

四国中央部三波川変成岩中のザクロ石 から解析する温度圧力履歴

乾 陸 子*

Pressure-Temperature Paths Deduced from Garnet Zoning of the Sambagawa Metamorphic Rocks, Central Shikoku, Japan

Mutsuko INUI *

Abstract

In central Shikoku, SW Japan, eclogitic rock masses expose themselves among the sedimentary schists of the Sambagawa metamorphic belt. When and how they were juxtaposed might reveal the nature of subduction zone tectonics. Garnet is known to have conspicuous zoning in the Sambagawa metamorphic belt. Apart from grains having a normal zoning with a bell-shaped Mn profile, grains with a composite chemical zoning pattern are found exclusively in the schists close to the eastern Iratsu metagabbro mass in the Besshi district. It is reasonable to consider that composite zoning formed as a result of an event related to the juxtaposition. P-T paths of the characteristic zoning in garnet were inversely calculated using differential thermodynamic method (Gibbs' method) to extract the influence of the emplacement of the tectonic block. The derived P-T paths of composite zoning, compared to the prograde P-T path of the Sambagawa metamorphism, showed temperature decreases during their growth interval. It is suggested that the growth interval of garnet corresponds to the juxtaposition of the eclogitic rock masses and the pelitic Sambagawa schists, and that the juxtaposition occurred during subduction.

Key words : Sambagawa belt, eclogite, P-T paths, garnet, zoning

キーワード : 三波川変成帯, エクロジャイト, 温度圧力履歴, ザクロ石, 化学組成累帯構造

I. はじめに

変成岩中の鉱物の中には、熱力学的条件に応じて化学組成を変化させながら成長するため、不均質な化学組成を結晶内に残しているものがある。これは化学組成累帯構造と呼ばれ、その結晶が成長した時の条件を経時的に記録しているものと考えられている。化学組成累帯構造を示す鉱物のう

ち代表的なものがザクロ石であり、ザクロ石の組成から逆解析を行うことによって、その結晶を成長させた温度圧力の変化を求めることができる。現在では、様々な鉱物の熱力学的特性に関する実験結果が得られるようになったこと、技術進歩によりパソコンで手軽に逆解析が可能になったこと等により、このような逆解析が変成作用の解明に欠かせない手段となりつつある。一方、変成作用

* 国土館大学工学部都市システム工学科

* Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Kokushikan University

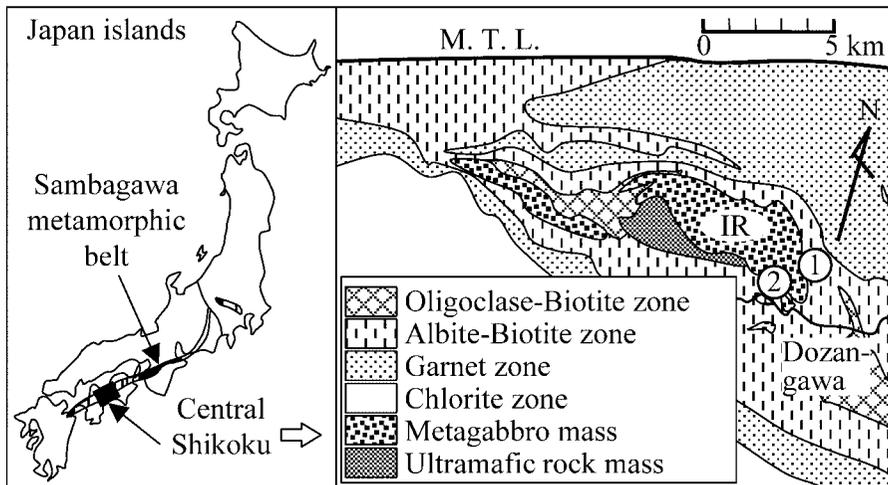


図 1 三波川変成帯四国中央部の変成分帯図。
M.T.L.: 中央構造線, IR: 五良津岩体, および : 試料採取地点. Higashino (1990) に加筆.

Fig. 1 Metamorphic zonation map of the Sambagawa metamorphic belt, central Shikoku. Iratsu mass is designated IR, the eastern half of which is the eastern Iratsu metagabbro mass. Numbers 1 and 2 in open circles are the sample localities Loc. 1 and Loc. 2. Loc. 2 is a narrow pelitic zone between the eastern Iratsu metagabbro mass and another smaller amphibolite mass. M.T.L.: Median Tectonic Line. Modified from Higashino (1990).

を理解するためには、温度圧力条件だけではなく、変形や流動の過程を知ることも必要である。これらは従来、断層や変形組織などの構造地質学的観察によって行われてきたが、変成度の高い岩石では解読が困難であることも多かった。逆解析によって個々の試料が経てきた温度圧力条件を精密に決定できれば、変成帯の内部における温度圧力条件の空間変化が得られ、変成帯の岩石流動を復元する新たな手がかりになると思われる。

西南日本に広く露出する三波川変成帯は、代表的な沈み込み帯起源の高圧型変成帯であり、変成作用の熱力学的検討も最も進んだ地域のひとつである(たとえば, Banno *et al.*, 1986)。そのうち四国の高変成度地域には、周囲の岩石とは起源の異なる変はんれい岩体や超塩基性岩体が多く知られ、従来テクトニック・ブロックと呼ばれてきた。これらの岩体を取り込まれたメカニズムは変成帯の運動を理解する上で重要だと考えられ、最近でも Wallis and Aoya (2000) は広域変成作用によるエクログャイト・ナップをこの地域に想定し、

Ota *et al.* (2004) は連続した三波川変成帯の一部であると主張するなど、注目されている。別子地域の変はんれい岩体等の周囲の泥質変成岩には、様々な組成累帯構造を示すザクロ石が特徴的に出現し、その特異な組織は、塩基性・超塩基性岩体が三波川変成帯の中に取り込まれたことと関係していると考えられる。本稿は、最大の変はんれい岩体のひとつである五良津東部岩体の周囲に見られる泥質岩中のザクロ石の組成累帯構造を詳細に分析し、温度圧力履歴の空間的なちがいが流動の痕跡を抽出しようとしたものである。

II. 地質概要

南西日本に延びる三波川変成帯は、代表的な高圧型変成帯のひとつであり、主にプレート上に堆積した付加体堆積物が、後期白亜紀に変成作用を受けて形成されたとされている。四国中央部に最も変成度が高い岩石が露出しており、変成分帯はこの地域の泥質片岩の鉱物組み合わせによって定義される: 変成度の高い方から灰曹長石 黒雲母

帯，曹長石 黒雲母帯，ザクロ石帯，緑泥石帯である (Higashino, 1990) (図 1)。灰曹長石 黒雲母帯および曹長石 黒雲母帯は，緑レン石角閃岩相の変成作用を受けている。変成分帯，岩相の分布境界とともに，三波川変成帯自体の長さ方向とほぼ平行であり，どちらもゆるやかな北傾斜を示す。灰曹長石 黒雲母帯が層序の中央にあり，構造的上位および下位へ向かうにつれて変成度が下がることが特徴的であるが，このような温度構造を生じさせた理由については現在様々な議論がある (たとえば, Hara *et al.*, 1990; Wallis, 1998; Ota *et al.*, 2004 など)。

四国中央部の別子地域には，灰曹長石 黒雲母帯および曹長石 黒雲母帯に当たる三波川変成岩の中に，長さ数メートルから数キロメートルに達するレンズ状の角閃岩体や超塩基性岩体が多く出現することが知られている。それらの岩体は火山灰堆積物やはんれい岩を原岩とし，三波川の昇温期変成作用を受けた形跡がない (Takasu, 1984; Kunugiza *et al.*, 1986)。五良津東部岩体は，層状はんれい岩を原岩とする，主にザクロ石緑レン石角閃岩からなる最大の岩体のひとつであり，曹長石 黒雲母帯の泥質片岩に直接接している (図 1)。過去にエクロジャイト相の変成作用を受けた後に，後退変成作用の途中で角閃岩相で再平衡に達した証拠が報告されている (たとえば, Toriumi and Kohsaka, 1994; Wallis and Aoya, 2000; Ota *et al.*, 2004)。

III. 試 料

1) 鉱物組み合わせとザクロ石の産状

五良津東部岩体に近接する泥質片岩の露頭 2 カ所で，岩体から遠ざかりながら数メートル間隔で試料を採取した (図 1, 図 2)。代表的な鉱物組み合わせは，ザクロ石 + 緑泥石 + 白雲母 + 曹長石 + 石英であり，この他に緑レン石，黒雲母，ホルンブレンド，チタン石，方解石，グラファイトなどを含むことが多い。泥質片岩において主に片理を形成している鉱物は白雲母であり，ザクロ石斑状変晶の周囲を迂回している。他に緑レン石，黒雲母，ホルンブレンド，チタン石などが存在すれば，

それらも面構造に従う。一方，緑泥石の多くは方向性を示さず，それらは片理の形成後に成長したことを示している。曹長石は粒径 1 ~ 5 mm の斑状変晶であることが多く，グラファイトやザクロ石などの包有鉱物を多く含む。

ザクロ石は主に斑状変晶として産し，光学顕微鏡下で淡いピンク色をした直径約 0.7 ~ 3 ミリメートルほどの半自形 ~ 丸みを帯びた結晶である。白雲母，パラゴナイト，緑泥石，緑レン石，グラファイトなどの他に，石英が多く包有されしばしば S 字状をなしている。この代表的なザクロ石を，以下で区別が必要な際には「1 型」のザクロ石と呼ぶ。試料 F2801 と F2803 は，鏡下で色がより赤く，石英包有物が少なく，直径は約 1 ミリメートル前後のザクロ石が含まれる。以下，この種のザクロ石は「2 型」と呼ぶこととする。2 型のザクロ石は緑泥石あるいはホルンブレンドに富む厚さ数ミリメートルの層に見られることが多い。さらに，いくつかの試料には，直径 50 ~ 300 ミクロンの明らかに細粒なザクロ石の結晶群が見られる。そのような群は比較的白雲母や石英に富む淡色の部分に多い。ザクロ石の結晶粒径の二極化は，同じ別子地域の東平変はんれい岩体付近でも観察されている (Shirahata and Hirajima, 1995)。

2) ザクロ石の累帯構造

41 試料について電子プローブマイクロアナライザ (EPMA) による化学分析を行った。ザクロ石のマッピング分析の結果，岩体付近の狭い地域に，正累帯構造，二重の正累帯構造，さらに，セクター型累帯構造という三種類の累帯構造を持つザクロ石が出現することが確認された。

正累帯構造とは，結晶中心部から外に向かって Mn 濃度が減少し Mg/Fe 比率が増加する構造を指す (図 3-a, c)。三波川変成帯に一般的に見られる累帯構造で，それらの中には成長途中で Ca 濃度が最大になり外に向かって減少するものと，中心部は Ca が少なく (グロシュラーのモル分率が 15 ~ 20%) 外に向かって増加するものがあった。

二重の正累帯構造は，分析した試料のうち 11 試料に含まれていた (Loc. 1 の 18 試料中 4 つ, Loc.

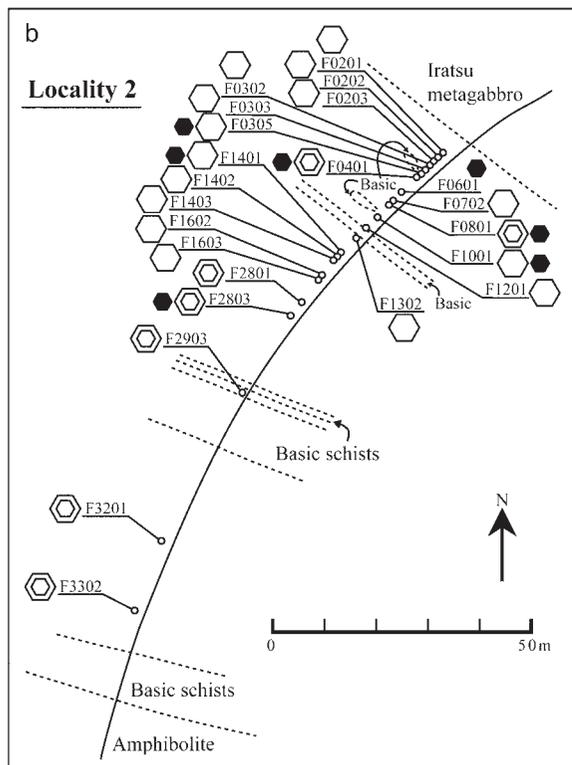
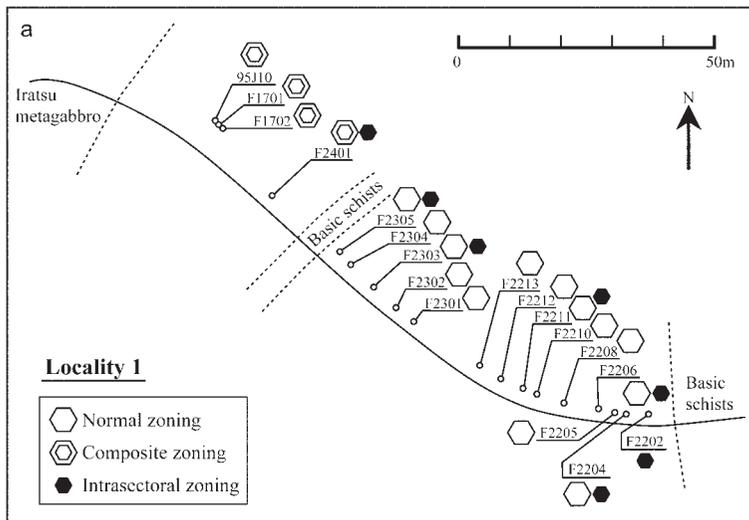


図 2 ザクロ石の累帯構造のパターン分布。
 Normal zoning : 正累帯構造 , Composite zoning :
 二重の正累帯構造。
 (a) Loc.1
 (b) Loc.2
 詳細は表 2 も参照のこと。

Fig. 2 Spatial distribution of garnet with
 different zoning patterns in (a) Loc. 1 and
 (b) Loc. 2.
 Details are listed in Table 2.

2 の 23 試料中 7 つ)。 Mn 量が中心部から減少した
 後、途中で不連続に増加し、再びゆるやかに減少
 するのが特徴で、 Mg および Fe の変動の仕方も含
 めて正累帯構造を 2 回繰り返すような形である

(図 3-b, d)。 Ca 成分については、 1 回目の成長部
 分の組成は Ca が少ないが、 2 回目の成長ではグロ
 シュラーのモル分率が 35% 程度まで上がる。 成
 長中は自型の結晶面の形が累帯構造として残され

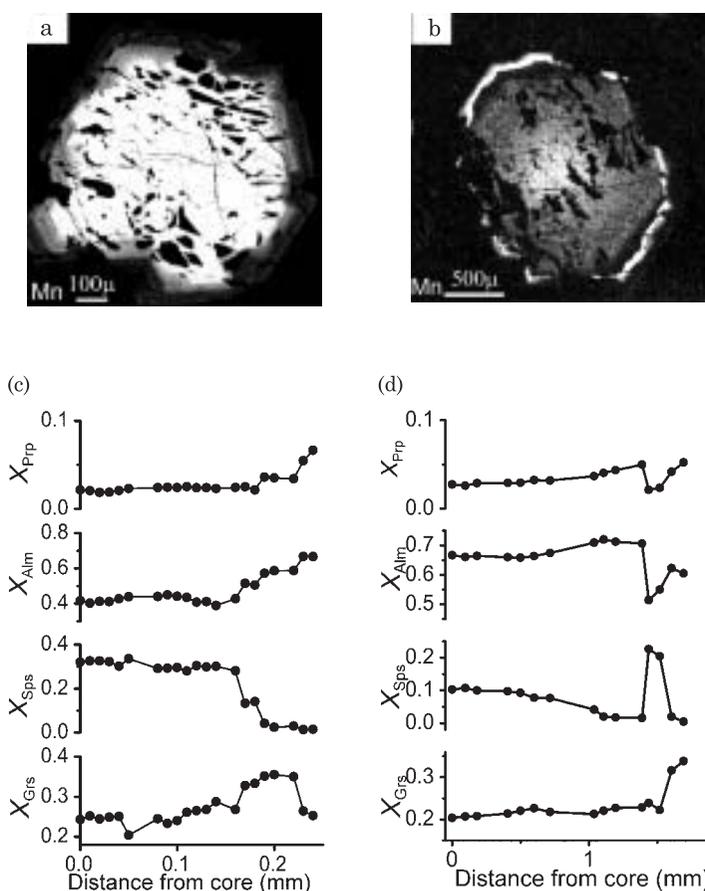


図 3 ザクロ石の組成マッピングと累帯構造のプロファイル .
 (a)(c): 正累帯構造の例(試料 F0702), (b)(d): 二重の正累帯構造の例(試料 F2903).
 (a) および (b) は Mn のマップであり, 白に近いほど Mn 量が多いことを示す .
 (b) の画像に, 2 回目に成長を始める際の Mn の不連続な増加が見られる .

Fig. 3 X-ray intensity maps of Mn (a, b) and compositional profiles from the core to the rim of garnet grains (c, d).

Areas in lighter colors indicate larger Mn contents. (a)(c): Garnet with normal zoning (sample F0702), (b)(d): garnet with composite zoning (sample F2903). X-ray intensity map (b) shows an abrupt increase in the midst of grain growth.

ているのに対して, 1 回目と 2 回目の成長の境界部分の形は不規則であった。光学顕微鏡下では通常の正累帯構造を持つザクロ石と区別することはできなかった。1 型と 2 型の両方を含む試料中のザクロ石は, いずれも二重の正累帯構造を示した。

セクター型累帯構造とは, 同心円状の構造を持たないもので, 化学組成が一定となる成長面を持たなかったと考えられる。セクター型累帯構造は,

前述の明らかに細粒なザクロ石群にのみ見られた。

ひとつの試料に含まれるザクロ石の累帯構造は, セクター型を除けば, 一重, 二重の正累帯構造のいずれか一方で, 混在することはなかった(表 1)。また, 同一試料に含まれる二重の正累帯構造を持つザクロ石は, ほとんどが中心から縁にかけて同一の化学組成変化をたどった。ただし, 1 型と 2 型の両方のザクロ石を含む試料では, 1 回目の成

表 1 ザクロ石の累帯構造のパターン分布。
 正累帯構造 (Normal) と二重の正累帯構造 (Composite) はひとつの試料の中に同時に存在しない。* はそれらの正累帯構造のさらに外側に微量な成長が見られることを示す。

Table 1 Distribution of garnet with different zoning patterns. Note that normal zoning and composite zoning do not occur in a single sample.

Sample localities	Sample No.	Normal zoning	Composite zoning (Type 1)	Composite zoning (Type 2)	Sector zoning	
<u>Locality 1</u>	F2202				y	
	F2204	y			y	
	F2205	y				
	F2206	y*			y	
	F2208	y				
	F2210	y				
	F2211	y*			y	
	F2212	y				
	F2213	y				
	F2301	y*				
	F2302	y				
	F2303	y*			y	
	F2304	y				
	F2305	y*			y	
	F2401			y*		y
	F1702			y		
	F1701			y		
95J10			y			
<u>Locality 2</u>	F0201	y*				
	F0202	y*				
	F0203	y*				
	F0302	y				
	F0303	y				
	F0305	y			y	
	F0401		y		y	
	F0601				y	
	F0702	y				
	F0801		y		y	
	F1001	y*			y	
	F1201	y				
	F1302	y				
	F1401	y*			y	
	F1402	y*				
	F1403	y*				
	F1602	y*				
	F1603	y				
	F2801		y	y		
F2803		y*	y	y		
F2903		y				
F3201		y				
F3302		y				

* Minor growth at the outermost rim of normal or composite zoning.

長については図4に示すように2型のザクロ石の方がパイロープ成分が多い傾向があった。しかし、2回目の成長では、最初のMn成分が大きく増加する部分を除けば、両型の組成経路はほぼ一致した。また1型どうし、2型どうしは、それぞれ同一の化学組成経路をたどっていた。正累帯構造および二重の正累帯構造を持つザクロ石の一部には、最外縁部に非常に薄い(厚さ20~30ミクロン)3回目の結晶成長の痕跡がある。そこではMnが再び不連続に増加し、縁に向かって急速に減少する。

IV. 温度圧力履歴

1) 化学平衡の認定

一重あるいは二重の正累帯構造を持つザクロ石は、互いに同一試料中に共存せず、同一試料中では中心から外縁部まで同じ化学組成経路を残していた。したがって、これらのザクロ石は、それぞれの環境においてマトリクス鉱物と化学平衡を保ちつつ成長してきたと考えられる。よって、化学平衡論から温度圧力経路を導き出すことが可能である。ただし、1型、2型の両方のザクロ石を含む試料については、1回目の成長時の化学組成が試料内で同一でなく、共存する鉱物が変わるなどした可能性があるため、本稿では温度圧力の見積りに用いない。また、セクター型累帯構造は非平衡結晶成長とされ、逆解析は不可能である。Inui and Toriumi (2002) は、正累帯構造の最外縁部に見られる微量成長部分の化学組成が、セクター型累帯構造のザクロ石と一致することから、セクター型累帯構造が形成されたのは正累帯構造が形成された時期より後であることを示した。すなわち、正累帯構造の外側の微量成長については非平衡成長の可能性があるため、本稿ではこの部分を用いない。以下、ザクロ石の最外縁部とは、正累帯構造の外側の微量成長を除いた最外縁部を指す。

逆解析を行うために、以下の鉱物組み合わせを持つ試料を選んで分析を行った：ザクロ石、白雲母、緑レン石、緑泥石、曹長石、パラゴナイト、石英、場合によって黒雲母、である。一重の正累帯構造のザクロ石を含む試料のうち7つと、二重

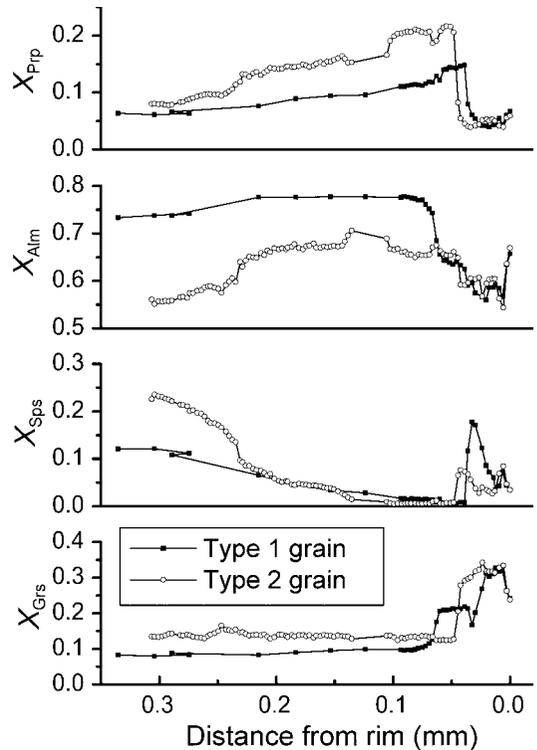


図4 ひとつの試料に共存する1型および2型の二重の正累帯構造を持つザクロ石の化学組成プロファイル。

1回目の成長では2型のザクロ石のパイロープ成分が高いが、外縁部付近の2回目の成長はほぼ同じ化学組成経路を示す。

Fig. 4 Compositional profile of garnet from the core (left) to the rim (right) of type 1 and type 2 grains in sample F2803.

Type 2 grains contain more pyrope during the first growth. Note that the two types have similar chemical compositions after the second Mn maximum toward the rim.

の正累帯構造のザクロ石を含む試料のうち3つが、光学顕微鏡下で認定不可能であるパラゴナイトを除き、要求される鉱物組み合わせを満たしていた。マトリクス中のパラゴナイトはEPMAによって5試料で確認された。白雲母、緑泥石、緑レン石、パラゴナイトおよび石英の包有物が、一重の試料F2302, F0201, F0702, F1401, F1403および二重の試料F2903およびF3201中のザクロ石に見られ、成長途中にそれらの鉱物がマトリ

クス中に存在していたことを示していた。曹長石の包有物はほとんど見つからなかったが、曹長石は三波川変成帯の泥質岩中に広く含まれることが知られている（たとえば、東野, 1975）ため、常に存在したと仮定した。

流体相としては水のみを考慮し、水は常に存在していたと仮定した。昇温期変成作用で進行するのは主に脱水反応であるため、水の存在を仮定することは妥当と考えられるが、流体相の中には Goto *et al.* (2002) が指摘したようにいくらかの CO₂ も実際には存在した可能性が高く、このことの影響については後述する。温度圧力経路の見積もりに用いたギブス法は、差分系を扱う手法であるため、水の分圧の絶対値はあまり影響しないと思われる。

2) 最終到達温度圧力

まず、地質学的温度圧力計を用いてザクロ石の外縁部が形成された時の最終到達温度圧力を推定した。ザクロ石の外縁部と化学平衡にあった黒雲母、白雲母の化学組成としては、それぞれの核に残された Mg に富む部分が、ザクロ石と化学平衡にあった時期の化学組成を保持している可能性が高いと判断し、その部分の値を用いた。黒雲母、白雲母は一般にザクロ石が成長するにつれて Mg に富むようになるが、現在観察される試料では外縁部の方が Mg に乏しく、これは後退変成作用の影響と考えられるからである。実際にはより Mg に富む外縁部が存在した可能性が高く、したがって本稿の見積もり温度は上限値と解釈できる。緑レン石については、外縁部の化学組成を用いた。まず、圧力を 0.9 GPa と仮定してザクロ石 黒雲母温度計 (Gessmann *et al.*, 1997) を適用した結果は 515 ± 30 であった (図 5-a)。Gessmann *et al.* (1997) は Fe-Mg ザクロ石でモデル化しているため、4 成分系のザクロ石を考慮するために Ganguly *et al.* (1996) のザクロ石の活動度モデルを挿入した。黒雲母を含む試料は一部だけであったため、白雲母 ザクロ石温度計 (Hynes and Forest, 1988) を全試料に適用し、対象地域内で大きな変動がないことを確認した (図 5-b)。斜長石が灰長石成分をほとんど含まないため、圧力の推

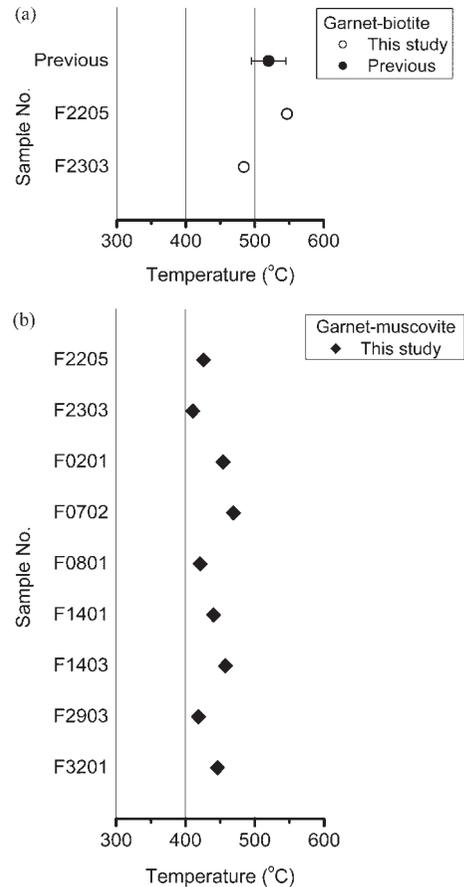


図 5 ザクロ石外縁部における温度の推定。

(a) ザクロ石 黒雲母温度計 (Gessmann *et al.*, 1997) の適用結果。
“Previous” は Enami *et al.* (1994) の結果を示す。

(b) ザクロ石 白雲母温度計 (Hynes and Forest, 1988) の適用結果。

Fig. 5 Temperatures deduced for garnet rim.

(a) Results obtained with garnet-biotite geothermometer (Gessmann *et al.*, 1997), shown with the previous result by Enami *et al.* (1994).

(b) Results obtained with garnet-muscovite geothermometer (Hynes and Forest, 1988)

定にはザクロ石と緑レン石、パラゴナイトを含む次の反応式に、Ganguly *et al.* (1996) によるザクロ石の活動度モデルと Holland and Powell (1998) による鉱物の熱力学的データ等を適用し

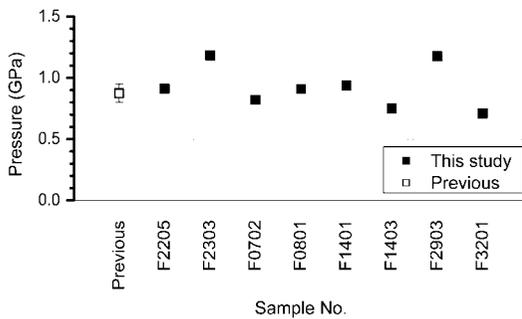
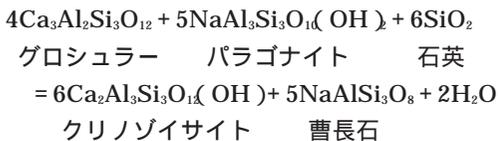


図 6 ザクロ石外縁部における圧力の推定。反応式は本文を参照。“Previous”は Enami *et al.* (1994) の結果を示す。

Fig. 6 Pressures deduced for garnet rim. See text for the reaction used. “Previous” shows the result by Enami *et al.* (1994).

た。水の分圧は岩石の圧力と同じとした。



温度 520 °C において推定された圧力は 0.8–1.0 GPa を中心に比較的ばらついた (図 6) が、求められた最終到達温度圧力は、曹長石–黒雲母帯についての従来の見積もり約 520 °C, 0.9 GPa (Enami *et al.*, 1994: 緑泥石–ザクロ石および黒雲母–ザクロ石温度計と、Na 輝石の化学組成による) と矛盾しなかった。なお、近年指摘されているように (Goto *et al.*, 2002) 流体相中にいくらかの CO₂ が存在したならば、圧力の見積もりは高くなるため、図 6 は圧力の下限值である。仮に水の分圧を岩石の圧力の 90% とすると、算出される圧力は図 6 の値よりも 0.1 GPa 未満高くなる。

3) 温度圧力経路

成長過程での温度圧力経路を、ギブス法 (Spear and Selverstone, 1983; Spear, 1993) によって推定した。ギブス法は逆解析手法のひとつで、一連の熱力学的方程式によって系の化学平衡をすべて記述し、それらの方程式の微分系を解く

ことによって解を得る。すなわち、ギブス法で求められるものは、ある状態から別の状態に (本稿の場合は、ザクロ石の化学組成がある値から別の値に) 移行した時の温度圧力等の変化量である。この手法を適用するための前提として、考慮したすべての相が常に互いに化学平衡状態にあったと仮定できなければならない。

ザクロ石の包有鉱物から、黒雲母、白雲母、緑泥石、緑泥石、斜長石、パラゴナイト、石英、がマトリクス鉱物としてザクロ石の成長中に平衡関係にあったことが確認できた。ただし黒雲母については、初めて包有鉱物として出現した後 (ザクロ石で言うと外側) のみ系に含めることとした。このとき、必要な系成分は Fe₂O₃-MnO-Na₂O-CaO-K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O の 10 成分であり、鉱物種すなわち相の数が 9 (8) であるので、系の熱力学的自由度は相律によって 10 - 9 + 2 = 3 (10 - 8 + 2 = 4) となる (かっこ内は黒雲母を含まない系の場合)。計算で用いた全端成分のリストを表 2 に示した。ザクロ石は 4 成分系の固溶体であるため、3 つの独立な成分を持つ。したがって、黒雲母を含む系では、ザクロ石の濃度変化を与えれば温度圧力変化を算出することができた。黒雲母を含まない系では、斜長石の化学組成を固定して自由度を 3 とした。斜長石中の灰長石成分が常に非常に少ないので、この仮定は妥当と思われる。ある系における独立な化学反応式の数は、(端成分の数) - (系成分の数) で求められる。端成分の数が 22 (18) であることから、独立な化学反応式の数は 12 (8) である。化学反応式の組み合わせは何通りも考えられるが、本稿の計算で用いた反応式の一覧を表 3 に示した。端成分の熱力学的特性は Holland and Powell (1998) のデータセットから適用した。水のフガシティは Holland and Powell (1990) の多項式で表した。活動度モデル等をまとめたのが表 4 である。Holland and Powell (1998) のデータセットで指定されていないものについては、最近の研究成果から適用している (ザクロ石: Ganguly *et al.*, 1996; 緑泥石: Holland *et al.*, 1998; 曹長石: Maruyama *et al.*, 1982; Inui and Toriumi,

表 2 逆解析で用いた鉱物および端成分の化学式。
略号はできるだけ Kretz (1983) に基づく。

Table 2 Chemical formulae and abbreviations of the phase components used in the differential thermodynamic calculation. Abbreviations follow Kretz (1983) wherever possible.

Phase	End-member	Formula unit
Garnet(Grt)	Pyrope(Prp)	$Mg_3Al_2Si_3O_{12}$
	Almandine(Alm)	$Fe_3Al_2Si_3O_{12}$
	Spessartine(Sps)	$Mn_3Al_2Si_3O_{12}$
	Grossular(Grs)	$Ca_3Al_2Si_3O_{12}$
Biotite(Bt)	Phlogopite(Phl)	$KMg_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$
	Eastonite(Eas)	$KMg_2Al_3Si_2O_{10}(OH)_2$
	Annite(Ann)	$KFe_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$
	Mn-biotite(Mnb)	$KMn_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$
Muscovite(Ms)	Muscovite(Ms)	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$
	Celadonite(Cel)	$KMgAlSi_3O_{10}(OH)_2$
	Fe-celadonite(Fec)	$KFeAlSi_3O_{10}(OH)_2$
Paragonite(Pg)		$NaAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$
Chlorite(Chl)	Clinochlore(Cln)	$Mg_5Al_2Si_5O_{16}(OH)_2$
	Amesite(Ame)	$Mg_4Al_4Si_2O_{16}(OH)_2$
	Daphnite(Dph)	$Fe_5Al_2Si_5O_{16}(OH)_2$
	Mn-chlorite(Mnc)	$Mn_5Al_2Si_5O_{16}(OH)_2$
Epidote(Ep)	Clinozoisite(Czo)	$Ca_2Al_3Si_3O_{14}(OH)_2$
	Pistacite(Ptc)	$Ca_2Fe^{3+}Al_2Si_3O_{14}(OH)_2$
Plagioclase(Pl)	Albite(Ab)	$NaAlSi_3O_8$
	Anorthite(An)	$CaAl_2Si_2O_8$
Quartz(Qtz)		SiO_2
Water		H_2O

2002)

ザクロ石の結晶内に近接して包有されている鉱物の化学組成を測定し、近傍のザクロ石の化学組成とともに、初期値として用いた。前述したように、マトリクス中の鉱物の化学組成は部分的に後退変成作用により変化していると考えられるため、より確実を期して包有物の値を用いた。鉱物組成の初期値の例を表 5 に示した。粒径が小さく包有鉱物がほとんどない一部の試料では、類似の累帯構造を持つザクロ石の初期値を流用した。温度圧力条件の初期値は、前項で見積もったとおり、最終的にザクロ石の最外縁部において温度圧力が 520 °C、0.9 GPa 付近に到達するようにフィード

バックを繰り返して決定した。

推定された温度圧力経路が図 7 である。正累帯構造のザクロ石は、単調な温度圧力上昇を示した (図 7a)。二重の正累帯構造のザクロ石は、1 回目の成長は温度・圧力ともに上昇したことを示しており、その後、結晶形が不規則に分解した間に温度が下がり (試料 F2903 では圧力も)、2 回目の成長で温度圧力ともに再び上昇していた (図 7b)。温度上昇に対する圧力の上昇率 dP/dT は、正累帯構造では 0.3-0.4 GPa/100 °C であった。二重の正累帯構造では、1 回目の成長の際に約 0.3 GPa/100 °C、2 回目の成長時には 0.4 GPa/100 °C に近く、2 回目の成長において圧力上昇率

表 3 逆解析で用いた反応式の一覧。

Table 3 Chemical reactions formulated in the inversion in this study.

<Biotite-bearing system>	
Net transfer reaction	
(1)	$2 \text{Phl} + \text{Ms} + 6 \text{Qtz} = \text{Prp} + 3 \text{Cel}$
(2)	$\text{Pg} + 2 \text{Czo} + 2 \text{Qtz} = \text{Ab} + 4 \text{An} + 2 \text{Water}$
(3)	$\text{Ame} + \text{Cln} + 4 \text{Qtz} = 3 \text{Prp} + 8 \text{Water}$
(4)	$\text{Phl} + 2 \text{Pg} + 3 \text{Qtz} = \text{Prp} + \text{Ms} + 2 \text{Ab} + 2 \text{Water}$
(5)	$4 \text{Grs} + 5 \text{Pg} + 6 \text{Qtz} = 6 \text{Czo} + 5 \text{Ab} + 2 \text{Water}$
Exchange reaction	
(6)	$\text{Phl} + \text{Ms} = \text{Eas} + \text{Cel}$
(7)	$\text{Sps} + \text{Ann} = \text{Alm} + \text{Mnb}$
(8)	$5 \text{Sps} + 3 \text{Dph} = 5 \text{Alm} + 3 \text{Mnc}$
(9)	$\text{Alm} + \text{Phl} = \text{Prp} + \text{Ann}$
(10)	$5 \text{Alm} + 3 \text{Cln} = 5 \text{Prp} + 3 \text{Dph}$
(11)	$\text{Alm} + 3 \text{Cel} = \text{Prp} + 3 \text{Fec}$
(12)	$\text{Phl} + \text{Ame} = \text{Eas} + \text{Cln}$
<Biotite-free system>	
Net transfer reaction	
(1)	$\text{Pg} + 2 \text{Czo} + 2 \text{Qtz} = \text{Ab} + 4 \text{An} + 2 \text{Water}$
(2)	$4 \text{Grs} + 5 \text{Pg} + 6 \text{Qtz} = 6 \text{Czo} + 5 \text{Ab} + 2 \text{Water}$
(3)	$\text{Ame} + \text{Cln} + 4 \text{Qtz} = 3 \text{Prp} + 8 \text{Water}$
(4)	$2 \text{Pg} + 3 \text{Dph} + 6 \text{Qtz} = 5 \text{Alm} + 2 \text{Ab} + 14 \text{Water}$
Exchange reaction	
(5)	$5 \text{Sps} + 3 \text{Dph} = 5 \text{Alm} + 3 \text{Mnc}$
(6)	$5 \text{Alm} + 3 \text{Cln} = 5 \text{Prp} + 3 \text{Dph}$
(7)	$\text{Alm} + 3 \text{Cel} = \text{Prp} + 3 \text{Fec}$
(8)	$\text{Cel} + \text{Ame} = \text{Ms} + \text{Cln}$

がより高かった。

V. 議 論

二重の正累帯構造を持つザクロ石は、成長途中で一度分解したような組織を示している。このことは一見、連続的な計算が不可能なようでもある。しかし、今回のギブス法の要件は、想定した鉱物がすべて存在して互いに化学平衡を保っていることだけであり、その鉱物が成長したか消費されたかは考慮しない。ザクロ石が分解しても、分解組織の直前と直後にザクロ石の表面が他のマトリクス鉱物と化学平衡を保っていさえすれば、設定し

た化学平衡の方程式はすべて成立し、計算は有効となる。ただし、分解していた間の温度圧力経路は制約することができない。また、2回目の成長開始時に極端な Mn の増加が見られる試料では、その部分にも不確実な要素が残る。あまりにも Mn に富むザクロ石の化学組成は、Holland and Powell (1998) で緑泥石などの Mn 成分の熱力学的特性を決定する際に想定された組成範囲をはずれ、計算結果が不正確になり得るからである。2回目の成長開始直前に推測されるような物理的混合を伴う岩石流動があったとすれば、化学的に非平衡な現象が起きる可能性もある。極端な Mn の

表 4 逆解析で用いた，端成分のモル分率および活動度モデルの定式化．

Table 4 List of formulations to obtain mole fractions and activities for mineral end-members.

End-member	Mole fraction(X_i)	Activity(a_i) ideal part)	Activity (a_i) (nonideal part)
Prp	(Mg/(Mg + Fe + Mn + Ca))	(X_{Prp}) ^Y	$W_{Fe-Mg} = 0.8$ kJ/mol (Holland and Powell, 1998)
Alm	(Fe/(Mg + Fe + Mn + Ca))	(X_{Alm}) ^Y	Other Ws from Ganguly et al. (1996)
Sps	(Mn/(Mg + Fe + Mn + Ca))	(X_{Sps}) ^Y	
Grs	(Ca/(Mg + Fe + Mn + Ca))	(X_{Grs}) ^Y	
Phl	$1 - X_{Eas} - X_{Ann} - X_{Mnb}$	$1/4 \cdot \{ (3X_{Phl} + 2X_{Eas}) (3 - X_{Eas}) \}^Y \cdot X_{Eas}^*(1 + X_{Eas})^Y$	Symmetric regular solution model, Ws from Holland and Powell (web)
Eas	Al - (4 - Si)	$\{ (3X_{Phl} + 2X_{Eas}) (3 - X_{Eas}) \}^Y \cdot X_{Eas}^*(1 + X_{Eas})^Y$	
Ann	(Fe/(Mg + Fe + Mn)) (3 - X_{Eas})/3	$\{ 3X_{Ann} / (3 - X_{Eas}) \}^Y \cdot (1 - X_{Eas})^Y \cdot (1 + X_{Eas})$	
Mnb	(Mn/(Mg + Fe + Mn)) (3 - X_{Eas})/3	$\{ 3X_{Mnb} / (3 - X_{Eas}) \}^Y \cdot (1 - X_{Eas})^Y \cdot (1 + X_{Eas})$	
Ms	Al - (4 - Si) - 1	(X_{Ms}) ^Y (2 - X_{Ms})	Ideal mixing (Holland and Powell, 1998)
Cel	(Mg/(Mg + Fe)) (1 - X_{Ms})	$1/4 \cdot X_{Cel}^*(2 - X_{Ms})^Y$	
Fec	(Fe/(Mg + Fe)) (1 - X_{Ms})	$1/4 \cdot X_{Fec}^*(2 - X_{Ms})^Y$	
Cln	$1 - X_{Ame} - X_{Dph} - X_{Mnc}$	$\{ (5X_{Cln} + 4X_{Ame}) (5 - X_{Ame}) \}^Y \cdot (1 - X_{Ame})^Y \cdot (1 + X_{Ame})$	Symmetric regular solution model, Ws from Holland and Powell (web)
Ame	Al - (4 - Si) - 1	$1/4 \cdot \{ (5X_{Cln} + 4X_{Ame}) (5 - X_{Ame}) \}^Y \cdot X_{Ame}^*(1 + X_{Ame})^Y$	
Dph	(Fe/(Mg + Fe + Mn)) (5 - X_{Ame})/5	$\{ 5X_{Dph} / (5 - X_{Ame}) \}^Y \cdot (1 - X_{Ame})^Y \cdot (1 + X_{Ame})$	
Mnc	(Mn/(Mg + Fe + Mn)) (5 - X_{Ame})/5	$\{ 5X_{Mnc} / (5 - X_{Ame}) \}^Y \cdot (1 - X_{Ame})^Y \cdot (1 + X_{Ame})$	
Czo	$1 - Fe^{3+}$	$1 - Fe^{3+}$	Ideal mixing (Holland and Powell, 1998)
Ptc	Fe^{3+}	Fe^{3+}	
Ab	Na(Na + Ca)	Na(Na + Ca)	$W_{Ab-An} = 26$ kJ/mol
An	Ca(Na + Ca)	Ca(Na + Ca)	(Inui and Toriumi, 2002)
Water	1	Fugacity polynomial from Holland and Powell (1990)	

表 5 用いた鉱物の化学組成(モル分率)の例(試料 F2205)。

Core : ザクロ石の中心部, A : ザクロ石中のある点 A とその付近に包有される鉱物, B : ザクロ石中の別のある点 B とその付近に包有される黒雲母 (B 点の方が外縁部に近い), Rim : ザクロ石の外縁部。

Table 5 Mole fractions of garnet and other mineral end-members included in garnet.

Sample No. : F2205. Core: garnet core, A : garnet and inclusion minerals at point A within the grain, B : garnet and inclusion biotite at point B within the same grain (point B is nearer to the rim), Rim : garnet rim.

		Core	A	B	Rim
Grt	X_{Fsp}	0.022	0.041	0.044	0.063
	X_{Alm}	0.45	0.62	0.64	0.68
	X_{Sps}	0.27	0.011	0.008	0.004
	X_{Grs}	0.27	0.33	0.31	0.25
Bt	X_{Phl}			0.069	
	X_{Eas}			0.47	
	X_{Ann}			0.46	
	X_{Mnb}			0.004	
Ms	X_{Ms}		0.55		
	X_{Cel}		0.29		
	X_{Fec}		0.16		
Pg	X_{Pg}		0.97		
Chl	X_{Cln}		0.20		
	X_{Ame}		0.31		
	X_{Dph}		0.49		
	X_{Mnc}		0.001		
Ep	X_{Zno}		0.55		
	X_{Ptc}		0.46		
Pl	X_{Ab}		0.99		
	X_{An}		0.010		

増加を持つ試料 F2903 が示した分解前後での圧力の減少はこれらの影響とも考えられる。いずれにしても、前述の理由により、平衡成長が連続していない部分をまたいでギブス法の計算を継続させても問題はないと判断される。分解の前と後では必然的にザクロ石の化学組成の変化量が大きくなり、ギブス法は微分系の一次の項までしか用いないため、与える変化量が大きいと誤差が大きくな

ることが予想されるが、温度圧力変化の方向は妥当と考えられる。

通常正累帯構造を示すザクロ石が、単調な温度圧力上昇のもとでの成長のみを記録していたことから、三波川変成帯の泥質岩は一般に昇温期変成作用の過程では沈み込み続けていたと考えられる。推定された圧力上昇率も 0.3-0.4 GPa/100 以上と高かったことから、三波川変成帯の原岩は沈み込み初期の段階で、想定されてきたよりも高温であった可能性がある。このモデルは、変成帯の上昇(減圧)期まで温度上昇が継続していたとする従来の推定結果 (Enami *et al.*, 1994; Enami 1998) とは異なる。この差違は、岩石の系全体を取り扱うか、系の一部分を取り出して検討するかのちがいで生じた。特定の反応式を取り出して検討する従来の方法では、自由度を下げるために一部の鉱物の化学組成を固定するなどの工夫を必要とした。しかし、本稿の逆解析は系を制約する反応式すべてを解くので、とくに Ca 成分に関わるいくつかの鉱物について化学組成を仮定する必要がなくなる。圧力に影響しやすいグロシユラー成分の影響が従来と異なると考えられる (Inui and Toriumi, 2002)。

一方、二重の正累帯構造は、間に温度が下降する時期をはさんで 2 回の温度圧力上昇期を示すことがわかった (図 8)。すなわち、五良津東部岩体付近の一部の泥質岩だけは、冷却(+減圧)によって成長が中断されたと考えられる。2 回の成長時期の圧力上昇率は通常正累帯構造と同様に高かった。ザクロ石成長の中断期の状況を示すと考えられるのが、1 型、2 型の両方のザクロ石を含む試料である。1 回目の成長においてのみ型毎に異なる化学組成経路を持つことから、それらのザクロ石は 1 回目は別々の環境(マトリクス)の中で成長したことになる。そして、成長が中断、分解した後、同一の環境におかれて再び成長を開始した。このような現象を実現するには、物理的にかき混ぜられたと考えるのが自然である。1 型 2 型が共存する試料にはギブス法を適用することが困難であるため、それらの試料はあくまでも定性的に物理的混合を示唆しているに過ぎない。しか

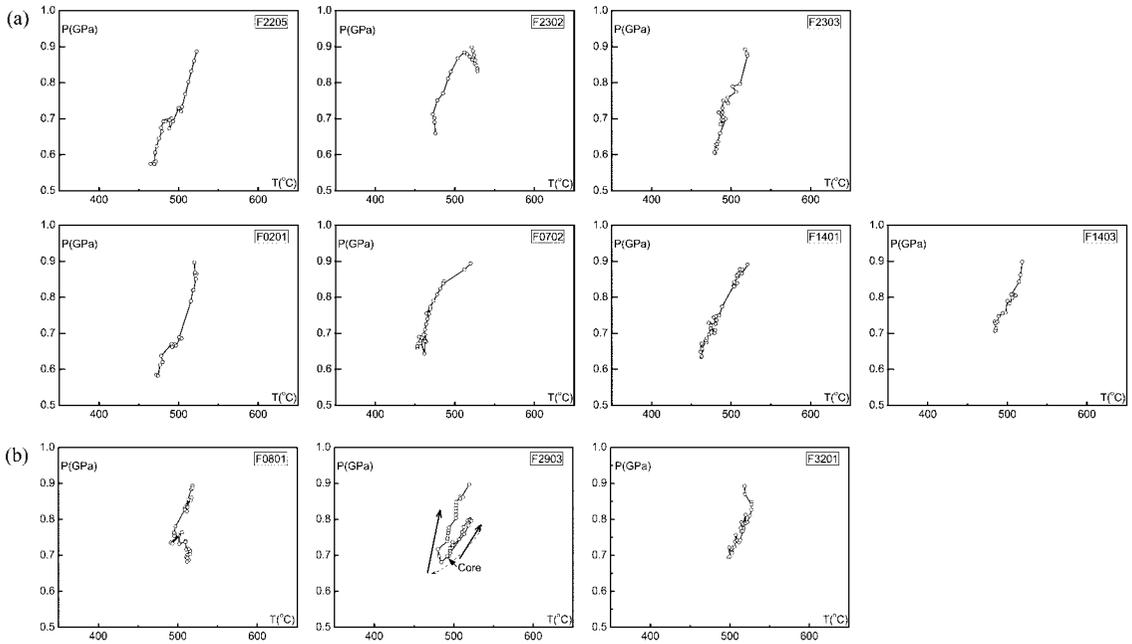


図 7 ザクロ石の逆解析によって推定された温度圧力履歴。
 (a) 正累帯構造のザクロ石が示す履歴。(b) 二重の正累帯構造のザクロ石が示す履歴。
 Fig. 7 Calculated P-T paths of garnet with (a) normal and (b) composite zoning.

し、二重の正累帯構造のパターンはいずれの試料も類似しているため、温度が低下しザクロ石の成長が中断した時期と、岩石流動が起きた時期が同じであり、同じ何らかの出来事に起因すると考えることに無理はない。そして、二重の正累帯構造のザクロ石が五良津東部岩体付近にのみ産することを考え合わせると、その出来事を泥質変成岩と五良津東部岩体とが接したことと関連づけても大きな矛盾はないと思われる。中断の後 2 回目の成長が起こり、その到達温度圧力が他の三波川変成岩と変わらないと考えられること、2 回目の温度圧力経路もまた圧力上昇率が高いことから、その出来事があった時点では三波川変成帯全体がまだ温度圧力上昇の途上にあったと解釈することができる。すなわち、五良津東部岩体と三波川変成帯の泥質岩とは沈み込みながら接することになったと考えられる。それらが接して泥質岩が何らかの影響を受けた後、系全体が沈み込みを続け、温度が上昇してザクロ石が再び成長に転じたと考えら

れる。変はんれい岩体と三波川変成岩とが沈み込む過程ですでに接していたとする点は Ota *et al.* (2004) のモデルと整合的である。

二重の正累帯構造については過去にも検討されている。Takasu (1986) によって報告されたザクロ石は、本稿の試料と同様に、二回の成長の間に分解した痕跡があるもので、瀬場谷変はんれい岩体の近傍の泥質岩中に見られた。Takasu (1986) は、ザクロ石が 2 回目に成長するための熱源を貫入した瀬場谷岩体に求めたが、地下深くで上昇貫入した岩体がどれほどの接触変成作用を生じさせることができるのか等、メカニズムが不明であった (Aoya, 1998)。さらに、本稿の結果によれば、ザクロ石の 1 回目の成長が終了した時よりも 2 回目の成長開始時の方が温度が低かったと考えられる。したがって、変はんれい岩体が接した時期と、2 回目の成長が始まった時期とは別であり、後者は三波川広域変成作用の続きと解釈することができる。このような結果のちがいは、1

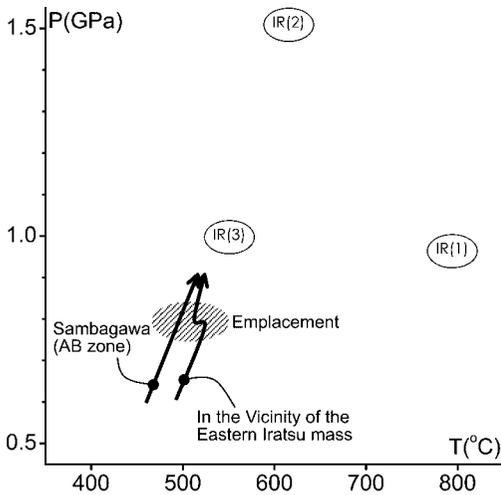


図 8 五良津東部岩体付近の泥質変成岩が示す温度圧力履歴のまとめ。

正累帯構造のザクロ石が三波川の昇温期変成作用の履歴を示すのに対し、二重の正累帯構造は五良津東部岩体と接したことにより成長が中断し特有の履歴を示す。IR は五良津岩体の過去の温度圧力条件であり、数字の順に IR (1): グラニユライト相, IR (2): エクロジャイト相, IR (3): 角閃岩相の変成作用 (または後退変成作用と再平衡) を受けている。

Fig. 8 P-T paths deduced from normal and composite zoning of garnet in the vicinity of the Eastern Iratsu mass.

Normal zoning records the Sambagawa metamorphism where composite zoning records the P-T path disturbed by the juxtaposition of the Eastern Iratsu mass. IR designates the previous P-T conditions of the Eastern Iratsu mass (IR (1): granulite facies, IR (2): eclogite facies, IR (3): amphibolite facies).

回目の正累帯構造の最外縁部(残っている部分の)から2回目の成長開始時にかけて、本稿ではMg/Fe比が減少していたのに対してTakasu(1986)のデータは減少していないことから来ている。おそらく本稿の試料の方が1回目の成長部分を多く残していると考えられる。

温度が低下することはザクロ石の分解とは整合的であるが、温度が下がった原因については明らかではない。五良津東部岩体をはじめとするこの地域の変はんれい岩体等がすべて三波川変成作用以前により高温の変成作用を受けている(Kunugiza et al., 1986)ことを考えると、岩体が

冷たかったという想定はしにくい。三波川変成岩である母岩自体の流動によって温度が異なる部分が接し、一時的に温度圧力分布を乱した可能性がある。

VI. ま と め

三波川変成帯四国中央部別子地域の五良津東部岩体付近において、正累帯構造および二重の正累帯構造を示すザクロ石の温度圧力履歴を逆解析によって推定した。正累帯構造を持つザクロ石は、温度圧力ともに上昇のみを示し、圧力上昇率は0.3-0.4 GPa/100 と高かった。この履歴は、三波川変成作用の温度圧力履歴であると考えられる。また、二重の正累帯構造を持つザクロ石は、やはり圧力上昇率の高い温度圧力上昇の履歴を2回持ち、間に一時期温度が下がり、成長が中断した時期があることがわかった。二重の正累帯構造を持つザクロ石は、五良津東部岩体の近傍にのみ産することから、五良津東部岩体が三波川変成帯に取り込まれたことと、ザクロ石の成長の中断期とは何らかの関係があると考えられた。

謝 辞

多くの方々からの有益な助言がなければこの研究を進めることはできなかったが、とくに東京大学の鳥海光弘教授にはあらゆる点で貴重なご教示をいただき、また本稿を執筆する機会をいただいた。匿名の査読者の的確なコメントにより、本稿は大いに改善された。東京大学の吉田英人氏には、化学分析を行うにあたって多大なるご協力をいただいた。以上の方々には感謝します。

文 献

- Aoya, M. (1998) Thermal calculation for high-pressure contact metamorphism: Application to eclogite formation in the Sebadani area, the Sambagawa belt, SW Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, **160**, 681-693.
- Banno, S., Sakai, C. and Higashino, T. (1986) Pressure-temperature trajectory of the Sambagawa metamorphism deduced from garnet zoning. *Lithos*, **19**, 51-63.
- Enami, M. (1998) Pressure-temperature path of Sambagawa prograde metamorphism deduced from grossular zoning of garnet. *J. Metamorphic Geology*, **16**, 97-106.

- Enami, M., Wallis, S. and Banno, Y. (1994) Paragenesis of sodic pyroxene-bearing quartz schists: Implications for the P-T history of the Sanbagawa belt. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **116**, 182-198.
- Ganguly, J., Cheng, W. and Tirone, M. (1996) Thermodynamics of aluminosilicate garnet solid solution: New experimental data, an optimized model, and thermometric applications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **126**, 137-151.
- Gessmann, C.K., Spiering, B. and Raith, M. (1997) Experimental study of the Fe-Mg exchange between garnet and biotite: Constraints on the mixing behavior and analysis of the cation-exchange mechanisms. *Amer. Mineralogist*, **82**, 1225-1240.
- Goto, A., Banno, S., Higashino, T. and Sakai, C. (2002) Occurrence of calcite in Sanbagawa pelitic schists: Implications for the formation of garnet, rutile, oligoclase, biotite and hornblende. *J. Metamorphic Geology*, **20**, 255-262.
- Hara, I., Shiota, T., Hide, K., Okamoto, K., Takeda, K., Hayasaka, Y. and Sakurai, Y. (1990) Nappe structure of the Sambagawa belt. *J. Metamorphic Geology*, **8**, 441-456.
- 東野外志男 (1975) 四国中央部白髪山地方三波川変成帯の黒雲母帯. 地質学雑誌, **81**, 653-670.
- Higashino, T. (1990) The higher grade metamorphic zonation of the Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan. *J. Metamorphic Geology*, **8**, 413-423.
- Holland, T.J.B. and Powell, R. (1990) An enlarged and updated internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: The system $K_2O-Na_2O-CaO-MgO-MnO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2-C-H_2O_2$. *J. Metamorphic Geology*, **8**, 89-124.
- Holland, T.J.B. and Powell, R. (1998) An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *J. Metamorphic Geology*, **16**, 309-343.
- Holland, T., Baker, J. and Powell, R. (1998) Mixing properties and activity-composition relationships of chlorites in the system $MgO-FeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$. *European J. Mineralogy*, **10**, 395-406.
- Hynes, A. and Forest, R.C. (1988) Empirical garnet-muscovite geothermometry in low-grade metapelites, Selwyn Range (Canadian Rockies). *J. Metamorphic Geology*, **6**, 297-309.
- Inui, M. and Toriumi, M. (2002) Prograde pressure-temperature paths in the pelitic schists of the Sambagawa metamorphic belt, SW Japan. *J. Metamorphic Geology*, **20**, 563-580.
- Kretz, R. (1983) Symbols for rock-forming minerals. *Amer. Mineralogist*, **68**, 277-279.
- Kunugiza, K., Takasu, A. and Banno, S. (1986) The origin and metamorphic history of the ultramafic and metagabbro bodies in the Sanbagawa belt. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, **164**, 375-385.
- Maruyama, S., Liou, J.G. and Suzuki, K. (1982) The Peristerite Gap in low-grade metamorphic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **81**, 268-276.
- Ota, T., Terabayashi, M. and Katayama, I. (2004) Thermobaric structure and metamorphic evolution of the Iratsu eclogite body in the Sanbagawa belt, central Shikoku, Japan. *Lithos*, **73**, 95-126.
- Shirahata, K. and Hirajima, T. (1995) Chemically sector-zoned garnet in Sanbagawa schists; Its mode of occurrence and growth timing. *J. Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, **90**, 69-79.
- Spear, F.S. (1993) *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineralogical Society of America, Washington, DC.
- Spear, F.S. and Selverstone, J. (1983) Quantitative P-T Paths from Zoned Minerals: Theory and Tectonic Applications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **83**, 348-357.
- Takasu, A. (1984) Prograde and retrograde eclogites in the Sambagawa metamorphic belt, Besshi district, Japan. *J. Petrology*, **25**, 619-643.
- Takasu, A. (1986) Resorption-overgrowth of garnet from the Sambagawa pelitic schists in the contact aureole of the Sebadani metagabbro mass, Shikoku, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **92**, 781-792.
- Toriumi, M. and Kohsaka, Y. (1994) Cyclic P-T path and plastic deformation of eclogite mass in the Sambagawa metamorphic belt. *J. Faculty of Science, University of Tokyo*, **22**, 211-231.
- Wallis, S. (1998) Exhuming the Sanbagawa metamorphic belt: The importance of tectonic discontinuities. *J. Metamorphic Geology*, **16**, 83-95.
- Wallis, S. and Aoya, M. (2000) A re-evaluation of eclogite facies metamorphism in SW Japan: Proposal for an eclogite nappe. *J. Metamorphic Geology*, **18**, 653-664.

(2004年6月30日受付, 2004年9月9日受理)