

地質・地球物理データの重合処理による熱・熱水異常地域の抽出 — 東北地方と中国・四国地方の例 —

玉生志郎¹・阪口圭一²・佐藤龍也³・加藤雅士³

Shiro Tamanyu, Keiichi Sakaguchi, Tatsuya Sato and Masashi Kato (2008) Integration of geological and geophysical data for extraction of subsurface thermal and hydrothermal anomaly areas –Examples in Tohoku and Chugoku/Shikoku districts, Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 59(1/2), p.7 - 26, 20 figs.

Abstract: In order to clarify the situation and origin of subsurface high temperature anomaly in non-volcanic area, the middle northern part and northern part of Tohoku district, and Chugoku/Shikoku district are selected as the model fields for this case study. The distribution maps of topography, geology, subsurface isotherms, Curie-point isothermal depth, seismic hypocenter, electric resistivity, and P-wave velocity were collected and summarized as input data to the database for 2-D and 3-D visualization. After digitizing, mutual correlations among various data are investigated. Major results are as follows. In deeper part, subsurface temperatures are generally higher at back-arc region than at fore-arc region, and also those of mountain regions are relatively higher than of plain regions for both back-arc and fore-arc regions respectively. These deep thermal features are correlated with thermal gradient, gravity basement depths, Curie-point isotherm depths and P-wave velocity. In shallow part, subsurface temperatures are relatively high in Quaternary volcanic regions by the high-level heat sources, and also somewhat high in plain regions by cap rock playing the shield for underlying hydrothermal convection. These shallow thermal features are correlated with thermal gradient, hot spring, electric resistivity and P-wave velocity.

Keywords: subsurface temperature, heat, hydrothermal convection, thermal anomaly area, geology, seismic hypocenter, magnetotelluric survey, Curie-point depth, P-wave velocity, visualization

要 旨

非火山性地域の地下での熱・熱水異常の存在状況や成因を明らかにするために、東北地方中北部、北部及び中国・四国地方をモデル地域に選定して、地形、地質、地温、震源、比抵抗、キュリー点深度、重力基盤、P波速度などの分布データを収集した。それらの情報はデジタル化後、データベースシステム（G★Base）に登録し、同システムの可視化機能で様々な角度から各種情報を比較検討した。その結果、以下のようなことが明らかとなった。1) 深部では、火山フロントより背弧側では高温となり、前弧側で低温となる。背弧側と前弧側では、概して山地域で高温となり低地域で低温となる傾向がある。このような深部の広域的な温度分布は地温勾配、重力基盤深度分布、地震波速度から推定される先第三系基盤岩深度分布、キュリー点深度等温面分布、浅部P波速度と整合的である。2) 浅部では、第四紀火山地域で浅所貫入マグマの影響で相対的

に高温となる。低地域でも帽岩の影響で多少高温となる。これらの浅部の温度分布は浅部の地温勾配、温泉分布、比抵抗分布、P波速度構造と相関している。

1. はじめに

本研究は、原子力発電環境整備機構の委託研究「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。本研究は、2000年に制定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」に基づいて実施される高レベル放射性廃棄物の地層処分を念頭において、その基礎的な研究の一環として実施されたものである。本研究では、非火山性地域の地下約10 km程度までの熱異常の分布状況や成因を、既存の地質・地球物理データの二次元・三次元可視化・重合技術を用いて明らかにしようとする

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

²地質調査情報センター(AIST, Geological Survey of Japan, Geoinformation Center)

³地熱技術開発株式会社(Geothermal Energy Research & Development Co., LTD. Shinkawa Nittei Annex Bldg., 22-4 Shinkawa 1-Chome, Chuo-Ku, Tokyo 104-0033, Japan)

ものである。そのために、2003年度には東北日本の中東部に位置する宮城県北部を中心とする、東西約174 km、南北約110 kmの地域をモデル地域として検討を行った。その結果は既に公表している（玉生・佐藤，2004）。

今回は2004～2005年度に検討した東北地方中北部、東北地方北部の結果と、2004年度に検討した中国・四国地方の結果について報告する。東北地方中北部の成果の一部は、Tamanyu, *et al.* (2006) として公表しているものの、全体として総括する意味で、ここに一部重複して報告する。これらの地域では、既存の地質調査データ、地温勾配図データ、空中磁気探査に基づくキュリー点深度分布データ、MT法調査データ、P波速度分布データなどのデータが利用可能である。また、本研究と並行して行われた東北地方での地震活動調査（楠瀬ほか，2004，2005）によって、詳細な震源分布データも利用可能である。これらデータの相互の相関をみるために、地質、坑井温度、震源、キュリー点等温面深度、MT調査、P波速度分布の各データの二次元断面図と三次元可視化モデル図を作成した。これらの図面に基いて、熱異常の分布状況を検討した。

2. データを収集したモデル地域

データ収集を行った地域は、研究年度などの違いから東北地方中北部、東北地方北部、中国・四国地方の3地域に分けることとした。

東北地方中北部の範囲は、秋田市、盛岡市、宮古市、湯沢市、水沢市、陸前高田市を含む、北緯39.00° - 40.00°（南北約110 km）、東経139.00° - 142.00°（東西約254 km）に囲まれた矩形の範囲である（第1図）。国土地理院発行の20万分の1地勢図では「仙台」、「石巻」の全域と「新庄」、「一関」の南半部の地域に相当する。第1図にはA-A' 断面とB-B' 断面の位置も図示されている。

東北地方北部の範囲は、青森市、弘前市、大館市、八戸市を含む、北緯40.00° - 41.00°（南北約110 km）、東経139.75° - 142.00°（東西約286 km）に囲まれた矩形の範囲である（第2図）。国土地理院発行の20万分の1地勢図では「男鹿」、「秋田」、「盛岡」の全域と「酒田」、「新庄」、「一関」の北半部の地域に相当する。第2図にはA-A' 断面の位置も図示されている。

中国・四国地方の範囲は、鳥取市、松江市、広島市、岡山市、姫路市、高松市、徳島市、松山市、高知市を含む北緯33.00° - 35.67°（南北約295 km）、東経132.00° - 135.00°（東西約272 km）に囲まれた矩形の範囲である（第3図）。国土地理院発行の20万分の1地勢図では「鳥取」、「松江」、「大社」、「浜田」、「高梁」、「姫路」、「徳島」、「岡山及丸亀」、「広島」、「松山」、「高知」、「剣山」、「宇和島」、「窪川」の全域に相当する。第3図にはA-A'

断面とB-B' 断面の位置も図示されている。

以下、東北地方中北部、東北地方北部、中国・四国地方と区分して、処理内容、検討結果などを記述する。

3. 東北地方中北部のデータ処理・検討

3.1 収集データ

収集したデータは地質図、キュリー点等温面深度分布、MT法による比抵抗分布、震源分布、地温データ、標高データ、P波速度構造である。以下、項目毎に出典と処理方法を説明する。

3.1.1 地質図

地質図は、産業技術総合研究所 地質調査総合センター監修の“コンピュータグラフィックス日本列島の地質 CD-ROM 版”に収められている東北地方と中国・四国地方の地質図（日本列島の地質編集委員会編，1996）を参照した。同CD-ROMには地質図のイメージ画像が納められている。そこで、対象地域に相当する部分の地質図のイメージ画像を切り取って使用した。東北地方の東西地質断面に関しては、北村 編（1986）を参照した。

3.1.2 キュリー点等温面深度分布

キュリー点等温面深度分布図としては、松林ほか（1992）の日本及び隣接地域熱流量・キュリー点深度図を参照した。同図を利用して、今回の調査で対象とした地域のキュリー点等温面深度を数値化した。これにより、2次元数値データを作成した。

3.1.3 MT法による比抵抗分布

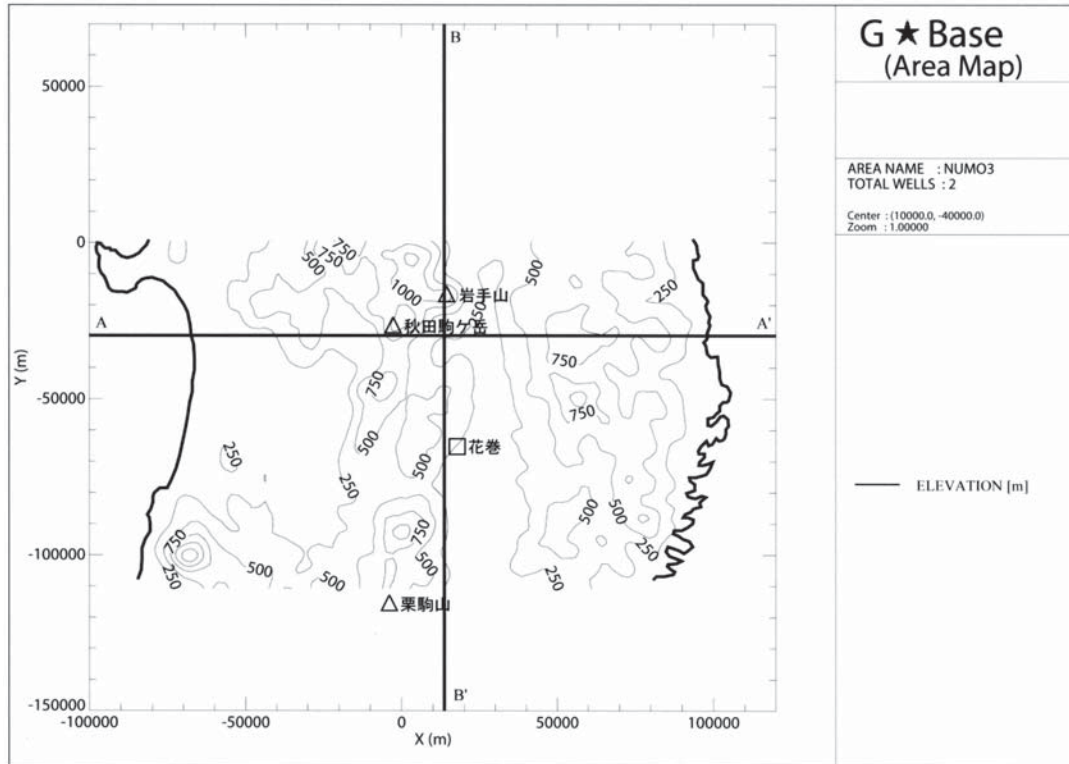
東北地方中北部については、高橋ほか（2003）により岩手県の岩手山付近を通るWNW-ENE方向の側線において調査が行われ、深度約40 kmまでの比抵抗2次元解析結果が示されている。1998年電磁気共同観測MTデータ整理委員会（1999）では、秋田県の千屋断層を東西に横切る側線で調査が行われ、深度約20 kmまでの比抵抗2次元解析結果が示されている。今回はこれらのデータを数値化し、三次元データとして扱って三次元比抵抗分布図を作成した。

3.1.4 震源分布

本調査にあたり、楠瀬ほか（2004）によってまとめられた東北地方の震源分布データを用いた。同データには1923年～2003年8月までに発生した震源情報が含まれている。ただし、1998年頃から自然地震の観測網が整備されたために、それ以降の取得データは従来の取得データに比較すると精度と量が飛躍的に増大している。なお、同データは非常に膨大なため、東北地方については精度の高い2000年1月～2003年8月までのデータを利用した。

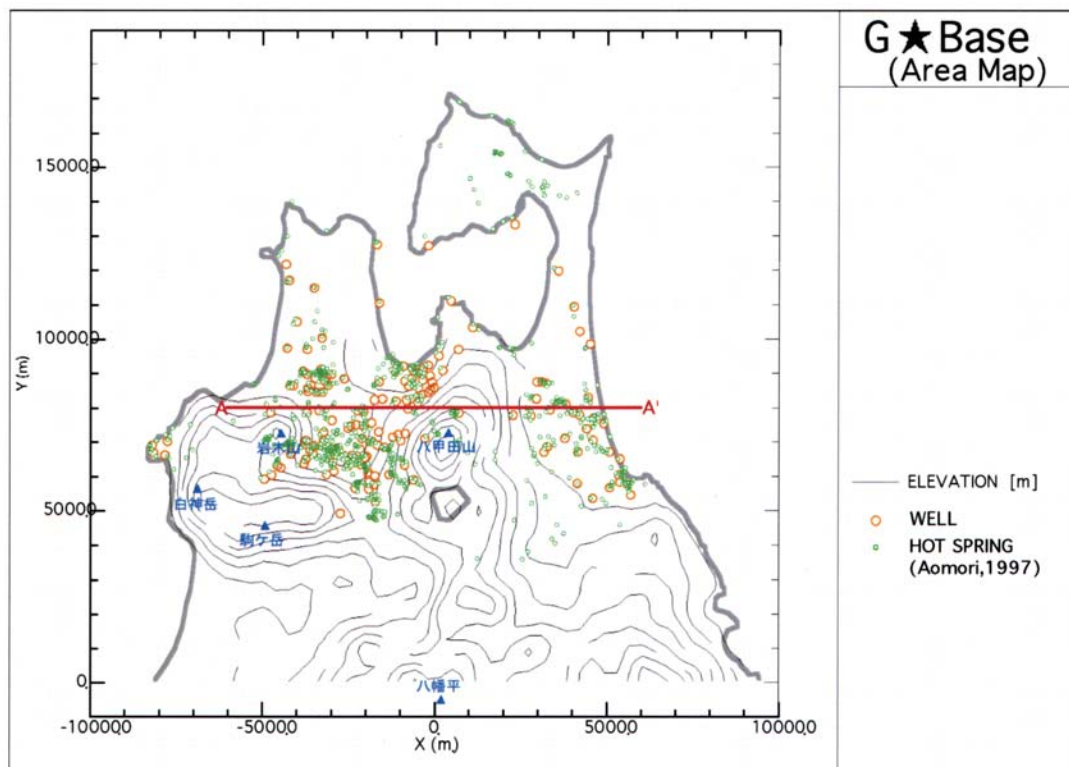
3.1.5 地温分布

地温データとしては、矢野ほか（1999）と田中ほか



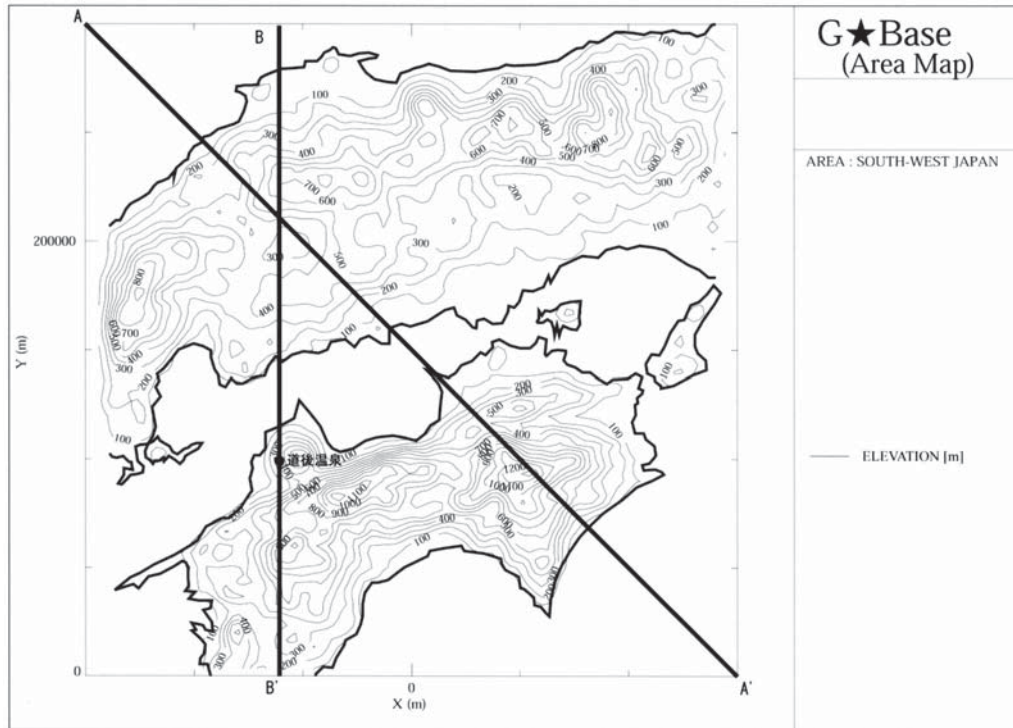
第1図 研究対象地域と断面位置（東北地方中北部）。

Fig. 1 Study area and index of cross sections (middle northern part of Tohoku district).



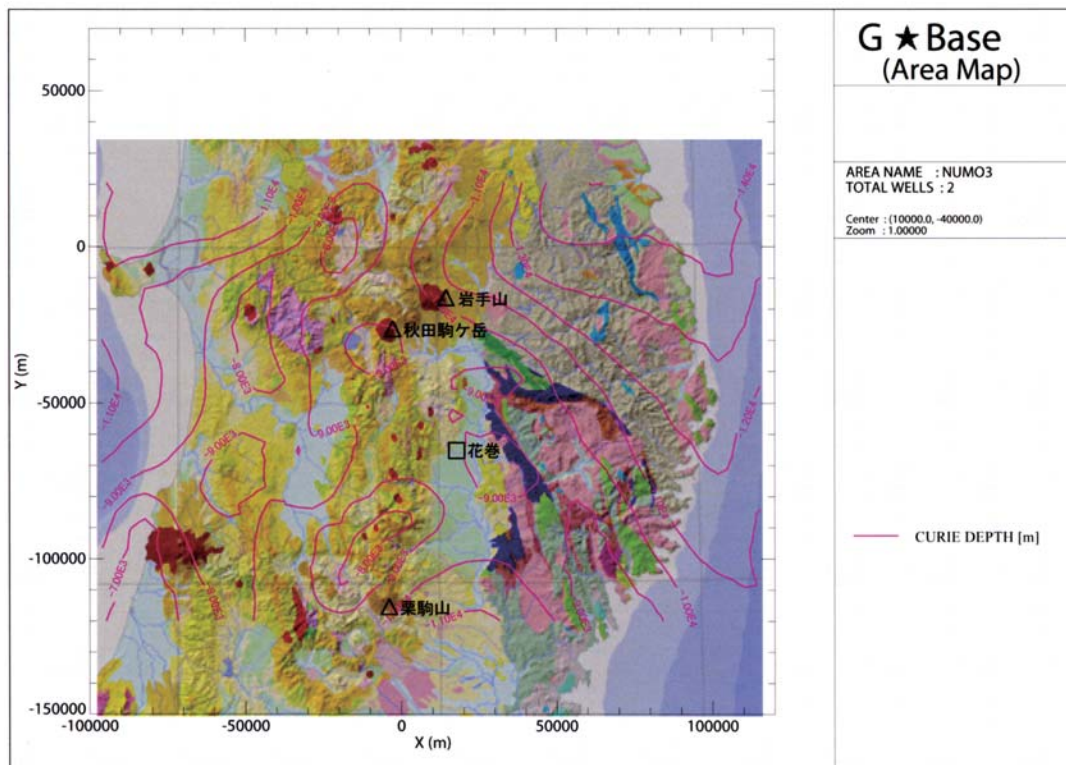
第2図 研究対象地域の地形、坑井・源泉位置及び断面位置（東北地方北部）。

Fig. 2 Study area, topography and index maps of well/hot spring sites and cross section (northern part of Tohoku district).



第 3 図 研究対象地域と断面位置（中国・四国地方）.

Fig. 3 Study area and index of cross sections (Chugoku/Shikoku district).



第 4 図 東北地方中北部の地質図とキュリー点等温面深度分布の対比.

Fig. 4 Correlations between geology and Curie point isothermal depths in middle northern part of Tohoku district.

(1999)を参照した。これらの文献では、地温勾配の調査のために全国の既存井の温度データ(坑底温度)を収集しており、井戸毎に地温勾配が示されている。そこで、対象地域のデータを抽出し、これを三次元数値データに変換した。抽出した坑井データは中国・四国地方で74本、東北地方で113本である。ここで、坑井毎に示された地温勾配を元に標高-5 kmまでの地温を下方への外挿により求め、これを3次元数値データ化した。このとき、外挿温度が650℃(キュリー点温度と仮定)を超える領域については650℃一定とした。

しかし、坑井の分布に偏りがあるため、このデータセットのみでは対象地域全域の地温分布を表現できない。そこで、キュリー点等温面深度データも利用した。なお、ここではキュリー点温度を650℃と仮定し、キュリー点等温面が650℃となるようにデータセットを作成した。地表面については、15℃一定と仮定し、データセットを作成した。このようにして求めたキュリー点深度による地下温度は、上記の坑井温度測定から外挿した温度よりすべて低く求められた。その原因は地温勾配を深部まで一定と仮定しているためと考えられる。

以上より、坑井温度データ、キュリー点等温面深度データ及び大気温度データをコンパイルし、3次元地温データを作成した。

3.1.6 標高分布

標高データとしては、国土地理院発行の50 mメッシュの標高データ利用し、対象地域のデータを抽出した。なお、対象範囲が広いので、データを250 m程度のメッシュ間隔になるように間引いた。

3.1.7 P波速度構造分布

長谷川ほか(1991)、趙ほか(1999)では、東北地方を平面図及び東西に横切る側線上で、P波速度構造を示している。ここで示された速度構造は、平均P波速度に対する±速度差(%で表記)の分布を2次元で示しており、これを用いた。

3.2 解析方法と可視化によるデータ対比

収集・変換したデジタルデータをデータベースに登録した。ここで用いたデータベースはG★Base(ジースターベース)である。その詳細は玉生・佐藤(2004)に記述してあるので、ここでは省略する。このデータベースを用いて地質図はイメージ画像データを登録した。キュリー点等温面深度分布と標高データは2次元の離散データ(x, y, 標高)として、MT法による比抵抗分布、地温データ、P波速度構造は3次元の離散データ(x, y, z, 各測定値)としてそれぞれ登録し、G★Baseの2次元クリッピング機能でコンターデータ(2次元、3次元マッピング用)に変換した。震源分布は震源位置を離散データ(x, y, z, マグニチュード)として登録

した。

登録データをG★Baseの可視化機能を用いて可視化し、相互のデータを比較検討した。

3.2.1 地質図とキュリー点等温面深度分布の対比

第4図に地質図とキュリー点等温面深度分布を平面図で重合し対比した。キュリー点深度は、北上山地北部と日本海北部で相対的に深く、その他の地域で浅い傾向が認められる。北上山地南部で相対的に浅くなっている理由は、温度異常からは考えられないので、超塩基性岩や磁鉄鉱系花崗岩の影響と思われる。

3.2.2 比抵抗(標高-5 km)、地形、震源分布及びキュリー点等温面深度分布の対比

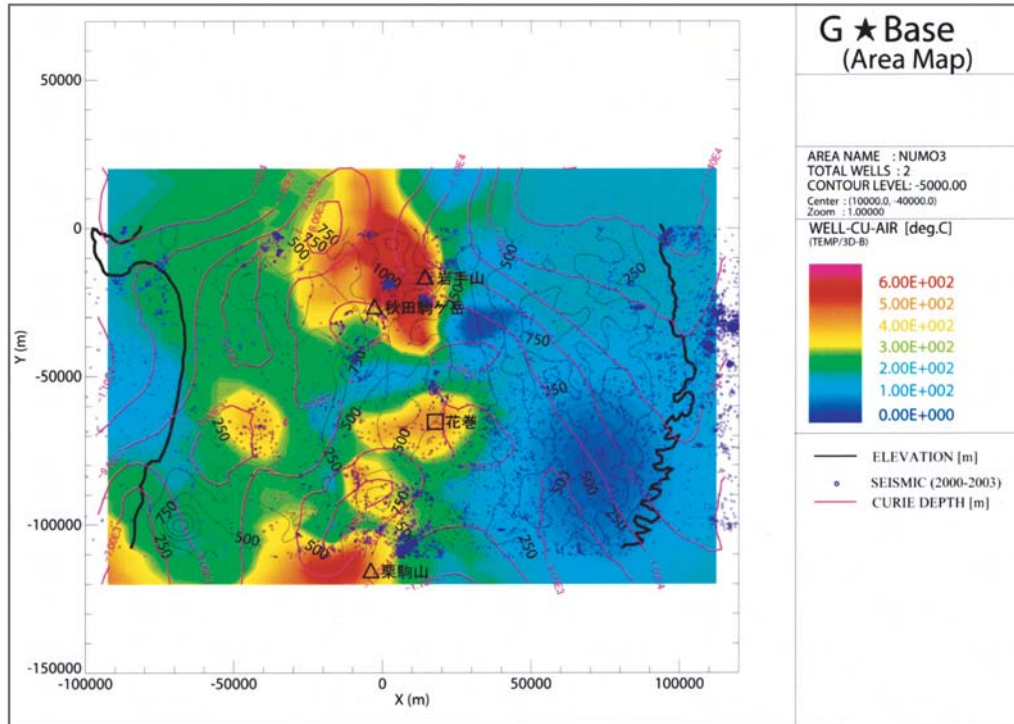
比抵抗、地形、震源分布及びキュリー点等温面深度分布を平面/断面図上で重合し、対比した。震源分布との相関を見るために、標高-5±10 km(いわば標高-15 km以浅)で発生した震源も投影されている。秋田駒ヶ岳北東方(葛根田地熱地域)と岩手山東方で発生した群発震源は、いずれも中比抵抗域で発生している。秋田駒ヶ岳東方5 km付近の浅部低比抵抗異常の原因は不明である。A-A'断面の中央部を拡大してみると、標高-20 km以浅の震源分布は例外が多いものの、全体的にはキュリー点深度面とほぼ調和している。また、秋田駒ヶ岳直下の標高-20 km付近には緩傾斜の低比抵抗層が存在し、その上方標高-10 km付近に震源が分布している。一方、岩手山直下の標高-40 km~-30 km付近には震源が垂直方向に分布している。この領域は周りに比べて若干低い中比抵抗域に対応している。

3.2.3 温度(標高-5 km)、地形、震源分布及びキュリー点等温面深度分布の対比

第5図と第6図に温度、地形、震源分布及びキュリー点等温面深度分布を平面図と断面図でそれぞれ重合し対比した。断面図にプロットした震源分布は、断面線の南北両側20 km以内で発生したものを投影している。平面図をみると、岩手山と栗駒山を結ぶ火山フロントのやや東側で比較的多くの地震が発生していることが読みとれる。一方、三陸海岸東方の震源は、太平洋プレートの沈み込みに関連した震源である。地下温度分布は、火山フロントを境に、前弧側が低く、背弧側が高くなっている。第6図のA-A'断面によれば、岩手山から秋田駒ヶ岳にかけて、地下温度が周辺より上昇していること、及び、それらに沿うように震源が垂直に分布している様子が読み取れる。

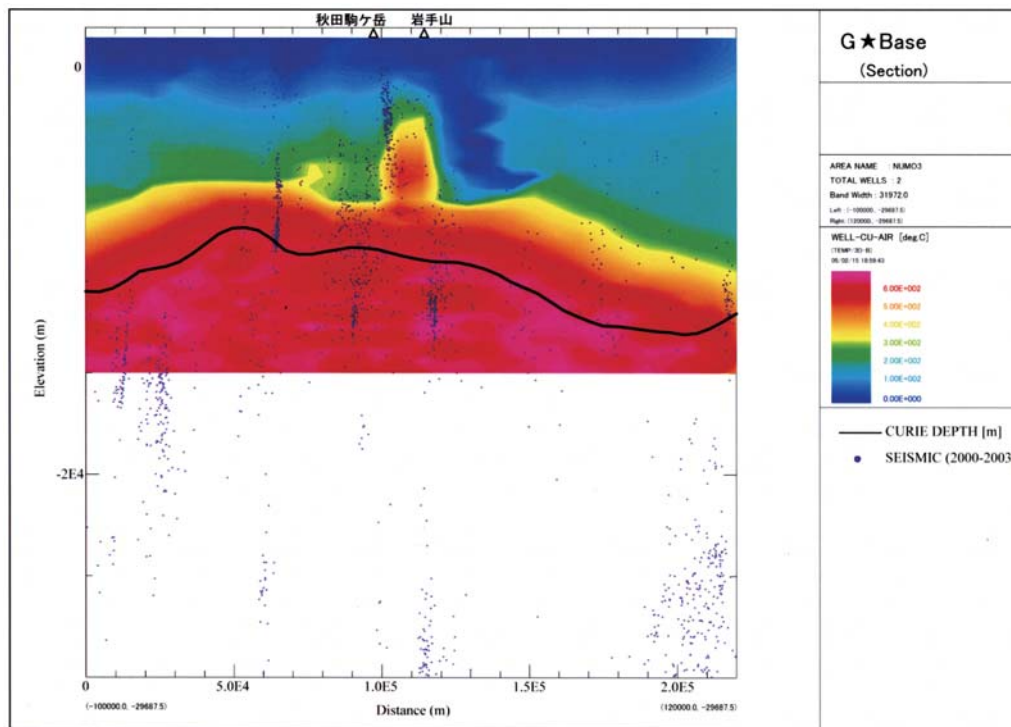
3.2.4 比抵抗、温度(標高-5 km)、地形及び震源分布の対比

比抵抗、温度、地形、震源分布を平面図及び断面図でそれぞれ重合し対比した。断面図にプロットした震源は、断面線の南北両側20 km以内に発生したものを投影している。全体的にみると、標高-5 kmレベルの高温域と比抵抗分布には相関は認められない。A-A'断



第5図 東北地方中北部の温度（標高-5 km レベル），地形，震源分布及びキュリー点等温面深度分布の対比（震源は表示標高の±10 km で発生したものをプロット）。

Fig. 5 Correlations among subsurface temperature (-5 km asl), topography, seismicity and Curie-point isothermal depths in middle northern part of Tohoku district. Blue dots are hypocenters occurred within the depth range of indicated level±10 km asl.



第6図 東北地方中北部の温度，地形，微小地震及びキュリー点等温面深度分布の対比（第1図A-A'断面）（震源は断面線の両側20 km の幅で発生したものを投影）。

Fig. 6 Correlations among subsurface temperature, topography, seismicity and Curie-point isothermal depth along A-A' cross section (Fig. 1) in middle northern part of Tohoku district. Blue dots are hypocenters occurred within 20 km width from the cross section.

面図では岩手山以西の高温域が比較的浅部まで広がっている領域では、秋田駒ヶ岳東方付近を除いて高比抵抗域が浅部まで広がっている。

3.2.5 比抵抗, 温度, P波速度構造及び地形の対比(第1図A-A'断面)

比抵抗, 温度, P波速度構造及び地形を断面図上で重合し対比した。ここでは, P波速度の平均速度からのズレを%で表現し, 暖色系では平均より遅く, 寒色系では平均より速い。標高-10 km以浅の温度分布とP波速度を比較すると, 岩手山を境に, 前弧側では温度が低くP波速度が速いものに対して, 背弧側では温度が高くP波速度が遅い傾向がある。

3.2.6 三次元分布図による対比

第7図に震源分布とキュリー点等温面深度分布を三次元分布図として重合し対比した。また, 震源と地下温度分布の分布についても, 同様に三次元分布図として重合し対比した。その結果によると, プレート上面の地震を除く地殻内地震の多くは, 背弧側ではキュリー点等温面(650℃)より下位に, 前弧側では上位に発生している傾向が認められる。これは地震を発生させる部分が背弧側では相対的に高温域で, 前弧側では低温域であることを示唆している。

3.2.7 特定地域の断面解析

東北地方の火山フロント沿いの熱異常を検討するために, 岩手山から花巻温泉を通り栗駒山東部へ抜ける南北断面(第1図B-B'断面)について各種データの相互比較を行った。火山フロントは, ほぼ岩手山と栗駒山を結ぶ線上に相当する。この断面位置では, 比抵抗データは調査・公表されていないため利用することはできない。この断面線に沿って, 温度と震源分布を比較したものを三次元分布図として第8図に示す。岩手山周辺では, 浅部に高温域が発達し, 標高-5 km以浅に群発震源が見られる。葛根田地熱発電所の事例を参考にすれば, この群発地震は熱水活動に関連している可能性がある。一方, 深部ではマグマ上昇に関連する可能性のある震源(-40~-30 km付近)が見られる。栗駒山付近においても同様な傾向が見られる。これらに対して, 第四紀火山のない花巻温泉付近では, 浅部に熱異常がみられるものの, その深部では第四紀火山付近で見られたような深い震源は認められない。

4. 東北地方北部のデータ処理・検討

4.1 収集データ

収集したデータは東北地方中北部と同様であるので, 収集データ毎の出典や処理方法は省略する。ただし, 本地域では比抵抗調査の公表データは, 現在のところ見当たらない。一方, 浅部の速度構造データが利用可能である(藤原ほか, 2005)。温泉分布データは, 高橋

ほか(2001)と阪口(2005)を, 坑井位置は矢野ほか(1999)を参照した。また, 駒澤ほか(2003)により全国レベルの重力基盤深度データが作成されているので, 本地域では, 重力基盤深度を比較データとしてとり上げて検討を試みた。

4.2 解析方法と可視化によるデータ対比

東北地方北部の登録データを, G★Baseの可視化機能を用いて二次元及び三次元の重ね合わせ表示を行った。東北地方北部で設定した調査対象域の地形, 坑井位置・源泉位置及び断面A-A'の位置は第2図に示すとおりである。データベース化と可視化の方法は3.2章と同様である。以下, 各種データを比較検討した結果について報告する。

4.2.1 地質図及び地形

第9図において, 地質図と地形(等高線図)を平面図上で重合した。

4.2.2 温度分布, キュリー点等温面深度分布及び震源分布の対比(標高-3,-6,-10 km)

第10図に, 温度分布(標高-6 km), キュリー点等温面深度分布及び震源分布を平面図上で重合し対比した。震源分布は各標高レベルの上下2 km区間で発生したものを投影した。キュリー点等温面深度は火山フロントの背弧側で標高-10 kmより浅く, 前弧側では急激に深くなり太平洋岸付近で標高-14 km程度となる。このような傾向は, 深部の温度構造を反映していると考えられる。

4.2.3 温度分布と重力基盤深度分布の対比(標高-3,-6,-10 km)

温度分布と重力基盤深度分布を平面図上で重合し対比した。標高-3 kmと-6 kmでは, 重力基盤深度が標高-0.75 kmより浅い部分で相対的に高温域となっている。一方, 重力基盤深度が標高-1.25 kmより深い部分で比較すると, 火山フロントの西側の津軽平野で相対的に高温(標高-3 kmで100℃程度)になり, 東側の上北平野では相対的に低温(標高-3 kmで100℃以下)となっている。これは重力基盤深度での温度に若干の差があることを示している。第11図の東西断面図においても, その様子を読み取ることができる。

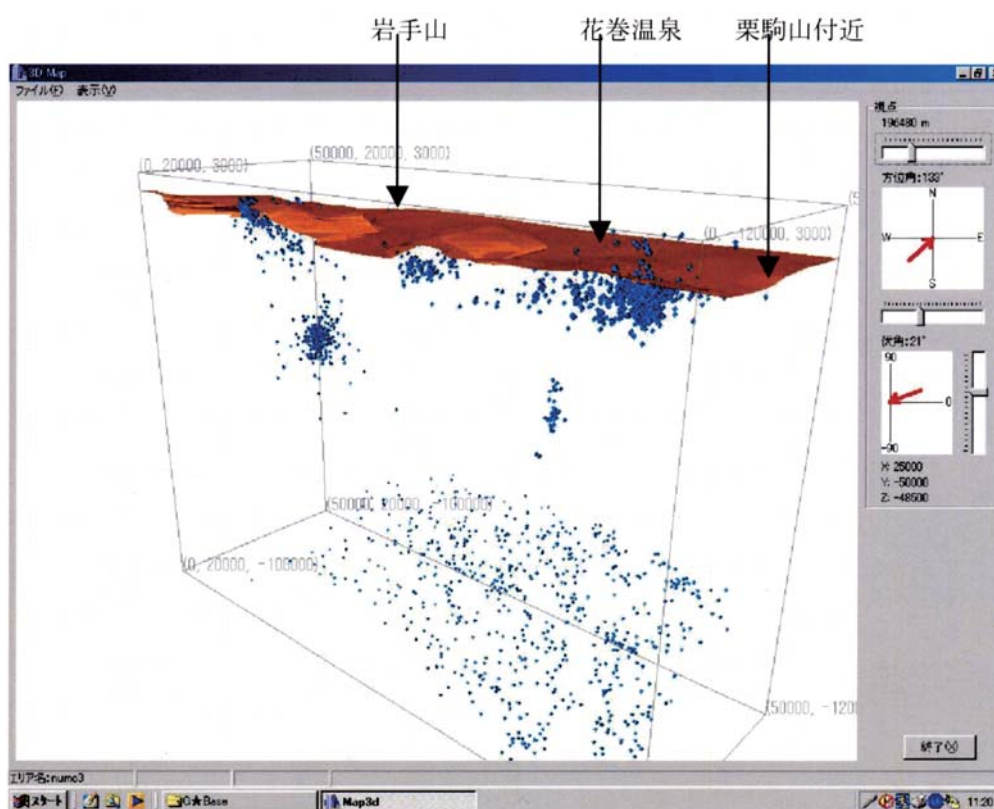
4.2.4 P波速度分布, 地形及び坑井位置の対比(標高-0.5,-1,-10,-40 km)

浅部P波速度分布, 地形及び坑井位置を平面図上で重合し対比した。標高-0.5 kmと-1 kmの浅部P波速度分布は, 八甲田山や白神山地で高速度であり, 津軽平野や上北平野で低速度である。一方, 深部P波速度減衰率は標高-10 kmで津軽平野と上北平野で顕著な減衰が認められる。標高-40 kmでは津軽平野や上北平野では減衰は認められず, 八甲田山南部で顕著な減衰が認められる。これらの減衰域は, マグマ領域が低速度となることから類推すると, マグマと同様な溶融部分を示



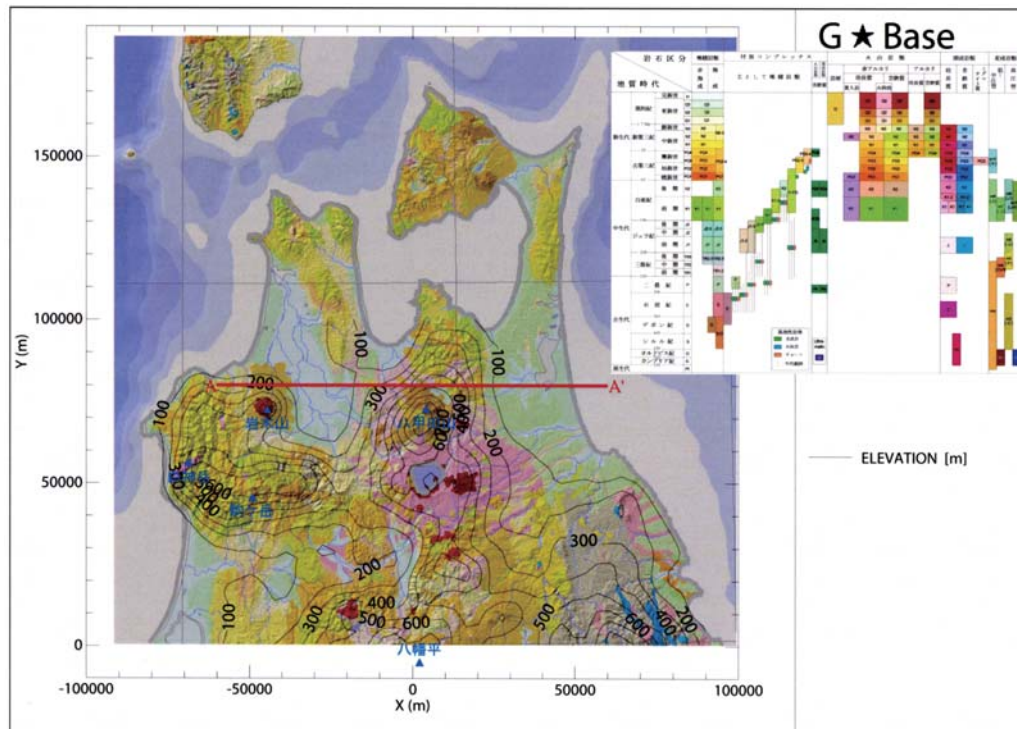
第 7 図 東北地方中北部の地下 200 km までの震源とキュリー点等温度面の三次元分布図（南東上方から）。

Fig. 7 3-D diagram showing seismicity and Curie-point isothermal depths distribution until -200 km asl in middle northern part of Tohoku district (downward view from southeast direction).



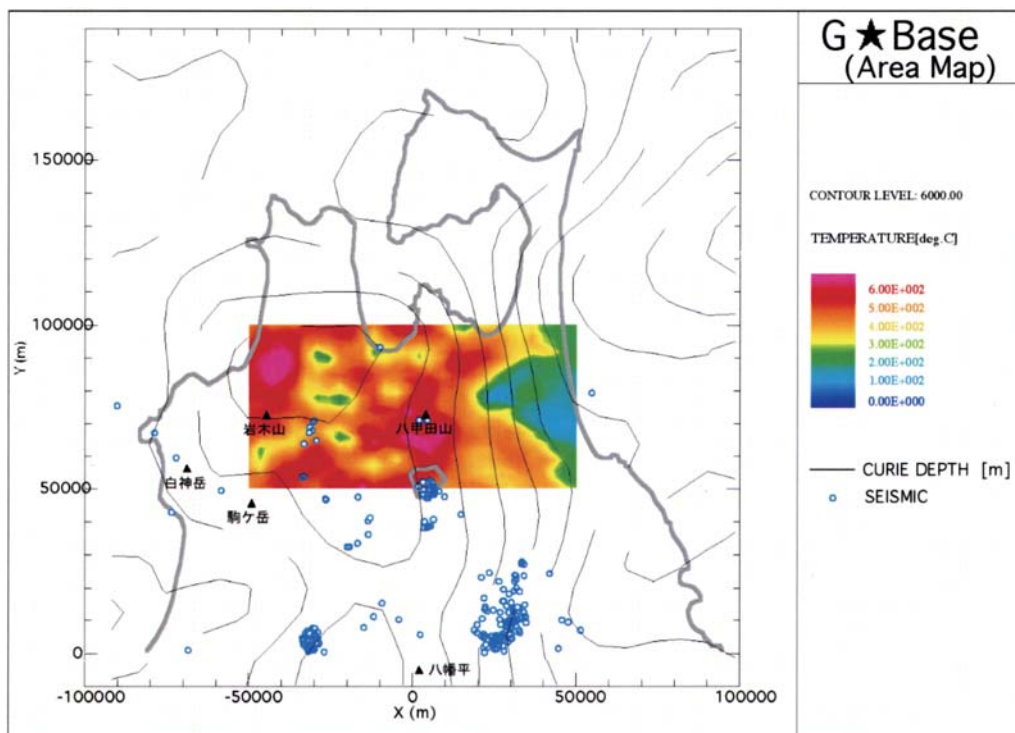
第 8 図 東北地方中北部の花巻温泉付近を通る南北断面（第 1 図 B-B' 断面）の地下 100 km までの三次元分布図（500 °C 等面温面と震源分布）（南西上方から）。

Fig. 8 3-D diagram showing 500 °C isotherm and seismicity distribution until -100 km asl along north-south cross section (B-B' cross section in Fig. 1) through the Hanamaki hot spring in middle northern part of Tohoku district. (downward view from southwest direction).



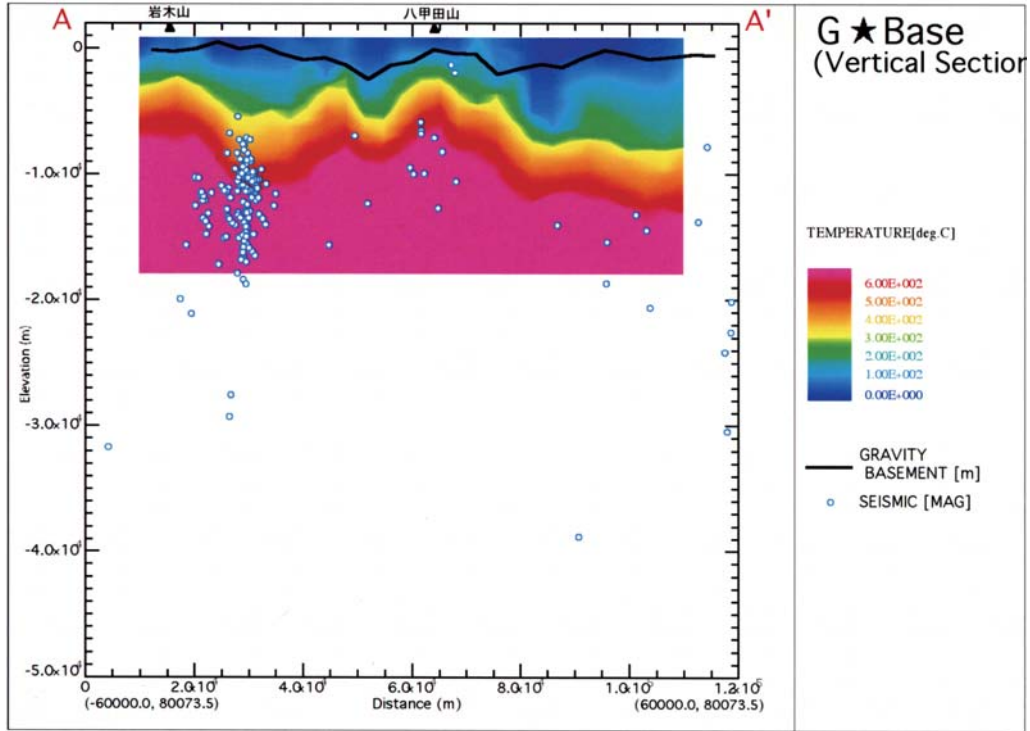
第9図 東北地方北部の地質図と地形との対比.

Fig. 9 Correlations between geology and topography in northern part of Tohoku district.



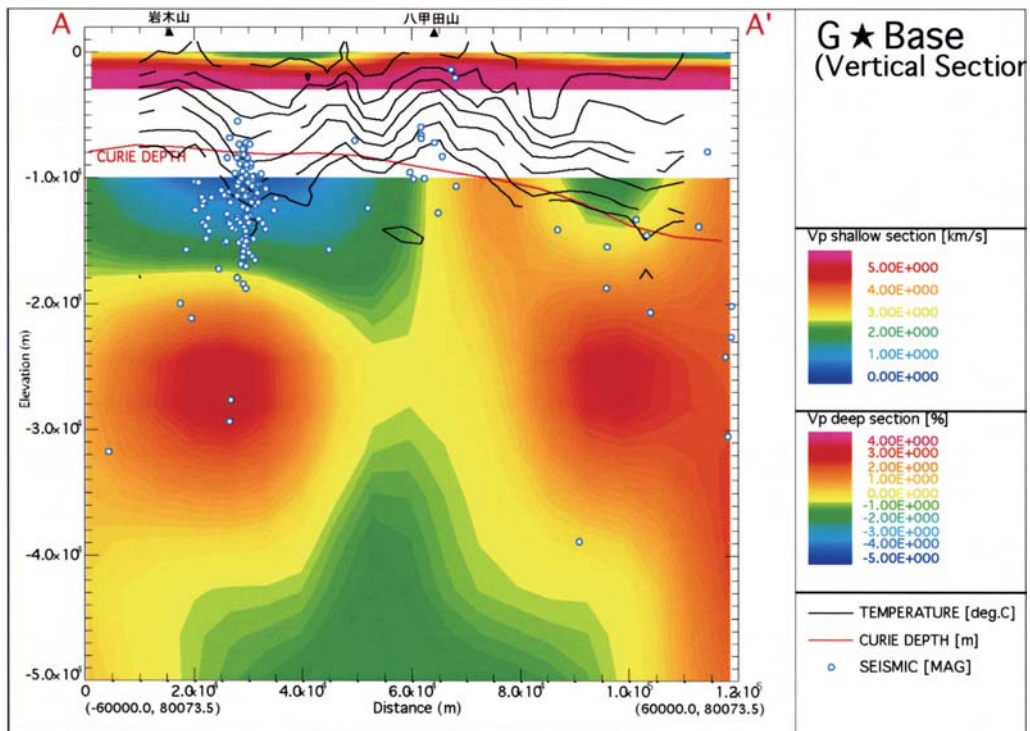
第10図 東北地方北部の温度(標高-6km), 震源分布及びキュリー点等温面深度分布の対比(震源は表示標高の±2kmで発生したものをプロット)。

Fig. 10 Correlations among subsurface temperature (-6 km asl), seismicity and Curie-point isothermal depths in northern part of Tohoku district. Blue dots are hypocenters occurred within the depth range of indicated level±2 km asl.



第 11 図 東北地方北部の温度，重力基盤深度及び震源分布の対比（第 2 図 A-A' 断面）（震源は断面線の両側 20 km の幅で発生したものを投影）。

Fig. 11 Correlations among subsurface temperature, gravity basement depth and seismicity along A-A' cross section (Fig. 2) in northern part of Tohoku district. Blue open circles are hypocenters occurred within 20 km width from the cross section.



第 12 図 東北地方北部の P 波速度分布，温度，キュリー点等温面深度及び震源分布の対比（第 2 図 A-A' 断面）。

Fig. 12 Correlation among P-wave velocity, subsurface temperature, Curie-point isothermal depth and seismicity along A-A' cross section (Fig. 2) in northern part of Tohoku district.

唆している可能性が考えられる。ここでは深部熱源を示唆するものとして解釈することとした。

4.2.5 P波速度分布, キュリー点等温面深度分布及び震源分布の対比(標高-0.5,-1,-10,-40 km)

P波速度分布, キュリー点等温面深度分布及び震源分布を平面図上で重合し対比した。標高-0.5 kmと-1 kmの浅部P波速度分布は, キュリー点等温面深度分布及び震源分布と相関が認められない。一方, 深部P波速度(標高-10 km)では減衰域と震源分布域とが相関している。特に津軽平野と八幡平東北方での群発地震域と良い相関が認められる。ただし, 上北平野の減衰域には群発地震は認められない。また, 深部P波速度(標高-40 km)では減衰域と震源分布域とは相関していない。

4.2.6 P波速度分布と重力基盤深度分布の対比(標高-0.5,-1,-10,-40 km)

P波速度分布と重力基盤深度分布を平面図上で重合し対比した。標高-0.5 kmと-1 kmの浅部P波速度分布は, 重力基盤深度と良い相関が認められる。重力基盤深度が浅い部分でP波速度が速く, 深い部分で遅くなっている。これは先第三系基盤岩類上面の深さと相関しているためである。一方, 深部P波速度の減衰率と浅部の重力基盤との間には, 相関は認められない。

4.2.7 重力基盤深度分布, 地形及び坑井・源泉位置の対比

重力基盤深度分布, 地形及び坑井・源泉位置を平面図上で重合し対比した。津軽平野では, 多くの源泉は重力基盤深度の浅い所から深い所への境界部付近に位置している。

4.2.8 重力基盤深度分布, キュリー点等温面深度分布及び震源分布の対比

重力基盤深度分布, キュリー点等温面深度分布及び震源分布を平面図上で重合し対比した。この図面では, 対象エリアで発生した地震の内, 震源深度が標高-50 km以浅のものを投影した。重力基盤深度の深い津軽平野や上北平野では, 自然地震は全般的に少ない。群発地震は岩木山東方, 十和田湖周辺, 八幡平北東方に発生している。

4.2.9 地震基盤深度, 地形及び坑井位置の対比

地震基盤深度とは, 地震波速度から推定される先第三系基盤岩深度のことである(以下, 地震基盤深度と略記)。地震基盤深度分布, 地形及び坑井位置を平面図上で重合し対比した。その基盤岩深度は, 太平洋岸より西側の陸域全域及び日本海で浅く, 太平洋東方に向かって深くなっている。

4.2.10 地震基盤深度分布, キュリー点等温面深度分布及び震源分布の対比

地震基盤深度分布, キュリー点等温面深度分布及び震源分布を平面図上で重合し対比した。この図面では, 対象エリアで発生したすべての震源分布を投影した。特に目立った相関は認められない。

4.2.11 温度分布, 重力基盤深度分布及び震源分布の対比(第2図A-A'断面)

第11図で, 温度分布, 重力基盤深度分布及び震源分布を断面図上で重合し対比した。震源分布は断面線の両側20 kmの範囲で発生したものを投影した。全体的に見ると, 八甲田山北方と岩木山北方の下部で高温域が盛り上がり, 重力基盤深度も浅くなっている。八甲田山北方の東西両側では重力基盤が落ち込んでいて, ここは低温域となっている。しかしながら, これに対応する津軽平野と上北平野では多数の温泉が分布している。その理由は地下浅部に存在する帽岩のためと考えられる。

4.2.12 温度分布, 地震基盤深度分布及び震源分布の対比(第2図A-A'断面)

温度分布, 地震基盤深度分布及び震源分布を断面図上で重合し対比した。震源分布は断面線の両側20 kmの範囲で発生したものを投影した。地震基盤は, 岩木山北方と八甲田山北方周辺で浅く, 津軽平野と上北平野で深くなっている。これは広域的な温度分布とほぼ調和的である。また, 震源分布においては岩木山東方で群発地震が認められ, 震源が標高-5 km~-20 kmにわたり垂直に連続して分布している。これは標高-10 km付近の深部熱源からの深部流体の上昇通路を示唆している可能性が考えられる。

4.2.13 P波速度分布, 温度分布, キュリー点等温面深度及び震源分布の対比(第2図A-A'断面)

第12図で, P波速度分布, 温度分布, キュリー点等温面深度及び震源分布を断面図上で重合し対比した。震源分布は断面線の両側20 kmの範囲で発生したものを投影した。P波速度の平均速度からのズレを%で表現し, 平均より速い部分を暖色系で, 平均より遅い部分を寒色系で示した。

標高-3 km以浅の分布を見ると, 岩木山北方と八甲田山北方の間に位置する津軽平野では, 両山体付近よりも温度が低く, 表層部に低速度層が存在する。この図面には表現されていないが, 温泉も多数存在している。この低速度層は津軽平野の第三系上部-第四系の堆積岩を反映しているもので, この地層が帽岩となってその下位に温泉貯留層を形成していると考えられる。同様の現象は上北平野でも認められる。ただし, 泉温は津軽平野で60℃前後に対して上北平野では45℃前後である。

一方, 標高-10 km以深のP波速度の減衰分布図では, 岩木山東方の標高-5 km~-20 kmに発生している震源域が, 減衰の大きい低速度領域に対応している。逆に, 高速度領域では自然地震はほとんど観測されていない。これは標高-10 km付近に深部流体が存在し, それが地震発生と関わっていることを示唆している。この推定深部流体が深部熱源になり得るかどうかは, 現在の所,

浅部での熱異常との関わりが十分解析できないため、不明である。

4.2.14 P波速度分布、重力基盤深度分布及び震源分布の対比(第2図A-A'断面)

P波速度分布、重力基盤深度分布及び震源分布を断面図上で重合し対比した。震源分布は断面線の両側20 kmの範囲で発生したものを投影した。重力基盤深度と浅部P波速度構造は大局的には調和的であるものの、津軽平野や上北平野では必ずしも一致していない。その原因はデータの精度によるものかもしれない。重力基盤深度は基盤岩類を密度 2.67 g/cm^3 として、またP波速度計算は 5.8 km/sec として計算しているので、両者は理論的には調和的になるはずと思われる。

4.2.15 P波速度分布、地震基盤深度分布及び震源分布の対比(第2図A-A'断面)

P波速度分布、地震基盤深度分布及び震源分布を断面図上で重合し対比した。震源分布は断面線の両側20 kmの範囲で発生したものを投影した。地震基盤深度と浅部P波速度構造は大局的には調和的である。

4.2.16 三次元分布図による対比

震源分布とキュリー点等温面深度分布を重合し対比した。震源分布と地下温度分布を重合し対比した。温度については、キュリー点温度に近い 500°C 以上の領域をボリュームで表現した。震源分布と 350°C の地下温度分布を重合し対比した。

上部地殻内地震とプレート沈み込み上面の地震とが、明瞭に区分される。地下温度との関連では、震源の下限は不明瞭であるが、A-A'断面付近では約20 km前後であると思われる。ただし、八甲田山周辺の下部では12~13 km程度と浅くなる傾向が認められる。一方、震源分布の上面深度は、データ数は少ないが 350°C 付近に対応しそうである。

4.2.17 地熱有望地域と標高-10 kmレベルP波速度減衰率との相関

第13図に地熱有望地域と標高-10 kmレベルP波速度減衰率とを重合した図面を示す。この図面から、多くの地熱有望地域が標高-10 kmレベルでのP波速度減衰域(減衰率3~5%)に対応していることが読み取れる。既に述べたようにP波速度減衰域はマグマ溜りと同様の兆候なので、深部での熱源を示唆している可能性がある。一方、地熱有望地域は火山地域、非火山地域を問わず、温泉などの地表地熱兆候を参照して抽出されたものである。したがって、両者は地表と標高-10 kmレベルと大きく離れているものの、何らかの相関があることを示唆している。特に注目すべき点は、仙台平野の火山フロントの前弧側でのP波速度減衰域の存在である。今後、その実態を把握するためには、より詳細な検討が必要である。

5. 中国・四国地方のデータ処理・検討

5.1 収集データ

収集したデータは地質図、地温データ、標高データ、キュリー点等温面深度分布、MT法による比抵抗分布、震源分布、P波速度分布である。項目毎の出典とデータ処理方法は3.1章と同様である。

震源データは、1998年1月~2003年12月までのデータ(楠瀬ほか、2005)を利用した。比抵抗データは、兵庫県では笠谷ほか(2002)、四国東部では山口ほか(1997)、島根県及び四国東部では飯尾ほか(2000)があり、それぞれ深度25~200 kmまでの比抵抗2次元解析結果が示されている。大志万(2002)は上記3地域を含めた広域な比抵抗構造を解析している。これらの比抵抗解析結果を数値化し、三次元データ化した。しかし、個々の調査地域が相互に離れているので、島根県、兵庫県、四国の3地域に分けて比抵抗三次元分布図を作成した。温泉データは、金原・長谷川編(2005)と阪口(2005)を参照した。

5.2 データ重合と対比

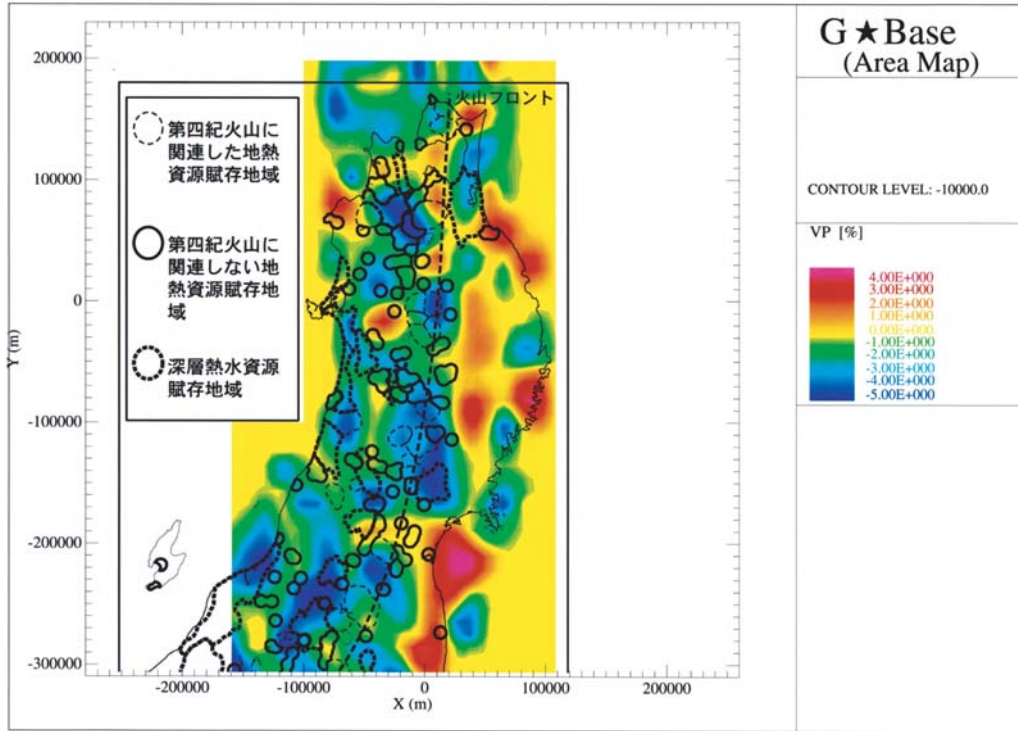
これらをG★Baseの可視化機能を用いて、3.1章と同様に二次元及び三次元の重ね合わせ表示を行った(第3図参照)。

5.2.1 地質図、震源分布及びキュリー点等温面深度分布の対比

第14図に地質図と震源分布及びキュリー点等温面深度分布を平面図で重合し対比した。四国山地・中国山地でキュリー点深度が比較的浅くなり、瀬戸内海に沿って深くなる傾向が認められる。前者は両山地を構成する苦鉄質岩と磁鉄鉱系花崗岩の影響と考えられ、後者は領家帯のチタン鉄鉱系花崗岩の影響と考えられる。したがって、中国・四国地方のキュリー点深度は地下温度の他、構成岩石の磁化率の違いをも反映している可能性が考えられる。

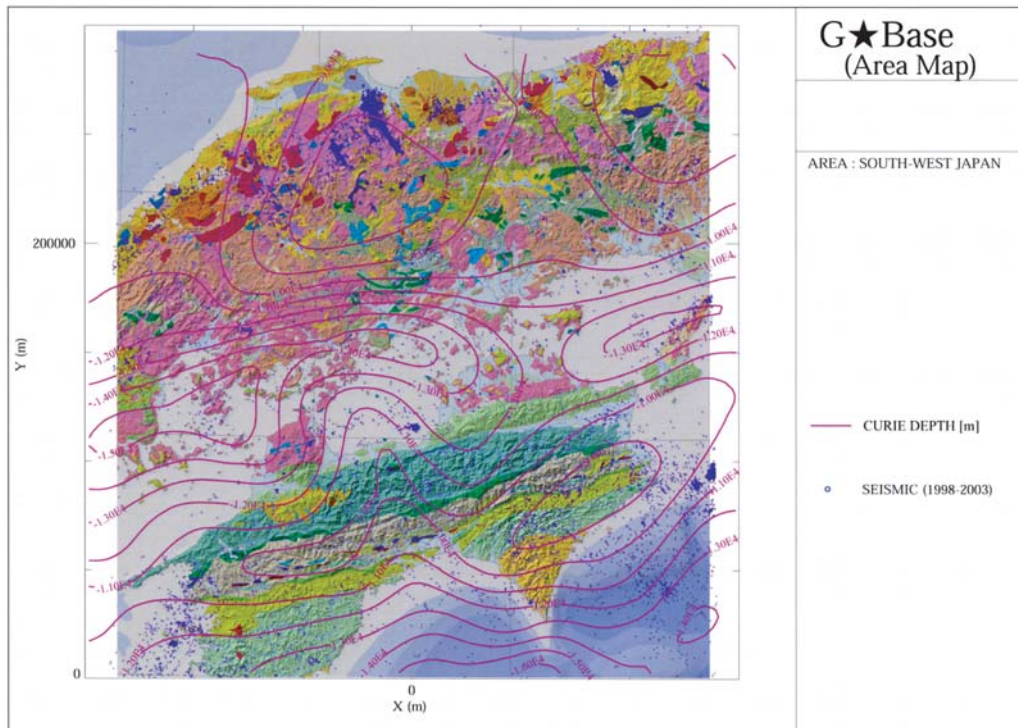
5.2.2 比抵抗(標高-5 km)、地形、震源分布及びキュリー点等温面深度分布の対比

比抵抗、地形、震源分布及びキュリー点等温面深度分布を平面図と断面図で重合し対比した。平面図には、比抵抗をプロットした標高-5 kmの±10 kmの範囲で発生した震源を投影している。第15図は平面図に、第16図は第3図のA-A'断面に投影したものである。断面図に示した震源分布は、断面線の両側20 km以内に発生したものを投影している。平面図では各データ間の関連性は明瞭には読みとれない。一方、A-A'断面図では、キュリー点深度と自然地震発生域が全体的に調和していることが判る。前節で述べた地域による構成岩石の磁化率の違いによるキュリー点深度の違いを考慮すると、キュリー点深度と自然地震発生域との調和性



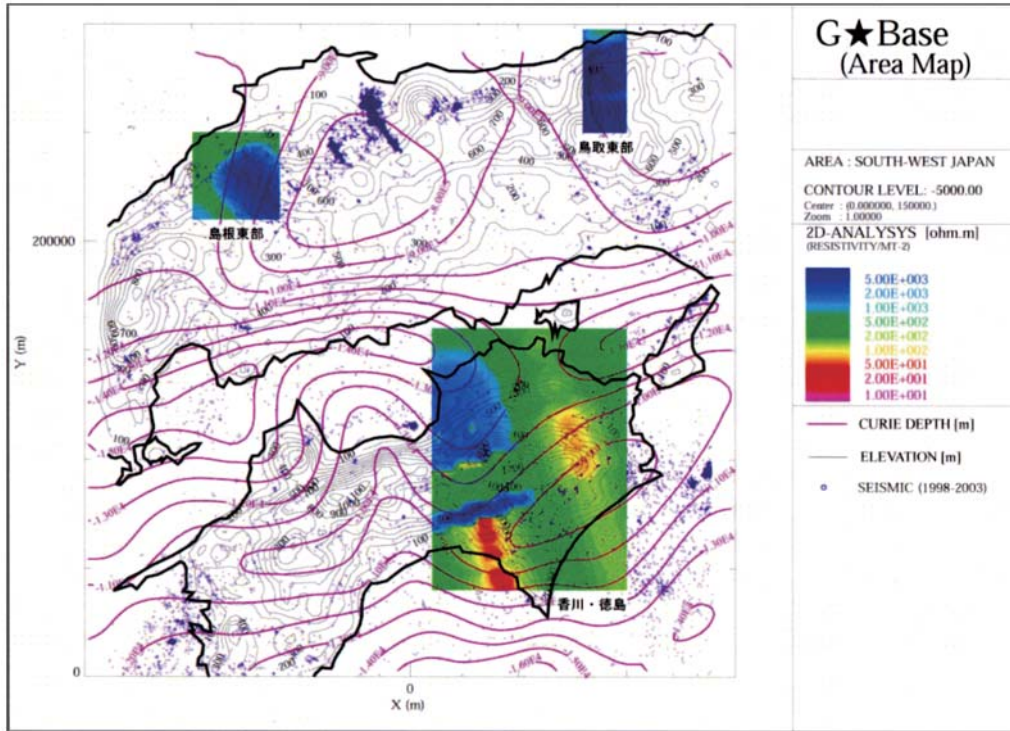
第13図 東北地方全域の地熱有望地域と標高-10 kmレベルのP波速度減衰率との対比.

Fig. 13 Correlation between promising geothermal areas and P-wave velocity distribution at -10 km asl in the whole Tohoku district.



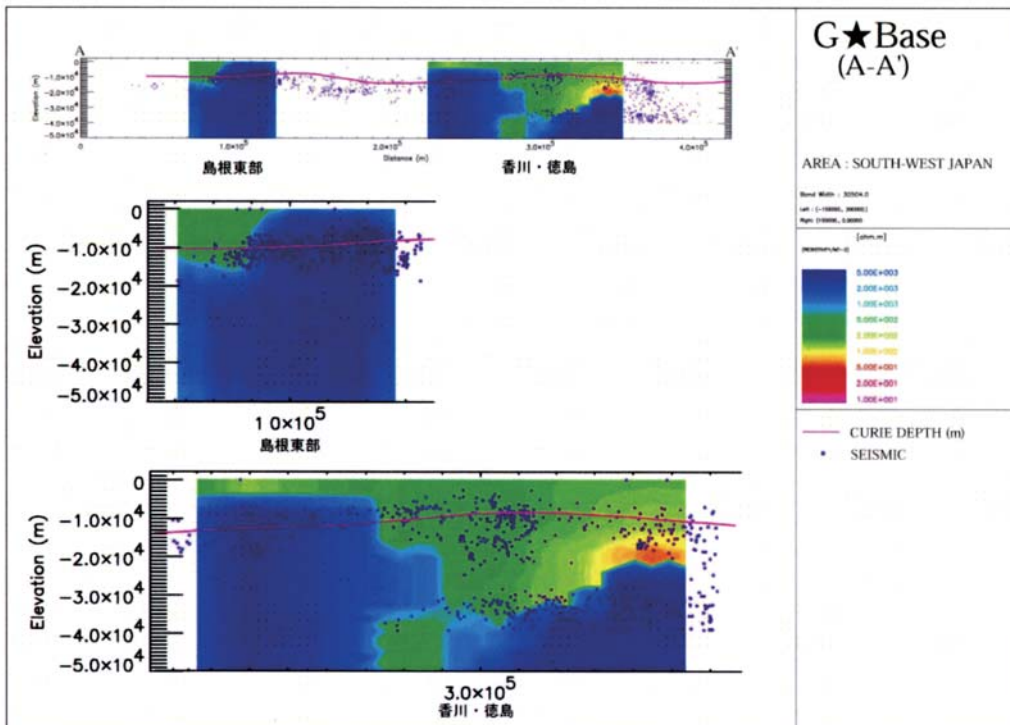
第14図 中国・四国地方の地質図、震源分布、キュリー点等温面深度分布の対比(震源は標高0～20 kmレベルで発生したものをプロット)。

Fig. 14 Correlations among geology, seismicity and Curie point isothermal depths in Chugoku/Shikoku district (Hypocenters occurred from 0 to -20 km asl are plotted).



第15図 中国・四国地方の比抵抗（標高-5 km），地形，震源分布及びキュリー点等温面深度分布の対比（震源は標高0～-15 km レベルで発生したものをプロット）。

Fig. 15 Correlations among subsurface temperature (-5 km asl), topography, seismicity and Curie-point isothermal depths in Chugoku/Shikoku district. Blue dots are hypocenters occurred from 0 to -15 km asl.



第16図 中国・四国地方の比抵抗（標高-5 km），地形，震源分布及びキュリー点等温面深度分布の対比（第3図A-A'断面と部分拡大図）（震源は断面線の両側20 kmの幅で発生したものを投影。）

Fig. 16 Correlations among subsurface temperature (-5 km asl), topography, seismicity and Curie-point isothermal depths in Chugoku/Shikoku district (A-A' cross section in Fig. 3 and partly enlarged drawings)(Location of epicenters are projected on the cross section from both 20 km-width intervals).

は、より一層良くなるように思われる。

5.2.3 温度(標高-5 km),地形,震源分布及びキュリー点等温面深度分布の対比

第17図と第18図に温度,地形,震源分布及びキュリー点等温面深度分布を平面図と断面図で重合し対比した。震源のプロットについては,断面線の両側20 km以内に発生したものを投影している。この断面図によれば,高温域では震源は比較的浅部まで広がって分布している傾向がある。一方,四国南方の深い震源はプレートの沈み込みに関わるものである。

5.2.4 比抵抗,温度(標高-5 km),地形及び震源分布の対比

比抵抗,温度,地形,震源分布を平面図と断面図で重合し対比した。震源のプロットについては,平面図では標高-20 km以浅のものを,断面図では断面線の両側20 km以内に発生したものを投影している。平面図では,これらデータ間の関連は明瞭には読みとれない。一方,A-A'断面では,日本海側の三瓶山周辺で,高比抵抗部が浅部まで広がり,高温域も比較的浅くなっている傾向が読みとれる。同様の傾向は,鳥取東部でも認められる。

5.2.5 3次元分布図による対比

第19図に震源分布とキュリー点等温面深度分布を重合し対比した。これによると,地殻内地震の多くはキュリー点等温面の上下部に発生し,フィリピン海プレートのもぐり込みによる深発地震面はゆるく傾斜していることを示している。

5.2.6 特定地域の断面解析(第3図B-B'断面)

中国・四国地方については,道後温泉付近を南北に横切る側線(第3図のB-B'断面)において,温度と震源分布を平面図と断面図(第20図)上で比較した。断面図では道後温泉付近で高温域の上面が比較的浅く,また,その下方で自然地震がまばらに発生している。発生している地震も震源が20 km以浅で,中国山地や瀬戸内海での震源と比較すると相対的に浅い。日本海側の三瓶山周辺では,道後温泉周辺と同様な傾向が,より明瞭に表れている。

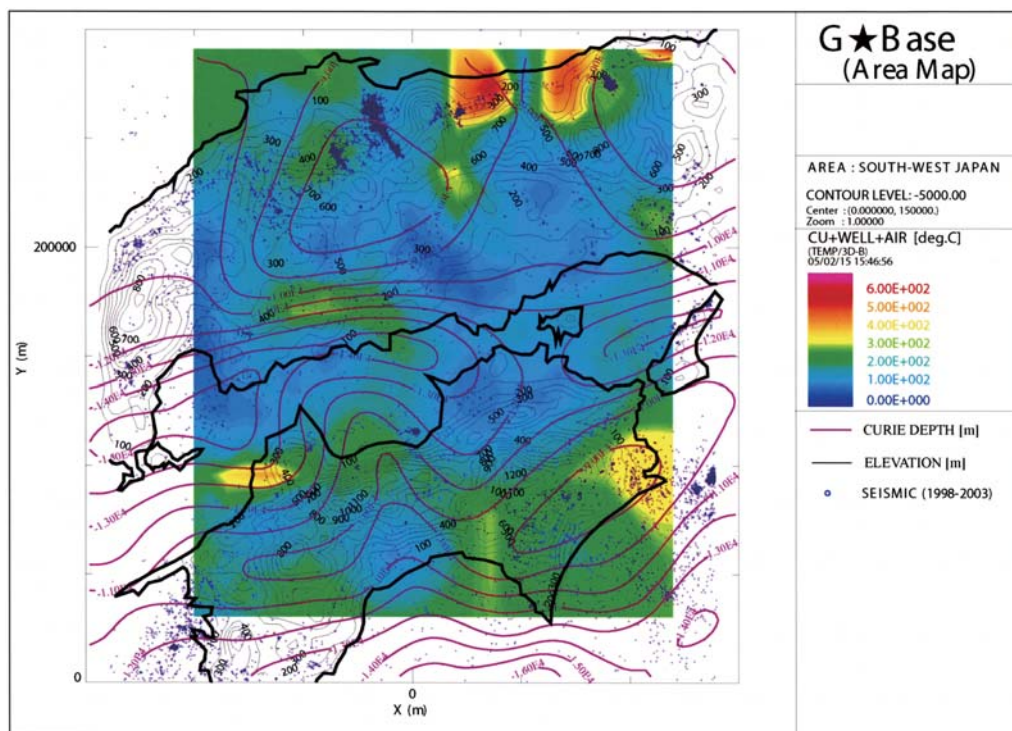
6. 結 論

わが国の熱・熱水の高温異常地域の特性や成因について,これまで検討してきた結果を,以下に箇条書きで記述する。

- 1) わが国の高温異常地域の特性と成因を検討するために,文献調査に基づいて各種調査・探査データを収集し,それらのデータを二次元,三次元で重ね合わせて可視化した。
- 2) 全国のデータを収集することは時間的にも費用的にも困難であり,また既存データも地域ごとに粗密が

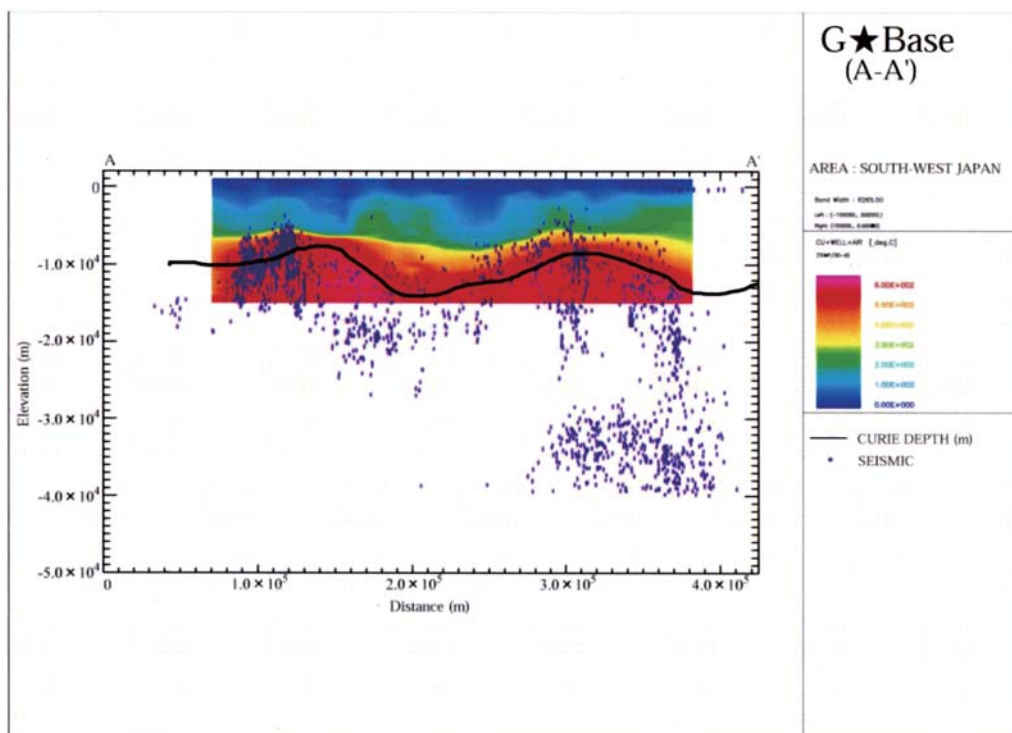
ある。そこでモデル地域として,日本の典型的なテクトニクス環境下にあり,既存データも相対的に多い地域を選択することとした。具体的には典型的なプレートの沈み込み帯で短縮型島弧である東北日本弧(北海道からフォッサマグナまで)のうちの東北地方を,また,準大陸縁の島弧としての西南日本弧(フォッサマグナから琉球弧まで)のうちの中国・四国地方を取り上げた。ただし,西南日本弧の西半分九州・琉球弧は典型的な伸張型島弧であるので,九州については別個に今後検討する必要があるとされている。

- 3) 東北地方では中央部,中北部,北部の3箇所での東西断面を検討した。中国・四国地方では中央部の南北断面を検討した。
- 4) 地下温度分布は坑井の地温勾配から外挿したが,坑井の分布に偏りがあることや深部までそのまま外挿すると過大評価となるため,キュリー点等温面を650℃と仮定して深部温度を推定した。
- 5) 島弧を横断するような広域規模で深部(約2~3 km以深)の地下温度分布を見ると,火山フロントより背弧側では高温となり,前弧側で低温となる。また,背弧側と前弧側でそれぞれの山地と低地での地下深部の温度を比較してみると,概して山地で高温となり低地で低温となる傾向が認められる。このような深部の広域的な温度分布は重力基盤深度分布,地震基盤深度分布,キュリー点深度等温面分布,浅部P波速度と調和的である。
- 6) 一方,浅部(約2~3 km以浅)では,第四紀火山地域と低地域で相対的に高温となる。標高と気温との相関性を考慮すると,山地域での熱異常が低地域よりも5~10℃ほど過小評価されることとなるが,全体的な傾向を把握する上では問題ない。低地域で高温となる理由は,主に熱水対流系に対する帽岩の存在によるものと考えられる。これらは浅部の比抵抗分布や浅部P波速度構造と調和的である。
- 7) 重力基盤深度と地震基盤深度は,おおよそ先第三系基盤岩類上面に対応すると考えられる。これ以浅では,一般的に対流系が発達している。その対流の形状を支配するのは透水係数分布である。多くの地域では新第三系上部-第四系下部の難透水層が対流系の帽岩として重要な役割を果たしている。東北地方の低地と中国・四国地方の背弧側低地にはこの帽岩の発達に認められるが,中国・四国地方の前弧側低地には現時点では広域的な帽岩は認識できない。一方,先第三系基盤岩類中では基本的には熱伝導が卓越する領域で考えられる。
- 8) 比抵抗データは限られた地域のみで利用可能であるが,第四紀火山地域では比抵抗基盤が周辺部より浅く,先第三系基盤岩が隆起していることと調和的な



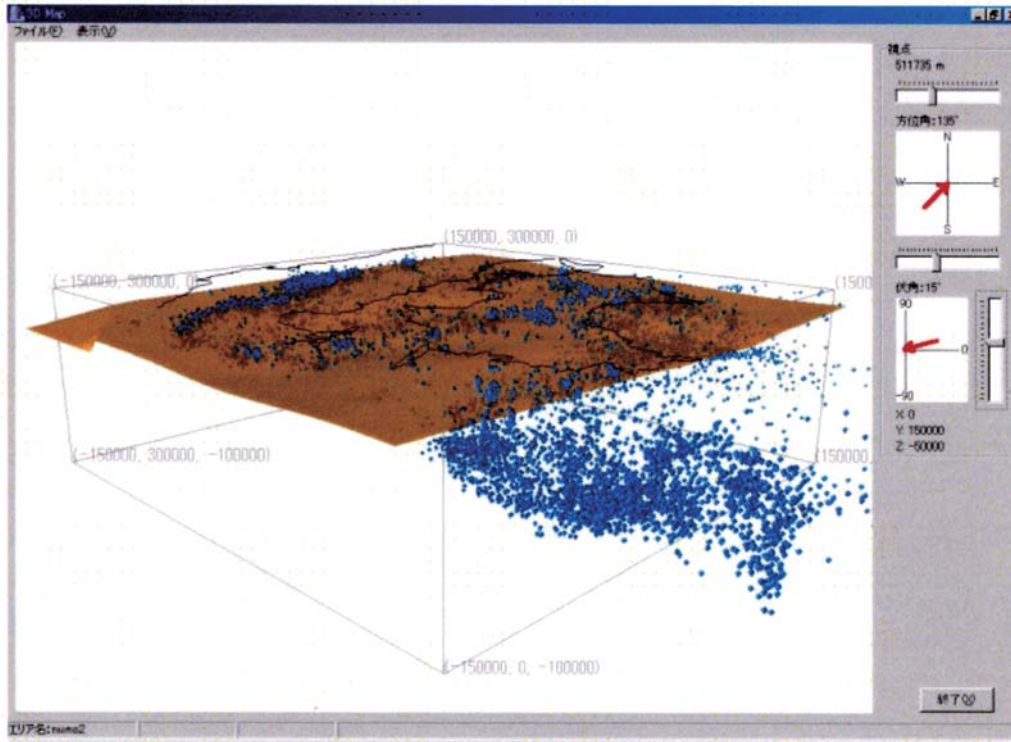
第 17 図 中国・四国地方の温度（標高-5 km）、地形、震源分布及びキュリー点等温面深度分布の対比（震源は標高 0 ～ -15 km レベルで発生したものをプロット）。

Fig. 17 Correlations among subsurface temperature (-5km asl), topography, seismicity and Curie-point isothermal depths in Chugoku/Shikoku district. Blue dots are hypocenters occurred from 0 to -15 km asl.



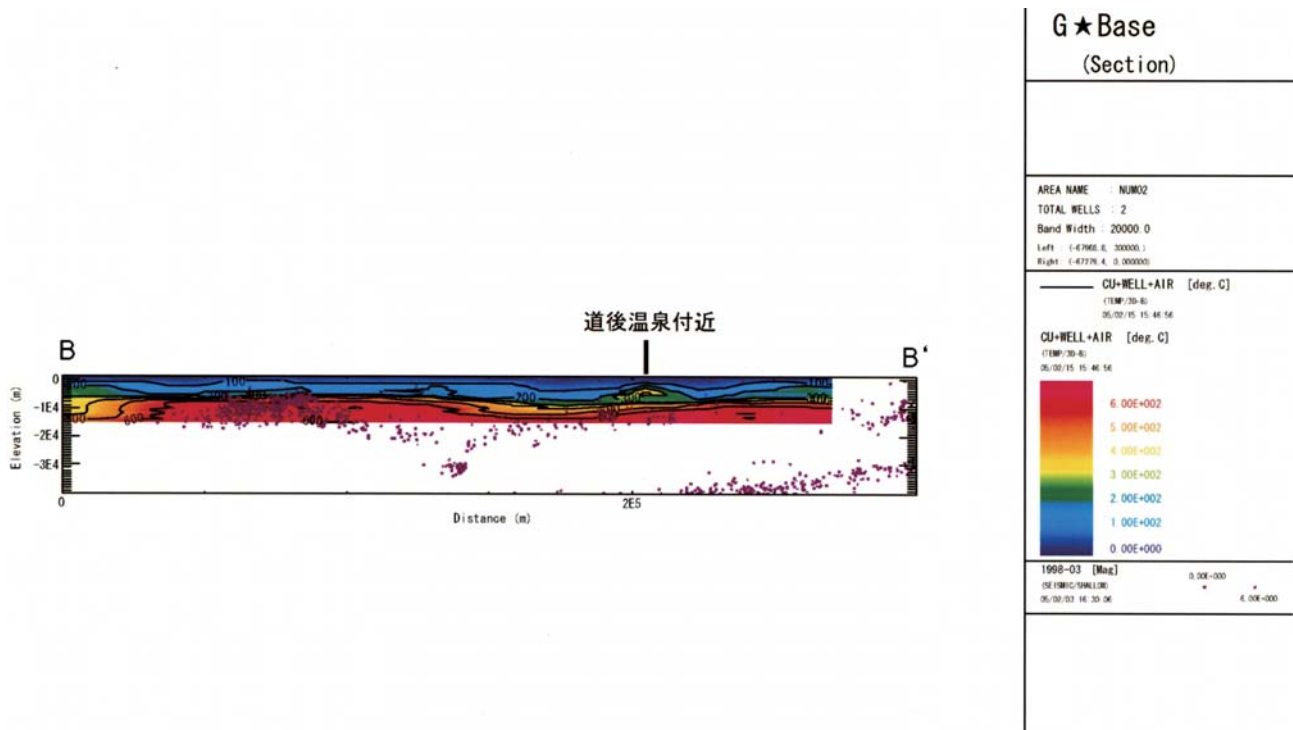
第 18 図 中国・四国地方の温度、震源分布及びキュリー点等温面深度分布の対比（第 3 図 A-A' 断面）（震源は断面線の両側 20 km の幅で発生したものを投影）。

Fig. 18 Correlations among subsurface temperature, seismicity and Curie-point isothermal depth along A-A' cross section (Fig. 3) in Chugoku/Shikoku district (Locations of epicenters are projected on the cross section from both 20 km-width intervals).



第 19 図 中国・四国地方の地下 100 km までの震源とキュリー点等温度面の三次元分布図（南西上方から）。

Fig. 19 3-D diagram showing hypocenters and Curie-point isothermal depths distributions until -100 km asl in Chugoku/Shikoku district (downward view from southwest direction).



第 20 図 中国・四国地方の道後温泉を通る南北断面図（第 3 図 B-B' 断面）での温度と震源分布との対比。（震源は断面線の両側 20 km の幅で発生したものを投影）。

Fig. 20 Correlation between subsurface temperature and seismicity along north-south cross section (B-B' cross section in Fig. 3) through the Dogo hot spring in Chugoku/Shikoku district (Location of hypocenters are projected on the cross section from both 20 km-width intervals).

結果を示している。また、低比抵抗域は第四紀火山地域の深部と非火山地域の浅部に認められる。前者は高温で地震活動の活発な地域に対応し、後者は新第三系上部-第四系下部の細粒堆積層(難透水層)に対応する。

- 9) 震源分布から地殻内地震とプレート沈み込み上面の地震とは明瞭に区分される。
- 10) 地殻内震源分布は東北地方ではキュリー点等温面深度の上下周辺に多いのに対して、中国・四国地方ではほとんどがキュリー点等温面深度以深に存在している。その原因は不明である。
- 11) 震源分布と温度との関連は、地熱地域では地震の下限が400℃前後の等温線と対比できると考えられている。しかし島弧全体としてみると、地殻内地震は地下数kmから20~30kmまで幅広く発生している。震源分布が垂直方向に伸びた群発地震も多い。したがって島弧全体としては震源下限を明瞭に規定することは困難である。ただし、地域を限ってみると地殻内地震の震源分布の上限と下限が推定できる地域も存在する。
- 12) 標高-10kmレベルでの深部P波速度減衰域は東北地方北部の津軽平野や上北平野に認められ、自然地震の発生している地域とほぼ一致している。これは第四紀火山下部のマグマ溜りでP波速度減衰が生じることから類推すると、深部でのマグマ発生を示唆している。また、岩木山東方で群発地震が認められ、震源が標高-5km~-20kmにわたり垂直に連続して分布している。これは標高-10km付近の深部マグマからの深部流体が上昇している通路を示唆している可能性が考えられる。しかしながら、このような深部流体が浅部の津軽平野や上北平野の温泉と直接関連しているデータは得られていない。むしろ、地表付近での帽岩の役割が温泉の成因に深く関わっていると考えられる。
- 13) 東北地方の標高-10kmレベルでの深部P波速度減衰域は、火山フロントの背弧側に広く認められる。日本海沿いには秋田平野、庄内平野、瀬波、新潟平野に認められる。一方、火山フロントの前弧側で例外的に顕著な減衰が認められる地域は仙台平野である。弱い減衰域は上北平野、三陸海岸沿い、いわき沖に認められる。
- 14) 東北地方南部の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。キュリー点等温面深度が広範にわたって地下8km以浅と浅い。また、深度10kmのP波速度の減衰が広く認められる。前述した津軽平野や上北平野とは異なり、この地域は背弧側の非火山性山地である。したがって、これらの地域の高温泉は帽岩によって形成されたものではなく、深部からの高熱流量(高い地温勾配)によっ

て形成されたと考えられる。

- 15) 東北地方太平洋岸の常磐湯本や五浦では60℃前後の温泉が局所的に分布している。このような局所的な分布形態は、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。四国の道後温泉も同様な成因を考えることができる。一方、近畿地方の本宮や有馬の高温泉(沸騰泉)は深部断裂以外に貫入岩のような熱源が必要と考えられる。

7. 今後の課題

モデル地域として、東日本弧を代表して東北地方中北部と北部を、西日本弧を代表して中国・四国を選択した。これによって日本列島の特徴的な熱構造をおおよそ把握できた。しかしながら、日本列島全体の広域的な熱異常の分布をより網羅的に把握するためには、以下の地域の検討が望まれる。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。これらの地域の検討を加えることで、日本列島全体の熱的特徴をより網羅的に把握することが可能となる。一方、調査地区選定後に実施される概要調査段階では、前述の全国規模の熱構造を考慮した上での概要地区固有の熱構造の把握が課題となる。

2003~2005年度の文献調査とそれらのデータの重合・可視化によって、浅部の対流域と深部の熱源分布域の概要を把握できた。これらの検討は広域規模かつ平衡状態の熱・熱水の分布状況の把握であった。一般的には、浅部の対流域はより短期的な影響予測に関連し、深部の熱源分布はより長期的な影響予測に関連すると考えられる。地層処分施設は地下300m以深と想定していることから、短期的な将来予測としては施設の掘削に伴う浅部の対流への影響評価が重要な課題となる。一方、深部での熱源分布については、より精度を上げた調査を行う必要がある。以下、概要調査地区での主な検討課題を列記する。

- ・周辺域での温泉水や地下水のくみ上げの影響評価
- ・坑井試験やトレーサー試験による透水係数測定
- ・帽岩と見なした地層の透水係数測定
- ・対流している流体の年代測定
- ・透水性分布を明らかにさせるための各種物理探査
- ・海水準面変動や地形変動による天水浸透への影響評価
- ・対流している流体の化学性状の検討
- ・岩石水反応の検討
- ・変質帯の性状や分布の検討
- ・震源分布や地震波速度構造分布(P波、S波両方)

の検討

- ・いわきのような地域での深部断裂の存在の有無の検討
- ・有馬温泉や本宮温泉のような高温の地域では、熱源となり得る貫入岩の検討

謝辞: 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、本研究の研究管理担当者として詳細なコメントを頂きました。また、茂野 博氏には本原稿を詳細に査読の上、適切な指摘をして頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

文 献

- 藤原広行・河合伸一・青井 真・功刀 卓・石井 透・早川 譲・森川信之・小林京子・大井昌弘・先名重樹・奥村直子 (2005) 三陸沖北部の地震を想定した地震動予測地図作成手法の検討。防災科学研究所研究資料, no. 279, 125p.
- 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.
- 長谷川昭・趙 大鵬・山本 明・堀内茂木 (1991) 地震波からみた東北地方の火山の深部構造と内陸地震の発生機構。火山, **36**, 197-210.
- 飯尾能久・小林洋二・鷺谷 威・塩崎一郎 (2000) 下部地殻の水が島弧地殻の変形を規定する。月刊地球, **22**, 37-44.
- 笠谷貴史・大志万直人・塩崎一郎・中尾節郎・矢部 征・近藤和男・藤田安良・宇都智史・吉田賢一 (2002) 兵庫県北部域での地殻比抵抗構造。京都大学防災研究所年報, no. 45B, 571-576.
- 金原啓司・長谷川功 編 (2005) 日本温泉・鉱泉分布図及び一覧 (第2版) (CD-ROM版)。産業技術総合研究所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。(株宝文堂).
- 駒澤正夫 (2003) 日本の重力探査事情—地下構造とのかかわり。石油技術協会誌, **68**, 21-30.
- 楠瀬勤一郎・川方裕則・竹内淳一 (2004) 地震データを用いた深部構造解析手法。原子力発電環境整備機構平成15年度委託研究報告書「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, 71-80.
- 楠瀬勤一郎・川方裕則・竹内淳一 (2005) 地震データを用いた深部構造解析手法。原子力発電環境整備機構平成16年度委託研究報告書「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, 92-101.
- 松林 修・大久保泰邦・山崎俊嗣・上嶋正人・宮崎光旗 (1992) 日本及び隣接地域熱流量・キュリー点深度図。500万分の1日本地質アトラス (第2版) no. 15. 地質調査所編集, 朝倉書店.
- 日本列島の地質編集委員会 編 (1996) 理科読本 コンピュータグラフィクス 日本列島の地質 CD-ROM版。地質調査所監修, 丸善株式会社.
- 大志万直人 (2002) 西日本の電気伝導度構造。月刊地球, 号外 no. 38, 82-90.
- 阪口圭一 (2005) 温泉放熱量に基づく熱異常抽出・特性把握方法に関する検討。原子力発電環境整備機構平成16年度委託研究報告書「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, 47-59.
- 1998年電磁気共同観測 MT データ整理委員会 (1999) 広帯域MT法による千屋断層深部比抵抗構造 (序報)。Conductivity Anomaly研究会, 1999年論文集, 6-13.
- 高橋幸祐・三品正明・浜口博之・茂木 透 (2003) 岩手山付近の深部低周波地震発生域の比抵抗構造。Conductivity Anomaly研究会, 2003年論文集, 40-47.
- 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.
- 玉生志郎・佐藤龍也 (2004) データベース・システムによる地質・地球物理データの重ね合わせ —東北地方中東部での例—。地調研報, **55**, 399-408.
- 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.
- 田中明子・矢野雄策・笹田政克・大久保泰邦・梅田浩司・中司 昇・秋田藤夫 (1999) 坑井の温度データによる日本の地温勾配値のコンパイル。地調月報, **50**, 457-487.
- 山口 覚・小林慶昭・大志万直人・谷元健剛・村上英記・塩崎一郎・上嶋 誠・歌田久司・住友則彦 (1997) ネットワークMT法より推定された四国地方東部の地下比抵抗構造。Conductivity Anomaly研究会, 1997 論文集, 158-165.

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, no.27, 14-21.

(受付:2008 年 1 月 28 日; 受理:2008 年 2 月 7 日)