

太陽系小天体若手研究会 2022 (SSBW2022)

プログラム・予稿集

SSBW2022 世話人

荒木 亮太郎 (大阪大), 池谷 蓮 (神戸大), 于 賢洋 (東京大),
菖蒲迫 健介 (九州大), 鈴木 雄大 (東京大), 豊川 広晴 (総研大/宇宙研),
野崎 舜介 (東工大), 米谷 珠萌 (明治大), 吉田 有宏 (総研大/国立天文台)

2022 年 11 月 16 日 (水), 17 日 (木), 18 日 (金)@オンライン (zoom)

更新履歴

- 2022/11/02 プログラムを決定.
- 2022/11/06 予稿を作成.

日程

11/16(水)

13:00 – 13:10	開会の挨拶
13:10 – 14:00	衝突セッション
14:00 – 14:20	議論
14:20 – 14:30	休憩
14:30 – 15:30	小天体・氷天体セッション
15:30 – 15:50	議論
15:50 – 16:00	休憩
16:00 – 17:00	招待講演 仲内 悠祐 様（宇宙科学研究所）
17:00 – 17:05	初日閉会の挨拶

11/17(木)

13:00 – 13:00	二日目開会の挨拶
13:00 – 14:45	惑星内部・生命セッション
13:45 – 14:00	議論
14:00 – 14:10	休憩
14:10 – 14:25	地学教育セッション
14:25 – 14:35	議論
14:35 – 14:40	休憩
14:40 – 15:40	月セッション
15:40 – 16:00	写真撮影 & 休憩
16:00 – 17:00	招待講演 野田 夏実 様（東京工業大学）
17:00 – 17:05	二日目閉会の挨拶

11/18(金)

13:30 – 13:30	三日目開会の挨拶
13:30 – 14:30	惑星・惑星間空間セッション
14:30 – 14:50	議論
14:50 – 15:00	休憩
15:00 – 16:00	円盤セッション
16:00 – 16:20	議論
16:20 – 16:30	休憩
16:30 – 17:30	招待講演 宮本 英昭 様（東京大学）
17:30 – 17:35	閉会の挨拶

プログラム 11/16(木)

* はライトニングトークを表す.

一般口頭講演は 12 分発表, 3 分質疑応答,

ライトニングトークは 5 分発表, 質疑応答は slack もしくは議論タイムにて行う.

衝突セッション

- | | | |
|-------|-------------|---|
| O-01 | 13:10-13:25 | 山口 祐香理 (神戸大学 理学研究科 惑星学専攻)
標的物性の高速度衝突エジェクタサイズへの影響 |
| O-02 | 13:25-13:40 | 内田 雄揮 (東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻 JAXA 宇宙科学研究所)
Phobos 捕獲年代を考慮したクレーター年代関数の導出 |
| O-03 | 13:40-13:55 | 米谷 珠萌 (明治大学大学院理工学研究科物理学専攻)
ダイヤモンドアンビルセルを用いた小天体衝突再現実験について |
| O-04* | 13:55-14:00 | 松原 光佑 (神戸大学 理学部 惑星学科)
高速度衝突によって形成されるクレーターの形状と分光特性の観察 |

小天体・氷天体セッション

- | | | |
|------|-------------|--|
| O-05 | 14:30-14:45 | 鈴木 雄大 (東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)
彗星の「見かけの D/H 比」に対する多重散乱・自己吸収効果の影響 |
| O-06 | 14:45-15:00 | 窪田 暉 (京都産業大学 理学研究科 物理学専攻)
エウロパに間欠泉はあるのか?-ALMA データアーカイブからの探索- |
| O-07 | 15:00-15:15 | 池谷 蓮 (神戸大学 理学研究科 惑星学専攻)
小天体との近接遭遇におけるリングの安定性 |
| O-08 | 15:15-15:30 | 野崎 舜介 (東京工業大学 地球生命研究所)
分子動力学シミュレーションで探る、タイタンにおけるガスハイドレートの形成と進化 |

招待講演 1

- | | | |
|------|-------------|------------------------|
| I-01 | 16:00-17:00 | 招待講演 仲内 悠祐 様 (宇宙科学研究所) |
|------|-------------|------------------------|

プログラム 11/17(木)

* はライトニングトークを表す.

一般口頭講演は 15 分発表, 5 分質疑応答,

ライトニングトークは 5 分発表, 質疑応答は slack もしくは議論タイムにて行う.

惑星内部・生命セッション

- O-09 13:00-13:15 于 賢洋 (東京大学 総合文化研究科 宇宙地球部会)
「マグマの生成・移動の効果」が引き起こす
月の熱史モデルにおける指状のマグマ上昇プロセス
- O-10 13:15-13:30 菖蒲迫 健介 (九州大学 理学府 地球惑星科学専攻)
弱圧縮 SPH 法によるマントル対流計算
- O-11 13:30-13:45 三堀 遼太 (東京大学 総合文化研究科 宇宙地球部会)
カナダ・サグレック岩体の変成堆積岩 (> 39.5 億年前) の
岩石鉱物学・地球化学的分析から見る初期生命の代謝および生態系

地学教育セッション

- O-12 14:10-14:25 荒木 亮太郎 (大阪大学理学研究科 宇宙地球科学専攻)
なぜ地学はマイナー科目になったのか?
～ 戦後日本の中等理科教育における地学科の変遷と現状 ～

月セッション

- O-13 14:40-14:55 荒木 亮太郎 (大阪大学理学研究科 宇宙地球科学専攻)
レゴリス反射率から水氷検量線を求める手法の構築および月極域探査への適用と考察
- O-14 14:55-15:10 加藤 正久 (京都大学大学院理学研究科 地球惑星化学専攻)
月探査における光電子・オージェ電子観測応用の可能性
- O-15 15:10-15:25 豊川 広晴 (総合研究大学院大学 物理科学研究科 宇宙科学専攻)
SELENE の観測に基づく、月初期に形成した純粋斜長岩に含まれる水が内部起源である根拠

招待講演 2

- I-02 16:00-17:00 野田 夏実 様 (東京工業大学)

プログラム 11/18(金)

* はライトニングトークを表す.

一般口頭講演は 15 分発表, 5 分質疑応答,

ライトニングトークは 5 分発表, 質疑応答は slack もしくは議論タイムにて行う.

惑星・惑星間空間セッション

- O-16 13:30-13:45 野口 里奈 (新潟大学 自然科学系)
火星露頭における柱状図自動作成のための機械学習の試行
- O-17 13:45-14:00 平田 佳織 (東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻)
表面組成データの多変量解析による水星の化学組成ユニットの同定
- O-18 14:00-14:15 小長谷 智哉 (北海道大学)
レゴリス角礫岩質隕石に記録された過去の太陽風フラックス
- O-19 14:15-14:30 眞田 聖光 (東京大学 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻)
複数の衛星観測データを用いた木星磁気圏の構造解明

円盤セッション

- O-20 15:00-15:15 神野 天里 (神戸大学大学院 理学研究科 惑星学専攻))
動径方向に不連続性を持つ原始惑星系円盤における
pebble accretion を考慮した惑星系 N 体シミュレーション
- O-21 15:15-15:30 駒木彩乃 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻)
原始惑星系円盤進化の中心星質量依存性
- O-22 15:30-15:45 吉田 有宏 (総合研究大学院大学/国立天文台)
輝線の圧力広がりを用いた原始惑星系円盤ガス分布の直接的制約
- O-23 15:45-16:00 長足 友哉 (東北大学大学院理学研究科地学専攻)
地球外模擬有機物の真空・低温環境での付着力測定に向けて

招待講演 3

- I-03 16:30-17:30 宮本 英昭 様 (東京大学)

予稿集 11/16(水)

* はライトニングトークを表す.

一般口頭講演は 12 分発表, 3 分質疑応答,

ライトニングトークは 5 分発表, 質疑応答は slack もしくは議論タイムにて行う.

講演番号 O-01

講演タイトル 標的物性の高速度衝突エジェクタサイズへの影響

著者(所属) 山口 祐香理 (神戸大学 理学研究科 惑星学専攻)

概要 火星衛星表面には、火星での衝突によって放出された火星物質が存在すると考えられており [1], MMX ミッションによる火星衛星フォボスからのサンプルリターンで、火星についての情報も得ることが期待されている [2]. 本研究では、火星から衛星に到達するエジェクタ量を実験的に推定するために、火星から放出される高速度エジェクタのサイズー速度ー放出角度関係と標的物性への依存性を明らかにすることを目的とする.

宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて、直径 3 mm のアルミニウム球弾丸を、衝突速度約 7 km/s で、一次標的に対して垂直および斜め 45° で衝突させた. エジェクタが通過する位置に二次標的を配置し、エジェクタの二次標的面への衝突を高速度カメラで撮影して高速度エジェクタのサイズー速度ー放出角度関係を調べた. 一次標的は、先行研究 [3] の豊岡産玄武岩 (2.7 g/cm³, 12 MPa) とは密度と圧裂引張強度が異なるモンゴル産玄武岩 (3.2 g/cm³, 21 MPa) と蛇紋岩 (2.7 g/cm³, 18 MPa) を使用した.

解析手法としては、エジェクタの二次標的への飛行時間と飛行距離から速度を導出した. また、エジェクタによって二次標的に形成されたクレーター面積からクレーター直径を算出し、 π スケーリング則を用いてエジェクタを球としてそのサイズを推定した. その結果、エジェクタサイズは一次標的の物性に依存する可能性がみられた. 本発表では、エジェクタ放出パターンについても報告する.

参考文献 [1] Ramsley, K. R. & Head 2162, J. W. (2013). Planetary and Space Science 87, 115-129.

[2] Hyodo, R. et al. (2019). Scientific Reports 9, 19833. [3] 野村 啓太, 神戸大学大学院理学研究科, 修士論文, 2022 年 3 月

講演番号 O-02

講演タイトル Phobos 捕獲年代を考慮したクレーター年代関数の導出

著者(所属) 内田 雄揮 (東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻 JAXA 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系 固体惑星グループ)

概要 火星衛星 Phobos の起源には、メインベルトから飛来した小惑星が火星引力により現在の軌道に捕獲されたとする小惑星捕獲説と、火星への天体衝突による副産物とする天体衝突説の主に 2 つの仮説が提唱されている. 火星衛星探査計画 MMX では、それら二説に代表される火星衛星の起源の解明を科学目標の一つに掲げている. Phobos の起源が捕獲説によって説明される場合、火星圏捕獲年代に関する制約が求まれば太陽系の進化における天体運動の描像をより詳細に得られると考えられる. そこで本研究ではクレーター年代学に基づいた理論予測を行い、サンプル分析から得られるクレーター形成年代から Phobos 捕獲年代を決定できるような着陸候補地点 (= サンプル採取地点) の鑑別に必要な判断材料の提供を目指す.

クレーター年代学に基づいた理論予測では 4.5 Ga から 0 Ga の範囲で複数の捕獲年代を仮定し、それぞれの単位時間、単位面積あたりのクレーター形成率から、捕獲年代ごとにクレーター数密度 N と地質年代の関係を表すクレーター年代関数を求めた. 本研究で得られたクレーター年代関数は、捕獲年代が 4.5 Ga のものは天体衝突説を仮定した際のクレーター年代関数を表す一方、0 Ga のものはメインベルト小惑星のクレーター年代関数を表す. また、捕獲年代の違いによりクレーター年代関数に差異が生じることが示された. 特に $N \sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ km}^{-2}$ においては捕獲年代に対する地質年代が大きく異なることが明らかになった. 一方、 $N \leq 10^0 \text{ km}^{-2}$ 付近では捕獲年代によるクレーター年代関数の変化が小さい. また、この N が大きい領域ではクレーターの飽和平衡が著しく、 N の判別が難しいことが知られている. MMX で

は、Phobos 試料の年代測定により着陸地点のクレーター形成年代がクレーター年代関数とは独立に得られる。つまり、 $N \sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ km}^{-2}$ の領域からの試料採取により、捕獲説の場合における捕獲年代の決定が期待される。

講演番号 O-03

講演タイトル ダイヤモンドアンビルセルを用いた小天体衝突再現実験について

著者(所属) 米谷 珠萌 (明治大学大学院理工学研究科物理学専攻)

概要 生命起源物質は宇宙からもたらされたという説がある。実際、アミノ酸や核酸塩基、糖類といった有機物が含まれる隕石も地球に飛来しているが、隕石中の有機物は衝突時に高温・高圧にさらされることでほとんどが分解してしまい、十分な量が地球に供給されないのではないかと指摘もある。これまでは、シミュレーション計算やガス銃を用いた衝撃圧縮実験により小天体衝突を再現し、アミノ酸の生存率を推定する試みがなされてきた。しかし、これらの手法では基となるデータの温度・圧力条件が低いことや、実験において 2000 K を超える高温を制御することが難しいという問題点がある。そこで、私たちのグループでは 300 GPa, 6000 K までの任意の温度・圧力を発生でき、様々なその場観察が可能で、急冷速度も大きいダイヤモンドアンビルセル (DAC) を用いて高温・高圧実験をすることで、小天体衝突時の条件を再現し、隕石中有機物の分解反応速度を決定することに挑戦している。DAC は静的圧縮、数秒以上の加熱により平衡過程を再現できる装置である。さらに、高温・高圧実験をしながら X 線回折測定やラマン分光測定などを同時に行うことができ、その場観察が可能である。今回、統合制御システムによってレーザー加熱・分光測定・X 線回折測定を精密に同時制御することで 1 秒未満の瞬間加熱を実現でき、有機物の分解速度について先行研究のモデルと良い一致があることを示した。DAC を用いた小天体衝突の再現実験は、隕石中の有機物のほか、隕石中にたまに見られる超高压鉱物の成因の解明にも役立てられると期待されている。

講演番号 O-04*

講演タイトル 高速度衝突によって形成されるクレーターの形状と分光特性の観察

著者(所属) 松原 光佑 (神戸大学 理学部 惑星学科)

概要 太陽系内では天体同士の衝突を通じて様々な物質が輸送されている。例えば、鉄やニッケルを豊富に含む M 型小惑星 Psyche や分化している小惑星 Vesta の表面には、衝突によってもたらされたと考えられる含水鉱物が存在していることが、分光観測によって示されている。衝突によってターゲットにプロジェクティル物質が付着する研究は行われているが、その付着量の定量化は進んでいないのが現状である。今回の研究では 2 段式軽ガス銃を使用し、岩石プロジェクティルを約 5 km/s と 7 km/s の速度で鉄鋼ターゲットに衝突させてクレーター試料を作成した。クレーターの表面形状と、プロジェクティル物質がターゲットへ付着する厚さを調べることで、クレーター内に残存する物質の量を推定することができる。作成したクレーターの断面を電子顕微鏡で観察したところ、プロジェクティル物質の付着は一様ではなく、クレーター底で薄く、反対にリム付近やターゲットに破砕が生じている箇所では厚く付着するという傾向が見られた。また、近赤外分光測定では、蛇紋岩を 5 km/s で衝突させて形成したクレーターには 3 μm 付近で吸収がみられる一方、7 km/s で衝突させて形成したクレーターには同様の吸収が見られなかった。インピーダンスマッチング法を用いると、5 km/s での衝突では約 90 GPa の圧力が生じたと推定される。この値は蛇紋岩が完全に脱水するとされる従来の推定値を大きく上回っており、大きな圧力が発生する衝突においても蛇紋岩内の水酸基が保存される可能性が示された。

講演番号 O-05

講演タイトル 彗星の「見かけの D/H 比」に対する多重散乱・自己吸収効果の影響

著者 (所属) 鈴木 雄大 (東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)

概要 彗星は太陽接近経験に乏しく表層進化が進行していないことから、初期太陽系の物質分布や惑星移動等の履歴を反映していると期待されている。また、地球の水起源の候補天体の 1 つともされており、地球および太陽系の歴史を紐解く上で重要な研究対象である。地球の水起源の制約の際に使われる指標の 1 つが重水素-水素同位体比 (D/H 比) である。彗星の場合、大気 (コマ) 中の分子の観測から推定される D/H 比が核表面の活動領域の割合と反相関関係にあることが指摘されているが、この傾向が熱史と大気生成輸送過程のどちらに起因するものかは分かっておらず、コマ中の D/H 比と核の D/H 比の関係性の理解のためにはコマ中での分子原子に働く物理化学過程の理解が必要である。本研究ではまず、ひさき衛星による 4 つの長周期彗星の紫外線分光観測データを解析し、コマ中の Ly- α 線の放射輝度分布の傾きが高度 5×10^4 km 付近を境に大きく変化することを明らかにした。これを説明するために、多重散乱効果を考慮した放射輸送モデルを構築し、Ly- α 線の空間分布の再現に成功した。同モデルを用いることにより、彗星コマ中では水素の視線に沿った柱密度が 5×10^{22} /km² を超える (水放出率 10^{29} /s の彗星の場合、高度 10^5 km 以下に相当) と多重散乱効果の考慮が重要になることが分かった。また、水素と輝線波長が 33 pm だけ異なる重水素の Ly- α 線についてはコマ中のほとんどの領域において光学的に薄いことから、Ly- α 線の光学観測の場合は核に近づくほど見かけ上 D/H 比が上昇することが分かった。本発表ではひさき衛星の解析と放射輸送モデルの比較を基に、彗星コマ中における多重散乱効果の重要性について議論する。さらに、同モデルを利用した Comet Interceptor ミッションによる D/H 比の観測可能性の検討結果についても述べる。

講演番号 O-06

講演タイトル エウロパに間欠泉はあるのか? -ALMA データアーカイブからの探索-

著者 (所属) 窪田 暉 (京都産業大学 理学研究科 物理学専攻)

概要 Cassini 探査機の探査により土星衛星エンセラダスには内部海や間欠泉の存在が知られているが、木星の氷衛星エウロパにもそのような内部海は存在するのだろうか? エウロパにおける内部海の存在を示唆する先行研究は幾つか存在するものの、間欠泉の有無といった、内部海の存在のより直接的な根拠となるような観測データは未だ得られていない。

過去の Galileo 探査機で得られた夜面の赤外線画像では Pwyll クレーターの領域に熱異常が示されて、その後、Trumbo et al. (2017) により ALMA 望遠鏡による電波観測を用いて同クレーターにおける熱異常の再調査が行われた。その研究では、ALMA で観測された昼面の輝度分布と Galileo 探査機による夜面の赤外線画像を比較し、輝度温度の日変化を議論することで、熱異常の有無を検証するものであったが、Trumbo et al. (2017) では Pwyll クレーターにおける熱異常の存在には否定的な結論が得られている。本研究では、Trumbo et al. (2017) で解析されたデータに、他の ALMA エウロパ観測データも加えることで、異なるローカルタイムにおける Pwyll クレーター周辺の輝度温度のデータを取得した。それと輝度温度の日変化モデルを比較することで、熱慣性および地熱流量を制約し、熱異常が起きているかを改めて調査することを目的としている。

講演番号 O-07

講演タイトル 小天体との近接遭遇におけるリングの安定性

著者 (所属) 池谷 蓮 (神戸大学 理学研究科 惑星学専攻)

概要 惑星だけでなく、太陽系小天体 (以下、小天体) も環を持つことが近年明らかになった (Braga-Ribas et al., 2014)。現在、3 つの小天体において環が発見されており、今後さらに発見されると考えられている (e.g., Ortiz et al., 2017)。環の特徴 (半径、本数、幅など) および環を持つ小天体の特徴 (質量、軌道など) はそれぞれ異なる。多様な特徴に対して環を持つ小天体の発見例が少ないため、観測事実から一般性を抽出し、環の形成メカニズムや長期的な進化を解明することが困難である。そこで本研究では、小天体同士の近接

遭遇 (例:衝突) は全ての小天体にとって普遍的かつ重要な現象であることに着目した。小天体同士での近接遭遇に際する環の安定性 (=環粒子の軌道が乱されないか) を数値計算し、小天体にとって環の保持に好ましい質量と軌道を制約できれば、得られた制約は全ての小天体へ適用できると考えた。本発表では、数値計算の途中経過を報告する。

講演番号 O-08

講演タイトル 分子動力学シミュレーションで探る、タイタンにおけるガスハイドレートの形成と進化

著者 (所属) 野崎 舜介 (東京工業大学 地球生命研究所)

概要 土星の氷衛星タイタンは窒素とメタンの分厚い大気で覆われた氷衛星であり、表面における液体炭化水素や複雑な有機物の存在、地下における内部海などの液体の存在からアストロバイオロジーの重要なターゲットである。その形成から現在まで、水・氷の存在下でのガスハイドレート形成・維持・崩壊に伴うガス分子の貯蔵・放出を通してシステム全体の化学組成や熱史に影響を与えてきたと考えられている。本発表では、ガスハイドレートの形成やガス分子の交換現象と、それらに対する分子動力学シミュレーションを利用したアプローチを紹介しながら、タイタンの進化史を議論する。

講演番号 I-01

著者 (所属) 仲内 悠祐 様 (宇宙科学研究所)

予稿集 11/17(木)

* はライトニングトークを表す.

一般口頭講演は 12 分発表, 3 分質疑応答,

ライトニングトークは 5 分発表, 質疑応答は slack もしくは議論タイムにて行う.

講演番号 O-09

講演タイトル 「マグマの生成・移動の効果」が引き起こす月の熱史モデルにおける指状のマグマ上昇プロセス

著者 (所属) 于 賢洋 (東京大学 総合文化研究科 宇宙地球部会)

概要 月内部の長期的な進化過程の解明を目指すべく, 月の熱史モデルの構築は半世紀以上にわたって行われてきた. 月の熱史モデルは技術の進歩によってモデルの多次元化, マントル対流の考慮ができるようになったのみならず, 月探査の発展や観測・測定技術の向上によって明らかになった新しい事実と整合的になるように様々な効果を反映させてきた. 先行研究においては, 例えば月の半径変化や火山活動史, 表裏における地殻の厚みや組成の二分性などを解明するため, 放射性元素濃度やその分布, 初期温度分布, マントル対流の程度などを変化させ, 整合的なモデル構築を目指してきた. しかし, 月の熱史モデルにおいてこれまでマグマの生成・移動とそれに伴うエネルギーや放射性元素, 玄武岩質成分の輸送は考えられてこなかった. ここでは 2 次元円環マントル対流モデルにそれらの効果を加え, 月の熱史に及ぼす影響を考えた. 結果として, 深部で生成されたマグマが上昇する段階で指状にマグマが上昇し, そのマグマが引き起こした活発なマントル対流によってさらにマグマの上昇が促進されることがわかった. マグマはマントル対流の影響で指状からプリューム状に変化し, 地表面付近まで上昇する. その過程で深部マントルに濃集していた放射性元素や玄武岩質成分の多くを上部マントルへ抽出するものの, 深部に残った放射性元素やマントル対流によってマグマの上昇は 20 億年程度継続することが明らかになった. 計算における後期に見られる上昇マグマは放射性元素に枯渇しているものもあり, 観測事実と整合的と言える. また, このような整合的なモデルに見られる最初の指状のマグマ上昇プロセスはマントル対流の程度で決まるものではなく, マグマの上昇速度に依存することがわかった. 今後はこのような上昇プロセスの詳細な解析を踏まえ, 月内部における力学的構造を把握したい.

講演番号 O-10

講演タイトル 弱圧縮 SPH 法によるマントル対流計算

著者 (所属) 菖蒲迫 健介 (九州大学 理学府 地球惑星科学専攻)

概要 惑星内部のダイナミクスを理解するのに, マントル対流計算はとりわけ重要である. 惑星内部の対流現象の特徴は, (1) 流れが音速より十分遅いことと, (2) 粘性率が非常に大きいことである. 数値流体計算における時間発展法のうち, 陽解法は実装が簡単で並列計算にも適しているため, 巨大な系を解く際に有効である. しかし, 陽解法ではある安定条件を満たすタイムステップで計算を進める必要がある. マントル対流では, 音速と動粘性率から見積もられるタイムステップが大変厳しく, 陽解法では解きがたい. 本研究の目的は, マントル対流を陽解法を用いて高速に解くための新しい枠組みを構築することである.

我々が提案する方法の基本的な考え方は, マントル対流本来の物理を損ねない程度にタイムステップ条件を緩和する, というものである. 具体的には, (1) 流れが音速より十分遅いという条件の下, 音速を低減させ (音速低減法; e.g., Rempel, 2005), (2) 粘性率が非常に大きいという条件の下, 慣性項を大きくする (慣性変化法; Takeyama et al., 2017). Takeyama et al. (2017) では, 音速低減の効果も考慮されている一方で, 熱対流で本質的な熱膨張率を変化させるパラメーターを含む欠点がある. そこで, 我々は両者を混合した計算法を新たに構築した.

我々の最終的な野望は, 惑星巨大衝突から惑星内部進化まで一貫して解ける計算手法を構築することである. 巨大衝突計算では大変形を扱うことができる, Smoothed Particle Hydrodynamics Method (SPH 法; Lucy, 1977) が広く用いられる. そこで, SPH 法を惑星内部計算に応用したいと考えた. SPH 法は圧

縮性流体を扱うための手法で、陽解法を用いる。一方、惑星内部の流れは音速よりも遅く、数値安定性から音波の存在が厄介である。そこで、音速低減法を SPH 法に適用した弱圧縮 SPH 法 (Monaghan, 1994) が有効である。しかし、従来の弱圧縮 SPH 法では、熱対流で本質的な熱膨張よりも、音波による圧縮の方が効きすぎてしまう。そこで、我々は SPH 計算における密度を、物理的な考察に基づき複数の異なる密度に置き換えることで、この問題の解決を試みた。本講演では、新たに提案する弱圧縮 SPH 法の基本的な考え方、および、これを用いたマントル対流計算の結果について発表する。

講演番号 O-11

講演タイトル カナダ・サグレック岩体の変成堆積岩 (> 39.5 億年前) の岩石鉱物学・地球化学的分析から見る初期生命の代謝および生態系

著者 (所属) 三堀 遼太 (東京大学 総合文化研究科 宇宙地球部会)

概要 初期生命についての研究は、地球生命史の重要なトピックであるばかりでなく、惑星の環境形成やアストロバイオロジーにも重要な示唆を与える。しかし、現存する初期地球の地質情報は限られており、生命の起源や初期進化について十分に明らかになったとは言い難い。

原太古代 (40~36 億年前) の表成岩としては、グリーンランドのイスア表成岩帯やカナダのサグレック岩体などが知られているが、これらの地層は専ら角閃岩相以上の強い変成作用を受けている。したがって、生命の形態が微化石として保存されておらず、同位体分析を中心とした化学分析によって研究が進展してきた。

同位体分析としては、まず炭素同位体分析が挙げられる。これは生命が炭素固定を行う際に軽い炭素 (^{12}C) を優先的に取り組むことを利用したもので、 ^{12}C に富むグラファイトが生命の痕跡の重要な一証拠とされている (Rosing et al., 1999; Ohtomo et al., 2014; Tashiro et al., 2017、など)。また、代謝的酸化還元反応に伴う同位体分別効果に基づき、硫黄同位体分析や鉄同位体分析などから生命の代謝活動が議論されている (Papineau & Mojzsis, 2006; Dauphas et al., 2017; Yoshiya et al., 2015、など)。しかし、同位体値から初期生命の代謝の存在を明確に示す研究は乏しく、どのような代謝を行う微生物が生息していたのか、生態系はあったのか、など不明な点は依然として多い。また、イスア表成岩帯よりも古い年代 (> 39.5 億年前) を持つサグレック岩体の堆積岩を対象とした研究としては、Tashiro et al. (2017) が最古の生命の痕跡を報告するのみである。

本研究では、カナダ・ラブラドル地域のサグレック岩体に存在する変成堆積岩中の硫化鉱物及び鉄酸化鉱物の硫黄・鉄同位体分析を行う。母岩としては礫岩・泥質岩・炭酸塩岩・BIF・チャートが存在し、その中に磁硫鉄鉱 (FeS)、磁鉄鉱 (Fe_3O_4) などの不透明鉱物が含まれる。また、岩石によって変成度が異なるものが知られている。したがって、それぞれの堆積場や鉱物生成、変成度の違いと、同位体値を比較することで、記録された同位体情報の起源を特定し、初期生命の代謝や生態系を明らかにしたい。

講演番号 O-12

講演タイトル なぜ地学はマイナー科目になったのか? ~ 戦後日本の中等理科教育における地学科の変遷と現状 ~

著者 (所属) 荒木 亮太郎 (大阪大学理学研究科 宇宙地球科学専攻)

概要 本若手会に参加した我々は分野の未来を担っていく者として、地球惑星科学という学問やその教育が社会にとっていかに重要かを認識している (はずである)。客観的な視点を持つと、防災・環境科学への社会的ニーズの高まりや、近年成長著しい宇宙開発産業といった様々な社会の営みを見出すことができ、やはり社会が広く地惑分野を理解し興味を持つことは重要であると確信される。

一方で、一般市民の教養の土台となる中学・高校のカリキュラムにおいては、理数系科目のなかで地学が圧倒的に軽視されている。高校地学の履修者の数は極めて少なく、具体的には 2019 年の履修率が 0.6%、全高校に対する地学開設校の割合が 8.8% と推定されている (吉田&高木, 2019)。地学科が冷遇されてきた理由は複合的だが、学際分野である地学の指導に理科教員の反発があった、「脱ゆとり」による単元の削減で暗記科目化した、大学受験で需要が少ない、教育委員会の関心の低下による地学教員削減といった要因

が存在する。

本発表では、戦後の日本に設置されてきた中等教育地学課程の歴史的経緯および現状について、いくつかの国内誌のレビューを行うとともに、今後どのような取り組みが考えられるか議論する。

講演番号 O-13

講演タイトル レゴリス反射率から水氷検量線を求める手法の構築および月極域探査への適用と考察

著者 (所属) 荒木 亮太郎 (大阪大学理学研究科 宇宙地球科学専攻)

概要 現在、日印共同の月極域探査 LUPEX が計画されている。この計画でローバーに搭載される近赤外分光装置は、月永久影土壤に微量分布する水氷を検出することを目指している。月面土壤を構成する鉱物粉体のスペクトルは、同じ着氷率でも、鉱物種や粒径の違いによって吸収の強度が変化する。これまでの研究では、作製した着氷鉱物粉体試料を近赤外分光観測して波長 $1.5\mu\text{m}$ に現れる水氷の吸収深さを検量した。結果、着氷率に対する吸収強度の検量線傾きは、乾燥鉱物反射率、粉体粒径を軸に取った時の三次元グラフにプロットした場合に、一定の関数で表される曲面に分布することが判明した。本発表ではこの関数の物理的意味の解釈を議論するとともに、月極域のリモートセンシングデータからこの曲面を実際の探査結果に適用する。

講演番号 O-14

講演タイトル 月探査における光電子・オージェ電子観測応用の可能性

著者 (所属) 加藤 正久 (京都大学大学院理学研究科 地球惑星化学専攻)

概要 月は固有磁場と濃密な大気を持たない天体であるため、宇宙空間からプラズマが直接表面まで降り込んでいる。このため、月面と荷電粒子との相互作用が直接発生しており、太陽光による電子放出 (光電子・オージェ電子) の発生は相互作用の一例である。

一方で光電子やオージェ電子の放出現象は、X線光電子分光 (XPS) やオージェ電子分光 (AES) として主に表面分析において応用されてきた。この AES の考え方を応用して Lin and Gopalan (1991) では、月などの一般的な大気をもたない天体において光電子とオージェ電子を衛星軌道上から計測することにより月面組成の遠隔観測によるマッピングの可能性を示した。

また、月におけるオージェ電子の観測も近年になり初めての例が報告されている (Xu et al., 2021)。

本研究では、月周回機である ARTEMIS 衛星の観測データと電子放出に関わる様種々のパラメータから計算した数値モデルを使用し、遠隔観測による月面環境探査につながる光電子とオージェ電子のエネルギー特性について考察する。

講演番号 O-15

講演タイトル SELENE の観測に基づく、月初期に形成した純粋斜長岩に含まれる水が内部起源である根拠

著者 (所属) 豊川 広晴 (総合研究大学院大学 物理科学研究科 宇宙科学専攻)

概要 地球-月系の形成と進化を理解するためには、月における水 (OH や H_2O) の分布と起源の解明が重要である。我々は SELENE に搭載されたスペクトルプロファイラで得られた近赤外分光データを用いて、純粋斜長岩の露出場所に濃集する水の起源を調査した。純粋斜長岩は月初期に形成されたと考えられているため、地球 FF0D 月系の初期進化を理解する上で重要な情報をもつ。結果として、純粋斜長岩の露出場所の 10 程度において、水の存在を示す可能性の高い $1.5\mu\text{m}$ 付近のスペクトル吸収を確認した。この吸収特徴は月のローカル時刻に依存せず、また吸収の最大値は表面への露出年代が古いほど減少する。このような短期的・長期的な変化は、純粋斜長岩に含まれる水が内部起源であることを示唆する。したがってこの結果は、月がマグマオーシャン期に揮発性物質に富んだ状態であったとする wet early moon 説を支持するも

のである。

講演番号 I-02

著者(所属) 野田 夏実 様 (東京工業大学)

予稿集 11/18(金)

* はライトニングトークを表す.

一般口頭講演は 12 分発表, 3 分質疑応答,

ライトニングトークは 5 分発表, 質疑応答は slack もしくは議論タイムにて行う.

講演番号 O-16

講演タイトル 火星露頭における柱状図自動作成のための機械学習の試行

著者(所属) 野口 里奈(新潟大学 自然科学系)

概要 火星で露頭スケールの地質調査が行われる時代が到来している。多量の探査画像データが得られ、火星探査を続々と控える今、画像データに基づいた露頭調査手法を確立する必要がある。一般的に、地球上で行われる地質調査では、地層の分厚さ(層厚)や構成物の種類や粒径などの基本的なデータを統合した表現方法である柱状図を最初に作成する。柱状図の作成には、1) 作成対象箇所の選定、2) 地層の認識・分割、3) 層厚の測定、4) 構成物の判別が必要であるが、データの収集には人的・時間的コストがかかる。そこで本研究では、画像解析・機械学習手法を適用し、地球上のフィールドでの人間による観察とすり合わせていくことで、柱状図を画像から自動的に作成する手法を検討する。自動化できれば、人間では不可能な同一基準からなる柱状図を短時間で多量に作成することが可能になる。これにより、探査データからの科学データ抽出の最大化が期待できるのみならず、今後の火星探査で基本的な地質調査をどのように進めるかの迅速なプロセス検討に貢献することができる。

第一段階として、本研究では、露頭画像中から地層露出のある部分を自動的に抽出する手法の開発に取り組んだ。本発表では、試行プロセスの詳細と学習・予測精度検証結果を紹介する。

講演番号 O-17

講演タイトル 表面組成データの多変量解析による水星の化学組成ユニットの同定

著者(所属) 平田 佳織(東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻)

概要 NASA の水星探査計画 MESSENGER では、X 線分光計やガンマ線分光計を用いた観測から、水星の表面化学組成に空間的な不均質が存在することが明らかになった。しかし、推定された化学組成は、用いた観測手法・装置や対象とする元素により空間解像度が異なっており、直接比較することが難しいという問題がある。本研究では、まず、MESSENGER の X 線分光計の観測から推定された元素組成の空間分布を多変量変数として主成分分析を行い、表面元素組成の空間不均質を特徴付ける指標を抽出する。また、クラスター解析により表面元素組成を反映した化学組成ユニットを定義し、その区分を決定する。さらに、得られた結果と、先行研究で定義されている可視分光観測に基づくユニット分類を比較し、元素組成の空間不均質を生み出した要因について議論する。

講演番号 O-18

講演タイトル レゴリス角礫岩質隕石に記録された過去の太陽風フラックス

著者(所属) 小長谷 智哉(北海道大学)

概要 過去の太陽風フラックスは長期的な惑星大気散逸過程を検討する上で重要なパラメーターである。太陽に似た恒星の観測や理論研究では現在と比べて非常に大きな過去の太陽風フラックスが提案されているが(例えば 30 億年前で 10 倍以上、10 億年前で数倍(Wood et al., 2005; Airapetian et al., 2016))、直接的証拠が無いことから実際の太陽風フラックス進化履歴は不明である。レゴリス角礫岩質隕石は小惑星レゴリスが固まった物質であり、過去の太陽風粒子を獲得・保存している。本研究では、太陽風暴露時に同時に蓄積した宇宙線照射起源希ガスを照射期間の指標に用いることで、6 つのレゴリス角礫岩質隕石に記録された過去の太陽風フラックスを推定した。その結果、PRE 95410 隕石(R コンドライト)以外の隕石は現在と同程度のフラックスを記録していることが明らかになった。このことは隕石レゴリスが太陽

風に暴露した当時から太陽風フラックスがほとんど変化していないことを示唆する。特に Kapoeta 隕石 (howardite) は 10 億年以上前に太陽風を獲得した可能性が高い。このため、これまでの恒星観測や理論研究では過去の太陽風フラックスを過剰に見積もっているかもしれない。

講演番号 O-19

講演タイトル 複数の衛星観測データを用いた木星磁気圏の構造解明

著者 (所属) 眞田 聖光 (東京大学 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻)

概要 宇宙空間は希薄なプラズマガスで満たされており、一部の粒子は超新星爆発や太陽コロナの爆発現象によって相対論的エネルギーまで加速され、周囲の惑星に飛来する。そのため、磁気圏プラズマには加速現象が深く関わっており、その理解が磁気圏環境の解明のために非常に重要である。プラズマの加速現象は地球周辺だけでなく木星周辺でも起きている。私は、加速現象の解明に適した興味深い構造を持つ木星磁気圏に着目している。具体的には、木星周辺では衛星イオの噴火活動に起因して高温のプラズマ粒子が常に木星の内部磁気圏に流入しており、極めて大規模な加速現象を引き起こしている。本研究は飛翔体観測データの解析を通してこれらの現象の理解を目指す。木星磁気圏は地球周回衛星「ひさき」と木星探査機「Juno」により長期的に観測されてきた。ひさき衛星のデータ解析からは、高エネルギー粒子が木星の内部磁気圏に輸送されていることが示唆された。しかし、ひさき衛星は地球軌道からの遠距離観測であり、木星磁気圏の粒子加速機構の詳細は明らかになっていない。そこで私は、「ひさき」と「Juno」の観測距離や視野が異なることと、観測時期が重なっていることに着目し、両データの解析で得た粒子のパラメータを相補的に利用することでより詳しいプラズマ加速機構を明らかにしたいと考えている。先行研究では、先述したイオの噴火によるプラズマ供給量の変化により、木星の磁気圏内プラズマの循環が促進されることを示しており、本講演ではその研究を踏まえた上で、上述したような衛星データを組み合わせた研究について話したい。

講演番号 O-20

講演タイトル 動径方向に不連続性を持つ原始惑星系円盤における pebble accretion を考慮した惑星系 N 体シミュレーション

著者 (所属) 神野 天里 (神戸大学大学院 理学研究科 惑星学専攻)

概要 従来の惑星形成標準理論では、原始惑星系円盤は軸対称で滑らかな構造を持つと考えられてきた。しかし近年、原始惑星系円盤内にリング構造やダスト放射の非軸対称性が観測によって見つかった。円盤リングは、非乱流領域 (dead zone) と乱流領域の境界に生じると考えられており、そこでは圧力バンプによって粒子の集積が起きることで、効率的に惑星が形成されることが期待される。本研究では、動径方向に不連続構造を持つ円盤内で惑星系形成 N 体シミュレーションを行い、地球型惑星形成領域内に存在する不連続境界への継続的な小石供給が惑星形成過程に及ぼす影響を調べる。我々の研究では、N 体系計算コード GPLUM を改良することで、大規模な粒子数を用いて地球型惑星形成領域内に存在する不連続境界への小石供給と集積を実際に再現した。動径方向に構造を持つ降着円盤内で、pebble 集積を考慮した N 体計算を行うと、地球型惑星形成領域内に存在する不連続境界で微惑星は効率的に成長し、 10^3 年から 2×10^4 年で地球質量に到達した。また我々の計算結果では、境界近傍に惑星サイズの天体が一定の距離間隔で複数個形成され、さらに pebble 集積終了後には、多くの系で水星質量 数地球質量の巨大衝突が起こることが確認された。本研究の結果から、動径方向に構造を持つ円盤内でも太陽系のような順で惑星系が形成される可能性を見出すことができた。

講演番号 O-21

講演タイトル 原始惑星系円盤進化の中心星質量依存性

著者 (所属) 駒木彩乃 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻)

概要 太陽系近傍星形成領域の観測から原始惑星系円盤の寿命は約 3-6 百万年であると見積もられている。特に 2 Msun 以上の星周りの円盤はそれ以外の星周りの円盤に比べて円盤寿命が短いことが観測から示唆されており (Ribas et al. 2015)、円盤寿命の中心星質量依存性が明らかになってきている。惑星系は円盤物質を材料として形成されるため、円盤寿命は惑星形成の直接的な時間制限となる。また、惑星軌道は惑星と円盤との力学的相互作用に影響を受け動径方向に移動するため、円盤進化は惑星系構造の決定に重要である。円盤消失機構として、中心星降着、磁気円盤風、光蒸発が挙げられる。光蒸発とは中心星または近傍星の高エネルギー光子、極端紫外線 (Extreme Ultraviolet(EUV); $13.6 \text{ eV} < h\nu < 100 \text{ eV}$), 遠紫外線 (Far Ultraviolet(FUV); $6 \text{ eV} < h\nu < 13.6 \text{ eV}$), X 線 ($0.1 \text{ keV} < h\nu < 10 \text{ keV}$) によって円盤物質が加熱され、円盤表面からガスが上空に流れ出ていく現象である。

中心星質量とともに星光度も変わることから、光蒸発の中心星質量依存性を明らかにすることで円盤進化の中心星質量依存性の解明につながると考えた。そこで、二次元輻射流体計算を用いた光蒸発シミュレーションを 0.5 - 7 Msun の中心星を持つ系に対して遂行した。中心星輻射の輸送、非平衡化学反応、流体(連続の式、オイラー方程式、エネルギー方程式)を同時に自己整合的に解いた。その結果、FUV が主な加熱源となり、光蒸発による質量損失率は FUV 光度の違いによって中心星質量の 2.06 乗に比例して増加することを明らかにした。初期円盤から円盤散逸までの実際の円盤進化を知るためには、光蒸発の他に降着、円盤風を加えた長期間にわたる計算を行う必要があると考えた。そこで、これらの円盤散逸過程を取り入れた円盤 1 次元進化シミュレーションを遂行した。その結果、大質量星周りでは光蒸発による散逸の効果が大きく、光蒸発プロファイルが円盤面密度進化の決定に重要であることが示唆された。

講演番号 O-22

講演タイトル 輝線の圧力広がりを用いた原始惑星系円盤ガス分布の直接的制約

著者(所属) 吉田 有宏 (総合研究大学院大学/国立天文台)

概要 太陽系形成過程を議論する上で、惑星系形成が今まさに進行中である原始惑星系円盤の天文観測は重要な示唆を与える。特に、円盤ガスの空間分布は最も重要なパラメータの一つである。それにもかかわらず、ガスの大部分を占める水素分子が放射を出さず、また、他の分子やダストは水素分子に対する存在度が大きく変化する、などといった理由で、ガス空間分布の観測的制約はこれまでほとんど不可能だった。今回、我々は、アルマ望遠鏡のアーカイブデータを解析し、TW Hya 周りの円盤中心部から放射される一酸化炭素分子輝線のスペクトルが、周囲の水素分子との衝突によって生じる特徴的なウィング(圧力広がり)を持つことを発見した。圧力広がりによるウィングが円盤から検出されたのは初めてであり、その放射強度からはガスの空間密度分布を初めて直接的に見積もることができた。その結果、TW Hya 円盤のガス面密度は中心星から 5 au の場所で最小質量太陽系星雲モデル(MMSN)の 8 倍に達し、中心星から 5 au 以内の領域には 7 木星質量に相当するガスが存在することがわかった。TW Hya は、若い星の中では比較的古いにもかかわらず、太陽系のような惑星系の形成に十分なガス質量を保持しているといえる。さらに、同じ領域で、気相中の水素分子に対する一酸化炭素存在度が星間空間での値から 100 分の 1 程度に減少していることがわかった。一酸化炭素のスノーラインは中心星から 20 au 程度の位置にあると考えられるため、この結果は、一酸化炭素が二酸化炭素や有機物などの比較的揮発性の低い物質へ変換され、ダスト表面に存在していることを示唆する。加えて、中心星から 20 au 付近には、ガス面密度に 2 桁に及ぶジャンプがあることも示唆された。これは、円盤の乱流発生機構として知られる磁気回転不安定性の不活性領域外縁に対応する可能性がある。

講演番号 O-23

講演タイトル 地球外模擬有機物の真空・低温環境での付着力測定に向けて

著者(所属) 長足 友哉 (東北大学大学院理学研究科地学専攻)

概要 原始惑星系円盤ダストの合体成長過程において、重力が効かないサイズではダストの付着力が成長の可否を左右し、岩石質ダストは低付着性のため、衝突破壊や跳ね返り、中心星への落下に直面すると考えられている。しかし、成層圏で採集される地球外岩石質ダストは有機物に覆われており [1]、これが付着性に影響

する可能性がある。一方、星間空間や彗星にみられるホルムアルデヒドを出発物質としたホルモース型反応で合成される有機物は、組成比・炭素同位体比の点で隕石や彗星ダスト有機物と類似しており、この反応は小惑星内部やダスト表面で起こった可能性がある [2]。そこで本研究では、このホルモース型反応による合成有機物の付着力を真空・低温環境で測定し、原始惑星系円盤ダストの付着成長に対する有機物の効果を解明することを目指して、今回はこの合成有機物の付着力測定を常温常圧で行った。先行研究 [3] と同様の条件でホルムアルデヒド、グリコールアルデヒド、アンモニアから合成した有機物から、水に溶ける成分を除去した試料と除去しなかった試料を合成し、その付着力を遠心法 [420136] で測定した。結果として、水に溶ける成分を除去した試料の測定付着力は $0.320130.6 \mu\text{N}$ 程度で、炭素質コンドライト破片の常温常圧での測定付着力 $0.0320130.1 \mu\text{N}$ [5,6] よりも大きい値であった。これは、電子顕微鏡画像に基づく合成有機物がサブミクロンからミクロンサイズの球形に近い粒子からなる凝集体であることから表面の形状の違い、もしくは、表面の物質の違いが原因と考えられる。一方、水に溶ける成分を除去しなかった試料は今回の測定装置では測定困難なほどに付着性が高かったが、これは試料の潮解性の影響と考えられる。講演ではさらに低温・真空環境での迅速な測定を可能にする装置の開発についても紹介する。

参考文献：[1] Flynn et al., 2013, *Earth Planets Space* 65, 1159-1166. [2] Cody et al., 2011, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 108, 19171-19176. [3] Furukawa et al., 2021, *Sci. adv.* 7, eabd3575. [4] Nagaashi et al., 2018, *Prog. Earth Planet. Sci.* 5, 1-14. [5] Nagaashi et al., 2021, *Icarus* 360, 114357. [6] Nagaashi Nakamura, under review

講演番号 I-03

著者(所属) 宮本 英昭 様(東京大学)