

月惑星表層を模擬したラフ表面での蛍光 X 線実験と月惑星探査への応用

XRF experiments at microscopic rough surface simulating planetary surfaces and its implication to planetary exploration

丸山 陽子 [1]; 小川 和律 [2]; # 岡田 達明 [3]; 加藤 学 [3]

Yoko Maruyama[1]; Kazunori Ogawa[2]; # Tatsuaki Okada[3]; Manabu Kato[3]

[1] 東大・理・地球惑星; [2] 東工大・理工・地球惑星; [3] 宇宙研

[1] Earth and Planetary Sci. Tokyo Univ; [2] Dept. of Earth and Planetary Sci., Titech.; [3] ISAS/JAXA

蛍光 X 線観測は惑星探査でも一般的に用いられる方法で、物質から放出された元素固有のエネルギーを持つ蛍光 X 線を観測することにより、物質表層の元素組成を定量的に決定する手法である。しかし、月惑星表層はレゴリスと呼ばれる砂礫層に覆われている場合が多く、計測に理想的ではない。Kuwada et al (1997) では蛍光 X 線発生強度が表面凹凸によって受ける影響（粒子サイズ効果）を物理的に理解するために単純な組成の粉末試料で実験を行った。特に位相角が 45° を越す場合には元素存在比の推定が数 10 % 変化する可能性を指摘した。それは過去の惑星蛍光 X 線探査の結果の見直し、今後の計画での補正が必要になる。本研究では、マトリクス効果などの岩石の複雑な組成による影響まで含めたより惑星探査に近い実験的研究を行うことで、1) 室内実験による粒子サイズと蛍光 X 線強度の関係の理解、2) 実験結果をモデル計算によって再現できる範囲の定量的評価、3) 月レゴリスを仮定したときの惑星観測におけるラフ表面による影響の見積もり、について調べた。

まず、入射、射出、位相角を任意に変えて、粉末試料に対して蛍光 X 線強度変化を測定できる実験装置を製作した。He ガスフロー型で He を充填し、空気中では減衰により計測できない軽元素（Mg, Al, Si など）の測定も可能にした。He ガスを充填したチェンバ内の岩石粉末試料に、X 線管球からの一次 X 線を照射させ、試料より発生する X 線を Si-PIN フォトダイオードで測定し、マルチチャンネルアナライザで X 線エネルギースペクトルを得た。各元素に対応する輝線強度を算出し、X 線強度の角度依存性、試料の粒度（表面粗さ）依存性などを調べた。試料は、3 種類の岩石（olivine basalt, dacite, dunite）をそれぞれ粉砕し、25 ~ 500 ミクロンの 5 種類の粒度の岩石粉末試料を準備した。

試料表面状態のモデル化のために、レーザー顕微鏡を用いて各試料の表面の形状を 3 次元的に 1 ミクロン以下の分解能で計測した。取得した凹凸分布から、平滑化及び高速フーリエ変換 (FFT) により、5 ミクロン以下の高周波成分と粒径の 2 倍以上の低周波成分を除去した。これを矩形波で近似し各粒度に対する W(幅) と H(高さ) を決定した。

実験結果から、蛍光 X 線強度は粒子サイズが増大するほど減少し、射出角を 0 度に固定した場合は入射角が大きくなるほどその傾向が顕著になることが確認された。さらに、蛍光 X 線のエネルギーが低い元素ほど、同じ試料に対して粒子サイズ効果の影響を受けやすいことが分かった。実験結果とモデル計算の比較により、代表的な月レゴリスサイズである数 10 ミクロンの範囲で、本モデル計算は実験結果と 10 % 以内の良い一致を示す。

実際の月惑星探査では、X 線管球と異なり、主に連続 X 線からなる太陽 X 線が励起源となる。典型的な太陽活動度の太陽から放射される X 線を模擬した入射 X 線に対し、月面の海玄武岩組成（A12 ソイル）で典型的な月レゴリスの粒度分布（平均 75 ミクロン）に対して、各主要元素の蛍光 X 線強度を数値シミュレーションにより算出した。2007 年夏に打ち上げ予定の SELENE での月面蛍光 X 線観測では X 線射出角が 0° （垂直）であり、入射角のみ $5 \sim 75^\circ$ の範囲で変化させ、粒子サイズ効果の影響を見積もった。その結果、Mg, Al, Si, Ca は入射角 35° 、Ti, Fe は 50° 以上で粒子サイズによる補正が必要であることが分かった（Fig.3）。特に Fe/Si では 20 ~ 30 % 程度の変化が発生し、大きな問題になることが確認された。同様に、小惑星探査機 NEAR シューメーカーが行った小惑星エロスの探査の場合（位相角 90° 固定）についても計算を行い、同様に Fe/Si や Ca/Si など大きな変化が生じることが確認された。これらの観測結果については、岩石の種類（隕石タイプ）も変わる可能性があり、粒子サイズ効果を考慮した補正が必要になる。

本研究において、以下の点があった。(1) 岩石試料を用いた本研究においても、粒子サイズ効果による蛍光 X 線強度の変化は顕著に見られた。(2) 一般に位相角が大きいほど、試料の粒度が粗いほど影響が大きくなる傾向があった。(3) 重い元素ほど、同じ凹凸に対する粒子サイズ効果の影響は小さい。(4) 岩石種の違いによる影響は小さい。(5) 簡便な矩形波で表面形状をモデル化して数値計算することにより、概ね 10 % 以内の誤差で再現できることが確認された。(6) 実際の惑星探査を模擬したシミュレーションでも、元素組成比推定値に差異が生じることが分かった。過去の探査結果の見直し、今後の探査への補正が必要であり、今回の研究結果はそのための重要なデータベースとなる。