資料番号：12－9

研究報告

超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階の現状

中野　勝志　　大澤　英昭
東濃地科学センター

Current Status of the Surface-Based Investigations in the MIU Project

Katushi NAKANO　　Hideaki OSAWA

Tono Geoscience Center

東濃地科学センターでは，地層処分研究開発の基盤となる地層科学研究の一環として，1996年度より「超深地層研究所計画」を進めている。超深地層研究所の全体目標は，①地質環境の評価のための体系的な調査・解析・評価技術の基盤の開発，及び②深地層における工学的技術の基盤の開発の二つである。研究は，第１段階：地表からの調査予測研究段階，第２段階：研究坑道の掘削を伴う研究段階，第３段階：研究坑道を利用した研究段階，の３段階に分け，約20年間の予定で進めている。

これまで第１段階の研究として，地表及び試錐孔において地質・地質構造，地下水流動，地下水の地球化学，岩盤力学の各分野にかかわる調査・試験を実施してきた。これらの過程において，地質環境特性にかかわる情報の整備，地質環境のモデル化と予測解析が段階的に実施されると共に，地質環境特性を評価するための方法論や個々の手法についての技術的知見や経験が蓄積されつつある。本稿では，これまでの第１段階の研究の成果について報告する。

Tono Geoscience Center (TGC) has been conducting a wide range of geoscientific research in order to build a firm scientific and technological basis for the research and development of geological disposal. One of the major components of the ongoing geoscientific research program is the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) project in the Tono region, central Japan. The R&D work of the MIU project has the following main goals:
-Develop comprehensive investigation techniques for the geological environment.
-Develop a range of engineering techniques for deep underground application.
A wide range of geoscientific research and development activities of the MIU project is planned in three phases a 20 years period;
-Phase one: surface-based investigation
-Phase two: construction
-Phase three: operations
The MIU site has been investigated by geological, hydrogeological, hydrochemical and rock mechanical surveys on the surface. Based on this information, modeling and simulation works have been conducted in the different investigation stages. Technological knowledge and experience have been accumulated, which allow application of the methodologies and techniques to characterize the deep geological environment in crystalline rock. This report presents the results of the investigations from fiscal 1996 to 1999 in phase one.

キーワード
超深地層研究所（MIU），地層科学，地層処分，地質環境，地下深部，地質・地質構造，地下水流動，地下水の地球化学，岩盤力学，モデル，解析

Mizunami Underground Research Laboratory, Geoscientific Research, Geological Disposal, Geological Environment, Deep Underground, Geology and Geological Structure, Hydrogeology, Hydrochemistry, Rock Mechanics, Modeling, Simulations

中野　勝志
地質環境特性研究グループ
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現場調査・地質環境のモデル化・予測解析業務に従事

大澤　英昭
地層科学研究情報化グループ所属
副主任研究員
研究プロジェクトの監理及び研究成果の取りまとめ業務に従事

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にあるサイクル機構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（原子力長計）[1] に示された「深地層の研究施設」の一つに相当する。また，2000年11

月の新たな原子力長計[2]においては,「核燃料サイクル開発機構等は,これまでの研究成果を踏まえ,今後とも深地層の研究施設（中略）を活用し，地層処分技術の信頼性の確認や安全評価手法の確立に向けて研究開発を着実に推進すること」と，今後の方向性が明示されている。

超深地層研究所計画は,結晶質岩を主な対象に,深部地質環境の評価のための体系的な調査・解析・評価技術の基盤の開発，及び深地層における工学技術の基盤の開発を全体目標とした，約20年の計画である[3]。本計画の調査・研究の成果は,地層処分技術の信頼性の確認や安全評価手法の確立に向けた地層処分研究開発の基盤として反映されるほか，地下深部についての学術的な研究，ならびに地層処分に対する国民の理解の醸成に寄与する。現在は，次章で紹介する第１段階の地表からの調査・研究を進めるとともに，第２段階で実施する研究坑道の掘削に伴う調査・研究計画や施工計画の策定を並行して行っている。

ここでは，1996年から開始した第１段階における，深部地質環境の評価のための体系的な調査・解析・評価技術の基盤にかかわる研究成果の現状を報告する。

２．超深地層研究所計画の概要

超深地層研究所計画は，大きく三つの段階に分けて進めている。第２段階より研究坑道の掘削が開始される。以下に各段階の概要を述べる。

① 第１段階：地表からの調査予測研究段階

地表からの調査により地質環境特性を把握し，第２段階で実施する研究坑道の掘削に伴う地質環境特性の変化を予測する。また，本段階で取得する地質環境にかかわる情報などを考慮し，研究坑道の詳細設計及び施工計画を策定する。

② 第２段階：研究坑道の掘削を伴う研究段階

研究坑道の掘削と並行して進められる調査により第１段階の予測結果の妥当性を確認する。また，第３段階において実施する研究坑道の拡張に伴う研究坑道周辺の地質環境特性の変化を予測する。さらに，研究坑道の施工・維持・管理にかかわる工学技術の有効性を確認する。

③ 第３段階：研究坑道を利用した研究段階

研究坑道での調査により地質環境にかかわる詳細なデータを取得すると共に，第２段階の予測結果の妥当性を確認する。また，深地層における工学技術の有効性を確認する。

2.1 全体目標

超深地層研究所計画の全体目標は以下に示す二つである[3]。

(1) 深部地質環境評価のための体系的な調査・解析・評価技術の基盤の開発

地表又は地下の研究坑道からの調査により深部地質環境にかかわる品質の保証された情報を取得し，様々な解析・評価手法を適用しつつ深部地質環境の評価に至る一連のプロセス（概念の提示→計画の立案／改訂→調査の実施→地質環境のモデル化／予測解析→評価）を繰り返し実施する。このプロセスの過程で着目すべき要素（評価項目）が抽出され，情報の過不足や不確実性などを順次明確化する。また，適用した手法の有効性を確認し,深部地質環境を評価するための体系的な調査・解析評価手法として段階的にとりまとめる。

(2) 深地層における工学的技術の基盤の開発

深地層にアクセスするための一般的な工学技術及び新たに開発される工学技術を適用することにより，地下深部に安全かつ合理的に研究坑道などを設計・施工・維持・管理できることを確認する。また，掘削する研究坑道が地質環境に与える長期的な影響を適切に解析・評価するための技術を整備する。

2.2 超深地層研究所の設置場所

超深地層研究所は，岐阜県瑞浪市明世町月吉の正馬様洞にあるサイクル機構用地（約140,000m^2，以下，研究領域）に建設を予定している。この周辺は，領家帯に属する深成岩類と美濃帯に属する中生層との境界部にあたる。超深地層研究所の研究坑道は，この地域の基盤をなす先新第三紀の花崗岩体（土岐花崗岩）を対象に建設される。

2.3 施設計画の概要

超深地層研究所は，研究坑道と地上施設で構成される。現状の施設計画における研究坑道は，図１に示すように,地下1,000m程度の深地層へアクセスするための主立坑，二つの水平坑道群（中間ステージ，最深ステージ），主立坑950m付近に分布することが予測される月吉断層を回避して，最深ステージを掘削するためのスパイラル坑道，換気立坑などからなる。

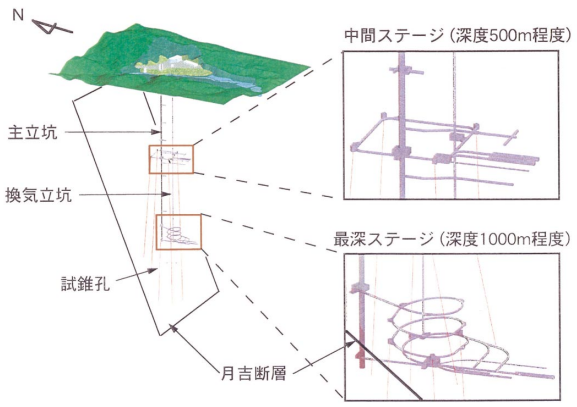


図１　超深地層研究所計画の施設概要

地上施設は，研究・管理，試料管理，機器の維持管理などの機能を持つ施設のほか，立坑坑口建屋，捨石の堆積場，排水処理施設などからなる。この施設計画については，今後も第１段階で取得される地質環境特性にかかわる情報を基に，順次見直し詳細化する予定である。

３．第１段階の概要

3.1　段階目標

第１段階の段階目標は全体目標を受けて以下の４項目を設定している[3]。

(1) 地表からの調査・研究による地質環境モデルの構築

地表からの調査・研究などにより地質環境にかかわる情報を取得し，研究坑道掘削前の未擾乱の地質環境特性を把握する。また，取得した情報の集約と解釈を通して研究領域とその周辺を対象とした地質環境モデル（地質構造モデル，水理地質構造モデル，地球化学モデル及び岩盤力学モデル）を構築する。さらに，新たに取得する情報を基に地質環境モデルを更新し，調査の種類･量，解析･評価の手法及び結果の精度との関係を把握する。これにより，一連の調査・解析・評価手法の有効性を評価する。

(2) 研究坑道の掘削に伴う深部地質環境の変化の予測

前述の地質環境モデルを用いて，研究坑道の掘削に伴う深部地質環境の変化を定量的に予測する。

(3) 研究坑道の詳細設計及び施工計画の策定

第１段階で取得する深部地質環境にかかわる情報と地質環境の変化にかかわる予測結果，及び本段階で別途策定される第２段階の調査・研究計画を考慮しつつ，研究坑道の詳細レイアウトを決定する。また，実際に適用する施工技術などを選定し，具体的な施工計画を決定する。

(4) 第２段階の調査・研究計画の策定

前述の深部地質環境にかかわる情報及び予測結果などを踏まえ，第２次取りまとめの評価報告書[4]などに示された今後の研究開発の課題を考慮しつつ，第２段階の詳細な調査・研究計画，及び第３段階の概略的な調査・研究計画を策定する。

3.2　研究の進め方

第１段階の調査・研究は地質・地質構造，地下水流動，地下水の地球化学及び岩盤力学の４分野で構成されている。調査・研究は，基本的に調査の種類と量，解析・予測手法とその結果（地質環境の理解度）との関係を繰り返し把握して評価するため，図２に示すアプローチを試みる[5]。

3.3　地質環境特性にかかわる既存情報

調査・研究を進めるに当たっては，研究領域周辺で取得されている地質環境特性に関する情報を十分に活用することが重要となる。広域地下水流動研究においては[6]，土岐花崗岩体を対象に研究領域を包含する約10km四方の領域を対象に涵養域から流出域までの地下水流動特性を把握するための調査手法の構築を目標に研究が進めらている。この研究の物理探査や試錐調査などで取得された地質環境特性に関する情報や地下水流動解析結果は，本調査・研究を進めるための最も重要な情報となる。また，研究領域周辺で実施された月吉ウラン鉱床を対象とした調査[7]，立坑掘削影響試験[8]などにおいても，土岐花崗岩を被覆する堆積岩類についての情報が蓄積されている。これらの研究

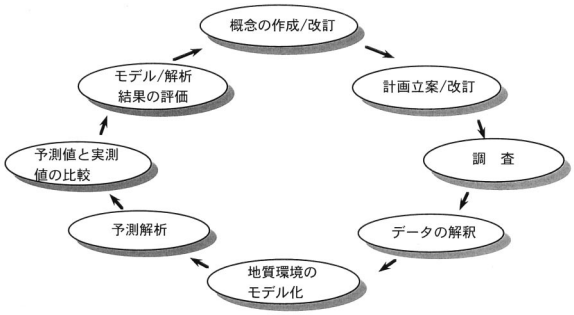


図２　調査・研究のアプローチの概念

成果などより明らかとなった地質の概要と，本調査・研究で特に重要となる地質環境特性にかかわる情報を以下に示す。

(1) 地質概要

研究領域を包含する領域の地質概要を図３に示す。この領域の地質は，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，更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。領域の中央部には花崗岩及び瑞浪層群を切る月吉断層が存在している。この断層は，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。

(2) 地質環境特性にかかわる既存情報[6)]

① 土岐花崗岩体の直径は約10kmであり，岩体内には水平・深度方向ともに粒度・組織の異なる黒雲母花崗岩が分布する。

② 電磁探査により堆積岩と土岐花崗岩との不整合深度の分布，及び屈折法及び反射法弾性波探査により，月吉断層の破砕帯の存在及び派生断層の存在が推定されている。

③ 土岐花崗岩健岩部の透水係数は，10^{-11}～10^{-10} m/secオーダー，開口割れ目と考えられる部分では10^{-6}～10^{-5}m/secオーダーの分布を示す。

④ 地下水流動解析により深度1,000m付近までの地下水は，おおむね北から南へ流れていると予測されている。

⑤ 花崗岩中の地下水の起源は，酸素・水素の同位体比から天水起源であることが確認された。また，深度1,000m付近の地下水の滞留時間は^{14}Cによる年代測定により１万数千年程度と推定されている。

⑥ 花崗岩浅部の地下水はNa-Ca-HCO_3型で中性かつ酸化性で，深部ではNa-HCO_3型で弱アルカリ性かつ還元性の地下水へと変化する。

3.4 これまでの調査・研究の概要

これまでの調査・試験の内容と目的を表１に，試錐調査の概要を表２に，研究領域内の調査位置を図４に示す。これらの調査結果を基に，研究領域の地質環境を理解し予測するための第１歩として，地質・地質構造，水理地質構造，岩盤力学それぞれについてモデルを構築し，段階的にモデルを更新した。また，地下水流動解析に関しては，研究領域を包含し，かつ一般に水理境界と考えられる尾根部と河川で囲まれた図３に示した約４

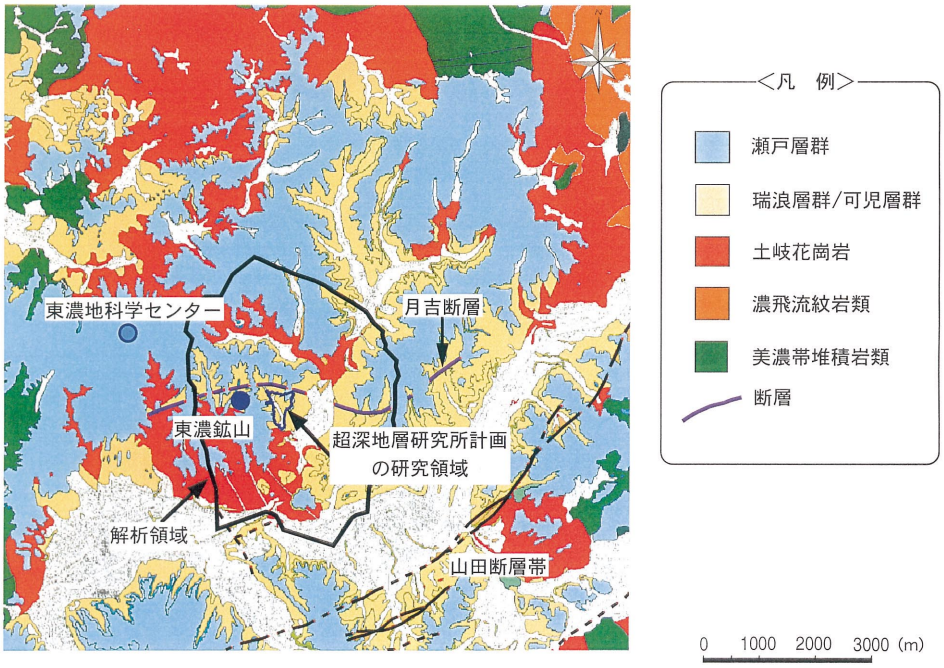


図３　研究領域周辺の地質概要

表１　調査・試験の概要

	平成1999年度までの調査数量	目　　的
表層水理調査	河川流量観測，気象観測，表層地下水位観測,土壌水分観測，など	表層の未固結砂礫層から岩盤への地下水の涵養量を推定する。
地下水位観測	自由地下水位面観測（AN-3，AI-4号孔）	領域の定常的な地下水位及び試錐孔掘削による地下水位の変化の実測値を取得する。
	MPによる観測（AN-1号孔）	水みちでの定常的な間隙水圧と試錐孔掘削による間隙水圧の変化の実測値を取得する。
物理深査	電気深査（１測線×約200m） 電磁深査（MT法） 反射法（１測線×約600m）	不整合，堆積構造，変質帯，破砕帯などの分布･連続性を推定する。
試錐調査 ○既在試錐孔 -AN-1号孔 約1,000m -AN-3号孔 約400m ○新規試錐孔 -MIU-1,2,3号孔各約1,000m	〔地質調査〕 ・岩芯記載，物理検層，BTV調査など	領域の地質とその分布を確認する。また，水みちとなりうる地質構造要素（割れ目，断層，岩脈）を抽出し，その特徴を把握する。
	〔水理試験〕 ・透水試験（３孔×約30区間） ・場水試験（３孔×約10区間）	領域での透水係数の深度変化，及び水みちの透水係数の実測値を取得する。
	〔分析〕 ・岩芯分析（３孔）	領域に分布する地質の地球化学的な特性とその深度方向の変化を把握する。
	〔力学試験など〕 ・物性試験（３孔×10深度） ・初期応力試験（３孔×10深度）	領域に分布する花崗岩の力学特性とその深度方向の変化を把握する。

表２　試錐調査の概要

	MIU-1号孔	MIU-2号孔	MIU-3号孔
掘削深度（m）	1011.8	1012.0	1014.0
孔径	HQ（約100mm）	HQ（約100mm）	HQ（約100mm）
掘削水	清水	清水	清水
物理検層*	○	○	○
BTV	○	○	○
場水試験（100m区間）（点数）	10	10	11
孔内水理試験（6.5m区間）（点数）	30	30	23
フローメーター検層	○	○	○
岩石鉱物試験**	○	○	○
年代測定（フィッショントラック法）	○（岩芯）	×	×
岩芯室内物性試験（数量）	見かけ比重(180) 有効間隙率(180) 含水比(180) 弾性波速度(180) 一軸圧縮試験（90） 圧裂試験(30) 三軸圧縮試験（90）	見かけ比重(20) 有効間隙率(20) 含水比(20) 弾性波速度(20) 一軸圧縮試験（20） 圧裂試験(40) 三軸圧縮試験（10）	見かけ比重(40) 有効間隙率(40) 含水比(40) 弾性波速度(40) 一軸圧縮試験（10） 圧裂試験(10) 三軸圧縮試験（10）
初期応力測定（点数）	AE/DRA試験（10）	水圧破砕試験（10） AE/DRA試験（20）	水圧破砕試験（10） AE/DRA試験（10）

＊　：電気検層，マイクロ比抵抗検層，密度検層，中性子・ガンマ検層，音波検層，温度検層，孔径検層，孔曲がり検層

＊＊：モード分析，全岩分析

km×６kmを解析領域として地下水流動解析が２回繰り返された。地下水の地球化学については，研究領域における地下水の採水・分析が2000年より着手されており，今後，それらの結果に基づき地球化学モデルを構築する計画である。

４．第１段階の研究成果

4.1　地質・地質構造に関する調査・研究

本調査・研究で得られた知見は，地下水流動，地下水の地球化学及び岩盤力学の各分野におけるモデル化の基礎となる。このことから，本研究では，研究領域の地質・地質構造を把握するとともに，地下水の流動や水質形成などを規制すると考えられる地質構造要素を同定し，地質構造モデル

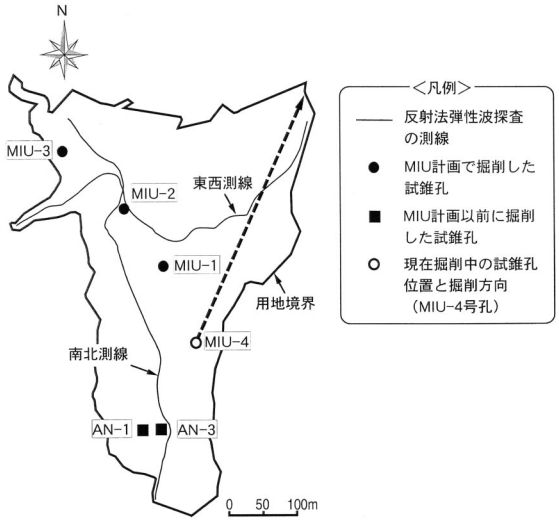


図４　研究領域内の調査位置

を構築することを目標としている[3]。

(1) 調査及びモデル化の考え方

後述する地下水流動にかかわる調査･研究では，現段階は連続体により場をモデル化することを基本としている。この場合，本調査・研究で重要となる点は以下のとおりである[5]。

① 堆積環境がほぼ等しい堆積岩の層序は，その物性値もほぼ等しく均質との仮説に基づき，領域全域にわたり連続する堆積構造，不整合などの地質構造要素を区分する。

② 断層などの不連続面の位置，連続性，幅などを確認する。

③ 花崗岩は，例えば割れ目の密度・方向・形態や充填物などの地質学的特徴を統計学的に解析し，有意な差が認められる岩盤を地質構造要素として区分する。

(2) 調査結果

研究領域内の主な調査として，反射法弾性波探査と３本の試錐調査（MIU-1，2，3号孔）を実施した[5]。

１） 反射法弾性波探査

研究領域内の堆積構造，不整合面の形状及び不連続面に関する情報を取得することを目的に，図４に示すように，南北と東西の２測線を配置して反射法弾性波探査を実施した。試錐調査結果を参考に南北測線における反射断面記録を解釈した例を図５に示す。この結果，堆積構造，不整合面にかかわる情報の他，花崗岩上部の水平割れ目が卓越していると考えられるゾーン，さらには断層などと考えられる不連続面を推定できた。このことから，反射法弾性波探査は本領域の調査において有効であったと評価できる。

２） 試錐調査

研究領域内に掘削された３本の深度約1,000mの試錐孔において，岩芯観察，物理検層，ボアホールテレビジョン（BTV）を実施した。また，採取した岩芯を用いて岩石鉱物試験を実施した。

岩芯観察の結果，各試錐孔とも地表からGL-90m付近まで堆積岩が分布し，その下に黒雲母花崗岩が分布すること，また，黒雲母花崗岩の最上部には厚さ10～15m程度の風化部が存在することが明らかとなった。また，MIU-2号孔及び３号孔においては，それぞれ深度約900mと700mで月吉断層を捕らえている。いずれも，約10～20m幅のカタクレーサイト帯からなり，その周囲には幅100m程度の割れ目帯が分布する。

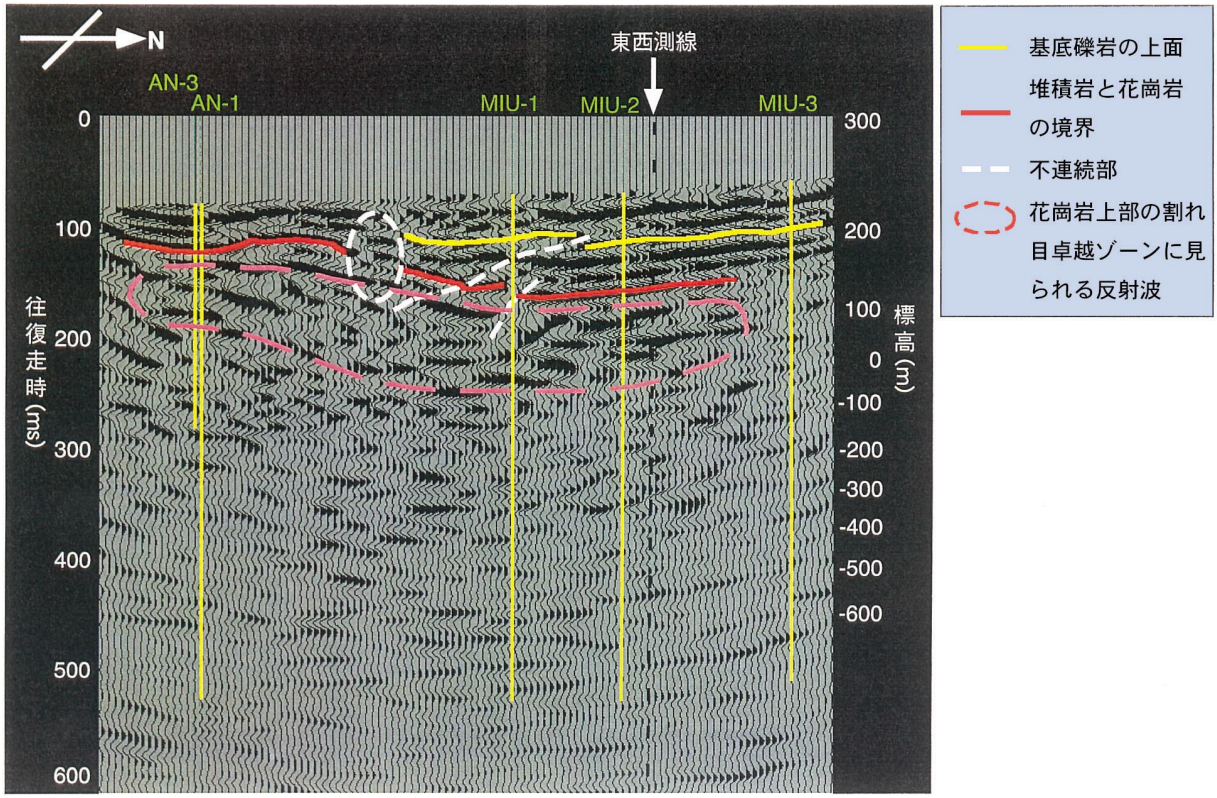


図５　反射法弾性波深査の調査結果と解釈（南北測線の反射断面記録）

BTVの調査結果を基にした割れ目累積本数の深度分布より，風化部より下位の黒雲母花崗岩を低角度の割れ目が発達した上部割れ目帯（3～5本／m），割れ目の少ない健岩部（1～3本／m），及び断層に伴う割れ目帯（3～6本／m）の大きく三つの地質構造要素に分類できた。この結果と分類した地質構造要素ごとの割れ目の方向と密度のヒストグラムの一例（MIU-2号孔）を図6に示す。また，物理検層の内，中性子検層，電気検層，音波検層の結果からも上部割れ目帯，健岩部，断層に伴う割れ目帯の各構造要素で明らかに物性が異なる結果が得られている。

(3) 地質・地質構造のモデル化

地質・地質構造のモデル化は，地質環境特性にかかわる情報の蓄積に伴って段階的に二つ地質構造モデルを構築した。一つは，既存情報のみで研究領域内での調査結果を用いないモデル，もう一つは前項で示した研究領域内での調査結果を加えたモデルである。

1） 既存情報を基に作成したモデル

地質・地質構造をモデル化する上で重要な地質構造要素として，初生的なものとして岩相，また二次的なものとして風化部，割れ目及び断層などが挙げられる。堆積岩については，既存情報の地質層序を基に，表土・瀬戸層群，生俵層群，明世累層，土岐夾炭累層（上部），土岐夾炭累層（下部）及び月吉断層を地質構造要素として抽出した。また，花崗岩については，風化部とそれ以外の岩盤及び月吉断層の三つの地質構造要素に区分した。作成した地質構造モデルを図7に示す。なお，地形面や各地質構造要素の境界面，断層面の形状は，ミニマム・テンション理論を用いて推定した。

この地質構造のモデル化における課題として，特に以下の3点が挙げられた。

① 花崗岩中の不均質性にかかわる情報が少なく，風化部以外に地質構造要素を区分できない。

② 花崗岩中の月吉断層にかかわる情報が皆無で，堆積岩中の特徴と同様と仮定している。

③ 既存情報から複数のリニアメントが判読され

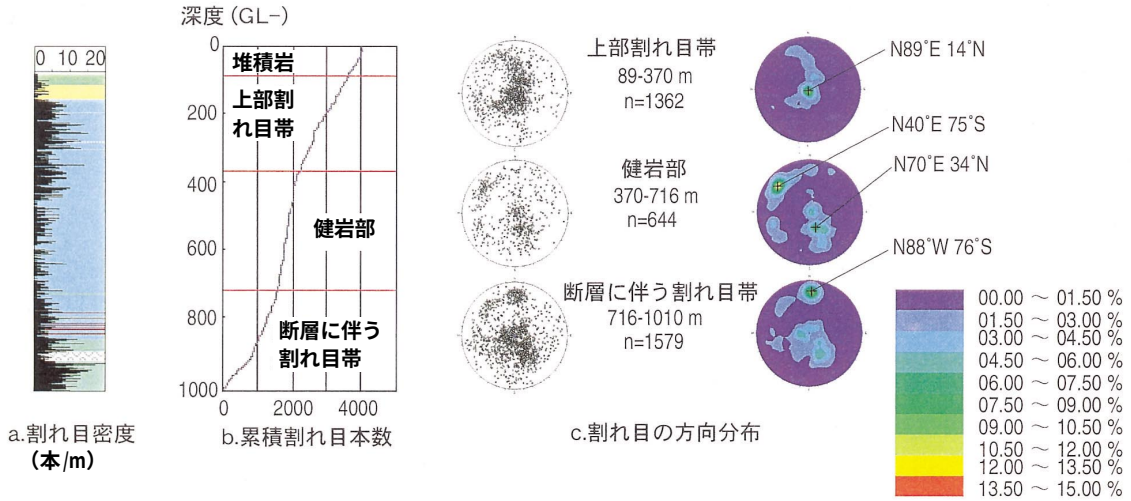


図6 割れ目の密度，累積本数及び方向分布

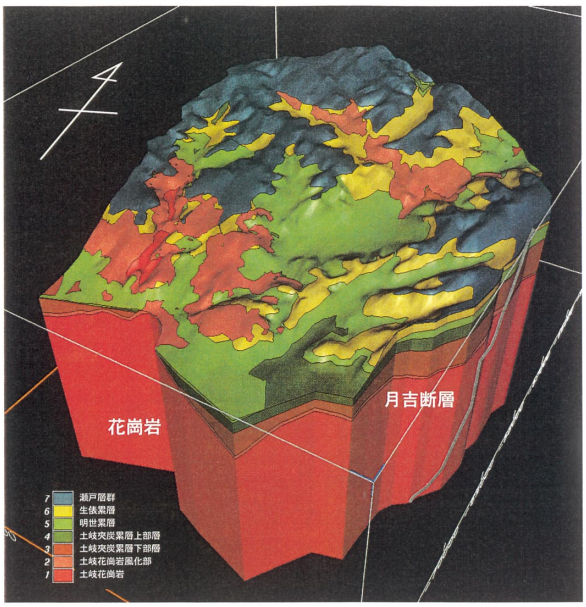


図7 既在情報を基に構築した地質構造モデル

（注）標高−1,000mまでをモデル化

ているものの，月吉断層以外の大規模な地質構造に関する情報がなくモデルに表現されていない。

２） 研究領域内の調査結果を加えたモデル

堆積岩中の地質構造要素については，前回のモデルと同様である。花崗岩については，調査結果で示したとおり割れ目密度分布などによる区分に基づき，上部割れ目帯，健岩部，断層に伴う割れ目帯を設定するとともに，後述する水理地質構造モデルにおいて割れ目の分布傾向をより詳細に表現するモデル化に備えて割れ目の方向，開口幅，長さ，密度など統計的なデータセットを作成した。なお，風化部については，情報が少ないこと，岩芯観察結果からマトリックスを含めて風化変質し，空隙が多いことが推定されるため，性状などを考慮して均質な物性として取り扱うこととした。月吉断層は２本の試錐孔で花崗岩中で存在が確認されたことから決定論的に表現した。

このモデルにおいては前回のモデル化において課題として挙げた①と②については改善がなされつつあるが，③については研究領域外の調査などを伴うため引き続き課題として残されている。この他，ここでの地質構造のモデル化における重要な課題として，以下の３点が挙げられる。

① ３本の試錐調査とも鉛直孔であるため，高角度傾斜の割れ目に関する情報が十分ではない。

② 割れ目分布に着目したより詳細なモデル化を進める上で，水みちの分布に関する情報が不足している。

③ 深度1,000m以深の情報が皆無であり，これ以深については深度1,000m付近の岩盤が下方へ連続していると仮定している。

4.2 地下水流動に関する調査・研究

地下水流動に関する調査・研究においては，研究領域における地表から地下深部までの地下水及び物質の移行経路と成りえる地質構造要素及び岩盤の水理学的な不均質性に関する情報を取得し，水理地質構造モデルを構築するとともに，研究坑道掘削前，掘削中及び掘削後の地下水流動場を推定することを目標としている[3]。

本調査・研究を進めるにあたっては，取得すべき情報の理解度，データやモデルの不確実性，その不確実性を低減するための取得情報の優先順位を研究の進捗に併せて明確にしていくことが重要となる。そのため，図２に示した研究のアプローチを新たな情報の取得とともに繰り返すことにより，個々の要素及び全体の不確実性を評価する方法で研究を進めている。

本調査・研究においては，まず既存情報のみを用いて水理地質構造モデルを構築し地下水流動解析を実施した。このモデル化・解析と並行して研究領域における調査が進められ，３本の試錐調査結果が得られた段階で第２回目の水理地質構造モデルの構築と地下水流動解析を実施した[5]。

(1) 水理地質構造のモデル化の考え方

岩盤を対象とした地下水流動解析手法は，岩盤を多孔質の連続的な媒体と考える連続体モデルと，割れ目などの不連続構造を取り出した不連続体モデルの二つに大きく分類される。本研究では，割れ目や透水係数の分布に関する情報が少ないこと，及び不連続体でモデル化するためには解析領域が広く計算量や時間に課題があることから連続体によるモデル化を採用した。連続体モデルを採用するにあたり，モデル化の概念として「解析領域が数km四方の平面的広がりをもつことから，地下水の流動経路となる割れ目などの不連続構造を巨視的にとらえ，割れ目密度分布やその傾向の把握に基づいたゾーン区分により，その物性を等価な連続体又は不均質性を考慮した等価な連続体に置き換えてモデル化する」との考え方の下，モデル化と地下水流動解析を実施した。

(2) １回目のモデル化と地下水流動解析

水理地質構造モデルは，4.1(3) １）で示した既存情報のみで構築した地質構造モデルに３次元メッシュを割り当て，既存情報から各地質構造要素ごとに表３に示す物性値を割り当てた。上部境界条件の涵養量には東濃鉱山周辺における観測地から算定された平均値0.28mm/日を用い[9]，下部境界

表３ 水理地質構造モデルで設定した物性値

層序・断層名	透水係数（m/sec）
表土、瀬戸層群	1.0×10^{-7}
生俵累層	1.0×10^{-9}
明世累層	1.0×10^{-9}
土岐夾炭累層（上部）	5.0×10^{-9}
土岐夾炭累層（下部）	1.0×10^{-8}
花崗岩（風化部）	1.0×10^{-7}
花崗岩（健岩部）	1.0×10^{-9}
月吉断層	1.0×10^{-10}

は不透水，側方境界は透水境界とし深度方向に一定の静水圧を与えた。研究坑道地下水流動解析には多孔質媒体を対象に開発された有限要素法による３次元飽和・不飽和浸透流解析コードTAGSAC[10]を用いた。地下水流動解析は，研究坑道掘削前に相当する定常解析と研究坑道掘削後の地下水流動を予測した非定常解析の二つを実施した。なお，非定常解析における研究坑道の壁面は自由浸出面に設定した。

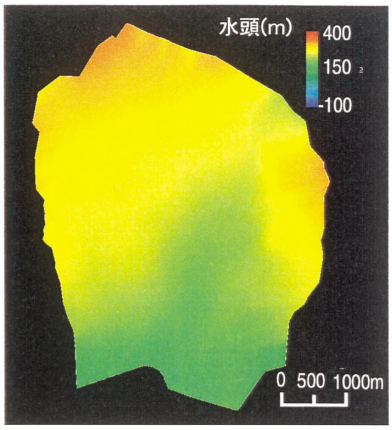
図８に地下水流動解析結果の一例を示す。同図の上段に示した定常解析の結果より，全水頭分布は北側が高く南側が低く地下水はおおむね北から南へ流れており，標高０m付近（深度240m付近）までの地下水流動は地表面の起伏の影響を受けていると推定された。また，同図の下段に非定常解析により得られた標高－758m（深度1,000m付近）の水平断面での水頭分布を示す。この結果では，全水頭低下量の分布は研究坑道掘削位置を中心にほぼ同心円状になっており，これまでの知見に基づく予想に反して月吉断層が地下水流動に与える影響（遮水壁的役割り）は小さいと考えられた。また，研究坑道の掘削に伴う全水頭の低下範囲は解析領域に設定した範囲内で収束しており，研究坑道の掘削に伴う影響範囲を捉える上では解析領域の大きさがおおむね妥当であることを示唆している。

(3) 調査結果

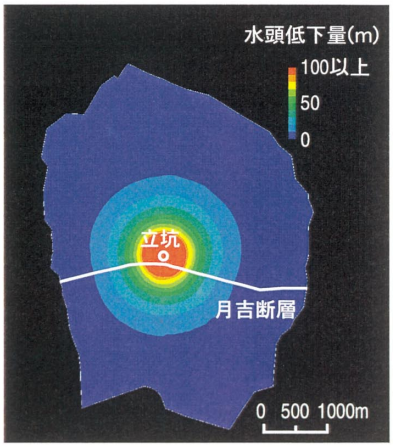
水理調査は大きく，地表から地下への水の浸透機構を明らかにするための表層水理調査と，地下深部岩盤の透水係数や間隙水圧分布及び水みちやその連続性を把握するための深層水理調査に分けられる。

表層水理調査に関しては，特に地下水流動解析に必要な上部境界条件を設定するために研究領域内で数年間にわたり連続観測を継続してきている。この観測結果を基に算定した地表から地下への涵養量の値は時間的にもまた空間的にも変化に富むことが明らかとなている[11]。また，人為的な揚水が表層の水収支に大きく影響を与えている可能性も示唆されている。このような現状から，より確実な情報の取得と涵養量の算定のために現在新たな観測体制に関する取り組みが開始されている。

一方，深層水理調査に関しては，第１回目の地下水流動解析で明らかとなった課題を踏まえ，深度約1,000mの３本の試錐孔で水理試験や流体検層を実施した。この試験により得られた透水係数の深度分布と水圧分布の一例（MIU-2号孔）を図９に示す。これらの調査結果を基に検討した結果，

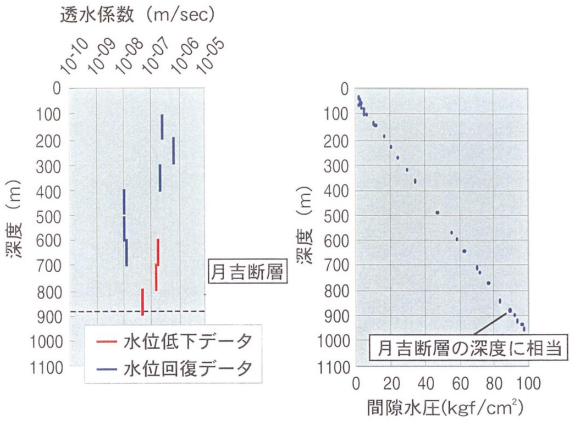


a. 定常解析結果の一例：標高0m水平断面での水頭分布



b. 非定常解析結果の一例：研究坑道掘削後の水頭低下量（標高−758mの水平断面）

図８　第１回目の地下水流動解析で得られた結果の一例



a.透水係数の深度分布　　b.間隙水圧分布

図９　透水係数と水圧の深部分布（MIU-2号孔）

以下の点が明らかとなった。

① 上部割れ目帯と月吉断層に伴う割れ目帯で高い透水性を示し，健岩部で低い透水性をを示す。

② 月吉断層の下盤側は上盤側に比べ約30m水位が高いことから，同断層は遮水壁として機能している可能性が高い。

(4) ２回目のモデル化と地下水流動解析

第２回目のモデル化と地下水流動解析は，前回の課題を踏まえ，割れ目や割れ目帯を考慮したモデル化と地下水流動解析の進め方を確認するために実施した。水理地質構造のモデル化においては，解析領域の広さやデータの空間的密度を考えると花崗岩中の個々の割れ目をモデル化することは非現実的なことから，断層など不連続構造及び不均質な割れ目分布の透水性への寄与をこれと等価な連続体で表現したモデル（不均質性を考慮した等価連続体モデル）を用いた[12]。図10に構築した水理地質構造モデル（透水係数分布モデル）を示す。

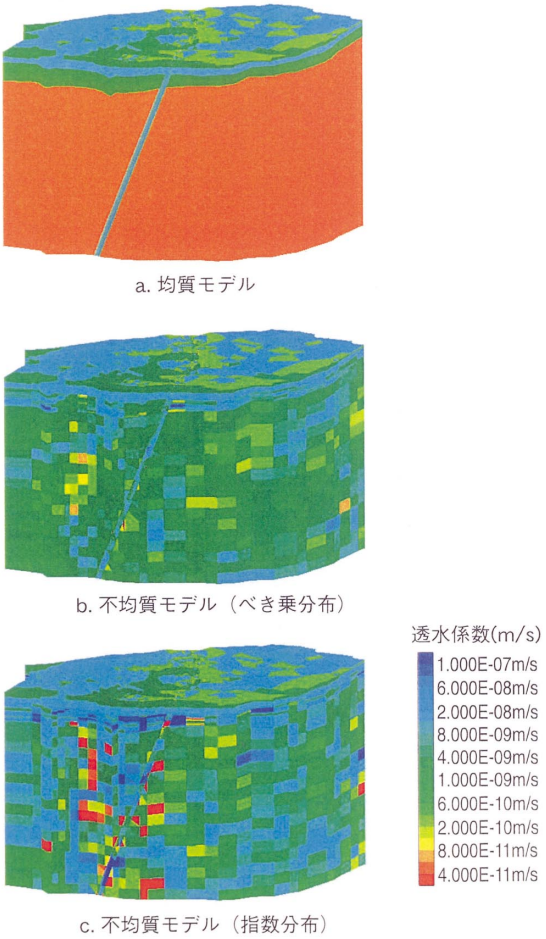


図10 第２回目の地下水流動解析で用いた水理地質構造モデル（透水係数分布モデル）

このモデルでは花崗岩中の割れ目の不均質性を，異なる２つの分布モデル（べき条分布モデルと指数分布モデル）を用いて割れ目を統計的に発生させ，透水係数の実測値との比較検討を通して花崗岩中の地質構造要素ごとに等価な連続体として表現した。また，比較のため，4.1.(3)２）で示した地質構造モデルで区分した地質構造要素ごとに均質な物性を与えた連続体モデル（均質モデル）も構築した。なお，解析領域やモデルの下部及び側方境界条件は前回と同様である。上部境界条件は，観測値と事前の解析結果の検討より，0.14mm/日を用いた[5]。

地下水流動解析は，不均質性を有する多孔質媒体を対象に開発された飽和不飽和浸透流解析コードEQUIV-FLOを用いた[12]。この解析では，第１回目の解析と同様に，研究坑道掘削前の状況に相当する定常解析と研究坑道掘削に伴う影響を考慮した非定常解析を実施し，水理地質構造モデルの違いが解析結果に与える影響を検討した。

図11に定常解析結果の一例として水平断面内の水頭分布を示す。全水頭分布から想定される地下水流動方向は，いずれのモデルにおいても北から南である。また，割れ目分布を考慮したべき条分布及び指数分布モデルでは月吉断層が南北方向の地下水の流れを遮断する傾向が顕著に認められた。

図12に非定常解析結果の一例として，研究坑道が月吉断層を貫通した後の南北断面の水圧及び流速ベクトルの分布を各モデルごとに示す。この結果を取りまとめて以下に示す。

① 得られた水頭分布の傾向より，均質モデルでは，あたかも断層が遮水機能を果たしていないような南北対称な水頭低下領域が形成されている。一方，割れ目の分布を考慮したべき条分布と指数分布モデルでは断層の遮水効果が表現されている。

② べき条分布及び指数分布モデルと，均質モデルを比較すると，水頭低下の程度及び研究坑道への湧水量に大きな差異が認められ，かつべき乗分布モデルでは特に割れ目分布の傾向に沿った不規則な水頭低下領域が形成された。これは，べき乗分布を用いたモデルでは割れ目の連続性が高く研究坑道を交差する割れ目分布に沿って岩盤内へ影響が及んでいることを示していると考えられる。

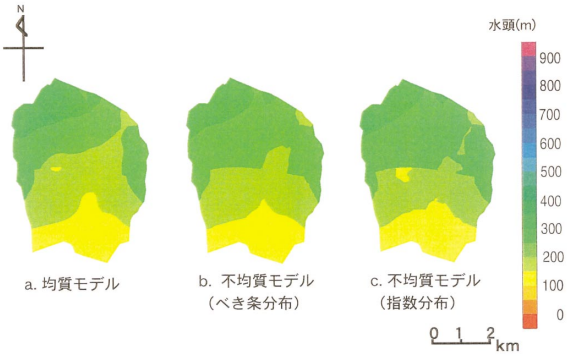


図11　第２回目の地下水流動解析で得られた水頭分布
－定常解析結果の一例：標高０mの水平断面－

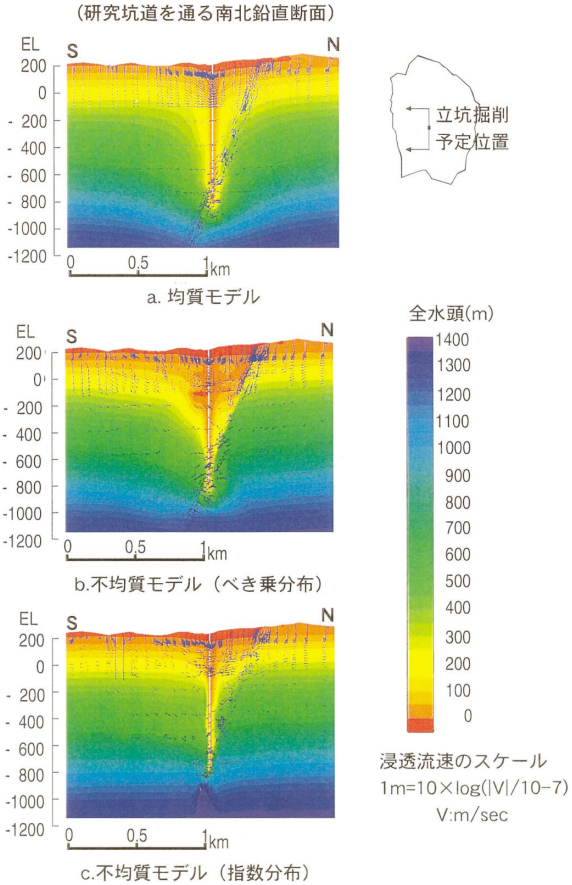


図12　第２回目の地下水流動解析で得られた水頭分布
－非定常解析結果の一例：研究坑道が断層貫通後の水頭分布－

③　研究坑道の掘削に伴う水頭低下は，坑道が月吉断層を通過するまでは断層の北側までほとんど及んでいない。断層を通過した後，断層下盤（北側）に水頭が低下する領域が形成されている。水頭低下の影響範囲は発生した割れ目の分布に依存するが，今回の解析結果ではべき条分布及び指数分布モデルが均質モデルに比べ小さかった。これは，割れ目の連続性に依存した不均質な物性分布の影響が現れた結果と考えられる。

以上の結果より，次の２点がこれまでの主な成果として挙げられる。

①　２回目の地下水流動解析ループにおける地下水流動解析により，数km×数kmの範囲であっても割れ目の分布を考慮することにより，より現実的な地下水流動を予測できることを示唆している。

②　本解析領域に介在する月吉断層は，これまでの調査結果から断層を直交する方向に遮水的機能を果たしていると推定されている。第２回目の解析で適用した不均質性を考慮した等価連続体モデルでは，この仮説を水頭変化等で適切に表現できており，この手法は割れ目や断層などを考慮した数km四方の領域を対象とした地下水流動解析への適用性が高い。

4.3　地下水の地球化学に関する調査・研究

地下水の地球化学に関する調査・研究においては，研究領域における深部地下水の地球化学特性の空間分布を把握し，水－岩石反応試験や理論解析などの結果と合わせて地球化学モデルを構築する。次に，研究坑道掘削に伴う地下水流動の変化に起因する深部地下水の地球化学特性の変化を予測することを目標とする[3)]。

地下水の地球化学特性を把握するためには，試錐孔において地下水を採取し分析する，及び物理化学パラメータなどに関しては試錐孔内で直接観測するなどの調査が唯一の手段となる。この場合，採水又は観測している地下水が本来岩盤中に存在していた地層水であることを確認することが重要となる。試錐調査では，１本の試錐孔において複数の分野で多くのデータを取得することが効率的であり，また複数の分野のデータを比較・検討できる長所がある。広域地下水流動研究の初期の試錐調査においては，諸外国の調査事例などを参考に，清水による試錐孔掘削後に物理検層，水理試験，採水試験の順序で調査を実施していた。しかし，大規模な破砕帯に遭遇し孔内崩壊により試錐孔を維持するのが困難な場合，また逸水により掘削水が大量に岩盤内に浸透し地層水を採取するのが極めて困難になるなど，当初考えた調査プログラム

では地下水の採水が現実的に不可能となるケースに遭遇した。

これらの知見を踏まえ，本計画の地下水の地球化学特性に関する調査では，試錐孔掘削後の各調査が完了した後，孔内にMPシステムを設置し，長時間の連続採水を通して，地下水（地層水）を採取する計画とした。そのため，深度約1,000mの３本の試錐孔にMP（Multiple Piezometer）システムを設置している[13]。しかしながら，これらの試錐孔で採水を実施した場合，並行して進んでいるほかの試錐調査への干渉の可能性があるため，現時点までに，本計画で採水は実施していない。今後，試錐調査の進捗状況を踏まえ採水の時期を決定する予定である。

一方，現在進められているMIU-4号孔の試錐調査においては，採水を効率的に進められなかった経験を基に，試錐孔掘削中に逸水などに遭遇した場合，直ちに試錐孔掘削を停止し，揚水試験と組み合わせて採水調査を実施する計画とした[14]。この試錐調査では，試錐孔掘削で用いた循環水（以下，掘削水）の残留の程度，ほかのゾーンからの地下水の回り込みなどを識別し，地下水の地球化学特性に関するデータの品質を保つため，掘削水に一定濃度の染料を混合している。また，これまでの知見を基に，堆積岩，月吉断層上盤側，月吉断層下盤側の三つのゾーンで地下水の地球化学特性が異なる可能性を想定し，三つのゾーンごとにそれぞれ異なる染料を用いている。この場合，水理試験の一環として実施する揚水試験を掘削水を排除するための予備的な採水として活用する。なお，掘削水の排除の判断は染料の濃度測定の結果と，連続観測している地下水の物理化学パラメータを指標に実施する。

この他，水質形成機構の検討の一環として，試錐孔掘削で得られた岩芯を用いて岩石の地球化学特性に関するデータを取得した。花崗岩中のFe^{3+}とFe^{2+}の量比を測定した結果，深度約300m以浅では相対的にFe^{3+}が多く，深度約300m以深ではFe^{2+}が多い傾向が認められた。このことは，花崗岩中における岩石の酸化還元環境が深度300m付近を境に変化していることを示していると考えられる。

4.4 岩盤力学に関する調査・研究

岩盤力学に関する調査・研究においては，研究領域における土岐花崗岩の岩盤物性（物理・力学特性）及び応力状態の空間分布を把握し，岩盤力学モデルを構築する。また，研究坑道の掘削に伴う坑道周辺岩盤の変形挙動及び応力変化，並びに応力集中に伴う岩盤の損傷範囲について予測することを目標としている[3]。

(1) 調査・研究の進め方

本研究で対象としている花崗岩などの結晶質岩においては，一般に不連続面の性状やその分布特性が原位置岩盤の力学的性質に大きな影響を及ぼすと考えられている。また，研究領域には，月吉断層のような大規模不連続面が存在し，調査領域内の岩体の応力状態に大きな影響を与えている可能性が想定される。これらの影響因子を考慮しつつ，限られた試錐孔の調査によって，岩盤のモデル化を進めるという観点から，本調査・研究においては，研究領域内の既存試錐孔のAN-1とMIU-1号孔，MIU-2号孔，MIU-3号孔と試錐孔ごとに調査結果を段階的に分析・整理し，岩盤の力学モデルを構築し更新するアプローチを採用している[5]。

(2) 調査結果

岩盤の力学特性を把握するための調査で取得しなければならない情報は，岩盤物性と応力状態の二つである。具体的には岩芯を用いた室内物性試験と初期応力測定である。室内物性試験の試験項目は，物理物性については，見かけ比重，有効空隙率，自然含水比，弾性波速度などである。力学物性に関しては，静弾性係数（E50），静ポアソン比，一軸圧縮強度，圧裂引張強度，粘着力，内部摩擦角である。初期応力は，水圧破砕法により水平面内の主応力値と方向を，岩石コアを用いてAE法により鉛直方向の応力成分を測定した。

室内物性試験の結果，AN-1，MIU-1，MIU-2及びMIU-3号孔とも岩石物性は深度方向に一様でない結果となった。試錐孔ごとの水圧破砕法による初期応力測定結果を図13に示す。以下に初期応力測定の主な結果について述べる。

① AN-1号孔における応力値の分布は，必ずしも深度ともに線形的に増加しておらず，深度300mと700m程度の地点で最小値をとり不連続な変化を示す。水平面内の最大主応力方向については，深度300m程度まではほぼNS方向であるが，それ以深ではNW-SE方向に変化している。

② MIU-2号孔における応力値の分布は，AN-1号

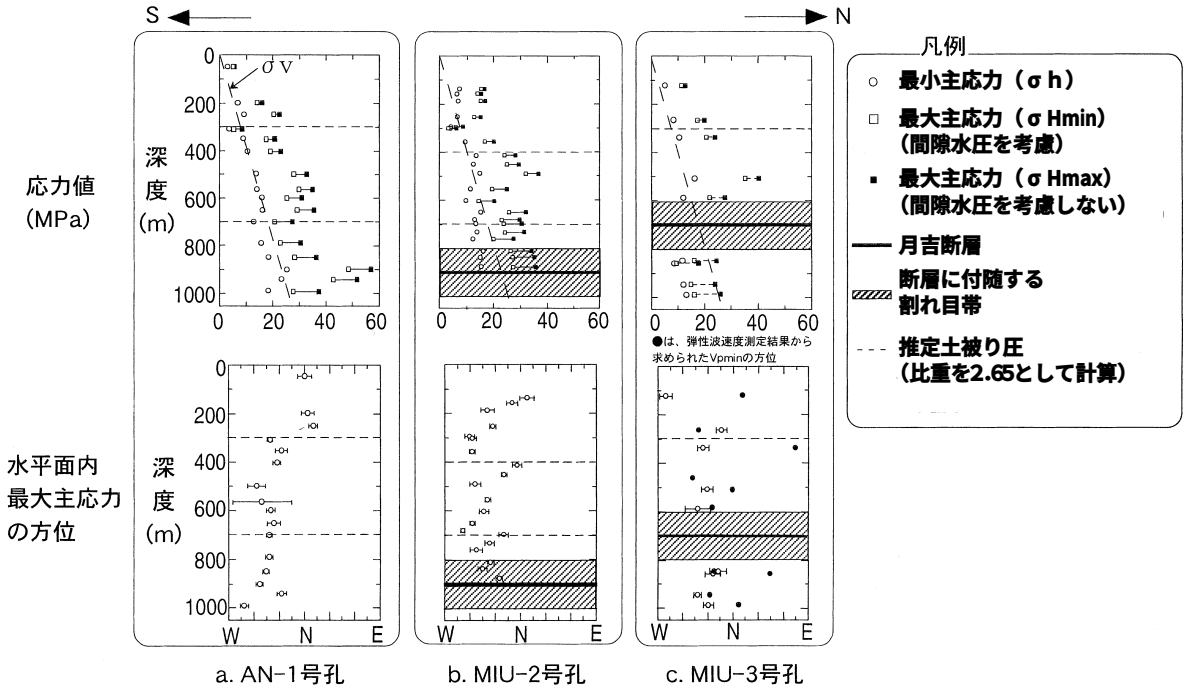


図13　水圧破砕法による初期応力測定結果

孔と同様，深度方向に不連続な変化を示している。主応力方向の深度方向の変化については，AN-1と異なり，地表～深度400m，深度400～700mの領域ではN-S→NW-SE方向に回転するような傾向を示す。AE法による応力測定結果では，断層上盤側では鉛直応力成分がほぼ推定土被り圧に等しいが，下盤側では低くなるような傾向を示す。

③　MIU-3号孔の応力値の分布は，深度500m程度まではほぼ線形的に増加し500m以深では応力値が小さくなる。特に，断層下盤側で測定された値は，上盤側のそれにくらべ著しく小さい。最大主応力方向については，深度136m地点はEW方向に最大主応力方向があるが，それ以深はほぼNNW-SSE方向を中心として主応力方向が分布している。AE法の測定結果では，断層近傍における鉛直応力の変化は複雑であるとともに，断層下盤側の深度900m以深では，推定土被り圧よりも鉛直応力が小さくなっている。

(3) モデル化

AN-1号孔とMIU-1号孔の調査結果では，深度方向の割れ目密度分布と最大主応力方向の応力値に不連続な変化が認められることから，研究領域の地表から地下1,000mの岩盤は三つの異なる力学物性や応力状態を有するゾーンで構成されるモデルが想定された。続いて実施したMIU-2号孔の調査結果では，断層に近づいたことが原因と考えられる主応力方向の複雑な変化が認められたが，岩盤物性，応力状態，主応力方向の変化点は一致しており，割れ目密度分布とも良い相関が認められることから，先に述べたAN-1及びMIU-1号孔の調査結果より想定したモデルと定性的には矛盾しないと判断した。また，月吉断層が逆断層と考えられていることから，断層上盤側の岩体を構成する三つの力学物性の異なるゾーンが，広域的な応力場により月吉断層に押しつけられている変形モードを一つの概念として付加した。MIU-3号孔の調査結果も同様な解釈ができ，これまでのモデルの考え方を支持している。

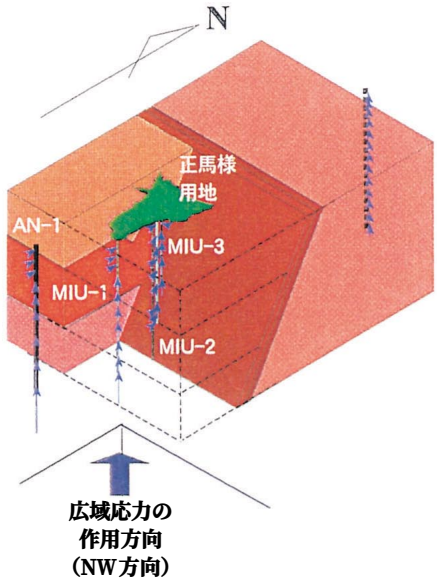
なお，現時点では断層下盤側の岩盤に関する情報が少なく十分な解釈はできないが，広域地下水流動や東濃鉱山における試験研究で取得された情報を加味して考えると，断層上盤側から下盤側に向かうにつれ明らかに応力値が減少する傾向が認められ，研究領域の北側付近の断層下盤側応力値は上盤側に比べかなり減少している可能性が高い。

以上の検討結果より構築した，現段階の土岐花崗岩を対象とした岩盤力学モデルを図14に示す。今後は，月吉断層及びそれに付随する割れ目帯の

応力状態

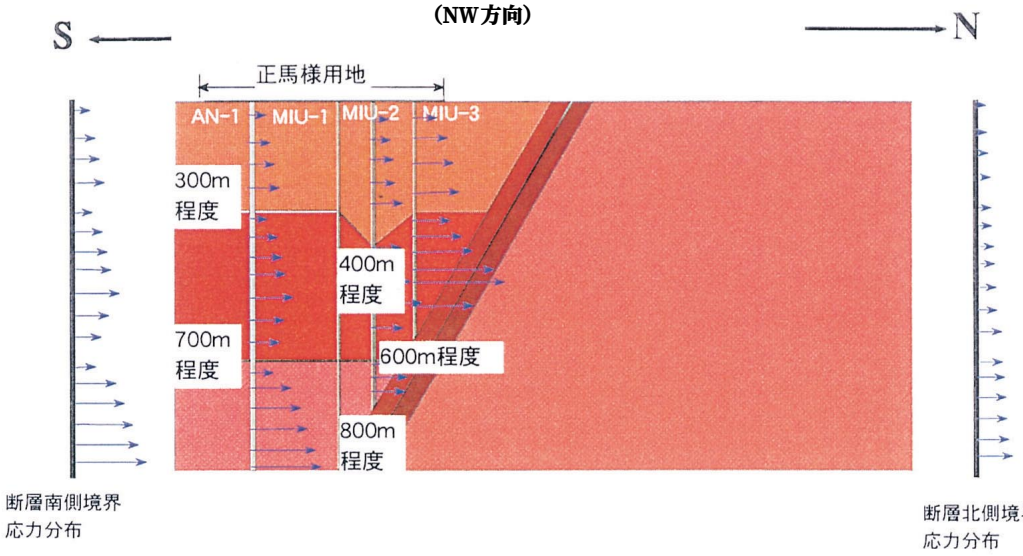
断層上盤側岩体

- 深度300m以深の水平面内の最大主応力方向は，NNW-SSE～NW-SE方向
- Stress decouplingを生じている。
- 地表から地下1000mの範囲で三つの異なる応力状態のゾーンが存在する。
- 断層近傍以外は，鉛直応力はほぼ土破り圧に等しい。



断層下盤側岩体

- 水平面内の最大主応力方向は，断層上盤側と同様,NNW-SSE～NW-SE方向
- 作用している応力が断層上盤側に比べかなり小さい。
- 断層近傍以外は，鉛直応力はほぼ土破り圧に等しい。



岩盤物性

	月吉断層上盤側岩体			月吉断層下盤側岩体	月吉断層周辺部
	ゾーン1	ゾーン2	ゾーン3	ゾーン4	断層上盤側割れ目帯 断層下盤側割れ目帯
岩石マトリックス部の力学特性	・剛性　小 ・力学的異方性不明	・剛性　大 ・力学的異方性大	・剛性　小 ・力学的異方性小	・剛性　小 ・力学的異方性最小	・剛性　最小 ・力学的異方性不明
割れ目の分布特性	・割れ目が多い ・低角～水平傾斜の割れ目が相対的に卓越	・割れ目が少ないゾーン	・割れ目が多いゾーン ・高傾斜の割れ目が卓越	・上盤側の岩体に比べ，極端に割れ目が少ない	・割れ目数は相対的に多い ・上盤側に比べ，断層下盤側の割れ目帯の方が相対的に割れ目が多い
原位置岩盤の力学特性	・剛性 ゾーン2に比べ小さい ・局所的な変化が大きい	・剛性 最も大きい ・局所的な変化は小さい	・剛性 ゾーン2に比べ小さい ・局所的な変化は大きい	・剛性 上盤側岩体とほぼ同等 ・割れ目密集部や断層破砕部以外の領域では，局所的変化は最小	・剛性 最小値で他の領域の60%程度

図14　研究領域の土岐花崗岩を対象とした岩盤力学モデル

力学特性を把握するとともに，上述したモデルをベースとした数値解析を実施し，同モデルの妥当性を検証する。また，不連続面の力学特性をジョイントせん断試験により評価し，割れ目の影響を考慮した原位置岩盤物性の評価を実施し，モデルの定量化を図る。

５．研究成果の統合化

本計画では深部地質環境の評価のための体系的な調査・解析評価技術の基盤の開発を全体目標の一つとしている。この全体目標を達成するためには，研究成果の反映先と具体的なアウトプットを明確にし，研究を進める過程で，何のデータをどのような手法で取得・解釈し，分野間の横断的な解釈やモデル化をどのような考え方で進めれば，地質環境をどこまで理解又は予測でき，最終的なアウトプットに到達できるのかを，事例的に示すこと，また研究全体の戦略や戦術を事前に提示しそれを段階的に確かめていくことが極めて重要である。このような事例の積み重ねが深部地質環境の評価のための体系的な調査・解析評価技術の信頼性，ひいては地層処分研究開発の基盤技術の信頼性を確かなものとしていく。

本計画では，上述した考え方を包含した研究の枠組みを研究成果の統合化と称して検討を進めている。図15に第１段階の地質・地質構造にかかわる研究の統合化データフローを例示する。この図は，(Nagra: Swiss National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste）での先行事例を参考に[15]，これまでの研究成果と経験を基に，現段階の調査・研究の考え方を例示したものであり，今後の研究の進捗により段階的に改善していく。また，第２・３段階においても同様に取り組み，これらの積み重ねを通して研究全体を統合する考えである。

６．おわりに

本稿では，2000年11月までに取りまとめられた超深地層研究所計画の第１段階の調査研究成果について報告した。現在，これまでに挙げられた様々な課題を解決するために，今までの知見を基に新たな考え方を取り入れたMIU-4号孔における試錐調査（傾斜試錐孔），モデルや解析結果の不確実性評価を目的とした複数チームによる地下水流動解析などを進めている。また，2001年後期には，

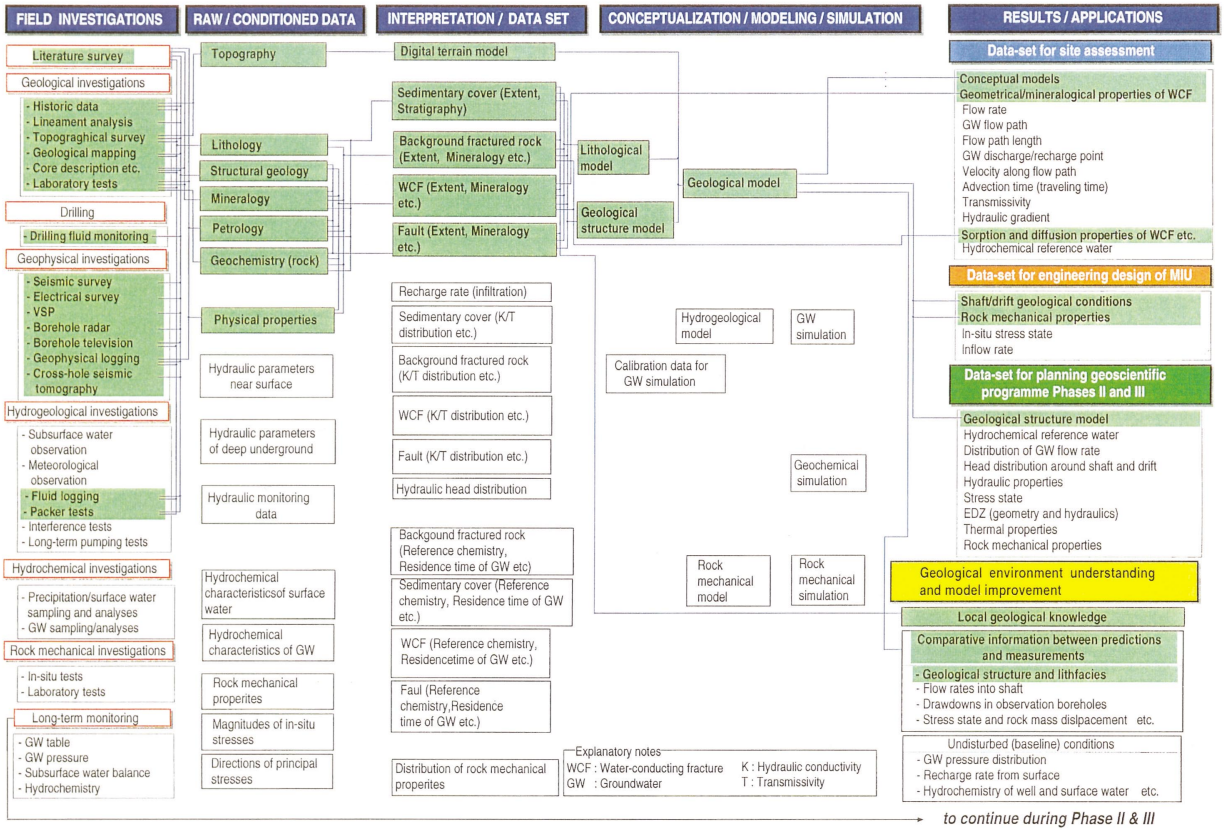


図15　第１段階の統合化データフロー（地質・地質構造）

研究坑道の掘削に伴う予測解析の事前検討の一環として長期揚水試験などを実施する計画である。今後は第１段階に残されている時間を考慮し，段階目標を達成すべく効率的に調査・研究を進めるとともに，第１段階の研究成果のとりまとめを実施する。また，第２段階以降の具体的な研究計画を策定する計画である。

謝辞

本研究における研究成果の統合化を進めるにあたり，NagraのMr.S.Vomvoris, Mr.B.Frieg, Mr.B. Lanyonの方々より貴重な御助言を賜りました。心より感謝申し上げます。

参考文献

１）原子力委員会:“原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画”(1994).
２）原子力委員会:“原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画”(2000).
３）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 2001-009（2001).
４）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の技術的信頼性　－地層処分研究開発第２次とりまとめ－”,サイクル機構技術資料，JNC TN7410 99-020～024(1999).
５）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).
６）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８年度～11年度－”，サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2000-014(2001).
７）動燃事業団（1995）:“東濃とその周辺地域のウラン資源”，動燃事業団技術報告書，PNC TN7420 95-005(1995).
８）杉原弘造，吉岡尚也，他:“新第三系堆積岩における立坑掘削影響試験の概要”,土木学会地下空間シンポジウム，p.185-194 (1992).
９）小田川信哉，三枝博光，他:“東濃鉱山周辺流域における水収支の算定と今後の展望”,岩盤地下水理に関するワークショップ論文集，㈳資源・素材学会地下計測部門委員会，p.13-18(1999).
10）今井　久，柳澤孝一，他:“３次元飽和不飽和浸透流解析プログラムTAGSACの概要”,動燃事業団技術報告書，PNC TN7410 90-026(1990).
11）山内大祐，宮原智哉，他:“超深地層研究所計画用地周辺の水収支観測結果”，サイクル機構技報　No.9，p.103-114(2000).
12）下茂道人，山本　肇:“等価不均質連続体モデルによる割れ目性岩盤の浸透流解析手法”,大成建設技術研究所報　vol.29(1996).
13）Black, W. H., H. R. Smith, et al. :“Multiple level ground water monitoring with the MP System”, Proc. NWWA-AGU Conf. on Surface and Borehole Geophysical Methods and Ground water Instrumentation，p.51～62(1986).
14）Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) :“Working Programme for MIU-4 Borehole Investigations”, JNC Technical Report,JNC TN7410 99-007 (1999).
15）Swiss National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste: “Synthesis of the geological investigations at Wellenberg”, nagra bulletin No.32(1999).