

論文の内容の要旨

論文題目

QUANTITATIVE ANALYSES OF AMPHIBOLE SOLID SOLUTION AND  
EXHUMATION PROCESS OF THE SANBAGAWA METAMORPHIC BELT

(角閃石固溶体からみた三波川変成帯の上昇過程の解析)

氏名 岡本 敦

プレートの収束境界では物質が地下深部にまで沈み込み、再び上昇するという現象がしばしば起こってきた。その履歴は現在地上に露出している高圧変成岩によって記録されている。本研究は典型的な高圧変成帯の一つである三波川変成帯を対象に、沈み込み帯深部における物質の運動を明らかにすることを目的とする。物質の運動に制約を与えるためには、個々の岩石の温度圧力経路と歪み速度履歴を定量的に評価し、その空間分布を知ることが必要である。本研究では塩基性片岩（玄武岩質変成岩）中の角閃石という一つの鉱物に着目する。角閃石は、(1) 非常に広い温度圧力領域で安定であること、(2) 顕著な成長の組成変化の履歴（組成累帯構造）を残していること、また(3) 変形組織（マイクロブーディン組織）を持つことから本研究に非常に適している。三波川変成帯は、変成度の低いほうから緑泥石帯、ザクロ石帯、曹長石黒雲母帯、灰曹長石黒雲母帯の4つの鉱物帯に分けられる。研究地域である四国中央部別子地域では、それらの4つの鉱物帯が連続的に露出しており、塩基性片岩が広く分布するという特徴を持つ。

本研究では主に岩石のマトリックスに存在する角閃石を分析した。その組成は Ca 角閃石と Na-Ca 角閃石である。累帯構造は高変成度の曹長石黒雲母帯ではバロア閃石→ホルンブレンド→（→ウィンチ閃石）→アクチノ閃石、低変成度の緑泥石帯ではウィンチ閃石→アクチノ閃石を示した。ザクロ石帯は両者の中間的な組成経路を示す。

角閃石の組成累帯構造から個々の岩石の温度圧力経路を熱力学的な解析によって推定し

た。解析は  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO-MgO-CaO-Na}_2\text{O-H}_2\text{O}$  の 8 成分、角閃石—緑簾石—緑泥石—斜長石—石英—水という 6 相（熱力学的な自由度=4）について行った。この鉱物組み合わせは、三波川変成帯の角閃石が成長する時期に常に存在していたと考えられる。角閃石は様々な結晶サイトで複数の陽イオンの置換が起こる非常に複雑な固溶体である。本研究では角閃石を tremolite - edenite - tschermakite - glaucophane - magnesioriebeckite - ferroactinolite - orderedtremolite の 7 つの成分からなる固溶体に近似した。熱力学的な自由度よりも角閃石の組成変数が多いことより、角閃石の組成変数を 4 つ与えれば、その他の示強変数（温度、圧力、共生鉱物の組成）をすべて求めることが出来る。実際の計算は、独立な各反応の熱力学的平衡の条件と各固溶体の化学量論的束縛条件を微分形式で表し、逆問題として解いた（ギブス法）。

角閃石固溶体を熱力学的に解析する際の最大の問題点はその固溶体モデルが確立されていないことである。本研究では活動度の理想部分に関しては Mixing on sites model、また非理想部分には正則溶液モデルを用いて近似した（Holland and Powell 1993）。7 つの端成分から角閃石固溶体には 21 個の非理想パラメータ（マーグラスパラメータ； $W_{ij}$ ）が必要である。しかし、今までに実験的に推定されているものは一つ（ $W_{tr-ts} = 20 \text{ kJ/mole}$ ）である。本研究ではまずマーグラスパラメータのセットを 500 個の天然の角閃石平衡組成と既存の熱力学データセットを用いて最適化した。ギブス法によって、温度、圧力、緑簾石、緑泥石、斜長石の組成および、角閃石の 1 成分が計算される。この解のうち、温度と角閃石の 1 成分については、ほかに手法により独立に得ることが出来るために、それぞれの差が小さくなるように最小自乗法を用いて最適化した。最適化した結果、92%の資料の温度差が 30 度以内に、87%の資料の角閃石の組成  $X_{\text{Al,Tl}}$  の差は 0.05 以内に収まった。

得られた角閃石の活動度モデルを用いて三波川変成帯の塩基性片岩の各角閃石組成から温度圧力条件を推定した。曹長石黒雲母帯の最高温度圧力条件（520-550°C, 1.0-1.1GPa）は Enami et al. (1994)で推定された値とほぼ一致する。塩基性片岩に一般的に存在するアクチノ閃石、ホルンブレンド、ウィンチ閃石、バロア閃石の安定な温度圧力領域の関係は Otsuki and Banno (1990)による予想と調和的な結果が得られた。各岩石の角閃石の組成変化を温度圧力条件に置き換えることにより連続的な温度圧力経路を推定した。高変成度と低変成度で一般的な 2 つの組成累帯構造バロア閃石→ホルンブレンド→アクチノ閃石とウィンチ閃石→アクチノ閃石はどちらも三波川変成帯の上昇期の履歴を記録していることが明らかとなった。また、曹長石黒雲母帯の温度圧力経路は 2 つのステージが認められた。高温領域（500 度以上）では等温減圧に近く、低温領域ではより小さい  $dP/dT$  を示した。30km で 500 度以上に達するような沈み込み帯の温度構造は三波川変成帯の形成が若いスラブの沈み込みと関連していたと考えられる。また、高温領域における高い  $dP/dT$  は深部においてウエ

ツジマントルの熱的影響を示唆する。

角閃石は岩石中でしばしば剛体として振る舞い、結晶の長軸に垂直な方向に脆性破壊し、長軸方向に引き離されている（マイクロブーディン組織）。また、その離れた隙間を後に成長した角閃石によって埋めている。粒子の破壊直後の角閃石組成を分析した結果、アクチノ閃石—ホルンブレンドまたはアクチノ閃石—ウィンチ閃石の組成境界付近で割れて、アクチノ閃石の成長と歪みの蓄積の時期が対応することが明らかとなった。粒子の破壊時期の温度圧力条件は 0.3–0.7GPa, 400–500℃であり、ブーディンに見られる引き延ばし変形は変成帯の上昇の後期の運動に対応している。Strain Reversal Method (Ferguson 1981; Masuda 1990)を用いて、この間に蓄積された岩石の歪みを推定すると数%から 90%であった。

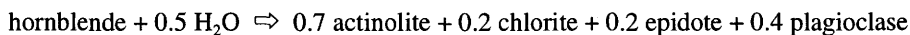
角閃石の伸びから岩石全体の変形を議論するためには、多数の粒子について統計的解析することが望ましい。しかし、実際には明瞭なブーディン組織は塩基性片岩中に非常に乏しい。そこで、岩石全体の変形を考えるために、同時期の反応との関連性について調べた。

ブーディン組織が発達したのはほぼアクチノ閃石の成長した時期に対応している。結晶内の元素の拡散が非常に遅いような条件(500℃以下)にも関わらず、塩基性片岩では鉱物組み合わせと全岩組成がほとんど変わらないまま反応が進む。このことから、固溶体の前の段階の組成を消費することによって後の組成部分が成長するという過程が予想される。

第1次近似的な後退変成反応の進行度の指標として  $X_{act}$  (= アクチノ閃石組成の量 / 角閃石全体の量) を EPMA の組成マップから測定した。角閃石成長の最終段階のアクチノ閃石以外の部分をコアと呼ぶ。コアの組成は黒雲母帯では主にホルンブレンドであり、緑泥石帯では主にウィンチ閃石である。各岩石について、100-200個の角閃石粒子の平均値をもって  $X_{act}$  とした。

非常に簡単な系に近似した場合のマスバランスの関係を解くことにより、アクチノ閃石が成長する時期の反応とその進行度を推定した。計算は最終的なアクチノ閃石ステージのモード、各鉱物の組成、アクチノ閃石部分の成長量を与えることにより、角閃石コアと他の鉱物のモード変化と岩石の  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $H_2O$  の変化量を推定した。解析結果より、測定した  $X_{act}$  は  $dM_{core} / M_{core}^0$  (反応に関与した角閃石コアの量 / 反応前に存在した角閃石コアの量) とほぼ対応することが明らかとなった。また、曹長石黒雲母帯とザクロ石帯の塩基性片岩では明瞭な吸水反応であるのに対して、緑泥石帯では反応は吸水量が非常に少ないという違いが認められた。

反応 a (曹長石黒雲母帯、ザクロ石帯)



反応 b (緑泥石帯)



角閃石以外の固溶体の組成変化はそれほど大きくないため、鉱物増減関係は角閃石のコアとマントルの間の組成ベクトルの方向によって主に決められる。また、曹長石黒雲母帯とザクロ石

帯ではほぼ同じ反応経路を示すため、 $X_{act}$  は反応の進行度の指標としての意味を持つ。角閃石のブーディンから推定される岩石の歪みの増分とアクチノ閃石を生成する反応の進行度の関係を調べると、全体として反応が進むにつれて岩石の歪みが大きくなる傾向にあることが明らかになった。

反応進行度 ( $X_{act}$ ) は四国別子地域において、ザクロ石帯および曹長石黒雲母帯の中のザクロ石帯との境界部において急激に高くなる。この空間分布から、三波川変成帯上昇期の後期において、ザクロ石帯および曹長石黒雲母帯の中のザクロ石帯との境界部が非常に変形が進行したことが明らかとなった。ザクロ石帯は Wallis (1998)で提唱された2つのナップのうちの一つ大歩危ユニットの底に対応しており、少なくとも三波川変成帯上昇後期に2つのナップの間の速度勾配が非常に大きかったことを示唆する。