

単一ボックスモデル熱水系数値シミュレーターを用いた 大沼地熱発電所における生産流体化学組成変化の順解析

茂野 博*・高橋正明**・野田徹郎***

SHIGENO Hiroshi, TAKAHASHI Masaaki and NODA Tetsuro (1992) Forward analyses of production fluid chemistry changes at the Onuma geothermal power plant, Northeast Japan, using a single-box-model numerical hydrothermal-system simulator. Bull. Geol. Surv. Japan, vol. 43 (9), p. 573-594, 14 fig., 4 tab.

Abstract: A single-box-model numerical simulator for personal computer analysis was developed in order to estimate macro-parameter values for exploited geothermal reservoirs and essential fluids supplied from the depth. The simulator was designed to compute history data concerning total production and reinjection fluids at geothermal power plants from the assumed parameter values, based on conservation laws for water mass, energy and masses of conservative chemical constituents of geothermal fluids. Using two kinds of forward analysis techniques, i.e. cast-net and pursuit methods, programs containing the simulator semi-automatically selected optimum combinations of the unknown parameter values by minimizing the differences between the simulated and measured history data for specific enthalpy and chemical compositions of the production fluids.

The forward analysis programs were applied to the history data from the Onuma geothermal power plant (production capacity, 10 MWe) where waste hot water reinjection, chemical monitoring and artificial tracer tests have been conducted since 1970, almost the beginning of the geothermal development. Using the history data, especially for enthalpy and iodine concentrations of production fluids with KI tracer amounts injected as spikes, the macro-parameter values for the exploited reservoir and essential hot water from the depth were uniquely determined as follows: mass of convecting hot water in the exploited reservoir (M0), 32.3×10^8 kg; recycling fraction of the reinjected waste hot water to the reservoir (R), 0.74; specific enthalpy of the essential water from the depth (H1), 385 kcal/kg; chlorine concentration of the water (C1), 259 mg/kg; iodine concentration of the water (I1), 0.086 mg/kg. These results support the conceptual model that the exploited Onuma reservoir mainly in the Tertiary volcanics is supplied with neutral hot water of abnormally high B/Cl mole ratio of around 1.0 by a large essential reservoir distributed at depth in the Paleozoic to Mesozoic detrital marine sedimentary rocks.

要 旨

開発された地熱貯留層および地下深部から供給される本源地熱流体に関するマクロパラメータ値を推定する目的で、パーソナルコンピュータ解析用の単一ボッ

クスモデルに基づく数値シミュレーターを開発した。このシミュレーターは地熱流体の水質量、エネルギーおよび非反応性溶存化学物質の保存則に基づいて、仮定されたパラメータ値から地熱発電所における総生産-還元流体についてのヒストリーデータを算出するものであ

*北海道支所

**地殻熱部

***環境地質部

Keywords: geothermal power plant, hydrothermal system, geothermal reservoir, geothermal fluid, chemical monitoring, tracer test, numerical simulation, box model, forward analysis, reservoir assessment.

る。生産流体の比エンタルピーおよび化学組成ヒストリーデータに関するシミュレーション値と観測値との差を最小化する2種類の順解析手法(投網法および追跡法)を用いることにより、上記のシミュレーターを核とするプログラムは半自動的に最適の未知パラメーター値の組み合わせを抽出することができる。

上記の順解析プログラムの適用を、地熱開発の初期(1970年頃)から不用熱水の地下還元、化学的モニタリングおよび人工トレーサー試験を行っている秋田県の大沼地熱発電所(発電容量10MWe)のヒストリーデータについて試みた。この結果、特に生産流体の比エンタルピーとI濃度とともにスパイク状に注入されたKI人工トレーサー量のヒストリーデータを利用することにより、開発された貯留層および地下深部からの本源的熱水について以下のようにマクロパラメーター値の最適組み合わせを決定することができた。すなわち、開発された貯留層中の対流熱水総量(M0)が $32.3 \times 10^8 \text{ kg}$ 、還元された不用熱水の貯留層への循環率(R)が0.74、深部からもたらされる本源熱水の比エンタルピー(H1)が385 kcal/kg、同熱水のCl濃度(C1)が259 mg/kg、同じくI濃度(I1)が0.086 mg/kgである。これらの結果は、大沼地域において主に新第三紀の火山岩類中に発達する開発された貯留層が、地下深部の古・中生代の海成の碎屑性堆積岩類中に発達する大規模な本源的貯留層から中性でB/Cl比が約1と異常に高い熱水を供給されているという概念的モデルを支持している。

1. はじめに

地熱発電の目的で地下に貯留されている高温・高圧の地熱流体を大規模長期的に採取する時、地下の環境を反映して地熱貯留層(リザーバー)では沸騰・気液分離、周辺からの低温地下水の混入、より深部からの本源的な地熱流体の流入等のダイナミックな変化が生じる。また、日本の地熱発電所のように環境保全等を目的として発電用蒸気分離後の不用な熱水を地下に還元する場合、還元熱水がこの変化に大きな影響を与える。このため、長期的に安定した地熱発電運転の目的で、各種の調査・観測データを集積し数値シミュレーションを含めた総合的な解析を行うことにより、これらの変化の実態や原因の解明と将来の予測を通じて、生産井・還元井の配置や生産・還元規模の最適化を図ることが非常に重要である(例えば、Grant *et al.*, 1982; 石戸, 1989, 1990)。

日本の各地熱発電所においては、程度の違いはあるが地熱井に関して坑口圧力・流量等の物理的な変化とともに、生産流体の主要化学組成変化のモニタリングが行わ

れている。また、還元熱水が直接的に生産井に与える影響を明かにすることを主目的として、人工トレーサー試験が行われている。これらの化学的データは、上述した地熱貯留層の変化の把握と開発の最適化を図る目的で重要な情報源になっており、様々な解析が試みられている

(例えば、茂野, 1988 a, 1988 b, 1989; Shigeno, 1992; Horne, 1982; 秋林, 1982; 藤井, 1982; Yuhara and Akibayashi, 1983; Inoue and Shimada, 1985; 島田ほか, 1985; 笠井・猿舘, 1986; 笠井ほか, 1990; 関根・戸田, 1990; 福田ほか, 1990; 池内ほか, 1990; 小倉ほか, 1991; 新堀ほか, 1991)。

これらの研究の中で資源評価に関連して特に注目されるのは、伊東ほか(1978)、松葉谷・窪田(1987)、窪田・松葉谷(1987)、窪田ほか(1989)が秋田県大沼地熱発電開発地域の熱水系について、ヨウ素イオン(以下Iと略記)を用いた人工トレーサー試験データ、自然の塩素イオン(以下Clと略記)濃度のモニタリングデータ等から、簡単な単一ボックスモデルに基づいて貯留層中で対流している地熱流体の総量、総還元熱水の貯留層への循環率等の地熱貯留層に関するマクロ値の推定を試みていることである。さらに窪田ほか(1991)は、この発展としてパーソナルコンピューターを用いてスチームキャップを伴う場合等の地熱貯留層のボックスモデル数値シミュレーション解析を、地熱流体の化学組成変化を含めて試みている。

地質調査所では、新エネルギー技術開発研究(サンシャイン計画、地熱エネルギー)の「深部地熱資源探査技術に関する研究」の一部として1991年度より「熱水系ダイナミクスに関する基礎的研究」を進めており、この中で「熱水系の発達過程に関する研究」と「熱水系の変動予測に関する研究」を行っている。今回、この一環として上記の化学的データを利用する解析手法の発展を図る目的でパーソナルコンピューターを使用し、単一ボックスモデルに基づく数値シミュレーションにより順解析的に地熱貯留層および本源的な地熱流体に関するマクロ値の推定を行う半自動的方法を検討・開発した。また、この方法を大沼地域のモニタリングデータ(窪田ほか, 1989)に適用し、その解析結果について上記の窪田ほか(1989)等の計算結果と比較するとともに、大沼地域およびこれに隣接した澄川地域の熱水系に関する従来の各種の研究結果と比較して検討を加えた。本報告ではこれらの内容を取りまとめて報告する。なお、本報告の概要についてはすでに茂野ほか(1991)が口頭発表を行っている。

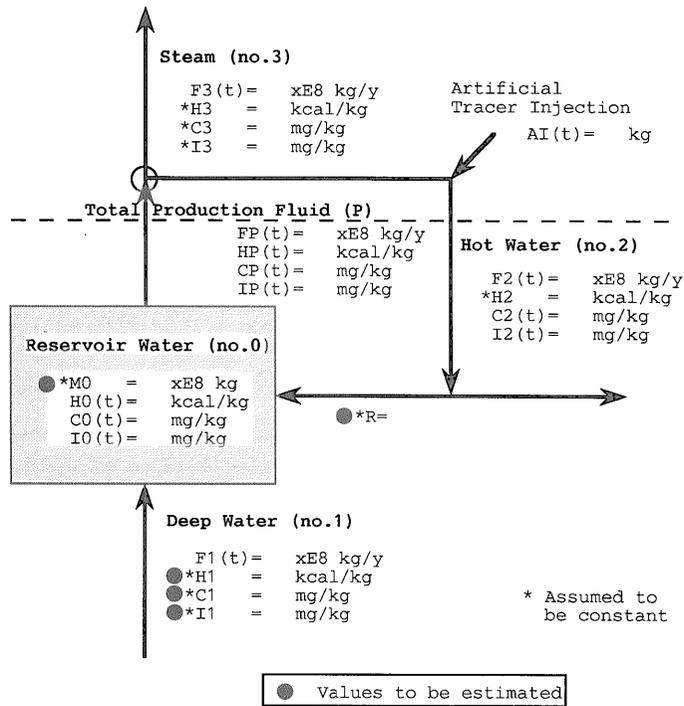
2. 解析手法

2.1 単一ボックスモデル

熱水系～地熱貯留層について定性的～定量的な理解を進めるためのモデル化の様式は、概念モデル、ランプドパラメーターモデル (ボックスモデル, タンクモデル) および分布パラメーターモデルの3つに分類される (例えば, Grant *et al.*, 1982; 石戸, 1989, 1990). このうちボックスモデルは1つのあるいは少数の均一なボックスで地熱貯留層等を代表させるもので, 開発によっても地熱貯留層の均一性が保持される場合に適応性が高く, 分布パラメーターモデルに比較してモデル化に多量の実測データを必要としない点, 数値シミュレーターの作成およびシミュレーション計算が小規模に行える点等に長

所がある. ボックスモデルに基づく熱水系～地熱貯留層の数値シミュレーションについては様々な可能性・拡張性ある (例えば, Whiting and Ramey, 1969; 宮崎, 1991; 窪田ほか, 1991). ボックスモデルは, 地熱開発初期に地下の貯留層の概要について数値シミュレーションを行う目的で利用される場合もあるが, より本質的には広く熱水系における地熱貯留層全体とその周囲との関係について大局的な (マクロな) 状況を数値シミュレーションを通じて把握する目的で重要である.

今回のボックスモデルに基づく数値シミュレーション順解析法では, 特に大沼地域の生産履歴データの解析を念頭において松葉谷・窪田 (1987) 等を参考にし非常に単純化し, 第1図に示すように地熱貯留層にマクロに対応する単一の均一なボックス (その中の対流地



- | | |
|-----------------------------|---|
| F: Flow rate | *M0: Mass of convecting reservoir water |
| H: Specific enthalpy | *R: Recycling fraction of reinjected water |
| C: Cl concentration | *H1: Specific enthalpy of deep water |
| I: I concentration | *C1: Cl concentration of deep water |
| AI: KI tracer amount | *I1: I concentration of deep water |

第1図 化学的履歴データに基づく数値シミュレーション順解析用の開発された熱水系の単一ボックスモデル

Fig. 1 Single box model of exploited hydrothermal system for numerical simulation forward analysis based on chemical history data.

トップ毎に貯留層中の流体は熱的にも化学的にも均一化している。

(5) 熱伝導については、深部熱源からの熱の伝導流入、地表への熱の伝導流出等無視できる。また、貯留層中および周辺の岩石からの低温の環元熱水によるコールドスライプ過程等も無視できる。

(6) 貯留層から地表への温泉水・噴気等の流出は無視できる。また、貯留層の側方への地熱流体の流出および側方からの低温地下水の流入も無視できる。

(7) 深部より貯留層へ流入する本源流体は熱水 1 相で、その比エンタルピー、Cl 濃度、I 濃度は一定である。

(8) 総生産熱水・蒸気の各比エンタルピーは、ほぼ 1 気圧下での平衡を仮定して一定である。

(9) 高可溶性・低揮発性の Cl と I (共に溶存イオン) については、開発された貯留層での岩石との反応およびセパレーターでの蒸気への分配は無視できる。

なお、特に(5)で仮定した貯留層中の流体への熱の供給機構の問題に関しては、4.で解析を行う大沼地域の場合について 5.2 で考察を加える。

2.3 解析アルゴリズム

本解析法は、地熱流体の生産履歴データとして第 2 図の FP (あるいは F2 と F3), HP (あるいは H2 と H3), CP (あるいは C2) と IP (あるいは I2) の経時変化モニタリングデータが利用可能で人工トレーサーの注入履歴データ AI が存在する場合に、地熱貯留層および本源流体に関する未知のパラメーターである M0, R, H1, C1, I1 を合理的かつ体系的に推定することを目的としている。

2.2 で述べた 4 つの基礎方程式は見かけ上はインプリシットスキームであるが、7 つの補助式等が存在しているため、上記 5 つの未知のパラメーターにそれぞれ仮定値を与え、初期値 $H_0(0)$, $C_0(0)$, $I_0(0)$ としてはモニタリングデータの初期値 $HP(1)$, $CP(1)$, $IP(1)$ を使用し、各タイムステップ毎にモニタリングデータ $FP(t)$, $AI(t)$ を与えることにより、貯留層中の $H_0(t)$, $C_0(t)$, $I_0(t)$ および総生産流体の $HP(t)$, $CP(t)$, $IP(t)$ について時間変化を単純にシミュレーション計算していくことが可能である。一方、 $HP(t)$, $CP(t)$, $IP(t)$ はモニタリングにより実測されている。そこで、目的関数として第 2 図の {12}, {13}, {14} 式で示される HP , CP , IP についてのシミュレーション値 (計算値、理論値) と実測値との差の関数 σ_{HP} , σ_{CP} , σ_{IP} をとり、これらの関数を最小化するパラメーター値の組み合わせを順解析的に求めることによりこれらを最適値 (解) とすることができる。

今回の解析法では、上記の方法を原理としてパーソナルコンピューターにより数値シミュレーション計算を繰り返す。以下に説明する(1)投網法と(2)追跡法により半自動的に未知のパラメーターの最適値を求める。

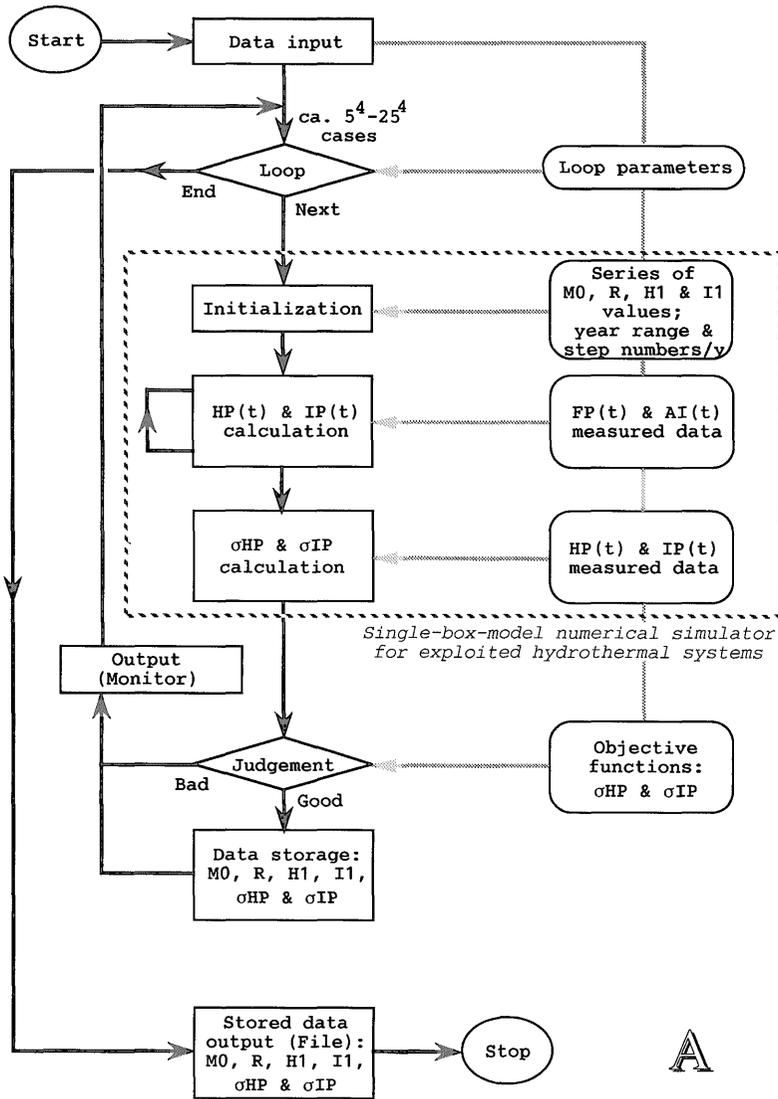
(1)投網法(網羅法): あらかじめ各パラメーターについて蓋然性のある広い範囲に適当な間隔で一連の仮定値を与え、これに基づいて網羅的に数値シミュレーションを行い、目的関数(複数)が小さな値となるパラメーター値の組み合わせ領域を求める。この抽出領域について、さらに各パラメーターにより細かい間隔で一連の仮定値を与えて同様の作業を繰り返す。上記の目的関数が最小値となるパラメーター値の組み合わせを解とする。

(2)追跡法(勾配法): 各パラメーターの初期値としてやや極端な値を与え、これを中心として各パラメーター値を独立に大小 1 回づつ小さく変化させて一連の数値シミュレーションを行い、目的関数(複数あるいは単数)が最小値となるパラメーター値の組み合わせを求める。この新しい組み合わせを中心として同様の作業を繰り返す。目的関数が極小値となるパラメーター値の組み合わせを求めてこれを解とする。パラメーターの初期値を別のやや極端な組み合わせとして追跡法を繰り返すことにより、解の唯一性・妥当性を確認・評価する。

なお、上述した解析手法は、数値シミュレーションを利用した数理計画法(多目的モデルパラメーター計画法)(例えば、日本数学会(1985)を参照)のカテゴリーに入ると考えられる。

2.4 解析プログラム

上記の解析アルゴリズムに従って、単一ボックスモデル熱水系数値シミュレーターを核とした投網法および追跡法に基づく 2 つの半自動的に順解析プログラムを作成した。その処理の流れ図を、 σ_{HP} と σ_{IP} を目的関数とした場合を例にして第 3 図 (A), (B) に示す。これらのプログラムの開発および 4. の大沼地熱発電地域の履歴データへの適用には、パーソナルコンピューターとして Apple 社の Macintosh II および II_{sx} を使用し、プログラムの開発言語としては Microsoft 社の QuickBASIC を用いた。プログラムの規模は簡単な入出力モジュール等も含めて各 500 行程度で、1 つのパラメーター値組み合わせによる 1 ケースの数値シミュレーション計算について、コンパイルしたプログラムで約 1~4 秒を要した。本プログラムの出力は Macintosh のクリップボード上に直接行い、これを Microsoft 社の Excel, Cricket Software 社の Cricket Graph, Claris 社の MacDraw II 等の市販ソフトウェアに転送して図表の表示、結果の解析等を行った。



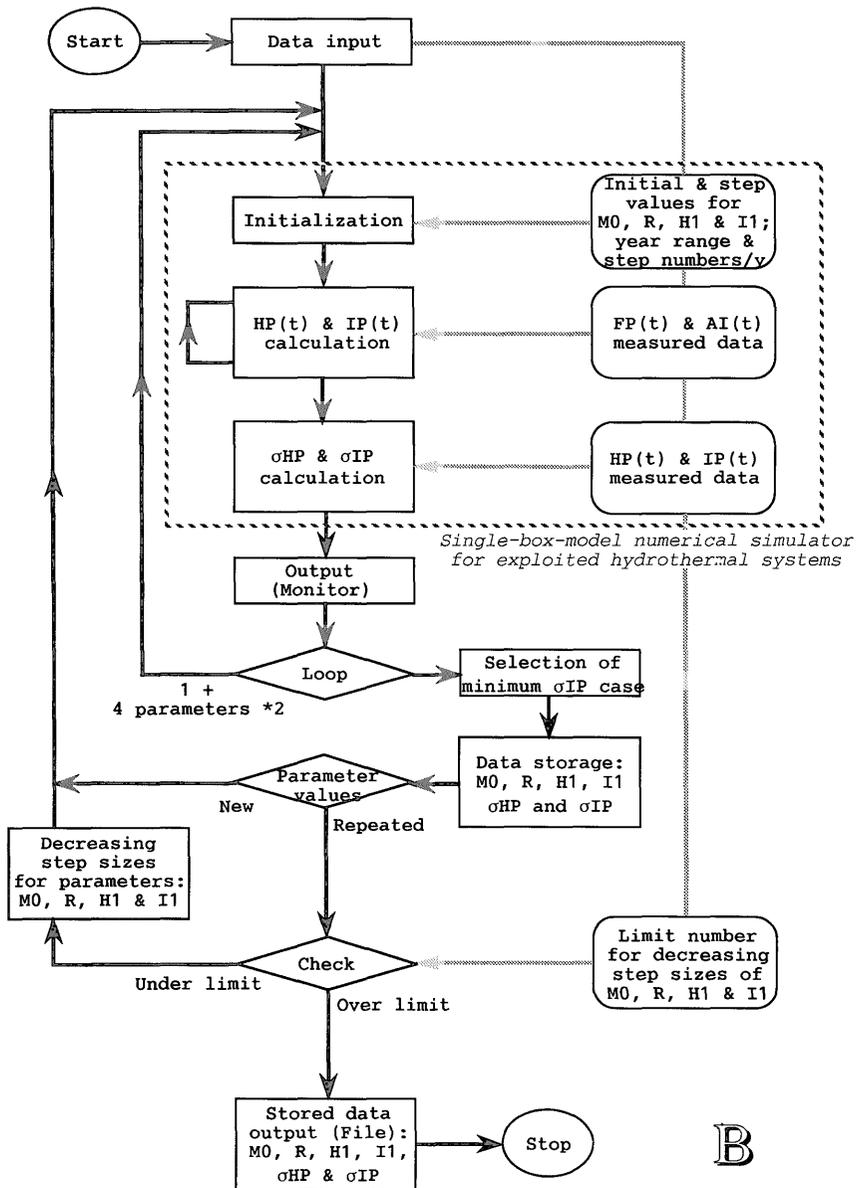
第3図 開発された熱水系の単一ボックスモデル数値シミュレーション順解析プログラムの処理の流れ図: (A)投網法, (B)追跡法

Fig. 3 Flow charts of forward analysis programs using the single-box-model numerical simulator for exploited hydrothermal system: (A) Cast-net method; (B) Pursuit method

3. 大沼地域熱水系の概要

秋田県北部に位置する大沼地域では1965年頃から三菱金属株式会社(現三菱マテリアル株式会社)により地表地熱探査・地熱調査井掘削が行われ、1973年に地熱発電(発電容量10MWe)を開始した。大沼地域の地質学・地球化学・地球物理学的な調査・探査結果や地熱井によ

る調査・観測結果等は与良ほか(1973)によって報告されたのを始めとして、与良ほか(1977)、窪田(1979)、Sakai and Mori(1981)、窪田(1985)、Sakai and Matsunaga(1988a)等によってまとめられている。大沼地域周辺ではその後各種の地熱調査・地熱井掘削が行われているが、1980~1987年度には仙岩広域地域で地質調査所、新エネルギー・産業技術総合開発機構等により



地熱探査技術等検証調査が実施され、同地域の北縁部に位置する大沼地域周辺でも各種の地表探査および地熱調査井の掘削が行われた (例えば、地質調査所, 1987; 西ほか, 1989)。

大沼地域は N-S 方向に伸びる花輪地溝帯の延長部に位置し、その東西両側には第四紀の安山岩質の複成火山である八幡平および秋田焼山が分布している。開発された大沼地域の地下 (坑井の最大深度約 1800 m) には、基

本的に火山岩類・火山砕屑岩類を主要構成岩種とする新第三系中に断裂系分布に伴われて熱水卓越系が発達しており、熱水は中性で Cl 濃度が約 400 mg/kg と低くその B/Cl モル比は 1 に近い異常に高い値を示す (与良ほか, 1973)。この異常な熱水の B/Cl 比に検討を加えて、茂野・阿部 (1981 a, 1981 b, 1982, 1987), Shigeno and Abe (1983) は、N-S 方向の地溝帯内に位置し地下深部にまで高い透水性が期待される大沼地域周辺では、その東西

両側に位置する第四紀のマグマ溜りからの主に伝導的な加熱を受けて、主に降水起源地下水を元とした熱水系が基盤の古・中生代の海成碎屑性堆積岩類中にまで深く発達しているという概念的な熱水系深部モデルを示した。野田ほか(1987)も仙岩地域北部の地熱流体の化学組成について多変量解析を行い、モデル化した起源水の組成と分布を求めて類似した熱水系モデルを提示している。また、仙岩地域の噴気・地熱井ガス中のHe, Ar, N₂, CH₄, C₂H₆等の非反応性ガス組成も、上記の熱水系モデルを支持している(茂野ほか, 1989; Shigeno *et al.*, 1992)。しかし、花輪地溝帯の縁辺部には部分的に古・中生代の海成の碎屑性堆積岩類が分布しているものの、現在までの大沼地域周辺の地熱井掘削(最大深度約2500 m)では、深部にこのような堆積岩類は発見されていない。

大沼地域では開発当初より環境保全のために不産熱水の全量地下還元が行われており、1975~1976年に人工トレーサー試験が行われて、還元井4本(深度600~1200 m)からのKIトレーサー合計1500 kgの注入と生産井5本(深度1400~1800 m)でのI濃度変化の観測が体系的に実施された(伊東ほか, 1977, 1978)。この結果、(1)断裂系の分布等を反映して貯留層中における地熱流体の流速には大きな不均一性が存在し、早い場合には流速が数m/hに達すること、(2)還元された地熱流体の再湧出率は30%以上に達していること、(3)I濃度バックグラウンド値の上昇から貯留層中の対流熱水総量は50~80×10⁸kg程度と見積もられること等が明かにされた(伊東ほか, 1977, 1978; 茂野, 1988 a, 1988 b, 1989; Shigeno, 1992)。その後1983年にも、一時的に利用された還元井O-8 R井からのKI(300 kg)の注入による人工トレーサー試験が実施されている(窪田ほか, 1989)。

一方、大沼地域では開発当初より各生産井における熱水・蒸気の流量、坑口圧力等の観測とともに、熱水中の主要溶存成分濃度の分析が定期的に行われている。窪田ほか(1989)は、1970年から1987年までの総生産流体の年平均値・集計値として坑口圧力、流量、比エンタルピー、Cl濃度、I濃度、Cl/B比、シリカ温度、アルカリ比温度等の経時変化を報告している。その結果は上記期間を通じてほぼ坑口圧力が2.1 ata、総生産流体の比エンタルピーが215 kcal/kg、シリカ温度が215°Cで非常に安定している。これに対してCl濃度は1970年の約280 mg/kgから1977年頃までに約420 mg/kgに上昇し、その後はほぼ一定化している。一方、I濃度は測定を開始した1974年の0.11 mg/kgから、1975~1976年の人工トレーサー試験の影響により1976年の0.29 mg/kgへと

急上昇し、その後漸次低下して約0.14 mg/kgで一定化している。

松葉谷・窪田(1987)、窪田・松葉谷(1987)、窪田ほか(1989)は開発当初の貯留層熱水の値を用いて地下深部からの本源熱水のCl濃度、I濃度等を仮定し、上記のモニタリングデータに基づいて単一ボックスモデルにより平衡値あるいは単年度変化から貯留層中の対流熱水総量と還元熱水の貯留層への循環率の推定を行った。その結果は前者が20~30×10⁸kg、後者が0.70~0.75と算出された。

1981年以降大沼地域の西方約1.5 kmに隣接する澄川地域において地熱探査・開発が精力的に行われ、三菱マテリアル株式会社と東北電力株式会社では1995年の地熱発電所(発電容量50 MWe)の運転開始を目標として、現在地熱井の掘削・噴出試験等を進めている(坂井ほか, 1986; Sakai and Matsunaga, 1988 b; Maki *et al.*, 1988; Ueda *et al.*, 1991; 村田, 1991)。

4. 大沼地域熱水系のシミュレーション順解析

4.1 解析データおよび解析方法

本解析においては、1970年から1987年まで各年度毎に大沼地熱発電所の総生産流体の集計値・平均値として示されている流量(FP)、比エンタルピー(HP)、Cl濃度(CP)、I濃度(IP)のヒストリーデータ(窪田ほか, 1989)およびIトレーサー注入(AI)のヒストリーデータ(伊東ほか, 1978; 窪田ほか, 1989)を用いた。これらのデータ使用に関して特記すべきことは以下の4点である。

(1) Iトレーサー注入ヒストリーを除くヒストリーデータは、窪田ほか(1989)の第9図を拡大して読み取り数値化した。

(2) 大沼地域では1970~1987年の間に坑井の配置・使用に若干の変更がなされている(窪田ほか, 1989, 第4図)。しかし、今回の解析ではこの点については配慮しなかった。

(3) 大沼地域で貯留層中の熱水の均一化に要する時間は、伊東ほか(1978)の第7図に示されている各還元井へのKIトレーサー注入後の各生産井におけるI濃度の一定化に要する時間から、2ヶ月程度であると判断される。これに基づいて、数値シミュレーションのタイムステップ数は4~12回/年とした。

(4) 大沼地域では、1983年に生産井から還元井に転用されたO-8 R井に300 kgのKIトレーサーを注入して人工トレーサー試験が行われたが、このIは当時の新しい生産井O-10 Rのみに多量に出現した(窪田ほか,

第1表 大沼地熱発電所のヒストリーデータ (CP, HP) に適用された単一ボックスモデル数値シミュレーション投網法順解析における仮定パラメーター値, 目的関数およびプログラム実行結果による抽出ケース率の一例 (第4図参照)

Table 1 An example of cast-net method forward analysis using single-box-model numerical simulator for the history data (CP and HP) from the Onuma geothermal power plant: Assumed parameter values, objective functions and ratio of selected cases by the program execution (see Fig. 4).

(1) Run number: O-66					
(2) Assumed parameter values:					
		Minimum value	Maximum value	Step value	Numbers of cases
M0	×10 ³ kg	10	100	5	19
R		0.05	0.95	0.05	19
H1	kcal/kg	200	450	10	26
C1	mg/kg	200	450	10	26
(3) Objective functions: $\sigma_{HP} <= 8$ and $\sigma_{CP} <= 16$					
(4) Total numbers of simulated cases: 244,036					
Suitable cases for the objective functions: 91					
Suitable case ratio: 0.000373					

1989, 第4図, 第1表)。しかし, その後すぐにO-8R井の使用は停止されて, 北西方向に位置する新しい還元井O-9Tが利用された(窪田ほか, 1989, 第4図, 第2図)。このため, 上記のO-8R井に注入されたIトレーサーは, 大沼地域の開発された貯留層の南縁部に位置するO-8R井~O-10R井間の孤立的な熱水循環系内に広がったのみで貯留層主部には浸入しなかったと仮定し, 今回の解析では無視した。

本解析においては, 2.4に述べた新しく開発した2種類の半自動的順解析プログラムを用いた。解析にあたっては計算量を軽減する目的で場合分けし, パラメーター数を減らしてそれぞれ投網法および追跡法の各プログラムを適用した。これらは(1)M0, R, H1, C1の4つの未知のパラメーター値を推定するために目的関数として σ_{CP} と σ_{HP} とを用いる方法, および(2)M0, R, H1, I1の4つの未知のパラメーター値を推定するために目的関数として σ_{IP} と σ_{HP} とを用いる方法である。なお, (2)の場合には1974年以前の生産流体中のI濃度の測定値が利用できないため, I0の初期値としては各解析ケースのI1パラメーター仮定値をそのまま用いた。

4.2 解析結果

本研究において, 実際の解析過程では様々な試行錯誤が行われたが, 本報告では以下に主要な結果のみを取りまとめる。

4.2.1 σ_{CP} と σ_{HP} を目的関数とした投網法および追跡法解析

今回の大沼地域熱水系についての σ_{CP} と σ_{HP} とを目的関数とした投網法解析プログラムの適用例として, 蓋然

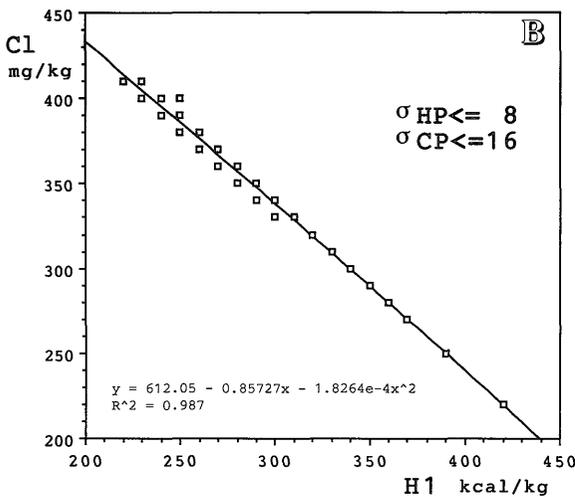
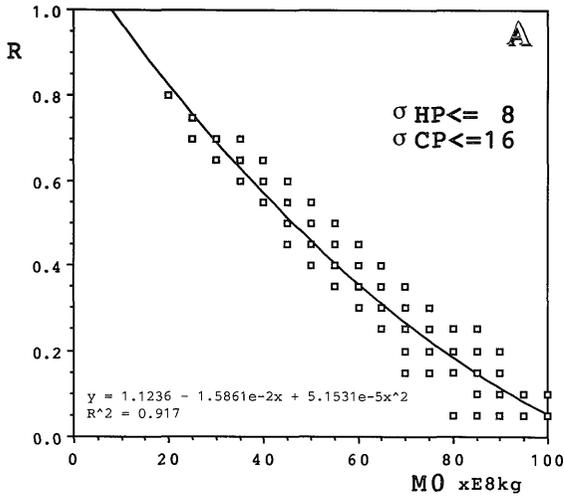
性のある範囲を広くまた値間隔を比較的小さく設定した4つのパラメーター値の組み合わせを第1表に示す。この解析では1年間のタイムステップ数は4回とし, 目的関数の計算期間は1970~1987年とした。

この投網法解析例の結果は, 第4図(A)のM0-R面および(B)のH1-C1面の投影図に示すように目的関数 σ_{CP} , σ_{HP} がそれぞれ16以下, 8以下の場合は4次元のパラメーター空間で1つの線に沿って分布しており, 唯一の解を求めることが困難である。この結果は, 第5図に示すようにM0, R, H1, C1の4つのパラメーター値を上記の線上の組み合わせで大きく変化させた4ケースのCP, HPのシミュレーション値と実測値との経時変化の比較からも明かである。

上記の線上から大きく外れたパラメーター値の組み合わせから出発し σ_{CP} を目的関数とした数回の追跡法解析プログラムの適用試験では, 4つのパラメーター値は投網法解析によって得られた上記の線上の値に到達する場合もあるが, パラメーター値組み合わせの最終到達点は出発点に依存しており, これらを一点に収束させることは困難であった。

4.2.2 σ_{IP} と σ_{HP} を目的関数とした投網法解析

今回の大沼地域熱水系についての σ_{IP} と σ_{HP} とを目的関数とした投網法解析プログラムの適用例として, 蓋然性のある範囲を広くまた値間隔を比較的小さく設定した4つのパラメーター値の組み合わせを第2表に示す。なお, この解析では計算時間を節約するために1年間のタイムステップ数は基本的に4回としたが, I濃度の変化が大きな1974~1978年の間は1年間のタイムステップ

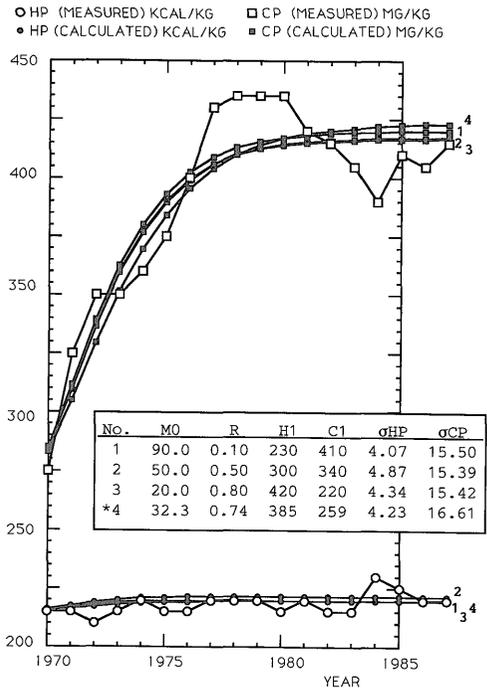


第4図 σ_{CP} および σ_{HP} を目的関数とした大沼地域ヒストリーデータの投網法プログラムによる順解析結果：目的関数を満足させるパラメーター値の組み合わせのM0-R平面投影(A)およびH1-C1平面投影(B)

Fig. 4 Forward analysis results of Onuma history data by the cast-net method program using σ_{CP} and σ_{HP} as objective functions: Cases with suitable combinations of parameter values were projected on M0-R plane (A) and on H1-C1 plane (B).

数を12回とした。目的関数の計算期間は1974~1987年である。

この投網法解析例の結果は、第6図(A)のM0-R面および(B)のH1-C1面の投影図に示すように目的関数 σ_{IP} 、 σ_{HP} がそれぞれ15以下、20以下の場合は4次元のパ

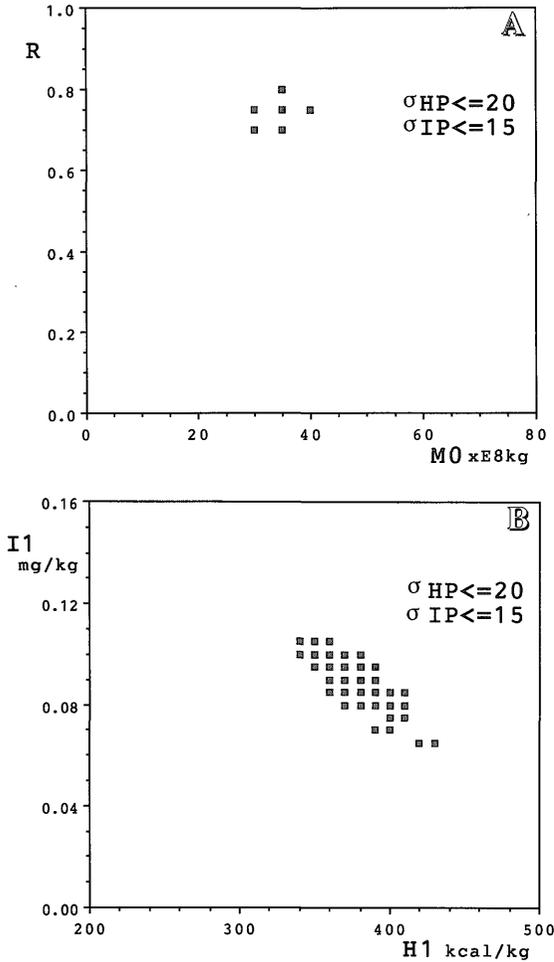


第5図 σ_{CP} および σ_{HP} を目的関数とした大沼地域ヒストリーデータの投網法プログラムによる順解析結果：目的関数を満足させるパラメーター値の組み合わせ4ケースについてのCP、HPの経時変化シミュレーション結果(★ケースno.4については第10図を参照)

Fig. 5 Forward analysis results of Onuma history data by the cast-net method program using σ_{CP} and σ_{HP} as objective functions: Simulated temporal changes of CP and HP for four cases with suitable combinations of parameter values (★ see Fig. 10 for the case no. 4).

ラメーター空間で1箇所にとまらなくて分布しており、唯一の解がこの狭い範囲内に存在していると見ることが出来る。しかし、この解析による σ_{IP} と σ_{HP} との相関性を示す第7図は、 σ_{IP} と σ_{HP} とが同時には最小値とはならない可能性が高いことを示している。このため本解析では σ_{HP} が最小値に近いものの中で σ_{IP} が最小値となる場合を求めたこととした。

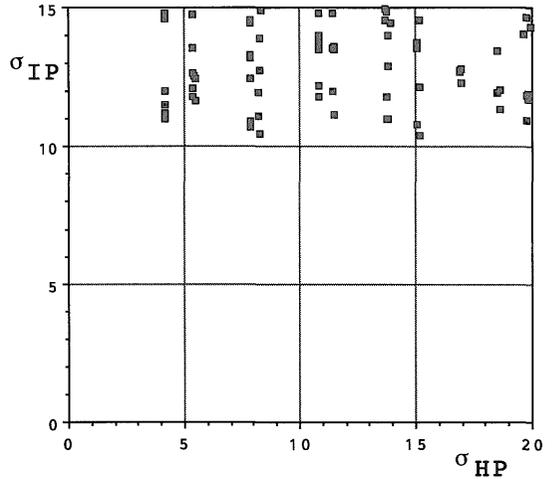
以上の非常に広いパラメーター空間についての解析結果に基づいて、以後さらに解が存在していると考えられる領域について各パラメーター値の範囲を限定し、値間隔をより細かく設定して投網法解析を試行錯誤的に数回繰り返した。



第6図 σ_{IP} および σ_{HP} を目的関数とした大沼地域ヒストリーデータの投網法プログラムによる順解析結果：目的関数を満足させるパラメーター値の組み合わせのM0-R平面投影(A)およびH1-I1平面投影(B)

Fig. 6 Forward analysis results of Onuma history data by the cast-net method program using σ_{IP} and σ_{HP} as objective functions: Cases with suitable combinations of parameter values were projected on M0-R plane (A) and on H1-I1 plane (B).

この結果は、M0, R, H1およびI1の最適値としてそれぞれ $32.3 \times 10^8 \text{kg}$, 0.74, 385 kcal/kg, 0.086 mg/kg が得られた。さらに、このM0, RおよびH1の各最適値を用いて σ_{CP} を目的関数とした投網法解析を行うことにより、最適のC1として259 mg/Kgが得られた。なお、2.2で述べたように本源流体を熱水1相と考えているので、上記の比エンタルピー値(H1)から計算すればその



第7図 σ_{IP} および σ_{HP} を目的関数とした大沼地域ヒストリーデータの投網法プログラムによる順解析結果：目的関数を満足させるパラメーター値の組み合わせの σ_{HP} - σ_{IP} 平面投影

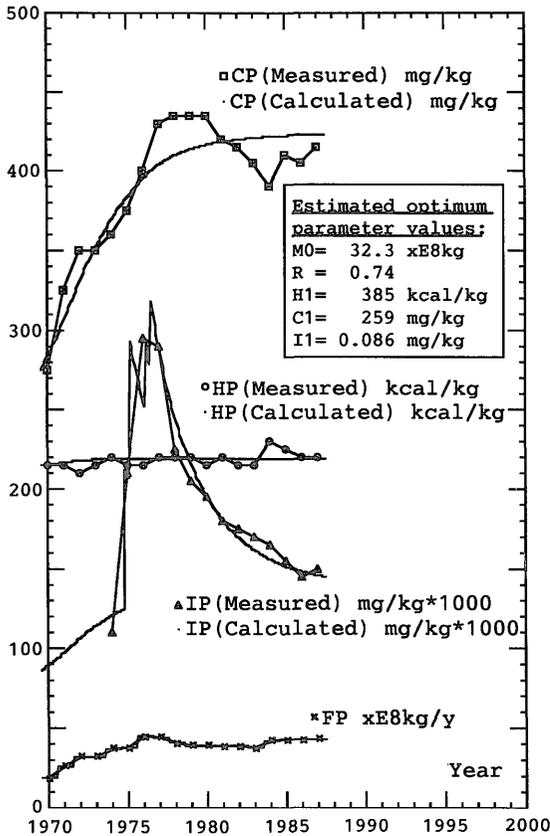
Fig. 7. Forward analysis results of Onuma history data by the cast-net method program using σ_{IP} and σ_{HP} as objective functions: Cases with suitable combinations of parameter values projected on σ_{HP} - σ_{IP} plane.

温度は342°Cとなる。以上の最適パラメーター値の組み合わせを用いてHP, CP, IPの経時変化シミュレーションを行った結果を、実測値と比較する形で第8図に示す。なお、第8図では1年間のタイムステップ数を12回としてシミュレーションを行った結果に基づき、毎月の変化を表示している。

2.3で述べた今回の数値シミュレーションを用いた順解析法では、IPのように時間変化が大きな場合にはタイムステップ(Δt)の大きさによって結果が大きく異なる可能性がある。このため、上述した最適パラメーター値の組み合わせの場合についてタイムステップ数/年を1~183回に変えて数値シミュレーションを行い、その影響を検討した。その結果は、第9図に示すようにタイムステップ数が年4~183回であれば σ_{IP} 値はほぼ一定となっており、本解析で用いた4ステップ/年を基本としIPの変化が著しい1974~1978年の間のみ12ステップ/年を用いる方法は、適当であったと考えられる。

4.2.3 σ_{IP} と σ_{HP} を目的関数とした追跡法解析

今回の大沼地域熱水系についての σ_{IP} と σ_{HP} とを目的関数とした追跡法解析プログラムの適用では、第3表に示すように4つのパラメーターについてそれぞれ上記

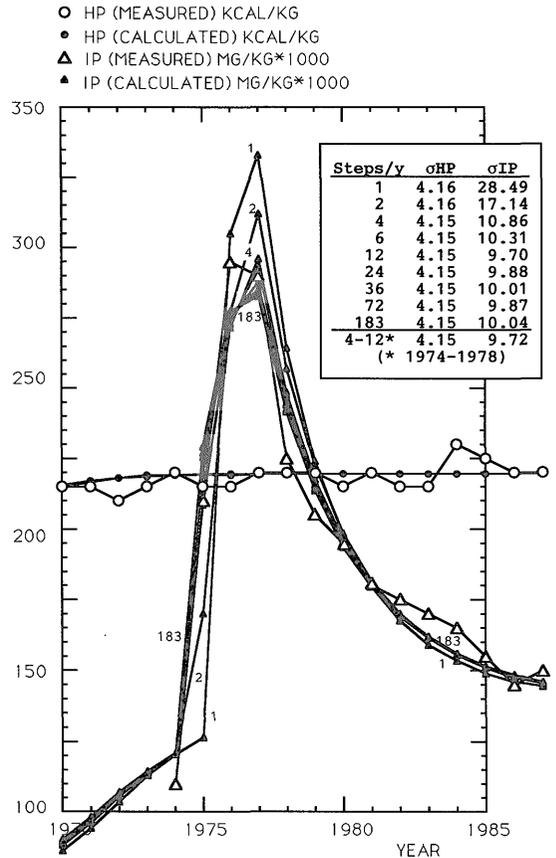


第8図 σ_{IP} および σ_{HP} を目的関数とした大沼地域ヒストリーデータの投網法プログラムによる順解析結果：最適パラメーター値を用いたIP, HPおよびCPの経時変化シミュレーション結果(タイムステップ数を12回/年として計算および表示)

Fig. 8 Forward analysis results of Onuma history data by the cast-net method program using σ_{IP} and σ_{HP} as objective functions: Simulated temporal changes of IP, HP and CP for the optimum solution parameter values (calculated and shown with 12 time steps/year).

4.2.2で得られた最適値から大きく外れた大小2つの値を取り、各解析ケースの初期値としてこれらの値の組み合わせを選択し、 σ_{IP} を主要な目的関数、 σ_{HP} を副次的な目的関数とした。参考としてこれらの初期値の組み合わせによる4つのケース(第3表参照)について、数値シミュレーションによるIPとHPの経時変化の計算結果を第10図にまとめて示す。

今回の追跡法解析の例として、特に各パラメーターの初期値が $M0=60 \times 10^8 \text{kg}$, $R=0.30$, $H1=250 \text{ kcal/kg}$,



第9図 σ_{IP} および σ_{HP} を目的関数とした大沼地域ヒストリーデータの投網法プログラムによる順解析結果：最適パラメーター値を用いたタイムステップ数/年が経時変化シミュレーション結果(IP, HP)に及ぼす影響のテスト(各年毎にIP, HPの平均値を表示)

Fig. 9 Forward analysis results of Onuma history data by the cast-net method program using σ_{IP} and σ_{HP} as objective functions: Tests for time-step change effect on simulated temporal changes of IP and HP with the optimum solution parameter values (annual average values for IP and HP are shown).

$I1=0.120 \text{ mg/kg}$ の場合(no. 1001)の追跡結果を $M0-R$ 平面, $H1-I1$ 平面に投影して第11図(A)および(B)に示す。なお、各パラメーター $M0$, R , $H1$ および $I1$ は次元の異なる数であり、また各パラメーターの値間隔の大きさは任意にとられているので、追跡の経路には絶対的な意味はない。第12図にはこの場合の追跡ステップ数の増加による σ_{IP} と σ_{HP} との変化を示す。さらに、第3表に示す4つのパラメーターの初期値の大小組

地熱発電所生産流体化学組成変化の順解析 (茂野ほか)

第2表 大沼地熱発電所のヒストリーデータ (IP, HP) に適用された単一ボックスモデル数値シミュレーション投網法順解析における仮定パラメーター値, 目的関数およびプログラム実行結果による抽出ケース率の一例 (第6図-第7図参照)

Table 2 An example of cast-net method forward analysis using single-box-model numerical simulator for the history data (IP and HP) from the Onuma geothermal power plant: Assumed parameter values, objective functions and ratio of selected cases by the program execution (see Figs. 6 and 7).

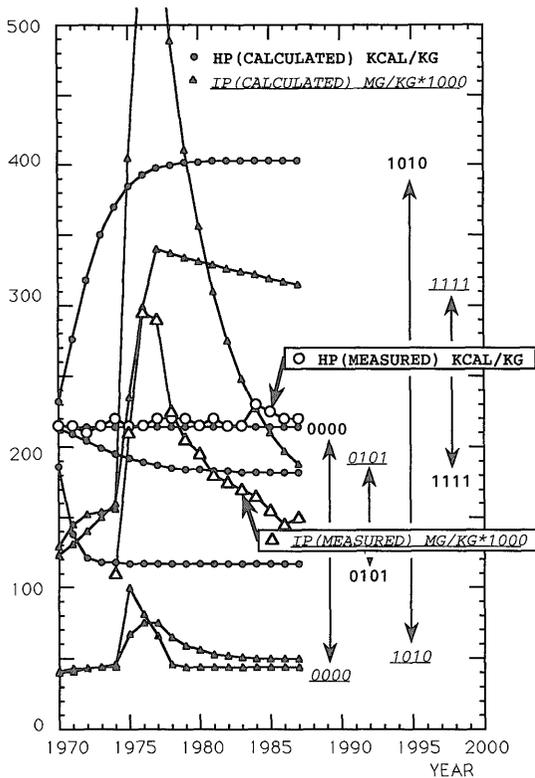
(1) Run number: N-124					
(2) Assumed parameter values:					
		Minimum value	Maximum value	Step value	Numbers of cases
M0	$\times 10^8 \text{kg}$	5	75	5	15
R		0.05	0.95	0.05	19
H1	kcal/kg	250	450	10	21
I1	mg/kg	0.050	0.150	0.005	21
(3) Objective functions: $\sigma_{HP} \leq 20$ and $\sigma_{IP} \leq 15$					
(4) Total numbers of simulated cases:				125,685	
Suitable cases for the objective functions:				70	
Suitable case ratio:				0.000557	

第3表 大沼地熱発電所のヒストリーデータ (IP, HP) に適用された単一ボックスモデル数値シミュレーション追跡法順解析におけるパラメーター初期値の組み合わせ例(第10図-第13図参照): (A)ケース番号の各位数字と各パラメーターの初期値との関係, (B)解析を行ったケースの番号と解析結果図番号との関係

Table 3 Examples of pursuit method forward analysis using single-box-model numerical simulator for the history data (IP and HP) from the Onuma geothermal power plant: Initial parameter value combinations for Figs. 10 to 13; (A) Relations of digits of case numbers to initial values of the parameters; (B) Relations of the analyzed case numbers to the numbers of the output figures.

(A)	M0 $\times 10^8 \text{kg}$	R	H1 kcal/kg	I1 mg/kg			
0	15	0.30	250	0.040	(Lower value)		
1	60	0.90	450	0.120	(Higher value)		
(B) Case number				Fig. 10	Fig. 11- Fig. 12	Fig. 13
	M0	R	H1	I1			
1	0	0	0	0	★		★
2	0	0	0	1			
3	0	0	1	0			★
4	0	0	1	1			
5	0	1	0	0			
6	0	1	0	1	★		★
7	0	1	1	0			★
8	0	1	1	1			
9	1	0	0	0			
10	1	0	0	1		★	★
11	1	0	1	0	★		★
12	1	0	1	1			
13	1	1	0	0			
14	1	1	0	1			★
15	1	1	1	0			
16	1	1	1	1	★		★

* The case of this number is shown in the above figure(s).

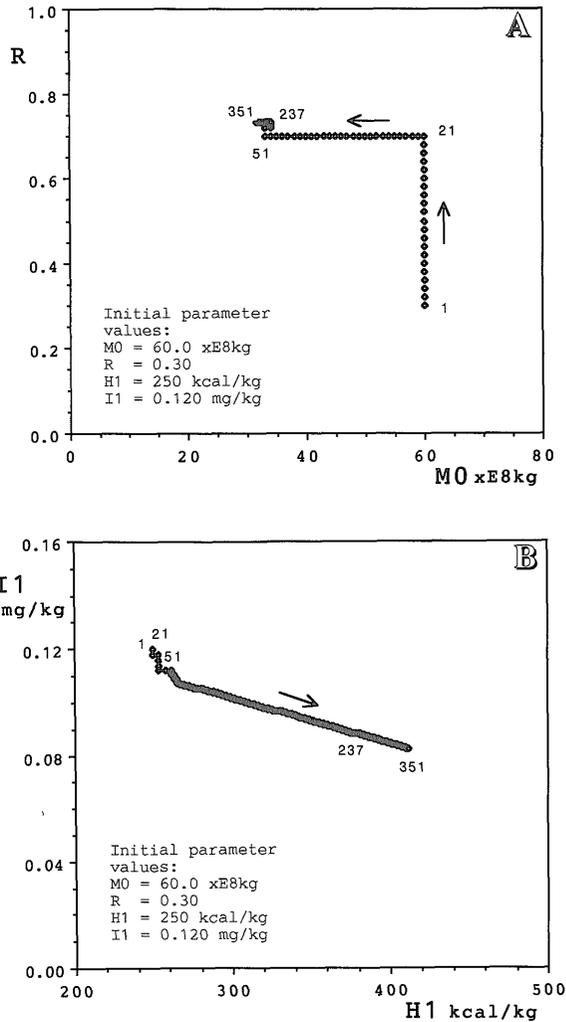


第10図 $\sigma_{IP} \cdot \sigma_{HP}$ を主・副目的関数とした大沼地域歴史リーデータの追跡法プログラムによる順解析結果：様々なパラメーター初期値組み合わせ4ケース(第3表参照)についてのIP, HPの経時変化シミュレーション結果

Fig. 10 Forward analysis results of Onuma history data by the pursuit method program using σ_{IP} with σ_{HP} as objective functions: Simulated temporal changes of IP and HP for four cases with varied initial parameter value combinations (see Table 3).

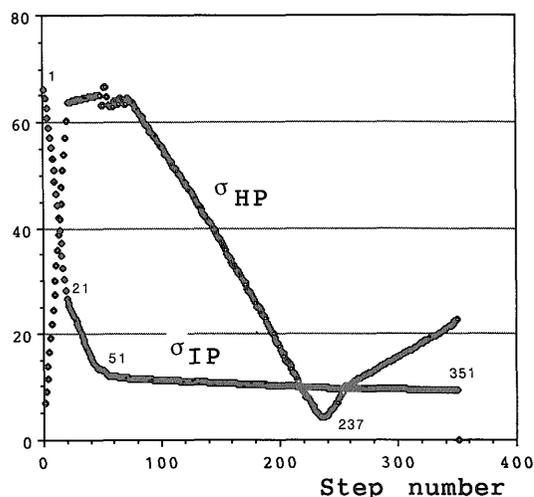
み合わせについて、8ケースの追跡法解析結果をM0-R平面およびH1-I1平面にまとめて投影して第13図(A)および(B)に示す。

これらの結果では、明かにすべての場合にM0とRについては4.2.2の投網法解析の最適値にほぼ収束している。一方、H1とI1の追跡値は、第11図(B)に示す負の傾斜の主収束線に到達後その線上をH1が増加しI1が減少する方向へと漸次動いて行く。しかし、この結果生じる主目的関数 σ_{IP} の微減は、第12図に示されるようにある点を過ぎると副目的関数 σ_{HP} の増加を伴うこととなる。このことから、上記の負の傾斜の主収束線にあ



第11図 $\sigma_{IP} \cdot \sigma_{HP}$ を主・副目的関数とした大沼地域歴史リーデータの追跡法プログラムによる順解析結果：パラメーター初期値組み合わせ1001の場合に進行したパラメーター値組み合わせ変化のM0-R平面投影(A)およびH1-I1平面投影(B)(図中の番号はステップ数)

Fig. 11 Forward analysis results of Onuma history data by the pursuit method program using σ_{IP} with σ_{HP} as objective functions: Pursuit trail for more suitable combinations of parameter values was projected on M0-R plane (A) and on H1-I1 plane (B) (initial parameter value combination is 1001; step numbers are shown in the figure).



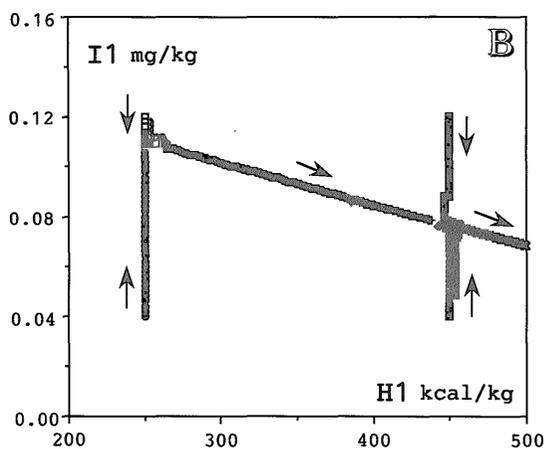
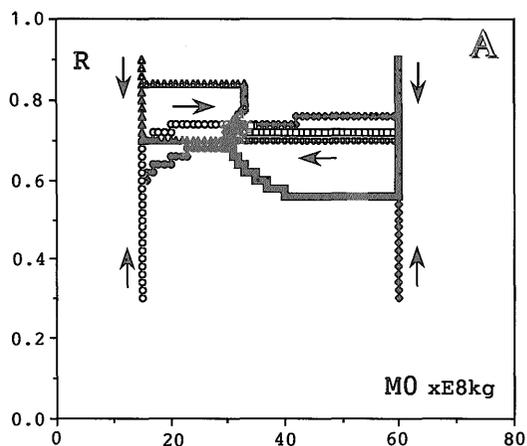
第12図 σ_{IP} ・ σ_{HP} を主・副目的関数とした大沼地域ヒストリーデータの追跡法プログラムによる順解析結果：パラメーター初期値組み合わせ1001の場合に進行したパラメーター値組み合わせ変化に伴う σ_{IP} 、 σ_{HP} の変化（傾斜変化の多くはステップ幅の調整により生じている）

Fig. 12 Forward analysis results of Onuma history data by the pursuit method program using σ_{IP} with σ_{HP} as objective functions: Changes of σ_{IP} and σ_{HP} along the pursuit trail for more suitable combinations of parameter values (initial parameter value combination is 1001; most inclination changes were caused by step size adjustments).

り、第12図に示される副目的関数 σ_{HP} が最小となる点（第12図のno. 237）が解として適当であると考えられる。この解は、4.2.2の投網法による最適値に良く一致している。

なお、シミュレーション値と実測値との経時変化の比較によれば、上記の負の傾斜の主収束線上を漸次右方向へ進むに従って第12図に示されるように σ_{IP} が次第に減少し σ_{HP} が増加する原因としては、乖離の大きな1974年のIPのシミュレーション値と実測値との不一致（第8図参照）がI1値の減少とH1値の増加により小さくなることの寄与が大きいようである。

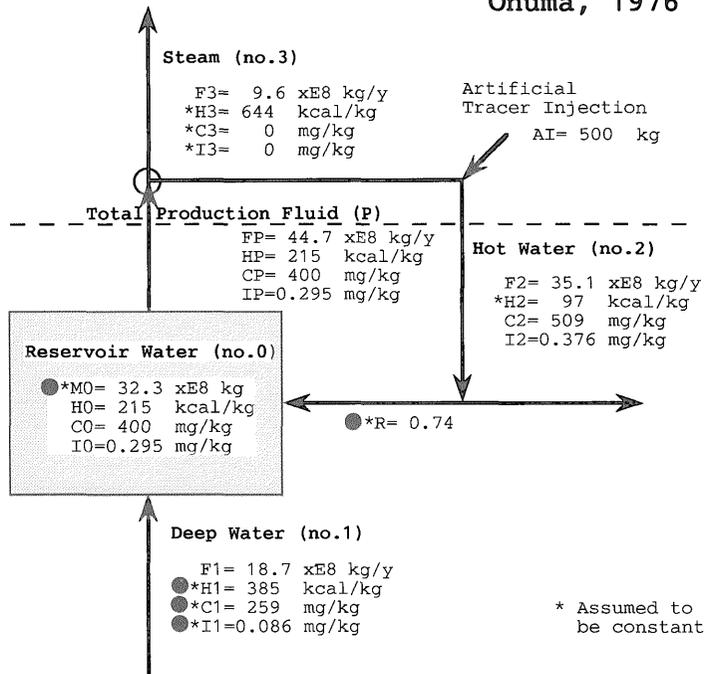
以上の解析結果を取りまとめて、大沼地域における開発された地熱貯留層に係わる水、熱エネルギーおよび熱水中のClとIの貯留と流れを、1976年を例として第14図に模式的に示す。



第13図 σ_{IP} ・ σ_{HP} を主・副目的関数とした大沼地域ヒストリーデータの追跡法プログラムによる順解析結果：パラメーター初期値組み合わせ8ケース（第3表参照）について進行したパラメーター値組み合わせ変化のM0-R平面投影(A)およびH1-I1平面投影(B)

Fig. 13 Forward analysis results of Onuma history data by the pursuit method program using σ_{IP} with σ_{HP} as objective functions: Pursuit trails for more suitable combinations of parameter values were projected on M0-R plane (A) and on H1-I1 plane (B) (for eight cases of initial parameter value combinations; see Table 3).

Onuma, 1976



● Estimated by this study

- | | |
|-----------------------------|---|
| F: Flow rate | *M0: Mass of convecting reservoir water |
| H: Specific enthalpy | *R: Recycling fraction of reinjected water |
| C: Cl concentration | *H1: Specific enthalpy of deep water |
| I: I concentration | *C1: Cl concentration of deep water |
| AI: KI tracer amount | *I1: I concentration of deep water |

第14図 化学的ヒストリーデータに基づく単一ボックスモデル数値シミュレーション順解析によって推定された大沼地域の熱水系についてのマクロパラメーター値の最適組み合わせ

Fig. 14 Optimum combinations of macro-parameter values for the Onuma hydrothermal system estimated by single-box-model numerical simulation forward analyses based on chemical history data.

5. 大沼地域熱水系についての考察

5.1 従来のボックスモデル解析結果との比較

人工トレーサー試験データおよび化学的モニタリングデータを用いて単一ボックスモデルに基づき大沼地域の開発された地熱貯留層について推定されたマクロなパラメーター値を、従来の報告と今回の数値シミュレーション順解析手法による結果とを比較して第4表に示す。

今回の結果に比較して伊東ほか(1978)が推定したM0値が2倍程度大きな原因は、貯留層へ流入しない一部の還元熱水の存在および貯留層に流入する本源地熱流体の

存在を組み入れない非常に単純なボックスモデルを使用したことにあると考えられる。

松葉谷・窪田(1987)が本源流体のパラメーター値を仮定して推定したM0値は、今回の結果等に比較して約30%小さい。この原因としては、解析の主な対象期間となった1976年以前の坑井配置では開発された貯留層の範囲が小さかったことを反映している可能性が高い。しかし、開発当初の貯留層の熱水の値を本源流体の値と仮定して経時変化が相対的に小さいCl濃度あるいは水のδ¹⁸O値の観測値を使用したために、解析の精度が十分ではなかった可能性も考えられる。

第4表 大沼地域熱水系について化学的ヒストリーデータに基づく単一ボックスモデル計算によって推定されたマクロパラメーター値の比較

Table 4 Comparisons of macro-parameter values estimated by single-box-model calculations using chemical history data for the Onuma hydrothermal system.

Study report		Ito <i>et al.</i> (1978)	Matsubaya and Kubota (1987)	Kubota and Matsubaya (1987)	Kubota <i>et al.</i> (1989)	Shigeno <i>et al.</i> (1992)
Applied data		IP 1975-1977	CP, HP 1970-1983?	IP, HP 1976-1983	IP, HP 1976-1983	IP, HP 1970-1987
M0	×10 ⁸ kg	50-80	20	30	31	32.3
R		—	0.71 (0.75)* ¹	0.70	0.70	0.74
H1	kcal/kg	—	—* ²	—* ²	230* ² (359)* ³	385
C1	mg/kg	—	—* ²	—	275* ²	259
I1	mg/kg	—	—	—* ²	0.110* ²	0.086

*¹ δ¹⁸O(H₂O) values of production fluids were used instead of CP.

*² Assumed with the data obtained at the initial stage of the reservoir development.

*³ Corrected value by simply imposing heat energy derived by cold sweep effect estimated for recycling reinjected hot-water on deep essential water inflow.

一方、1976～1983年を解析の対象期間とした窪田・松葉谷(1987)、窪田ほか(1989)の結果は、仮定された還元熱水によるコールドスイープ加熱の寄与を深部からの本源熱水のエンタルピーに加算すれば、本源熱水中のI濃度(I1)を除いて各パラメーター値が本報告の結果と10%以内の差異で一致している。大きな差異が認められるI1については、窪田・松葉谷(1987)、窪田ほか(1989)が1970～1974年間の蒸気生産と不用な生産熱水の地下還元によりすでに濃縮が進行している貯留層熱水のI濃度(1974年のIP実測値0.11 mg/kg)をそのままI1濃度の推定値(仮定値)としたことが主な原因であると考えられ、今回の解析結果(0.086 mg/kg)が正しい値により近いと思われる。なお、今回の解析によって得られたI1濃度に基づいて再解析を行えば、窪田・松葉谷(1987)、窪田ほか(1989)の他のパラメーター推定値は多少変化する可能性がある。

5.2 開発された貯留層中の地熱流体への熱の供給機構の問題

今回の単一ボックスモデル解析では、第1図および第2図に示すように開発された貯留層中の熱水への熱の供給機構については、非常に単純化して深部からの高温の本源熱水の流入-混合のみを考えている。すなわち、2.2(5)で述べたように貯留層中および周辺の岩石からのコー

ルドスイープ過程や深部熱源からの熱の伝導輸送等は無視できると仮定している。

窪田ほか(1989)は、大沼地域における開発当初の貯留層中の検層温度や一部の生産熱水が示したシリカ温度から本源流体の温度を230°Cと仮定して、残りの熱エネルギーの供給にはコールドスイープの寄与を考えている。しかし、開発された貯留層よりも深部からもたらされる大量の本源の熱水の温度は、貯留層の温度よりかなり高いことが予想される。

石戸(1991)は仮想的に外部から断熱・閉鎖した熱水貯留層についてコールドスイープに関する分布パラメーターモデル数値シミュレーション計算を行っており、地熱発電所の発電容量が50 MWe、初期の均一な貯留層温度が300°C、生産流体を全量地下還元した熱水の温度が100°C、還元井群と生産井群間の距離が1 km、断面積が1 km²の場合に、生産井における熱水の温度は遅い場合でも約7年で低下し始め、その後は急激に低下して行くことを示している。大沼地熱発電所(10 MWe)では、開発された貯留層(215～220°C)について還元井群と生産井群間の距離が500 m程度、断面積が700 m×700 m程度であり、生産井における熱水温度の時間変化については上記のモデルに基づくシミュレーション値が相似的にほぼ適用できると考えられる。大沼地域における生産蒸

気分離と還元熱水の不完全循環による貯留層熱水の減少に対して周辺からの低温地下水の流入を仮定すれば、上記の生産井における熱水の温度低下はより早く発生するであろう。しかし、大沼地域では第8図に示されるように18年間の生産ヒストリー(窪田ほか, 1989)を通じて生産井における熱水の著しい温度低下は観測されていない。このことは、大沼地域の開発された貯留層中の熱水への熱のマクロ的な供給機構として、コールドスweep過程よりも地下深部から上昇してくる本源熱水の混合の寄与が大きいことを示していると考えられる。

なお、上述したように大沼地域の開発された貯留層では地熱流体の生産に伴って還元熱水の還流とともに周辺から低温地下水が流入しており、地下深部からの大きな熱伝導輸送によって貯留層中の熱水の温度が保持されているという別の可能性も考えられる。しかし、大沼地域については地熱井を通じた流体および熱の生産に比較して発電開発地域近傍における温泉・噴気地・放熱地等の活動は小規模であり(窪田ほか, 1989, 第1図, 第2図参照), 開発当初の自然状態における地表への熱流出は小さかったと考えられるが貯留層の温度は230°C程度に過ぎなかったことから、上記の深部からの大規模な熱伝導輸送が存在するという可能性は低いと判断される。

5.3 大沼地域の熱水系深部像

第14図に示すように、本解析等で推定された大沼地域で開発・利用されている地熱貯留層中の対流熱水総量M0は約 $32 \times 10^8 \text{kg}$ である。大沼地熱発電所における平均的な1年間の地熱流体の総生産量約 $40 \times 10^8 \text{kg}$ はこの値に近く、1970年から1987年間の地熱流体の総生産量約 $680 \times 10^8 \text{kg}$ (第8図参照)はその20倍以上に達する。このような多量の生産によって生じる地熱貯留層からの流体質量の流出については、約22%の生産蒸気の系外への流出があるために不用な熱水の地下還元($R=0.74$)によっては約58%が補充されているに過ぎない。また、エネルギーの損失についても、5.2で述べたように不用な低温熱水(約97°C)の地下還元とそれに伴う岩石からのコールドスweep過程等によっては十分な補充は行われていないと考えられる。それにもかかわらず1970年から1987年間の地熱流体の生産量とその比エンタルピー(第8図参照)とが非常に安定していることから、大沼地域の開発された地熱貯留層の深部環境が非常に恵まれており、開発された貯留層に対して地熱流体の生産-還元による水質量と熱エネルギーの損失を補うように多量の高温熱水を供給していると推定される。

茂野・阿部(1981a, 1981b, 1982, 1987), Shigeno and Abe(1983)は、大沼地域周辺の地質構造、火山分布に加

えて同地域の温泉水および地熱井からの熱水が中性低塩濃度のNa-Cl型で1程度の異常に高いB/Clモル比を示すことに注目し、主に降水起源地下水を元として地下深部にまで熱水対流系の発達が進んでいると推定した。すなわち、本地域はN-S方向の花輪地溝帯の延長部に位置しており地下深部にまで透水性が高い断層系が分布し、東西両側に位置する第四紀の複成火山である八幡平および秋田焼山火山深部のマグマ溜りからの主に伝導的な加熱を受けて、空隙率・透水率が比較的高い基盤の古・中生代の成熟した海成の碎屑性堆積岩類(同岩類起源の変成岩類を含む可能性がある)中に本源的な地熱貯留層が発達しているという予想である。

上述した数値シミュレーション順解析等で示された大沼地域の開発された地下1000~1800mレベルの貯留層からの生産に対して流入する本源熱水の高い補充率(0.42)は、地下深部に本源的貯留層が発達しているという上記モデルと調和的である。また、今回の解析結果等で示された本源熱水の低いCl濃度、長期モニタリング結果の中で特に低異常のないpHや増加する傾向にある高いB/Cl比(窪田ほか, 1989)等は、上述した本源的貯留層が主に降水起源地下水を元として伝導型の加熱機構により基盤の古・中生代の海成碎屑性堆積岩類中に深く発達しているという考え方を支持している。なお、松葉谷・窪田(1987)は、大沼地域の熱水系は「きのこ型」であるという表現で地下深部に地熱流体の供給部があるという考え方を示している。

大沼地域の西方約1.5kmに隣接し同様に花輪地溝帯の延長部に位置する澄川地域においては、1992年現在地熱井の掘削と噴出試験が進められているが、澄川地域の貯留層の熱水は大沼地域のものと比較して温度がより高く(最高300°C以上)、同程度の高いB/Clモル比(0.2~1.0)を示すことが明かにされている(坂井ほか, 1986; Ueda *et al.*, 1991)。このことから、野田ほか(1987)も指摘しているように澄川地域についても大沼地域と同様に基盤の古・中生代の海成の碎屑性堆積岩類中に本源的な貯留層が存在している可能性が高いと思われる。なお、澄川地域は活火山である秋田焼山の北東斜面中腹に位置しており、南部では部分的に蒸気卓越系も発達している(坂井ほか, 1986; Maki *et al.*, 1988; 石戸, 1990)が、これは帽岩となる第四紀の厚い湖沼堆積物の分布とともに、Ueda *et al.* (1991) が示しているように秋田焼山火山深部のマグマ溜りから上昇してくる高温で酸性のマグマ起源流体が混入していることが原因であると考えられる。

澄川-大沼地域の地下の広域的な透水構造はN-S方向

に平行に伸びてブロック化していると推定されている (Maki *et al.*, 1988 b) が、澄川-大沼地域を通じて深い坑井の同一深度圧力は均一であり、広く両地域の貯留層には圧力伝播があることが推定されている (Maki *et al.*, 1988 a; 石戸, 1990)。地熱探査技術等検証調査に伴って澄川地域東部で新エネルギー・産業技術総合開発機構により掘削された SN-7 D 井 (深度約 2500 m, 新第三紀の花崗岩類に到達) (西ほか, 1989) では、噴出試験 (圧力遷移試験) により容積 3 km³ 以上の大規模な地熱貯留層の存在が推定されている (石戸ほか, 1989; 石戸, 1990)。これらの結果は、上述した大沼・澄川両地域の地下深部の地熱貯留層がマクロ的には 3 次元的に連結していることを示唆しており、さらに花輪地溝帯延長部全幅に広がる非常に大規模なものである可能性が高いことを示している。

6. おわりに

今回、地熱発電開発地域の熱水系に関するボックスモデルとして最も単純な単一ボックスモデルを取り上げ、不用な生産熱水の地下還元が行われている地熱貯留層および地下深部からもたらされる本源流体に関する 4~5 個のマクロなパラメータ値を化学的なモニタリングデータ等を利用して順解析的に求める方法 (投網法, 追跡法) を検討し、パーソナルコンピューターによる熱水系数値シミュレーターを核とした半自動的解析用のプログラムを開発した。次に、このプログラムを利用して大沼地熱発電所における生産-還元流体のヒストリーデータを解析し、特にスパイク状の特異な形状を示す人工トレーサーの長期ヒストリーデータ (I 濃度) を利用することにより、上記のマクロパラメータ値について良好な解を得ることができた。この結果は地熱貯留層に関するマクロ的な推定・評価法としての本手法の有効性を証明すると同時に、大沼地域の開発された貯留層の深部において、基盤の古・中生代の海成碎屑性堆積岩類中に大規模な本源的貯留層が発達するという概念的モデルを強く支持している。

今回開発した数値シミュレーションに基づく半自動的順解析手法は、より精度・信頼性の高い解析を可能とする点、非定常状態の解析を可能とする点、本源的熱流体の性状についての仮定を必要としない点等で従来のボックスモデルに基づく直截的な計算方法を改良するものであり、また生産流体の性状についての将来の変動予測をも可能とする点で意義があると考えられる。

従来より高温の熱水系型地熱資源の資源量評価においては、これを化石的資源と考えるかあるいは再生可能資

源と考えるか、すなわち地下浅部と深部における熱と水の起源および貯留と流れの関係が非常に重要な基本問題になっている。本報告で述べた既開発貯留層についての人工トレーサー試験データ、化学的モニタリングデータ等を基にしたマクロ的で動的な順解析手法は、浅部貯留層についての推定・評価に寄与するのみならずその深部に潜在する貯留層の探査・資源評価に貢献するもので、上記の問題を解明するための有力な手段として今後の利用が期待される。

しかし、本報告で検討した大沼地域の地熱系の浅部~深部環境は日本国内外においてかなり特異なものである可能性があり、今回の比較的単純な解析手法が他の地熱開発地域でも有効であるという保証はない。このため、今回開発した解析プログラムについては、今後(1)貯留層中の圧力減少と本源流体流入量との関係や沸騰・気液分離、浅部地下水浸入、熱伝導加熱等の寄与についてのモデルへの組み込み、(2)地熱貯留層の性状が水平分布的あるいは垂直分布的に不均一な場合の単一ボックスの分割あるいは小ボックスの連結によるモデル化等の改良・拡張を進めていく必要がある。今回開発した単一ボックスモデルに基づく数値シミュレーション順解析プログラムは分布パラメータモデルに基づく大型の熱水系~貯留層数値シミュレーターに比較すれば非常に小規模なもので、2.4 で述べたように現在非常に限定された環境下で作動している。しかし、上記の機能拡張を考えれば、今後解析アルゴリズムの修正・改良を図るとともに計算の大規模化・高速化を目的としてハードウェアおよびソフトウェアの充実化を図っていく必要があろう。

謝辞 石戸経士本研究グループ長には原稿について様々な御指摘・御教示を頂いた。本研究を進める過程では地熱熱部の矢野雄策・宮崎芳徳の両氏から各種の御助言を頂いた。また、「熱水系ダイナミクスに関する基礎的研究」の開始にあたっては、当時の金原啓司研究グループ長に大変御尽力頂いた。以上の方々記して厚く感謝致します。

文 献

- 秋林 智 (1982) 還元熱水の挙動調査。湯原浩三監修、地熱開発総合ハンドブック、フジテクノシステム、東京、p. 623-637.
- 地質調査所 (1987) 仙岩地熱地域における研究。地調報告、no. 266, 596 p.
- 藤井幸夫 (1982) 孔井相互影響調査。湯原浩三監修、

- 地熱開発総合ハンドブック, フジテクノシステム, 東京, p. 680-685.
- 福田道博・加藤恭子・糸井龍一・秋林 智 (1990) トレーサー試験記録の一解析法. 日本地熱学会平成2年度学術講演会講演要旨集, p. B3.
- Grant, M. A., Donaldson, I. G. and Bixley, P. F. (1982) *Geothermal Reservoir Engineering*. Academic Press, New York, 369 p.
- Horne, R. N. (1982) Geothermal reinjection experience in Japan. *Jour. Petrol. Technol.*, vol. 34, p. 495-503.
- 池内 研・能勢 盾・中西繁隆 (1990) トレーサー試験結果へのダブルポロシティモデルのマッチング. 日本地熱学会平成2年度学術講演会講演要旨集, p. B4.
- Inoue, K. and Shimada, K. (1985) Reinjection experiences in the Otake and Hatchobaru geothermal fields. *Proceedings 7th N.Z. Geothermal Workshop*, p. 69-74.
- 石戸経士 (1989) 地熱レザーバ評価とその歴史. 物理探査, vol. 42, p. 397-410.
- (1990) 地熱開発とレザーバ工学. 地熱, vol. 27, p. 73-92.
- (1991) 断裂型地熱レザーバでの cold sweep 過程. 日本地熱学会平成3年度学術講演会講演要旨集, p. A44.
- ・菊地恒夫・野田徹郎 (1989) 仙岩 SN-7D 井の圧力遷移テスト解析について. 日本地熱学会平成元年度学術講演会講演要旨集, p. A22.
- 伊東潤二・窪田康宏・黒沢昌志 (1977) 大沼地熱貯留層における地熱熱水の流れ. 地熱, vol. 14, p. 139-151.
- ・———— (1978) 大沼地熱発電所における地熱熱水のトレーサーテストと地熱貯留層および坑井仕上等の諸考察. 地熱, vol. 15, p. 87-95.
- 笠井加一郎・小田中浩一・千葉文彦 (1990) 葛根田地熱発電所の蒸気生産と貯留層管理 (1990). 地熱, vol. 27, p. 1-22.
- ・猿舘正大 (1986) トレーサーテストによる貯留層内の熱水流動解析. 日本地熱学会昭和61年度学術講演会講演要旨集, p. 16.
- 小倉啓明・新堀雄一・千田 信 (1991) 断裂型地熱貯留層におけるトレーサー応答解析. 地熱学会誌, vol. 13, p. 95-105.
- 窪田康宏 (1979) 八幡平北部地区の地熱変質. 地熱, vol. 16, p. 196-210.
- (1985) 八幡平-焼山北部地域の地熱系モデル. 日本地熱学会誌, vol. 7, p. 231-245.
- ・畠山和義・番場光隆・加藤久遠 (1989) 大沼地熱発電所における地熱流体の化学組成変化とレザーバ管理. 地熱, vol. 26, p. 1-20.
- ・松葉谷治 (1987) 化学成分濃度と同位体比の変化を指標とした大沼地熱レザーバのボックスモデル(2). 日本地熱学会昭和62年度学術講演会講演要旨集, p. 84.
- ・上田 晃・有木和春 (1991) スチームキャップを伴うレザーバのランプトパラメーターモデル. 日本地熱学会平成3年度学術講演会講演要旨集, p. A42.
- Maki, H., Ishido, T., Kubota, Y., Maeda, T., Ariki, K. and Nakai, T. (1988) A modeling study of the natural state of the Sumikawa field. *Abstracts Internat. Symp. on Geothermal Energy, Kumamoto and Beppu, Japan 1988*, p. 148-151.
- , Pritchett, J.W. and Grag, S.K. (1988 a) Subsurface pressure distribution and the hydrology of the Sumikawa geothermal field. *Abstracts Internat. Symp. on Geothermal Energy, Kumamoto and Beppu, Japan 1988*, p. 152-155.
- , ———— and ———— (1988 b) Interpretation of a pressure interference test of the Sumikawa geothermal field. *Abstracts Internat. Symp. on Geothermal Energy, Kumamoto and Beppu, Japan 1988*, p. 557-560.
- 松葉谷治・窪田康宏 (1987) 化学成分濃度と同位体比の変化を指標とした大沼地熱レザーバのボックスモデル(1). 日本地熱学会昭和62年度学術講演会講演要旨集, p. 83.
- 宮崎芳徳 (1991) 包蔵水量法による地熱資源評価の研究. 地調報告, no. 275, p. 311-328.
- 村田 誠 (1991) 地熱発電地域に行く(その3), 澄川地区における地熱開発の現状. 地熱エネルギー, vol. 16, p. 75-83.
- 日本数学会編 (1985) 数学辞典, 第3版. 岩波書店, 東京, 1609 p.

- 新堀雄一・小倉啓明・千田 信 (1991) 二層亀裂モデルによるトレーサー応答解析—二つのピークを持つ応答の場合。日本地熱学会平成3年度学術講演会講演要旨集, p. A34.
- 西 祐司・三村利光・阿部昭夫・高木慎一郎・玉生志郎・野田徹郎 (1989) 地熱探査技術等検証調査・仙岩地域, N61-SN-7 坑坑井調査。地熱エネルギー, vol. 11, p. 2-26.
- 野田徹郎・阿部喜久男・竹野直人・高橋正明 (1987) 坑井水化学調査から推定される仙岩地域の熱水系。地調報告, no. 266, p. 295-319.
- 坂井定倫・窪田康宏・畠山和義 (1986) 秋田県北八幡平・澄川地区の地熱資源探査。地熱, vol. 23, p. 281-302.
- Sakai, Y. and Matsunaga, E. (1988 a) Ohnuma geothermal power plant. In *Geothermal Fields and Geothermal Power Plants in Japan, Internat. Symp. on Geothermal Energy, Kumamoto and Beppu, Japan 1988*, p. 57-63.
- ・ and ————— (1988 b) Sumikawa geothermal field. In *Geothermal Fields and Geothermal Power Plants in Japan, Internat. Symp. on Geothermal Energy, Kumamoto and Beppu, Japan 1988*, p. 77-82.
- Sakai, S. and Mori, H. (1981) Ohnuma geothermal field. In *Field Excursion Guide to Geothermal Fields of Tohoku and Kyushu, Symp. on Arc Volcanism, Tokyo and Hakone 1981*, p. 21-29.
- 関根英樹・戸田忠康 (1990) 地熱貯留層空隙内の流体移動とトレーサー解析。日本地熱学会平成2年度学術講演会講演要旨集, p. B2.
- 茂野 博 (1988 a) 人工トレーサーを利用した熱水系の化学的調査・評価手法(1)。地質ニュース, no. 411, p. 22-34.
- (1988b) 人工トレーサーを利用した熱水系の化学的調査・評価手法(2)。地質ニュース, no. 412, p. 44-52.
- (1989) 人工トレーサーを利用した熱水系の化学的調査・評価手法(3)。地質ニュース, no. 413, p. 46-59.
- Shigeno, H. (1992) Applications of geochemistry in geothermal-field development of Japan. In D'Amore F. ed., *Applications of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*, U. N. Institute for Training and Research, New York, p. 365-382.
- 茂野 博・阿部喜久男 (1981 a) B/C1 比による地熱貯留岩の推定。日本地球化学会年会講演要旨集, p. 195-196.
- ・————— (1981b) 仙岩地域における熱水系の化学調査研究 (昭和55年度)。昭和55年度サンシャイン計画研究開発成果中間報告書, 地熱探査技術等検証調査 仙岩地域, p. 111-129.
- ・————— (1982) 仙台地域における熱水系の化学調査研究 (昭和56年度)。昭和56年度サンシャイン計画研究開発成果中間報告書, 地熱探査技術等検証調査 仙岩地域, p. 245-266.
- Shigeno, H. and Abe, K. (1983) B-Cl geochemistry applied to geothermal fluids in Japan, especially as an indicator for deep-rooted hydrothermal systems. *Extended Abstracts of 4th Internat. Symp. on Water-Rock Interaction, Misasa, Japan 1983*, p. 437-440.
- 茂野 博・阿部喜久男 (1987) 温泉・噴気の化学に基づく仙岩地域熱水系の概念的モデル。地調報告, no. 266, p. 251-283.
- ・高橋正明・野田徹郎 (1989) 仙台地域の噴気・地熱井ガスの化学組成とその解釈。日本地熱学会平成元年度学術講演会講演要旨集, p. B34.
- ・—————・————— (1991) 単一ボックスモデル熱水系数値シミュレーターを用いた生産—還元流体化学組成変化の順解析 (大沼地域への試用)。日本地熱学会平成3年度学術講演会講演要旨集, p. A43.
- Shigeno, H., Takahashi, M. and Noda, T. (1992) Inactive gas ratios of geothermal gases from the Sengan field, Northeast Japan, and their implications in origins of hydrothermal systems. *Proceedings 7th Internat. Symp. on Water-Rock Interaction, Park City, Utah 1992*, p. 1353-1356.
- 島田寛一・藤野敏雄・古賀昭人・広渡和緒 (1985) 八丁原地熱地帯の酸性熱水の成因と対策。地熱, vol. 22, p. 276-292.

- Ueda, A., Kubota, Y., Katoh, H., Hatakeyama, K. and Matsubaya, O. (1991) Geochemical characteristics of the Sumikawa geothermal system, northeast Japan. *Geochem. Jour.*, vol. 25, p. 223-244.
- Whiting, R. L. and Ramey, H. J. Jr. (1969) Application of material and energy balances to geothermal steam production. *Jour. Petrol. Technol.*, vol. 21, p. 893-900.
- 与良三男・脇田健治・本多朔郎(1973) 秋田県大沼地熱地域の探査. *地熱*, vol. 10, no. 4, p. 27-44.
- ・渡部憲一・伊東潤二・脇田健治・窪田康宏(1977) 八幡平北部地域の地熱系. *鉱山地質*, vol. 27, p. 233-244.
- Yuhara, K. and Akibayashi, S. (1983) Flow of reinjected water and transmissibility distribution estimated by a tracer test in Otake geothermal reservoir, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 16, p. 205-219.

(受付: 1992年5月20日; 受理1992年6月24日)