

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—

Hydrogeological Modeling and Groundwater Flow Analysis focused on Hydraulic Anisotropy of Faults - A Case study in the Tono region, Gifu Prefecture -

三枝博光*・稲葉 薫**・澤田 淳***

Hiromitsu SAEGUSA, Kaoru INABA and Atsushi SAWADA

It is important to understand the influence of the hydraulic characteristics of discontinuities such as faults on the groundwater flow path at a scale of several kilometers for the planning of investigation for characterization of the discontinuities. In this study, hydrogeological modeling and groundwater flow analyses were performed to understand the influence of the uncertainty of hydraulic properties, such as anisotropy, of the Tsukiyoshi fault and other faults. This study was concluded that the hydraulic characterization of the faults normal to the direction of groundwater flow are significant in order to predict groundwater travel time and/or length, which are the performance measures for this study.

Key Words: hydrogeological model, groundwater flow analysis, fault, hydraulic anisotropy, migration path

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構は、深地層の科学的研究の一環として超深地層研究所計画¹⁾および広域地下水流動研究²⁾を実施している。これらでは、段階的に行われる地質環境特性調査により情報が增加する過程の中で、調査計画の立案から調査・解析・評価に至る一連のプロセスをくり返し行うことにより、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ている。筆者らは、この調査・解析・評価の体系化に資することを目的として、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を検討するとともに、この不確実性の検討結果に基づき、水理地質構造のモデル化・地下水流動解析結果の不確実性に対する影響因子を抽出し、調査研究計画に反映させている^{3), 4)}。

本研究は、この検討の一環として、地質構造・水理地質構造の

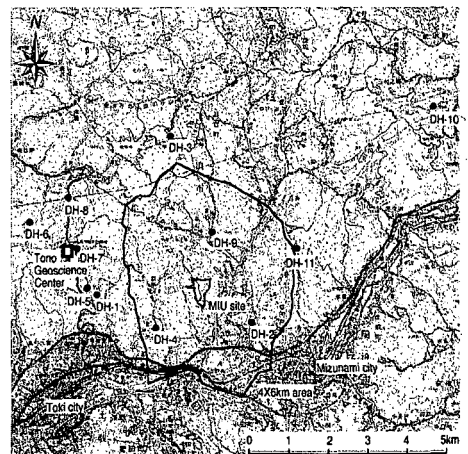


図-1 モデル化・解析領域および試錐孔位置
(国土地理院発行、1:50,000「美濃加茂」および「恵那」)

* 正会員 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

** 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

*** 核燃料サイクル開発機構 東海事業所

モデル化および地下水流動解析（以下、モデル化・解析）の対象領域内に分布する地下水流動に影響を及ぼすと考えられる大規模不連続構造（断層等）について、調査の優先順位、項目や量、精度を検討することを目的として、これらの構造の水理特性が地下水の最短移行経路や移行時間、移行距離に与える影響を検討した。断層のモデル化にあたっては、存在が確認されている月吉断層をモデル化する場合、および長く連続しているリニアメントが断層であると想定した場合を考慮した。

2. モデル化・解析領域

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（図-1）。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る。地形標高は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 130m）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。

3. 地質概要

モデル化・解析領域周辺の地質は⁵⁾、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、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（図-2）。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落差は約 30m である。

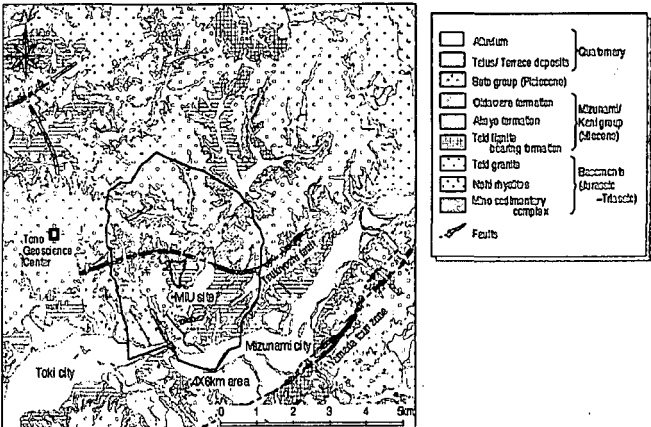


図-2 モデル化・解析領域の地質概要（糸魚川(1980)⁶⁾を編纂）

4. 地質構造のモデル化

本研究では、地形の起伏に加え、透水コントラストの観点から、以下の地質・地質構造を地質構造モデルのモデル化要素として選択した。なお、この地質構造モデルは 5 章で述べる水理地質構造モデルの基礎となるものである。

① 断層については、その分布（走向、傾斜を含む）が確認されている月吉断層のみをモデル化対象とする場合とリニアメントから推定した断層についてもモデル化する場合の 2 種類のモデルを

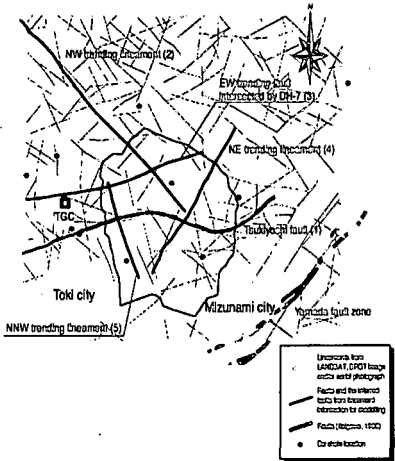


図-3 リニアメント分布および抽出した不連続構造

構築し、それらを比較検討した。リニアメントから推定される断層については、3km以上の連続性を有する4本の断層を抽出・モデル化した(図-3)。

また、月吉断層については、断層に伴う割れ目帯が試錐調査により確認されており、水理試験結果から他の花崗岩部より透水性が高いことが明らかとなっていることから、モデル化の対象とした。

- ② 瀬戸層群(固結度の低い新第三紀鮮新世の砂礫層)では、水理試験の結果から瑞浪層群(新第三紀中新世の堆積岩)と比較して透水性が高いことから、地質構造モデルにおいては、堆積岩部を瀬戸層群と瑞浪層群に区分し、モデル化した。
- ③ 花崗岩風化部では、水理試験の結果からその上部に分布する瑞浪層群や花崗岩の割れ目低密度帯と比較して透水性が高い。また、花崗岩風化部直下の花崗岩浅部には、水平割れ目の卓越する上部割れ目帯が分布していることが確認されている⁶⁾。この上部割れ目帯は、一部で開口性の割れ目を伴い、水理試験結果では割れ目低密度帯と比較して透水性が高いゾーンである。以上のことから、花崗岩を風化部および上部割れ目帯、割れ目低密度帯に区分し、モデル化した(図-4)。

以上に述べたモデル化要素の空間分布をそれぞれモデル化し、その位置関係や形成過程を考慮し、組み合わせることにより3次元地質構造モデルを構築した(図-5)。

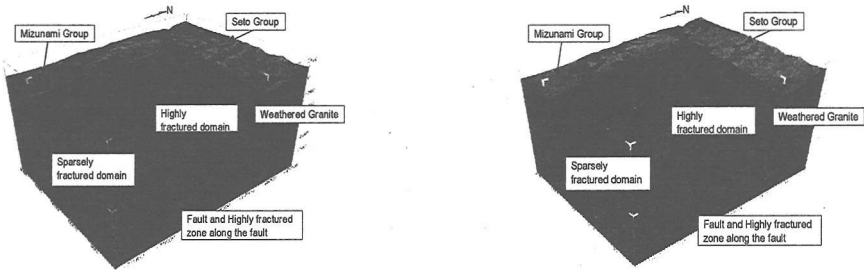


図-5 3次元地質構造モデル

5. 水理地質構造のモデル化

(1) 物性値の設定

各モデル化要素の透水係数については、それらを包含する比較的長い区間を対象とした水理試験結果^{6), 7)}の幾何平均値を用いた(表-1)。また、花崗岩風化部および上部割れ目帯の透水係数の幾何平均値や最大値、最小値がほぼ同一であることから、水理地質構造モデルではこれらを同一のユニットとして取り扱った。

月吉断層の透水係数については、月吉断層がその断層面に直交する方向に遮水的であり、強い透水異方性を有していることが確認されているものの、断層面に直交方向の水理特性に関する物性値は取得されていない。したがって、月吉断層の透水係数については、月吉断層の

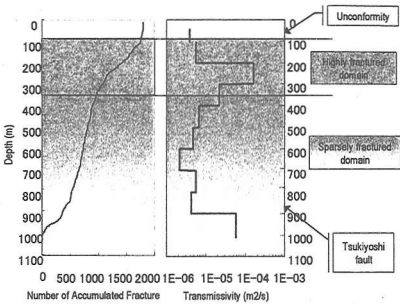


図-4 累積割れ目本数と透水量係数 (MIU-2)

表-1 透水係数設定値

Units	Log [K (m/s)]
Seto Group	-6.0
Mizunami Group	-7.1
Weathered Granite	-6.6
Highly Fractured Domain	-6.6
Sparsely Fractured Domain	-7.3
Highly Fractured zone along the Tsukiyoshi fault	-6.7
Tsukiyoshi fault	-10
	-11
	-12
Faults based on lineaments (Normal to fault)	-11
Faults based on lineaments (In-Plane of fault)	-8

水理特性が地下水流動場に与える影響を検討することを目的として 1×10^{-10} 、 1×10^{-11} 、 1×10^{-12} m/s の3 ケースを設定した。また、月吉断層以外のリニアメントから推定した断層やそれらの断層に伴う割れ目帯の水理特性については、試錐調査によるデータの取得がなされていないことから、月吉断層と同様に透水異方性を有していると仮定した。断層面直交方向の透水係数は月吉断層と同様とし、面方向については月吉断層との相対的な規模の違いを考慮して設定した(表-1)。

(2) 境界条件の設定

本解析では、飽和状態による3次元定常地下水流動解析を実施することから、上部境界面は地下水面とし、固定水頭条件を与えた。地下水面の分布は、モデル化・解析領域およびその周辺の試錐孔で観測された地下水面標高のデータから、地下水面標高と地下水面標高を計測した試錐孔での地表標高に良い相関が得られたため、その関係式を用いて推定した(図-6)。南側の河川部を除いた側方境界については、モデル化・解析領域内における試錐孔での水頭分布が、月吉断層を貫いているMIU-2号孔を除き、ほぼ静水圧状態であることから、上部境界面より深度方向に一定の静水圧分布での固定水頭条件を与えた。河川部の南側側方境界については、本研究でのモデル化・解析領域を含む約30 km 四方の地下水流動解析⁸⁾から地下水の分水界と見なすことができるといった結果が得られていることから不透水条件を与えた。下部境界については、不透水条件を与えた。

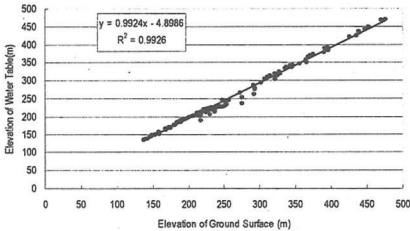


図-6 地下水面と地表標高の関係

6. 地下水流動解析

(1) 地下水流動解析ケース

地下水流動解析では、月吉断層のみをモデル化する場合とリニアメントから推定した断層もモデル化する場合の2つのケースを設定し、月吉断層およびリニアメントから推定した断層について、表-2に示す透水係数を与えた。

表-2 地下水流動解析ケース

解析ケース	Tsuki10B	Tsuki11B	Tsuki12B	Tsuki10B_Ft	Tsuki11B_Ft	Tsuki12B_Ft
Tsukiyoshi fault	-10	-11	-12	-10	-11	-12
Faults based on lineaments (Normal to fault)	-	-	-	-11	-11	-11
Faults based on lineaments (In-Plane of fault)	-	-	-	-8	-8	-8
備考	月吉断層のみをモデル化対象とする場合			月吉断層およびリニアメントから推定した断層をモデル化する場合		

(表中数字は、透水係数 (m/s) の対数値)

(2) 地下水流動解析方法

地下水流動解析は、差分法による解析コードであるFrac-Affinity⁹⁾を用いた飽和状態による3次元定常地下水流動解析を実施した。

(3) 地下水流動解析結果

地下水流動解析結果は、全水頭分布およびパーティクルトラッキング法による地下水の最短移行経路や移行距離、移行時間について比較した。また、この地下水の移行距離および移行時間は、パーティクル出発点(図-7)からモデル境界に到達するまでのものである。以下に、地下水流動解析結果をまとめる。

- ① 全てのケースにおいて、地下水の主流動方向は、局所的な地形の高低に従い、概ね北から南方向であった(図-8)。ただし、月吉断層北側では東西両方向から日吉川への流動が認められた(図-9)。

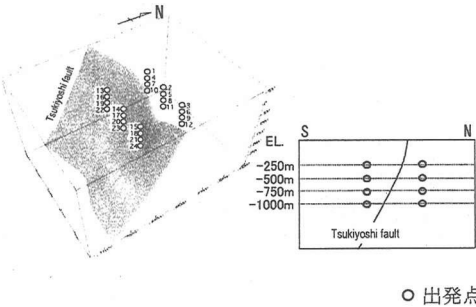


図-7 パーティクルトラッキングの出発点

② 月吉断層のみをモデル化とした場合においては、月吉断層北側を出発点とするパーティクルについて、月吉断層の透水係数が小さくなるに従い、月吉断層を通過するパーティクルの数が減り、地下深部より地表方向に流動するパーティクルが多くなった（図-10）。また、月吉断層南側を出発点とするパーティクルおよび月吉断層を通過したパーティクルについては、概ね水平方向に流動しているが、月吉断層の透水係数が小さくなるに従い、月吉断層南側の地下深部の水頭が相対的に低くなることにより、下向きに流動するパーティクルが現れた。このことから、月吉断層の透水異方性の大きさは、断層を挟んだ地下水の上流側の地下水の移行経路のみならず下流側の移行経路にも影響を及ぼすことが考えられる。

③ 地下水の移行距離と移行時間について、月吉断層のみをモデル化した場合における月吉断層の透水異方性が地下水の移行経路に与える影響が、リニアメントから推定した断層もモデル化した場合においてどのように異なるかを検討した。その結果を以下に示す。

- ・ リニアメントから推定した断層もモデル化する場合においては、①に示した地下水の流動方向に沿って流動したパーティクルが、流動方向とほぼ直交し、かつ

透水異方性を有する断層（月吉断層の北に位置し月吉断層と同様の走向（ほぼ東西走向）をもつ断層、および日吉川沿いに分布する断層）に到達した際に、その断層を通過せずに、断層に沿って地表方向へ流動する傾向がある（図-11）。このことから、月吉断層北側では、月吉断層のみをモデル化した場合に、その水理特性の違いによって生じた移行距離と移行時間のバラツキが、リニアメントから推定した断層もモデル化する場合では低減したと考えられる（図-12）。

また、リニアメントから推定した断層もモデル化する場合においては、月吉断層のみをモデル化した場

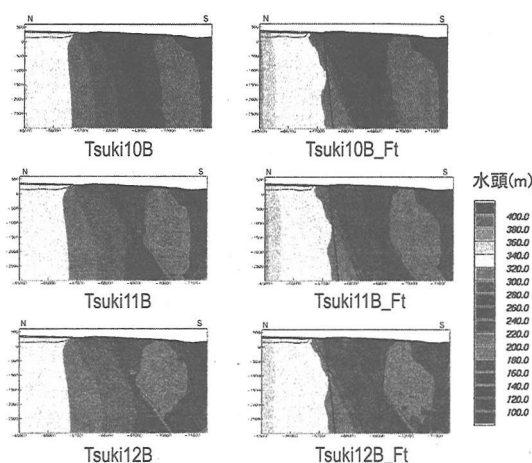
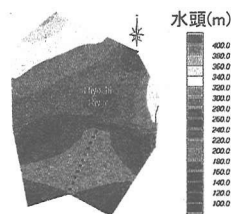


図-8 全水頭分布（MIU-2号孔を通る南北断面）



Tsuki12B

図-9 全水頭分布（標高-500mの水平断面）



図-10 地下水の移行経路（月吉断層のみをモデル化とした場合）

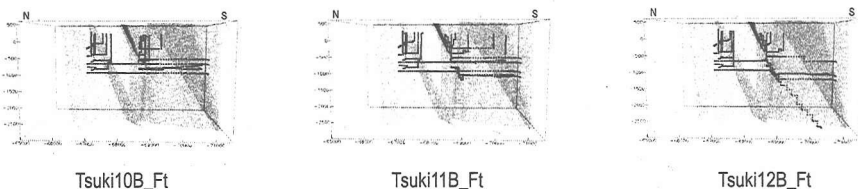


図-11 地下水の移行経路（月吉断層およびリニアメントから推定した断層をモデル化する場合）

合と比較して、地下水の流動方向にほぼ直交する断層に囲まれたブロック内では、地下水の移行経路沿いのフラックスが小さくなる結果となった（図-13）。これは、流動方向に直交する断層の影響により、ブロック内の動水勾配が低減したためであると考えられる（図-8）。

以上のことから、流動方向とほぼ直交し、かつ透水異方性を有する断層は、局所的にフラックスを小さくさせる一方で、地表方向への流動を生じさせ、移行経路を短くさせる可能性があると考えられる。

- ・ リニアメントから推定した断層もモデル化した場合においては、月吉断層南側では、モデル化した断層が地下水の流動方向とほぼ平行であるため、月吉断層北側と同様の傾向は認められない。このことから、月吉断層南側では、月吉断層のみをモデル化した場合で認められた移行距離と移行時間のバラツキが、リニアメントから推定した断層もモデル化した場合においても低減しない結果となったと考えられる。

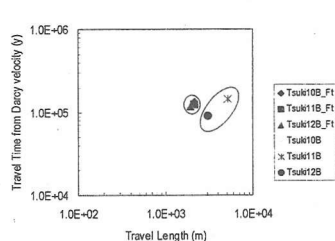


図-12 地下水の移行距離と移行時間

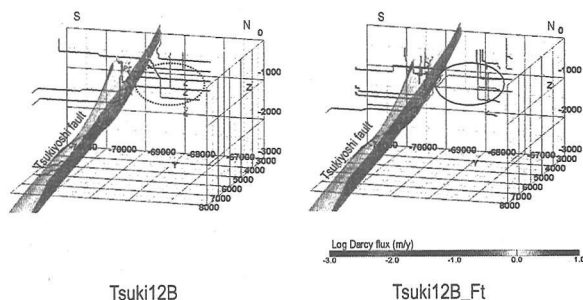


図-13 地下水の移行経路沿いのフラックス

(図中赤丸: 流動方向に直交する断層に囲まれたブロックの位置)

7. まとめ

本研究において、モデル化・解析領域内に分布する地下水流動に影響を及ぼすと考えられる大規模不連続構造について、調査の優先順位、項目や量、精度を検討することを目的として、これらの構造の水理特性が地下水の移行経路や移行距離、移行時間に与える影響を検討した。その結果、地下水の流動方向にほぼ直交する方向に分布する透水異方性を有する断層においては、地下水の移行経路や移行時間、移行距離に与える影響が大きいことが明らかとなった。このことから、モデル化・解析領域内の地下水の移行経路を推定するためには、地下水の流動方向に直交する方向の断層を対象とした調査を優先的に実施するとともに、遮水性といった定性的な評価のみならず、透水異方性といった定量的に評価するための調査項目が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 澤田淳，三枝博光，中野勝志，大澤英昭：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，2002.
- 5) 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.
- 6) 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 2000-014, 2000.
- 7) 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.
- 8) 三枝博光，稲葉秀雄，小出馨，尾方伸久：東濃地域を対象とした広域地下水流動解析，動燃技術報告書，PNC TN7410 98-004, 1998.
- 9) 稲葉薫，三枝博光，M. J. White, P. Robinson：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.