

プロトン励起 X 線分析法による流体包有物の微量元素分析

Quantitative proton-induced X-ray analyses of trace elements in individual fluid inclusions from hydrothermal quartz crystal

黒澤 正紀[1]

Masanori Kurosawa[1]

[1] 筑波大・地球科学

[1] Inst. Geosci., Univ. Tsukuba

地球内部では、H₂O、CO₂、マグマなど多様な流体が縦横に移動しており、それらは、鉱床形成・マグマ発生・マントル対流の速度調節などの地球内部の諸現象に重要な役割を果たしている。こうした流体は、鉱物の結晶成長過程で捕獲されたり、鉱物の割れ目に侵入した際に捕獲され、これら鉱物内部に捕獲された流体を流体包有物と呼ぶ。流体包有物は、流体の挙動や物質移動を示す直接的証拠で、そのため、その組成情報は、鉱床形成、地球や隕石母天体でのマグマ活動や熱水活動、地温勾配決定や地熱探査、氷中の空気包有物による古環境復元などの解明の手がかりとして重視されてきた。

流体包有物の元素分析からは様々な情報が得られるが、包有物中の含有元素量は ng レベルのため、高感度の分析法が必要であり、しかも 1 つの鉱物には様々な起源の包有物が存在するため、高分解の情報を得るには個々の包有物を個別に分析する必要がある。また、他手法で別の情報を得ることを考慮すると、非破壊であると都合が良い。こうした要求を満たす手法の一つとして、プロトン励起 X 線分析 (PIXE) という方法が注目されている。今回は、筑波大学で開発した PIXE による流体包有物中の微量元素定量法と石英中の流体包有物の分析結果について紹介する。

PIXE は、試料に高エネルギーのプロトンビームを当て、そこから放出される特性 X 線を半導体検出器で分析する手法で、ppm レベルの元素定量、多元素同時分析などの特徴がある。分析は筑波大学加速器センターの 4 MeV プロトンビームを用いて行った。最初に定量精度を検討するため、既知濃度と既知形状を持つ模擬的な流体包有物を試料として準備した。この模擬的な包有物は、石英ガラス中の半径 100μm 程度の気泡に ICP 用多元素標準溶液を入れ、上に厚さ 10mm の石英ガラスを被せて作成された。標準溶液には、各元素が 10ppm, 50ppm, 100ppm, 500ppm, 1000ppm 含まれている 5 種類の溶液を使用した。

模擬的な包有物を新たに開発した定量法で定量した結果、PIXE では流体包有物中の 10~1000ppm の微量元素を相対誤差 7% で定量できることが分かった。天然の流体包有物分析では、この誤差に流体包有物の埋没深度の決定誤差が加わり、最終的な分析誤差は ±14% (平均) となることが分かった。検出限界は原子番号や包有物のサイズ、分析条件に依存するが、平均的な分析条件では原子番号 25~50 の元素に対して 4~46ppm の検出限界であった。

また、今回の手法で、長野県川上村川端下産の熱水性石英脈からの単結晶石英中の多数の流体包有物を分析した。各包有物の元素濃度は、包有物ごとに大きく変化しており、各包有物には、Ca, Fe が 0.2~9 wt.%, Mn, Zn が 300~8000ppm, Cu が 40~3000 ppm, Br, Rb, Sr が 100~4000ppm, Ge が 100 ppm 以下の濃度で含まれていた。これらの元素種と濃度範囲は、花崗岩起源の熱水脈中の流体包有物からこれまでに報告された結果とほぼ一致する。また、各包有物の濃度変化は、同時に形成された二次流体包有物の間でも認められ、それらの間でも 1 桁程度の濃度の違いを示した。特に注目すべきことは、同時形成の二次包有物の元素濃度は流体包有物の液体量と逆相関を示すが、元素間の相対的な量比はどの包有物でもほぼ一定であるということである。このような濃度変化は、流体包有物から水だけが選択的に失われ、溶質として存在する元素が包有物中に残され、見掛け上、元素濃度が濃縮されたとすると説明できる。今後、濃縮の過程を含めて検討したい。