

同位体地球化学に基づくオマーンオフィオライト海洋地殻の熱水変質

Study on hydrothermal alteration of oceanic crust in the Oman ophiolite based on isotope geochemistry

(提出先：東京大学大学院新領域創成科学研究科，2010年3月)

山岡香子 (Kyoko Yamaoka)

所属：東京大学大気海洋研究所海洋底科学部門

E-mail: yamaoka@aori.u-tokyo.ac.jp

プレート拡大境界である中央海嶺では、マグマ活動に伴い活発な熱水噴出活動が起こっていることが知られている。中央海嶺における熱水循環は、地球内部エネルギーを効率的に放出するという点で、地球システムの重要な役割を担っている。また、水-岩石反応に伴う元素の移動は、海洋地殻の化学組成を変化させ、長期的には海水の化学組成にも影響を与える。さらに、熱水変質した海洋地殻が地球内部へ沈み込む過程では、脱水作用によって島弧マグマを生成し、マンツルの化学組成にも影響を与える。従って、海洋地殻全体の熱水循環の詳細を明らかにすることは、マンツルを含めた地球全体の水循環を考える上で重要である。しかし、実際の海洋地殻の深部掘削は困難であるため、いまだ海洋地殻の完全な層序を連続的に掘り抜いた試料は得られていない。本研究で取り扱うオマーンオフィオライトは、白亜紀の海洋プレートがアラビア半島に衝突した岩体で、海洋プレート層序が完全かつ連続的に露出しており、海洋地殻全体の熱水変質を調べるために適した試料である。熱水変質した岩石中の同位体組成は、水-岩石反応の条件を記録している。本研究では、オマーンオフィオライトのフィズ地域に連続的に露出する海洋地殻岩試料について酸素および水素同位体比を分析した。また、近年、分析技術の発展により、ホウ素が新たな指標として注目されている。しかしながら、海洋地殻のホウ素濃度は低いので、既存の同位体分析法の改良が必要不可欠である。本研究では、ホウ素同位体分析法の改良を行い、低いホウ素濃度の試料でも精度良く測定できる手法を確立し、その手法をオマーンオフィオライト海洋地殻岩に適用することにより、ホウ素濃度・同位体比の鉛直プロファイルを得た。本研究は、以上の結果から、1) 中央海嶺熱水循環系地下での水-岩石反応、および2) 海洋地殻全体の熱水変質が地球システムにおいて果たす役割、を明らかにすることを目的とする。

試料は、オマーンオフィオライトのフィズ地域における海洋地殻岩の約90試料を用いた。この試料は、堆積物-地殻境界からモホ面までの深さ約5 kmを網羅する。岩石は風化している部分を取り除き、粉碎したのち、乳鉢で粉末化した。岩石中の酸素は、試料をフッ素法によって分解し、二酸化炭素として捕集した。水素は、粉末X線回折分析(XRD)により含水鉱物(緑泥石、緑廉石、角閃石)を同定したのち、1,000℃で水を抽出、水素ガスに還元して捕集した。酸素および水素同位体比は、質量分析計 MAT 250 (於秋田大学環境資源学センター)を用いて測定した。ホウ素は、試料を HCl-HF で加熱分解し、四重極型誘導結合プラズマ質量分析計 ELAN DRC II

(於海洋研究機構高知コア研究所)を用いて濃度を測定した。ホウ素同位体比は、イオン交換クロマトグラフィーによってホウ素を分離し、表面電離型質量分析計 TRITON (於海洋研究機構高知コア研究所)を用いて測定した。ホウ素に関する化学処理はすべてクリーンルーム内で行った。

オマーンオフィオライト海洋地殻の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) は、深度とともに減少傾向を示し、枕状溶岩およびシート状岩脈群の上部は未変質の岩石と考えられる中央海嶺玄武岩 (MORB) の $\delta^{18}\text{O}$ ($5.7 \pm 0.2\text{‰}$) より高く、シート状岩脈群の下部およびハンレイ岩では MORB と同じか、より低い値を示した。一方、水素同位体比 (δD) には明瞭な深度方向の傾向は見られず、緑廉石は高い δD を示した。海洋地殻の $\delta^{18}\text{O}$ は海水との同位体交換により、低温の熱水変質では増加、高温の熱水変質では減少する。また、水/岩石比が大きいほど、MORB からのずれが大きくなる。したがって、フィズ地域の海洋地殻における $\delta^{18}\text{O}$ 深度プロファイルは、深くなるほど熱水変質の温度は上昇、水/岩石比は低下することを示す。しかし、上部シート状岩脈群の $\delta^{18}\text{O}$ が示す温度は変質鉱物組成が示す温度よりも明らかに低く、海洋地殻がまず海嶺軸上で高温の熱水変質を受けたのち、軸から離れたところでも継続的に低温の熱水循環があり、酸素同位体交換が起こったためと考えられた。一方、シート状岩脈群の下部より深い地殻と反応したのは300℃以上の高温の熱水に限られ、下部の変質したハンレイ岩が著しく低い $\delta^{18}\text{O}$ を示すことは、モホ面付近まで水/岩石比が1~2程度で熱水の流入があったことを意味する。オマーンオフィオライトの他の地域で報告されている $\delta^{18}\text{O}$ プロファイルと比較したところ、ハンレイ岩が著しく低い $\delta^{18}\text{O}$ を示すという点で、フィズ地域はラジミ地域と共通していた。両地域はどちらも拡大軸のセグメント境界付近に位置していたと考えられており、セグメント境界では海洋地殻深部まで活発な熱水の流入が起こることが示唆された。

$\delta^{18}\text{O}$ から推定された温度条件をふまえ、鉱物の水素同位体平衡定数を用いて熱水の δD を見積もったところ、上部地殻の緑泥石は海水程度の δD を持つ熱水と反応したのに対し、下部地殻の緑泥石や角閃石は海水よりも明らかに低い δD を持つ熱水と、緑廉石は海水よりも高い δD をもつ熱水と反応したことが示唆された。高温高压下で海水の超臨界二相分離が起こるとき、気相の δD は増加、液相の δD は減少することが実験的に示されている。従って、下部地殻では大規模な海水の超臨界二相分離が起こり、周囲の岩石と反応している可能性が示され

た。超臨界二相分離で生成された高塩分の液相は、密度が高いことから上部の熱水循環とは分離して深部に存在し、マグマからの効率的、かつ定常的な熱エネルギー輸送に役立っていると考えられる。

本研究では、海洋地殻のような低いホウ素濃度の試料の同位体比を精度良く測定するため、イオンクロマトグラフィーを用いたホウ素の化学分離について詳細に検討し、標準岩石試料 (JB-2, JB-3) を用いて分析法の精度・確度および再現性について評価した。本分析法で測定されたホウ素同位体比 ($\delta^{11}\text{B}$) は、JB-2, JB-3ともにこれまでに報告された値と調和的であり、分析誤差 $\pm 0.1\sim 0.2\%$ (2 SD) と再現性も良好であった。従って、既存の分析法がホウ素1,000 ng相当の試料を必要としたのに対し、本分析法ではその10分の1である100 ng相当でのホウ素同位体分析が可能となる手法を新しく確立した。

オマーンオフィオライト海洋地殻のホウ素濃度は、深度とともに減少傾向を示したが、海洋地殻全体を通して新鮮な岩石のホウ素濃度より高く、岩石中のホウ素は海水から付加されたことを意味する。ホウ素は低温熱水変質では粘土鉱物などの二次鉱物にとりこまれ、高温熱水変質では逆に岩石から放出されることが実験的に示されているが、高温でもホウ素に富む熱水との平衡により岩石に取り込まれることが示された。一方、 $\delta^{11}\text{B}$ は深度にそって増加傾向を示し、 $\delta^{18}\text{O}$ と負の相関があることから、反応温度上昇にともなう同位体分別係数の減少を反映していると考えられた。また、最下部のハンレイ岩は低い水/岩石比で $\delta^{18}\text{O}$ の高い熱水と反応したため、岩石の $\delta^{18}\text{O}$ は MORB と見分けがつかないが、 $\delta^{11}\text{B}$ には明瞭なシフトが見られ、 $\delta^{11}\text{B}$ は $\delta^{18}\text{O}$ よりも鋭敏な水-岩石反応の指標となることが示された。推定された熱水の $\delta^{11}\text{B}$ は現在の噴出熱水の $\delta^{11}\text{B}$ とほぼ一致し、白亜紀の海水の $\delta^{11}\text{B}$ は現在と同程度であったことが予想された。フラックス計算から、海洋地殻は下部地殻も含めてホウ素の大きな吸収源となっており、河川による海洋へのイン

プットフラックスのおよそ30%を除去していると考えられた。さらに、熱水変質を通じて海洋地殻の $\delta^{11}\text{B}$ は10%近く増加することが明らかになった。

このような熱水変質を受けた海洋地殻が、プレート収束帯において地球内部へ沈み込むプロセスを通じ、1) 長期的な海水の $\delta^{18}\text{O}$ および δD 変化、2) 島弧マグマの生成、に及ぼす影響について考察を行った。まず1) について、熱水変質を受けた海洋地殻全体の平均 $\delta^{18}\text{O}$ は約6%となり、MORB ($5.7\pm 0.2\%$) とほぼ一致することから、熱水変質は海洋地殻全体の平均 $\delta^{18}\text{O}$ を変化させない。そのため、これまでの研究では海洋地殻の熱水変質は海水の $\delta^{18}\text{O}$ に影響を及ぼさないと考えられてきた。この従来の考え方に対し、本研究では、沈み込み帯で海洋地殻が脱水するとき、粘土鉱物に富んだ上部地殻から選択的に脱水が起こる効果を考えると、結果的に沈み込む海洋地殻の $\delta^{18}\text{O}$ は MORB よりも低くなり、長期的には海水の $\delta^{18}\text{O}$ 増加に寄与している可能性を提案した。これは炭酸塩から復元された顕生代における海水の $\delta^{18}\text{O}$ 増加トレンドと調和的である。水素についても同様に、特に下部地殻の低い δD を持つ含水鉱物がマントルへ持ち込まれることにより、長期的に海水の δD を増加させている可能性を提案した。次に2) について、沈み込み帯では海洋プレートからの脱水によってマントルウェッジが部分熔融し、島弧マグマが生成されることが考えられている。島弧火山岩に見られる高いホウ素濃度および $\delta^{11}\text{B}$ は、島弧マグマに海洋プレート由来の流体が関与していることを証拠づけるものであるが、これまでの研究では堆積物および上部海洋地殻のホウ素しか考慮されてこなかった。しかし、本研究の結果からは、熱水変質した下部海洋地殻は ^{11}B に富んだホウ素の大きなリザーブであり、ホウ素はマントルにはほとんど入らないという性質をふまえると、上部地殻のみならず下部地殻からも無視できない量のホウ素が、島弧マグマに付加している可能性が示唆された。