

(12) パルステストデータによる岩盤水理物性分布逆解析手法の 実用化に関する研究

東京大学工学部 ○ 増本 清
東京大学工学部 登坂博行
応用地質(株) 伊藤一誠

A Study of Improving Numerical Technique for the Inversions of Spatial Rock Permeability Distribution
utilizing Interference Well Testing

Kiyoshi MASUMOTO, University of Tokyo
Hiroyuki TOSAKA, University of Tokyo
Kazumasa ITOH, OYO Corporation

Abstract

Numerical inversion of permeability distribution using transient pressure data obtained from interference test is one of the attractive geotomography techniques. For the purpose of making the technique applicable to field-scale problems, the authors studied some aspects of possible ways to improve the inversion process. The summarized results are as follows.

- (1) To model the vicinity of the pulsing well, an analytical well model is introduced, by which observed pressure data are correctly related with the calculated pressure of relatively coarse gridblock. This is very useful to avoid increasing the number of gridblocks or unknowns to be identified through inversion process.
- (2) Weighting of the observed data at respective wells are successfully applied to reduce the number of iteration for non-linear minimization as much as a half of the case without weighting.

1. はじめに

ウエルテストトモグラフィーは干渉試験データによる空間物性分布同定の手法であるが、そのフィールドスケールでの適用に際しては、①未知数に見合う十分なデータ量を得るための計測方法の確立、②フィールド状況に可能な限り忠実な数値モデル構築方法の確立、③高速、高精度の計算手法、の3点が重要な課題と考えられる。

著者らはこれまでの研究^{1) 2) 3)}において、坑井における流体の圧入及び密閉を繰り返すパルステストを想定した逆解析数値実験を試み、3次元地層モデル浸透率分布同定の可能性を示すと共に、上記①に関し強非定常流動を生起させること、およびパルスの発・受信点を交換したデータを用いることが情報の質と量を増やし、空間的に不均質に分布する水理特性を同定する上で効果的であることを報告している。

今回は、実用スケールでの逆解析をワークステーションレベルで実用的時間で処理することを目指して、特に上記③の改良を試みた結果を報告する。

2. 逆解析における発信孔の取扱い—解析的ウエルモデルの組み込み—

非定常干渉試験によって得られる発信点圧力は孔内の1点のものである。これを基本データとする逆解析に数値解法を使う場合、離散化された格子の計算圧力 P_c は観測圧力 P_w と対応しない。両者を一致させるに

は格子分割を非常に細かくする必要があるが、実用解析上、それは不可能である。一方、ウェルテストトモグラフィーでは坑井周辺の水理特性を知ることと共に、坑井から離れた領域の水理特性分布を求めることも目的となるため、坑井周辺を細かく分割せざるを得ない場合には逆解析の可能性自体が否定されかねない。坑井を含む大きめに切った差分格子において、計算で得られる格子圧力を計測で得られる坑底圧力（図-1参照）に換算する方法として、非定常解析解を利用したPeacemanの式⁴⁾を組み込むことにより順解析計算量を著しく抑えることができる。また、このような坑井周辺を解析的に扱うような解析的ウェルモデルを適用して格子数を削減することは、順解析計算量だけでなく、逆解析における未知パラメータ数の削減による逆解析反復回数の低減という点においても効果が期待できる。そこで本論では、Peacemanのウェルモデルを用いて2次元モデル問題の逆解析計算を行った。本章では、Peacemanモデルの適用性を示し、逆解析プログラムに組み込む方法について述べる。

2-1. 解析的ウェルモデル

流体の圧入または生産が行われている孔（パルステストの場合はパルス発信点）を含む格子（図-2の*i, j*）において、計算による格子圧力値*P*から坑底圧力値*P_w*を計算するPeacemanの式は、以下の①～④を仮定することにより(1), (2)式の様に導かれる。

- ①対象となる流体は弱圧縮性で2次元放射状流。
- ②坑井の直径は格子の一辺に比べて十分に小さい。
($r_w \gg r_o$)
- ③坑井を含む格子内における浸透率は均質で*x, y*方向に異方性があっても良い。
- ④坑井位置は、長方形格子の中心。（注：坑井位置が格子の中心でないモデルまで拡張した例⁵⁾も示されているが、本論では中心的な問題ではなく、また、逆解析に組み込む方法も本論と同様に行える。）

$$P_w = P_o + \frac{q \mu B}{2 \pi \Delta z (K_x \cdot K_y)^{1/2}} \cdot \ln \frac{r_o}{r_w} \quad \cdots (1)$$

ただし、*q*：流量、 μ ：粘性係数、*B*：容積係数、*r_w*：坑井半径、 Δz ：層厚、*K_x(*y*)*：*x*(*y*)方向の格子浸透率とする。また、*r_o*は坑井を含む格子の有効半径と呼ばれる量で、Peacemanによると格子の各辺の長さ $\Delta x, \Delta y$ 、および*K_x*、*K_y*を用いて次のように求められる。

$$r_o = 0.28 \cdot \frac{\{ (K_y/K_x)^{1/2} \Delta x^2 + (K_x/K_y)^{1/2} \Delta y^2 \}^{1/2}}{(K_y/K_x)^{1/4} + (K_x/K_y)^{1/4}} \quad \cdots (2)$$

さて、(1), (2)式に従えば、順解析における坑底圧力値は差分格子を細かくすることなく容易に計算することができる。しかし、著者らが行っている逆解析法³⁾では特に、格子間浸透率を未知パラメータとして用い、目的関数の微分計算を最適制御理論を応用した方法で求めている。従って、上記のPeaceman式を逆解析プログラムに組み込むためには、*P_w*を*P*や格子間浸透率(*K_{i+1/2, j}*等)で微分した値を求める必要があり、*K_x*、*K_y*を格子間浸透率で表すことが要求されるので、本解析では、*K_x*は、*K_{i+1/2, j}*と*K_{i-1/2, j}*の調和平均で

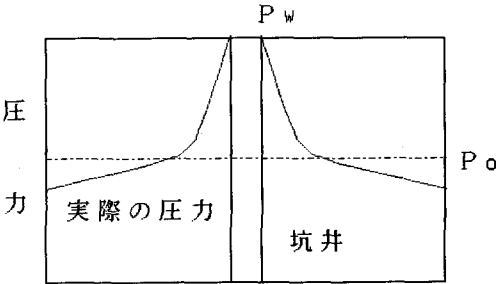


図-1 格子圧力と実際の圧力分布模式図

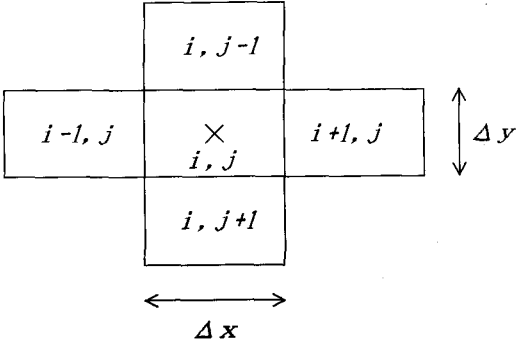


図-2 パルス発信点を含む差分格子

近似できるものとし、 K_x も同様とした。すなわち、 $K_x = 2 / (1 / K_{i+1/2, j} + 1 / K_{i-1/2, j})$ 、 $K_y = 2 / (1 / K_{i, j+1/2} + 1 / K_{i, j-1/2})$ とした。

Peacemanは、長方形格子と浸透率の異方性を考慮するために格子内平均浸透率を $(K_x \cdot K_y)^{1/2}$ としているが、著者らが用いている格子間浸透率は格子内平均浸透率の格子間調和平均として求めているので、上記のようにするのが妥当であろう。また、Peaceman式の仮定に従うならば、 $K_{i+1/2, j} = K_{i-1/2, j}$ の様な制約条件を逆解析計算に組み込むことも考えられるが、隣接格子内の浸透率に影響するなどの問題も考慮して今回は、 $K_{i+1/2, j}$ と $K_{i-1/2, j}$ を独立の未知パラメータとして逆解析計算を行った。

2-2. 順解析によるPeacemanウエルモデルの適用性の検討

ウエルモデルの適用性は基本的には、非常に細かい格子に切られた場合の孔での圧力 P_w と、ウエルモデルから計算される圧力 P_w' を比較することにより行われる。その結果、良い近似となっていることがわかる。(紙面の都合上、図は割愛) 以下、このようなPeacemanの式を組み込んだ逆解析プログラムを用いている。

3. 逆解析計算の効率化に関する試み

実際のパルステストのような複数坑井を用いた干渉試験では、圧入した流体の圧力伝播が3次元的に拡散するので、受信孔における圧力値は発信孔(流体注入井)における圧力値に比べて大きく減衰する。特にパルステストにおいて非定常性が強い短時間の流動過程を扱う場合受信圧力は極めて小さくなる。実際の問題で、このことを考慮せずに、計測された発・受信圧力をそのまま用いて逆解析を行うと、受信圧力に含まれている情報を十分に活かすことが予想される。従って、発信受信に応じた何らかの重み付けをすることが考えられる。坑井毎の重み付けとは、逆解析で用いる目的関数 J における坑井 n の圧力値 P_n に対して重み W_n を掛け合わせることである。

$$J = \int \left[\sum_n \{ W_n \cdot (P_n - P_{ob}) \}^2 \right] dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここでは、前節の解析的ウエルモデルを組み込んだ逆解析プログラムを用いて、発信点と受信点の圧力データに適当な重み付けをする事によって逆解析を効果的に行うことが可能であることを2次元モデルを用いた数値実験により示す。このような重み W_n の与え方として坑井位置や圧力値に応じた方法がいろいろと考えられるが、紙面の都合上、ここでは次式のように、発・受信圧力の各孔における圧力値の最高値を用いて重み W_n を次のように取る。

$$W_n = 1 / (P_{nmax} - P_{nit}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 P_{ob} : 圧力データ、 P_{nmax} : 坑井 n における圧力の最大値、 P_{nit} : 坑井 n の初期圧力値とする。
 このような重み付けの効果を見るため、2次元モデルによる数値実験を行った。使用したモデルは、図-3の様な領域内部に低透水ゾーンを含む9×9の2次元モデル(流体: 水単相、領域内格子: 2m×2m、層厚: 2m、境界の格子: 100m、坑井位置は図-3の①~④に想定、浸透率分布は図-3の通り)を用いて行った。ただし、図-3はモデルの格子間浸透率分布を示している。パルス形態は2サイクルの圧入密閉の繰り返しで、10

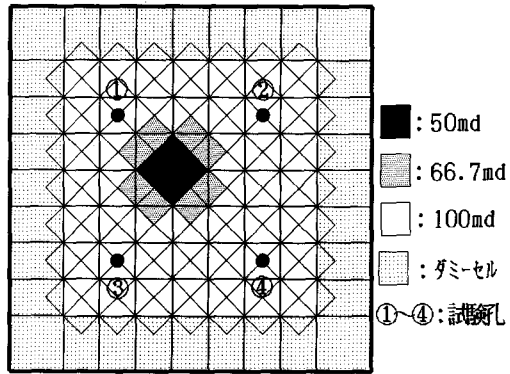


図-3 2次元逆解析モデル

[cm³/sec]の流量で150[sec]圧入するパルスと150[cm³/sec]の流量で 10[sec]圧入するパルスの2種類（流量×圧入時間を一致させた。）について、それぞれ(3)式における重み $W_n=1.0$ としたものと、(4)式の様な重みを用いて坑井毎に圧力値を正規化したものの4ケースを比較した（表1）。それぞれのパルス波形に対する圧力挙動の1例として①を発信点としたときの4点における圧力挙動をそれぞれ図-4a, bに示す。ただし、これまでの研究²⁾ ³⁾を踏まえて①～④を全てパルス発信点として使用した。境界は無限遠方を取ることを想定して境界格子を大きくした。また、格子間浸透率の初期推定値は全ケースで100md均一とした。

表1 逆解析数値実験のケース

ケース1	図-4aの低流量波形、重み $W_n=1$
ケース2	図-4aの低流量波形、重み W_n は(4)式の様に正規化
ケース3	図-4bの高流量波形、重み $W_n=1$
ケース4	図-4bの高流量波形、重み W_n は(4)式の様に正規化

逆解析の結果としてケース1、4についてそれぞれ図-5、図-6に反復回数200回の時の浸透率分布再構成過程を図示した。また、図-7に目的関数Jが、反復に応じて減少していく様子を、図-8に未知パラメータ推定値 $K_{...}$ とモデルの $K_{...}$ との差の2乗和の平方根 $[\sum (K_{...} - K_{...})^2]^{1/2}$ の値が反復回数に応じて変化する様子を図示した。これらの結果より、圧力値を正規化したケース2、4の方が、ケース1、3に比べて少ない反復回数でモデルを再現していることがわかる。特に、図-8を見ると、ケース1、2に比べてケース3、4の方がモデルの再現性が良く非定常性の強いパルス形態の方がモデル再現性が良いことがわかる。また、ケース4が反復200回程度でほとんど格子間浸透率分布を再現できているのに対して、ケース3は400回以上費やしており、2倍程度収束が遅いことがわかる。さらに、ケース1と2の違いに比べて、ケース3と4の違いが大きいことから、非定常性が強いほど圧力値の正規化が効果的であることがわかる。また、図-7、図-8

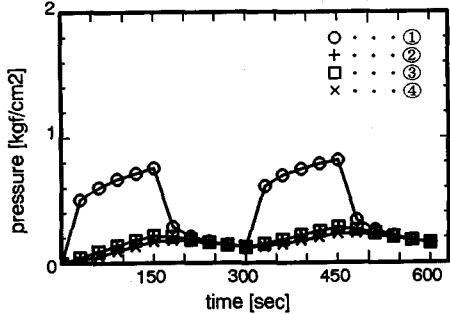


図-4a 低流量パルスによる圧力挙動

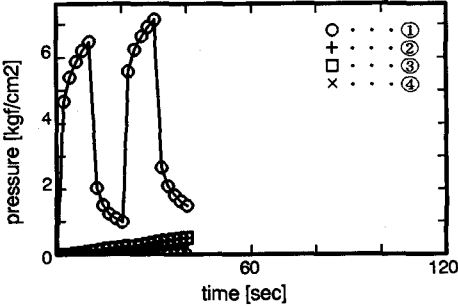


図-4b 高流量パルスによる圧力挙動

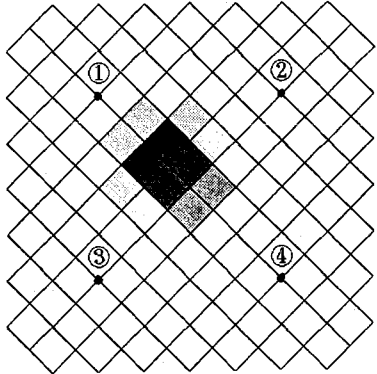


図-5 ケース1の逆解析結果（反復200回）

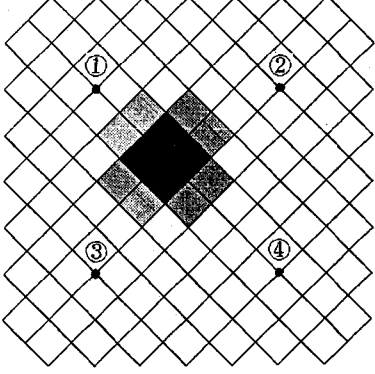


図-6 ケース4の逆解析結果（反復200回）

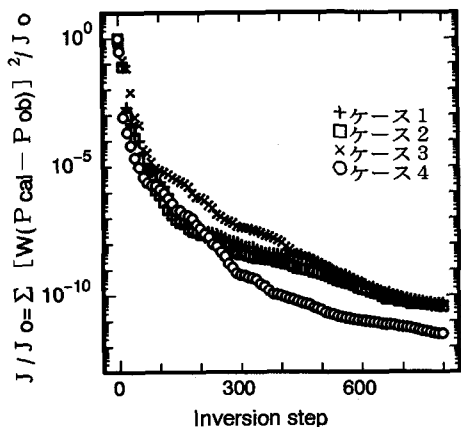


図-7 逆解析反復に伴う目的関数の変化

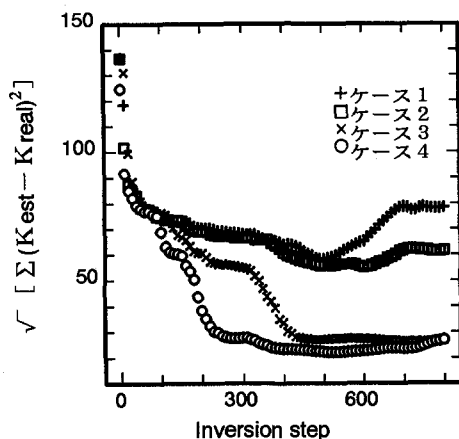


図-8 逆解析反復と浸透率分布の再現性

を見比べると必ずしも目的関数の減少傾向と物性分布の再現性の傾向が一致するわけではないことがわかる。特に図-8のケース1に示される様に物性分布が途中からモデルから離れていくのは、推定した分布に偽像ができており、分布を一意に決定できるような情報量がデータに含まれていなかったと考えられる。

以上から、坑井毎の重み付け方法として(4)式のように圧力値を正規化することが、反復回数を減少させ、逆解析効率を向上させる上で有効である事が分かる。さらに、3次元モデルで計算する場合は、2次元以上に正規化の効果が大きいと考えられる。又、Peacemanのウエルモデルを組み込んだ逆解析の適用性も示された。

4. おわりに

本論では実用化を念頭において、坑井周辺のモデル化と逆解析反復計算の効率化について検討し、次の結果を得た。

- ①解析的ウエルモデルを逆解析に組み込むことで発信孔圧力と格子計算圧力の対応がつけられ、格子分割を減らすことが出来、逆解析上の不安定性等の問題も生じない。
- ②圧力データを坑井毎に重み付けすることによって、少ない逆解析反復回数で水理物性分布の特性を評価し得る。又、特に非定常性が強いパルスと重み付けの組み合わせが有効である。

今後は、3次元モデルにおける解析的ウエルモデルを組み込んだ逆解析手法の確立と、重み付け等による反復計算の大幅な減少によりフィールドスケールへの適用を計りたい。

参考文献

- 1) 登坂博行、伊藤一誠、増本 清、大塚康範：非定常流れを考慮したパルステストによる透水性逆解析手法について、土木学会第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.156-160、1990
- 2) 伊藤一誠、増本 清、登坂博行、大塚康範：パルステストによる岩盤水理特性分布の逆解析、日本応用地質学会平成2年度研究発表会講演論文集、pp.97-100、1990
- 3) 登坂博行、増本 清、伊藤一誠、大塚康範：パルステストデータを用いた岩盤水理特性分布の3次元逆解析手法、第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.399-404、1990
- 4) Peaceman, D.W.: "Interpretation of Well-Block Pressures in Numerical Reservoir Simulation With Nonsquare Grid Blocks and Anisotropic Permeability," Soc.Pet.Eng. J., pp.531-43, June 1983
- 5) Abou-Kassem, J.H. and Aziz, K.: "Analytical Well Models for Reservoir Simulation," Soc.Pet.Eng. J., pp.573-79, August 1985