

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

茂野 博¹

Hiroshi SHIGENO (2000) Systematic forward and preliminary inversion analyses for magma-hydrothermal system environments based on simplified-model numerical simulations. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 51(12), p. 631-648, 18 figs.

Abstract: Systematic forward and preliminary inversion analyses have been conducted by simplified-model numerical simulations for macroscopic magma-hydrothermal systems based on vertical one-dimensional transient 'extended thermal conduction' model by Shigeno (1999a) in order to contribute to understanding the deep geothermal environments that are closely related to promising future resources, but are poorly known.

By the systematic forward analysis, the temperature distributions at 3 km depth changing with time were compared on the basis of four models for reservoir distributions: (A) no reservoir, (B) two reservoirs (1.0 to 2.0 and 2.5 to 3.5 km depths), (C) one reservoir (1.0 km depth to magma chamber top), and (D) one reservoir (2.5 km depth to magma chamber top). For each model, the top depth and thickness of the magma chamber were changed from 3 to 6 km, and from 1 to 8 km, respectively. The reservoir directly attached to the magma chamber top and covered by a thick cap rock of Model D (possibly of concealed nature) tends to keep high to very high temperatures (250° to 500°C) at 3 km depth regardless of the magma chamber conditions. However, the similar reservoir, but covered by a thin cap rock, of Model C can hardly keep the 3 km depth temperature higher than 250°C, provided that the thickness of the magma chamber is less than 2 km. The deep reservoir of Model B can hardly keep the 3 km depth temperature higher than 250°C, provided that the distance between the bottom of the reservoir and the top of the magma chamber is greater than *ca.* 1.5 km regardless of the thickness of the magma chamber.

The preliminary inversion analysis revealed that many possibilities exist for hydrothermal-system development at depth in actual situations, even if thermal conduction dominates at the shallow levels. These results will be useful guidelines for exploration and evaluation of deep geothermal resources that will be exploitation targets in the future.

要 旨

将来の資源として期待されるが未知の点が多い深部地熱環境の理解に寄与する目的で、垂直 1 次元非定常の「拡張熱伝導」モデルに基づいた巨視的なマグマ-熱水系についての簡易モデル化・数値シミュレーション手法(茂野, 1999a)により、体系的な順解析および予察的な逆解析を行った。

体系的な順解析では、深度 3 km における温度の経時変化が、以下の 4 つの貯留層分布モデルに基づいて比較された。すなわち、(A)貯留層が分布しない場合、(B)深度 1.0~2.0 と 2.5~3.5 km に貯留層が 2 枚分布する場合、(C)深度 1.0 km~マグマ溜頂部間に貯留層が 1 枚分布する場合、(D)深度 2.5 km~マグマ溜頂部間に貯留層が 1 枚分布する場合である。各モデルについて、マグマ溜の頂部深度と厚さを各々 3~6 km, 1~8 km で変化

させた。(D)の貯留層がマグマ溜頂部に直接接するとともに厚い帽岩で覆われる場合(潜頭性熱水系となる傾向大)には、マグマ溜の条件に強く規制されずに、深度 3 km の温度は長期間高温~超高温 (250°~500°C) を保持する傾向が強い。しかし(C)の帽岩が薄い場合には、マグマ溜の厚さが 2 km よりも薄い条件では、深度 3 km の温度を概略 250°C 以上に保持することは困難である。さらに(B)の場合には、深部貯留層底部とマグマ溜頂部とが離れている条件(概略 1.5 km 以上)では、マグマ溜が厚い場合でも深度 3 km の温度を概略 250°C 以上に保持することが困難である。

予察的な逆解析の結果は、現実の地熱地域の地下浅部で熱伝導が卓越する場合でも、深部に熱水系が発達する様々な可能性があることを示している。これらの結果

Keywords: magma-hydrothermal system, geothermal resources, geothermal reservoir, cap rock, magma chamber, thermal conduction, thermal history, modeling, numerical simulation, inversion analysis, deep drilling, Deep-Seated Geothermal Resources Survey.

¹ 地質調査所地殻熱部 (Geothermal Research Department, GSJ)

は、今後の開発対象となる深部地熱資源の探査・評価に指針を与える意味で重要と考えられる。

1. はじめに

地熱開発は、近年世界的に地下深部(概略深度2.5 km以深)へと向かっており、特に開発地域に関して社会的制約の多い日本では、深部地熱貯留層の発電開発の進展が期待されている。しかし、深部地熱環境には実態に不明な点が多く、また深部坑井掘削には多額の費用を要する。このため、国のニューサンシャイン計画の中で、平成4~12年度に新エネルギー・産業技術総合開発機構を中心に「深部地熱資源調査」が実施され、地質調査所でも「深部地熱資源調査の解析・評価」が進められてきた(例えば、茂野ほか, 2000)。しかし、地域毎に分布・特性が異なっていると考えられる深部地熱資源の探査・評価は非常に困難な課題であり、さらに今後の技術開発、調査・研究が必要である。

茂野(1998, 2000)は、特に温度時空分布に関する各種の測定・推定データの総合解析によって、深部地熱環境を推定する手法の可能性を検討した。この一環として茂野(1999a)は、非常に単純ではあるが問題の本質を保持していると考えられる「拡張熱伝導率」を軸とした垂直1次元非定常の簡易モデルに基づいて、数値シミュレーションによるマグマ溜熱水系賦存環境の多様性の基礎的検討を行った。その中では、(1)マグマ溜の頂部深度、(2)貯留層の底部・頂部深度、(3)マグマ溜の厚さ、および(4)貯留層の「拡張熱伝導率」が貯留層の温度寿命に与える影響を、いくつかの代表的な条件の場合について検討した。また、茂野(1999b), Shigeno(2000)は、この手法を動的環境の解析にまで拡張して、「深部地熱資源調査」の深部調査井(WD-1a井、深度3729 m, 1995年)の掘削により第四紀花崗岩体中で500°Cを越える高温分布が観測された岩手県葛根田地域に適用し、同地域の半定量的な浅部~深部地熱系モデル化、特に地熱系発達史の検討を行った。

筆者は、深部地熱資源の探査・評価の進展に寄与する目的で、上記の簡易モデルに基づく数値シミュレーション手法について、その後もさらに様々な検討を試みて来た。本説では、この内以下の2つの検討結果を報告する。その1は、体系的な順解析であり、代表的と考えられる4種類の貯留層分布モデルに基づいて、各々マグマ溜の頂部深度と厚さを幅広く変化させた一連の数値シミュレーションを行い、特に地下深度3 kmにおける温度の経時変化を体系的に取りまとめて表示・比較検討した。その2は、上記の体系的な順解析の結果を利用した予察的な逆解析であり、特に地下浅部が熱伝導場となっている単純な場合について、深部の温度構造・貯留層構造の推定の可能性を検討した。

本説は、上記のように茂野(1999a)の手法と結果をさらに発展させたものである。そのため、手法の原理・問題点、従来の関連研究などについての記述は、基本的に茂野(1999a)を引用し簡略化するとともに、文献引用はその範囲で必要なものみに留めた。従って、マグマ溜の深度・規模などが地下の温度分布に及ぼす影響(1~3次元)については、従来より熱伝導モデルに基づき解析の手法などによってFukutomi(1960), 福富(1964), Smith and Shaw(1975, 1978)などを始め様々に検討されていることを、ここで付記する。ただし、これらの場合にはマグマ溜を主要な検討対象として、基本的に均一方向の熱伝導率分布が仮定されており、熱水系~貯留層分布の問題は十分取り扱われていない。

2. モデル化およびシミュレーションの方法

2.1 モデル化の要点

今回の深部地熱環境の検討を目的とした簡易モデル化では、基本的に茂野(1999a)の方法に従った。すなわち、実際のマグマ溜熱水系における複雑な空間3次元の熱の伝達過程について、垂直1次元で取り扱い、また不明の点が多く取り扱いが難しい対流過程(および放射過程)をすべて伝導過程に置き換えることにより、モデル化および数値シミュレーションの大幅な単純化・効率化を図った。具体的には、対流により低い地温勾配を示す地熱貯留層について、以下の(1), (2)で定義される垂直1次元の「拡張熱伝導率(extended thermal conductivity, K_{ext})」を用いて高熱伝導性の水平層として取り扱った。

$$H_{tot} = Nu H_{cond} = K_{ext}(T_L - T_U)/L \quad (1)$$

$$K_{ext} = Nu K_m \quad (2)$$

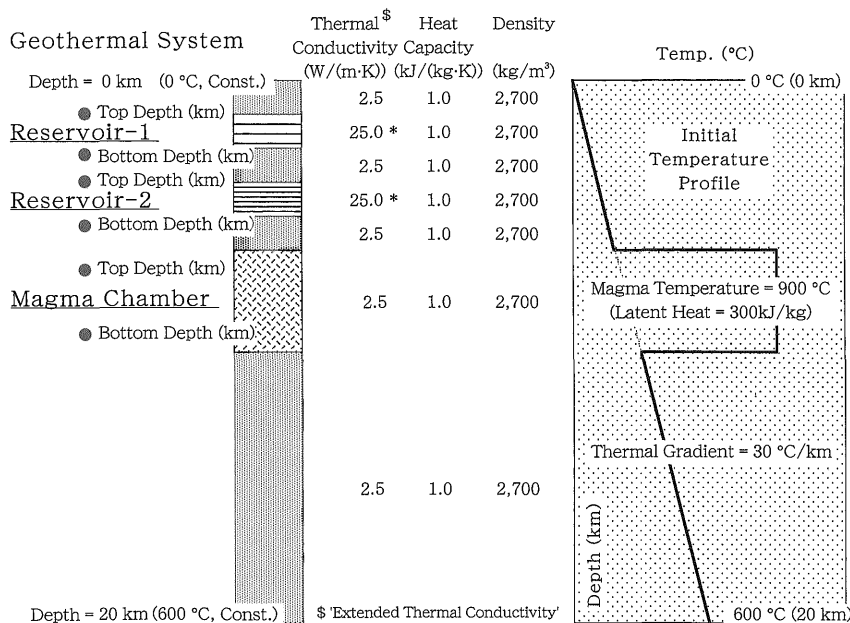
ただし、 H_{tot} は総熱流量(W)、 Nu はヌセット数、 H_{cond} は伝導による熱流量(W)、 T_L は下部境界の温度(K)、 T_U は上部境界の温度(K)、 L は水平層の厚さ(m)、 K_m は媒質の熱伝導率(W/(m·K))である。

手法の理論、各種の問題点などについては、その概要が茂野(1999a)にまとめられているので、ここでは省略する。

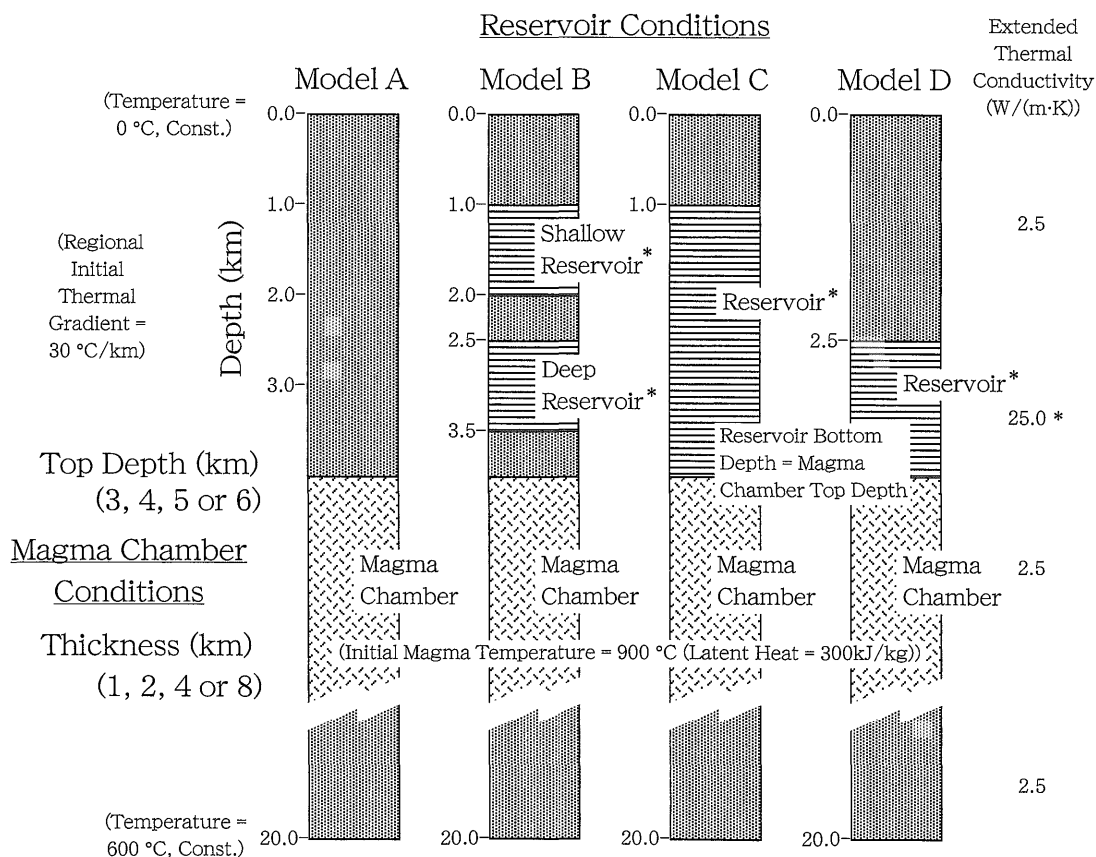
2.2 基本的モデルとシミュレーションの方法

今回の数値シミュレーションのための基本的な概念・数値モデルを、茂野(1999a)に基づいて第1図に示す。その概要は以下(1)~(7)の通りである。

(1) マグマ溜と貯留層を含む垂直1次元の分布パラメータモデル(巨視的モデル)を考え、温度分布の時間変化(非定常)を計算出力とする。深度範囲は地表から地下深度20 kmまで、時間範囲はマグマ溜の定置から



第1図 今回の解析の基本とした巨視的なマグマ-熱水系の垂直1次元非定常熱伝導モデル。茂野 (1999a) に基づく。*は、地熱貯留層に高い「拡張熱伝導率」が適用されたことを示す (本文参照)。
Fig. 1 Basic model used in this study: vertical one-dimensional transient thermal conduction model for macroscopic magma-hydrothermal systems. This figure is after Shigeno (1999a). The * indicates that high 'extended thermal conductivity' was applied to geothermal reservoirs (see the text).



第2図 今回の解析に用いた4種類の巨視的なマグマ-熱水系モデル。

第1図の基本モデルを基礎として、今回の体系的な順解析と予察的な逆解析とに用いたA・B・C・Dモデルを示す。各モデルについて、マグマ溜の頂部深度を3~6 km、マグマ溜の厚さを1~8 kmの範囲で変えて16ケースのシミュレーションが行われた。*は、地熱貯留層に高い「拡張熱伝導率」が適用されたことを示す (本文参照)。

Fig. 2 Four models of macroscopic magma-hydrothermal systems used in this study.

Models A, B, C and D were based on the basic model in Fig. 1 and used in systematic forward and preliminary inversion analyses. For each model, 16 case simulations were conducted by changing the depth of the magma chamber top (3 to 6 km), and the thickness of the magma chamber (1 to 8 km). The * indicates that high 'extended thermal conductivity' was applied to geothermal reservoirs (see the text).

400 ky (40 万年, 以下同様に標記する) 後までを考える。

(2) 地下の各深度に, 平均化した岩石(地質単位: マグマ溜, 貯留層, 非マグマ溜・非貯留層の3種類の何れか)の分布を仮定する。流体については独立には取り扱わない。

(3) 上述したように, 熱の移動については熱伝導のみで近似し, 貯留層は垂直方向に高い「拡張熱伝導率」を持つ層としてモデル化し, 熱伝達全体が熱伝導方程式で半定量的に近似できると仮定する。

(4) マグマ溜および貯留層の各々の頂部および底部の深度を, 2, 3で述べるようにモデル型およびパラメータ値として与える。上記(2)の3種類の地質単位について, 共通一定の熱伝導率(2.5 W/(m·K)), 熱容量(1.0 kJ/(kg·K)), 密度(2700 kg/m³) (各々温度・圧力・時間などに依存しない)を与える。ただし, 貯留層については10倍高い「拡張熱伝導率」(25.0 W/(m·K))を与える(茂野(1999a)の議論を参照)。

(5) 境界条件として, 地表温度が0°C, 地下深度20

kmの温度が600°Cで各々一定とする。

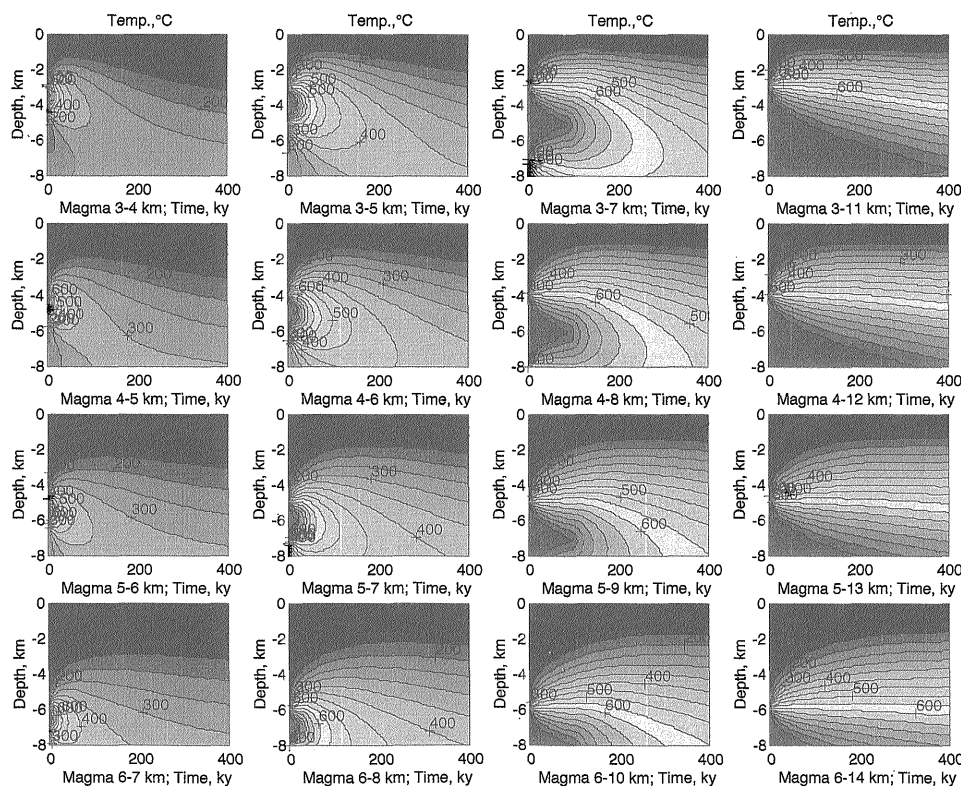
(6) 初期条件として, 地下増温率が一定(30°C/km)とし, マグマ溜部分のみ一定の高温(900°C)とする。

(7) マグマ固結の潜熱については考慮する(固結温度900°Cにおいて300 kJ/kg)。しかし, 放射崩壊の発生熱, 岩石の変成・変質の反応熱などは考慮しない(なお, 放射崩壊の発生熱については, 上記(6)の地下増温率に組み込まれている)。

今回の数値シミュレーションでは, 基本的に茂野(1999a)の方法(差分法, 陽形式)を用い, そのプログラムを一部修正・拡張することにより体系的な順解析用および予察的な逆解析用の各種のプログラムを作成し, 計算を実施した。その概要については, ここでは省略する。

2.3 今回の解析に用いたモデルとパラメータ

今回の体系的な順解析および予察的な逆解析では, 以下に示すように4種類の貯留層分布モデルと2つのマグマ溜に関するパラメータを用いた(第2図参照)。こ



第3図 Aモデルに基づく16ケースの体系的な順解析シミュレーション結果の温度コンター図。

Aモデルは第2図を参照。上下4行はマグマ溜の頂部深度が3, 4, 5, 6 km, 左右4列はマグマ溜の厚さが1, 2, 4, 8 kmの場合の計算結果に対応している。各小図は縦軸が深度(0~8 km), 横軸がマグマ溜定置後の時間(0~400 ky)の温度コンター(50°C間隔)図である。

Fig. 3 Temperature contours of systematic forward simulation results for 16 cases based on Model A.

Refer to Fig. 2 for Model A. Four rows and four columns correspond to depths of the magma chamber top at 3, 4, 5 and 6 km, and thicknesses of the magma chamber of 1, 2, 4 and 8 km, respectively. Each small figure shows temperature contours (50°C intervals) on the depth (0 to 8 km) and time after the magma chamber emplacement (0 to 400 ky) plane.

れらは、上述したように基本モデルの(4)について、ある範囲で変化させたものである。

(1) 貯留層分布モデルは以下に示す A・B・C・D の 4 種類である。これらは、基本的にマグマ溜頂部よりも浅部の熱水系分布環境の相違に対応するものである。具体的には、(A)貯留層が分布しない場合、(B)深度 1.0~2.0 と 2.5~3.5 km に貯留層が 2 枚分布する場合、(C)深度 1.0 km~マグマ溜頂部間に貯留層が 1 枚分布する場合、(D)深度 2.5 km~マグマ溜頂部間に貯留層が 1 枚分布する場合である。

(2) 一方、マグマ溜に関するパラメータとして、マグマ溜の頂部深度と厚さの 2 つを、上記の 4 つのモデルについて各々体系的に変化させた。これらは、基本的に熱水系よりも深部の熱源分布環境の相違に対応するものである。具体的には、マグマ溜の頂部深度を 3, 4, 5 および 6 km の 4 つの値、マグマ溜の厚さを 1, 2, 4 および 8 km の 4 つの値で変化させた。

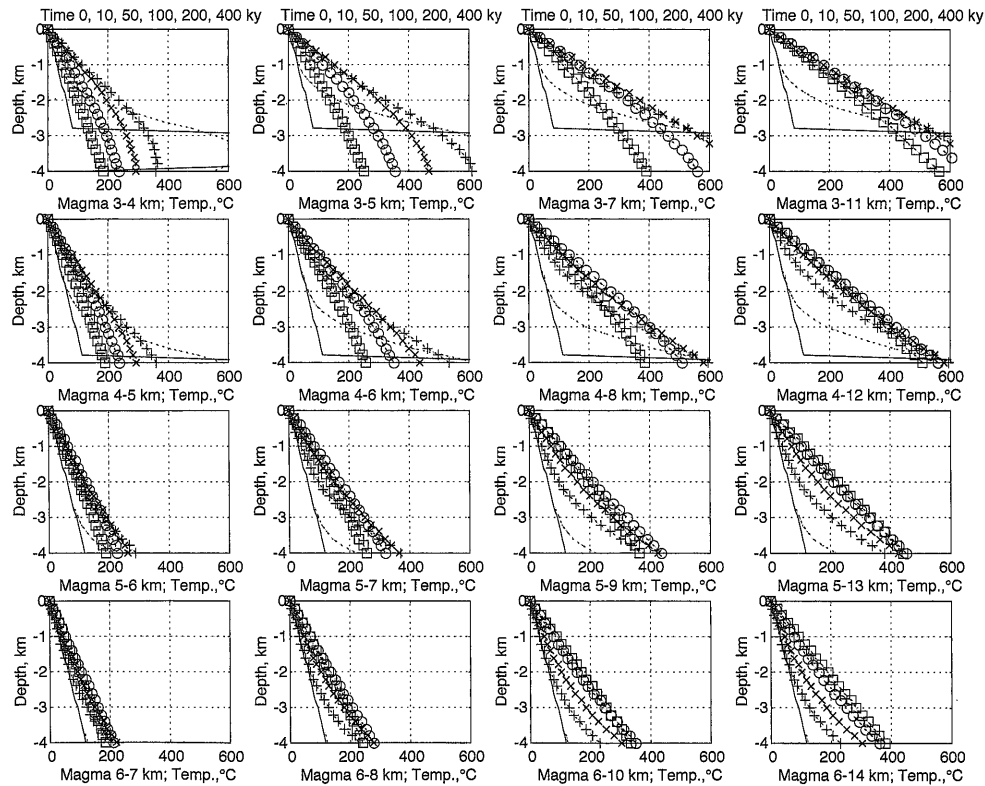
3. 体系的な順解析

3.1 方法・結果

今回、2. 3 で述べた A・B・C・D の 4 種類のモデル (第 2 図) に基づいて、各々体系的にマグマ溜の頂部深度 (3, 4, 5, 6 km) と厚さ (1, 2, 4, 8 km) とを変えて順解析シミュレーションを実施した。従って、各モデルについてシミュレーションケース数は各々 16 である。

その結果を、4 種類のモデル毎に、時間 (マグマ溜定置後 0~400 ky) - 深度 (0~8 km) 面上の温度コンター (50°C 間隔) 図、および温度 (0~600°C) - 深度 (0~4 km) 面上の温度プロファイル (マグマ溜定置後 0, 10, 50, 100, 200, 400 ky) 図として、体系的に第 3 図~第 10 図に示す。

さらに第 3 図~第 10 図の内容を整理する目的で、第 11 図には 4 種類のモデル (上下 4 行: A・B・C・D モデル) による 4 つの時間 (左右 4 列: マグマ溜定置後 50, 100, 200, 400 ky) における深度 3 km の温度シミュレ

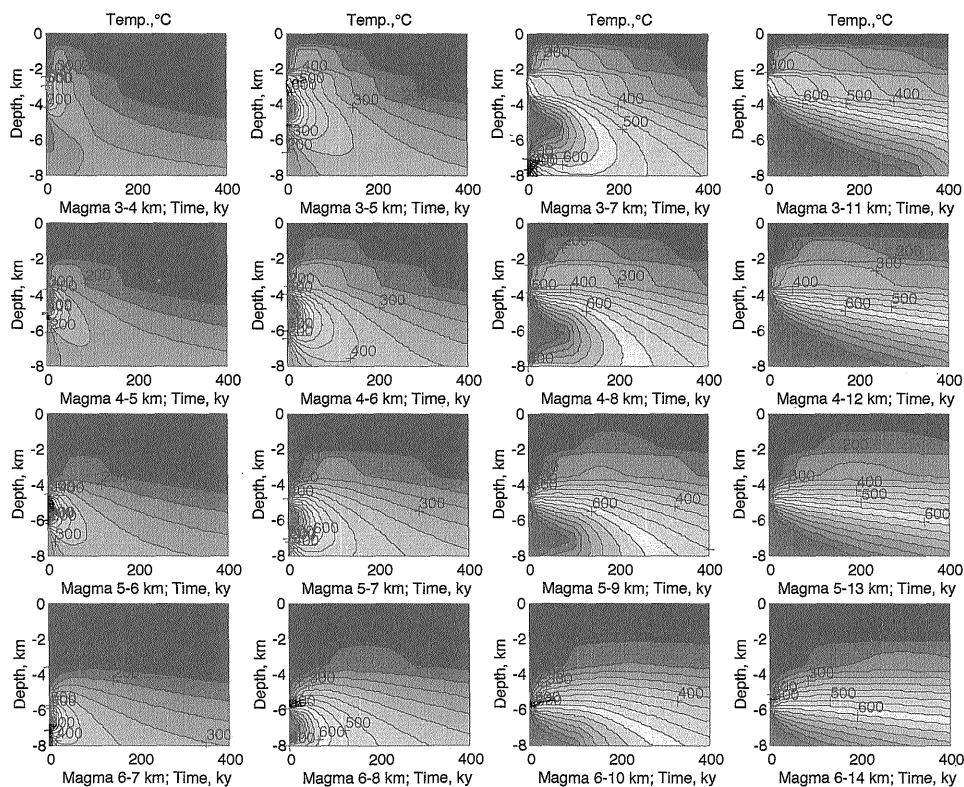


第 4 図 A モデルに基づく 16 ケースの体系的な順解析シミュレーション結果の温度プロファイル図。

A モデルは第 2 図を参照。上下 4 行はマグマ溜の頂部深度が 3, 4, 5, 6 km, 左右 4 列はマグマ溜の厚さが 1, 2, 4, 8 km の場合の計算結果に対応している。各小図は縦軸が深度 (0~4 km), 横軸が温度 (0~600°C) で、温度プロファイルの時間変化 (マグマ溜定置後 0 ky (実線), 10 ky (点線), 50 ky (+), 100 ky (x), 200 ky (o) and 400 ky (□)) を示す。

Fig. 4 Temperature profiles of systematic forward simulation results for 16 cases based on Model A.

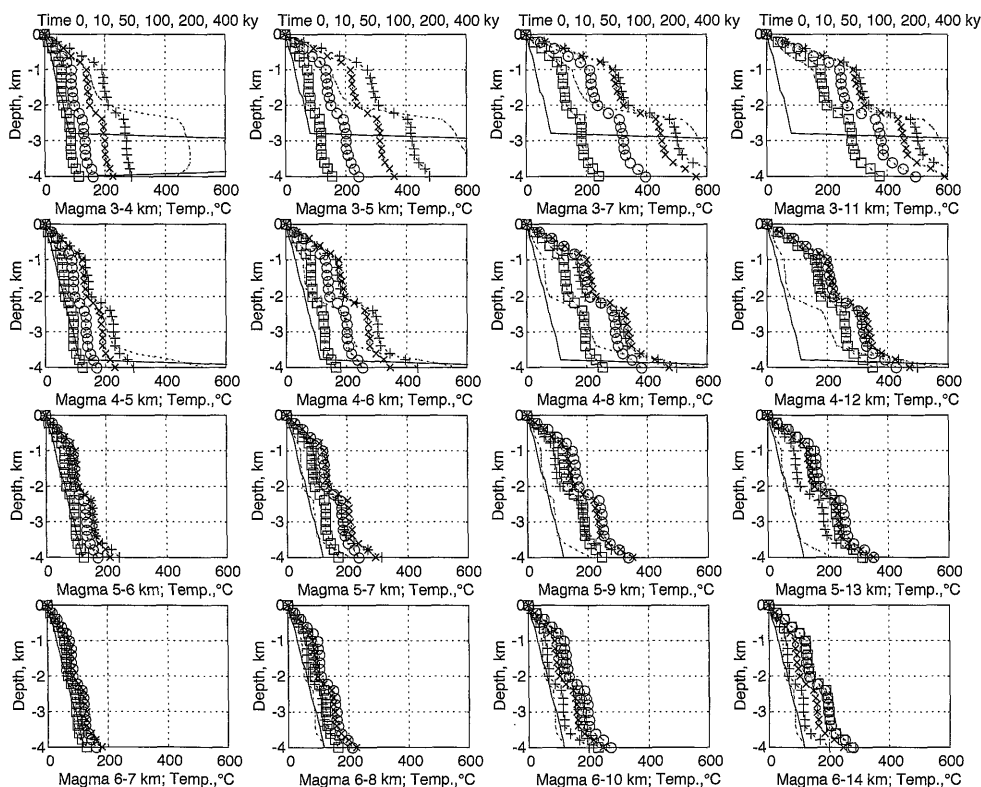
Refer to Fig. 2 for Model A. Four rows and four columns correspond to depths of the magma chamber top at 3, 4, 5 and 6 km, and thicknesses of the magma chamber of 1, 2, 4 and 8 km, respectively. Each small figure shows temperature profiles at 0 ky (solid line), 10 ky (dotted line), 50 ky (+), 100 ky (x), 200 ky (o) and 400 ky (□) after magma chamber emplacement on the depth (0 to 4 km) and temperature (0° to 600°C) plane.



第5図 Bモデルに基づく16ケースの体系的な順解析シミュレーション結果の温度コンター図。

Bモデルは第2図を参照。本図の説明は第3図を参照。

Fig. 5 Temperature contours of systematic forward simulation results for 16 cases based on Model B. Refer to Fig. 2 for Model B. See Fig. 3 for explanations.

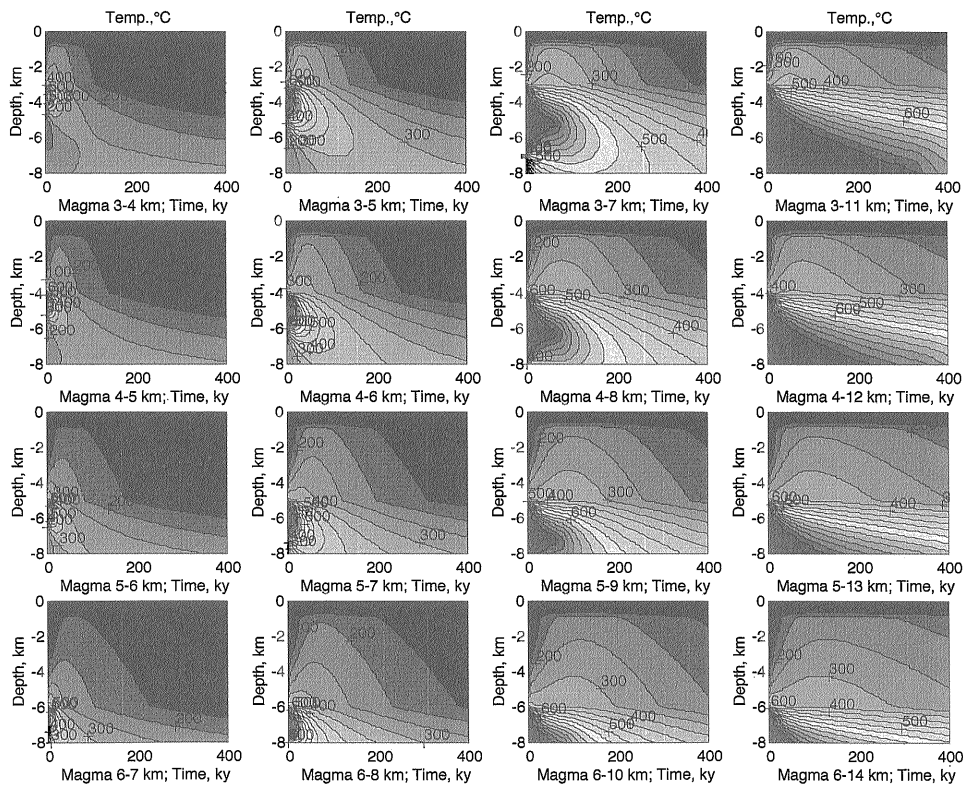


第6図 Bモデルに基づく16ケースの体系的な順解析シミュレーション結果の温度プロファイル図。

Bモデルは第2図を参照。本図の説明は第4図を参照。

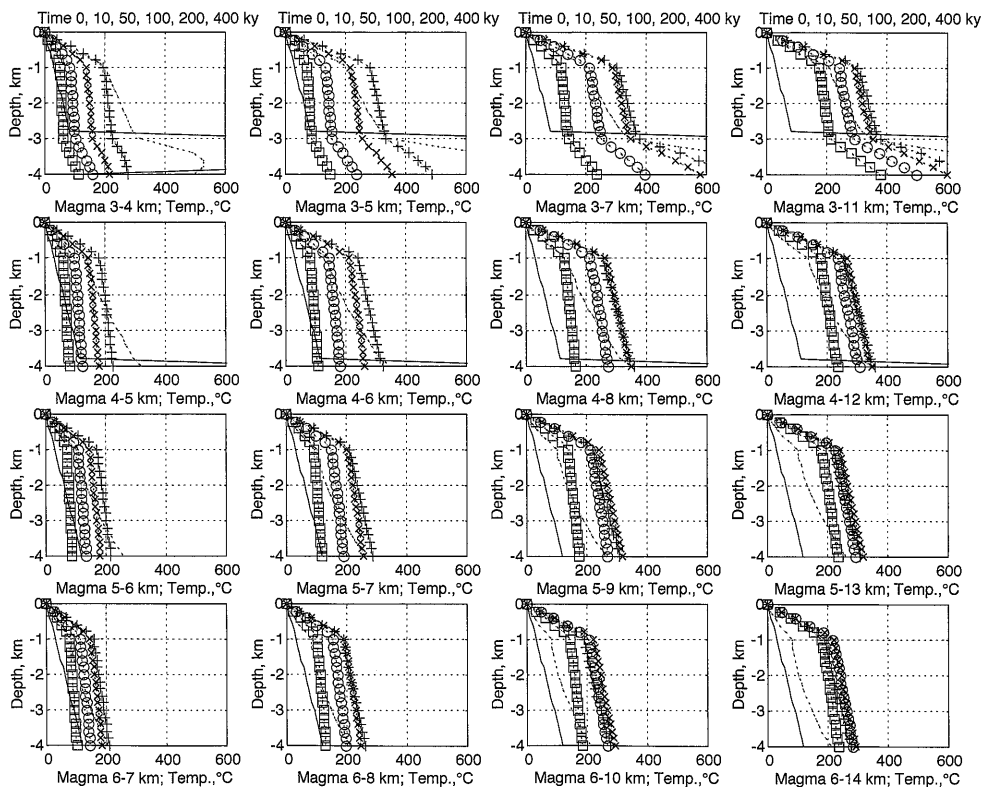
Fig. 6 Temperature profiles of systematic forward simulation results for 16 cases based on Model B. Refer to Fig. 2 for Model B. See Fig. 4 for explanations.

簡易シミュレーションによるマグマ-熱水系賦存環境の順解析と逆解析 (茂野)



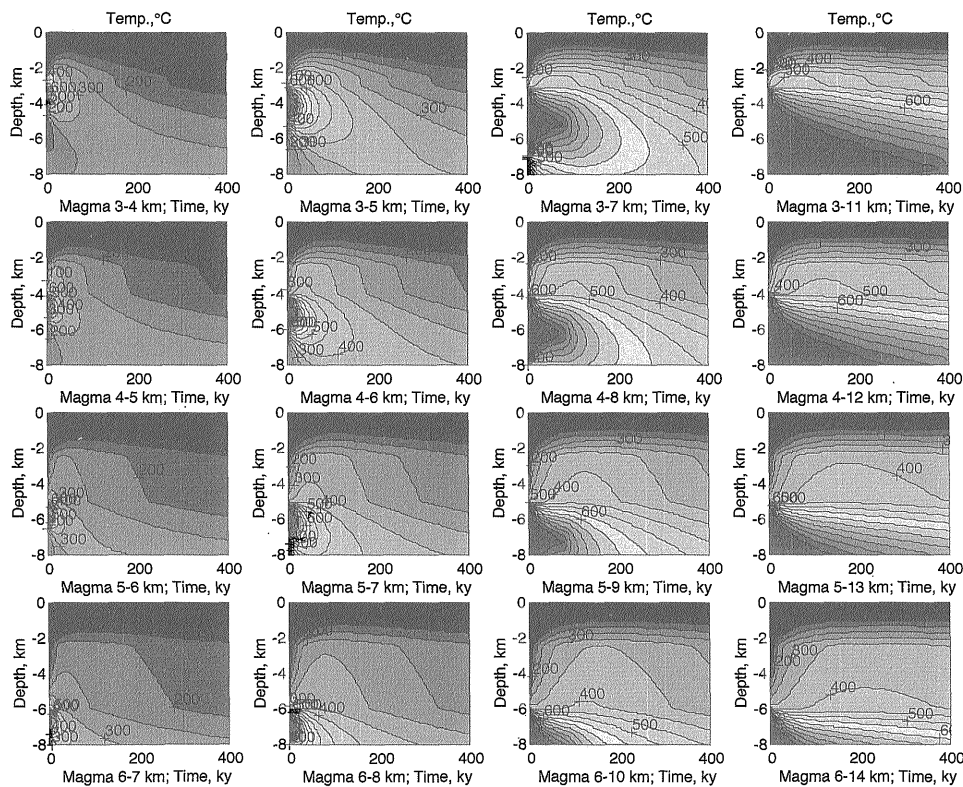
第7図 Cモデルに基づく16ケースの体系的な順解析シミュレーション結果の温度コンター図。
Cモデルは第2図を参照。本図の説明は第3図を参照。

Fig. 7 Temperature contours of systematic forward simulation results for 16 cases based on Model C. Refer to Fig. 2 for Model C. See Fig. 3 for explanations.



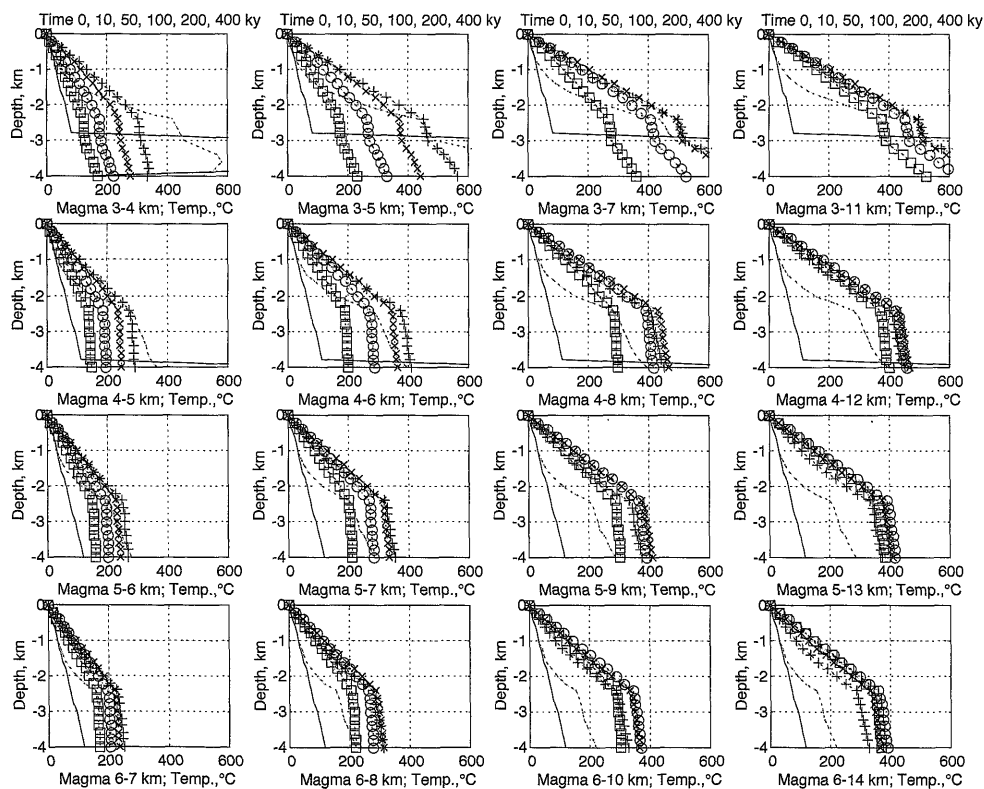
第8図 Cモデルに基づく16ケースの体系的な順解析シミュレーション結果の温度プロファイル図。
Cモデルは第2図を参照。本図の説明は第4図を参照。

Fig. 8 Temperature profiles of systematic forward simulation results for 16 cases based on Model C. Refer to Fig. 2 for Model C. See Fig. 4 for explanations.



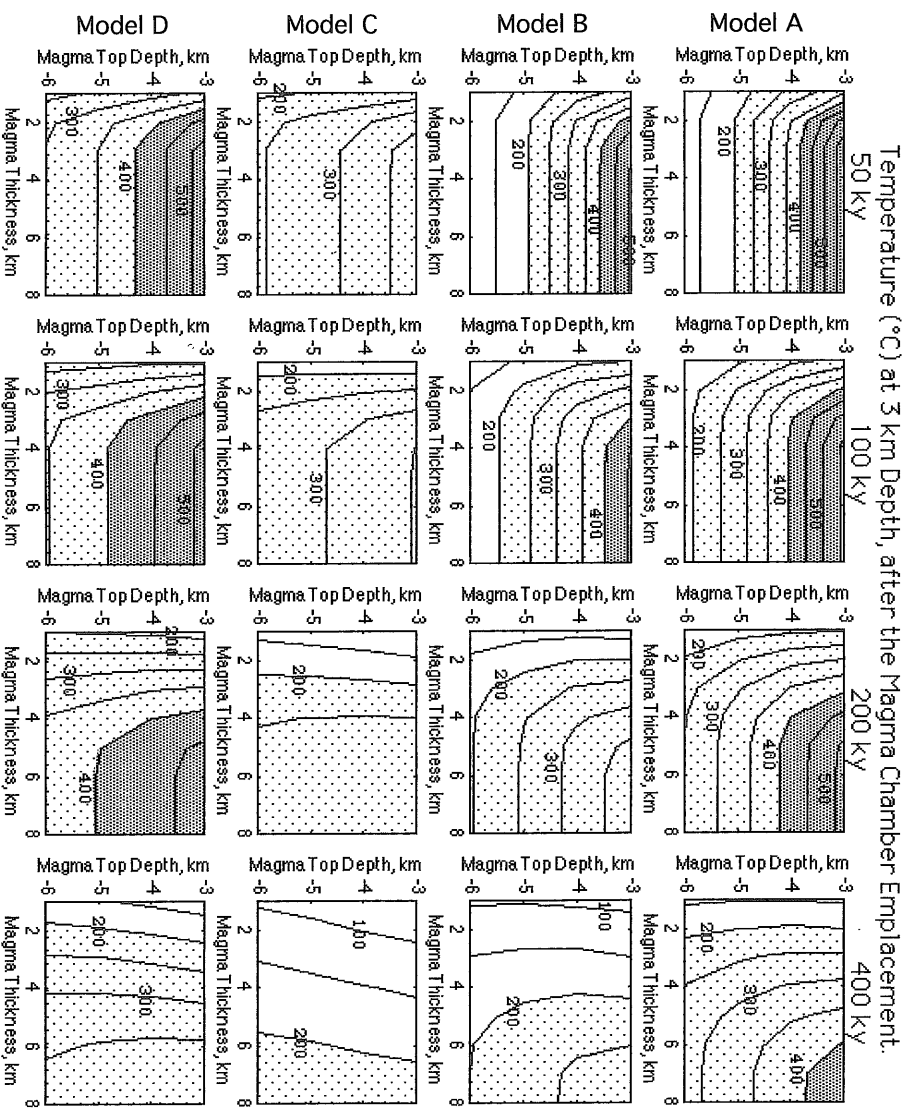
第9図 Dモデルに基づく16ケースの体系的な順解析シミュレーション結果の温度コンター図。
Dモデルは第2図を参照。本図の説明は第3図を参照。

Fig. 9 Temperature contours of systematic forward simulation results for 16 cases based on Model D. Refer to Fig. 2 for Model D. See Fig. 3 for explanations.



第10図 Dモデルに基づく16ケースの体系的な順解析シミュレーション結果の温度プロファイル図。
Dモデルは第2図を参照。本図の説明は第4図を参照。

Fig. 10 Temperature profiles of systematic forward simulation results for 16 cases based on Model D. Refer to Fig. 2 for Model D. See Fig. 4 for explanations.



第11図 体系的な順解析シミュレーション結果のまとめ (深度3 kmにおける温度分布) 図。上下4行はA・B・C・Dの4モデル, 左右4列はマグマ溜り位置後50, 100, 200, 400 kyの4時間後の計算結果に対応している。各小図は, 縦軸をマグマ溜りの頂部深度, 横軸をマグマ溜りの厚さとした地下深度3 kmにおける温度コンター図(50°C間隔)である。

Fig. 11 Summary of systematic forward simulation results for temperature distributions at 3 km depth. Four rows and four columns correspond to models A, B, C and D, and the time after magma chamber emplacement of 50, 100, 200 and 400 ky, respectively. Each small figure shows temperature contours (50°C intervals) at 3 km depth on the depth of the magma chamber top and thickness of the magma chamber plane.

ーシミュレーション値を, 16の小図で各々マグマ溜りの頂部深度(縦軸)と厚さ(横軸)をパラメータとして示した。

また第12図には, 第11図と同一の4種類のモデルと4つの時間についての16小図で, 深度3 kmにおける温度経時変化率(°C/10 ky)のシミュレーション結果を, 参考として示した。

なお, 茂野(1999a)による試行的な簡易モデル数値シミュレーション結果(茂野(1999a)の第3・4・5図の各6小図)の一部は, 今回の体系的な順解析結果(第3・5・7・9図の各16小図)と以下のように対応している。すなわち, (1)前者第3図の4小図S0, D0, S2, D2が, 後者第3図の2行3列目(各々上から下へ, 左から右へ), 同4行3列目, 第5図の2行3列目, 同4行3列目; (2)前者第4図の2小図RB3, RT3が, 後者第7図4行3列目, 第9図の4行3列目(ほぼ相当) ;

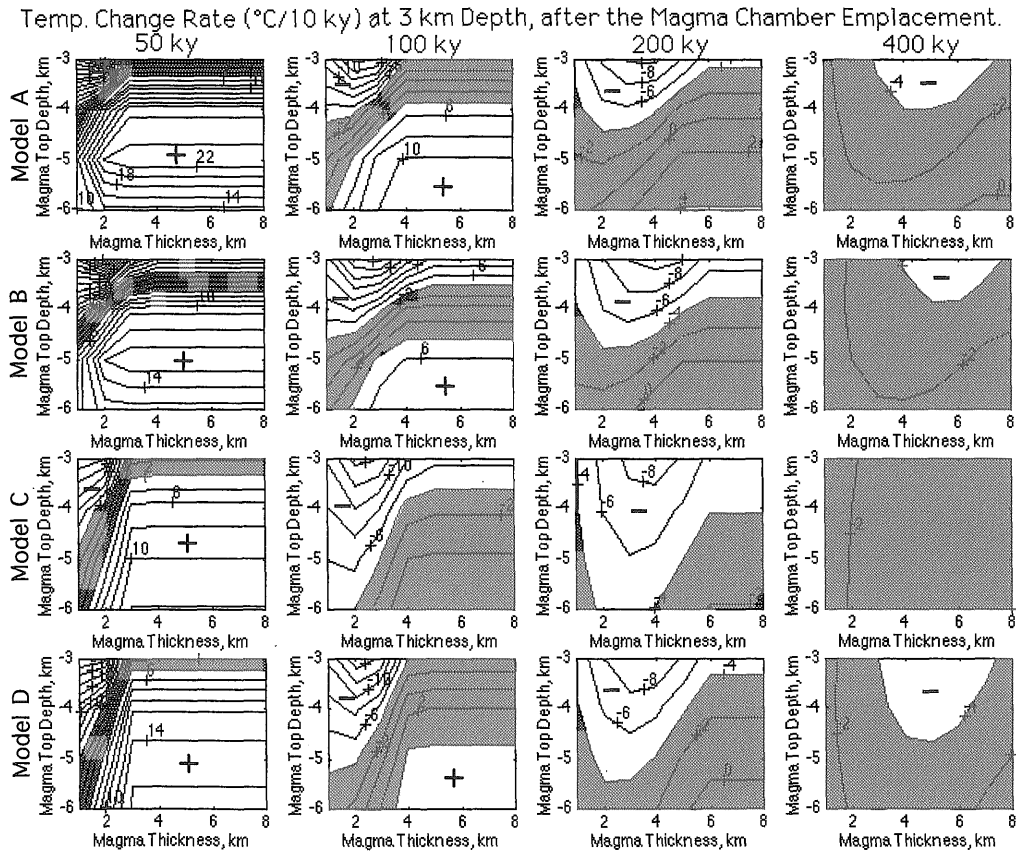
(3)前者第5図の6小図S2-MT2, -MT4, -MT8, RT3-MT2, -MT4, -MT8が, 各々後者第5図の2行2~4列目, 第9図の4行2~4列目(ほぼ相当) である。

3. 2 考察

まず, 2. 3で述べた今回の4種類の貯留層分布モデルを整理して, その概要を以下に説明する(第2図参照)。

Aモデルは, 貯留層が分布しない場合で, 全深度について均一な低い熱伝導率分布となっている。Aモデルは, 今回の解析・考察の中で他のモデルの比較基準となっている。

Bモデルは, 浅部と深部に合計2枚の貯留層が分布する場合で, 深部貯留層底部の深度が一定(3.5 km)のため, マグマ溜り頂部の深度に応じて貯留層底部とマグ



第12図 体系的な順解析シミュレーション結果のまとめ(深度3 kmにおける温度経時変化率の分布)図。上下4行はA・B・C・Dの4モデル、左右4列はマグマ溜定置後50, 100, 200, 400 kyの4時間後の計算結果に対応している。各小図は、縦軸をマグマ溜の頂部深度、横軸をマグマ溜の厚さとした地下深度3 kmにおける温度経時変化率のコンター図($2^{\circ}\text{C}/10\text{ ky}$ 間隔)である。網目は、温度経時変化率が $\pm 4^{\circ}\text{C}/10\text{ ky}$ の範囲内であることを示す。

Fig. 12 Summary of systematic forward simulation results for distributions of rate of temperature change at 3 km depth. Four rows and four columns correspond to four models A, B, C and D, and the time after magma chamber emplacement of 50, 100, 200 and 400 ky, respectively. Each small figure shows contours of temperature change rate ($2^{\circ}\text{C}/10\text{ ky}$ intervals) at 3 km depth on the depth of the magma chamber top and thickness of the magma chamber plane. Mesh shows that the temperature change rate is in the range of $\pm 4^{\circ}\text{C}/10\text{ ky}$.

マグマ溜頂部間の距離が変化し、貯留層の加熱効率が大きく変化する。なお、マグマ溜頂部の深度が3 kmの場合は、その最上部の0.5 kmは同時に貯留層として高い「拡張熱伝導率」を持つ。マグマ溜頂部の深度が浅い場合は、岩手県葛根田地域の現在の地熱系のモデル条件に近い(茂野, 1999b; Shigeno, 2000)が、地表部の帽岩に2倍の厚さが想定されている。

Cモデルは、1枚のみの貯留層の底部とマグマ溜頂部とが直接接する場合で、同時に帽岩が薄く(1.0 km)、地下深部から地表への熱伝達が最も良好な場合である。

一方Dモデルは、Cモデルと同様に1枚のみの貯留層の底部とマグマ溜頂部とが直接接する場合であるが、帽岩が厚い(2.5 km)。このため、Cモデルと同様にマグマ溜から貯留層へ熱が移動し易いと同時に、Aモデルに次いで系全体としては熱が保存され易いと考えられる条件にある。厚い帽岩により、熱水系は潜頭性となる

場合が多いことを想定している。

今回の体系的な順解析の結果から、以下の7点が一般的にあるいはモデル別に指摘される(特に、第11図を参照)。

(1) 深部(特に深度3 km周辺)の温度は、A・B・C・Dのモデルを通して、マグマ溜定置後短期的(概略100~200 ky後より以前)にはマグマ溜の頂部深度によって規定され(第11図の50 kyでは横方向のコンターが卓越)、長期的にはマグマ溜の厚さによって規定される(第11図の400 kyでは縦方向のコンターが卓越)傾向が強い。

(2) Aモデルの場合(貯留層が分布しない)には、熱の伝達が不良なために他のモデルに比較して浅部の温度上昇は遅い(第3図参照)が、逆に深部の温度が高温に保たれる期間が長い(第11図のマグマ溜定置後200~400 kyを参照)。また他のモデルと比較してAモ

デルの場合は、最高到達温度が浅部ではより低温となり、深部ではより高温となる傾向が強い。

(3) Bモデルの場合(深度1.0~2.0と2.5~3.5 kmに貯留層が2枚分布する)は、深部貯留層底部とマグマ溜頂部間に可変幅の低熱伝導帯が存在するために、深部貯留層温度の経時変化は、パラメータ値の組み合わせおよびマグマ溜定置後の時間によって極端に変化する。特にマグマ溜頂部の深度が深く、深部貯留層の底部深度とマグマ溜の頂部深度の距離が概略1.5 kmを越える場合(マグマ溜頂部の深度が5.0 km以深)には、マグマ溜が厚い条件でも貯留層の温度は最高でも250°C程度に留まる。

(4) Cモデルの場合(深度1.0 km~マグマ溜頂部間に貯留層が1枚分布する)は、帽岩が薄く系全体の熱伝達性が高いために、貯留層温度の上昇・下降が速い傾向にある。また、他のモデルに比較して、深部貯留層の最高到達温度が深度3 kmで200~350°C程度と低い傾向が顕著である。特に、マグマ溜の厚さが概略2 kmよりも薄い場合には、貯留層の温度は最高でも250°C程度に留まる。

(5) Dモデルの場合(深度2.5 km~マグマ溜頂部間に貯留層が1枚分布する)は、AモデルとCモデルの中間的な環境で、貯留層の温度上昇が速いと同時に、高温が長期間保存される傾向が顕著である。マグマ溜が厚い条件では、マグマ溜の頂部深度が浅い場合(概略深度4~5 km以浅)には、薄く分布する貯留層は長期間400~500°Cの超高温となるのに対して、マグマ溜の頂部深度が深い場合には、厚く分布する貯留層は長期間350°Cに近い高温を保持し続ける。また、マグマ溜が薄い条件でも、深部貯留層は200~350°Cの温度を長時

間保持する傾向にある。

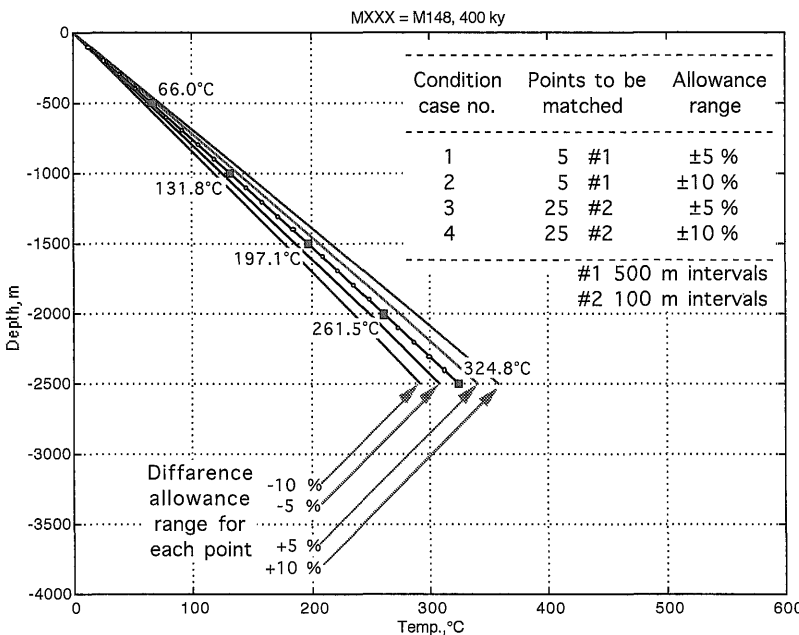
(6) 以上の様に、Dモデルの場合、深部貯留層が350°C程度の高温を長期間保持するパラメータ値の組み合わせ領域が広い結果となっており、深部地熱資源として有望な環境と考えられる。CモデルとDモデルとの中間の帽岩の厚さが1.0~2.5 kmの場合には、両者の中間的な温度分布の有望な深部地熱環境の存在が期待される。

(7) 一方、Dモデルでは、深部貯留層が400°Cを越える高温を長期間保持するパラメータ値の組み合わせ領域も広い結果となっている。このような場合には、貯留層岩石物性の塑性化による非貯留層化や、流体圧力の大きな上昇による帽岩・貯留層構造の破壊などが生じる可能性がある。しかし、今回の解析では、このような問題は検討対象外とした。

4. 予察的な逆解析

4.1 方法・結果

今回、マグマ-熱水系環境の探査・評価の進展に寄与する目的で、簡易モデル数値シミュレーション手法に基づく逆解析法について、その有効性の初歩的検討を試みた。特に今回は、地下浅部に厚く非貯留層が分布し熱伝導が卓越する場合について、逆解析による地下深部の環境の推定を行った。これは、茂野(1999a)が示した地表下に厚く帽岩が発達し、地下深部に大規模な貯留層が長期間高温に賦存する場合の探査・評価に対応するものである。具体的に逆解析で解を求めるテストデータとしては、実際の坑井検層データではなく、2.3で示したAモデルでマグマ溜の頂部深度が4 km、厚さが8 km



第13図 今回の予察的な逆解析に用いたテスト温度プロファイルデータと解の条件。

Aモデル、マグマ溜の頂部深度が4 km、マグマ溜の厚さが8 kmの場合の順解析シミュレーション結果に基づき、マグマ溜定置から400 ky後の深度0~2.5 kmの温度プロファイルを逆解析のテストデータとした。解の条件(4つの場合)については、本文を参照。

Fig. 13 Test temperature profile data and solution conditions for a preliminary inversion analysis in this study.

Temperature profile, from 0 to 2.5 km depth and 400 ky after magma chamber emplacement, which was obtained by a forward simulation based on Model A assuming depth of the magma chamber top of 4 km and thickness of the magma chamber of 8 km, was used as a test data for the inversion analysis. Refer to the text for conditions (four cases) of solutions.

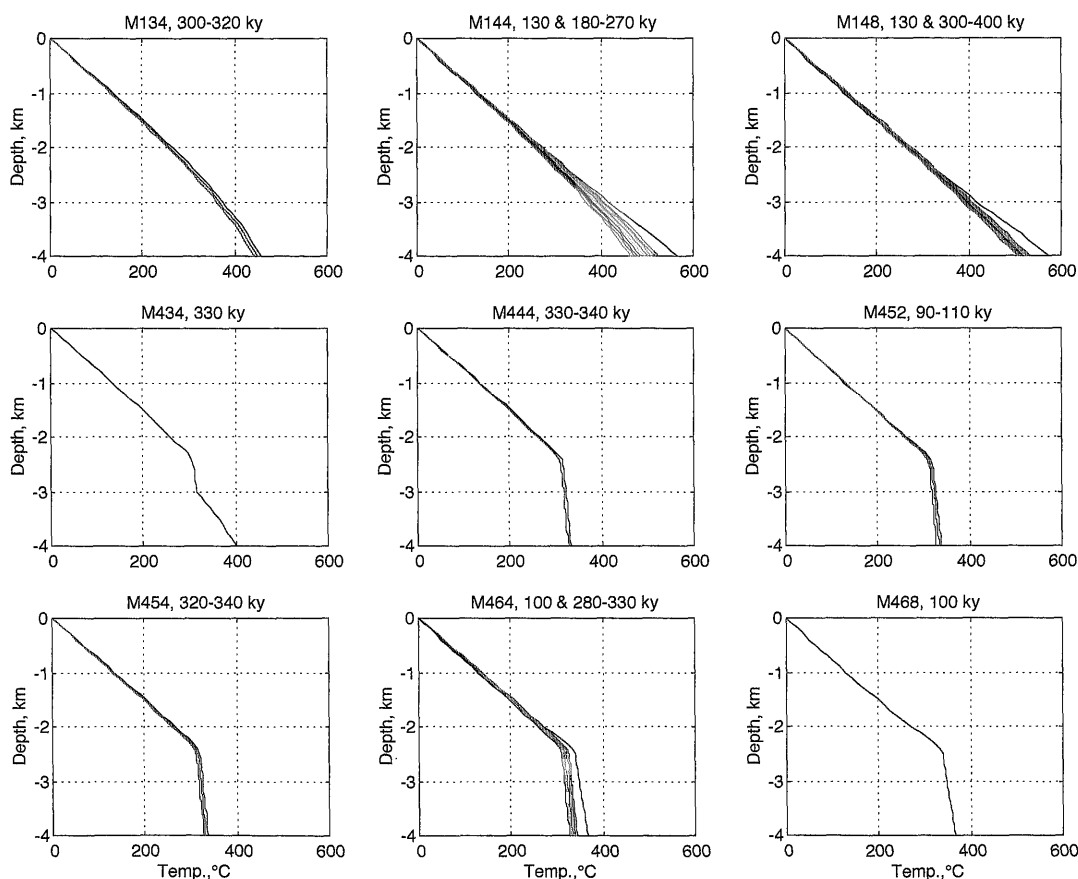
の場合について、マグマ溜定置後 400 ky 経過時のシミュレーション温度プロファイル (M148, 400 ky) (第13図) を用いた。

逆解析法としては、3. 1で述べた A・B・C・Dの4種類のモデルに基づき体系的にマグマ溜の頂部深度 (3, 4, 5, 6 km) と厚さ (1, 2, 4, 8 km) とを変えて実施した順解析シミュレーション結果 (マグマ溜定置後 1 ky 間隔で 0~10 ky, その後 10 ky 間隔で 10~400 ky の合計 50 出力時間) のデータ・ファイル群 (合計 3200 の温度プロファイル) について、条件を満たすものを検索する簡易的な方法を用いた。上記のように今回の逆解析は試験的なものであり、地下浅部~深部の様々な環境条件、マグマ溜定置後の経過時間などについて網羅的ではないため、以下に示す結果以外にも解となるモデルとパ

ラメータ値の組み合わせは数多く存在していると考えられる。

今回の逆解析で求めた解の温度分布の条件は、基本的に第13図に示した様に(1) 500 m 間隔で深度 2500 m までの 5 点すべての温度を、差異の許容範囲 5% 以内で満たす場合とした。これ以外に、(2)上記(1)で差異の許容範囲 10% 以内で満たす場合、(3) 100 m 間隔で深度 2500 m までの 25 点すべての温度を、差異の許容範囲 5% 以内で満たす場合、および(4)上記(3)で差異の許容範囲 10% 以内で満たす場合についても逆解析を試みた。

上記の A モデルからのテストデータ、逆解析法、解の温度分布条件(1)により得られた 43 個の解となる温度プロファイルを、解のモデル型およびマグマ溜の頂部深度・厚さで 9 つの組み合わせ (グループ) に分けて第



第14図 逆解析結果の解の温度プロファイル図 (深度 0~4 km)。

本文(1)の条件の逆解析で得られた解のモデル型・パラメータ値の組合せと温度プロファイルをまとめて示す。各小図の表題の M 以下 3 桁の数字は、順にモデル型 (1, A; 4, D), マグマ溜の頂部深度 (km), マグマ溜の厚さ (km) を示し、引き続き数字はマグマ溜定置後の時間範囲 (ky) を示す。各小図は縦軸が深度 (0~4 km), 横軸が温度 (0~600°C) で、逆解析の解の温度プロファイルを示す。

Fig. 14 Temperature profiles (0 to 4 km depth) of solutions obtained by inversion analysis.

Model types and parameter-value combinations, and temperature profiles of the solutions obtained by inversion analysis for the conditions (1) in the text are summarized in this figure. The three-digit number after M at the top of each small figure indicates the model type (1, A; 4, D), depth of the magma chamber top (km), and thickness of the magma chamber (km) in order. It is followed by time periods after the magma chamber emplacement. Each small figure shows temperature profiles of the solutions obtained by inversion analysis on the depth (0 to 4 km) and temperature (0° to 600°C) plane.

14 図 (深度 0~4 km) と第 15 図 (深度 0~20 km) に示した. 温度分布条件が(2), (3), (4)の場合には, 得られた解となる温度プロファイル数は各々 136, 40, 131, 解のグループ数は各々 13, 8, 13 であった.

さらに, 上記(1)の条件の逆解析で得られた第 14 図・第 15 図の 9 つの解のグループについて, 比較検討の目的でマグマ溜定置~400 ky 後までの温度プロファイルのシミュレーション結果を第 16 図に示した. また, 第 17 図には, 上記(1)と(2)の条件の逆解析結果について, 解となっているモデル型, マグマ溜の頂部深度, 同じく厚さ, 同じく定置後の時間, 温度プロファイルの継続時間の関係を整理して示した.

なお, 今回上述した A モデルに基づくテストデータの他に, D モデルに基づくテストデータを用いて同様に予察的な逆解析を実施した. 具体的には, D モデルでマグマ溜の頂部深度が 6 km, 厚さが 4 km の場合について, マグマ溜定置後 200 ky 経過時のシミュレーション温度プロファイル (M464, 200 ky) を用いた (第

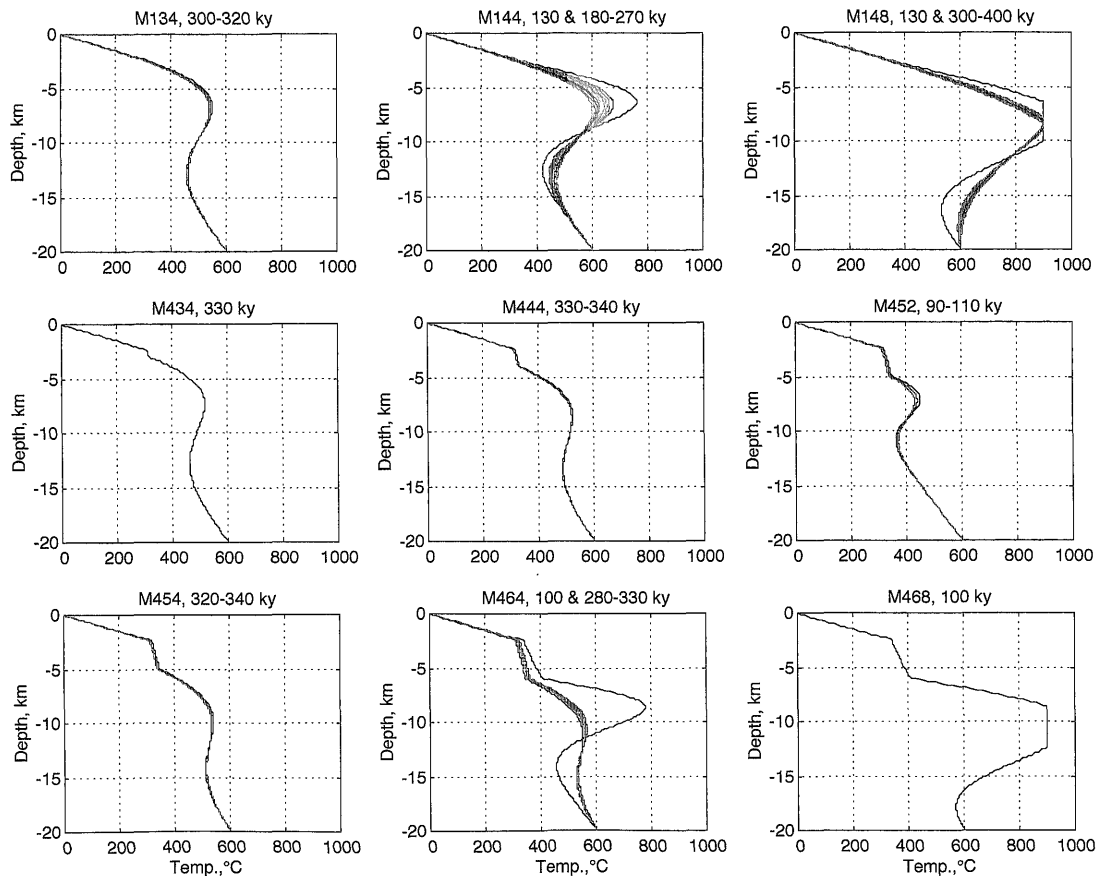
10 図上から 4 行左から 3 列目の小図を参照). 逆解析法, 解の温度分布条件(1)~(4)などは同様である. その結果は, 基本的に上記の A モデルに基づく場合と類似性が高いため大部分省略したが, 第 17 図にはその概要を A モデルの場合と比較する形で示した.

4.2 考察

今回の A モデルからのテストデータに基づく一連の逆解析の結果から, 以下の 5 点が指摘される (特に第 15 図・第 17 図を参照).

(1) 今回のテストケースが含まれる A モデルの場合 (貯留層が分布しない) については, テストケース (マグマ溜の頂部深度 4 km, 厚さ 8 km, 定置後の時間 400 ky) に近い条件 (マグマ溜の頂部深度 3~4 km, 厚さ 2~8 km, 定置後の時間 120~400 ky) で, 定常性の高い (継続期間 40~290 ky) 解が得られた.

(2) 浅部に貯留層が分布する B・C モデルの場合には, どのようなマグマ溜の頂部深度, 厚さ, 定置後の時間

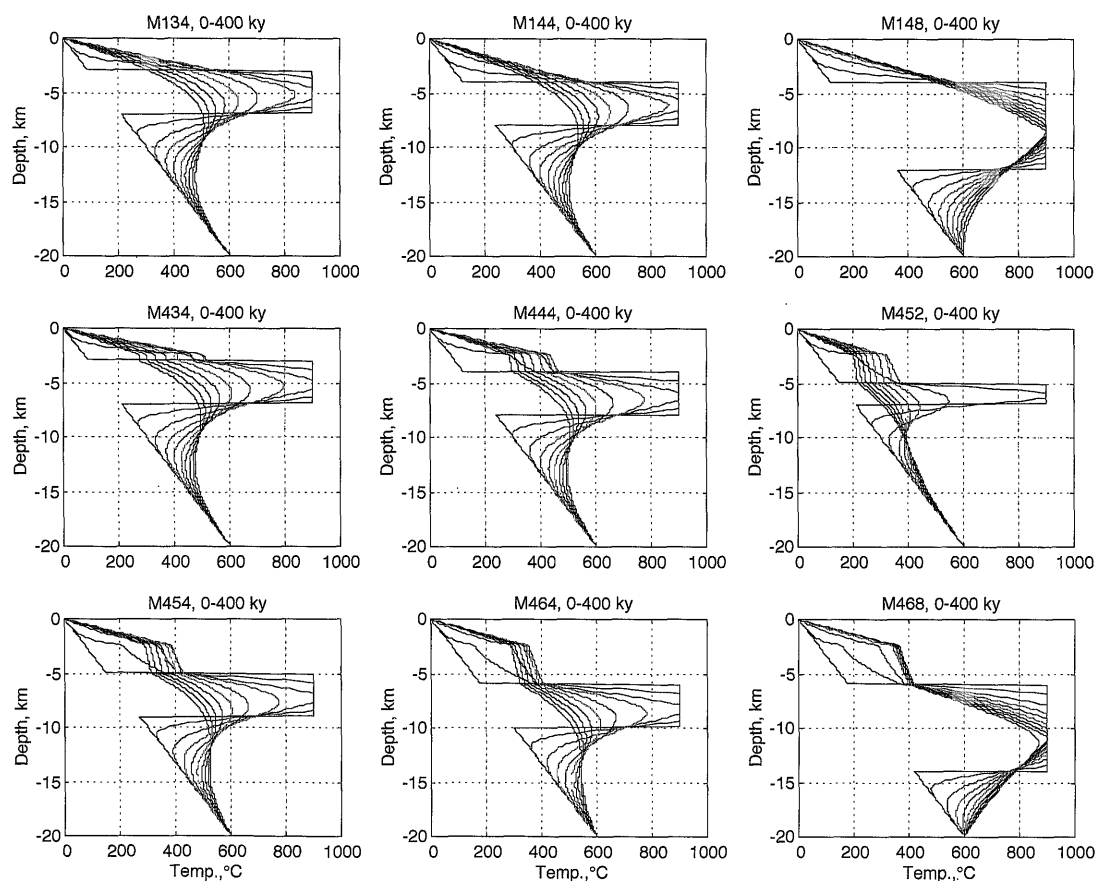


第 15 図 逆解析結果の解の温度プロファイル図 (深度 0~20 km).

本図の説明は第 14 図を参照. 各小図は縦軸が深度 (0~20 km), 横軸が温度 (0°~1000°C) で, 逆解析の解の温度プロファイルを示す.

Fig. 15 Temperature profiles (0 to 20 km depth) of solutions obtained by inversion analysis.

See Fig. 14 for explanations. Each small figure shows temperature profiles of the solutions obtained by inversion analysis on the depth (0 to 20 km) and temperature (0° to 1000°C) plane.



第16図 逆解析で得られた解のモデル型・パラメータ値の組合せについての順解析シミュレーションによる温度プロファイル経時変化図(深度0~20 km)。

各小図の表題のM以下3桁の数字は、順にモデル型(1, A; 4, D), マグマ溜の頂部深度(km), マグマ溜の厚さ(km)を示す。各小図は縦軸が深度(0~20 km), 横軸が温度(0°~1000°C)で、マグマ溜定置後0, 10 ky後および50~400 ky後(50 ky間隔)の温度プロファイルを示す。

Fig. 16 Temperature profiles (0 to 20 km depth) changing with time calculated by forward simulations for the model types and parameter-value combinations of the solutions obtained by inversion analysis.

The three-digit number after M at the top of each small figure indicates the model type (1, A; 4, D), depth of the magma chamber top (km), and thickness of the magma chamber (km) in order. Each small figure shows temperature profiles at 0 and 10 ky, and 50 to 400 ky (50 ky intervals) after the magma chamber emplacement on the depth (0 to 20 km) and temperature (0° to 1000°C) plane.

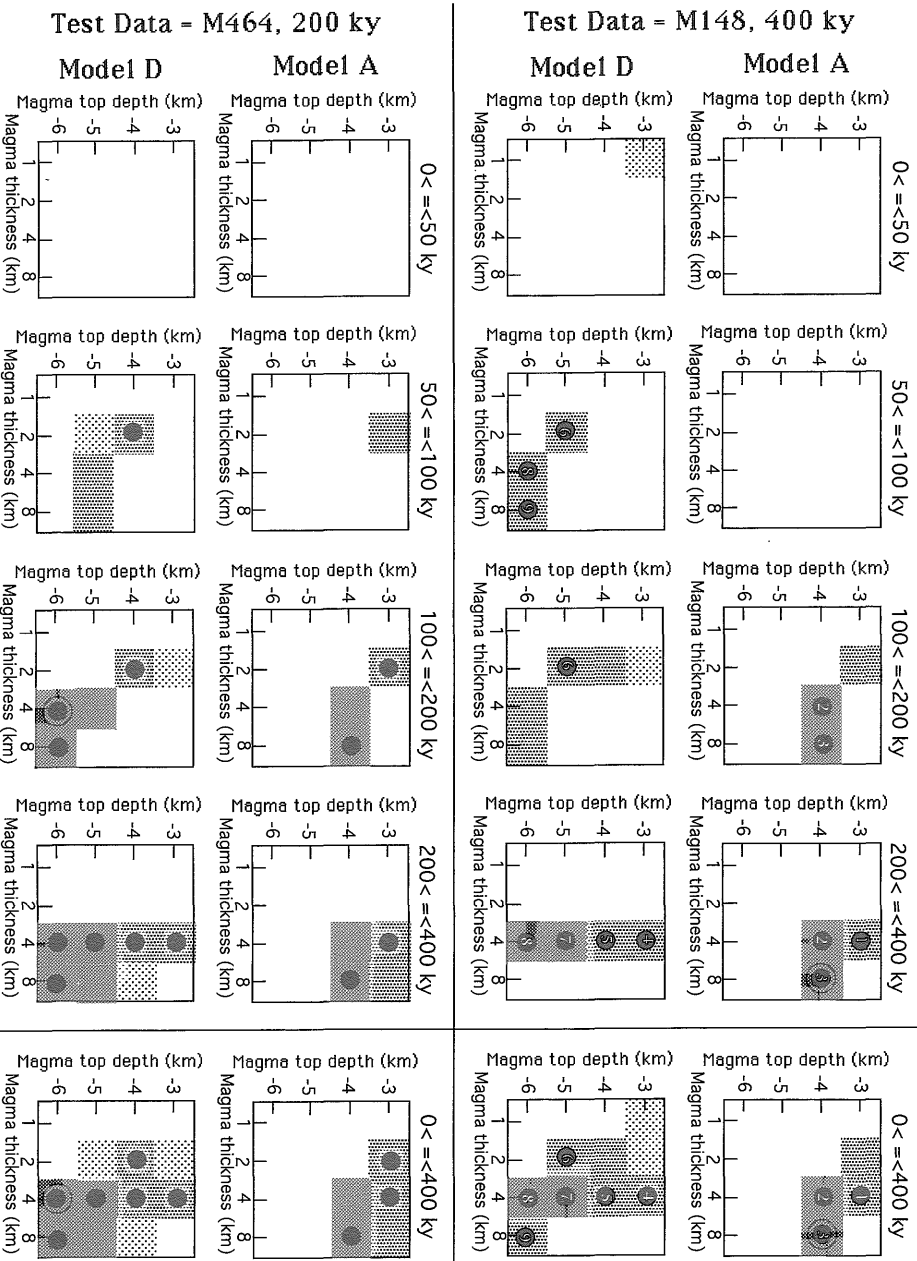
においても、解は得られなかった。

(3) Dモデルの場合(深度2.5 kmからマグマ溜頂部に貯留層が1枚分布する)には、Aモデルに比較して以下の様により多様な解が得られた(第17図参照)。すなわち、1)より深いマグマ溜の頂部深度まで(3~6 km), 2)より薄いマグマ溜の厚さまで(1~8 km), 3)マグマ溜定置後より早い時期にも(40~390 ky), および4)継続時間の短いより非定常的な(20~190 ky)解が存在する。これは、Dモデルの場合はAモデルに比較して深部に高い「拡張熱伝導率」が分布しているために、高い熱伝達に起因する短時間で生じる高温分布を始め、地下浅部により複雑な温度分布の経時変化を生じることが基本的な理由と考えられる。

(4) 今回の逆解析では各々のモデル型とパラメータ値

の組み合わせについて、解が存在しない場合、1つの時期に存在する場合、2つの時期に存在する場合が認められた(第15図・第16図を参照)。2つの時期に存在する場合は、地下浅部の温度分布の上昇期と下降期とに対応しており、特にマグマ溜が厚い条件で、温度下降期に継続期間の長い解が得られた。なお、マグマ溜の頂部深度が浅く同時に厚さが薄い条件では、温度プロファイルの時間変化が速く、今回のシミュレーションの出力時間間隔(1~10 ky)では解が捉えられなかった場合があり得る。また、Dモデルでマグマ溜の頂部深度が6 km, 厚さが8 kmの場合(M468)については、今回は温度上昇期の短期間の解のみが得られており、逆解析の時間範囲を越えたマグマ溜定置後400 ky以降に温度下降期の定常性の高い解の存在が推定される。Aモデル

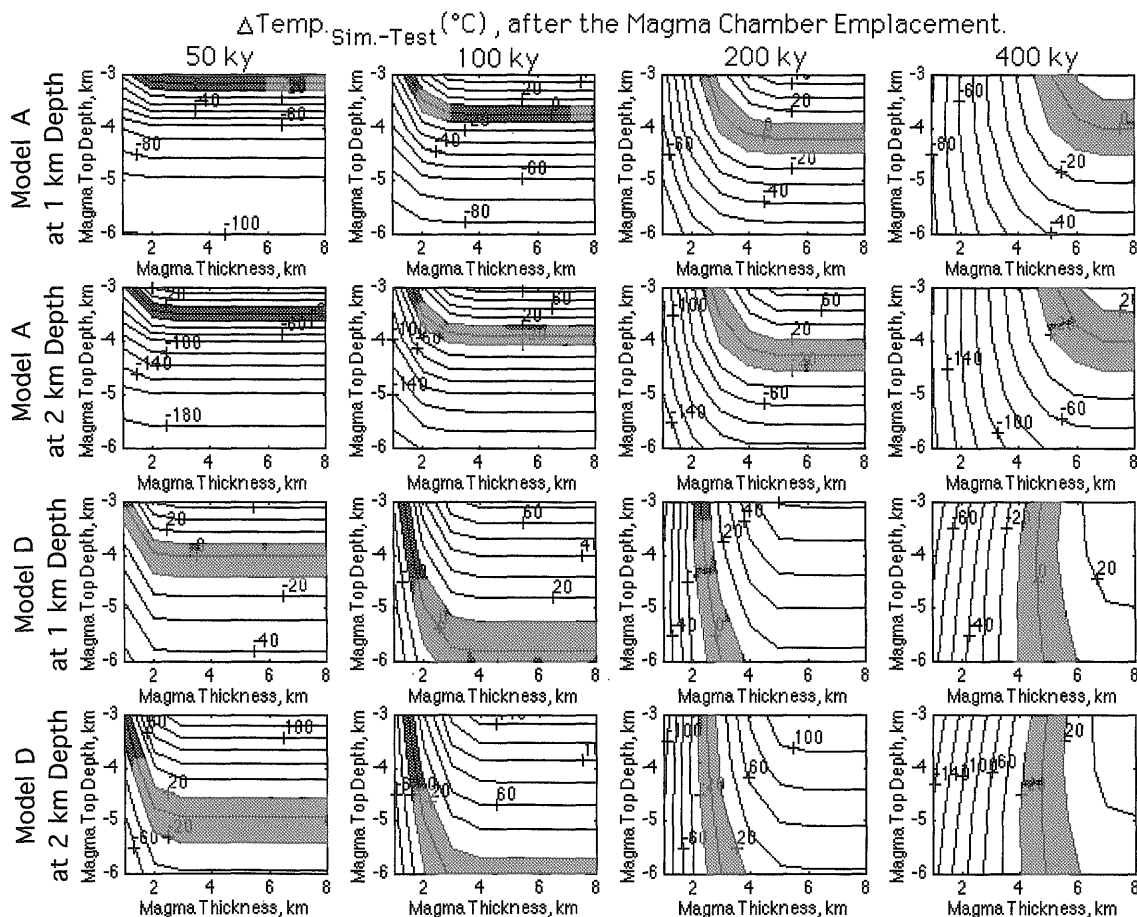
Time after the Magma Chamber Emplacement



第17図 2つのテストト温度プロファイルデータを用いた予想的な逆解折シミュレーション結果のまとめ図。

上段2行は今回のテストデータ (Aモデル, マグマ溜の頂部深度が4 km, 厚さが8 km の場合のテストデータ (Dモデル, マグマ溜の頂部深度が6 km, 厚さが4 km の場合のテストデータ) 後, 下段2行は別のテストデータ (Dモデル, マグマ溜の頂部深度が6 km, 厚さが4 km の場合のテストデータ) 後, 200 ky 後における深度0~2.5 km のシミュレーション温度プロファイル) に基づく逆解折結果をまとめて示す。その各々上下2行は解を持つA・Dの2モデル, 左右5列はマグマ溜定置後0~50, 50~100, 100~200, 200~400 ky の4期間および0~400 ky で, 10小図に解の分布を示す。各小図は, 縦軸をマグマ溜の頂部深度, 横軸をマグマ溜の厚さとした解の分布を示す。黒丸は本文(1)の条件の解となっていることを示し, 付随する番号は第14図~第16図の9小図(上→下, 左→右の順)に対応している。網目は本文(2)の条件の解の存在を示し, 3段階に解の継続期間が<30 ky, 30 ky<= <100 ky, 100 ky<= <=である。大きな丸は, テストデータとなっている温度プロファイルが含まれていることを示す。

Fig. 17 Summary of preliminary inversion simulation analysis results using two test temperature profile data. The upper two rows show the inversion analysis summary based on the test data of this study: simulated temperature profile, from 0 to 2.5 km depth and 400 ky after magma chamber emplacement based on Model A with an assumed 4-km depth of the magma chamber top, and 8-km thickness of the magma chamber. The lower two rows show the summary based on another test data: simulated temperature profile, from 0 to 2.5 km depth and 200 ky after magma chamber emplacement based on Model D with an assumed 6-km depth of the magma chamber top, and 4-km thickness of the magma chamber. For the each test data, distributions of the solutions are shown in ten small figures arranged in two rows and five columns corresponding to the two solution models, A and D, and periods after magma chamber emplacement of 0-50, 50-100, 100-200 and 200-400 ky, and 0-400 ky, respectively. Each small figure shows distributions of the solutions on the depth of the magma chamber top, and thickness of the magma chamber plane. Solid circles indicate solutions for condition no. 1 in the text, and the associated numbers correspond to the nine small figures in Figs. 14, 15 and 16, from top to bottom, and left to right, in order. Meshes show distributions of the solutions for condition no. 2 in the text. The three circles correspond to the continued periods of the solutions for condition no. 2 in the text. The large circle indicates that the thermal profile of the test data is included.



第 18 図 2つの深度における体系的な順解析結果とテストデータとの温度差の比較検討。

上段 2 行は深度 1 km および 2 km における A モデルについての体系的なシミュレーション温度と今回のテストデータ温度との差を、下段 2 行は D モデルについての同様の差を示す。第 13 図に示されるようにテストデータは、非常に高い直線性を持つ。左右 4 列はマグマ溜定置後 50, 100, 200, 400 ky の 4 時間後に対応している。各小図は、縦軸をマグマ溜の頂部深度、横軸をマグマ溜の厚さとした上記の温度差のコンター図である。網目は、温度差が約 $\pm 8\%$ の範囲内であることを示す。

Fig. 18 Comparisons of the temperature differences between systematic forward analysis results and test data at two depths.

The upper two rows show the differences of the systematically-simulated temperatures using Model A and the test data at 1 and 2 km depth, and the lower two rows show the same differences using Model D. The test data have high linearity as shown in Fig. 13. Four columns correspond to the time after magma chamber emplacement of 50, 100, 200 and 400 ky. Each small figure shows contours of the temperature differences on the depth of the magma chamber top and thickness of the magma chamber plane. The mesh shows that the temperature difference is in the range of $\pm 8\%$.

でマグマ溜の頂部深度が 3 km、厚さが 8 km の場合 (M138) については今回は解が得られなかったが、同様の解の存在の可能性が指摘される。

(5) 今回の逆解析については、テストデータに一致させる各点温度の差異の許容範囲 (5% 対 10%) が、解の数 (解領域の広さ) の決定に大きな制約となっている (34 対 136 および 30 対 131)。これに対して、一致させる点の数 (5 対 25) は、ほとんど制約となっていない (34 対 30 および 136 対 131)。これは、今回のテストデータの温度プロファイルが直線に近いことが、大きな原因と考えられる。

さて、今回のテストデータは直線性が非常に高い (第 13 図)。このため、順解析結果を用いて直接的に解の条件を満たすモデル型・パラメータ値組合せを推定・表示することが簡単かつ定量的にできる。第 18 図には、A・D 両モデルについて深度 1 km と 2 km の体系的な順解析シミュレーション温度とテストデータ温度との差をまとめて示した。上記の 2 深度について温度差が非常に小さい ($\pm 8\%$ 以下) 網目領域の積集合の経時変化は、第 17 図の逆解析結果のまとめと非常によく一致している。すなわち、D モデルの場合の方がマグマ溜定置後初期から多様なパラメータ値組合せの解があり、またマ

グマ溜定置後 400 ky 以降にも頂部深度が深いおよび厚いマグマ溜の領域に解が広がっていることが明らかである。

最後に、上記の今回の体系的な順解析と予察的な逆解析の結果および本研究と一連の過去の検討結果に基づいて、総合的に以下の4点が考察される。

(1) 改めて当然のことながら、地下浅部（ここでは、深度 0~2.5 km 程度）の温度分布が熱伝導型（温度プロファイルが地表から深部へほぼ一定傾斜で増加する）であることは、それよりも深部（ここでは、特に深度 2.5 km~5.0 km 程度）の温度分布が熱伝導型であることを必ずしも意味しない。すなわち、その場合にも地下深部に厚い高温の貯留層が長期間賦存している可能性が広く存在している。

(2) 上記(1)から、実際に具体的な地熱地域において深部の温度構造や貯留層分布・特性を解明・評価するためには、単純な系と予想される場合でも現在の地下深部の温度分布を指示する各種調査・探査手法の適用、マグマ溜の分布深度・規模・年齢・温度（過去~現在）の推定手法の適用、さらにこれらの結果に基づくマグマ溜-熱水系のモデル化・シミュレーション解析を通じた総合的な検討などが必要である（例えば、茂野、2000）。

(3) 地下浅部に熱水系~貯留層が分布する場合には多くの複雑な現象・過程が妨害となるため、地下深部の温度構造や貯留層分布・特性を解明・評価することはより困難である。すなわち、その様な環境では上記(2)に加えて、浅部貯留層の温度構造・流体流動構造についての測定・解析などを含めたより総合的な検討が必要となる。

(4) 地下浅部~深部の環境は、応力・破壊場の経時変化や流体・岩石反応の進行などにより、マグマ溜-熱水系の各々の位置や特性が短期的~長期的に動的に大きく変化している場合があり得る（例えば、茂野、1999b；Shigeno, 2000）。その様な環境に対しては、上記(2)・(3)についてより多くの測定・観測データの取得、より総合的な解析・モデル化およびより体系的・効率的な数値シミュレーションによる順解析・逆解析が必要と考えられる（茂野、1998；茂野、2000）。

5. おわりに

深部地熱資源については、現状では実態に不明の点が多く（高品位貯留層発見リスクなどが高い）、開発の経済性の制約が大きい（掘削費用などが高い）。しかし、21世紀には世界的に構造的なエネルギー供給不足・不安定、エネルギー価格の上昇、地球環境問題の深刻化が予想され、重要な経済的開発対象となる可能性が高いと考えられる。このため、様々な手法により深部地熱環境の実態を解明して行くことは、特に他のエネルギー資源に乏しい日本において重要と考えられる。

茂野（1998, 2000）は、各種温度データの総合解析による深部地熱環境の推定手法の可能性について検討した。この一環として、茂野（1999a）は、「拡張熱伝導率」を軸に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を、代表的な条件の場合について行った。また、茂野（1999b）、Shigeno（2000）は、この手法を動的環境にまで拡張し、「深部地熱資源調査」によって 500°C を越える高温深部環境が明らかとなった岩手県葛根田地域について、半定量的な地熱系のモデル化を行った。

これらを引き継いで本説では、深部地熱資源の探査・評価の進展に寄与する目的で、「拡張熱伝導率」を軸とした静的な簡易モデル数値シミュレーション手法により、深部地熱環境について体系的な順解析および予察的な逆解析を行った結果を取りまとめた。

本説2.の体系的な順解析では、深度 3 km における温度の経時変化が、以下の4種類の貯留層分布モデルに基づく数値シミュレーションにより比較された。すなわち、(A)貯留層が分布しない場合、(B)深度 1.0~2.0 と 2.5~3.5 km に貯留層が2枚分布する場合、(C)深度 1.0 km~マグマ溜頂部に貯留層が1枚分布する場合、(D)深度 2.5 km~マグマ溜頂部に貯留層が1枚分布する場合である。各モデルについて、マグマ溜の頂部深度と厚さを各々 2~6 km, 1~8 km で変化させた。(D)の貯留層がマグマ溜頂部に直接接するとともに厚い帽岩で覆われる場合（潜頭性熱水系となる傾向大）には、マグマ溜の条件に強く規制されずに、深度 3 km の温度は長期間高温~超高温（250°~500°C）を保持する傾向が強い。しかし(C)の帽岩が薄い場合には、マグマ溜の厚さが 2 km よりも薄い条件では、深度 3 km の温度を概略 250°C 以上に保持することは困難である。さらに(B)の場合には、深部貯留層底部とマグマ溜頂部とが離れている条件（概略 1.5 km 以上）では、マグマ溜が厚い場合でも深度 3 km の温度を概略 250°C 以上に保持することが困難である。

一方、3.の予察的な逆解析では、上記の体系的な順解析の結果を利用して、特に地下浅部が熱伝導型の直線的な温度プロファイルを示す単純な場合について検討が行われた。その結果は、浅部で熱伝導が卓越する場合でも、深部に熱水系が発達する様々な可能性があることを示した。すなわち、各地熱地域において深部の温度構造や貯留層分布・特性を解明・評価するためには、当然のことながら浅部坑井調査によって得られる温度検層データの解析のみでは不十分であり、マグマ溜-熱水系に関する様々なデータの総合化と体系的なモデル化・数値シミュレーション解析が必要である。この目的で、今後さらに多様な技術開発および調査・研究が必要である（例えば、茂野、1998；茂野、2000）。以上のように、今回の簡易モデル数値シミュレーションによる体系的な順解

析および予察的な逆解析の結果は、今後の深部地熱資源の探査・評価に指針を与える意味で重要と考えられる。

すでに茂野(1999a)でも述べた様に、深部地熱環境は複雑・多様であり、第四紀のマグマ溜り～その固結岩体の定置深度が深くても、貯留構造が地下深部にまで発達する条件では、良好～適度な流体の温度、化学性状、生産性を持つ大規模な深部貯留層が賦存する場合があります。今回の簡易的なC～Dモデルに基づく体系的な順解析シミュレーションの結果は、この考え方に調和的である。このような型の深部貯留層は、当面の開発が可能な深部地熱資源として有望であり、すでにその存在が流体地球化学的なデータなどからも推定されている(例えば、茂野, 1992; Shigeno, 1995)。近い将来に、このような深部貯留層の発達可能性が高い地域において深部掘削調査が実施され、その深部地熱系の実態が明らかにされることを期待したい。

謝辞 本稿を取りまとめるにあたっては、「深部地熱資源調査」を推進されて来た工業技術院ニューサンシャイン計画推進本部、新エネルギー・産業技術総合開発機構地熱開発利用センター、日本重化学工業株式会社、地熱エンジニアリング株式会社、地熱技術開発株式会社、西日本技術開発株式会社の方々、および新エネルギー・産業技術総合開発機構の「深部地熱資源調査委員会」、「同深部調査部会」の委員の方々などの様々な場でのご意見を参考にさせて頂きました。また、地質調査所の「深部地熱資源調査の解析・評価」グループの多くの方々のご意見を参考にさせて頂きました。さらに講演会発表などの機会には、陶山淳治(元地質調査所)、江原幸雄(九州大学)、糸井龍一(同)、松永 烈(資源環境技術総合研究所)などの方々から本説の手法などについて貴重なご意見を頂きました。最後に竹野直人(地質調査所)氏には有益な査読コメントを頂きました。以上の方々にして感謝致します。

文 献

Fukutomi, T. (1960) On the possibility of volcanic hot springs of meteoric and magmatic origin and their probable life span. *Jour. Fac. Sci. Hokkaido Univ.*, ser. VII, 1, 223-266.

福富孝治(1964) 地熱エネルギーとその保存性について. *地熱*, no. 5, 15-27.

茂野 博(1992) 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.

Shigeno, H. (1995) Estimating deep environments of Japanese hydrothermal systems based on geochemical data from geothermal power plants. *Proc. World Geothermal Congress 95, Florence 1995*, 1019-1024.

茂野 博(1998) 深部地熱資源の考察(2): 温度データ総合逆解析による深部環境推定の可能性. 日本地熱学会平成10年学術講演会講演要旨集, 3-10.

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.

Shigeno, H. (2000) Evolution history of the Kakonda magma-hydrothermal system, Japan, estimated through simplified-model numerical simulations. *Proc. 25th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ. 2000*, 135-142.

茂野 博・村岡洋文・石戸経士・金原啓司(2000) 「深部地熱資源に関する研究—葛根田地域の深部地熱系の解析・評価を中心に—」の概要. *地調報告*, no. 284, 1-15.

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, 315-338.

Smith, R. L. and Shaw, H. R. (1975) Igneous-related geothermal systems. *U. S. Geol. Surv. Circular*, no. 726, 58-83.

Smith, R. L. and Shaw, H. R. (1978) Igneous-related geothermal systems. *U. S. Geol. Surv. Circular*, no. 790, 12-17.

(受付: 2000年8月14日; 受理: 2000年11月30日)