

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)—

茂野 博¹⁾

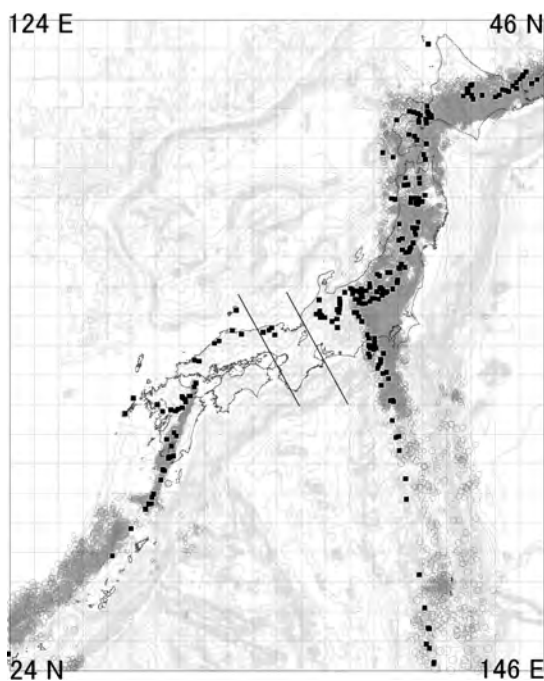
1. はじめに

高温(特に90℃以上)の温泉は、第四紀火山(～新第三紀後期火山)の周辺に分布する場合が多い。これらの温泉の熱の起源は、地下のマグマ溜まりから放出される高温流体(火山ガス, マグマ起源水など)およびマグマ溜まり～その高温固結岩体から伝導で伝えられる熱(その輸送には降水起源地下水の深部対流が寄与する場合が多い)と考えられる。しかし、それ以外の地域(一般に「非火山性地域」と呼ばれる)に高温温泉が自然湧出する場合があります。古くからその生成機構に興味を持たれてきた。

第1図に、地質調査所(2000a)に基づいて日本の第四紀火山の分布を示す。第2図には、地質調査総合センター(2005a)に基づいて日本の高温温泉地(90℃以上)の分布を示す。従来から指摘されているように、近畿地方の湯の峰温泉(和歌山県; ~93℃・中性・低塩濃度・含S-Na-HCO₃-Cl型)・有馬温泉(兵庫県; ~98℃・中性・高塩濃度・含Fe-Na-Ca-Cl-HCO₃型)が、特異的な「非火山性高温温泉」となっている。これらの温泉については、中村(1962), 松葉谷ほか(1974), 鶴巻(1993), 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1994), 原田・木戸(1995), 大石ほか(1995)などの調査・研究がある。

近畿-中国-九州地方の日本海沿いに分布する第四紀火山は、大部分が現在活動的ではないやや古い(数10万年前よりも以前に活動)小規模の単成火山(玄武岩質のスコリア丘など)であり(例えば, 守屋, 1983), その地下に現在大規模なマグマ溜まり～その高温固結岩体が分布しているとは考えにくい。近畿地方北西部の第四紀火山も同様であり、高温温泉の生

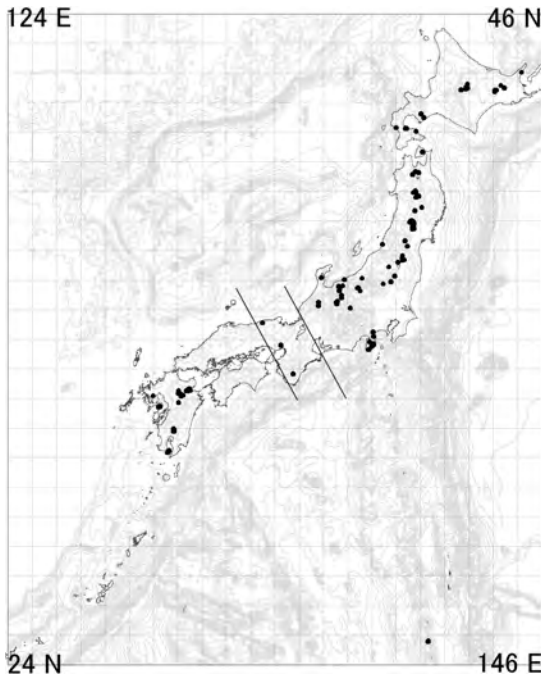
成に恵まれた環境とはいえない。この地域に位置する湯村温泉(兵庫県; ~95℃・中性・低塩濃度・Na-HCO₃-Cl型)を含めると、湯の峰-有馬-湯村の3つの高温温泉地は概略的にNW-SE方向の直線上に約



第1図 日本列島の第四紀火山分布図。第四紀火山データ(■)は地質調査所(2000a), 震源(深度範囲100~200km)データ(○)は気象庁(2006)により, 作図は地質調査総合センター(2007)の簡易アトラス作成プログラム群による。NW-SE方向の2本の構造線は本文参照。背景地形は、米国地球物理学データセンター(NGDC)公開の標高メッシュデータETOPO5を用いて、GMT(the Generic Mapping Tools)により作図した。

1) 産総研 地図資源環境研究部門

キーワード: 高温温泉, 地熱, 非火山性, 近畿, 西南日本弧, 電子地球科学情報, 統合解析, プレートテクトニクス, フィリピン海プレート, 地溝帯



第2図 日本列島の高温温泉(90℃以上)分布図。温泉データ(●)は地質調査総合センター(2005a)による。NW-SE方向の2本の構造線などは本文参照。背景は第1図参照。

100km間隔で分布している。

近年、近畿地方におけるこれらの高温温泉の生成環境-機構について、Seno *et al.* (2001), 西村 (2001), 梅田ほか (2004), 森川ほか (2006), 村岡 (2007), Sano and Nakajima (2008) などがプレートテクトニクスに関係付けて検討した結果を報告している。本説は、新たな検討-モデル化の結果を紹介するもので

ある。検討の手段としては、近年各種の高品質データの公開化が進んでいる電子地球科学情報を利用して、「オープンソース」の簡易重合処理・表示プログラム群(地質調査総合センター, 2007)を拡張的に使用した。

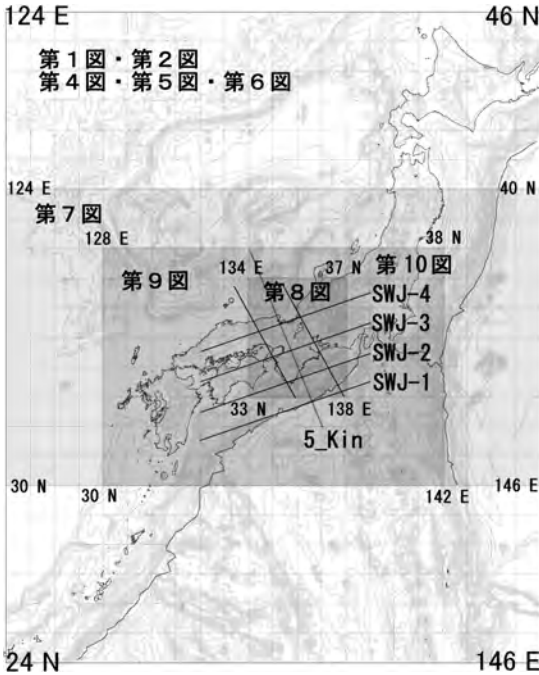
本説の検討の基礎として、茂野 (2008) は「海洋プレートスラブの斜め沈み込みの簡易数値モデルと数値シミュレーション-電子地球科学情報の統合解析による近畿地方の高温温泉の検討(1)-」を取りまとめた。本説ではこれに重複する部分は省略されているので、必要に応じて茂野 (2008) を参照されたい。

2. 電子地球科学情報の処理方法

今回の検討で処理した電子地球科学情報を、一覧表にして第1表に示す。これらは、基本的に地質調査総合センター(2007)と同一であるが、以下の追加・修正を行った。(1) 震源データとして、より新しい気象庁 (2006) を用いて震源数を増やした。なお、使用したデータフォーマット変換プログラムの問題点・修正点については、茂野 (2008) の付録を参照されたい。(2) 磁気異常データとして、より広範囲の Geological Survey of Japan (1996) を用いた。(3) 新たに活断層データとして、中田・今泉編 (2002) および地質調査総合センター (2005b ; 電子データは未公表) のベクトルデータ (ESRI社のShapefile形式) を用い、米国統計局が公開するフリーソフト (shp2mie.exe) を利用してテキスト形式化し、自作の小プログラムを用いて共通フォーマット化 (LL-PPA形式など(地質調査総合センター, 2007)) して使用した。

第1表 使用した電子地球科学情報の一覧表(地質調査総合センター(2007)・茂野(2008)を参照)。

項目(略号)	出典および備考
第四紀火山(QV)	地質調査所(2000a)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.
地温勾配(TG)	地質調査総合センター(2004)日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース。数値地質図, P-5.
温泉温度(HS)	地質調査総合センター(2005a)日本温泉・鉱泉分布図及び一覧(第2版)(CD-ROM版)。数値地質図, GT-2.
熱流量(HF)	地質調査総合センター(2004)日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース。数値地質図, P-5.
標高(Elev)	国土地理院(1997)数値地図250mメッシュ(標高)(CD-ROM版)。
水深(SBD)	日本海洋データセンター(—)500mメッシュ水深データ(J-EGG500)。(WWWダウンロードによる)
活断層(AF)	中田 高・今泉俊文編(2002)活断層詳細デジタルマップ(DVD2枚)。東大出版会。(製品シリアル番号:DAFM0345)
同上	地質調査総合センター(2005b)全国主要活断層活動確率地図。構造図, no. 14. (電子数値データは未公表。)(第10図の4断面図には不使用。)
地質(Geol)	地質調査所(1995)100万分の1日本地質図第3版, CD-ROM版。数値地質図, G-1.
重力異常(Grav)	地質調査所(2000b)日本重力CD-ROM。数値地質図, P-2。(仮定密度, 2.67 g/cm ³)
磁気異常(AMag)	Geological Survey of Japan (1996) Magnetic anomaly map of East Asia 1:4,000,000, CD-ROM version. DGM P-1.
震源(EQHC)	気象庁(2006)平成17年地震年報(CD-ROM)。



第3図 第1図～第2図および第4図～第10図の索引図。WSW-ENE方向の4本の線は第10図の4断面線的位置を、NNW-SSE方向の線は第12図のモデル断面線的位置を示す。NW-SE方向の2本の構造線などは本文参照。背景は第1図参照。

データの地図画像化は、基本的に地質調査総合センター(2007)中の簡易アトラス地図表示ソフト(QMM系)を以下のように拡張して行った。(1)階層化されたデータについて特定階層のみの選択表示を可能化。(2)地図上の特定断面線に沿った各種データの簡易垂直断面図表示を可能化(QMM-Cross系)。(3)統合断面表示図の作成効率化(4断面の半一括処理)。(4)上記の活断層データなどについては、線ベクトル型データの表示を可能化(QMM-Line系)。(5)震源データ、地形データなどについて基本的な3次元表示を可能化(QMM-3D系)。

今回の処理・表示では、以下の3つの地域レベルについて各種の平面図を作成した(第3図参照)。(1)ほぼ日本列島全域にあたる第3図の範囲(経度124°-146° E, 緯度24°-46° N; 縮尺1/500万, A2判縦72 dpi 印刷)。(2)西南日本地域(経度128°-142° E, 緯度30°-38° N; 縮尺1/250万, A2判横72 dpi 印刷)。(3)近畿地方(経度134°-138° E, 緯度33°-37° N; 縮尺1/100万, A2判縦72 dpi 印刷)。

測線に沿った断面図作成(第3図参照)では、11種類(以下の括弧内は略号)のデータ(第四紀火山(QV)・地温勾配(TG)・温泉温度(HS)・熱流量(HF)・標高(Elev)・水深(SBD)・活断層(AF)・地質(Geol)・重力異常(Grav)・磁気異常(AMag)・震源(EQHC))を処理し(第1表参照)、この順序で上下に並べて表示した(縮尺1/200万, A2判縦72dpi 印刷; 実際に深度成分を持つ3次元データは標高・水深・震源のみ)。

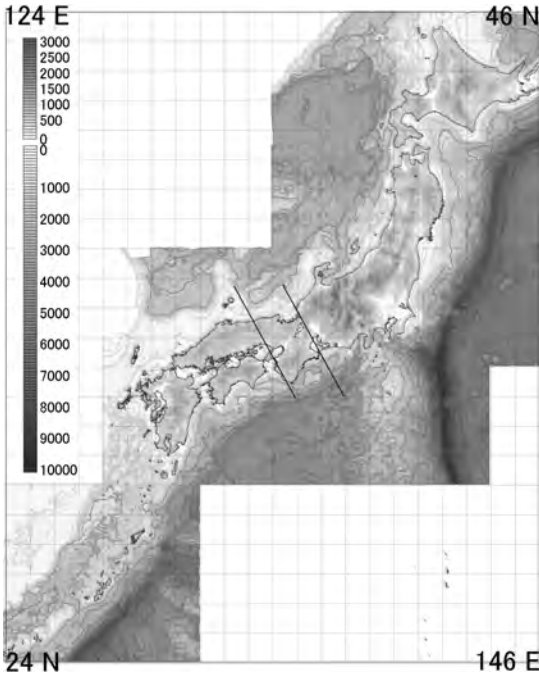
なお参考として、データの処理-表示に使用したパーソナルコンピュータは、CPUがIntel社のPentium 4 (3.2GHz)、主メモリーが512MBで、Microsoft社のWindows XPを基本ソフトしたノート型のものである。処理プログラムはMicrosoft社のVisual Basic v.6を作成-処理環境とし、作成した画像の重合処理などにはAdobe社のPhotoshop (v.5.5)を使用した。地域レベル(1)の全領域ではデータ規模が大きい標高・水深・地質・重力データについては、事前のフォーマット変換段階で2~4ファイルに地域分割して処理を行った。

3. 電子地球科学情報の地図上平面図・断面図表示

上記2. で作成した多数の平面図の中から選択して、第4図・第5図・第6図に、各々日本周辺の地形(標高-水深)分布図・ブーゲー重力異常分布図・活断層分布図を示す。すでに第1図・第2図には、日本の第四紀火山分布図・高温温泉分布図を示した。また、第7図に西南日本弧を中心とした深度別の震源分布図((A)~(H)の8図)を示す(より広域については茂野(2008)の第4図を参照)。

第8図には、近畿地方の地球科学情報の重合表示図(2図組)を示す。これは、本説の主要対象地域について、左図に標高・水深・活断層・第四紀火山・高温温泉の分布を、右図にブーゲー重力異常・震源(3つの選択深度範囲を区別)の分布をより大きな縮尺で平面図表示したものである。

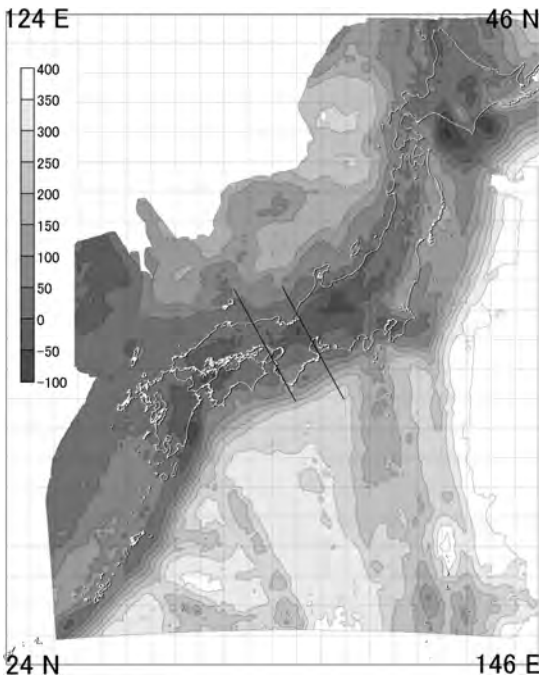
さらに、茂野(2008)による沈み込むスラブの簡易数値モデル-数値シミュレーション手法に基づいて、第9図(平面図)に西南日本弧周辺のスラブ群についての結果を示す。計算に使用したプレート沈み込み点(海溝-トラフ)群のパラメータについては、第2表



第4図 日本とその近海の地形(標高-水深)分布図。標高データは国土地理院(1997)、水深データは日本海洋データセンター(WWW)による。NW-SE方向の2本の構造線などは本文参照。



第6図 日本列島の活断層分布図。データは中田・今泉編(2002)および地質調査総合センター(2005b; 電子数値データは未公表)による。海域に分布する多数の活断層については、電子数値データは限られている。NW-SE方向の2本の構造線などは本文参照。

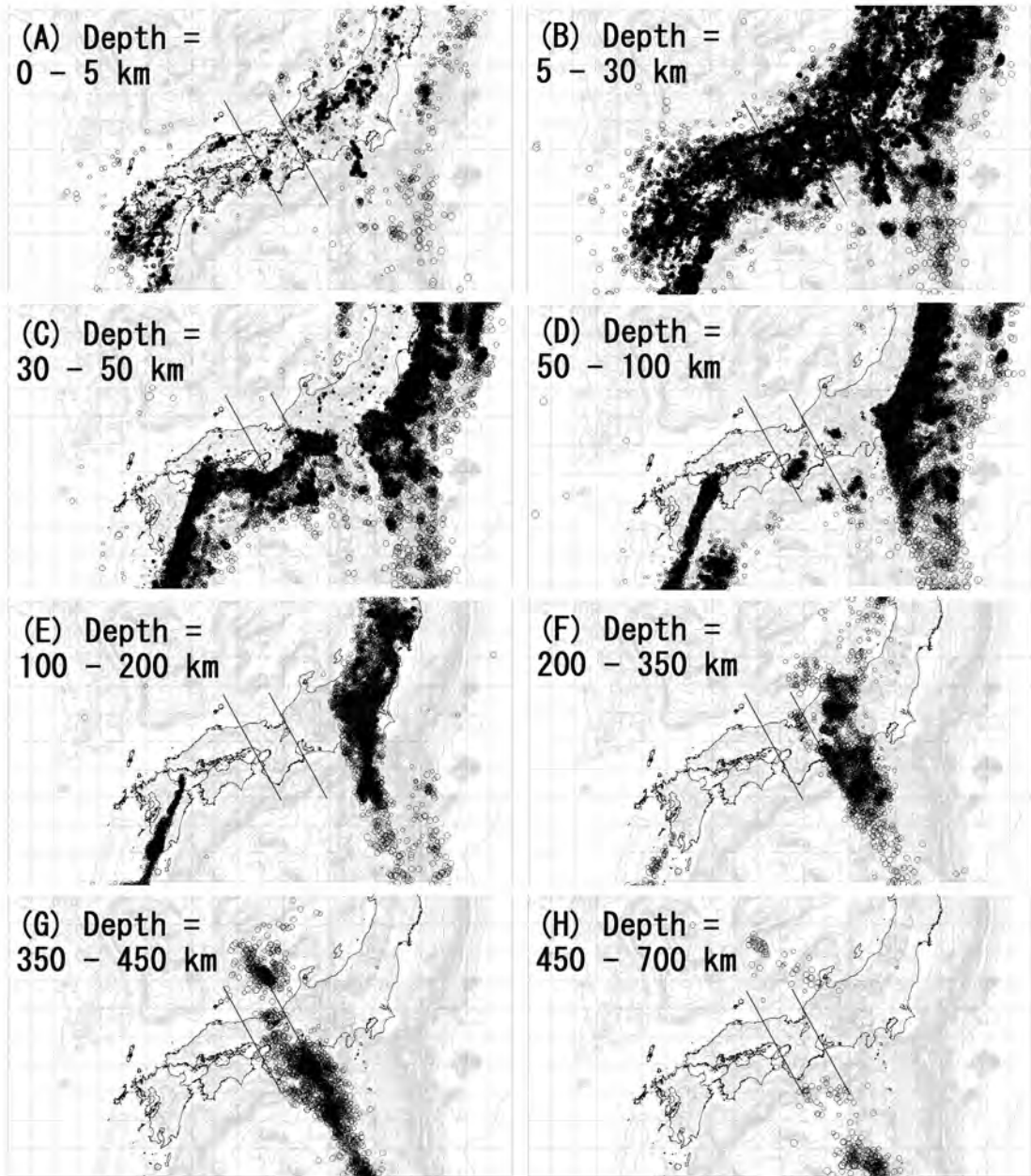


第5図 日本周辺のブーゲー重力異常(假定密度, 2.67 g/cm³)分布図。データは地質調査所(2000b)による。NW-SE方向の2本の構造線などは本文参照。

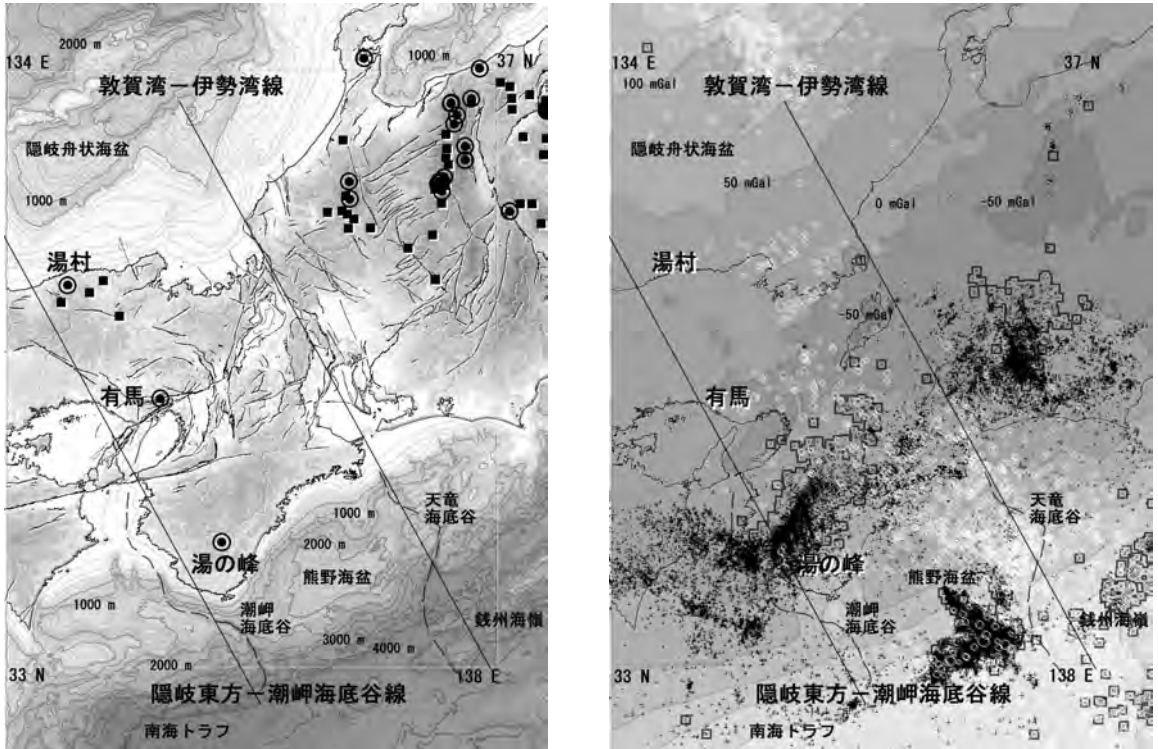
を参照。第10図の4図には、近畿地方を中央にしたWSW-ENE方向の4測線について、11データ種と上記の沈み込むスラブのシミュレーション結果の重合断面図を示す。日本のその他の地域についての代表的な同様の断面図は、茂野(2008)の第10図(8測線)を参照されたい。

4. 地球科学図集から見た近畿帯の特異性

茂野(2008)は、深部震源分布などについて特異性の高い西南日本弧(関門海峡・豊後水道~フォッサマグナの間)を、NW-SE方向の2本の平行な境界線によって中国四国帯、近畿帯、中部帯に3区分した(第4図・第8図参照)。しかし、両線は、長さが400kmに達する大規模な構造区分線であり、その位置についてはある程度の屈曲を、また線自体についてもある程度の範囲幅を考える必要がある。参考として第8図には、両線の南半部について、構造区分線として妥当性がより高いと思われる海底地形を破線で示した。



第7図 西南日本弧周辺の深度範囲別の震源分布図((A)～(H)の8図)。震源データは、気象庁(2006)の1998～2005年の8年間のデータファイルを使用した。詳しくは茂野(2008)を参照。NW-SE方向の2本の構造線などは本文参照。背景は第1図参照。



第8図 近畿地方の地球科学情報の重合表示図(2枚組)。左図は、標高(国土地理院, 1997), 水深(日本海洋データセンター, WWW), 活断層(中田・今泉編, 2002; 地質調査総合センター, 2005b), 第四紀火山(地質調査所, 2000a; ■印), 90℃以上の温泉地(地質調査総合センター, 2005a; ○縁付き●印)の各分布データを表示した。右図は、ブーゲー重力異常データ(地質調査所, 2000b), 深度30-50kmの震源(気象庁, 2006; +印), 同50-75kmの震源(□縁付き×印), 同350-450kmの震源(影付き○印)の各種分布データを表示した。各種データの凡例, 広域分布などは, 第1図~第7図を参照。NW-SE方向の2本の構造線と付随する南半部の破線は本文参照。

近畿帯(幅約200km)を挟む上記の2本の線は、概略的に西側が隠岐東方(-鳥取市)-潮岬海底谷を結ぶ線、東側が敦賀湾-伊勢湾(-天竜海底谷)を結ぶ線である。従って、中国四国帯、近畿帯、中部帯の南東沖のフィリピン海海底は、それぞれ四国海盆の西部-紀南海山、四国海盆の東部(南方で消滅化する逆直角三角形状)、伊豆小笠原弧の背弧域にほぼ対応している。また、上記の2線は、南海地震・東南海地震・東海地震の震源想定域の境界線にほぼ一致しているとともに、西南日本弧に顕著な深部低周波微動が欠落する箇所にも合致している。

以下に、本説の主対象であり特異性が高い近畿帯について、3.の各種表示図に基づいて構造異常と熱異常を整理-略述する。

4.1 構造異常(沈降帯)

4.1.1 標高分布

第4図に示すように、西南日本弧の標高分布については、両縁の地域(関門海峡・豊後水道とフォッサマグナ)に顕著な相対的低標高域(海・湖沼を含めて)の分布がある。また、上記のNW-SE方向の近畿帯の2境界線周辺も、概略的に低標高域となっている(第8図)。

特に東側の敦賀湾-伊勢湾線については、周辺地域が広域的な低標高域(近江盆地, 上野盆地などを含む)で特異的に陸域の幅が狭くなっており、従来より敦賀伊勢湾線(近畿地方と中部地方の境界に当たる大きな地形区分線, マイクロプレートの境界構造線)などとしてその重要性が指摘されてきた(例えば、米倉ほか編, 2001; 金折, 1997)。周辺海岸線につい

第2表 西南日本弧下へ沈み込むフィリピン海プレートと太平洋プレートのスラブ点群のシミュレーション用パラメータ値一覧表(茂野(2008)参照)。

NEJ No	VA cm/y	θA deg	θp1 deg	θd1 deg	Time1 My	θp2 deg	θd2 deg	Time2 My
2	10.0	70	110	10	1.5	110	62	8.0
3	10.0	70	100	10	1.0	100	55	8.0
4	10.0	70	90	10	1.0	90	41	8.0
5	10.0	70	90	10	1.0	90	40	8.0
6	10.0	70	110	10	2.0	110	60	9.0
7	10.0	70	90	15	2.0	90	35	8.0
8	10.0	70	80	15	2.0	80	35	8.0
9	10.0	70	60	15	2.0	60	35	8.0

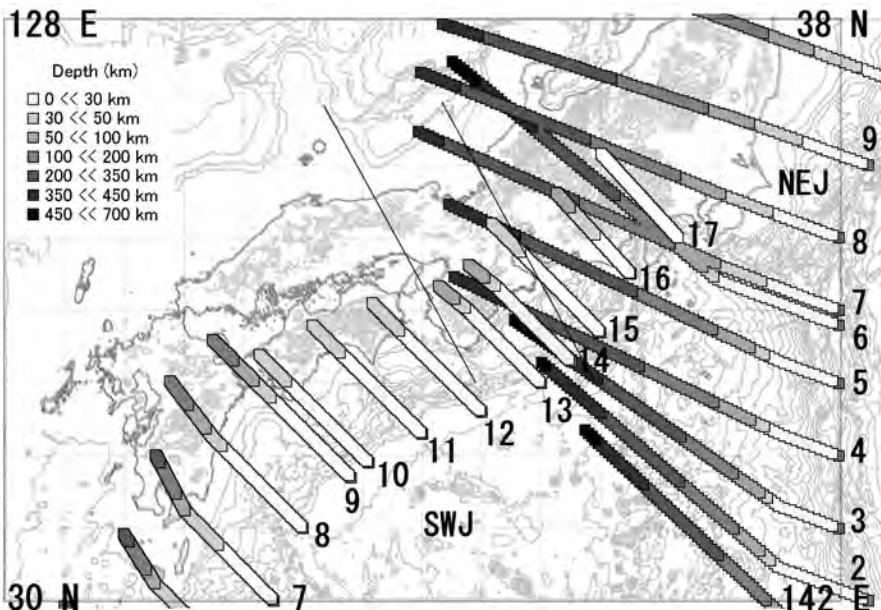
SWJ No	VA cm/y	θA deg	θp1 deg	θd1 deg	Time1 My	θp2 deg	θd2 deg	Time2 My
7	4.0	45	60	15	5.0	60	65	10.0
8	4.0	45	60	10	5.0	60	50	9.0
9	4.0	45	45	10	5.0	45	50	9.0
10	4.0	45	30	10	4.0	30	10	6.0
11	4.0	45	30	10	4.0	30	10	6.0
12	4.0	45	30	10	4.0	30	10	6.0
13	4.0	45	30	10	4.0	30	45	6.0
14	4.0	45	30	10	4.0	30	45	6.0
15	4.0	45	45	10	4.0	45	10	6.0
16	3.0	45	80	25	3.0	80	25	6.0
17	3.0	45	-80	25	3.0	-80	25	6.0

でも、北側の若狭湾周辺、南側の志摩半島とその西方が顕著なリアス式海岸となっており、沈降域であることを示している。ただし、この地域にはN-S方向に山地が配列する傾向(紀伊山地を含めて)などもあり、標高分布はかなり複雑である。

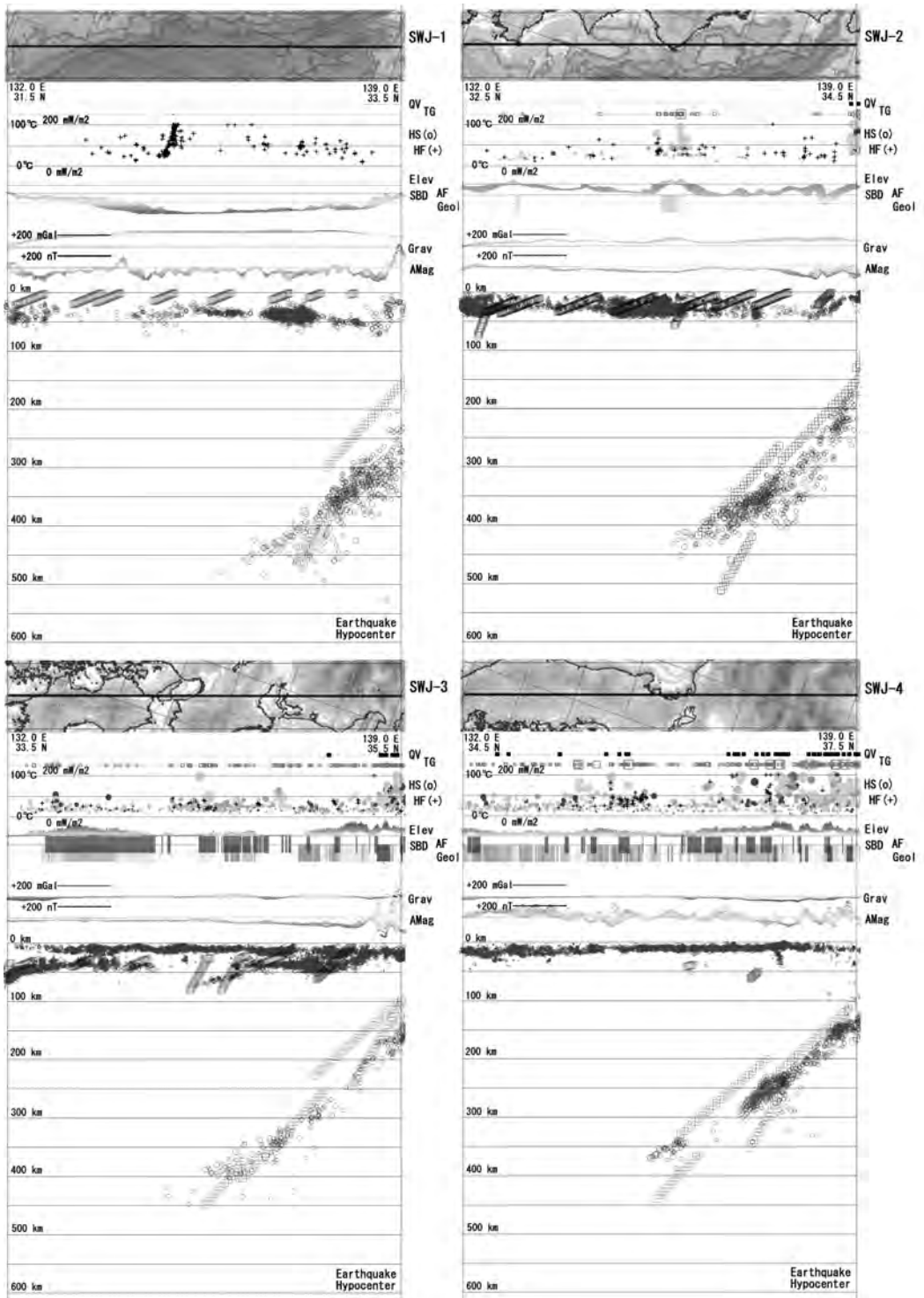
一方、西側の隠岐東方-潮岬海底谷線については、東側の敦賀湾-伊勢湾線に比較してあまり明瞭ではなくまた直線性が低く、従来ほとんど注目されていない。概略的に、北部では鳥取平野の東縁部、姫路市街地の東縁部(平野-山地の境界)を通り、瀬戸内海に入って淡路島を越えて友ヶ島水道を抜ける。その南方の紀伊半島(近畿地方の外帯)については全体的な海岸線方向に該当し、また卓越する海岸線方向の一つに近いが、個々の地形分布にはあまり一致しない。

近畿帯の中央部では、東西方向に琵琶湖、上野盆地、京都盆地、奈良盆地、大阪平野などが分布しており、近畿帯の南北両海域の海盆配列と平行した低地形配列となっている。なお、これらの盆地は西方に瀬戸内海へと続いているが、後述するように低ブーゲー重力異常は瀬戸内海へは必ずしも続いていない。

4.1.2 水深分布



第9図
 西南日本弧周辺のスラブ群の沈み込みについての簡易数値シミュレーション結果(平面図)。シミュレーションの方法とより広域的な計算結果は、茂野(2008)を参照。計算に使用したプレート沈み込み点(海溝-トラフ上)群のパラメータ値については第2表を参照。背景データは、国土地理院(1997)、日本海洋データセンター(WWW)による。NW-SE方向の2本の構造線などは本文参照。



第10図 西南日本弧の4断面線 (SWJ-1～SWJ-4) に沿った震源分布と簡易数値シミュレーションによって計算されたスラブの分布 (□印)。断面線の位置は第3図を参照。スラブ分布のシミュレーション結果は第9図 (平面図) を参照。各種データの重合断面図の作成は、第1表に示す電子地球科学情報を用いて、地質調査総合センター (2007) の簡易アトラス作成プログラム群を拡張化して行った。

第4図・第8図に示すように、水深分布についても標高分布と同様の傾向が認められる。すなわち、近畿帯周辺の水深分布では、北側(日本海)と南側(フィリピン海)の両海域を繋ぐようにNW-SE方向の配列傾向が認められ、陸域-海域を通じて広域横断的な構造が存在していることを示している。

近畿帯の西縁部では、北側で隠岐舟状海盆の西縁として、隠岐の東方にNW-SE方向の急斜面が鳥取市の沖付近から伸びており、南側でやや西方にずれるがSE方向に紀伊水道に繋がり、さらに南方の四国海盆では紀南海山列の東斜面に相当している。南側では、特に潮岬海底谷(第8図では隠岐東方-潮岬海底谷線から約20km東方に位置)が、非常に明瞭なNW-SE方向の地形(堆積物で埋没しておらず新しい)となっている。

一方、近畿帯の東縁部では、北側で敦賀湾-越前岬からの地形がNW方向にゲンタツ瀬西端へと伸びている。同様に南側では、伊勢湾奥部-入口からの地形が伸びており、新しい天竜海底谷の基部(第8図では敦賀湾-伊勢湾線から約20km西方に位置)を通して、銭洲海嶺の西端部へと繋がる。

上記のNW-SE方向の隠岐東方-潮岬海底谷線と敦賀湾-伊勢湾線との間の海域は、南北ともに顕著に海盆が発達している。北側では、若狭湾の窪地から北に広い谷となっており、NE-SW方向に伸びる隠岐舟形海盆に繋がっている。南側では、熊野海盆(特異的に流出谷のない凹地で、内部に泥火山が発達)が広く分布している。

4.1.3 ブーゲー重力異常

第5図に示すように、日本列島周辺のブーゲー重力異常については様々な特徴が認められるが、その一つとして島弧会合部で負異常域が発達する傾向が明らかである。すなわち、日高沖(千島弧-東北日本弧)、関東平野(伊豆小笠原弧-東北日本弧)、伊予灘-日向灘(琉球弧-西南日本弧)で顕著である。これらは、島弧の会合部(プレートの斜め沈み込みによって衝突する島弧間-前弧域)に沈降域-堆積盆が発達していると解釈できるであろう。

一方、中部地方の陸域にも広域的に負異常域が分布している。その東縁部は、フォッサマグナ(東北日本弧と西南日本弧間の大きな地溝帯で、伊豆小笠原弧北端の衝突域の延長部にも接した複雑な地域)に対

応するもので、駿河湾から越後平野へと伸びている。これに対して、中部山岳地域に広がる中央~西方の部分は、島弧間の衝突によって地殻が厚くなったために、大きな負のブーゲー重力異常域となったものと考えられる。

さらにその西方には、上記の負異常から独立的に、近畿地方東部に別の負異常域が明瞭に分布している(第5図・第8図)。これは正に上述した若狭湾-琵琶湖-伊勢湾を結ぶ地域にあたり、さらに西方の大阪平野へと伸びている。ここでは、低地が低重力異常域となっており、中部山岳地域とは異なる環境にあると考えられる。この低重力異常は、西南日本弧の中で近畿帯(主にその東部)が特異的な沈降域となっており、むしろフォッサマグナ地域に類似性を持つことを示唆している。

4.1.4 活断層

第6図に示すように、日本列島(陸域)には多数の様々な形式の活断層が分布している。その中で、活断層の分布密度が最も高いのは中部地方(西南日本弧中部帯)である。その原因は、中部帯が東北日本弧-伊豆小笠原弧-西南日本弧の会合-衝突部に位置しており、主に太平洋プレートの速い西進による強い圧縮応力場にあるためと考えられる。

近畿帯は、フォッサマグナ地域から200km以上離れているが、それにも係わらず活断層の分布密度は中部帯とほぼ同様に高い(なお、中央構造線以南の紀伊山地は活断層の分布に乏しいとされている)。複雑な応力-破壊の場とその履歴の理解は容易ではないが、このことは、近畿帯が強い地殻変動帯となっていることを示している。

特に、近畿帯の東縁部の敦賀湾-伊勢湾地域には多数のNW-SE走向の活断層(柳ヶ瀬断層、養老断層、伊勢湾断層など)が分布している(東傾斜の逆断層や左横ずれ成分を持つものが多い)(第8図)。このことは、上記の標高、水深、ブーゲー重力異常の分布と整合的である。さらに、近畿帯の西部でも、NW-SE走向のものを含めて多種多様な多数の活断層の分布が見られる。

隠岐東方-潮岬海底谷線の西方の中国四国帯では、活断層の分布密度は極端に低くなる。なお、近畿帯の西縁部には大規模な山崎断層(WNW-ESE走向の左横ずれ断層)などが分布しており(第6図・第8

図参照), 位置などはややずれるが隠岐東方-潮岬海底谷線に対応している可能性が指摘される。

4.1.5 構造異常(沈降帯)のまとめ

上述した標高, 水深, ブーゲー重力異常, 活断層の分布データは, 概略的に近畿帯(南部の紀伊山地域を除く), 特にその東部(敦賀湾-伊勢湾線の周辺)がNW-SE走向の沈降帯となっていることを示している。これは, 西南日本弧西部の中国四国帯および東部の中部帯とは明瞭に異なる特異な現象である。近畿帯の東部は, 複雑な島弧接合域の地溝帯であるフォッサマグマの規模には及ばず, また火山活動を伴わないなど特性は異なるが, 島弧系を横断する新しい地溝帯と考えることができると思われる。

4.2 熱異常

4.2.1 第四紀火山

第1図に示すように, 日本列島では概略的に深度100~200kmの震源が分布する位置に, 第四紀火山が分布している。これは, 一般的に沈み込むスラブがその深度範囲に達した時に, その上位のマントル(ウェッジ)でマグマが生成-上昇する環境になるためと考えられている。しかし, スラブやウェッジの環境が特殊な場合(若く熱く薄い縁海プレートの沈み込みの場合など)には, 必ずしも上記の関係が成立しない可能性がある(例えば, 岩森, 2003)。

西南日本弧はそのような例外地域となっており, 上記深度の震源が分布しないにも係わらず, 日本海沿いに第四紀火山が分布している。これらの第四紀火山は, 中国四国帯および近畿帯では主に数10万年前よりも前に活動した単成火山(多くは玄武岩質; 大山などの例外はある)であり, 地下に高温熱水系の熱源となる大規模なマグマ溜まりは分布していないと考えられる。これに対して, 中部帯ではより多様-より大規模な第四紀火山が分布しており, 高温熱水系の発達環境も存在していると考えられる。

西南日本弧中国四国帯-近畿帯の第四紀火山活動の起源については, 概略的に2つの可能性が指摘されている(例えば, 米倉ほか編, 2001)。(1) 深部震源分布では現れないが, 現在のフィリピン海プレートのスラブがより高温化して北方に続いており, 適度な深度に達してマントルウェッジ起源のマグマを生成・供給しているという可能性。(2) 日本海下の上部マントル

深部からマグマが供給されているという可能性(古いフィリピン海プレートのスラブが切断されて落下しており, 深部高温マントルの上昇(対流)が発生しているなどの原因による)。岩石学的な検討から両者を総合化した履歴モデル(木村, 2002, 2003)なども提案されている。

特に, 近畿帯について興味深い点(第8図)は, その東半部は上記の第四紀火山が分布せず, かなり明瞭な空白域となっていることである。この地域は4.1で述べた沈降域(若狭湾)に対応している。また, この地域は近畿帯の中で深度50~75kmの深部震源が分布していない地域の延長部に当たる(第7図)。

4.2.2 高温温泉

第1図・第2図に示すように, 西南日本弧の中で比較的多数の第四紀火山が分布する中部帯では, その周辺などに高温温泉(90℃以上)が分布している。一方, 中国四国帯では高温温泉の分布に乏しく, 比較的高温の温泉は小規模な第四紀火山が分布する山陰地方に湧出している。

この中で際立った異常(第8図)は, 1. で述べたように近畿帯の西部に3つの高温温泉地(90℃以上; 自然湧出)がNW-SE方向の直線上に分布していることである。すなわち, SE方向から湯の峰温泉(紀伊半島南部), 有馬温泉(六甲山地沿い)が分布しており, さらにNW方向の日本海沿いには湯村温泉が分布している。3温泉地を結ぶ線は, 近畿帯の両縁境界線にほぼ平行である。

なお, 紀伊半島(近畿帯西部)には温度が60~90℃の温泉地として, 川湯温泉, 白浜温泉なども分布している(地質調査総合センター, 2005a)。また, 近畿帯には, 高塩濃度で多量の炭酸塩沈殿物を伴う低温温泉や比較的多量の炭酸ガスを伴う鉱泉も多い。これらは, 中国四国帯, 特に山陽地域~四国地方とは明瞭に異なる特徴である。

4.2.3 地温勾配と熱流量

地質調査総合センター(2004)などによれば, 西南日本弧(陸域)の地温勾配と熱流量については, 4.2.2の高温温泉分布と同様の傾向にある。ただし, 陸域での地温勾配・熱流量の測定には坑井掘削を必要とするため, データは限られており温泉地域で高密度となっている(逆に, 一部の温泉地では温泉保護-掘

削制限によってデータに乏しい)。近畿地方では、地熱調査井の掘削によって特異的に湯の峰と湯村の両温泉地では高い地温勾配と熱流量が報告されているが、有馬温泉では異常が出現していない。

一方、近畿帯の周辺海域の熱流量データについては、特に南方の南海トラフ域(紀南海山列の北端域など)に高異常(150mW/m²以上)が顕著である(地質調査総合センター, 2004)。この高異常の原因については、単純にスラブ上部の堆積物中の放射壊変熱と沈み込みによる摩擦熱との関係による可能性なども指摘されている(山野・濱元, 2005)が、ゆっくりと沈み込む若くてまだ暖かいスラブの上面などに沿って逆流する古海水-続成・変成水の寄与(間隙水循環)の可能性(山野・木下, 1989)が高いと思われる。

4.2.4 熱異常のまとめ

西南日本弧では、日本海沿いに第四紀火山(中国四国帯および近畿帯では主に単成火山)が分布しているが、概略深度100~200km(一般的に島弧でマグマ活動-火山生成環境となるスラブ深度)の震源分布とはまったく対応していない。また、上記の第四紀火山分布・震源分布にまったく対応していない高温温泉(90℃以上の湯の峰-有馬(-湯村))が、近畿帯の西部にNW-SE方向に配列している。これらは日本列島の中で、西南日本弧の近畿帯に特異な現象である。一方、南海トラフ域では異常に高い熱流量分布が報告されており、西南日本弧下へ沈み込む若いフィリピン海プレート-スラブがかなりの程度高温を維持していることを示している。

5. 考察

5.1 島弧系と縁海の発達過程の概要

近畿地方の高温温泉の生成環境モデルを考える前に、少し脇道にそれるが島弧系と縁海の発達過程の概要を「沈み込み進化モデル」(例えば、上田ほか編, 1977)的に述べる。これは、特に新生代後半の日本周辺(北西太平洋域)における非常に複雑な過程を、整理・単純化したものである。

(1)大規模な大洋中央海嶺でのプレートの生成とその長距離移動(~10cm/year程度の高速)によって、大洋プレートが大陸プレート(あるいはその周辺域)に衝突しスラブの沈み込みが進行すると、前弧の

付加体形成、弧中軸の火山帯形成、背弧の海盆形成などを通じて島弧系(海溝-島弧-背弧)が形成される。東北日本弧+西南日本弧の原型は(概略的に他の島弧の原型も)、このようにして生成したと考えられる。

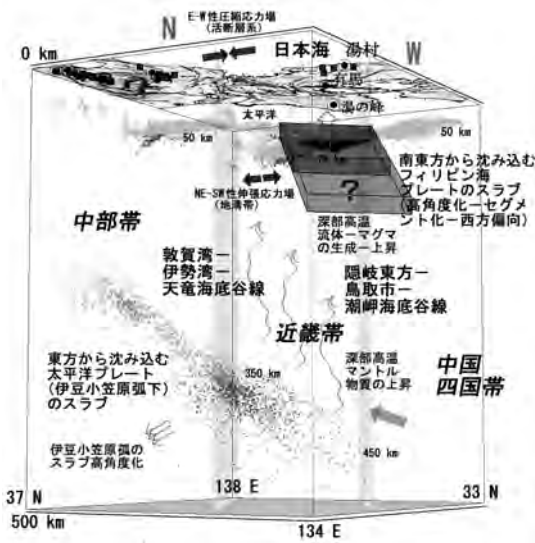
(2)さらに大洋スラブの沈み込みが進行すると、スラブの自重による沈み込み角度の増大、スラブの屈曲・切断・落下などが生じるとともに、背弧域での深部高温マンツルの対流(上昇)が促進され、背弧海盆が広がって縁海へと成長する(縁海プレートや縁海中央海嶺を形成)。フィリピン海や日本海はこのようにして生成したと考えられる。

(3)しかし、(2)による縁海下のマンツル対流活動は相対的に小規模で継続期間が短いため、再び(1)の大洋プレート-スラブの沈み込み活動が卓越し、大洋側に移動した島弧系の形成活動が進展する。また(1)-(2)の経過とともに、スラブの斜め沈み込みに引きずられた島弧系の横方向への移動と衝突、プレート運動で移動してきた海嶺との衝突などもあり、島弧系群とその会合部の形態・構造は複雑となる。現在の千島弧-東北日本弧-伊豆小笠原弧は、概略的にこの段階の末期にあると考えられる。

(4)上記(3)の過程が進行すると、再び(2)の状況が発生する。この時、深部マンツルの対流活動は(3)の島弧の背弧域で生じて新たな背弧海盆-縁海が形成されることとなるが、すでに島弧系群-縁海群が複雑に分布しているために、状況は非常に複雑となる。上記(2)の縁海プレートが再稼働して、その沈み込み域に独自の(大陸に近く大洋プレートに直接接していない)島弧系を成長させる場合も生じる。フィリピン海プレートと琉球弧-西南日本弧は、現在この状況にあると考えられる。

5.2 西南日本弧の特異性と深部震源分布

西南日本弧は、その原型の生成時(上記(1))には東北日本弧と直線的に繋がっていたものが、日本海の拡大時(上記(2))の回転運動に伴われて分離したものと考えられている(~15Ma)。現在は、直接的にフィリピン海プレートの移動(概略NW方向に4cm/yearの速度)-スラブの沈み込み、間接的に太平洋プレートの移動(概略WNW方向に10cm/yearの速度)-スラブの沈み込みの両者の影響を受けると同時に、周辺を取り囲む東北日本弧、伊豆小笠原弧、琉

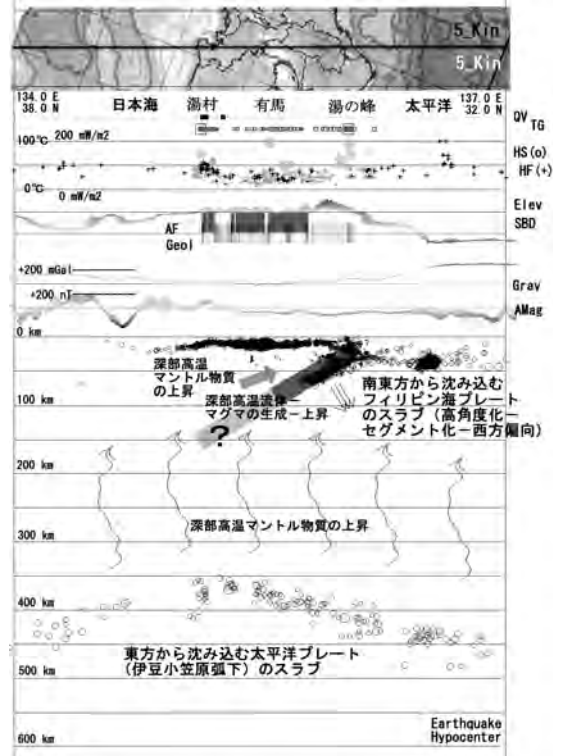


第11図 近畿地方の高温温泉の生成環境-機構のモデル図(3次元表示). 説明は本文を参照. 立体の地表範囲は第8図と同一で, NW-SE方向の2本の構造線の間を北西方向の地下深度約400kmから見ている. 地表面(地下からの表示に注意)では, 活断層(中田・今泉編, 2002; 地質調査総合センター, 2005b), 第四紀火山(地質調査所, 2000a; ■印), 90°C以上の温泉地(地質調査総合センター, 2005a; ○縁付き●印)の各種分布データを表した. 地下は, 深部震源分布(気象庁, 2006; 地下30km以深)を示し, 特に深度50-75kmの震源は黒色で強調されている. 作図は地質調査総合センター(2007)の簡易アトラス作成プログラム群を3次元拡張化して行った.

球弧との相互作用の影響を受けると非常に複雑で特異な環境にある(上記(3)~(4)参照).

第7図に示した深部震源分布は, 上記の西南日本弧の複雑性を明瞭に示している. すなわち, 太平洋プレート-伊豆小笠原弧下のスラブの沈み込みに対応する深部震源分布が, 東方から近畿帯の西部(NW-SE方向に配列; 最大深度~450km程度)まで広がっている. 一方, フィリピン海プレート-スラブの沈み込みに対応する深部震源分布は, 西南日本弧の南半部を通じて広がっているが, それは大きな屈曲(セグメント化)を示し, 最大深度は約75km程度に留まっていて, 近畿帯において南東側に偏在し同時に深いという特徴を示している.

上記の2つのプレート-スラブの沈み込みと深部震源分布については, 簡易数値モデル-数値シミュレ-



第12図 近畿地方の高温温泉の生成環境-機構のモデル図(断面図表示). 説明は, 本文および第8図・第11図を参照. 本図は, 茂野(2008)の第10図(2)の5_Kin断面図を利用して, 震源分布図にモデルを加筆したものである.

ションに基づいて茂野(2008)が検討を加えているので, 必要に応じて参照願いたい.

5.3 近畿地方の高温温泉の生成環境モデル

近畿地方の熱異常については, プレートテクトニクスを基礎に近年Seno *et al.* (2001), 梅田ほか(2004), 最近ではSano and Nakajima (2008)などによって議論されている. ここでは新たに, 茂野(2008)の検討結果を参考に上記4.の観察と基礎的な考察に基づいて, 近畿地方の高温温泉の生成環境-機構モデルを提案する. 概念的モデルを, 第11図に3次元図, 第12図に2次元断面図として示す.

(1) 近畿帯は, 太平洋プレートの西進(概略WNW方向に10cm/yearの速度)によって東北日本弧-伊豆小笠原弧と西南日本弧とが衝突する中部帯の西方に位置しており, 地殻浅部の現象としては広域的なE-W性の圧縮応力場にあり, 多様な活断層が高密度で

分布している(紀伊半島を除く)。しかし同時に、近畿帯では太平洋プレート-伊豆小笠原弧下の厚いスラブがNW-SE走向で地下深部(～450km程度)に沈み込み、上部マントル底部付近から新たな高温マントル物質(低密度)の対流(上昇)が始まっている。その結果、近畿帯は地下深部が広域的にNE-SW性の伸張応力場になっていて、沈降域-地溝帯が形成されている。

(2) フィリピン海プレートは概略NW方向に4 cm/yearの低速度で進み西南日本弧の下にスラブが沈み込んでいるが、スラブの沈み込み長は短く、またスラブは若く・暖かく・薄いために沈み込み角度は10°程度と小さい。近畿帯下のスラブは、(1)の深部マントル物質(低密度)の上昇場に位置するためにやや沈み込み易く、中国四国帯・中部帯よりもやや高角度でより地下深部(～75km)に達している。その結果、スラブは近畿帯の両縁部の地下で変形し切断されて、3つにセグメント化(短冊状化)している。フィリピン海プレートが西南日本弧へ斜めに沈み込む影響を受けて、沈み込み角度が大きな近畿帯下の短冊状スラブはやや西方向に振れて(中国四国帯下のスラブのようにほぼ真直ぐではなく)沈み込んでいる(第9図および茂野(2008)参照)。その結果、深度50～75 kmの深部震源は近畿帯の西部に集中し、東部にはほとんど分布していない。

(3) フィリピン海プレートの暖かいスラブは、近畿帯西部下において上述したように相対的により深くまで沈み込んでいる。また、近畿帯西部下ではフィリピン海プレートの沈み込み角度が漸次増大しており、開いて行くマントルウェッジにNW方向の深部から高温マントル物質が上昇してくる。従って、下方のみならず上方からも加熱が進むスラブからは、流体(スラブ上面の堆積岩-塩基性岩に伴われる変質海水-続成・変成水など)が放出され上昇する。上記のマントルウェッジ(地殻下部の可能性もある)では、地下深度100 kmよりもずっと浅いにも拘わらず、本地域の特異な条件によってマグマが生産され、それが上昇して伴われる流体(主にH₂O; CO₂に富む場合もあり得る)が放出されている可能性も考えられる(例えば、岩森, 2003)。また、4.2.1の(1)の第四紀火山活動モデルに沿えば、現在のフィリピン海プレートのスラブ先端部は高温化してさらに北方延長方向の深部(～深度100 km以上)に分布しており、マントルウェッジで生産さ

れたマグマが上昇して、伴われる流体(同上)が放出されているとも考えられる。地域分布的に、前者は湯の峰-有馬地域、後者は有馬-湯村地域の温泉水の本来の起源として、妥当性を持つと考えられる。

(4) 近畿帯西部には、各種の活断層が多数分布している。上記(3)の過程によって地殻内へ上昇してきた深部起源流体は、これらの断層系(および付随する断裂系)などを流動路あるいは流動壁としてさらに上昇し、近畿帯西部のNW-SE方向の線状の地域に流出している。しかし、地下浅部の環境は複雑・多様で、地表近傍では基本的に降水起源の地下水が卓越する傾向にあり、広域的な深部透水環境や局地的な浅部透水条件が、高温温泉の湧出地の生成に大きな影響を持っていると思われる。

上記(1)～(4)に整理した第11図および第12図のモデルは、近畿帯西部にSE-NW方向に3つの高温温泉地が配列するのに対して、近畿帯東部と中国四国帯(山陰地方を除く)に高温温泉が分布しない原因を、新たな視点を加えて概念的・定性的に説明するもので、本説の結論となっている。近畿帯の東部(沈降域が顕著)と西部(高温温泉分布)の特性の差異は、(2)の短冊状スラブの西方に偏向した沈み込みの影響が大きいと考えられる。

6. おわりに

本説では、筆者が2001年以降行ってきた「地理情報システム(GIS)を利用した地熱資源の評価(アセスメント)の研究」(地質調査総合センター, 2007)に引き続いて、現在継承-発展的に進めている研究の一環を紹介した。本説で使用した手法の基礎である地質調査総合センター(2007)および本説の基礎的部分をまとめた茂野(2008)についても、参照頂ければ幸いである。

近畿地方の高温温泉の生成環境-起源に関する本説の結論は、必ずしも決定的なものではないが、その手法・結果が何らかの参考となれば幸いである。残念ながら西南日本弧の第四紀マグマ-火山活動の起源については未解明の点が多く、本説の考察(5.3(3))の深部流体生成のモデル化では曖昧な記述となった。また、近畿地方の高温温泉は流体化学的に多様である(1. および4.2.2を参照)が、本説では議論しなかった。これらの問題については、今後様々な研

究の進展の成果を取り入れて、モデルの改良を図る必要がある。

公開電子化情報(一部の例外を除く)を使用した本説では、空間3次元の地下深部の情報としては基本的に震源分布データ(気象庁, 2006)のみを利用した。近年様々な機関によって地下深部について反射波構造、地震波速度、地震波減衰率、電気伝導度、キュリー点深度などの有力なデータが取得され研究成果が報告されている。近い将来にこれらの空間3次元データが利用し易い形で電子公開化されることが望まれる。これにより、今回対象としたような分野についても更なる研究の進展が期待される。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、地圏資源環境研究部門・地熱資源研究グループの方々、特に玉生志郎・阪口圭一の両氏および村岡洋文グループ長との議論が有益であった。本説の原稿について、産業技術総合研究所北海道センターの中川 充氏(地質調査総合センター所属)には貴重なご意見を頂いた。活断層分布図(地質調査総合センター, 2005b)の電子数値データの使用については、活断層研究センターの関係の方に便宜を図って頂いた。以上の方々に感謝します。

文献(本文中に非引用で、図作成に使用した電子情報は第1表を参照)

- 地質調査所(2000a):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.
 地質調査所(2000b):日本重力CD-ROM. 数値地質図, P-2.
 地質調査総合センター(2004):日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース. 数値地質図, P-5.
 地質調査総合センター(2005a):日本温泉・鉱泉分布図及び一覧(第2版)(CD-ROM版). 数値地質図, GT-2.
 地質調査総合センター(2005b):全国主要活断層活動確率地図. 構造図, no.14.
 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.
 Geological Survey of Japan(1996):Magnetic anomaly map of East Asia 1:4,000,000, CD-ROM version. DGM P-1.
 原田 円・木戸 宏(1995):地熱開発促進調査の地域レポート, [37]本宮地域. 地熱エネルギー, 20, 43-50.
 岩森 光(2003):沈み込み帯の温度構造と水循環・火成作用. 笠原順三・鳥海光弘・河村雄行編, 地震発生と水. 東大出版会, 14-37.
 金折裕司(1997):活断層系-大地震発生とマイクロプレート. 近未来社, 228p.
 木村純一(2002):中国地方のフィリピン海プレートと火山活動. 月刊地球, 号外, no.38, 91-94.

- 地球, 号外, no.38, 91-94.
 木村純一(2003):西南日本の新生代火山活動とフィリピン海プレートサブダクション. 月刊地球, 号外, no.43, 28-30.
 気象庁(2006):地震年報平成17年(CD-ROM).
 松葉谷修・酒井 均・鶴巻道二(1974):有馬地域の温泉, 鉱泉の水素と酸素同位体比について. 岡大温研報告, 43, 15-28.
 森川徳敏・風早康平・安原正也・稲村明彦・高橋 浩・高橋正明・大和田道子・仲間純子・半田宙子・佐藤 努・Ritchie, B. E.・長尾敬介・角野浩史(2006):有馬・紀伊半島の温泉の化学・同位体組成-前弧域非火山性温泉の起源について. 地調研報, 57, 66.
 守屋以智雄(1983):日本の火山地形. 東大出版会, 135p.
 村岡洋文(2007):中新世貫入岩体を熱水貯留層としてみた和歌山県本宮温泉の成因. 日本地熱学会平成19年学術講演会講演要旨集, B9.
 中村久由(1962):本邦諸温泉の地質学的研究. 地調報告, no.192, 126p.
 中田 高・今泉俊文 編(2002):活断層詳細デジタルマップ(DVD 2枚). 東大出版会.
 西村 進(2001):紀伊半島の温泉とその熱源. 温泉科学, 51, 98-107.
 大石 朗・村松容一・吉田 裕・橋詰良吉(1995):流体包有物による和歌山県本宮地域の熱水活動の検討. 温泉科学, 45, 63-75.
 Sano, Y. and Nakajima, J. (2008): Geographical distribution of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio and seismic tomography in Japan. *Geochem. Jour.*, 42, 51-60.
 Seno, T., Zhao, D., Kobayashi, Y. and Nakamura, M. (2001): Dehydration of serpentinized slab mantle: Seismic evidence from southwest Japan. *Earth Planets Space*, 53, 861-871.
 茂野 博(2008):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, 6-25.
 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1994):地熱開発促進調査報告書, no.37本宮地域, 885p.
 鶴巻道二(1993):有馬温泉. 地熱エネルギー, 18, 146-158.
 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.
 梅田浩治・浅森浩一・及川輝樹・角田地文・趙 大鵬・鎌谷紀子(2004):前弧域の非火山地帯における高温熱異常について-紀伊半島中~南部の地殻・マントル構造と温泉ガスのヘリウム同位体比-. 月刊地球, 26, 407-413.
 山野 誠・木下正高(1989):南海トラフの熱流量分布と間隙水循環. 月刊地球, 11, 651-656.
 山野 誠・濱元栄起(2005):南海トラフ沈み込み帯の熱流量分布と温度構造. 月刊地球, 号外, no.51, 74-80.
 米倉伸之・貝塚爽平・野上道男・鎮西清高 編(2001):日本の地形1総説. 東大出版会, 349p.

SHIGENO Hiroshi (2008): Study on high-temperature hot-springs in the Kinki district, Japan, based on integrated analysis of electronic earth-sciences information (2): Modeling the formation environment of the Yunomine and Arima hot-springs on the bases of plate tectonics.

<受付:2007年11月1日>