

標準250mメッシュレイヤー系を用いた地熱資源評価の事例研究 (その2): 20万分の1地勢図「大分」地域の簡易3次元的資源評価

茂野 博¹⁾

1. はじめに

「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」を、筆者らは2001年より進めている(例えば、茂野・阪口, 2002)。茂野(2005)では、その第1期の取りまとめの一環として、地熱資源評価の事例研究(その1)「2次元的有望地域抽出」の概要を紹介した。今回、(その2)「簡易3次元的資源評価」の概要を紹介する。重複する部分の多くは省略したので、必要に応じて前報を参照いただきたい。

今回の簡易3次元的な試行では、以下を手法の特徴としており、各種市販の3次元空間データ処理が可能な高機能ソフトウェア(一般に高価格で独自規格化)は使用していない(茂野・阪口(2002)を参照)。(1) 平面的に数値地図250mメッシュ(標高)のデータフォーマット(国土地理院・日本地図センター, 1998)を共通規格として使用することにより、多種多様な地理・地球科学情報の統合処理(数値的にも画像的にも)を容易に可能とした。(2) 垂直(深度)方向については250m間隔の多層レイヤーを使用することにより、地下3次元情報処理の標準化・共通化(将来の階層的な処理を含めて)を試みた。(3) 温度構造、貯留構造(「地層型」・「断裂型」)に関するデータを3つの独立パラメータ化することにより、統合的な処理を容易にした。(4) 簡易的な数値シミュレーション手法(茂野(1999a, 2000b)の「拡張熱伝導率」)を応用することにより、ある程度の統一性・合理性を持つ地下地熱環境の評価を比較的容易に可能とした。

全国～広域地域レベルの地熱資源の評価は、日本においても1950年代より様々な目的・手法・使用データで試みられてきた(例えば近年では、新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1989, 2002; 地質調査

所, 1991; 宮崎ほか, 1991; 伊達ほか, 2002)が、残念ながら紙上での作業あるいは規格化・公開化が進んでいない電子化作業によって実施されており、継続性に欠けている。今回の試行的な一連の電子化処理作業は、今後の継承的な地熱関連情報の整備、発展的な地熱資源の評価について、基盤的・手法的に寄与することが期待される。残念ながら現状では、地下の複雑な温度構造と貯留構造に関して既存の測定・編集データが非常に不足しており、また大規模な4次元の熱-流動シミュレーションの実施などには困難が多いが、今後より高度で多面的な地熱資源の評価が進展することを期待したい。

本説が、今後の地熱資源の調査・開発・保全の一層の進展、さらに環境保全や火山防災を含めた地域開発最適化の合意形成などに向けて参考となれば幸いである。なお、本説で取り上げた各種の市販ソフトウェアなどについては、必ずしもその使用を推奨するものではないことをお断りする。また、今回使用したメッシュ系は、現状では日本測地系に基づいており、世界測地系への変換が今後必要である。

2. 方法

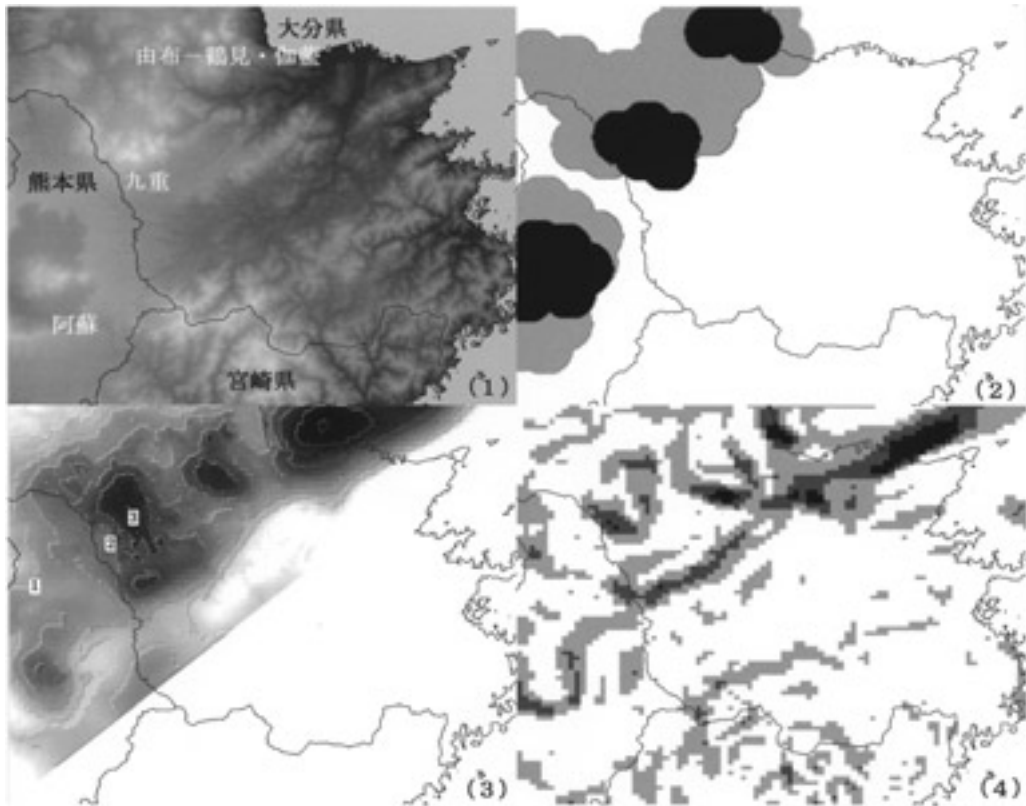
2.1 概要

今回、「2次元的有望地域抽出」(茂野, 2005)の場合と同様に、20万分の1地勢図「大分」の範囲(以下「大分」地域と略記、第1図)を、試行的な事例研究の対象とした。使用したデータの種類と概要については、茂野(2005)の第1表を参照されたい。

データの編集・処理・解析・表示などの一連の作業は、基本的に平面的には国土地理院の数値地図250mメッシュ(標高)のファイルフォーマット(各標準1

1) 産総研・地図資源環境研究部門(地質調査総合センター)

キーワード: 地熱資源, 評価, アセスメント, 熱水系, 温度分布, 貯留層, 地理情報システム, メッシュ, 統合データ処理, 大分



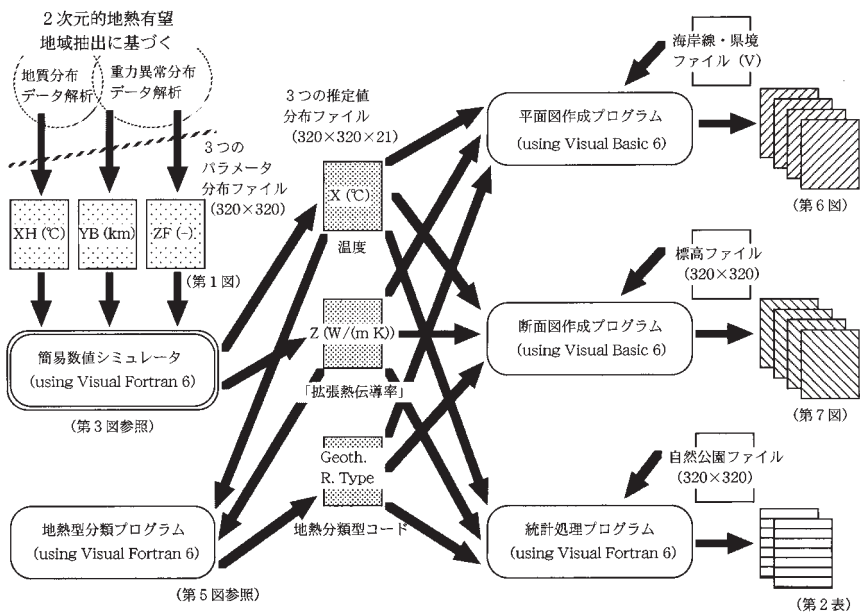
第1図 「大分」地域の範囲と温度構造・貯留構造パラメータ値の分布図。

- (1) 地形陰影分布：低地ほど暗色で表示されている。国土地理院の数値地図250mメッシュ(標高)データを処理した。日本地図センターのJMCマップデータにより、海岸線・県境を示した(以下同様)。
- (2) 温度構造パラメータ値(XH℃)の分布：活火山とその他の第四紀火山(火砕流堆積物などの分布を除く)について、各々のバッファゾーン(分布の外縁から半径5.0km以内の範囲)を設定して得点を処理し、深度5.0kmの概略の推定温度(XH℃)を白色(165℃)、灰色(465℃)、黒色(615℃)で表示した(茂野(2005)の第5図(1)・(4)を比較参照)。地質調査所(1995)の250mメッシュデータを処理した。
- (3) 貯留構造(「地層型」)パラメータ値(YB km)の分布：平均的に空隙率・透水性の高い岩石(第四紀～新第三紀の堆積岩類・火山岩類)の概略の推定厚さ(YB km)を白色～黒色および等高線で示す。簡易的な手法により地質調査所(2000)のブーゲー重力異常データ(仮定密度 = 2.30g/cm³, 1kmグリッド)および国土地理院の標高メッシュデータから作成した(茂野(2005)の第6図を比較参照)。
- (4) 貯留構造(「断裂型」)パラメータ値(ZF)の分布：ブーゲー重力異常の片側4方向の傾斜度の分布を処理して得点化し、貯留構造パラメータ値(断裂効果係数, ZF)として白色(1.0)～黒色(4.0)で表示した(茂野(2005)の第7図を比較参照)。ブーゲー重力異常データとその処理法は(3)を参照。

次メッシュ(20万分の1地勢図1枚に相当)あたり320×320点(国土地理院・日本地図センター, 1998)を共通に適用して行った(茂野・阪口(2002)を参照)。このため、各種の原電子データについて、パーソナルコンピュータ(基本ソフトとしてMicrosoft社のWindowsを使用)上で各々独自に開発した小規模プログラム(開発環境としてCompaq社のVisual Fortran, v.6およびMicrosoft社のVisual Basic, v.6を使用)を

利用して上記のフォーマットに変換し、統合的な処理を可能とした。250mメッシュフォーマット化したデータの画像化と画像処理・編集は、日本地図センター販売のBird's View Pro, Adobe社のPhotoshopなどのほか、処理効率化のために自作のソフトを使用した。

一方、垂直的なデータ処理には、地表から地下深度5.0kmまで深度250m等間隔で21レイヤー(第1レイヤーは地表面、第21レイヤーは深度5.0km面)を用



第2図
今回の簡易的な地熱資源の3次元の評価処理の流れ図。図中に該当する図表の番号を入れた。

いた。従って、今回の「大分」地域について各メッシュ内・レイヤー間で定義される直方体のセルの総数は2,048,000 (320×320×20)で、各セルの体積は概略0.01686km³ (292m×231m×250m)である。なお、各セルの各種の値としては、セルの中心点ではなく、今回簡便的に下面レイヤーの値を用いた。

今回の簡易3次元的地熱資源評価は、以下の4過程を通じて実施した。

- (1) メッシュ毎の温度構造と貯留構造に関する3つのパラメータ値の推定。
- (2) メッシュ毎に上記3パラメータ値を用いた簡易的な垂直1次元数値シミュレーションによる地下温度分布の推定。
- (3) 上記(1)・(2)の推定値に基づいた各セル毎の地熱資源型の分類。
- (4) 全セルについての温度構造、貯留構造、地熱資源型の推定値の集計(深度別、自然公園との関係の処理を含む)と結果の図化および検討。

今回の処理の流れを整理して第2図に示す。なお、今回の手法は「大分」地域を事例とした試行的なものであり、骨格的であると同時に簡便性を重視したものである。

2.2 パラメータ値の推定

茂野(2005)の2次元的地熱有望地域の抽出作業

では、「大分」地域の各種データを用いて温度構造パラメータ値、貯留構造(「地層型」・「断裂型」)パラメータ値、地熱資源型の平面分布を推定した(茂野(2005)の第5図～第8図を参照)。今回の3次元的地熱資源評価では、簡易的な数値シミュレーションに利用するために第1表に示すようにこれらを一部改変した。第1図(2)～(4)に今回の温度構造、貯留構造(「地層型」・「断裂型」)に関する3つのパラメータ値(XH, YB, ZF)の平面分布を示す。

- (1) 温度構造については、深度5.0kmの温度をパラメータ(XH °C)とし、活火山およびその他第四紀火山の分布(境界線から5.0km以内のバッファゾーン)を得点化して値(165, 465または615 °C; 地表温度を15 °Cとして地温勾配が30, 90, 120 °C/kmに相当)を与えた。
- (2) 貯留構造(「地層型」)については、プーゲー重力異常値から推定した基盤深度(新第三系+第四系の厚さ)をパラメータ(YB km)とし、それ以外(浅(地表部を除く)と以深では異なる「拡張熱伝導率」(Z2 = 9.0, Z3 = 3.0 W/(m K))を与えた。
- (3) 貯留構造(「断裂型」)については、上記の「拡張熱伝導率」(Z2・Z3)に対して断裂系分布が与える効果の係数(ZF)をパラメータとし、プーゲー重力異常の方向別の傾斜度(mGal/km)を総合得点化(1.0, 2.0, 3.0または4.0)して、地表部を除

第1表 今回の温度構造パラメータ値(XH), 貯留構造パラメータ値(YB・ZF), 地熱資源分類型の算定方法(簡易的な垂直1次元数値シミュレーションを含む)の概要。

● 1. メッシュ毎の温度構造に関するパラメータの算定法 温度構造パラメータ(深度5.0 kmの推定温度, °C) : XH $XH = 30.0 \times (PAVC \text{ or } PQVC + 1.0) \times 5.0 + 15.0 \quad (165. \sim 615.)$ 活火山得点 : PAVC = 3.0 (周辺5 kmのバッファゾーン内, 優先) or 0.0 その他の第四紀火山得点 : PQVC = 2.0 (周辺5 kmのバッファゾーン内) or 0.0
● 2. メッシュ・レイヤー毎の貯留構造(以下の「地層型」と「断裂型」の合計)に関するパラメータの算定法(最浅部の帽岩域(~0.5 km)については, Z = 3.0 W/(m K)と仮定) 貯留構造パラメータ(「拡張熱伝導率」, W/(m K)) : Z = Z2×ZF or Z3×ZF
◎ 2. 1 メッシュ・レイヤー毎の貯留構造(地層型)に関するパラメータの算定法 貯留構造パラメータ(「地層型」貯留層の下限深度, km) : YB (0.0~3.0) (拡張熱伝導率, W/(m K)として, 帽岩域~深度YBは Z2 = 9.0, 深部は Z3 = 3.0を賦与) $YB = Elv - BH; \quad BH = -\Delta g / (2 \pi G \Delta \rho) \times 10^{-8}$ Δg (mGal) はブーゲー重力異常の基準値(今回仮に-5.0 mGalを使用)からの差, Gは万有引力常数(6.7 x 10 ⁻⁸ cm ³ /(g s ²)), Δρは2層構造の仮定で下部層を基準とした上部層の岩石の密度差(今回-0.35 g/cm ³ を使用)で, BH (km)は上部層下限の標高, Elv (km)は標高。
◎ 2. 2 メッシュ毎の貯留構造(断裂型)に関するパラメータの算定法 貯留構造パラメータ(断裂効果の係数) : ZF = 1.0 (0 ≤ FRSP < 25), 2.0 (25 ≤ FRSP < 50), 3.0 (50 ≤ FRSP < 75) or 4.0 (75 ≤ FRSP) (0.0~4.0) 断裂パラメータ : FRSP = PN + PNW + PE + PNE (0~100+) (N-S, NW-SE, E-W, NE-SWの方向により, 今回仮の重み(1.0~4.0)を付与) N-S方向重力傾斜度得点 : PN = N-S方向傾斜度 (mGal/km) × 2.0 NW-SE方向重力傾斜度得点 : PNW = NW-SE方向傾斜度 (mGal/km) × 1.0 E-W方向重力傾斜度得点 : PE = E-W方向傾斜度 (mGal/km) × 3.0 NE-SW方向重力傾斜度得点 : PNE = NE-SW方向傾斜度 (mGal/km) × 4.0
● 3. セル毎の地熱資源型・特性の推定法(各メッシュ毎に20セル(21深度レイヤー)で計算)
◎ 3. 1 セル毎の温度構造特性値(X °C)の推定法 簡易的な1次元数値シミュレーションにより算出(Xの範囲は, 15.0~615.0となる)
◎ 3. 2 セル毎の貯留構造特性値(「拡張熱伝導率」, Z W/(m K))の推定法 貯留構造パラメータ推定値を使用(Zは, 3.0, 6.0, 9.0, 12.0, 18.0, 27.0または36.0となる)
◎ 3. 3 セル毎の地熱資源型・特性値の推定法 X・Zの2つの特性値に基づいて, 第5図の分類基準により推定(5資源型の一つとなる)
● 4. 全領域についての全セルの上記推定値の総計, パラメータ階級値による小計の算定 (さらに, 深度範囲, 地表環境状況(自然公園分布)による上記推定値の集計)

く全深度を通して影響が及ぶとした。

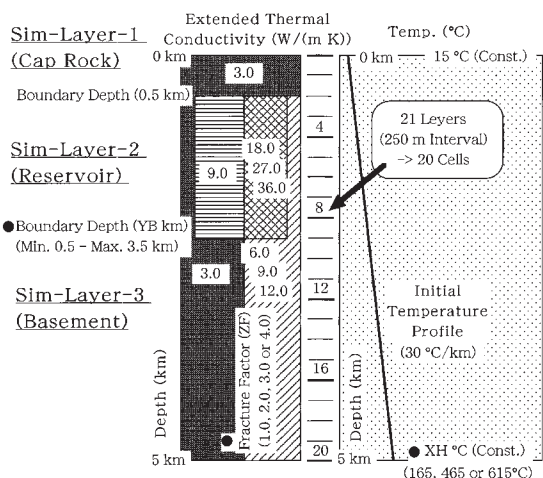
貯留構造としては, 上記の(2)・(3)を一体化して各セルに「拡張熱伝導率」(Z = ZF×Z2, ZF×Z3; 3.0~36.0W/(m K))を与えた。

2.3 簡易シミュレーションによる地下温度分布の推定

茂野(1999a, 1999b, 2000b), Shigeno(2000, 2001)は, 地下環境を非常に単純化して垂直1次元格子モ

デル化し, 複雑な流体対流による熱輸送の効果を熱伝導率の増大(「拡張熱伝導率」, 空隙率・透水性を重畳的に表現)に置き換えて簡易的な数値シミュレーションを実施することにより, 地熱系(熱源・地熱貯留層を含めて)の長期的な温度時空変化を推定した。今回, 簡易的なこの方法を, メッシュ毎(21深度レイヤー)の角柱状域の温度分布の推定に応用した。

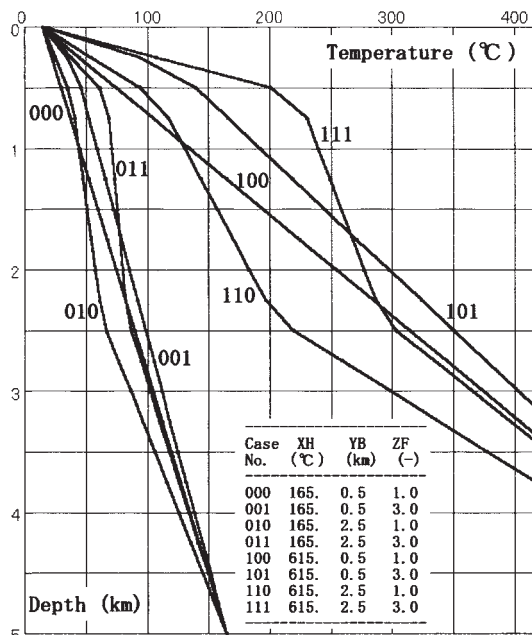
第3図に, 今回の地熱系の3層構造(第1層, 帽岩; 第2層, 貯留層; 第3層, 基盤岩類)の概念-数理



第3図 簡易数値シミュレーションに用いた地熱系の垂直1次元モデル。茂野 (1999a, 2000b) を一部改編して各250mメッシュ (四角柱状域) に適用し、地表から深度5.0kmまで250m間隔で21レイヤー、20セルとした。今回のパラメータ (●) は、(1) 深度5.0kmの温度 (XH °C)、(2) 「地層型」貯留層 (第2層) の下限深度 (YB km)、(3) 「断裂型」貯留層の効果係数 (ZF) の3つで、まず「拡張熱伝導率」の分布を求め、初期条件を地温勾配30°C/km一定として順解析的に定常温度分布を計算した。なお、各層の熱容量は1.0kJ/(kg K)、密度は2700kg/m³で一定と仮定した。

モデルを示す。第1層は、全域について地表～地下深度0.5kmの間 (1～3レイヤー) とし、統一的に低い「拡張熱伝導率」(3.0W/(m K)) を与えた。第1層は、熱水系が発達する場合には帽岩に相当する。第2層の貯留層については、その下限深度は上述した基盤深度 (YB km) とし、「拡張熱伝導率」は ZF × Z2 とした。なお、YB が 0.5km よりも小さい場合には、第2層は存在しないこととなる。第3層については「拡張熱伝導率」を ZF × Z3 とした。

境界条件として、地表温度を15°Cで一定、深度5.0kmの温度を上述のXHで一定とした。初期条件を地表から地温勾配30°C/km一定として、順解析的に定常温度分布を求めた。数値シミュレーションの方法については、茂野 (1999a, 2000b) とほぼ同様であり、今回それらを基礎に作成した自作プログラム (Visual Fortran を使用) を用いて全域について一括処理を実施した。処理結果 (セル毎の「拡張熱伝導率」と温度



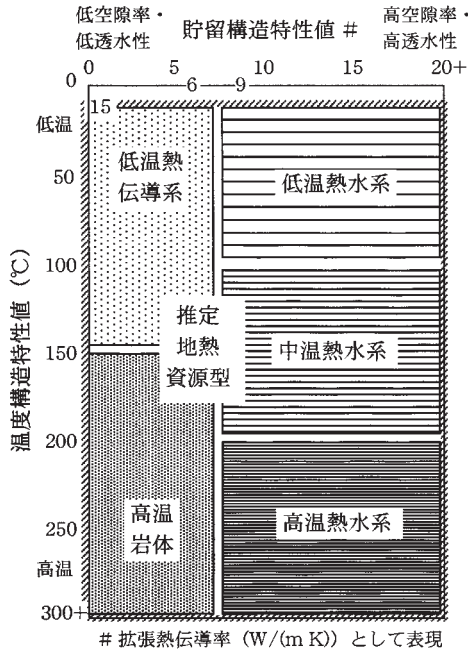
第4図 代表的な簡易数値シミュレーションの結果例。第3図の垂直1次元モデルに基づき、3つのパラメータについて仮想的に (1) 深度5.0kmの温度 (XH °C) が165と615の場合、(2) 「地層型」貯留層 (第2層) の下限深度 (YB km) が0.5と2.5の場合、(3) 「断裂型」貯留層の効果係数 (ZF) が1.0と3.0の場合の組み合わせ、合計8ケース (000～111) のシミュレーション結果をまとめて示した。

の推定値) は大きな2つの表 (各電子情報量は約15MB) にまとめるとともに、特定深度について共通の250mメッシュフォーマットでの出力も行った。

第4図には、いくつかの代表的な条件の場合について数値シミュレーションの例 (深度-温度曲線群) を示す。その結果は、上記のパラメータ値および概念-数値モデルが、現実に対してかなりの親和性を持つことを示している。

2.4 地熱資源型の分類

各セルについて、2.2～2.3で得られた温度推定値 (X°C) と「拡張熱伝導率」推定値 (Z W/(m K)) の2つの値を用いて、地熱資源の分類型を決定した。今回使用した地熱資源の5分類 (「低温熱伝導系」、「高温岩体」、「低温熱水系」、「中温熱水系」、「高温熱水系」) の分類基準を第5図に示す。「低温熱伝導系」は、茂野 (2005, 第4図) の平面的な「広域熱伝導系」地域に



第5図 今回簡易的に演算処理した地熱資源の分類方法。各セル毎に算出される温度構造と貯留構造の2特性値の範囲によって、分類される地熱資源型を示す。3次元的資源評価の簡易定量的な本図と2次元の有望地域抽出の定性的な茂野(2005)の第4図とを比較参照。

加えて、3次元的に熱水系や高温岩体の上位の低温で空隙率・透水性が低い領域などを含んでいる。分類型の決定も、簡単なプログラムの作成により同様に一括処理して、その後のデータ処理を行った。

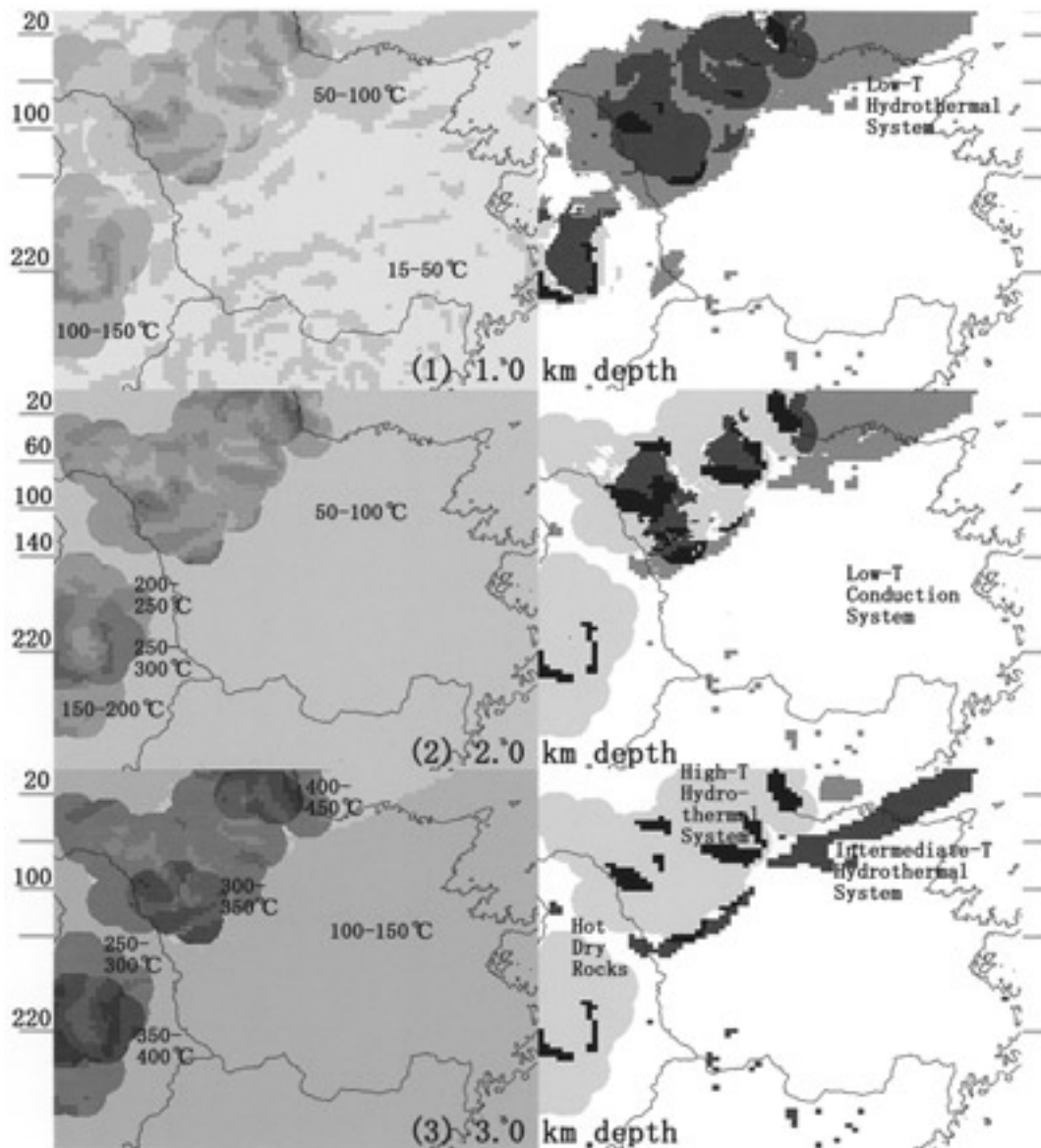
2.5 結果の集計

最後に、2.2～2.4の処理により各セルについて推定された温度、「拡張熱伝導率」、地熱資源型を、全域・全深度(深度0.0～3.0km)および0.5km間隔の深度範囲別に体積(km³)として集約した。これは、一般に「容積法」と呼ばれる静的な地熱資源の評価手法に該当する。同時に、地表環境として自然公園の指定水準別分布(茂野(2005)の第2図(4)を参照)と上記の結果との関係を整理した。これらも簡単なプログラムの作成により一括処理した。なお今回のとりまとめでは、その試行的な性格から熱エネルギー賦存量、発電可能エネルギー量などとしての整理は行わなかった。

3. 結果

今回の一連の処理作業の取りまとめとして、簡易数値シミュレーションにより推定した「大分」地域の地下3深度(1.0, 2.0, 3.0km)における温度と地熱資源型の平面分布を、第6図(1)～(3)に示す。これらを東西方向の5断面図として、第7図(1)～(5)に温度と資源型の分布を重畳的に示す。また第2表に、今回の「大分」地域の3次元的資源評価の試行結果を一覧表に取りまとめた。その結果は、概略以下のようにまとめられる。

- (1) 今回の「大分」地域全域では、資源型としては「低温熱伝導系」が最も大きく(13,382km³、全体の約74.9%)、「高温岩体」(2,226km³、約12.5%)、「中温熱水系」(1,028km³、約5.8%)、「低温熱水系」(823km³、約4.6%)、「高温熱水系」(406km³、約2.3%)の順で続いている。なお今回の分類では、熱水系型を定義する「拡張熱伝導率」の下限値を7.5W/(m K)とした。下限値を4.5W/(m K)とすれば、全体の約33%が熱水系型となる(「低温熱伝導系」の中で概略23%が熱水系型に変化し、中温-高温「熱水系」も増加)が、これはかなり楽観的過ぎると思われる。
- (2) 深度範囲別にも「低温熱伝導系」が卓越する(各範囲内の約68%以上)が、2番目は深度により変化して、浅部(深度0.5～1.0km)では「低温熱水系」(約15%)、中部(1.0～1.5km)では「中温熱水系」(約12%)、深部(1.5～3.0km)では「高温岩体」(17～27%)が続いている。それと調和的に、浅部から深部へ向かって温度(最低値、最頻値、平均値、最高値など)が上昇し、逆に「拡張熱伝導率」が低下する傾向が明瞭に認められる。なお、今回の評価では、数値シミュレーション手法の制約により、全域の最浅部(深度0.0～0.5km)に最低の「拡張熱伝導率」(3.0W/(m K))を与えていることに注意する必要がある。現実にはこの深度範囲に「低温熱水系」が分布する場合が少なくないであろう。
- (3) 現状で技術的・経済的に発電開発の有望性が最も高い「高温熱水系」の賦存量は、総計が406km³(全体の約2.3%)で、相対的には深度1.5～2.5kmの存在度が高い。なお、深部では推定温度が一部で350～450℃に達しており、「超



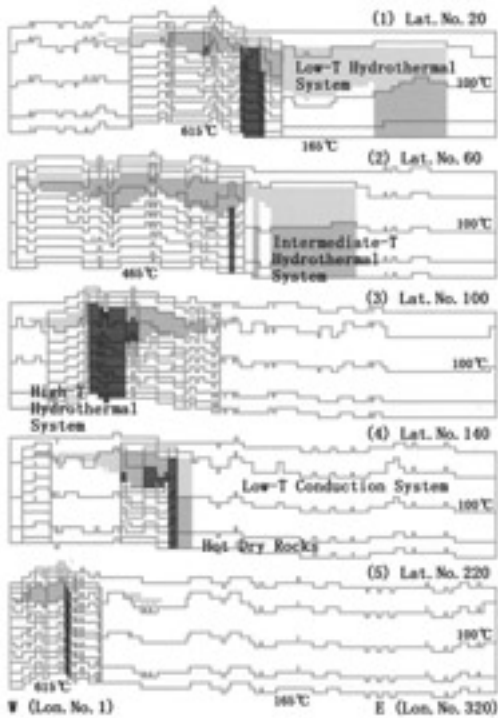
第6図 「大分」地域の簡易3次元的地熱資源評価図(平面図)。

- (1) 深度1.0kmにおける地熱資源の分布評価図：左側は、温度分布を50℃の灰色濃度区分で示す。右側は、地熱資源型の分布を示し、白色、「低温熱伝導系」、淡灰色、「高温岩体」、中間の灰色、「低温熱水系」、濃灰色、「中温熱水系」、黒色、「高温熱水系」である。簡易数値シミュレーションによる評価法は本文を、資源型の分類方法は第5図を、資源型毎の評価のまとめは第2表を参照。第7図の断面位置を図の両脇に示した。
- (2) 深度2.0kmにおける地熱資源の分布評価図：(1)の説明を参照。
- (3) 深度3.0kmにおける地熱資源の分布評価図：(1)の説明を参照。

高温熱水系」と呼べる領域となっている。

- (4) 「大分」地域には非常に広く自然公園が分布しており、区分別には普通地域が全域の17.3%、特別地域が13.5%、特別保護区が0.5%、合計

31.3%となっている(茂野(2005)の第2図(4)を参照)。公園外の地域に比較して、公園区域内では「高温岩体」、「中温熱水系」、「高温熱水系」が概略3倍の高密度で分布しており、全域の各賦



第7図 「大分」地域の簡易3次元的な地熱資源評価図(東西断面図)。温度等値線と地熱資源型のW-E方向の断面分布(深度0.0~5.0km, 高度250m間隔の壇状地形を添付)を, 5つの緯度(右上に「大分」地域の250mメッシュ行番号を表示)について示す。断面位置は, 第6図を参照, 地熱資源型は, 淡灰色が「低温熱水系」, 中間の灰色が「中温熱水系」, 濃灰色が「高温熱水系」である。「高温岩体」の分布は, 白色域の温度分布から読み取れる。断面図の(1)は由布-鶴見・伽藍火山地域, (3)は九重火山北麓地域, (5)は阿蘇火山地域を含む。

存量の中で各々概略55%, 42%, 48%が公園内に位置し, 各々その半分以上(概略28%, 29%, 27%の部分)は特別地域(特別保護区を含める)に位置している。なお, 相対的に公園区域内では「低温熱水系」の存在度は低い。

- (5) 地域別では, 「大分」地域の北西半部の火山性地溝帯に「高温岩体」, 「低温熱水系」, 「中温熱水系」, 「高温熱水系」の分布が顕著である(第6図)。その深度別では, 上記(2)のように浅部では「低温熱水系」が卓越, 中部では多様な型が複雑に分布, 深部では「高温岩体」が卓越する

傾向が明らかである。現在の地熱地域・温泉地分布(茂野(2005)の第8図を参照)と今回の3次元評価との相関性については, 一般的に良好である。しかし個々の地域については, 今回使用した限られたデータの種類の種類と評価手法の制約によって, 様々な不一致が存在する。

- (6) これに対して, 「大分」地域の南東半部の非第四紀火山地域では, 大部分の地域の浅部~深部に「低温熱伝導系」が分布している。例外的に, 1) 火山性地溝帯に隣接するNE-SW方向に連続的な大分市周辺の地域, および2) 大分-熊本県境から宮崎県内へ延びるNW-SE方向に散点的な地域には, 浅部~中部に「低温熱水系」, 深部に「中温熱水系」の分布が推定される。なお, 現在の温泉地分布と今回の簡易的な3次元評価結果とは大きな不一致が認められる(第6図)が, これは今回使用したデータの種類の種類と評価手法では不可避の問題である。
- (7) 地図上で今回の簡易3次元的資源評価の結果(第6図)と2次元的有望地域抽出の結果(茂野, 2005, 第8図)とを比較すれば, ある程度高い類似性が認められる。しかし, まとめの表(体積(第2表, km³)に対して面積(茂野, 2005, 第3表, km²)では, 両者には以下のように大きな相違点が指摘される。1) 2次元有望地域抽出の場合は, 噴気・温泉地の分布を温度構造・貯留構造の評価に利用したため, これらの地域が必然的に有望地域に含まれて, 熱水系型, 特に「低温熱水系」の分布が大きく, 「高温岩体」の分布が小さい。2) 3次元評価の場合は, 深度別の資源分布が把握され, 地下深部には「高温岩体」の分布が広く推定されるため, その資源量が低温-中温-高温の「熱水系」型の合計量とほぼ同程度に大きく評価された。

4. 考察とまとめ

4.1 問題点の整理

今回「大分」地域を事例対象に, 簡易的な数値シミュレーションを含めた3次元的な地熱資源評価を試みた。3. にまとめたその結果はある程度のもっともらしさを示しているが, 現段階では試行的水準のものとして参考に留めることが妥当である。その理由は, 以

第2表 250mメッシュレイヤー系を用いた簡易的な垂直1次元数値シミュレーションによる「大分」地域の地熱資源評価 (km³) のまとめ。

項目	区分	-----深度範囲 (km) -----					全深度 2.5-3.0	全域 総計	自然 公園外 の地域	-自然公園内の地域%-		
		0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5				普通 地域	特別 地域	特別 保護区
温度構造 特性値	15 - 50 ℃	2283.	1518.	27.	0.	0.	0.	3828.	2884.	578.	355.	4.
	50 - 100 ℃	519.	873.	2152.	2147.	2115.	784.	8590.	6304.	1375.	867.	24.
	100 - 150 ℃	148.	390.	394.	113.	32.	1363.	2441.	1571.	439.	397.	16.
	150 - 200 ℃	24.	154.	300.	422.	154.	6.	1061.	545.	211.	271.	21.
	200 - 250 ℃	3.	40.	81.	182.	399.	135.	840.	420.	182.	213.	13.
	250 - 300 ℃	0.	2.	23.	101.	165.	383.	673.	321.	163.	170.	9.
	300 - 350 ℃	0.	0.	0.	13.	99.	158.	270.	92.	77.	93.	7.
	350 - 400 ℃	0.	0.	0.	0.	12.	125.	138.	44.	48.	42.	4.
400 - 450 ℃	0.	0.	0.	0.	0.	23.	23.	4.	13.	6.	0.	
貯留構造 特性値	3.0 W/(m K)	2977.	1536.	1721.	1862.	1920.	1935.	11952.	8541.	1885.	1453.	31.
	6.0 W/(m K)	0.	549.	673.	754.	824.	856.	3656.	2221.	880.	508.	21.
	9.0 W/(m K)	0.	448.	293.	200.	172.	163.	1276.	738.	229.	275.	26.
	12.0 W/(m K)	0.	10.	15.	19.	22.	22.	89.	86.	1.	1.	0.
	18.0 W/(m K)	0.	308.	183.	102.	33.	0.	626.	391.	75.	137.	18.
	27.0 W/(m K)	0.	114.	84.	37.	7.	0.	242.	187.	15.	38.	1.
	36.0 W/(m K)	0.	12.	8.	3.	0.	0.	24.	21.	1.	1.	0.
地熱 資源型 \$	低温熱伝導系	2950.	2054.	2181.	2109.	2040.	2047.	13382.	9754.	2196.	1373.	25.
	高温岩体	27.	31.	214.	507.	703.	745.	2226.	1008.	569.	588.	27.
	低温熱水系	0.	455.	169.	122.	75.	2.	823.	616.	103.	88.	8.
	中温熱水系	0.	395.	349.	130.	56.	98.	1028.	596.	134.	267.	28.
	高温熱水系	0.	42.	65.	110.	103.	86.	406.	212.	85.	99.	9.
総体積 #		2977.	2977.	2977.	2977.	2977.	2977.	17864.	12185.	3086.	2414.	98.

単位はkm³である。%, 海中公園を除き, 特別地域は特別保護区を除く。\$, 各資源型の温度構造値と貯留構造値の設定領域は, 第5図を参照。深度0.0-0.5 kmの特殊性は本文を参照。#, 海域(約954 km²)等を除く。

下の通りである。

- (1) 使用したデータの種類・質・量の問題: 今回の3次元の評価で使用したデータは, 地表地質分布(地質調査所(1995)の250mメッシュ), ブーゲー重力異常分布(地質調査所(2000)の1kmグリッド)データのみである。地下の温度構造・貯留構造の推定については, 有力な手法が様々あり(例えば, 茂野(2000a), 茂野・阪口(2002)を参照)新たな技術開発も進められているが, 現状ではデータ(特に広域的な)の未取得, 未編集, 未電子化, 未公開などの問題により, 今回の作業では使用しなかった。なお, 今回使用した公開電子データについても, その分解能や使い易さなどに問題が残っている。
- (2) 数値シミュレーション手法の問題: 今回の3次元の評価で使用した簡易数値シミュレーション手

法は, 概念-数理モデルが非常に大胆な仮定に基づいた制約が大きなものである。現実の地下環境では多くの場合に, 地形, 熱源, 熱水系などの分布に従って発生する水平的な流体流動などの効果が大きく, 統合的な数値シミュレータの使用による空間3次元の熱移動・流体流動シミュレーションが必要である。しかし, 今回は時間的・技術的・予算的な制約などにより, 簡易的な方法に留めた。

- (3) 複雑な地熱環境の問題: 実際の地下環境は, 不均一が高く短期的~長期的に変化しており, 特に活動的な火山-地熱地域の地下では非平衡, 非定常の多様な状態が存在する。具体的には, マグマ-火山活動による地下深部からの熱・流体供給と噴火・破壊活動, 熱水系の内部~周辺における温度・圧力・透水性・流体相・

化学環境などの時空分布の変化、山岳地形による多量の降水起源地下水の生成・移動や浸食・崩壊などが重要である。例えば、今回の地下温度分布の推定では簡易数値シミュレーションによって平衡温度分布を求めたが、伝導的に平衡に達する時間は数10万年を要して現実の活火山のマグマ溜まりの生成-冷却時間よりも長い場合があるなど、必ずしも合理的ではない。これらの問題は本質的に取り扱いが難しいが、動的な地下環境についての解析・評価・解釈などが今後必要であろう。

- (4) 坑井掘削調査データ使用の問題：今回の試行的な評価結果は、坑井調査によって得られた温度構造・貯留構造についての情報と比較検討することにより、その精度の大幅な向上が期待される。しかしその作業には、坑井調査データが比較的狭い地域の浅部の地下条件に規制されている場合が少なくないこと(上記(3)と関連)、現状では各種の坑井調査データの電子化整備が不十分なこと(例えば、茂野, 2004)、従って比較検討には長時間と大きな労力を要することなどが問題となる。なお、坑井掘削調査は、良質の地熱資源が大規模に分布する(～その可能性が期待される)地域でも、温泉観光地近傍や自然公園内では実施されていない場合が少なくない(「大分」地域では、別府温泉、湯布院温泉、九重火山東部、阿蘇火山東部など)。

4.2 今回の成果と今後の計画

「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」を、筆者らは2001年より進めている。その第1期の取りまとめの一環として「大分」地域を対象に、茂野(2005)では地熱資源評価の事例研究(その1)「2次元的有望地域抽出」の概要を紹介し、今回は(その2)「簡易3次元的資源評価」の概要を紹介した。

今回の一連の作業は試行的なもの(地熱資源の生成・分布についてかなり楽観的な視点からの)であるが、その主要目的は地熱資源に関する基礎的な情報の整備とそれを利用した評価について、長期的な観点から継承-発展的・多面的・経済-効率的・公開的な電子化処理作業の基盤を構築することにある(茂野(2005)の第1図を参照)。4.1で述べた問題は大きい

が、茂野(2005)と本説では、上記の目的で一応の取りまとめとした。

今回整備・構築された編集・解析データ群と処理システム(開発された各種の小規模プログラムを含む)は、将来的に以下のような発展が期待される(茂野・阪口(2002)を参照)。

- (1) 全国化：今回の統合システム的手法に基づいた、日本全国～地方レベルの地熱資源関係の各種データの編集・整備と簡易的な2次元～3次元の地熱資源の評価。
- (2) 高度化：今回の「大分」地域などを事例とし、より多種類のデータの編集・整備に基づいたより高度な解析・処理手法による地熱資源の評価(統合的な熱-流動シミュレーターの利用を軸に)。
- (3) 詳細化：多階層化を通じて、より詳細な50mメッシュレイヤー系に基づいた、特定有望地域の各種データの編集・整備と簡易的な地熱資源評価のケーススタディー(特に、新エネルギー・産業技術総合開発機構によって全国各地で実施されてきた地熱開発促進調査データの整備・利用を通じて)。
- (4) 多面化：地熱資源の探査・開発・保全のみならず、より多面的に環境保全、災害防止(特に火山災害)を含めた地域開発・保全の最適化に向けたケーススタディー。
- (5) 融合化：今回のシステムと市販の各種地理情報システム(GIS)などとの融合化による、多様な社会的データなどとの統合処理化、インターネット・WWWなどを通じた情報検索・交換機能などに優れたシステム化。

今後、「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」の第2期として、これらの課題に取り組んで行く予定である。

5. おわりに

電子情報技術(IT)を通じた多種多様な地理・地球科学情報の統合利用は、自然災害防止、環境保全、地下資源開発などの分野に今後必要不可欠である。特に、火山-温泉-自然公園地域に分布する地熱資源については、探査のみならず開発・保全などの最適化への応用は非常に重要である。これに寄与する

目的で、筆者らは2001年より「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」を進めてきた。その第1期の取りまとめの一環として、茂野(2005)および本説では「大分」地域についての2次元-3次元の地熱資源評価の事例研究の概要を整理・紹介した。

本研究では、その特徴として標準化・共通化・公開化に適した電子データフォーマット(テキスト形式の250mメッシュレイヤー系)を使用している。従って、各種の市販および自作のソフトウェアを利用することにより、今回編集-処理した電子データの再検討や再解析、さらに新たな様々な試行を容易(比較的)に行うことができる。なお、上記のメッシュ形式は、発展的に階層的(1km-250m-50mなどのメッシュレイヤー系)なデータの処理も容易に可能である(茂野・阪口, 2002)が、前述したように現状では日本測地系に基づいており、将来的に世界測地系への変換が必要である。

今後、2005年度末を目途にCD-ROMを媒体として、「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」第1期の成果を取りまとめて公開化する計画である。この中では、総括的な報告に加えて、従来の報文の内容、これらに使用した各種編集データ(テキストファイル、画像ファイル)、作成した各種ソフトウェア(ソースファイル、実行プログラム)、各種処理結果(テキストファイル、画像ファイル)などを一式添付して幅広い利用に供したい。同時に、関連情報をインターネット・WWW(<http://staff.aist.go.jp/hiroshishigeno/index.html>)で公開予定である。本説とともに、これらが地熱資源評価(アセスメント)の発展的・公開的な実施の基礎となれば幸いである。また、他の地球科学分野でもこれらが何らかの参考となれば幸甚である。

謝辞: 原稿について地圏資源環境研究部門・地熱資源研究グループの村岡洋文、玉生志郎、阪口圭一などの方々から有益なコメントを頂いた。重力データの解析については、地質情報研究部門の駒澤正夫氏から貴重なコメントを頂いた。以上の方々へ厚く感謝します。

文 献

- 地質調査所(1991):日本の地熱資源評価に関する研究。地調報告, no. 275, 352p.
- 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.
- 地質調査所(2000):日本重力CD-ROM。数値地質図, P-2.
- 伊達二郎・井出俊夫・山田亮一(2002):地熱開発促進調査開発可能性調査(戦略的調査全国調査)の概要。地熱エネルギー, 27, 211-219.
- 国土地理院・日本地図センター(1998):数値地図ユーザーズガイド(第2版補訂版)。471+29p.
- 宮崎芳徳・津 宏治・浦井 稔・高倉伸一・大久保泰邦・小川克郎(1991):全国規模地熱資源評価の研究。地調報告, no. 175, 17-43.
- 茂野 博(1999a):簡易モデル数値シミュレーションによるマグマ-熱水系賦存環境の多様性の基礎的検討。地調月報, 50, 725-741.
- 茂野 博(1999b):簡易モデル数値シミュレーションによる岩手県葛根田地域の地熱系発達史の検討。地熱, 36, 261-279.
- 茂野 博(2000a):深部地熱資源の探査・開発の今後の進展に向けて。地調報告, no. 284, 313-336.
- 茂野 博(2000b):簡易モデル数値シミュレーションによるマグマ-熱水系賦存環境についての体系的順解析と予察的逆解析。地調月報, 51, 631-648.
- Shigeno, H. (2000): Evolution history of the Kakkonda magma-hydrothermal system, Japan, estimated through simplified-model numerical simulations. Proc. 25th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ., 135-142.
- Shigeno, H. (2001): Time-depth-temperature relations for igneous, metamorphic and hydrothermal processes: Visualized through simplified-model numerical simulations. Proc. 10th Internat. Symp. on Water-Rock Interaction, Villasimius 2001, 749-752.
- 茂野 博・阪口圭一(2002):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)新計画。地質ニュース, no. 574, 24-45.
- 茂野 博(2004):地熱井の温度・地質・変質データの簡易データベース化と地図上統合表示-GISを利用した地熱資源評価研究の一環として「豊肥」地域を例に。地質ニュース, no. 595, 43-56.
- 茂野 博(2005):標準250mメッシュレイヤー系を用いた地熱資源評価の事例研究(その1):20万分の1地勢図「大分」地域の2次元の有望地域抽出。地質ニュース, no. 609, 19-30.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1989):地熱資源量の評価に関する調査。194p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2002):平成13年度地熱開発促進調査 開発可能性調査(戦略的調査全国調査)(第3次)。262p.

SHIGENO Hiroshi (2005): Case study of geothermal resources assessment using the standardized 250-m mesh-layer system: simplified 3-D resource assessment for the "Oita" area, Kyushu, Japan.

<受付:2005年02月24日>