

## データ同化を用いた地下水流動評価の信頼性向上に向けて

山本真哉\*1

データ同化はシミュレーションと観測データを合理的に融合できる解析技術として、さまざまな分野で応用が進んでいる。本稿では地下水流動の評価に焦点をあて、データ同化を利用した地下水流動シミュレーションのモデルキャリブレーションの事例、および、観測地点の配置の合理化について検討した事例を紹介するとともに、放射性廃棄物処分において地下水流動評価の信頼性向上に資するデータ同化の活用方法について述べる。

**Keywords:** データ同化, シミュレーション, 観測, 地下水流動

## 1 はじめに

シミュレーションを用いた地下水流動評価において、地質構造や境界・初期条件等に関して得られる情報は限定的であり、また、岩盤の水理特性自体が大きな不均質性を有する。このような不確かさが存在することにより、構築した解析モデルで観測結果を十分な精度で再現するのが困難となり、解析モデルのキャリブレーションに経験や時間を要することも珍しくない。さらに、V&Vで提唱されているように、近年では解析結果の妥当性を示すために、不確かさの定量化が求められてきている。しかしながら、地下水流動シミュレーションに含まれる種々の不確かさを厳密にモデル化し、定量化することは非常に難しい問題といわざるをえない。このような問題に対して、シミュレーションと観測を統合する解析技術であるデータ同化（Data assimilation）が有効な手段の一つになりうると思われる。データ同化は、ベイズ推定の考え方で捉えると、不確かさを有する解析結果に対し、ある信頼性を持つ観測結果というエビデンスで条件付けることにより、もともとの不確かさを低減し、より信頼性の高い答えを得るための手段と解釈できる（図1）[1]。さらに、データ同化を有効に行うためには、使用する観測データの質と量が決め手となるが、この

とき、データ同化の枠組みを利用することで、観測計画の合理化にも役立てることができるものと思われる。

本講演では、以上に挙げた2つの利点に着目して地下水流動解析に関するデータ同化の活用事例を紹介する。

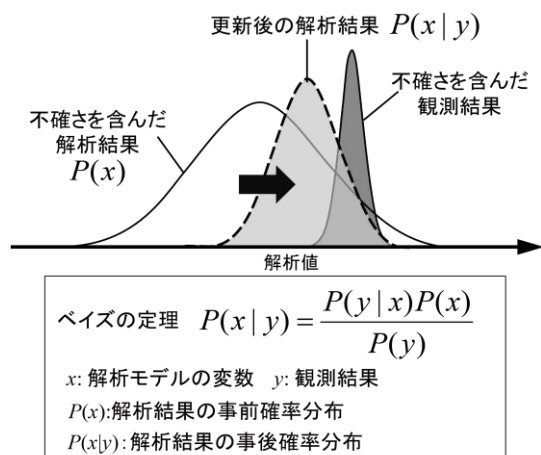
## 2 データ同化の概要

データ同化は、一般的には逆問題を解くことと同義であり、出力に相当する観測結果に基づいて、シミュレーションに入力される解析モデル、すなわち、状態量やモデルパラメータを同定するための手法といえる。

データ同化の手法は大きくオフライン型と逐次型の2種類に分けられ、両者の違いは、前者はある期間全体の観測データを用いて同化を行うのに対し、後者は観測データが得られるたびに同化を行う点にある。2つのアプローチにはそれぞれ長所と短所があるが、本講演では両手法の詳細については触れず、継続的にデータが取得される地下水モニタリングを考えた場合に解析モデルの修正が容易に行える逐次型のデータ同化手法のみを取り上げたい。

逐次型データ同化の最も基本的な手法はカルマンフィルタであるが、カルマンフィルタは非線形シミュレーションに適用できないことから、さらにこれを拡張した手法がいくつか存在する。その中でも、モデルパラメータ等にはばらつきをもたせ、多数の解析モデルでシミュレーションを実行する、いわゆる、アンサンブル解析と組み合わせたアンサンブルカルマンフィルタ[2]は、解析モデルの非線形性に対してロバストであることや、解析結果の不確かさを表現できる利点からデータ同化手法の代表的手法となっている。

図2はアンサンブルカルマンフィルタの概念の概



観測により更新された解析結果  $\propto$  尤度  $\times$  解析結果

図1 観測結果に基づいた解析結果の信頼性向上

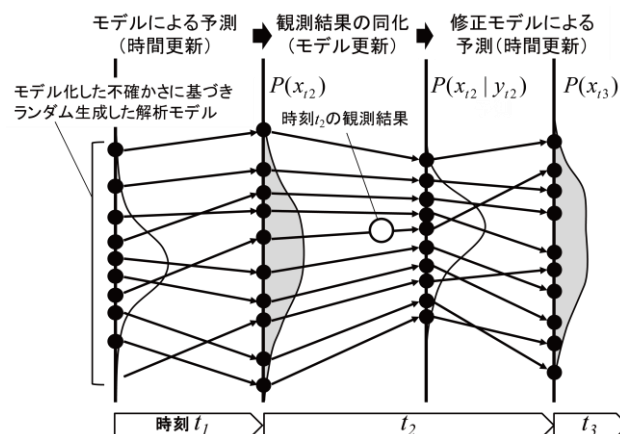


図2 アンサンブルカルマンフィルタの概念

Improving reliability of groundwater flow assessment with data assimilation by Shinya YAMAMOTO (s-yama@shimz.co.jp)

\*1 清水建設株式会社 技術研究所

Institute of Technology, Shimizu Corporation

〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第34回「バックエンド」夏期セミナーにおける講演内容を加筆したものである。

り、概略は次のようになる。まず、モデルパラメータの不確かさを確率密度分布として仮定し、分布に従うパラメータの実現値を発生させて解析モデルのアンサンブルを用意する。そして、アンサンブルを用いて非定常シミュレーションを実行し、次の観測時刻までの予測結果を得る。次に、予測結果と観測結果の誤差に基づいて各解析モデルのパラメータを修正する。なお、このときの修正量はカルマンフィルタの修正項の考え方に従う。このようにして修正された解析モデルのアンサンブルから、さらに以後の予測と修正を逐次繰り返すことで逐次データ同化が行われる。本手法では解析結果が常に実現値の集合で近似される確率密度分布として得られるため、パラメータの同定値だけでなく、ばらつきの幅から不確かさの大きさを評価できる。

### 3 データ同化の適用事例

#### 3.1 解析モデルのキャリブレーション

最初に紹介するのは、観測結果を再現できるようにするため、解析モデルのキャリブレーションにデータ同化を利用した事例である[3]。この例では、実在の地下構造物を対象に3次元の飽和不飽和地下水流動シミュレーションを実行し、構造物周辺で実施されている地下水モニタリングの観測結果を用いてアンサンブルカルマンフィルタを実行した(図3)。観測データには地下構造物周辺に設置された観測井戸の水位および構造物に流入する地下水流量の2種類を用いた。キャリブレーション、すなわち、パラメータ同定の対象は地質区分ごとに割り当てられた飽和時の透水係数であり、対象領域内に計15個の地質区分が存在している。1日間隔で取得される観測データを用いて逐次的にデータ同化を実施した。なお、データ同化は2段階に分けて行い、最初は模擬観測結果を使用してアンサンブルカルマンフィルタの解析条件の妥当性を確認し、その後、実測の観測結果を用いて適用性を評価した。

模擬観測結果を用いた解析では、事前に透水係数の仮の真値を設定したうえでシミュレーションを実行し、データを人工的に生成した。そして、この模擬観測結果を用いて透水係数が未知の条件で透水係数の同定を試みた結果、キャリブレーションした解析モデルにより模擬観測結果を再現でき、透水係数の真値も同定できることを確認した(図

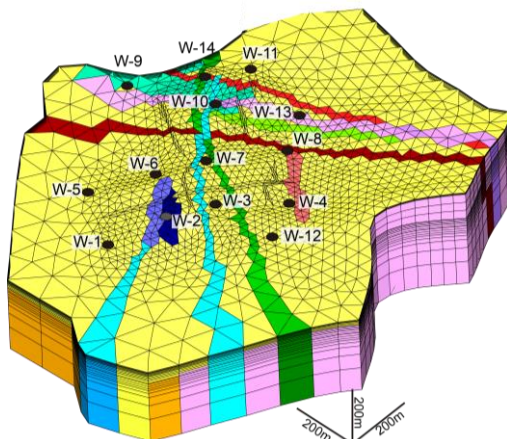


図3 地質モデルと解析メッシュ

4および図5)。これより、解析モデルや観測に誤差のない理想的な状態であれば、逆問題としておおむね正しく解けることが示された。

次に、実際の観測結果を使用した際の観測の再現結果を図6に示す。模擬観測データと異なり、実測データには様々な変動が含まれるが、これは人為的要因など様々な影響が含まれているためである。解析モデルではこれらの要因をモデル化していないため、データ同化を実行しても全ての挙動を正確に再現するのは困難であるが、大局的な観測値の大きさには整合している。また、データ同化を行ったにもかかわらず観測値との乖離が大きい水位観測孔が一部で見られたが、このことは、解析モデル上で想定している地質モデルや境界条件が現実とは異なっていることを示唆していると思われる。図7は各地質区分の透水係数の同定値を文献から参照した値と比較したものであり、多くの区分で近い値を示しているが、一部区分で値が大きく異なっている。ここで、アンサンブルの標準偏差に着目すると、文献値との乖離が大きい区分では明らかにばらつきが大きくなっており、同定値の信頼性が低いことを示している。透水係数の参照値が得られない状況ではパラメータの同定値が妥当かどうかの判断は難しいが、このようなとき、アンサンブルのばらつきは解析結果の信頼性を反映する有用な指標になりうる。

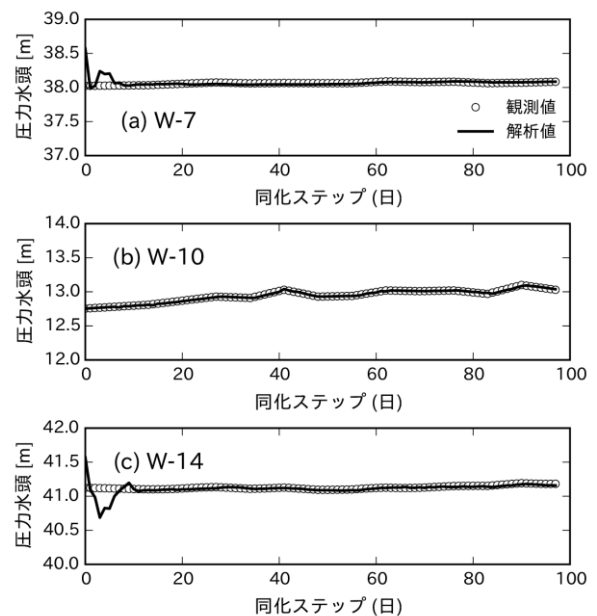


図4 地下水位の再現結果例(模擬観測結果を使用)

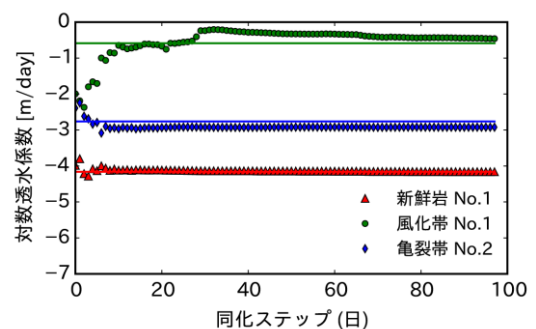


図5 透水係数の同定結果例(模擬観測結果を使用)

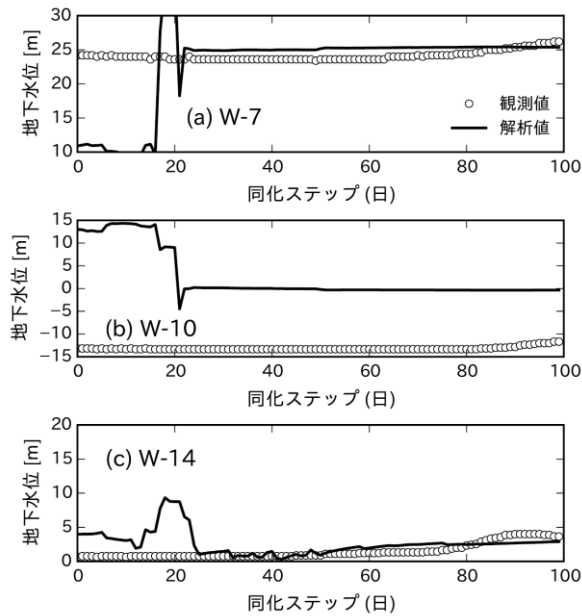


図6 地下水位の再現結果例(実観測結果を使用)

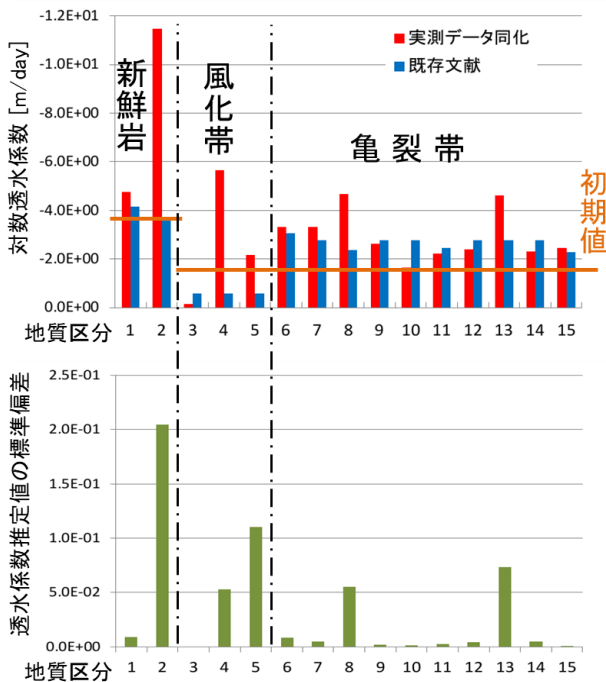


図7 透水係数の同定値とアンサンブルのばらつき

### 3.2 観測位置の検討

次に紹介するのはデータ同化の結果に基づき、観測位置を評価した事例である[4]。データ同化においては観測データの情報の量と質が結果に大きな影響を与えるため、限られた調査数量でできるだけ効果的に観測を行うことが重要である。しかし、対象となる地下水流動場により適切な観測位置は変わり、場に応じた観測位置の選定が必要である。図8は、岐阜県瑞浪市の超深地層研究所周辺において推定された水理地質構造であり、この領域内に6本の断層の存在が確認されている。本事例ではこれらの断層の透水特性を把握するのに適した観測地点について数値実験により検

討した。実験では仮想的な観測孔(No.1~o.5)を5本設定し(図9)、各観測孔において鉛直方向に10m間隔で10点の地下水圧観測点が配置されているとした。さらに、中央の観測孔から揚水がおこなわれ、このときの水圧応答が各観測点で計測されているものとした。水圧応答の模擬観測データを生成するため、以上の条件でシミュレーションを実施した。なお、断層の透水係数には事前情報として得られている値を入力した。次に、断層の透水係数を未知として模擬観測結果によりアンサンブルカルマンフィルタを実行し、透水係数の同定精度を確認した。

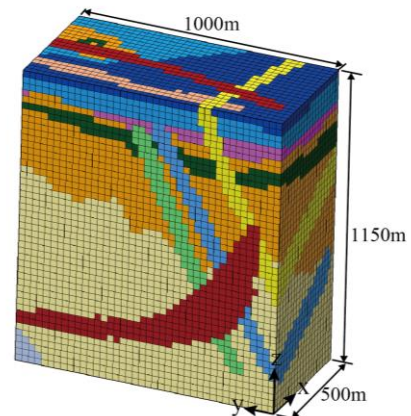


図8 瑞浪超深地層研究所周辺の水理地質モデル

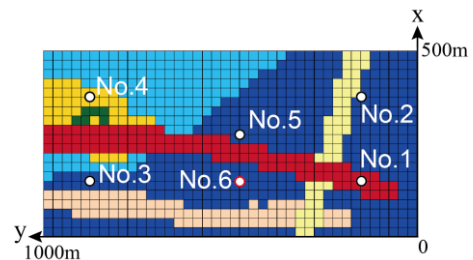


図9 仮想的な観測孔の配置

図10(a)は全50点の観測結果を使用した場合の透水係数の同定結果であり、真値を同定できているのが確認できる。よって、このケースで用いた観測結果は断層の透水係数を同定できるだけの情報量をもっていることがわかる。続いて、観測点数を半数にした場合について検討した。図10(b)は各観測点の間隔を20mに広げることによって観測点数を半減したケースであるが、透水係数の真値が推定できていないことから、対象の水理地質構造では観測点を単純に均等配置すると情報量が不足することがわかる。次に、全観測点のデータを同化に用いたケースで、各観測点が透水係数の同定にどの程度寄与するのかを感度解析により求めた(図11)。この結果、各観測の寄与度が地点によって大きく異なり、地下水流動場の不均質性を反映していることがわかった。また、No.4孔は全体的に寄与度が小さいが、これは同孔が断層から離れた場所に位置し、断層の透水係数の同定には大きな影響を及ぼさないことを示している。ここで孔ごとに寄与度が高い観測点上位5点を選び、これら25点の観測データのみでデータ同化を実行した。このときの透水係数の同定結果図10(c)をみると、50点の観測点を用



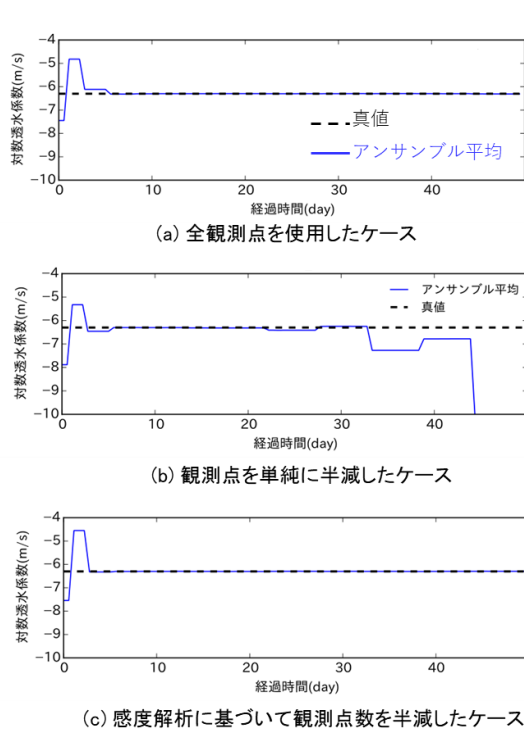


図 10 断層の透水性係数の同定結果

いた場合と同程度の精度で真値の同定ができていることがわかり、観測点数が半減しても十分な情報量を有していることが示された。以上の結果は、地下水モニタリングの計画時に模擬観測データによるデータ同化の結果を評価することで、地下水流動場を考慮した観測位置を合理的に提案できる可能性を示している。

#### 4 おわりに

最後に放射性廃棄物処分を対象とした地下水流動評価においてデータ同化の活用法を考えてみる。

処分施設の地下水モニタリングは調査～施工～竣工後にわたって継続され、事業の進展とともに情報量が増加する。観測量が限られる初期の地下水流動シミュレーションのモデル構築では、データ同化手法の特徴を踏まえると比較的長い期間の観測データを対象としたオフライン型のデータ同化、例えば、アジョイント法などが精度の面から適していると思われる。そして、以降の段階では構築した解析モデルの妥当性を新たに得られる観測結果から検証しつつ、逐次データ同化によりモデル修正を繰り返すことで、合理的な解析モデルの信頼性確保につながると考えられる。

一方で不確かさの評価の観点からは、アンサンブルベースのデータ同化手法が有効である。同時に、モデルパラメータの感度解析や各観測項目のデータ同化に対する寄与度の評価を行うことも重要となる。

また、紹介事例で示したように、シミュレーションで生成した模擬的な観測結果を用いてデータ同化を行うことで、逆解析としての適切性の評価や観測配置の事前検討が行えるため、このような活用法も地下水流動評価の信頼性向上に貢献できると思われる。

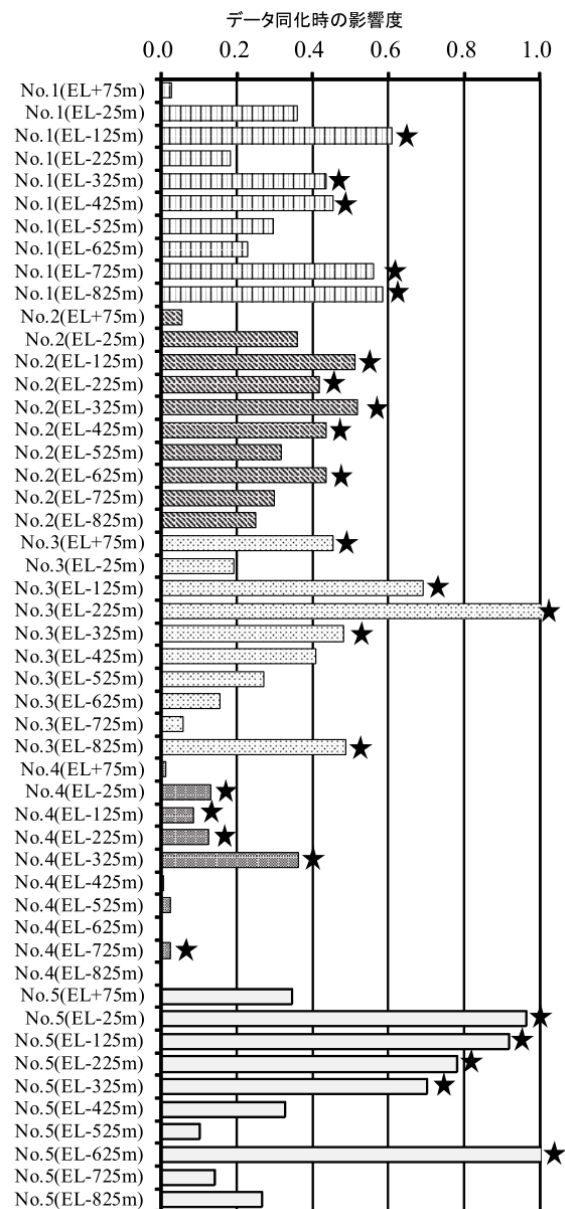


図 11 各観測点のデータ同化時の影響度

#### 謝辞

本講演の内容の一部は日本原子力研究開発機構との共同研究によるものであり、同機構の尾上博則氏には多くのご助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] 山本真哉: 土木分野の工学シミュレーションと不確かさ. 計算工学, Vol.22, No.1, pp.3548-3551(2017).
- [2] Evensen, G.: The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation, Ocean Dynamics, Vol.53, pp.343-367(2003).
- [3] Yamamoto, S. et al: Data assimilation for model identification in groundwater flow simulation. ARMS8, pp.2299-2307(2014).

- [4] 尾上博則, 山本真哉, 小橋昭夫, 尾崎裕介, 櫻井英行,  
増本清: 逆解析を用いた地下水流動のモデル化・解析  
に関する研究 (その 2) (共同研究) . JAEA Research  
2018-003, (2018).

