地球化学 46, 205-215 (2012) Chikyukagaku (Geochemistry) 46, 205-215 (2012)

総説

# 沈み込み帯深部で発生する脱水流体と地震性破壊

岡本和明<sup>\*,\*\*,†</sup>・小林まさよ<sup>\*\*</sup>・荒川 幸<sup>\*</sup>・福村成哉<sup>\*</sup> (2012年6月18日受付, 2012年11月26日受理)

## Dehydrated fluid and seismic deformation in deep subduction zone

Kazuaki Okamoto<sup>\*,\*\*,†</sup>, Masayo Kobayashi<sup>\*\*</sup>, Miyuki Arakawa<sup>\*</sup> and Seiya Fukumura<sup>\*</sup>

\* Graduate School of Education, Saitama University,
255 Shimo-Okubo, Sakura-Ku, Saitama City, Saitama 338-8567, Japan

\*\* The United Graduate School of Education, Tokyo Gakugei University, 255 Shimo-Okubo, Sakura-Ku, Saitama City, Saitama 338-8570, Japan

Dehydrated fluid in deep subduction zone causes various geological phenomena such as earthquake, and arc volcanism. It has been considered that there is a correlation between the double seismic zone and metamorphic dehydration reaction in deep slab. The location of the upper limits of the upper seismic plane correspond to metamorphic facies boundary where  $H_2O$ contents change in subducting crust; numerous earthquakes from 60 to 110 km depths in the lawsonite-blueschist facies, many earthquakes in the lower crust of the slab from 110 to 150 km depths in the lawsonite-amphibole eclogite facies and few earthquakes in the lawsonite eclogite facies. Recent petrological researches have revealed that both blue schist and lawsonite eclogite are stable in the same pressure and temperature condition because chemical variation including water content creates both lawsonite-amphibole eclogite and lawsonite eclogite in different portion of subducted crust. Partial melting would occurred in eclogite in deep subduction zone if warm slab is subducted. In descending slab, the eclogite would reach wet solidus defined as phengite-, through zoisite-, and amphibole-decomposition reactions with increasing temperatures. The lower plane of the double seismic zone, is considered to be related to dehydration reaction in the slab. Metamorphic olivine has been described in vein from serpentinite mylonite. The vein was created by dehydration reaction to decompose antigorite under shear deformation. In the cold slab beneath Tohoku arc, the reaction has a negative slope in P-T space and forms olivine + orthopyroxene + fluid. In the warm slab beneath SW Japan, the reaction has a positive slope in P-T space and forms olivine + talc + fluid. The above these dehydration reactions are well-described in the serpentinite from high P/T metamorphic belt from Spain, and Italy, respectively.

Key words: Subduction zone, Slab melting, Eclogite, Dehydrated fluid, Earthquake faulting, Antigorite decomposition, Metamorphic olivine

 \* 埼玉大学大学院教育学研究科 〒338-8567 埼玉県さいたま市桜区下大久保255
<sup>†</sup> 連絡先, kokamoto@mail.saitama-u.ac.jp

\*\* 東京学芸大学大学院 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255

## 1. はじめに

沈み込み帯深部や大陸(島弧)地殻で変成作用に伴い発生する流体は, 脆性破壊, 塑性流動, 元素移動や マントルウエッジの部分融解や粘性の低下など様々な 物理化学現象とそれに伴う地質現象を引き起こす。著

者らは、脱水流体と岩石変形(特に地震性破壊)の観 察に焦点をあて、研究を進めている。沈み込み帯浅部 のプレート境界地震に関わる流体は、プレート境界を 含む上下の岩石に存在する岩石のマクロからミクロな 隙間(クラック)から供給されると考えられる。変成 作用が起こる沈み込み帯深部(ここでは変成作用が起 こる15~20 km 以深から上部マントル) では地層や 岩石内のクラックは封圧のため閉じてしまう。沈み込 みに伴いさらに温度, 圧力が上昇すると, 含水鉱物の 分解(脱水反応)によって岩石中に流体が放出され る。この流体のことを、ここでは脱水流体と呼ぶ。含 水鉱物を含む複数の鉱物の関与する脱水化学反応で規 定される脱水流体の物理化学的性質を理解しないと, 沈み込み帯でおこる地質現象を十分に説明できない。 例えば、ある温度圧力条件での元素の水への溶解度か ら推定される流体組成は、その温度圧力条件で起こる 変成岩中の脱水流体組成とは同一ではない。なぜなら 反応生成側の鉱物と流体の元素分配が、変成岩中に存

在する脱水流体組成を決定するからである。筆者ら は,沈み込み帯深部での脱水化学反応や岩石変形を経 験した変成岩の観察を行っている。本稿では,低温の 沈み込み帯深部での脱水流体に関する問題,高温の沈 み込み帯深部の脱水流体の特性をエクロジャイト,蛇 紋岩の脱水化学反応に関する最近の研究例から概説し たい。エクロジャイトは,上部マントルまで沈み込ん だ過去の海洋地殻物質である。蛇紋岩は海洋リソス フェアーやマントルウエッジを構成するかんらん岩が 海洋底,沈み込み帯浅部で加水反応を受け,形成され る。

### 2. 低温の沈み込み帯深部での脱水流体

沈み込み帯深部での脱水流体と地震性破壊の関係 は、地震学的研究でかなり詳細に解明されつつある (例えば、長谷川ほか、2010)。Kita *et al.* (2006) の解析した東北日本下では、Fig. 1のような脱水流体 とスラブ内地震の関連性が考えられている。二重深発



Fig. 1 Cross-arc vertical cross-section of intraslab earthquakes in central Tohoku, modified after Hasegawa et al. (2010) & Kita et al., 2006). Circles with numerals show hypocenters. The heavy black solid line and dashed black line show the plate interface estimated by Zhao et al. (1997). Triangles show volcanoes. Metamorphic facies (see Fig. 2) are shown as Blueschist, Law Am Ec (Lawsonite-Amphibole eclogite), and Law Ec (Lawsonite eclogite), respectively. Notice that Lawsonite eclogite facies is replaced from Eclogite facies (defined by Hacker et al., 2003) shown in the original figure in Kita et al. (2006).

地震の上面の大部分は, 沈み込む海洋地殻内に分布し ている。Fig. 1において, 上面は70~120 km の深さ で認められる。この上面の下限は, Hacker *et al.* (2003)によるひすい輝石ローソン石青色片岩(簡略 化して青色片岩と本稿では呼ぶ)一ローソン石角閃石 エクロジャイトの変成相の境界で区切られている。こ こでの変成相とは, 中央海嶺玄武岩(Mid Ocean ridge basalat: MORB)+H₂O の系において, ある温 度圧力条件の範囲で安定な鉱物組み合わせの領域のこ とである。Fig. 1では、さらに沈み込む海洋下部地殻 層に集中している地震は、ローソン石角閃石エクロ ジャイト-ローソン石エクロジャイトの変成相境界で 区切られている。Kita et al. (2006)では、Hacker et al. (2003)を引用して、ローソン石エクロジャイト 相ではなく、(無水の)エクロジャイト相に対応させ ている。変成相の境界に向かい温度圧力が上昇する事 で、含水鉱物の脱水分解反応が進行し地震を引き起こ す、と Kita et al. (2006)は考えた。よって、「地殻



Fig. 2 P-T trajectory of subducting crust beneath NE Japan and SW Japan on the phase diagram of the MORB + H<sub>2</sub>O system. Modified from Peacock and Wang (1999), Okamoto and Maruyama (1999), and Poli and Schmidt (2002). P, T condition of the Sanbagawa, quartz-bearing eclogite is from Miyamoto *et al.* (2007). Ec: eclogite facies, BS: blue schist facies, Zo: zoisite, Am: amphibolite, EA: epidote amphibolite facies, AM: amphibolite facies, GR: granulite facies, GS: green schist facies, PA: pumpellyite-actinolite facies. SCP: second-critical-end point from Mibe *et al.* (2011). Zoisite and amphibole melting reactions are from Vielzeuf and Schmidt (2001). Zoisite melting reaction is shown as Zo + Ms + Qtz = Ky + Melt. Zoisite and amphibole melting reaction is shown as Zo + Amp + Qtz = Grt + Melt. Zo: zoisite, Ms; muscovite, Qtz; quartz, Ky: kyanite, Amp; amphibole, and Grt: garnet.

層で地震の起こらない領域が無水のエクロジャイト相 に対応する」と考えるほうが、脱水脆性化説に基づく 上面の存在を説明しやすいからである。Hacker et al. (2003)の作成した状態図は、天然の変成岩の鉱物組 み合わせに基づく経験的な状態図である。Kita et al. (2006) がもう一つの可能性としてあげているよう に、超高圧平衡実験に基づく MORB+H<sub>2</sub>O 系の状態 図 (Poli and Schmidt, 1995; Schmidt and Poli, 1998; Okamoto and Maruyama, 1999) (Fig. 2) では, ローソン石エクロジャイト相が安定に存在する。熱力 計算に基づく状態図でも、 ローソン石エクロジャイト 相が安定に存在する (Wei and Clarke, 2011)。変成 相が異なる理由は, Hacker et al. (2003) では, ロー ソン石をエクロジャイト相の安定な鉱物組み合わせか ら除外しているからである。ローソン石は含水鉱物な ので, ローソン石エクロジャイト相においても, スラ ブの沈み込みにより温度圧力が上昇すると、海洋地殻 層ではローソン石の脱水分解反応が連続的に進行す る。各変成相の含水量(H<sub>2</sub>Owt%)(Okamoto and Maruyama, 1999; Hacker et al., 2003) は、(ひすい) 輝石) ローソン石青色片岩相で5.4 wt%, ローソン石 角閃石エクロジャイト相で3 wt%, ローソン石エクロ ジャイト相で1wt%と推定される。つまり「二重深発 地震の上面」の上限を超えても, まだ少量の脱水流体 は放出されていることになる。したがって、脱水流体 の存在に加えて、単一のあるいは複数の要因が上面の 形成に関係していると考えられる。脱水流体以外に上 面の形成に寄与する要因を探るため、ローソン石青色 片岩相からローソン石エクロジャイト相で起こる脱水 化学反応と地震性破壊の関係を、岩石として扱える野 外露頭スケールから多結晶体として取り扱うミクロの スケールで解明する必要がある。ここでは以下の3 点,1)青色片岩相でなぜ二重深発地震の上面が形成 されているのか?,2) ローソン石角閃石エクロジャ イト相ではなぜ海洋下部地殻に震源が集中しているの か?,3) ローソン石エクロジャイト相では脱水流体 が地震性破壊を起こしていないのか?の疑問を解明す る可能性のある低温高圧型変成岩(沈み込み帯変成 岩)を紹介してみたい。天然の低温高圧型変成岩の解 析が重要なのは、超高圧実験で上面地震帯の成因を検 証するには、東北日本下のスラブの温度条件は低温す ぎるからである(600度以下の温度条件での平衡実験 は極めて困難である)。したがって,沈み込み帯起源 の低温高圧型変成岩の解析とそれに基づく熱力計算が 現在のところ有効と考えられる。

ローソン石エクロジャイトは, 東北日本下のような 非常に冷たい沈み込み帯で形成されていると考えられ ている (例 Peacock and Wang 1999; Okamoto and Maruyama, 1999)。しかし過去の造山帯からローソ ン石エクロジャイトは世界でわずか10地域しか見つ かっていない (Tsujimori et al., 2006)。これは, 非 常に冷たい沈み込み帯深部からローソン石エクロジャ イトが上昇しにくいからだと考えられる。上昇の過程 で変成温度が上昇し、ローソン石が化学組成の近いエ ピドート (緑廉石) へ相変化しやすいことも、 ローソ ン石エクロジャイトの記載が少ないことと関係してい る。ローソン石エクロジャイト相と青色片岩相が一連 の変成岩として記載されている変成帯はさらに少ない (コルシカ, アルプス, フランシスカン, ニューカレ ドニア) (Tsujimori et al., 2006)。このうちフランシ スカン帯では、エクロジャイトはテクトニックブロッ クとして青色片岩と接していると考えられている (e.g. Maruyama and Liou, 1988)。ニューカレドニ アでは,温度上昇,圧力減少に伴いローソン石エクロ ジャイトからエピドードエクロジャイトに相変化して いる (Clarke et al., 1997)。アルプスでは, 海洋下部 地殻を構成していたはんれい岩起源のローソン石エク ロジャイトが部分的に記載されている(Groppo and Castelli, 2010)。ここでは、コルシカの変成岩から最 近明らかにされた重要な研究成果(Vitale Brovarone) et al., 2011) を紹介したい。

ローソン石エクロジャイト相の安定領域では青色片 岩相の岩石が不安定であるとこれまでは考えられてき た。そのため青色片岩相の条件に存在するローソン石 エクロジャイトはテクトニックブロックだと解釈され てきた。しかし Vitale Brovarone et al. (2011) はロー ソン石エクロジャイトと青色片岩が同じ温度圧力条件 で安定であることを示した。原岩化学組成と含水量の 違いにより2つの岩石が共存できるというのである。 ローソン石角閃石エクロジャイトとローソン石エクロ ジャイトは、Mg に富み含水量が多い場合は前者が、 Ca に富み含水量の少ない場合は後者が安定であるこ とが熱力計算により示された(Vitale Brovarone et al., 2011; Wei et al., 2011)。これは, 沈み込む海洋地 殻において、含水量の多い青色片岩と含水量の低い ローソン石エクロジャイトが混在することを示唆する (Vitale Brovarone et al., 2011)。青色片岩とローソ ン石エクロジャイトの混在は、混在する岩石の境界で 応力集中を引き起こす可能性が高い。詳細な野外露頭 観察を行うことで、1) 青色片岩相でなぜ二重深発地 震の上面が形成されているのか?という疑問に対する 明確な解答が得られる可能性がある。また、海洋下部 地殻に認められる化学組成の不均一も青色片岩とロー ソン石エクロジャイトの混在をもたらす可能がある。 2)「二重深発地震の上面」遷移帯であるローソン石 角閃石エクロジャイト相の領域で、下部地殻層に集中 して起きている地震の成因として、エクロジャイト相 変化の遅れ(Hacker *et al.*, 2003)や、下位のリソス フェアーからの脱水流体による下部地殻の脆性化 (Angiboust *et al.*, 2012)などが提案されているが、

下部地殻の化学組成の不均一も検討する必要がある。 さらにコルシカでは, Healy *et al.* (2009), Vitale Brovarone *et al.* (2011) が, 青色片岩, ローソン石 角閃石エクロジャイトの両方に, ローソン石エクロ ジャイトの変成脈が存在することを明らかにしてい る。彼らは野外露頭の観察および岩石薄片の観察か ら,青色片岩が脱水反応によりローソン石エクロジャ イトになる過程が岩石中に残されていると考えてい る。脱水反応に伴う変成脈が存在することは脆性破壊 によるクラックが脱水流体により形成された可能性が ある。ローソン石の分解に伴う脱水流体がクラックを 形成しているかどうかを検討することは,3) ローソ ン石エクロジャイト相ではなぜ地震が起こっていない のか?という疑問を解決できる可能性がある。これら の脱水変成脈より詳細な総合的研究が望まれる。

# 高温の沈み込み帯深部での脱水流体 ーメルトの関係

高温の(若い)海洋地殻が沈み込む場合,スラブ融 解を引き起こす可能性がある。西南日本(中部,四国 地方)下のフィリピン海プレートの沈み込み帯の場 合,東北日本下で見られたような太平洋プレートの地 設内に発達する地震帯は,35~60 kmの深さに発達 している(Hirose *et al.*,2008;長谷川ほか,2010) (Fig.3)。沈み込む海洋地殻の温度圧力経路から判

断すると(Fig. 2中の赤黄色矢印参照),青色片岩 (Blueschist)から角閃石エクロジャイト(Amphibole eclogite)への相変化に伴う脱水反応だと考えら れる。Fig. 3に示されている低周波地震の震源は,ス ラブ地殻における青色片岩相に分布するとFig. 2から 判断される。ポアソン比(Vp/Vs)の高い領域は,青 色片岩相,そして角閃石エクロジャイト相に対応する ことがFigs. 2,3から判断される。フィリピン海プ レートの場合,約90 kmの深さで部分融解(スラブ メルティング)を起こす可能性がFig. 2の状態図から 考えられる。この状態図には,脱水流体とメルトとの 関係に関して重要な情報が示されている。Fig. 2の SCP は,Mibe et al. (2011)による超高圧実験により



Fig. 3 Cross-section showing seismicity beneath southwest Japan (modified after Hirose et al., 2008; Katayama et al., 2010). Black and red circles indicate earthquakes and low-frequency tremors, respectively. Open triangle indicates the downdip limit of interplate earthquake. Black dashed lines indicate island arc Moho. Gray solid and dashed lines represent plate boundary and hypothesized bottom of oceanic crust, respectively. . Open triangle denotes the Median Tectonic Line. Orange areas indicate Vp/Vs higher than 1.80.

決定された MORB+H<sub>2</sub>O の系での secondary critical end point (第二臨界終端点)の略号であり、この点 より高温高圧条件では、メルトと流体の区別がつかな い事を意味する(Kawamoto et al., 2012)。SCP から 高圧の破線および低圧の実線は、phengite (フェン ジャイト)の分解に伴うウェットソリダス(H<sub>2</sub>Oに 飽和している条件での部分融解曲線) (Schmidt and Poli, 1998; Poli and Schmidt, 2002; Okamoto et al., 2006)を示している。スラブには過剰流体が存在し ないので, ウェットソリダスを超える条件で部分融解 反応が起きないと考える研究者も存在する。累進変成 作用の過程で脱水反応が進行する場合、脱水流体は系 外(熱力学的に平衡とみなす領域の岩石外)に移動し てしまうので、過剰な H<sub>2</sub>O が存在しないという論理 だと想像される。確かに単純系(例えばかんらん岩組 成のモデル系である MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 系および泥質岩 のモデル系である K<sub>2</sub>O-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 系) に おける高圧実験では、含水鉱物の分解は、不連続反応 としてある温度もしくはある圧力で起こる。ところが 本論で扱っている火山岩(含水玄武岩)起源の変成岩 のような多成分系(K<sub>2</sub>O-Na<sub>2</sub>O-CaO-MgO-FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O系)では、含水鉱物は複数の連続反応 により広い温度圧力の範囲で分解する。連続反応によ り流体は常に放出されることになるので、流体相は常 に存在すると考えられる (Poli and Schmidt, 1997, 2002)。したがって、高温のスラブがウェットソリダ スを超える温度条件に達していれば、エクロジャイト 中で部分融解が起こりうる。また、次章で詳しく後述 するが, 高温スラブの場合, スラブ地殻層へ下部から の流体供給が起こっている可能性もある。高温スラブ のマントルを構成する海洋リソスフェアー中の蛇紋石 の脱水分解は、約60kmの深度で起こると考えられ るが,数km上の海洋地殻層では,青色片岩-角閃石 エクロジャイト相変化が起きていると考えられる。

近畿,四国の下に沈み込むフィリピン海プレートの ような温かいスラブの場合,3GPa以下の圧力条件 で,エクロジャイト相(ゾイサイトエクロジャイトも しくは角閃石エクロジャイト)の変成作用を受けると 考えられる。この場合,650~700°C 程度の温度条件 でフェンジャイトの分解に伴うメルトが生成される。 さらに温度が上昇するとゾイサイト/エピドート(緑 廉石),角閃石の分解によるメルトが生成される (Fig.2)。

上記のような3 GPa 以下のエクロジャイト相の変

成条件で起こる脱水反応、部分融解の解析を天然の岩 石を用いて行うには、三波川変成岩中のエクロジャイ トが適していると考えられる。三波川エクロジャイト は、若いスラブの沈み込みで形成された(e.g. Aoya et al., 2003) と考えられているからである。Fig. 2に Miyamoto et al. (2007) による三波川変成岩中の石英 エクロジャイトの変成温度圧力条件(675~740°C, 2.3~2.4 GPa) が示されている。明らかにウェットソ リダスにまたがっており、フェンジャイトの分解によ る部分融解を経験しているだけでなく、ゾイサイト・ エピドート(緑簾石)の分解に伴う部分融解も起きて いると考えられる。なぜならば MORB+H2O 系にお けるゾイサイト・エピドート(緑廉石)の限界反応よ りも低温側から連続反応によってゾイサイト・エピ ドート (緑廉石) の分解がはじまるからである (Fig. 2)。 Miyamoto et al. (2007) は、エクロジャ イト岩体全域で幅広い温度圧力条件を求めている Ota et al. (2004) らの温度圧力条件の見積もりを批判し ており、上記の温度圧力条件が岩体に広域に広がる可 能性がある、と述べている。もし本当にそうであれば 岩体全域が部分融解条件に達していることになる。す でに筆者らは石英エクロジャイトの野外露頭から部分 融解組織を記載しており、地質学会の野外巡見調査で 現地討論も行っている(岡本ほか,2009)。岩石微細 組織に基づく岩石学的な部分融解過程の解析は今後別 稿で議論したい。石英エクロジャイトの岩石記載,全 岩化学組成,同位体組成については,Okamoto et al. (2004), Utunomiya et al. (2011) に報告している。 ジルコンの U-Pb 年代測定とジルコンの REE 濃度変 化については Arakawa et al. (2013) において記載し ている。

### 4. 沈み込みに伴う蛇紋岩の脱水分解反応

沈み込む海洋リソスフェアーやマントルウエッジ中 で起こる脱水化学反応の中で最も主要なものは,蛇紋 石の分解反応である。二重深発地震面の下面で起こる やや深発地震(Fig. 1)の成因として蛇紋石の分解が 注目されている(e.g. Peacock, 2001)。にもかかわら ず沈み込み帯起源の変成岩における蛇紋石の脱水分解 反応の研究は少ない。太平洋プレートの沈み込み,付 加により形成された環太平洋造山帯中には,三波川変 成岩等沈み込み帯起源の変成岩が含まれている。これ らには露頭スケールから数 km の大きさの蛇紋岩が含 まれている。これまでの研究では,沈み込み帯から上 昇する際の加水反応によりこれらの蛇紋岩が形成され た、と考えられてきた。ところが大陸衝突帯に含まれ る超高圧変成帯中の蛇紋岩では、蛇紋石の脱水分解組 織が記載されている(e.g. Scambelluri *et al.*, 2001)。アルプス変成帯では、蛇紋岩マイロナイト中 に存在するせん断脈中にはかんらん石が析出してい る。このかんらん石脈は、蛇紋石の脱水分解反応によ り生じたと考えられている。かんらん石の流体包有物 には塩素や希土類元素が含まれており、スラブからの 脱水流体と解釈されている (e.g. John et al., 2011)。 これらの解析が環太平洋造山帯で検証されれば、スラ ブやマントルウエッジ中での流体移動や岩石変形の実 態に大変重要な制約を与える。そこで三波川変成岩中 の蛇紋岩で蛇紋石の脱水分解反応を記載すべく、文献 調査から開始したところ,すでに1980年代に蛇紋石 の脱水分解により生じる変成かんらん石の記載は報告 されていた (e.g. Kunugiza et al., 1986)。三波川変成 岩中の蛇紋岩体(東赤石山岩体, 白髪山岩体, 龍門岩

体等)中の粗粒なかんらん石は火成岩起源であり, 細粒なかんらん石は、変成かんらん石であると Kunugiza et al. (1986) は記載した。Kunugiza (1982), Kunugiza et al. (1986) は, 蛇紋石+ブ ルース石が反応し、変成かんらん石+流体が生成され る連続反応が累進変成作用で起こっていると考えた (Fig. 4)。マイロナイト組織を構成する変成かんら ん石の存在は、Mizukami and Wallis (2005) によ り東赤石山岩体からも記載されている。Mizukami and Wallis (2005) は、ディオプサイドと蛇紋石が 反応し、かんらん石とトレモラ閃石と流体が生成する 累進変成作用を提案している。岡本・福村(2012) は、白髪山蛇紋岩体中の蛇紋岩マイロナイトからタル ク,変成かんらん石脈を発見した。脱水流体の化学組 成,変形作用と脱水流体の関係の解明等,今後の研究 課題は多い。

東北日本に沈み込むスラブの温度条件は,西南日本 よりも低温であると考えられている(e.g. Peacock



Fig. 4 Antigorite breakdown reactions in the MSH system. Modified after Bromiley and Pawley (2003). Dashed lines indicate antigorite breakdown reactions in the CMSH system, shown as brucite + antigorite = forsterite + fluid, and diopside + antigorite = forsterite + tremolite + fluid, respectively (Ulmer and Trommsdorff, 1999).

and Wang, 1999)。脱水脆性化説に基づくならば,ス ラブ内に存在する二重深発地震面の成因は以下のよう に考えられる(長谷川ほか,2010)。上側の地震面 は,海洋地殻内に存在するので,青色片岩相からエク ロジャイト相へ変化する際の脱水反応に起因すると考 えられている(Kita *et al.*, 2006)(Fig. 1)。下側の地 震面が,蛇紋石の脱水反応であるならば,東北日本で は,蛇紋石=かんらん石+エンスタタイト(輝石)+ 流体(1)が考えられる(Fig. 4)。脱水面上にかんらん石+輝石で構成されるかんらん岩が生成され、その上位の低温領域で、上昇した脱水流体による加水反応により蛇紋岩が形成される(Fig. 5)。この蛇紋石の分解反応は、負の圧力温度勾配を持っているので(Fig. 4)、二重深発地震面の下面は等温線よりも緩やかな傾斜角度でスラブ内部に発達するはずである。 西南日本では、上下の地震面を区別することは困難



Fig. 5 Schematic cross-sections beneath northeast and southwest Japan (modified after Katayama et al., 2010). The eclogite transformation occurs at a depths of 90 km in northeast Japan, and water released reacts with peridotite to form serpentine in the mantle wedge. Dehydration of serpentine occurs at a depths of 150 km, and expelled aqueous fluids are brought up due to buoyancy. In southwest Japan, eclogite transformation occurs at a depth of 60 km. Consequently, water circulation is limited to a relatively shallow regions. For the hydrated slab, dehydration reactions occur subparallel to isotherms within the subducting plate.

である。しかし地殻内で起こった地震が35~65 km 深度に集中しているのに対して, スラブのマントル内 で起こった地震は、45~70km深度に分布している (Fig. 3)。沈み込む海洋プレートの年齢と上面地震 帯と下面地震帯の間隔には相関性があり、プレートの 年齢が古くなるにつれて、上面帯と下面帯の間隔が広 がることが Brudzinski et al. (2007) により明らかに されている。また, Brudzinski et al. (2007) は, 下 面が形成される位置はスラブのマントル中で蛇紋石の 脱水分解すると期待される位置に一致すると述べてい る。西南日本(紀伊半島、四国地域)に沈み込むスラ ブマントルに発達する地震面に対応する蛇紋石の脱水 分解反応は、1.5 GPaより低圧(45 km 深度以浅)で は、蛇紋石=かんらん石+タルク(滑石)+流体(2) になる(Fig. 4)。この反応は正の圧力温度勾配を持っ ている (Fig. 4)。したがって, 高圧になるほど脱水 反応は高温側にシフトする。ところが1.5 GPa 以上の 圧力条件(45 km 以深)では、(1)の脱水反応にな る。この反応は負の圧力温度勾配を持っているため、 高圧になるほど反応は、低温側にシフトする。西南日 本のスラブの場合、蛇紋石の脱水反応位置は、下位の 高温側にシフトしても、45km深度を境に、低温側 にシフトする。60 km 以深では蛇紋石は不安定になっ てしまい、蛇紋石の脱水反応は起こらない。蛇紋石は すべて分解されてしまうことになる。脱水反応位置は 海洋地殻層低温側にシフトする (Fig. 5b)。すでに先 の章で述べたように高温のスラブ場合、海洋地殻層の 青色片岩の部分とスラブマントル内の蛇紋石の単独限 界の線がどのくらい離れているかが、二重深発地震面 がクリアにみえるかどうかに関わる。Fig. 5b に示さ れるように、蛇紋石の脱水反応位置はスラブの地殻・ マントル境界層の下位に分布している。45 km より 浅い領域では、かんらん石とタルクの層の直上に蛇紋 岩層が発達する可能性がある。蛇紋岩層を流体が浸透 できなければ、かんらん石タルク層と蛇紋岩層の間に 薄い流体層が広がる可能性がある。蛇紋岩層を流体が 浸透できるならば、さらに上位の海洋地殻層まで流体 が移動する (Fig. 5b)。西南日本のような高温のスラ ブ地殻では、沈み込みにつれて青色片岩相から角閃石 エクロジャイトの相変化に伴う脱水反応が進行すると 考えられているが (Fig. 2),下位のスラブマントル からの脱水流体が移動している可能性がある。この場 合,脱水反応と加水反応が複雑に起こることが予想さ れる。この可能性を検証するためには、過去の高温の

沈み込み帯から上昇してきた変成岩の累進変成作用時 の脱水反応,加水反応の解析,そして後退変成作用に 伴う加水反応の厳密な温度圧力の決定が重要である。

#### 5. おわりに

本稿では、スラブ内で認められる(二重)深発地震 面の特徴と,超高圧実験結果と天然の沈み込み帯変成 岩の解析に基づく脱水流体の関係を概説した。その結 果, 脱水化学反応と変成作用に関する解析が, スラブ 内地震の起源を理解する上で大変重要であることが明 確になった。沈み込み帯変成岩の多くは、上昇過程に おいて著しい塑性流動や、加水反応を伴う後退変成作 用を受けている。そのため、脱水反応や、沈み込み過 程での岩石変形の情報は、非常に限られている。しか しながら、コルシカ島の青色片岩、ローソン石エクロ ジャイトでの Vitale Brovarone et al. (2011) の解析 例や, 蛇紋石の脱水分解に伴う変成かんらん石脈の記 載 (e.g. Scambelluri et al., 2001) のように、特定の 岩石露頭に沈み込み過程の脱水反応,変成組織が残さ れている。非常にまれではあるが、特別な岩石の解析 を集中的に行うことで、深部脱水流体と変成作用に関 する新たな発見があることを期待している。

### 謝 辞

京都大学小木曽哲博士,川本竜彦博士,平島崇男教 授,東京工業大学高橋栄一教授には終始ご指導頂い た。広島大学片山郁夫博士,放送大学大森聡一博士に は蛇紋岩についてご指導頂いた。広島大学高橋嘉夫教 授には,数々の有益なご指摘を頂いた。地質調査およ び室内分析は科研費課題番号21540468ならびに 21109004より研究費の援助を受けた。

### 引用文献

- Angiboust, S., Agard, P., Yamato, P. and Raimbourg, H. (2012) Eclogite breccias in a subducted ophiolite: A record of intermediate-depth earthquakes? *Geology*, 40, 707–710.
- Aoya, M., Uehara, S., Matsumoto M., Wallis S. R. and Enami, M. (2003) Subduction-stage pressure-temperature path of eclogite from the Sambagawa belt: Prophetic record for oceanic-ridge subduction. *Geology*, **31**, 1045–1048.
- Arakawa, M., Okamoto, K., Keewook, Y. and Tsutsumi, Y. (2012) SHRIMP U-Pb dating of zircons related to the partial melting in deep subduction zone -case study from the Sanbagawa quartz bearing eclogite-. *Island Arc* (in press)
- Bromiley, G. D. and Pawley, A. R. (2003) The stability of antigorite in the systems MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (MSH) and MgO-Al<sub>2</sub>

O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (MASH): The effects of Al<sup>3+</sup> substitution on high-pressure stability. *American Mineralogist*, **88**, 99– 108.

- Brudzinski, M. R., Thrber, C. H., Hacker, B. R. and Engdahl, E. R. (2007) Global prevalence of double benioff zones. *Science*, **316**, 1472–1474.
- Clarke, G. L., Aitichison, J. C. and Cluzel, D. (1997) Eclogites and blueschists of the Pam Peninsula NE New Caledonia: a reappraisal. *Journal of Petrology*, **38**, 843–876.
- Groppo, C. and Castelli, D. (2010) Prograde P-T Evolution of a Lawsonite Eclogite from the Monviso Meta-ophiolite (Western Alps): Dehydration and Redox Reactions during Subduction of Oceanic FeTi-oxide Gabbro. *Journal of Petrology*, **51**, 2489–2514.
- Hacker, B. R., Abers, G. A. and Peacock, S. M. (2003) Subduction factory 1. Theoretical mineralogy, densities, seismic wave speeds, and H<sub>2</sub>O contents. *Journal of Geophysical Research*, **108**, doi: 10.1029/2001 JB001127.
- 長谷川昭・中島淳一・内田直希・弘瀬冬樹・北佐枝子・松澤暢 (2010)日本列島下のスラブの三次元構造と地震活動.地 学雑誌,119,190-204.
- Healy, D., Reddy, S. M., Timms, N. E., Gray, E. M. and Vitale Brovarone, A. (2009) Trench-parallel fast axes of seismic anisotropy due to fluid-filled cracks in subducting slabs. *Earth and Planetary Science Letters*, 283, 75–86.
- Hirose, F., Nakajima, J. and Hasegawa, A. (2008) Threedimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in south western Japan estimated by double-difference tomography. *Journal of Geophysical Research*, **113**, doi: 10.1029/2007 JB005274.
- John, T., Scambelluri, M., Frische, M., Barnes, J. D. and Bach, W. (2011) Dehydration of subducting serpentinite: Implications for halogen mobility in subduction zones and the deep halogen cycle. *Earth and Planetary Science Letters*, **308**, 65–76.
- 片山郁夫・平内健一・中島淳一(2010)日本列島下での沈み込 みプロセスの多様性,地学雑誌,119,205-223.
- Kawamoto, T., Kanzaki, M., Mibe, K., Matsukage, K. N. and Ono S. (2012) Separation of supercritical slab-fluids to form aqueous fluid and melt components in subduction zone magmatism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. doi: 10.1073/pnas.1207687109
- Kita, S., Okada, T., Nakajima, J., Matsuzawa, T. and Hasegawa, A. (2006) Existence of a seismic zone belt in the upper plane of the double seismic zone extending in the along-arc direction at depths of 70-100 km beneath NE Japan. *Geopysical Research Letters*, **33**, doi: 10.1029/ 2006 GL028239.
- Kunugiza, K. (1982) Formation of zoning of olivine with progressive metamorphism of serpentinite -an example from the Ryumon peridotite body of the Sanbagawa metamorphic belt, Kii peninsula. Journal of Japanese Association of Mineralogy, Petrology, and Economical Geology, 77, 157–170.

- Kunugiza, K., Takasu, A. and Banno, S. (1986) The origin and metamorphic history of the ultramafic and metagabbro bodies in the Sanbagawa metamorphic belt. In: *Blueschists and Eclogites* (eds. B. Evans and E. H. Brown), pp. 375–385, The Geological Society of America Memoir 164.
- Maruyama, S. and Liou, J. G. (1988) Petrology of Franciscan metabasites along the jadeite-glaucophane type facies series, Cazadero, California. *Journal of Petrology*, 29, 1–37.
- Mibe, K., Kawamoto, T., Matsukage, K., N., Fei, Y. and Ono, S. (2011) Slab melting versus dehydration in subductionzone magmatism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **108**, 8177–8182.
- Miyamoto, A., Enami, M., Tsuboi, M. and Yokoyama, K. (2007) Peak conditions of kyanite-bearing quartz eclogites in the Sanbagawa metamorphic belt, central Shikoku, Japan. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 102, 352–367.
- Mizukami, T. and Wallis, S. R. (2005) Structural and petrological constraints on the tectonic evolution of the garnet-lherzolite facies Higashi-akaishi peridotite body, Sanbagawa belt, SW Japan. *Tectonics*, 24, TC6012, doi: 10.1029/2004 TC001733.
- Okamoto, K. and Maruyama, S. (1999) The high-pressure synthesis of lawsonite in the MORB+ $H_2O$  system. American Mineralogist, 84, 362–373.
- Okamoto, K., Shinjoe, H., Katayama, I., Terada, K., Sano Y. and Johnson, S. (2004) SHRIMP U-Pb zircon dating of quartz-bearing eclogite from the Sanbagawa Belt, southwest Japan: implications for metamorphic evolution of subducted protolith. *Terra Nova.*, 16, 81–89.
- Okamoto, K., Katayama, I., Maruyama, S. and Liou, J. G. (2006) Zircon-Inclusion Mineralogy of a Diamond-Grade Eclogite from the Kokchetav Massif, Northern Kazakhstan. 48, 882–891.
- 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.
- 岡本和明・福村成哉(2012)三波川帯白髪山蛇紋岩体の地質学 および岩石学.日本地質学会第119年学術大会講演要旨, 65.
- 岡本和明・青木一勝・丸山茂徳 (2009) 四国中央部三波川変成 帯のテクトニクス. 地質学雑誌, 115. 補遺, 37-49.
- Peacock, S. M. (2001) Are the lower planes of double seismic zones caused by serpentine dehydration in subducting oceanic mantle? *Geology*, 29, 299–302.
- Peacock, S. M. and Wang, K. (1999) Seismic consequence of warm versus cool subduction metamorphism: examples from southwest and northeast Japan. *Nature*, 286, 937– 939.
- $\begin{array}{l} \mbox{Poli, S. and Schmidt, M. W. (1995) $H_2O$ transport and release} \\ \mbox{in subduction zones -experimental constraints on basaltic} \\ \mbox{and andesitic systems. Journal of Geophysical Research,} \end{array}$

214

100, 22299-22314.

- Poli, S. and Schmidt, M. W. (1997) The high-pressure stability of hydrous phases in orogenic belts: an experimental approach on eclogite-forming processes. *Tectonophysics*, 273, 169–184.
- Poli, S. and Schmidt, M. W. (2002) Petrology of Subducted Slabs. Annual Review of the Earth and Planetary Sciences, 30, 207–235.
- Scambelluri, M., Bottazzi, P., Trommsdorff, V., Vannucci, R., Hermann, J., Gòmez-Pugnaire, M.T. and LòpezSànchez-Vizcaino, V. (2001) Incompatible element-rich fluids released by antigorite breakdown in deeply subducted mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, **192**, 457– 470.
- Schmidt, M. W. and Poli, S. (1998) Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 163, 361–379.
- Tsujimori, T., Sisson, V. B., Liou, J. G., Harlow, G. E. and Sorensen, S. S. (2006) Very-low-temperature record of the subduction process: Areview of worldwide lawsoniteeclogites. *Lithos*, **92**, 609–624.
- Ulmer, P. and Trommsdorff, V. (1999) Phase relations of hydrous mantle subducting to 300 km. In: Mantle Petrology: Field Observations and High Pressure Experimentation

(eds. F. R. Boyd, Y. Fei, C. M. Bertkaand B. O. Mysen), pp. 259-281, Special publication Geochemical Society, 6.

- Utunomiya, A., Jhan, B., Okamoto, K., Ota, T. and Shinjoe, H. (2011) Intra-oceanic island arc origin for Iratsu eclogites of the Sanbagawa belt, central Shikoku, southwest Japan. *Chemical Geology*, 280, 97–114.
- Vielzeuf, D. and Schmidt, M. W. (2001) Melting relations in hydrous systems revisited: application to metapelites, metagreywackes and metabasalts. *Contributions to Min*eralogy and Petrology, 141, 251–267.
- Vitale Brovarone, A., Groppo, C., Hetényi, G., Compagnoni, R. and Malavieille, J. (2011) Coexistence of lawsonitebearing eclogite and blueschist: phase equilibria modeling of Alpine Corsica metabasalts and petrological evolution of subducting slabs. Journal of Metamorphic Geology, 29, 583–600.
- Wei, C. J. and Clarke, G. L. (2011) Calculated phase equilibria for MORB compositions: a reappraisal of the metamorphic evolution of lawsonite eclogite. *Journal of Metamorphic Geology*, 29, 939–952.
- Zhao, D., Matsuzawa, T. and Hasegawa, A. (1997) Morphology of the subducting slab boundary in the northeastern Japan arc and its relationship to the interplate seismic coupling. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 102, 89–104.