# 境界変成岩の温度・圧力・脱水量経路と 沈み込むプレート境界の力学的結合

鳥海光弘\*

# Pressure-Temperature-Water Production Rate Paths of Boundary Metamorphic Rocks and Mechanical Coupling between Subduction Slab and Island Arc Crust

Mitsuhiro TORIUMI \*

### Abstract

Boundary metamorphic rocks as exemplified by Sanbagawa metamorphic rocks have chemical records accompanied by physical processes in garnet and amphiboles. Garnet showing chemical zoning from core to rim grew during prograde metamorphism, which is the process of boundary rock subduction, and the pressure-temperature-water production rate path can be precisely determined by the modified differential thermodynamic method with the volume fraction of garnet. The results of the paths can be discussed in a dynamic system involving mechanical coupling between slab and arc crust, thermal interaction, and dehydration reaction, suggesting that mechanical coupling is weakend by a dehydration reaction.

Key words: P-T-Water path , metamorphic rocks , subduction boundary , dehydration reaction , mechanical coupling

キーワード:温度・圧力・脱水量経路,変成岩,沈み込み境界,脱水反応,力学結合

## I.はじめに

自然地震および人工音源によるマルチチャンネ ル地震探査を用いた反射法および屈折法によるプ レート境界の構造探査研究では驚くほど細部にわ たる構造が観測にかかるとともに,*Vs*および*Vp* の変化とそれらの比の変化に関する大変興味ある 事実が発見されはじめた(Kodaira *et al.*, 2000, 2004; Zhao *et al.*, 2000; Kasahara *et al.*, 2001; Park *et al.*, 2002; Tsuru *et al.*, 2002; Nakanishi *et al.*, 2002)(図1)。そのなかでも岩石の状態を 示していると考えられる地震波速度の急減する部 分の上面に,地震波の強い反射面が南海トラフや 日本海溝から沈み込むスラブとの境界面にそって 発見されたことであろう(Kodaira *et al.*, 2000; Kasahara *et al.*, 2001; Park *et al.*, 2002; Miura *et al.*, 2003)。このような反射面はスラブ上面から ほぼ2km程度離れており, Miura *et al.*(2003) によればその水平的拡がりは10 30km程度と なっている。そしてその深度は足摺岬沖から東海

<sup>\*</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科 / 海洋科学技術研究機構, 固体地球進化研究センター

<sup>\*</sup> Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo and IFREE, Japan Marine Science Research and Developing Organization



# Off Fukushima

図 1 紀伊半島沖(南海トラフ)と福島沖(日本海溝)における MCS による精密地下構造断面図.

Fig. 1 Poststack depth migrated section of MCS profiles off Kii (top: Kodaira *et al.*, 2000) and off Fukushima (bottom: Tsuru *et al.*, 2002) lines from the trench.

沖では浅いところで 10 20 km 程度,深いところ では紀伊半島直下で約 30 40 km である。日本海 溝沿いでは十勝沖や仙台沖,福島沖では約 30 40 km ほどの深さに位置している。反射面からスラブ 上面までの厚さは約 2 km であり(Miura et al., 2003),この部分の Vp と Vs がともに減少し,そ の比は大きくなることから,この挟まれた部分の 地震波速度変化は,その空間的な拡がりから岩石 が局所的に異なるものとして考えるか,または岩 石が同種でも,そのなかに適当な量比で液体,こ こでは岩石の温度条件を考えると水溶液を含んで いることによると考えるのが合理的であろう (Yamasaki and Seno, 2003; Kodaira et al., 2004)。

こうした反射体 低速度・高ポアッソン比体はし

ばしば境界型地震のアスペリティ,またはコサイ スミックスリップとは相反的な場合と,逆にアス ペリティと重なっている場合がある(Kasahara *et al.*, 2001; Miura *et al.*, 2003)。岩石が異なる 場合でも,このような物性的な変化を起こさせる には,結晶粒子間やクラックなどに水などの流体 相が有限量含まれていることによる力学的不安定 性の発生が必要である。

最近になって流体の移動によって引き起こされ たと考えられた低周波微動とよばれるシグナルが 多数発見されはじめた。その低周波微動は四国か ら紀伊半島,東海地域の南海トラフから沈み込ん でいるスラブの上面からマントルにかけての深さ 30 40 km 程度で発生している(Obara, 2002)。 この深度はほぼ温度 400 と推定されているため, この論文で扱う変成作用の温度・圧力範囲と一致 し,流体の発生・移動と変成作用という命題から はきわめて興味ある事柄である。これと類似した 微動発生は北米西岸のカスケイディアでも発見さ れた(Rogers and Dagard, 2003)。ここでも深さ 30 40 km であり,推定される温度も400 と同様 である。面白いことにはカスケイディアでは GPS 測位で観測される1年周期の地盤低下のあとの急 激な地盤上昇の時期に一致してこの微動やプレー ト境界型地震が起こることである。それらの現象 から,境界における岩石の力学的変化が脱水変成 作用とカップリングしており,そのようなカップ リングが境界型地震を起こす力学的不安定性と 関連していると思われる(Seno and Yamasaki, 2003)。

また,沈み込むスラブからの脱水反応と力学的 な岩石の強度低下によるプレート内の地震発生と くに日本海溝沿いの2重震発面の原因が焦点をあ つめている(Peacock, 1993; Seno and Yamanaka, 1996; Omori et al., 2002) とくにこのプロセスは スラブのマントル部分における蛇紋石の脱水反応 や海洋地殻における含水鉱物の脱水反応による流 体の発生と上部,つまり沈み込み境界部分への移 動と集積を伴い,このために境界部分での強い地 震波反射面をつくり,また,その部分の力学的不 安定性を発生させる要因となることが容易に推定 されるために大変注目を浴びている (Seno et al., 2001; Hacker et al., 2003; Kodaira et al., 2004 ), 従来プレート内部に水をもたらす原因については いくつかの問題があったが,最近になって沈み込 むスラブ内部の Vp, Vsの低下と Vp/Vs比の増大 が直接観測されて (Miura et al., 2003; Kodaira et al., 2004) もはや沈み込むスラブには均一では ないが水などの流体相が岩石の中に存在すること は疑いえなくなりつつある。こうした流体の存在 はむろんプレートの中に含水鉱物として固定され た水の場合には Vp/Vsの増大はなく、地震波速度 の低下が観測されるのみであろうが,それらの比 の低下が観測されていることは含水鉱物が脱水反 応によって水を放出するのであり,このとき脱水 反応の速度と岩石の実効的な水の移動速度とのバ ランスによるスラブやプレート境界における水な どの流体の集積量が力学的性質や流体の存在形態 に大きな影響を与えると考えられる。とくにプ レート境界で発生する地震のモーメント放出の 大きなアスペリティのサイズ分布や周辺の滑り帯 の存在(Kasahara *et al.*, 2001; Seno and Yamasaki, 2003; Obana *et al.*, 2003),およびその時間 的変化などは, さまざまな大きさを持ち, 流体を トラップできるクラックなどのサイズや方位およ びその分布を決定できる観測や境界変成岩での実 証の予測可能性を示しているといえよう。

ところで,脱水・吸水過程と地震発生とが密接 な関係を持っていることが明らかな沈み込みプ レート境界では, それに沿う温度・圧力構造はプ レート境界の岩石 ここでは境界変成岩とよぶ に記録されている温度・圧力・脱水反応経路その ものであるはずであり,すでに本特集号の冒頭 でも述べたようにその解析が相当進んでいる (Okamoto and Toriumi, 2001, 2004; Toriumi and Inui, 2001; Inui and Toriumi, 2002; Aoya et al., 2003) こうした状況と Peacock and Wang (1999) や Yamasaki and Seno (2003), および Hacker et al. (2003) らによって指摘されたよう に,沈み込みプレート境界における温度・圧力構 造が高温型の南海トラフやカスケイディア (hot boundary)と日本海溝や伊豆マリアナ型の低温型 (cold boundary; cool boundary)に分類され,前 者には特徴的に低周波微動が約400 程度の温度 に達する深さで観測されるが後者にはみられない こと,両者に共通してプレート境界の上部には約 2km 程度の厚さの低速度層および強い地震波反 射面があること (Kodaira et al., 2000; Miura et al., 2003)を考えると,2種のプレート境界にお ける累進的な脱水変成反応 吸水変成反応経路の 差異についての観測的・実証的研究が大変重要で ある。

最近,著者らは境界変成岩で起こる脱水反応を 温度・圧力経路とともに定量的に解析する方法を 明らかにした(Toriumi and Inui, 2001)。解析さ れた温度・圧力範囲は低周波微動が起こっている 南海トラフ沿いのスラブと島弧地殻との境界の温 度・圧力条件とはほぼ一致している。したがって, その変成岩で起こっている脱水・吸水過程および 破壊・クラック形成過程などを定量的に解析する ことができるならば,現在地震波などで観測され ている現行の現象に変成作用が直接関係づけられ ることになり,プレート境界の挙動を知る上でた いへん重要なことと考えられる。従来変成作用と いう地学現象は現在起こっている観測可能な現象 とどのように関係しているのか不明であった。し かし,変成作用に伴う岩石の流動・破壊現象や流 体の発生と移動現象は短時間過程をも含み現在起 こっているプレート境界の現象と対応可能な事柄 なのである。この点から変成岩科学を建設するこ とが必須であろう。

本文では三波川変成作用における脱水量の履歴 を明らかにするとともに,それが変成岩の温度・ 圧力経路およびプレート間の力学結合とどう関係 しているかを明らかにする方法を紹介しよう。三 波川変成作用の概略についてはIsozaki and Itaya (1990)や Enami (1998), Wallis *et al.* (2004)らおよび本特集号の論文を参照していた だきたい。

# II. 変成作用の温度圧力経路と ざくろ石の平衡成長

沈み込み境界にその成因を持つ変成岩は通常海 溝で堆積し,付加体となった砂岩泥岩起源の変成 岩と,海洋地殻とその上部に堆積した堆積岩など の玄武岩質岩石,はんれい岩質岩石,チャート, 泥岩,石灰岩などを起源とする変成岩や,すでに 存在した島弧地殻が削られてプレート境界に沿っ て引きずり込まれた変成岩などから構成されてい る。これらの変成岩は温度・圧力範囲が100 700

,0.1 3 GPa と非常に広い範囲で再結晶したも ので,その温度と圧力に応じて低温・低圧の変成 相で安定なゼオライトや粘土鉱物などから超高 圧・高温の変成岩にコーサイトやダイアモンドな どを含む。なかでも広い範囲の温度・圧力条件で 形成するざくろ石や角閃石はそれぞれ泥質変成岩 と玄武岩質変成岩に普遍的に含まれる。

泥質変成岩のざくろ石は一般的に白雲母,緑泥

石,斜長石,緑廉石,および石英と化学平衡状態 を保持しつつ成長している。低圧力条件の変成作 用では黒雲母や菫青石およびカリ長石などが含ま れる。ざくろ石は広域変成岩では結晶学的には等 価な面である{110)面で成長している。この結果, 菱形24面体をなして,断面では6角形または5 角形をとることが多い。ざくろ石はしばしば顕著 な化学的累帯構造を示し,中心部から外縁部にか けてMnが次第に減少し,Mgが増加,Feは次第 に増加し,最外縁部で減少する。Caは外縁部に向 かい次第が増大し,最外縁部では再び減少する。

多くの研究の結果,こうした化学組成の累帯構 造は,ざくろ石の結晶成長の過程で温度・圧力の 上昇・下降に伴ってつくられたものであるが,600

以上の温度に達した変成岩では結晶成長のとき の化学組成累帯構造は Mn, Fe, Mg, Ca 等の相 互拡散により失われているが,600 以下では相 互拡散による化学組成の変化はほとんど起こらず、 成長したときのざくろ石の周囲にある鉱物と化学 平衡状態にあるときの化学組成を保持しているこ とが明らかにされている(たとえば, Spear, 1993)。 このため,先に述べたようにざくろ石の成長面, {110}に平行な等化学組成面がざくろ石の内部に 残っているので,結晶成長のときの化学組成の変 化に対して,またはあとで述べるように化学組成 から導かれる圧力や温度の変化に対するざくろ石 の成長量変化を読みとることができる。また,成 長の等方性または非等方性についても検討するこ とが可能である。

ここではざくろ石の化学組成累帯構造が変成岩 の温度・圧力履歴のみではなくざくろ石の逐次成 長量(incremental growth rate)およびそれから 導かれる脱水反応により放出された水の量の履歴 (Toriumi and Inui, 2001)とそれに関係した温 度・圧力変化つまり,プレート間力学結合の強度 履歴すら記録していることを示す。

すでに詳細な微分熱力学的方法(Gibbs法)に よるざくろ石や角閃石の化学組成累帯構造から温 度・圧力履歴を決定する方法とその沈み込み境界 における変成帯の典型である三波川変成岩への応 用が示されている(Inui and Toriumi, 2002; Okamoto and Toriumi, 2004)。そこで,詳細は それらの論文に譲るとして,ここでは脱水量変化 が温度・圧力変化およびその経路およびプレート 間力学結合とどのように関係しているかについて, その理論的背景も含めて紹介する。

ざくろ石を含む泥質変成岩は周囲の白雲母,ア ルバイト,緑泥石,パラゴナイト,緑廉石,石英, および水と化学平衡状態で成長する(Toriumi and Nomizo, 2001)。水を主成分とする流体相の 圧力は岩石に加わる圧力と等しいとする。これは クラックの発生により当然影響を受けるが,たか だか10m 程度の長さのクラック(Toriumi and Hara, 1995)では2気圧程度の差しか発生しない であろうから,0.5 GPa 以上の固体圧の条件では 十分にこの近似でよいだろう。ここで解析するの は圧力変化,あるいは温度変化に対するざくろ石 の成長量変化である。したがって,泥質変成岩の 単位体積あたりざくろ石がどのように成長したか というデータが必要である。

ざくろ石の岩石中での体積比を Vt とする。泥質 岩ではこの値は0から0.2程度である。三波川変 成岩のざくろ石帯では 0.01 0.1 であり, オリゴク レース・黒雲母帯では0.1 0.2 程度である。一方 ざくろ石の累帯構造は粒径とどのような関係であ ろうか。スケール不変な関係にあれば比較的簡単 な形で一定の範囲の化学組成のざくろ石の生成量 が単位体積の岩石に対して決定することができる。 実際に Inui and Toriumi (2002)や Sakai et al. (1985)はざくろ石を岩石から取り出して,中心 を通る切断面で化学組成の累帯構造を測定した。 この結果,粒径が変化しても中心部と最外縁部の それぞれの組成が一致し,化学的累帯構造は粒径 で規格化した距離でみると同一のパターンである ことが示された。したがって,ざくろ石の化学組 成の累帯構造はスケール不変であるといえる。こ のことは大きい粒子ほど成長速度が速いことを意 味し,はじめに速い成長速度を持つ粒子は変成作 用の期間中大きい成長速度を持つこととなる。こ れは周囲のざくろ石の主原料である緑泥石におけ る陽イオンの拡散がかかわっていると考えられる。 Toriumi and Nomizo(2001)はざくろ石が温度・

圧力上昇の途中で Mn が増加する逆の累帯構造を 示し,その化学組成の変化幅が粒子の大きさとと もに大きくなることを見出して,その原因を成長 速度が大きい粒子は周囲の緑泥石の拡散帯の濃度 勾配が大きく,速度の小さい粒子は濃度勾配が小 さいためであるとした。実際にざくろ石の成長は その表面で周囲の鉱物と化学平衡にあり,表面か ら離れるところで拡散帯をつくっていると考える のが自然である (Toriumi and Nomizo, 2001)。

いずれにせよ, ざくろ石の粒径と化学組成の累 帯構造にはスケール不変な関係にあることから, 粒径で規格化することによって,岩石の単位体積 あたり,化学組成のある範囲のざくろ石の体積比 は以下のように求めることができる。

$$dVg = r^2 dr$$
  
 $r = l/L$   
 $dVt = Vt dVg$ 

ここで, dVg, dVt, V, rはそれぞれ, 単一ざく ろ石粒子で規格化した, その中のある組成範囲の 体積増分, 岩石の単位体積中のざくろ石の全体積 で規格化したある組成のざくろ石体積の増分, 岩 石の単位体積中のざくろ石の全体積, およびざく ろ石中のある組成を持つ位置の規格化された中心 からの距離である。また, Lと Iはそれぞれ球で 近似したざくろ石の半径と中心からの距離である。

図 2 に示すように,三波川変成岩中のざくろ石 の中心から r の位置にある点と r + dr の点の間の 圧力と温度の変化はすでに微分熱力学的に求めら れていて(Inui and Toriumi, 2002),それぞれ dPと dTであるとする。こうしてざくろ石中にお いて中心部から最外縁部にいたる各点において

(*dT*, *dP*, *dVg*; *r*, *r*+*dr*)

#### が決定される。

Toriumi and Inui (2001) は岩石の単位体積中 の全ざくろ石増加分 *dVt* とその体積のざくろ石を 微分熱力学解析に用いたざくろ石の生成反応によ る岩石の単位体積あたりの脱水量変化 *dVw* との thermal structure of plate boundary



- 図 2 高温型,中間型,そして低温型沈み込みプ レート境界に沿う温度構造と三波川変成岩 にみられる温度・圧力経路.
- Fig. 2 Thermal structures of the hot subduction boundary (Nankai Trough : NT ), intermediate boundary (SK : southern Kyushu ) and cold boundary (NEJ : Northeast Japan ) after Hyndman *et al.*(1997 ) and Yamasaki and Seno (2003 ). The P-T path of the Sambagawa metamorphic rocks is shown as Smpath (Inui and Toriumi, 2002 ).

関係を求めた。実際には生成するざくろ石の化学 組成によって関与する独立反応の割合が異なるた めに多少の変動は発生するが,ここで扱うざくろ 石の組成を考えるとその平均モル体積は110 cc で あり,それだけのざくろ石生成に対して水は平均 2.4 モル放出されるので,水のモル体積18 cc を用 いて,以下のように近似してよい。

 $dVw = 0.39 \ dVt$  $= 0.39 \ Vt \ dVg$ 

したがって,ひとつのざくろ石粒子の中心部から 最外縁部にいたる各点で

(*dT*, *dP*, *dVw*; *r*, *r+dr*)

が決定されたことになる。

*r*から*r* + *dr*にいたる間の経過時間,*dt*を独立に 決定することができるならばざくろ石粒子の各点 で

(dT, dP, dVw, dt; r)

が決定され, ざくろ石の成長速度の絶対値のみな らず, その岩石の *dP/dt*, *dT/dt* および脱水速度 *dVw/dt* が決定されることになる。現在までのと ころは *dt* を直接求めてはいないが, *dt* を除いた データセットからは次のような微分量が求められ る。すなわち,

(dVw/dT, dVw/dP)

である。これらはそれぞれ

 $\frac{dVw}{dT} = (\frac{dVw}{dt})(\frac{dT}{dt})$  $\frac{dVw}{dP} = (\frac{dVw}{dt})(\frac{dP}{dt})$ 

であり、それぞれの速度の比の形をとる。Toriumi and Inui (2001) では dP/dtを一定として dVw/dPから直接脱水速度の履歴を求めた。その 根拠は, dPが dVgに対して小さいことが dP/dtが小さいことであるとすると,プレート境界岩と しての変成岩が周囲の沈み込むスラブや島弧下部 地殻などから熱を供給されるか,反対に吸収され るかであろうから, dTに規則的な変化を与えるだ ろう。しかしそれが見られないので原因は脱水量 にあると考えた。しかしながら,実際には境界変 成岩が常に沈み込むスラブとともに一定に引きず り込まれているのではなく, Inui and Toriumi (2002)が示したように,圧力が減少するという 履歴もあることから dP/dt は変化するのが自然で あり,また,このとき dT/dt も変化するであろう。 したがって(dVw/dP, dVw/dT)または(dVg/dP, dVg/dT)を変数とする平面上での変成岩の軌跡 について議論すべきであろう(図3)。

## III.フォワード法によるざくろ石の 成長と脱水量履歴

最近 Inui and Toriumi (2004)は泥質岩の温 度・圧力履歴を微分熱力学的に決定した履歴と類 似したパターンを与え,その過程でざくろ石生成 反応を順問題としてとして解き,ざくろ石の化学 組成の累帯構造を再現することに成功している。 かれらの順問題は周囲の緑泥石中のイオンに関す る拡散速度を無限とし,ざくろ石の拡散は起こら ないとして,完全分別結晶作用(perfect fractional crystallization)を仮定して計算機実験をおこ なったものである。熱力学的には周囲の鉱物とざ くろ石の表面とは完全平衡にあり,このためざく ろ石の成長は圧力あるいは温度の増加によって進 行する。

この計算機実験では圧力に対して dVg/dP, dVg/dTの変化を決定することができる。その結 果,dVg/dPは圧力が増加するにしたがって急激 に増加し,約0.9 GPa 程度で最大値をとりその後 1.2 GPaまで減少することがわかった。これは主 に緑泥石からざくろ石への脱水反応の反応曲線が (Mn,Fe,Mg)成分系で幅広い反応ループを持 つためと完全分別結晶作用のために起きたことで ある。つまり,たとえば角閃石と緑泥石の間など のようにFe,Mgの分配の少ないシステムでの脱 水反応では反応ループは狭いために,ざくろ石の ように脱水量の圧力変化率 dVg/dPは圧力が増大 したときには単純な増加様式をとることになると いうことである。

そこで, ざくろ石の測定データと比較するため にモデルシステムの計算結果を *dP/dVg-dT/dVg* 図での軌跡をみよう。この順問題の計算は温度・ 圧力履歴が単純に *P=aT*である。したがって,

dP = a dT (a > 0)

となり,

dP/dVg = a dT/dVg

Ca image of garnet

(dP, dT, dVg; r) r=I/L



**500** μm

- 図 3 三波川変成岩のざくろ石結晶の化学組成の 累帯構造と中心から計測した微小部分にお ける温度,圧力,成長量増分.
- Fig. 3 Chemical zoning of Ca in Sambagawa garnet showing {110} growth surface, and illustration of pressure, temperature, and garnet growth increments at position t(=l/L) from the core. L and l are grain radius and distance from the core, respectively.

となる。ただし, *a* は定数として。このため *dP*/ *dVg-dT*/*dVg* 図においては, モデル岩石の軌跡は 図 4 のように正の傾き *a* の直線となる。

## IV.三波川変成岩における脱水量履歴の dP/dVg-dT/dVg 図

ここではざくろ石の化学組成累帯構造から逆解 析される温度・圧力・脱水量履歴を dP/dVgdT/dVg 図での時間変化に対する軌跡として表現 しよう。試料は Inui and Toriumi(2002)のデー タを用いた。その試料地点を図5に示す。脱水量 の圧力微分量と圧力との関係はToriumi and Inui (2001)にしたがって求め,図6に示した。この 図は距離的に近い岩石にもかかわらず,それらの 脱水量・温度・圧力履歴のパターンが多少異なっ ていることを示している。このことは温度・圧力 経路については比較的類似していることから,こ こでみられる軌跡の違いはもう局所的な変動なの であろう。すなわち,脱水量変化が温度・圧力履



- 図 4 完全分別結晶過程での脱水量変動の軌跡.
- Fig. 4 Relation of dVw/dP and dVw/dT in the perfect fractional growth model of Inui and Toriumi (2004).

歴に変動をもたらしていると考えられよう。

図7は大きく見るとdP/dVg-dT/dVg関係が正 の勾配を持つループで構成されている。このこと は前章で議論した完全分別作用を仮定したときの 変成岩のざくろ石成長に伴う脱水経路の軌跡と類 似している。つまり,モデル系では同一直線上を 往復する軌跡を示すが,実際のプレート境界の変 成作用で起こる脱水過程では,その過程の軌跡は 脱水反応と圧力の変動および温度の変動が相互に 影響を与えるということを示しているのである。 そこで,本稿では温度変化や圧力変化が脱水反応 に影響を与えるとした力学系のモデルシステムに ついて考えてみることにする。

ざくろ石を含む変成岩を一つの力学系と考える。 変成岩は一定速度 Vp で沈み込むスラブからの剪



図 5 四国における三波川変成帯の地質とここで研究された試料地点.

Fig. 5 Map of the Sambagawa metamorphic belt and localities of the samples studied here modified from Inui and Toriumi ( 2002 ).

IR, HA and TN are Iratsu mass, Higashi-Akaish mass, and Tonaru mass, respectively.



図 6 代表的なざくろ石試料の圧力 成長量速度履歴.

Fig. 6 Pressure-incremental growth of garnet for the pressure increment diagrams of the studied Sambagawa samples.

断応力を受けて圧力(静水圧)を増加するか,境 界変成岩の密度が周囲の岩石に対して小さいため に浮力によって圧力を減少する。この境界変成岩 の運動はスラブと変成岩との力学的カップリング の強弱により連続的に変化する。したがって,

dP/dt = x Vp

ここで x は沈み込むスラブと変成岩との間のカッ プリング強度であり,摩擦とは異なって,正から 負の値もとることができる。負の値は変成岩が浮 力により上昇するときにとるものである。

一方,変成岩は周囲から熱を吸収,または放出 して温度変化をする。この熱には摩擦で発生する ものと周囲との熱エネルギー交換によるものとが ある。これらによる温度変化はいずれもパラメタ として周囲の場の変数をyとし,

dT/dt = y

とする。

さらに,変成岩の脱水分解反応によるざくろ石の 成長速度は,表面が化学平衡であるため大変小さ いだろう。しかし,変成岩の正の温度変化により 反応は促進される。そこで,

dVg/dt = G+m dT/dt

としよう。ここで m, Gは定数である。 一方,カップリング強度は,脱水反応で水が岩石 に放出されると当然小さくなる。このため x は次 のように脱水反応量と関係している。

x = K - h dVg/dt

ここで *K* , *h* は定数とする。これらの関係を整理 して

dT/dVg = -(G/m)z + 1/mdP/dVg = (VpK)z - hVp1/z = G + m y

これらの関係から最終的に次の関係を得る。

dP/dVg=-(mVpK/G)dT/dVg)+VpK/G-hVp

この関係は,定数はすべて正にとってあるので, dP/dVg-dT/dVg図上では負の傾きの直線となる。





前章で完全分別作用のときの関係が正の傾きの直 線であったが,力学系のモデルではその力学的 カップリングと脱水量の関係のために負の傾きと なるのである。以上の関係は脱水反応が時間差を おかずに力学的カップリングを減少させ,そのた めに変成岩の圧力変化が減少するので直線状に変 化することになるが,流体の移動などのために時 間遅れがあれば位相のずれが発生する。このとき 軌跡は閉曲線となるだろう。

現実の三波川変成岩の場合の軌跡はすでに述べ たように,正の傾きのいくつかのループと負の傾 きのループから構成されていて,脱水反応が力学 的なカップリングに影響を与えている形式と,あ まり影響を与えていない形式が混在していること が読み取れる。ただし,温度変化が圧力変化に よって影響を受けるときには上で導いた関係は多 少変化し,傾きも正となることもありうる。した がって,実際の三波川変成岩にみる沈み込み過程 での温度・圧力・脱水量変化の軌跡がいろいろな 傾きを持つループで表されるのは自然なことであ ろう。このような力学系としての扱いを考えれば, *dP/dVg-dT/dVg*図上では,とくにループの傾き が符号を変えるときが力学的なカップリングと脱 水反応が結合するときであると考えられよう。

## V.結 論

三波川変成岩のざくろ石に記録されている化学 組成の累帯構造から,成長面における周囲の鉱物 との化学平衡により,沈み込み過程での変成作用 の温度変化・圧力変化・脱水量変化を解読するこ とができる。ざくろ石の中心から外縁部にかけて とった各点に対して(*dT*,*dP*,*dVg*;*r*)から積分 した温度・圧力・脱水量履歴ではなく,変成岩の *dP/dVg-dT/dVg*軌跡を求めて,この軌跡から変 成作用における脱水反応と沈み込むスラブと境界 岩としての変成岩との力学的カップリング強度の 推定を試みることができた。

#### 謝辞

本稿を書くにあたり,乾 睦子さんにはデータの提供 をいただいた。記して謝意を表したい。

#### 文 献

- Aoya, M., Uehara, S., Matsumoto, M., Wallis, S. and Enami, M. (2003). Subduction stage pressuertemperature path of eclogite from the Sambagawa belt: Prophetic record for oceanic-ridge subduction. *Geology*, **31**, 12, 1045–1048.
- Enami, M. (1998) Pressure-temperaure path of Sanbagawa prograde metamorphism deduced from grossular zoning of garnet. *J. Metamorphic Geol.*, **16**, 97 106.
- Hacker, B.R., Peacock, S.M., Abers, G.A. and Holloway, S.D. (2003) Subduction factory-2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? J. Geophys. Res., 108(B1), doi: 10.1029/ 2001JB00129.
- Hyndman, R.D., Yamano, M. and Oleskevich, D.A. (1997). The seismogenic zone of subduction thrust faults. *The Island Arc*, **6**, 244 260.
- Inui, M. and Toriumi, M(2002) Prograde pressuretemperature paths in the pelitic schists of the Sanbagawa metamorphic belt, SW Japan. J. Metamorphic Geol., 20, 563 580.
- Inui, M. and Toriumi, M. (2004). A theoretical study on the formation of growth zoning in garnet consuming chlorite. *J. Petrol.*, **45**, 1369–1392.
- Isozaki, Y. and Itaya, T. (1990) Chronology of Sanbagawa metamorphism. *J. Metamorphic Geol.*, **8**, 401 411.
- Kasahara, J., Kamimura, A., Fujie, G. and Hino, R. (2001) Influence of water on earthquake generation along subduction zones. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **76**, 291 303.
- Kodaira, S., Takahashi, N., Nakanishi, A., Miura, S. and Kaneda, Y. (2000). Subducted seamount imaged in the rupture zone of the 1946 Nankaido Earthquake. *Science*, **289**, 104–106.
- Kodaira, S., Hidaka, T., Kato, A., Park, J.-D.,

Iwasaki, T. and Kaneda, Y. (2004). High pore fluid pressure may cause silent slip in the Nankai trough. *Science*, **28**, May, 1295–1298.

- Miura, S., Kodaira, S., Nakanishi, A., Tsuru, T., Takahashi, N., Hirata, N. and Kaneda, Y. (2003). Structural characteristics controlling the seismicity of southern Japan Trench fore-arc region, revealed by ocean bottom seismographic data. *Tectonophysics*, **363**, 79 102.
- Nakanishi, A., Kodaira, S., Park, J-P. and Kandea, Y.(2002) Deformable backstop as seaward end of coseismic slip in the Nankai Trough seismogenic zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **203**, 255–263.
- Obara, K. (2002) Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science*, **296**, 1679 1681.
- Obana, K., Kodaira, S. and Kaneda, Y. (2003). Microseismicity at the seaward updip limit of the western Nankai Trough seismogenic zone. *J. Geophys. Res.*, **108**, B10, 2459, doi: 10.1029/2002 JB0002370.
- Okamoto, A. and Toriumi, M. (2001) P-T paths of amphiboles by Gibbs method. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 141, 168 181.
- Okamoto, A. and Toriumi, M. (2004) Optimal mixing properties of calcic and subcalcic amphiboles: Application of Gibbs' method to the Sanbagawa schists, SW Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **146**, 529 545.
- Omori, S., Kamiya, S., Maruyama, S. and Dapeng, Z. (2002) Morphology of the intraslab seismic zone and devolatilization phase equilibria of the subducting slab peridotite. *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, **76**, 455–478.
- Park, J-P., Tsuru, T., Nakanishi, N., Hori, T., Kaneda, S., Nakanishi, A., Miura, S. and Kaneda, Y. (2002) A deep strong reflector of the Nankai accretionary wedge from multichannel seismic data: Implications for underplating and interseismic shear stress release. J. Geophys. Res., 107, ESE3 1, 3 16.
- Peacock, S.M. (1993) Large-scal hydration of the lithosphere above subducting slabs. *Chemical Geology*, **103**, 45 59.
- Peacock, S.M. and Wang, K. (1999) Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism: Examples from southwest and northeast Japan. *Science*, **286**, 937 939.
- Rogers, G. and Draget, H. (2003). Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: The chatter of silent slip. *Science*, **300**, 1942–1943.
- Sakai, C., Banno, S., Toriumi, M. and Higashino, T. (1985) Growth history of garnet in pelitic schists of the Sanbagawa metamorphic terrane in central Shikoku. *Lithos*, **18**, 81 95.
- Seno, T. and Yamanaka, Y. (1996). Double seismic zones, compressional deep trench-outer rise

events, and superplumes. *In* Bebout, G.E., Scholl, D.W., Kirby, S.H. and Platt, J.P. eds.: *Subduction: Top to Bottom.* Geophysical Monograph **96**, AGU, 347 356.

- Seno, T. and Yamazaki, T. (2003). Low-frequency tremors, intraslab and interplate earthquakes in Southwest Japan- from a viewpoint of slab dehydration. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 22, 2171, doi: 10.1029/2003GL018349.
- Seno, T., Zhao, D., Kobayashi, Y. and Nakamura, M. (2001) Dehydration of serpentinized slab mantle: Seismic evidence from southwest Japan. *Earth Planets Space*, **53**, 861 871.
- Spear, F.S. (1993) Metamorphic phase equilibira and pressure-temperature - Time paths. *Mineral. Soc. Amer. Monograph*, 547 639.
- Toriumi, M. and Hara, E. (1995). Crack geometries and deformation by the crack-seal mechanism in the Sambagawa metamorphic belt. *Tectonophysics*, **245**, 249 261.
- Toriumi, M. and Inui, M. (2001) Pressure-temperature-water production rate paths in the subduction metamorphism. *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, **76**, 367–376.

- Toriumi, M. and Nomizo, A. (2001) Diffusioncontrolled garnet growth during Sanbagawa metamorphism. *Structural Geology*, 44, 47 58.
- Tsuru, T., Park, J-P., Miura, S., Kodaira, S., Kido, Y. and Hayashi, T. (2002) Along-arc structural variation of the plate boundary at the Japan Trench margin: Implication of interplate coupling. J. Geophys. Res., **107**, B12, doi: 10.1029/ 2001JB001664.
- Yamasaki, T. and Seno, T. (2003) Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab. J. Geophys. Res., 108, 2212: doi: 10,1029/2002JB001918.
- Zhao, D., Asamori, K. and Iwamori, H. (2000). Seismic structure and magmatism of the young Kyushu subduction zone. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 14, 2057 2060.
- Wallis, S., Moriyama, Y. and Tagami, T. (2004). Exhumation rates and agge of metamorphism in the Sanbagawa belt; New constraint from zircon fission track analysis. *J. Metamorphic Geol.*, 22, 17 24.

(2004年7月26日受付,2004年8月18日受理)