

深部岩盤を対象とした地下水流動
シミュレーション

三枝 博光
日本原子力研究開発機構
東濃地科学センター

深部岩盤を対象とした地下水流動シミュレーション

三枝 博光, 尾上 博則

日本原子力研究開発機構・東濃地科学センター
〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64
[\[saegusa.hiromitsu, onoe.hironori\]@jaea.go.jp](mailto:{saegusa.hiromitsu, onoe.hironori}@jaea.go.jp)

本講演では、地層処分における地下水流動シミュレーションの役割や特徴を述べるとともに、筆者らが段階的な地質環境特性調査に反映するために開発した地下水流動シミュレーションシステムの概要を紹介する。

1. 地層処分における地下水流動シミュレーションの役割

高レベル放射性廃棄物の地層処分は、深度 300m 以深の岩盤中に処分場を建設し、廃棄物を埋設するものである。処分場は、数 km 四方の領域に総延長数 100km にもわたるトンネル群から構成されており、ベントナイトと鉄製のオーバーパックで覆われた廃棄物を埋設する計画となっている。このように地層処分とは、地層が持っている物質を閉じ込める能力を利用し、人工的なバリアと組み合わせた多重の防護システムによって、数万年以上にも及ぶ長期の時間スケールの安全を確保しようとするものである。この安全性の評価においては、廃棄物から溶出した核種が地下水によって運ばれる「地下水移行シナリオ」が基本となっていることから、広域かつ長期の時空間スケールを対象とした地下水流動特性を評価する必要があり、地下水流動シミュレーションはそのための重要な役割を担う。

2. 地層処分における地下水流動シミュレーションの特徴

地下水流動シミュレーションに必要な入力条件を大別すると、岩盤中の地下水の流動を規定する透水性の空間分布と、地下水流動の駆動力となる条件を設定するための境界条件がある。また、地下水流動シミュレーションを通じて地下水の流動方向や流速等の空間分布が出力される。

岩盤中には、断層や亀裂等の不連続構造や性質の異なる岩相が分布しており、それらに起因して様々な空間スケールの透水不均質性を有しているが、調査コストの制約からこの透水不均質性を完全に理解することは不可能である。このため、地下水流動特性評価結果は不確実性を含むものになってしまう。また、長期的な時間スケールを考慮すると構造運動や続成作用により透水性が変化する可能性がある。さらには、境界条件設定の際には、様々なイベントや現象を考慮する必要がある。具体的には、処分場の建設から埋戻しといった短期的時間スケールでのイベントや、その後の地形変化や気候・海準変動といった長期的な時間スケールでの自然現象の変遷が挙げられる。

以上のように、地層処分における地下水流動シミュレーションの実施においては、広域かつ長期の時空間スケールを対象とすることのみならず、透水不均質性に伴う不確実性を常に考慮することが重要である。この不確実性を低減させるための調査対象とすべき重要因子は、地下水流動シミュレーション結果に基づき特定することが可能である。このため段階的に進められる地質環境特性調査に対し、調査終了後、地下水流動シミュレーションを迅速に実施し、その結果を次段階の調査計画の立案に反映することが有効である。しかしながら、従来は、離散モデル（解析メッシュ）構築等の前処理や、シミュレーションの実施、結果の可視化等の後処理が、個別にかつ手動で実施されていたことから多くの時間を要し、地下水流動シミュレーション結果を調査計画に反映させることが困難であった。

3. 段階的な地質環境特性調査に資するための地下水流動シミュレーションシステムの開発

段階的な地質環境特性調査に地下水流動シミュレーション結果を反映させることを目的として、調査データの解釈や、数値シミュレーションに関わる一連の作業に必要な図化処理ソフトやシミュレーションコードを統合したシステムを構築した。ここで開発したシミュレーションコードは、岩盤中の地下水流動をより現実的に表現するために、多孔質媒体モデルと亀裂ネットワークモデルを統合したハイブリッド型を採用した。このシステムを用いることによって、複数の岩相や不連続構造が複雑に分布する地域の透水不均質性の空間分布モデルを、グラフィックスソフトで確認しながら視覚的に構築することが可能となった。また、離散モデルを自動的に作成することが可能となり、煩雑な離散モデル構築作業に関わる労力を大幅に削減できた。特に、複雑な透水不均質性を考慮した数値シミュレーションを実施する場合や、異なる解析領域形状や境界条件を考慮した多数の感度解析を実施するような場合において、本システムは有効なツールである。

深部岩盤を対象とした 地下水流動シミュレーション

三枝 博光, 尾上 博則

独立行政法人 日本原子力研究開発機構(JAEA)

バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター

地層科学研究部 結晶質岩地質環境研究グループ

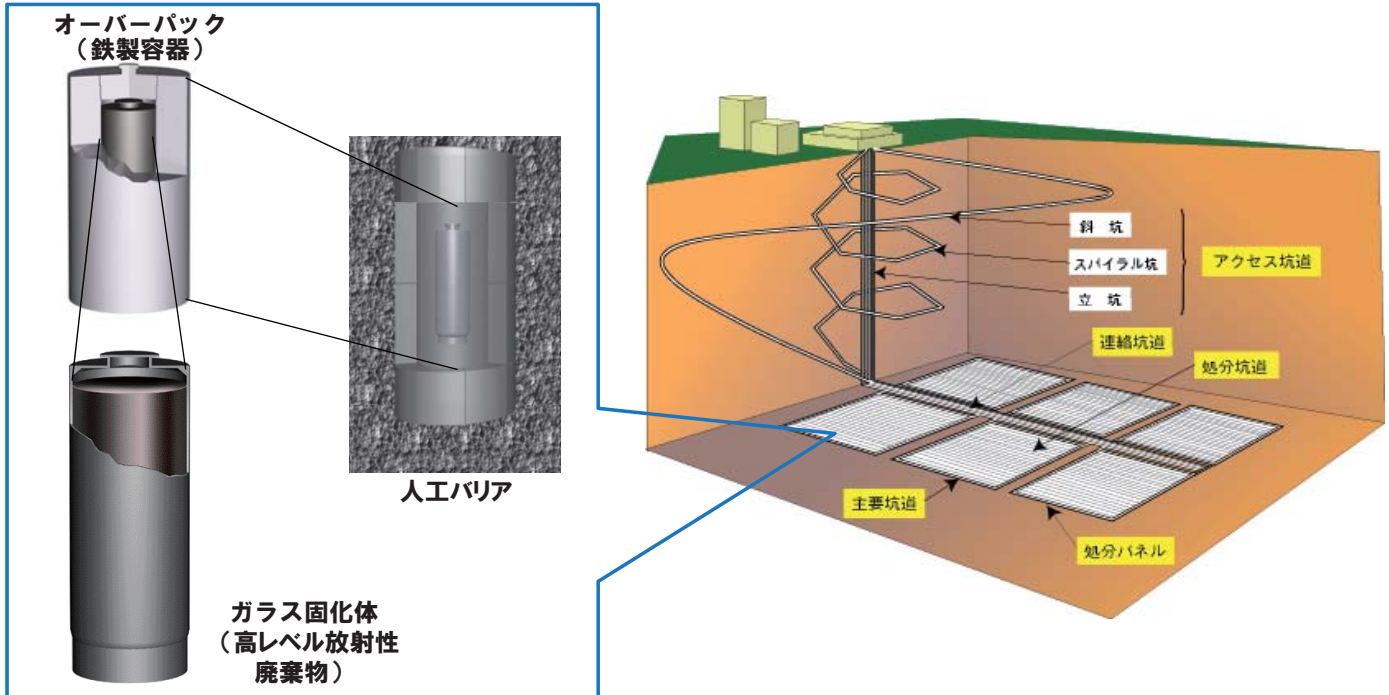
紹介内容



2

地下水流動シミュレーションに関わる・・・

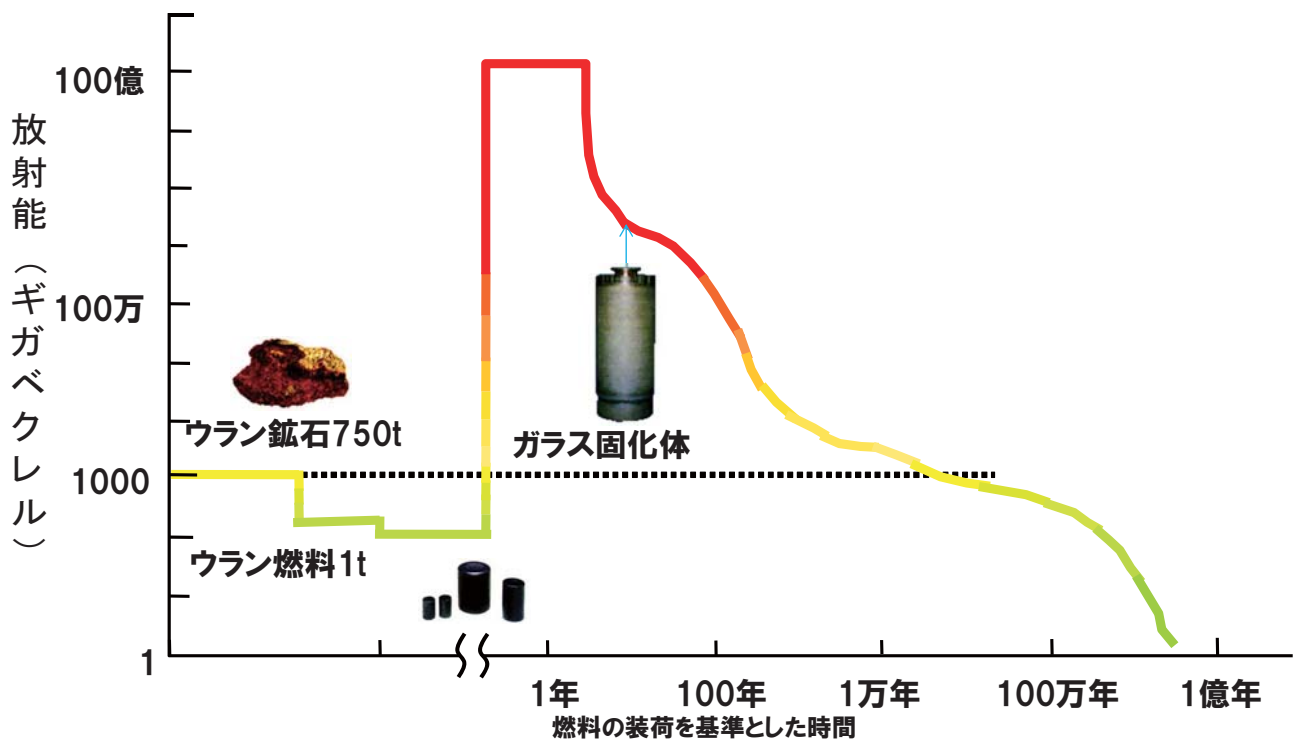
- 地層処分における役割・特徴
- 開発したシステムの概要
- 研究事例紹介



- 深度300m以深
- 数km四方の平面領域
- 総延長約300km(小断面の多数の坑道群が近接して存在)

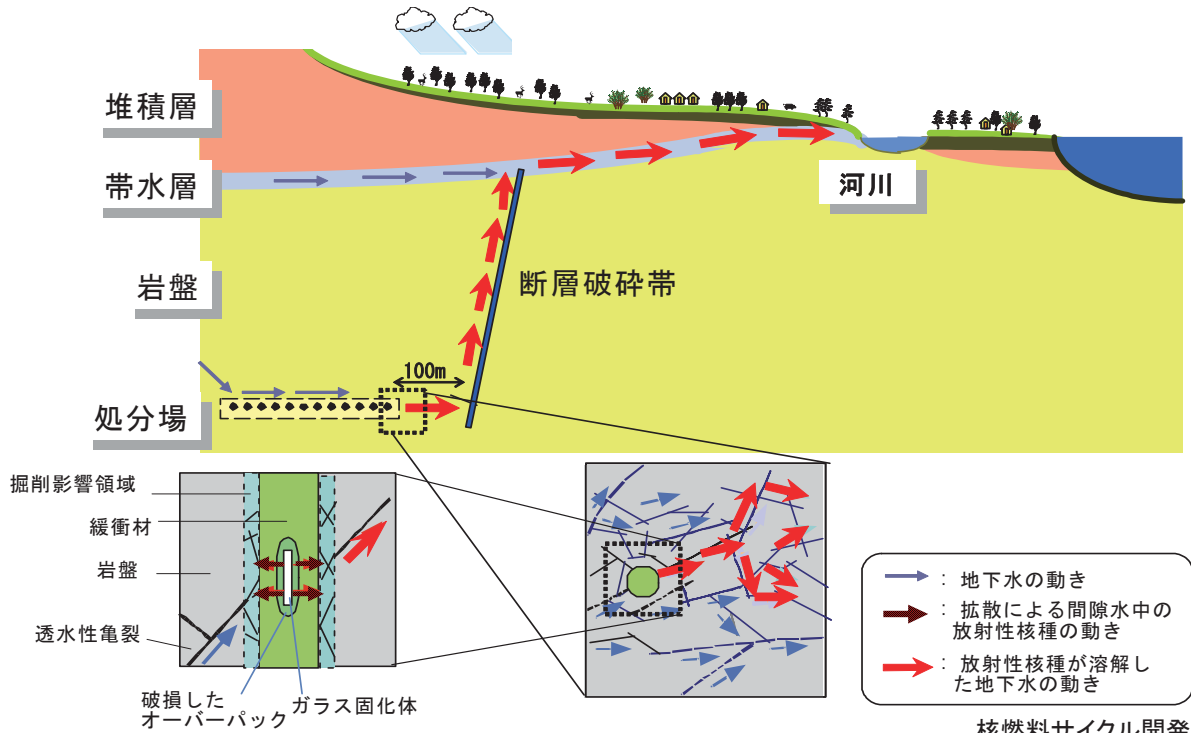
第26回CCSEワークショップ 東京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト 2015年2月26日(木)

高レベル放射性廃棄物の性質



- 高レベル放射性廃棄物の放射能は、時間とともに減少し、数万年後にウラン鉱石と同じ程度となる

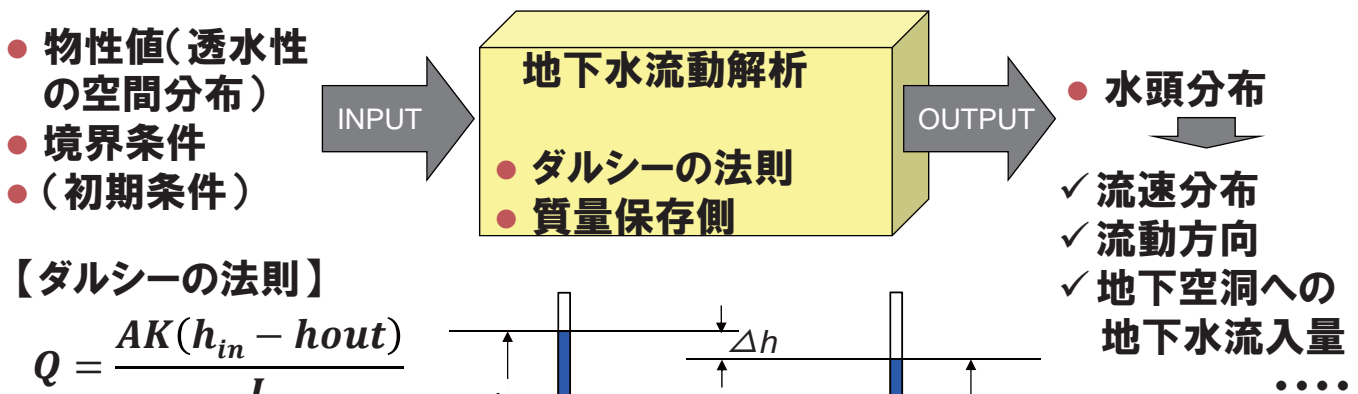
第26回CCSEワークショップ 東京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト 2015年2月26日(木)



核燃料サイクル開発機構 (1999)

● 高レベル放射性廃棄物の地層処分では、何万年という長い年月の間に、地下深部に埋設した廃棄物に含まれる放射性核種が、**地下水中に溶け出し**、**地下水流動に伴い**人間の生活環境に運ばれることを想定した安全評価が行われる

地下水流動シミュレーション



【ダルシーの法則】

$$Q = \frac{AK(h_{in} - h_{out})}{L} = AKi = Av$$

Q: 通過流量 (L³)

A: 通過断面積 (L²)

K: 透水係数 (LT⁻¹)

⇒ 地下水流動の抵抗

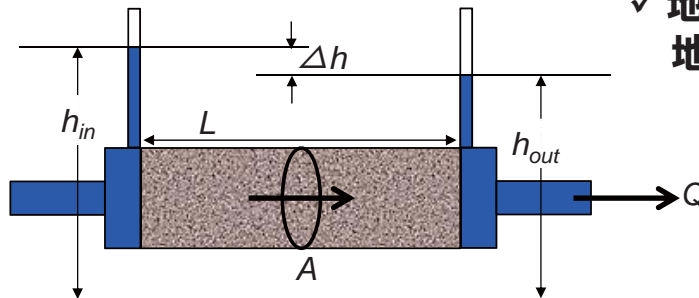
h_{in}, h_{out} : 全水頭 (L)

L: 距離 (L)

i: 動水勾配

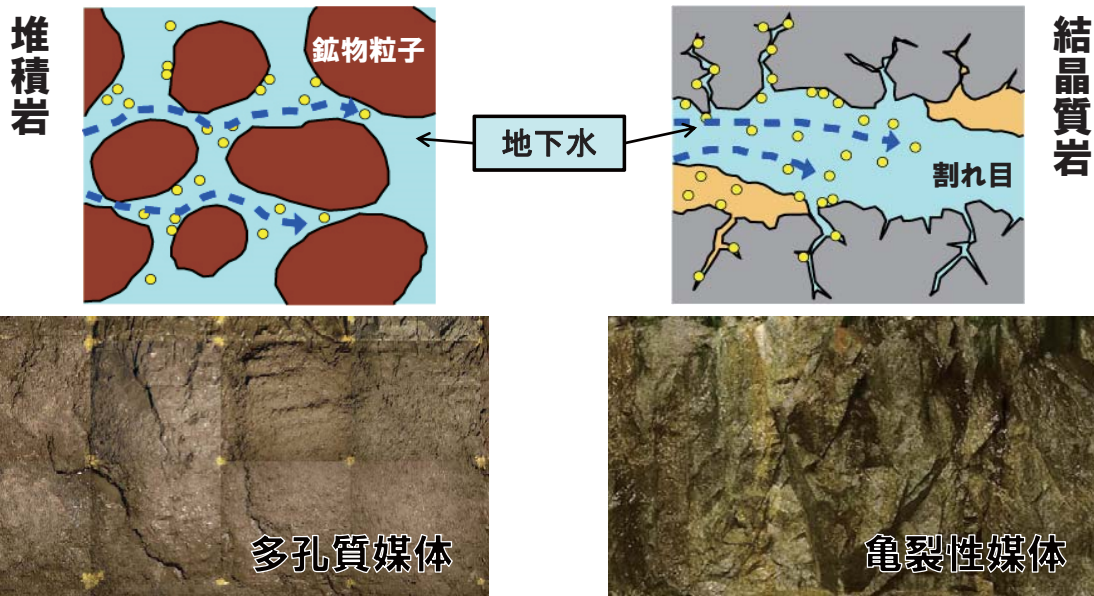
⇒ 地下水流動の駆動力

v: ダルシー流速 (LT⁻¹)



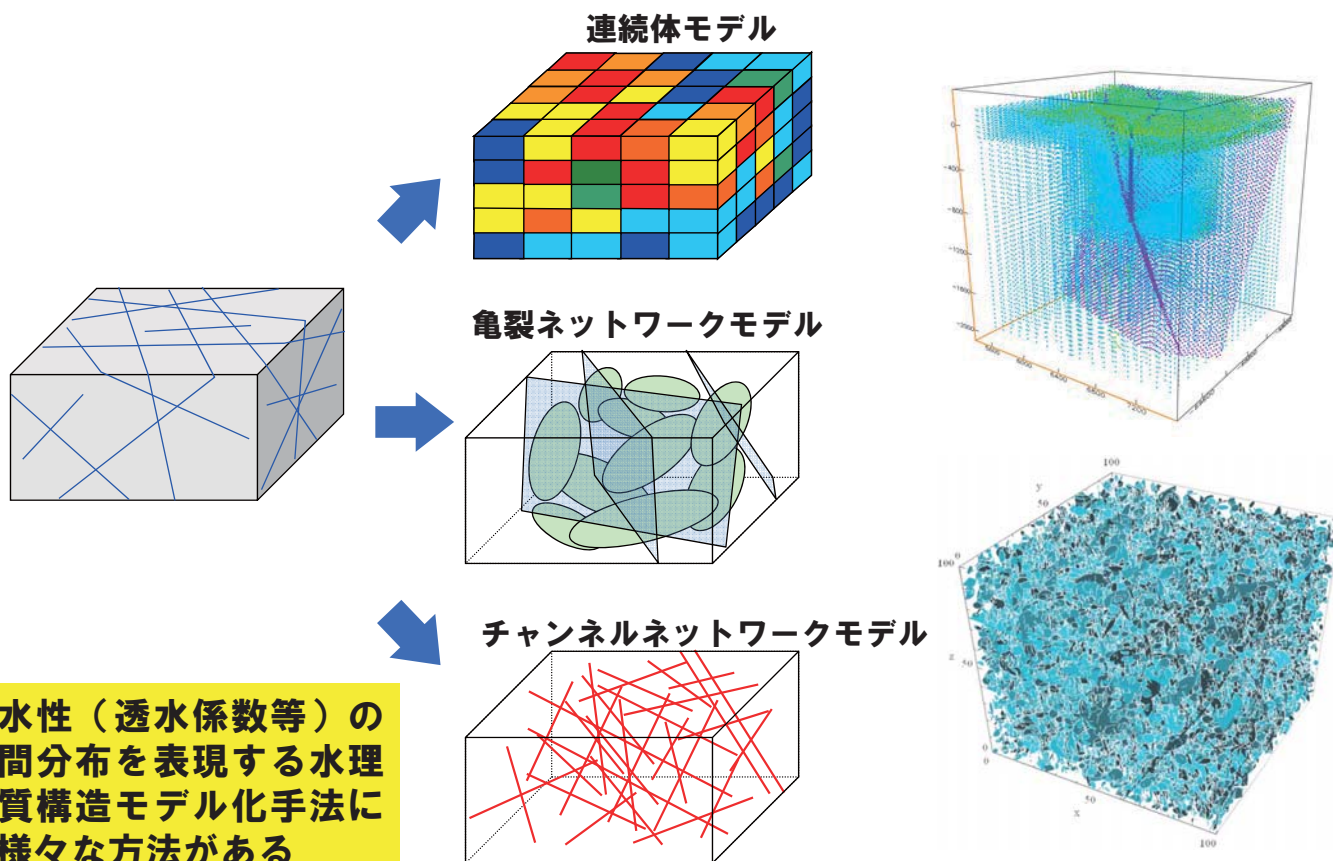
【支配方程式(一般形)】

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = Ss \frac{\partial h}{\partial t} - R^*$$

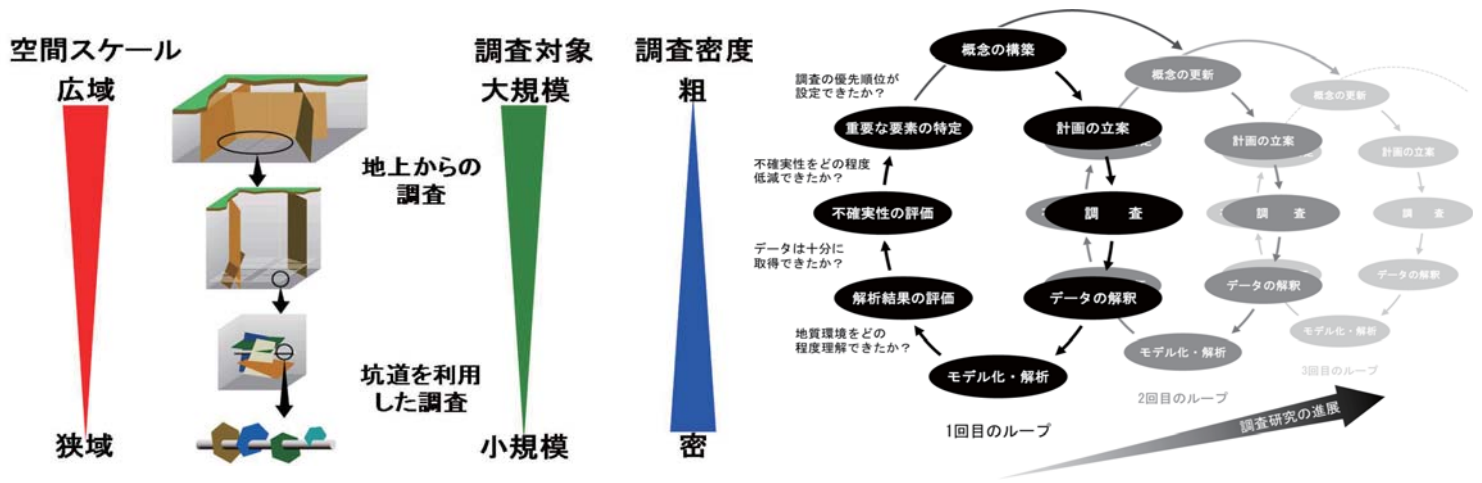


- 断層や亀裂等の不連続構造や性質の異なる岩相が分布
- 様々な空間スケールの透水不均質性を有している

水理地質構造モデル



- 透水性（透水係数等）の空間分布を表現する水理地質構造モデル化手法には様々な方法がある

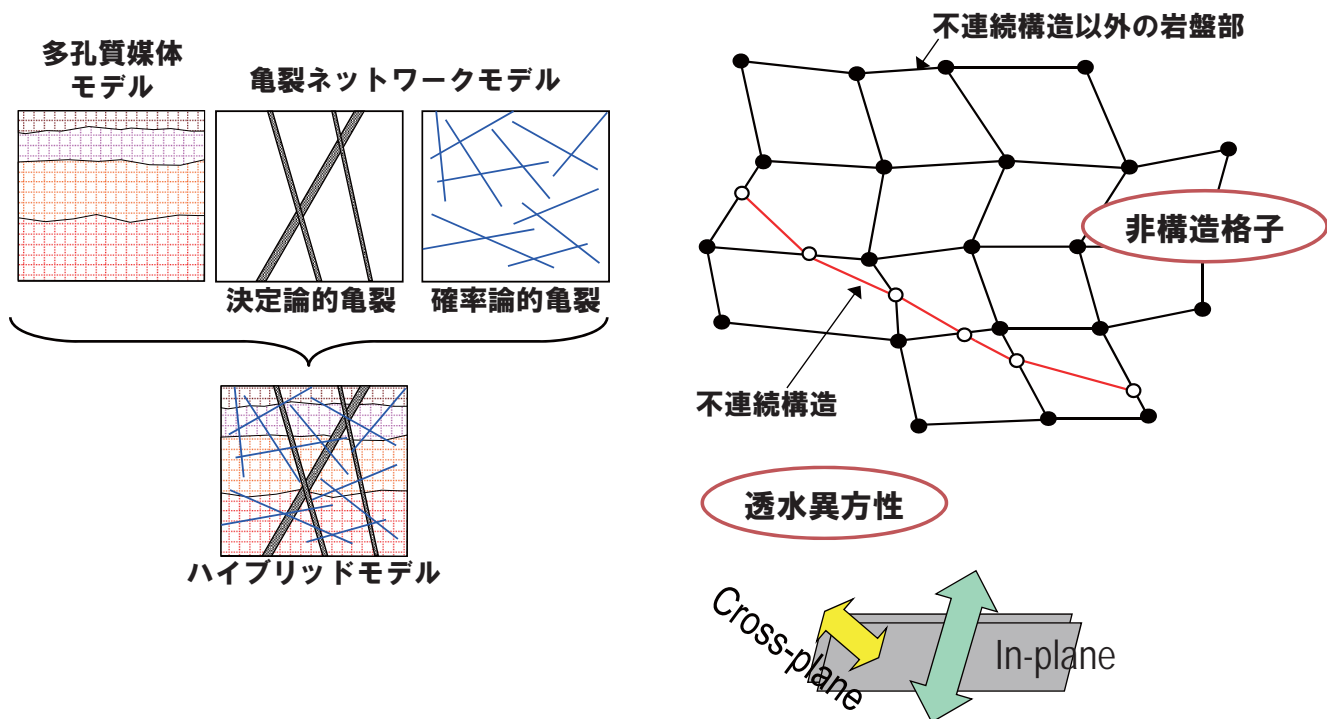


- 調査コストの制約から様々な空間スケールの透水不均質性を調査により完全に理解することは不可能であり、地下水流動特性評価結果は不確かさを含むものになる
- 空間的な透水不均質性を理解していくためには、広範囲の全体の傾向を知る調査から狭い範囲の調査へ段階的に進めることが一般的
- 不確かさを低減させるための調査対象とすべき重要因子は、地下水流動シミュレーション結果に基づき特定することが有効

- ◆ 地下水流動シミュレーションにおける考慮事項
 - 大深度（深度：1,000m程度）
 - 様々な（広域的～局所的）な空間スケール（平面：約100m～約10km四方）
 - 様々な時間スケール
 - 処分場の建設から埋戻しといった短期的時間スケール
 - 地形変化や気候・海水準変動を考慮した長期的な時間スケール
 - 透水性の空間分布の不均質性
- 研究開発課題
 - 地下水流動シミュレーション技術の開発
 - 様々な空間スケールの透水不均質性を現実的に表現するための手法
 - 合理的かつ効率的な調査・評価に寄与するための迅速化
 - 様々な時空間スケールを考慮した地下水流動シミュレーションにおける物性値、境界条件、初期条件の設定に関わる方法論の構築

地下水流動シミュレーションシステムの開発 (1)

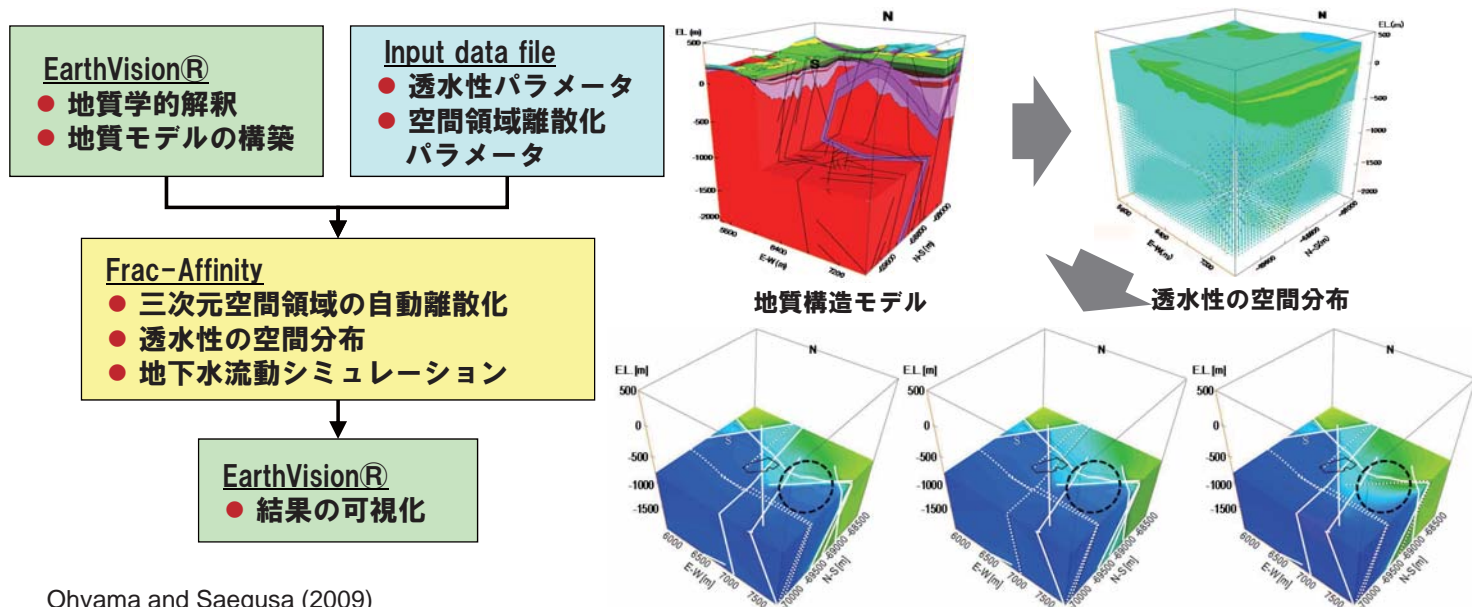
- ◆ シミュレーションコードは、岩盤中の地下水流動をより現実的に表現するために、多孔質媒体モデルと亀裂ネットワークモデルを統合したハイブリッド型を採用



Ohyama and Saegusa (2009)

地下水流動シミュレーションシステムの開発 (2)

- ◆ 調査データの解釈から数値シミュレーションまでの一連の作業に必要な図化処理ソフトやシミュレーションコードを統合したシステムを構築
 - 複数の岩相や不連続構造が複雑に分布する地域の透水不均質性の空間分布モデルを、グラフィックスソフトで確認しながら視覚的に構築することが可能
 - 数値シミュレーションに必要な離散モデル(解析メッシュ)を自動的に作成することが可能となり、煩雑な要素分割作業に伴う労力を大幅に削減することが可能

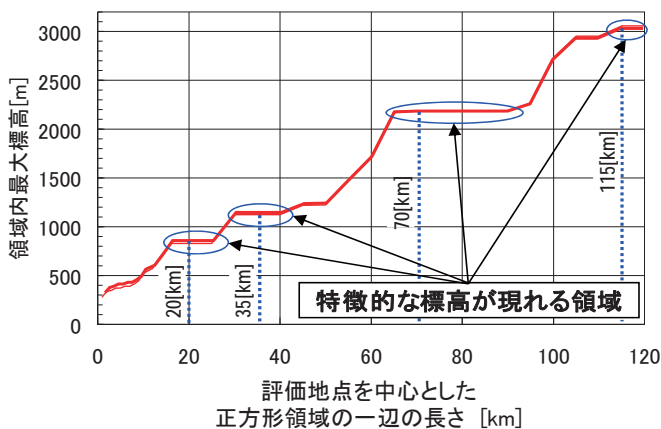


Ohyama and Saegusa (2009)

広域スケールにおける地下水流動シミュレーション (1)

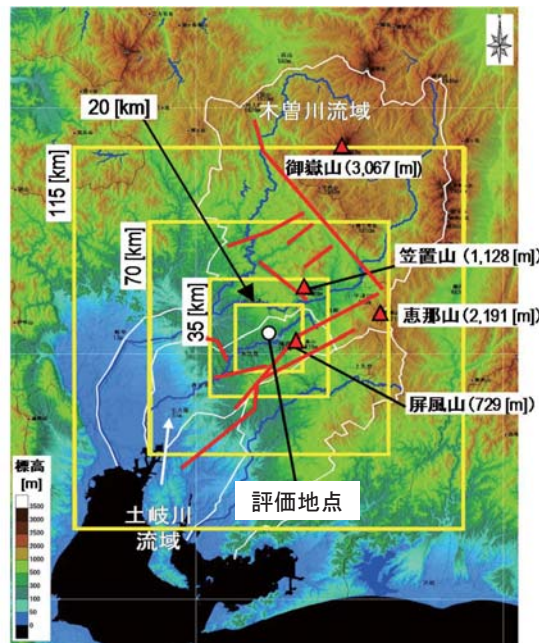
- ◆ 地下深部の広域地下水流動に影響を与えている主要因である地形及び大規模不連続構造を考慮した広範囲での地下水流動シミュレーションを実施し、その結果得られる流線に基づき地下深部における広域地下水流動の範囲(分水界)を把握

① 主要因を包含する広範囲の解析領域を設定するために地形解析を実施



特徴的な地形の抽出

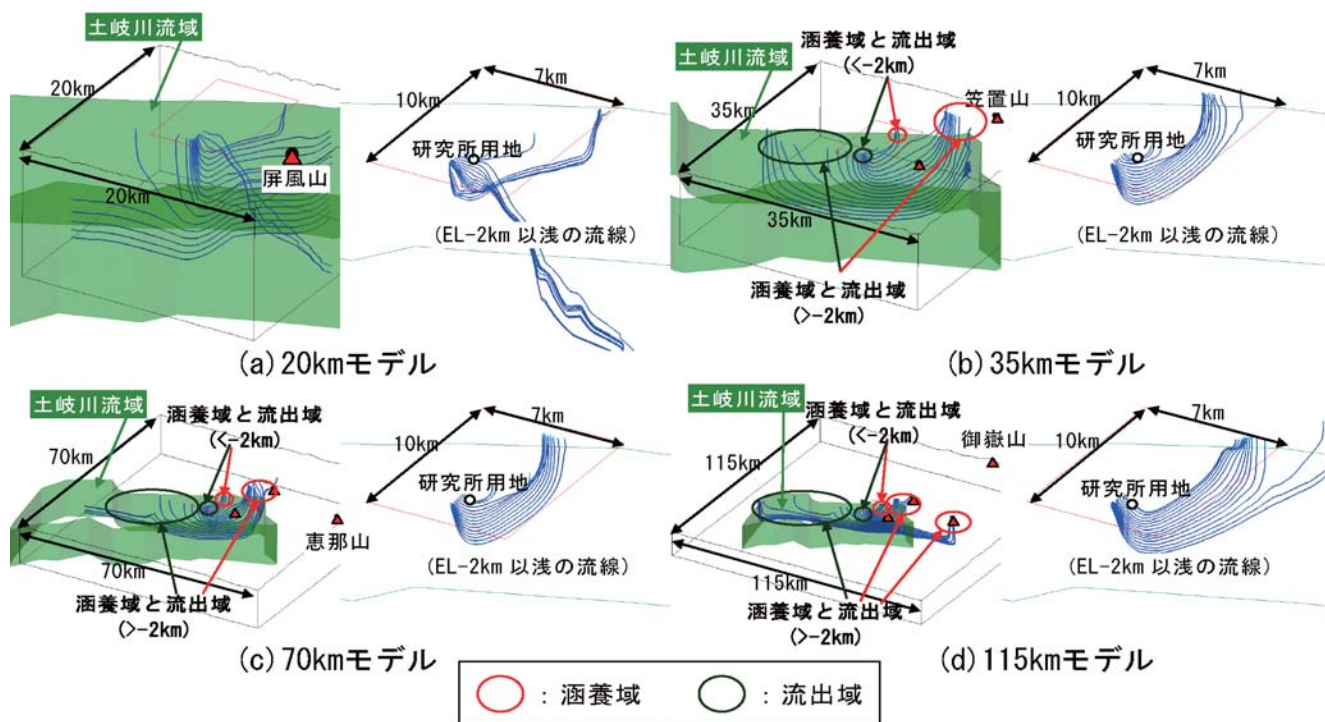
稲葉, 三枝 (2005)



特徴的な地形と大規模不連続構造を考慮した複数の広範囲の解析領域の設定

広域スケールにおける地下水流動シミュレーション (2)

② 地下水流動シミュレーション結果に基づく流線解析を実施し、広域地下水流動の範囲(分水界)の位置を比較

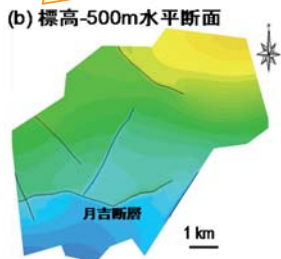
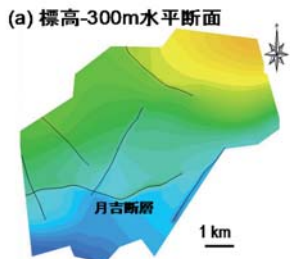


流線解析を用いた解析結果の解釈

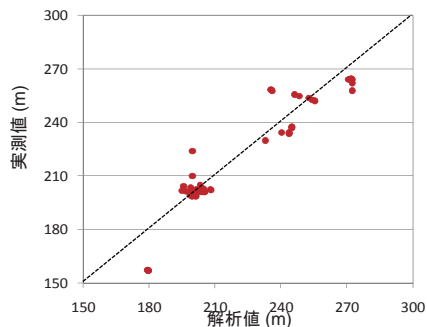
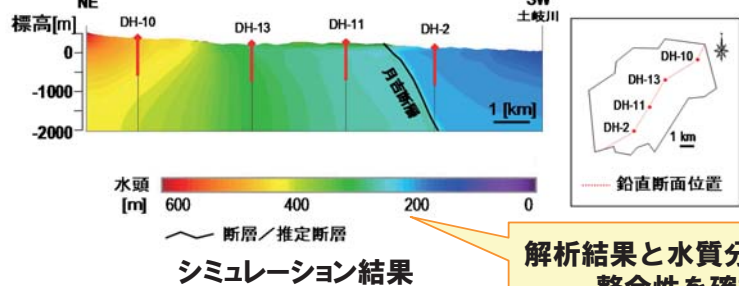
稲葉, 三枝 (2005)

③ 広域地下水流動の範囲(分水界)を解析領域とした地下水流動シミュレーションを実施し、調査対象とすべき重要因子を特定するための感度解析や、実測データや他分野モデルとの比較によりシミュレーション結果の妥当性を確認

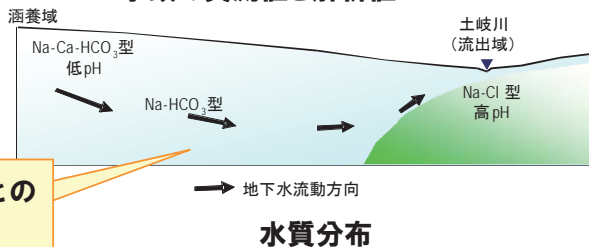
不連続構造の水理特性の不確実性に着目した感度解析



(c) ボーリング孔を結ぶ鉛直断面



水頭の実測値と解析値

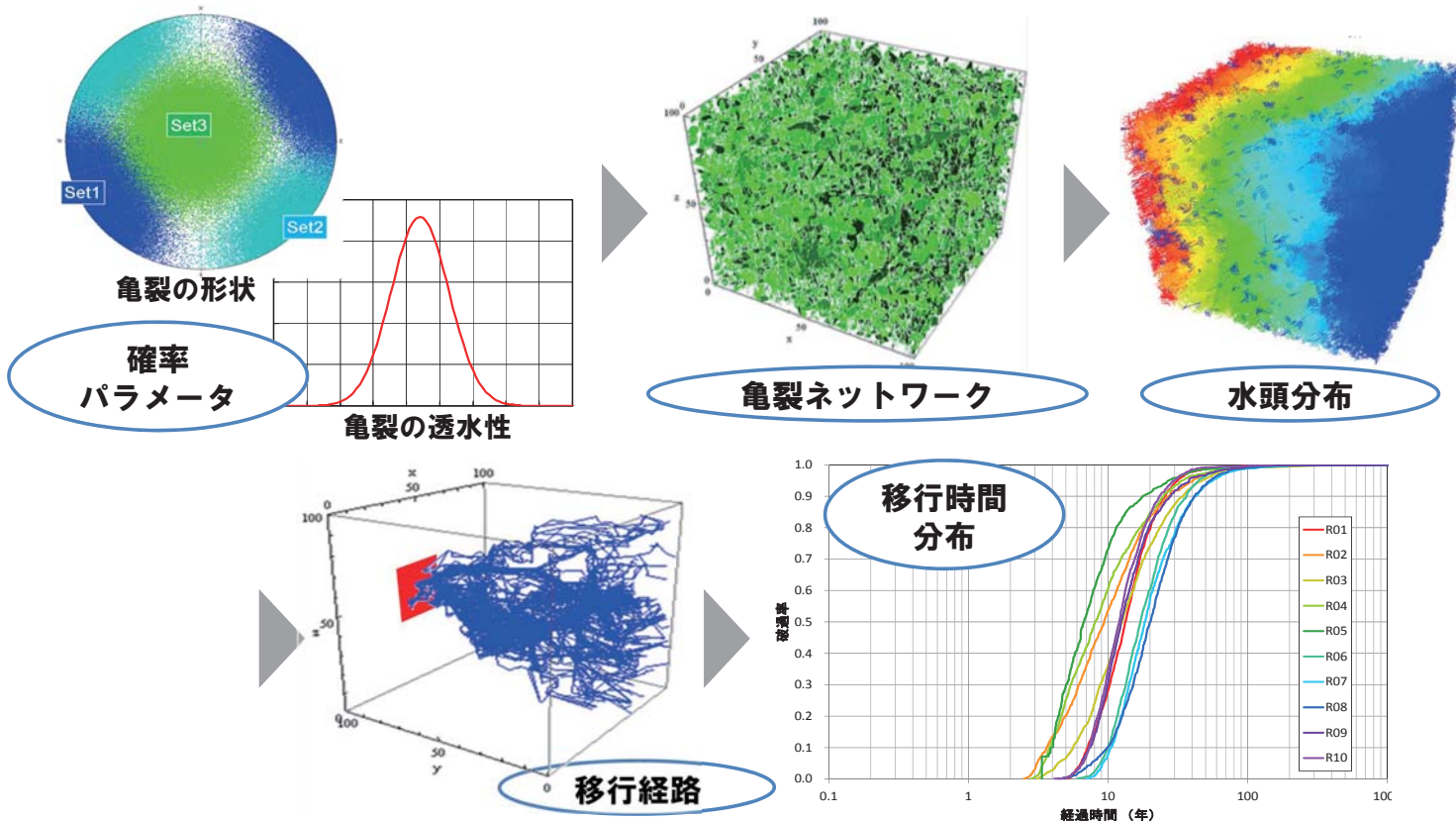


水質分布

解析結果と水質分布との整合性を確認

Saegusa et al. (2003)

◆ 確率論的亀裂ネットワークモデルによる坑道周辺岩盤中の物質移動特性の評価



【研究事例③】

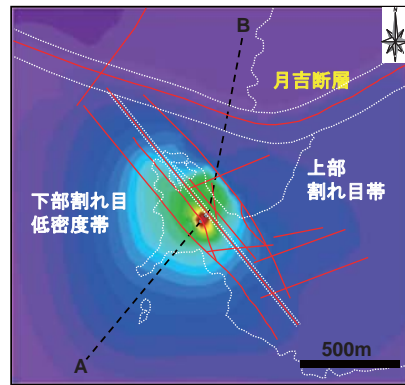
短期的な時間変化を考慮した地下水流動シミュレーション



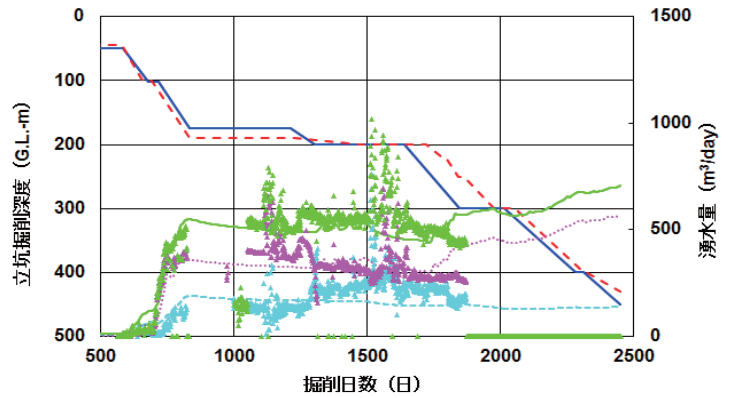
- ◆ 周辺環境への影響の推定や、地下施設の設計に反映するために、地下施設の建設に伴う坑道への地下水流出量（湧水量），および岩盤中の水頭低下量や範囲を地下水流動シミュレーションにより予測



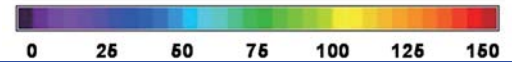
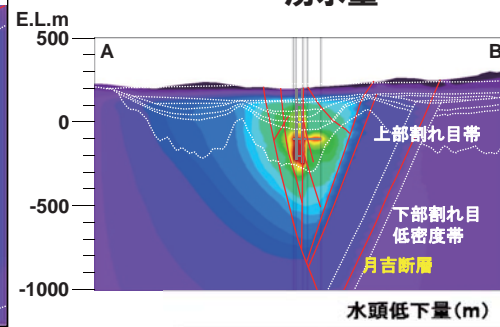
瑞浪超深地層研究所



水頭低下量



湧水量

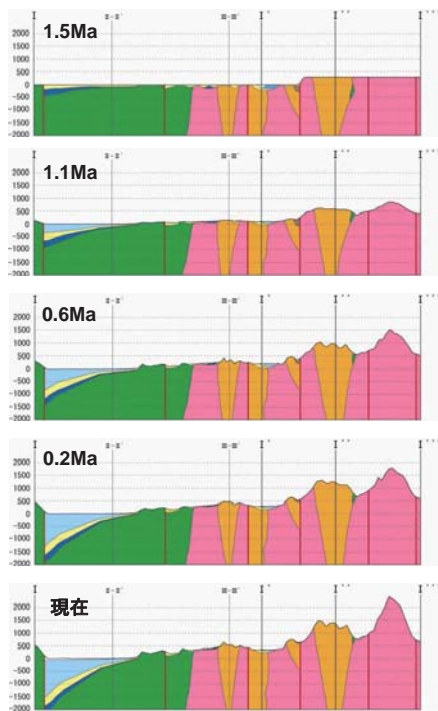


【研究事例④】

長期的な時間変化を考慮した地下水流動シミュレーション



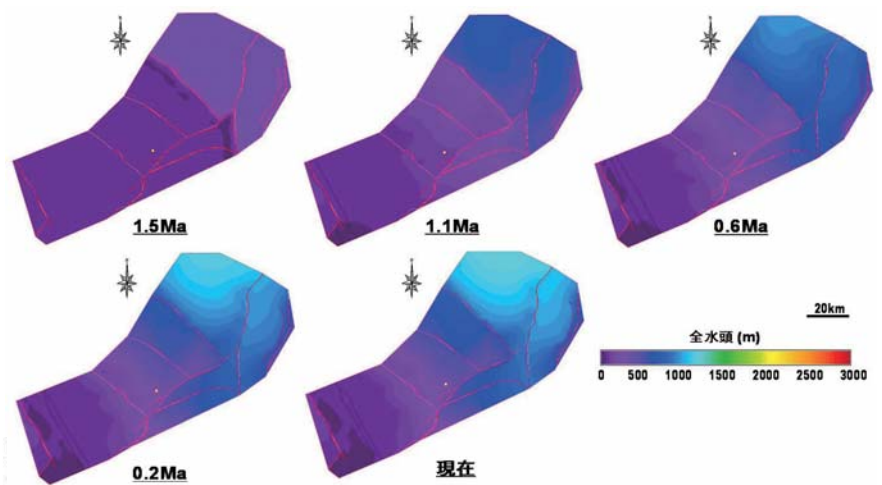
- ◆ 木曾山脈等の主要な山地や濃尾平野の発達過程を考慮した広範囲の概括的な古地形変化や地下水涵養量の変化を考慮した地下水流動シミュレーション



地形モデル

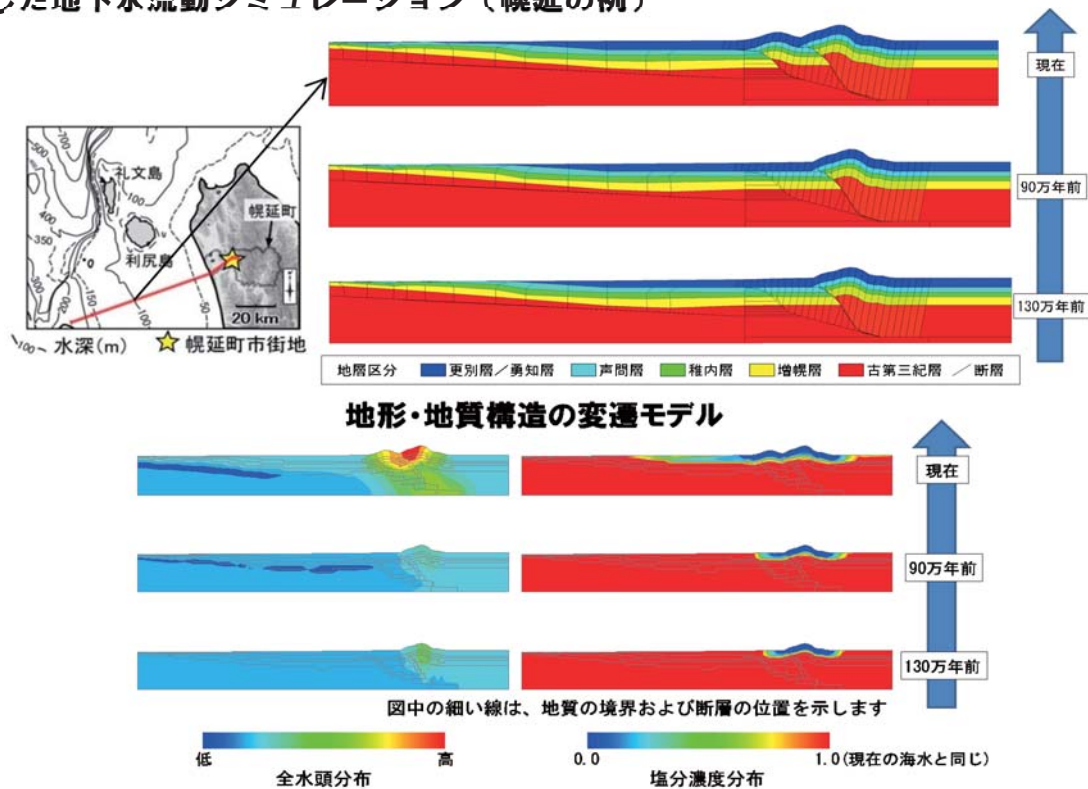
凡例

a	沖積層
t	段丘堆積物
Vq	第四紀火山岩類
Tg	東海層群
Mg	瑞浪層群
Vt	第三紀火山岩類
Nr	濃飛流紋岩類
Rg	領家花崗岩類
Ms	美濃帯堆積岩類
Mr	変成岩類



地下水流動シミュレーション結果

- ◆ 海面変化を含む地形変化や気候変動に伴う地下水涵養量の変化，続成作用に伴う透水性の変化に着目した地下水流動シミュレーション（幌延の例）



解析結果の一例

Niizato et al.(2009)

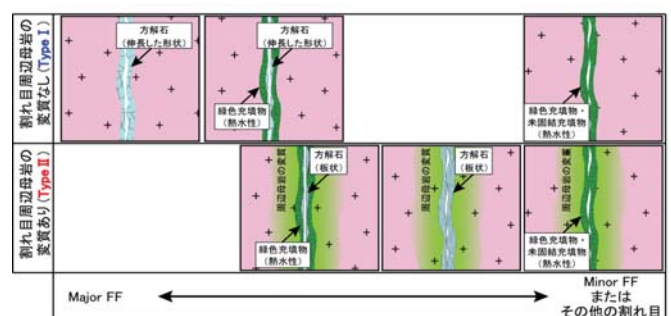
最後に

◆ 地層処分における地下水流動シミュレーション

- 開放系問題
- 大深度（深度：1,000m程度）
- 様々な（広域的～局所的）な空間スケール
- 様々な時間スケール（短期的時間スケール～長期的な時間スケール）
- 透水性の空間分布の不均質性

■ 今後の研究開発方針

- シミュレーション結果の妥当性確認手法の高度化
- シミュレーションコードの高速化・並列化
- 逆解析問題への適用
- 実際の割れ目の性状を考慮した亀裂ネットワークモデル化手法の開発



ご清聴ありがとうございました

