

超 深 地 層 研 究 所 計 画
年度報告書（平成11年度）

（技術報告）

2000年4月

核燃料サイクル開発機構

東濃地科学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2001

[目 次]

1. はじめに	1
1.1 概要	1
1.2 目標	2
1.2.1 全体目標	2
1.2.2 「地表からの調査予測研究段階」の段階目標	2
2. 平成11年度の調査・研究の概要	3
3. 地質・地質構造に関する調査・研究	7
3.1 目標	7
3.2 実施内容	7
3.2.1 試錐孔における地質・地質構造調査	7
3.2.2 モデルの構築	8
4. 地下水の水理に関する調査・研究	22
4.1 目標	22
4.2 実施内容	22
4.2.1 表層水理調査	22
4.2.2 深層水理調査	23
4.2.3 地下水の長期観測	25
4.2.4 モデルの構築および地下水流動解析	25
5. 地下水の地球化学に関する調査・研究	43
5.1 目標	43
5.2 実施内容	43
5.2.1 地下水の採水・分析	43
5.2.2 固相を対象とした地球化学調査	43
5.2.3 研究実施領域周辺の地下水の地球化学特性の整理	43

6. 岩盤の力学特性に関する調査・研究	4 6
6. 1 目標	4 6
6. 2 実施内容	4 6
6. 2. 1 MIU-2 号孔における物性試験および初期応力測定	4 7
6. 2. 2 MIU-3 号孔における物性試験および初期応力測定	4 7
6. 2. 3 モデルの構築	4 8
7. 調査技術・調査機器の開発	5 1
7. 1 目標	5 1
7. 2 実施内容	5 1
7. 2. 1 試錐掘削技術開発	5 1
7. 2. 2 地質構造調査技術開発	5 2
7. 2. 3 地下水の水理特性調査技術開発	5 4
7. 2. 4 地下水の地球化学特性調査技術開発	5 4
7. 2. 5 岩盤の力学特性調査技術開発	5 4
7. 2. 6 坑道の掘削を伴う調査研究段階に必要となる 調査技術・調査機器の開発	5 6
7. 2. 7 地質環境データ解析・可視化システムの構築	5 7
7. 2. 8 情報公開技術の開発	5 7
8. まとめ	6 2
参考文献	6 5

1. はじめに

1. 1 概要

原子力委員会は、平成6年6月に策定した「原子力の研究、開発および利用に関する長期計画（以下、原子力長計）」（原子力委員会、1994）において、『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こと』との指針を示した。ここでいう深部地質環境の科学的研究を、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）は地層科学研究として進めている。この原子力長計では、深地層の研究施設を以下のように位置づけている。

- ・『深地層の環境条件として考慮されるべき特性などの正確な把握や地層処分を行うシステムの性能を評価するモデルの信頼性向上など地層処分研究に共通の研究基盤となる施設であり、我が国の深地層についての学術的研究にも寄与できる総合的な研究の場として整備していくことが重要』、
- ・『我が国の地質の特性などを考慮して複数の設置が望まれる』、
- ・『深地層の計画は、研究開発の成果、とくに深部地質環境の科学的研究の成果を基盤として進めることが重要であり、その計画は処分場の計画とは明確に区別して進める』。

これを受け、サイクル機構では、日本に広く分布する結晶質岩のひとつである花崗岩を主たる研究対象として、瑞浪市明世町のサイクル機構用地に超深地層研究所を建設することとし、平成8年度より調査・研究を開始した。

超深地層研究所での研究は、その内容が異なる以下の3段階に分け、地下施設の建設前から地下施設の完成後まで約20年をかけて実施する。

第1段階：地表からの調査予測研究段階

第2段階：坑道の掘削を伴う研究段階

第3段階：坑道を利用した研究段階

地表からの調査予測研究段階では、地質・地質構造、地下水の水理、地下水の地球化学、岩盤力学に関する研究が主体となる。この段階では地表からの物理探査や試錐調査によって、地質環境の概略を把握し、これに基づいて地質構造などを簡明に示す地質構造モデルのほか、水理地質構造モデル、地球化学モデル、岩盤力学モデルを構築する。これらのモデルは、地下水流動解析や地下の研究坑道の設計などの基礎となる。また、取得される膨大な情報を効率よく管理し活用するために不可欠なデータ管理システムなどの構築を行う。これらの研究の結果に基づき、深部地質環境の特徴、研究坑道の建設に伴う地下水の流動と水質の変化などを予測すると同時に、予測結果を評価する基準や方法を決定しておく。また、研究坑道の詳細設計を行うとともに、引き続き実施する「坑道の掘削を伴う研究段階」の詳細な研究計画を決定する。

本報告書は、「超深地層研究所計画 年度計画書（平成11年度）」（サイクル機構、2001）に基づいて行った平成11年度の調査・研究の成果を取りまとめたものである。

1. 2 目標

1. 2. 1 全体目標

超深地層研究所計画においては、全体目標として以下の三つが設定されている（動燃事業団，1996）。

- ①地質環境の総合的な調査技術を確立すること。
- ②深部の地質環境に関する情報を取得すること。
- ③深地層における工学的技術の基礎を開発すること。

1. 2. 2 「地表からの調査予測研究段階」の段階目標

段階目標として以下の三つが設定されている。

- ①地表からの調査により地質環境データを取得し、地下の地質環境および地下施設建設に伴う地質環境の変化を予測すること。

地表からの調査により、研究対象である地層の地質環境データを取得するとともに、地質環境を簡明に表現する地質構造モデル、水理地質構造モデルおよび地下水の地球化学モデルを構築し、後続の研究段階で対象となる地質環境と地下施設の建設による影響を予測する。

- ②予測結果の評価方法を決定すること。

上記で行う予測の結果を、坑道の掘削を伴う研究段階で取得される情報との比較により検証するため、評価基準を設定し具体的な評価方法を決定する。

- ③地下施設の詳細設計を行い、坑道の掘削を伴う研究段階の計画を決定すること。

本段階で取得される情報と予測結果に基づき、地下施設の詳細設計を行うとともに、坑道の掘削を伴う研究段階の研究計画を決定する。

2. 平成 11 年度の調査・研究の概要

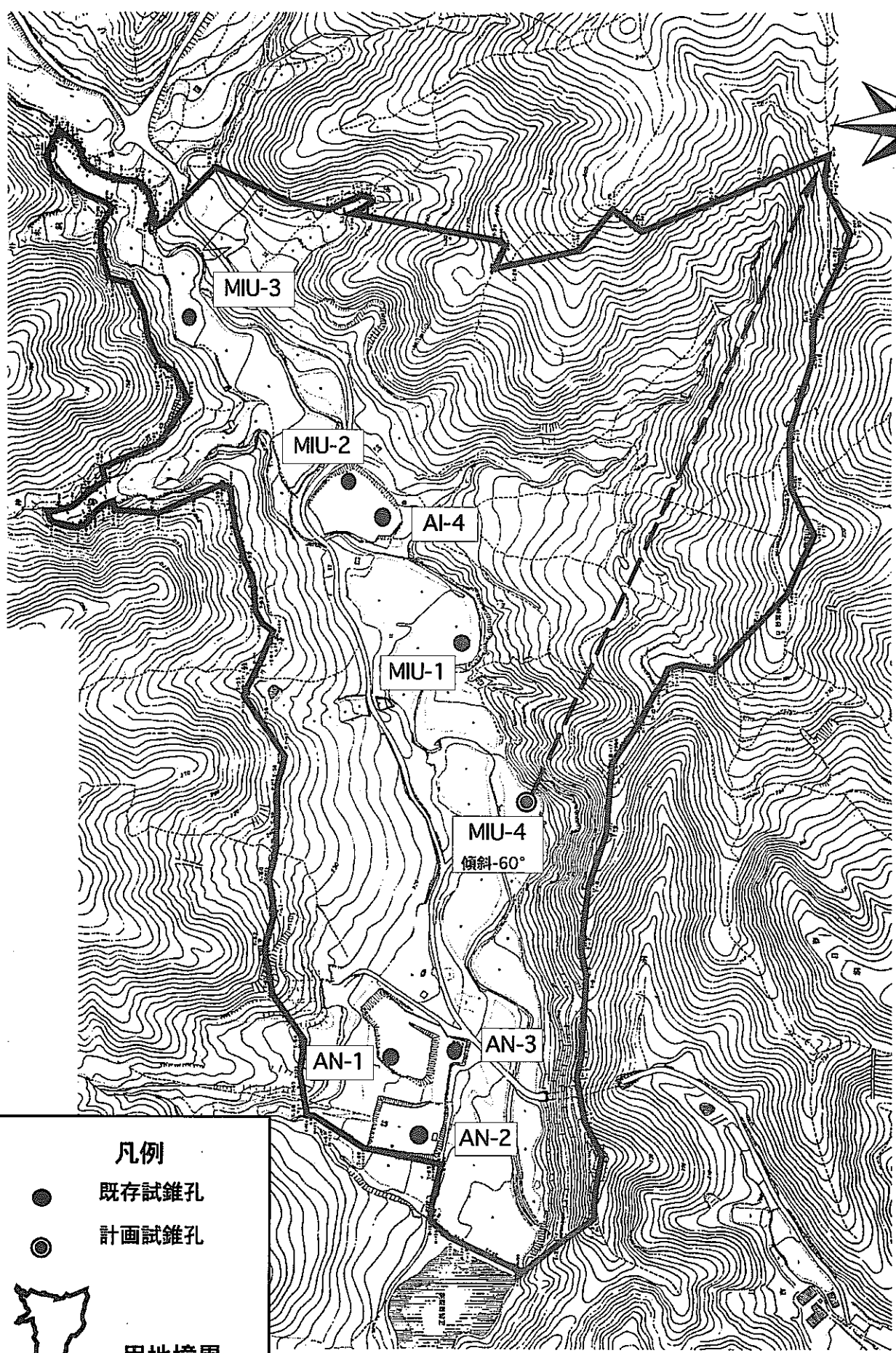
平成 11 年度は、研究坑道掘削前の地質環境を概括的に把握するため、平成 10 年度に着手した試錐調査 (MIU-2 号孔, MIU-3 号孔) を引き続き実施した。また、新たな試錐調査 (MIU-4 号孔) の計画を策定した (Ota, et.al.,1999)。図 1 に試錐位置図を示す。なお、「超深地層研究所計画 年度計画書 (平成 11 年度)」(サイクル機構, 2001) では、MIU-4 号孔の試錐調査を平成 11 年度から開始する計画としていたが、MIU-3 号孔の試錐調査の遅れのため、平成 12 年度に開始する計画とした。

また、これまでに取得されたデータを用いて、地質・地質構造、地下水の水理、岩盤力学のそれぞれについて、モデルの構築・更新を行うとともに、地下水流動解析を行った。

一方、調査技術・調査機器の開発として、これまでに東濃地科学センターが開発してきたものを含めた既存の調査技術・調査機器の改良・高度化、坑道の掘削を伴う調査研究段階 (第 2 段階) 以降に必要となる調査技術・調査機器の開発を行った。

本計画の平成 11 年度の調査・研究スケジュール (実績) を表 1 に示す。

なお、本報告書では、「超深地層研究所計画 年度計画書 (平成 11 年度)」(サイクル機構, 2001) の第 5 章で示した試錐調査の結果を、地質・地質構造、地下水の水理、地下水の地球化学、岩盤力学に関する調査・研究の各々の章に示した。



凡例

- 既存試錐孔
- ⊙ 計画試錐孔


 用地境界
(研究実施領域)



図1 試錐孔位置図

表1 平成11年度 調査・研究スケジュール (1/2)

	平成11年度											
	H11									H12		
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
(1) 試錐調査 ・ MIU-2号孔	解体									<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> 計画 実績 </div>		
	室内試験・分析											
	・ MIU-3号孔	掘削・検層			透水試験			解体 孔間透水試験				
		室内試験・分析									準備	掘削
・ MIU-4号孔											準備	
(2) 地質・地質構造 ・ 試錐孔における地質・地質構造調査 ・ モデルの構築	MIU-2,3,4号孔											
	MIU-2,3号孔											
	地質・地質構造の検討/地質構造モデルの構築											
(3) 地下水の水利 ・ 表層水利調査 ・ 深層水利調査	表層水利調査(観測)											
・ 地下水の長期観測	地下水の長期観測 深層水利調査(水利試験/水利データの整理)											
	AN-3号孔、AI-4号孔											
・ モデルの構築および地下水流動解析	AN-1号孔 MIU-1,2号孔(MP設置)									観測		
										MIU-2号孔(準備)		
	水利地質構造モデルの構築/地下水流動解析											
(4) 地下水の地球化学 ・ 地下水の採水・分析 ・ 固相を対象とした調査 ・ 地下水の地球化学特性の整理	AN-1号孔									MIU-1,2号孔		
	MIU-1,2,3号孔											
	地球化学特性分布の推定, 水質形成機構の推定 (MIU-1,2号孔, AN-1号孔での地下水の採水・分析ができなかったため、広域地下水流動研究で得られた成果を用い、研究実施領域周辺の地球化学特性の整理を実施)											

表1 平成11年度 調査・研究スケジュール (2/2)

	平成11年度												
	H11										H12		
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
(5)岩盤力学													<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> 計画 実績 </div>
・物性試験および初期応力測定													
・モデルの構築													
(6)調査技術・調査機器													
・試錐掘削技術開発													
・地質構造調査技術開発													
・地下水の水理特性 調査技術開発													
・地下水の地球化学特性 調査技術開発													
・岩盤の力学特性 調査技術開発													
・第2段階以降に必要となる 調査技術・調査機器の開発													
・地質環境データ解析・ 可視化システムの構築													
・情報公開技術の開発													

3. 地質・地質構造に関する調査・研究

3. 1 目標

地表からの調査予測研究段階における地質・地質構造の調査・研究の目標は、以下の3項目にまとめられる(サイクル機構, 1998)。

- ①研究実施領域の地表から地下深部(約 2,000m)までの地質・地質構造に関するデータの取得。
- ②データの検討結果に基づく地質構造モデルの構築と妥当性の検証。
- ③地質・地質構造を体系的に調査・解析する手法の開発。

3. 2 実施内容

MIU-3号孔における試錐調査において地質・地質構造のデータを取得するとともに、MIU-1~3号孔の試錐調査結果に基づき、地質構造モデルを構築した。以下に、その結果の概要を示す。

3. 2. 1 試錐孔における地質・地質構造調査

平成11年度には、MIU-3号孔における地質・地質構造調査として、岩芯記載および試錐孔を用いたボアホールテレビ調査(以下、BTV調査)、物理検層、岩石鉱物試験を実施した(サイクル機構, 2000a)。以下に、その結果の概要を示す。

(1) 岩芯記載

MIU-3号孔の岩芯記載は、掘削長、岩相、岩石組織、斑晶の種類・粒径・形状、有色鉱物の含有量、風化、変質、岩盤等級、RQD、割れ目形態、割れ目の密度・位置・傾斜角・形状・幅、割れ目面上の構造、割れ目沿いの変質、割れ目充填物の特徴を対象として行った。

肉眼観察では、土岐花崗岩の岩相は中粒花崗岩と粗粒花崗岩を主体とした黒雲母花崗岩で、細粒花崗岩やペグマタイトがわずかに分布する。概略的な柱状図を図2に示す。不整合(深度88.0m)~深度97.9mまでは風化花崗岩(厚さ9.9m、堆積岩と花崗岩の境界(不整合)の直下に分布し、褐鉄鉱が認められるか、またはマサ状になっている部分)が存在する。割れ目の分布に関しては、不整合~深度約317mまでは割れ目が発達し、それ以深は約600m付近まで割れ目がやや少なくなる。月吉断層は約719mの深度に存在し、断層部はカタクラサイトから構成される。月吉断層の近傍(深度約600m~831m)は割れ目が発達している。深度831m以深は、優白質花崗岩が分布する。

(2) 物理検層

MIU-3号孔では、電気検層、密度検層、中性子・ガンマ線検層、音波検層、温度検層、孔径検層、孔曲がり検層を実施した。検層は、試錐孔の掘削工程にあわせ、

基盤花崗岩の風化部までの掘削後（深度約 12～103m：第 1 次検層），風化部以深から月吉断層の上盤側の掘削後（深度約 103～580m：第 2 次検層），月吉断層上盤側から孔底までの掘削（深度約 580m～1,014m：第 3 次検層）の 3 回に分けて行った。図 2 に物理検層の結果を示す。掘削時に僅かではあるものの逸水が生じた区間（約 866m 以深）や，フローメーター検層（インペラー型フローメーター検層，ヒートパルス型フローメーター検層）で変化が検出された深度（795～935m 区間など）で，電気，密度，中性子・ガンマ線，音波，温度，孔径，孔曲がりの各検層による変化が検出された。

なお，物理検層結果と地質・地質構造との関係については，MIU-1 号孔および MIU-2 号孔の試錐調査結果とあわせて，「3.3 モデルの構築」に示す。

(3) BTV 調査

MIU-3 号孔の BTV 調査では，孔壁で観察される不連続面について，不連続面の位置，方向（走向・傾斜），幅，構造などを対象として記載を行った。BTV 調査で得られた割れ目の密度および深度方向の割れ目の累積本数により，MIU-3 号孔で観察された岩盤は，上部より，割れ目の多い岩盤（深度約 98m～317m），割れ目の少ない黒雲母花崗岩からなる岩盤（深度約 317m～600m），月吉断層周辺の割れ目の多い岩盤（深度約 600m～831m）に区分された（図 3）。優白質花崗岩が分布する MIU-3 号孔 831m 以深については，割れ目密度の高い部分が存在するものの，割れ目の分布特性については十分な情報がない。

割れ目の多い岩盤（深度約 98m～317m）では，低角度傾斜の割れ目が卓越している（図 3）。割れ目の少ない黒雲母花崗岩からなる岩盤（深度約 317m～600m）では，低角度傾斜，東西走向高角度南傾斜，東西走向中角度北傾斜の割れ目が卓越している。月吉断層周辺の割れ目の多い岩盤（深度約 600m～831m）では，低角度傾斜，北東走向高角度南東傾斜の割れ目が卓越している。

(4) 岩石鉱物試験

MIU-3 号孔で見られる花崗岩は，顕微鏡観察では有色鉱物として黒雲母が観察され，無色鉱物のモード分析では図 4 に示すように，石英，アルカリ長石，斜長石の量比で花崗岩質岩を分類した IUGS(1973)の花崗岩に相当する。全岩組成分析の結果，岩芯観察で分類した黒雲母花崗岩と優白質な花崗岩の化学組成は，図 5 に示す酸化物組成変化図において異なる直線上にプロットされており，異なった生成過程を持つことが推察される。

3. 2. 2 モデルの構築

(1)地質・地質構造の検討

1)MIU-1～3 号孔における割れ目分布特性

研究実施領域で掘削された MIU-1～3 号孔の岩芯観察結果は，各試錐孔とも地表から GL-88m～GL-89m 程度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を示している。黒雲母花崗岩の最上部には厚さ約 10～15m 程度の風化花崗岩が

分布する。なお、MIU-3号孔の深度831m以深には優白質花崗岩が存在するものの、MIU-1号孔、MIU-2号孔でも優白質花崗岩の部分は少なく、優白質花崗岩における割れ目の分布特性については十分な情報がない。そのため、割れ目分布特性の解析は行わなかった。

各試錐孔のBTV調査結果から得られた割れ目密度の分布、割れ目の累積本数の深度分布図、割れ目の方向を図3および図6に、各地質構造要素ごとの割れ目密度のヒストグラムを図7に示す。

風化花崗岩の下部の黒雲母花崗岩は割れ目密度によって、上部割れ目帯、健岩部、断層に伴う割れ目帯に区分される。各地質構造要素毎の割れ目密度とおもな卓越方向を表2に示す。

上部割れ目帯は風化花崗岩からGL-300~GL-370mまでの区間で、MIU-1~3号孔と交差する割れ目の密度は3~5本/mを示している(表2)。また、割れ目の方向については、低角度傾斜の割れ目が卓越している(図8、表2)。

断層に伴う割れ目帯は、月吉断層周辺に分布する割れ目集中部で、試錐孔と交差する割れ目の密度は3~6本/mを示している(表2)。また、割れ目の方向については、低角度傾斜、東西走向高角度南傾斜、北北東走向中角度西北西傾斜の割れ目が卓越している(図8、表2)。とくに、最も卓越する東西走向高角度南傾斜の割れ目は月吉断層の走向傾斜とほぼ一致する。

健岩部は、上部割れ目帯と断層に伴う割れ目帯に囲まれた岩盤で、試錐孔と交差する割れ目の密度は1~3本/mを示している(表2)。割れ目の方向については、断層に伴う割れ目帯における割れ目の卓越方向と類似し、低角度傾斜、東西走向高角度南傾斜、東西走向中角度北傾斜、北東走向高角度南東傾斜の割れ目が卓越している(図8、表2)。

割れ目密度および割れ目の方向の異なる三つの岩盤(上部割れ目帯、健岩部、断層に伴う割れ目帯)については、全体的な傾向として、上部割れ目帯および断層に伴う割れ目帯は高い透水性を示し、健岩部は低い透水性を示す(図9)。

表2 各地質構造要素ごとの割れ目密度とおもな卓越方向

	上部割れ目帯	健岩部	断層に伴う割れ目帯
割れ目密度*の平均値	3~5本/m	1~3本/m	3~6本/m
割れ目のおもな卓越方向	低角度傾斜	低角度傾斜 東西走向高角度南傾斜 東西走向中角度北傾斜 北東走向高角度南東傾斜	低角度傾斜 東西走向高角度南傾斜 北北東走向中角度西北西傾斜

*: BTV計測区間の1m毎の割れ目本数

2)物理検層による花崗岩中の物性値

MIU-1~3号孔においては、電気検層、密度検層、中性子・ガンマ線検層、音波検層、温度検層、孔径検層、孔曲がり検層が実施されている。これらのうち、一般的に岩盤の透水性と関係が深いと考えられている電気検層から得られた見かけ比抵抗値(ショートノルマル、ロングノルマル)、中性子検層から算出された孔隙率、

音波検層から得られたP波速度の結果を図10に示す。割れ目密度で区分した各地質構造要素（上部割れ目帯、健岩部、断層に伴う割れ目帯）ごとに、孔隙率（中性子検層結果から算出したものを孔隙率と呼ぶ）、見かけ比抵抗値、P波速度を比較した結果は、以下のとおりである。

- ①各地質構造要素ごとの孔隙率の平均値をみると、断層に伴う割れ目帯と上部割れ目帯で大きく、それぞれ、4~8%、4~7%である。健岩部は3~5%を示す。また、上部割れ目帯と健岩部を比較すると、上部割れ目帯の方が孔隙率が5%を超える局所的なゾーンが多く認められる。月吉断層と交差する深度の孔隙率の平均値はMIU-2号孔で約8%、MIU-3号孔で約14%を示している。
- ②各地質構造要素ごとの見かけ比抵抗値の平均値をみると、断層に伴う割れ目帯が最も低い値（SN:400~1,500Ωm、LN:700~1,600Ωm）を示し、上部割れ目帯（SN:800~2,000Ωm、LN:1,800~2,800Ωm）、健岩部（SN:1,500~2,500Ωm、LN:2,800~3,500Ωm）の順に大きな値を示す。また、上部割れ目帯と健岩部について、深度方向の見かけ比抵抗値の変化の周期で比較すると、上部割れ目帯の方が短い周期で見かけ比抵抗値の低い局所的なゾーンが認められる。月吉断層と交差する深度の見かけ比抵抗値の平均値は、MIU-2号孔でショートノルマルで約400Ωm、ロングノルマルで約300Ωmを、MIU-3号孔でショートノルマルで約100Ωm、ロングノルマルで約200Ωmを示している。
- ③各地質構造要素ごとのP波速度の平均値をみると、断層に伴う割れ目帯が4.6~4.8km/sと一番小さく、上部割れ目帯（4.8~5.1km/s）、健岩部（5.2~5.3km/s）の順で大きくなる。上部割れ目帯と健岩部を比較すると、上部割れ目帯の方がP波速度が5.0km/sを下回るゾーンが多く認められる。月吉断層と交差する深度の孔隙率の平均値はMIU-2号孔、MIU-3号孔ともに約4km/sを示している。

(2)モデルの構築

1)研究実施領域の地質構造要素の抽出

MIU-1~3号孔における試錐調査の結果に基づき、研究実施領域の堆積岩および花崗岩の地質構造要素を抽出した。

堆積岩については、岩石の生成に伴う初生的な地質構造要素として岩相、また、岩石の生成後に発生した二次的な地質構造要素として、割れ目、断層などがあげられる。堆積岩については、地質層序と透水性との相関関係などから、①表土・瀬戸層群、②生俵累層、③明世累層、④土岐夾炭累層、⑤月吉断層の地質構造要素を抽出した。

また、花崗岩については、岩石の生成に伴う初生的な地質構造要素として黒雲母花崗岩と優白質花崗岩を抽出した。さらに、岩石の生成後に発生した二次的な地質構造要素として、風化部、上部割れ目帯、断層（月吉断層）、断層（月吉断層）に伴う割れ目帯を抽出した。上部割れ目帯は、割れ目の密度が高く透水性が高いと推定されることから、黒雲母花崗岩（健岩部）および優白質花崗岩（健岩部）とは区別した。月吉断層については、その周辺に約100m程の割れ目帯が存在することから、月吉断層の両側に、断層に伴う割れ目帯を設定した。

結果として花崗岩の地質構造のモデル化に際し設定した地質構造要素は、風化部、

上部割れ目帯，月吉断層，断層（月吉断層）に伴う割れ目帯，黒雲母花崗岩（健岩部），優白質花崗岩（健岩部）である。なお，二次的な地質構造要素として岩脈もあげられるが，施設スケールを対象とした場合，その連続性を決定論的にモデル化できないため，モデルの構築のための地質構造要素からは除外した。以上に示した割れ目の特徴を踏まえて作成した割れ目の概念図を図 11 に示す。

2)地質構造モデルの構築

地質・地質構造の調査・研究の成果は，水理地質構造，地下水の地球化学，岩盤力学の各モデル化の基礎となる。平成 11 年度までは，研究の目標を達成するための第一歩として，研究実施領域の地質・地質構造を概括的に把握する必要がある。そのため，研究実施領域を包括する地下水流動を把握するために設定された解析領域（約 4km×6km，図 12）と，研究実施領域の二つのスケールを対象として地質・地質構造のモデル化を行った。

また，調査の種類・量，解析・評価の方法および結果の精度との関係を事例的に確認していくため，地下水流動解析の解析領域（約 4km×6km），研究実施領域とともに，既存情報を用いた地質構造モデルの構築，平成 11 年度までの調査結果に基づく地質構造モデルの更新の二つのステップでモデル化を行った。図 13 にその例として研究実施領域の地質構造モデルを示す。

既存情報を用いた地質構造モデルの構築では，とくに花崗岩については，モデル化するうえで必要となる割れ目帯の連続性についての十分な情報がなく，結果として花崗岩については風化部とそれ以外の岩盤にしか区分できていない。

平成 11 年度までの調査結果に基づく地質構造モデルの改良では，研究実施領域で実施した物理探査や試錐孔調査により抽出された，化学組成の異なる黒雲母花崗岩と優白質花崗岩，割れ目密度の異なる上部割れ目帯，健岩部，断層（月吉断層）に伴う割れ目帯を地質構造モデルに加えることができた。これらの地質構造モデルの一部は，水理地質構造モデルの構築およびそれを用いた地下水流動解析に用いられた。

しかしながら，平成 11 年度までの調査結果に基づいて更新した地質構造モデルは，研究実施領域北東部の地質構造，高角度の地質構造，1,000m 以深の地質構造に関する情報が不足していることによる不確実性を有する。

Overview of the MIU-3 Borehole Investigations

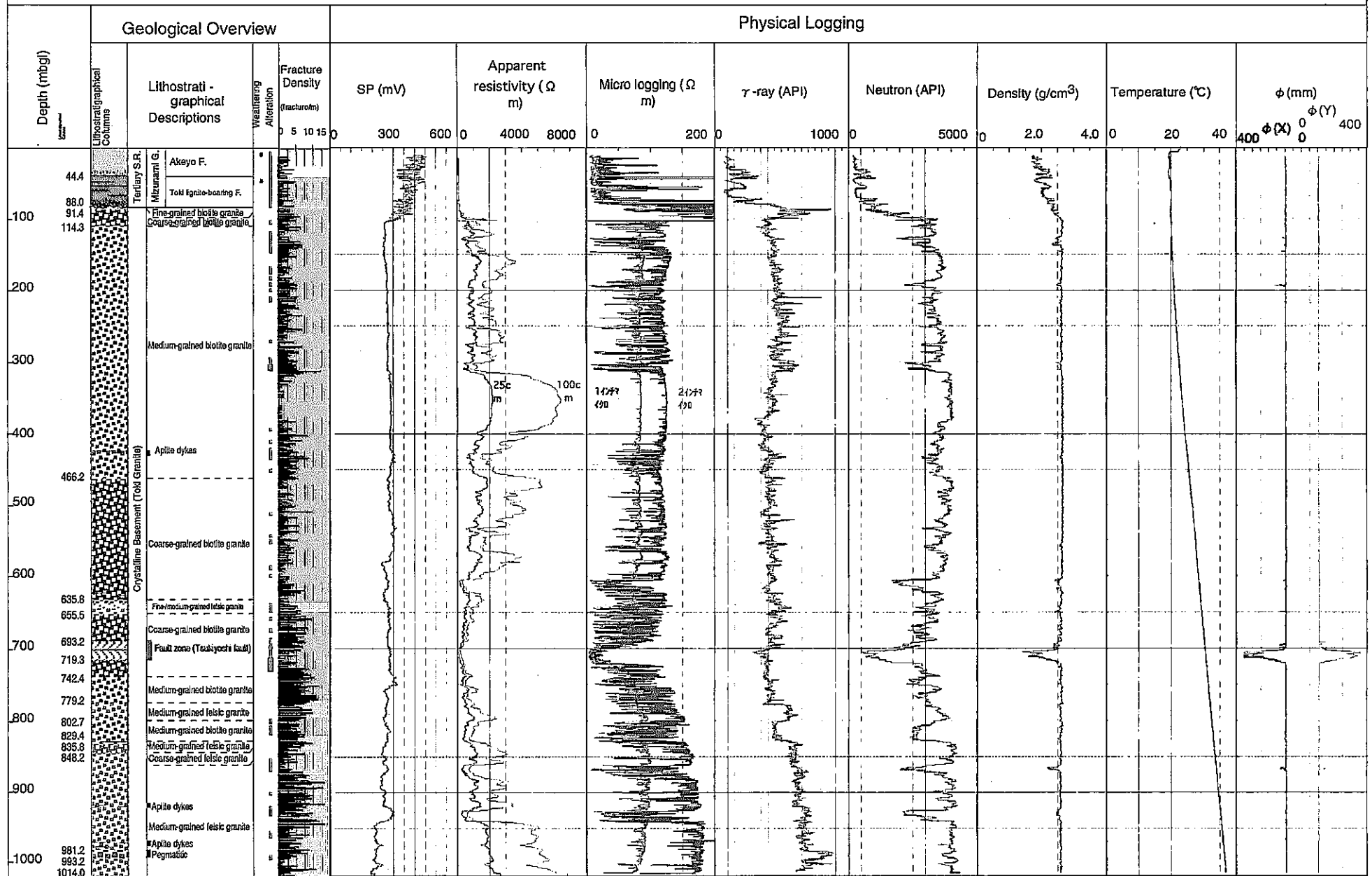


図2 MIU-3号孔の柱状図および物理検層の結果

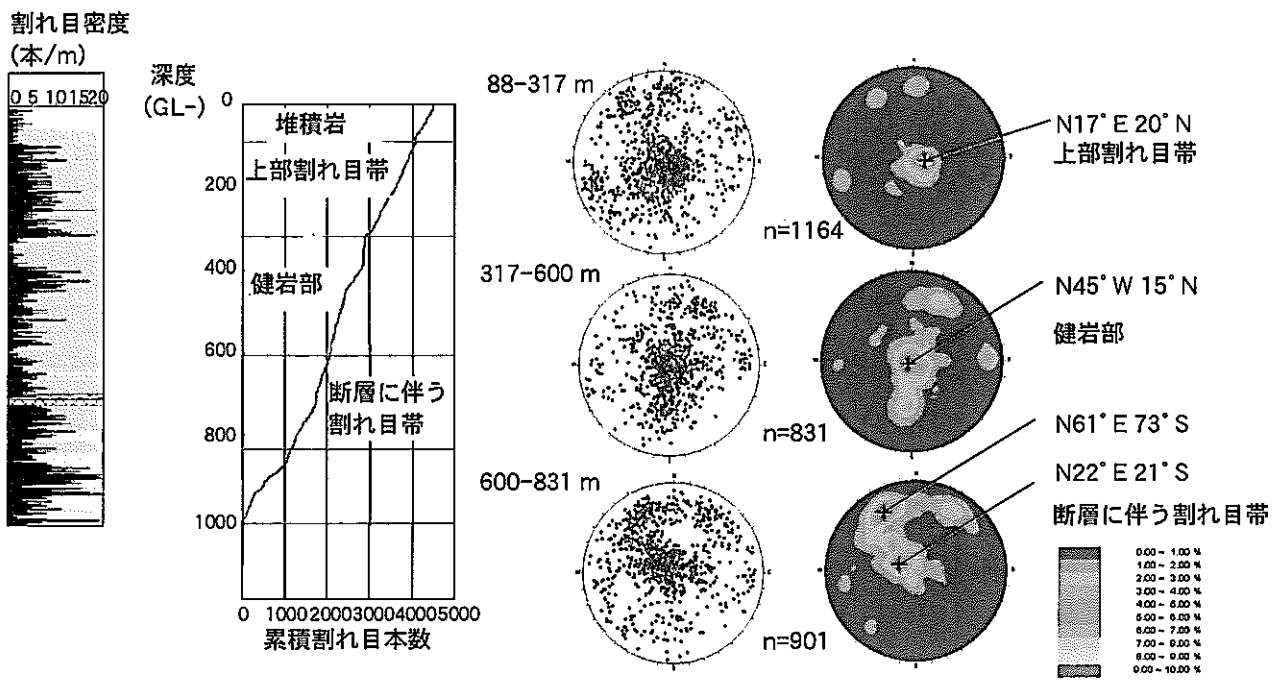


図3 MIU-3号孔割れ目密度，累積割れ目本数と上部割れ目帯，健岩部，断層に伴う割れ目帯ごとの割れ目の方向

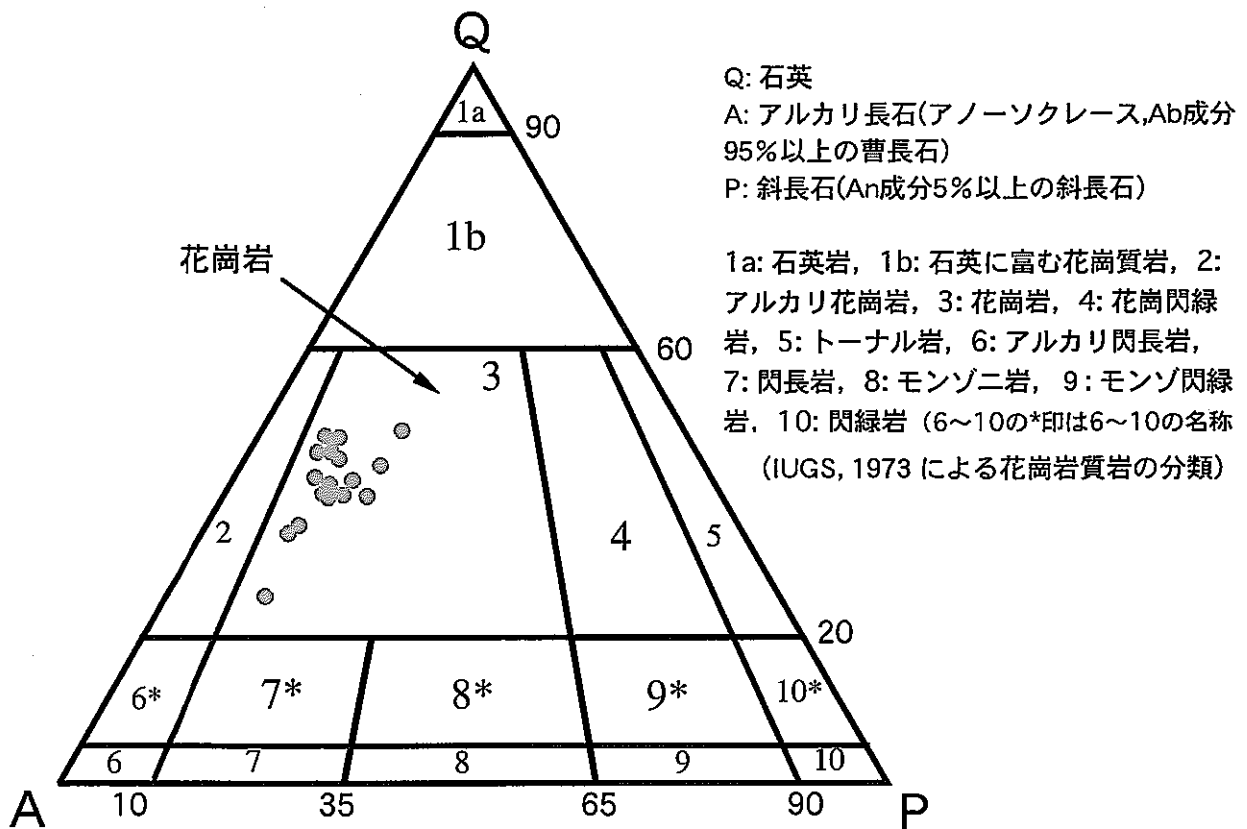


図4 土岐花崗岩のモード分析 (MIU-3号孔)

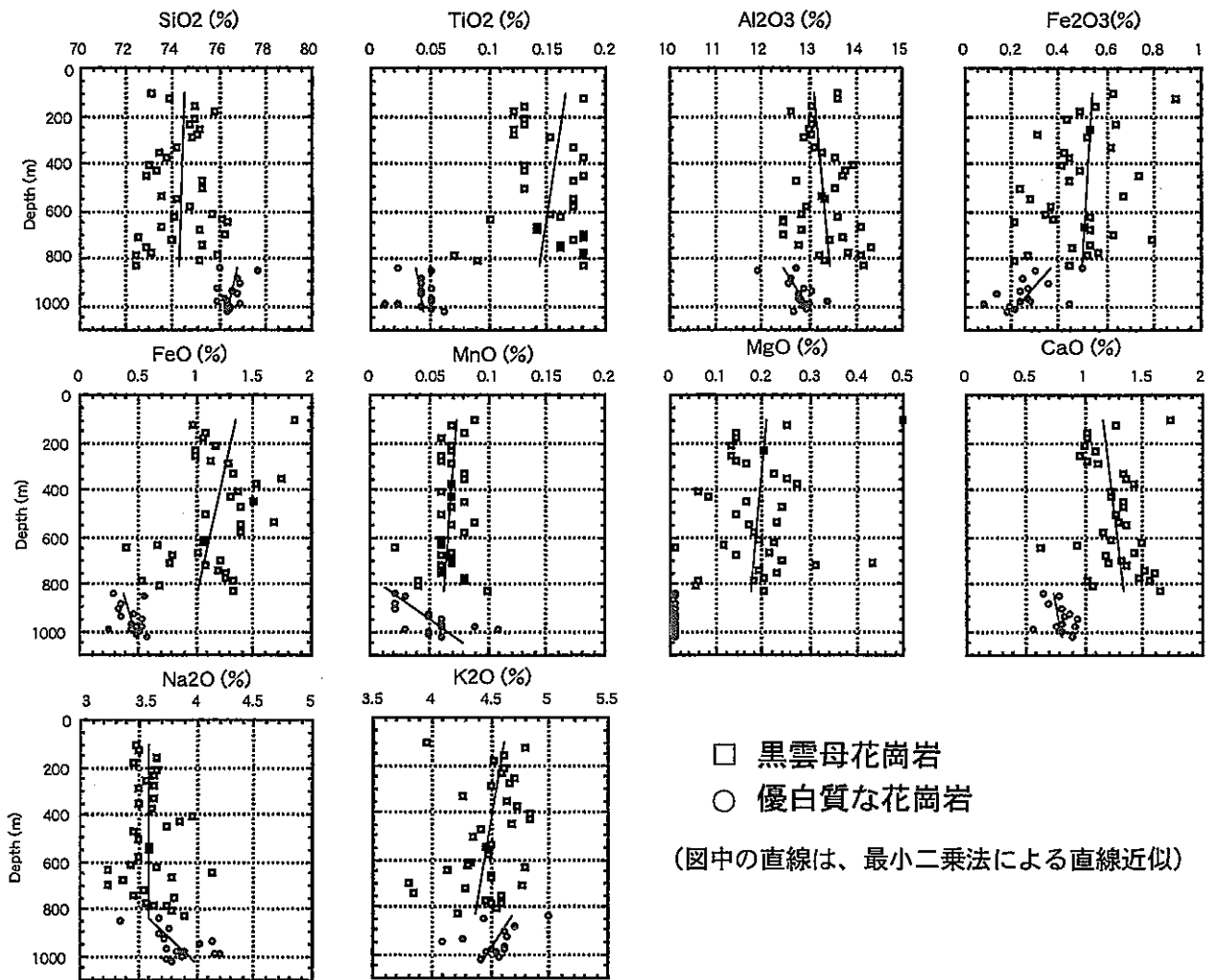


図5 全岩組成分析結果 (MIU-3号孔)

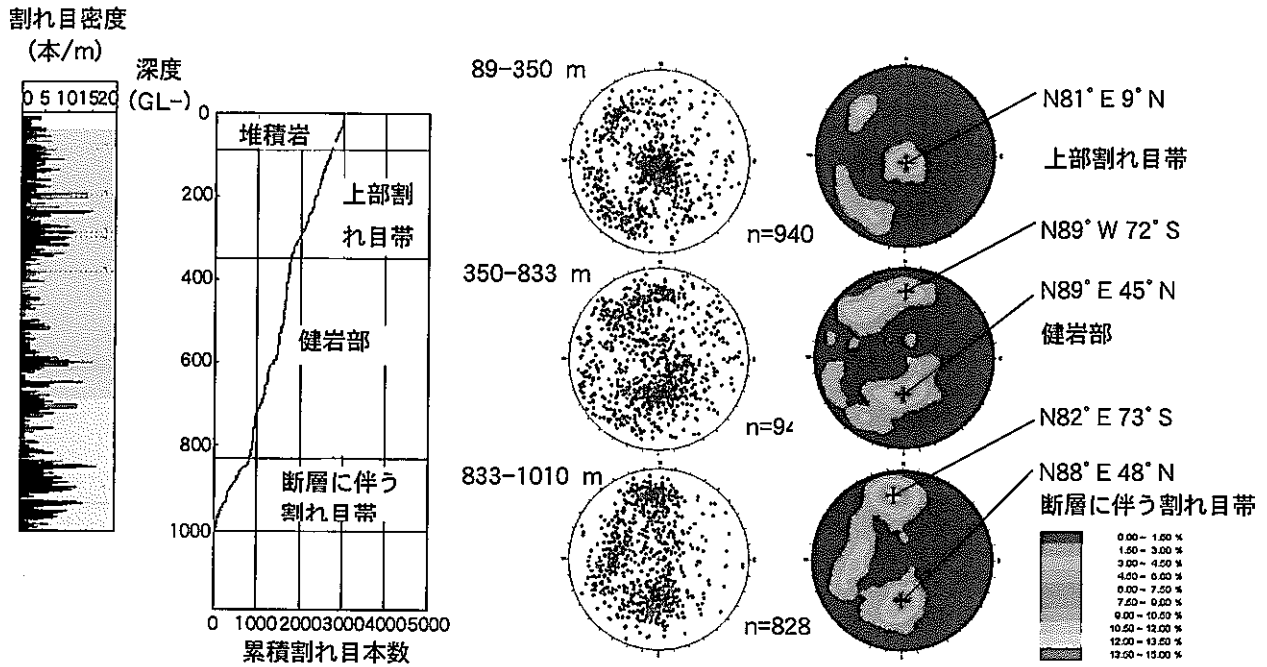


図6(1) MIU-1号孔割れ目密度，累積割れ目本数と上部割れ目帯，健岩部，断層に伴う割れ目帯ごとの割れ目の方向

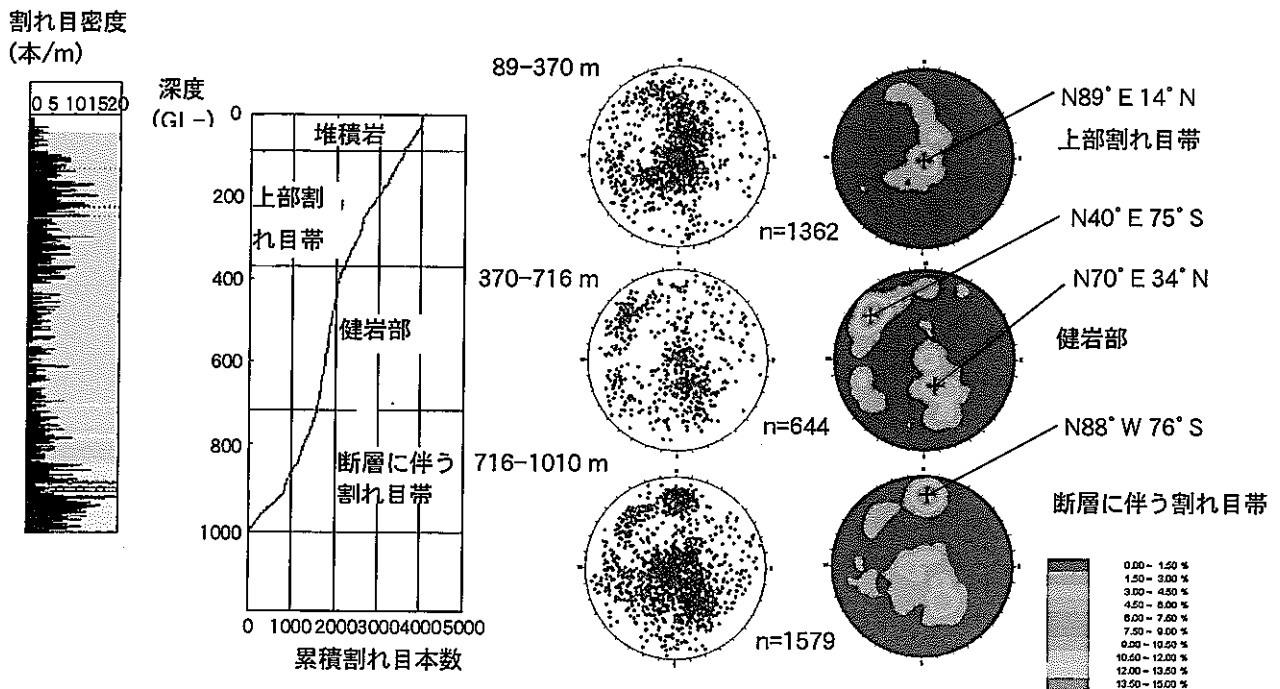


図6(2) MIU-2号孔割れ目密度，累積割れ目本数と上部割れ目帯，健岩部，断層に伴う割れ目帯ごとの割れ目の方向

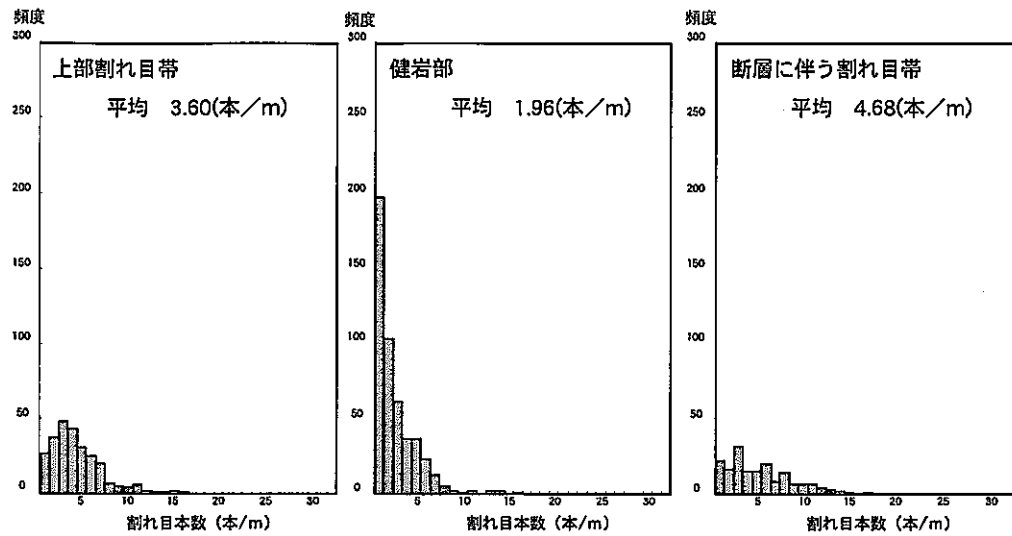


図7(1) 地質構造要素ごとの割れ目頻度 (MIU-1号孔)

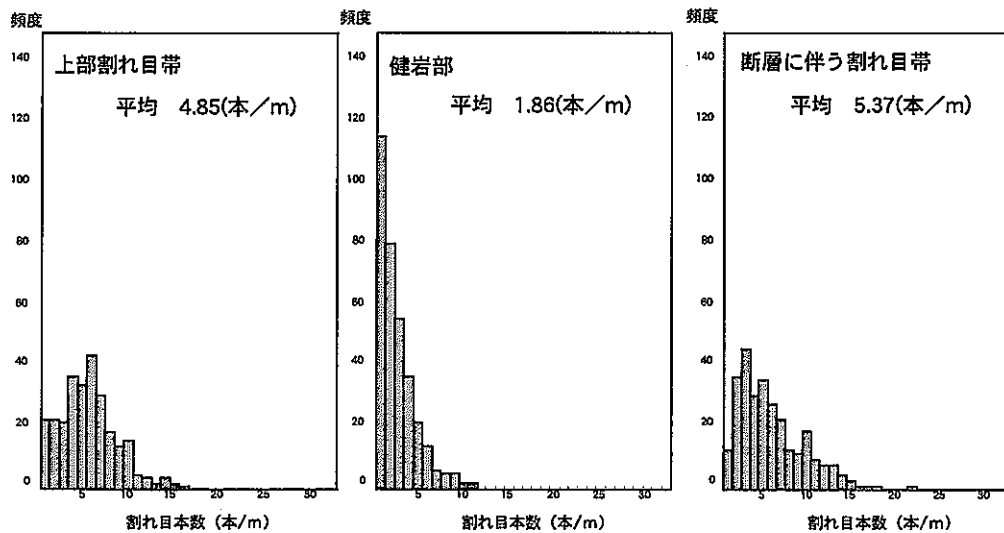


図7(2) 地質構造要素ごと割れ目頻度 (MIU-2号孔)

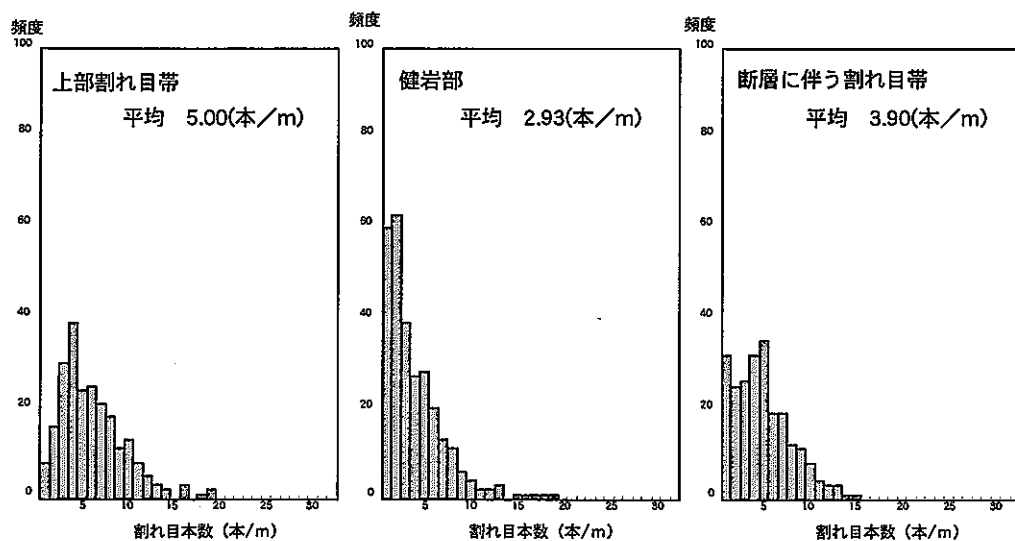
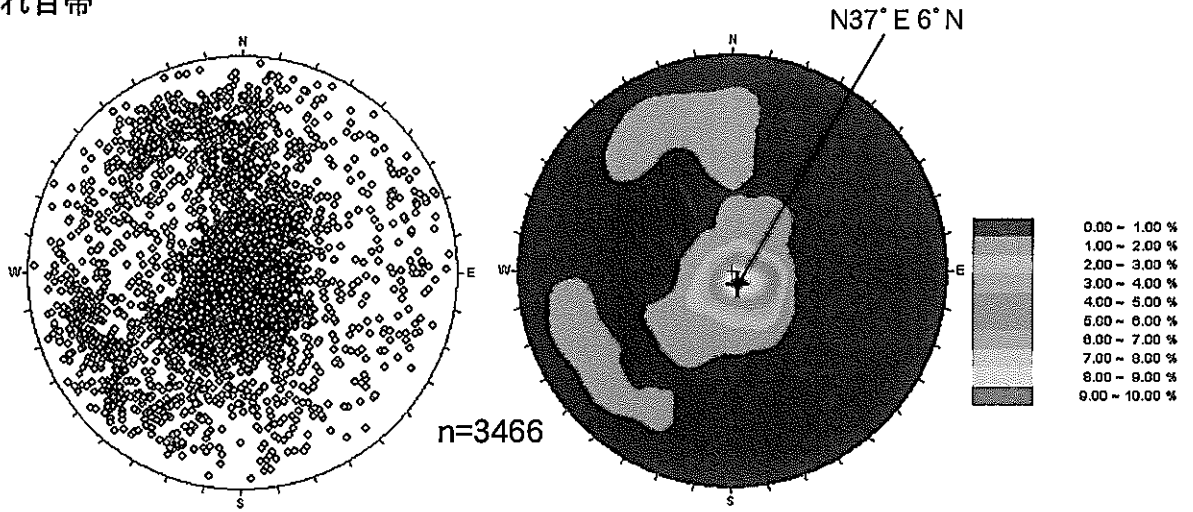
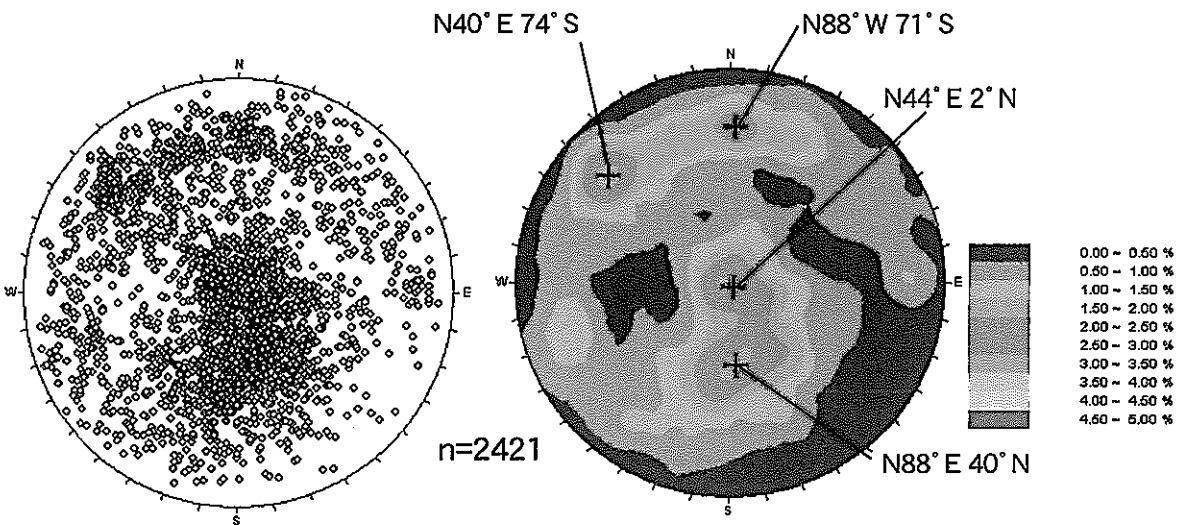


図7(3) 地質構造要素ごとの割れ目頻度 (MIU-3号孔)

上部割れ目帯



健岩部



断層に伴う割れ目帯

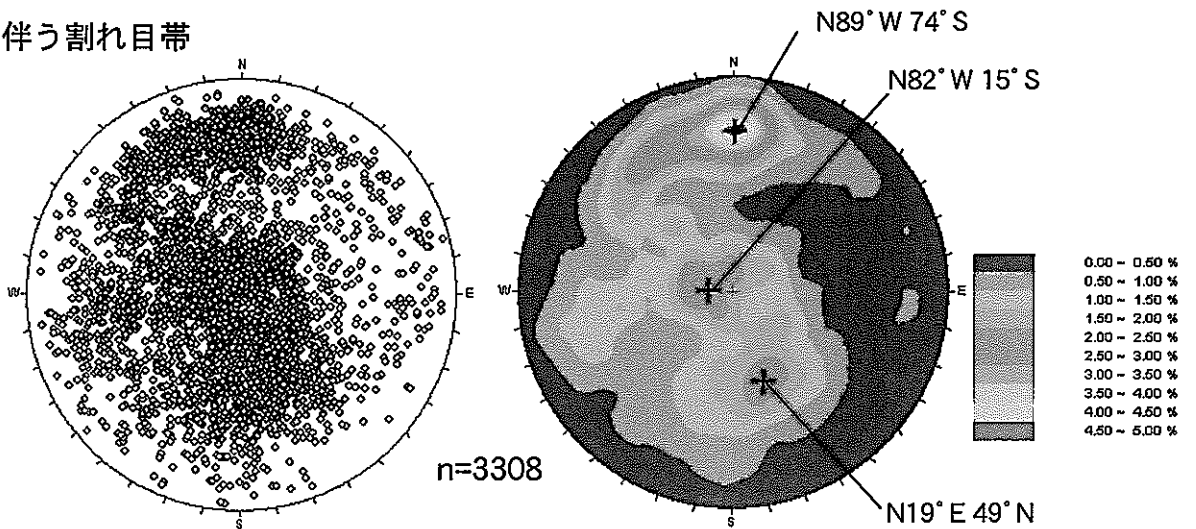


図8 地質構造要素ごとの割れ目方向分布

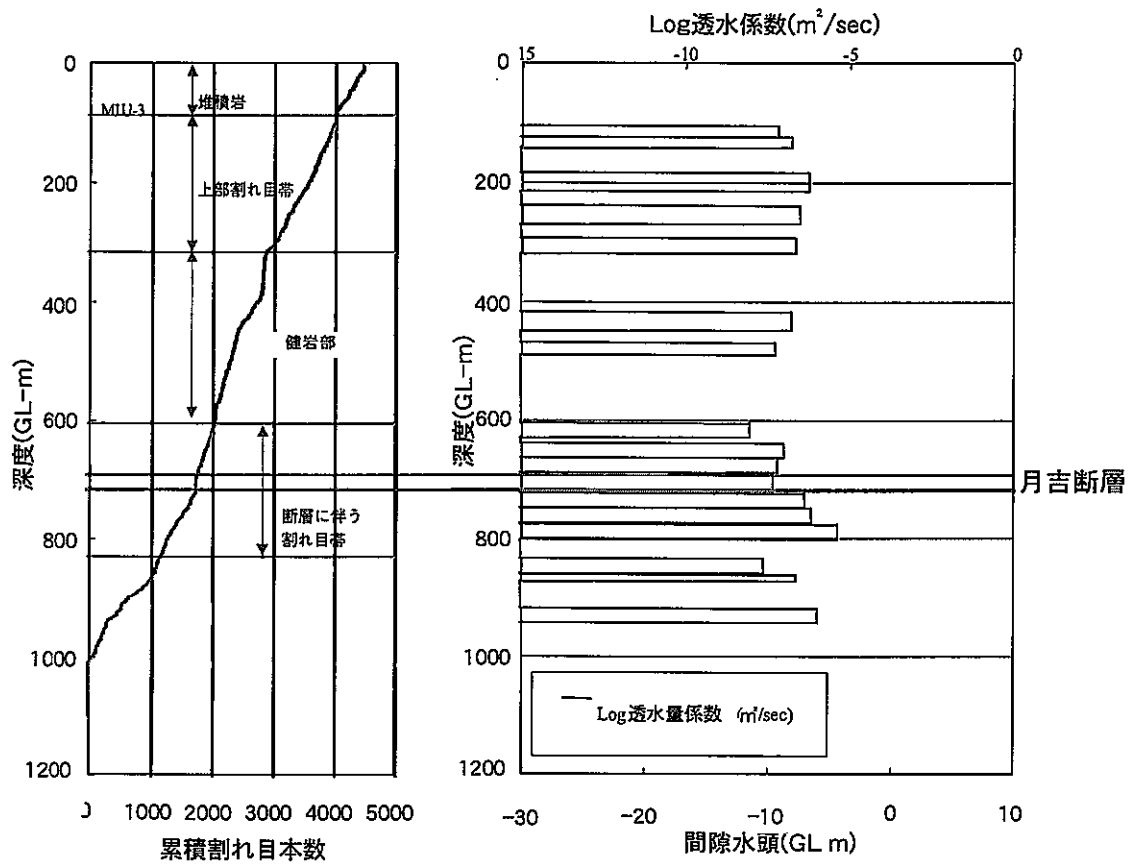
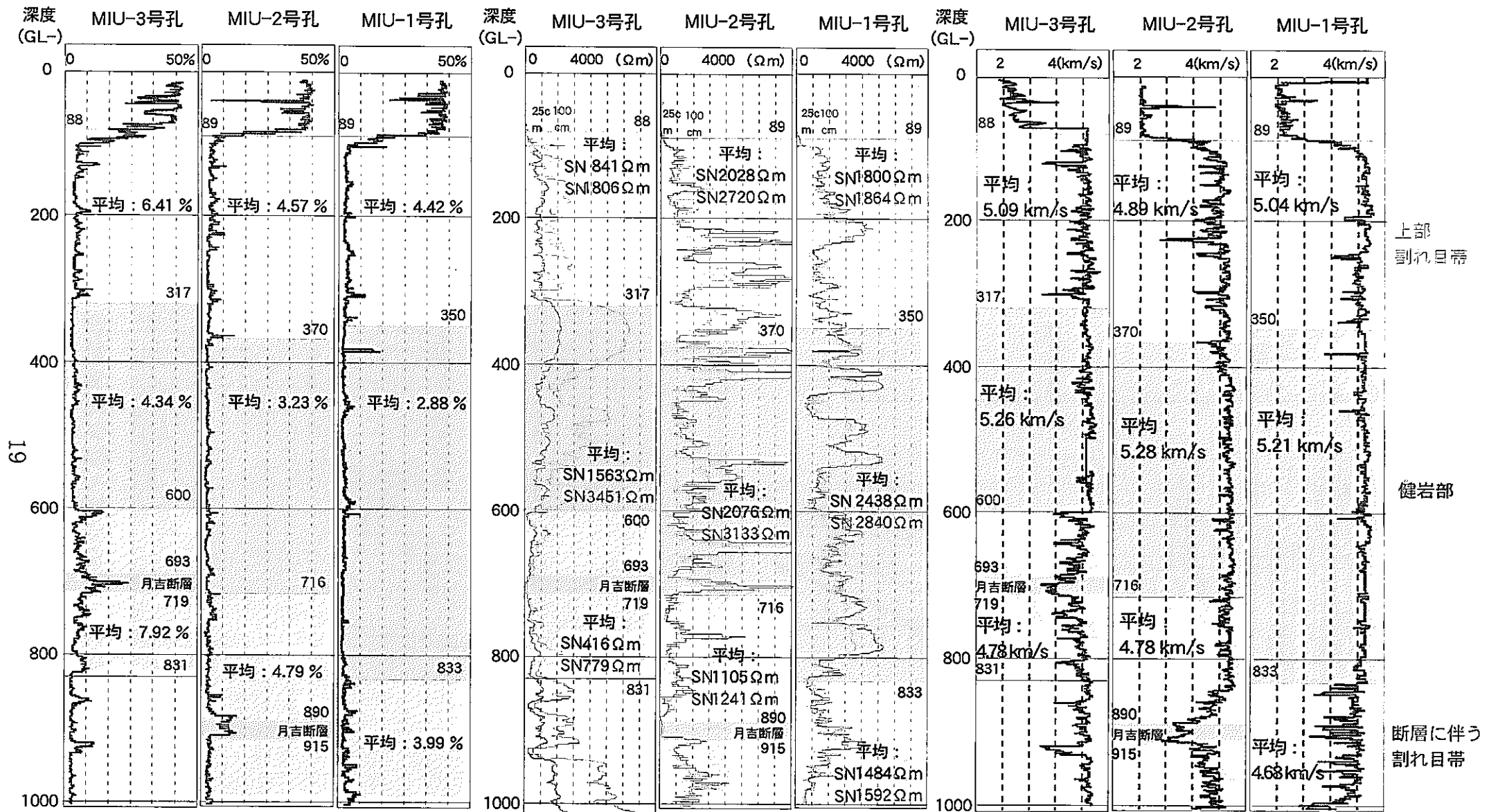


図9 累積割れ目本数と単孔水理試験結果 (MIU-3号孔)



(a) 中性子孔隙率

(b) 見掛け比抵抗

(c) P波速度

SN : ショートノルマル (25cm)

LN : ロングノルマル (100cm)

図10 物理検層結果

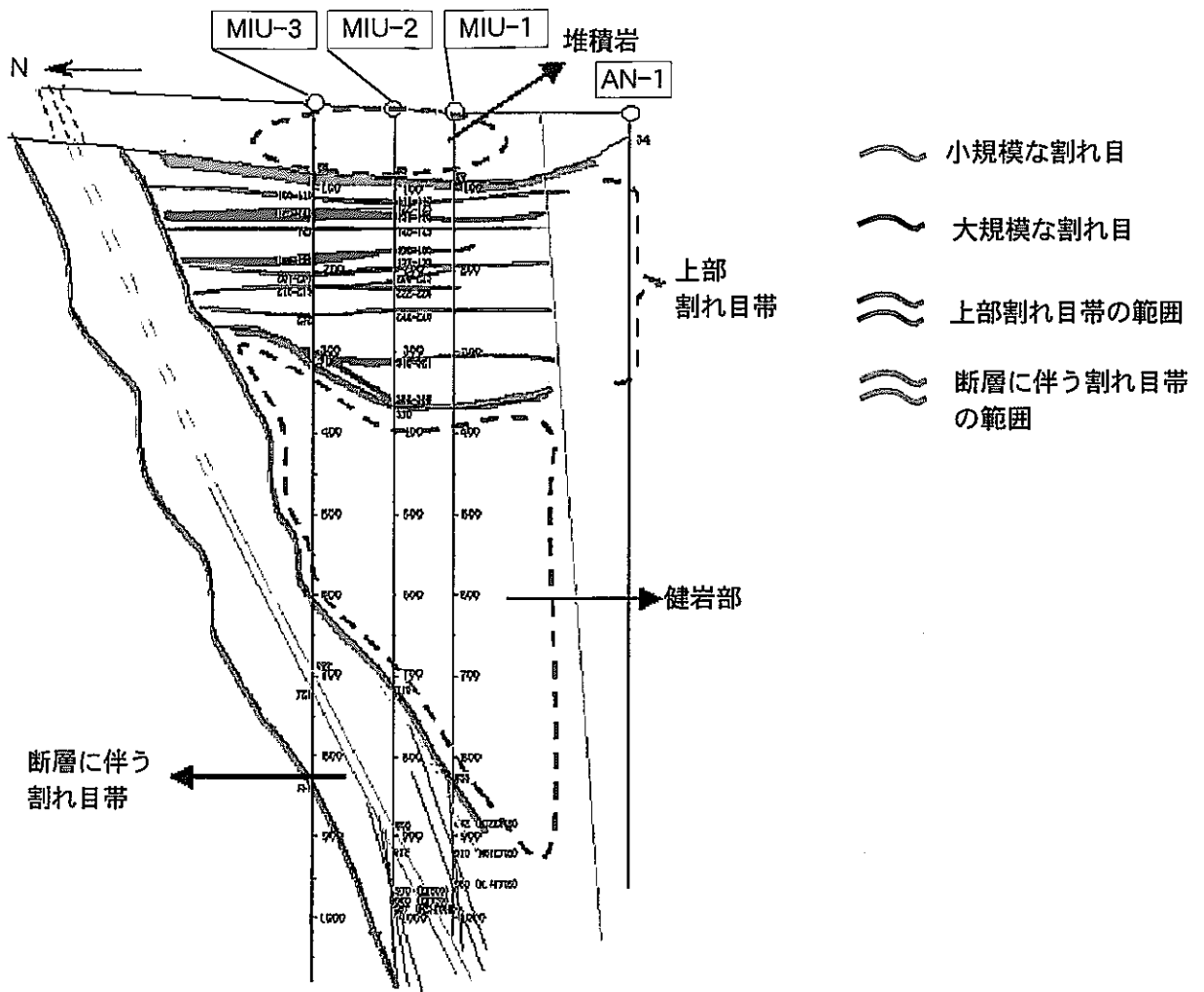


図11 MIU-1～3号孔で取得されたデータによる割れ目分布概念図

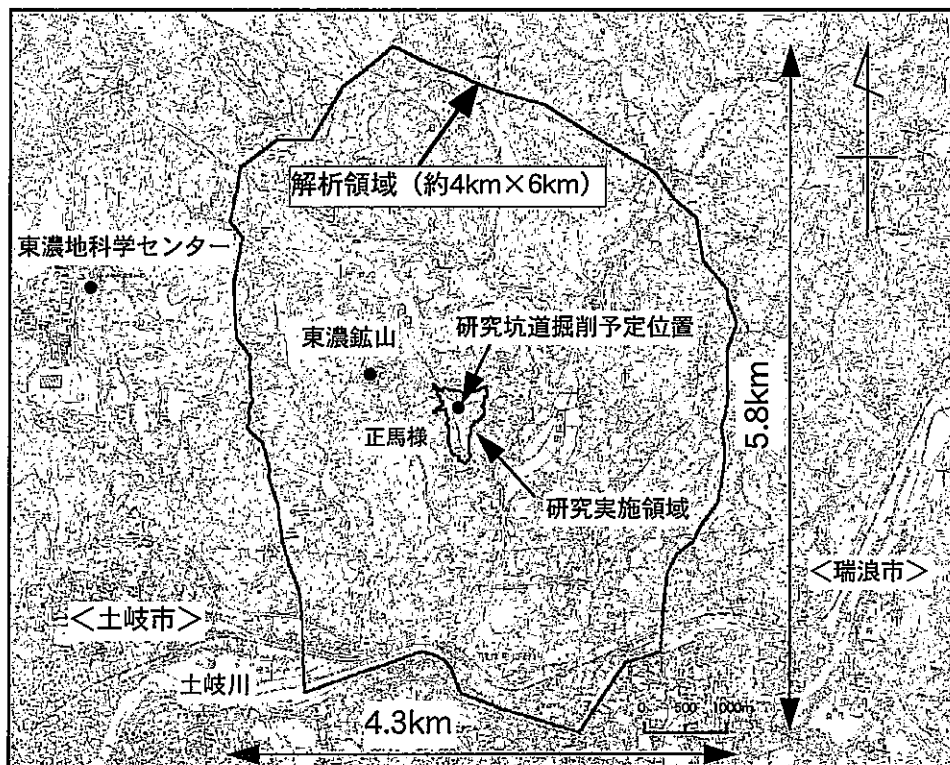


図12 解析領域と研究実施領域

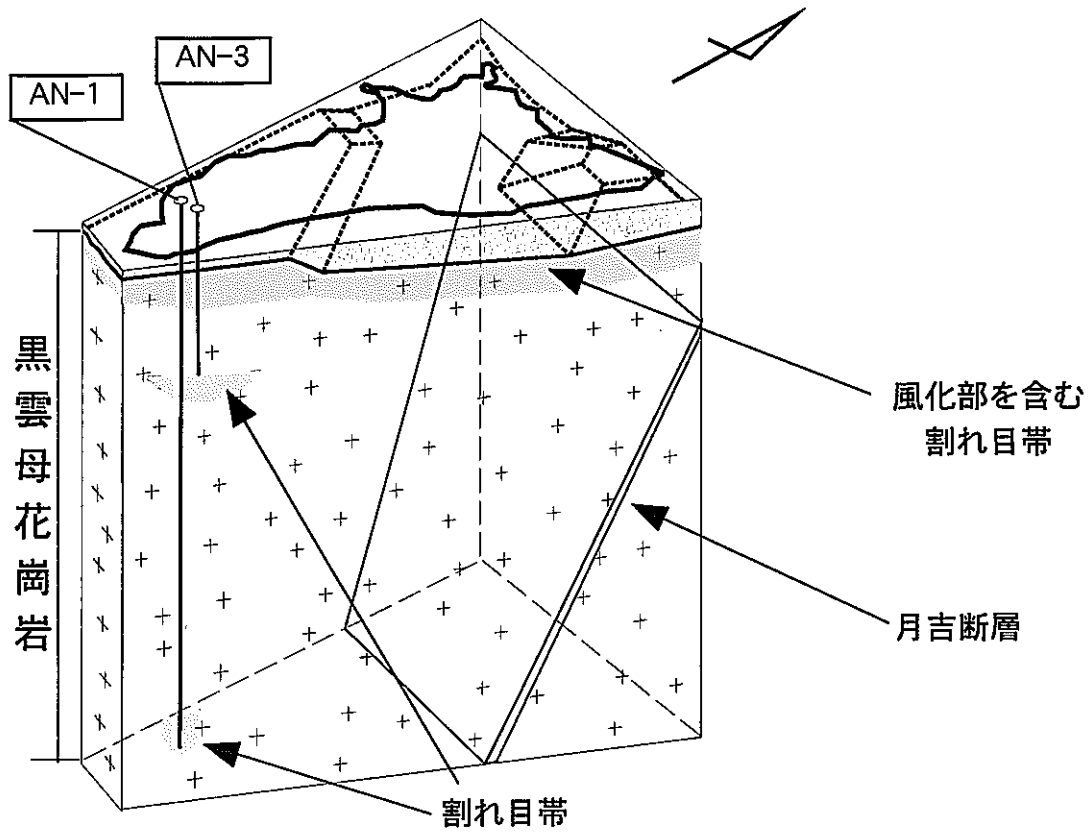


図13(1) 既存情報を用いた研究実施領域の地質構造モデル

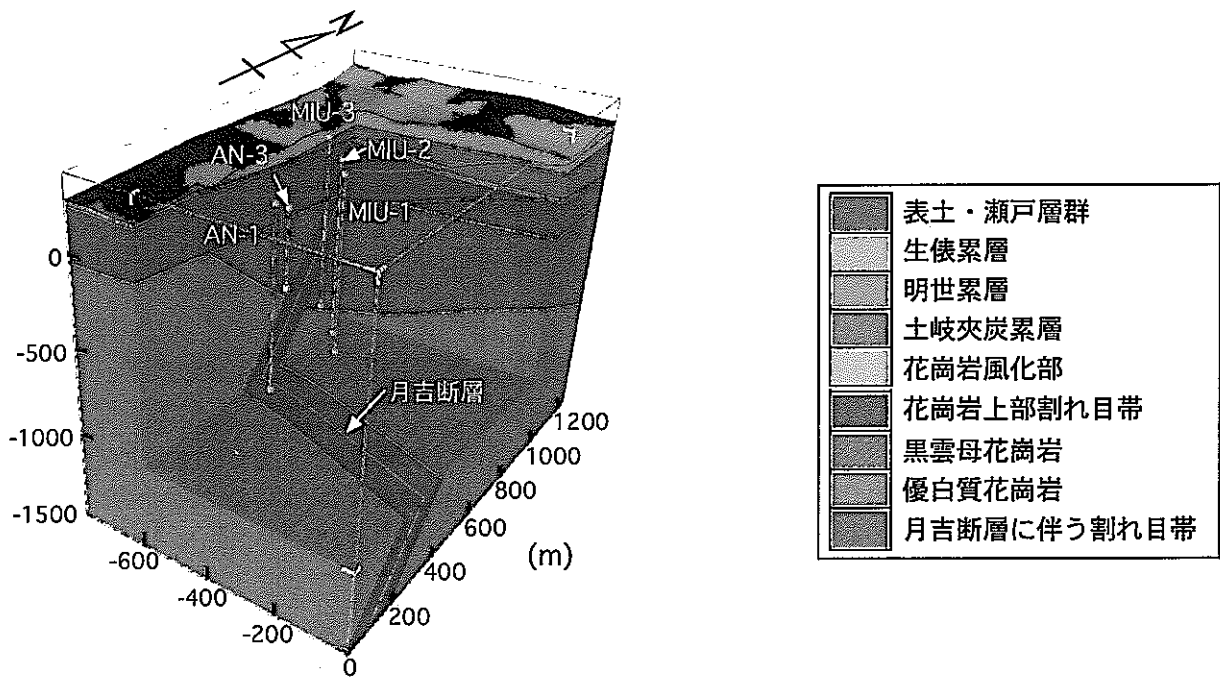


図13(2) 平成11年度までの調査結果に基づく研究実施領域の地質構造モデル

4. 地下水の水理に関する調査・研究

4. 1 目標

「地表からの調査予測研究段階」における地下水の水理に関する研究の目標は、以下の4項目にまとめられる（サイクル機構，1998）。

- ①研究実施領域の地表から地下深部に至るまでの、地下水および物質の移行経路と成り得る地質構造要素（断層，割れ目など）および岩盤の水理的な不均質性（岩相および風化・変質帯など）に関するデータの取得。
- ②データの検討結果に基づく水理地質構造モデルの構築と妥当性の検証。
- ③坑道を掘削する前の研究実施領域における地下水流動の把握，および坑道の掘削に伴う地下水流動の変化の範囲と規模，ならびに坑道内への湧水量の予測。
- ④水理地質構造を体系的に調査・解析する手法の開発。

4. 2 実施内容

表層水理調査および深層水理調査（MIU-3号孔における試錐調査）により水理的データを取得するとともに，これらのデータを用いて，水理地質構造モデルの構築と地下水流動解析を行った。以下に，それらの結果の概要を示す。

4. 2. 1 表層水理調査

地下水流動解析の境界条件ならびに初期条件の設定，および地下水流動解析結果の検証に必要な岩盤浸透量の算定のため，浅層（堆積岩）を対象にした試錐孔の掘削と水位計の拡充を行い，既存の地下水位計，土壤水分計，気象観測装置，河川流量計と組み合わせた表層水理観測システムを用いた表層水理の観測を継続した（図14）。平成10年度末には正馬川モデル流域での水収支観測（河川流量，降水量など気象観測）を開始しており，観測値が集積されつつある。おもな観測結果は以下のとおりである。

(1) 気象観測

平成11年度の年間降水量は正馬川流域（正馬様雨雪量計）で1,640mmであり，平成10年度（1,985mm）と比較して300mm以上減少している。正馬様雨雪量計による年間降水量の平均値は，平成2年度～平成11年度の10年間で1,544mmであり，ここ3年ほど連続して降水量は平均値を超えている。正馬様モデル流域（図14）では，樹冠外雨雪量計の降水量は1,498mmで，正馬様雨雪量計の降水量より142mm少なかった。同モデル流域に設置した気象観測装置から計算したペンマン法による蒸発散量は370mmであり，降水量の40%である。この値は，研究実施領域に隣接する東濃鉾山での蒸発散量の計算値（503mm）よりかなり小さく，夏頃に多く発生したデータの欠測の影響が大きくでているものと思われる。

(2) 地下水位観測

正馬様用地北東部の正馬川モデル流域において、瑞浪層群上部（第三紀堆積岩）および瀬戸層群基底層（未固結層）の地下水位変動を把握するために、観測井 97MS-01（瑞浪層群明世累層上部）、97MS-02（瀬戸層群基底層）を孔間距離 1m で掘削し、平成 9 年度より水位の自動観測を行っている（図 14）。また、98MS-03（瑞浪層群明世累層下部）と 98MS-04（瀬戸層群）の水位計を 10 年度末に拡充し、データの集積を行っている。さらに MIU 用地の林道脇では、明世累層基底礫岩層に水位計を拡充して（99MS-05）観測を開始した。97MS-01 から 98MS-04 の水位変動を図 15 に樹冠外降水量とともに示す。

瀬戸層群の水位挙動は 2 孔（97MS-02,04）で調和的であり、この 2 孔を結んだ断面で想定される動水勾配も数%の範囲で安定している。97MS-01 の水位は豊水期にだけ GL-18m 程度に出現するが、普段は水位計以深に低下している。その意味で同じ瑞浪層群の水位計である 97MS-03 では、降雨の有無や季節に係わらず水位が一定であるが、97MS-01 は僅かに季節変動がある。瀬戸層群に設置した水位計では降雨への反応や季節変動が明瞭である。

(3) 河川流量観測

平成 11 年度の正馬川河川流量計での河川流出高（流量を流域面積（正馬川流域； 0.535km^2 、正馬川モデル流域； 0.01km^2 ）で割った値）は 932mm であり、平成 10 年度の河川流出高 1,410mm と比較すると降水量に呼応した減少を示した。正馬川モデル流域の河川流出高は 710mm であり、流域面積で除して標準化した値では面積の大きい正馬川流域と、面積の差ほど大きな差異はない。

(4) 岩盤浸透量

平成 11 年度において、①～③で取得した降水量、蒸発散量、河川流量から水収支を計算した。その結果、岩盤浸透量は、正馬川流域で $0.22\text{mm}/\text{日}$ （10 年間の平均値で 0.06mm ）、正馬川モデル流域で $1.14\text{mm}/\text{日}$ であった。これらは研究実施領域周辺で行われている広域地下水流動研究で得た花崗岩分布域での岩盤浸透量と比べて著しく大きい。

4. 2. 2 深層水理調査

岩盤、断層および割れ目などの水理学的特性に関するデータを取得するため、MIU-3 号孔において透水性割れ目を検出するための流体検層（フローメータ検層、温度検層）、ならびに同定した透水性割れ目の透水性を把握するための透水試験（パルス試験、スラグ試験）および岩盤の平均的な透水性を把握するための揚水試験を実施した。また、研究実施領域の岩盤の水理学的な連続性に関するデータを取得するために必要な間隙水圧のモニタリング装置を既存試錐孔に設置した。

なお、フローメータ検層は、物理検層と同様、試錐孔の掘削工程にあわせ、基盤花崗岩の風化部までの掘削後（深度約 12～103m：第 1 次検層）、風化部以深から

月吉断層の上盤側の掘削後（深度約 103～580m：第 2 次け検層），月吉断層上盤側から孔底までの掘削（深度約 580m～1,014m）第 3 次検層）の 3 回に分けて行った。

(1) 流体検層（サイクル機構，2000a）

孔内の逸水層や湧水層を検出し，透水性に関する評価を行うためにフローメータ検層（インペラー型およびヒートパルス型），および温度検層を実施した。

インペラー型フローメータ検層では，深度 90m 付近の堆積岩と花崗岩の境界付近での流速の変化が確認された。花崗岩部では，深度約 750m 以深の断層に伴う割れ目帯での流速変化が優勢であった（図 16）。また，水理試験区間での孔内流速の変化量は，水理試験により得られた透水係数と正の相関があることが確認された（図 17）。

ヒートパルス型フローメータ（注水試験）では，堆積岩部の深度約 80m～102m の間に流入帯が認められた。花崗岩部では深度 215m 付近，310m 付近および 450m 付近にとくに大きい流入が認められたことから，ここが透水性の割れ目と考えられる。さらに，795m～935m および 935m～1010m で地層への流入帯が認められた。逆に，深度 580m～795m 付近では地層中から孔内への流入帯が認められた（図 18）。

(2) 水理試験（サイクル機構，2000a）

堆積岩に対しては，孔全体の岩相を網羅するように抽出した 5 区間（試験区間長：6～11.5m）を対象に透水試験を，花崗岩に対しては，割れ目密度，物理検層，流体検層の結果をもとに異常が認められた割れ目を対象において，パルス試験およびスラグ試験を実施した（18 区間，試験区間長：7～31.5m）。また，割れ目の累積本数および物理検層結果などをもとにゾーン区分を行い，このゾーンをまたがない様かつ孔全体をほぼ網羅するように試験位置を設定し（11 区間，試験区間長：51～135m），揚水試験を実施した。MIU-3 号孔で実施した水理試験（透水試験，揚水試験）全体の結果を透水量係数分布図として図 19 に示す。また，MIU-1～3 号孔で実施した透水試験および揚水試験により得られた透水係数の深度分布は，割れ目の累積本数の分布から区分される地質構造要素（上部割れ目帯，健岩部，月吉断層に伴う割れ目帯）ごとに差異が認められることを示している（図 20）。

(3) 孔間水理試験

月吉断層を貫く MIU-2 号孔および MIU-3 号孔において，断層近傍の水理特性を明らかにするために，孔間水理試験を実施した（図 21）。本試験は，MIU-3 号孔の断層下部を揚水区間に設定し，揚水孔である MIU-3 号孔から約 135m 離れた MIU-2 号孔に設置した MP システムにおいて揚水に伴う水圧応答を観測した。その結果，断層上盤の観測区間（図 21, PRB-8～10）では水圧応答は認められず，断層下盤の観測区間（図 21, PRB-1～7）で水圧応答が認められた。このことより，月吉断層が遮水壁の機能を果たしていることが確認された（図 22）。また，断層下盤側の透水係数はいずれの観測区間も同様の値を示していることから，多孔質媒体的な挙動を示していることが考えられる（表 3）。本試験により深部の断層付近における水理特性を把握することができたことから，本試験方法の有効性が確認された。

表 3 揚水試験解析結果

試験の種類	パラメータ	PRB-1	PRB-2	PRB-3	PRB-4	PRB-5	PRB-6
揚水試験	Δs (mH ₂ O)	0.61	0.58	0.59	0.50	0.60	0.73
	T ₀ (sec)	38530	29670	26830	21310	24800	29610
	K (m/sec)*	9.52E-08	9.96E-08	9.78E-08	1.16E-07	9.63E-08	7.95E-08
	Ss (1/m)*	1.27E-07	1.09E-07	1.04E-07	1.17E-07	1.27E-07	1.59E-07
回復試験	Δs (mH ₂ O)	0.53	0.53	0.58	0.52	0.57	0.78
	K (m/sec)*	1.05E-07	1.05E-07	9.65E-08	1.06E-07	9.78E-08	7.09E-08

(注) ・ PRB-1~6 : 観測区間

・ Δs : 1 対数サイクル時間の水位低下 (回復) 量

・ * : 割れ目帯の厚さを 110m と仮定して透水量係数および貯留係数から求めた。

4. 2. 3 地下水の長期観測

「超深地層研究所計画 年度計画書 (平成 11 年度)」 (サイクル機構, 2001) では, MIU-1,2 号孔および AN-1 号孔に多点式間隙水圧観測装置 (以下, MP システム) を設置し, 間隙水圧を観測するとともに, その採水機能を用いて採水・分析を行うこととしている。しかしながら, MIU-2,3 号孔の試錐調査が平成 11 年度まで引き続き行われることになったため, MP システムの設置は AN-1 号孔 (花崗岩部 20 区間) のみ行われた。MIU-1,2 号孔については, 平成 12 年度以降, MP システムを設置する計画である。

4. 2. 4 モデルの構築および地下水流動解析

本調査・解析にあたっては, 取得すべき情報の理解度, 情報の過不足, 不確実性および取得情報の優先順位をそのつど明確にすることが重要となる。そのため, 図 23 に示す「地下水流動解析ループ」を繰り返すアプローチでモデルの構築および地下水流動解析を行った。

岩盤内の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。平成 11 年度の本研究では, 『地下水流動の解析領域が数 km×数 km 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または不均質性を考慮した等価な連続体に置き換えて水理地質構造をモデル化する』との考え方の下, 1 回目および 2 回目の地下水流動解析ループの地下水流動解析を行った。なお, 2 回目の地下水流動解析ループまでは以下に示す二つの理由から不連続体によるモデル化を行っていないが, 平成 12 年度より双方のモデル化手法を用いて水理地質構造のモデル化と地下水流動解析を進める計画である。

①解析領域内の割れ目や透水係数の分布に関する情報が少ない

②数 km×数 km の解析領域を不連続体で解析する場合の計算量や時間の制約
本研究の解析領域は、図 24 に示すように研究実施領域を包含し、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約 4km×6km の範囲とした。

(1)1 回目の地下水流動解析ループでの実施内容と成果

1)実施内容

第 1 回目の解析ループでは、広域地下水流動研究および東濃鉦山における調査・研究で取得されている既存情報を用いて、地質構造および水理地質構造のモデル化と地下水流動解析を実施した。地質構造モデルは図 25 に示すように、堆積岩類の各累層、花崗岩風化部および月吉断層を表現した。水理地質構造モデルにおける水理パラメータは東濃鉦山周辺域を対象とした地下水流動解析で用いた物性およびその解析結果を参考に設定した(稲葉ほか, 1998)。なお、月吉断層と風化部を除く花崗岩の物性については、全体に一様の物性を与えた。

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三次元飽和・不飽和浸透流解析プログラム TAGSAC を用いた(今井・柳澤, 1990)地下水流動解析は、解析領域に存在する東濃鉦山の坑道を考慮した定常解析と超深地層研究所計画において 1,000m の研究坑道(立坑)掘削による地下水流動を予測するための非定常解析を実施した。

2)解析結果

(i)定常解析結果

定常解析により得られた全水頭分布と試錐孔調査により得られた実測値を比較した一例を図 26 に示す。なお、図 26(a),(b),(c)の各図においてそれぞれ標高約 137m, 269m, 131m より上位が堆積岩で下位が花崗岩である。この解析結果は以下の 3 点にまとめられる。

- ① 図 26(a)に示すように解析で得られた堆積岩中の全水頭分布と実測値を比較すると、解析メッシュの大きさと実際の測定ポイントの間隔が整合していないことから、解析結果は細部を表現できていないものの、全水頭分布の全体傾向は表現できている。
- ② 図 26(b)および(c)に示すように、花崗岩中の水頭分布の傾向は概ね表現できていると考えられる。しかし、ほとんどの試錐孔で解析値の水頭分布は実測値に比べ 30m 程度高い値となった。これは、月吉断層およびその周辺の割れ目帯に起因する透水性のコントラスト、地下水位面などの上部境界条件および断層の位置や形状が水理地質構造モデルにおいて十分に表現できていないためと考えられる。
- ③ 標高-758m における全水頭分布(図 27)においても大局的な地形の影響が認められる。また、地下水は北から南へ流れている傾向にある。

(ii)非定常解析結果

非定常解析による解析結果は以下の 2 点にまとめられる。

- ① 研究坑道掘削により全水頭が低下する範囲は、解析領域として設定した約 4km×6km の範囲内で収束している。

- ② 平面的な全水頭低下量の分布は研究坑道の掘削位置を中心にはほぼ同心円状となり、月吉断層が遮水構造を成している傾向はほとんど認められなかった。この結果からは月吉断層が地下水流動に与える影響はあまり大きくない可能性が示唆された。

(iii)定常解析結果および非定常解析結果から抽出した課題

定常および非定常の解析結果より、2回目の解析ループを進めるうえでは、とくに花崗岩中の地下水の流動に大きく寄与していると考えられる月吉断層周辺の割れ目帯およびその他の割れ目帯の性状と水理特性の把握などが優先的な課題として挙げられた。

(2)2 回目の地下水流動解析ループでの実施内容と成果

1)実施内容

2 回目の解析ループにおける地質構造および水理地質構造のモデル化は、1 回目の解析ループで得られた課題を踏まえ、1 回目の解析ループと並行して進められていた研究実施領域内における深度約 1,000m の 3 本の試錐調査 (MIU-1~3 号孔) および反射法弾性波探査などの調査結果を加えて行われた。とくに、試錐調査では花崗岩中の水みち構造と考えられる割れ目帯などに関する詳細な情報を取得するために、コア観察およびボアホールテレビによる割れ目分布密度の調査、試錐孔全長の水理特性を把握するための約 100m 区間長の試験、および特定の水みちの水理特性を把握するための数 m の区間長の試験を併用して調査を実施した。なお、MIU-2 号孔では深度 900m 付近で、MIU-3 号孔では深度 700m 付近でそれぞれ月吉断層をとらえている。図 28 に調査結果の一例として MIU-2 号孔での調査結果を示す。これらの調査結果をもとに、花崗岩中の水理地質構造について検討した結果、以下の解釈がなされた。

- ① 花崗岩はその中の割れ目の頻度により、花崗岩上部割れ目、健岩部、月吉断層に伴う割れ目帯の三つのゾーンに大きく分類できる。
- ② 上部割れ目帯および月吉断層に伴う割れ目帯では透水性が高く、健岩部では透水性が低い傾向にある。
- ③ 月吉断層の下盤側 (北側) は上盤側 (南側) に比べて約 30m 水頭が高いことから、月吉断層は遮水壁として機能している可能性が高い。

地質構造のモデル化にあたっては、2本の試錐孔で存在が確認されるとともに、既存情報から解析領域内での連続性が高く地下水流動を規制していることが予想される月吉断層は決定論的に扱うこととした。また、花崗岩中の割れ目は、頻度分布に基づいて区分した三つのゾーンごとに割れ目の分布傾向 (方向、開口幅、半径、密度) を考慮したうえで統計的に与えることとした。

水理地質構造のモデル化においては、解析領域の広さや取得データの空間的密度を考えると花崗岩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、断層などの不連続構造およ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できる等価連続体モデルを用いた (サイクル機構, 2000b)。図 29 に水理地質構造モデルの断面を示す。このモデルでは花崗岩中の割れ目の不均質性を異な

る二つの分布モデル（べき乗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て等価不均質連続体モデルを作成した。また、比較のために、地質構造モデルで区分したゾーンごとに均質な物性を与えた連続体モデルも作成した。

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（サイクル機構，2000b）。この解析では、研究坑道掘削による影響予測を行なううえでの初期条件を得るための定常解析と研究坑道掘削による影響の予測解析を実施し、水理地質構造のモデルの違いが解析結果に与える影響を検討した。

2)解析結果

(i)定常解析結果

定常解析により得られたおもな結果を以下に示す。

- ① 解析により得られた水頭分布から想定される地下水流動の向きは、いずれのモデルにおいても北から南方向である。
- ② 図 30 に示した、解析により得られた水平面内の水頭分布の一例からも分かるように、いずれのモデルにおいても月吉断層は南北方向の地下水流動を遮断する傾向が認められる。とくに、割れ目の分布を考慮した二つのモデルでは断層本体の遮水機能が顕著に表現されている。これは、割れ目分布を考慮したモデルにおいて、高透水性の割れ目の影響が現れているためと考えられる。

(ii)非定常解析結果

非定常解析により得られたおもな結果を以下に示す。

- ① 図 31 に示した、解析により得られた水頭分布の傾向より、割れ目の分布を考慮していないモデルでは、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二つモデルでは断層の遮水効果が表現されている。
- ② 割れ目の分布を考慮したモデルと考慮していないモデルを比較すると、水頭低下の程度および研究坑道への湧水量に大きな差異が認められ、かつ割れ目の分布を考慮したモデルのうち、べき乗分布を用いたモデルではとく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（割れ目の交差箇所が多く水みちとして連結性がよい）研究坑道を交差する割れ目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。
- 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割れ目の分布を考慮したモデルの方が割れ目の分布を考慮しなかった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。

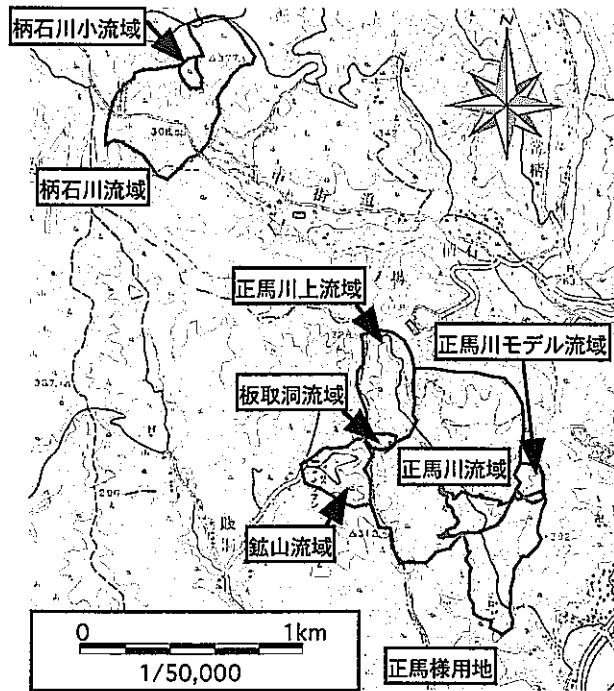


図14(1) 水収支観測の流域

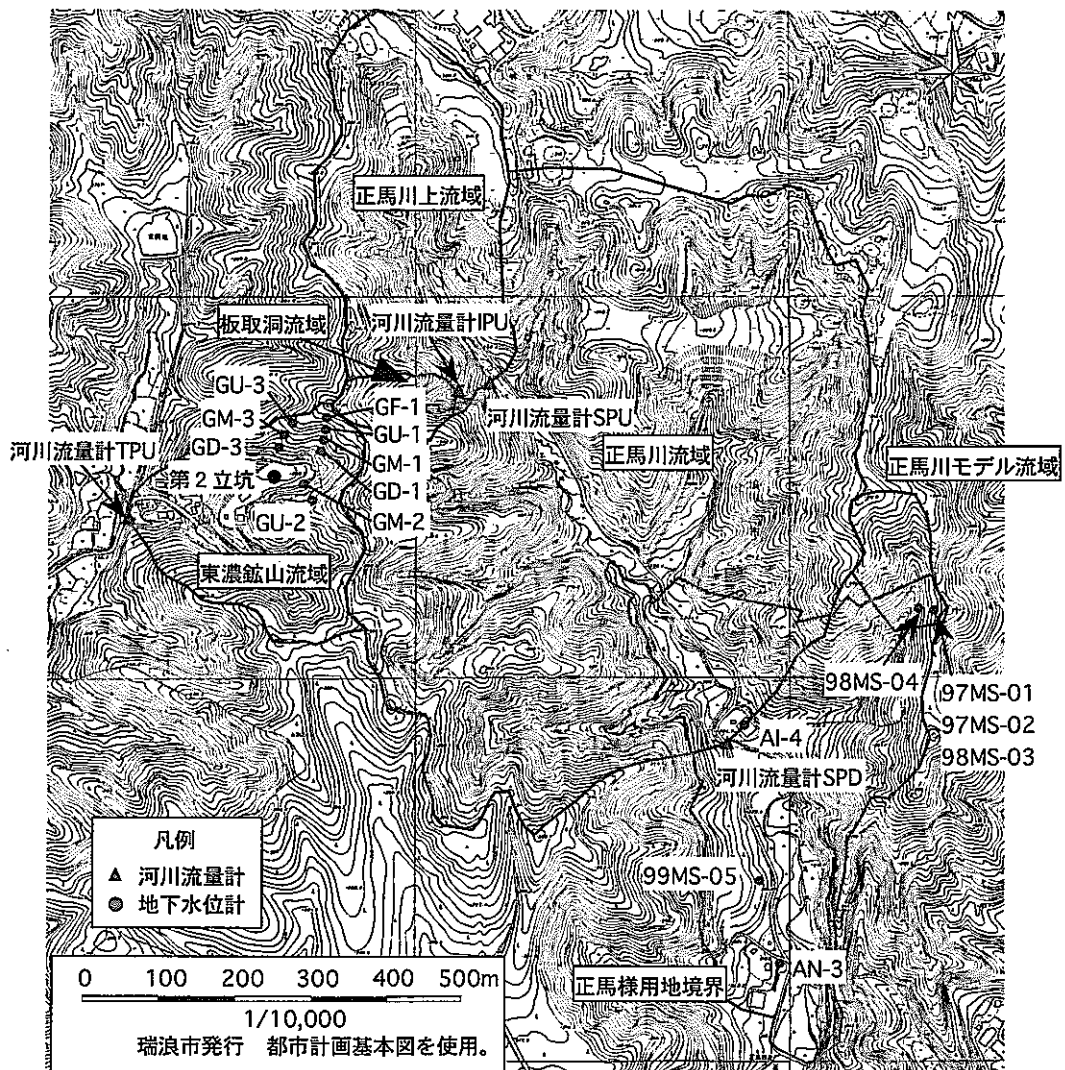


図14(2) 研究実施領域周辺における主な地下水観測の位置

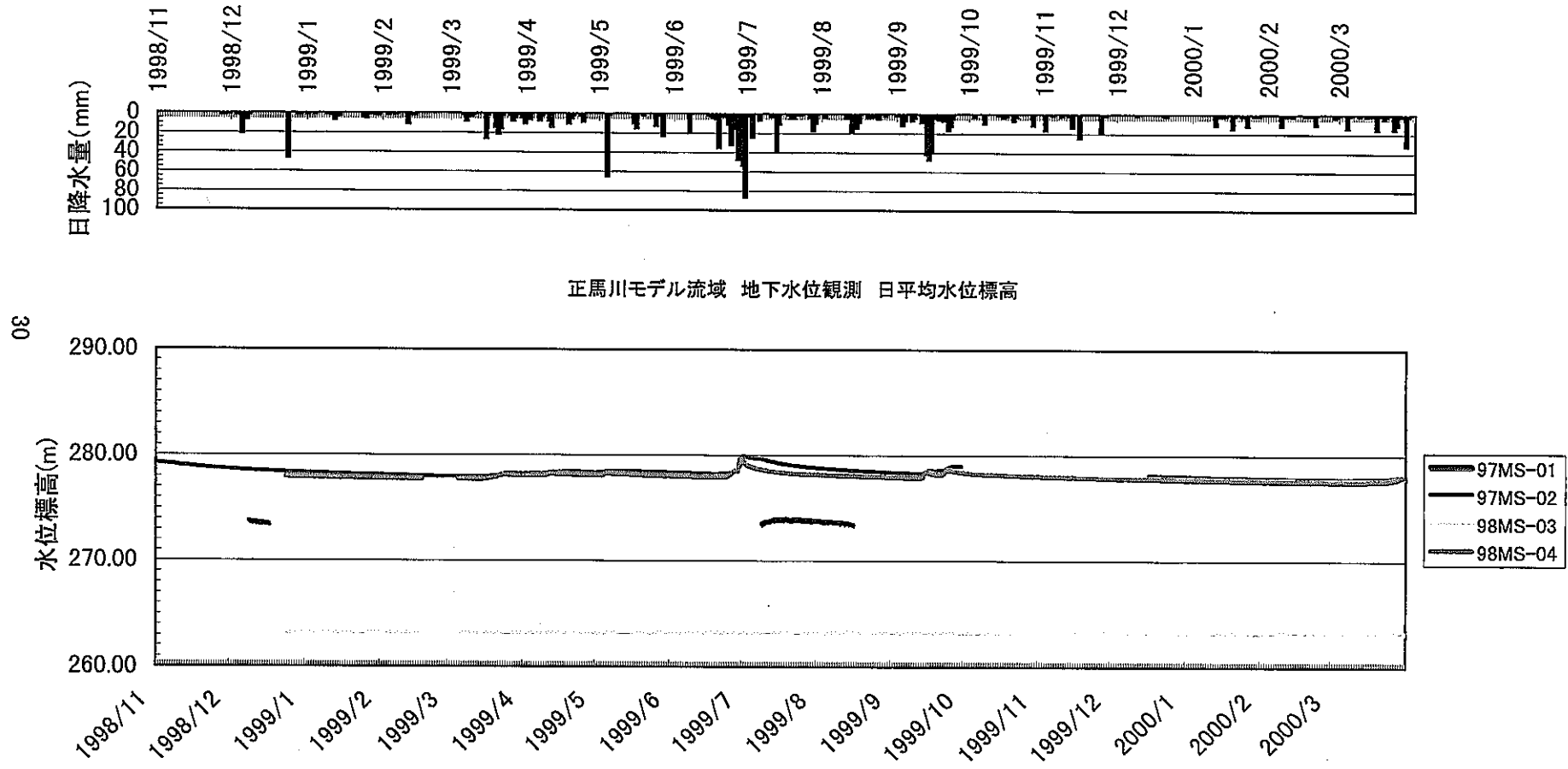
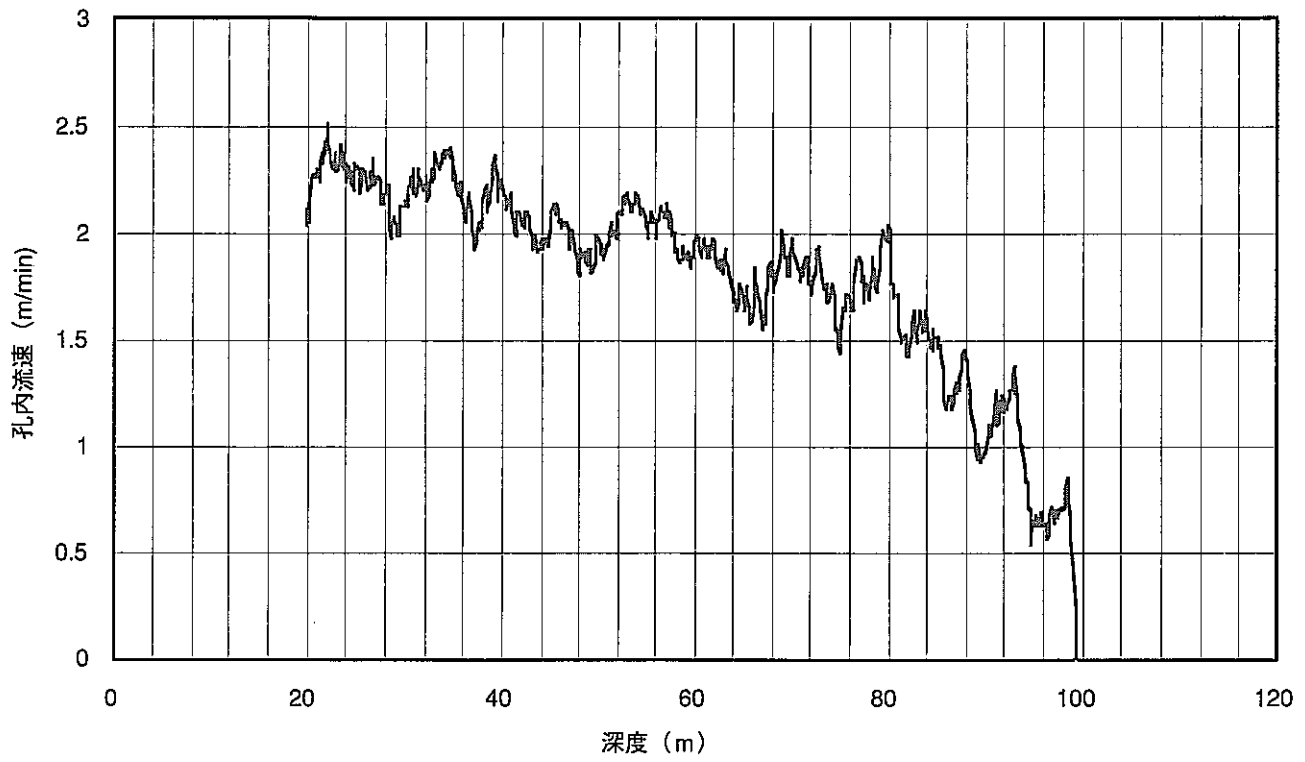
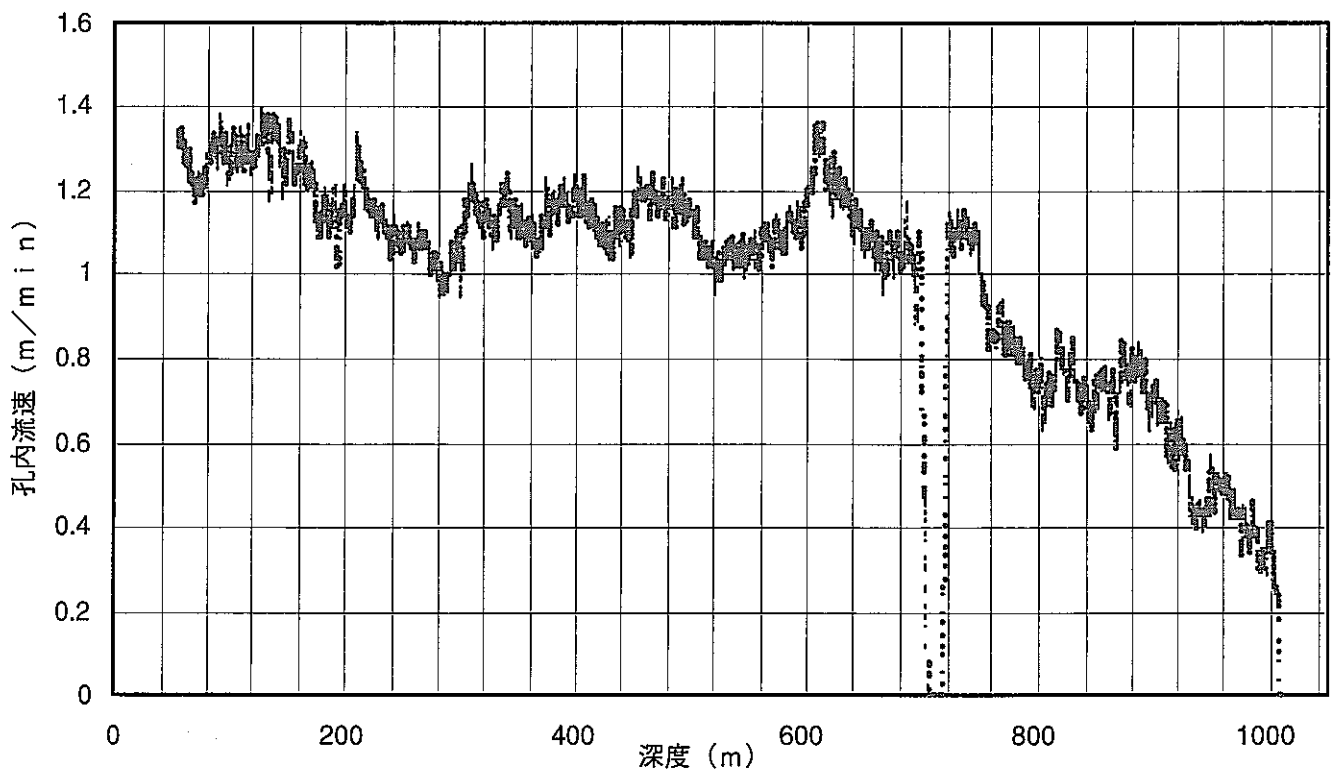


図15 正馬川モデル流域における水位観測



(1) 堆積岩部



(2) 花崗岩部

図16 フローメーター検層結果(インペラー型)

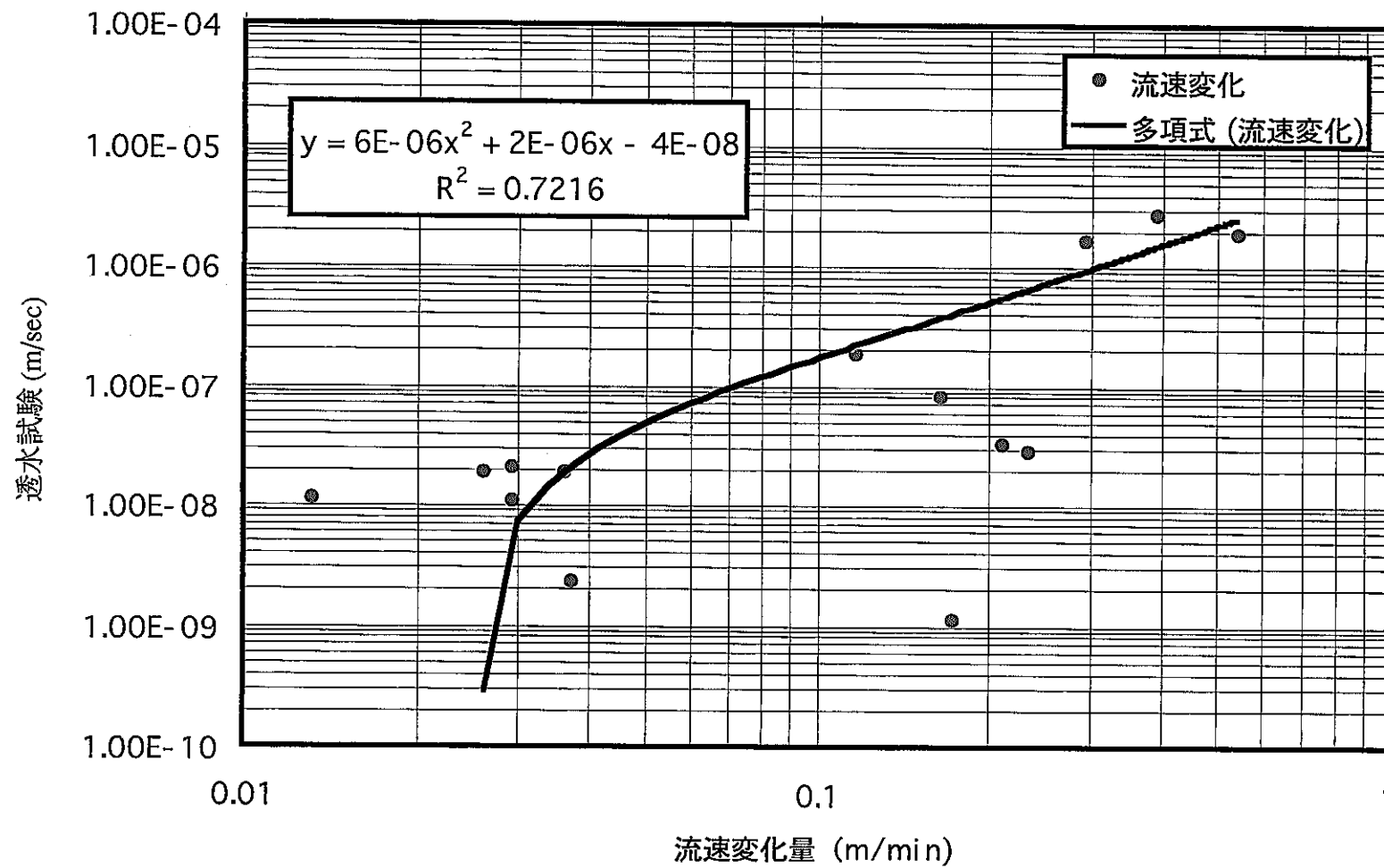


圖17 孔内流速変化量—水理試験相關

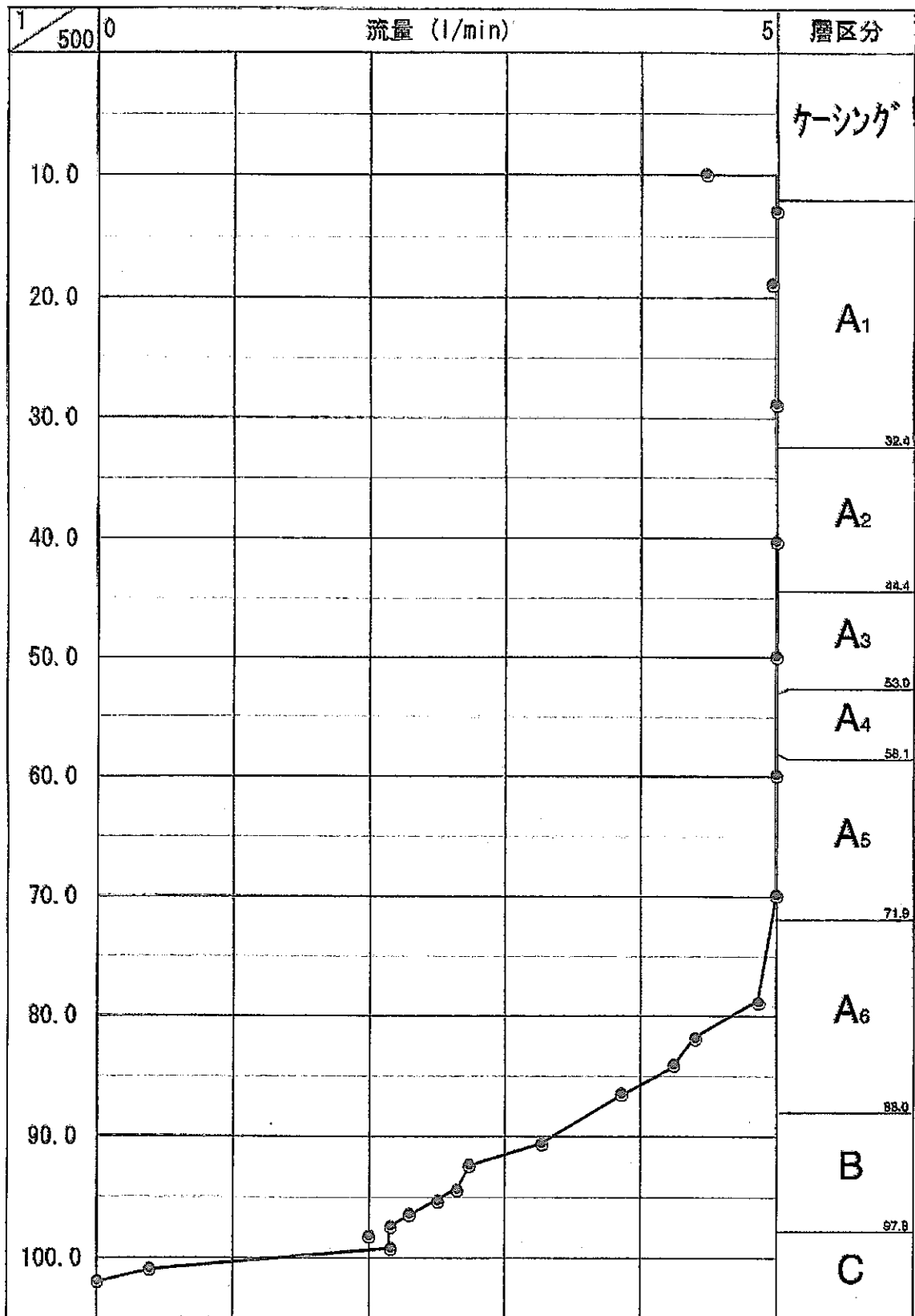


図 18(1) フローメータ (ヒートパルス型) 測定結果
(堆積岩部第 1 次検層)

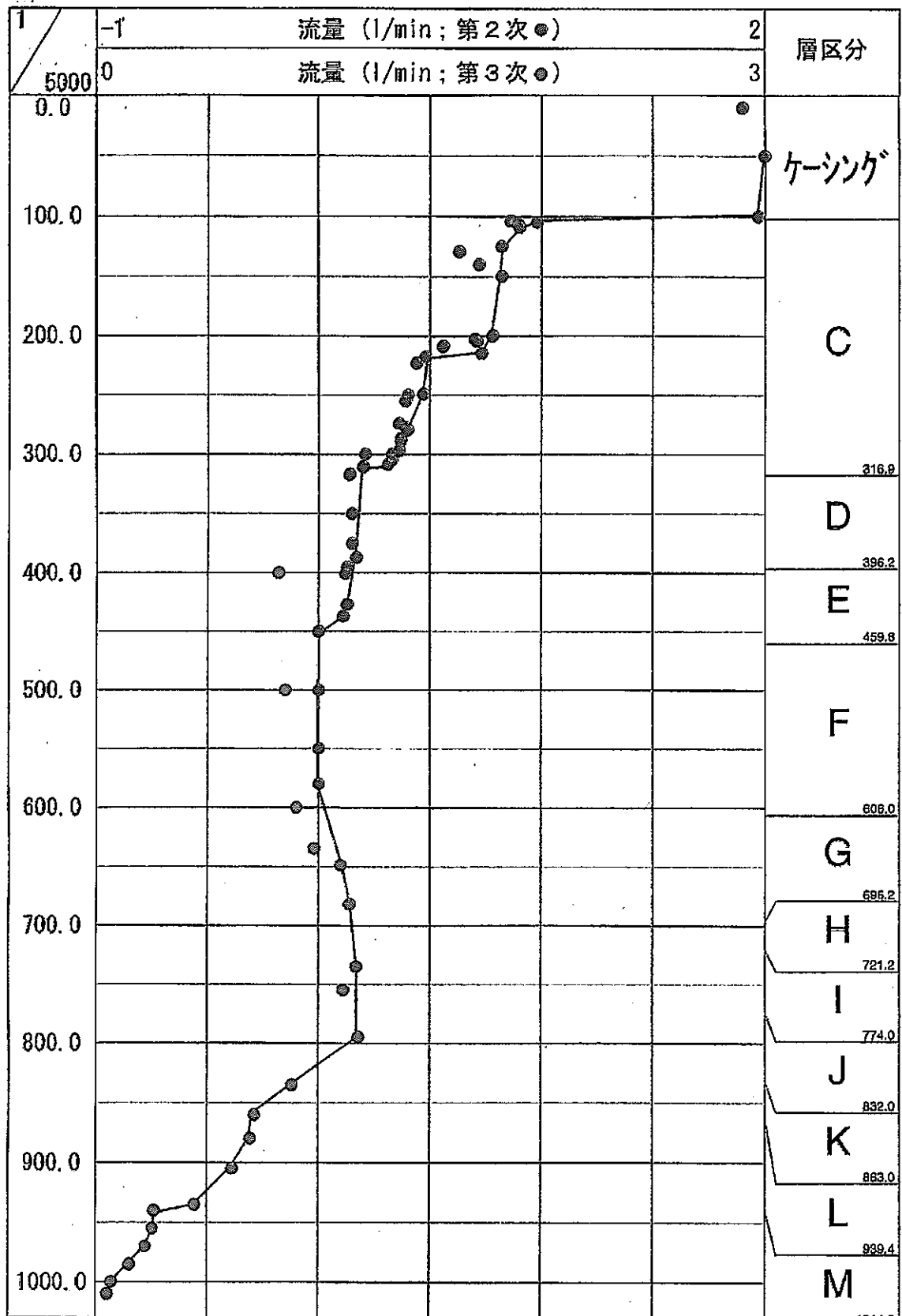


図 18(2) フローメータ (ヒートパルス型) 測定結果
(花崗岩部第2次, 3次検層)

MIU-3号孔

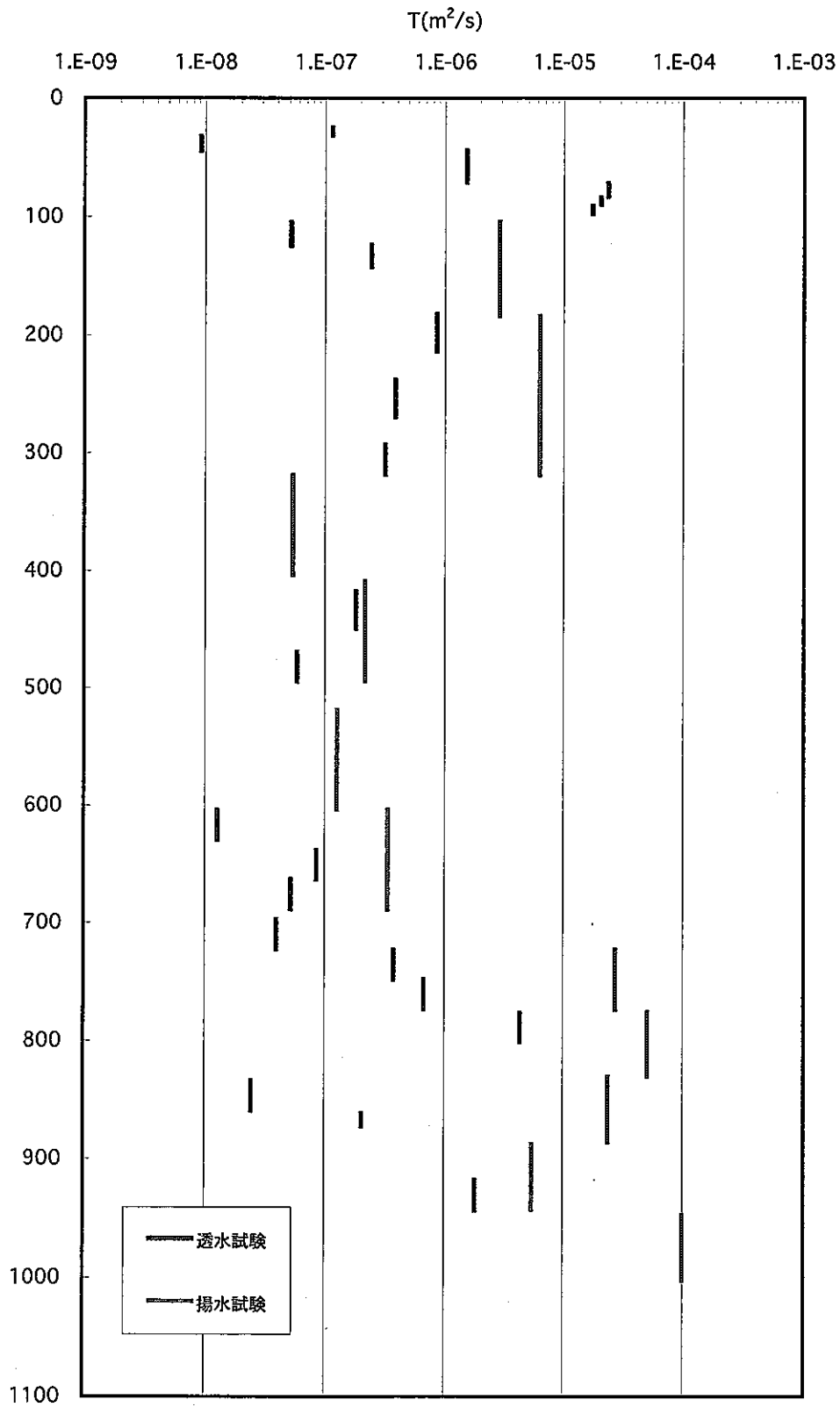
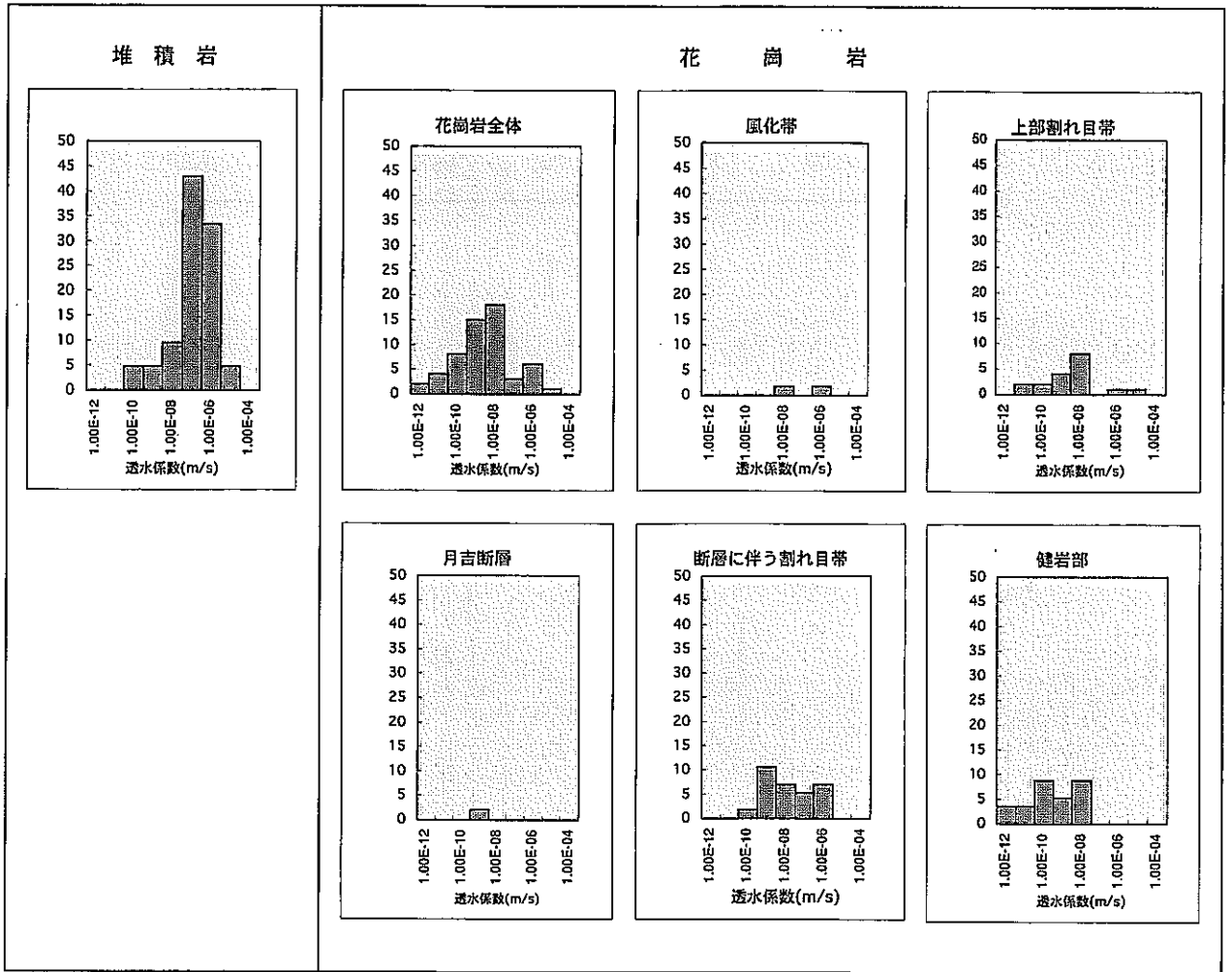


图19 MIU-3透水量系数分布

透 水 試 験



揚 水 試 験

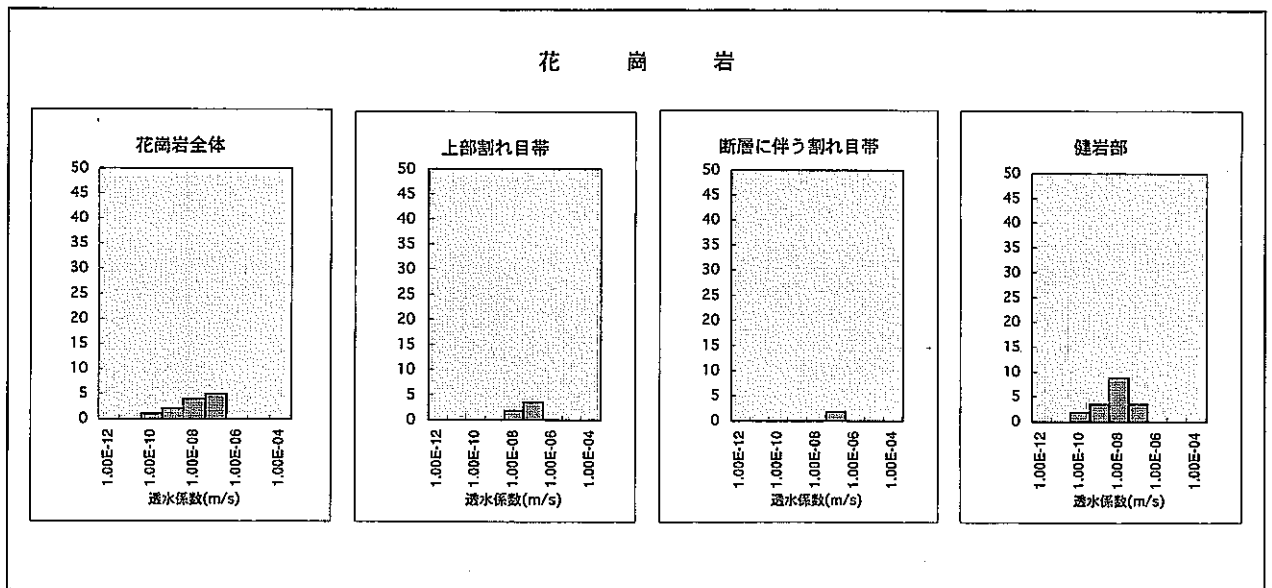


図20 MIU-1,2,3号孔における水理試験結果

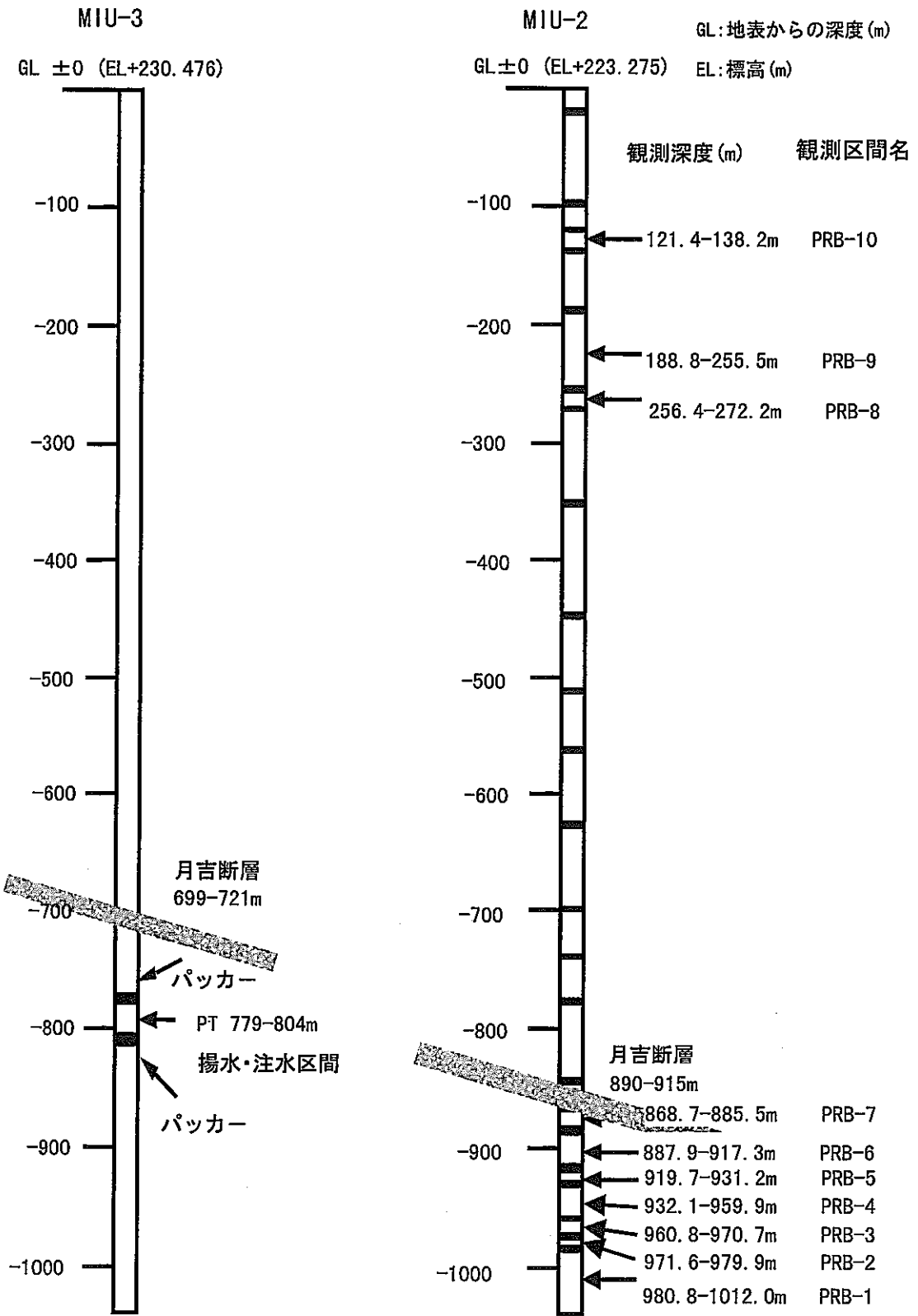


図 21 孔間試験位置レイアウト

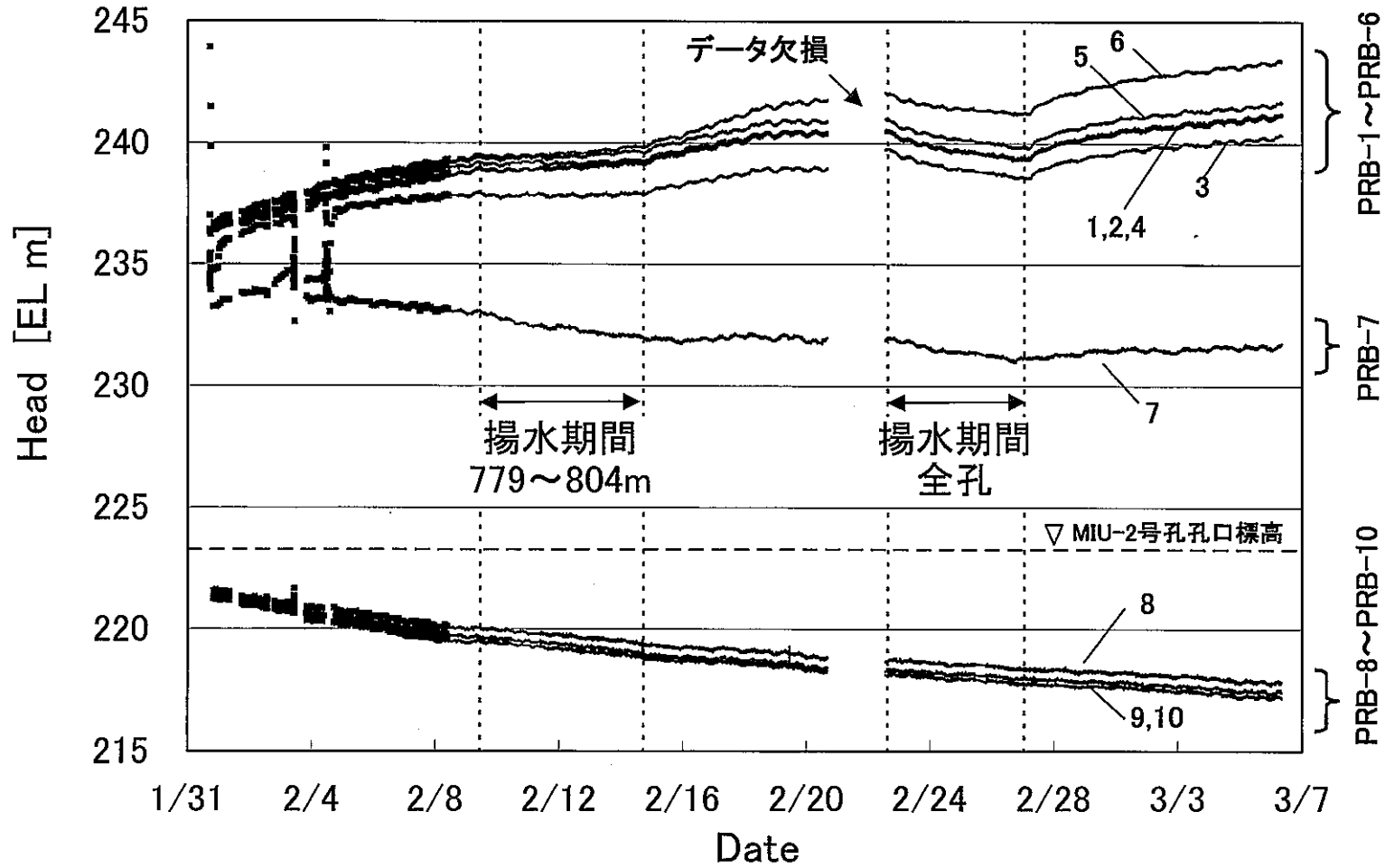


図22 MIU-2号孔内の水頭変化

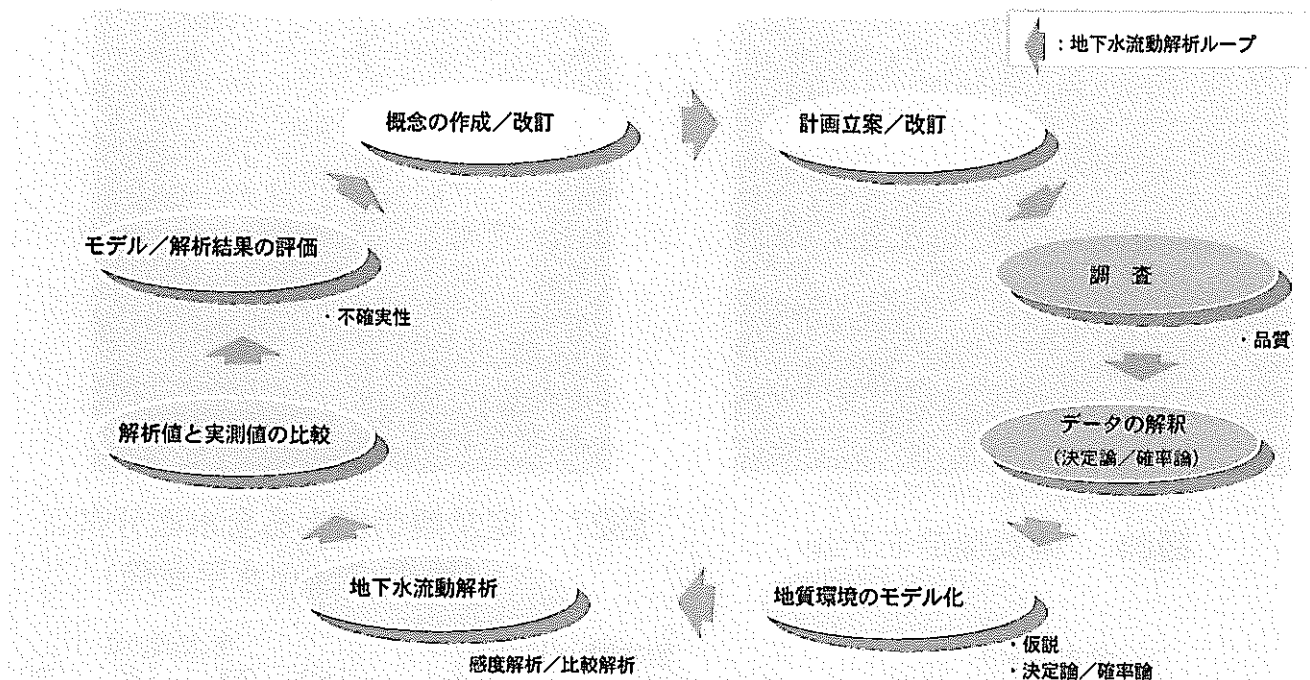


図23 地下水流動調査・解析（地下水流動解析ループ）

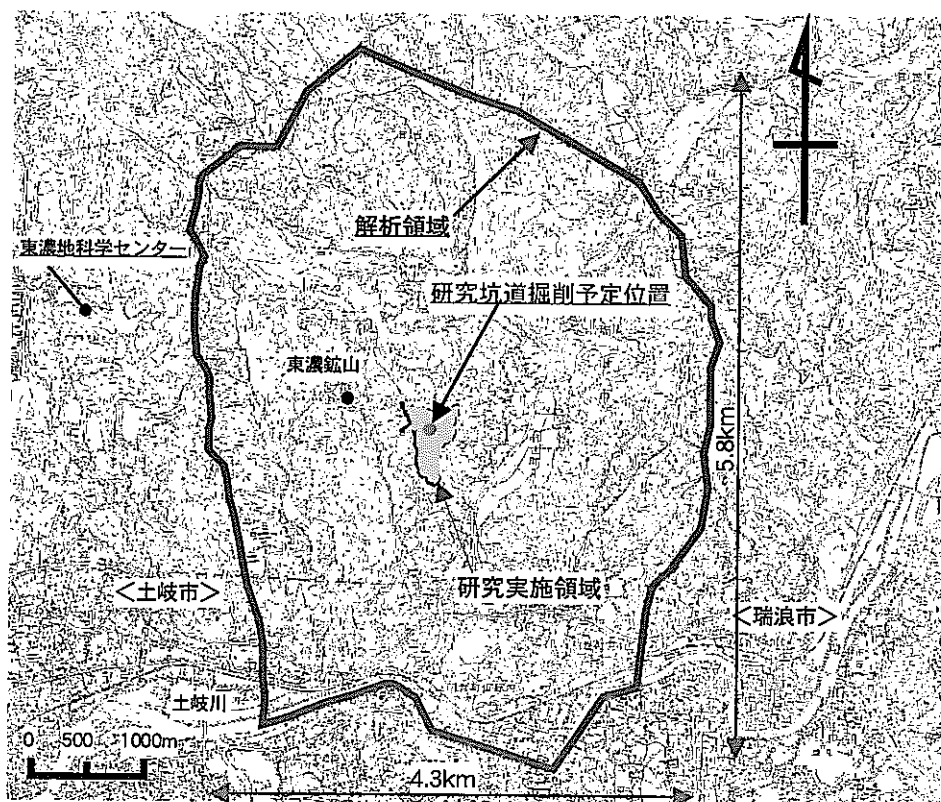
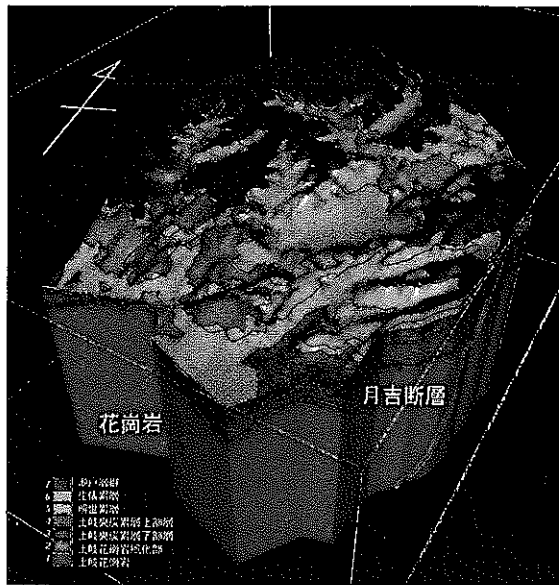


図24 解析領域と研究実施領域



(注)標高-1,000mまでをモデル化

図25 地質構造モデル

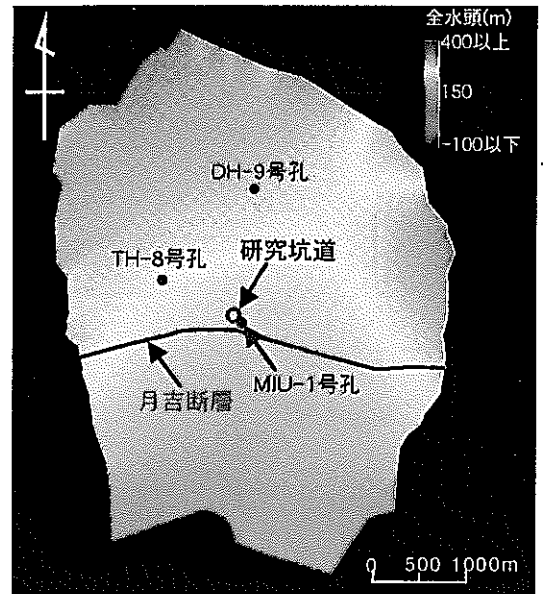


図27 定常解析による全水頭分布 (標高-758m水平断面)

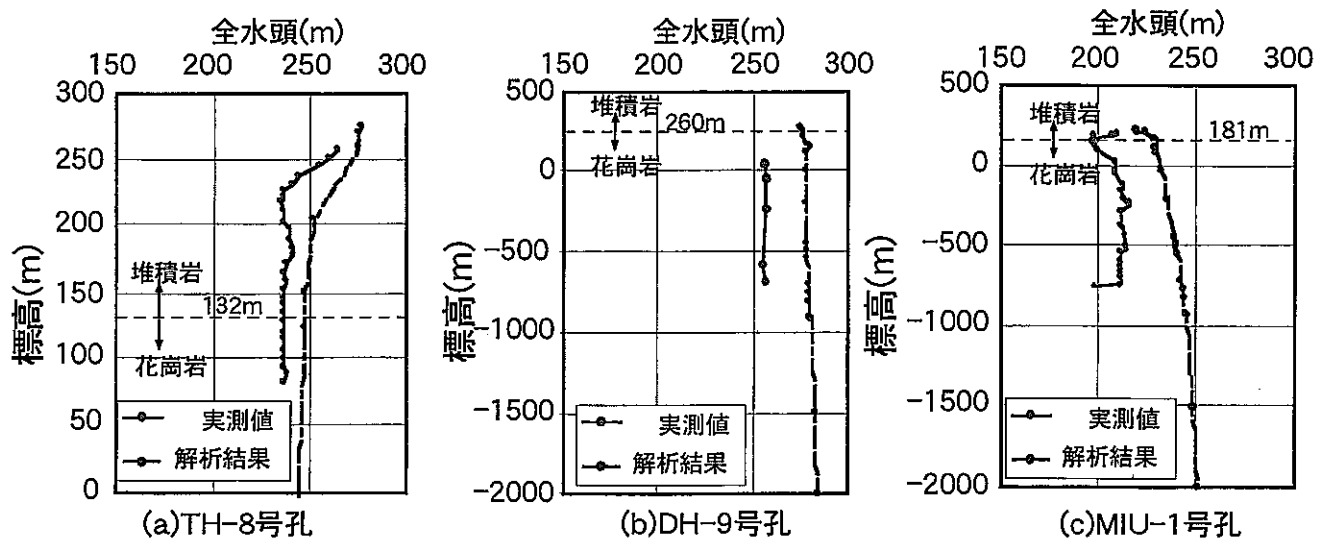


図26 実測値と解析結果の比較の一例

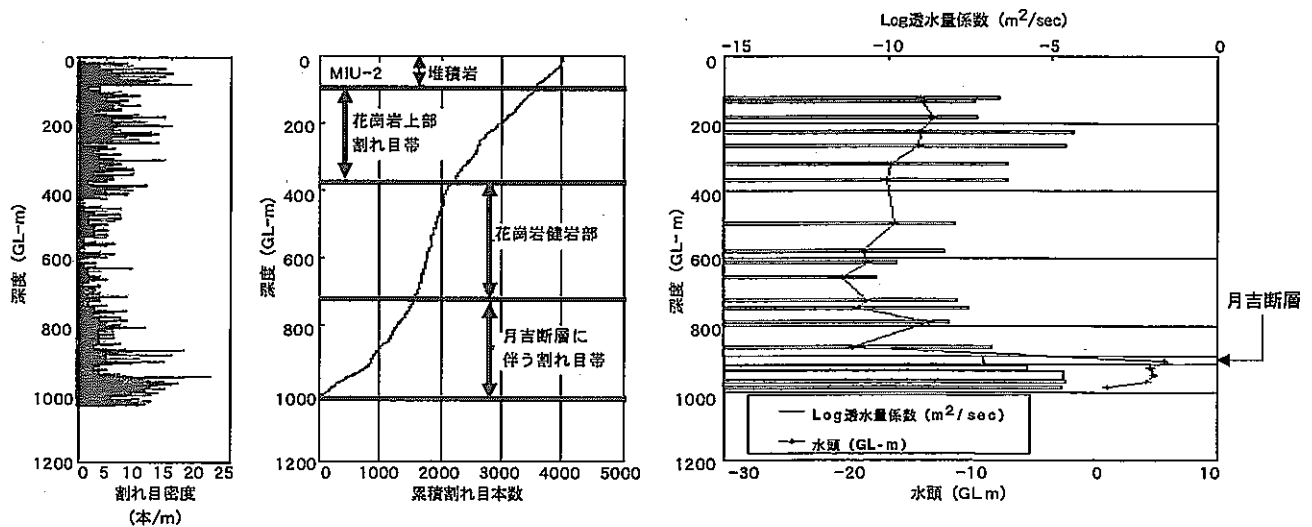
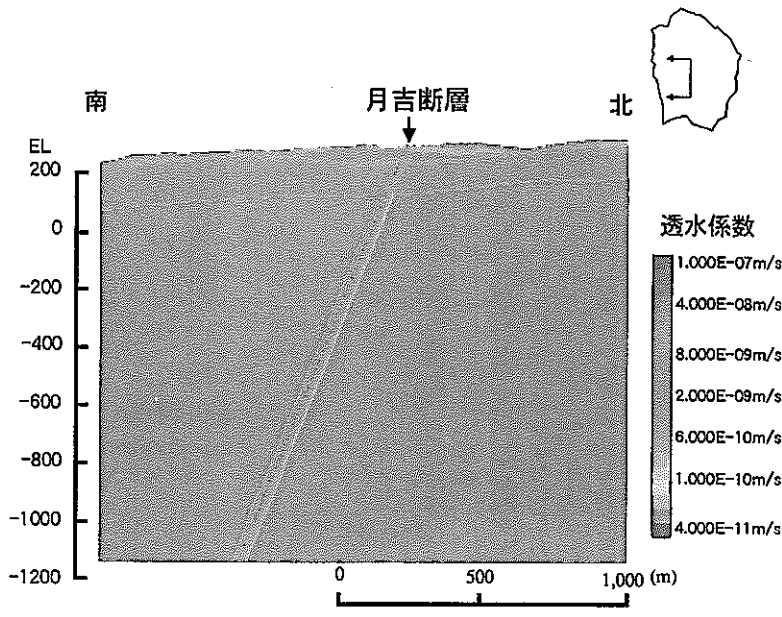
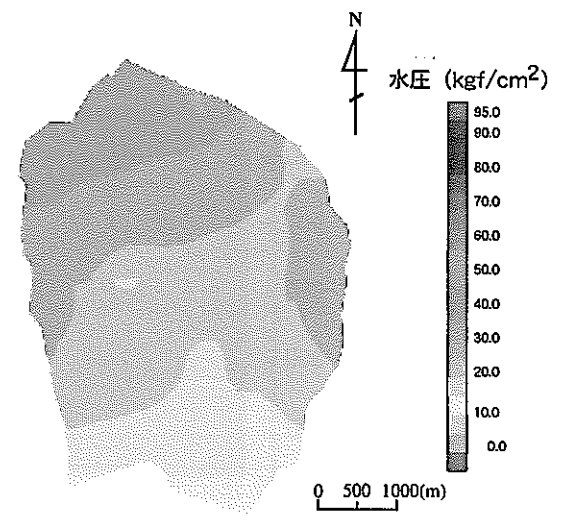


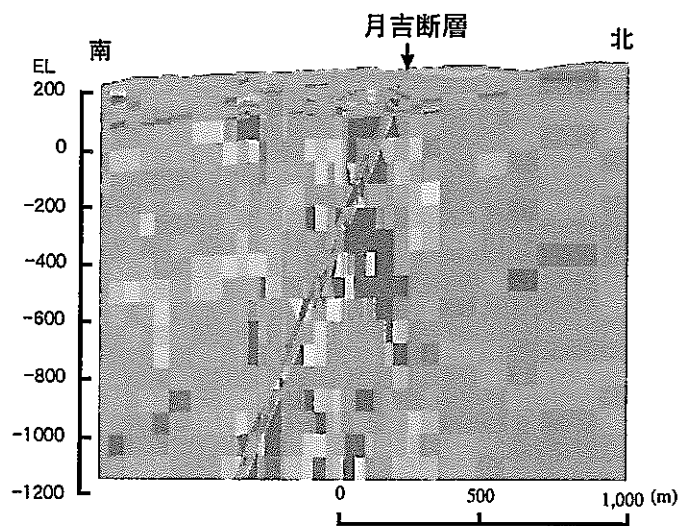
図28 累積割れ目本数と単孔水理試験結果の比較の例 (MIU-2号孔)



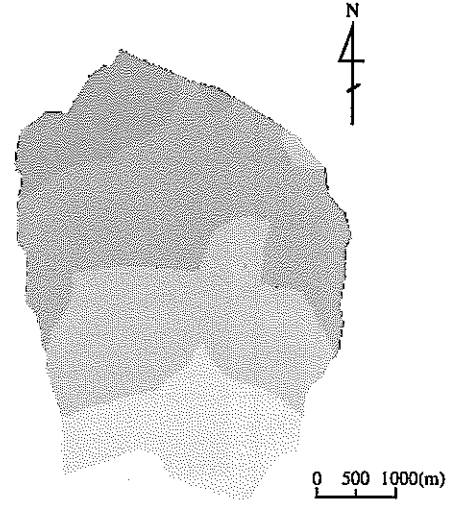
(a) 割れ目の分布を考慮しない均質なモデル



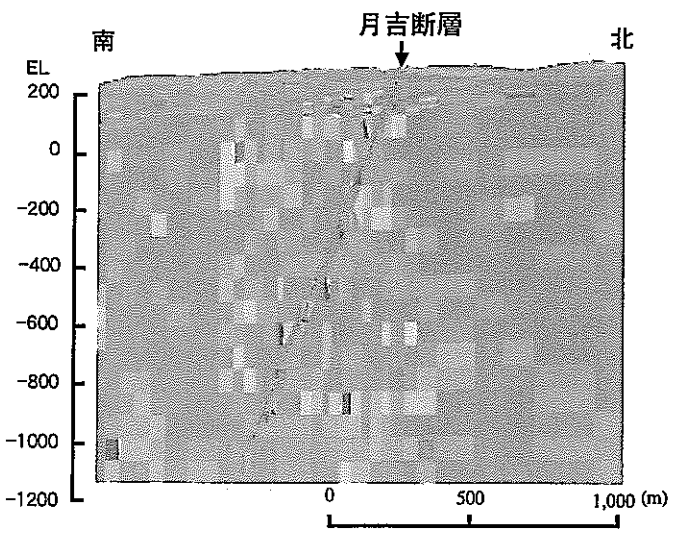
(a) 割れ目の分布を考慮しない均質なモデル



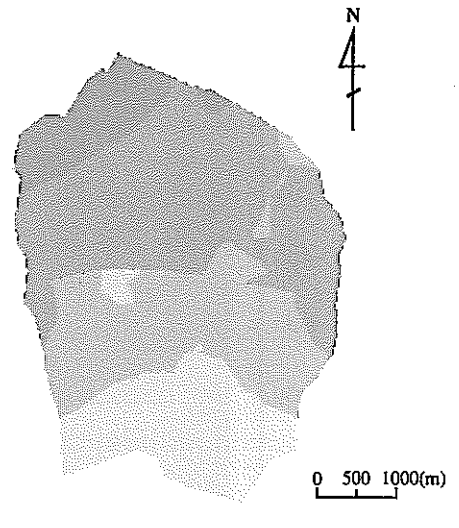
(b) 割れ目の分布を考慮したモデル (べき乗分布モデル)



(b) 割れ目の分布を考慮したモデル (べき乗分布モデル)



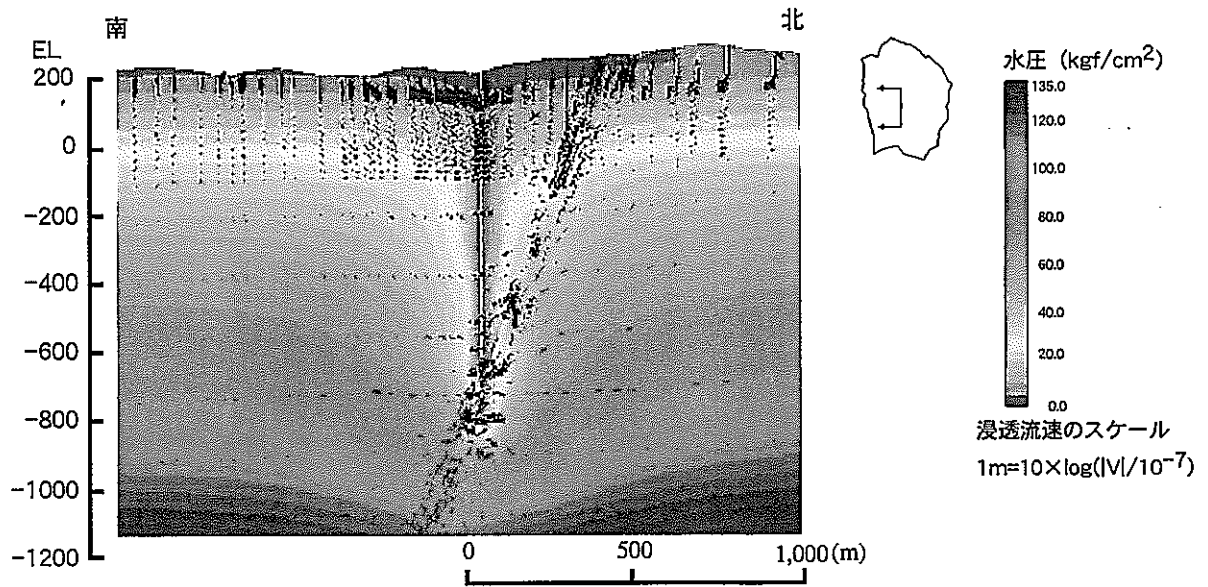
(c) 割れ目の分布を考慮したモデル (指数分布モデル)



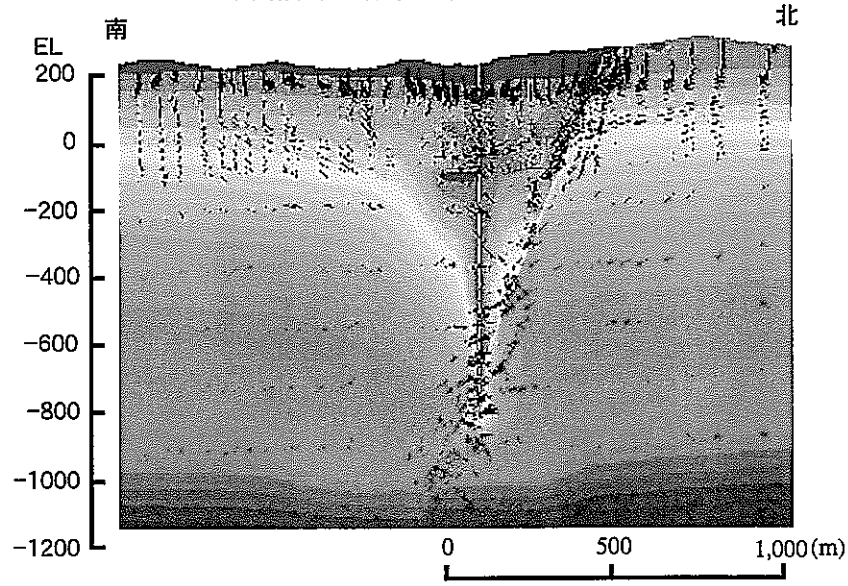
(c) 割れ目の分布を考慮したモデル (指数分布モデル)

図29 水理地質構造モデル

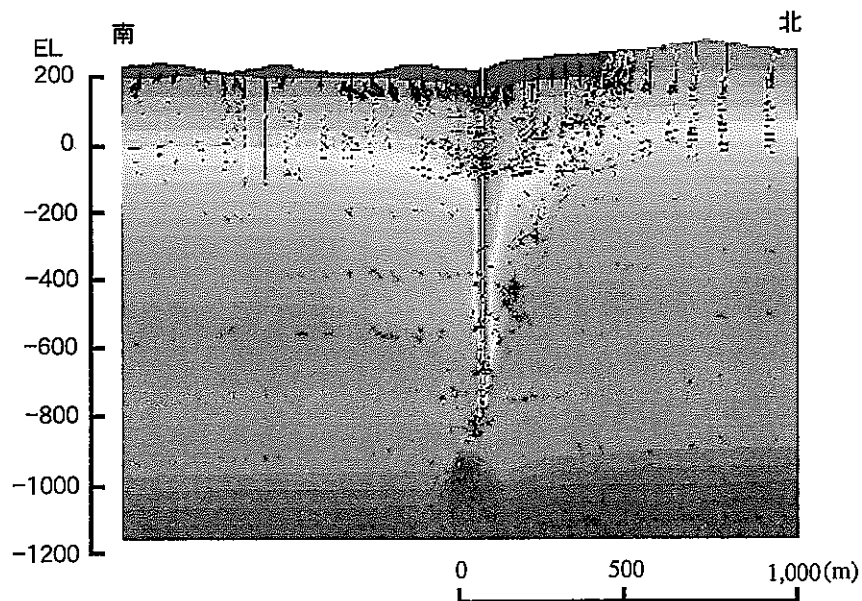
図30 水平面内水圧分布 (EL0m,土岐花崗岩上部割れ目帯相当深度)



(a) 割れ目の分布を考慮しない均質なモデル



(b) 割れ目の分布を考慮したモデル (べき乗分布モデル)



(c) 割れ目の分布を考慮したモデル (指数分布モデル)

図31 研究坑道が断層貫通後の水圧分布 (研究坑道を通る南北鉛直断面)

5. 地下水の地球化学に関する調査・研究

5. 1 目標

地表からの調査予測研究段階」における地下水の地球化学に関する研究の目標は以下の4項目にまとめられる（サイクル機構，1998）。

- ①研究実施領域の地表から地下深部までに分布する地質および地質構造要素（断層，破碎帯など）毎の地下水の地球化学特性に関するデータの取得。
- ②データの検討結果に基づく地下水の水質形成機構の解明，および地球化学モデルの構築と妥当性の検証。
- ③坑道の掘削に伴う地下水の地球化学的特性の変化の予測。
- ④地下水の地球化学特性を体系的に調査・解析する手法の開発。

5. 2 実施内容

平成11年度は，研究実施領域の試錐孔において地下水の採水・分析を行うことができなかったため，固相を対象とした地球化学調査を行うとともに，研究実施領域周辺で取得した地下水の地球化学特性の整理を行った。以下にその概要を示す。

5. 2. 1 地下水の採水・分析

「超深地層研究所計画 年度計画書（平成11年度）」（サイクル機構，2001）では，MIU-1,2号孔およびAN-1号孔にMPシステムを設置し，その採水機能を用いて採水・分析を行うこととしている。しかしながら，MIU-2,3号孔の試錐調査が平成11年度まで引き続き行われることになったため，MPシステムの設置はAN-1号孔のみ行った。MIU-1,2号孔およびAN-1号孔における採水・分析は，平成12年度以降，試錐調査の進捗状況を勘案し行うこととした。

5. 2. 2 固相を対象とした地球化学調査

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。

5. 2. 3 研究実施領域周辺の地下水の地球化学特性の整理

研究実施領域を包含する領域で行われている広域地下水流動研究においては，以下に示す知見が得られている。

- ①河川水の採取・分析を行った29地点において、水質は $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 型である（尾方ほか、1995）。このことは、瀬戸層群、瑞浪層群、土岐花崗岩浅部においては、 $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 型の地下水水質が想定すべき地下水水質の一つであることを示している。このことから研究実施領域内は降水系地下水（尾方ほか、1995）であることが示唆される。
- ②6本の試錐孔における地下水の採取・分析（合計20ポイント）および物理化学パラメータの測定により、花崗岩分布域における浅部（深度300m以浅）の地下水は $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 型で中性（pH7）かつ酸化性（ $\text{Eh}>0\text{mV}$ ）の地下水であるのに対し、深部（深度300m以深）では、 $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 型で弱アルカリ性（pH9）かつ還元性（ $\text{Eh}<-300\text{mV}$ ）の地下水へ変化していることが明らかとなった（図32、図33）（サイクル機構、1999b）。
- ③地下水中の微生物については、土岐花崗岩中の地下水および瑞浪層群中の地下水を利用して、全菌数の測定、特定微生物（硫酸還元菌、鉄酸化菌）分析を開始し、現在までに以下に示す知見が得られている。
- ・全菌数は $10^6\sim 10^7$ cell/mlの範囲であり、岩種や深度との明瞭な相関はない。
 - ・硫酸還元菌については、全く検出されない深度や 10^3 CFU/ml程度検出される深度がある。
 - ・鉄酸化菌については、ほとんどの深度において $10^4\sim 10^5$ cell/mlの範囲である。
- ④土岐花崗岩中の地下水水質は、黄鉄鉱の溶解、長石類の粘土鉱物化、方解石の溶解、地下水-粘土鉱物間のイオン交換反応により形成されている（サイクル機構、1999b）。
- ⑤土岐花崗岩中の地下水は水素・酸素安定同位体比測定結果から天水起源であることが明かとなっている。 ^{14}C 測定結果から、深度1,000mの地下水の滞留時間が1万年程度と推定されている。

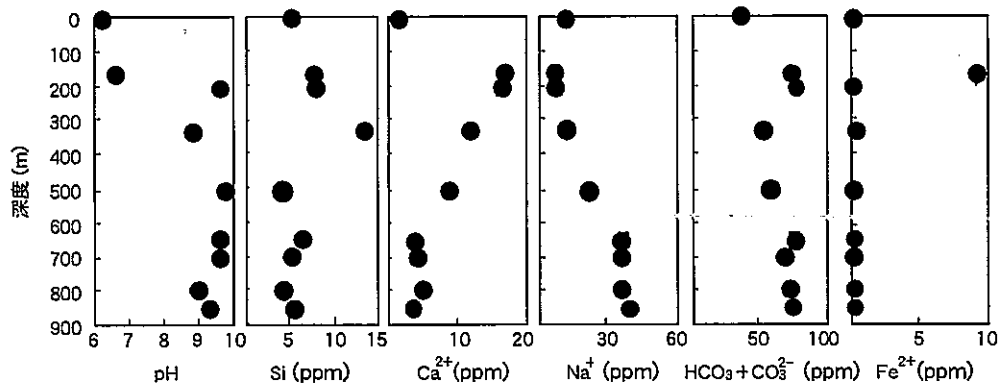


図32 東濃地域における花崗岩中の地下水の水質変化

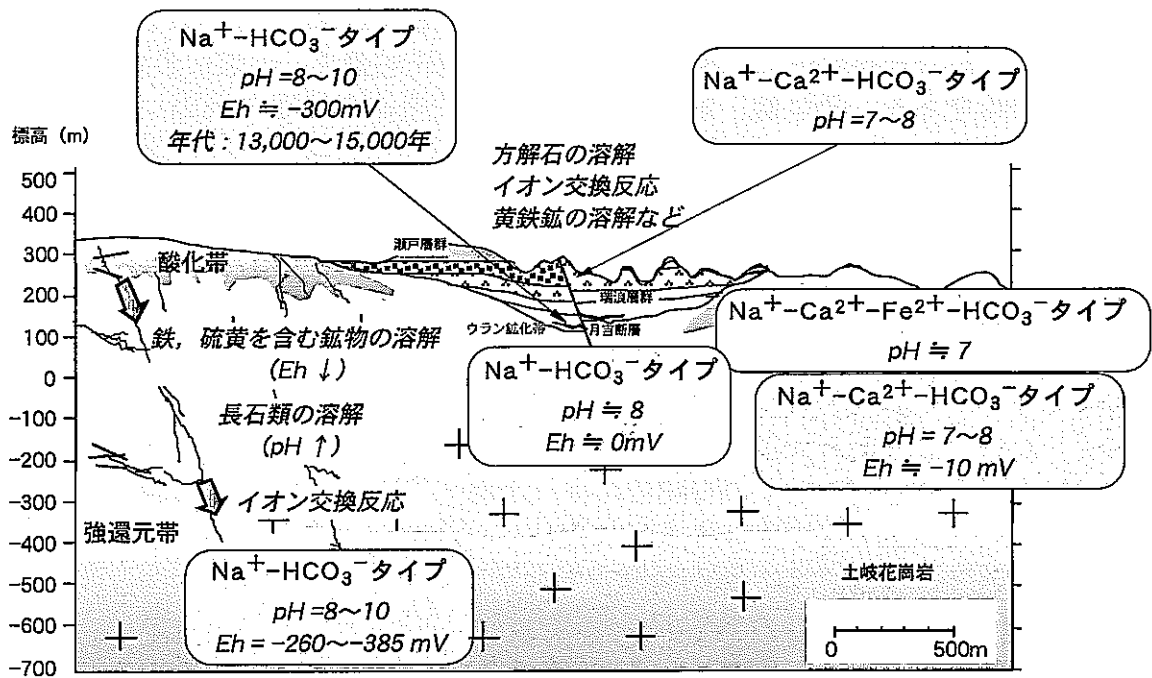


図33 東濃地域における深部地下水の地球化学的性質

6. 岩盤の力学特性に関する調査・研究

6. 1 目標

「地表からの調査予測研究段階」における岩盤の力学特性に関する研究の目標は以下の4項目にまとめられる(サイクル機構, 1998)。

- ①研究実施領域の地表から地下深部までの岩盤の力学特性に関するデータの取得。
- ②データの検討結果に基づく、初期応力状態の把握と岩盤力学モデルの構築と妥当性の検証。
- ③坑道の掘削に伴う坑道周辺岩盤の力学的安全性の変化の予測。
- ④岩盤の力学特性を体系的に調査・解析する手法の開発。

6. 2 実施内容

MIU-3号孔を対象に、岩芯を用いた物性試験(物理試験, 力学試験), 初期応力測定を行うとともに、平成10年度から引き続き、MIU-2号孔の岩芯を用いて物理試験および力学試験を行った。また、AN-1号孔およびMIU-1号孔のデータを用いて、力学特性や初期応力の異なるゾーンに区分することを試みた。

室内物性試験は、岩石コアを用いて実施した。試験項目は、物理物性については、見かけ比重、有効間隙率、自然含水比、弾性波速度(P,S波)などである。力学物性に関しては、静弾性係数(E_{50})、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。その他、岩石の熱特性試験や帯磁率測定も実施した。すべての試験は、ISRM指針あるいはJIS規格にのっとって実施した。初期応力は、水圧破碎法により水平面内の主応力値および方向を、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することとした。水圧破碎法を採用した理由は、地表～地下1,000m地点までの応力状態を計測する手法が同手法以外にないことと、既存の研究事例(Yin and Cornet, 1995; Brudy and Zobak, 1993)から鉛直方向が主応力方向の一つとみなせる可能性があるためである。AE法による鉛直応力の測定は、地表～深度1,000mまでの範囲の鉛直応力分布と、一般に行われる単位体積重量から推定される土被り圧との関係を確認するために実施した。なお、AE法による鉛直応力測定では、カイザー効果の時間依存性(小島・松木, 1994)を考慮し、コア採取後5日以内に試験を完了するようにした。

MIU-2号孔の調査では、室内試験のサンプリング位置および初期応力測定深度は、AN-1号孔およびMIU-1号孔における調査結果の評価により区分した三つのゾーン(「6.3 モデルの構築」参照)の妥当性の検討および月吉断層下盤の岩体の力学特性の把握を念頭において設定した。MIU-2号孔における物性試験の数量は、MIU-1号孔の調査と同様100mピッチとした。これは、AN-1号孔とMIU-1号孔の割れ目数や物性値の深度方向の分布傾向が異なっており、両孔間の原位置岩盤の力学特性の分布が南北方向に連続しない可能性があったため、MIU-1号孔と同様、網羅的に情報を取得することとした。試験項目は、AN-1号孔およびMIU-1号孔の測定

結果との比較の観点から、AN-1 号孔および MIU-1 号孔と同様、物理試験（見かけ比重、有効間隙率、含水比、弾性波速度）と力学試験（一軸圧縮試験、圧裂試験、三軸圧縮試験）を行った。また、MIU-2 号孔は、月吉断層と交差することが想定されていたため、初期応力測定（AE/DRA 試験、水圧破碎試験）についても断層上盤側と下盤側の両方で実施することを計画していた。しかし、MIU-2 号孔の断層下盤側の領域は既存割れ目が非常に多く、水圧破碎法によって有意な測定結果を得られると判断される測定ポイントを設定できなかつたため、ここでは実施していない。

MIU-3 号孔では、MIU-2 号孔までの調査により得られた物理特性および力学特性の確認、断層下盤側の岩体の物理特性および力学特性の把握を主眼として調査を実施した。MIU-3 号孔における調査項目についても、AN-1 号孔、MIU-1 号孔および MIU-2 号孔で得られた試験結果との比較の観点から、AN-1 号孔、MIU-1 号孔および MIU-2 号孔と同様、物理試験（見かけ比重、有効間隙率、含水比、弾性波速度）、力学試験（一軸圧縮試験、圧裂試験、三軸圧縮試験）および初期応力測定（AE/DRA 試験、水圧破碎試験）とした。しかし、月吉断層上盤側の岩体については、AN-1～MIU-2 号孔の調査までである程度の情報が得られていたことなどから、これまでの調査に比べ数量を減じた。

6. 2. 1 MIU-2 号孔における物性試験および初期応力測定

図 34 に MIU-2 号孔における室内物性試験結果（物理試験、力学試験）を示す。AN-1 号孔および MIU-1 号孔の結果と同様、物性値の深度方向の分布は一様ではない。図 35 は、MIU-2 号孔における水圧破碎法による初期応力測定結果を示したものである。応力値の深度分布は、AN-1 号孔と同様深度方向に不連続的な変化を示している。とくに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傾向を示す。

6. 2. 2 MIU-3 号孔における物性試験および初期応力測定

図 34 に、MIU-3 号孔における物性試験結果を示す。試験点数は少ないものの、これまでの AN-1、MIU-1 および MIU-2 号孔における結果と同様に、深度方向に物性値の分布は一様ではない。水圧破碎法による初期応力測定結果では、応力値については深度 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（図 35）。とくに、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。

6. 2. 3 モデルの構築 (サイクル機構, 1999b)

本調査の対象は、土岐花崗岩と呼ばれる結晶質岩であり、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。また、調査領域には、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あるとして想定された。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、調査領域の岩盤のモデル化を進めるという観点から、本調査においては、AN-1 から MIU-3 号孔に至る試錐孔ごとに調査結果を分析・整理し、岩盤力学的概念モデルの構築・更新を行うアプローチを採用している。

平成 11 年度は、これまでに試験が行われた AN-1 号孔および MIU-1 号孔のデータを用いてゾーン区分を試みた。なお、これらの知見は、平成 11 年度にかけて引き続き行われた MIU-2 号孔および MIU-3 号孔の調査の計画にも反映されている。

図 36 に BTV 観察で得られた AN-1 号孔および MIU-1 号孔における地表～地下 1,000m までの割れ目数の深度分布を 50m 間隔ごとに示す。この結果を見ると、深度 300m 程度および 700m 程度の地点から割れ目数の増減傾向の変化が認められる。また、それぞれの領域内の割れ目の卓越方向分布も異なっている。上記の結果および室内物性試験結果と対象岩盤が不連続性岩盤であることを考慮すると、原位置岩盤の力学物性もそれぞれの領域で異なる可能性が高いと判断した。また、初期応力測定結果においても割れ目数の変化が生じる地点付近で最大主応力方向の回転や応力値の不連続な変化が認められることから、調査領域の土岐花崗岩における岩盤力学的な概念モデルとして、地表～地下 1,000m の範囲で三つの異なる力学物性や応力状態を有するゾーンに区分することができた。

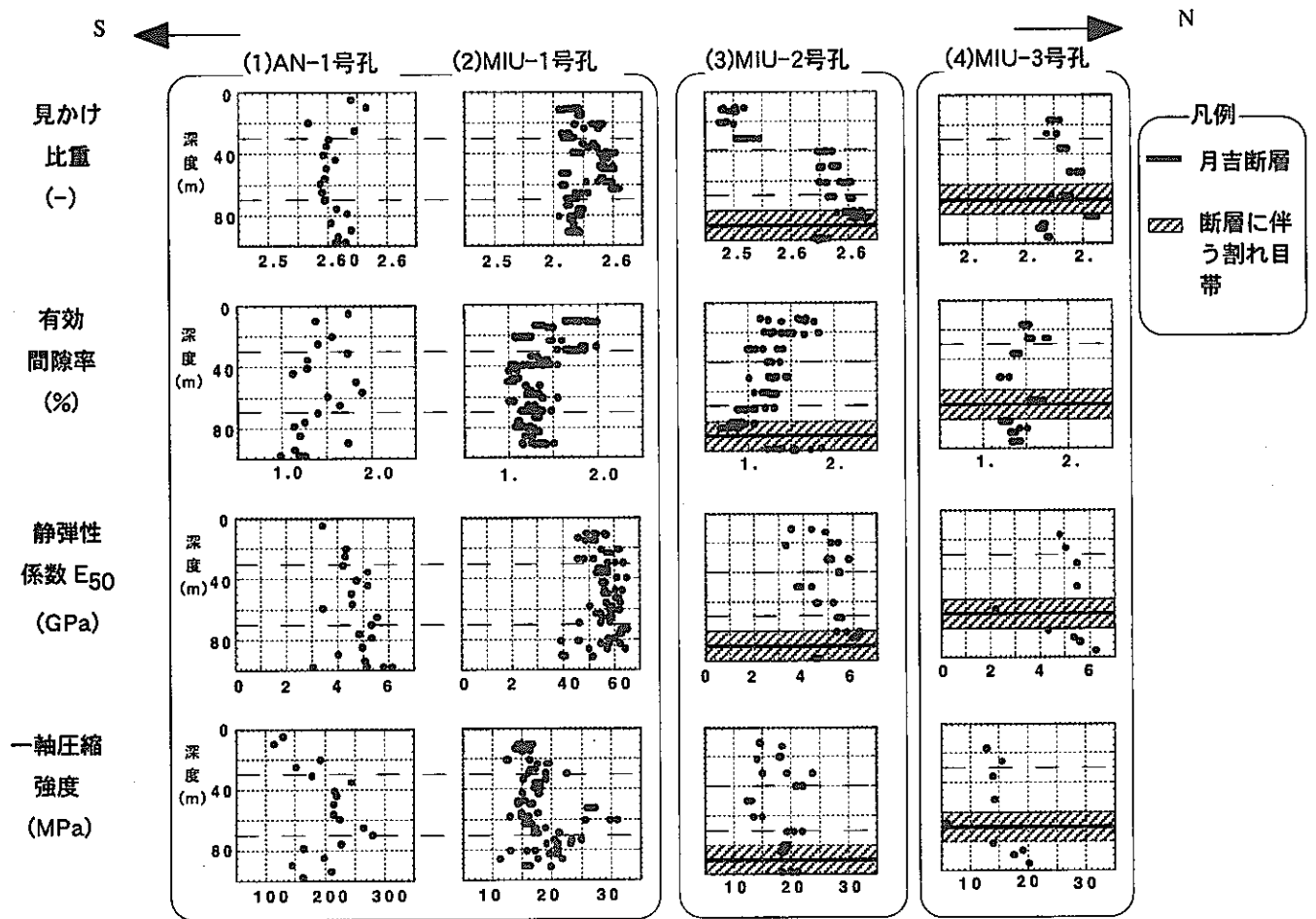


図34 各試錐孔における室内物性試験結果

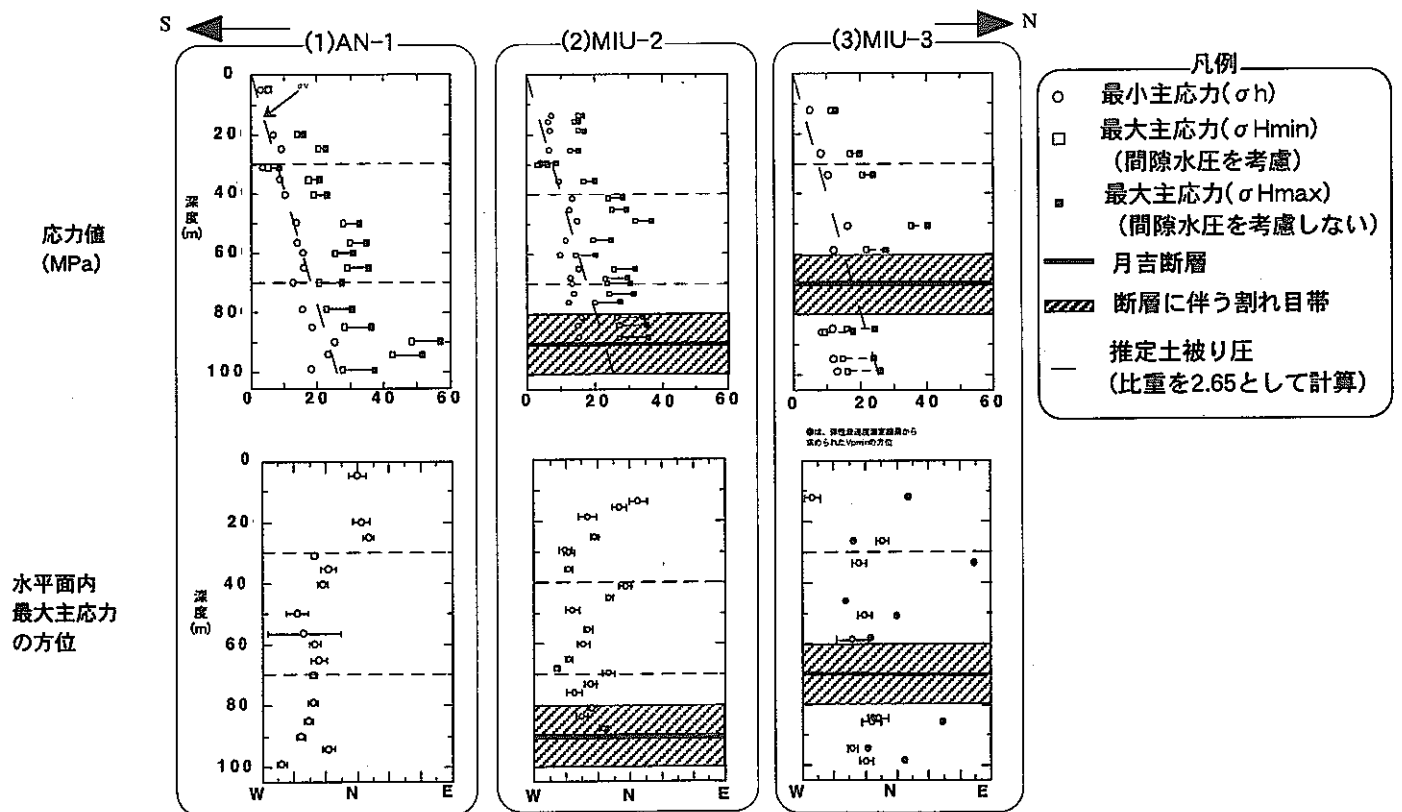


図35 各試錐孔における水圧破砕法による初期応力測定結果

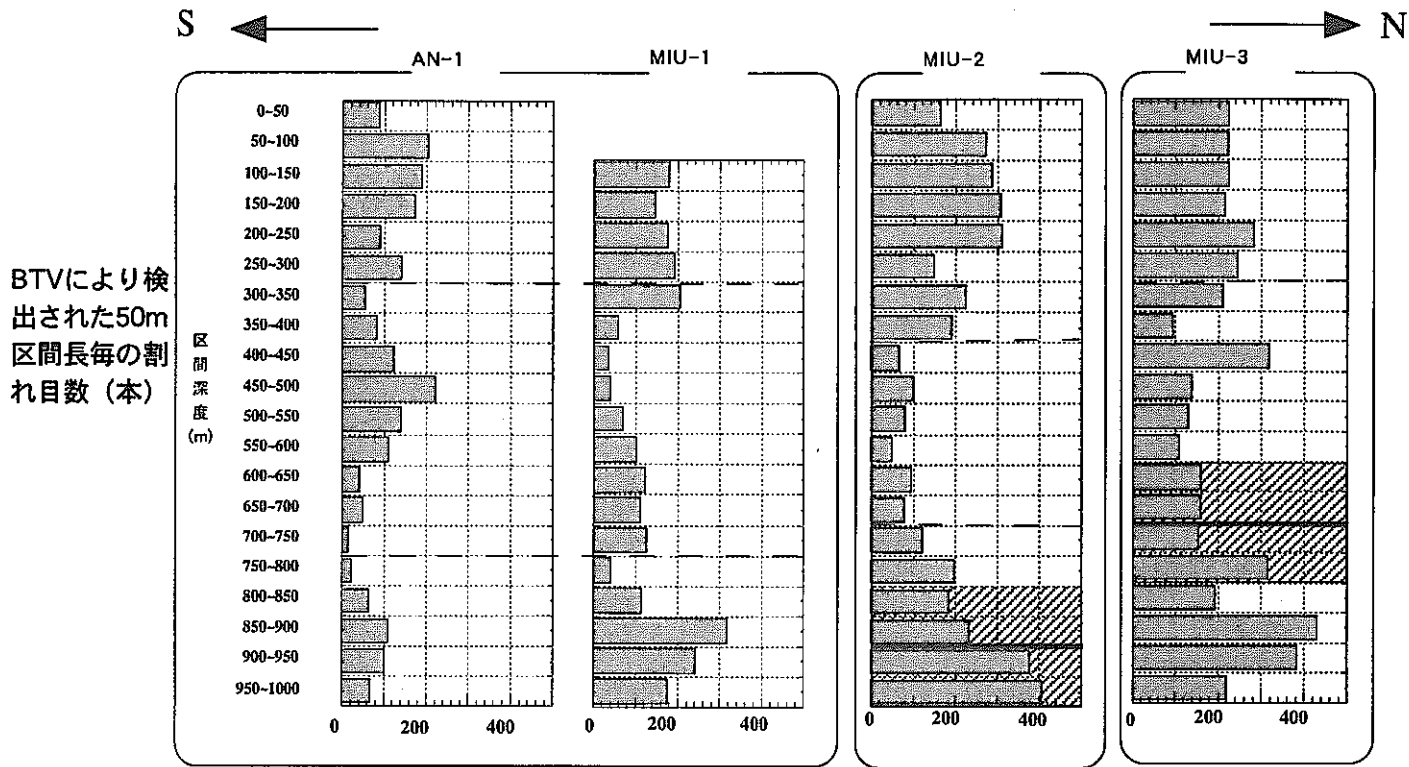


図36 各試錐孔における割れ目本数 (50m区間毎)

7. 調査技術・調査機器の開発

7. 1 目標

地表からの調査予測研究段階における調査技術・調査機器の開発の目標は、以下の二つにまとめられる（サイクル機構，1998）。

- ①各研究分野で必要とされる調査技術・調査機器の開発および改良。
- ②調査に適用された調査技術・調査機器の体系化。

7. 2 実施内容

東濃地科学センターがこれまで開発してきた調査技術・調査機器を含めた既存の調査技術・調査機器を適用し、適用された調査技術・調査機器の実績（データの精度や調査機器の信頼性など）が各研究分野からの要求に達しない場合、それらの改良・高度化を図った。また、坑道の掘削を伴う研究段階以降に必要な調査手法の開発を行った。

7. 2. 1 試錐掘削技術開発

(1) 部分保孔装置の開発

部分的な孔内崩壊に対応するため、部分保孔装置の開発を行った。部分保孔装置は、部分拡孔用ビット、部分ケーシングおよび部分ケーシング挿入装置から構成され、掘削中の試錐孔の崩壊および掘削後の調査における崩壊に対する保孔技術として適用できるものである。

具体的には、平成10年度に実施した部分ケーシングおよび挿入装置と、これまで適用試験を重ねてきた部分拡孔用ビットを併せて試錐現場での適用試験を実施した。部分ケーシングをボーリング孔内に設置し、ボアホールテレビで設置状況を確認したところ、部分ケーシングの下端が孔の内側に曲がり、適切に岩盤に装着されていないことが確認された。今後、その原因と考えられる、ケーシング挿入装置から部分ケーシングを切断する方法（ケーシング挿入装置に下側に負荷をかけて部分ケーシングを切断）などの改良が必要となる。

(2) リバース三重管ワイヤライン工法の開発

岩盤本来の透水性や地下水の地球化学特性を極力乱さずに試錐孔を掘削するためには、試錐孔の掘削の際に清水を利用することが望ましいが、その場合は泥水を使用する場合に比べ孔内崩壊が発生しやすい。その解決のために、清水とスライムの両方をロッド内に通すことにより、これらの孔壁との接触を防ぎ、孔壁の崩壊を最小限にとどめるリバース式三重管ワイヤライン工法の開発を行った。

平成11年度においては、これまで実施した詳細設計をもとに、試錐掘削の周辺設備も含めた一連のシステムとしての設計を行った。

7. 2. 2 地質構造調査技術開発

(1) 弾性波トモグラフィー調査技術開発

地下深部での不連続面の広がり把握するために、深度約 1,000m の試錐孔を用いた弾性波トモグラフィー調査技術を開発している。本開発は、試錐孔（発振孔）への影響の少ない孔内振源（非破壊振源：スパーカー）の開発とデータ解析技術開発からなる。

平成 11 年度は、MIU-1 号孔および MIU-2 号孔を用いて、深度 1,000m までを対象とした適用試験を実施した。また、データ解析技術開発として、分解能の向上を目的としたフルウェーブインバージョンと呼ばれるデータ解析手法の開発を行った。具体的な実施内容は、以下のとおりである。

1) 適用試験

地下深部での不連続面の広がり把握するために、深度 1,000m 程度の試錐孔を利用した、弾性波トモグラフィー調査技術を開発する。本開発は、適用試験を含む孔内振源（非破壊振源）の開発とデータ解析技術開発からなる。本年度は、既設試錐孔 MIU-1,2 号孔を用いて、昨年度に引き続き試錐孔（発振孔）への影響の少ない非破壊振源（スパーカー）の適用試験を実施した。表 4 にデータ取得仕様を昨年度の適用試験（AN-1,3 号孔を使用）のそれと合わせて示す。昨年度の適用試験とのおもな違いは孔間距離とデータ取得深度である。

土岐花崗岩を対象とした適用試験の結果、以下のことが明らかになった。

- ・孔間距離を約 100m、深度 1,000m を対象として本スパーカーを用いてトモグラフィーデータを取得することができた。
- ・前回の適用試験のデータから、本スパーカーによる一回の発振で、初動 P 波をノイズから分離抽出できる距離は約 260m と見積もった。しかし、今回の適用試験では観測されるノイズが大きく、一回の発振で初動 P 波を認識できる距離は 150m 程度であった。
- ・初動 P 波を認識できる距離の限界について複数回の発振によるスタッキング（データの重ね合わせ）試験を実施した結果、S/N 比が向上する（初動 P 波が認識しやすくなる）スタッキングの効果が確認できた。図 37 は 32 回のスタッキングで初動 P 波が認識できた例である（振源と受振点の距離は約 240m）。

また、取得データから初動 P 波の伝播時間を読み取って初動走時トモグラフィー解析を実施した。図 38 は、P 波速度構造解析結果である。解析グリッドの大きさは 2.5m（水平方向）×3m（深度方向）である。深度 850m 付近を境にして比較的高速度（P 波速度は 5.3km/sec 程度）の上部（浅部）領域と低速度（P 波速度は 4.9km/sec 程度）を示す領域に分かれており、速度検層結果と同様の傾向が認められる。MIU-2 号孔の深度 900m 付近で試錐孔と交差していると思われる月吉断層については、本解析断面上では、周辺岩盤と明瞭な速度コントラストを有する構造としては認められなかった。

表4 トモグラフィーデータ取得仕様

	平成 10 年度適用試験 (AN-1,3 号孔)	平成 11 年度適用試験 (MIU-1,2 号孔)
孔間距離	約 36m	約 95m
データ取得深度	30m ~ 364m	762m ~ 1,000m (発振) 762.5m ~ 1,000m (受振)
起振点間隔/起振点数	1m/335 点 (AN-1)	2m/120 点 (MIU-2)
受振点間隔/受振点数	2m/168 点 (AN-3)	2.5m/96 点 (MIU-1)
取得データ数	56,280 (335×168)	11,520 (120×96)
データ記録長	192msec	256msec
データサンプリング間隔	0.125msec	0.125msec

2) データ解析技術の開発

弾性波トモグラフィー調査において、現在実用化され広く用いられている調査方法は、上述の適用試験（データ取得）ならびにデータ解析のように初動 P 波の伝播時間を測定して調査領域の P 波速度分布を再構成する初動走時トモグラフィーである。一方、さらに高分解能な調査（解析）手法として受振波形全体をデータとして用いるフルウェーブインバージョン解析が研究段階にある。この解析手法の理論ならびに数値実験による解析例は報告されているが、現場で取得された実データに適用された例は極めて少ない。

そこで、弾性波トモグラフィーデータ解析技術の開発として、フルウェーブインバージョン解析の実データへの適用性に関する研究を実施した。解析対象としたデータは昨年度にスパーカーの適用試験として AN-1,3 号孔を利用して取得したデータである。

実施内容は主に以下の 3 項目である。

- ・一連の解析コードの妥当性を検証するための数値シミュレーション
- ・フルウェーブインバージョン解析を実データに適用するために必要な実データの前処理に関する検討
- ・フルウェーブインバージョン解析の実施ならびに課題の抽出

図 39 にフルウェーブインバージョンによる解析結果を示す。解析グリッドの大きさは 25cm×25cm であり、一般的に数 m 程度と考えられる従来の初動走時トモグラフィーと比較して高分解能の解析結果が得られている。深度方向の速度変化について速度検層結果と同様の傾向が認められたが、水平に近い送受信ペアのデータ以外はノイズが大きく、解析に使用することができなかつたため、水平層的な構造を有する解析結果となった。今後、フルウェーブインバージョン解析ではノイズに対する適用限界を検討するとともに、フルウェーブインバージョン解析方法の改良の可能性についても検討していく必要がある。

7. 2. 3 地下水の水理特性調査技術開発

(1) 1,000m 対応水理試験装置の改良・高度化

平成 10 年度に、地表から地下深部までの水理特性（間隙水圧，透水係数）に関する信頼性の高いデータを取得するために、高温環境や屈曲孔に対応させるために水理試験装置のプロトタイプを改良している。

平成 11 年度は、この水理試験装置により取得されるデータの解析プログラムで使用されている単位系をすべて SI 単位系に変更した。この変更をした装置は、1,000m 対応水理試験装置 3 機種・5 セットである。今後は、必要に応じてさらに深部・高温への対応のための改良を検討する。

7. 2. 4 地下水の地球化学特性調査技術開発

(1) 1,000m 対応地下水の地球化学特性調査機器の改良・高度化

地表から地下深部までの地下水の地球化学特性に関する信頼性の高いデータを取得するため、地球化学特性調査機器（プロトタイプ）が既に開発されている。本調査機器は採水機能（連続採水，被圧不活性状態の採水）と地球化学検層（pH，電気伝導度，酸化還元電位，硫化物イオン濃度，水温）の機能を有する各ユニットから構成される。

プロトタイプの開発技術をもとに、地下 1,000m での地温（50℃から 70℃）に対応させ、かつ機動性や操作性を向上させた高温環境型の地球化学調査機器を平成 10 年度までに製作し、運用を開始した。また、既存のプロトタイプ調査機器（1 号機）を屈曲孔に対応させるために、フレキシブルジョイントを加えるなどの改良を行った。

平成 11 年度には、制御・データ管理プログラムを SI 単位に対応するよう変更した。今後必要に応じてさらに深部・高温への対応のための改良を検討する。

7. 2. 5 岩盤の力学特性調査技術開発

(1) 1,000m 対応初期応力測定装置の開発

1) 目的

岩盤の初期応力は地質環境のデータのひとつであるとともに、超深地層研究所計画の地下施設的设计の最適化や安定性の評価あるいは坑道掘削による影響を数値解析で評価する際の境界条件として不可欠である。

一般に用いられている初期応力測定手法は、水圧破碎法や応力解放法などの試錐孔を利用する方法と、AE 法や DRA 法などのコアを利用する方法がある。それぞれの手法は実用段階から研究開発段階までの様々なレベルにあるとともに、測定・解析するうえでの制約条件があること、さらには、適用深度についても制限がある。このため、深度 1,000 m における三次元初期応力を求めることができる信頼性の高い方法は現状では存在しない。

上記のような状況を踏まえて、本研究では深度 1,000 m を対象として三次元初期

応力を測定する手法を確立することを目的とし、平成8年度と9年度は、国内外の研究事例を対象とした文献調査、調査結果に基づく手法の選定、装置の概念設計および技術的な課題について検討した（佐藤・加藤，1998）。平成10年度は、装置の設計を行った。平成11年度は装置のうちひずみゲージセルと耐圧容器を製作した。

2) 実施内容

製作した装置はひずみゲージセルと耐圧容器である。また、製作したひずみゲージセルを用いて耐圧性能試験を実施した。各部材の仕様、製作方法および耐圧性能試験の結果を以下に示す。

(a) ひずみゲージセル

ひずみゲージセルは、応力解放に伴う孔壁のひずみを計測するためのひずみゲージを格納するとともに、計測されたひずみの温度補正のために温度計を装備する。また、孔壁に接着するための接着材を格納する。ひずみゲージ、温度計およびセルの仕様は以下のとおりである。

(7) ひずみゲージ

- ・形式：共和電業（株）製 120Ω 3線式
- ・寸法：ゲージ長さ 5 mm, ベース直径 11 mm
- ・温度保証範囲：10～100 °C
- ・ひずみ限界：約 5 %（室温）

(4) 温度計

- ・形式：共和電業（株）製 50Ω
- ・測定範囲：-196～+180 °C
- ・分解能：±0.01 °C

(7) セル

- ・材質：エポキシ樹脂（ナガセエレクトクス（株）製）

製作したひずみゲージセルの写真を図 40(1)に示す。

(b) 耐圧容器

耐圧容器はレコーダー、電池および方位・傾斜測定装置を格納する。仕様は以下のとおりである。

- ・寸法：直径 45mm, 全長 866mm
- ・材質：ステンレス鋼（SUS304）

耐圧容器の製作はステンレス鋼（SUS304）を用いて旋盤加工することによって行った。製作した耐圧容器の写真を図 40(2)に示す。

(c) ひずみゲージセルの耐圧性能試験

上記(a)で製作したひずみゲージセルの耐圧性能試験を実施した。地下 1,000m における地下水圧に相当する 10MPa の封圧を作用させた場合のひずみの変化を確認することが試験の目的である。

ひずみゲージセルを材料試験用の耐圧容器内にセットし、油圧を作用させ、ひず

みゲージの出力を記録した（図 40(3)）。その結果、以下のことが分かった。

- ・ 9 枚のひずみゲージ間のばらつきは極めて小さい（最大でも 20μ であり、これは最大出力の 3%程度である）。
- ・ ひずみゲージの方向の違いによる差は認められず、理論どおりである。
- ・ 封圧に対するひずみの変化は直線的である。
- ・ 封圧の载荷に伴う温度ゲージの変化は $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下である。
- ・ 繰り返し载荷に伴い残留ひずみが生じるが、 10μ 以下である。
- ・ ひずみゲージセルの弾性係数は 15 GPa 程度であり、花崗岩の平均的な弾性係数の 25~50 %程度の値を示す。

以上の結果より、ひずみゲージセルの完成度は高く、実際の使用にあたっては、ひずみ間の補正が不要と判断できる。

3) 今後の予定

平成 12 年度は残る装置（方位・傾斜測定装置およびレコーダー）を製作し、機能確認試験を実施する。

7. 2. 6 坑道の掘削を伴う調査研究段階（第 2 段階以降に必要となる調査技術・調査機器の開発

(1) 連続波レーダー調査技術開発

一般に、レーダートモグラフィ調査が適用されるスケール（試錐孔の孔間距離）は、数十 m 程度までであるが、送信・受信信号に連続波を採用することにより、とくに花崗岩などの結晶質岩を対象とした場合は比抵抗が大きくエネルギーの損失が少ないため、孔間距離を広げられる可能性がある。釜石鉱山などで適用実績のあるポアホールレーダー調査技術の高度化として、調査深度の拡大と分解能の向上を図ることを目的とした、連続波レーダー調査法の技術開発を実施した。

連続波レーダー開発はアクロスの技術を応用して、従来のレーダー探査より格段に高い空間分解能と格段に大きな探査距離の両立を目標としている。

平成 10 年度、連続波レーダー実験機を製作した。平成 11 年度は、地表付近の不均質性の把握、および、大地の誘電率の周波数依存性把握ツールとしての利用の観点から、実験機のアンテナ 3 種（対象周波数帯域：1~5MHz, 5~50MHz, 50~200MHz）について、空気中での入力インピーダンス測定および水上での入力インピーダンス測定（水の誘電率の周波数依存性測定）を実施し、アンテナと媒質の合成インピーダンスに関する基礎データを取得した。

(2) 試錐孔を利用した長期モニタリング装置の開発

地下水位などの観測を行う MP システムは、第 2 段階での立坑掘削や大規模な揚水試験によって発生する高差圧環境における観測性能を有していない。そのため、このような高差圧環境に対応した長期モニタリング装置を平成 5 年度より開発している。

平成 11 年度は、昨年度製作した機器を用いて、深度 200m までの適用試験を実施した。

適用試験を行った結果、概ね正常に作動することが確認できた。ただし、深度検出装置にノイズが発生し（チャタリング）、正確に測定ポートの深度への接続が出来ない場合があった。ノイズ発生の原因はケーシング内の油汚れが主であることが判明したため、ケーシング内面を有機溶剤で洗浄した結果、チャタリングの発生をほぼ抑えることができた。この適用試験により、当機器の実用性を確認し、必要に応じていつでも実用化できる段階に達した。

7. 2. 7 地質環境データ解析・可視化システムの構築

本計画によりもたらされる地質環境に関するデータに基づいて地質構造をモデル化し、さらに、地質構造や地下水の流動現象などの地質環境データを解析し、その結果を三次元的に可視化できる計算機システムを開発することは、分野の異なる研究者間の認識の共有化を図ることのみならず、専門家以外への情報提供にも重要な手段となる。平成 10 年度までに、これらの地質環境データ解析および可視化システムは本計画および広域地下水流動研究における各地質環境モデル構築に利用されており、また、飽和不飽和浸透流解析が可能なシステムへと拡張するための検討を行ってきている。

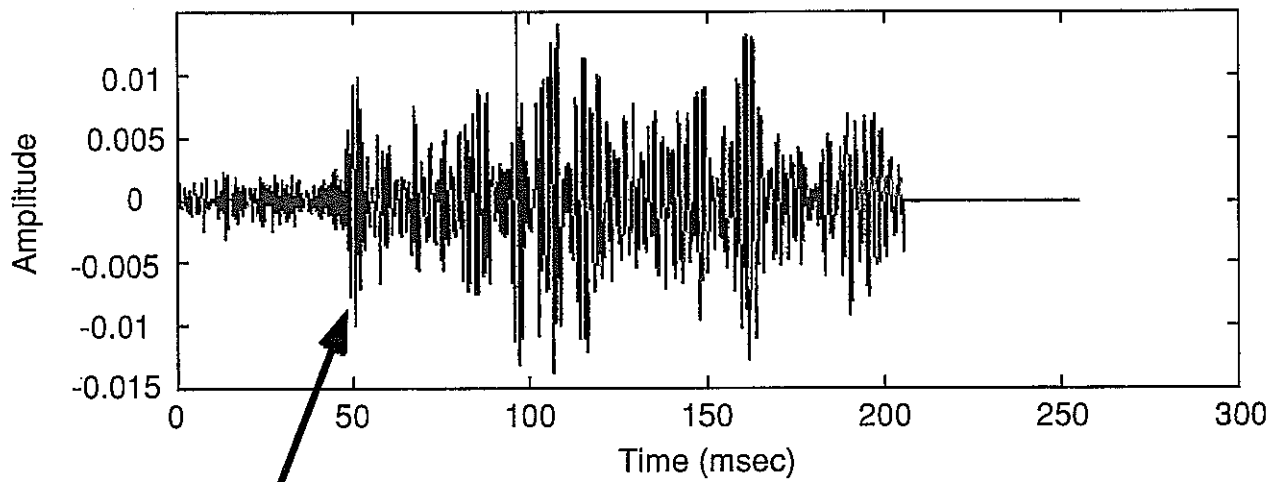
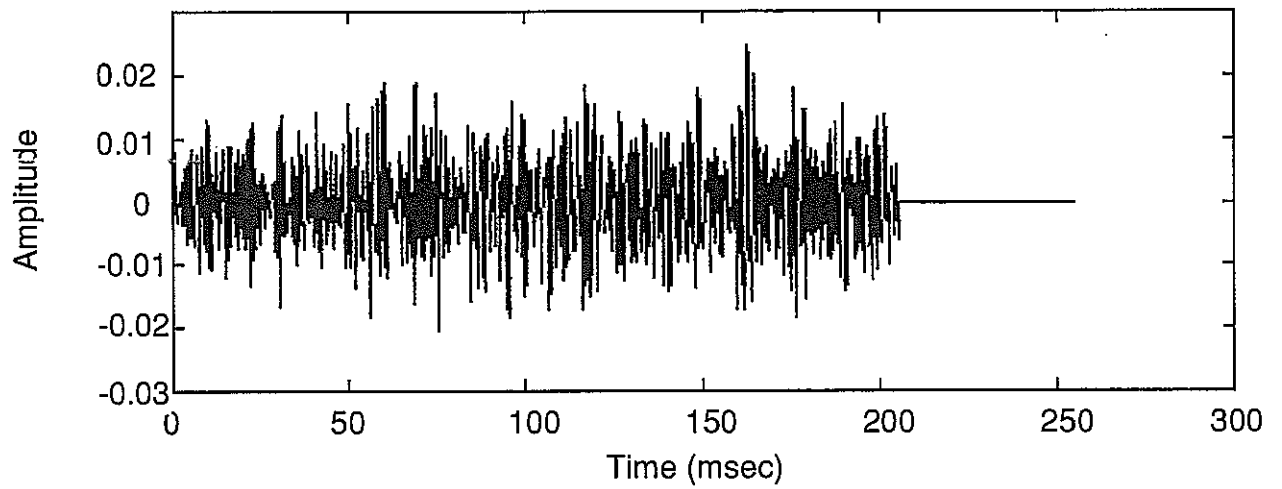
平成 11 年度は、このシステムを用いて本計画の研究実施領域周辺の地質構造モデルと水理地質構造モデルを構築し現状の地下水流動を把握するための定常解析を行うとともに、広域地下水流動研究における地質構造モデルおよび水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析を実施した。また、昨年度の検討結果に基づき、本システムの改良を行い、飽和不飽和浸透流解析が可能なシステムへと拡張した他、入出力インターフェースや境界条件の設定方法などについて改良を行い、より現実的なモデル化を行うための機能を向上させるとともに操作性を向上させた。

7. 2. 8 情報公開技術の開発

(1) VR（バーチャル・リアリティ）システムの構築

超深地層研究所計画において実施している地層科学研究を一般の方々に理解していただくため、平成 9 年度より VR システムを当計画の情報提供活動の手段として適用を開始し、平成 10 年度までに、当計画および研究所紹介のためのデスクトップパソコン用の「超深地層研究所の仮想体験」ソフトウェアの製作と改良、およびアミューズメント性を加えたソフトウェアの製作を実施している。

平成 11 年度は、当計画の研究成果を紹介するソフトウェアの製作を行った。また、VR システムの適用についての検討を行った。また、将来的に研究所の地上施設や研究坑道の一部において VR 体験や研究成果を紹介することを前提として、超深地層研究所に設置する具体的な VR システムの検討を実施した。



初動P波

上：スタッキング 1回

下：スタッキング 32回

図37 スタッキングテストの一例
 (発振源深度：450m、受振源深度：230m)

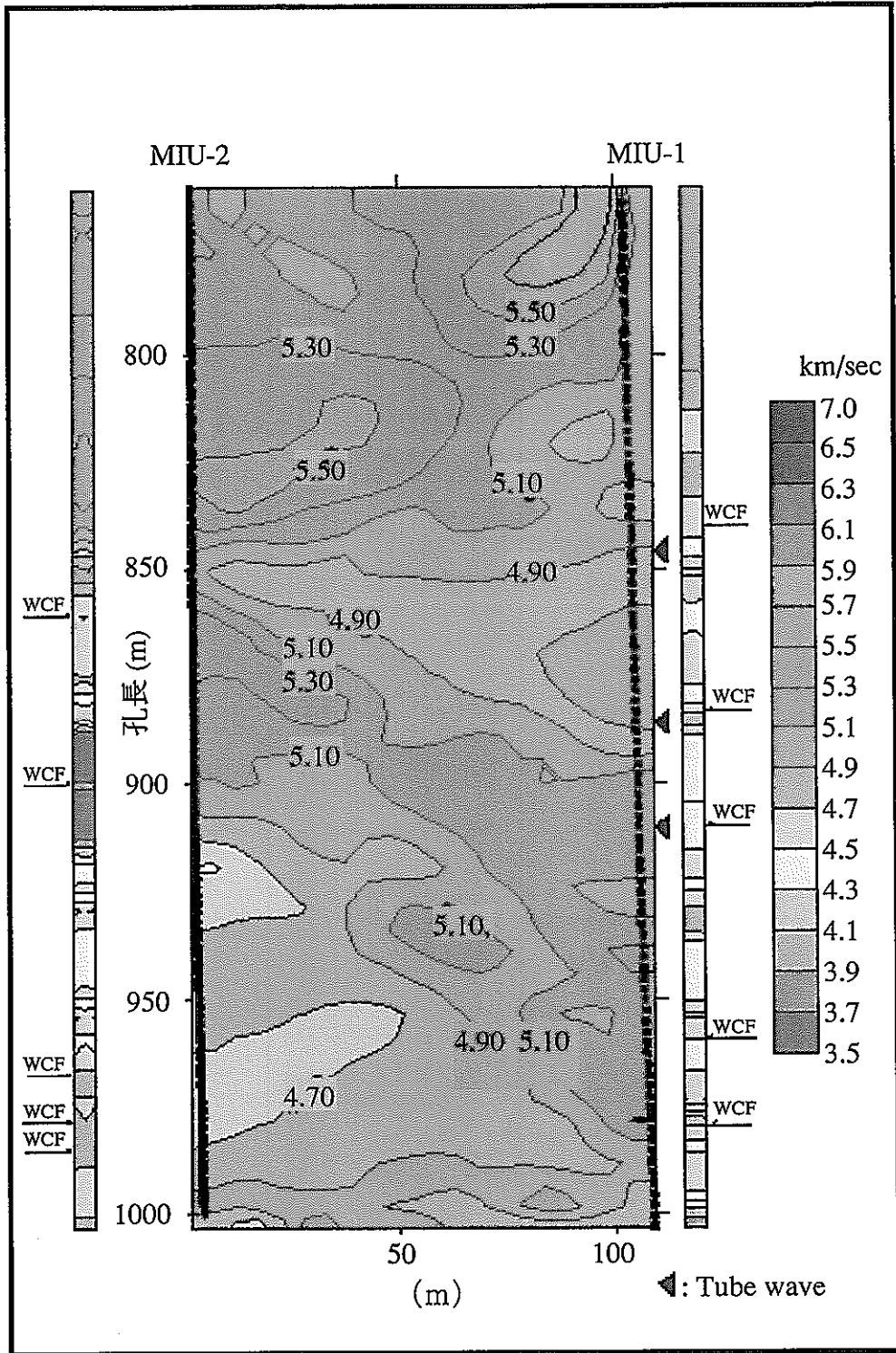


图38 P波速度構造解析結果

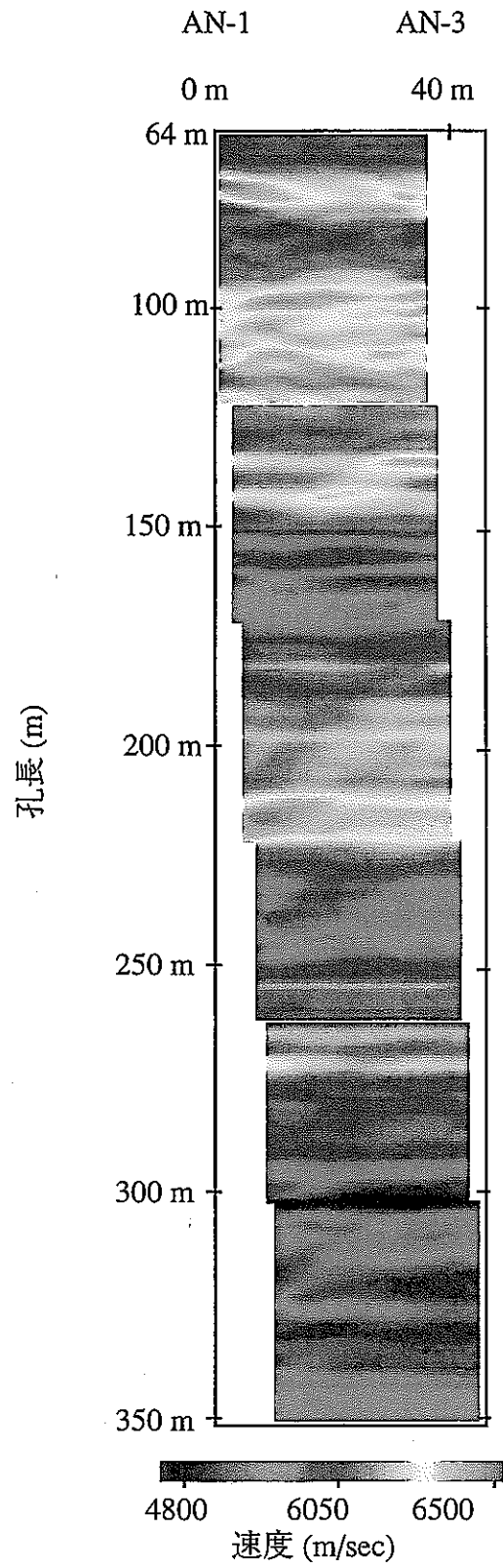


図39 フルウェーブインバージョン解析結果

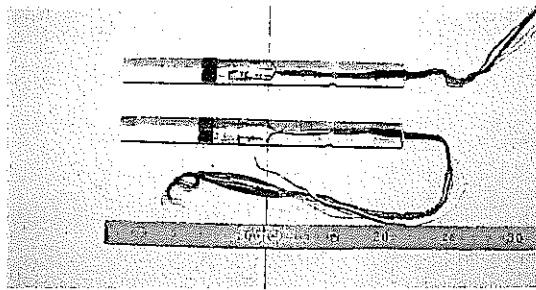


図40(1) ひずみゲージセルの写真

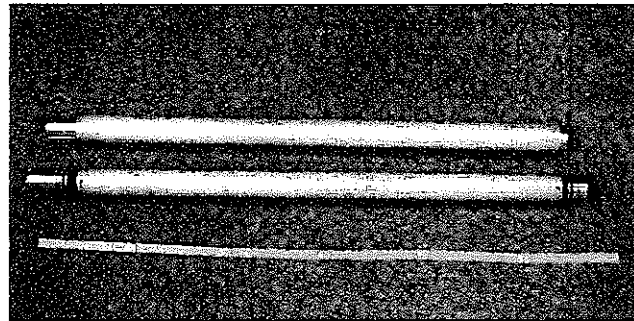


図40(2) 耐圧容器の写真

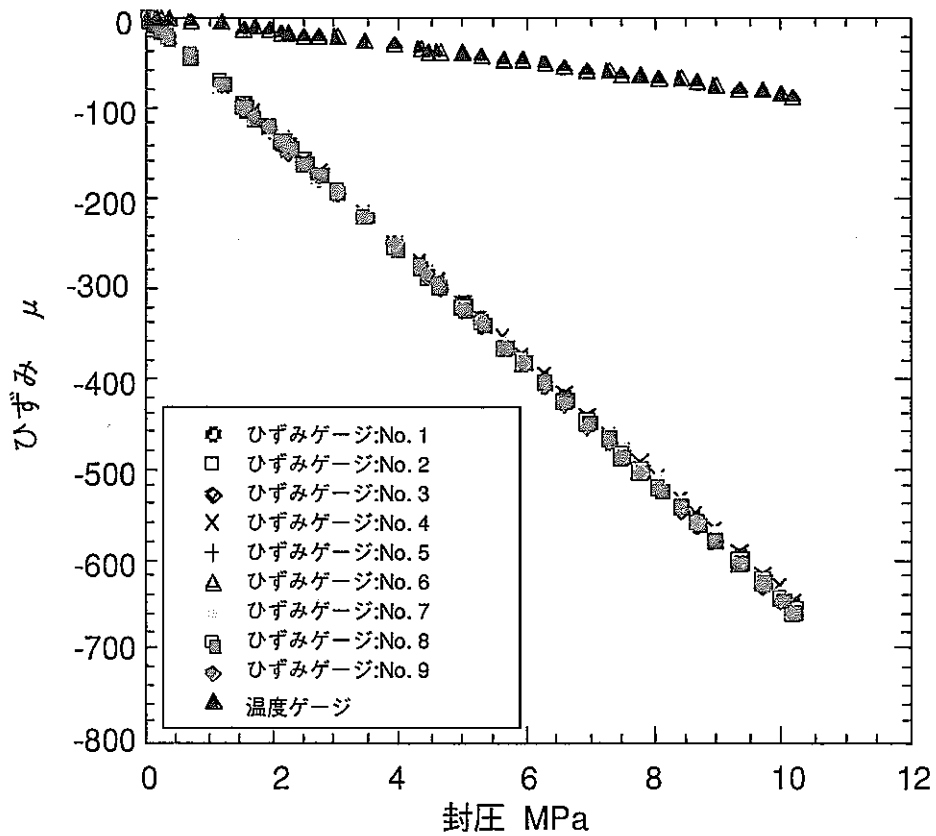


図40(3) ひずみゲージセルの载荷試験 (1回目)

8. まとめ

平成 11 年度は、MIU-3 号孔における試錐調査を行い、地質・地質構造、地下水の水理、岩盤力学のデータを取得するとともに、これまでのデータを用いて地質構造モデル、水理地質構造モデル、岩盤力学概念モデルの構築・更新、および地下水流動解析を実施した。また、既存の調査技術・調査機器の改良・高度化を図るとともに、坑道の掘削を伴う調査研究段階（第 2 段階）以降に必要となる調査技術・調査機器の開発を行った。

平成 11 年度のおもな研究成果は、以下のとおりである。

(1) 地質・地質構造

調査の種類・量、解析・評価の方法および結果の精度との関係を事例的に確認していくため、地下水流動解析の解析領域（約 4km×6km）、研究実施領域とともに、既存情報を用いた地質構造モデルの構築、本計画第 1 段階第 1 フェーズの調査結果に基づく地質構造モデルの更新の二つのステップでモデル化を行った。

既存情報を用いた地質構造モデルの構築では、とくに花崗岩については、モデル化するうえで必要となる割れ目帯の連続性についての十分な情報がなく、結果として花崗岩については風化部とそれ以外の岩盤にしか区分できていない。

平成 11 年度までの調査結果に基づく地質構造モデルの改良では、研究実施領域で実施した物理探査や試錐孔調査により、化学組成の異なる黒雲母花崗岩と優白質花崗岩、割れ目密度の異なる上部割れ目帯、健岩部、断層（月吉断層）に伴う割れ目帯を、地質構造モデルに加えることができた。これらの地質構造モデルの一部は、水理地質構造モデルの構築およびそれを用いた地下水流動解析に用いられた。

しかしながら、平成 11 年度までの調査結果に基づいて改良した地質構造モデルは、研究実施領域北東部の地質構造、高角の地質構造、1,000m 以深の地質構造に関する情報が不足していることによる不確実性を有する。

(2) 地下水の水理

2 回目の地下水流動解析ループにおける等価不均質連続体モデルによる地下水流動解析により、とくに非定常解析の場合、割れ目の分布を考慮したモデルとしていないモデルでは解析結果の水頭変化の程度および研究坑道への湧水量に大きな差異が認められ、かつ割れ目を考慮したモデルでは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。この結果は、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と考えられる。

本解析領域に存在する月吉断層は、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。上記の定常解析および非定常解析結果において、等価不均質連続体モデルによる解析結果はこの仮説を水頭変化などで適切に表現できており、両方の結果と併せて考えると、このモデル化手法が割れ目や断層などを考慮した中領域の地下水流動解析へ適用することが可能であると考えられる。

(3) 地下水の地球化学

広域地下水流動研究などによる地下水の採取・分析および物理化学パラメータの測定により、研究実施領域周辺の花崗岩分布域における浅部（深度 300m 以浅）の地下水は $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 型で中性（pH7）かつ酸化性（ $\text{Eh} > 0\text{mV}$ ）の地下水であるのに対し、深部（深度 300m 以深）では、 $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 型で弱アルカリ性（pH9）かつ還元性（ $\text{Eh} < -300\text{mV}$ ）の地下水へ変化していることなどが明らかとなっている。

研究実施領域の地下水の地球化学については、水質形成機構の検討のため、岩盤の地球化学特性に関するデータを取得した。その結果、試錐孔掘削で得られた岩芯（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+} が多いことが認められた。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 付近を境に変化することを示している。

今後、平成 12 年度以降の試錐調査（MIU-4 号孔）において地下水を採水・分析を行うとともに、広域地下水流動研究で取得されたデータも含めて、地下水の地球化学特性の代表性を示すため、岩石の化学組成、鉱物組成と併せて、地下水水質形成機構（水-岩石反応）を検討していく。

(4) 岩盤の力学特性

平成 11 年度は、MIU-2 号孔および MIU-3 号孔において、物理試験、力学試験および初期応力測定を行った。また、調査の種類・量、解析・評価の方法および結果の精度（深部地質環境の理解度）との関係を事例的に確認していくための第一歩として、AN-1 号孔および MIU-1 号孔の調査結果に基づくモデルを構築した。

その結果、研究実施領域の岩盤は、地表から地下 1,000m の範囲で三つの異なる力学物性や応力状態を有するゾーンに区分できることがわかった。

今後、MIU-2 号孔のデータを加えたモデル、MIU-3 号孔のデータを加えたモデルに更新するとともに、上記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必要がある。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行い、上記モデルの定量化を図る。

(5) 調査技術・調査機器

東濃地科学センターがこれまで開発してきたものを含め、既存の調査技術・調査機器の改良・高度化を図った。また、坑道の掘削を伴う調査研究段階（第 2 段階）以降に必要な調査技術・調査機器の開発などを行った。

試錐掘削技術開発のうち部分保孔装置の開発では、平成 10 年度に開発した部分ケーシングおよび挿入装置と、これまで適用試験を重ねてきた部分拡孔用ビットを併せて、適用試験を実施した。また、リバーズ式三重管ワイヤライン工法については、ポンプなどの周辺機材と操作手順を含めた一連のシステムの設計を行った。

地質構造調査技術開発としては、地下深部での不連続面の広がりを把握するための弾性波トモグラフィ調査技術について、既存の試錐孔を用いて深度 1,000m までを対象とした適用試験を実施するとともに、データ解析手法の検討を行った。

地下水の水理特性調査技術開発および地下水の地球化学特性調査技術開発としては、それぞれ、平成 10 年度までに製作・運用を行っている 1,000m 対応水理試験装置および 1,000m 対応地下水の地球化学特性調査機器のデータ解析プログラムに使用されている単位系の変更を行った。

岩盤の力学特性調査技術開発としては、平成 10 年度までに設計を行っている 1,000m 対応初期応力測定装置の製作を行った。

坑道の掘削を伴う調査研究段階（第 2 段階）以降に必要となる調査技術・調査機器としては、連続波レーダー調査技術開発として、平成 10 年度に製作した実験機を用いて基礎データを取得した。また、試錐孔を利用した長期モニタリング装置の開発としては、平成 10 年度製作した機器を用いて深度 200m までの適用試験を行った。

本計画および広域地下水流動研究において地質環境モデル構築および地下水流動解析に利用されている、地質環境データ解析・可視化システムの改良を行い、機能性および操作性を向上させた。

情報公開技術の開発としては、平成 9 年度より適用している VR システムにおいて当計画の研究成果を紹介するソフトウェアの製作・改良、および、今後超深地層研究所に設置する具体的なシステムについての検討を行った。

参考文献

Brudy, M. and Zoback, M. D. (1993) : Compressive and tensile failure of boreholes arbitrarily-Induced to principal stress axis: application to the KTB borehole, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., pp.1035-1038.

動力炉・核燃料開発事業団 (1996) : 超深地層研究所地層科学研究基本計画, 動燃技術資料, PNC TN7070 96-002.

原子力委員会 (1994) : 21世紀の扉を拓く原子力—原子力の研究, 開発及び利用に関する長期計画—.

今井久, 柳澤孝一 (1990) : 3次元飽和不飽和浸透流解析プログラム TAGSAC の概要, 動燃技術資料, PNC TN7410 90-026.

稲葉秀雄, 竹内真司, 岡崎彦哉, 尾方伸久, 三枝博光 (1998) : 東濃鉱山周辺域を対象とした地下水流動解析, 動燃技術資料, PNC TN7410 98-002.

核燃料サイクル開発機構 (1998) : 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, 11年度研究計画書, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 99-004.

核燃料サイクル開発機構 (1999a) : 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 分冊1, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 99-021.

核燃料サイクル開発機構 (1999b) : AN-1号孔及びMIU-1号孔における力学特性調査結果, JNC TN7420 99-004.

核燃料サイクル開発機構 (2000a) : 正馬様用地における試錐調査 (MIU-3号孔), サイクル機構技術資料, JNC TJ7440 2000-022.

核燃料サイクル開発機構 (2000b) : 不均質等価連続体モデルを用いた広域地下水流動解析, JNC TJ7400 2000-008.

核燃料サイクル開発機構 (2001) : 超深地層研究所計画年度計画書 (平成11年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2001-004.

小島隆, 松木浩二 (1994) : 低応力レベルにおける岩石のカイザー効果に関する基礎的研究, 資源と素材 Vol.110, pp.435-440.

尾方伸久, 若松尚則, 梅田浩司, 柳澤孝一 (1995) : 河川水の流量および水質による表層部の地下水流動の推定, 応用地質, 36, pp.2-13.

Ota,K., Nakano,N., et al.,(1999) : Working Programme for MIU-4 Borehole Investigation, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 99-007.

佐藤稔紀, 加藤春實 (1998) : 1,000 m 対応の応力解放法による測定装置開発の現状, 資源・素材 '98 (北九州), 企画発表・一般発表 (A) 資料, pp.41-44.

Yin,J. and Cornet, F.H. (1995) : Integrating hydraulic data and focal plane solution for regional stress determination, Proc. International Workshop on Rock Stress Measurement at Great Depth , pp13-18.