

地下温度分布から見た高温地区を含む広域地域のタイプ分け —東北地方と中国・四国地方の例—

玉生志郎¹

Shiro Tamanyu (2008) Classification of wide areas including high-temperature regions from the viewpoint of subsurface temperature distribution –Examples of Tohoku and Chugoku/Shikoku districts. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 59(1/2), p.45 - 52, 3 figs, 2 tables.

Abstract: The characterization on wide areas including high-temperature anomaly regions of the Tohoku and Chugoku/Shikoku districts are examined based on the geological and geophysical data sets. From the viewpoint of topographic and geologic features, following 5 type areas are identified in each district: fore arc plain, fore arc mountain, Quaternary volcanic terrain, back arc plain and back arc mountain. The conceptual models for representative cross sections of both districts are drawn. The thermal and hydrothermal features of each type area are described in detail based on the overlaid various data sets.

Keywords: classification of wide areas, characterization, Tohoku, Chugoku/Shikoku, high-temperature anomaly regions, conceptual models, thermal and hydrothermal feature, fore arc, back arc, volcanic front

要 旨

既存文献の収集データを用いて、東北地方と中国・四国地方の高温地区を含む広域地域を、その地域の地形、地質の特徴から、それぞれ5タイプ（前弧側低地、前弧側山地、第四紀火山地域、背弧側低地、背弧側山地）にタイプ分けを行った。また、東北地方と中国・四国地方で、それぞれの地方を横断する概念モデル断面図を作成した。これらの結果から、各地域における熱・熱水の具体的特徴を記述した。

1. はじめに

本研究は、原子力発電環境整備機構の受託研究「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」(原子力発電環境整備機構, 2004)、「同(その2)」(原子力発電環境整備機構, 2005)及び「同(その3)」(原子力発電環境整備機構, 2006)として実施したものの一部である。東北地方中北部については、一部、誌上発表されている(Tamanyu, *et al.*, 2006)。

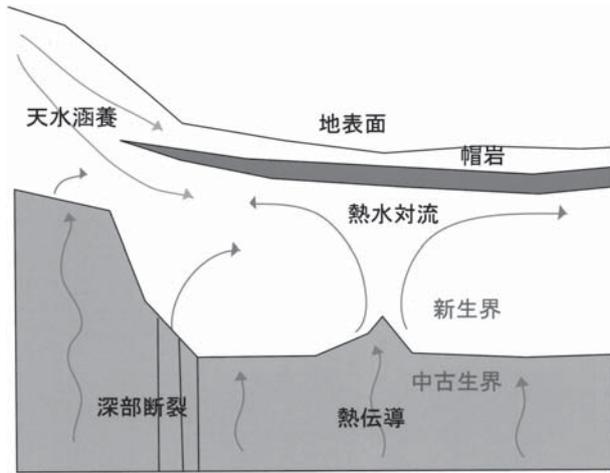
地下深部から地表への熱の伝わり方には対流と伝導がある。対流の一例としては、地下深部の熱水が地層中の亀裂を通して上昇し、温泉として地表に湧出する場合が挙げられる。伝導の例としては、地下深部から地表に向かって地層全体を通して熱が伝わり、地殻熱流量が高くなっている場合が挙げられる。

角(1982)は、全国の温泉放熱量分布図から、温泉

放熱量分布と地質構造区との関係を検討している。それによると、第四紀火山地域は、それ以外の非第四紀火山地域と比較すると、5倍の熱が集中し、一方、第三紀造山帯の火山活動地域はそれ以外の堆積岩地域と比較すると2倍の水が集中していると指摘している。また、鈴木(1989)は東北地方の新生代の熱史を検討し、火山フロントの前弧側では上部マンツルの熱構造が反映され、背弧側の地温勾配は火山の分布と新第三系の地質構造と密接に関連していると指摘している。矢野ほか(1999)は、全国の坑井温度検層データを整理して、日本列島地温勾配図を作成した。その中で、坑井地温勾配を水平方向に外挿した日本列島地温勾配コンター図と、温泉の泉温を水平方向に外挿した日本列島泉温コンター図を参考として提示した。前者は熱伝導に支配された広域的な熱的特徴を、後者は熱水対流に支配された局所的な高温地区を含む広域的な熱的特徴を描き出している。玉生ほか(2000)は、東北地方の地熱資源分布図から、東北地域の背弧側の熱異常地域はNNW-SSE方向の構造線に支配されていると指摘している。

高レベル放射性廃棄物の処分サイト選定に際しては、局所的な高温地区の分布が重要であることから、熱水対流に基づく高温地区を含む広域地域のタイプ分けを試みた。なお、ここでの高温地区とは、42℃以上の温泉を含む地区(矢野ほか(1999)のコンター図で黄色・赤色に塗色された部分)とする。ただし、平均的な地温勾配を示す堆積盆地などで、地下約1 kmより深部か

¹地圏資源環境研究部門(AIST, Geological Survey of Japan, Institute for Geo-Resources and Environment)



第1図 帽岩の熱水対流に対する役割を示した概念モデル。
Fig. 1 Conceptual model showing the role of cap rock for hydrothermal convection.

ら汲み上げられている42℃以上の温泉を含む地区については、対象から除外することとする。

日本列島は第四紀テクトニクスの視点から区分すると、典型的な短縮型島弧としての東日本弧（北海道からフォッサマグナまで）、準大陸縁的島弧としての西日本弧（フォッサマグナから中国・四国まで）、そして典型的な伸張型島弧としての九州・琉球弧に大別される。広域的な熱的特徴は、深部の熱源と深部からの地殻熱流量に、浅部では熱水対流の分布状況に大きく支配されている。換言すると深部では熱源の位置と規模及び熱伝導率に、浅部では透水性分布に強く支配されている。浅部での熱水対流は主に先第三系基盤岩上面深度と帽岩分布に支配されている。一部の地域では局所的な透水性の断裂にも支配されている。これらを勘案してタイプ分けを行う必要がある。

2. 高温地区を含む広域地域のタイプ分け

広域的な温度分布状況を示唆する各種探査・調査データと地形・地質との対応を検討することで、東北地方と中国・四国地方における広域的なタイプ分けを行った。熱源としては、地下から熱伝導によって供給される地殻熱流量と、第四紀火山の溶融マグマ及び非火山域の潜頭性熱源〔貫入岩・固結マグマ・深部熱源（P波速度の減衰などから示唆されるもの）〕などを考慮した。熱源の観点からは、島弧は第四紀火山のある火山地域と第四紀火山のない非火山地域に大別できる。また、プレートの沈み込み帯が最初にマグマを発生させる深さに対応した火山フロントを境にして、マグマ発生のない前弧側と、マグマ発生があり得る背弧側とに区分することができる。

一方、広域熱水対流の観点からは、それらを規制する地形勾配や透水性構造（特に先第三系基盤岩類の深度）と密接に関わる地形と地質を考慮して、大きく低地と山地とに区分した。山地では地形勾配が低地よりも相対的に大きいため、天水涵養が大きくなる。また、透水性の高い第四紀火山岩類が厚く堆積している山地（第四紀火山地域）では、天水涵養は更に大きくなると考えられる。

また、中尾ほか（2005, 2006）の検討のなかで、北村 信編（1986）の東北本州弧の地質断面図を参照したところ、非火山地域の背弧側低地と前弧側低地では、ほとんどの地域で第三系上部・第四系下部にシルト層の卓越する層準（海成層及び湖成層）が存在し、熱水対流系の帽岩の役割を果たしていることが明らかとなった。そこで低地に発達する帽岩の役割も考慮に入れてタイプ分けすることとした。帽岩が熱水対流を規制する様子を描いたモデル図を第1図として示した。重力基盤や地震基盤がほぼ先第三系基盤岩類上面に相当し、それ以浅では対流が卓越し、それ以深では熱伝導が卓越する。そのため、浅部と深部とを区別して熱異常分布を検討することとした。最終的には、火山地域を第四紀火山地域の1タイプに、非火山地域を前弧側低地、前弧側山地、背弧側低地、背弧側山地の4タイプに、合計5タイプに区分することとした。

3. 広域地域の特徴

タイプ分けと、それぞれの代表的な地域名を、第1表に示した。ここでは火山フロントは背弧側に含めている。また、これらの東北地方と中国・四国地方の各5タイプ地域において、透水構造、浅部熱異常分布（温泉放熱量、地温勾配、推定400℃等温面深度、泉質）、深部熱異常分布（比抵抗分布、震源分布、地殻内地震の発生下限、P波速度減衰、キュリー点等温面深度）が、どのような特徴を有しているか取りまとめた。その結果を、第2表に示す。

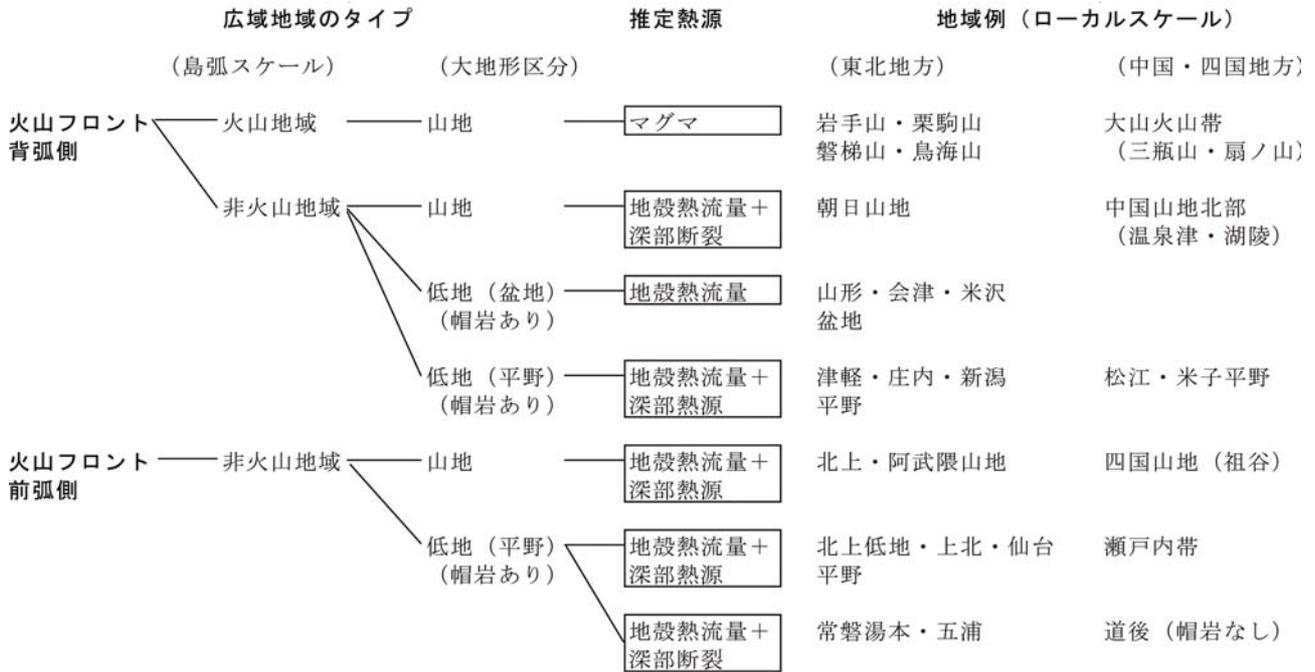
3.1 東北地方

玉生ほか（2008）の重ね合わせデータを基に、東北地方の東西断面のモデル図を作成した（第2図）。ここでは、ある特定の断面位置を想定したものではなく、東北地方全域の特徴をある架空の断面に総合的に投影させた概念的な断面図である。先第三系基盤岩類より上部では熱水対流系が、下部では熱伝導が卓越する。また、地温勾配図やキュリー点深度分布からは約400℃の等温面を推定することができる。この東北地方の東西断面図では、中央部の脊梁山脈に相当する第四紀火山性山地で、地下の温度は最も高くなり、背弧側でやや低下し、前弧側で火山フロントを離れるにつれて

地下温度分布から見た高温地区を含む広域地域のタイプ分け(玉生)

第1表 高温地区を含む広域地域のタイプ分け(東北地方及び中国・四国地方の例).

Table 1 Classification of types of wide areas including high temperature anomalous regions (examples of Tohoku and Chugoku/Shikoku districts).



第2表 高温地区を含む広域地域の熱/熱水の特徴.

Table 2 Thermal and hydrothermal features of wide areas including high temperature anomalous regions.

	タイプ分け (地形・地質)		代表的な地域例	透水構造	浅部熱異常分布 (地質・地化学データ)				深部熱異常分布 (地球物理データ)					
	タイプ	サブタイプ			先第三系 基盤岩深度	温泉放熱量 (注1)	地温勾配 ℃/km	推定400℃ 等温面深度	泉質	比抵抗分布	震源分布	地殻内地震の 発生下限	P波速度減衰 (深度10km)	キュリー点 深度
東北地方	非火山地域	低地 (第四系)	前弧側内陸低地	北上低地	地下1-2km	中	30-80	地下7km	重碳酸塩泉	浅部低、深部中	少ない	地下13km		浅い
			背弧側内陸低地	山形盆地	地下2-3km	中	50-80	地下5km	硫酸塩泉	浅部低、深部中	少ない	地下13km		浅い
中国・四国	非火山地域	低地 (第四系)	会津・米沢盆地	津軽平野	地下2-3km	中	30-60		重碳酸塩泉	測定データなし	少ない	地下10km		浅い
			前弧側海岸平野	常磐湯本・五浦	地下1-2km	高	80-100		塩化物泉	測定データなし	少ない		低速度層	深い
中国・四国	非火山地域	低地 (第四系)	北上・仙台平野	新潟・庄内平野	地下2-3km	中	50-60		塩化物泉	測定データ一部	少ない	地下13km		深い
			背弧側海岸平野	阿武隈・北上山地	地下2-3km	中	20-60		塩化物泉	測定データなし	一部で多い	地下10~15km	低速度層	深い
中国・四国	非火山地域	山地/丘陵 (先第四系)	前弧側山地	朝日山地	地表面	低	10-40	地下10km	重碳酸塩泉	浅~深部で高	少ない	地下15~20km		深い
			背弧側山地	朝日山地	地表面	低	50-60	地下7km	重碳酸塩泉	測定データなし	少ない	地下15~20km	低速度層	深い
東北地方	火山地域	第四紀火山性山地	岩手山・栗駒山	磐梯山・鳥海山	地下1km	高	60-150	地下5km	塩化物・硫酸塩泉	浅部高、深部低	多い	地下5~10km	低速度層	浅い
			三瓶山・扇ノ山	大山	地下1km	高							反射面	
中国・四国	非火山地域	低地 (第四系)	瀬戸内海周辺	高知・阿南平野	地表面	低~中	10-40	地下12km	単純泉	測定データなし	少ない	地下13km		深い
			松江・米子平野	中国山地南部	地下1-2km	中~高	20-40	地下10km	単純泉	浅部中、深部高	少ない	地下15km		やや浅い
中国・四国	非火山地域	山地/丘陵 (先第四系)	前弧側山地1	中国山地南部	地表面	低	20-30	地下10km	単純泉	浅~深部で高	少ない	地下15km		深い
			前弧側山地2	中国山地北部	地下1-2km	中~高	20-30	地下12km	重碳酸塩泉	測定データなし	少ない	地下20km		深い
中国・四国	非火山地域	低地 (第四系)	三瓶山・扇ノ山	大山	地下1-2km	中~高	30-40	地下5km	重碳酸・塩化物泉	浅部中	若干多い	地下10km		やや浅い?
														やや浅い?
データの量・密度				全面	ほぼ全面	局所データから外挿	局所データから外挿	局所データから外挿	局所データから外挿	局所データから外挿	局所データから外挿	局所データから外挿	局所データから外挿	局所データから外挿
解釈				透水性基盤深度	泉量・泉温も考慮	坑井の温度検層に基づくデータ	左記のデータから外挿した推定値	濃度と化学成分から区分	地温・含水量との関連	群発地震との関連	地下温度との関連	深部熱源としての解釈の是非	地下温度との関連	

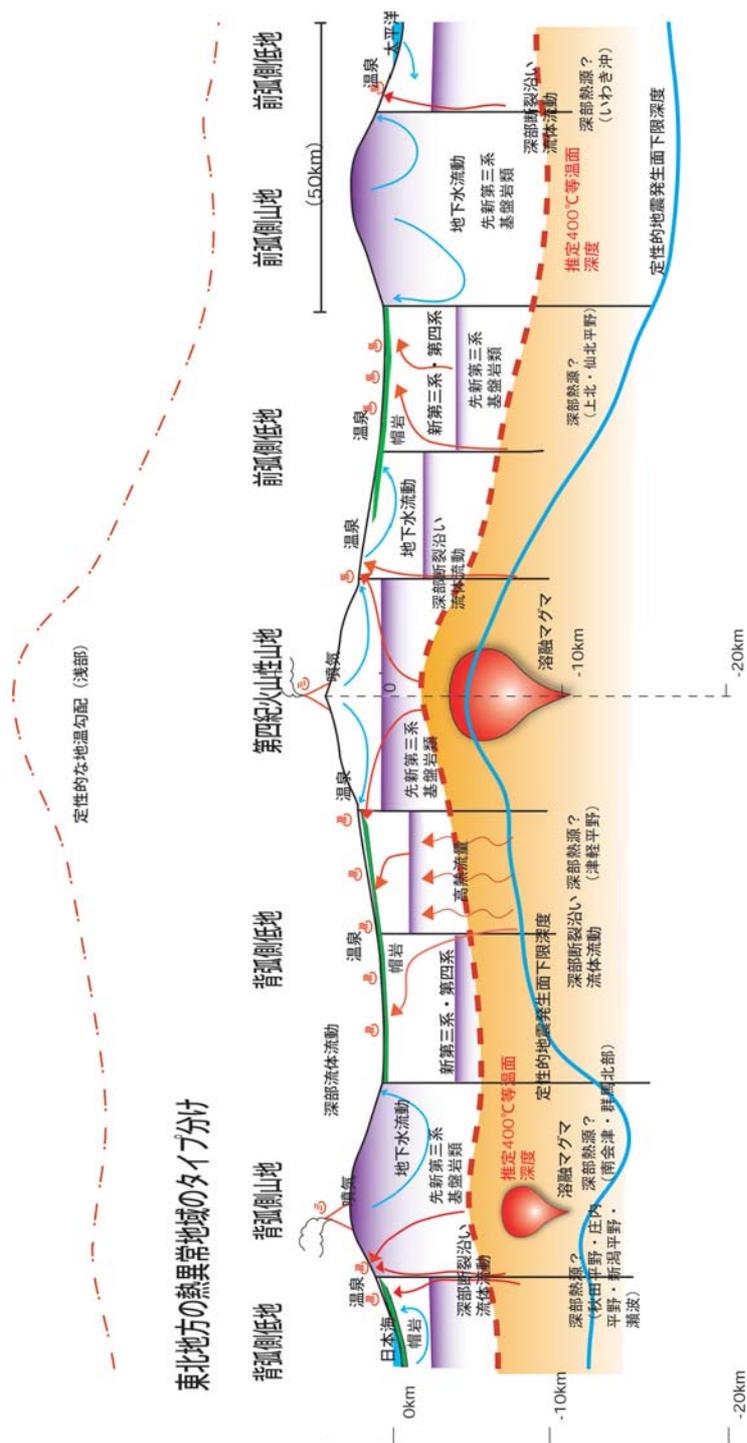
(注1) 高: >10⁵μW/m², 中: >10³μW/m², <10⁵μW/m², 低: <10³μW/m²

低下し、前弧側山地で最も低くなる。温泉の分布は、火山フロント周辺から背弧側に高温の温泉が高密度で存在するのに対して、前弧側では火山フロントから離れるに従って、温度も密度も低下する。ただし、太平洋

側の低地には局所的に60℃前後の温泉が分布する。以下、各タイプ毎に説明する。

3.1.1 前弧側低地

本地域は一般的に熱異常の程度や分布密度の低い地



第2図 東北地方の高温地区を含む広域地域のタイプ分けの概念断面モデル図。

Fig. 2 Conceptual cross section model of Tohoku district showing types of wide areas including high temperature anomalous regions.

域であるが、第四紀火山地域との境界付近や太平洋に面する地域の一部において、42～65℃の温泉が認められる。太平洋に面した福島県常磐湯本や茨城県五浦では60℃前後の温泉が局所的に分布している（高橋ほか、1993）。このような局所的な分布形態と中程度の泉温は、これらの温泉が顕著な浅部熱源によって熱せられているものではなく、深部断裂に沿って深部熱水が

上昇してきていることを示唆している。このような深部熱水はある断裂に沿って天水が地下深部まで浸透し、そこで地温勾配で温度が上昇した地層によって熱伝導で温められて、再度地表付近に上昇してきたものと考えられる。したがって、このような場所では、深部に特別な熱源を推定する必要はなく、むしろ断裂に沿った深部対流を保障しうる破碎型透水性の高い箇所が必

要条件となる。

一方、青森県上北平野のように、泉温は40～50℃と相対的に低温であるが、かなりの密度で温泉が分布している地域(高橋ほか, 2001)は、先第三系基盤岩類の熱流量を熱源として、新第三系に熱水対流系が発生していると考えられる。これらの熱水は地表付近の帽岩の存在のために、地表に遺漏することなく、地下に安定的に存在し続けることができる。ただし、上北平野では後述べる宮城県仙台平野と似たような深部熱源を示唆するP波速度の減衰域(深度10 km: 趙ほか, 1999)が認められるので、それらが深部熱源として先第三系基盤岩類の地殻熱流量を大きくしている可能性も併せて考える必要もある。

宮城県仙台平野では深度10～20 kmに低比抵抗帯が存在し、その上面に震源が分布している(Mitsuhashi *et al.*, 2001)。これはマグマ溜りの特徴と類似することから、深部熱源の存在を示唆するものと考えられる。しかしながら、浅部においては帽岩に成り得る地層が分布しているにも拘わらず、地表での温泉数は上北平野と比較すると少ない。その理由は温泉開発が十分進んでいないためなのか、本当に温泉資源が乏しいのか、現在のところ不明である。

P波速度の減衰域(深度10 km: 趙ほか, 1999)のデータからは、仙台平野に顕著な減衰域が認められる。上北平野にも減衰域が認められる。その実態は現在のところ不明ではあるものの、これらの特徴はマグマ溜りと類似する特徴なので、深部熱源との関わりを、今後検討していく必要がある。

3.1.2 前弧側山地

熱異常の程度は全体的に低い。北上山地の一部の鉱泉(久慈市宇部冷泉と岩泉町宮本)でpHの低い(3～6程度)ものが存在するが(高橋ほか, 2001)、これは硫化鉱床や粘土鉱床に関連している可能性が考えられる。地殻内の地震活動は全体的に低い。内田(2004)によると、阿武隈山地では比抵抗値は地下約10 kmまでは高比抵抗であるものの、地下20 km以深では数100 ohm-mまで低下している。

3.1.3 第四紀火山地域

高温の熱異常地区を含む広域地域で、90℃以上の温泉が密集する。上部地殻内地震の震源下限やキュリー点等温面深度が周辺域より相対的に浅くなっている。これは地下温度が浅部まで高温であることを意味している。また、深部(深度10 km)でのP波速度の減衰域(趙ほか, 1999)が火山の周辺に分布している。これは溶融マグマまたは深部熱源の存在を示唆していると考えられる。地震活動は全般に活発である。一部の火山周辺には、顕著な地震波反射面が確認されている。

3.1.4 背弧側低地

前弧側低地と比較すると、背弧側低地では温泉分布

域が脊梁山脈の火山地域の西縁から60 km以上離れた西方まで、広範に、かつ、密度もやや高く存在する。津軽平野では42～70℃の温泉が多数密集して分布している(高橋ほか, 2001)。地殻熱流量は一般的に前弧側より背弧側の方が高い。本地域は前弧側低地の上北平野と同様に、先第三系基盤岩類中の熱流量を熱源として、新第三系に熱水対流系を発生させていると考えられる。これらの熱水は地表付近の帽岩の存在のために、地表に遺漏することなく、地下に安定的に存在し続けることができる。温泉は帽岩を掘り抜いた坑井によって汲み上げられている。一方、前弧側低地の上北平野や仙台平野で記述したような深部熱源を示唆するP波速度の減衰域(深度10 km: 趙ほか, 1999)が、津軽平野をはじめ多くの内陸盆地や日本海側の海岸平野で広く認められる。それらが深部熱源として先第三系基盤岩類の熱流量を大きくしている可能性も考えられる。深部熱源との関わりについては、今後の検討が必要である。

3.1.5 背弧側山地

背弧側低地と比較すると、一般的に熱異常の度合いは低い。ただし、一部の山地縁辺部(新潟県関川・山形県温海など)には、約70℃の温泉が認められる。また、福島県南会津や群馬県北部には、60～90℃の温泉が広範に分布している(高橋ほか, 1993)。これらの広域的な熱異常は深度10 km付近のP波速度の減衰(趙ほか, 1999)から示唆される深部熱源と関連している可能性がある。また、福島県南会津から群馬県北部にかけては、キュリー点等温面深度が広範にわたって地下8 km以浅と浅くなっている。上記の熱異常分布と調和的である。最近、梅田ほか(2007)は、飯豊山地の下部に低比抵抗ゾーンを見いだして、マグマの存在を予想している。

3.2 中国・四国地方

玉生ほか(2008)の重ね合わせデータを基に、中国・四国地方のモデル図を作成した(第3図)。ここでは、ある特定の断面位置を想定したものではなく、中国・四国地方全域の特徴を有する架空の南北断面に総合的に投影させた概念的な断面図である。中国地方の火山フロントは小倉(2004)に基づいた。それによると、火山フロントは太田ほか編(2004)で地形区分されている中国山地のほぼ中央を東西に通っている。先第三系基盤岩類より上部では熱水対流系が、下部では熱伝導が卓越するとした。また、地温勾配図やキュリー点深度分布からは約400℃の等温面を推定することができる。この中国・四国地方の南北断面図では、中国山地の南部に相当する部分が第四紀火山性山地で、地下の温度は最も高くなり、背弧側でやや低下し、前弧側で火山フロントを離れるにつれて低下し、瀬戸内海で最も低くなる。温泉の分布は、火山フロント周辺から背弧側

祝谷断層(花崗岩中の正断層)に沿って花崗岩中に賦存しているとのことである。広域的に見ると、道後温泉から中央構造線周辺では相対的に浅い地震が発生している。本地域全体としては、震源分布はまばらである。

3.2.2 前弧側山地

四国山地と中国山地南半部とからなる。四国山地には42℃を越える温泉は徳島県祖谷温泉のみである。ここはもともと風呂の谷と言われ、地表兆候が認められていた。単純硫化水素泉で、泉温は47.4℃、湧出量は1,300 L/分(金原・長谷川編, 2005)である。高知県安芸市付近には顕著な南北方向の低比抵抗地域が認められるが、地表での熱異常は認められない。最近、Matsumoto (2006)により、愛媛県東部と高知県東北部にかけて、Hi-net観測坑で100 mW/m²以上の地殻熱流量が測定されたと報告しているが、この地域では現在の所、25℃以上の温泉は確認されていない。

中国山地南半部には42℃を越える温泉はない。震源分布は全体にまばらに分布している。

3.2.3 第四紀火山地域

本地域は大山火山帯に相当し、扇ノ山と三瓶山に火山性温泉が存在している。扇ノ山を熱源とする湯村温泉は、本地域最高の95℃の高温泉(金原・長谷川編, 2005)である。また、第四紀火山から少し離れているが、50℃前後の温泉が岡山県奥津、湯原、鳥根県海潮に存在する。地域全体として見ると、熱異常の程度や分布密度は、東北地方の第四紀火山地域に比較すると、相対的に低い。角(1982)の第2図には、その様子が図示されている。

3.2.4 背弧側低地

日本海側の島根県松江・米子平野には、70~90℃の高温温泉(島根県松江, 玉造及び鳥取県皆生温泉: 金原・長谷川編, 2005)が分布している。ここでは震源は少ない。熱源は不明であるが、貫入岩などの潜頭性熱源が想定される。この地域では帽岩に相当するものが存在していると想定できる。

3.2.5 背弧側山地

日本海側の中国山地北部に相当する山地には、70~100℃の高温泉が鳥取県三朝、鹿野、兵庫県浜坂、城崎などに散在している。また島根県の日本海に近い山地には50℃前後の湖陵、温泉津、有福などの温泉が存在する(金原・長谷川編, 2005)。これらの温泉は第四紀火山から離れているので、貫入岩などの潜頭性熱源が想定される。また、これらの温泉分布域の周辺では、歴史上しばしば群発地震が発生している。

4. 今後の課題

全国規模の文献調査段階として、日本列島全体の広域的な熱異常の分布状況を把握するためには、以下の

地域の検討を追加することが望まれる。九州・琉球弧を代表する九州地域、東日本弧北部の北海道、それに西日本弧東部の中部・近畿地方での検討である。もし、このような追加調査が実行できない場合は、東日本弧北部の北海道は、東北地方と共通したタイプとして、また、西日本弧東部の中部・近畿地方は中国・四国地方と共通したタイプとして類推可能と思われる。ただし、近畿地方の紀伊半島や有馬温泉などの熱異常は、別途現地調査を行って検討する必要がある。一方、琉球弧の九州・沖縄に関しては伸張テクトニクス場にあるため、単純に東北地方や中国・四国地方のタイプから類推するだけでなく、新たに大陸地殻の薄化に伴う熱異常も考慮して検討する必要がある。第1表のタイプ分けでは、火山フロント背弧側の火山地域を山地のみに区分しているが、九州地方では別府・九重地溝帯や鹿児島地溝帯のような、低地での火山活動域が特徴的に認められる。このような伸張テクトニクス場に注目して検討する必要がある。

今までの検討によって、タイプ毎に高温地区の温度や分布状況には大きな違いがあることが明らかとなった。背弧側非火山性地域の山地や低地には相対的に温度の高い高温地区が密に分布するのに対して、前弧側の山地や低地では相対的に温度の低い高温地区が疎らに分布する。しかしながら、火山フロント前弧側には、東北地方のいわきや、近畿地方の有馬、本宮で、局所的な高温異常域が例外的に存在している。このような特異な地域では地下深部から断裂や貫入岩体に沿って、熱水上昇通路が形成されていると考えられる。他の地域では、そのような通路がないと考えられる。このような例外的な地域で熱異常の成因をより正確に検討するためには、それぞれの地域での現地調査が必要である。

一方、概要調査段階では地層処分地が地下300 m以深に計画されていることから、地下に空洞を掘削した場合に、地下の熱水対流系がどのような擾乱を受けるか予測することが課題となる。いわば、地下の平衡状態にある温度構造が掘削によってどのような擾乱を受けるか、また熱水上昇流の通路をつくる可能性がどの程度あるか等、評価することである。熱源の観点から考えると、地層処分によって新たな熱源が発生し、それに誘起される熱水対流が発生する可能性も検討する必要がある。また、自然条件下では海水準面の変動や地殻変動によって動水勾配の変動が予測される。したがって、今後の研究課題としては、概要調査地域規模の範囲での透水係数分布、温度分布、動水勾配等の変化に着目した検討が必要である。これらの調査結果に基づいて、概要調査地区固有の問題と広域規模のタイプ分け地域としての特徴とを明らかにさせることができる。このような検討をすることで、第三者に対して、より客観的な地域特性やモデルの説明を行うことが可

能となる。

謝辞:本研究を進めるに当たり、「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」研究グループの方々から、貴重なコメントを頂きました。原子力発電環境整備機構の土 宏之、瀬尾俊弘、後藤淳一、大東秀光の諸氏からは、本研究に対して詳細なコメントや情報提供を頂きました。防災科学研究所の松本拓己氏からは最新データを提供して頂きました。査読者には適切な指摘をして頂きました。以上の方々ここに深謝の意を表します。

文 献

- 原子力発電環境整備機構 (2004) 熱・熱水の影響評価手法に関する検討。(独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門, 145p.
- 原子力発電環境整備機構 (2005) 熱・熱水の影響評価手法に関する検討(その2)。(独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門, 184p.
- 原子力発電環境整備機構 (2006) 熱・熱水の影響評価手法に関する検討(その3)。(独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門, 236p.
- 金原啓司・長谷川功 編 (2005) 日本温泉・鉱泉分布図及び一覽(第2版)(CD-ROM版)。産総研地質調査総合センター, 数値地質図, GT-2.
- 北村 信 編(1986) 新生代東北本州弧地質資料集, 第1~3巻。(榊宝文堂発行).
- Matsumoto, T. (2006) Terrestrial heat flow anomaly at non-volcanic area in Southwest Japan based on the temperature logging in a borehole of the Nied Hi-net. American Geophysical Union, 2006 Fall Meeting, T21A-0377.
- Mitsuhashi, Y., Ogawa, Y., Mishina, M., Kono, T., Yokokura, T. and Uchida, T. (2001) Electromagnetic heterogeneity of the seismogenic region of 1962 M6.5 Northern Miyagi Earthquake, north-eastern Japan. *Geophysical Research Letter*, **28**, 4371-4374.
- 宮久三千年 (1982) 道後温泉の地質。「道後温泉」編集委員会編 道後温泉。松山市観光協会発行。1-12.
- 中尾信典・菊地恒夫・石戸恒雄 (2005) 2.2 高温地域の成因の検討。原子力発電環境整備機構 委託研究報告書「熱・熱水の影響評価手法に関する検討(その2)」, 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門, 35-45.
- 中尾信典・菊地恒夫・玉生志郎 (2006) 2.2 高温地域の成因の検討。原子力発電環境整備機構 委託研究報告書「熱・熱水の影響評価手法に関する検討(その3)」, 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門, 68-84.
- 小倉博之 (2004) 近畿地方から中国地方にかけて分布する第四紀火山。太田陽子・成瀬敏郎・田中眞吾・岡田篤正編, 日本の地形6 近畿・中国・四国。東京大学出版会, 160.
- 太田陽子・成瀬敏郎・田中眞吾・岡田篤正 編 (2004) 日本の地形6 近畿・中国・四国。東京大学出版会, 402p.
- 角 清愛 (1982) 温泉放熱量分布図(400万分の1)。日本地質アトラス, 98-101.
- 鈴木舜一 (1989) 東北日本の新生代熱史。地質学論集, **32**, 321-337.
- 高橋正明・山口 靖・野田徹郎・駒澤正夫・村田泰章・玉生志郎 (1993) 50万分の1新潟地熱資源図説明書。特殊地質図(31-1), 地質調査所, 116p.
- 高橋正明・駒澤正夫・玉生志郎 (2001) 50万分の1青森地熱資源図説明書。特殊地質図(31-5), 地質調査所, 126p.
- Tamanyu, S., Sato, T. and Kato, M. (2006) Subsurface thermal and hydrothermal characterization based on geothermal resources map, drill core thermal gradients, Curie point depths and hypocenter distribution -Examples of Tohoku districts, Japan. *Jour. Geochemical Exploration*, **89**, 389-393.
- 玉生志郎・阪口圭一・佐藤龍也・加藤雅士 (2008) 地質・地球物理データの重ね処理による熱・熱水異常地域の抽出—東北地方と中国・四国地方の例—。地調研報, **59**, 7-26.
- 玉生志郎・高橋正明・村田泰章・駒澤正夫・金原啓司・川村政和・山口文春 (2000) 東北日本の深部地熱資源有望地域—地熱資源図に基づいて—。地調報告, **284**, 261-276.
- 内田利弘 (2004) 電磁探査法による深部構造解析。原子力発電環境整備機構 委託研究報告書「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」。産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門, 129-135.
- 梅田浩司・浅森浩一・二ノ宮淳・根木健之・花室孝広 (2007) 非火山性温泉の熱源について—地球物理、地球化学データからの制約—。日本地球惑星科学連合2007予稿集, G121-004.
- 矢野雄策・田中明子・高橋正明・大久保泰邦・笹田政克・梅田浩司・中司 昇・秋田藤夫 (1999) 日本列島地温勾配図。1:3,000,000, 地質調査所。
- 趙 大鵬・中島淳一・長谷川昭 (1999) 東北地方の3次元地震波速度構造と地震・火山活動。月刊地球号外, **27**, 14-21.

(受付:2008年1月30日;受理:2008年2月7日)