

プラズマ照射実験に基づくエウロパ内部海起源 NaCl の表層での結晶構造の解明

#小林 愛結¹⁾, 木村 智樹¹⁾, 星野 亮¹⁾, 大槻 美沙子¹⁾, 奥本 海友¹⁾, Sadgrove Mark¹⁾, 仲内 悠祐²⁾, 土屋 史紀³⁾, 丹 秀也⁴⁾, 木村 淳⁵⁾

¹⁾ 理科大, ²⁾ 立命館大学, ³⁾ 東北大・理・惑星プラズマ大気, ⁴⁾ 国立研究開発法人海洋研究開発機構, ⁵⁾ 阪大

Crystal Structure of NaCl on Europa's Surface Originated from Subsurface Ocean Based on Plasma Irradiation Experiments

#Kobayashi Ayumi¹⁾, Kimura Tomoki¹⁾, Hoshino Ryo¹⁾, Otuki Misako¹⁾, Okumoto Miyu¹⁾, Sadgrove Mark¹⁾, Nakauchi Yusuke²⁾, Tsuchiya Fuminori³⁾, Tan Shuya⁴⁾, Kimura Jun⁵⁾

¹⁾Tokyo University of Science, ²⁾Ritsumeikan University, ³⁾Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University, ⁴⁾Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ⁵⁾Osaka University

Europa, an icy satellite of Jupiter, has an interior ocean that is expected to be habitable for life. Since material transport between the ocean and surface layer has been suggested, understanding the chemical composition of the surface layer could provide insights into the ocean's chemistry. However, the surface material composition is still unknown because it must be altered immediately after transport from the ocean due to exposure to Jupiter's magnetospheric plasma and other elements. The telescopic data showed absorption signatures in the solar reflectance spectrum at wavelengths of 450 nm and 230 nm in the Tara Regio, which is over 1,000 kilometer-wide area of the Chaos Terrain and is likely active in the eruption of the ocean materials [Trumbo et al., 2022]. These are consistent with the spectral absorption generated by laboratory electron irradiation of NaCl, which would be 'color centers' corresponding to lattice defects in the NaCl crystal [Trumbo et al., 2022]. However, the relationship between the spectral absorption depth of the color centers and irradiation conditions is still unresolved, which leads to difficulty in estimating the NaCl crystal structure from the spectral observation. Therefore, the alteration state of NaCl in the Europa surface layer has not been unveiled.

In this study, we attempted for the first time to relate the absorption structure of the color centers, irradiation conditions, and crystal structure by applying multiple optical analyses to NaCl samples, which are irradiated with electrons and ions that model Jupiter's magnetospheric plasma interacting with Europa's surface layer. Powdered NaCl was irradiated with electron beams at 10 keV energy at room temperature (300 K) while maintaining a constant fluence (2.3×10^{14} - 3.2×10^{18} /cm²) or flux (1.9×10^{12} - 1.5×10^{15} /s/cm²). As a result, the F center around 460 nm decreased and the M center around 720 nm increased with increasing fluence. This indicates that the F center may have changed to the M center after being saturated via alteration by the irradiation, similar to the results of the electron irradiation experiment by Denman et al. [2022]. Under constant values of fluence, both F and M centers increased with increasing flux, but more M centers were produced. In addition, the irradiation of NaCl with both electrons and H₂⁺ resulted in the F and M centers generated by the electron irradiation being attenuated due to the H₂⁺ irradiation. This suggests that ion sputtering on the sample surface suppressed the formation of color centers. A comparison of Europa's F center observed by the Hubble Space Telescope with the electron irradiation experiment suggested that photobleaching may also decay F centers and not reach M center production [Denman et al., 2022]. These results indicate that sputtering and photobleaching may attenuate the F and M centers produced by electron irradiation on Europa's surface.

We are directly evaluating the crystal structure of the irradiated NaCl samples after irradiation using the cathodoluminescence method developed by Sadgrove et al. [2022], which is a crystal structure analysis that does not easily alter samples. We will correlate lattice defects with color centers and analyze surface conditions more rigorously to estimate Europa's surface age.

References

1. S. K. Trumbo et al, Planet. Sci. J. 3 27(2022).
2. William T. P. Denman et al, Planet. Sci. J. 3 26 (2022).
3. M. Sadgrove et al, Technical Digest Series, (Optica Publishing Group), paper CTuP8A.03.(2022).

木星の氷衛星であるエウロパは内部海を持ち、生命の存在可能性が期待されている。その内部海と表層の間では物質の輸送が示唆されているため、表層組成の理解は内部海組成の理解につながる。しかし、表層物質は、木星磁気圏プラズマ等が照射され変性するため、内部海から輸送された直後の表層物質の組成は未解明である。内部海物質の噴出が活発であると推定されるカオス地形は斑点模様の地形が多く存在する。その地形の一部であるタラ地域では、450 nm と 230 nm に太陽光反射スペクトルの吸収構造が観測されている [Trumbo et al., 2022]。これらは、室内実験における NaCl への電子照射によって発生する反射率スペクトルの吸収構造と一致しており、NaCl 結晶中の格子欠陥に対応する色中心である可能性がある [Trumbo et al., 2022]。しかし、色中心による吸収の深さと照射条件の関連性は未解明な点が多く、色中心の観測から NaCl 中の格子欠陥等の結晶構造を推定することは困難であり、エウロパ表層の NaCl の変性の状態は推定できていない。

そこで本研究では、エウロパ表層を再現した環境下で、木星磁気圏を模した電子やイオンを、NaCl 試料に照射し、複数の光学的な物質分析を適用することで、色中心の吸収構造、照射条件、結晶構造を初めて関連付けることを試みた。粉体の NaCl に対し、室温 (300 K) でエネルギー 10 keV の電子を、総照射量 (2.3×10^{14} — $3.2 \times 10^{18}/\text{cm}^2$) やフラックス (1.9×10^{12} — $1.5 \times 10^{15}/\text{s}/\text{cm}^2$) のいずれかを一定に保ちつつ、他方を変化させて照射した。その結果、総照射量が大きいほど 460nm 付近の F 中心が減少し、720 nm 付近の M 中心は増加した。これは、Denman et al. [2022] の電子照射実験の結果と同様に、照射による変成によって F 中心が飽和した後、M 中心に変化した可能性を示す。また、総照射量が一定値のもとでは、フラックスが大きいほど F 中心、M 中心ともに増加したが、M 中心の方がより多く生成された。電子と水素分子イオンの両方を NaCl に照射した結果、水素分子イオン照射によって電子照射による F 中心や M 中心が減退した。これは、試料表面のイオンスパッタリングによる色中心生成の抑制を示唆している。Denman et al. [2022] のハッブル宇宙望遠鏡によって観測されたエウロパ昼夜の F 中心の分布と、電子照射実験との比較によると、フォトブリーチングによっても F 中心が崩壊し、M 中心生成には達しない可能性もある。これらの結果を総合すると、エウロパ表層では電子照射で生成された F 中心や M 中心が、スパッタリングとフォトブリーチングによって減退している可能性がある。

今後は、Sadgrove et al. [2022] で開発された、試料が変性しにくい結晶構造分析であるカソードルミネッセンス法を用いて、照射後の NaCl 試料の結晶構造を直接評価し、格子欠損と色中心の関連付けを行い、より厳密に表層状態を分析して表層年代の推定に紐づけていく。