され、長さ 2m のボルダーがクレーター内から放出されたのが観測されており、今回の推定値と整合的である。

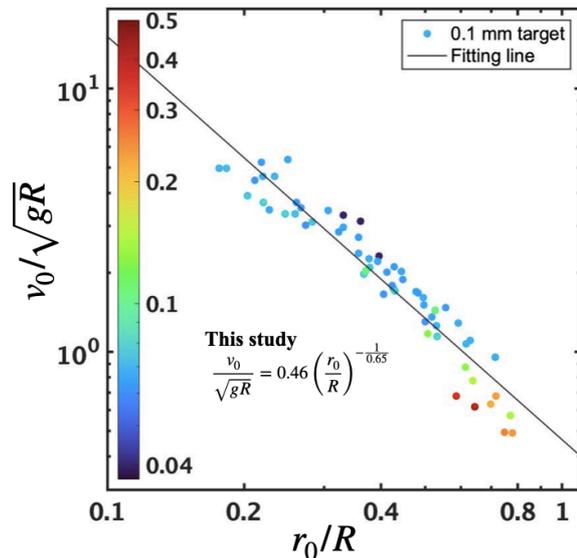


図 1：エジェクタ速度分布。色はトレーサー粒子の粒径をクレーター半径で規格化した値に対応する。

参考文献： [1] Kadono *et al.* (2020) *ApJL*, 899, L22 (6pp). [2] Honda *et al.* (2021) *Icarus* 366, 114530. [3] Tsujido *et al.* (2015) *Icarus* 262, 79-92.

三次元地震波伝搬シミュレーションによる月地殻の散乱特性評価

○小野寺圭祐^{1,2,3}, 川村太一², 田中智³, 石原吉明⁴, 前田拓人⁵

¹総合研究大学院大学, ²パリ地球物理研究所/パリ大学, ³JAXA 宇宙科学研究所,

⁴JAXA Space Exploration Center, ⁵弘前大学

月の内部構造(物理状態や化学組成)は、月形成シナリオにおいて強力な境界条件を与えることから、月科学におけるトップサイエンスの一つに位置付けられている。1970年代に実施されたアポロの月震観測では、約8年間で12,000以上の月震イベントを検出しており、それらを用いて一次元内部構造モデルが推定されてきた。しかし、アポロ計画より半世紀が経過した現在においても内部構造の不確定性は大きく[1]、月の起源や進化の議論にクリティカルな境界条件を与えることができていないのが現状である。内部構造の決定には、P波やS波などの地震波フェーズの正確な読み取りが必要となるが、月ではレゴリスやメガレゴリスなどの低速度かつ不均質な構造により、地震波のエネルギーが散乱され、フェーズの読み取りが困難になる。月震波の散乱についてはデータ解析によるアプローチが為されてきたが[2][3]、未だ当該分野での合意が得られるまで至っていない。

本研究では今までの研究とは異なり、地球の地震波散乱モデルに基づき、数値計算の立場から散乱特性の定量評価を行う。計算には、地球の地震分野で広く用いられているOpenSWPC[4]を使用し、月の地形モデルや散乱体を組み込んだ形で三次元地震波伝搬シミュレーションを行う。新規要素としては、計算周波数を2.0Hzまで拡張したことにより、世界で初めてアポロの観測周波数帯(0.3-1.5Hz:長周期地震計)と同じ周波数帯で三成分(ZNE)を比較できることになった点である。

大まかなアプローチとしては、様々な散乱特性を仮定した上で計算を実施し、シミュレーション結果とアポロデータを波形エンベロープや周波数成分について比較することで、実データを最も説明できるパラメータを制約する(順問題)。

アポロの人工衝突月震に関する結果の一例を図1に示す。ここでは、平均的な速度構造からのゆらぎ(散乱強度)を30-40%の範囲で変えた時のシミュレーション波形と実データを比較している。速度ゆらぎが30%の場合では、表面波のエネルギーが卓越し、強いピークとして見えているのに対し、40%の場合では十分に表面波のエネルギーが散乱されており、実データと非常に似た波形が再現されていることがわかる。本研究では、以上のような波形の比較に加え、エネルギーや周波数特性についてもアポロデータを再現することに成功し、新しい月の散乱構造モデルを提案するに至った。

散乱の影響は月に限らず、火星や他の地震探査候補天体(ex. タイタン)でも常に問題視されており、本研究成果は惑星地震学の発展に大きく貢献していると考えられる。今後は、将来の月震観測シミュレーションや他天体への応用を視野に更に研究を進展させていく予定である。

謝辞: 三次元地震波伝搬シミュレーションを行うにあたり、計算資源(地球シミュレータ)を提供していただいたJAMSTECに感謝申し上げます。参考文献: [1]Garcia et al. (2019), *SSR*, 215:50. [2]Blanchette-Guertin et al. (2012), *JGR*, 117, E06003. [3]Gillet et al. (2017), *PEPI*, 262, 28-40. [4]Maeda et al. (2017), *EPS*, 69(1), 102.

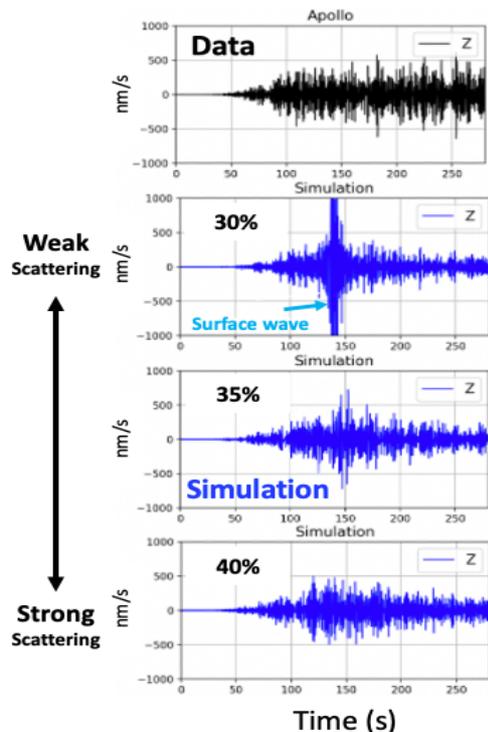


図1. アポロデータ(黒)とシミュレーション(青)の鉛直成分の波形比較. シミュレーション波形については、仮定した速度構造に対する速度ゆらぎ(散乱強度)を30-40%の範囲で変更した際の結果に対応する。

初期火星における新たな水素分子生成過程： 惑星気候、環境進化、ハビタビリティへの示唆

○野田夏実^{1,2} 関根康人¹、高橋嘉夫²、佐久間博³、河合敬宏²、中川麻悠子¹、北台紀夫⁴、
Kristin Johnson-Finn¹、Shawn McGlynn¹

¹東京工業大学地球生命研究所、²東京大学理学系研究科、³物質・材料研究機構、⁴海洋研究開発機構

近年の火星探査、特に着陸機による化学分析では、詳細な鉱物組成や化学種の同定が可能となっている。中でもノアキアンからヘスペリアン初期を形成年代とする水質変成鉱物は、生成当時の環境やその進化を復元する手がかりとして注目されている。解釈において地球の天然試料等に基づく従来の理解で不十分な場合は、室内実験と併せた議論が重要となる。

地質証拠に基づく環境復元が進む一方で、初期火星表層に液体の水が保持されたメカニズムは長らく議論の最中にある。大気主成分とされる二酸化炭素は一定量以上で凝結し温室効果が働かなくなるため、地質記録と整合的な地表温度や持続時間の達成には他の温室効果の考慮が欠かせない。有力視されているのが衝突誘起吸収(CIA)で、厚い二酸化炭素大気に水素分子が数%以上混合すると氷点を上回る温室効果が得られると計算されている(Turbet et al. 2020)。しかし既知の水素分子供給源候補のうち主力とされる火山ガスでは、水素の高い散逸フラックスを賄えず温暖気候は持続しない(Wordsworth et al. 2021)。長期的な温暖気候を実現するシナリオとして、火星に豊富な硫黄が硫化水素として脱ガスし水素源となった可能性を仮定した研究例があるものの(Ramirez et al. 2014)、具体的な反応経路は不明であった。

本研究では硫化水素から水素を供給する還元力の源として、二価鉄を含む鉱物、特に鉄サポナイトの効果に初めて着目した。鉄サポナイトは火星の玄武岩地殻から集積時の水熱反応や形成後の水質変成による全球的な生成が支持され(Catalano 2013; Cannon et al. 2017)、観測例も多い(Vaniman et al. 2014; Michalski et al. 2015)。しかし、鉄サポナイトは地球環境下で容易に酸化してしまうため、天然試料や研究例に乏しい(Treiman et al. 2014)。そこで本研究では超嫌気環境を達成可能なグローブボックス内で鉄サポナイトの水熱合成実験および硫化水素を導入した水岩石反応実験を行い、水素生成の有無を調べた。ガス成分の定量分析に加え、反応過程を制約するために鉱物相に含まれる鉄の価数・化学種の時間変化も分析した。

その結果、水素濃度の上昇は鉄サポナイトと硫化水素が共存する条件でのみ確認され、最も反応が進行した中性条件では鉄サポナイト 100 μmol あたり約 6 μmol の水素が生成して定常状態に達した。反応途中・後の鉱物相中にはサブミクロン粒子状のパイライトが観察視野の 1 割程度を占め、その周辺で鉄サポナイトが酸化している傾向もみられた。これは鉄サポナイトにより硫化水素が還元されパイライトと水素が生成した反応過程を支持する。この水素分子生成過程は初期火星でも全球的に起きたと推測され、十分な硫化水素の脱ガスがある限りは鉄サポナイトが枯渇するまで持続したと考えられる。枯渇後は硫化水素が固定されずに大気化学反応等で酸化されたとすると、ゲイルクレータをはじめ火星に広く観測される粘土鉱物から硫酸塩への鉱物相の変遷とも整合的である。水素は生体反応のエネルギーをもたらす還元剤としての役割も期待でき、このような生成過程やその変遷の推定は、初期火星の気候復元のみならずハビタビリティの理解にも繋がる。反応を経た鉱物相のより詳細な分析により、火星探査データとの比較検討が可能となると思われる。

セレスと月における衝突体サイズ分布の類似と セレスを汚染した二次クレーター

○豊川広晴^{1,2}、春山純一^{2,1}、平田直之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/宇宙航空研究開発機構、³神戸大学

クレーターサイズ頻度分布 (Crater Size Frequency Distribution, CSFD) は天体表面の進化や衝突体の情報を表す。天体への年代ごとの衝突体のサイズ頻度分布を表すクレーター生成関数は、天体の表面年代や地下構造の推定に非常に重要である。しかしメインベルト天体におけるクレーター生成関数はよくわかっていない。NASA の Dawn が探査した準惑星セレスはメインベルト最大の天体であり、メインベルト内における衝突体のサイズ頻度分布を調査するのに適している。我々はこれまでの研究で、セレスの全球における直径 1km 以上の全てのクレーターをカタログ化し、様々な年代をもつ 18 個の巨大衝突クレーターのフロア領域においてそれぞれ CSFD をプロットした。そしてそのうち 6 個のフロア領域における CSFD が、月面での衝突体サイズ頻度分布をセレスに対して類推した Lunar Derived Model (LDM) [Hiesinger et al., 2016] のクレーター生成関数とよく一致することを確認した。これは、セレスと月とで衝突体のサイズ頻度分布が一致することを示す。しかし一方で、LDM のクレーター生成関数と一致を示さないフロア領域が 12 個確認された。このように、LDM のクレーター生成関数との一致性が各領域の CSFD によって異なる原因として、それぞれ異なる衝突体サイズ頻度分布を示唆していること、あるいは二次クレーターの混入などの後天的なプロセスによって CSFD の汚染されていることが考えられる。

そこで本研究では、作成したクレーターカタログデータから、明らかな二次クレーターを画像データをもとに目視で抽出・除去した後に、それぞれの調査対象領域の CSFD を再度プロットすることとした。二次クレーターの特徴として、(1)比較的に浅い形状を持つこと、(2)非対称的な形状を持つこと、(3)類似するサイズのクレーターがクラスターやチェーンのように分布することなどが挙げられている。しかし一般に、一次クレーターと二次クレーターを完全に区別することは難しい。なぜなら、一次クレーターのような形状や分布を持つ二次クレーターや、劣化に伴って二次クレーターのように浅い形状を持つ一次クレーターが存在するからである。本研究では、類似するサイズを持つ比較的新しいクレーターの明らかなクラスターとチェーン状に分布するクレーターのみを二次クレーターと判別し、それらをカタログデータから除去した。

結果として、元より LDM のクレーター生成関数と一致を示していた 6 個のフロアにおける CSFD の形状はほとんど変わらず、一致を示さなかった 12 個のフロアのうち 9 個のフロアにおける CSFD の形状は LDM のクレーター生成関数に大きく近づくという傾向が見られた。このことから LDM との一致を示さなかった CSFD は二次クレーターの汚染による影響が大きく、セレスにおける衝突体サイズ頻度分布は各領域・各年代で月と一致する可能性が高い。

本発表では、上記の結果を紹介し、また月とセレスにおける衝突体サイズ頻度分布が一致することの天体力学的重要性についても議論する。

アーチ型天井構造を有する月地下空洞の存在検証 と空洞形状を用いた火成活動推定の可能性

○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

月・火星の地下に存在すると考えられる溶岩チューブは、過去の火成活動の規模や溶岩流の物理的諸量、地下における溶岩の輸送プロセスを解明する上で重要である。月では SELENE 搭載の地形カメラによって、溶岩チューブの天井が崩落してできたと考えられる縦孔が発見されている [1]。また、米国探査機 LRO による縦孔の斜め観測から、水平方向に広がる地下空間が確認され [2]、月における溶岩チューブの存在が強く示唆されている。さらに、SELENE 搭載月レーダーサウンダー (LRS) や米国探査機 GRAIL の重力場の解析から、月のマリウス丘に大規模な溶岩チューブが存在することが示されている [3] [4]。一方、溶岩チューブは地球でも確認されており、その断面は内部を流れた溶岩が完全に排出された場合は円形、一部の溶岩が排出しきらなかった、もしくは二次的に流れた溶岩が固まった場合は円形の下側部分が埋まった形状になり、天井はアーチ型になることが多い。地球上の火山においては、溶岩チューブの形状からチューブ形成当時の溶岩温度や粘性係数といった溶岩流の物理的諸量が推定できる可能性が示されており [5]、火成活動を読み解く上で重要な情報となる。

そこで、本研究では [6] で報告されている月のリマラン地域に存在する大規模な”溶岩チューブ候補”について再解析を行い、溶岩チューブの形状について調査した。その結果、アーチ型天井を持つ地下空洞の可能性を示すレーダーパターンを発見した。このレーダーパターンが実際の地下構造であることを示すために、有限差分時間領域法 (FDTD 法) によりアーチ型天井を持つ地下空洞を模擬した結果との比較を行なった。ただし、LRS はダイポールアンテナによる観測を行うため、衛星直下点以外の側方地形の反射によって地下構造の解釈を誤る恐れがある。そのため、月面での電波の散乱シミュレーションを行うことで、側方地形の影響についても評価した。本公演では、これらの解析から、月におけるアーチ型天井を持つ地下空洞の存在について検証する。さらに、[5] の手法を用い、地下空洞の傾斜を 0.2~1 度の範囲で変化させた場合の溶岩流の温度条件を推定した。その結果、最も低傾斜 (0.2 度) の時、溶岩流の温度条件は 1020 度以下と推定され、傾斜の増加とともに溶岩流の温度が低下していくことがわかった。今後、月・火星での溶岩チューブ分布を調べ、溶岩チューブを形成した当時の温度条件を全球規模で推定することで、月・火星の火成活動に強い制約を与えることができると考えられる。

文献:[1] Haruyama et al., 2009, Geophysical Research Letters 36, 21. [2] Robinson et al., 2012, Planetary Space Science 69, 18. [3] Kaku et al., 2017, Geophysical Research Letters 44, 20. [4] Chappaz et al., 2017, Geophysical Research Letters 40, 1. [5] 本多, 2020, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会予稿 [6] Kaku et al., 2018, Lunar and Planetary Science Conference. No. 2083.

金星硫酸雲の子午面分布： 物質循環モデルを用いた凝結物質輸送量の評価

○ 桑山慎也¹, はしもとじょーじ¹

¹ 岡山大学大学院自然科学研究科

金星の高度 42-65km に存在する硫酸の雲の厚さは、緯度方向に一様でなく、中緯度に比べて低緯度と高緯度で厚くなっていることが知られている。雲水量の分布は、蒸発・凝結と輸送及び沈降によって決まっているが、雲の厚さの緯度分布がどのようなメカニズムによって作られているのかは明らかになっていない。本研究は、子午面物質循環モデルを用いて金星の雲を構成する H_2SO_4 と H_2O の子午面内における輸送を計算することで、雲水量の子午面分布を決定するメカニズムについて考察した。

本研究で用いた子午面物質循環モデルは、移流、渦拡散、凝結・蒸発、沈降、化学反応を結合したもので、雲水となる H_2SO_4 と H_2O のほか、 H_2SO_4 の生成・分解に関する CO や OCS などの子午面分布を計算する。流れ場と温度場を与え、初期条件として与えた物質分布から時間発展を計算することで定常状態における物質分布を求める。流れ場は赤道から極までつながる 1 セルの子午面循環を与え、それより小さいスケールの流れによる輸送は渦拡散によって表現した。また、温度場は金星標準大気モデル (VIRA) を用いた。計算された雲水量の子午面分布は、低緯度は雲底付近 (高度 $\sim 47\text{km}$) と高度 50-55 km に、高緯度は雲底付近 (高度 $\sim 42\text{km}$) に雲水が多くなる領域が現れ、鉛直積算した雲水量は低緯度と高緯度で大きくなるという観測された雲水の分布が再現された。

計算された雲水量が低緯度と高緯度で大きくなったことは、それぞれ子午面循環と温度の子午面分布によって説明される。子午面循環の上昇域 (低緯度) では、上昇流で上向きに輸送された硫酸蒸気が温度の低い上空で凝結して雲が生成する。凝結した雲水が沈降によって下向きに輸送されることで、雲底付近の硫酸蒸気量が増加する。雲底付近の硫酸蒸気量の増加は、循環で持ち上がる硫酸蒸気量を増やし、雲をより厚くする。一方、子午面循環の下降域 (高緯度) では、硫酸蒸気の少ない上空の空気が輸送されてくるため、子午面循環は高緯度の雲水を減らす。子午面循環からは決して生成しえない高緯度の厚い雲は、雲層内の高度 50km 付近の温度分布が低緯度で高く高緯度で低くなっていることによって生成していた。雲層内の硫酸蒸気量は飽和蒸気圧で決まり、飽和蒸気圧はほぼ温度で決まる。そのため、硫酸蒸気は温度が高く飽和蒸気圧の大きい低緯度から、温度が低く飽和蒸気圧の小さい高緯度に向かって、水平渦拡散による輸送が生じ、高緯度で硫酸蒸気が凝結し、生成した雲水が沈降する。この水平渦拡散、凝結、沈降による高緯度への硫酸蒸気の輸送が、子午面循環の影響を打ち消して高緯度に厚い雲を生成した。

近赤外顕微鏡マイクロオメガによるリュウグウ帰還試料の記載状況

Initial descriptions of Ryugu returned samples using the MicrOmega

○岡田達明^{1,2}, 与賀田佳澄¹, 畠田健太郎^{1,3}, 矢田達¹, 中藤亜衣子¹, 宮崎明子¹, 熊谷和也^{1,3}, 人見勇矢^{1,3}, 西村征洋¹, 安部正真^{1,4}, 臼井寛裕^{1,2}, Jean-Pierre Bibring⁵, Cedric Pilorget⁵, Vincent Hamm⁵, Rosario Brunetto⁵, Damien Loizeau⁵, Lucie Riu⁵, Lionel Lourit⁵, Guillaume Lequertier⁵, Hayabusa2 MicrOmega-Curation チーム^{1,5}
(¹/ISAS/JAXA, ²東京大学, ³マリン・ワーク・ジャパン, ⁴総研大, ⁵IAS)

小惑星探査「はやぶさ2」では、C型小惑星リュウグウの表面の2地点から試料を採取した後、2020年12月に試料の地球帰還に成功し、JAXA相模原キャンパス内のキュレーション設備で非破壊かつ非汚染での初期記載を進めている[1]。主な記載項目は、試料の大きさや形状、重量測定、多色撮像、近赤外分光である。それらの記載情報は、初期分析やフェーズ2キュレーション等のより高精度・高分解能な分析や、NASAへの配分試料の選定に使用されるほか、国際公募研究のための試料選択用にカタログ情報として公開される。

MicrOmegaはフランス宇宙天体物理学研究所で開発された近赤外ハイパースペクトル顕微鏡であり、スターリング冷凍機によって冷却したHCT検出器と、黒体に音響光学フィルタ(AOTF)を装着して波長域0.99~3.65 μm の波長(正確には周波数)走査型の光源をもち、視野領域5x5mm、解像度22 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ でイメージキューブを生成する[2]。含水鉱物の主要な吸収帯である1.4, 1.9, 2.7~3.0 μm 帯、有機物(-CH基)や炭酸塩(-CO₃)の3.4 μm 帯、アンモニウム等窒素化合物(-NH)などの3.1 μm 帯、その他の吸収帯の検知に適し、かつコンドリュール等の組織の識別に必要な空間解像度を有する。MicrOmegaはクリーンチェンバCC3-3室の拡張ポートに据え付けられた専用チェンバの外部に装着され、チェンバ内の試料をサファイア窓越しに分析する。試料は窒素環境に保持され、XYZRステージで焦点位置に設置される。MicrOmegaは水冷で一定温度に保持され、結露防止用に窒素パージされる。

MicrOmegaによる測定は、試料コンテナA室(1回目の採取試料、リュウグウの赤道付近)とC室(2回目の採取試料、人工クレータ近傍)のバルク試料のほか、1mm径以上の個別粒子、また微細な砂状試料も測定してきている。国際公募に向けたカタログ作成用の測定も継続的に進めている。MicrOmegaによるカタログ情報には、各試料に対して単波長の画像、試料の平均スペクトル、特徴点のスペクトル、特徴の記述等が提示される。これまでの主な結果は、大部分の試料は反射率が2~3%と暗く、2.72 μm 付近に水質変成の兆候とみられる狭い吸収が存在し[1,2]、近赤外分光計NIRS3によるリュウグウ全球の観測結果[3]と整合する。また、3.4 μm 付近に弱い吸収が存在し、有機物または炭酸塩鉱物の存在が示唆される[1,2]。MicrOmegaは粒子毎の吸収スペクトル、および粒子内のスペクトルの分布も測定可能であり、本発表では測定で得られた特徴について紹介する。

参考文献: [1] Yada et al. submitted to Nature Astron., [2] Pilorget et al. submitted to Nature Astron., [3] Kitazato et al., Science 364, 272-275 (2019).

リュウグウ帰還試料の初期記載から分かった事

Results of initial descriptions for samples returned from Ryugu

- 矢田達¹、安部正真^{1,2}、岡田達明^{1,3}、中藤亜衣子¹、与賀田佳澄¹、宮崎明子¹、熊谷和也⁴、畠田健太郎⁴、西村征洋¹、人見勇矢⁴、副島広道⁴、吉武美和^{1,5}、岩前絢子^{4,6}、古屋静萌^{1,3}、白井寛裕¹、林佑¹、山本大貴¹、深井稜汰¹、杉田精司³、長勇一郎³、湯本航生³、矢部佑奈³、Jean-Pierre Bibring⁷、Cedric Pilorget⁷、Vincent Hamm⁷、Rosario Brunetto⁷、Lucie Riu^{1,7}、橘省吾^{1,2}、澤田弘崇¹、岡崎隆司⁸、高野淑識⁹、坂本佳奈子¹、三浦弥生³、矢野創¹、Trevor Ireland¹⁰、山田哲哉¹、藤本正樹¹、中澤暁¹、田中智¹、佐伯孝尚¹、吉川真¹、渡邊誠一郎¹¹、津田雄一¹
- (¹ISAS/JAXA, ²総研大, ³東京大学, ⁴マリン・ワーク・ジャパン, ⁵特許庁, ⁶東洋大学, ⁷IAS, ⁸九州大学, ⁹JAMSTEC, ¹⁰The University of Queensland, ¹¹名古屋大学)

小惑星探査機はやぶさ2は2019年2月と7月に近地球C型小惑星リュウグウの表層においてタッチダウンによる試料回収を行った[1]。その後、探査機は同年11月に小惑星を発ち、翌2020年12月6日に試料を収めた再突入カプセルを豪州ウーメラ地域に帰還させた[2]。再突入カプセル回収後、現地 Quick Look Facility にて試料コンテナ取り出し・ガス採取実施の上、空路にて帰還2日後には試料コンテナを JAXA キュレーション施設内に搬入した。クリーンルームにおいて、試料コンテナの外蓋その他部品の取り外し、クリーニングを行った上で、帰還5日後にはクリーンチェンバー第3-1室に導入し、真空環境で維持し、帰還8日後に真空環境において試料コンテナ開封作業を行った。コンテナから取り出したサンプルキャッチャーは直ちに真空環境の第3-2室に搬送され、キャッチャーA室の蓋を取り外して、キャッチャーA室から2~3粒のmmサイズの粒子を取り出し、そのまま真空環境で保管した。残りの大部分の試料は第3-3室に搬送後、ゲートバルブを閉めて大気圧高純度窒素雰囲気下の第3-3室、第4-1室及び第4-2室でグローブ操作により試料の取り出し・初期記載を行った。キャッチャー全体の秤量の結果、5.4gの試料がリュウグウ表層から持ち帰られた事が確認された。その内、3.2gが1回目のタッチダウン地点回収試料を収めたキャッチャーA室から、2.0gが2回目のタッチダウン地点回収試料を収めたキャッチャーC室から回収された(残りはキャッチャーB室及び回転筒内残留試料)。このA室及びC室バルク試料について光学顕微鏡撮影を行った結果、コンドライト隕石中に見られる高温生成物(コンドリュール・CAI)は確認されなかった。また、これらのバルク試料について可視分光分析・赤外分光分析を行った結果、探査機搭載機器によるリュウグウ表層の観測結果とほぼ一致し、持ち帰られた試料がリュウグウ表層物質を代表している事が分かった[3]。更なる結果の詳細について発表では報告する。

参考文献：[1] Tsuda, Y. et al. (2020) Acta Astron. 171, 42-54. [2] Tachibana, S. et al., submitted to Science. [3] Yada, T. et al., submitted to Nature Astron.

小惑星探査機はやぶさ 2 の低高度運用で観測された小惑星リュウグウに点在する岩塊の温度変化分布解析 (2)

○大杉 歩^{1,2}, 坂谷 尚哉³, 寫生 有理², 金丸仁明², 千秋 博紀⁴, 荒井 武彦⁵,

出村 裕英⁶, 神山徹⁷, 関口朋彦⁸, 田中 智^{1,2}, 岡田 達明^{1,2}

¹ 東京大学, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³立教大学, ⁴千葉工業大学, ⁵前橋工科大学, ⁶会津大学,

⁷産業技術総合研究所, ⁸北海道教育大学

研究背景:小惑星探査機はやぶさ 2 に搭載されているリモートセンシング機器の一つである中間赤外カメラ (Thermal Infrared Imager: TIR) [1] は C 型小惑星 162173 リュウグウの熱放射画像を取得することができ, 小惑星表面の熱的な物理特性を把握することができる[1-2]. 近年, これまでの全球的熱画像から, リュウグウ表面は典型的な炭素質コンドライトと比べると多孔質な岩塊で覆われており, 希に地球上で採取された炭素質コンドライトと同様の圧密の岩塊が存在していることが判明している [3].

目的と観測条件:特定の地域における岩石の温度変化とその物理状態を調査することで, リュウグウ表面に存在する岩塊のより詳細な情報を得ることを目的とした. 特に本研究では, 高度 500 m 未満で実施されたオペレーション (2018 年 9 月 21 日の MINERVA rover の投下時の降下運用: MNRV, 2018 年 10 月 3 日の MASCOT lander の投下時の降下運用: MSCT, 2019 年 2 月 21 日の 1st タッチダウン: TD1-L08E1) の際に撮像した高解像度の熱画像を使用し, 各領域に点在する岩塊を解析した. 得られる熱放射画像は 328×248 ピクセルで空間解像度は 1 ピクセルあたり約 0.051°である [1]. 今回は各画像内において 100 ピクセル超で撮像された岩塊について解析を行った.

結果と考察:100 ピクセル超で検出した岩塊の総数は 355 個 (MNRV) と 312 個 (MSCT) と 368 個 (TD1-L08E1) であり, 検出誤差は Wald の不等式 [4] によって $\pm 5.2\%$, $\pm 5.5\%$ と $\pm 5.1\%$ と算出された. MNRV では, 最低温度, 平均温度, 最高温度の平均値と標準偏差はそれぞれ 286 ± 11.2 K, 314 ± 5.65 K, 332 ± 5.74 K, MSCT では, それぞれ 287 ± 11.0 K, 313 ± 5.53 K, 332 ± 5.99 K, TD1-L08E1 では 251 ± 9.69 K, 282 ± 6.30 K, 301 ± 5.53 K であり, 各温度分布は正規性に沿っていることが示唆された. 最小温度の平均値の標準偏差が大きい理由として計測時に岩塊の影を排除できなかったことが挙げられる. さらに各領域において岩塊のサイズ頻度分布 (SFD) を作成し, その傾きの値から各領域の岩塊の物理状態を調査した. 結果, 低高度で撮影された岩塊の SFD の値は -1.9 ± 0.09 (撮像平均高度 55.4-88.0 m, MNRV), -2.1 ± 0.2 (59.4-98.0 m, MSCT), -2.7 ± 0.1 (36.2-78.2 m, TD1-L08E1) となり, 高高度での岩塊の SFD の値 -3.8 ± 0.2 (撮像平均高度 301.0-392.6 m, MNRV), -3.3 ± 0.2 (402.7-427.6 m, MSCT), -3.7 ± 0.2 (305.8-381.6 m, TD1-L08E1) と比べ緩やかとなった. SFD の勾配値が緩やかであると, 大きな断片化が示されることから [5-7], 各領域ではリュウグウの母天体の破壊の際に形成された岩塊の存在が示唆される. TD1-L08E1 では高度 100m 未満で撮影された画像の枚数が特に多いため (MNRV: 4 枚, MSCT: 7 枚, TD1-L08E1: 21 枚), 他の領域よりも岩塊の計測漏れが少なくなったことから, 低高度での SFD の勾配値 -2.7 ± 0.1 が他の低高度で得られた値 -1.9 ± 0.09 (MNRV), -2.1 ± 0.2 (MSCT) に比べ値が大きくなったことが考えられる. 今回の結果に対して, 本発表ではより詳細な比較検討や他機器等で得られた情報との整合性などを考慮し議論する予定である.

参考文献: [1] Okada, T. *et al.*, *Space Sci. Rev.*, **208**, 255-286 (2017), [2] Watanabe S. *et al.*, *Science* **364**, 268-272 (2019), [3] Okada, T. *et al.*, *Nature* **579**, 518-522 (2020). [4] Kurihara, S., *Introduction to statistics: from testing to multivariate analysis and experimental design*, Ohmsha Ltd., pp.336 (2011) [5] Michikami *et al.*, *Icarus* **331**, 179-191 (2019). [6] Hartmann, *Icarus*, **10**, 201-213, (1969). [7] Thomas, P.C. *et al.*, *Nature* **413**, 394-396, (2001).

リュウグウ帰還粒子キュレーションのための 可視マルチバンド分光/ステレオ形状計測装置の開発

○湯本航生¹、長勇一郎¹、矢部佑奈¹、森晶輝¹、小倉暁乃丞¹、宮崎明子²、矢田達²、
畠田健太郎²、与賀田佳澄²、安部正真²、岡田達明²、西村征洋²、白井寛裕²、杉田精司¹
¹ 東京大学, ² JAXA/宇宙科学研究所

研究背景: はやぶさ2光学航法カメラ(ONC)によるリュウグウの全球リモートセンシング観測から、天体表面の可視スペクトルは宇宙風化や熱変性による影響を反映していることが示された[1,2]。中でも、特に明るい反射率を持つ岩塊(Bright boulder)のスペクトルは多様であり、リュウグウ物質が経験した変成の歴史を記録している可能性が高い[3]。観測されるスペクトルは、組成のみならず、粒径等の多くの物性に影響される。このため、定量評価が難しく、変成時の物理化学条件(e.g., 温度や圧力)まで制約することは容易ではない。しかし、帰還試料の精密分析結果と結びつけることができれば全球的な変成史を理解することが可能となる。そのためには、ONCと同じ波長で帰還試料の各粒子についてスペクトルを測定し、カタログ化することが不可欠である。特に、数ある帰還粒子の中から、Bright boulderと同等の反射率を持つ粒子を特定するためには、スペクトル形のみならず反射率も精度良く測定する必要がある。しかし、帰還粒子表面の輝度は、測光条件に強く依存していることが初期観察から明らかとなった[4]。よって、この測光条件の影響を排した反射率を測定するためには、スペクトルと同時に粒子の形状を合わせてカタログ化することが必要となる。

研究目的: 数mmから数百 μm の帰還粒子カタログ作成のため、本研究では可視域でのマルチバンド分光スペクトル及び形状を高精度で測定可能な装置を開発し、計測を行なった。小惑星近傍でのリモセン観測と同条件で帰還試料の計測を行う本研究の試みは、将来の惑星探査データを解釈する際のground truthを与えるという点でも意義がある。

開発装置の性能: 本装置は、粒子に対して入射角 30° で光を照射し、粒子表面で散乱された光の強度を出射角 0° で観測する。この光の強度を標準散乱体のそれと比演算することで反射率を測定する。入射光の光路中にはフィルターホイールが設置されている。ホイールには紫外から近赤外にかけて6つの狭帯域フィルターが搭載されており、入射光の波長を変えながら反射率を測定することが可能である。これらはONCのフィルター[5]と等価(中心波長・透過幅の相違は $0\text{-}6\text{ nm}$)であり、全球観測データとの直接比較を可能にする。入射光源には近赤外でも明るく、試料を過度に加熱せず、輝度の変動が1%以下で安定したハロゲンランプ(LA-150FBU/ハヤシレピック社)を採用した。また検出器には全波長に渡って量子効率 $\sim 20\%$ 以上であるモノクロCMOSカメラ(CS895MU/Thorlabs社; ピクセル数 $4096 \times 2160\text{ pix}$)を採用した。

チャンバ上面のガラス窓から6cm以上の距離に置かれた粒子を測定するため、 $f=100\text{ mm}$ のレンズを用いた接写光学系を作成することで $1.9\ \mu\text{m}/\text{pix}$ の高解像度を達成した。この高解像度を活かし、コントラストの高い画像を全波長帯で得るため、光学系全体を全幅約7mm上下に動かすことで色収差を低減させた。性能評価のため、リュウグウと同等の反射率を持つ2%標準散乱体、Murchison隕石、Allende隕石のマルチバンド分光スペクトルを開発した装置で測定した。これを別途用意した分光計(HR4000/Ocean Optics社)による連続分光測定結果と照合した結果、本装置で測定された反射率は1-3%(分光計の測定精度が低い近赤外では5%)の誤差で分光計測定の結果と一致することを示した。

上記の光学系を用いて得られる光学画像を元に、粒子形状を同時に測定するため、本装置はA)ステレオ視法、B)照度差ステレオ法の2種の独立した原理に基づく形状測定を行うことができる。A)は視線方向から 15° 傾けた回転軸を中心に、カメラを回転させて視差を付けながら連写する方法である。B)はカメラを固定したまま、視線方向から 15° 傾けたLED光源を回転させながら連写する方法である。これにより、入射角を変化させた時の照度の変化が測定でき、形状を推定することができる。リュウグウ物質と類似した測光特性を持つグラフィット片をA)の方法で形状測定した。更に、測定対象を回転変位させた時に得られる独立した形状測定結果と照合することで、形状の測定精度を試験した。その結果、これらの測定形状は、粒子の高さ全幅に対して標高誤差 $\sim 3\%$ (中央値)で一致することを示した。

リュウグウ帰還粒子のスペクトル測定結果: A3室及びC1室の試料に対して本装置を用いたマルチバンド分光測定を行なった。A3, C1室の 550 nm における反射率はそれぞれ $0.0237(9)$, $0.0241(17)$ であり、試料室内で反射率の有意な差は認められなかった。しかし、この反射率はONCで測定された反射率 0.0185 よりも有意に高い。これは、粒子表面での鏡面反射等による測光特性や、サンプリングに伴う粒子表面からのダストの剥がれ落ち等に起因している可能性がある。また、可視(550 nm)に比して紫外域での反射率は $\sim 3\%$ 、近赤外では $\sim 3\%$ であり、平坦ながらも全体的に赤くなるCbタイプ小惑星と類似したスペクトル形を示す[4]。このスペクトル形はONCによる全球観測[6]とも整合的であり、帰還試料がリュウグウ物質の良い代表になっていることを示唆している。

文献: [1] Sugita et al., 2019, Science, 364(6437). [2] Morota et al., 2020, Science, 368(6491). [3] Sugimoto et al., 2021, Icarus, 114591. [4] Yada, T., et al., 2021, in revision. [5] Kameda et al., 2017, Space Sci. Rev., 208(1-4). [6] Tatsumi et al., 2020, A&A.

小惑星リュウグウにおけるメートルサイズ以下のボルダー形状分布

○道上達広（近大）、ハガーマン・アクセル（キルナ大）、諸田智克（東大）、横田康弘（宇宙研）、浦川聖太郎（スペースガード協会）、岡村裕之（名古屋大）、湯本航生（東大）、海老原樹（東大）、杉田精司（東大）+ONC チーム

室内実験において、激しい衝突破壊における破片の形状の分布は、実験条件に依らず、特徴的でかつ普遍的な分布になっている。それは破片の長軸 a : 中間軸 b : 短軸 c の比が、分布に拡がりはあるものの、平均で $2:\sqrt{2}:1$ となる (Fujiwara et al. 1978)。すなわち平均で b/a が 0.7、 c/a が 0.5 程度になっている。この分布は、 $100\mu\text{m}$ サイズから一枚岩の 100m サイズ小惑星まで成り立っている可能性が高い (Michikami et al. 2019)。しかしながら、衝突破片である小惑星表面のボルダー（岩塊）の 3 軸比 (b/a と c/a) は、太陽位相角や画像解像度の制約があり、これまで十分に測定されておらず、定量的に明らかになっていない。そこで本研究では、小惑星リュウグウにおいて、太陽位相角の大きい約 37.5° の高解像度の近接画像を用いて、影の長さからボルダーの高さを計算し、直径数 m サイズ以下のボルダーの 3 軸比を求めた。

今回測定したのは、探査機「はやぶさ 2」が 2 回目のタッチダウンを行った直前までに得られた領域であり、北緯 10° 前後、西経 0° から 53° 、高度 461m から 31m の 8 枚の画像を解析した。それらの画像を解析する際、より高解像度の画像を得るためにデコンボリューション法を用いて、画像解像度を 4 倍向上させた。今回測定した画像の解像度は 1 ピクセル当たり 0.75mm (高度 31m) から 11mm (高度 461m) で、3 軸比を測定した直径 45mm から 6.9m のボルダーの総数は約 4100 個である。

得られたボルダーの 3 軸比は、直径 1m 以下だと、 b/a で平均 0.71 ± 0.01 、 c/a で平均 0.46 ± 0.02 で、室内実験による衝突破片形状 (Michikami et al. 2016) と類似している。一方、直径 1m 以上では、 b/a は平均 0.70 ± 0.01 と室内衝突破片と類似しているものの、 c/a の平均は 0.39 ± 0.02 と室内衝突破片に比べてかなり小さい (すなわち見かけ上、平べったい) ことが分かった。この理由として、直径 1m 以上のボルダーは、1m 以下のボルダーによって埋もれていることが考えられる。今回調査したのは、リュウグウの赤道域に近いので、この解釈は、過去の研究、すなわち、赤道域での 5m 以上のボルダー数密度が低く (Michikami et al. 2019)、1m 以下のボルダー数密度が高いこと (Tanabe et al. 2021) と調和的である。

以上のことから、リュウグウにおけるメートルサイズ以下のボルダー形状はすべて室内衝突破片の形状と類似していると考えられる。このことから、激しい衝突破壊における破片の形状の分布は、衝突条件に依らず、長軸 a : 中間軸 b : 短軸 c の比が、平均で $2:\sqrt{2}:1$ であることを、リュウグウのボルダーでも確かめることができた。

はやぶさ 2 ONC 画像を用いたリュウグウの 地域測光解析

Regional photometric analysis on asteroid Ryugu using Hayabusa2 ONC images

○横田康弘¹, 本田理恵², 巽瑛理³, Deborah Domingue⁴, Stefan E. Schröder⁵, 松岡萌¹,
Lucie Riu⁶, Andrea Longobardo⁷, 杉田精司⁸, 諸田智克⁸, 坂谷尚哉⁹, 千秋博紀¹⁰,
本田親寿¹¹, 長勇一郎⁸, 亀田真吾⁹, 神山徹¹², 山田学¹⁰, 早川雅彦¹, 鈴木秀彦¹³,
吉岡和夫⁸, 澤田弘崇¹, 小川和律¹

¹JAXA, ²高知大, ³カナリア天体物理学研究所, ⁴PSI, ⁵DLR, ⁶IAS, ⁷INAF, ⁸東大, ⁹立教大,
¹⁰千葉工大, ¹¹会津大, ¹²産総研, ¹³明治大

はやぶさ 2 光学航法カメラ ONC-T の画像を用いたリュウグウ表面の測光解析の進捗状況を JPGU2021 に引き続き報告する。

先行研究において、リュウグウ地表にはボルダ分布[1]やクレーター密度分布[2]に関して Western Bulge [3]と Eastern Hemisphere 間の東西二分性が指摘されてきた。太陽位相角 19 度の観測に基づく ONC-T v バンド（波長 0.55 μm ）反射率地図においても東西二分性が報告 [4] されていたが、一方、位相角 0 度の観測では東西二分性が見られなかった[5]。この不一致の理由について我々は、地表面ラフネスによる測光的効果により異なる位相角では可視光での見え方が異なったためと仮説をたて、次の測光解析を行った。我々はリュウグウ地表を 32m 幅のメッシュに分割し、各メッシュについて様々な観測角度での ONC-T 反射光強度データを集め、Hapke 測光モデル [6,7] フィットにより Hapke パラメータを求めた。求めたパラメータには Single scattering albedo と Macroscopic roughness が含まれる。作成したパラメータ分布地図には Single scattering albedo よりも Macroscopic roughness で明瞭な東西二分性が現れ、仮説を支持する結果が得られた。測光解析で得られるラフネスのスケールとはレゴリス層を光が透過できなくなる程度の大きいスケールであることと、天体地表では一般に小スケールで観察するほどラフネスは大きく計測されることの両面から考えると、今回得られた Macroscopic roughness は mm~cm スケールのラフネス分布を表していると推測される。今後は、測光解析の結果と他の手法によるラフネス関連量や計算機模擬地表面との間の比較をすすめ、東西差が生じた原因について議論をする予定である。

References: [1] Michikami T. et al. (2019) Icarus 331, 179–191. [2] Cho Y. et al. (2021) JGRE 126, e2020JE006572. [3] Watanabe S. et al. (2019) Science 364, 268. [4] Sugita S., et al. (2019) Science 364, 252. [5] Yokota Y. et al. (2021) PSJ, Accepted. [6] Hapke B. (1981) JGR 86(B4), 3039–3054. [7] Hapke B. (2012) Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy (2nd ed.). Cambridge Univ. Press.

小惑星リュウグウ上の岩塊のスペクトルの統計解析による 母天体不均一性の定量評価

Parent-body heterogeneity estimated with statistical analysis of the spectra of Ryugu boulders

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

¹東京大,²カナリア天体物理研,³立教大,⁴高知大,⁵JAXA,⁶産総研,⁷明治大,⁸会津大
探査機はやぶさ2の小惑星リュウグウの全球観測からは、可視光でも近赤外光でもリュウグウ表面の反射スペクトルは非常に均一であることが判明した[1,2]。これは試料採取地点を選択する上でも重要な意味を持った[3]。しかし、それから3年を経て、サイエンス機器のデータ解析は大きな進展を見せた。我々が特に注目しているのは、可視光や中間赤外光で見える特性が平均値と大きく異なる岩塊 (bright boulders [4-6], cold boulders [7], highly porous boulders[8]など) である。リュウグウは母天体の破片の集合体 (ラブルパイル) であるため、これらの岩塊の多様性はリュウグウの母天体内の多様性の存在を支持する。しかし、それらの岩塊が全体積に占める割合が小さいことから、リュウグウの母天体の多様性は一部に限定されていて、大部分は均一であることもまた事実である。この問題に答を出すには定量的な評価が必要である。本研究では、リュウグウおよびベヌーの表面にある岩塊のスペクトルおよびアルベドを統計解析して、母天体の不均一性を定量的に評価した。

解析の結果からは、リュウグウのボルダーの反射率は、その95%が反射率 0.02 ± 0.003 という狭い領域内に収まること、リュウグウの直径 3m 以上の全ボルダーの中で最大反射率は 0.045 であること、その存在度は 10^{-4} 以下と極めて小さいことが判明した。

さらに、リュウグウの反射率範囲 0.02 ± 0.003 と CM 隕石や CI 隕石の加熱実験で生じる反射率変化[9]と比較すると、それぞれ 120°C および 40°C という狭い温度範囲で生じる変化に対応することが分かった。ベヌーのボルダーの反射率分布は、リュウグウより広いが、その広がりにはリュウグウの2倍程度でしかない[10]。また $0.48\text{-}0.86\mu\text{m}$ のスペクトル傾斜の分布幅については、両小惑星でほぼ同じである。したがって、定性的には、両小惑星の可視域での反射スペクトルは、炭素質隕石の加熱実験で生じる変化幅に比べると非常に小さいと言える。その一方で、水質変成や組成の差による反射スペクトルの変化幅の定量評価は、系統的な隕石データが整備されていないため難しい。しかし、main belt の小惑星の多様性からその変化幅は加熱による酸化と同じ桁の幅であろうと推定されている。したがって、リュウグウおよびベヌーのスペクトル多様性が水質変成度ないし組成の多様性に起因している場合にも、その程度は非常に小さく、均一な物質から構成されることが示唆される。

引用文献:[1] Sugita et al. (2019) *Science*, 364, eaaw0422 [2] Kitazato et al. (2019) *Science* 364, 272, [3] Watanabe et al. (2019), *Science* 364, 268 [4] Tatsumi et al. (2021) *Nature Astron.* 5, 39, [5] Sugimoto et al. (2021a) *Icarus* 114529. [6] Sugimoto et al. (2021b) *Icarus* 114591. [7] Okada et al. (2020) *Nature*, 579, 518. [8] Sakatani et al. (2021) *Nature Astron.* 5, 766, [9] Hiroi et al. *MAPS*, 31, 551. [10] Laretta et al., *Nature*, 568, 55.

リュウグウ粒子のステレオ撮像による形状計測とカタログ化

○矢部佑奈¹、湯本航生¹、長勇一郎¹、森晶輝¹、小倉暁乃丞¹、宮崎明子²、矢田達²、
畠田健太郎²、与賀田佳澄²、安部正真²、岡田達明^{1,2}、西村征洋²、白井寛裕^{1,2}、杉田精司¹

1 東京大学、2 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

小惑星リュウグウ表面のメートル大の岩塊は複数の形状タイプに分類され、スペクトルとの相関や母天体過程の関連の可能性が指摘されている[1]。このような異なる形状タイプを持つ粒子が数百 μm の帰還試料の中にも存在することが確認された[2]。リュウグウ上の岩塊の物理形状を決定づけるプロセスを解明するには、粒子ごとの形状を測定・カタログ化し、他の精密測定結果と対応づける必要がある。また、リュウグウ表面には、周囲より明るい物質で構成されて輝点のように見える岩塊 (bright boulder) が発見されている[3,4]。帰還試料の光学画像中にも多数の輝点が観察されたが、それらの多くの見かけ輝度は測光を行う幾何条件(照明や撮影の角度)に大きく依存することも指摘されている[5,6]。これは、試料中の輝点は試料粒子の面の鏡面反射による影響を受けていることを示唆している。この幾何学的影響を補正 (i.e., 測光補正) して正しい反射率を得るには、試料形状の精密計測が必要である。そこで本研究では、帰還試料キュレーションの一環として、個別粒子のステレオ撮像による三次元形状計測を実施した。

リュウグウ試料は、清浄度を保持するためにキュレーション設備のクリーンチャンバ内に静置されており、外には取り出せない。そのため、ステレオ撮影の際には、チャンバのガラス越しに視差が付くよう計測角度を変化させつつ撮像を行う必要がある。具体的には、15度傾いた回転軸回りに小型 CMOS カメラを回転させることで異なる角度から撮影することが可能な装置を開発し、リュウグウ試料計 69 粒子のステレオ撮像を行った。各粒子に対しては、180度~210度の角度レンジに渡って、6度刻みでカメラ方位角度を変化させて 0.55 μm の狭帯域フィルターで計測を行った。この時のカメラの画素分解能は約 1.9 $\mu\text{m}/\text{pix}$ であった。各粒子あたり約 30枚の画像群を市販の Shape-from-motion パッケージ (Metashape) で解析したところ、高解像度の DEM (digital elevation model) を得ることができた。

どのサイズの面素まで有効に求められるかの検証は今後の課題だが、今回は面素の辺の長さの平均が約 15 pix (約 30 μm)になる面素数で計算を行った。同一粒子に対して、3度刻みの計測と6度刻みの計測それぞれから DEM を得たところ、それらの体積は約 10%の差異で一致した。先行研究[5]の結果との差は 10%~20%だったが、画像に写らない粒子下部の体積の不確定性に依存していそうである。ここを補正できれば、精度の改善が見込めると考えられる。

高精度の DEM を用いた形状解析には、実際の個々の粒子の立体形状の特徴を反映した体積を計算することができるという利点がある。講演では、DEM を用いて分析したリュウグウ粒子の形状の特徴について説明する。

引用文献：[1] Sugita et al. (2019), Science, 364, eaaw0422, [2] Tachibana et al. submitted. [3] Tatsumi et al. (2021) Nature Astron. 5, 39-45, [4] Sugimoto et al. (2021ab) Icarus, in press, [5] Yada et al. submitted, [6] Cho et al. to be submitted.

小惑星リュウグウの自転による エジェクタ堆積への影響

○平田直之¹ 池谷蓮¹

¹神戸大学惑星学専攻

小惑星には多くの衝突クレーターがある。衝突クレーターから飛び出るエジェクタ粒子の軌道を計算することで、天体表面上におけるエジェクタ堆積物の空間分布を計算できるコードを開発した。実形状と複雑な重力場を加味したコードを開発したことで様々な事が明らかになった。

リュウグウの赤道には大きなクレーターが複数存在している。これらのクレーターのリムは共通して、東側のリムの方が西側のリムより低いような西高東低の地形プロファイルを持つ(Namiki et al. 2019)。その不対称なリムの起源としてコリオリ力の可能性が指摘されていた。自転周期を考慮にいたしたエジェクタ堆積物の空間分布の解析を行ったところ、リュウグウの自転が3.6時間よりも短いような速さで自転している場合、そのような不対称なリムプロファイルがコリオリ力作られることがわかってきた(Hirata et al. 2020)。東西不対称が顕著なクレーター (Urashima, Gendrillon, Kintaro, Kolobok) はリュウグウの自転が速かった時期に形成された可能性を示唆するとともに不対称性を持たないクレーター

(Brabo, Momotaro, Kibidango) は自転速度がある程度落ちてから形成された可能性を示唆する。これらの知見を発展させて、新たにリュウグウの赤道リッジとリッジ上の青みを帯びた部分の形成過程について新たな知見を得た。

リュウグウの特徴としてソロバンのコマのような形状を成していることが挙げられる。この赤道が尾根状に高まっている特徴 (以下赤道リッジ) は 1999KW4 や Bennu などでも多数見つかっている。これらの赤道リッジはその小惑星がかなり速く自転していたことによって形成されたと考えられている。様々な形成モデルが提唱されているが、我々は新たに衝突クレーターから飛び散るエジェクタが赤道に降り積もることで赤道リッジが形成される可能性があることを発見した(Ikeya and Hirata 2021)。またリュウグウの赤道上に見られる青みを帯びた部分についても、エジェクタの堆積で説明できることがわかった(Hirata and Ikeya 2021)。さらにこれらの成果に加えて、小惑星ヴェスタの赤道トラフの形成メカニズムも自転の効果によって曲げられた二次クレーターもしくはRadial Sculptureである可能性があることを明らかにした。

引用 [1] Namiki, N. et al. (2019) Topography of large craters of 162173 Ryugu, abstract #2658 presented at 50th LPSC, Houston, Texas, 18-22 March. [2]Hirata, N. et al., (2021), Icarus 354, 114073. [3]Ikeya R. and N. Hirata, (2021), Icarus 367, 114590. [4] Hirata, N., and R. Ikeya, (2021), Icarus 364, 114474.

ラブルパイル小惑星の自転加速による変形過程の数値計算 とリュウグウやベヌーなどのコマ型形状形成条件

○杉浦圭祐¹, 小林浩², 渡邊誠一郎³, 玄田英典¹, 兵頭龍樹⁴, 犬塚修一郎²

¹東京工業大学 地球生命研究所

²名古屋大学大学院 理学研究科

³名古屋大学大学院 環境学研究科

⁴宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

探査機はやぶさ2・OSIRIS-RExが訪れた小惑星リュウグウ・ベヌーはラブルパイル天体であり、「コマ型」と呼ばれるそろばんの珠のような特徴的な形をしている (Watanabe et al. 2019; Lauretta et al. 2019). コマ型小惑星の多くが自転周期3時間程度的高速自転をしていることから、YORP効果などによる自転加速の結果としてコマ型に変形したと考えられている。しかしながらコマ型に変形するための定量的な条件や変形過程は明らかになっていない。そのため、コマ型形状形成の条件を明らかにすることで、そのような小惑星の物性や形成機構などに制約を与えられると期待される。

我々は自転加速及び高速自転による変形過程及びコマ型の形成条件を明らかにするために、粉体の動力学を扱えるSmoothed Particle Hydrodynamics法 (Sugiura et al. 2018) によるラブルパイル小惑星の自転変形の数値シミュレーションを行った。小惑星リュウグウ程度である半径500 m、密度 1.19 g/cm^3 の球を自転させた。本研究では構成物質の実効的摩擦角(安息角)と自転加速タイムスケールの2パラメータに着目し、どのような条件で軸対称なコマ型が形成可能であるか調べた。

自転加速タイムスケールが1日程度の場合は、自転加速に伴う変形によって軸対称な形状が形成された。図1は自転加速タイムスケールが1日程度の自転加速による変形で形成された天体の形状を表している。実効的摩擦角が 60° 以下の場合では内部変形によって扁平楕円体に近い形状になるが、実効的摩擦角が 80° と高い場合には軸対称な表面地滑りが起きて軸対称なコマ型が形成されることがわかる。 80° の実効的摩擦角は非常に大きいですが、リュウグウのような低重力環境下ではある程度の付着力が存在すれば実現可能である。

自転加速タイムスケールが1ヶ月程度と自転加速が遅い場合も、実効的摩擦角が 60° 以下の場合には同様な変形過程によって同様な形状が形成された。しかしながら、実効的摩擦角が 80° の場合には非軸対称な表面地滑りが起き(図2)、形成される形状も非軸対称な形状になった。このことから、YORP効果のような非常に自転加速タイムスケールが長い機構では非軸対称な形状が形成されると考えられる。

まとめると、軸対称なコマ型の形成には 80° の高い実効的摩擦角と1日程度の速い自転加速機構が必要であることが示唆された。速い自転加速機構としては、小惑星の衝突大規模破壊後の破片の集積による自転加速などが考えられるかもしれない。

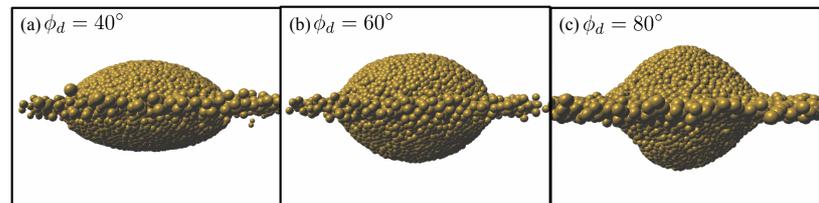


図1: 自転加速タイムスケールが1日程度的高速自転変形後の小惑星形状。実効的摩擦角は(a) 40° 、(b) 60° 、(c) 80° 。

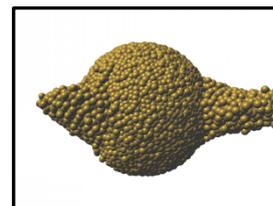


図2: 自転加速タイムスケールが1ヶ月程度で実効的摩擦角が 80° の場合の、表面地滑りが起きている最中の小惑星形状。

小惑星リュウグウの彗星起源説に関する理論的検討

○三浦 均¹, 中村 栄三², 国広 卓也³

¹ 名古屋市立大学大学院理学研究科

² 岡山大学自然生命科学研究支援センター

³ 岡山大学惑星物質研究所

はじめに：小惑星探査機「はやぶさ2」ミッションにより、小惑星リュウグウの詳細な物理的特徴が明らかになりつつある。特筆すべき特徴として、特に、コマ型ラブルパイルである点、および、潜在的に極めて有機物に富む点が指摘されている。リュウグウの起源として、より大きな母天体が破壊的衝突を受け、その衝突破片が重力的に凝集したという説（衝突再集積説）が検討されている。だが、この説では、極めて有機物に富むという特徴は説明できない。本研究では、上に挙げたリュウグウの特徴をすべて説明しうる代替モデルとして提案された「彗星起源説」を理論的に検討した。

モデル：リュウグウの母天体が、内部に数 10 cm 程度の大きさの岩石塊を含む、主に水氷の微粒子からなる半径 3 km の球の形をした多孔質な彗星核状の天体だと考える。この母天体がなんらかの理由によって加熱されると、母天体表面付近から氷が昇華していき、最終的には岩石塊のみが取り残されて小惑星状の天体に至ると考えられる。母天体内部は多孔質なので、氷の昇華は母天体の最表面においてのみでなく、表面下においても生じ得る。本研究では、母天体内部が、氷を含む領域（始原領域）と、氷を失って岩石塊のみからなる領域（マントル）の二層構造を持つと仮定し、多孔質物体内の水蒸気流束の式を用いて母天体内部の水蒸気圧分布の解析解を導出し、母天体中心からの距離の関数として氷の昇華速度を決定した。さらに、この氷の昇華速度の式を用いて、始原領域が氷を失って収縮する様子を数値計算した。この際、取り残された岩石塊は天体中心に向かって崩落するが、崩落後の空隙率は氷昇華前と等しいと仮定した。

また、母天体全体の収縮に伴ってその慣性モーメントが減少するため、母天体が初期に回転していた場合、氷の昇華とともに自転が加速すると予想される。本研究では、慣性モーメントの減少と水蒸気の流出による角運動量の減少を考慮して、母天体の自転角速度の変化を計算した。

結果と考察：母天体が一様に 200 K まで加熱された場合、母天体内部の氷は 10 万年程度でほぼすべて昇華することがわかった。これは、例えば YORP 効果によるスピニアップの典型的なタイムスケールよりも桁で速い。また、母天体にトルクが作用しない場合、氷が完全に昇華すると自転角速度が 3 倍以上に増幅することがわかった。現在観測されている彗星核の自転周期の中央値は約 12 時間であり、もしリュウグウの母天体がこれと同程度の自転周期を氷昇華前に持っていたならば、遠心力によって天体が分裂する限界値付近まで自転が加速しうる。また、氷には星間雲由来の有機分子が微量含まれていると考えられるが、その一部が蒸発残渣として岩石塊上に濃集することで、極めて有機物に富んだ組成になり得るだろう。理論的に予想されるこれらの特徴は、リュウグウの物理的特徴と整合的である。

リュウグウ模擬物質を用いた衝撃回収実験

○大野遼¹・黒澤耕介¹・三河内岳²・岡本尚也¹・松井孝典¹

¹千葉工業大学惑星探査研究センター, ²東京大学総合研究博物館

はやぶさ2探査機の赤外吸収分光観測により、含水鉱物がリュウグウ表層に存在するが、水酸基や水分子の赤外吸収は典型的な炭素質隕石や小惑星ベンヌのそれに比べて微弱であることが明らかにされた [Kitazato et al., 2019]。500°C程度まで加熱した炭素質コンドライト隕石の赤外吸収スペクトルがリュウグウのそれに似ていることから、リュウグウ、もしくはその母天体が何らかの加熱により、揮発性成分を部分的に失ったと考えられている [Sugita et al., 2019]。リュウグウの模擬物質として炭素質コンドライト模擬粉末を用いた衝撃実験によれば、小惑星帯における典型的な相互衝突速度程度の衝撃加熱では脱ガスは非効率であり、衝撃加熱のみではリュウグウの乾燥状態を説明することは難しいことが示唆された。 [Kurosawa et al., 2021]。先行研究では放出されたガスを分析したが、技術的な困難からリュウグウ表面の観察データや回収試料と比較可能な衝撃残渣の計測は行われていなかった。本研究では同様の模擬物質を用いた衝撃回収実験の結果を報告する。

実験は、千葉工業大学に設置されている二段式水素ガス銃を用いて行った。炭素質コンドライト模擬物質を直径 30 mm、高さ 24 mm の円柱状に加工し、チタン製のコンテナ（外径 50 mm）に収納し、厚み 3 mm のチタン板で蓋をした。前蓋に直径約 2 mm のチタン球を衝突させ、標的に衝撃波を作用させた。衝突速度は秒速 6.9 km であった。回収した試料は、衝突点を横切るように切断し、研磨薄片に加工した。回収試料中の含水鉱物の有無を定性的に分析するため、東京大学総合研究博物館の顕微赤外分光計を用いて、薄片試料上の衝突点近傍(衝突による凹みの壁から 1 mm 以内)、中間、遠方に分けて分析を行った。視野は 100 μm 角の領域である。我々の実験系では衝突点から離れると衝撃波が減衰するため、脱水するほどの昇温が起こるのは衝突点のごく近傍に限られることが予想される。現時点では S/N のよいデータを取得するには至らなかったが、薄片上の衝突点遠方及び中間点で含水鉱物が存在している石基部分を分析したところ含水鉱物に特徴的な 2.7 μm 付近の吸収帯を確認した。定性的ではあるが、我々の実験で計測領域における含水鉱物の有無を見分けることは可能であることを示す結果である。衝突点近傍の異なる 4 点を同様の手順と基準で測定したところ、中間、遠方と同程度の水酸基の吸収が見られた。今回の実験では衝撃直下点においても炭素質コンドライト模擬物質からの顕著な脱水は起きておらず、先行研究と整合的な結果となった。本発表では、顕微赤外分光の結果に加え、偏光顕微鏡および走査型電子顕微鏡による鉱物学的組織観察の結果も含めて、炭素質コンドライト模擬物質の衝撃回収試料が経験した温度・圧力と脱水可能性についての考察を行いたい。

戦略的火星探査の概要

○臼井 寛裕¹, 関 華奈子², 藤田 和央¹, 関根 康人³, 山崎 敦¹, 岩田 隆敬¹, 小澤 悟¹,
石上 玄也⁴,

¹宇宙航空研究開発機構, ²東京大学大学院, ³東京工業大学大学院, ⁴慶応義塾大学

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]。

JSMEP では、2030 年代の「火星地下水圏・生命圏探査火星着陸探査」[1] を今後 20 年のマイルストーンと見据え、2020 年代の「MMX」[2] および、それに続く「Marc Ice Mapper 計画」[3] の 3 つからなる、戦略的火星探査計画を提案する。JSMEP 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。つまり、（1）2020 年代中盤の MMX を端緒に、同時期に実施される月着陸探査（SLIM・月極域探査など）で獲得される重力天体着陸技術を生かしながら、（2）2020 年代後半から 2030 年代初頭に向け、火星での着陸実証技術の獲得を目指した火星周回機探査 Mars Ice Mapper を行い、（3）2030 年代の本格的火星着陸探査へとつなげていく。地質学的に多様な天体である火星への着陸探査では、着陸地点の選定が探査のサイエンス価値に直結する。リュウグウなどの小天体とは対照的に、火星に限らず多くの重力天体では、既存の表面分光観測データが充実している場合が多く、それらのデータベースを活用した着陸探査計画立案が求められる。米国と比較した際、日本の惑星探査コミュニティは地球科学分野（地質学・火山学・水文学など）の研究者の取り込みが十分とは言えない。一方、地球科学の諸分野も、生物学などとの融合を進めつつあるが、同時に地球外にも未開拓のフロンティアを強く求めている。火星は両者の融合に最適な研究対象であり、“地球・惑星科学”を文字通り“地球惑星科学”とする可能性を秘めている。

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] 倉本圭, 他 (2018) 太陽系ハビタブル惑星の成立を探る火星衛星探査計画 MMX, *遊星人*, **27**, 207-215. [3] Ianson, E., Davis, R., Meyer, M. & Haltigin, T. (2021) Mars Ice Mapper: Next Steps. *12th Virtual Mars Exploration Program Analysis Group Meeting*.

火星衛星探査計画 MMX: 詳細設計段階における科学検討の深化

○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, 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^{2,15}, 大嶽久志², 尾崎正伸², Sara Russell¹⁶, 佐々木 晶¹⁷, 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¹⁷

1. 北海道大, 2. JAXA, 3. Paris Observatory, 4. 東京工業大, 5. DLR, 6. 会津大, 7. 東京大, 8. 立教大, 9. 千葉工業大, 10. 量子科学技術研究開発機構, 11. Johns Hopkins Univ., 12. 国立天文台, 13. Côte d'Azur Observatory, 14. 東北大, 15. 神戸大, 16. Natural History Museum, 17. 大阪大

2024年打ち上げを目標に開発が進められている火星衛星探査計画 MMX は、基本設計審査を終え、2021年2月からフェーズ C (詳細設計段階) に移行している。始原的炭素質小惑星の捕獲ないし火星への巨大衝突による放出破片の再集積が有力視される火星衛星の起源を明らかにし、水や有機物を含む固体物質の外惑星系から内惑星系への輸送と、火星表層を含む火星圏の変遷・進化に新たな制約を与える MMX 計画の主科学目的にゆるぎはない。MMX 探査機は科学観測機器として、望遠カメラ、レーザ高度計、広角多色カメラ、赤外分光計、ガンマ線・中性子分光計、ダストモニター、イオン質量分析計を搭載し、また、カメラ、熱放射計、ラマン分光装置を具備したローバをフォボスに降ろす。

MMX 探査機は疑似周回軌道からフォボスを詳細に観測し、また、着陸と試料採取を行う。MMX は 2025 年 8 月に火星圏に到着、その後約 3 年間火星圏に滞在し、最初の約 2 年間を主にフォボスの観測と着陸・試料採取に充て、火星周回軌道投入直後とフォボス主観測後にダイモスのフライバイ観測を行う。火星衛星観測の合間を見て火星大気分光撮像を行い、また質量分析計は衛星由来成分だけでなく火星大気流出成分を含みうる周辺イオンを常時的に観測する。

科学観測、着陸点選定、降下着陸上昇、ローバ投下・運用について、運用計画の詳細化が進行している。着陸運用の準備期間やフォボス軌道の一部が地球から見て火星の陰に隠れてしまう期間を考慮し、2027 年 2 月から約 5 か月間の着陸好期の前半にローバ投下と着陸をフォボスの反火星側で、後半に 2 回目の直陸を火星側で行う。周回高度に応じた探査機の指向精度を加味し、十分な科学データの確保および着陸点選定に必要な観測を実現する観測運用計画が完成しつつある。

MMX の観測期間は、他国の火星探査機も稼働を予定しており、ダストストームによる水蒸気の宇宙空間への散逸の加速など新現象の解明に向け、協調観測の可能性が議論されている。はやぶさ 2 の試料分析によって、水と有機物を含む大粒子数の試料を扱うノウハウ、技術、初期太陽系物質進化の新知見が得られつつあり、これらは MMX 試料の分析と科学解釈にも活用される。フォボスのレゴリスには、比較的若い火星クレータからの放出物が 0.1wt%程度含まれているとみられ、2029 年帰還予定の MMX は、初めて火星試料を持ち還る探査機となる。試料中の生命体の痕跡の探索から、本格化しつつある火星生命探査にも MMX 計画は貢献する。

戦略的火星探査：周回機による火星宇宙天気・ 気候・水環境探査計画(MIM)

○関 華奈子¹, 山崎 敦², 臼井 寛裕², 寺田 直樹³, 今村 剛¹, 前澤 裕之⁴,
横田 勝一郎⁵, 二穴 喜文⁶, 中川 広務³, 松岡 彩子⁷, 笠原 慧¹, 齋藤 義文²,
火星宇宙天気・気候・水環境探査計画ワーキンググループ

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 東北大学, ⁴ 大阪府立大学, ⁵ 大阪大学,
⁶ スウェーデン国立宇宙空間物理学研究所, ⁷ 京都大学

今後の太陽系探査の中で火星は、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地球外太陽系天体として、国際的にも重要な探査対象である。我が国においては、JAXA の国際宇宙探査専門委員会を中心に戦略的火星探査プログラムが検討されてきている。その中で、火星宇宙天気・気候・水環境探査計画では、急速に検討が進みつつある Mars Ice Mapper (MIM) との国際協働によって、ハビタブル環境の持続性の理解に向けた、火星宇宙天気・気候・水環境の探求と、着陸探査に向けた着陸技術実証を目的としている。本発表では、この MIM 計画への日本の参画に関する検討のうち、周回機に日本から提供予定の科学機器パッケージの概要および検討状況を報告する。

近年の先行火星探査における新発見も踏まえ、本計画では以下の2つの達成目標を設定している。

- I. 宇宙気候・水環境に関する達成目標「火星の大気上下結合を観測し、水をトレーサーとして地表・地下との相互作用・輸送・散逸を理解するとともに、将来の着陸探査の事前調査を行う」
- II. 宇宙天気に関する達成目標「火星オーロラと残留磁化分布の対応を観測し、南北半球の比較により、放射線環境と大気散逸への固有磁場の影響を理解する」

I については、THSS(テラヘルツ分光装置)、HRMS(高質量分析粒子計測装置)、IDA(イオン速度・温度測定器)から成る大気上下結合パッケージを搭載することで実現する。これにより、世界で初めて表層から高度2 km 以下の大気の上層境界層における水蒸気の分布観測を実現し、地表・地下の水リザーバーと大気の相互作用を明らかにするとともに、下層大気や地殻磁場が大気散逸機構に与える影響を実証的に調べる事が可能となる。また、II については、MAI(火星オーロラカメラ)、MAG(磁力計)、EPD(高エネルギー電子計測器)、ESA(低エネルギー電子計測器)からなる火星宇宙天気パッケージを搭載することにより実現する。

MAVEN が新たに発見した火星オーロラを、その発光の高度・水平分布リモート撮像と広いエネルギー帯での電子・磁場のその場観測を組み合わせることで観測し、地殻磁場強度の異なる南北半球のオーロラ比較の実現により、放射線環境と大気散逸への固有磁場の影響を明らかにする。これにより先行ミッションで成し得なかった、大気散逸に固有磁場が果たす影響を理解する貴重な手がかりを得ることを目指している。

戦略的火星探査：着陸実証機による火星宇宙 天気・気候・水環境探査計画(MIM)

○藤田和央¹，関根康人²，石上玄也³，臼井寛裕¹，関 華奈子⁴，火星宇宙天気・気候・水環境探査計画ワーキンググループ，着陸機による火星環境探査リサーチグループ

¹宇宙航空研究開発機構，²東京工業大学，³慶應義塾大学，⁴東京大学

約 40 億年前の火星においては、濃い大気、河川・湖などの表層水、および磁場が存在し、生命の誕生、生存、および増殖を許容する環境が長期的に存在したことが様々な観測から示唆されているが、現在の火星は、大気が希薄で、極めて低温で乾燥し、強い放射線が地表まで到達するなど、過酷な環境となっている。過去の火星において生命が発生し得たか、現在も生存しているか、という根源的な問いに加えて、将来人類が有人探査や植民活動を行うための居住可能性を明らかにすることを目的として、火星探査リサーチグループ並びに火星宇宙天気・気候・水環境探査計画ワーキンググループにおいては、戦略的火星探査プログラム(JSMEP)を提案し、火星の水環境の進化に注目した探査計画を検討してきた。現在、国際共同ミッションとして Mars Ice Mapper ミッション(MIM)の検討が進められており、当該ミッションにおいて我が国から 200 kg 級の小型ランダを提供することを検討している。

小型ランダミッションの目的は、JSMEP で 2030 年代初頭に実施することを検討している本格的な地表探査ミッションに向けた段階的な技術獲得、JSMEP が標榜する科学探査の実現、さらには将来の国際有人火星探査に向けた知見獲得によって国際貢献を達成することである。JSMEP の基本戦略を踏まえて、小型ランダミッションで獲得する技術としては、目標とする着地点への正確なアクセスを実現する空力誘導と TRN (Terrain Relative Navigation) を備えた EDL (Entry-Descent-Landing) 技術、および火星特有の厳しい熱・電力設計を含む火星表面探査技術を目標としている。

小型ランダで実現するサイエンスとしては、小型ランダのリソース制約を踏まえて、複数の着陸点と、そこで実現する科学観測の組み合わせについて、議論を進めている。第 1 案として、低緯度で氷が浅部地下に存在する可能性があり地下からの供給が期待される領域を着地点とし、そこで温度、風力などの気象情報やカメラによる観測などの基礎的観測に加え、水蒸気、メタン、ダスト、地震、音波、Ne 同位体、レーダによる地下構造等の中からリソースが許容する範囲で観測することを検討している。また第 2 案として、将来の有人火星探査の exploration zone (EZ) として検討が進んでいる領域であって、地下氷床の存在が期待されている北緯 25~40 度領域を着地点とする案も検討している。この案は MIN が目標とする浅部地下氷の探索とも調和的である。現在、開発リスクやコストも含めた総合的なトレードオフ検討を行っており、会場においても貴重なご意見を頂きたい。

003-05

火星探査機 MAVEN のイオン質量分析観測データを用いた火星外気圏大気密度分布の
導出：MMX の将来観測に向けた検討

(Establishing a retrieval method of Martian exospheric density profiles based on pickup ion
measurements of MAVEN: A study for future MMX observations)

○益永圭¹, 寺田直樹², 堺正太郎, 横田勝一郎³, 白井寛裕¹, MSA チーム

(○K. Masunaga¹, N. Terada², S. Sakai², S. Yokota³, T. Usui¹, and MSA team)

1. JAXA/ISAS, 2. Tohoku University, 3. Osaka University

The Martian Moon eXploration (MMX) spacecraft will carry multiple scientific instruments to investigate Mars and Martian moon environments and return samples from Phobos. One of the instruments is the Mass Spectrum Analyzer (MSA) instrument that measures ion velocity distributions and magnetic fields. The high mass resolution ($M/\Delta M > 100$) of MSA will allow us to study ion isotopes such as $^{18}\text{O}^+$ and $^{13}\text{C}^+$ as well as their major ion elements ($^{16}\text{O}^+$ and $^{12}\text{C}^+$). In the future observations of MMX/MSA, we aim to retrieve Martian exospheric density profiles of multiple components, including isotopes, with the MSA's pickup ion measurements around Mars. Such information will be crucial for understanding the evolution history of Mars through atmospheric escape.

In this study, we establish a retrieval method of parent neutral atom density profiles from pickup ion measurements for the future MMX observations. We use O^+ ion measurements of the SupraThermal And Thermal Ion Composition (STATIC) instrument on MAVEN, and retrieve O number density profiles of the Martian exosphere. We study how large altitude ranges of the density profile we can retrieve from the Phobos orbit where MMX will be inserted. We also study the dependence of the retrieved O density profiles on the local time, dust storms, solar wind, and the crustal magnetic field and discuss nature of the O exosphere of Mars.

MMX MEGANE で得られる化学組成データの多変量解析による 火星衛星 Phobos の形成仮説の制約

○平田佳織^{1,2}、臼井寛裕²、兵頭龍樹²、玄田英典³、深井稜汰²、
David J. Lawrence⁴、Nancy L. Chabot⁴、Patrick N. Peplowski⁴、草野広樹⁵

¹ 東京大学、² JAXA 宇宙科学研究所、³ 東京工業大学 地球生命研究所、
⁴ Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory、⁵ 量子科学技術研究開発機構

火星衛星 Phobos の起源において、火星により重力的に捕獲された小天体を起源とする捕獲説、巨大衝突により発生した破片が集積することを起源とする巨大衝突説といった仮説が提案されている。しかし、表面のスペクトル特性や軌道要素などの観測結果からは現在のところ形成過程の特定に至っていない[1]。2024 年に打上予定の火星衛星探査計画 MMX では、リモート観測やサンプル収集を通じて Phobos の形成過程を特定することを科学目標の 1 つとして掲げており、ガンマ線中性子線分光計(MEGANE)を用いた Phobos の周回軌道上からのバルク元素組成の測定が予定されている[2]。Phobos のバルク組成は形成過程や捕獲・衝突天体の組成により異なると示唆されており[3]、MEGANE の観測によりこれまで解明されてこなかった Phobos の形成過程を読み解くことが可能になると期待される。

本研究では、捕獲説の場合は捕獲天体、衝突説の場合は火星と衝突天体の混合物のバルク組成を Phobos のバルク組成と仮定する混合モデルを用いて、MEGANE の観測データによる形成過程の特定について検証した。火星の組成として BSM (Bulk Silicate Mars)[4]、捕獲・衝突天体の組成として 13 種類の隕石[5,6]を仮定した。MEGANE で測定可能な元素のうち、初期組成の情報を保持していると期待される 6 つの親石元素 (Fe, O, Si, Ca, Mg, Th) の存在度を用いて、捕獲・衝突説により説明可能な Phobos 組成を計算した(図1上段・中段)。MEGANE の観測精度を 20, 10, 0 %と変化させた際の形成過程の特定の可能性を比較した (図1下段)。

形成過程の特定のために最低限必要と推定されていた 20%の観測誤差を仮定した場合[2]、MEGANE 観測による 6 元素組成データから、78 %程度の領域で捕獲説と衝突説の区別が可能になることが示唆された。さらに観測精度が 10%まで向上した場合、87%の領域で形成仮説が特定できると考えられる。本研究により、MEGANE 観測によって Phobos の形成仮説の判別が可能であることが定量的に示された。

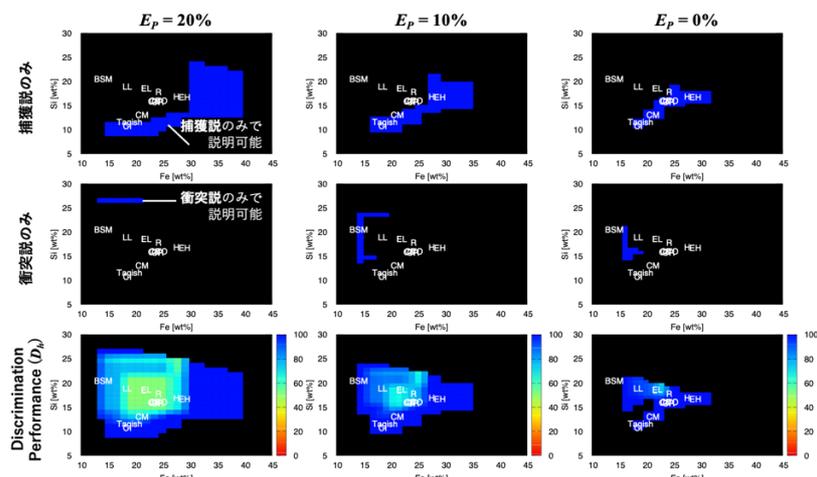


図 1 : 混合モデルに基づいて計算された Phobos のバルク組成とそれを説明できる形成仮説の関係を Fe-Si 図上で表した結果。(上段)青: 捕獲説のみにより説明可能な組成。(中段)赤: 衝突説のみにより説明可能な組成。(下段)形成仮説が特定できる領域の割合(Discrimination performance)の値。

[1] Usui *et al.* (2020), *Space Science Review* **216**, 49. [2] Lawrence *et al.* (2019), *Earth and Space Science* **6**, 2605-2623. [3] Pignatella *et al.* (2018), *The Astrophysical Journal* **853**, 118. [4] Visscher & Fegley (2013), *The Astrophysical Journal Letters* **767**, L12. [5] Alexander (2019b), *Geochimica et Cosmochimica Acta* **254**, 277-309. [6] Alexander (2019a), *Geochimica et Cosmochimica Acta* **254**, 246-276.

MMX 搭載 MSA による同位体比計測に向けた 外圏リトリバルの数値実験

○堺正太郎^{1,2}, 寺田直樹¹, 益永圭³, 中川広務¹, 横田勝一郎⁴, 笠羽康正^{1,2}

¹東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ²東北大学 惑星プラズマ・大気研究センター

³JAXA 宇宙科学研究所, ⁴大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

Mars has experienced a massive atmospheric escape and climate change over the past 4.6 Gyr. The main component of Martian atmosphere is carbon dioxide (CO₂) and how much CO₂ has escaped to space is significant for understanding the climate change on Mars. The isotope ratio is one of the key parameters to understand the atmospheric evolution. Jakosky et al. (2017) suggested from measurements of argon isotope ratio (³⁸Ar/³⁶Ar) based on observations by the Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) spacecraft that one bar or more of oxygen (O) has been lost to space, assuming that the lost O comes primarily from CO₂, but these estimations were not based on direct observations of CO₂. Evolution of O and carbon (C) isotope ratios (¹⁶O/¹⁸O and ¹²C/¹³C) between the surface and upper atmosphere are suitable for understanding the CO₂ loss process, but no observational constraints on these isotope ratios in the upper atmosphere have been made until this point. Japanese future sample return mission "Martian Moons eXploration (MMX)" is a candidate of this observation. Mass Spectrum Analyzer (MSA) onboard MMX can measure the escaping ions with a high mass resolution of $M/dM > 100$. MSA enables us to measure isotope ratios in the escaping atmosphere for the first time, and in addition, it can estimate isotope ratios in the exosphere by retrieving the neutral atmosphere of each isotope from the ion observations. As a first step toward future MMX observations, this study investigates the distribution and energy of oxygen ions (¹⁶O⁺ and ¹⁸O⁺) seen at midnight around the Phobos' orbit, as well as their sources, using test particle simulations under electric and magnetic fields obtained from magnetohydrodynamic simulations (e.g., Sakai et al., 2021). The particle simulations are conducted under certain interplanetary magnetic field (IMF) conditions. The ions that reach Phobos' orbit at midnight are picked up in the induced magnetosphere or the solar wind region. Most of the ions come from the induced magnetosphere around 2000 km altitude, and the energy is as low as several eV. The ions coming from the solar wind reach several keV because of the acceleration by the solar wind electric field. The simulations show that there is a proportional relationship between the energy and the distance from the Phobos' orbit to the pickup position in the solar wind, and that the gradient significantly depends on the IMF direction and intensity. Establishing a retrieval method would enable us to determine the pickup position from the ion energy around the Phobos' orbit in MMX. Finally, the radial ¹⁶O⁺ and ¹⁸O⁺ fluxes around the Phobos' orbit are $10^5 - 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and $10^3 - 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectively. Multiple measurements of isotope ratios at different altitudes by MMX, Curiosity, and ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) would lead to a better understanding of atmospheric evolution on Mars, and this simulation aims to help measurements by MMX.

Spitzer/IRAC による Sh 2-208 の中間赤外線観測： 低金属量環境下における原始惑星系円盤の進化

○安井千香子¹

¹ 国立天文台

われわれは、銀河半径 (R_g) がおよそ 15 kpc 以遠の銀河系外縁部における、星生成の探查とその観測を進めている。銀河系外縁部では太陽近傍と比較して「金属量」が非常に小さい (約 1/10) ことが知られ、星生成過程において重要な加熱・冷却過程や、惑星形成過程において重要な惑星の核となるダスト量の変化が星・惑星形成に与える影響を調べることを目的とする。これまでにおよそ 10 の星生成領域について、すばる望遠鏡による近赤外線撮像を行った結果、原始惑星系円盤の寿命が太陽近傍 (~5-10 Myr) に比べて著しく短くなる (~2-3 Myr) という示唆を得た。

本研究では、Spitzer 宇宙望遠鏡の中間赤外線撮像装置 IRAC を用いて、われわれの銀河系内で最も金属量の低い H II 領域の一つである Sh 2-208 (S208; [O/H] = -0.8 dex) にある若い星生成クラスターの高感度中間赤外線測光を行った。これまでの我々の近赤外線撮像観測によりこのクラスターの年齢を約 0.5 Myr、距離を 4 kpc と導出したが、この距離は最近の Gaia EDR3 による年周視差から導出されるものと一致することが確認された。このような低金属量環境が比較的小さな距離に存在する例は非常に稀であり、そのような星生成領域について、初めて中間赤外線観測による円盤についての定量的な物理量の導出が可能となった。S208 を覆う約 3.5 × 4 arcmin の領域に 96 個の天体が少なくとも 1 つの IRAC バンドで 10σ 以上で検出され、質量検出限界が約 1.0 M_☉ と見積もられた。近赤外線 K_s バンドと IRAC バンドから得られたスペクトルエネルギー分布 (SED) の傾きの空間分布と天体の減光量から、クラスターメンバーとして合計 41 個の候補天体が同定された。クラスターメンバーの SED 分布の傾きの累積分布は、IRAC バンドでは検出されなかったものの近赤外線観測からメンバーと同定された天体も考慮すると、年齢が同程度の太陽金属量環境下にある他のクラスターの分布と有意な差は見られなかった。このことから、円盤内のダストの成長・沈降の度合いは、金属量が ~1 dex 程度の違いでは大きく変わらないことが示唆された。また、1 M_☉ 以上のクラスターメンバーの中で円盤からの中間赤外線超過を示す星の割合は 64%-93% と求められたが、これは太陽金属量環境下での結果と同程度のものだった。このことより、少なくともこのような若い段階においては円盤の進化・消失プロセスに金属量による明確な依存性がないことが観測的に初めて示唆された。

ALMA による原始惑星系円盤の HCO⁺輝線観測ALMA observation of HCO⁺ lines in protoplanetary disks相川祐理¹, Gianni Cataldi^{1,2}, 大和義英¹, 古家健次², MAPS team¹東京大学大学院理学系研究科天文学専攻, ²国立天文台

原始惑星系円盤の輝線観測は、円盤ガスの組成、構造、進化を解明する上で重要である。ALMA 大型プログラム "Molecules with ALMA at Planet-forming Scales" (MAPS)では、IM Lup, GM Aur, AS 209, HD 163296, MWC 480 の5つの原始惑星系円盤において 0.15"-0.3"の空間分解能で 20 本以上の輝線観測を行った[1]。

本研究ではこのうち HCO⁺($J=1-0$)および H¹³CO⁺($J=1-0$)輝線の解析を行った[2]。HCO⁺は円盤の主要なイオン分子であり、分子層での電離度のプローブである[3]。HCO⁺輝線は円盤全体に広く分布しており5つの円盤において 0.3"で空間分布が得られた。H¹³CO⁺輝線は弱く、Matched Filter を用いて GM Aur, HD163296 で6 σ 以上で検出、そのほかの円盤では3 σ 程度で検出された。ドップラーシフトによる周波数のずれを補正しながら回転方向に輝線をスタックすることで、各半径において輝線プロファイルを導出し、両輝線を同時にフィットすることで励起温度、柱密度を求めた。

半径 100 au 以内では HCO⁺柱密度はほぼ一定または中心領域で減少する。100 au 以遠では HCO⁺柱密度は外側に向かって減少するが、HCO⁺/CO の柱密度比はほぼ 10⁻⁵-10⁻⁴である。MAPS チーム内の CO データ解析から得られた CO 存在度も考慮すると、分子層内での HCO⁺の水素に対する存在度は半径 100 au 以遠で 3 \times 10⁻¹¹ - 3 \times 10⁻¹⁰となった。この値は X 線によって電離された円盤モデルの分子層での HCO⁺存在度と整合的である。より内側の領域では、中心にむかって存在度が減少する。これは分子層が高密度な中心面付近にシフトしているためと考えられる。また AS209, HD 163296, MWC 480 のダスト連続波空隙領域において、HCO⁺の存在度が高くなっていることが示唆された。円盤空隙領域での電離度の上昇をとらえており、ガス円盤の空隙構造を探る手掛かりになる可能性がある。

[1] Oberg, K. I. et al. 2021, ApJS in press

[2] Aikawa, Y. et al. 2021, ApJS in press

[3] Teague, R. et al. 2015, A&A, 574, A137

原始惑星系円盤における一酸化炭素同位体組成の測定可能性

○ 吉田 有宏^{1,2}, 野村 英子^{1,2}, 古家 健次², 塚越 崇², Seokho Lee²

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

惑星形成過程は観測、理論、探査、実験などの多方面から精力的に研究されており、その全貌が明らかになりつつある。しかし、惑星系に存在する物質がどこで形成され、どのように変化したかについての理解はいまだ不十分である。惑星系物質の起源と進化のトレーサーとして有用なのが同位体組成である。例えば、太陽系内では酸素同位体組成が不均一であることが地球海洋や隕石、太陽風などのサンプル分析により明らかになっている。具体的には、太陽系内の固体物質は、太陽組成と比較して希少な酸素同位体 $^{17,18}\text{O}$ に質量数に依存せず富む傾向にある。この酸素同位体異常を説明するためには、太陽系形成時に太陽組成よりも少なくとも 25 % 程度高い $^{17,18}\text{O}/^{16}\text{O}$ を持つ水の氷の存在が必要だとされている。そのような水の氷は、酸素が、太陽系母分子雲や原始太陽系星雲で質量非依存の同位体分別を受けた後に生成されたものであると解釈される。同位体分別のプロセスとしては、一酸化炭素分子 (CO) の同位体選択的光解離が提案されている。

CO は分子雲や原始惑星系円盤の気相では水素分子について多い物質であり、メインの同位体 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ に対して $^{12}\text{C}^{17}\text{O}$ や $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ がそれぞれ 1/2600, 1/500 程度存在している。分子雲や円盤は紫外線に曝されているが、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ を解離する波長は表層部分で吸収されてしまう。その結果、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ は内部では分子として存在できる。一方で、 $^{12}\text{C}^{17}\text{O}$ や $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ は存在度の小ささから、紫外線を十分に吸収することができず、内部でも解離されてしまう。結果、分子雲や円盤の内側では CO は $^{17,18}\text{O}$ に乏しくなる。解離されてできた $^{17,18}\text{O}$ 原子はダスト表面反応によって水の氷に取り込まれ、水は $^{17,18}\text{O}$ に富む。

この一連のプロセスのモデル非依存な観測的検証は、分子雲での数例を除いて未だなされていない。特に、惑星系形成の現場である原始惑星系円盤での CO 同位体組成を制限することは重要である。円盤での CO 同位体組成の測定が難しいのは、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 輝線の線中心が一般に光学的に厚く、柱密度の情報を取り出せないためである。しかし、輝線はガスの熱運動に起因する拡がりをもつため、輝線のすそには光学的に薄い部分が存在する。したがって、すそを複数の同位体について観測することができれば、それらの柱密度の比が決定できる。

本手法による測定可能性を具体的に議論するために、うみへび座 TW 星の原始惑星系円盤を想定して、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O } J=3-2$, $^{13}\text{C}^{16}\text{O } J=3-2$ 輝線に関して輻射輸送計算を行った。結果として、円盤外側領域 ($R > 50$ au) では、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ が光学的に薄い速度域が 0.1 km/s 程度存在することがわかった。さらに、 $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ の輝線の同じ速度域を同時に観測できれば、 $^{13}\text{C}^{16}\text{O}/^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ の値を求められる。この値を ~ 30 % 以内の精度で決定するには、ALMA 望遠鏡を用いて速度分解能 0.03 km/s、角分解能 0.5 秒角、on-source で 7.0 時間の観測を行えば良い。 $^{12}\text{C}^{18}\text{O}/^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ は、 $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ が外側領域ではあまり光学的に厚くないためにライン全体を用いて比較的精度良く決定できるので、2つの比から外側領域の平均的な $^{12}\text{C}^{18}\text{O}/^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ が 30 % 以内の精度で求められる。太陽系の酸素同位体異常の理論では、太陽組成に対して最大で 40 % 程度の $\text{C}^{17,18}\text{O}/\text{C}^{16}\text{O}$ の減少が予想されているので、本手法による値の制限で示唆を与えられる。

“H₂O スノーライン以遠に影構造を持つ原始惑星系円盤の赤道面化学構造”“The molecular composition of the protoplanetary disk midplanes with shadow structures beyond the H₂O snowline”

○野津 翔太 (Shota Notsu)¹, 植田 高啓 (Takahiro Ueda)², 大野 和正 (Kazumasa Ohno)³,
野村 英子 (Hideko Nomura)², Christian Eistrup⁴, Catherine Walsh⁵

¹理化学研究所 坂井星・惑星形成研究室 (Star and Planet Formation Laboratory, RIKEN), ²国立天文台 (National Astronomical Observatory of Japan), ³University of California, Santa Cruz, USA, ⁴Max Planck Institute for Astronomy, Germany, ⁵University of Leeds, UK

原始惑星系円盤の化学構造の理解は、円盤観測及び惑星大気観測を解釈する上でも重要である。近年の円盤輻射輸送計算 (e.g., Ueda et al. 2019, ApJ, 871, 10) によると、ダストが動径方向に濃集する領域が存在する場合、中心星からの放射が遮られる事で影構造が形成され、円盤内側領域においても低温な領域が形成されうる可能性が示唆されている。Ohno & Ueda (2021, A&A, 651, L2) は、T Tauri 星 (太陽型の前主系列星) 周りの円盤において H₂O スノーライン (= 1.3 au) 前後で 30 倍程度以上のダスト面密度差があれば、その外側では影になる事で温度が 30K を下回り、N₂ や希ガスなどがダスト上に凍結可能である事を示した。この事は惑星大気組成の解釈、特に木星形成領域の制約に大きく影響を与えうる。しかし上記論文では主要分子の組成を固定した上で、それぞれの凍結・昇華のみを考慮した単純な化学モデルを採用しており、円盤影領域の詳細な化学構造は未だ明らかではない。

そこで発表者らはガス・ダスト化学反応ネットワーク (e.g., Notsu et al. 2021, A&A, 650, A180) を用いた上で、影構造を持つ T Tauri 円盤の赤道面の詳細な化学構造計算を行い、主要分子の組成や炭素-酸素元素組成比 (C/O 比) の変化などを調べた。その結果先行研究では考慮されていない HCN や CH₄, H₂CO などの分子も豊富に存在する事、影構造を持つ円盤では CH₄ などがダスト上に凍結する事により H₂O スノーライン外側でガス中の C/O 比が低下する事、CO や N₂ など 3-7 au の影領域でダスト表面に凍結する事、影領域ではダスト表面で CH₃OH などの有機分子の組成が増加する事などが分かった。発表者らは引き続き、化学進化にとって重要なパラメータである初期化学組成や電離度など (e.g., Notsu et al. 2020, MNRAS, 499, 2229) を変えた円盤での計算も進めている。本発表ではこれらの計算結果を紹介した上で、ALMA などを用いた円盤分子輝線観測との関係や、惑星大気組成に与える影響なども議論を行う予定である。

磁気流体力学的に降着する 原始惑星系円盤のスノーラインの進化： 岩石惑星の水含有量進化への示唆

○近藤克¹, 奥住聡¹, 森昇志²

¹東京工業大学, ²東北大学

惑星はガスとダストからなる原始惑星系円盤と呼ばれる場所で形成される。原始惑星系円盤の中で氷の昇華が起こる軌道をスノーラインと呼ぶ。スノーラインが中心星や円盤の進化とともにどのように移動するかを理解することは、地球をはじめとする岩石惑星の形成を理解するために必要不可欠である。

近年の磁気流体力学(MHD)シミュレーションによると、磁気的に降着する円盤では降着加熱が非効率であることが示されている。Mori et al. (2021)はMHDシミュレーションに基づいた円盤温度進化モデルを構築し、恒星が誕生してから0.6 Myrでスノーラインが1 auに到達することを示した。スノーラインが1 Myr以内に1 auを通過する場合、1 auの位置にある原始惑星に大量の氷が供給され、水惑星になる(Sato et al., 2016)。これは現在の地球の描像と整合的ではないため、このモデルは地球がより内側の軌道で形成されたことを示唆する。しかし、この研究では円盤の温度を決める冷却効率と電離度構造の計算で0.1 μm の均一サイズのダストを仮定していた。現実の円盤では、ダストは合体成長し、サイズ分布を持つと考えられる。

そこで本研究は、ダストの成長によってスノーラインの1 au到達時刻がどの程度変化するかを明らかにするため、冷却効率と電離度分布の両方を任意のダストサイズ分布に対して計算できるようにMori et al. (2021)の磁気降着円盤モデルを拡張した。ダストの成長を具体的に調べるため、ダストのサイズ分布は冪乗則に従うとし、最小ダストサイズを0.1 μm 、最大ダストサイズをパラメータとする円盤温度計算を行った。その結果、最大ダストサイズが10–100 μm 程度になるまでダストが成長すると、磁気降着円盤でも降着加熱が効率的になることがわかった。さらに、スノーラインの1 au到達時間が0.1 μm の均一サイズの場合で0.6 Myrであったのに対し、ダストが成長すると最大で2.5 Myrまで到達が遅れることを示した。乱流拡散が弱く、10–100 μm サイズのダストが沈殿してしまう場合では、降着加熱が非効率になり、スノーラインが1 Myrほどで1 auを通過することも分かった。

本研究の結果は、ダストのサイズ分布を考慮すると、磁気降着円盤においても地球のもととなった原始惑星が1 auで形成された可能性があることを示唆する。1 auで誕生した原始惑星が地球のような水分含有量が少ない岩石惑星に成長するためには、最大ダストサイズがおおよそ10–100 μm であり、このようなサイズのダストが沈殿しないほどの鉛直拡散が必要である。

HD 142527 に付随する原始惑星系円盤表層部での 水氷特性と乱流拡散への示唆

○ 田崎亮^{1,2}, 村川幸史³, 武藤恭之⁴, 本田充彦⁵, 井上昭雄⁶

¹ アムステルダム大学, ² 東北大学, ³ 大阪産業大学,
⁴ 工学院大学, ⁵ 岡山理科大学, ⁶ 早稲田大学

水氷は原始惑星系円盤外縁部で最も豊富に存在する揮発性物質であり、その存在は円盤における化学進化やダスト進化で重要な役割を果たす。円盤内の水氷を観測的に調べる有力な方法は、近赤外線や遠赤外線域に存在するスペクトル・フィーチャーを観測することである。HD 142527 に付随する原始惑星系円盤は近・遠赤外線ともに水氷のフィーチャーが観測されており (Malfait et al. 1999, Honda et al. 2009, Min et al. 2016), 観測的に最も水氷の性質が調べられてきた円盤といえる。Honda et al. (2009) は円盤散乱光の観測から水氷の $3 \mu\text{m}$ フィーチャーを検出し、モデル計算との比較から水氷/シリケート質量比 ~ 2.2 , 半径 $1 \mu\text{m}$ 程度のダストの存在を示唆した。しかし、先行研究で用いられた輻射輸送モデルでは単純な円盤構造や等方散乱が仮定されており、これらの仮定が結果に与える影響は精査されてこなかった。

本研究では HD 142527 周りの円盤の $3 \mu\text{m}$ フィーチャーの観測結果の輻射輸送モデリングを行った。我々は 3次元輻射輸送計算コード RADMC-3D を用い、円盤内のダスト半径、サイズ分布、水氷/シリケート質量比を様々に変化させ、観測されたフィーチャーを再現可能なダスト・モデルを調査した。その結果、水氷/シリケート質量比 $\sim 0.06 - 0.2$ の先行研究に比べて遥かに氷に欠乏したダストで観測結果をよく説明できることが明らかになった。この円盤表層での水氷の欠乏は光脱離反応などによる氷破壊の重要性を示唆している。また、 K , L' バンド間での赤い円盤散乱光を説明するためには、半径 $3 \mu\text{m}$ 程度のダストが必要であることも明らかになった。さらに赤い円盤散乱光は、サブミクロン・サイズの比較的小さなダストが円盤表層部で枯渇している場合によく再現できることもわかった。半径 $3 \mu\text{m}$ 程度のダストを円盤表層に保持するには沈殿を効率的に妨げる機構が必要である。仮に乱流拡散が沈殿を妨げているとすると、ダストの鉛直方向の拡散係数の α パラメータは少なくとも $\alpha \sim 2 \times 10^{-3}$ が必要であると推定される。将来の分子輝線観測による乱流強度推定が HD 142527 円盤におけるダストの鉛直方向の力学を理解する上で重要である。

原始惑星系円盤の非定常な温度構造進化： 新しい数値計算法の開発と熱波不安定への応用

○奥住 聡¹, 植田 高啓², Neal Turner³

¹東京工業大学, ²国立天文台, ³Jet Propulsion Laboratory

原始惑星系円盤の温度構造とその進化の理解は、惑星形成と円盤物質の組成進化の理解のために必要不可欠である。円盤温度構造の理論研究には長い歴史があるが (e.g., Kusaka et al. 1970; Calvet et al. 1991; Chiang & Goldreich 1997)、「温度構造はどのように時間変動するのか?」という基本的な問いの答えは意外にも明らかになっていない。例えば、中心星の放射によって加熱される円盤の温度分布は不安定になりやすく、大きな振幅の波が生じる場合があることが知られている (熱波不安定; Watanabe & Lin 2008)、この波はダストの集積を引き起こす可能性があり、近年の円盤ダストリングの観測的発見をきっかけに再び理論的な注目が集まっている (Ueda et al. 2021; Wu & Lithwick 2021)。しかしながら、このような円盤温度の時間進化を正確かつ長時間にわたってシミュレートできる輻射輸送モデルはこれまで存在せず、熱波不安定による円盤温度構造の長時間進化の様子も未解明のままとなっている。

本研究では、原始惑星系円盤の非定常な温度進化をシミュレーションするための新しい輻射輸送モデルを構築した。この計算法は、2層モデルと呼ばれる従来の簡便な輻射輸送モデル (Chiang & Goldreich 1997) を、円盤表面の大局的な照射構造を考慮できるように拡張したものであり、我々はこれを「大局2層モデル」と呼ぶことにする。この新しい手法は、熱波不安定によって円盤表面に星の直射光が当たらない「影」が形成される場合も取り扱うことが可能であり、さらに放射平衡を仮定しないため温度分布の非定常な進化も取り扱い可能である。円盤の軸対称性を仮定する代わりに輻射輸送計算の大部分を解析的に処理しているため、長時間進化計算のような計算コストのかかる計算にも適している。本研究ではこの新手法を用いて、原始惑星系円盤の寿命に相当する時間スケール (100万年) にわたって熱波不安定を初めてシミュレートした。我々の計算では過去の計算 (Watanabe & Lin 2008) と異なり、光学的に厚い円盤の放射冷却効率の補正 (Wu & Lithwick 2021) を取り入れたため、熱波不安定の時間スケールは場所によって大きく変化する。計算の結果、この時間スケールの空間変化によって温度分布の時間変動がカオス的になることを明らかにした (右図)。本計算法を用いれば、ダストの合体成長や微惑星形成を熱波不安定と同時に計算することも容易である。

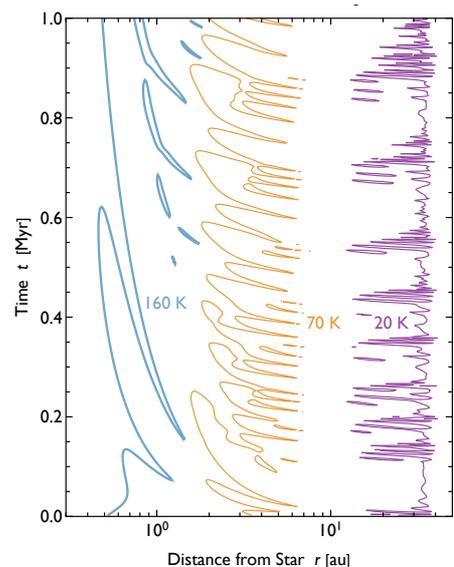


図: 熱波不安定による円盤温度分布の時間変化。3つの等温度線(160, 70, 20 K)の進化を示している。これらの線はおおむねH₂O, CO₂, COのスノーラインに対応する。

円盤風によって散逸する降着円盤に現れる 移動しないピーク構造

○ 瀧哲朗¹, 小林浩², 小久保 英一郎^{1,3}, 鈴木建³

¹ 国立天文台, ² 名古屋大学, ³ 東京大学

惑星系の形成は原始惑星系円盤と呼ばれるガス円盤の内部で進行する。古典的な描像では原始惑星系円盤は強い磁気乱流状態にあり、乱流が磁場を介して駆動する角運動量輸送（乱流粘性）によって円盤ガスは中心星に向かって降着していく。このとき円盤の動径方向分布はシンプルなべき乗則プロファイルで表現できることが知られており、そのような分布を仮定した円盤の大局構造モデルは惑星科学研究の様々な場面において大きな役割を果たしてきた。しかし近年の非理想磁気流体計算の進展によって円盤進化の描像は単純な粘性降着円盤から大きく変わりつつある。それに伴い、円盤の大局構造モデルもまた再考を迫られていると言えるだろう。

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

本講演では、磁気駆動円盤風と円盤風に伴う磁気ブレーキングを考慮した弱乱流円盤進化の1次元モデリングについて紹介する。まず我々は、円盤風が存在する状況においても円盤は定常な面密度分布を実現するという点を数値計算から見出した。この円盤の定常分布は、従来のシンプルなべき乗則プロファイルとは異なり、面密度・圧力それぞれにピーク構造をもつことがある。このようなピーク構造は、ダストや原始惑星の動径方向移動を阻害するように働くため、惑星系の形成過程において重要な意味をもつ。特に今回発見した定常ガス分布の実現において重要なのは、円盤は内側領域から外側領域へ向かって徐々に定常分布に漸近していくという点である。すなわち、円盤はその進化の比較的初期段階において内側領域に定常なピーク構造を形成し、そのような場所で局所的に惑星形成が進行していくといったシナリオを考えることができる。

さらに我々は、この定常なガス面密度分布を解析的に予言することにも成功した。円盤ガスの面密度分布は、乱流強度・磁気ブレーキングの効率と円盤風による質量損失率との比によって特徴づけることができる。今回導出した解析的な表式を用いれば、動径方向の（局所的な）スロープの値やピーク構造の位置など観測的に得られる量を、乱流や円盤風の強さなどの円盤パラメータへと容易に焼き直すことが可能となる。

原始惑星系円盤中のダスト成長が駆動する不安定性と微惑星形成：衝突破壊の影響

○ 富永遼佑¹, 田中秀和², 小林浩³, 犬塚修一郎³

¹ 理化学研究所, ² 東北大学理学研究科, ³ 名古屋大学理学研究科

原始惑星系円盤におけるダスト成長と微惑星形成は惑星形成過程の第一歩であり、その解明に向けた議論が盛んに行われている。例えば微惑星形成過程の候補の1つとして、円盤で起こるダスト-ガス不安定性 (e.g., Youdin & Goodman 2005; Youdin 2005) が従来議論されてきた。ダスト-ガス不安定性による微惑星形成を起こすためには、衝突合体で大きくなったダストをガス面密度の数%以上まで集積する必要がある。この集積機構として我々は、衝突合体成長自体が駆動する円盤の不安定性 (coagulation instability, CI) を提唱した (Tominaga et al. 2021)。CI の非線形成長によりダスト面密度がガスの 10%程度にもなる濃集領域が形成され、その領域ではドリフト速度が最大になるサイズまでダストが成長することがわかっている。また形成された濃集領域では永年重力不安定性が成長できることも我々のこれまでのシミュレーションからわかっている (2020 秋季講演会)。

上述のシミュレーションはダストの完全合体を仮定したものであった。ところが衝突速度がある臨界値を超えるとダストはむしろ破壊されることが分かっており (e.g., Dominik & Tielens 1997; Wada et al. 2009, 2013), 現実的なダスト-円盤進化と微惑星形成過程を解明する上で破壊を考慮した議論が重要である。特に CI の発展過程では (1) サイズ成長に伴う衝突速度の増加と (2) 赤道面でのダスト濃集に伴う衝突速度の減少が同時に起こるため、数値シミュレーションに基づく調査が必須である。そこで本研究では臨界衝突速度に達するサイズまでしかダストが成長できないとする破壊モデル (Okuzumi & Hirose 2012; Okuzumi et al. 2016) を取り入れたシミュレーションを行い、破壊を伴う CI の非線形発展を調べた。その結果、臨界衝突速度が 10m/s 以上の場合には非線形 CI に伴う (2) の速度減少効果が優位になり、ダストは衝突破壊を回避して成長した。特に乱流由来の衝突速度がダスト濃集に伴い減少することが破壊を回避するために重要であると分かった。臨界衝突速度が 3m/s の場合には、ダスト-ガス比が 0 の極限での乱流強度 α_0 が 1×10^{-4} 以下であれば (2) の速度減少効果が優位になりダストが成長できると分かった。一方、臨界衝突速度が 1m/s と低い場合には初期に弱乱流を仮定しても (1) の速度増加の効果が卓越し CI の成長が妨げられることが分かった。

臨界衝突速度は $0.1\mu\text{m}$ サイズの H_2O 氷モノマーから成るダストアグリゲイトに対しておよそ 50-80m/s, シリケートの場合にはおよそ 5-8m/s 程度ということが衝突シミュレーションの研究でわかっている (Wada et al. 2009, 2013)。上記の結果を踏まえると、CI は H_2O スノーライン外側でダスト集積・成長を促進し微惑星形成に発展すると期待される。また弱乱流円盤 ($\alpha_0 < 1 \times 10^{-4}$) であれば H_2O スノーラインの内側でも微惑星形成に重要な役割を果たす可能性も示唆される。

鉛直降着流による巨大惑星の周惑星円盤への 衛星材料物質の供給

○前田夏穂¹、大槻圭史¹、末次竜²、町田正博³、谷川享行⁴

1. 神戸大学、2. 大島商船高等専門学校、3. 九州大学、4. 一関工業高等専門学校

ガリレオ衛星やタイタン等の質量の大きな規則衛星は、周惑星円盤内で固体物質の集積により形成されたと考えられている。しかし、衛星の材料となる固体粒子の供給過程には未解明な点が多い。Tanigawa et al. (2012) では、惑星まわりの局所領域について等温・非粘性流体のシミュレーションを行い、ガスは周惑星円盤に鉛直方向に降着することを明らかにした。また、Homma et al. (2020) では、Tanigawa et al. (2012) で得られたガス場を用いて、ガス抵抗を受ける固体粒子の軌道計算を行い、周惑星円盤に供給されるダストはガスとともに鉛直方向に供給されることを明らかにした。しかし、これらの研究では、惑星質量が $0.4M_J$ (M_J : 木星質量) の場合についてしか調べておらず、衛星材料供給の惑星質量依存性は、未だよくわかっていない。

本研究では、等温・非粘性流体の高解像度流体シミュレーションを、様々な惑星質量の場合について行い、周惑星円盤へのガス供給の惑星質量依存性を調べた。周惑星円盤に降着するガスの原始惑星系円盤内での分布（ガス降着帯）は、惑星質量が大きいほど、動径方向に広がることがわかった。また、ガス降着帯の鉛直方向の分布は、惑星質量が $0.2M_J$ の時は約 $0.3h_g$ 以上に分布し、 $1M_J$ の時は約 $0.1h_g$ 以上に分布する、というように、惑星質量との相関があることがわかった。ガス降着帯の動径方向の幅と、ギャップ形成の効果を考慮すると、ガスと完全にカップルして運動する微小粒子の周惑星円盤への質量降着率は、惑星質量が $0.2M_J$ 以上のとき、惑星質量の $-2/3$ 乗に比例するという準解析解が得られた。

また、得られたガス場を考慮してダストの軌道計算を行い、周惑星円盤への降着率の惑星質量依存性を調べた。原始惑星系円盤内でのギャップ形成の効果と、乱流によるダストの巻き上げの効果を考慮すると、周惑星円盤へのダスト供給率の惑星質量依存性は、流体計算結果から求めた準解析解と概ね一致し、ダスト供給率の惑星質量依存性は、乱流強度依存性より小さいことがわかった。本講演では、これらの結果をもとに、衛星材料供給の観点からガリレオ衛星の形成過程について議論する。

ガス惑星のつくるギャップを跨いだ 円盤ダスト混合に対するダストサイズ分布の影響

○本間 和明¹ 奥住 聡¹

¹東京工業大学 理学院 地球惑星科学系

近年の隕石の同位体分析から、炭素質コンドライトと非炭素質コンドライトは異なる同位体組成を持つことが明らかになっている。この同位体二分性は、炭素質コンドライトと非炭素質コンドライトがそれぞれ独立したリザーバーから形成されたことを意味する。独立した2つのリザーバーが存在したことの1つの有力な説明は、原始太陽系星雲内で早期に存在した原始木星がガス円盤に間隙（ギャップ）を作り、その内側と外側の領域の間での固体物質の移動と混合を抑制したというものである。しかしながら、ダスト粒子の移動がガス惑星のギャップによってどの程度抑制されるかは、粒子のサイズに依存する。特に、ダストアグリゲイトの衝突破壊で生じる小さなダスト粒子は、乱流拡散によってガスギャップを通り抜ける。したがって、ダストのサイズ分布によっては、ガス惑星ギャップによる円盤物質の混合の抑制が効率よく作用しない可能性がある。

そこで本研究では、惑星ギャップが存在する原始惑星系円盤におけるダストの移流拡散・合体成長・衝突破壊を考慮し、ダストのサイズ・空間分布と同位体組成を同時に進化させるシミュレーションを行った。シミュレーションの結果、ギャップの内側への流入を支配するダストアグリゲイトのサイズは、ガス抵抗の強さを表す無次元量であるストークス数と乱流拡散の強度の比で決まることがわかった。この結果は先行研究と整合的であった。またギャップ外側に大きなダストアグリゲイトが堆積することで、ギャップ外側の衝突破片量が増加し、ギャップ内側へのダスト流入量も増加することがわかった。従って、ギャップを跨いだ物質混合が抑制されるかは、ギャップを通過できるサイズのダストアグリゲイトの流入量とギャップ内側でのダストアグリゲイトの流出量から推定できると考えられる。本結果は、木星ギャップの外側から内側へのダスト流出がダスト成長によって妨げられ、かつギャップより内側の領域でも別の何らかの機構によってダストの落下が妨げられたことによって太陽系物質の同位体二分性が生じたことを示唆する。

"No-drift"メカニズムによる微惑星形成

○兵頭龍樹¹、井田茂²

¹JAXA, ²ELSI

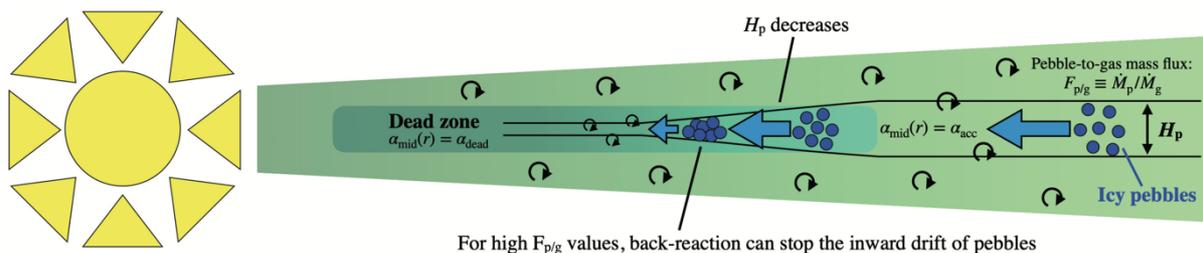
原始惑星系円盤中でペブルはガス抵抗によって中心星に向けて落下する（下図）。その効率があまりにも良すぎるために、惑星形成論は微惑星形成に困難を有してきたが、ペブル落下はもしかすると固体物質をガス円盤中で局所的に集めるプロセスかもしれない。

本研究では、円盤内側にデッドゾーンがある構造を考える。また、ガス降着とペブルの垂直方向の拡散がそれぞれ別の物理で支配されている状況を考える（i.e., different classical α -parameters for the gas accretion, α_{acc} , and for the midplane turbulence, α_{mid} , that regulates the vertical scale height of pebbles; 下図参照）。本研究は、以上の円盤構造において、ペブルが円盤外縁部から落下し、デッドゾーンに流れ込む状況を1次元の移流拡散シミュレーションを用いて調べたものである。

その結果、あるペブル/ガス質量フラックス ($F_{p/g}$) と円盤構造が存在すると (e.g., $F_{p/g} > 0.1$, $\alpha_{\text{mid}}/\alpha_{\text{acc}} < 10^{-2}$ w. $\alpha_{\text{acc}} = 10^{-2}$; α_{mid} decreases with decreasing the heliocentric distance)、ペブルがデッドゾーン内で“流れない/暴走的に溜まる”状況が発生することが明らかになった。

というのも、ペブルがデッドゾーン内で中心星落下するにつれて α_{mid} がより小さくなり、その結果スケールハイト (H_p) が小さくなり、円盤中心面でペブルがより空間的に濃集する。そうすると、バックリアクションによってペブルの落下速度がより小さくなる。そしてこれがある臨界条件を超えると暴走的にペブルが溜まる状況になるということである（"no-drift"メカニズム）。

このようなペブルの濃集が効率的に起こる場所・条件を理解することは、微惑星形成過程の理解に本質的に重要となる。本研究は、Hyodo R., Ida S., Guillot T. (2021c) A&A, 645, L9 にまとめ、出版されている。また本講演では、streaming instability を考慮して、no-driftメカニズムから生まれる微惑星分布についても議論する（Hyodo+2021f, submitted）。



磁気円盤風駆動の層流周惑星円盤における 微衛星の形成

○芝池諭人¹ 森昇志²

1. ベルン大学 2. 東北大学

ガス惑星を周回する巨大衛星は、ガス集積過程の副産物である周惑星円盤の中で「微衛星」が集まってできたと考えられてきた。しかし、乱流円盤内でのダストの合体成長による微衛星の形成には、微惑星形成と同様に、ダストが十分に周惑星円盤に供給されない限り、ペブルサイズまで成長すると中心惑星に向かって落下してしまう問題があるとわかった (Shibaïke et al. 2017)。従って、微衛星形成は、特殊な状況でない限り困難だと考えられてきた。また、周惑星円盤における非理想 MHD 計算はこれまでに十分に行われていない。

そこで、我々は3つ全ての非理想 MHD 効果を含む3次元非理想局所 MHD 計算を行い、周惑星円盤の描像を明らかにした。さらに、その結果と整合的な1次元周惑星円盤モデルにおける、ダストの合体成長による微衛星の形成を調べた。

結果、我々の非理想 MHD 計算によって、磁気応力により円盤の降着が駆動されることがわかった。また、30木星半径より内側、すなわち周惑星円盤の衛星形成領域において、円盤風が円盤表面から放出されると推定された。このとき、十分な円盤降着によりガス面密度は低く保たれる一方で、円盤は層流となり、乱流によってダストが赤道面から高く巻き上げられることがないとわかった。ただし、ケルビン-ヘルムホルツ不安定により、ダストのスケールハイトが極端に小さくはならないこともわかった。結果として、赤道面におけるダストの密度は比較的高く保たれ、効率的な合体成長が可能となった。得られた微衛星形成条件は、乱流円盤における条件よりも大きく緩和されることがわかった。すなわち、周惑星円盤に流入するダストとガスの質量フラックス比が0.02より大きければ、氷微衛星の形成が可能であるとわかった(図1)。これは、最近のダスト-ガス3D流体計算によれば、到達可能なダスト/ガス比である (Szulágyi et al. 2021)。

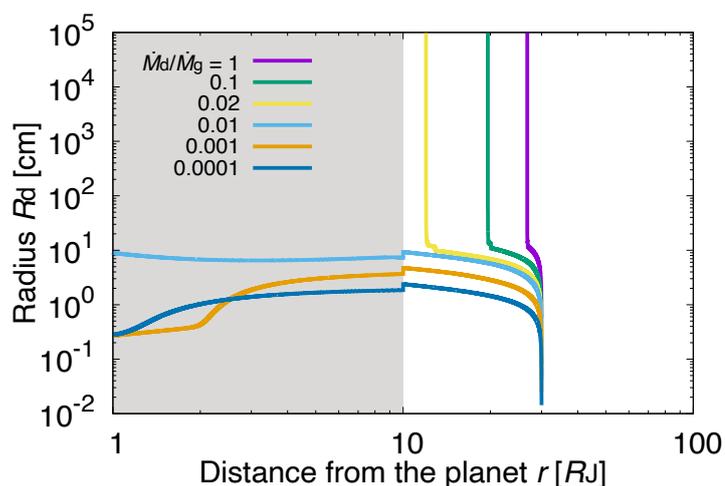


図1. 層流周惑星円盤におけるダスト(ピーク質量)の合体成長。線の色は円盤に流入するガスのダスト/ガス質量比、灰色の領域は水のスノーラインの内側を示す。Shibaïke & Mori (submitted)の図を改変。

タンデム惑星形成論による岩石惑星の質量と組成

○二村徳宏¹、戎崎俊一²

¹日本スペースガード協会、²理研

タンデム惑星形成論 (Ebisuzaki and Imaeda, 2016; Imaeda and Ebisuzaki, 2015) をもとに岩石惑星の質量進化および軌道進化を明らかにした。さらに、岩石惑星および微惑星の材料となる物質が形成される領域の温度・圧力・ダスト/ガス比を求め、これらの結果から平衡凝縮論 (e. g., Eble and Grossman, 2000) を用いて、岩石惑星および微惑星の化学組成を導き、地球の化学組成の推定値および隕石の化学組成の分析値を説明した。本モデルは太陽系の地球型惑星の形成を再現するものであると考えている。

タンデム惑星形成論 (Ebisuzaki and Imaeda, 2016; Imaeda and Ebisuzaki, 2015) による原始惑星系円盤は、中心星に近い方から乱流領域、静穏領域、そして再び乱流領域という構造を持ち、乱流領域と静穏領域の境界では、効率的に固体粒子が集積し、そこで惑星が形成される。タンデム惑星形成論では、微惑星形成までの過程が精密に議論されているが、本研究では、この後の岩石惑星形成についての理論構築を行った。太陽に近い方の乱流領域と静穏領域の境界 (岩石惑星形成領域) で、効率的に固体粒子が集積して微惑星が成長し、岩石惑星サイズになると動径方向外側への移動の影響 (e. g., Lyra et al., 2010) を強く受ける。これにより、地球質量程度になると固体粒子の集積する岩石惑星形成領域から離れ、動径方向外側へ惑星が移動することを明らかにした。そして、岩石惑星形成領域にダストが集積し続けている間は、そこに次の岩石惑星が形成される。原始惑星系円盤における質量降着の減衰の時定数が、岩石惑星の動径方向の移動の時定数より小さくなるまで計算を行った。本モデルでは中心星の特徴に応じて、いくつかの地球型惑星が形成された。

次に、太陽系に近い結果について、惑星の進化段階における温度・圧力・ダスト/ガス比を求め、平衡凝縮論 (e. g., Eble and Grossman, 2000) を用いて凝縮物質を求め、形成した惑星や微惑星の化学組成を導いた。地球型惑星の化学組成について、難揮発性元素は、地球の化学組成の推定値によく合う結果を示した。揮発性元素は、マグマオーシャンや ABEL 爆撃 (Maruyama and Ebisuzaki, 2016) などの効果を考える必要がある。

ダストから惑星への統一シミュレーションによる 巨大ガス惑星形成

○小林浩¹、田中秀和²

¹名古屋大学、²東北大学

原始惑星系円盤の中で地球の10倍程度の質量までに成長した固体核がガス集積をして木星のような巨大ガス惑星は形成されたと考えられている。しかし、固体核は数十万年の短時間で中心星に落下してしまうので(I型惑星移動)、落下よりも早く固体核がガス集積するほど大きくなれるかが大きな懸念であった。固体核が微惑星ではなく、小石サイズ天体を集積して成長されると、I型惑星移動と同等の短時間で固体核集積を実現できることから、「小石集積モデル」の研究が盛んに行われている。しかし、「小石集積」では、ほとんどの小石は固体核に集積されずに中心星に落下して失われる。簡単な見積もりから、10倍地球質量の固体核を形成するのに、最低でも300倍以上の地球質量の固体が必要であることが分かる。平均的な原始惑星系円盤の固体質量はもっと小さい。つまり、「小石集積」では平均的な原始惑星系円盤からガス惑星を作ることはできない。この問題を解決するには落下が速い小石サイズの天体から落下が遅い微惑星サイズの天体へさらに合体成長させることが有効である。この効果を調べるには、幅広いサイズの天体の衝突進化を取り扱う必要がある。

この要請のもと、本研究では、ダストから惑星までの進化と円盤内での移動を一貫して取り扱うシミュレーションを行った。このシミュレーションでは、ダストの空隙率をモデル化してあたえ、ガス抵抗による動径移動やI型惑星移動の効果を考慮して行った。また、簡単のため、すべての衝突は完全合体を仮定した。原始惑星系円盤は108 AU程度の大きさで、固体総質量は210地球質量とした。シミュレーションの結果、ダストは円盤の内側から成長し、成長前線は円盤外側に移っていく。10 AUより内側の円盤では衝突合体により微惑星へ、そして原始惑星へと成長していく。一方、外側の円盤では小石サイズまで成長した天体がガス抵抗により内側の円盤に移動していく。この小石サイズの天体も10 AU以内に移動すると微惑星サイズへと成長し、動径移動が遅くなるため、内側円盤の固体面密度を上げる。また、微惑星サイズとなった天体は、大きな微惑星へと成長する前に、原始惑星に集積される。固体面密度の上昇と比較的小さな微惑星の集積は、固体核形成を大幅に加速することが明らかになった。その結果、数十万年程度の非常に短い時間でガス惑星の固体核を形成し、I型惑星移動により落下する前にガス集積が可能な固体核形成に成功した。標準的なモデル(氷も含めた金属量が1.7%)では太陽系のような5 AU付近のガス惑星形成が形成される。一方、系外惑星の巨大ガス惑星は2-3 AUに軌道を持つものが多いが、このような惑星系の形成は初期の固体量がより少ない円盤(氷も含めた金属量1%)で形成される。

巨大惑星と円盤ガスによる微惑星の軌道進化

Planetesimal Dynamics in the Presence of a Giant Planet

○ Kangrou Guo^{1,2}, Eiichiro Kokubo^{1,2}

¹ 東京大学 ² 国立天文台

Standard models of planet formation explain how planets form in axisymmetric, unperturbed disks in single star systems. However, it is possible that giant planets could have already formed when other planetary embryos start to grow. We investigate the dynamics of planetesimals under the perturbation of a giant planet in a gaseous disk. Our aim is to understand the effect of the planet's perturbation on the formation of giant planet cores outside the orbit of the planet. We calculate the orbital evolution of planetesimals ranging from 10^{13} to 10^{20} g, with a Jupiter-mass planet located at 5.2 au. We find orbital alignment of planetesimals distributed within disk radius of roughly 9–15 au, except for the mean motion resonance (MMR) locations. The degree of alignment increases with increasing distance from the planet and decreasing planetesimal mass. Aligned orbits lead to low encounter velocity and thus faster growth. The typical velocity dispersion for identical-mass planetesimals is on the order of 10 m/s, except for the MMR locations. The relative velocity decreases with increasing distance from the planet and decreasing mass ratio of planetesimals. When the eccentricity vectors of planetesimals reach equilibrium under the gas drag and secular perturbation, the relative velocity becomes lower when the masses of two planetesimals are both at the larger end of the mass spectrum. Our results show that with a giant planet embedded in the disk, the growth of another planetary core outside the planet's orbit might be accelerated in certain locations.

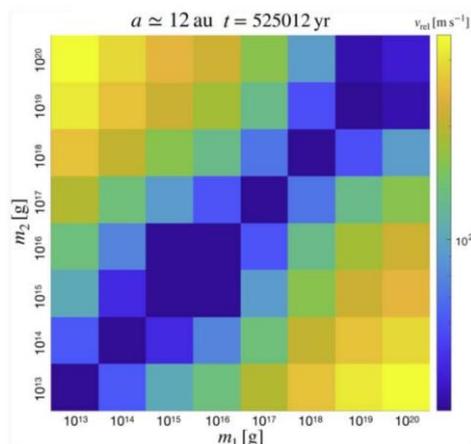


Fig.1: Relative velocity between particles of m_1 and m_2 near 12 au at $t=525012$ yr.

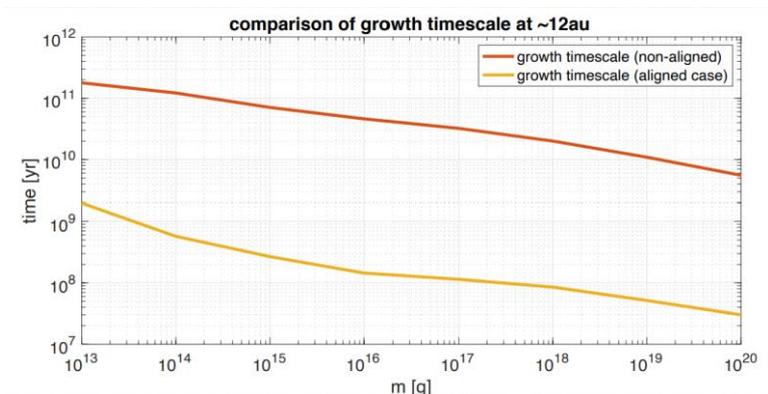


Fig.2: Growth timescales with orbital alignment (yellow) and without orbital alignment (red) near 12 au.

Evolution of Debris Disks Caused by Giant Impacts in the Final Stages of Planet Formation

○Leonardo M. V. Teixeira¹, Hiroshi Kobayashi¹

¹Nagoya University

Warm Debris Disks (WDDs), observed from the infrared excesses of main-sequence stars, are located at the terrestrial planet forming regions around their host stars. The lifetimes of dust grains in WDDs are much shorter than the stellar ages, so that a supply of collisional fragments is necessary to maintain those WDDs. The infrared excesses are explained by the fragments ejected from collisions between planets (called giant impacts), which are expected to occur in the final stages of terrestrial planet formation. Those fragments collide with each other, resulting in still smaller fragments. The successive collisions among the fragments grind them down until micron-sized or smaller fragments are blown out by stellar radiation pressure. Therefore, the collisional cascade decreases the total mass of fragments in the disk. In addition, the accretion onto planets also decreases the total mass of fragments.

We first calculate the orbital evolution of protoplanets in the giant impact stage via N-body simulations of protoplanets orbiting around a host star. We then obtain the record of giant impacts between protoplanets, and the snapshots of their locations and velocities at the giant impacts. We then chose a data set of a giant impact and protoplanets, and investigate the evolution of the fragments originated from the giant impact under the influence of the protoplanets via N-body simulations with collisional cascade. We use the superparticle approximation for the fragments, and assume that they do not have gravitational interaction with each other. The mass loss of fragments due to the collisional cascade is calculated from the orbits of surrounding superparticles. Superparticles can collide with protoplanets so that the accretion of superparticles is automatically calculated.

The fragments ejected from the giant impact occurring at 0.57AU form a disk like structure with a width of ~ 0.15 AU around 0.6 AU in a short timescale (~ 1000 years). The total mass of fragments then decreases by the collisional cascade among the fragments in 10^4 years. As these orbits evolve, some of fragments are scattered into wider orbits by neighbor protoplanets. Such a wide distribution of fragments decreases the efficiency of the collisional cascade. On the other hand, the accretion rate tend to relatively increase the accretion onto protoplanets.

SR 21 : 複数のリングと非対称構造を持つ円盤

○楊 毅^{1,2}, 武藤 恭之³, 橋本 淳^{4,1}, 百瀬 宗武⁵, 田村 元秀^{4,2,1},
Hauyu Baobab LIU⁶, Ruobing Dong⁷,

1. 国立天文台, 2. 東京大学, 3. 工学院大学, 4. アストロバイオロジーセンター, 5. 茨城大学, 6.
Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica, 7. The University of Victoria

惑星形成過程を解明するためには、原始惑星系円盤内のダスト成長過程の理解が不可欠である。近年、アルマ望遠鏡を用いた高空間分解能のミリ波観測やすばる望遠鏡など 8m 級望遠鏡の補償光学を用いた近赤外線観測より、円盤の詳しい構造が明らかになってきた。中でも一部の円盤は三日月のような非対称の構造を持っている。そのような構造は、ダストの蓄積を示唆していると考えられる。したがって、円盤の非対称構造に関する研究はダスト成長過程の解明の手がかりとなる。

本研究では、円盤の非対称構造の進化とダスト成長過程を解明に着目し、若い星 SR 21 の円盤観測を行った。その結果、アルマ望遠鏡の Band 6 (1.1-1.4 mm)を用いて 0.03"の空間分解能で SR 21 の円盤構造を成功に解明できた。SR 21 の円盤は、二つのリング構造（半径 0.21"と 0.41"）を持っていることがわかった。また、三つの非対称構造が検出され、一つは内側のリングに有り、Inner Arc と名付け。そのほかの二つは外側のリングに有り、South Arc と North Arc と名付けた。

さらに、アルマ望遠鏡 Band 3(2.6-3.6 mm)の観測データと VLT/SPHERE の近赤外観測 (H-Band, 1.6 μm) の比較を行なった。アルマ Band 3 のデータには、Band 6 に検出された非対称構造も見える。しかし、Band 3 の South Arc にはいくつかの塊が含まれている。このような塊は、理論で予言された非対称構造におけるダストが合体し構造であることを示唆している。また、Band 3 と Band 6 データを用いて spectral index map を求めた。この spectral index map によると、外側のリングの index は 3 より大きい、しかし内側のリングの index は 3 より小さい。従って、外側のリングと内側のリングのダスト性質は大きく違うと考えられる。さらに、VLT/SPHERE の観測データと比べると、内側の非対称構造と近赤外観測に検出された spiral arm の位置が一致しており、spiral arm と非対称構造の関連性を示唆している。

惑星への小天体集積率及び集積熱についての 理論的研究

○岡村 達弥¹, 小林 浩¹

¹名古屋大学

近年の惑星形成理論では km サイズの微惑星に加えて、微惑星よりも小さい mm-cm サイズ粒子 (ペブル) の降着による惑星形成が盛んに議論されている (e.g., Ormel & Klahr 2010, Lambrechts & Johansen 2012)。これら固体小天体は原始惑星系円盤、惑星大気中をガス抵抗を受けながら運動しており、ガス抵抗により惑星と小天体の衝突断面積が決まる。我々はこれまでの研究で、原始惑星周りの原始惑星系円盤の流体シミュレーションとそこでの小天体の軌道計算を組み合わせることで、原始惑星への小天体の集積率を導出した (Okamura & Kobayashi 2021)。この結果を現実的な惑星形成に適応するとき、原始惑星周りの大気構造が重要になるが、大気構造は小天体が集積するときどこで集積熱を解放しているかに依存する。そこで、本研究では小天体集積における集積について調べる。

本研究では、原始惑星系円盤の中の原始惑星への小天体の集積率を求めた我々の過去の研究 (Okamura & Kobayashi 2021) と同様な設定でシミュレーションを行う。簡単にこの設定を説明すると、まず惑星重力により摂動を受けた原始惑星系円盤のガスの流れを 3次元流体シミュレーションで求める。次に、流体シミュレーションで得た結果を用いて、ペブルから微惑星まで幅広いサイズの小天体の軌道を計算する。原始惑星に衝突する小天体が集積可能な小天体なので、この小天体の軌道進化に注目して解析することで集積熱を導出する。

原始惑星に衝突 (集積) する小天体は、原始惑星周りの大気との摩擦 (ガス抵抗) により運動エネルギーを失い、大気に捕獲されて集積する。小天体は一度惑星大気に捕獲されるとそれ以降は、ガス抵抗と惑星重力により決まる終端速度で原始惑星に向かって運動していき、最終的に原始惑星に衝突することがわかった。大気がなければもっと速い速度で原始惑星に向かっていくので、その差のエネルギーを大気に熱として放出しながら運動していることになる。そのため、惑星の大気の密度構造は変化する。これまでの研究では原始惑星の表面で熱を解放すると仮定して、大気構造を決める研究が多かったが、本研究の結果を用いると集積熱が大気中で捨てられるため低高度の大気の密度が上がる。この効果により、低高度の大気に捕獲される比較的大きな天体の集積率は従来の見積もりに比べて大きくなることがわかった。

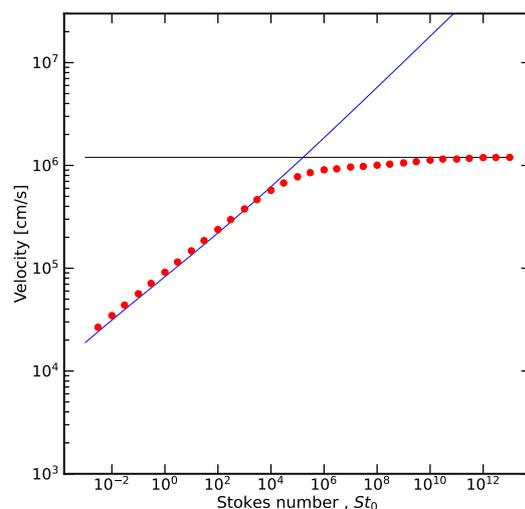


図 1: 惑星表面での小天体速度の例。赤丸：軌道計算結果、青線：終端速度、黒線：惑星の脱出速度

惑星形成が太陽内部構造に及ぼす影響について

○ 國友 正信¹, Tristan Guillot²¹ 久留米大学, ² コート・ダジュール天文台

太陽組成の理解は太陽系初期組成の理解にもつながるため、太陽物理・恒星物理のみならず惑星科学においても重要である。しかし、太陽の組成は未だに議論が続いている。これは、2000年代に太陽表面組成の見積もりが改訂されると、理論モデルが予言する太陽の内部構造モデルが日震学観測による音速分布の制約と合致しなくなったためであり、太陽組成問題と呼ばれている。これまでこの問題に対して、主に太陽内部のオパシティの不定性が注目されてきた。本研究では別の可能性として、惑星形成の影響を検討する。原始惑星系円盤では、難揮発性成分（ダスト）の落下や惑星への成長、円盤風による揮発性成分の流出など、円盤ガスの組成は時間とともに変化する。そのため、円盤降着により太陽内部に組成勾配が生じ、音速分布に影響している可能性がある。本研究では原始星段階から太陽年齢までの進化を追う計算を多数行った。太陽年齢での計算結果と観測データからカイニ乗値を計算し、Simplex法によりこれを最小にする入力パラメータを探索した。まず降着物質の組成を変化させない場合、太陽内部のオパシティが標準的な値より12%程度大きければ音速分布が大きく改善されることがわかった（図1左）。これは近年の実験により示唆された値と同程度である。一方、オパシティを変えず降着物質の組成進化のみ考慮した場合、音速分布の不整合は残されたままであった。これは原始太陽は対流層が厚く、中心部にしか組成勾配が生じないことによる。両者を考慮した場合、日震学の音速分布を再現し、かつ太陽中心部の金属量が高くなることがわかった（図1右）。近年のニュートリノ観測の結果は太陽中心の金属量が高いことを示唆しており、惑星形成の影響と整合的である。オパシティの変化と惑星形成過程はどちらも太陽系の初期組成の取りうる値に影響し、本研究では初期金属量が0.0127–0.0157、初期ヘリウム組成が0.268–0.274の範囲にあれば観測を再現する結果を得た。

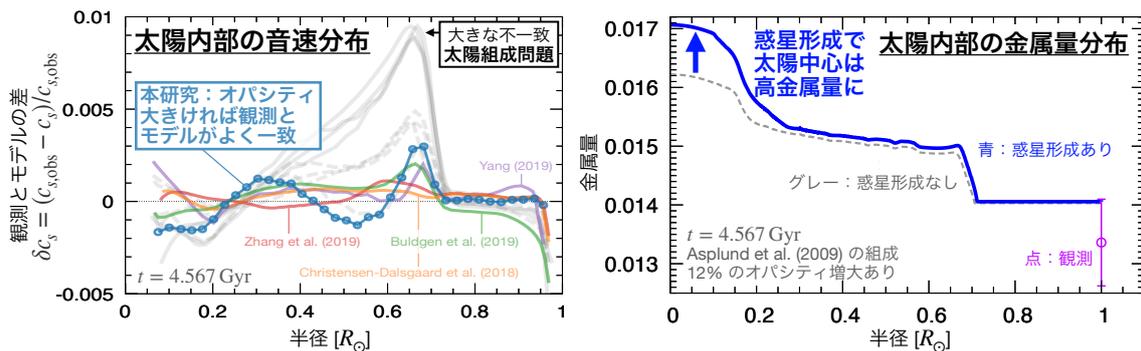


図 1: (左) 太陽内部の音速分布。実線は Asplund et al. (2009) の組成、破線は Grevesse & Sauval (1998) の組成を用いた結果。グレーは標準的な恒星進化モデル、青が本研究、それ以外の線は先行研究の結果。(右) 太陽内部の金属量分布。青・グレーの線はそれぞれ惑星形成あり・なしの結果。

水星の分光スペクトル分類マップに基づく 水星の表面進化の考察

○晴山慎¹、石原吉明²、大竹真紀子³

¹ 聖マリアンナ医科大学、² 宇宙航空研究開発機構、³ 会津大学

水星の分光スペクトルは、過去の観測によって、月のスペクトルと比較して分光スペクトルの吸収は浅く、また地域差が小さいことが知られてきた。このような観測結果と月研究との比較から、水星の表面は斜長岩質であり、太陽に近いため宇宙風化がかなり進んでいると考えられてきた。しかしながら、米国の水星探査機 MESSENGER による水星表面の大量の硫黄の存在[1]やグラファイト地殻の形成に関連する炭素の存在[2]といった発見は、これまでの水星の地殻形成史に修正を迫っている。

水星地殻の進化を巨視的に理解するためには、水星の全球地質図は重要な情報の一つである。近年、MESSENGER 観測の水星の全球スペクトルデータ[3]と全球化学組成データ[1, 4]は公開されており、全球地質図を作成することが可能になった。そこで、我々は、MESSENGER-MDIS で得られた 8 バンドの可視・近赤外分光スペクトルデータを教師なし自動分類法の一つである ISODATA 法を用いて、緯度 65 度以内のスペクトルデータを分類した。同様の方法は月探査機かぐやで得られた分光データに適用され、実証されている[5]。スペクトル分類の結果、水星の分光スペクトルは大きく 2 グループに分類され、それぞれ 4 クラス（グループ 1）と 9 クラス（グループ 2）の総計 13 クラスに分類結果された。

この分類結果に基づき、各分類クラスのスペクトル特徴量の平均を抽出し、特徴量間の比較、特徴量と元素濃度・クレータ密度との比較から、水星の表層進化について考察を行った。その結果、水星の分光スペクトルは、表層の大部分は宇宙風化が大きく進み多くの情報が減衰しているが、産状や分類クラスごとに特徴があることが明らかになった。特に、水星の分類クラスの地域分布を月の自動分類による地域分布と比較したところ、水星の分類クラスの地域分布は月の海と高地に対応するような分布となった。このことから、多くの分類クラスで構成される水星北部の広大な平原(north smooth plane)は、月の海のように、複数の溶岩噴出によって形成されたと考えられることがわかった。

本研究は、JSPS 科研費 基盤研究 C(17K05641) によって助成されています。

[1] Weider, S. Z. et al. (2016), GRL, 43, 3653-3661. [2] Peplowski, P. N. et al. (2016) Nature Geosci. 9, 273-276. [3] <http://messenger.jhuapl.edu/Explore/Images.html#global-mosaics>. [4] Evans, L. G. et al. (2015) Icarus, 57, 417-427. [5] Hareyama, M. et al. (2019) Icarus, 321, 407-425.

Mineralogical Characterization of Martian Carbonate Analogs

○ Chang-Chin Wang¹, Tomohiro Usui^{1,2}, Haruna Sugahara², Ryoichi Nakada³, Mizuho Koike⁴, Hans Amundsen⁵

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

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

³Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

⁴Earth and Planetary Systems Science Program, Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

⁵Vestfonna Geophysical

Noachian Martian carbonates are important for understanding the habitability of ancient Mars because of their relation to aqueous environments. A unique Martian meteorite, Allan Hills (ALH) 84001, is the only available sample that contains Noachian carbonate deposits. However, the lack of geological context of ALH 84001 makes it difficult to determine the formation process and environment of its carbonates. Meanwhile, carbonate-bearing rock from the Bockfjord Volcanic Complex (BVC) on the Spitsbergen Island (abbreviated as BVC carbonates hereafter) is regarded as a terrestrial analog for Martian carbonates due to their morphological and compositional similarities. In order to constrain the formation environments of ancient Martian carbonates, this study focuses on characterizing the petrology and mineralogy of BVC carbonates.

Two polished thick sections of BVC carbonates are studied using an optical microscope and a scanning electron microscope with energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS) at ISAS, JAXA. The first sample is a basaltic rock consisting of two lobes cemented together by carbonates. Its basalt portion consists mainly of clinopyroxenes (diopside and augite), feldspar-like glassy mesostasis, and magnetite grains. Phenocrysts and possible mantle xenocrysts of olivine and possible xenocrysts of orthopyroxene are also present. A large mantle xenolith (~1cm) is identified in one of the lobes. It contains mostly large olivine crystals, along with some orthopyroxene, clinopyroxene, and spinel. Both the olivine (Fo₉₁₋₉₃) and the clinopyroxene (En₄₉₋₅₃) have higher Mg contents compared to those of the phenocrysts in the host basalt: olivine (Fo₈₂₋₈₄) and clinopyroxene (En₂₇₋₄₃). Zoned, globular carbonate deposits are found on the outer surface, along cracks in both the host rock and the xenolith, and within vesicles in the host rock. Based on their Fe contents, these carbonates can be classified into three types: (1) Fe-poor carbonates, which usually have Mg-rich cores, alternating layers with different Mg and Ca abundances, and an abrupt shift to Fe-rich outermost layers. (2) Fe-rich carbonates with either Mg-rich cores and Fe-rich rims or more complex zoning patterns. (3) Intermediate carbonates, whose interior composition is similar to that of Fe-poor globules but become gradually more Fe-rich towards the rim. Type (1) is mainly found on the outer surface and along cracks, while type (2) is found in vesicles of the host rock. Type (3) is found both in vesicles and along cracks. Non-globular, Mg-rich carbonate is also identified between crystals in the xenolith.

Alteration phases such as phyllosilicates and silica are also identified. Layered talc is present between the host rock and Types (1) and (3) carbonate globules. Talc is also found with magnesite in the xenolith. Silica phases are found filling interstitial voids in the xenolith and lining vesicles with Types (2) and (3) globules. Zeolite is associated with some Type (2) globules and magnesite in altered host rock. Fe sulfide grains are present in all types of carbonate deposits and talc associated with them but are more common in Type (1) globules. The second sample almost entirely consists of carbonates. The carbonates are layered and vary in color, texture, and Mg and Ca contents, but Fe content is very low overall. A porous vein contains small, polygonal globule-like carbonates with dolomite cores and magnesite rims. Fe sulfide grains are found in the carbonates.

The presence of alteration products (zeolite and talc) is consistent with a hydrothermal origin of the carbonate globules. The three types of carbonate globules with different zoning patterns from those in ALH 84001 show a broad diversity of carbonates in mafic igneous rocks that underscores the value of Martian analogs in providing a larger sample size. Moreover, the well-preserved petrographic relationship between the carbonates, original mafic silicate phases, and alteration products, in contrast to ALH 84001, will allow future studies to better understand the carbonate formation process on ancient Mars.

二価鉄光酸化反応による古 Gale 湖の酸化還元成層 条件と古火星水環境への示唆

○田畑陽久^{1,2}, 関根康人¹, 尾崎和海³, 菅崎良貴⁴, 杉田精司²

¹東京工業大学/ELSI, ²東京大学, ³東邦大学, ⁴Georgia Institute of Technology

Curiosity 探査機による堆積物のその場鉱物分析により、着陸地点の Gale クレーターは約 35 億年前には酸化還元成層した湖であったことが示唆されている(Hurowitz et al., 2017)。酸化還元成層を形成するメカニズムのひとつに二価鉄光酸化反応が提案されている。これは水中に溶存した二価鉄が紫外光を吸収して三価の酸化鉄沈殿を形成する反応である。これにより湖表層部分を酸化的にし、酸化還元成層を形成できる可能性がある。酸化還元成層の形成条件は大気組成や湖水の循環速度にも依存するため、これらを定量的に評価することで古火星環境を推定することができる。しかし、中性 pH 条件における二価鉄光酸化反応の反応速度が不明であったため、これまでそのような研究は行うことができなかった。

我々は、低酸素環境を実現可能なグローブボックスを用いた室内実験により中性 pH 条件での二価鉄光酸化反応の反応速度を測定した(Tabata et al., 2021, GCA)。本発表では、得られた反応速度を用いて構築した湖水中の鉄供給と酸化反応を考慮した一次元の反応輸送モデルと、計算された湖水中の鉄酸化状態の鉛直分布について発表する。計算では、pH、二価鉄供給フラックス、大気組成、湖水循環速度、二価鉄供給モード（地下水供給／河川供給）をパラメータとし、酸化還元成層が成立可能な条件を調べた。

計算の結果、酸化還元成層が成立するには湖水循環速度として約 3 m/day 以下という低速が必要なことが分かった。このような低速の循環速度は、湖の水深が 1000 m 程度と深い場合に実現される。また、湖水への二価鉄が河川供給される場合、酸化還元成層は弱酸性条件 (pH 5)に限られるのに対し、地下水供給であれば広い pH 条件(pH 5-7)で実現することが分かった。さらに、大気 CO₂分圧が 1 気圧以上では pH 7 以上では鉄炭酸塩(siderite)の沈殿が卓越し、酸化還元成層が実現しないことも明らかになった。

これらの結果から、古 Gale 湖の循環が風に駆動されていたと仮定すると Gale の湖水深が約 1000 m 以上であることが示唆された。また、Gale 堆積物の鉱物組成から湖水 pH は中性であったと推定されていることから、古 Gale 湖において二価鉄は地下水によって供給されかつ大気 CO₂大気分圧は 1 気圧以下であったことが示唆される。これらのことは、初期火星において CO₂以外に温室効果ガスが存在していたという従来の考えを支持し、湖への溶存鉄供給が地下水によって行われていた可能性を示唆する。

初期惑星のハビタビリティにおよぼす 太陽エネルギー粒子の役割

○小林憲正¹, 毛利駿介¹, 内藤弘毅¹, 宇土拓海¹, 癸生川陽子¹, 高橋淳一¹, 柴田裕実²,
三田肇³, 福田一志⁴, 小栗慶之⁴, N. Globus⁵, V. S. Airapetian^{6,7}

¹横浜国立大学, ²大阪大学, ³福岡工業大学, ⁴東京工業大学, ⁵New York University,

⁶NASA Goddard Space Flight Center, ⁷American University

近年の恒星観測により、太陽に似た恒星にもスーパーフレアが観測されること[1]などから、初期太陽も高フラックスの荷電粒子(太陽エネルギー粒子; SEPs)を放出していた可能性が示唆されている。われわれは初期地球および火星のハビタビリティにおよぼす SEPs の役割について、模擬実験などを通して考察した。

初期地球・火星は「暗い太陽のパラドックス」から、液体の水を表面に持てなかったはずであるが、実際には両惑星とも海洋を保持していたとされる。この理由として、SEPsにより大気中で温室効果がきわめて高い(CH₄の約12倍)N₂Oが生成した可能性が提案された[2]。また、弱還元型であったとされる初期地球・火星大気からは雷や紫外線によりアミノ酸などの含窒素有機物の生成が限定的と考えられている。われわれは、初期大気が弱還元型であったとしても宇宙線(GCRs)のエネルギーでアミノ酸や核酸塩基の生成が可能であることを報告した[3]。SEPsはGCRsよりも高フラックスだったことが期待されるため、弱還元型大気から高効率でアミノ酸などの含窒素有機物を生成したことが考えられる。さらに、SEPsと大気分子との衝突で生じたスピン偏極ミュオンがアミノ酸のホモキラリティの種になった可能性も考えられる。

本研究においては、これらの仮説を検証するため、加速器等を用いた実験を行った。N₂, H₂Oを含む模擬原始大気にタンデム加速器(東工大)からの陽子線を照射し、生成物をGC/MSで分析したところ、N₂Oの生成が確認された。CO₂, N₂にCOもしくはCH₄を少量(CO₂の25%以下)加えた弱還元型混合気体からは、火花放電や紫外線などではアミノ酸は生成しなかったが、陽子線照射の場合は、極微量(CO₂の1%)でもCH₄が存在すればアミノ酸が生成した。SEPs/GCRsにより原始大気中で生成したアミノ酸は地球外から供給されたアミノ酸量を上回る可能性が示唆された。現在、原始海洋中に存在したFe²⁺や、大気中で生じたN₂Oのアミノ酸生成への影響を調べている。

隕石中のアミノ酸にエナンチオ過剰が見つかったこと[5]から、地球生物の生体分子のホモキラリティの種が宇宙から届けられた可能性が議論されている。しかし、SEPs/GCRsの高エネルギー陽子が分子と相互作用した時に生じるミュオンは片方みのスピン偏極を有し、これがホモキラリティの種になる可能性が考えられる[6]。つまり、星間のみならず原始大気中でもエナンチオ過剰が生じる可能性がある。現在、J-PARCの物質・生命科学実験施設でアミノ酸へのミュオン照射実験を行い、エナンチオ過剰が生じるか検証を行っている。

引用文献

- [1] Maehara, H. et al. (2012) *Nature* 485, 478.
- [2] Airapetian, V. S. et al. (2016) *Nat. Geosci.* 9, 452.
- [3] Catling, D. C. and Kasting, J. F. (2017) *Atmospheric Evolution on Inhabited and Lifeless Worlds*, Cambridge University Press.
- [4] Miyakawa, S. et al. (2002) *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 99, 14628.
- [5] Cronin, J. R. and Pizzarello, S. (1997) *Science* 275, 951.
- [6] Globus, N. (2020) *Astrophys. J. Lett.* 895, L11.

氷混合物への電子照射実験：エウロパ表面での選択的酸化と内部海組成への影響

○丹秀也¹, 関根康人¹, 末松久幸², 菊池崇志², 羽馬哲也³, 高橋嘉夫⁴

¹東京工業大学地球生命研究所, ²長岡技術科学大学原子力システム安全工学専攻,

³東京大学先進科学研究機構, ⁴東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

木星の氷衛星エウロパの表面は木星の磁場によって加速された電子などの高エネルギー粒子の放射にさらされている (e.g., Paranicas et al. 2009)。こうした放射による水氷の解離と水素の遊離に伴う酸化的なラジカルや分子の生成 (e.g., OH, O, O₂) によって、表面物質が酸化される。エウロパ表面には内側の衛星イオから降着するとされる硫黄や、内部海由来と思われる塩化物 (e.g., NaCl, MgCl₂) の存在が示唆されている (e.g., Fischer et al. 2015)。こうした表面物質が酸化的なラジカルや分子によって酸化され、表面更新に伴って内部海に流入する場合、その化学的狀態に影響し、さらには酸化剤として生命利用可能な酸化還元非平衡に寄与する可能性が考えられる (e.g., Hand et al. 2015)。エウロパ表面には硫黄の酸化によって生成されたとと思われる硫酸が多量に観測されている。一方、塩化物が酸化される場合、塩素酸塩 (e.g., NaClO₃, Mg(ClO₃)₂) や過塩素酸塩 (e.g., NaClO₄, Mg(ClO₄)₂) が生成される可能性がある。塩化物酸化は火星表面でも紫外線によって生じていることが示唆されている (Carrier & Kounaves, 2015)。しかし、こうしたエウロパ表面での物質の酸化効率について室内実験による検証は進んでいない。

そこで本研究ではエウロパ表面を模擬した低温条件下で氷・硫黄の混合物、もしくは氷・塩化物の混合物への電子照射実験を行った。エウロパ表面には MeV 以上のエネルギーの一次電子が降り注いでおり、さらに一次電子の放射を受けた物質内ではより低エネルギーの二次電子が生じうる。これらをそれぞれ再現するために、数 MeV と ~10 keV の二種類のエネルギーの電子を混合物サンプルに対して照射し、その組成変化を調べた。~10 keV 電子の照射には電子銃を組み込んだ本研究において新規に構築した装置を、数 MeV のパルス電子照射には線形誘導加速器 "ETIGO-III" をそれぞれ用いた。

実験の結果、氷・塩化物への照射実験では、実験条件・電子のエネルギーによらず、塩化物の酸化は検出限界以下で確認されなかった。一方、氷・硫黄の混合物への照射では硫黄の酸化によると思われる硫酸の生成が確認された。電子照射量と、過塩素酸塩の生成量の上限值、および硫酸の生成量から、塩化物から過塩素酸塩への変換効率の上限値は $\sim 10^{-21}$ – 10^{-19} /electron, 硫黄から硫酸への変換効率は $\sim 10^{-19}$ – 10^{-18} electron 程度と算出された。こうした酸化効率の違いは、電子照射された水氷中での硫黄と塩素の安定性の違いによると思われる。硫黄は単体として存在し、水氷の解離由来の酸化的分子やラジカルと容易に反応して酸化によって硫酸を生成しうる。一方、塩素は塩化物として陽イオンと結合した状態で存在し、酸化的物質との反応が進みにくい状態にあることが考えられる。こうした結果から、エウロパ表面においても硫黄と塩化物に対する酸化反応の選択性が示唆される。本研究から示された物質種による酸化の選択性から、エウロパの内部海に流入しうる主な酸化剤は硫酸、あるいは水氷の分解由来の酸素が考えられる。これらは海底での水岩石反応由来の水素などの還元剤により消費されることで内部海の酸化を進行させる、もしくは還元剤と併せて生命利用可能な酸化還元非平衡に寄与すると思われる。

金属の露出した小惑星における 宇宙風化作用について

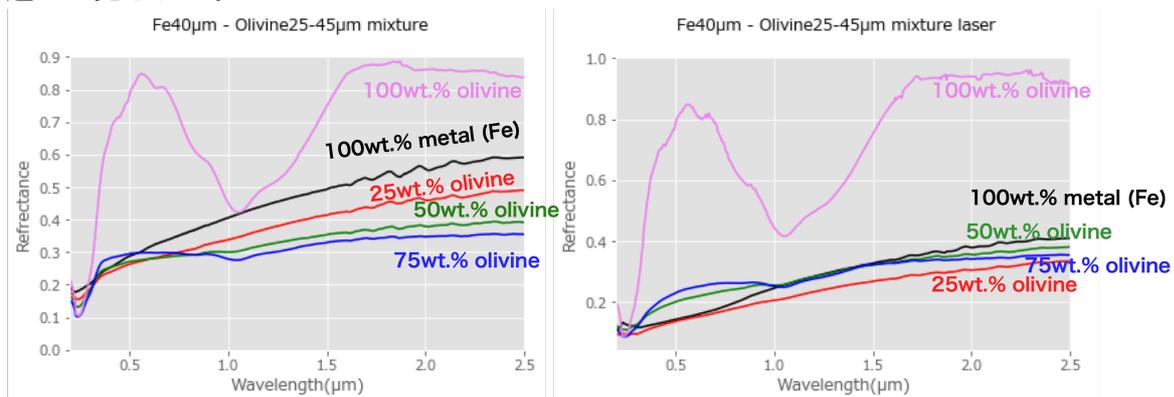
○川上結生¹、佐々木晶¹、盛満眞一¹、島名亮太¹

¹大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻

宇宙風化作用とは、岩石質天体の表面に存在する物質の光学特性や物質構造が長期間宇宙空間に晒されることによって変化することを指す。主な光学特性の変化として、1. 反射スペクトルの傾きの増加(赤化)、2. 全体の反射率が小さくなる(暗化)、3. 吸収帯の深さが浅くなる(吸収帯の弱化)の3つが知られている。このような変化の原因は太陽風や微小隕石の衝突によって天体表面の鉱物に含まれる鉄イオンが還元され、ナノ鉄微粒子が生成されることであるとわかっている(Sasaki et al. 2001, NATURE, 410, 555-557)。宇宙風化作用の程度は天体表面の鉱物組成や粒径、太陽からの距離などの様々な要素によって異なる。本研究の目的は天体表面に金属の露出した小惑星 Psyche における宇宙風化作用がどのように観測されるかを明らかにすることである。

鉄とカンラン石を混合した5つの試料(Olivine100wt%、75wt%、50wt%、25wt%、Fe100wt%)に 1.1×10^7 Paの圧力をかけ、微小隕石の衝突を模擬したナノ秒パルスレーザーを照射した。0.25 μ m-2.5 μ mで反射スペクトルを取得し、レーザー照射前後の試料のスペクトルを比較、その影響を解析した。結果、グラフの傾きを0.55 μ mと2.1 μ mで取得し比較すると、最も変化が大きかったのはFe100wt%試料だった。また、Fe粉末を混ぜた試料にレーザー10mJを照射すると、Feの割合が多い試料ほど照射後のスペクトルが大きく暗化した。

天体表面の状態によってスペクトルが変化する影響を考慮するため、レーザー照射前の5つの試料にかかる圧力を0Pa、 0.5×10^7 Pa、 1.1×10^7 Paと変化させ、そのスペクトルを取得し解析した。0Paかけた5つの試料のスペクトルは鉄の割合が少ないほど反射率が大きく、Cloutis et al.(2015,Icarus 252, 39-82)と一致した。一方で試料にかかる圧力を 0.5×10^7 Pa、 1.1×10^7 Paと増加させていくと、Fe100wt%の場合で反射率が大きく増加し、先行研究との違いが見られた。



左: カンラン石と鉄の粉末の混合割合を変化させた時のスペクトル

右: カンラン石と鉄の粉末の混合割合を変化させ、10mJのレーザーを照射した時のスペクトル

NWA 2900 CK コンドライトに含まれる水質変成を経験した dark inclusion の熱史

○高橋実樹¹, 中村智樹¹, 渋谷岳造², 牛久保孝行³, Michael Zolesnsky⁴

¹東北大学大学院理学研究科, ²海洋研究開発機構, ³海洋研究開発機構高知コア研究所, ⁴NASA/JSC

様々な種類の隕石に含まれる Dark Inclusions (DIs) は、特異な岩石鉱物学的特性を示すものが存在し、それらは地球に直接飛来する隕石にはない物質情報を含んでいる可能性がある。NWA 2900 CK コンドライトに含まれている DI の観察を行ったところ、粗粒で不純物をほとんど含まない diopside 組成の脈状組織 (diopside veins) が含まれていた。全岩化学組成と鉱物組み合わせから DI が形成した温度を熱力学平衡計算を行って求めたところ、高温で形成したことが示唆された (Takahashi et al., 2019, MetSoc2019 abstract#6221)。本研究では、二次イオン質量分析計 (SIMS) を用いて酸素同位体組成分析を行い、その結果を踏まえて DI の熱変成の歴史を考察した。

NWA 2900 中の DI の大きさは約 1.0×2.5 cm で細粒な物質で構成され、コンドリュールを含まない。DI のマトリクスは 20 μm 以下の細粒な olivine (Fa_{34.8±0.52}), magnetite, plagioclase (Ab_{63.6±7.1}, An_{35.8±7.3}), Cr-spinel から構成される。Diopside veins は DI 全体に広がっており、その長さは約 1 cm、幅は 100 μm 程度ある。Diopside veins は結晶性の良い粗粒な diopside でできている。Diopside の組成は Wo 46.1-50.8 mol%, 平均 Wo 49.6 mol% で Mg/(Mg+Fe+Ca) は 51.9 > En > 31.1 と幅を持ち、Al₂O₃ ~0.5 wt%, Na₂O ~0.2 wt%, Cr₂O₃ <0.04 wt% のように微量元素の濃度が低い。このように Mg を多く含み、微量元素をほとんど含まないという組成の特徴は、diopside veins が衝撃によって形成したのではなく、高温の水質変成によって形成したことを示唆している (Bird et al., 1984; Robinson et al., 2002)。

DI の olivine, magnetite, plagioclase (マトリクス) そして diopside (veins) の 4 種類の鉱物と、母岩 (Host) の細粒な olivine, magnetite, plagioclase (マトリクス) と粗粒な olivine (コンドリュール) の酸素同位体組成分析を行った。Host の粗粒な olivine を除いて、酸素同位体組成は DI と Host の両方で地球型分別直線 (TFL) の下に分布し ($\Delta^{17}\text{O} = \sim 3.4$)、鉱物ごとにそれぞれ同位体分別を示した。よって、DI が示す酸素同位体組成は、Host の CK コンドライト母天体に集積した後の熱変成によって、再平衡に達した値を示していると考えられる。DI の熱履歴について考察すると、以下の 3 つの段階に分けられる: (1) DI 母天体で高温の熱水活動が起こり、DI の組織や diopside veins が形成した。(2) 微惑星の衝突などの結果、DI は Host の CK 母天体に集積し、さらに熱変成を受けた。(3) その後、DI と Host は CK 母天体を離脱し、隕石として地球に落下した。

隕石全岩の同位体組成・元素存在度による小惑星形成過程への制約

○深井 稜汰¹, 荒川 創太², 本間 和明³

¹宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ²国立天文台, ³東京工業大学 地球惑星科学系

太陽系に存在する小惑星は多様な表面組成を示し、惑星形成過程や物質輸送過程に重要な制約を与える。小惑星から飛来する未分化な隕石（コンドライト隕石）には、重元素同位体組成のばらつきが存在する。このばらつきは、分子雲コアまたは原始惑星系円盤が時空間的に保持していた、同位体不均質性によると考えられている[1 ほか]。そのため隕石全岩の重元素同位体組成は、小惑星の形成領域を反映する直接的なツールとなるが期待されるが、この関係性が定量的に示された研究例はない。

近年では、はやぶさ、はやぶさ2、OSIRIS-REx と小惑星サンプルリターン探査が活発に行われており、2021 年度には C 型小惑星リュウグウ試料の初期分析が開始した。特に、湿式分析による元素存在度測定・同位体組成測定は、リュウグウ全球スケールの組成情報が得られるため、惑星形成論において重要である。これらの化学的データが持つ意味を定量的に解釈するために、既存の隕石から得られたデータを説明可能なモデルの構築が必要である。

本研究では、原始惑星系円盤におけるガスと微粒子の力学的計算により、円盤上の同位体分布を推定し、隕石の同位体データを用いて小惑星の形成領域を求めることを試みた。原始惑星系円盤に存在するダストは太陽系平均の Cr 同位体組成 ($\epsilon_{\text{Cr}} = -1$) を持つと仮定した。また、円盤上には超新星爆発由来の微粒子が注入される ($\epsilon_{\text{Cr}} = 25,000$) とし、初期に動径方向に一様な面密度で分布すると仮定した[2]。加えて、3AU に木星コアが存在する状況を考え、同位体不均質性に与える影響を評価した。

最も単純なケースを考えたシミュレーションから、円盤の乱流強度が小さい場合 ($\alpha = 10^{-4}$)、移流と拡散のタイムスケールが十分に大きくなることがわかった。このような状況下では、同位体不均質性が円盤形成の数 Myr 後にも保持される。また、微粒子のサイズが小さい場合 ($a = 10^{-5}$ cm)、中心星への落下の影響が小さくなり、同位体不均質性が保持されやすい。以上の条件に加えて、超新星爆発由来物質の面密度等に適切なパラメータを用いて、円盤の Cr 同位体分布を推定した（図 1）。この同位体分布と隕石全岩の Cr 同位体組成によって、多くの炭素質隕石母天体が 3–10 AU 程度で形成したことが示唆された[3]。リュウグウは既存の隕石とは異なる空隙率や表面組成を持っていることが知られており、10AU 以遠で母天体が形成された可能性がある。将来的には、同位体組成と同様に重要な指標である、元素存在度組成の分布を得て、整合性を評価することが必要となる。

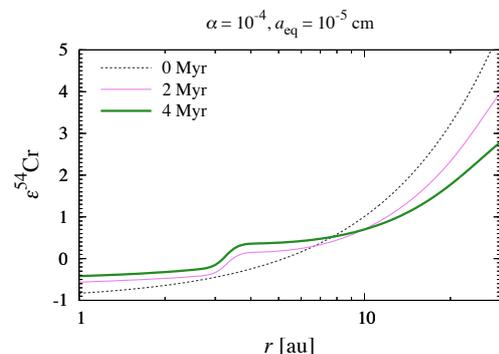


図 1 : Cr 同位体の動径方向分布[3]

[1] Kruijer et al. (2017) *PNAS*, **114** (26), 6712. [2] Ouellette et al. (2007) *ApJ*, **662**, 1268. [3] Fukai and Arakawa (2021) *ApJ*, **908**, 64.

天体衝突時の塑性変形加熱が隕石の同位体時計に与える影響

黒澤耕介¹, 小池みずほ², 玄田英典³

¹千葉工業大学, ²広島大学, ³東京工業大学

地球上で発見される各種隕石を観察すると、多くの隕石が少なからず衝撃による変成組織を有している[e.g., Stöffler et al., *MaPS*, **52**, 5–49, 2018]. これは過去の太陽系で隕石母天体への衝突が頻繁に起きていたことの証拠である。隕石母天体中に含まれていた ²³⁸U や ⁴⁰K といった長寿命放射性同位体は、その娘核種である ²⁰⁶Pb や ⁴⁰Ar との量比を用いて太陽系の時刻基準として用いられてきた。この同位体時計を利用することで隕石母天体が衝突を経験した時刻を推定することも可能である [e.g., Marchi et al., *Nature Geoscience*, **6**, 303–307, 2013]. 同位体時計は、天体衝突時の加熱によって、ジルコン、輝石、長石、アパタイトなどの鉱物中に蓄積された娘元素が拡散し、その鉱物から失われることによって初期化される。顕著な元素拡散を起こすには、例えば K-Ar 同位体時計では 1,000 K 程度の温度が必要である [e.g., Marchi et al., 2013].ところが、Rankine-Hugoniot 関係式と熱力学演算から検討すると、小惑星帯における典型的な衝突速度程度では、衝突直下点の衝撃波通過直後においても 1,000 K まで昇温しない。

本研究では近年見いだされた塑性変形加熱の効果[Quintana et al., *Procedia Engineering*, **103**, 499–506, 2015; Kurosawa and Genda, *GRL*, **45**, 620–626, 2018; Kurosawa et al., *GRL*, **48**, e2020GL091130, 2021]を取り入れて、小惑星帯の典型的な衝突で同位体時計消去が起こるか否かを検討した。塑性変形加熱が顕著に起こる比較的低速度(<10 km s⁻¹)の衝突では、衝撃波通過直後の温度よりも減圧した後の残留温度の方が数 100 K も高くなる。残留温度は断熱膨張でなく輻射と熱伝導で冷却するため、年単位で高温状態が持続する。従って塑性変形加熱の効果によって実際の衝突後の元素拡散距離は従来の想定より数桁大きいことが期待される。以上の見通しを実証するため、iSALE shock physics code [Amsden et al., LANL Rep. LA-8095, p.101, 1980; Ivanov et al., *IJIE*, **20**, 411–430, 1997; Wünnemann et al., *Icarus*, **180**, 514–527, 2006]を用いて、小惑星帯の典型的な衝突速度である秒速 5 km の 2 次元数値衝突計算を実施した。衝突天体と被衝突天体は橄欖石からなると仮定した。また両天体のサイズ比は大きく、衝突面の曲率は無視できると仮定した。また初期温度構造、重力の効果は無視した。iSALE に実装されている”ROCK” model を用いて岩石の弾塑性体挙動を流体計算に取り入れた。このモデルへの入力パラメータは先行研究の値[Johnson et al., *Nature*, **517**, 339–341, 2015]を採用した。比較のために完全流体の計算も実行した。数値計算の結果から元素拡散に寄与すると思われる残留温度の分布を求めたところ、弾塑性体では 1000 K を超える領域が現れたが、完全流体では計算領域中で残留温度が 600 K を超える物質が現れなかった。弾塑性体の計算結果から >1,000 K の物質はクレータ縁に高温層を形成し、その厚みは衝突天体半径の 10%程度であることがわかった。数値衝突計算で求めた残留温度分布を初期条件として 1 次元球座標の熱伝導方程式を数値的に解き、温度変化と元素拡散距離を評価した。その結果、秒速 5 km の衝突でも衝突天体サイズが >10 m であれば、K-Ar 同位体時計が消去され得ることがわかった。

謝辞: iSALE の開発者である Gareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausen の各氏に感謝致します。数値衝突計算結果の解析と描画には pySALEPlot を使用致しました。開発者の Tom Davison 氏に感謝致します。

減衰衝撃波を利用した花崗岩の衝撃回収実験: 石英中の Feather Features の形成圧力

○多田賢弘¹, 黒澤耕介², 大野遼², Christopher Hamann³, 岡本尚也², 新原隆史⁴, 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,³Museum für
 Naturkunde, Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung,⁴東京大学大学院工学系研究
 科システム創成学専攻

はじめに: 天体衝突が起きた証拠は、高圧相やガラス、衝撃変成組織として鉱物中に残され、その鉱物学的特徴から経験衝撃圧力を推定することができる。特に石英は、地球上に普遍的に存在することや Planar deformation features (PDFs)などの特徴的な衝撃変成組織を示すことから、地球上の衝突クレーター・イジェクタ層の探索や衝撃圧力の推定に用いられてきた。

衝突クレーター内では、衝撃波が衝突点から広がりながら急激に減衰するため、数 GPa 程度の低い圧力を被った岩石の割合が大きくなると考えられる。一方で、石英を用いた従来の衝撃回収実験は 10 GPa 以上の衝撃圧力で行われたものが多く、10 GPa 以下の低圧での石英中の衝撃変成組織の理解は十分でない。

石英中の衝撃変成組織の一種である Feather Features (FFs) は、石英中の平板割れ目(Planar fractures; PFs)から一方向に伸びる微細なラメラであり、天然のクレーター試料中から多く報告されている。FFs は 7~10 GPa 程度で形成されるとされ、低圧範囲での石英の衝撃変成組織として近年用いられている(e.g., Koeberl and Ferrier 2019)。しかし、実験的に FFs の形成を確認した例は Poelchau and Kenkmann (2011)の衝撃回収実験 1 ショットのみに限られており、FFs の形成圧力範囲も十分明らかにはなっていない。

そこで本研究では、実験的に FFs の形成を確認すること、そのうえで FFs の形成圧力範囲を探ることを目的に、花崗岩を用いた衝撃回収実験を行った。本研究では、標的に対して十分に小さい飛翔体を用いることにより試料中で衝撃波を減衰させ、1~10 GPa 程度の幅広い衝撃圧力を経験した試料を回

収した。さらに実験と同条件の数値衝突計算を実施し、試料が経験した温度圧力推定を行った。

手法: 花崗岩を直径 30 mm、高さ 24 mm の円柱状に加工し、チタン製コンテナに収納した。これに直径 4.8 mm のポリカーボネイト球を衝突速度 6~7 km/s で衝突させた。回収試料の薄片を作成し、偏光顕微鏡下で観察した。石英中の PDFs, PFs, FFs についてはその結晶方位を、ユニバーサルステージ搭載偏光顕微鏡により測定した。また、iSALE shock physics code を用いた数値衝突計算を実施し、試料の経験温度圧力を推定した。

結果と議論: 試料中の衝突点直下において、石英中に PDFs・PFs とともに FFs が形成されているのが観察された。FFs を構成している PFs の方位は {1010}, {1120}, {5160}、PFs から伸びている微細なラメラの方位は {1013} であり、両者のなす角はおよそ 85~90°であった。この PFs とラメラの方位は天然のクレーター試料中の FFs でも報告がされている方位である(Poelchau and Kenkmann 2011)。また、iSALE を用いた数値計算の結果、FFs が観察された領域の経験温度圧力はおおよそ 530 °C, 11 GPa と推定された。

FFs の形成が実験的に確認されたのは本研究が 2 例目である。本実験で推定された形成圧力(11GPa)を Poelchau and Kenkmann 2011 の実験結果(7~10GPa)と比較すると、概ね整合的であるもののやや高い圧力であり、FFs が 10GPa 以上の圧力でも形成される可能性が示唆される。今後は衝突速度等の条件を変えた実験を行い、FFs の形成条件をさらに制約する予定である。

氷微惑星まわりの弧状衝撃波によるコンドルール形成：細粒リムの集積

○荒川 創太¹, 金子 寛明², 中本 泰史²¹国立天文台 科学研究部, ²東京工業大学 地球惑星科学系

コンドライト隕石の主要な構成物であるコンドルールは、原始太陽系星雲中でどのように形成されたのだろうか？コンドルール形成は太陽系における惑星形成と密接に結びついていると考えられるが、その形成メカニズムは未だ解明されていない。我々は、コンドルールが氷微惑星まわりの弧状衝撃波で形成されるというシナリオを提示し、その妥当性を検討した。本発表では、コンドルールを覆う細粒リムに着目し、未分化氷微惑星まわりの弧状衝撃波がコンドルール形成および細粒リム集積の場として適していることを示す。

細粒リムの特徴として、構成粒子がサブミクロンサイズであること、および、リムの空隙率が小さいことが挙げられる。典型的な細粒リムの厚さは 10–100 μm 程度である。近年、細粒リムの起源としてコンドルールと微小なダスト粒子の高速衝突 (kinetic dust aggregation; Liffman 2019) という新しいアイデアが提案された。サブミクロンサイズのセラミック粒子は、真空中で 0.1–1 km/s の速度で衝突するとセラミック基板に付着することが実験的に知られている。本研究では、コンドルール形成の場である弧状衝撃波中における kinetic dust aggregation プロセスによる細粒リム形成の可能性を検討した。

我々は、未分化氷惑星のまわりで衝撃波が発生すると、氷微惑星の蒸発によって微小なダスト粒子が天体表層から放出され、局所的にダスト・ガス比が 1:1 程度のダスト濃集領域が形成され得ることを示した。さらに、衝撃波面後方におけるコンドールの運動を考慮し、単純な一次元計算に基づいて細粒リムの付着成長を計算した。その結果、厚さ 10–100 μm 程度の細粒リムが形成されることがわかった。

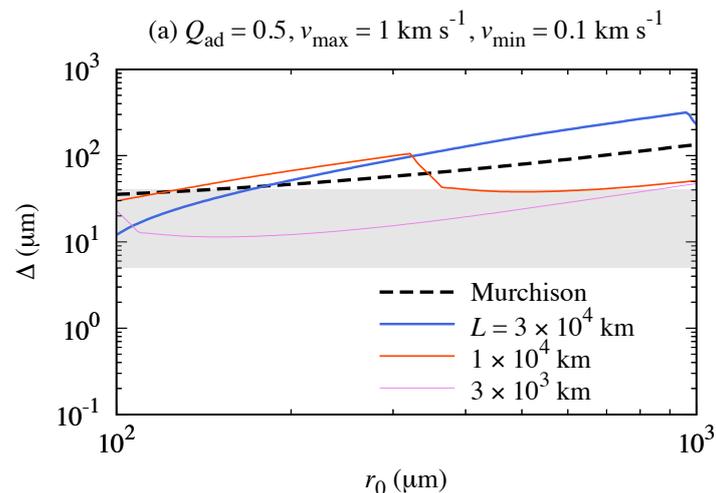


図 1. 衝撃波面後方での kinetic dust aggregation プロセスによって形成される細粒リムの厚さ Δ のコンドルール半径 r_0 に対する依存性。衝撃波の空間スケール L の違いによって最終的に形成される細粒リムの厚さは異なる。破線は Murchison CM コンドライト中のコンドールの細粒リムの典型的な厚さ (Hanna & Ketcham 2018)、灰色の領域は非平衡普通コンドライト中のコンドールの細粒リムの典型的な厚さ (Matsumani 1984) を表している。

隕石粒子の低付着力が示唆する小惑星表面粒子の可動性

○長足 友哉, 中村 昭子 (神戸大学理学研究科)

はじめに :

粒子の付着力は、天体表層の強度や流動性、表層からの粒子放出等、特に低重力環境で重要である。従来の小天体構成粒子の付着力の推定には、付着力が粒子径に比例するとした理論式が用いられている。しかし、我々はこれまでに、数十マイクロンサイズの隕石粒子の付着力が、表面構造で決定され粒子サイズに依らないと考えられること、110°Cでの加熱と真空引きで3倍程度増加することを指摘した(Nagaashi et al., 2021; Nagaashi & Nakamura, JpGU 2021)。しかし、その付着力の増加が、吸着水蒸気の除去によるもの(シリカ粒子: Kimura et al., 2015; Steinpilz et al., 2019)か、物質の変化によるものかを検証できていなかった。そこで今回は、大気中で加熱した場合と加熱後に室温で再び水蒸気が吸着した場合の隕石粒子の付着力を測定し、加えて、付着力測定条件での加熱による質量変化と物質変化の有無を調べた。

実験方法 :

遠心法(Krupp 1967; Nagaashi et al., 2018; 2021)により、湿度 40-50%の大気中で、110°Cと 250°Cで1時間加熱した場合の数十マイクロンサイズの Allende 隕石と Tagish Lake 隕石粒子の付着力を測定した。後者の隕石種に関しては、加熱後、室温で再び水蒸気吸着させた場合の付着力も測定した。隕石粒子の加熱による質量変化と物質変化の有無は、熱重量・示差熱同時測定を行うことで調べた。

結果・議論 :

真空引きなしの 250°C1 時間の加熱で、どちらの隕石種も付着力が 5 倍程度増加した。加熱による Allende 隕石粒子の質量減少は吸着水蒸気の除去で説明でき、吸着水蒸気の除去が付着力増加をもたらしたと考えられる。一方、Tagish Lake 隕石粒子は加熱で内部の揮発性物質も失っている可能性がある。しかし、加熱後、室温で再び水蒸気が吸着した場合の付着力は、加熱しなかった場合と大きな違いはなかった。従って、Tagish Lake 隕石粒子の付着力増加も吸着水蒸気の除去によるもので、揮発性物質の減少は影響を与えていないと考えられる。本研究の結果から、小惑星構成粒子の付着力は常温常圧での測定値よりも 5 倍程度大きいと予想されるが、それでも、小惑星 Benu 構成粒子として予想される水質変成した炭素質コンドライト(Hamilton et al., 2019)の数十マイクロンサイズの破片は、同サイズの月レゴリス粒子よりも付着力が 1 桁程度小さいと推測される。従って、月レゴリス粒子を仮定し、その付着力が粒子サイズに比例する理論式を採用して Benu 表層粒子の可動性を議論した先行研究(Bierhaus et al., 2021)では数十マイクロンサイズ以上の粒子の付着力を桁違いに過大評価している。本研究の結果に基づくと、Benu 表層粒子はこの先行研究の推定よりも高可動性で、より小さいセンチメートルサイズの粒子が最も動きやすい可能性がある。これは Benu から放出されている粒子サイズと調和的である。

多孔質氷球の超低速度衝突における非弾性衝突メカニズムと付着境界速度

神戸大学大学院理学研究科 ○豊田優佳里 荒川政彦 保井みなみ

はじめに：土星リングは、サイズ数 cm から数十 m までの水氷粒子で構成されており、その粒子同士は数 cm/s 以下の相対衝突速度で互いに衝突すると言われている。その相互衝突の結果、リング粒子は凝集・反発・破壊を起こし、土星リングの力学的進化やその構造に影響を及ぼしている。また、土星リングが非常に薄い円盤状（厚さ約 100 m）を保っているのは、リング粒子が非弾性衝突を起こし、エネルギーを効果的に散逸しているためであると考えられている。また、衝突速度が小さくなると、粒子同士が付着することが予測されている。リング粒子は惑星探査機カッシーニの観測から高空隙率の水粒子集合体であると予測されているが、多孔質氷球の反発係数及び付着特性はこれまで詳しく調べられていない。そこで、多孔質氷球の衝突過程について詳しく調べる必要がある。本研究の目的は、多孔質氷球の反発係数及びエネルギー散逸のメカニズムや付着特性を明らかにし、土星リング粒子の内部構造を推定することである。そのため、多孔質氷球と多孔質氷板に対して低速度衝突実験を行い、衝突速度と反発係数及び付着特性の関係に対する空隙率依存性を調べた。

実験方法：本研究では、多孔質氷球を同程度の空隙率 (Φ) を持つ多孔質氷板へと自由落下させることで低速度衝突実験を行った。反発係数の測定にはレーザー変異計を使用し、衝突の時間間隔から反発係数を求めた。また、放物線と比較することで衝突結果（反発及び付着）を決定した。多孔質氷球（半径 1.5 cm, $\Phi = 47, 53, 60\%$ の 3 種類）は氷粒子（平均粒径 20 μm ）を球形に押し固めて作成した。また、標的板は多孔質氷球と同様に作成した多孔質氷板（半径 1.5 cm, 高さ 2 cm の円盤形, $\Phi = 47, 53, 60\%$ の 3 種類）を使用した。衝突速度範囲は $v_i = 1.27 \sim 101.1 \text{ cm/s}$ であった。

実験結果：多孔質氷球の反発係数は氷球の場合と異なり、衝突速度の増加とともに反発係数は下がり続け、準弾性領域は確認されなかった。1 回目の衝突による反発係数は空隙率の増加に伴って低下し、衝突速度と反発係数の関係は塑性変形を考慮した以下の Andrews モデルで説明できた。

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{3(v_i/v_c)^2} [-2 + \sqrt{30(v_i/v_c)^2 - 5}]. \quad v_c: \text{塑性変形が開始する限界速度}$$

$\Phi = 47\%$ では $v_c = 1.5 \text{ cm/s}$, $\Phi = 53\%$ では $v_c = 0.68 \text{ cm/s}$, $\Phi = 60\%$ では $v_c = 0.47 \text{ cm/s}$ となり、空隙率が大きいほど小さい衝突速度で塑性変形が始まることが示唆された。2 回目以降の衝突による反発係数は、1 回目の衝突の影響により空隙率の差は確認できなかった。しかし、衝突速度と反発係数の関係は空隙率によらず Andrews モデルで説明でき、 $v_c = 0.28 \text{ cm/s}$ となった。また、 $\Phi = 47\%$ では $v_i = 70 \text{ cm/s}$, $\Phi = 53\%$ では $v_i = 17 \text{ cm/s}$, $\Phi = 60\%$ では $v_i = 90 \text{ cm/s}$ の衝突速度で付着が開始し、今回の衝突速度範囲においては付着と反発の両方の衝突結果が確認された。付着は衝突速度が小さくなるにつれて起こりやすくなり、 $v_i = 20 \text{ cm/s}$ 以下では衝突の約半分が付着が起こるようになった。

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

○吉田雄城^{1,2}, 小久保英一郎^{2,1}, 田中秀和³

¹東京大学, ²国立天文台, ³東北大学

惑星形成は原始惑星系円盤の中で進行する。原始惑星系円盤はガスと固体成分(ダスト)から構成されており、惑星の主な材料であるダストが微惑星や原始惑星を経て惑星へと成長する。mm-cm以下の大きさを持つダストは、分子間力による付着により衝突合体成長することが考えられているが、その成長過程は明らかではない。ダストの最小構成単位であるダストモノマーやダストモノマーが合体して形成されるアグリゲイトの衝突合体による成長過程は、室内実験と数値計算の両方から研究されている。数値計算ではモノマー間相互作用として2つのモノマー間に働く付着や回転、滑り、ひねりなどの相互作用を与えるJKR理論が用いられている。しかしこのJKR理論に基づいた数値計算から得られる結果について、室内実験の結果との違いが指摘されてきた。Pope et al. (2000) はモノマー同士の衝突室内実験を行い、モノマーが衝突で跳ね返る限界速度がJKR理論の予測より大きいことを示唆した。また、Gundluch & Blum (2015) ではアグリゲイト衝突の室内実験を行い、跳ね返りの限界速度は温度依存性を持つことを示唆している。このような限界速度の違いや温度依存性はJKR理論では説明することができない。これらの違いは、JKR理論が弾性球を仮定していることが原因であると指摘されており(Krijt et al. 2013; Tanaka et al. 2015)、Tanaka et al. (2015) は分子動力学法によるモノマー衝突シミュレーションによって、衝突のエネルギーの一部がモノマーを構成する分子の振動励起に用いられることを指摘している。JKR理論は分子レベルでの物理を考慮しておらず、モノマー間相互作用を正しく与えるためには分子レベルでの衝突現象を調べて、JKR理論を修正もしくは拡張する必要がある。

本研究はモノマー衝突の分子動力学シミュレーションを行うことにより、分子レベルのモノマー間相互作用を明らかにすることを目的とした。我々は、半径が7.6 nmのモノマーを用意して、衝突速度や温度といった衝突条件を変化させてシミュレーションを行った。すると、衝突速度を大きくするとモノマーが変形しやすくなり、重心間距離が近い状態で付着することがわかった(図2)。この変形はJKR理論とのズレの要因の一つであると考えられる。次に温度依存性について、本研究では低温度範囲($T < 100\text{K}$)で衝突計算を行い、その温度範囲内では依存性はあまり見られないことがわかった。本発表ではこれらの結果について詳しく紹介する。

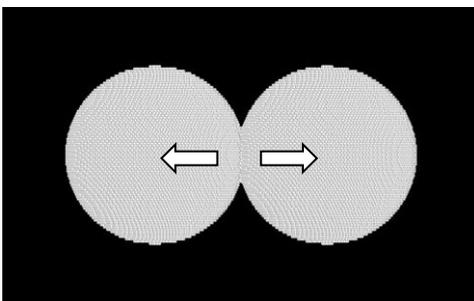


図1: モノマー衝突計算のスナップショット。モノマーが接触する前後では分子間力による引力が働き、圧縮していくと斥力が働く。ここでは斥力を正、引力を負となるようにしている。

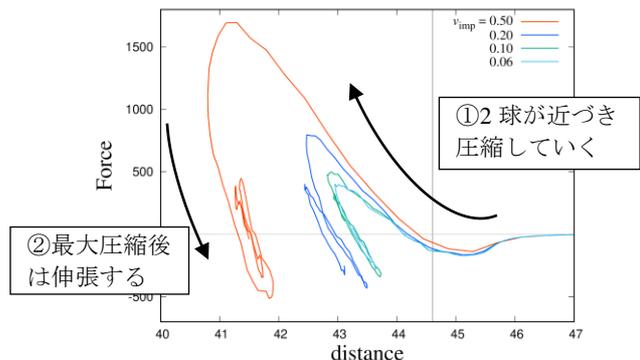


図2: 2つのモノマー重心間距離とモノマーに働く力の関係。距離は0.3405 nmで規格化されている。圧縮時と伸張時で異なる様子(ヒステリシス)が見られる。

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, 洪鵬¹, 岡本尚也¹, 石丸貴博², 須崎祐多², 山田学¹, 奥平修¹, 荒井朋子¹,
吉田二美^{1,3}, 鍵谷将人⁴, 亀田真吾⁵, 宮原剛², 太田方之², 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 年の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, 2021 年 5 月にプロジェクトフェーズに移行した理工学連携ミッションで, 宇宙から地球へ飛来するダスト (宇宙塵) 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を目指し, 地球周辺のダスト観測および小惑星 (3200) Phaethon のフライバイ探査を実施する. 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, Phaethon のフライバイ撮像観測を実施する. ふたご座流星群の母天体として知られている 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おり, 活動小惑星と呼ばれている. しかし, ダストの生成・放出機構はよくわかっていない.

TCAP は可視波長域の望遠モノクロカメラで, フライバイ中に, 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, 地上観測により示唆されている Phaethon 上のスペクトル不均一性を, 東西や南北方向といったグローバルな分布や特定のローカル地形に関連した情報として得ることが可能であり, Phaethon からのダストの生成・放出機構についての知見が得られると期待されている.

相対速度約 35 km/s, 最接近距離約 500 km という, これまでに無い高速フライバイ条件 (最大相対角速度約 4 deg/sec) 下での小天体追尾撮像を, TCAP 画像を使用した自動制御 (オンボード光学航法) により実施する. TCAP には天体追尾の観点からの開発の困難もあるが, 追尾機構の試作評価, 追尾方法の検討, 追尾性能検証試験計画の検討を実施してきた.

現在, 搭載カメラは基本設計フェーズ, すなわち EM (エンジニアリングモデル) の設計フェーズに移行している. 今秋に基本設計審査会 (PDR) を実施し, その後 EM の製造, 評価へと進む予定である. 本発表では, 上記の 2 台のカメラ TCAP と MCAP の開発状況および Phaethon 追尾性能の検証計画について報告する.

DESTINY⁺ Dust Analyzer (DDA) で計測する 星間ダストの化学組成やサイズ分布が 如何に星間物質科学を発展させるのか

○木村 宏¹、小林 正規¹、荒井 朋子¹、平井 隆之¹

¹ 千葉工業大学惑星探査研究センター (PERC)

星間物質はガス (気体) とダスト (固体) からなり、ダストの輪廻転生に伴い、各元素は気相と固相を往き交う。我が惑星系の中心に位置する太陽は、現在、局所星間雲 (Local Interstellar Cloud) と呼ばれる星間物質を横切っている恒星の一つである。局所星間雲起源のプラズマ粒子は、星間プラズマと太陽風プラズマとの相互作用で形成されたヘリオポーズによって、惑星間空間への流入を拒まれている。一方、イオン化エネルギーの高い元素に限られるが、ヘリオポーズを突き抜けて惑星間空間に到達可能な中性粒子は、太陽風プラズマとのイオン交換後に Ulysses 探査機や ACE 衛星に搭載された質量分析装置 SWICS で計測されている。局所星間雲を航行中の Voyager 1/2 探査機は、局所星間雲のプラズマ、宇宙線、磁場を直接計測可能となったが、1977 年に打ち上げられてからヘリオポーズに到達するまでに 35~41 年もの長い年月が必要であった。星間ガスは、紫外線や可視光に現れる各元素特有の吸収線を分光測定することで検出可能な元素もあるが、検出不可能な元素も電離度が既知であればその存在度を推測することも無理ではない。それに対し、重元素の多くはガスではなくダストとして存在しており、星間物質の 1 wt% 程度しかない星間ダストの観測でも、星間ガスの観測では得ることが困難な情報を提供できるのである。星間ダストのその場測定は Ulysses、Galileo、Hiten に端を発し、Cassini 探査機搭載の質量分析器によるその場測定では、星間ダストの組成が従来のモデルでは説明できない反面 SWICS で観測された星間ガスの組成とは矛盾しないことが分かった。従って、星間ダストのその場測定結果は、星間物質科学においては非常に貴重なデータの宝庫とみなすことができる。また、Stardust 探査機によるサンプルリターンで地球に持ち帰られた星間ダストの分析では、従来の赤外線観測によるスペクトルデータには現れないカンラン石の存在も明らかになったことから、星間物質科学の再構築が望まれる。

2024 年打ち上げ予定の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 (DDA) は、日心距離 1 au 付近の惑星間空間を航行中に、星間ダストの化学組成、質量、電荷量、速度をその場測定する。本講演では、DDA での星間ダストの計測が、星間物質の知見を広めるためにどのように役に立つのか、如何に星間物質科学を発展させるのか、について以下の具体例を挙げて解説する。

- 局所星間雲の電離度
- $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ 同位体比
- 局所星間雲ダストの年齢

あかつき観測から得られる水平風速を用いた 金星客観解析データ作成の試み

○藤澤 由貴子¹、村上 真也²、杉本 憲彦¹、高木 征弘³、今村 剛⁴、堀之内 武⁵、
はしもと じょーじ⁶、石渡 正樹⁵、榎本 剛⁷、三好 建正⁸、林 祥介⁹

¹慶應義塾大学、²JAXA、³京都産業大学、⁴東京大学、⁵北海道大学、⁶岡山大学、
⁷京都大学、⁸理化学研究所、⁹神戸大学

金星探査機「あかつき」の観測により、紫外カメラの雲追跡による水平風速、中間赤外カメラによる温度の水平分布のデータ等が蓄積されつつある。しかし、あかつきから得られる観測の多くは、観測高度、観測面（昼側あるいは夜側に偏る）、観測頻度に制約があり、観測データのみから時間・空間的に様々なスケールの全球的な循環場を知ることは難しい。本研究の目的は、我々がこれまでに開発してきた、金星大気大循環モデル「AFES-Venus」

（Sugimoto et al. 2014a）を基にした金星大気データ同化システム「ALEDAS-V」（Sugimoto et al. 2017）を用いて、あかつき観測をデータ同化の手法によってモデルに取り込むことで、高時間・空間分解能の金星の客観解析データを作成することである。本発表では、金星の雲層上部における太陽加熱で励起され、太陽とともに移動する惑星規模の大気波動である熱潮汐波に着目して、作成した解析データの検証を行った。

図1は、あかつき紫外カメラ(365nm)の雲追跡（Ikegawa and Horinouchi, 2016）により得られる水平風速を2018年9月から12月の期間について雲層上部である高度70kmに同化した結果である。東西風の同化の結果（図1c）は、同化なし結果（図1b）に比べて赤道付近の東西波数2の構造が午前側に2時間ほどシフトしている。この構造は観測結果と近く、AFES-Venusが持っている熱潮汐波の位相のずれの全球的な改善に成功した。また先行研究（Sugimoto et al. 2019）とも整合的である。今後は、得られた同化結果を世界で初めての金星の客観解析データとして、公開していく予定である。

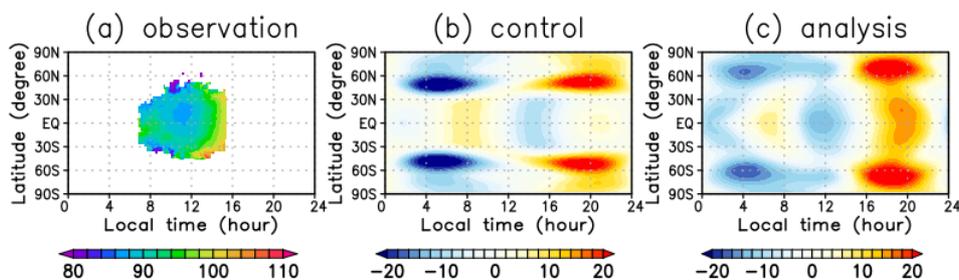


図1 2018年10-11月平均の高度70kmにおける東西風の緯度ローカルタイム図。(a) 観測、(b) 同化なし結果、(c) 同化した結果。(b, c) は帯状平均からの偏差である。

宇宙研と大学の連携強化について
-宇宙理工学合同委員会、大学連携強化タスクフォースの活動-

○中村正人¹、鈴木宏二郎²、笠羽康正³

¹ 宇宙科学研究所、² 東京大学新領域、³ 東北大学理学部

大学連携強化タスクフォース(以下 TF)は 2020 年末に宇宙研、宇宙工学/理学委員会の下に発足した。この TF は宇宙研の立場とは独立し、大学を含む広い「宇宙科学コミュニティ」と宇宙研をどう連携・発展させるかを議論している。メンバーは理工 合同委メンバーに限らず委員会外の有識者を含み、多様な機関・分野を跨いでいる。TF は主に以下の 2 つの議論を行った。

(1)コミュニティのあるべき姿 宇宙科学コミュニティを呼べる確固としたものは現在存在しない。そこで TF ではコミュニティのあるべき姿を定義した。

宇宙科学コミュニティとは、その限られた人的・財政的・技術的リソースを認識し、全体の目標・配分・計画を立てられる、矜持を持ったプレイヤー集団である。特に、ISAS による宇宙科学ミッションの推進力となる「狭義の宇宙科学コミュニティ」は、「宇宙工学委員会」「宇宙理学委員会」とその合同である「宇宙理工学合同委」を中核に、意図的かつ不断の努力をもって建設 していく必要がある。

その上で以下を TF の結論としている。宇宙研の工学・理学委員会は、宇宙研執行部に対等に意見を述べ、かつ政府・社会・世界に対して実行責任を共有することを前提に、JAXA および宇宙研との関係を確保し、また各コミュニティおよびそれを支える国内諸大学・機関に対する代表性を確立 する必要がある。また、両委員会は宇宙研所長に諮問されたことにだけ答えるのではなく、委員会が必要と考えるときには独自 に問題設定をして議論をし、実行に協力する姿勢が大事である。

宇宙工学・理学委員会は、宇宙科学コミュニティおよび関連する国内諸大学・機関全体の代表として、大学共同利用機関としての宇宙研と車の両輪として宇宙科学の発展を目指す。宇宙科学コミュニティの充実と、それを代表する宇宙工学・理学委員会と宇宙研との意思疎通は、宇宙科学における意思決定・実行の基盤でありまたその未来創出の柱である。

(2)大学が主体となる人材育成の方策 宇宙科学コミュニティ全体の充実には、宇宙科学コミュニティsのプレイヤーを抱える国内諸大学・機関における宇宙科学全体の 充実を要する。その常設的な柱の1つとして、これまで諸分野・諸機関を横断統合した実行のなかった「人材教育」がある。宇宙科学における人材育成では、これまで大学研究室、学会、JAXA、産業界などが個別に成果をあげてきたが、相互をグローバルに結んだ見通しの良い「日本として共有された横断的な人材育成プログラム」となっていない。このため、各機関における超 小型衛星などの革新技术開発や宇宙ベンチャー等との連結もローカルな動きに留まり、宇宙科学コミュニティ全体としてのタイムリーな対応ができていない。

TF は、問題の本質は「コミュニティにおける人材育成のセンターの欠如」にあると考え、狭義宇宙科学に参加する多くの院生・学部生および若手人材の育成を現に行っている大学が主体となり、これらを横断するとともに JAXA や産業界、さらには、宇宙理 学・工学を明示してはいないが、潜在的に関係のある多様な分野と連結・協力し、若手人材の育成・交流・水準向上を目指す「宇宙科学の人材育成ハブ」を構築することが必要と結論づけた。

福島ロボットテストフィールドの惑星探査研究 への活用

○山田竜平¹、大竹真紀子¹、出村裕英¹、小川佳子¹、本田親寿¹、矢口勇一¹、成瀬継太郎¹、
白石浩章²、田中智²
¹会津大学、²ISAS/JAXA

2011年3月の東日本大震災、及び原子力災害によって大きな被害を受けた福島県浜通り地域の再生をかけて「福島イノベーション・コースト構想」のもと、2020年4月、福島県南相馬市に「福島ロボットテストフィールド(RTF)」が開所された。福島イノベーション・コースト構想では廃炉、ロボット・ドローン、エネルギー・環境、農林水産、医療、航空宇宙が重点分野とされており、RTFはその中核となる施設である。RTFは、米国テキサス州のディザスターシティーを参考に作られ、屋内試験設備と屋外試験フィールドの両者を兼ね添えた複合型のロボット試験・開発施設となっている。施設は4つのエリアに区分され、陸、海、空、全てのロボット試験に対応できる一方、各種試験設備、フィールドは宇宙・惑星探査用ロボットや衛星搭載機器にも適用可能である。

現在、RTFには会津大学の研究オフィスが存在し、NASA ドラゴンフライ搭載用地震計と同タイプの地震計の試験や、ドローンを使用したペネトレータの投下試験等を実施してきた。また、現在、ロボットに搭載した可視光カメラと3次元LIDARを使用した不整地フィールド（土砂、陥没、瓦礫、傾斜）での3次元地形モデル生成研究も実施している。本発表では、惑星探査に利用可能なRTFの各種施設、フィールドを紹介すると共に、これらRTFで実際に実施した実験例についても報告する。

また、現在、会津大学を中心に、産学連携でRTF内に惑星探査用ローバーの試験に適用可能な惑星表面環境模擬フィールドを構築するプロジェクトを計画している。この計画では、月表層、及び火星表層を模擬したフィールドを構築し、ローバーの走行試験、自律移動、地図生成の実験を可能とすると共に、VRでのシミュレーターとの連携も検討している。また、惑星表層環境を使用した、各種探査試験、科学研究（地震計の設置、埋設、カップリング、熱流量測定、サンプル採取等）への利用も期待できる。本発表では、このプロジェクト計画についても紹介を行う予定である。

中空光ファイバを用いた太陽系内探査用 中間赤外レーザーヘテロダイン分光器の開発

○塚田 悟輝¹, 中川広務¹, 村田功¹, 平原靖大², 笠羽康正¹,
片桐崇史³, 松浦祐司⁴, 宮本明歩¹, 山崎敦⁵

¹東北大・理, ²名大・環境, ³富山大・理工, ⁴東北大・医工学, ⁵JAXA/ISAS

赤外レーザーヘテロダイン分光は、赤外レーザー光を局部発信光源として、これに観測対象からの光を重ねることで得られる混合光を GHz 帯まで応答する高速赤外線検出器で受信し、超高波長分解能($\lambda/d\lambda > 10^6$)を得る分光法である。我々が開発した中間赤外レーザーヘテロダイン分光器は、マウイ島ハレアカラ山頂に設置した Tohoku 60 cm telescope に装着され、金星・火星の大気の観測を実現してきた (e.g. Nakagawa et al., 2016, Miyamoto et al., 2021)。この現行機は光を多数の鏡で導きビームスプリッタで混合しているため、光学系が複雑で装置が大型となっている。この課題に対し、本研究では中間赤外域で高効率の伝送を実現できる中空光ファイバ (Matsuura et al., 1995) によって多数の鏡を削減するとともに、このファイバを用いて開発されたファイバカップラを用いて高効率の混合器を実現することで、装置の大幅な小型化を図った。既に中空光ファイバとファイバカップラを用いたブロードボードモデルを確立しており、このモデルを用いた中空光ファイバの伝送効率、レーザー光の輝線スペクトル、システム雑音温度の測定に成功している。測定の結果得られた中空光ファイバの伝送効率は波長 10.3 μm で最大 95%、システム雑音温度は約 3000K であった。これらの結果は中空光ファイバを用いた光混合とレーザーヘテロダインの成立性を示すものである。本発表では、地球大気の吸収スペクトルの試験観測結果も併せて報告する。本装置の小型化は、望遠鏡への装着自由度を増すばかりでなく、探査機・着陸機を含めた飛翔体への搭載実現に繋がるため、赤外レーザーヘテロダイン分光器の未来を大きく拓くものとなり得る。

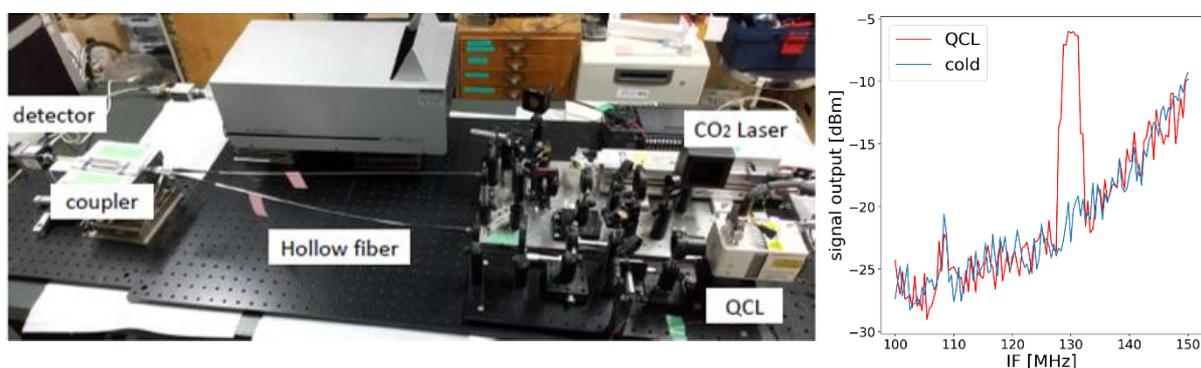


Fig. (left)中空光ファイバとファイバカップラを用いたヘテロダイン分光器のブロードボードモデル(BBM),

(right) BBM で取得した 10.3 μm の量子カスケードレーザーのエミッション

30m 光学赤外線望遠鏡計画 TMT

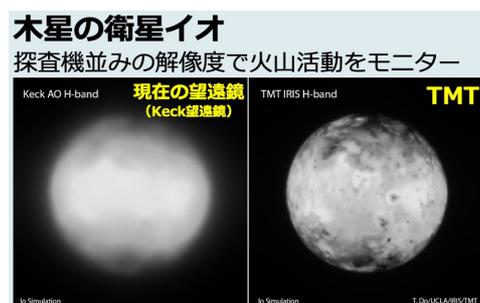
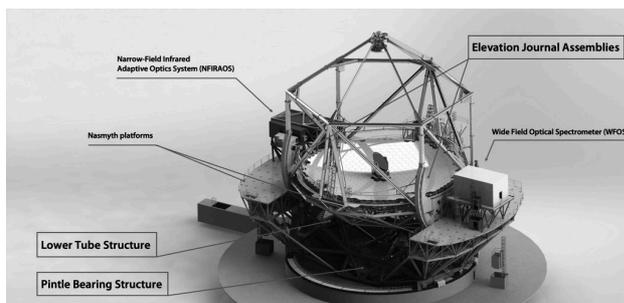
○臼田知史¹, 岩田生¹, 青木和光¹, 齋藤正雄¹, 山下卓也¹, 早野裕¹, 藤縄俊之¹, 能丸淳一¹, 安井千香子¹, 関口和寛¹, 井口聖¹, 常田佐久¹, 吉田二美²

¹ 国立天文台, ² 産業医科大学

TMT 計画は、日本、米国、カナダ、中国、インドの 5 か国の協力で進めている口径 30m の超大型望遠鏡の建設計画で、日本は自然科学研究機構が最終責任機関、国立天文台が実施機関となって参加している。2014 年に参加機関の間での合意書を締結して建設と運用を担う TMT 国際天文台 (TIO) を設立し、建設を進めている。日本は望遠鏡主鏡の製造、望遠鏡本体 (左下図) の設計・製造と現地据付・調整、観測装置の設計・製作を担当している。国立天文台においては TMT プロジェクトを設置して計画を推進している。

すばる望遠鏡をはじめとする口径 8-10m 級の地上望遠鏡や宇宙望遠鏡、さらにはアルマ望遠鏡等の活躍により、宇宙の理解は大きく進展したが、より大口径の光学赤外線望遠鏡でなければ実現できないフロンティアも明確になってきた。地球惑星科学の分野においては、TMT は地球型系外惑星の姿を直接撮像すると共に、系外惑星の反射光や惑星大気を透過してくる星の光を分析することで地球型系外惑星の表面や大気の組成を調べ、酸素など生命に関連する物質の存在を探る。これは科学的な生命探査の第一歩と言える。また、太陽系内では、探査機を容易に送り込むことができない天体の観測や、探査機には搭載が難しい高分散分光観測によって、惑星や衛星の表層・大気構造 (右下図) や組成分布・温度場・速度場等の変動を観測することが可能になり、太陽系の形成史に迫ることも期待できる。

TMT は建設予定地ハワイで 2015 年と 2019 年に計画した現地工事開始が反対運動により実施できず全体計画が遅延しているが、日本をはじめ各国で再開に向けた準備が進められている。TIO はハワイへの本部の段階的移転を決め、ハワイ州政府を始め関係機関と協力して事態の打開に取組みを行っている他、米国では国立科学財団 (NSF) の TMT 計画参加のための審査手続きが進められている。建設予定地ハワイ地元社会での支持を拡大し、現地工事を早期に再開して、2032 年度の完成を予定している。本講演では、TMT 計画の国内外を含む現状と今後の展望について報告する。



TMTを使った新時代の太陽系研究

○吉田二美^{17,2}, 阿部新助¹, 荒井朋子², 有松亘³, 飯野孝浩⁴, 伊藤孝士^{5,2},
白井文彦⁶, 浦川聖太郎⁷, 大澤亮⁴, 大槻圭史⁸, 大坪貴文⁵, 岡田達明⁶, 笠羽康正⁹,
河北秀世¹⁰, 北元⁶, 木村宏², 小林仁美¹¹, 小林浩¹², 坂野井健⁹, 佐川英夫¹⁰, 寫生有理⁶,
新中善晴¹⁰, 関口朋彦¹³, 関根康人¹⁴, 高遠徳尚⁵, 寺居剛⁵, 中川朋子¹⁵, 中村昭子⁸,
中本泰史¹⁴, 長谷川直⁶, パトリック・S・リカフィカ¹⁶, 樋口有理可¹⁷, 前澤裕之¹⁸,
藪田ひかる¹⁹, 和田浩二² (第一著者を除き五十音順)

¹ 日本大学, ² 千葉工業大学, ³ 京都大学, ⁴ 東京大学, ⁵ 国立天文台, ⁶ 宇宙科学研究所,
⁷ 日本スペースガード協会, ⁸ 神戸大学, ⁹ 東北大学, ¹⁰ 京都産業大学, ¹¹ 京都虹光房,
¹² 名古屋大学, ¹³ 北海道教育大学, ¹⁴ 東京工業大学, ¹⁵ 東北工業大学, ¹⁶ 近畿大学,
¹⁷ 産業医科大学, ¹⁸ 大阪府立大学, ¹⁹ 広島大学

世界的に見て、2020年代以降の宇宙天文科学の大きな研究目標の一つは宇宙における生命探査である。私達が宇宙の生命を考え、その誕生の場や複雑な生命圏を構築し維持する条件を探る際に基準となるのは言うまでもなく地球である。現代の地球にいるような種類の生命が発生し得る場所は液体の水と有機物の共存が可能な惑星や衛星である。そうした天体に関する詳細な情報はもちろんこの太陽系でのみ取得可能である。その意味で太陽系の起源と進化の研究は全宇宙に於ける生命存在可能環境（ハビタビリティ）研究の起点である。これまでも太陽系内の様々な天体へ探査機を送り生命に関する探査が試みられたが、探査機が到達できる天体数は限られている。また、探査機に搭載できる機器の仕様にも限りがある。従って、地上から様々な天体を様々な機器・様々な波長で網羅的に観測することの重要性は現在でも不変である。それは探査機による詳細な観測や試料採取がより盛んになる将来でも同じであろう。

私達は太陽系天体を対象とし、国立天文台のすばる望遠鏡とTMT (Thirty Meter Telescope) を使って2020-2030年代に実現可能かつ実現が必要な科学目標を検討した。その帰結は2020年3月に「すばる望遠鏡とTMTが結ぶ新たな宇宙像」というサイエンスブックの一つのセクションにまとめられている。本講演ではこのサイエンスブックに於いて私達が提案した研究例を紹介し、現在の太陽系科学研究が直面する課題の解決にすばる望遠鏡やTMTがどのように貢献できるかを議論する。本講演がすばる望遠鏡やTMTの将来計画やその更なる可能性を多くの惑星科学研究者に知って頂く契機となり、将来的にこうした設備を使った研究を推進して頂く一助となれば幸いである。

超大型望遠鏡 TMT で解き明かす太陽系外惑星

○青木和光¹, 河原創², 葛原昌幸³, 小谷隆行³, 佐藤文衛⁴, 成田憲保⁵, 福井暁彦², 臼田知史¹

¹国立天文台, ²東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, ³アストロバイオロジーセンター,
⁴東京工業大学理学院地球惑星科学系, ⁵東京大学総合文化研究科広域科学専攻

近年の太陽系外惑星研究の急速な進展を牽引しているのは、長期にわたる測光観測および分光観測による間接的な惑星系の検出、高解像度赤外線観測による系外惑星の直接撮像である。そのための観測手段の開発も日進月歩である。今後、多様な惑星系の全体像の解明が期待されるが、その中でとりわけ重要な課題となるのが地球型の系外惑星の検出であり、その表面や大気組成の解明による生命存在可能性の調査である。これに向けて近い将来最も確かな進歩をもたらすと期待されているのが超大型光学赤外線望遠鏡である。現在、日本を含む5カ国協力で口径30メートルの超大型望遠鏡TMT計画が進められており、これにより従来の望遠鏡に比べ解像度が3倍以上、点光源については感度で100倍以上の観測が可能となる。

まず画期的な進展が期待されるのは惑星系の直接撮像である。現在、補償光学とコロナグラフを用いた地上観測で太陽近傍の恒星の周りの惑星の直接検出が続いているが、これらはまだ軌道半径の大きな巨大惑星である。TMTはその高解像度と高感度により地球型惑星の直接撮像を展望している。特に期待されているのは低光度の主系列星(M型矮星)である。この場合は恒星と惑星の光度比(コントラスト)が小さくなることから、地球型惑星の直接撮像も期待できる。さらに惑星の分光観測を行えば表面の状態を明らかにすることに道が開ける。TMTの建設地マウナケアは補償光学の観測に必要な大気の大安定性で群を抜いており、TMTは始動時から補償光学装置を用いた観測を行う計画である。観測装置としては、系外惑星観測の専用観測装置PSIや中間赤外線の撮像分光装置MICHの開発を進めている。

一方、惑星が直接撮像できない場合でも、惑星が恒星の周りを回ることによりその視線速度が変化するため、連続的な観測を行えば惑星スペクトルを恒星スペクトルから分離することが可能である。実際、太陽型星のごく近くを回る巨大惑星(ホットジュピター)についてはこの手法により惑星起源のスペクトルが検出されている。さらに、我々からみて惑星が恒星の前面を通過(トランジット)する場合は、恒星の光の一部が惑星大気を透過してくるため、そこに惑星大気の組成に応じた吸収線スペクトルが刻まれる。これらの観測では、惑星大気による吸収や放射が恒星スペクトルにわずかにのるだけなので、その検出には非常に高い精度(S/N比)を限られた時間で達成する必要がある。TMTによる大集光力が不可欠となる。TMTではファーストライト時に搭載する観測装置として近赤外線高分散分光器MODHISの設計・開発が進められており、さらに可視光高分散分光器も予定されている。

講演ではTMTによって達成可能な系外惑星研究とそれに対応する観測装置計画を紹介する。

紫外線宇宙望遠鏡 WSO-UV による系外惑星観測計画の現状

○亀田真吾¹, 村上豪², 中山陽史¹, 平林賢人¹, 桑原正輝¹, 小玉貴則³, 成田憲保³, 生駒大洋⁴, 寺田直樹⁵, 塩谷圭吾², Alexander Tavorov⁶, Mikhail Sachkov⁷, Andrey Shugarov⁶, Oleg Korablev⁷
1. 立教大, 2. JAXA, 3. 東京大, 4. 国立天文台, 5. 東北大, 6. IKI, 7. INASAN

すでに多くの地球程度の大きさの惑星が発見されており、最近では太陽系近傍の低温恒星のハビタブルゾーンにも地球型惑星が複数検出されている。しかし、それらが地球に似た惑星か、金星に似た惑星か、判別することはまだ難しい。大気の観測にはトランジット分光法が有効であるが、小さな地球型惑星の薄い下層大気の観測には非常に高い精度が要求される。一方、地球の外気圏（水素原子）は地球半径以上の遠方まで広がっているが、金星や火星の外気圏は、大気温度が低いため、あまり広がっていない。これは、上層大気中の CO_2 混合比の違いに依るものである。また、地球には海洋がありプレートテクトニクスによる炭素循環によって、大気中の CO_2 が除去されているが、金星や火星大気の主成分は二酸化炭素となっている。このことから、上層大気の広がり、ハビタブルゾーンにある太陽系外惑星が、地球類似大気を持つのか、火星・金星類似大気を持つのかを見分ける目印になる可能性がある。膨張した上層大気は、トランジットの際に紫外線で観測することができる。

我々は、ロシア2024年の打ち上げを目指して開発中の7m口径紫外宇宙望遠鏡 (WSO-UV) 用の紫外分光器 (UVSPEX) の予備設計を行った。UVSPEX 求められる主な性能要求は以下の通りである。酸素原子の輝線である O I 線を他の輝線から分離するために、0.5nmより高い波長分解能を持つこと。水素ライマン α 線 (121.6nm) から酸素原子輝線 O I (130nm) を検出できるように、115nm-135nmの波長範囲が観測できること。分光器のスループットが3%以上であること。我々は、これらの要求を達成するために、スリット、分散素子としてのトロイダル回折格子、およびMCM検出器を含む、シンプルな分光器の設計を行った。この方式は、ひさきなど他の宇宙望遠鏡による紫外分光観測にも採用されている。本発表では、WSO-U計画の概要、UVSPEXの装置構成とその科学的目標を紹介する。

主星近傍の系外岩石惑星の大気：宇宙望遠鏡 Ariel による検出可能性

○伊藤祐一^{1,2}

¹国立天文台, ²University College London

近い将来、計画されている大型宇宙望遠鏡を用いた大気観測により、これまで詳細な観測が困難であった系外の岩石惑星の大気や表層環境などについての特徴づけが飛躍的に進むと期待される。特に、ESA M4 Mission である Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey (以下、Ariel)は、2029年に打ち上げられ、木星型だけでなく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る。

岩石惑星の中でも、主星近傍の系外岩石惑星は、大気観測から表面組成を知るのに最適な天体である。なぜなら、岩石の融点温度を超えた放射平衡温度を持つほど中心星近傍(0.1AU以下)に存在する主星近傍の系外岩石惑星は、その高温環境故にマグマオーシャンを持ち、マグマ由来の蒸気が大気を構成していると考えられるためである。これまで、マグマ・気体間の化学平衡計算から、揮発性元素の枯渇したマグマオーシャンからはNa, SiOを主成分とした岩石蒸気大気、揮発性元素を含むマグマオーシャンからはH₂O, CO₂を主成分とした大気が形成することが示されている。

本発表では、先行研究(Ito et al., 2015; Hu & Seager, 2012)で示された主星近傍の系外岩石惑星大気の理論推定スペクトルと宇宙望遠鏡 Ariel で想定される観測誤差(Mugnai et al., 2020)から、主星近傍の系外岩石惑星の大気の揮発性元素の有無が検出可能であることを示す(Ito et al., 2021)。また、Arielによる観測からさらに何を知ることができるか、大気散逸が主星近傍の系外岩石惑星に与える影響を含め議論する。

周期比が2に極めて近い惑星ペアが トランジットするM型星の発見

○福井暁彦¹, John Livingston¹, 森万由子¹, 荻原正博², 成田 憲保¹,
Jerome de Leon¹, 磯貝 桂介³, 川内 紀代恵⁴, 小玉 貴則¹, 栗田 誠矢¹
日下部 展彦⁵, 西海 拓⁶, 寺田 由佳^{7,8}, 渡辺 紀治¹, 田村 元秀^{1,5}

¹ 東京大学, ² 東京工業大学, ³ 京都大学, ⁴ IAC, ⁵ アストロバイオロジーセンター,
⁶ 総合研究大学院大学, ⁷ Academia Sinica, ⁸ 国立台湾大学,

軌道共鳴に近い、つまり公転周期が尽数関係にある惑星ペアは力学的に穏やかな過程を経て形成された可能性が高く、惑星の形成進化を知る上で貴重なサンプルである。Kepler 衛星によって主に太陽型 (FGK 型) 星周りでトランジット法による系外惑星探索が行われ、複数惑星系が多数発見されるとともに、惑星ペアの公転周期比分布が明らかとなった。その結果、周期比がちょうど尽数関係の惑星ペアはあまり存在しない一方、やや尽数関係から外れた (特に、周期比が尽数関係よりやや大きな) 惑星ペアが過剰に存在していることが明らかとなった。このような「軌道共鳴反発」が起こる機構については、潮汐散逸の効果などいくつかのアイデアが提唱されているものの、まだ良く分かっていない。

軌道共鳴反発の機構モデルによっては、反発の程度が主星の質量に依存するため (例えば潮汐散逸モデルの場合、主星が軽いほど反発が強くなる)、同機構を解明する上で周期比分布の主星質量依存性を調べるのが重要である。しかし、これまで低質量星 (M 型星) 周りの惑星探索はあまり進んでおらず、周期比分布の主星質量依存性は分かっていなかった。

現在、TESS 衛星が全天の明るい恒星を対象にトランジット惑星探索を進めており、M 型星まわりの惑星候補が次々と発見されている。我々は、TESS 衛星で発見された M 型星を主星にもつ複数惑星系候補 TOI-1749 について、多色カメラ MuSCATs などを用いて地上のフォローアップ観測を行い、 $1.4\text{--}2.5 R_{\oplus}$ の半径をもつ3つのトランジット惑星 (TOI-1749b,c,d) の存在を明らかにした。このうち、外側の軌道を周る2つの惑星の周期比は極めて2に近い (2.015)。そのような惑星ペアは他の M 型星周りでも発見されており (e.g., TOI-270c&d, TOI-175c&d)、FGK 型星と異なり、M 型星まわりでは軌道共鳴反発をあまり受けていない惑星ペアがより普遍的に存在する可能性があることが分かった。これらの惑星ペアはいずれも、さらに内側の軌道に3つ目の惑星が存在しており、この惑星の存在が軌道共鳴反発を妨げている可能性がある。

月の縦孔・地下空洞直接探査（UZUME） その2

○春山純一¹

月の縦孔・地下空洞直接探査ワーキンググループ

¹宇宙航空研究開発機構

月火星には、火成活動起源の溶岩チューブといった地下空洞に開いたと思われる縦孔が見つかったと考えられている。また、こうした地下空洞は成因を考えると、水星や金星にも存在する可能性が高い。

これまで我々は、特に月、火星について、その縦孔・地下空洞を直接探査することを目指すミッションを、宇宙科学研究所/理学委員会のもとのリサーチグループとして検討を続けてきたが、月の縦孔・地下空洞直接探査については、2020年度、Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration (UZUME: 古今未曾有の月地下世界探査) ワーキングとしてプロジェクト化に向けて検討を進める事が同委員会に認められた。

本WGが目指す探査の科学目的(大目的)は、月の地下空洞とそこに開いた縦孔を探査することで、

大目的1: 重力天体に固有の火山活動(溶岩流被覆)や古代における磁場形成、隕石衝突履歴(レゴリス形成)や、月面と縦孔底での(温度、放射線、磁場)環境の違いを明らかにし、生命の発現と持続可能性の理解に資する情報を得ること

大目的2: 月の地下空洞の環境を把握し、利用可能性を把握し、今後の探査・基地建設への予備情報を取得する

である。

現在おおよそ次のようなミッション構想をベースに検討に進められている。

①イプシロンSによって打ち上げられたUZUMEの小型着陸機は、SLIMと同様に動力降下を行い、その後月縦孔に向かって垂直降下する。小型着陸機は、月縦孔(半径50m)の内部に侵入し月縦孔の壁下部や、横穴の構造及び状態を観測する。

②地球との交信が可能なエリア(月の東北部の半径10mのエリア)に着陸し、地球との間で交信を行う。

③縦孔に降下中もしくは縦孔底に着陸後に縦孔壁の複数の詳細画像を取得する。

④小型着陸機は、着陸後に360度の光学センサと測距計を用いて、月孔底の広さの確認と、溶岩チューブの形状の撮影を行い、地上に送信する。光学センサのデータを地上で処理することで、月底および溶岩チューブの立体的な位置情報を確認することが可能となる。

⑤小型着陸機は、SLIM搭載用小型プローブLEVベースの小型プローブを放出する。小型プローブは溶岩チューブに向かって移動し、溶岩チューブに接近した状態で壁(喫水線構造があるか)、床(縄状構造があるか)の情報を得るための光学観測を行う。データは、小型着陸機を経由して地球に送信され、画像解析される。

本講演では、UZUME計画の現状について、紹介する。

月の縦孔・地下空洞直接探査 (UZUME) 初号機の科学ミッション

○庄司大悟¹、春山純一¹

月の縦孔・地下空洞直接探査ワーキンググループ

¹宇宙航空研究開発機構

これまで、SELENE や LRO による高解像度画像によって、月の表面には深い垂直の孔（縦孔）が存在していることが明らかとなっている。特に静の海に発見された縦孔は、直径、深さともに 100 メートルに及ぶ巨大なもので、斜め観測から縦孔の底から水平方向へ空間が広がっていることがわかっている。これら縦孔は、通常のクレーターとは異なるメカニズムで形成されたと考えられる。

地球上の縦孔との類推から、こうした縦孔の起源として、2 つの形成メカニズムが考えられる。ひとつは「ドレンバック構造」で、マグマが表面浅部まで上昇してきた後、再びマグマ溜りに戻ってケースである。この場合、縦孔は月面で殆ど見つかっていない火口を表している。もう 1 つの仮説は、縦孔が「天窓」であるというものである。これは、溶岩チューブの天井が隕石衝突などによって打ち抜かれたりして引き起こされたと考える。縦孔の起源を解明するためには、縦孔を直接に入り降下しつつ縦孔や、その下の空洞構造を詳細に観察する必要がある。そこで、50 名を越す理工学研究者がこれまで、月の縦孔を直接探査することを目指す検討を行い、2020 年度には、宇宙科学研究所/理学委員会のもと、ワーキンググループ設立が認められ、Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration 初号機 (UZUME-1) のプロジェクト化を目指している。

UZUME-1 の縦孔構造の調査により、月の熱的および火山的歴史に科学的な制約を与えることが期待される。たとえば、縦孔がドレンバックによって形成された場合、マグマ溜りの分布と構造構造を知ることができる。一方、縦孔が溶岩チューブの天窓の場合、月で溶岩流が広く分布したその要因を特定出来ることになる。また、垂直な縦孔側壁が層状になっていることが観察されており、各層の厚さと磁力を観察することで、火山噴火の間隔の時間スケールと月の磁場変化の履歴を知ることが期待出来る。

本講演では、月の縦孔・地下空洞直接探査 (UZUME) 初号機の科学ミッションを紹介する。

月極域探査機（LUPEX）-最新状況報告-

○唐牛譲¹、石原吉明¹、野村麗子¹、下村琢磨¹、金森洋史¹、大竹真紀子^{1,2}、諸田智克^{1,3}、
井上博夏¹、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、³東京大学

JAXA は、国際的なパートナーや民間セクターとの月面基地の運用など、今後 50 年間で持続可能な月探査活動を行うことを目指している。この目標を実現するために、技術デモンストレーションを段階的に実施する。2020 年 10 月、日本、米国、および 6 つのパートナー国は、宇宙探査協力を導くための実践的な原則を策定することに合意し、アルテミス協定に署名した。日本政府は、この国際宇宙探査に正式に参加し、月探査ミッションで取得したデータの共有や月面着陸地点の選択技術など、いくつかの分野での調整を進めることを決定した。

月面ミッションについて、JAXA は高精度着陸技術の実証を目的とした小型月着陸実証機（SLIM）を開発中であり、これに続いて、JAXA は月極域の水資源を調査することを目的とした月極域探査機（LUPEX）ミッションをインド宇宙機関（ISRO）との共同ミッションとして計画している。

近年、複数の月探査データから月面に水が存在する可能性が報告されており、もし水が存在する場合、その場の資源として使用することに強い関心が寄せられている。具体的には、水を推進剤として使用すると、地球から月に輸送する推進剤の量を減らすことができるため、将来の探査シナリオや活動に大きな影響を与える。月面を直接観測することにより、水の存在、その量、質（純水または他の相を含む）、および使いやすさ（掘削に必要な深さまたは必要なエネルギー量）を確認する必要がある。LUPEX は、月面に存在する水を資源として利用可能か評価するために、月全体の水の量と質を推定し、水の分布と濃集原理を理解するためのデータを取得することを目的とする。

LUPEX は 2020 年 12 月にシステム要求審査（SRR）を合格した。ISRO/JAXA は、LUPEX の概念設計（フェーズ A 検討）をほぼ終了した。このミッションでは、JAXA はロケットとローバシステムを提供し、ISRO が着陸機を提供する。JAXA はローバシステムおよびローバに搭載する観測機器の開発メーカを 2021 年中に選定する。さらに 2021 年末までにシステム定義審査（SDR）を開催する予定である。

着陸機とローバシステムからなる探査機システムの目標質量（推進剤を含む）は約 6 トンで、ペイロードの質量は約 350 kg である。探査機システムは月到達した後、いくつかの軌道変更を経て、高度 100km の円軌道に投入される。動力降下段階では、探査機システムの位置は、地形によって作成された影を使用したランドマークナビゲーションによって推定される。着陸後、ローバシステムは着陸機から月面に展開される。次に、ローバシステムは観測機器を使用して水を探査する。

着陸地点の位置や日照条件によっては、運用や観測の計画の順序を変更することでミッションを達成することができる。着陸後すぐに着陸地点を特定する必要があるため、ローバシステムの迅速な位置決定機能を地上システムの要件に含める必要がある。

LUPEX プリプロジェクトチームは、観測データを担当するアウトプットデータ創出チーム（ODCT）発足のための準備活動を行っている。2020 年夏からの ODCT 発足準備活動の一環として、観測機器提案チームや他のメンバにインタビューを行っている。各観測機器から得られたデータの処理方法、得られた情報の組み合わせ、アウトプットの作成方法、観測運用のタイミングや観測条件について検討している。

月極域探査機 (LUPEX) — 観測機器・観測シナリオ —

○石原吉明¹・唐牛謙¹・野村麗子¹・下村琢磨¹・金森洋史¹・大竹真紀子^{1,2}・水野浩靖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

JAXA は国際的なパートナーや民間セクターとの月面基地の運用など、今後 50 年間で持続可能な月探査活動を行うことを目指している。この目標を実現するため、技術デモンストレーションを段階的に実施する。現在、高精度着陸技術の実証を目的とした小型月着陸実証機 (SLIM) を開発中であり、さらに SLIM に続いて月極域の水資源探査を目的とした月極域探査機 (LUPEX) をインド宇宙機関 (ISRO) との共同ミッション (ISRO が着陸機、JAXA がローバとロケットを提供) として検討を進めている。観測機器は ISRO・JAXA 両機関および第三者機関 (NASA、ESA) が開発提供する予定である (表 1)。

運用シナリオ：月極域の長期日照域に着陸後、ローバ・観測機器の初期チェックアウトを実施した後、着陸地点近傍に設定した複数の探査領域 (1 領域は 30 m 四方程度、半永久日陰領域も探査領域候補とする) において、下記の一連の観測を実施する。

疎観測：移動しながら地中レーダ (GRP)・中性子検出器 (NS)・近赤外画像分光装置 (ALIS)・表層分圧計 (EMS-L) によりマッピング観測を実施する。

(解析：疎観測データをもとに詳細観測前の充電期間を利用し、探査領域中で最も水資源の存在が有力視される位置を特定する。)

詳細観測：特定した水資源の存在が有力な位置において、ローババスシステムの掘削・試料採取装置を用いて月レゴリス試料を取得 (地中サンプルを含む複数) し、パッケージ型装置である水資源分析計 (REIWA) において、月熱重量分析計 (LTGA) による月レゴリス試料の熱重量分析を行い、LTGA による加熱で発生した揮発ガスの質量分析計 (TRITON) による質量分析及び微量水分計 (ADORE) による微量水分分析 (D/H 測定を含む) を実施する。さらに REIWA に組み込まれる ISRO 開発のサンプル分析機器パッケージ (ISAP) により、月レゴリス試料のラマン分光及び XRD/XRF 分析を実施する。

表 1 ローバ搭載観測機器

観測機器	GPR	NS	ALIS	EMS-L	REIWA				
					LTGA	TRITON	ADORE	ISAP	
								ラマン分光	XRD/XRF
目的	水含有層検出	地中水素原子濃度	水・OH の検出・濃度・鉱物組成	水・その他の化学種の雰囲気圧力	揮発性物質定量	揮発ガスの分子種特定・量比	揮発ガス中の水の確定検出・定量・D/H 測定	水・鉱物の検出・同定・定量	鉱物種の同定・元素分析
観測対象	地下	地下	表層 (+掘削排土)	月極希薄大気	掘削レゴリス	LTGA による揮発ガス	LTGA による揮発ガス	掘削レゴリス	掘削レゴリス

GPR・ISAP は ISRO 開発、NS は NASA 提供予定、EMS-L は ESA 提供予定

月極域探査のための画像分光カメラ ALIS の 仕様と開発状況

○佐伯 和人¹、仲内 悠祐²、海老塚 昇³、岡本 隆之³、小川 佳子⁴、鹿山 雅裕⁵、
北里 宏平⁴、佐々木 実⁶、出村 裕英⁴、長岡 央³、平野 照幸⁷、三河内 岳⁵、山形 豊³、
石原 吉明²、唐牛 譲²、水野 浩靖²

¹大阪大学、²宇宙航空研究開発機構、³理化学研究所、⁴会津大学、⁵東京大学、
⁶豊田工業大学、⁷アストロバイオロジーセンター

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) とインド宇宙研究機関 (ISRO) が共同で月極域探査計画 LUPEX を検討している。この計画は、月の極域に存在する可能性のある水氷をロケット燃料資源として利用可能であるかを検証するために、極域での水氷の量と分布を調査する計画である (文献 1)。この計画に我々は近赤外画像分光装置 Advanced Lunar Imaging Spectrometer (ALIS) を提案し、2020 年 4 月にローバ搭載候補機器として採択された。ALIS は鉱物の同定や水氷の存在の確認・定量を行う。目標の視野を水平スリットで切り取り、透過型 Volume Binary 回折格子によって垂直に分散して「空間 1 次元」x「波長 1 次元」の画像として撮像素子面に結像する。さらに可動鏡で視野を走査して「空間 2 次元」x「波長 1 次元」のデータキューブを得る。光学系の他に永久影での観測を可能にする光源部と ALIS の分光データを較正するための標準拡散反射板を搭載する。ALIS の瞬時観測視野は、5m 先の月面に対して 2m x 1cm のライン状になっており、ラインの各画素で、750~1650 nm までの連続スペクトルデータを取得する。1500 nm 付近の水氷の吸収帯により 0.5wt% 程度の微量氷を定量検出を目指す。また、1400~1500 nm 付近の吸収帯による OH 基の検出や、1000 nm 付近の吸収帯による造岩鉱物の同定も行う。着氷鉱物種の同定は水氷の精密定量のためにも必須である。

申請当初は ALIS 視野を月面掘削排土にむけ観測するための固定鏡や、排土観察用の第二光源部も構想していた。しかし、開発予算規模を越える見込みから廃止した。排土観測が必要な場合は、掘削後にローバが移動し、排土を ALIS の観測視野に入れて行う。

月面での水氷の定量精度を上げるために、月面での観測を模擬できるような試料の作成と ALIS の地上モデルによる観測実証を行っている。例えば様々な鉱物種や粒径について水氷を近赤外分光法で定量するための検量線を作る研究を進めており、まとまった部分から順次公表している (文献 2, 本講演会荒木&佐伯)。今後は、水酸基を含む鉱物の定量にも取り組む他、揮発成分の起源解明という科学成果を最大化するために水氷以外にも存在する可能性がある CO₂ や CH₄ など他の揮発成分の定量可能性についても検証を拡げていく計画である。参考文献 (1) Ohtake et al, (2021) 52nd LPSC, #1840. (2) Ogishima and Saiki (2021) Icarus, 357, 114273.

月極域探査のための鉱物種と粒径が異なる着氷鉱物粉体の近赤外分光観測

NIR spectroscopy of frosted mineral powders with different mineral species and particle size for the Lunar Polar Exploration.

○荒木亮太郎¹, 佐伯和人¹

¹大阪大学 理学研究科

月極域永久影に存在する可能性がある水氷を直接検出するため、日本とインドが共同で月極域着陸探査を計画している。ここで、ローバに搭載した近赤外分光装置を用いて月面土壤に含まれる水氷を検出する予定である。Ogishima & Saiki (2021) は、月面土壤を模擬した物質に混ざる水氷粒が水の近赤外吸収帯としてどのように観測されるのかを調べるために、落下式着氷装置を製作して実験を行い、異なる鉱物種の粉体に付着した水氷の 1500 nm 吸収深さを比較した。その結果、着氷率に対する吸収深さ強度の検量線は、鉱物種の違いによって異なることが判明した。

本研究では、先行研究に加えて粒径を変化させた場合の吸収深さ検量線を求めて比較した。また、粒径の大きい試料を対象にした観測では粒子の光学的方位ランダム性が不十分であることが分かったため、観測線を移動させるなど再現性を向上させる工夫も行った。

試料鉱物としてかんらん石 (Fo ~ 90) および斜長石 (An ~ 60) を破碎し、篩に掛けて 75 ~ 125 μm と 180 ~ 250 μm の粒径分布の粉体を用意した。Ogishima & Saiki (2021) で使用された落下式微量着氷装置を使用してこれら試料を着氷させ、開発した近赤外分光装置 (LPSC, 2019) を用いて波長範囲 900 nm ~ 1640 nm の近赤外スペクトルを得た。

得られたスペクトルの波長 ~ 1500 nm 付近に現れた水氷の吸収帯は、コンテナムで規格化した吸収深さで評価した。かんらん石および斜

長石について、横軸に着氷率、縦軸に吸収深さを取ってプロットしたグラフが図 1 である。

検量線の傾きから、乾燥鉱物に微量水氷が混合した粉体試料の吸収深さは、鉱物の粒径が大きいほど強く出ることが分かる。実験試料 4 種類 (= 鉱物 2 種 × 粒径 2 種) の検量線の傾きの値と、乾燥試料の 1500 nm 反射率、粒径の 3 変数を軸にとって三次元にプロットしたところ、4 点が一平面上に分布した。このことから、着氷状態が未計測の別の鉱物に対しても検量線の傾きを予言できる可能性が示唆される。

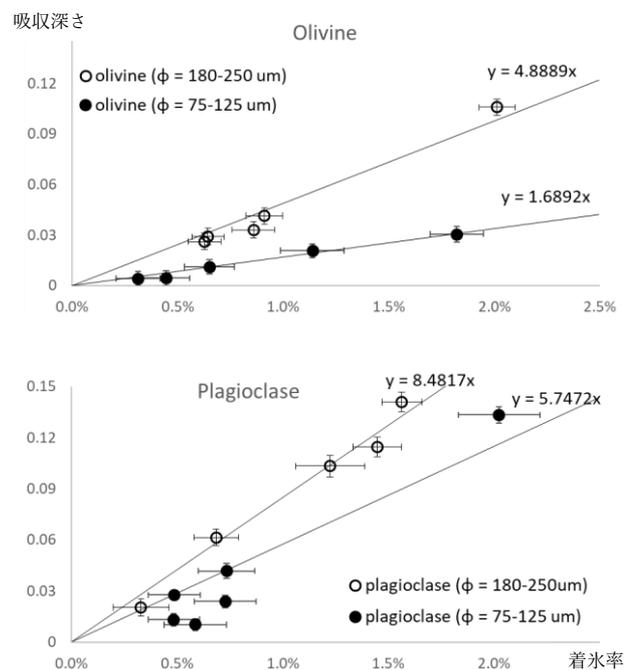


図 1. かんらん石 (上) および斜長石 (下) の着氷率に対する吸収深さの検量線

月面での小さな地震アレイ探査の有効性と可探深度の検討 ～月における水資源探査や地盤調査に向けて～

○折田まりな¹, 池田達紀², 辻健²

¹九州大学大学院工学府, ²九州大学大学院工学研究院

将来, 月を拠点とし宇宙開発を進めていくために, 月での水資源探査や地下構造の調査は重要とされている。こうした中, 月の地下速度構造を求めることは, 水資源の発見や地盤支持力の推定などに繋がり, 重要である。また, 月探査では, ロケットに搭載できる物資の量や金銭的な問題から, 探査機の重量や大きさに限度がある。そのため, 探査システムの軽量化, 小型化が求められている。本研究では, この課題を解決しつつ, 月速度構造を調べるシステムを検討した。具体的には, 小型の地震計アレイを使用して微動を観測し, CC法で解析した場合のアレイ配置毎の最大可探深度を評価した。CC法で求められる可探深度は, 微動の「NS比 (SN比の逆数)」, 「アレイ半径(地震計を配置する円の半径)」, 「地震計の数」により影響を受ける(Cho et al., 2006)。したがって, 実際に月面で取得されたアポロ14号の微動データを用いて, 月の微動NS比を推定し, 月の環境下で小型アレイを使った場合を想定した評価を行なった。ここで, 微動として用いるシグナルは(A)月の昼間に遠方で起きたと思われる熱月震, (B)月の昼間の明瞭な月震を含まない微動の二つを考えた。また, 月の夜間は熱月震が少ないことを考慮し, 特別な震動を含まない夜間の微動からノイズを定義した。可探深度は, 月の表層を伝播する表面波の周波数毎の波数 k が, NS比とアレイ半径, 地震計の数を考慮しCC法による最小波数解析限界 k_{min} (Cho et al., 2013)を上回る最小波数から最大波長を求め, その波長の三分の一とした。まず, この方法の地球の微動データへの有効性を確認した後, CC法を月探査で用いる際に考慮すべき点や課題の整理と, 月での可探深度の推定より, 求めたい深度に対してどのようなアレイ配置が必要かを考察した。例えば求めたい深度が2mの場合, 精度の良い地震計を用いてノイズを抑える, もしくはノイズの小さい時間帯のデータを選んで解析すれば, 5角形アレイでは0.3m半径, 3角形アレイでは0.4m半径の小型アレイでも探査できることが分かった(Fig.1)。このように提案する評価方法は, 将来の月探査プロジェクトにおいて地震計アレイを設計する際に有効であると考えられる。

謝辞: 本研究では JAXA Data Archives and Transmission System (DARTS) のアポロデータを 使用させていただきました。本研究は JSPS 科研費 JP20H01997 の助成を受けたものです。

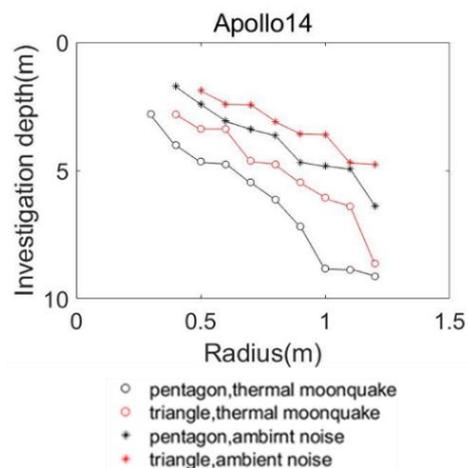


Fig. 1 NS比が最小まで抑えられた場合のアポロ14号地点における可探深度

月の熱進化に及ぼすマグマの生成・移動と放射性元素輸送の影響
The Thermal History of The Moon caused by Transport of Heat and Heat
Producing Elements by Magma.

于 賢洋¹, 荷見 拓生², 小河 正基¹
Kenyo U, Hiroki Hasumi, Masaki Ogawa

1. 東京大学総合文化研究科 2. 東京大学理学系研究科

1. Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

2. Graduate School of Science, The University of Tokyo

月では重力異常や表面地形の観測から初期の数億年間に全球で数 km 程度の半径膨張が起き、海の火成活動極大期を経たのち、全球で半径収縮が起きたことが示唆されている。観測される膨張は従来考慮されていた熱膨張のみで説明するにはあまりにも大きい。そこで本研究では、マグマの生成・移動とそれに伴う放射性元素の移動を考慮した熱史一次元球対称数値モデルを構築した。

初期温度は、深部・中部マントルで 1400K から 1650K とし、また、浅部マントルは溶融温度に等しいとした。さらに、浅部マントルは初期に部分溶融しているとした。マグマの生成は温度が融解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た。内部熱源となる放射性元素は、時間とともに減衰していき、マグマ移動に伴って輸送されると仮定した。

その結果、マントル深部で発生したマグマが上部マントルへと移動する過程で放射性元素の効果でさらに融解が起こり、これにより初期の数億年間膨張が起こった。さらにマグマによる熱輸送と、深部マントルの放射性元素の欠乏の結果、月は冷却し、後期の収縮が起こることがわかった。特に、半径が最も膨張した時期はマントル広域で最も溶融した時期でもあり、海の火成活動極大期と一致している。また、初期条件として与える深部マントルの温度があまりにも高いと、マグマの移動により放射性元素が最初の数千万年で地殻に濃集してしまい、マントル中の放射性元素が枯渇することによって初期膨張が発生しないことがわかった。このことから、形成期の月内部温度は 1450K から 1600K 程度であり、コア・マントル境界直上に放射性元素に濃集した領域があったと推定した。これらは先行研究で示唆された初期の内部構造を補強するとともに、さらなる月形成過程への制約となり得る。

将来の月極域着陸探査に向けた クレーターおよびボルダールの統計研究

○川島 桜也¹, 諸田 智克¹, 大竹 真紀子², 笠原 慧¹

¹東京大学, ²会津大学

近年の様々な探査により、月極域には揮発性物質（特に水素・水）が濃集していることを示すデータが出揃ってきている [e.g., LCROSS: Colaprete *et al.*, 2010; LRO/LEND: Mitrofanov *et al.*, 2010; LRO/LORA: Fisher *et al.*, 2017; Chandrayaan-1/M3: Li *et al.*, 2018]. 月にはプレート活動がなく古代の情報をよく保存することから、このような月の揮発性物質は太陽系内惑星への揮発性物質の輸送プロセスを読み解く鍵になるとして重要視されている。さらに極域の水をはじめとする揮発性物質の存在可能性は、将来的な月面基地での活動におけるその場で入手可能な資源（燃料・呼吸ガス等）を議論する上でも重要であることから、より詳細な物質分析（化学的存在状態・深さ分布など）を行うべく、現在多くの極域揮発性物質探査計画が持ち上がっている [e.g., Artemis/NASA, LUPEX/ISRO-JAXA]. このような極域探査の候補地点について、先行研究 [e.g., Glaser *et al.*, 2014; Mazarico *et al.*, 2011; Ohtake *et al.*, 2020] では、日射条件（ローバーのエネルギーとして重要）、地形的スロープの条件（ローバーには走行可能領域の限界があるため重要）、永久影領域までの距離や水素濃集の程度、地球との幾何学的位置関係をもとにした通信可能性、などをもとにして選定を行っている。一方で表面の地質解析（クレーターやボルダールの数密度、層序学的な年代情報）から探査候補領域を議論するといったことはあまり行われていない。例えば探査候補領域を見込む極域のクレーターカウンティングに関する先行研究 [Zuber *et al.*, 2012] では、（主に年代決定の目的で）>200 m 以上のクレーターしか同定していない。これは、着陸楕円 [-100m×100m, Ueda *et al.*, 2017] の決定やローカルな探査シナリオの決定においては不十分であり、より小さい数 m 級のクレーター・ボルダールのサイズ・数密度情報が重要であることは明白であった。そこで本研究では、既に先行研究で選定された将来探査候補領域が集中している北極・南極直下のクレーター（それぞれ Whipple crater, Shackleton crater）リム付近においてメートルサイズの小クレーター・ボルダールのカウンティングを行なうことで、探査領域選定に寄与する情報を整理することを目的とした。手法は LROC/NAC による高解像度モザイク画像（~1m/pix）を利用したマニュアルカウンティングである。結果として、南極の Shackleton crater 周りで、直径 5m 以上のクレーターを 101,547 個、2m 以上のボルダールを 2,973 個発見した。また北極の Whipple crater 周りで、直径 5m 以上のクレーターを 65,323 個、2m 以上のボルダールを 7,373 個発見した。それらの統計から、1. クレーター数密度は地形スロープに対して短調減少関数になっていること、2. ボルダール数密度が、Apollo 計画や Luna 計画で探査された領域のボルダール数密度 [Basilevsky *et al.*, 2013] に比べて小さいこと、がわかった。また今回の解析により、LUPEX ミッションで候補領域の一つとして挙げられている SR3 領域でクレーター数密度が低く、探査に適している可能性が示唆された。本研究ではこの領域についての詳細な解析と層序マップを作成し、~1m の深さをサンプリングすることで複数の年代のイジェクタに到達できる場所を可視化しており、それをを用いて将来月極域着陸探査における観測運用の具体例を提案する。

月における嵐の大洋の地下構造解析
Subsurface structure in Oceanus Procellarum

石山 謙¹

¹⁾ 鶴岡工業高等専門学校

(ishiyama.ken@tsuruoka-nct.ac.jp)

かぐや衛星に搭載された地下レーダサウンダー (LRS) は、月全球で地下構造探査をすることに成功し [Ono et al., 2009], 嵐の大洋の北部領域においては、見かけ深さ (d_r) で約 400~1200m 付近に反射面を検出することに成功している [Oshigami et al., 2009]. 見かけ深さは実際の深さではない為、月地層の誘電率 (~ 6) を考慮すると [Carrier et al., 1991], 嵐の大洋の北部領域での地下反射面の深さは約 150~500m である. 本研究では、嵐の大洋の北部領域のリュムケル山付近の地下構造を解析し、この山がマグマの貫入による地形であることをモデル計算より示した.

リュムケル山付近では、LRS により 3 つの地下反射面を検出することに成功し、反射面の実深さは 190~360m であった. 地下反射面の空間分析に基づくと、浅い地下反射面はリュムケル山付近まで存在するが、深い地下反射面ほどリュムケル山付近には存在していないことが明らかとなった. この特徴的な地下構造は、リュムケル山付近の地質図 [Zhao et al., 2017] やマグマ貫入モデル [Michaut, 2011] と整合している.

LRS で検出した地下構造は、いくつかのマグマの仮定 (マグマの貫入幅を 200m、マグマ密度を 3100kg/m^3 [e.g., Michaut, 2011]) をすると、地下~1km 付近でのマグマの貫入モデルと整合的であり、マグマの上昇に伴う圧力勾配は 4~42Pa/m 程度であると推定された. この圧力勾配は、先行研究から予想される範囲にも収まる [e.g., Wilson and Head, 2008]. リュムケル山付近には、マリウス丘などの似たような貫入地形も存在しており、嵐の大洋にはマグマの貫入しやすい地層が存在することを示唆している. この地層は、おそらく、古レゴリス層や岩石強度が弱い層と考えられ、このような地層が激しい隕石衝突を示唆している. 嵐の大洋は盆地ではないが、ローカルな激しい隕石衝突が嵐の大洋の北部領域付近にあったのかもしれない.

月面表層での資源探査手法の開発に向けた模擬物質の作製

○竹村知洋¹, 新原隆史¹, 神崎友裕¹, 小林真輝人², 清水雄太¹, 宮本英昭^{1,2}

¹東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

²東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

月は深宇宙探査の中継地点として近年再び注目されており、各国の宇宙機関・民間企業が月軌道上や月面での活動計画を発表している。将来の有人／無人の長期滞在を視野に入れると、断続的な隕石衝突や宇宙放射線による被曝への対処に加え、水氷をはじめとした月面表層における資源の活用が重要となる。月面上での活動や資源探査の検討には、具体的に探査地の土壌を想定し、機器の評価や検証実験を行うことが重要である。こうした検討に月面で採集した希少な岩石試料を使用することは現実的ではなく、地球上の岩石を混合して作製した月面表層模擬物質(月シミュラント)を用いることになる。そのため月シミュラントは、さまざまな機関で開発・利用されてきた[e.g., 1]。これまでの開発計画は月の表側が主体であったため、シミュラントも月の表側で採取されたアポロ試料を基に作製されたものが多かったが、今後は探査が行われる地点ごとに、精密に想定されるレゴリスの性質を反映したシミュラントが必要とされるであろう。そこで本研究では、月の任意地域について、化学組成や鉄物量比、岩石形状等を再現した月シミュラントの作製手法について検討した。

シミュラントの作製には、1) 対象領域の化学組成・鉄物量比の決定、2) それを模擬するための地上での材料岩石・鉄物の選定、3) 対象領域における粒径分布の決定、4) それを再現するための材料物質の破碎・分級、5) 化学組成・鉄物量比を再現するための適切な配合、という手順が必要となる。材料物質の選定では、薄片を用いた観察を行い月面の岩石と同様の組織、含有鉄物を持つ岩石・鉄物を選定した。粒径分布はアポロ土壌試料のデータをコンパイルし決定した。不規則で角ばった粒子形状やざらざらとした粒子表面組織を再現するため、材料物質は衝撃破碎によって岩石を破碎し、分級して粒径分布を調整した。準備した材料岩石については、模擬する地域におけるレゴリスの化学組成に近くなるよう、最適化した割合で配合を行った。この際、Clementine 探査機の分光観測を基にした主要元素の定量データ[2]を使用してアポロ着陸地点でない場所を再現したシミュラントの作製を行った。再現対象とする月面表層上のレゴリスと作製した月シミュラントの主要元素の重量比の誤差は最大でも3%程度であった。今回の発表では、作製したシミュラントの性質について詳しく報告を行う。

■ 参考文献

[1] Mckay et al., *Engineering, construction, and operations in space IV* **2**, 857-866 (1994).

[2] Wöhler et al., *Planetary and Space Science* **59(1)**, 92-110 (2011).

月のクレータ斜面におけるボルダー生成と斜面崩壊過程

○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

月のクレータ周辺にはボルダーとよばれる 1–10 m サイズの岩塊が存在する。Kumar et al. (2016, 2019) ではボルダーが斜面を転がったボルダー崩れの成因についての研究を行い、月震による震動により生じた可能性を指摘している。ボルダーは、クレータ形成時に地下物質が破壊され表面に放出されたものと考えられており(例えば Watkins et al., 2019)、形成後数百万年程度で破壊され細粒化されると推定されている(Basilevsky et al., 2013)。しかし、シュレディンガー盆地など重爆撃期に形成された古い領域でもボルダーが盆地内部の斜面に存在している。このようなボルダーはクレータ形成時に生成されたものではないと考えられるが、その生成過程はよくわかっていない。そこで本研究では、古いクレータ内部に存在するボルダーの成因を検討した。

本研究ではシュレディンガー盆地(月裏側の南極付近)の南側リムの斜面で解析を行った。まず斜面に存在するボルダーと小クレータの分布を米国月探査機 Lunar Reconnaissance Orbiter 搭載の Narrow Angle Camera (NAC) の画像を用いて調べた。さらに、月周回衛星「かぐや」搭載のマルチバンド画像から新鮮度を表す OMAT (Lucy et al., 2000) の分布、地形カメラのステレオ画像から作成された数値地形モデルを用いて斜度の分布を算出し、これらの関係を比較した。

解析領域の周辺では比較的新しい大きなクレータがないことから、斜面で見られるボルダーは周辺のクレータ形成時に放出されたイジェクタではないと考えられる。ボルダーは斜面上方に密集して存在することがわかり、斜面下に一部が崩れている様子がみられた。また、小クレータは不均一に分布しており、ボルダーが密集している領域では少ないことがわかった。さらに高 OMAT 領域とボルダーが存在する領域がよく対応していることがわかった。これはボルダーが新鮮な物質であることを示している。斜度と小クレータの分布を比較すると、斜度が大きい領域では小クレータ密度が小さくなる傾向がわかった。これらの特徴から、以下のようなクレータ斜面におけるボルダーの生成過程を考えることができる。比較的斜度が大きくレゴリスが堆積しづらい斜面上方において、隕石が衝突すると地下物質を破壊しボルダーを生成する。一方斜面下方では斜度が小さいことからレゴリスが厚く隕石衝突時に小クレータが形成されるが、レゴリスより下の岩盤を破壊できないためボルダーを生成できない。ボルダーの消滅時間(数百万年程度)より古いクレータ内部では、斜面の上方のみでボルダーが生成され、それらが崩れることによって斜面に供給される。このような過程により、クレータ形成時以降においてもボルダーがクレータ斜面で継続的に生成されることが考えられる。今回の結果は、従来のクレータ緩和モデルで考えられていたクレータ周辺での隕石衝突時のイジェクタの放出と再堆積に加え、クレータ斜面における隕石衝突がボルダーを生成し、衝突時の振動が周辺の物質を斜面下に移動させていることを示唆している。今後同様の過程が他のクレータ斜面でも起こっているか調べる必要がある。

地下水輸送と透水率の鉛直変化を考慮した 陸惑星の大気・気候・水循環

○谷口 啓悟^{1,2}, 関根 康人¹, 小玉 貴則³, 野田 夏実^{1,4}, 玄田 英典¹, 阿部 彩子⁵

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, ⁴東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, ⁵東京大学大気海洋研究所

液体の水が存在可能な気候条件や水循環を明らかにすることは、ハビタブルな惑星の普遍的な理解に対して重要である。これまでの大気大循環モデルを用いた理論研究により、表層の水の総量の違いから、湿潤な気候の水惑星と乾燥した気候の陸惑星に気候状態が二分されると考えられてきた (Abe et al., 2011; Kodama et al., 2018)。また、陸惑星では水は極冠として極域に多く分布しているとされてきたが、氷床底面での底面融解や地下水循環によって液体の水が中低緯度に運ばれる可能性がある。タイタンや初期火星では、地下水による水輸送が気候に大きな影響を及ぼしていることが観測などから明らかになっているが (e. g., Faulk et al., 2020)、上記の陸惑星の気候に対する地下水輸送の役割を調べた例はない。

本研究では、陸惑星の気候状態における地下水循環の役割を数値的に検証した。数値シミュレーションでは、大気大循環モデル AGCM (agcm5.4g : Numaguchi, 1999) と、地下水循環モデル (GETFLOWS : Tosaka et al., 2000) の 2 つを用い、以下の 3 ステップにわけて計算を行った。ステップ 1 では、ある CO₂ 濃度における気候場や氷床の分布を計算した。ステップ 2 では氷床底面での底面融解と、地下の圧力勾配を駆動力とした地下水の輸送を、ステップ 1 の結果に基づき計算した。このとき地下の透水率をパラメーターとして与え、加えて簡単のために深さ分布をなくし一定として設定した場合と、べき乗則に従って透水率が深さ方向に減少する場合を設定した。その結果、表層や浅部地下が礫や砂で構成される場合に相当する、10⁵-10⁶ mDarcy 以上の高い透水率において、氷床底部の融解水が地下水として効果的に輸送され、地表面に液体の水が存在する領域が低緯度まで広がることがわかった。最後にステップ 3 では、地下水循環モデルで導かれた水分分布をもとに、大気循環や気候状態を AGCM により調べた。その結果、高い透水率下で水の分布する末端緯度がハドレーセル内に到達する場合、ハドレー循環により低緯度全体が湿潤となり、湿潤な水惑星的な気候状態が実現することが分かった。

これらの数値シミュレーションは、これまで考えられていなかった地下の地質状態によっても、惑星の気候は大きく影響を受けることを示している。本研究では、水分分布としては陸惑星の性質（高緯度に氷床が存在）を持ちつつ、気候状態としては水惑星の性質（低緯度が湿潤）を兼ね備えた気候状態の存在を示唆している。

火星大気ネオンの示唆する 揮発性元素に富んだマントルとその起源

○黒川宏之¹, 三浦弥生², 杉田精司³, 長勇一郎³,
Leblanc François⁴, 寺田直樹⁵, 中川広務⁵

¹東工大 ELSI, ²東大地震研, ³東大, ⁴LATMOS/IPSL, Sorbonne Univ., UVSQ, CNRS, ⁵東北大

火星大気中のネオン(Ne)は、Viking で検出され、火星隕石中にトラップされたガスからも発見されている。しかし、その存在度や同位体組成はよくわかっていない。MAVEN による最近の測定から推定される Ne の大気散逸のタイムスケールは 0.6-1 億年と短いため、火星大気中の Ne の存在量と同位体組成は主に火山の脱ガスによる最近の大気ガス供給を反映している(図 1)。従って、大気 Ne は火星内部の揮発性存在度とその起源の手がかりとなる。我々は、暫定的に得られている大気 Ne の存在度から、火星マントルが地球マントルよりも 5-80 倍以上 Ne に富んでいると見積もった。この豊富なマントル Ne は、原始惑星系円盤ガスの効率的な捕獲や太陽風が照射されたダストなどの Ne に富む物質の集積を示唆しており、いずれも火星内部の他の揮発性元素の存在度や火星形成史への重要な制約となる。将来的に、その場分析や大気サンプルリターンによって大気 Ne の同位体組成を決定することで、豊富な Ne の起源を解明することが期待される。

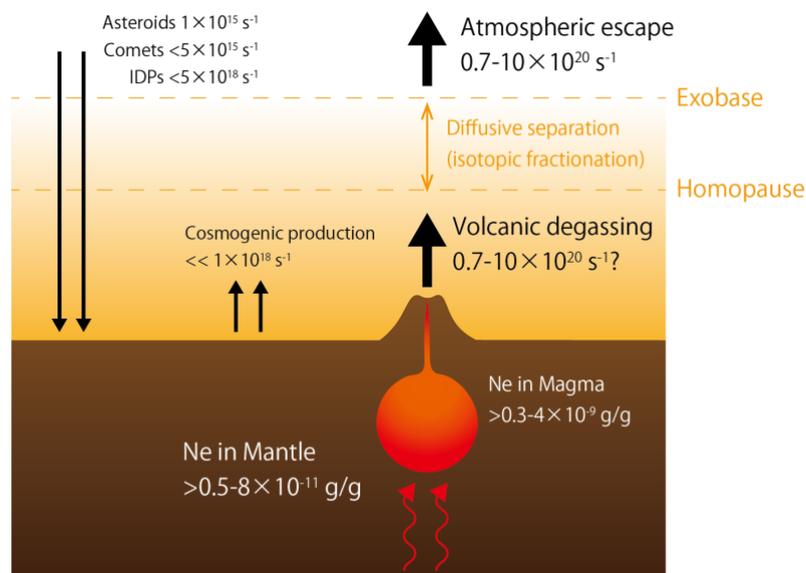


図 1. 火星大気ネオンの収支とマントル中の存在度 (Kurokawa et al. Icarus in press.)

全球非静力学火星大気大循環モデルの開発： 地形あり計算

○ 檜村 博基¹・八代 尚²・西澤 誠也³・富田 浩文³・小郷原 一智⁴
黒田 剛史⁵・中島 健介⁶・石渡 正樹⁷・高橋 芳幸¹・林 祥介¹

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

火星では、小規模なダストデビル (塵旋風) から、全球を覆うグローバルダストストームに至るまで、大小様々な規模の大気現象がダストによって可視化されているが、これらの相互の位置づけはよく理解されていない。また火星は大気が薄く海がないため、昼夜間の寒暖差が大きく、鉛直対流が卓越すると考えられるが、全球規模の大気大循環や大気へのダスト供給における鉛直対流の役割は解明されていない。

我々は、観測されている水平数 km 規模の鉛直対流を全球的に再現し、その気象・気候学的役割を調べるために、非静力学全球火星大気モデルを開発している。開発は、正 20 面体準一様格子上で 3 次元運動方程式を有限体積法で解く力学コア「SCALE-GM」に、既存の汎惑星大気大循環モデル「DCPAM」の火星大気物理モジュールを移植する形で進めてきた。これまでに火星大気放射や地表面、ダスト過程を導入し、全球で水平格子間隔 1.9 km の高解像度計算を実現した。一方、地表面の起伏は未導入であった。

本研究では、火星地形を導入した計算を試行した。火星 SCALE-GM に大規模地形を導入すると、容易に計算が不安定化することが分かった。その原因は、地球に比べて、標高差が大きく大気が薄いことで生じる強い斜面風によって、速度や温度の鉛直勾配が大きくなるためだと考えられた。そこで、水平風と温度に関して鉛直方向にも高階の数値粘性を導入したところ、計算不安定を抑制することに成功した (図 1)。発表ではこれまでの試行錯誤の結果を紹介し議論したい。

謝辞：本研究は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」及びポスト「京」萌芽的課題 3「太陽系外惑星 (第二の地球) の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明」の一環として実施しました。数値計算には、HPCI システム利用研究課題 (課題番号：hp200124、hp210164) のもと、理化学研究所のスーパーコンピュータ「富岳」を使用しました。

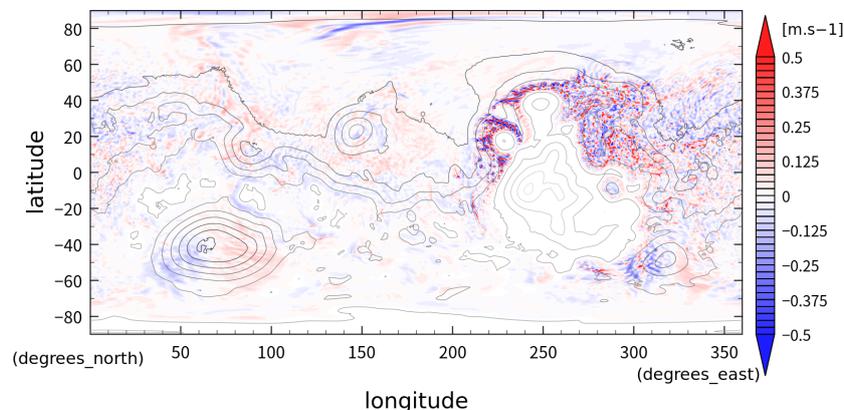


図 1: 地形あり計算の一例。北半球の春分から 30 日後の高度 2 km の鉛直流の瞬間場。水平解像度は glevel 8 ($\Delta x \sim 15$ km)、鉛直層間隔は約 250 m。等値線はモデル地形の等高線を表す。

火星サイズの原始惑星内部に分配される揮発性成分量

○齊藤 大晶, 倉本 圭

北大 理

火星隕石の分析によると、火星マントルには現在でも相当量の水 (7.2×10^{18} - 1.9×10^{20} kg, 水濃度 14-380 ppm) が存在しているらしい (e.g., McCubbin et al., 2012, 2016, Taylor et al., 2010, Gross et al., 2013, Taylor, 2013). 水の内部への分配機構の候補の 1 つとして、材料物質から脱ガスする揮発性成分の保温効果により形成するマグマオーシャンへの水の溶解がある。我々はこれまでに、火星隕石の年代学が示唆する原始惑星の急速な集積成長 (集積時間: 1.8 ± 1.0 Myr) (e.g., Dauphas & Pourmand, 2011) は、原始惑星が原始太陽系星雲ガス中で集積することを示唆する。これは、星雲ガスの寿命が 10 Myr 程度 (e.g., Kita et al. 2005) と、より長いと推定されているためである。この場合、原始惑星上には、大気上層に星雲ガス成分、下層に微惑星衝突由来の脱ガス成分が占める混成型原始大気が形成する可能性がある (Saito & Kuramoto, 2018). 微惑星集積による原始大気への脱ガス成分の供給と表層の熱収支を同時に解く数値シミュレーションを行った結果、原始惑星が火星質量まで成長すると、高温高压な原始大気とマグマオーシャンが形成する可能性があることがわかった。しかしながら、この先行研究では、水の惑星内部へ分配過程は数値モデルに組み込んでいなかった。

そこで本研究では、一次元放射対流平衡モデルを用いて、星雲ガス成分および脱ガス成分で構成される混成型原始大気の熱的構造を解析し、地表面温度進化を追うと同時に、大気からマグマオーシャンへの水の溶解を考慮した新たな数値シミュレーションを行った。地表面温度が 1500 K 以上に達すると、マグマオーシャンが形成する。このとき大気中の水蒸気はその分圧に応じて内部に溶解する。均質集積を仮定し、炭素質コンドライト様の H/C 比 (=5) を惑星材料物質に与え、衝突時の高温高压下における金属相と酸化鉄成分との化学平衡から決定される脱ガス大気成分の組成を $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2:\text{CH}_4:\text{CO} = 0.15:0.45:0.20:0.20$ と与えた。また、集積率には隕石年代学と矛盾のない $0.2 - 1$ 火星質量/Myr とし、揮発性成分濃度をパラメタとして与えた。

2 - 4 wt% 以上の揮発性成分濃度をもつ材料物質が集積率 $1/3$ 火星質量/Myr で集積する場合、原始惑星が 0.4 火星質量以上に成長するとマグマオーシャンが形成し始め、その後集積完了時まで、マグマオーシャンが持続する。最終的な大気圧は数 kbar に達する。集積完了直後の火星内部に分配される水量は、 $2.2 - 4.5$ 地球海洋質量 (1.4×10^{21} kg) に達した。これは、火星隕石の示唆する内部の含水量を十分に説明し得る。

太古火星におけるイオン散逸の固有磁場強度依存性
Dependence of ion escape from ancient Mars on the intrinsic
magnetic field strength

○坂田遼弥¹, 関華奈子¹, 堺正太郎², 寺田直樹², 品川裕之³, 田中高史^{3,4}

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

³国立研究開発法人情報通信研究機構, ⁴九州大学国際宇宙天気科学・教育センター

Atmospheric escape to space is one of the candidate processes responsible for a drastic climate change on ancient Mars. Escape of the ionized atmosphere, i.e., ion escape is thought to have played a significant role due to intense solar X-ray and EUV (XUV) radiation and strong solar wind from the young Sun. On the other hand, crustal magnetic fields remained on Martian surface imply that ancient Mars once had a global intrinsic magnetic field like the Earth. Existence of an intrinsic magnetic field affects the magnetic configuration and thus ion escape. Previous studies suggested both inducing and reducing effects of an intrinsic magnetic field on ion escape, but the detailed effect is still unknown. Sakata et al. (2020) studied the relationship between ion escape from Mars and the dipole field under the solar XUV and solar wind conditions at 4.5 Ga based on multispecies magnetohydrodynamics (MHD) simulations. They revealed that the effects of an intrinsic magnetic field depend on the pressure balance between the solar wind dynamic pressure and the magnetic pressure of the intrinsic magnetic field at the equatorial surface and that the effects are more pronounced on escape of molecular ions (O_2^+ and CO_2^+) originated in the ionosphere.

We investigated ion escape dependence on the dipole field strength under solar XUV and solar wind conditions during coronal mass ejection (CME)-like events at 3.5 Ga. As the young Sun experienced CMEs more frequently, enhanced ion escape during CMEs is expected to contribute to atmospheric loss. We conducted multiple simulation cases with different strength of the dipole field.

The effects of the dipole field on the flux distributions and the topology of the magnetic field lines are consistent with Sakata et al. (2020). The change of ion escape rates from those in the unmagnetized case (the case assuming no dipole field) has two different dependences on the pressure ratio of the dipolar magnetic pressure at the equatorial surface to the solar wind dynamic pressure. When the pressure ratio is below 0.1, the escape rates of molecular ions are increased by a factor of six, while the O^+ escape rate does not increase. When the pressure ratio is above 0.1, the escape rates of all three ions (O^+ , O_2^+ and CO_2^+) are decreased largely. The threshold ratio might be determined by the oblique incident angle of the solar wind flow against the ionosphere at high latitude. The results indicate that the contribution of ion escape to atmospheric loss can be affected by an order of magnitude due to existence of an intrinsic magnetic field.

References

Sakata, R., et al. (2020). Effects of an intrinsic magnetic field on ion loss from ancient Mars based on multispecies MHD simulations. *J. Geophys. Res.*, 125, e2019JA026945.
doi:10.1029/2019JA026945

原始地球における NH₃ の海洋への貯蔵と大気海洋系での熱的安定性

○有馬銀河, 倉本 圭

北海道大学

太古の地球における暗い太陽のパラドックスを解決する仮説の1つとして、極めて強力な温室効果ガスである NH₃ による温室効果が提唱されている (Sagan and Mullen, 1972). NH₃ は生命前駆体物質の生成に寄与した可能性があるととも考えられており (Bada and Miller, 1968), 地球上での生命誕生の観点からも注目される. NH₃ は太陽紫外線により N₂ に光分解され大気中から短時間で除去される傾向があるが (Kasting, 1982), Sagan and Chyba (1997) は CH₄ 由来のヘイズによる紫外線の遮蔽を考慮すると、十分な温室効果をもたらす大気 NH₃ (10⁻⁵ bar) の寿命は 5000 年程度にまで延びると推定した. また、もし現在の大気中の N₂ がすべて NH₃ として貯蔵され、大気に徐々に供給され続けていたと仮定すると、さらに長い期間大気中に十分な分圧の NH₃ が保持されることが推定される. しかし NH₃ の貯蔵の場所や機構については、これまでほとんど議論されてこなかった.

NH₃ は非常に高い水溶性を持つため、原始地球大気に NH₃ が含まれていた場合、海洋中には大量の NH₃ が溶解していたと考えられる. 他方、NH₃ の溶解度は温度に強く依存し、水温が高いほど溶解度は減少する. そのため、NH₃ の温室効果と海洋からの NH₃ 放出には正のフィードバックがかかる可能性がある. そこで本研究では、原始地球海洋が NH₃ の長期的貯蔵庫として機能し得たか明らかにすることを目的とし、有意な大気 NH₃ を含有する大気海洋系において安定な熱的平衡状態が達成されうるか、達成されるならそのときの温室効果の強さと、大気海洋間の NH₃ 分配を明らかにするために、大気海洋での放射対流溶解平衡計算を用いた理論的検討を行った.

まず、大気中の温室効果ガスとして NH₃ のみを考えると、大気中に NH₃ が 2.4 × 10⁻⁴ bar 以上存在するとき地表温度が 273 K を上回るような熱的安定解が得られた. 大気中に CH₄ と CO₂ を加えるとさらに高い地表温度安定解が得られた. また、総 NH₃ mol と N₂ 分圧を変えた場合にも熱的安定解が存在した. これらの結果は、太古の地球大気に NH₃ が存在し海洋との溶解平衡が成立していた場合、液体の水が存在できる地表温度範囲で熱的安定解が存在しうることを示す. また、現在の大気中の全 N 原子のうち半分 (N₂ 分圧換算で 0.4 bar 分) が太古の地球で NH₃ であったと仮定したときの地表温度の変遷について調べると、太古の地球において温暖な環境が持続的に実現可能であることが示唆された. さらに、海洋が大量の NH₃ を貯蔵可能なことから、光分解が NH₃ の主たる消費過程だと仮定したとき、大気 NH₃ が大気中に維持される期間を推定した. その結果、Sagan and Chyba (1997) での光分解率を用いると、NH₃ による十分な温室効果は約 350 万年間持続可能であったことが示唆された. しかし、この光分解率については再検討の余地があり、大気での光化学反応を改めて検討することで大気 NH₃ の寿命はこれよりも長くなる可能性がある.

初期地球大気における原始微生物生態系活動の 影響とメタン濃度増幅機構 ：系外地球類似惑星大気への示唆

○赤堀愛香¹, 渡辺泰士¹, 田近英一¹

¹東京大学大学院理学系研究科

初期地球は、太陽光度が現在と比べて低かったにも関わらず温暖な気候が実現されていたと考えられている。そのためには大気中に多量の温室効果ガスが必要であるが、その有力な候補として二酸化炭素および原始的代謝系を持つメタン生成古細菌が放出するメタンが提案されている。Ozaki et al. (2018)は水素または鉄を電子供与体として利用する複数の原始的生態系が共存する場合であれば、必要とされる高いメタン濃度（高いメタン生成フラックス）が実現可能であることを理論的に明らかにした。しかしながら、そのような生態系の変化に伴い大気光化学反応系がいかに応答しメタン濃度が非線形的に増幅されたのかについては十分に定量的に理解されていなかった。そこで本研究では、初期地球および様々な主星の周りのハビタブル惑星を想定した条件でメタン濃度の上昇過程における挙動を詳細に解析し、その非線形的な増幅メカニズムについての定量的な検討を行った。

海洋中で異なる電子供与体を用いる複数の原始的生態系が共存することは大気へのメタン供給率の増大を引き起こすため、大気海洋系に供給される正味の還元力の供給が増加することに相当する。大気へと供給されたメタンは大気光化学反応を介して、電子供与体として生物が用いることができる水素と一酸化炭素へと変化し海洋微生物生態系によって再利用されることから、正味の還元力の供給に対するメタンフラックスを増幅する。そこで、本研究では広い範囲のメタンフラックスにおける大気メタン濃度の挙動および大気光化学的な収支を調べた。その結果、初期地球においてメタン濃度の非線形増幅が引き起こされる条件は、メタンの主要な消費プロセスがOHラジカル反応から光解離反応へと遷移する条件に対応していることが明らかになった。一方、生命誕生以前の無生物条件に相当する低いメタンフラックス条件では、メタンの主要な消費プロセスはOHラジカルとの反応が大部分を占めるため、メタンフラックスの増大に対するメタン濃度の上昇は線形的であることが明らかになった。この結果は、初期地球における生命誕生以前にはメタン濃度は低く保たれるが、光合成細菌の進化に伴いメタン濃度の非線形的上昇が引き起こされ、二酸化炭素が温室効果を担う大気組成から二酸化炭素・メタンの双方が温室効果を担う大気組成へと進化したことを示唆する。この結果は、ハビタブルゾーンに軌道を持つ地球類似惑星大気の将来観測に示唆を与えるものである。

高 UV 環境下における地球型 N_2-O_2 大気の保持： 原子電子遷移に伴う効率的な放射冷却による大気散逸の抑制

○中山陽史¹、生駒大洋²、寺田直樹³

¹東京大学、²国立天文台、³東北大学

惑星大気の保持は地球型惑星のハビタビリティを議論する上で重要である。また、組成だけでなくその大気の量によっても惑星の気候状態は大きく左右される。しかしながら、ハビタブルゾーンに存在する地球型惑星は主星からの強い X 線と UV (XUV) 放射にさらされる。強度や期間は恒星のスペクトルタイプや恒星自身の進化によって決まるが、一般的に現在地球が受け取る強度の 100 倍以上の XUV 放射を受け取り、大気散逸が駆動される環境が実現される。過去の理論的検討から、そのような強い XUV 放射を受け取った場合、惑星大気は簡単に剥ぎ取られ、現在地球のような N_2-O_2 大気は 0.1Myr 以内に完全に損失すると推定されている。そのため、地球のような環境の保持は困難であると考えられる。しかしながら、先行研究では分子の振動-回転遷移に伴う放射冷却について着目しており、大気散逸が駆動されるほどの高温で生じると予想される原子の電子遷移に伴う放射冷却について検討されていない。本研究では、先行研究で考慮されていない原子の放射冷却に着目し、高 XUV 環境における高層大気の構造、そして散逸率への影響について検討を行う。

原子の放射冷却に加えて、先行研究と同様に光化学、熱化学、拡散、熱伝導、移流、近赤外吸収、分子の放射冷却を考慮した高層大気モデルを構築した。先行研究と同様に現在地球条件である N_2-O_2 大気を持つ地球質量の惑星に対して、XUV 強度を変え、大気の応答を検討する。結果として、原子の放射冷却は 3000K 以上の高温環境では優位に働き、高 XUV 環境では主要な冷却過程になりうるということがわかった。その結果、高層大気は静水圧構造を保ち続け、大気散逸が大きく抑制されることがわかった。先行研究で大規模な散逸が生じると見積もられていた現在地球の 100 倍 XUV 環境においても、1bar 大気の散逸タイムスケールが数 100Myr となることがわかった。本研究で明らかになった大気散逸のタイムスケールが 1000 倍以上伸びうるという結果は惑星のハビタビリティを含む大気の進化を議論する上で重要な結果となる。特に、XUV 強度の進化の早い太陽型星などでは、散逸タイムスケールが XUV 強度の進化に比べて長く、大気保持は容易となる。一方で、進化の遅い M 型星周りの惑星に関しては、脱ガスなどの大気を形成する過程と散逸に伴う大気の損失が共存するような形で大気の長期的な進化が決定されると予測される。

暴走温室限界の自転軸傾斜、軌道離心率、自転角速度依存性

○小玉貴則¹、門屋辰太郎²、玄田英典³

¹ 東京大学総合文化研究科先進科学研究機構、²JAMSTEC、東京工業大学 ELSI

近年、観測技術の向上により、地球型惑星を含む、多くの系外惑星が検出されている。惑星表面に海洋を保持する可能性のある地球型惑星はハビタブル惑星と呼ばれ、ハビタブルゾーン の概念を用いて、議論されている。ハビタブルゾーンとは、液体の水が惑星表面に安定に維持できる恒星からの軌道範囲である。ハビタブルゾーンの内側境界は、惑星大気が暴走温室状態に突入する中心星放射で(暴走温室限界)で定義されている。

Kodama et al. (2018, 2019)にて、水量の少なく水が局在化している陸惑星の暴走温室限界は、惑星表面の水分布により、大きく変化することがわかっている。先行研究では、簡単のため、円軌道で自転軸傾斜がなく、季節変化のない惑星が仮定されていた。しかしながら、系外惑星の中には様々な自転軸傾斜角や軌道離心率を持つ惑星が考えられ、こうした軌道要素の違いで生じる日射量の季節変化がハビタブルゾーンの内側境界にも影響を与える可能性が考えられる。

我々は3次元大気大循環モデルを用いて、表面水分布と暴走温室限界の関係を、自転軸傾斜角、軌道離心率、自転角速度をパラメタにとり、系統的に調べた。表面での水分布は、Kodama et al. (2018)の水分布を用いた。現在の地球と同じ大気組成からなる1barの大気を考慮した。自転軸傾斜角について、0°、15°、30°、45°、60°を考慮、軌道離心率は0から0.4まで、自転角速度は現在の地球の値の0.1-2倍の範囲を考慮した。結果として、日射分布の季節変動による雲・氷床・水蒸気の分布の変化により、暴走温室限界が大きく影響を受けることがわかった。我々の結果は、ハビタブルゾーンの内側境界は中心星の放射で一意に決まるものではなく、惑星自身のパラメタにより変化する、より幅を持った境界であることを意味している。

本講演では、暴走温室限界の自転軸傾斜角依存性に焦点を当て、発表する予定である。

D型小惑星の分光学的分類手法に対する月のハイパースペクトルデータによる検証

Validation of spectroscopic classification methods for D-type asteroids using lunar hyperspectral data

○山本聡¹, 渡邊誠一郎²

1) 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 2) 名古屋大学大学院 環境学研究科 地球環境科学専攻

D型小惑星は、低いアルベドを示し、可視・近赤外スペクトルが赤く、特徴的な鉱物吸収を持たないスペクトル(D型スペクトル)を示す小惑星と定義されている。そのスペクトルの特徴から、一般に有機物を含む岩石が表層に支配的に存在し、炭素質隕石の母天体の一つとして考えられてきた。また、火星の衛星であるフォボスとデイモスはD型スペクトルを示すことから、もともと火星以遠で形成されたD型小惑星が捕獲され、その後衛星として火星を周回していると考えられてきた。一方、月の高地領域の中で宇宙風化を受けたと考えられる斜長岩の露頭の示すスペクトルの中に、D型スペクトルと非常に似たものが存在する事が報告されている[1]。また火星衛星の成因として、火星への巨大衝突で生じた周火星円盤中で集積して形成したモデル(巨大衝突説)が提唱されており、巨大衝突説においてD型スペクトルを持つ衛星表面がどのように形成されるのかについての議論が行われている。このような観点からも、そもそもD型スペクトルとは何かについて、改めて考え直す必要性が指摘されている。

そこで我々は豊富なスペクトルデータが蓄積されている地球の月に着目し、月面上のD型類似スペクトルが、どのような鉱物・岩石からなり、どのような地質的特徴を示すのかについて調査を行った[2]。「かぐや」搭載の連続波長分光計(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、(1)月面上で最もアルベドが低くかつ赤いスペクトルとして知られているDark Mantle Deposits (DMDs)、(2)酸化チタンを多く含むアルベドが4%以下の暗い玄武岩海領域、(3)酸化チタンに相対的に乏しいスペクトル的に赤い玄武岩海領域、(4)月の高地に広く分布する特徴的な吸収を示さない露頭(宇宙風化を受けた斜長岩と解釈されている)の4種類の検証分光データに対して、DeMeo判別式[3]として知られる小惑星スペクトル分類法を適用し、どの小惑星スペクトルタイプに分類されるかについて検証を行った。その結果、(1)-(4)のほとんどがD型に分類されることがわかった。このことは、D型と判別されている小惑星であっても、その表層に有機物が存在するとは限らず、火成岩由来の表層を持つ小惑星が混在していても、分光学的には区別が出来ないことを意味する。

本発表では、上記の結果の紹介と、その結果に基づき、トロヤ群、内惑星に分布するD型天体、火星衛星に対する議論を行う。

[1] Yamamoto et al. (2018) *Geophysical Research Letters*, 45, doi:10.1002/2017GL076612.

[2] Yamamoto and Watanabe (2021) *Journal of Geophysical Research*, 126, e2020JE006669, doi:10.1029/2020JE006669.

[3] DeMeo, F. E., & Carry, B. (2013) *Icarus*, 226, 723–741.

月南極域における地質解析

○佐藤広幸¹、大竹真紀子²

¹JAXA 宇宙科学研究所、²会津大学

近年月極域において、永久影内に存在が期待されている水氷などを始めとする、資源探査計画が国際的な枠組みで進みつつある。地形的な起伏に富み、永久影領域の多い月南極域では、既存のリモートセンシングデータを駆使した解析が進んでいる。例えば Lunar

Reconnaissance Orbiter (LRO) 搭載の Narrow Angle Camera (NAC) やレーザー高度計 (LOLA) による高解像度 (~2 m/pixel) の地形データを使った日照・通信・傾斜のシミュレーションにより、着陸地点検討やローバの走行経路検討が行われている[1]。

一方、反射スペクトルを用いた鉱物組成分布など表層物質を対象とした地質解析は、極域においてはあまり進んでいない。太陽光の反射を利用したパッシブな観測装置は、太陽光入射角が常に大きい月極域では補正が難しく、精度の高いスペクトルを得難いのがその一因である。

本研究では、JAXA の月周回衛星 SELENE (かぐや) に搭載されたマルチバンドイメージャ (MI) データを使った月南極域 (緯度 60° 以南) の 9 バンド反射スペクトルマップを作成し、それを用いて同地域の地質解析を行った。かぐやの軌道精度に起因する画像同士のずれは、LOLA 地形モデルと MI 地形モデル同士のマッチングにより補正済みであり[2]、高解像度地形モデルを使った測光補正により、精度の高い反射率マップの作成を可能にしている。まずエジェクタの分布については、従来の地形起伏を基にした地質図[3]には記載のない、比較的若いクレータ周辺に広がる反射率の高いエジェクタ堆積物が多数見つかった。従来の地質図に記載のあるクレータについても、新しい反射率マップではより広範囲 (約 2~5 倍) に及ぶものがあつた (例えば Schomberger A、Shackleton、Grotrian など)。南極点周辺は 5000km 以上に及ぶ Tycho クレータの光条が縦断し、Shackleton クレータのエジェクタと交差している。これらの詳細な堆積構造解析は、今後の着陸探査によって得られるサンプルの起源を知る上で重要な制約情報となるだろう。

【参考文献】

[1] 井上博夏ほか (2018) 月極域探査ミッション検討状況 (着陸地点), 日本航空宇宙学会宇宙科学技術連合講演論文, 2B08. [2] 佐藤広幸ほか (2020) 月南極域カラーモザイクの作成, 日本惑星科学会秋季講演会要旨, O-D1-B16. [3] Fortezzo, C. M., et al. (2020) Release of the Digital Unified Global Geologic Map of the Moon At 1:5,000,000- Scale. 51st LPSC, abstract #2760.

海洋底と Plate Tectonics の起源の謎が、

何故月の起源と一緒に述べられるのか？

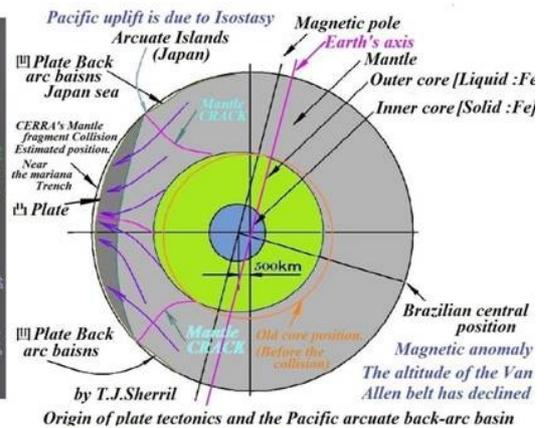
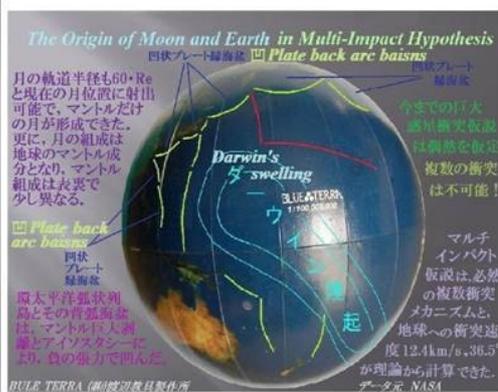
太陽系としての進化をアブダクションで語ろう。

Mystery of Ocean Floor and Origin of Plate Tectonics, Why is it spoken with together Origin of Moon? Let's talk about Evolution of Solar system Abduction.

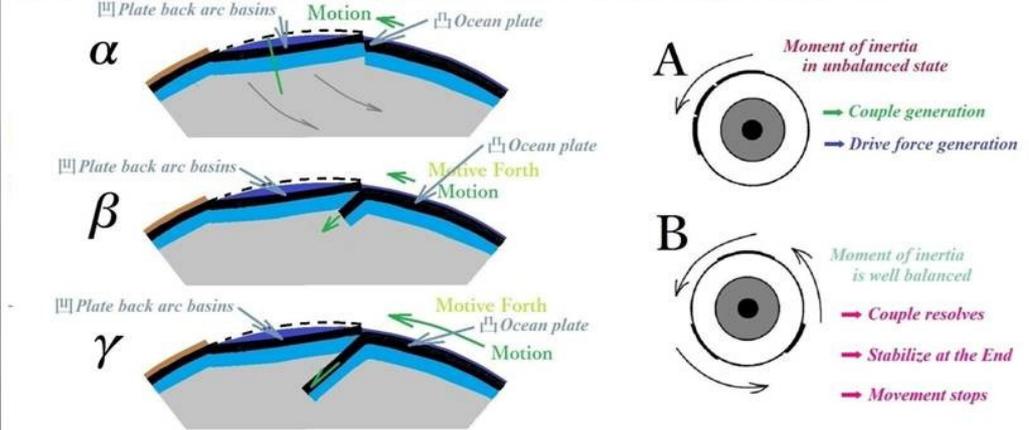
○種子 彰 Taneko Akira¹, ¹SEED SCIENCE Labo.

太陽系の中の地球, 何故生命の碧い星と呼ばれた地球にだけ生命と海と穏やかな環境が創られたのか? その謎の解明には, 月と地球海洋底の共通起源メカニズムが必要であり, 「マルチインパクト仮説」だけが, 生命の起源からプレートテクトクスの起源まで, 進化の結果を用いた Abduction で全て統一的に検証できた。

- ### 6. 地球 Abduction
- ① 環太平洋弧状列島の起源,
 - ② 深海洋底の起源とアイソスタシーによる凹プレートの形成メカニズム
 - ③ プレート相互の重なり始めのメカニズム
 - ④ 駆動力 (偏芯慣性モーメント)



Abduction to verify The Origin of the Asteroid belt in Multi-Impact Hypothesis.



そして太陽系全ての起源(水星のコアリッチ, 木星の大赤斑, 月, 七つの浅い海[1%の剥離, 70%表面積], 生命誕生, 高緯度衝突=偶力地軸傾斜, ⇒地軸傾斜=生息域拡大, 小惑星帯, 太平洋プレート移動方向急変, ダイヤモンド鉱山=小惑星対極衝突, ティチス海)が説明可能である。月の起源仮説は, 進化の結果を利用したアブダクションだけが太陽系の謎を統一的に検証できた。α, β, γは衝突欠損の周囲プレート陥没凹プレートの下に潜り込む, 太平洋凸プレートの説明。此处に, 太陽系の起源を統一的に説明するメカニズム(ストーリー)を, 人類は初めて獲得した。

シミュレーションによる、微惑星衝突によって形成される コンドリュール生成量および付着量の解明

○小田中 佑樹¹, 城野 信一¹

¹名古屋大学大学院 環境学研究科

地球で回収できる隕石である普通コンドライト隕石中にはコンドリュールと呼ばれる mm サイズの球状物質が体積のほとんどを占めている。コンドリュールは固体が初期の原始太陽系円盤の中で加熱されて溶融したケイ酸塩が速やかに冷却されて形成されたと考えられている。隕石の年代測定から太陽系の形成とほぼ同時期に形成されたことがわかっている。つまり、太陽系が形成される過程で固体が溶融するような加熱イベントが多数発生していたと考えられる。

Nagasawa et al. (2019) では木星形成後、軌道共鳴などで周囲の微惑星の軌道を大きく乱し、原始惑星系円盤に対して大きな相対速度を持つことが示された。また、大きな相対速度によって微惑星が衝撃波を形成し、それがコンドリュールを形成するのではないかと示唆された。Nagasawa et al. (2019) ではコンドリュールが形成される期間が数百万年であることが示されたが、生成量については議論されていない。また、コンドリュール形成後、微惑星に降り積もると考えられているが、微惑星にどの程度コンドリュールが降り積もるかも明らかになっていない。

そこで私は、太陽、木星、微惑星 100 天体を 2~5au に均等に配置し、1000 万年間微惑星の軌道計算を行い、コンドリュール回収量を求めた。原始惑星系円盤に放出した正味のコンドリュール量は 0.6 地球質量とし、これを 300 万年の間で 4~5au に放出するとした。また、微惑星半径を 1km、10km、100km、原始惑星系円盤のガス散逸時間を 10 万年、100 万年、1000 万年パラメータを変え、複数回シミュレーションした。

その結果、コンドリュール全放出質量に対してのコンドリュール総回収量の割合が極端に多い場合と少ない場合に分かれた。さらに、1つの計算の中でもよくコンドリュールを回収する天体が 100 天体中数天体、全く回収しない天体が多くを占めるという結果になった。

これらのことより、コンドリュールをたくさん回収する天体が存在するのはごく稀であることがわかった。

あかつき観測から得られる水平風速を用いた 金星客観解析データ作成の試み

○藤澤 由貴子¹、村上 真也²、杉本 憲彦¹、高木 征弘³、今村 剛⁴、堀之内 武⁵、
はしもと じょーじ⁶、石渡 正樹⁵、榎本 剛⁷、三好 建正⁸、林 祥介⁹

¹慶應義塾大学、²JAXA、³京都産業大学、⁴東京大学、⁵北海道大学、⁶岡山大学、
⁷京都大学、⁸理化学研究所、⁹神戸大学

金星探査機「あかつき」の観測により、紫外カメラの雲追跡による水平風速、中間赤外カメラによる温度の水平分布のデータ等が蓄積されつつある。しかし、あかつきから得られる観測の多くは、観測高度、観測面（昼側あるいは夜側に偏る）、観測頻度に制約があり、観測データのみから時間・空間的に様々なスケールの全球的な循環場を知ることは難しい。本研究の目的は、我々がこれまでに開発してきた、金星大気大循環モデル「AFES-Venus」

（Sugimoto et al. 2014a）を基にした金星大気データ同化システム「ALEDAS-V」（Sugimoto et al. 2017）を用いて、あかつき観測をデータ同化の手法によってモデルに取り込むことで、高時間・空間分解能の金星の客観解析データを作成することである。本発表では、金星の雲層上部における太陽加熱で励起され、太陽とともに移動する惑星規模の大気波動である熱潮汐波に着目して、作成した解析データの検証を行った。

図1は、あかつき紫外カメラ(365nm)の雲追跡（Ikegawa and Horinouchi, 2016）により得られる水平風速を2018年9月から12月の期間について雲層上部である高度70kmに同化した結果である。東西風の同化の結果（図1c）は、同化なし結果（図1b）に比べて赤道付近の東西波数2の構造が午前側に2時間ほどシフトしている。この構造は観測結果と近く、AFES-Venusが持っている熱潮汐波の位相のずれの全球的な改善に成功した。また先行研究（Sugimoto et al. 2019）とも整合的である。今後は、得られた同化結果を世界で初めての金星の客観解析データとして、公開していく予定である。

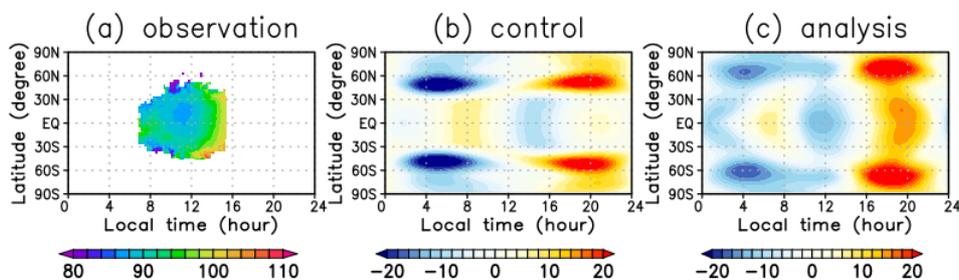


図1 2018年10-11月平均の高度70kmにおける東西風の緯度ローカルタイム図。(a) 観測、(b) 同化なし結果、(c) 同化した結果。(b, c) は帯状平均からの偏差である。

惑星着陸機搭載地中レーダ・表層誘電率計の検討

A study of the ground penetrating radar and permittivity meter for planetary lander

○熊本篤志¹, 宮本英昭², 西堀俊幸³, 土屋史紀¹, 石山謙⁴

¹ 東北大, ² 東大, ³ JAXA, ⁴ 鶴岡高専

惑星着陸機に搭載して、着陸機近傍表層の地下構造・誘電率を計測するための観測装置の検討を行った。地中レーダ（GPR）は位置を変えながら計測することでエコーの到来方向の識別、水平方向の構造の推定が可能となる。ローバ搭載の場合は、ローバが移動を担うので、こうした観測も十分可能となるが、地表に固定された着陸機に搭載し、かつ水平構造を明らかにしようとする場合には、以下のような対応策を講じる必要がある：(1) 着陸機に可動機構を設けて GPR アンテナの局所的移動を可能とする。数波長（数 10cm）移動することで、相関のある地下エコー・相関のないクラッタの識別が容易となり、さらに混在する地下エコーの直下・非直下成分の識別も可能となって、地下誘電率の水平分布導出に有利となる。但し、可動部があるために、季節をまたぐような長期運用を想定すると、電力収支・耐久性の面で制約が出てくる可能性がある。(2) 送受信アンテナをアレイ状に配置して、振幅・位相制御によってビーム方向を絞った合成アンテナで送受信を行う。送受信アンテナの組み合わせを変えて送受信を行ってにおいて、データ処理でビームを走査して送受信したのと等価な観測結果を得ることができる（MIMO-radar）。可動部がないため、長期運用の面では有利だが、アンテナの基数を増やすと、配線・フロントエンドも増やす必要が出てくるので、求める水平構造の分解能と最小限必要な送受信アンテナ基数については、検討を要する。

GPR が直接計測するエコーの遅れ時間から、反射面となっている誘電率コントラストの深さを求めるためには、地下の物質の誘電率の絶対値が必要となる。誘電率の絶対値を求めることができれば、空隙率、水氷の含有率等の地下の物質の組成の議論が可能になるとともに、MIM (Mars Ice Mapper) で検討されているような合成開口レーダの較正においても、誘電率絶対値の Ground truth として貢献できる。地表に固定した着陸機で地下の誘電率の絶対値を推定しようとする場合にも、以下のような対応策を講じる必要がある：(1) 地中の石片は point reflector と見なせる。可動機構の可動範囲内もしくはアレイアンテナの範囲内の地下にこうした石片があれば、直下・非直下エコーの遅延時間差を用いて、誘電率絶対値の推定が可能となる（Chang' E-3, 4 ローバ搭載 GPR で適用例）。(2) 可動機構と本体にそれぞれアンテナ設置、もしくはアレイアンテナ使用の場合、地震計アレイによる地震波速度分布推定でも用いられるような CMP (Common Mid-Point) 法を適用して、誘電率絶対値の鉛直分布を推定することができる。(3) 地中にプローブを差し込んで、電磁パルスではなく、連続的な交流電圧を印可することによって、表層物質・プローブ含めた静電容量を計測して表層の誘電率を計測する。プローブ・GND 間に電気力線が分布する範囲内の誘電率に感度をもつ計測となるため、地中のなるべく広範囲に電気力線が分布するようなプローブ・GND 形状、プローブを地中に差し込む機構、等の検討を要する。

双子コンクリーション形成の 数値シミュレーション

○城野信一¹, 梶浦鉄平¹, 勝田長貴², 吉田英一³, Marjorie A. Chan⁴

¹名古屋大学大学院環境学研究科 ²岐阜大学教育学部 ³名古屋大学博物館

⁴ Department of Geology and Geophysics, University of Utah

アメリカユタ州やモンゴルゴビ砂漠において、球状鉄コンクリーションが産出されている。似通ったものが火星においても発見されており、その成因に注目が集まっている。Yoshida et al. (2018: Sci. Adv., 4, eaau0872)によれば、炭酸塩のコンクリーションがまず形成され、その周囲に鉄が沈殿することにより球状鉄コンクリーションが形成される。球状鉄コンクリーションの形状は通常単一の球であるが、二つの球がつながったものも発見される（図1）。これは、第一段階において形成された炭酸塩コンクリーションの形状を反映していると考えられる。その複雑な形状を生かして、地下水におけるカルシウムイオンの量と拡散係数の制約を数値シミュレーションにより試みた。112個の天然サンプルの画像を解析し、コンクリーション本体の半径と結合部の半径を計測した。数値シミュレーションにはフェイズフィールド法を用いた。シミュレーション結果（図2）と、天然サンプルの形状を比較することにより、カルシウムイオン濃度は5 mmol/L以上、拡散係数は純水中の0.1倍以上であることが必要であることがわかった。また、これらの条件を満たしている場合、拡散のタイムスケールは沈殿タイムスケールよりも早くなり、濃度場はほぼ一様とみなせることもわかった。



図1：双子コンクリーションの例。

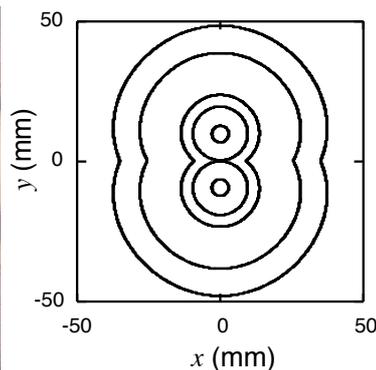


図2：シミュレーションの一例。いくつかの時刻における形状を示す。

数値計算による炭酸塩コンクリーションの

自己組織的な空間分布の解明

○田村 美紗樹¹, 城野 信一¹¹名古屋大学大学院環境学研究科

ユタ州のスペンサーフラット平原やゴビ砂漠では、砂の隙間が鉱物で埋め尽くされたコンクリーションが存在する。火星でもコンクリーションが発見されており、これらの形成過程を解明することで周辺の古環境について推定することができる。

これらのコンクリーションは生物由来ではなく、初期段階で炭酸カルシウムが主成分のコンクリーションができ、そこに鉄イオンを含む地下水が流れ込むことで鉄コンクリーションが生成した。(Yoshida et al.(2018)) この形成モデルにより、炭酸塩コンクリーションの配置によって現在の鉄コンクリーションの配置が決まる。本研究では、炭酸塩コンクリーションの形成条件を明らかにするために鉄コンクリーションの空間分布に注目した。

ユタ州スペンサーフラット平原でコンクリーションの最近隣距離を測定したところ、ランダムな分布ではなく自己組織的な分布であった。(Potter and Chan (2011)) さらに詳しく解析するため、空間分布がランダムな分布より疎であるか密であるか分布の特徴を調べたところ、測定した面積との相関関係があることがわかった。

本研究では炭酸塩コンクリーションは、地下水中で炭酸カルシウムが核形成した後、その核が成長し他の核同士と合体する。その後、地下水の濃度変化によって沈殿物が溶解すると考えた。このシナリオに従って濃度変化に関するパラメータを変えて数値計算を行い、最近隣距離を算出した。沈殿物が成長し、溶解し始める時は疎な分布であったが、ある程度溶解すると密な分布になった。また、数値計算での面積と分布の特徴が観測した場合の傾向と類似していた。このように、実際のコンクリーションの空間分布と数値計算による空間分布を比較することによって炭酸塩コンクリーションの地下水の濃度変化を推定する。



図 1: ユタ州スペンサーフラット平原のコンクリーション(S. L. Potter and M. A. Chan)

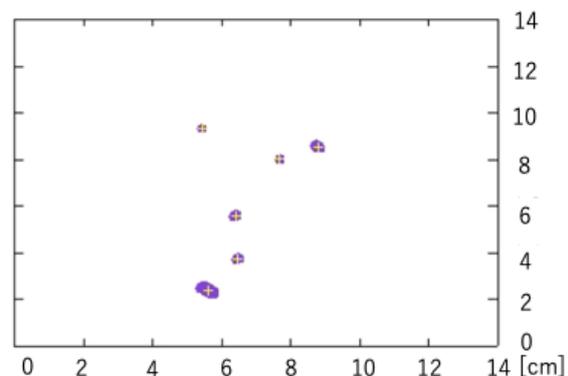


図 2: 数値計算によるコンクリーションの配置 (+は沈殿物の質量重心)

制限三体問題を用いたケンタウルスの軌道安定性の評価

○樋口有理可

産業医科大学

木星と海王星の間に軌道を持ち、惑星と 1:1 共鳴に入っていない天体をケンタウルスと呼ぶ。ケンタウルスは 4 個の巨大惑星からの摂動を受けるため軌道が不安定で、力学的寿命は数百万年から数千万年と短い。そのため、ケンタウルスの起源は海王星以遠にある天体(海王星以遠天体)で、それらがケンタウルス領域に定常的に供給されているのだと考えられている。すなわち、現在も太陽系内では物質が移動している。この移動に重要な役割を果たすのが、海王星をはじめとする惑星との重力相互作用である。最初は海王星とのみ相互作用を持つ軌道にあった天体が、天王星、土星とより内側の惑星と軌道交差するように進化する。ついに木星にまで到達したケンタウルスの多くは木星との重力相互作用により太陽系外に放出されるか、逆により内側の軌道に進化し木星族彗星と呼ばれるようになる。以上の進化では、惑星重力の影響は近接遭遇による散乱という形で記述できる。よって、ケンタウルス領域には惑星が 4 個あるが軌道進化の素過程は制限三体問題で記述できる。

本発表ではケンタウルスの軌道進化を円制限三体問題の重ね合わせで記述し、天体の動径方向移動の傾向を解析的に表す。特に、外側の惑星(海王星とする)の支配にあった天体が内側のある惑星(例えば天王星)の重力散乱を経て、外側惑星の支配から逃れる過程に着目する。よく知られた円制限三体問題の保存量であるティスランパラメタ(ヤコビエネルギーを近似し軌道要素で表したものを)をこの 2 惑星について表し、それを用いて注目する天体の軌道を表す。そして外側惑星についてのティスランパラメタが内側惑星による散乱で変化する範囲や確率を、天体の軌道、2 惑星のパラメタ(質量、軌道)、遭遇のインパクトパラメタの関数として表す。本研究では、内側惑星の散乱により外側惑星についてのティスランパラメタが 3 を超えると、「天体は内側に進化した」と見なす。この過程の時間非対称性を利用し、天体の内側・外側への進化のしやすさの違いを議論する。

火星衛星探査計画（MMX）における回収試料の 分析プロトコル

○藤谷 渉¹、古川 善博²、菅原 春菜³、小池 みずほ⁴、馬上 謙一⁵、Nancy. L. Chabot⁶、
三浦 弥生⁷、Frederic Moynier⁸、Sara S. Russell⁹、
橘 省吾⁷、高野 淑識¹⁰、臼井 寛裕³、Michael E. Zolensky¹¹
¹茨城大学、²東北大学、³ISAS JAXA、⁴広島大学、
⁵北海道大学、⁶Johns Hopkins University、⁷東京大学、⁸IPGP Paris、
⁹NHM London、¹⁰海洋研究開発機構、¹¹NASA JSC

火星衛星探査計画（MMX）は火星衛星フォボスからのサンプルリターン計画であり、2024年に探査機打上げを予定している。本計画では、フォボス表面へのタッチダウンを2回行い、コアリングおよび空気圧サンプリング機構により表層レゴリス試料を10 g以上回収することを目標としている（Usui et al., 2020）。フォボスの起源および火星-衛星系進化を回収試料から解明するため、試料分析ワーキングチーム（SAWT）で試料の分析プロトコルを議論している。その初期成果は論文として最近出版された（Fujiya et al., 2021）。

火星衛星の形成過程にはその場形成（巨大衝突）説および小惑星捕獲説がある。予想される試料の性質は二つの説で全く異なる。岩石学的観察・全岩化学組成分析・全岩同位体分析（酸素・クロム・チタンなど）から回収試料の基本的な特徴を記載し、二つの形成過程を区別することができる。

巨大衝突説の場合、上で述べた同位体組成から、インパクトがどのような隕石に類似した天体か推測できる。天体衝突にともなう中程度揮発性元素（亜鉛など）の同位体分別から衝突の規模を推定でき、Rb-Sr 壊変系やU-Pb 壊変系を利用した放射年代測定から衝突の年代が明らかになる。小惑星捕獲説の場合、より詳細な試料の記載：軽元素（水素・炭素・窒素）同位体組成・有機物組成・プレソーラー粒子存在度・（主に短寿命放射性核種による）鉱物の形成年代などから既知の隕石グループと捕獲天体を比較する。K-Ar 年代とサンプリングサイトのクレーター密度から、小惑星がメインベルトを離れて火星重力に捕獲された年代を推定できる可能性もある。どちらの説の場合でも、これらの分析結果を総合して、小天体が地球型惑星領域へ輸送されるプロセスや、それが火星圏へおよぼす影響を解明する。

また、試料の表面組織の観察や、希ガス分析による宇宙線生成核種や太陽風の検出により、宇宙風化やガーデニングなど天体表面プロセスに関する情報が得られる。異なるサンプリングサイトおよび異なるサンプリング機構による試料の比較が鍵となり、フォボスの表面スペクトルの不均質性（bluer unit と redder unit）が生じた原因が天体表面プロセスかどうか、試料の分析から解明できるかもしれない。

オールト雲起源新彗星の力学進化 10. 他の小天体群への遷移

Transition of the Oort Cloud new comets into other SSSB populations

○伊藤孝士¹, 樋口有理可²

¹ 国立天文台天文シミュレーションプロジェクト, ² 産業医科大学医学部

本研究ではこれまで、オールト雲の成長と同時進行で惑星領域に落ちて来る新彗星の軌道進化を数値実験により追いつけて来た ([日本地球惑星科学連合 2019 大会](#), [日本惑星科学会 2020 秋季講演会](#), など)。現時点までに以下の事柄が分かりつつある。(1) 惑星領域へ突入後の新彗星の力学的寿命は 10^7 年の程度に留まる。(2) 新彗星が平面的に飛来する場合にはいわゆる惑星バリアが有効に働く。今回は上記の副産物的な結果として、オールト雲からやって来る天体が TNO やケンタウルスなど他の小天体群へ一時的にでも遷移する実態を例示する。オールト雲からやって来る天体は離心率・軌道傾斜角とも大きいため、遷移できる小天体群は限られる。けれども detached TNOs への遷移確率は有意であることが分かった (数%)。また既に三次元化しているであろう現代の外部オールト雲からはほぼ等方的に彗星が落下するので、いわゆる極域回廊 (polar corridor, 軌道半長径 a が $30 < a < 1000$ au, かつ軌道傾斜角 I が $60^\circ < I < 120^\circ$) を通過する天体も有意に多い可能性が判明した。

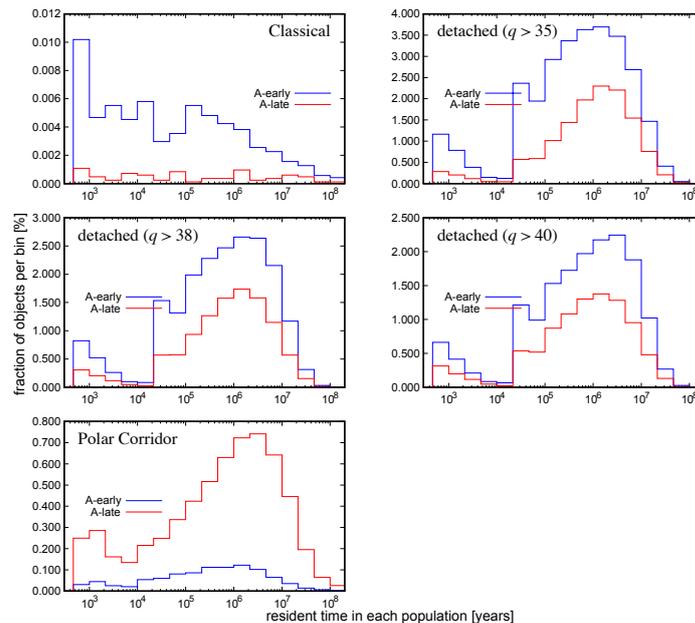


図 1: オールト雲から落下する天体が他の他の小天体群 (ここではいずれも TNOs) の軌道要素空間に一時的に滞在する時間の頻度分布。A-early は太陽系初期の力学モデル (外部オールト雲が等方に近い分布を持つ) であり、A-late は現代の太陽系モデル (外部オールト雲が平面的に近い分布を持つ) を使った結果である。縦軸は全計算期間 (最大で 5 億年) に於ける全天体 (60–70 万天体) 内の割合である。Detached TNOs の内側境界値には不定性があるので、ここでは $q = 35, 38, 40$ au の三種を用いた。極域回廊 (polar corridor) については [Namouni and Morais \(2018, MNRAS, 477, L117–L121, 10.1093/mnras/sly057\)](#) を参照のこと。

原始太陽系星雲散逸後の初期火星膨張大気におけるフォボスの軌道進化

○藤田晃平、寺田直樹、堺正太郎、寺田香織、吉田辰哉¹

¹東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

火星はフォボスとダイモスの2つの衛星を有しており、軌道傾斜角と離心率が小さいという共通した特徴がある。これら2つの衛星の起源は、小惑星が火星の重力によって捕獲されたとする捕獲説や、天体が火星に衝突し、衝突により形成された破片が集積することによって形成されたとするジャイアントインパクト説などが挙げられる。捕獲説が支持されている理由として、フォボスはD型小惑星とT型小惑星、ダイモスはD型小惑星とそれぞれ反射スペクトルが一致していることが挙げられるが、現在の軌道傾斜角と離心率の特徴を説明することは難しいと考えられている。捕獲説の場合、捕獲後の軌道エネルギーの散逸を考える必要がある。軌道エネルギーの散逸過程の例として、大気ドラッグが挙げられる。大気が静止している場合、捕獲された小惑星の寿命（火星への落下時間）は大気ドラッグにより短くなり、長時間生存できないことが分かった (Hunten, 1979)。この時、軌道はある程度真円化させられるが、傾斜角を減衰させることは難しい。そこで先行研究では、原始火星大気の共回転を考慮に入れた軌道計算が行われた。その結果、静止軌道近傍において順行衛星の寿命が比較的長くなり、離心率や軌道傾斜角が短いタイムスケールで減衰することが示された (Matsuoka and Kuramoto, 2020)。しかし、捕獲後の衛星の軌道進化を追うためには、大気の進化も同時に考慮する必要がある。

先行研究では火星大気に原始太陽系星雲が接続し、大気が共回転している状況を考えていた。その後、原始太陽系星雲は散逸し、火星大気の流体力学的散逸が起こる。本研究では、大気が流体力学的散逸に移行した時の軌道計算を行った。ここで、大気回転速度について、動径方向は大気の流出速度、方位角方向は角運動量保存の法則に従った速度を仮定した。Yoshida and Kuramoto (2020) の純粋な水素大気の場合、静止軌道付近で捕獲された小惑星の寿命は数億年となることが分かった。一方で、流体力学的散逸をしていた時期の火星大気は不確実性があるため、前述の結果で使用した大気の密度と異なる可能性がある。そこで、初期火星の異なる大気構造における捕獲された小惑星の寿命を求める。また、この捕獲された小惑星が軌道を維持するためには、軌道進化のタイムスケールよりも早く大気が収縮する必要がある。本発表では、以上のシナリオにおけるフォボスの軌道計算結果と流体力学的散逸のタイムスケールを比較し、捕獲説の妥当性について議論する。

ダストによる現実的な円盤冷却下の鉛直シア不安定性乱流

○ 福原優弥¹, 奥住聡¹, 小野智弘¹

¹ 東京工業大学地球惑星科学系

原始惑星系円盤における乱流は、ダスト成長や微惑星形成に大きな影響を与える。近年では円盤乱流の駆動源としていくつかの流体不安定性が注目されており、そのうちの1つが鉛直シア不安定性 (Vertical Shear Instability: VSI) と呼ばれるものである。VSIは円盤内の角速度の鉛直勾配が引き起こす不安定性 (Urpin & Brandenburg 1998) であり、円盤の熱緩和が素早く起こることが発生条件である (Nelson et al. 2013)。

VSI乱流は、円盤の熱緩和を担うダスト構造の影響を強く受ける。円盤の熱緩和構造は、ダストのサイズや空間分布に依存する。これらを考慮した現実的なダスト構造を考えると、VSIが不安定になる領域は円盤の一部に限られる (Pfeil & Klahr 2019; Fukuhara et al. 2021)。しかし、円盤ダストと統合的な熱緩和時間構造下で駆動するVSI乱流の詳細な挙動については明らかになっていない。VSI乱流はダスト構造に強い影響を与える (Flock et al. 2017, 2020) ことから、現実的な円盤下で駆動するVSI乱流の性質を明らかにすることは、VSI乱流とダストの共進化を解明する上で必要不可欠である。

本研究の目的は、これらの現実的な円盤熱緩和構造下でのVSI乱流の詳細な性質を数値流体シミュレーションによって解明することである。我々の数値流体シミュレーションでは、円盤ダストの空間分布と統合的になるよう熱緩和時間を空間変化させた。このときの熱緩和構造として、熱緩和が効率的に起こる不安定層が赤道面からある高さまで存在している状態と、VSIの安定層が赤道面付近に存在し、その安定層を不安定層が挟んでいる状態の二つを計算した。それらを複数通りシミュレートし、VSI乱流の熱緩和時間の空間分布依存性を調べた。

その結果、不安定層が赤道面からある高さまで存在している状態では、VSI乱流は不安定層のみで駆動し、その層が薄くなるとVSI乱流が弱まることがわかった。特に、不安定層の厚みがガスのスケールハイトより小さい場合は、VSI乱流は駆動しなくなることもわかった。不安定層はダストが成長・沈殿すると赤道面付近に限られる (Fukuhara et al. 2021)。したがってこの結果は、円盤の主要な乱流駆動メカニズムがVSIであるとする、ダストが成長・沈殿するにつれ円盤の乱流が弱くなる可能性を示唆する。一般に乱流がダストの合体成長の阻害要因であることを踏まえると、ダストがどのサイズまで合体成長できるかがダストとVSI乱流の共進化から決まる可能性がある。

一方で、安定層を不安定層が挟んでいる状態では、VSI乱流がその安定層を貫通し、安定層でも乱流が駆動することがわかった。この熱緩和状態は、赤道面は光学的に厚いため熱緩和効率が悪くなり、円盤上層は光学的に薄いため熱緩和効率が良くなる円盤構造に対応している。この結果は、VSI乱流が現実的な円盤熱緩和構造下でも駆動する可能性が高いことを意味する。

Scientific goals and mission requirements of Comet Interceptor

S. Kasahara, H. Kawakita, Y. Shinnaka, K. Yoshioka, N. Sakatani, S. Kameda, A. Matsuoka, N. Murata, Y. Harada, R. Funase, S. Nakajima, N. Ozaki, N. Usami, T. Sasaki, and Comet Interceptor science team

Comets are pristine small bodies and thus provide key information about the solar system evolution. Remote observations by ground observatories have characterized various comets, while in-situ observations by spacecraft have brought much more detailed information on several comets. However, the direct observations by spacecraft fly-by or rendezvous have been limited to the short-period comets, which neared the sun many times in the past and thus lost some of primitive characteristics. The Comet Interceptor mission, led by ESA, aims at a long period comet or an interstellar object. JAXA will provide an ultra-small (24 U) daughter spacecraft (probe B1), whose closest approach will be less than 1,000 km, allowing the first-ever multi-spacecraft fly-by observations of a comet. Here we report our recent programmatic progress as well as scientific strategies mainly based on the ISAS science review held in February/March in 2021. A special emphasis is put on the science traceability matrix, in which scientific goals are linked to mission requirements.

小惑星 Ryugu の軌道と自転の進化

Evolution of orbit and spin of asteroid Ryugu

○金丸仁明¹、兵頭 龍樹¹、白井 寛裕¹、岡田 達明¹

¹宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

小惑星 Ryugu からの帰還試料の分析が本格化する中、リモートセンシング観測で得られた地質学的知見をもとにした小惑星の進化史を検証していくことが求められる。小惑星の軌道と自転の進化は、Ryugu のメインベルトから地球近傍への輸送過程を理解する上で重要である。特に、Ryugu の軌道進化の時間スケールは、表層物質の宇宙風化や宇宙線照射生成核種の分析から解明されることが期待できる。我々は、小惑星 Ryugu の力学進化を明らかにすることで、Ryugu の起源となる小惑星族の同定に貢献することを目指している。

小惑星の軌道や自転の進化は、天体衝突や惑星との重力相互作用に加えて、熱放射に起因する摂動によって支配される。天体の熱慣性や不規則形状によって生じる非等方的な熱放射は、軌道長半径の変化（Yarkovsky 効果）や、自転周期および自転軸方向の変化（YORP 効果）を引き起こす。

Kanamaru et al. (in review)では、小惑星 Ryugu の3次元形状を用いて熱物理シミュレーションを行い、熱放射によって生じるトルク（Normal YORP; NYORP）を求めた。推定された $-0.59 \sim -0.040 \text{ N}\cdot\text{m}$ ほどの NYORP トルクが、小惑星 Ryugu の自転を減速させてきたと考えられ、自転減速（自転周期 $3.5 \text{ h} \rightarrow 7.6 \text{ h}$ ）に要する時間スケールにして58~870万年に相当する。これは Urashima クレーターや Western bulge のクレーター年代と近く、こうした地質更新イベントが Ryugu が高速自転の状態から自転減速に転ずるきっかけとなった可能性がある。一方で、天体表面にある m スケール以下の岩塊は、熱伝導によって1日の平均気温が東側よりも西側で高くなる。岩塊の東西側面における温度差は、小惑星の自転加速に寄与することが知られている（Tangential YORP; TYORP）。小惑星 Ryugu における岩塊のサイズ頻度分布から見積もると、TYORP による加速は NYORP による減速と同程度に働いていると考えられ、自転進化の時間スケールはさらに長くなる可能性がある。

加えて我々は、上述の熱放射による摂動を取り入れた小惑星の軌道計算コードの開発に取り組んでいる（Astroshaper.jl: <https://github.com/MasanoriKanamaru/Astroshaper>）。惑星との重力相互作用と Yarkovsky 効果を考慮して、Ryugu の軌道進化を計算した。Yarkovsky 効果を初めとする非重力効果が小惑星の力学的な寿命に与える影響を議論する。

短周期 super-Earth の大気的光蒸発に伴う軌道進化: 観測への示唆

○藤田菜穂¹, 堀安範^{2,3}, 佐々木貴教¹

¹京都大学宇宙物理学教室, ²アストロバイオロジーセンター, ³国立天文台

近年 Kepler 宇宙望遠鏡などの活躍によって系外惑星探査が大きく進展し、数多くの系外惑星が発見されてきた。中でも super-Earth の発見数は飛躍的に増加しており、発見された super-Earth は 10wt% の分厚い大気を持つものからほとんど大気を持たないものまで様々である。また、系外惑星の分布からは、半径 1.5-2.0 地球半径の惑星が少ない(radius gap)、海王星サイズの惑星が少ない(Neptune desert)などいくつかの特徴があることも分かっている。

このような系外惑星の多様性や統計的な分布における特徴の起源は明らかになっていないが、惑星からの大気散逸が重要な役割を担っていると考えられている。実際、観測により示されている特徴のいくつかは、大気散逸によって説明できるということがすでに示されている。ただし、先行研究では、大気散逸を経験する惑星の軌道は変化しないと仮定して計算が行われてきた。しかし実際には、中心星-惑星系全体の軌道角運動量を考慮すると、大気散逸による質量損失に伴って惑星が外側に移動するという軌道進化も起きると考えられる。

本研究では、super-Earth の質量-軌道分布の理解を目的とし、惑星大気的光蒸発に伴う軌道進化が最終的な惑星系の構造に与える影響、そして観測された惑星分布における特徴が軌道進化を含めても再現されるのかを調べた。計算の結果、このような軌道進化は軌道間隔の狭い密集 super-Earth 系では特に重要になってくることが分かった。さらに、軌道進化を含めた場合でも惑星分布における特徴が再現され、観測と整合するということが確認できた。今後は観測によって M 型星周りの super-Earth 系が多数発見されることが期待されるため、本研究はそのような観測に先駆けた理論的予測となる。さらに、将来的には観測データと計算結果を比較することで、この理論モデルを再検証することが可能になる。本講演ではこのような今後の系外惑星探査との関連性についても議論したい。

氷衛星内部海での凍結融解がリン脂質二重膜小胞のサイズ・形状に与える影響：人工進化実験の地球外天体への応用

○金子和夢¹、関根康人²、松浦友亮²、成田麻子²

¹東京工業大学、²東京工業大学 地球生命研究所

エウロパやエンセラダスのような地質学的に活発な氷天体は、氷地殻の下部に内部海を保持していることが知られている。このような氷で覆われた海洋は、生命可能性の観点から注目を集めている。内部海環境における機能をもつ有機化合物の安定性を知ることは、内部海での生命存在の可能性や将来的な生命探査において重要となる。地球生命の基本骨格である細胞膜は外環境から内包物質を隔離する機能を持つため、地球外生命にとっても不可欠な構造であると考えられる。地球生命の細胞膜の組成やその構造は、ベシクルと呼ばれる原始的な球状二重膜構造が様々な環境を経験する中で進化してきたと考えられている (e.g. Maurer and Monnard 2011)。ベシクルは両親媒性分子が疎水炭素鎖を向け合う二重膜で構成され (図 1)、その物理化学的な特性は、炭素鎖の長さや本数、不飽和度、ヘッドグループなどの両親媒性分子の特徴に依存する。

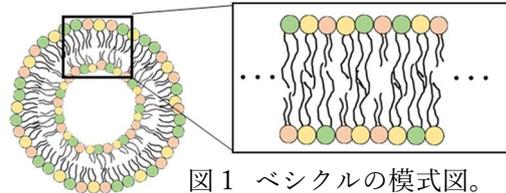


図 1 ベシクルの模式図。

本研究では、氷衛星の内部海の凍結融解サイクルという環境圧に対して、ベシクルのサイズや形状変化、ベシクルを構成する両親媒性分子の選択性がどう変化するかを調べる人工進化実験を行う。氷天体の内部海と氷地殻の界面では、凍結融解現象が繰り返し起こっていると考えられる。一方、ベシクルの融合は凍結融解を経験することで進行することが分かっているが (e.g., Sunami et al., 2010)、融合の際の両親媒性分子の組成変化について調べた研究はない。本研究では、鶏卵から抽出された複数のリン脂質 (eggPC: egg yolk phosphatidyl choline) を例に、これを用いて人工細胞 (ベシクル) を作製した。この eggPC ベシクルに凍結融解を経験させた後、動的光散乱計 (DLS) を用いてサイズを測定した。その結果、溶液中のベシクル濃度が高い場合において、ベシクルの一部が約 100 nm から 200~1000 nm に成長することが確認された。また脂質定量により、凍結融解 1 回目と 2 回目でサイズ増加のみられたベシクルは約 3 wt% から約 8 wt% に増加したことがわかった。次に液体クロマトグラフ質量分析計 (LC-MS/MS) を用いて、サイズの増加が確認されたベシクルに対して組成分析を行った。これにより、凍結融解の回数の増加に伴ってサイズ成長したベシクルからは、不飽和度が 2 以上の炭素鎖を持つリン脂質が選択的に排除されていくことが確認された。この傾向は炭素鎖の脚の長さや本数によらず現れていた。これらの結果は、凍結融解サイクルを経験することで、不飽和度が 0 または 1 のリン脂質を多く含むベシクルが選択的に成長する可能性を示唆する。以上の結果より、氷地殻と内部海の界面で生じる凍結融解現象は、ベシクルのサイズ成長を引き起こすだけでなく、生体膜の組成進化に大きな影響を与える可能性がある。

アポロ月震観測で捉えた衝突月震を生成したクレータ探索

Search for impact craters detected by Apollo seismic observation

○田中智¹, 森川恵海², 小野寺圭祐³, 今川裕喜², 横矢直人², 大竹真紀子⁴, 出村裕英⁴S.Tanaka¹, E.Morikawa¹, K.Onodera⁵, Y.Imagawa¹, N.Yokoya², M.Ohtake¹, H.Demura³,

1.宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構, 2.東京大, 3.総研大, 4.会津大

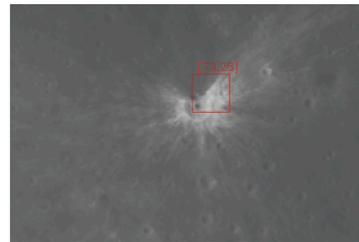
1. JAXA, 2.Univ. Tokyo, 3.Sokendai, 4.Univ. Aizu

近年、衝突に伴うインパクトフラッシュが定常的に観測されるようになり、月周回探査衛星による高分解能画像からそれらに対応するクレータを特定することに成功している。これらにより惑星表面の衝突頻度や物理的な理解が進んでいる(例えば[1])。1969年-1977年に行われたアポロミッションでは4地点の地震(月震)観測ネットワークが構築され、1743の隕石衝突起因とされる月震イベントが観測された。当時はインパクトフラッシュの観測がされておらず、それらを生成したクレータは特定されていない。これらを特定することができれば、詳細なエネルギー分配など明らかになり衝突現象の物理的理解が進むことに加え、内部構造決定の高精度化も期待される。本研究では物体検出アルゴリズムを用いてインパクト月震イベントを生成したクレータの検出を試みた。

新しく生成されたクレータを発見するためには異なる時期に同じ場所を撮影した画像ペアを用いてその差分から検出する方法が考えられる。Speyerer et al.,(2016)[2]はこの手法を用いて200個あまりの新クレータ検出に成功した。しかしながらアポロミッション時代には撮像された月面画像と最新の月周回探査機の高分解能画像のペアを作成するのは範囲が限定され、かつ異なった条件での画像比較も困難である[3]。我々はまず新しく生成されたクレータ画像ペアから検出し、それらを教師データとして学習させることで単画像から新クレータ検出を試みた。用いたデータは月面の広範囲にわたり1m以下の高分解能での可視画像が得られているLunar Reconnaissance Orbiter (LRO)のLROC画像を用いた。検出方法は基本的に[2]の手法に準拠するが、我々独自のアルゴリズムを開発した。[2]の検出結果地域に範囲を限定して探索した結果、

191個のクレータを検出に成功した。これらの中から新クレータの特徴を有する28個のクレータを抽出して教師データとして用いた。

物体検出アルゴリズムとしては、一般的に用いられるYOLOv4[4]を用いた。教師データの少なさから学習の安定性に欠く結果となったが、検証データによるAccuracyは67%を得た。この結果を用いてアポロミッションで得られたインパクト月震の特に大きいもの3例について月震波形解析から決定された震源地点を中心に探索を行った結果、1つの月震イベントについて300-500クレータが候補として検出された。これらの地点についてさらに月震規模やクレータの特徴の詳細な検討から1~数個レベルに絞り込むことに成功した。現在、教師データが少数でも高精度で検出可能なアルゴリズムを導入して精度の高い検出方法の開発をすすめている。



1972年5月13日に観測された月震イベントとして検出されたクレータ(直径39m)

[1] Suggs et al., ICARUS, 19, 1-29, 2014

[2] Speyerer et al., Nature, 538, 215.2016

[3] Dauber et al., LPSC abst. 2232, 2011

[4] Bochkovsky et al.,

<https://github.com/AlexeyAB/darknet>, 2020

熱進化した氷微惑星の斜め衝突に関する実験的研究

中村誠人, ○保井みなみ, 荒川政彦

神戸大学大学院理学研究科

背景：水氷は木星以遠の衛星，巨大惑星のリング，カイパーベルト天体，彗星等において主要な構成物質である．惑星形成過程では，微惑星同士の衝突破壊・再集積により原始惑星が形成されたと考えられており，氷微惑星の衝突現象は氷天体の形成を考える上で非常に重要である．また，氷微惑星から原始惑星へと進化する過程で，圧密による氷物質の塑性変形や熱進化による融解などにより，多孔質氷天体から緻密氷天体へと内部密度が変化すると考えられる．さらに，天体同士の衝突は斜め衝突で起こる確率が高く，衝突角度が45度の衝突確率が最も高い [Shoemaker, 1962]．しかし，水氷を用いた衝突実験は低温設備が必要なことから研究例が少なく，さらに，衝突破壊過程に対する衝突角度の影響を調べた研究はほとんど行われていない．従って，本研究では様々な熱進化過程を経た氷微惑星の模擬物質として氷球・雪玉（高空隙氷）を用いた高速度衝突破壊実験を行い，氷・雪の衝突破壊過程（衝突破壊強度及び破片速度）に対する衝突角度の影響を調べた．

実験方法：標的には直径60～80mmの氷球，雪玉（空隙率50%）を用いた．弾丸には，直径2mm及び4.7mmのポリカーボネート球を用いた．衝突速度は0.8～4.2km/sとし，衝突角度は90～15度と変化させた．実験は，神戸大学の低温室に設置された横型二段式軽ガス銃を用いた．実験及び標的作成は-15°Cの低温室内で行った．また，破壊の様子を高速カメラで撮影した．衝突角度は正面衝突を90度として，高速カメラの画像から決定した．破壊後の衝突破片は回収し，質量と個数を計測した．

結果：まず，正面衝突における氷と雪の衝突破壊強度 Q^* （破壊後の最大破片質量 m_1 が元の標的質量 M_t の半分になる時のエネルギー密度 Q ， Q は標的単位質量あたりに与えられる弾丸の運動エネルギー）を調べた結果，それぞれ13.5J/kg，489J/kgと得られた．また，正面衝突において規格化最大破片 m_1/M_t が0.03となる高エネルギー密度の条件下では，衝突角度を変化させると氷では30度以下で m_1/M_t の急増が，雪では50度以下で緩やかな増加が見られた．正面衝突において m_1/M_t が0.3となる低エネルギー密度の条件下では，氷・雪ともにデータのばらつきが大きくなったが，衝突角度が小さいほど m_1/M_t が増加した．ここで，Yasui et al.[2020]を参考に，有効エネルギー密度 $Q_{\text{eff}} = m_p(v_i \sin \theta)^2 / 2M_t$ を用いて m_1/M_t を整理した結果，衝突角度によらず一つのべき乗式で説明でき，氷・雪の衝突角度によらない衝突破壊強度はそれぞれ15.6J/kg，462J/kgとなった（図1）．

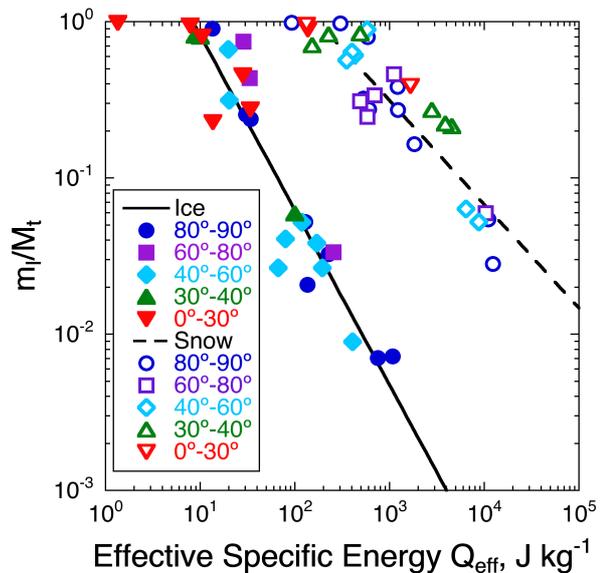


図1：規格化最大破片質量と有効エネルギー密度の関係。

はやぶさ 2 探査と微惑星形成

○渡邊誠一郎¹, 安部正真², 諸田智克³, 道上達弘⁴, 平田直之⁵, 平田成⁶, 畠生有理²,
 杉田精司³, 岡田達明², 北里宏平⁶, 竝木則行⁷, 橘省吾^{3,2}, 荒川政彦⁵, 田中智²
¹名古屋大学, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³東京大学, ⁴近畿大学, ⁵神戸大学,
⁶会津大学, ⁷国立天文台

はやぶさ 2 探査によって, C 型小惑星リュウグウの姿が明らかになった. 1.19 g/cm^3 という低いバルク密度と, 大きなボルダーが散在することからラブルパイル天体と考えられている. さらに直径 1–100 m の表面ボルダーの累積サイズ頻度分布のべきは急であり (-2.65), 帰還試料の直径 $\geq 1 \text{ mm}$ の粒子の同べきはさらに急であり, $\sim 1 \text{ mm}$ の直径の粒子が卓越することを示唆する. これは, 空隙率が高く粒子間隙を埋める微小粒子が少ないと推定されること, SCI 人工クレーターの直径から表層での粒子間付着力が小さいと示唆されることと整合的である. 表面ボルダーの熱慣性も多くは小さいことから, mm サイズのダスト集合体が空隙をもってさらに集合した階層構造を持っている可能性が高い.

惑星形成論の最大の問題はダストから微惑星の成長過程である. ダスト集合体がどの程度の大きさまで直接合体で成長し, ダスト・ガス混合流体における resonant drag instabilities [1]などを通じて, 重力不安定による飛躍的な成長に至るのかがわかっていない. Bouncing, fragmentation, radial drift barriers などのダスト合体を阻害する要因がいくつも指摘されており, ふわふわでフラクタルな集合体やコンパクトな集合体 (ペブル) では cm サイズを超えて直接合体成長するのは難しいとされる. こうしたペブルが重力不安定でゆるやかに集まり微惑星を形成したならば, 直径 $\sim 100 \text{ km}$ の微惑星を母天体とする小惑星にはペブルの痕跡を示す構造が残されて得る. ただし, 母天体内部での圧密・変成や, その後の衝突過程の影響によって微惑星形成時のペブル構造が不明瞭化している可能性もある.

ESA の Rosetta ミッションでは 67P/Churyumov–Gerasimenko 彗星から放出された微粒子の粒子衝突解析装置 GAIDA や顕微撮像ダスト分析装置 MIDAS による分析から, コンパクトな粒子に混じってふわふわでフラクタルな粒子が存在することが明らかになった [2,3]. これはペブルが重力不安定で集合して彗星核を作ったことを示唆する. 小惑星探査においても, 天体表層の高解像度/その場観測や, 表層から直接もたらされた帰還試料から, 構成粒子のサイズ分布や物理特性を調べ, 隕石等と比較することにより, 母天体上でのプロセスを切り分け, 微惑星形成時の粒子サイズ分布を読み出す試みをすべきである. よって, リュウグウ粒子の地上分析により, その構造と物理特性を解明することは極めて重要である.

[1] Squire, J. & Hopkins, P. E., 2018, MNRAS, 477, 5011

[2] Mannel T., et al., 2016, MNRAS, 462, S304

[3] Fulle, M., & Blum, J., 2017, MNRAS, 469, S39

カンラン石への紫外光照射を用いた宇宙風化模擬実験

Space weathering simulation with UV irradiation on olivine

○盛満真一¹, 佐々木晶¹, 島名亮太¹, 海田博司², 廣井孝弘³

¹大阪大学, ²国立極地研究所, ³ブラウン大学

宇宙風化とは、月や小惑星などの大気を持たない岩石天体が、長時間宇宙空間に晒されることで、表面材料の光学特性が徐々に変化していくことである。主な光学特性の変化としては、反射スペクトルの赤化(傾きの増加)、暗化(全体的に暗くなる)、吸収帯の弱化的の三つが知られている。このような変化は、微小隕石の衝突や太陽風の照射、太陽からの紫外光、宇宙線などにより天体表面の鉱物に何らかの変化をもたらすことによるものと考えられている。宇宙探査の主な手段のひとつであるリモートセンシングなどで得られるスペクトルに影響を与えるため、宇宙風化について研究することは重要である。また、スペクトルの変化から天体の表面の宇宙空間への露出時間を推定できる可能性があることも、宇宙風化を研究する上での重要な点である。

本研究では、紫外光ランプを複数回照射して、太陽光線からの紫外光の照射を模擬する宇宙風化模擬実験を行った。試料には、粒径を45~75 μm に揃えたカンラン石の粉末を銅板にプレスしたものを使用した。実験の結果、紫外光照射によって可視光領域でのスペクトル強度が30%減少するという、宇宙風化作用特有の暗化の変化が見られた。他にも、スペクトル全体での赤化や、1000nm付近を中心とする吸収帯の弱化も確認できた。しかし、これらの反応は比較的長時間の紫外光照射では、一度の照射で反応が飽和して、それ以上変化しなくなった。紫外光ランプの劣化曲線のデータをもとに解析したところ、実際の天体では数日という非常に短いタイムスケールで変化が飽和していることが分かった。

以上の実験から、非常に短いタイムスケールで紫外線照射による宇宙風化が進むことから、パルスレーザーによる模擬実験など、長いタイムスケールの模擬実験を行う際には、まず、紫外線照射による宇宙風化の効果を与えてから実験を行うことで、実際の現象に近い模擬実験を行うことができると考えられる。

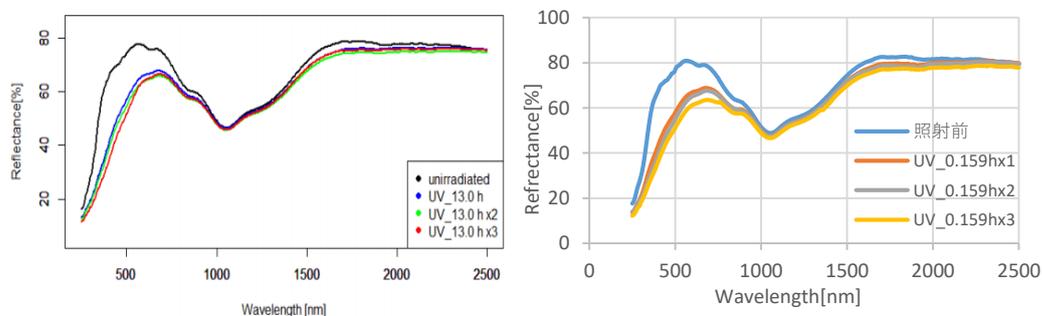


図1.左:反応が飽和したスペクトル 右:反応が飽和していないスペクトル

地球型惑星大気中にみられる乱流拡散係数の多様性 (Considerable variability of eddy diffusion coefficients in the terrestrial planetary atmospheres)

Hiromu Nakagawa¹, Nao Yoshida¹, Hitoshi Fujiwara², Naoki Terada¹, Takeshi Imamura³, Kanako Seki⁴, Shohei Aoki⁵, Yasumasa Kasaba¹

¹Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai, Japan ²Faculty of Science and Technology, Seikei University, Tokyo, Japan ³Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Tokyo, Japan ⁴Graduate School of Science, The University of Tokyo, Tokyo, Japan ⁵Institute of Space & Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-hara, Kanagawa, Japan

The eddy diffusion coefficient is important to characterize the efficiency of vertical transport in the planetary atmospheres. On Mars, recent studies highlighted the efficiency of vertical transport of water vapor in the middle atmosphere, which drives the enhancement of hydrogen escape in a short time scale (Chaffin et al., 2017). This new discover of water loss to space requires the update of eddy diffusion coefficient in the middle atmosphere. On Titan, Voyager UVS implies an eddy diffusion coefficient nearly two orders of magnitude larger than inferred for other planetary thermosphere (Smith, 1982). However, comprehensive understanding of large variability of eddy coefficients in the planetary atmosphere is still an open question. The purpose of this study is to review our recent studies to quantitatively update the eddy diffusion coefficients in the Martian and Venusian atmospheres. On Venus, Mahieux et al. (2021) proposed the new eddy profile. Their updated profile improved the agreements with the mean VEx/SOIR CO and Pioneer Venus He profiles. On Mars, Yoshida et al. (in prep.) attempt to determine the eddy coefficient in the mesosphere from new solar occultation observations by the NOMAD onboard TGO, which allows us to study the CO and CO₂ profiles in the 60 to 100 km altitudes. They found that the inferred eddy coefficients $10^8 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ in the warmer season in $L_s = 240\text{-}270$ implies nearly one order magnitude larger than inferred $10^7 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ in the colder season in $L_s = 120\text{-}150$. In addition, we aimed to determine the eddy coefficient at homopause by direct detection of homopause from new stellar occultation observations by the IUVS onboard MAVEN. Our tentative result suggests that the inferred eddy coefficients on the dayside at homopause could reach to $10^8 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$, nearly one order of magnitude larger than inferred on the night side on Mars. The inferred eddy coefficient during the planetary encircling dust event in 2018 must be more significant, which exceeds $10^8 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$. Our results highlighted highly variable nature of the eddy coefficients along altitude, season, local-time, and dust condition. It is noteworthy that the importance of large-scale winds induced by solar heating via the dust (or haze) upon the mixing in the upper atmosphere thus appears to be common in the terrestrial planetary atmosphere in the solar system, as seen in Titan's atmosphere.

DESTINY+搭載用ダストアナライザの 開発と地上較正計画 2021

○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, 天野 翠³, 小林 幸雄⁴, 伊藤 元雄⁴, 山口 亮⁵, 矢野 創⁶,
Tomas Ludwig⁷, Winfried Schwarz⁷, Jens Hopp⁷, Trieloff Mario⁷,
Hillier Jon⁸, Khawaja Nozair⁸, Eckart Lisa⁸, Postberg Frank⁸,
Simolka Jonas⁹, Krüger Harald¹⁰, Carsten Henselowsky¹¹, 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、探査機バスシステムとのインタフェース条件の詳細化をメーカー、探査機システムチームとともに進めると同時に、装置の基本的機能・性能を検証するためのエンジニアリングモデル (EM)、探査機システムとの電気噛み合わせを早期に実施するための電気シミュレータ (ESIM) の開発も進行中である。

質量スペクトルを解釈するための地上較正については、ダスト模擬物質の選定と微粒化の準備、静電加速器の立ち上げ、種々の質量分析装置を使った予備測定実験などを進めている。本発表ではこれらの進捗状況を報告する。

層構造含水微惑星の模擬物質への衝突実験 ：デジタル画像相関法による標的内部の粒子速度分布の計測

○石田紗那¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 白井慶¹, 長谷川直², 長野巧¹, 堀川和洋¹

1. 神戸大学大学院理学研究科 2. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

背景：氷微惑星は熱進化を経て、水質変成したコアと多孔質マントルの層構造をもったといわれている。この氷微惑星は衝突破壊と再集積を繰り返し、現在の氷天体へと成長した。この衝突破壊現象を理解するために、これまで衝突破壊強度 Q^* が調べられてきた。 Q^* は、半径100m以上の天体では破壊後の重力による破片の再集積で決まり、重力支配域の衝突破壊強度 Q_D^* と呼ばれている。本研究は、これまで室内実験で調べるのが困難であった衝突破壊強度 Q_D^* を求めるため、氷微惑星模擬物質を用いた衝突破壊実験を行い、破壊後の破片の移動についてデジタル画像相関法(DIC)及びフラッシュX線画像を用いて解析して標的内部の粒子速度分布を調べ、衝突破片の質量-速度分布を調べた。

実験方法：衝突実験は神戸大学と宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸は直径4.7mmと7mmのポリカーボネート球を用い、衝突速度 V_i は1.5-4.0 km s⁻¹とした。熱進化を経た氷微惑星を模擬するため、マントルには砂と石膏を質量比2:1で混合したもの(空隙率38%)、コアにはベントナイトと粘性率10² Pasのシリコーンオイルを質量比3:1で混合したものをを用いて層構造標的を作成した。コア直径は30mm、マントル直径は60mmで、球と半球標的を作成した。層構造標的との比較のため、マントル物質のみからなる均質構造標的も作成した。DIC法による解析のため、半球標的の表面にはランダムに点模様をつけた。球標的には12個の鉄球(直径3mm)を単一平面上に配置し、衝突直後にフラッシュX線で撮像した画像を用いて、鉄球の移動を解析した。

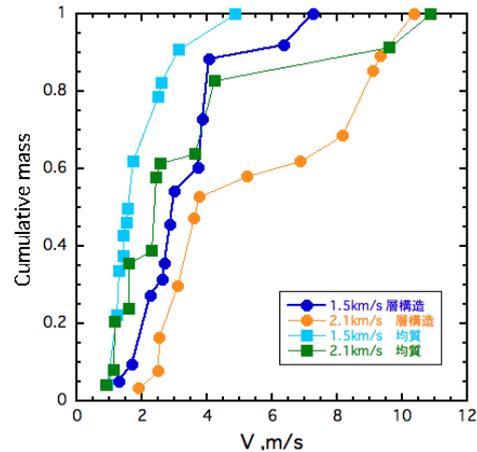


図1 フラッシュX線画像解析から得られた規格化積算質量と粒子速度の関係。

結果：DIC法を用いて、標的内部の速度分布を各粒子速度がある一定の速度を獲得することが確認できた1ms後まで解析した結果、内部構造に関わらず内部の粒子速度は衝突点から一番遠い反対点付近では $V_i = 4 \text{ km s}^{-1}$ で $\sim 6 \text{ m s}^{-1}$ 、 $V_i = 2.6 \text{ km s}^{-1}$ で $\sim 3 \text{ m s}^{-1}$ となり、弾丸の進行方向と同方向に運動した。また、衝突点近傍は、弾丸の進行方向と逆向きに $V_i = 4 \text{ km s}^{-1}$ では $\sim 10 \text{ m s}^{-1}$ 、 $V_i = 2.6 \text{ km s}^{-1}$ では $\sim 8.5 \text{ m s}^{-1}$ で運動することがわかった。層構造標的では、マントル・コア境界でギャップがあり、衝突点近傍のコアは約 6 m s^{-1} で運動した。一方、フラッシュX線画像を用いて得られる粒子速度と、鉄球の最近傍領域を鉄球速度と仮定して求めた破片質量の関係を得た(図1)。実験の結果、衝突速度が大きくなると、全体的に破片の飛散速度も大きくなることがわかった。そして、同じ速度では、均質構造標的に比べて、層構造標的ではほとんどの破片の飛散速度が大きくなることがわかった。

太陽系外縁に新惑星の存在の究明 Investigating the existence of a new planet in the far outer solar system

○ソフィア リカフィカ パトリック(Patryk Sofia Lykawka)¹

¹ 近畿大学 総合社会学部 (School of Interdisciplinary Social and Human Sciences, Kindai University)

How many planets are (were) in the solar system? Do the orbits of trans-Neptunian objects (TNOs) indicate the existence of a new planet in the far outer solar system at ~100 au today or in the past? Previous research without considering such hypothetical Kuiper Belt planets (KBPs) cannot explain two important properties in the trans-Neptunian region: 1) TNOs with very high orbital inclinations ($i > 45\text{-}50$ deg); 2) A large population of TNOs with orbits too distant from Neptune's gravitational influence, the so-called detached TNOs with perihelia $q > 40$ au; 3) TNOs on peculiar orbits, such as Sedna and other extreme objects in the outer solar system.

Here, I performed N-body computer simulations of the outer solar system to investigate the effects of a new planet on the orbital structure beyond Neptune. First, I considered a model of TNOs representing the currently known orbital structure of distant TNOs beyond 50 au including resonant and outer populations. I used the intrinsic CFEPS model for this purpose. I also identified the stable distant resonant populations based on up-to-date observations. I took the observational data from the AstDys online database. Finally, I tested several combinations of masses (Mars to Earth-like) and orbits of potential KBPs that could satisfy the aforementioned constraints.

First, I identified the best candidates for a new planet in the current solar system by constraining their orbits and masses that would preserve the stable resonant populations. Overall, KBPs should be located beyond 100 au for masses within 0.1-2 times the mass of Earth. There was a trend of more massive KBPs with more distant orbits. In particular, more massive Earth-like KBPs should be located beyond 200 au. Concerning the gravitational perturbations of such a KBP in the trans-Neptunian region, an increasing population of detached TNOs arose for KBPs more massive than a few tenths of Earth mass. In particular, Earth-like KBPs can create a substantial detached population and objects with very high inclinations (>50 deg). Therefore, observationally testable predictions for distinct distributions of TNOs beyond 50 au are possible and link to specific KBPs' orbits and masses.

Overall, these results will guide future astronomical surveys in the search of new planets located beyond Neptune and new populations of TNOs.

半揮発性物質を考慮した 原始太陽系円盤の元素組成進化

○中澤 風音¹, 奥住 聡¹

¹東京工業大学 地球惑星科学系

軽元素組成は天体の形成位置や時期を制約する重要なパラメータである。太陽系に存在する惑星や彗星・小惑星といった小天体はそれぞれ異なる軽元素組成をもち、木星・土星は太陽組成の数倍 N に富んだ大気を持つ (Atreya et al. 2016) など天体ごとに様々な特徴を有する。この軽元素組成は天体が形成した環境のダスト・ガス組成を反映しており、円盤内のダスト・ガス組成を正確に調べることが天体形成プロセスを決定する上で重要である。

これまでの円盤組成進化の研究は、元素が主に揮発性の高い物質により運ばれると仮定して行われてきた (e.g. Öberg et al. 2011, Booth & Ilee 2019)。例えば窒素に関しては高揮発性の NH_3 や N_2 が主要な元素キャリアであるとして計算が行われている。一方で近年、これらの高揮発性キャリアのみならず半揮発性の塩や有機物も軽元素キャリアを担っている可能性が指摘されている。彗星 67P ではアンモニウム塩に由来する赤外スペクトルが検出され、太陽組成と比べ N に欠乏した彗星の窒素リザーバーが半揮発性の塩に担われていることが示唆された (Poch et al. 2020)。従って、円盤の軽元素組成を正確に理解するためには従来の高揮発性キャリアだけでなく半揮発性の塩の輸送・解離を考慮した計算を行う必要がある。

本研究は半揮発性の塩を考慮したより正確な円盤の軽元素組成進化の理解を目的とする。研究の初期計算として、我々はアンモニウム塩の解離による円盤内側 ($r < 10$ AU) での窒素ガス供給・拡散を調べた。その結果、0.1 Myr 以内に円盤内側でガスに対し質量比 10^{-4} を超える窒素を供給し得ることを明らかにした。この値は窒素に富むガス惑星大気 (e.g. 木星 $\text{N}/\text{H} : 3 \times 10^{-4}$) の値を達成している。従来、このような窒素ガスの供給は円盤外側の N_2 スノーライン近傍でしか起こらないと考えられていたため、塩による窒素ガス供給は円盤内側での天体形成の新たな可能性を示すものである。

セレス氷火山における発泡破碎による 非平衡塩析出：地下海の化学進化への示唆

○依田優大^{1,2}、関根康人^{1,3}、丹秀也¹、渋谷岳造⁴

(1 東京工業大学 地球生命研究所、2 東京大学理学系研究科 地球惑星科学専攻、
3 金沢大学 環日本海域環境研究センター、4 国立研究開発法人 海洋研究開発機構)

小惑星帯の準惑星セレスには、若いクレータの底部などに内部の液体の塩水が地表面に噴出した氷火山が局所している (Carrozzo et al., 2018)。この氷火山噴出物は炭酸ナトリウム (Na_2CO_3) を主成分とし、内部に存在する地下海の化学状態を知る鍵として着目されている。一方、セレス内部で起きる炭素質コンドライトを含む水-岩石反応計算によると、地下海の pH は 9 から 10 程度と推定されている (Castillo-Rogez et al., 2018; De Sanctis et al., 2020)。そのような海水が地表に噴出・凍結する場合、化学平衡モデルからは炭酸水素ナトリウム (NaHCO_3) が主成分として析出することが予想されている。そのため、セレス地表の Na_2CO_3 からなる塩の起源は、クレータ衝突時に地殻内に形成された pH 10 以上の塩水に由来し、地下海とは別である可能性も議論されていた (Zolotov, 2017)。しかしドーン探査機による重力探査から、クレータ地下の塩水リザーバは深部の地下海と連結している可能性が示唆されているため (Raymond et al., 2020)、地球化学的制約と地球物理的観測が相反する状況になっている。

本研究では、セレス地下の塩水が地表面に噴出するときの急減圧と、それに伴う液体の発泡・破碎に着目する。本研究では、まず溶存炭酸成分に富む塩水の pH をパラメタとした減圧実験を実施し、減圧発泡過程を高速度カメラでの観察、析出塩の鉱物組成の分析を行った。その結果、溶存炭酸成分に富む塩水が減圧時に発泡・破碎する場合、化学平衡モデルから NaHCO_3 の析出が予想される pH 9-10 の範囲から、 Na_2CO_3 を主成分とする塩が析出することが明らかになった。これは急減圧における発泡・破碎によって小さな液滴が多数生成し、効果的に溶存炭酸成分の脱ガスが起こり、液滴がアルカリ化したためと解釈される。本研究の結果は、溶存揮発性成分の濃度が高く、爆発的噴火スタイルの氷火山がセレスに存在する場合、pH が 9-10 の地下海からも、 Na_2CO_3 が析出する可能性を示唆する。

一方で、セレス地下海にはアンモニアも含まれることが、表面のアンモニウム・サポナイトの存在から強く示唆される。発泡・破碎によりアンモニアが脱ガスする場合、溶存炭酸成分とは逆に液滴を酸性化する。本発表では、アンモニアを含めた減圧実験も系統的に行い、 Na_2CO_3 が析出するための $\Sigma \text{CO}_2 / \Sigma \text{NH}_3$ の下限値を実験的に求める。そして、そのような $\Sigma \text{CO}_2 / \Sigma \text{NH}_3$ が実現するためのセレスの出発物質組成を明らかにする。

ガス惑星の磁場強度の違いによる周惑星円盤構造と衛星系の軌道 Difference in the structure of circumplanetary disks and satellite systems due to the strength of planetary magnetic fields

○藤井悠里¹, 荻原正博², 堀安範³

¹京都大学 人間・環境学研究科, ²東京工業大学 地球生命研究所, ³アストロバイオロジー
センター/国立天文台

○Yuri I. Fujii¹, Masahiro Ogihara², Yasunori Hori³

¹Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University, ²ELSI, Tokyo Institute of
Technology, ³Astrobiology Center/NAOJ

ガス惑星の衛星が周惑星円盤の中で形成されると、円盤ガスとの相互作用によりその軌道が変化する。多くの場合、衛星は惑星に向かって移動し、円盤のガス面密度が十分小さくなるまでに惑星に落下してしまうことが知られている。よって、最終的に生き残る衛星系の形成を議論するには、周惑星円盤の進化の最終段階に注目する必要がある。

様々な円盤モデルにおけるN体計算から、木星のガリレオ衛星が落下せずかつ内側3つが平均運動共鳴に入っていることを説明するには、周惑星円盤の内縁が惑星表面に接せずに、円盤の真ん中に穴があいた状態であることが好ましいことが分かった。しかし、円盤内側に穴があくかどうかは自明ではない。本研究では、ガス惑星内部のダイナモによる磁場強度と周惑星円盤の質量降着率および電離度を計算し、惑星磁場によって周惑星円盤の内側に穴があくかどうかを検討した。そして、木星の場合には穴があき、土星の場合には穴はあかないという結果が得られた。これにより、木星系と土星系における衛星系の軌道構造の違いには惑星の磁場が重要な役割を果たすと言える。

小惑星 25143 Itokawa の地域的な測光学的特性

○平田 成^{1,2}, 北里 宏平^{1,2}, 巽 瑛理³, 菊地 紘⁴, 佐藤 広幸⁴

¹会津大学コンピュータ理工学部, ²会津大学先端情報科学研究センター (ARC-Space),

³カナリア天文物理学研究所

⁴宇宙航空研究開発機構月惑星探査データ解析グループ (JLPEDA/JAXA),

小惑星の測光学的特性は表面の物質組成や宇宙風化度, ラフネスなどの表面状態を反映している。地上から小惑星を点光源として測光観測を行い, 位相角をパラメータとする disk-integrated な測光学的特性を推定する研究がしばしば行われている。これに対し, 探査機による近接観測を実施することで, 対象を面光源の像として捉えることができる。面光源観測データを用いることで, 位相角, 入射角, 出射角をパラメータとした disk-resolved な測光解析を行い, 測光学的特性の地域差も調査することができる。

著者らは小惑星探査機はやぶさが 2005 年に実施した小惑星 25143 Itokawa の近接観測の際に取得された, 分光撮像装置 AMICA の画像データを源泉とし, 輝度値, 位相角, 入射角, 出射角などの観測条件など画素単位でデータベース化し, 所望の条件を満たす観測データを抽出して disk-resolved な地域的な測光学的特性を推定できる環境を構築した。

Itokawa 表面には rough terrain と smooth terrain という地形学的な二分性が存在するほか, 地域によって宇宙風化度が大きく異なることも指摘されている。本研究ではまず全球の平均的な disk-resolved な測光学的特性を求め, 先行研究で報告されている disk-integrated な測光学的特性との比較を行った。さらに, 図 1 に示す Itokawa 表面の代表的な地形学・地質学的ユニットごとの測光学的特性を求め, 表面地形や宇宙風化度の地域差との関連について検討した。

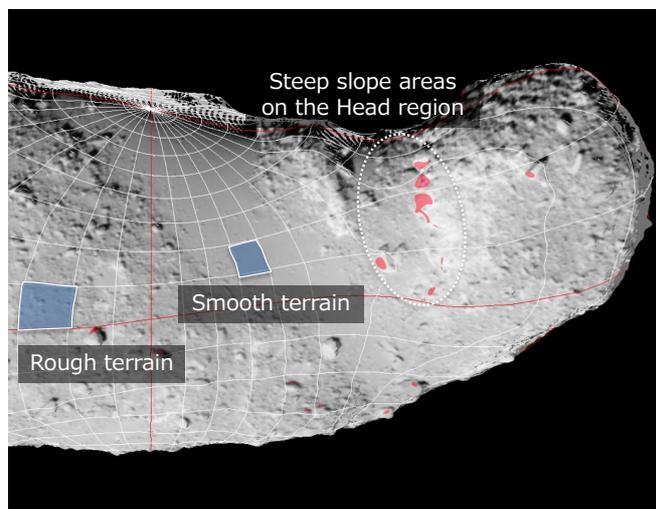


図 1 本研究で disk-resolved な測光学的特性解析を行なった対象地域。

Rough terrain と Smooth terrain, Head region の急斜面を解析対象とした。

火星酸性流体が岩石表面組織に与える影響：ジェゼロクレータに見られる穴状組織の解釈

○杉内光輝¹、関根康人¹、高橋聡²

¹東京工業大学 地球生命研究所、²東京大学 理学系研究科地球惑星科学専攻

NASAの着陸探査車パーサヴィアランスは、火星の古環境や生命存在可能性を理解するために、ジェゼロクレータ上の堆積物を調べている。ジェゼロクレータ上の湖底堆積物はノアキアン期に Nili Fossae から運搬されてきた可能性が示唆されており、炭酸塩や粘土鉱物が広く分布することが周回機の赤外観測から示唆されている (Ehlmann et al., 2008)。探査車によって撮影された地表面の可視画像によると、表面に穴状組織を持つ特徴的な礫が広く存在していることが確認されている。このような穴状組織を持つ礫はこれまでの着陸探査では見つかっておらず、その成因はよくわかっていない。本研究では、ジェゼロクレータ上の岩石表面に穴状組織を形成するメカニズムに関して、二つの可能性を比較検討する。一つ目として、寒冷環境における酸性流体による浸食風化に着目する。先行研究によると、ヘスペリアン期の火星表層では広い範囲で酸性表層水が地下に浸透していたことが示唆されている (Tosca et al., 2004; Zolotov and Mironenko, 2016)。本研究では、硫酸溶液を凍結させて氷を作成し石灰岩片上に設置し、ディープ・フリーザを用いて一定速度で昇温させ繰り返し融解させ、石灰岩の浸食過程を観察した。二つ目として、岩石表面の塩水の蒸発による塩類風化に着目する (Huinink et al., 2004)。塩水は岩石上で蒸発することで塩を析出し、これによる体積膨張により岩石の浸食風化を引き起こす。これにより、地球上の沿岸地域で多く見られるタフォニと呼ばれる穴状構造を形成することが知られている。本研究では、北日本の下北半島沿岸に現れている石灰岩 (尻屋コンプレックスの三疊系-ジュラ系石灰岩) と熱水変成由来のグリーンタフ (中新統檜川層) の露頭に対して野外調査を行い、それぞれの露頭で形成している穴状構造の観察を行った。室内実験、野外調査ともに、岩石表面の3次元構造モデルを作成し、DEM、オルソ画像を用いることで対象岩石表面の空洞の形状および数密度を分析した。それによって、空洞の形状や数密度の違いの要因となるメカニズムについて議論し、火星のジェゼロクレータ上で見られる穴状組織を持つ岩石の形成に関して示唆を与える。

原始惑星が駆動するガス流が粒子の動径移動に及ぼす影響： 原始惑星系円盤のリング・ギャップ構造への示唆

○桑原 歩^{1,2}, 黒川 宏之², 谷川 享行³, 井田 茂²

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

近年の観測から、多くの原始惑星系円盤（以下、円盤）の遠方領域 (>10 au) でダストのリング・ギャップ構造が見つかっている[e.g., 1,2]。円盤内に見られる構造の起源については議論が続いている。有力な候補の一つとして、円盤と惑星の相互作用が挙げられる。円盤内に存在する固体粒子は、ガス抵抗を受けながら円盤ガスの圧力勾配に比例した速度で中心星方向に移動する。円盤内に存在する惑星の質量が大きいとき（～木星質量）、惑星から円盤ガスに働く潮汐トルクによって惑星軌道周辺からガスが取り除かれ、深いガスギャップが形成される[e.g., 3]。惑星軌道外側から移動してくる粒子は、惑星軌道外側のガスギャップの縁（圧力極大点）でせき止められる。このようにして、リング・ギャップ構造が形作られる可能性がある[e.g., 4]。しかし、観測的には円盤内のガスと粒子の空間分布間の相関は明らかになっていない。系外惑星分布における遠方巨大惑星の推定存在頻度は～10%程度であり[5,6]、円盤内に普遍的に存在するリング・ギャップ構造の全てを巨大惑星で説明することは難しい。

近年の高解像度流体シミュレーションから、円盤内に埋没した成長途中の原始惑星の周囲には、3次元的なガス流構造が形成されることが明らかになった[e.g., 7]。原始惑星が駆動する3次元ガス流構造は、惑星近傍において、～mm—cmサイズ粒子の軌道を大きく変化させ、惑星への粒子降着効率に影響を及ぼす[8,9]。このガス流構造は、リング・ギャップ構造形成に関する従来研究では考慮されていない。

本研究では、まず、円盤内にガスギャップを開けないような範囲の惑星質量を仮定した局所3次元流体計算を実施した。次に、得られた流体計算結果を元に、幅広い粒子サイズに対する粒子軌道計算を実施し、3次元ガス流中における粒子の空間分布を調べた。最後に、得られた粒子分布を元に、粒子の動径方向移動速度を求め、円盤動径方向1次元移流拡散方程式に導入することで粒子面密度分布に与える影響を調べた。

その結果、円盤内に埋没した惑星が駆動するガス流構造、特に、惑星軌道の内外に向かって吹き出すガスの流れが、惑星軌道付近における粒子の動径移動に影響を及ぼすことがわかった。惑星質量が7地球質量（10 au における換算質量）以上である場合、惑星軌道外側に向かって吹き出すガスの流れにより、惑星軌道の外側では、～mm—cmサイズ粒子の中心星方向への移動が阻害されることが明らかになった。一方、惑星軌道内側に向かって吹き出すガスの流れは、粒子の中心星方向への移動を加速させる。両者の影響が組み合わさることにより、惑星軌道付近の粒子面密度は、惑星の存在を仮定しない場合に比べて減少することがわかった。また、面密度の減少度合いは、粒子サイズ、及び粒子の巻き上げに寄与する乱流強度が小さいほど顕著になることがわかった。本研究結果から、リング・ギャップ構造を持ち、かつガスと粒子の空間分布に相関が見られないような円盤内には、スーパーアース質量程度の惑星が存在している可能性が示唆される。観測的には、スーパーアース質量の惑星が最も多く見つかっていることから、惑星形成過程についての示唆も議論する。

[1] ALMA Partnership, Brogan, C. L., Pérez, L. M., et al. 2015, ApJ, 808, L3 [2] Andrews, S. M., Huang, J., Pérez, L. M., et al. 2018, The Astrophysical Journal Letters, 869, L41 [3] Lin, D. N. & Papaloizou, J. 1979, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 186, 799 [4] Rice, W., Armitage, P. J., Wood, K., & Lodato, G. 2006, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 373, 1619 [5] Johnson, J. A., Aller, K. M., Howard, A. W., & Crepp, J. R. 2010, PASP, 122, 905 [6] Fernandes, R. B., Mulders, G. D., Pascucci, I., Mordasini, C., & Emsenhuber, A. 2019, ApJ, 874, 81 [7] Ormel, C. W., Shi, J.-M., & Kuiper, R. 2015, MNRAS, 447, 3512 [8] Kuwahara, A. & Kurokawa, H. 2020a, A&A, 633, A81 [9] Kuwahara, A. & Kurokawa, H. 2020b, A&A, 643, A21

一酸化炭素の放射吸収・散乱特性を考慮した地球型惑星の大気構造

Atmospheric structures of terrestrial planets considering the radiative absorption and scattering properties of CO

○青木紘介¹， 黒川宏之²， 藤井友香³

1. 東京工業大学， 2. 東京工業大学 地球生命研究所， 3. 国立天文台

惑星惑星の大気組成・構造は、大気自身を含む惑星の表層環境とその進化に重要な影響を及ぼす。従来の研究では、地球をはじめとする地球型惑星の表層環境として CO₂ に富んだ大気が考えられてきた (e.g., Kasting and Ackerman 1986)。一方で昨今の地球化学的研究から、初期地球大気には CO が豊富に存在していた可能性が示唆されている (Endo et al., 2016)。初期地球マントルは現在より還元であった (e.g., Aulbach and Stagno 2016) 可能性があることも CO 大気と調和的である。また過去の光化学計算を取り扱った研究から、初期地球大気・初期火星大気・太陽系外の M 型星周りの惑星大気でも大量の CO を保有する可能性が考えられている (e.g., Kasting et al., 1990; Zahnle et al., 2008; Hu et al., 2020)。大量の CO ガスが存在する場合、その放射吸収・散乱特性が大気構造と表面温度に影響を及ぼすことが考えられるが、その効果はこれまで系統的に調べられていない。

我々は、大気中の CO の存在が地球をはじめとする地球型惑星の大気構造・表面温度にどのような影響を及ぼすかを明らかにすべく研究を行った。様々な CO₂, CO 分圧に対し CO の放射吸収・散乱を組み込んだ放射対流平衡大気構造計算を実行することで表面温度を含む温度構造・水蒸気構造を求めた。計算には大気構造・光化学計算コード Atmos の大気構造計算モジュールである CLIMA (Kasting et al. 1984) を改変して使用した。CO の放射吸収については、中心星からの可視光照射と惑星からの赤外放射それぞれを考慮した。

放射対流平衡計算により様々な CO₂, CO 分圧に対し表面温度を求めた結果、CO₂ 分圧が 0.5 bar 未満では CO が多い大気ほど表面温度は低くなった。これは、CO が増えることで惑星のアルベドが上昇するためである。一方、CO₂ 分圧が 0.5 bar 以上では CO が多いほど表面温度が上昇することがわかった。これは、全圧が上昇することで CO₂ の温室効果が促進されるため (pressure broadening) である。また、CO 自身の放射吸収特性の効果は、惑星表面温度を僅かに上昇させるに留まる一方で、中層大気 (高度 15-60 km) を冷却することがわかった。これは大気下層の僅かな温度上昇に伴う窓領域の波長帯の放射量の増加が、中層大気の冷却による非窓領域の放射量の減少で補われるためである (“blocking effect,” Goessling and Bathiany 2016)。惑星大気の光化学反応は主に成層圏で起こることを鑑みると、この結果は地球型惑星大気の光化学に影響を及ぼす可能性がある。

Life-signature Detection fluorescence Microscope (LDM) 生命兆候探查蛍光顕微鏡 (LDM)

○Keigo Enya¹, Yoshitaka Yoshimura², Satoshi Sasaki³, Sohsuke Ohno⁴, Shunta Kimura¹,
Hajime Mita⁵, Akihiko Yamagishi⁶, Kensei Kobayashi⁷, ⁸Eiichi Imai, and ⁶Atsuo Miyakawa

¹JAXA/ISAS, ²Tamagawa University, ³Tokyo University of Technology, ⁴Chiba Institute of Technology, ⁵Fukuoka Institute of Technology, ⁶Tokyo University of Pharmacy and Life Science, ⁷Yokohama National University, ⁸Nagaoka University of Technology

Though surface of Mars is cold and dry, Mars had a large amount of liquid water on the surface in early stage of the history. Several billion years ago, Mars was similar to the early Earth from which life arose, and life would have also emerged on Mars. Although the Viking mission in 1976, which explored life on Mars, did not find evidence for life, many findings supporting the habitability on Mars have been discovered since the Viking mission: past and present aqueous environments, organic compounds, methane and reduced compounds supporting microorganism as energy sources, and so on. These findings tend to suggest that microorganisms might still exist on Mars surface.

For searching extant microorganisms, a microscopic instrument is a powerful tool, which directly images life forms and identify their shapes, sizes, and other morphological and biochemical characteristics. However, it has not reported results in planetary exploration missions yet. For in situ imaging of particles and microbial cells, we have proposed the Life-signature Detection fluorescence Microscope (LDM) which visualizes organic compounds by staining the samples with fluorescent pigments. The current LDM scans a volume of 1 mm³ and detects organic compounds including cells and other biological materials in high sensitivity. The fluorescent pigments have been selected to identify the fundamental features of cells by differentiating organic compounds surrounded by membranes or those show enzyme activity. The LDM is also equipped with a high-resolution imaging system which visualizes detailed life forms as well as regolith and dust particles. Our investigation goals are the followings. 1) High-resolution characterization of regolith and dust particles. 2) Search for organic compounds in Mars surface samples. The compounds include cells, other biological materials, and abiotic polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH). 3) Identify cell-like structure in which organic compounds are enveloped by membrane, which may represent Martian life.

In this presentation we will report the current status of the development of LDM and potential application to planetary explorations.

Hera 搭載熱赤外カメラ TIRI による科学観測計画 Science Operations of Thermal Infrared Multi-band Imager on Hera

◦岡田達明^{1,2}, 田中 智¹, 坂谷尚哉³, 鳶生有理¹, 千秋博紀⁴, 荒井武彦⁵, 神山 徹⁶,
出村裕英⁷, 関口朋彦⁸, 金丸仁明¹, Hera TIRI チーム
¹JAXA 宇宙科学研究所, ²東京大学, ³立教大学, ⁴千葉工業大学, ⁵前橋工科大学,
⁶産業技術総合研究所, ⁷会津大学, ⁸北海道教育大学

Hera計画：小惑星は太陽系初期の物質的・物性的な状態を現在まで保存する始原天体であり、太陽系の起源と進化の解明にとって不可欠な探査対象である。惑星の形成過程では衝突・破壊・再集積が重要な役割を果たしてきたが、その過程は現在も続いており、直径数m以上の小惑星が地球に衝突すると、人類社会に甚大な被害をもたらす。この潜在的に危険な天体の地球衝突を回避するための防災技術（Planetary Defense）の獲得が国際的枠組みで討議され、NASAやESAでは宇宙科学や有人宇宙活動と同格の部局が設立された。NASAのDART計画は2021年11月に打ち上げ、2022年10月に小惑星65803 Didymos（S型、直径約780m）の衛星Dimorphos（直径約160m）に衝突させ、衝突前後の公転周期の変化を地上観測で検知し、衝突の効果を評価する[1]。ESAのHera計画は、2024年10月に打ち上げ、2027年1月にDidymosにランデブして現地観測を行う[2]。距離約30kmから半年かけて2km以下まで接近し、二つの小惑星の物質的・物性的な特徴の把握と、DARTによる衝突痕を観測するほか、小惑星の軌道や自転と軌道進化を詳細に計測する。

熱赤外カメラTIRI：Heraには熱赤外カメラTIRIが搭載され、日本が開発や観測を担当する[3]。「はやぶさ2」TIRによる熱撮像観測では、C型小惑星リュウグウの熱物性的な知見が得られた[4]。TIRIは非冷却ボロメータ（Lynred PICO1024：1024 x 768画素）による中間赤外帯（7-14 μm 付近）の熱撮像を行うほか、多色のフィルタによる物質分布も調査する。視野角は13.3° x 10.0°、解像度は0.013°/pixelである。Hera探査機のランデブ中のDidymosの太陽距離は1-2 auであり、特に到着直後は大きな太陽位相角（～70°）で観測する（夜領域の撮像により、高精度な形状モデルが構築できる）。小惑星表面温度は150～400Kと想定され、その広範囲な温度測定が必須である。温度分解能はNETDで0.1K以下（@300K）を目標とする。

TIRI観測概要：TIRIは到着後に、小惑星の1自転分撮像し、地域ごとの温度履歴から熱慣性を導出し、全球熱慣性マップを作成する。多色バンドで得られるChristensen Feature(CF)やReststrahlen Feature(RF)から、組成、結晶度、などの物質情報も取得する。その結果として、S型小惑星の隕石タイプとの比較、DidymosとDimorphosの物質的な差異の有無、衝突痕内部と外部やイジェクタとの物質的な差異も調査する。このように、TIRIはS型小惑星で初の熱物性観測を実施し、かつ探査史上最小の天体の詳細観測を行うことで、C型のリュウグウとのタイプによる差異や天体サイズによる差異を比較し、二重小惑星の形成過程を考察する。さらに小惑星の熱モデルを構築し、軌道を高精度で実測することで、軌道進化やBYORP効果の評価を行う。さらに、DART衝突痕や、イジェクタ堆積物、クレータ内部の状態を調べ、衝突物理現象の理解を深化する。さらに、日陰表面の撮像は正確な形状モデルの導出に役立つ。特に歪形状天体の観測（可視光だと凹部が見えない場合あり）では熱撮像カメラは優位性があり、正確な形状モデルの構築のほか、新たな航法誘導制御技術にも寄与する。

参考文献：[1] Cheng A.F. et al. (2018) *PSS* 157, 104-115, [2] Carnelli I. et al. (2019) *ISTS2019*, Fukui, 16-21 June 2019, 2019-o3-04, [3] Okada T. et al. (2021) *LPSC*, 52, #1449, [4] Okada T. et al. (2020) *Nature* 579, 518-522.

N 体計算コード GPLUM の開発: 高解像度微惑星集積計算による展望

○石城陽太^{1,2}, 小久保英一郎³, 兵頭龍樹², 藤本正樹², 牧野淳一郎^{4,5}

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ³ 国立天文台, ⁴ 神戸大学,
⁵ 理化学研究所 計算科学研究機構

一般に, 惑星系は, 中心星を取り巻く原始惑星系円盤から形成したと考えられている. 固体惑星やガス惑星のコアは, 原始惑星系円盤内で km サイズの天体(微惑星)の集積により形成したとされている. 微惑星の集積過程は, 主に微惑星系の重力多体計算(N 体計算)によって研究されている.

本研究では, 大規模な微惑星系 N 体計算を実行するため, Particle-particle Particle-tree 法 (P³T 法)を用いた新しい N 体計算コード GPLUM を開発した. GPLUM では, より効率的な新たなアルゴリズムを実装することで, 従来の P³T 法コードより数倍程度高速な計算を実現した. GPLUM の性能は, 従来の P³T 法コードと比較して, 大きな質量比のついた質量分布を持つ粒子系のシミュレーションに対しては大幅に改善される. GPLUM によって, これまで N 体計算で扱うことができなかつた広範囲, 高解像度の N 体計算を行うことができる. さらに, 計算コストが削減することで, N 体計算によるパラメータサーベイなど, 新たな議論も可能となることが期待される.

本発表では, GPLUM を用いた大規模な惑星集積過程の N 体計算の結果について発表する. 中心星から 0.5-1.5 au の距離の領域に, 初期粒子数をそれぞれ $N=10^4$, 10^5 , 10^6 として微惑星を配置し, N 体計算を行った結果について比較を行う. N 体計算の解像度を変化させることで, 微惑星や原始惑星の成長過程にどのような影響があるかを考察し, 微惑星系の N 体計算の結果の解像度依存性について議論する.

さらに, 微惑星の半径に対する膨らまし係数を変化させた計算や, SPH 計算によって得られたより現実的な衝突合体モデル(Shibata et al. in press)を取り入れた計算も行い, 微惑星系の N 体計算の結果の衝突合体条件に対する依存性についても議論する. また, 富岳において GPLUM を用いた高解像度 N 体計算による惑星系形成シミュレーションの今後の展望について発表する.

光学カメラと XGT5200 を用いた球状鉄コンクリーションの鉄殻成長過程の実験的解明

○岡村裕之¹, 城野信一¹

¹名古屋大学 大学院環境学研究科 地球環境科学専攻

米国ユタ州のナバホ砂岩層には、球状鉄コンクリーション（球形、数 mm～数 cm、表面：酸化鉄殻、内部：砂）が存在する。多重鉄殻を持つ個体も確認されるが、成因は不明。先行研究では、地下酸性水と CaCO_3 が触れ、表面に鉄が沈殿し、鉄殻が形成されたとするモデルが提唱され[1]、半径 15[mm]の CaCO_3 コンクリーションに 2.2[mm]の鉄殻が形成されるには、数百～数千年かかることが示された[2]。課題は、コンクリーション内部の空隙が鉄殻形成に与える影響が考慮されていないことと、形成時間は実験的に議論されていないことであった。そこで、空隙が鉄殻形成速度に与える影響の推定を目的とし、3つの実験/解析を実施した。

撮影実験： CaCO_3 粉末・ガラスビーズ・純水・ FeCl_2 結晶から、人工 CaCO_3 コンクリーションと FeCl_2 酸性砂層を作製し、これらをシャーレに詰め、裏側から定点撮影した。気泡量の異なる、3つのサンプル(水分量 35.2[%], 乾燥, 湿潤)を観察した。ImageJ を用いて形成速度を概算し、気泡の褐色帯（鉄が沈殿した褐色領域）への影響を推定した。結果、先行研究より短時間・広範囲に褐色帯が形成され、気泡量に寄らず、速度の異なる 3Step で褐色帯が形成された。褐色帯が拡散で成長すると仮定した理論的褐色帯成長グラフと比較した。第 1, 2Step は理論と実験値の褐色帯幅が特定条件ではほぼ同じ結果となった。第 3Step は、 O_2 が拡散でシャーレ壁面～コンクリーション表面に達する時間と一致し、 O_2 流入が原因と推測した。**切断実験**：反応後 3 か月のサンプルを切断した。裏面褐色帯幅と切断面褐色帯幅を比べた結果、ほぼ同じ幅であった。人工コンクリーション内部には 2 重の褐色帯が形成され、天然コンクリーション内部の気泡の存在が示唆された。**X線解析**：反応開始 5 時間後と 5.7 日後のサンプルを解析した結果、コンクリーション表面で CaCO_3 が溶解した領域と、Fe が沈殿している領域が一致した。褐色帯の質量濃度 [wt%] は Fe が高く、Ca は低かったことから、 CaCO_3 が溶解して Fe に置き換わるモデル[1]と類似した元素移動が起きていると推察される。

撮影実験より、空隙は、鉄殻の形成速度を速める可能性が示唆された。切断実験より、天然鉄コンクリーションも内部に気泡を持つことが推察される。X線解析より、[1]が提唱する元素遷移が示唆された。

参考文献

- [1] Yoshida et al., (2018) Sci. Adv. 4:eaau0872. doi:10.1126/sciadv.aau0872
- [2] Sirono et al., (2021) Geochimica et Cosmochimica Acta 295, 194-206

弾丸アスペクト比がクレーター形状に与える影響

○ 鳶生有理¹, 黒澤耕介², 福原哲哉³, 木内真人¹, 長谷川直¹,

¹宇宙航空研究開発機構, ²千葉工業大学惑星探査研究センター, ³立教大学

はやぶさ2搭載の小型衝突装置 SCI は小惑星 Ryugu 表面に直径 14.5 m の人工クレーターを形成すると同時に、人工クレーターを中心とする同心円状の地形変化(副クレーター形成および岩塊露出)を形成した(Arakawa et al. 2020)。この地形変化は、主衝突体である半球状の銅ライナーと同時に放出される SCI 前方破片が形成したと推定されている。地上試験から SCI 前方破片の形状は長軸と短軸の比が約 3:1 の不規則形状であることがわかっている。副クレーターの大きさは、小惑星上でのクレータースケーリング則を構築する上で重要であるが、弾丸形状が重力支配域のクレーター形状に与える影響はよくわかっていない。そこで本研究では、アスペクト比を変化させた円柱弾丸が形成するクレーター形状と残留温度を調べるため、iSALE 数値実験および室内衝突実験を行った。

iSALE 数値計算は国立天文台 CfCA の共同利用計算機(計算サーバ, 解析サーバ)を用いて実施した。計算には iSALE shock physics code を用いた(Amsden et al., 1980; Collins et al., 2004; Wünnemann et al., 2006)。弾丸には高さ/直径比を 1-4 に変化させた円柱の Al および Cu を、標的には砂(fused quartz)に対応する Tillotson 状態方程式を用いた。衝突速度は 2.5 km/s とし、重力加速度は鉛直下向きに 9.8 m/s^2 とした。その結果、円柱の高さ/直径比が 3 以上の場合、過渡クレーターの深さ/直径比が増加することがわかった。

室内衝突実験は宇宙研のたて型二段式軽ガス銃を用いた。弾丸は円柱の高さ/直径比を 0.5-1.5 に変化させた Al および Cu(直径 2 mm, 高さ 1-3 mm)を用い、衝突速度 2.1-2.9 km/s で標的に衝突させた。標的試料には直径 45.0 cm, 高さ 16 cm の容器に充填した珪砂 5 号を用いた。衝突時の弾丸の姿勢は高速度カメラ(Shimadzu, HPV-X)と高輝度レーザー光源を用いたバックライト撮像によって確認した。衝突の様子は上部から熱赤外カメラ(Vision Sensing, BOL), 高速度熱カメラ(Telops, FAST M3K), 高速度カメラ(Phantom, v1612)で撮像した。真空度は 1-10 Pa とした。衝突後のクレーター形状はレーザープロファイラーを用いて計測し、クレーターの深さと直径を計測した。クレーターの半径は 69.4-41.1 mm, 深さは 32.3-54.9 mm であった。Cu 弾丸の場合、衝突直後の衝突点で 302°C 以上の高温領域が観察され、クレーター内壁の崩落による高温領域の埋没は観察されなかった。クレーターの深さ/直径比は、弾丸の直径/高さ比が 0.5-1.5 の範囲では Al で約 0.20, Cu で約 0.25 とほぼ一定であった。

謝辞: iSALE の開発者である G. Collins, K. Wünnemann, B. Ivanov, J. Melosh, D. Elbeshausen の各氏に感謝致します。iSALE の計算出力の解析には pySALEPlot を利用しました。開発者の Tom Davison 氏に感謝致します。数値計算と数値解析は国立天文台 CfCA の計算サーバと解析サーバで、衝突実験は宇宙科学研究所の超高速度衝突施設で行われました。

月極域で検出された揮発性成分の挙動推定

Behavior of the detected volatile materials at the lunar polar region

○大竹真紀子（会津大），田中智（宇宙研），仲内悠祐（宇宙研），
小野寺圭祐（総研大/宇宙研），長岡央（理研）

我々はこれまで月周回衛星「かぐや」に搭載されたスペクトルプロファイラ（SP）による分光観測データを用いて月極域の水氷の探索を行い、複数の領域において明確な水および他の揮発性成分の吸収を同定・報告してきた（SPは可視から近赤外波長域を観測し、高いS/Nを有しており、水氷の探索に適した観測データである）。今回は、同定した水や他の揮発性成分に起因する吸収を持つ観測データの時間的、空間的な信号強度変化（ダストや揮発性成分の量に対応する）に着目して解析を行い、これに基づいて揮発性成分の挙動について考察した。また、観測された信号強度をこれまでの他の観測結果（これまでに報告されてきた赤道付近での dust levitation の信号強度など）と比較することで、今回の観測信号の起源についても推定する。

今回、特に水の吸収が明確に、かつ多数連続的に同定された領域のうち南極2箇所注目し、永久影領域とその外側での各揮発性成分量の変化や信号検出の期間について調査した。結果、永久影以外の領域上空でも揮発性成分が検出された。これら観測のタイミングでは該当の観測領域（月面）に太陽光は入射しておらず、短期的には低温条件である（夜の時間帯である）と推定され、揮発性成分が検出されることと矛盾しない。一方、基存する揮発性成分の種類や量は場所により変化しており、数km～数10kmのスケールで不均一であること、数日単位で信号強度が大きく変化することから、極域において揮発性成分は短い時間（数日程度）の間に（昇華・凝縮に伴って）移動している可能性があると考えられる。観測信号の分布と月面日照条件（月面温度）との関係については本学会の西谷他で報告する。また、これまでの levitation や天体衝突に伴って形成されたダスト観測結果と比較すると我々が検出した信号の強度は数桁程度明るい、浮遊する粒子サイズがある程度大きい（100 nm サイズ）と仮定すれば、極端に高いダスト密度を仮定することなく信号強度の差を説明できることを確認した。

自転天体に対する天体衝突における角運動量輸送

○ 黒崎健二¹, 犬塚修一郎¹

¹ 名古屋大学

太陽系内に存在する惑星はいずれも自転という固有の角運動量を持っている。地球型惑星の角運動量は惑星形成期の巨大衝突に伴って天体にもたらされたと考えられている。巨大ガス惑星の木星や土星は、ガス降着に伴う角運動量によって自転角運動量を獲得していると他方、巨大氷惑星を見ると自転軸の傾斜角度に大きく違いがみられる。特に、天王星は自転軸傾斜角が公転面に対して 98° と大きく傾いていることが知られている。この天体は近年では天体衝突に伴って形成される円盤から衛星形成も示唆されており、天体衝突の条件を制約することは非常に重要となる。

本研究では、水素大気を20%持たせた自転する天体に対して、氷成分でできた固体天体を衝突させる計算をSmoothed Particle Hydrodynamics法によって行った。自転軸が垂直な場合について、自転軸と同じ方向および垂直な方向の二種類の方向に対しての衝突パラメータを考慮した。天体が衝突したあと、前述の二方向の角運動量から衝突後の自転軸傾斜角の変動と、大気流出量を計算した。計算の結果、衝突に伴う角運動量の輸送量は、ターゲット天体とインパクト天体の衝突位置による衝突パラメータに依存し、方向の依存性は大きくないことがわかった。これは、衝突に伴って発生する角運動量輸送自体は、回転していない天体の場合と同様であることになる。最終的に天体が保持する角運動量は、衝突に伴って輸送される角運動量と衝突前にターゲットが保持していた角運動量の和によって表すことができることもわかった。さらに、衝突に伴う角運動量流出量は、衝突に伴う大気流出量の結果と合わせることで、半解析的に予測することもできることがわかった。本研究の成果は、斜め衝突によって引き起こされる大気流出や角運動量輸送を理解する上で重要な結果を与えることが期待される。

月極域探査(LUPEX)–アウトプット創出に向けた活動–

Activity for maximizing output from Lunar Polar Exploration mission (LUPEX)

○大竹真紀子¹, 麻生大², 石原吉明², 井上博夏², 榎戸輝揚³, 鹿山雅裕⁴,
唐牛讓², 熊本篤志⁵, 佐伯和人⁶, 齋藤義文², 田中智², 橋爪光⁷, 晴山慎⁸,
星野健², 水野浩靖², 宮本英昭⁴, 諸田智克⁴, 山中千博⁶

1: 会津大学, 2: JAXA, 3: 理化学研究所, 4: 東京大学, 5: 東北大学,
6: 大阪大学, 7: 茨城大学, 8: 聖マリアンナ医科大学

これまでに行われた月探査による複数の観測機器データの解析から、月極域(85度以南, 以北の領域)に水氷が存在する可能性が示唆されている。月極域に水氷が十分な量かつ掘削可能な深さ範囲内に存在していれば、それらを月以遠の探査機用の燃料作成のための資源として使える可能性がある。宇宙航空研究開発機構(JAXA)とインド宇宙研究機関とは、月極域に資源として利用可能な量・質の水が存在するかどうか調査するための探査を2020年代に協働で行うための検討を行なっている。これら活動を受けてJAXAは月極域探査機(LUPEX)プリプロジェクトチームを設立し、これまでにMission Requirement Reviewを終了し、国内で開発する観測機器の選定を終えている。

LUPEX ミッションではローバに搭載する複数の観測機器を用い、月表層から地下1m程度の深さまでの間に存在すると推定される水氷を走行しながら測定、あるいは最大地下1.5m程度までの掘削と試料採取により測定することを予定している。それら複数機器のデータを統合し、効率的な観測運用検討(例えば掘削地点の選定)に反映する目的や、運用の結果得られる観測データを基に作成するアウトプット(複数機器のデータを統合して作成する探査領域における水の3Dマップなど)を早期に作成し、同ミッションにより得られる成果を最大にする目的で、アウトプット創出チーム(Output Data Creation Team; ODCT)の設立を予定している。現在、同チーム設立の準備段階として、観測機器開発チームのリード研究者らと議論を開始しており、これまでにLUPEXミッションの統合解析による成果を含めたプロダクトの種類や処理内容の定義、観測運用のための検討(掘削地点決定までの解析フロー検討、ローバ・観測機器間の観測データ参照要求の整理)、観測機器評価に用いる月シミュラントの作成に向けた議論などを行なった。発表では、これら検討の成果について紹介する。

太陽系形成を通しての地球への水輸送シミュレーション

○荻原 正博, 玄田 英典, 関根 康人
東京工業大学 地球生命研究所

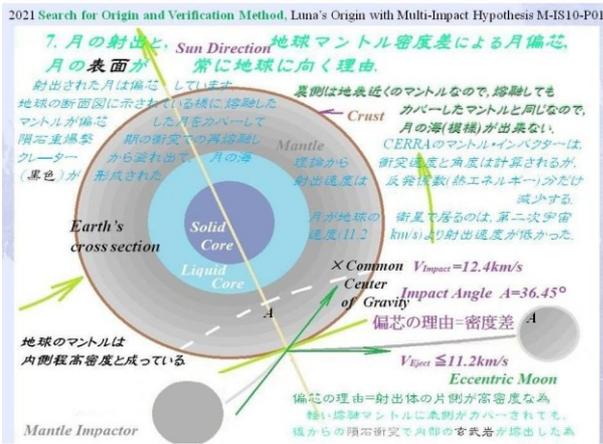
地球への水の輸送がいつどの程度生じたかを明らかにすることは重要な課題である。これまでの研究では、原始惑星系円盤ガス散逸後に小惑星帯付近に残った含水微惑星が地球へ衝突すること（後期集積）によって、地球へ水が輸送されたという考えが主に検討されてきた。即ち、従来の水輸送シミュレーションでは、木星などの巨大惑星は既に形成が完了しており、また微惑星は原始惑星系円盤ガスの影響を受けないで輸送されるという描像を考えていた。一方で最近の太陽系形成シミュレーションによると、巨大惑星の成長や軌道移動が小惑星帯の微惑星分布に影響を及ぼすことや、その影響は微惑星が受ける円盤ガス抵抗の強さに依存することが指摘されている。

本研究では、円盤中で地球型惑星及び巨大惑星が成長する段階から水輸送シミュレーションを開始し、更に巨大惑星の軌道移動段階や円盤散逸段階までを追っている。このようなシミュレーションにより、各段階での地球への水輸送の様子を明らかにすることが可能である。これまでのシミュレーションの結果、地球の成長段階においても地球軌道への含水微惑星の輸送が生じている可能性があることがわかった。

**玄武岩の海が月の表側にだけ有り裏側に無い理由、
月の表側が常に地球に面するメカニズム、
そして月が地球マントルだけから作られた本当の理由。**

*Reason why Basalt Sea is only on Front-side of Moon and not on Back-side.
Mechanism by which Front-side of Moon always faces Earth,
and Real Reason why Moon was made only from Earth's Mantle.*

○種子 彰 Taneko Akira¹, ¹SEED SCIENCE Labo.



2021 Search for Origin and Verification Method, Luna's Origin with Multi-Impact Hypothesis M-IS10-P01

8. 月の起源論:成績表 Origin of Moon with Abduction by Evolution. Origin of Plate Tectonics, Ocean Floor.

TABLE 3. A "Report Card". The Author's Opinion of How Well Five Models of Lunar Origin Satisfy Seven Constraints. Wood (1986)に 倉本主氏 加筆 倉本主氏の図に種子 彰加筆.

Hypothesis Model → Evolution result ↓ Items.	Intact Capture	Coaccretion	Earth Fission	Collisional Ejection	Disintegrative 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
Volatile element depletion	C	C	B	B	C	A, $Rm \approx 60 \times Re$ cf. $Re = 6400 \text{ km}$
Fe depletion	C	D	A	I	B	A, Collision and ejection, melted
Oxygen isotopes (Similarity of mantle trace element patterns)	B	B	A	B	B	A, Impactor is only Mantle.
Magnesium ocean Liquid Collision	C	(C)	(A)	(C)	(C)	A, Moon Mantle is Earth's one.
Physical plausibility	D	C	A	A	B	(A, Earth's Mantle has been ejected into Moon)
Inevitable Mechanism of Collision	F	F	F	F	F	A: Perfection Good!
Moon always faces to Earth	F	F	F	F	F	A, Multi-Impact Hypothesis
Origin of the deep ocean floor	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 Eccentric Moment of Inertia
Inclination of the Earth's rotation axis	F	F	F	F	F	A, Earth deficiency and too stay in a huge Collision
Sudden change in moving direction	F	F	F	F	F	A, High latitude collision, Formation of This Sea, initiation of Plate Movement

*For readers unfamiliar with the U.S. educational system: A is the best grade; F (failing) is the worst; I (incomplete) means all assignments have not been completed and a grade cannot yet be awarded; F: Model is limit, Impossible.

左側の説は月形成の提案論中、右端は太陽系の起源を探究する仮説、少しは固体地球への衝突、創発的理論によるマルチインパクト仮説は月の起源から海洋、Plate Tectonics, 駆動力の起源を検証

玄武岩の海が月の表側にだけ有り裏側に無い理由と月の表側が常に地球に面するメカニズムは、**「マルチインパクト仮説」**から進化の全ての結果を用いて**アブダクション**で検証が可能である。更に**地球海洋底とプレートテクトニクスの起源まで説明できます。** cf. 8. 月の起源論:成績表, A. Taneko.

私達は月が常に地球に表側を向けている事を知っています。しかし、何故常に同じ表側を地球に向けているかは説明できません。少し賢い人は月が偏芯しているからと云ったが、**何故月が偏芯したかを示せず結果論でしか無かった。** ⇒GIHの受け売りで、形成メカニズムを示せなかった。

「マルチインパクト仮説」では、月の形成モデルとして、セレス位置に形成された原始惑星 **CERRA** が、その外周位置に形成された巨大質量惑星 **JUPITER** の摂動により、角運動量を吸い取られて軌道が偏平化した。具体的には木星近点側に **CERRA** の遠点が引き寄せられて、長半径が一定(運動エネルギーが保存)のまま偏平化し、太陽と木星との引力が釣り合う地点まで進化します。

◎この時点で **CERRA** の強度より張力が優れば潮汐断裂し、**トレンマン mantle 断裂片**となる。⇒**MIH**.

逆に、強度が優れば断裂せず、地球軌道との交叉位置で衝突すれば「必然のジャイアント・インパクト(GI)仮説」となる。必然 **GIH** の衝突では、相対**衝突速度 $V=12.4 \text{ km/s}$ と角度 $\Phi=36.45 \text{ deg}$ が両者で一緒**なので、速度も角度も大き過ぎて地球が破碎されてしまう。cf. **GIH:R** $\approx 3 \times Re$, $Re \approx 6400 \text{ km}$. **MIH** の**衝突速度**は、**第二次宇宙速度 $V_{esc}=11.2 \text{ km/sec}$ より大きい**が、**反発係数 $\ll 1$ を考慮し位置エネルギーを計算すると $MIH:R \approx 60 \times Re$ となり、現状の月軌道位置とも略一致する。**

射出された月は、断面図に示す様に熔融したマントルが偏芯した月をカバーする。隕石重爆撃期の衝突で再熔融しクレーターから溢れ出て、**海(黒色)が形成された。**裏側は同じ材質で同じ色。

クレーター形状の非対称性からの

小惑星リュウグウの過去の自転状態の推定

○山田理央奈¹, 渡邊誠一郎¹, 諸田 智克², 平田 成³, 平田 直之⁴, 畠生 有理⁵, 野口里奈⁶, 本田 理恵⁷, 亀田 真吾⁸, 山田 学⁹, 坂谷 尚哉⁸, 巽 瑛理¹⁰, 神山 徹¹¹, 横田 康弘^{5,7}, 長 勇一郎², 鈴木 秀彦¹², 早川 雅彦⁵, 松岡 萌⁵, 本田 親寿³, 吉岡 和夫², 澤田 弘崇⁵, 小川 和律⁵, 杉田 精司²

¹名古屋大学, ²東京大学, ³会津大学, ⁴神戸大学, ⁵宇宙航空研究開発機構, ⁶新潟大学, ⁷高知大学, ⁸立教大学, ⁹千葉工業大学, ¹⁰ラ・グラーナ大学, ¹¹産業技術総合研究所, ¹²明治大学

小惑星リュウグウのコマ型形状は過去の高速自転によると推定されており, 表面には 86 個のクレーターの存在が報告されている. それらクレーターは, YORP 効果などの自転速度変化により, 過去の高速自転から現在の低速自転に至るまでさまざまな自転速度下で形成されたはずである. 室内実験によると, 衝突角によらず傾斜角が 20° を越えると傾斜方向にクレーターの非対称性が生じることが知られている. また, 赤道から $\pm 30^\circ$ 以内にある比較的大きなクレーターは, リムの西側が高く, 東側が低くなる東西非対称のクレーターが見られ, 高速自転時にコリオリ力がはたらくためと推定されている. よって, リュウグウのクレーターの形状を比較検討することにより, 各クレーター形成された当時の自転状態を制約できると考えた.

クレーター年代学的に直径の大きいクレーターほど形成時期が古い傾向にあること, またコリオリ力などの自転状態の影響を受けやすいことから, リュウグウ表面にある直径 75m 以上のクレーターを解析することとした. 高緯度でありデータ解像度が低いものと他クレーターの内部にあるもの計 3 個を除外した 13 個について, クレーター形状の東西・南北の非対称性を調べた.

その結果, 周辺地形の補正をした後に, リムの赤道側が低いものが 8 個(61.5%), リムの西側が高いものが 5 個(38.5%)であった. また, 東西リム平均高さが, 南北リム平均高さよりも有意に高いクレーターは 13 個中 11 個と大半を占めた(図 1). これらのうち, 同心円状の深まりが見られないものは 4 個であった. ただし, 赤道リッジや隣接するクレーターの影響を受けているものもあり, 慎重に検討する必要がある. 発表では, これら特徴から推定される過去の自転状態について議論する.

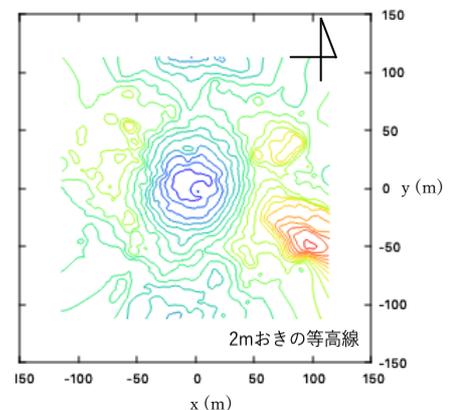


図1 No.9 (-17.1° N, 16.9° E)の等高線図

Discovery and characterization of transiting planets orbiting young field and cluster stars

○ Jerome de Leon¹, J. Livingston¹, M. Mori¹, A. Fukui¹, I. Crossfield⁴, R. Wittenmyer⁵, J. Jenkins⁶, G. Zhou⁵, N. Narita^{1,2,3}, M. Tamura^{1,2,3}, and TESS architects⁷

¹The University of Tokyo, ²NAOJ, ³Astrobiology Center, ⁴Kansas University, University of ⁵Southern Queensland, ⁶Instituto de Astrofísica de Canarias, ⁷MIT

Studying young exoplanets is important because they inhabit a very important part of the exoplanet evolutionary timescale. We currently do not know how different planets form and evolve over time because the majority (>99%) of discovered planets orbit old (>1 billion year old) stars, while only very few are known to orbit young (<0.1 billion year old) stars (See Fig. 1). Discovery and characterization of young exoplanets therefore is mandatory in order to fill a big gap in our understanding in the earliest stages of planet formation and evolution. Currently, less than 10 young (<100 million year old) stars are known to host transiting planets. However, finding and characterizing transiting exoplanets orbiting young stars is notoriously difficult due to the intrinsic high stellar activity in young stars that induces photometric and radial velocity variations orders of magnitude larger than the planet signal. This problem is compounded by the fact that most of the young stars usually reside in star clusters or moving groups where the false positive rate is high due to the crowded field. Despite the small sample of known young planets however, there is tentative evidence that the planet's size depends on the host star's age (e.g. Mann et al. 2016, Berger et al. 2020, David et al. 2020, Sandoval et al. 2021). To confidently corroborate or refute such trends and to have a complete understanding on how exoplanets form and evolve from birth to maturity, the community needs a statistically significant sample of transiting planets orbiting bright young stars. We present our work focused on accelerating young planet discoveries through a dedicated search for new transiting planets orbiting young stars observed by the Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) space telescope.

Using a suite of follow-up observations, our preliminary work resulted in the discovery and validation of a Neptune-sized exoplanet orbiting a young star named TOI 179. The brightness of the host star would facilitate precise measurements of the fundamental parameters of the host stars and planets which in turn lead to better models to constrain their bulk density and atmospheric composition. We also present a new set of follow-up observations of a known young system named K2-95 in a star cluster observed by the Kepler space telescope in order to refine its planetary properties which is valuable for future studies.

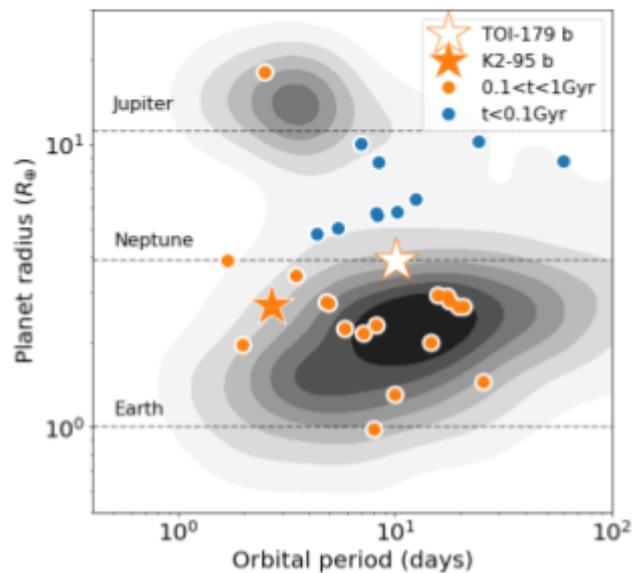


Fig. 1. New and refined young planets in this study (star) in the context of other known young (<1 Gyr) planets (circle) and old field stars (contours).

アポロ短周期地震計データの再解析による未検出月震イベントの探索

○小野寺圭祐^{1,2,3}, 今川裕喜^{3,4}, 田中智³, 川村太一²

¹総合研究大学院大学, ²パリ地球物理研究所/パリ大学, ³JAXA 宇宙科学研究所, ⁴東京大学大学院

1970年代に行われたアポロ計画により、月でも地震が発生していることが確認された。地球でも実証されているように、地震はその天体の内部構造や天体内部の活動度を見積もる上で有益な情報を我々に与えてくれる。月に関しては、アポロの月震観測で検出された12,000以上のイベントを元に内部構造の推定が為されてきた。更には、近年火星でも地震データが得られるようになったことで、異なる天体間での地震活動度の違いの評価も可能になってきた(図1)。本研究では、特に月の地震活動度の指標となる浅発月震に焦点を当て、解析を行っている。

浅発月震は表面～深さ300kmで発生していると考えられており、High Frequency Teleseismic events (HFT)とも呼ばれる。特徴としては、深発月震や衝突月震と比べて高周波側にエネルギーが励起される点である(図2)。深発月震や衝突月震が外的な要因(地球・月・太陽間の潮汐作用や隕石衝突)であるのに対し、浅発月震は断層などの内的な活動を反映している[2]と考えられていることから月の地震活動度の評価基準として用いられている[1]。

以上のように、現在の月の活動度を評価する上で浅発月震は重要な現象であると言える。しかし、カタログ化されているイベント数は28例と深発月震(>7000例)や衝突月震(>1700例)と比べて圧倒的に統計量が少なく、震源メカニズムなどについて謎が多いのも事実である。

Nakamura[3]によれば、アポロの月震カタログは、主に長周期地震計(感度ピーク:0.45 Hz)で取得されたデータに基づいて制作されており、短周期計(感度ピーク:7 Hz)の観測については考慮されていない。高周波側にエネルギーピークを持つ浅発月震は、長周期計では観測されていなくても、短周期計では検出されている可能性が大いにある。本研究では、アポロ短周期地震計のデータを再解析し、新しい浅発月震の検出を行い、月における地震活動度を再評価することを目的としている。本発表では、現在までにカタログ化されている浅発月震についてレビューを行うと共に新しいイベントの検出手法の検討状況について報告する。

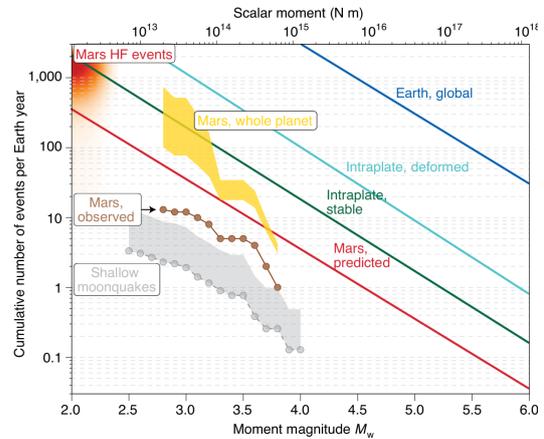


図1. 一地球年あたりの地球・月・火星間での地震エネルギーの累積個数分布の比較(図はBanerdt et al. [1]より引用)。

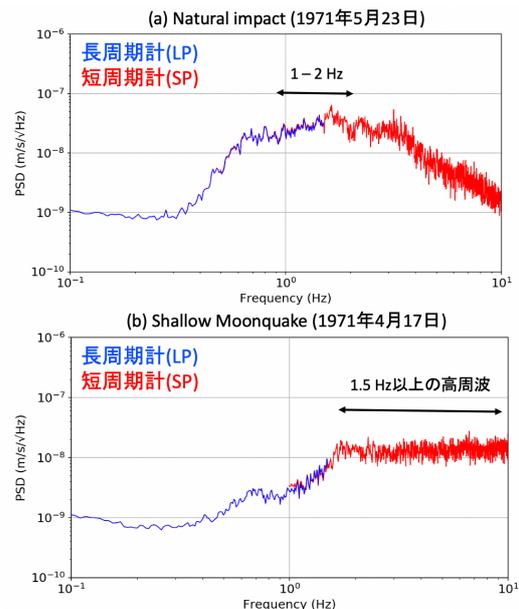


図2. アポロ14号の長周期および短周期地震計で観測された月震のパワースペクトル密度の比較。(a)は隕石衝突由来の月震、(b)は浅発月震に対応している。ここでは鉛直成分のみを表示している。

参考文献

- [1]Banerdt et al. (2020), Nature Geosci., 13, 183-189.
- [2]Watters et al. (2019), Nature Geosci., 12 (6), 411.
- [3]Nakamura (2021.6), pers. comm.

行列表示を用いた有機物反応のモンテカルロ計算：

星間粒子表面で糖合成が起こる条件の制約に向けて

Monte Carlo calculation of organic synthesis by the matrix-based bond model:

Toward the constraint on sugar synthesis conditions on interstellar particles

○竹原 仁¹、庄司 大悟²、井田 茂³

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

有機物は生命にとって必要不可欠な物質であり、地球生命の誕生において複雑有機物の生成は重要なイベントであったと考えられている。有機物の合成実験はこれまでに行われてきているが、その反応経路ははっきりとわかっていない。例えば、Meinertらは宇宙空間の氷ダストを模擬してそれに紫外線を当てることによる複雑有機物の生成実験を行い、多数の糖が生成することを確認した(Meinert et al., 2016)。彼女らはそれらの糖の生成はホルモース反応によるものであると予想したが、あくまでもそれは推測の域を出ていない。この実験では 10eV の紫外線を照射した後に、試料を常圧の室温環境に戻してから生成物の分析をしており、どのタイミングで糖が生成したのか明らかになっていない。すなわち具体的にどのような環境が糖の生成に適しているのかも定かではない。そこで本研究では、紫外線照射による糖の合成をコンピューターシミュレーションにより再現し、糖の生成量が紫外線のエネルギーや温度などの環境にどのように依存するかを調べる。それと同時にどのような反応経路で糖が生成するのかについての解明を試みる。

本研究のシミュレーションには、化学反応を行列の足し算で表現する計算モデル(Modified Dugundji-Ugi model)を用いた。初期物質としてホルムアルデヒドと水を用意し、主に2つのパラメータを変えながら計算を行った。1つ目のパラメータは、照射する紫外線のエネルギーである。本研究では、系の温度を紫外線エネルギーに対応する温度まで上げることで紫外線照射を模擬することにした。そして2つ目のパラメータは紫外線照射後の系の温度である。これらのパラメータが糖の生成量にどのような影響を与えるかを調べた。結果として、様々な条件下において紫外線照射を終えた後のタイミングで糖の生成量が一時的に増加すること、またこれまで考えられてきた糖の生成システムとは異なるシステムで糖が生成する可能性があることがわかった。我々はこの結果について詳しく分析を行った。

小天体サンプルリターンミッションの候補天体検討

○ 嶋生有理¹, 脇田茂^{2,3}, 浦川聖太郎⁴, 末次竜⁵, 洪鵬⁶, 臼井文彦¹,

松岡萌¹, 坂谷尚哉⁷, 田中智¹, 長谷川直¹, 黒田大介⁸, 佐伯孝尚¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²マサチューセッツ工科大学, ³パデュー大学, ⁴日本スペースガード協会,

⁵大島商船高等専門学校, ⁶千葉工業大学惑星探査研究センター, ⁷立教大学, ⁸京都大学

小惑星探査機はやぶさ2は、2020年12月6日にC型小惑星リュウグウの試料を地球に帰還させた。帰還試料は地球飛来および地球環境による変成を受けていないため、地球上で回収される隕石やIDPでは検出が困難な脆弱物質、揮発性物質、有機物等を保持していると期待されており、太陽系形成過程の初期状態を理解する上で重要である。我々は、はやぶさ2ヘリテージを生かした2030年代の小天体サンプルリターンを検討するため、次世代サンプルリターン勉強会を開催し、探査候補天体を検討してきた。候補天体として、E型小惑星、D型小惑星、活動的小惑星、彗星核が有望であると考えている。小惑星帯内側に多く存在するE型小惑星はエンスタタイトに富む隕石と関連すると考えられており、地球型惑星の形成過程を理解する上で重要である。木星トロヤ群に多く存在するD型小惑星は、タギシュレイク隕石やIDPと関連すると考えられており、揮発性物質や有機物に富むと考えられている。活動的小惑星は小惑星-彗星遷移天体であり、活動性の起源の解明は小天体形成過程を理解する上で重要である。彗星は、岩石質ダスト、氷、有機物で構成され、熱変成を経験していない物質や前太陽系物質を多く含むと期待されている。我々は、低推力 ($dV < 2 \text{ km/s}$) の探査機で2030~2040年代にサンプルリターンが実現可能な天体を調査するため、JPLの小天体データベースから近日点が $1.0 \pm 0.1 \text{ au}$ かつ傾斜角が10度以下の小天体を抽出し、小惑星スペクトルタイプ[e.g. 1]や活動性[2]などの特徴を調べた。抽出した天体の中から、理学的価値が高いと考えられる上記4天体タイプについて、軌道成立性を検討した。その結果、2030年代前半に打上げ、2040年代に帰還が可能な7天体を選定した。これらは、打上げから帰還まで8~15年である直径4 km以下の地球近傍天体であり、いずれも目標天体かつバックアップ天体として有望だと考えている。本発表では、勉強会の概要についても紹介する。

[1] Binzel, R.P., et al., 2019, *Icarus* **324** 41-76. [2] Jewitt, D. et al., 2015, in *Asteroids IV*, 221 (Tucson: University of Arizona Press).

氷微惑星上の高速衝突により発生する衝突残留熱の定量的評価

○笹井遥, 荒川政彦, 保井みなみ, 白井慶
神戸大学大学院 理学研究科

■ **背景**：近年の惑星探査や観測により、彗星核は低密度・多孔質であることが明らかになってきた。このような多孔質氷天体に小天体が高速で衝突すると、衝撃圧力の急速な減衰に伴う衝撃エネルギーの散逸により、クレーター孔周辺に衝突残留熱が蓄積される。これにより、揮発性物質の蒸発やアモルファス氷の結晶化、化学反応が起き天体表層の物質分布や物性が変化する可能性がある。これまでに、彗星のクレーター周囲に蓄積された衝突残留熱を室内実験に基づいて推定した例はない。本研究では多孔質氷の衝突残留温度のその場観測結果を、熱伝導シミュレーションを用いて彗星表面へ応用した。

■ 研究手法

室内実験：二段式軽ガス銃(神戸大)を用いて、空隙率 $\phi=0.4\sim0.6$ の多孔質氷標的に対する衝突実験を行い、衝突後5分間、標的内部に埋め込んだ熱電対により温度測定を行った。弾丸は直径2mmのアルミ球、衝突速度は $v=3.0\sim5.8$ km/sである。

計算：室内実験より求めた弾丸運動エネルギーから熱へのエネルギー分配率を用いて、彗星クレーター(半径 $R=10$ m~1000 m)周囲の衝突残留温度を計算した。計算はクレーター内壁の熔融層(273K)から天体内部への熱伝導を考え、有限要素法により2次元熱拡散方程式を解いた。初期表面温度は $T_s=30$ K(Arrokoth 表面)~90 K, 熔融層の初期温度は273K。

■ **結果・考察**：室内実験におけるエネルギー分配率の最小値は、 $v=4.2$ km/s のとき $\phi=0.4, 0.5, 0.6$ でそれぞれ0.12, 0.40, 0.70と推定された。彗星クレーターの衝突残留温度の計算結果例($\phi=0.6, R=10$ m, $T_s=50$ K)を図1に示す。横軸はクレーター壁からの規格化距離、左縦軸は最高温度 T_{\max} (K)(青)を表す。右縦軸は熱拡散時間 τ (s)で規格化した、最高温度到達時刻 t_{\max} (s) (赤・太線)や半値幅(最大温度上昇

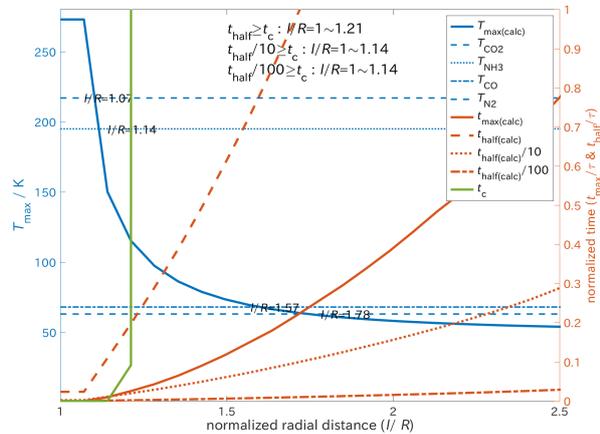


図1: $\phi=0.6, R=10$ m, $T_s=50$ K の計算結果

の半分以上の温度上昇が続いた時間) t_{half} (s) (赤・破線)などを示す。揮発性物質が脱ガスする温度の最大値として三重点温度 $T_{\{CO_2, NH_3, CO, N_2\}}$ を考え、脱ガスする($T_{\max} \geq T_{\{CO_2, NH_3, CO, N_2\}}$)領域を求めた。図1より N_2 は $l/R=1\sim1.78$ で脱ガスする。また T_{\max} におけるアモルファス氷の結晶化時間を t_c (Kouchi et al., 1994)として、結晶化する($t_c \ll t_{\text{half}}$)領域を求めた。図1ではその範囲は $l/R=1\sim1.14$ となった。結晶化領域は高温の T_{\max} を経験したクレーター壁付近に限られることから、衝突による結晶化は局所的であり、彗星表面の大部分ではアモルファス氷が保たれることがわかった。

高速度衝突による微小クレーターの形状

○野村啓太¹, 中村昭子¹, 白井慶¹, 長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙科学研究所

探査機はやぶさによって持ち帰られた小惑星イトカワのサンプルには、微小クレーターの存在が確認されている。これまでクレーター形状について、太陽系小天体を模擬する多孔質ターゲットへの衝突実験が行われ、空隙率や標的強度、弾丸と標的の密度比、衝突速度が与える影響について調べられてきた。しかし、10 km/s を超えるような衝突速度でつくられるクレーターの形状に関する研究はあまり行われていない。クレーター形状からインパクト速度の情報を読みとれるのであれば、探査によって持ち帰られる小天体サンプル上のマイクロクレーターの解析からインパクト情報が得られると期待される。本研究では、衝突速度がクレーター形状に与える影響を調べることを目的として、実験を行った。

我々の以前の研究では、玄武岩に弾丸を斜め衝突させ放出されるエジェクタを二次標的に捉えることで、衝突速度の約2倍となる14 km/sのエジェクタ破片のサイズ-速度、放出角度の関係を得た(野村他, 惑星科学会2020年秋季講演会)。本研究では、既知の速度および角度で放出されるエジェクタ破片を利用し、これらの高速な破片が放出される方向に多孔質天体を模擬した二次標的を配置することで、微小インパクトの小天体表面への高速度衝突を再現した。直径3 mmのアルミニウム球を衝突速度7 km/sで玄武岩標的に対し入射角45°で衝突させ、石膏(空隙率55%)にフォボスシミュラント(UTPS-TB:空隙率45%)、カンラン石を表面に埋め込んだものを二次標的として使用した。

実験後に二次標的を回収し、表面凹凸の深さプロファイルや光学顕微鏡画像をもとに二次標的上のクレーター形状を調べた。先行研究で行われた同程度の空隙を持つ石膏標的への衝突実験より、クレーターの深さ直径比(d/D)が示されている(約2 km/s: $d/D \sim 0.65$ ^[1], 約6 km/s: $d/D \sim 1.0$ ^[2])。本研究の10 km/sを超えるような高速度衝突においては石膏標的で $d/D \sim 1.9$ となり、多孔質標的においても密な標的の場合^[3]と同様に、衝突速度の増加に伴い直径に対し深さが大きいクレーター痕を残すことが確認できた。また約10 km/sの衝突でUTPS-TB標的($d/D \sim 0.95$)、ガラス標的($d/D \sim 0.5$ ^[3])となることから空隙率が高い場合、より深いクレーターが形成される傾向が見られた。

謝辞：東京大学の宮本英昭氏と新原隆史氏にはUTPS-TBの提供をしていただきました。

[1] Yasui *et al.* (2012), *Icarus* 221, 646-657. [2] Okamoto *et al.* (2017), *Icarus* 292, 234-244

[3] Vedder and Mandeville (1974), *J. Geophys. Res.* 79, 3247-3256.

はやぶさ 2 画像データ検索システム JADE の進捗

○菊地紘¹, 山本光生¹, 横田康弘¹, 佐藤広幸¹, 大嶽久志¹, 本田理恵², 杉田精司³, 諸田智克³, 逸見良道³, 宮本英昭³, 山本幸生¹, 平田成⁴, 平田直之⁵, 佐々木晶⁶, 小松吾郎⁷, 出村裕英⁴, 本田親寿⁴, 山田学⁸, 亀田真吾⁹, 巽瑛理¹⁰, 村上真也¹, 長勇一郎³, 吉川和夫³, 澤田弘崇¹, 坂谷尚哉⁹, 早川雅彦, 松岡萌¹, 神山徹¹¹, 鈴木秀彦¹², 小川和律¹
1JAXA, 2高知大学, 3東京大学, 4会津大学, 5神戸大学, 6大阪大学, 7ダヌンツィオ大学, 8千葉工業大学, 9立教大学, 10カナリア天文物理学研究所, 11産業技術総合研究所, 12明治大学

近年, 小惑星探査機「はやぶさ」や「はやぶさ 2」, 「オサイリス・レックス」の成功により, 小天体に関する新しい知見を獲得している. NASA や DLR, JAXA などの機関で, 様々な小天体の探査が立案されている. これらの利用を最大化するには, 画像データとそのメタデータ, 撮像位置などの個々の情報がリンクされ, それらをユーザの目的の応じて取り出せるシステムの開発が必要である. 今後世界的に小天体の探査の需要は一層高まるため, 他の天体にも応用可能で, かつ利用しやすい検索システムが望まれる.

小天体のデータを閲覧・検索できるシステムはいくつか存在している. 例えば USGS が公開している PILOT [1]は, ある天体における 2 次元地図上で領域を指定することで, その領域に画像のフットプリントが含まれる画像を検索でき, メタデータと共にサムネイル画像が表示され, データを取得できる. 小天体では 3 次元地理空間上でどこを撮像した画像データなのかを理解することも重要となる. 3D の地図上でデータを検索できるシステムとしては Small Body Mapping Tool [2]があり, これを利用した研究は数多い.

既存の小天体のデータ検索システムとして 2D と 3D を同一システム内で地図表示することは, 研究活動を促進する上で極めて有用であると考えられるが, 既存の小天体の画像データを対象とした検索システムは, 2D または 3D のどちらか一方で地図表示されたものに限られている. そのため本研究では最終的には小天体の 2D と 3D を, 同一システム内での切り替えが可能な地図表示を行うウェブシステムを開発することを目指している.

本研究では小惑星リュウグウを扱うこととする. はやぶさ 2 探査機によって, 小惑星リュウグウの膨大な画像データを取得することに成功し, これまでの探査データの中でも質, 量とも最高水準である. さらにリュウグウの形は比較的球形に近いので, 2D と 3D の地図の切り替えの有用性を確認する上では理想的な天体である. またリュウグウのデータは整理されている最中であり, 今後最も多く利用されるため, はやぶさ 2 のデータを用いて検討しておくことは有用である. 本発表では, 現状のシステムの開発状況と使い方について報告する.

[1] USGS PILOT <<https://pilot.wr.usgs.gov>> [2] Ernst, C., Barnouin, O., Daly, R., Team, S. B. M. T., 2018. The Small Body Mapping Tool (SBMT) for Accessing, Visualizing, and Analyzing Spacecraft Data in Three Dimensions. Lunar and Planetary Science Conference, Vol. 49.

温度依存性を考慮した 月・火星地下誘電率の実験的検討

○小林 真輝人¹, 新原 隆史², 宮本 英昭²

¹東大・理 ²東大・工

電磁波反射法 (e.g., 地中レーダーやレーダーサウンダー) は、固体天体地下浅部の構造や物質分布などを知る上で重要な観測手法の一つである。この手法により、たとえば月では Kaguya 搭載の LRS や Chang'E 搭載の LPR が地下の層序を決定し [e.g., 1,2]、火星では Mars Express 搭載の MARSIS や MRO 搭載の SHARAD が地下浅部での水や水氷の存在を推定している [e.g., 3,4]。また、Mars 2020 は RIMFAX という地中レーダーを搭載し、地下構造や水分子を検出しようとしていたり、LUPEX も類似した地中レーダーでレゴリス中の水氷の検出を目指している。こうした観測により、今後月や火星の地下浅部の理解は飛躍的に進むと考えられる。

電磁波反射法は、電磁波が物質中を伝播し物質境界面において反射する特性を利用する。電磁波の伝播速度や反射強度は物質の電気特性に依存し、岩石や鉱物などについては特に誘電率が重要となる。そのため、岩石や鉱物が持つ誘電率の正確な決定が、地下構造の正確な把握や地下の水・水氷の存在の解明につながると言える。しかし誘電率は、印加する電磁波の周波数や物質の温度、組成、などの複合的な要因で決定するため[5]、地球環境下で測定された典型的な誘電率値をそのまま解析に用いることはできない。そのため電磁波反射法で用いる周波数帯での月や火星のレゴリスやダスト、岩石の組成を持つ試料の誘電率を、適切な環境下で決定することが電磁波反射法の解析に重要となる。

発表者らはこれまでに低温での誘電率測定システムを開発し、主に地中レーダーで用いられる周波数 (UHF-SHF 帯) での低温での月・火星シミュラントの誘電率測定を行ってきた。その結果、ごく微量 (0.5 wt%) であっても水氷がレゴリス中に存在すれば、地中レーダーで検出が可能な反射波が生まれることがわかった。さらに、これまでの電磁波反射法の解析に用いられてきた誘電率値は最大で 20%程度大きく見積もられており、その結果、地下の地層境界面が 10%程度は過剰に見積もられていることがわかった。こうした計測を基に、月や火星のレゴリス・ダスト中に水氷が混合していた場合の水氷存在量と誘電率の関係と、火星表層における表層への吸着・濃集量の日変化による誘電率変化に関する検討したので、本発表で報告する。こうした検討は、LUPEX での地中レーダーの運用時の解析に役立つだけでなく、現在検討中の MIM 着陸機での誘電率絶対値の決定が、大気-表層間での水分子輸送過程の解明にどのように貢献可能か示すことができる。

Reference: [1] Ono et al. (2009) *Science*. [2] Xiao et al. (2015) *Science*. [3] Orosei et al. (2018) *Science*. [4] Plaut et al. (2009) *GRL*. [5] Campbell and Urichs (1969) *JGR*.

地球型惑星集積時の内部・表層進化と元素分配

○櫻庭 遥¹, 黒川 宏之²

¹東京工業大学 地球惑星科学系, ²東京工業大学 地球生命研究所 (ELSI)

地球型惑星の表層環境は惑星によって表層水量や表面温度に多様性があり、大きく異なる様相を呈する。例えば地球には海洋があり安定した温暖湿潤な気候が保たれている一方、金星は高温で極端に表層水が枯渇している他、炭素に比べて窒素に富んでおり地球とは全く異なる揮発性元素組成を示す。惑星集積段階において、惑星の獲得する揮発性元素量がどのように決定づけられるのかを明らかにすることは、地球型惑星の表層環境の起源を解明する上で極めて重要である。

本研究では特に惑星の表層環境を特徴づける大気や海洋の主要構成成分である揮発性元素 (C, N, H) の供給・分配・散逸過程に着目する。集積中の岩石惑星では火星サイズまで成長すると大気を長時間保持することができるようになり、岩石が溶融したマグマオーシャンが形成される。一部の揮発性元素は大気からマグマオーシャンへ溶け込み、内部ではさらにその一部を金属鉄がコアへ取り去る。マグマオーシャンに溶け込んでいた揮発性元素は固化速度に応じて一部メルトのまま固化マントルへ取り込まれる。一方表層では初期太陽からの UV 放射により水素散逸が、天体衝突により衝突蒸気雲を伴う大気散逸が駆動され、大気の一部が宇宙空間へ散逸する。太陽から受け取る放射量は太陽からの距離に依存するため、軌道によってマグマオーシャンの冷却速度や水素散逸効率が変化し、惑星の獲得水量・揮発性元素組成に影響すると考えられる。

本研究では以上の元素分配過程に着目した岩石惑星集積モデル(図1)を構築し、惑星の熱進化と各リザーバに分配される揮発性元素量進化を同時に計算することで、各素過程における揮発性元素量進化と、軌道位置や集積タイムスケールなどの形成条件への依存性を調べる。具体的に金星と地球に対応する条件での計算結果と観測から見積もられる大気・表層・マントル中の揮発性元素存在量を比較することでモデルの検証を行い、本講演では金星と地球を含むハビタブル・ゾーンの内側境界をまたぐ軌道範囲において、軌道半径に依存して表層・マントルそれぞれに獲得される C, N, H 量がどう変化するのかを調べた結果を紹介する。

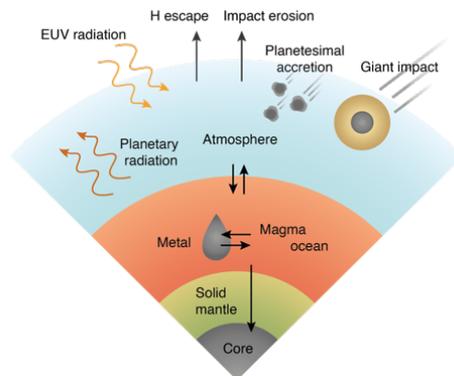


図1：本研究で用いる岩石惑星集積モデル概念図

小惑星探査機はやぶさ2 搭載中間赤外カメラ TIR のデータリリース

○荒井 武彦¹, 岡田 達明², 田中 智², 福原 哲哉³, 出村 裕英⁴,
坂谷 尚哉³, 鳶生 有理², 千秋 博紀⁵, 神山 徹⁶, 関口 朋彦⁷ 金丸 仁明²
¹前橋工科大学, ²宇宙航空研究開発機構, ³立教大学, ⁴会津大学,
⁵千葉工業大学, ⁶産業技術総合研究所, ⁷北海道教育大学

小惑星探査機はやぶさ2 搭載中間赤外カメラ (TIR) は, 2018 年から 2019 年にかけて, 小惑星 162173 リュウグウのサーモグラフィーを取得した. TIR はリュウグウの全球, およびサンプル採取着陸時に撮像した局所地域に対して, 地表の温度を決定し, 熱モデルと比較して, 表層の熱慣性や物理的な特性を明らかにした (Okada *et al.*, 2020; Sakatani *et al.*, 2021). 自転する小惑星のサーモグラフィーの取得は世界初であり, 小天体の熱進化や成因を探る上で貴重なデータである. TIR のリュウグウ観測データは ISAS/JAXA 内にあるデータサーバーにてデジタル値画像 (Level1) に変換し, 会津大学のデータベース HEAT (Endo *et al.*, 2017; Suko, 2019) を用いて輝度温度画像 (Level2) に変換した. その後, リュウグウの形状モデル (Watanabe *et al.*, 2018) 上にマッピングし (Arai *et al.*, 2021), 表層のラフネスモデル (Senshu *et al.*, in preparation) を取り入れた熱モデルでフィッティングして, 熱慣性マップを作成した (Shimaki *et al.*, 2020). 現在までに Level1 と Level2 データを公開しているが, 2021 年 12 月末にリュウグウ形状モデルに輝度温度をマッピングしたデータ (Level3) と熱慣性マップ (Level4) を公開する予定である. 本発表では, TIR が観測したデータの公開プロダクトの詳細について紹介する.

原始惑星系円盤における磁束輸送と円盤進化

○榎本晴日¹, 奥住聡¹

¹東京工業大学

原始惑星系円盤の形成過程において、磁場は円盤物質の降着に多くの影響を与えている。円盤を貫くポロイダル磁場が乱流を介して引き起こす力は、円盤降着を引き起こす。したがって、円盤内の物質の降着プロセスを考えるためには、円盤の磁場進化を理解することが必要である。しかし円盤を貫く磁場の強さを直接観測することは難しい。

大規模なポロイダル磁場の時間発展は、円盤内輸送に対する平均場モデル(Lubow 1994a)により求められる。Okuzumi et al., 2014ではこのモデルをもとに、ポロイダル磁場の内向きの移流と外向きの拡散が釣り合う定常状態に着目し、原始惑星系円盤における磁場の定常解を求め、Takeuchi&Okuzumi 2014では円盤のガス進化を考慮した磁場の時間発展を調べた。しかし過去の研究では、電気伝導度とガスの降着速度をパラメータとして扱ったモデルであった。

本研究の目的は、より現実的な電気伝導度とガスの降着速度を使うことで、原始惑星系円盤における1次元の磁束輸送のモデルを作成することである。本研究ではまず、原始惑星系円盤における円盤電離度分布のモデル(Okuzumi 2009)を基に、電離度構造を計算することによって円盤全域に渡る電気伝導率を求めた。またBai(2013b)のMHDシミュレーションより、円盤赤道面ではガスと磁場が強く結合しているが、上層に向かうにつれこの結合が弱くなり、エルサッサ数が1を超えたあたりの領域で強い電流層が形成されている。この層が降着の流れ全体を運んでいるとし、円盤で電流が流れる高度(Mori et al., 2019)での降着速度を使用した。そして、これらの値を元に磁束輸送の方程式を解き、円盤での磁束進化を考える。本発表ではモデルの詳細と初期成果を紹介する。

円盤形成段階におけるダストのダイナミクス

○古賀駿大¹、町田正博¹

¹九州大学

現在の惑星形成論では、まず原始惑星系円盤においてダスト同士が衝突し、付着成長していくと考えられている。円盤におけるダスト成長の議論は、従来主に Class II を想定して行われてきた。一方、近年の観測 (e.g., Tychoniec et al. 2020) は class 0 段階での惑星形成の開始を示唆しており、より早い段階、つまり円盤形成過程におけるダスト成長モデルの構築の重要性が増してきている。円盤形成過程のガスの進化については、3次元流体シミュレーションを始めとした理論研究と ALMA などによる観測によって、スパイラル構造を伴う複雑な進化過程が明らかになりつつある。ダストの成長過程の解明の前段階として、まずは複雑なガス進化過程に伴うダストのダイナミクスを明らかにすることは必要不可欠である。

本研究では、3次元非理想流体数値シミュレーションコードに新たにダスト粒子を導入した。今回はダスト粒子からガスへの back reaction は考慮していないが、流体計算から局所的なガスの物理量を抽出することで、ガス進化と同時に軌道計算を行った。その際、ガスは分子雲コアを初期条件とし、ダストをサイズをパラメータとしてコア全域にばら撒いて軌道を追跡することで、円盤形成に伴うダストの統計的な性質を明らかにした。計算した結果、 $10\mu\text{m}$ 以下のダストは、ガスと couple して運動することがわかった。また、ダストが高密度領域であるスパイラル構造に濃集することがわかった。結果の一部を図1に示す。

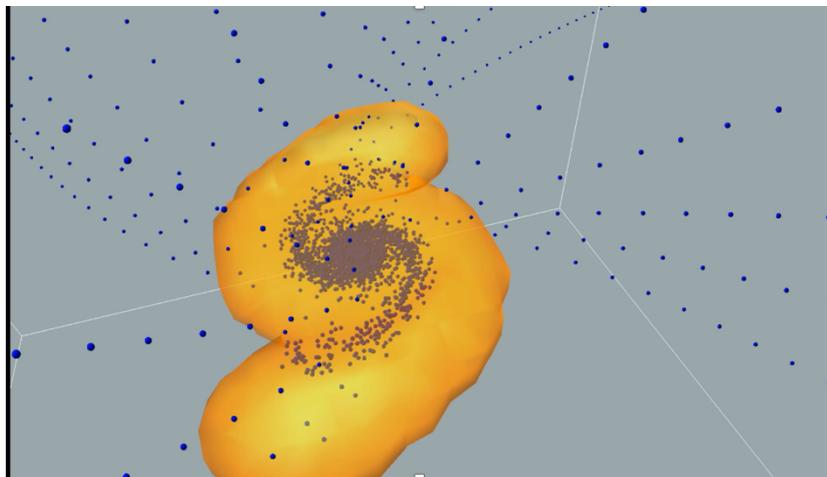


図1：黄色がガス(数密度 10^{11} cm^{-3})、点がダスト粒子を示す。

本講演では、より詳細な数値計算の解析結果とともに、ダストのラグランジュ的な情報からダスト成長の定量的な議論も行う。

コンドリュールリムの円盤中における集積による厚みの見積もり

○ 松本 侑士¹, 長谷川 靖紘², 松田 望³¹ 国立天文台, ² カリフォルニア工科大学/ジェット推進研究所, ³ カリフォルニア大学

コンドライト隕石の主成分であるコンドリュールの中にはリムと呼ばれるダスト粒子によって囲まれた構造を持つものがある。リムには fine-grained rims (FGRs, e.g., King and King, 1981) と coarse-grained igneous rims (e.g., Rubin, 1984) の 2 種類がある。FGRs の集積過程の 1 つとして円盤内での集積が考えられている (e.g., Morfill et al., 1998)。また集積された FGRs は再溶融イベントを経験することで igneous rims が形成したと考えられる (Rubin, 2010)。円盤中での FGRs の集積とその後再溶融により igneous rims が形成した場合、円盤中で集積される FGRs のサイズが実際に測定された FGRs や igneous rims のサイズと一致することが期待される。

そこで我々は円盤中で集積される FGRs について見積もり、また FGRs 及び igneous rims のサイズについての文献を調査を行った。円盤中で集積される FGRs のサイズはこれまでも研究がなされており、測定された FGRs とコンドリュールのサイズの線形相関を再現することが知られている (e.g., Morfill et al. 1998; Cuzzi, 2004)。これらの研究ではコンドリュールによるダスト集積とこの集積の典型タイムスケールから FGRs のサイズを見積もられているが、ダストとコンドリュールが同時に存在する場合にはダスト同士の衝突成長のタイムスケールが短く (Ormel et al., 2008; Arakawa, 2017)、コンドリュールは成長したダストアグリゲイトを集積しリムを纏い、またリム付きコンドリュール同士の衝突時点でリムの厚みがおおよそ決まると考えられる。これらの効果を考慮し、集積によるリムの厚みを見積もった。我々はコンドリュールサイズや初期のコンドリュールとリムとなるダストの割合をパラメータとしてリムのサイズを見積もった。

FGRs のサイズは LL コンドライト中のコンドリュール (Bigolski 2017) や CM コンドライト中のコンドリュール (Metzler et al. 1992; Hanna and Ketcham, 2018) で得られている。我々の見積もりは LL コンドライトや CM Kivesvaara, CM Y791198, CM Y74662 といったコンドライト中のコンドリュール周りの FGRs のサイズをよく再現した。CM Murray や CM Murchison の FGRs のサイズは我々の見積もりよりも小さい。CM コンドライトのコンドリュール/ダスト比はほぼ同じであるため、同じコンドリュールサイズでは見積もったリムサイズは同じになるが、実際は CM Murray や CM Murchison のような薄いリムを持つコンドリュールが存在する。これらを説明するにはリム剥ぎ取り (Liffman 2019) や母天体過程といった別の過程の考慮が必要だと思われる。

Igneous rims のサイズとコンドリュールのサイズとの相関はあまり知られていない。Krot and Wasson (1995) 及び Rubin (2010) のデータから全体的な傾向として igneous rims も FGRs のようにコンドリュールサイズに対してリムの厚みが増加する傾向を発見した。この傾向については同じコンドライト中のコンドリュールと igneous rims のサイズのより多くの測定により確認されるだろう。Igneous rims のサイズは FGRs のサイズよりも大きく、我々の見積もりよりも大きかった。Igneous rims のサイズは初期のダストをコンドリュール全てが一様に集積することで得られるサイズよりも大きい。この解釈として、初期の円盤のダスト量が隕石中から推定されるよりもかなり多かったのであれば、igneous rims 形成時の再溶融イベントにおいて一部のコンドリュールのみがリムのダストを寡占するような衝突が起きたことが考えられる。

小天体表層画像における岩石粒子自動識別法の提案

○清水 雄太¹, 逸見 良道², 宮本 英昭^{1,2}

1. 東京大学工学系研究科システム創成学専攻
2. 東京大学総合研究博物館

小天体探査により、小さな (~1km 程度の) 小天体の表層は大量の岩石粒子で覆われていることが明らかになった [e.g. 1]。岩塊の粒径や空間、形状の分布は小天体表層が経験したさまざまな進化プロセスを反映していると考えられる [e.g. 2]。ところが岩石粒子は隙間なく大量に存在しており、画像分解能の制約だけでなく、粒子ごとの掩蔽や表面凹凸による陰影、反射率の似た粒子の重なり合い等の影響により、個々の粒子の外形や粒子間の境界を客観的に抽出するには困難を伴う。そこで本研究は、小惑星表面の岩塊に特化した粒子の自動識別法を開発することで、客観的かつ正確に大量の小惑星表層の高解像度画像の粒子の粒径 (累積サイズ頻度分布) 及び空間分布を解析しようとしている。

岩石粒子の自動識別法としては、例えばエッジ抽出のようなパターン認識技術に基づくものがあるが [3]、小天体表層の岩石粒子は輪郭が非常に不規則な複雑形状で粒子同士の反射率コントラストも小さいため、こうした手法の適用には制約が多い。そこで本研究では畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いた画像の特徴抽出結果を基に、粒子をポリゴンで自動識別する手法を開発した。教師データとしては、小惑星表層の高解像度画像に見られる個々の岩石粒子の輪郭のみを手動でポリゴンとして抽出し、天体別に岩石粒子に関するデータベースを作成した。さらに教師データの増産のため、実験室で小天体上の岩塊を模擬した物質を撮影し、小天体の表面環境を可能な限り再現した画像を新たに作成した。これにより、700 枚以上の画像に対し、20,000 以上の岩石粒子の輪郭に関する教師データを用意した。

学習させたモデルにより、小惑星表層の岩石粒子を Precision 89.3%、Recall 66.2% の精度で自動識別できた。そこで小惑星 Itokawa の Hayabusa AMICA 画像に対し自動識別法を適用したところ、識別された岩石粒子はべき数 -3.7 ± 0.1 のべき乗分布を示し、先行研究 [5] と調和的な結果が得られた。さらに画像処理で副次的に得られる地理座標に基づき岩石粒子の輪郭を Itokawa の Gaskell 形状モデル [4] の上に表示することで、3 次元的な空間分布を明らかにした。本研究ではこの結果に加え、同様の手法で小惑星 Bennu 及び Ryugu の高解像度画像を解析した結果も示す。さらに、本研究で提案する小天体表面の岩石粒子の自動識別法により、小天体表層の地質学的プロセスの理解がどう進展するかについて議論する。

[1] Sugita et al., *Science* **364**, eaaw0422 (2019). [2] Michikami et al., *Icarus* **331**, 179-191 (2019). [3] Wang, *Pattern recognition techniques, technology and applications*, 197-226 (2008). [4] Gaskell et al., *Meteoritics & Planetary Science* **43**(6), 1049-1061. [5] Mazrouei et al., *Icarus* **229**, 181-189.

レゴリス起伏地形の緩和に対するクレーターと非対称エジェクタカーテンの影響

○横田優作, 荒川政彦, 保井みなみ, 山本裕也, 大川初音
神戸大学大学院理学研究科

【背景】衝突クレーターは、固体天体で主要な地質学的特徴の1つである。また、小惑星や衛星上には斜面やバルジ、峡谷など、様々な地形が存在する。近年、はやぶさ2や OSIRIS-REx などの探査によって、小惑星リュウグウやベヌスは赤道域に巨大なバルジ地形を有していることがわかった。このような起伏地形上に形成されるクレーター形成過程を理解するには、これらの地形に適したクレータースケール則が必要である。さらに、それに伴うエジェクタ放出過程を理解することは小惑星の表層進化や表面地形の緩和を明らかにする上で重要である。しかし、これまで得られたクレータースケール則やエジェクタ放出過程に関する知見は、平面に対して行われた研究をもとに得られたものであるため、小惑星表面の起伏地形の影響を考慮する必要がある。そこで本研究では、小惑星レゴリス層を模擬した粉粒体に起伏地形を再現してクレーター形成実験を行い、クレーターサイズや形状、エジェクタ放出過程における起伏地形の影響を調べた。

【実験方法】クレーター形成実験は、神戸大学の縦型一段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸は直径 3mm のアルミナ球、標的は直径 100 μ m の石英砂を使用した。標的は、小惑星表面の起伏地形を再現するために山脈型に作成し、その山頂付近に弾丸を衝突させた。標的の傾斜角は 30° と 20° とし、山頂から衝突点までの距離 d を 1~22mm と変化させ、衝突の様子は高速カメラで撮影し、エジェクタ放出過程を観察した。また、実験後のクレーターを多方向からデジタルカメラで撮影し、ソフトウェア Metashape を用いてそれらの画像からクレーターの 3次元形状を再構築した。その形状モデルを利用し、クレーターの形状、サイズを調べた。

【実験結果】山脈型標的に形成されたクレーターは、斜面方向の直径 D_{mi} に対し、稜線方向の直径 D_{ma} が長い楕円形になった。 D_{ma} は平面に形成されるクレーターの直径よりも大きく、標的の傾斜角が 30° のときの方が 20° のときよりも大きくなった。一方、クレーターの深さ直径比は d が大きくなるにつれて小さくなり、 d が 7mm 以上になると 0.2 より小さくなった。エジェクタカーテンは、斜面方向の半径 R_{mi} に対する衝突位置 d/R_{mi} が 0.3~0.5 のときにクレーターが山頂を超えて成長し、衝突した斜面では直線状に成長するが、衝突点の反対側の斜面から放出されるエジェクタカーテンの輪郭が曲線を描く非対称な形状になった[1]。一方、 d/R_{mi} が 0.8 以上のときはエジェクタカーテンが衝突した斜面側のみで成長し、遷移クレーター形成後に斜面方向に地滑りを起こしていることが分かった。また、低速度のエジェクタは等方的にクレーターの周囲にリムとして堆積した後、そのほとんどが斜面下側方向に崩れていたため、実験後、明瞭な堆積リムを確認することはできなかった。



[1]非対称なエジェクタカーテン

DESTINY⁺搭載カメラの地上光学校正計画の検討

○岡本 尚也¹, 石橋 高¹, 山田 学¹, 洪 鵬¹, 吉田 二美^{1,2}, 荒井 朋子¹, 石丸 貴博³,
太田 方之³, 宮原 剛³, 高島 健³

¹千葉工業大学惑星探査研究センター, ²産業医科大学, ³宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

2024年度打ち上げ予定の深宇宙探査技術実証機 DESTINY⁺ (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUst Science)には小惑星追尾望遠モノクロカメラ TCAP(Telescopic CAmera for Phaethon)とマルチバンドカメラ MCAP(Multi-band CAmera for Phaethon)が搭載され、小惑星(3200) Phaethon を高速フライバイし、カメラ観測によって以下の4つの科学目標を達成することを目指している: (1) Phaethon のグローバル形状の解明: 輪郭撮像とライトカーブ観測, (2) Phaethon のセミグローバル形状の解明: 比較的大きなクレーターや崩壊した地形などの日照域の3次元形状観測, (3) Phaethon のローカル地形の解明: ダスト放出などの特徴的な表層の詳細地形観測, (4) Phaethon 表層の物質分布の解明: マルチバンドカメラによる表層の分光観測。これらの科学目標を達成するためには、イメージセンサの特性を把握し、光学系を含めた理学観測に必要な光学校正データを取得しておかなければならない。そのために地上で可能な限り詳細に校正を行うとともに、打ち上げ後に性能変化や劣化することが考えられるため機上での校正を行う。前者を地上光学校正、後者を機上光学校正と呼ぶ。機上光学校正に関しては昨年度の日本惑星科学会で報告を行った。本発表では地上光学校正の計画について報告を行う。DESTINY⁺搭載カメラで必要となる地上光学校正は、以下の(a)-(c)から構成される。

(a) イメージセンサの性能評価

イメージセンサの基本性能の確認、およびデータ解釈に必要なセンサデータの取得を行うため、センサを光学系取り付け前に、ダーク画像・バイアス画像の取得、リニアリティの確認、コンバージョンゲインの推定、ホットピクセル・デッドピクセルの調査を行う。また、TCAP, MCAP で使用予定のCMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)イメージセンサの飽和電荷量は、これまでの評価により入射光量や温度に依存することが明らかになっている。飽和させずに撮像するためにこの飽和電荷量の特性を把握する。

(b) 感度校正

イメージセンサと光学系を組み合わせた状態(Engineering Model; EM, Flight model; FM)でデータ取得を行い、信号量に関する補正や性能確認を行う。光学系による周辺減光などによる感度ムラや、画素間の感度のばらつきといった非均一性を補正するためのフラットフィールド画像の取得、センサ上で観測されるカウント値と入射光の放射輝度との関係を得るための感度特性の評価、理想的な経路以外の経路でセンサ面に入射する迷光の調査を行う。

(c) 幾何学校正

イメージセンサと光学系を組み合わせた状態(EM, FM)でデータ取得を行い、空間情報に関する補正や性能確認を行う。点像分布関数の取得、像の歪みを補正するための歪曲補正、設計された視野角・角度分解能が実現されているかの確認を行う。

校正データ取得はカメラ組み上げ後に全て行うのが望ましい。しかし、カメラ全体の温度調節を行うのはコストと試験の準備・工程の両面で困難を伴う。光学系が必要ない、あるいは光学系の影響がないセンサの評価項目(a)については、光学系取り付け前にセンサ部の温度調節を行いながら測定する。光学系を含む評価(b), (c)はシミュレーションと組み合わせて可能な範囲で温度調節を実施することを検討している。また、これら TCAP, MCAP の EM, FM の校正をスムーズに実施するために、本番を想定した模擬校正を事前に行い、問題点の洗い出しや解析方法の検討、解析ツールの準備等を実施する予定である。現在そのような模擬校正の準備を進めている。

本発表では、TCAP, MCAP 両カメラのより詳細な地上光学校正計画と模擬校正の準備状況について報告する。

Influences of solar energetic particles on the Martian ozone

○晝場清乃¹, 中川広務¹, 中村勇貴¹, 寺田直樹¹, 堺正太郎¹, 村田功¹, 二穴喜文²

¹東北大学理学研究科地球物理学専攻惑星大気物理学分野

²Swedish Institute of Space Physics

Solar energetic particles (SEPs) consist of protons, electrons and heavy ions in the energy range between a few tens of keV and GeV. SEPs are originated from solar flares, shock waves driven by coronal mass ejections. SEPs penetrate the Earth's atmosphere down to tens of kilometers at high geomagnetic latitudes. The penetrating SEPs can change the composition in the middle atmosphere. During the large solar flare that occurred in October 2003, penetrating SEPs caused NO₂ enhancement by several hundred percent, accompanied by ozone depletion of tens of percent between 36 and 60 km altitudes (e.g., Seppala et al., 2004; Rohen et al., 2005). Considering the increasing human activities in space, such as future international missions to the Moon and Mars, it is important to understand the behavior of SEPs in planetary environments in order to assess their impacts on missions and human bodies. In addition, the ozone layer is essential for understanding how NO_x increases in the Martian environment, and the increases in NO_x can have implications for aspects of astrobiology and the past Martian greenhouse effect.

In this study, we aim to identify the response of the Martian ozone layer to SEP events. We use vertical profiles of ozone number densities observed by stellar occultation measurements by IUVS onboard MAVEN, and the energy fluxes of electrons and ions monitored by Solar Energetic Particle onboard MAVEN (MAVEN/SEP). Comparing the data during this SEP event with data during another period of quiet solar activity with similar seasons and latitudes, there was no significant difference in the ozone profile.

We estimated the production rate of CO₂⁺ induced by the SEP flux using a Monte-Carlo model. We then considered the process of ozone depletion by OH increased by SEP, and estimated the amount of ozone depletion using a photochemical model (Nakamura et al., this issue). As a result, no ozone depletion was observed during the November 2015 event. On the other hand, the model suggests that OH increase by a factor of 10-100 at around 40 km compared to the quiescent state, and ozone decrease by a factor of 100 during the large flux SEP event in the September 2017 event. The results of the Monte-Carlo model suggest that particles above 5 MeV for protons and 200 keV for electrons effect on the production rate of CO₂⁺ at below 60 km. The reason for this result is that the SEP flux in that energy band is three to four orders of magnitude larger in September 2017 than in November 2015. However, there is concern about cross contamination in the SEP flux data during the SEP event in September 2017, the estimated ozone variation can be assumed as an upper limit.

Since the MAVEN data are only available after 2014, we analyze the data from Mars Express (MEX). The ozone column densities can be obtained from the observation by nadir observation of Spectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmospheric of Mars (SPICAM). The Analyzer of Space Plasma and Energetic Atoms (ASPERA-3) can record the penetrating energetic particles through the instrument structure as background counts (Ramstad et al., 2018). We analyze ozone data observed by SPICAM/MEX during several SEP events identified using ASPERA-3/MEX. We also evaluate the effect of SEPs on atmospheric chemistry on Mars using the aforementioned photochemical model and the Mars Climate Database (MCD).

氷天体において高圧氷相境界が氷固相対流のダイナミクスに与える影響

The effect of high-pressure ice phase boundaries
on the dynamics of icy solid-state convection in icy bodies

○有田直哉, 木村淳
大阪大学大学院理学研究科

氷天体の内部では、天体のサイズや温度圧力範囲に従って様々な相の固体 H_2O 氷層が出現する。表層には低圧相の氷 Ih からなる氷殻が存在する一方、例えば木星衛星ガニメデのような直径 5000 km 級の大型の氷天体内部（圧力～数 GPa）においては、様々な高圧相（III、V、VIなど）の氷が成層した多層系の氷マントルをなす。こうした固相—固相転移を伴う氷層の対流運動は、熱的進化やテクトニクス、物質輸送などに大きく関わると考えられる。一部の氷天体では氷殻下に全球的な海を持つことが示唆され、海底での水・岩石相互作用による物質生成の考察などと合わせて地球外生命の発生可能性が議論されているが、大型の氷天体では海底に高圧氷相が出現し、海水と岩石層との直接の相互作用を阻害する。すなわち高圧氷相のダイナミクス（対流運動）が、岩石層からの熱や物質の輸送過程をコントロールするはずである。このような、固相相転移を伴う対流運動の惑星科学的考察については、従来地球マントルの 660 km 相転移面の影響に着目した数値シミュレーションを中心に数多くの研究例があるが、氷天体内部での多層氷マントル系に対してはほとんど調べられていない。固体 H_2O 氷の相転移境界（クラペイロン勾配）に対しては多くの実験的研究が様々な値を提示しており、その不定性が対流運動に与える影響を定量的に評価することも重要である。

そこで本研究では、相転移面を伴う多層氷マントルの対流に関する数値シミュレーションを行い、相境界面が対流のダイナミクスに与える影響を調べた。氷天体内部では様々な多層氷系が考えられる中で、本発表では氷 I 相と III 相が上下に重なった系を仮定し、相転移境界のクラペイロン勾配やレイリー数をさまざまに変えた場合における 2次元の矩形領域の対流計算を行なった。

その結果、 $-0.2 \sim -0.3$ MPa/K 程度のクラペイロン勾配においては、レイリー数が 10^8 以下の場合には安定的な 2層対流の傾向を示し、下部からの熱物質輸送が相転移面で阻害される。より大きいレイリー数では対流構造が非定常的になり、上下の層が周期的に入れ替わる 1層対流と 2層対流の遷移的な挙動を示した。すなわち、レイリー数が大きい場合では岩石核からの熱や物質が相転移面で阻害されず、直接的に上層まで輸送される可能性がある。本発表では様々なパラメータの組み合わせによる計算結果を比較検討し、それらが表面熱流量やヌセルト数に与える影響についても考察を行う。

雷加熱によるコンドリュール形成；分析・実験と統合的なモデルの探求

○金子寛明¹ 中本泰史¹

¹東京工業大学

コンドリュールはコンドライト隕石の主要な構成物である。コンドリュールは前駆体であるダストの集合体が、原始太陽系星雲内で急激な加熱を受けて溶融・固化した結果できたと考えられている。この加熱機構については衝撃波、天体衝突、雷、X-wind など様々なモデルが提案されてきた。しかし、それぞれのモデルが問題点(e.g. Desch et al., 2012)を持っており、コンドリュールの形成機構は未解決問題のままである。コンドリュール形成の描像を明らかにすることは、原始太陽系星雲で頻繁に起きたであろう物理・化学現象を明らかにすることであり、惑星科学において極めて重要な意味を持つ。

本講演では雷による加熱モデルに注目する。原始太陽系星雲内で絶縁破壊が起きるのに十分な電場が形成されて、円筒形の放電が生じたと仮定する。その上で、溶融物の冷却時間、複合コンドリュールの形成率や同位体分別の有無について実験・分析の結果と統合的な条件を調べる。Alexander et al., 2008 はコンドリュールが揮発性元素の Na を保持していることから、コンドリュール形成はロシュ密度よりも数桁高いダスト密度を持った環境で起きたと推定している。これは自己重力収縮による微惑星(隕石母天体)形成とコンドリュール形成が同時に起きた可能性を示す。しかし、このシナリオではコンドリュールの再加熱を説明することが難しいという問題がある。そこで本講演は、自己重力不安定を起こしているダストクランプ内でのコンドリュール形成とロシュ密度以下のダスト密度を持つ自己重力的に安定な環境でのコンドリュール形成の2つの場合を分けて考える。

自己重力的に安定な条件では、輻射による冷却時間内に数%以上の割合で複合コンドリュールを作るには、放電領域の半径の上限として従来考えられている電子の平均自由行程の 10^3 - 10^4 倍程度よりも大きい半径が必要である。

自己重力収縮するクランプ内でコンドリュールを作る場合、放電領域のコンドリュール前駆体を溶融するために必要なエネルギーを得るには、クランプに形成された電場のエネルギーを集約する必要がある。最終的な微惑星のサイズとクランプの大きさを比較することでコンドリュールを形成可能な放電領域の半径を制限することができる。

揮発性元素の同位体分別を抑えるには、ガスの拡散スケールより十分長いコンドリュール形成領域が必要である(Cuzzi & Alexander, 2006)。氷ダストの蒸発による分圧の上昇を考えれば、ガスの拡散は抑えられるかもしれない。しかしこの場合、高温ガスの流体運動による膨張の効果も考慮する必要があるだろう。

MMX 搭載赤外線分光計 MIRS の 科学目標と開発状況

Science Target and Development Results of MIRS: MMX Infrared Spectrometer on the MMX Spacecraft

○岩田隆浩¹, 中川広務², 土屋広務², 中村智樹², Maria Antonietta Barucci³,
Jean-Michel Reess³, Pernelle Bernardi³, Alain Doressoundiram³, Sonia Fornasier³,
Michel Le Du⁴, Eric Sawyer⁴, and Veronique Tyrout⁴

¹JAXA宇宙研、²東北大、³LESIA, Observatoire de Paris、⁴CNES

The Martian Moons Exploration (MMX) is a probe which will be launched by the Japanese launch vehicle H-III, and it will navigate the quasi-satellite orbit of Phobos and will make a fly-by of Deimos. MIRS (MMX InfraRed Spectrometer) is a push-broom imaging spectrometer in the wavelength range of 0.9 to 3.6 micrometers which is one of the candidate instruments to be installed on the MMX spacecraft. It has a field-of-view (FOV) of 3.3 deg width with instantaneous-FOV (IFOV) of 0.35 mrad, which can be scanned by inner along track scan mirror in the range of ± 20 deg.

MMX aims to elucidate the evolution of our solar system by investigating the migration process of primitive bodies in the early stage. MIRS will observe absorptions of hydroxide or hydrated minerals on Phobos and Deimos in the wavelength range of 2.7-3.2 micrometers. By analyzing the behavior of the spectra, we will distinguish between structural water in hydrous silicate minerals, and water ice particles. MIRS will also try to detect the absorption of organic matters in the wavelength range of 3.3-3.5 micrometers. These results will be crucial evidence to answer the question of the origin of the Martian satellites and identify whether they are satellites formed by a giant impact or primitive asteroids captured by Mars gravitational field. MIRS will observe Phobos to survey the sampling site candidates, to investigate the sampling site precisely at the touch-down mode, and to make global mapping. The global mapping of Phobos to select prior areas and landing sites will be performed on the quasi-satellite orbit. Precise mapping for candidate landing sites will be followed on the lower altitude. Observations for Deimos will be basically executed from the fly-by orbit. MIRS will also monitor the Martian atmosphere with particular attention to spatial and temporal changes as clouds, dust and water vapor. Models for ground tests are under manufacturing, and some of basic functions and properties have been confirmed. We will report and discuss on the observation plans and the development results of the MIRS instrument.

リュウグウの衝突乾燥説の実験的検証

黒澤耕介¹, 小松吾郎², 薮田ひかる³, 森脇涼太¹, 石橋高¹, 松井孝典¹¹千葉工業大学, ²Università d'Annunzio, ³広島大学

はやぶさ2探査により, リュウグウは揮発性成分に乏しく, 半乾き状態であることが明らかとなった. その揮発性成分の少なさを説明する有力仮説は3つあり[Sugita et al., *Science*, 364, 268–272, 2019], そのうちの1つは過去の天体衝突時の加熱によって揮発性成分を失ったとする「衝突乾燥説」である[Sugita et al., 2019; Michel et al., *Nat. Commun*, 11, 2655, 2020]. 以前我々はリュウグウ模擬試料を用いた衝撃脱ガス実験とそれに対応する数値衝突計算を実施し, 衝撃脱ガス効率は低く, 小惑星帯における典型的な衝突速度程度の衝撃加熱ではリュウグウの乾きを説明することができないことを報告した[黒澤ら, 2020, 地球惑星科学連合大会]. 今回はその実験結果を元に脱ガス機構を考察した[Kurosawa et al., *Communications Earth & Environment*, 2, 146].

(a)標的物質の素性, (b)数値衝突計算結果, (c)実験結果を整理する. リュウグウ模擬試料としてオルゲイユ隕石を元にした炭素質隕石模擬粉末を使用したことを注意しておく. 以下リュウグウ様物質と呼ぶ. (a1) 試料中の炭素含有物質は亜瀝青炭という種類の石炭に限られ, そのC/O比は~5, (a2) 試料の主成分は蛇紋石(48wt.%)と酸化鉄(magnetite, 13.5wt.%), (a3)試料の熱重量分析[Britt et al., *MaPS*, 54, 2067–2082, 2019]によれば, 含水鉱物の脱水, 有機物の分解温度は~800 K, (a4)不活性気体中での熱分析での発生気体の主成分はH₂O, CO₂, (b1) 数値衝突計算で800 Kを超えると判定される領域の質量は弾丸質量の~40% (衝突速度 5.8 km s⁻¹), ~10% (衝突速度 3.7 km s⁻¹)程度, (c1) 衝突実験で検出された気体の主成分はCO₂で全体の48–71%を占める, (c2) 放出ガス組成(CO/CO₂, H₂/CO)は衝突速度に依存しない, である. (a4)及び(c1)の結果は, 試料内の炭素の大部分がCO₂まで酸化されていることを示している. 酸素源としては含水鉱物から放出される水蒸気と酸化鉄が高温還元される際に生じる酸素が考えられる. 熱重量分析で報告されていないが, 衝突実験ではCO₂に対して~10mol%程度のCOが衝突速度によらず検出された. 放出気体のCO/CO₂比は脱ガス場の酸素分圧で決定される. 炭素質隕石組成の酸素分圧の温度依存性[Schaefer and Fegley, *ApJ*, 843, 120, 2017]と実験で計測されたCO/CO₂比から脱ガス場の温度を推定したところ, 衝突速度によらず1,200–1,650 Kとなった. したがって数値計算では表現されていないエネルギーの局在が発生し, 局所高温領域が発生したことが示唆される. この温度では含水鉱物も完全脱水を起こす. 計測されたH₂/CO比がほぼ1であったことは水蒸気による炭素の酸化反応(C + H₂O → H₂ + CO)と調和的である. 脱ガスはこの局所高温領域の周辺で主に進行したと仮定すると, その体積は脱ガス温度(800 K)に達している領域の~5%程度であった. 以上の結果は小惑星帯における典型的な衝突速度程度の衝突では衝突点近傍でエネルギーの局在が起こり, 衝突直下点においても効率的な脱ガスは起こらないことを示唆する. 従って, 衝突乾燥説単独ではリュウグウの乾きは説明できない可能性が高い. しかし, 局所高温領域の周辺では脱水, 有機物の分解, 酸化鉄の高温還元などが起きていることが示唆される. これは回収試料分析で検出できる可能性がある.

謝辞: iSALE の開発者である Gareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausen の各氏に感謝致します. 数値衝突計算結果の解析と描画には pySALEPlot を使用致しました. 開発者の Tom Davison 氏に感謝致します.

タイタンにおける液体メタンへの有機物エアロゾルの溶解模擬実験

○平井英人¹, 関根康人², 張乃忠²¹東京工業大学 理学院 地球惑星科学系 ²東京工業大学 地球生命研究所

カッシーニ探査機の赤外反射分光観測により、タイタンの北半球高緯度には、大気の窓領域である $5\mu\text{m}$ 付近に強い反射率を持つ堆積物が見つかっており、液体メタンの蒸発に伴う溶存有機物の蒸発岩であることが示唆されている (Barnes et al. 2009, 2011)。これらの蒸発岩の化学組成について、観測スペクトルからは芳香族炭化水素であるベンゼンやシアン化合物に富むことが示唆されている一方で (Clark et al. 2010)、光化学モデルと溶解モデルからは大気中で生成する飽和・不飽和炭化水素であるブタンやアセチレンに富むと予想されている (Cordier et al. 2013)。タイタンの有機物エアロゾルが芳香族炭化水素やニトリルで構成されていること考慮すれば、これらの物質が有機物エアロゾルから液体メタンへ溶解し、その蒸発時に蒸発岩として析出したのかもしれない。しかしながら、これまでに有機物エアロゾルと液体メタンの相互作用を調べた研究はない。

そこで本研究では、有機物エアロゾルのアナログ物質であるタイタンソリンを、液体メタンに溶解させる実験を行った。本研究では、内部の温度圧力を制御することで液体メタンを維持することが出来るステンレス鋼製の液体メタン作成装置を開発した。タイタンソリンは、 500 Pa の $\text{CH}_4/\text{N}_2=10/90$ の混合ガスのフロー系に、3時間コールドプラズマを照射することで粒子状のソリンと薄膜上のソリンの2種類を作成した。これらタイタンソリンを $95\sim 100\text{ K}$ の液体メタンへ3時間浸した後に、装置内のメタンガスをゆっくりと排気することで、液体メタンを蒸発させた。その後、残存したソリン、および装置底部に析出した液体メタンへの溶存成分を回収した。電子顕微鏡観察の結果、析出した液体メタンの溶存成分は、粗い表面を持つ $10\mu\text{m}$ 程度の有機物であることがわかった。また、液体メタンへの溶存と蒸発により、粒子状のソリン同士が固着する様子も確認した。本発表では、これらの観察に加えて、析出した溶存成分の化学組成と赤外分光分析を行い、タイタン表面に存在する蒸発岩との比較を行い、その結果を報告する。

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(LAPYUTA)計画の検討

○土屋史紀¹, 村上豪², 山崎敦², 木村智³, 吉岡和夫⁴, 鍵谷将¹, 古賀亮⁵, 木村淳⁶, 成田憲⁴,
亀田真吾⁷, 生駒大洋⁸, 大内正^{8,4}, 田中雅¹, 益永圭², 堺正太郎¹, 埜千尋⁹, 桑原正輝⁷,
鳥海森², LAPYUTA ワーキンググループ

¹東北大学, ²ISAS, ³東京理科大学, ⁴東京大学, ⁵名古屋大学, ⁶大阪大学, ⁷立教大学, ⁸NAOJ, ⁹NICT

LAPYUTA (Life-environmentology, Astronomy, and Planetary Ultraviolet Telescope Assembly) は、2029年-2030年の打ち上げを目指す紫外線望遠鏡計画で、太陽系科学、系外惑星大気、及び天文学分野に跨る科学目標を掲げている。太陽系科学・系外惑星分野では、惑星・衛星における生命存在環境の形成に関する課題に取り組み、太陽系内外の惑星・衛星の生命環境を普遍的視座のもとに理解することを目指す。木星の氷衛星には生命存在可能環境を持つ地下海が存在する可能性がある。表層から吹き出す Plume ガスの検出は地下海の存在証明となる。Plume の存在とその物理的特性の把握から、地下海が存在と衛星の内部構造の解明を目指す。火星には過去に大量の水を保有していた証拠が見つかっており、金星にも過去に水を有していた可能性が示唆されているが、その水の行方は明らかとなっていない。現在の火星・金星における水と温室効果ガスの大気散逸を捉え、惑星大気の進化過程と水の行方を解明する。惑星大気散逸の知見は系外惑星に拡張できる。系外惑星の紫外線トランジット分光観測からは、高層大気の観測を通じた地球類似惑星の発見と惑星進化過程の解明を目指す。紫外線天文学はハッブル宇宙望遠鏡により大きく進展したが、銀河形成論や時間領域天文学に関して未開拓の領域が残されている。広視野サーベイと、突発天体现象に対する機動的な観測を可能とすることで、宇宙論におけるミッシングサテライト問題と、マルチメッセンジャー・時間領域天文学に取り組む。これらの科学課題に取り組む手段として、高解像度・高感度の紫外線宇宙望遠鏡を提案する。紫外線波長域では、惑星・衛星の大気とその周りに分布する希薄なガスを高いコントラストで観測することが可能であるため、大気・ガスの物理的状态を観測する有効な手段となる。LAPYUTA では、主鏡口径 60cm 級の望遠鏡と惑星分光観測衛星「ひさき」で培った紫外線分光観測技術を組み合わせるとともに、姿勢擾乱により生じる望遠望遠鏡の指向ブレ補正する独自のアイデアを採用することにより、ハッブル宇宙望遠鏡並みの高い感度・空間分解能を備えた宇宙望遠鏡を目指す。ロシア宇宙望遠鏡 WSO-UV に搭載される紫外分光器 UVSPEX とは、系外惑星大気の科学検討と技術開発で協力する。2030 年は欧州が主導する木星氷衛星探査計画 JUICE や米国の Europa clipper が木星系で観測を開始する見込みである。空間構造を俯瞰した観測が可能な LAPYUTA とこれらの探査機との協調観測を計画し、2030 年台の国際的な氷衛星探査に臨む。

リュウグウ表面の熱疲労

○佐々木 晶、神田 志穂(大阪大学)、菊地 紘(ISAS/JAXA)、道上 達広(近畿大学)、諸田 智克(東京大学)、本田 親寿(会津大学)、宮本 英昭、逸見 良道、杉田 精司(東京大学)、巽 瑛理(カナリア天体物理学研究所)、渡邊 誠一郎(名古屋大学)、竝木 則行(国立天文台)、平田 成(会津大学)、中村 智樹(東北大学)、廣井 孝弘(ブラウン大学)、野口 高明(京都大学)、平林正稔(オーバーン大学)、松本 晃治、野田 寛大(国立天文台)、坂谷 尚哉、亀田 真吾(立教大学)、神山 徹(産業技術総合研究所)、鈴木 秀彦(明治大学)、山田 学(千葉工業大学)、本田 理恵、横田 康弘(高知大学)、Patrik Michel(コート・ダジュール天文台)、長 勇一郎、吉岡 和夫(東京大学)、早川 雅彦、松岡 萌、金丸 仁明、澤田 弘崇、吉川 真(ISAS/JAXA)

熱疲労は、固体が加熱・冷却を繰り返し受けたときに、内部に働く熱応力のため、クラック（き裂）が伸展して破壊される現象である。岩石では、鉱物間で熱膨張率が異なるため、結晶粒界に沿ったクラックが成長する。Delbo らは、普通コンドライト、炭素質コンドライトを用いた熱サイクル実験により、数 100 回の熱サイクルの後、隕石の一部が破壊されることを確認した[1]。また、熱応力によるクラックの伸展を計算して、衝突による破壊の時間スケールと比較して、数 cm 以上のサイズの岩では熱疲労による破壊が優勢であると論じている。

日射の変化が、子午線方向のクラックを成長させるため、地球の砂漠地域[2]や、火星表面の岩石のクラック[3]に（南北）方向への卓越が見られるという結果がある。小惑星(162173) Ryugu の表面は様々なサイズの岩塊(ボルダー)で覆われている[4,5]。我々は、Ryugu において、クラックの南北方向への卓越を発見した。南北依存性には、クラックの形態による違いが見られる。また、岩塊のサイズの依存性は明白では無いが存在する。Delbo らは、Bennu において、同様の結果を得ていて（南北からのズレはある）、表面が古い地域に多く見られると報告している[6]。岩塊表面の日照による非対称な温度変化が、熱ストレスを生じて、亀裂を生んだ可能性が考えられる。Uribe-S'uares ら[7]は、岩塊上の小クラックが日照方向の変化に応じて成長していく方向を見積もることから、南北方向もしくは南北から少しずれた方向にクラックが卓越することを示した。

一方、Molaro らは、Bennu 表面では、岩塊の表層を剥がすような割れ目が多く見られることを指摘している[8]。これは、Exfoliation（表層剥離）と呼ばれる現象で、半分が地中に埋もれた岩塊内部の熱応力が最大になるところで、割れると考えると説明できる。Ryugu においても、Exfoliation と考えられる構造は存在する。

References: [1] Delbo M. et al. (2014) Nature 508, 233–236; [2] MacFadden, L. D., et al.; (2005) Geol. Soc. Am. Bull. 117, 161-173; [3] Eppes, M. C. et al., (2015) Nature Comm. 6, 6712; [4] Sugita, S. et al., (2019) Science 364, eaaw0422; [5] Michikami, T., et al., (2019) Icarus, 331, 179-191; [6] Delbo, M. et al (2019) EPSC-DPS-176-2; [7] Uribe-S'uares, D. et al (2021) Icarus 360, 114347; [8] Molaro, J. L. et al. (2020) Nature Comm., 11, 1-11.

小惑星上の低強度粗粒レゴリス層を伝播する衝突励起地震波

○山本 裕也¹, 荒川 政彦¹, 保井みなみ¹, 長谷川直², 横田優作¹, 大川初音¹

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

【はじめに】 小惑星上の高速度衝突に伴って発生する衝突励起振動は、天体表面や内部を伝播してレゴリスの流動化を引き起こし、表面地形を緩和する。ラブルパイル天体のような小惑星表面はボルダーで覆われており、例えば、小惑星 Ryugu 表面は比較的空隙率が高く、力学的強度が小さい(200-280 kPa)ボルダーで覆われているとされる(Grott et al., 2019)。このような小惑星における衝突励起振動による地形緩和を定量的に理解するためには、衝突励起振動の伝播・減衰過程や衝突エネルギーの振動エネルギーへの変換効率である seismic efficiency factor の系統的な研究が必要である。しかし室内実験において、調べられた例は少ない。そこで本研究では、レゴリス層における衝突励起振動のエネルギー減衰率や seismic efficiency factor を明らかにするために、低強度粗粒粒子から成る標的に対してクレーター形成実験を行い、標的が受ける加速度を計測した。

【実験方法】 クレーター形成実験は(A)神戸大学の縦型一段式軽ガス銃と(B)JAXAの縦型二段式軽ガス銃を用いて実施した。弾丸は標的表面に対して垂直に衝突させた。標的には直径1~4 mm(細粒)と1~4 cm(大玉)の鹿沼土を用いた。粒子の圧壊強度はそれぞれ約60, 13kPaであった。(A)では弾丸に直径3 mmの5種類の球(鉄, ジルコニア, アルミナ, ガラス, ナイロン)を用い、40~200 m/sで衝突させた。(B)では弾丸に直径2 mmの8種類の球(アルミ, ナイロン, チタン, ジルコニア, 鉄, 銅, タングステンカーバイド, ポリカ)を用い、1.2~4.3 km/sで衝突させた。クレーター形成過程はハイスピードカメラ(10³, 10⁴, 10⁵ FPS)で撮影した。衝突励起振動は、衝突点からの距離が異なる3箇所に加速度計(型番:SV1111, SV1113, 固有振動数:30 kHz)を設置し計測した。加速度データはチャージアンプ(型番:AD-8724D)を通してデータロガー(取込速度:100 kHz)で記録した。実験後の標的は回収して、表面に作られたクレーターの直径と深さを計測した。

【実験結果】 クレーターサイズと弾丸の運動エネルギーの関係を調べた結果、細粒標的に関して約0.14 J~0.6 Jの領域でクレーターサイズが運動エネルギーの増加に伴って変化せずほぼ一定となる、オフセット領域が生じることがわかった。これは、弾丸の運動エネルギーが標的粒子の破壊に使われたためだと考えられる。また、標的の受けた最大加速度とクレーターリム半径で規格化した衝突点距離の関係を調べた結果、どちらの標的に関しても弾丸の種類、衝突速度に依らず最大加速度は規格化距離が増加すると指数関数的に減少することがわかり、最大加速度の距離減衰に関する以下の経験式を得た。

$$g_{max} = 10^{1.4} \times (x/R)^{-1.65} \text{ (細粒)}, \quad g_{max} = 10^{1.32} \times (x/R)^{-1.62} \text{ (大玉)}.$$

クレーターリムにおける最大加速度や減衰率に、標的粒径による違いは見られなかった。また、オフセット領域前後で標的が受ける最大加速度を比較すると違いが見られなかったことから、クレーターサイズが等しい場合、衝突速度によらず同等の最大加速度を受けると考えられる。さらに、計測した加速度波形を詳しく調べると、塑性波と弾性波の2種類の波が生じていることを発見した。波形の種類によって、最大加速度と規格化衝突点距離の関係を整理すると、標的粒径によらず最大加速度 10 m/s² を境に塑性波と弾性波で分かれており、上記で得た経験式の距離減衰率と違いがあることがわかった。弾性波の伝播に関して次の経験式を得た。 $g_{max} = 10^{1.03} \times (x/R)^{-1.01}$ 。これは、粒子破壊を伴う塑性波は直ちに地球重力加速度以下まで減衰され、その後、弾性波として振舞うと考えられる。弾性波波形から衝突励起振動の対数減衰率を求めることで、Q値 ≈ 30 と求まった。

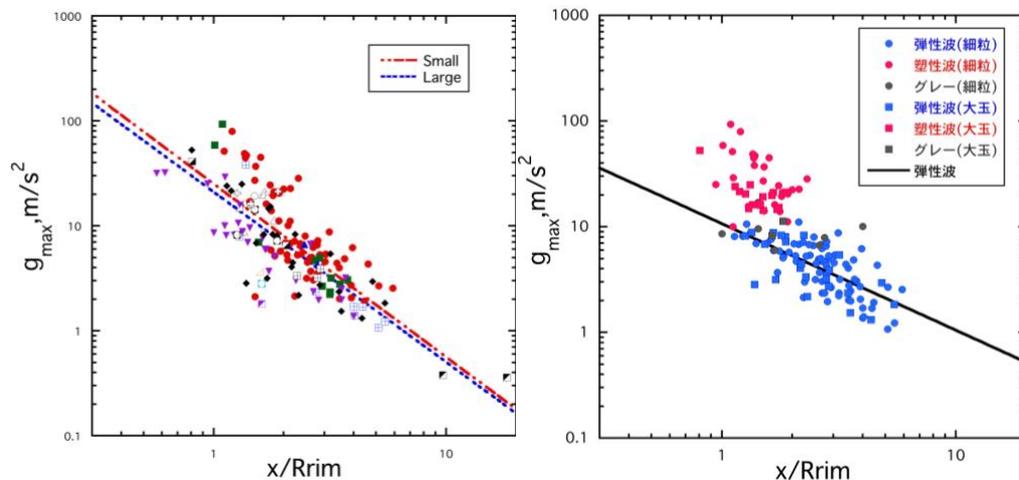


図 1: 最大加速度と規格化衝突点距離の関係

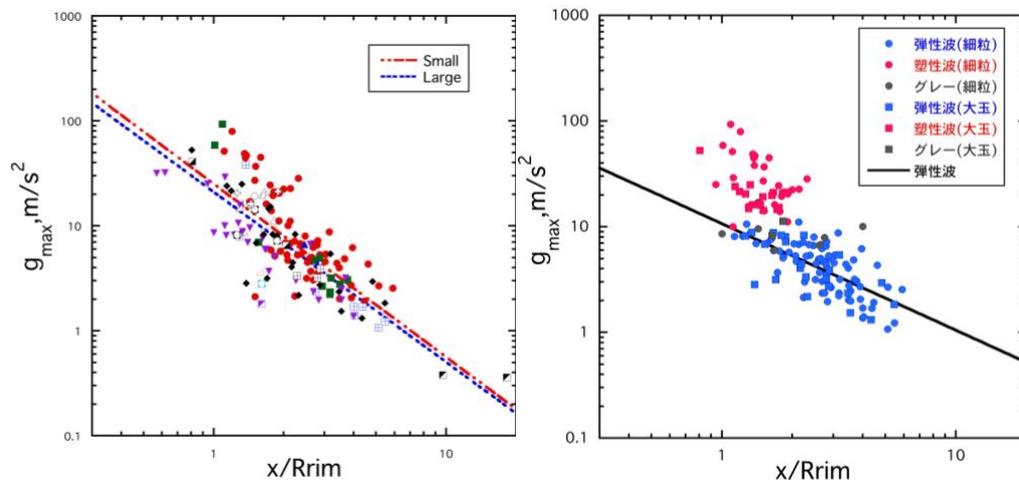


図 2: 10m/s² を境に塑性波と弾性波が分かれて見られた。

DESTINY⁺探査機搭載小惑星追尾駆動鏡の検討

○洪鵬¹、石橋高¹、須崎祐多²、山田学¹、細沼貴之³、尾崎直哉²、宮原剛²、太田方之²、
佐藤峻介²、大槻真嗣²、豊田裕之²、西山和孝²、奥平修¹、高島健²

¹千葉工業大学、²宇宙航空研究開発機構、³東京大学

深宇宙探査技術実証機 DESTINY⁺ (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUst Science) はふたご座流星群の母天体と考えられている小惑星 (3200) フェートンを近接フライバイし、地表面の高解像度撮像を行う予定である。探査機には 2 種類のカメラ、可視光のワイドバンドで小惑星を追尾しながら高解像度地形撮像を行う望遠モノクロカメラ TCAP (Telescopic Camera for Phaethon)、と可視から近赤外のマルチバンド撮像を行うカメラ MCAP (Multiband Camera for Phaethon) が搭載される。TCAP では、最接近の 7.5 時間前にフェートンの理学撮像を開始するが、距離 500 km の最接近を含む約 9 分間は、1 秒間隔の高空間解像度撮像を計画しており、最高空間解像度は 3.5 m/px に達する。フライバイ撮像におけるカメラの視線方向は、過去のほぼすべての小天体探査では探査機本体の姿勢制御により制御されてきた。しかし、Phaethon は軌道離心率が大きく、軌道傾斜角も大きいいため、フライバイ相対速度が 30-40 km/s と高速で、かつ 500km まで近づくため、相対角速度が 4 deg/s 以上に達し、探査機本体の姿勢制御だけでは小惑星を視野内に収め続けることが難しい。そのため、高速フライバイ中に自律的に小惑星を視野内に収め続け、かつぶれのない高解像度画像を取得するための追尾機構がカメラ自身に要求される。

そこで私たちはまず駆動鏡と呼ぶ追尾機構の概念検討を行い、光学系の仕様やアライメント、探査機の姿勢制御や追尾アルゴリズムも考慮した上で、駆動鏡への要求仕様を決定した。そして、その要求を満たすようなアクチュエータ部品や性能検証に使用する角度測定器の検討を行い、選定したアクチュエータ部品の動作確認と性能評価、測定方法・環境の整備を目的として、地上用部品を用いたアクチュエータ試作機を製作し評価した。エンコーダおよびレーザ・ドップラ速度計を用いた試作機の評価により、測定手法を確立するとともに、アクチュエータの指向精度と指向安定度、角度再現性が要求仕様を概ね満たすことを確認した。しかし、試作機の評価により、測定系に内在するバイアス誤差や共振の影響が大きいことが判明したため、エンコーダの角度校正や、共振の影響を除外するための非接触角度測定法の検討を実施した。ノミナルの設計では駆動鏡の現在角度はゼロ点とステップモータの回転数から推定するため、角度再現性の鍵となるゼロ点検出機構の試作評価も実施している。また角度検出のためのオプション機能としてレゾルバの搭載も検討している。今後、これらの評価結果を反映して、EM (エンジニアリングモデル) の設計を実施する。

アルマの高精度観測による、タイタン・海王星の特異な大気化学・物理過程の網羅的解明

○ 飯野孝浩¹, 佐川英夫², 谷口琴美³, 塚越崇³, 野澤悟徳⁴, 山田崇貴⁵

¹ 東京大学・情報基盤セ, ² 京都産業大学・理, ³ 国立天文台, ⁴ 名古屋大学・ISEE, ⁵ 情報通信研究機構

ALMA をはじめとする地上大型望遠鏡の革新は、太陽系内惑星・衛星の大気や地表の高感度・高精細・長期スパンでの観測を可能とし、これまでにない大量の観測量データの取得が行われている。このような状況下で惑星科学のブレイクスルーを引き起こすには、隣接分野の解析技術（テラヘルツリモートセンシング逆問題解析、干渉系データ解析）および化学・物理過程（星間空間化学、大気化学、原始惑星系円盤進化、地球大気物理）の知見を融合した研究体制の構築が重要である。我々は高い学際性を持つ本発表グループで研究チームを構成、科研費・基盤(B)研究体制を構築するとともに、以下のように ALMA 用いた海王星・タイタンの観測的研究の成果を得てきた。本発表では、両成果とともに、今後の展開のための学際研究の方針を紹介・議論したい。

海王星大気においては、成層圏に偏在する気相のシアン化水素 (HCN) の存在が 90 年代より指摘されており、その起源について多様な議論がなされてきた。我々はアルマアーカイブから抽出した HCN の $J=4-3$ 回転遷移の観測データを用い、世界初の HCN 空間分布マップの構築に成功した。空間分解能は ~ 0.4 秒であり、海王星の視直径 2.2 秒に対し十分に精細であった。輝線強度比はそれぞれ赤道上空と南緯 60 度付近で明瞭に最大値・最低値を取り、また南極においても弱いピークを呈した。輻射輸送計算により両領域での HCN 混合比を導出したところ、赤道における混合比は南緯 60 度に対して約 1.7 倍となった。海王星成層圏においては、中緯度において対流圏上部から成層圏へと上昇し、低緯度及び高緯度へと水平輸送され沈降する大規模循環の存在が指摘されている。この循環モデルと、HCN が対流圏から輸送される窒素分子により成層圏で生成されるという化学モデルを結合することで、得られた空間分布を説明することが可能となった。本成果は Iino et al. 2020b, ApJL, 903, L1 として出版済みである。

タイタン大気については、シアノアセチレン (HC_3N) 分子の 3 種の ^{13}C 置換体、すなわち $\text{H}^{13}\text{CCC}\text{N}$, $\text{HC}^{13}\text{CC}\text{N}$, HCC^{13}CN の存在量比を求め、星間空間との比較により、その前駆体における化学過程の制約を行った。星間空間では、上記 3 種の置換体のうち、1 ないし 2 種に 140 – 200% に及ぶ卓越が生じることが示されてきた (e.g. Taniguchi et al. ApJ, 846(2017)). その同位体分別過程として、 HC_3N の前駆体である CN や C_2H への ^{13}C の濃集が挙げられている。土星最大の衛星タイタンの大気においても、 HC_3N を含む多様な炭化水素・窒素化合物が検出されており、その大気化学過程の解明は惑星大気化学の重要なトピックである。我々は ALMA のアーカイブデータから、 $\text{HC}^{13}\text{CC}\text{N} - \text{HCC}^{13}\text{CN}$ と $\text{H}^{13}\text{CCC}\text{N} - \text{HCC}^{13}\text{CN}$ のペアについて、日時および観測設定を共有する観測データを抽出し、それぞれ 12 及び 1 のデータセットを得た。輝線強度比より導出された同位体比は $[\text{H}^{13}\text{CCC}\text{N}]:[\text{HC}^{13}\text{CC}\text{N}]:[\text{HCC}^{13}\text{CN}] = 1.17 (\pm 0.20) : 1.09 (\pm 0.25) : 1 (1\sigma)$ であり、星間空間で検出されている程度の濃集は検出されなかった。タイタンの成層圏は 170K 前後という相対的な高温環境であり、星間空間における同位体分別を引き起こした同位体交換反応は抑制されると考えられる。なお、本成果は PSJ に受理済である。

フラッシュ X 線による衝突破片の速度—質量分布の計測： 粘土を用いた延性標的の衝突破壊実験

○長野巧¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 石田紗那¹, 長谷川直²

¹神戸大学, ²宇宙航空研究開発機構

炭素質コンドライト隕石の母天体である C 型小惑星は、水と有機物を含む水質変成を経た天体である。小惑星帯で惑星形成が盛んであった太陽系初期には、内部は水・有機物の混合液体とシリケート微粒子が混ざり合う泥のような粘性流体であった。従って、この炭素質微惑星は、衝突時に岩石質天体のような脆性破壊を起こさずに、金属のように延性変形をする可能性が高い。

100m 以上の天体では、衝突破壊強度 (Q) は物質強度よりも天体の重力に依存して変化することが知られており、重力支配の衝突破壊強度 (Q_0^*) と言われる。この Q_0^* は、天体を構成する物質の空隙率、摩擦、結合力などに影響される。しかしながら、炭素質微惑星のように延性的な性質を持つ微惑星の Q_0^* に対して、その粘性が及ぼす影響は調べられてこなかった。そこで本研究では、重力支配域の衝突破壊強度に対する粘性の効果を調べるためにフラッシュ X 線を利用した衝突破壊実験を行い、衝突時の破片の速度—質量分布を調べた。

衝突破壊実験は、主に宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃とフラッシュ X 線を用いて行った。衝突速度は 2kms^{-1} – 4.5kms^{-1} で、直径 7mm のポリカ弾丸を衝突させた。標的試料は 10Pas と 60Pas のシリコンオイルとベントナイト粉末を質量比 1:3 で混合して作成した。標的は直径 60mm の球形であり、中心を通る断面に直径 3mm の鉄球 12 個を格子状に配置した。実験では、衝突破壊中にフラッシュ X 線撮影を行い、この鉄球の初期位置からの移動量を計測した。12 個の鉄球から衝突後の試料内部の速度場を求め、さらに全破片の速度—質量分布を計算した。この関係から、破片速度の積算質量分布を調べ、積算質量が元の質量の 1/2 になる時の破片速度 (中間速度: v^*) を求めた。この v^* は、エネルギー密度 (Q) にほぼ比例して大きくなるが、10Pas 混合試料では 60Pas 混合試料より系統的に大きくなることが分かった。先行研究から Q_0^* は、この v^* とほぼ反比例の関係にあることが分かっているため、粘性は Q_0^* に直接影響することになる。

原始天王星への巨大衝突により生じた蒸気円盤におけるダスト成長と微衛星形成

○石澤祐弥¹, 井田茂¹, 佐々木貴教²

¹ 東京工業大学 地球生命研究所

² 京都大学大学院理学研究科 宇宙物理学教室

天王星の順行衛星の起源を説明するシナリオの一つとして巨大衝突仮説がある。太陽系形成段階後期において原始天王星に地球サイズの天体が衝突し、惑星周りに散らばった破片が軌道上で集積し衛星になるという説である。この説は天王星の 98 度という大きな赤道傾斜角の起源とその傾いた赤道面上を周回する順行衛星の起源を同時に説明できる可能性がある。衝突計算については粒子法流体計算 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) を用いて検証されてきており、天王星の現在の自転周期を説明すると共に、岩石と氷を含む衛星形成に十分な質量が周惑星軌道上にばら撒かれることが示唆されている。また巨大衝突後に形成される円盤は衝突エネルギーの大きさから、岩石や氷成分を含め大部分が蒸発していると考えられる。Ida et. al.(2020) によって巨大衝突により生じた蒸気円盤の一次元粘性拡散進化が計算され、円盤ガスの拡散と冷却の後に動径方向に正の勾配を持つ氷円盤が形成されることが示唆された。さらにその得られた氷円盤の分布をもとに N 体計算を行った結果、現在の衛星の質量-軌道半径分布を再現できる可能性があることがわかった。しかしで Ida et al.(2020) による数値計算においては固体物質の動径方向の移動や昇華/再凝縮、岩石成分の寄与は計算に含まれていない。現在の天王星の全衛星質量の 99% 以上を占める五大衛星の平均内部密度はおよそ $1.4\text{-}1.6\text{g/cm}^3$ であり、氷と岩石成分の質量比がおよそ 1:1 に達している衛星も含まれる。そのため円盤の進化および微衛星の形成過程でいかに岩石が含まれるかを調べることは重要である。

そこで我々は天王星への巨大衝突後に生じた、水素・ヘリウム・水・シリケートを含む蒸気円盤の粘性拡散進化と、その円盤中における氷およびシリケートの凝結・凝縮/昇華、衝突合体成長、移流拡散を含む進化について単一サイズ近似 (Single size approximation) を用いて計算した (e.g., Sato et. al., 2016)。この単一サイズ近似では、各軌道半径の質量分布ではなくピーク質量のみの成長進化を近似的に計算している。今回は氷とシリケートの混合固体物質の面密度、ピーク質量、平均内部密度の動径分布時間進化を、乱流粘性パラメータと氷同士の衝突限界速度、初期円盤質量および初期円盤組成について変化させて計算した。その結果、乱流粘性のパラメータと衝突限界速度により固体粒子が成長を妨げられる場合はデブリ円盤は形成されなかったが、ある臨界パラメータ領域に達するとスノーライン付近で混合固体物質の成長が加速され、微衛星サイズまで成長することがわかった。また平均内部密度はその臨海を迎えるタイミングによって変化することも計算によりわかった。今回の発表ではこれらの計算によって得られた、最終的な固体物質の面密度分布や内部密度分布、微衛星集積計算における課題などについて報告する。

月極域における日照量時間変化

Time variation of sunlight at the lunar polar regions

○西谷 隆介¹、大竹 真紀子¹、仲内 悠祐²、山本 光生²、佐藤 広幸²

¹会津大学、²宇宙航空開発機構

近年の月探査機によるリモートセンシング観測から、月極域には水氷が存在する可能性が示唆されてきた。これは中性子分光による水素原子の検出 (Feldman et al., 1998) や赤外分光による水もしくは OH 基に起因する 3 μm 付近での吸収の観測 (Pieters et al., 2009) によるもので明確な水氷の存在を示すものではなく、その存否や分布について結論はまだ出ていない。これまでの秋季講演会において、月周回衛星「かぐや」に搭載されたスペクトルプロファイラ (SP) による分光観測データの解析によって月極域の複数領域において水およびその他揮発性物質由来の吸収が確認されたことが報告されてきた。こうした吸収は長期間低温である永久影 (一年を通して太陽光が入射しない領域) に限らず、その周辺地域にも分布していることが分かっている。永久影以外でも水の吸収が観測された理由の一つとして、周辺地域に保持された水氷の日照による昇華 (Schorghofer and Aharonson, 2014) が考えられる。そのため観測された水やその他揮発性物質の分布は SP データ取得時における極域の日照条件と関連する可能性がある。

本研究では、水およびその他揮発性物質の吸収が確認された SP データ取得日時周辺における月極域での日照条件を明らかにするため、月極域において複数時刻でのレイトレーシング (太陽光線の追跡による日照の有無の判定) を行い、日照量の時間変化を調べた。成果として月極地域における観測日を含む一ヶ月間の日照量の時間変化が得られ、該当地域は観測時に直達光が無かったことが分かった。この時、最後に直達光が当たったのは少なくとも数日以上前で、次に直達光が当たるまで一週間程度あることが分かった。そのため、観測された水やその他揮発性物質はその場で昇華しつつあるものではないと考えられる。一方、観測地域近傍には 2 日前まで直達光があったことが確認できた。そのため観測された水やその他揮発性物質はこの直達光があった領域から昇華したものが観測地点まで移動してきたものである可能性がある。

コンドリュール生成に寄与する雷の発生可能性

○中本泰史¹, 菅原幸輝¹, 南敦貴¹, 森崇志¹, 池田千尋¹, 佐藤拳斗¹

¹東京工業大学

雷によってコンドリュールが形成されるというモデルがある。本研究では、原始太陽系星雲中でコンドリュール生成に寄与する雷が発生する可能性を検討した。

まず、原始太陽系星雲中で雷が発生し得る場を検討する。雷が発生するためには、異符号の電荷を持つダスト粒子群が空間的に離れて位置し、その間に強い電場が形成される必要がある。また、その前段階として、ダスト粒子群が電荷を獲得しながら移動する過程が必要である。こうした状況が形成される可能性のある場として、原始太陽系星雲の赤道面に形成されるダスト層、ダスト層の重力不安定による分裂片、ストリーミング不安定時の高密度ダスト領域、微惑星周囲の円盤、などいくつか挙げられる。

本研究では、これらの場のうち最初に、ダスト層の重力不安定による雷発生の可能性を検討した。重力不安定が発生した後、ダスト粒子群は自己重力によって分裂片中心部に向かって移動する。この際、ガス抵抗を受けるので移動速度はダスト粒子の大きさに依存することになり、ダスト粒子同士の衝突が生じる。そして、摩擦帯電などでダスト粒子が電荷を獲得しつつ、そのまま移動が継続することで電荷の分離が起こる。最終的にはこの結果、重力不安定によるダスト層の分裂で生まれるダスト粒子群塊内で雷が発生する可能性が十分に高いことがわかった。また、他の可能性についても同様の検討を行ったところ、雷が発生する可能性が高い場が多いことが推定された。

次に、こうした場における雷とコンドリュール形成の物質科学的知見の関係を見た。コンドリュール形成場に関する研究に、Naなどの揮発性の高い元素が一定程度含まれている、あるいはそれらの同位体分別が見られない、ということからコンドリュール形成は極めてダスト密度の高い領域で起こったと結論づけたものがある (Cuzzi & Alexander 2006, Alexander et al. 2008)。ここで推定されている形成場は、原始太陽系星雲内で雷が発生し得る場として上で検討した「微惑星形成に至るダスト粒子塊内」と非常に整合的である。

以上より、原始太陽系星雲内でダスト粒子が集まり微惑星形成に至る場において、雷が発生しコンドリュールが形成されるということは十分あり得ることと思われる。

LIBS を用いた月隕石元素分析の精度向上研究

○ 小倉暁乃丞¹, 湯本航生¹, 長勇一郎¹, 新原隆史², 亀田真吾³, 杉田精司¹

¹ 東京大学 理学系研究科, ² 東京大学 工学系研究科, ³ 立教大学 理学研究科

これまでの月探査により月は過去にマグマオーシャン (LMO) を経験したことがわかっているが、LMO の組成や地殻の詳細な形成過程についてはまだ明らかにされていない。かぐやの観測では斜長石を 100% 近く含む斜長岩 (Purest Anorthosite, PAN) が発見され (Ohtake et al., 2009)、地殻の主要構成要素である斜長石が結晶化した時の始原的な元素組成を保持していると期待される。月の着陸探査でこの主要元素組成を鉱物単位で調べることができれば、斜長岩に含まれる有色鉱物の Mg# (=Mg/(Mg+Fe)) を求めることで、LMO のバルク組成が取り得る Fe₂O₃ と Al₂O₃ の濃度に制約を与えることができる。(Sakai et al., 2014)

こうした着陸探査における元素分析手法の一つにレーザー誘起プラズマ発光分光法 (LIBS) がある。LIBS とはレーザーを照射することで試料をプラズマ化し、そのプラズマの脱励起による光を分光観測することで試料に含まれる元素を定量分析する手法である。LIBS 装置は現在火星で運用中のアメリカや中国の火星探査車にも搭載され、1 m 以上遠方にある試料の数百 μm の領域を 1 分程度の短時間で分析できる特徴を持つ。先行研究では、月面の真空下でも一定の元素濃度範囲においては LIBS により 1 wt% の確度で元素濃度予測が可能であることが示された (Lasue et al., 2012)。また、発表者らの過去の研究で、現実の月試料が持つ幅広い元素濃度の範囲で LIBS の元素定量性能を検証するため、月隕石を LIBS 測定し元素分析を行ってきた。その結果、高地由来の月隕石 NWA11474 では Ca と Si が、海由来の月隕石 NWA479 では Ca, Mg, Al の濃度予測結果が、別の手法 (SEM-EDS) で測定した濃度と誤差の範囲で一致することが確かめられた (惑星科学会 2020 年秋季講演会)。一方で、特に高地由来の隕石において Mg, Al, Fe の定量性能に改善の余地があることも分かっていた。

そのため本研究では、Mg, Al, Fe の元素に注目し、較正試料やハードウェアの改良点を見出すため追加のデータ取得と Partial Least Squares (PLS) アルゴリズムを用いたスペクトルの多変量解析を行った。PLS による多変量解析ではある元素の濃度に相関があるスペクトル中の輝線を抽出し、それが定量結果に与える影響の大きさを寄与 (回帰係数) として導出できる。その結果、Mg の定量には Mg 輝線 (448 nm, 517.2 nm, 518.32 nm) と Na 輝線 (589.13 nm) が使用されることがわかった。このうち Mg の輝線強度が濃度予測結果を大きく変化させ、同程度の Mg 濃度を持つ較正用試料に比べて高地由来の隕石は 2 倍ほど強い Mg の輝線強度を呈することが過大評価の原因であるとわかった。海由来の隕石も同程度の Mg 濃度を持つが、高地由来の隕石のように Mg の輝線が特異的に強く出る現象は見られず、文献値と整合的な Mg 濃度が得られている。このことは高地由来の隕石のように一部の岩石試料では表面状態の影響や共存元素の影響が顕著に現れている可能性を示唆する。

次に Al の定量では、569.7 nm, 572.3 nm (Al III) と 624 nm, 704 nm, 705 nm (Al II) の輝線の寄与が強いことがわかった。そこで高地由来の隕石のスペクトルにおけるこれらの輝線強度を較正試料のものと比較したところ、同隕石の半分以下しか Al を含まない試料と同程度であった。海由来の隕石は高地由来の隕石に比べて約 3 分の 1 しか Al を含まないが、これらの輝線強度は高地由来のものより強い値であった。569.7 nm, 572.3 nm (Al III) の輝線は 568.68 nm (Na I) の輝線と重なっていることが、濃度変化に対する輝線強度の線形性を悪化させている要因の一つだと考えられる。

Fe の定量では 513.9 nm, 541.3 nm, 561.7 nm の輝線が潜在的に重要であることが示唆された。しかし LIBS スペクトルにおいてこれらの輝線は微弱であるせいか実際の濃度予測結果に対してこれらの輝線の貢献度は低く、Fe 濃度の低い高地由来の隕石では Ca や Al の輝線による寄与が大きく、ノイズによって定量結果がばらつくことがわかった。これらが Fe 濃度を較正試料の平均値より高く予測する方向に働き、Fe 濃度が較正試料より低い高地由来の隕石では過大評価されたと推測される。一方 Fe を較正試料の平均値の倍以上含む海由来の隕石ではこれらの輝線の貢献度は上がったものの、Fe 濃度は過小評価されている。輝線の半値全幅が約 2 nm である現装置の波長分解能では、Fe の輝線が Mg, Ca といった元素のより強い輝線に埋まってしまうことが原因である可能性がある。

以上の結果から、月隕石での元素濃度予測性能を向上させるには 1 nm 離れた輝線が重ならないよう、分光器の波長分解能を向上させることが必要であることが示唆された。また、較正試料については岩石試料で Mg の輝線強度が強くなる可能性を考慮し、粉末ペレットだけでなく岩石試料を追加すべきだということも示唆される。

DESTINY⁺プロジェクト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, 洪 鵬¹, 山田 学¹, 千秋 博紀¹, 和田 浩二¹, Ralf Srama³, Harald Kruger⁴, 今村 裕志⁵, 豊田 裕之⁵, 西山 和孝⁵, 高島 建⁵, 佐々木晶⁶, 藪田 ひかる⁷, 石黒 正晃⁸, 渡部 潤一⁹, 伊藤 孝士⁹, 大坪 貴文⁹, 大塚 勝仁¹⁰, 阿部 新助¹¹, 中村 智樹¹², 廣井 孝弘¹³, 中村メッセンジャー圭子¹⁴, 小松 睦美¹⁵, 関口 朋彦¹⁶, 浦川 聖太郎¹⁷, 木下 大輔¹⁸, 橘 省吾¹⁹, 三河内 岳¹⁹, 諸田 智克¹⁹, 野口 高明²⁰, 金田 英宏²¹, 矢野 創⁵, 吉川 真⁵, 岡本 尚也⁵, 中藤 亜衣子⁵, 柳沢 俊史⁵, 黒崎 裕久⁵, 小松 吾郎^{22, 1}, 出村 裕英²³, 平田 成²³, 伊藤 元雄²⁴, 山口亮²⁵, 松浦周二²⁶

¹千葉工大・惑星探査研, ²産業医科大学, ³University of Stuttgart, ⁴MaxPlanck Institute, ⁵JAXA・ISAS, ⁶大阪大学, ⁷広島大学, ⁸ソウル大学, ⁹国立天文台, ¹⁰東京流星観測網, ¹¹日本大学, ¹²東北大学, ¹³ブラウン大学, ¹⁴NASA JSC, ¹⁵総合研究大学院大学 ¹⁶北海道教育大学, ¹⁷日本スペースガード協会, ¹⁸台湾中央大学, ¹⁹東京大学, ²⁰九州大学, ²¹名古屋大学, ²²ダヌンツィオ大学, ²³会津大学, ²⁴JAMSTEC, ²⁵国立極地研究所, ²⁶関西学院大学

深宇宙探査技術実証機デスティニープラス DESTINY+は、開発中の小型ロケット「イプシロン S」を利用して打ち上げられる小惑星探査計画である。本計画の前身となる DESTINY は、ISAS の「2013 年度イプシロン搭載宇宙科学ミッション」の提案募集に応募したが、最終審査で不採択となったため、理学ミッションを加えた DESTINY+として、ISAS の「2015 年度公募型小型計画宇宙科学ミッション」の提案募集に再応募し、2017 年 8 月に選定された。DESTINY+の理学ミッションは、2010 年の「月惑星探査の来たる 10 年」検討に提案された小惑星 Phaethon 探査計画がベースとなっている。昨年 6 月 1 日にプリプロジェクト（プロジェクトの前段階）、本年 5 月 1 日にプロジェクトとなり、2024 年度の打上げを目指している。DESTINY+は Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage wit Phaethon fLyby and dUst Science の略称で、前半が工学ミッションの目的である「深宇宙探査技術の実証」、後半が理学ミッションの目的である「小惑星(3200)Phaethon のフライバイ及びダストサイエンス」を表す。工学と理学の連携により、小惑星の近傍を通過して観測を行う「フライバイ」という探査技術を獲得し、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って計画を進める。理学ミッションでは、ふたご座流星群の母天体である活動的小惑星 Phaethon の高速フライバイ撮像を行うと共に、1au 付近の惑星間ダスト・星間ダスト、Phaethon 周辺ダスト粒子毎の質量、軌道、化学組成をその場分析する計画である。また、エクストラミッションとして、Phaethon からの分裂天体と考えられている小惑星 2005UD のフライバイも計画している。高速追尾機能を有する望遠カメラ及び可視マルチバンドカメラは千葉工大が中心となり開発し、ダストアナライザはドイツとの国際協力でシュツットガルト大が開発する。

2017 年 12 月には Phaethon の国際観測キャンペーン、2018 年 10 月には Phaethon からの分裂天体である小惑星 2005UD の国際観測キャンペーンが行われた。また、2019 年 7 月 29 日米国南西部で行われた Phaethon による恒星食観測は歴史的成功を収め、天体サイズに係る新たな情報が得られた。同年 8 月 22 日には北海道渡島半島で、10 月 26 日には宮城県及び山形県でも Phaethon による恒星食観測を行った。これらの地上観測により Phaethon 及び 2005UD の物理化学特性について理解が進んだ。さらにアルベドとサイズ不定性を小さくするため、本年 10 月 3 日に中国四国地方での Phaethon による恒星食観測、11 月には小さい太陽位相角での測光及び分光観測を計画している。本講演では、DESTINY+計画の進捗及び地上観測による小惑星 Phaethon の最新理解について報告する。

木曾 105 cm シュミット望遠鏡 Tomo-e Gozen を用いた 微小地球接近小惑星の高時間分解撮像観測

○ 紅山仁¹, 酒向重行¹, 大澤亮¹, 瀧田怜¹, 小林尚人¹,
奥村真一郎², 浦川聖太郎², 吉川真³, 臼井文彦³, 吉田二美^{4,5}

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

近日点距離が1.3 au 未満で定義され地球に接近する軌道をもつ天体を地球接近小惑星 (Near-Earth Objects, NEO) という。NEOの多くは火星-木星間のメインベルトから軌道進化したと考えられており、その過程においては太陽や惑星の重力に加え、太陽輻射に起因して小惑星の軌道や自転状態を変化させる非重力効果が重要となる。非重力効果の一つであるYORP効果は直径100 m 以下の微小天体に強く作用し、軌道進化に比べて短いタイムスケールで自転周期を変化させる[1]。高速自転小惑星には強い遠心力が働くため、YORP効果により自転加速され構造を維持できなくなる臨界自転周期に達した天体は変形や破壊を経験する。すなわち非重力効果や強度を反映した微小天体の自転周期は、小天体の力学史を理解する上で重要な物理量である。しかし小さく暗い天体の観測は難しく直径100 m 以下のNEO (微小NEO) を観測した先行研究では長時間露光による高速自転の見逃しを危惧している[2]。微小天体の真の自転周期分布を得るためには、系統的な高時間分解観測が不可欠である。

我々は東京大学木曾観測所105 cm シュミット望遠鏡に搭載されたTomo-e Gozenカメラ[3]を用いた2 fps 観測により、推定直径3 – 86 m の51天体の微小NEOの高時間分解撮像観測を実施した。取得した光度曲線から周期1分以下の高速自転小惑星11天体を含む32天体の微小NEOの自転周期の推定に成功した(図)。本研究で得た自転周期分布は先行研究に比べて周期1分以下の高速自転小惑星の割合が高く、先行研究では高速自転を十分に検出できていないことが示された。一方、本研究で得た自転周期分布を外挿すると51天体観測した場合に9天体で周期10秒以下の高速自転が期待されるが、2 fpsの高時間分解観測を行っても周期10秒以下の高速自転は1天体でしか検出されなかった。系統的な高速観測により高速自転する微小NEOの欠如を示したのは本研究が初めてである。さらにYORP効果による自転加速モデルを用いて微小NEOの自転周期変化を計算し、本研究で得た微小NEOの自転周期分布を説明しうるか検証を行った。(i)高速自転するNEOが臨界自転周期に達して自転破壊している、(ii)微小隕石の衝突によりYORP自転加速が抑制される、という二つの説では観測で得た自転周期分布をうまく説明できず、微小NEOの自転加速を選択的に抑制するプロセスの存在が示唆される。小惑星の強度や力学史に関する議論において微小NEOの高時間分解観測が有用な手段であることを示した。

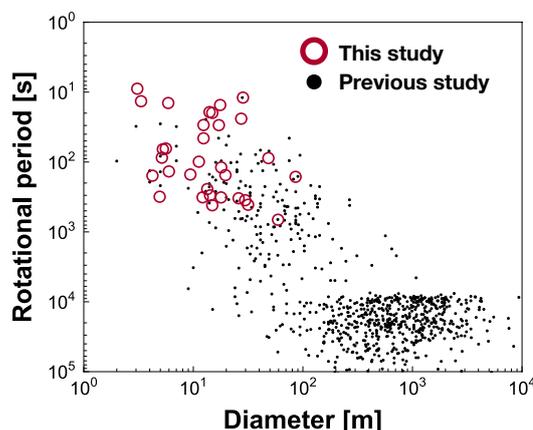


図. 小惑星の直径-自転周期関係 [4]。
本研究(赤丸)では既知の天体(黒丸)が少ない
微小高速自転小惑星の多数発見に成功した。

参考文献

[1] Rubincam D.P., 2000, Icarus 148, 2 [2] Thirouin A. et al., 2018, The Astrophysical Journal Supplement Series, 239, 4 [3] Sako S. et al., 2018, Proceeding of SPIE, 10702, 140 [4] Warner B. D. et al, 2009, Icarus, 202, 134

ラブルパイル天体上の衝突クレーターからのボルダー放出過程

○大川 初音¹ 戸田 瑞乃² 荒川 政彦¹ 保井 みなみ¹ 長谷川 直³

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

背景：小惑星探査機「はやぶさ2」が行った小惑星 Ryugu での SCI 衝突実験では、小惑星上でのクレーター形成の様子を撮影することに成功した。Ryugu 表面は大小様々な岩塊に覆われており、小型分離カメラ DCAM3 が撮影したエジェクタカーテン中には、直径数十 cm の岩塊が含まれていた[1]。また、衝突実験の前後で Ryugu 上空から撮影されたクレーター周辺の画像から、エジェクタとして放出されたものより大きな岩塊も移動したことが確認されている[2]。しかし、そのような岩塊がクレーター形成過程に及ぼした影響やそれ自身の移動過程の特徴は未解明である。本研究では、クレーターが形成される領域に岩塊が存在する状態を想定した衝突実験を行い、それらの岩塊の放出過程や移動について解析し、Ryugu 表面で起きた岩塊の放出・移動過程について議論した。

実験：神戸大学と宇宙科学研究所に設置された縦型銃を用いたクレーター形成実験を行った。標的には直径 100 μ m のガラスビーズを使用し、その表面に岩塊を模擬した直径 3~30mm のガラスビーズ（以下、トレーサー粒子と呼ぶ）を半分標的に埋まるように配置した。実験の様子は2台の高速ビデオカメラを用いて撮影し、これらの動画からトレーサー粒子の三次元放出軌道を解析した。

結果と議論：トレーサー粒子の解析から得られた放出軌道を用いて、その放出角度と放出速度を求めた。放出角度はトレーサー粒子の直径に依存せず平均約 53 $^\circ$ となり、先行研究の結果 (40 $^\circ$, [3]) と比較してやや大きくなった。放出速度はクレーター半径で規格化した初期位置（弾丸の衝突点からトレーサー粒子中心までの距離）を用いて整理した。その結果、同じ規格化初期位置でも、クレーター半径に対するトレーサー粒子の半径（規格化粒子径）が大きいほど、放出速度が遅くなった（図 1）。一方、この放出速度分布について、衝突点からトレーサー粒子の外側の端までの距離を用いて規格化初期位置を再定義して整理すると、速度分布には規格化粒子径の依存性が見られなくなった。本研究で得られたトレーサー粒径と放出速度の関係から、クレーター外に放出される最大のボルダーサイズを求めることが可能となった。その結果、クレーターから放出されるボルダーの最大半径は、クレーター半径の約 0.3 倍であることがわかった。これを SCI クレーターに適用すると SCI クレーターから放出されたボルダーの最大半径は約 2m となる。一方、SCI クレーター内部には、長さ 6m のイイジマ岩が残され、長さ 2m のボルダーがクレーター内から放出されたのが観測されており、今回の推定値と整合的である。

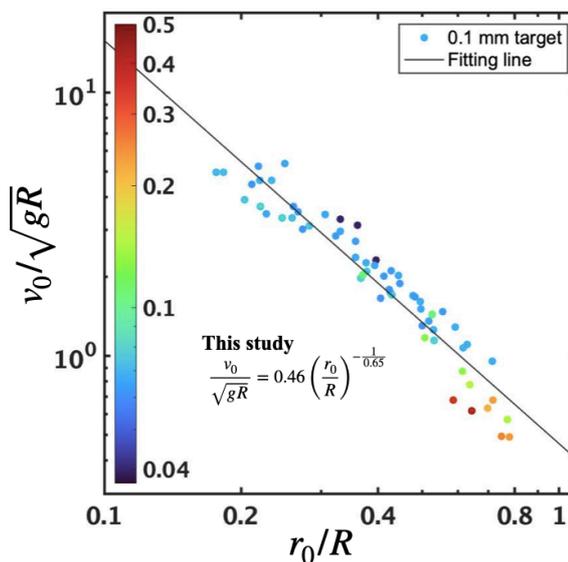


図 1：エジェクタ速度分布。色はトレーサー粒子の粒径をクレーター半径で規格化した値に対応する。

参考文献： [1] Kadono *et al.* (2020) *ApJL*, 899, L22 (6pp). [2] Honda *et al.* (2021) *Icarus* 366, 114530. [3] Tsujido *et al.* (2015) *Icarus* 262, 79-92.

JUICE 計画 – PEP/JNA 高速中性粒子観測器の開発

○浅村和史¹、下山学²、二穴喜文²、齋藤義文¹、三好由純³、坂野井健⁴
JUICE-PEP/JNA チーム

¹宇宙航空研究開発機構

²Swedish Institute of Space Physics

³名古屋大

⁴東北大

欧州の木星探査計画 JUICE は 2022 年 9 月の打ち上げ予定で準備が進められている。私たちは JUICE 衛星に搭載される粒子観測器パッケージ (PEP) を構成する観測器の一つである非熱的中性粒子観測器 PEP/JNA (Plasma Environment Package / Jovian Neutrals Analyzer) を開発している。PEP/JNA は主として衛星表面で生成される非熱的中性粒子の観測をターゲットとしており、10 - 3300eV の中性粒子のエネルギー、質量、到来方向分析を行う。木星磁気圏において非熱的中性粒子の成因の一つは、Ganymede などの天体表面へのプラズマ粒子の降り込みによって起こる後方散乱及びスパッタリング現象である。生成した非熱的中性粒子は電磁場の影響を受けずに弾道飛行する。このため、希薄な大気しかもたず、氷衛星表面と木星磁気圏プラズマ粒子が直接衝突する環境における非熱的中性粒子観測は、氷衛星表面に投影したプラズマ構造の空間変化の情報をもたらす。これに対しプラズマ直接観測では、詳細なプラズマパラメータが得られるものの、原理的に時間・空間変化の分離が困難である。非熱的中性粒子観測はプラズマ観測に対して相補的な役割を持つものであり、両観測を通して木星/氷衛星磁気圏の理解を進めてゆきたい。本発表では PEP/JNA の科学目的、開発状況について報告する。

JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) : 概要および日本担当ハードウェアのフライトモデルの開発・出荷報告

○塩谷圭吾^{1,2}, 小林正規³, 木村淳⁴, 並木則行^{5,2}, 荒木博志^{5,2}, 野田寛大^{5,2}, 押上祥子¹,
石橋高⁴, 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, 2022 年の打ち上げに向けて欧州宇宙機関 (ESA) が主導する木星氷衛星探査機 (JUICE) の科学観測機器のひとつである。GALA は氷天体に適用される初めてのレーザ高度計である。GALA の科学目標の柱は (1) 地形情報にもとづく氷テクトニクスの理解, (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マクロな表面変位および回転変動, 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。好条件地点での測距精度は約 1 m である。

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進めている。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。日本チームは 2020 年にこれらのフライトモデルの開発と国内試験および審査を経て, 欧州への出荷を完了した。現在, 欧州では GALA 全体の試験が, また日本国内では 3 つのモジュールについてフライトスペアのハードウェアの製造が進行中である。

木星氷衛星探査計画 JUICE : JUICE-Japan の目指すサイエンス

○関根康人¹、齋藤義文²、浅村和史²、塩谷圭吾²、笠井康子³、笠羽康正⁴、春山純一²、松岡彩子⁵

(1 東京工業大学 地球生命研究所、2 宇宙科学研究所 JAXA、3 情報通信研究機構 テラヘルツ研究センター、4 東北大学 大学院理学研究科、5 京都大学 大学院理学研究科)

Jupiter Icy moons Explorer (JUICE) とは木星とその衛星群を探査対象とする、欧州宇宙機構 (ESA) による L クラスミッションであり、日本はジュニアパートナーとして参加する。JUICE 探査機搭載の 11 の観測機器の内、日本からはレーダ高度計 (GALA)、電波・プラズマ波動観測器 (RPWI)、サブミリ波観測器 (SWI)、プラズマ環境観測パッケージ (PEP) の 4 つの観測器の一部を開発・提供し、多数の日本人研究者が参画する。また、可視分光映像カメラ (JANUS)、磁力計 (J-MAG) にも日本人研究者が参画している。打ち上げは 2022 年夏ごろを予定し、木星軌道突入が 2029 年、エウロパやカリスト、木星本体の観測を行った後、2032 年にガニメデの周回機となり詳細観測を行う予定である。

エウロパやガニメデ、カリストには、内部海と呼ばれる液体の海が存在する。内部海における地球化学過程や地下海化学組成の理解は、これら天体の生命生存可能性の理解に直結する。また、これら氷衛星は、初期太陽系における原始木星周辺の氷微惑星や氷ペブル、ダストから形成したと考えられ、その化学・同位体組成を制約することは、原始太陽系円盤における原始木星の形成位置やそのタイミング、円盤内での揮発性分子の化学・同位体組成の空間分布の理解にもつながる。このような地球化学的、宇宙化学的な重要性があるにもかかわらず、JUICE 計画に対する惑星形成理論研究者や宇宙化学者、隕石学者の参画は限られており、これは日本のみならず欧米でも同様である。日本においてこれらの参画を得ることができれば、探査計画のサイエンスが最大化されると同時に、日本の強みである惑星形成論・宇宙化学に基づくサイエンスを提案し、欧州の関連研究者に対して日本の存在感を強く発揮することにもつながる。

本講演では、我が国の太陽系探査、系外惑星観測や太陽系内での生命生存可能性の探索といった潮流を踏まえ、日本における JUICE がどのような役割を果たして、今後の太陽系のサイエンスをリードしていくのか目標と戦略を議論する。

Radio & Plasma Wave Investigation (RPWI) aboard JUICE: 木星および氷衛星への科学目標お よびその実現性

○笠羽 康正¹, 三澤 浩昭¹, 土屋 史紀¹, 熊本 篤志¹, 木村 智樹², 北元³,
安田 陸人¹), 加藤 雄人¹, 三好 由純⁴, 笠原 禎也⁵, 八木谷 聡⁵, 小嶋 浩嗣⁶,

B. Cecconi⁷, Jan-Erik Wahlund⁸, JUICE RPWI team¹

¹東北大, ²東京理科大, ³東北工業大, ⁴名大 ISEE, ⁵金沢大, ⁶京大 生存圏研,
⁷パリ天文台, ⁸IRF ウプサラ

This talk shows a view of Radio & Plasma Wave Investigation (RPWI) aboard JUICE which provides a unique and first opportunity in this huge mission. RPWI provides an elaborate suite for electromagnetic fields and plasma environment around Jupiter and icy moons, with 4 Langmuir probes (LP-PWI; 3-axis E-field -1.6 MHz, and cold plasmas), a search coil magnetometer (SCM; 3-axis B-field -20 kHz), and a tri-dipole antenna system (RWI; 3-axis E-field 0.08-45 MHz, 2.5-m tip-to-tip length). The RPWI Japan team provides the high frequency part of this system, i.e., Preamp of RWI and its High Frequency Receiver (HF), under with the collaboration of Japan, France, Poland and Sweden.

We have confirmed that this system has high sensitivity reaching close to the galactic background enough for the detection of Jovian radio emissions from magnetosphere (aurora etc.), atmosphere (lightning), and icy moons. Direction and polarization capabilities are first enabled in the Jovian system, to identify their source locations and characteristics. RPWI with other instruments covers the survey of harsh environment around Jupiter, environments and interaction with icy moons, and their surface and subsurface characteristics. The most key parts is the sensing of the ionospheres, surface, and subsurface of icy moons during the flybys and on the orbit around Ganymede. Our 'High frequency part of RPWI' can do unique remote observations to detect the highest ionospheric density not only in usual status but also episodic plume ejections triggered by expected crustal activities. The sensing of surface and subsurface are more challenging topics, based on the passive subsurface radar (PSSR) concept which sounds the icy crusts of Galilean satellites by the reflections of penetrated Jovian radio emissions.

小惑星の熱履歴の制約を目指した 炭素質コンドライト隕石の加熱脱水の反応速度論的研究

○ZHENG MENGYAN¹ 林祐香¹ 癸生川陽子¹ 小林憲正¹

¹ 横浜国立大学

「はやぶさ2計画」のターゲットである始原始的なC型小惑星リュウグウは、近赤外分光法（NIR）で表面に含水鉱物が存在することが発見された[1]。しかし、始原始的な炭素質コンドライトと比べると含水鉱物が少ないため、加熱により脱水した可能性が指摘されている。このような脱水は主要な含水鉱物であるフィロケイ酸塩のOH基が400°Cから770°Cで脱水することに起因するとされる[2]。脱水過程の検討は、小惑星の熱史の解明につながると期待される。しかし、加熱時間も含めた速度論的な研究はあまり行われていない。本研究では、含水鉱物の脱水の程度から小惑星の熱史を制約することを目的とし、炭素質コンドライトの加熱脱水実験を行った。実験室での限られた時間での実験から長期の変化を予測するため、反応速度論を用いて脱水の速度を評価した。

より始原始的な Murchison (CM2.5) 及び 500°Cまで加熱するとリュウグウのスペクトルに近づくことが知られている[1] Ivuna (CI) を出発試料とし、赤外分光法（FTIR）及び加熱ステージを用い、高温で 2.72 μm の OH バンドをその場観察した。OH バンドの積算面積を 0 時間(測定開始時)の積算面積の値で規格化した。OH バンドの減少を 1 次反応であると仮定して、縦軸を積算面積の変化の自然対数、横軸を時間にして近似直線の傾きの絶対値を反応速度定数として求めた（図 1）。この結果の平均値からアレニウスプロットを作成し、アレニウスの式によって頻度因子や活性化エネルギーを求めた。また、温度と時間の関係を表す温度-時間-変換 (TTT) ダイアグラム(図 2) を 1 次反応の式、アレニウスの式から求めた。

リュウグウのもとの組成が Ivuna と同様であり、表面温度を 330~370 K[1]と仮定すると、図 2 より、50%脱水するのに約 4 万~250 万年かかったと推定できる。一方、Murchison の組成として同様に計算すると、約 0.04-0.12 年という値となったが、実験精度などについて検討が必要である。このように、含水鉱物の加熱脱水の反応速度論から、小天体の熱履歴の制約が可能であると期待される。

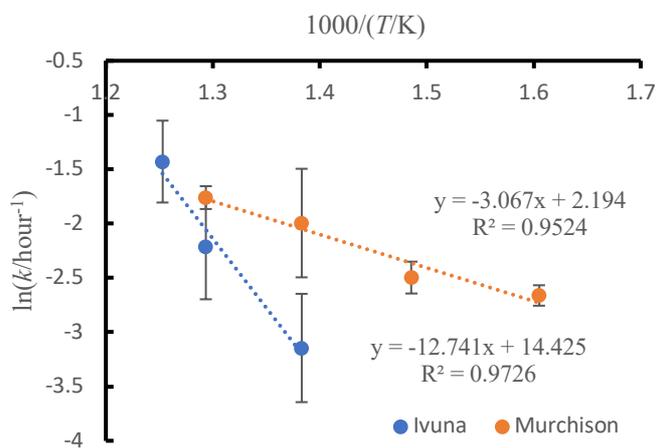


図 1.コンドライト隕石の加熱脱水のアレニウスプロット

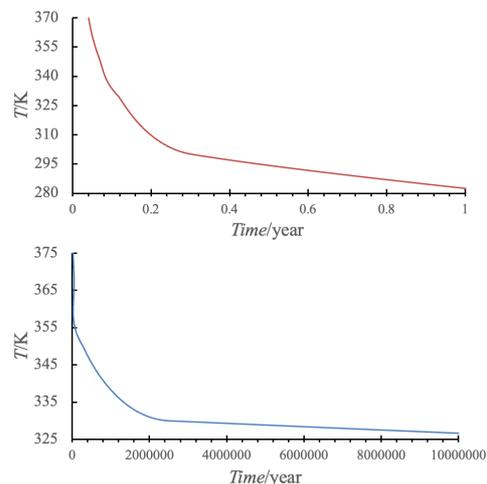


図 2.OH 基の半減期の TTT ダイアグラム

(上 : Murchison, 下 : Ivuna)

[1] Kitazato et al., Science 364, 272–275 (2019)

[2] Garenne et al. Geochimica et Cosmochimica Acta 137, 93–112 (2014)

初期火星における新たな水素分子生成過程： 惑星気候、環境進化、ハビタビリティへの示唆

○野田夏実^{1,2} 関根康人¹、高橋嘉夫²、佐久間博³、河合敬宏²、中川麻悠子¹、北台紀夫⁴、
Kristin Johnson-Finn¹、Shawn McGlynn¹

¹東京工業大学地球生命研究所、²東京大学理学系研究科、³物質・材料研究機構、⁴海洋研究開発機構

近年の火星探査、特に着陸機による化学分析では、詳細な鉱物組成や化学種の同定が可能となっている。中でもノアキアンからヘスペリアン初期を形成年代とする水質変成鉱物は、生成当時の環境やその進化を復元する手がかりとして注目されている。解釈において地球の天然試料等に基づく従来の理解で不十分な場合は、室内実験と併せた議論が重要となる。

地質証拠に基づく環境復元が進む一方で、初期火星表層に液体の水が保持されたメカニズムは長らく議論の最中にある。大気主成分とされる二酸化炭素は一定量以上で凝結し温室効果が働かなくなるため、地質記録と整合的な地表温度や持続時間の達成には他の温室効果の考慮が欠かせない。有力視されているのが衝突誘起吸収(CIA)で、厚い二酸化炭素大気に水素分子が数%以上混合すると氷点を上回る温室効果が得られると計算されている(Turbet et al. 2020)。しかし既知の水素分子供給源候補のうち主力とされる火山ガスでは、水素の高い散逸フラックスを賄えず温暖気候は持続しない(Wordsworth et al. 2021)。長期的な温暖気候を実現するシナリオとして、火星に豊富な硫黄が硫化水素として脱ガスし水素源となった可能性を仮定した研究例があるものの(Ramirez et al. 2014)、具体的な反応経路は不明であった。

本研究では硫化水素から水素を供給する還元力の源として、二価鉄を含む鉱物、特に鉄サポナイトの効果に初めて着目した。鉄サポナイトは火星の玄武岩地殻から集積時の水熱反応や形成後の水質変成による全球的な生成が支持され(Catalano 2013; Cannon et al. 2017)、観測例も多い(Vaniman et al. 2014; Michalski et al. 2015)。しかし、鉄サポナイトは地球環境下で容易に酸化してしまうため、天然試料や研究例に乏しい(Treiman et al. 2014)。そこで本研究では超嫌気環境を達成可能なグローブボックス内で鉄サポナイトの水熱合成実験および硫化水素を導入した水岩石反応実験を行い、水素生成の有無を調べた。ガス成分の定量分析に加え、反応過程を制約するために鉱物相に含まれる鉄の価数・化学種の時間変化も分析した。

その結果、水素濃度の上昇は鉄サポナイトと硫化水素が共存する条件でのみ確認され、最も反応が進行した中性条件では鉄サポナイト 100 μmol あたり約 6 μmol の水素が生成して定常状態に達した。反応途中・後の鉱物相中にはサブミクロン粒子状のパイライトが観察視野の 1 割程度を占め、その周辺で鉄サポナイトが酸化している傾向もみられた。これは鉄サポナイトにより硫化水素が還元されパイライトと水素が生成した反応過程を支持する。この水素分子生成過程は初期火星でも全球的に起きたと推測され、十分な硫化水素の脱ガスがある限りは鉄サポナイトが枯渇するまで持続したと考えられる。枯渇後は硫化水素が固定されずに大気化学反応等で酸化されたとすると、ゲイルクレータをはじめ火星に広く観測される粘土鉱物から硫酸塩への鉱物相の変遷とも整合的である。水素は生体反応のエネルギーをもたらす還元剤としての役割も期待でき、このような生成過程やその変遷の推定は、初期火星の気候復元のみならずハビタビリティの理解にも繋がる。反応を経た鉱物相のより詳細な分析により、火星探査データとの比較検討が可能となると思われる。