

R009-16

A 会場 : 11/24 PM2 (16:05-18:05)

17:50~18:05:00

プラズマ照射実験に基づくエウロパ表層の塩化物塩の枯渇時間評価

#奥本 海友¹⁾, 木村 智樹¹⁾, 仲内 悠祐²⁾, 土屋 史紀³⁾, 丹 秀也⁴⁾, 木村 淳⁵⁾

(¹⁾ 東京理科大学, (²⁾ 立命館大学, (³⁾ 東北大学, (⁴⁾ 国立研究開発法人海洋研究開発機構, (⁵⁾ 大阪大学

Lifetime of chloride salts on Europa estimated from plasma irradiation experiments

#Miyu Okumoto¹⁾, Tomoki Kimura¹⁾, Yusuke Nakauchi²⁾, Fuminori Tsuchiya³⁾, shuya Tan⁴⁾, Jun Kimura⁵⁾

(¹Tokyo University of Science, (²Ritsumeikan University, (³Tohoku University, (⁴Japan Agency Marine-Earth Science and Technology, (⁵Osaka University

Europa, one of Jupiter's moons, is thought to harbor an interior ocean beneath its icy crust and is considered one of the celestial bodies with potential for life. Near-infrared spectra obtained by the Galileo spacecraft (McCord et al., 2010) indicated the presence of sulfate and chloride salts, and spectral comparisons in laboratory experiments on these near-infrared reflection spectra (Poston et al., 2017; Trumbo et al., 2019) suggested that material from the interior ocean may have been transported to the surface. Determining the chemical composition of surface materials provides indirect clues to the properties of the interior ocean and its habitability (e.g., Carlson et al., 2001). Europa's surface is continuously irradiated by high-energy charged particles from Jupiter's magnetosphere, inducing space weathering that alters the chemical composition of materials through the ionization, dissociation, and recombination processes (Cooper et al., 2001). Consequently, the chemical state of fresh surface material before the space weathering is difficult to estimate. Sulfates and chloride salts are considered potential candidates for surface materials supplied from the interior ocean (e.g., Carlson et al. 2001). In a previous laboratory plasma experiment involving electron, oxygen ion, and hydrogen ion irradiation of MgSO_4 —one of the sulfates—Otsuki (Master's thesis, Tokyo University of Science, 2024) proposed that sulfates may originate from Europa's interior ocean. This study simulated chemical cycling driven by space weathering and estimated the depletion time of MgSO_4 to be approximately 1.1×10^3 years. This value is significantly shorter than Europa's average surface age ($\sim 1 \times 10^7$ years; Zahnle et al., 2003). Regions where hydrated materials such as sulfates are observed correspond to areas where material transport from the interior ocean to the surface is considered plausible (Carlson et al., 2009). Therefore, the experimental results suggest that MgSO_4 may be supplied from the interior ocean to the surface within 1.1×10^3 years, remaining present without complete depletion. Meanwhile, Ligier et al. (2016) conducted model calculations combining near-infrared observations from ground-based large telescopes with laboratory spectral data. Their results revealed spectral features consistent with chloride salts, including MgCl_2 , in regions where material transport from the interior ocean is expected. This suggests that MgCl_2 may also originate from the interior ocean. However, no prior studies have reproduced the depletion processes of chloride salts under space weathering conditions, and both the depletion time and mechanisms remain unclear. Consequently, the presence of chloride salts on Europa's surface has not yet been empirically demonstrated. As a result, the concentration of chloride salts in the interior ocean and the surrounding environmental conditions relevant to potential habitability remain unresolved.

In this study, laboratory plasma irradiation experiments targeting magnesium chloride (MgCl_2) were conducted under conditions like Otsuki (2024). Electron, oxygen ion, and hydrogen ion irradiations were performed at fluxes of 2.1×10^{14} , 1.9×10^{14} , and 5.3×10^{14} /cm²/s, respectively, over durations of 2.0 – 3.5 hours to simulate space weathering spanning 4.7×10^2 to 2.8×10^4 years in Europa. As a result, quadrupole mass spectrometry detected the release of gases such as Cl, Cl_2 , and HCl from chloride salt samples during irradiation. Based on the measured gas production rates, numerical simulations were conducted to estimate the depletion time of MgCl_2 under each irradiation condition. The estimated depletion times were 5.1×10^2 years for electron irradiation, 3.6×10^4 years for oxygen ion irradiation, and 1.3×10^4 years for hydrogen ion irradiation. Additionally, the depletion cross sections were estimated to be 2.4×10^{-18} , 4.8×10^{-18} , and 1.2×10^{-18} cm², respectively. Assuming Europa-like environmental conditions and applying these cross sections, the simulated depletion time of MgCl_2 under simultaneous irradiation by electrons, oxygen ions, and hydrogen ions was calculated to be 4.8×10^2 years. This depletion time is significantly shorter than Europa's average surface age ($\sim 1 \times 10^7$ years; Zahnle et al., 2003), which is inferred from crater chronology. Therefore, MgCl_2 is likely to be depleted by space weathering before the surface is renewed by geological processes. The model calculations by Ligier et al. (2016), which combined near-infrared observations with laboratory spectral data, suggest the presence of chloride salts, including MgCl_2 , in chaos regions where material transport from the interior ocean to the surface is expected. Assuming chloride salts are present in these regions, the results of this study indicate that a continuous supply of material from the interior ocean within the estimated depletion time (4.8×10^2 years) could allow chloride salts to persist on the surface despite ongoing space weathering. Furthermore, when compared to the depletion time of sulfates (1.1×10^3 years; Otsuki, Master's thesis, Tokyo University of Science, 2024), chloride salts appear to deplete more rapidly under space weathering conditions. This suggests that chloride salts may serve as a significant tracer of more recent material supply from the interior ocean than sulfates.

木星の衛星エウロパは、氷の地殻の下に液体の水からなる内部海を持つと考えられており、生命が存在する可能性が示

唆されている天体の一つである。ガリレオ探査機による近赤外分光観測 (NIMS) によって得られた表層スペクトルは、硫酸塩や塩化物塩などの存在を示しており (McCord et al., 2010)、これらの近赤外反射スペクトルに関する室内実験との比較 (Poston et al., 2017; Trumbo et al., 2019) により、内部海の物質が表層へ輸送されている可能性が示唆されている。表層物質の化学組成を理解することは、内部海の成分や生命存在可能性を間接的に探る手がかりとなる (e.g., Carlson et al. 2001)。一方、エウロパの表層は木星周辺の高エネルギー粒子によって継続的に照射されており、物質の組成変化を引き起こす「宇宙風化」が生じている (Cooper et al., 2001)。この風化過程では、物質が電離、分解、再結合を繰り返すことによって化学サイクルが形成される。その結果、風化前の物質組成を明らかにすることは困難である。

現在、内部海から供給される可能性のある表層物質の候補として、塩化物塩と硫酸塩が注目されている (e.g., Carlson et al. 2001)。硫酸塩の一つである MgSO_4 に対して、電子・酸素イオン・水素イオンを照射する室内プラズマ実験を通じて、硫酸塩が内部海由来である可能性を提示した先行実験 (大槻, 東京理科大学修士論文, 2024 年) では、宇宙風化による化学サイクルを模擬し、 MgSO_4 の枯渇時間を 1.1×10^3 年程度と推定した。この値はエウロパの平均表層年代 ($\sim 1 \times 10^7$ 年; Zahnle et al., 2003) よりも十分に短い。硫酸塩などの水和物が存在する領域は、内部海の物質が表層へ輸送されている可能性がある領域に対応している (Carlson et al., 2009) ことから、先行実験の結果は、 MgSO_4 が内部海から 1.1×10^3 年以内に表層へ供給され、枯渇せず表層に存在している可能性を示唆している。一方 Ligier et al. (2016) は、地上の超大型望遠鏡による近赤外観測と室内実験のスペクトルを組み合わせたモデル計算を実施した。その結果、内部海からの物質輸送が期待される領域において、 MgCl_2 を含む塩化物塩に由来すると考えられるスペクトルが検出され、 MgCl_2 が内部海由来である可能性を示唆している。しかし、宇宙風化による枯渇過程を再現した前例は報告されておらず、枯渇時間やその過程は未解明であり、表層における塩化物塩の存在の実証には至っていない。結果として、内部海における塩化物塩の濃度やそれを取り巻く生命存在可能性につながる環境も未解明である。

本研究では、塩化物塩の一つである塩化マグネシウム (MgCl_2) に対して、大槻 (東京理科大学修士論文, 2024 年) と同条件の室内照射実験を行った。電子・酸素イオン・水素イオンをそれぞれ 2.1×10^{14} , 1.9×10^{14} , 5.3×10^{14} / cm^2/s のフラックスで 2.0 - 3.5 時間照射し、宇宙風化による塩化物塩の枯渇過程を 4.7×10^2 - 2.8×10^4 年再現した。その結果、四重極質量分析器を用いて、照射中の塩化物塩サンプルからは Cl , Cl_2 , HCl などのガスの脱離が観測された。得られたガス生成データをもとに、各成分の生成率から MgCl_2 の枯渇までに要する時間 (枯渇時間) を数値シミュレーションした結果、電子照射では 5.1×10^2 年、酸素イオン照射では 3.6×10^4 年、水素イオン照射では 1.3×10^4 年と見積もられた。さらに各照射における枯渇断面積は 2.4×10^{-18} , 4.8×10^{-18} , 1.2×10^{-18} cm^2 と推定された。実際のエウロパ環境を想定し、得られた枯渇断面積を用いて電子・酸素イオン・水素イオンの同時照射による MgCl_2 の枯渇時間をシミュレーションした結果、 4.8×10^2 年と算出された。

この枯渇時間は、クレーター年代学に基づいて示唆されているエウロパの平均表層年代 ($\sim 1 \times 10^7$ 年; Zahnle et al., 2003) よりも十分に短く、地質学的プロセスにより表層が更新されるより前に、 MgCl_2 は宇宙風化により枯渇する可能性が高いと考えられる。Ligier et al. (2016) による近赤外観測と室内実験スペクトルを組み合わせたモデル計算は、内部海物質が表層へ輸送されたと示唆されるカオス領域に MgCl_2 を含む塩化物塩が存在する可能性を示している。当該領域に塩化物塩が存在すると仮定すれば本研究の結果は、推定された枯渇時間 (4.8×10^2 年) 以内に内部海から表層へ物質が継続的に供給されることで、宇宙風化を受けながらも、完全には枯渇せず塩化物塩が表層に安定して存在し続ける可能性を示している。また硫酸塩の枯渇年数 (1.1×10^3 年; 大槻, 東京理科大学修士論文, 2024 年) と比較すると、塩化物塩は宇宙風化により速く枯渇する傾向にある。塩化物塩は、硫酸塩よりも最近の物質供給を示す有意なトレーサーである可能性が示唆される。