

深地層の研究施設計画検討委員会(第11回)

幌延深地層研究計画における 第2/3段階の進捗状況と第1段階の評価 1) 水理地質構造と地下水流動

平成23年9月5日

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門
幌延深地層研究ユニット

岩盤中の水理に関する調査研究



	第1段階:地上からの調査	第2段階:地上からの調査 結果の妥当性評価	第2段階の到達目標
安全評価	第1段階モデル(広域) の構築・流動解析(H19モデル) ・表層水理調査, 地表地質調査, 物理探査, 深層ボーリング調査(計11本) ・地質図スケールの断層を決定 論的に取り扱うとともに, 水理 学的に不均質な地層の透水性 分布を確率論的にモデル化	水頭の実測値を用 いた妥当性の確認 (H21, 22モデル) ・情報量と精度との関連 性を評価 ・パイロットボーリング等の 精査により解析精度の 向上可能性を評価	第3段階モデル (狭域)の構築・ 流動解析 ・坑道スケールの 水理地質構造 モデルを構築し, 詳細スケールで の地下水流動 特性を評価
地下施設の設計・ 施工		湧水量の実測値を用 いた妥当性の確認 ・確率論モデルをベースにし パイロットボーリング等で確 認された透水性構造を決 定論的にコンディショニン グしてモデルを構築	350m調査坑道 での湧水量予測 モデルの構築 地下施設の設計・施 工に必要な坑道内へ の湧水量や周辺の水 位低下を予測する調 査解析手法の構築 (止水対策への基盤 情報の提供)

▲ 現段階(250m)

本研究で目標とする成果

地上からの調査段階で構築した水理地質構造モデルおよび地下水流動結果解析による水頭値、湧水量の予測結果と第2段階で取得された実測値との比較を通じて、

- 地上からの調査段階での効果的な調査の順番，組み合わせ，データの量・質，レイアウトの提示(主な報告事項)
- 地上からの調査段階での限界の提示
- 不確実性を低減する上で不可欠なデータ等の抽出

2

解析対象領域



- 広域スケール
 - 流域境界(北側、東側)
 - 河川境界(南側)
 - 海岸線境界(西側)
- 施設スケール
 - 流域境界

※解析対象領域は、幌延町内で実施した地上からの調査範囲を含む広域地下水流動系の涵養域と流出域で区切られたエリアとして設定

3

深層ボーリング孔・地上物理探査測線配置図



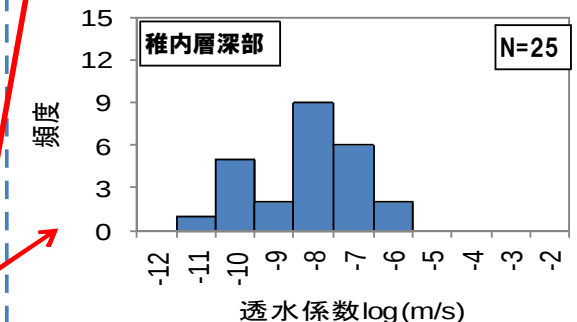
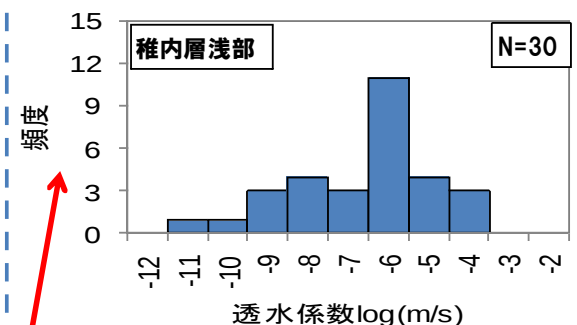
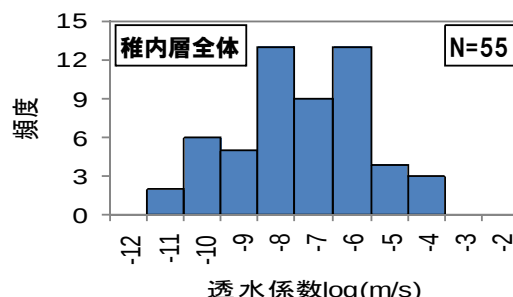
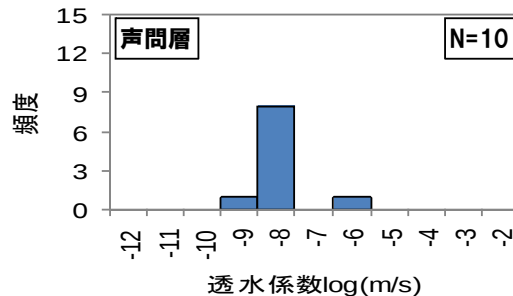
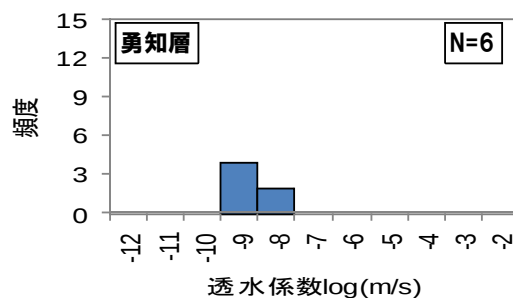
<第1段階調査の調査項目>

- 既存文献調査
- 地表地質調査, 表層水理調査
- 地上物理探査(二次元反射法地震探査(測線の総延長約26km)/二次元電磁, 電気探査)
- 深層ボーリング調査(計11孔: 総孔長6,650m)
 - ・コア観察/孔壁画像観察
 - ・物理検層/水みち検層
 - ・水理試験(シーケンシャル)
 - ・採水調査
 - ・室内物性試験, 化学分析等

各地層, 地質構造の透水係数データ

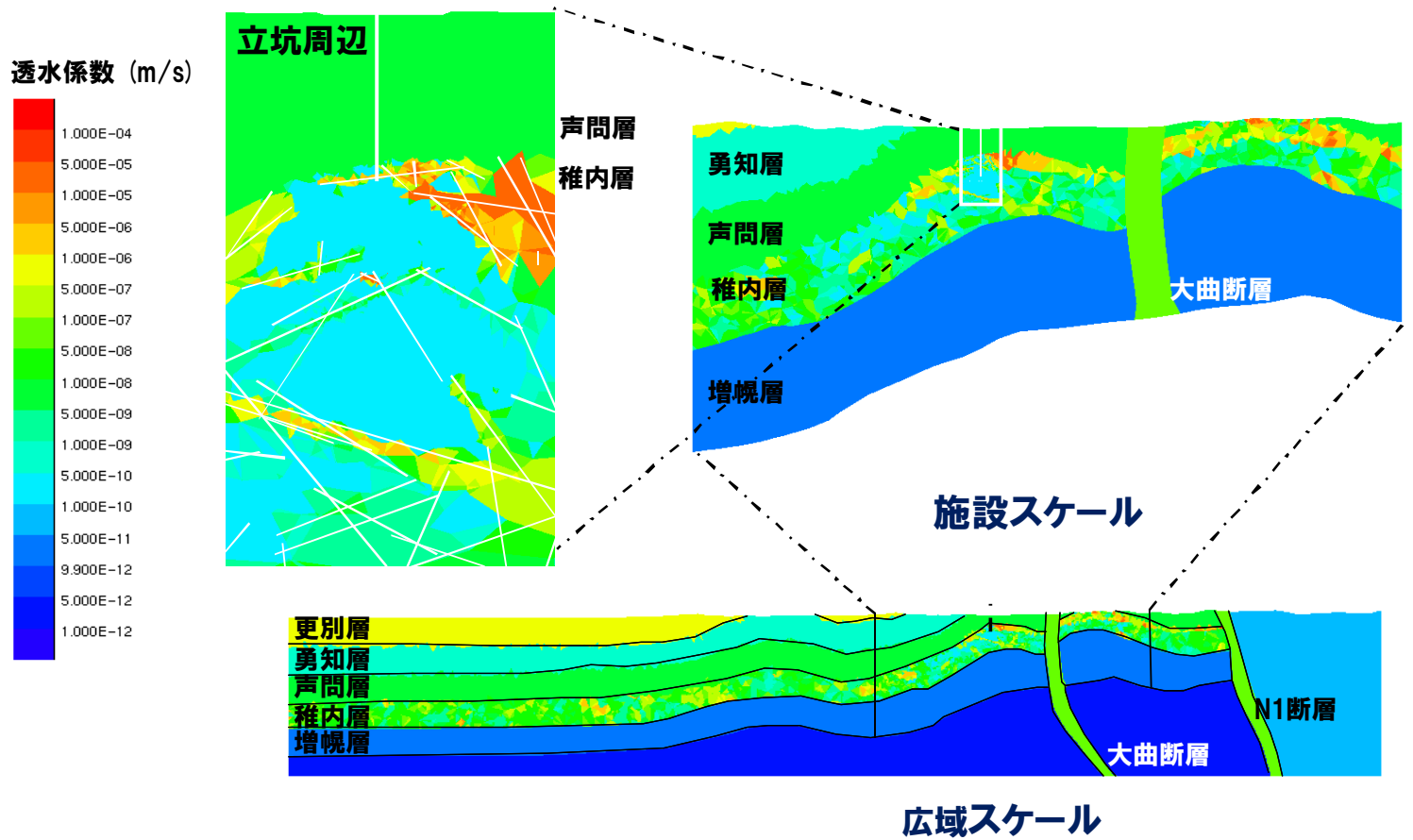
	透水係数 log (m/s)
更別層以浅	-6.00
勇知層	-9.14 ±0.52 (1σ)
声間層	-8.33 ±0.69 (1σ)
稚内層	浅部 -7.15 ±1.80 (1σ) 深部 -8.58 ±1.31 (1σ)
増幌層	-10.3
増幌層以深	-11.3
大曲断層	-7.00
N1断層	-7.00
東側領域	-10.00

※大曲断層以外は文献値を使用



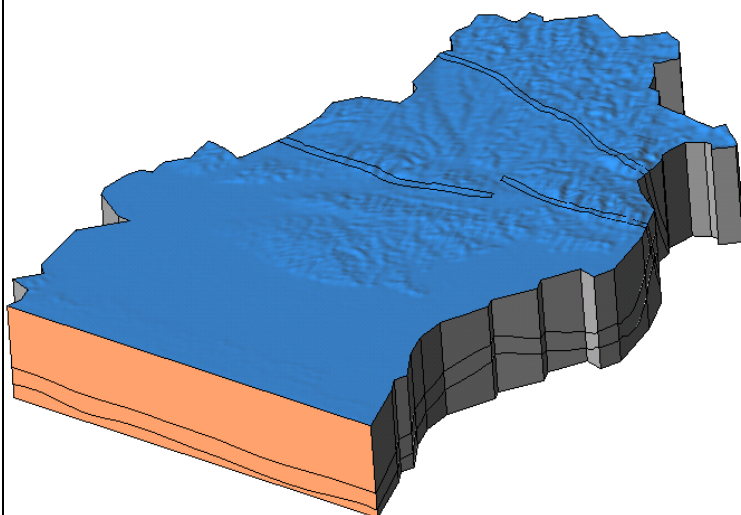
対象母岩である稚内層に透水不均質性が認められることから, 稚内層中の水理地質構造を不均質媒体として確率論的にモデル化(その他の地層, 地質構造は均質媒体として決定論的にモデル化) 5

本調査研究で構築した水理地質構造モデルの概要

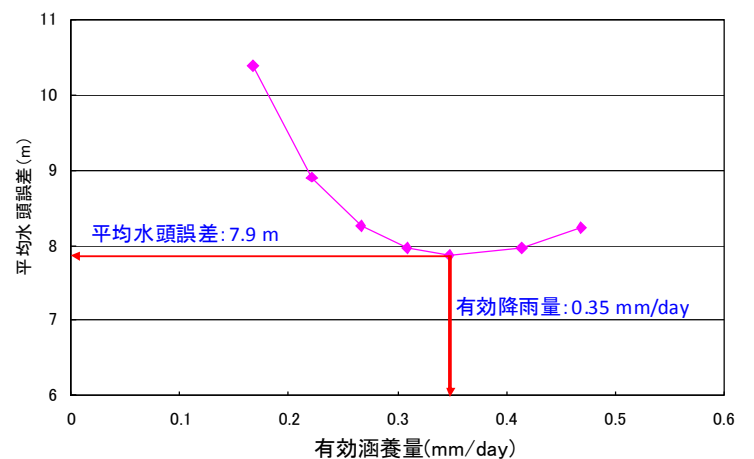


6

境界条件の設定



涵養量のキャリブレーション



- 地表境界 : 降雨境界
- 海側側方境界 : 定水頭境界(海水面標高)
- その他の側方境界: 不透水境界

- 試錐孔内の水圧観測データを再現できる降雨涵養量を導出
- 有効涵養量の範囲 : 0.1~0.5mm/day

7

1)安全評価関連

地上からの調査段階で構築された水理地質構造モデルの妥当性の確認と調査解析手法の体系化

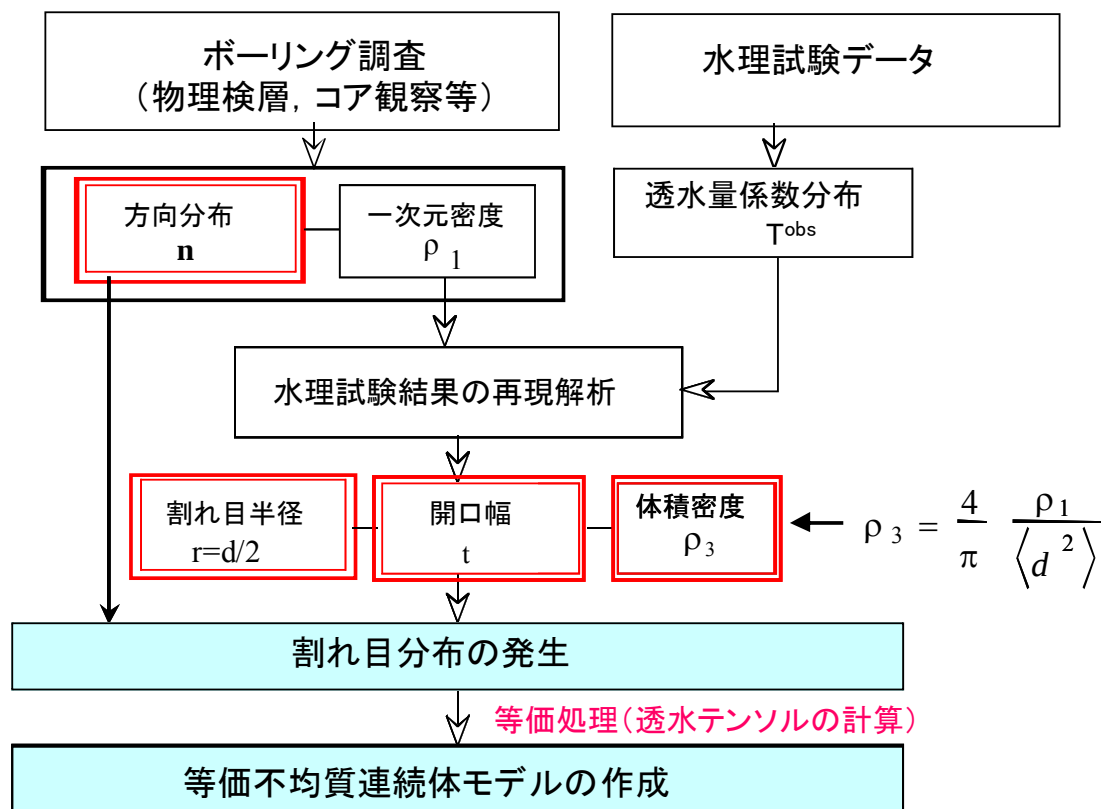
稚内層を対象とした確率論モデル構築フロー

調査・試験
データ

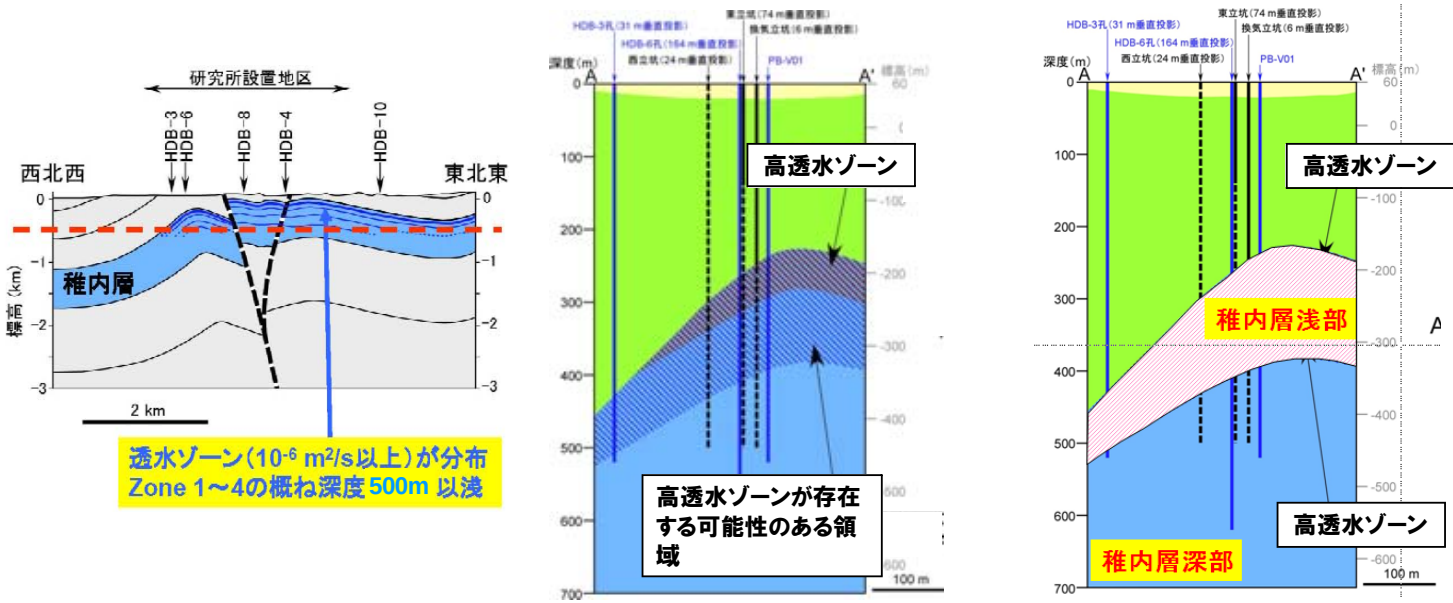
割れ目分布の
モデル化

割れ目の発生

等価モデルの
作成



稚内層中の水理地質構造区分



H19モデル(第1段階最終モデル):稚内層を深度500mの上下で2層に区分

HDB1~11

コア観察/BHTV/物理検層/流体検層/シーケンシャル水理試験により、透水性構造を詳細に区分・抽出し、各層内で確率論的にモデル化

H20モデル:稚内層を褶曲構造に合わせて3層に区分

HDB1~11+パイロット孔

H19と同一

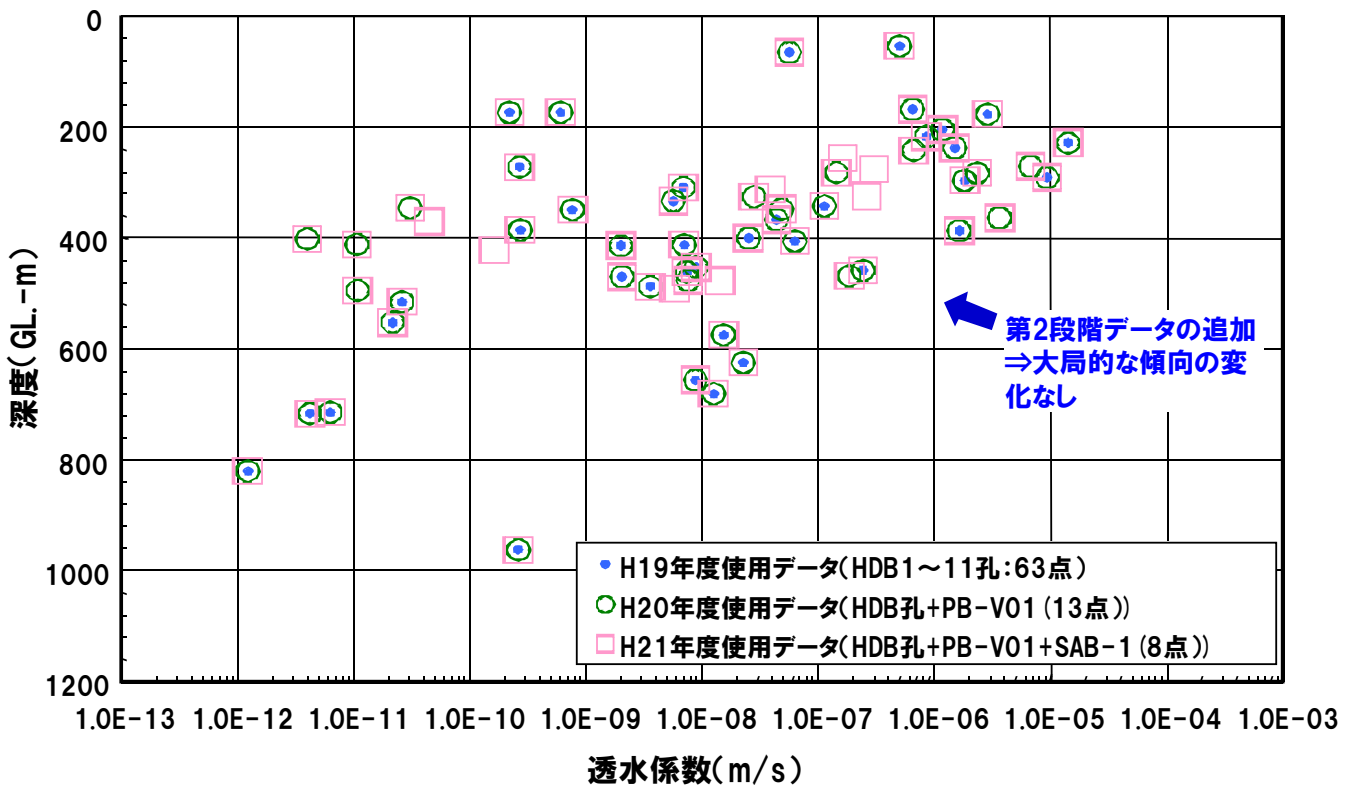
H21モデル:稚内層中を褶曲構造に合わせて2層に区分/断層の解釈を見直し

HDB1~11+パイロット孔+観測孔

地質観察結果と水理調査結果に基づき、厚さ10cm以上の断層岩を含む高角断層を主要な透水性構造として再抽出してモデル化

10

透水係数データの深度分布



第1段階モデル(H19)⇒計63点の水理試験データを使用

第2段階モデル(H20, 21)⇒計21点の立坑周辺ボーリングデータを追加

11

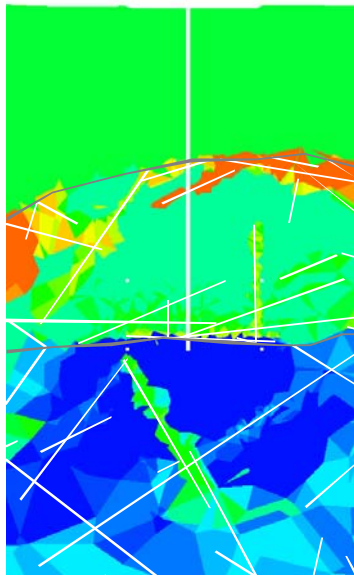
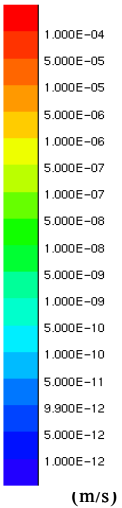
各年度に構築された水理地質構造モデル

H19モデル

H20モデル

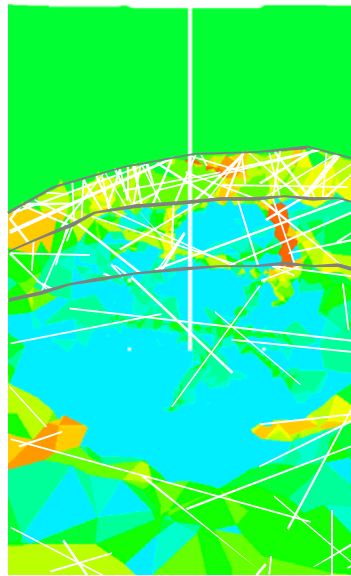
H21モデル

透水係数



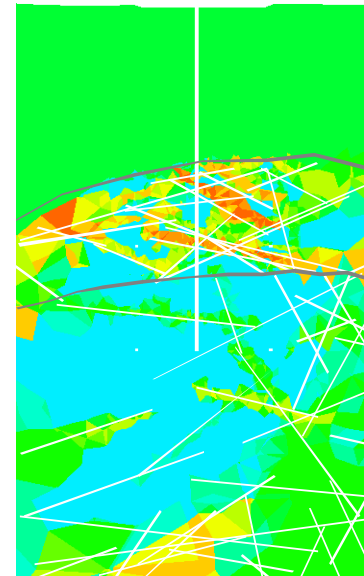
リアライゼーションNo.7

確率論14ケース
決定論1ケース



リアライゼーションNo.1

確率論10ケース
決定論1ケース

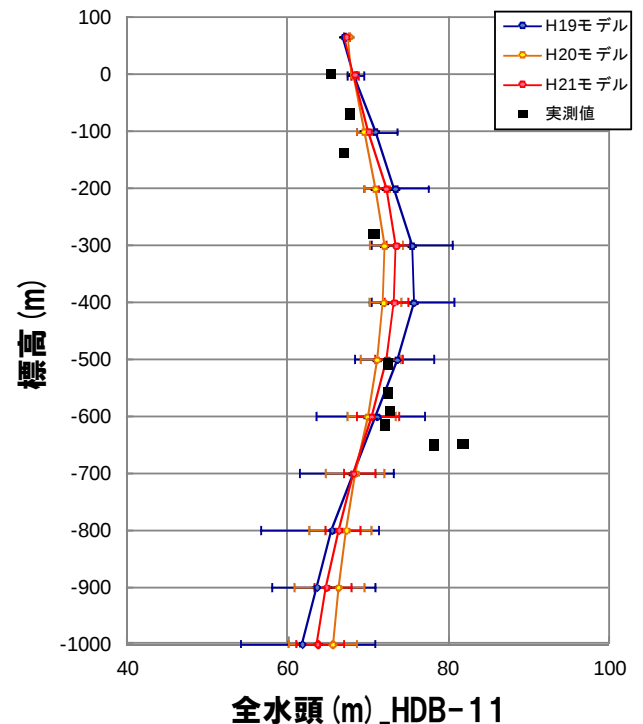
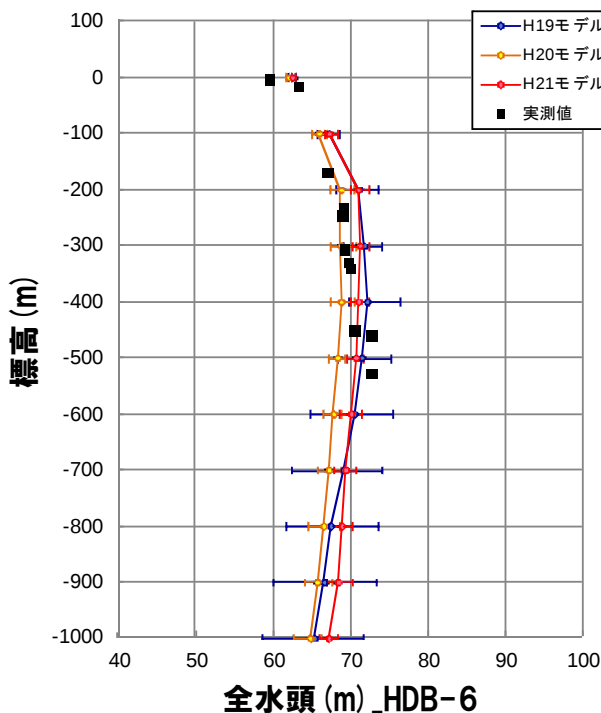


リアライゼーションNo.4

確率論10ケース
決定論1ケース

水頭予測結果と実測値との対比(1/2)

相対的に再現性の良いボーリング孔の例

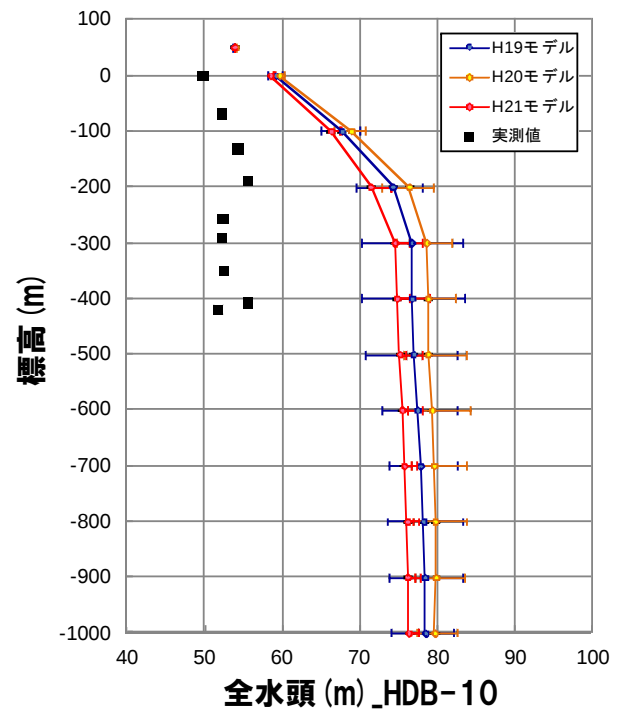
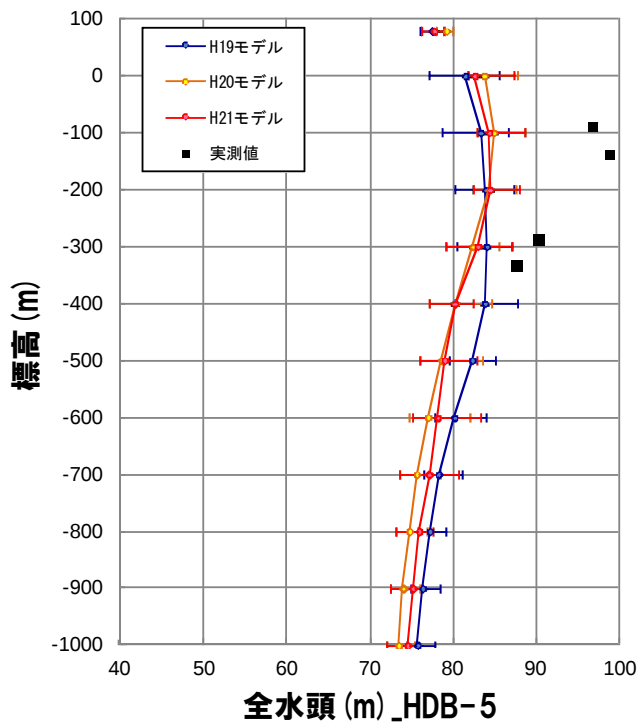


HDB-11孔の650m以深が十分に再現性されていない

⇒ 被圧傾向にある低透水性岩盤($T=10^{-9}$ [m²/sec] 以下)が決定論的にモデル化されていない
ことに起因する可能性

水頭予測結果と実測値との対比(2/2)

相対的に再現性の低いボーリング孔の例



⇒両孔とも深度全体に大きなずれが認められる(深度プロファイルは類似)。両孔は離間距離1500m程度で隣接しており、実測値においても大きな差があることが特徴(両孔間の不透水性構造の存在等が可能性の一つ) 14

モデルの妥当性の確認手法

モデル(解析結果)の妥当性の確認にはFB(偏差)-NMSE(正規化平均二乗誤差)プロットを使用
⇒FB-NMSEプロットでは観測値と解析値との差異および過大・過小の程度を表現可能

$$\bullet \text{FB (Fractional Bias)} = \frac{\overline{C_o} - \overline{C_s}}{0.5(\overline{C_o} + \overline{C_s})} \quad \bullet \text{NMSE (Normalized Mean Square Error)} = \frac{(\overline{C_o} - \overline{C_s})^2}{\overline{C_o} \overline{C_s}}$$

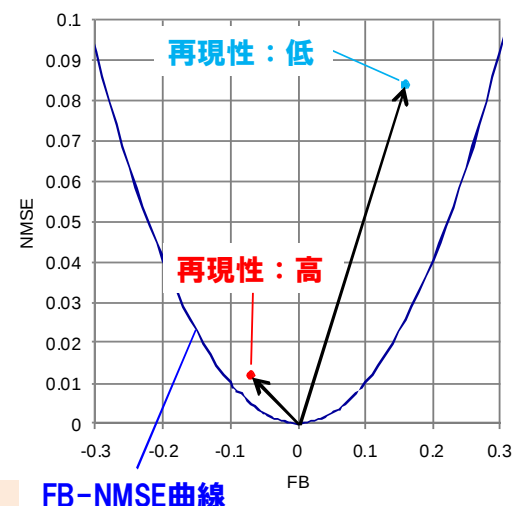
C_o : 実測値, $\overline{C_o}$: 実測値の平均値, C_s : 解析値, $\overline{C_s}$: 解析値の平均値

$$NMSE \geq \frac{4FB^2}{4 - FB^2}$$

- FBは0より大きいと過小評価, 0より小さいと過大評価であることを示し, FBのとりうる範囲は $-2 < FB < +2$
- FB-NMSEプロット上では, 実測値と解析値が完全に一致する場合に原点にプロットされ, 原点に近いほど再現性が高く, 原点から離れるほど再現性が低い

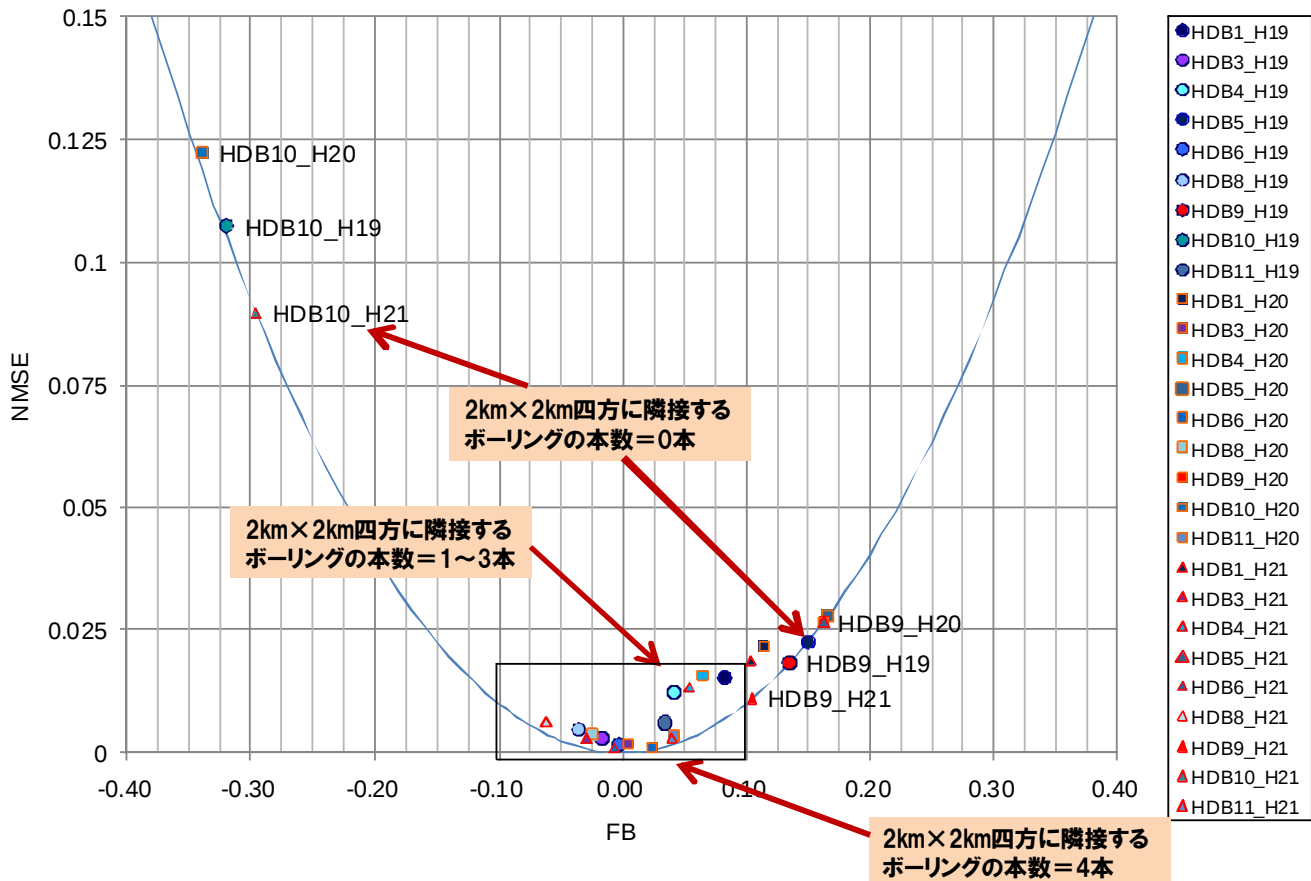


各解析結果は, FB-NMSEプロットで整理。原点からの距離を用いて実測値との再現性の程度を指標化



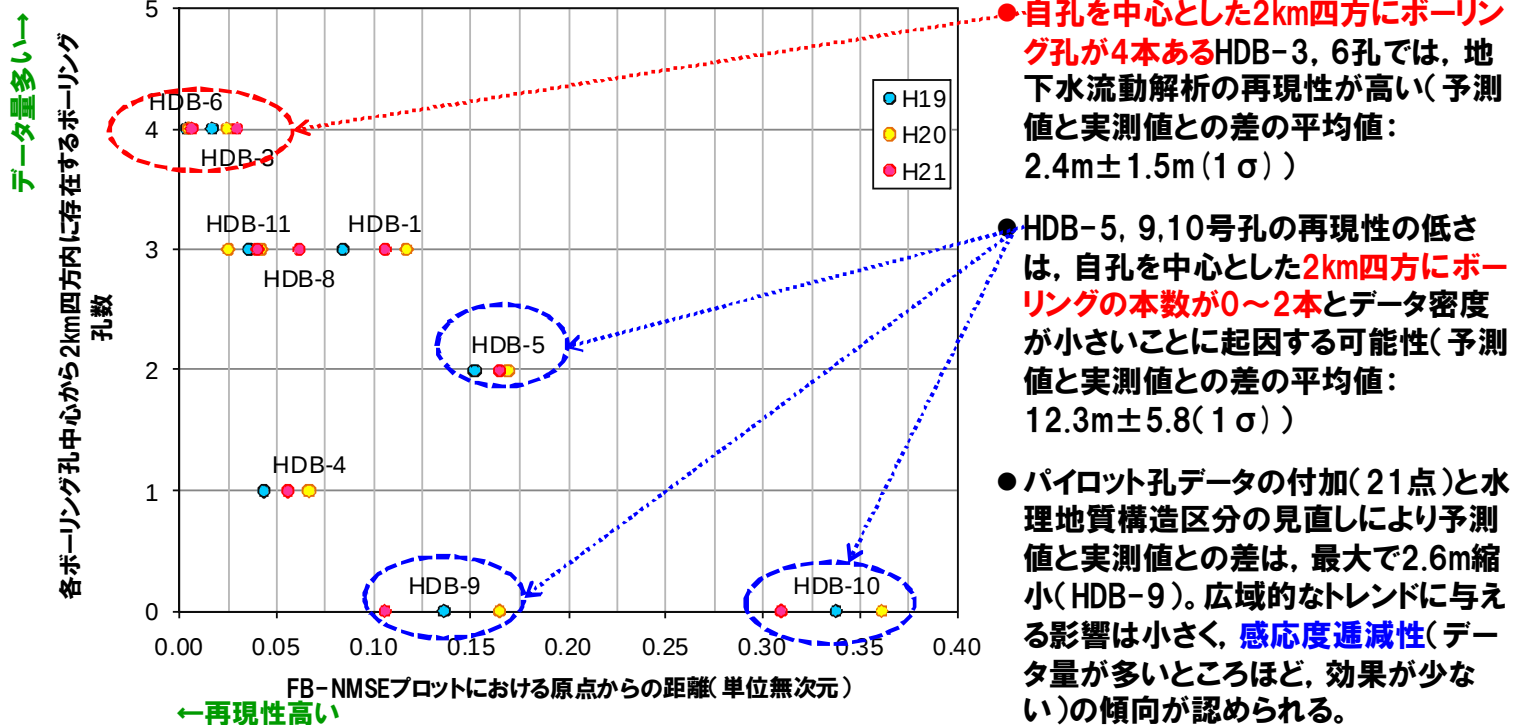
FB-NMSE曲線

モデルの妥当性の確認(FB-NMSEプロット)



16

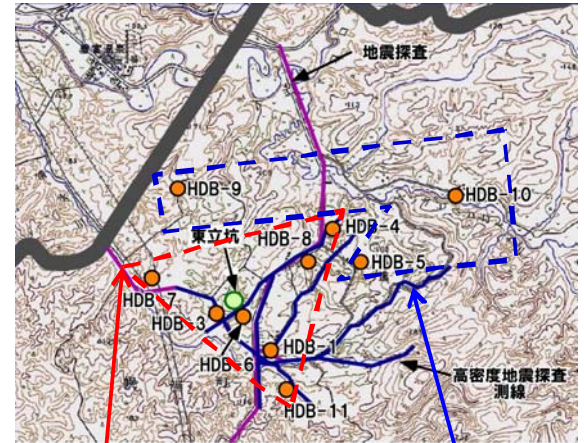
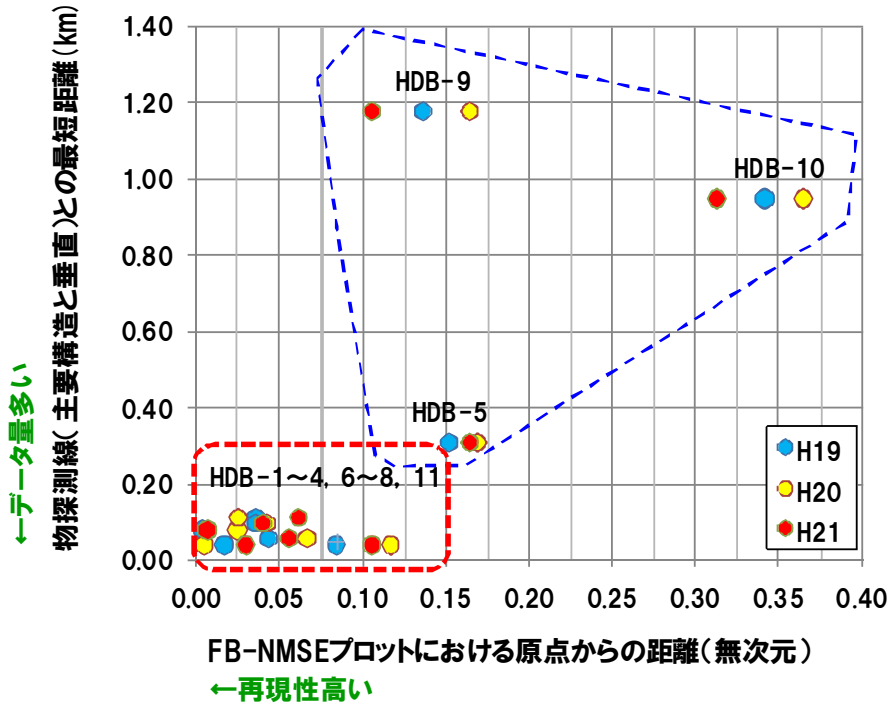
FB-NMSEプロットの原点からの距離とボーリング配置との関係



- ボーリング孔の粗密が広域的な地下水流動場の予測再現性に大きく影響
(水理試験点数や品質の確保は, ボーリング孔周辺の再現性を高めるのに一定の効果)
- ボーリング孔の粗密に応じた水理地質構造区分が必要

17

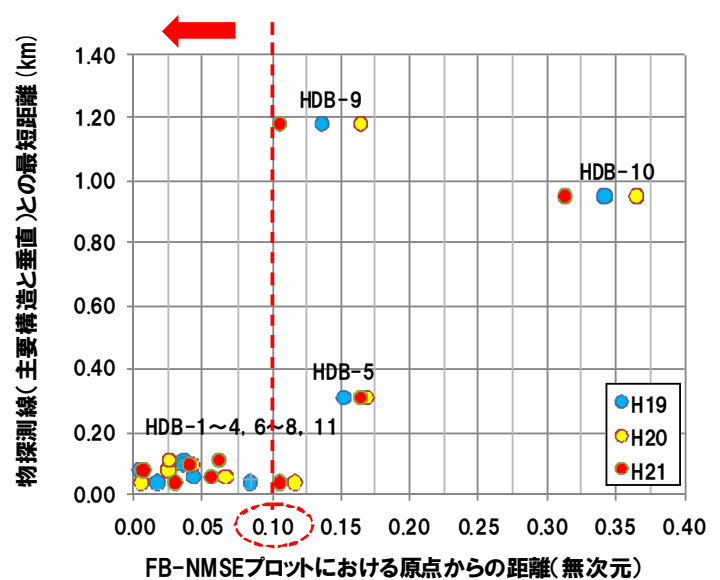
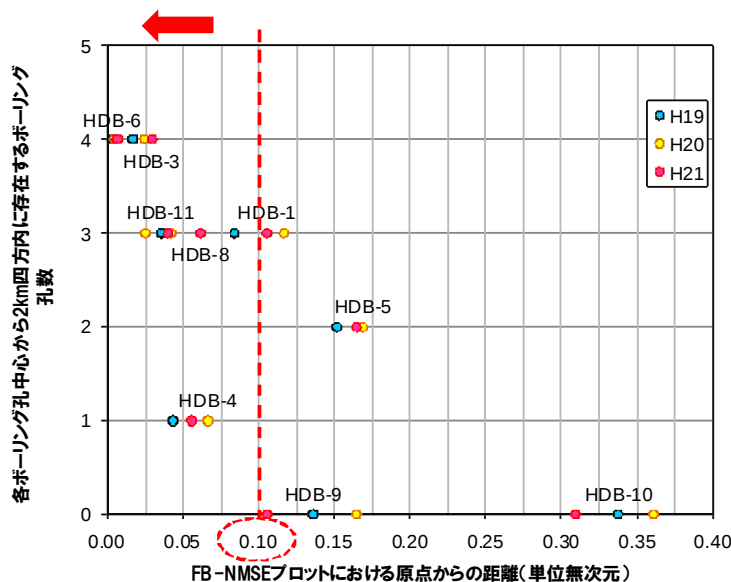
FB-NMSEプロットの原点からの距離と物理探査側線との関係



- ボーリング孔と反射法地震探査側線(主要構造の方向と交差する方向)との距離が約200mより小さい場合, 地下水流動解析による予測と実測との乖離差が少ない
- 約300m以上の離間距離を有する場合は, 予測と実測との差が相対的に大きい

18

相対的に再現性の良いボーリング孔・物理探査の条件



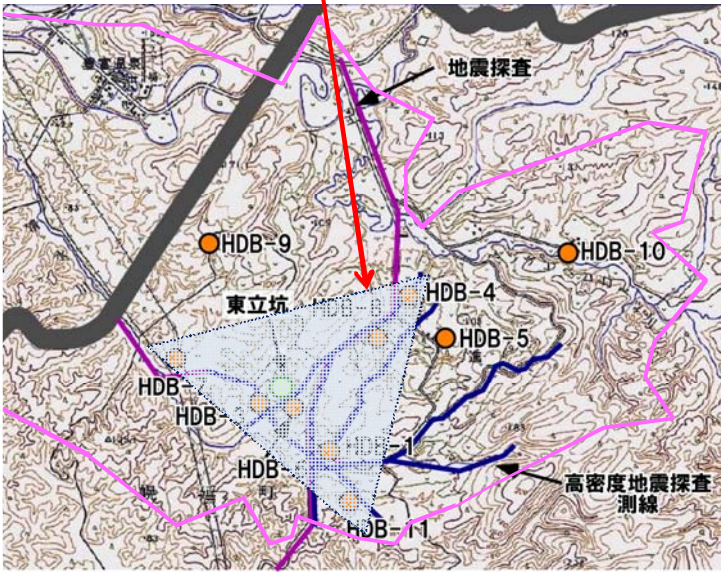
水頭の予測値と実測値との差が約5m以内(図中のプロット原点からの距離で0.1以下に相当)の箇所は,

- 自孔を中心として2km四方に存在するボーリング孔が1本以上
- ボーリング孔と反射法地震探査測線(主要構造に対して垂直方向)との最短距離が200m未満の**2つの十分条件**を有する

19

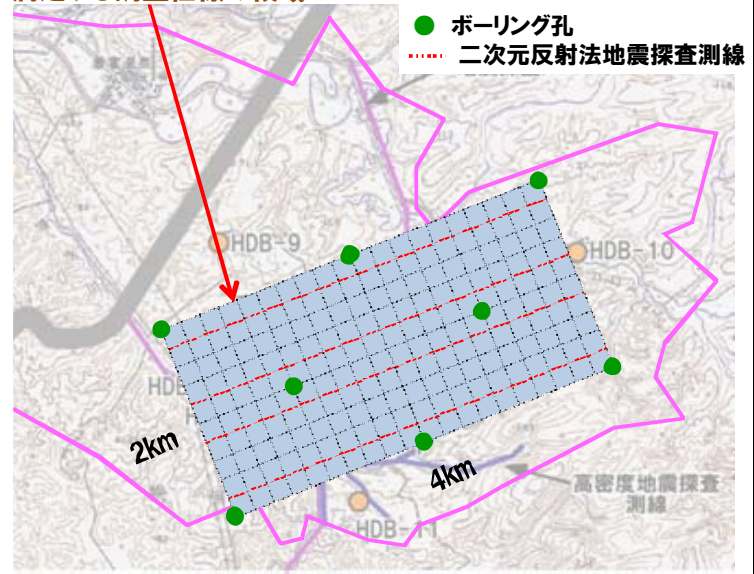
水頭の実測値と予測値の差が約5m以内の領域 実際の調査レイアウトと十分条件から導かれる調査レイアウトとの比較

第1段階調査で水頭の実測値と予測値の差が約5m以内の領域



ボーリング本数: 11本(総孔長: 6,650m)
二次元地震反射法探査測線: 約26km
領域面積: 約4km²

実測値と予測値の差が約5m以内の十分条件を最低減の数量で満足する調査仕様の領域



ボーリング本数: 8本(総孔長: 5,200m)
※予測と実測値の差が5m以下を示すボーリング孔の平均孔長650mを使用
二次元地震反射法探査測線(断層方向に直交): 16km
領域面積: 8km²

グリッド状に測線やボーリング孔を配置し、**データ間のばらつきを抑える**ことにより、第1段階の調査と同等未満の規模で、**2倍の領域を評価可能**⇒制約条件下では、予測値との実測値との乖離を地点・エリア毎に定量化し、目標値までイタレーティブに低減させる取り組みが重要

20

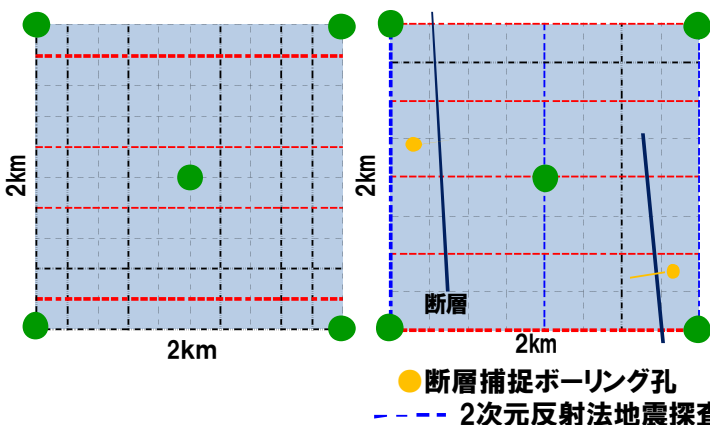
地上からの調査レイアウト(物理探査とボーリング調査)の詳細検討結果(1)

十分条件を最低限の数量で満足するレイアウト案の課題

- 必要十分条件ではないため、再現性の低い地点が発生する可能性(例: HDB-5⇒断層データの不足)
- 一般的に、物理探査測線は検証や原位置データの取得のためにボーリング孔上に配置。派生構造や胴切り断層などの存在可能性も考慮して、主要構造と平行方向にも補助的に測線を配置し、三元的に評価する例も多い。
- エリア内での予測精度は不均質(期待される水頭の実測値と予測値の差: 中心孔→約2m以内、四隅の周辺孔→約5m以内)

(課題解決のための方策案)

原案 → 修正案



- ①反射法地震探査測線で確認された断層を対象に断層ボーリングを掘削(断層の数毎/数100m程度、斜孔もしくはコントロール孔)
- ②断層に直交する地震探査3測線をボーリング孔上に配置し、更に十分条件を向上させる2本の測線をその間に追加(5測線×2km)/4km²
- ③断層平行方向の地震探査補助測線を追加:(3測線×2km=9km)/4km²

21

地上からの調査レイアウト(物理探査とボーリング調査)の詳細検討結果(2)

	第1段階調査	十分条件を最低限満たすレイアウト案	修正レイアウト案
ボーリング本数(総孔長)	11本(6,650m)	8本(5,200m)	11本(6,500m) ※断層を2条と想定
二次元反射法地震探査の総測線長	約26km	16km	30km ※補助測線を設定しない場合は20km
水頭の実測値と予測値との差が5m以内の領域面積	約4km ²	8km ²	8km ²

修正レイアウト案⇒第1段階調査と同等規模でほぼ2倍の領域を評価可能であるとともに、見落とし等の回避の効果も期待

●エリア端部での予測精度低下に関する検討

➢ エリア外の低解像度調査の有効性評価が必要(AIST沿岸域ボーリング, JNES涵養域・流出域ボーリング結果の活用)

●更なる調査数量の低減可能性に関する検討

➢ 三次元反射法地震探査, 地球統計学などの最新のモデリング技術の適用した場合の仮想評価／調査の組み合わせ方や順序の詳細評価を今後検討

●調査の実施が困難なエリアに対するアプローチ方法の検討

➢ 逆解析による水理地質構造場の推定技術／地質発達シミュレーションを用いた補間技術の開発を大学との研究協力により実施予定

残された課題と対応

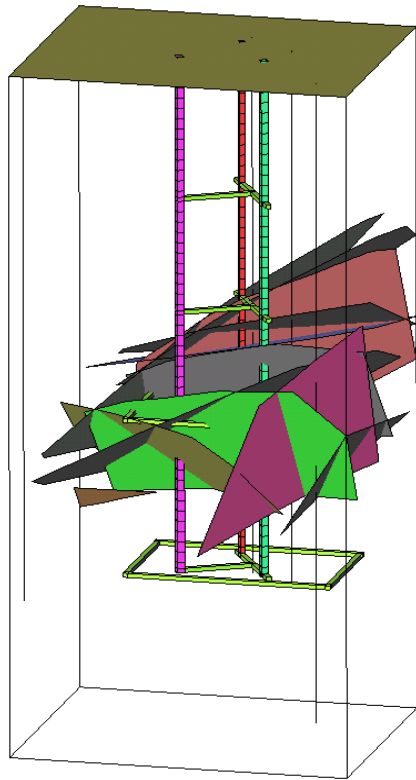
22

2)地下施設の設計・施工

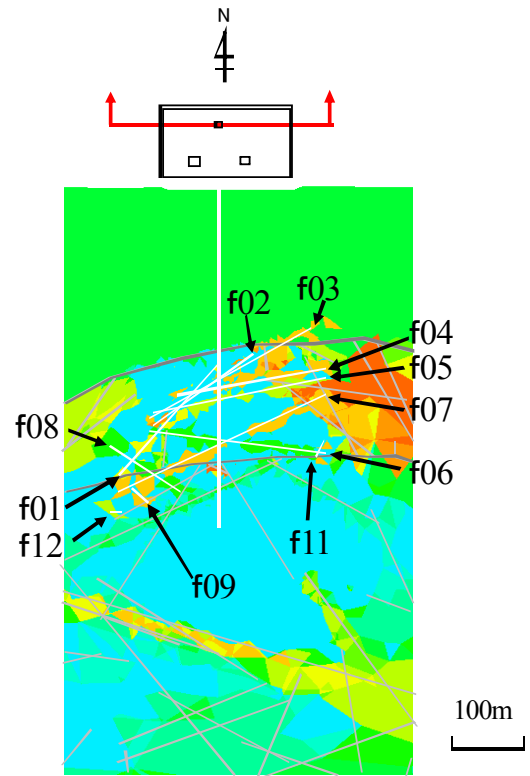
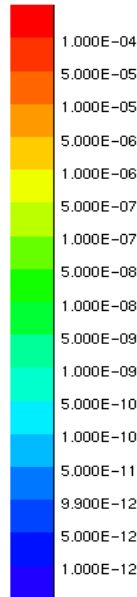
地下施設の設計・施工に必要な坑道内への湧水量や周辺の水位低下を予測する調査解析手法の構築(止水対策への基盤情報の提供)

23

湧水量予測に用いた水理地質構造モデル 決定論モデル(リアライゼーションNo.1をベース)



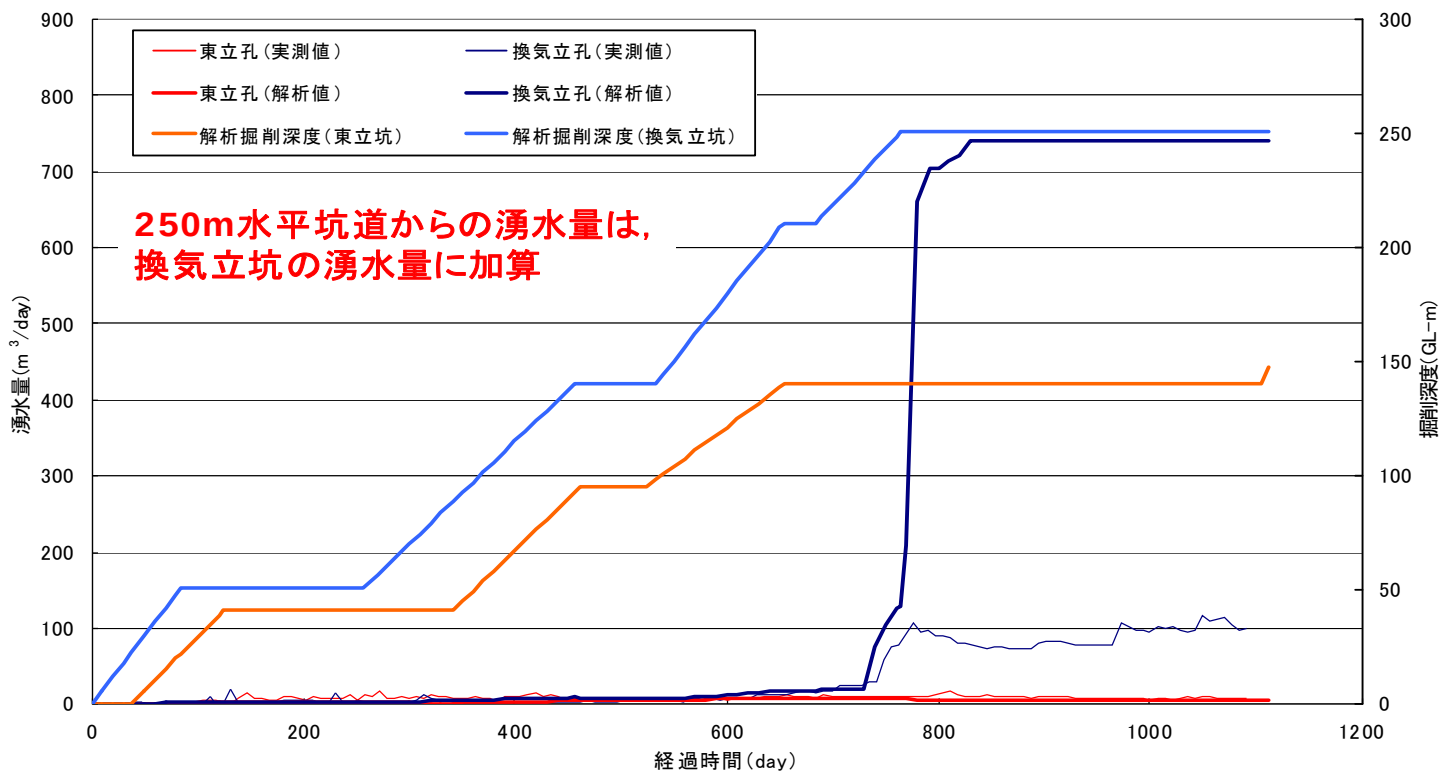
透水係数 (m/s)



- 確率論モデルで発生した割れ目のうち、ボーリング孔ならびに立坑に交差する割れ目を除去
- 立坑周辺で確認・推定されている断層(12本)をモデルに反映
- 推定断層(12本)の透水係数は、推定断層を含む区間の水理試験結果から設定

24

解析結果



深度250m付近の換気立坑における実際の湧水量と予測された解析結果が大きく乖離(過大に評価)

25

断層の透水性の見直し

f01 (PB-V01 GL.-243m)

$K_{org} = 6.6E-07 \text{ m/s}$ ($T=9.3E-06 \text{ m}^2/\text{s}$)

$K_{rev} = 3.0E-07 \text{ m/s}$ ($T=4.2E-06 \text{ m}^2/\text{s}$)

f02 (PB-V01 GL.-266m)

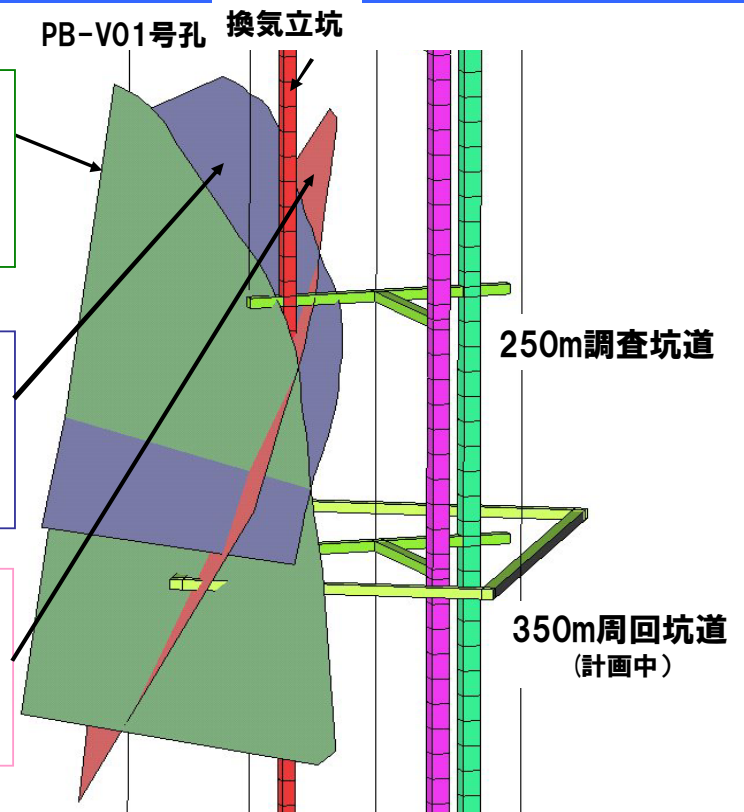
$K_{org} = 6.7E-06 \text{ m/s}$ ($T=9.5E-05 \text{ m}^2/\text{s}$)

$K_{rev} = 1.0E-08 \text{ m/s}$ ($T=1.4E-07 \text{ m}^2/\text{s}$)

f03 (PB-V01 GL.-287m)

$K_{org} = 2.4E-06 \text{ m/s}$ ($T=3.5E-05 \text{ m}^2/\text{s}$)

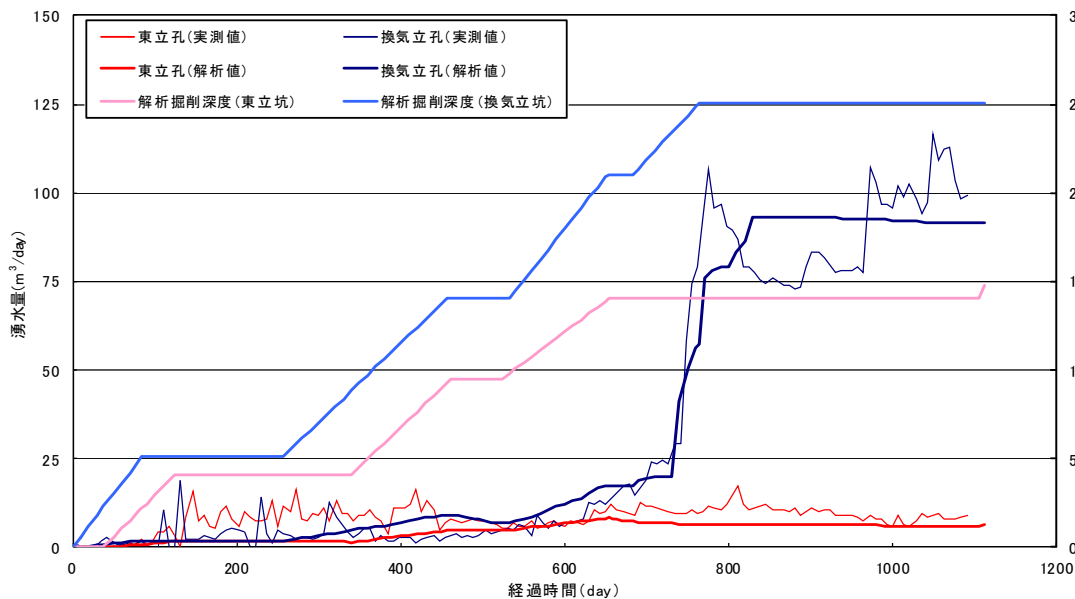
$K_{rev} = 1.0E-08 \text{ m/s}$ ($T=1.5E-07 \text{ m}^2/\text{s}$)



実際の湧水量を説明するために深度250m付近(稚内層と声問層の境界付近)に分布する3条の断層の透水係数を感度解析的に再設定

26

更新したモデルによる解析結果



●大きな乖離が生じていた換気立坑の湧水量の予測値は実測値と整合的に推移

●パイロット孔データを使用していないモデル(H19)では、更に大きな湧水量を予測(H19⇒H21で誤差は減少)

●見直し後のモデルに基づく250m以深の湧水量予測⇒止水対策のための基盤情報として提供

●グラウト工情報との整合性を随時確認するとともに、350m調査坑道の湧水量予測解析や注意個所のマッピングを実施中

換気立坑での比較結果

掘削深度(GL.-m)		50m	100m	150m	200m	250m
予測湧水量 (m³/day)	パイロット孔なし (H19モデル)	0	0	30	70	980
	パイロット孔あり (H21モデル)	0	5	8	15	750
予測湧水量 (m³/day)	見直し後のH21モデル	2	6	14	22	108
	実測湧水量 (m³/day)	2	0	3	8	96

27

断層の透水性の見直し：原因と教訓

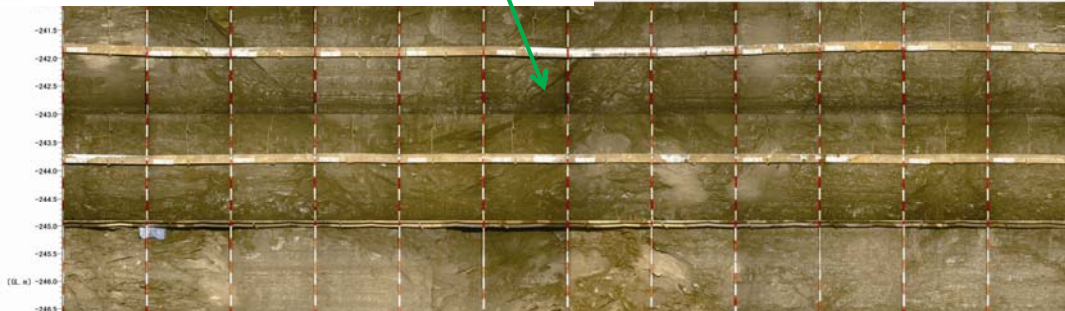
（背景）

f01～03断層は換気立坑に隣接して掘削されたPV-B01号孔の稚内層中で確認された断層（透水係数： $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{m/s}$ オーダー）。湧水量解析に用いたモデルでは、稚内層のデータを声問層分布区間にそのまま適用

換気立坑

声問層

f01断層

250m
調査坑道

（坑道壁面の状況）

- 各断層は予測された立坑深度付近に遭遇。250m付近では声問層中に分布しており、稚内層中と比較して、明らかに破碎の程度が小さい（湧水程度も小さい）

（原因）

- 声問層の割れ目・断層が稚内層と比較して、連続性に乏しく、緻密な岩相であることを認識していたものの、実測値がないため、間接的な推定を行うことよりも稚内層のデータを用いることを選択。その結果、過大な湧水量を算出

- パイロット孔に観測孔の役割を併用させたことにより、**データの不確実性が増大**
- 湧水や崩壊などの重大リスクに対しては、その要因となる地質構造、水理・力学特性に関する**直接的なデータの取得を原則**とするとともに、安易な効率化に歯止めをかける取り組みが必要

28

まとめ

対象領域において、地質図に記載される規模の断層が周辺に分布し、母岩となる堆積岩が平均透水係数が 10^{-8}m/s オーダーで、透水係数の不均質性が標準偏差で1.6程度で示される場合、

（水頭分布を用いた評価結果から）

- 2km四方のエリアに、二次元反射法地震探査測線（8本×2km）と深層ボーリング孔（5本×650m＋断層捕捉ボーリング孔）を**グリッド状に配置し、第1段階で適用してきたものと同様の地質環境調査（装置・手法、品質、数量）と水理地質構造モデリング（主要断層を決定論、断層間の地層を確率論的にモデリング）を適用することにより、再現性の高い地下水流動解析結果を得ることができるものと期待**

（湧水量を用いた評価結果から）

- 施設スケールの解析によって、再現性の高い水理地質構造モデルが構築されている場合、湧水量の中央値を取る**確率論モデルをベースにパイロット孔に遭遇する実際の構造を決定論的にコンディショニングしてモデル化することにより、立坑内への湧水量をある程度の確からしさで予測できるものと期待**
- 確率論モデル・決定論モデルとも、シミュレーションのケース数が少ないため、頻度分布に基づく予測範囲の信頼区間が提示できていないなどの技術的課題が存在。ボトルネックとなっている部分（手作業や容量の必要な解析処理など）の**効率化を主眼とした手法の改良が必要**

29

他の堆積岩系岩盤への適用に向けたアプローチ

- 透水不均質性が小さい領域における解析結果と実測値の評価

AIST沿岸域ボーリング, JNES涵養域・流出域ボーリングの活用

⇒声問層上部の地層が分布しており, 構造変形作用も少なく非常に均質な岩質

- 国内外の調査・解析事例の収集

海外URLや地層処分関連調査を中心に, ボーリング孔・物理探査測線の配置間隔と地下水流動解析結果の再現性との関連性を整理・分析

- 一般化

母岩を透水係数の平均値や分散の観点から区分した上で, 配置間隔と再現性との関連性の有無を評価⇒**幌延での研究結果を軸に体系化**