

# 2孔式塩水トレーサ試験と3次元数値モデルの逆解析による帯水層定数の同定

富樫 聡<sup>1</sup>・藤縄 克之<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 八千代エンジニアリング株式会社 技術開発部 (〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12)

E-mail: tomigashi@yachiyo-eng.co.jp

<sup>2</sup>正会員 信州大学教授 工学部土木工学科 (〒380-8553 長野県長野市若里4-17-1)

E-mail: fujinawa@shinshu-u.ac.jp

信州大学の長野若里キャンパスにおいて、不圧帯水層とその下部の被圧帯水層の飽和透水係数および縦分散長を求めるため、塩水を用いた2孔式トレーサ試験を実施した。注入孔と観測孔でモニタリングした地下水の電気伝導度データを基に、密度流を考慮した飽和・不飽和流動および保存性トレーサの移流分散の連成問題を解くための3次元数値モデル(SIFEC3dp)にパウエルの共役傾斜法を組み合わせた逆解析法を適用することにより、パラメータの同定を行った。開発した逆解析法はまずパラメータが与えられた任意のテストケースで検証し、ついで現場のデータを用いてパラメータ同定を行った。同定されたパラメータを用いた数値シミュレーションによる計算濃度は実測された塩分濃度と良く一致した。

**Key Words :** saltwater, tracer test, hydraulic conductivity, longitudinal dispersivity, inverse method, 3-dimensional numerical model, Powell's optimization method

## 1. はじめに

PCやワークステーションの高性能化によって、不均質性の高い地下の飽和・不飽和空間における浸透流と物質移動を連成させた3次元非線形連立偏微分方程式の数値解析が威力を発揮する環境が整ってきた。また、化石燃料に代わる代替エネルギーとして、また福島第一原子力発電所の事故に起因する電力不足を補う手段として、自然エネルギーに対する期待が高揚する中で(たとえば、藤縄<sup>1)</sup>)、地下熱を利用した冷暖房システムが急速に普及しつつあり(たとえば、長野<sup>2)</sup>)、複雑な帯水層システムにおける熱エネルギーの貯留や移動が正確に評価できる数値モデル(たとえば、藤縄・富樫<sup>3)</sup>)の重要性が飛躍的に高まっている。このような社会的要請に応えるためには、数値解析手法の開発と同時に、帯水層の水理定数や物質移動あるいは熱移動に関わるパラメータの簡便かつ高精度な評価手法の開発が欠かせない。

従来、透水量係数や貯留係数などの水理定数は揚水試験によって得られる地下水位の変動記録を用いて、井戸関数と呼ばれる各種の解析解に基づいて作成される標準曲線法などを利用した図解法を用いて同定されてきた<sup>4)</sup>。一方、流動地下水における物質や熱の移動に関わるパラメータの同定に当たっては、地下水中にトレーサを注

入し、その濃度の空間分布や時間変化をモニターする試験法が一般に用いられてきた。このトレーサ試験法は、トレーサ投入方法、濃度のモニター方法、トレーサの種類、解析法などの組み合わせにより様々な方法が選択できる<sup>5)</sup>。

トレーサの注入法には、地盤内の水圧を変化させないようにトレーサを注入する自然動水勾配試験法と注水や揚水により人為的に動水勾配をつける人為動水勾配試験法がある。前者は、自然の地下水流動によるトレーサの移動が検出でき、地下水流動を一樣と仮定することで解析解が誘導しやすいというメリットがあるが、注水や揚水により地下水の流動を加速しないためトレーサの検出までに要する時間が長くなるおそれがある上、事前調査で地下水の流動方向を正確に把握して下流の適切な位置に観測孔を設置出来なかった場合は、トレーサの検出に失敗するリスクがある。

トレーサ試験の費用、所要時間、モニターの容易性などを考えた場合、1本のボーリング孔で注入から濃度のモニターまでを実施する単孔式試験は非常に魅力的な方法である。Drost *et al.*<sup>6)</sup>は、トレーサをボーリング孔へ瞬間的に注入し、その孔内の濃度変化から地下水流速を求める点希釈法(Point Dilution Method)を提案している。近年、国内でよく利用されている単孔式流向流速試験も、

電極を複数配置して孔内のトレーサ濃度を計測するなど計測法は改良されているものの、試験の原理は点希釈法と同様である。点希釈法は地下水流速を計測する一手段であるが、Fujinawa<sup>7)</sup>は単孔に投入された塩水が地下水の移流および分散により希釈される現象を反映した詳細な解析解を導き、投入孔内の塩分濃度変化をパウエルの共役傾斜法<sup>8)</sup>を用いる最適化手法で逆解析する方法を提示し、利根川河川敷で現地試験を行い、地下水流速および縦・横分散係数を求めている。

単孔式トレーサ法は、トレーサ注入孔内でトレーサの濃度変化を直接計測するため、ボーリング孔埋戻し部の性状や帯水層鉛直方向の水圧分布などの影響を受け易く、測定精度を担保するためには測定要件を解析理論に厳格に一致させる必要がある。これに対して、多孔式トレーサ法は、単孔式より削孔費用は要するもの、埋戻し部のノイズなどが軽減できるため、同定結果の信頼性が向上する。

多孔式トレーサ法には、注入孔からトレーサを注入して周囲の観測孔で濃度変化をモニターする放射状発散試験法と、水頭分布が変わらないように注入孔に注入したトレーサの濃度を揚水孔で連続揚水してモニターする放射状収束試験法、注入孔でトレーサを圧力注入して揚水井で揚水したトレーサの濃度をモニターするダイポール試験法があり、放射状収束試験法についてはMoench<sup>9)</sup>が、ダイポール試験法についてはWelty and Gelhar<sup>10)</sup>やGrove and Beetem<sup>11)</sup>らが解析解を提案している。なお、放射状発散試験法、放射状収束試験法、ダイポール試験法はすべて人為動水勾配試験法に区分される。このうち、放射状発散試験法では注入孔に注入する真水とトレーサ溶液をパルス状やステップ状で切り替え、周辺の観測孔でトレーサ濃度を観測するため、トレーサの注入は比較的容易であるが、試験時間が長くなるとトレーサ溶液が多量に必要となる。また放射状収束試験法では、揚水による希釈を考慮して高濃度のトレーサを投入する必要がある。

トレーサ物質には、一般に色素、放射性あるいは安定同位体、塩化ナトリウムなどが用いられる。その利用に当たっては、安価でかつ入手が容易であること、安全であること、原位置観測が容易であることなどの要件を満たしている必要があり、電気伝導計を用いて原位置で簡便かつ迅速に測定できる塩化ナトリウムが従来より最も多く用いられてきた<sup>12)</sup>。ただし、流動地下水中には塩分濃度は大きく減衰するため、塩水をトレーサに利用する場合には注入水の塩分濃度を十分大きくする必要がある。

モニターされたトレーサ濃度から地層の分散長を同定する手段には、解析解を用いる方法と数値解を用いる方法がある。解析解を用いる場合は、地下水流動が一様で、注入井にトレーサが瞬間注入される、といった要件が満

たされる必要がある。Carslaw and Jaeger<sup>13)</sup>やBear<sup>14)</sup>などによる解析解は自然動水勾配下で且つ無限遠の一次元流動場を想定している。しかしながら、トレーサ溶液を注入する試験法では、これらの要件を満足させることは実質的に不可能である。これに対して、地下水流動と物質移動を連成させた数値解法を用いる方法では、計測された注入水量や注入濃度に応じて解析内容を試験法へ適合させることができるため、柔軟に解析することが可能である。ただし、高濃度塩水をトレーサとする場合は、淡水地下水と塩水トレーサとの間に大きな密度差があるため密度流が発生し、高濃度の塩水トレーサは淡水地下水下部に沈降する特性がある。川端ほか<sup>15)</sup>は平面2次元数値解析法を用いて物質移動パラメータを求めているが、より正確にパラメータを同定するためには密度依存流を考慮した3次元の数値モデルが必要である。

実地のトレーサ試験では現場の地質構造が不均一なうえ、地下水流動状況がトレーサ注入によって変動し、さらにはトレーサの注入量や注入濃度も変化する。このようなケースの解析には、解析解よりも数値解が適している。さらに、取り扱いや計測が容易な塩化ナトリウムをトレーサとして用いた場合、密度依存流の影響が考慮できる3次元数値モデルが有用である。そこで本研究では、信州大学長野若里キャンパスにおいて、注入孔から塩水トレーサを注入して人為的な地下水流動を生じさせて近傍の観測孔でトレーサ濃度を原位置観測する2孔式塩水トレーサ試験を実施し、流体の密度を考慮した飽和・不飽和浸透流と物質移動を連成させた3次元数値モデルをパウエルの共役傾斜法と組み合わせた逆解析により飽和透水係数および縦分散長を同定する手法を開発し、その精度を検証するとともに、原位置トレーサ試験結果へ適用し帯水層定数を同定した。

## 2. 帯水層中における塩水トレーサの移動および数値解析の基礎理論とパウエルの共役傾斜法の概要

帯水層中における塩水トレーサの移動は、密度を考慮した飽和・不飽和多孔体中の浸透流に関する支配方程式と、移流および分散を伴う物質輸送の支配方程式を連成させることにより解析できる。

### (1) 流体密度を考慮した 3 次元飽和・不飽和浸透流の支配方程式

流体の密度を考慮した飽和・不飽和多孔体中の浸透流の基礎方程式は、Bear<sup>14)</sup>に従い次式で与えられる。

$$(S_e S_s + C_s) \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{K} \nabla \left( h + \frac{\rho z}{\rho_f} \right) - \sum_I Q_I \delta_I(\mathbf{x} - \mathbf{x}_I) \quad (1)$$

ここに、 $S_e$  は有効飽和度、 $S_s$  は比貯留係数(不飽和帯では  $S_s \geq 0$ )、 $C_s (= n \partial S_e / \partial h)$  は比水分容量(飽和帯では  $C_s = 0$ )、 $n$  は間隙率、 $h$  は圧力水頭、 $t$  は時間、 $\mathbf{K}$  は淡水に対する透水係数テンソル、 $\rho$ 、 $\rho_f$  はそれぞれ流体および基準とする淡水の密度、 $z$  は鉛直上向き座標、 $Q_I$  は井戸  $I$  の揚水強度、 $\delta_I(\mathbf{x} - \mathbf{x}_I)$  はディラックのデルタ関数である。なお、 $\mathbf{x}$  は位置ベクトル、 $\mathbf{x}_I$  はスクリーンの位置ベクトルであり、以下では地下水流動方向が透水係数テンソルの主軸方向と一致するものとし、 $\mathbf{K}$  の  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向成分をそれぞれ  $K_x$ 、 $K_y$ 、 $K_z$  とする。

流体密度  $\rho$  は、淡水密度  $\rho_f$ 、塩水密度  $\rho_s$  および塩分相対濃度  $c$  ( $0 \leq c \leq 1.0$ ) を用いて次式で表現できる。

$$\rho = \rho_f + (\rho_s - \rho_f) c \quad (2)$$

土壌が不飽和の場合、van Genuchten の関係式<sup>16)</sup>より、有効飽和度  $S_e$  は圧力水頭  $h$  の関数として、次式で与えられる。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + \alpha |h|^\beta)^\gamma}, \quad \left( \gamma = 1 - \frac{1}{\beta} \right) \quad (3)$$

ここに、 $\theta_s$  は飽和体積含水率、 $\theta_r$  は残留体積含水率、 $\alpha$ 、 $\beta$  は土壌に固有のパラメータである。また不飽和領域での透水係数  $K (= \rho g k / \mu)$  は、次式で算出される透過度  $k$  により算定できる。

$$k = k_s S_e^{1/2} \left\{ 1 - (1 - S_e^{1/\gamma})^2 \right\} \quad (4)$$

ここに、 $g$  は重力加速度、 $\mu$  は粘性係数、 $k_s$  は飽和透過度である。飽和領域で  $k$  は  $k_s$  で一定となり、飽和透水係数  $K_s$  が得られる。なお、不飽和浸透における土壌水分特性曲線のヒステリシスを考慮する場合、藤縄<sup>17)</sup>が土壌水分の変動過程をモデル化している。

## (2) 3次元物質輸送の支配方程式

飽和・不飽和浸透を伴う保存性物質輸送の支配方程式は次の移流分散方程式で与えられる<sup>18)</sup>。

$$\nabla \cdot D_{ij} \nabla c - \mathbf{v} \cdot \nabla c = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (5)$$

ここに、 $D_{ij}$  は水学的分散係数で添字  $i, j = 1, 2, 3$  はそれぞれ  $x, y, z$  に対応し、 $\mathbf{v} (= \mathbf{q}/n)$  は間隙流速ベクトル、 $\mathbf{q}$  は浸透流解析で得られるダルシー流速である。水学的分散係数  $D_{ij}$  は、等方性媒体では分散度を表す4階のテンソル  $\alpha_{ijkl}$  を用いて次式で与えられる<sup>14)</sup>。

$$D_{ij} = \alpha_{ijkl} |v_k| |v_m| / |\mathbf{v}| + D_{ef} \quad (6)$$

$$\alpha_{ijkl} = \alpha_T \delta_{ij} \delta_{km} + (\alpha_L - \alpha_T) (\delta_{ik} \delta_{jm} + \delta_{im} \delta_{jk}) / 2$$

ここに、 $D_{ef}$  は有効分子拡散係数、 $\delta_{ij}$  などはクロネッカーのデルタであり、 $v_k$ 、 $v_m$  等の添字はそれぞれ  $k$ 、 $m$  方向の座標を意味し、 $k, m = 1, 2, 3$  はそれぞれ  $x, y, z$  に対応する。なお、物質輸送に係る帯水層定数は、水学的分散係数  $D_{ij}$  を得るための縦分散長  $\alpha_L$  および横分散長  $\alpha_T$  である。

## (3) ガラーキン型有限要素法による3次元飽和・不飽和密度依存浸透流の数値解法

3次元飽和・不飽和浸透流を有限要素法を用いて解析する場合、アイソパラメトリック(六面体)要素、プリズム(三角柱)要素、四面体要素などによる要素分割が可能であるが、トレーサ試験は比較的狭い範囲で地表面の高低差が小さい場所で実施されること、また解析にあたっては揚水井や注入井などを正確に表現する必要があることを考慮し、以下ではプリズム要素(たとえば、藤縄・富樫<sup>3)</sup>)を適用する。

まず、領域をプリズム要素に分割し、圧力水頭  $h$  を各節点  $j$  における水頭値  $h_j$  と座標関数  $\varphi_j(x, y, z)$  との一次結合

$$h \cong \sum_{j=1}^n \varphi_j(x, y, z) h_j \quad (7)$$

で近似する。ここに、 $n$  は総節点数である。また、流体密度  $\rho$  も圧力水頭  $h$  と同じ座標関数を用いて、

$$\rho \cong \sum_{j=1}^n \varphi_j(x, y, z) \rho_j \quad (8)$$

で近似する。

ここで、式(1)を変形すると次の残差方程式  $R(h)$  が得られる。

$$R(h) \equiv (S_e S_s + C_s) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (9)$$

$$- \nabla \cdot \mathbf{K} (\nabla h + \frac{\rho}{\rho_f} \nabla z) + \sum_I Q_I \delta_I = 0$$

ついで、残差方程式  $R(h)$  にガラーキン型有限要素法を適用すると次の関係式が得られる。

$$\iiint_V \varphi_i R(h) dx dy dz = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

式(10)に式(9)を代入してガウスの発散定理を適用し、要素  $e$  における座標関数  $\varphi$  を  $N^e$  で表してマトリクス表示すると、次の連立一次方程式が得られる。

$$[A_e] \{h\} + [B_e] \{\rho\} + [F_e] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\} = \{Q_e\} \quad (11)$$

$$A_{h,ij} = \sum_{e=1}^E \iiint_V \left( K_x \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + K_y \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} + K_z \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) dx dy dz$$

$$B_{h,ij} = \sum_{e=1}^E \iiint_V \frac{K_z}{\rho_f} \frac{\partial N_i^e}{\partial z} N_j^e dx dy dz$$

$$F_{h,ij} = \sum_{e=1}^E \iiint_V (S_e S_s + C_s) N_i^e N_j^e dx dy dz$$

$$Q_{h,i} = - \sum_{e=1}^E \sum_T \iiint_V N_i^e Q_T \delta_T(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) dx dy dz + \sum_{e=1}^E \iint_S N_i^e \mathbf{K}(\nabla h + \frac{\rho}{\rho_f} \nabla z) \cdot \mathbf{n} ds$$

ここに、 $E$ は全要素数、 $\mathbf{n}$ は外法線単位ベクトルである。なお、時間項に関わるマトリックス $F_{h,ij}$ はランピングにより不飽和領域における湿潤前線付近での数値解の振動を制御する。したがって、 $F_{h,ij}$ は

$$F_{h,ij} = \sum_{j=1}^n \sum_{e=1}^E \iiint_V (S_e S_s + C_s) N_i^e N_j^e dx dy dz \quad (i = j) \quad (12)$$

$$F_{h,ij} = 0 \quad (i \neq j)$$

となる。

式(11)の左辺第3項の差分近似に解の安定性が良い陰解法を用いると、式(11)は最終的に

$$([A_h] + [F_h]/\Delta t)\{h\}_{t+\Delta t} + [B_h]\{\rho\}_{t+\Delta t} = \{Q_h\} + [F_h]\{h\}_t/\Delta t \quad (13)$$

と書き直すことができる。流体密度 $\rho$ は相対濃度より計算されるので、後述する相対濃度の離散化式と連成させることにより圧力水頭 $\{h\}_{t+\Delta t}$ を求めることができる。

#### (4) 特性曲線型有限要素法による3次元物質輸送の数値解法

式(5)を双曲型の移流項と放物型の分散項に分離し、移流項に特性曲線法、分散項に有限要素法を適用する特性曲線型有限要素法 (Characteristic Finite Element Method : CFEM)<sup>19),20),21)</sup>を用いて離散化することにより解の振動が防げ、さらに数値分散が緩和できる。そこで式(5)を Garder *et al.*<sup>22)</sup>に従い次の3次元空間の連立微分方程式に変換する。

$$L(c) = \frac{Dc}{Dt} - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \right\} \quad (14)$$

$$\frac{Dc}{Dt} = \frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z}$$

ここに、 $L(c)$ は残差方程式であり、 $Dc/Dt$ はラグランジェ微分、 $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$ はそれぞれ $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向の間隙流速成分である。

まず、 $c$ を各節点 $j$ における相対濃度 $c_j$ と座標関数 $\varphi_j(x, y, z)$ との一次結合で以下のように近似する。

$$c \cong \sum_{j=1}^n \varphi_j(x, y, z) c_j \quad (15)$$

次に、 $L(c)$ にガラーキン型有限要素法を適用すると次式を得る。

$$\iiint_V \varphi_i L(c) dx dy dz = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

さらに、式(16)にガウスの発散定理を適用し、要素 $e$ における座標関数 $\varphi$ を $N^e$ で表してマトリックス表示すると次の連立一次方程式が得られる。

$$[A_c]\{c\} + [F_c] \left\{ \frac{Dc}{Dt} \right\} = \{Q_c\} \quad (17)$$

$$A_{c,ij} = \sum_{e=1}^E \iiint_{V^e} \left\{ \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \left( D_{xx} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \left( D_{yx} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \left( D_{zx} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) \right\} dx dy dz$$

$$F_{c,ij} = \sum_{e=1}^E \iiint_{V^e} N_i^e N_j^e dx dy dz$$

$$Q_{c,i} = \sum_{e=1}^E \iint_S N_i^e \mathbf{D} \nabla c \cdot \mathbf{n} ds$$

特性曲線法の粒子追跡において、各固定節点に時間 $t + \Delta t$ の粒子を配置し、時間 $t$ におけるそれら粒子の位置とそのときの相対濃度を逆算するSRPT(Single-step Reverse Particle Tracking)法<sup>18)</sup>を適用すると、次式が得られる。

$$\left( \frac{[A_c]}{2} + \frac{[F_c]}{\Delta t} \right) \{c\}_{t+\Delta t}^{k+1} = \{Q_c\} - \left( \frac{[A_c]}{2} - \frac{[F_c]}{\Delta t} \right) \{c\}_t - \frac{[F_c]}{\Delta t} \left( \frac{\{c\}_{t+\Delta t}^k + \{c\}_t}{2} - \frac{\{\bar{c}\}_{t+\Delta t} + \{\bar{c}\}_t}{2} \right) \quad (18)$$

ここに、 $\bar{c} = c(\mathbf{x} - \mathbf{v}\Delta t)$ である。

連立一次方程式(18)を式(13)と連成させて解くことにより時間 $t + \Delta t$ における各節点 $i$ での相対濃度 $c(\mathbf{x}_i, t + \Delta t)$ が計算できるが、このとき係数行列を圧縮し、飽和・不飽和浸透流の連立一次方程式の解法と同様に共役勾配法を適用することによって、計算容量を節約し、計算時間を短縮する。

(5) パウエルの共役傾斜法

帯水層定数を同定するための非線形最適化法には、Newton-Raphson法、Gauss-Newton法、DEP法、adjoint法などがある。これらの方法はいずれも目的関数の勾配、すなわち未知パラメータに関する微係数を計算して最適パラメータを探索する。一方、パウエルの共役傾斜法は、目的関数の評価値から間接的に共役方向を求めるため、各パラメータに関する微係数を計算する必要がない。この利点を利用して、小林・丸山<sup>23)</sup>はタンクモデルの定数を同定している。また、パウエルの共役傾斜法は地下水学の分野でも解析解や数値解の逆解析に効力を発揮し、Fujinawa<sup>7)</sup>、藤縄<sup>17)</sup>、江澤ほか<sup>24)</sup>は解析解を用いて逆解析を行い、藤縄<sup>25)</sup>、堀野<sup>26)</sup>は数値解を用いて逆解析を行っている。本研究では、塩水トレーサ試験に対する数値解析の逆解析にパウエルの共役傾斜法を適用する。

最適パラメータを同定するため、任意時間 $t_j$ における $i$ 地点の実測トレーサ濃度を $c_i(t_j)$ 、計算値を $c'_i(t_j)$ とし、目的関数 $F$

$$F = \sqrt{\sum_{j=1}^m \{c_i(t_j) - c'_i(t_j)\}^2} \quad (19)$$

を最小にする探索過程の最終結果として最適パラメータを求める。ここに、 $m$ は実測トレーサ濃度のデータ数である。

3. 3次元数値モデルを用いた逆解析コードの開発

(1) 物質輸送解析コード SIFEC とパウエルの共役傾斜法を用いた逆解析

2孔式塩水トレーサ試験におけるトレーサの挙動は前述の基礎理論で定式化されている。そこで本研究では、連成支配方程式の3次元数値解析とパウエルの共役傾斜法を併用することにより、支配方程式の主要パラメータである飽和透水係数 $K_s$ と縦分散長 $\alpha_L$ を同定するための逆解析法を開発した。なお、ここでは均質等方性地盤を想定し、数値解析には塩水浸入解析などで実績のある物質輸送解析コード SIFEC (Salt-water Intrusion by Finite Elements and Characteristics)<sup>27)</sup>の3次元版<sup>28)</sup>を適用する。

(2) パラメータ同定手順

本逆解析法によるパラメータ同定手順を図-1に示す。まず、数値解析の境界条件として用いることとなる塩水トレーサ試験時の注入孔における全水頭の時間変化 $H_{inj}(t)$ および注入水の相対濃度の時間変化 $c_{inj}(t)$ 、併せて観測孔のセンサー設置位置( $i$ 地点)において、逆解析の検証値となる相対濃度の時間変化 $c_i(t)$ を測定する。

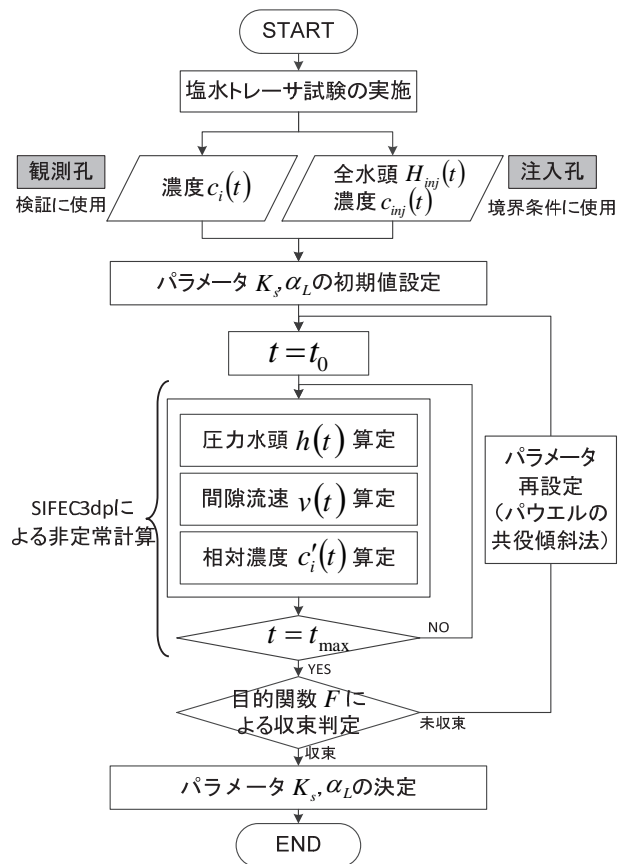


図-1 逆解析法によるパラメータの同定手順

次に、飽和透水係数 $K_s$ と縦分散長 $\alpha_L$ に初期推定値を設定し、SIFEC3dpにより時間 $t_{max}$ までの非定常の順解析を実施する。この非定常計算では求められたモデル領域内の圧力水頭 $h(t)$ を用いて間隙流速 $v(t)$ の分布を評価し、さらに $i$ 地点における相対濃度の計算値の時系列データ $c'_i(t)$ と観測濃度 $c_i(t)$ から、式(19)を用いて目的関数の値 $F$ を求め、逆解析の収束判定を行う。未収束と判断された場合はパウエルの共役傾斜法によりパラメータを再設定し、同様の手順を繰り返してパラメータ同定を行う。

(3) 逆解析法の検証

開発した逆解析プログラムの検証は以下に示す 1)~4)の手順により実施する。

1) SIFEC3dpによる順解析の実施

まず、SIFEC3dpを用いてテストケースにおける順解析を実施した。テストケースによる数値解析には、後述する原位置トレーサ試験への適用を想定して、図-2に示す扇形の中心部を注入孔とする半径100mの3次元領域を用いた。なお、3次元領域としたのはトレーサである塩水による密度変化を表現するためであり、有限要素法では要素形状が正三角形に近いものが望ましいため中心角を $60^\circ$ とした。また、テストケースの解析領域は鉛直方向の幅を6m ( $\Delta z=1.0m \times 6層$ )とするプリズム要素で分割

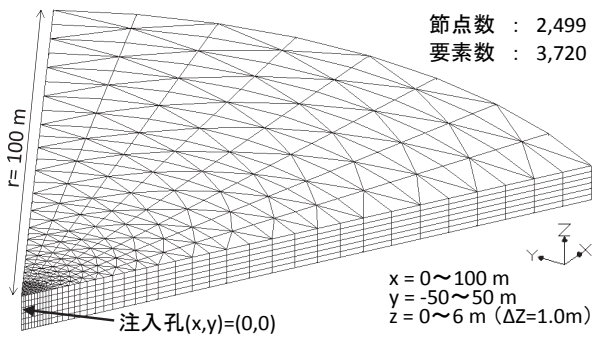


図-2 テストケースに用いたFEMメッシュ

表-1 テストケースの順解析条件

計算条件		テストケース		
		case1	case2	case3
パラメータ	飽和透水係数 cm/s	0.1667	0.8333	1.6667
	縦(横)分散長 m	10.000	2.000	1.000
	間隙率	0.20		
時間条件	計算時間	360分		
	時間刻み	0.2分		
境界条件	定水頭境界	(注入孔) 全水頭H=11.0m (円弧上) 全水頭H=6.0m		
	定濃度境界	(注入孔) 相対濃度c=1.0で一定		
初期条件	初期水位	モデル領域で一様 全水頭H=6.0m		
	初期濃度	モデル領域で一様 相対濃度c=0.0		
塩水密度 g/cm <sup>3</sup> (c=1.0)		1.1000		

し、塩水と淡水の密度差を考慮した計算を行った。

テストケースは3パターンで実施した。それぞれの計算条件を表-1に示す。間隙率は後述する現場トレーサ試験サイトで推定された有効間隙率と同値とした。なお、トレーサ試験では注入孔を中心とする放射状流となる。したがって、放射方向の地下水流動が同心円方向に対して卓越し、流れに直交する同心円方向の分散現象の影響は無視できると考えられることから、数値解析においては横方向の計算値が一樣になるように、便宜的に縦分散長と横分散長の比を  $\alpha_r / \alpha_L = 1$  とした。

一方、飽和・不飽和浸透流解析においては、上下面および側面を不透水境界とした。また、物質輸送解析では、トレーサ注入条件を設定する節点群は定濃度境界として相対濃度  $c = 1.0$  を与え、それ以外の境界上の節点はすべて不分散境界とした。

2) サンプリング地点における検証用データの取得

テストケースの順解析により、サンプリング地点  $(x_i, y_i, z_i) = (9.3, 0.0, 3.0)$  における相対濃度を計算し、時系列データとして式(19)の  $c_i(t_j)$  に与える。

3) 開発したプログラムによる逆解析の実施

同定パラメータである飽和透水係数  $K_s$  と縦分散長  $\alpha_L$  の初期値は順解析に用いた設定値と異なる値を初期推定

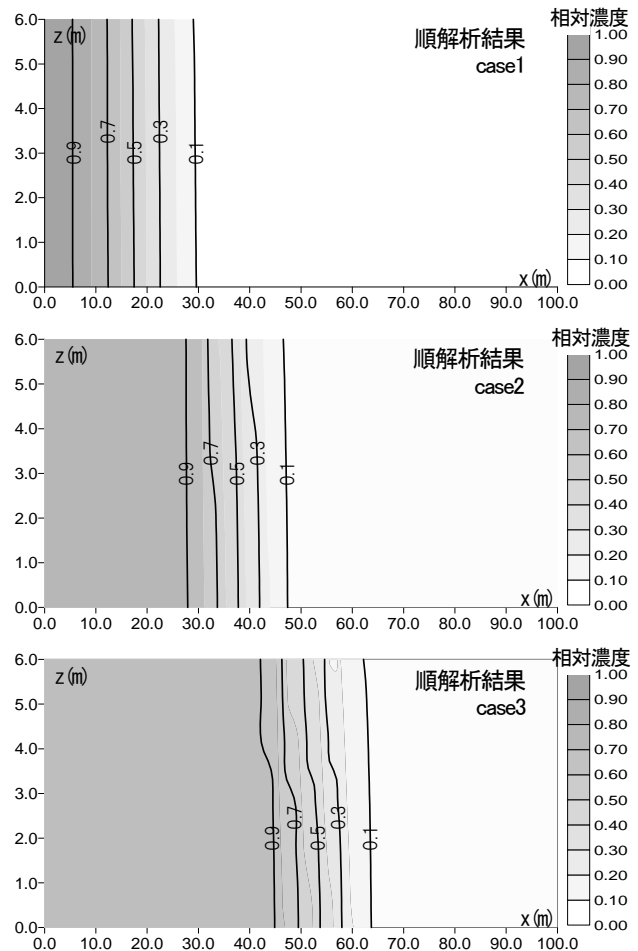


図-3 相対濃度の鉛直分布 (t=360分)

表-2 テストケースにおけるパラメータ同定結果

逆解析 テスト ケース名	飽和透水係数 cm/s			縦分散長 m			逆解析 収束時の 目的関数F
	順解析 設定値	逆解析		順解析 設定値	逆解析		
		初期値	同定値		初期値	同定値	
case1	0.1667		0.1662	10.000		10.040	0.00217
case2	0.8333	0.3333	0.8325	2.000	5.000	1.999	0.00281
case3	1.6667		1.6637	1.000		1.001	0.00413

値に与え、逆解析を実施する。なおすべてのケースにおいて計算開始から60分間のデータを用いた。すなわち、検証用データ数  $n$  を60 (1分間隔)、収束条件を  $F < 0.005$  とした。

4) 同定パラメータの検証

逆解析で同定したパラメータを順解析の設定値と比較し、そのパラメータの同定精度を検証した。

図-3はテストケースのcase1, case2, case3における計算開始から360分経過後の相対濃度の鉛直分布(横軸をx軸、縦軸をz軸)を図示したものである。遷移領域に着目すると、縦分散長の設定値が最も大きいcase1で最大となっている。一方、case2とcase3を比較すると、飽和透水

係数が大きく、移流が卓越するcase3の方が濃度フロントの移行距離が長くなっている。また、case2とcase3では濃度フロントが下方ほどやや移行距離が長くなっているが、これは密度流により注入した塩水が下方へ沈降したためである。

サンプリング地点  $(x_i, y_i, z_i) = (9.3, 0.0, 3.0)$  における各テストケースの相対濃度を検証値として、逆解析プログラムの検証を実施し、表-2に示すパラメータ同定値が得られた。

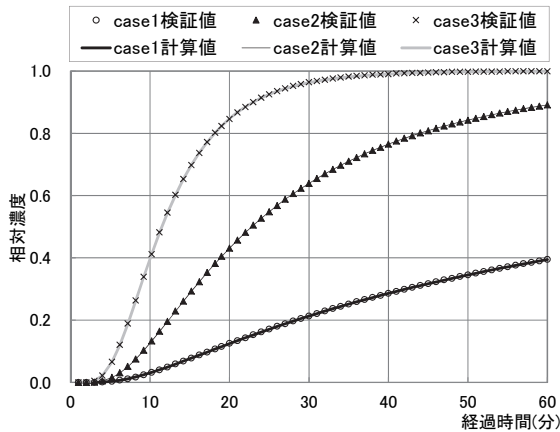


図4 順解析より得られたサンプリング地点の検証値と逆解析の同定パラメータを用いた計算値との比較

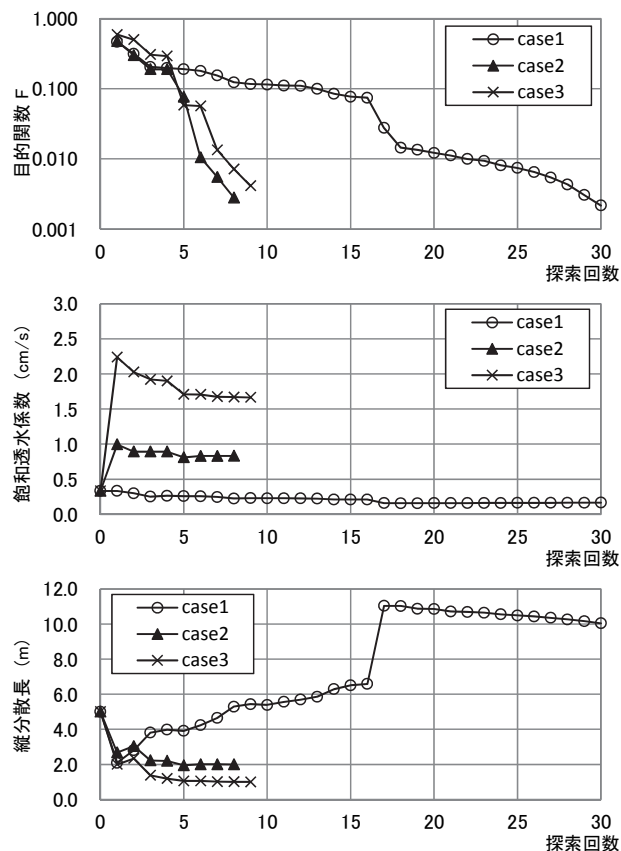


図5 テストケースにおける逆解析時の目的関数、飽和透水係数、縦分散長の探索状況

3ケースにおける同定値と順解析時の設定値との誤差はいずれも-0.3%~0.4%の範囲内であった。また、順解析より得られた検証値と逆解析で同定したパラメータを用いた計算値を比較したものが図-4であり、すべてのケースにおいて良好な再現性を示している。図-5に逆解析が収束に至るまでの目的関数  $F$ 、飽和透水係数、縦分散長の推移を示す。いずれのケースも  $F < 0.005$  となった時点で計算を終了させた。なお、ワークステーション (CPU : Intel Xeon W3580) を使用した場合、収束までに要した計算時間は、最も探索回数の少なかったcase2の場合で約840分であった。これら結果より、テストケースの条件下において、開発した逆解析プログラムの妥当性および有効性が確認できた。

#### 4. 2孔式塩水トレーサ試験の適用

##### (1) 試験サイトの地質構造と試験に用いた井戸群

筆者らは2010年度より信州大学工学部若里キャンパスにおいて帯水層蓄熱 (Aquifer Thermal Energy Storage : ATEs) を利用した地下水制御型地下熱冷暖房システムの実証試験を実施しており<sup>29),30),31)</sup>、試験プラント稼働に先駆けて図-6に示す調査・観測孔で基礎調査を行った。表-3に調査・観測孔の諸元を、図-7に実証試験サイトの地質構造を明らかにするため実施されたA70孔でのオールコアボーリング結果とB孔で実施された電気検層結果を示す。これらの基礎調査より実証試験サイトは砂礫層と粘土層の互層構造を成していることがわかった。そこで本研究では、図-7に示すとおり、帯水層を浅層より順に第一帯水層、第二帯水層、第三帯水層に区分した。なお、図-7の電気検層結果より、各帯水層区分内において地層の不均質性が確認できるが、本研究では明瞭に確認できた粘土層により便宜的に帯水層を分割した。

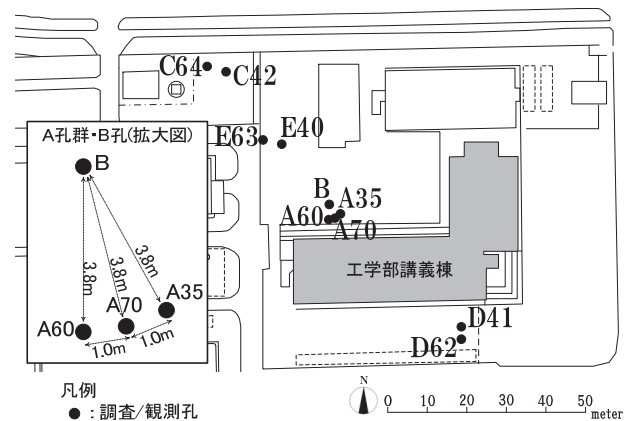


図6 調査・観測孔の配置図

表-3 調査・観測孔の諸元

井戸名称 (数字は深度m)	井戸口径 (mm)	スクリーン位置 (G.L.-m)	対象 帯水層	電気 検層	コア 採取
A35	50	19~35	第一帯水層	-	-
A60	50	44~60	第二帯水層	-	-
A70	50	67~70	第三帯水層	-	○
B (深度80m)	150	7~40,47~ 63.5,69~74.5	第一, 二, 三 帯水層	○	-
C42	150	7~40	第一帯水層	-	-
C64	150	45~61.5	第二帯水層	-	-
D41	150	6~39	第一帯水層	-	-
D62	150	43.3~39.8	第二帯水層	-	-
E40	50	4.5~37.5	第一帯水層	-	-
E63	50	44~60.5	第二帯水層	-	-

表-4 自然地下水の流動状況

対象とする 帯水層	観測日	観測孔	地下水位 E.L.m	水位差 <sup>注)</sup> m	孔間距離 m	動水勾配	
第一帯水層	2011年 10月25日	E40	346.53	0.01	30.2	1/ 3,020	
		A35	346.52				
	2011年 10月29日	E40	346.49	0.02		1/ 1,510	
		A35	346.47				
	2012年 1月22日	C42	345.10	-0.08		88.1	1/ 1,101
		D41	345.18				
2012年 2月5日	C42	344.87	-0.09	1/ 979			
	D41	344.96					
第二帯水層	2011年 10月25日	E40	346.19	-0.06	30.2		1/ 503
		A60	346.25				
	2011年 10月29日	E40	346.16	-0.04		1/ 755	
		A60	346.20				
	2012年 1月20日	C64	344.37	0.01		94.5	1/ 9,450
		D62	344.36				
	2012年 2月10日	C64	344.69	0.02			1/ 4,725
		D62	344.67				

注) 水位差は南東方向を正として算出(観測孔欄の上段孔-下段孔)

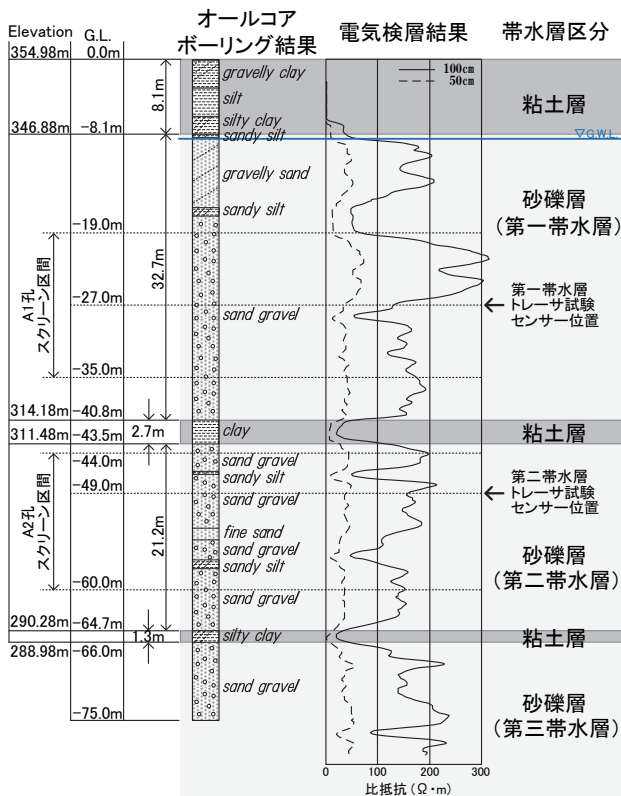


図-7 実証試験サイトの地質構造

表-3に示すとおり、A35孔、C42孔、D41孔、E40孔は第一帯水層に、A60孔、C64孔、D62孔、E63孔は第二帯水層に、A70孔は第三帯水層にそれぞれスクリーンが設けられており、B孔はすべての帯水層にスクリーンを有する調査孔になっている。また、C64孔、D62孔掘削時の掘削土砂観察より、各帯水層を分離する厚さ1~2mの粘土層に連続性が確認されている。ただし、粘土層厚が1m程度と薄い箇所もあることから、加圧による漏水が生じている可能性がある。

実証試験で実施するATESでは、第一帯水層に冷水、第二帯水層に温水を貯留するように設計されており、各

帯水層の水力定数および分散長を同定する目的で第一帯水層と第二帯水層で揚水試験および塩水トレーサ試験を実施した。

(2) 試験サイトにおける地下水調査結果

塩水トレーサ試験の実施に先立ち、A35孔、A60孔、A70孔において地下水位を測定した結果、第一帯水層の地下水位は標高 345.5m 程度で不圧地下水であることがわかった。また、第二帯水層のピエゾ水頭は第一帯水層よりも約 20~30cm 低く、第三帯水層のピエゾ水頭は第二帯水層よりさらに約 20~30cm 低いことが確認された。この結果、マルチスクリーンを有する B 孔では帯水層間の水頭差のため孔内において鉛直下向きの流れが生じているものと推定された。なお、実際には井戸掘削や複数回の揚水試験の実施等の人為的な作業により、埋戻し部においても帯水層間で地下水の交流が生じている可能性も考えられる。

さらに、自然地下水の流動状況を確認するため、A 孔群、E 孔群、C 孔群、D 孔群で地下水位を計測したところ(表-4 参照)、自然地下水の動水勾配は第一帯水層で約 1/980~1/3,020、第二帯水層で約 1/500~1/9,450 と、各帯水層とも極めて小さいことがわかった。

これらの調査結果を受け、試験サイトにおいて、B孔で揚水し、A孔群で観測する揚水試験と、C孔群で揚水し、E孔群で観測する揚水試験が実施された。

(3) 2孔式塩水トレーサ試験の概要

複数の帯水層定数を同定するため、第一帯水層と第二帯水層において放射状発散型の2孔式塩水トレーサ試験

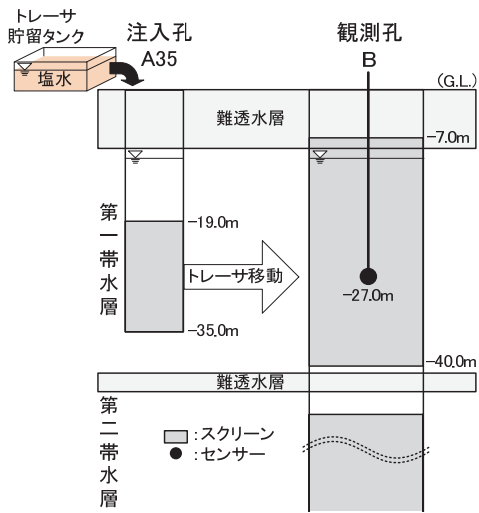


図-8 第一帯水層の2孔式塩水トレーサ試験模式図

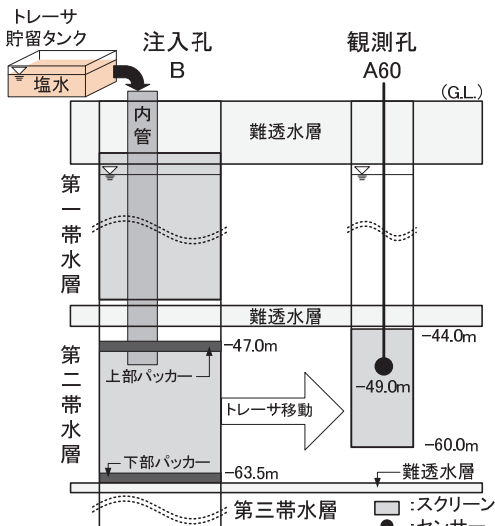


図-9 第二帯水層の2孔式塩水トレーサ試験模式図

を別々に実施した。なお、注入孔の地下水位は触針式水位計（分解能0.01m），トレーサ貯留タンク内の電気伝導度と水温はポータブルセンサ（分解能0.1mS/m, 0.1℃）をそれぞれ用いて計測した。また、観測孔は孔内にデータロガー付センサを設置し、地下水位（分解能0.001m），電気伝導度（分解能0.1mS/m），水温（分解能0.1℃）を1分間隔で自記録した。

a) 第一帯水層における塩水トレーサ試験の概要

図-8に示すように、第一帯水層ではA35孔に塩水を注入し、注入時の孔内水位と注入する塩水の塩分濃度を電気伝導度で計測すると共に、B孔のG.L.-27.0mの深度でも孔内水位と電気伝導度をモニタリングした。なお、A35孔とB孔の距離は3.8mである。

b) 第二帯水層における塩水トレーサ試験の概要

図-9に示すように、B孔の第二帯水層に相当するスク

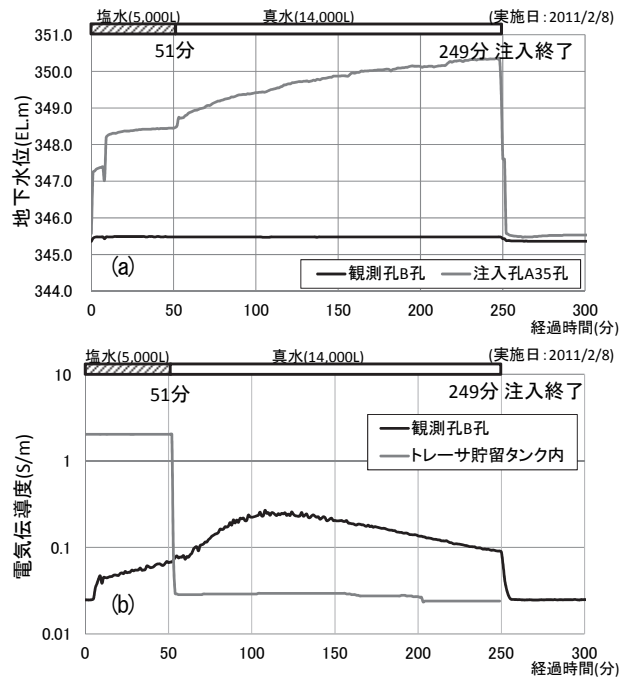


図-10 第一帯水層トレーサ試験時の地下水位(a)および電気伝導度(b)の変化

リーン区間の上下部にパッカーをかけ、B孔に挿入した内管より第二帯水層へ塩水を注入し、孔内水位と注入塩水の電気伝導度を計測した。またA60孔のG.L.-49.0mの深度でも孔内水位と電気伝導度をモニタリングした。なお、B孔とA60孔の距離は3.8mである。

(4) 2孔式塩水トレーサ試験の結果

a) 第一帯水層における試験結果

第一帯水層の塩水トレーサ試験（実施日：2011/2/8）では、試験開始から51分間は塩水（総量5,000L）を、51分経過後から198分間は真水（総量14,000L）をA35孔より注入した。このときの平均注水量は76.3L/分であった。図-10(a)に注入孔（A35孔）および観測孔（B孔）の水位変化を示す。A35孔では試験開始直後より注入終了時まで地下水位が上昇し続け、最大4.78mの水位上昇を観測したが、注入を終了すると極めて短時間に試験開始時の地下水位まで回復した。また、B孔でもA35孔とほぼ同様の水位の増減傾向が確認されたが、地下水位の変動量は0.13mであった。

図-10(b)はトレーサ貯留タンク内およびB孔内の電気伝導度を示したもので、B孔の電気伝導度は注入開始から約10分後より上昇し始め、注入開始から約120分後にピークを観測している。試験開始から249分後にA35孔への注水を終了したが、B孔の電気伝導度は注水終了直後に急激に低下している。図-10(a)の地下水位変動から明らかのように、注入終了後に速やかにA35孔の地下水位

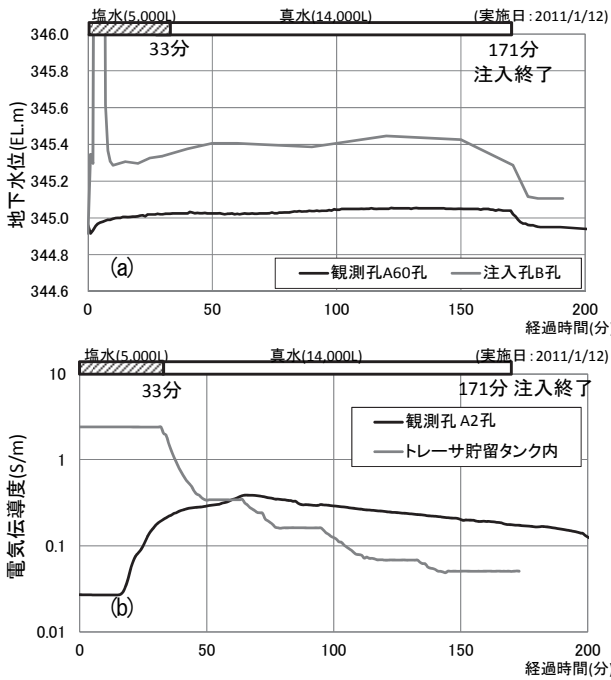


図-11 第二帯水層トレーサ試験時の地下水位(a)および電気伝導度(b)の変化

が自然地下水位程度まで低下し、注入孔A35孔から観測孔B孔に向かう流れがなくなっている。

b) 第二帯水層における試験結果

第二帯水層の塩水トレーサ試験（実施日：2011/1/12）では、B孔に挿入した内管より、試験開始から33分間は塩水（総量 5,000L）を、それ以降138分までは真水（総量 14,000L）を注入した。このときの平均注入量は111.8L/分であった。図-11(a)に注入孔（B孔）および観測孔（A60孔）の水位変化を示す。短時間に多量の水を注入したため内管内の水位が試験開始直後に一時的に上昇（バブリング）したが、10分程度で安定し、その後は注入終了まで345.4m程度の水位が続いた。一方、A60孔では試験開始直後に水位がやや上昇し、約20分あたりから緩い水位上昇に転じ、注水終了と共に急速にもとの水位に回復した。なお、水位上昇幅は、初期のバブリング期を除けばB孔が0.34m、A60孔が0.13mであった。

図-11(b)に示すように貯留タンク内のトレーサの電気伝導度は塩水注入終了後ゆるやかに低下しており、A60孔では試験開始から約66分後に電気伝導度のピークを観測した。

(5) 電気伝導度と水温の観測値を用いた塩水密度の算出

密度依存流を考慮した浸透流と物質輸送の連成解析には、塩水密度 $\rho_s$ が必要である。塩水密度は塩分濃度と水温によって変化するため、ここでは富樫・藤縄<sup>32)</sup>が導

表-5 質量分率算定式のパラメータ

$\alpha_0$	0.00636	$\alpha_1$	0.00402	$\alpha_2$	0.0000440
$\alpha_3$	0.000248	$\alpha_4$	-0.000000258	$\alpha_5$	0.000248

出した塩分濃度と水温を変数とする密度の補助方程式

$$\rho_s = \rho_f + \frac{1 - \rho_f A}{(B - 1)/\rho_f + A}, \quad B = c_m^{-1} \quad (20)$$

を用いて $\rho_s$ を求める。なお、淡水密度 $\rho_f$ はFischer et al.<sup>33)</sup>の付表から求めた水温 $T$  (°C) を変数とする関係式

$$\rho_f = 1.0 - 0.0000269 \times (T - 4) - 0.000005233 \times (T - 4)^2 \quad (21)$$

から求めることができる。また、式(20)の $B$ を求めるために必要な質量分率 $c_m$  (=溶質の質量/溶液の質量) は、電気伝導度 (25°C補正值)  $E_c$  (S/m) と水温 $T$  (°C) を用いた $E_c$  と $T$  の双二次多項式として次式で近似できる。

$$c_m = \alpha_0 + \alpha_1 E_c + \alpha_2 T + \alpha_3 E_c^2 + \alpha_4 T^2 + \alpha_5 E_c \cdot T \quad (22)$$

ここに、 $\alpha_0 \sim \alpha_5$  は定数 (表-5参照) である。

さらに、溶液中に溶解している塩分の質量 $m_s$  と溶液の体積 $V_s$  から求まる $A (= V_s / m_s)$  と質量分率 $c_m$  との関係式は、理科年表の「種々の物質の水溶液の密度」を用いると、近似式

$$A = -0.400641c_m^2 + 0.372264c_m + 0.290671 \quad (23)$$

で与えることができる。

そこで、トレーサ試験時に観測した注入水の $E_c$  と $T$  を用いて式(22)より求めた質量分率の最大値 $c_{mmax}$  を用い、注入孔の相対濃度 $c_{inj} (= c_m / c_{mmax})$  を算出した。なお、以上の補助式より算出したトレーサ試験時における相対塩分濃度 $c_{inj} = 1.0$  の塩水密度 $\rho_s$  は、第一帯水層試験では1.01102g/cm<sup>3</sup>、第二帯水層試験では1.01180g/cm<sup>3</sup>であった。また、第一帯水層で実施した試験で測定された観測孔B孔でのピーク時相対塩分濃度は0.10、第二帯水層で実施した試験で測定された観測孔A60孔でのピーク時相対塩分濃度は0.14であった。

5. 逆解析による帯水層定数の同定

前項で検証した逆解析法を前述の2孔式塩水トレーサ試験に適用し、第一帯水層、第二帯水層の飽和透水係数と縦分散長を同定した。

なお、本研究で実施した塩水トレーサ試験では、図-8、図-9に示すように、一観測孔内の一観測点で塩分濃度

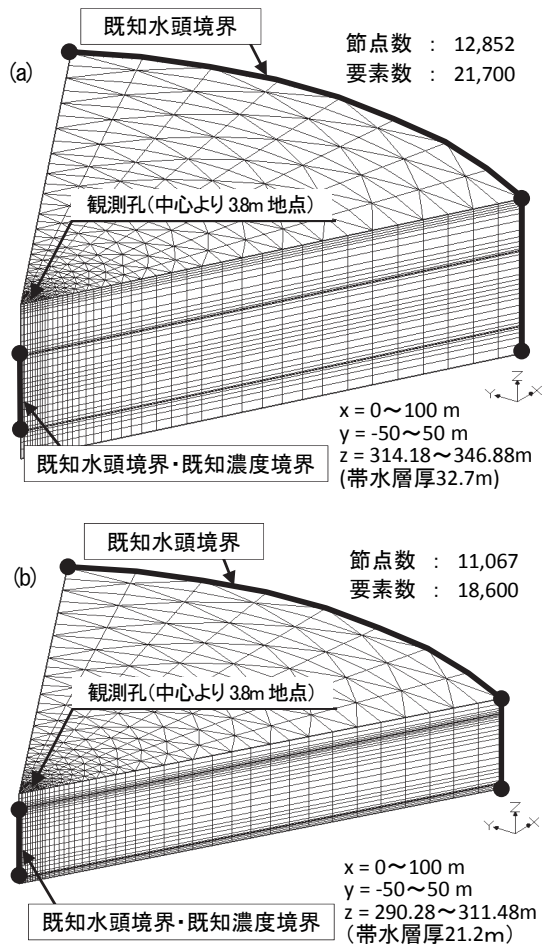


図-12 逆解析用3次元FEMメッシュ (第一帯水層(a), 第二帯水層(b))

を計測しているが、不均質・異方性の地盤特性を評価する場合は、複数の観測孔および複数深度での計測を行い、このような条件にも対応できる3次元数値モデルを用いた逆解析手法を開発する必要がある。

(1) 計算メッシュおよび計算条件

逆解析には図-12に示す3次元プリズムメッシュを使用した。なお、水平方向の三角形は水位や濃度変化が大きい注入孔周辺で密にした。また、プリズム要素のZ方向の要素長は $\Delta z = 1.0 \sim 2.0m$ を基本としたが、注入孔スクリーンの上下端付近は大きな圧力変化が想定されることから $\Delta z = 0.1m$ とし、さらに第一帯水層は不圧地下水となることから、不飽和浸透流の計算に対応できるよう、モデル上面から2.0m区間を $\Delta z = 0.5m$ とした。

逆解析では同定値が局所解とならないように初期値を変えた複数ケースを同時に計算しており、その探索過程において一般値から大きく乖離する値で収束する傾向が見られたケースは棄却した。最適解に至ったと判断された逆解析ケースに用いた初期値、物性値および計算条件

表-6 逆解析の計算条件

計算条件		逆解析ケース		
		第一帯水層	第二帯水層	
パラメータ	初期値	飽和透水係数 cm/s	0.01667	0.03333
	不飽和物性	縦分散長 m	5.000	2.000
		横分散長 m	5.000	2.000
		比貯留係数 1/m	0.00000758	0.00051800
	境界条件	間隙率	0.20	0.20
		(飽和領域のみ)	飽和体積含水率	0.20
残留体積含水率			0.10	
Genuchten式 $\alpha$			5.270	
Genuchten式 $\beta$	2.156			
時間条件	塩水密度 $g/cm^3$	1.01102	1.01180	
	計算時間	250分	170分	
時間刻み		0.1分~1.0分		
初期条件	定水頭境界	(注入孔) 実測水位 (円弧上) 全水頭H=345.571m	(注入孔) 実測水位 (円弧上) 全水頭H=344.915m	
	定濃度境界	(注入孔) 実測トレーサ濃度	(注入孔) 実測トレーサ濃度	
境界条件	初期水位	モデル領域で一樣 全水頭H=345.571m	モデル領域で一樣 全水頭H=344.915m	
	初期濃度	モデル領域で一樣 相対濃度c=0.0	モデル領域で一樣 相対濃度c=0.0	

を表-6に示す。

試験サイトの不飽和帯の物性値については文献から得られた礫層のパラメータを用いた。また、各帯水層の間隙率 $n$ はオールコアボーリング結果から $n = 0.2$ とした。

飽和・不飽和浸透流解析では、各帯水層の上下部に存在する粘土層を不透水層とみなし、上下面を不透水境界とした。また、地下水の流れは注入孔を中心とする放射状流となるため、側面も不透水境界とした。さらに、トレーサ注入部となる扇型中心部に位置する節点群のうち、注入孔スクリーン区間に該当する節点には水位変動型既知水頭境界を設定し、第一帯水層ではA35孔のスクリーン区間 (EL.319.98~335.98m)、第二帯水層ではB孔のスクリーン区間 (EL.291.48~307.98m)の境界条件に実測地下水位を与えた。一方、トレーサの注入に伴う水圧の影響範囲をヤコブの近似解<sup>9)</sup>を用いて計算したところ、両試験ともに注入孔から100m離れた円弧上では水位変化が確認されなかったことから、円弧上の節点群は定水頭境界とし、初期水位を継続して与えた。また、物質輸送解析の境界条件に対しては、トレーサ注入条件を設定する節点群に注入水の相対濃度を与え、それ以外の境界上の節点はすべて不分散条件を与えた。なお、電気伝導度のモニタリング地点で実測値と計算値を比較するため、計算値のサンプリングは注入孔から3.8m離れた地点の、観測孔内のセンサー設置深度に位置する節点で行った。

(2) 逆解析によるパラメータの同定結果と考察

逆解析にはサンプリング地点において5分間隔で測定されたトレーサ濃度の実測値と算出した相対濃度を用い、

式(19)に示す目的関数  $F$  が最小となるように最適パラメータを同定した。本検討での実測データの個数は、第一帯水層では50、第二帯水層では34であった。逆解析で設定したパラメータの初期値および同定値と目的関数  $F$  の最小値を表-7に、また目的関数  $F$  および探索過程のパラメータ値の推移を図-13に示す。なお、いずれの計算においても目的関数  $F$  が変化しなくなったところで計算を終了している。同定された縦分散長は第一帯水層で3.561m、第二帯水層で10.089mであり、同定された飽和透水係数は第一帯水層で0.00852cm/s、第二帯水層で0.03067cm/sであった。

図-14に、同定されたパラメータを用いてトレーサ試験を再現計算したときのサンプル地点におけるトレーサ濃度の計算値を実測値と比較した。第一帯水層では同定パラメータによる計算結果は、実測トレーサ濃度のピーク到達時間や濃度変化をよく再現している。一方、第二帯水層では計算濃度のピークが10分程度後ろにずれているが、ピークの大きさや全体の波形の再現は概ね良好であった。

分散長は、試験が行われた場のスケールに依存するとされている<sup>12)</sup>。そこで、Gelhar *et al.*<sup>34)</sup>による多孔質媒体および亀裂系岩盤から得られた縦分散長  $\alpha_L$  とトレーサ流下距離  $L$  との関係を整理したものを図-15に示す。なお、図中の実線は Neuman<sup>35)</sup>の関係式を示したものである。逆解析より求めた縦分散長を同図中にプロットすると、既往の報告と照らしてやや大きい値となっている。その原因は以下のように考えられる。

- 第一帯水層トレーサ試験では観測孔として、第二帯水層トレーサ試験では注入孔としてB孔を使用しているが、B孔はオールスクリーン仕様であり、帯水層間の水頭差により孔内を第一帯水層から第二帯水層へ鉛直下向き流れが発生していることがわかっている。また、複数回の揚水試験の実施により、B孔埋め戻し部の透水性が大きくなっており、埋め戻し部を通して第一帯水層から第二帯水層へ鉛直下向き流れが発生しているものと考えられる。透水性が高くなると縦分散長は大きくなるが、逆解析結果はこのような井戸構造も反映したものと考えられる。

次に、逆解析した飽和透水係数と揚水試験結果よりハンタッシュ-ヤコブの式を用いて求めた透水係数を整理したものを表-8に示す。第一帯水層の揚水試験結果では0.03517cm/sおよび0.04450cm/sの値が得られており、逆解析結果は揚水試験結果の1/4~1/5程度となっている。これに対して、第二帯水層の揚水試験結果では0.01833cm/sおよび0.03137cm/sの値が得られており、逆解析した飽和透水係数値はほぼ妥当な値であった。第一帯水層において逆解析結果と揚水試験結果に差異が生じ

表-7 逆解析による帯水層定数の同定結果

逆解析の対象帯水層	センサー設置位置 (G.L.-m)	検証データ数	飽和透水係数 cm/s		縦分散長 m		目的関数Fの最小値
			初期値	同定値	初期値	同定値	
第一帯水層	27.0	50	0.01667	0.00852	5.000	3.561	0.07888
第二帯水層	49.0	34	0.03333	0.03067	2.000	10.089	0.10803

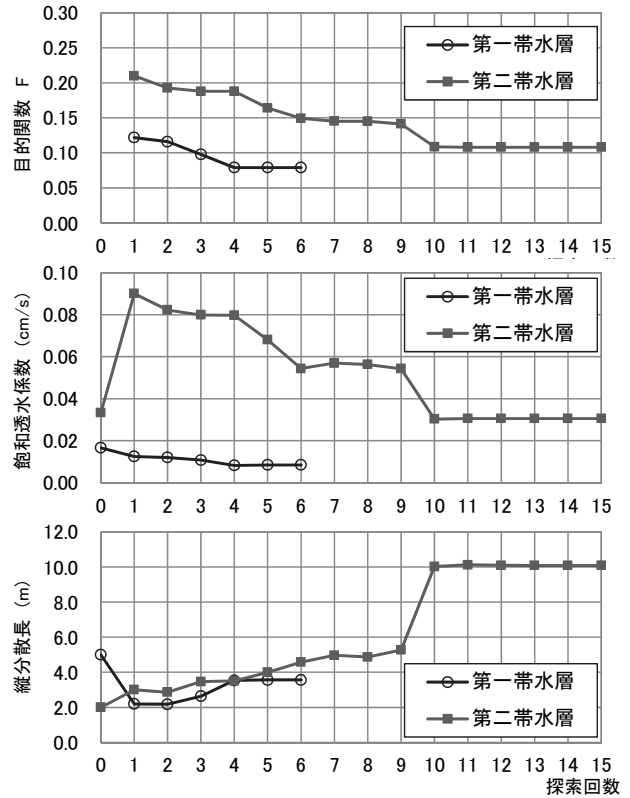


図-13 逆解析時のパラメータ探索過程

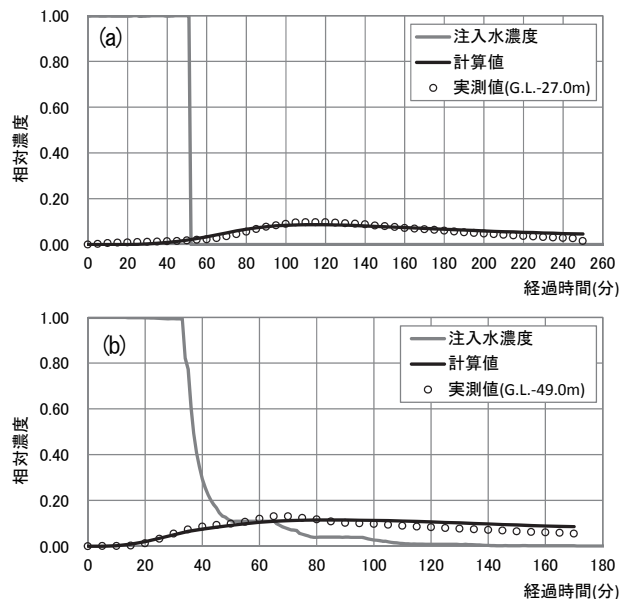


図-14 第一帯水層 (a) および第二帯水層 (b) の実測値と計算値の比較

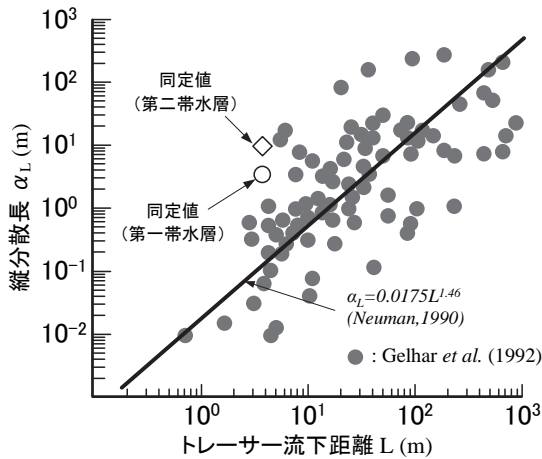


図-15 縦分散長と流下距離の関係 (文献<sup>12)</sup>図を一部加筆)

表-8 逆解析による帯水層定数の同定結果

対象となる帯水層	逆解析により同定した透水係数 cm/s	揚水試験結果より推定した透水係数			
		揚水試験条件			透水係数 (ハンタッシュェーヤコブの式) cm/s
		実施日	揚水孔	観測孔	
第一帯水層	0.00850	2011年1月18日	B	A35	0.03517
		2011年11月10日	C42	E40	0.04450
第二帯水層	0.03067	2011年1月8日	B	A60	0.01833
		2011年11月9日	C64	E63	0.03137

た理由として次の要因が考えられる。

- ・揚水試験では帯水層の平均的な透水係数が得られるが、逆解析ではセンサー設置位置近辺の局所的な値が得られ、地盤の不均質性の影響を受ける。図-7 に調査孔スクリーン区間とセンサー位置を示したが、電気検層結果より第一帯水層トレーサ試験のセンサー位置は透水性が低い地層部に相当しており、逆解析による透水係数値が小さくなった。これに対して、第二帯水層トレーサ試験のセンサー位置はスクリーン区間の平均的な透水性が想定される地層部に相当しており、逆解析結果と揚水試験結果はほぼ同等の値となった。

## 6. おわりに

本研究では、飽和・不飽和浸透および物質移動の支配方程式の主要パラメータである透水係数と分散長を同時に同定するため、密度流を考慮した飽和・不飽和流動と保存性トレーサの移流分散の連成問題を解くための3次元数値モデル (SIFEC3dp) にパウエルの共役傾斜法を組み合わせた逆解析法を開発し、信州大学工学部若里キャンパスで実施した不圧帯水層と被圧帯水層を対象とする2孔式塩水トレーサ試験結果に適用してパラメータ同定

を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 複数の帯水層定数が同時に同定できる密度流を考慮した3次元数値モデルに基づく逆解析法を開発し、テストケースにおいてその有効性および妥当性が検証できた。
- (2) 注水孔から塩水を注入し、3.8m離れた観測孔で塩分濃度をモニタリングする2孔式塩水トレーサ試験を2つの帯水層 (第一帯水層, 第二帯水層) に対して実施した。注入孔の地下水位や注入塩水濃度が時間変化し、観測孔でモニタリングされた塩水濃度も経時変化したが、数値モデルを用いる逆解析法により適切にパラメータ同定のための条件設定ができるようになった。
- (3) 開発した逆解析法を原位置トレーサ試験結果に適用し、帯水層定数の同定を行った。その結果、同定されたパラメータを用いた場合のトレーサ相対濃度の計算値と実測値は良好な一致を示した。
- (4) 同定された飽和透水係数と揚水試験から解析された値の間に乖離が見られ、縦分散長も一般値よりも大きい値が同定された。これは地盤の不均質性や試験に用いた井戸構造等に起因するものであり、ピンポイントで帯水層定数を同定するトレーサ試験に固有の結果である。今後、注入孔や観測孔の構造を改善したり、複数深度で計測する等の工夫をすることにより、本研究で開発した3次元数値モデル併用パラメータ同定手法の有効性がさらに向上することが期待される。

**謝辞:** 本研究は NEDO 「次世代型ヒートポンプシステム研究開発事業」の一環として実施している「地下水制御型高効率ヒートポンプ空調システムの研究開発」の成果の一部である。本研究の推進に当たっては、共同研究者である清水建設株式会社各位からご協力を頂いた。また、原位置試験においては株式会社日さくの各位に便宜を図って頂いた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 藤縄克之: 技術手帳-地下熱利用, 地盤工学会誌, Vol.59, No.6, pp.56-57, 2011.
- 2) 長野克則: 地下熱利用技術-2.地下熱利用技術とは, 地下水学会誌, Vol.53, No.1, pp.83-90, 2011.
- 3) 藤縄克之, 富樫聡: 地下熱利用技術-9. 地下熱利用のための数値解析技術, 地下水学会誌, Vol.54, No.1, pp.39-52, 2012.
- 4) 藤縄克之: 環境地下水学, 共立出版, 2010.
- 5) Hotzl, H. and Werner, A.: Tracer Hydrology, *Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing*, 1992.
- 6) Drost, W., Klotz, D., Koch, A., Moser, H., Neumaier, F. and Rauert, W.: Point dilution methods of investigating groundwater flow by means of radioisotopes, *Water Resources Research*, Vol.4, No.1, pp.125-146, 1968.
- 7) Fujinawa, K.: Asymptotic solutions to the convection-

- dispersion equation and Powell's optimization method for evaluating groundwater velocity and dispersion coefficients from observed data of single dilution tests, *Journal of Hydrology*, Vol.62, 1983.
- 8) Powell, M. J. D. : An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives, *The Computer Journal*, Vol.7, pp.155-162, 1964.
  - 9) Moench, A. F. : Convergent radial dispersion : A Laplace transform solution for aquifer tracer testing, *Water Resources Research*, Vol.25, No.3, pp.439-447, 1989.
  - 10) Welty, C. and Gelhar, L. W. : Evaluation of longitudinal dispersivity from nonuniform flow tracer tests, *Journal of Hydrology*, Vol.153, pp.71-102, 1994.
  - 11) Grove, D. B. and Beetem, W. A. : Porosity and dispersion constant calculations for a fractured carbonate aquifer using the two well tracer method, *Water Resources Research*, Vol.7, No.1, pp.128-134, 1971.
  - 12) 日本地下水学会 : 地下水のトレーサ試験, pp.25-232, 技報堂出版, 2009.
  - 13) Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C. : *Conduction of Heat in Solid*, 2nd ed., Oxford University Press, London, pp.510, 1959.
  - 14) Bear, J. : *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, 1979.
  - 15) 川端淳一, 中村充利, 河合達司, 山本毅史 : 砂質帯水層における物質移行特性の評価に基づく原位置バイオレメディエーションの設計について, 地下水学会誌, Vol.40, No.4, pp.429-443, 1998.
  - 16) van Genuchten, M. T. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
  - 17) 藤縄克之 : 土壌水分特性曲線および不飽和透水係数のヒステリシス表現—多孔体中における不飽和浸透流の研究 (I) —, 地下水学会誌, Vol.39, No.4, pp.299-312, 1997.
  - 18) 藤縄克之, 増岡健太郎, 長野宇規, 渡邊紹裕 : 海面上昇がゼロメートル地帯に及ぼす影響を予測するための塩水浸入数値解析モデル, 土木学会論文集, No.790/VII-35, pp.35-48, 2005.
  - 19) Fujinawa, K. : A 'Characteristic' finite element method for dispersion-convection equation, *Journal of Japanese Association of Groundwater Hydrology*, Vol.5, No.2, pp.93-108, 1983.
  - 20) 藤縄克之 : 特性曲線型有限要素法を用いた密度差のある地下水流動の数値解析—淡水・塩水 2 相流への応用, 地下水学会誌, Vol.26, No.1, pp.12-22, 1984.
  - 21) Fujinawa, K. : A 'characteristic' finite element scheme for convective-dispersive transport with non-equilibrium reaction, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.23, No.6, pp.1161-1178, 1986.
  - 22) Garder, A. O., Peaceman, D. W. and Pozzi, A. L. Jr. : Numerical calculation of multidimensional miscible displacement by the method of characteristics, *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol.4, No.1, pp.26-36, 1964.
  - 23) 小林慎太郎, 丸山利輔 : Powell の共役方向法によるタンクモデル定数の探索, 農業土木学会論文集, Vol.65, pp.42-47, 1976.
  - 24) 江澤静一郎, 藤縄克之, 高見澤友見, 藤田佳秀 : 非平衡吸脱着反応を伴う移流分散モデルを用いた製材残滓による VOC 汚染浸出水の浄化解析, 土木学会論文集 G, Vol.65, No.3, pp.143-152, 2009.
  - 25) 藤縄克之 : パラメータ最適同定法を用いた有限要素法による地下水シミュレーション—長岡平野の月別地下水収支解析—, 水利科学, Vol.30, No.5, pp.1-27, 1986.
  - 26) 堀野治彦 : 地下水数値計算法(15) 3-2. パウエル法によるパラメータ同定問題, 地下水学会誌, Vol.34, No.1, pp.31-44, 1992.
  - 27) Fujinawa, K., Iba, T., Fujihara, Y. and Watanabe, T. : Modeling interaction of fluid and salt in an aquifer/lagoon systems, *Ground Water*, Vol.47, No.1, pp.35-48, 2009.
  - 28) 江澤静一郎, 長谷川純也, 藤縄克之, 渡邊紹裕 : 3 次元密度依存流のための数値解析コードの開発とその検定, 日本地下水学会 2009 年春季講演会講演要旨, pp.58-63, 2009.
  - 29) Tomigashi, A. and Fujinawa, K. : Enhanced aquifer thermal energy storage for cooling and heating of Shinshu University building using a nested well system, *Sustainable Development and Planning V*, pp.871-882, 2011.
  - 30) 富樫聡, 藤縄克之 : 地下水制御型帯水層蓄熱(ATES)システムの開発, 日本地下水学会 2011 年春季講演会講演要旨, pp.44-49, 2011.
  - 31) Fujinawa, K. and Tomigashi, A. : Cooling and Heating System of Shinshu University Building by Enhanced Aquifer Thermal Energy Storage, *Proceedings of the 12th International Conference on Energy Storage (Innotock2012)*, pp.440-441, 2012.
  - 32) 富樫聡, 藤縄克之 : 地下水を利用した熱エネルギー貯留技術の一環としての温塩水の特長, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.195-196, 2004.
  - 33) Fischer, H. B., Imberger, J., List, E. J., Koh, R. C. Y. and Brooks, N. H. : *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, 1979.
  - 34) Gelhar, L. W., Welty, C. and Rehfeldt, K. T. : A critical review of data on field scale dispersion in aquifers, *Water Resources Research*, Vol.28, pp.1955-1974, 1992.
  - 35) Neuman, S. P. : Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media, *Water Resources Research*, Vol.26, No.8, pp.1749-1758, 1990.

(2012.9.12 受付)

**IDENTIFICATION OF AQUIFER PARAMETERS BY DUAL-BOREHOLE  
SALTWATER TRACER TEST AND INVERSE ANALYSIS USING THREE-  
DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL**

**Akira TOMIGASHI and Katsuyuki FUJINAWA**

In order to identify saturated hydraulic conductivity and longitudinal dispersivity, saltwater tracer tests using dual boreholes were performed for an unconfined and an underlying confined aquifer at Nagano-Wakasato campus of Shinshu University. The data of electrical conductivity monitored at injection and observation borehole were used to inversely identify the parameters by combining a three-dimensional numerical model, SIFEC3dp, for solving coupled problems of density-dependent, saturated-unsaturated flow and convective-dispersive transport of conservative tracer in an aquifer system, and Powell's optimization method. The developed method was first validated by applying to arbitrary test cases with given parameters. Furthermore, application of the inverse method to the site generated reasonable results while numerical simulations using identified parameters satisfactorily reproduced measured salt concentrations.