



青色片岩は有馬型熱水の起源

平 島 崇 男¹⁾

(平成 30 年 10 月 31 日受付, 平成 30 年 11 月 5 日受理)

Blueschist as an Origin of the Arima Type Hot Spring

Takao HIRAJIMA¹⁾

要 旨

沈み込み帯は火山活動や地震発生だけでなく、変成作用や地殻-マントル間の物質交換の場である。沈み込む海洋地殻を構成する玄武岩は地下 15-30 km 付近では青色片岩に、地下 45-60 km 付近ではエクロジヤイト (eclogite) に変化する。青色片岩からエクロジヤイトに変化する際に脱水反応が生じ、相当量の水流体が系に放出される。本研究では、白亜紀の温かい沈み込み帯で形成された三波川変成帯において、地下 15-30 km で変成した片岩ユニットと地下 45-60 km 程度で変成したエクロジヤイトユニットの岩石の主片理面に平行に発達した石英脈からクラッシュリーチング法で流体包有物を抽出し、その主要・微量成分を測定した。その結果、エクロジヤイトユニットの流体包有物の水質は NaCl 型と (Na,K)HCO₃ 型、片岩ユニットの試料はすべて (Na,K)Cl 型と (Ca)HCO₃ 型の間中型であった。母岩の化学組成や流体活動の深度や時期の違いにもかかわらず抽出流体の大半は Li/Cl 比 > 0.001 となった。これは、現在の温かい沈み込み帯の前弧域に噴出する有馬型熱水の特徴 (風早ほか, 2014) と一致し、有馬型熱水はスラブ脱水流体を起源とする説を支持した。

キーワード：流体包有物, 有馬型熱水, 三波川変成帯, 青色片岩, エクロジヤイト

1. はじめに

日本列島が位置する島弧-海溝系では、ダイナミックな地球科学現象が日々生じている。その中でも、火山の噴火に代表される島弧火山活動やプレート境界付近や島弧地殻で生じる地震活動については、噴火を目視できるし、地面の揺れを体感できるので、一般の方々も広く認識されていると思う。

それに対して、知名度の低い現象の代表例として、変成岩の形成や地殻-マントル間での固体や

¹⁾ 京都大学大学院理学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町. ¹⁾ Graduate School of Sciences, Kyoto University, Kitashirakawa-oiwake, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502.

流体物質の循環過程が挙げられる。

変成岩の形成，あるいは，そのプロセスである変成作用とは，既存の鉱物が新たな温度圧力状態に置かれた場合，新しい環境下で安定な鉱物群に変化する現象のことである。

例えば，地表付近で安定な炭素 (C) 鉱物は六方晶系あるいは三方晶系で硬度が1～2のグラファイト (石墨) である。皆さんよくご存知の鉛筆の芯に使われている。硬度が小さい，すなわち，柔らかいので，紙の上を滑らせる芯が削れて文字が描ける。プレート運動でグラファイトを地下150 km より深いマントルに沈み込ませると，立方晶系で硬度10のダイヤモンドに変化する。1990年に，現在のカザフスタン共和国から地殻物質を起源とする変成岩から直径数十ミクロンのマイクロダイヤモンドが世界で初めて見出された (Sobolev & Shatsky, 1990)。現在では，世界の約10箇所から同様のダイヤモンドが見出されている。但し，これらのダイヤモンドは小さすぎて宝石にはならない。

水晶として広く知られている六方晶系の石英 (SiO_2) を深さ90 km より深いマントルに沈み込ませると，単斜晶系のコース石 (SiO_2) という鉱物が安定になる。コース石を含む地殻物質起源の変成岩は1984年に世界で初めてイタリアとノルウェーで発見された (Chopin, 1984; Smith, 1984)。それ以降，コース石を含む同様の岩石は世界の約30箇所から見出されている (例えば，榎並・平島, 2017)。マイクロダイヤモンドやコース石を含む地殻物質起源の岩石は超高压変成岩と呼ばれ，これらの産地の大半は，過去，あるいは，現在の大陸同士が衝突する造山帯である。

以上のような新知見から，沈み込み帯や大陸衝突帯などのプレート収束境界は，地表物質がマントル深部に沈み込む“入り口”としての機能だけでなく，地下150 km を超えるマントル深部で形成された岩石が地表に上昇する“出口”としての機能を持っているとの認識が広まってきた (図1)。

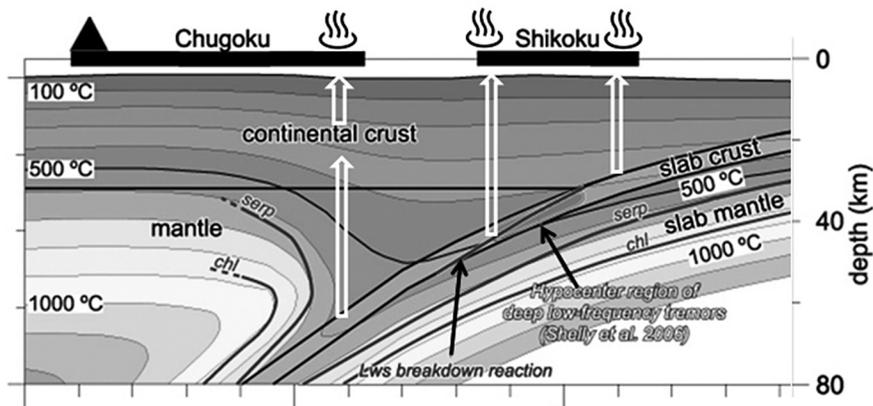


図1 現在の中国・四国地方の地下に沈み込むフィリピン海プレート周辺の温度構造 [Peacock & Wang (1999) に準拠]。ローソン石の脱水分解 (Lws-breakdown reaction) が生じる近傍では深部低周波微動 (deep low-frequency tremors) など特異な地震活動が活発である。マントルウエッジから垂直に伸びる線は，想定される有馬型熱水の上昇経路。

日本列島では，超高压変成岩はまだ見出されていないが，地下15–60 km から地表に上昇した変成岩類が広域的に分布している。その代表例が関東山地から中部地方・紀伊半島・四国を経て九州の佐賀関半島まで，中央構造線の南側に沿って延長約700 km に渡って分布している三波川変成帯である。

岩石学を専門とする我々の研究グループは 2003 年頃から陸水学の研究グループと“水”をキーワードにした共同研究を開始し、これまでに、変成岩類に含まれる流体包有物を対象とした研究でいくつかの画期的成果を挙げてきた。本稿では、沈み込み帯のスラブで生じる吸水・脱水過程の概略を説明するとともに、白亜紀の温かい沈み込み帯の地下 15-60 km で形成された三波川変成岩に含まれる深部流体そのものである流体包有物の水質・微量成分組成の概略について、Yoshida *et al.* (2015) に沿って説明する。

Yoshida *et al.* (2015) では、三波川変成岩に含まれる流体包有物を抽出し、主要・微量元素濃度を測定した結果、流体包有物は海水並の高い NaCl 濃度を示すに留まらず、その Li-B-Cl 組成は現在の西南日本の前弧域に噴出する有馬型熱水と同じ特徴を示すことを明らかにした(網田ほか, 2014)。本稿では、さらに、三波川変成岩が形成されている温度圧力形成条件が、現在の西南日本弧の四国・中国地方に沈み込むフィリピン海プレートの温度圧力推定値と類似することに注目し、温かい沈み込み帯での深部流体の上昇経路にも考察を加える。

2. 沈み込み帯の吸水・脱水過程と変成作用

沈み込む海洋プレートの上部を構成する代表的な岩石は玄武岩 (basalt) と呼ばれる火山岩である。この岩石は高温状態でマグマから晶出した以下の鉱物群で構成されている。

かんらん石	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$
直方 (斜方) 輝石	$(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$
Ca 単斜輝石	$\text{Ca}(\text{Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$
斜長石	$(\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ の固溶体

これらの鉱物は H_2O を含まないことが特徴の一つである。

玄武岩がプレートの動きとともに地下に沈み込むと、沈み込み帯の温度圧力条件では、玄武岩を構成するマグマから晶出した鉱物群は準安定になり、地下の多様な温度・圧力のもとで安定な鉱物群に変化する。

例えば、玄武岩が地下 15-45 km まで沈み込むと青色片岩 (blueschist: 図 2A) と呼ばれる岩石群に変化する。青色片岩を構成する代表的な鉱物群は以下のような含水鉱物である。

Na 角閃石	$\text{Na}_2(\text{Mg,Fe})_3\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
ローソン石	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$
緑簾石	$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$
緑泥石	$(\text{Mg,Fe})_5\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

この岩石名は Na 角閃石が青色を示すことに由来するが、古くは藍閃石片岩と呼ばれていた。

青色片岩のもう一つの特徴は、上記の主要構成鉱物が含水鉱物であることである。含水鉱物とは、固体である結晶中に H_2O が水酸基 (OH^-) あるいは水分子として結晶構造に組み込まれていることである。そのため、玄武岩から青色片岩への変化は吸水作用が進行したとみなす事ができる。特に、ローソン石と緑泥石は単位モル量当り 12 重量%の H_2O を含んでいるため、ローソン石青色片岩の含水量は 5 重量%程度になることが確認されている (Hacker *et al.*, 2003; Sato *et al.*, 2016)。

青色片岩が地下 50 km 以上に沈み込むと、エクロジャイト (eclogite) と呼ばれる岩石群に変化する。エクロジャイトの主要構成鉱物は

ざくろ石:	$(\text{Ca,Mg,Fe})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
Ca-Na 輝石:	$(\text{Na,Ca})(\text{Mg,Fe,Al})\text{Si}_2\text{O}_6$

などの無水鉱物である。そのため、青色片岩がエクロジャイトに変化する沈み込み帯の地下 45-

60 km 付近では多様な脱水反応が進行し、 H_2O を主体とする多量の脱水流体が周囲に放出されると考えられている (図 1)。

沈み込んでゆく海洋プレート中では、上記の結晶水以外に、以下の 2 つの形態で水が存在する。それらは、

- ・岩石を構成する結晶粒子の隙間に保持された水である間隙水
- ・岩石を構成する結晶中の構造欠陥 (空孔) に取り込まれた水である流体包有物 (fluid inclusion : FI) (図 2B)

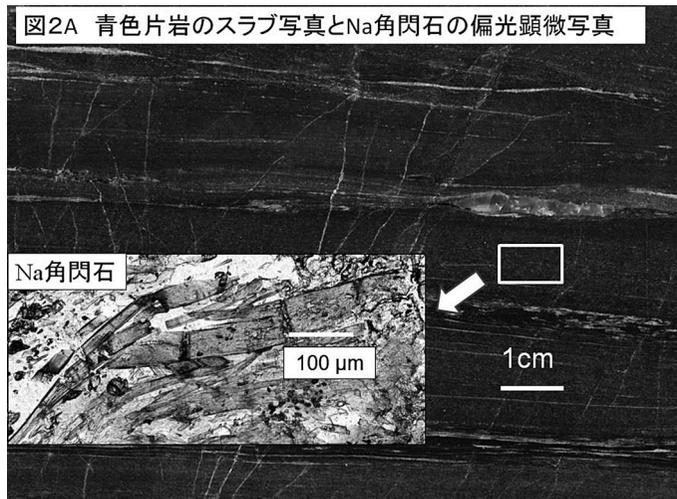


図 2A 三波川変成帯の青色片岩のスラブ写真と Na 角閃石の偏光顕微鏡写真。



図 2B 三波川変成帯の石英質片岩の主片理面に平行に発達する石英脈と流体包有物。Yoshida *et al.* (2015) はこの様な石英脈から流体包有物を抽出し、組成分析を行った。

である。間隙水は主として堆積岩を構成する粒子と粒子の間の空隙に保持されている。沈み込みの

進行と共に岩石が圧密を受けると間隙の割合が減少し、それと共に岩石から搾り出され、その大半は地下 10 km までに放出されると考えられている {図 3: Hacker (2008) 原図に加筆}.

Hacker (2008) は海洋プレートを構成する主要な岩石種毎の含水量の温度-圧力変化をシュートセクション法で試算した。それによると、沈み込む深度と温度の増加と共に変成岩中の含水量は一般的に減少することが示された。各沈み込み帯を構成する岩石種の割合を加味した結果、海溝から沈み込む海洋プレートが保持する水の総量の約 54 重量%を結晶水が占め、そのうちの約 2 割が地下 10-120 km の深度でプレートから放出され、残りはマンツルの深部へ持ち込まれると提案している (図 3)。

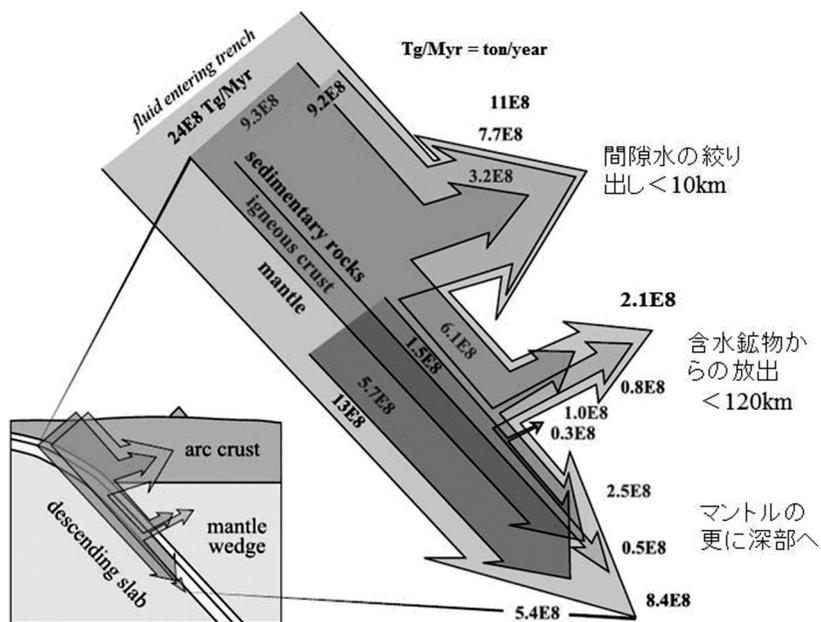


図 3 海溝からマンツルに持ち込まれる水の総量とその挙動 (Hacker, 2008 の Fig. 12 を一部修正・加筆).

3 番目のタイプの水である流体包有物は他の 2 種類の水に比べて微々たる量であり、しかも、これらの量をモデル化することは難しい。しかし、流体包有物は地下深部で活動した深部流体そのものであり、その物理的・化学的性質について重要な情報を保持している。その一方で、流体包有物は非常に微小なサイズであることや、流体包有物が結晶に取り込まれた時期の同定等が困難であるため、流体包有物の研究は非常に立ち遅れていた。

3. 流体包有物の研究方法

我々は、白亜紀の温かい沈み込み帯の地下 15-60 km で形成された三波川変成岩中の流体包有物を沈み込むスラブ中の含水鉱物から脱水した深部流体そのものとして捉え (図 1)、岩石学と陸水学の共同研究を実施した。その際、伝統的な手法を活用するだけでなく、近代機器を取り入れた分析手法開発も行った。

具体的には、流体包有物が母結晶に取り込まれた時期を推定するための組織観察 (Yoshida *et*

al., 2011; Yoshida & Hirajima, 2012), 加熱冷却台を用いた塩濃度・均質化温度の測定, Raman 分光計を用いた流体包有物を構成する気相・液相の同定, Raman シフト (Nishimura *et al.*, 2008) やクライオ集束イオンビーム (FIB) 装置とマイクロトモグラフィーを併用した流体包有物の密度測定法や組成分析法の開発 (Yoshida *et al.*, 2016: 2018), クラッシュリーチング法を用いて深部流体を抽出し, 主要・微量成分を分析する手法の開発 (Nishimura *et al.*, 2008) と, その手法を用いて抽出した流体包有物の主要・微量元素比の測定 (Yoshida *et al.*, 2015) などである。

4. 研究試料と測定方法

三波川変成岩は最高到達深度が地下 15-30 km 程度の片岩ユニットと地下 60 km 程度のエクロジヤイトユニット (e.g., Aoya *et al.*, 2013) で構成されている。深部流体活動の痕跡とみなすことができ石英脈 (図 2B) は三波川変成岩の両ユニットにおいて普通に見られ, しかも, その活動時期は沈み込み開始時から, 変成帯の上昇時まで多岐に渡る。本研究では, 各岩石の最高到達深度付近の流体の性質を把握するために, 変成岩の主片理面と平行に発達した石英脈を主な研究対象とし, 片岩ユニットの 3 試料とエクロジヤイトユニットの 8 試料にクラッシュリーチング法を適用した。また, 対比のため, 片岩ユニットで採集した変成帯上昇時の石英脈 1 試料にも適用した。クラッシュリーチング法で抽出した流体について, 主要カチオンとアニオンはイオンクロマトグラフで, Li と B は ICP-MS で測定した。

5. 流体包有物 (FI) の水質

エクロジヤイトユニットの 5 試料は NaCl 型を, 残り 3 試料は (Na,K)HCO₃ 型を示し, 片岩ユニットの 3 試料はすべて (Na,K)Cl 型と (Ca)HCO₃ 型の間中型であった。片岩ユニットで採集した変成帯上昇時の石英脈中の流体は, (Na,K)HCO₃ 型と (Ca)HCO₃ 型の間中型で, 他の試料とは少し異なる水質を示した。

FI の組織観察, Raman 分光実験や加熱冷却実験で, 海水並あるいはそれ以上の高い塩濃度を示す流体包有物を含むエクロジヤイトユニットの 3 試料は HCO₃⁻ と Cl の割合 $\{= \text{HCO}_3^- / (\text{HCO}_3^- + \text{Cl})\}$ が 10% 以下の NaCl 型であったが, それらが認められなかった残りの試料では, HCO₃⁻ と Cl の割合 $\{= \text{HCO}_3^- / (\text{HCO}_3^- + \text{Cl})\}$ が約 0.25 から 0.95 まで変動した。

6. 流体包有物 (FI) の Cl-B-Li 比

母岩の化学組成や到達深度, さらには, 流体活動の時期の違いにもかかわらず, 抽出流体の大半は Li/Cl 比 > 0.001 (図 4) となった。この値は, 風早ほか (2014) による有馬型熱水の特徴と一致した。

今回採用した流体包有物の抽出手法で得られたデータは, 白亜紀の温かい沈み込み帯で, スラブが沈み込んで行く過程, 最高到達深度, その後の上昇過程の間の多様な時期の深部流体の性質を反映している。すなわち, 海水並みあるいはそれ以上の高塩分濃度と高 Li/Cl 比 (> 0.001) は, 白亜紀でも現在でも, 沈み込みの最中にローソン石が分解するような温かい沈み込み帯の深部流体の特徴とみなすことが出来る。

さらに, 抽出流体の Li/B 比は母岩の形成深度と概ね正の相関を示した。すなわち, 地下 15-20 km (Chlorite zone: 図 4a/b) で形成された母岩からの抽出流体の Li/B 比は 0.025 程度, 地

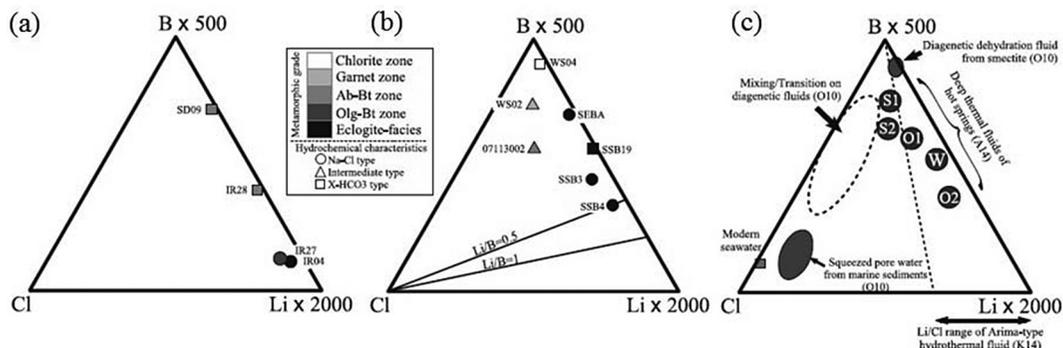


図 4 三波川変成岩の主片理面に平行に発達した石英脈中の流体包有物 (a, b) と西南日本前弧域の温泉水 (c) の Cl-B-Li 比。

(a) 母岩が泥質変成岩。(b) 母岩が塩基性変成岩。試料を採集した鉱物帯や水質は図中のシンボル参照。各三角図の点線より右側の Li に富む領域 ($Li/Cl > 0.001$) が風早ほか (2014: K14) による有馬型熱水に相当。O10: 大沢ほか (2010), A14: 網田ほか (2014), Yoshida *et al.* (2015) の Fig. 6 を改変。

下 20-30 km で形成された母岩からの抽出流体の Li/B 比は 0.055-0.107 (Garnet, ab/Olg-Bt zone: 図 4a/b), 地下 60 km 付近で形成されエクロジャイトユニット (図 4a/b) の岩石からの抽出流体中の Li/B 比は 0.107-2.000 と大きな変動を示した。

エクロジャイトユニットの抽出流体のうち, Li/B 比が 0.5~2.0 程度の試料は, NaCl 型の水質で, 石英脈の変形が弱く, 石英粒子が等粒状を示し, 流体包有物の配列が石英粒子内部で閉じているタイプの流体包有物を含む試料から得られた。この Li/B 比は, ギリシャの青色片岩とエクロジャイトの全岩組成の変化 (Marshall *et al.*, 2006) から推定される脱水流体の Li/B 比 (0.50-0.55: 図 4b) と同等, 或いは, より Li に富んでいた。一方で, Li/B 比が 0.107-0.50 程度の流体は, 石英脈が変形し, モザイク組織を示す石英粒子を含む試料から抽出されており, その水質は HCO_3 量が増える傾向を示した。

7. 考 察

流体包有物の組織解析から, 地下 60 km 付近で形成された岩石は, 地表に上昇する過程で複数回の変形作用を被り, それと共に浸潤した流体を色々な程度で含んでいる可能性が高い。また, 変成岩が上昇中に貫入した石英脈中の流体包有物の水質は前述の様な (Na) HCO_3 型と (Ca) HCO_3 型の間タイプを示した。

以上のことから, 白亜紀の温かい沈み込み帯で活動した流体は, 地下 60 km 付近では NaCl 型の水質で高い Li/B 比を持ち, より浅部の流体は (Na,K-Ca) HCO_3 型で低い Li/B 比を持つと推察できる。

三波川変成帯のエクロジャイトの形成過程については諸説あるが, 緑簾石角閃岩相あるいは青色片岩からエクロジャイトに移したとする説に従うと (e.g., Endo *et al.*, 2012; Tsuchiya & Hirajima, 2013), NaCl 型で Li/B 比 > 0.5 を示す流体は, 青色片岩がエクロジャイトに変化する際の脱水流体の性質を現している可能性が高い。

網田ほか (2014) は現在の西南日本の前弧域の断層沿いの深井戸温泉水の Cl-Li-B 比を測定し, それらは, 0.001 以上の高い Li/Cl 比を示し, かつ, Li/B 比がそれぞれの温泉サイトの地下のプレート上面深度に比例するとの興味深いデータを提示している (図 4c)。

現在の西南日本の中国・四国地方の地下に沈み込むフィリピン海プレートの温度圧力構造は白亜紀の三波川変成帯の形成条件とよく似ている (Peacock & Wang, 1999). そして, その地下 30 km 付近では, 低周波微動等の変った地震活動が観測され, それらは活発な脱水流体に拠ると考えられている (図 1, Shelly *et al.*, 2006).

以上のデータを総合すると, 温かい沈み込み帯における, 地表温泉水と沈み込み帯の地下 15-60 km で活動した流体の水質や Cl-Li-B 組成の類似性は, 有馬型熱水のプレート脱水流体説を強く支持する.

有馬型熱水の模式地の一つである有馬温泉や中央構造線沿いの有馬型熱水の地下には島弧地殻とマントルウエッジが存在している. この様な地質条件の場に有馬型熱水を噴出させるためには以下のようなモデルを考えた. すなわち, スラブで脱水した深部流体は発生地からプレート境界に沿って上昇するだけでなく, その一部はその上方のマントルウエッジや地殻を通り抜けて, 島弧前弧域に噴出するとするものである (図 1: Yoshida *et al.*, 2015). この考えは現時点では作業仮説の一つに過ぎない. この説の信憑性を高めるためには, 多様な沈み込み場での検証が不可欠である.

謝 辞

本稿は京都大学の変成岩岩石学グループと陸水学グループの共同研究として, 以下の方々の協力の下に成り立っている; 大沢信二教授, 西村光史博士, 網田和宏博士, 小林記之博士, 三島壮智氏, 吉田健太博士, 千眼喜照君, 土谷茂樹君, 皆川広太君. 本稿をまとめるに当たり, 改めて諸氏に謝意を述べる. また, 本稿をまとめる機会を与えていただいた温泉科学会, 並びに, 由佐悠紀京都大学名誉教授には重ねて感謝いたします.

引用文献

- Aoya, M., Endo, S., Mizukami, T. & Wallis, S.R. (2013): Paleo-mantle wedge preserved in the Sambagawa high-pressure metamorphic belt and the thickness of forearc continental crust. *Geology*, **41**, 451-454.
- 網田和宏, 大沢信二, 西村光史, 山田 誠, 三島壮智, 風早康平, 森川徳敏, 平島崇男 (2014): 中央構造線沿いに湧出する高塩分泉の起源—プレート脱水流体起源の可能性についての水文科学的検討. *日本水文科学会誌*, **44**, 17-38.
- Chopin, C. (1984): Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: a first record and some consequences. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **86**, 107-118.
- 榎並正樹・平島崇男 (2017): 高圧-超高压変成岩研究 25 年 (Progress on petrology of high- and ultrahigh-pressure metamorphic rocks - 25 years -). *地質学雑誌*, **123**, 661-675. Doi:10.5575/geosoc.2017.0020.
- Endo, S., Wallis, S.R., Tsuboi, M., Aoya, M. & Uehara, S. (2012) Slow subduction and buoyant exhumation of the Sanbagawa eclogite. *Lithos*, **146-147**, 183-201.
- Hacker, B.R., Abers, G.A. & Peacock, S.M. (2003) Subduction factory, 1, Theoretical mineralogy, densities, seismic wave speeds, and H₂O contents. *J. Geophys. Res.*, **108**(B1), 2029, doi:10.1029/2001JB001127.
- Hacker, B.R. (2008): H₂O subduction beyond arcs. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **9**, Q03001. <http://dx.doi.org/10.1029/2007GC001707>.
- 風早康平・高橋正明・安原正也・西尾嘉朗・稲村明彦・森川徳敏・佐藤 努・高橋 浩・北岡豪一・大沢信二・尾山洋一・大和田道子・塚本 斉・堀口桂香・戸崎裕貴・切田 司 (2014): 西南日

- 本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴. 日本水文科学会誌, **44**, 3-16.
- Marschall, H.R., Altherr, R., Ludwig, T., Kalt, A., Gméling, K. & Kasztovszky, Z. (2006): Partitioning and budget of Li, Be and B in high-pressure metamorphic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **70**, 4750-4769.
- Nishimura, K., Amita, K., Ohsawa, S., Kobayashi, T. & Hirajima, T. (2008): Chemical characteristics and trapping P-T conditions of fluid inclusions in quartz veins from the Sanbagawa metamorphic belt, SW Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **103**, 94-9.
- 大沢信二, 網田和宏, 山田 誠, 三島壮智, 風早康平 (2010): 宮崎平野の大深度温泉井から流出する温泉水の地化学的特性と成因—温泉起源流体としての続成脱水流体—. 温泉科学, **59**, 295-319.
- Peacock, S. M., & Wang, K. (1999): Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism: Examples from southwest and northeast Japan. *Science*, **286**, 937-939.
- Sato, E., Hirajima, T., Fujimoto, Y., Kamimura, K. and Yoshida, K. (2016): Phase relations of lawsonite-blueschists and their role as a water-budget monitor: a case study from the Hakoishi sub-unit of the Kurosegawa belt, SW Japan. *European Journal of Mineralogy*, **28**, 1029-1046.
- Shelly, D. R., Beroza, G. C., Ide, S. & Nakamura, S. (2006): Low-frequency earthquake in Shikoku, Japan, and their relationship to episodic tremor and slip. *Nature*, **442**, 188-191.
- Sobolev, N.V. & Shatsky, V.S. (1990): Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks; a new environment for diamond formation. *Nature*, **343**, 742-746.
- Smith, D. C. (1984): Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and implications for geodynamics. *Nature*, **310**, 641-644.
- Tsuchiya, S. & Hirajima, T. (2013): Evidence of the lawsonite eclogite facies metamorphism from an epidote-glaucophane eclogite in the Kotsu area of the Sanbagawa belt, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **108**, 166-171.
- Yoshida, K., Sengen, Y., Tsuchiya, S., Minagawa, K., Kobayashi, T., Mishima, T., Ohsawa, S. & Hirajima, T. (2011): Fluid inclusions with high Li/B ratio in a quartz vein from the Besshi area of the Sambagawa metamorphic belt: implications for deep geofluid evolution. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **106**, 164-168.
- Yoshida, K. & Hirajima, T. (2012): Annular fluid inclusion found from a quartz vein intercalated with metapelites from the Besshi area of the Sanbagawa belt, SW Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **107**, 50-55.
- Yoshida, K., Hirajima, T., Ohsawa, S., Kobayashi, T., Mishima, T. & Sengen, Y. (2015): Geochemical features and relative B-Li-Cl compositions of deep-origin fluids trapped in high-pressure metamorphic rocks. *Lithos*, **226**, 50-64.
- Yoshida, K., Hirajima, T., Miyake, A., Tsuchiyama, A., Ohi, S., Nakano, T., & Uesugi, K. (2016): Combined FIB microsampling and X-ray microtomography: a powerful tool for the study of tiny fluid inclusions. *European Journal of Mineralogy*, **28**, 245-256.
- Yoshida, K., Orozbaev, R., Hirajima, T., Miyake, A., Bakirov, A., Takasu, A & Sakiev, K. (2018): Fluid inclusion analysis of quartz pressure-shadow of the ultrahigh-pressure Talc-Garnet-Chloritoid schist from the Makbal Complex, Kyrgyz. *Geochemical Journal*, **52**, 59-67.