

14. 帯水層中の物質移動パラメータ同定のための トレーサー試験と適用結果

- 地下熱利用技術の高度化に関する一連の研究（その1） -

○富樫聡（信州大院・八千代エンジニアリング）、石原貴之・上原健人・
梶田明宏・藤縄克之（信州大工）、片桐憲一・秩父俊一（日さく）

1. はじめに

福島第一原発事故が契機となり、再生可能エネルギーを積極的に開発する機運が急速に高まっている。このような背景のもと、筆者らは地下浅層部が有する良好な断熱性および蓄熱性を利用する地下熱利用技術（ATES: Aquifer Thermal Energy Storage）に着目し、平成22年度より信州大学工学部キャンパスにおいて従来システムの高度化を目的とした実証試験を実施している^{1),2)}。本報告は、ATESシステム設計に寄与する帯水層中の物質移動パラメータをトレーサー試験と逆解析から評価する技術について検討したものである。

2. 実証試験サイトの地質構造と ATES システムの概念

実証試験では、信州大学工学部講義棟の空調システムに ATES を適用する。そこでまず地質構造を明らかにするため、オールコアボーリングと電気検層を実施し、図1に示すとおり砂礫層で構成される3つの帯水層を確認できた。この結果を踏まえ、本研究で適用する ATES システムでは、帯水層中の温冷水の移動特性と蓄熱効率を考慮し、第一帯水層に冷水、第二帯水層に温水をそれぞれ貯留することとした（図2）。なお、トレーサー試験に用いる調査孔および観測孔の諸元を表1に整理する。A35孔、A60孔、A70孔は、各々が対象とする帯水層のみを観測できるように、膨張性遮水材により遮水構造としている。

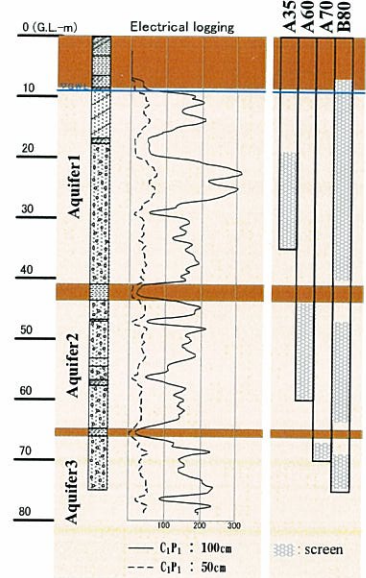


図1 地質構造

表1 井戸の諸元

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	井戸位置関係
A35	50	19~35	第1層	×	×	
A60	50	44~60	第2層	×	×	
A70	50	67~70	第3層	×	○	
B80	150	7~40, 47~63.5, 69~74.5	第1~3層	○	×	

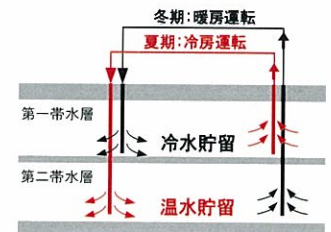


図2 ATES システム概念図

3. 帯水層中の熱移動のメカニズム³⁾

帯水層中の熱移動機構は熱伝導、熱分散、熱交換といった現象が関係して非常に複雑なものとなっている。熱の移動を精度良くシミュレーションするためには、これら現象を適切にモデル化する必要がある。このとき、熱移動現象に大きく寄与するパラメータである熱分散率の評価が特に重要である。

固相・流体相・気相の熱伝導率に熱分散を加味した混合系の熱分散率 λ_{ij} は、各相に温度差がないと仮定すると、固相・流体相・気相混合系の体積熱容量 (ρC) と水力学的分散係数 D_{ij} より、(1)式で求まる。

$$\lambda_{ij} = (\rho C) D_{ij} \tag{1}$$

また、 (ρC) は固相、流体相、気相の体積熱容量 $(\rho C)_s$ 、 $(\rho C)_w$ 、 $(\rho C)_a$ を用いて次式から得られる。

$$(\rho C) = nS(\rho C)_w + n(1-S)(\rho C)_a + (1-n)(\rho C)_s \tag{2}$$

ここに、 n は間隙率、 S は有効飽和度である。一方、水力学的分散係数 D_{ij} は多孔体の間隙形状で決定される幾何学的分散度 α_{ijk} を用いて、次式で与えられる。

$$D_{ij} = \alpha_{ijkm} \frac{|v_k| |v_m|}{|v|} + \kappa_e \quad (3)$$

$$\alpha_{ijkm} = \alpha_T \delta_{ij} \delta_{km} + \frac{\alpha_L - \alpha_T}{2} (\delta_{ik} \delta_{jm} + \delta_{im} \delta_{jk}) \quad (4)$$

ここに、 $|v_k|$ 、 $|v_m|$ は間隙流速 $|v|$ の k および m 方向成分、 v は平均流速、 κ_e は等価温度拡散係数、 α_L および α_T は縦方向および横方向の分散長、 δ_{ij} などはクロネッカーのデルタである。さらに、 κ_e は λ_{ed} と (ρC) を用いて、次式より得られる。

$$\kappa_e = \lambda_{ed} / (\rho C) \quad (5)$$

ここに、混合系の熱伝導率の評価に直列、並列混合モデルを使用し、直列型 λ_{ed1} と並列型 λ_{ed2} の割合を de Vries モデル (de Vries, 1963) と近い結果が得られる 1:4 とすると、以下の関係式により λ_{ed} を求めることができる。

$$\lambda_{ed} = (\lambda_{ed1} + 4\lambda_{ed2}) / 5 \quad (6)$$

$$\lambda_{ed1} = nS\lambda_w + n(1-S)\lambda_a + (1-n)\lambda_s \quad (7)$$

$$\frac{1}{\lambda_{ed2}} = \frac{nS}{\lambda_w} + \frac{n(1-S)}{\lambda_a} + \frac{(1-n)}{\lambda_s} \quad (8)$$

なお、 λ_s 、 λ_w 、 λ_a は固相、流体相、気相の熱伝導率である。

以上で述べた、熱分散率 λ_{ij} を決定するためには、地盤固有のパラメータである固相の熱伝導率 λ_s と固相の体積熱容量 $(\rho C)_s$ 、水力学的分散係数 D_{ij} を決定するための縦分散長 α_L および横分散長 α_T を適切に評価する必要がある。

4. トレーサー試験

前述のように、ATES を利用する空調システムの設計には、地層固有のパラメータとなる縦分散長、横分散長、熱伝導率、体積熱容量の評価が重要となる。そこで本研究ではトレーサー試験を実施し、観測結果を用いた逆解析⁴⁾によりパラメータを評価することとした。なお、物質移動パラメータの縦および横分散長の評価には保存系トレーサーとなる塩水を、熱移動パラメータの熱伝導率および体積熱容量の評価には非保存系トレーサーである冷水をそれぞれ用いる。本報告ではこのうち、塩水トレーサー試験の結果と評価したパラメータについて述べる。

4.1. 塩水トレーサー試験の概要

トレーサーに塩水を用いて、帯水層中のトレーサーの移動を観測するとともに、観測結果を用いて物質移動パラメータの評価を行う。塩水トレーサー試験の概要を以下に示す。

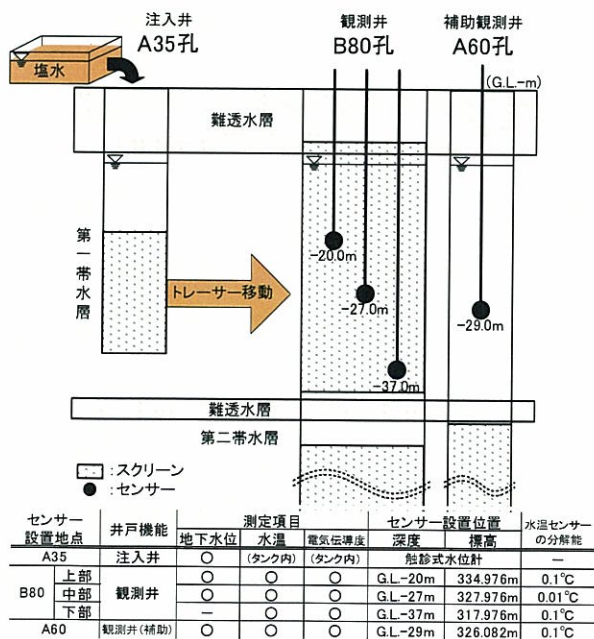


図3 第一帯水層トレーサー試験模式図

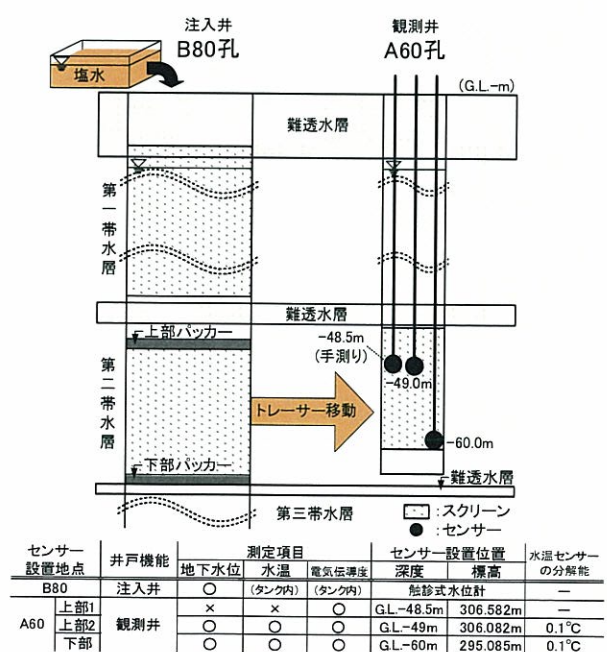


図4 第二帯水層トレーサー試験模式図

(1) 第一帯水層トレーサー試験

第一帯水層を対象とするトレーサー試験模式図を図3に示す。図に示すとおり、A35孔に塩水を一定量注入し、B80孔で観測する。観測する項目は、注入水（タンク内）の電気伝導度と水温、A35孔の地下水位、B80孔上部(G.L.-20.0m)、中部(G.L.-27.0m)、下部(G.L.-37.0m)における地下水位（間隙水圧）、電気伝導度、水温である。なお、マルチスクリーン構造となるB孔において、各帯水層間の遮水が十分でない可能性があるため、A60孔による補助観測により、帯水層間の通水状況を把握することとした。

(2) 第二帯水層トレーサー試験

第二帯水層を対象とするトレーサー試験模式図を図4に示す。図に示すとおり、B80孔に塩水を一定量注入しA60孔で観測する。観測する項目は、注入水（タンク内）の電気伝導度と水温、B80孔の地下水位、A60 上部 2(G.L.-49.0m)、下部(G.L.-60.0m)における地下水位（間隙水圧）、電気伝導度、水温である。また、A60 孔上部 1(G.L.-48.5m)において電気伝導度を手測りで観測している。

4.2. 電気伝導度および水温による質量分率と流体密度の算定式

塩水トレーサー試験では電気伝導度 E_c と温度 T を経時観測し、トレーサーの移動を把握する。ただし、塩水をトレーサーとする場合には、塩分濃度（質量分率 c_m [M/M]）により流体密度 ρ が変化し、帯水層中で自然対流が発生することになる。このような現象をシミュレーションで評価するにはトレーサー試験時の流体密度を正確に評価する必要があることから、富樫ら（2004）⁵⁾が作成した E_c (S/m) および T (°C) から質量分率 c_m と流体密度 ρ (g/cm³) を換算する以下式を利用し、観測結果を整理することとした。

(1) 質量分率 c_m の算定式

$$c_m = \alpha_0 + \alpha_1 E_c + \alpha_2 T + \alpha_3 E_c^2 + \alpha_4 T^2 + \alpha_5 E_c \cdot T \quad (9)$$

ここに、 $\alpha_0 \sim \alpha_5$ はパラメータであり、塩水トレーサー試験時に最大となる注入水の質量分率 $c_{m\max}$ を塩分相対濃度 $c=1.0$ として、塩水トレーサー試験結果を整理する。

(2) 流体密度 ρ の算定式

$$\rho = \rho_f + \frac{1 - \rho_f A}{(1 - c_m)(c_m \rho_f)^{-1} + A} \quad (10)$$

ここに、 ρ_f は淡水密度 (g/cm³) であり、Fischer et al(1979) の付表から求めた以下式で与えられる。

$$\rho_f = 1.0 - 0.0000269 \times (T - 4) - 0.000005233 \times (T - 4)^2 \quad (11)$$

また、 A は理科年表の「種々の物質の水溶液の密度」より求めた以下の近似式より得られる。

$$A = -0.4006412c_m^2 + 0.372264c_m + 0.2906713 \quad (12)$$

なお(10)式は、淡水密度 ρ_f 、塩水密度 ρ_s および塩分相対濃度 c を用いて、Baxter and Wallace(1916)の理論式と呼ばれる次式で表現できる。

$$\rho = \rho_f + (\rho_s - \rho_f)c \quad (13)$$

4.3. 塩水トレーサー試験の結果と考察

(1) 第一帯水層トレーサー試験（実施日：2011/2/8）

第一帯水層の塩水トレーサー試験では、注入井となるA35孔より、試験開始から51分間は塩水を注入（総量5,000L）、51分以降から198分間は真水を注入（総量14,000L）した。総注入時間は249分であり、平均注入量は76.3(L/min)であった。観測した地下水位、電気伝導度、水温をそれぞれ図5～図7に示す。

地下水位は図5に示すとおり、A35孔（注入井）では開始直後より注入終了時まで地下水位が上昇を続け、最大で約5mの地下水位上昇が観測された。また、注入を終了すると試験開始時の地下水位まで速やかに回復した。一方、B80孔（観測井）においては地下水位上昇の程度

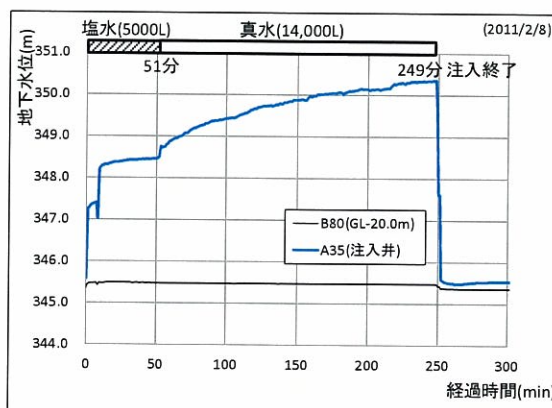


図5 地下水位（第一帯水層）

は最大で 0.13m であり、A35 孔とほぼ同様の水位の増減傾向が確認できた。また、A60 孔（補助観測井）では、注入終了 65 分後に地下水位が 0.09m とわずかな上昇が見られた。

電気伝導度（図 6）は、B80 孔下部（G.L.-37.0m）、中部（G.L.-27.0m）ともに注入開始から約 10 分後に上昇し始め、その後、B80 孔下部（G.L.-37.0m）は、注入開始から約 50 分後にピークを迎え、次いで中部（G.L.-27.0m）ではその約 70 分後（注入開始から約 120 分後）にピークを観測した。また、B80 孔上部（GL-20.0m）および A60 孔では観測値に変化は見られなかった。以上のとおり、電気伝導度については、同一孔内のセンサーにおいて設置位置により観測結果に時間的なズレが生じる結果が得られたが、この理由としては、図 1 に示した電気検層の結果からも確認できるとおり帯水層内の地層が不均質なため透水性が深さによって異なっていること、またトレーサーとした塩水が密度差により下方へ沈降しながら A35 孔から B80 孔へ移動したこと等が挙げられる。このため下部に設置したセンサーほど早く到達が確認されたものと考えられる。また、B80 孔上部（GL-20.0m）でピーク値が計測されなかったのも同様の理由と思われる。

さらに、B80 孔下部（G.L.-37.0m）では中部（G.L.-27.0m）のセンサーがピークを観測したのとほぼ同じタイミング

で 2 度目のピークが確認されたが、これは B 孔中部位置に到達した塩水が B 孔内を通じて下方へ移動し、これを下部位置のセンサーが検出したものと考えられる。

図 7 より、注入した塩水と真水の水温は、各々の注入直前にタンク内で観測し、それぞれ 7℃ と 5℃ であった。B80 孔の水温は試験開始時に 14.6℃ であったが、注入開始とともに中部（G.L.-27.0m）と下部（G.L.-37.0m）は 14℃ 程度までゆるやかに低下し、注入終了と同時に回復した。また、A60 孔の水温は 14.3℃ で一定であった。

なお、注入した塩水の相対濃度を $c=1.0$ とすると、B80 孔で観測された相対濃度 c のピーク値は、中部、下部ともに 0.1 程度であった。また、補助観測を実施した A60 孔で地下水位、電気伝導度、地下水温の顕著な変化は確認されなかったことから、帯水層間の通水の影響は少なく、数値解析時には条件として見込む必要はないと判断された。

(2) 第二帯水層トレーサー試験（実施日：2011/1/12）

第二帯水層の塩水トレーサー試験では、注入井となる B80 孔より、試験開始から 33 分間は塩水（総量 5,000L）、33 分以降は真水を 138 分間注入（総量 14,000L）した。総注入時間は 171 分であり、平均注入量は 111.8(L/min) であった。観測した地下水位、電気伝導度、水温を図 8～図 10 にそれぞれ示す。

図 8 に示すとおり、地下水位は B80 孔（注入井）では試験開始直後に一時的に上昇するが、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。また、A60 孔（観測井）においては試験開始直後に水位が上昇し始め、B80 孔と同様に、注入試験終了までほぼ一定の水位が観測された。

電気伝導度（図 9）は、A60 孔下部（G.L.-60.0m）では

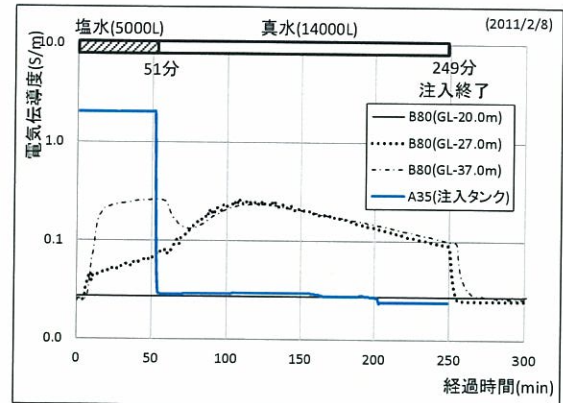


図 6 電気伝導度（第一帯水層）

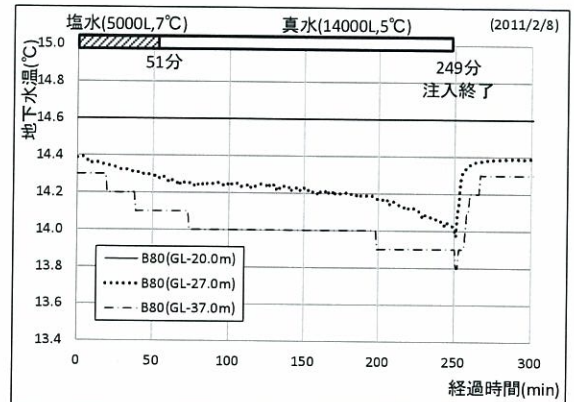


図 7 地下水温（第一帯水層）

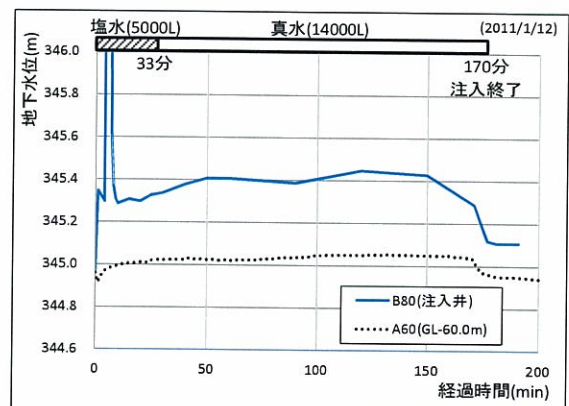


図 8 地下水位（第二帯水層）

試験開始から約 52 分後、上部 2 (G.L.-49.0m) では約 66 分後にそれぞれピークを観測した。これは第一帯水層の試験結果と同様に、地層の不均質性や密度差などの影響であると想定される。また、A60 孔上部 1(G.L.-48.5m)では、上部 2 のセンサー位置との深度差が 50 cm にも関わらず、両者で観測された電気伝導度値は大きく乖離している。理由としては、上部 1 位置のセンサーが手測りであること、地層の不均質性等が考えられるが、実験結果について精査し、数値解析に用いる情報を適切に選定することとした。

図 10 より、注入水の水温は塩水の注入期間中はほぼ一定であり、その後真水の注入開始とともに急激に下降するが、試験開始後約 100 分以降は緩やかに上昇した。A60 孔の水温は上部下部ともにほぼ一定であった。

なお、注入した塩水の相対濃度を $c=1.0$ とすると、A60 孔で観測された相対濃度 c のピークは、上部 (G.L.-49.0m) で約 0.14、下部 (G.L.-60.0m) で約 0.18 であった。

5. 逆解析による物質移動パラメータの同定

塩水トレーサー試験結果を踏まえ、縦分散長 α_L および横分散長 α_T を、最適化理論を用いた逆解析手法を適用し、数値解析を実施して評価する。

5. 1. 支配方程式

帯水層中の塩水トレーサーの挙動は、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。

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以下式で与えられる。

$$(SS_s + C_s) \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot K \left(\nabla h + \frac{\rho}{\rho_f} \nabla z \right) + \sum_i Q_i \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) \quad (14)$$

ここに、 h は圧力水頭、 t は時間、 z は鉛直上向き座標、 ρ 、 ρ_f はそれぞれ地下水および基準とする淡水の密度、 K は淡水に対する透水係数、 S は有効飽和度、 S_s は比貯留係数(不飽和帯では $S_s = 0$)、 C_s ($= n \partial S / \partial h$) は比水分容量(飽和帯では $C_s = 0$)、 Q_i は井戸 i の揚水強度、 $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)$ はディラックのデルタ関数である。

一方、物質輸送に対する支配方程式は、次に示す移流分散方程式で与えられる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot D_{ij} \nabla c - \mathbf{v} \cdot \nabla c \quad (15)$$

ここに、 c は溶液の相対濃度 ($0 \leq c \leq 1.0$)、 D_{ij} は水力的分散係数、 \mathbf{v} は間隙流速ベクトルである。

5. 2. 物質輸送解析コード SIFEC⁶⁾

物質輸送解析には物質輸送解析コード SIFEC (Salt-water Intrusion by Finite Elements and Characteristics) を適用する。SIFEC は移流分散方程式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) を用いている。CFEM は解の振動を防ぎ、さらに数値分散を緩和する上で有効なことが示されている。

本研究では 3 次元領域のプリズム要素を適用した SIFEC3dp で数値解析を行い、算出される相対濃度 c に対して、以下に示す最適化手法を適用することによりパラメータを決定する。

5. 3. 最適化手法

物質輸送方程式(15)式中の水力的分散係数 D_{ij} を決定する縦分散長 α_L および横分散長 α_T の同定には、共役方向法の一つであり目的関数の微分値を必要としない Powell の共役傾斜法を適用する。

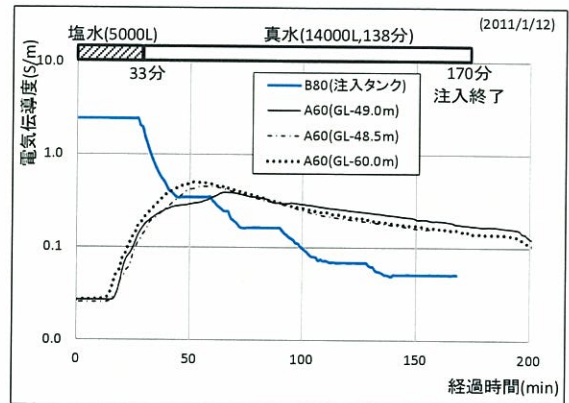


図 9 電気伝導度 (第二帯水層)

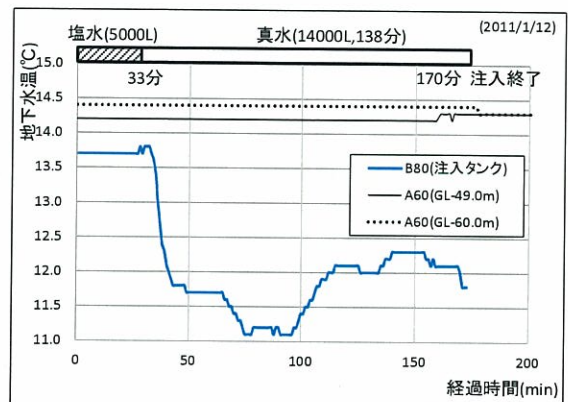


図 10 地下水温 (第二帯水層)

ある期間におけるパラメータ群に対して、計算された*i*地点（ここでは、観測井のセンサー設置地点）の相対濃度を \bar{c}_i 、実測した相対濃度を c_i とすると、最適パラメータの同定は、次式の目的関数を最少にする探索過程の最終結果として求められる。

$$F = \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c}_i)^2 \quad (16)$$

ここに、*n*は実測した相対濃度データの個数である。

なお、江澤ら(2009)⁷⁾、Fujinawa(1983)⁸⁾などにおいて、トレーサー試験結果などにPowellの共役傾斜法を適用することによりパラメータを精度良く評価できることが報告されている。

5. 4. 計算実施手順

本検討における数値解析の検討手順は、図11に示すとおり、まず注入井を中心とする半径100mの扇型メッシュモデル(図12)で順解析を実施する。この結果から試験期間中におけるトレーサーの移動範囲を把握し、逆解析を行う計算領域を決定する。決定した計算領域に対する境界条件は、順解析で求めた水頭値を用いる。この方法により、逆解析時の繰り返し計算によって増大する計算時間の負荷を軽減する。

6. おわりに

本研究では、ATESシステム設計を行う際に重要となる帯水層中の物質移動パラメータを評価する目的で、塩水トレーサー試験および数値解析によるパラメータの同定手法を検討した。

第一および第二帯水層における塩水トレーサー試験から、同一孔内においても、センサーの設置深度によってはトレーサー濃度のピークを観測するタイミングが異なることが確認できた。これは地盤の不均質性や塩水と淡水の密度差により生じたものと考えられる。

今後は、逆解析により物質輸送パラメータを同定し、さらには別途実施した冷水トレーサー試験結果から熱移動パラメータを評価する予定である。また、同定した熱および物質移動パラメータを用いた数値解析を実施し、その結果を基にした井戸運用等のシステム設計を検討する予定である。

7. 謝辞

本研究は、NEDO助成による平成22-24年度次世代型ヒートポンプシステム研究開発「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」事業によった。本プロジェクトの共同研究者である清水建設株式会社の各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 富樫聡・藤縄克之(2011): 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, 44-49.
- 2) A.Tomigashi,K.Fujinawa (2011):Enhanced aquifer thermal energy storage for cooling and heating of Shinshu University building using a nested well system,Sustainable Development and Planning V,871-882,2011
- 3) 藤縄克之(2010): 環境地下水学 第9章 土壌・地下水中の熱移動, 協立出版.
- 4) 日本地下水学会 (2009): 地下水のトレーサー試験, 技報堂出版.
- 5) 富樫聡・藤縄克之(2004): 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性, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 195-196.
- 6) たとえば藤縄ら(2005): 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, Vol.VII-35, No.790, 35-48, 2005.
- 7) 江澤静一郎・藤縄克之・高見澤友見・藤田佳秀(2009): 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.65No.3,143-152,2009.
- 8) Fujinawa,K(1983): A symptotic 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,62.

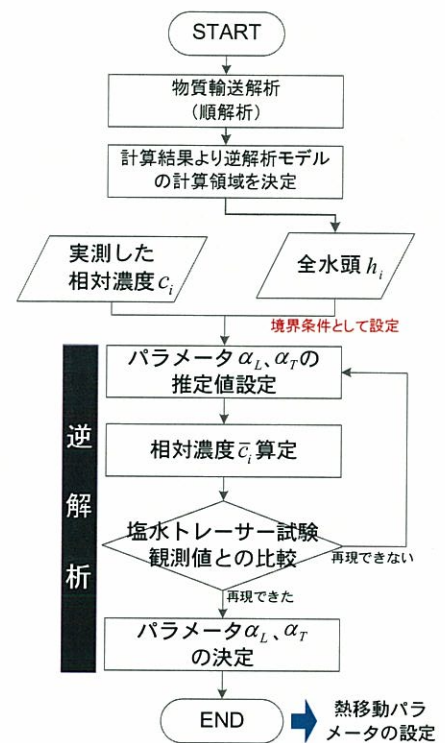


図11 計算実施手順

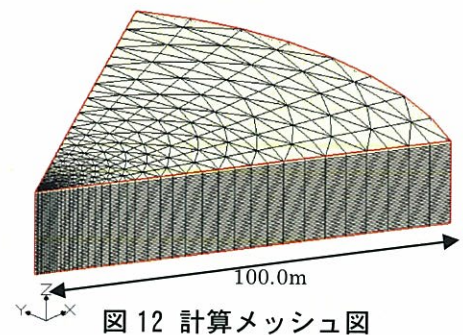


図12 計算メッシュ図