

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	Gabriel Theophilus Vinalay VALERA
論文題目	The boundary of the subducting slab and mantle wedge of an incipient arc: <i>P-T-D</i> history, mixing, and fluid-related processes recorded in the Dalrymple Amphibolite, Palawan Ophiolite (the Philippines) (初期島弧の沈み込むスラブ-マントルウェッジ境界: フィリピン・パラワンオフィオライト中のダーリンプル角閃岩に記録された温度・圧力・変形履歴、岩石混合および流体の関与プロセスについて)		
(論文内容の要旨)			
<p>沈み込むスラブと、その構造的上位に位置するマントルウェッジとの境界部では、複雑な物理的・化学的過程が進行している。そしてスラブ-マントルウェッジ境界を構成する物質の種類や、そこで起きている物理的・化学的過程は、沈み込みが始まってからの時間経過に応じ、時間発展することが期待される。</p> <p>第1章では、フィリピン・パラワン島に露出するDalrymple Amphiboliteのたどった温度-圧力-変形履歴と岩石形成過程を調べた。パラワンオフィオライトの溶け残りマントルかんらん岩類 (ダナイトやハルツバージャイト) の構造的下位に位置するDalrymple Amphiboliteは、強く剪断変形を受けたマトリクス (鉱物組合せは藍晶石+Ca角閃石+黒雲母+チタン鉄鉱±ザクロ石) 中に、変苦鉄質岩と少量の変堆積岩のブロックが散在する、ブロックインマトリクス構造を呈する。Zr-in-rutile 地質温度計やquartz-in-garnet地質圧力計をザクロ石角閃岩ブロックに適用したところ、昇温変成期の温度圧力条件を約625°C, 11.5 kbar から約700°C, 13 kbarと見積もることができた。さらに、Zr-in-rutile地質温度計とクリノゾイサイト+ルチル+石英 = アノーサイト+チタン石+水の平衡を用いたTZARS地質圧力計を、角閃岩ブロックと緑簾石角閃岩ブロックに適用し、ピーク変成条件である約605-710°C, 10-13 kbarを得た。一方、ブロックを取り囲むマトリクス部分の構成鉱物に地質温度計と地質圧力計を適用したところ、ザクロ石角閃岩ブロックから得たピーク変成条件と同様の、約700°C, 13 kbar を得た。こうして推定したかつての沈み込み帯の地温勾配の値 (約16°C/km)とブロックインマトリクス構造の存在は、通常メタモルフィック・ソールには見られない特徴であり、むしろ沈み込み帯初期にできたとされる、メランジュの産状を典型的に示す高温エクロジャイト岩体に類似している。従ってDalrymple Amphiboliteは、沈み込み開始直後の非常に温かい沈み込み帯の状態からしばらく時間経過してはいるが、成熟した段階に至る前の、沈み込み帯初期のスラブ-マントルウェッジ境界の状態を表していると考えられる。変苦鉄質岩ブロックとマトリクスから得られたピーク温度圧力条件が似ていることは、マトリクス形成時の変形が、これらの岩石が地下約45 kmでピーク変成条件に達する前に始まったことを示す。</p> <p>第2章では、Dalrymple Amphiboliteのブロックとマトリクスの全岩化学組成を用いて、変苦鉄質岩ブロックの原岩決定や、変形したマトリクスの形成に機械的混合や流体流入が果たした役割の評価を行った。その結果、変苦鉄質岩ブロックの原岩は、非変成のパラワンオフィオライトにみられる玄武岩質溶岩に似た中央海嶺玄武岩であり、両者は成因関係があることがわかった。すなわち変苦鉄質岩ブロックは、沈み込むスラブの玄武岩から斑レイ岩部分が変成したものである。一方、マトリクスは多様な鉱物組合せを示す。マトリクスの成因を明らかにするた</p>			

め、マトリクスの構成元素/成分の挙動を、相関係数を用いて調べ、それぞれ異なる挙動をする2つの元素/成分グループを検出した。グループ1はTiO₂、Al₂O₃、Zr、Th と軽希土類元素であり、グループ2はCr、Ni、MgOである。これらの元素/成分グループの存在は、マトリクスが変堆積岩（グループ1）と変苦鉄質岩（グループ2）を端成分とした機械的混合によって生じたことを示唆する。そこで、これら2つの端成分の混合比を変化させてマトリクスのモデル全岩化学組成を作成し、マトリクスの全岩化学組成の実測値と比較することで、不動元素/成分(Cr、Ni、Zr、TiO₂、Al₂O₃)によるアイソコンを最小二乗法で作成した。そして、最大の決定係数(r^2)を与える混合比を、マトリクスの原岩が機械的混合によって形成された際の混合比とみなした。こうして得られたマトリクスのモデル全岩化学組成を原岩、実測値を物質移動経験後の組成と位置付け、すべての元素/成分についてアイソコン解析を行った。マトリクスに藍晶石、チタン鉄鉱、ジルコンが遍在することから、TiO₂、Al₂O₃、Cr、Nd、Zr、Hfを不動元素/成分とした。この手法によって、適切な端成分の決定、端成分の混合割合の決定、流入流体の影響の見積もりを行うことに成功した。特に多くのマトリクス試料の全岩化学組成が、多量の変堆積岩と少量の変苦鉄質岩の機械的混合によって説明できることがわかった。このことは、鉱物化学組成、すなわちマトリクスのルチルの鉱物化学組成（Cr、Nb濃度）にも記録されている。Dalrymple Amphiboliteのマトリクスが変苦鉄質岩成分と変堆積岩成分が卓越する化学組成を示すことは、超苦鉄質岩に由来する低温のMgに富む鉱物（蛇紋石、緑泥石、滑石）が卓越する高P/T型変成帯とは対照的であり、Dalrymple Amphiboliteの記録する、より温かい沈み込み地温勾配を反映しているのかもしれない。上述のアイソコン解析によって、混合プロセス後の流体関与現象により、流体によって移動しやすい元素/成分（CaOやSiO₂）や、マトリクスで安定に存在した鉱物に取り込まれなかった元素/成分が、選択的に溶出したことがわかった。マトリクスの鉱物組合せが、全岩化学組成変化に強く影響していることは、従来、不動元素であると考えられてきた元素（重希土類元素やY）が、多くの試料で多少の増減を示すことからわかる。マトリクスの全岩化学組成へのK₂O、Rb、Baの添加は、後退変成時の流体流入による2次的な鉱物成長（例えば藍晶石を置換する白雲母）に起因する。こうした後退変成期の流体流入による影響は、初期の岩石-水反応によるこれらの元素の減少を上書きし、見えなくしている可能性がある。

従来Dalrymple Amphiboliteは、通常メタモルフィック・ソールだととらえられてきた。しかし本研究で行った野外調査、地質温度計・地質圧力計による解析、鉱物化学組成および全岩化学組成の分析/解析の結果、Dalrymple Amphiboliteには、沈み込み開始直後から成熟するまでの間の、中間的な状態の弧-海溝系のスラブ-マントルウェッジ境界で起きた、複雑な変形・変成作用、機械的混合、何段階にもわたる流体流入現象が記録されていることが明らかとなった。本研究で得られた知見は、Dalrymple Amphiboliteと類似の沈み込み帯地温勾配を持つ、他の温かい沈み込み帯にも応用できると考えられる。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

沈み込むスラブとマントルウェッジの境界は、流体の関与した複雑な物理化学的プロセスがダイナミックに進行している場であり、沈み込み開始直後から、若い沈み込み帯を経て、成熟した沈み込み帯へと、沈み込み帯が時間発展する過程において、スラブ-マントルウェッジ境界を構成する物質や物理化学プロセスの性質は変化していく。

本研究では第1部において、フィリピン・パラワン島に分布するメタモルフィック・ソールであるDalrymple Amphibolite岩体を、野外地質学および変成岩石学的手法で詳細に研究した。野外調査において、同岩体に変成された整然層に近い産状を示す露頭から、ブロックインマトリクス構造を示す露頭まで、変成同時の変形の程度が異なる露頭が存在することを見出し、ブロックとマトリクスの詳細なサンプリングと記載を行った。そのうえで、相対的に古い情報を記録するブロックと、相対的に新しい情報を記録するマトリクスの、詳細な鉱物組織観察と鉱物化学分析をそれぞれ行い、最新の地質温度・圧力計 (Zr-in-rutile地質温度計およびザクロ石中の石英を用いた地質圧力計) の適用や、シュードセクションモデリング (岩石の全岩化学組成を与えて相平衡を計算する前進モデリング計算) によって、同岩体を経た温度-圧力-変形履歴の解読を行った。この結果、同岩体は地下約45kmにおけるスラブの地温勾配を記録しており、Agardら(2018)のモデルに従えば、沈み込み開始後数Maの比較的若い沈み込み帯の地温勾配に相当することを明らかにした。また、ブロックインマトリクス構造は、地下45km付近での変成同時の変形によって形成されたことも明らかにした。従来、Dalrymple Amphibolite岩体には、沈み込み開始直後の地温勾配が記録されていると考えられていたが、本研究は従来の知見を変更する新しい成果を得たと言える。

第2部ではこの新知見に基づき、変成岩石学および地球化学的手法を用いて、比較的若い沈み込み帯のスラブ-マントルウェッジ境界で起きている、流体の関与した地球化学的プロセスの解析を行った。ブロックインマトリクス構造を持つ岩体の構成要素のうち、マトリクスは地下45km付近で起きた昇温変成時の変形・異なる岩種間の機械的混合・流体の関与した物質移動など、諸過程の影響を受けているが、ブロックの内部は、これらのプロセスの影響を免れている。そこで、ブロックとマトリクスの全岩化学組成を分析し、アイソコン解析と統計的解析を行った。すなわち、複数の不動元素を用いて最小二乗法でアイソコンを決定し、決定係数が最大となる混合割合をもとに、流体による物質移動前のマトリクスのモデル化学組成を個々の試料について決定した。そしてこのモデル化学組成とマトリクス化学組成の実測値との差が、流体による物質移動の結果生じたと考える方法を考案した。この方法に基づき、スラブ-マントルウェッジ境界における流体を介した物質移動を議論することに成功した。さらにまた第1部の成果をもとに、このような物質移動は昇温昇圧変成期に地下45km付近で起きたことを明らかにした。このような元素移動により、上盤側のマントルウェッジは組成変化し、さらなる沈み込みを経てマグマ生成に寄与する可能性がある。このように、沈み込み帯形成初期における物質循環の理解を深めた点は高く評価できる。

以上の貢献から、本論文は博士 (理学) の学位論文として価値あるものと認める。また、2022年1月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日：2022年 4月 1日以降