

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

茂野 博¹⁾

1. はじめに

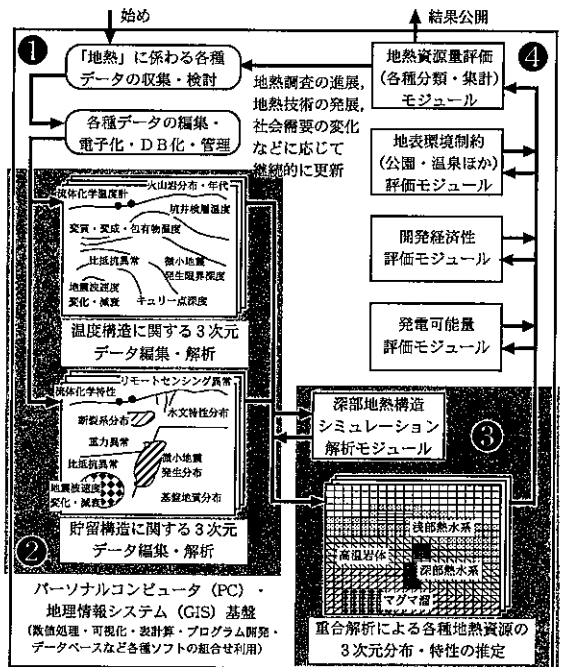
1995年以降日本においても各種の電子地理情報(地球科学情報を含む)の公開化と地理情報システム(以下GISと略記)の普及化が進み、地球科学・工学の様々な分野で多様な情報の統合的な管理・処理・応用などが可能となりつつある。この流れに沿って、地質調査総合センター(産業技術総合研究所・地圏資源環境研究部門)の地熱資源研究グループでは、日本の地熱資源の長期的・総合的な最適利用に資する目的で「GISを利用した地熱資源の評価(アセスメント)新計画」を開始した(茂野・阪口, 2002a, 2002b)。

第1図に、この計画の中核となる評価支援システムの概要を示す。地熱資源の評価では、全国的～地熱資源有望地域毎に地表から地下深度3～10 km程度までの温度構造と流体貯留構造を把握し、賦存する地熱資源の型・量・特性・利用可能性などを明らかにすることが、基本的な課題である。この目的で、多種多様な地表探査、坑井掘削調査、地下モニタリングなどの測定・解析データを総合的～重層的に利用する必要がある。「GISを利用した地熱資源の評価(アセスメント)新計画」では、2001-2004年を第1期として多種多様なデータの統合的な管理・処理方法を研究するとともに、代表的な広域地域～地熱資源有望地域についてケーススタディーを進めている(茂野・阪口, 2002a, 2002b, 2002c; 茂野, 2002)。

地震学的な手法は、地下の物性値分布、温度構造などを把握する目的で有効性が非常に高い。近年、地震の予知・災害軽減化などの目的で、気象

庁、大学(国立大学共同地震観測網、以下大学観測網と略記)、防災科学技術研究所(精密地震観測網、以下防災科研と略記)などによって全国的に高密度・高精度の地震観測体制が整備され、観測・解析データが研究目的で公開されるようになった。特に、震源については従来に比較して非常に多数の位置が決定され、一覧表データが無料～低価格で一般にも電子公開されている。

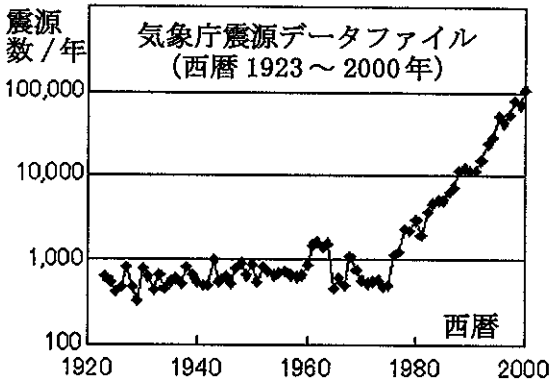
第2図には、気象庁(2002)が提供する震源デー



第1図 GISを利用した地熱資源の評価(アセスメント)支援システムの概要。茂野(2000), 茂野・阪口(2002a)を一部改編した。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 地震, 震源, 電子地理情報, GIS, 火山, 活断層, 地熱, 資源評価, 九州, 気象庁



第2図 気象庁による日本列島周辺の年間震源決定数の指数関数的な増加。気象庁(2002)の一覧表を図化した。今回の主要検討対象とした1998-2000年には、観測機器使用による気象庁の震源決定期間中(1923-2000年)で40%以上の約26万個の震源位置が決定された。

タファイルの一覧表を整理して、日本列島とその周辺の年間震源決定数の急激な増加を示す。今後、さらに高精度の震源データが利用し易い形で一般提供されることが期待される。このような公開震源データを、GISを利用して多種類データと重層的に解析・表示する試みが、例えば西田ほか(1997)、今田・渡辺(1999)、蓮沼・山崎(2001)などによって行われている。

筆者は今回新しい公開電子震源データを取り上げ、「GISを利用した地熱資源の評価(アセスメント)新計画」の一環として、茂野・阪口(2002a, 2002b)が提案した柔軟性、経済性などの高いデータの管理・処理方法に沿って、20万分の1地勢図「大分」の広域的な範囲(以下「大分」地域と略記)についてケーススタディーを試みた。本説では、その方法と予察的な結果とを紹介する。

筆者は地震学や地球物理学の専門家ではないが、新しい公開電子震源データの重要性と処理の容易さに注目して、今回日本の地熱資源の評価への有効利用を試みました。読者の方々から、問題点などについてご教示を頂ければ有り難く存じます。本説が、地熱分野のみならず地球科学・工学の幅広い分野において、電子地理情報およびGISに関心をお持ちの方々には何らかの参考となれば幸いです。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します。

第1表 地殻内の非地震活動域-地震空白域-地震頻発域の生成原因の概念的な整理

非火山地域 (広域熱伝導系)	火山地域 (マグマ-高温熱水系)
非地震活動域	
<ul style="list-style-type: none"> ○ 弱い広域応力場による場合 <ul style="list-style-type: none"> ・大陸・海洋プレート内の安定域 ○ 分布岩石の物性による場合 <ul style="list-style-type: none"> ・地温勾配による深部の高温域 ・低温の塑性岩石の分布域 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 分布岩石の物性による場合 <ul style="list-style-type: none"> ・マグマ溜まりの分布域 ・高温火成岩体の分布域 ・地温勾配による深部の高温域
(○ 震源観測の精度が低い場合?)	(○ 震源観測の精度が低い場合?)
地震空白域 (地震活動域中で短~中期的に地震発生がない領域)	
<ul style="list-style-type: none"> ○ 歪みの蓄積が不十分な場合 <ul style="list-style-type: none"> ・強い地震活動の後の期間 ○ 分布岩石の物性変化による場合 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 歪みの蓄積が不十分な場合 <ul style="list-style-type: none"> ・強い地震活動の後の期間 ○ 分布岩石の物性変化による場合
(○ 震源観測の精度が低い場合?)	(○ 震源観測の精度が低い場合?)
地震頻発域	
<ul style="list-style-type: none"> ○ 強い広域応力-歪場による場合 <ul style="list-style-type: none"> ・断裂・断層の生成域 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 強い広域応力-歪場による場合 <ul style="list-style-type: none"> ・断裂・断層の生成域 ○ 高圧の流体移動による場合 <ul style="list-style-type: none"> ・マグマ溜まりの周辺域 ・高温熱水系の中心~周辺域 ○ 温度の急変環境による場合 <ul style="list-style-type: none"> ・マグマ溜まりの周辺域 ・高温熱水系の周辺域? ○ 圧力の急変環境による場合 <ul style="list-style-type: none"> ・沸騰-ガス分離域 ・鉱物生成による閉塞域? ○ 岩石強度の低下による場合 <ul style="list-style-type: none"> ・大規模マグマ溜まりの周辺域 ・高温熱水系域 (孔隙圧上昇)
<ul style="list-style-type: none"> ○ 閉塞環境で脱水反応が進む場合 <ul style="list-style-type: none"> ・高圧変成作用などの領域? ○ 特殊な原因の応力-歪場の場合 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 特殊な原因の応力-歪場の場合

2. 震源データの地熱探査・評価への利用

地震学的な手法は、大きく自然地震を利用する場合と人工地震を利用する場合とに区分されるが、両者ともに地下構造の解明などの目的で広くまた様々に応用されている(例えば、宇津, 2001; 物理探査学会編, 1998)。自然地震を利用してマグマ溜まりの分布・特性を推定する場合については、例えば横山ほか(1979)、大湊(2001)などによってまとめられている。また、熱水系~地熱貯留層の分布・特性を推定する場合については、例えば伊藤(1982, 1989)、江原(1982)、杉原(1993)、永野(1995)、物理探査学会編(1998)などによって紹介されている。震源分布を利用した地熱資源の探査・評価手法は、1970年代から世界的に試みられている。

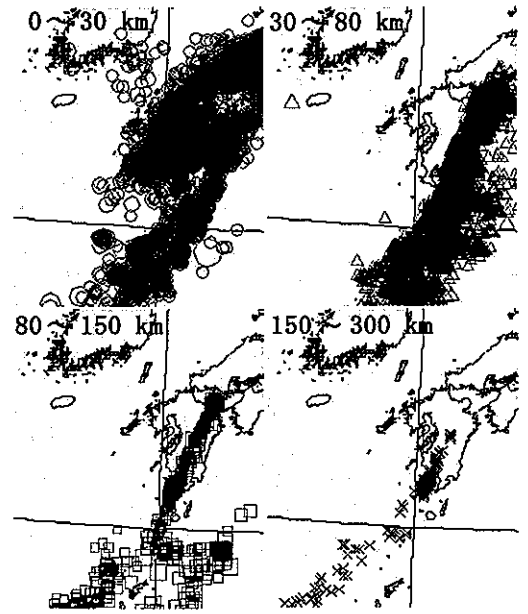
第1表は、地殻内の非地震活動域、地震空白域、地震頻発域の生成原因を非火山-火山地域に分けて、独自に概念的に整理したものである。自然地震

は、基本的に地下の岩石の破壊によって発生する。このため、岩石の脆性が低下する高温環境(400℃程度以上)などでは地震は発生し難い。従って、高温のマグマ溜まり～火成岩体は、非震源域として抽出されることが期待される。これに対して、マグマ溜まりの周辺部は、マグマやマグマ性地熱流体の移動による圧力増加、温度変化による熱応力発生、広域的な岩石強度の低下などの場であり、岩石破壊が生じて震源(集中)域となることが予想される。

一方、第四紀火山(マグマ～火成活動)地域に賦存する高温の熱水系～地熱貯留層は、一般に断裂系が発達する地熱流体の貯留・流動・相変化・岩石反応などの場であり、高压流体の流入、沸騰現象、岩石強度の低下、孔隙流体圧の変化などによって微小断層が生成し易く、微小地震の震源(集中)域となることが期待される。例えば、岩手県の葛根田地熱発電開発地域では、地熱貯留層の分布に対応した活発な微小地震活動が観測されている(例えば、Tosha *et al.*, 1998; 当舎ほか, 2000)。将来の地熱利用技術として研究開発が進められている高温(乾燥)岩体中の人工熱水系造成では、高压低温の注入水を用いたハイドロフラクチャリングおよび注入水の地下循環により、多数の微小地震～AE(アコースティックエミッション)が発生するため、その観測は地下状況の有力なモニタリング手法となっている。

従来より日本の火山・地熱地域では、火山活動研究・噴火予知、地熱資源調査・環境モニタリングなどの目的で、大学・気象庁・企業などによって非常に高精度の長期～短期の地震観測が行われている。しかし、それらの観測・解析結果の一部は取りまとめて様々な形で報告されているものの、震源決定結果の一覧表などは公開されていない。

一方、気象庁などによって全国的に観測・解析され、公開されて広く利用可能な震源データは従来非常に限られていた(第2図参照)。しかし、前述したように近年地震の予知・災害軽減化を目的として全国の地震観測が高密度・高精度化され、震源分布の一覧表が無料～低価格で電子公開されるようになった。この新しい公開震源データについて、地熱資源の評価への利用の可能性を明らかにする目的で、今回予察的な検討を行った。



第3図 九州周辺の深度範囲別の震源分布図。気象庁(2002)の2000年の震源分布図を加工した。記号の大きさはマグニチュードに対応する。

3. 九州の震源分布と地震研究

九州およびその周辺地域の地震活動は、例えば唐木田ほか編(1992)、日本列島の地質編集委員会(1996)などにその概要が紹介されているが、近年の地震観測の高密度・高精度化によって詳細に把握されるようになってきた。第3図に、気象庁(2002)の図面を編集して九州周辺の深度範囲別の震源分布を示す。震源分布は、深度30km程度を境として大きく異なった傾向を示す。

概略地殻よりも下位の深度30km以深の震源は、伊予灘～日向灘から九州中央部(NNE-SSW方向に大分県中部～鹿児島県中部)へと広がっており(第3図右上)、その深度分布はWNW方向に次第に急傾斜して活火山の周辺(由布～鶴見、阿蘇、霧島、桜島など)まで続いている(同左下・右下)。これらの震源分布は、WNW方向へ沈み込むフィリピン海プレート(スラブ)に対応していると考えられる。

これに対して、概略地殻内の深度30km以浅の震源は、九州全域に広がっている(第3図左上)が、その分布は一様ではない。この深度30km以浅の震源分布は、地殻内3次元(時間を含めて4次元)の広域的な応力～歪み～破壊場、マグマ溜まり～高温火成岩体～熱水系の分布・活動場の環境に関し

て、様々な情報を含んでいると考えられる。

従来より九州中央部の火山・地熱地域については、様々な地震学的な研究が行われている。特に「大分」地域に関しては、地震波速度分布、地震波減衰分布、人工地震による構造調査などを含めて、多数の報告がある。その例として、(1) 広域的には、江原(1984)、須藤(1993)など、(2) 別府-由布-鶴見-野矢地域周辺については、須藤(1987)、古川ほか(2000)、三浪ほか(1984)など、(3) 九重-涌蓋山地域周辺については、三浪ほか(1981)、伊藤・杉原(1985)、久保寺(1988)、杉原ほか(1990)、江原ほか(1990)、Sudo and Matsumoto(1998)、Sudo *et al.*(1998)、吉川ほか(2002)など、(4) 阿蘇地域周辺については、須藤(1981, 1990, 2001)、金嶋ほか(2001)などが挙げられる。

近年は、高密度・高精度化された地震観測データを利用して、九州およびその周辺地域の広域的な地下深部構造(スラブ-マントルウエッジ-地殻の地震波速度構造、地殻内地震発生層の上下深度など)について、様々な解析・議論が行われている(例えば、鈴木ほか, 1999; 八木原ほか, 2001; 浅森・趙, 2001; 越智・趙, 2001)。

本説では、従来の研究報告の紹介は以上に止め、以下では特に関連するもののみを適宜引用する。

4. 震源データの処理方法

4.1 震源データ

今回は震源データとして、気象庁(2002)が「地震年報」として低価格でCD-ROMにより電子提供している各種の地震データの中の、震源データファイルを使用した。これには、1923-2000年の日本の震源データが、固有のファイルフォーマットで特定の期間毎に表(テキスト)形式でまとめられている。

気象庁の震源データファイルは、近年大学観測網や防災科研などの観測データを加えて総合化され、震源位置の決定精度が大幅に向上し、年間の震源数も飛躍的に増加している(第2図)。今回主に使用したデータは、震源決定方法が最新のものに改正されて以降の1998-2000年の3年間のもので、報告されている震源総数(基本的に日本周辺のもの)は約26万個である(第2表)。

この他に比較の目的で、気象庁(2002)が震源デ

第2表 気象庁(1998-2000年), 同(1923-1997年), 国立大学共同観測網(1885-1998年)の震源データファイルに基づく「大分」地域の深度範囲別震源数の比較。

機関	気象庁	気象庁	大学観測網
観測期間	1998.01-	1923.01-	1885.07-
(年月)	2000.12	1997.12	1998.12
	3.0年間	75.0年間	13.5年間
1. 震源数の総括表(個)			
日本全体の総数	262,575	291,773	192,154
「大分」の総数	3,178	1,809	812
「大分」の各深度範囲(km)の震源数(個)			
0.0=<< 7.5	765	598	175
7.5=<< 15.0	2,011	559	92
15.0=<< 30.0	57	87	13
30.0=<	345	565	532
2. 震源数の割合の総括表(%)			
「大分」/日本全体	1.21	0.62	0.42
「大分」の各深度範囲(km)の震源数の割合(%)			
0.0=<< 7.5	24.07	33.06	21.55
7.5=<< 15.0	63.28	30.90	11.33
15.0=<< 30.0	1.79	4.81	1.60
30.0=<	10.86	31.23	65.52
3. 年平均震源数の総括表(個/年)			
日本の年平均数	87,525	3,890	14,234
「大分」の年平均数	1,059	24	60
「大分」の各深度範囲(km)の年平均震源数(個/年)			
0.0=<< 7.5	255	8	13
7.5=<< 15.0	670	7	7
15.0=<< 30.0	19	1	1
30.0=<	115	8	39

ータファイルを提供する残りの期間(1923-1997年)についても、簡単な解析を行った(第2表参照)。また、大学観測網がインターネット・WWWのダウンロードサイトを通じて、表(テキスト)形式で無料で提供している震源データ(国立大学微小地震観測網地震カタログ; 第3表参照)についても、比較の目的で全期間(1885-1998年)について予察的な解析を行った(第2表参照)。

上記3種類の震源データは、観測期間のみならず観測点の数・位置、震源決定の方法などが異なっている。このため、データの単純な一体化処理は様々な問題を引き起こす可能性が高いと判断して、今回は処理を分離した。なお、気象庁(2002)の震源データファイルについては、フォーマットが複雑であり(小数点の省略、時期による計算法・表示桁数の違いなど)、その処理には注意を要することを付記する。

第3表 今回の「大分」地域の震源データの各種表示に利用した電子地理～地球科学情報の一覧表。

データの種類	提供元	データの名称	有料/無料
震源 (1998-2000年)	気象庁	地震年報 (平成12年度版) (CD-ROM)	有料
震源 (1923-1997年)	気象庁	地震年報 (平成12年度版) (CD-ROM)	有料
(震源 (1985-1998年)	大学	国立大学微小地震観測網地震カタログ (JUNEC) *1	無料)
地質 (火山体)	地質調査所*2	100万分の1地質図第3版CD-ROM版, メッシュデータ	有料
噴気・温泉地	地質調査総合センター	東北・九州地熱資源図CD-ROM版, 一覧表	有料
重力異常	地質調査所*2	日本重力CD-ROM, メッシュデータ	有料
活断層	活断層研究会	新編 日本の活断層一分布図と資料*3	有料
行政界・海岸線	日本地図センター	JMCマップ, ベクトルデータ (CD-ROM)	有料
標高	国土地理院	数値地図50mメッシュ (標高) (CD-ROM)	有料

*1 WWWダウンロードサイト (URL: <http://www/eri.u-tokyo.ac.jp/database-j.html>) .

*2 現在, 産業技術総合研究所・地質調査総合センター.

*3 歴史的な災害地震～比較的大きな地震を含む. 原典の図面から独自にスキャナーで電子化した.

4.2 対象地域と比較・重合データ

今回, 広域的なケーススタディーとして国土地理院の20万分の1地勢図「大分」の範囲を取り上げた. この範囲は, 日本の標準地域メッシュ系の1次メッシュ「4931」に相当する (例えば, 国土地理院・日本地図センター, 1998).

茂野・阪口 (2002a, 2002b, 2002c) は, 「大分」地域について地表地質分布, プーゲー重力異常分布, 温泉地分布などの各種の公開電子地理情報を, 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形式 (国土地理院・日本地図センター, 1998) に変換し, 各種データ間の重畳的な数値演算処理・画像処理などを可能とした.

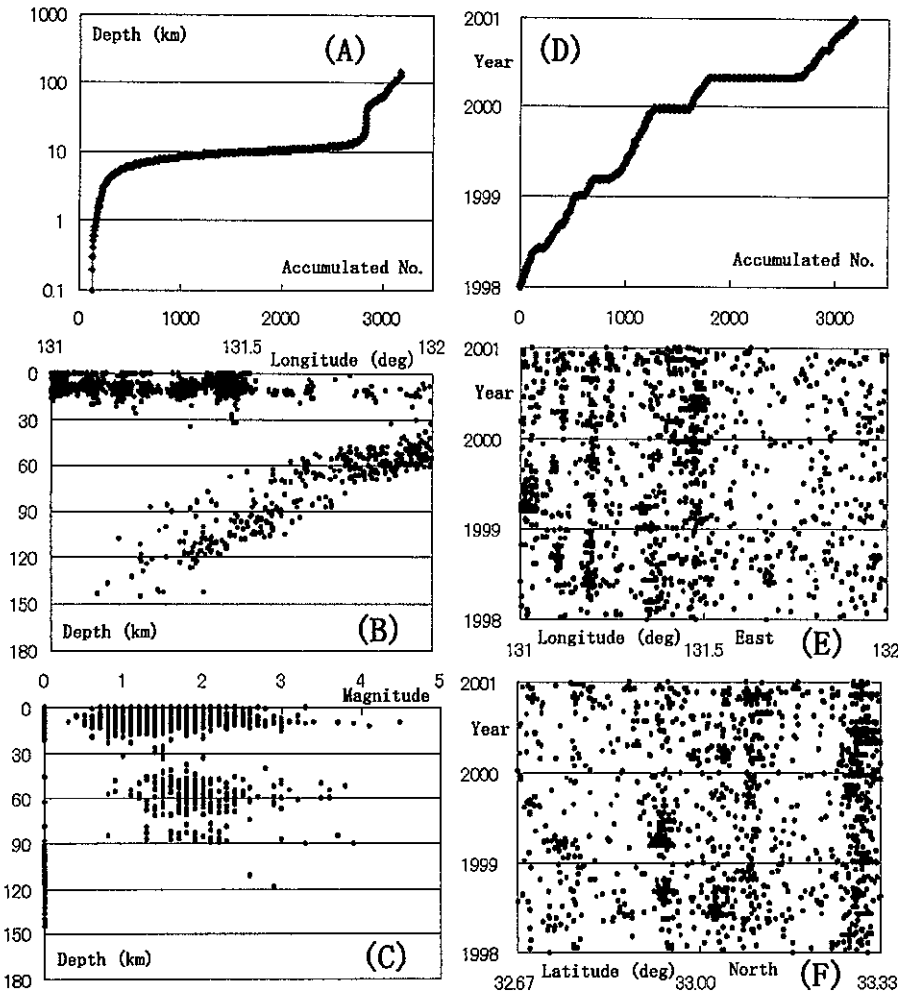
今回の処理では, これらのメッシュ形式・画像形式のデータを利用した (第3表). 活断層および過去の災害地震～比較的大きな地震の分布については, 活断層研究会編 (1991) から「大分」地域の図面を独自にスキャナーで画像化し, 対象をAdobe社のPhotoshopおよびIllustratorで処理・編集して利用した. なお, 活断層については九州活構造研究会編 (1989), 中田・今泉編 (2002) などによってより詳しいデータが提供されているが, 内容は類似性が高く, 電子処理の都合から上記を用いた.

4.3 処理方法

今回の震源データの処理では, 概略以下のよう

回の処理では, Microsoft社のWindowsを基本ソフトとするパソコン (PC) 上で5種類の市販ソフトを使用した. 他, 基本ソフト, 類似ソフトなどを用いても同様の作業が可能と思われる.

- (1) FORTRAN言語 (Compaq社のVisual FORTRAN) によってデータ変換・加工・抽出用の簡単なプログラム (EQHCO01) を自作し, オリジナルの表形式の震源データファイルから, 「大分」地域の震源データについて必要項目を整理して表 (テキスト) 形式で出力ファイルに書き出した.
- (2) 抽出された「大分」地域の震源データ数は数1000個程度であったため, 今回は (1) の出力ファイルからデータを表計算ソフト (Microsoft社のExcel) に取り込み, 全域・全深度あるいは特定の地域・深度範囲について基本的なデータの編集, 統計処理, 図化などを行った. さらに, 上記のグラフィックスソフト類を用いて, 図面の編集・印刷などを行った.
- (3) 別にFORTRAN言語によって簡単なプログラム (EQHCO02) を自作し, 上記 (1) で作成した「大分」地域の震源データファイルを読み込み, 国土地理院の数値地図250mメッシュ (標高) のフォーマット形式 (テキスト形式) で, 地殻内の3つの深度範囲別 (後述) の震源頻度分布を3枚の出力ファイルに書き出した.
- (4) 上記 (3) で作成した3枚の震源分布ファイルについて, 数値地図250mメッシュ (標高) データ処理用の低価格のGISソフト (日本地図センタ



第4図
 気象庁の震源データファイル(1998-2000年)による「大分」地域の地震の発生時間・マグニチュード・頻度、震源の緯度・経度・深度の関係。左側は震源深度を縦軸に、(A)震源深度(対数表示)と累積頻度との関係、(B)「大分」のW-E断面上に投影した震源分布、(C)震源深度とMとの関係を示す。右側は地震発生時間を縦軸に、(D)累積頻度、(E)「大分」の1次元W-E線上に投影した震源分布、(F)同S-N線上に投影した震源分布を示す。

販売のBird's View Pro)により、各々画像化した。今回の処理では、震源分布の深度関係を分かり易くする目的で、浅いものから深いものへ黒、濃灰、淡灰の3色を用いた(該当メッシュの該当深度範囲に1個以上の震源が存在する場合は該当の色、震源が存在しない場合は白)。なお、口絵の原図作成では、RGBカラーの赤、緑、青の3色と黒(スクリーンモード、加法混色)を用いた。

(5) グラフィックスソフトを用いて、上記(2)および(4)で作成した各種の震源分布図の画像と4.2で述べた重力異常分布図、活断層分布図などの同型式の画像との重合表示(全域あるいは特定地域)を行い、編集・印刷した。

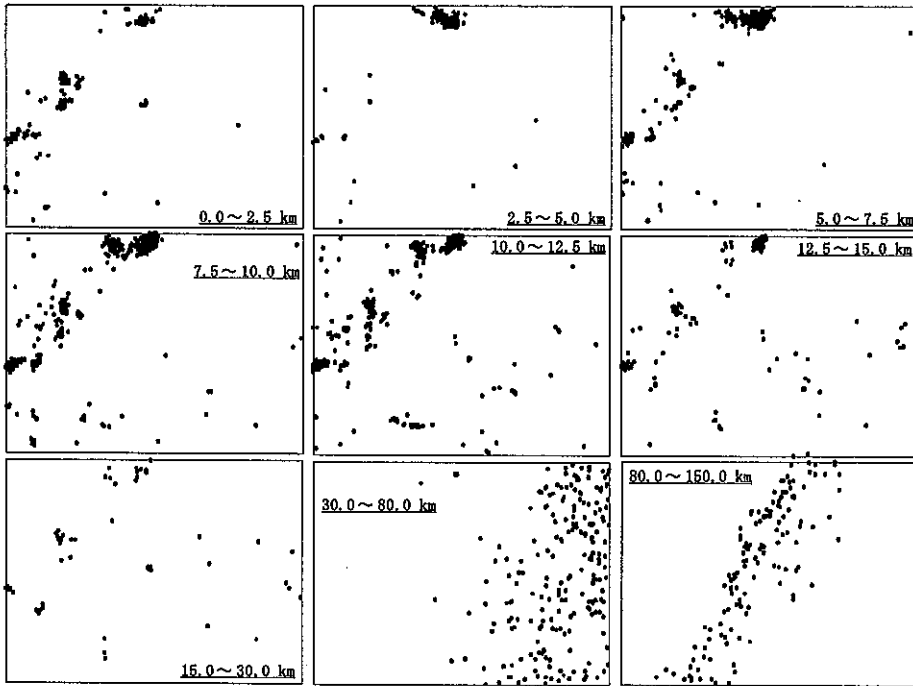
今回の処理では、以上のように空間3次元震源分布を中心に、各種画像データの重合的な表示に

止めた。地熱資源の評価を目的とした各種メッシュデータの重合的な数値演算処理などについては、今後さらに多種類のデータを含めて改めて実施する予定である。

5. 震源データの処理結果

5.1 気象庁(1998-2000年)データの処理結果の概要

第2表では、4.3の方法で処理した気象庁(1998-2000年)、同(1923-1997年)、大学観測網(1885-1998年)の震源データの概要を比較した。今回処理を行った「大分」地域について、気象庁(1998-2000年)の震源数は3,178個で、年平均の震源数としては後二者に比較して約40倍、約17倍となっており、特に深度15km以浅の震源数が多くなっている。



第5図
 気象庁の震源データファイル(1998-2000年)による「大分」地域の深度範囲別の震央分布。震源の深度範囲は、上段3図が地殻浅部(0~7.5km, 2.5km間隔)、中段3図が地殻中部(7.5~15km, 2.5km間隔)、下段3図が地殻深部(15~30km)およびより深部(30~80km, 80~150km)である。

以下の5.2~5.4では、このように観測精度が飛躍的に向上した気象庁(1998-2000年)の震源データの処理結果を述べる。第4図には、「大分」地域の震源の時空間分布特性を明らかにする目的で、地震の発生頻度・マグニチュード(以下Mと略記)・発生時間、震源の緯度・経度・深度の関係を、総合的にまとめて示す。

5.2 深度を軸とした震源の表示と分類

第4図左側の(A), (B), (C)では、震源の深度を縦軸にデータを整理した。

まず、(A)では、地震の震源深度(対数表示)と累積頻度の関係を表示した。これにより、震源は若干の任意性はあるが地殻浅部(深度範囲0~7.5km, 震源数の約24%), 地殻中部(同7.5~15km, 同約63%), 地殻深部(同15~30km, 同約2%), およびより深部(同30km以上, 同約11%)の4グループに分類することができる。

(B)は、「大分」地域のW-E断面に投影した震源分布で、上記4グループへの分類の妥当性を示している。最多の地殻中部の震源の平面的な分布範囲に比較して、地殻浅部の震源の分布範囲は狭く、希少な地殻深部の震源の分布範囲は極めて限られている。より深部の震源はフィリピン海プレートのスラ

ブに対応するもので、深度は地域の東端部では40~60km, 中西部では80~150kmとなっている。

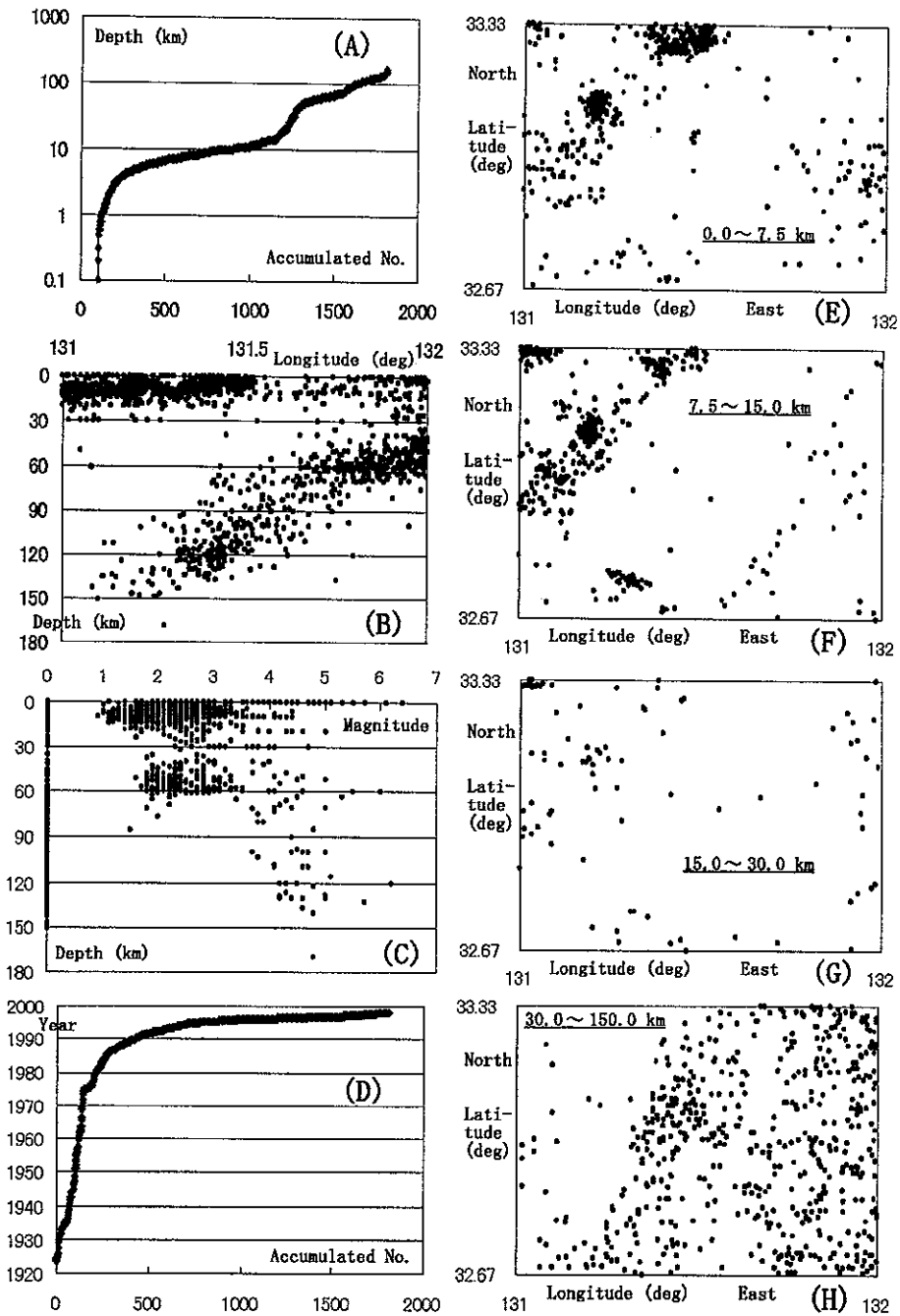
(C)は、震源の深度とMとの関係を示す。全体としてMは0.3~4.5の範囲にあり、Mの範囲は地殻中部で最も広く、地殻深部で最も狭い。なお、Mが0.0となっている震源は、Mの決定が困難であった場合に対応し、基本的にMが小さいものである。観測・解析がより困難な深部の震源のMの下限値は約1.0で、地殻内のものに比較して大きくなっている。

5.3 時間を軸とした震源の表示と特徴

第4図右側の(D), (E), (F)では、地震の発生時間を縦軸にデータを整理した。

(D)では、地震の発生時間と累積頻度との関係を示した。ステップ状の3回の急激な地震数の増加は、阿蘇火山の北方(1999年2月)および鶴見火山の周辺(1999年12月, 2000年4月)の地殻内の群発地震活動によるものである。地震数の全般的な増加傾向については、地震観測・解析精度の向上が寄与している可能性がある(第2図参照)。

(E)は地震の発生時間と「大分」地域の1次元W-E線上に投影した震源位置との関係、(F)は同じくS-N線上に投影した震源位置との関係を示



第6図 気象庁の震源データファイル(1923-1997年)による「大分」地域の地震の発生時間・マグニチュード・頻度、震源の緯度・経度・深度の関係、左側は、(A) 震源深度(対数表示)と累積頻度との関係、(B) 「大分」のW-E断面に投影した震源分布、(C) 震源深度とMとの関係、(D) は地震の発生時間と累積頻度との関係を示す。右側は震央分布で、震源の深度範囲が、(E) 地殻浅部(0~7.5km)、(F) 地殻中部(7.5~15km)、(G) 地殻深部(15~30km)、(H) より深部(30~150km)である。

す。(E)は、地域西部の震源の時空間分布が特定部分で集中(クラスター化)しており、地殻内の地震

活動が群発的であることを示している。一方、地域東部の震源の時空間分布はランダム性が強く、主に

地殻よりも深部の地震活動が単発的であることを示している。

5.4 深度範囲別の震源の分布と特徴

第5図には、「大分」地域の深度別震源分布の平面図をやや詳しく示した。深度範囲は、上段の3図が地殻浅部(0~7.5km, 2.5km刻み)、中段の3図が地殻中部(7.5~15km, 2.5km刻み)で、下段は地殻深部(15~30km)およびより深部(30~80km, 80~150km)となっている。

気象庁(1998-2000年)の震源データでは、多数の観測点で得られたデータから計算で求められた個々の震源の深度について標準偏差値が付けられており、その範囲は概略0.0~5.0kmで、平均値は約1.38kmとなっている。従って、第5図の深度範囲別の震源分布の差異は、十分に有意と考えられる。

地殻内の震源は、主に地域北西部に大きくは3、小さくは10程度の集中域を形成している。一方、より深部の震源は、主に地域南東部~中央部でNNE-SSW方向の帯状に散点的に分布している。

5.5 気象庁(1923-1997年)データの処理結果の概要

ここでは、上に整理した気象庁(1998-2000年)の震源データの処理結果の補強の目的で、より長期間の気象庁(1923-1997年)データの処理結果の概要を示す。震源深度の平均的な誤差は、1998-2000年よりもかなり大きいと推測される。

第6図には、第4図・第5図を簡素化した形式で、1923-1997年データの処理結果をまとめた。左側の(A)、(B)、(C)では、震源の深度を縦軸に各々累積頻度、W-E断面に投影した震源分布、Mとの関係を、(D)では地震の発生時間と累積頻度との関係を示した。また、右側の(E)、(F)、(G)、(H)では、深度範囲別平面図上の震源の分布として、地殻浅部、同中部、同深部およびより深部のものを整理した。

1923-1997年のデータは、相対的に地震観測精度が低くまた年平均震源数が少ないが、その処理結果は基本的に1998-2000年データの処理結果と類似性が高い。しかし、明瞭に異なった地域にも震源集中域が存在しており、1923-1997年のデータではより長期間の震源の分布傾向が捉えられている。

6. 考察

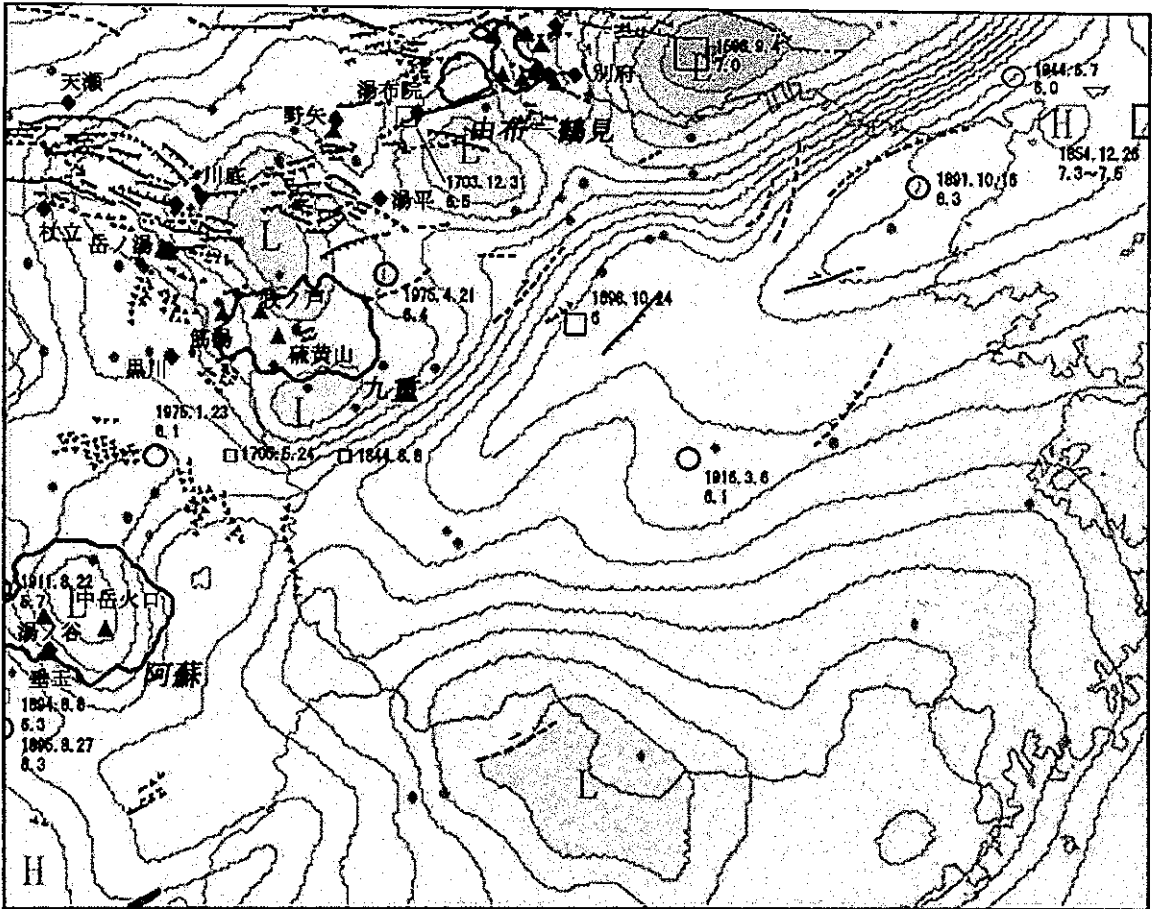
本章では、「大分」地域の地熱構造の推定を主目的として、地殻内の震源に焦点を絞り、他種類データとの比較-重合表示を通じて予察的な考察を加える。まず、6.1~6.2では、「大分」地域の地質学的な概要を紹介し、震源分布の概観的な特徴をまとめる。中心となる6.3~6.5では、活火山体、高温熱水系、活断層系と震源との分布関係を議論する。6.6~6.7では、地溝帯外の震源分布について若干述べるとともに、グーテンベルク-リヒター式のb値の有効性について検討する。

第7図には活火山体、高温噴気・温泉地、重力異常、活断層および過去の地震の分布を重合表示した。また、第8図には気象庁の震源データファイル(1998-2000年)の地殻内の震源分布と活火山体・重力異常分布を重合表示した。なお、口絵では、震源の深度範囲をRGBカラーで表現し、地表地質分布をも加えて重合表示した。

6.1 「大分」地域の地質学的な概要

「大分」地域は、第四紀の構造運動・火山活動などによって、以下のように大きく2つの地域に区分される(第7図および口絵参照)。

- (1) 別府-阿蘇地域を結ぶ北西部は、NE-SW方向の大規模な地溝帯となっており、大きな負のブーゲー重力異常域を形成している。この地溝帯は、1cm/年程度の速度でN-S方向に分離する南北九州の境界にあたり、地震波の発震機構解析結果は、広域的にN-S方向水平の伸張応力が卓越することを示している(例えば、唐木田ほか編, 1992; 須藤, 1993)。地溝帯内には、E-W走向の活断層系(主に正断層)が多数分布している。また、第四紀の火山岩類が広く分布しており、3つの大きな第四紀後期の火山体(以下活火山体と略記)として由布-鶴見、九重、阿蘇がある。さらに、100℃以上の火山性噴気地とともに、80℃以上の高温の温泉地・噴気地および低温の温泉地が多数分布している(例えば、阪口・高橋, 2002)。
- (2) 「大分」地域の概略60%を占める中央部~南東部では、先新第三紀の付加体堆積岩類の分布が卓越しており、ENE-WSW方向の構造線



第7図 「大分」地域の活火山体、高温噴気・温泉地、重力異常、活断層および過去の災害地震～比較的大きな地震の分布の重合表示。活火山体は地質調査所(1995)の250mメッシュデータ、高温の噴気地(三角形)および温泉地(80℃以上は菱形、同未満は小丸)は阪口・高橋(2002)の一覧表、ブーゲー重力異常は地質調査所(2000)の1kmメッシュデータ(岩石密度=2.67g/cm³)、活断層・過去の地震は活断層研究会編(1991)の図面(スキャナーで電子化)、海岸線・県境は日本地図センターのJMCマップのベクトルデータに基づく。地域の大きさは概略94km×74kmである。

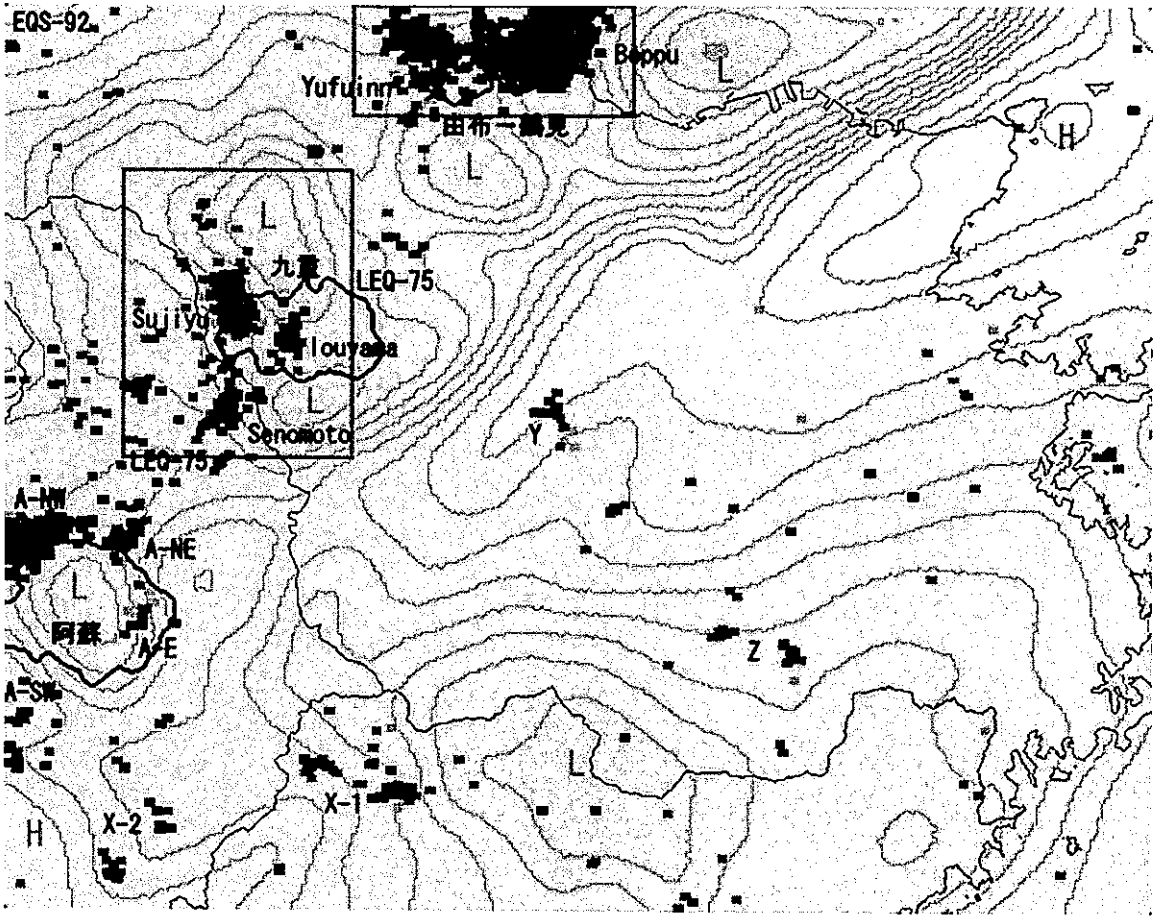
に境されて北から南へ三波川帯、秩父累帯、四万十累帯北帯の順で分布している(唐木田ほか編, 1992)。ブーゲー重力異常値の分布は、地質分布に調和的で全体的に上記の走向を持ち、北から南へ次第に低い値になっている。本地域には、NE～ENE走向の活断層が一部分布するが、第四紀の火山体は分布しておらず(阿蘇火山の火砕流堆積物などを除く)、温泉地は60℃以下の低温のものが散点的に存在するのみである。

6.2 震源分布の概観的な特徴

広域的な「大分」地域における地殻内の震源分

布の概観的な特徴として、以下の2点が重要である。

- (1) 地殻内の震源は、第4図(B)、第5図などに示すように大部分が地殻浅部～中部に分布している。地殻深部(～スラブ間)の震源は非常に少ない。これは、深度約15kmで温度が400～500℃程度となっており(地温勾配を30℃/km程度と仮定)、岩石物性が脆性から塑性へと変化しているとして説明できる。なお、本地域の地温勾配は、北西部の地溝帯内に比較して南東部の地溝帯外で低く(田中ほか, 1999)、第4図(B)の断面投影図でも東端部で地殻内震源の下限深度が深い傾向が認められる。



第8図 気象庁の震源データファイル(1998-2000年)による「大分」地域の地殻内の震源分布と活火山体・重力異常分布の重合表示。震源の色は深度範囲を示し、黒色は0~7.5km、濃灰色は7.5~15km、淡灰色15~30kmである。浅部の震源が上書きして深部の震源が見えない場合がある。活火山体は地質調査所(1995)の250mメッシュデータ、ブーゲー重力異常は地質調査所(2000)の1kmメッシュデータ(岩石密度 = 2.67 g/cm³)、海岸線・県境は日本地図センターのJMCマップのベクトルデータに基づく。2つの矩形は、第9図・第10図の範囲を示す。図中の英数字表記は本文参照。地域の大きさは概略94km×74kmである。詳細は口絵を参照。

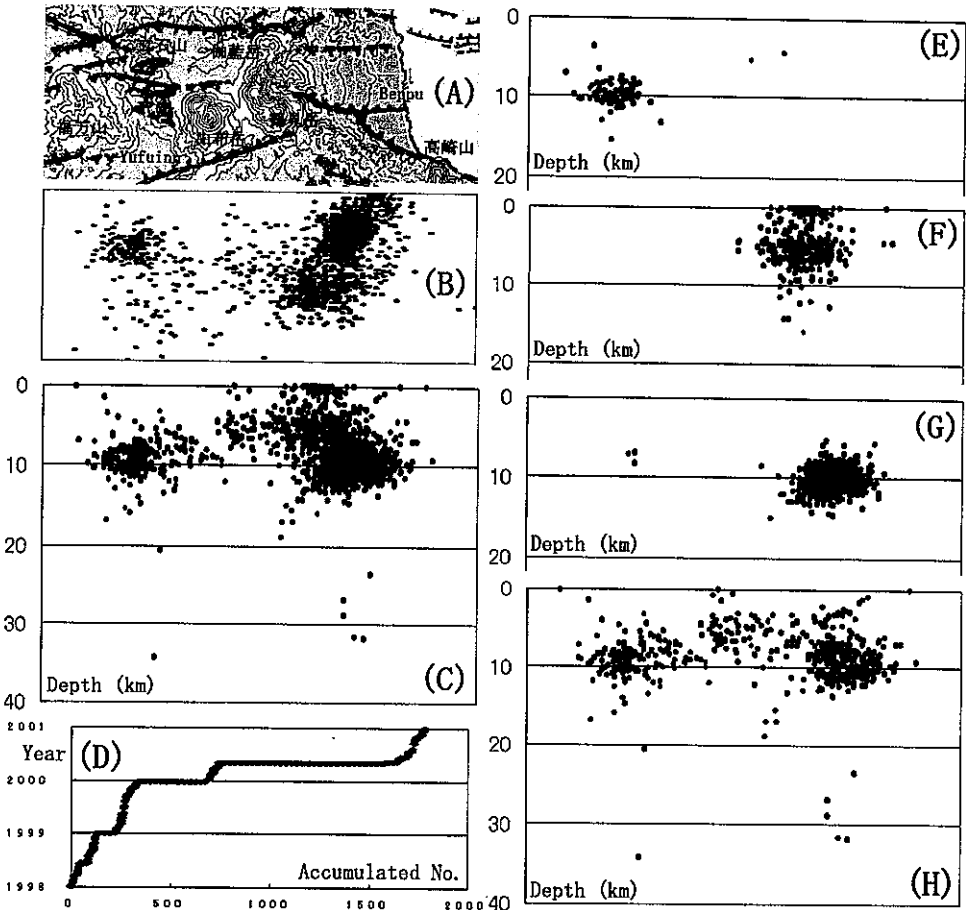
(2) 地殻内の震源は、第5図・第8図に示すように別府-阿蘇の地溝帯内に、特に由布・鶴見-九重-阿蘇の活火山列に沿って、集中的~散点的に分布する傾向が強い。ブーゲー重力異常分布との関係では、震源集中域は主に急傾斜部に位置し、低異常盆底部には少ない傾向が明瞭である。一方、「大分」地域の中央部~南東部にも、より少数の地殻内の震源が散点的~一部集中的に分布している。

別府-阿蘇の地溝帯内で活発な地殻内の地震活動は、本地溝帯内の伸張的な広域応力場における小断裂系~断層系の生成活動に起因するとともに、

マグマ溜まり~高温火成岩体および高温熱水系の分布・活動に対応していると考えられる。以下の6.3~6.5では、これらを区別した議論を行う。

6.3 活火山体~マグマ溜まりと震源との関係

本地域の震源は、別府-阿蘇の地溝帯内でも由布-鶴見、九重、阿蘇の3つの活火山体の周辺に集中的に分布している(第8図)。特に、地殻浅部の震源分布が他の地域に比較して顕著であり(第5図)、これらの地域の直下~周辺の地殻浅部~中部に独自の強い応力-歪み源などが存在することを示している。また、他の地域には少ない地殻深部の震源



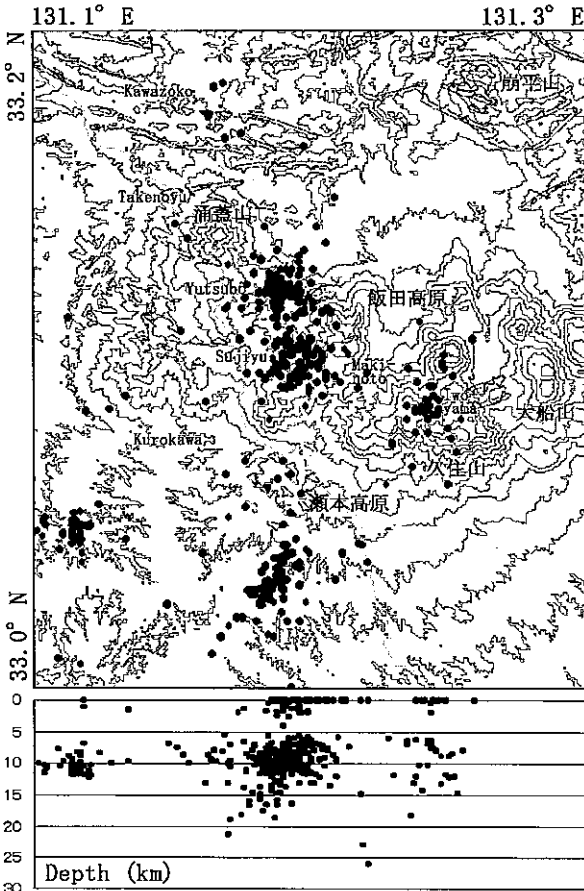
第9図 気象庁の震源データファイル(1998-2000年)による由布-鶴見火山地域の震源分布. 地域範囲は、東経131.30°～131.55°、北緯33.25°～33.33°(概略24km×9km)である. 左側は、(A)地形等高線図(国土地理院・数値地図50mメッシュ(標高)データによる)に活断層(活断層研究会編(1991)の図面からスキャナーで電子画像化)を上書き、(B)全期間の震央分布(震源数1,781)、(C)同震源分布のW-E断面への投影図、(D)同累積震源数の時間変化である. 右側の上3図は、3回の顕著な群発地震について震源分布のW-E断面への投影図を示し、(E)1999年1月1～2日(震源数83)、(F)1999年12月20～22日(同342)、(G)2000年4月29日～5月1日(同805)で、最後の(H)は残りの期間(同551)をまとめて同様に示す.

の共通的な存在(第5図)は、より深部からのマグマの供給・流動に起因している可能性が指摘される. 3地域毎の特徴は、次の通りである.

(1) 由布-鶴見火山地域の地震活動は、「大分」地域内で最も活発である. この地域では、第9図に示すように3年間に位置を変えて3回の群発地震が生じている. 震源分布は、由布-鶴見火山を中心にW-E方向に伸びており(立石山西方・由布院温泉-別府温泉)、その深度は4～13kmのものが大多数であるが、浅部の0～4kmのものが鶴見岳周辺などで、深部の13～35kmのものが由布-鶴見火山の東西両側で観測され

ている(第5図参照).

本地域の震源分布で興味深い点は、広く由布-鶴見活火山体を含む中央部では震源分布密度が低く、深度0～10kmの震源は存在するが、10km以深がほぼ非震源域となっていることである. その浅部および東西両側の震源域で囲まれたこの中央深部の非震源域は、マグマ溜まり～高温火成岩体の分布に対応している可能性が高いと推測される. 由布-鶴見火山周辺で最も顕著な震源分布は、地質学的な意味での現在、この地域のマグマ溜まり～高温火成岩体および高温熱水系の活動が、「大分」地



第10図 気象庁の震源データファイル(1998-2000年)による九重火山西部地域の震源分布。地域範囲は、東経131.10°~131.30°、北緯33.00°~33.20°(概略19km×22km)である。上は、地形等高線図(国土地理院・数値地図50mメッシュ(標高)データによる)に活断層(活断層研究会編(1991)の図面からスキャナーで電子画像化)を加え、全期間の震央分布(震源数397)を示した。下は、同震源分布のW-E断面への投影図である。

域内で最も活発なことが主因となっている可能性がある。

- (2) 九重火山では、1995-1996年頃に小規模な噴火活動を生じた硫黄山の高温噴気地帯に対応する中央部に、地殻中部-浅部の震源域がある(第8図・第10図)。これは、九重火山の地下のマグマ溜まりからの高温地熱流体の分離-上昇-放出域に対応していることに起因すると考えられる。

これに対して、より新しい火山体東部(大船山など)は、広く非震源域となっている。これは、上記の硫黄山噴気帯を含む中央部~東部の地下に大規模なマグマ溜まり~高温火成岩体が存在することを示唆するが、その周辺に発生が期待される震源の分布は九重火山の北・東・南方向には認められない。

一方、九重火山の北西方向の筋湯~湯坪温泉周辺および南西方向の瀬本高原周辺には、地殻浅部-中部-深部の震源集中域が存在する。これらは、九重火山の地下のマグマ溜まり~高温火成岩体の西縁部、あるいは中心部からの高温地熱流体の流動-貯留域などになっていることに対応している可能性が指摘される。

- (3) 阿蘇火山では、現在の噴火・噴気活動のある中岳火口を中核とした活火山体中心部の地下は、非震源域となっている(第8図)。一方、その周辺(大規模カルデラ内)の東・北東・北西(・南西)方向(第8図A-E, A-NE, A-NW, A-SW)には、地殻浅部-中部-深部の震源集中域~散点域がある。これらは、前者が阿蘇の活火山体直下のマグマ溜まり~高温火成岩体の分布、後者がその周辺部の広がりに対応している可能性が指摘される。

以上のように、由布-鶴見、九重、阿蘇の3つの活火山体には、マグマ溜まり~高温火成岩体に対応する中心部の非震源域、その周辺部~地殻浅部の震源集中域~散点域、地殻深部の震源域の存在が、多様ながらもかなり共通的に認められて非常に興味深い。これらから、中心部にマグマ溜まり~高温火成岩体、その周辺部~地殻浅部には附随する応力-歪み-破壊集中域あるいは地熱流体の貯留-流動域の分布モデルが想定される。このように「大分」地域では、地下深部のマグマ性熱源とそれを取り囲む領域の温度構造(および流体貯留-流動構造)についての定量的な指標として震源分布の有効性が指摘され、今後のより高精度の震源データの蓄積・総合解析が期待される。

6.4 高温熱水系と震源との関係

別府-阿蘇の地溝帯内には、多数の高温噴気地・温泉地が3つの活火山体の周辺のみならず遠

方にも分布しており(第7図)、地下の熱水系の活動は活発である。これらの地熱地域の直下～周辺は、今回の震源分布について集中域、散点域、空白域となっている様々な場合がある。

まず、マグマ起原流体の寄与が大きいと推定される活火山体山頂部の高温噴気地帯では、鶴見火山の噴火口および九重火山中央部の硫黄山は、前述したように震源集中域となっている。これに対して、より開放的で活発な阿蘇火山中央部の中岳噴火口周辺は、その西方の噴気性高温温泉地(湯ノ谷・垂玉)を含めて非震源域となっている。

より低地の高温温泉地・噴気地の中では、別府、由布院および九重火山西方の筋湯が、広くあるいは部分的に震源集中域となっている。これらの地域では、震源は地殻浅部～中部のみならず深部にも分布している(第5図)。

一方、より多数の高温温泉地・噴気地は、(1)由布院の西～西南方向の野矢、湯平、(2)九重火山の西～西北方向の牧ノ戸、黒川、岳ノ湯、川底、(3)阿蘇火山の中岳西方の湯ノ谷、垂玉、(4)地域北西端部の杖立、天瀬などは、震源散点域あるいは非震源域となっている。

以上のように、高温熱水系の分布と震源集中域～非震源域の関係は複雑であり、現状では統一的な理解は難しい。複雑さの要因としては、(1)熱水系の規模・特性(流動の程度、沸騰の有無、岩石強度の強弱、孔隙圧の高低など)の効果、(2)周辺地下のマグマ溜まり～高温火成岩体の分布・活動・地熱流体供給の相乗効果、(3)その地域の広域応力～歪み～破壊場の相乗効果、(4)人工的な地熱・温泉開発利用が地下環境に及ぼす効果などが考えられる。さらに(5)として(1)～(4)の短期的～長期的な経時変化を考慮する必要がある、(6)として地震の観測・解析精度の問題がある。

上記の要因の複雑さに関して、ここでは野矢-湯平地域の例を簡単に紹介する。第8図に示すように、この地域では1998-2000年には主に地殻中部の震源が10個程度しか観測されていない。しかし、三浪ほか(1984)による独自のより高精度の観測網では、同地域範囲で1983-1984年の約9ヶ月間にM2以下の地殻浅部の震源が100個程度も観測されている。この大きな違いについては、(5)、(6)あるいは両者が原因となっている可能性があり、現

状では結論を出すことはできない。

一般にマグマ溜まり～火山に比較して熱水系～温泉・噴気地では、物質・エネルギーの貯留-移動規模が小さいため、地震活動の規模も小さい場合が多いと考えられる。従って、熱水系～地熱貯留層を探索・評価の対象とする場合は、今回の気象庁の1998-2000年の震源データ(M>~0.5;第4図(C)参照)よりも高精度(M>0~-1)の地震観測・解析データの使用が望まれる。

本説の主題上、高温熱水系と震源との分布関係は特に大きな興味を持たれる点である。しかし、上記のように今回の処理・解析結果については、一般化やそれに基づく応用は難しい。今後、より高精度・長期間の震源データの蓄積・利用可能化、他種類データとの複合的な解析手法の発展などを待って、さらに検討を進めたい。上記(4)については、震源の時空間分布と地熱・温泉利用の規模、方法、時間経過などの関係について多面的・体系的な解析が必要であるが、今後の検討課題としたい。

6.5 活断層系と震源との関係

別府-阿蘇の地溝帯内には、E-W走向の活断層(主に正断層)が多数分布している(第7図)。1998-2000年の震源データでは、上記の活火山体や一部の高温熱水系の分布と重なる地域を除けば、活断層の分布密度が高い地域はむしろ非震源域になっている傾向にある(第8図)。しかし、より長期の1923-1997年の震源データ(第6図)では、活断層の分布地域は、かなりの程度震源分布域となっている。その概要は以下のように整理される。

- (1) 3つの活火山体からある程度距離を置いた活断層帯として、由布-鶴見火山と九重火山の中間の緯度帯をW-E方向に広がる地域(天瀬・杖立温泉-川底・岳ノ湯温泉-野矢・湯平温泉を結ぶ地域)が最も顕著である(第7図・第10図)。しかし、地溝帯内の「非活断層地域」と比較して、この活断層帯でも震源分布は特に多くはない。従って、広域的な伸張応力場にある本地溝帯内の「非活火山地域」では、定常的な地震活動度はそれほど高くないと判断される。
- (2) 一方、6.3で述べたように3つの「活火山地域」には、顕著な震源集中域が存在する。これは、

地溝帯内の広域的な応力-歪み場に、マグマ溜まり～高温火成岩体が発生する応力-歪み集中場、地熱流体の貯留-流動場などが重なるために、定常的に「非活火山地域」の活断層系の分布域よりも地震活動が活発であるとして理解される。

- (3) 活火山体周辺の震源集中域は活断層系の分布域と重なっている場合があり、特に最も震源が集中する由布-鶴見火山周辺で多くの活断層が認められる(第7図・第9図)。これらの活断層の生成には、広域的な応力-歪み-破壊場のみならず、火山～火成活動に伴う応力-歪み-破壊場～地殻変動などが寄与している可能性が指摘される。一方、視野を若干広げれば、由布-鶴見火山では震源が主に北方の別府北断層、南方の由布院断層、朝見川断層(活断層研究会編, 1991)などの比較的大規模な断層群で区切られた地域内に分布している。この現象については、マグマ溜まり～高温火成岩体などが分布する地域を囲むこれらの活断層群が、応力-歪み-破壊場の境界となっている可能性が指摘される。
- (4) 活断層の分布に対応する震源集中域としては、1923-1997年の震源データによれば本地域北西端の入美断層(活断層研究会編, 1991)周辺の群発地震(1992年頃; 第6図参照; 第8図EQS-92)、阿蘇外輪山北東部の地震群(1975年, M6.1; 第7図参照; 第8図LEQ-75)がある。また、1998-2000年のデータでは、阿蘇野断層(活断層研究会編, 1991)の周辺に地殻浅部-深部の震源集中域が認められる。この付近には、本地域内の観測地震として最大規模の大分県中部地震(1975年, M6.4)の震源が位置している(第7図; 第8図LEQ-75)。このような「非活火山(・非高温熱水系)地域」の活断層系の生成・運動は、長期的な周期で活動する広域的な応力-歪み-破壊場によって制御されていると推測される。

6.6 地溝帯外の地殻内震源

「大分」地域中央部～南東部の地溝帯外の地域では、相対的に地殻内の震源は少ない。しかし、数え方によって3～9の震源の集中域が認められ

る。これらについて、以下に若干の指摘を行う。

- (1) 祖母山の南には地殻浅部-深部の震源集中域が存在し(第8図X-1)、そのWSW方向にも地殻浅部-中部の震源集中域が存在する(同X-2)。X-1は、第6図の1923-1997年の震源分布にも非常に明瞭に現れている。これらの地域の周辺には4つのENE-WSW走向の活断層が分布しており(第7図参照; WSW方向にはさらに緑川断層・日奈久断層などへと続く)、両震源域は本地域南東部の大構造と同一のこの方向の活断層系の生成・運動に関係している可能性が高い。また、X-1は、NW-SE方向の大きなプーゲー重力異常の傾斜部(広域的に概略福岡市-日向市を結ぶように認められる地形-地質的境界線に対応する)に位置しており、これに関係した震源域の可能性もある。以上のように、X-1～X-2周辺については、本地域の深部の大構造や地震予知の観点から重要性が指摘される。
- (2) 本地域の中央部、竹田市北方のENE-WSW走向の山地の一部には、地殻浅部-深部の震源集中域が存在する(第8図Y)。Yは、第6図の1923-1997年の地殻浅部の震源分布にも非常に明瞭に現れている。Yについては、その北東方向にENE-WSW走向の活断層が分布するとともに、過去の災害地震の推定震源も分布している(第7図)。またプーゲー重力異常分布に示されるように、同走向の基盤岩類の大きな構造にも対応している。このように、YはENE-WSW走向の大構造・活断層系に関係する可能性が高いが、北西部の地溝帯内のプーゲー重力異常分布に認められるNW-SE方向の構造(北西方向には大分県中部地震の震源域(第8図LEQ-75)、南東方向には別の震源集中域(同Z)が存在)にも関係して、両者の交点になっている可能性が指摘される。以上のようにX-1～X-2と類似したY周辺についても、深部の大構造や地震予知の点から重要である。

6.7 グーテンベルク-リヒター式のb値

ある領域に発生する地震のMとその頻度($n(M)$)との間には、 $n(M)$ が十分に大きい場合には、 a 、 b を係数として、(1)のグーテンベルク-リヒター

第4表 気象庁の震源データファイル(1998-2000年)による「大分」地域の地震マグニチュードについてのゲーテンベルク-リヒター式のb値一覧表(b値の計算法および異常については本文参照)。

Mz	b-value	No.	Mmax	異常
1. 全地域・全深度 (震源数: 3178)				
1.5	1.120	1363	4.5	0
2. 全地域・深度別				
2.1 地殻浅部, 0~7.5 km (765)				
1.5	1.313	287	3.3	++
2.2 地殻中部, 7.5~15 km (2011)				
1.5	1.186	851	4.5	0
2.3 地殻深部, 15~30 km (57)				
---	---	---	---	---
2.4 マントル内上部, 30~80 km (212)				
1.5	0.804	182	3.8	-
2.5 マントル内下部, 30~150 km (133)				
---	---	---	---	---
3. 地域別・地殻内, 0~30 km				
3.1 由布-鶴見地域 (1781)				
1.5	1.239	597	3.9	+
3.2 九重西部地域 (397)				
1.5	1.225	220	3.7	+
3.3 「大分」地域中央部-南東部 (202)				
1.5	1.258	93	3.0	+

式が成立することが知られている(例えば, 宇津, 2001)。

$$\log n(M) = a - bM \quad (1)$$

係数bの値はb値と呼ばれ, 地震集団の性質を表す重要なパラメーターと見られており, 多くの場合0.7~1.1程度である。b値の計算については様々な方法があるが, マグニチュードMz以上の地震のMがすべて分かっている時, Mの平均値をMaveとすれば, 以下の(2)式で最尤推定値を求めることができる(宇津, 2001, p.145)。

$$b = \log e / (Mave - Mz) \quad (2)$$

(なお, $\log e \sim 0.4343$)

b値は, 大きな地震の発生割合が相対的に低い場合に高い値となるが, それは歪みが少ししか溜まっていない段階でも破壊が生じ易いことを意味し, 岩石強度が低下した環境など(第1表参照)に対応すると考えられる。火山性地震などではb値が大きく, 2を越える場合も知られている(宇津,

2001)。従って, マグマ溜まり~高温火成岩体の周辺, 高温熱水系の内部などでは高いb値が予想され, それ以外の環境にある領域との区別に利用出来ることが期待される。

須藤(1981)は, 阿蘇火山周辺地域の約13,000個の震源データからb値を計算しており, 平均的には1に近いあるいはそれ以下の値を得ているが, 阿蘇火山の北西地域については1.2程度(一部の中央火口丘の群発微小地震については2.0程度)の高い値を報告している。伊藤・杉原(1985)は, 九重火山周辺地域の約1,000個の震源データからb値の計算を試みており, b値が1に近い結果を得ている。

今回, 気象庁(1998-2000年)の震源データに基づいて, 「大分」地域の全地域・全深度, 全地域の3つの深度別, 3つの地域別(地殻内)について, (2)式により予察的にb値の計算・比較を試みた。その結果を整理して第4表に示す。

今回の「大分」地域の震源のb値は, 全地域・全深度(第4表1)では1.1程度であるが, 地殻浅部(同2.1)および由布-鶴見地域(同3.1), 九重西部地域(同3.2)では1.2~1.3程度と高く, 上記の期待に沿っている。しかし, 震源数が少なくまた広い地域をまとめて計算しているが, 地溝帯外の地殻内震源全体(同3.3)のb値も高く計算され, マグマ溜まり~高温熱水系に密接に関係する震源とそれ以外の震源との区別が必ずしも容易ではないことを示唆している。一方, より深部のフィリピン海プレートのスラブに沿った震源全体(同2.4)のb値は, 0.8程度と明瞭に低く前記の通常値の範囲に入っている。

以上のように, 「大分」地域の活火山体周辺の地殻内(特に地殻浅部の)地震は1.2以上の高いb値を持つており, b値がマグマ溜まり, 高温熱水系などの分布領域を抽出する指標となる可能性が示された。しかし, 今回の検討では, 地溝帯内外の「非活火山地域」の活断層系に関係する地震などのb値の計算を独立に行うことが出来なかったため, 高いb値がどの程度有効かは不明である。今後, より多数の高精度の震源データの検討により, 地熱資源の探査・評価に適用可能となることが期待される。b値の有効性の検討には, 西隣りの「熊本」地域の震源データの解析なども重要と考えられるが, 将来の研究課題としたい。

7. まとめ

本説では、「GISを利用した地熱資源の評価（アセスメント）新計画」の一環として、20万分の1地勢図「大分」の広域的な範囲をケーススタディーに取り上げ、高密度・高精度観測化が進んだ気象庁（2002）の1998-2000年の公開震源データ（震源数3,178個、M0.3～4.5）の処理結果に基づいて、地下の地熱構造を中心に予察的な検討を行った。この目的で、簡易的なGISソフトにより地殻内震源の分布について、活火山体、高温噴気・温泉地、活断層系、ブーゲー重力異常などの分布と比較・重合的に平面図表示した（第7図・第8図および口絵）。その概要は以下のように整理される。

- (1) 累積頻度曲線により、震源は地殻内の浅部（0～7.5km, 24%）、中部（7.5～15km, 63%）、深部（15～30km, 2%）、フィリピン海プレートのスラブに対応するより深部（30km以深, 11%）の4グループに分類される。地殻内の震源は時空間的に集中域を作る傾向が強いが、より深部の震源は散点的に地域東部に分布している。
- (2) 地殻内の震源集中域は、地域北西部をNE-SW方向に伸びる別府-阿蘇の地溝帯内の3つの大規模な活火山体（由布-鶴見、九重、阿蘇）の周辺に最も顕著で、そこでは特徴的に地殻浅部-中部-深部の震源が揃って存在する。特に、由布-鶴見火山では、中央深部の非震源域（幅約10km、概略10km以深）の浅部および東西両側に多数の震源が観測されており、中心部にマグマ溜まり～高温火成岩体、その周辺部に応力-歪み-破壊集中域あるいは高温地熱流体の貯留-流動域の分布モデルが想定される。地震活動度が相対的に低い九重・阿蘇火山でも、活火山体下に非震源域が広がるとともに周辺には一部～半環状に震源集中域が分布しており、マグマ溜まり～高温火成岩体の分布を示唆する。
- (3) 今回の震源域と熱水系との分布関係はより複雑で、火山性高温噴気地については鶴見岳、九重硫黄山では震源集中域となっているが、阿蘇中岳では震源は報告されていない。高温温泉・噴気地については、別府・由布院、筋湯

は震源集中域に該当するが、野矢・湯平、牧ノ戸・黒川・岳ノ湯・川底、湯ノ谷・垂玉、杖立・天瀬は震源に乏しい。その原因として、各熱水系の規模・特性の効果、マグマ-火山活動の相乗効果、広域的な応力-歪み場の相乗効果、それらの経時変化および微小地震観測精度の不足などが指摘される。

- (4) 上記の活火山体～一部熱水系分布地域を除けば、地溝帯内に非常に多いE-W走向の活正断層の大部分は、今回の震源集中域には該当しない。しかし、1923-1997年には阿蘇野断層、阿蘇外輪山北東部の断層群、入美断層などの近傍でM6級地震や群発地震が観測されており、より長期的な周期で活動する広域的な応力-歪み-破壊場が、これら「非活火山・非高温熱水系」地域の活断層系の生成・運動を制御していると推測される。

以上のように、今回の「大分」地域についてのケーススタディーでは残された課題も多いが、公開電子震源データとGISの利用によって地下の地熱構造に関して有意義な知見が得られることが示された。今後、より長期間・高精度の地震データを用いた総合解析、他種類データとの統合解析により、全国的に地下浅部～深部の地熱環境の定量的な理解-評価が進展することが期待される。

8. おわりに

1. で述べたように、地質調査総合センターの地熱資源研究グループでは、日本の地熱資源の長期的・総合的な最適利用化に資するために、「GISを利用した地熱資源の評価（アセスメント）新計画」を2001年から進めている。この計画では、全国～地熱有望地域毎の地下深度3～10km程度までの温度構造・流体貯留構造を推定する目的で、多種多様な地球科学・工学情報の総合的な利用が必要である。しかし、それらの全国的な整備-電子公開化は、様々な研究機関などの努力によってまだ現在進行中（あるいは将来計画など）の段階である。

このような現状の中で、近年地震の予知・災害軽減化を目的として全国的に飛躍的に充実化した公開電子震源データを今回取り上げ、簡易的な方法により「大分」地域についてケーススタディーを試

みた。その結果は、7.でまとめたように有望性が高いが、残された問題も少なくない。今後、公開震源データのより一層の高精度化・長期蓄積化、多種多様な地球科学・工学情報の整備・電子公開化、GISソフトの発展・普及化などの流れに沿って、より統合的なケーススタディーを進めたい。

本説の最後に、今回の報告は公開震源データの処理方法と「大分」地域についての予察的な研究結果の紹介であり、それらを環境・特性が異なる他の地域に応用する場合には、注意深い考慮が必要であることを付言したい。また、地震学分野では長い歴史の中で非常に多種多様な研究が行われているが、本説の予察的な検討結果と同様～類似の報告がすでに一般論としてあるいは個別地域などについて行われており、それらを本説で十分に参照・引用できなかった場合についてはご容赦を願いたい。

謝辞：本報告でデータを利用して頂いた地震の観測・解析およびデータの電子公開化に携わっている気象庁、大学、防災科研などの関係の方々に感謝します。本説を取りまとめるに当たっては、地質調査総合センターの杉原光彦氏・阪口圭一氏および玉生志郎研究グループ長から原稿について有益なコメントを頂きました。また、須藤茂氏からは、活火山地域の地震観測の現状などについてご教示頂きました。記して感謝します。

文 献

浅森浩一・趙大鵬(2001):地震波トモグラフィーから推定した九州地方の島弧マグマ分布とスラブ構造。東大地震研究所集報, 76, 155-161。
 物理探査学会編(1998):物理探査ハンドブック, 1336p。
 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。
 地質調査所(2000):日本重力CD-ROM, 数値地質図, P-2, 地質調査所。
 江原幸雄(1982):地熱微動法, 湯原浩三監修, 地熱開発総合ハンドブック, 272-281, フジ・テクノシステム。
 江原幸雄(1984):九州中部地域の地熱構造と地震活動の関連, 火山, 第2集, 29, 249-265。
 江原幸雄・尾藤晃彰・大井豊樹・笠井弘幸(1990):活動的な噴気地域下の微小地震活動-九重硫黄山の例-, 日本地熱学会誌, 12, 263-281。
 古川善紹・馬渡秀夫・黒田 徹(2000):九州・別府地域での地震活動, 地震, 第2輯, 52, 487-490。
 遊沼 賢・山崎謙介(2001):インターネットGISに基づいた地震のe-ラーニングシステム, 日本地熱学会秋季大会講演予稿集, 2001,

B33。
 今田幸史・渡辺邦彦(1999):GISを用いた西南日本における地震活動の空間特性, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集(CD-ROM), 1999, Sm-013。
 伊藤久男(1982):微小地震, 湯原浩三監修, 地熱開発総合ハンドブック, 282-290, フジ・テクノシステム。
 伊藤久男・杉原光彦(1985):豊肥地域の地震活動, 地調報告, no. 264, 407-443。
 伊藤久男(1989):探査法としての微小地震法, 地熱エネルギー, 14, 215-223。
 金嶋 聡・山本 希・川勝 均・高木憲明(2001):火山起源の地震動解析と爆発機構の理解-阿蘇火山を主な例として-, 地球, 23, 565-572。
 唐木田芳文・早坂祥三・長谷義隆ほか編(1992):日本の地質9, 九州地方, 371p., 共立出版。
 活断層研究会編(1991):新編 日本の活断層-分布図と資料, 437p., 東大出版会。
 気象庁(2002):平成12年地震年報(CD-ROM), 気象業務支援センター。
 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。
 久保幸章(1988):地熱地域における地震活動, 温泉科学, 38, 23-29。
 九州活構造研究会編(1989):九州の活構造, 553p., 東大出版会。
 三浪俊夫・久保幸章・表俊一郎・木下保美(1981):豊肥地熱地域における地震活動, 日本地熱学会誌, 3, 43-53。
 三浪俊夫・久保幸章・表俊一郎・長谷川淳・青木道夫・本松利郎(1984):大分県野矢滝上地区とその周辺地域に於ける微小地震について, 日本地熱学会学術講演要旨集, 1984, 81。
 永野征児(1995):微小地震利用探査法開発について-微小地震データ処理・解析システム(MEPAS)-, 地熱, 32, 371-378。
 中田 高・今泉俊文編(2002):活断層詳細デジタルマップ, DVD 2枚+解説書 68p.+付図1枚, 東大出版会。
 日本列島の地質編集委員会(1996):コンピュータグラフィックス日本列島の地質(CD-ROM付), 139p., 丸善。
 西田良平・渡辺邦彦・尾崎順一・浅井亨崇(1997):GIS-SEISMOLOGY「活断層周辺の地震活動度の検証」, 日本地熱学会講演予稿集, 1997, 2, P105。
 越智富美子・趙大鵬(2001):日本列島下の地殻内地震発生層の地域的变化, 東大地震研究所集報, 76, 145-153。
 大湊隆雄(2001):火山におけるモニタリング, 物理探査, 54, 455-472。
 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(2000):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・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.
- 須藤靖明 (1981) : 阿蘇カルデラ西部地域の地震活動. 火山, 第2集, 26, 263-279.
- 須藤靖明 (1987) : 鶴見岳火山及びその周辺の地震活動. 火山, 第2集, 32, 205-218.
- 須藤靖明 (1990) : 阿蘇カルデラ地域の地震活動の特徴. 地球, 12, 379-382.
- 須藤靖明 (1993) : 中部九州地域の火山周辺の地震活動とそのテクトニクス. 地質学論集, no.41, 19-34.
- Sudo, Y. and Matsumoto, Y. (1998) : Three-dimensional P-wave velocity structure in the upper crust beneath Kuju Volcano, central Kyushu, Japan. Bull. Volcanol., 60, 147-159.
- Sudo, Y., Ono, H., Hurst, A. W., Tsutsui, T., Mori, T., Nakaboh, M., Matsumoto, Y., Sako, M., Yoshikawa, S., Tanaka, M., Kobayashi, Y., Hashimoto, T., Hoka, T., Yamada, T., Masuda, H. and Kikuchi, S. (1998) : Seismic activity and ground deformation associated with 1995 phreatic eruption of Kuju Volcano, Kyushu, Japan. Jour. Volcanol. Geothermal Res., 81, 245-267.
- 須藤靖明 (2001) : 阿蘇火山の火山活動の特徴-開放型火山-. 地球, 23, 545-550.
- 杉原光彦・西 祐司・当舎利行 (1990) : 豊肥地熱地域の微小地震活動. 平成元年度サンシャイン計画研究開発成果中間報告書, 深部地熱資源探査技術に関する研究, 41-103, 地質調査所.
- 杉原光彦 (1993) : 微小地震を利用した地熱探査. 日本地熱学会誌, 15, no.4, 72-75.
- 鈴木貞臣・Sadeghi, H.・竹中博士・清水 洋 (1999) : 地震トモグラフィによる九州背弧のマントルアップウエリング構造と九州の張力場. 地球, 号外, 27, 211-216.
- 田中明子・矢野雄策・笹田政克・大久保泰邦・梅田浩司・中野昇・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.
- Tosha, T., Sugihara, M. and Nishi, Y. (1998) : Revised hypocenter solutions for microearthquakes in the Kakkonda geothermal field, Japan. Geothermics, 27, 553-572.
- 当舎利行・西 祐司・杉原光彦 (2000) : 深部地熱資源調査における微小地震について. 地調報告, no.284, 193-206.
- 宇津徳治 (2001) : 地震学, 第3版. 376p., 共立出版.
- 八木原寛・清水 洋・後藤利彦・角田寿喜 (2001) : 近地地震データによる九州の地殻および最上部マントルの3次元地震波速度構造. 地球, 23, 583-588.
- 横山 泉・荒牧重雄・中村一明編 (1979) : 岩波講座地球科学7, 火山, 294p., 岩波書店.
- 吉川美由紀・須藤靖明・筒井智樹・田口幸洋 (2002) : 九重火山北西部の地熱地帯における Vp/Vs と地震活動. 日本地熱学会誌, 24, 1-12.

SHIGENO Hiroshi (2003) : Examining deep geothermal environments using open data for hypocenters and GIS - A case study for the "Oita" area, Kyushu, Japan.

< 受付 : 2002年10月8日 >