

放射光 X 線を用いたリュウグウ母天体の水環境の復元

○高橋嘉夫¹、河合敬宏¹、大野智洋¹、福士圭介²、菅大輝³、竹本重優¹、上相真之³、

吉田英人¹、松本恵⁴、中村智樹⁴、大浦正樹⁵、山下翔平⁶

(¹東大、²金沢大、³JASRI/SPring-8、⁴東北大、⁵理研、⁶Photon Factory)

リュウグウ試料の放射光分析により、母天体で生じた水質変成時の水環境 (Eh、pH など) の復元を行った結果を紹介する。この分析では、軟 X 線領域の走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM)、硬 X 線領域の μ -XRF-XAFS などの顕微分析と、全体を把握するためのバルク XAFS 分析の併用が重要である。

【背景】小惑星リュウグウの母天体では水による鉱物の変成 (水質変成) が起こったと考えられている。この際、有機物を含む様々な物質が水中に溶けだし、多様な化学反応を起こしていたと推定される (Nakamura et al., 2022; Yokoyama et al., 2022; Yabuta et al., 2023)。リュウグウのような小惑星は初期地球に多数飛来しており、地球生命の起源の問題に関わるため、リュウグウの有機物がどのような過程で生成したのか調べることは重要である。水中での化学反応には、どのような化学種が溶存しているかの他に、酸化還元電位 (Eh) や pH が大きな影響を与える (Kitadai et al., 2018; Oba et al., 2020)。

【目的・手法】リュウグウ母天体での水環境、特に Eh-pH 環境を推定するため、我々はリュウグウ AO で得た試料について、X 線吸収端近傍構造 (XANES) 分析により、各元素がどのような化学種として存在しているかを分析した。具体的には、KEK-PF BL-19A (STXM)、DESY PO-06 (μ -XRF-XAFS) などの軟 X 線および硬 X 線領域の顕微分析、KEK-PF の BL-9A、BL-19B、SPring-8 BL17SU における軟 X 線および硬 X 線領域のバルク分析を用いて、層状ケイ酸塩層間に吸着していると考えられるナトリウム (Na)、カリウム (K)、カルシウム (Ca)、および層状ケイ酸塩の構造中に含まれていると考えられるアルミニウム (Al)、主要な溶存陰イオンと考えられる塩素 (Cl) について、XANES による化学種分析を行った。また EPMA による元素分析により、リュウグウ試料中の主要鉱物の分析や層状ケイ酸塩の組成分析を行った。

【結果・考察】上記の分析の結果をもとに、リュウグウの層状ケイ酸塩層間の陽イオン組成を決定した。XANES 分析から、Na や K はほぼ全て層状ケイ酸塩層間に存在することや Ca に占める層状ケイ酸塩層間 Ca の割合などが得られた。Al は主にサポナイト 4 面体層中に存在し、それ結果生じる負電荷と層間イオンの総電荷が等しいと仮定することで、層間の Mg 濃度も推定できた。この結果を Fukushi (2019) と同様に解析し、層状ケイ酸塩層間の陽イオン選択係数 (Tournassat et al., 2009) 及び溶解度の化学平衡計算を行い、リュウグウ母天体の水環境、特に酸化還元電位や水素イオン濃度を推定した。Geochemist's WorkBench Spec8 での化学平衡計算の結果、リュウグウの水は非常に還元的 (Eh = -0.4 ~ -0.5 V) で塩基性 (pH = 10-11) であると推定された。またバナジウムやクロムなどの微量元素の価数なども測定したところ、これらの結果と整合的な化学種であることが分かった。推定された Eh は、それぞれの pH で水が分解し水素ガスが発生する程度に還元的な値を示しており、リュウグウの水が氷の昇華や鉱物の水和だけではなく、水還元反応によっても失われた可能性を示唆している。講演では、これらの XAFS 分析において、顕微分析による局所化学種分析と全体を把握するためのバルク分析の両方が重要であることも強調したい。