報 告

生産情報による油層キャラクターゼーション
—自動ヒストリーマッチングの可能性と課題*

登坂 博行**・増本 清***

(Received August 2, 1997; accepted September 22, 1997)

Reservoir characterization through well performances
—possibility and problems of automatic history matching

Hiroyuki Tosaka and Kiyoshi Masumoto

Abstract: Reservoir history matching which has been done through trial and error by engineers is viewed from the standpoint of the dynamic inverse problem, in which automatic history matching is performed as a nonlinear optimization process. The basic concepts, algorithms and example results are briefly introduced, and various obstacles for practical use of it are pointed out. In addition, responding to discussions in the symposium, our ground of research is explained. Lastly, a recommendation is made concerning the systematic field operation that might be useful to improve identifiability of reservoir properties through well performances.

Key words: well performance, history matching, inversion

1. はじめに

生産段階のある程度進んだ油田では、ヒストリーマッチングされた油層モデルによる挙動予測が生産計画に重要な役割を果たすことは言うまでもない。

油層のヒストリーマッチングは油層モデルのパラメータ、特に岩石物性分布を格子スケールで同定することが主たる目的となるが、油層パラメータは種類が多く非線

形性の強いものが関与するため、人間の持てる知識とセンスを注いで実行されてきている。しかし、技術者として分布を修正しながら多数のケースのシミュレーションを混乱なく秩序立てて行うことは非常に難しい。何か月～何年にわたる作業が最終的に生み出した結果が十分満足でき自然なものであるかどうか、技術者自身が疑心にさいなまれることもしばしばである。

ヒストリーマッチング作業の大部分の時間は反復修正(新たな設定の検討、データ修正、1回のヒストリーランの実行、出力処理)に費やされる。この部分は、いわゆる「逆解析」(英語で inversion, inverse modeling, backward analysis などと呼ばれる)に相当し、数学的な手続きに置き換えうる可能性がある。

著者らは、シンポジウムにおいて「油層のヒストリーマッチングは自然界とはいったん切り離された物理モデル(ブラックボックス)に最もふさわしいパラメータを見つけたす作業である」ことを説明した。地質とか油層の知識を離れた数学のプロセス、との説明はすぐには理解し難い(したくない)面もあることは確かである。当然のことながら、賛同いただけなかった、批判的なかた、

* 平成 9 年 6 月 6 日、平成 9 年度石油技術協会春季講演会開発・生産部門シンポジウム「最近の油層評価技術」で講演

This paper was presented at the 1997 JAPT Development and Production Technology Symposium entitled "Aspects of reservoir characterization by multi-disciplinary approach—present and future—" held in Makuhari, Chiba, Japan, June 6, 1997.

** 東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻 Department of Geosystem Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo.

*** 島根大学総合理工学部地球資源環境学科 Department of Geoscience, Faculty of Science and Engineering, Shimane University.

極端な批判的論調の人もいた。油層モデルは「難しいブラックボックス」であり、歴史的には、人間が苦勞して逆行解釈を行わざるをえない状況にあったし、現在でもそれは事実である。しかし、計算機の発達や数学的プロセスの改良を軸として、本来の数学的逆問題として反復修正作業を自動化できる可能性が大きくなり、ここ数年のうちには、ある程度実用化される見込みが出てきたところである。

本論では、シンポジウムの発表に沿い論を構成するが、当日の議論、特に批判的論調に対し、よりわかりやすく著者らの立場を説明することにする。

2. 人間によるヒストリーマッチングの難しさ

ヒストリーマッチングの難しさは、もちろん、経験したものでなければわからないが、経験した者でも、新たな問題に対して今度は大丈夫と楽観的に始めるのが常で、結局混乱の中で妥協し、期限を迎えることが多い。問題によっては満足のいく場合もあるかと思うが、坑井数が増え、ヒストリーの長い場合には、個人的経験からみて例外なく混乱すること請け合いである。

以下に、著者らの経験に基づきいくつかの例を紹介するが、この種の問題の性質上、フィールド名や結果の図を掲載できないのでイメージが十分伝わらないのはご容赦願いたい。

最初の例は、中東の大きな油田のヒストリーマッチングで、約10,000個の格子分割、100本以上の坑井の20年にわたる生産情報をマッチングするものである。実施当時は10年以上前で、当時としては大規模なシミュレーションで、IBMの汎用機にも乗らず、計算機速度が今の100分の1程度のスーパーミニコンが使われた。グラフィックなどインフラも貧弱で、作業環境はよくなかった。油層の形、地層の対比は多数の井戸で行われたが、推定に頼らざるをえない場合も多く、また、多数の断層が存在すると考えられ、断層を通るクロスフローのモデル化、さらに、異なるAPI原油のミキシングのモデルも組み込まれた。坑井や格子の擬似関数として多数のテーブルが作成され、マッチング作業が行われた。反復段階が進むにつれ、系統立てたマッチングが難しくなり、マッチング精度の厳しい要求を満たすに至らず、他の理由も含め2年以上を経ても完遂せずに中止された。

第2の例は大規模な地下石油備蓄空洞周辺の地下水挙動のヒストリーマッチングである¹⁾。約10年にわたる調査・建設期間中に約2 km×2 km程度の範囲で、30坑の経時の水位観測、数か所の河川流量観測値、調査坑道・備蓄空洞における湧水記録、岩相・断層などの応用地質学的記載などのデータが取得されている。油田と違

い観測値も多く地質的な記述はより詳細である。この例では、領域を約32,000個の三次元不規則格子に分割し、河川流量、湧水量、地下水位の観測値すべてをマッチングの対象とした。作業は地質・水理・ソフトウェアの技術者チームにより行われた。作業途上では建設期間中の工事に携わった人々の記録・記憶を頼りに計算値から逆に観測値の正否を見直すことも行われ、ようやく許容できるマッチングにたどり着いたのは、約1年後であり、試行錯誤ランは70以上に上った。得られた最終モデルは、大雨や渇水時の基地周辺地下水挙動予測に使われた。

第3の例は、ダムの放流に伴う下流側の地下水温度、河川水温度の季節変化を予測するためのシミュレーションである。この地域では、上流から下流にかけて裾広がり砂礫質の堆積物が数mから50m程度たまっており、数本の井戸において1年間の地下水位変化、地下水温、数地点での河川流量、水温、気温が計測されている。7,500個以上の格子分割を施したモデルに対し、地下水位、水温、流量のマッチングが試みられた。井戸観測結果より当初予想された岩相分布、浸透率分布、孔隙率分布ではどのように組み合わせても到底観測値を説明できないことがわかってきたのは20回程度の試行錯誤の後である。浸透率や孔隙率を大幅に変更するとともに、境界条件の変更、地表の河川流れのパラメータ（マニング粗度係数）の変更を行い、さまざまな組み合わせに対しさらに20以上の試行錯誤の後、満足なマッチングの得られないまま期限を迎え、それまでの最良モデルにより妥協せざるをえなかった。全期間は半年以上である。

最後の例は、大学における実験講義での経験である。7×7に分割された二次元平面モデルの浸透率分布を4本の坑井における生産量と圧力の経時情報から推定する問題を与えた。浸透率分布は複雑な分布ではないこと、またその値は3種類だけであることという事前情報があっても、正解には容易に到達できないことが経験された。

なぜヒストリーマッチングは難しいのであろうか。歴史的な人間によるヒストリーマッチングには大きく次の2つの作業段階があると考えられる。

(1) 基本コンディショニング

試行錯誤の時にまずは固定しておく条件設定。地質構造、平面格子分割、レイヤーリング、流体物性、境界条件、初期条件、一部の擬似関数など。

(2) 反復修正作業

推定パラメータ分布の入力（主に浸透率分布、孔隙率分布など）、および1回のヒストリーラン（順解析）の組み合わせ。

多くの場合、(1)までの作業は地質屋と油層屋が協力すればあまり混乱するものではない。しかし、基本コンディショニングがなされてしまうと、それを所与のものとして、マッチするまで(2)の作業を行うのが普通である。(2)に伴う困難は結局以下の点であろう。

- ・パラメータの組み合わせで結果にどのような変化が起こるか人間が予想しにくいこと。これは、多数のパラメータの逆解析上の宿命である。
- ・基本コンディショニングの段階で、生産情報で逆解析できる以上に細かい格子分割が行われる場合が少なくないこと。
- ・多数のケースを系統立てて実行し、絞り込んでいくことが人間にとって難しいこと。
- ・基本コンディショニングのしかたが悪い場合でも、人間にはそれが判断できず、あくまで合わせようと試み原点まで引き返すのが遅れる。

3. 自動ヒストリーマッチングの手法

著者らの目的は「基本コンディショニングされたモデルのパラメータ分布を生産情報に従い数学的に逆解析する」ための技術の開発である。自動ヒストリーマッチングの技術開発は、1970年代から現在まで多数行われており、現在、実用化一步手前の状況と考えている（例えば、文献2）から文献4））。

自動ヒストリーマッチングの手続きについては、すでに平成5年度シンポジウムの報告として発表⁵⁾しており、また末尾に多数の参考文献を挙げるので、そちらを参照願いたい（文献6）から文献10））。ここでは、簡単な紹介にとどめる。

3.1 自動ヒストリーマッチングの前提

ここで、前提としてもう一度明確にしておきたいのは

以下の点である。

- ・自動ヒストリーマッチングは基本コンディショニングされた油層モデルから出発する。
- ・この過程では生産情報（圧力、水油比 WOR、ガス油比 GOR など）がマッチング対象となり、未知パラメータとしては、油層モデルの格子スケールの物性（格子間浸透率、格子孔隙率、あるいは擬似関数）がとられる。
- ・この過程では数学的に計測値と計算値の差を小さくしていくが、最終的なマッチングの程度、逆解析の分解能は基本コンディショニングと計測値の信頼性に依存する。
- ・計算の過程では必ずしも収れんは得られないこと、また、偽像と称される不安定な解の出現、初期値が違えば異なる解がでることなどが十分ありうる。

図1(a)、(b)には格子システムおよび同定されるべき方向別格子境界面浸透率を示した。これをすべての格子で未知とすれば、格子数の3倍程度となり、格子孔隙率を逆解析パラメータとして加える場合は、格子の数だけ未知パラメータが増える。さらに、擬似相対浸透率を未知とする場合には、1種類につき4個程度が追加されることになる（これは、いろいろな取扱いがあるが）。

3.2 目的関数

自動ヒストリーマッチングは、観測値と計算値との差をなるべく小さくする作業を、数学的最小化問題として定式化する。例えば、三相ブラックオイル型シミュレーションでは次のような目的関数の最小点を探すことに対応する。

$$J = \sum_t \sum_{Nw} \beta_p (P_{cal} - P_{obs})^2 + \sum_t \sum_{Nw} \beta_w (W_{cal} - W_{obs})^2 + \sum_t \sum_{Nw} \beta_g (G_{cal} - G_{obs})^2 \quad (1)$$

(a) Three dimensional grid system

(b) Six intergrid permeabilities

図1 格子システムと方向別格子間浸透率

ここで、 P は圧力、 W は WOR、 G は GOR であり、 β は重み、 t がついた Σ は時間に関する和、 Nw がついたものは井戸に関する和である。上記目的関数は全領域の浸透率や孔隙率の非線形関数であり、その最小点（極小点）を求めるためには浸透率分布などを動かして反復計算をすることが必要である。

3.3 非線形最適化手法

このような問題の解法に関する研究はさまざまな分野で行われており、油層ヒストリーマッチングのような非線形問題の解法を一括して非線形最適化手法（Nonlinear optimization method）と呼ぶ。

さらに、非線形最適化手法の中にも、数学的にデターミニスティック（deterministic）に極小点を探していく方法と、少し緩く確率論的側面をいれて全体を探索する手法がある。

数学的デターミニスティックな方法としては、Gauss-Newton 法、Marquart 法、Conjugate Gradient 法、quasi-Newton 法などが知られている。いずれも、目的関数の各未知量に関する勾配（各未知量の目的関数に対する影響度）を利用しながら極小点を見つけていくものである。多くの既刊論文ではこのような方法がとられている。必要となる目的関数の勾配を算出するためには、単純には未知パラメータの数だけのヒストリーランを必要とするが、最適制御理論を応用すれば、1 回のヒストリーランに相当する計算で算出できることが知られている。パラメータ数が多い逆解析では、目的関数の局所最小点（極小点）は多数あるおそれがあり、デターミニスティックな方法ではこのような局所最小点から抜け出すことが難しいことが指摘されている。

確率論的側面をいれた最適化手法では、より大域的な最小化が達成できるとされ、代表的な方法に Simulated annealing、Genetic algorithm（遺伝的アルゴリズム）がある。Simulated annealing では、高温下におかれた金属がゆっくり冷え、格子の整列したエネルギー最小状態になっていくプロセスを数値的に具現化するもので、さまざまな最適化問題に使われている。遺伝的アルゴリズムでは、例えば未知パラメータを二進数で表された遺伝子に擬し、その交配、突然変異などを計算機内で起こし、目的関数を次第に減少させていくものである。両方法とも、ある場合には目的関数が増加することを確率的に許容し、局所的な極小状態から抜け出すことを可能としている。これらの方法は、一般に非常に多数の反復を必要とし、収束を早める方策の開発を必要とする。

実際のヒストリーマッチングにおいては、このような基本的な最適化プロセスに加え、計測値の重み付け、油

層のゾーニング、スミージング、ウェルモデルなどを考慮する必要がある。詳細は末尾文献を参照願いたい。なお、図 2 にはデターミニスティックな最適化手法である quasi-Newton 法を用いた逆解析のフローチャートを示した。

3.4 自動逆解析の例

図 3(a)、(b) には断層の存在する地層断面モデルの例を示してある。断層は坑井に部分的には現れているが全体像はわからないものとする。地層は一相状態とし、地層

図 2 デターミニスティックな自動ヒストリーマッチングのフローチャート

(a) Imaginary fracture network model

(d) Given permeabilities

(b) Modeled fracture network

(e) Reconstructed permeabilities

(c) Typical pressure responses

図3 断層の存在する二次元断面モデルと逆解析結果の例

部分および断層の浸透率はそれぞれ 10 md, 500 md である。2つの坑井間の複数点で生産圧入を繰り返した後、得られた圧力データ (図 3(c)) のみから逆にたどって内

部分分布 (図 3(d)) が見えるか、というのが我々の問題である。おそらく人間が圧力情報をいくら見てもわからないし、坑井での岩相物性の統計処理から内部の浸透率を

仮定してシミュレーションを繰り返していたらいつ合うかもわからない。しかし、後述するような数学的プロセスは、一様な浸透率初期値から出発し、坑井情報を最もうまく説明するものが図3(e)のような浸透率分布であることをはじき出すのである。二相、三相問題などではこうはうまくいかないと考えられるが、他のいくつかの例については、引用文献を参照いただきたい。

4. 自動逆解析への誤解にこたえて

「油層モデルを動かしヒストリーマッチングをすることは自然とは切り離された数学的プロセスである」という著者らの説明に対して、シンポジウム当日さまざまな反応があった。1つの典型的な誤解は「地質とかけ離れたものが出てくる、地質を知らないでそういうものを使うのは非常に危険だ」というものである。もう1つは、地下の地質・物性分布は統計的に発生しようとする人たちの批判である。逐次それらに答えよう。

第1の誤解に答えるために幾つか例を挙げよう。最初の例は医療用X線CTである。これは、計測情報(X線強度)とX線の吸収モデル(ある材料を通るときの強度減衰の実験則)を使い、内部のようすを純粋に数学的に逆解析するのである。体の内部を医者が医学的に検討して計算(順解析)していたらいつまでたっても画像は出てこないが、計算機は一瞬のうちに答を出す。医者の出番はCTをかけるための前準備とかけた後の画像の専門的な解釈・判断である。CT画像を作るのは医者ではなく純粋数学的プロセスであることが、逆に医者の熟練度に左右されない信頼感につながる。X線CTは、現在では岩石試料中の割れ目や流体の画像を得ることに成功している。もちろん、この解析でも、地質屋が岩石の生成条件などを吟味して画像を作る必要などない。石油や土木における通常の震探処理、ウェルテスト解析、ジオトモグラフィー(弾性波、レーダー、比抵抗、水圧などによる)もすべて逆解析であり、計測値、基本モデル、基本コンディショニングを使い、地質を離れたところで行われる。そもそも、地下に関する逆解析は地質を知るために行われるのだから、人間が細かく地質の予見をいれてしまうと本末転倒になることがご理解いただけるだろうか。

油層の自動ヒストリーマッチングは、逆解析としては非常に複雑で難しい部類にはいるが、上例と同様に考えてもらえばよいと思う。地質と油層技術者による適当な基本コンディショニングが行われた後、生産情報とのマッチングは数学的逆解析として計算機に任せられるところは任せてしまうのである。人間の出番は結果を地質的知見などと照らし、大きな地質環境変化や物性分布の

特徴をつかむことである。マッチングが思わしくない場合には、速やかに基本コンディショニングに立ち戻る必要性もわかる。また、解として不自然と思えるものが出た場合、それを解釈し、許容・棄却・やり直しをするのは人間に任されており、それはどの逆解析でも同じである。

第2の批判的観点は「三次元的な地質・物性分布は、地質推計学的(Geostatistical)に再構成される多数の物性分布パターンから、順解析によって自然本来に近いものを選び出すのが筋で、自動ヒストリーマッチングは意味がない」というようなものであったと理解している。

地質推計学に基づく地下のキャラクターゼーションに関する研究は、石油に限らず地下を扱う他の分野でも近年行われている。この種の研究にどれだけの可能性を見るかは、研究者個々に任されている問題であり、ここで批判をしようとは思わない。立場の違いのみを明らかにしておく。

この種のアプローチは、コアやログデータの相関を把握し、物性を細かいブロック単位で発生させ、それを積み上げて三次元空間を構成しようとするものである。さらに、細かいブロックをくくりアップスケーリング(upscaling)によって油層モデルのレベルにたどり着くことになる。ヒストリーマッチングはこのアップスケールされたモデルに対し順解析を行い、生産情報に対する適否を決定し、否の場合には細かいレベルでの新たな物性分布の発生を行い、同じことを繰り返すことが考えられている。これは、空間の物性分布を所与のものとするforward modelingの立場に立ち、ヒストリーマッチングもその範疇で考えているのである。

それに対し、著者らの計算の出発点はアップスケールされた油層モデルのレベルであり、ヒストリーマッチングは、そのスケールでのbackward modelingととらえている。生産情報があって、そこから逆にたどってパラメータを割り出すのである。犯罪捜査でいえば、前者は、しらみつぶしに市民にあたり犯人を捜す作戦であり、著者らの手掛かりから犯人を捜すものといえようか。また、強調しておきたいことは、割り出すパラメータは油層モデルのコンディショニングのしかたによって大きく変わるから、それ自体自然のものというより、油層モデルの格子スケールの物性であるということである。シンポジウムの議論においても、細かいブロックの物性は人間の知りうるところではない、とする考えを述べた。

地質推計学的にアップスケールされた油層モデルからヒストリーマッチするものを見つけることは、高速のシ

ミュレータが開発されたとしても大変であろうことは誰しも想像できる。そこに逆解析的思想はやはり必要となろう。また、著者らの自動逆解析にとって、地質推計学的にコンディショニングされたモデルはよい初期値となる可能性もある。さらに、自動逆解析から得られる格子レベルの物性分布を地質推計学的に解釈して、細かい物性分布へ戻していくような両方向の利用が考えられるのではないか。

5. 自動ヒストリーマッチングの可能性と課題

以上述べてきたように、ヒストリーマッチングの反復作業を数学的なプロセスとして自動化できるのであるが、1970年ごろから今日までさまざまな研究があるのに、いまだに実用化されていない。計算機速度は高速のワークステーションでも当時の1,000倍程度になり、記憶容量も飛躍的に増大したことを考えると、実用化の可能性は高まったが、まだ乗り越えるべき壁があり、ブレークスルーが必要である。

以下に、その現状、可能性および課題を挙げる。

- (1) 現在、どの程度の大きさの問題に自動プロセスが適用できるかという点についてまず述べよう。一相問題で圧力観測値のマッチングにより浸透率分布を求める場合には、著者らの試行段階では、20,000個程度の未知浸透率の逆解析も実行した経験がある（収れんまでには至らなかったが）。油・水二相状態かつ水油比も大きな変化のない条件下で、圧力のマッチングを実用的な規模の油層モデルに対し行う場合、坑井数が多くヒストリーが長ければ、数千個の未知浸透率を設定して逆解析することもできないわけではない（もちろん、収れんは保証されない）。
- (2) 今後、情報量と逆解析可能性の関係の究明が必要である。ある時点で持っている生産情報によって、どの程度の範囲が、どの程度の細かさでわかるのかは、ヒストリーマッチングを人間が行う場合も計算機が行う場合も知っておきたいことであるが、これは明らかではない。一般に、大規模なフィールドシミュレーションでは、生産情報量よりも格子数のほうがずっと多い不定問題となっている可能性が強く、未知数はゾーニング、スミージングせざるをえないが、そのしかた自体が人間の恣意に左右されるのは問題である。
- (3) 自動プロセスが適用された場合の大きなメリットは次のことである。反復状況をモニタリングしていて、目的関数の減少が遅いなどの現象が見られたときには、基本コンディショニング（離散化のしかた、境界設定、初期設定、観測データ自体の良否な

ど）が問われており、早期の見直しが可能となる。人間の行うヒストリーマッチングでは、一度作ると何が悪いかわからないまま、なかなか元まで作り替える勇気が湧かず、長引くことになる。

- (4) 二相系での水油比、ガス油比マッチング、遊離ガスの存在する三相系での自動逆解析は数学的には可能であるものの、実際的には、何を未知パラメータとするかによって難易度が変わってくる。擬似関数を所与としたうえで格子間浸透率、格子孔隙率を未知パラメータとして逆解析するのは比較的やりやすく、まず、この方向で実用化が図られると思われる。擬似関数自体を未知パラメータに加えることも考えられるが、非線形性に起因する収れんの悪さ、計算量の増大などがあり、実用化については明らかではない。
- (5) 大規模な油層モデルを組んでヒストリーマッチングを行うとき、ただ1つの正解というのはいりえないであろう。人間がやっても計算機がやってもそうである。目的関数は多次元の面であり、それは多数の極大、極小点を持つことが予想される。収束点は出発値によって異なることは技術者として心配になるところである。解の自然らしさ、優劣を検定するため、何らかの判断手法・基準が必要かもしれない。

6. よりよいヒストリーマッチングのためのオペレーションの提案

人間が行うにしろ計算機で行うにしろ、生産情報の質・量が油層キャラクタライズの良さのかぎとなることは当然である。これについては、すでに本誌テクノウィンドーにおいて、登坂¹¹⁾が油層モニタリング操業法の提案を行っている。ここで、その要旨を述べさせていただきたい。

ダイナミックな生産情報によって油層内部をキャラクタライズするためには、生産井間・圧入井間の干渉が十分含まれた情報である必要がある。一般に、生産の影響は時間とともに広がり、遠方の坑井に及ぶ。このような干渉の時間的遅れと影響の程度がヒストリーマッチング上のよいデータとなる。通常の坑井のオペレーションでは1つの坑井の生産量は一定の値をなるべく保つように操業されるが、この場合、油層内が圧力に関してある種の落ちついた状態となり、内部情報が増えない。なるべく早期に油層内物性を知るためには、油層内流体を揺り動かし、圧力応答を測ることである（流動より圧力伝播はるかに速い）。そのためには、複数の生産井でシステマティックに流量変動（総生産量を変えない範囲で、

周期的変動,あるいは密閉・生産を繰り返す)を起こし,流量と圧力の計測をより綿密に行うことである。実際の油田管理では,長期の坑底圧力観測の費用対効果の問題もあるので,なかなか簡単に採用されないと思うが,早い段階からこのようなオペレーションを実施することで,短いヒストリーで内部がよりよくわかり,インフィルドリリング(infill drilling)を含めた生産計画策定のよい情報となるであろうと期待をしているのだが。

7. おわりに

油層ヒストリーマッチングにおける試行錯誤作業を数学的な逆解析として実行しうる可能性,手法,課題などについて述べてきた。これは,ダイナミックな生産情報を利用したトモグラフィーであり,将来,より明瞭に油層内の三次元的な地質状況を見るための道具と考え,開発を進めている。油層ヒストリーマッチングは非線形の動的逆解析(Nonlinear dynamic inversion)であり,今後のアルゴリズムなどの改良はもちろん必要であるが,油田操業も,よりシステムティックに油層内部の情報を速やかに収集できるような形態をとることが望まれる。

引用文献

- 1) 岡本明夫・登坂博行・小島圭二・山石 毅・谷藤吉郎・小林 仁, 1995: 建設全期間にわたる地下石油備蓄基地周辺の水文・水理挙動再現シミュレーション。平成7年度日本応用地質学会講演論文集, 91-94.
- 2) Yang, P. H. and Watson, A. T., 1988: Automatic history matching with variable metric methods. *SPE*, 995-1001.
- 3) Makhoulouf, E. M., Chen, W. H. and Seinfeld, J. H., 1990: A general history matching algorithm for three-phase, three-dimensional petroleum reservoirs. *SPE* 20383.
- 4) Tan, T. B. and Kaiogerakis, N., 1991: A fully implicit, three-dimensional, three-phase simulator with automatic history-matching capability. *SPE* 21205.
- 5) 登坂博行・増本 清, 1993: 自動ヒストリーマッチングによる貯留層キャラクタリゼーション。石技誌, 58 (6), 494-501.
- 6) Sen, M. K., Datta-Gupta, A., Stoffa, P. L., Lake, L. W. and Pope, G. A., 1995: Stochastic reservoir modeling using simulated annealing and genetic algorithms. *SPEFE* (Mar.), 49-55.
- 7) 増本 清・登坂博行ほか, 1996: ハイドロパルス・トモグラフィー技術による多孔質媒体不均質性の逆同定。東京大学工学部総合試験所年報, 第55巻, 193-197.
- 8) 増本 清・登坂博行ほか, 1995: ハイドロパルス・トモグラフィー—岩盤内の3次元透水性分布を描き出す技術—。地下水技術, Vol. 37, No. 6, 11-23.
- 9) Masumoto, K., Tosaka, H., Kojima, K., Itoh, K. and Otsuka, Y., 1995: New measuring system and high speed three dimensional inversion method for hydropulse tomography. *Proc. ISRM in Tokyo, Japan*, 847-850.
- 10) 増本 清・松田育子・登坂博行・小島圭二, 1995: ハイドロパルステストデータによるフィールドスケール逆解析の可能性。平成7年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 95-98.
- 11) 登坂博行, 1996: 逆解析とモニタリング型オペレーション。石技誌, 61 (2), 182-186.