

日本列島直下で現在進行中の広域変成作用

丸山茂徳* 大森聡一* 岩瀬康行**

On-going Regional Metamorphism beneath the Japanese Islands

Shigenori MARUYAMA *, Soichi OMORI * and Yasuyuki IWASE **

Abstract

Recent advances in seismic studies have revealed that earthquakes have a close link with chemical processes, *i.e.* metamorphic dehydration. From this point of view, we provide a new scheme for observation of on-going regional metamorphism in a subduction zone.

Combining the phase diagrams of MORB + water and peridotite + water with the thermal structure of the descending Pacific oceanic plate in NE Japan and in the Philippine Sea (PHS) plate in SW Japan, we can draw the distribution of metamorphic facies of regional metamorphism. However, the most uncertain parameter is thermal structure, even though it has been calculated numerically, because of the difficulty of evaluating frictional heating, heat transportation by dehydrated fluids and mantle convection in the hanging wall. To overcome this problem, we have carried out different approach from seismic observations in estimating the thermal structure of a subduction zone, by applying the dehydration-induced earthquake hypothesis. This hypothesis involves the assumptions as follows: 1) any dehydration in the subducted slab induces earthquakes, 2) peridotite of the subducting plate is more or less hydrated, as well as the oceanic crust, and 3) the dehydration reactions proceed in near equilibrium condition.

Direct seismic determination of the depths of the blueschist or epidote-amphibolite facies to eclogite transformation, decomposition of serpentine (antigorite), and the stability limit of clinocllore enable us to establish fixed points for the slab temperature. The seismogenic zone (150°C to 350°C), the depth limit of non-volcanic tremor seismicity, and the slab melting in SW Japan (800-900°C) were also used to fix temperatures at given depths. Three profiles in NE-Japan and two profiles in SW-Japan were examined, and their P-T paths along the Wadati-Benioff zone were estimated to be anti-clockwise in all cases. The P-T paths are consistent with those of metamorphic facies series from well-studied on-land regional metamorphic belts. The P-T path of the subducting slab in NE-Japan is colder than that of the eastern-Shikoku section in SW-Japan, except for the Kii-peninsula section which has an almost similar P-T path to that in NE-Japan.

Comparison between the on-going metamorphism beneath the Japanese islands and the

* 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

** 防衛大学校応用科学群地球海洋学科

* Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

** National Defense Academy

on-land regional metamorphic belts in the Sanbagawa and Kokchetav shows that the P-T conditions of these two metamorphic belts are located between that of NE-Japan and of the eastern-Shikoku profile.

A numerical model for wedge-mantle convection shows that the direction of the small corner flow of the wedge mantle causes a back current along the subducting slab. The area of the corner flow is wider in a shallow subduction zone corresponding to that in eastern Shikoku, and is narrower in a steeper subduction zone represented by NE-Japan. Since the exhumed metamorphic belts have intermediate P-T conditions between those in NE Japan and eastern Shikoku, We suggest that a change in the mode of wedge-corner flow from steep to shallow subduction plays some role in the exhumation of a metamorphic belt. Such a change in Cretaceous time from 120 Ma to 80 Ma may have promoted the exhumation of the Sanbagawa belt.

Key words : subduction zone, intraslab earthquake, regional metamorphism, dehydration-induced earthquake hypothesis, northeastern Japan, southwestern Japan

キーワード : 沈み込み帯, スラブ内地震, 広域変成作用, 脱水誘発地震仮説, 東北日本, 西南日本, 変成岩の上昇

I. はじめに

変成岩研究の意義の一つは、地殻-マントル・テクトニクスの物理化学的条件の提示にある。岩石が地下深部にもたらされる過程や、地下深部から地表に到達するまでの過程の物理化学的条件の変化を変成岩は記録し、我々はその一部を解読することができる。しかし、ここで根本的な問題として存在するのは、地球深部における変成作用を対象とした場合、我々は基本的に地表付近まで戻ってきた岩石しか取り扱うことができないということである。沈み込み帯では常に変成作用が進行中であるが、どこでも定常的かつ広域的に変成岩が上昇しているわけではない。したがって、変成岩が上昇するためには何か特別なテクトニックな条件が必要なだろう。

岩石の脱水脆性化に関する実験 (Raleigh and Paterson, 1965; Meade and Jeanloz, 1991; Dobson *et al.*, 2002) は、地震を見ることは脱水反応を見ることである、という理解を生み出した。これらの実験による予測に基づき、和達-ベニオフ面の地震分布と予測される脱水反応の位置を比較

し関連を認める報告がなされている (Nishiyama, 1992; Seno and Yamanaka, 1996; Peacock, 2001; Omori *et al.*, 2002; Yamasaki and Seno, 2003)。また、西南日本には、海溝にほぼ平行に分布する非火山性長周期微動の存在が報告されている。これは、一つの解釈として、マントルウェッジまたは地殻内の流体の移動に起因するという説明がされている (Obara, 2002; Katsumata and Kamaya, 2003)。

脱水反応、または流体の移動と地震との関連を示唆する研究は、蛇紋岩の実験 (Raleigh and Paterson, 1965; Meade and Jeanloz, 1991; Dobson *et al.*, 2002) を除くと、主に震源分布と脱水が起きているであろう場所の経験的対応に基づいている。蛇紋石鉱物以外の脱水が地震を誘発することになるかどうかを、実験で確認した例はまだない。しかし、Omori *et al.* (2002, 2004) は、以下のような推論から、ある応力下にある岩石が、流体としての水に欠如した状態から水が存在する状態へと変化する時に地震が起こる可能性が高いことを示唆している。岩石物性に対する水の影響に関する研究 (たとえば、Karato *et al.*,

1986; Hirth and Kohlstedt, 1996; Chen *et al.*, 1998; Karato and Jung, 1998) によると, かんらん石に 10 ~ 100 ppm の水が加わっただけで, かんらん石結晶の粘性は 1/100 以下に減少する。また, 鈹物粒間に水が浸透することにより, 鈹物粒子の結合が弱くなることも予想される (Ra-leigh and Paterson, 1965)。初生的な含水鈹物の分布は, 割れ目や脈に支配されて不均質であると考えられるから, 脱水で生成した水も不均質に分布する。これらの要因により, 脱水反応により岩石中に物理的強度の不均質が発生し, 弱化した部分が急速な応力の解放 (=地震) を誘発すると考えられる。実験で蛇紋石の脱水分解により誘発された破壊現象は, 間隙水圧の上昇によるものではない, なぜならば, 高压下 (約 2 GPa 以上) では, 水を含めた分解生成物の方が体積が小さいからである。したがって, 脱水反応そのものが破壊エネルギーの起源とは考えにくいので, 水の生成とともに, なにかしらの応力の存在も地震発生には必要である。脱水反応の進行速度に対して地震はごく短時間の現象である。実際には, 脱水反応は長時間にわたって進行し, 流体としての水の量がある閾値に達した時に, 地震が発生するのであろう。

このようにして実験や観測を元に構築された脱水誘発地震仮説は, 地球内部における化学過程と物理過程の関連を示すという点で, 地球ダイナミクスにおける革新となり得る。それと同時に, 今, そこで起きている脱水反応, すなわち変成作用を間接的に観測することができる, という可能性を包有している。本論文では, 脱水誘発地震仮説に基づき, 地震観測および地震波トモグラフィと岩石の相平衡を総合化して, 東北日本と西南日本で現在進行中の変成作用の温度・圧力条件を推測し, 変成岩から求められている変成 P-T 時間経路や変成相系列と比較した。東北日本では地殻物質はマントルへと一方的に運搬されていくが, 西南日本では, 現在上昇中の変成岩が存在する可能性が示唆される。

II. 研究の手法とデータセット

本論文の議論では, 前章で述べたスラブ内地震の脱水誘発起源仮説に基づき, 以下の仮定の下に議論を進める。1) 沈み込むプレートの内部で起きるすべての脱水反応は, 地震を誘発する。2) 沈み込むプレートのペリドタイト部で起きる地震も脱水反応起源である。そのために, 海洋プレートは海底面から 50 km 以深まで多かれ少なかれ加水作用を被っている。3) 脱水反応は平衡条件付近で進行する。仮定の 1 は前章でその可能性を紹介した通りである。2 については, 直接的証拠として, 関東下の太平洋プレート中のポアソン比分布が含水鈹物の存在を示唆することが示されている (Omori *et al.*, 2002)。3 は, 累進変成作用の解析が可能であるということから, 経験的に導かれる結論である (たとえば, Spear, 1993; Miyashiro, 1994)。

震源の分布と脱水反応を正確に対応させるためには, 温度構造が自明でなければならない。ところが, 温度構造を独立に求めることができない。そのために, 従来の研究では数値計算モデルから温度構造を見積り, 状態図を参考に脱水反応を島弧断面図に投影し, 震源分布との関連を調べてきた (Peacock, 2001; Yamasaki and Seno, 2003; Hacker *et al.*, 2003)。ところが, その結果では, 脱水反応と震源との相関に, 良い一致が見られているとはいえない。震源決定と反応の P-T 条件の誤差を考慮しても, 説明し切れない程の大きなずれが存在する (Omori *et al.*, 2002)。このずれは数値計算に基づく温度構造から来ている。

本研究では, 温度構造に関して逆解析的手法を採用し, 震源と反応の一致を優先させ, 沈み込み帯の等温線を描くことにした。初めに震源の深度を圧力に変換し, その圧力下で起こり得る脱水反応の温度を求める (Omori *et al.*, 2002, 2004)。ここで, 重要なのは, 脱水分解反応が不連続反応に近く, 相対的ではあるが, 他の反応に比べて大量の脱水を起こす反応曲線に注目することである。これは上述の仮定が正しいとすれば, 地震の頻度が急激に減少する境界深度の温度が求まることを

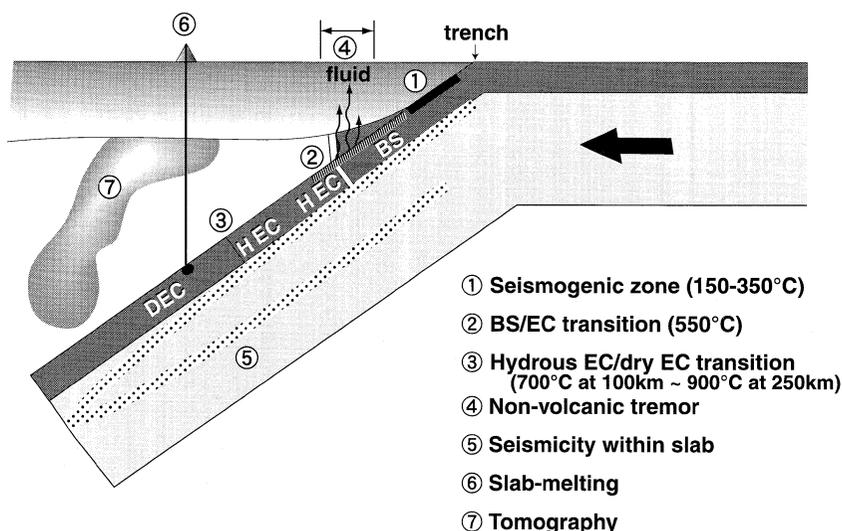


図 1 本研究で用いた方法の概念図。

Fig. 1 Schematic diagram of the method of this study.

意味する。その反応とは、(1) 海洋地殻のエクロジイト相転移、(2) かんらん岩中の蛇紋石の分解、および(3) 緑泥石の高温高压安定限界の三本である。さらに、トモグラフィによる低速度領域の位置、ポアソン比トモグラフィ、島弧火山の位置を考慮して、内部整合性の最も高い温度構造を帰納的に求める(図1)。脱水反応の温度・圧力条件の基準となる相平衡図については、熱力学計算で描かれたペリドタイト系(Omori *et al.*, 2004)と Okamoto and Maruyama (1999) による海洋地殻(MORB)系を採用した(図2)。

III. 東北日本における現在進行中の 広域変成作用

東北日本の沈み込み帯では、約 130 Ma の太平洋プレートがほぼ真西に向かって 10 cm/yr の速度で沈み込んでいる。東北日本下、二重地震面上面の地震の震央分布図(Igarashi *et al.*, 2001)を図3に示す。また、海溝に垂直な断面から幅 50 km の範囲の震源(1985-1995 日本国立大学地震観測網:JUNET のデータ)を東西断面に投影した震源分布図を図4に示す。図4には、Zhao *et al.* (1997) による太平洋スラブの上面の境界と、お

よそのプレート下面の境界も重ね書きされている。

東北日本においては、深度 100 ~ 200 km のスラブ内部に、二重地震面が発達している。二重地震面の上面と下面は、浅部では約 30 km 程度の間隔を示すが、200 km 付近で上面と下面が収束する。200 km 以深では震源数が急減するが、350 km 付近にも震源が分布する。図4にはは示されていないが、この地域のスラブ内地震の最大深度は 600 km に達する。二重地震面の上面は、80 km 以浅では海洋地殻の内部とスラブのかんらん岩中に分布する。海洋地殻内の地震は、50 ~ 60 km と 60 ~ 80 km で頻度が高い。80 km 以深では、多くのスラブ内地震は、スラブかんらん岩中で発生している。現在までのところ、東北日本においては流体の移動に関連すると思われる非火山性長周期微動は観測されていない。

以上の震源分布の観測を、脱水誘発地震の仮定に基づいて解釈すると、東北日本沈み帯の温度構造と現在進行中の変成反応は、図5のようになる。東北日本では 50 km よりも浅い地震が観測点から遠い海域で起こるため、これらの地震の震源決定精度があまり良くない。それでも、断面図における震源分布の頻度から判断して、海溝から内側の

ベニオフ面に沿って、海洋地殻中の地震発生帯の開始地点（20～25 km 深度）を海洋地殻の脱水反応の開始と考えることにする。ここが変成反応による脱水の開始地点と考え、この深度における圧力と可能な温度範囲から推定して、ここをパンペリー石-アクチノ閃石相から緑色片岩相の境界とする。すると、この点の温度は約 330℃ 程度と見なされる（図 5）。この地震帯は 50～60 km 深

度で、いったん終息するが、ここを緑れん石角閃岩相または藍閃石片岩相と角閃石エクロジヤイト相との境界とすると、約 500℃、海洋地殻中の地震はさらに 60～70 km 深度から 80～100 km 深度にかけて引き続いて起きるが、密集した震源分布は、100 km までに終息する。この終息深度が無水エクロジヤイトの生成地点と考えると、温度は約 600℃ である。このような傾向は南北方向に幾らかバラつく傾向も見られる（図 5）。スラブの上面で起きる地震には海洋地殻の内部とスラブのかんらん岩最上部で起きる場合の二つがあり、地震の応力場の解析によって、ある程度の区別は可能であるが完全ではない。図 3～図 5 ではそれらの区別がなされていないが、発震機構の解析と海洋地殻の厚さを比較して海洋地殻内部で起きる地震

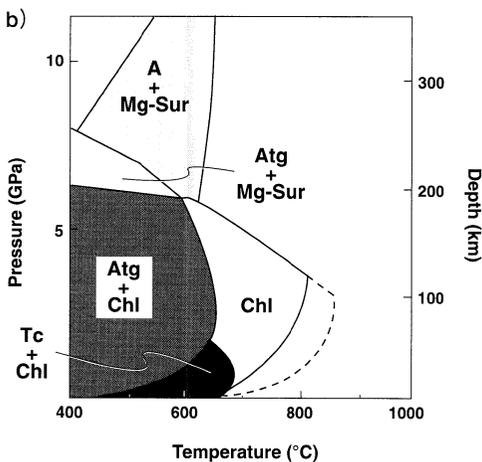
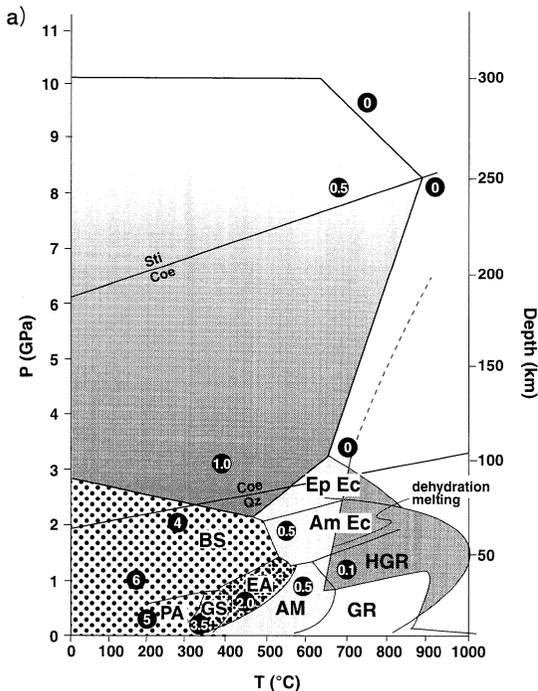


図 2 a) MORB+H₂O系の相図(Okamoto and Maruyama, 1999 を修正).

PA: パンペリアイト-アクチノ閃石相, BS: 藍閃石片岩相, GS: 緑色片岩相, EA: 緑れん石-角閃岩相, AM: 角閃岩相, AmEc: 角閃石エクロジヤイト相, EpEc: 緑れん石エクロジヤイト相, HGR: 高圧グラニュライト相, GR: グラニュライト相. 数字はおよその含水量(重量%)を示す.

b) かんらん岩 + H₂O 系の相図 (Omori *et al.*, 2004 を修正).

Atg: アンチゴライト, Tc: タルク, Chl: クリノクロア, A: A相, Mg-Sur: Mgサーササイト

Fig. 2 a) Petrogenetic grid for the MORB+H₂O system (modified after Okamoto and Maruyama, 1999).

PA: Pumpellyite-Actinolite facies, B: blueschist facies, GS: greenschist facies, EA: epidote-amphibolite facies, AM: amphibolite facies, EpEc: epidote-eclogite facies, HGR: high-P granulite facies, GR: granulite facies. Numbers in the fields correspond approximate water content in the rock.

b) Petrogenetic grid for the peridotite+H₂O system (modified after Omori *et al.*, 2004).

Atg: antigorite, Tc: talc, Chl: clinochlore, A: phase A, Mg-Sur: Mg-sursasite

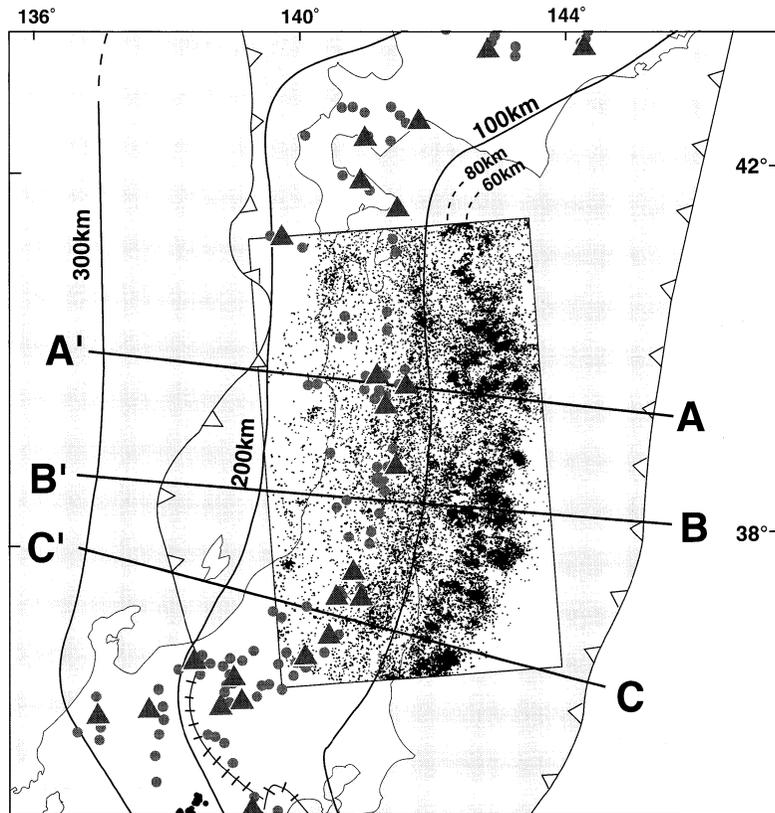


図 3 東北日本，二重地震面上面地震の震央分布（黒点），第四紀火山（丸印），および活火山（三角）．震央分布は Igarashi *et al.* (2001) による．A-A'，B-B'，C-C' はそれぞれ図 4 の断面図の基準線である．

Fig. 3 Epicenters (black dots), quaternary volcanoes (circle) and active volcanoes (triangles) in the NE-Japan. Epicenter map was taken from Igarashi *et al.* (2001). Lines A, B, C correspond to the location of the cross-sections in Fig. 4.

の分布頻度を示した Igarashi *et al.* (2001) を参考にして境界深度の温度を求めた (図 5)。

スラブかんらん岩中の二重地震面の地震は，250 km 以浅では，アンチゴライト，およびクリノクロアの脱水反応に対応する。各帯の示す幅はクリノクロア分解の連続脱水反応に対応すると思われる。クリノクロアの安定限界は，典型的レルゾライト組成で 60 ~ 120 km で 800°C である。180 ~ 240 km 付近において二重地震面が収束するが，これは，クリノクロアから Mg-サーササイトの生成する反応とアンチゴライトの分解反応に

対応させることができる。この反応が起きるためには 180 km におけるスラブ内部の最低温度が 600°C 以下である必要がある。240 km 以深のスラブかんらん岩中の地震は，Mg-サーササイトの脱水分解に対応する。

東北日本から沈み込んだスラブの延長は中国北京の下部まで到達し，マントル遷移層 (410 ~ 660 km) で滞留している (たとえば，Zhao, 2004)。マントル遷移層に滞留したスラブ内部では，等圧加熱により 1000°C 程度で DHMS の脱水が起こり，この反応が最深部の地震に対応していると考えら

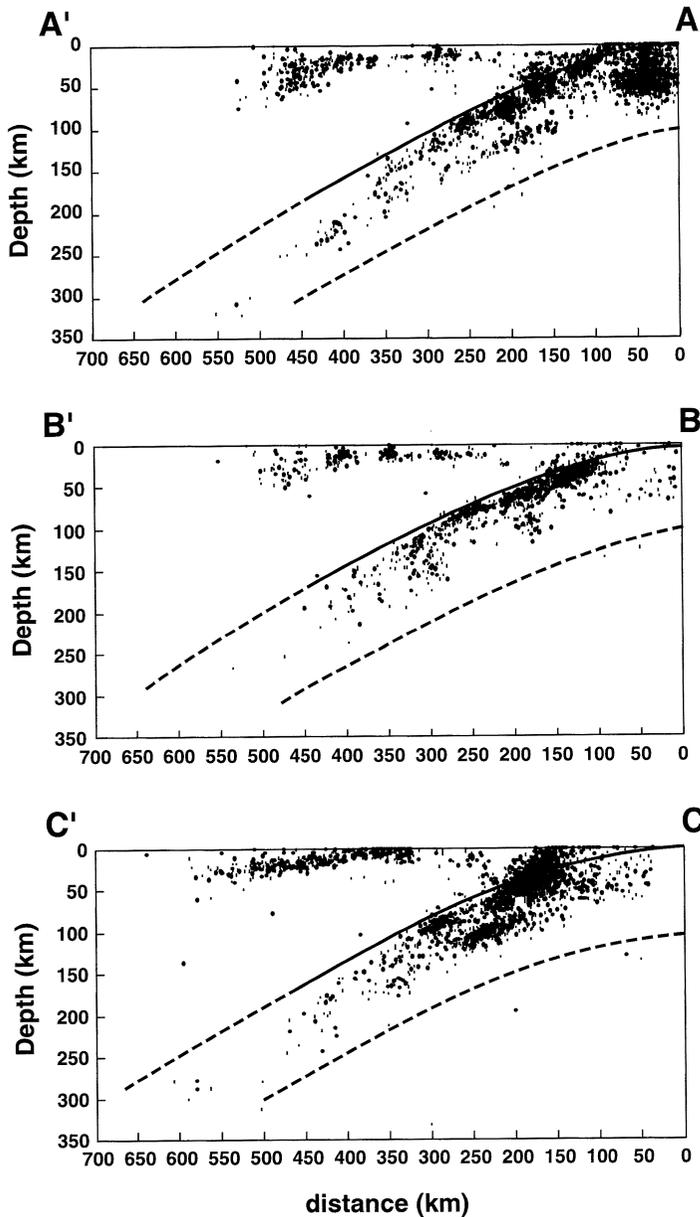


図 4 東北日本震源分布断面図。
各断面の位置は、図 3 を参照。

Fig. 4 Hypocenter distributions in NE-Japan.
The location of each section is shown in Fig. 3.

れている (Omori *et al.*, 2004)。

IV. 西南日本における現在進行中の 広域変成作用

西南日本の下には 8 ~ 30 Ma の年代を持つ若い
フィリピン海プレートが伊豆半島から豊後水道ま

での間の西南日本に沈み込んでいる。その中で、
最も若い部分は南北走向を持つ紀南海山列付近に
対応し、紀伊水道の下に沈み込んでいる。豊後水
道以西では 100 ~ 50 Ma の古いフィリピン海プ
レートが九州と琉球列島の下に沈み込んでいる。
このように、西南日本は東北日本のような一様に

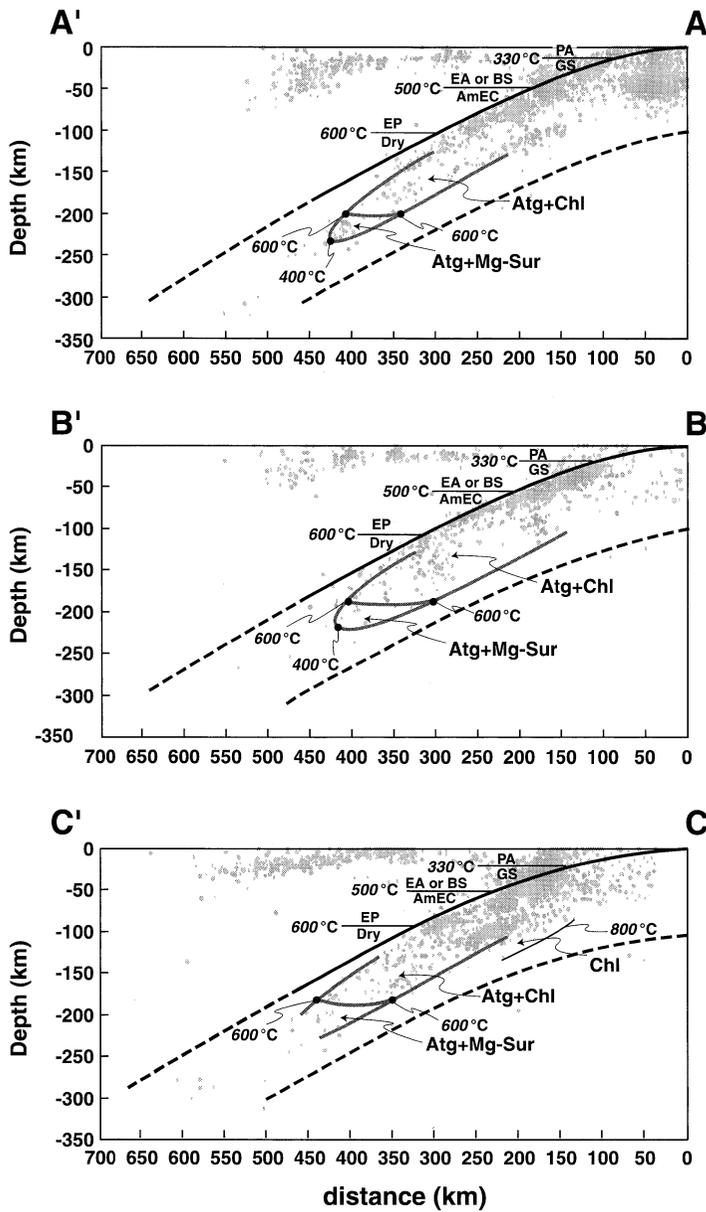


図 5 東北日本，現在進行中の変成作用と温度の定点。略号は図 2 に準ずる。

Fig. 5 On-going metamorphic reactions and the thermal fixed-points in NE-Japan. Abbreviations are similar to Fig. 2.

古い海洋プレートの沈み込みとは異なり，場所によって，極端な違いがある。西南日本の下に沈み込むフィリピン海プレートの，さらに下位には，東側から東北日本の下に沈み込んだ太平洋プレートが 400 ~ 600 km 深度に横たわっており，この地域のマントルは中央海嶺直下のマントルに比べ

て約 10 倍の含水量を持つと考えられている (Komiya and Maruyama, 2004)。

Obara (2002) が明らかにした西南日本沈み込み帯の和達-ベニオフ面の等深度線と非火山性長周期微動の震央分布図を図 6 に示す。Kodaira *et al.* (2002) による紀伊水道-四国東部下のトモグ

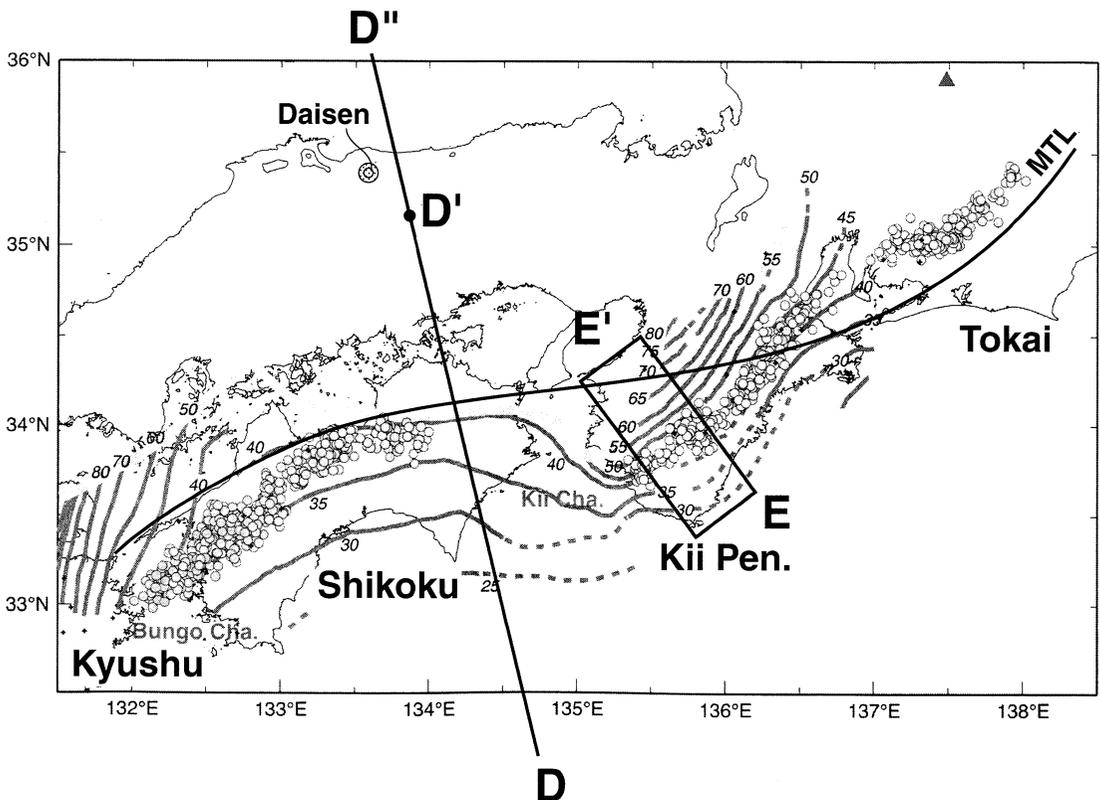


図 6 西南日本非火山性長周期微動分布と和達-ベニオフ面等深度線 (Obara, 2002 を改変). 丸は非火山性長周期微動の震央を示す. 和達-ベニオフ面等深度線は 5 km 間隔. D-D'-D'', E-E' はそれぞれ図 7 および図 8 の断面図の基準線である.

Fig. 6 Distribution of the non-volcanic tremors (after Obara, 2002) and depth contours for the Wadati-Beniof plane in SW-Japan. Circles represent epicenters of the non-volcanic tremors. The depth contours were drawn for each 5 km. D-D'-D'' and E-E' represent the locations of the cross-sections in Fig. 7 and Fig. 8.

ラフィ断面と, Smith *et al.* (2004) が震源位置を再決定した紀伊半島下の震源分布断面を図 7 に示した。東北日本と比較して, 西南日本で特徴的な地震学的観測は次の 4 点である。1) 関東地域 (Omori *et al.*, 2002) を除くと, 深発二重地震面 (DSZ) は明瞭でない。2) 非火山性長周期微動の震央が, 約 50 km 幅の帯状を呈して, 東西方向に四国西部から伊豆半島西部まで, ほぼ 600 km にわたって連続する。四国東部~紀伊水道, および知多半島~名古屋付近の 2 箇所には非火山性長周期微動が欠落する。非火山性長周期微動の震源は, 35 ~ 50 km 深度の和達-ベニオフ面上盤側の下部

地殻内部に位置する。Kodaira *et al.* (2002) と Seno and Yamasaki (2003) によれば, 非火山性長周期微動の見られない断面では, 海洋地殻内部の地震活動の頻度は低く, 逆にスラブかんらん岩中に多くの震源が位置している (図 7a)。3) 西南日本においては, スラブ内地震は中央構造線下付近で無くなり, それより北側では, 和達-ベニオフ面の追跡は困難である。最近の P 波トモグラフィ像によると, フィリピン海プレートと思われる高速度異常の北限はほぼ日本海の海岸線までであるが, その付近 (80 km 深度) から高角度で折れ曲がり, 150 km 深度付近まで追跡できる (Zhao *et*

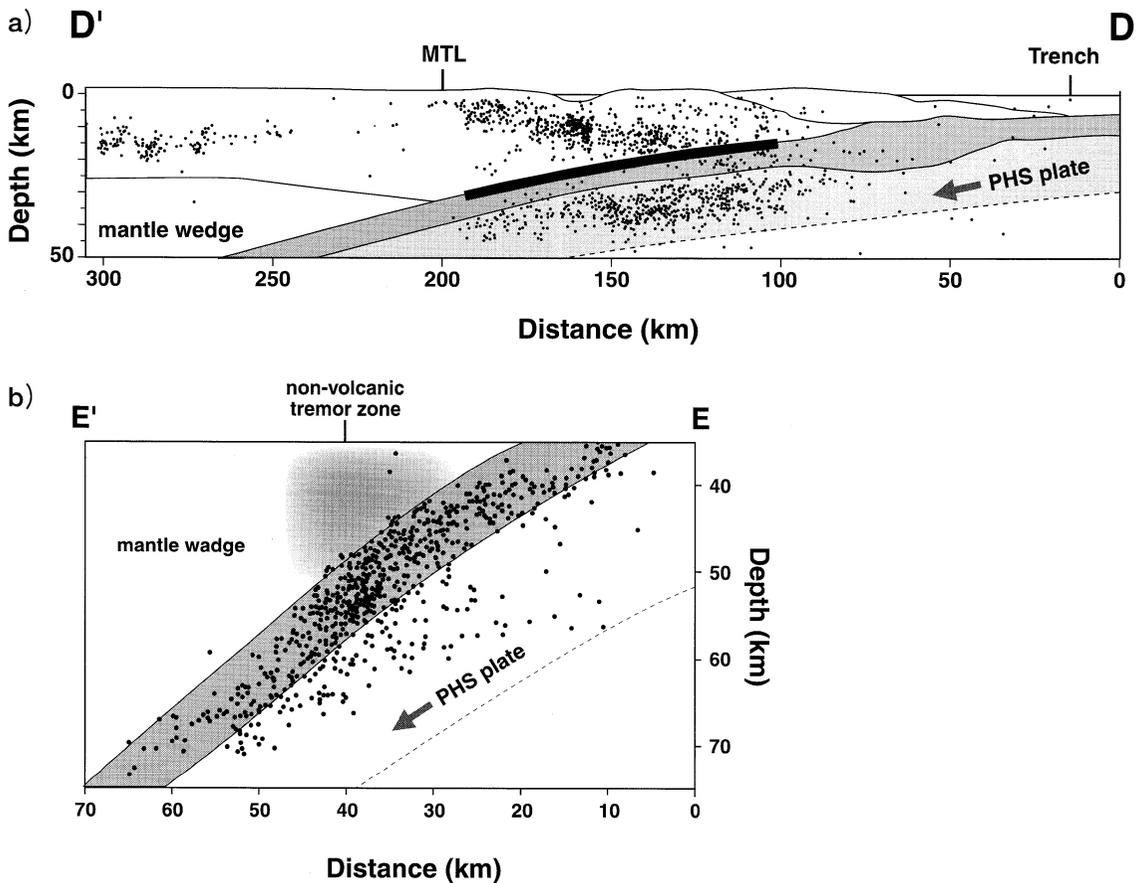


図 7 西南日本震源分布断面図。

- a) D-D' 断面 (Kodaira *et al.*, 2002 を改変), グレーの部分は沈み込むフィリピン海プレートの海洋地殻。点線はおよそのプレート下面の位置。
- b) E-E' 断面 (Smith *et al.*, 2004 を改変)。グレーの部分は沈み込むフィリピン海プレートの海洋地殻。点線はおよそのプレート下面の位置。影は非火山性長周期微動の震源が分布すると考えられる領域である。

Fig. 7 Hypocenter distributions in SW-Japan.

- a) D-D' section (modified after Kodaira *et al.*, 2002), Gray area is the oceanic crust of the Philippine Sea plate. Dotted curve is an approximate bottom of the plate.
- b) E-E' section (modified after Smith *et al.*, 2004). Gray area is the oceanic crust of the Philippine Sea plate. Dotted curve is an approximate bottom of the plate. Shaded area in the mantle wedge is a possible source region of the non-volcanic tremor.

al., 2004)。4) プレートの沈み込み角度は地域によって変化するが、東北日本と比べて非常に浅く約 20～30 度である。ただし古い海洋プレートが沈み込む九州から琉球にかけては 50～60 度となり東北日本と大差がない。

以上の震源分布の観測を、脱水誘発地震モデルから現在進行中の変成作用に対応させた解釈を四

8a, b に示す。西南日本において重要な定点は次の 3 つである。1) 非火山性長周期微動の流体は、沈み込んだ海洋地殻とスラブのかんらん岩から供給されている。非火山性長周期微動の位置と和達-ベニオフ面の深度の関連より、その流体の起源を藍閃石片岩相または緑れん石角閃岩相から角閃石エクロジャイト相への転移と関連させ、非火山性

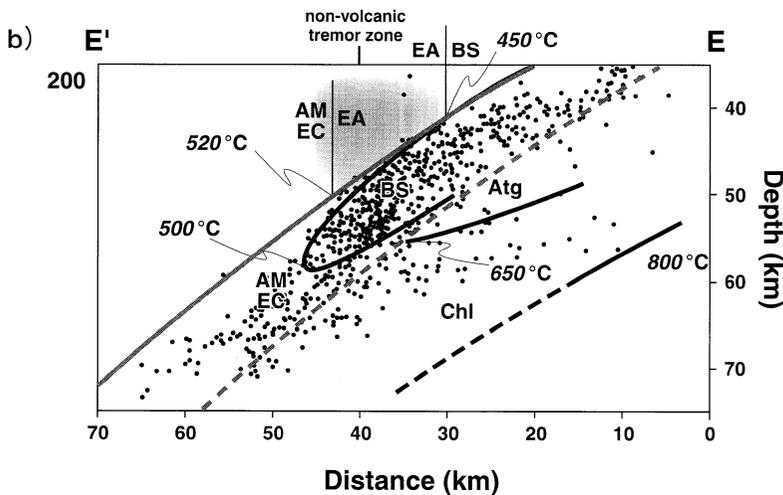
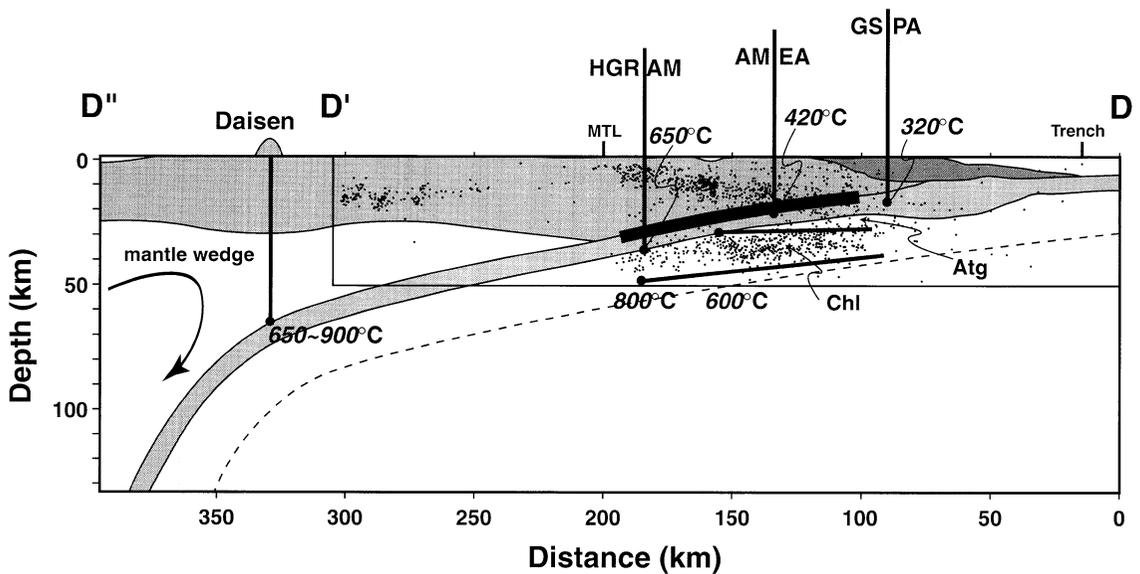


図 8 西南日本、現在進行中の変成作用と温度構造。略号は図 2 に準ずる。

a) D-D'-D'' 断面, b) E-E' 断面。

Fig. 8 On-going metamorphic reactions and the thermal fixed-points in SW-Japan. Abbreviations are similar to Fig. 2.

a) D-D'-D'' section. b) E-E' section.

長周期微動震源直下の海洋地殻内の温度を固定した。2) スラブかんらん岩内の地震は、蛇紋岩および緑泥石の連続脱水反応に起因すると考えられる。断面における震源分布が帯状として分布することは、連続反応で説明できる。深さ 25 ~ 50 km におけるこの反応の終了温度は、600 ~ 800°C 程度として、スラブ内の温度定点とした。3) スラブが比較的高温のため、西南日本ではスラブ内の脱水反応は、ほぼ中央構造線以南で終了してしまう。そのため、日本海側に位置する大山等の火山のマ

グマの起源として、通常の島弧火山のようなマン托ルの加水融解とは異なる成因を考える必要がある。ここでは、海洋地殻の部分融解によりマグマが生成すると考え、海洋地殻の脱水部分融解温度 (650 ~ 900°C, 70 km) を大山下に固定した。

V. 現在進行中の広域変成作用の構造場： コーナー対流の力学

ここまでは現在進行中の広域変成作用の P-T 条件を考えてきたが、ここでは、変成岩が置かれて

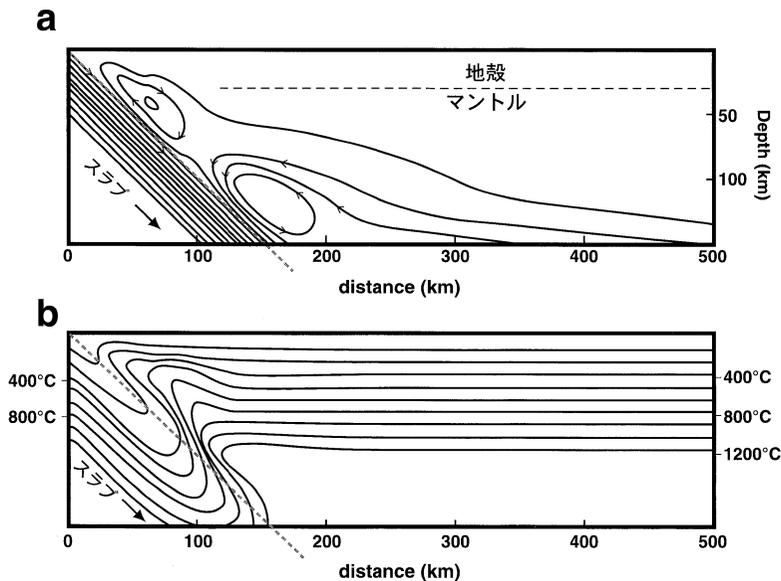


図 9 コーナー対流の 2 次元数値シミュレーションによる結果 (Iwase and Honda, 1993) の例。

計算開始から 240 万年後の流れ場 (流線関数) a) と温度場 b) を表している。計算領域は 500 km × 150 km で、地殻の厚さは 30 km である。左端が海溝軸で海洋プレートは 45 度の角度で沈み込んでいる。等温線の間隔は 130°C。

Fig. 9 Corner flow in a model mantle-wedge by the result of 2-dimensional numerical simulation (Iwase and Honda, 1993) .

a) Stream line field after 2.4 My. b) Thermal structure. The area of 500 km × 150 km were considered, and a 30 km-thick continent is assumed. Left end is trench axis, and subduction angle is 45 deg.

いる場の力学的性質を考える。地表で観察される変成岩には、その岩石の被ってきた構造運動が鉱物組織、結晶定向配列、断層・裂隙などに記録されている。しかし、これらの記録は、沈み込み→上昇過程の複数過程の重複である。そこで、ここではマントルウェッジのコーナー対流を数値計算により見積った例を用いて、現在進行中の広域変成作用の構造場について議論する。

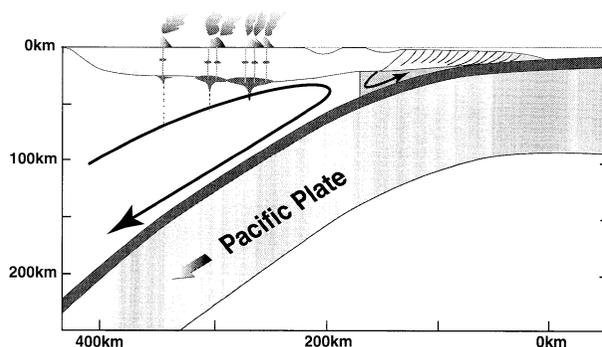
海洋プレートが沈み込むことにより、沈み込むプレート (スラブ) の直上の大陸側のマントルウェッジも引きずり込まれる。その結果、マントルウェッジにはスラブの運動に沿った循環流 (コーナー対流) が生じると考えられる。このようなコーナー対流の考えに基づき、沈み込み帯での流れ場、温度構造の数値計算が多数行われてきた (たとえば、Honda, 1985; Davies and Stevenson,

1992; Iwase and Honda, 1993; Ponko and Peacock, 1995)。

岩石学的な制約を重要視したマントルウェッジのコーナー対流数値シミュレーションを最初に行ったのは Honda (1985) であるが、Iwase and Honda (1993) はさらに進めて地殻および上部マントルを構成する岩石の実験に基づく温度と圧力に依存するレオロジーを取り入れたコーナー対流のシミュレーションを行った。Iwase and Honda (1993) では、さらにスラブ上面に沿って約 60 km の深さまで存在するスラスト帯では周囲に比べて粘性率を 1/100 に設定することで滑り状態を再現し、当時としては可能な限り現実的な数値シミュレーションを行った。

図 9a, b は計算開始から 240 万年後の流れ場と温度場である。その他の研究と同様に、海洋プレー

a NE Japan - type



b SW Japan

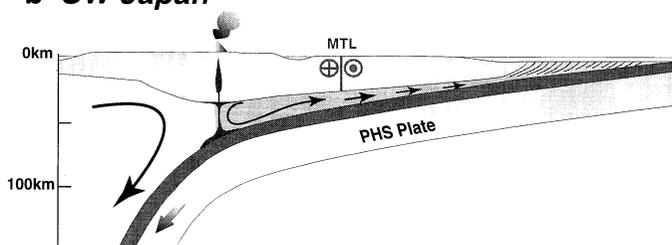


図 10 東北日本 (a) および西南日本 (b) のウェッジマンテル・コーナー対流の模式図。

Fig. 10 Schematic diagrams showing corner flow in mantle-wedge. a) NE-Japan and b) SW-Japan.

トの沈み込み運動により引き起こされた大きな反時計回りの流れが見られる。しかし、ウェッジの先端付近には、深さ 30 km 付近を中心に 60 km 程度の深さまでの小さな対流渦が発生している。この小循環流は、同じ温度、圧力の下では地殻はマンテルよりも粘性率、密度が共に低いために、ウェッジ小コーナーと他の部分とのカップリングが弱いことが原因となって発生したものである。温度構造を見るとベニオフ面に沿った温度勾配は $4^{\circ}\text{C}/\text{km}$ であるが、ウェッジ小コーナー内では 60 km 深度で $500 \sim 600^{\circ}\text{C}$ の温度に達している。

このウェッジ小コーナー内の流れは 30 ~ 60 km の深度で形成された広域変成岩を上昇させる原因となるかも知れない。その場合の上昇速度はスラブの角度にもよるが、海洋プレートの沈み込み速度の数分の一以下になるであろうことが数値計算から見積られる。

この計算では沈み込み角度を 45 度としているが、浮力の効果は角度に鈍感であるので沈み込み角度が違って本質的に同じ現象が起こることが予想される。沈み込みが低角度の場合はウェッジ小コーナーがより内陸側まで延びることになる。また、この計算では化学変化は考慮していないが、脱水反応による密度および粘性変化がマンテルウェッジでの対流に影響を及ぼす可能性があることが示唆される。

以上の数値計算の結果より推察される、東北日本と西南日本の現在進行中の広域変成作用の構造場の模式図を図 10 に示した。ウェッジマンテルのコーナー対流は、東北日本では小さく、西南日本では大きく大山下まで拡張する。両者間の差は、主にプレートの沈み込み角度の違いに起因している。

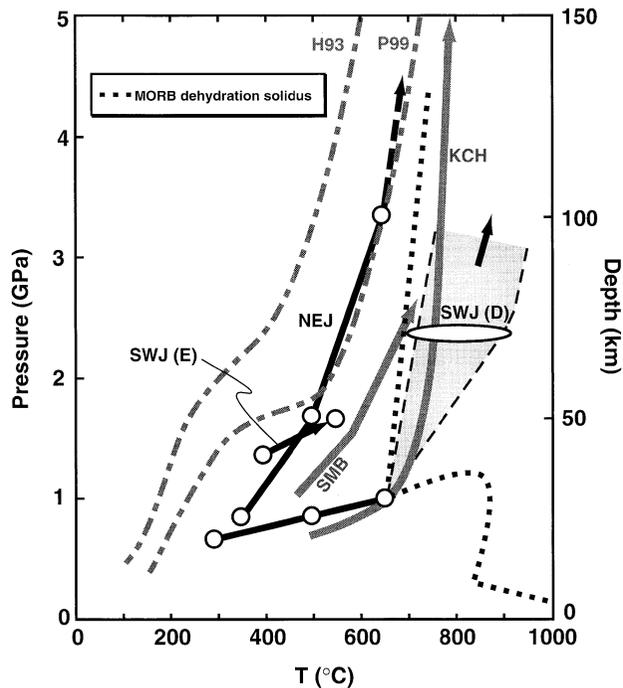


図 11 現在進行中の広域変成作用（海洋地殻上面）の P-T 経路と、変成岩から見積られた埋没 P-T 経路，および数値計算の比較。

NEJ：東北日本，SWJ (D)：西南日本 D-D' プロファイル，SWJ (E)：西南日本 E-E' プロファイル，SMB：Ota *et al.* (2004) による三波川五良津岩体エクログャイト，KCH：コクシェタフ超高压変成帯，(Maruyama *et al.*, 2002; Masago, 2003; 大森・眞砂, 2004 本特集号)，H93：Hacker *et al.* (2003) の数値計算による東北日本スラブ上面の温度構造，P99：Peacock and Wang (1999) の数値計算による西南日本スラブ上面の温度構造。

Fig. 11 Subduction P-T paths of on-going metamorphism at the uppermost oceanic crust, regional metamorphic rocks, and numerical simulations for the uppermost subducted crust.

NEJ：NE-Japan, SWJ (D)：profile D in SW-Japan, SWJ (E)：profile E in SW-Japan, SMB：Iratsu-eclogite in Sambagawa belt (Ota *et al.*, 2004), KCH：Kokchetav Ultrahigh-pressure metamorphic belt (Maruyama *et al.*, 2002; Masago, 2003; Omori and Masago, 2004 in this issue), H93：numerical estimate for NE-Japan by Hacker *et al.*, 2003, P99：numerical estimate for SW-Japan by Peacock and Wang (1999).

IV. 議 論

1) 現在進行中の変成作用の P-T パス

前章までの結果から，東北および西南日本の沈み込み帯で，海洋地殻が被っている現在進行中の変成作用の変成 P-T パスを見積り，これまでに見積られている，いくつかの変成岩の埋没ステージの P-T 経路とともに図 11 にまとめた。今回の手

法で得られた P-T 経路は，いずれの沈み込み帯においても数値計算による温度構造よりも，より高温に位置している。しかし，反時計回りに屈曲する形態は共通している。今回比較した観測で得られたパスの中では，東北日本が最も低温側で，西南日本 E，三波川変成岩，Kokchetav 超高压変成岩，西南日本 D の順で高温になる。

西南日本 D (四国東部) の高温の P-T 経路は，

Komiya and Maruyama (2004) による太古代の沈み込み帯の地温勾配と調和的である。沈み込み帯の深部(大山直下の深度)では、もしそこに流体が存在すれば、海洋地殻が部分溶融してもおかしくない。

紀伊半島下(西南日本E)は、特異である。プレート年齢は若い、沈み込み角度が急なため(図6, 8)、スラブ表面の温度は東北日本とほぼ同じになる。しかし図8bに示される様に、スラブ内部は東北日本に比べ高温なので、蛇紋岩起源の地震が東北日本に比べて浅所で消滅している。

2) 広域変成帯の上昇メカニズム

三波川変成帯五良津エクロジヤイトのP-T経路(Ota *et al.*, 2004)は、現在の東北日本と西南日本の中間に位置している。野外の産状と組織を詳しく観察して求められた変成温度圧力変化と変成相系列は逆時計回りを示し(Ota *et al.*, 2004)、東北日本と西南日本で求められたP-Tパスと同じ傾向を示す。

三波川変成岩の最高変成度部のエクロジヤイトの放射性同位体年代(SHRIMP年代)は120~130 Maである(Okamoto *et al.*, 2004)。これは累進変成作用の年代であるが、広域変成帯が地殻中部まで上昇して大量の流体が構造的な下位(四万十帯)からもたらされ、ザクロ石を除いてほぼ完全に変成再結晶化した年代は約80 Maである(丸山ほか, 2004本特集号)。この時期(120~80 Ma)のプレート古地理はイザナギ・クラプレートと太平洋プレートとの間の中央海嶺が次第に接近して、沈み込むプレートの年齢が徐々に若くなった時期と対応している。このような変化は三波川帯の温度場が東北日本型から西南日本型へと変化したことを意味する。実際、三波川変成岩の高変成度部の岩石の温度圧力履歴は、減圧と共にやや冷却されつつ西南日本型の温度圧力パスへの移行を示している。沈み込むプレート年代の変化に対応して、海洋プレートの沈み込み角度も東北日本型から西南日本型へと著しく浅化し、それに伴って、広域変成帯の上昇を促進するウェッジ・マンタルの反流が深部まで拡大したことが推測される(図10)。

VII. ま と め

脱水誘発地震仮説に基づき、物理的なプロセスである地震と化学的プロセスである変成反応のリンクを確立する方法を提示した。この手法により、観測から現在進行中の変成作用の条件を見積ることができる。海洋域下の高精度震源位置決定、および海洋地殻内地震とスラブペリドタイト内地震の厳密な分離が、本手法の発展のために重要である。

変成岩は、過去の沈み込みと上昇のテクトニクスの記録媒体である。そして、その記録の解読には、現在の地球上の、様々な沈み込み帯で現在進行中の変成作用を研究することが重要な鍵になるであろう。その意味では、リアルタイムに近い観測による地球科学と地球史との間にもリンクが確立されつつあると言っても良いだろう。

文 献

- Chen, J., Inoue, T., Weidner, D.J., Wu, Y. and Vaughan, M.T. (1998): Strength and water-weakening of mantle minerals, olivine, wadsleyite and ringwoodite. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 575-578.
- Davies, J.H. and Stevenson, D.J. (1992): Physical model of source region of subduction zone volcanics. *J. Geophys. Res.*, **97**, 2037-2070.
- Dobson, D.P., Meredith, P.G. and Boon, S.A. (2002): Simulation of subduction zone seismicity by dehydration of serpentine. *Science*, **298**, 1407-1410.
- 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**, 2030, doi: 10.1029/2001JB001129.
- Hirth, G. and Kohlstedt, D.L. (1996): Water in the oceanic upper mantle - Implications for rheology, melt extraction and the evolution of the lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **144**, 93-108.
- Honda S. (1985): Thermal structure beneath Tohoku, northeast Japan - A case study for understanding the detailed thermal structure of the subduction zone. *Tectonophysics*, **112**, 69-102.
- Igarashi, T., Matsuzawa, T., Umino, N. and Hasegawa, A. (2001): Spatial distribution of focal mechanisms for interplate and intraplate earthquakes associated with the subducting Pacific plate beneath the northeastern Japan arc: A triple-planed deep seismic zone. *J. Geophys. Res.*,

- 106, 2177-2191
- Iwamori, H. (1998): Transportation of H₂O and melting in subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **160**, 65-80.
- Iwase, Y. and Honda, S. (1993): Deformation of the crust and upper mantle beneath the back-arc caused by the subducting plate. *J. Phys. Earth*, **41**, 347-363.
- Karato, S. and Jung, H. (1998): Water, partial melting and the origin of the seismic low velocity and high attenuation zone in the upper mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **157**, 193-207.
- Karato, S., Paterson, M.S. and Fitz Gerald, J.D. (1986): Rheology of synthetic olivine aggregates - Influence of grain-size and water-. *J. Geophys. Res.*, **91**, 8151-8176.
- Katsumata, A. and Kamaya, N. (2003): Low-frequency continuous tremor around the Moho discontinuity away from volcanoes in the southwest Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 20-1-20-4.
- Kodaira, S., Nakanishi, A., Miura, S., Iwasaki, T., Hirata, N., Ito, K., Kaneda, Y., Kurashimo, E., Park, J. and Takahashi, N. (2002): Structural factors controlling the rupture process of a megathrust earthquake at the Nankai trough seismicogenic zone. *Geophys. J. Intern.*, **149**, 815 - 835.
- Komiya, T. and Maruyama, S. (2004): A very hydrous mantle under the western Pacific region: Implications for formations of marginal basins and style of Archean plate tectonics. *Tectonophysics*, in press.
- Maruyama, S., Parkinson, C. and Liou, J.G. (2002): Overview of the tectonic evolution of the Kokchetav massif and the role of fluid in subduction and exhumation. In Parkinson, C., Katayama, I., Liou, J.G. and Maruyama, S. eds.: *The Diamond-bearing Kokchetav Massif, Kazakhstan*. Universal Academy Press, Tokyo.
- Masago, H. (2003): *Metamorphic Evolution of the Kokchetav Massif, Northern Kazakhstan*. ph.D. thesis, Tokyo Institute of Technology.
- Meade, C. and Jeanloz, R. (1991) Deep-focus earthquakes and recycling of water into Earth's mantle. *Science*, **252**, 68-72.
- Miyashiro, A. (1994): *Metamorphic Petrology*. UCL Press.
- Nishiyama, T. (1992): Mantle hydrology in a subduction zone: A key to episodic geologic events, double Wadati-Benioff zones and magma genesis. *Mathematical Seismology, VII, Report of The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo*, **34**, 31-67.
- Obara, K. (2002): Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science*, **296**, 1679-1681.
- Okamoto, K. and Maruyama, S. (1999): The high-pressure synthesis of lawsonite in the MORB+H₂O system. *Amer. Mineral.*, **84**, 362-373.
- Okamoto, K., Sano, Y., Johnson, S., Shinjoe, H., Katayama, I. and Terada, K. (2004): SHRIMP U-Pb zircon dating of quartz-bearing eclogite from the Sanbagawa Belt, south-west Japan: Implications for metamorphic evolution of subducted protolith. *Terra Nova*, **16**, 81-89.
- 大森聡一・眞砂英樹 (2004): 変成 P-T 経路の見積りにおける相平衡熱力学的フォワードモデリングの適用. *地学雑誌*, **113**, 647-663.
- Omori, S., Kamiya, S., Maruyama, S. and Zhao, D. (2002): Morphology of the intraslab seismic zone and devolatilization phase equilibria of the subducting slab peridotite. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **76**, 455-478.
- Omori, S., Komabayashi, T. and Maruyama, S. (2004): Dehydration and earthquakes in the subducting slab: Empirical link in intermediate and deep seismic zones. *Phys. Earth Planet. Interior*, **146**, 297-311.
- 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.
- Peacock, S. (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 consequences of warm versus cool subduction metamorphism: Examples from southwest and northeast Japan. *Science*, **286**, 937-939.
- Ponko, S.C. and Peacock, S.M. (1995): Thermal modeling of the southern Alaska subduction zone: Insight into the petrology of the subducting slab and overlying mantle wedge. *J. Geophys. Res.*, **100**, 22117-22128
- Raleigh, C.B. and Paterson, M.S. (1965): Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implications. *J. Geophys. Res.*, **70**, 3965 - 3985.
- Seno, T. and Yamanaka, Y. (1996): Double seismic zones, compressional deep trench-outer rise events, and superplumes. In Bebout, G. et al. eds.: *Subduction Top to Bottom*. AGU Geophys. Monogr., **96**, 347-355.
- Seno, T. and Yamasaki, T. (2003): Low-frequency tremors, intraslab and interplate earthquakes in Southwest Japan - From a viewpoint of slab dehydration. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, SDE 8-1-SDE 8-4.
- Smith, A.J., Kodaira, S., Kaneda, Y., Yamaguchi, H., Cummins, P.R. and Baba, T. (2004): Intraplate seismicity in the subducting Philippine Sea Plate, southwest Japan: Magnitude-depth correlations. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **145**, 179-202.

- Spear, F. (1993): *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-temperature-time Paths*. Mineralogical Society of America, Monograph.
- Yamasaki, T. and Seno, T. (2003): Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab. *J. Geophys. Res.*, **108**, 10.1029/2002JB001918.
- Zhao, D. (2004): Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: Insight into deep Earth dynamics. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **146**, 2004, 3–34.
- Zhao, D., Matsuzawa, T. and Hasegawa, A. (1997): Morphology of the subducting slab boundary in the northeastern Japan arc. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **102**, 89–104.
- Zhao, D., Tani, H. and Mishra, O.P. (2004): Crustal heterogeneity in the 2000 western Tottori earthquake region: Effect of fluids from slab dehydration. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **145**, 161–177.

(2004年9月2日受付, 2004年10月23日受理)