

火山・地熱活動異常の原因としての スラブ沈み込みの急傾斜化

—幾何学モデルと琉球弧・西南日本弧の4セグメント域の比較検討—

茂野 博¹⁾

1. はじめに

1960年代末に登場したプレートテクトニクス理論(全体像は上田(1989), Kearey *et al.* (2009)など)に基づいて, 沈み込み帯(subduction zone)に位置する日本列島の第四紀火山や地熱活動の分布や起源がよりよく理解されるようになってきた。しかし, 残された問題や見過ごされてきた問題も少なくない。

最近, 茂野(2008a, 2008b, 2008c, 2009a)は, 海洋プレート-スラブの斜め沈み込みの簡易的な幾何学モデルと数値シミュレーション手法を提案し, 近畿・関東・九州地域の火山・地熱活動分布にそれぞれ認められる特異性について, 各々その原因の検討を進めた結果を紹介した。その後茂野(2009b)は, 茂野(2008a)の不十分な点(地図の投影法に関する問題)について補足的な検討を行った。本説では, 茂野(2008b, 2009a)の不十分な点(沈み込むスラブの急傾斜化に関する問題)について, 補足的な検討結果を紹介する。また, 茂野(2009a)について修正を要する点についても述べる。

火山・地熱活動分布の特異性として, 近畿地域では第四紀火山活動に乏しいにもかかわらず, 前弧域(非火山性地域)にまで高温温泉(90℃以上; 北西から南東方向へ線状に湯村, 有馬, 湯の峰)が分布している。また九州地域では, 新第三紀後期~第四紀に火山・地熱活動が東方に移動するとともに集中化して, 大規模な火砕流が噴出し多数のカルデラが生成した。両地域が位置する西日本2弧系(西南日本弧・琉球弧)では, その下に沈み込むフィリピン海プレートのスラブがセグメント(短冊状)化しているが, 近畿・九州の両地域下ではスラブの沈み込み角度が急傾斜化する傾向が明らかで, 上記の火山・地熱活動

異常の基本的な原因の一つになっていると推測される(茂野, 2008b, 2009a)。

本説では, まず以下の2.に, スラブの急傾斜化とマントルウェッジへの高温マントル物質上昇との関係について, 簡易的な幾何学モデルを示す。次に3.では, 西日本2弧系下における深部震源(本説では概略50 km以深)の分布と地下3次元のスラブの分布(~0 Ma・~3Maの2時階)の関係について, 擬似的な経度-緯度座標系(茂野, 2009b)を用いて再整理する。そして4.では, 2.の幾何学モデルに基づく概略的な計算によって, 西南日本弧と琉球弧のセグメント化された4地域について, 高温マントル物質の上昇量(速度)についての大きな比較検討を行う。その後5.の考察では, 取りまとめの議論とともに茂野(2008b, 2009a)の不十分な点について検討を行う。

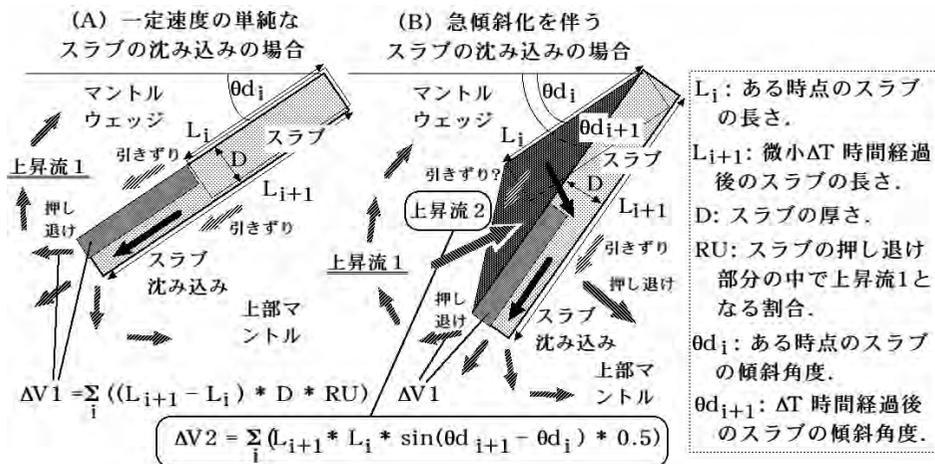
2. 沈み込むスラブによる高温マントル物質上昇の幾何学モデル

沈み込み帯は, 地下深部から島弧(あるいは大陸)地殻へ高温のマグマや深部起源流体が上昇し, 大規模な火山・地熱活動が生成することが特徴となっている。これらの活動は, 基本的に沈み込む海洋プレート-スラブの特性・運動とともに, 沈み込みを受け入れる上部マントルの特性・挙動によって規定される。すなわち, マグマの発生-上昇の場となるマントルウェッジの環境が, 沈み込むスラブからの揮発性成分(主にH₂O)の供給の量・様式などとともに, 受動的あるいは能動的に地下深部からもたらされる高温のマントル物質の上昇の量・様式によって, 大きな影響を受ける(例えば, Eiler, 2003)。

世界の沈み込み帯では, 深部震源分布などから沈

キーワード: スラブ沈み込み, セグメント化, 急傾斜化, フィリピン海プレート, 西南日本弧, 琉球弧, 近畿, 九州, 火山, 地熱

1) 産総研 地圏資源環境研究部門



第1図 スラブの沈み込みによる高温マントル物質上昇の非定常的な幾何学モデル断面図。(A)は一定速度の単純な沈み込みの場合を、(B)はある深度を折れ線とした急傾斜化を伴う沈み込みの場合を示す。プレートの進行に平行な単位幅(1km)の地域(一定期間)について、 $\Delta V1$ はスラブの先端部の進行によって生じる上昇流1の、 $\Delta V2$ はスラブの急傾斜化によって生じる上昇流2の各々概略的な体積を、微小期間の累計式の形で示す。本モデルの基礎となる海洋プレートスラブの斜め沈み込みの簡易的な幾何学モデルについては、茂野(2008a)の第5図と式群を参照。

み込むスラブの形態(長さ、傾斜角度など)は多様であることが知られている(例えば、上田, 1989; 宇津, 1999; 瀬野, 2001; Kearey et al., 2009)。しかし、従来個別地域の検討でもまた一般化した検討でも、非常に単純化して傾斜角度が一定の定常的なスラブの沈み込みが長期間継続したと仮定して、各種のモデル化・議論が行われる場合が多かった。

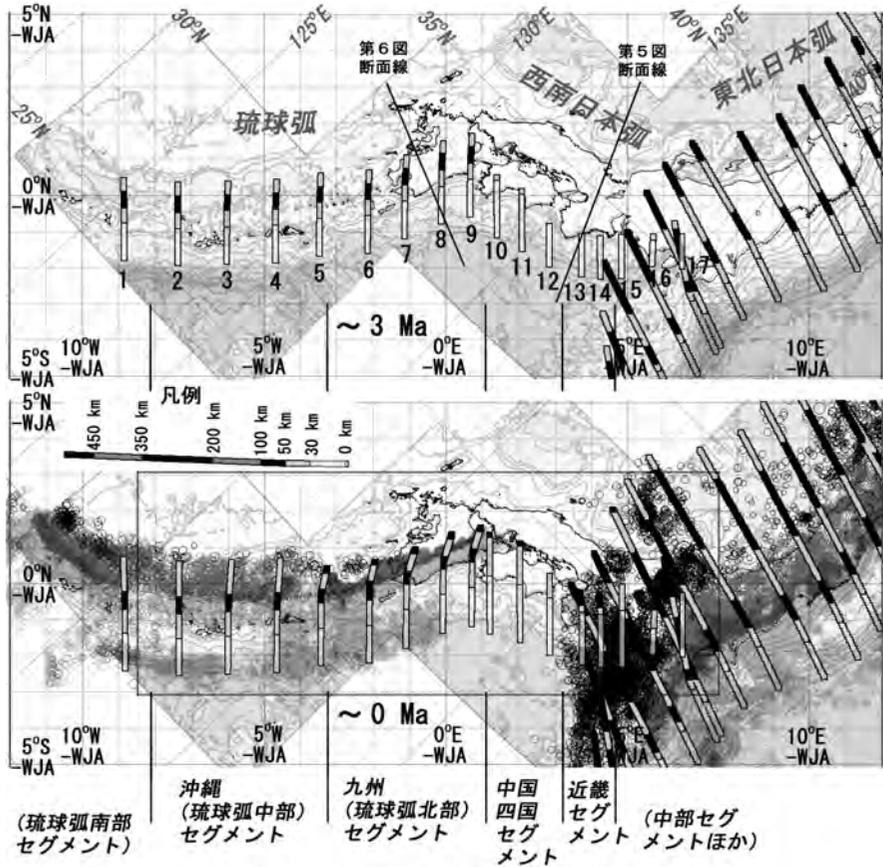
しかしながら、スラブの沈み込み過程が経時的に大きく変化する場合があることも指摘されており、沈み込むスラブの長さが伸びるとともに次第にあるいは急激にスラブの傾斜角度が増加し(スラブの自重、上部マントル物質の対流などに起因して)、背弧海盆～縁海の形成へと繋がるなどの考え方も示されてきた(例えば、上田ほか編, 1977; 新妻, 2007)。茂野(2008b, 2009a)はこの「沈み込み進化モデル」を簡略的に紹介するとともに、近畿・九州の両地域における火山・地熱活動の異常分布について、沈み込むスラブの経時的な変化(セグメント化と急傾斜化)が基本的な原因であると推測した。

今回、別の視点からこの非定常的な問題に再検討を加えた。第1図に、スラブの急傾斜化と上昇するマントル物質の量の関係について、簡易的な2次元垂直断面の幾何学モデルを示す。なお、スラブはある深度を折り線として急傾斜化すると想定し、スラブの先端

部は単純にスラブ伸長面に垂直な平面を仮定した。

まず、第1図(A)には、速度一定・傾斜角度一定で沈み込む比較的短いスラブの場合を示す。この場合、スラブ(剛体的)の先端部が高温マントル物質(流動性を持つアセノスフェア)を漸次押し退けることによって、高温マントル物質の上昇流が生じるであろう。その体積は、概略的(茂野(2008a)の第5図の θ_p と θ_A の差が $\sim 20^\circ$ 以内の通常的な場合)に第1図(A)の $\Delta V1$ の式(微小時間(ΔT)分の体積の累計)で示される。なお、この上昇流は、図中に示したスラブの沈み込みに伴うマントルウェッジ物質の地下深部への引きずりによって循環的(対流)になっていくと考えられる。この上昇流は、多くの場合に島弧系の背弧域のマグマ活動の起源になると考えられる(特に短いスラブの場合には、島弧域(あるいは前弧域)のマグマ活動の起源となる可能性もあろう)。

一方、第1図(B)には速度一定で沈み込むと同時に、ある深度を折り線として傾斜角度が一定速度で増加するスラブの場合を示す。この場合には第1図(A)の $\Delta V1$ に加えて、スラブが急傾斜化する効果によって高温マントル物質の上昇流が生じると考えられる。その体積は、概略的に第1図(B)の $\Delta V2$ の式(微小時間(ΔT)分の体積の累計)で示される。この上昇流は、比較的短いスラブの場合には島弧域(あるいは



第2図 西日本2弧系向けの擬似経度-緯度座標系 (PLLCS, JILLS-WJA) に基づいて地図上表示したスラブ分布のシミュレーション結果。上は~3Ma, 下は~0Maのフィリピン海および太平洋の2プレート-スラブ分布の簡易シミュレーション結果を示す。シミュレーションの方法は茂野 (2008a) を、代表移動点の番号とパラメータ値は第1表 (A)・(B) を参照 (琉球弧下の沈み込みについては、沖縄トラフの拡大を想定して~3Maの沈み込み開始点 (琉球海溝) の位置を変化させていることに注意)。上図・下図ともに地形は現在のもの、背景の海岸線 (国土地理院, 2000)、水深 (日本海洋データセンター, 2009)、経度-緯度座標系とともに、下図では深部震源分布 (気象庁, 2006) として深度50~100km (薄灰色)、100~200km (濃灰色) および200km以深 (黒色) のものを示す。下図の長方形は、第3図の断面図群の範囲を示す。セグメントの区分ほか、詳しくは本文を参照。

前弧域) のマグマ活動の起源となる可能性が高いであろう (長いスラブの場合には、背弧域のマグマ活動の起源ともなるであろう)。なお、スラブの先端部が沈み込み深度に応じて漸次曲線的に急傾斜化する場合には、第1図 (B) のモデルと式は適用できない ($\Delta V2$ の体積は発生しない) に注意を願いたい。

以上、第1図の2つのモデル図と式が示すように、高温マントル物質の上昇量・速度と様式は、プレート-スラブの進行速度や厚さとともに、スラブの傾斜角度の増加の速度・形式によっても大きく規定され

る。ただし、第1図のモデルは必ずしも網羅的なものではないことに注意されたい。第1図では背景的なマントル物質の上昇・流動 (特に左方向からの) などは想定されていないが、何らかの原因によって広域的~局地的な上昇・流動が存在する場合などには、上記の議論には修正・拡張が必要となる。

なお、海洋プレート-スラブの進行速度が同一の条件下で、沈み込むスラブが急傾斜化する場合には、単純に一定角度で沈み込む場合よりも早く深部に達する。従って、上述した沈み込むスラブからマントルウェ

ッジへの揮発性成分 (H₂O など) の供給なども、その影響を受けることとなる。本説では省略するが、その幾何学的な計算は例えば茂野 (2008a, p.11) の一連の式を利用して行うことができる。

3. 擬似経度-緯度座標系を用いた西日本2弧系下のスラブ沈み込みシミュレーション

茂野 (2008a) は、海洋プレート-スラブの斜め沈み込みについて簡易的な幾何学・運動学的モデルを提案し、日本列島周辺における深部震源分布と太平洋・フィリピン海の2海洋プレート-スラブ分布の簡易シミュレーション結果とを比較することにより、スラブのセグメント化を議論した。西日本2弧系については、その下に沈み込むフィリピン海プレート-スラブが6つにセグメント化しており、これに対応して西南日本弧は中部帯、近畿帯、中国四国帯の3地域に、琉球弧は北部 (九州地域)、中部 (本説では沖縄地域と呼ぶ)、南部の3地域に区分することができる (茂野 (2008a, 2008b, 2009a) を参照)。

最近茂野 (2009b) は、擬似的な経度-緯度座標系 (PLLCS, JILLS-EJA) を用いて、東日本3弧系について深部震源分布と太平洋プレート-スラブの沈み込み分布の簡易シミュレーションの改良版を示した。今回、西日本2弧系に擬似経度-緯度座標系 (同, JILLS-WJA) を設定して、茂野 (2008b, 2009a) の再検討を行った。通常、経度-緯度座標系から今回の擬似系への座標系変換操作のオイラー角 (茂野 (2009b) 参照) は、z-y-x系の操作で $\theta_z = -132^\circ$, $\theta_y = +32^\circ$, $\theta_x = -45^\circ$ とした。JILLS-WJAでは擬似経線群が、想定したフィリピン海プレートの相対的進行方向 (NW方向に $\sim 4\text{cm/year}$) に平行になっている。

第2図に、JILLS-WJAを用いた西日本2弧系の深部震源分布とともに、2時階 ($\sim 3\text{Ma}$ と $\sim 0\text{Ma}$) のフィリピン海プレート-スラブ沈み込み分布の簡易シミュレーション結果を示す。シミュレーションの方法は茂野 (2008a) を、作図プログラムなどは茂野 (2008b, 2009b) を参照されたい。また、通常、経度-緯度座標系に基づく西南日本弧下と琉球弧下のシミュレーション結果については、茂野 (2008b, 2009a) を参照されたい。

第1表 (A)・(B)には、今回フィリピン海プレート-スラブ沈み込みシミュレーション (2時階) に使用したパラメータ値の一覧表を示す。今回、深部震源分布

第1表 (A) 中期鮮新世 ($\sim 3\text{Ma}$) に西日本2弧系下へ沈み込むフィリピン海プレート-スラブの代表移動点群の簡易シミュレーション用パラメータ値一覧表 (本文3.および5.2を参照)。

WJA	Lon	Lat	Lon	Lat	VA	θA	$\theta p1$	$\theta d1$	Time1	$\theta p2$	$\theta d2$	Time2
3 Ma	-WJA		-WJA									
No.	deg	deg	deg	deg	cm/y	deg	deg	deg	m.y.	deg	deg	m.y.
1	126.5	24.4	-8.844	-1.732	4.0	0	-3	15	4.0	-3	45	7.0
2	127.7	25.4	-7.370	-1.858	4.0	0	0	15	4.0	0	45	7.0
3	128.7	26.4	-6.025	-1.833	4.0	0	6	15	4.0	6	45	7.0
4	129.7	27.4	-4.885	-1.791	4.0	0	6	15	4.0	6	45	7.0
5	130.5	28.4	-3.474	-1.605	4.0	0	6	15	4.0	6	45	7.0
6	131.5	29.4	-2.146	-1.529	4.0	0	8	15	4.0	6	45	7.0
7	132.0	30.4	-1.132	-1.131	4.0	0	9	15	4.0	9	45	7.0
8	132.5	31.4	-0.122	-0.725	4.0	0	9	15	4.0	9	45	7.0
9	133.0	32.1	0.072	-0.526	4.0	0	9	15	4.0	9	45	7.0
10	134.1	32.2	1.410	-1.103	4.0	0	-15	10	3.0	-15	10	4.5
11	135.0	32.4	2.099	-1.483	4.0	0	-15	10	3.0	-15	10	4.5
12	136.0	32.6	2.852	-1.913	4.0	0	-15	10	3.0	-15	10	3.0
13	137.0	33.0	3.742	-2.186	4.0	0	-15	10	3.0	-15	10	3.0
14	137.5	33.3	4.254	-2.244	4.0	0	-15	10	3.0	-15	10	3.0
15	138.0	33.7	4.832	-2.224	4.0	0	0	10	3.0	0	10	3.0
16	138.5	34.5	5.673	-1.899	3.0	0	35	25	3.0	35	25	3.0
17	139.3	35.0	6.498	-1.954	3.0	0	-125	0	3.0	-125	0	3.0

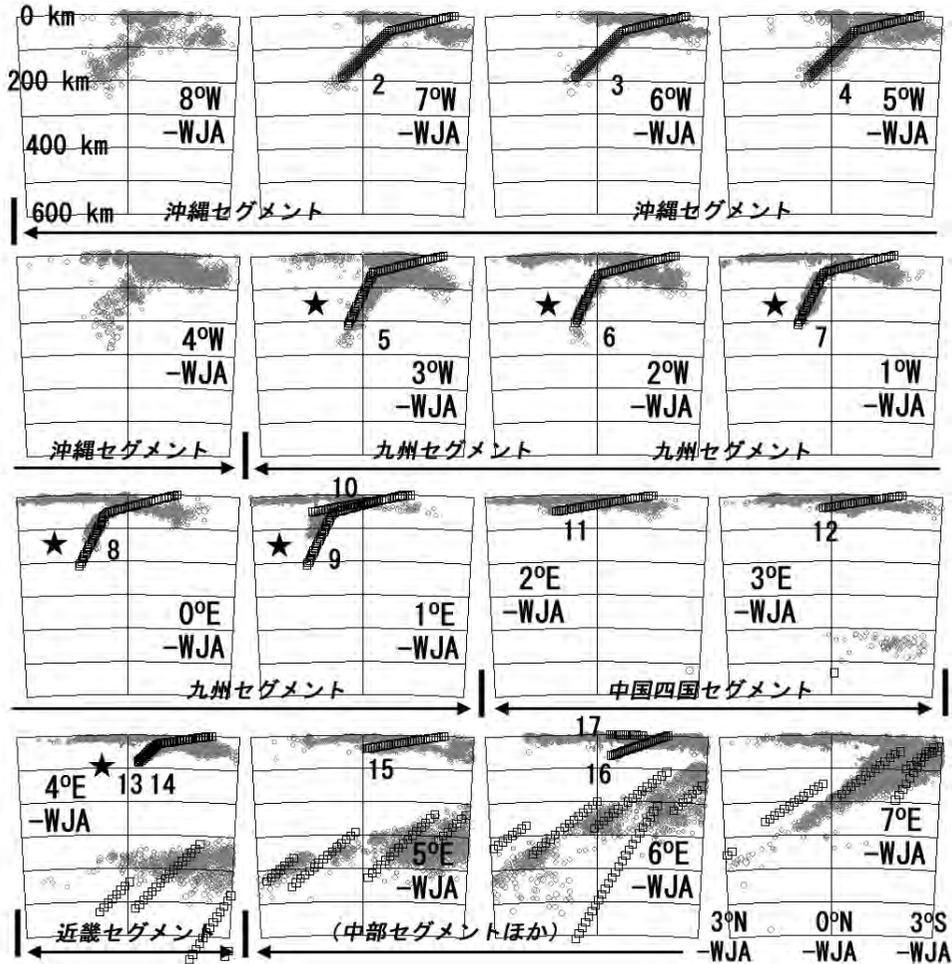
Lon-WJAの負値は擬似経度の西経、Lat-WJAの負値は擬似緯度の南緯を示す。灰色は第1表(B)とは異なる部分を、イタリックは茂野 (2009a) からの変更を示す。東日本3弧系下へ沈み込む太平洋プレート-スラブの代表移動点群の簡易シミュレーション用パラメータ値一覧については、茂野 (2009b) の第2表を参照 (なお、Lon-WJA, Lat-WJAへの変換を行うとともに、Time2を3.0 m.y. 分減した)。

第1表 (B) 完新世 ($\sim 0\text{Ma}$) に西日本2弧系下へ沈み込むフィリピン海プレート-スラブの代表移動点群の簡易シミュレーション用パラメータ値一覧表 (本文3.および5.2を参照)。

WJA	Lon	Lat	Lon	Lat	VA	θA	$\theta p1$	$\theta d1$	Time1	$\theta p2$	$\theta d2$	Time2
0 Ma	-WJA		-WJA									
No.	deg	deg	deg	deg	cm/y	deg	deg	deg	m.y.	deg	deg	m.y.
1	127.0	24.0	-8.832	-2.339	4.0	0	-5	15	5.0	-5	45	10.0
2	128.2	25.0	-7.355	-2.462	4.0	0	0	15	5.0	0	45	10.0
3	129.2	26.0	-6.007	-2.434	4.0	0	10	15	5.0	10	45	10.0
4	130.2	27.0	-4.665	-2.388	4.0	0	10	15	5.0	10	45	10.0
5	131.0	28.0	-3.452	-2.199	4.0	0	10	15	5.5	10	65	10.0
6	132.0	29.0	-2.122	-2.121	4.0	0	10	15	6.0	10	65	10.0
7	132.5	30.0	-1.108	-1.720	4.0	0	15	15	5.5	15	65	10.0
8	133.0	31.0	-0.098	-1.310	4.0	0	15	15	5.5	15	65	10.0
9	133.5	31.7	0.697	-1.108	4.0	0	15	15	5.5	15	65	10.0
10	134.1	31.9	1.202	-1.319	4.0	0	-15	10	4.0	-15	10	7.5
11	135.0	32.3	2.030	-1.555	4.0	0	-15	10	4.0	-15	10	7.5
12	136.0	32.6	2.852	-1.913	4.0	0	-15	10	4.0	-15	10	6.0
13	137.0	33.0	3.742	-2.186	4.0	0	-15	10	4.0	-15	45	6.0
14	137.5	33.3	4.254	-2.244	4.0	0	-15	10	4.0	-15	45	6.0
15	138.0	33.7	4.832	-2.224	4.0	0	0	10	4.0	0	10	6.0
16	138.5	34.5	5.673	-1.899	3.0	0	35	25	3.0	35	25	6.0
17	139.3	35.0	6.498	-1.954	3.0	0	-125	0	3.0	-125	0	6.0

Lon-WJAの負値は擬似経度の西経、Lat-WJAの負値は擬似緯度の南緯を示す。イタリックは茂野 (2009a) (No.13~17) については茂野 (2008a) からの変更を示す。東日本3弧系下へ沈み込む太平洋プレート-スラブの代表移動点群の簡易シミュレーション用パラメータ値一覧については、茂野 (2009b) の第2表を参照 (なお、Lon-WJA, Lat-WJAへの変換を行った)。

とスラブ分布のシミュレーション結果の一致を改善する目的で、パラメータ値の一部に若干の変更を加えた (第1表 (A)・(B) の備考を参照)。ただし、茂野 (2009a) の議論との関係で特に問題となる西南日本弧と琉球弧の会合部 (大分県の火山・温泉群などが



第3図 擬似経度-緯度座標系 (PL LCS, JILLS-WJA) に基づく8° W-WJAから7° E-WJA間の震源分布とスラブの沈み込み簡易シミュレーション結果の断面図。セグメント区分のほか、詳しくは本文と第2図を参照。★は、フィリピン海プレートのスラブの急傾斜化が顕著であることを示す。

分布)については、不一致が大きいそのまま残した。

なお、第2図には太平洋プレート-スラブの簡易シミュレーション結果(同2時階)についても合わせて示した。シミュレーションに使用したパラメータ値については、茂野(2009b)の第2表(JILLS-EJAに基づく)を参照されたい(第1表(A)・(B)の備考を参照)。

第3図には、第2図の中心地域について震源分布とスラブ沈み込み分布(~0Ma)の簡易シミュレーション結果とを、擬似経線に平行に擬似経度1°間隔の16断面図にして示す。なお、これらの断面図群は、フィリピン海プレートの想定進行方向に平行になっている。

4. 西日本2弧系の4セグメントにおける高温マントル物質上昇の比較

上述した2.の簡易幾何学モデル(第1図)と3.のスラブ分布の簡易シミュレーション結果(第2図・第3図)を用いて、西日本2弧系のセグメント群における高温マントル物質上昇の大きな比較を試みる事ができる。非常に概略的ではあるが、第2表に沖縄(琉球弧中部)、九州(琉球弧北部)、中国四国、近畿の4セグメント(西方から東方へ配列)について、(1)スラブの先端部の押し退けと(2)スラブの急傾斜化による高温マントル物質の上昇速度などの見積りを示す。また表の下方に備考として、(3)それ以外に想定される原因に

第2表 フィリピン海プレート-スラブの沈み込みに伴う高温マントル物質の上昇量など(ΔV1・ΔV2・ΔV3)についてのセグメント群の概略的な比較計算表(第1図・第4図を参照)。

セグメント 地域名	沖縄 地域	九州 地域	中国四国 地域	近畿 地域
代表的擬似経度 (JILLS-WJA)	6°W -WJA	1°W -WJA	2°E -WJA	4°E -WJA
VA (cm/year) \$1	4	4	4	4
ΔT (m.y.) \$2	2	2	1	1
L0 (km) \$3	80	80	40	40
LT (km) \$4	160	160	80	80
D (km) \$5	40	40	30	30
RU \$6	0.5	0.5	0.5	0.5
θd0 (°) \$7	45	45	10	10
θdT (°) \$8	45	65	10	45
DepthSM (km) \$9	190	210	50	80
ΔV1 (km ³) \$10	1600	1600	600	600
ΔV2 (km ³) \$11	0	2240	0	900
ΔV1/L1/1 km/ΔT (km/m.y.) \$12	8	8	6	6
ΔV2/L2/1 km/ΔT (km/m.y.) \$12	0	11	0	9

- \$1, VA: プレート-スラブの進行速度(第1表(B)参照)
- \$2, ΔT: 急傾斜化の期間(地域条件に応じて設定)
- \$3, L0: 初期時点のスラブの長さ(今回LTとΔTから逆算)
- \$4, LT: ~0 Ma(ΔT時間経過後)のスラブの長さ
- \$5, D: スラブの厚さ
- \$6, RU: スラブの押し退け部分の中で上昇流ΔV1となる割合
- \$7, θd0: 初期時点のスラブの沈み込み傾斜角度
- \$8, θdT: ~0 Maのスラブの沈み込み傾斜角度
- \$9, DepthSM: ~0 Maのスラブ先端部の深さ(参考値)
- \$10, ΔV1: 単純なスラブの沈み込みによる上昇量
- \$11, ΔV2: スラブの急傾斜化による上昇量
- \$12, L1, L2: 対象とする地域の島弧に直交方向の幅(km)
(今回4地域ともに両者~100 kmと仮定)

備考: 上記のフィリピン海プレート-スラブの沈み込み以外
の原因による高温マントル物質上昇の寄与の可能性

ΔV3/L3/1 km/ΔT (km/m.y.) \$13	~ 10 ??	~ 10 ??	~ 5 ??	~ 20 ??
	#1	#1	#2	#3

- \$13, ΔV3: ΔV1・ΔV2以外の原因による上昇量
- L3: 対象とする地域の島弧に直交方向の幅(km)
(今回ΔTとL3は地域に応じて適宜仮定した)

- #1, 沖縄トラフ域(特異な背弧海盆)における上昇
- #2, 日本海沿いの(過去のプレート活動による)上昇
- #3, 太平洋プレート-スラブの深部沈み込みによる上昇

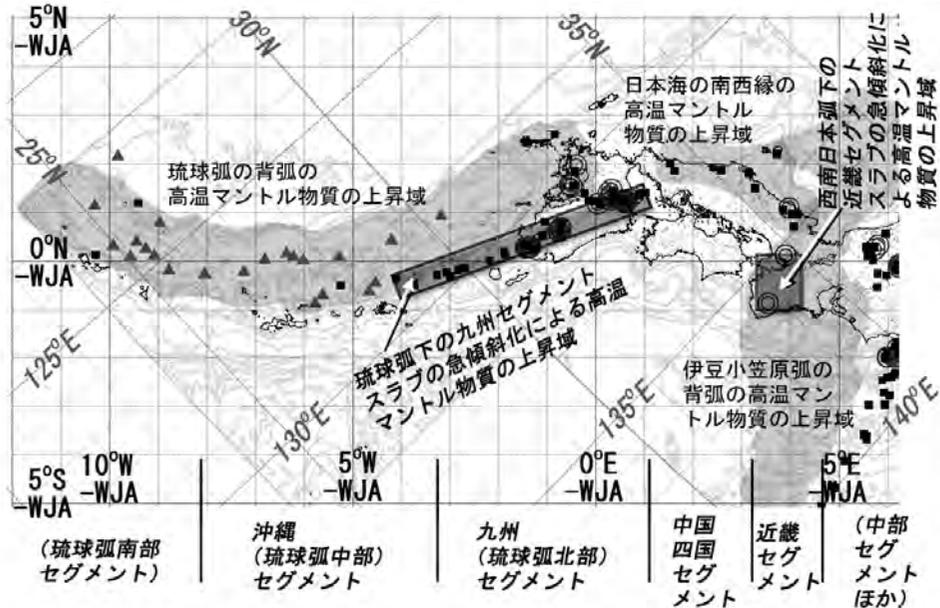
よる高温マントル物質の上昇速度の非常に大きくな見積りを示す。茂野(2009a)で主要検討対象から除外した琉球弧南部、複雑性が非常に高い西南日本弧の中部帯(茂野, 2008b)の2セグメントについては、第2表から除外した。

なお、上記(1)の見積りで不確実性が高い上昇流の係数RU(第1図参照)については、共通的に0.5と仮定した。(2)の見積りでスラブの傾斜角度の増加(第2表 \$7, \$8)については、九州地域下では沖縄地域下、近畿地域下では中国四国地域下の現在の各概略値を初期値として使用した(第3図参照)。また、スラブの傾斜角度の増加開始時期(第2表 \$2)については、概略的に前者では茂野(2009a)に基づいて~2Ma、後者では第2図のフィリピン海プレート-スラブの先端部の移動状況から~1Maと想定した。

非常に概略的ではあるが第2表に示すように、上記(1)の過程による高温マントル物質の上昇速度(ΔV1/L1/1km/ΔT)は、フィリピン海プレート-スラブについては4地域ともに同程度(6~8km/m.y.)と想定される。一方、(2)の過程による高温マントル物質の上昇速度(ΔV2/L2/1km/ΔT)は、フィリピン海プレートのスラブの急傾斜化が認められる九州・近畿の両地域で大きい(9~11km/m.y.)と想定される。なお、(1)の過程による上昇流の一部が、そのまま(2)の過程による上昇流になってしまう可能性もあるが、この問題については今回の検討では考慮しなかった。

第4図には、上記の結果をまとめて概略的な平面地図として示す。第4図に濃灰色の矩形で示される九州と近畿の2地域は、フィリピン海プレート-スラブ沈み込みの急傾斜域の分布から、概略的に上記(2)の過程による高温マントル物質の上昇が推測される地域にあたる。これら2地域は、前者が第四紀の火山・地熱活動が非常に活発な陸域、後者が前弧域(非火山性地域)にあたるが現在高温温泉が分布する特異な陸域となっている。

これに対して、第4図に薄灰色の不定形で示される3地域は、上記(1)の過程あるいは(おおよび)(3)それ以外の原因によって高温マントル物質の上昇域となっている可能性がある。ただし、3地域の選出基準は多様であり、(A)琉球弧の背弧域については沖縄トラフの分布、(B)日本海の南西縁域(山陰地域)については第四紀火山(主に玄武岩質の単成火山)の分布、(C)伊豆小笠原弧の背弧域(近畿地域)については深部震源(深度350km以深)の分布に基づいている。これらの中で(A)・(B)の2地域については、フィリピン海プレート-スラブの沈み込みによる上記(1)の過程によって、(C)地域については、太平洋プレート-スラブの深部沈み込みによる上記(1)の過程によ



第4図 西日本2弧系の地下における高温マントル物質上昇域の概念図(擬似経度-緯度座標系(PLLCS, JILLS-WJA)に基づく)。フィリピン海プレートのスラブの急傾斜化による高温マントル物質上昇域として、九州地域と近畿地域の該当地域を濃灰色の矩形で示す。また、その他の原因による高温マントル物質上昇の可能性が高い地域として、(A) 沖縄トラフの分布から琉球弧の背弧域、(B) 第四紀火山の分布から日本海の南西縁域、(C) 深部震源(350km <)の分布から伊豆小笠原弧の背弧域を抽出し薄灰色で示す。背景の経度-緯度座標系、海岸線(国土地理院, 2000)、水深(日本海洋データセンター, 2009)とともに、■は第四紀火山(地質調査所, 2000)、▲は沖縄トラフ域の海底火山(日本の地質「九州地方」編集委員会 編, 1992)、◎は高温温泉(90℃ <)(地質調査総合センター, 2005)の各分布を合わせて示す。本図の説明は、第2図、第2表および本文を参照。なお、非常に複雑な西南日本弧の中部地域については検討・表示から除外した。

って、高温マントル物質の上昇が生じている可能性が高い。しかし、上記の過程に加えて、(3)のそれ以外の過程が副次的にあるいは主要に寄与している可能性も指摘される(第2表の備考を参照; また(A)地域については茂野(2009a)、(B)地域については茂野(2008b)を参照)。

5. 考察(訂正を含む)

5.1 本説の取りまとめ

茂野(2008b, 2009a)は、西日本2弧系(陸域)の中で第四紀の火山・地熱活動が特異な分布を示す近畿地域と九州地域について各々検討を加え、基本的にフィリピン海プレート-スラブのセグメント化と急傾斜化が異常の原因になっていると推測した。ただし、大きな枠組みとして、近畿地域では太平洋プレート-スラブ(沈み込み長が長い)、フィリピン海プレート-スラ

ブ(同短い)および西南日本弧の3者の相互作用に起因しているのに対して、九州地域ではフィリピン海プレート(同やや長い)、琉球弧(・沖縄トラフ)および西南日本弧の3(・4)者の相互作用に起因しており、両地域の異常現象も大きく異なった内容となっている。

本説では、スラブの沈み込みとそれに伴う高温マントル物質のマントルウェッジへの上昇を非定常的な過程として取り扱い、簡易的にその幾何学モデル化を行った。そして、そのモデルを西日本2弧系の4セグメント群に適用し、火山・地熱活動の起源(根源)となっている地下深部の高温マントル物質上昇の過程・速度について概略的な比較検討を行った。

残念ながら今回の検討は幾何学的な視点からの半定量的な段階のものであり、次の(1)~(3)のような大きな問題点を残している。(1)スラブ(剛体的)や上部マントル・マントルウェッジ(粘性流体的な性格を持つ)の状態・物性(温度・圧力・履歴などへの依存性

が強く、地域・深度によって大きく異なっている可能性が高い)について考慮していない。(2)スラブ(特に先端部)の沈み込み深度などが高温マントル物質上昇の速度・様式などに及ぼす影響について考慮していない(これは当然、熱エネルギーの上昇速度に影響を持つが、上記(1)の状況によって大きく規制される)。(3)スラブからの揮発成分の放出過程やマントルウェッジにおけるマグマ発生過程についても考慮していない。

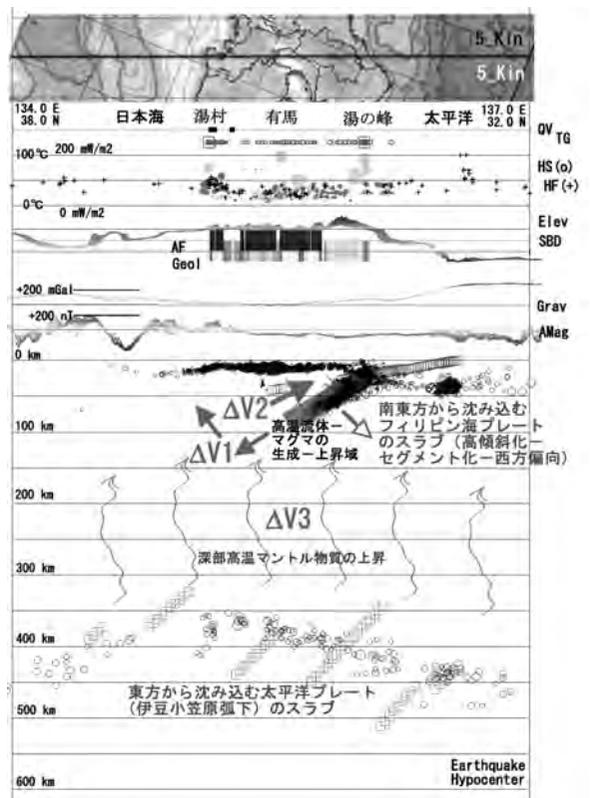
近年、沈み込むスラブと上部マントル・マントルウェッジの環境・相互作用について、温度・圧力、物質状態・移動、流体放出・マグマ生成などの時空分布の定量的な数理モデル化-数値シミュレーションが進展している(例えば、Peacock, 2003; Honda, 2009)。本説の非常に簡易的ではあるが非定常的なスラブ沈み込みのモデル化とその応用についても、今後数値シミュレーションを通じた総合的・定量的な検討が必要である。一方、本説の内容が、上記の様々な研究の今後の進展に何らかの参考となれば幸いである。

5.2 茂野(2008b, 2009a)の修正・再検討

上述した検討結果に基づいて、茂野(2008b, 2009a)の不十分な点について以下に修正を加える。

まず第5図に、茂野(2008b)の第12図の修正版として近畿地域のモデル断面図を示す。茂野(2008b)では、近畿地域(特に非火山性の前弧域)における高温温泉の分布異常の基本的な原因について、太平洋プレート-スラブの地下深部への沈み込み(伊豆小笠原海溝から;深度~350km以深)に伴う高温マントル物質の上昇(第5図, $\Delta V3$)、およびその影響を受けたフィリピン海プレート-スラブのセグメント化-急傾斜化(南海トラフから;最大深度~80km)に伴う高温マントル物質の上昇(下方へ開いていくマントルウェッジへの侵入)(同 $\Delta V2$)を想定した。上述したように、沈み込むフィリピン海プレート-スラブの先端部の押し退け(~押し上げ)による高温マントル物質の上昇(同 $\Delta V1$)の寄与も、合わせて考える必要がある。

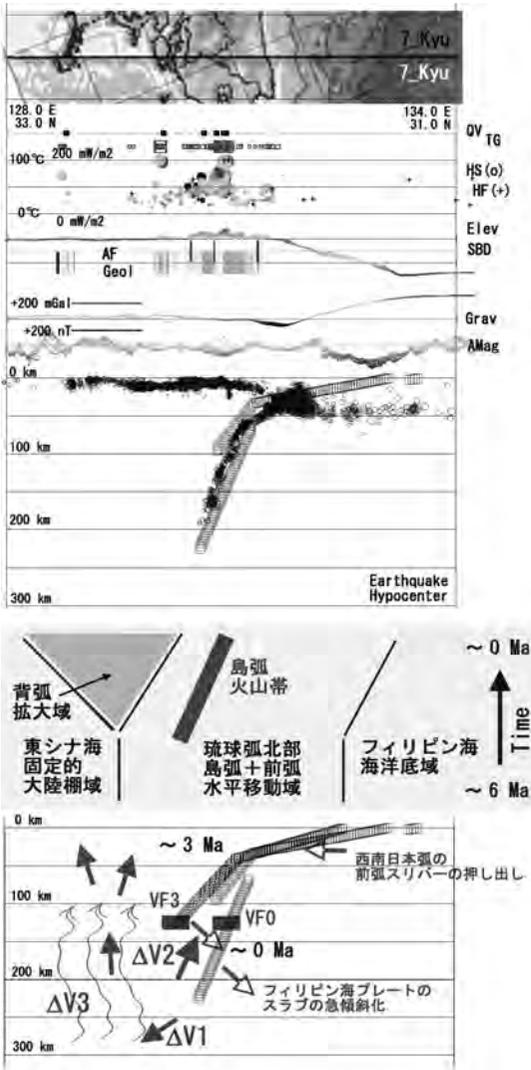
一方第6図に、茂野(2009a)の第7図(B)の修正版として九州地域南部のモデル断面図を示す。茂野(2009a)では、九州地域の新第三紀後期~第四紀の火山・地熱活動の東方移動と集中・大規模化の基本的な原因として、~3Ma以降のセグメント化したフィリピン海プレートのスラブの急傾斜化に伴うマグマ発生



第5図 近畿地域の修正断面モデル図。茂野(2008b)の第12図を修正したもので、近畿地域の高温温泉の生成環境-機構のモデル図(下部に震源分布とともに~0Maのスラブの分布の簡易シミュレーション結果と説明を示した)である。第1図(B)のモデル図と第4図の概念地図表示に沿って、高温マントル物質の上昇矢印群を修正した。断面線の位置は、第2図の上図を参照。なお、本図では通常の経度-緯度座標系が使用されていることに注意。詳しくは本文および茂野(2008b)を参照。

域の集中化を想定していた。しかし、上述したように、スラブの急傾斜化によって生じる高温マントル物質の上昇(第1図, $\Delta V2$)の寄与が、恐らく非常に大きいであろう。また、スラブ先端部の沈み込みによる高温マントル物質の押し退け(~押し上げ)(第1図, $\Delta V1$)の寄与も無視できないであろう。

なお、本説では省略するが、琉球弧中部(茂野(2009a)の第7図(A))のモデル断面図についても、スラブ先端部の沈み込みによる高温マントル物質の押し退け(~押し上げ)(第1図, $\Delta V1$)の寄与を取り入れる必要がある。また、沖縄トラフの基本的な生成機構に関しても、現在の琉球弧中部(~南部)のスラブ



第6図 九州地域南部の修正断面モデル図、茂野(2009a)の第7図(B)を修正したもので、琉球弧を横断する九州地域南部の火山活動の変化モデル図(震源分布とともに下部に~0Ma, 最下部に~3Maおよび~0Maのスラブの分布の簡易シミュレーション結果を示し、両者の間に概略的な説明図を入れた)である。第1図(B)のモデル図と第4図の概念地図表示に沿って、高温マントル物質の上昇矢印群を修正した。VF3・VF0は~3Maと~0Maの島弧火山フロントの概略の位置に対応する。断面線の位置は、第2図の上図を参照。なお、本図では通常の経度-緯度座標系が使用されていることに注意。詳しくは本文(特に5.2)および茂野(2009a)を参照。

の沈み込み傾斜角度がかなり大きい(第3図)ことから、場の特殊性(ΔV3; 茂野(2009a) 参照)のほかに、継続的なΔV1・ΔV2の寄与が大きな原因となっている可能性が指摘される。

最後に、茂野(2009a)の問題点について、再検討した内容を追記する。茂野(2009a)では、フィリピン海プレートが~6Ma以降NW方向に~4cm/yearの相対速度(東シナ海などの固定域に対して)で定常的に進行するとともに、~3Ma以降沖縄トラフが広がることによって、琉球弧域がSE方向へ~2cm/yearの速度で移動していると想定したモデル化-簡易数値シミュレーションを実施した。これにより、現在の琉球弧の深部震源分布と3~4Ma以降の九州地域の火山岩類の分布の両者を、フィリピン海プレート-スラブの沈み込みによって説明した。

上記のモデルに基づけば、~3Ma以降は琉球弧に対するフィリピン海プレートの相対速度は~6cm/yearとしてシミュレーションを行う必要があった。しかし、茂野(2009a)では、~3Ma以降も~4cm/yearの相対速度が使用されており、長さ約60km(~2cm/year×300万年間)分のスラブがシミュレーション結果では行方不明になるという問題を生じている。

この問題への対処として、上記の茂野(2009a)のモデルを基礎に、以下の修正モデルが提案される。(1)~6Maのフィリピン海プレートの沈み込み(現サイクル)の開始時点で、琉球弧下のスラブの長さは~100km程度であった(茂野(2009a)の4.2の~160kmから60km減)。(2)~6Maから~3Maの間の上記フィリピン海プレートの琉球弧に対する相対速度は、~4cm/yearであった(茂野(2009a)から変更なし)。(3)~3Maから~0Maの間の上記相対速度は、~6cm/yearであった(スラブの長さは茂野(2009a)から60km増となるが、(1)+(2)+(3)の全長では増減なしとなる)。

この修正モデル(パラメータの調整)に基づくシミュレーションにより、~0Maのスラブの分布は第2図・第3図・第6図と同様になる。しかし、~3Maのスラブの長さは~60km短くなり、スラブの先端部の深度は~85km程度に留まる。この深度は、通常の島弧火山活動の生成には十分ではない。しかしながら、沖縄トラフとその延長域におけるマントル物質の上昇(ΔV3)の開始に、本説で述べたスラブ先端部の押し退け(~押し上げ)によるマントル物質の上昇(ΔV1)の効果が

加われば、九州地域の各ブロック(茂野(2009a)の第5図(C)参照)における「高弧火山活動」を生成することが可能ではないかと思われる。

フィリピン海プレートの相対運動が一定などの制約を持つモデル(茂野(2009a)の6.2を参照)では、上記の修正モデル以外では現在のところ、3~4Ma以降の九州地域の火山岩類の分布と現在の琉球弧の深部震源分布の両者を説明することは難しい。モデルの自由度を高めれば適合性の高いシミュレーション結果を得ることが可能であるが、モデルが適正か否かの検証が難しい。

本説の「火山・地熱活動異常の原因としてのスラブ沈み込みの急傾斜化」は、基本的には異常発生機構の検討を主題としており、個別地域の具体的な経時変化の問題とは独立的に考えることができる。その立場から、本説では基本的に茂野(2009a)の結果を利用し、茂野(2009a)の問題点については本考察の最後に取り扱う形として、琉球弧-九州地域の変化史のよりよい理解は将来の課題として残した(茂野(2009a)の6を参照)。

6. おわりに

本説は、電子地理・地球科学情報を利用した地熱資源の評価手法(例えば、地質調査総合センター、2007)の継承-発展的な研究として、筆者が進めている各種の検討の一部を紹介したものである。茂野(2009b)では、茂野(2008a)の懸案問題を解決する目的で、擬似経度-緯度座標系(PLLCS)手法の有効性を中心に再検討結果を紹介した。本説では、茂野(2008b, 2009a)で重要性を指摘したスラブの急傾斜化を巡って、高温マントル物質上昇の簡易的な幾何学モデル化を行い、茂野(2008b, 2009a)の問題点について再検討を加えた結果を紹介した。

本説が、様々な電子地理・地球科学情報の統合的、発展的な利用に向けて、一つの参考となれば幸いである。また本説が、プレート沈み込み帯における様々な火山・地熱現象のよりよい理解に向けて、一つの試みとして寄与する機会があれば幸いである。

文 献

地質調査所(2000):日本の新生代火山岩の分布と産状 Ver. 1.0. 数値地質図, G-4.

地質調査総合センター(2005):日本温泉・鉱泉分布図及び一覽(第2版)(CD-ROM版). 数値地質図, GT-2.

地質調査総合センター(2007):九州-大分-豊肥地域の地熱データ処理集「地理情報システム(GIS)を利用した地熱資源の評価の研究(2001-2005年度)」のまとめと簡易統合的処理データ・プログラム集(CD-ROM). 数値地質図, GT-3.

Eiler, J. M. (2003): Introduction. In Eiler, J. M. ed., Inside the Subduction Factory. *A.G.U., Geophys. Monogr. Ser.*, **138**, 1-6.

Honda, S. (2009): Numerical simulation of mantle flow around slab edges. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **277**, 112-122.

Kearey, P., Klepeis, K. A. and Vine, F. J. (2009): *Global Tectonics*, 3rd ed. Wiley, 496p.

気象庁(2006):地震年報 平成17年(CD-ROM).

国土地理院(2000):数値地図25000(行政界・海岸線)(CD-ROM版).

日本海洋データセンター(2009):500mメッシュ水深データ(J-EGG500). (WWWダウンロード(http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-bin/1997/depth500_file.jp))による)

日本の地質「九州地方」編集委員会 編(1992):日本の地質9 九州地方. 共立出版. 371p.

新妻信明(2007):プレートテクトニクス-その新展開と日本列島-. 共立出版. 292p.

Peacock, S. M. (2003): Thermal structure and metamorphic evolution of subducting slabs. In Eiler, J. M. ed., Inside the Subduction Factory. *A.G.U., Geophys. Monogr. Ser.*, **138**, 7-22.

瀬野徹三(2001):続プレートテクトニクスの基礎. 朝倉書店, 162p.

茂野 博(2008a):海洋プレート-スラブの斜め沈み込みの簡易数値モデルと数値シミュレーション-電子地球科学情報の統合解析による近畿地方の高温温泉の検討(1)-. 地質ニュース, no.646, 6-21.

茂野 博(2008b):プレートテクトニクスに基づく湯の峰・有馬温泉の生成環境のモデル化-電子地球科学情報の統合解析による近畿地方の高温温泉の検討(2)-. 地質ニュース, no.647, 25-38.

茂野 博(2008c):相模トラフ域-関東平野におけるフィリピン海プレート-スラブの沈み込み-公開電子地球科学情報を利用した簡易モデル化-数値シミュレーションによる検討-. 地質ニュース, no.648, 20-33.

茂野 博(2009a):九州の火山・地熱活動の時空変化とフィリピン海プレート-スラブの沈み込みの関係-電子地球科学情報を利用した簡易モデル化-シミュレーションによる検討-. 地質ニュース, no.656, 10-28.

茂野 博(2009b):日本列島に沿って擬似赤道(大円)を引く擬似経度-緯度座標系(PLLCS, JILLS)の試み-東日本3弧系下への太平洋プレート沈み込みへの適用事例-. 地質ニュース, no.664, 50-61.

宇津徳治(1999):地震活動総説. 東大出版会, 876p.

上田誠也・小林和男・佐藤任弘・斎藤常正 編(1977):岩波講座地球科学11 変動する地球II-海洋底-. 岩波書店, 302p.

上田誠也(1989):プレート・テクトニクス. 岩波書店, 268p.

SHIGENO Hiroshi (2010): Steepening of slab subduction as a cause of anomalous activities of volcanoes and geothermal systems: Geometry model, and comparisons between the four segmented areas of the Ryukyu and Southwest Japan arcs.

<受付:2009年9月24日>