

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 —

玉生志郎¹・佐藤龍也²

Shiro Tamanyu and Tatsuya Sato (2004) Combination of geological and geophysical data by database system – Example in middle eastern part of Tohoku, Japan –. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 55(11/12), p.399 - 408, 11 figs.

Abstract: In order to clarify the situation and origin of subsurface anomalous high temperature zone in non-volcanic area, the middle eastern part of Tohoku is selected as the model field for this case study. The distribution maps of topography, geology, microseismic hypocenter, electric resistivity, Curie-point depth, and subsurface isotherms were collected and summarized as input data to the database for 2-D and 3-D visualization. After digitizing, 6 kinds of maps are correlated each other. Following three data sets resulted in good correlation sets: volcanic front and microseismic hypocenter, resistivity and microseismic hypocenter, Curie-point depth and microseismic hypocenter.

The first good correlation between volcanic front and microseismic hypocenter indicates microseismicity is caused by upward migration of magma and hydrothermal fluids. The second good correlation between resistivity and microseismic hypocenter indicates the following two patterns. One is the microseismic areas on the volcanic zone where is characterized by shallow resistivity basement, and the other is the edge of inland basin where is characterized by low resistivity. The latter is interpreted as infiltrated meteoric water causes seismic activity along fault zones. The third good correlation between Curie-point depth and microseismic hypocenter indicates the cut-off depths of upper crustal seismicity, so-called brittle-plastic boundary, is almost equivalent to Curie-point depth which is presumed as around 600°C.

Keywords: Microseismic hypocenter, Magnetotelluric survey, Curie-point depth, Borehole temperature, Deep subsurface thermal structure, 2D cross-section, Visualization, Database

要 旨

非火山性地域の地下での熱異常の存在状況や成因を明らかにするために、東北地方中東部をモデル地域に選定して、地形、地質、震源、比抵抗、キュリー点深度、地温の分布データを収集した。収集された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、三つのデータ組み合わせに比較的良い相関が認められた。それらは、火山フロントと微小地震分布、比抵抗分布と微小地震分布、温度 (キュリー点等温面深度) 分布と微小地震分布である。

一番目の火山フロントと微小地震の相関は、火山フロントがマグマや熱水の上昇域で微小地震が多く発生しているためと考えられる。二番目の比抵抗と微小地震の相関は、二つのタイプがある。一つは火山フロントを含む火山地域で認められるもので、比抵抗基盤が浅く高比抵抗帯となっている地域で、火山活動に伴う

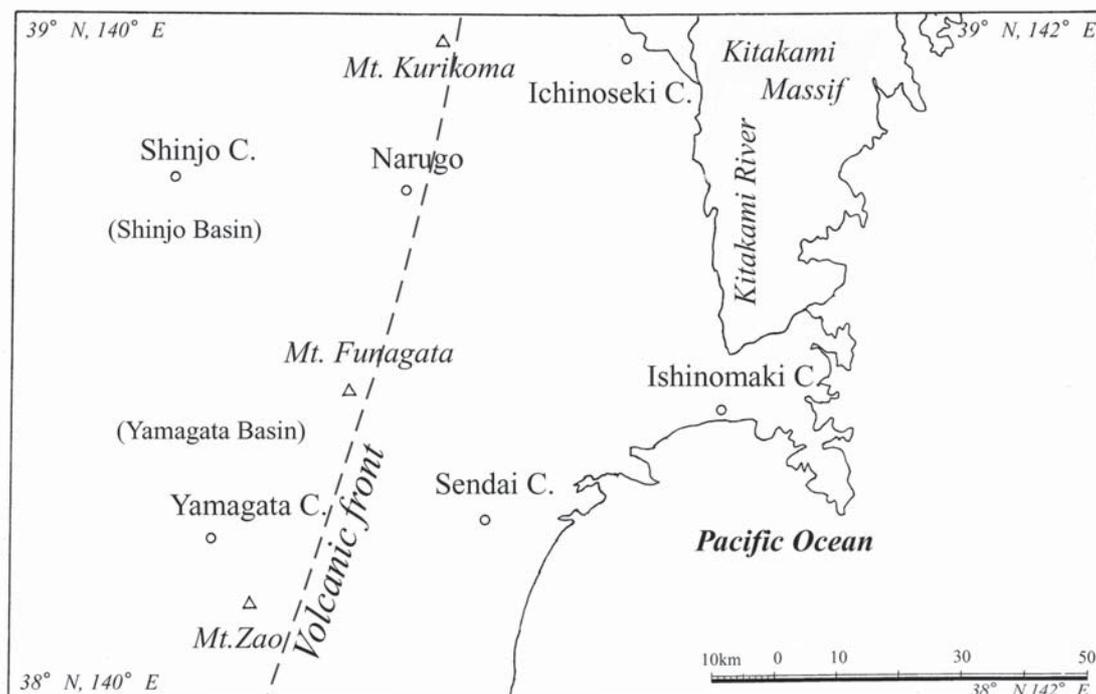
微小地震が多数発生している例である。もう一つは火山フロントの東方の内陸盆地の周辺に認められる微小地震の集中域で、そこは低比抵抗域となっている。この後者の場合は、天水が断層などの比較的透水性の高い領域に沿って地下に浸透し、微小地震を発生させていると想定される。三番目の温度 (キュリー点等温面深度) と微小地震の相関は、上部地殻内の微小地震の発生限界深度、いわば脆性-延性破壊の境界深度が、ほぼ 600°C 前後のキュリー点深度と大略一致しているためと考えられる。

1. はじめに

本研究は、高レベル放射性廃棄物の地層処分を行うために設立された原子力発電環境整備機構からの委託研究「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」の一つとして、実施されたものである。本研究では、非火山地域の地下約 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

¹地圏資源環境研究部門 (Institute for Geo-Resources and Environment, GSJ)

²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)



第1図 研究対象地域.
Fig. 1 Study area.

可視化・重合技術を用いて明らかにしようとするものである。そのために、東北地方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た。ここでは、既存の地質調査データや空中磁気探査に基づくキュリー点等温面深度分布データの他に、詳細なMT法調査データや宮城県北部地震の余震観測データがある。また、別途行われた東北地方での地震活動調査（楠瀬ほか，2004）によって、詳細な微小地震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、微小地震、MT調査、キュリー点等温面深度、坑井温度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。

2. データ収集したモデル地域

データ収集の範囲は、仙台市、山形市、新庄市、一関市を含む、北緯38.00°～39.00°（南北約110 km）、東経140.00°～142.00°（約174 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地形図では「仙台」、「石巻」の全域と「新庄」、「一関」の南半部の地域に相当する。

2.1 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、微小地震分布、地温デー

タ、標高データである。以下、各項目毎に出典と処理方法を説明する。

2.1.1 地質図

地質図は、地質調査所監修の“コンピュータグラフィクス日本列島の地質 CD-ROM版”に収められている東北地方の地質図（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。

2.1.2 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デジタルにより数値化し、2次元数値データを作成した。

2.1.3 MT法による比抵抗分布

MT法による比抵抗分布については、Fujinawa *et al.* (1999)を参照した。この論文では、宮城県付近を通り太平洋から日本海へ東西方向に抜ける調査測線上（3測線）で調査が行われ、2次元の比抵抗解析が行われている。この調査では、標高40 kmまでの範囲を解析対象としている。そこで、Fujinawa *et al.* (1999)で示された3本の比抵抗解析断面図をデジタル化し、3次元の比抵抗データを作成した。

2.1.4 微小地震データ

微小地震データについては、楠瀬ほか（2004）によっ

てまとめられた東北地方の微小地震データを用いた。同データには1923年～2003年8月までの微小地震震源情報がある。近年1998年頃から微小地震の観測網が整備され、取得データの量が増えている。

なお、同データは非常に膨大なため、今回は2000年1月～2003年8月までの最近のデータを利用することとした。また、同データセットは全国版であるため、今回の対象地域内(深度方向は標高-100 kmまで)のデータのみを抽出した。

2.1.5 地温データ

地温データについては、田中ほか(1999)を参照した。この論文では、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)を収集している。そこで、対象地域のデータを抽出し、これを3次元数値データに変換した。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、2.1.2で作成した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。地表面は、15℃一定と仮定し、データセットを作成した。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。

2.1.6 標高データ

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を利用し、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. 解析方法と可視化によるデータ対比

3.1 データベース化

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。本データベースシステムは地熱技術開発(株)が1994年以降に開発してきたもので、地下資源(主に地熱分野)、核廃棄物地層処分研究の各種地下データ解析用ソフトウェアとして市販されている。Oracle7/8iをマスターにして、データベース構造とGUI部分が機能強化されたもので、1)地表探査、地質、井戸掘削、検層、時系列モニタリングデータ等の地下情報に対応している、2)検索データは二次元、三次元表示で可視化できる、3)地下流体流動シミュレータ(TOUGH2)のポストプロセッシング機能をもつ、等の特徴を有する。今回はG★Baseの2次元、3次元可視化機能を活用し、収集したデータ相互の関連性を見出すことで、熱構造や基盤構造との関わりなどを検討した。データベース化及び可視化については、以下

のような表示体裁を用いた。なお、以下で言うバリオグラムとは、地球統計学の基本的概念で、距離が離れた2点間における値の差の平方和の平均である。また、クリッキングとはバリオグラムを用いて、離散的測点以外の地点における値を、最小誤差で推定するための手法である。

3.1.1 地質図

イメージ画像データを登録した。

3.1.2 キュリー点等温面深度分布

等温面を離散データ(x, y, 標高)として登録し、G★Baseの2次元クリッキ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。

3.1.3 MT法による比抵抗分布

比抵抗分布を離散データ(x, y, z, 比抵抗)として登録し、G★Baseの3次元クリッキ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。

3.1.4 微小地震分布

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。

3.1.5 地温データ

地温を離散データ(x, y, z, 温度)として登録し、G★Baseの3次元クリッキ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。

3.1.6 標高データ

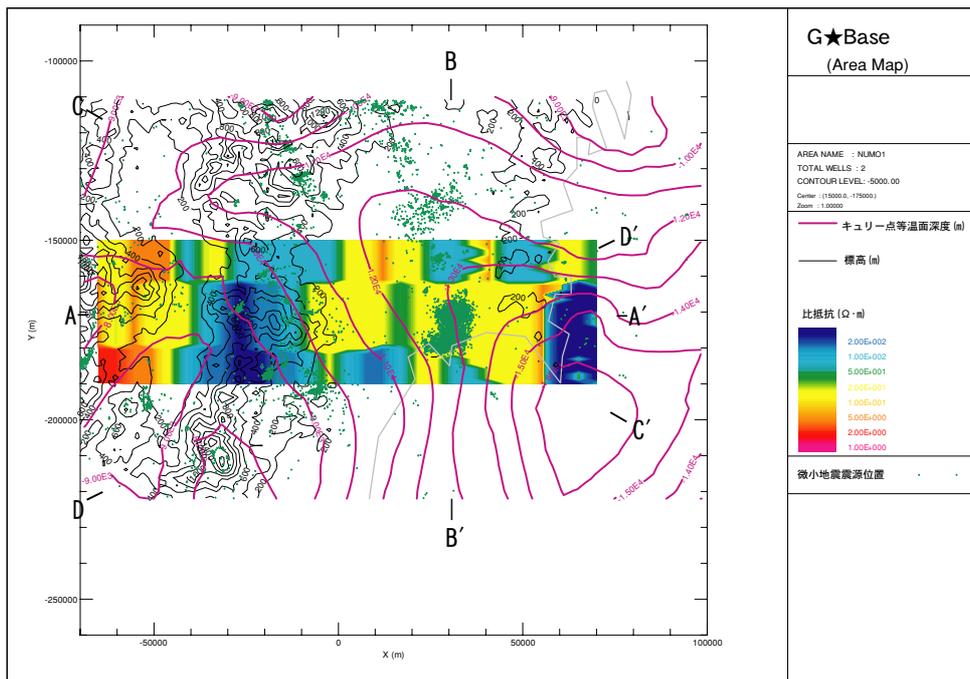
標高を離散データ(x, y, 標高)として登録し、G★Baseの2次元クリッキング機能でコンターデータ(2次元、3次元マッピング用)に変換した。ここで、クリッキングを行う場合は、予め使用するデータセットを用いてバリオグラムを計算し、クリッキングパラメータを推定した。バリオグラム計算についてもG★Baseの計算機能を利用した。

3.2 データ重合と対比

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。

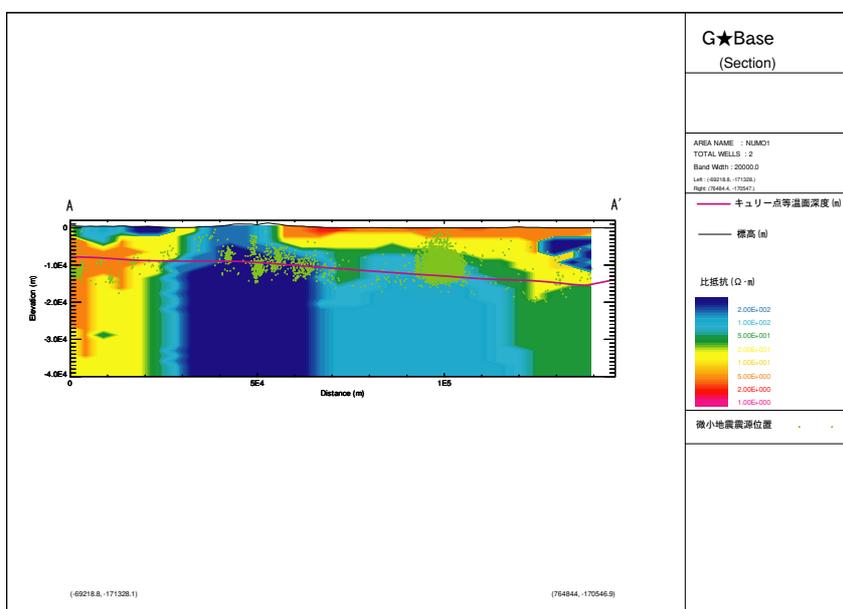
3.2.1 比抵抗(標高-5,000 m)、地形、微小地震及びキュリー点等温面深度分布の対比

第2図と第3図に比抵抗、地形、微小地震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。第2図では、比抵抗のプロット標高±10,000 mで発生した微小地震が投影されている。第3図には、A-A'断面図を示した。断面位置は第2図に示されている。断面図に示した微小地震分布は標高-20,000 m以浅、かつ、断面線の南北両側20,000 m以内に発生したものを投影している。A-A'断面図では、微小地震分布とキュリー点等温面深度にかなり良い相関が見られる。ほとんどの微小地震の震源は、キュリー点等温面深度以浅に発生している様子がわかる。また、キュリー点等温面深度と比抵抗分布を比較すると、低比抵抗帯か



第2図 比抵抗 (標高-5,000 m), 地形, 微小地震及びキュリー点等温面深度分布の対比 (微小地震は表示標高の±10,000 mで発生したものをプロット)。

Fig. 2 Correlations among resistivity (-5,000 m asl), topography, micro-seismicity and Curie-point isothermal depth. Green dots are hypocenters occurred within the depth range of indicated level±10,000 m asl.



第3図 比抵抗, 地形, 微小地震及びキュリー点等温面深度分布の対比 (A-A'断面) (微小地震は標高-20,000 m以浅で, かつ, 断面線の両側20,000 mの幅で発生したものを投影. 断面線は第2図参照)。

Fig. 3 Correlations among resistivity, topography, micro-seismicity and Curie-point isothermal depth along A-A' cross section which position is referred in Fig. 2. Green dots are hypocenters of which depths are shallower than 20,000 m and occurred within 20,000 m width from the cross section.

ら100~200 $\Omega \cdot m$ の中比抵抗帯へ変化する境界線の形状が、キュリー点等温面と整合的である様子が示されている。

3.2.2 温度(標高-5,000m),地形,微小地震及びキュリー点等温面深度分布の対比

第4図と第5図に温度,地形,微小地震及びキュリー点等温面深度分布を平面/断面で重合し,対比した。微小地震のプロットについては3.2.1と同様で,標高-20,000 m以浅,かつ,断面線の南北両側20,000 m以内に発生したものを投影している。温度分布では,海側で高温域の深度が深く,脊梁山脈で,すなわち栗駒山,鳴子,船形山,蔵王などの第四紀火山地域で高温域の深度が浅くなる様子が示されている。

3.2.3 比抵抗,温度(標高-5,000 m),地形及び微小地震分布の対比

第6図と第7図に比抵抗,温度,地形,微小地震分布を平面/断面で重合し,対比した。微小地震のプロットについては3.2.1と同様で,標高-20,000 m以浅,かつ,断面線の南北両側20,000 m以内に発生したものを投影している。比抵抗と地形を平面図で対比してみると,先第三系基盤岩類の浅くなっている脊梁山脈部で高比抵抗となり,地形の低くなる東西両側の内陸盆地では低比抵抗となっている。第7図のA-A'断面では,図面中央より左側の高比抵抗域が火山フロントを含む脊梁山脈部と一致している。温度コンターを見ると,比較的高温域が上部まで盛り上がっている様子がみられる。また,熱的な活動に起因すると思われる微小地震も比較的多く発生しているなど,温度,比抵抗及び微小地震分布の相関が見られる。また,約5 km以深の比抵抗構造は,全体的には高比抵抗となっているのに対して,脊梁山脈の西側(図面左側)のみで強い低比抵抗が認められる。

3.2.4 地質図と微小地震及びキュリー点等温面深度分布の対比

第8図に地質図と微小地震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。石巻近傍及びそれから北上川に沿って北北西方へ延びる微小地震の集中域の他に,脊梁山脈部に北北西-南南東方向の微小地震の震源分布域が認められる。一方,研究地域西部の山形盆地から新庄盆地にわたる地域と,東部の先第三系基盤岩から構成される北上山地とでは微小地震が少ない様子が見てとれる。

3.3 三次元鳥瞰図による対比

3.3.1 微小地震とキュリー点等温面深度分布の対比

第9図に微小地震とキュリー点等温面深度分布を重合し,対比した。キュリー点等温面深度以浅で微小地震が多く分布するとともに,その下方では太平洋プレートのサブダクションに伴う微小地震が分布してい

る様子が見られる。サブダクション・ゾーンとキュリー点等温深度までの領域では,微小地震の分布は少ない。また,図面では分かりづらいが,G★Base画面上でマウス操作により任意方向へ視点をめくりながら見ると,火山フロント付近で見られる微小地震分布のいくつかは,鉛直方向に筒状に分布している様子が見られ,その分布はマグマや熱水の上昇と関連性があると思われるような形状を呈している。

3.3.2 微小地震とキュリー点等温面深度分布及び比抵抗の対比

第10図に微小地震と地下温度分布及び比抵抗(200 $\Omega \cdot m$ 以上)分布を示す。比抵抗については,200 $\Omega \cdot m$ の領域を曲面で表現した。太平洋プレートのサブダクション・ゾーン付近の微小地震も表示した。石巻近傍の微小地震集中域は比抵抗が低く,仙台西方の脊梁山脈の微小地震域では比抵抗基盤が盛り上がり高比抵抗になっている様子が示されている。

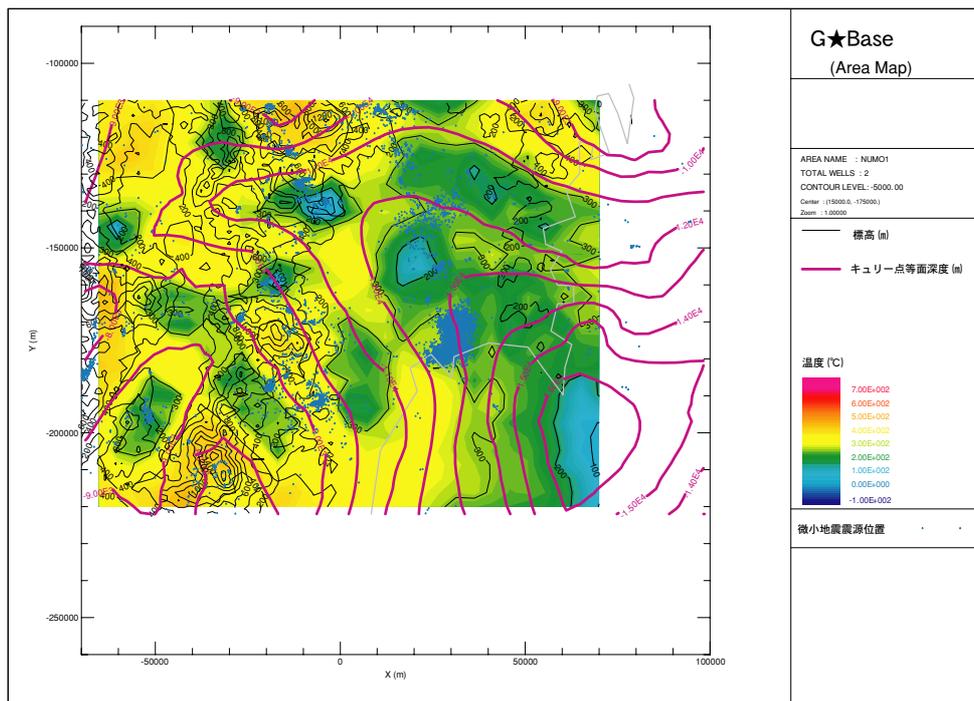
3.3.3 微小地震と地下温度分布の対比

第11図に微小地震と地下温度分布の分布を示す。温度については,500 $^{\circ}C$ 以上の領域をボリュームで表現した。ボリュームで表現された温度の上部に微小地震が発生している様子が見られる。また,南東部から鳥瞰した図では,石巻付近の微小地震領域はボリューム表示した温度が低い(凹んでいる)様にみえる。

4. まとめ

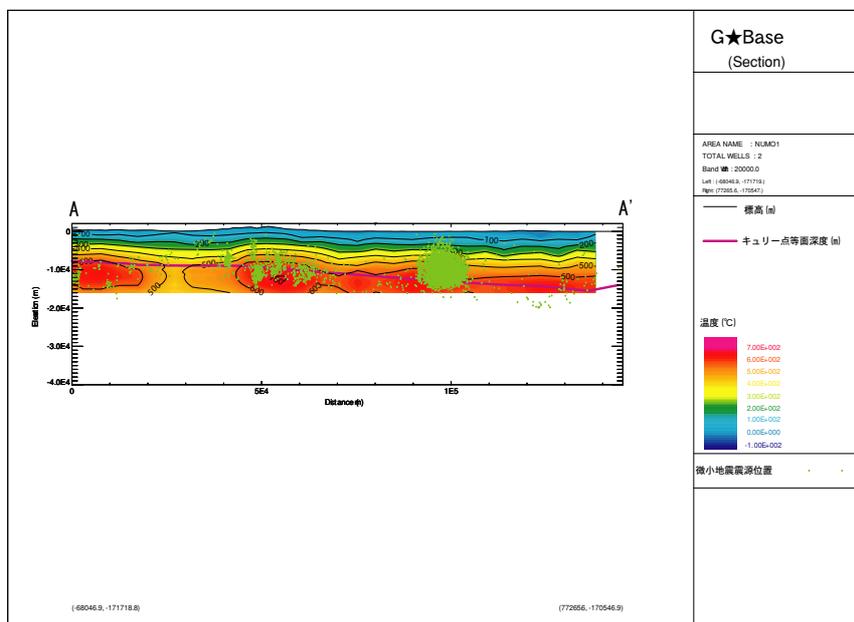
東北地方の中東部にモデル地域を設定し,同地域内の既存データを収集した。ここで収集したデータは,地質図,キュリー点等温面深度分布,MT法による比抵抗分布,微小地震分布,地温データ,標高データである。収集された情報はデジタル化され,データベース・システム(G★Base)に登録され,同システムの可視化機能で様々な角度から相互比較を行った。これにより各データ間の相関性を検討することができた。今回の検討結果では,以下の三つのデータの組み合わせに比較的良好な相関が見られた。1)火山フロントと微小地震分布,2)比抵抗分布と微小地震分布,3)温度(キュリー点等温面深度)分布と微小地震分布。その解釈は,以下に示すとおりである。

一番目の火山フロントと微小地震の相関は,火山フロントがマグマや熱水の上昇域で微小地震が多く発生しているためと考えられる。二番目の比抵抗と微小地震の相関は,二種類のタイプが認められた。一つは火山フロントを含む第四紀火山地域で,ここでは比抵抗基盤が東西両側よりも浅く高比抵抗帯となり,微小地震も多数発生している。もう一つは,火山フロントの東方の内陸盆地の周辺に認められる微小地震の集中域で,そこは低比抵抗域となっている。ここでは,天水



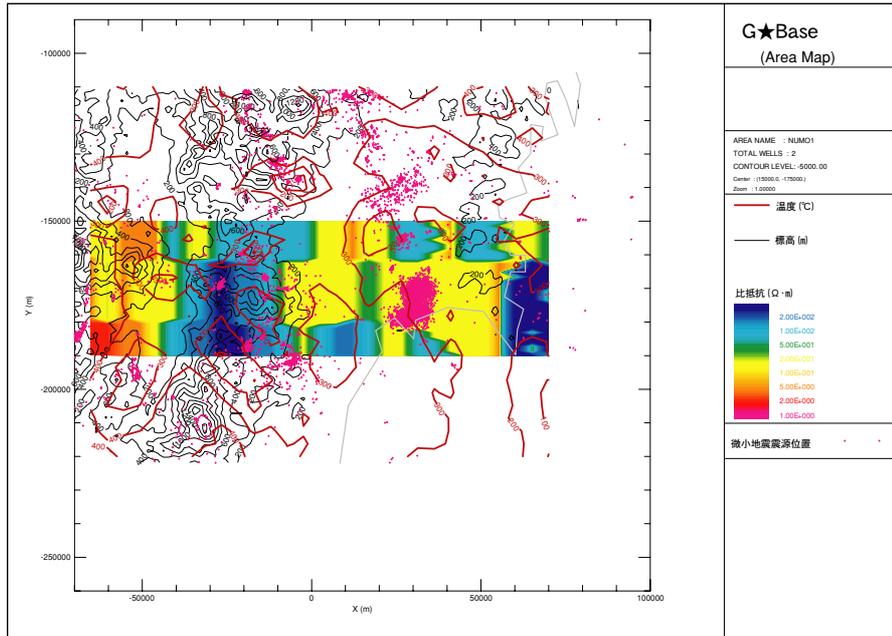
第4図 温度（標高-5,000 m）、地形、微小地震及びキュリー点等温面深度分布の対比（微小地震は表示標高の±10,000 mで発生したものをプロット）。

Fig. 4 Correlations among subsurface temperature (-5,000m asl), topography, micro-seismicity and Curie-point isothermal depths. Green dots are hypocenters occurred within the depth range of indicated level ±10,000 m asl.



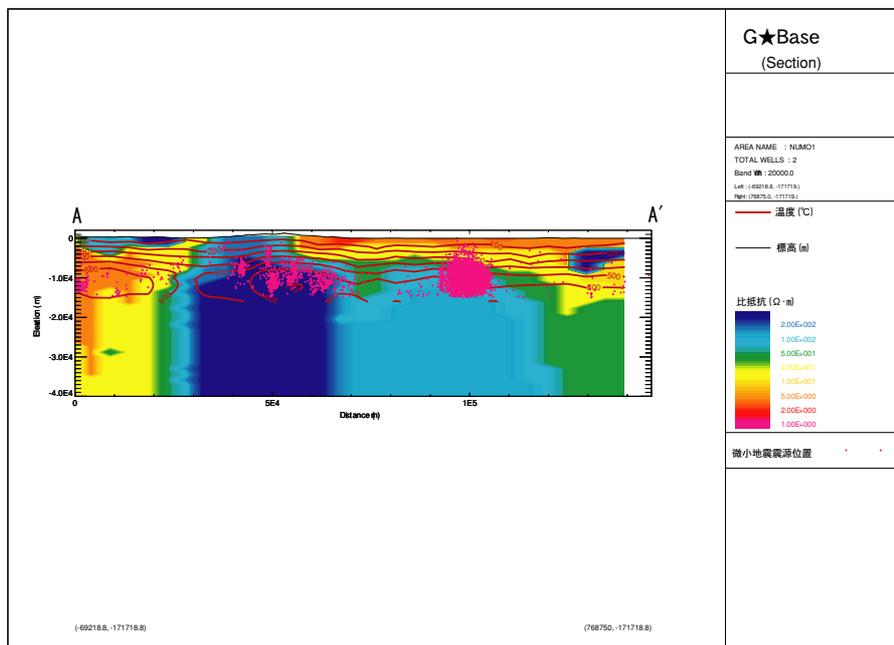
第5図 温度、地形、微小地震及びキュリー点等温面深度分布の対比（A-A'断面）（微小地震は標高-20,000 m以浅で、かつ、断面線の両側20,000 mの幅で発生したものを投影。断面線は第2図参照）。

Fig. 5 Correlations among subsurface temperature, topography, micro-seismicity and Curie-point isothermal depth along A-A' cross section which position is referred in Fig. 2. Green dots are hypocenters of which depths are shallower than 20,000 m and occurred within 20,000 m width from the cross section.



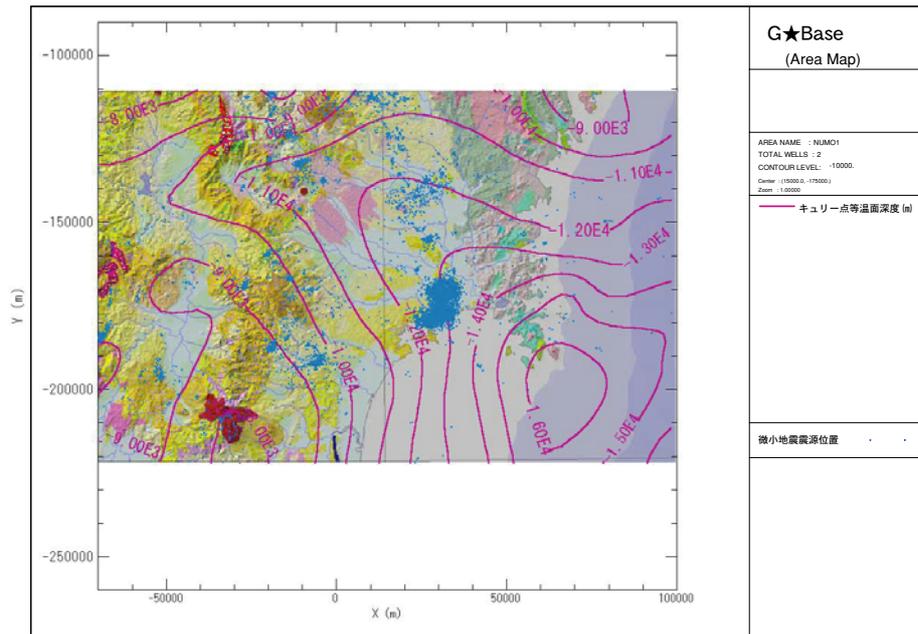
第6図 比抵抗, 温度 (標高-5,000 m), 地形及び微小地震分布の対比 (微小地震は表示標高の±10,000 mで発生したものをプロット) .

Fig. 6 Correlations among resistivity, subsurface temperature (-5,000m asl), topography, and micro-seismicity. Green dots are hypocenters occurred within the depth range of indicated level±10,000 m asl.



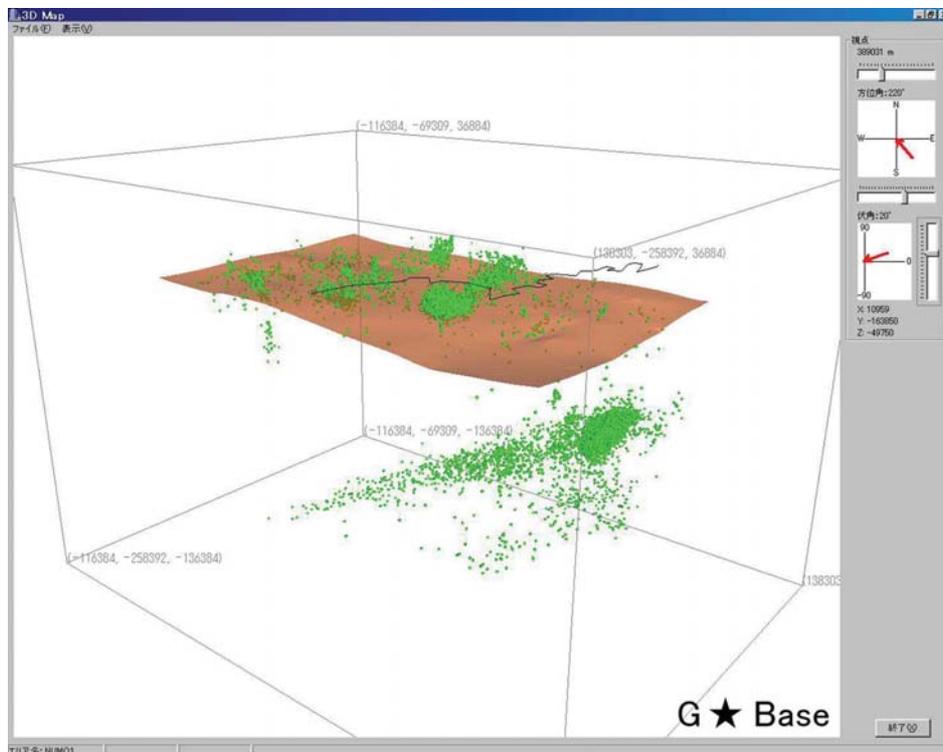
第7図 比抵抗, 温度, 地形及び微小地震分布の対比 (A-A'断面) (微小地震は標高-20,000 m以浅で, かつ, 断面線の両側20,000 mの幅で発生したものを投影. 断面線は第2図参照) .

Fig. 7. Correlations among resistivity, subsurface temperature, topography and micro-seismicity along A-A' cross section which position is referred in Fig. 2. Red dots are hypocenters of which depths are shallower than 20,000 m and occurred within 20,000 m width from the cross section.



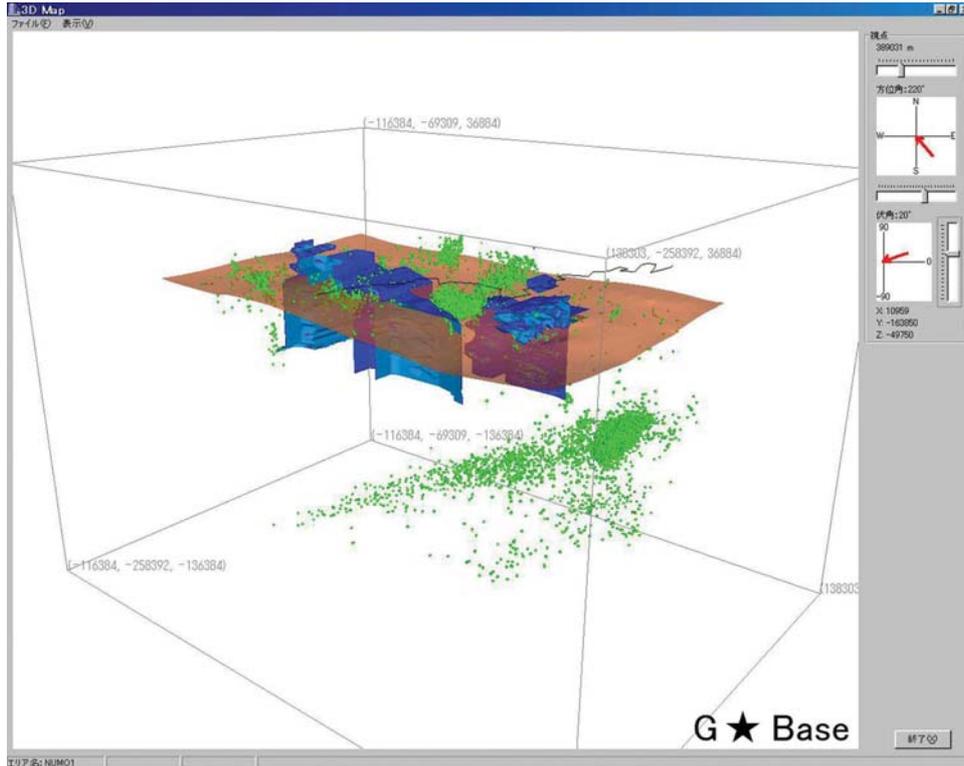
第8図 地質図と微小地震及びキュリー点等温面深度分布の対比（微小地震は標高-10,000 m ± 10,000 m で発生したものをプロット）。

Fig. 8 Correlations among geology, micro-seismicity and curie-point isothermal depths. blue dots are hypocenters occurred within the depth range of indicated level ± 10,000 m asl.

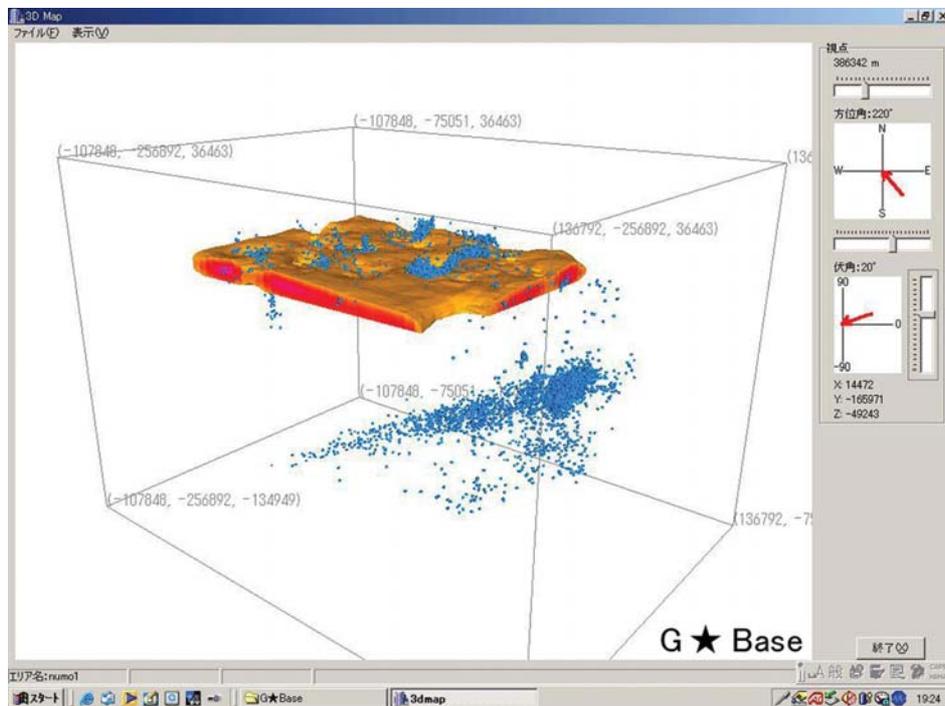


第9図 微小地震とキュリー点等温面深度分布の鳥瞰図（南東上から）。

Fig. 9 A bird's-eye picture of micro-seismicity and Curie-point isothermal depths (downward view from southeast direction).



第 10 図 微小地震とキュリー点等温度面及び比抵抗 ($200 \Omega \cdot m$ 以上) 分布の鳥瞰図 (南東上から).
 Fig. 10 A bird's-eye picture of micro-seismicity, Curie-point isothermal depths and resistivity higher than $200 \Omega \cdot m$ (downward view from southeast direction).



第 11 図 微小地震と地下温度 ($500 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上) 分布の鳥瞰図 (南東上から).
 Fig. 11 A bird's-eye picture of micro-seismicity and subsurface temperature higher than $500 \text{ }^\circ\text{C}$ (downward view from southeast direction).

が断層などの比較的透水性の高い領域に沿って地下に浸透し、微小地震を発生させていると想定される。三番目の温度（キュリー点等温面深度）と微小地震の相関は、浅部地殻内の微小地震の発生限界深度、いわば脆性-延性破壊の境界深度が、キュリー点深度のほぼ600℃の等温面に対応しているためと考えられる。ただし、キュリー点深度等温面の温度は地下の構成岩石によって大きく異なるので、ここでは広域的な傾向を示すものとして解釈する。

今回の解析で熱構造や対流系などの情報を得ることができた。ここで得られた情報は、今後の地下温度・熱水対流域シミュレーションの数値モデル構築のために利用される予定である。

謝辞：本論文を査読し適切な指摘をして下さった、地圏資源環境研究部門の高倉伸一氏に謝意を表す。

文 献

Fujinawa, Y., Kawakami, N., Inoue, J., Asch, H. Theodore, Takasugi, S. and Honkura, Y. (1999)

2-D georesistivity structure in the central part of the northeastern Japan arc. *Earth Planets Space*, **51**, 1035-1046.

楠瀬勤一郎・川方裕則・竹内淳一 (2004) 震源データを用いた深部構造解析手法の検討—東北日本の例—。地質調査研究報告「放射性廃棄物地層処分における熱・熱水の影響評価に関する基礎研究」(本報告) **55**, 423-429.

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, 朝倉書店出版。

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, 丸善株式会社出版。

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。地質調査所月報, **50**, 457-487.

(受付: 2004年10月1日; 受理: 2004年12月16日)