

海嶺の沈み込みと三波川-領家変成岩 および花崗岩の成因

— 広域ダイナミクス, 物質循環との関連性 —

岩 森 光*

Ridge Subduction and Origin of Sanbagawa-Ryoke Metamorphic Rocks and Associated Granitic Rocks: Link to Regional Dynamics and Material Cycling

Hikaru IWAMORI*

Abstract

The origin of the Sanbagawa-Ryoke metamorphic rocks and associated granitic rocks is discussed with respect to thermal structure and water cycling in subduction zones. First, the relationship between thermal structure and water cycling is summarized based on previous studies of numerical modeling for three different settings along the Japan arcs. This shows that water cycling becomes shallower in a warmer environment, which has been demonstrated or supported by studies on seismic structures and distribution of volcanoes. In a very hot environment associated with a young (<10 Ma) plate, including ridge subduction, arc magmatism is shut down to switch to granitic magmatism and regional metamorphism in the forearc region, as both heat and water are supplied to the region. Numerical modeling studies show that a paired metamorphism can occur associated with ridge subduction in a single forearc domain within a relatively short period (a few tens of million of years), which explains the spatial association of Sanbagawa (high-P type) and Ryoke (high-T type) metamorphic rocks associated with granitic batholiths, their similar metamorphic ages, and a common mode of syn-metamorphic deformation (prolate strain). Therefore, in terms of thermal structure and water circulation, arc magmatism and regional paired metamorphism associated with granitic magmatism are regarded as representing different stages of a series of thermal and fluid processes in subduction zones. At any stage of these processes, even after major dehydration of the subducting slab and the overlying mantle wedge, nominally anhydrous minerals, such as olivine, pyroxene, and garnet, can carry a significant amount of water (up to several 1000 ppm) to the deep mantle. Recent geochemical and statistical studies have revealed that such signatures of deeply subducted fluid and associated elements are indeed identified in oceanic basalts as exits of global material circulation. Based on an understanding of the thermal structure and water circulation in subduction zones, it is argued that the fluid processes and slab configuration (*e.g.*, cold hard slab vs. hot soft slab) exer-

* 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

* Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo

本稿は 2007 年 5 月 26 日に行われた春季講演会での講演をまとめたものである。

cise great control on large-scale dynamics in subduction zones, such as formation of backarc basins (e.g., Japan Sea), and wet region representing extensive magmatism with abundant volatile components over eastern Asia. Regional metamorphism, arc magmatism, large-scale dynamics in Eastern Asia, and global material circulation are potentially all connected with each other, irrespective of qualification or disqualification of the model or working hypothesis discussed in this paper.

Key words : subduction zone, metamorphism, magmatism, thermal structure, water circulation
キーワード : 沈み込み帯, 変成作用, 火成作用, 温度構造, 水循環

I. イントロダクション

沈み込み帯の諸過程は、さまざまな地球科学的現象の理解にとって重要である。沈み込むプレートは、熱的・物質的な不均質をマントルに持ち込む。一般に、沈み込むプレートは周囲よりも冷たくヒートシンクとして働くと同時に、 H_2O や CO_2 などの揮発性成分、および MORB 成分などの化学的不均質をマントルにもたらす。これらの“input”に対応して、沈み込み帯の地表付近では、顕著な現象が“output”として起こる：地震、火山活動、変成作用、造山運動などである。しかし、この“input”と“output”が具体的にどのようなつながるのか、未解明の点が多い。この関連性が第一の重要点である。第二の点は、沈み込んだ不均質の行方である。例えば、 H_2O は沈み込むプレートとともにマントルに持ち込まれるが、この水が浅所で循環して地表に戻るのか、深くまで沈み込み、地表には還元されない、あるいは長時間を経たあとに地表に戻ってくるのかは、地球のダイナミクスと変遷に大きな違いをもたらす。水は地球内部物質の相平衡関係、密度、レオロジーなど、諸物性に大きな影響を与えるからである。本論では、まず、これらの沈み込み帯全体の温度構造、物質循環（特に水循環）について、主に筆者の行ってきた数値計算モデルやその観測との対比に基づいて議論を行う。その上で、大局的な視点から、領家-三波川広域変成帯に代表される「対の変成帯」が、どのような場に対応し、どのような成因に由来するのかを議論する。最後に、沈み込み帯の諸現象が島弧-大陸の変遷に及

ばず影響、およびグローバルな物質循環とどのように関連するかについて議論を行う。

II. 沈み込み帯の温度構造と水循環、火成作用

沈み込み帯での諸現象は、一般に複数の熱的、化学的過程が組み合わさった複雑な現象である。沈み込むプレートとそれに伴うウエッジでのマントル対流が、大局的な流れ場、温度構造を決める。その流れ、温度構造に従って、沈み込むプレートは脱水し、水溶液流体を生成すると考えられている。生成した流体は、主に周囲の岩石との密度差に由来する圧力勾配に従って移動するが、周囲の岩石と化学反応を起こしながらその量や組成を変えながら移動し、温度圧力条件に応じて含水鉱物を生成あるいは溶融を引き起こす。従ってこれらの過程の理解には、化学反応を起こす固体-液体からなる二相流としての viscous flow の力学と、固体-液体間反応の化学の両方を取り入れた定式化が必要である（例えば、McKenzie, 1984; Iwamori, 1998）。そのような二相流の支配方程式を詳しく調べると、質量保存、運動量保存、エネルギー保存が、互いに強くカップリングしており、通常の一相流に比べて解くのが難しいことがわかってきた。このために、これまでに行われてきた研究は、いずれも何らかの近似・仮定を定式化に組み込み、保存式同士のカップリングを弱くして解くことが行われている。しかし同時に、これらの研究は、そのような近似モデルが、流体の生成や移動を比較的うまく再現することも示している。

筆者らは、そのような近似モデルを用いて、日

本列島下における水循環とマグマ生成、および変成帯の生成に関する研究を行った (Iwamori, 2000a, b; Iwamori and Zhao, 2000; Iwamori, 2007)。日本列島は、火成、変成作用や地震学的構造の研究が豊富にあり、かつ列島に沿って沈み込みパラメーター (沈み込むプレートの年齢や速度等) が大きく変化し、モデル検証の場として好適である。東北日本では、古い (~ 130 Ma) 太平洋プレートが 8-9 cm/年 で沈み込み、比較的冷たい場を生み出している。中部日本では、太平洋プレートに加えてフィリピン海プレートが折り重なるように沈み込んでおり、世界的にもまれな極めて冷たい場を生み出している (Iwamori, 2000a)。一方、西南日本の中国地方から九州北部下へは、比較的若い四国海盆 (27-15 Ma) が沈み込み、比較的暖かい場を生み出している (Zhao *et al.*, 2000)。

以上の3つの場に対応するモデル計算の結果、(1) いずれも沈み込むプレートに沿って水がマントルに運ばれていくこと、(2) ある深さで水の多くは脱水して上側に移動し、島弧火成活動に貢献すること、(3) 水の沈み込みの深さは、暖かい場ほど浅く、冷たい場ほど深くなる傾向にあることが示唆された。これらのモデル結果は、地震学的な構造との対比 (例えば, Iwamori and Zhao, 2000), 特に近年の Hi-net のデータを用いた研究 (Kawakatsu and Watada, 2007), および地表付近の火山の分布 (Iwamori, 2000a) から支持されている。

III. 沈み込み帯の広域変成作用

沈み込むプレートが、西南日本よりもさらに若くなると、温度構造や水循環はどうなるであろうか? 現在の地球上では、ごく若いプレートが沈み込んでいる場所が数箇所あり、特にチリ沖の三重会合点では、spreading center (プレート年齢 0 Ma) がチリ海溝に沈み込んでいる。現在の地球上では、チリ沖が唯一の現在進行中の海嶺沈み込み場であるが、地球史を通して、そのような現象はかなり普遍的に (例えば 1-2 億年に一度程度) 起こっていたと考えられる。Uyeda and Miya-

shiro (1974) は、90 Ma ごろ、Kula と Pacific プレート間の発散境界が東アジアに沈み込み、その熱の影響で領家変成帯を含む高温の変成帯および多量の花崗岩類が形成された可能性を示唆した。Maruyama *et al.* (1997) は、過去およそ 4 億年の間に、同様のイベント (海嶺沈み込みとそれに伴う高温変成帯・花崗岩帯の形成) が複数起こった可能性を示唆した。海洋底拡大に伴って形成された海が閉じる際には、海嶺軸が沈み込まざるを得ず (ただし、必ずしも活動的な spreading center とは限らない)、超大陸の形成・分裂に合わせて、あるいはウィルソンサイクルに合わせて海嶺の沈み込みが起こっていたと考えられる。Iwamori *et al.* (2007) は、そのようなケースに対応する数値シミュレーションを行い、沈み込み帯全体での広域的な熱収支を議論した。水平方向 5120 km, 深さ方向 670 km の大きな対流領域 (ただし上部マントルに限られる) における熱対流を、さまざまな沈み込み条件下 (プレートの沈み込み速度、プレートの年齢とその時間変化) で計算したところ、定常的な古いプレートの沈み込みを仮定すると、沈み込み帯は急速に冷却されて 1 億年程度で火成活動を引き起こせなくなるが、6 千万年または 1 億 2 千万年に一度海嶺が沈み込む場合 (すなわち、沈み込むプレートの年齢が連続的に変化し、古く冷たいプレートと若く熱いプレートが繰り返し沈み込む場合) には、沈み込み帯の冷却はそれほど進まず、途切れることなく火成活動を維持しうることがわかった。

海嶺が沈み込む際には、前弧領域に熱と水が集中的に供給される。Iwamori (2000b) は、海溝に海嶺が近づいて沈み込み、その後再び沈み込むプレートが古く冷たくなっていく際の、温度構造、水循環とそれらの時間変化を数値シミュレーションによって調べた。その結果、大量の花崗岩生成と高温型 (主にグラニュライト相) 変成作用が海嶺軸の沈み込みに伴って起こり、その前後の比較的短い時間内 (数千万年以内) に高压型 (主に藍閃石片岩相あるいはエクログナイト相) 変成作用が起こることがわかった。言い換えるなら、花崗岩 バソリス と「対の変成帯」 (Miyashiro,

1961) の形成が、同一の前弧領域内において、比較的短い時間内に相前後して起こりうることになる。これは、従来の説（例えば、Uyeda and Miyashiro, 1974）とは大きく異なる。これまで、高圧型変成作用は海溝沿いの冷たい場で、一方多量の花崗岩質マグマ生成と高温型変成作用は火山弧下の熱い場で別々に起こり、それぞれの形成後に断層運動などによって移動して、偶然「対」をなしたと考えられてきた。しかし、上記の数値シミュレーションにより、花崗岩バソリス帯と対の変成帯は海嶺沈み込みの必然であり、これによって、両者がほぼ同じ形成年代をもって接すること、そのような組み合わせは世界中でかなり頻繁に認められること（Miyashiro, 1961）、日本の対の変成帯である三波川帯と領家帯は、変成作用時に共通の変形作用を被ったと考えられること（Toriumi, 1985; Iwamori, 2003）などが無理なく説明される。実際には、花崗岩バソリス帯と対の変成帯（高圧型と高温型）の三者がはっきりと認められる例は少なく、多くの場合、高圧型変成帯と花崗岩バソリス帯のペアである（例えば、フランスカン帯とシエラネバダバソリス）。いずれの場合にも、大きく生成温度圧力条件が異なると考えられていた高圧力/温度条件と低圧力/温度条件のイベントは、どちらも海嶺沈み込みに伴う比較的高い温度場においてのみ実現され、通常沈み込み帯における活動には対応しない点が重要である。

平均的な年齢のプレート（平均約 60 Ma, Turcotte and Schubert, 1982）の定常的な沈み込みでは、前弧領域のほぼ全域は摂氏 200 度以下となり、また水の供給も少ないために、そこではほとんど変成作用は起こらない。この状況は、沈み込むプレートの年齢が 10–20 Ma 程度までは大きくは変わらず（比較的低温で起こりうる）、高圧変成作用でさえも前弧領域においては通常の沈み込み条件では起こらない（Iwamori, 2000b）。沈み込むプレートの年齢が 5 Ma 程度となると、沈み込むプレートと上盤のインターフェース近傍で急激な温度上昇が起こり、同時にスラブの脱水により多量の水が前弧領域に供給され、まず高圧型

変成作用が、続いて海嶺軸沈み込み時の最高温度条件に対応して高温型変成作用および海洋地殻・上盤側地殻の溶融による花崗岩質マグマの生成が起こる。海嶺軸の通過後は、再び高圧変成作用の条件を経過し、その後急速に場の冷却が起こって変成作用は起こらなくなるが、その代わりにスラブはより深部で脱水を起こし、II 章で述べた一連の arc magmatism にスイッチングを起こす（Iwamori, 1998, 2000b）。

図 1 にこのスイッチングの様子を模式的に示す。通常の arc magmatism は、II 章に述べたとおり、沈み込み帯の熱構造に応じて、主要なスラブ脱水深度が変化する：二重の沈み込みによる大変冷たい場である中部日本ではより深く、若い四国海盆が沈み込み比較的温暖な場である西南日本ではより浅くなる。海嶺の沈み込みに伴う対の変成作用は、西南日本よりもさらに熱い場において、脱水が前弧領域で起こり、熱と水の両者が供給されて起こる現象として理解される。この点で、arc magmatism と対の変成帯をもたらす広域変成作用は、沈み込み帯の熱構造と水循環が連続的に変化した場合の一連の現象であると考えられることができる。

IV. 広域ダイナミクス、物質循環とのリンク

図 1 に示すいずれの場合にも、沈み込むスラブに含まれていた水の多くは吐き出される。その水は、直接的あるいは間接的に（一度スラブ直上のマントルウエッジを加水しその加水部分がスラブに沿って深部に持ち込まれる際に再度脱水が起こり）、上方に供給され arc magmatism あるいは広域変成作用を引き起こす要因となる。近年の高圧実験および数値実験により、これらの脱水を経たスラブおよびマントルウエッジは、脱水後もなお相当量の水を含んだままマントル深部に沈み込むことがわかってきた（Iwamori, 2007）。カンラン石、輝石、ザクロ石などの nominally anhydrous minerals (NAMs) が、数百から数千 ppm の H₂O を含みうるためである。これらの NAMs によって持ち込まれる H₂O およびそれに伴う元素は、どのように地球内部を循環するので

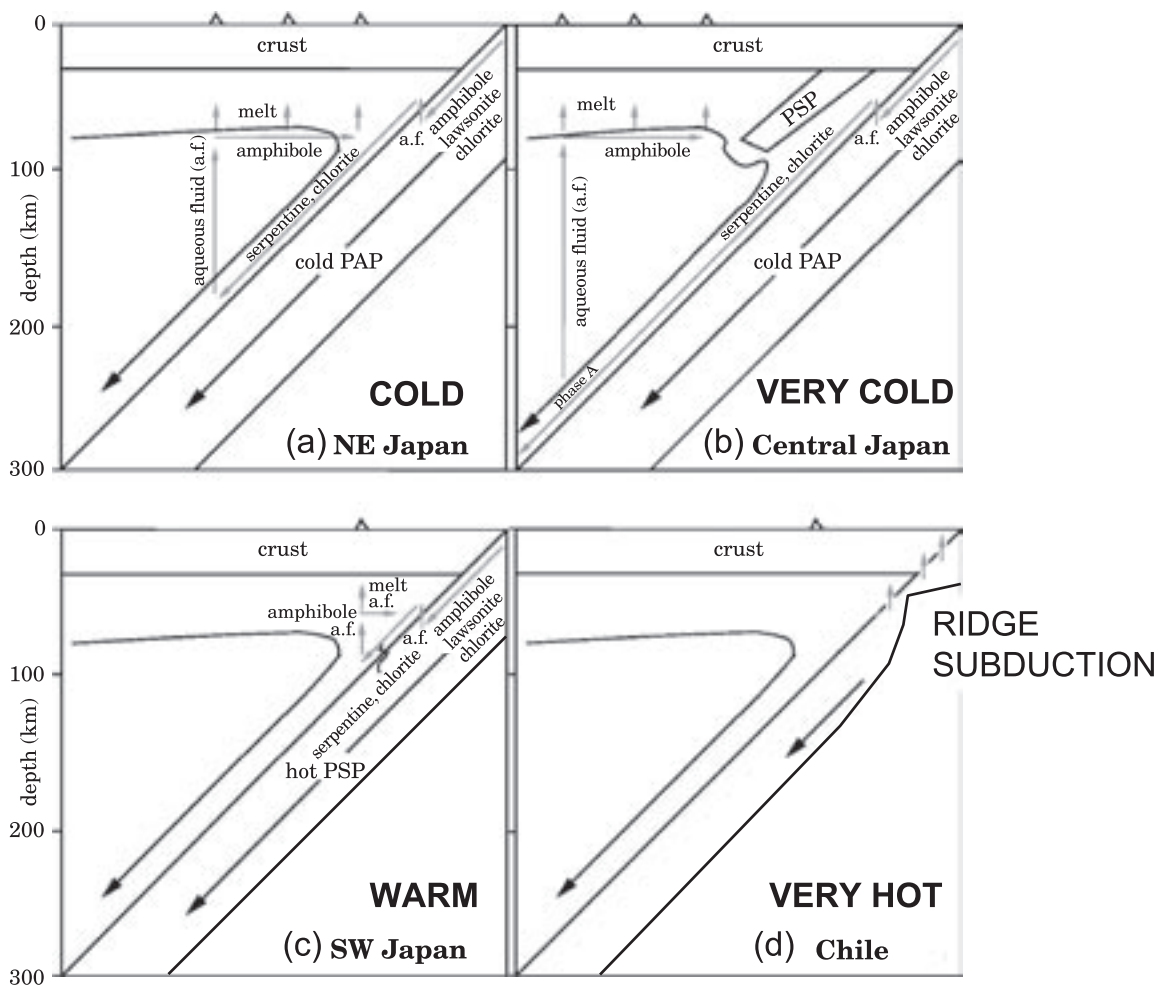


図 1 沈み込み帯における水輸送の経路と水を運ぶ相を示した模式図：(a) 冷たい場（東北日本），(b) 例外的に冷たい場（中部日本），(c) 暖かい場（西南日本，九州北部），(d) 海嶺沈み込み時の熱い場（南米チリ）。「PAP」は太平洋プレート，「PSP」はフィリピン海プレート，「a.f.」は水溶液をそれぞれ表す。

Fig. 1 Schematic figure showing transportation paths of H_2O and transportation agents along the paths beneath (a) cold subduction zone (NE Japan), (b) very cold subduction zone (central Japan), (c) warm subduction zone (SW Japan, north Kyushu), and (d) very hot subduction zone (Chile). 'PAP', 'PSP' and 'a.f.' represent Pacific Plate, Philippine Sea Plate and aqueous fluid, respectively.

あろうか？ 地球内部に蓄積されたまま地表には還元されないのか，あるいは海嶺・ホットスポットの火成活動などを通して還元されるのか，還元されるとすればその時間スケールはどのくらいかなど，さまざまな疑問が沸く。水は地球内部の物性（相，密度，レオロジー，融点など）を大きく左右し，その分布，循環経路，滞留時間などの理

解は地球全体のダイナミクスや歴史を理解する上で重要である。これらの問いに対して，近年新しいアプローチがひらかれつつある。物質循環の出口としての海嶺やホットスポットに，明瞭に沈み込み帯の流体活動の証拠が見つかり始めたのである（例えば，Elliott *et al.*, 2006; Iwamori and Albarède, 2007）。以前より，DUPAL 異常の存在

や性質 (Hart, 1984) から、沈み込み物質のリサイクリングが疑われてきた。しかし, Iwamori and Albarède (2007, および投稿中の論文) は, DUPAL 異常の定義と分布は沈み込み成分には対応せず, 新たな沈み込み成分の検出方法とその成分が北半球へ大きく広がっていることを示した。さらに, Iwamori and Albarède (2007, および投稿中の論文) では, マントルに見られる不均質のほとんどが, たった二つの (それぞれは独立な, しかし結果として重なり合う) 元素分別プロセスによって説明されうること, そのうちの一つが沈み込み帯の水溶液活動に伴う元素分別である可能性を指摘した。これらの研究は, 不均質をマントルに持ち込む入り口としての沈み込み帯と, 物質循環の出口としての海嶺・ホットスポットとのつながりを定量的に明らかにし, 地球の物質分化とダイナミクスを解く鍵となりうる。

図 1 は, 沈み込むプレートの性質と沈み込まれる側で起こる現象との間に強い関連性があることを, 沈み込み帯の火成活動-広域変成作用の遷移とテクトニクスを通して示している。この関連性の存在は, 東アジア全体の広域ダイナミクスを紐解く上でも新たな視点を提供する。今からおよそ 1 億年前に日本列島付近に海嶺が沈み込み, 三波川-領家変成作用が起こったあと, 沈み込むプレートはしばらくの間まだ温かく, 力学的な強度も小さかったと想像される。どの程度の時間温かく低強度の状態が継続したかは不明であるが, 西南日本から中部日本にかけての花崗岩質マグマ活動が数千万年間にわたって起こった (例えば, Suzuki and Adachi, 1998) ことは, それらが海嶺あるいは若いプレート沈み込みの熱的影響の産物だと仮定するならば, 数千万年間は温かくやわらかいスラブが存在したことを示唆する。一方, 現在の日本列島および東アジア下には, スタグナントスラブが 660 km 不連続面近傍に横たわっていることが示されている (Fukao *et al.*, 1992)。スタグナントスラブとは, 周囲よりも冷たいがゆえに地震波の高速度異常を示す領域に対応し, 沈み込んだ太平洋プレートがいくつかの理由によって下部マントルには沈み込むことができず (例え

ば, 660 km 相転移の負のクラウジウス-クラペイロン勾配に由来する浮力, 下部マントルの高粘性率に由来する抵抗力など), 660 km 付近に停留しているものであると解釈されている。海嶺が沈み込む温かい場から, スタグナントスラブの形成に代表される冷たい場への遷移では何が起こったのであろうか? 最近のマントル対流数値モデルでは, これまで困難であったプレートとその沈み込みのダイナミクスがより自然に再現されつつある (例えば, Tagawa *et al.*, 2007)。その結果, 比較的硬いスラブが沈み込む際, 特に 660 km 境界で上向きの力をスラブが受ける際に, 上盤側プレートの背弧領域において伸張場が形成され, 背弧海盆の形成・拡大と海溝後退が起こりうるということが明らかとなった。東アジアの場合, 海嶺沈み込み後, 温かくやわらかいスラブから硬いスラブに遷移が起こり, そのような 660 km 境界とスラブの力学的相互作用が日本海形成時である約 2000 万年前に起こったことが推定される。また, 時期を同じくして, 約 2000 万年前から西南日本を含む東アジア一帯では流体に富む玄武岩質活動が起こり始め, 現在まで継続している。これはマントル深部から融剤となる流体が広域的に供給され, フラックス溶融により火成活動が引き起こされている, いわば“ウェットリージョン”が形成されたためと考えられている (岩森, 1995)。この時期がスタグナントスラブ形成と時を同じくしていることから, 太平洋プレートの沈み込みに伴って, IV 章冒頭で述べた NAMs により持ち込まれた水が蓄積・再循環して, そのような火成活動を引き起こした可能性が示唆される。

領家-三波川広域変成帯に代表される「対の変成帯」が, どのような場に対応し, どのような成因に由来するのかを沈み込み帯の温度構造-水循環という視点からとらえることによって, 火成活動とのつながり, 東アジア一帯の過去約 1 億年間のダイナミクス, さらには地球規模での物質循環への関連性が議論された。ここに述べたモデル, 仮説が正しいかどうかに関わらず, このような大局的視点, 関連性の理解への工夫は, 沈み込み帯諸過程のさらなる理解に必要であらう。また

そのような大局的場や広域的現象との関連性の理解が進むことにより、個々の変成帯、花崗岩帯の成因に対する理解も進むことが期待される。

謝 辞

本稿を書く機会を与えてくださった笠原順三博士に深く感謝いたします。また原稿を読み、コメントをくださった丸山茂徳博士に深く感謝いたします。

文 献

- Elliot, T., Thomas, A., Jeffcoate, A. and Niu, Y. (2006): Lithium isotope evidence for subduction-enriched mantle in the source of mid-ocean-ridge basalts. *Nature*, **443**, 565–568.
- Fukao, Y., Obayashi, M., Inoue, H. and Nenbai, M. (1992): Subducting slabs stagnant in the mantle transition zone. *Journal of Geophysical Research*, **97**, 4809–4822.
- Hart, S.R. (1984): A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, **309**, 753–757.
- 岩森 光 (1995): 中国地方新生代玄武岩類の成因. 月刊地球, **17**, 368–375.
- Iwamori, H. (1998): Transportation of H₂O and melting in subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, **160**, 65–80.
- Iwamori, H. (2000a): Deep subduction of H₂O and deflection of volcanic chain towards backarc near triple junction due to lower temperature. *Earth and Planetary Science Letters*, **181**, 41–46.
- Iwamori, H. (2000b): Thermal effects of ridge subduction and its implications for the origin of granitic batholith and paired metamorphic belts. *Earth and Planetary Science Letters*, **181**, 131–144.
- Iwamori, H. (2003): Viscous flow and deformation of regional metamorphic belts at convergent plate boundaries. *Journal of Geophysical Research*, **108** (B6), 2321, doi:10.1029/2002JB001808.
- Iwamori, H. (2007): Transportation of H₂O beneath the Japan arcs and its implications for global water circulation. *Chemical Geology*, **239**, 182–198.
- Iwamori, H. and Albarède, F. (2007): Independent component analysis of isotopic compositions of oceanic basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **71** (15), A433.
- Iwamori, H. and Zhao, D. (2000): Melting and seismic structure beneath the northeast Japan arc. *Geophysical Research Letters*, **27**, 425–428.
- Iwamori, H., Richardson, C. and Maruyama, S. (2007): Numerical modeling of thermal structure, circulation of H₂O, and magmatism-metamorphism in subduction zones: Implications for evolution of arcs. *Gondwana Research*, **11**, 109–119.
- Kawakatsu, H. and Watada, S. (2007): Seismic evidence for deep-water transportation in the mantle. *Science*, **316**, 1468–1471.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M. (1997): Paleogeographic maps of the Japanese Islands plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, **6**, 121–142.
- McKenzie, D. (1984): The generation and compaction of partially molten rock. *Journal of Petrology*, **25**, 713–765.
- Miyashiro, A. (1961): Evolution of metamorphic belts. *Journal of Petrology*, **2**, 277–311.
- Suzuki, K. and Adachi, M. (1998): Denudation history of the high T/P Ryoke metamorphic belt, southwest Japan: Constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granitoids. *Journal of Metamorphic Geology*, **16**, 23–37.
- Tagawa, M., Nakakuki, T. and Tajima, F. (2007): Dynamical modeling of trench retreat driven by the slab interaction with the mantle transition zone. *Earth, Planets and Space*, **59**, 65–74.
- Toriumi, M. (1985): Two types of ductile deformation/regional metamorphic belt. *Tectonophysics*, **113**, 307–326.
- Turcotte, D.L. and Schubert, G. (1982): *Geodynamics: Applications of Continuum Physics to Geological Problems*. John Wiley, New York.
- Uyeda, S. and Miyashiro, A. (1974): Plate tectonics and the Japanese islands: A synthesis. *Geological Society of America Bulletin*, **85**, 1159–1170.
- Zhao, D., Asamori, K. and Iwamori, H. (2000): Seismic structure and magmatism of the young Kyushu subduction zone. *Geophysical Research Letters*, **27**, 2057–2060.