

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

清水建設 技術研究所
山本 真哉

本日の内容

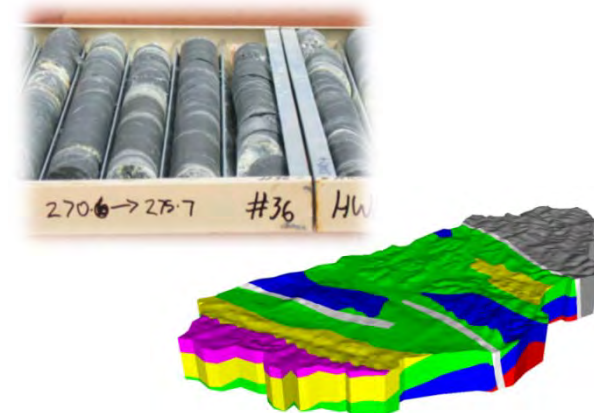
1. 地下水流動シミュレーションとデータ同化
2. 事例その1:地下水流動モデルのキャリブレーション
3. 事例その2:同化実験に基づいた観測位置の検討

不確かさに起因する地下水流動解析の難しさ

得られる地下の情報に極めて少なく (Epstemic Uncertainty)、
水理特性のばらつきも大きい (Aleatory Uncertainty)。

地下水流動シミュレーションの不確かさ

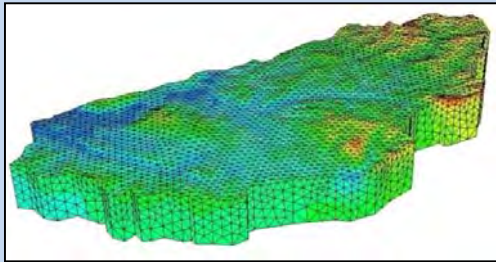
- 地質構造
- 境界条件
- 水理特性
- 初期条件



課題	現状
• 解析精度の向上	観測結果を十分に再現できないことがある。
• 合理的なモデル構築	経験のある解析技術者が試行錯誤的にキャリブレーションを実施。
• 解析結果の妥当性評価	不確かさの要素が多いため解析結果の信頼性を示すのが難しい。

データ同化による地下水流動解析の信頼性向上

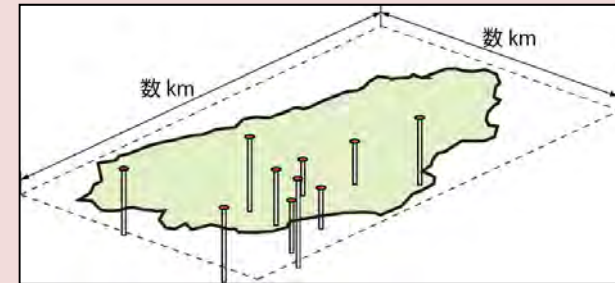
地下水流動解析



- ✓ 全体の地下水流動場の評価
- ✓ 様々なシナリオに基づく予測
- ✗ 予測精度に限界

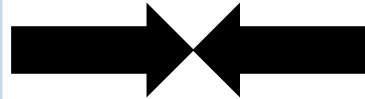
解析の信頼性向上

地下水の調査・観測



- ✓ 実際の地下水に関する情報
- ✗ 数が限られ、情報は断片的
- ✗ データのみからの予測は困難

観測の合理化

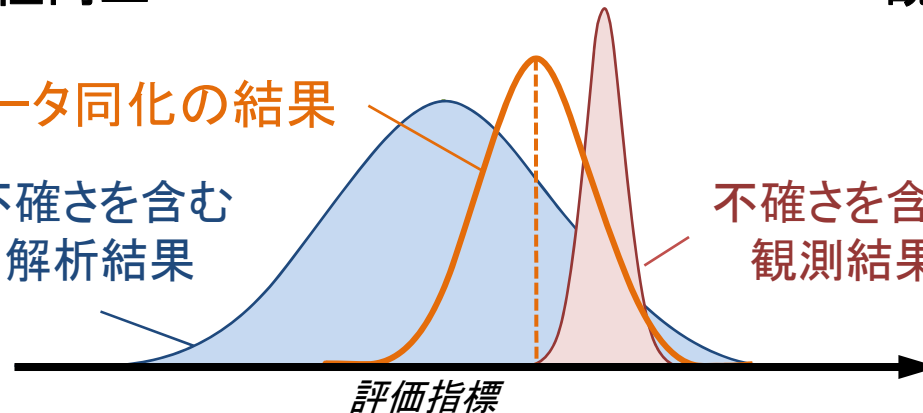


データ同化

データ同化の結果

不確さを含む
解析結果

不確さを含む
観測結果

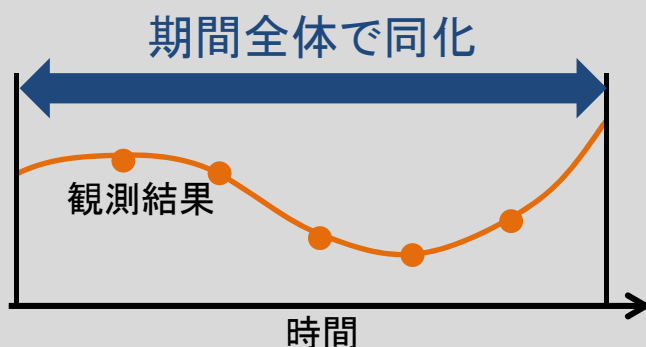


データ同化手法の種類

地下水モニタリングのデータは継続的に得られるため、モデルの逐次更新が容易で、かつ、精度・計算コストの面で有利なアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)を選定

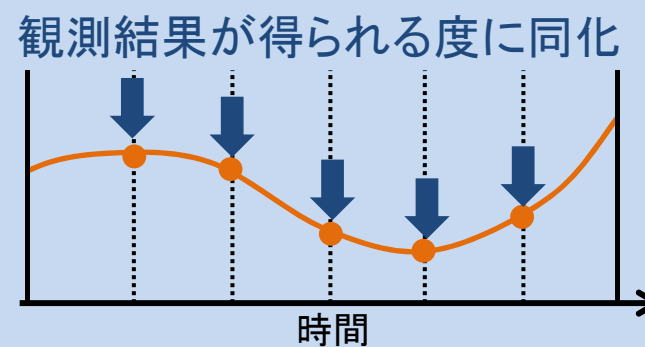
➤ オフライン型

- 最適内挿法
- 3次元変分法
- 4次元変分法(4D-Var)



➤ オンライン(逐次)型

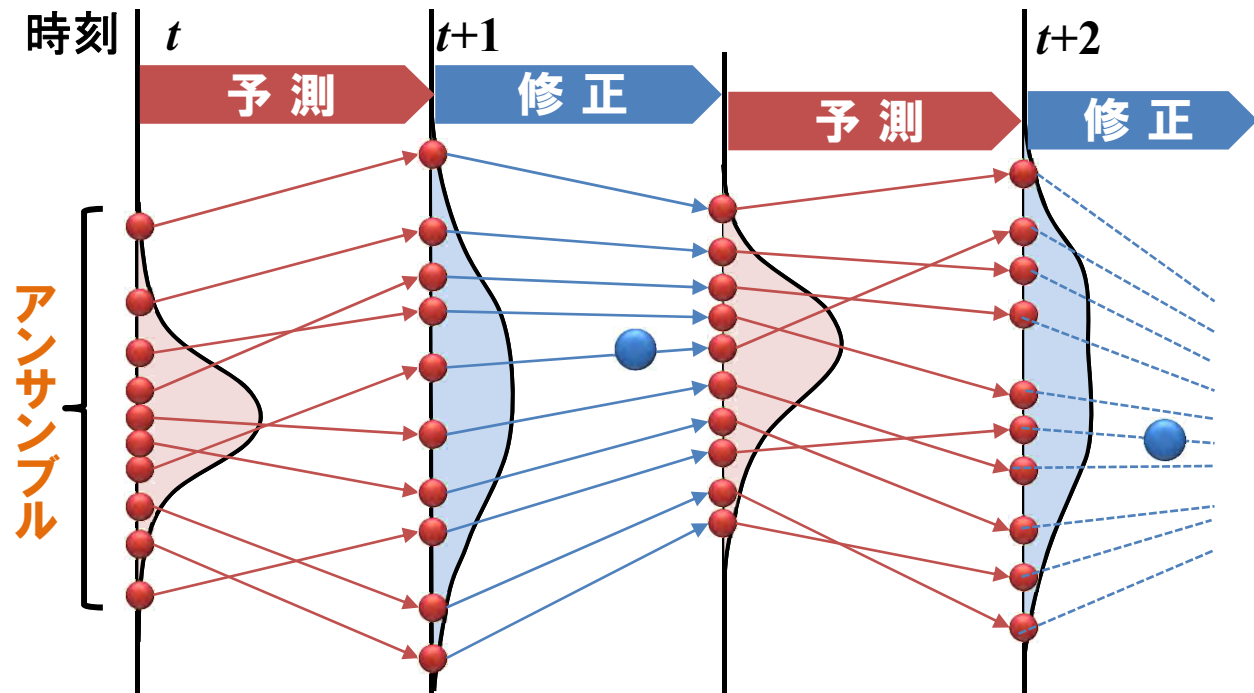
- カルマンフィルタ(KF)
- アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)
- 粒子フィルタ(PF)



アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)

- モンテカルロ計算を行う(確率分布として解析結果を得る)
- 予測とモデル修正を逐次繰り返す。

- アンサンブルメンバー
- 観測結果



$$\mathbf{x}_{t|t}^{(i)} = \mathbf{x}_{t|t-1}^{(i)} + \mathbf{K}_t (\mathbf{y}_t - \mathbf{H}\mathbf{x}_{t|t-1}^{(i)} + \boldsymbol{\varepsilon}_t^{(i)}), \quad \mathbf{K}_t = \mathbf{P}_t \mathbf{H}^T [\mathbf{H}\mathbf{P}_t \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_t]^{-1}$$

同化結果 予測結果 観測結果との差 観測誤差とモデル誤差の比

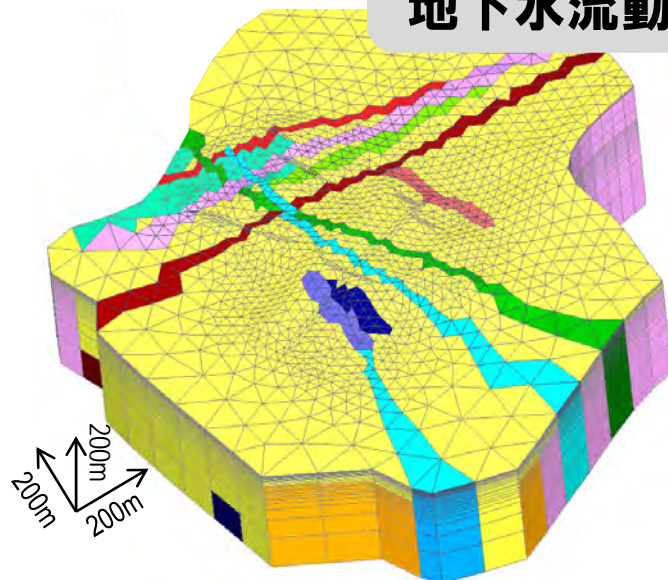
\mathbf{x} : モデル変数、パラメータ, \mathbf{y} : 観測 i : 実現値のインデックス, \mathbf{K} : カルマンゲイン,
 \mathbf{P} : 予測誤差共分散, \mathbf{R} : 観測誤差共分散, \mathbf{H} : 観測演算子

事例その1: 地下水流動モデルのキャリブレーション

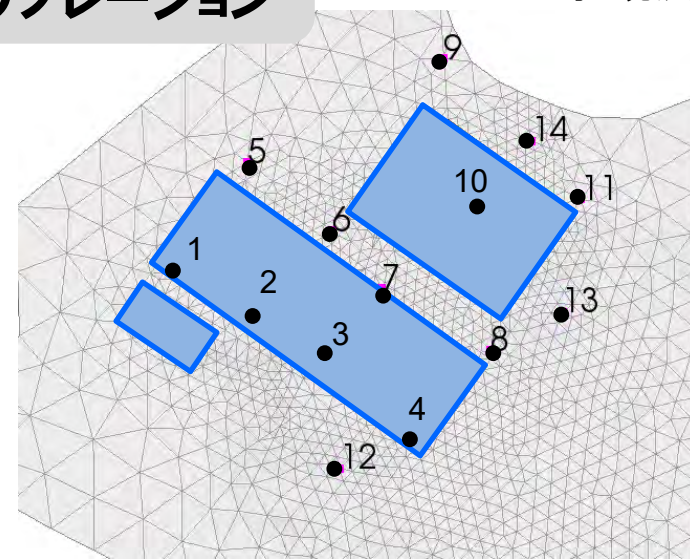
目的: 実際の地下構造物と地下水観測データを対象に
データ同化解析の適用性を検証

地下水のモニタリングデータを同化し、
地下水流動モデルをキャリブレーション

- 地下構造物
- 地下水観測孔



【シミュレーション】
地下水流動モデル

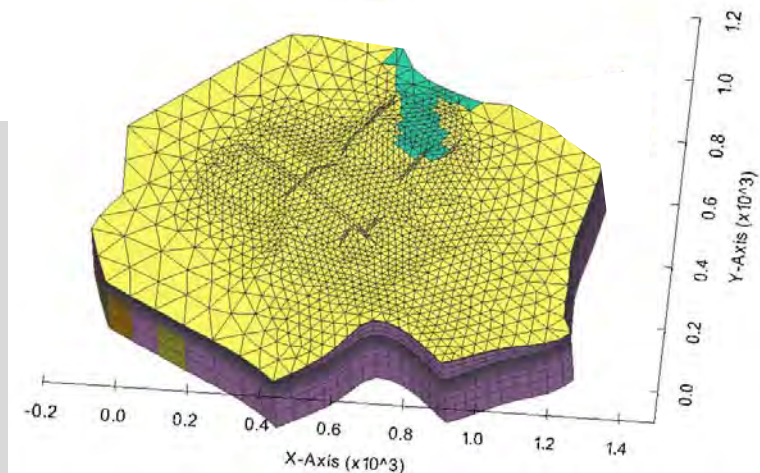


【観測】
地下水モニタリング

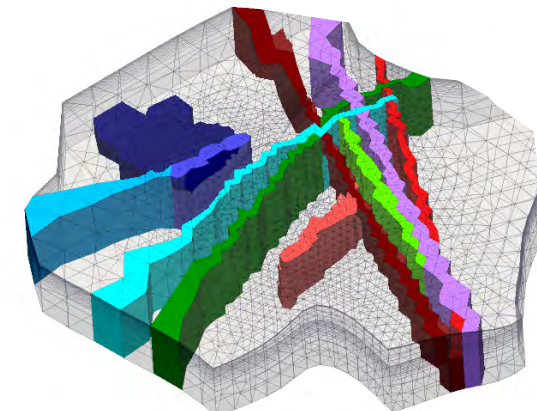
問題の概要

観測結果を再現できる解析モデルを得るため、各地質区分ごとの透水係数を同定

- 同定対象 : 各地質区分の対数**透水係数** (計15個)
- 観測データ : **水圧、地下水流量** (1日毎データ、計20点)
- 事前情報 :
 - 三次元地質構造
 - 亀裂帯・風化帯は新鮮岩よりも高透水
 - 透水係数の取りうる範囲 ($1.0 \times 10^{-10} [\text{m/s}] < K < 1.0 \times 10^{-4} [\text{m/s}]$)
- 手法 : アンサンブルカルマンフィルタ (96メンバー)
透水係数にシステムノイズを付加



地層区分(4区分)

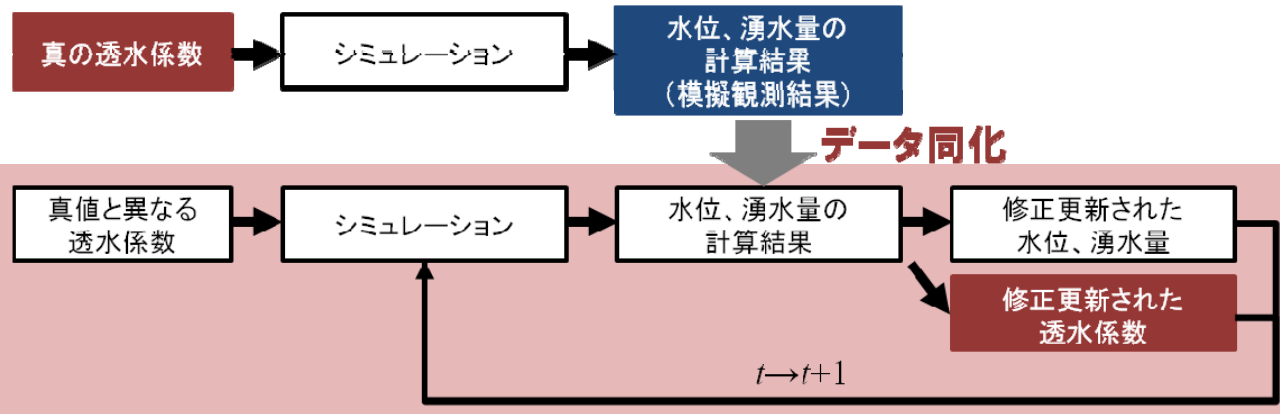


亀裂帯の分布(11系列)

同化実験の流れ

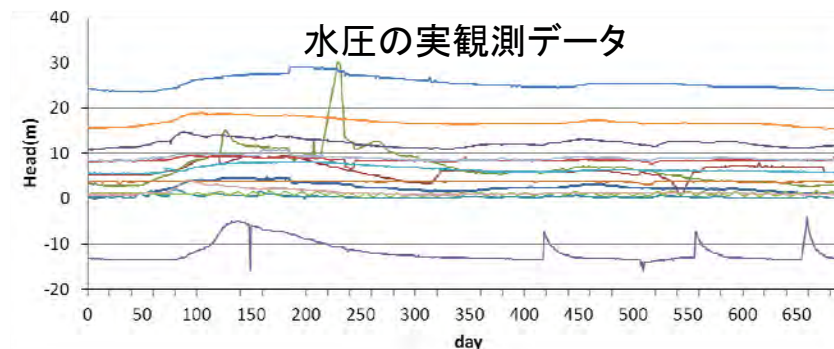
ステップ1: 模擬観測結果を用いてEnKFの基本性能を把握

“誤差のない観測データ”を“誤差のないモデル”に同化



ステップ2: 実観測結果に対して適用性を検証

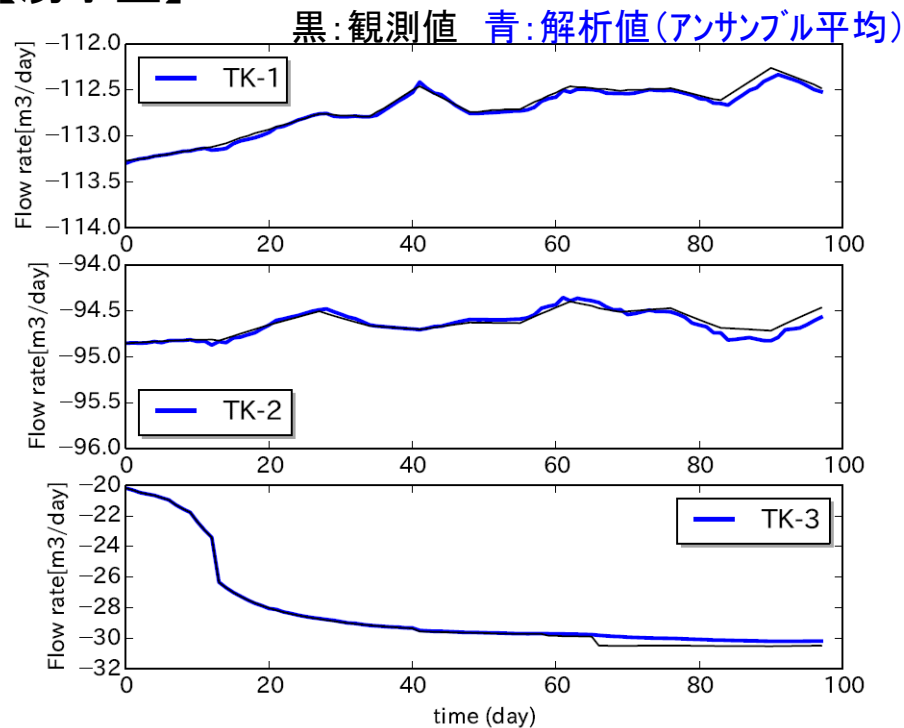
現状のモデルでは説明できない挙動を示す観測データも存在



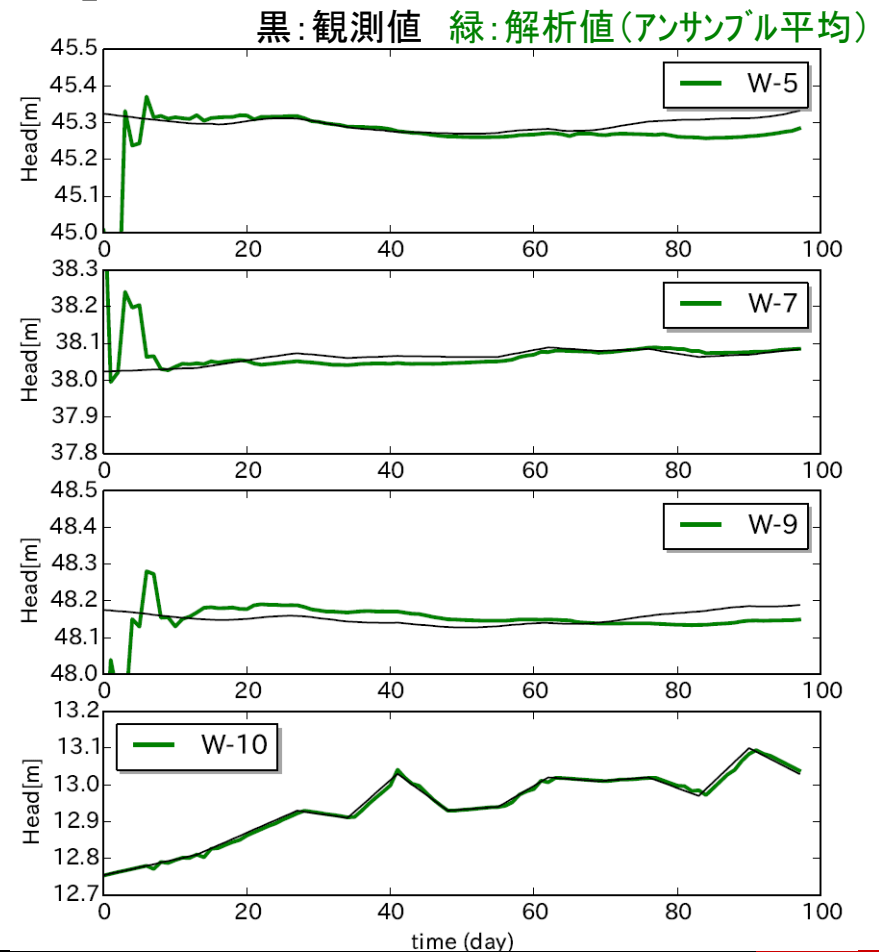
ステップ1: 模擬観測結果を用いた場合 観測結果の再現結果

同定されたモデルは観測結果を精度良く再現できることを確認

【湧水量】



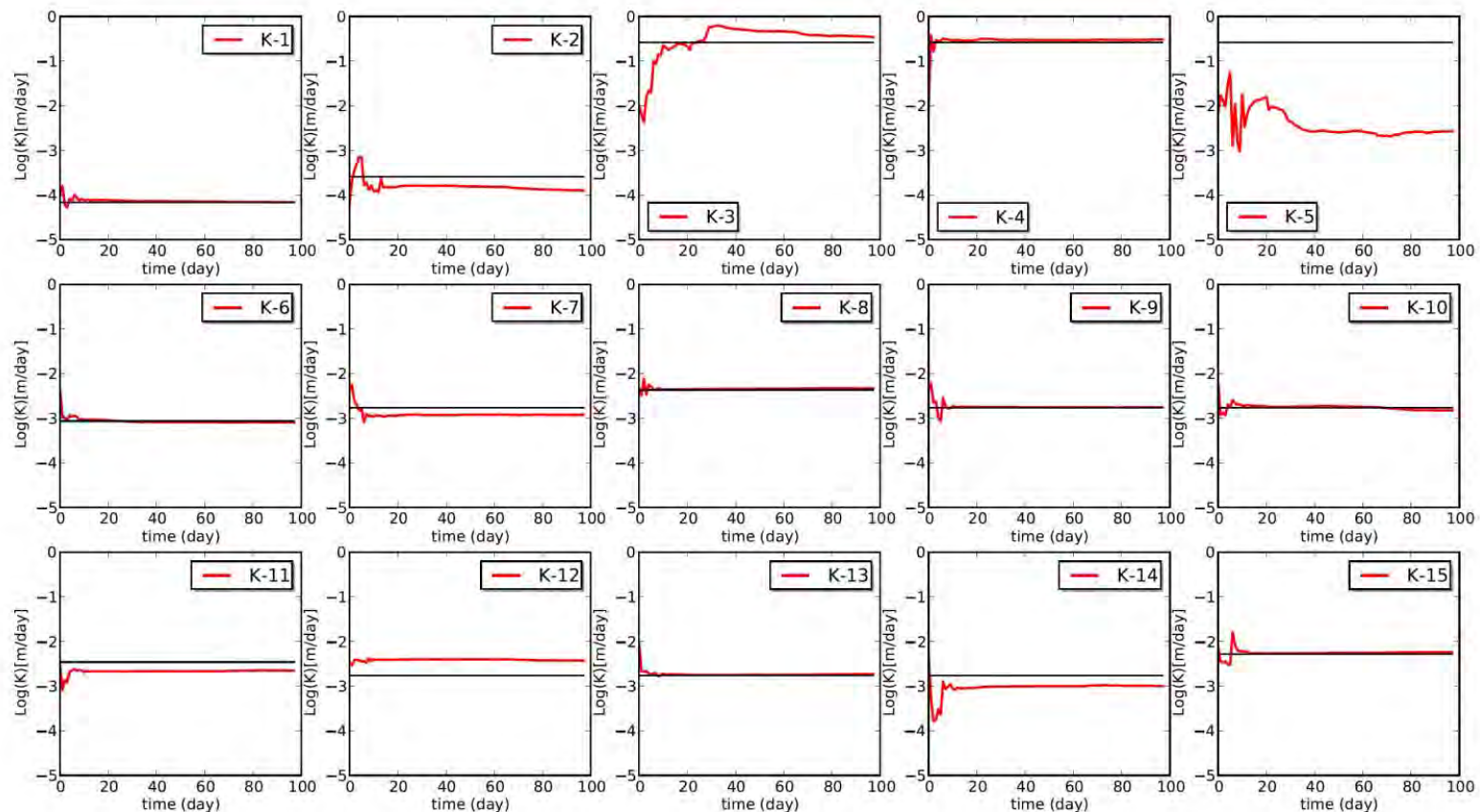
【水圧】



ステップ1: 模擬観測結果を用いた場合 透水係数の推定結果

概ね透水係数の真値を推定可能。観測位置の影響により推定精度が悪いものもみられる。

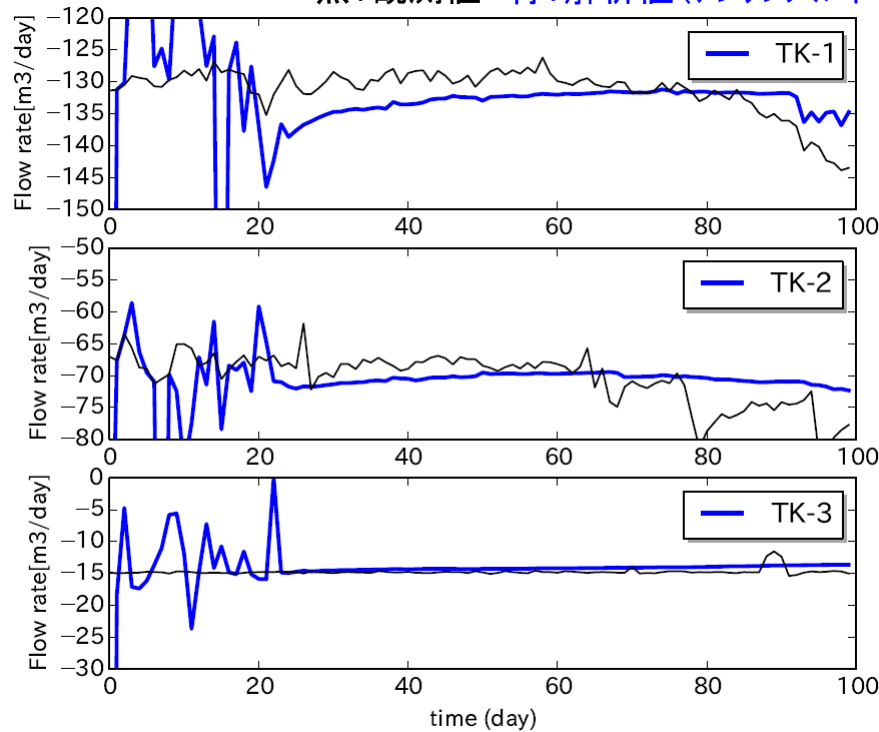
※横軸: 日数 黒: 真値 赤: 推定値 (アンサンブル平均)



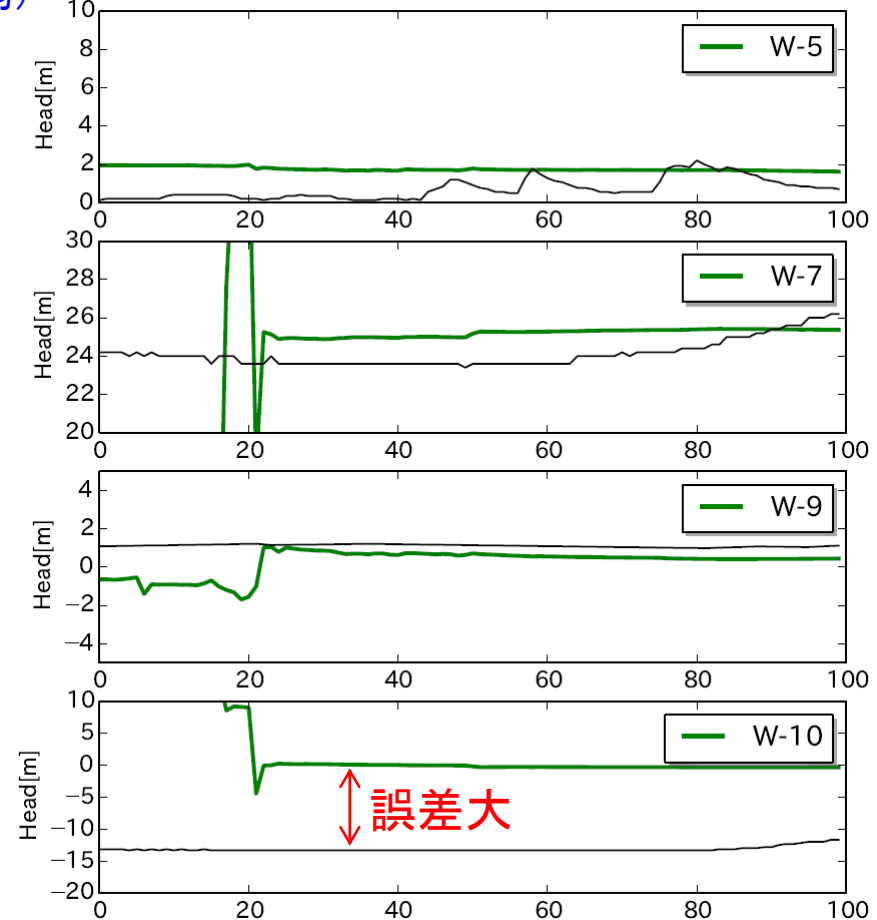
ステップ2:実観測結果を用いた同化実験

多くの地点で観測結果の大まかな傾向の再現が可能。
再現度の低い観測結果は解析モデルの精度不足を示唆。

【空洞湧水量】 黒:観測値 青:解析値(アンサンブル平均)



【観測孔水位】 黒:観測値 緑:解析値(アンサンブル平均)

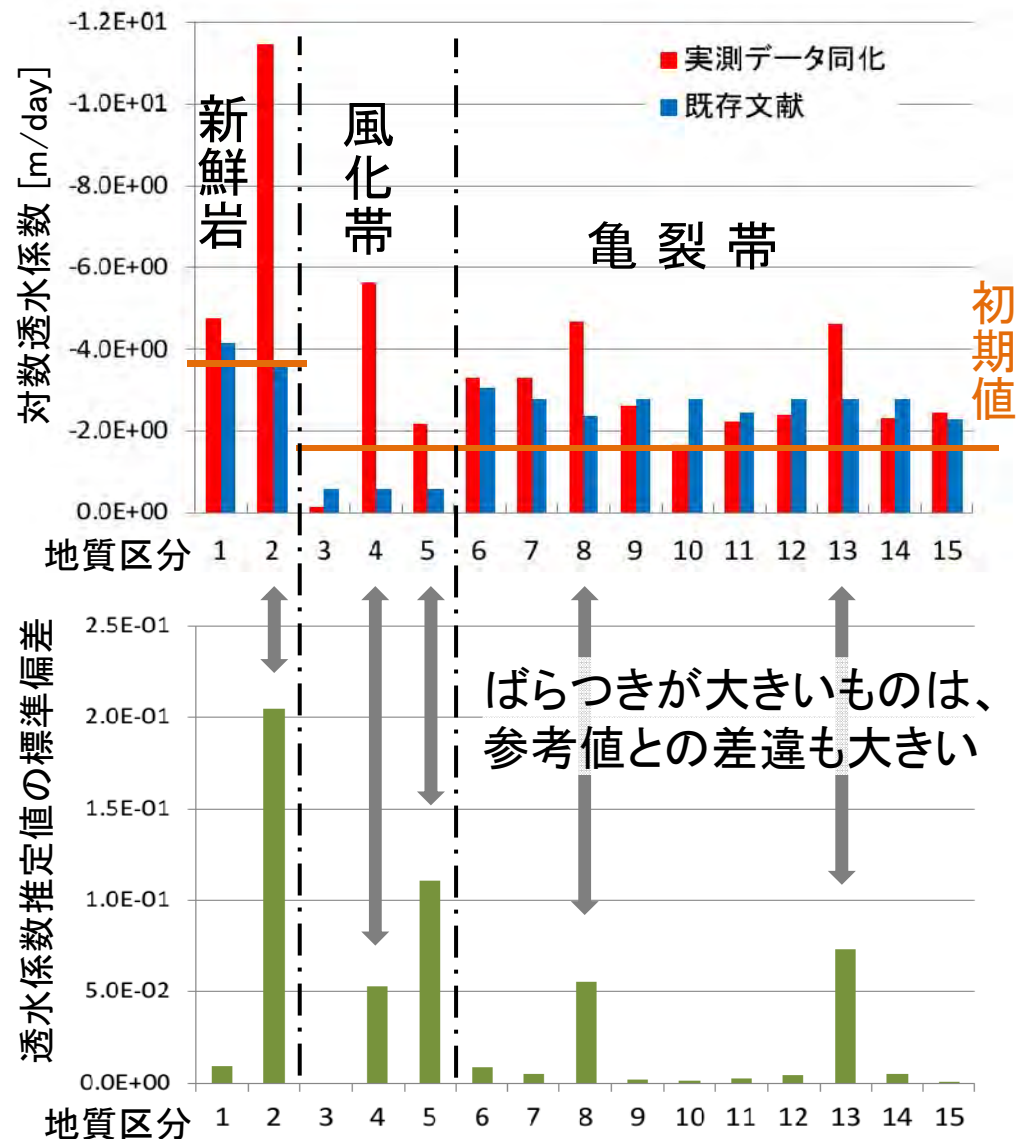


ステップ2:実観測結果を用いた場合 透水係数の推定結果

実際の透水係数は不明であり、
同定値の検証ができない。



アンサンブルのばらつきは
推定結果の信頼性を反映



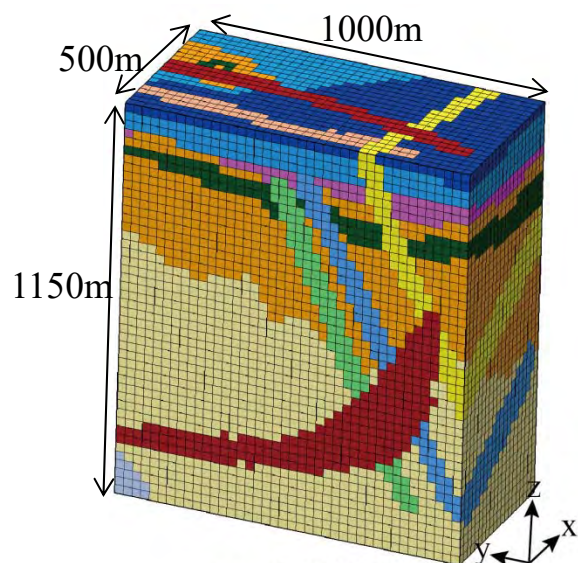
事例1のまとめ

- 実構造物で観測されたデータを対象として、地下水流動解析のデータ同化の適用性を検証。
- 理想条件下においてEnKFは適切に機能し、解析モデルのパラメータを精度良く同定できることを確認。
- 実観測データを用いたケースでは、地下水の観測結果を大局的に再現する透水係数を同定した。また、データ同化の結果は解析モデルの検証にも有用。

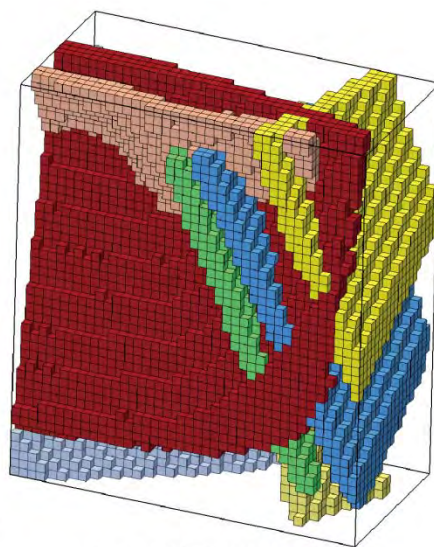
事例その2: データ同化実験による地下水観測位置の検討

目的: データ同化の結果から有効な地下水観測位置を提案する

- JAEA瑞浪超深地層研究所周辺(岐阜県瑞浪市)の水理地質構造を対象
- アンサンブルカルマンフィルタにより計6断層の透水性係数を推定
- シミュレーションより生成した模擬観測データを同化に使用



(a) 地質構造



(b) 断層の分布

地質区分名称	対数透水性係数(m/s)
明世/本郷累層(基底礫岩)	-6.3
土岐夾炭累層	-6.6
土岐夾炭累層(基底礫岩)	-5.3
土岐花崗岩(UHFD)	-7.5
土岐花崗岩(LAFZ)	-6.0
土岐花崗岩(LSFD)	-7.7
月吉断層に伴う割れ目帯	-9.0
S200_15_2	-5.2
SH180_07	-5.1
SH180_08	-6.3
SH180_09	-6.0
SB3_11	-9.0
S200_15	-9.0

各地層の透水性係数(真値)

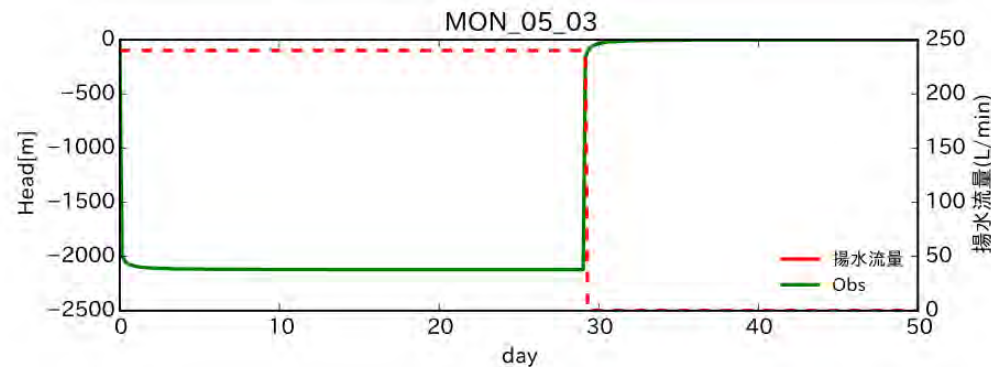
山本ほか(2017): 「模擬観測結果を用いたデータ同化実験に基づく地下水モニタリング位置の評価」 第22回計算工学講演会

尾上ほか(2018): 「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)」,

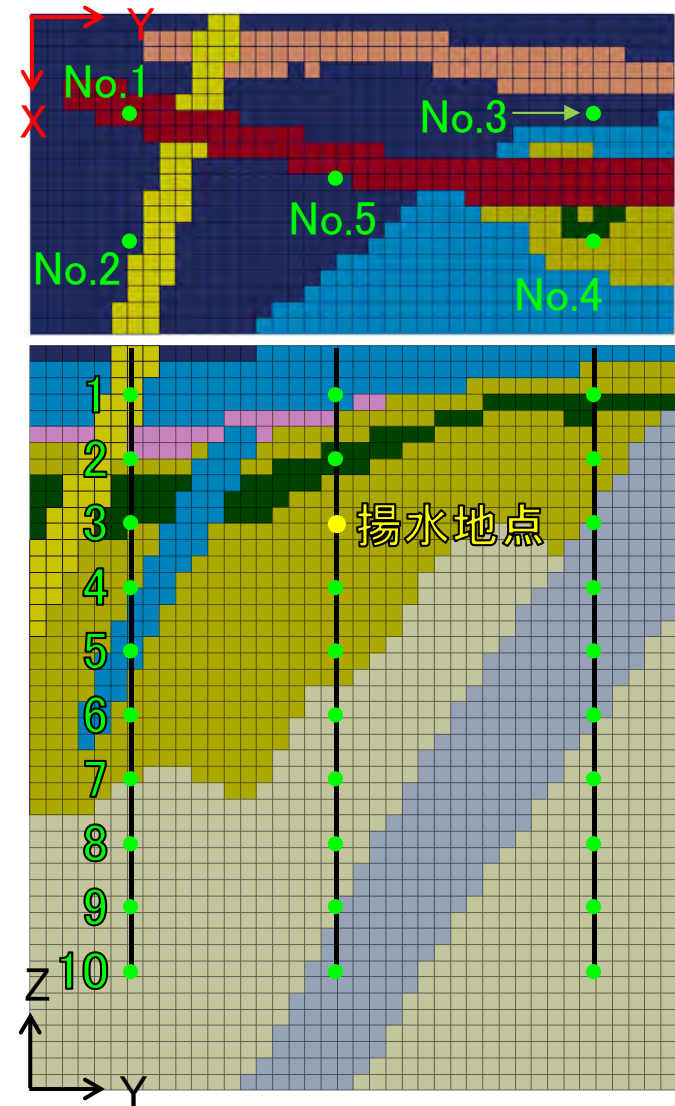
JAEA-Research 2018-003

揚水試験と観測点配置

- 5本の観測孔において100mごとの各10地点で水圧応答を観測。
- 揚水地点より240L/minで30日間揚水を実施。その後、揚水を停止し、さらに20日間観測を継続。

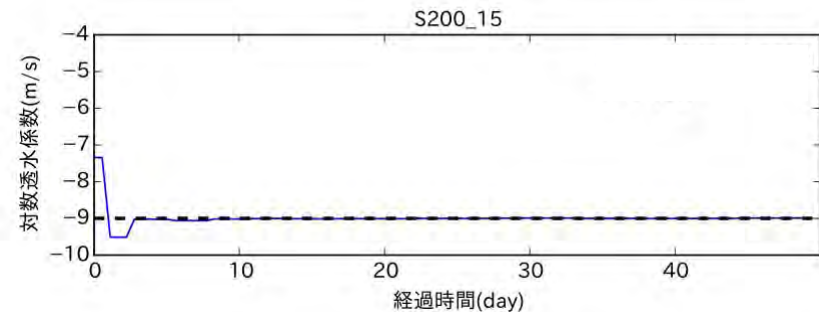
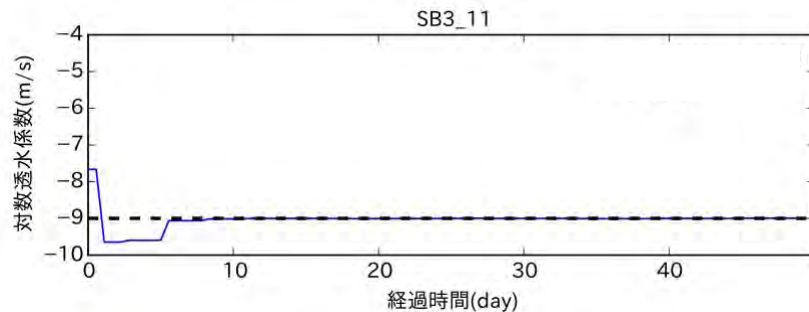
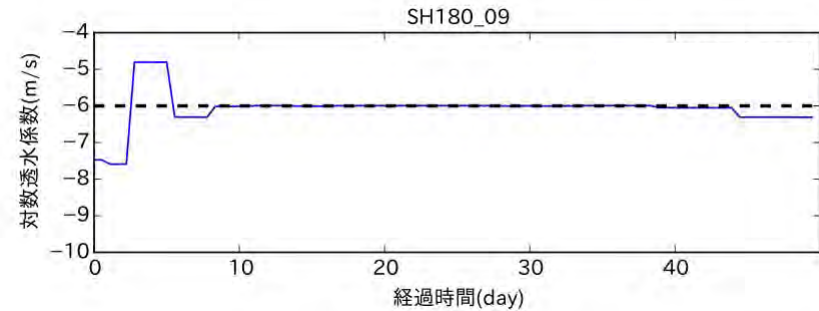
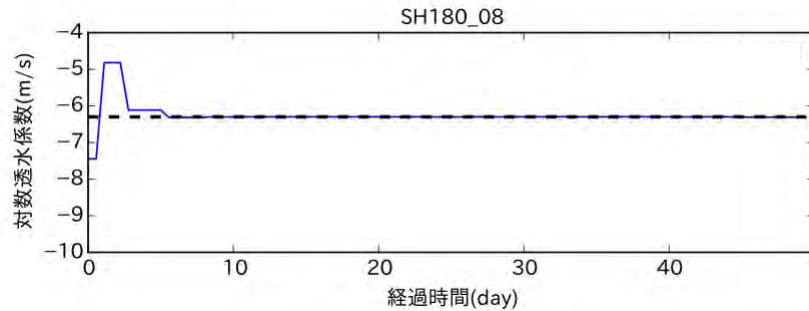
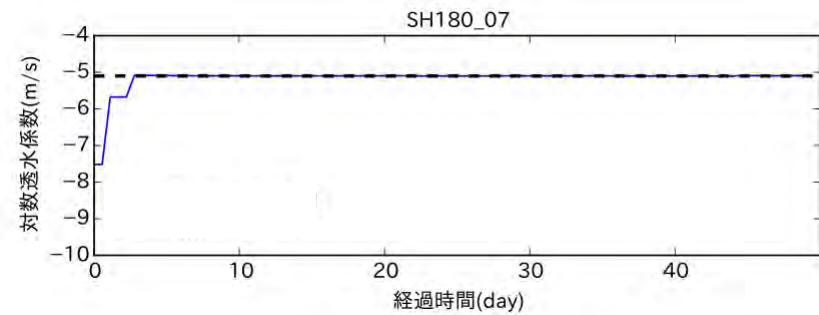
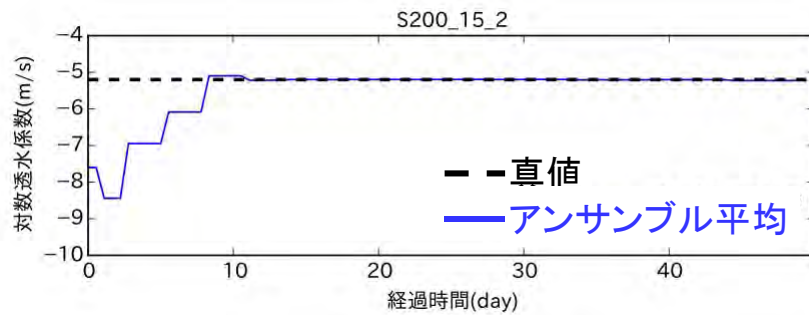


揚水量と揚水地点の水圧

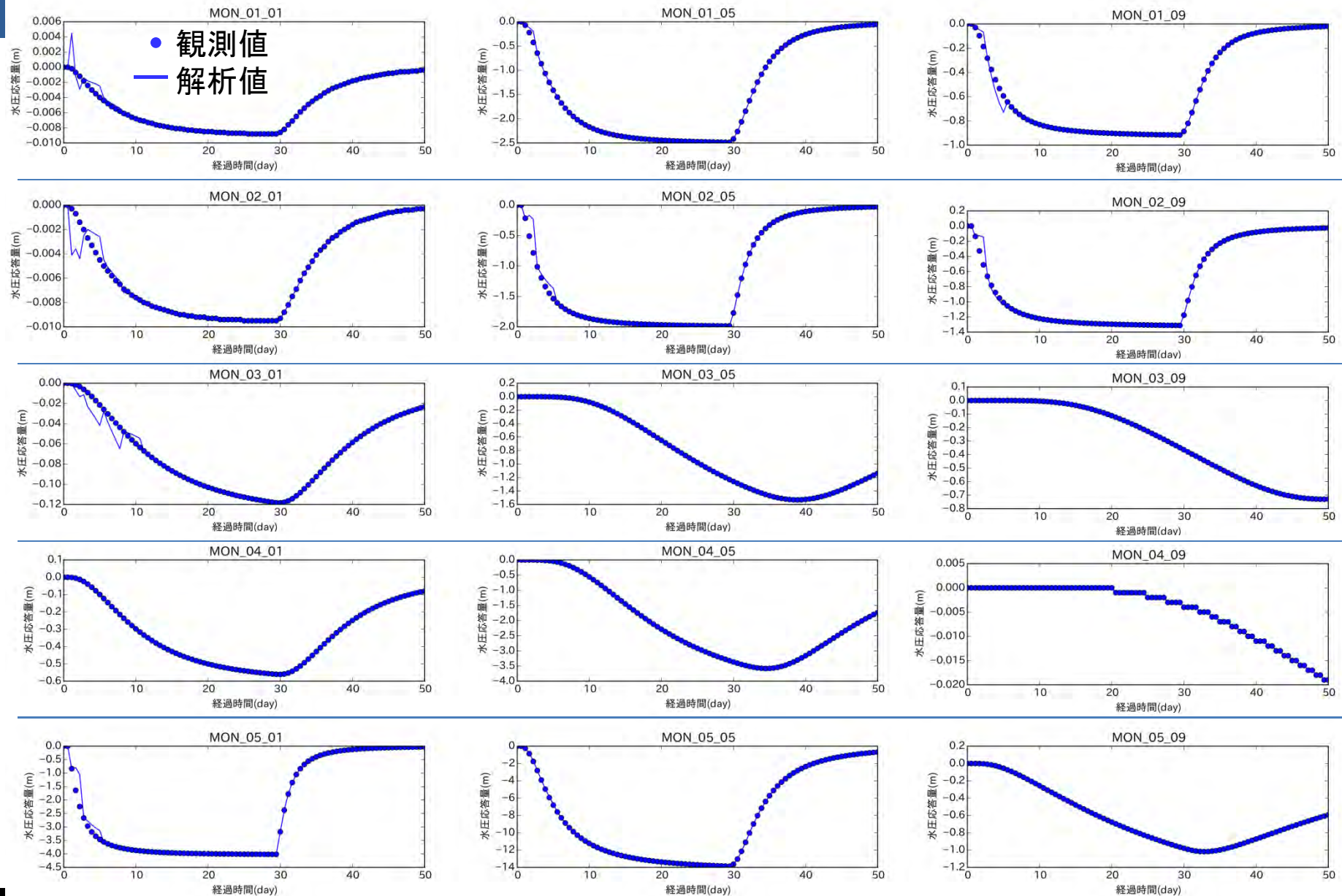


透水係数の推定結果(基本ケースA)

全観測結果を同化することで各断層の透水係数真値が推定可能。



水圧観測の再現結果の例(基本ケースA)



検討したケース

モデル同定が成功した基本ケースAに対して、
観測点数を半減したケースB~Dの逆解析結果に着目

ケース	使用観測数	概要
ケースA	50	全ての観測結果を使用した基本ケース
ケースB	25	200m間隔で水圧データを取得したケース
ケースC	25	観測感度により使用観測点を選定したケース
ケースD	25	不確かさの大きい領域に観測孔を移したケース

透水係数の推定結果(ケースB)

各孔とも200m間隔の観測点でデータ同化を実施すると、情報量が減少したことで真値の同定が困難に。

EL.m

+25

-75

-175

-275

-375

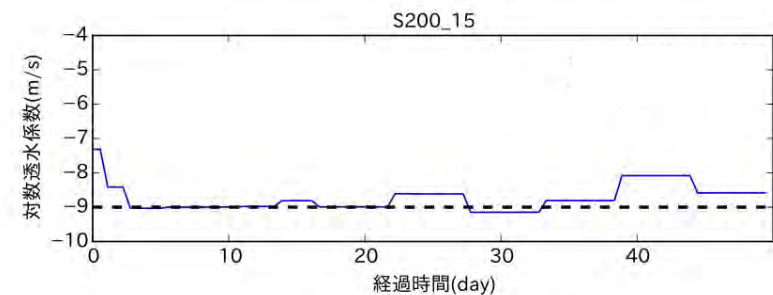
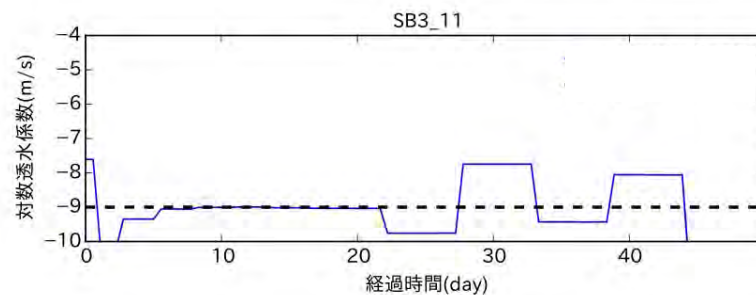
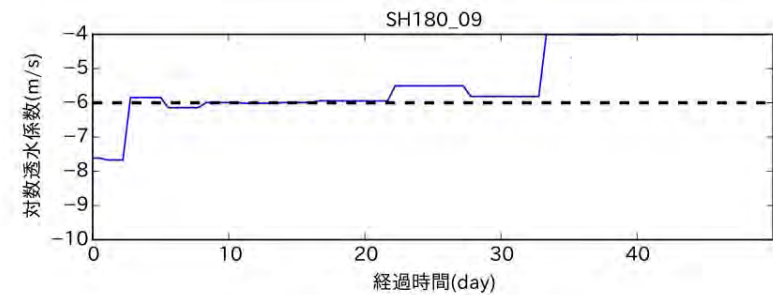
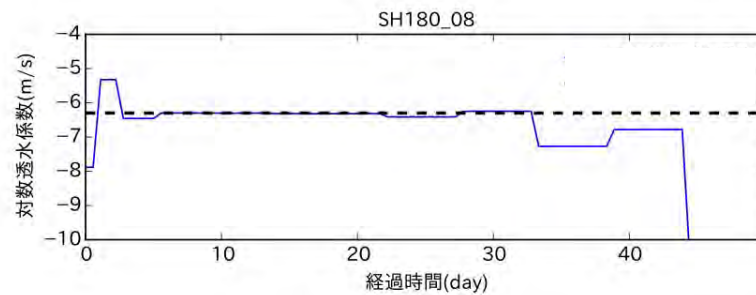
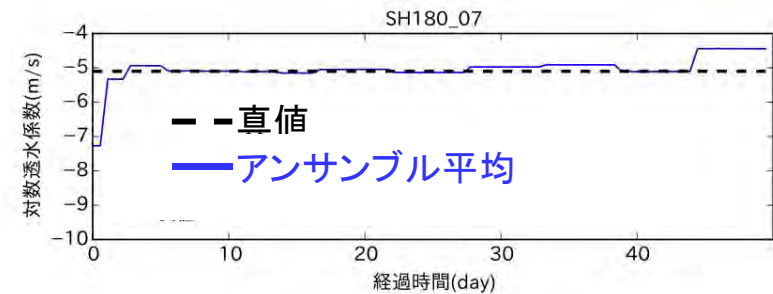
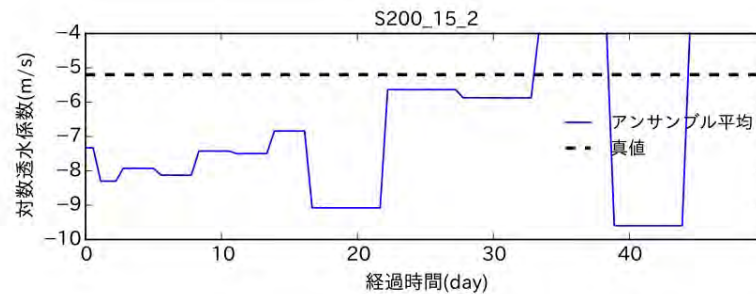
-475

-575

-675

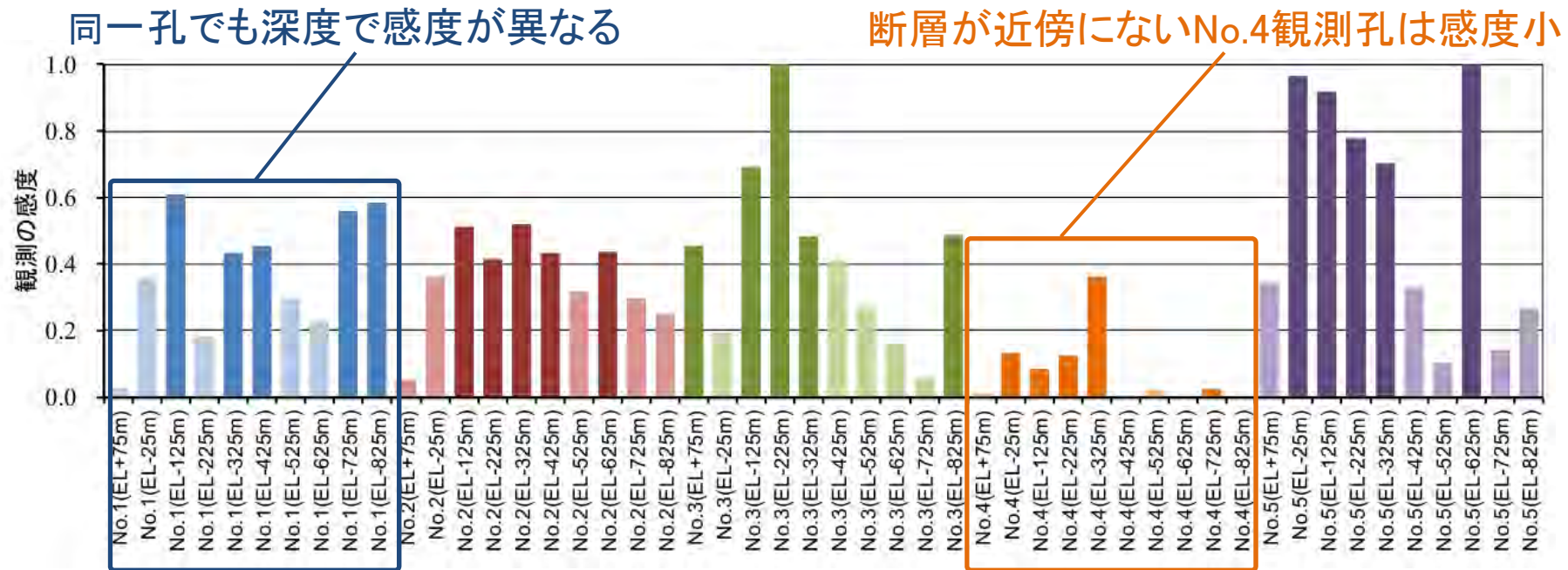
-775

-875



観測点の感度解析結果(基本ケースA)

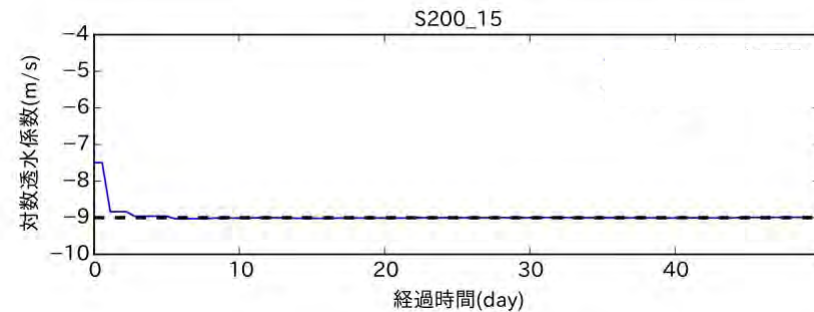
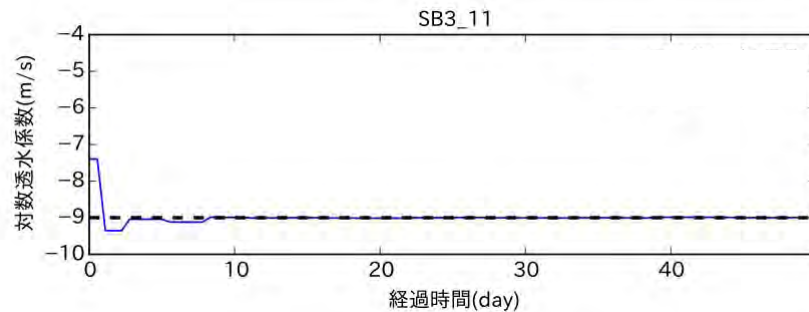
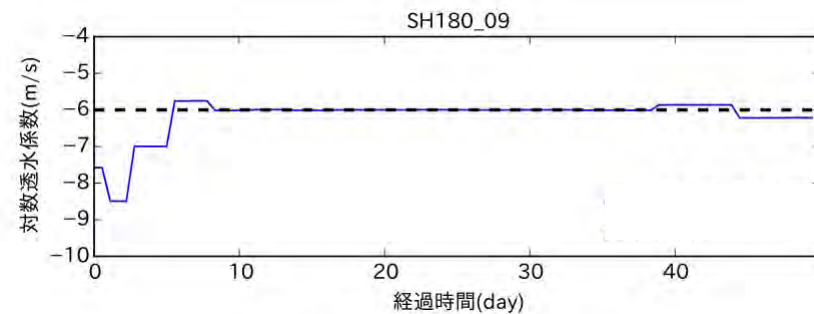
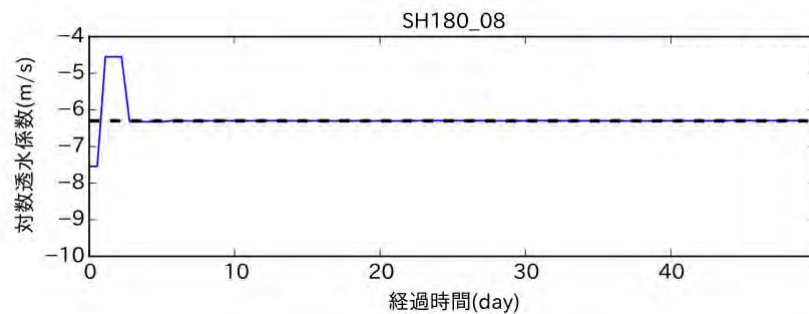
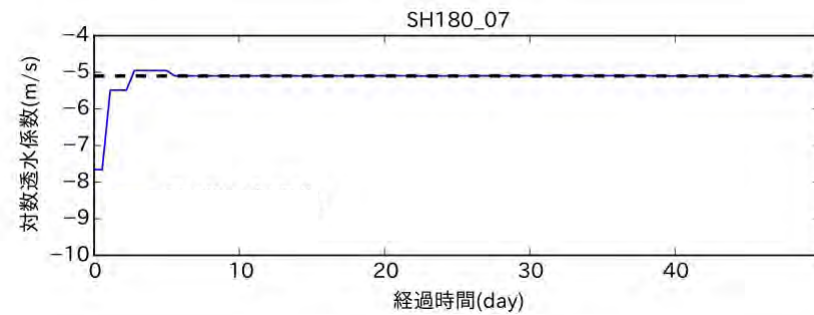
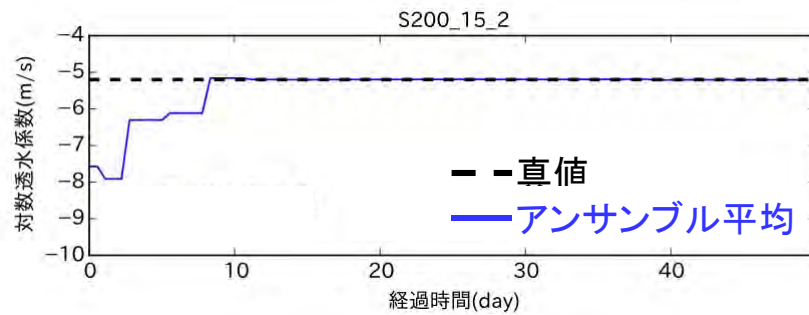
同化結果から各観測点の感度(モデル同定時の寄与度)が算出可能



ケースC:各孔で感度が高い上位5点(図中濃色)のみを使用

透水係数の推定結果(ケースC)

情報量の多い観測点を選択すれば、数が少なくても真値の同定が可能

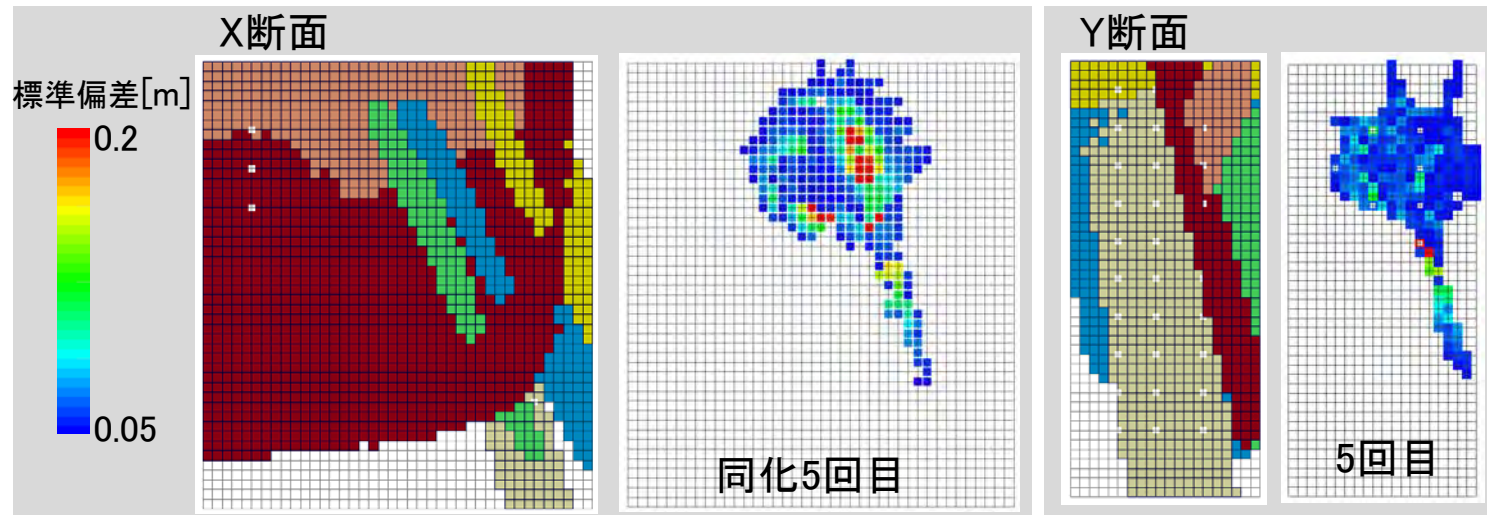
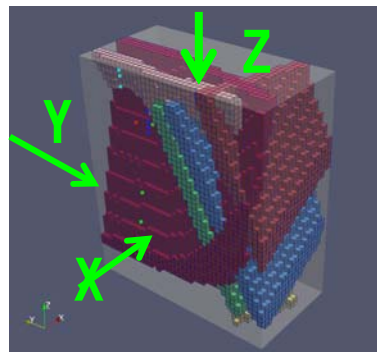
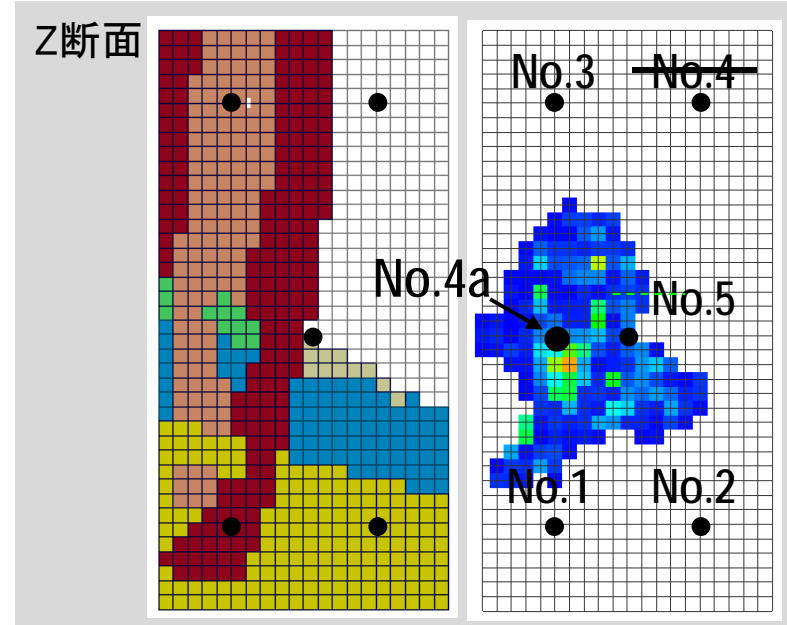


水圧のアンサンブル標準偏差 (基本ケースA)

透水係数の不確かさの影響が大きい領域が特定の場所に偏在

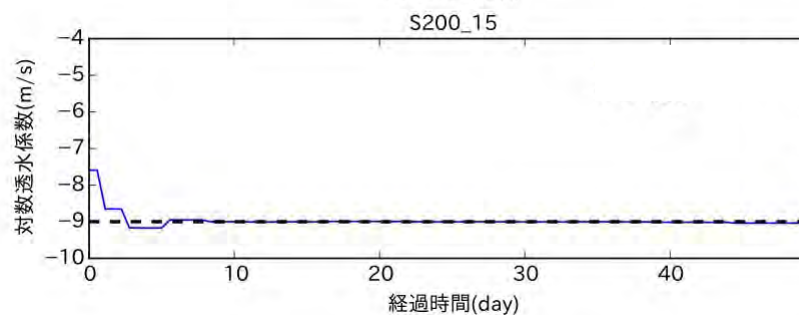
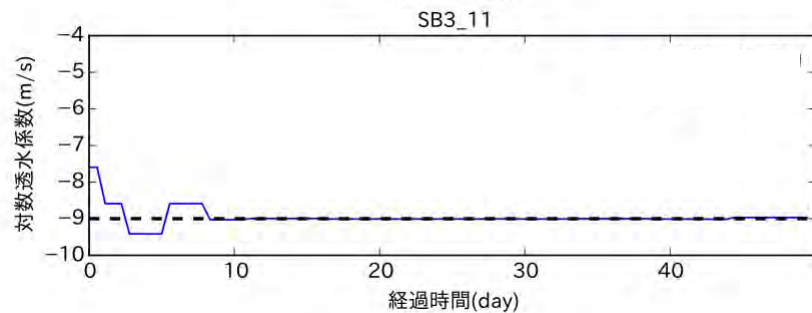
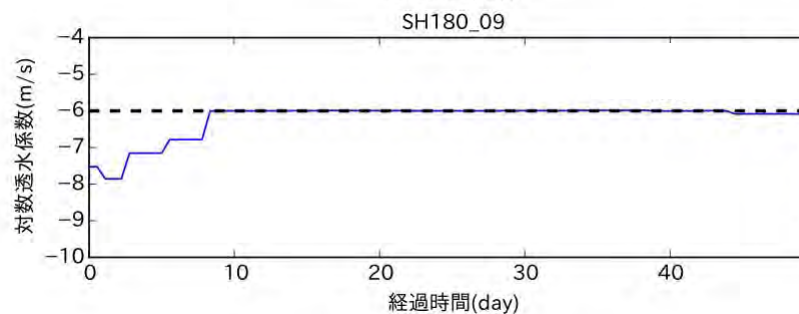
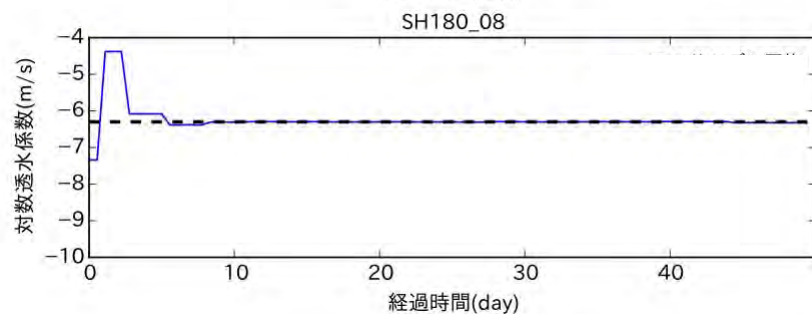
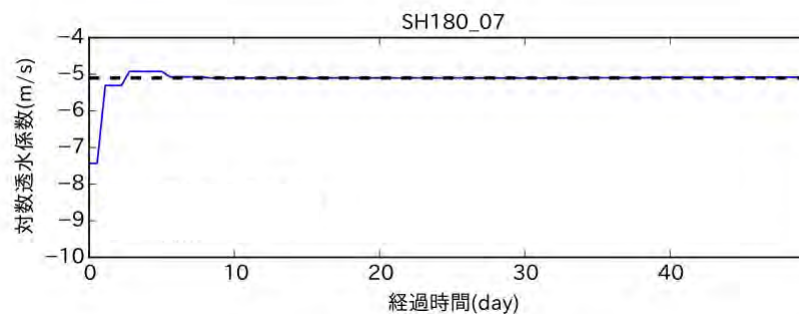
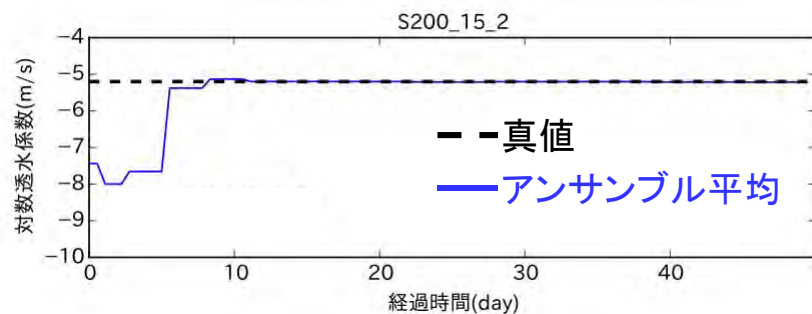
ケースD:

- 感度の低いNo.4観測孔の代わりに水圧のばらつきが大きい箇所 No.4aを設定。
- ケースBと同様の200m間隔の観測点を使用。



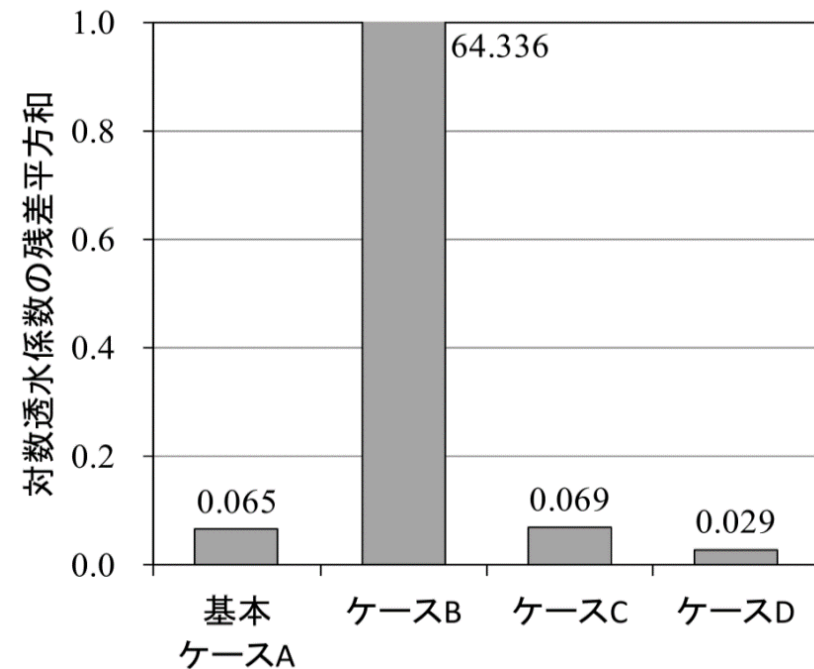
透水係数の推定結果(ケースD)

不確かさの大きい地点に観測孔を配置することで真値の同定が可能



事例その2のまとめ

- EnKFの結果から観測位置を選定することで、限られた観測点数でも断層の透水性を推定可能。
- 調査計画時に、模擬観測データによる逆解析結果を評価し、想定した地下水流動条件において合理的な観測位置を提案できる。



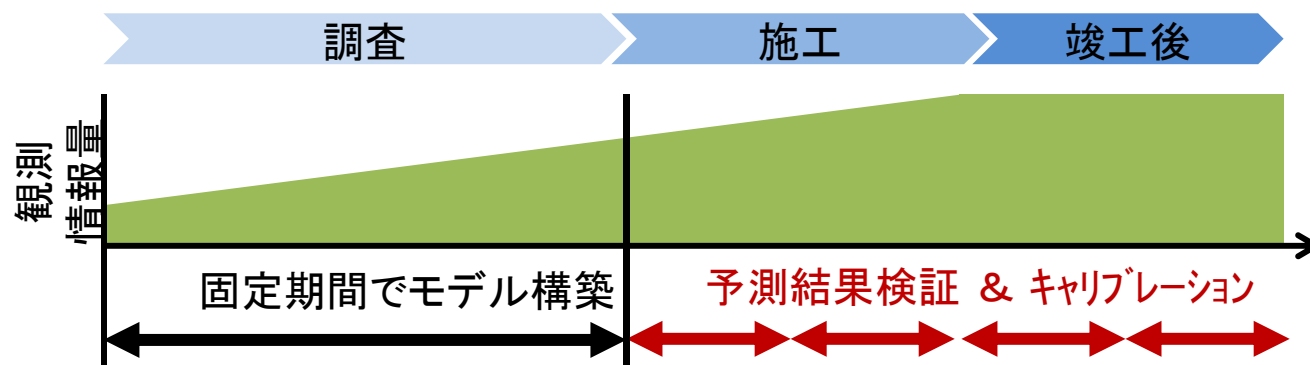
地下水流動評価におけるデータ同化活用のあり方

① 観測を利用した継続的なモデル検証・修正

- 予測結果の検証とモデル修正を調査の進展とともに繰り返すことでモデルの信頼性は向上。

② 不確かさの低減

- 不確かさを厳密にモデル化することは困難であるが、観測結果という“事実”で条件付け(conditioning)により低減が可能。



ご清聴ありがとうございました。