



超深地層研究所計画における地質構造モデルの構築及び地下水流動解析

三枝 博光 須山 泰宏*

東濃地科学センター
*鹿島建設株式会社

資料番号：9 - 11

Geological Modeling and Groundwater Flow Simulation in the MIU Project

Hiromitsu SAEGUSA Yasuhiro SUYAMA*

Tono Geoscience Center
*Kajima Corporation

地層処分研究開発の基盤となる深部地質環境の科学的研究を実施するために、東濃地科学センターでは、我が国の「深地層の研究施設」の一つとして超深地層研究所計画を進めている。この超深地層研究所計画における全体目標の一つである地質環境の総合的な調査技術を確立するためには、地下水流動場を把握するためのモデル化・解析技術を構築することが重要である。このモデル化・解析手法の構築を目標とした研究の一環として、今後の研究課題を整理するために、地質構造モデルを構築するとともに、地下水流動を規制する重要な地質構造であると考えられる断層のモデル化、及び水理学的境界条件が解析結果に与える影響を把握することを目的とした地下水流動解析を実施した。その結果、地下水流動解析の精度を向上させるためには、断層の透水性（透水異方性や不均質性）の把握、及び自由地下水面（上部境界面）の位置や形状を含む水理学的境界条件の設定方法の確立が重要であることが分かった。

The MIU (Mizunami Underground Research Laboratory) will be a major deep underground research facility in Japan. One of the main goals of the MIU project is to establish comprehensive techniques for investigating the geological environment. An important part of the MIU project is to develop methodologies for modelling and groundwater flow simulation. In this study, we performed geological modelling and groundwater flow simulation to evaluate the influences of the hydraulic properties of a Tsukiyoshi fault and hydraulic boundary conditions on the hydrogeological environment and to define issues to be addressed in the future. In order to characterize the hydrogeological environment using groundwater flow simulation, investigations of the heterogeneous hydraulic properties of faults and the development of methods to establish hydraulic boundary conditions are essential.

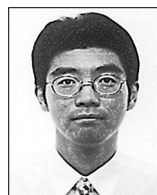
キーワード

超深地層研究所計画、地質構造モデル、水理地質構造モデル、地下水流動解析、月吉断層、水理学的境界条件、感度解析

Mizunami Underground Research Laboratory, Geological Model, Hydrogeological Model, Groundwater Flow Simulation, Tsukiyoshi Fault, Hydraulic Boundary Condition, Sensitivity Analysis



三枝 博光



須山 泰宏

1. はじめに

東濃地科学センターでは、1996年度より、岐阜県瑞浪市明世町のサイクル機構所有の用地を研究開発の場とする超深地層研究所計画を進めている。超深地層研究所は、「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」の定めるところの地層処分研究開発の基盤となる深部地質環境の科学的研究を着実に進めるための「深地層の研究施設」の1つである。本研究計画は、我が国における

代表的な結晶質岩である花崗岩を対象に、地質環境の総合的な調査技術の確立、深部の地質環境に関する情報の取得、及び深地層における工学的技術の基礎の開発を主たる研究課題とするものである¹⁾。この超深地層研究所計画は、地表からの調査予測段階、坑道の掘削を伴う研究段階、及び坑道を利用した研究段階の3段階で実施するものであり、現在、試錐孔等を用いた地表からの調査予測段階での研究を実施している²⁾。

上記の地質環境の総合的な調査技術を確立するためには、地下水流動場を把握するためのモデル化・解析技術を構築することが重要な課題の一つである。この課題を解決するためには、以下に示す項目に関する検討を実施する必要がある。

地質構造モデルの要素の設定方法

地質構造モデル及び地下水流動解析に必要な情報の種類や質、量

水理地質構造のモデル化手法（例：3次元透水係数分布の推定手法）

地下水流動解析手法

水理学的境界条件の設定方法

地下水流動解析結果の有する不確実性の評価

本報告では、このモデル化・解析技術の構築を目標とした研究の一環として実施した、超深地層研究所計画の研究実施領域を包含する領域（以下、モデル化・解析対象領域）を対象とした地質構造モデルの構築及び地下水流動解析について報告する。

2．研究実施内容

本研究では、上記の課題や検討項目を受け、今後の研究課題を整理するために、以下に示す内容について着目し研究を実施した。

現時点での地質・地質構造に関する理解の程度や情報の過不足等を明確にすること

地下水流動を規制する重要な地質構造であると考えられる断層のモデル化、及び水理学的境界条件が解析結果に与える影響を把握すること

3．モデル化・解析対象領域

本研究においては、図1に示す東西約400m、南北約700mの逆三角形形状を呈する超深地層研究所計画実施領域内の地質・地質構造や地下水流動を主な研究対象としている。

通常、地下水流動解析を行う上では、水理学的境界条件を設定する必要があるため、1つの閉じた地下水流動系とみなせる地下水の分水界等を考慮した領域を設定する。しかしながら、超深地層研究所計画の研究実施領域近傍においては、地下水の分水界となる地形的な特徴が存在しない。そ

のような地形的特徴を考慮して領域を設定する場合は、数km四方の領域まで範囲が拡大することになり、超深地層研究所計画の研究実施領域内の地質・地質構造や地下水流動をモデル化・解析する際の精度が減少するといった問題が生じる。

したがって、本研究におけるモデル化・解析対象領域は、モデル化・解析精度の関係上、図2に示すように、超深地層研究所計画実施領域、及び地下水流動場に大きな影響を及ぼしていると考えられる月吉断層を包含する東西約800m、南北約1,250mの直方体の領域とした。

また、超深地層研究所計画では地表（標高約200m～300m）から深度約1,000m付近までの地下水流動を研究対象としているため、下部境界条件がこの地下水流動に直接的に影響を及ぼすことを避けるために、モデル化・解析対象領域の鉛直深度は、地表から標高 - 1,500mまでとした。

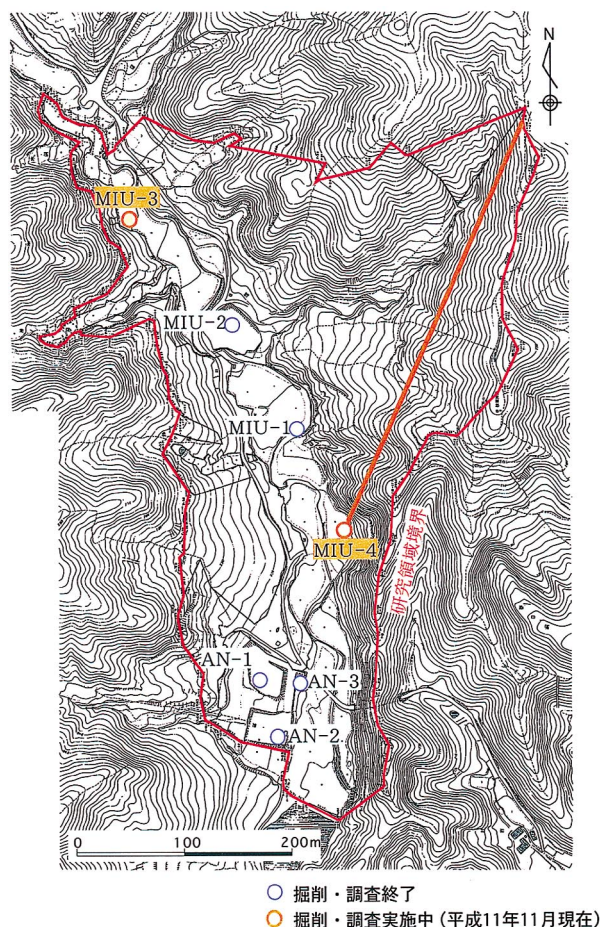


図1 超深地層研究所計画実施領域及び試錐孔位置

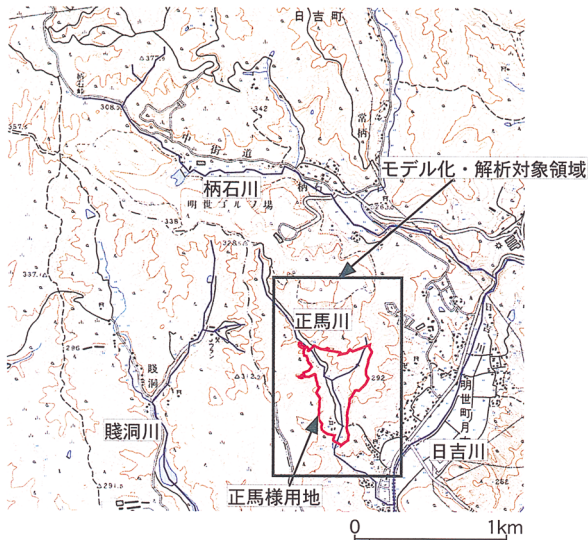


図2 モデル化・解析対象領域

4. モデル化・解析対象領域周辺の地質概要

モデル化・解析対象領域周辺の地質概要を図3に示す。当該地点の地質は³⁾、先新第三紀の花崗岩から成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。瑞浪層群は、下位より、泥岩・砂岩・礫岩から成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・解析対象領域中央部には、花崗岩及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。

5. 使用データについて

本研究において使用したデータは、以下のとおりである。

地形情報：デジタル標高データ（20m間隔）
 地表地質図：土岐・瑞浪周辺地質図³⁾
 試錐調査結果：超深地層研究所計画実施領域内で、本研究を開始した時点（1999年11月）で掘削及び調査が終了した試錐孔（MIU-1, MIU-2, AN-1, AN-3号孔）（図1, 図4）^{4), 5)}
 その他：広域地下水流動研究における地質構造のモデル化及び地下水流動解析結果⁶⁾

6. 研究の手順

本研究は、以下の手順に従って実施した。

(1) 地質構造モデルの構築

1) 地質構造モデルの要素の抽出

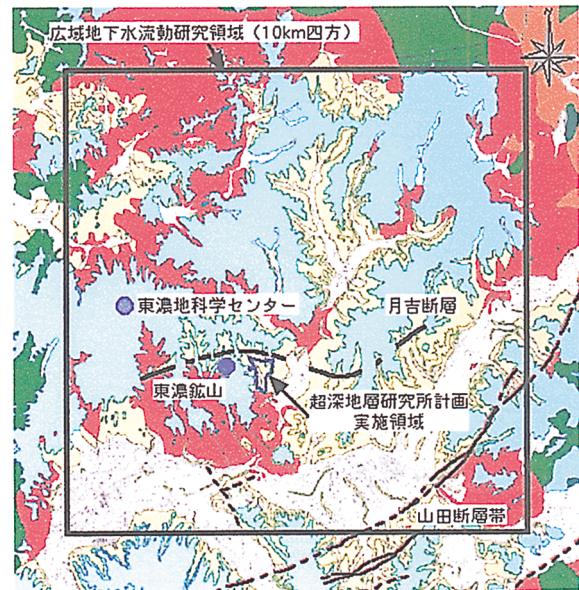


図3 モデル化・解析対象領域周辺の地質概要

2) 地質構造モデルの構築

(2) 地下水流動解析

1) 水理地質構造モデルの構築

物性値の設定

自由地下水面の設定

水理学的境界条件の設定

2) 地下水流動解析の実施

3) 地下水流動解析結果の評価

7. 地質構造モデルの構築

7.1 地質構造モデルの位置付け

地質構造モデルは、モデル化・解析対象領域において地下水流動や水質形成等に影響を及ぼすと考えられる、地形の起伏や地質（岩相の違い等）、地質構造（断層等）の空間分布を表現するものである。したがって、地質構造モデルは、水理地質構造モデル及び地下水の地球化学モデルの基盤となるものと位置付けられる⁷⁾。

7.2 地質構造モデルの要素の抽出

岩盤が有する水理学的物性（透水係数等）の

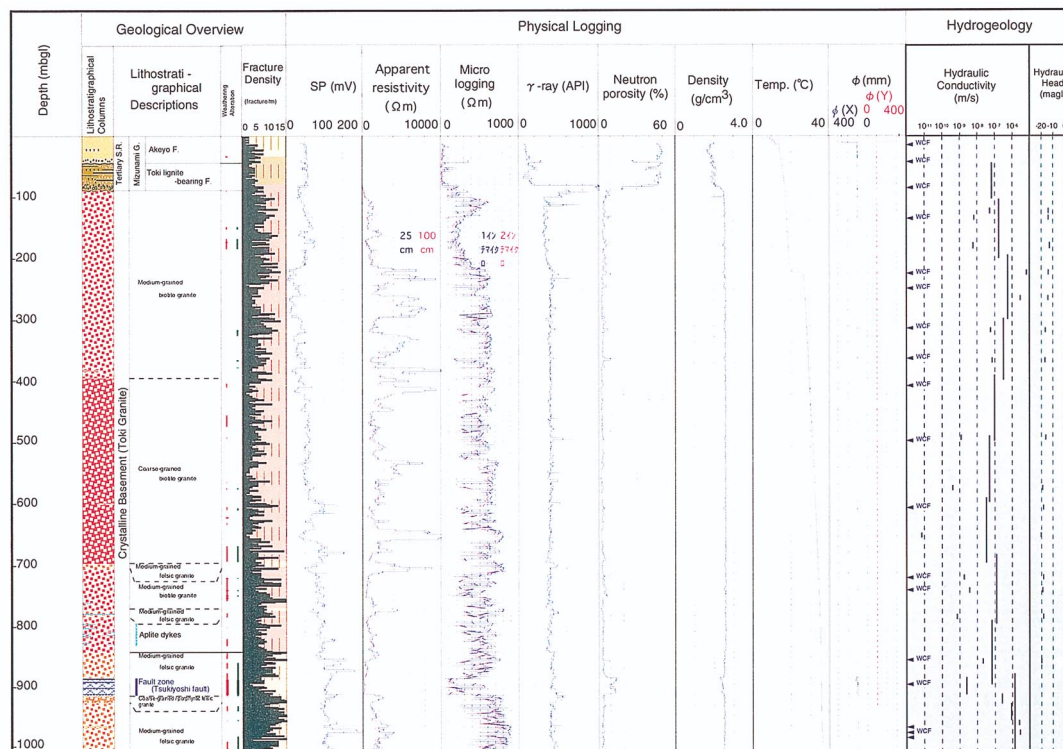


図4 試錐調査結果 (MIU-2号を例として)

ントラストは、地下水流動や水質形成等に大きな影響を及ぼすと考えられる⁷⁾。

したがって、本研究でのモデル化・解析対象領域における地質構造モデルで表現すべき要素（以下、地質構造モデルの要素）として、地形の起伏に加え、以下の地質・地質構造を抽出した。

表土・瀬戸層群、生俵累層、明世累層、土岐夾炭累層堆積岩部では、形成過程や粒度等の違いは、透水性に関係があると考えられるため、これら4つに区分した⁸⁾。

花崗岩風化部

花崗岩風化部では、水理試験結果や物理検層結果、割れ目密度から他の花崗岩部と比較して明らかに透水性が高いと考えられる⁴⁾。

黒雲母花崗岩健岩部、優白質花崗岩健岩部

これら2種類の花崗岩健岩部は、粒度、鉱物組成及び化学組成において異なる傾向を示している⁴⁾。

花崗岩上部割れ目帯

花崗岩風化部の直下には、割れ目密度が高いゾーンが確認されている。このゾーンにおいては、より深い深度における花崗岩部において高傾斜の割れ目が卓越しているのに対し、水平に近い傾斜の割れ目が卓越している。この水平割れ目は、花崗岩貫入時の応力開放によって形成されたものと考えられる。また、このゾーンは水理試験結果か

ら花崗岩健岩部と比較し、明らかに透水性が高いことが明らかとなっている⁴⁾。

月吉断層、月吉断層に伴う割れ目帯

断層等の不連続構造は、これ自体が地下水の流動経路となる場合と、遮水的な性質を持つ場合とが考えられる。

本研究におけるモデル化・解析対象領域内に分布する月吉断層については、MIU-2号孔における水頭分布から月吉断層を境に約30mの水頭差があることが確認されており、断層面に直交する方向には、遮水的性質を有していると考えられる。また、月吉断層沿いには、断層に伴う割れ目帯が観察されており、水理試験結果から花崗岩健岩部より明らかに透水性が高いことが明らかとなっている⁴⁾。

7.3 地質構造モデルの構築

(1) 地質構造モデルの構築及び可視化手法

地質構造モデルの構築及び可視化手法には、3次元地質構造モデル構築用ソフトウェアであるDynamic Graphics, Inc.製のEarthVisionを用いた。EarthVisionは、各地層の境界面や断層等の不連続面の形状を推定し、これらの面を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次元の地質構造モデルを構築するものである^{9),10)}。

また、このEarthVisionは海外における主要な地層処分研究開発プロジェクトである、Sellafield (Nirex), Wellenberg (Nagra), Aspo HRL (SKB), 及びYucca Mountain (USGS, USDOE)においても地質構造モデルの構築に使用された実績を持つソフトウェアである¹¹⁾。

なお、本研究における地形面や各地質の境界面、断層面の推定には、EarthVisionの有する機能の一つであるスプライン補間に基づくミニマム・テンション理論を適用した。この手法は、入力された位置や方向に関する情報を基に、 n 次元の多項式を用い、最も滑らかな曲面でデータ間を補間する方法である¹²⁾。

(2) 地質構造モデルの構築

本研究では、以下に示す情報を基に、前述のミニマム・テンション理論を使用し、地質構造モデルの要素である、地形面や各地質の境界面、断層面の形状を推定した。

1) 地形面

地形面については、デジタル標高データ(20m間隔)を用いてモデル化した。

2) 表土・瀬戸層群と生依累層の境界面

生依累層は、モデル化・解析対象領域においては月吉断層の下盤(北側)のみに分布しているため、超深地層研究所計画実施領域内で掘削された試錐孔では観察されていない。したがって、表土・瀬戸層群と生依累層の境界面については、土岐・瑞浪周辺地質図における地表地層境界線のデジタル情報を用いてモデル化した。

3) 表土・瀬戸層群と明世累層の境界面

超深地層研究所計画実施領域内での試錐孔掘削地点においては、表土・瀬戸層群と明世累層の境界面は、地表面近傍に位置しており、この区間は、試錐孔掘削作業の関係上(橋基礎工事等)、コアが取得されていない。したがって、表土・瀬戸層群と明世累層の境界面のモデル化では、土岐・瑞浪周辺地質図における地表地層境界線のデジタル情報を用いた。

4) 明世累層と土岐夾炭累層の境界面

明世累層と土岐夾炭累層の境界面は、MIU-1及びMIU-2号孔での試錐調査結果よりその深度が明らかになっている。また、モデル化・解析対象領域南部のAN-1及びAN-3号孔では、土岐夾炭累層は分布していない。さらに、土岐夾炭累層は地表においても分布していない。以上のことより、明世累層と土岐夾炭累層の境界面については、MIU-1及びMIU-2号孔での位置情報、及びAN-1及びAN-3号孔付近までは連続していないという情報に基

づきモデル化した。

5) 堆積岩部と花崗岩風化部の境界面

堆積岩部と花崗岩風化部の境界面は、MIU-1、MIU-2号孔及びAN-1、AN-3号孔での試錐調査結果よりその深度が明らかになっている。また、地表において分布している花崗岩についてもその上部が風化していると考えられる。したがって、堆積岩部と花崗岩風化部の境界面については、試錐調査での位置情報及び土岐・瑞浪周辺地質図における地表地層境界線のデジタル情報を用いてモデル化した。

6) 花崗岩風化部と花崗岩上部割れ目帯の境界面

花崗岩風化部は、以下の4点が該当するゾーンとして定義した。

電研式岩盤等級¹³⁾(風化による劣化の程度、岩塊の固さ、亀裂の状態)が C_M 以下のゾーン
RQD(掘進1mにおける総コア当たりの10cm以上の長さのコアの合計)が50以下のゾーンが主体

物理検層で相対的に低比抵抗・低密度・高空隙率であるゾーン

堆積岩部と花崗岩風化部の境界面より連続しているゾーン

これらの定義に従い、MIU-1、MIU-2号孔及びAN-1、AN-3号孔での試錐調査結果より花崗岩風化部のモデル化・解析対象領域での厚さ分布を推定し、この結果を用いて、花崗岩風化部と花崗岩上部割れ目帯の境界面をモデル化した。

7) 花崗岩上部割れ目帯と黒雲母花崗岩健岩部の境界面

花崗岩上部割れ目帯は、以下の3点が該当するゾーンとして定義した。

割れ目密度が高いゾーン

物理検層で高空隙率であるゾーン

水平割れ目が卓越しているゾーン

これらの定義に従い、花崗岩上部割れ目帯と黒雲母花崗岩健岩部の境界面については、その境界が確認されているMIU-1及びMIU-2号孔での試錐調査での位置情報を用いてモデル化した。

8) 花崗岩上部割れ目帯と優白質花崗岩健岩部の境界面

花崗岩上部割れ目帯と優白質花崗岩健岩部の境界面については、上述した花崗岩上部割れ目帯と黒雲母花崗岩健岩部の境界面のモデル化方法と同様に、その境界が確認されているAN-1及びAN-3号孔での試錐調査での位置情報を用いてモデル化した。

9) 黒雲母花崗岩健岩部と優白質花崗岩健岩部の境界面

黒雲母花崗岩健岩部と優白質花崗岩健岩部の境界面は、MIU-1、MIU-2号孔及びAN-1、AN-3号孔での試錐調査結果よりその深度が明らかになっている。また、土岐・瑞浪周辺地質図においては、花崗岩を黒雲母花崗岩と優白質花崗岩に区別して記載されていないため、黒雲母花崗岩健岩部と優白質花崗岩健岩部の境界面については、試錐調査での位置情報のみを用いてモデル化した。

10) 月吉断層面

月吉断層については、MIU-2号孔での試錐調査結果よりその深度が明らかになっている。また、MIU-2号孔に隣接するMIU-1号孔では確認されていない。したがって、月吉断層面はMIU-2号孔での試錐調査での位置情報及び土岐・瑞浪周辺地質図における断層線のデジタル情報を用いてモデル化した。また、月吉断層の変位をモデル化するため、月吉断層を境に以下に示す各境界面に30mの変位を持たせた。

明世累層と土岐夾炭累層の境界面

堆積岩部と花崗岩風化部の境界面

花崗岩風化部と花崗岩上部割れ目帯の境界面

黒雲母花崗岩健岩部と優白質花崗岩健岩部の境界面

なお、花崗岩上部割れ目帯については、月吉断層との形成関係が明らかになっていないため、花崗岩上部割れ目帯と黒雲母花崗岩健岩部の境界面、及び花崗岩上部割れ目帯と優白質花崗岩健岩部の境界面については、断層変位を考慮していない。

11) 月吉断層に伴う割れ目帯上盤側境界面

月吉断層に伴う断層上盤側の割れ目帯の厚さ分布に関する情報は、MIU-2号孔の試錐調査結果でのみ取得されている。したがって、月吉断層に伴う割れ目帯上盤側境界面は、MIU-2号孔で確認された月吉断層に伴う断層上盤側の割れ目帯の厚さが一定に連続すると仮定し、モデル化した。

12) 月吉断層に伴う割れ目帯下盤側境界面

月吉断層に伴う断層下盤側の割れ目帯については、MIU-2号孔の試錐調査結果からその分布は確認されているものの、月吉断層に伴う割れ目帯下盤側境界面は、試錐孔最下部より下方に分布していると考えられるため、厚さに関する情報は取得されていない。したがって、月吉断層に伴う割れ目帯下盤側境界面は、MIU-2号孔で確認された月吉断層に伴う断層上盤側の割れ目帯と同様の厚さで分布していると仮定した。

以上のように推定した地形面や各地層の境界面、断層面等をその位置関係や形成過程を考慮し、

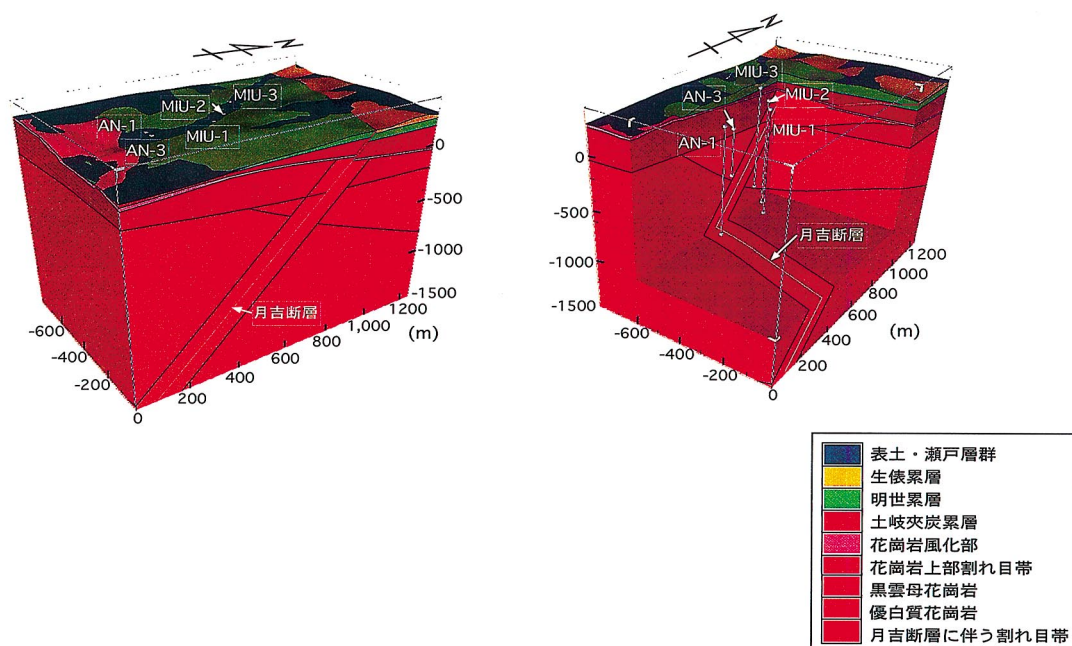


図5 構築した地質構造モデル

組み合わせることにより、構築した地質構造モデルを図5に示す。

本研究における地質構造のモデル化を通して、地質・地質構造に関する理解の程度や、モデル化に不足している情報を明確にすることができた。一般的に情報が不足している地点においては、データの内挿・外挿に伴う地質構造モデルの不確実性が増大する。したがって、深度1,000m以深における月吉断層の連続性や月吉断層に伴う割れ目帯の形状に関する不確実性は大きいと考えられる。また、深度1,000m以深や月吉断層下盤等の情報の不足している地点においては、本研究において抽出した地質構造モデルの要素以外の新たな地質・地質構造が存在している可能性が考えられる。以上のことから、今後、モデル化・解析対象領域内の地質・地質構造に関する理解度を深めるためには、これらの地点における情報を取得することが必要である。

また、モデル化・解析対象領域内において計画されている試錐調査のプログラムを策定する際には、試錐孔沿いの地質・地質構造を予測する必要がある。この予測を行う上で、地質構造のモデル化は有効な手法の一つであると考えられる。例として、図6に本研究において構築した地質構造モデルに基づいて予測したMIU-4号孔沿いの地質・地質構造の予測結果を示す。

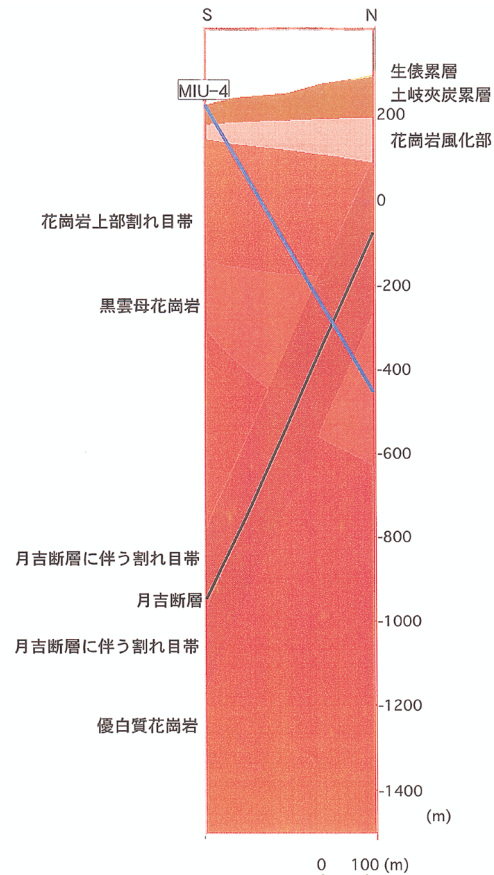


図6 MIU-4号孔における地質構造分布の予測

各地質・地質構造毎の物性値については、均質と仮定し、原位置調査結果に基づき表1に示すように設定した。

(2) 自由地下水面（上部境界面）の設定

本研究での地下水流動解析では、水理学的境界条件設定の一部に、モデル化・解析対象領域を含む広域地下水流動研究における地下水流動解析結果⁶⁾を用いたため、自由地下水面については、この広域スケールでの解析と同一のものを使用している。

具体的には、広域地下水流動研究における地下水流動解析対象領域内における各試錐孔での地表面標高と自由地下水面標高の関係をを用いて、自由地下水面を設定した。両者の関係を近似する際、土岐川の標高を拘束条件（地表面標高＝自由地下水面標高）として設定する必要がある。かつ、土岐川が東から西へ傾斜しているため、その影響を考慮する必要があった。

以上のことを考慮し、両者の関係を以下に示す線形式〔式(1)〕で近似し、自由地下水面を設定した。

$$\Phi = 0.804 \times H + 1.22 \times 10^{-3} \times X + 22.2 \quad \dots (1)$$

8. 地下水流動解析

8.1 水理地質構造モデルの構築

(1) 物性値の設定

本研究においては、地質構造モデル構築の際に、地下水流動に影響を及ぼすと考えられる地質・地質構造等を地質構造モデルの要素として抽出している。したがって、地下水流動解析においては、地質構造モデルにおいて区分した各地質・地質構造ごとに物性値を与えた。

月吉断層の物性値については、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や不均質性を有していること^{14),15)}は確認されているものの、月吉断層面に直交した方向の透水性に関する物性値は取得されていない。したがって、月吉断層の透水性は、これまで東濃鉾山周辺領域を対象とした地下水流動解析^{8),16)}（主に堆積岩を対象）において推定された $1.0E-10 \text{ m/s}$ を設定するとともに、月吉断層の透水性がモデル化・解析対象領域内の地下水流動場に与える影響を検討するために、さらに $1.0E-12$ と $1.0E-14 \text{ m/s}$ を設定した。

表 1 地下水流動解析に使用した透水係数

地質構造モデルの要素	透水係数 (m/s)
表土・瀬戸層群	1.00E-07
生俵累層	1.00E-09
明世累層	1.00E-08
土岐夾炭累層	5.00E-09
風化花崗岩	1.79E-07
花崗岩上部割れ目帯	2.80E-07
黒雲母花崗岩健岩部	2.41E-08
優白質花崗岩健岩部	2.41E-08
月吉断層に伴う割れ目帯（上盤）	1.92E-07
月吉断層に伴う割れ目帯（下盤）	4.50E-07

ここで、 ϕ は自由地下水面標高、 H は地表面標高を示す。また、 X で示す東西方向座標は、国家系の東西方向座標を用いている。

また、自由地下水面の位置や形状が地下水流動場に与える影響を検討するために、以下に示す 2 ケースの自由地下水面を追加設定した。

自由地下水面と地形面が一致していると仮定し、地形面を自由地下水面として設定するケース

モデル化・解析対象領域内の試錐孔のみを使用して地表面標高と自由地下水面標高の関係式〔式(2)〕を推定し、自由地下水面を設定するケース

$$\Phi = 0.4124 \times H + 108.52 \quad \dots\dots (2)$$

(3) 水理学的境界条件の設定

1) 上部境界条件

本研究においては、飽和状態における地下水流動解析を実施したため、(2) で設定した自由地下水面を上部境界面とし、その上部境界条件は固定水頭境界とした。また、同時に水の流入出がある自由漫出面として設定した。

2) 側方境界条件

側方境界条件は、以下の 2 ケース設定した。

広域地下水流動研究における地下水流動解析結果⁶⁾から得られた水頭分布を用いる。

モデル化・解析対象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、ほぼ静水圧分布を示している試錐孔が多いことから、側方境界条件として上部境界面より深度方向に一定の静水圧分布を仮定する。

3) 下部境界条件

地下深部での地下水は、主に水平方向へ流動していると報告されているため^{13),14)}、下部境界条件としては、水の流入出のない不透水境界とした。

(4) 水理地質構造モデル

7 章で構築した地質構造モデルに、以上で述べた物性値、水理学的境界条件に関する情報を追加することにより、図 7 に示す水理地質構造モデルを構築した。

8.2 地下水流動解析

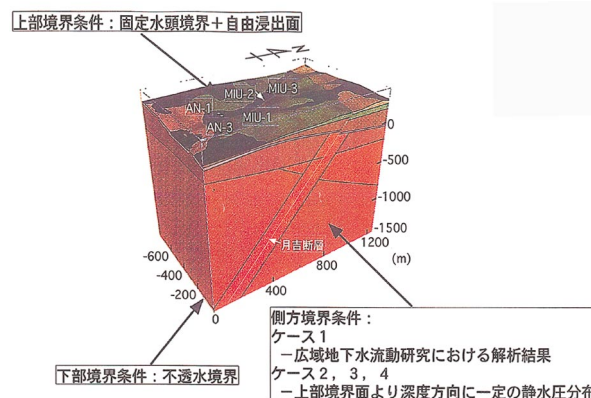
(1) 地下水流動解析コード

本研究における地下水流動解析においては、差分法による 3 次元飽和浸透流解析コードである Frac-Affinity¹⁰⁾ (Ver.1.2.4) を用いた。Frac-Affinity の特徴を以下に示す。

多孔質媒体部と亀裂性媒体部を同時に扱うことが可能なハイブリッド媒体である。

亀裂性媒体部については、決定論的割れ目と確率論的割れ目の両者を考慮することが可能である。

多孔質媒体部及び亀裂性媒体部（決定論的割



(a) 境界条件

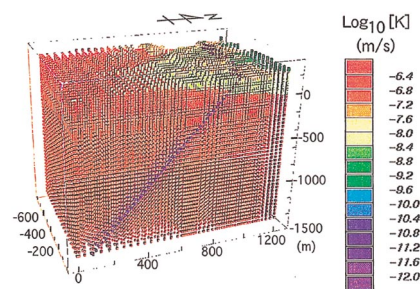
(b) 透水係数分布
(月吉断層の透水係数が $10E-12$ m/sの場合)

図 7 水理地質構造モデル
(a) 境界条件, (b) 透水係数分布

れ目部)の物性値については、各地質・地質構造毎に均質に設定する方法と、フラクタル理論を用いた地球統計学的手法により不均質に設定する方法を選択することが可能である。

確率論的割れ目は、ランダムに発生させる場合と、位置固定で発生させる場合の2種類が設定できる。また、物性値については、均質な場合と正規分布を用いて確率論的に発生する場合が選択できる。

地質構造モデル構築に使用したEarthVisionからのデータインターフェイス環境がシステム化されているため、入力データの作成及び差分メッシュの作成が容易である。

本研究における地下水流動解析では、確率論的割れ目として取り扱う小規模割れ目の水理学的影響は、各地質・地質構造毎の物性値に含まれていると考え、その形状や分布は、モデル化していない。

(2) 地下水流動解析ケース

本研究における地下水流動解析では、水理学的境界条件を表2に示す4ケース設定した。また、各ケースにおいて月吉断層の透水性を8.1章で述べたように3パターン設定し、地下水流動解析を実施した。

8.3 地下水流動解析結果

本研究における地下水流動解析結果より以下のことが明らかとなった。

(1) 上部境界面の設定方法について

図8にモデル化・解析対象領域内の試錐孔における全水頭分布を示す。図中のMIU-2号孔における全水頭分布の実測値と解析値を比較すると、実測値では標高-680m付近の月吉断層を境として、約30mの急激な水頭差があることが確認されてい

るが、ケース1においては地表部から地下深部に向かい、全水頭がなだらかに上昇している。この上昇傾向は月吉断層の透水性が低くなるほど大きい(月吉断層の透水性が $1.0E-12m/s$ の場合で約7m、 $1.0E-14m/s$ の場合で約17m)。また、ケース2～4では月吉断層の透水性の大小にかかわらず、ほぼ静水圧分布を示している。

ケース1の場合では、月吉断層上盤では実測値と解析値に約25～30m程度の水頭差が見られる。しかし、月吉断層下盤では実測値と解析値はよい一致を示している。この結果は、ケース2でも同様である。ケース3の場合は、上部境界面を地形面としたため、上部境界面の標高が他のケースと比較して、全体的に高くなり、ケース1及び2の場合と比較して全体的に水頭が高い結果となった。ケース4の場合は、ケース1～3と比較して全体的に水頭が低い結果となり、ケース1、2の場合とは逆に、月吉断層上盤での水頭の実測値とおおむね一致するといった結果が得られた。これは上部境界面の標高が全体的に低くなっていることによるものである。

以上の結果から、本研究におけるモデル化・解析対象領域内の地下水流動場は自由地下水面の位置や形状の影響を受けていることが示された。

(2) 月吉断層の透水性について

図9にケース1におけるモデル化・解析対象領域内全体の全水頭分布を、図10に各ケースにおける月吉断層の透水係数が $1.0E-14m/s$ の場合のMIU-2号孔を通る南北鉛直断面における全水頭分布を示す。

図9のケース1においては、月吉断層の透水性が低くなるほど、断層下盤の水頭の高いゾーンが広がっていると同時に、断層上盤の等水頭線が密になっていることが分かる。このことは、月吉断

表2 地下流動解析ケース

ケース番号	月吉断層の透水係数		上部境界面	側方境界条件
		(m/s)		
ケース1	(a)	$1.0E-10$	自由地下水面 (広域地下水流動研究における地下水流動解析に使用した上部境界面と同様の形状を設定)	広域地下水流動研究を対象とした地下水流動解析結果 ⁶⁾ における水頭分布
	(b)	$1.0E-12$		
	(c)	$1.0E-14$		
ケース2	(a)	$1.0E-10$	自由地下水面 (広域地下水流動研究における地下水流動解析に使用した上部境界面と同様の形状を設定)	上部境界面より深度方向に一定の静水圧分布
	(b)	$1.0E-12$		
	(c)	$1.0E-14$		
ケース3	(a)	$1.0E-10$	地形面	上部境界面より深度方向に一定の静水圧分布
	(b)	$1.0E-12$		
	(c)	$1.0E-14$		
ケース4	(a)	$1.0E-10$	自由地下水面 (本研究におけるモデル化・解析対象領域内の試錐情報より設定)	上部境界面より深度方向に一定の静水圧分布
	(b)	$1.0E-12$		
	(c)	$1.0E-14$		

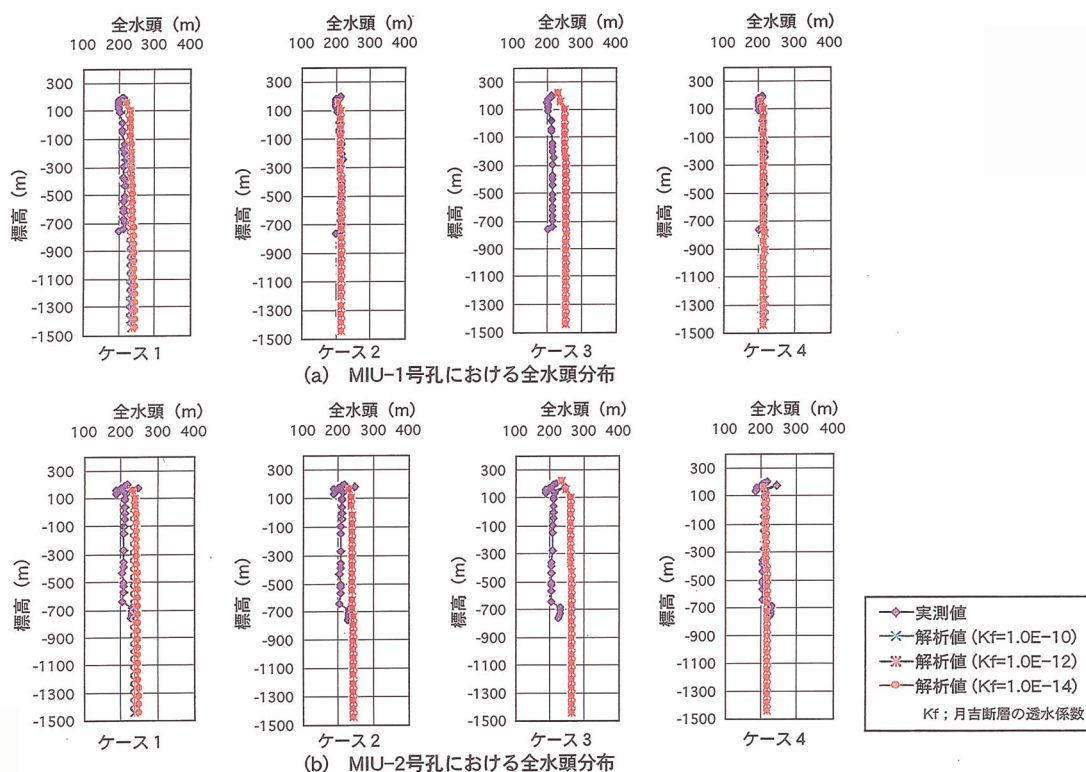


図8 試錐孔における全水頭分布

層の透水性がモデル化・解析対象領域内の地下水流動場に与える影響が大きいことを示している。

一方、ケース2, 3, 4の側方境界条件を上部境界面より深度方向に一定の静水圧分布を与えた場合においては、地表部を除きほとんどの箇所静水圧分布を示しており、月吉断層の透水性の違いが地下水流動場に与える影響は再現できていない。さらに、図8中のMIU-2号孔における全水頭分布から、ケース1では月吉断層下盤において、月吉断層の透水性が $1.0E-10\text{m/s}$ の場合（全水頭：約235m）と $1.0E-14\text{m/s}$ の場合（全水頭：約247m）では、約12mの水頭差が生じているのに対し、他のケースでは、この水頭差がほとんど見られなかった。これらのことから、ケース2, 3, 4においては、月吉断層下盤の水頭が高くなるといった結果は再現できなかった。

(3) モデル化・解析対象領域内の地下水流動場について

ケース1の場合では、MIU-1号孔及びMIU-2号孔における実測値と解析値に約25～30mの水頭差が見られたものの、この差は自由地下水面設定時の誤差や季節変動分の範囲（約37m：自由地下水面設定時の誤差の標準偏差 σ の2倍の値）に含まれていることや（図8）、月吉断層の下盤での水頭の高いゾーンを再現していることから、この場

合の解析結果が最も現実的であると判断し、この解析結果に基づきモデル化・解析対象領域内の地下水流動場について説明する。

図9に示す全水頭分布から、モデル化・解析対象領域内の大局的な地下水の流動方向は、上部境界面（自由地下水面及び地形面）の起伏の影響を顕著に受けており、北方から南方に流れていることが分かる。また、地下浅部においては、小規模な地下水流動系が発生している。

また、MIU-2号孔における深度約500m及び1,000m付近の水平断面における全水頭分布を図11, 12に示す。これらの図から、深度約500mの地下水は北西から南東方向へ流動しており、深度約1,000mの地下水は、北から南方向へ流動していることが分かる。このことは深度約500mの地下水の流動方向は、局所的な地形の起伏の影響を受けているのに対し、深度約1,000mの地下水の流動方向は、大局的な地形の起伏の影響を受けていると考えられる。

8.4 地下水流動解析結果の考察

本研究の地下水流動解析においては、地下水流動を規制する重要な地質構造であると考えられる断層のモデル化、及び水理学的境界条件が解析結果に与える影響を把握することを目的とした感度

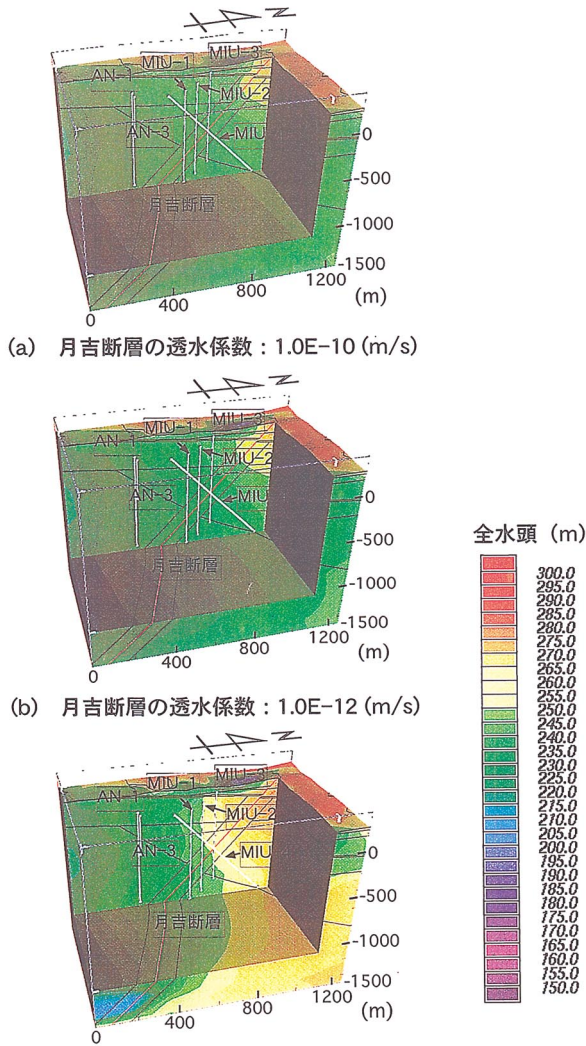


図9 領域全体の全水頭分布（ケース1）

解析を実施した。

自由地下水面の位置や形状に関する感度解析の結果、モデル化・解析対象領域内の地下水流動場は自由地下水面の位置や形状の影響を受けていることが示された。しかし、月吉断層上盤と下盤での水頭差を再現する結果は得られていない。この水頭差は、自由地下水面の位置や形状が月吉断層を挟んで不連続的に変化していることに起因しているものと考えられ、解析上で再現するためには、月吉断層上盤と下盤のそれぞれにおいて自由地下水面を設定する必要があると考えられる。

月吉断層の透水性に関する感度解析の結果、ケース1においては、月吉断層の透水性が低くなるほど、断層下盤の水頭の高いゾーンが広がっていることが再現できた。このことから、断層の透水性がモデル化・解析対象領域内の地下水流動場に与える影響が大きいことが示された。しかし月吉断層の透水性が低い場合においても、試錐孔の位置している地点での断層下盤における水頭の高いゾーンが再現できていない。このことは、月吉断層の透水性の設定方法と同時に自由地下水面の位置や形状に起因するものであると考えられる。ケース2～3においては、月吉断層の透水性の大小にかかわらず、断層下盤で水頭が高くなるといった現象を再現できず、側方境界条件の設定方法に問題があったと考えられる。

また、感度解析の結果から、一部の解析結果を除いて試錐孔での全水頭分布には大きな違いが得

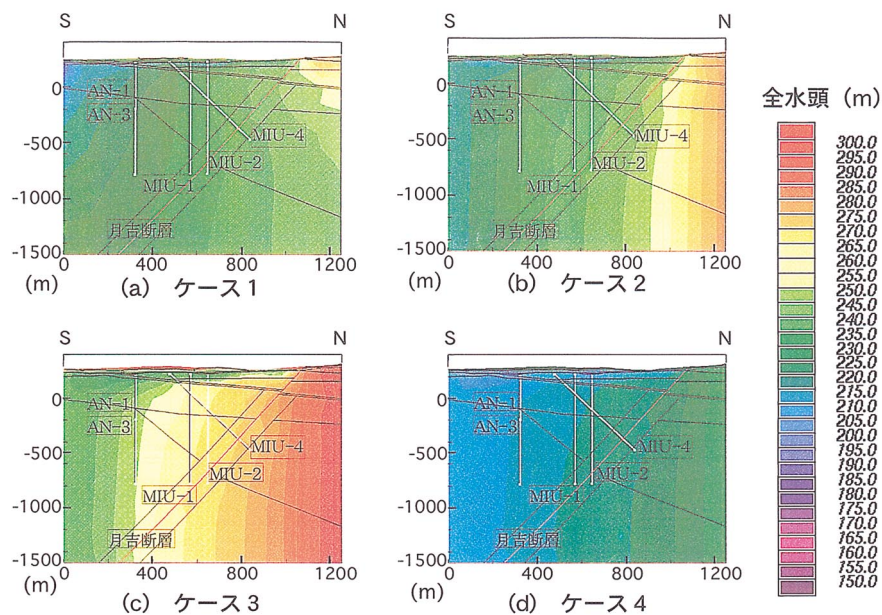


図10 MIU-2号孔を通る南北鉛直断面における全水頭分布（月吉断層の透水係数が1.0E-14 (m/s) の場合）

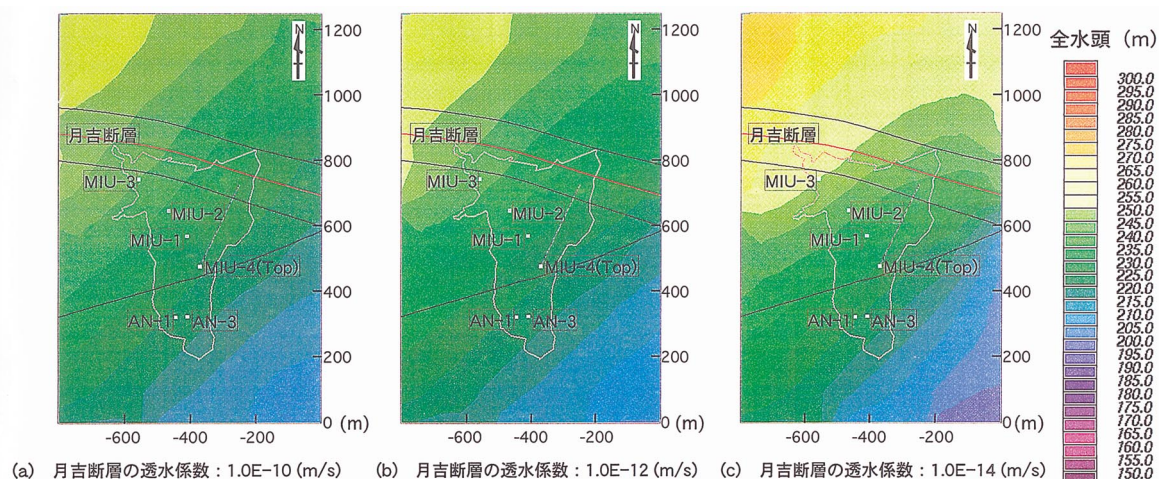


図11 ケース1における全水頭分布 (MIU-2号孔深度約500mの水平断面)

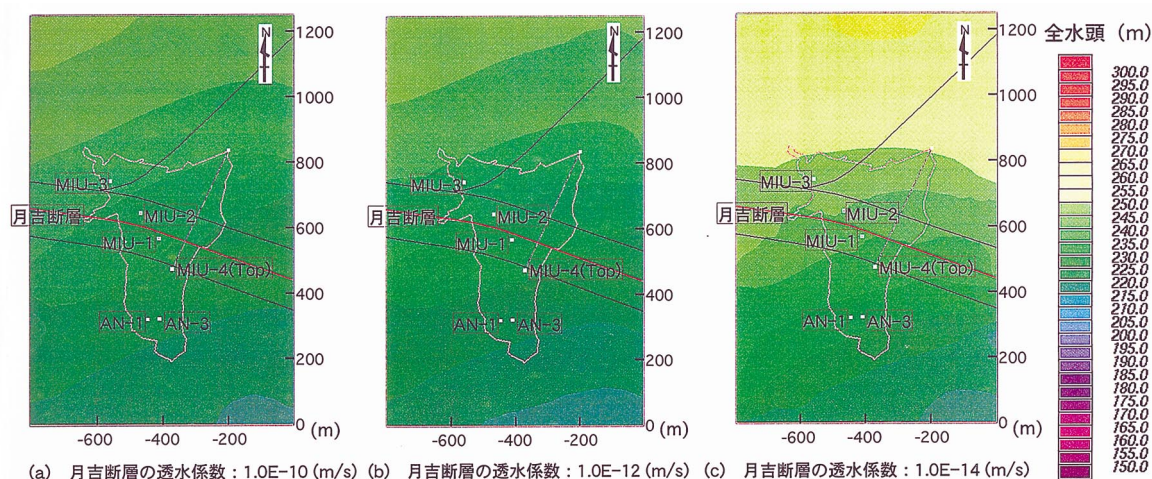


図12 ケース1における全水頭分布 (MIU-2号孔深度約1,000mの水平断面)

られなかったにもかかわらず、モデル化・解析領域全体の全水頭分布においては違いが現れる結果となった。このことは解析結果の妥当性を確認する情報として、試錐孔での全水頭分布のような局所的な情報のみでは不十分であることを示していると考えられる。

以上のことから、今後、地下水流動解析の精度を向上させるためには、以下に示す研究課題が明らかになった。

(1) 自由地下水面の位置や形状については、本研究と同様の飽和地下水流動解析を用いる場合のみならず、飽和不飽和地下水流動解析においても、解析結果の妥当性を確認する上で重要な項目の一つであると考えられることから、これを精度よく推定するための情報や手法を確立すること、及び月吉断層の透水性(透水異方性や不均質性)を把

握することが必要である。

(2) 地下水の分水界等の側方境界条件設定に用いることのできる地形的な特徴が存在しない領域を対象とした地下水流動解析においては、より広域なスケールでの地下水流動場を考慮した側方境界条件の設定が必要である。

(3) 解析結果の妥当性を確認する情報としては、試錐孔での全水頭分布のような局所的な情報だけでなく、モデル化・解析領域全体の地下水流動場と密接な関係があると考えられる河川流量や前述の自由地下水面の位置や形状(飽和不飽和地下水流動解析の場合)等の情報も同時に使用する必要がある。

9. 今後の方針

本研究における地質構造モデルの構築、及び地下水流動解析結果の成果を踏まえ、今後、地下水流動場を把握するためのモデル化・解析技術を構築するためには、以下に示す検討が必要であると考える。

(1) 地質構造のモデル化においては、今後、より地質・地質構造に関する理解を深めるために、不確実性の大きい地点における情報を取得することが必要である。また、地質の区分方法や地質構造の抽出方法等のような地質構造モデルの要素の抽出方法や、花崗岩風化部や花崗岩上部割れ目帯における定義方法の妥当性に関する検討を実施することが必要である。

(2) 地下水流動解析においては、今後、より精度よく研究対象領域内の地下水流動場を評価するために、本研究と同様に様々な因子が地下水流動場に与える影響を感度解析的手法や比較解析により評価することが必要である。

謝辞

本研究を進めるに当たり、M. White氏 (QuantiSci) には多大な協力と助言を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団：“超深地層研究所 地層科学研究基本計画”，動燃技術報告書，PNC TN7070 96-002 (1996)。
- 2) 核燃料サイクル開発機構：“超深地層研究所 - 地表からの調査予測研究段階計画 - 平成10年度，平成11年度研究計画書”，サイクル機構技術報告書，JNC TN7410 99-004 (1998)。
- 3) 糸魚川淳二：“瑞浪地域の地質”，瑞浪市化学博物館専報，No.1，p.1～50 (1980)。
- 4) 核燃料サイクル開発機構：“平成11年度地層科学研究情報・意見交換会 発表QHP集”，サイクル機構技術報告書，JNC TN7400 99-012 (1999)。
- 5) K.ota, K.Nakano, et al.：“Working Programme for MIU-4 Borehole Investigations”，サイクル機構技術報告書，JNC TN7410 99-007 (1999)。
- 6) 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のモデル化及び地下水流動解析”，サイクル機構技術報告書，JNC TN7400 2000-012 (2000)。
- 7) 太田久仁雄，天野健治 他：“広域地下水流動研究における三次元地質構造モデルの構築”，サイクル機構技報，No.4，p.101～110 (1999)。
- 8) 柳澤孝一，今井 久 他：“立坑掘削に伴う地下水流動影響調査研究 - 東濃ウラン鉱山試験立坑を例として -”，応用地質，Vol.33，p.276～293 (1992)。
- 9) M. J. White, C. del Olmo：“The Application of Geological Computer Modelling Systems to the Characterisation and Assessment of Radioactive Waste Repositories”，Proc. the International Conference on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste，Canadian Nuclear Society，p.3-235～3-244 (1996)。
- 10) M.J.White,J.P.Humm et al.：“GEOMASS: Geological Modelling Analysis and Simulation Software for the Characterisation of Fractured Hard Rock Environments”，Proc. the third Aspo International Seminar, Oskarshamn, June 10-12 1998, SKB TR-98-10, p.233～242 (1998)。
- 11) Tim McEwen：“The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste”，Chapter 8, p.239～320, John Wiley & Sons (1995)。
- 12) I.C.Briggs：“Machine Contouring Using Minimum Curvature”，Geophysics，Vol. 39, p.39～48 (1974)。
- 13) 日本応用地質学会編：応用地質特別号，p.15～16 (1992)。
- 14) 山根正樹，中野勝志 他：“立坑掘削に伴う間隙水圧の長期観測”，土と基礎，Vol.44-No.11，p.24～26 (1996)。
- 15) 尾方伸久，山根正樹 他：“間隙水圧の長期観測による立坑掘削影響の把握について”，地下水学会1996年秋季講演会講演会要旨，p.34～39 (1996)。
- 16) 稲葉秀雄，竹内真司 他：“東濃鉱山周辺領域を対象とした地下水流動解析”，動燃事業団技術報告書，PNC TN7410 98-002，(1998)。
- 17) 山本荘毅：“新版 地下水調査法”株式会社 古今出版，(1983)。
- 18) 柳澤孝一，今井 久 他：“我が国を対象とした地下水流動解析 その1 中部日本を対象とした地下水流動解析”，動燃事業団技術報告書，PNC TN7410 92-019 (1992)。