

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01956

研究課題名(和文) 氷天体の表層・内部進化の解明に向けた長期プラズマ宇宙風化の再現

研究課題名(英文) Evolutions of the icy moon surface and interior probed by the long-term plasma space weathering experiment

研究代表者

木村 智樹 (Kimura, Tomoki)

東京理科大学・理学部第一部物理学科・准教授

研究者番号：50578804

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：地球外に生命環境は発生しうるか？という問いの解決のための最重要課題の1つは、氷天体の内部海の発生年代の解明である。発生年代を紐解くには、内部海物質が噴出した年代「表出年代」の解明が鍵だが、表層物質の直接分析が不可能なため未解決だった。本研究は、宇宙プラズマ等の照射がもたらす表層物質の変性「宇宙風化」に注目し解決を試みた。本研究では、宇宙風化を再現するプラズマ照射装置を完成させ、表層物質を模した塩試料に対し照射実験を行った。表層物質の風化と内部海物質の表出年代を定量的に紐付け、探査機観測等と比較した結果、内部海物質の表出年代が、2000年以内の比較的新しい地形が存在することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で明らかになった表出年代は、内部海がつい最近まで活発に水を噴き上げ存在していたことを意味する。これは氷天体が形成されたあとから現在に至るまで安定的に内部海を保持し、生命を育みうる環境を維持してきたことを支持する重要な結果である。また、内部海から噴出された水以外の塩等の物質が、天体進化の時間スケールよりも十分短い時間で表層において分解されてしまうことを示した。これは塩が噴出したばかりの海水の組成や、若い地形に対応する重要なトレーサーになることを意味する。将来の氷衛星探査JUICE(ESA)では、上記の塩を探査することで内部海の噴出の活動度や海水環境の推定に寄与することが期待される。

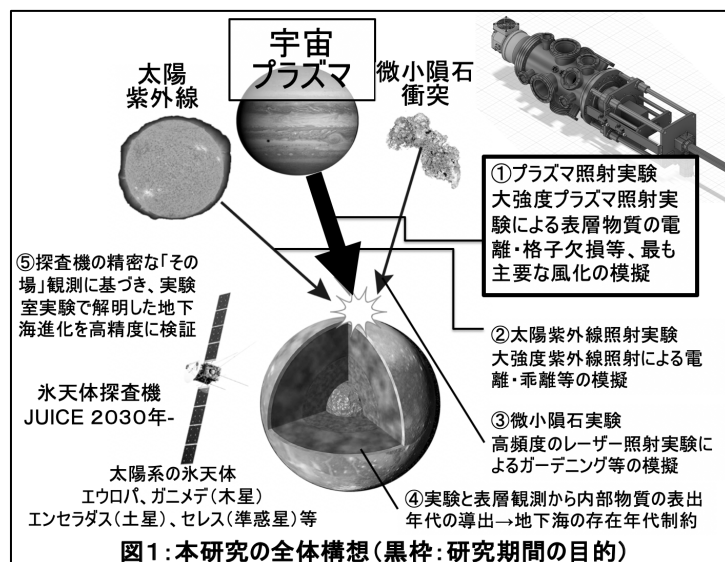
研究成果の概要(英文)：The key to the occurrence age of the icy body interior ocean is to determine the surface age, at which the interior ocean material erupted and accumulated on the surface. However, this has not yet been solved because direct analysis of the surface material is still technically impossible. This study addressed this problem by focusing on space weathering, which is the alteration of surface materials caused by the irradiation of space plasma. A plasma irradiation device that reproduces space weathering was completed, and irradiation experiments were conducted on salt samples. The surface space weathering was quantitatively correlated with surface age, and the results were compared with spacecraft and telescope observations. Quantitative correlation between the weathering of surface materials and the surface age, and comparison with spacecraft and telescope observations, revealed the existence of relatively new geological units with the interior ocean eruptions within 2000 years.

研究分野：惑星圏物理学

キーワード：氷天体 内部海 プラズマ 宇宙風化

## 1. 研究開始当初の背景

**背景と学術的問い:** 太陽系において、天体表層に水の海を持つのは地球1つである一方、複数の氷天体 (エウロパ、ガニメデ、エンセラダス等) は内部に地下海を持つ可能性がある (図1)。氷天体の地下海は、地球外の普遍的な生命環境である可能性が高い。しかし、その発生年代は未解明である。地下海内部の物質は、氷天体が進化してきた過程で、地殻変動や天体衝突により噴出して表層に堆積し、周囲の宇宙空間と相互作用してきたと考えられる。内部物質が表出した年代が解明できれば、その年代は、地下海が表層に噴出できる深さに存在した年代に対応する。これにより、地下海の発生年代を制約し、地球外の生命環境の進化という大きな学術的問いに答えることができる。



**本研究の Scope:** 本研究は、研究代表者が開発に参加する欧日共同探査 JUICE の対象である、木星の氷衛星ガニメデとエウロパに注目する。これらの氷衛星では、地下海の内部物質が表出した後、木星磁気圏プラズマの入射、太陽紫外線の照射、衛星イオの火山や黄道面起源の微小隕石の衝突により宇宙風化が顕著に進行する。これらの風化に基づき、風化の進行度合いから表出年代を推定できる。氷衛星は、木星磁気圏の奥深くに軌道があるため、風化の主要なエネルギー源は木星磁気圏プラズマである。なお、惑星間空間の小天体等で主要な太陽風による風化は無視できる。

**問題点:** プラズマ、太陽紫外線、微小隕石による天体物質の宇宙風化の素過程は、室内実験で研究されてきた (例: Lantz et al., 2017)。電子は、原子・分子を電離・乖離し、イオンは結晶構造等を破壊する。太陽紫外線は光電離・光乖離、微小隕石衝突は、表層の掘り起こし等を担う。実際の氷衛星では、全過程が天体進化の時間スケール (100 年-数億年) に渡り同時進行し、原子 (pm) から微小隕石 (mm) のスケールで表層に複雑な物理・化学変化をもたらす。これは、各素過程を分離した先行研究では再現できていない。また、実験装置の 利用時間の制約で、短期間の風化しか再現できていない。そのため、長期宇宙風化の再現による表出年代推定は不可能だった。

## 2. 研究の目的

**全体構想:** そこで本研究は、氷衛星における天体進化スケールに至る宇宙風化の全素過程の完全同時再現に向けて、専有可能な独自の大強度照射装置の開発を目指す。同装置を用いた表層模擬試料へのプラズマ・紫外線・レーザーの長期同時照射実験により、氷衛星において同時進行する全素過程による長期宇宙風化を再現する。再現実験で得られた風化の度合いを、表層の遠隔観測を比較することで、風化の継続時間を導出し、地下海物質の表出年代を推定する。本研究の全体構想を図1に示す。

**本研究期間の目的:** 本研究期間では、氷衛星で最も主要な風化エネルギー源である木星磁気圏プラズマに注目する。大強度プラズマ照射実験による、プラズマが担う長期宇宙風化過程の解明を目的とする (図1の①)。応募者らが既に完成させた独自の大強度電子照射装置に、新たにイオ

ン照射部を付加する。完成した装置を用い、表層の模擬試料に大強度のイオン・電子を長時間照射し、100年-数億年スケールの宇宙風化を再現する。試料の反射スペクトルや分子構造を測定して照射量で特徴づけ、風化特性を定量化する。定量化した特性と、探査機のプラズマ観測の比較から、磁気圏プラズマの長期進化と、それによる氷衛星の宇宙風化の長期進化を議論する。

### 3. 研究の方法

**初の実験事実による内部進化解明**：今までも、計算機実験により氷衛星の表層・内部進化の解明を試みた研究は存在する（例：Kimura et al., 2009）。しかしそれらの殆どは、物性値等大きな不定性の中で得られたモデル計算の一例に過ぎず、観測や実験の事実に基づいた客観的な検証は行われていない。本研究は、研究代表者が長年取り組んできた木星磁気圏プラズマ（例：Kimura et al., 2015）が主要なエネルギー源である宇宙風化に注目し、世界で初めて実験事実から表層・内部進化を制約する。専有可能な独自の実験装置を開発することで、今までの公共性の高い共同利用設備では不可能だった、長期間かつ大強度の照射実験を初めて実現し、目的を達成する。

### 4. 研究成果

**装置開発**：本研究では、大強度イオン照射部を開発した。同照射部は、電子銃と共に、低温真空チャンバに設置することができた。完成した装置で最も重要な性能は、照射電流の強度である。要求仕様を満足した強度かを評価するため、研究分担者の仲内博士が中心となり、照射電流センサを開発した。開発した電流センサーを用いてプラズマ照射装置の性能評価を行い、所定の要求仕様を満たすことを確認した。

**表出年代の解明**：完成させたプラズマ照射装置を用いて、室温で扱いやすいMgSO<sub>4</sub>やNaCl試料に対して、強度一定の照射実験を行った。これにより、氷衛星周囲の宇宙環境が時間一定だったと仮定した最もシンプルな長期宇宙風化の再現に成功した。これにより、氷衛星周囲の宇宙環境が時間一定だったと仮定した長期宇宙風化を再現することができた。実験サンプルのスペクトル情報とモデル物質の比較から、風化の継続時間の導出に最も適切な波長帯や関連する物質を見出す事ができた。サンプルを冷凍機で冷却することにも成功し、氷衛星と同様の温度環境を模した、現状で最もリアルな照射実験を実現する準備が整った。常温の塩サンプルに関しては、複数種類の氷衛星表層模擬物質に関して、プラズマの総照射量を変化させた照射実験を行うことができた。氷衛星の宇宙環境が長期変化を再現し、表層物質の風化と内部海物質の表出年代を定量的に紐付け、さらに内部海の組成の推定を行うことができた。先行研究の探査機や望遠鏡観測と比較し、実験で推定された内部海物質の表出年代を検証した結果、内部海が噴出した年代が、2000年以内である、比較的新しい地形が氷天体上に存在することが明らかになった。また、望遠鏡による氷天体希薄大気観測と、照射実験による脱ガス率等を比較することで、内部海から表層へ噴出したばかりの水の塩分濃度が数10%以上の高濃度であることを示唆した。これは、内部海の組成として塩分濃度が非常に高い、もしくは噴出後に高濃度に濃縮された可能性を示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計30件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 北野智大
2. 発表標題 無水鉱物への水素イオン照射実験による水星表層における太陽風起源H <sub>2</sub> O生成過程の解明
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北野智大
2. 発表標題 無水鉱物への水素イオン照射実験による水星表層における太陽風起源H <sub>2</sub> O生成過程の解明
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第152回総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北野智大
2. 発表標題 無水鉱物への水素イオン照射実験による水星表層におけるH <sub>2</sub> O生成過程の解明
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 星野 亮
2. 発表標題 塩化ナトリウムへのプラズマ照射実験と物理化学モデリングによるエウロパの希薄大気生成と表層組成の解明
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 星野 亮
2. 発表標題 塩化ナトリウムへのプラズマ照射実験と物理化学モデリングによるエウロパの希薄大気生成と表層組成の解明
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 152回総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryo Hoshino
2. 発表標題 Europa 's tenuous atmospheric sputtering and surface composition uncovered by plasma irradiation to NaCl samples
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大槻 美沙子
2. 発表標題 硫酸塩へのプラズマ照射実験によるエウロパ表層物質の内部海起源説の検証
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 152回総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Misako Otsuki
2. 発表標題 Elemental sources for Europa's surface materials unveiled by oxygen ion irradiation to sulfates
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoki Kimura
2. 発表標題 Planet-moon interaction as an external boundary condition for habitable environment
3. 学会等名 JAXA/ISAS Planetary Exploration Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoki Kimura
2. 発表標題 Physics of reconnection-related auroral emission of giant planets and its application to exoplanet
3. 学会等名 NAOJ IRCC-AFP meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoki Kimura
2. 発表標題 Scientific feasibility study for the planetary aurora observed with the LOPYUTA telescope
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土屋 史紀
2. 発表標題 惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安田 陸人
2. 発表標題 Numerical radar simulation for the explorations of the ionosphere at Jupiter's icy moons
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古賀 亮一
2. 発表標題 ジオコロナの影響を考慮した紫外線宇宙望遠鏡計画LAPYUTAに向けた氷衛星プルーム観測の科学検討
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 徳重 みなみ
2. 発表標題 3次元グローバルMHDシミュレーションによる過去地球と現代タイタンの窒素大気散逸過程の比較
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安田 陸人
2. 発表標題 Numerical radar simulation for the explorations of the ionospheres of Jupiter's icy moons
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第152回総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土屋 史紀
2. 発表標題 惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画の検討状況
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 152回総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村上 豪
2. 発表標題 Next UV space telescope, LOPYUTA: instrument overview and technical developments
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 152回総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村智樹
2. 発表標題 LOPYUTAによる惑星オーロラ観測に向けた科学検討
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 152回総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 徳重 みなみ
2. 発表標題 3次元グローバルMHDシミュレーションによる過去地球と現代タイタンの窒素大気散逸過程の比較
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 152回総会・講演会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 佐藤 晋之祐
2. 発表標題 A Test Particle Simulation of Jovian Magnetospheric Electrons Precipitating into Europa's Oxygen Atmosphere
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 152回総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村智樹
2. 発表標題 Mercury's surface and interior evolutions unveiled by the laboratory plasma irradiation in synergy with BC
3. 学会等名 ESA/BepiColombo Science Working Team Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村智樹
2. 発表標題 Opening remarks of WG5 Pre-workshop “Jupiter-Moon-magnetosphere electrodynamic interactions”
3. 学会等名 ISSI-Beijing “Exploring the Jovian satellite system: from formation to habitability” (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村智樹
2. 発表標題 Numerical simulation of the passive subsurface radar for Jupiter's icy moons
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村智樹
2. 発表標題 Numerical simulation of the passive subsurface radar for Jupiter's icy moons
3. 学会等名 Magnetosphere of Outer Planets 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村智樹
2. 発表標題 太陽系天体の宇宙風化再現実に向けた汎用プラズマ照射装置の開発・評価の現状
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第150回総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村智樹
2. 発表標題 惑星量子ビームとミュオン分析の連携で迫る氷衛星物質の合成と蓄積
3. 学会等名 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」第2回全体会合
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村智樹
2. 発表標題 太陽系天体の宇宙風化再現実験に向けた汎用プラズマ照射装置の開発
3. 学会等名 Japan Geoscience Union _ American Geophysical Union joint meeting 2020, 2020年7月16日 Japan Geoscience Union
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村智樹
2. 発表標題 Numerical simulation of the passive subsurface radar for Jupiter's icy moons
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 148回総会・講演会 2020年11月1日 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村智樹
2. 発表標題 JUICE SWT Passive Rader Splinter Meeting 2020年11月5日 JUICE SWT
3. 学会等名 Simulation of RPWI/PSSR for water plumes and ionospheres at the icy moons (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	仲内 悠祐  (Nakauchi Yusuke)  (20812514)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・ 招聘研究員    (82645)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------