



研究報告

複数のモデル化手法を用いた地質環境特性調査における地下水流動特性評価の不確実性の検討

三枝 博光 澤田 淳* 稲葉 薫
竹内 真司 中野 勝志

東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所
*東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部

A Study of Uncertainties in Groundwater Flow Evaluation Using Multiple Modeling Approaches

Hiromitsu SAEGUSA Atsushi SAWADA* Kaoru INABA
Shinji TAKEUCHI Katsushi NAKANO

Mizunami Underground Research Laboratory, Tono Geoscience Center
*Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

岩盤は、断層や割れ目等に伴って様々なスケールの不均質性を有している。しかし、地下水流動特性を評価するための調査においては、調査コストや試錐孔の掘削等に伴う場の擾乱の回避等の観点から、調査項目や数量が限定される。これらの限定された調査量や岩盤の不均質性は、地下水流動特性評価結果に不確実性を生じさせる原因となっている。

このことから、本研究では、効率的に地下水流動特性を把握するための調査→モデル化・解析→評価の体系化に資することを目的として、データ解釈、概念モデルの構築等の各作業段階における不確実性を包括的に取り扱い、複数の解析者による地下水流動のモデル化・解析を実施し、モデル化・解析結果に対する不確実性要因の評価及び抽出を試みた。その結果、データの解釈や概念モデルの構築、水理地質構造のモデル化等における解析者の考え方の共通点と相違点を明らかにすることができた。また、この相違点を生じさせる不確実性要因から、特に地下水流動解析結果に与える影響の大きい要因を抽出することができ、それらを調査研究計画に反映した。

以上のことから、複数の解析者によるデータ解釈や概念モデルの構築、モデル化・解析を実施し、その結果を比較検討することは、地下水流動特性を把握するための効率的な調査研究計画策定に有効な手段であると考えられる。

Hydrogeological condition includes heterogeneity due to faults and joints, and the information that can be obtained from surface and borehole investigations is often limited in fractured rock, such as granite. The heterogeneity and limited information are sources of uncertainty in the groundwater flow characterization. Consequently, it is important to establish the most effective procedures for groundwater flow characterization in order to reduce the uncertainty.

In this study, the identification of essential uncertainty factors for the groundwater flow characterization was attempted using multiple modeling approaches. Through this study, the similarities and differences in the modeling process could be clarified, and the essential uncertainty factors could be identified based on the differences.

This study shows that the multiple modeling approaches are useful for establishing the effective procedures for groundwater flow characterization.



三枝 博光

超深地層研究グループ所属
副主任研究員
超深地層研究所計画及び広域地下水流動研究の地質環境のモデル化・地下水流動解析業務に従事



澤田 淳

システム解析グループ所属
副主任研究員
天然バリアの性能評価研究に従事



稲葉 薫

超深地層研究グループ所属
超深地層研究所計画及び広域地下水流動研究の地質環境のモデル化・地下水流動解析業務に従事



竹内 真司

超深地層研究グループ
チームリーダー
副主任研究員
超深地層研究所計画及び広域地下水流動研究の水理調査業務に従事



中野 勝志

研究情報化グループ所属
副主任研究員
超深地層研究所計画及び広域地下水流動研究の研究成果の取りまとめ業務に従事

キーワード

不確実性, 地下水流動特性評価, 水理地質構造モデル, 地下水流動解析, 地下水移行経路, データ解釈, 概念モデル, 有効空隙率, 境界条件, 透水異方性

Uncertainty, Groundwater Flow Characterization, Hydrogeological Model, Groundwater Flow Analysis, Groundwater Flow Path, Data Interpretation, Conceptual Model, Effective Porosity, Boundary Condition, Hydraulic Anisotropy

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の第2次取りまとめでは、地質環境や処分場のレイアウトを幅広く考慮し、簡略かつ保守的な視点から核種移行評価が試みられた¹⁾。第2次取りまとめ以後の地層処分に関わる研究開発においては、実際のデータに基づいた地質環境モデルを構築して地下水流動特性や地下水移行経路を評価するとともに、その結果に基づく安全評価の一連の流れを体系化することが重要となる²⁾。最終処分事業の実施主体による今後の処分地の選定プロセスは概要調査地区、精密調査地区、さらに最終処分施設建設地の選定と段階的に進められる計画であり³⁾、各調査段階における対象スケールも地表における数10km四方から数km四方のスケール、さらに坑

道周辺の数10m四方から数m四方のスケールへと段階的に変化すると考えられる。

核燃料サイクル開発機構が、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する基盤的研究である深地層の科学的研究の一環として、東濃地域を事例として進めている「超深地層研究所計画」⁴⁾並びに「広域地下水流動研究」⁵⁾では、様々な空間スケールにおける地質環境の体系的な調査・解析・評価技術の開発を主な目標としている。これらの調査研究においては、調査からデータ解釈、地質環境のモデル化・解析を通じた評価に至るまでのデータの流れと成果の反映項目を系統的に整理した統合化データフロー（図1）⁶⁾を活用した繰り返しアプローチ（段階的に実施される調査に応じた情報量の増加を反映させて、調査・解析・評価の一連のプ

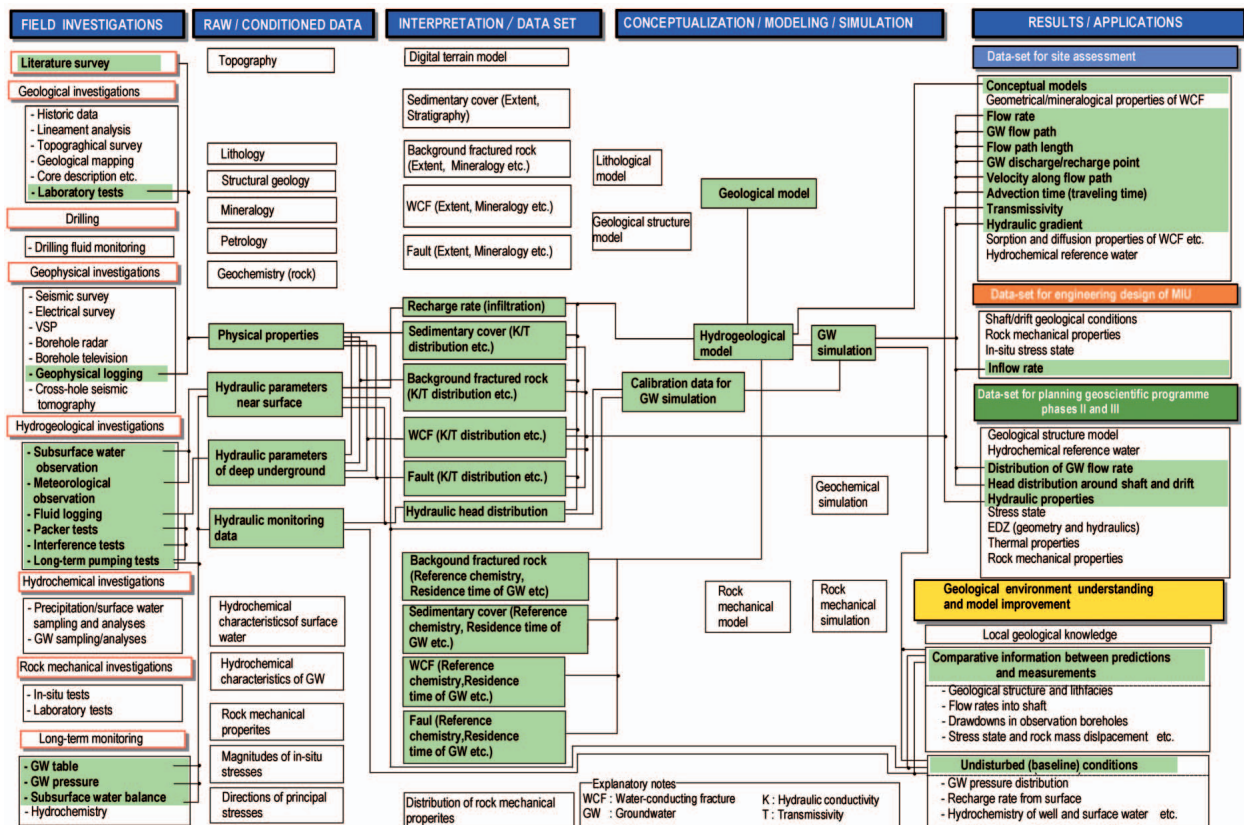


図1 統合化データフロー（地下水の水理の例）

プロセスを繰り返し行うこと)を実施することにより、情報の過不足や評価結果の不確実性等、地質環境に対する理解の程度を評価し、それらを次の調査計画に反映させることを検討してきている⁷⁾。

著者らは、このような調査研究の一環として、超深地層研究所計画の正馬様用地を包含する数km四方を対象に、これまでに取得したデータに基づき、水理地質構造のモデル化を通じて実施される地下水流動特性評価結果の不確実性に関する検討を進めている^{8)~11)}。

本研究では、効率的に地下水流動特性を把握するための調査→モデル化・解析→評価の体系化に資することを主な目的として、これまでに取得されているデータを用いて、調査データやデータ解釈、概念モデルの構築等の各作業段階における不確実性を包括的に取り扱い、解析者の経験に基づく判断を積極的に取り入れた複数の解析チームによるデータ解釈、概念モデルの構築、水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析(以下、モデル化・解析)を実施した。また、その結果を比較検討することにより、地下水流動解析結果の不確実性要因の抽出を試みた。また、この不確実性要因の抽出結果に基づく、次期調査計画への提言を行った。本報告では、これらの一連の検討結果について紹介する。

2. 地下水流動特性評価結果の不確実性要因

一般的なモデル化・解析までの作業手順としては、まず、目的に応じて、解析者の経験的判断による調査データの解釈に基づき、水理地質構造の概念モデルが構築される。さらに、この概念モデルを表現するための解析コードが選択される^{12)~13)}。

水理地質構造の概念モデルの構築の際には、地質・地質構造、水文・水理、地下水の地球化学等の様々な調査結果が総合的に活用される。このモデル構築の対象となる岩盤は、ミクロからマクロなスケールの不均質性を有している。しかしながら、これらの情報を取得するための調査は、調査コストや試錐孔等の掘削による場の擾乱の影響の排除等の観点から、調査項目や数量が限定される。特に、調査対象が数km四方のスケールを対象とした地表からの調査段階においては、試錐調査等の調査量が限られ、三次元的な水理地質構造モデルを構築するために必要な情報を取得することが困難である場合が多い。これらの限定された調査量

や岩盤の不均質性により、調査データは、データの不足や時空間的なバラツキ(調査データの不確実性¹³⁾)を伴っている。調査データの不確実性は、地下水流動に関する場の性質、事象、プロセスに対する理解不足を生じさせるとともに、モデル化・解析・評価の一連の過程に大きな任意性を伴うことになる。また、この仮定は、様々なデータ解釈や水理地質構造の概念モデル、モデル化・解析の方法(連続体モデルや亀裂ネットワークモデル、チャンネルネットワークモデル等^{12),14)}(図2))を選択しうる要因であり、データ解釈の不確実性及び概念モデルの不確実性¹³⁾は、地下水流動解析結果等の不確実性を増幅する原因になっている。また、これらの不確実性は密接な相互関係を有しており、それぞれを個別に議論することは困難であることが報告されている¹³⁾。図3にこれらの不確

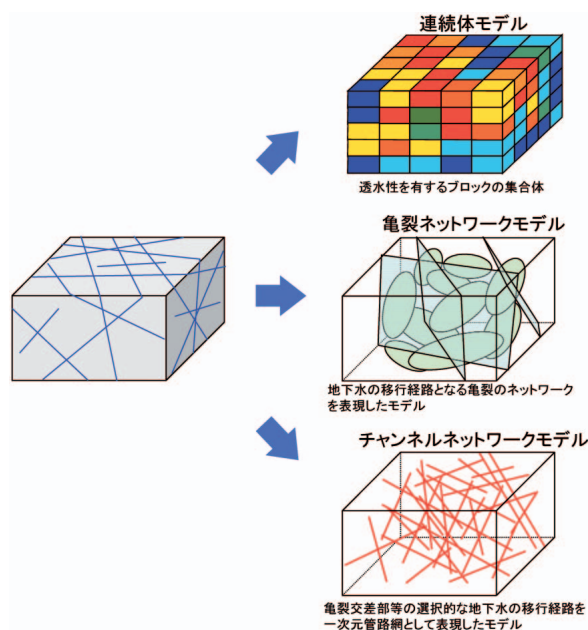


図2 地下水流動のモデル化・解析の方法

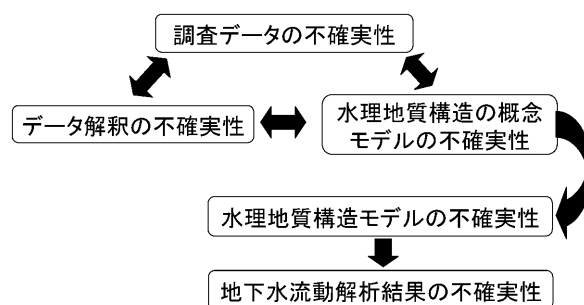


図3 地下水流動特性評価結果における不確実性要因の関係

実性の概略的な関係を示す。

最終的には、調査データやデータの解釈、地質環境のモデル化・解析等の各作業段階における個々の不確実性を系統的かつ定量的に評価する必要がある¹⁵⁾。また、この不確実性の影響が、調査→モデル化・解析→評価といった流れにおける不確実性の影響の伝播の分析と、評価結果に対する重要な不確実性要因の抽出といった不確実性の低減に資する効果的な取り組みが必要となる。このような不確実性低減に向けた取り組みにおいても統合化データフローを活用することで、各作業段階の不確実性の定量化やその影響の伝播を記録・追跡できるようになる。具体的には、統合化データフローは、調査から評価に至るまでのデータの流れを系統的に整理したものであることから、調査から評価までの各作業段階に介在する作業や仮定、不確実性要因、その影響の伝播を統合化データフローに準じて整理することにより、目的とする指標に影響を与える不確実性要因の抽出に資することが期待される。そして、抽出された不確実性要因の調査を次期調査計画に反映させることで、繰り返しアプローチによる不確実性低減に対する効果的な取り組みが可能になると期待される。

水理地質構造の概念モデルについては、不均質連続体モデルや亀裂ネットワークモデルのように岩盤中の不均質構造や不連続面など様々な特徴に着目した手法が提案されている。これらの手法はそれぞれ長所・短所があり、単純に比較検討できるものではないが、近年ではこの水理地質構造の概念モデルの違いが性能評価に与える影響を評価することを目的としてSKBが安全評価報告書SR97においてAMP (Alternative Models Project)を実施している¹⁶⁾。AMPではÅspö島 (SR97では仮想的サイト「Aberg」と呼んでいる)を含む2 km × 2 kmの領域 (深さ1 km)を対象に、亀裂ネットワークモデル、不均質連続体モデル、チャンネルネットワークモデルを採用して、解析対象領域内に設定した仮想的な処分場からの地下水移行時間、F値 ($2LW/Q$, L : 移行距離, W : 亀裂内の流路幅, Q : 地下水流量)、仮想的に設定したキャニスター周辺のダルシー流束を指標にした不確実性解析が実施されている。SR97では、この結果から、3つの概念モデルにより算出された指標に大きな違いはなく、概念モデルの不確実性の影響は小さいと結論付けられている。この理由として、

物性値の入力条件や境界条件等のモデル化・解析条件がコントロールされていることが挙げられる。すなわち、境界条件や入力データ、仮想処分場のレイアウト等の多くの共通した制約条件に基づいてモデル化・解析が実施されており、モデル化プロセスにおける解析者の経験に基づく判断の自由度が制限されていることが原因と述べている¹⁷⁾。

以上のことから、モデル化・解析等に基づいた地下水流動特性評価結果の不確実性を包括的に検討するためには、下記の項目を検討する必要があると考えられる。

- ①対象スケール／調査段階に応じた適切な指標設定
- ②調査データの不確実性評価
- ③モデル化手法に応じたデータ解釈の不確実性評価
- ④概念モデル相互の不確実性評価
- ⑤概念モデルごとに目的とする指標に対するパラメータ応答解析評価

3. 研究の進め方

本研究では、2章で述べた調査データやデータ解釈、モデル化・解析の不確実性がモデル化・解析結果に与える影響を評価するために、同一データセットを用いて、複数の解析チームによるデータの取捨選択を含むデータの解釈、概念モデルの構築、解析コードの選択、及びモデル化・解析を実施した。また、これらの結果を比較することにより、モデル化・解析結果に対する不確実性要因を抽出することを試みた (図4)。

本検討においては繰り返しアプローチによる、効率的な地下水流動特性把握のための、調査→モ

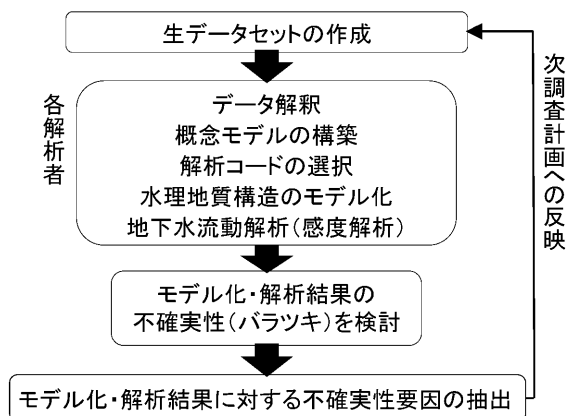


図4 研究手順

デル化・解析→評価の体系化に資することを目的としていることから、2章で述べたAMPとは異なり、解析者の経験を踏まえた判断に基づくデータ解釈や概念モデルの構築、モデル化・解析入力パラメータの設定等において、調査データと矛盾しない範囲で様々なバリエーションを含む包括的なアプローチを採用することとした。なお、各解析チームは、各々が構築した概念モデルに応じた感度解析を実施することによって、概念モデルに応じた不確実性を評価することとした。また、調査の進展（情報量の増加）に応じて、その都度モデルの更新及び地下水流動解析を実施することにより、各調査段階における不確実性要因を抽出し、その結果を次期調査研究計画へ反映させることも目指している。

これまでに、モデル化・解析の1順目として、2000年9月までに取得した調査データ（1順目のデータセット）を用いて感度解析を含む検討を実施した。また、1順目の追加検討として、1順目の検討において抽出された不確実性要因以外の要因を検討するために、解析条件を再設定することによって、モデル化・解析を実施した。さらに、

2順目の検討として、1順目のデータセットに試錐調査データや長期揚水試験結果を追加し、モデルの更新及びキャリブレーションを実施している。本報告では、これらのうち、1順目の実施内容と結果について報告する。

4. モデル化・解析領域の概要

4.1 モデル化・解析領域

モデル化・解析領域（図5）は、超深地層研究所計画の正馬様用地を中心に、東西及び北境界を尾根線、南境界を河川とした南北約6 km、東西約4 kmの領域とした。また、鉛直方向については、境界条件の影響を考慮して地表から標高-3 kmまでとした。モデル化・解析領域周辺の地形は、標高約150~400mの丘陵地形で特徴付けられ、領域北東部から南西部方向に緩やかに傾斜している。領域北東部の標高最高点と南西部の標高最低点の標高差をその距離で除すことによって算出した最大地形勾配は約4%である。領域内には、東から西方向に流れ、モデル化・解析領域の南境界を形成する土岐川（水面標高：約150~120m）のほか、領域中央を北北東から南南西方向に流れる日吉

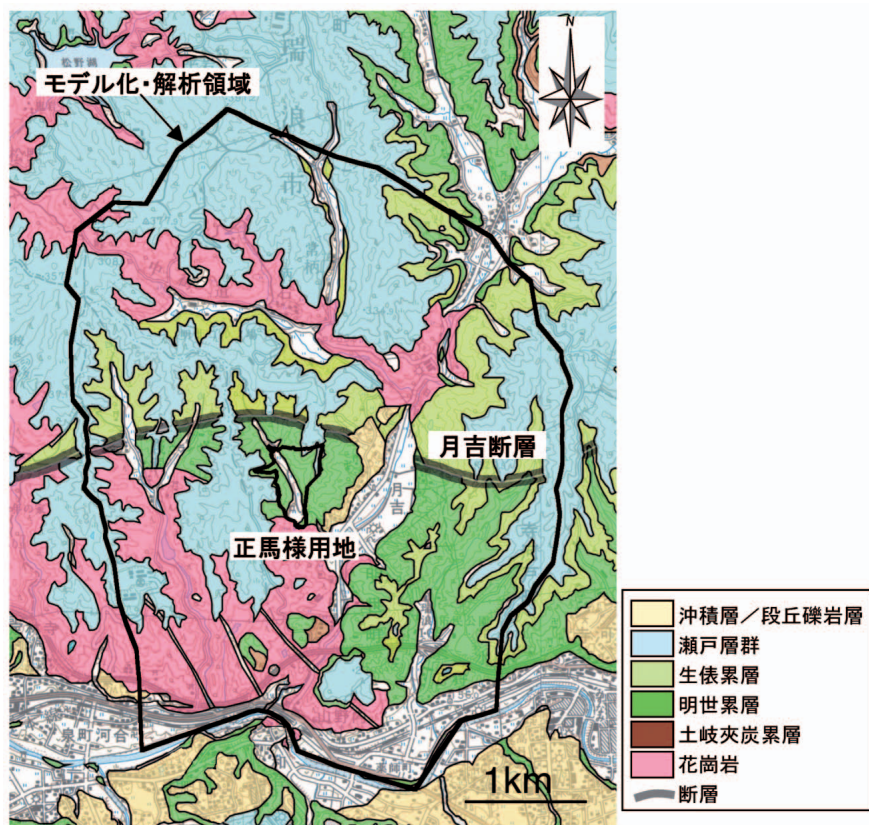


図5 モデル化・解析領域及び地質概要（糸魚川（1980）^{18）}に加筆）

川、領域中央部で西北西から東南東方向に流れる柄石川が存在する。

4.2 地質概要

当該地域の地質は、先新第三紀の花崗岩（約70Ma）からなる基盤を新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群：約15～18Ma）が不整合で覆い、さらにその上位に固結度の低い新第三紀鮮新世の砂礫層（瀬戸層群：約2～5Ma）が不整合で覆っている¹⁸⁾（図5）。瑞浪層群は、下位より、泥岩・砂岩・礫岩からなり亜炭を挟む土岐夾炭累層、凝灰質の泥岩・砂岩を主体とする明世累層、シルト岩・砂岩を主体とする生俵累層の3層に区分される。モデル化・解析領域中央部には、花崗岩及び瑞浪層群を横断して月吉断層が分布している。月吉断層は、ほぼ東西走向で70～80度の南傾斜の逆断層で堆積岩と花崗岩の不整合部での変位は約30mである。

4.3 調査データの概要

モデル化・解析領域における調査結果^{19), 20)}を以下にまとめる（表1）。

リニアメント調査ではSPOT画像、LANDSAT画像及び航空写真の3種類の画像データを用いて、異なるスケールや地形特徴を有するリニアメントを抽出しており（図6）、抽出されたリニアメ

ントの一部は試錐孔調査で抽出された断層の地表面への延長部との整合性が確認されている。

物理探査のうち、地上弾性波探査については、反射法と屈折法を併用し、月吉断層の位置並びに瀬戸層群、瑞浪層群、花崗岩の境界深度が明らかにされているものの、測線が限定されているため、月吉断層以外の主要な構造についてはデータが得られていない。また、地上電磁探査（MT法）により得られた比抵抗の分布から、瑞浪層群と花崗

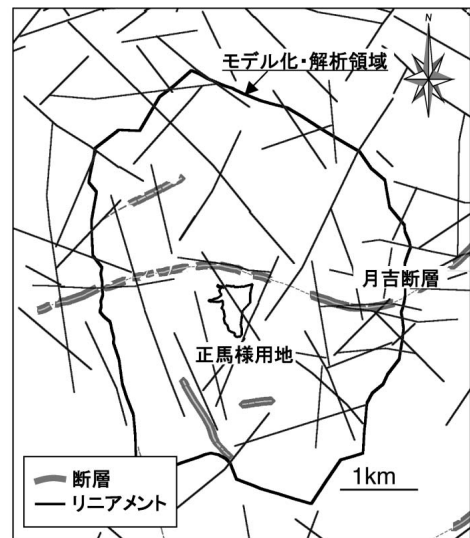


図6 断層及びリニアメント分布

表1 1順目の地下水流動のモデル化・解析に使用したデータセット

種 類	デ ー タ	備 考
文献調査	地形図	
	地表地質図	
空中調査	ランドサット画像	
	スポット画像	
	航空写真	
地上調査	弾性波探査結果	
	電磁探査（MT法）結果	
	水収支観測結果	
試錐調査 (掘削深度500m以上の深層試錐孔：19孔)	地下水位観測結果	試錐孔による観測：全158孔
	コア観察	地質柱状図
	掘削時の逸水流量	
	ボアホールテレビ	割れ目の深度、走向傾斜、開口幅、充填鉱物の有無等の観察
	物理検層	キャリパー検層、密度検層、自然γ線、見掛け比抵抗、マイクロ比抵抗、中性子検層、中性子間隙率、音波検層、自然電位、温度検層等
	水圧観測	試錐孔内の深度方向の水圧分布の観測
	水理試験	パルス試験、スラグ試験、揚水試験

岩の境界（不整合面）の深度分布が推定されている。

水収支観測においては、正馬様用地や東濃鉾山周辺等の河川を対象に観測流域を設定し、それぞれ降雨量、蒸発散量、河川流量等の水文調査がなされている。また、地下水位に関する情報は、浅層試錐調査結果等に基づき整理されている²¹⁾。

モデル化・解析領域においては、数100mから約1,000mの鉛直試錐孔等を用いた調査が実施されている。試錐孔調査においては、掘削時の逸水記録、コア観察、ボアホールテレビ観察、各種物理検層、水理試験、水圧観測等が実施されている。水理試験は数10mから100m程度の区間長で実施した試験と、断層等の主要な構造を対象として数mから10数m程度の区間長で実施した試験に分けられる。前者は岩盤の平均的な透水性を把握することを、後者は特定の構造の透水性を把握することを目的としている。水理試験の結果から花崗岩の透水係数はおよそ $10^{-6} \sim 10^{-12}$ m/sの広範囲に分布し、主要な透水部として、花崗岩上部に発達する割れ目帯、月吉断層に伴う割れ目帯が挙げられる。月吉断層を貫いている試錐孔では、月吉断層を境に断層上盤側より断層下盤側の水圧が高いことが観測されている。このことから、月吉断層は断層に沿って発達する割れ目帯に沿った方向の透水性が卓越する一方で断層に垂直な方向が低透水性といった透水異方性を有していると考えられている^{19), 22)}。

5. モデル化・解析

5.1 解析結果の比較項目

解析結果の比較検討を行うための評価項目としては、統合化データフローに示されている結果の反映項目に基づき、地下水の移行経路や移行時間、移行距離を設定した。地下水の移行経路の出発点は、モデル化・解析領域内の地下水流動方向が大局的に北から南に向かっていることが推定されていること²³⁾や、モデル化・解析領域中央部を東西に走る月吉断層が遮水性を有していることを考慮して、東西走向を有する月吉断層でモデル化・解析領域を南北の領域に分け、それぞれの領域全体の移行経路特性の検討ができるように、東西方向に3点、深度方向に4点（標高-250m, -500m, -750m, -1,000m）に配置した（図7）。また、地下水の移行経路や移行時間、移行距離については、粒子追跡法により算出することとした。

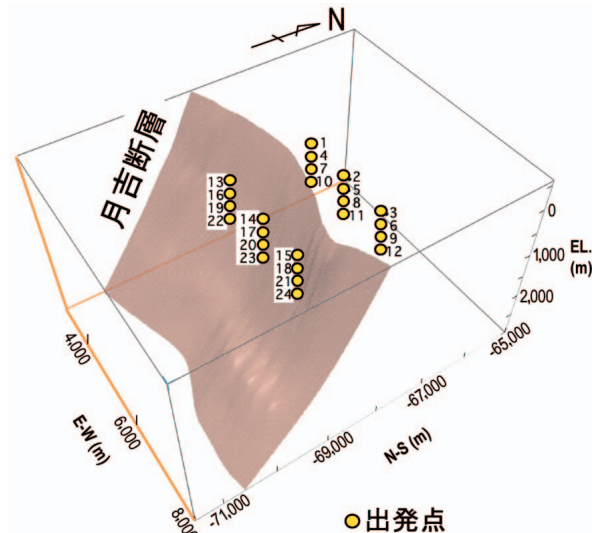


図7 地下水の移行経路の出発点

5.2 1順目のモデル化・解析

(1) モデル化手法及び概要

1順目のモデル化・解析は、各解析者による概念モデルや水理地質構造モデルにおける共通点と相違点を明らかにするために、データセットとモデル化・解析領域以外の制約条件を設けずに実施した。1順目においては、表1に示すデータセットを用いて、それぞれの解析チームがデータの解釈を実施し、その結果に基づく概念モデルの構築及び解析コードの選択を実施した。その結果、岩相・構造ごとに透水不均質性を設定する連続体モデル（TOUGH2²⁴⁾, EQUIV_FLO²⁵⁾）、及び亀裂ネットワークに基づくチャンネルネットワークモデル（Don-Chan²⁶⁾）、岩相・構造ごとに均質な透水性を設定する連続体モデル（POR-SALSA²⁷⁾, Frac-Affinity²⁸⁾）が選択され、それらを用いたモデル化・解析を実施した。表2にそれぞれのモデル化・解析の概要をまとめる^{29)~33)}。なお、地下水流動解析においては、等温状態及び定常状態を仮定した。本報告では、それぞれの解析チームを解析コード名を用いて示す。

(2) モデル化・解析結果

図8に各解析チームの水理地質構造モデルの一例を示す。この図に示される例からも明らかなように、水理地質構造のモデル化の結果、同じ領域を対象に同じデータセットを用いても、多種多様な考え方を採り得ることが分かる。具体的には、すべての解析チームが、月吉断層及び堆積岩と花崗岩の不整合面等の地質構造がモデル化・解析領

表2 地下水流動のモデル化・解析の概要（1 順目）

概念モデル		連続体モデル	連続体モデル	連続体モデル	ハイブリッドモデル	チャンネルネットワークモデル
コード名		TOUGH2	POR-SALSA	EQUIV_FLO	Frac-Affinity	Don-Chan
解析領域		尾根線と河川で囲まれた4 km×6 km領域	解析領域に対応した直方体	尾根線と河川で囲まれた4 km×6 km領域	尾根線と河川で囲まれた4 km×6 km領域	解析領域に対応した直方体
解法		体積差分法	有限要素法	有限要素法	差分法	差分法
格子間隔		ブロック数：39,400 水平方向：100m 鉛直方向： 50m(>0 m) 100m(−1,000 < z < 0 m) >100m(−3,000 < z < −1,000m)	40m×40m×40m 要素数：937,500 節点数：967,176	要素数：87,811 節点数：16,548	節点数：397,059	チャンネル数： 278,046 岩盤部：3方向チャンネル間隔100m
地形		考慮	考慮せず (上面は不整合面)	考慮	考慮	考慮せず (上面は不整合面)
堆積岩		考慮	モデル対象外	考慮	考慮	モデル対象外
主要モデル構造		・月吉断層 ・2リニアメント ・堆積岩層序 ・不整合面	・月吉断層 ・複数のリニアメント ・不整合面 (堆積岩は対象外)	・月吉断層 ・月吉断層周辺割れ目帯 ・堆積岩 ・不整合面 ・花崗岩 (割れ目低密度帯, 割れ目高密度帯, 風化花崗岩)	・月吉断層 ・リニアメント ・断層周辺割れ目帯 ・堆積岩地層構造 ・不整合面 ・花崗岩 (割れ目低密度帯, 割れ目高密度帯, 風化花崗岩)	・月吉断層 ・月吉派生断層 ・リニアメント ・不整合面 (堆積岩は対象外) ・割れ目 (EW・NW方向, 低角度)
母岩の不均質性		・均質ケース ・不均質ケース	均質	不均質異方性 (割れ目構造から透水テンソル算定)	均質	均質異方性 (割れ目方向考慮; EW, NW, 低角度)
感度解析ケースの着眼点		①母岩の不均質性 ②月吉断層の透水性	①断層及びリニアメントのモデル化数 ②月吉断層の透水性 ③地表からの涵養量	①東濃鉱山の有無 ②亀裂大きさ分布 ③堆積岩の透水性	①断層及びリニアメントの透水性 ②側方境界条件	1ケースのみ
境界条件		上方：固定水頭 下方：不透水 側方：固定水頭 東濃鉱山：固定流量 ($5.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$)	上方：涵養量 (233mm/y) 下方：不透水 側方：不透水(河川境界のみ固定水頭)	上方：涵養量 (50mm/y) 下方：不透水 側方：固定水頭(静水圧; 水位は文献 ²³⁾ を参考に設定) 東濃鉱山：圧力水頭0 m	上方：固定水頭 下方：不透水 側方：固定水頭(地下水面からの静水圧) 東濃鉱山：固定フラックス ($4.56 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$)	上方：不透水 下方：不透水 側方：固定水頭(静水圧; 水位は文献 ²³⁾ を参考に設定)
解析結果のバラツキ*	移行時間	4.2倍程度	4.2倍程度	2.5倍程度	4.4倍程度	—
	移行距離	1.3倍程度	1.7倍程度	1.2倍程度	3.1倍程度	—

*指定点11からの移行時間及び移行距離

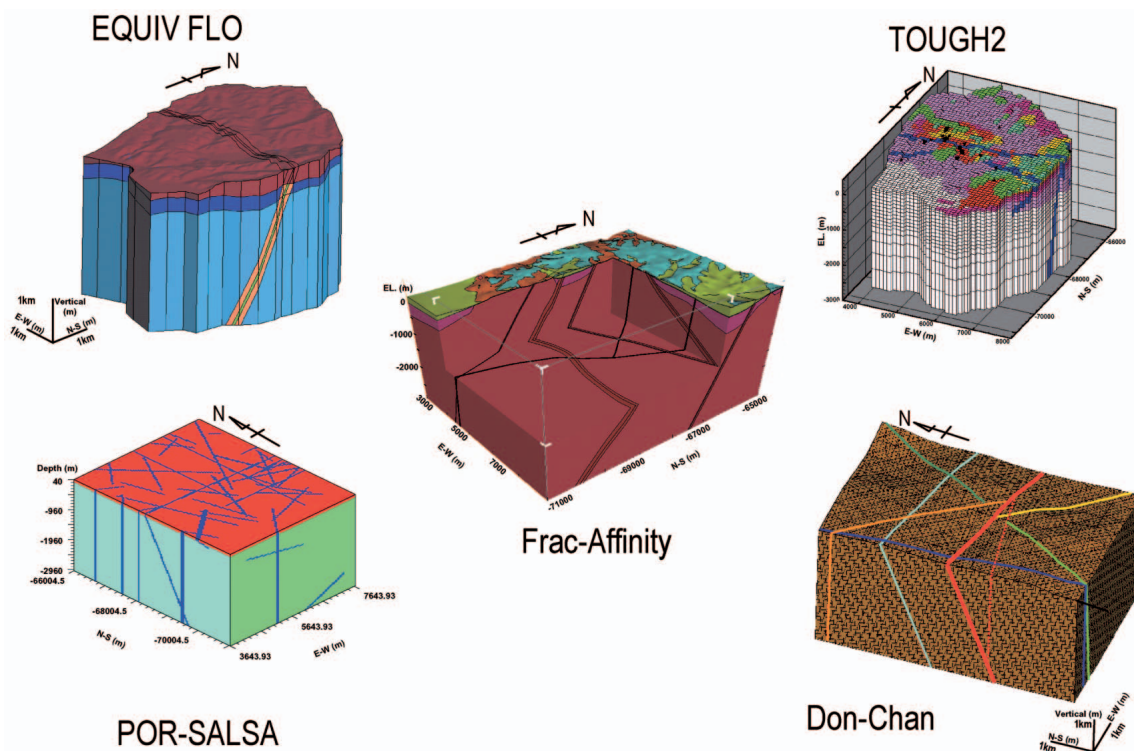


図8 水理地質構造のモデル化結果の一例

域内の地下水流動に影響を及ぼしていると判断し、調査データと矛盾しない範囲でモデル化した。一方、これらの地質構造より小さいスケールのリニアメント分布や岩相区分、割れ目分布等の情報に基づく不均質性に関するモデル化については、各解析チームで差異が認められた。特に、リニアメント分布に基づく不連続構造の設定については、解析チーム間の違いが顕著に現れた。

複数のモデルから推定された地下水の大局的な流動方向は、全て、モデル化・解析領域の北から南もしくは南南東方向であった。

地下水流動解析結果から得られた移行経路の出発点からモデル境界までの地下水の移行時間と移行距離の分布についてモデル間の差異を検討した。図9に一例として、出発点11（月吉断層北側、領域中央部、標高-1,000m）の結果を示す。この結果から、各モデルで実施した感度解析によるバラツキより、解析チーム間によるバラツキ（概念モデル及び水理地質構造モデルの違いによるバラツキ）が大きいことが明らかとなった。具体的には、地下水の移行距離は、2 km程度のグループと6 km程度のグループに、移行時間は、数年から数10年のグループと数100年から数1,000年のグループに分かれた。

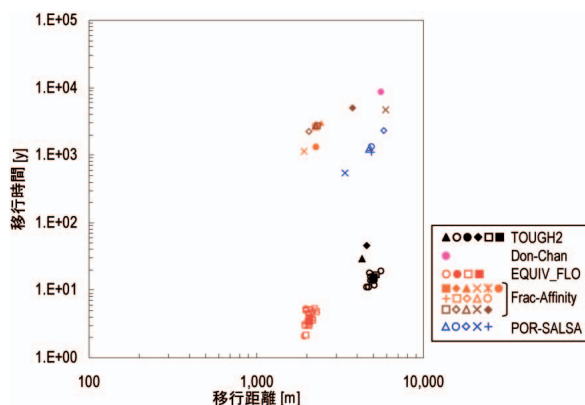


図9 出発点11からの地下水移行距離と移行時間（1順目）

(3) モデル化・解析結果に対する不確実性要因の抽出

各解析チームにより構築された概念モデルや水理地質構造モデルの違いに基づき、地下水の移行時間と移行距離について、考察することにより、モデル化・解析結果に対する主な不確実性要因の抽出を試みた。

地下水の移行距離の違いについては、主にモデル化・解析領域の中央部に存在し、地下水の大局的な流動方向に直交する走向を有する月吉断層のモデル化方法や境界条件設定方法の違いに起因し

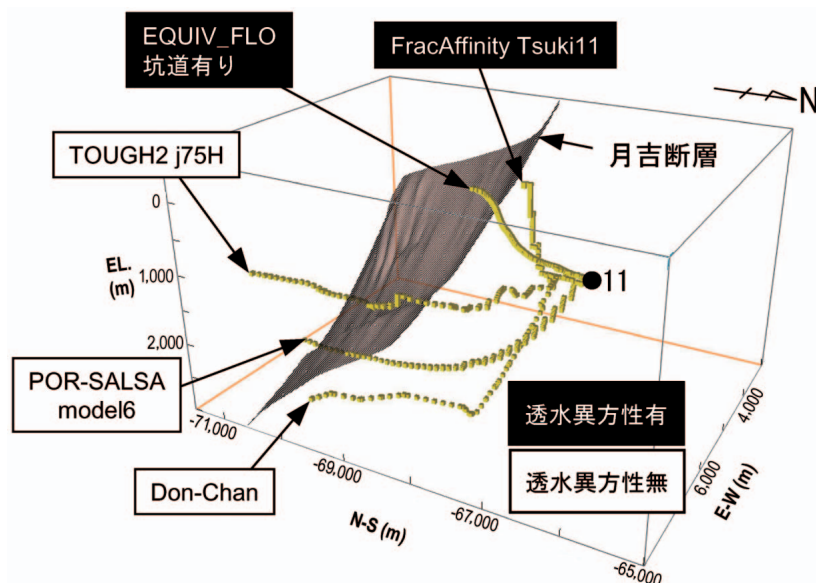


図10 出発点11からの地下水の移行経路（1順目）

ていると考えられる。

図10に出発点11からの地下水の移行経路を示す。図より、出発点11から地表方向へ流れる場合、水平に流れる場合、及びより深部へ流れる場合の3パターンに区分され、これにより移行距離が数倍程度異なる。これは、月吉断層の透水異方性のモデル化方法と境界条件の設定方法の違いによるものと考えられる。EQUIV_FLOとFrac-Affinityは月吉断層の遮水性を強調する際に、透水異方性もしくは断層周辺の高透水性の割れ目帯をモデル化しているために、月吉断層の北側（上流側）で断層や断層周辺の高透水性の割れ目帯に沿った地表方向への流れが生じたと考えられる。Don-Chanも月吉断層について同様のモデル化を行っているものの、上部境界面を不透水境界としているために断層に沿った地表方向への流れは生じなかったと考えられる。TOUGH2及びPOR-SALSAは周辺岩盤よりも低い透水係数を月吉断層に与えているものの、透水異方性や断層周辺の高透水性の割れ目帯をモデル化していないために、EQUIV_FLOやFrac-Affinityと比較して月吉断層周辺の透水コントラストが小さく、地表方向ではなく、水平方向への流れとなったと考えられる。

地下水の移行時間の違いが、数桁に渡って異なっている主な原因は、それぞれのモデルで設定した有効空隙率が数桁に渡って異なっているためであると考えられる。広域地下水流動研究や超深地層研究所計画では、これまでトレーサー試験等を

活用した有効空隙率に関わるデータを取得していないため、移行時間が数100年から数1,000年のグループ（POR-SALSA, Frac-Affinity, Don-Chan）では、一般的な岩石の空隙率に関する文献情報から任意に一律の値もしくはそれぞれの岩相ごとに一定の値（0.01～0.3）を設定した。一方で、移行時間が数年から数10年のグループ（TOUGH2, EQUIV_FLO）では、個々の要素ごとに亀裂密度と亀裂開口幅（EQUIV_FLO）、もしくは亀裂密度と透水係数（TOUGH2）から有効空隙率を算出しており、その値は 10^{-3} ～ 10^{-5} 程度に分布する。そこで、有効空隙率の影響を排除するため、有効空隙率で規格化した移行時間（距離／ダルシー流速）を用いて比較検討した。移行時間の規格化には、それぞれのモデルの代表的な有効空隙率（TOUGH2:0.0001, POR-SALSA:0.01, EQUIV_FLO:0.0001, Frac-Affinity:0.035, Don-Chan:0.01）を用いた。図9に示す移行時間を代表的な有効空隙率で規格化した結果を図11に示す。この結果より、数年から数10年のグループと数100年から数1,000年のグループに分かれた移行時間の違いが大きく低減した。

以上のことから、モデル化・解析結果に対する主な不確実性要因として以下の要因を抽出した。

- ①モデル化する不連続構造（断層やリニアメント）の幾何学的情報や水理学的特性
- ②断層の透水異方性
- ③境界条件
- ④有効空隙率

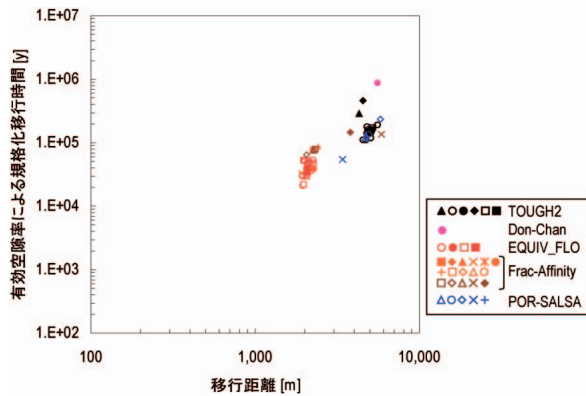


図11 出発点11からの地下水移行距離と規格化移行時間（1順目）

5.3 1順目の追加検討におけるモデル化・解析

(1) モデル化手法及び概要

1順目の検討においては、5.2(3)に示す不確実性要因の影響が大きいことが明らかとなったが、それら以外の要因の影響については検討が困難であった。そこで、追加検討として、地質構造として月吉断層以外のリニアメント構造をモデルから取り除くとともに、境界条件を絞り込むことで、5.2(3)での①と③の不確実性要因を排除した条件で再度モデル化・解析を実施することとした。また、④については、1順目の検討と同様に有効空隙率を必要としないダルシー流速による移行時間を用いることにより、5.2(3)の④の影響を排除して評価することとした。

1順目の追加検討においては、TOUGH2、EQUIV_FLO、Don-Chan、Frac-Affinity、及びMODFLOW³⁴⁾が採用された。Don-Chanについて

は、複雑な境界面形状の取り込みを可能とするようにコードの改良がなされ、堆積岩も含めて地表面形状並びに側面の複雑な境界面形状がモデル化された。MODFLOWは、解析条件等を考慮した上での解析チームの判断により、1順目のPOR-SALSAから変更されたものである。表3にそれぞれのモデル化・解析^{35)~37)}の概要をまとめる。

(2) モデル化・解析結果

解析結果から得られた各出発点からの地下水移行距離と移行時間（ダルシー流速に基づく）の分布が、それぞれのモデルによってどのように異なるかについて検討した。図12に一例として、出発点11の結果を示す。全体的には移行距離のバラツキが1順目の検討より狭まった一方で、ダルシー流速に基づく移行時間はモデル間のバラツキが大きくなる結果となった。表4に1順目の検討と追

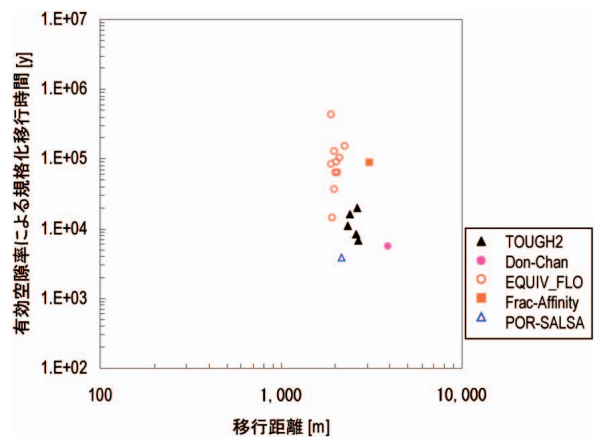


図12 出発点11からの地下水移行距離と移行時間（追加検討）

表3 各モデルの概念モデルと透水係数設定値（追加検討）

コード名	TOUGH2	Don-Chan	EQUIV_FLO	FracAffinity	MODFLOW
概念モデル	不均質連続体	チャンネルネットワーク	不均質連続体	均質連続体 + 割れ目モデル	均質連続体
花崗岩割れ目低密度帯の透水係数	$8.5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ (対数平均値) ^{*1}	$3.2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ^{*2}	$4.5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ (対数平均値) ^{*3}	$5.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$	$4.9 \times 10^{-6} \text{ m/s}$
月吉断層	断層コア部の透水係数（層厚） $7.1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ (100m)	$1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ (9 m)	$1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ (50m)	$1.0 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ (1 m)	$4.9 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ (74.4m)
断層	断層に沿った割れ目帯の透水係数（層厚） $7.2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ (片側100m)	上盤： $7.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ (34.2m) 下盤： $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (34.2m)	$3.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ (片側100m)	$2.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ (上盤：78.9m, 下盤：52.7m)	なし

*1：透水係数データを岩相ごとに整理してその統計値からランダムサンプリングによりモデル化（透水係数（対数値）の標準偏差：1.6）

*2：6パターンの主要割れ目群の個々の透水係数から算出

*3：透水係数データを岩相ごとに整理してその統計値に対してキャリブレーションした値

表4 1順目と追加検討のモデル化・解析結果

	主 な 解 析 条 件				解 析 結 果 の バ ラ ツ キ*		
	地質構造	境界条件	透水係数分	有効空隙率	移行経路	移行時間	移行距離
1順目	任意	任意	任意	任意	大	4,000倍程度	3.1倍程度
追加検討	共通条件	共通条件	任意	考慮なし	小	110倍程度	2.8倍程度

*指定点11からの移行経路, 移行時間, 移行距離

加検討の解析条件及び解析結果の比較を示す。

(3) モデル化・解析結果に対する不確実性要因の抽出

移行距離のバラツキが1順目の検討より狭まった理由については、境界条件や主要断層を月吉断層に限定するなどの解析条件に制限を設けることにより、地下水の移行経路が各モデル間でほぼ同様の結果となったためと考えられる。図13は出発点11からの移行経路の様子を示したものである。月吉断層の北側で地表方向へ移行するとともに、河川（日吉川）に沿った谷地形方向へ湧出していることがわかる。Don-Chanについては月吉断層に沿って地表付近に移行した後、地表付近で月吉断層を越えて谷地形に沿って下流側へ移行しているため、他のモデルに比べて移行距離が長い。移行時間の違いについては、ダルシー流速が異なるためと考えられる。図13には移行経路に沿ったダ

ルシー流速を示しているが、MODFLOWやDon-Chanは他に比べてダルシー流速が大きく、TOUGH2も部分的にダルシー流速の大きな部分が見られる。このようなダルシー流速の違いが、移行時間の違いとして現れていると考えられる。このダルシー流速の違いは、岩盤中の透水特性の設定値の違いに起因していると考えられる。表3には各モデルの花崗岩健岩部の透水係数、月吉断層コア部と月吉断層に沿った割れ目帯の透水係数と厚さを示しているが、透水係数設定に関しては、10孔以上の試錐孔で実施された水理試験結果から算定された透水係数について、それぞれの解析チームにおいて異なる解釈がなされた。解釈の違いは大きく二分され、岩相ごとに整理して各々の対数平均値を均質モデルへ適用したもの（Frac-Affinity, MODFLOW）や、確率密度関数を求めてその分布をモデルに適用したもの（TOUGH2,

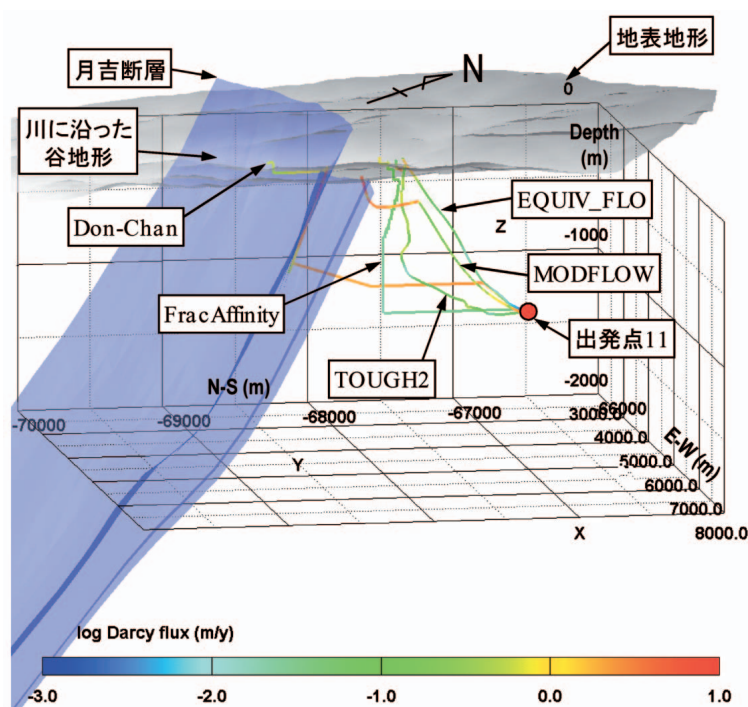


図13 出発点11からの地下水の移行経路と経路沿いのダルシー流速（追加検討）

EQUIV_FLO)である。また、様々な試験目的や試験区間長で取得された透水係数について、解析チームによって、その取捨選択方法が異なっている。

一方、月吉断層においても、要素やグリッドの形状やサイズといった解析コード等の制約によりモデル上の層厚が一定でない場合が生じるため、モデル上の層厚を考慮した透水係数の設定が必要であった。

これらのことから、5.2(3)①～④に示す不確実性要因の他に、以下の点がモデル化に必要なデータ整理の過程で生じる不確実性の低減に有効であると考えられる。

- ①これまでに取得されたデータについては、各データ取得時の調査目的や調査対象、試験区間、試験方法等の背景情報と共に保管することにより、調査とモデル化のコミュニケーションを図ること。
- ②今後の調査計画においては、モデル化手法に依拠して「どこの水理特性を把握するためにどのような試験を実施していくか」という調査・モデル化方針を明確にすること。
- ③断層の水理学的特性の定量的評価に加えて、断層の層厚などの幾何学的性状を定量的に評価すること。

6. 次期調査研究計画への反映

1 順目の検討及びその追加検討により、抽出されたモデル化・解析結果に対する主な不確実性要因に基づき、広域地下水流動研究及び超深地層研究所計画での調査研究計画に以下のように反映した。

- ①リニアメントのような間接的な情報のみに基づいて不連続構造（断層等）をモデル化する際には、解析者の解釈の自由度が大きくなる。したがって、リニアメントの地質学的意味を確認することを目的とした地上物理探査を実施した³⁸⁾。
- ②不連続構造については、「遮水性」といった定性的な評価のみならず、その幾何学的性状や透水異方性、周辺岩盤との透水コントラスト等の定量的評価が必要である。したがって、地上物理探査等によって、分布が推定された断層について、これらの特性の定量的な評価を目的とした試錐調査を計画した。
- ③境界条件については、より広域的な空間スケ-

ルでの地下水流動場を考慮して設定すること（側方境界条件）及び評価対象の空間スケールに応じた地表での水収支データを取得すること（上部境界条件）が必要である。したがって、側方境界条件では、より広域的な空間スケールにおけるモデル化・解析を実施し、後背地地形が地下水流動場に与える影響を評価することにより、適切なモデル化・解析領域及び境界条件の設定を行った³⁹⁾。上部境界条件では、モデル化・解析領域の空間スケールに応じた地表での水収支観測を実施するための検討を開始した。

- ④地下水の実流速を求めるための有効空隙率については、既に計画している孔間水理試験にトレーサー試験等の調査を盛り込むことを検討している。
- ⑤調査・モデル化方針を明確にするために、調査担当者及びモデル化担当者による調査計画の策定を実施した。
- ⑥これまでに取得されたデータについて、データ取得時の調査方針等の背景情報の保管を含めたデータ管理方法について検討している。

7. まとめ

本研究では、統合化データフローを利用した繰り返しアプローチにより、効率的に地下水流動特性を把握するための調査→モデル化・解析→評価の体系化に資することを主な目的として、数km四方の空間スケールを有する領域において、複数の解析者の経験に基づくデータ解釈や概念モデルの構築、モデル化・解析を実施した。また、これらのモデル化・解析結果を比較検討することにより、モデル化・解析結果に対する不確実性要因の評価及び抽出を試みた。

その結果、データ解釈や概念モデルの構築、水理地質構造のモデル化等における解析者の考え方の共通点と相違点を明らかにするとともに、その相違点に起因した地下水流動解析結果における地下水の移行経路や移行時間、移行距離のバラツキを示すことができた。また、この相違点を生じさせる不確実性要因から、特に地下水流動解析結果に与える影響の大きい要因を抽出することができた。さらに、この結果に基づき、不確実性を低減するための調査項目を提言し、広域地下水流動研究及び超深地層研究所計画での調査研究計画に反映した。

以上のことから、複数の解析者の経験に基づくデータ解釈や概念モデルの構築、モデル化・解析を実施し、その結果を比較検討することは、地下水流動特性を把握するための効率的な調査研究計画策定に有効な手段であると考えられる。

8. 今後の進め方

本報告では、地下水流動特性評価に関する調査→モデル化・解析→評価の繰り返しアプローチの1順目の結果について報告した。このモデル化・解析では、モデル化プロセスにおける解析者の経験に基づく判断の自由度を制限した上で実施されたAMPに対し、この経験に基づく判断を積極的に取り入れることにより、調査データやデータ解釈、概念化、モデル化・解析等の各作業段階における不確実性を包括的に取り扱った。しかしながら、この各作業段階における個々の不確実性がモデル化・解析結果に与える影響の評価には至っていない。したがって、各調査段階におけるモデル化・解析に対する不確実性要因に関する評価においては、これら各作業段階における個々の不確実性の影響について定量的に評価するとともに、この不確実性の影響が、調査→モデル化・解析→評価のデータの流れにおいてどのように伝播するかについて検討する必要がある。具体的には、これまで実施してきたモデル化・解析を対象として、それらの解析に至る作業を、「調査」→「生データ」→「解釈／データセット」→「概念化／モデル化／解析」→「アウトプット」までのデータの流れとそれに介在する作業や仮定を統合化データフローに準じて整理する。また、このデータの流れの整理結果に基づき、調査データやデータ解釈、概念化、モデル化・解析等の各作業段階における個々の不確実性がモデル化・解析結果の不確実性に与える影響について、モデル化手法ごと及びモデルの更新ごとに比較、分析する予定である。さらに、これらの分析結果に基づいて、地下水流動解析結果に大きな影響を与える不確実性要因を抽出するとともに、それを解決するために必要な調査データ・手法やモデル化・解析手法について検討する予定である。

一方で、地下水の同位体組成等の情報によるモデル化・解析結果のそのものの信頼性向上に関する検討を平行して実施し、モデル化・解析結果のバラツキの低減を試みる予定である。

謝辞

本研究の実施にあたり、それぞれのモデル化・解析は以下の諸氏により実施されました。ここに記して感謝の意を表します。EQUIV FLO:下茂道人氏、西 篤望氏、文村賢一氏(大成建設株式会社)、Don-Chan: 森田豊氏 (Package-D)、渡辺邦夫氏 (埼玉大学)、TOUGH2: Christine Doughty氏、Kenzi Karasaki氏 (Lawrence Berkeley National Laboratory)、POR-SALSA及びMODFLOW: Sean A. McKenna氏、Mehdi Eliassi氏 (Sandia National Laboratories)。また、モデル化・解析結果の取りまとめについては、井尻裕二氏、鈴木俊一氏 (大成建設株式会社) に御協力いただきましたことをお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構: “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性、地層処分研究開発第2次取りまとめ 総論レポート”, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 99-020 (1999).
- 2) 核燃料サイクル開発機構: “高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究報告—平成13年度報告—”, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-003 (2002).
- 3) 官報: “特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律” (2000).
- 4) 核燃料サイクル開発機構: “超深地層研究所 地層科学研究基本計画”, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2001-018 (2002).
- 5) 動燃事業団: “広域地下水流動研究基本計画書”, 動燃事業団技術資料, PNC TN7020 98-001 (1997).
- 6) 核燃料サイクル開発機構: “超深地層研究所計画 年度報告書 (平成12年度)”, サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2001-011 (2001).
- 7) 大澤英昭, 中野勝志, 他: “不確実性を考慮した地質環境特性評価の基本的考え方について”, 土木学会第57回年次学術講演会論文集, 平成14年CS10-002, pp. 385-386 (2002).
- 8) 澤田 淳, 三枝博光, 他: “水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価 (その1) —複数の概念モデル化手法による不確実性の検討—”, 亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム論文集, pp. 249-258 (2001).
- 9) 三枝博光, 澤田 淳: “地質環境特性調査における地下水流動の不確実性評価に対する取り組み”, 第18回バックエンド夏期セミナー資料集, pp. 1.5-1-1.5-21 (2002).
- 10) 澤田 淳: “地表からの調査段階における地下水流動評価について”, 第19回岩盤システム工学セミナー「放射性廃棄物の地層処分特集 (その2)」, システム総合研究所, pp. 131-150 (2002).
- 11) 澤田 淳, 三枝博光, 他: “複数のモデル化手法を用いた地下水流動評価の不確実性について”, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, pp. 161-166

- (2002).
- 12) Anderson, M. P. and Woessner, W. M.: "Applied groundwater modeling Simulation of flow and advective transport", Academic press, Inc (1992).
 - 13) OECD/NEA: "Review of safety assessment methods" (1991).
 - 14) Sahimi, M.: "Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock", VCH Verlagsgesellschaft mbH (1995).
 - 15) Andersson, J. and Grundteknik, G.: "Data and data uncertainties, Compilation of data and data uncertainties for radionuclide transport calculations" SKB Technical Report, TR-99-09 (1999).
 - 16) SKB: "Deep repository for spent nuclear fuel, SR97-Post-closure safety", SKB Technical Report, TR-99-06 (1999).
 - 17) Selroos, J., Walker, D. D. et al.: "Comparison of alternative modeling approaches for ground water flow in fractured rock", Journal of Hydrology, vol. 257, pp. 174-188 (2002).
 - 18) 糸魚川淳二: "瑞浪地域の地質", 瑞浪市化学博物館専報, No. 1, pp. 1-50 (1980).
 - 19) 核燃料サイクル開発機構: "超深地層研究所計画の現状—平成8年度~11年度—", サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2001-001 (2001).
 - 20) 核燃料サイクル開発機構: "広域地下水流動研究の現状—平成4年度~11年度—", サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2001-001 (2001).
 - 21) 斎藤 庸, 坂森計則: "広域地下水流動解析対象地域における地下水位データ整理業務", サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 日本工営), JNC TJ7440 2000-010 (2000).
 - 22) 竹内真司, 下茂道人, 他: "1000m ボーリング孔を用いた圧力干渉試験による断層近傍の透水性調査", 第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 296-300 (2001).
 - 23) 須山泰宏, 三枝博光: "広域地下水流動研究における地質構造モデルの構築と地下水流動解析", サイクル機構研究報告, JNC TJ7400 2000-012 (2000).
 - 24) Pruess, K.: "TOUGH2-A general-purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow", Rep. LBL-29400, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA (1991).
 - 25) 下茂道人, 山本 肇: "等価不均質連続体モデルによる亀裂性岩盤の浸透流解析手法", 大成建設技術研究所報, pp. 257-262 (1996).
 - 26) 田中達也, 渡辺邦夫, 他: "地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発 その1—解析の考え方—", 応用地質, 35巻, 3号, pp. 22-33 (1994).
 - 27) Martinez, J., P. Hopkins et al.: "LDRD Final report: Physical simulation of nonisothermal multiphase multicomponent flow in porous media", SAND97-1766, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico (1997).
 - 28) 稲葉 薫, 三枝博光 他: "地下水流動の予測解析統合システム (GEOMASS システム) の概要と東濃地域への適用事例", 地下水学会誌, 第44巻第2号, pp. 105-123 (2002).
 - 29) Doughty, C., Karasaki, K.: "Evaluation of Uncertainties due to Hydrogeological Modeling and Groundwater Flow Analysis (2)-LBNL Effective Continuum Model Using TOUGH2-", 亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム論文集, pp. 259-268 (2001).
 - 30) Shimo, M., Nishijima, N. et al.: "Evaluation of Uncertainty due to Hydrogeological Modeling and Groundwater Flow Analysis (3)-Taisei Equivalent Heterogeneous Continuum Model using EQUIV_FLO-", 亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム論文集, pp. 269-278 (2001).
 - 31) 森田 豊, 渡辺邦夫: "水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価 (その4) —大断層の地下水流動と物質移動に与える影響に着目したフラクチャー・ネットワーク解析—", 亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム論文集, pp. 279-288 (2001).
 - 32) McKenna, S., Eliassi, M. et al.: "Evaluation of Uncertainties due to Hydrogeological Modeling and Groundwater Flow Analysis (5)", 亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム論文集, pp. 289-298 (2001).
 - 33) 三枝博光, 前田勝彦, 他: "水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価 (その6) —不連続構造及び水理学的境界条件に着目した地質構造・水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析—", 亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム論文集, pp. 299-308 (2001).
 - 34) McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W.: "A Modular Three-dimensional finite-difference ground-water flow model", Book 6, Modeling Techniques, Scientific Software Group, Washington, D. C., (1988).
 - 35) 井尻裕二, 鈴木俊一, 他: "水理地質構造の不確実性を考慮した水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析", サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 大成建設), JNC TJ7400 2002-003 (2002).
 - 36) Eliassi, M. and McKenna, S.: "Long-term Pumping Test at MITU Site, Toki, Japan: Hydrogeological Modeling and Groundwater Flow Simulation", SAND REPORT, SAND 2003-0698 (2003).
 - 37) 三枝博光, 稲葉 薫, 他: "断層の透水異方性に着目した水理地質構造のモデル化・地下水流動解析—東濃地域を例として—", 第32回岩盤力学に関するシンポジウム論文講演集, pp. 371-376 (2001).
 - 38) 松岡稔幸, 上原大二郎, 他: "花崗岩地域を対象とした反射法弾性波探査の適用", 日本応用地質学会 中部支部 平成14年度支部研究発表会・講演会予稿集, pp. 31-36 (2002).
 - 39) 稲葉 薫, 三枝博光, 他: "深部地下水の流動系を把握するためのモデル化領域とその境界条件の設定に関する検討", 第32回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, pp. 359-364 (2002).