

[2024104109]

## 放射化分析を用いた隕石の元素組成に関する研究 Elemental abundances for meteorites by using neutron activation analysis

白井直樹<sup>#A)</sup>, 劔持尚希<sup>A)</sup>  
Naoki Shirai<sup>#A)</sup>, Naoki Kenmochi<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> Faculty of Science, Kanagawa University

### Abstract

By combining prompt gamma-ray analysis and instrumental neutron activation analysis, concentrations of 26 elements (B, Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Zn, La, Sm, Eu, Gd, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, and Th) were determined. Among these elements, Na, Mg, Al, Ca, Ti, Mn, and Fe were determined by both methods with consistent results within 10%. Based on major element concentrations, Qiquanhu meteorite was classified as a eucrite. Trace element concentrations (Sc and La) indicated that Qiquanhu belongs to the Stannern group. The lower Co concentration ( $6.44 \pm 0.10 \mu\text{g/g}$ ) in Qiquanhu suggests that Qiquanhu was slightly affected by impact processes, making it suitable for estimating the original abundances of platinum group elements in the silicate portion of asteroid Vesta.

**Keyword:** prompt gamma-ray analysis, instrumental neutron activation analysis, elemental abundances, Qiquanhu meteorites

### 1. はじめに

隕石や地球の岩石に含まれる元素組成を調べることで、太陽系や惑星の形成過程、さらには隕石の母天体における火成活動や進化過程を明らかにすることができる。隕石試料は、地球の岩石と比べて得られる量が限られており、少量の試料から多元素を高感度・高精度で定量できる分析手法が求められる。このような要求に応えられる代表的な手法の一つが放射化分析である。放射化分析法の中でも即発ガンマ線分析法は、中性子フラックスが比較的強く、適当な冷却時間を減らすことで、試料の放射能が天然のバックグラウンドレベルにまで低下する。そのため、分析後の資料を管理区域外に持ち出すことが可能であり、他の分析手法（例えば機器中性子放射化分析法や誘導結合プラズマ質量分析法）と組み合わせることで多角的な化学分析を行うことができる[1]。

HED 隕石は、Howardite (Howardite)、ユークライト (Eucrite)、ダイオジェナイト (Diogenite) の頭文字を取ったグループ名であり、これらは小惑星ベスタに起源を持つと考えられている。小惑星ベスタは地球と同様に地殻・マントル・核の層構造を有し、太陽系形成初期に火成活動を終えているとされる。したがって、HED 隕石には、地球型惑星の形成過程で起こった初期の地質学的情報がそのまま記録されている可能性が高い。本研究では、岩石組織や鉱物組成に基づきユークライトに分類される Qiquanhu 隕石を対象とし、即発ガンマ線分析法と機器中性子放射化分析法を用いて、その化学組成を求めた。これにより、本隕石の化学的特徴を明らかにすることを目的とした。

### 2. 実験

#### 2.1 試料

Qiquanhu 隕石は 2021 年に中国に落下した総重量 847 g の隕石である。塊状 (1.3 g) の Qiquanhu 隕石

の瑪瑙乳鉢で粉末にし、その一部を元素分析に用いた。

#### 2.2 即発ガンマ線分析

Qiquanhu 隕石を四フッ化エチレン六フッ化プロピレンフィルム袋に封入し、日本原子力研究開発機構 3 号炉 (JRR-3) 実験ホール内の即発ガンマ線分析装置を用い、約 3 時間中性子照射しながら即発ガンマ線を測定した。定量には、日本地質調査所の JB-1 を用いた。

#### 2.3 機器中性子放射化分析

機器中性子放射化分析は、3 号炉の PN-3 を用いて 10 秒間中性子を照射し、10 分後にガンマ線を測定した。異なる粉末試料を PN-2 にて 20 分間中性子を照射し、約一ヶ月間に 3 回のガンマ線測定を行った。定量には、JB-1 を用いた。

### 3. 結果と考察

即発ガンマ線分析と機器中性子放射化分析を組み合わせることで、B, Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Zn, La, Sm, Eu, Gd, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Th の計 26 元素を定量することができた。これらのうち、Na, Mg, Al, Ca, Ti, Mn, Fe については、両分析法による定量が可能であり、それぞれの手法で得られた値は 10%以内の一致を示した。

ユークライトは主に輝石と斜長石から構成され、ダイオジェナイトは斜方輝石を主体とする。一方、Howardite はユークライトとダイオジェナイトが機械的に混合したものである。そのため、Mg, Al, Ca や Fe などの元素濃度に基づいて、これら 3 種類の隕石の分類が可能である。これら元素の濃度相関図において、Qiquanhu 隕石はユークライトの領域に位置し、岩石組織や鉱物学的特徴とも一致する結果が得られた。

ユークライトは、岩石組織および化学組成に基づい

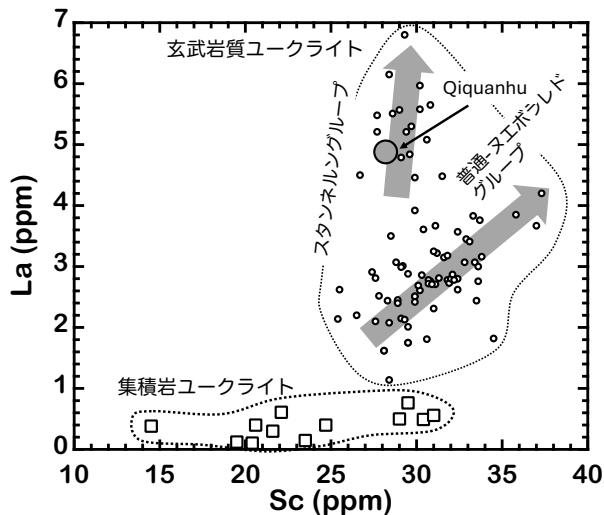


図1. ユークライト隕石のSc含有量 (ppm)とLa含有量 (ppm)の関係

て、集積岩ユークライトと玄武岩質ユークライトに分類される。さらに、玄武岩ユークライトは、スタンネルグループ、普通-ヌエボラレドグループ、および残渣ユークライトに分類される。図1には、本研究で分析対象とした Qiquanhu を含むユークライトにおける Sc と La の濃度の関係を示す。図1から、Qiquanhu はスタンネルグループに分類されることがわかった。また、Qiquanhu は、Ti、Ba、希土類元素、Hf、Ta、Th といった地球化学的に不適合元素での濃度が高く、これらの特徴はスタンネルグループの化学的特徴と一致していた。メイングループユークライトである Juvinas 隕石で規格化したスパイダー図では、Sr と Eu に負の異常が見られ、より不適合元素が約 20% 富んでいるパターンが得られた。このパターンはスタンネルグループに分類される Stannern 隕石や Bouvante 隕石のパターンと一致していた。以上より、親石元素存在度パターンより、Qiquanhu 隕石は、Stannern 隕石や Bouvante 隕石と同様の火成活動を経て形成された隕石であることがわかった。

ほとんどのユークライトは、母天体表面での隕石衝突により形成された角礫岩である。このため、ユークライトには、外来隕石物質が混入する可能性があり、その影響でユークライトの親鉄元素濃度は、上昇する。本研究では、即発ガンマ線分析と機器中性子放射化分析により、親鉄元素のうち Co のみが定量可能であった。Qiquanhu 隕石における Co 濃度は  $6.44 \pm 0.10 \mu\text{g/g}$  であり、外来物質の混入が少ないとされるユークライトの範囲と一致していた。このことから、Qiquanhu 隕石は隕石衝突の影響をほとんど受けていないと考えられ、始原的な小惑星ベスタのケイ酸塩相（マントルと地殻）の白金族元素濃度を推定する上で有用である。その結果として、小惑星ベスタにおける核とマントル分離過程に関する知見が得られると考えられる。