

# 地熱流体化学データの簡易データベース化と統合解析 -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

茂野 博<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

地熱流体(温泉水・噴気, 地熱井からの熱水・蒸気など)は, その供給源である地下の熱水系の起源や環境などを反映して, 通常地表水・地下水・海水・大気などとは異なる地球化学(同位体化学を含む)的な特異性・多様性を示す. このような地熱流体の化学分析データは, 地熱資源の探査・評価, 開発利用, 維持管理あるいは周辺地域の環境保全などの目的で非常に重要である(例えば, D'Amore ed., 1992; 茂野, 1993, 1997; 野田編, 2003). 地熱資源に係わる流体化学的な手法の概要を整理して第1表に示す.

地熱流体の地球化学的データは, 多相・多成分・空間3次元・時間1次元のデータである. したがって, 各種成分間-試料間関係のみならず, 時空間分布関係の解析・表示には様々な可能性がある. さらに, 地質学・地球化学・地球物理学・資源工学的な多様な時空間データとの関係の解析・表示には, 無限とも言える可能性がある.

筆者は2001年度より「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」を進めている(茂野・阪口, 2002a). 2002年度には20万分の1地勢図「大分」の範囲の地域を選び, 広域地熱地域レベルのケーススタディーとして各種データについて解析・表示手法の検討を行った(茂野・阪口, 2002c; 茂野, 2002, 2003). 引き続き2003年度には, 同地域中で2万5千分の1地形図「湯坪」を中心とした地域を「豊肥」地域(狭義)として選び(第1図), 地熱開発有望地域レベルのケーススタディーとして各種データについて解析・表示手法の検討を進めている.

今回はその最初として, 既存の温泉水・熱水の

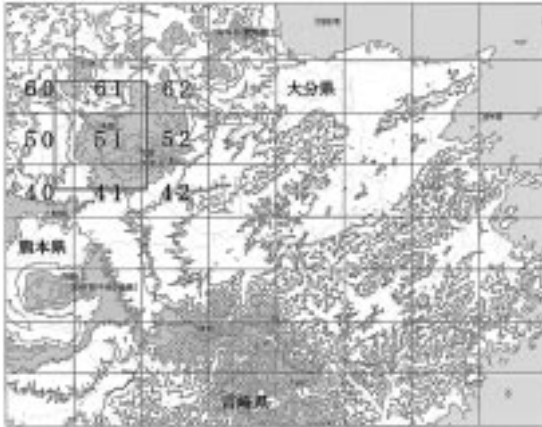
第1表 熱水系型地熱資源の調査・探査・評価-開発・維持・管理における地球化学的手法の整理(茂野(1997)を改編, ◎は本説の主題に対応).

手法	目的(・内容)
(1) 調査・探査・評価段階	.....
○土壌ガス・揮発成分法	・熱水系の平面的広がり, 断裂系分布の推定.
◎温泉・噴気・坑井流体化学法	・熱水系～貯留層の分布, 物理的状态・過程(特に, 貯留層内の温度と流体相)の推定. ・地熱流体の熱・水・化学成分の起源の推定.
◎地熱系の概念的モデル化～数値シミュレーション解析(他種類データとの総合解析)	・熱源・貯留層, 熱・流体収支の総合的把握. ・熱水系～貯留層の最適利用化設計. ・開発に伴う問題の予測と対策の検討.
○化学関連問題の発生予測	・スケール生成問題.      ・材料腐食問題. ・環境有害成分問題. (・有用成分の回収.)
(2) 開発・維持・管理段階	.....
○流体化学モニタリング法	・貯留層の物理的状态・過程の変化の推定. ・流体の熱・水・化学成分の起源の変化の推定.
○人工トレーサー法	・還元水が生産流体へ及ぼす影響の推定. ・貯留層～熱水系の巨視的環境・資源量の評価.
○貯留層～地熱系の数値シミュレーション解析(他種類データとの総合解析)	・貯留層～熱水系の将来予測と最適利用計画化. ・周辺地域～より深部の開発可能性の検討.
○化学関連問題への対応	・スケール生成対策.      ・材料腐食対策. ・環境有害成分対策. (・有用成分の回収.)

地球化学的データ(以下流体化学データと略記)について, 電子化・規格化・統合利用化を指向した検討の結果を紹介する. 具体的には, (1)表計算ソフト(以下ソフトウェアはソフトと略記)を利用した流体化学データの簡易的なデータベース化の検討,

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 地熱資源, 地球化学, 温泉水, 熱水, データベース, プログラム開発, 多変量解析, モデル化, GIS, 豊肥地域



第1図 「豊肥」地域の位置図。20万分の1地勢図「大分」の範囲(標準地域1次メッシュ番号:4931)に、2万5千分の1地形図の境界線を示す(数字は2次メッシュ番号)。太枠で示す今回の「豊肥」地域は、経度131.09°~131.26°E、緯度33.04°~33.21°Nの範囲で、概略15.9km×18.9kmに相当する。

(2) 流体化学データの代表的な図・地図上表示のためのプログラム群の作成と試用, (3) 多変量解析ソフトを利用した流体化学データの解析と結果表示, (4) 簡易的なGISソフトの利用による各種の電子地理・地球科学情報と流体化学データとの重層的表示および地熱系の概念的モデル化である。

なお、本説で取り上げた会社名・商品名などについては、筆者は必ずしもその利用を推奨するものではないことをお断りする。

## 2. データおよび処理方法

### 2.1 データ

大分・熊本県境、九重火山の西方~北方に当たる「豊肥」地域では、多数の地熱兆候地が分布しており、国・企業などによって様々な地表調査と坑井掘削が行われ、大岳、八丁原などの地域で地熱発電所が稼働している。本地域では、「大規模深部地熱発電所環境保全実証調査(豊肥地域)」として、3,000m級坑井掘削を含む様々な調査が1978-1985年に実施された(例えば、地質調査所, 1985)。本説では、その中で主に1978-79年度に実施された温泉水・熱水を対象とした地球化学的調査の公表データ(茂野ほか, 1985)を利用する。

今回の検討では、以下の未電子化データ(1)お

よび既存電子データ(2)~(4)を使用した。

(1) 地熱流体の化学組成: 茂野ほか(1985, 第1表)の温泉水・熱水の化学分析データ。これを、後述する暫定的なフォーマットにしたがって表計算ソフト上で簡易的にデータベース化した。なお、試料採取地点の経度・緯度については、茂野ほか(1985, 第1図)をスキャナーによって電子画像化し、簡易的な方法により数値化した。

(2) 標高(地形): 国土地理院の数値地図50mメッシュ(標高)データ。

(3) 県境・道路: 日本地図センターのJMCマップのベクトルデータ。

(4) ブーゲー重力異常: 地質調査所(2000)の1kmメッシュデータ(仮定密度=2.67g/cm<sup>3</sup>)を、国土地理院の数値地図50mメッシュ(標高)のファイル単位・フォーマットでファイル化したデータ(茂野・阪口(2002a)を参照)。これは、20万分の1地勢図「大分」範囲について暫定的に自作したものである。なお、地質調査所(2001)、鎌田(1997)などでは、仮定密度2.30g/cm<sup>3</sup>でブーゲー重力異常が表示されている。今回のデータは高低幅が狭く、また大幅に平滑化されているが、概括的にはこれらと異常分布の形状は類似している。

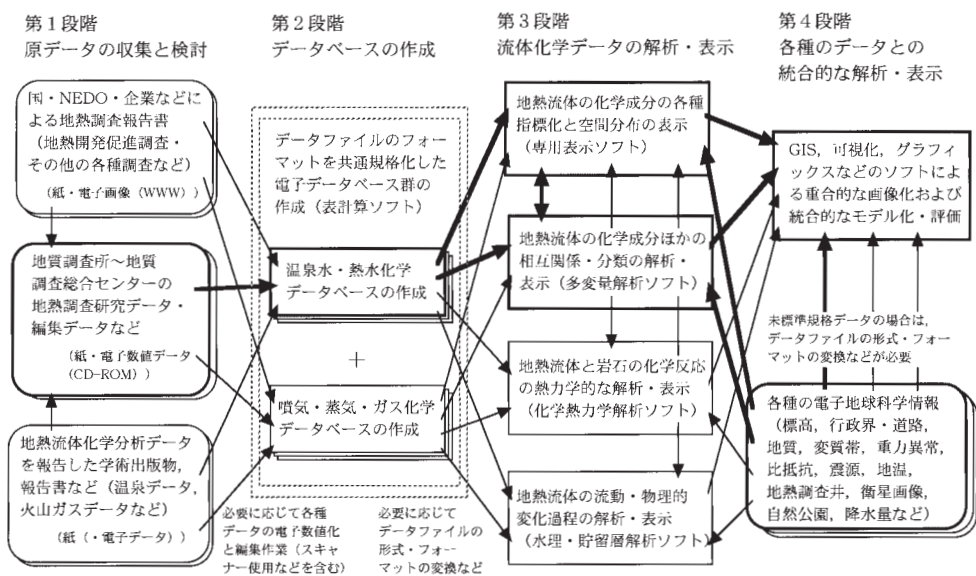
地表地質分布データについては、精度、原図製作年度、作業負担などの点から適当な電子化データが見当たらなかったため、今回は使用しなかった。

### 2.2 処理方法と使用ソフト

今回の検討では、第2図に示す処理の流れに沿って、下記の6種類のソフトを用いてデータの入力・管理・処理、図化表示・編集などを行った。なお、今回のこれらの処理は、Microsoft社のWindows 98/Meを基本ソフトとしたパーソナルコンピュータ(以下パソコンと略記)上で実施した。

(1) 表計算ソフト(Microsoft社のExcel): 流体化学データの入力・データベース化・管理および解析・表示ソフトへのデータの入出力用。

(2) 地熱流体化学データの表示プログラム群(自作のGPGG(Grouped Programs for Geothermal-Fluid Geochemistry), 暫定版): 流体化学データの相互関係、地図上分布などの表示用。なお、本プログラム群の使用にあたっては、Microsoft社の



第2図 「豊肥」地域の温泉水・熱水化学データの処理の流れ図. 今回に関連する部分を太線で示した.

Visual Basicが別に必要である.

(3) 多変量解析ソフト(SPSS社のSPSS (Statistical Package for the Social Sciences)): 流体化学データについての各種の多変量解析用.

(4) 簡易的GISソフト(日本地図センター販売のBird's View Pro): 50mメッシュの標高・重力異常データおよびベクトルの県境・道路データの表示用.

(5) グラフィックスソフト(ペイント系, Adobe社のPhotoshop): 各種の図・地図の重合表示および編集用.

(6) グラフィックスソフト(ドロー系, Adobe社のIllustrator): 地熱系の概念モデル図などの作成用.

### 3. 流体化学データの簡易データベース化

#### 3.1 基礎的な問題の検討

地理学的あるいは地球科学的な多種多様な情報(紙上および電子データ)については, 従来様々なデータ形式, 座標系・投影法, 表・ファイル規格などが使用されており, 効率的な統合利用に大きな障害となっている. このため, これらの情報の今後の電子データベース化過程を通じて, 体系的なデータフォーマットの規格化・標準化・共通化の進展が望まれる. しかし, 各種情報の多様な特性, 利

用目的, 処理手法などを考えると, これは最適化が難しい問題であり基礎的・多面的な検討が必要となる.

特に地球化学データの場合は, 分析の目的・対象・成分・方法などが多種多様であるため問題が多い. オリジナルな試料採取・分析の場合は, (1) 試料採取の位置・時期・環境, 試料の状態, (2) 試料の採取実施者・方法, 現地処理法・保管法, (3) 分析対象および各化学成分の分析結果と表示単位, (4) 分析試料の前処理の実施者と方法, 各化学成分の分析者・分析法・分析精度などのデータの記述が必要であるが, 多種多様なこれらのデータのフォーマットの標準化などは非常に難しい. データ編集の場合にはさらに編集者, 文献名などについて規格化・標準化したデータを加える必要がある.

本説の主題である地熱関連の流体化学データに限定しても, 分析の対象・成分・方法などの多様性は大きい. これらは, 地熱資源の探査, 開発, 維持管理などの目的・段階において異なり, また火山ガス調査, 温泉水・噴気ガスの保健分析, 関連河川水・大気的环境調査などのデータを含めると非常に大きく異なる. また, 地熱流体は, 化学組成の多様性が大きいと同時に地表環境では必ずしも安定ではないため(例えば, 地熱井からの100℃を越える流体, ガス分離・沈殿物生成を伴う温泉水), そ



第2表 地熱流体化学データについての今回の簡易的なデータベースのファイルフォーマット(温泉水・熱水用34項目の暫定版, データは茂野ほか(1985)により表計算ソフトによって編集した)。

試料および採取に関するデータ										温度・pH・塩濃度			主要溶存化学成分データ			
試料番号	温泉地名	源泉名	経度	緯度	高度	湧出形態	坑井深度	湧出量	採取年月日	温度	pH	全溶存成分濃度	Cl濃度	SO4濃度	freeCO2濃度	HCO3濃度
No.	Name-1	Name-2	Longitude	Latitude	Altitude	Feature Code	Well Depth	Discharge Rate	Time	Temp.	pH	T.S.M.	Cl	SO4	freeCO2	HCO3
			(+133. E)(+33. N)		m		m	l/min	yy.mm.dd	°C		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
1	宝泉寺	湯浅	1744	01906	-9999	A	-9999	-9999	-9999	82.30	7.50	-9999	261.00	15.80	-9999	55.00
2	宝泉寺	同和建	1715	01915	-9999	A	-9999	-9999	-9999	61.60	8.20	-9999	307.00	20.90	-9999	120.00
3	宝泉寺	迫健太	1712	01936	-9999	A	-9999	-9999	-9999	97.60	8.30	-9999	921.00	54.70	-9999	42.00
201	地熱井	DB-9号	1394	01436	-9999	B	-9999	-9999	-9999	100.00	7.20	-9999	0.40	163.00	-9999	496.00
202	地熱井	DY-1号	1454	01583	-9999	C	-9999	-9999	-9999	100.00	8.60	-9999	1040.00	56.30	-9999	18.30

(陰イオンナ, 5項目;陽イオン, 4項目;その他, 2項目)								水の同位体組成		追加自由項目(その他の化学成分, 解析結果, 特記事項など)							
CO3	Na	K	Ca	Mg	SiO2	B		δD	δ18O	地区	第1	第2	第3	クラスター	経度	緯度	
濃度	濃度	濃度	濃度	濃度	濃度	濃度	濃度	(H2O)	(H2O)	コード	因子	因子	因子	グループ	表示位	表示位	
mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	per mil	per mil		得点	得点	得点		置調整	置調整	
0.00	192.00	11.00	21.60	0.26	136.00	4.10		-9999	-9999	A	-0.05	-0.75	0.62	1	-9999	0.02	
1.00	160.00	7.87	15.60	0.20	141.00	4.80		-9999	-9999	A	-0.13	-0.66	0.90	1	-9999	0.01	
0.00	440.00	26.60	45.20	0.52	225.00	17.00		-9999	-9999	A	0.78	-0.55	0.72	2	-9999	0.02	
0.00	170.00	51.20	49.80	6.10	165.00	0.01		-9999	-9999	B	-0.04	-0.08	1.03	5	-9999	0.01	
36.00	625.00	50.00	39.40	0.05	258.00	13.10		-9999	-9999	A	1.00	-0.48	0.83	2	-9999	0.00	

の採取-保存-化学分析を通じて様々な処理が必要であり, それらに関する情報の処理・保存も必要になる。

地質調査所および地質調査総合センターにおいては, 地熱流体化学データの電子化編集について, これまでにいくつかの方法・形式が使用あるいは試行されてきた(例えば, 比留川ほか, 1977, 1981; 茂野ほか, 1986; 阪口・高橋, 2002)。しかし, これらは, 目的, 対象, データフォーマット, 使用ハードソフト系, 現状などが大きく異なっており, 横断的なデータ利用は難しい。

今回, 「地理情報システム(GIS)を利用した地熱資源の評価の研究」の一環として, 地熱流体化学データのデータベース化について, フォーマットの規格化・標準化・共通化を検討した。しかし, 上述したようにデータは複雑性・多様性が高く, またデータの利用目的・処理内容などにも様々な可能性がある。このような場合, 少数のデータ項目で作業効率が高いデータベースの構築を指向すると, 各種の目的に必要なデータが欠落したり解析結果が不正確になるなどの問題を生じる可能性が高い。一方, 多数のデータ項目で網羅的なデータベースの構築を指向すると, フォーマットが複雑化しデータの入力・管理・操作に過度の労力を要して, 上手く機能しない可能性がある。

上述した問題の難しさから, 今回のケーススタデ

ィーでは, 暫定的に対象を重要性が最も高い温泉水・熱水の主要溶存化学成分の分析データに絞り, 以下の様に最低限の規格で柔軟性が高いフォーマットを使用して, 簡易的なデータベースを試作した。

### 3.2 今回の暫定的な処理

2.1で述べた「豊肥」地域のデータを例として, 第2表に今回のファイルフォーマットの全項目および一部試料のデータを示す。その概要は以下の通りである。

(1) 基本的に, ファイルフォーマットとして表計算ソフトの表上で横方向(列)に化学成分などの各種項目, 縦方向(行)に試料を取り, 表計算ソフトの高い操作性・機能性・汎用性などを利用したデータの入力・管理・処理などを行う。

(2) 地熱流体化学データ(今回は温泉水・熱水のみ)の項目は, 第2表に示した34を暫定的に定める。すなわち, 試料番号・試料名・採取位置・湧出形態・採取時期などについて10項目, 温度・pH・塩濃度について3項目, 主要溶存化学成分濃度が11項目, 水の水素・酸素同位体組成が2項目およびその他の追加自由項目が8項目である。

(3) 表の最上部の数行に, データ項目の名称・単位などをまとめて入力・表示する。試料採取位置については, 経度・緯度(度未満は10進法小数表記)による。化学成分濃度の単位については, 基

本的にmg/lを使用する。非測定データ、欠損データについては、暫定的に-9999を用いる。

(4) 追加自由項目については、各種の化学成分濃度、同位体組成のほか、多変量解析による試料得点・グループ名、付記事項などにも使用可能とする。なお、追加自由項目については、任意に項目数を増やすことも可能であるが、それに伴う想定外の問題の発生に注意する必要がある。

(5) 各種ソフトによるデータベースの利用の段階で、上記フォーマットの保存用ファイルからカンマ区切り形式(.CSV)などの処理用ファイルに変換する。必要に応じて、表最上部のデータの名称・単位などの行を削除する。

(6) 各種ソフトは、上記(5)の処理用ファイルから必要なデータ項目・試料を読み込むとともに、必要に応じて追加自由項目に処理・出力データを書き出し、処理済・修正済ファイルなどとして別名で保存する。

#### 4. 自作プログラム群による流体化学データの各種表示

##### 4.1 プログラムの概要

地熱資源の探査・評価などの目的では、地熱流体化学の原理・特性に沿った独自の定型的なデータの図-地図上表示法が、各種考案・改良されて普及している(例えば、D'Amore ed., 1992)。今回、初・中級者用プログラム開発環境として広く利用されているVisual Basic (Ver. 6J Learning Edition, 以下VBと略記)を用いて、このような各種の表示用に簡単なプログラム群GPGGの自作を試みた。本プログラム群の内容を第3表に示す。本プログラム群は、温泉水-地熱井熱水用、噴気-地熱井蒸気・ガス用およびユーティリティの3群に分かれ、前2者は各々10種類のプログラムよりなる。

これらの源は、1990年代にApple社のパソコンMacintosh用にMicrosoft社のQuick Basic (Ver. 1E)を用いて自作・利用し(例えば、茂野, 1992a, 1992b, 1997)、一部をMicrosoft社のMS-DOS環境下でQuick Basic (Ver. 4.5E)を用いて改編していたものである。しかし、その後各基本ソフトの更新にしたがって、これらのBasic言語環境およびこれらによる開発ソフトは動作不能となった。今回

第3表 地熱流体化学データの表示プログラム群(GPGG, 暫定版)のプログラム項目一覧表(計画中を含む)。

1. 温泉水-地熱井熱水用プログラム群 #			主な作図目的 \$
1. 1	主要陰イオン (Cl-SO4-ECO2) の三角図		A
1. 2	主要陽イオン (Na+K-Ca-Mg) の三角図		A
1. 3	バイバー (キー) ダイアグラム		A
1. 4	SiO2およびNa-K-Ca(-Mg)化学温度計の相関図		B
1. 5	Na-KおよびK-Mg化学温度計のNa-K-Mg三角図		B *
1. 6	Cl-Bの濃度対数値の相関図		C *
1. 7	δ18O(H2O)-δD(H2O)の相関図		C
1. 8	スティフ (ヘキサ) ダイアグラムの地図上表示		D-A *
1. 9	各種熱水化学温度計による計算温度の地図上表示		D-B
1. 10	B/Clモル濃度比などの分級記号の地図上表示		D-C *
2. 噴気-地熱井蒸気・ガス用プログラム群 #			主な作図目的 \$
2. 1	主要ガス成分 (CO2-H2S-R Gas) の三角図		A
2. 2	主要Rガス成分 (H2-CH4-N2) の三角図		A
2. 3	微量Rガス成分 (N2-Ar-He) の三角図		A
2. 4	H2-Ar化学温度計の表示計算図		B
2. 5	C-H-S反応系による温度-蒸気飽和率の推定図		B
2. 6	N2/Ar-He/Arの濃度対数比の相関図		C
2. 7	δ18O(H2O)-δD(H2O)の相関図		C
2. 8	ガス成分のスティフダイアグラムの地図上表示		D-A
2. 9	各種ガス化学温度計による計算温度の地図上表示		D-B
2. 10	N2/Ar濃度比などの分級記号の地図上表示		D-C
3. ユーティリティプログラム群			
3. 1	紙地図上の点位置から経度・緯度値への簡易変換 (スキャナーで読み込みソフト的にデジタイズ処理) *		
3. 2	地質調査所へ地質調査総合センターが編集した地熱流体化学分析データのファイルフォーマット変換		

# 各種成分の基本的な頻度分布図、百分率図、相関図などは、各種の表計算ソフト、統計解析ソフトなどの利用により作成可能である。  
\$ A, 特性把握; B, 熱水系温度推定; C, 流体起源推定; D, 地図上表示-地下状況モデル化。 \* 本報告で利用したプログラム。

VBに移植するとともに修正を加えたが、現状では温泉水-地熱井熱水用プログラム群の暫定版が作成されており、その他はまだ修正中～計画中の段階である。

ここでは温泉水-地熱井熱水用の暫定版について、以下に箇条書きにして概要を説明する。噴気-地熱井蒸気・ガス用についても、入力データの項目および出力図の様子が異なるのみで、概要は基本的に同様である。

(1) 各プログラムは、現状ではVBの環境下でインタープリター方式で動作する。各プログラムは、単機能の独立プロジェクトとして共通の構成・使用方法となっており、共通の入出力方式を持つ。

(2) 入力データは、3.2で述べたデータフォーマットを共通に使い、表最上部のデータ項目などを取り除いたCSV形式のファイルとして、プログラムのプロジェクトフォルダー内に置く。

(3) 各プログラムの使用に当たっては、VBを起動して各プログラムのソースコードを開き、指定箇所に入出力ファイル名の書き込み、各種パラメータ値の代入・変更などを行う。VBの実行開始(Run)命令により、各プログラムは入力データファイルを読み込み、各種処理を行って出力ウインドウに図を表示するとともに、それを画像形式ファイル(.BMP)として同一のフォルダー内に出力する。

(4) グラフィックスソフト(2.2参照)を用いて出力画像ファイルを開き、独自の修正・加筆により出力図を完成する。場合によっては、各プログラム添付のオーバーレイシート(基準線など)の重合化を行う。地図上表示のデータについては、GISソフトなどで処理した各種のデータと重合化して出力図を完成する(2.2参照)。

## 4.2 主な作図例

ここでは、2.1と3.2で述べた簡易的に電子データベース化した「豊肥」地域の温泉水・熱水の化学分析データについて、上記のプログラム群を用いて作図した例を示す。なお、茂野ほか(1985, 1986)では、地熱情報データベース・システムの開発ソフトなどを用いてミニコン～メインフレームとX-Yプロッターによって作成した図やその加工図が掲載されており、一部は下記の図に対応している。

### 4.2.1 スティフ(Stiff)ダイアグラムの地図上表示

流体化学データの解析では、試料採取地点の位置・環境と多成分の化学分析データとの関係を総合的に把握することが必要である。第3図では、広く利用されているスティフダイアグラム(ヘキサダイアグラム)を本地域の地形等高線図上に表示し、最も基本的な流体化学特性の空間分布を示した。

高温地熱地域の温泉水・熱水のpH、陰イオン構成・濃度などは、流体供給源の熱水系の特性・生成機構について有力な情報を提供する(例えば、White, 1970; D'Amore ed., 1992)。高温・中性・中塩濃度のNa-Cl型流体は、地下に熱水型の高温貯留層の分布を指示しており、本地域では大岳・八丁原-湯坪、岳湯-宝泉寺、黒川-満願寺の3地区がこれに当たる。また、高温・酸性・低塩濃度のSO<sub>4</sub>型流体は、地下に蒸気卓越型の高温貯留層の分布や火山ガスの寄与を示唆しており、牧ノ戸-吉部、黒川-満願寺、大岳・八丁原-湯坪、小国鉱



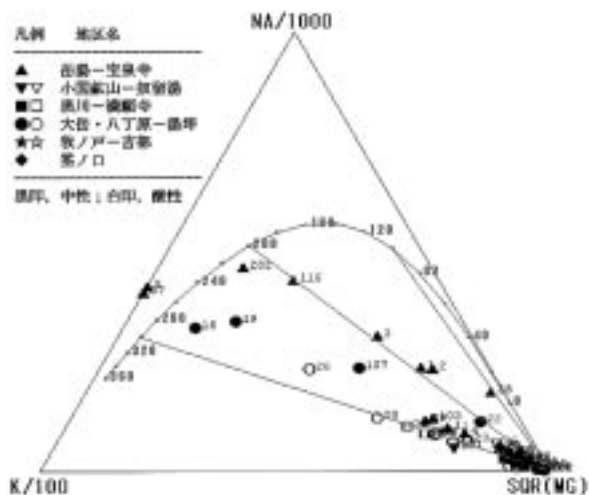
第3図 「豊肥」地域の温泉水・熱水化学データのスティフ(ヘキサ)ダイアグラムの地図上表示。データは茂野ほか(1985)、表示ソフトはGPGGによる。試料採取地点の地区記号は第4図などと同一で、各ダイアグラムの表示位置は図の混み具合に応じて調整されている。背景は、国土地理院の数値地図50mメッシュ(標高)データに基づく地形等高線である。

山-奴留湯の4地区の各一部分がこれに相当する。一方、低温・中性のΣCO<sub>2</sub>型や混合型は、高温熱水系の周辺部あるいは独立した中・低温熱水系などに対応すると考えられ、上記の各地区中で火山体から離れた低所(下流側)および釜ノ口地区に分布している。

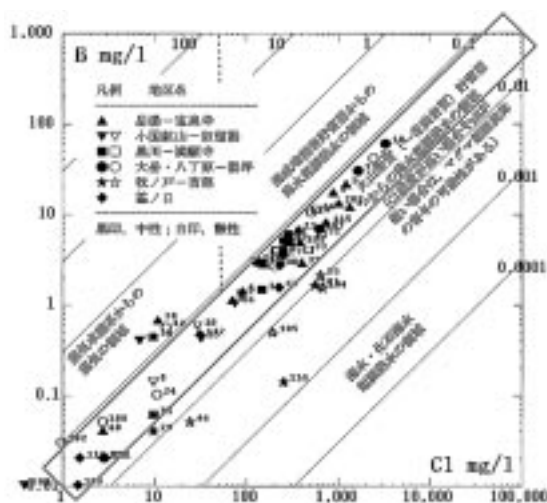
### 4.2.2 Na-K・K-Mg温度計による2次元温度表示

地熱流体化学データの解析では、地下の地熱貯留層の温度推定が非常に重要である。この目的で様々な手法が提案されているが、第4図は3種類の陽イオンの熱水-岩石反応の化学平衡に基づく2次元温度計手法(Giggenbach, 1988)を、本地域の温泉水・熱水の化学データに適用したものである。Na-KおよびK-Mgの両温度計温度が一致する化学平衡線に近い試料は、地下の安定した高温の熱水型貯留層から直接的に湧出したことを示しており、その温度推定値の信頼性が高い。一方、化学平衡線から離れた試料は、火山ガスの関与、低





第4図 「豊肥」地域の温泉水・熱水化学データに適用したNa-K・K-Mg両温度計の2次元温度表示. 表示ソフトはGPGGによる. 図の様式および中央の平衡温度曲線はGiggenbach (1988)による. 凡例の地区などは第3図を参照.



第5図 「豊肥」地域の温泉水・熱水のClとBの対数濃度相関表示. 表示ソフトはGPGGによる. 斜線群に附随する右上の数字はB/Clモル比を示す. 図中の流体起源の領域区分は, 茂野 (1992b) などによる. 凡例の地区などは第3図を参照.

温地下水との混合などの過程によりMg濃度が影響を受けている場合が多く, 推定値の取り扱いには注意が必要である.

本地域の中では, 大岳・八丁原-湯坪, 岳湯-宝泉寺, 黒川-満願寺の3地区からの熱水・温泉水が, Na-K温度計(化学平衡線上の該当温度とSQR(Mg)点との結線で示される)で180~300℃の推定貯留層温度となっている. 前2地区では, 地熱井が多数掘削され, 概略一致する実測温度が得られている. 一方, 黒川-満願寺地区では高温の温泉水は酸性で第4図の化学平衡線から離れており, また地熱井などの掘削は限られているが, 特に本地区東部の地下には高温熱水系の分布が期待される.

4.2.3 Cl-B対数濃度表示

地熱流体化学データの解析では, 地下の熱水系のモデル化の基礎として熱源, 流体源, 地熱貯留層の各種特性などを推定することも重要である. この目的で, 自然トレーサーとなる各種の可溶性成分(非反応成分)の利用が有効である(例えば, 茂野, 1997). 第5図は, 本地域の温泉水・熱水について, ClとBの対数濃度の相関性を表示・検討したものである. B/Cl比が同一の試料は共通の起源(貯留層における類似の岩石・水の起源, 類似の物理過程)を持つ可能性が高いと推定され, Cl濃

度も貯留層中の卓越流体相の種類, 本源流体の起源などの推定に有効である(例えば, 茂野, 1992a, 1992b).

本地域の温泉水・熱水の多くは, 概略4,000 mg/l以下のCl濃度で0.02~0.08のB/Clモル比を示し, 降水起源地下水が卓越する火山岩類質の熱水型貯留層からもたらされた可能性が高い. これに対して, 一部の低塩濃度の温泉水は, より高い0.08~0.3のB/Clモル比を示し, 蒸気卓越型貯留層(4.2.1参照)と関係したものである可能性が高いと考えられる. 一方, (牧ノ戸-)吉部地区の温泉水は, 0.02以下の特異的に低いB/Clモル比を示しており, 本地域の中では特殊な起源・生成環境を持つと考えられ, 化石海水, 蒸気分離に伴ってBを選択的に失った熱水などの寄与の可能性が指摘される.

5. 多変量解析ソフトによる流体化学データの解析と結果表示

5.1 概要

多変量(統計)解析は, 様々な多成分・多試料データについて成分間-試料間の関係の把握, 特異な成分・試料の抽出などを行う数学的手法で, 解析の目的・条件, データの特性などによって様々な

処理方法が開発されている(例えば, Davis, 1986; 田中・脇本, 1983). 地球化学分野では, 河川堆積物, 土壌などの試料を採取し多成分化学分析を行ってその分布図(地球化学図)を作成する場合などに, 各種の化学的異常の特性・分布・原因(例えば, 鉱床分布, 人工汚染)を推定する手法として幅広く利用されている(例えば, Howarth ed., 1983; 上岡ほか, 1991). 近年, 高機能のパソコンと市販の多変量解析ソフトの普及により, 多様な手法の適用が低価格で容易に可能となってきた.

今回のケーススタディーでは, 上述した「豊肥」地域の地熱流体化学データについて, 多変量解析法として最も一般的な因子(主成分)分析を試みた. 市販ソフトとしては, 1960年代のメインフレーム時代から多方面に幅広く利用されている多機能のSPSSのパソコン版(Ver. 11.5J)を試用した. 解析結果は, 同ソフトの機能で図表として整理するとともに, 3.2で述べた簡易的なデータベース(ファイル)に移し, 4.1で述べたGPGGの転用により地図上に統合的に表示して4.2の結果と比較した. なお, 同時にクラスター分析も試みたが, 誌面の厳しい制約により今回は結果の大部分を割愛した.

## 5.2 因子(主成分)分析

因子分析は, 多成分・多試料データ間の複雑な関係を少数の潜在的因子によって説明(総合的に指標化)するもので, 外的基準のない定量的なデータの場合に適用される. 今回, 記述統計により標準化した11化学成分(温度・pHを含め,  $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$ を $\Sigma\text{CO}_2$ として合体)・全61試料のデータを用いた. 処理は, まず3.2で作成したデータファイルをSPSSに読み込み, ユーザーズガイド(SPSS Inc., 2002)にしたがってプルダウン形式のメニューから一連の選択・指定を行って実施した.

今回, 因子抽出法としては, 化学成分の相関行列を用いて回転のない主成分分析法により最小の固有値を求める方法を指定した. これにより, 第1~第3因子(主成分)について, 各化学成分の因子負荷量(成分行列), 各試料についての各因子得点(主成分得点)などを得た. 第4表には, 第1~第3因子について, 共通性, 説明された分散の合計, 成分行列をまとめて示す. 第1~第3因子により良好に, データの分散の約84%が説明されている.

第4表 「豊肥」地域の温泉水・熱水化学データの因子(主成分)分析結果のまとめ(データは茂野ほか(1985), 多変量解析ソフトはSPSSによる).

(1) 共通性			(3) 成分行列		
化学成分*	初期	因子抽出後	化学成分*	成分(因子)	
				1	2
Temp.	1.000	0.445	Temp.	0.631	-0.182
pH	1.000	0.746	pH	0.203	-0.085
Cl	1.000	0.965	Cl	0.966	0.158
SO <sub>4</sub>	1.000	0.824	SO <sub>4</sub>	-0.193	0.725
ΣCO <sub>2</sub>	1.000	0.774	ΣCO <sub>2</sub>	-0.150	0.682
Na	1.000	0.977	Na	0.981	0.116
K	1.000	0.928	K	0.933	0.223
Ca	1.000	0.820	Ca	-0.124	0.895
Mg	1.000	0.906	Mg	-0.157	0.918
SiO <sub>2</sub>	1.000	0.936	SiO <sub>2</sub>	0.958	0.136
B	1.000	0.930	B	0.961	0.025

(2) 説明された分散の合計				(4) 成分(因子)の指示内容	
成分#	抽出後の負荷量平方和合計	分散の%	累積%	成分#	意味
1	5.15	46.79	46.79	1	高温熱水系(中性Na-Cl型)
2	2.78	25.28	72.07	2	中・低温熱水系(中間型)
3	1.32	12.04	84.11	-3	蒸気卓越系・火山ガスの寄与(酸性SO <sub>4</sub> 型)

\* 基本統計により標準化した. # 因子.

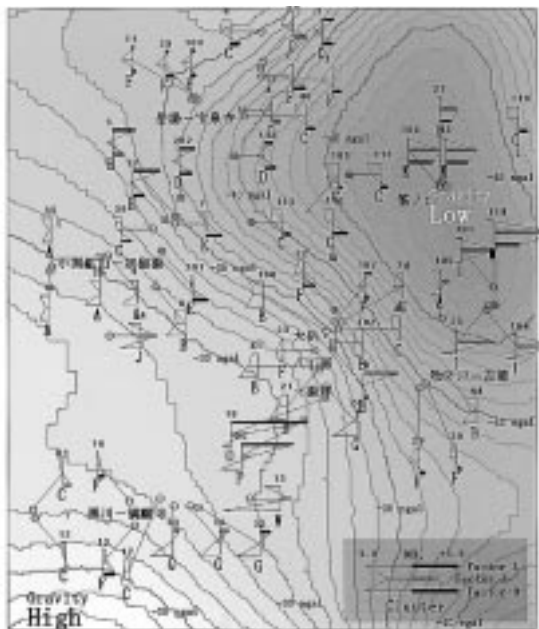
第1因子は, 正のCl, Na, B, SiO<sub>2</sub>, Kの各濃度および温度の寄与が非常に大きく, 4.2で述べた高温熱水系を指示する成分である. 一方, 第2因子は, 正のMg, Ca, SO<sub>4</sub>, ΣCO<sub>2</sub>の各濃度の寄与が大きく, 一部の中・低温熱水系を指示する成分である. これに対して, 第3因子は, 正のpHおよびΣCO<sub>2</sub>濃度, 負のSO<sub>4</sub>濃度の寄与が大きく, 大きな負の因子得点が高温の蒸気卓越型系の分布あるいは火山ガスの寄与を指示する成分である.

第6図には, 各試料の第1~第3因子得点を統合化し, 「豊肥」地域のブーゲー重力異常分布とともに地図上に表示した. また参考として第6図には, クラスター分析によるグループ番号(A~P)を合わせて示した. 第6図の因子得点の分布は, 第3図のスティフダイアグラムの分布と類似性が高い結果となっている.

## 5.3 若干の議論

5.2の結果は, 地熱流体化学データへの多変量解析手法の適用が, 地熱探査・評価などに有効性を持つことを示している. しかしながら, 本来的に多変量解析は相互関係が不明な多成分・多試料データへの適用を主目的とした統計学的手法であり,





第6図 「豊肥」地域の温泉水・熱水化学データの多変量解析結果の統合的な地図上表示。データは茂野ほか(1985)、多変量解析ソフトはSPSSにより、表示ソフトはGPGGの転用による。各試料についてのダイアグラムの内容は、右下の凡例を参照。因子(主成分)分析結果(主要3因子得点)をステイフダイアグラムの形式で表示し、その下にクラスター分析結果(グループ記号)を表示した。試料採取地点の記号は、温泉や坑井の深度を示す(茂野ほか(1985)を参照)。背景は、地質調査所(2000)の1kmメッシュデータを変換したブーゲー重力異常(假定密度=2.67g/cm<sup>3</sup>)である。

その応用限界に注意する必要がある。高温の地熱流体化学データについては、4.で述べたように(第3図~第5図参照)すでに化学的な原理、地球化学的・地熱学的な知識・経験などに基づく体系化が進んだ解析・表示法があり、多変量解析はその補助的な手段と考えるべきであろう。

一方、様々な要因があって現象が非常に複雑で、多成分・多試料データが様々な地域で多様な異常を示すような場合には、多変量解析手法は有効性が高いと考えられる。地熱資源についても、起源流体が複雑多様でまた化学平衡が進み難い中・低温熱水系の探査・評価などでは、多変量解析は有力な解析手段となる可能性がある。また、地質学・地球化学・地球物理学・資源工学などの多様なデータの総合解析では、各種データが示す



第7図 「豊肥」地域の温泉水・熱水の化学的特性と地形・重力異常データの統合的な地図上表示および熱水系の概念モデル化。温泉水・熱水の化学データは茂野ほか(1985)、表示ソフトはGPGGの転用による。記号の大きさは湧出温度、×・十印は低pH(×はpH ≤ 6.0, 十はpH ≤ 3.0)、記号の形は卓越する陰イオン種(○, Cl<sup>-</sup>; □, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; △, ΣCO<sub>2</sub>(各60%以上); ◇, Cl-SO<sub>4</sub>-ΣCO<sub>2</sub>の混合)、記号の色はB/Clモル濃度比(黒, < 0.02; 白, 0.02 ≤ < 0.08; 枠付きの白, 0.08 ≤) (第5図参照)を示す。地形とブーゲー重力異常は、第3図、第6図を参照。矢印は熱水系浅部の流体流動方向を示す(茂野ほか(1985)を参照)。

多様な異常の分布から地下深部の温度構造・流体貯留構造に係わる本質的な異常を抽出する目的などで、多変量解析に高い有効性が期待される。これらの場合には、多変量解析手法の多面的な高度利用のほか、今回例示した解析結果の地図上表示法の工夫なども重要であろう。

## 6. 簡易的GISソフトを利用した各種データの重畳表示と地熱系の概念モデル化

### 6.1 概要

地熱流体化学データは、地熱探査・評価などの中で特に概念的な熱水系モデルの作成について非常に有力な情報を提供する。本説の最後に第7図

として、「豊肥」地域について(1)指標化した地熱流体化学データと(2)地形・ブーゲー重力異常とを地図上に重疊的に表示し、それに地熱系の概念モデルを書き加えたものを示す。(1)は4.1で述べたGPGGの転用、(2)は2.で述べた各種のデータとソフトによって作成され、各種の変更が柔軟に可能である。なお本図は、主に手作業によって作図した茂野ほか(1985、第7図・第8図)の概念モデル図を基礎に、一部改編したものとなっている。

## 6.2 地熱系の概念モデルの説明

第7図に示した「豊肥」地域の地熱系の概念モデルについて、ここでは以下に特に重要性の高い5点を述べる。

(1)熱源：第7図では、第四紀後期の安山岩質火山体地下のマグマ溜まり～高温火成岩体の分布・特性については、地表地質分布(例えば、鎌田, 1997)から概略的に推定した。本地域では、活火山である九重火山(概略0.2Maより若い)の西方～北方および涌蓋山を中心としたやや古い火山(概略0.6-0.4Ma)の周辺に広く地表地熱兆候地が分布し、特に前者の周辺ではpHが3以下の温泉・噴気地が一部存在している。したがって、これら両火山体の地下のマグマ溜まり～高温固結岩体が2つの熱源となっており、熱水系の加熱機構としてより若い前者ではマグマ性流体供給の寄与が大きく、より古い後者では深部からの熱伝導が卓越する可能性が高いと考えられる。

(2)中軸域の高温熱水系：本地域の高温熱水系は、第7図の左上から右下へ概略岳湯-涌蓋山-大岳・八丁原-牧ノ戸-九重硫黄山(高温噴気地)を結ぶNW-SE方向の帯状の地域に本源があり、両側の地形的低所(NE方向とW方向)に温泉水・熱水が流動して、温度低下・化学変化する傾向が認められる。岳湯-宝泉寺、大岳・八丁原-湯坪および牧ノ戸-吉部の3地区の高温部を結ぶこのNW-SE方向の帯は、同走向のブーゲー重力異常急傾斜部の位置と一致し(第6図参照)、また地形的にも明らかに現れており(第3図参照)、大規模な構造線～断裂帯に対応していると考えられる。当該地域には、NW-SE走向の断層群(岳湯断層、筋湯断層など)の分布が1960年代から指摘されており、地熱流体の貯留・流動を規制していると考えられ

てきた。地熱井コアの観察や発震機構の解析によれば、これらは最大圧縮主応力軸が水平E-W方向の横ずれ型の活断層として分布する可能性が高い(例えば、林ほか, 1985; 清崎ほか, 2002)。なお、同走向の活断層やブーゲー重力異常の急傾斜部は九州北部-中部で所々に認められ、地熱貯留構造としての重要性が指摘される。

(3)北東域の熱水系：大岳・八丁原-湯坪、岳湯-宝泉寺および牧ノ戸-吉部の各地区はブーゲー重力の大きな低異常分布へ向かって、また釜ノ口地区はその中心部に位置しており、相対的に孔隙率・透水性が高い新第三紀～第四紀の火山岩類(一部堆積岩類を含む)の厚い分布により、比較的貯留層の発達環境に恵まれていることが期待される。しかし、残念ながら吉部、釜ノ口では流体化学データは高温環境を示唆しておらず、高温貯留層の分布は上述したNW-SE方向の帯状の地域周辺に限られる可能性が高い。

(4)南西域の熱水系：本地域のブーゲー重力異常は広域的にSW方向へ高い値になっており、概括的に孔隙率・透水性が低い中生界～古生界の基盤岩類(主に花崗岩類～変成岩類)の分布深度が浅くなっていることに対応している。黒川-満願寺、小国鉦山-奴留湯の2地区の熱水系は、概略地形に沿ったE->W方向の分布および浅部流体流動が想定されるが、上記の点から大規模な発達の可能性は低いと考えられる。

(5)活断層系との関係：上述したように、本地域の高温熱水系の分布は概括的にNW-SW方向の構造帯に規制されており、この地域周辺の地表に発達するE-W走向の正断層を中心とした活断層群(例えば、活断層研究会編, 1991)が及ぼす影響はそれほど大きくない。地表に発達するこれらの活断層は、多くの場合降水起源地下水の涵養域となっている可能性が指摘される。しかし、九州中部の活火山周辺では高温熱水系(噴気・酸性温泉が多く、マグマ起源流体の寄与の可能性が高い)がE-W性の1方向にのみ分布する傾向(活火山体の最高標高部->山頂部噴気地->山腹・山麓の噴気地・温泉地の配列)が強く、九重火山と黒川-満願寺地区の熱水系はこの関係に当たる(茂野・阿部, 1986)。本地区の温泉地の配列は河川分布を斜めに切ってE-W方向に直線的であり(第3図参照)、

同方向の地下浅部の活断層-断裂系が地熱流体の通路となっていると推測される。一方、岳湯-宝泉寺地区の温泉地については、活断層と推定されるE-W性の線状地形近傍に位置する場合が多く(茂野(2003, 第10図)を参照)、S->N~SW->NE方向の河川沿いに発達する熱水系浅部に対して、直交的なE-W走向の活断層系が地表への地熱流体の通路を提供している可能性が高い。

### 6.3 若干の議論

筆者らは、「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」として、多種多様なデータを高い柔軟性・発展性を持って総合利用化する目的で、標準地域メッシュ系に基づく国土地理院の数値地図1km-250m-50mの標高メッシュ系やこれらに対応した表形式のファイルフォーマットなどを標準的に使用すること(データの計算・表示点位置の共通化)を提案し、いくつかの試みを行ってきた(茂野・阪口, 2002a, 2002c; 茂野, 2003)。しかし、今回述べた地熱流体化学データや坑井検層結果などについては、データ地点が少なくその分布が不規則散点的であり、また各点の測定・分析成分数が非常に多く、そのまま上記のメッシュ系で情報を整理することには問題が多い。

今回の簡易的なGISソフトを利用した各種データの重合表示および地熱系の概念モデル化では、地熱流体化学データについては3.~5.で述べたように表形式を中心に独自の方法で処理し、地形・重力異常データについては標準地域メッシュ系で処理を行って、両者を画像的に重合化して検討を加えた。この方法はそれなりに有効であり、今後各種のデータについても特性に応じて両データ形式の柔軟な利用により管理・処理の検討を進めたい。また、将来的にはより定量的なデータの数値演算処理~シミュレーションを指向して、上記2形式のデータのより多様で高度な統合解析を目標に検討を進めたい。

## 7. おわりに

筆者らは「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」を実施しており、2001-2004年度にはその第1期として代表的な

地域について各種のデータの解析・表示のケーススタディーを進めている。今回は、地熱開発有望地域レベルとして「豊肥」地域を選び、地熱流体(温泉水・熱水)の地球化学的分析データについて以下の4点の検討結果を紹介した。

(1) 表計算ソフトによる簡易的なデータベースの構築(基礎的な問題の検討と今回の暫定的な処理法の説明)。

(2) VBに基づく自作のプログラム群(GPGG)による各種表示(プログラム概要と作図例の紹介)。

(3) 市販の多変量解析ソフト(SPSS)による解析と結果表示(因子(主成分)分析結果の統合的な図上表示と若干の議論)。

(4) 簡易的なGISソフトを利用した地形・重力異常データとの重合表示および地熱系の概念モデル化(方法の概要、モデルの説明と若干の議論)。

今回の地熱開発有望地域のケーススタディーで不十分な点としては、(1) 噴気、地熱井蒸気などについては対象外としたこと、(2) 地熱流体化学データの地下深度変化、時間変化などについては対象外としたこと、(3) 1論文のデータのみを処理し、本地域で多数報告されている他の温泉水・熱水データは対象外としたこと、(4) 地質、活断層、比抵抗異常、震源などの分布との重合処理を割愛したこと、(5) 本地域で提案されている他の熱水系モデルなどとの比較検討を割愛したことなどが挙げられる。これらについては、本研究の時間的な制約によるもので、今後の検討課題としたい。

本説の3. で若干触れた地表水・地下水などの各種流体(特に陸水)の地球化学的なデータは、各地域レベル~世界規模での資源開発・環境保全・災害防止などの目的で、多面的に非常に重要なものである。今後、多種多様な流体化学データの電子データベース化が対象・成分・地域毎などに進められることが期待されるが、流体は循環し相互に関係し合っており、データベースの公開化によるデータの相互利用が要望される。地熱流体化学についても、この点に留意したデータベース化、処理システム化が必要であろう。今回試作したデータベースおよびプログラム群(GPGG)は、現状では限られた内容の暫定版ではあるが今後さらに充実化を計り、本研究第1期のとりまとめの一環として2004年度に他の各種編集データ・開発プログラムなどと



ともに電子公開化したい。

なお、本説ではより詳細に原稿(各種の図・表を含む)を取りまとめたが、厳しい誌面の制約によって一部削除した。これについては、今後再整理し機会を見て公表したい。

**謝辞:** 本説で引用した地熱流体化学データの起源である「大規模深部地熱発電所環境保全実証調査」に関係された省庁・企業・研究機関などの多くの方々、特に電源開発株式会社、三菱金属株式会社(現三菱マテリアル株式会社)および旧工業技術院地質調査所の方々へ改めて謝意を表します。本説の検討の一部(多変量解析)は、「貯留層変動探査法の研究開発」の中で「地球化学的モデリング支援技術の研究」として行われました。本説のとりまとめに当たっては、地質調査総合センター(地熱資源研究グループ)の玉生志郎、佐脇貴幸などの方々から貴重なコメントを頂きました。記して感謝します。

#### 文 献

- 地質調査所(1985): 豊肥地熱地域における研究。地調報告, no.264, 443p.
- 地質調査所(1986): 地熱情報データベース・システムの研究。地調報告, no.265, 538p.
- 地質調査所(2000): 日本重力CD-ROM。数値地質図, P-2.
- 地質調査所(2001): 大分地域重力図, 重力図(ブーゲー異常)no.17.
- D'Amore, F. ed. (1992): Applications of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development. U. N. Institute for Training and Research, 408p.
- Davis, J. C. (1986): Statistics and Data Analysis in Geology, 2nd ed. Wiley, 646p.
- Giggenbach, W. F. (1988): Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca-geoindicators. Geochim. Cosmochim. Acta, 52, 2749-2765.
- 林 正雄・渡辺公一郎・古谷直行(1985): 大岳-八丁原地域の断層と応力場。地熱学会誌, 7, 383-399.
- 比留川貴・安藤直行・角 清愛(1977): 日本の主要地熱地域の熱水の化学組成。地調報告, no.257, 934p.
- 比留川貴・安藤直行・角 清愛(1981): 日本の主要地熱地域の熱水の化学組成, その2。地調報告, no.262, 403p.
- Howarth, R. J. ed. (1983): Statistics and Data Analysis in Geochemical Prospecting. Handbook of Exploration Geochemistry, vol.2, Elsevier, 437p.
- 鎌田弘毅(1997): 宮原地域の地質。地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 127p.
- 上岡 晃・田中 剛・伊藤司郎・今井 登(1991): 元素の地表分布パターンとその解析-北関東の地球化学図。地球化学, 25, 81-99.
- 活断層研究会編(1991): 新編 日本の活断層-分布図と資料, 東大出版会, 437p.
- 清崎淳子・吉川美由紀・須藤清明・田口幸洋(2002): 活断層と地熱帯-大岳・八丁原地域-。月刊地球, 24, 758-762.
- 野田徹郎編(2003): 地熱地化学講座。産業技術総合研究所地質資源環境研究部門, 210p.
- 阪口圭一・高橋正明(2002): 東北・九州地熱資源図(CD-ROM版)。数値地質図, GT-1, 地質調査総合センター。
- 茂野 博・阿部喜久男・野田徹郎(1985): 地熱流体の化学に基づく豊肥地域熱水系の概念的モデル。地調報告, no.264, 285-302.
- 茂野 博・野田徹郎・比留川貴・角 清愛・花岡尚之(1986): 水地球化学データベース・システム。地調報告, no.265, 271-330.
- 茂野 博・阿部喜久男(1986): 別府-九重-阿蘇-熊本-雲仙地域の熱水系-(1)火山性温泉・噴気地分布の規則性から推論される熱水系モデル。地調月報, 37, 159-181.
- 茂野 博(1992a): 熱水系の深部環境を地球化学データから予測する。地質ニュース, no.457, 16-33.
- 茂野 博(1992b): 地球化学的に見た北海道の地熱資源の開発有望性。平成4年度資源・素材関係学協会合同秋季大会分科研究会資料, U 北海道における地熱の現状と展望, 30-33.
- 茂野 博(1993): 地化学探査の新技术。日本地熱学会誌, 15, (4), 43-48.
- 茂野 博(1997): 起源指標としての地熱流体化学。日本地熱調査会セミナー「地熱発電所の維持管理における地化学の活用について」, 1-23.
- 茂野 博・阪口圭一(2002a): 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・阪口圭一(2002b): 電子地理情報を地熱調査・開発に利用する。地熱エネルギー, 27, 252-273.
- 茂野 博・阪口圭一(2002c): 地質調査所「100万分の1日本地質図CD-ROM版」メッシュデータの様々な利用法-国土地理院・標高メッシュ・ファイルフォーマット化を通じて。地質ニュース, no.578, 36-49.
- 茂野 博(2002): 九州の地熱発電開発地域の地質鳥瞰図-山と風景のGISソフト「カシミール3D」による作図例。地質ニュース, no.580, 21-31.
- 茂野 博(2003): 公開震源データとGISを利用した深部地熱環境の推定-20万分の1地勢図「大分」地域を例とした試み。地質ニュース, no. 581, 14-32.
- SPSS Inc. (2002): SPSS Base 11.5J User's Guide. 566p.
- 田中 豊・脇本和昌(1983): 多変量統計解析法。現代数学社, 296p.
- White, D. E. (1970): Geochemistry applied to discovery, evaluation, and exploitation of geothermal energy resources, Rapporteur's report. Proc. U. N. Symp. on Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa 1970 (Geothermics, Spec. Iss., 2), 1, 58-80.

SHIGENO Hiroshi (2004): Simple database and synthetic analysis of geothermal-fluid chemistry data - A case study for the Hoho area, Japan, in geothermal resources assessment program using GIS.

< 受付: 2003年7月24日 >