

論文審査の結果の要旨

氏名 桑谷 立

本論文は、これまで相平衡熱力学に基づく温度・圧力経路解析を中心に研究が進められてきた沈み込みプレート境界における海洋地殻構成物質の変成作用を、水に富む流体の輸送に伴って進行する脱水・吸水非平衡反応系としてとらえ、天然系の観察と理論的取り扱いをカップリングさせることによってその振る舞いを検討し、天然系の岩石から沈み込み帯における水輸送に関係する有用な情報を引き出すことをめざしている。

まず、これまでの沈み込み帯変成作用のレビューを行った上で変成作用に関する問題点を整理したイントロダクションに続く第一章は、海洋性島弧地殻の断面が露出する丹沢変成帯の温度圧力経路の推定に関する章である。平衡近似の適用可能性を検討した上で、平衡熱力学に基づいて鉱物の累帯構造から温度圧力変化を推定できるギブス法を角閃石の累帯構造に適用し、前進脱水反応の進行に対応して温度圧力が共に単調増加する経路 ($dP/dT \sim 2.5 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$) と、後退吸水反応の進行に対応して温度圧力が同様の dP/dT で共に単調減少する経路が、地域的に分かれて分布することを見出している。この結果に基づいて、空間的に不均質に進行する後退吸水変成反応の特徴を明らかにし、ほぼ同様の dP/dT で前進・後退変成作用を経験している点に注目し、島弧地殻の衝突・付加に伴った沈み込みと上昇過程について考察している。

第二章では、四国三波川帯高変成度地域に存在する五良津エクロジヤイト岩体の後退吸水変成反応の定量的評価を行っている。岩体中央部の後退吸水反応組織は、無水条件でより安定である粗粒な鉱物（エクロジヤイト鉱物＝ざくろ石+オンファス輝石）を低温高含水条件で安定な鉱物より成る細粒の反応縁（角閃石+緑簾石±斜長石等）が静的に置換するようになり取り囲む組織で特徴づけられる。本章では、この反応縁の化学組成と体積の測定結果に基づいて化学反応式の特異、反応進行度と物質移動量の推定を行い、ざくろ石とオンファス輝石の反応縁間で元素を交換し合うことで、水を除くほとんどの成分について局所的閉鎖系を保ちつつ吸水反応が進んだことを明らかにしている。さらに、この反応組織は、岩体縁辺部にむかって、強い変形を示唆する伸張自形等粒状鉱物（バロア閃石+緑簾石+斜長石±緑泥石）で特徴づけられる均一組織に漸次的に遷移していることを述べ、縁辺部では、エクロジヤイト鉱物の吸水反応が、空間的に均質な大域平衡に向かってより進行したと結論している。このように、岩体の内部から縁辺部に向かう吸水反応進行度、変形強度、物質移動量の増加を定量化することで、吸水反応が岩体外部からの流体浸入によって引き起こされ、粒間拡散と表面反応速度の比および流体の存在形態と量によってその進行度が支配されていたことを明らかにしている。

第三章ではギブス法に、新たに質量保存則の制約を加え、任意の温度圧力変化から鉱物の物質量・化学組成変化を決定する微分熱力学フォワードモデルを構築し、塩基性岩系の脱水変成作用の前進解析を行っている。天然系で

は脱水変成作用が比較的均質に進行するという一般則に基づいて、フォーワードモデルを脱水反応へ適用する妥当性を述べた上で、沈み込むスラブの温度圧力経路を与え、海洋地殻からの脱水量をスラブの温度と深度の関数として推定している。その結果に基づいて、脱水量がピークに達する深度が、高ポアソン比異常・スロースリップ・低周波微動等の特異性を持つ、沈み込み帯の中深度地震の発生深度と一致することを明らかにし、沈み込み帯深部の地震発生要因として脱水不安定が重要な役割を果たしている結論している。

第四章は塩基性岩の吸水変成作用の前進解析の開発について述べている。吸水変成反応は、外部からの流体供給に強く依存し粗粒鉱物を分解しながら非平衡を保って進行するという第二章の五良津エクロジイト岩体の解析結果に基づいて、第三章で取り扱った脱水反応の前進解析モデルを吸水反応にそのまま適用することはできない事を指摘した上で、質量保存則を改善することで吸水変成作用に適用可能な前進解析モデルを開発している。これによって高変成度で安定な鉱物が高含水条件で不安定となり縁辺部から分解しながら、含水鉱物が局所平衡を保って成長する非平衡吸水反応過程の解析が可能となった。エクロジイトの吸水反応について本モデルを適用し、高温のスラブではより少ない水の供給量でエクロジイト鉱物が分解され効果的に密度が低下することを明らかにしている。このことは、高温の変成帯は、浮力源となる蛇紋岩を伴わなくても、吸水変成作用によって得た自らの浮力で上昇する可能性を示唆しており重要な成果である。

第五章では、天然系の組織や鉱物化学組成から、脱水・吸水反応を支配する速度論定数、流体量、水溶液組成等のインバージョンをめざして、固溶体水溶液化学平衡・表面反応速度・粒間拡散を考慮した反応拡散モデルを新たに構築している。このモデルの挙動は元素の粒間拡散係数に対する表面反応速度の大きさを表す無次元パラメータに支配され、局所平衡系（不均質・置換反応・拡散律速）から、大域平衡系（均質・反応律速）にわたる反応系を取り扱うことが可能であり、応用における汎用性が高い。第二章で明らかにした五良津エクロジイト岩体のざくろ石とオンファス輝石の反応縁系に適用し、各元素の無次元パラメータの値を最適化させることによって、五良津岩体の吸水反応様式の空間変化の再現に成功している。

本研究は、非常に困難とされてきた本質的に非平衡開放系である変成作用を閉鎖系平衡近似から開放系非平衡過程におよぶ様々なモデルと天然系からの情報抽出によって迫ったものであり、沈み込み帯における水輸送の理解にむけた岩石学的アプローチの端緒を開いたと言え、地球科学における意義は非常に大きい。よって本審査委員会は、全員一致で本論文が本学の博士（理学）の学位を授与するに値するものと認定した。

なお本研究の一部は、鳥海光弘氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって行ったもので、その寄与が十分であると判断する。