

## 地下における熱と水の流れの定量的解明を目指して

### —温泉科学の進め方の一試論—

江 原 幸 雄<sup>1)</sup>

## Toward the Quantitative Study of Hydrothermal Systems

### —An Approach to Understand Hydrothermal Systems—

Sachio EHARA<sup>1)</sup>

#### Abstract

The quantitative understanding of hydrothermal systems is very important in order to advance geothermal sciences including hot spring sciences. In this paper, such a discussion is described from the viewpoint of numerical modeling techniques and a case study of the geothermal system at the central part of Kuju volcano, central Kyushu, Japan. The construction process of the numerical thermal models is shown as follows: The first step is construction of a conceptual thermal model based on the geological, geochemical, geophysical and hydrological data, the second is construction of the natural state numerical model, and the third is construction of the history matched numerical model. The final history matched thermal model can estimate geothermal potential quantitatively and also predict changes in the physical state of the geothermal reservoir during exploitation. Furthermore, it will contribute to symbiotic utilization of geothermal energy, that is, symbiotic utilization between geothermal power generation and hot spring utilization.

Key words : Hydrothermal systems, Conceptual model, Numerical model, Hot spring sciences, Geothermal reservoir

#### 要 旨

温泉を含めた地下の熱と水の流れに関する科学を進めるためには、定量的な熱水系モデルの構築が重要であることを、一般的なモデル作成プロセス、および九重火山中心部の地熱地域の例に基づいて述べた。地質学、地球化学、地球物理学、水理学等の観測データを統合し、熱水系概念モデルを作り、さらに、それに基づいて、数値モデルを作成すること、特に、自然状態モデル作成後、ヒストリーマッチングのプロセスを経た数値モデルを作成することの重要性を指摘した。そして、そのような定量的モデルに基づいて、温泉現象の本質に迫るとともに、温泉資源量評価あるいは利用に伴う状態変化に関する科学的な予測が可能となり、温泉の持続可能な利用への貢献ができ、さらに、地熱発電利用と温泉利用との共生にも貢献できるとの見解を述べた。すなわち、地球の熱の適切な利用を行っていく上でも、温泉も含めた地球の熱と水

<sup>1)</sup>九州大学大学院工学研究院 地球資源システム工学部門 地球熱システム学研究室 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地。 <sup>1)</sup> Laboratory of Geothermics, Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, Motoooka 744, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan.

の流れに関する科学の進展が必要である。

キーワード：熱水系，概念モデル，数値モデル，温泉科学，地熱貯留層

## 1. はじめに

「温泉科学の進め方」という大きなテーマの中での議論を日本温泉科学会会長 西村 進先生から頂いた。このテーマを包括的に議論するのは著者の能力の範囲を超えるので、これまで著者が携わってきた範囲から議論してみたい。著者は、現在、地熱の専門研究者との言われ方もするが、広く、火山・地熱・温泉を含めた地球の熱に関する科学、さらに、防災も含めたその利用に関する工学に関心がある。そこでは地熱・温泉をことさら分けて考えることはしていない。したがって、本論文でも、日本語のタイトルでは「温泉科学」という表現を使っているが、英語のタイトルは「Hydrothermal systems」としている。このような立場からは、現在、共生がうまくいっている地域も多いが、一方、地熱発電利用と温泉利用とが共生の関係にない地域が少なくないことを非常に残念に感じている。地熱と温泉は本来対立する概念ではなく、基本的に根を同じくするもの（化学成分を溶かし込んだ温められた水）が、科学的、工学的、社会的あるいは経済的環境の差異に基づき、異なる利用法を展開しているのであって、人間の知恵により、共生が可能と著者は考えている。本論文が、この共生というテーマにも貢献することを期待している。

## 2. 地下における熱と水の流れ（熱水系）の議論に関する基本的な考え方

本論文では、温泉を含めた地下における熱と水の流れ、すなわち、熱水系に関して、主として地球物理学および地熱貯留層工学的観点から議論する。熱と水の流れは、地下の特定のある場の中で、それぞれの場に応じて、特有な状態が出現するものであり、その場の構造がどのようなものであるかが極めて重要であり、したがって、地下構造の議論を外すことはできない。

また、熱と水の流れの議論を行うに当たって、順を追って進めることが重要であり、最終的には、定量的な議論をする必要がある。そのような一例として、モデル作成の一般的アプローチの例を Fig. 1 に示した (Elders, 1991)。すなわち、熱水系を理解するためには、まず、地質学、地球化学、地球物理学、水理学的データを収集・統合し、特定の場における熱と水の流れに関する概念モデルを構築する必要がある。この概念モデルの構築というプロセスは、従来から、温泉科学の分野でも多くの地域で試みられてきている。

この概念モデルの構築は極めて重要である一方、この概念モデルが不適切なものであれば、後に述べる数値モデルの構築が陳腐なものになったり、誤った最終結論に至る場合もありうる。もちろん、不適切な概念モデルは数値モデル構築の段階で、修正を余儀なくされることにもなる。

さて、次に数値モデル構築について述べる。これは概念モデルに基づいて、定量的なモデルを組み立てることである。多くの場合、地下の流体が利用される前の状態、すなわち、自然状態モデルの構築から始められる。概念モデルには、ある地下構造の中での熱と水の流れに関する考え方が示されているが、単に、概念的な事柄だけではなく、温度分布、圧力分布、放熱量、湧出量、放出される流体の気液比のような数値データも含まれる。数値モデル作成にもいろいろな段階がある (Elders, 1991)。地表からの放熱量・湧出量データに基づいて、適当な熱水系モデルを仮定して、各素過程において、どのような流れ、状態が可能かを議論するものから（これは「熱収支モデル」とも言える。たとえば、江原ら、1981、後述の5章で示す）、対象地域を3次元的なブロック構造で表現し、3次元の多相（液相、気相、気液2相、超臨界相等）の熱と流体の流れを再現するものまであ

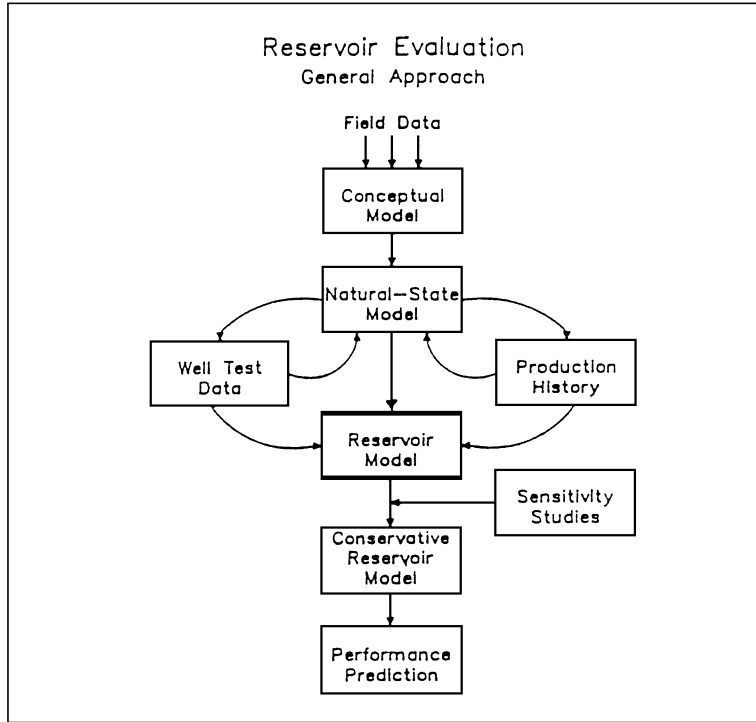


Fig. 1 A generalized approach to reservoir evaluation (Elders, 1991)

る (たとえば, Ehara *et al.*, 2005, 後述の 5 章で示す)。

現在, 数値モデルの作成と言えば, この 3 次元数値モデルをコンピュータを使って構築することが普通となっている。現実の地下構造の下で, より詳細なモデルを作るためには, この 3 次元数値シミュレーション法が最も優れているが, 問題によっては, それより低位のモデル (たとえば, 地熱貯留層を一樣なパラメータで表現するランプトパラメーターモデル) でも, 有効な議論が可能である。3 次元数値シミュレーションモデルを構築する場合においても, 種々のレベルの数値モデルを構築することは重要である。適切なモデルが構築される場合には, より低位のモデルでも, 本質的な点に関しては, 3 次元数値モデルと同様な性質を導き出すことが可能である。

さて, 適切な自然状態の数値モデルが構築されればそれで良いかと言えばそうではない。この自然状態モデルは, 数学的に厳密な意味ではないが, 「必要条件は満たしているが十分条件は満たしていない」と言える。たとえば, この自然状態モデルを用いて, 現実の利用状況を再現してみるとよくわかる。利用開始前のデータを説明できる自然状態モデルを使って, 利用開始後の実際のデータを説明しようとするとき多くの場合うまくいかない。すなわち, 観測データを説明できないのである。ここが「十分条件を満たしていない」と言われる所以である。そこで, それを解消するために, ヒストリーマッチングというプロセスが取られる (Fig. 1)。これは, すでに得られた観測値を説明できるように, 自然状態モデルの透水係数等の諸パラメータ, あるいは境界条件等を修正し, 観測値を説明できるようなモデルに修正するプロセスである。そして, 必要な精度で観測値を説明できるデータを, 実際的な意味における, 熱水系の数値モデルとするのである。

ところで, 上述のような意味での, 数値モデルの作成は, 従来の温泉科学ではあまり試みられてこなかったのではないと思われる。このような数値モデルの構築は持続可能な温泉利用において

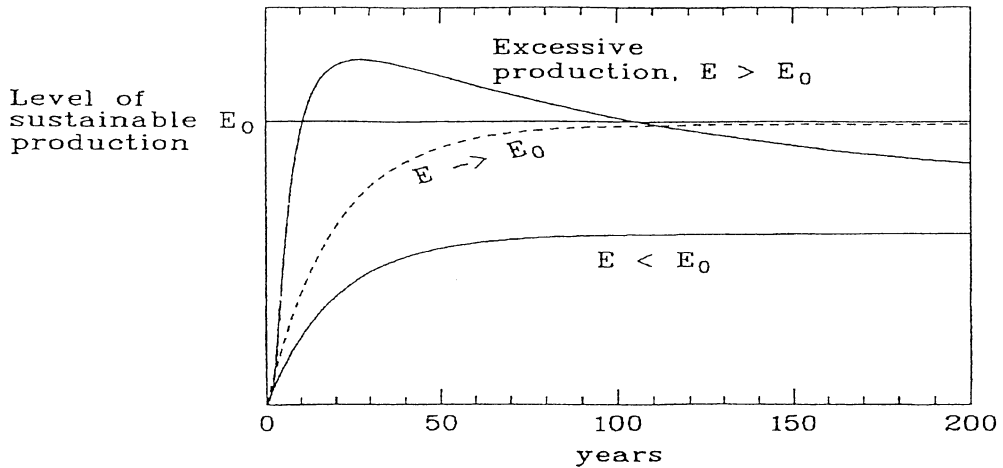


Fig. 2 Sustainable production of geothermal energy from an individual geothermal system.  $E_0$  shows the level of sustainable production rate. Excessive production rate  $E$  is  $E > E_0$ . The value of  $E_0$  is not known a priori, but it may be estimated on the basis of available data, i.e. through monitoring and modeling of the geothermal system (Axelsson *et al.*, 2003)

も重要な意味を持つと考えられる。ある温泉地域の適正な利用量を定量的に理解していく上でも、ヒストリーマッチングのプロセスを経たモデルの作成は重要であると考えられる。個々の温泉井における温度・水位等の変化だけではなく、その温泉地域の熱水系全体の定量的理解に基づいて、利用可能な量を把握していくことは、持続可能（長期間安定）な温泉利用を考えていく上で、非常に重要と考えられる。そこで、以下では、持続可能な温泉利用を考える上で、重要な概念を紹介したい。なお、この考え方は、持続可能な地熱発電を考えるにあたって提案されたモデルであるが、温泉地域にもそのまま当てはまる。

ある温泉地域（一般に地熱地域）はその地域固有の、長期間安定して利用可能な適切な利用量  $E_0$  というものが考えられる (Fig. 2, Axelsson *et al.*, 2003)。この  $E_0$  より過大な生産をすれば、短期間はそれを実現できるが、やがては生産量が減少し、持続可能な生産は困難になる。一方、 $E_0$  より小さな生産であれば、長期間安定した生産が可能であるが、温泉資源の一部のみを使用していることになり、一般には経済性も十分とは言えないであろう。したがって、経済的にも一定の意味があり、長期間にわたって安定な生産を続けるためには、開発のより早い段階で  $E_0$  を見出し、その後  $E_0$  を超えない利用を続けることが重要である。この  $E_0$  を開発利用の前に知ることができれば、最も望ましい。しかしながら、これを事前に正確に知ることは一般に困難であり、それを知るためには、当初は、控えめな見積もりからはじめ、生産に伴う温泉帯水層の反応を見ながら、可能な場合は、段階的に増加していくという考え方（段階的開発）が望ましいと考えられる。地熱開発もこれまでの経験に基づいて、このような考え方が望ましいという考え方が定着しつつある。この  $E_0$  を見出すプロセスにおいても、その精度を上げるためには、ヒストリーマッチングというプロセスが重要となる。

### 3. 地下構造調査と概念モデル作成

前節で述べた3次元数値モデル作成において、最初に行われるのは、対象地域の3次元地下構造モデルの作成である。まずはじめに、対象地域を3次元的な直方体に切り出す。この場合、熱と水

の流れの状態を知りたい領域だけを切り出すのではなく、それを取り囲む、十分広い領域を切り出す。これは、境界条件の影響をなるべく小さくしたモデルを作るために、周辺に緩衝領域を取ることが必要だからである。そして、次に、緩衝領域を含めた直方体の領域内を必要な小さな直方体ブロックに分割する。一般には緩衝領域や周辺部分では大きなブロック分割をし、中心部では小さなブロック分割を行う。この各ブロック（岩石ブロックと言ってもよい）に対して、透水係数、空隙率、熱伝導率等の岩石物性値を与える。これらは、調査データに基づいて与える。一般に、地表調査においては、地質学的、地球化学的、地球物理学的、水理学的調査と多様な調査が行われる。さらに、坑井調査が行われ、地表調査に基づいて推定された物性に関する地下データだけでなく、坑井を使った調査により、実際の地下の透水係数等のデータが得られる。そして、測定値に基づいて温度、圧力等の値も与えることができる。このように、各ブロックに与える物性データ等は調査に基づいて与えられるが、一般には調査には限りがあるので、種々の推定によって、岩石物性値が付与されるブロックもあることになる。ここに数値モデルの1つの限界がある。なお、一般に、熱と流体の流れに関する数値モデル構築において、最も大きな影響を与えるパラメータは岩石の透水係数である。そして、これは一般に、調査結果から得にくいパラメータでもある。したがって、数値モデルの作成においては、透水係数は変数として扱い、温度や圧力等の観測値に適合するように決定される場合が多い。したがって、多くの場合、透水係数の与え方によって、モデルがどのように影響を受けるかという見積もり、すなわち、感度試験が行なわれる。そして、たとえば、資源量評価を行うような場合は、安全側の控えめな値が使われることになる (Fig. 1)。

また、観測値に基づいて、放熱量、湧水量等の境界条件も与えられる。これらの観測値も、一般には、高精度で得ることが困難な場合が多く、観測値の精度を十分考慮して、数値モデルの構築を行う必要がある。また、一般に、数値モデルを作成するに当たっては、境界条件として、領域境界に位置する特定のブロックから、ある流量、あるエンタルピーの流体を注入することが行なわれる。これによって、高温領域を実現する。

#### 4. 数値モデルによる熱と流体の流れの挙動解明

分割された各ブロックに岩石物性値、温度等の状態値が与えられ、流量等の境界条件が与えられれば、計算を実行することにより、諸観測値を満たすモデルを作ることができる。個々の問題に応じて、熱と水の流れに関する微分方程式を作り、それを解くことも行われなくてもいいわけではないが、現在では、非定常3次元多相の状態を扱うことのできるコンピュータプログラム（数値シミュレータ）が整備され、特殊な問題を除いて、数値モデルの作成には、汎用の数値シミュレータ（STAR, TOUGH2やHYDROTHERM等）が使われる。なお、数値モデル作成における問題点は、数値シミュレータそのものにあるというより、精度の高いモデルを作成するために、どれほど高密度で精度の高い観測値があるかということに絞られる。かつ、より長時間の観測値があることが重要である。そして、特に重要なパラメータは岩石（地層）の透水係数である。個々の岩石試料の透水係数を測定することは可能であるが、それは、個々のブロックレベルの透水係数とは異なり、また、一般に、地層の透水係数は断層の存在等マクロ的な環境に影響を受けるので、透水係数の推定には困難が多い。また、坑井試験により、具体的な透水係数を得ることができるが、それでも、得られるのは坑井周辺に関する値である。このようなことから、透水係数は、個々の岩石試料に関する測定値、坑井試験による測定値等に基づいて推定値を与え、これを1つのパラメータとして変化させ、温度・圧力等の観測値に適合する透水係数を求めるプロセスとなることが多い。

自然状態モデルを作成するに当たっては、与えられたパラメータの元で、一般に数万年～数10万



年程度の期間にわたって、計算を実行し、ほぼ定常状態に達したもののうち、諸観測値を最もよく説明するものを、自然状態モデルとすることになる。そして、経時変化データがある場合には、それに適合するようなモデルを作成することになる。多くの場合、それは1回で済むことはなく、ブロックのパラメータ（多くの場合、透水係数）を修正したり、境界条件を修正したりして、経時変化データをも説明することができる数値モデルを作成する。このようなヒストリーマッチングのプロセスを経たモデルを地熱貯留層モデル（熱水系モデル）と言う場合もある（Fig. 1）。なお、ここでは、自然状態モデルは貯留層評価（資源量評価や変動評価）を行うための前段としての位置づけとしているが、見方を変えて、ある初期条件の下で熱水系がどのように発達していくかという問題に適用可能である。このような考え方に基づいた熱水系発達の議論が今後活発に行われることを期待したい。このような問題の先駆的研究として、由佐（1983）によるものが挙げられる。この研究では、火山体中心部にある熱源の単調な冷却の中で、側方流動の発達に伴って、山腹において、地熱地域が移動しながら繰り返し発生するという興味深い現象が指摘されている。

さて、上述したように、ヒストリーマッチングにより検証を受けた熱水系数値モデルは現象をよく説明することができるという位置付けであるが、このモデルの役割は、自然現象の理解という、自然科学的意義だけではない。実は、このモデルを使って、利用可能な資源量の評価や、利用に伴う変動予測といった大きな役割がある。実用的な数値シミュレータが存在しなかった地熱開発初期においては、掘削された坑井の噴出試験による実測噴出量のみによって、生産規模を予測したが、現在では、実測噴出量も説明する地熱貯留層全体に関するモデルに従って、資源量を評価できるようになっている。また、同様に、地熱開発初期においては、生産に伴う貯留層の変化の予測は困難であったが、現在では数値モデルに基づいて可能となってきている。

このように数値シミュレータの出現はわれわれの熱水系理解に大きく貢献するようになってきている。従って、数値シミュレータを、地熱発電利用だけでなく、温泉利用の場合にも積極的に利用し、自然現象のより高精度な把握を行い、適切な利用を図っていくことが重要と考えられる。このような共通の理解の基盤は、地熱発電利用と温泉利用との共生にも貢献できるものと考えられる（日本地熱学会 地熱発電と温泉との共生を検討する委員会、2010）。

このような定量的な熱水系モデルを多く持ち、それらを総合化していくことによって、熱水系理解に新しい視点が得られるのではないかと考えている。特に、時間のパラメータを組み込んだ、熱水系の発達という観点からの定量的な研究の進展を期待したい。

## 5. 数値モデル作成の例—九重火山中心部の例—

さて、以上では、地熱地域における熱と水の流れの取り扱いのプロセスに関する一般的な考え方を述べた。現在では、このような考え方に基づいて、特に、地熱発電所地域においては、精緻なモデルが構築され、資源量評価とともに、将来予測も行われている（たとえば、Yahara and Tokita, 2010）。しかしながら、本章では、著者が関与した、初歩的なモデルからより進んだモデル作成にいたるプロセスを、大分県九重火山中心部地域（九重硫黄山の噴気地域を中心とする地域）を例として紹介したい。これは、各地熱地域における熱水系の理解（モデル作成）の程度はいろいろな段階にあると理解され、九重火山のケースはその進化プロセスを示す1つのよい例になるのではないかと考えるからである。精度の高い数値モデルが各地熱地域で構築されるようになるならば、温泉を含む地球の熱に関する科学は大いに進展すると考えている。なお、多くの地熱地域における現実の数値モデルは多数のブロックからなる複雑なものが多いが、本論文で示す九重火山の例は比較的簡単なものである。

さて、九重火山は大分県西部にあり、1995年に水蒸気爆発を起した活火山である。その中心部星生山の北東山腹には九重硫黄山と呼ばれるわが国でもっとも活発な噴気地域（直径約500m内にA, B, C, 3つの噴気地域が存在している）が存在している。噴火前に最高噴気温度は400°Cを超えていたことが確認されている。なお、1950年代後半には508°Cという温度が観測されている（Mizutani *et al.*, 1986）。また、自然放熱量は約100 MWで、その大部分は噴気によって放出されていた（江原ら, 1981）。この領域には深いボーリング孔がなく、これまでに述べてきたような適切なヒストリーマッチングを経た数値モデリングが可能ではない面があるが、1995年の水蒸気爆発は、以下に述べるように「熱水還元をしない蒸気生産」になぞらえることもでき、一定の意味のあるモデル構築が可能ではないかと考えた。

九重硫黄山地域では、まず噴気地域およびその周辺地域で熱的観測を行い、噴気地域から放出される自然放出量（噴気, 温泉, 熱伝導による）・噴出水量, 周辺地域の地殻熱流量等を評価した。そして、それらの観測値をもとに、マグマ, 地熱貯留層に関する推定にしたがって、熱収支に基づいた熱水系モデルを作成した（Fig. 3, 江原ら, 1981）。このモデルにより、噴気地域地下に貯留層があるとすれば、気液2相の沸騰している貯留層であり、放出される水のうち、数10%がマグマ起源であると推定した。

上の熱収支に基づく熱水系モデル作成の段階では、地下構造に関する情報は不十分で、地熱貯留層およびマグマの深さ（それぞれ2 km および5 km）のみを仮定していた。そこで、実際の地下構造

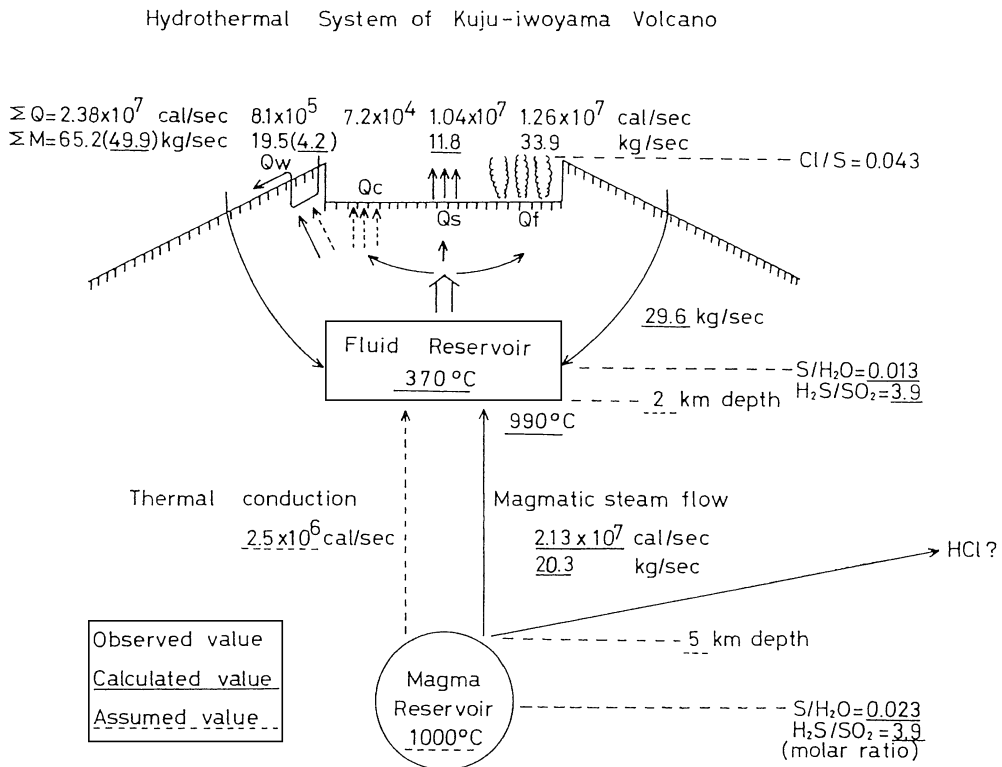


Fig. 3 Hydrothermal system model of Kuju-iwoyama estimated from observed water and heat discharge rates. The values in parentheses contain only the water flow rate discharged from the fluid reservoir (Ehara *et al.*, 1981)

に基づく議論を行うために、地震観測、MT 探査等の地球物理的観測を行った(江原ら, 1990 ; Mogi and Nakama, 1998). さらに、重力データあるいは坑井データを援用して、簡単な地下構造モデルを作成した。その結果、直径 5 km, 厚さ 2 km の円筒領域の中心に、直径 500 m, 厚さ 2 km の円筒型高透水性ゾーンを持つ地下構造モデルを作成し、中心部円筒領域の下部から、高エンタルピーのマグマ水が供給され、それ以外の下部からは、地殻熱流量が供給され、地表からは自由に水が入りできるモデルの下、気液 2 相が扱える数値シミュレータにより、熱水系モデルを作成した (Fig. 4, Ehara, 1992). その結果、中心部高透水性ゾーンでは、200~340°C の気液 2 相が存在するモデルとなり、マグマ水の寄与は地表から放出される水の 75% と、典型的なマグマ性熱水系モデルであることを数値的に示した。また、このモデルから予想される圧力分布は噴気地域地下に発生する微小地震の原因をも説明することになった (Ehara, 1992).

その後、1995 年に九重硫黄山近く(噴気前に存在していた噴気地域の南 300 m) で水蒸気爆発が発生し、噴火後、諸観測を行うとともに、諸量の経時変化を観測した(江原, 1998). その結果得られた最も大きな特徴は、水蒸気爆発後、噴火前(100 MW 程度)に比べ多量の放熱量(1000 MW 程度。そのほとんどは水蒸気噴出による)が継続したことで、火山体が一貫して冷却したことであった。そこで、火山体冷却を説明するような、3次元多相モデルを構築することを試みた (Fig. 5, (a), (b), (c), (d), Ehara *et al.*, 2005). その結果、水蒸気爆発に伴って、地熱貯留層の圧力が急激に減少し、周辺から冷地下水が火山体中心部に集中的に補給され、火山体中心部を冷却する一方、大量の噴気が放出されるというモデルで諸現象を説明できることを明らかにした。モデルの本質的な性質(気液 2 相貯留層の存在、数 10% にも及ぶマグマ水の大きな寄与)はこのモデルでも同じではあるが、たとえば、地下における流体流動に与える地形の効果(動水勾配の効果と言ってもよい)が大きいことなどを新たに示した。すなわち、地形の効果が入っていない円筒形モデルでは、地下から供給された流体のほとんどが地表から放出されていたが、地形を考慮した 3 次元モデルでは、地表から放出される流体は 70% 程度であり、残りは選択的に特定方向への側方流動となって火山体地下を流下することが明らかにされた。おそらく、この一部が山麓に存在する温泉水の起源になっているのではないかと推定している。

以上では、九重火山中心部の噴気・温泉地域を例にとって、熱水系モデル構築の進展を示したが、

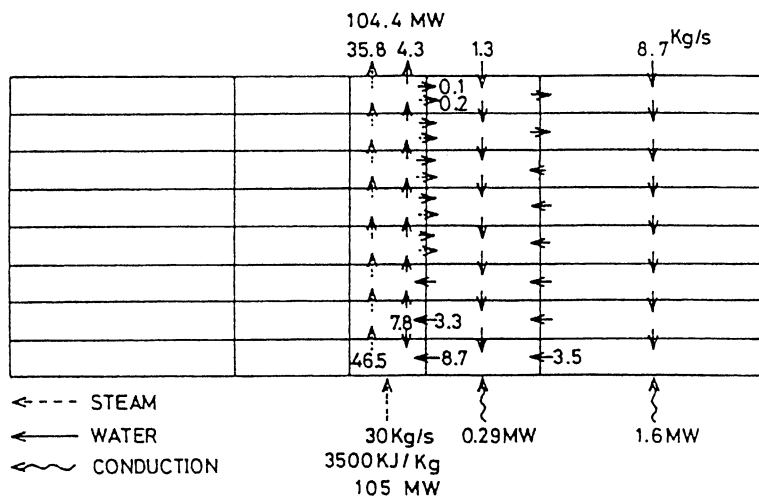


Fig. 4 Vertical cross section of the cylindrical geothermal reservoir of Kuju-iwoyama (Ehara, 1992)



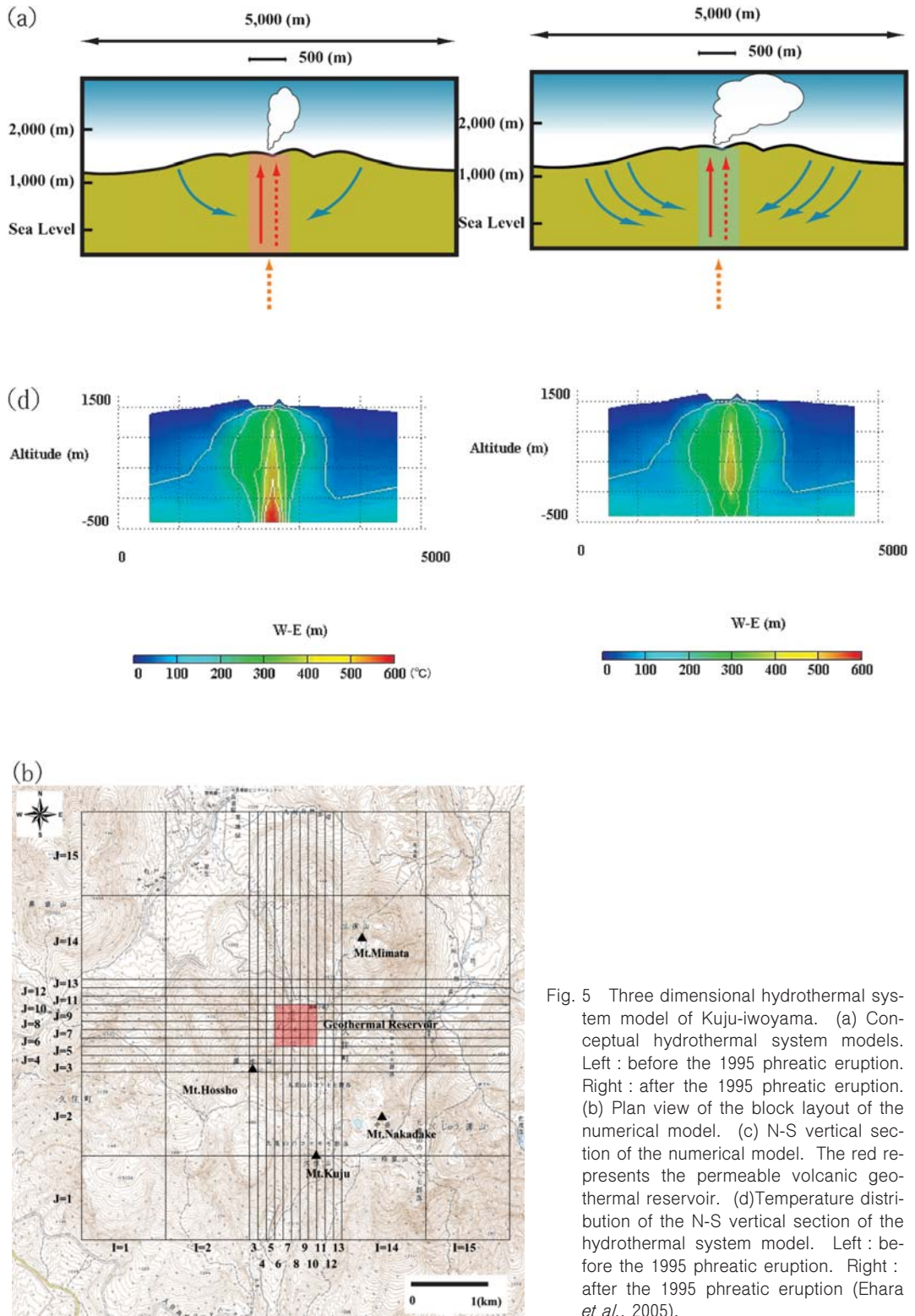


Fig. 5 Three dimensional hydrothermal system model of Kuju-iwoyama. (a) Conceptual hydrothermal system models. Left : before the 1995 phreatic eruption. Right : after the 1995 phreatic eruption. (b) Plan view of the block layout of the numerical model. (c) N-S vertical section of the numerical model. The red represents the permeable volcanic geothermal reservoir. (d) Temperature distribution of the N-S vertical section of the hydrothermal system model. Left : before the 1995 phreatic eruption. Right : after the 1995 phreatic eruption (Ehara *et al.*, 2005).

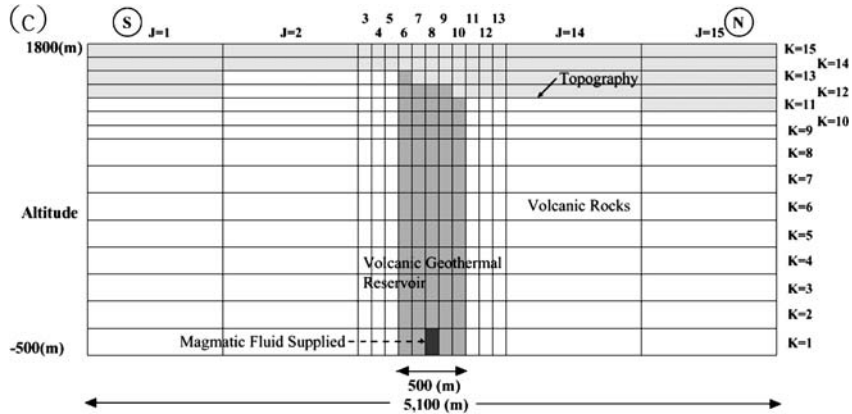


Fig. 5 Continued

いろいろな地熱地域において、多くの観測データに基づいた数値モデルが構築されていくことによって、熱水系の性質が定量的に理解され、それらを総合的に理解していくことによって、熱水系の一般的な理解が深まり、温泉を含む総合的な地球の熱に関する科学の進展がもたらされるのではないかと考えている。

## 6. おわりに

温泉を含めた地球の熱と水の流れに関する科学を進めるためには、定量的な熱水系の理解が重要であることを、数値モデリングのプロセス、および九重火山中心部の地熱地域の例を挙げて述べた。地質学、地球化学、地球物理学、水理学等の観測データを総合し、熱水系概念モデルを作り、さらに、それに基づいて、数値モデル、特にヒストリーマッチングのプロセスを経た数値モデルを作成することの重要性を指摘した。そして、そのような数値モデルに基づいて、温泉を含む地球の熱と水に関する現象の本質に迫ることができ、さらに温泉資源量評価や温泉帯水層の科学的な変動予測が可能となり、地熱発電利用と温泉利用との共生にも貢献するとの見解を述べた。地球の熱の適切な利用を行っていくには、温泉を含む地球の熱に関する科学の進展が必要であると考えます。

## 謝 辞

本論文を書くにあたって、執筆をお勧めいただいた日本温泉科学会会長西村 進先生に深く感謝の意を表すものである。また、野田徹郎氏には、原稿をお読み頂き、種々のご指摘を頂き、本論文の改善に大いに役立った。深く感謝するものである。この小論が、地下における熱と水の流れに関する科学的理解という側面だけではなく、温泉利用と地熱発電利用との共生にも貢献することを心より期待したい。

## 引用文献

Axelsson, G., Armannsson, H., Bjornsson, S., Floventz, O. G., Gudmundsson, A., Palmason, G., Stefansson, V., Steigrimsson, B. and Tulinus, H. (2003) : Sustainable production of geothermal energy—Suggested definition—, 1.

Elders, W.A. (1991) : Geologic models of geothermal reservoirs. Geothermal Resources Council

BULLETIN, **20**, 194-203.

Ehara, S. (1992) : Thermal structure beneath Kuju volcano, central Kyusu, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **54**, 107-116.

江原幸雄 (1998) : 1995 年九重火山噴火とその後の経過. *温泉科学*, **48**, 72-83.

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.

江原幸雄, 湯原浩三, 野田徹郎 (1981) : 九重硫黄山からの放熱量・噴出水量・火山ガス放出量とそれらから推定される熱水系と火山ガスの起源. *火山*, **26**, 35-56.

Ehara, S., Fujimitsu, Y., Nishijima, J., Fukuoka, K. and Ozawa, M. (2005) : Changes in the thermal state in a volcanic geothermal reservoir beneath an active fumarolic field after 1995 phreatic eruption of Kuju volcano, Japan. *Proc. World Geothermal Congress 2005*, CD-ROM.

Mizutani, Y., Hayashi, S. and Sugiura, T. (1986) : Chemical and isotopic compositions of fumarolic gases from Kuju-iwoyama, Kyushu, Japan. *Geochem. J.*, **20**, 273-285.

Mogi, T. and Nakama, K. (1998) : Three dimensional resistivity structure beneath Kuju volcano, central Kyushu, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **22**, 99-111.

日本地熱学会 地熱発電と温泉利用との共生を検討する委員会 (2010) : 地熱発電と温泉利用との共生を目指して, 1-62.

Yahara, T. and Tokita, H. (2010) : Sustainability of the Hatchobaru geothermal field, Japan. *Geothermics* (to be published).

由佐悠紀 (1983) : 地熱環境下における地下水流動の数値実験—ポテンシャル流と熱対流の競合. *日本地熱学会誌*, **5**, 23-38.