

(別紙様式-4)

超高解像度・素粒子顕微鏡技術による岩石中の放射性元素の空間分布測定
Measurement of the spatial distribution of radioactive elements in rocks
using ultra-high-resolution elementary particle microscopy technology

福田 努、名古屋大学・高等研究院

【研究目的】

地球の地殻及びマントルを構成する岩石中には、ウラン、トリウム、カリウムなどの放射性元素が含まれる。これらの放射性元素は惑星の内部熱源として重要であり、放射性元素の地球内部における分布や、放射性元素の循環および濃縮をもたらす地質学プロセスの解明は、地球の熱的進化を議論する為には不可欠である。この問題に取り組む上で、第一に様々な岩石中の放射性元素濃度および存在形態を理解することが重要である。これらの元素は、特定の鉱物内、鉱物粒界など、多様な形態で岩石中に存在し得る。そこで、岩石内での放射性元素の空間分布を濃度も含めて測定することが必要である。しかしながら、既存の手法では、空間分解能、分析スループットといった制約から、広面積に対する高解像度の空間分布を取得することが困難だった。

原子核乾板検出器と高速光学顕微鏡システムを組み合わせた超高解像度・素粒子顕微鏡技術を用いた岩石表面の α 線および β 線の観測は、放射性元素の詳細な分布および濃度を高精度で観測する方法として極めて有望であり、申請者らによって技術開発が進展しつつある。特に本技術により、これまで捉えることが困難だった粒界に存在する放射性元素の分布を調べることが可能となる。本研究では、原子核乾板を用いた岩石中の放射性元素濃度の空間分布観測の技術を確立すると共に、実際の岩石の観測を行う。そして、将来的には地質試料に基づく本課題の成果を総括し、地球ニュートリノ観測結果との融合を図ることで、地球内部の放射性元素に関して精密な3次元分布モデルを組み立てることを目指す。

【研究内容】

我々は、ウランなどの放射性元素を含む岩石試料から放射された α 線飛跡を高速自動検出する画像処理と機械学習を統合した手法を開発した。具体的には α 線飛跡を原子核乾板上に記録し、高速光学顕微鏡システムで取得した画像に対して飛跡を抽出・アノテーションすることで機械学習用の教師データを構築した。これにより目視計測と比べて解析の約8,000倍の高速化を実現した。

- ①: ウラン/トリウムの濃度参照物質を用いて本手法の性能評価を実施し、 α 線飛跡の検出効率やS/N比、そして α 線飛跡の長さ・放出角度に対するバイアスの定量評価を行う。
- ②: 岩石表面のU・Th分布を直接可視化して岩石における粒内・粒間の濃集を検証するために、 μm レベルでの岩石写真と原子核乾板データの精密位置合わせ手法を開発する。

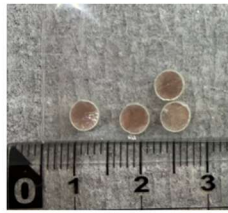
【研究結果と考察】

①: 濃度参照物質としてNIST SRM610試料を原子核乾板に20日間接触させ、 α 線を照射した。その後、機械学習を用いて α 線候補24659事象を検出した。また、独立に肉眼による目視観察を行い、16321本の α 線事象を検出した。これらを比較した結果、目視観察で検出した α 線事象のうち97.5%が機械学習でも検出できていることがわかった。さらに、機械学習では検出しているが、目視観察で不検出の事象のうち1000本をランダムに選出して目視観察を行ったところ、79.2%は短い α 線事象であることがわかった。その他の10.2%, 2.1%, 8.5%はそれぞれ β 線飛跡の停止箇所、宇宙線飛跡、原子核乾板上の傷や表面銀の誤検出であることがわかった。以上から、機械学習による α 線事象の検出効率は92.4%と見積もられ、S/N比は13.6と算出された。今後は飛跡の長さや放出角度に対する依存性を調べ、大面積の岩石測定に適用してゆく。

②: ^{40}K を含む白雲母マーカーを岩石薄片の四隅に設置することで白雲母からの β 線を原子核乾板に記録させるために、白雲母板をレーザー加工して直径5mmの円形にくり抜いた白雲母マーカーを作成した(図1)。これにより、原子核乾板上に β 線で描かれる円の中心を基準として岩石薄片と原子核乾板を

精密に位置合わせすることが可能になる。今後は実際に原子核乾板を設置して位置合わせの精度の測定を行う。

白雲母マーカー



30 μ m岩石薄片 + 白雲母マーカー

位置合わせ用
白雲母マーカー
(β 線源)



花崗岩
薄片

図1：白雲母マーカーを設置した岩石薄片サンプルの開発

【まとめ】

本研究を通して原子核乾板+機械学習を用いた新手法による岩石表面における α 線飛跡の検出効率やS/N比に対する定量評価を行った。また、新たに白雲母マーカーを用いる精密位置合わせ手法を開発したことで、岩石中の放射性元素の空間分布の系統的な測定が可能となった。

【成果発表】

・竹下漱一・福田努・他, 「原子核乾板内における β 線飛跡の再構成」, 画像関連学会連合会2025年合同秋季大会, 名古屋大学, 2025/10/27

・T. Nishikiori, T. Fukuda, Y. Kouketsu, S. Niki et al, 「Development of a High-speed Detection Method for Alpha Particle Tracks in Nuclear Emulsion Using Machine Learning」, Neutrino Geoscience 2025, Queen's University, 2025/10/28

・T. Fukuda, Y. Kouketsu, S. Niki et al, 「Pioneering advanced research through α and β ray measurement using nuclear emulsions」, ICMaSS2025, Nagoya University, 2025/12/13

・錦織司・福田努・瀨瀬佑衣・仁木創太・他, 「機械学習を用いた原子核乾板中の α 線飛跡高速検出法の開発」, 日本物理学会2025年度春季大会, オンライン, 2026/3/24