

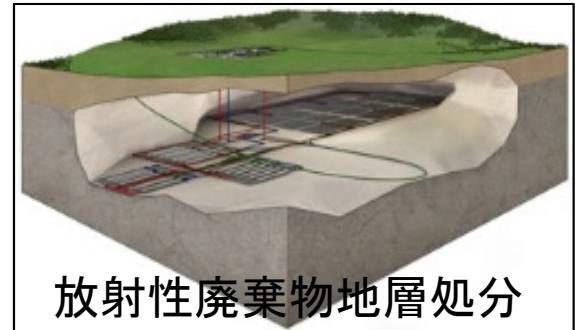


# 地下水流动シミュレーションにおける データ同化の活用

清水建設 技術研究所  
山本 真哉

# 自己紹介

- 出身:地質工学(資源系)
- 技術:
  - データ解析(帰納的)
    - 時系列解析、空間統計解析
    - ※シミュレーション(演繹的)の経験はほぼなし。
  - データ同化
    - 帰納的アプローチと演繹的アプローチの統合
- やってきたこと:
  - 統計手法による調査・観測データ分析(例:要因分析、空間補間)
  - 維持管理データによる土木構造物の健全性評価
  - データ同化による地下水流动解析の高度化



# 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: 地下水流動解析モデルのキャリブレーション
  - 事例②: 水理地質構造の不確かさの低減
  - 事例③: データ同化実験による地下水観測位置の検討
3. 土木分野におけるデータ同化の活用方法

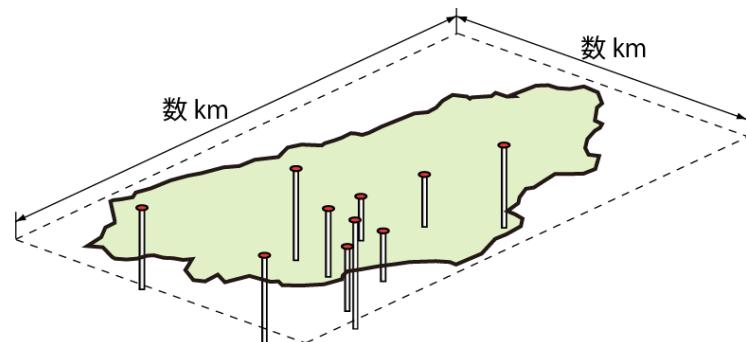
# 地下水流动解析の目的

**地下構造物の設計・施工・維持管理を行う上で、地下水流动評価は重要**

- 建設サイト周辺の地下水はどのように流动している？（再現）
- 構造物を建設すると周辺の地下水環境はどう変化する？（予測）

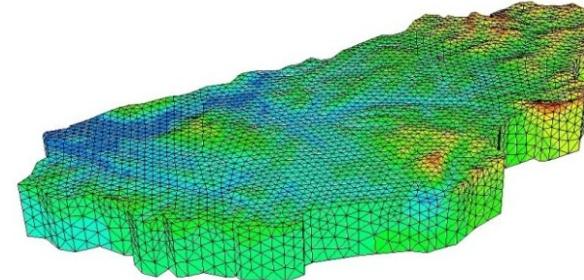
**地下水問題の例：水位低下、施工中の湧水、地下水汚染**

## 地下水の調査・観測



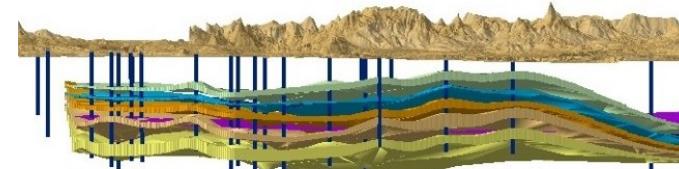
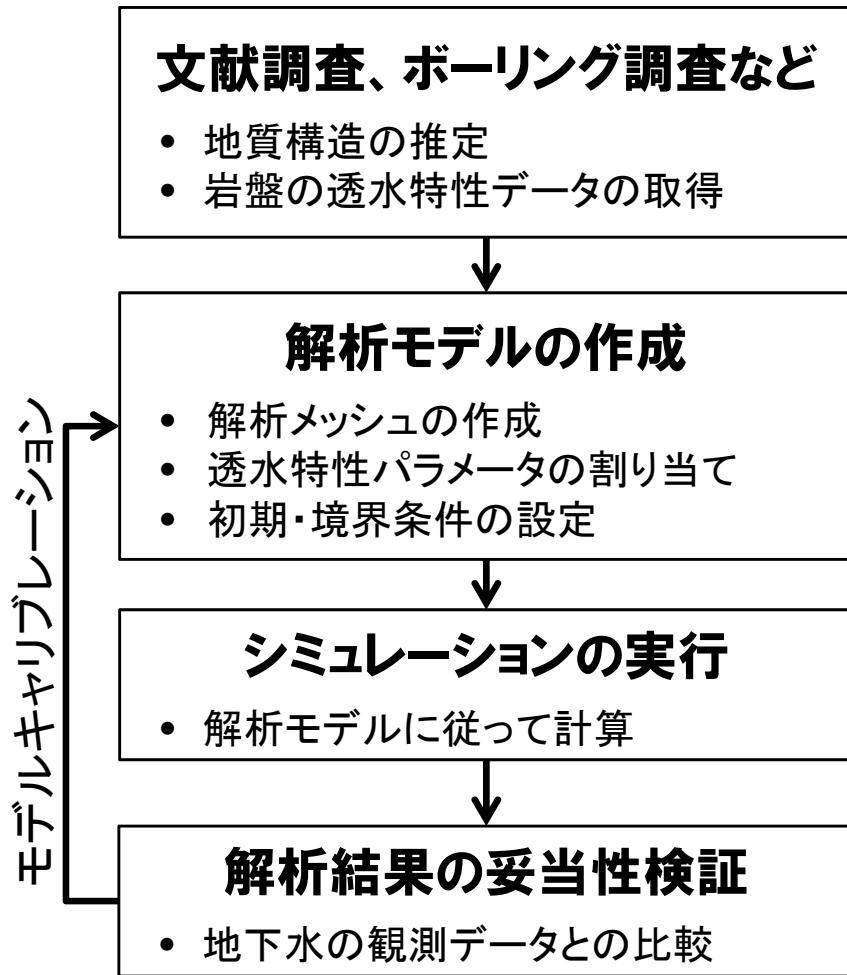
- ✓ 実際の地下水の情報が入手可能
- ✗ 数が限られ、情報は断片的
- ✗ 予測が困難

## 地下水流动解析

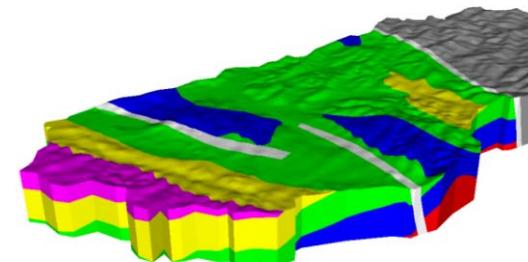


- ✓ 領域全体の状況を評価できる
  - ✓ 様々なシナリオに基づく予測が可能
  - ✗ 高精度な予測が難しい
- ※CAEとしては用いられていない

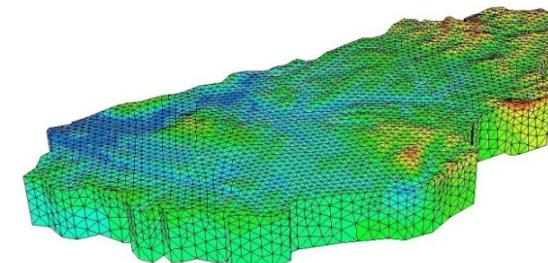
# 地下水流动シミュレーションのプロセス



ボーリング調査結果から地質構造を推定



地質構造に基づいて水理特性を設定



初期・境界条件を与え、地下水流动を  
シミュレーション(再現・予測)

解析モデルのキャリブレーションには経験・時間が必要

# 地下水水流動シミュレーションに含まれる不確かさ

地下に関する情報・知識は極めて少ない

- 物性値のばらつき
- 三次元地質構造
- 境界条件(地下水の流入出)
- 初期条件(定常的な地下水水流動場)

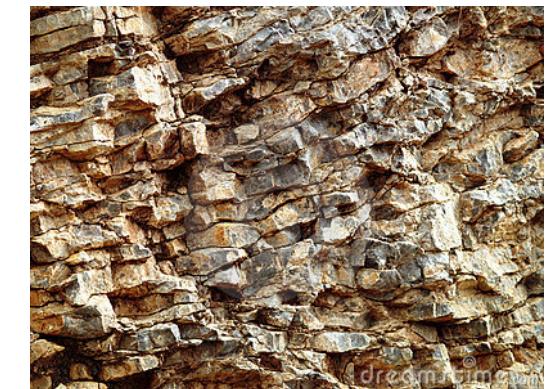


## ➤ Reducible (Epstemic) な不確かさ

- 確率で表現できないものも存在
- 現実的には調査できる数量に限度あり

## ➤ Irreducible (Aleatory) な不確かさ

- 岩盤の物性値のばらつきは大きい
- 不確かさを定量化するにはサンプル数が不足



不確かさの定量化  
が困難

# 不確かさに起因する地下水水流動解析の課題

## 地下水水流動シミュレーションにおける不確かさ

- 地質構造
- 水理特性のばらつき
- 境界条件
- 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。

# 地下水流动評価におけるデータ同化の活用

シミュレーションに観測結果を取り込み、地下水流动評価を高度化

## 地下水流动解析モデル

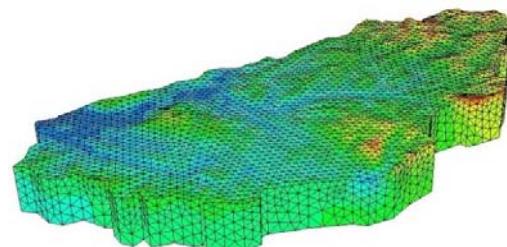
物理則

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial h}{\partial x} \right) = (C + \beta S_s) \frac{\partial h}{\partial t}$$



条件

地質, 物性, 降雨...



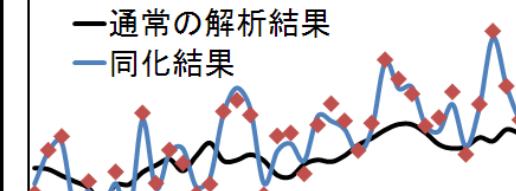
## データ同化

解析結果

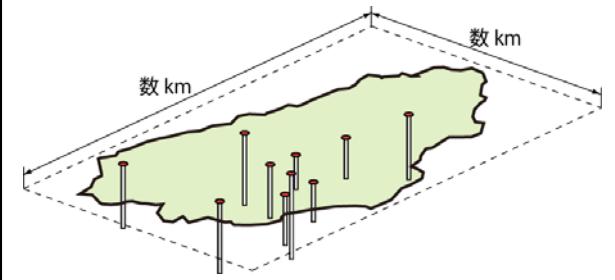
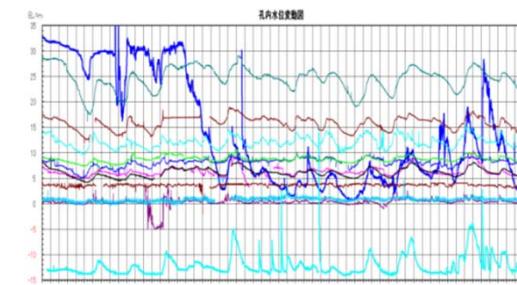
観測結果

観測結果を取り込んだ解析

- ◆ 観測値
- 通常の解析結果
- 同化結果



## 地下水観測



## 解析の信頼性向上

- 解析結果の正確度(Accurate)と精度(Precise)の向上

## 観測の合理化

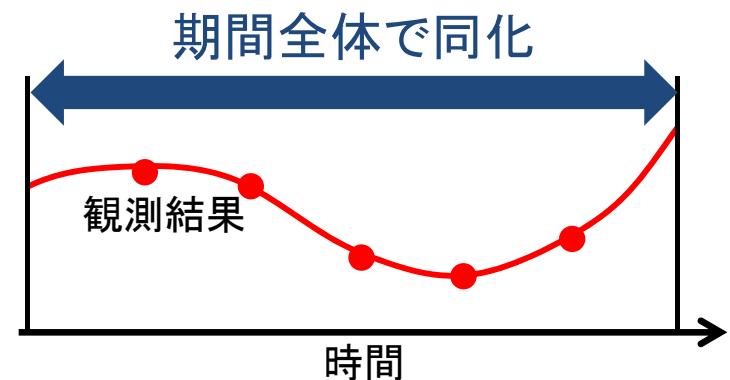
- より価値の高い観測データの取得

# データ同化の種類

データ同化手法にはいくつかの種類が存在。問題や目的に応じた手法の選択が重要。

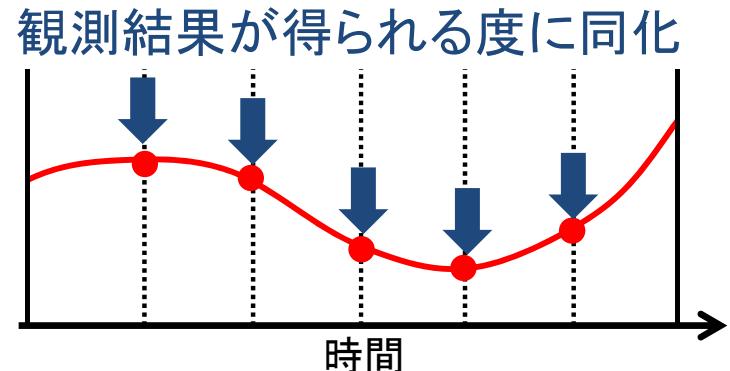
## ➤ オフライン型データ同化手法

- 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
- アンサンブルカルマンフィルタ
- 粒子フィルタ



# アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)

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

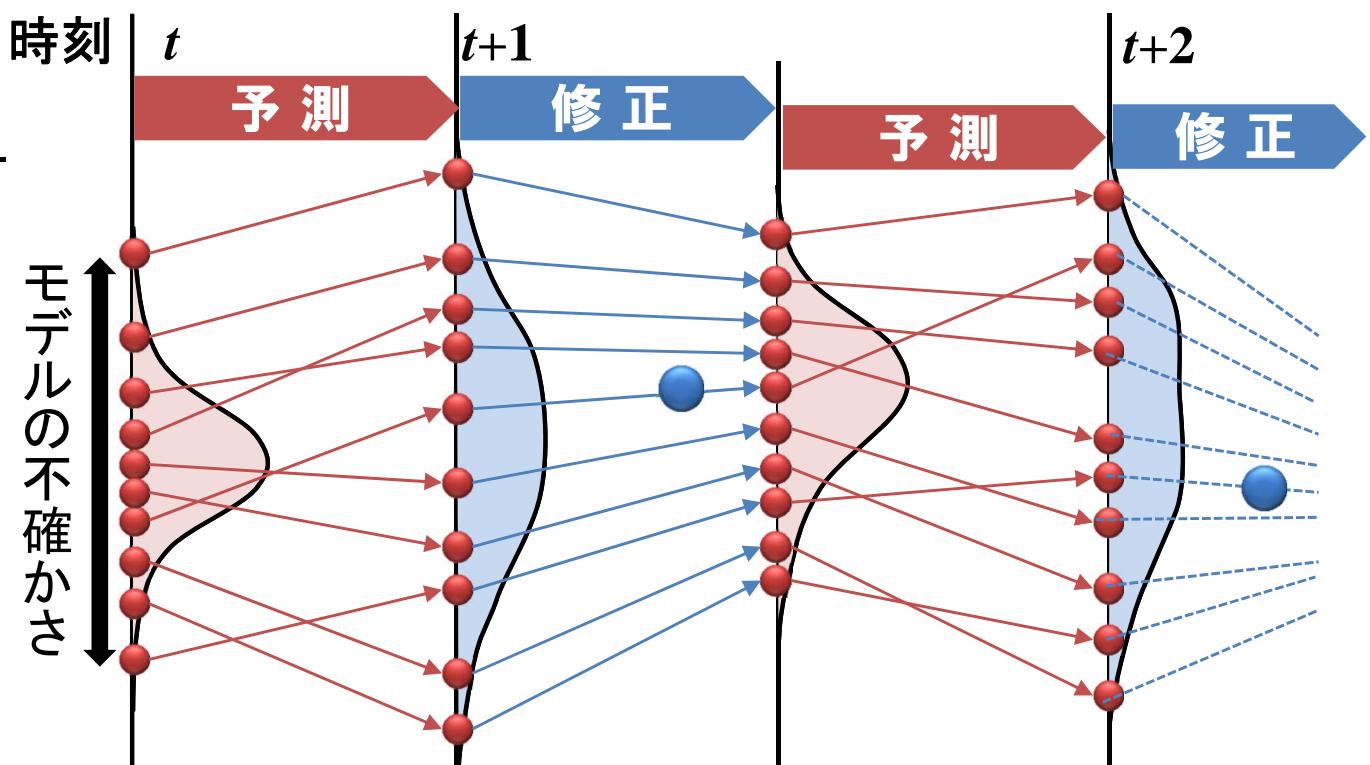
同化結果 予測結果 観測結果との差

観測誤差とモデル誤差の比

x: モデル変数、パラメータ, y: 観測  $i$ : 実現値のインデックス, K: カルマンゲイン,  
P: 予測誤差共分散, R: 観測誤差共分散, 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。

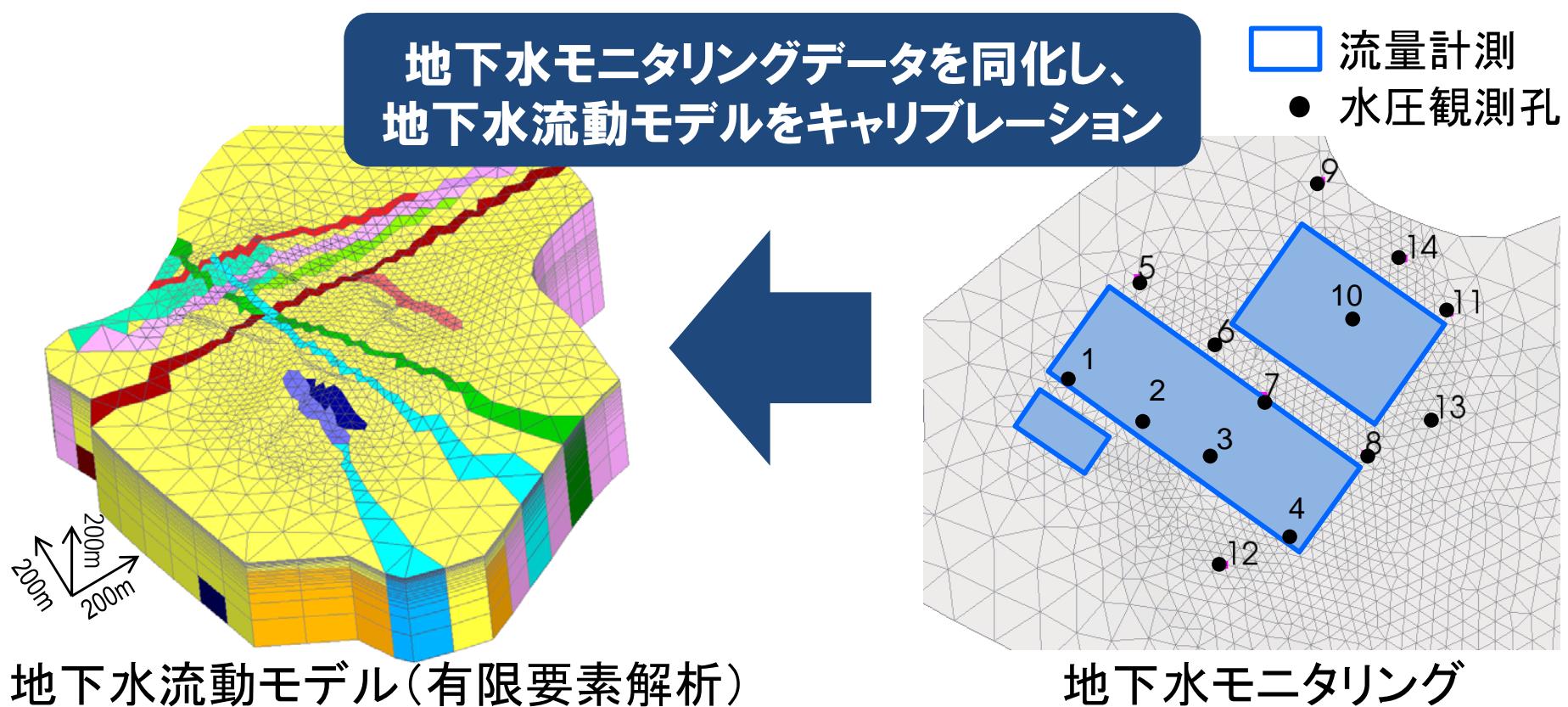


# 本日の内容

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: 地下水流動解析モデルのキャリブレーション
  - 事例②: 水理地質構造の不確かさの低減
  - 事例③: データ同化実験による地下水観測位置の検討
3. 土木分野におけるデータ同化の活用方法

# 事例①: 地下水流動解析モデルのキャリブレーション

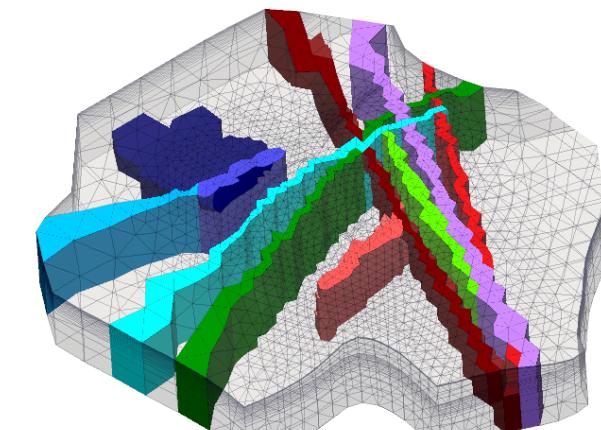
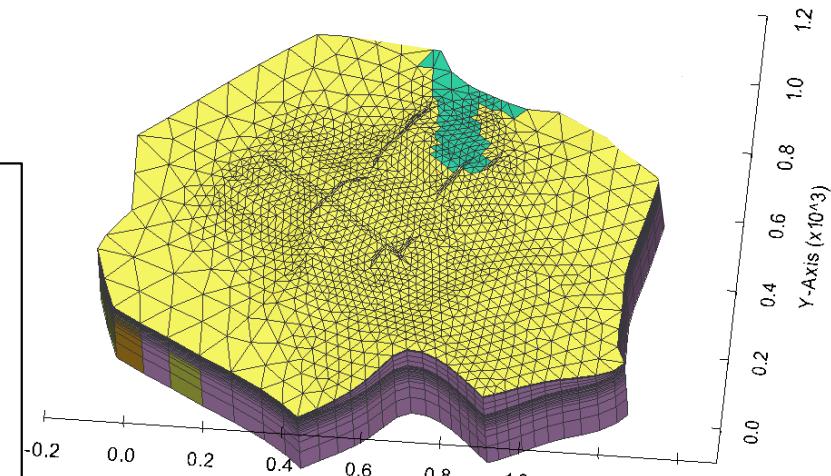
ねらい: 実際の地下構造物と地下水観測データを対象に、  
地下水水流動解析への適用性を検証



# 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に、各地質区分ごとの透水係数を同定

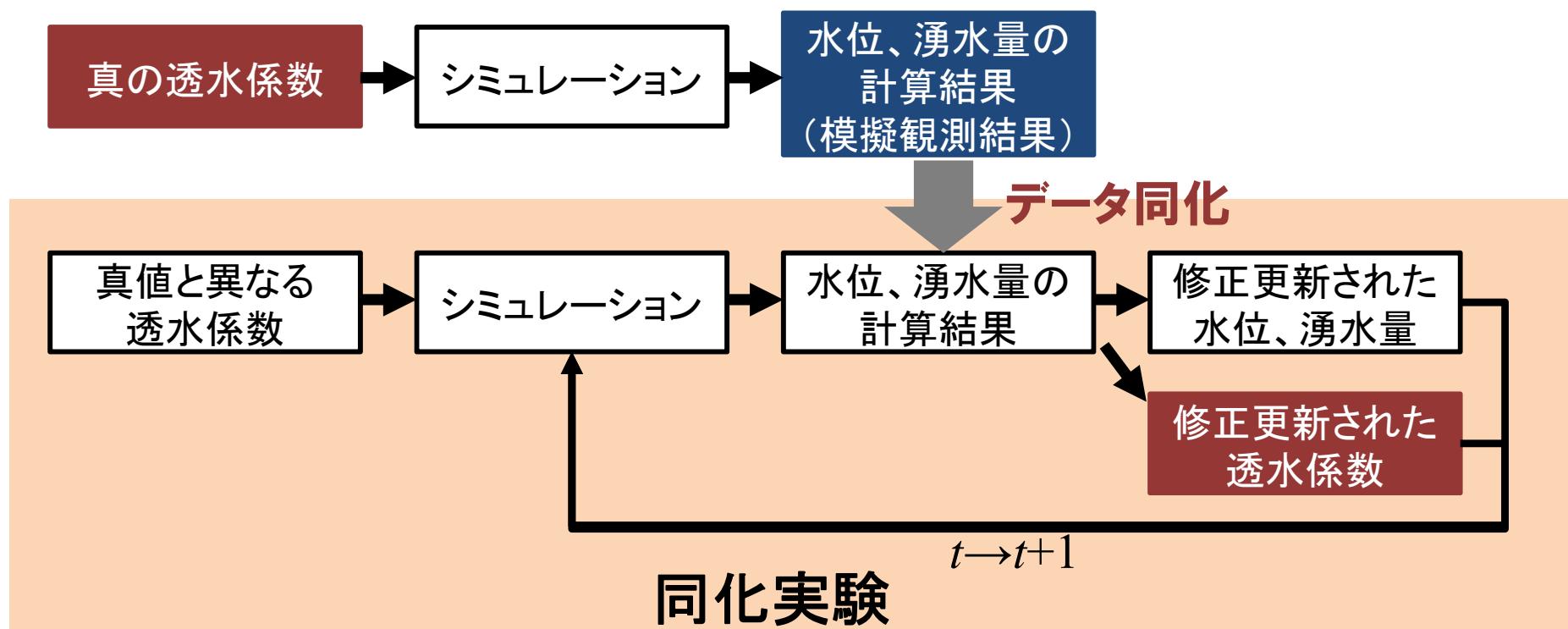
- 同定対象：各地質区分の透水係数（計15個）
- 観測データ：水圧、地下水流量（日毎データ、計20点）
- 手法：アンサンブルカルマンフィルタ（96メンバー）
- 事前情報：
  - 三次元地質構造
  - 亀裂帯・風化帯は新鮮岩よりも高透水
  - 透水係数の取りうる範囲  
 $(1.0 \times 10^{-10} [\text{m/s}] < K < 1.0 \times 10^{-4} [\text{m/s}])$



亀裂帯の分布(11系列)

# ステップ1:模擬観測結果を用いた同化実験

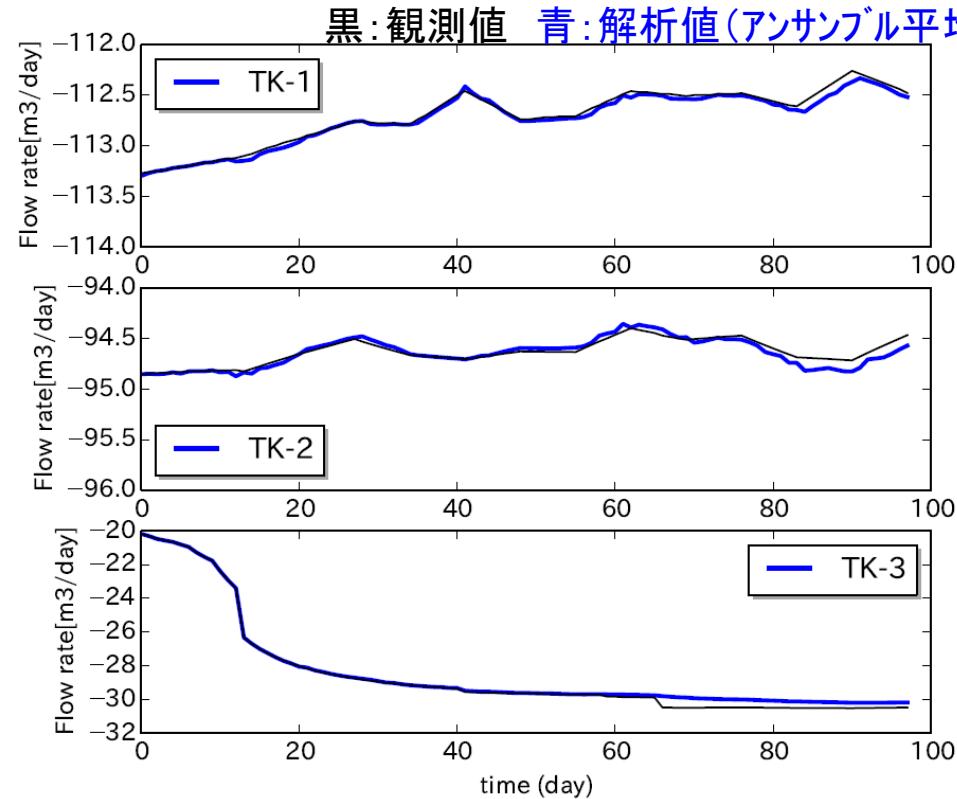
“誤差のない完全なモデル”と“誤差のない完全な観測データ”を用いてデータ同化を行い、手法の性能を評価



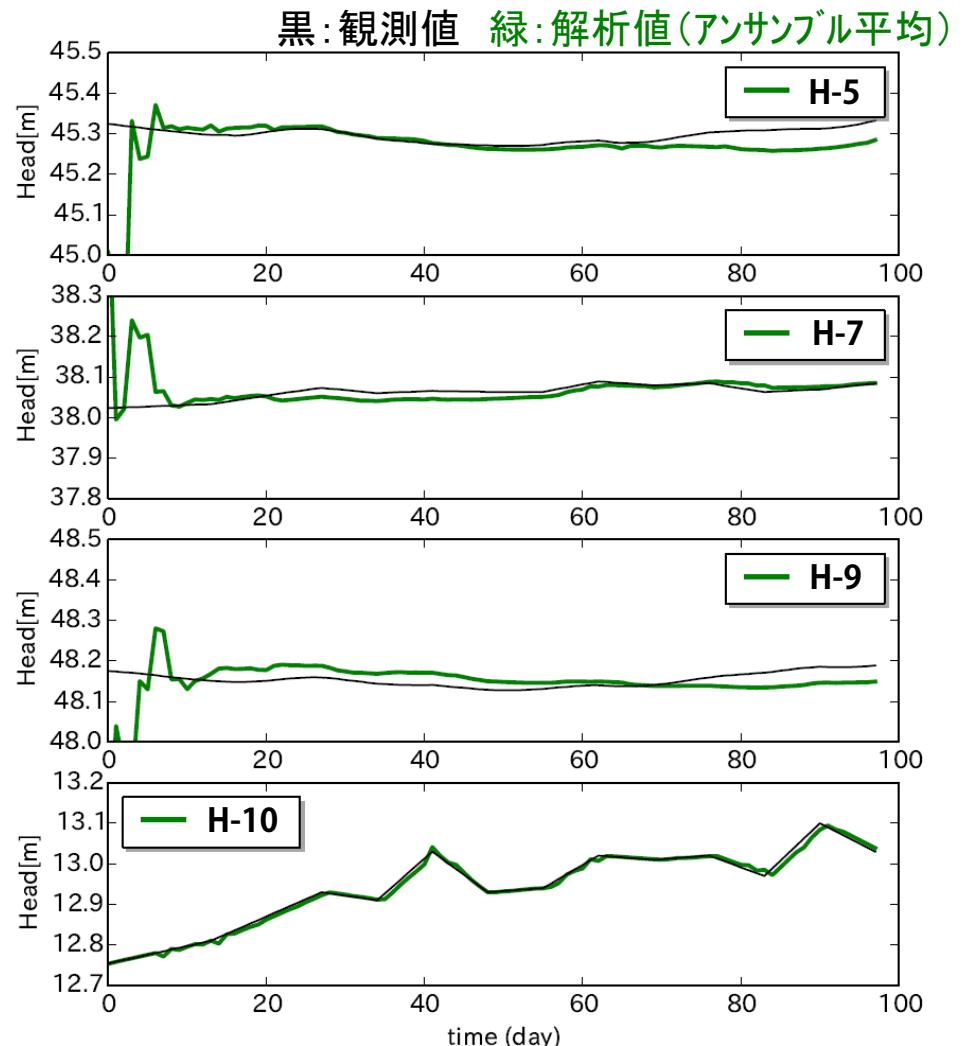
# ステップ1:模擬観測結果を用いた同化実験 同定モデルによる観測結果の再現結果

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

【流量】



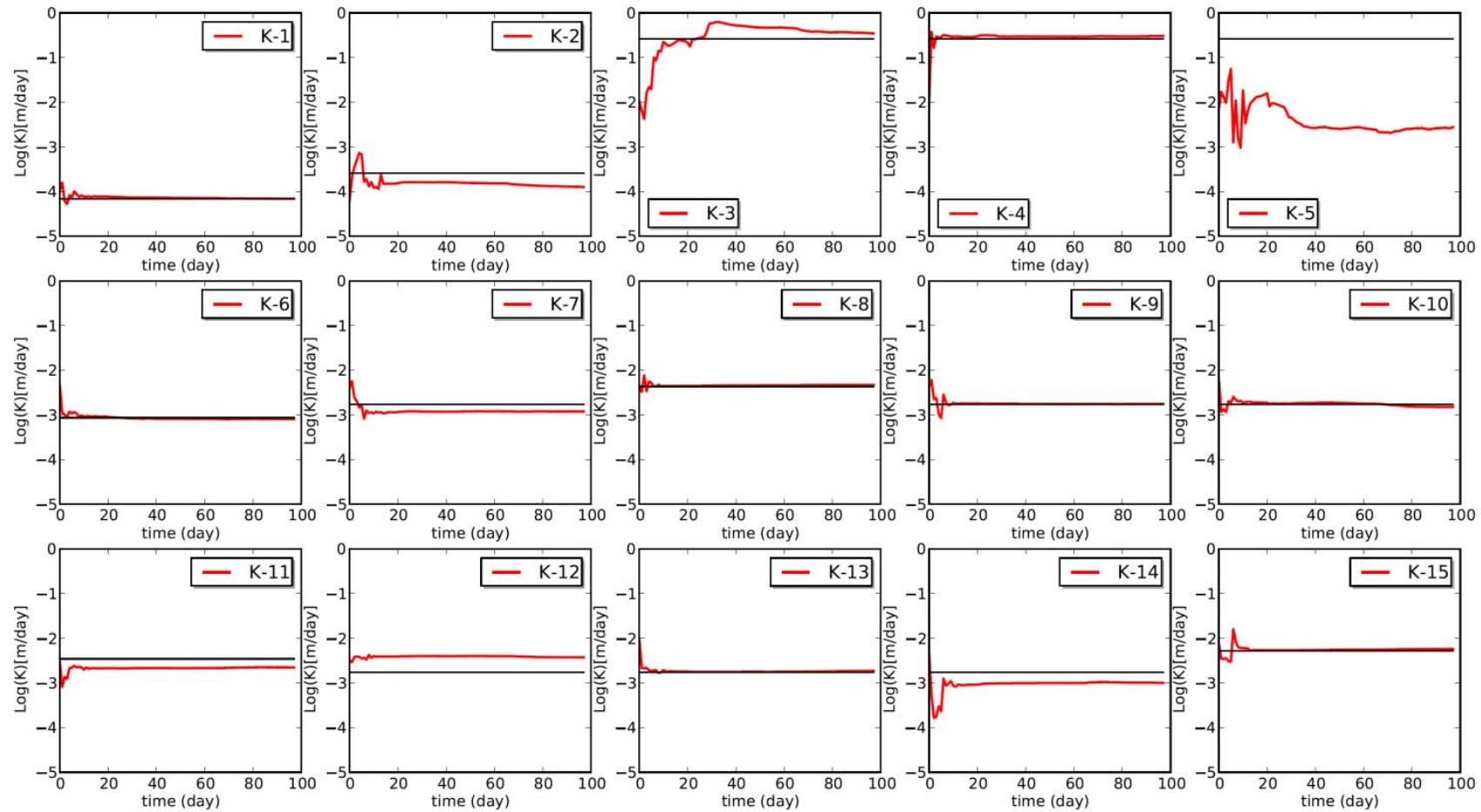
【水圧】



# 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

データ同化により高い精度で透水係数を推定可能

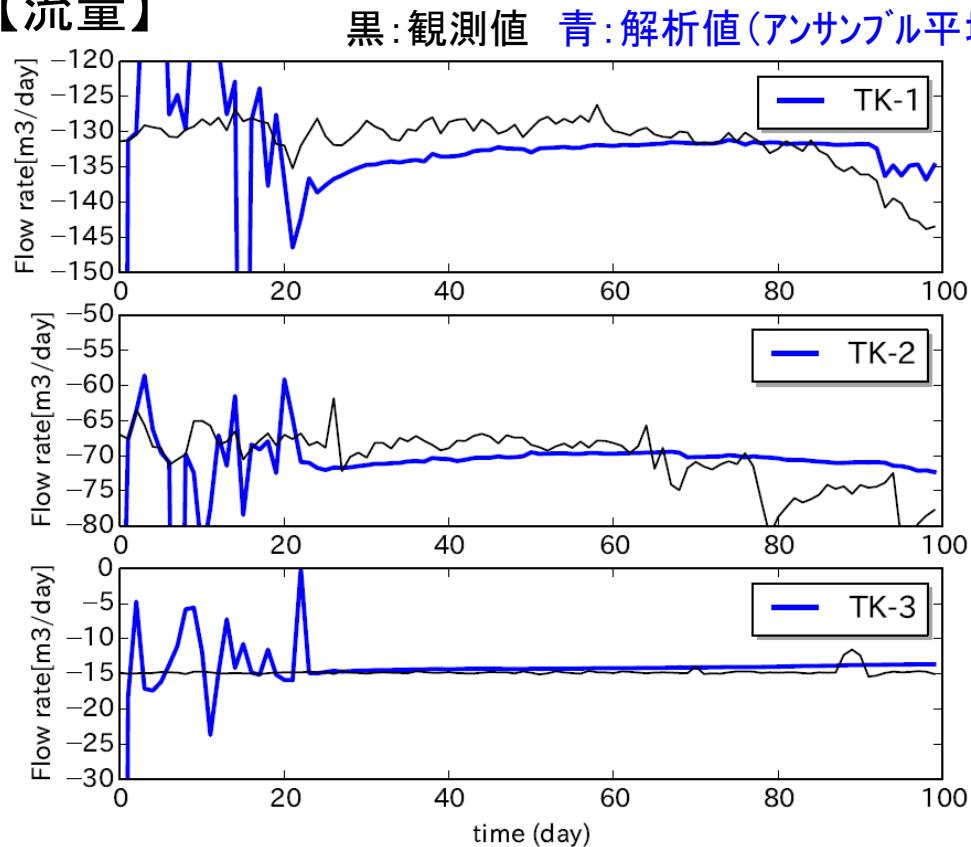
※横軸:日数 黒:真値 赤:推定値(アンサンブル平均)



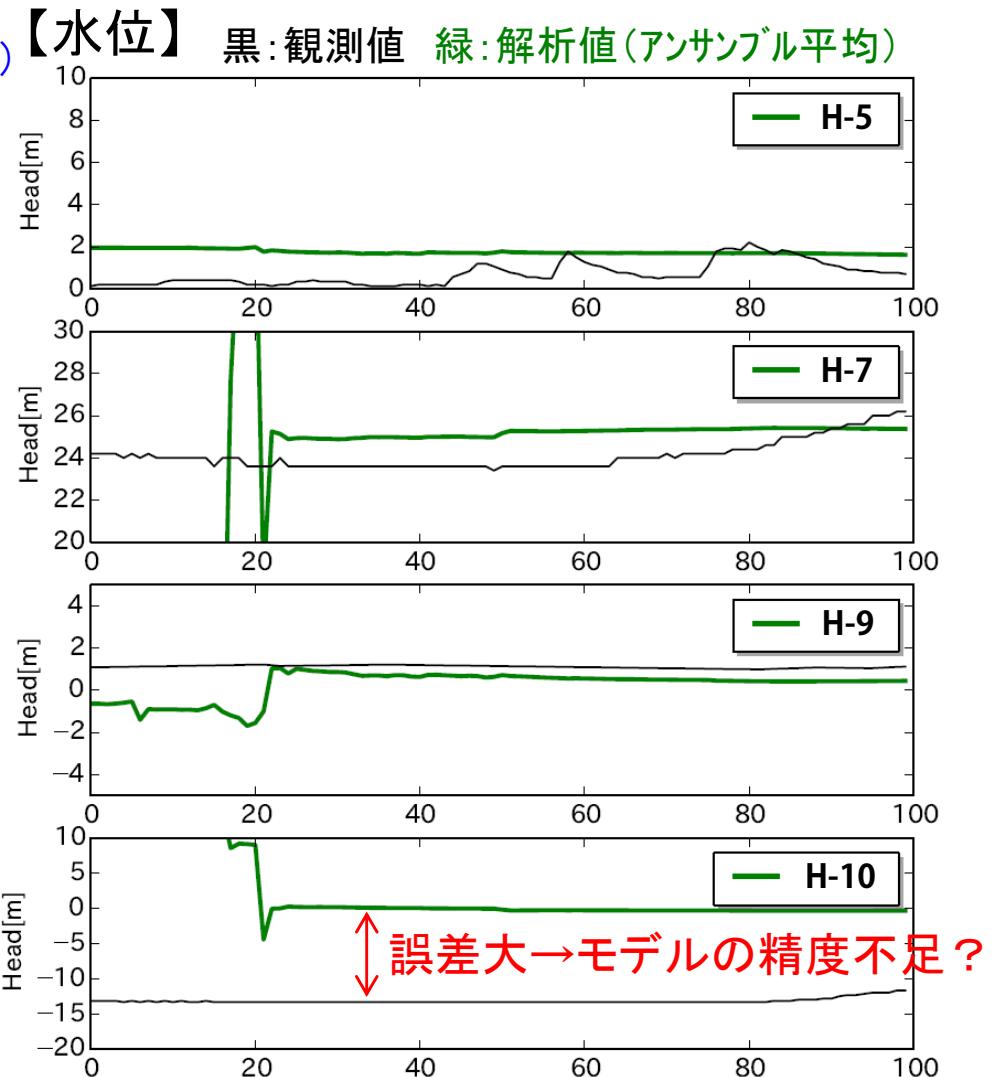
# ステップ2: 実観測結果を用いた同化実験

実測値を用いた場合でも多くの観測結果を概ね再現。  
再現精度の低い観測結果は解析モデルの欠点を示唆。

【流量】

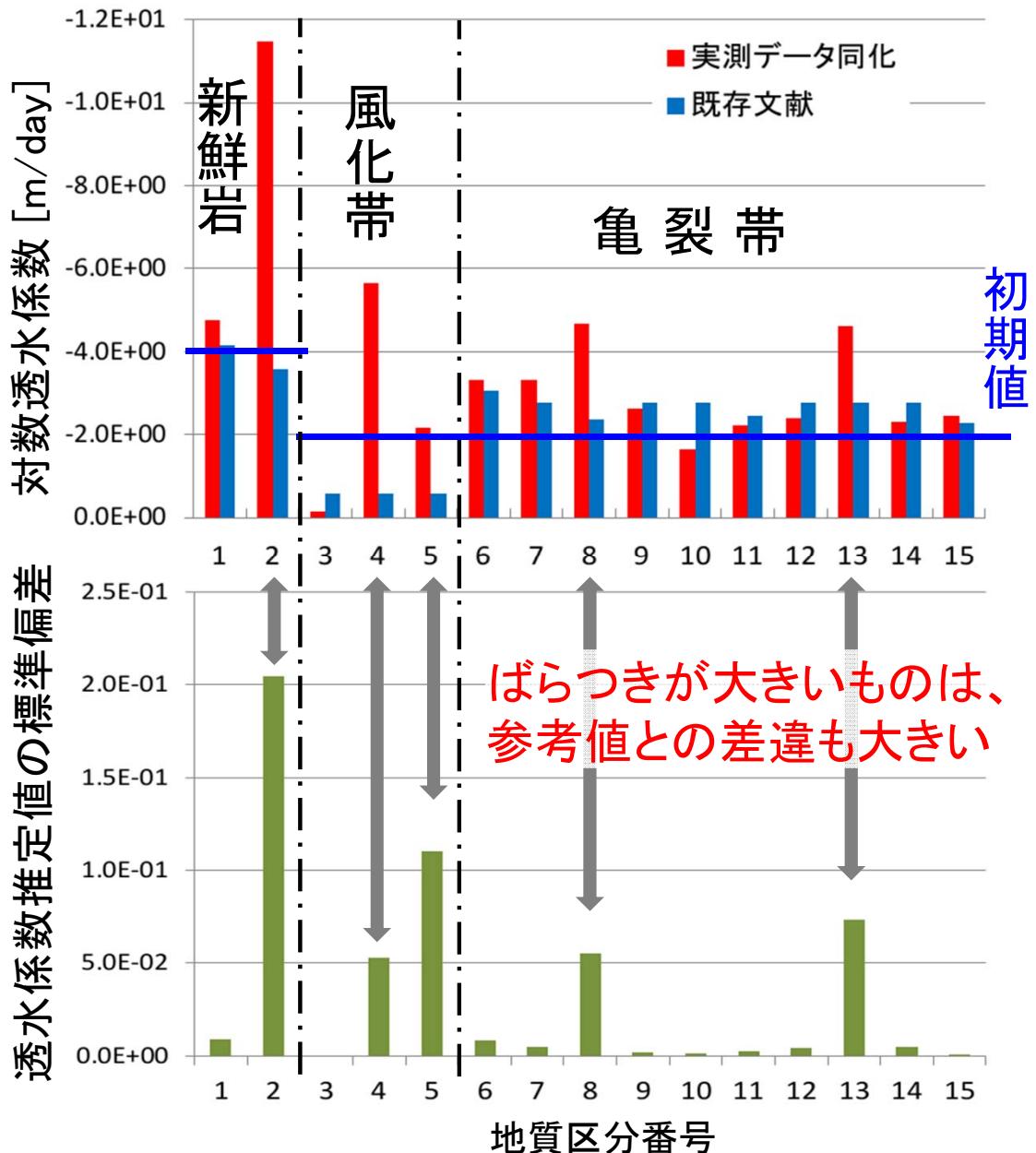


【水位】



# 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  
ばらつきから、  
推定結果の信頼性を  
ある程度把握可能。



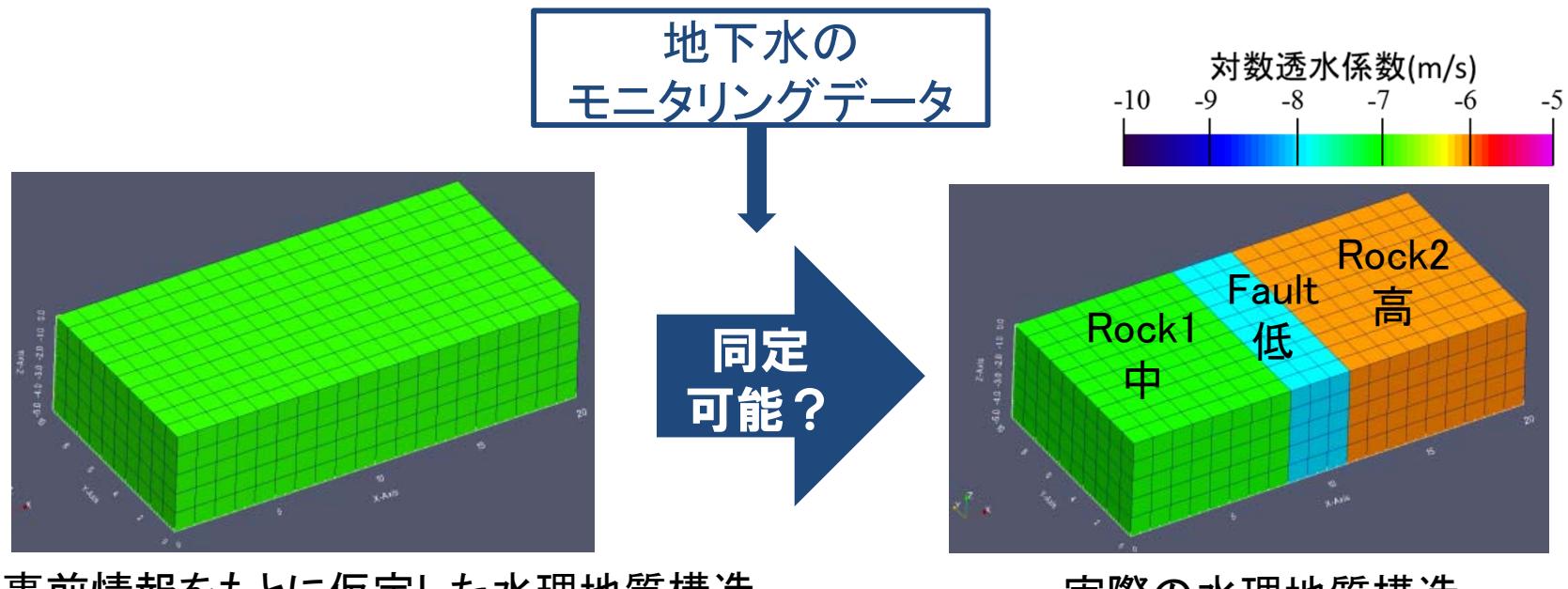
# 事例①のまとめ

- 実構造物を対象として、地下水流动解析のデータ同化技術の適用性を検証。
  - 理想条件下では解析モデルのパラメータを精度良く同定できることが確認され、EnKFは良好な性能を示すことが分かった。
  - 実観測データを用いたケースでは、観測結果を大局的に再現する透水係数を同定できた。また、解析モデルの精度検証にも活用できる。
- 今後の課題
- ケーススタディの蓄積
  - 境界条件などの不確かさの組み込み

## 事例②: 水理地質構造の不確かさの低減

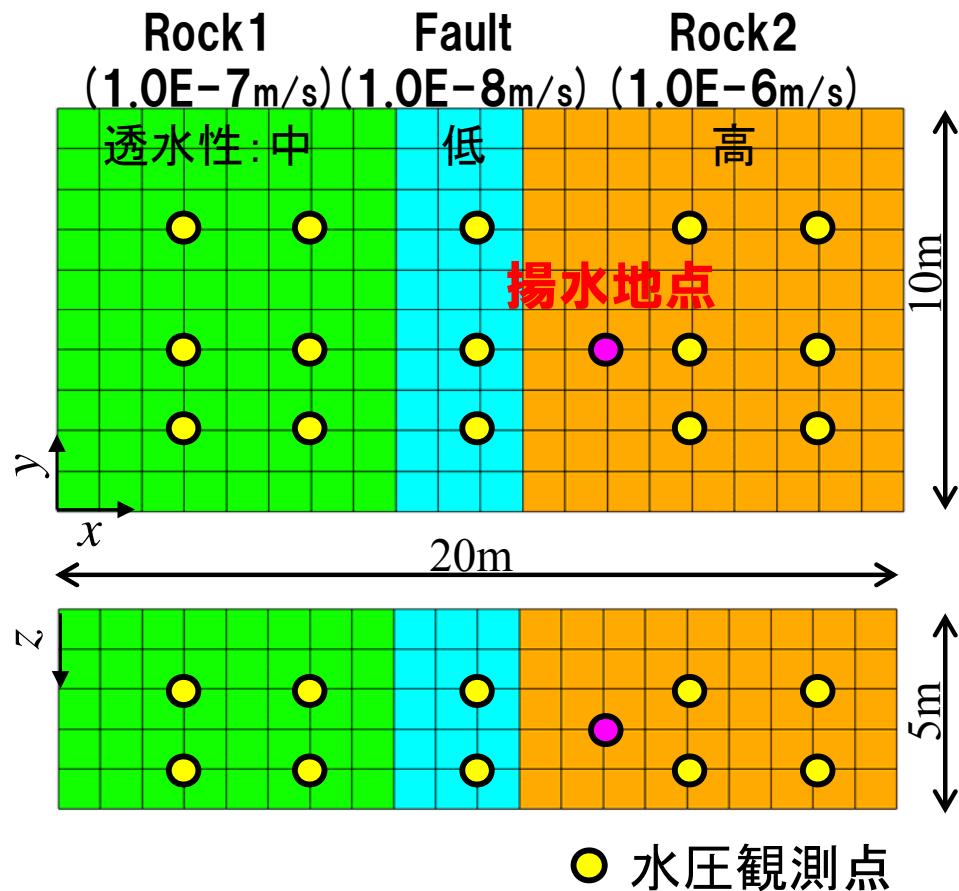
ねらい: 観測結果を利用して解析モデルがもつ不確かさを低減できるかどうかを数値実験で検証

揚水試験のデータを同化し、透水係数の空間分布を推定することで、未知の水理地質構造を同定



# 問題の概要

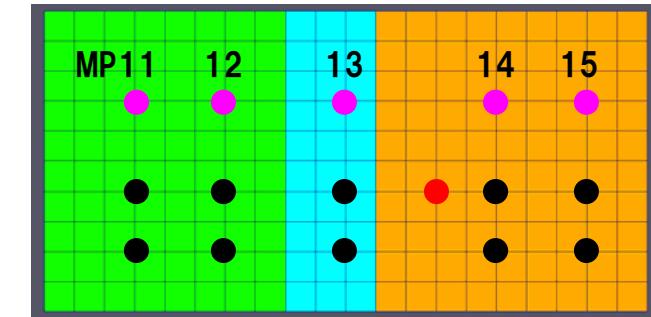
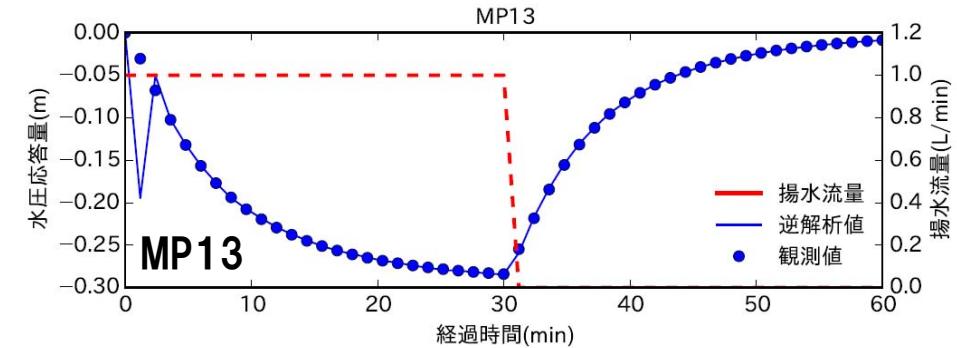
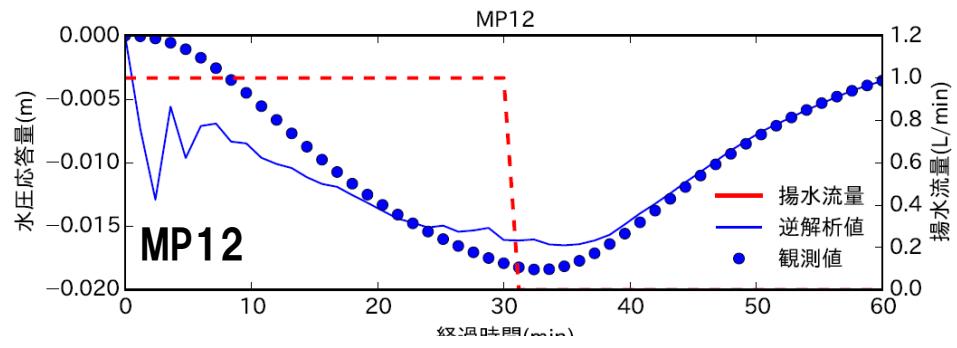
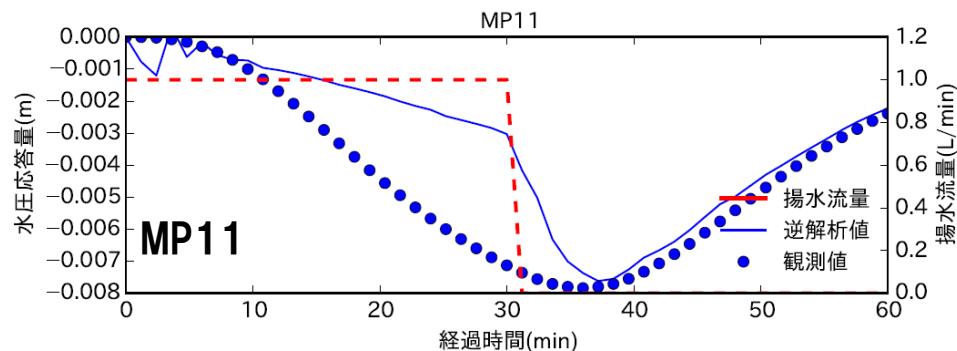
- 同定対象: 各要素の透水係数(1,000個)
- 観測データ:
  - 揚水時の水圧応答観測データ  
(72sec間隔 計31点)
    - 模擬観測データを順解析で生成
    - ノイズを付加したデータでも検討
  - 手法: アンサンブルカルマンフィルタ  
(96、480メンバー)
  - 事前情報: Rock1が均質に分布する場を仮定(不完全な情報)



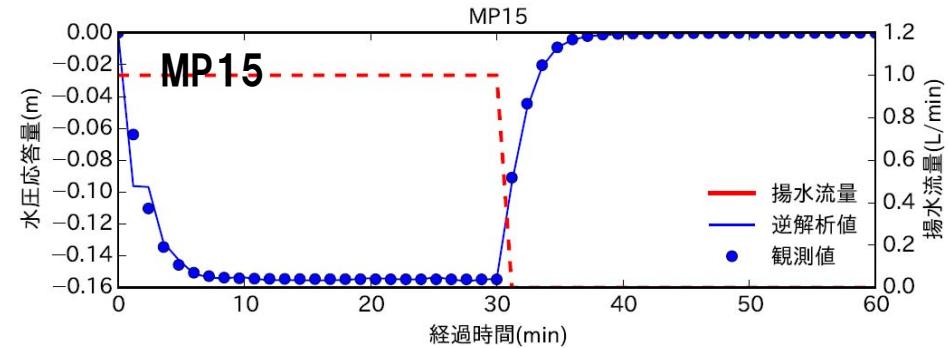
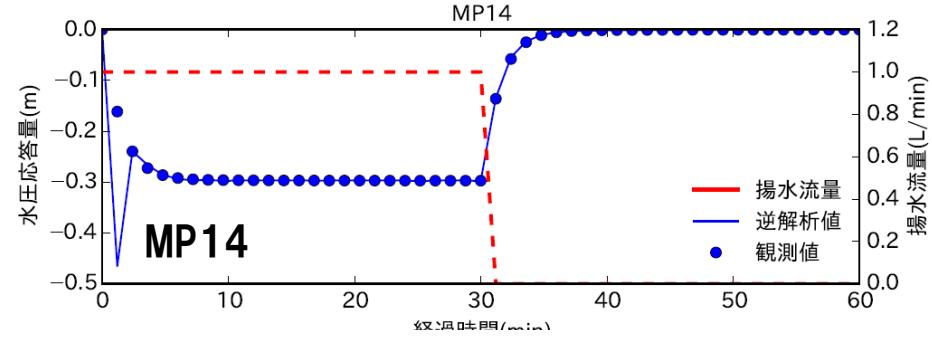
未知パラメータ数が観測数よりも大幅に多い不適切な逆問題

# 観測値の再現性(96メンバー)

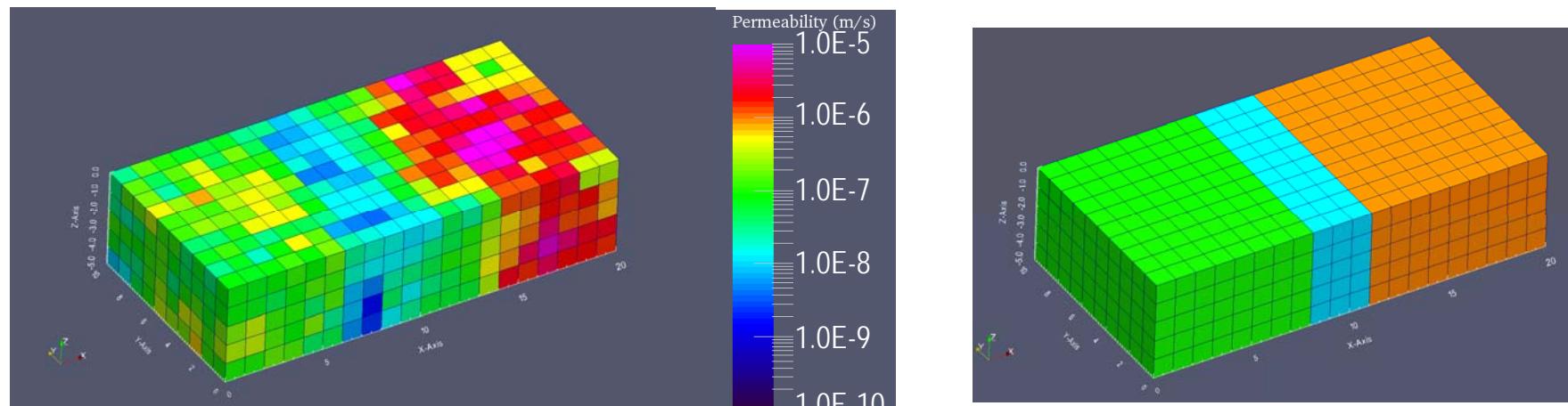
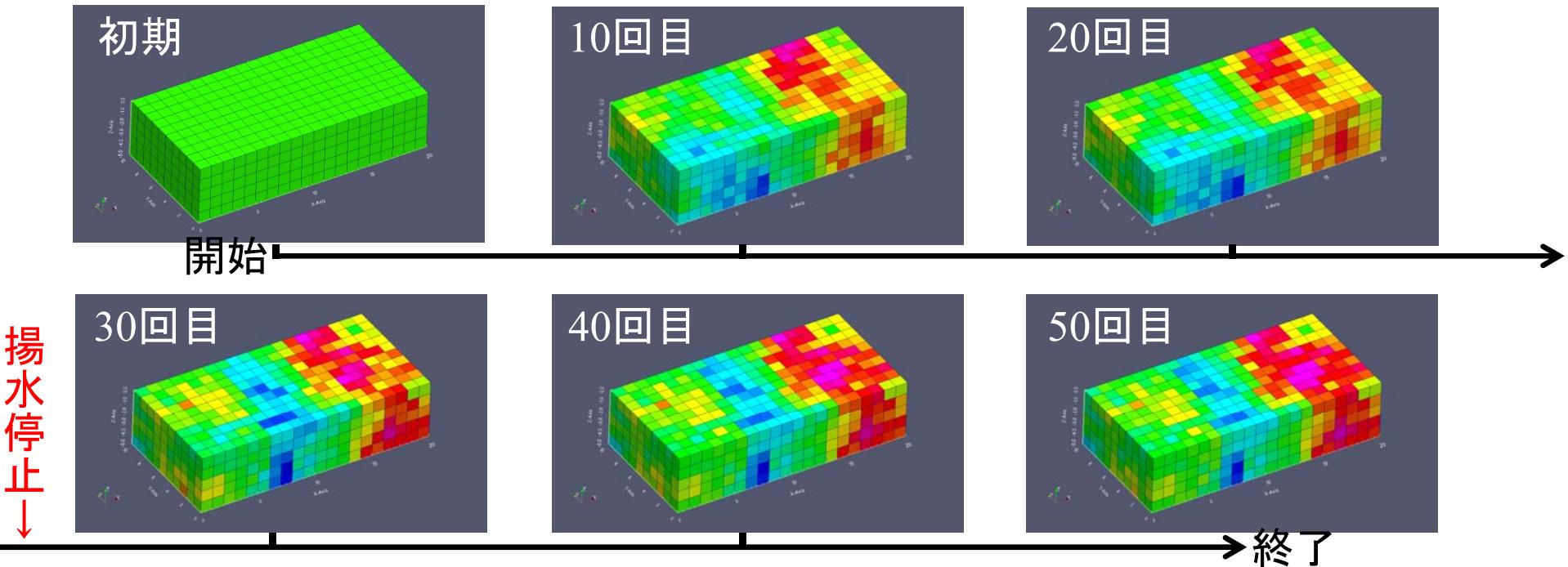
場所(水圧応答の大きさ)により傾向は異なるが、観測を再現可能。



透水性： 中 低 高

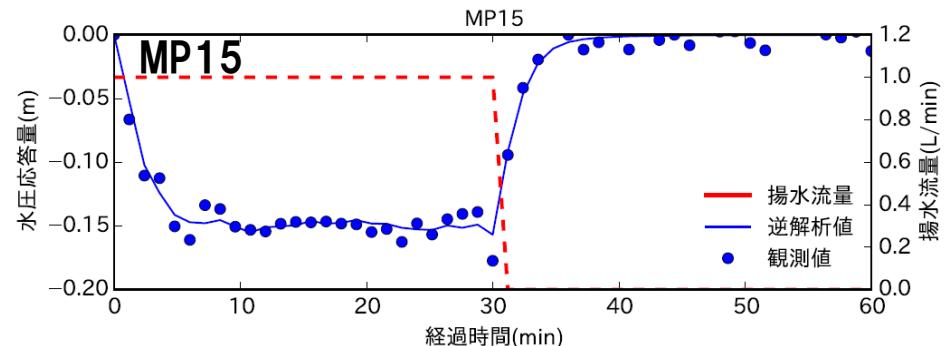
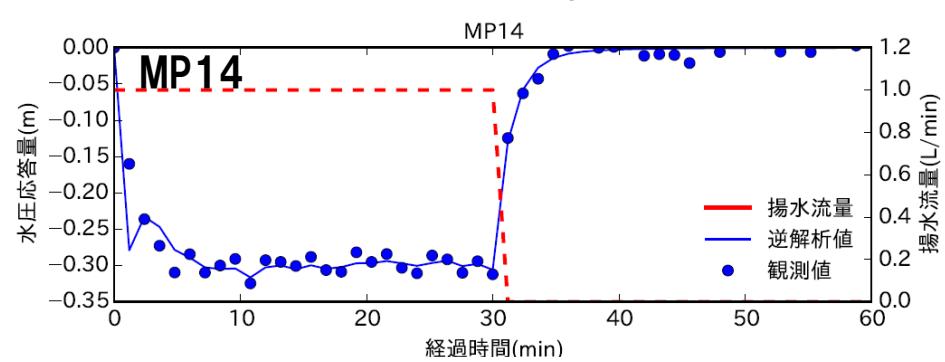
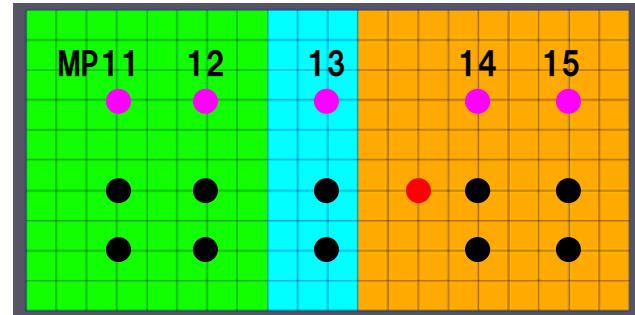
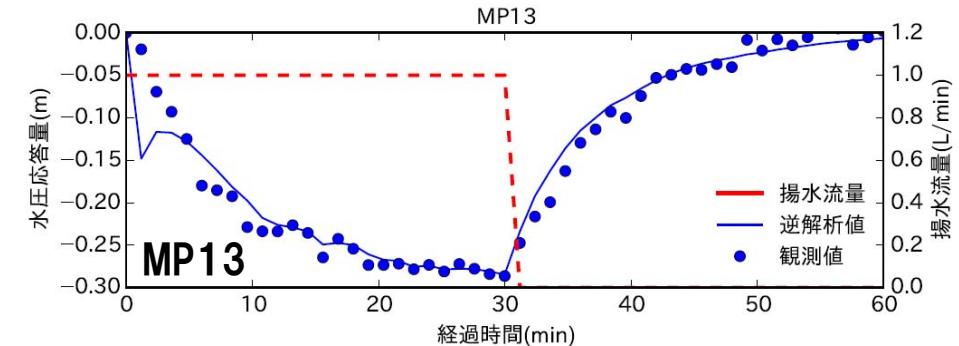
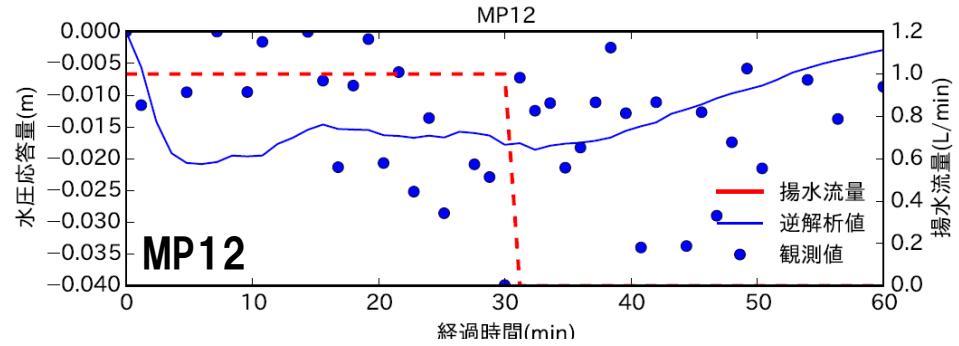
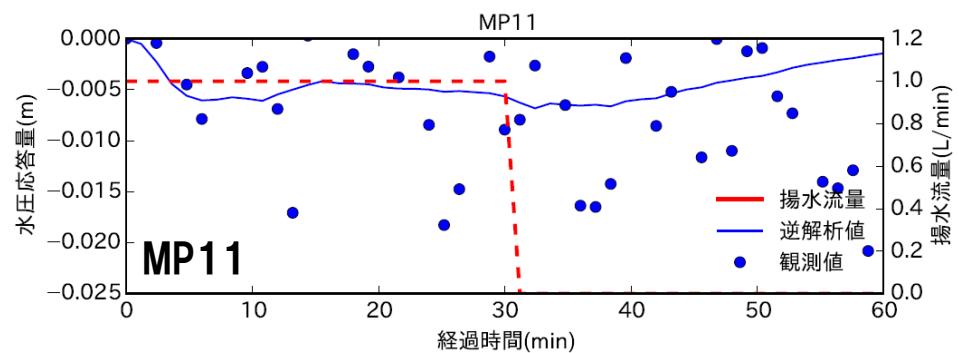


# 透水係数分布の推定結果(96メンバー)

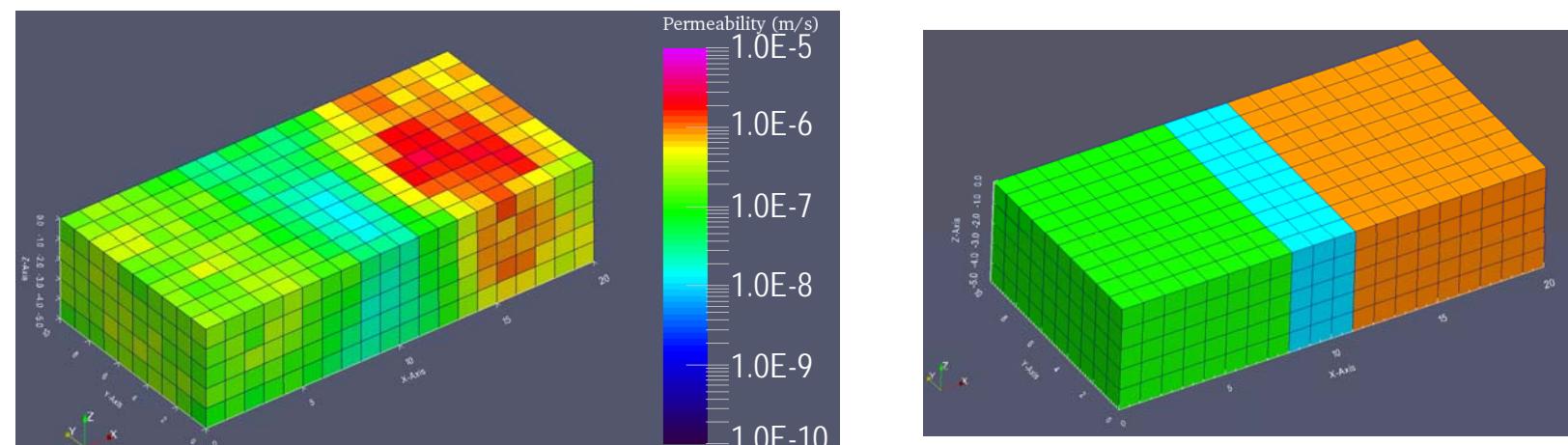
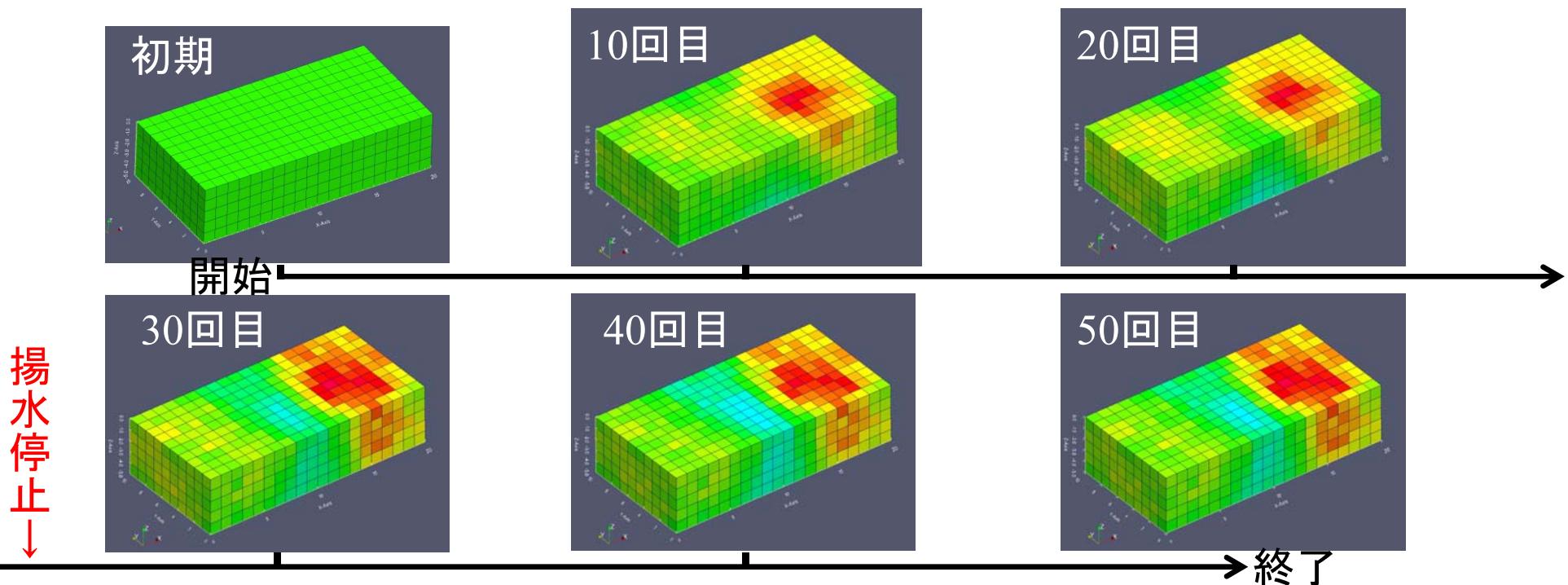


# 観測値の再現性(観測誤差あり 480メンバー)

観測誤差が含まれる場合でも逐次データ同化は機能



# 透水係数分布の推定結果(観測誤差あり 480メンバー)



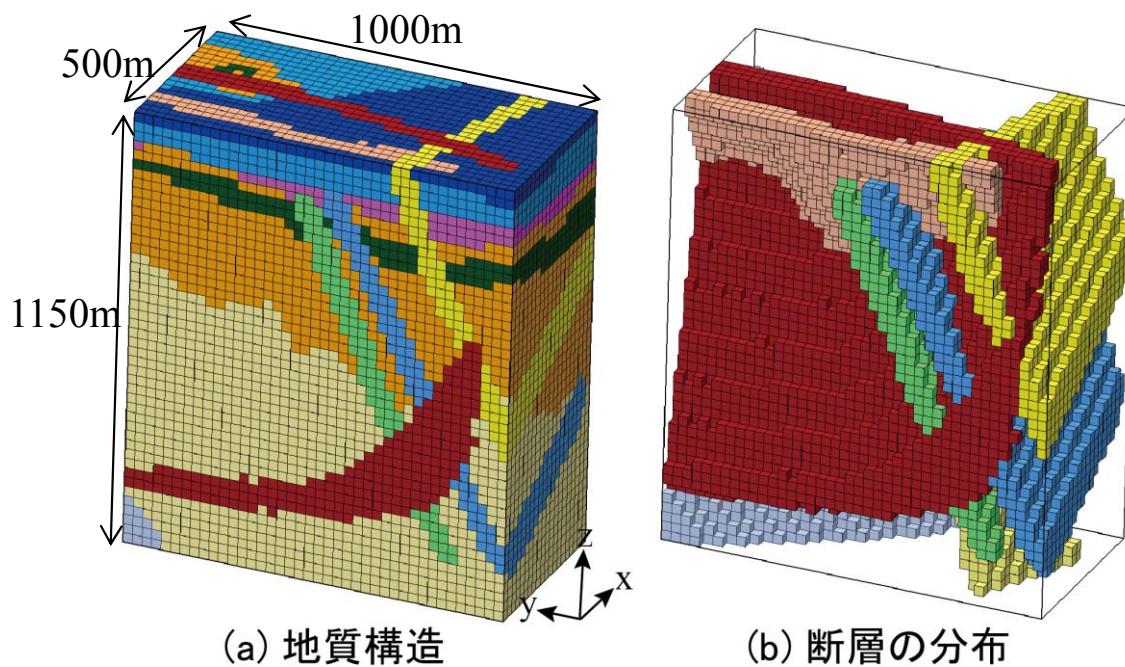
## 事例②のまとめ

- ・ 事前情報が少ない場合でもアンサンブルカルマンフィルタにより水理地質構造の推定が可能であった。
- ・ 逐次データ同化による逆解析の精度は、各観測点が経験する水圧応答の大きさや時間遅れの影響を受ける。
- ・ 観測誤差(ノイズ)の逆解析の精度に対する影響を評価した結果、小さな誤差であれば、透水係数の不均質性評価が可能であることが分かった。

# 事例③:データ同化実験による地下水観測位置の検討

ねらい:データ同化に有効な地下水観測位置を把握したい

- 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

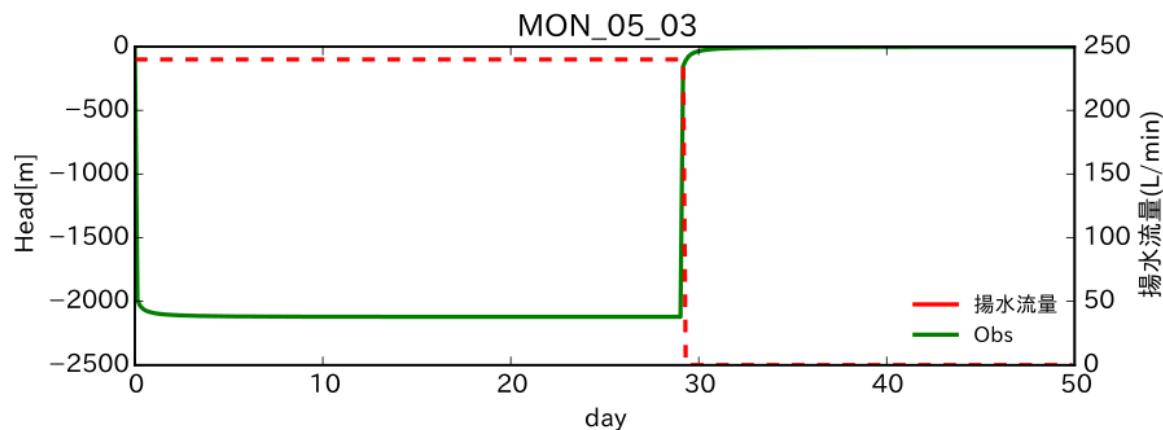


地質区分名称	対数透水係数(m/s)
明世/本郷累層(基底礫岩)	-6.3
土岐夾炭累層	-6.6
土岐夾炭累層(基底礫岩)	-5.3
土岐花崗岩(UHFD)	-7.5
土岐花崗岩(LAFZ)	-6.0
土岐花崗岩(LSFD)	-7.7
月吉断層に伴う割れ目帯	-9.0
S200_15_2	-5.2
SH180_07	-5.1
SH180_08	-6.3
SH180_09	-6.0
SB3_11	-9.0
S200_15	-9.0

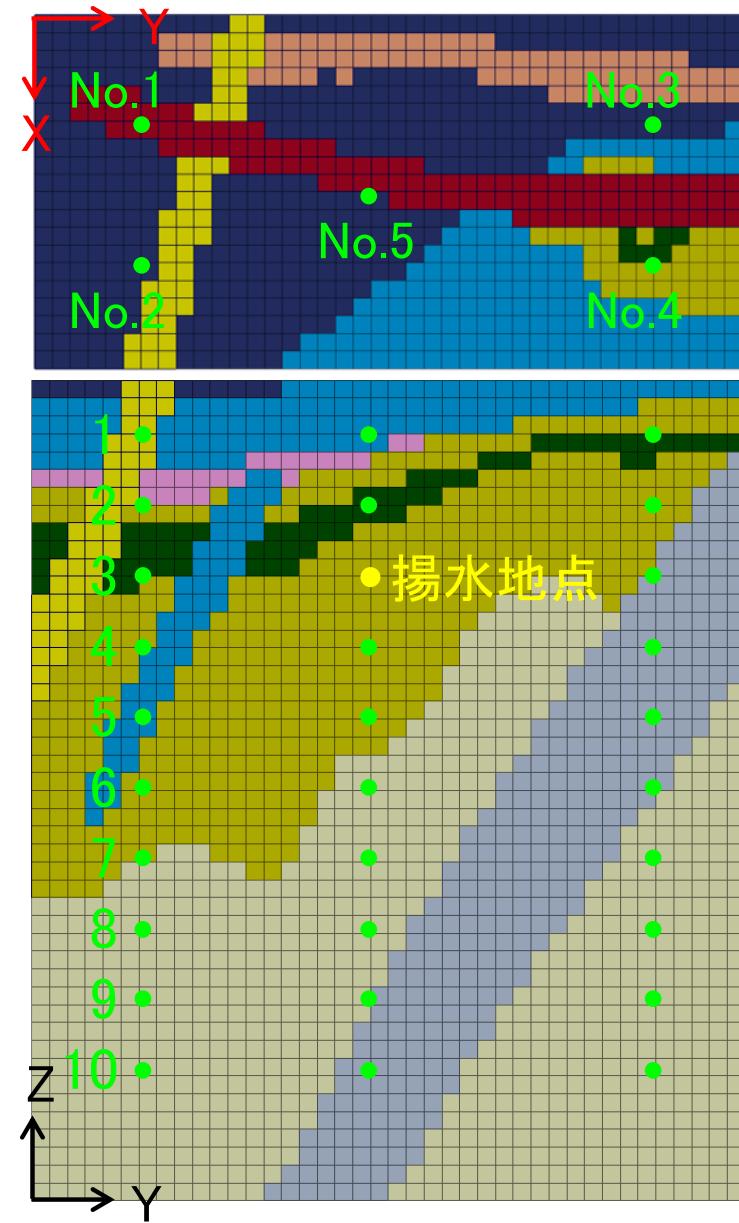
各地層の透水係数(真値)

# 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

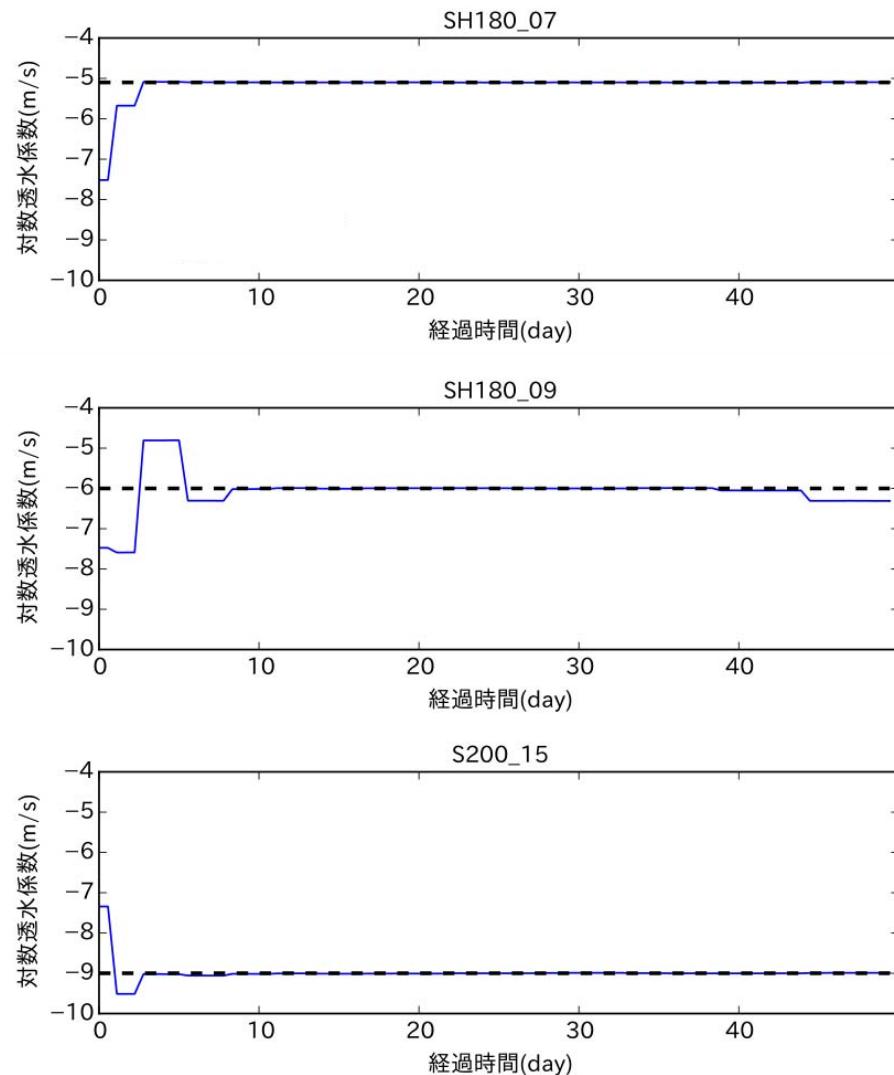
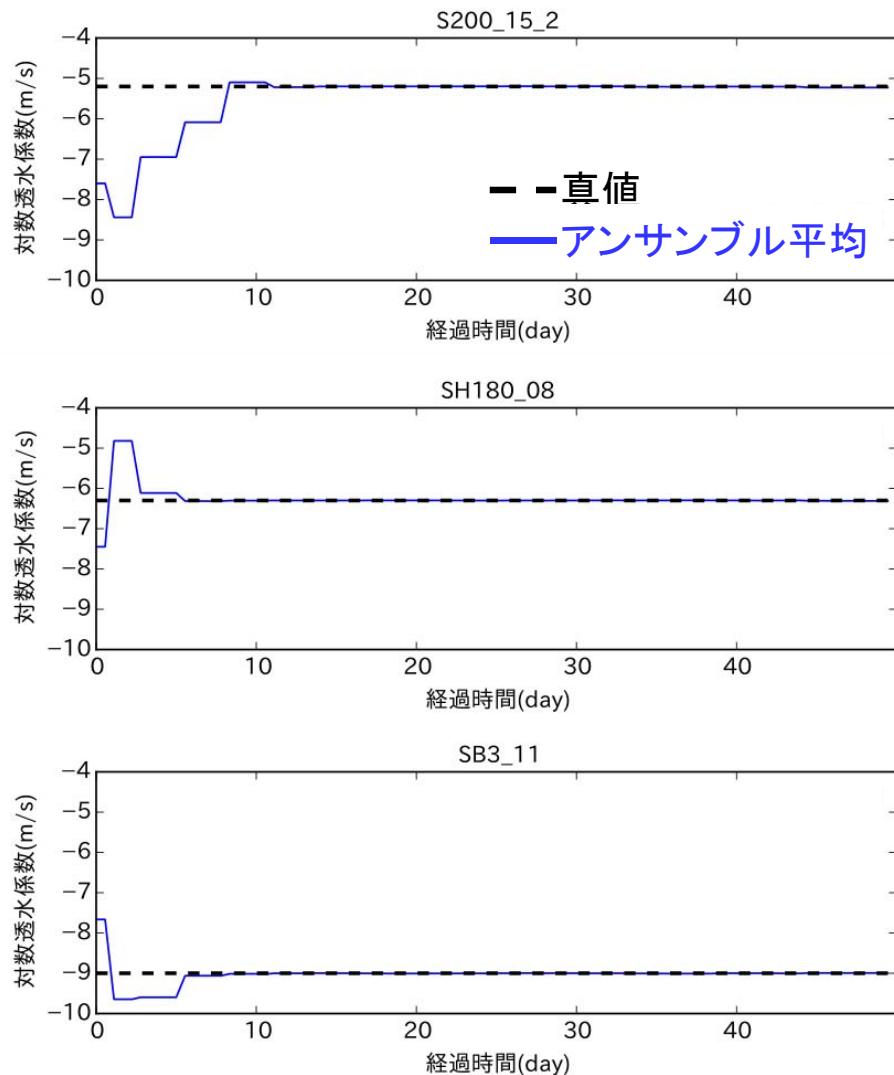


# 検討ケース

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

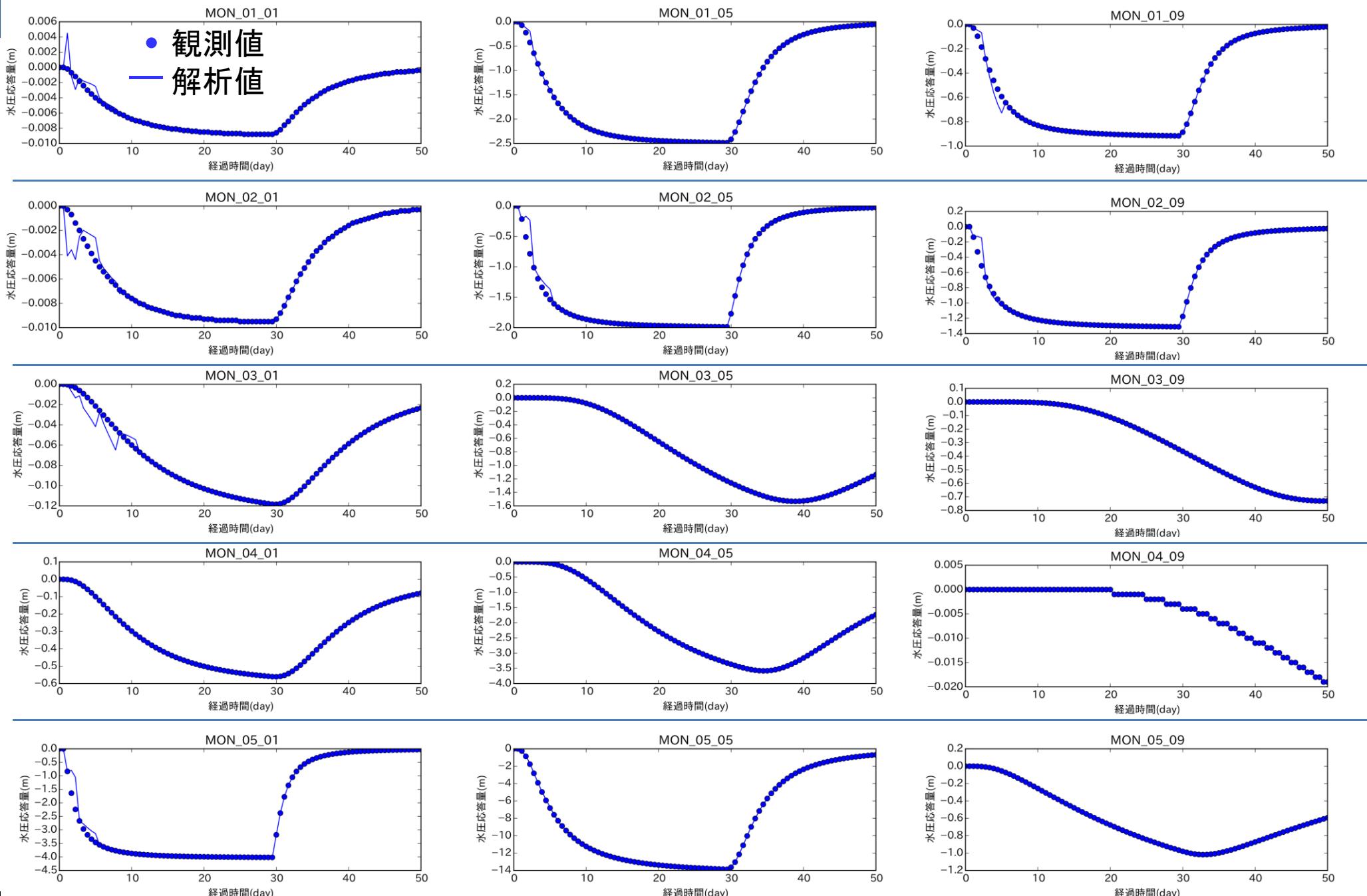
- ・ モデル同定が成功した基本ケースAに対し、観測点数を半減したケースB～Dの逆解析結果に着目

# 透水係数の推定結果(基本ケースA)



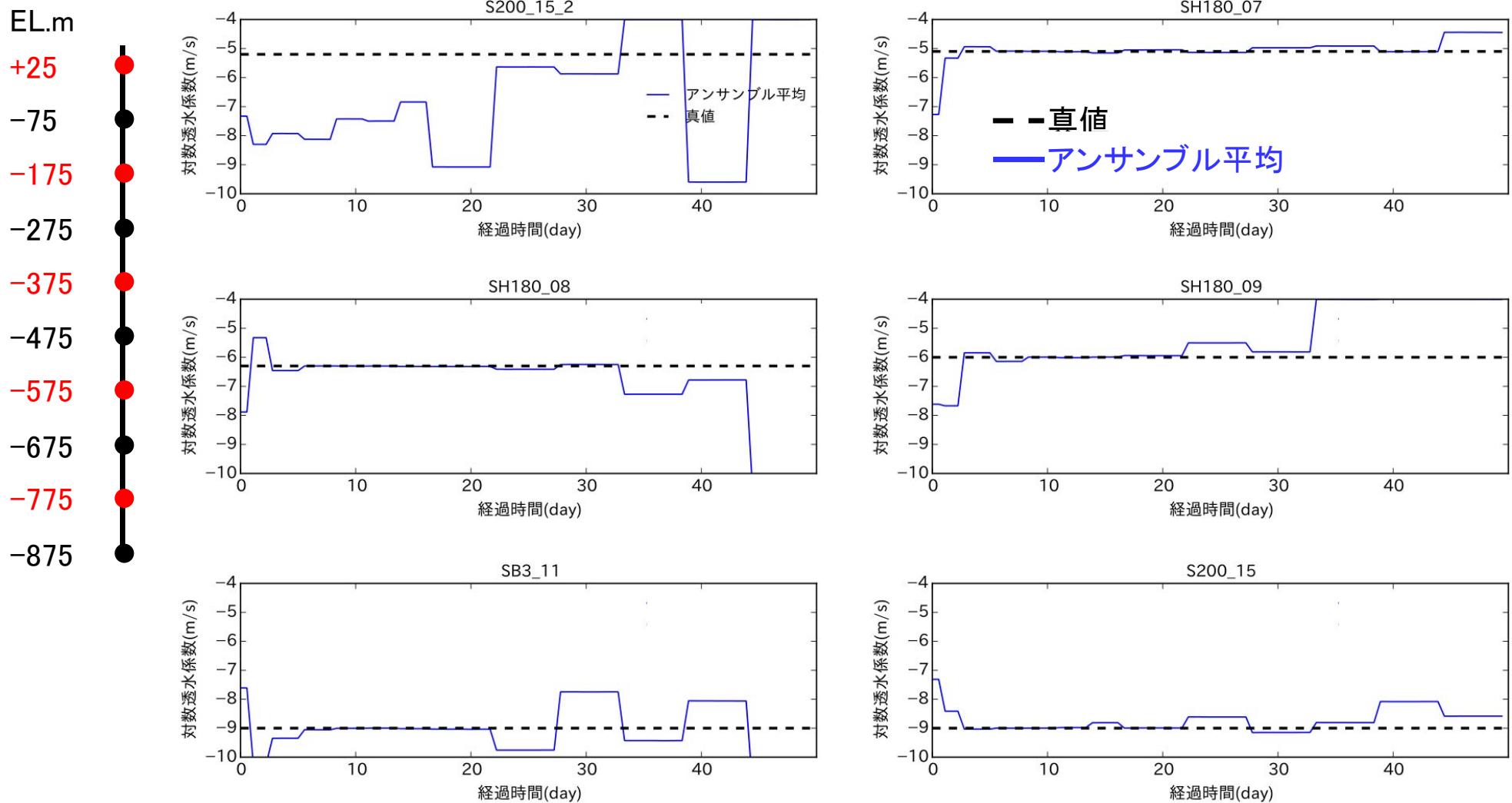
各断層とも概ね透水係数の真値を推定可能。

# 水圧観測の再現結果の例(基本ケースA)



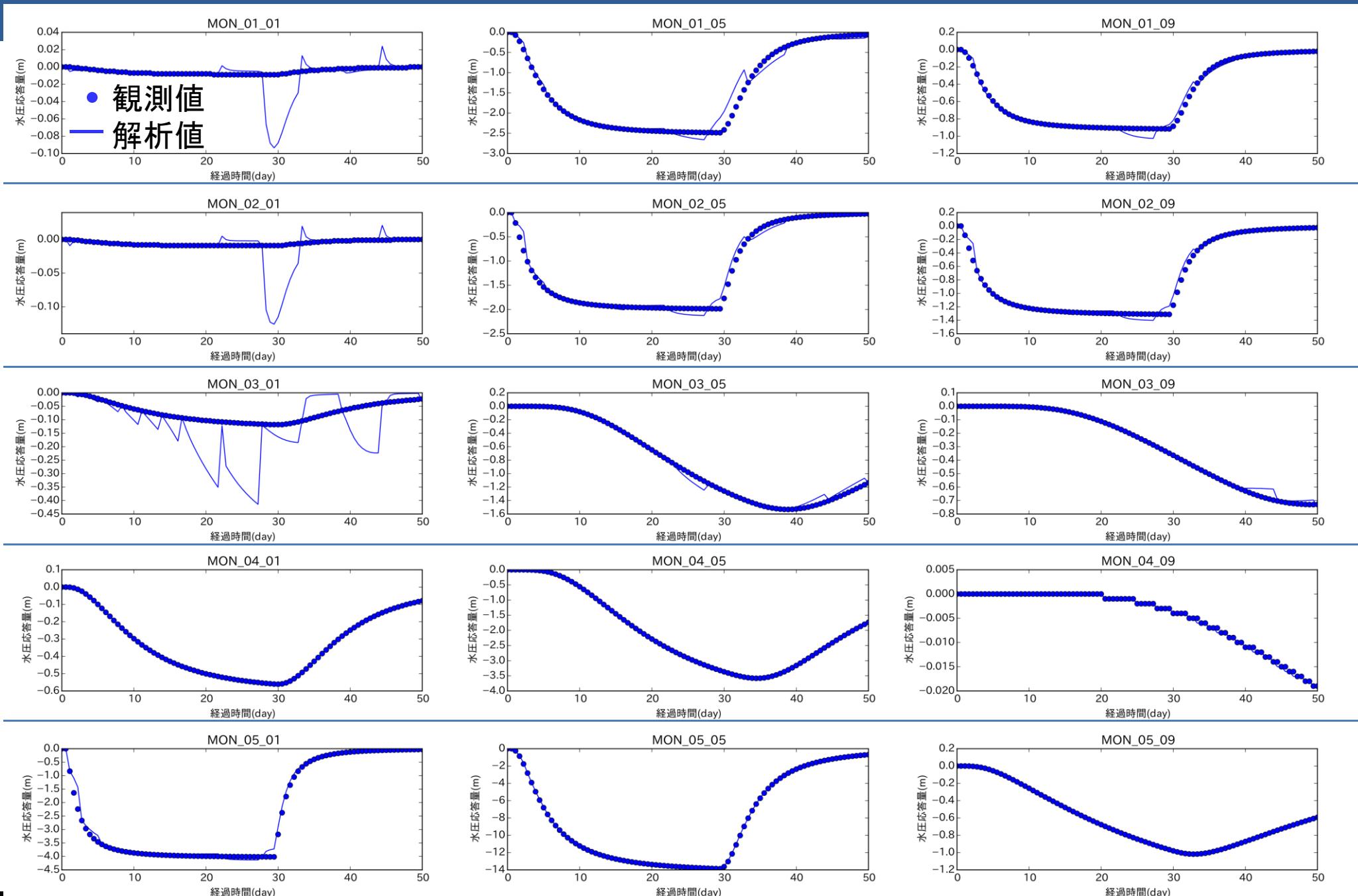
# 透水係数の推定結果(ケースB)

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



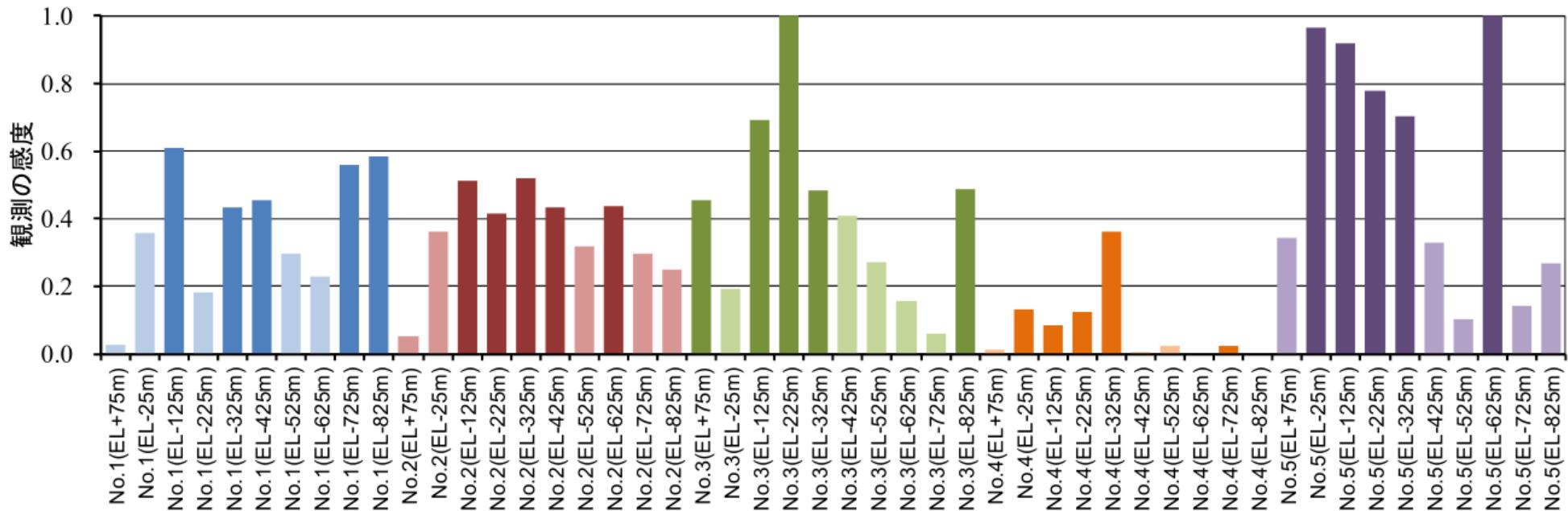
観測の情報量が減少したことで真値の同定が困難に。

# 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)

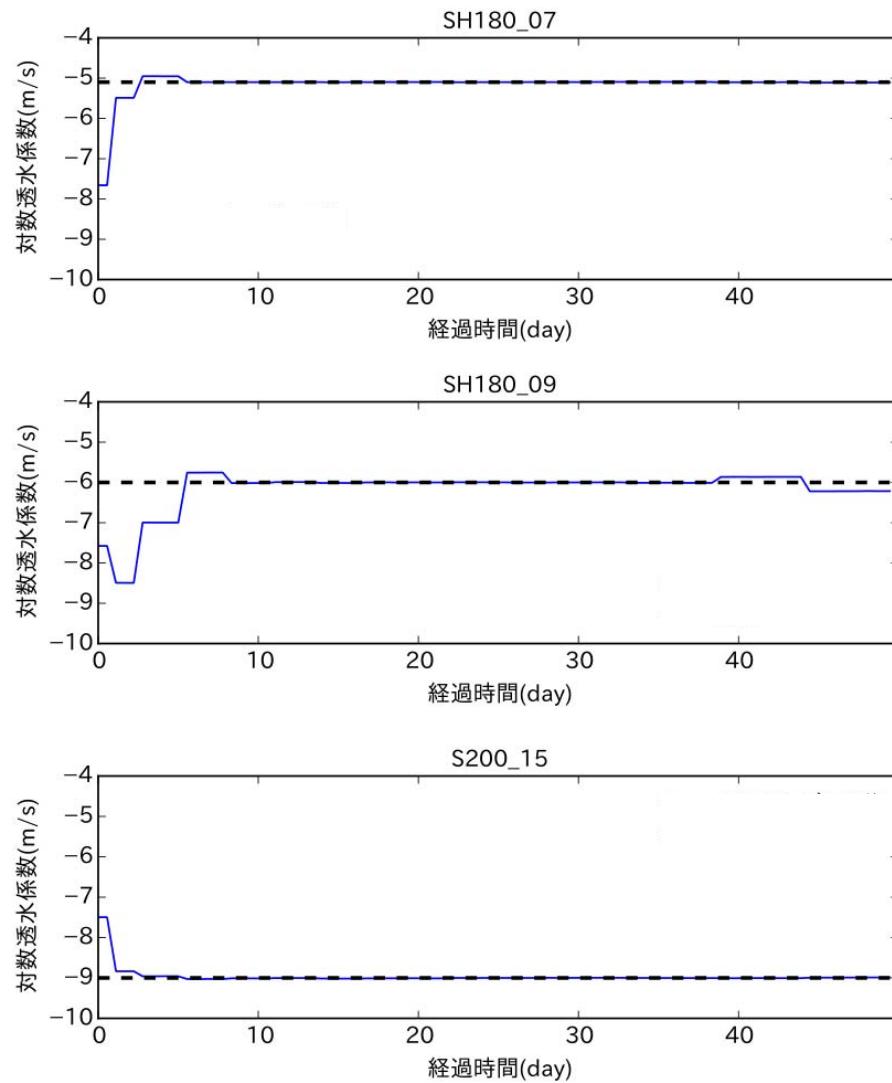
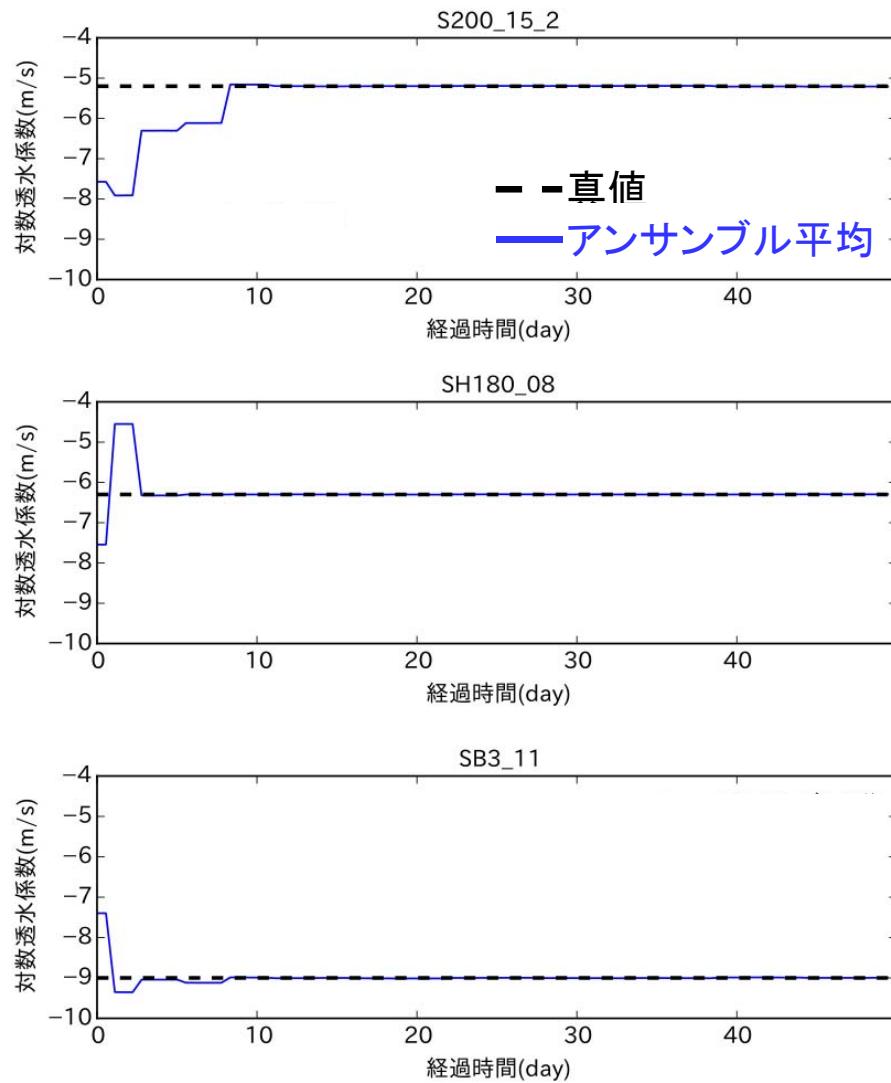
各観測点の感度(モデル同定時の寄与度)を算出



- 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。

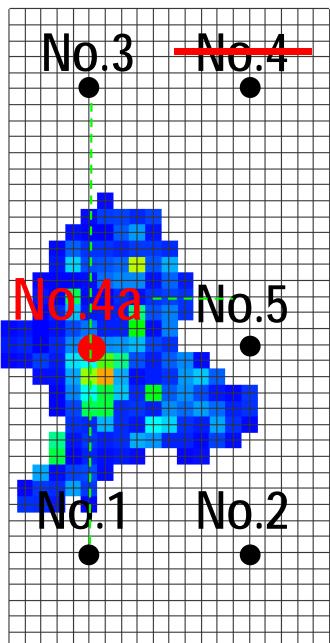
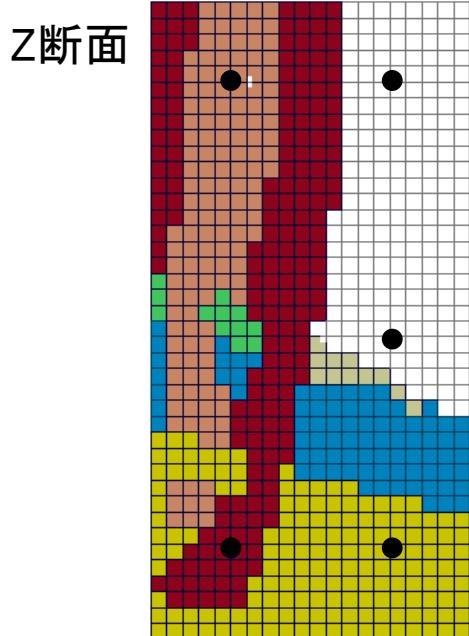
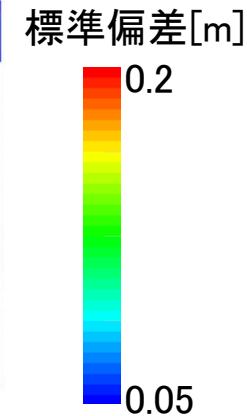
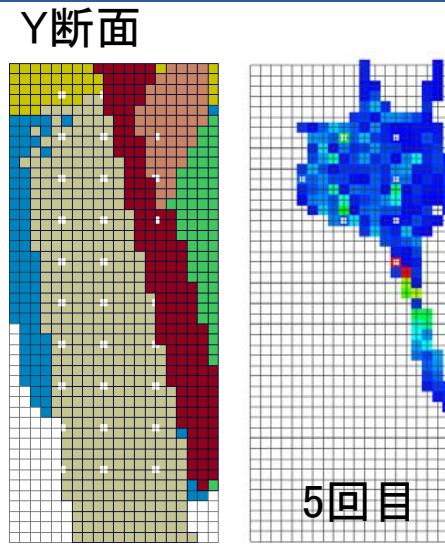
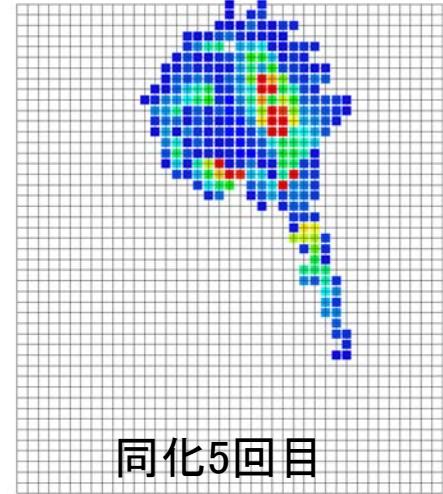
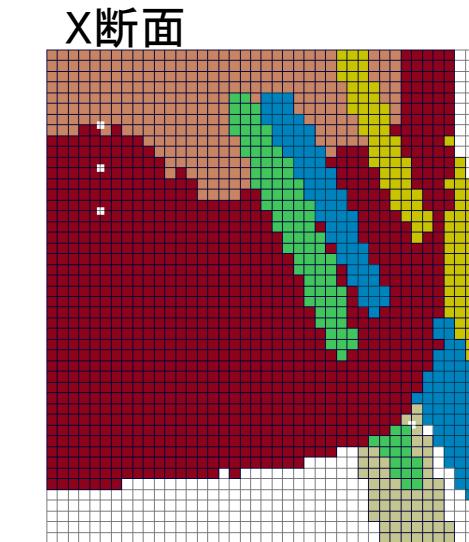
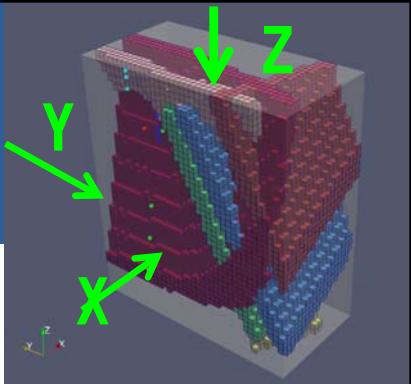
ケースC: 各孔で感度の上位5点(図中濃色)のみを使用

# 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)

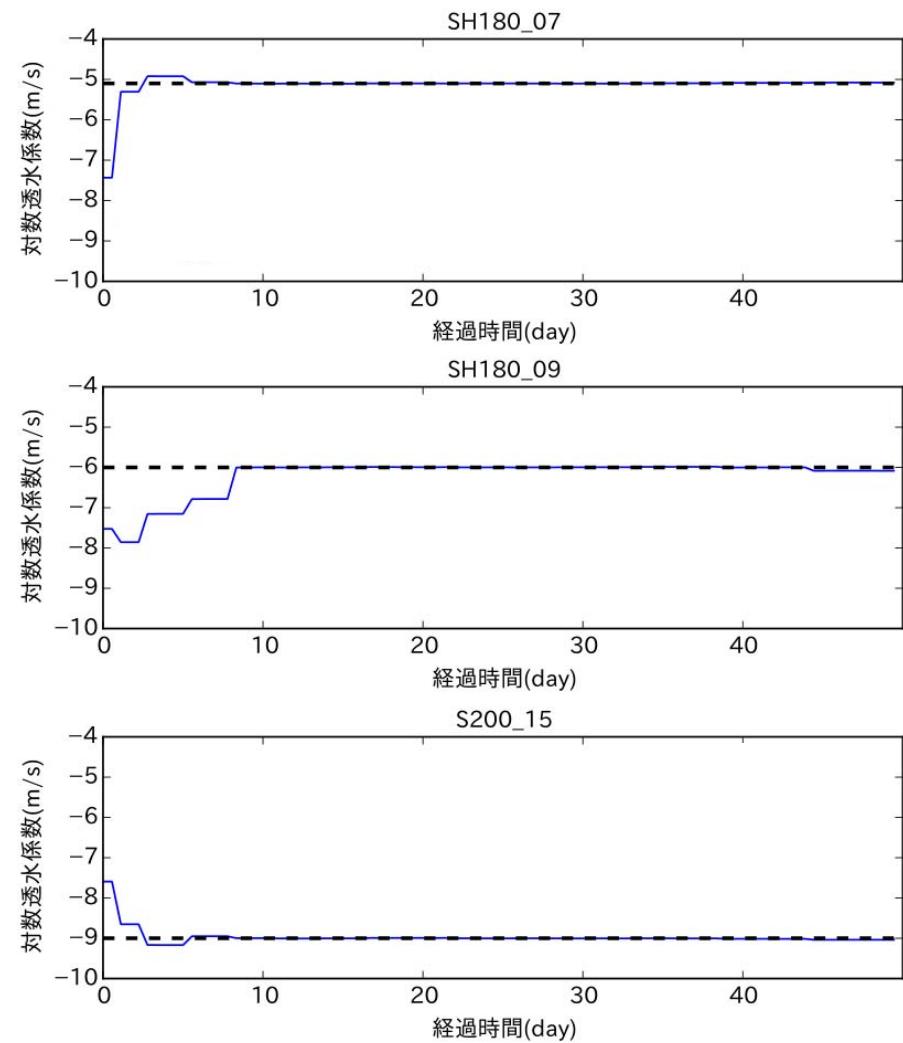
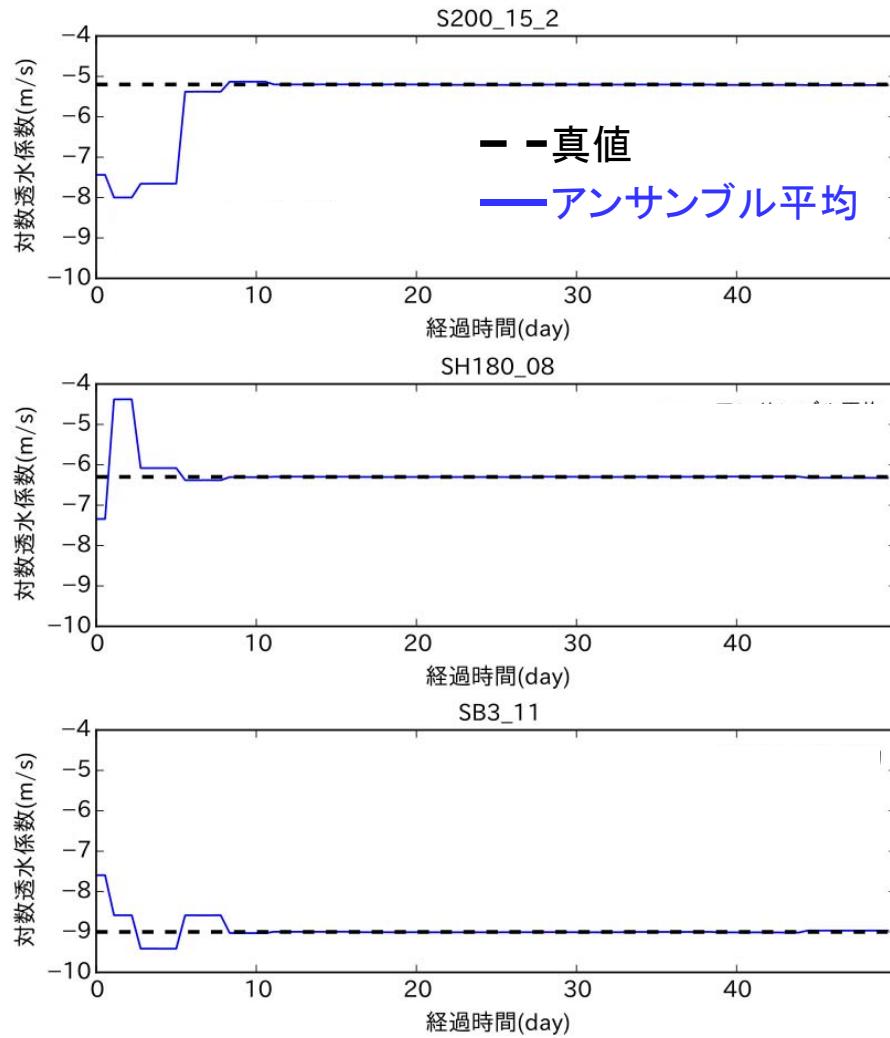


透水係数の不確かさの影響が大きい領域が特定の場所に存在

## 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。

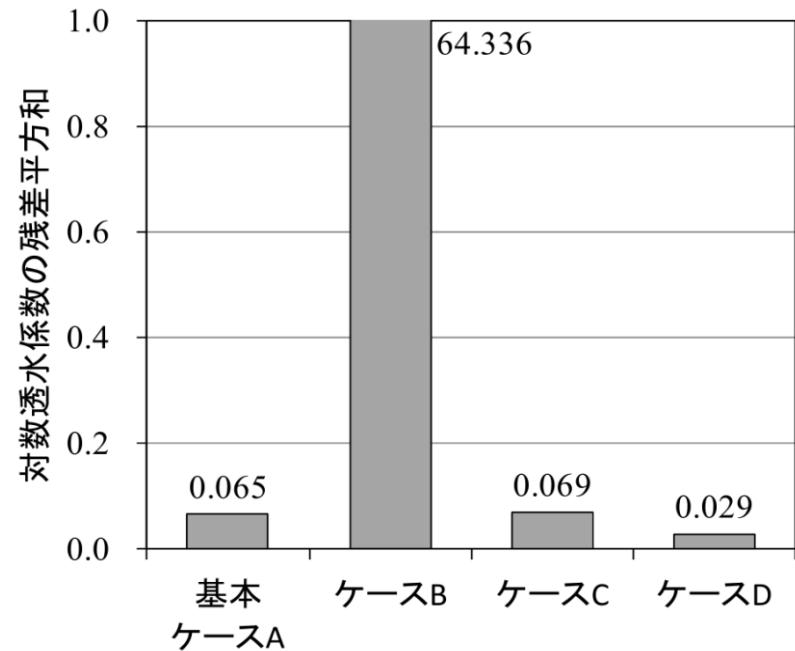
# 透水係数の推定結果(ケースD)



不確かな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③のまとめ

- ・アンサンブルカルマンフィルタの結果に基づいて観測位置を選定することで限られた観測点数でも高精度に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することで、想定した地下水流動に基づき、有効な観測位置を提案できる可能性がある。
- ・想定した水理地質モデルの誤差が観測位置の選定結果に与える影響についても確認が必要



# 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: 地下水流動解析モデルのキャリブレーション
  - 事例②: 水理地質構造の不確かさの低減
  - 事例③: データ同化実験による地下水観測位置の検討
3. 土木分野におけるデータ同化の活用方法

# データ同化による解析モデルの信頼性確保

## ① モデル検証と修正の繰り返し

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

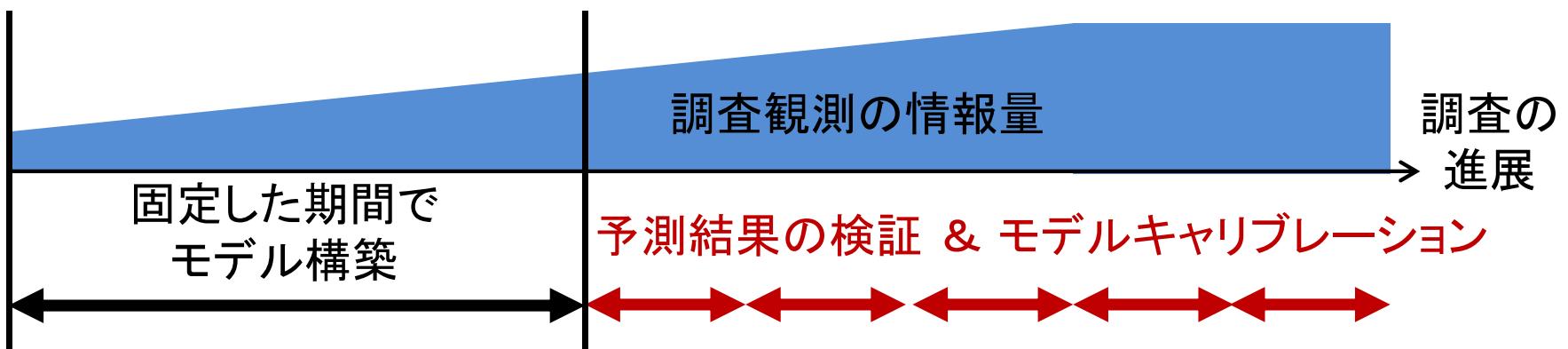
## ② 不確かさの低減

- 不確かさの厳密なモデル化は困難だが、観測結果という“事実”で条件付ける(conditioning)ことで低減が可能。

$$\text{ベイズ更新 } P(M|E) = P(M)L(E|M)/C$$

$P(M|E)$ : 観測結果に条件付けられた事後確率分布

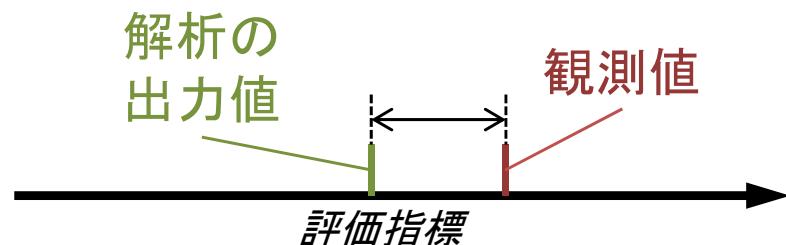
$P(M)$ : 事前確率分布  $L(E|M)$ : 観測結果に関する尤度



# 解析結果の妥当性検証とデータ同化の関係

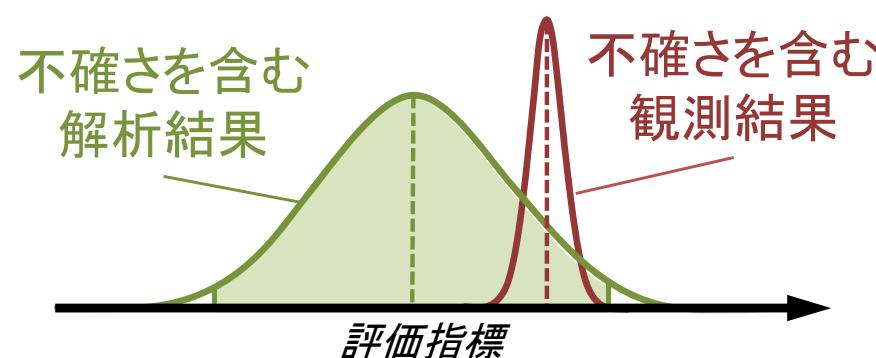
不確かさの大きい地下水流动モデルの妥当性検証(Validation)は容易ではないが、データ同化により解析結果の不確かさを低減できる

## 現 状



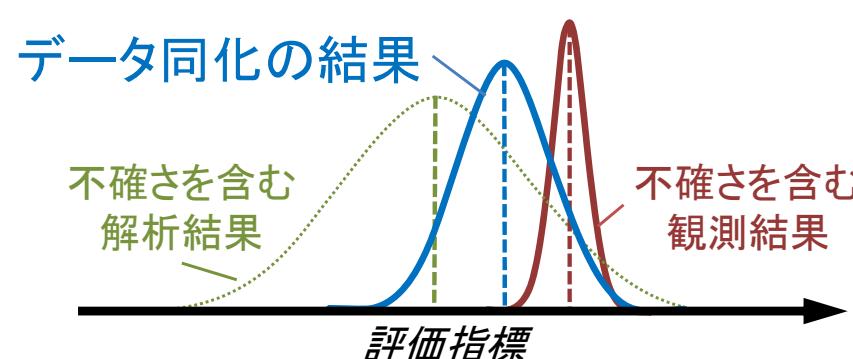
- ✓ 解析プログラムの検証
- ✓ 誤差の大きさ

## V&Vに基づく検証



- ✓ 解析プログラムの検証
- ✓ 誤差の大きさ
- ✓ 結果の確からしさ

## データ同化



- ✓ 解析プログラムの検証
- ✓ 誤差の大きさ
- ✓ 結果の確からしさ
- ✓ 不確かさの低減

# 土木分野におけるデータ同化の用途

- モデルキャリブレーション
  - シミュレーションの精度向上
- パラメータ同定
  - 物性パラメータの変化検知(例:構造物の損傷検知)
- アンサンブル予測
  - 解析結果の信頼性評価
- 観測システムシミュレーション実験
  - 合理的な観測位置の選定
- オンライン予測
  - 高精度な将来予測(例:情報化施工の高度化)



**CAEとしての工学シミュレーションの役割が大きくなることを期待**

# 紹介事例のソース

- 事例①

Yamamoto, S., Honda, M., Suzuki, M., & Sakurai, H. :

Use of Data Assimilation to Model Groundwater Flow for a Real Underground Structure.  
ISRM International Symposium – 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014.

- 事例②

山本真哉、本多眞、櫻井英行、尾上博則、増本清:

アンサンブルカルマンフィルタによる透水係数の空間的不均質性の推定

日本地下水学会2015年秋季講演会講演要旨 pp.114–117, 2015.

- 事例③

山本真哉、櫻井英行、尾上博則、増本清:

地下水流动解析の逆問題における観測位置選定に関する検討

日本地下水学会2016年秋季講演会講演要旨 pp.90–93, 2016.

ご清聴ありがとうございました。