

# 地下水流動問題における データ同化の活用と課題

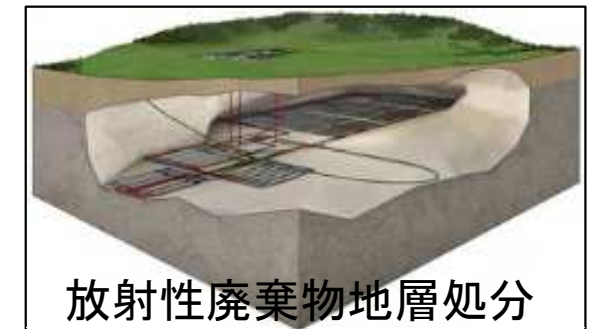
清水建設 山本 真哉

# 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. 事例紹介
  - 事例①: 地下水流動モデルのキャリブレーション
  - 事例②: 同化実験に基づいた観測位置の検討
3. 地下水流動問題でのデータ同化活用の課題

# 自己紹介

- 専門: 地質工学⇒地質統計学 (Geostatistics)
- アプローチ:
  - データ解析 (帰納的)
    - 物理モデル (演繹的) の代替モデル
    - 数理統計、時系列解析、空間統計解析
  - データ同化
    - 帰納的アプローチと演繹的アプローチの融合
- アプリケーション:
  - 維持管理データを用いた土木構造物の健全性評価
  - 様々な調査データを統合した地下環境特性の評価
  - データ同化による地下水流動評価の高度化

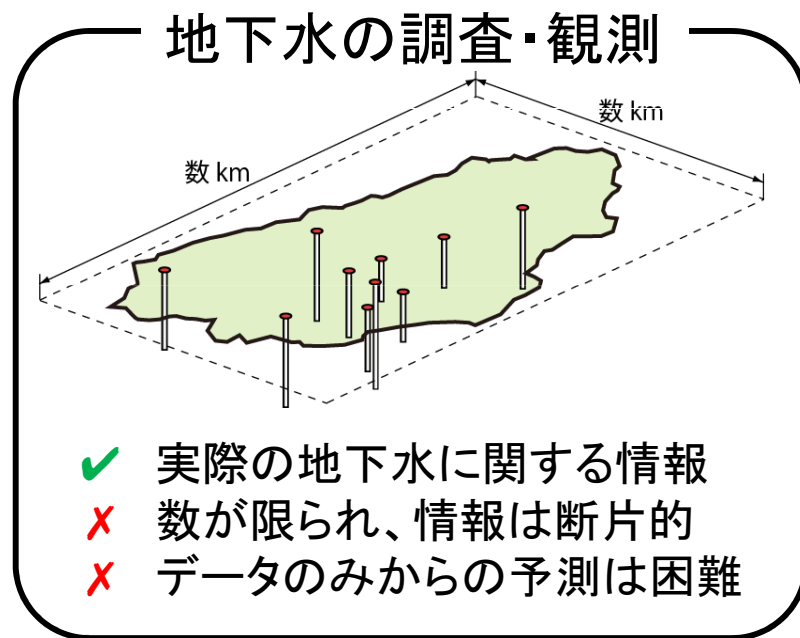


# 地下水流動解析の目的

## 地下構造物の設計・施工・維持管理を合理的に行うためには 地下水流動の正確な評価が重要

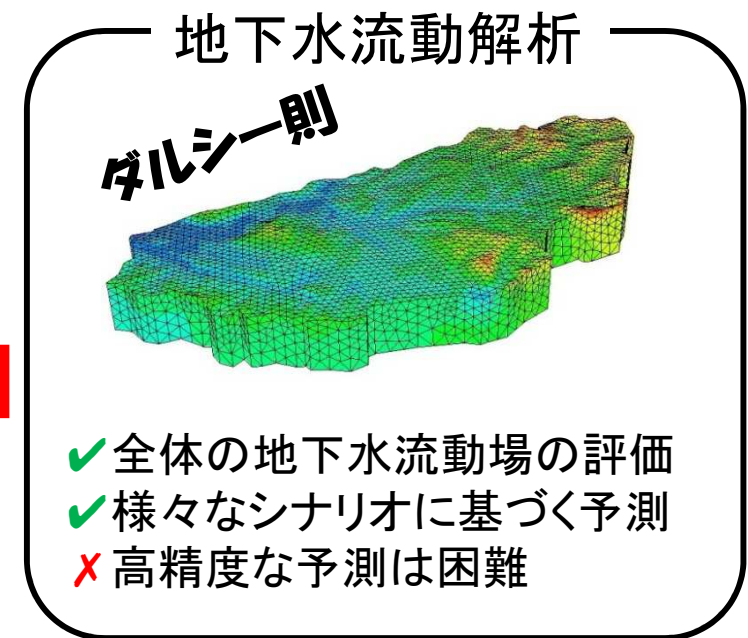
地下水に関する問題: 水位の低下、施工中の湧水、地下水汚染...

- 建設サイト周辺の地下水はどのように流動している? (現状把握)
- 構造物の建設により周辺の地下水環境はどう変化する? (予測)



観測の合理化

データ同化



解析の信頼性向上

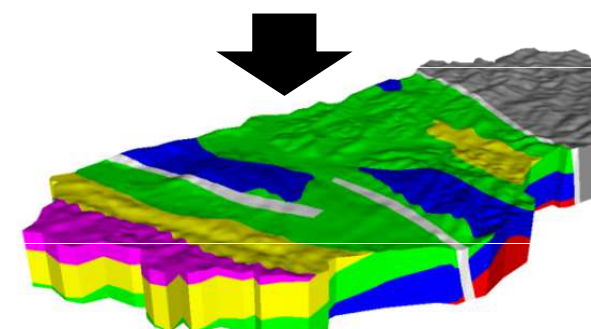
# 地下水流動シミュレーションの難しさ

地下に関する情報・知識は極めて少ない

- 岩盤は不均質性が大きい材料
- ボーリング情報から推定した地質構造
- 境界条件(モデル境界の地下水の流入出)
- 初期条件(定常的な地下水流動場)



ボーリングコア



地質構造モデル

## ➤ Reducible (Epstimic) な不確かさ

- 知識不足による不確かさ
- **調査できる数量に限界**

## ➤ Irreducible (Aleatory) な不確かさ

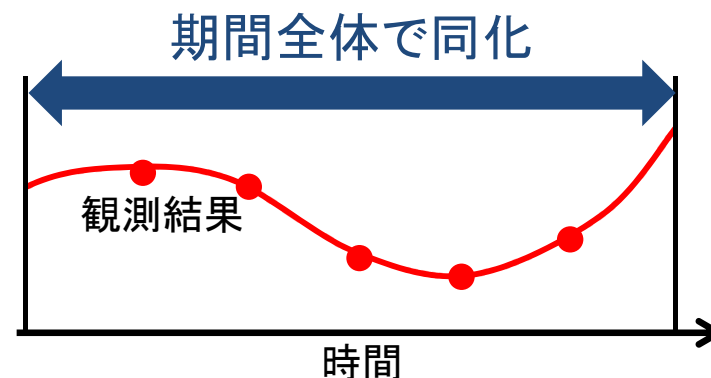
- 元来存在するばらつきによる不確かさ
- **定量化にはサンプル数が不足**

経験に基づいた  
キャリブレーション  
が必要

# データ同化手法の種類

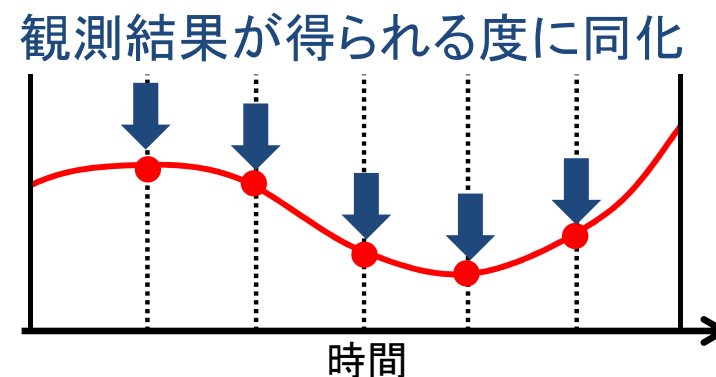
## ➤ オフライン型データ同化手法

- 最適内挿法
- 3次元変分法
- 4次元変分法



## ➤ オンライン(逐次)型データ同化手法

- 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)



地下水モニタリングは継続的に実施されるため、モデルの逐次更新が容易で、計算コストが比較的小さいEnKFを選定

# アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)

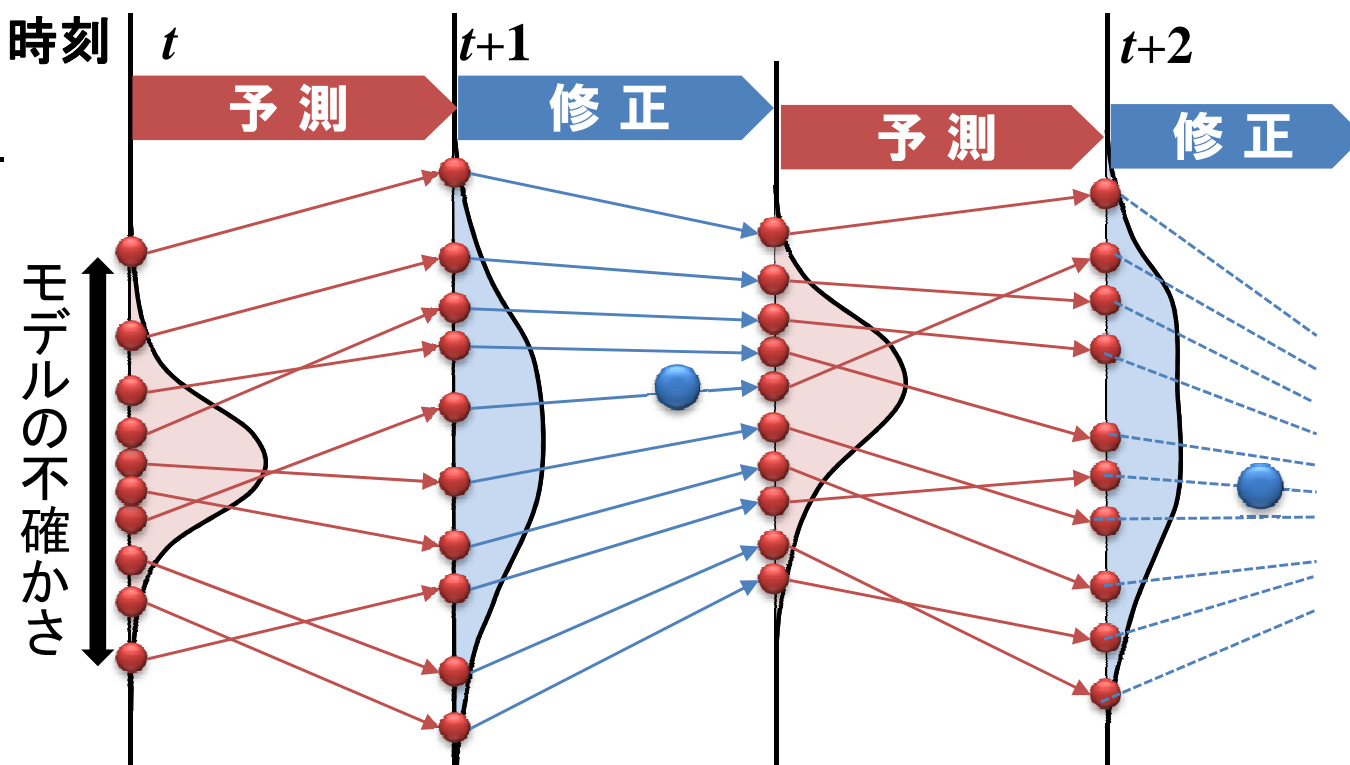
$$\mathbf{x}_{t|t}^{(i)} = \mathbf{x}_{t|t-1}^{(i)} + \mathbf{K}_t (\mathbf{y}_t - \mathbf{H}\mathbf{x}_{t|t-1}^{(i)} + \boldsymbol{\varepsilon}_t^{(i)}), \quad \mathbf{K}_t = \mathbf{P}_t \mathbf{H}^T [\mathbf{H}\mathbf{P}_t \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_t]^{-1}$$

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

- アンサンブルメンバー
- 観測結果

時間更新(シミュレーションによる予測)と観測更新(モデル修正)を逐次的に繰り返す。



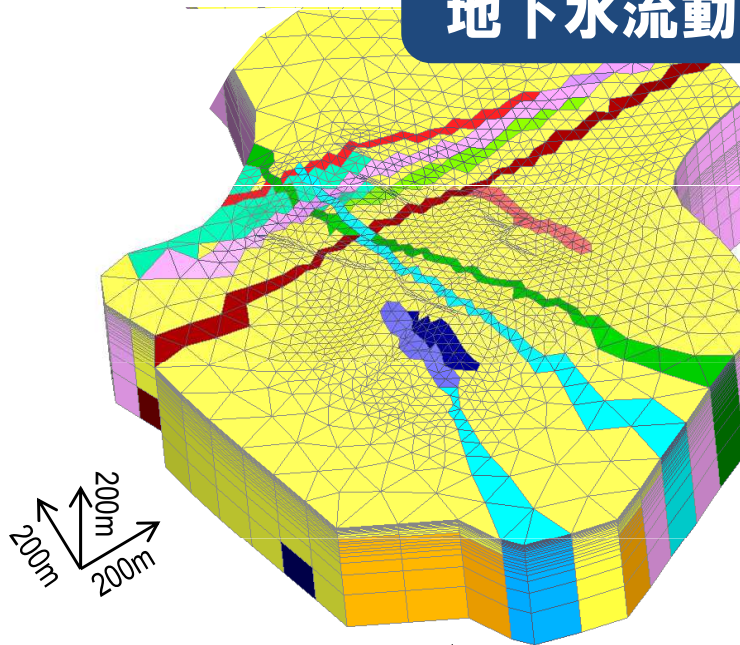


# 事例①: 地下水流動モデルのキャリブレーション

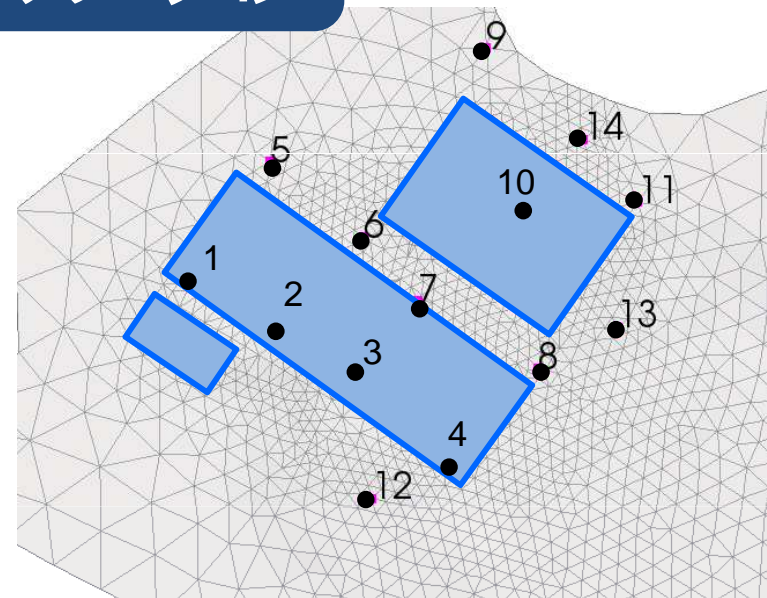
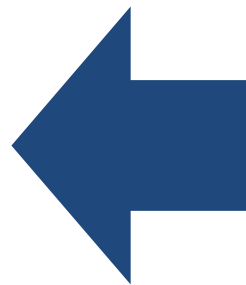
ねらい: 実際の地下構造物と地下水観測データを対象として  
データ同化の適用性を検証

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



地下水流動モデル(FEM解析)



地下水モニタリング



# 問題の概要

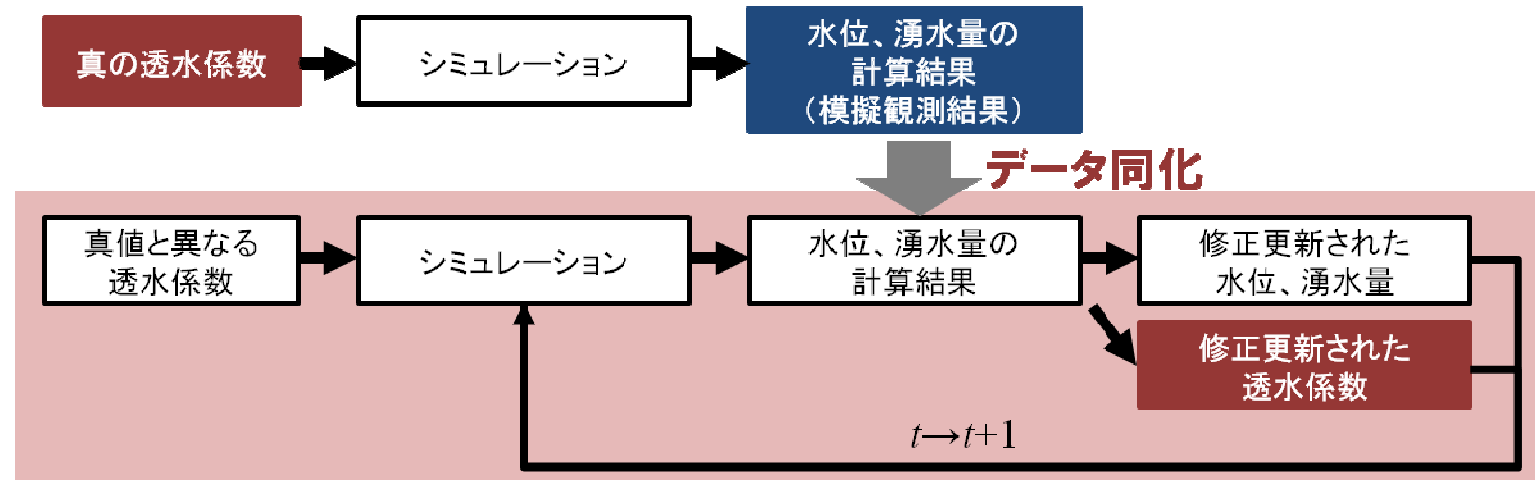
観測結果を精度良く再現できる解析モデルを得るため、各地質区分ごとの透水係数を同定

- 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性
  - 透水係数の取りうる範囲  
( $1.0 \times 10^{-10}$  [m/s]  $< K < 1.0 \times 10^{-4}$  [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

# 同化実験の流れ

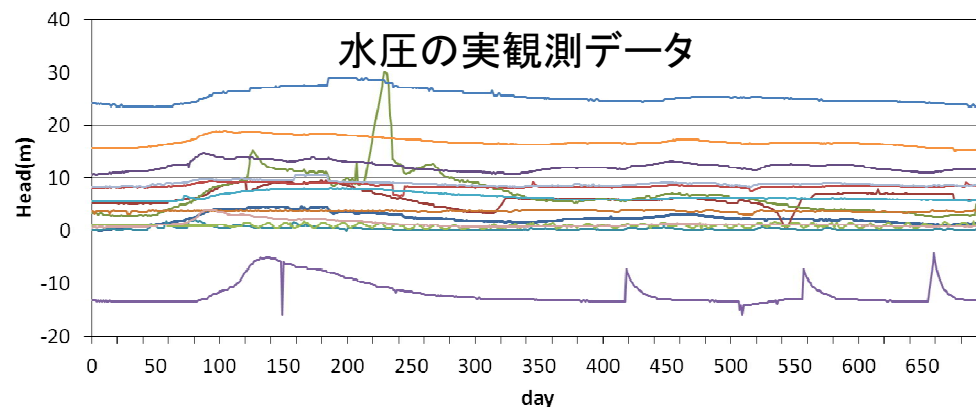
ステップ1: 模擬観測結果を用いてEnKFの基本性能を把握

“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: 実観測結果に対する適用性を検証

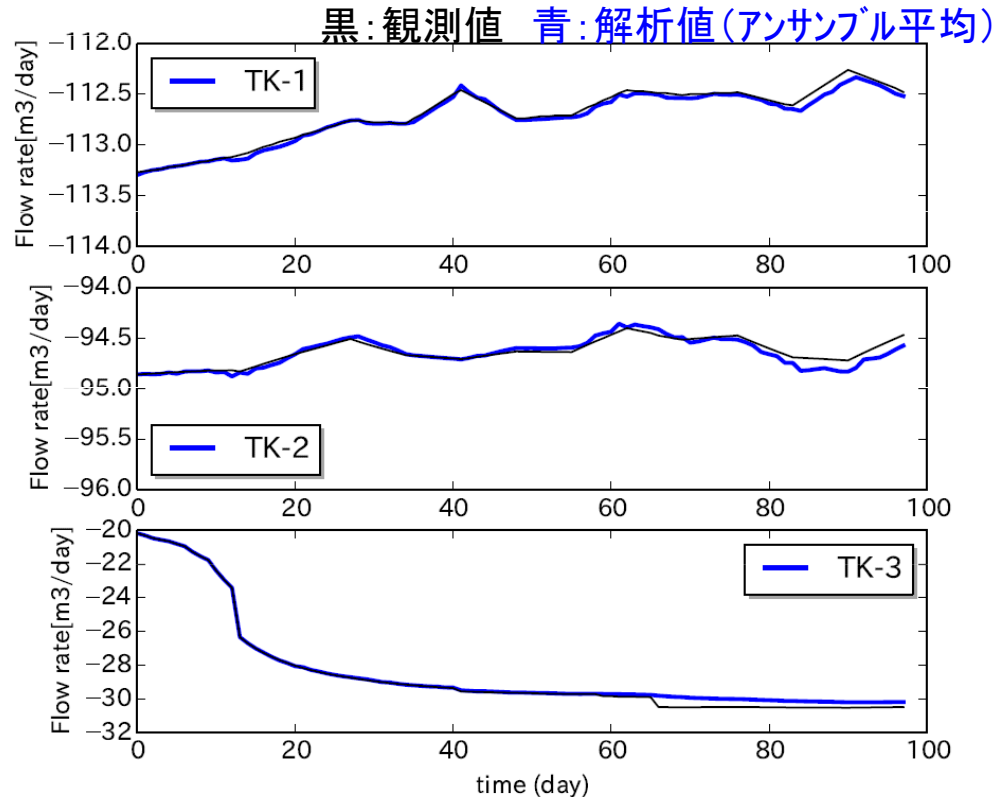
モデルでは説明できない挙動を示す観測データも存在



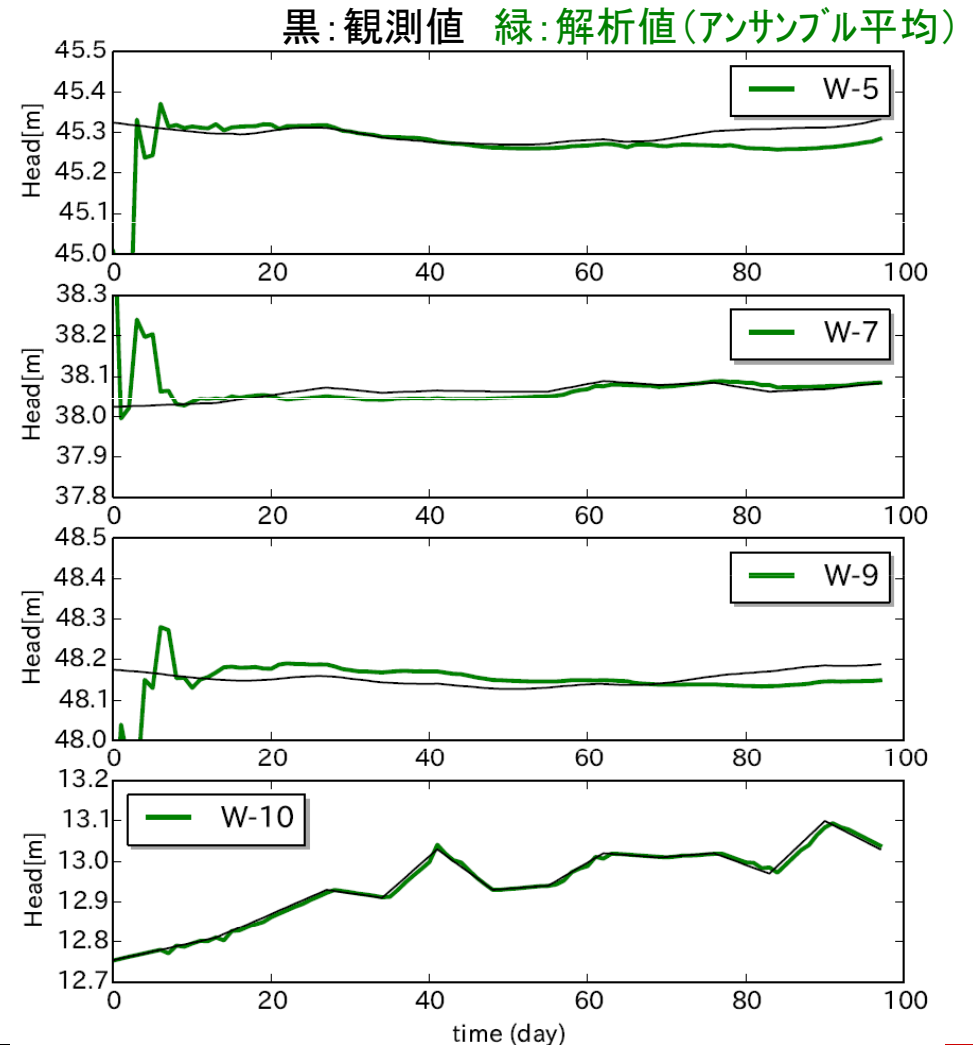
# ステップ1: 模擬観測結果を用いた同化実験 同定モデルによる観測結果の再現結果

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】



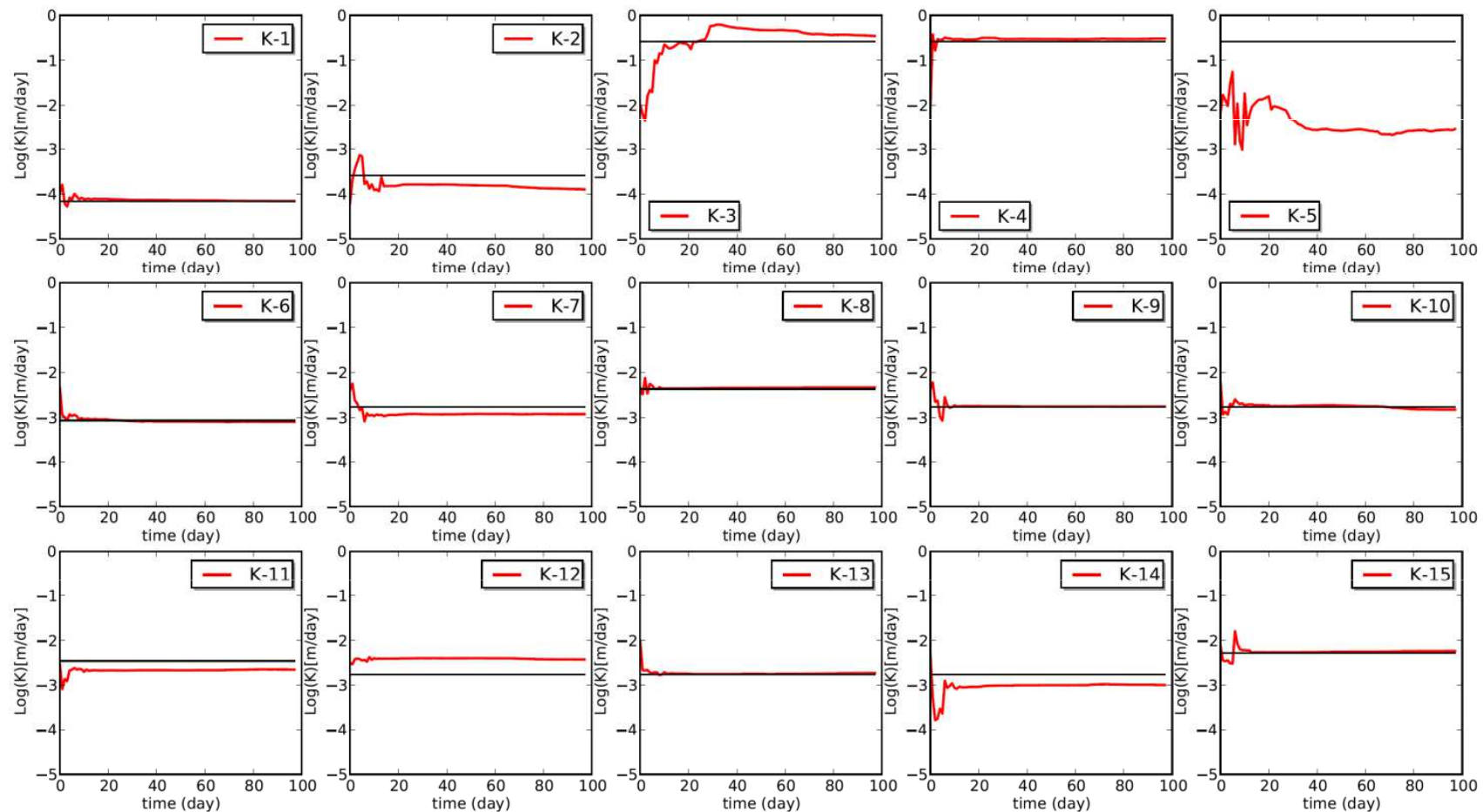
## 【水圧】



# ステップ1: 模擬観測結果を用いた同化実験 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。

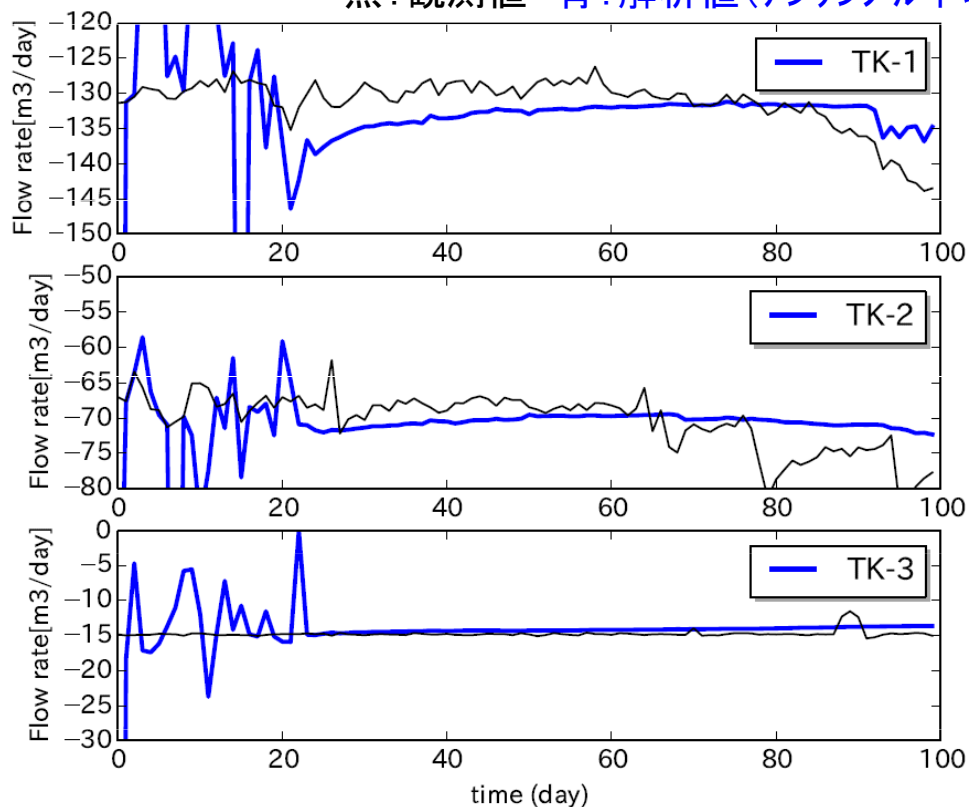
※横軸: 日数 黒: 真値 赤: 推定値(アンサンブル平均)



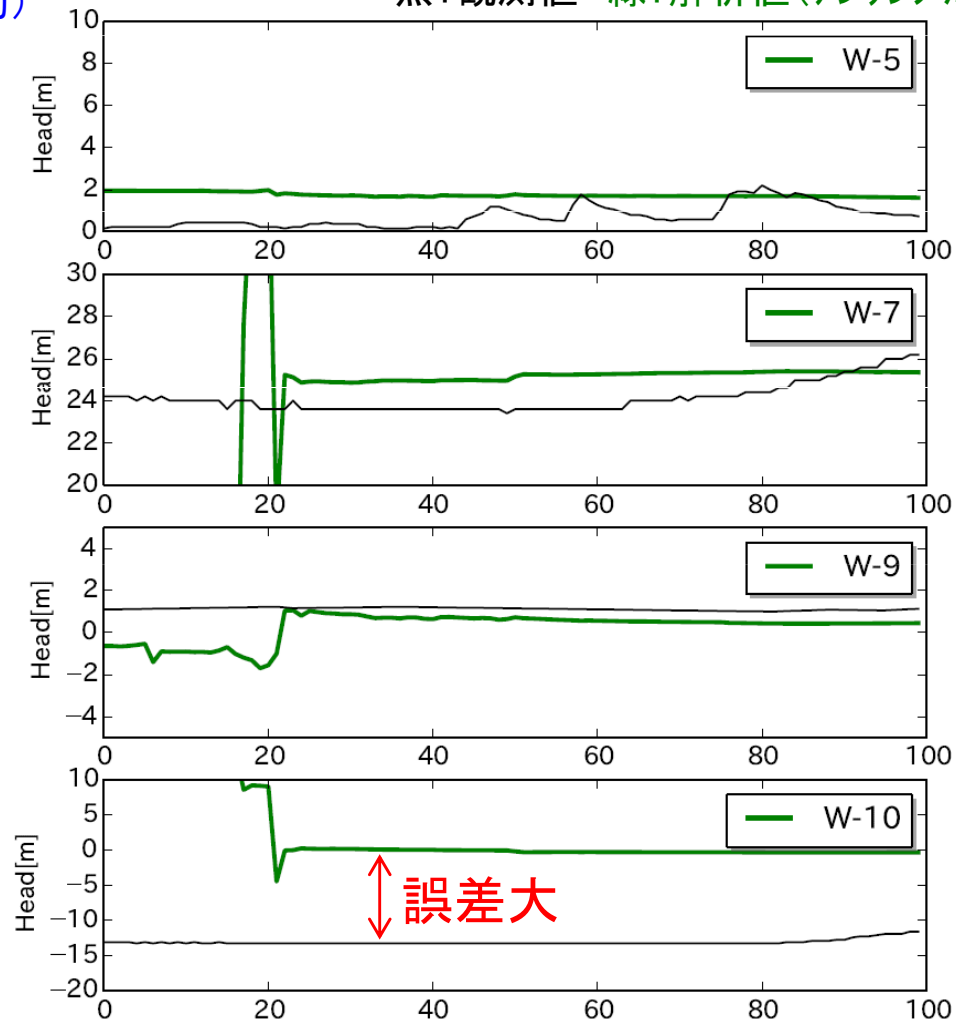
# ステップ2:実観測結果を用いた同化実験

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

【空洞湧水量】 黒:観測値 青:解析値(アンサンブル平均)

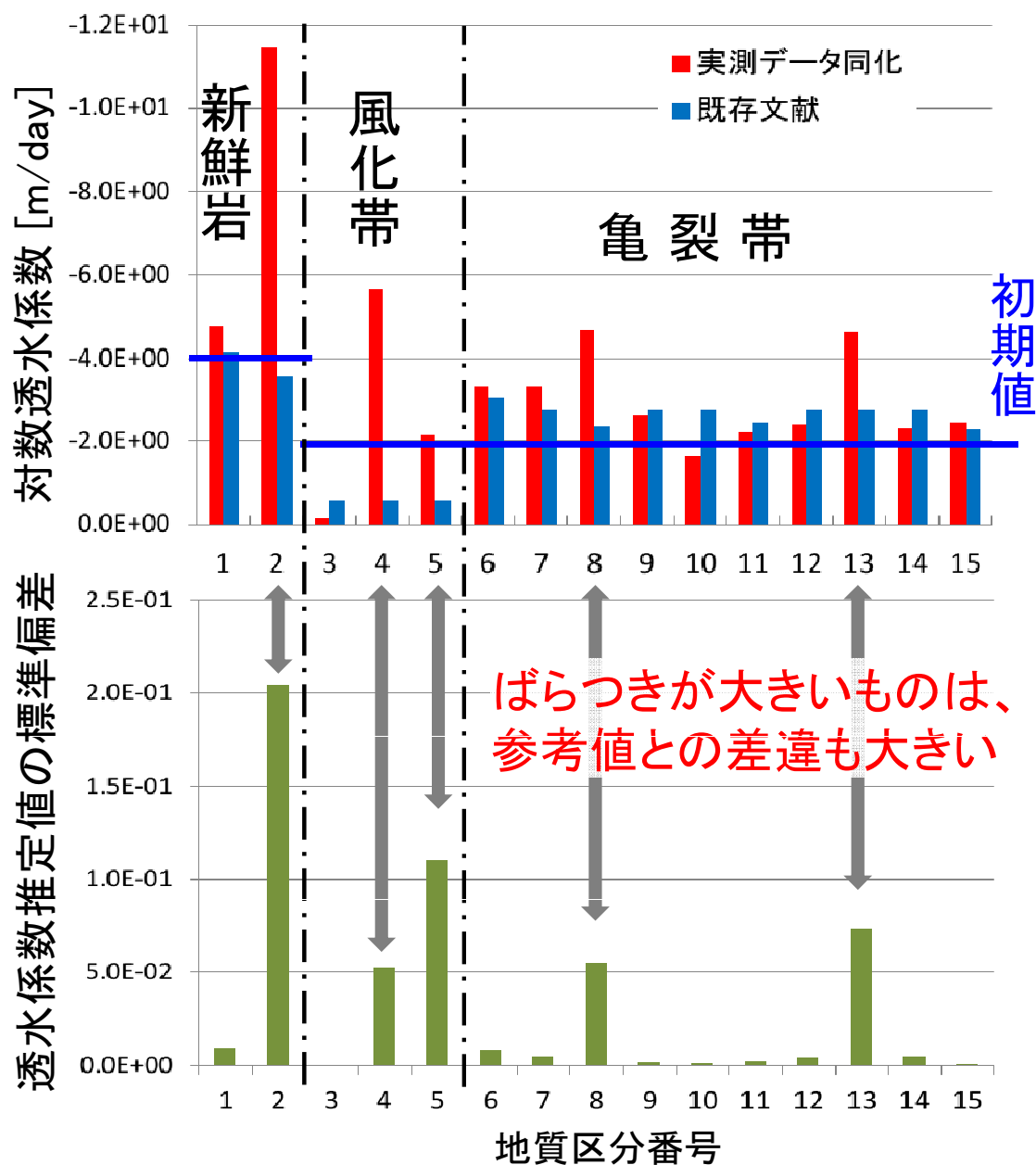


【観測孔水位】 黒:観測値 緑:解析値(アンサンブル平均)



# ステップ2:実観測結果を用いた同化実験 透水係数の推定結果

同定パラメータのアンサンブルのばらつきは推定結果の信頼性を反映している。



# 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。

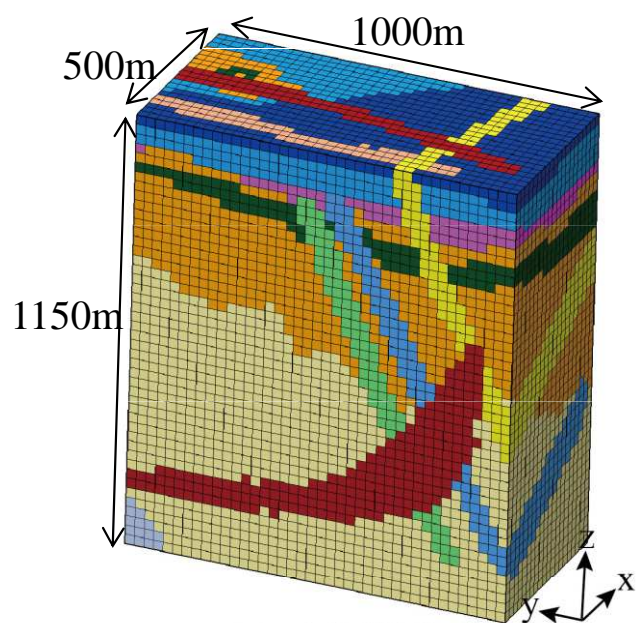


# 事例②: データ同化実験による地下水観測位置の検討

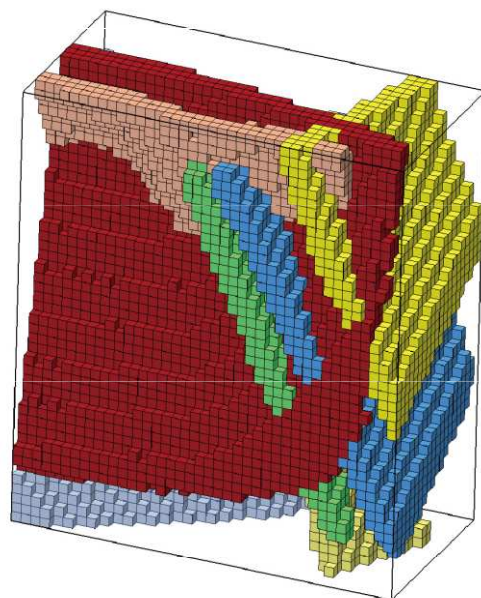
山本, 櫻井, 尾上, 増本: 「模擬観測結果を用いたデータ同化実験に基づく地下水モニタリング位置の評価」 第22回計算工学講演会

## ねらい: データ同化に有効な地下水観測位置を提案

- JAEA瑞浪超深地層研究所周辺(岐阜市)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



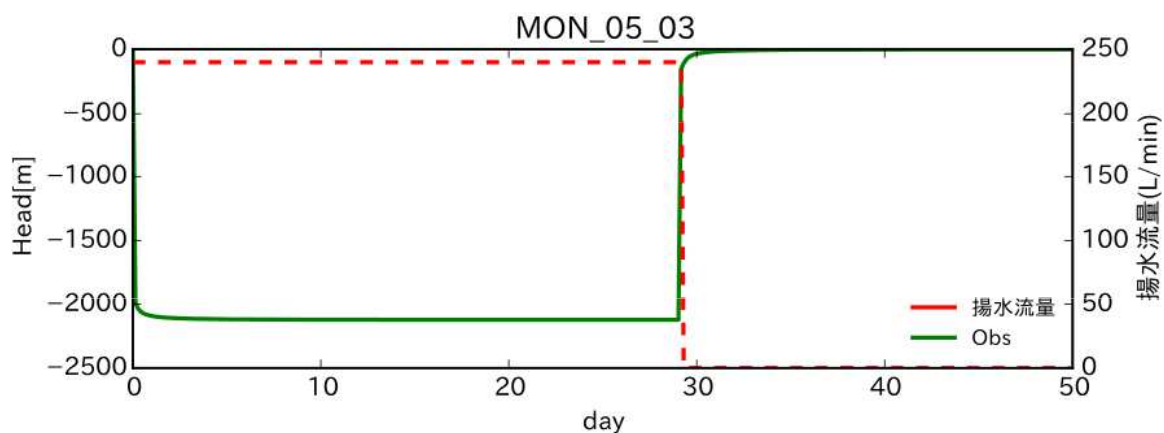
(b) 断層の分布

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

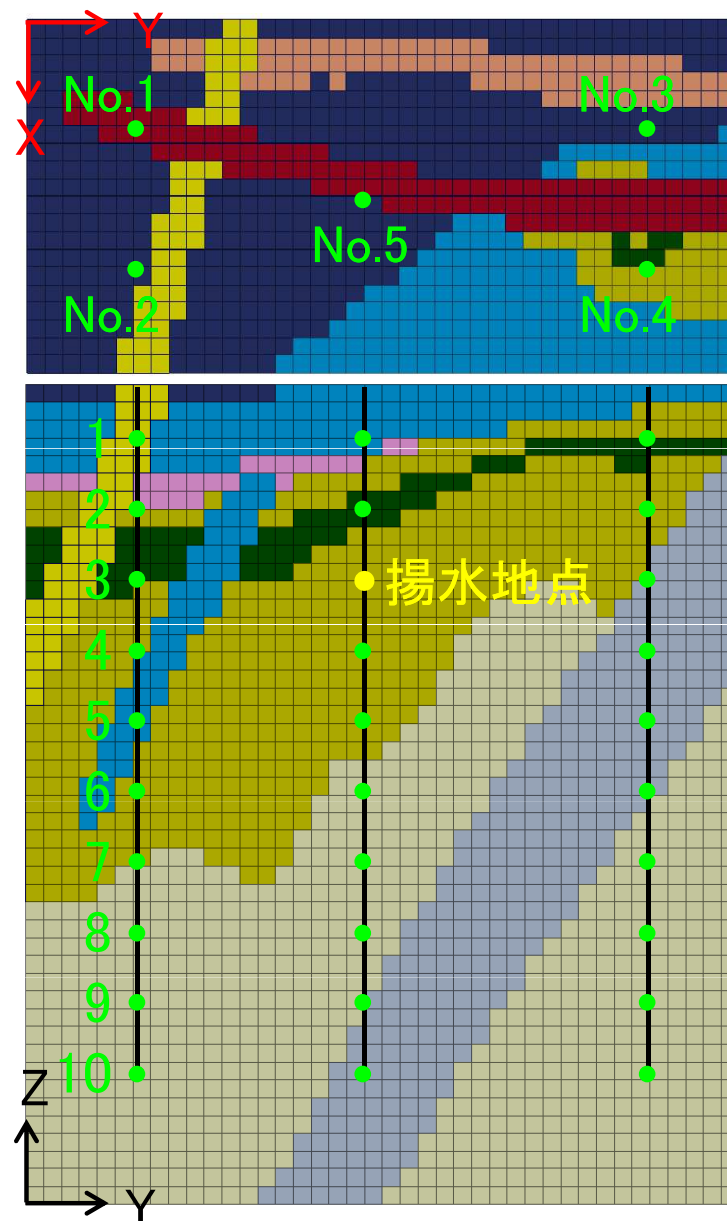
各地層の透水係数(真値)

# 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

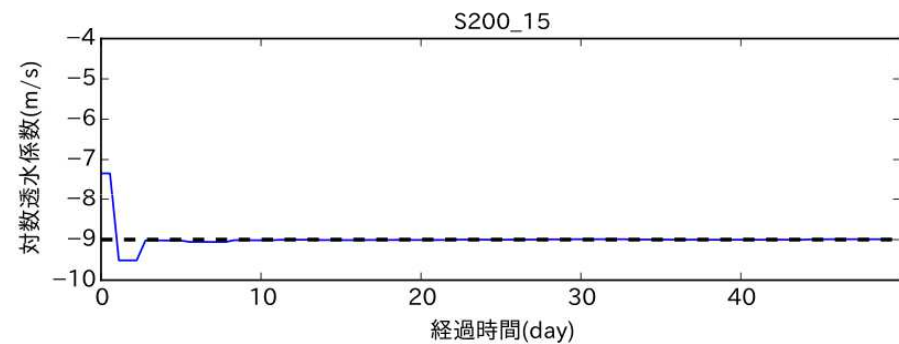
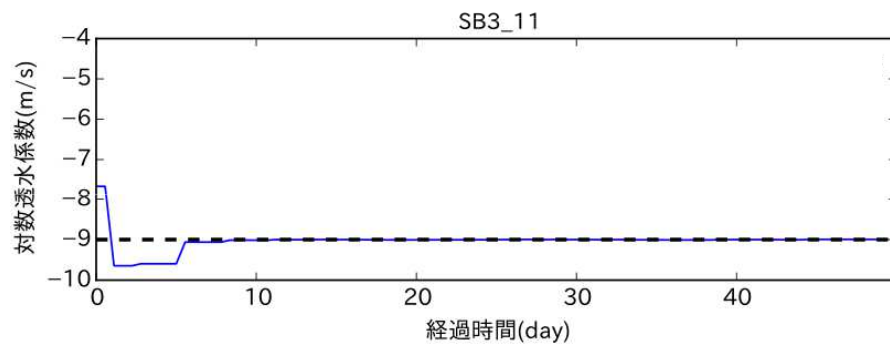
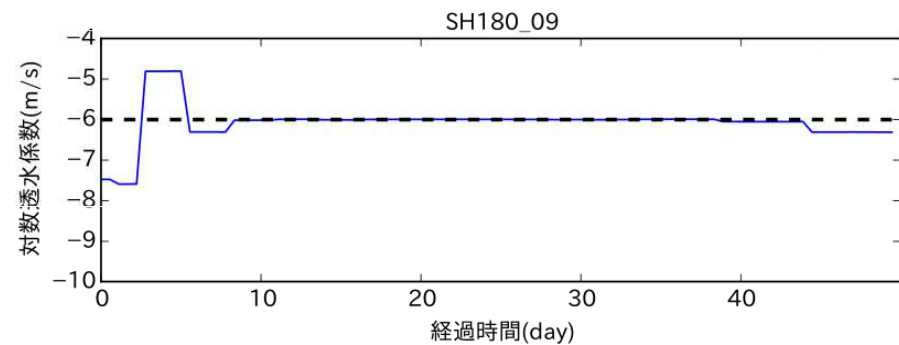
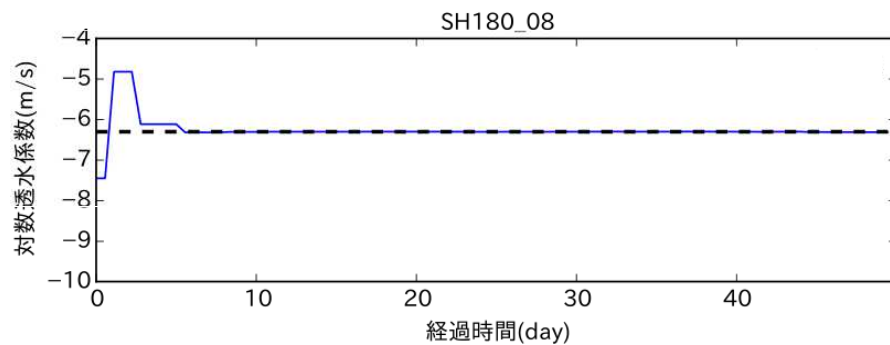
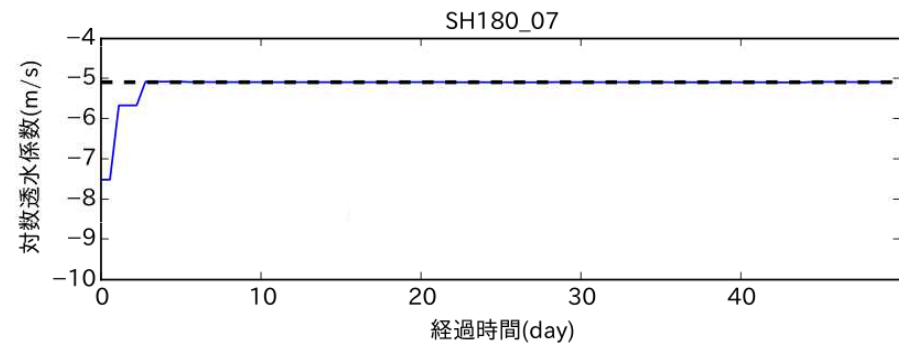
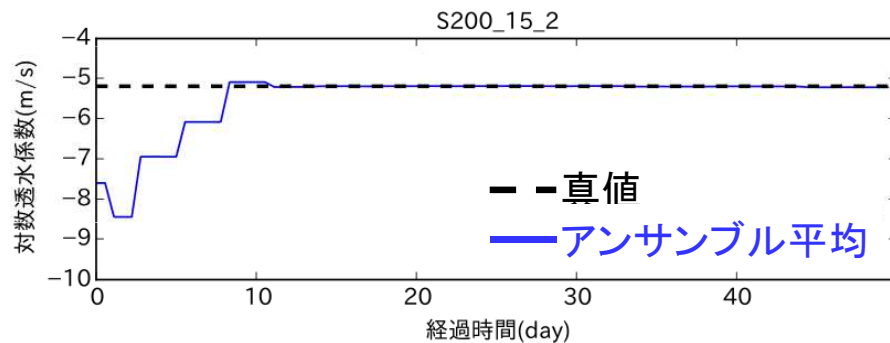


# 検討したケース

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

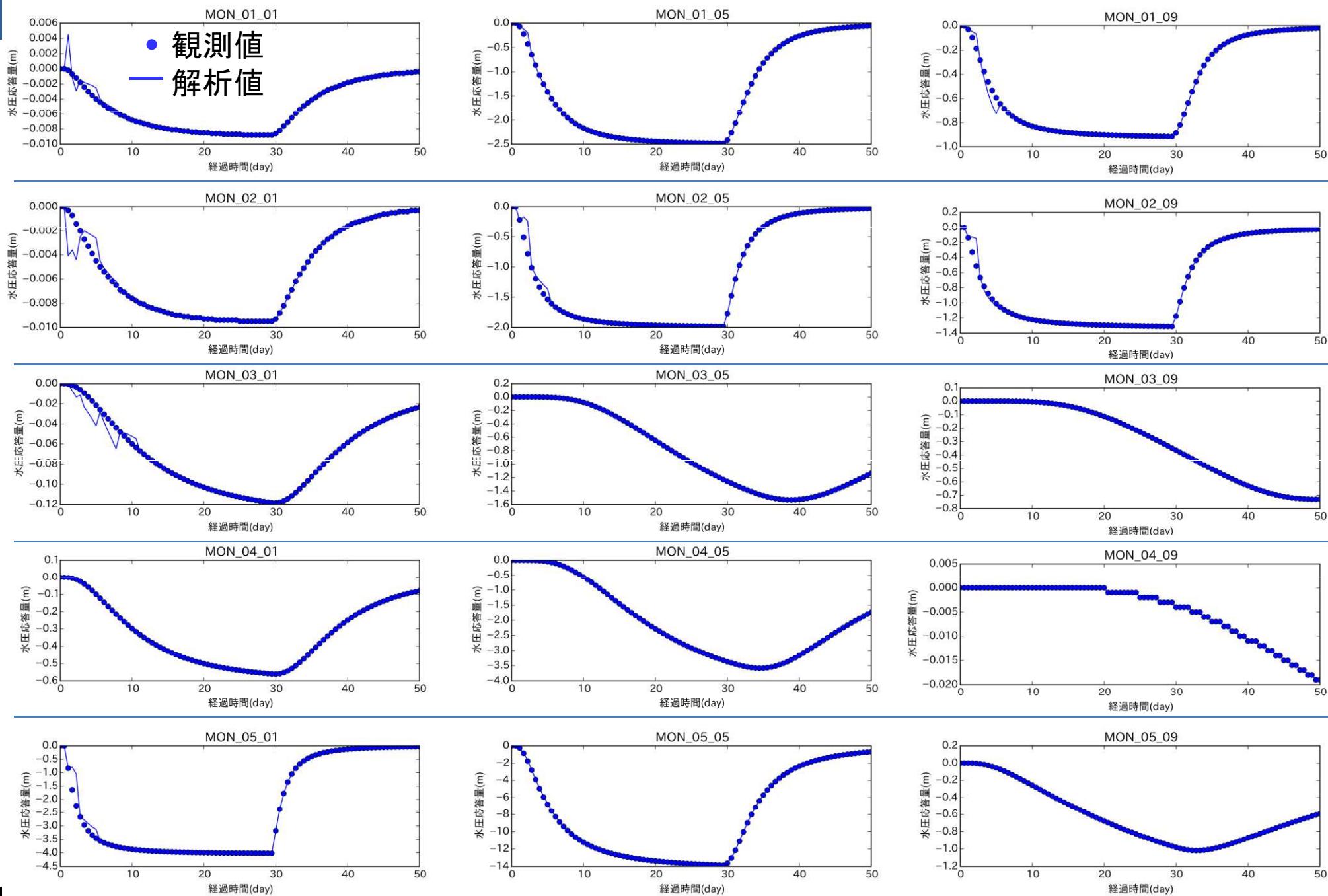
- モデル同定が成功した基本ケースAに対し、観測点数を半減したケースB～Dの逆解析結果に着目

# 透水係数の推定結果(基本ケースA)



各断層とも概ね透水係数の真値を推定可能。

# 水圧観測の再現結果の例(基本ケースA)





# 透水係数の推定結果(ケースB)

各孔とも5地点の観測点のみ使用してデータ同化を実施

EL.m

+25

-75

-175

-275

-375

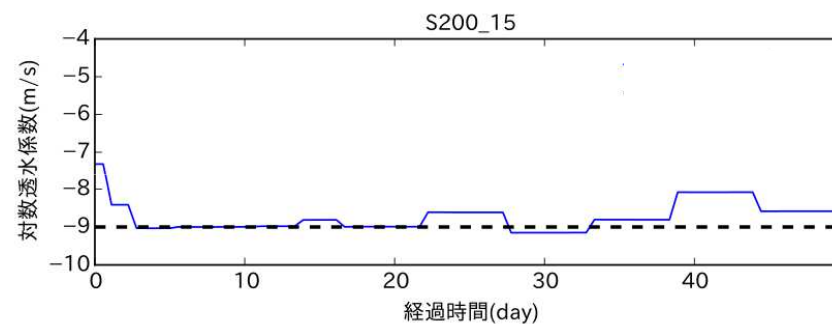
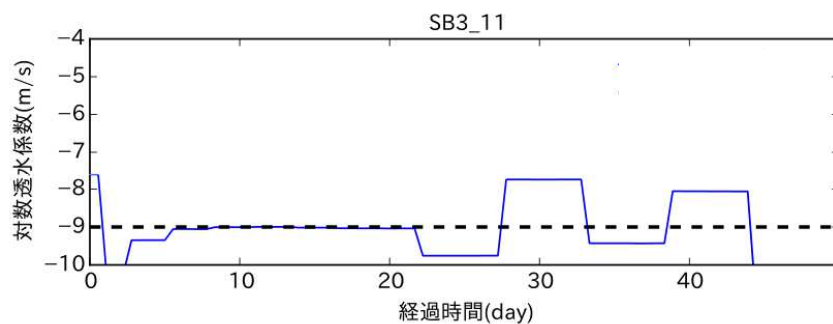
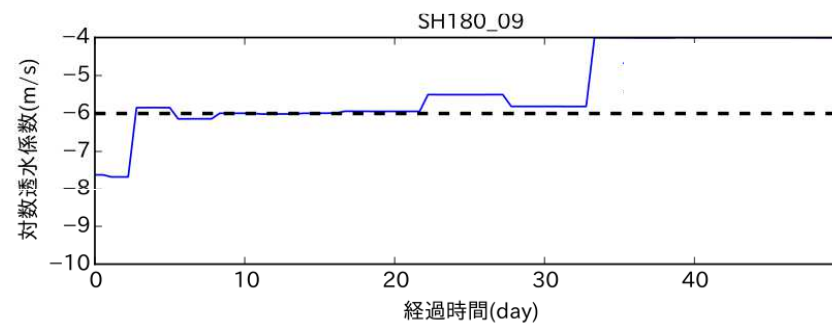
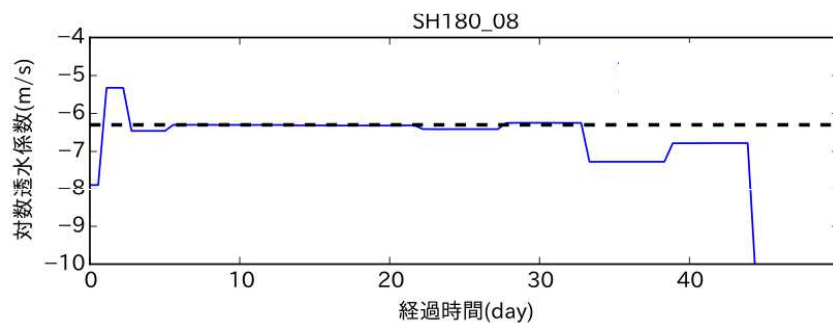
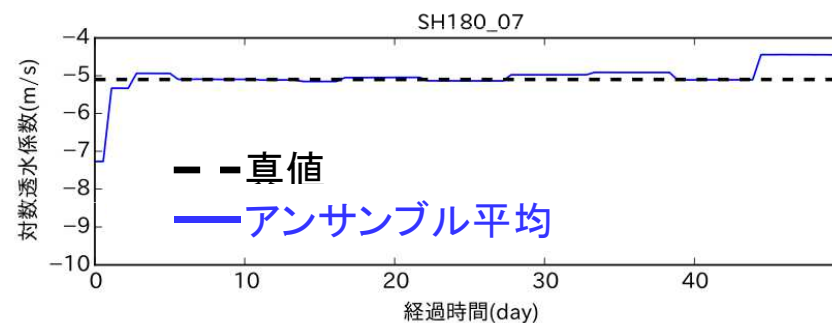
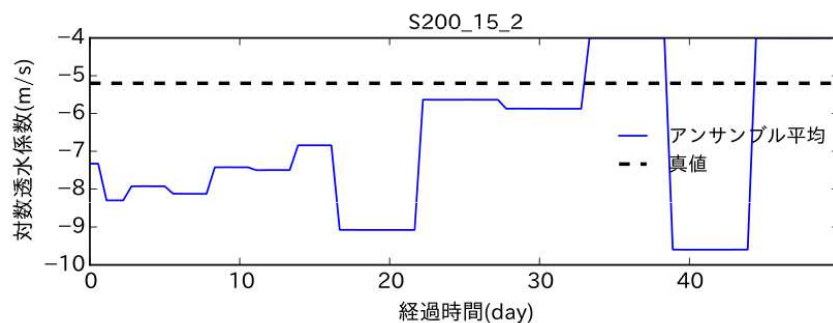
-475

-575

-675

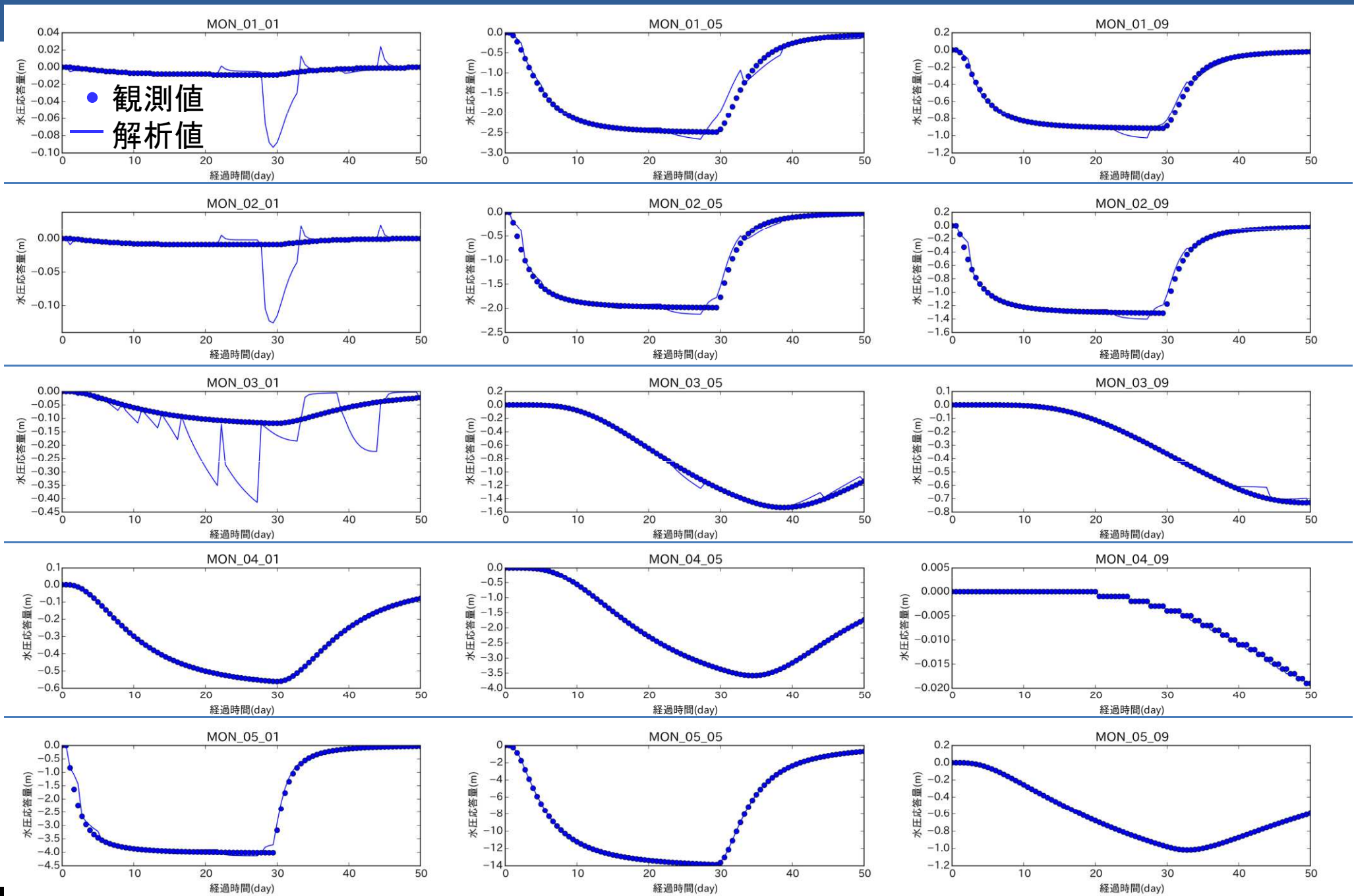
-775

-875



観測の情報量が減少したことで真値の同定が困難に。

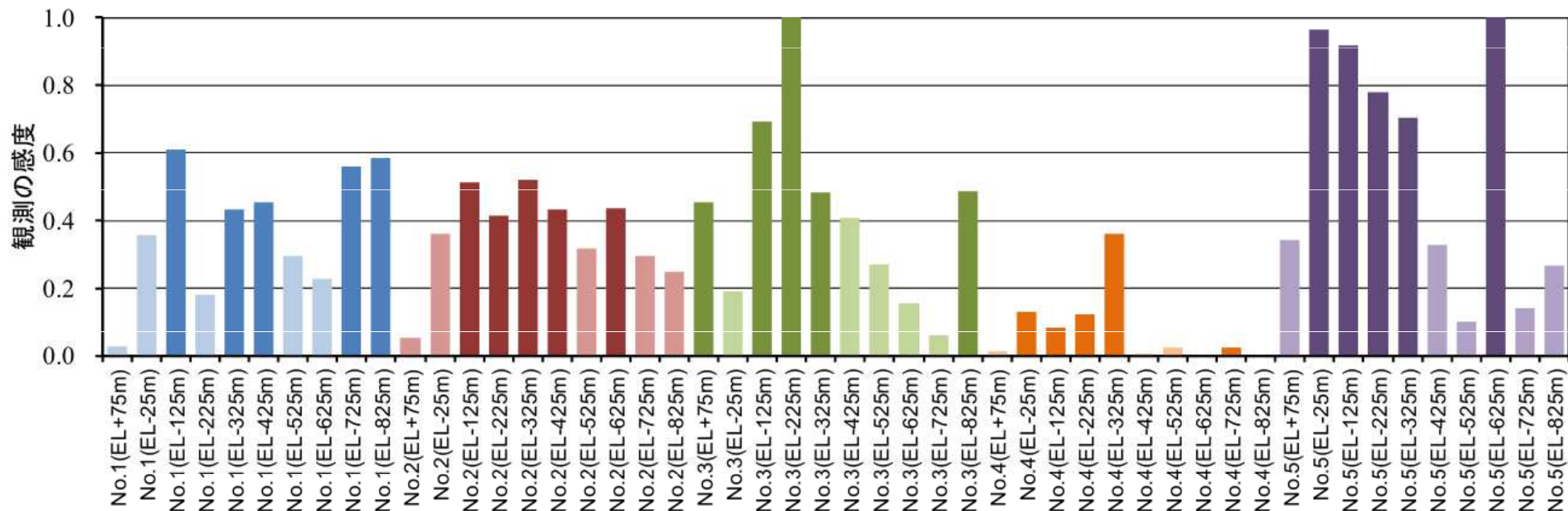
# 水圧観測の再現結果の例(ケースB)





# 観測点の感度解析結果(基本ケースA)

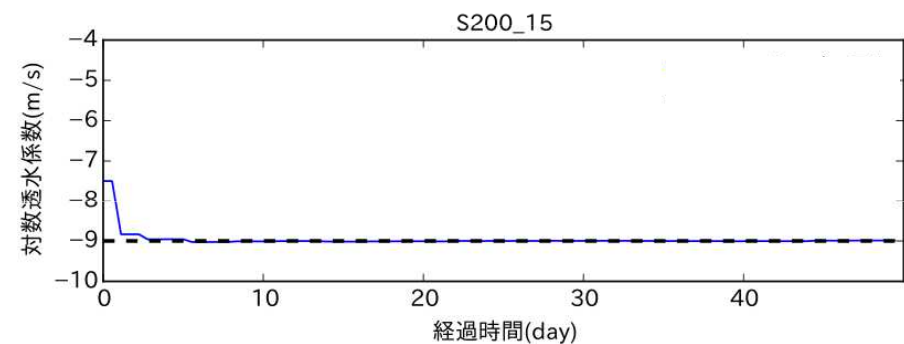
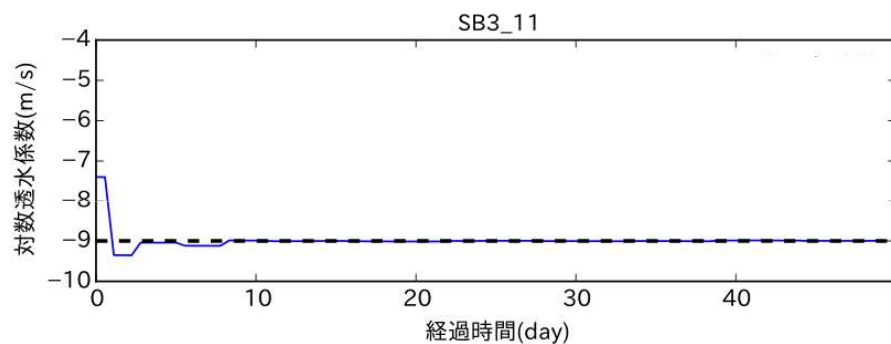
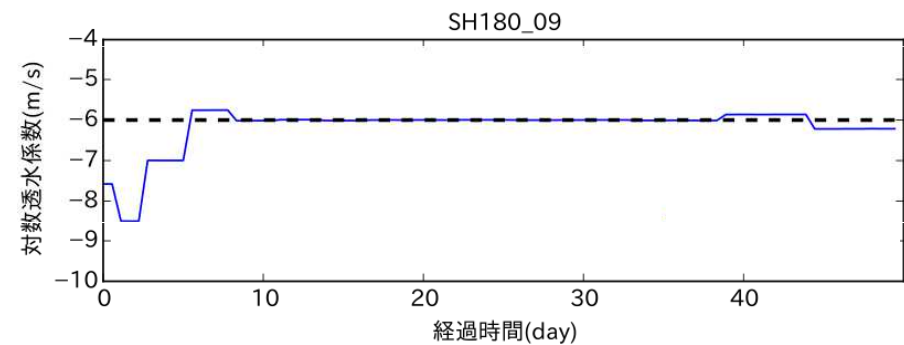
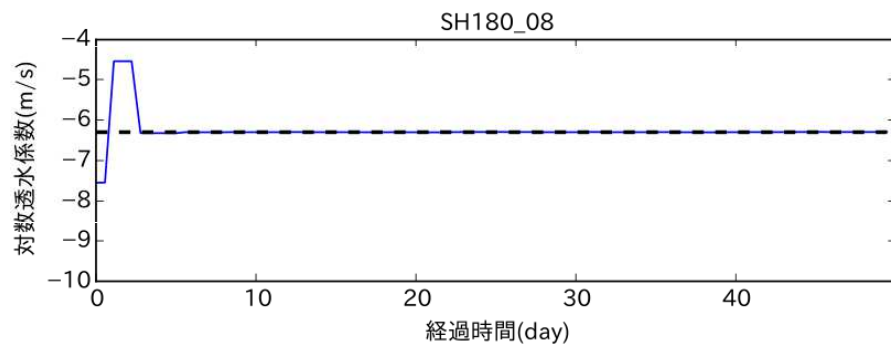
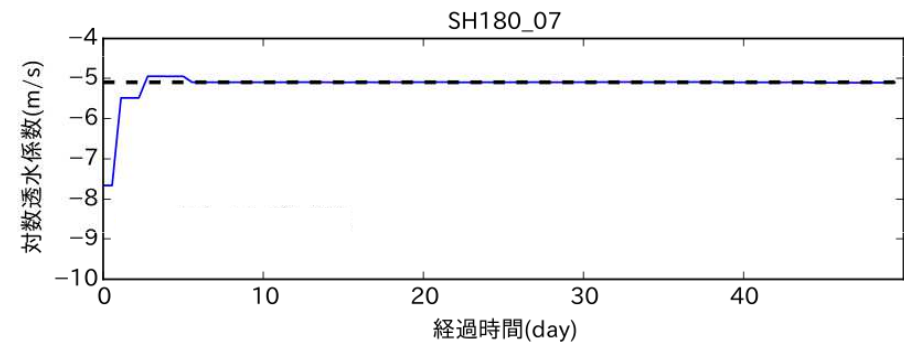
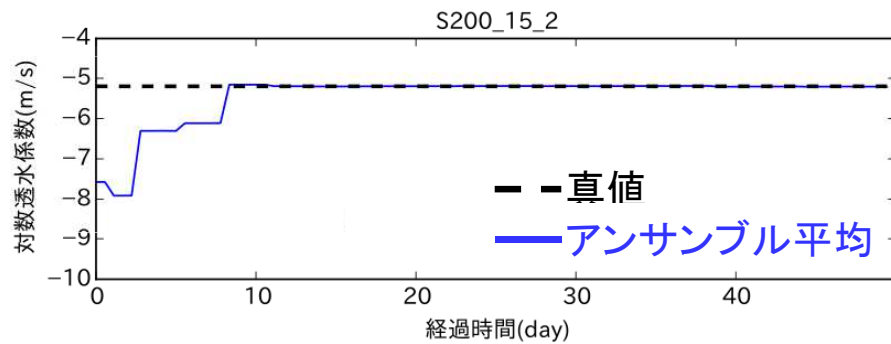
各観測点の感度(モデル同定時の寄与度)を算出



- 推定対象の断層が近傍に存在しないNo.4観測孔は感度が小さい。
- 同一孔でも観測深度で感度が大きく異なる。

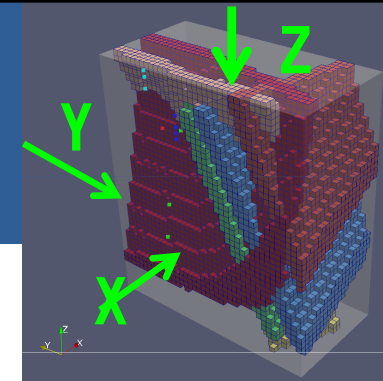
ケースC: 各孔で感度が高い上位5点(図中濃色)のみを使用

# 透水係数の推定結果(ケースC)

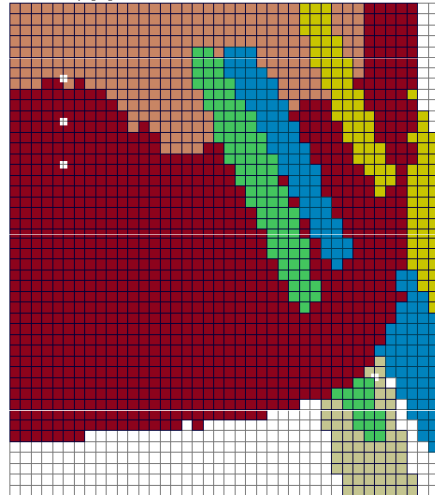


情報の多い観測点を選択することで観測数が減少しても真値の同定が可能

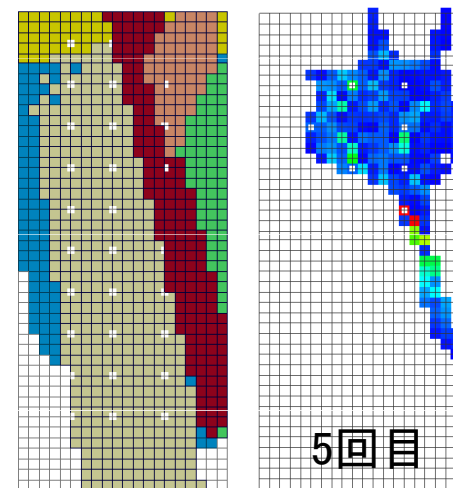
# 水圧のアンサンブル標準偏差 (基本ケースA)



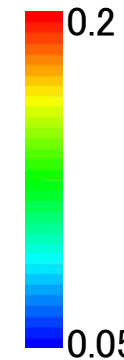
X断面



Y断面



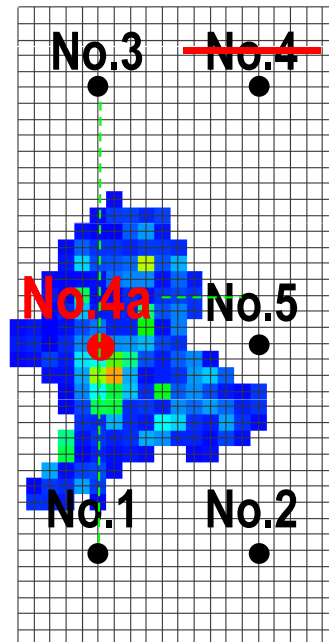
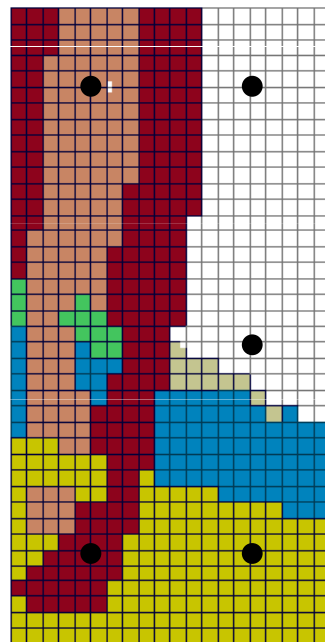
標準偏差[m]



同化5回目

5回目

Z断面

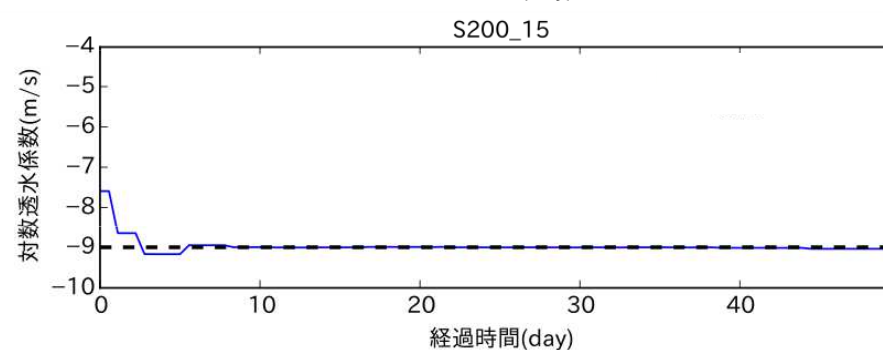
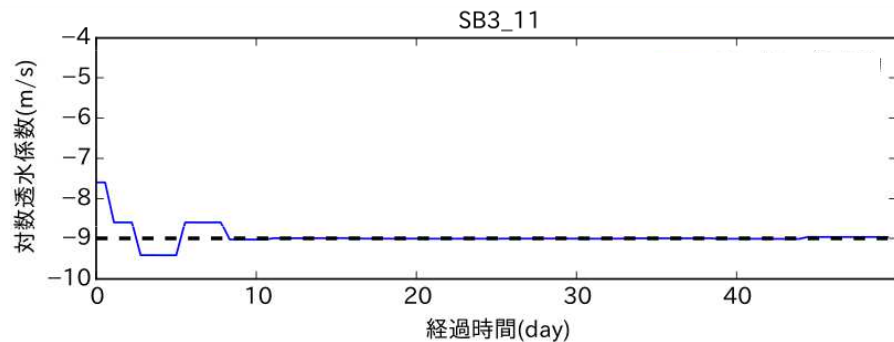
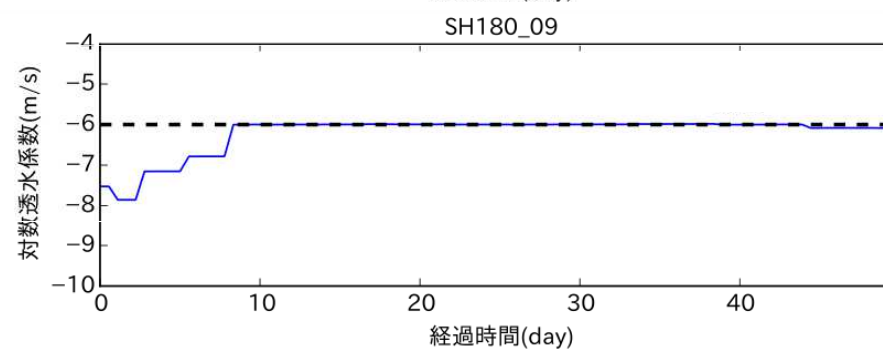
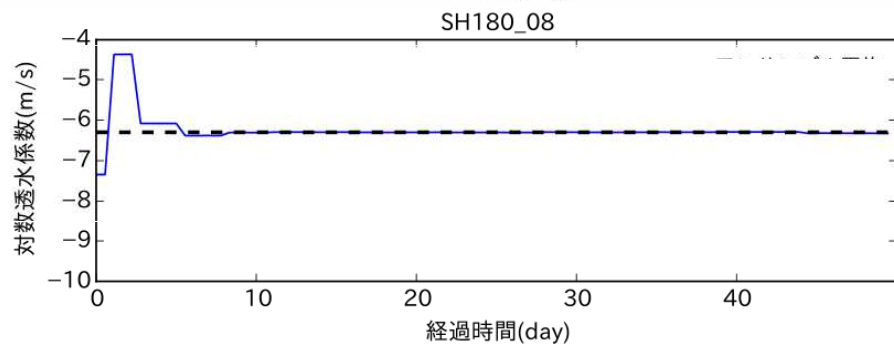
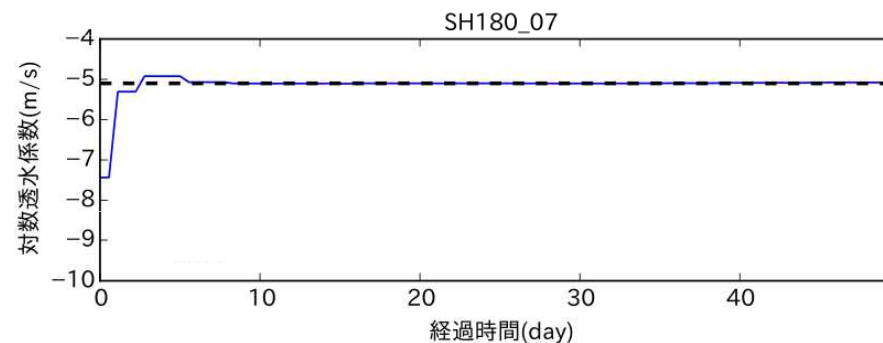
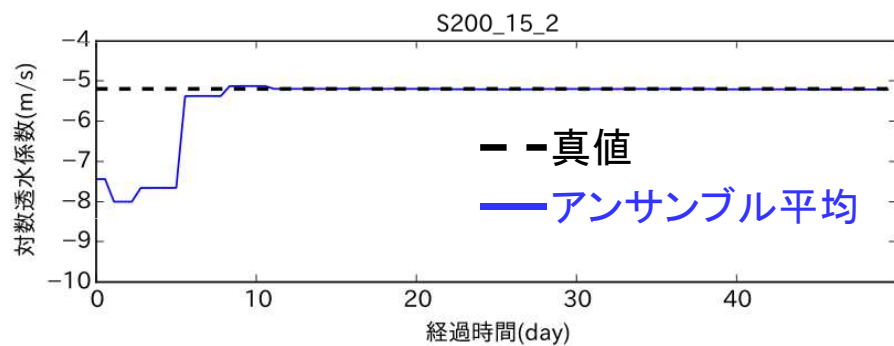


**透水係数の不確かさの影響が大きい領域が特定の場所に存在**

**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にNo.4aを設定。
- ケースBと同様に200m間隔の観測結果で逆解析を実行。

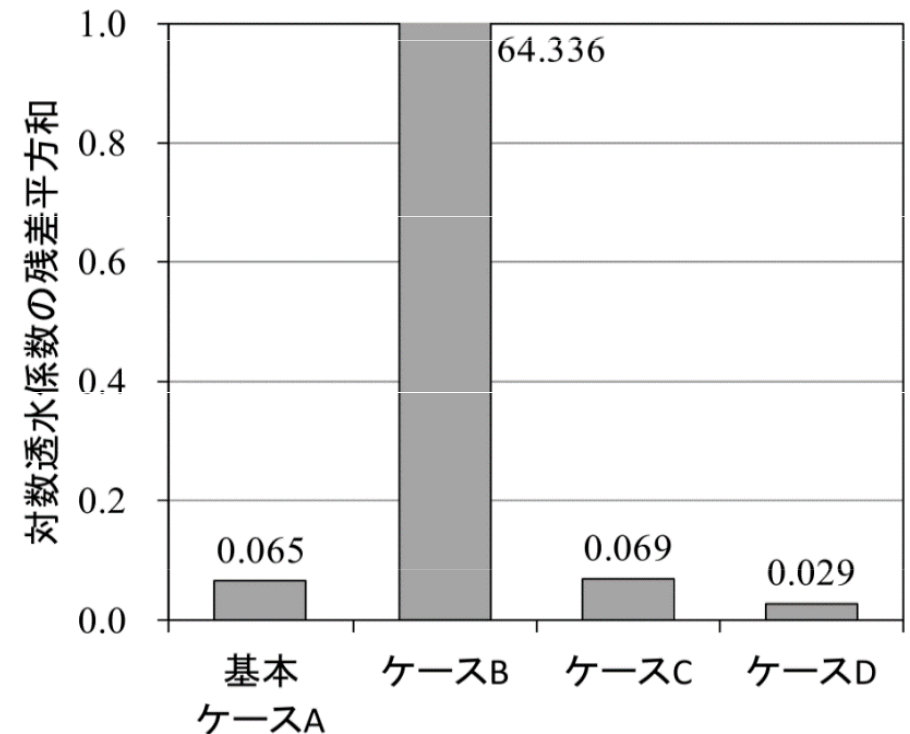
# 透水係数の推定結果(ケースD)



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。



# 地下水流動問題でのデータ同化活用の課題

- 不確かさのモデル化

- 現状は透水性の不確かさのみ。境界・初期条件の不確かさが課題
- パラメータのばらつきでは表現できない不確かさも存在

**究極的にはマルチモデルアンサンブルが有効？**

- 長期予測のためのモデル同定

- 逐次法で同定したモデルは長期予測では精度が低い。

**オフライン型データ同化との連携**

**平滑化法や変分法とのハイブリッド法の利用**

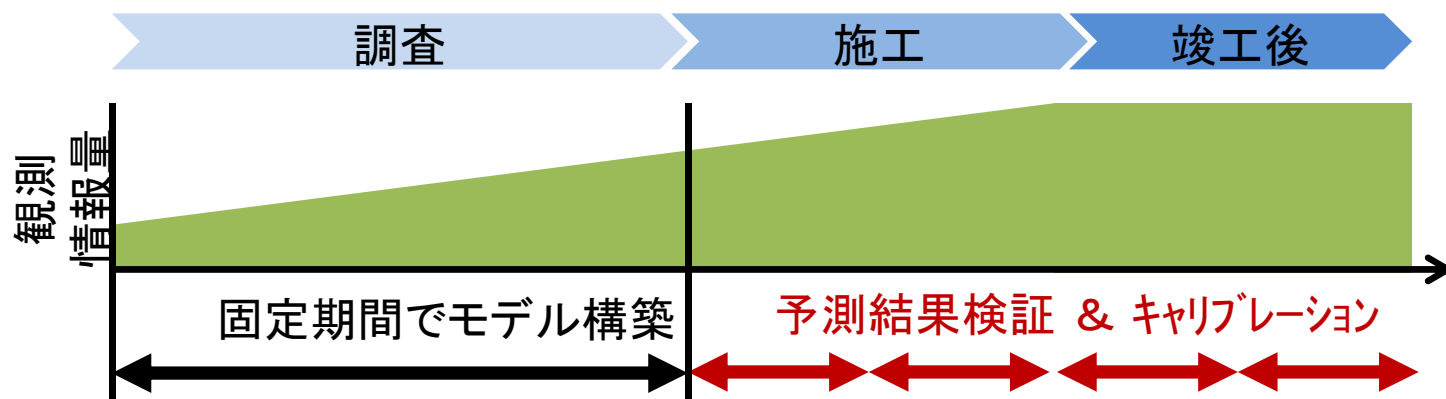
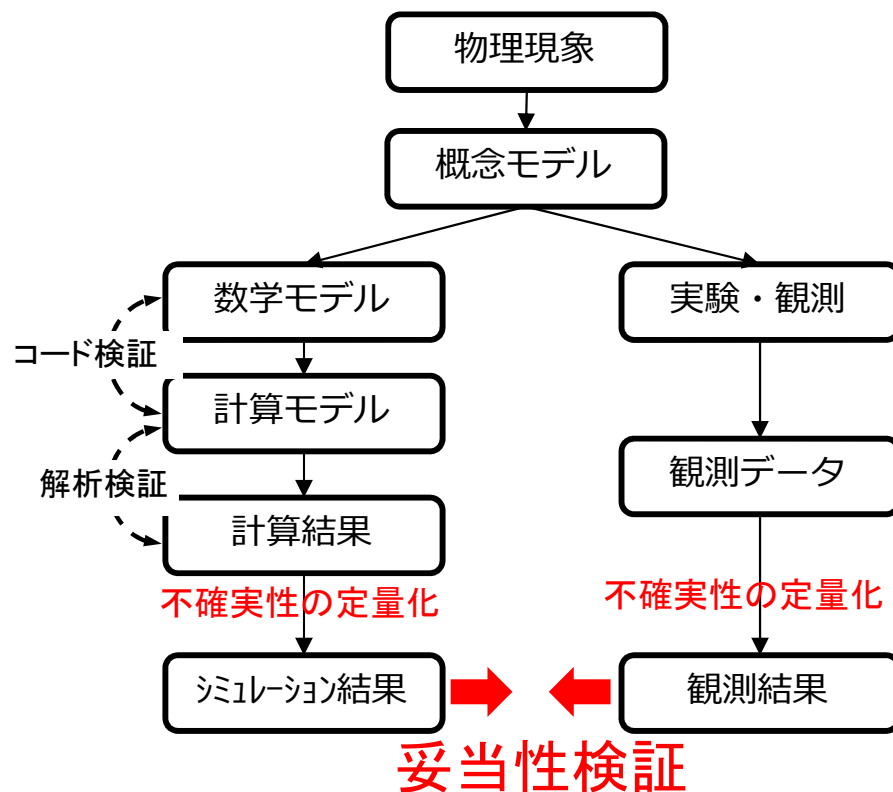
- 手法論の構築

- データ同化を適切かつ効果的に用いるための手引きが必要

**事前情報の活用、模擬観測データによる同化実験、  
観測データの質向上**

# 解析結果の妥当性をいかに検証するか？

- 地下水流動問題では観測結果が少なく、それらの再現だけでは不十分  
蓄積されるデータにより予測結果の検証とモデル修正を繰り返すしかない？
- 不確かさの精緻なモデル化が不可能なため、一般的な妥当性検証は困難  
観測結果の条件付け(conditioning)により不確かさを低減することは可能

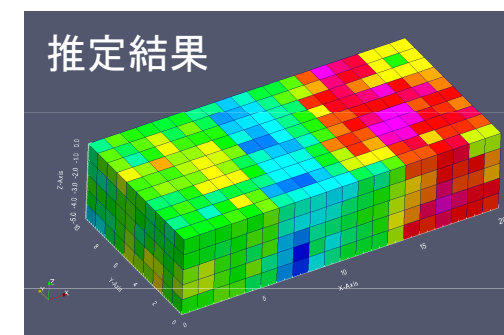
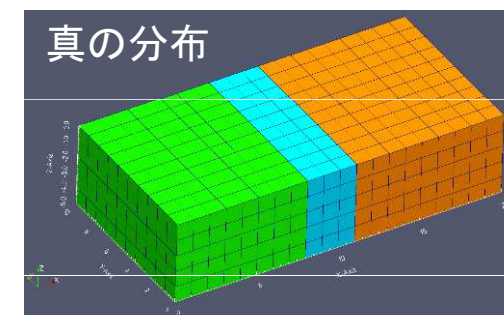




# 建設分野におけるデータ同化への期待

## 取り扱うデータの増加により、データ同化活用の方は拡大

- モデルキャリブレーション
  - インフラの劣化予測モデル
- パラメータ同定
  - 構造物の損傷検知、物性分布のイメージング
- アンサンブルに基づいた予測評価
  - 構造物の信頼性設計
- 観測システムの評価
  - モニタリング計画への応用
- オンライン予測
  - 施工時の高精度なリアルタイム予測



透水係数分布のイメージング

ご清聴ありがとうございました。