

[J] ポスター発表 | セッション記号 P (宇宙惑星科学) | P-PS 惑星科学

[P-PS07] 惑星科学

コンビーナ:菊地 紘(宇宙航空研究開発機構)、コンビーナ:金丸 仁明(宇宙航空研究開発機構)、座長:菊地 紘(宇宙航空研究開発機構)、金丸 仁明(宇宙航空研究開発機構)

2022年6月1日(水) 11:00 ~ 13:00 オンラインポスターZoom会場 (2) (Ch.02)

本セッションでは、広く惑星科学に関する研究発表と議論を行う。惑星科学とは、地球や他の惑星をはじめとする太陽系や系外惑星系の現在・過去・未来に関する様々な研究からなる学問であり、幅広い視点からの議論が望まれる。

[PPS07-P01] 太陽光線と硫酸による玄武岩の変質

*小森 信男¹ (1.東京学芸大学大学院連合学校教育学研究科)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P02] 欧州系外惑星観測衛星 Ariel への日本の開発貢献

*塩谷 圭吾¹、生駒 大洋²、成田 憲保³、福井 暁彦³、亀田 真吾⁴、村上 豪¹、伊藤 祐一²、川島 由依⁵、藤井 友香² (1.宇宙研、2.国立天文台、3.東京大学、4.立教大学、5.理研)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P03] 巨大衝突現象に伴う大気流出現象とその後の惑星大気進化への影響

*黒崎 健二¹ (1.名古屋大学大学院 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P04] ピリカ望遠による2018年海王星ストームの移動速度と規模の推定

*佐藤 佑樹¹、高橋 幸弘¹、佐藤 光輝¹、高木 聖子¹、今井 正亮²、大野 辰遼¹ (1.北海道大学大学院理学院、2.京都産業大学)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P05] 中型・小型氷天体の熱構造と内部構造の進化：地下海の発生条件と存続期間

*筏 明子¹、木村 淳¹ (1.大阪大学)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P06] 望遠鏡観測と室内実験による木星衛星エウロパ表面 NaClの起源の検討

*濱田 築¹、高橋 幸弘¹、佐藤 光輝¹、高木 聖子¹ (1.北海道大学・大学院理学院・宇宙理学専攻)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P07] 天体衝突による蒸発量とその状態方程式依存性

*宮山 隆志¹、小林 浩¹ (1.名古屋大学理学研究科)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P08] 子午面物質循環モデルを用いた金星大気大循環の推定

*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)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P09] 太陽系外サブネプチューンの進化：大気散逸と金属コアからの水素再補充の影響

*小林 一生¹、黒川 宏之²、奥住 聡¹ (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)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P10] CO-rich atmospheres on terrestrial planets: the role of deep carbon cycling

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)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P11] Mass Distributions of Remnants for Collisional Fragmentation of Dust Aggregates

*長谷川 幸彦¹、鈴木 建¹、田中 秀和²、小林 浩³、和田 浩二⁴ (1.東京大学、2.東北大学、3.名古屋大学、4.千葉工業大学)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P12] Effect of “fibrous materials” on dust agglomeration

*田中 玲奈¹、岩野 志織¹、桂木 洋光¹ (1.大阪大学)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P13] 惑星コア形成を目指した DISPH法の改良

*菖蒲迫 健介¹、吉田 茂生²、川田 佳史³、中島 涼輔⁴ (1.九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻、2.九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門、3.海洋研究開発機構・海洋機能利用部門・海底資源センター、4.九州大学 大学院理学研究院)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P14] 氷衛星の内部海の三次元数値流体シミュレーションに向けたコード開発

*村嶋 慶哉¹、細野 七月²、斎藤 貴之²、佐々木 貴教¹ (1.京都大学、2.神戸大学)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P15] 巨大惑星のつくる衝撃波による原始惑星系円盤の加熱：エントロピー変化の解析

*岡村 龍樹¹、小野 智弘¹、奥住 聡¹ (1.東京工業大学)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P16] 氷天体内部の多相固体氷層の対流ダイナミクス

有田 直哉¹、*木村 淳¹ (1.大阪大学)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P17] 球状鉄コンクリーションの空間分布およびサイズ分布の解明

田村 美紗樹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)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P18] 木星衛星イオの環境を想定した SO₂霜の紫外線照射による変性実験

*古賀 亮一¹、平原 靖大¹、根岸 昌平¹、李 源¹、趙 彪¹、伊藤 文之²、今井 正亮³、山崎 敦⁴ (1.名古屋大学、2.産業技術総合研究所、3.京都産業大学、4.宇宙科学研究所)

11:00 ~ 13:00

[PPS07-P19] 蛇紋岩と氷標的を用いた火星からフォボスに飛来する衝突エジェクタの実験的研究

*山口 祐香理¹、中村 昭子¹、野村 啓太¹ (1.神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻)

11:00 ~ 13:00

太陽光線と硫酸による玄武岩の変質

Change of Basalt by Solar Light and Sulfuric Acid

*小森 信男¹

*Nobuo Komori¹

1. 東京学芸大学大学院連合学校教育学研究科

1. The United Graduate School of Education Tokyo Gakugei University

1 背景と目的

筆者は、火星表層に酸化鉄が多い原因の一つを紫外線と考え、紫外線が岩石に及ぼす影響を中学校の科学部指導において調べてきた。これまで得られた結果では、玄武岩を浸した硫酸水溶液中に紫外線を照射すると、3価鉄イオン濃度が増加し3価鉄硫酸塩が、照射しない場合よりも多く生じることがわかっている。この実験の目的は、太陽光線を硫酸中の玄武岩に浴びせ、水溶液と玄武岩表面の変化を調べることである。

2 方法

a pH2の硫酸水溶液を入れた試験管を2つ用意する。そしてそれぞれの試験管に、整形した同じ大きさの玄武岩を入れる。玄武岩は兵庫県玄武洞産のものをを用いた。

b これらの試験管を、ベランダに設置し、太陽光線を浴びせる。一方の試験管はアルミホイルで包み、玄武岩には太陽光線は全く届かない。そして2つの硫酸水溶液は、どちらの試験管ともほぼ同じになるように(±2℃以内)、調整した。

c 設置後、1週間～2週間毎に、硫酸水溶液中の全鉄濃度、3価鉄イオン濃度を測定した。また玄武岩試料を肉眼観察し、写真撮影した。

d 実験後、試料表面に生じた褐色の粉末の分析をXRDで分析した。また試料のSEM観察及びEDS分析を行った。

3 結果

太陽光線を照射した場合は、照射しない場合に比べて、硫酸水溶液中の3価鉄イオンが増加した。そして玄武岩表面に、粉末状の褐色の物質が多く生じた。XRDによって、この表面に生じた粉末は、主にメタホーマナイトまたは非晶質の硫酸第二鉄であることがわかった。照射しない場合では表面全体に僅かに褐色の粉末が生じたが、少量のためXRD分析はできなかった。

4 考察

太陽光線を照射した場合は、照射しない場合に比べて玄武岩を浸した硫酸水溶液中の3価鉄イオン濃度が増加した。この理由は、太陽光線による光酸化と推定する (braterman(1983)、小森 (2020))。過去の火星表面では、30億年前から40億年前に、温暖で酸性の水があった時期があったと推定されている。この時期に、太陽光の主に紫外線BとAによって、酸性水溶液中で3価鉄イオンが増加した。そして火星表面の酸性水溶液が蒸発したため、火星表層に3価鉄硫酸塩が生じたと推定した。つまりこの実験によって、火星表層に3価鉄硫酸塩の生じた一因は、太陽光による光酸化であると考ええる。

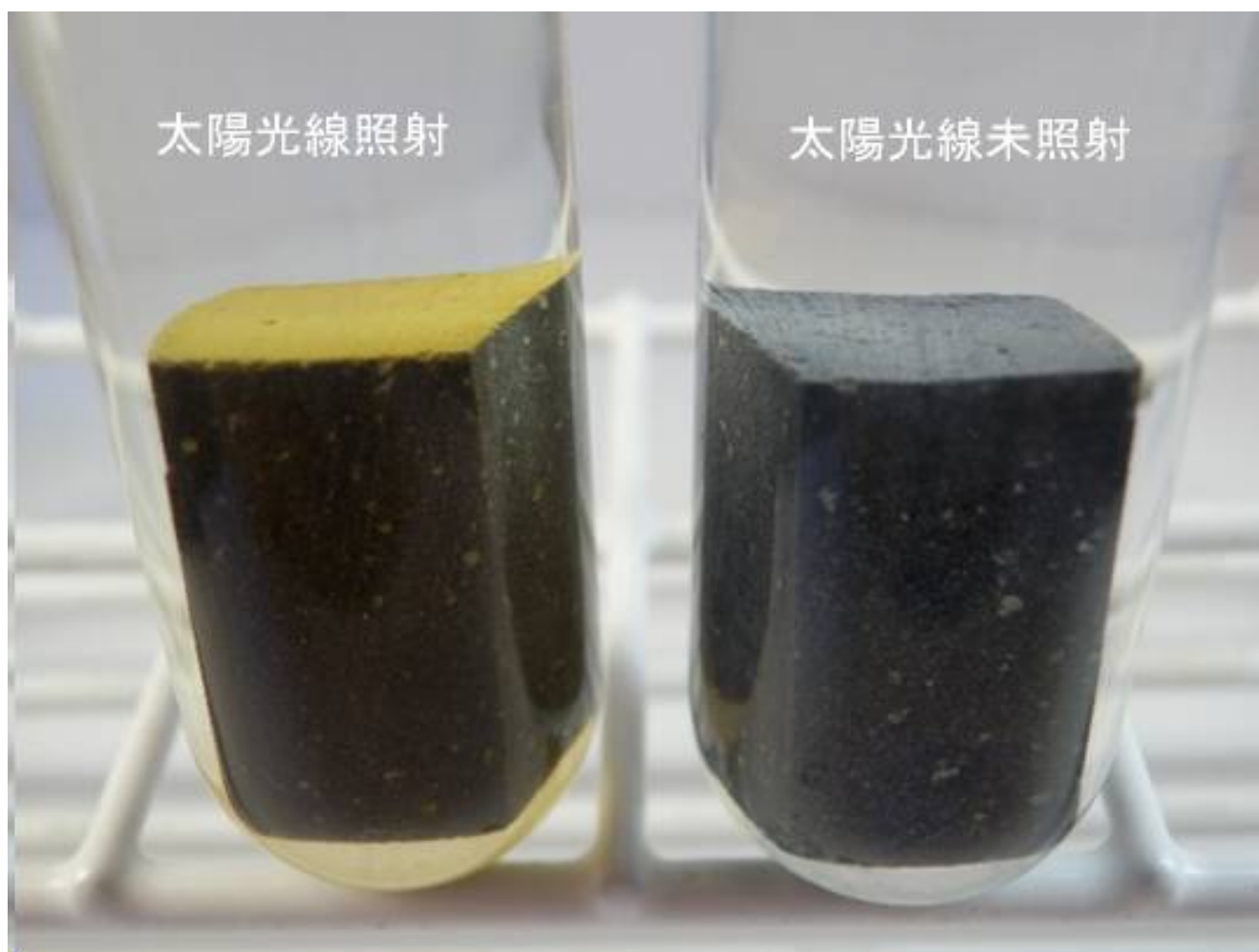
引用文献

Braterman, P., Smith, G., Sloper, A.(1983): Photo-oxidation of hydrated Fe^{2+} —significance for banded iron formations. Nature 303, 163–164.

小森信男 (2020): 中学校科学部における火星に関連する岩石鉱物の風化実験, 学校教育学研究論集 (42), 63-75.

キーワード：過去の火星、太陽光線、硫酸、玄武岩、変質

Keywords: past Mars, solar rays, surfic acid, basalt, change



欧州系外惑星観測衛星 Ariel への日本の開発貢献

Japanese development contribution to Ariel

*塩谷 圭吾¹、生駒 大洋²、成田 憲保³、福井 暁彦³、亀田 真吾⁴、村上 豪¹、伊藤 祐一²、川島 由依⁵、藤井 友香²

*Keigo Enya¹, Masahiro Ikoma², Norio Narita³, Akihiko Fukui³, Shingo Kameda⁴, Go Murakami¹, Yuichi Ito², Yui Kawashima⁵, Yuka Fujii²

1. 宇宙研、2. 国立天文台、3. 東京大学、4. 立教大学、5. 理研

1. ISAS, 2. NAOJ, 3. The University of Tokyo, 4. Rikkyo University, 5. Riken

Ariel (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey) はESAが主導する系外惑星分光トランジット観測のための専用宇宙望遠鏡計画である。Arielは ESA/M4 に選ばれており(2020)、その打ち上げは2029年に予定されている。スペース系外惑星観測の重要な一里塚となると考えられる Ariel に、日本は Co-PI 国として参入することを目指している (WG代表：生駒大洋)。サイエンスを主とする参加のために必要な開発貢献として、日本は主力科学観測機器 AIRS (赤外分光器) のフッ化カルシウム製光学素子等の開発を担当する。日本ならではの切り口で、小規模ながら挑戦性を含む開発を低価格・低リスクで行う (非常にコスパの良い貢献)。

キーワード：アリエル、系外惑星、トランジット、AIRS、CaF2光学素子、ESA

Keywords: Ariel, exoplanet, transit, AIRS, CaF2 optical device, ESA

巨大衝突現象に伴う大気流出現象とその後の惑星大気進化への影響

The impact-induced atmospheric pollution and the implication for the planetary evolution

*黒崎 健二¹

*Kenji Kurosaki¹

1. 名古屋大学大学院 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻

1. Department of Physics, Nagoya University

系外惑星の中には地球質量の数倍から数十倍程度ある一方で、惑星半径が地球半径よりも大きな天体も多く確認されている。これら惑星半径が大きな天体は惑星大気を多く持っている天体であることを示唆し、その大気量は惑星質量の1%から30%程度と多様性に富んでいることがわかっている。このような惑星大気量の多様性は原始惑星系円盤内における形成過程での大気獲得量の違いによるものだけでなく、円盤が消失したあとの形成後期過程における衝突合体や惑星の進化プロセスにも影響を受けている。惑星形成過程の後期段階において、惑星の衝突合体は必ず発生する現象である。このとき、天体が原始惑星系円盤由来の大気を持っていた場合、天体衝突に伴いその原始大気を失うことが予想される。本講演では大気を持った惑星に対する衝突計算に伴う水素大気損失量を定量的に評価するために、天体衝突現象のSmoothed Particle Hydrodynamics法による数値流体計算を行った。また、衝突後に残った天体の構造を調べ、その後と惑星大気が長期進化を経てどのような大気量の変化をするかについても検討を行い、衝突直後から現在までに惑星大気がどのような進化をたどる可能性があるかを議論する。

キーワード：惑星科学、熱進化、惑星大気

Keywords: Planetary science, Thermal evolution, Atmosphere

ピリカ望遠による2018年海王星ストームの移動速度と規模の推定

Estimation of the drift rate and intensity of Neptune's storm in 2018 with Pirka Telescope

*佐藤 佑樹¹、高橋 幸弘¹、佐藤 光輝¹、高木 聖子¹、今井 正亮²、大野 辰遼¹

*Yuuki Sato¹, Yukihiro Takahashi¹, Mitsuteru Sato¹, Seiko Takagi¹, Masataka Imai², Tatsuharu Ono¹

1. 北海道大学大学院理学院、2. 京都産業大学

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Kyoto Sangyo University

海王星では直径が4,000 kmを超える巨大なストームが時折発生している。先行研究では、ボイジャー2号が1989年5月24日に海王星を観測し、大暗斑と呼ばれる直径13,000 kmのストームを発見した。大暗斑は木星の大赤斑と同様南半球に位置していたが、その後ハッブル宇宙望遠鏡が1994年に観測したところ、大暗斑は消滅していた(Hammel et al., 1995)。大暗斑のようなストームは海王星で常に発生しているのか。突発的なものなのか不明である。また、直径9,000 kmのストームが2017年6月26日、7月2日にケック天文台10 m光学近赤外望遠鏡で観測された(Edward et al., 2019)。通常、海王星のストームは上昇気流が発生している南北の中緯度で発生すると考えられている。しかし、このストームは赤道付近で発生していた。海王星の自転軸傾斜角は29.6度であり、季節変化によって赤道付近でストームが発生した可能性も考えられる。ケック天文台やハッブル宇宙望遠鏡によって海王星は観測されているが、それらの望遠鏡を常に海王星観測に使用することは容易ではない。そのため、短い時間スケールで長期的な海王星ストームの観測は行われていない。本研究では海王星全体のスペクトルを観測することによって、ストームの移動速度や規模を推定する手法の開発を行った。それにより、シーイングが悪い時でも観測可能になり、短い時間間隔で長期的な海王星ストームの観測データを取得することができるようになった。この手法で、ストームの詳細な変動を追うことで、海王星大気の大気構造の理解を深めることに繋げる。本研究では、北海道大学が所有する口径1.6 mピリカ望遠鏡を用いて海王星のスペクトルを観測した。観測時期は2018年10月22日から11月26日、2020年7月30日から10月22日まで観測を行った。観測波長は890, 855 nmである。本研究では、メタンが890 nmを強く吸収するという性質を用いる。海王星大気にはメタンが存在し、890 nmで観測すると周りの領域よりも高度の高いストームはより明るく見え、ストームがある面を観測すると890 nmフラックスは大きくなる。また、海王星の自転によって、観測点から見たストームの大きさは変化するため、890 nmのフラックスも変化する。地球大気の影響を補正するために、890 nmフラックスと855nmのフラックスの比をとり、相対強度を求めた。その相対強度の理論値を求め、その理論値と観測値を最小二乗法でフィッティングをすることで、ストームの移動速度や規模を見積もった。理論値は、ストームの緯度で変化するためHST観測画像から緯度を求め、その緯度を固定値として用いた。ストームの面積を仮定しストーム内部の890 nm反射率を求め、ストームの規模は面積と反射率の積とした。2018年のストーム緯度は、HST画像から北緯39°と求め、移動速度、890nm反射率は25.2°/day、0.377と推定した。2018年に、Simon et al. (2019)によって北緯23°に位置し、2.46°/hr (59.04°/day)で移動するストーム(NDS-2018)が観測された。しかし、NDS-2018は我々の観測日では裏面に位置し見ることとはできず、違うストームを観測したと考えられる。2020年のストーム緯度は、HST画像から南緯69°と求め、移動速度、890nm反射率の推定を試みた。しかし、南半球のある一定の緯度を超えると常にストームが見える計算になり、フィッティングを正確に行うことが出来なかった。今後は吸収を考慮した理論値を算出し、より詳細なフィッティングを行い、観測を継続し他の研究者やアマチュア観測と比較し、議論を進める。

キーワード：海王星、地上望遠鏡

Keywords: Neptune, Ground-based telescope

中型・小型氷天体の熱構造と内部構造の進化：地下海の発生条件と存続期間

Evolution of thermal and internal structures of medium/small sized icy bodies: conditions for the formation and duration of the subsurface ocean

*筏 明子¹、木村 淳¹

*Akiko Ikada¹, Jun Kimura¹

1. 大阪大学

1. Osaka University

氷天体の内部では岩石核からの熱などによって氷殻の底面が融け、地下海が存在する可能性が指摘されており、地球のような天体表面のハビタブル様式とは異なる様式の、新たなハビタブル環境として、注目されている。ガリレオやカッシーニミッションなどによる従来の氷天体探査によって行われた、惑星の磁気圏との相互作用で生じる誘導磁場や重力相互作用による潮汐変形(ラブ数)、秤動やオーロラの揺動などの測定に基づいて、木星衛星エウロパやガニメデ、カリスト、土星衛星エンセラダスなど多くの氷天体の内部では全球的な地下海が現在も存在することが強く示唆されている。一方で、天王星系や海王星系など探査機の接近観測が不足する氷天体も数多く残されており、これらの内部では地下海の有無を含めた内部の現状はよくわかっていない。それらを理論的に推定するために従来行われてきたモデル計算では内部熱平衡状態を仮定したものや、熱輸送過程として伝導のみを考慮し対流を無視したものが多く、正しい推定ができていない。

本研究では、半径200~1000 km の様々な表面半径と様々な平均密度を持った氷天体に対して、粘性流体に関する混合距離理論を用いた一次元球対称の熱輸送方程式を数値的に解くことで、長期の熱進化シミュレーションを行う。天体中心から表面までの伝導と対流による熱輸送を追跡することによって、内部の温度構造や地下海の生成消滅、厚さの時間変化などを見出す。天体内部は、岩石核とそれを覆うH₂O層の2層に完全に分化した構造を仮定し、初期に完全固化しているH₂O層はその後の温度変化に従って固液間の状態変化を起こすものとする。熱源は岩石中にClコンドライトの濃集度で存在するとした長寿命放射性核種の崩壊熱を考える。物性の不定性をあらわすパラメータとして、氷の融点付近における結晶粒径を反映した融点粘性率を $10^{13} \sim 10^{17}$ Pas の範囲で用いる。また、氷天体の表面温度は50~130 K の様々な値で固定し、表面温度の違いが地下海の構造進化に与える影響を評価する。最後に液体水の凝固点を下げる物質としてアンモニアをさまざまな濃度で与える。

同一の平均密度をもつ天体においては、表面半径が大きいほど岩石核(発熱量)が大きいために地下海が存続しやすい傾向にある。例えば、天体の平均密度を1.5 g/cc とした際、表面半径が400 km の天体では、地下海は全く発生しない一方、表面半径が800 km の天体では約45.6億年前から約9.5億年前にかけて地下海が存在するものの、現在は再びすべて固化して地下海が消滅する。また、表面半径が1000 km の天体では現在も地下海が存続することがわかった。また、同一の表面半径をもつが平均密度が異なる天体では、平均密度が大きいほど岩石核が大きく発熱量が増えるために地下海が存続しやすくなる一方、天体全体に占めるH₂O層が小さい(H₂O層が薄い)ために地下海が全て固化してしまいやすいという相反する傾向が見出された。例えば、表面半径が800 km、平均密度が1.125 g/cc の天体では35.9億年間にわたって地下海が存続し、平均密度が1.25 g/cc の天体では36.4億年間、2.0 g/cc の天体では29.4億年間にわたって存続する。また、氷の融点粘性率が大きいほど氷殻内での対流が発生しにくくなり、地下海は存続しやすくなる。さらに興味深い点は、表面温度が低いほど地下海が存続しやすくなる傾向である。これは温度が低いことによって氷の粘性率が大きくなった結果、氷殻の対流が起りにくくなり内部の熱輸送効率が下がるためと考えられる。またH₂O層中にアンモニアが存在すると、H₂Oの凝固点が最大で100 K 近く下がることから、地下海の存続期間が長くなる。

キーワード：地下海、熱進化、氷天体

Keywords: subsurface ocean, thermal evolution, icy bodies

望遠鏡観測と室内実験による木星衛星エウロパ表面NaClの起源の検討

Examination of the origin of NaCl on the surface of Jupiter's moon Europa by telescope observation and laboratory experiment

*濱田 築¹、高橋 幸弘¹、佐藤 光輝¹、高木 聖子¹

*Kizuku Hamada¹, Yukihiro Takahashi¹, Mitsuteru Sato¹, Seiko Takagi¹

1. 北海道大学・大学院理学院・宇宙理学専攻

1. Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

木星の衛星のエウロパではマントルブルームによる間欠泉がハッブル宇宙望遠鏡(HST)によって観測されており(Roth et al., 2014)、その一部は地表面に堆積している。先行研究のHSTによるエウロパの観測ではリーディング半球面に広がる地質的に活発なカオス地域において、波長460 nmに吸収が確認されている(Trumbo et al., 2019)。この吸収波長は、エウロパ表面環境を模し、NaClに放射線を照射した実験において生じたカラーセンターと呼ばれる格子欠陥が吸収する波長のうちのひとつと一致している(Poston et al., 2017)。このことから、エウロパ表面にはNaClが存在することが示唆されている。しかし、HSTによる観測は特定の4か月間に4回と限られており、年単位でのエウロパ表面スペクトルの長期的な変動は調べられていない。

本研究の目的は、エウロパ表面に堆積しているNaClのスペクトルの長期的な変動の調査と、エウロパでのNaClの堆積や風化の年代を制限することである。

本研究では北海道大学が所有する主鏡口径1.6 mのピリカ望遠鏡に搭載されているスペクトル撮像装置MSIを用いて、2020年8月17日から10月20日と2021年7月3日から12月8日までの期間で、エウロパのスペクトルを17回観測した。観測波長は400–550 nmおよび650–800 nmの間を、バンド幅がそれぞれ3.90–10.2 nm、4.17–7.62 nmで、中心波長の間隔10 nmで撮像している。解析方法は観測したスペクトルとその3次の近似曲線との差を算出し、吸収波長の特定と吸光度を求めた。さらに、観測したエウロパの経度を4つに分類し、それぞれの経度において反射率の平均値と変動を導出した。変動を求めた結果、顕著な変動は確認できなかった。

また、2022年2月に予定している電子線照射実験では、先行研究よりも大きいMeV単位の電子線をNaClに照射した際のスペクトルを測定することで、エウロパ環境下での高エネルギー電子によるNaClのカラーセンター形成速度への寄与を確認し、エウロパの観測結果をNaClの堆積年代に変換する。

これまでの観測結果では、室内実験によって確認されている波長460, 720 nmでは吸収は見られなかった。一方で、波長430, 520 nmに吸収が見られた。この波長はフラウンホーファー線と一致していることから、エウロパの観測結果に太陽光のスペクトルが反映されている可能性がある。現在、同じく太陽光を反射する月の観測結果を用いることで、観測結果から太陽光の影響を除去する作業を慎重に進めている。

キーワード：エウロパ、地上観測、電子線形加速器

Keywords: Europa, Ground observation, Electronic linear accelerator

天体衝突による蒸発量とその状態方程式依存性

The Amount of Vapor Caused by an Impact and the Dependence on Equation of State for Impact Vaporization

*宮山 隆志¹、小林 浩¹

*Ryushi Miyayama¹, Hiroshi Kobayashi¹

1. 名古屋大学理学研究科

1. Department of Physics, Nagoya University

Collisions are general phenomena in planet formation, and it is widely believed that the growth of planets were caused by collisions. The temperature elevation due to a high velocity collision causes vaporization of the material. The criterion for vaporization depends on material. Impact vaporization causes the compositions of planetary bodies. In this study, we carry out impact simulations to obtain the amount of vapor and understand the amount theoretically.

Impact vaporization is understood as follows. The shock wave induced by an impact results in an increase in entropy due to irreversible heating and compressing. The material, heated and compressed by the shock wave, rapidly cools down by isentropic expansion, according to the first law of thermodynamics. In other words, if the increase in entropy exceeds the boiling point of the material, vaporization occurs. Therefore, the amount of vaporized material is determined by the increase in entropy caused by the shock wave induced by the impact.

We investigate the amount of vaporized material using the iSALE code by considering two different equations of state, TillotsonEOS and ANEOS, which are widely used in the field of planetary collisions. We confirm the amount of vapor is consistent for TillotsonEOS and ANEOS, if we choose the parameters for EOSs. Furthermore, we constructed an analytical model for the amount of vapor as a function of impact velocity, which can explain the vaporization threshold velocity.

キーワード：衝突蒸発、状態方程式、固体

Keywords: Impact Vaporization, Equation of State, Solid

子午面物質循環モデルを用いた金星大気大循環の推定

Estimation of Venus' atmospheric circulation using a newly developed material circulation model

*桑山 慎也¹、はしもと じょーじ¹

*KUWAYAMA Shinya¹, George L HASHIMOTO¹

1. 岡山大学大学院自然科学研究科

1. Department of Earth Sciences, Okayama University

金星大気には、高度45-65kmに硫酸液滴の厚い雲があるため雲頂より下の大気の流れを外から観測できない。そのため、金星大気中で熱や運動量がどのように輸送されているのかわからず、金星大気の力学を考える上で大きな問題となっている。雲より下の大気を観測する手段は非常に限られていたが、近年、近赤外線を用いたリモートセンシングによって、雲頂より下の大気成分を観測することができるようになった。化学反応や相変化があると物質の分布は非一様になり、大気の運動は物質を輸送して分布を変える。したがって、観測された物質分布から大気の運動を推定することができる。本研究は、大気の運動と液滴の沈降による輸送、化学過程、雲モデルを取り入れた金星子午面物質循環モデルを構築し、子午面循環の強度や構造の違いがCO, H₂O, H₂SO₄などの子午面分布とどのような関係にあるのかを調べた。観測された物質の子午面分布と比較することで、これまで子午面循環の強度と構造を定量的に推定した。

キーワード：金星、大気大循環、物質循環

Keywords: Venus, atmospheric circulation, material circulation

太陽系外サブネプチューンの進化：大気散逸と金属コアからの水素再補充の影響

The Evolution of Extrasolar Sub-Neptunes: The Effects of Atmospheric Escape and Hydrogen Repletion

*小林 一生¹、黒川 宏之²、奥住 聡¹

*Issei Kobayashi¹, Hiroyuki Kurokawa², Satoshi Okuzumi¹

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

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

地球と海王星の間のサイズを持つサブネプチューンは、太陽系外で最も多く発見されている惑星である。サブネプチューンは水素に富んだ大気を持ち、岩石のみで構成された惑星と比べて低い密度を持つ。観測されているサブネプチューンの多くは軌道周期が100日以下である。このような短周期のサブネプチューンは恒星からの強いXUV照射によって大気の散逸が激しく、惑星の年齢より短い時間スケールですべての大気を失うと考えられている。したがって、これらの惑星の存在は現在の理論モデルでは説明ができない。

過去の研究では、マグマオーシャン中への溶解水素が大気中の水素を補うとしてサブネプチューンの大気の説明を試みた(Chachan & Stevenson 2018)。しかし、この効果は観測を説明するには不十分であった(Modirrousta-Galian et al. 2020)。一方で、地球形成の研究においては、マグマオーシャンと比較してコアに数十倍の水素が分配されうる可能性が示されている(Tagawa et al. 2021)。

本研究では金属コアに溶解する水素が散逸する大気を補う影響に着目した。我々は、一次元内部構造モデルを用いてマグマオーシャンと金属コアからの水素供給を考慮した惑星の熱進化および質量進化計算を行った。その結果、金属コア中の溶解水素が大気を補う効果によって、サブネプチューンの大気寿命が従来モデルと比較して10倍以上に伸びる場合があることを明らかにした。特に、コアとマグマオーシャンの境界面が長期間に渡り熔融状態にある場合、コアからの水素流出の効果は大きくなる。我々は、本モデルを用いて観測されている系外サブネプチューンとの比較を行うことで、多数のサブネプチューンにおける大気存在が金属コアからの水素流出によって説明できるかもしれないことを示唆した。

実際に観測されている惑星で金属コアからの水素の流出が起きているのかどうかを確認するためには、He/H比を観測する必要がある。本研究で用いたモデルは水素の分配係数などの不定性の大きなパラメータに強く依存する。サブネプチューン進化において惑星内部からの水素供給の役割をより正確に理解するためには、このようなパラメータを制約するための実験室実験、数値シミュレーションが必要不可欠である。

参考文献:

Chachan, Y., & Stevenson, D. J. 2018, ApJ, 854, 21.

Modirrousta-Galian, D., Locci, D., Tinetti, G., & Micela, G. 2020, ApJ, 888, 87

Tagawa, S., Sakamoto, N., Hirose, K., et al. 2021, Nature Communications, 12, 2588

キーワード：系外惑星形成、系外惑星進化、系外惑星大気

Keywords: Exoplanet formation, Exoplanet evolution, Exoplanets atmospheres

CO-rich atmospheres on terrestrial planets: the role of deep carbon cycling

青木 紘介¹、*黒川 宏之²、藤井 友香³

Kosuke Aoki¹, *Hiroyuki Kurokawa², Yuka Fujii³

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

1. Tokyo Institute of Technology, 2. Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 3. National Astronomical Observatory of Japan

Atmospheric compositions of terrestrial planets control their climates and the possibility of abiotic formation of biologically relevant species that may give rise to the emergence of life. Though the terrestrial planets in our Solar System today possess CO₂ as the major form of carbon in the atmosphere, CO-rich atmospheres have been theoretically predicted for planets orbiting M-type stars and for those receiving only low stellar irradiation, the latter of which include early Mars. In these environments, CO produced by photodissociation of CO₂ piles up because of lower H₂O photodissociation rates which lead to slower CO oxidation by OH than that on Earth. Meanwhile, it has also been suggested from the record of sulfur isotope anomaly that Earth also had a CO-rich atmosphere in the Archean era, which may imply unknown mechanisms of CO accumulation. Because such reducing atmospheres are more suitable to form organic compounds relevant to life via atmospheric chemistry, elucidating mechanisms to form CO-rich atmospheres are important.

Here we propose new mechanisms to form a CO-rich atmosphere by considering the role of deep carbon cycling, namely, CO₂ drawdown via carbonate precipitation and CO degassing from the reducing mantle. We constructed a model for deep carbon cycle combined with atmospheric photochemistry and climate modeling to simulate the evolution of CO and CO₂ contents in the atmosphere from the time of magma ocean solidification and formation of oceans. We found that rapid CO₂ drawdown from the initially-dense atmosphere leaves CO and naturally leads to the formation of a CO-rich atmosphere. When the CO partial pressure is a few bars (depends on the initial condition), the CO-rich atmosphere could remain over ~1 billion years. The long lifetime is caused by the self-stabilizing effect –CO reduces water vapor mixing ratio in the atmosphere and, consequently, CO oxidation rate by photochemically-produced OH. Moreover, the lifetime of CO becomes longer if the mantle is reducing to directly release CO via volcanism.

In this presentation, we further discuss the implications for evolution of Earth and other terrestrial worlds and for observations of extrasolar systems.

キーワード：CO大気、炭素循環、気候、大気化学、地球、系外惑星

Keywords: CO-rich atmospheres, Deep carbon cycling, Climate, Atmospheric chemistry, Earth, Exoplanets

Mass Distributions of Remnants for Collisional Fragmentation of Dust Aggregates

*長谷川 幸彦¹、鈴木 建¹、田中 秀和²、小林 浩³、和田 浩二⁴

*Yukihiko Hasegawa¹, Takeru K Suzuki¹, Hidekazu Tanaka², Hiroshi Kobayashi³, Koji Wada⁴

1. 東京大学、2. 東北大学、3. 名古屋大学、4. 千葉工業大学

1. The University of Tokyo, 2. Tohoku University, 3. Nagoya University, 4. Chiba Institute of Technology

We investigated fundamental processes of collisional sticking and fragmentation of dust aggregates by carrying out N-body simulations of submicron-sized icy dust monomers. We examined the distribution of the number of dust monomers constituting remnants. We fitted the results of the numerical simulations and modeled the distributions of the remnant mass as functions of the collision velocity and the mass ratio between colliders. The mass distributions of the largest and the second-largest remnants are represented by two or three power-law functions, and the number of kinds of the power laws depends on the mass ratio. The boundary between two and three power laws may be related to the mass transfer from a larger dust aggregate to a smaller one. On the other hand, the cumulative mass distribution of small remnants do not well depend on the mass ratio.

キーワード：数値計算、惑星形成、原始惑星系円盤

Keywords: Numerical simulation, Planet formation, Protoplanetary disk

Effect of “fibrous materials” on dust agglomeration

*田中 玲奈¹、岩野 志織¹、桂木 洋光¹

*Rena Tanaka¹, Shiori Iwano¹, Hiroaki Katsuragi¹

1. 大阪大学

1. Osaka University

The current model planetesimal-formation process is based on the collisional growth of tiny monomers whose typical size is (sub) micrometers. However, it is not very easy to form planetesimals only by simple mutual collisions of dust aggregates. Particularly, a highly porous structure should be kept during the collisional growth to prevent fragmentation. In this study, therefore, we consider the effect of the shape of monomers to efficiency form the porous disk aggregation. Specifically, we consider the effect of fibrous monomers.

When we look around us, we realize that dust on the floor and corners in the room can grow to a visible (macroscopic) size keeping a highly porous structure. By careful inspection of the formed dust, one can confirm that hair and fiber debris play a crucial role to sustain the porous structure.

Based on this simple observation, we consider similar phenomena might govern the planetesimal formation as well. If there were fibrous materials as monomers constructing dust aggregates, the entanglement of the fibrous materials would help the dust- aggregate growth also in space.

However, it is not very easy to mimic realistic planetesimal conditions in laboratory experiments. Thus, in this study, we focus on the effect of fibrous materials on the aggregate-growth process by performing a simple laboratory experiment under the atmospheric pressure condition. Specifically, we prepared a set of thin silk threads as starting materials. The length of the threads was varied from 1.6 cm to 15 cm. Then, the threads were sucked by a vacuum cleaner. By this simple procedure, we succeeded to form porous dust aggregates formed by fibers.

As a result, we found that there were two types of aggregate structures depending on the length of the threads. Furthermore, the mass of formed aggregates logarithmically grows as a function of the length of threads. By the image analysis of the formed aggregates, we revealed that the aggregates have a highly porous structure whose fractal dimension is less than 2.

By considering the elasticity of the fibers, we can qualitatively explain the logarithmic relation between aggregate mass and thread length. However, the experimental conditions are far from the actual planetesimal-formation conditions. Moreover, the flow produced by the vacuum cleaner was not controlled in this experiment. Measurement and/or control of the experimental conditions are necessary to discuss actual planetesimal formation. In this study, we only revealed that the fibrous materials indeed enhanced the growth of dust aggregates in the laboratory conditions.

キーワード：微惑星形成、ソフトマター、ダスト、絡まり

Keywords: Planetesimal formation, Soft matter, Dust, Entanglement

惑星コア形成を目指したDISPH法の改良

Improving the DISPH method for simulating planetary core formation

*菖蒲迫 健介¹、吉田 茂生²、川田 佳史³、中島 涼輔⁴

*Shobuzako Kensuke¹, Shigeo Yoshida², Yoshifumi Kawada³, Ryosuke Nakashima⁴

1. 九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻、2. 九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門、3. 海洋研究開発機構・海洋機能利用部門・海底資源センター、4. 九州大学 大学院理学研究院

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, 3. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 4. Faculty of Sciences, Kyushu University

導入: 惑星形成過程において集積過程と分化過程の両者を同時に解くような流体シミュレーション手法は確立されていない。特に分化プロセス(もしくは**惑星コア形成過程**)を数値流体計算によってグローバルに解いた例は少ない。

集積プロセスのシミュレーションには、一般に**SPH法**(Smoothed Particle Hydrodynamics method)という手法が広く用いられる[e.g., Benz et al., 1986; Nakajima et al., 2021]。そこで、集積問題で一定のコンセンサスを得ている手法を惑星コア形成問題に応用できないだろうか、と考えた。しかし、従来のSPH法(the Standard SPH method, **SSPH法**)では物質境界を上手く扱えないという大きな問題があった[Agertz et al., 2007]。この問題に対して、Saitoh and Makino (2013)やHosono et al. (2013)で初めて提案された、密度に依存しないSPH法(the Density-Independent SPH method, **DISPH法**)は非常に有効な手法である。一方で、この新しい手法を用いた流体数値計算例は少なく[Hosono et al., 2016; Takeyama et al., 2017; Hosono et al., 2019]、境界設定や熱力学量の定式化は、コアマントル分離を扱う目的では使いやすい形に書かれていない。

本研究では惑星進化(特に惑星コア形成過程)を扱うためにDISPH法の改良を試みる。本研究の目的は、先行研究[e.g., Saitoh and Makino, 2013; Hosono et al., 2013]で明らかにされていない問題点に触れ、その改良方法を提案するものである。

方法: SPH法の基本的な概念は「場の物理量を、近傍粒子を用いなめらかな関数を使って平滑化する」というものである。しかし、従来のSPH法(**SSPH法**)では密度を平滑化することが理由で、物質境界付近で非物理的な現象が生じる。この解決法としてSaitoh and Makino (2013)が開発した、**DISPH法**は非常に有効である。一方で、オリジナルのDISPH法をコアマントル分離の問題に応用するには工夫が必要である。例えば、(1)熱力学量の時間発展式を使いやすい形に変形すること(2)境界条件の取り扱い方を工夫することなどである。特に後者は重要である。その理由は、SSPH法では境界の取り扱い方が計算精度に大きく影響を与えることが知られていて[e.g. Bonet and Kulasegaram, 2002; Shao et al., 2012]、DISPH法でも同様であると期待されるからである。そこで、これらの改良を試みた。具体的には、(1)惑星内部を記述するのに適切なDISPH法の基礎方程式を構築し、(2)SSPH法で用いられる境界処理法の一つをDISPH法に応用した[Marrone et al., 2011; Asai et al., 2013]。さらに、DISPH法における自由表面の新しい取り扱い方を提案する。

これらの改良点を加えたDISPH法を用いて、二次元レイリー-テラー不安定の問題を解いた。つまり、上側に重い液体金属を、下側に軽い液体シリケート(マグマオーシャン)を配置し、物質境界に適切な摂動を加え、その様子を観察した。

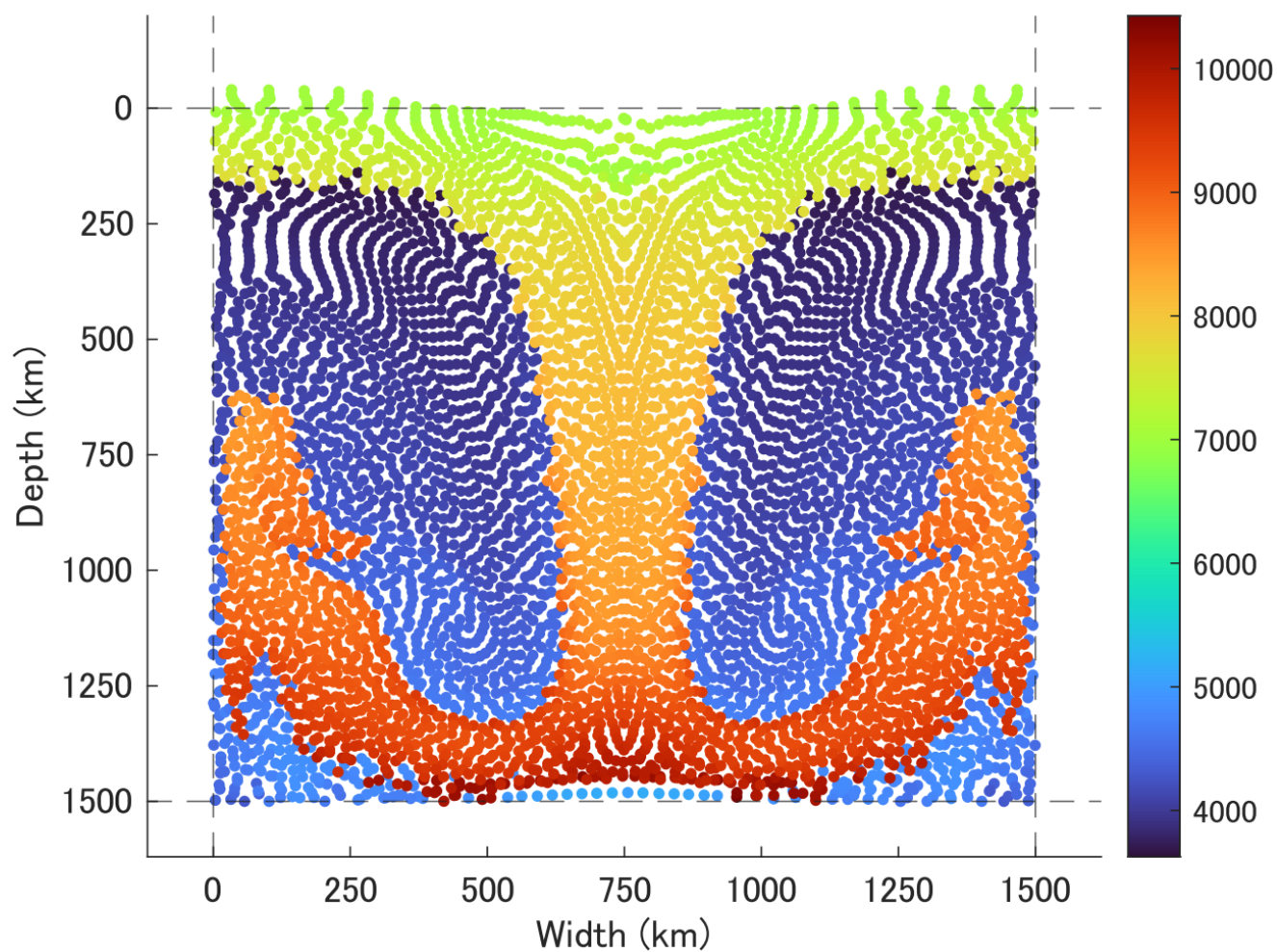
結果と今後の研究: 水平方向に1波長分の不安定なモードが成長するような摂動を加えた場合の結果は添付の図のようになった。図のカラーバーは密度を表している。重い液体金属が液体シリケートと混和することなく沈降する様子が分かる。

惑星コア形成問題をグローバルに解くための流体計算の第一歩として、DISPH法の改良を行った。この手法を用いたシミュレーション例として、物性の似ている液体間の二次元レイリー-テラー不安定の問題を解い

た． 今後は， 固体シリケートを含めた三相二次元問題を考え， その後三相三次元問題に拡張してゆきたい． さらにには元素分配も同時に扱えるような粒子法の開発も進めていきたいと考えている．

キーワード： 惑星コア形成、 金属・シリケート分離、 SPH法、 DISPH法、 レイリーテラー不安定

Keywords: planetary core formation, metal-silicate separation, SPH method, DISPH method, Rayleigh-Taylor instability



氷衛星の内部海の三次元数値流体シミュレーションに向けたコード開発

Development of SPH toward a three-dimensional simulation of an icy moon with internal ocean

*村嶋 慶哉¹、細野 七月²、斎藤 貴之²、佐々木 貴教¹*keiya murashima¹, Natsuki Hosono², Takayuki Saitoh², Takanori Sasaki¹

1. 京都大学、2. 神戸大学

1. Kyoto University, 2. Kobe University

近年の観測により、EuropaやEnceladusといった氷衛星で、氷殻表面の割れ目から水蒸気が噴出していることがわかっている。これは表面の氷殻の下に液体の水の領域（内部海）が存在していることを示唆している。液体の水は化学反応を支える溶媒で、生命の誕生に必要な不可欠な要素の一つであると考えられており、氷衛星の内部構造、特に温度の分布と進化について理解することは重要なことである。現在考えられている氷衛星の内部海の熱進化のメカニズムは、潮汐変形による加熱が起き、熱が衛星表面まで熱伝導で伝わり、表面からの放射で熱が抜けていく、というものである。これらの熱過程が平衡状態にあることによって内部海が保たれている。同時に、氷殻と内部海の境界では氷と水の間で相転移が起きている。そこで、潮汐加熱、熱伝導、放射冷却、相転移を導入した三次元流体数値シミュレーションを行うことのできるSPH法のコードを開発を目的とした。

しかし、従来の粘性項を含むSPHを用いた剛体回転の計算には、以下の2つの問題があることがわかった。(1)従来の粘性力の定式では、非物理的な粘性力によって回転を妨げられる。(2)標準的なSPHの定式化に起因する層状構造において、人工的な内部エネルギー分配が起こる。一つ目の問題を解決するために粘性の定式化を修正し、それによって非物理的な粘性力が抑制されることを確認した。二つ目の問題に対しては、不連続面の取扱を改善するためにDensity Independent SPH (DISPH)を導入することで解決した。さらに、粒子法で流体の表面を定義するアルゴリズムを用いることで、衛星表面からの放射冷却を導入した。また、相転移に関しては、氷水間の相転移を考慮した状態方程式 (AQUA-EOS) を導入した。以上で、我々は氷衛星の内部構造のシミュレーションするために必要なすべての物理過程（粘性、伝導、放射冷却、相転移）を導入したSPH法のコードを開発した。今後は開発したコードを用いて、2パターンの計算を行うことを計画している。(1) 軌道長半径、離心率、軌道傾斜角、氷衛星の質量などを変化させてパラメータスタディを行い、それらの内部構造への影響を統計的に議論する。(2) 太陽系内の氷衛星 (Europa, Enceladus) へ適用し、その内部構造を解明する。

キーワード : SPH, 氷衛星

Keywords: SPH, icy moon

巨大惑星のつくる衝撃波による原始惑星系円盤の加熱：エントロピー変化の解析

Heating of protoplanetary disks by shock waves produced by giant planets: Analysis of entropy changes

*岡村 龍樹¹、小野 智弘¹、奥住 聡¹

*Tatsuki Okamura¹, Tomohiro Ono¹, Satoshi Okuzumi¹

1. 東京工業大学

1. Tokyo Institute of Technology

原始惑星系円盤の温度構造を理解することは、惑星系の組成分布の起源を明らかにする上で必須の課題である。磁気流体力学に基づく最近の円盤温度計算によると、円盤の内部は従来考えられていたよりも低温であり、現在の地球軌道付近でも固体が多量の水氷を保持しうることが示されている。もしこのような低温の円盤が現実的であるならば、地球をはじめとする太陽系岩石惑星の形成に対する我々の理解は大きな修正を迫られる可能性がある。一方で、従来の円盤温度モデルが重要な円盤加熱機構を見落としていた可能性もある。

本研究ではそのような加熱機構の1つとして、巨大惑星のつくる衝撃波による円盤加熱に注目する。原始太陽系星雲で木星が早期に誕生していた可能性は、隕石の同位体二分性の有力な解釈の1つとして近年注目されている。円盤中にこのような巨大惑星が存在すると、スパイラルと呼ばれる螺旋状の円盤密度波が惑星重力によって励起され、惑星遠方まで伝播する。このスパイラルが伝播とともに衝撃波化すると、円盤ガスの不可逆な加熱（衝撃波加熱）を生じる。近年の流体シミュレーションによって、中心星から数 au 以内の領域では、衝撃波加熱が円盤の温度上昇に寄与しうることが明らかになっている。しかし、この先行研究はシミュレーションの最終出力である円盤温度に注目しており、衝撃波加熱自体を取り出して調べたものではない。円盤温度は他の加熱過程や放射冷却に関する仮定にも依存しているため、この結果からより一般の状況における衝撃波加熱の効果をモデル化することはできない。

そこで本研究では、任意の円盤に対する惑星衝撃波加熱の影響を明らかにすることを目指し、衝撃波加熱量自体を流体シミュレーションから抽出し定量化するという新しい試みに取り組んだ。具体的には、巨大惑星のつくるスパイラルの分布を2次元流体計算によって求め、スパイラルが衝撃波化した際に生じる発熱量、つまりエントロピーの増加量を測定した。ここで温度や密度の変化でなくエントロピーの増加に注目したのは、密度波の断熱膨張・圧縮に起因する短期的・周期的な温度変化を除外し、長期的な温度増加に寄与する不可逆な加熱のみを取り出すことを意図している。

その結果、円盤の各軌道での衝撃波加熱量が、惑星軌道からの距離と惑星質量の簡単な冪乗則に従うことを発見した。さらに、円盤に複数本励起されるスパイラルのそれぞれが、惑星からどの程度離れると衝撃波化するかについても今回のエントロピー解析で明らかになった。エントロピー増加の測定値から直接求めた衝撃波加熱量と、同地点での面密度ジャンプからランキン・ユゴニオ関係を用いて間接的に求めた衝撃波加熱量を比べたところ、前者の方が流体シミュレーションの解像度に対する依存性が低い傾向にあることがわかった。これは、エントロピー解析に基づく衝撃波加熱量の算出がより数値的な影響を受けづらいことと示唆する。

本研究で導いた惑星密度波による衝撃波加熱量の経験式は、衝撃波加熱が円盤温度分布に与える影響を、多次元流体計算を行わずに調べることを可能にするものである。特に、円盤の放射冷却効率を支配するダストの円盤内進化シミュレーションに本研究の経験式を適用することで、木星をもつ原始太陽系星雲において固体と円盤温度がどのように同時進化するかが明らかになるだろう。

キーワード：原始惑星系円盤、惑星形成

Keywords: protoplanetary disks, planet formation

氷天体内部の多相固体氷層の対流ダイナミクス

Dynamics of multi layered solid-state convection of ice in the icy body

有田 直哉¹、*木村 淳¹

Naoya Arita¹, *Jun Kimura¹

1. 大阪大学

1. Osaka University

In the interior of icy bodies, several ice layers in various solid phases appear depending on the size of the body, the temperature and the pressure conditions. Surficial icy shell consists of low-pressure phase ice Ih, and additionally in a deeper region of large icy bodies, such as Jovian moon Ganymede and Saturnian moon Titan, multi-layered ice mantle which consists of various high-pressure phases exist. Convection in these ice layers with solid-solid phase transitions is likely to play an important role in thermal evolution, surface tectonics and material transport. For examples, methane in the atmosphere of Saturn's moon Titan is estimated to convert into a complex hydrocarbons within several 10s Myrs through photochemical reactions, suggesting that methane can be continuously replenished to the surface possibly from the rocky core through thick solid ice layers. Also, the bottom of the high-pressure ice layer (the boundary with the rocky core) can be molten according to the heat flow from the core, and the rate at which molten water with lower density than surrounding ice rises through the high-pressure ice layer could have a significant effect on the thermal evolution and the material transport.

In such ways, the solid-state convection of ice associated with solid phase transition controls the heat and material transports from the rocky core to the surface. For the rocky mantle of the Earth, many numerical works focusing the effect of 660 km discontinuity have been performed. However, multi-layered icy mantle within a large icy body has not been well investigated. Although the effect of the phase transition is characterized by the Clapeyron slope, various different values for the high-pressure water ice have been provided throughout many previous experimental studies. Thus here we examine quantitative investigation of convective dynamics and transport efficiency considering such uncertainty of phase boundaries. We perform numerical simulations of solid-state convection in a multilayered ice mantle with solid phase transitions to investigate the flow structure and heat transport rate.

Our calculations assume the layered structure of the ice I - III, and ice I - III - V, and perform in a two-dimensional region with various Rayleigh number (10^{5-9}) and Clapeyron slope ($0 \sim -0.3$ MPa/K). As a general trend, the convective structure changes from one to two layers with a smaller (larger absolute value in negative) Clapeyron slope, and the Nusselt number significantly decreases. On the other hand, very large Rayleigh number shows that the two-layered structure unsteadily collapses and the transport efficiency intermittently increases even in case of smaller Clapeyron slope.

We evaluate the upward timescale through the ice layers based on the velocity of upwelling plume, and compare the CH_4 conversion timescale for the Titan's atmosphere (10s Myrs). For a relatively smaller Rayleigh number (10^{5-6}), the upward timescale is about 100 Myrs or more for a larger (smaller absolute value in negative) Clapeyron slope ($0 \sim -0.1$ MPa/K) implying difficult to maintain a steady amount of atmospheric methane, and similar orders of timescale for a smaller (larger absolute value in negative) Clapeyron slope ($-0.2 \sim -0.3$ MPa/K). For a larger Rayleigh number (10^7 or more), the upward timescale is

1 ~ 2 orders of magnitude smaller than the CH_4 conversion timescale in any value of the Clapeyron slope, suggesting that a sustainable supply of CH_4 from the rocky core to the atmosphere is possible.

球状鉄コンクリーションの空間分布およびサイズ分布の解明

Spatial and size distributions of spherical iron rinded concretions

田村 美紗樹¹、*城野 信一¹

Misaki Tamura¹, *Sin-iti Sirono¹

1. 名古屋大学 大学院環境学研究科 地球環境科学専攻

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Nagoya University

研究の背景

アメリカ・ユタ州のエスカランテ国立公園に産する球状鉄コンクリーションは大きさが1mm-数センチであり、砂岩粒子の隙間を酸化鉄が球殻状に埋めている。火星のメリディアニ平原において類似物が発見され、球状鉄コンクリーションの形成過程の解明が火星の古環境復元につながるものと期待されている。Yoshida et al. (2018: Sci. Adv. 4, eaau0872)により、球状鉄コンクリーション形成の第一段階は炭酸カルシウムコンクリーションの形成であることが示された。したがって、現在我々が観察している球状鉄コンクリーションの空間分布およびサイズ分布は、炭酸カルシウムコンクリーションの空間分布とサイズ分布を反映しているものと考えられる。炭酸カルシウムコンクリーションの核形成はランダムな確率過程であるため、空間分布もランダムな配置になることが期待されるが、Potter and Chan (2011: Geofluids, 11, 184)では空間分布はランダムからずれており等間隔に近いことが報告されている。一方でサイズ分布については、直径1mm, 1cm, 3cmにピークがあり、それぞれのピークの幅は、直径と正の相関が見られる(Potter et al., 2010 EPSL 201, 444)。しかしこれら先行研究のデータのサンプル数は必ずしも大きいとは言えない（空間分布算出に用いられているコンクリーション数は20個程度）のため、本研究ではより大きなデータセットを用いた上で空間分布とサイズ分布を求めた。また、サイズ分布の特徴を再現するモデルを構築し、数値シミュレーションを行った。

画像解析

空間分布およびサイズ分布の計測には、エスカランテ国立公園で撮影された3種の画像を用いた。1：約1000 m²の範囲の画像。解像度の制約から、直径1cm以上の鉄コンクリーションを解析した。2：約0.1m²の範囲の画像4枚。1では解析できないmmサイズのコンクリーションを解析する。3：Potter and Chan (2011)で用いられた画像（Potter氏より提供）。空間分布については、最近隣距離の頻度分布を算出し、ランダムな場合の解析解と比較した。解析の結果、Potter氏より提供された画像の一部（5枚）においてランダムな空間分布からの明らかなずれが見られたものの、その他のデータ（95枚）ではランダムな分布とのずれは見られなかった。ここから、サイズが小さい段階では何らかのメカニズムでランダムな空間分布からずれることがあるものの、基本的には空間分布がランダムであることがわかった。この結果は、炭酸カルシウムの核形成が砂岩中で一様に進行し、その核がそれぞれ独立に成長していることを示唆する。画像の解像度の制約により、先行研究で報告されている直径1cmにおけるサイズ分布のピークは観察されなかったものの、1mmと3cmのピークは本研究においても同定された。また、サイズと間隔との間の比例関係も観察された。この結果は、コンクリーションのサイズによらず砂岩の単位体積に含まれる炭酸カルシウムの含有量が一定であることを示す。

数値シミュレーション

炭酸カルシウムコンクリーションは、沈殿と溶解を繰り返して徐々に成長する。1次元球対称拡散方程式の

定常解から、炭酸カルシウムの沈殿速度は半径と共に増大し、逆に溶解速度は半径が大きくなると減少する。ここから、溶解と沈殿が繰り返されると、比較的小さなコンクリーションは消滅し、大きなものが成長することになる。そこで、溶解量と沈殿量が常に等しいという制約の下、サイズ分布がどのように進化するのか数値シミュレーションを行った。結果、オストワルトライプニングと同様の進化を示し、平均サイズに比例して分布幅が広がることがわかった（図1）。一方で形成時間については不確実性が大きく、1cmまで成長する時間は数千年一数十万年と制約された。溶解時のpH、沈殿時の過飽和度、溶解時間および沈殿時間の間に関係があることが明らかとなった。

キーワード：球状鉄コンクリーション、サイズ分布、空間分布

Keywords: spherical iron concretion, size distribution, spatial distribution

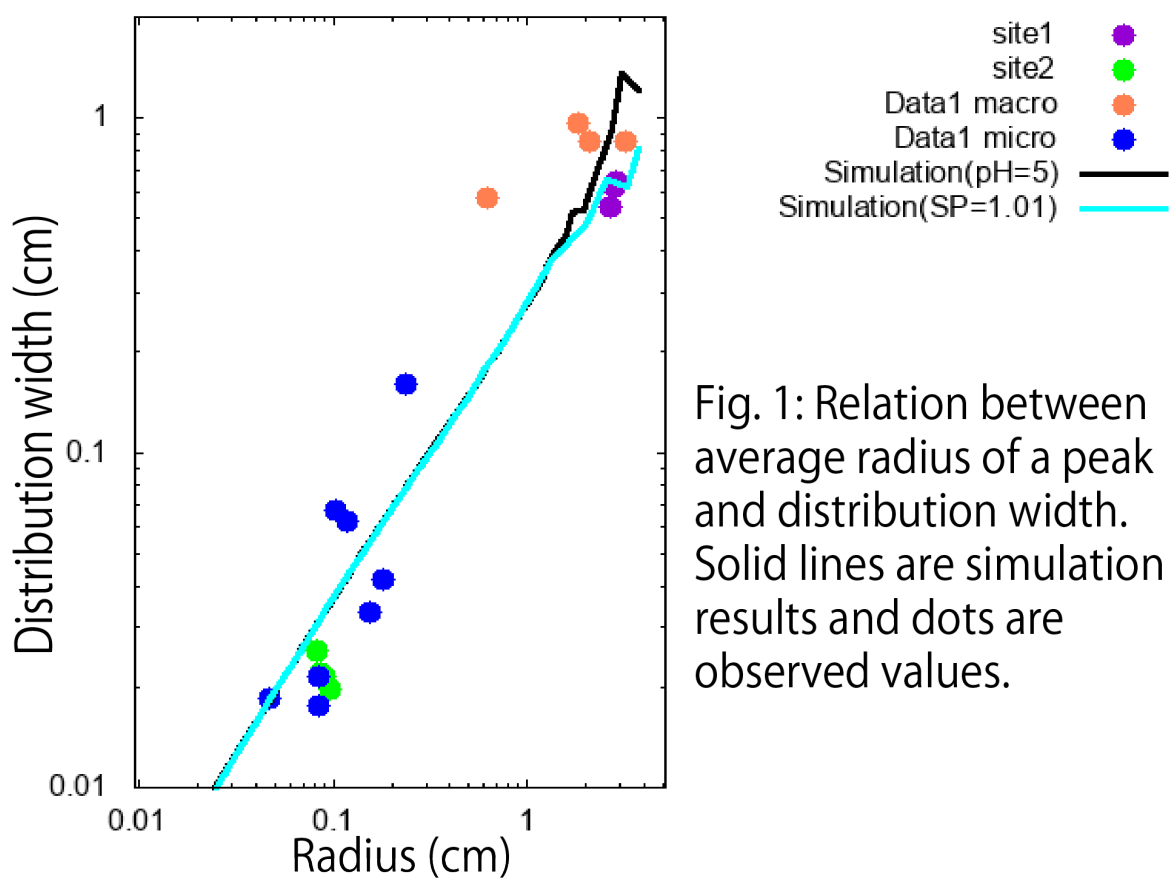


Fig. 1: Relation between average radius of a peak and distribution width. Solid lines are simulation results and dots are observed values.

木星衛星イオの環境を想定したSO₂霜の紫外線照射による変性実験

UV radiation experiment of SO₂ frost based on Jupiter moon Io's environment

*古賀 亮一¹、平原 靖大¹、根岸 昌平¹、李 源¹、趙 彪¹、伊藤 文之²、今井 正亮³、山崎 敦⁴

*Ryoichi Koga¹, Yasuhiro Hirahara¹, Shohei Negishi¹, Li Yuan¹, Zhao Biao¹, Fumiyuki Ito², Masataka Imai³, Atsushi Yamazaki⁴

1. 名古屋大学、2. 産業技術総合研究所、3. 京都産業大学、4. 宇宙科学研究所

1. Nagoya Univ., 2. AIST, 3. Kyoto Sangyo Univ., 4. ISAS/JAXA

木星衛星イオはSO₂を主成分(~90%)とした希薄な硫黄酸化物大気(~10⁻³ Pa)とSO₂の霜に覆われている。この大気は、高温火口から直接噴出と、表面に堆積したSO₂の霜の昼面の表面温度の上昇による昇華によって生成する。大気中のSO₂は電子衝突や紫外線波長帯の太陽光によってO, S原子に解離し、一部は大気スパッタリングによってイオ重力圏から脱出する。一方で、表面の”固体”のSO₂霜は紫外線の照射によって、分解されるか、成長を促進されるかは明らかになっていない。Baklouti et al (2007)ではイオの特定のPele火口周辺の赤色堆積物を想定して、実験室でSO₂に微量のS₂Oが混合した霜を生成した。彼らはこの試料に紫外から可視の波長帯の光を照射し、中間赤外スペクトルを計測した。しかし、”普遍的な”イオ表面の霜に対する紫外線の影響を想定する場合、純粋なSO₂霜への紫外線照射実験を行う必要がある。もし、地上観測と比較可能な希薄かつ低温の大気、表面霜、紫外線照射を再現した実験室測定で得られたスペクトルが得られれば、SO₂の霜の形態とイオの多様な火山活動の時空間変化及び太陽光照射の関係性に踏み込み、惑星科学と物性物理・化学の相補的な理解に寄与することができる。

本研究では以下の手順で紫外線強度・波長とSO₂の凝縮微粒子の化学的変性との関係性を中間赤外分光測定で明らかにする。液体窒素デュアーに小型の真空チャンバー内が接続しているクライオスタットを用いる(装置の詳細は同セッションの根岸他のポスターを参照)。小型のチャンバー内をイオの昼面の環境に近い10⁻³ Pa, 110-130 Kの状態に保ちつつ、デュアーのサンプルホルダーに取り付けられているCsIプレート上にSO₂ガスを吹き付けて、SO₂凝縮微粒子を堆積させる。その後、紫外光波長160 nmをピークに持つ重水素ランプ、及び遠紫外から可視域まで連続スペクトルを持つキセノンランプを光源にして、紫外線を照射しつつ、in-situで中間赤外線領域に現れる振動スペクトルの変化を測定する。重水素ランプを用いた場合、紫外線照度は10⁴ W/m²程度と見積もられる。木星磁気圏における120-250 nmでの木星磁気圏における太陽照度(e.g. 8.9×10⁻² W/m²)の140日分の紫外線照射を重水素ランプ1分間の照射で実現可能と見積もられる。実際の紫外線照射変成実験では紫外線の照射時間を調整することで、紫外線照射の強度・年数とSO₂霜の構造変化との関係性を明らかにする。実験のその場観測には准共通路波面分割型位相シフト干渉法(Qi et al., 2015)に基づくイメージングフーリエ変換中間赤外分光器を用い、空間二次元の透過吸収スペクトルを取得する。本発表では得られた赤外吸収2Dスペクトルの時空間変化を通して、紫外線照射時におけるSO₂霜の形態変化を議論する予定である。

キーワード：イオ、中間赤外、実験室実験

Keywords: Io, Mid infrared, Laboratory experiment

蛇紋岩と氷標的を用いた火星からフォボスに飛来する衝突エジェクタの実験的研究

Experimental study of impact ejecta flying from Mars to Phobos using serpentinite and ice blocks as targets

*山口 祐香理¹、中村 昭子¹、野村 啓太¹

*Yukari Yamaguchi¹, Akiko Nakamura¹, Keita Nomura¹

1. 神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University

はじめに：火星衛星フォボスからのサンプルリターンを行う MMX ミッションでは、フォボスの表面物質の調査から火星についての情報も得ることが期待されている。火星衛星表面には、火星での衝突によって放出された火星物質が存在すると考えられている(e.g.[1])。火星への衝突によって放出されるエジェクタのサイズと速度の関係は、火星での衝突クレーター形成にともなって火星から脱出し、衛星に到達するエジェクタ量の推定に制約を与えるために重要である。室内実験において 1 km/s 以上のエジェクタのサイズ-速度の情報は限定的であり、火星からフォボスに到達するのに必要なエジェクタ速度の 4 km/s を上回る高速なエジェクタのサイズに関する情報を高速度カメラ画像から導出することは困難である。そこで、一次標的に弾丸を衝突させて二次標的面へのエジェクタ衝突を高速度カメラで撮影する方法で衝突実験を行った先行研究と同様の手法で[2]、一次標的を先行研究(玄武岩)と異なる蛇紋岩および氷に変えて実験を行った。火星の表面のさまざまな物質に対応出来るような知見を得ることが狙いである。

実験方法：宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて蛇紋岩および氷標的への衝突実験を行った。弾丸には直径 3 mm のアルミニウム球を用い、衝突速度約 7 km/s で標的に対し垂直衝突させた。エジェクタが通過する位置(一次標的から、蛇紋岩は 300 mm、氷は 100 mm)に二次標的としてポリカ板やガラス板(縦 70 mm 横 150 mm)を配置した。放出角 θ を、弾丸軌道と二次標的の面の法線のなす角と定義する。一次標的が蛇紋岩の場合、二次標的全体の θ の範囲は約 15° から 40° であった。二次標的は、氷標的の場合にガラス板を用い、蛇紋岩標的の場合にポリカ板を用いた。ガラス板はポリカ板よりもクレーターが大きくなるので、二次標的上にたくさんのクレーターができる蛇紋岩標的の場合はポリカ板を用いてクレーターの重複を防いだ。弾丸の一次標的への衝突とエジェクタの二次標的への衝突の様子は高速度カメラで撮影を行い、撮影速度は 10⁵ fps 以上とした。エジェクタの二次標的への飛行時間と飛行距離からエジェクタの速度、エジェクタによって二次標的に形成されたクレーターの直径から π スケーリング則を用いてエジェクタを球としてサイズを算出した。クレーターの輪郭の中央をなぞって計測したクレーター面積から、クレーターの等価円と仮定して、クレーター直径を算出した。

結果：一次標的が蛇紋岩の場合も、先行研究[2]と同様に 4 km/s を超える速度のエジェクタが見つかった。エジェクタ速度と破片サイズについて調べた結果、高速なもののほど破片は小さくなる傾向が先行研究[2]同様に見られた。また、一次標的が蛇紋岩のときは、同じエジェクタ速度で、玄武岩[2]の最大サイズと同程度のサイズのものが見つかった。一次標的が氷の場合は、二次標的で観察されたエジェクタの速度範囲は、200 m/s ~ 4 km/s であり、二次標的上にはミクロンサイズのクレーターが数個見つかったのみであった。クレーターは高速度カメラ画像上で同定できていないが、このクレーターが衝突速度 200 m/s ~ 4 km/s で形成したと仮定すると、蛇紋岩と同じエジェクタ速度でのエジェクタサイズは、どのエジェクタ速度でも蛇紋岩のおよそ 1/100 になると推定された。

クレーター形状について、一次標的が蛇紋岩のときの二次標的上のクレーターは、円形と細長いものの二種類が観察された。放出角 θ (弾丸軌道と二次標的の面の法線のなす角)が小さいとき(約 20°)、クレーター形状は円形

で直径数10 - 数100 μm だった。 θ が大きいとき(約35°), クレーター形状は細長く長径数 mmであった。 一次標的が氷の場合は, 二次標的上に見つかったクレーターは円形であった。

今後は, エジェクタ形状によるクレーター直径への効果とそれに伴うスケーリング則への影響を加味して, 以上の結果を再評価することが目標である。

謝辞

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

参考文献

- [1] Ramsley, K.R., Head III, J.W., 2013. Planetary and Space Science 87, 115-129.
- [2] 野村啓太, 中村昭子, 長谷川直, 2021. JpGU2021 Online, May 30-June 6, 2021. (poster)など

キーワード： 高速度エジェクタ、蛇紋岩、フォボス

Keywords: high speed ejecta, serpentinite, Phobos