

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試み

三枝博光* 澤田淳**

数 km 四方程度の空間スケールにおける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等の掘削による場の擾乱の影響等の観点から、調査項目や数量が限定される。また、岩盤は、断層や割れ目等による透水不均質性を有している。このように、限定された調査量や岩盤の不均質性に起因した様々な不確実性が、水理地質構造のモデル化および地下水流動解析結果に対して影響を与えていると考えられる。

このことから、これらの不確実性がモデル化・解析結果に対して与える影響を評価すること、およびモデル化・解析結果に対する影響因子を抽出することは、効率的に地下水流動特性調査を進める上で重要である。

本研究では、これらを検討することを目的に、数 km 四方の空間スケールの領域において、複数の解析者の経験に基づくデータの解釈や概念モデルの構築、および水理地質構造のモデル化と、それに基づく地下水流動解析を実施した。その結果、水理地質構造のモデル化手法等の違いによって、水理地質構造のモデル化および地下水流動解析の結果に違いが生じていることを確認するとともに、地下水の移行距離や移行時間といった地下水流動解析結果に違いを生じさせる主要な因子を抽出することができた。

Keywords: 不確実性, 水理地質構造モデル, 地下水流動解析, 地下水移行経路

It is difficult for a modeler to obtain a complete data-set for hydrogeological modeling and groundwater flow analysis. Because hydrogeological condition in fractured rock such as granite has heterogeneity due to faults and joints, and the information that can be obtained from surface and borehole investigations is often limited. In order to establish effective investigation procedures for hydrogeological characterization, it is important to understand the influence of some uncertainties due to the heterogeneity and limited information on the results of hydrogeological modeling and groundwater flow analysis.

At a scale of several kilometers, hydrogeological modeling and groundwater flow analyses were performed by five modelers. Through this study, the significant factors to predict groundwater travel time and path length could be extracted.

Keywords: uncertainty, hydrogeological model, groundwater flow analysis, groundwater flow path

1 はじめに

地下水流動特性を把握するための調査においては、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。また、岩盤は、断層や割れ目等による透水不均質性を有している。

このように、限定された調査量によって、不均質性岩盤の地下水流動特性を評価する際には、パラメータやデータ解釈、そしてこれらに基づき構築する概念モデル等に不確実性が存在し、これらの不確実性が水理地質構造のモデル化および地下水流動解析（以下、モデル化・解析）結果に対して影響を与えていると考えられ、概略的にそれらの関係は Fig.1 のように示される。

理想的には、調査データやデータ解釈、概念化、モデル化・解析等の各種・各段階における個々の不確実性を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・評価といった流れにおいてどのように伝播

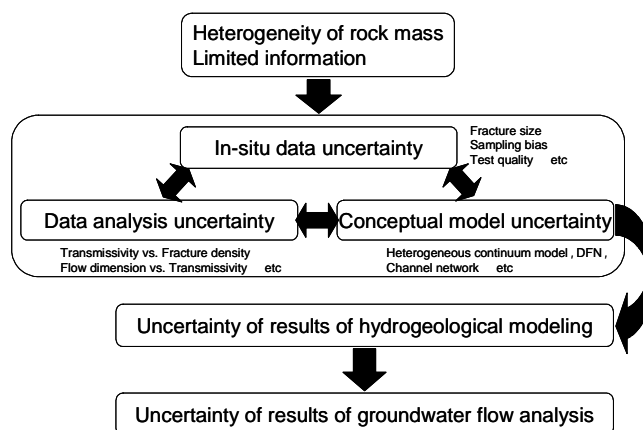


Fig.1 Uncertainties of results of hydrogeological modeling and groundwater flow analysis

するかについて分析し、評価結果に対して重要な影響因子を抽出することが必要である。

これらの不確実性のうち、概念モデルの不確実性に関する評価については、SKB がまとめた安全評価報告書 SR-97[1]の一環として Alternative Models Project（以下、AMP）において検討されている。詳細は 3 章で述べるが、この検討では、調査データに基づくモデル化・解析入力パラメータの設定までの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、多くの共通した制約条件下で実施されている。

本報告では、この SKB における不確実性評価に関する検討事例を踏まえ、核燃料サイクル開発機構が岐阜県

A study of uncertainty evaluation of groundwater flow for geological/hydrogeological characterization, by: Hirimitsu Saegusa (saegusa@tono.jnc.go.jp), Atsushi Sawada

本稿は日本原子力学会バックエンド部会第 18 回「バックエンド夏季セミナー」における講演内容に加筆したものである。

* 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所 超深地層研究グループ Underground Research Group, Mizunami Underground Research Laboratory, Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-63

** 核燃料サイクル開発機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ Repository System Analysis Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works, Japan Nuclear Cycle Development Institute

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村 4-33

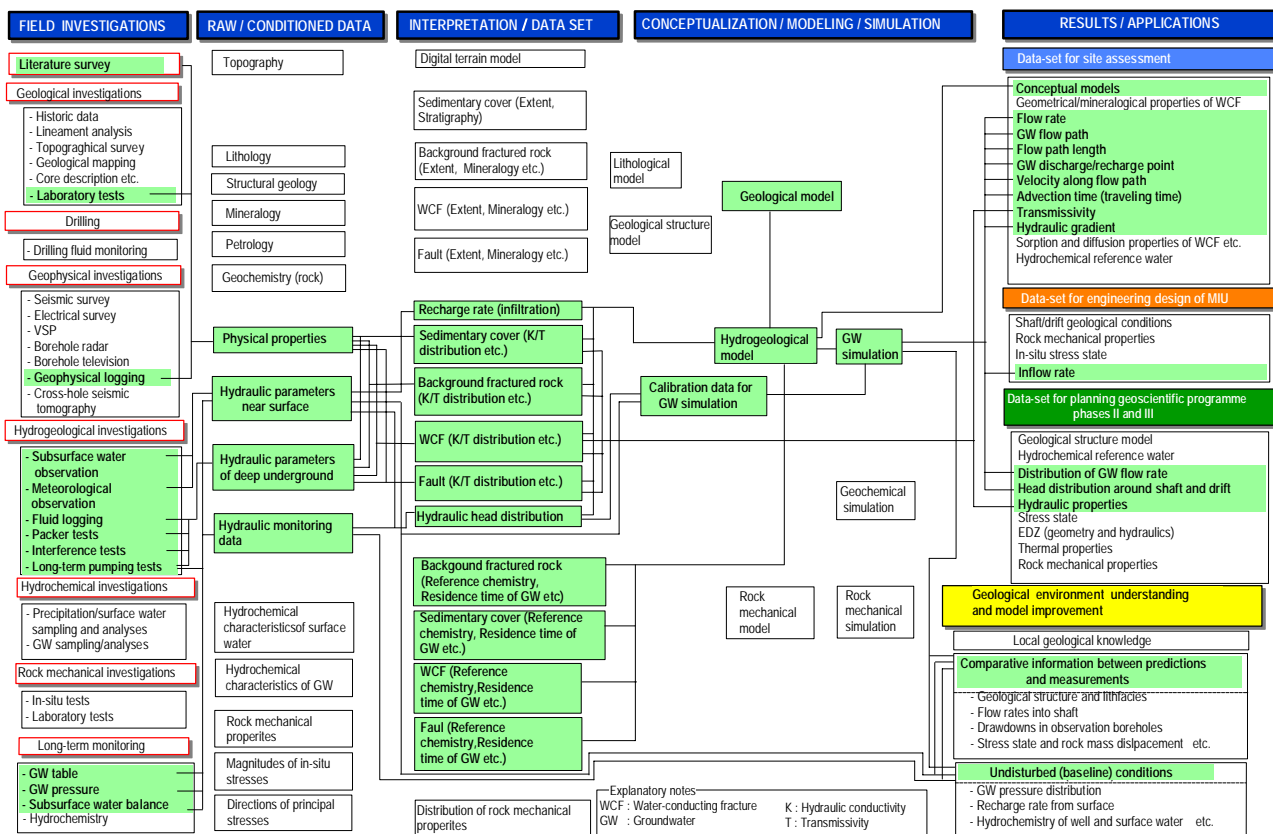


Fig.2 Geo-synthesis data flow (hydrogeology)

東濃地域において実施している超深地層研究所計画[2]および広域地下水流動研究[3]の一環として、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実施した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試みについて紹介する。本検討では、AMPとは異なり、解析者の経験に基づいたデータの解釈、概念モデルの構築、およびモデル化・解析を実施した。

2 不確実性低減に向けた地質環境特性調査でのくり返しアプローチ

超深地層研究所計画および広域地下水流動研究は、地層処分研究開発の基盤となる深地層の科学的研究の一環として実施しているものである。これらの研究は、異なる空間スケールにおける深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤を整備することを主たる目標としている。

近年では、超深地層研究所計画および広域地下水流動研究を対象として、統合化データフロー[4]を用いたくり返しアプローチにより、情報の過不足や不確実性など、地質環境に対する理解度を評価し、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[5]。統合化データフローおよびくり返しアプローチについて Fig.2, 3 に示す。統合化データフローは、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

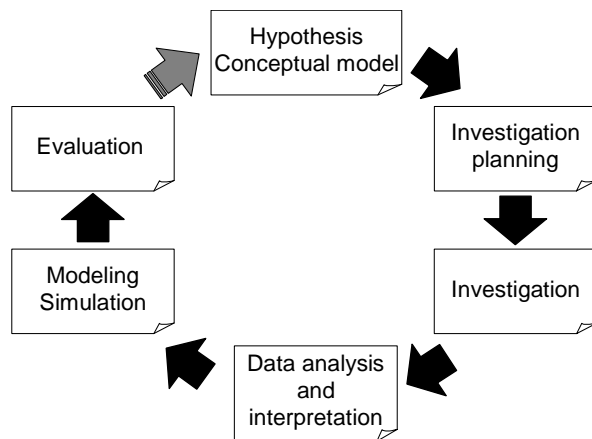


Fig.3 Iterative approach for characterization of geological environment

反映項目を系統的に整理したものであり、この統合化データフローを基礎として、段階的に行われる調査に応じて情報が增加する過程において、調査・解析・評価の一連のプロセスをくり返し行うこととしている。

3 不確実性評価に関する検討事例(SKBでの事例)

地下水流動特性評価に対しては、不均質連続体モデルや亀裂ネットワークモデル等のように不均質性岩盤内の地下水流動を評価するための様々な手法が提案されている。

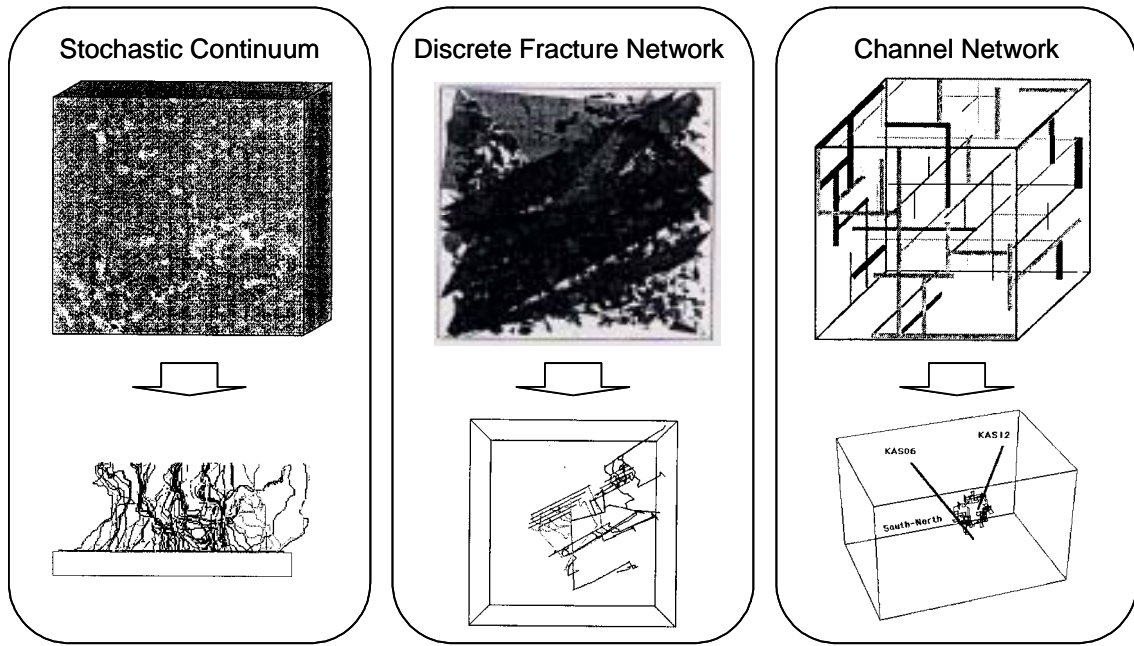


Fig.4 Conceptual hydrogeological models for AMP

近年、亀裂性岩盤中の地下水 / 物質移行に対する概念モデルの違いが、地層処分安全評価に与える影響を評価することを目的として、安全評価報告書 SR-97 において AMP を実施している。AMP では 2km×2km の領域の仮想サイトを対象に、Fig.4 に示すように亀裂ネットワークモデル、統計的不均質連続体モデル、チャンネルネットワークモデルを用いて、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), および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とした不確実性解析が実施されている。

これらの指標に対する解析結果を Fig.5 に示す。SR-97 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。これは、地下水流動のモデル化・解析結果の比較のために解析条件が良くコントロールされていることが理由の一つに挙げられる。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解析が実施され、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も指摘されている[6]。このようなアプローチによる不確実性評価においては、調査データに基づくデータ解釈の違いがモデル化・解析結果に与える影響を検討することが困難であると考えられる。

4 複数のモデル化手法による不確実性の検討

4.1 研究内容

本研究は、パラメータやデータ解釈、概念モデルの不確

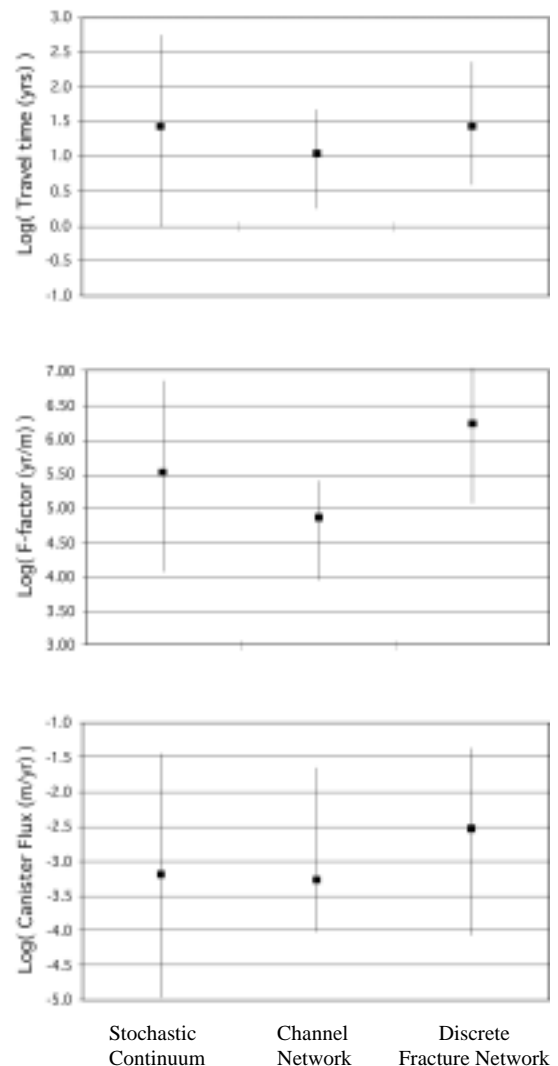


Fig.5 Results of AMP (Selroos et al, 2002)

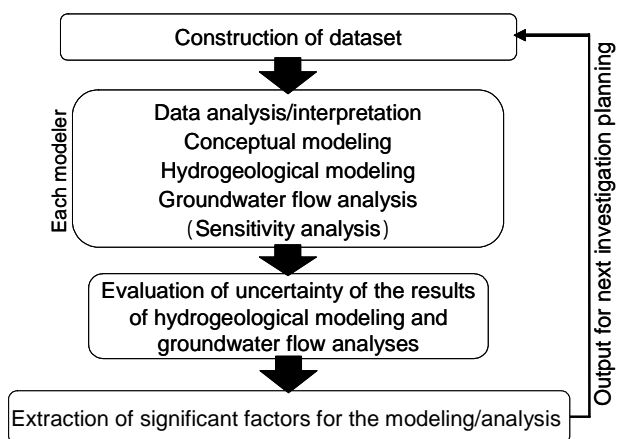


Fig.6 Study flow for multiple modeling approach

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、Fig.6 に示すように、同一データセットを用いて、複数の解析者によるデータの解釈、概念モデルの構築、およびモデル化・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・解析結果に対する影響因子を抽出することを検討した[7-8]。

本検討では、く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いることから、3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した。

なお、各解析者は、それぞれの着目点に対する感度解析を実施することによって、概念モデルに応じたパラメータの不確実性を評価することとした。

また、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、任意の点からの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の設定にあたっては、モデル化・解析領域内の地下水流動方向が大局的には北から南に向かっていることが推定されていること[9]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[10-11] Fig.7 に示すように、同断層を挟んで北側と南側に配置した。また、地下水の移行経路や移行時間、移行距離については、パーティクルトラッキング法により算出することとした。

なお、地下水流動解析においては、等温状態および定常状態を仮定した。

4.2 モデル化・解析領域

モデル化・解析領域を Fig.8 に示す。モデル化・解析領域は、超深地層研究所計画の正馬様用地を中心に、東西お

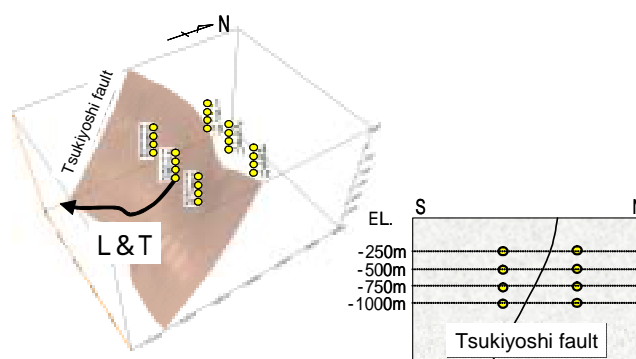


Fig.7 Initial points for particle tracking calculations

よび北境界を尾根線、南境界を河川とした南北約 6km、東西約 4km 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-3km 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、領域北部から南部方向に緩やかに傾斜し、その勾配は北東から南西方向に最大約 4%を示す。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。

4.3 地質概要

モデル化・解析領域周辺の地質図を Fig.9 に示す。当該地域の地質は[12]、先新第三紀の花崗岩からなる基盤の上位を新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が不整合で覆い、

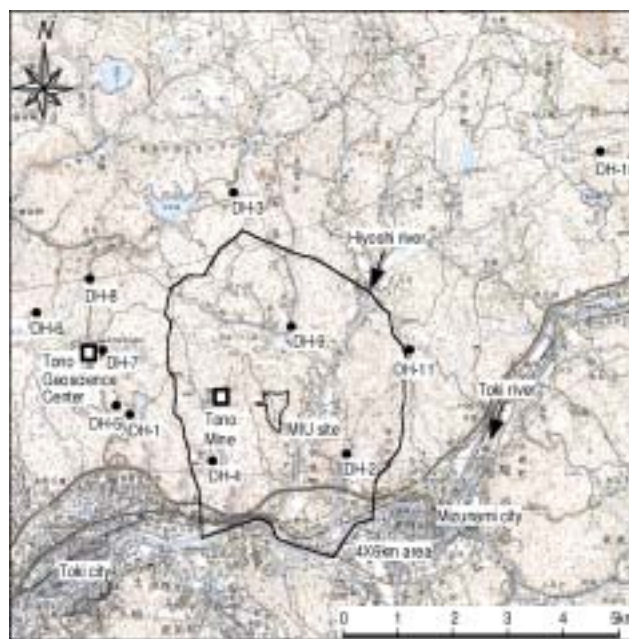


Fig.8 Study area and location of boreholes

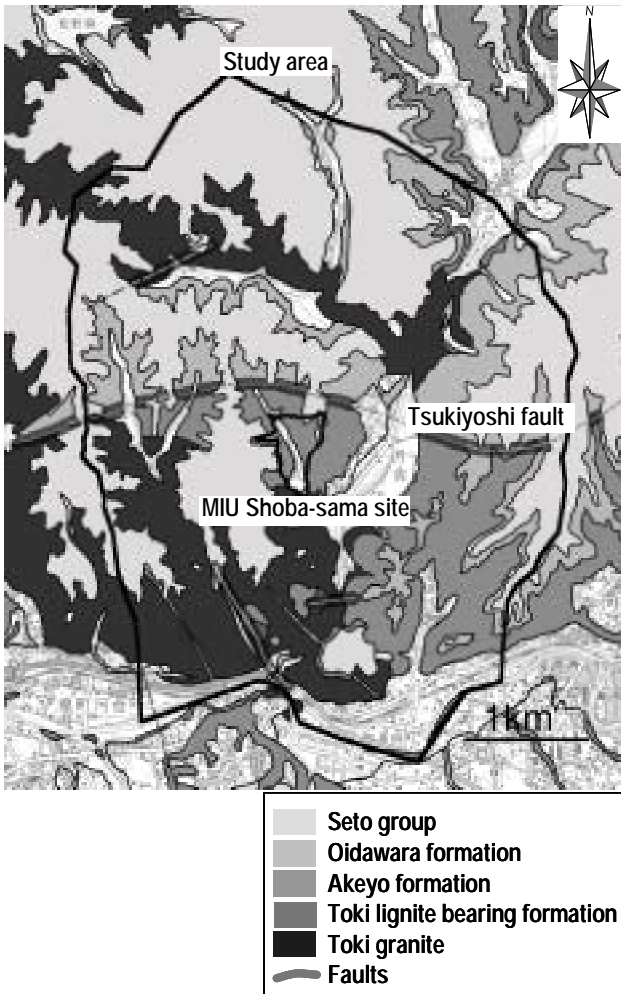


Fig.9 Geological map around the study area

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）が不整合で覆っている。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炭灰累層、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、花崗岩および瑞浪層群を切る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落差は約 30m である。

4.4 調査データの概要

広域地下水流動研究においては、10km 四方の領域を対象に Fig.8 に示す数 100m から約 1000m の鉛直試錐孔等を用いた調査が実施されている[13]。また超深地層研究所計画の正馬様用地においては、東西約 400m、南北約 700m の逆三角形を呈する正馬様用地内で、数百メートルから約 1000m の鉛直試錐孔等を用いた調査が実施されている[10]。また、地質調査、物理探査、水収支観測、水理試験、物理検層、地下水位・水圧および掘削水の連続観測等の様々な調査を実施している。

Fig.10 にリニアメント分布図を示す。リニアメント調査

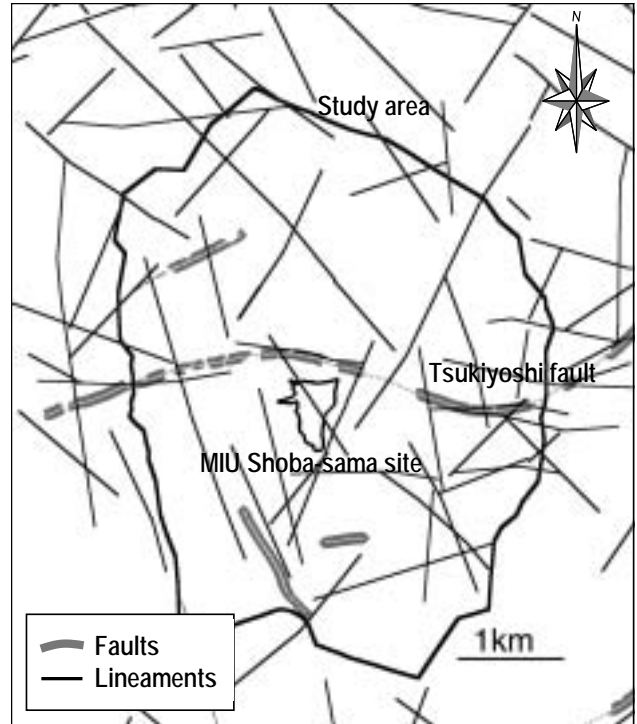


Fig.10 Lineament distribution

には SPOT 画像、LANDSAT 画像および航空写真の 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、抽出されたりニアメントのうち複数のものについては試錐孔調査で抽出された断層の地表面への投影線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、月吉断層ならびに瀬戸層群、瑞浪層群、花崗岩の深度方向への分布を調査しているものの、測線が正馬様用地内に設定されているため、上記リニアメント等のうち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、地上電磁探査により得られた比抵抗の分布から、新第三紀堆積岩と花崗岩の境界（不整合面）の分布が推定されている。

地下水位に関する情報は、浅層試錐調査等によって取得されている。水収支観測においては、正馬様用地や東濃鉢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。

試錐孔調査においては、掘削時の逸水記録、コア観察、ポ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。Fig.11 に試錐調査結果の一例を示す。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に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

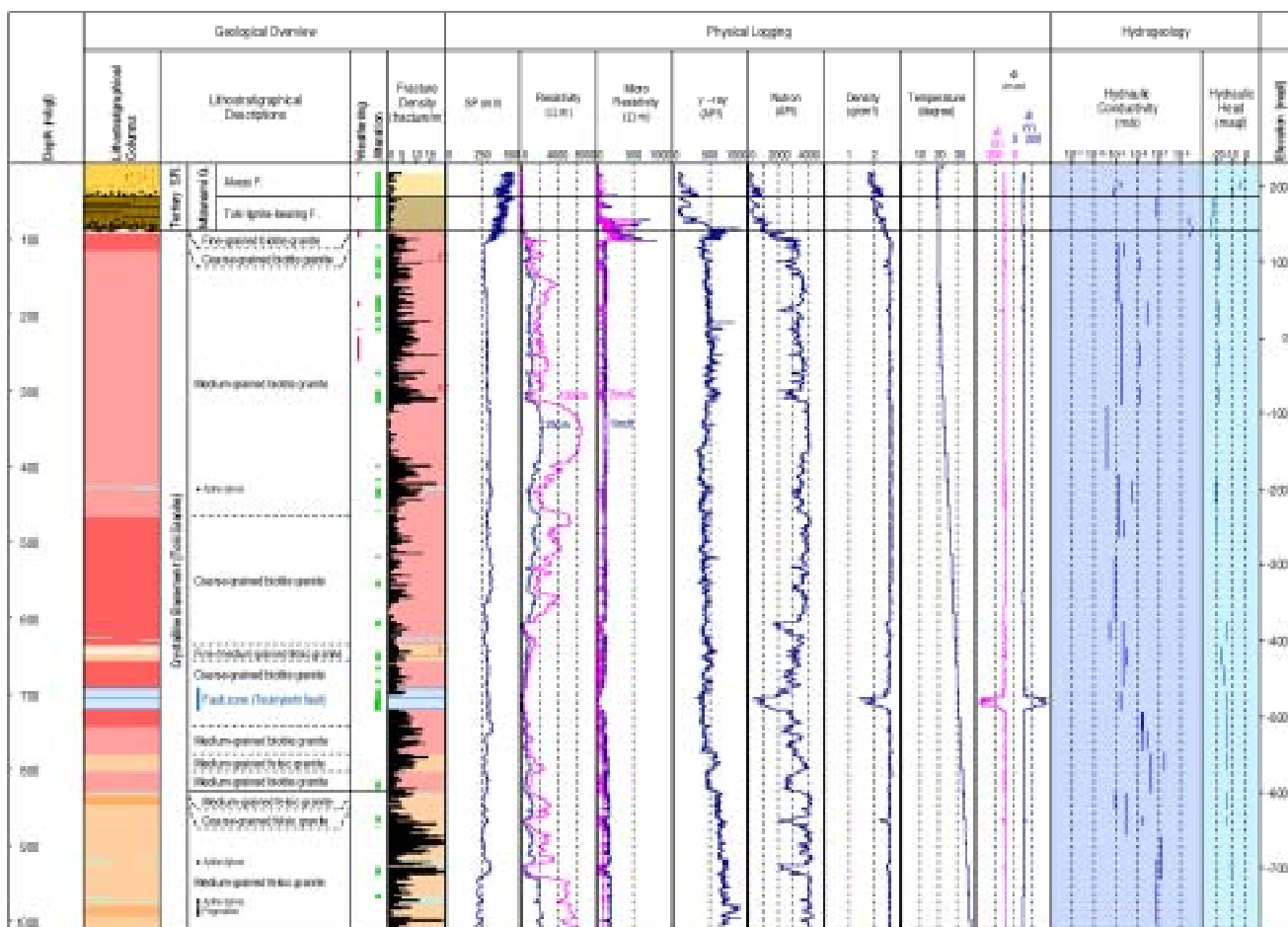


Fig.11 Results of borehole investigations (MIU-3)

境に断層上盤側より断層下盤側の水頭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[10-11]。

4.5 水理地質構造モデルの概要

本研究では、岩相・構造毎に透水不均質性を設定した連続体モデル (TOUGH2[14], EQUIV_FLO[15])、およ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-Chan[16])、岩相・構造毎に均質な透水性を設定した連続体モデル (POR-SALSA[17], Frac-Affinity[18]) の 5 手法を採用した。以下に、それぞれの手法の特徴およびモデル化・解析の概要を示す。また、Table.1 にこのモデル化・解析の概要をまとめる。

(1) TOUGH2

TOUGH2 は熱の影響を含む液相・気相の混合の影響を考慮可能な連続体モデルを対象とした数値解析コード[19]であり、本解析においては地下水流れの項のみを考慮した。一辺が約 100m の直方体で分割した体積要素を用いて、地形、堆積岩、堆積岩と花崗岩の不整合面、月吉断層、月吉断層南側の北西 - 南東系および北東 - 南西系 2 つのリニアメントから推定される断層、花崗岩中の岩相区分を決定論

的に表現した。岩相分布については各試錐孔データをクリギングにより補間した。透水係数は各構造 / 岩相毎に一定の値を設定したケース (j74) と、統計的な不均質性を考慮したケース (j74H) を設定した。すなわち、各試錐孔で実施された水理試験から求められた透水係数データを岩相・構造毎に整理、それぞれの対数平均値と標準偏差を求め、それぞれの平均値を基に一定の値を設定したケースに用い、対数平均値と標準偏差からリサンプリングした値を不均質ケースに用いた。統計的リサンプリングは岩相・構造毎に実施し、空間的相関性は無視した。また、月吉断層が遮水性を示すことから、月吉断層とリニアメントから推定した断層が低透水性であると仮定してこれらの透水係数を 1/10 倍に下げたケース (均質モデル: j75, 不均質モデル: j75H) についても検討した。有効空隙率については各要素の透水係数から 3 乗則ならびに亀裂密度から算定した。亀裂密度は、試錐孔の BTV データから平均亀裂密度 7.95 本/m、標準偏差 5 本/m を求め、これらに基づきモデル全体に対して統計的にリサンプリングした。この場合も空間的相関性は無視した。上部境界条件は、試錐孔で認められた孔口標高と地下水位の相関に基づき設定し、側方境界もこれに併せて静水圧境界とした。また、東濃鉦山についても、一定流量の排水 ($5.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$) により表現した。

Table 1 Overview of results of hydrogeological modeling

Model	Continuum model				Channel network model
Code name	TOUGH2	POR-SALSA	EQUIV_FLO	Frac-Affinity	Don-Chan
Modeled area	Specified 4 x 6 km area with topography	Rectangular parallelepiped without surface and sedimentary formations	Specified 4 x 6 km area with topography	Specified 4 x 6 km area with topography	Rectangular parallelepiped without surface and sedimentary formations
Analysis method	Integrated finite difference method	Finite element method	Finite element method	Finite difference method	Finite difference method
Modeling method	Continuum parameter from hydraulic characteristics	Continuum parameter from hydraulic characteristics	Continuum parameter from fracture characteristics	Continuum parameter from hydraulic characteristics	Channel pipe parameter from fracture characteristics
Topography		x (only Granite)			x (only Granite)
Sedimentary formations		x			x
Modeled geological structures	- Tsukiyoshi fault - Faults inferred from lineaments - Sedimentary formations - Unconformity	- Tsukiyoshi fault - Faults inferred from lineaments - Unconformity	- Tsukiyoshi fault - Fracture zone along fault - Sedimentary formations - Unconformity - 3 sub-domain in granite	- Tsukiyoshi fault - Faults inferred from lineaments - Fracture zone along fault - Sedimentary formations - Unconformity - 3 sub-domain in granite	- Tsukiyoshi fault - Branched fault from Tsukiyoshi fault - Faults inferred from lineaments - Unconformity - 3 fracture set
Heterogeneity of rock mass	- Homogeneous - Heterogeneous	- Homogeneous	- Heterogeneous and anisotropy (from crack tensor theory)	- Homogeneous	- Homogeneous and anisotropy (from 3 fracture set)
Sensitivity analysis case	- Heterogeneity of rock mass - Hydraulic parameter of Tsukiyoshi fault	- Number of modeled fault - Hydraulic parameter of Tsukiyoshi fault - Recharge rate	- Existence of Tono mine - Fracture size - Hydraulic parameter of sedimentary formations	- Hydraulic parameter of modeled fault - Side boundary condition	1 case only
Boundary conditions	Top: Constant head Bottom: No-flow Side: Constant Head Mine: Constant discharge rate (5.8×10^{-4} m ³ /s)	Top: Constant recharge rate (233mm/y) Bottom: No-flow Side: No-flow (along river: constant head)	Top: Constant recharge rate (50mm/y) Bottom: No-flow Side: Constant Head Mine: 0 head	Top: Constant head Bottom: No-flow Side: Constant Head Mine Constant discharge rate (4.56×10^{-9} m/s)	Top: No-flow Bottom: No-flow Side: Constant Head

(2) POR-SALSA

POR-SALSAもTOUGH2同様に熱の影響を含む多相流れを考慮することが可能な連続体モデルを対象とした数値解析コード[20]であり、本解析においては地下水流れの項のみを考慮した。40m×40m×40mの立方体要素を用いて解析対象を含む直方体領域をモデル化した。堆積岩はモデル化対象外とし、堆積岩と花崗岩の不整合面をモデル上部境界とした。上部境界条件は水収支観測から推定された年間平均涵養量(233mm/y)を上部境界面へ一様に与え、尾根沿いの北方、東方と西方の側方境界条件は不透水とし、土岐川沿い南方の側方境界は一定の静水圧条件とした。主要な構造として、月吉断層と大小のリニアメントから推定した断層を考慮するとともに、花崗岩を上部割れ目帯とそれ以外の2つの領域に分割して、それぞれ決定論的にモデル化した。すなわち、月吉断層を低透水構造(透水係数: 5×10^{-9} m/s, 有効空隙率 0.005)でモデル化するとともに、不整合面直下の120mを上部割れ目領域(透水係数: 5×10^{-6} m/s, 有効空隙率: 0.1)に、その他の領域を下部割れ目領域(透水係数: 5×10^{-8} m/s, 有効空隙率: 0.01)の2つに分けてモデル化した。大小のリニアメントについては月吉断層と同様に低透水構造であると仮定してその影響を検討するため、月吉断層のみをモデル化したケース(model-1)、model-1に比較的長いリニアメント構造を追加したケース

(model-2)、model-2に比較的短いリニアメントを追加したケース(model-3)について検討した。また、model-2に対して、上部境界からの涵養量を10%低減させたもの(model-4)、リニアメントが高透水性(透水係数: 5×10^{-6} m/s, 有効空隙率: 0.05)である場合(model-5)、正馬様用地内の試錐孔で観測された水頭分布でキャリブレーションしたケース(model-6)についても検討した。

(3) EQUIV_FLO

EQUIV_FLOは等価不均質連続体モデル化手法を用いた飽和・不飽和地下水流動問題を対象とした数値解析コード[21]である。等価不均質連続体モデル化手法は、観測された亀裂データに基づき解析対象領域の亀裂ネットワークモデルを作成するとともに、同じ領域で任意に作成した連続体要素の各要素に分布する亀裂の性状からクラックテンソル理論により透水テンソルを求め、連続体有限要素法により解を求めるものである。本モデルでは、地形、堆積岩(透水係数: 1×10^{-7} m/s および 1×10^{-8} m/s の2ケース, 有効空隙率: 0.3)と月吉断層(透水係数: 1×10^{-10} m/s, 有効空隙率: 0.1)を決定論的にモデル化するとともに、主に割れ目密度の観点から、花崗岩風化部+花崗岩上部割れ目帯、花崗岩健岩部、月吉断層に沿った割れ目帯の3つの領域に分割し、それぞれの領域毎に亀裂データの統計特性を

求めて等価不均質連続体モデル化手法を適用した。亀裂方向分布、亀裂密度については各試錐調査データに基づきその統計分布を求めたが、亀裂の大きさについては、べき乗分布と指数分布の2ケースを仮定した。べき乗分布と指数分布を決定するパラメータならびに透水量係数分布について仮想透水試験シミュレーション[22]により、実測された透水係数分布を再現可能な分布特性を領域毎に求めた。物質移行に寄与する亀裂開口幅を透水量係数の平方根の2倍に等しいと仮定して算定し、各要素に占める亀裂開口部体積の割合から有効空隙率を求めた。上部境界条件は一定の流入条件としたが、水収支観測から得られた涵養量ではなく地下水位観測データとのキャリブレーションにより50mm/yを用いた。南側境界は河川で区切られることから不透水境界をその他の側方境界は一定の静水圧境界とした。また、東濃鉱山として坑道の両端を節点でモデル化し（圧力水頭=0）その影響を考慮したケースも検討した。

(4) Frac-Affinity

Frac-Affinity は亀裂ネットワークモデルと連続体モデルの両方の機能を備えたハイブリッドモデル[23]に分類されるもので、本解析においては、月吉断層と複数のリニアメントから推定した断層を決定論的に面で表現し、地形、堆積岩（瀬戸層群の透水係数： 1×10^{-6} m/s、有効空隙率：0.3、瑞浪層群の透水係数： 8×10^{-8} m/s、有効空隙率：0.2）、堆積岩と花崗岩の不整合面を決定論的にモデル化した。また、花崗岩を風化部+上部割れ目帯（透水係数： 2.5×10^{-7} m/s、有効空隙率：0.05）、健岩部（透水係数： 5×10^{-8} m/s、有効空隙率：0.02）、月吉断層に沿った割れ目帯（透水係数： 2×10^{-7} m/s、有効空隙率：0.05）の3つの領域に分割してモデル化した。月吉断層は遮水性を示すことから面構造に対して垂直方向の透水係数を $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-12}$ m/s に設定した。リニアメントについては、3km以上の連続性が確認されている4つのリニアメントを断層と仮定してモデル化した。すなわち、月吉断層北側に北西-南東方向のリニアメント（NW系、鉛直を仮定）、月吉断層の北側に月吉断層とほぼ平行な断層であると確認されているリニアメントの本領域への延長（EW系）、日吉川（DH-9孔とDH-11孔の間を南西方向へ流れる河川）沿いのリニアメント（NE系、鉛直を仮定）、領域西側境界沿いのリニアメント（NNE系）、の4つである。また、リニアメントから推定した断層の透水性についての知見が得られていないことから、月吉断層と同様に面構造に対して垂直な方向の透水係数を小さく、面構造に沿った方向の透水係数を大きく設定するとともに、これらの設定の影響を複数のケースを設定して検討した。なお、東濃鉱山も固定フラックス（ 4.56×10^{-9} m/s）で排水されるようモデル化した。

(5) Don-Chan

Don-Chan モデルは、亀裂中の特定の水みちと亀裂交差点に沿った水みちを管路網（チャンネルネットワーク）に

よりモデル化するもので、そのモデルの構築に際して、現場のデータとの比較検証を繰り返し行う（現場対話型）ために、パソコン程度の計算機で容易に計算できるように、計算時間の短縮、入力データの簡易化、結果の可視化等の整備がなされている[24-25]。本解析では、POR-SALSA と同様に解析領域を含む直方体領域をモデル化することとした。堆積岩はモデル対象外とし、不整合面をモデル上部境界とした。断層やリニアメントに関する情報に加えて、対象地域とその周辺地域の応力場や阿寺断層、屏風山・山田断層等の性状に関わる検討により、東西系、北西-南東系、低角度系の3つの断層系が顕著であるとした。また、遮水性の主要構造として月吉断層に加えて、月吉断層北側の北西-南東方向のリニアメント、月吉断層北側の月吉断層とほぼ平行な断層の延長、日吉川沿いのリニアメント、月吉断層南側の北西-南東方向のリニアメント（の南東への延長方向）、月吉断層南側の北西-南東方向のリニアメント（の西側）、月吉断層の派生断層と推定される月吉断層南側の西南西-東北東方向の構造、領域西側境界沿いの北北西-南南東方向のリニアメントの7つの構造をモデル化した。遮水構造のモデルとしては、それぞれの構造を2枚の面で表現し、それらで挟まれるチャンネルの透水性を低下させるとともに、断層に沿って高透水性の割れ目帯を付随させるサンドイッチ構造とした。他の母岩部については、東西系、北西-南東系、低角度系の3つの断層系を、それぞれ100m間隔で規則的にモデル化して、 1×10^{-8} m/sの透水係数を保つように、各チャンネルの透水量係数を設定した。また、各主要構造の透水係数については $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-12}$ m/s を設定するとともに、2ケースの境界条件を設定することにより、複数のケースにおいて地下水流動解析を実施した。上部境界条件は不透水とし、側方境界条件は一定の静水圧境界とするケースと、東側面と西側面を不透水とするケースの2つのケースを設定した。これらの解析結果と月吉断層を貫く試錐孔における水圧観測値を比較した結果、境界条件としては東側面と西側面を不透水とするケースを、主要構造の透水係数としては 1×10^{-10} m/s（ただし、月吉断層： 1×10^{-12} m/s、月吉断層の派生断層： 4×10^{-11} m/s）が最も妥当な結果であった。なお、有効空隙率の設定においてはその設定根拠となるデータが乏しいことから、一様に0.01と設定した。

4.6 モデル化・解析結果

Fig.12にそれぞれの解析者による水理地質構造のモデル化結果の一例を示す。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、多種多様な考え方が提案できることが明らかとなった。具体的には、全ての解析者が、月吉断層および堆積岩と花崗岩の不整合面等の主要な地質構造がモデル化・解析領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、この主要地質構造より小さ

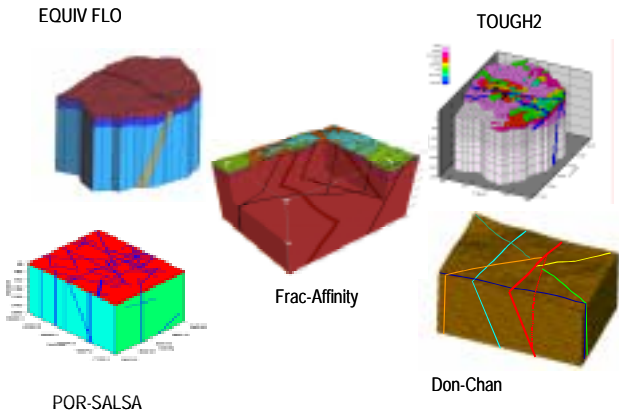


Fig.12 Results of hydrogeological modeling

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、各解析者の解釈に差異が認められた。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、解析者による解釈の違いが顕著に現れた。

地下水流動解析結果から得られた各出発点からの地下水の移行時間と移行距離の分布が、それぞれのモデルでどのように異なるかについて検討した Fig.13 に一例として、出発点 11 (月吉断層北側、中央部、標高-1,000m) の結果を示す。この結果より、それぞれのモデルで実施した感度解析による地下水の移行時間や移行距離のパラッキより、概念モデルおよび水理地質構造のモデル化手法等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、2km 程度のグループと 6km 程度グループに、移行時間は、数年から数十年のグループと数百年から数千年のグループに分かれた。

4.7 モデル化・解析結果に対する影響因子の抽出

算出された地下水の移行時間と移行距離のモデル化手法間での違いについて考察することにより、モデル化・解

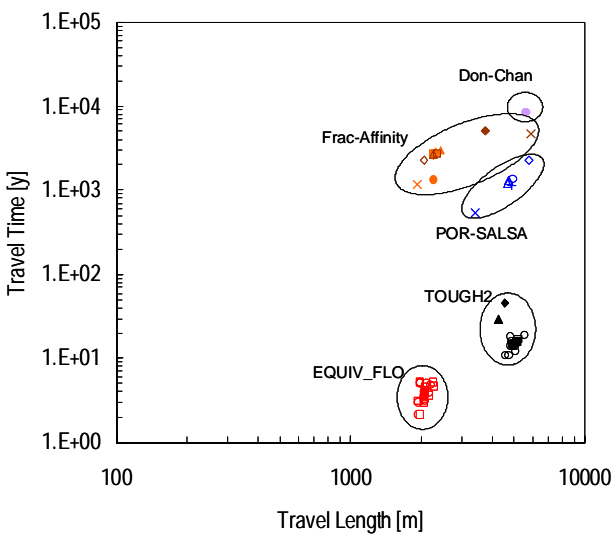


Fig.13 Travel time and length of flow path from specified point No.11

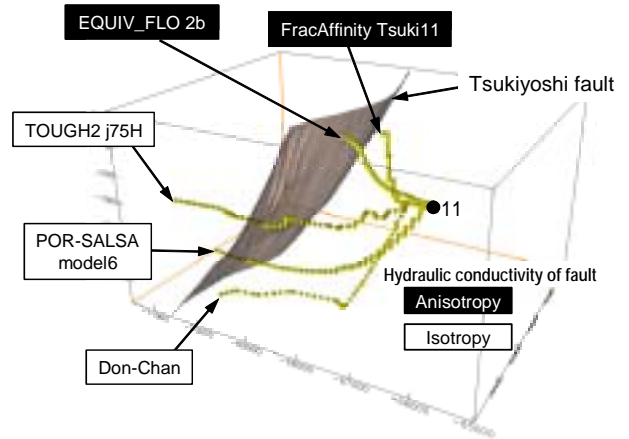


Fig.14 Flow path from specified point No.11

析結果に対する主な影響因子の抽出を試みた。

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方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ていると考えられる。なお、地下水の大局的な流動方向は、全てのモデルにおいて、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。

Fig.14 に出発点 11 からの地下水の移行経路を示す。Fig.14 より、深度方向では出発点 11 から地表方向へ流れる場合、水平に流れる場合、およ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

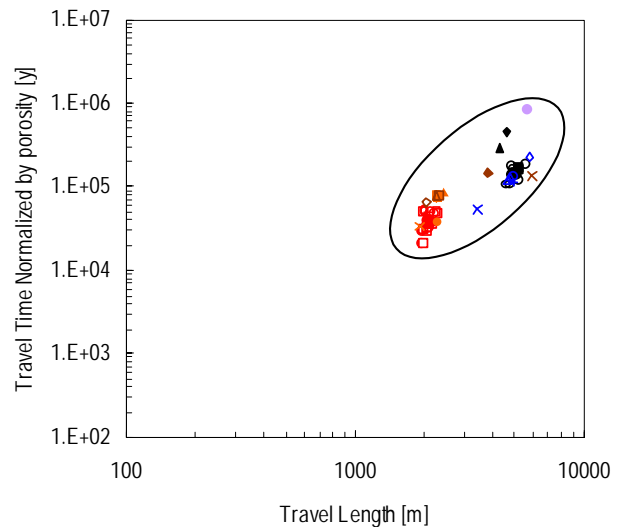


Fig.15 Travel time normalized by porosity and length of flow path from specified point No.11

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 および POR-SALSA は母岩部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としては、それぞれのモデルで設定した有効空隙率が異なっているためと考えられる。移行時間が数百年から数千年のグループ (POR-SALSA, Frac-Affinity, Don-Chan) では、文献情報に基づき、一律の値もしくはそれぞれの岩相毎に一定の値 (0.01 ~ 0.3) を設定している。一方で、移行時間が数年から数十年のグループ (TOUGH2, EQUIV_FLO) では、個々の要素毎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。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の地下水流速に関するデータを取得していない。したがって、本研究では、一般的な岩石の空隙率に関する情報から任意に一律の値を用いる場合と、亀裂密度や透水性等の他の特性から有効空隙率を算定する場合で、設定された有効空隙率の値に大きな違いが生じた。そこで、有効空隙率の影響を除くことにより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。Fig.13 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 Fig.15 に示す。この結果より、数年から数十年のグループと数百年から数千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影響因子として以下の因子を抽出した。

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データ
断層の透水異方性に関する定量的データ
境界条件の設定に関わる情報
実流速を求めるための有効空隙率の設定に必要なデータ

4.8 次期調査研究計画への反映

モデル化・解析結果に対する主な影響因子の抽出結果に基づき、広域地下水流動研究およ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。

- ・ 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 (断層やリニアメント) 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。

- ・ 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、これらのような特性を評価することを目的とした試錐調査を計画した。
- ・ 境界条件については、より広域的な空間スケー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)、およ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、側方境界条件については、より広域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・解析領域および境界条件の設定を行った。上部境界条件については、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。
- ・ 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 まとめ

本研究では、統合化データフローおよびくり返しアプローチに基づき、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、このモデル化・解析結果を比較検討することにより、様々な不確実性がモデル化・解析結果に与える影響を評価するとともに、モデル化・解析結果に対する影響因子の抽出を試みた。

その結果、同一のデータセットを用いたにもかかわらず、解析者毎のデータの解釈方法や概念モデル化手法、水理地質構造のモデル化手法等の違いにより、水理地質構造のモデル化および地下水流動解析の結果に違いが生じることを示すとともに、その違いを生じさせる主要な因子を抽出することができた。

このことから、本研究で用いた考え方は、くり返しアプローチによる地下水流動特性の効率的な調査 モデル化・解析 評価の体系化に対して有効であると考えられる。

6 今後の方針

本研究は、調査 モデル化・解析 評価のくり返しアプローチの 1 回目のループの結果である。今後は、新たに取得した情報に基づく、2 回目のモデル化・解析 (くり返し

アプローチの2回目のループ)を実施する。

また、本研究では、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・解析等の各種・各段階における不確実性を一括的に取り扱った。しかしながら、この各種・各段階の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、今後は、これら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と考える。

一方で、地下水の同位体組成等の情報によるモデル化・解析結果の信頼性向上に関する検討を実施する予定である。

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, 西嶋望氏, 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: 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] SKB: Deep repository for spent nuclear fuel, SR97-Post-closure safety, SKB Technical Report, TR-99-06 (1999)
- [2] 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)
- [3] 動燃事業団: 広域地下水流動研究基本計画書, 動燃事業団計画資料, PNC TN7020 98-001(1997)
- [4] 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)
- [5] 大澤英昭, 中野勝志, 澤田淳: 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)
- [6] Selroos, J., Walker, D. D., Ström, A., Gylling, B., Follon, S.: Comparison of alternative modeling approaches for ground water flow in fractured rock, Journal of Hydrology 257, 174-188(2002)
- [7] 澤田淳, 三枝博光, 竹内真司, 中野勝志, 井尻裕二: 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)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 竹内真司, 下茂道人, 西嶋望, 後藤和幸: 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, p.296-300(2001)
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] Shimo, M., Nishijima, N., Fumimura, K.: 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)
- [16] 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)
- [17] McKenna, S., Eliassi, M., Inaba, K., Saegusa, H.(2001): 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)
- [18] 三枝博光, 前田勝彦, 稲葉薫: 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)

- [19] Pruess, K.: TOUGH2 - A general-purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow, Rep. LBL-29400, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, 1991.
- [20] Martinez, J., P. Hopkins, J. Shadid: LDRD Final report: Physical simulation of nonisothermal multiphase multicomponent flow in porous media, SAND97-1766, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico(1997)
- [21] 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)
- [22] 下茂道人, 山本肇, 松井裕哉, 仙波毅: 等価不均質連続体モデルによる釜石鉱山原位置試験場周辺の地下水解析, 第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.278-282(1997)
- [23] 稲葉薫, 三枝博光, White, M. J., Robinson, P.: 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 44, 105-123 (2002)
- [24] 田中達也, 渡辺邦夫, 前川恵輔, 中村直昭: 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, 22-33 (1994)
- [25] 渡辺邦夫, 田中達也, 内田雅大, 岩崎浩: 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 2 - 釜石鉱山 KD90 坑道・トレーサー試験の解析 -, 応用地質 35, 2-12 (1994)