[Research Note]

Sequential Assimilation of Tracer Test Data by Ensemble Kalman Filter for Fracture Identification

Takashi GODA^{†1)} and Kozo SATO^{†2)*}^{†1)} Dept. of Geosystem Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, JAPAN^{†2)} Frontier Research Center for Energy and Resources, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, JAPAN

(Received December 2, 2008)

Application of the ensemble Kalman filter (EnKF) to reservoir characterization has the limitation that the observed watercut data cannot be reflected for tuning model variables in some time intervals. The present study assumed a homogeneous isotropic porous medium including a single fracture with adequate width, so that tracer tests could be simulated by the complex variable boundary element method. The resulting tracer effluent behavior was used as observed data, and the EnKF was applied for identifying fracture location to match the data. Using the conventional method, the effluent tracer concentration was measured as the observed variable. Depending on the initial ensemble, the data was not reflected for tuning the fracture location in some time intervals, resulting in a mismatch between the fracture location obtained by EnKF and the referenced location. Furthermore, the poor correspondence of observation data resulted in inaccurate identification even for initial ensembles not including the problematic time interval. Therefore, the observed variable was transformed from the effluent tracer concentration into the time corresponding to the amount of tracer recovery. Consequently, the observed data were adequately assimilated, and the correspondence of the observation data was improved. Accurate localization of the fracture was possible regardless of the initial ensembles.

Keywords

Ensemble Kalman filter, Sequential data assimilation, Tracer test, Fracture, CVBEM

1. 緒 言

データ同化はシミュレーションにおける初期条件、境界条件ならびにモデルに含まれるパラメーターを、実観測に基づいて適切なものに構成する手法である。特に、逐次型のデータ同化は、観測が得られるたびにシステムに含まれる状態の変数を修正し適切なものに収束させていく、時系列解析の一手法ともとらえられる。代表的なものに、カルマンフィルター (Kalman Filter: KF) がある¹⁾。

KFは線形なシステムに対して、シミュレーションから予測される観測値の確率分布と観測ノイズを含む実観測との誤差を考え、最小2乗推定によってシミュレーションモデル内の状態を表す確率変数を修正する。これを非線型な系に対しても適用可能にしたものに拡張カルマンフィルター (Extended Kalman Filter: EKF) があるが²⁾、システムモデルの分散共分散行列が安定しない点、オンラインでシステムモデルのヤコビ行列を計算しなければならない点が問題として挙げられ、この欠点を克服するために導入されたのがアンサンブルカルマンフィルター (Ensemble Kalman Filter: EnKF) である^{3)~5)}。

EnKFはモデル内の状態変数について、その分布を実現値集合であるアンサンブルによって保持するモンテカルロ近似を用いる。各実現値で予測される観測値から近似的に確率分布を求め、観測を得るごとに2次モーメントまでが一致するよう、アンサンブルを修正することを繰り返す。EnKFは気象学や海洋学の分野で多く用いられてきたが^{6)~9)}、近年では油層工学の分野においても貯留層特性解析への応用研究がなされている。

Naevdal *et al.*¹⁰⁾ は、EnKFを用いて浸透率分布を調整することにより、坑井近傍の状態変数を逐次更新した。さらに、浸透率分布および圧力、飽和率分布とともに逐次調整することで、2次元3相モデルへEnKF適用を拡張した¹¹⁾。Gu *et al.*^{12),13)} は孔隙率、浸透率分布の逐次更新にEnKFを適用し、3D PUNQ-S3モデル3相生産データとのマッチングを行った。また、Zafari *et al.*¹⁴⁾ は無作為最尤 (さいゆう) 法とEnKFとの理論的關係を確立するとともに、EnKF適用に関していくつかの問題点を提示した。その一つに、含水率のデータがモデル変数の修正に反映されない点が挙げられており、浸透率分布や飽和率プロファイルが真の解と一致しない原因の一端と考えられる。

本論文では、この問題を簡易な問題設定上で議論・検討する。単一フラクチャーを含む均質な2次元媒体を仮定し、複素変数境界要素法 (Complex Variable Boundary Element Method: CVBEM)^{15),16)} によりトレーサー試験を再現する。吸い込みで

* To whom correspondence should be addressed.

* E-mail: sato@frcer.t.u-tokyo.ac.jp

得られるトレーサー流出濃度を観測データとして取り扱い、EnKF適用によりフラクチャーの同定を行う。ただし、観測データとモデル変数修正との関係に問題の焦点を当てるため、実フィールドで想定される観測ノイズによる影響は含めない。さらに、流体置換はピストン状に行われると仮定するが、CVBEMでは分散を伴う流れも扱うことができる¹⁶⁾。本論文では、トレーサー流出後の観測データをモデル変数の修正に的確に反映させる手法の開発を目的とし、正確な同定の可能性を検討する。

2. 流動方程式と CVBEM

均質な多孔質媒体内の非圧縮性渦なし流れは、複素速度ポテンシャルに関するラプラス方程式で記述される：

$$\nabla^2 \Omega = \nabla^2 (\Phi + i\Psi) = 0 \quad (1)$$

ここで、速度ポテンシャル $\Phi = (k/\mu)p$ は媒体の浸透率 k 、流体の粘性 μ 、ならびに流体の圧力 p によって定義され、流れ関数 Ψ とは共役の関係にある。複素ポテンシャル Ω は特異点を除き正則であるので、コーシーの積分公式が成り立つ：

$$\Omega(z) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{\Gamma} \frac{\Omega(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta \quad (2)$$

ただし、点 z は領域内の任意の点であり、 ζ は境界 Γ 上の点である。Eq. (2) における境界 Γ を境界要素に離散化し、数値的に評価することで、領域内の任意の点における複素ポテンシャル Ω が求められる。

2.1. 特異性

重ね合わせの原理により、わき出し・吸い込みやフラクチャーによる特異性を CVBEM に組み込むことができる。完全解 Ω は Eq. (2) から得られる非特異解 Ω^{ns} とわき出し・吸い込み群の特異解 $\sum_{j=1}^{n_w} \Omega_{wj}$ 、およびフラクチャー群の特異解 $\sum_{j=1}^{n_f} \Omega_{fj}$ の和として表される：

$$\Omega = \Omega^{ns} + \sum_{j=1}^{n_w} \Omega_{wj} + \sum_{j=1}^{n_f} \Omega_{fj} \quad (3)$$

ただし、 n_w はわき出し・吸い込み点の数、 n_f はフラクチャーの本数である。座標 z_{wj} に位置する強さ q_{wj} を持った吸い込みを表す特異解は、Eq. (4) で与えられる：

$$\Omega_{wj} = \frac{q_{wj}}{2\pi h} \ln(z - z_{wj}) \quad (4)$$

ここで、 h は媒体の厚さである。強さ q_{wj} に負値を用いると、Eq. (4) はわき出しの特異解を与える。一方、フラクチャー周りの流れを表す特異解は、ジューコフスキー変換を行った χ 平面上で：

$$\Omega_{fj} = \sum_{l=1}^{n_l} \frac{a_l}{\chi^l} + \sum_{l=1}^{n_l} \left(\frac{\beta_l \delta_l}{\chi - \delta_l} + \frac{\overline{\beta_l \delta_l}}{\chi - \overline{\delta_l}} \right) \quad (5)$$

と表される¹⁵⁾。ここで、 $\beta_l = b_l + ic_l$ であり、 a_l 、 b_l 、 c_l は実数のパラメーターである。第一項は原点を中心とした n_l 次のローラン展開、第二項は δ_l と $\overline{\delta_l}$ に位置する n_p 対の仮想極を中心とする一次のローラン展開である。

2.2. 流線追跡と流出濃度曲線

流線は流れ関数 Ψ が一定の曲線であり、流線上の点 z_j にあ

Fig. 1 Streamlines through Porous Media with a Fracture

る流体粒子を考え、それを逐次追跡することによって時間経過に伴う流体移動を把握することができる。わき出しから吸い込みに向かって十分な数 (n_s) の流線を引き、各流線 i に沿って流体粒子が吸い込みに到達するまでの時間 t_{bi} を計算すれば、圧入流体の流出濃度は：

$$C(t) = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^{n_s} q_i H(t - t_{bi}) \quad (6)$$

と表される。ただし、 $q = \sum_{i=1}^{n_s} q_i$ であり、 $H(x)$ はヘビサイド関数である。トレーサーを無次元時間 ΔV_p だけ圧入したスラグ試験の場合、時刻 V_p での吸い込みにおけるトレーサー流出濃度は Eq. (7) となる：

$$C_{\text{slug}}(V_p) = C(V_p) - C(V_p - \Delta V_p) \quad (7)$$

2.3. 数値計算例

よく用いられる坑井配置として5点法を考え、その1/4領域を計算対象とする。長さ 1×1 、境界要素80に分割された正方領域で、坑井半径を0.001とするわき出しを $(0, 0)$ 、吸い込みを $(1, 1)$ に配する。また、圧入、生産レートは1で釣り合っているとする。

簡単のため、単一フラクチャーを含む多孔質媒体を仮定する。ポアゼイユの法則を適用すれば、開口幅 w_f のフラクチャー浸透率は：

$$k_f = \frac{w_f^2}{12} \quad (8)$$

である。両端点の座標を $(0.65, 0.35)$ 、 $(0.75, 0.75)$ とするフラクチャーが領域内に存在する場合、CVBEMにより流線は Fig. 1 のように描かれる。ここでのフラクチャー開口幅は $w_f = 10^{-5}$ である。このとき、わき出し $(0, 0)$ において x 軸と角度 θ の向きに引かれる流線に沿って、トレーサーが吸い込み $(1, 1)$ に到達するのに要する時刻を計算した結果が Fig. 2 である。区間 II がフラクチャーを通過し、区間 I および III はフラクチャーを通過せずに吸い込みに到達する。このように、各区間からトレーサーが流出する時刻にずれがあるため、流出濃度曲線は特徴的な形状を描く。

Fig. 2 Time of Flight as Function of the Angle θ between the Streamline and the x -Axis at $(0, 0)$

Fig. 3 Comparison of Effluent Tracer Concentration Curves for Various Widths of a Fracture

Fig. 3に $\Delta V_p = 0.2$ のトレーサースラグ流出濃度曲線を示す。領域内にフラクチャーを含まない場合、および位置は上記と同様で開口幅の異なるフラクチャーを含む媒体でトレーサ試験を行った場合の結果を比較している。フラクチャーを含む場合にはFig. 2で示した3区間からのトレーサ到達時刻の相違により、三つのピークを持った曲線となる。ただし、開口幅が 10^{-6} 以上ではトレーサ流出濃度曲線はほぼ一定となることが分かる。これはフラクチャーの持つ浸透率が、周囲の媒体の浸透率に対し、無限大とみなせるためである。本論文では開口幅の相違が流出プロファイルの結果に及ぼす影響を無視し、フラクチャーの位置のみを流出曲線の形状を変化させる変数として扱う。ここでは、フラクチャーの位置を両端点の xy 座標 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) によって決定するものとする。

3. EnKF

EnKFの手順は、与えられたパラメーターを用いて流動方程

式を解く一期先予測と、観測データに基づいてシミュレーションモデルの状態変数を修正するフィルタリングの二つの手順に分かれる。適用に際して、以下のような状態ベクトル ψ を定義する：

$$\psi_j = \begin{bmatrix} m \\ d \end{bmatrix}_j \quad (9)$$

ただし、下付き文字 j は j 番目の実現値を表し、1から全実現値の個数 N_e までとる。 m は N_m 次元のモデル変数ベクトルで、シミュレーションモデルに与えられる浸透率、孔隙率などの静的変数 m_s ならびに圧力や飽和率等の動変数 m_d から構成される。さらに、 d は N_d 次元の観測変数ベクトルで、坑底圧や含水率等の坑井で観測される変数からなる。このように、 ψ の次元 N_ψ は $N_\psi = N_m + N_d$ と与えられる。本論文においては、 m_s はフラクチャー特性を表すパラメーター、すなわちフラクチャー両端点の xy 座標からなる。また、動変数は考慮しないため、 $m = m_s$ が成り立つ。以下、一期先予測とフィルタリングについて説明する。

3.1. 一期先予測

一期先予測は各実現値の状態ベクトルに対して、次の観測が行われる時刻における観測変数の予測値を計算する手続きである。

$$\psi_k^f = F(\psi_{k-1}^u) \quad (10)$$

ただし、 F は流動方程式を表す。ここでは、流動方程式を直接解く代わりにCVBEMを用いて、タイムステップ $k-1$ で更新された状態ベクトル ψ_{k-1}^u から次ステップ k における観測変数 d を求め、 ψ_k^f とする。したがって、 $m = m_s$ の場合、 ψ_{k-1}^u と ψ_k^f 内のモデル変数は等しい。Eq. (10)において、上付き文字 u はupdated、すなわちフィルタリング後の更新された値を表す。また、上付き文字 f はforecast、フィルタリング前にシミュレーターから計算された予測値を表す。

3.2. フィルタリング

一期先予測で各実現値に対し、タイムステップ k における予測状態ベクトル ψ_k^f が求められる。これらの値を用いてカルマンゲイン K_k を計算する：

$$K_k = P_{e,k} H^T (H P_{e,k} H^T + R_{e,k})^{-1} \quad (11)$$

ただし、 H は状態ベクトルと観測変数ベクトルを関連付ける行列演算子で、 $H = [0 \mid I]$ である。このうち、 0 は $N_d \times N_m$ の零行列、 I は $N_d \times N_d$ の単位行列である。 $R_{e,k}$ は観測誤差の分散共分散行列で、次元は $N_d \times N_d$ である。 $P_{e,k}$ はステップ k における状態ベクトルの分散共分散行列であり、一期先予測($\psi_{k,j}^f$)のアンサンブルを用いて、標本分散の定義より：

$$P_{e,k} = \frac{1}{N_e - 1} (A_k^f - \bar{A}_k^f) (A_k^f - \bar{A}_k^f)^T \quad (12)$$

と計算される。ただし、 A_k^f は全ての状態ベクトル $\psi_{k,j}^f$ を並べた $N_\psi \times N_e$ 次元の行列、 $\bar{A}_k^f$ は状態ベクトルの平均を N_e 列ならべた行列である：

$$A_k^f = (\psi_{k,1}^f, \psi_{k,2}^f, \dots, \psi_{k,N_e}^f) \quad (13)$$

$$\bar{A}_k^f = A_k^f \mathbf{1}_{N_e} \quad (14)$$

ただし、行列 $\mathbf{1}_{N_e}$ は $N_e \times N_e$ 次元で、全ての成分値が $1/N_e$ である。

Fig. 4 Algorithm of the EnKF

Table 1 Average Values of Model Variables for Initial Ensembles of 8 Cases

No. of case	(x_1, y_1)	(x_2, y_2)
1	(0.3, 0.7)	(0.7, 0.3)
2	(0.4, 0.6)	(0.6, 0.4)
3	(0.5, 0.25)	(0.5, 0.75)
4	(0.5, 0.4)	(0.5, 0.6)
5	(0.3, 0.3)	(0.7, 0.7)
6	(0.4, 0.4)	(0.6, 0.6)
7	(0.25, 0.2)	(0.75, 0.2)
8	(0.4, 0.2)	(0.6, 0.2)

以上のように求められるカルマンゲイン $\mathbf{K}_k$ と実観測を用いて、状態ベクトルは Eq. (15) により更新される：

$$\psi_{k,j}^u = \psi_{k,j}^f + \mathbf{K}_k (d_{k,\text{obs}} - \mathbf{H} \psi_{k,j}^f) \quad (15)$$

ここで、観測データ $d_{k,\text{obs}}$ は実際に観測された値にガウス乱数に従う観測誤差 γ を足したものであり、各実現値ごとに値は異なる。次の観測データが得られる場合は、再び一期先予測の手続きに戻って繰り返し計算を行う (Fig. 4)。

4. 結果と考察

本論文では推定するモデル変数がフラクチャー両端点の座標のみであることから、モデル変数ベクトル $\mathbf{m}$ は、

$$\mathbf{m}_j = [x_1, y_1, x_2, y_2]^T \quad (16)$$

と表される。Eq. (11) に従えば、CVBEM により計算したタイムステップ k における観測変数 d を用いてカルマンゲイン $\mathbf{K}_k$ は：

$$\mathbf{K}_k = \frac{1}{\sigma_{d,d}^2 + \gamma^2} [\sigma_{x_1,d}^2, \sigma_{y_1,d}^2, \sigma_{x_2,d}^2, \sigma_{y_2,d}^2, \sigma_{d,d}^2] \quad (17)$$

と表される。ただし、 σ はアンサンブルから計算される各状態変数と観測変数との標準偏差、 γ は観測誤差の標準偏差を表す。

Table 1 に記載する初期アンサンブルの違いによる 8 ケースを対象として、同定を行った。実現値の個数 N_e は全てのケースに対して 100 とする。ただし、初期アンサンブルのモデル変数の標準偏差はすべて 0.03 とした。

Fig. 5 Symmetric Axes and Mirror Images

Case 1 は平均位置が x 軸方向とのなす角 $-\pi/4$ 、中心 (0.5, 0.5) の長いフラクチャー、Case 2 は向き、中心は同様に短いフラクチャーを初期に与える。Case 3, 4 は x 軸方向とのなす角が 0, Case 5, 6 は x 軸方向とのなす角が $\pi/4$ で、中心は全て (0.5, 0.5)、各 2 ケースとも長さを変えて与える。Case 7, 8 はフラクチャーの中心座標が領域の中心から外れている場合を考え、長さの違いで 2 ケースを考える。

参照解として、2. 章の計算例で示したフラクチャー位置を考え、観測データは Fig. 3 の $w_r = 10^{-5}$ の結果を用い、 V_p が 0 から 3 の範囲で 0.01 ずつ得られるものとした。ただし、領域が直線 $y=x$ および $y=1-x$ に関して対称であるため、同一の観測データが得られるフラクチャー位置が他にも三つ存在する (Fig. 5)。本論文の問題設定では、これらの鏡像を区別することはできないため、Fig. 5 に示される 4 カ所のいずれかに収束すれば同定できたとする。ただし、この問題については、Yamashita *et al.*¹⁷⁾ が 2 方向のトレーサー試験を行うことで同定が可能であることを示している。

4.1. 従来手法

一般に行われているように、トレーサー流出濃度 C_{slug} を観測変数 d にとった結果を本項で示す。Zafari *et al.*¹⁴⁾ が提起した、観測データが同化に反映されない区間の存在を明らかにし、その理由について考察する。

Fig. 6 は上段が Case 2、下段が Case 5 の計算結果であり、左図が参照観測データとフィルタリング後の観測変数アンサンブル平均値を比較したものである。また、中図は初期のフラクチャーアンサンブルを重ねて示したものの、右図は計算終了後のフラクチャーアンサンブルを重ねて示したものである。ただし、全てのケースに関して観測誤差 γ は 0.002 とした。

Fig. 6 の Case 2 の結果からは 0 でない観測データが得られ始めても、観測変数アンサンブルが 0 のままの区間が存在することが分かり、フラクチャーの収束位置は参照解からずれている。0 でない観測データがデータ同化に反映されなかった理由は以下の通りである。

時刻 V_p が 0 から全実現値中最小のブレイクスルー時刻 (Breakthrough Time: BTT) までの間は、全ての予測される観測

Fig. 6 Effluent Tracer Concentration (left), Fracture Positions of Initial Ensemble (center), and Fracture Positions of Ensemble after $V_p = 3$ (right)

変数 d_k^f が 0 であり、その平均値も 0 である。したがって、全ての実現値に対して $d_{k,j}^f - \bar{d}_k^f = 0$ であり、任意の状態変数と観測変数との分散共分散が 0 となる：

$$\sigma_{x1,d}^2 = \sigma_{y1,d}^2 = \sigma_{x2,d}^2 = \sigma_{y2,d}^2 = \sigma_{d,d}^2 = 0 \quad (18)$$

Eq. (17) より、カルマンゲイン K_k は：

$$K_k = 0 \quad (19)$$

となるため、Eq. (15) から状態ベクトル ψ は Eq. (20) のように更新される：

$$\psi_{k,j}^u = \psi_{k,j}^f \quad (20)$$

これは観測データ $d_{k,obs}$ の値に関係なく成り立ち、修正が行われないことがわかる。

Case 2 では、 $\inf_j BTT_j > BTT_{obs}$ であったため、実観測ではトレーサーがブレイクスルーした後も推定するモデル変数が変化しない区間が存在したと言える。

一方、Fig. 6 の Case 5 については、初期実現値の BTT の方が実観測より早く、実観測ブレイクスルー後の全データが反映されているにも関わらず、参照解とずれた位置に収束した。これは左図中の三つ目のピークにおいて、更新されたアンサンブルのトレーサー流出濃度が観測データからずれていることに起因すると考えられる。ずれた原因としては、同じトレーサー流出濃度が得られる時刻 V_p が複数存在することによる対応性の悪さが挙げられる。Fig. 7 に全 8 ケース計算後の実現値平均位置を示す。Case 7 および 8 は参照解とほぼ一致するように収束したが、他のケースについては解とはずれた位置に収束もしくは

Fig. 7 Average Convergence Positions of 8 Cases

は計算領域外に発散している。

4.2. 観測変数の再選択による新規手法

初期アンサンブルによって観測データが反映されなくなる区間の存在を解消するために、観測変数を入れ替えることを考える。ある時刻 V_p で観測データ d_{obs} が得られたとき、EnKF 一期先予測の手続きにおいて、同じ観測データが得られる時刻を計算し、それを観測変数にとる。ここで、Fig. 3 に示されるように、同じトレーサー流出濃度が得られる時刻は複数存在し得ることから、データに単調性を持たせる必要がある。この目的の

ため、Fig. 8のようにトレーサー流出濃度を時間積分して得られる累積トレーサー流出量 A_R を C_{slug} の代替変数にする。これにより、 A_R は単調増加なグラフとなるため、時刻 V_p と1対1の対応性を示す。すなわち、Fig. 9のように観測変数を V_p にとり、フィルタリングを行う。この A_R と V_p の1対1の対応性は3.章 Case 5で参照解とのずれが生じた原因への対応策ともとえられる。一期先予測の手続きでは、観測データが得られた後に、CVBEMによってその累積トレーサー流出量が得られる時刻をシミュレートする。従来手法ではBTTの前後関係で

データが反映されないことがあったが、時刻自体を変数にすることで実観測のブレイクスルー後は任意のアンサンブルに対して観測データが反映され、モデル変数が修正される。ただし、実観測がブレイクスルーする前のデータは考慮しないことに注意する。

Fig. 10に計算結果（上段がCase 2, 下段がCase 5）を示す。ここでは、観測データ $V_{p,obs}$ の誤差 γ を0.02とした。Case 2では、BTTは実観測の方が早く、従来手法ではモデル変数修正に反映されない区間が存在したが、時刻を変数にしたことにより修

Fig. 8 Amount of Tracer Recovery

Fig. 9 Conversion of Observation Variable

Fig. 10 Amount of Tracer Recovery (left), Fracture Positions of Initial Ensemble (center), and Fracture Positions of Ensemble after $V_p = 3$ (right)

Fig. 11 Average Convergence Positions of 8 Cases

正が行われ、観測データに近づいている様子が見られる。これによりブレイクスルー後の全観測データが修正に反映され、計算終了時のフラクチャー位置も参照解近くに収束した。

また、Case 5はBTTに関して、実観測よりも早いアンサンブルであるが従来手法では参照解とはずれた位置に収束した。これも A_R に対する V_p を観測変数にしたことによりデータの対応性が改善され、観測データから大きくずれることなく更新され、参照解付近に収束した。Fig. 11に示すように、他の6ケースについても同様に、参照解付近に収束しており、アンサンブルの相違による結果への影響を取り除くことができた。

5. 結 語

一般的に、EnKFはモデル変数の個数が大きいシステムで適用されるが、ここでは既往研究において指摘されている、観測データがモデル変数の修正に反映されないという難点を克服するために、モデル変数の少ない簡便な問題設定をした。すなわち、CVBEMにより再現されたトレーサー試験の流出結果からEnKFを用いた最適化分析によりフラクチャーを同定する、というものである。まず、逐次得られるトレーサー流出濃度を観測変数としてEnKFを適用した場合には、初期アンサンブルの与え方によって観測データがフラクチャー位置の修正に反映されない区間が存在した。また、当該区間が存在しない初期アン

サンブルであっても、正確に同定できないことがあり、結果として設定した8ケース中2ケースのみで参照解付近に収束した。新規の適用手法として、流出濃度データを時間積分することで累積流出データに取り直し、その累積流出量と同じ値が得られる時刻を観測変数とした。これはデータに単調性と1対1の対応性を付与することを目的とした操作である。これにより上記の難点を克服、全8ケースで参照解付近に収束しており、初期アンサンブルに依存しない手法である可能性を示した。

実フィールドデータへの適用に際しては、フラクチャーが有する浸透率の相違による影響などを加味する必要がある、モデル変数ベクトルに含めるパラメータの検討が必要である。また、実際に観測される濃度変化は様々なノイズの重畳が想定されるため、観測誤差 γ の与え方に関する深化が肝要である。

References

- 1) Kalman, R. E., *Trans. ASME J. Basic Eng. Ser. D*, **82**, 35 (1960).
- 2) Jazwinski, A. H., "Stochastic processes and filtering theory," Academic Press, New York (1970).
- 3) Evensen, G., *J. Geophys. Res.*, **99**, 10143 (1994).
- 4) Burgers, G., van Leeuwen, P. J., Evensen, G., *Mon. Weather Rev.*, **126**, 1719 (1998).
- 5) Evensen, G., *Ocean Dyn.*, **53**, 343 (2003).
- 6) Anderson, J. L., Anderson, S. L., *Mon. Weather Rev.*, **127**, 2741 (1999).
- 7) Hamill, T. M., Whitaker, J. S., *Mon. Weather Rev.*, **129**, 2776 (2001).
- 8) Houtekamer, P. L., Mitchell, H. L., *Mon. Weather Rev.*, **126**, 796 (1998).
- 9) Reichle, R. H., McLaughlin, D. B., Entekhabi, D., *Mon. Weather Rev.*, **130**, 103 (2002).
- 10) Naevdal, G., Mannseth, T., Vefring, E. H., SPE in Proceeding of SPE/DOE Improved Oil Recovery, (2002), 75235.
- 11) Naevdal, G., Johnsen, L. M., Aanonsen, S. I., Vefring, E. H., *SPE J.*, **10**, (1), 66 (2005).
- 12) Gu, Y., Oliver, D. S., *SPE J.*, **10**, (2), 217 (2005).
- 13) Gu, Y., Oliver, D. S., *J. Energy Resour. Technol.*, **128**, 79 (2006).
- 14) Zafari, M., Reynolds, A. C., *SPE J.*, **12**, (3), 382 (2007).
- 15) Sato, K., *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **192**, 1421 (2002).
- 16) Sato, K., *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **192**, 4425 (2002).
- 17) Yamashita, K., Sato, K., Masuda, Y., *J. Jpn. Petrol. Inst.*, **48**, (5), 308 (2005).

要 旨

アンサンブルカルマンフィルターを用いたトレーサー試験データの逐次同化によるフラクチャーの同定

合田 隆^{†1)}, 佐藤 光三^{†2)}^{†1)} 東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻, 113-8656 東京都文京区本郷7-3-1^{†2)} 東京大学大学院工学系研究科エネルギー・資源フロンティアセンター, 113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

逐次型データ同化手法の一つであるアンサンブルカルマンフィルターの貯留層特性解析への適用可能性を議論する。既往研究において、坑井で観測される含水率データがモデル変数の修正に反映されない点が指摘されており、本研究では簡便な問題設定上で解決策を開発・提唱する。十分な開口幅の単一フラクチャーを含む均質な多孔質媒体を仮定、複素変数境界要素法でトレーサー試験を再現する。得られた結果を観測データとみなし、アンサンブルカルマンフィルターを用いた最適化分析によってフラクチャーの同定を行う。従来の適用手法では観測変

数として流出するトレーサー濃度を用いるのが一般的であるが、初期アンサンブルによってトレーサー流出後のデータがフラクチャー位置の修正に反映されない区間が存在し、正確な同定が行われなかった。また、当該区間の存在しない初期アンサンブルの場合でも、観測データの対応性が悪く、正確な同定が行われないことがあった。そこで、累積トレーサー流出量に対応する時刻を観測変数とすることで、トレーサー流出後の全観測データを的確に同化させるとともに、観測データの対応性を改善し、初期アンサンブルに依存せず正確な同定を可能にした。

.....