

広域地下水流動研究

年度報告書（平成 13 年度）

（技術報告）

2002年10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

Inquires 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)

2002

広域地下水流動研究年度報告書

(平成 13 年度)

東濃地科学センター
地層科学研究情報化グループ

要 旨

核燃料サイクル開発機構・東濃地科学センターでは、地層処分技術に関する研究であり、地層処分研究開発の基盤となる深地層の科学的研究(地層科学研究)を実施している。この研究の一環として、広域における地質環境を把握するための体系的な調査・評価技術の開発を重要な研究課題として、「広域地下水流動研究」を平成 4 年度から岐阜県土岐市にある東濃鉾山の周辺域を研究開発の場として実施している。

これまでに、約 10km 四方の研究実施領域を対象にリモートセンシング調査、空中物理探査、地上物理探査、地表地質調査、表層水理調査、試錐調査及び地下水長期観測が実施されている。これらの調査研究により、表層地質の分布、土岐花崗岩体の岩相(粒度・鉱物組成)の不均質性などの地質学的情報、岩盤の透水性や地下水の水頭分布などの水理学的情報、花崗岩中における地下水の水質分布などの地球化学的情報が蓄積されている。

平成 13 年度においては、平成 12 年度に掘削した DH-13 号孔を利用した水理試験・地下水採水、並びにリモートセンシング調査で判読されたりニアメントを対象とした高密度電気探査などを実施した。また、表層水理定数観測及び試錐孔を利用した地下水の長期観測を継続した。

解析作業としては、瑞浪超深地層研究所用地を対象とした広域地下水流動解析のモデル化・解析実施領域の設定に関する検討に着手した。

調査技術開発に関しては、調査に適用された要素技術の評価、並びに調査手法・調査機器の開発・改良を継続した。

Tono Regional Hydrogeological Study Project Annual Report Fiscal Year 2001

Geoscience Research Integration and Dissemination Group
Tono Geoscience Center

Abstract

Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute 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 programme is the Regional Hydrogeological Study (RHS) project in the Tono region, central Japan. The main goal of the RHS project is to develop and demonstrate surface-based investigation methodologies to characterize geological environments on a regional scale in Japan. The RHS project was initiated in 1992.

To date, remote sensing, geological mapping, airborne and ground geophysical investigations, and measurements in eleven deep boreholes have been carried out in the study area (c. 100 km²). Groundwater chemistry and hydraulic head monitoring is under way in these boreholes. Important results that have been obtained from these investigations include various information concerning the heterogeneity of lithological, hydrogeological and geochemical, and evolution of the groundwater geochemistry.

During fiscal year 2001, hydraulic testing and groundwater sampling were conducted in borehole DH-13 which was drilled during fiscal year 2000. High density electrical resistivity measurements were conducted on a lineament. Groundwater monitoring was continued in the existing boreholes. As a part of evaluation of data uncertainties for modeling and simulation, study was started with the purpose of setting of modeling and simulation area around MIU construction site. Development of investigation instruments were also continued.

目 次

ページ

1 . はじめに	1
2 . 広域地下水流動研究の概要	2
2 . 1 研究の構成	2
2 . 2 研究目標	3
2 . 2 . 1 全体目標	3
2 . 2 . 2 研究分野毎の目標	3
2 . 3 研究実施領域	5
2 . 4 これまでの成果	6
3 . 平成13年度の研究実績	7
4 . 地質・地質構造に関する調査・研究	11
4 . 1 地質構造調査	11
4 . 1 . 1 高密度電気探査	11
4 . 1 . 2 反射法（屈折法）弾性波探査の検討	16
4 . 2 地質構造モデルの構築	16
5 . 地下水の水理に関する調査・研究	17
5 . 1 表層水理調査	17
5 . 2 深層水理調査	19
5 . 3 地下水流動解析	21
5 . 4 地下水位・間隙水圧の長期観測	25
6 . 地下水の地球化学に関する調査・研究	30
6 . 1 地表水を対象とした地球化学調査	30
6 . 2 固相を対象とした地球化学調査	32
6 . 3 地下水の地球化学モデルの構築	34
6 . 4 地下水水質の長期観測	34

7 . 調査技術開発	36
7 . 1 地質構造調査技術開発	36
7 . 2 地下水の水理特性・地球化学特性調査技術開発	36
7 . 3 岩盤の力学特性調査技術開発	36
7 . 4 統計解析手法を用いた地質環境解析の不確実性評価手法の開発	37
8 . 研究成果の統合化	38
9 . まとめ	38
9 . 1 地質・地質構造に関する調査・研究	38
9 . 2 地下水の水理に関する調査・研究	39
9 . 3 地下水の地球化学に関する調査・研究	40
9 . 4 調査技術開発	40
9 . 5 研究成果の統合化	41
参考文献	42

目 次

ページ

図 2.3.1 広域地下水流動研究の研究実施領域	5
図 2.3.2 研究実施領域周辺の地質	6
図 3.1.1 試錐孔位置図	7
図 4.1.1 研究実施領域周辺のリニアメント分布図	12
図 4.1.2 調査測線および周辺地質図	12
図 4.1.3 高密度電気探査解析結果	15
図 4.1.4 地質解釈図	15
図 5.1.1 表層水理調査位置図	18
図 5.1.2 平均岩盤浸透量と流域面積の関係	18
図 5.2.1 水理試験結果	20
図 5.3.1 平成 12 年度に作成したモデルによる地下水流動解析結果	21
図 5.3.2 4 つの正方形モデル化領域と各領域に含まれる山および モデル化する大規模断層	22
図 5.3.3 研究所用地周辺の地下を通過する地下水の流線	24
図 5.4.1 地下水長期観測孔位置図	25
図 5.4.2 既存試錐孔における MP システム観測結果	26
図 5.4.3 DH-5 号孔における地下水位の経時変化	28
図 5.4.4 DH-8 号孔における地下水位の経時変化	29
図 5.4.5 DH-10 号孔における地下水位と地下水温の経時変化	29
図 6.1.1 揚水試験中のウラニン濃度測定結果	32
図 6.2.1 DH-3 号孔におけるストロンチウム同位体 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 測定結果	33
図 6.4.1 各試錐孔より採取された地下水の $^3\text{H}/^4\text{H}$ 比と $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比との関係	35

表 目 次

ページ

表 3.1.1 (1/3) ~ (3/3) 調査・研究の実績	8 ~ 10
表 4.1.1 測定仕様	13
表 5.1.1 観測流域における岩盤浸透量(平成13年度)	19
表 5.2.1 水理試験実施区間と試験結果	20
表 5.4.1 DH-9号孔における観測区間	27
表 5.4.2 DH-11号孔における観測区間	27
表 5.4.3 DH-13号孔における観測区間	28
表 6.1.1 DH-13号孔における地下水の水質および物理化学パラメータ	31

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構・東濃地科学センター（以下、東濃地科学センターという）では、原子力委員会が平成12年11月に決定した「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画（原子力委員会，2000）」に示された高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究であり、地層処分研究開発の基盤となる「深地層の科学的研究（以下、地層科学研究という）」を実施している。この研究の一環として、広域における地質環境、特に地下水の流動特性や地球化学特性を把握するための体系的な調査・解析技術の開発を重要な研究課題として、岐阜県土岐市にある東濃鉱山周辺域の約10km四方の範囲を研究開発の場とした「広域地下水流動研究」を平成4年度から実施している。

本研究のように広範囲な領域の地質環境を対象とする段階の調査手段は、文献調査や空中および地上からの調査に限定される。このような領域を対象とした調査を効率的に行うためには、実際の地質環境を対象とした調査・研究を通して、取得される情報量と地質環境の理解の程度との関係を事例的に示すとともに、用いられた各種調査・解析技術の適用性の評価と、それらの技術の組合せや手順および適用に際しての留意点などを示した調査・解析フローを構築することが重要である。

本研究では、開始後の5年間（平成4年度～平成8年度）までは、主として調査・解析に関する要素技術の開発とその有効性・適用性の確認に主眼を置いた研究が行われた。その後は、平成9年3月に策定された「広域地下水流動研究基本計画書（動燃事業団，1997）」に則り、要素技術の開発と並行して、広域を対象とした地質環境の調査・評価技術の体系化に向けた研究開発を進めている（動燃事業団，1994；動燃事業団，1996）。

これまでに、実用化された深度1,000mまでの地下水調査を可能とする調査機器などを用いて、主要な研究対象である土岐花崗岩体中の地質構造や岩盤の透水性、並びに地下水の水質などに関するデータが蓄積されている。これらの調査・研究成果は深部地質環境の科学的データとして、サイクル機構が平成11年度に国へ提出した地層処分研究開発成果の第2次取りまとめ（サイクル機構，1999）に反映されている。また、大学などの外部研究機関でも、地下深部のデータとして活用されている（例えば、村上ほか，1999）。

一方、超深地層研究所研究計画については、平成14年1月17日に、瑞浪市と瑞浪市明世町の市有地（瑞浪深地層研究所用地，以下「研究所用地」）の賃貸借契約を締結し、超深地層研究所の研究坑道および関連施設を設置することとなった。広域地下水流動研究の研究実施領域は、研究坑道を展開する研究所用地を含むことから、研究成果を相互に活用することとしている（サイクル機構，2002）。

本報告書は、「広域地下水流動研究年度計画書(平成13年度)(サイクル機構,2001a)」に従って、東濃地科学センターが実施した調査・研究の実績・成果を基に取りまとめたものである。

2. 広域地下水流動研究の概要

広域地下水流動研究は、地層科学研究の一環として、平成4年度から岐阜県土岐市にある東濃鉱山の周辺域を研究開発の場として進められている。東濃鉱山が位置する岐阜県東濃地域は、中生代白亜紀の花崗岩類からなる基盤を新第三紀堆積層が覆い、かつ複数の断層が存在するという日本においても普遍的にみられる地質構造を有している。また、サイクル機構が長年にわたり実施してきた東濃ウラン鉱床を対象とした調査研究や地層科学研究の成果として得られた科学的・技術的知見が蓄積されている。

本研究では、このような特徴を有する東濃地域において、地表から地下深部までの地質・地質構造、地下水の流動特性及び地球化学特性などを明らかにするために必要な調査・解析技術、並びに調査解析結果の妥当性を評価するための技術の開発を実施している。

調査・評価技術の適用性評価にあたっては、解析結果に含まれる不確実性の評価も重要である。解析結果の不確実性は、測定データの質(精度・分解能)に加えて、対象となる地質環境の不均質性や異方性の程度と調査量に深く関係するものであることから、既存情報に基づく地質環境の概念モデルを出発点とし、「計画立案 調査・解析 モデルの構築(更新)」といった一連のプロセスを繰り返し、段階的に地質環境のモデル化を進めることにより、不確実性を考慮した地質環境の調査・評価技術に関する研究開発を実施している。

2.1 研究の構成

広域地下水流動研究は、以下の研究分野で構成されている。

地質・地質構造に関する調査・研究

地下水の水理に関する調査・研究

地下水の地球化学に関する調査・研究

調査技術開発

これらに加えて、各研究分野の成果を統合して、研究対象とする地質環境を包括的に理解し、また、調査・解析技術を体系化するための、「研究成果の統合化」を行う。

2.2 研究目標

2.2.1 全体目標

広域地下水流動研究では、広域における地表から地下深部までの地質・地質構造、地下水の流動特性及び地球化学特性などを明らかにするために必要な調査・解析、並びに調査・解析結果の妥当性を評価するための技術の開発を目標としている。すなわち、実際の地質環境を対象とした調査研究を通して、限定された情報量で地質環境の何がどの程度把握できるのかを事例的に示すとともに、用いられた各種調査・評価技術の適用性の確認、およびそれらの技術の組合せや手順などを示した調査・評価フローの構築を目指す。

ここでいう「広域」とは、地下深部を流れる地下水流動系の涵養域から流出域までを含む数km四方以上の領域を指し、本研究では約10 km四方の範囲を研究実施領域として設定している。

2.2.2 研究分野毎の目標

(1) 地質・地質構造に関する調査・研究

地質・地質構造に関する調査・研究では、広域スケール（数km四方以上のスケール）での地下水流動の観点から地質・地質構造を把握し、地質構造モデルを構築するための調査・研究を通して、地質・地質構造を把握するための一連の調査解析技術を構築する。

（基本方針）

- ・ 研究実施領域における地質（堆積岩類、花崗岩類などの岩相分布、風化帯、変質帯など）の把握に加え、地表に達するような大規模な不連続構造（断層、割れ目帯、岩脈など）に注目し、これらの地質構造の分布及び性状の把握に重点をおく。
- ・ 地質構造モデルの深度は、地下水流動解析で必要とされる深度2,000m程度までを対象とする。

(2) 地下水の水理に関する調査・研究

地下水の水理に関する調査・研究では、研究実施領域内の地下水流動を明らかにするための調査・研究を通して、広域スケールにおける花崗岩での水理地質構造を明らかにするとともに、地下水流動場を把握するための一連の調査・解析技術を構築する。

（基本方針）

- ・ 抽出された地質構造の透水性及び水理学的連続性、並びに花崗岩中の透水性コントラ

スト（高／低透水性領域）の評価に重点をおく。

- ・ 地下水流動解析（水理地質構造モデルの構築及び妥当性の評価）の観点から，深度約2,000mまでを研究対象とする。

(3) 地下水の地球化学に関する調査・研究

研究実施領域における深部地下水の地球化学特性の三次元分布を把握し，地球化学モデルを構築するための調査研究を通して，花崗岩分布域における水質形成機構を明らかにするとともに，地下水の地球化学特性を把握するための調査・解析技術を構築する。

（基本方針）

- ・ 花崗岩中の地下水の物理化学パラメータ，化学組成及び同位体組成の深度分布，並びに透水性割れ目及び断層破碎帯における地下水の地球化学特性の把握に重点をおく。
- ・ 水理的データ（例えば，長期水理観測データ）のみならず，地下水の地球化学的情報（例えば，地下水の水質や滞留時間など）を用いて，地下水流動解析結果の妥当性を評価する方法の構築に重点をおく。
- ・ 地下水流動解析（水理地質構造モデルの構築及び妥当性の評価）の観点から，深度約2,000mまでを研究対象とする。

(4) 調査技術開発

試錐技術，深度1,000m程度までの地質環境を対象とした地下水調査技術，断層などの地質構造を把握するための物理探査技術や試錐調査技術の構築を主な目標として，各研究分野で必要とされる調査手法及び調査機器の開発を行う。

（基本方針）

- ・ 既存の調査・解析・評価技術の適用性・有効性を確認するとともに，必要とされる調査仕様を満たすため，改良及び新規開発を行う。
- ・ 地表から地下深部の地質環境を把握するために，各要素技術を合理的かつ効果的に適用するための基本的な考え方を提示する。

(5) 研究成果の統合化

各研究分野における調査研究の成果を統合し，研究実施領域の深部地質環境（特に，広域的な地下水流動）を包括的に理解するとともに，その過程で蓄積した技術的知見やノウハウ等を広域スケールにおける深部地質環境を把握するための一連の体系的な調査・評価技術として取りまとめる。

（基本方針）

- ・ 調査の種類や量と地質環境に関する理解度との関係性を評価する。

- ・ 海外における結晶質岩を対象とした調査研究において有効とされた調査・評価技術やノウハウ等のわが国の地質環境への適用性を評価し、活用する。

2.3 研究実施領域

広域地下水流動研究における研究実施領域の設定にあたっては、調査・解析の主要な課題が地下水流動の把握であることから、研究対象となる地下水流動系の涵養域から流出域までの範囲を包含すること、また、研究効率の観点から、これまでの研究成果が活用できると共に、超深地層研究所計画や東濃鉾山などにおける他の研究プロジェクトへ研究成果が反映できることを考慮した。具体的には、大略的な地形及び大規模な地質構造に基づいて設定した領域（約30 km四方）における予察的な地下水流動解析結果から、研究対象とする地下水流動系の涵養域から流出域までの範囲を推定し、それを包含する範囲（図 2.3.1）

を研究実施領域に設定した。研究実施領域内には、中生代の堆積岩類（美濃帯）、流路を覆う新第三紀堆積層は研究実施領域内に

中生代の堆積岩類（美濃帯）を不整合に覆う新第三紀堆積層のうち、本研究

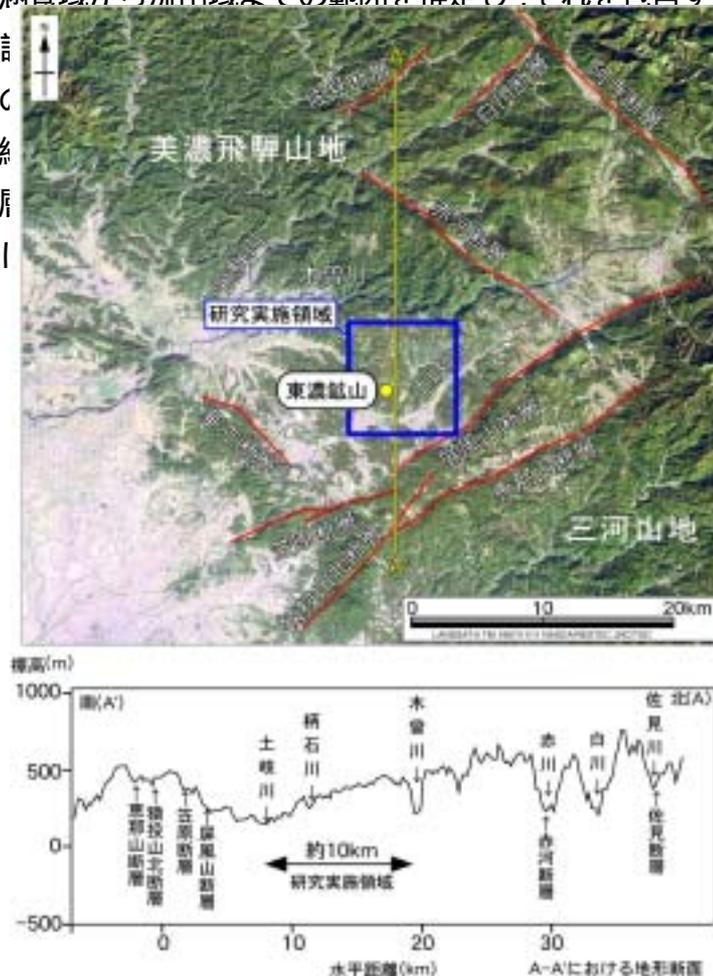


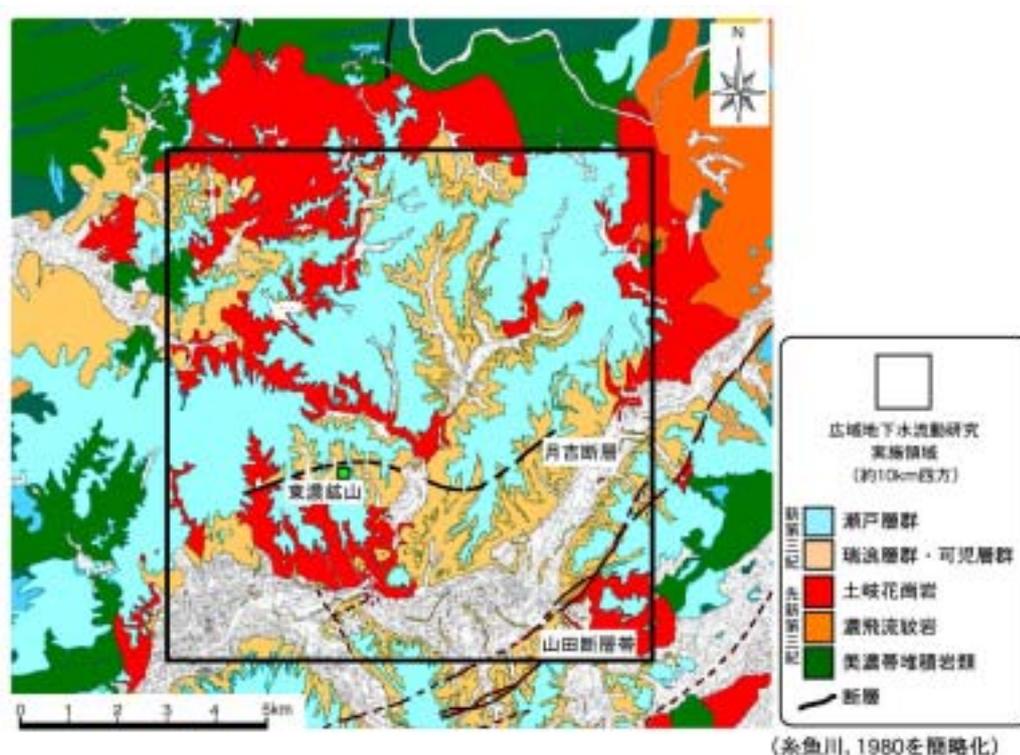
図 2.3.1 広域地下水流動研究の研究実施領域

2.4 これまでの成果

広域地下水流動研究では、研究実施領域内の地下水流動の把握を主たる目的として、平成4年度の開始以来、これまでに固定翼機による空中物理探査（磁気探査）、ヘリコプターによる空中物理探査（磁気探査、電磁探査、VLF法探査、自然放射線探査）、地表電磁探査、地表地質調査、掘削深度500mから1,000mまでの試錐孔13孔（DH-1～13号孔）による試錐調査を実施してきた。また、地下水の涵養量を把握するための表層水理定数観測及び地下水の間隙水圧や水質などの変化を把握するための長期観測が実施されている。

これらの調査・研究によって、表層地質の分布、土岐花崗岩体の岩相（粒度・鉱物組成）の不均質性などの地質学的情報、花崗岩の透水性や地下水の水頭分布などの水理学的情報、花崗岩中における地下水の水質などの地球化学的情報が得られている。また、これらの調査研究を通して、地質環境を調査するための方法論や個々の手法について、技術的知見や経験が蓄積されている。

図 2.3.2 研究実施領域周辺の地質



3. 平成13年度の研究実績

平成13年度は、平成12年度に掘削した試錐孔（DH-13号孔）を利用した水理試験・地下水採水、並びにリモートセンシング調査で判読されたリニアメントを対象とした高密度電気探査などを実施した。また、表層水理調査および既存の試錐孔（図 3.1.1）を利用した地下水の長期観測を継続した。解析作業としては、広域地下水流動解析の領域を研究所用地の水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析に反映できるような領域に修正することとし、広域地下水流動のモデル化・解析実施領域の設定に関する検討に着手した。

調査技術開発に関しては、調査に適用された要素技術の評価、並びに調査手法・調査機器の開発・改良を継続した。

本研究の平成13年度における調査・研究の計画及び実績を表 3.1.1(1)～(3)に示す。

この地図は国土地理院刊行1/50,000地形図（美濃加茂，恵那）を使用

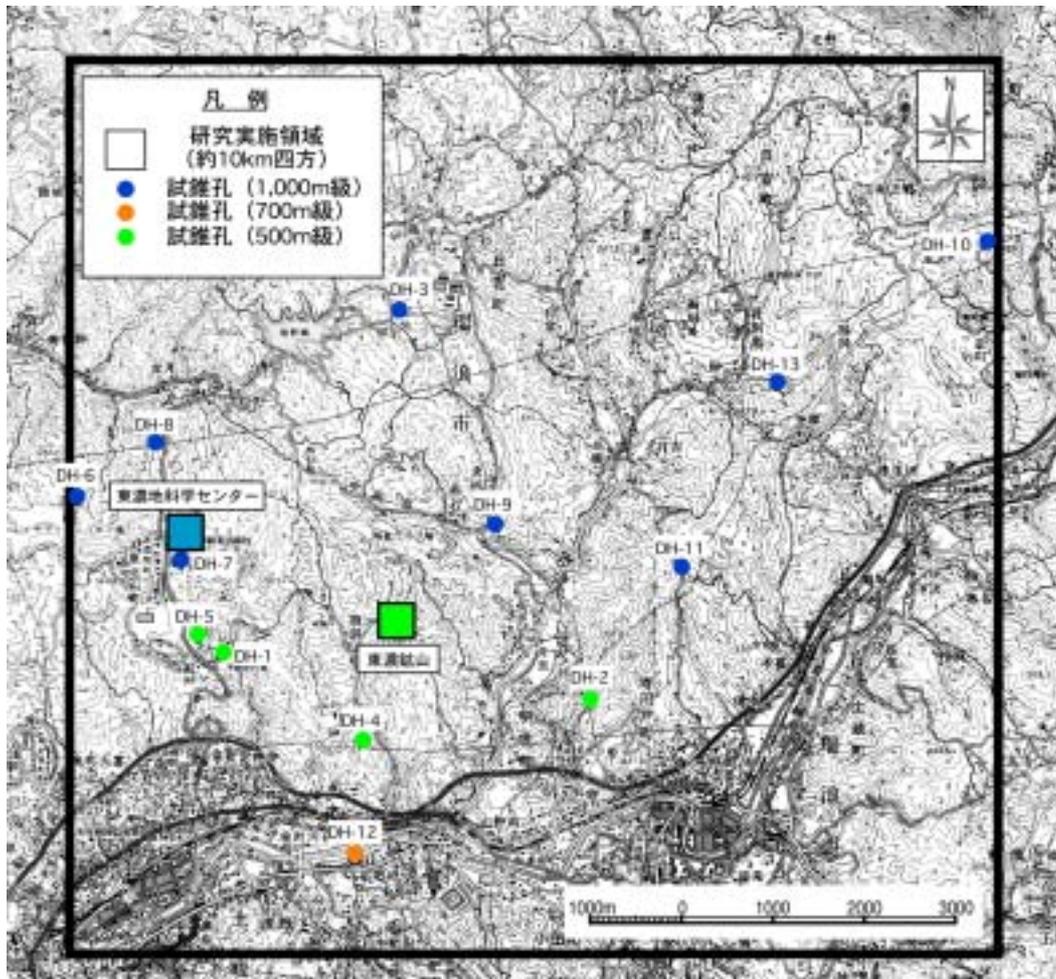


図 3.1.1 試錐孔位置図

表 3.1.1 調査・研究の実績 (1 / 3)

	平成13年度											
	H13									H14		
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
1. 地質・地質構造に関する調査・研究												
(1) 地質構造調査												
高密度電気探査												
反射法弾性波探査の計画立案												
(2) 地質学的情報の整理												
土岐花崗岩を対象とした地質学的調査法の評価												
花崗岩中の割れ目帯・断層の形成メカニズムに関する基礎研究												
(3) 地質構造概念モデルの構築												
2. 地下水の水理に関する調査・研究												
(1) 表層水理調査												
表層水理定数観測												
表層水理調査												
(2) 深層水理調査												
水理試験 (DH・13)												

表 3.1.1 調査・研究の実績 (2 / 3)

	平成13年度											
	H13									H14		
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
(3) 地下水流動解析												
水理地質構造モデルの構築												
地下水流動解析												
(4) 地下水位・間隙水圧の長期観測												
長期観測												
MPシステムの設置(DH-9,11)												
MPシステムの設置(DH-13)												
水位計の設置(DH-5,8,10)												
3. 地下水の地球化学に関する調査・研究												
(1) 地下水を対象とした地球化学調査												
採水・分析(DH-13)												
(2) 固相を対象とした地球化学調査												
(3) 地下水の地球化学モデルの構築												
(4) 地下水水質の長期観測												

表 3.1.1 調査・研究の実績 (3 / 3)

	平成13年度											
	H13									H14		
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
4. 調査技術開発												
(1) 地質構造調査技術開発												
(2) 地下水の水力特性・地球化学特性調査技術開発												
1,000m対応水力試験装置および地下水の地球化学特性調査機器の改良・高度化												
1,000m対応揚水試験装置の改良・高度化									←→			
水力試験データの解析手法の高度化									←→			
(3) 岩盤の力学特性調査技術開発												
1,000m対応初期応力測定装置の開発									←→			
5. 研究成果の統合化												
(1) 調査研究成果の取りまとめ									←→			
(2) 平成14年度以降の研究計画の検討												
(3) 研究成果の取りまとめ報告書の作成方針の検討												

4 . 地質・地質構造に関する調査・研究

平成13年度における地質・地質構造に関する調査研究では，リモートセンシング調査で判読されたリニアメントを対象として高密度電気探査を実施し，手法の適用性を検討するとともに，リニアメント周辺の地質構造を推定した。また，平成14年度以降に実施する予定の反射法弾性波探査の概略の計画の検討を実施した。さらに，平成14年1月17日に，瑞浪市と瑞浪市明世町の研究所用地の賃貸借契約を締結し，超深地層研究所の研究坑道および関連施設を設置することとなったことから，広域地下水流動解析の領域を研究所用地の水利地質構造モデルの構築及び地下水流動解析に反映できるような領域に修正することとし，これに応じて広域地下水流動のモデル化・解析実施領域の設定に関する検討に着手した。

4 . 1 地質構造調査

4 . 1 . 1 高密度電気探査

リモートセンシング調査で判読されたリニアメントを対象として，リニアメントと交差する測線を設定し，調査測線における断層破碎帯等の不連続構造の分布を把握するために，複雑な地下構造を把握するのに有効な高密度電気探査を実施した。また，測定結果から花崗岩を対象とした断層破碎帯調査における高密度電気探査の適用性について考察した。

(1) 調査実施場所

調査対象としたリニアメントは，広域地下水流動研究において，研究実施領域の地下水流動を規制している可能性のある不連続構造として抽出されている瑞浪市日吉町付近のNW-SE系のリニアメント（三枝ほか，2001）とした。

図 4.1.1 に研究対実施域周辺のリニアメントの分布図を，図 4.1.2 に高密度電気探査で調査対象としたリニアメントと調査測線，ならびに調査測線周辺の地質分布を記載した図を示す。測線は，花崗岩が地表付近に分布すると推定される場所において，リニアメントとほぼ直交する方向に設定した。なお，測線近くの沢で花崗岩が露出しているのを確認している。



図 4.1.1 研究実施領域周辺のリニアメント分布図

図 4.1.2 調査測線および周辺地質図

測定仕様を表 4.1.1に示す。測線長は550m，電極間隔は5mで調査を実施した。なお，現場での測定作業期間は平成14年 2月13日～ 2月17日までの5日間である。

表 4.1.1 測定仕様

測線長	550m
電極間隔	5m
調査対象深度	100m程度
取得データ数	3900

(2) 調査・解析結果

今回の高密度電気探査では，取得データを逆解析することにより，測線下の垂直2次元断面の比抵抗構造を取得した。図 4.1.3 に逆解析により得られた比抵抗構造を示す。

図 4.1.3 の比抵抗構造解析結果に，地質に関する既存の情報（例えば，尾西ほか，1999；梅木ほか，2000；山本ほか，2000）等を参考にして解釈を加えたものを図 4.1.4 に示す。

図 4.1.4 において，厚さ5～10m程度で比抵抗が100～800 m程度の表層部（1a）と，その下部に存在する厚さ10～20m程度で比抵抗が50 m程度の低比抵抗層（1b）を合わせた領域は，図4.1.2の地質図において瀬戸層群が分布する場所に対応するため，は瀬戸層群の分布領域であると推定される。1aの部分と1bの部分の比抵抗の違いは，1aの部分は不飽和状態にあり比較的高い比抵抗値を示しているのに対し，1bの部分は飽和しているため低比抵抗値を示しているものと考えられる。

領域は領域の下部に分布し，測線中央部分では地表に露出している領域で，比抵抗が他の領域と比較して中程度の値（200～2,000 m）を示している。この領域は，図4.1.2における花崗岩が地表付近に分布する領域に対応しているため，は花崗岩の分布領域であると推定される。ただし，当地域の新鮮な花崗岩の一般的な比抵抗値（2,000 m以上）よりも低いことから，風化が進んだ領域と推定される。

領域は領域の下部に分布し，2,000 m以上の高い比抵抗値を示す領域である。この領域は地質に関する既存情報等を勘案すると新鮮な花崗岩が分布する領域と推定される。

領域は測線右端部分，深度40m以深に100～300 mの低比抵抗値を示す部分である。この領域については，地質に関する既存情報等を考慮しても大規模な（落差100m以上）断層構造が存在する可能性は小さく，堆積岩の分布に対応するとは考えにくい。そこで，別途花崗岩中にほぼ垂直の低比抵抗帯を入れたモデルを用いて高密度電気探査のシミュレーションを行った結果，取得データの逆解析結果とよく一致した。よって，領域は花崗岩中に低比抵抗帯（例えば断層破碎帯などの含水量が多くなっている構造で，図中Dで示した

ゾーン)が分布する構造を示していると考えられる。

また、領域 の中に認められる低比抵抗部分(図中A, B, Cで示したゾーン)についても、シミュレーションによる検討を行った。その結果、B, CについてはDと比べて小規模な低比抵抗帯が存在すると考えられ、AについてはB, Cと比較して确实度は小さいが、さらに小規模の破碎帯の存在する可能性が考えられる。なお、調査の対象としたリニアメント(図 4.1.2)の位置は、図 4.1.4 ではCのゾーンの位置にほぼ一致している。

(3) 断層破碎帯調査における高密度電気探査の適用性

今回の高密度電気探査の調査結果から、断層破碎帯調査における高密度電気探査の適用性について考察する。

高密度電気探査では、比抵抗値のコントラストから地下構造を推定する。今回の調査結果(図 4.1.4)において、花崗岩中に存在する断層破碎帯は、高比抵抗層の中の低比抵抗帯として検出されており、地表付近では5~10m程度の分解能で断層破碎帯を検出できると考えられる。ただし、探査手法の原理上、分解能は深部になるほど低下する。また、調査結果から断層破碎帯構造を解釈する過程において、シミュレーションによる検討が有効であることが確認された。

以上のことから、少なくとも花崗岩を対象とした断層破碎帯調査においては、高密度電気探査は適用可能であると考えられる。

(4) まとめ

リモートセンシング調査で判読されたリニアメントを対象として、高密度電気探査を実施した。

調査結果から、深度100m程度までの地質分布が推定されたとともに、調査対象のリニアメントに対応すると考えられる花崗岩中の破碎帯が検出された。また、リニアメントに対応する破碎帯と同じトレンドを有する破碎帯が検出され、調査領域における不連続構造の分布が推定された。本調査結果は、花崗岩を対象とした、断層破碎帯調査における高密度電気探査の適用性を示すものと考えられる。

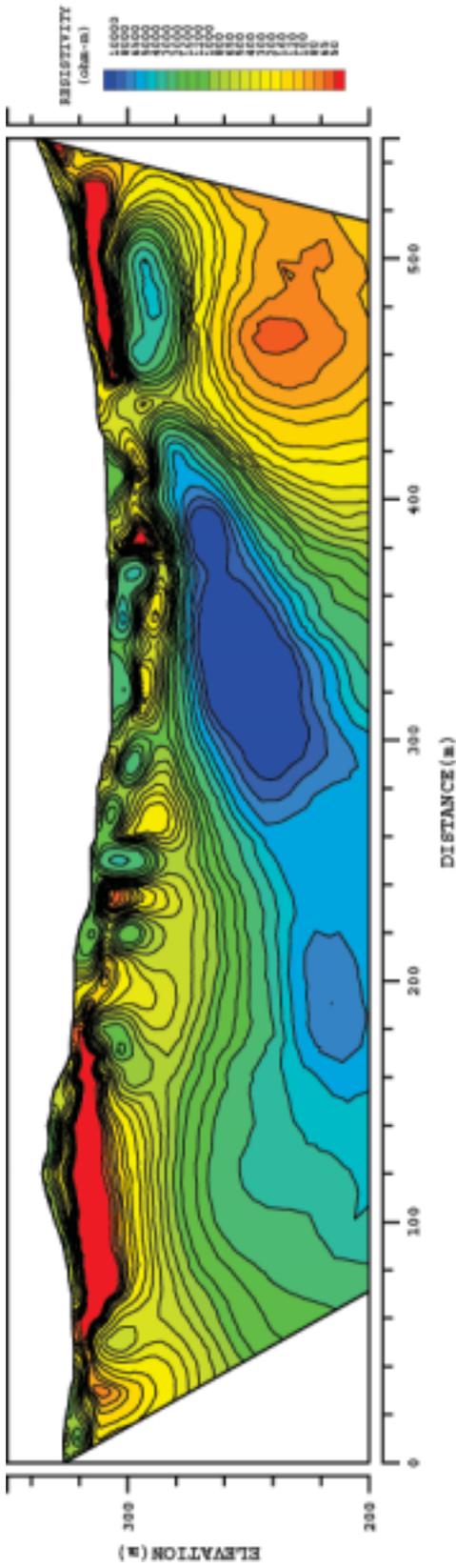


図 4.1.3 高密度電気探査解析結果

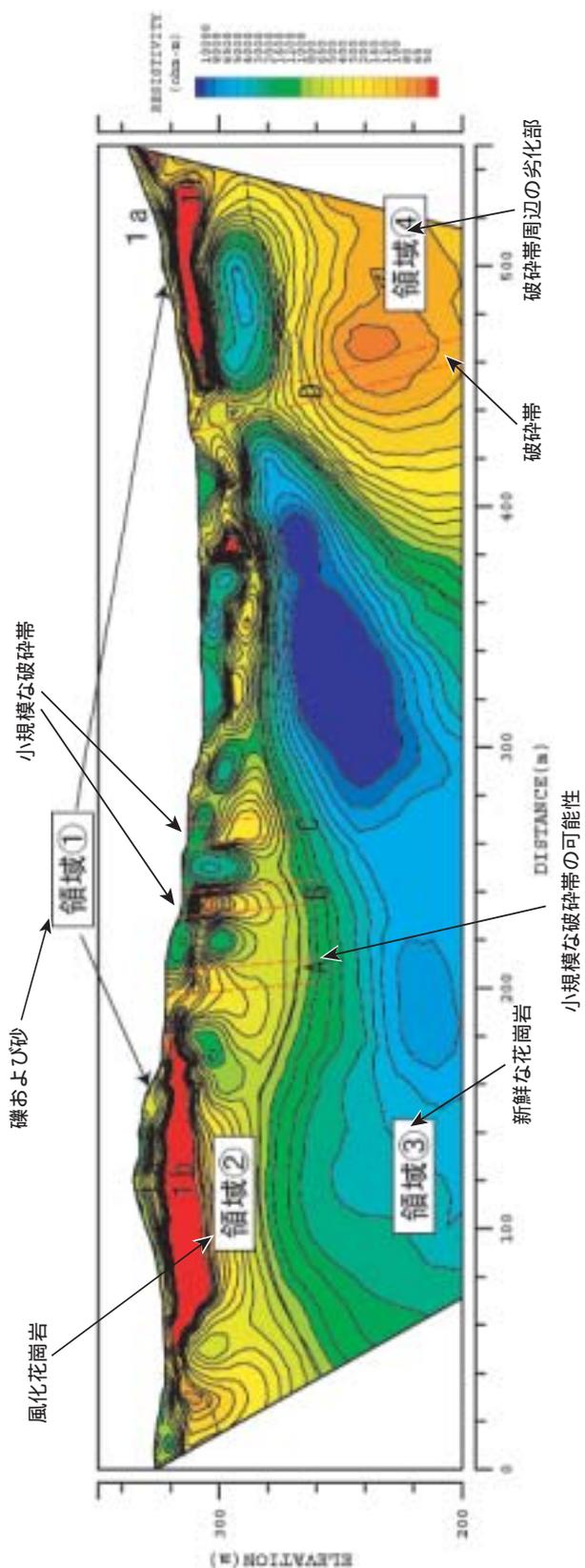


図 4.1.4 地質解釈図

4.1.2 反射法（屈折法）弾性波探査の検討

大規模な断層破碎帯の分布・性状の把握を目的とした反射法弾性波探査の平成14年度、15年度の実施に向け、これまでに取得されている調査結果に基づき、反射法弾性波探査の概略の計画（測線位置，測定仕様）を検討した。

測定仕様の詳細や屈折法の併用の是非については、平成14年度上期に実施する、超深地層研究所計画における反射法弾性波探査の最終結果を踏まえて決定する。

4.2 地質構造モデルの構築

平成14年1月17日に、瑞浪市と瑞浪市明世町の研究所用地の賃貸借契約を締結し、超深地層研究所の研究坑道および関連施設を設置することとなった。広域地下水流動研究の研究実施領域は、超深地層研究所計画における研究坑道を展開する研究所用地を含み、広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の間で研究成果を相互に活用することが合理的であることから、広域地下水流動解析の領域を研究所用地の水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析に反映できるような領域に修正することとした。これに応じて広域地下水流動のモデル化・解析実施領域の設定に関する検討に着手した。モデル化領域は、研究所用地を中心として東濃地方における後背地地形として相対的に標高の高い山を含む20km四方、35km四方、70km四方、115km四方の4つのスケールの正方形領域を設定した。モデルに反映した断層は、「新編日本の活断層」（活断層研究会編，1991）に記載のある断層から特に研究所用地周辺の地下水流動に大きな影響を与えると思われるものを選定した。このモデルに基づき、地下水流動解析を実施した（詳細は5.3章を参照）。

5 . 地下水の水理に関する調査・研究

平成 13 年度においては、主として、平成 12 年度に掘削した深度 1,000m級の試錐孔 (DH-13 号孔 : 図 3.1.1) において、原位置での水理試験および地下水の採水・分析を実施した。また、表層水理調査、試錐孔を利用した地下水の長期観測を継続した。

解析作業としては、平成 12 年度までに実施してきた情報の種類や量と解析結果の關係の検討を継続するとともに、平成 14 年 1 月 17 日に、瑞浪市と瑞浪市明世町の研究所用地の賃貸借契約を締結し、超深地層研究所の研究坑道および関連施設を設置することとなり、広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の間で研究成果を相互に活用することが合理的である (サイクル機構, 2002) ことから、広域地下水流動解析の領域を研究所用地の水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析に反映できるような領域に修正することとした。これに応じて広域地下水流動のモデル化・解析実施領域の設定に関する検討に着手した。

5 . 1 表層水理調査

本調査は、地下水流動解析の境界条件や初期条件の設定に必要な岩盤浸透量および地下水位などの表層付近の地下水流動に関する情報の取得を目的としている。

平成 13 年度は、表層水理定数観測システムを用いた観測を正馬川および柄石川流域 (図 5.1.1) で継続実施するとともに、これまでの観測結果から観測対象面積と岩盤浸透量の關係について検討した (宮原ほか, 2002)。

平成 13 年度観測において得られた観測結果から、各流域において岩盤浸透量を算出した結果を表 5.1.1 に示す。この結果、降水量に対する岩盤浸透量の割合は、正馬川流域では上流域、下流域とも正の値を示しており、全体として岩盤へ涵養する傾向があることを示しているのに対し、柄石川流域では、負の値を示すことから流域全体では地下から流出していることが推察される。

また、流域面積に着目し、平成 12 年度までのデータを用いて各観測流域における流域面積と平均岩盤浸透量の關係について検討した (図 5.1.2)。この図からは、流域面積の増加に伴い岩盤浸透量が双曲線状に減少する傾向が読み取れる。これに基づくと、地下水流動解析の上部境界条件として与える岩盤浸透量は、数 10mm 程度の小さい値となる。したがって、今後この値の妥当性を検証するために地下水解析領域を考慮した、より広い範囲を対象とした岩盤浸透量を求めることが必要である。

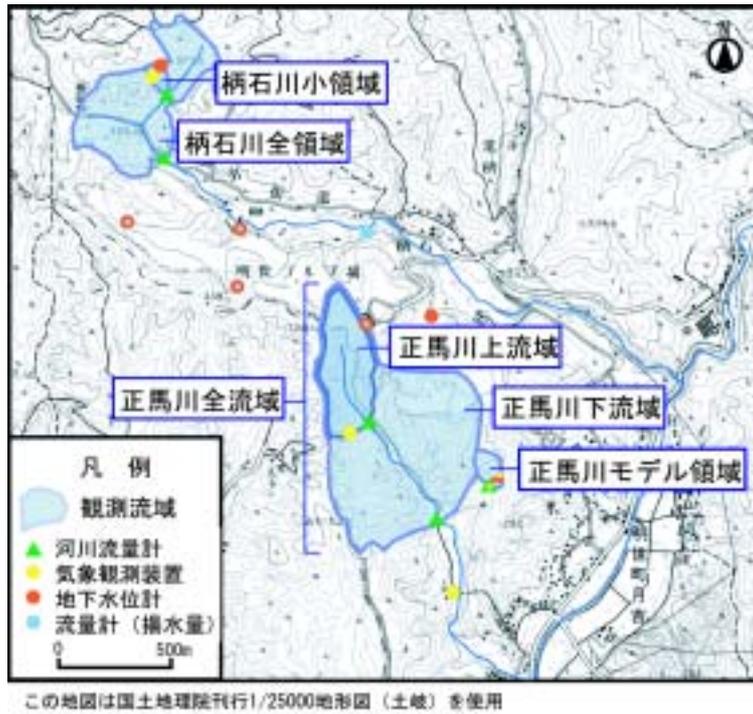


図 5.1.1 表層水理調査位置図

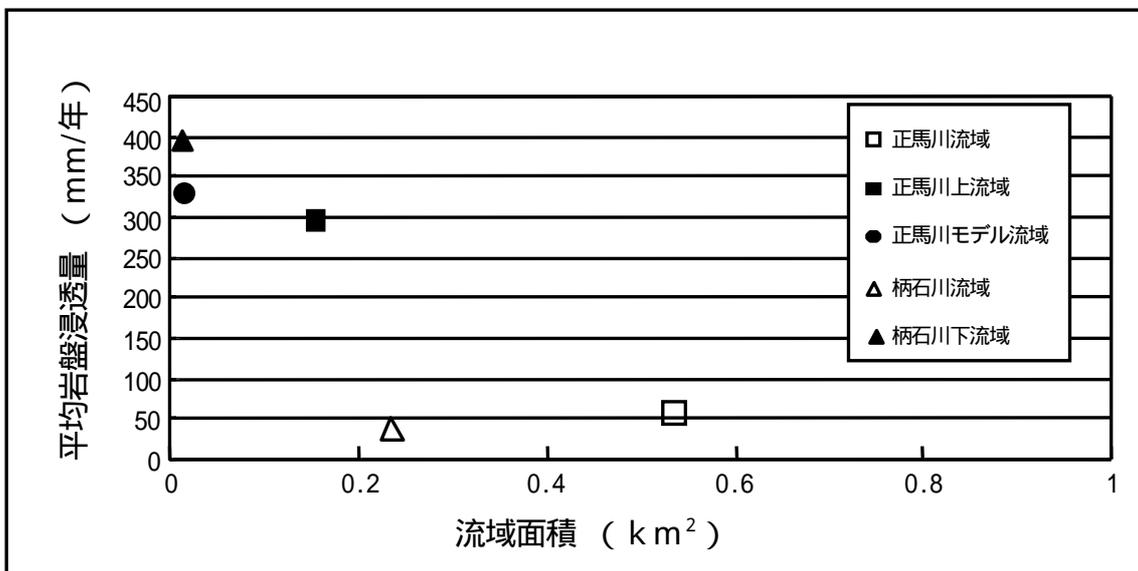


図 5.1.2 平均岩盤浸透量と流域面積の関係

表 5.1.1 観測流域における岩盤浸透量（平成 13 年度）

		13年度				13年度			
P：降水量（mm）		（正馬様）	1329	P：降水量（mm）		（柄石尾根）	1459		
		（鉦山）	1420			（柄石谷）	1322		
		（平均）	1374			（平均）	1319		
E：蒸発散量（mm）：鉦山			505	E：蒸発散量（mm）：鉦山			681		
降水量に対する蒸発散量の割合（％）		（正馬様）	38	降水量に対する蒸発散量の割合（％）		（柄石尾根）	47		
		（鉦山）	36			（柄石谷）	51		
		（平均）	37			（平均）	49		
正馬川流域	正馬川上流域	R：河川流出高（mm）	647	柄石川流域	柄石川上流域	R：河川流出高（mm）	729		
		降水量に対する河川流出高の割合（％）	（正馬様）			49	降水量に対する河川流出高の割合（％）	（柄石尾根）	50
			（鉦山）			46		（柄石谷）	55
	（平均）		47		（平均）	52			
	G：岩盤浸透量（mm）	（正馬様）	177		G：岩盤浸透量（mm）	（柄石尾根）	50		
		（鉦山）	268			（柄石谷）	-87		
		（平均）	222			（平均）	-19		
	降水量に対する岩盤浸透量の割合（％）	（正馬様）	13		降水量に対する岩盤浸透量の割合（％）	（柄石尾根）	3		
		（鉦山）	19			（柄石谷）	-7		
		（平均）	16			（平均）	-1		
	正馬川下流域	正馬川上流域	R：河川流出硬（mm）		546	柄石川下流域	柄石川上流域	R：河川流出硬（mm）	709
			降水量に対する河川流出高の割合（％）		（正馬様）			41	降水量に対する河川流出高の割合（％）
（鉦山）				38	（柄石谷）			54	
（平均）		40		（平均）	51				
G：岩盤浸透量（mm）		（正馬様）	278	G：岩盤浸透量（mm）	（柄石尾根）		69		
		（鉦山）	369		（柄石谷）		-68		
	（平均）	323	（平均）		1				
降水量に対する岩盤浸透量の割合（％）	（正馬様）	21	降水量に対する岩盤浸透量の割合（％）	（柄石尾根）	5				
	（鉦山）	26		（柄石谷）	-5				
	（平均）	24		（平均）	0				
正馬川下流域	正馬川上流域	R：河川流出硬（mm）	676	柄石川下流域	柄石川上流域	R：河川流出硬（mm）	730		
		降水量に対する河川流出高の割合（％）	（正馬様）			51	降水量に対する河川流出高の割合（％）	（柄石尾根）	50
			（鉦山）			48		（柄石谷）	55
	（平均）		49		（平均）	52			
	G：岩盤浸透量（mm）	（正馬様）	148		G：岩盤浸透量（mm）	（柄石尾根）	49		
		（鉦山）	239			（柄石谷）	-88		
（平均）		193	（平均）	-20					
降水量に対する岩盤浸透量の割合（％）	（正馬様）	11	降水量に対する岩盤浸透量の割合（％）	（柄石尾根）	3				
	（鉦山）	17		（柄石谷）	-7				
	（平均）	14		（平均）	-1				

5.2 深層水理調査

平成12年度に掘削されたDH-13号孔を利用して 研究対象領域の涵養域における地下水の流動特性を把握する目的で、地下深部の岩盤（花崗岩）および地下水流動を規制していると考えられる割れ目帯や断層破碎帯を対象に水理試験（試験点数：8点）を実施した。試

験区間および試験結果を表5.2.1に示す。また図 5.2.1には、今年度の試験結果と平成12年度に本孔で実施した水理試験の結果(透水係数および間隙水圧(地下水位換算)の分布)をあわせて示す。試験の結果、透水性の高い区間は、試錐掘削中に逸水もしくはフローメータ検層による流入、流出区間と対応していることが分かった。試験区間の間隙水圧(地下水位に換算)は、土岐夾炭累層から花崗岩上部にかけての試錐孔浅部で比較的水圧が高く、逆に、孔底(深度1000m)付近で観測された逸水区間では水圧が低いことが確認された。全体としては、地下深部に地下水が涵養していく傾向を示しており、涵養域の地下水圧の分布形態と一致している。

また水理試験終了後、主要な割れ目帯の水理特性(間隙水圧)を把握するため、地下水の長期モニタリング装置を設置し観測を開始した。設置区間を5.4章の表5.4.3に示す。

表 5.2.1 水理試験実施区間と試験結果

区間番号	試験区間 (mbgl)	区間長 (m)	パッカー配置	透水量係数 代表値 (m^2/sec)	透水係数 代表値 (m/sec)	区間の特徴
No.1	182.0 - 252.0	70.0	ダブルパッカー	2.19E-04	3.13E-06	健岩部中の割れ目帯, 232.6-232.9mで逸水
No.2	235.5 - 323.5	70.0	ダブルパッカー	3.71E-04	5.30E-06	健岩部
No.3	474.5 - 544.5	70.0	ダブルパッカー	3.47E-04	4.96E-06	健岩部, 524.9-527.9m で逸水
No.4	546.0 - 616.0	70.0	ダブルパッカー	9.07E-06	1.30E-07	健岩部中に割れ目帯を 含む
No.5	713.0 - 783.0	70.0	ダブルパッカー	5.01E-05	7.16E-07	健岩部, ヒートパルスで 異常
No.6	784.8 - 854.8	70.0	ダブルパッカー	6.74E-06	9.63E-08	健岩部, ヒートパルスで 異常
No.7	856.2 - 926.2	70.0	ダブルパッカー	2.18E-06	3.11E-08	割れ目帯
No.8	995.5 - 1015.0	19.5	シングルパッカー	1.29E-05	6.62E-07	割れ目帯, 1003.4-1004.0/ 1006.2-1009.5で逸水, スピナー検層で異常

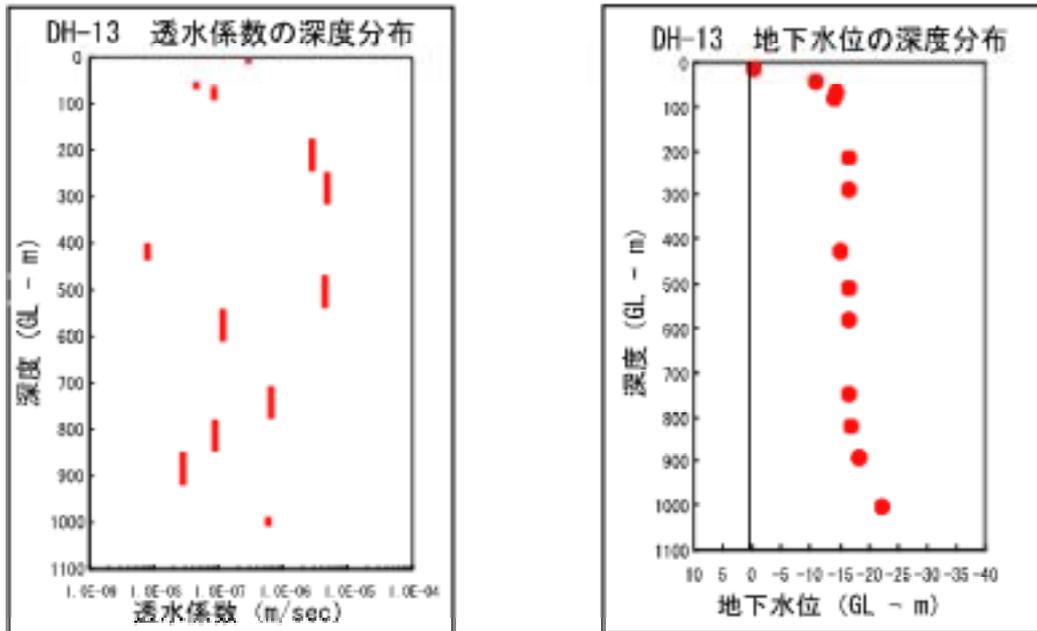


図 5.2.1 水理試験結果（透水係数分布（左）と間隙水圧分布（右））

5.3 地下水流動解析

広域地下水流動解析の領域を研究所用地周辺の地下水流動解析に反映できるような領域に修正するための検討として、超深地層研究所計画の研究坑道などを設置する研究所用地周辺の地下水流動場に影響を与える後背地地形および大規模断層を明らかにすることを目的とした地下水流動解析を実施した。

(1) スケール及び地質構造要素の設定

研究所用地周辺の地下水流動場に影響を与える後背地地形及び大規模断層を明らかにすることを目的として、広域的な地下水流動場に大きな影響を与えると思われる地形及び大規模断層を地質構造要素としてモデル化し、後背地地形の特徴や含まれる大規模断層の異なる領域において水理地質構造モデルを構築し、地下水流動解析を行った。

平成12年度に作成したモデル(サイクル機構, 2001b)を用いた地下水流動解析結果によると、標高 -1km より深部において河川流域の境界を超えるような地下水流動がある可能性があることから(図 5.3.1)、河川流域によるモデル化領域区分は行わず、研究所用地を中心として東濃地方において後背地地形として相対的に標高の高い山(屏風山、笠置山、恵那山、御嶽山)を含む20km四方、35km四方、70km四方、115km四方の4つのスケールの正方形領域を設定し、その領域をモデル化・解析領域とした。深度方向は地表から標高 -10km としている。

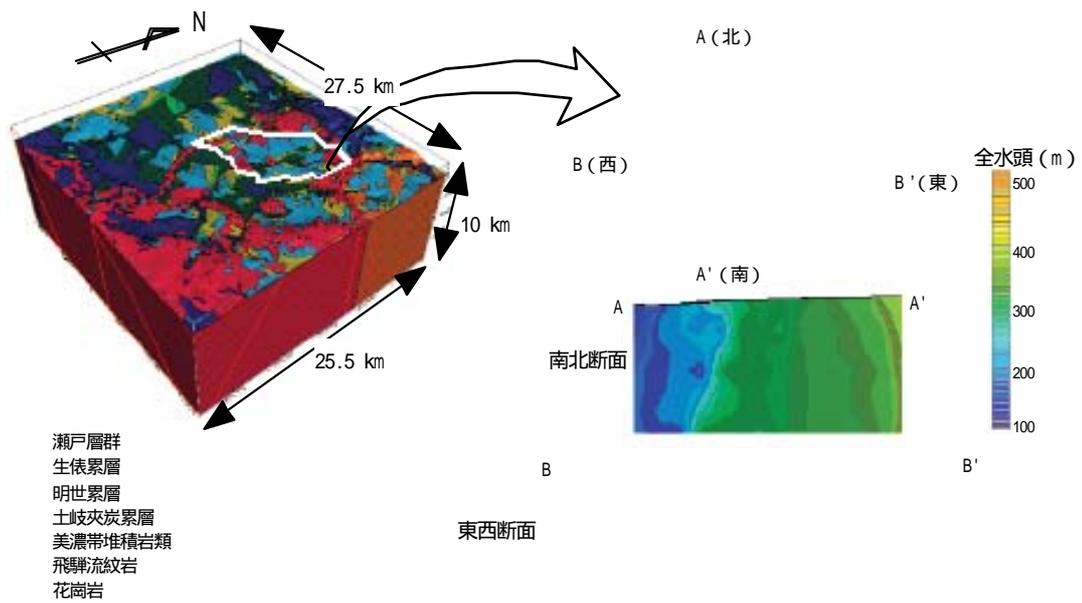


図 5.3.1 平成12年度に作成したモデルによる地下水流動解析結果

断層については「新編日本の活断層」(活断層研究会編, 1991)に記載のある断層から特に研究所用地周辺の地下水流動に大きな影響を与えると思われるものを選定した。

図 5.3.2に20km四方, 35km四方, 70km四方, 115km四方の正方形領域と, 相対的に標高の高い山々, モデル化する大規模断層の位置を示す。

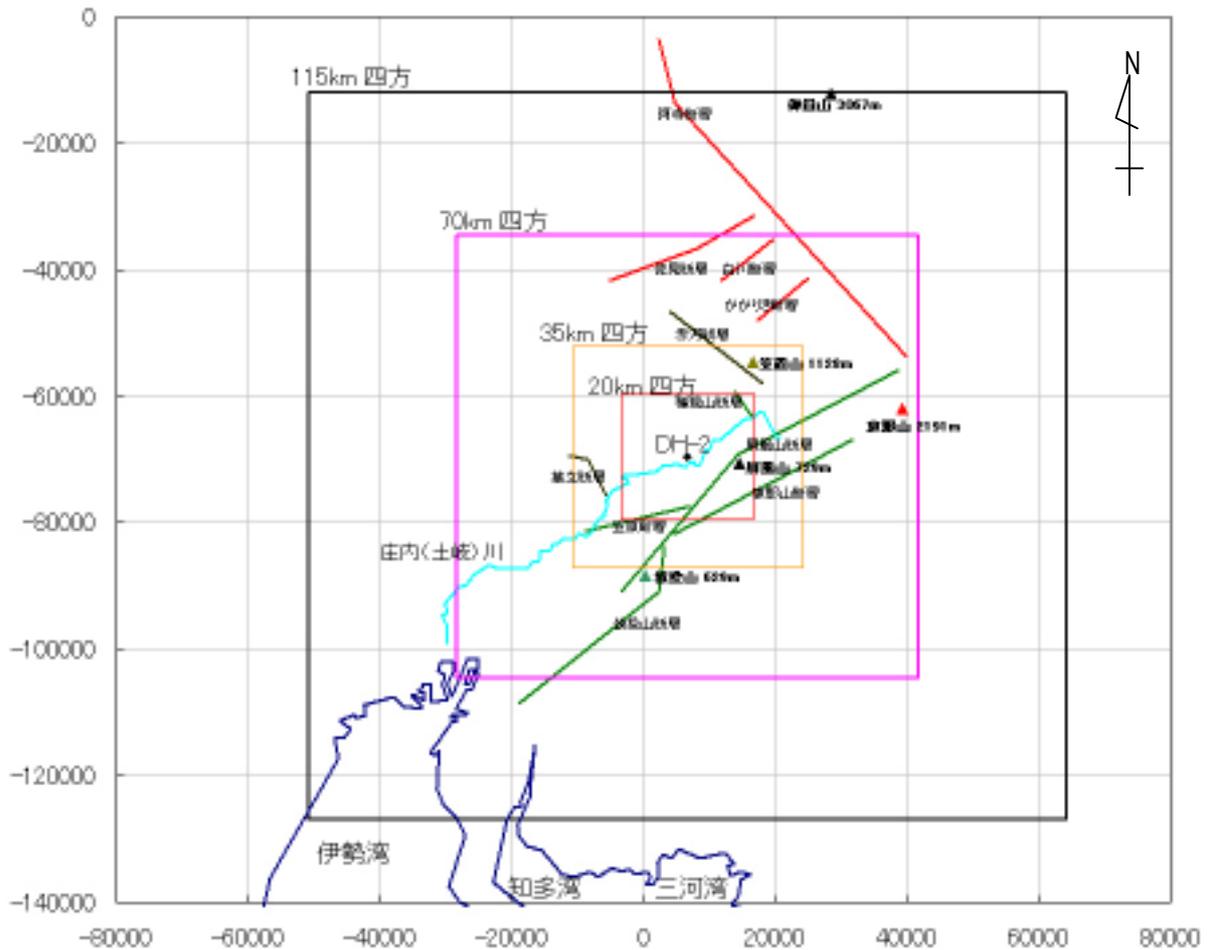


図 5.3.2 4つの正方形モデル化領域と各領域に含まれる山およびモデル化する大規模断層

(2) 物性値の設定

断層以外の透水係数は文献から花崗岩の代表的な透水係数 $6.5 \times 10^{-7} \text{m/s}$ をモデル化領域全体に設定し、断層については超深地層研究所計画において平成12年度に実施した水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析(サイクル機構, 2001c)を参考に月吉断層の直交方向の透水係数 $1.0 \times 10^{-11} \text{m/s}$ を設定した。

(3) 解析結果

解析に用いたコードは、有限差分法による三次元飽和浸透流解析コード Frac-Affinity である。なお、今回の解析は岩盤を連続体として扱い、モデルに与えた境界条件は、上部境界および側方境界が固定水頭境界、下部境界は不透水境界としている。

図 5.3.3は地下水流動解析結果から算出された，研究所用地付近の地下を通過する地下水の流線を示している。この流線から，研究所用地周辺の地下水は北～北東方向から南西～西方向へ流動していることがわかる。これはこれまでの広域地下水流動解析結果を支持している。

20km 四方のモデルを除き流線の傾向はどのスケールも同じことから 研究所用地におけるモデル化・解析に反映することを目標とした広域地下水流動のモデル化・解析実施領域として研究所用地を中心とした 35km 四方の領域として設定できる。

研究所用地付近を通過する地下水は標高約 - 2 km を境としてそれより浅部は土岐川流域境界内に，それより深部は土岐川流域境界外の笠置山周辺あるいは恵那山周辺に涵養域を持つことがわかる。すなわち土岐川流域境界を超えるような大規模な広域地下水流動系は標高約 - 2 km 以深の地下水流動場に認められ、それ以浅では土岐川流域境界内に涵養～流出までの地下水流動系を形成していると考えられる。

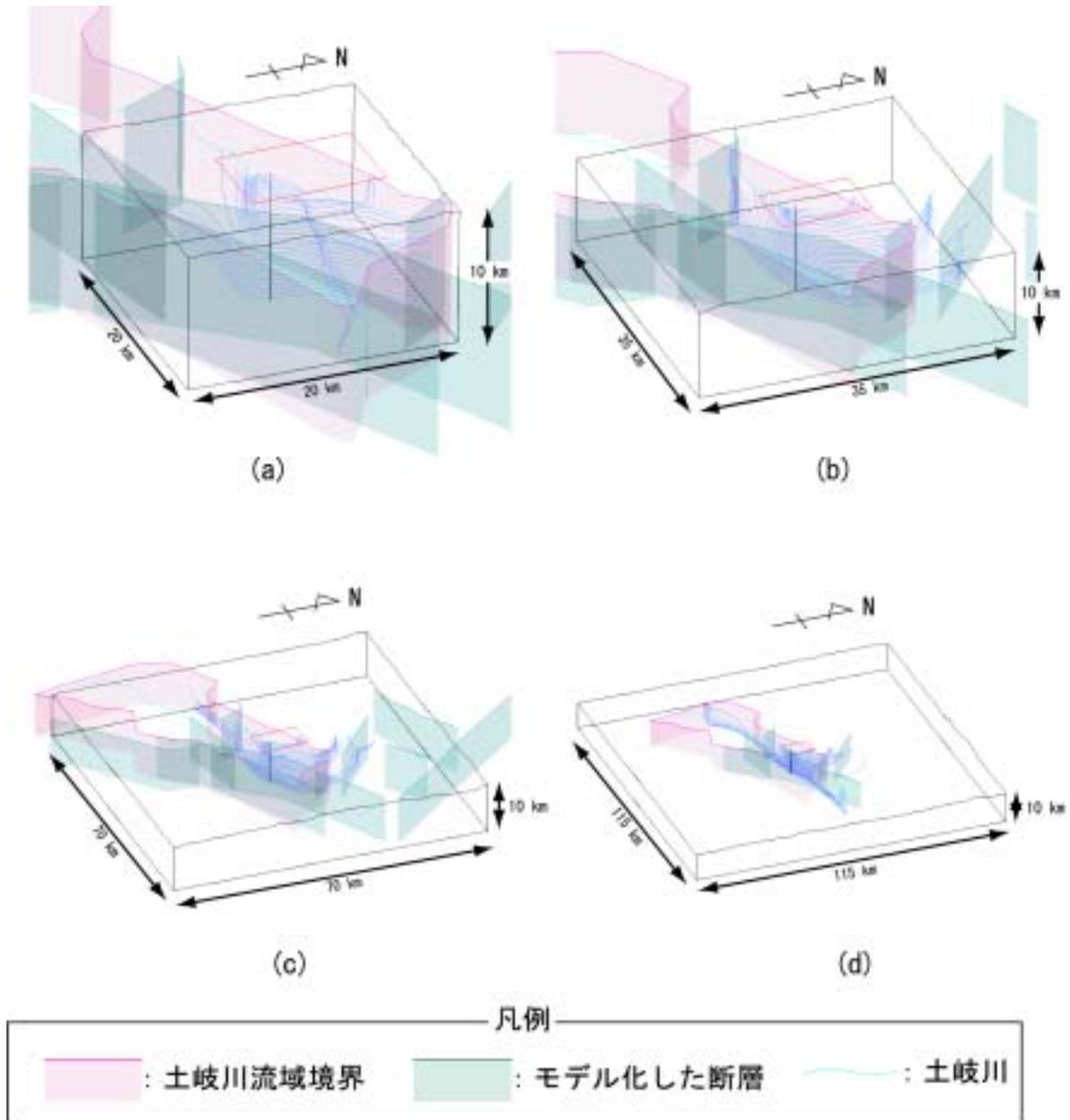


図 5.3.3 研究所用地周辺の地下を通過する地下水の流線
 (a) 20km四方モデル, (b) 35km四方モデル
 (c) 70km四方モデル, (d) 115km四方モデル

5.4 地下水位・間隙水圧の長期観測

地下水流動解析での境界条件の根拠および解析結果の検証データとなる地下水位および間隙水圧の分布およびその季節変動などを把握するため、多点式間隙水圧観測システム(MPシステム)が設置された既存試錐孔(AN-6号孔, TH-4, 6号孔, DH-3, 7号孔)での長期観測を継続実施した。また、観測体制の整備の一環として、これまで地下水位の観測のみを実施してきたDH-9, 11号孔および平成12年度に掘削したDH-13号孔にMPシステムを設置し、間隙水圧の観測を開始した。さらに、DH-5, 8, 10号孔に大気開放型水位計を設置し、地下水位観測を開始した(図5.4.1)。

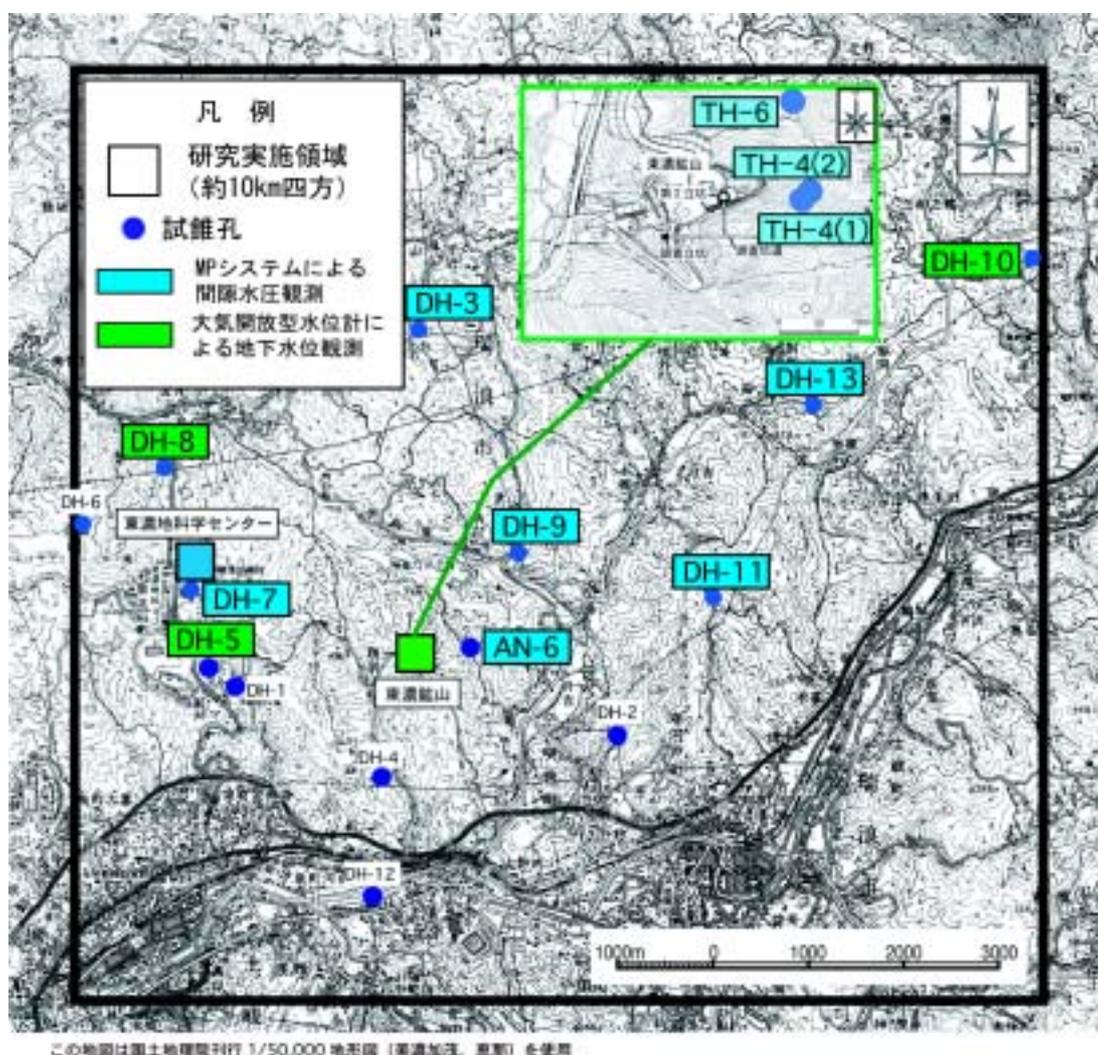


図 5.4.1 地下水長期観測孔位置図

MPシステムが設置された既存試錐孔(AN-6号孔, TH-4, 6号孔, DH-3, 7号孔)における平成13年度の観測結果(月1回)を図5.4.2に示す。観測期間による観測区間毎の間隙

水圧（標高換算）には大きな変化はないものの、特に土岐夾炭累層では水圧の変化が著しいことが分かる。また、花崗岩を対象としている DH-3 号孔は深部ほど水圧が低い、涵養域の水圧分布形態を示していることが分かる。このことは DH-3 号孔が高い標高に位置することと整合している。

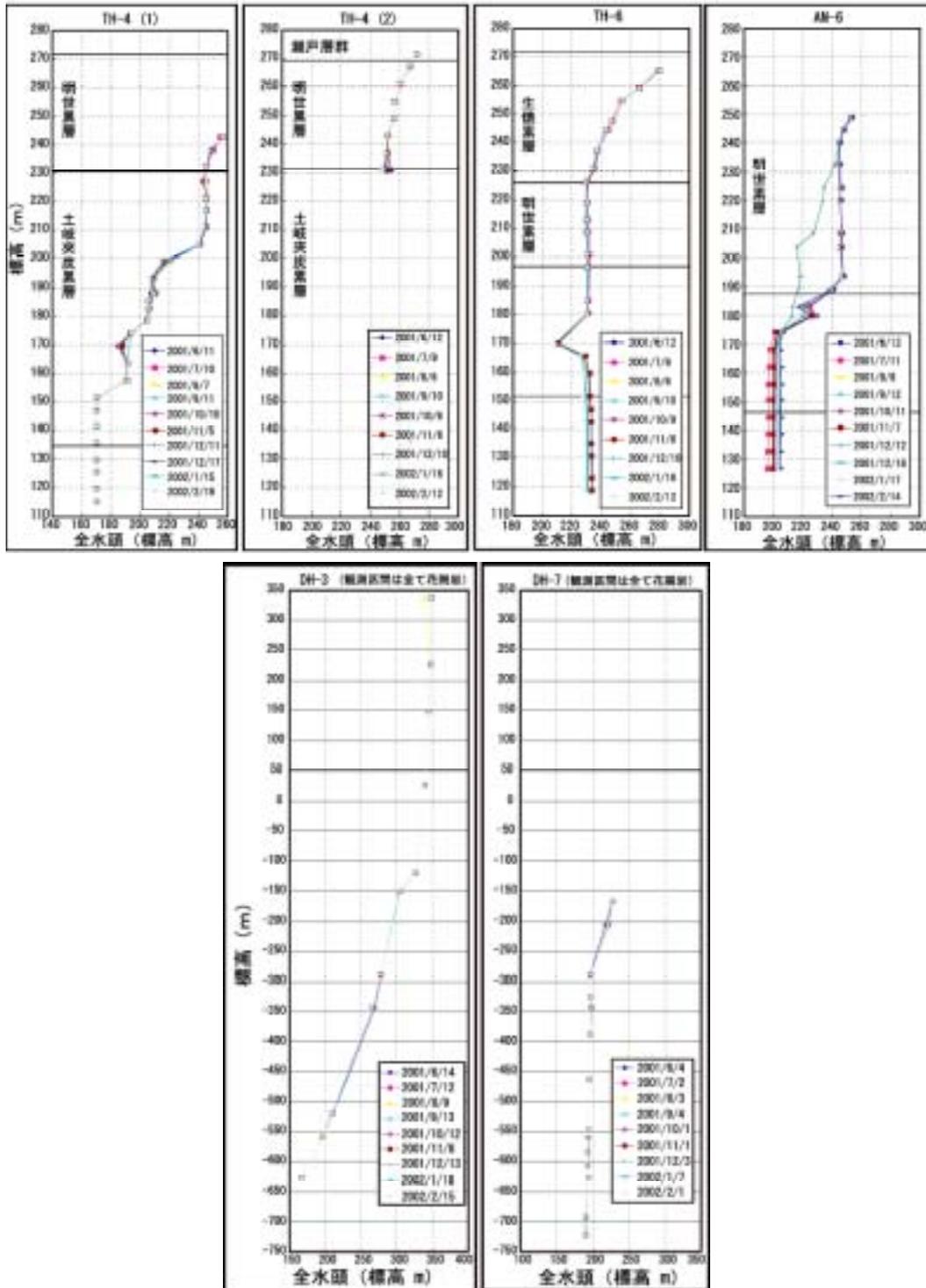


図 5.4.2 既存試錐孔における MP システム観測結果

また、平成13年度に新たにMPシステムを設置したDH-9,11,13における観測区間を表5.4.1～5.4.3に示す。ここでは特に割れ目分布にしたがって観測区間を設定した。

表 5.4.1 DH-9号孔における観測区間

DH-9号孔におけるMPシステム設置区間 (ハッカ拡張後)

孔口標高 E.L.(m) ; 275.42

区間番号	区間深度 (m)		区間長 (m)	マンホール設置深度		ボルト設置深度	
	G.L. (-m)	E.L. (m)		G.L. (-m)	E.L. (m)	G.L. (-m)	E.L. (m)
1	0.0 ~ 62.0	275.4 ~ 213.4	62.0	-	-	-	-
2	62.9 ~ 150.7	212.5 ~ 124.7	87.8	66.4	209.0	69.6	205.8
3	151.6 ~ 246.8	123.8 ~ 28.6	95.2	155.1	120.3	158.2	117.2
4	247.7 ~ 330.7	27.7 ~ -55.3	83.0	251.2	24.2	-	-
5	331.6 ~ 392.0	-56.2 ~ -116.6	60.4	335.1	-59.7	-	-
6	392.9 ~ 501.9	-117.5 ~ -226.5	109.0	396.6	-121.2	399.7	-124.3
7	502.8 ~ 572.4	-227.4 ~ -297.0	69.6	506.3	-230.9	-	-
8	573.3 ~ 681.6	-297.9 ~ -406.2	108.3	576.8	-301.4	579.9	-304.5
9	682.5 ~ 791.0	-407.1 ~ -515.6	108.5	686.0	-410.6	689.1	-413.7
10	791.9 ~ 894.5	-516.5 ~ -619.1	102.6	795.4	-520.0	798.6	-523.2
11	895.4 ~ 1030.0	-620.0 ~ -754.6	134.6	898.9	-623.5	902.0	-626.6

表 5.4.2 DH-11号孔における観測区間

DH-11号孔におけるMPシステム設置区間 (ハッカ拡張後)

孔口標高 E.L.(m) ; 339.88

区間番号	区間深度 (m)		区間長 (m)	マンホール設置深度		ボルト設置深度	
	G.L. (-m)	E.L. (m)		G.L. (-m)	E.L. (m)	G.L. (-m)	E.L. (m)
1	0.0 ~ 110.4	339.9 ~ 229.5	110.4	-	-	-	-
2	111.3 ~ 220.4	228.6 ~ 119.5	109.1	112.4	227.5	-	-
3	221.3 ~ 320.0	118.6 ~ 19.9	98.7	222.3	117.6	-	-
4	320.9 ~ 390.6	19.0 ~ -50.7	69.7	321.5	18.4	-	-
5	391.5 ~ 500.3	-51.6 ~ -160.4	108.8	392.1	-52.2	-	-
6	501.2 ~ 578.8	-161.3 ~ -238.9	77.6	501.8	-161.9	504.9	-165.0
7	579.7 ~ 665.9	-239.8 ~ -326.0	86.2	580.3	-240.4	583.4	-243.5
8	666.8 ~ 714.5	-326.9 ~ -374.6	47.7	667.4	-327.5	-	-
9	715.4 ~ 782.2	-375.5 ~ -442.3	66.8	716.0	-376.1	719.1	-379.2
10	783.1 ~ 879.5	-443.2 ~ -539.6	96.4	783.7	-443.8	786.8	-446.9
11	880.4 ~ 980.1	-540.5 ~ -640.2	99.7	881.0	-541.1	-	-
12	981.0 ~ 1012.0	-641.1 ~ -672.1	31.0	981.6	-641.7	-	-

表 5.4.3 DH-13 号孔における観測区間

DH-13号孔におけるMPシステム設置区間 (バツカ拡張後)

孔口標高 E.L.(m) ; 277.51

区間番号	区間深度 (m)		区間長 (m)	マンホークト設置深度		ポンクホークト設置深度	
	G.L. (-m)	E.L. (m)		G.L. (-m)	E.L. (m)	G.L. (-m)	E.L. (m)
1	0.0 ~ 55.1	277.5 ~ 222.5	55.1	-	-	-	-
2	56.1 ~ 110.9	221.5 ~ 166.6	54.8	59.5	218.0	-	-
3	111.8 ~ 182.4	165.7 ~ 95.1	70.6	112.0	165.5	-	-
4	183.3 ~ 252.3	94.2 ~ 25.2	69.0	183.5	94.0	186.4	91.1
5	253.2 ~ 323.2	24.3 ~ -45.7	70.0	253.4	24.1	-	-
6	324.1 ~ 407.1	-46.6 ~ -129.6	83.0	324.3	-46.8	327.3	-49.8
7	408.0 ~ 475.1	-130.5 ~ -197.6	67.1	408.2	-130.7	-	-
8	476.0 ~ 546.5	-198.5 ~ -269.0	70.5	476.2	-198.7	479.2	-201.7
9	547.4 ~ 617.5	-269.9 ~ -340.0	70.1	547.6	-270.1	-	-
10	618.4 ~ 712.5	-340.9 ~ -435.0	94.1	618.6	-341.1	-	-
11	713.4 ~ 783.9	-435.9 ~ -506.4	70.5	713.6	-436.1	716.5	-439.0
12	784.8 ~ 854.4	-507.3 ~ -576.9	69.6	785.0	-507.5	-	-
13	855.3 ~ 925.9	-577.8 ~ -648.4	70.6	855.5	-578.0	-	-
14	926.8 ~ 991.4	-649.3 ~ -713.9	64.6	927.0	-649.5	-	-
15	992.3 ~ 1015.0	-714.8 ~ -737.5	22.7	994.0	-716.5	997.0	-719.5

また、大気開放型水位計を設置した DH-5, 8, 10 の平成 13 年度における観測結果を図 5.4.3~5.4.5 に示す。この図より、孔口標高が高い試錐孔ほど地下水位が高いことが分かる。また、DH-5 号孔の水位変化は豊水期(夏期の降雨および冬季の降雪)に水位が高いという、季節変動の影響を反映した水位変化を示しているが、DH-8 号孔および DH-10 号孔には季節変動がみられない。特に DH-10 号孔においては、夏期に約 4m 水位が低下していることから、周辺における人工的な揚水等の影響が推察される。

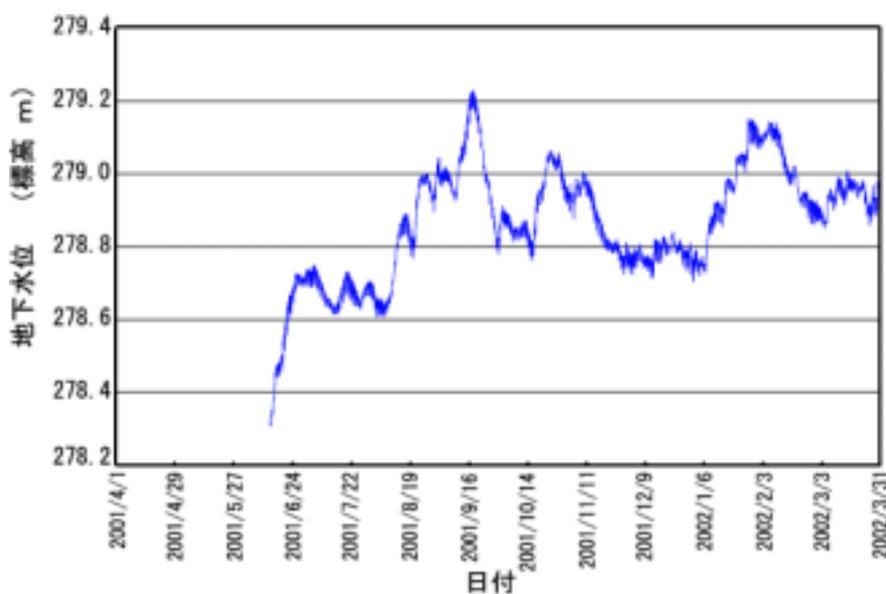


図 5.4.3 DH-5 号孔における地下水位の経時変化

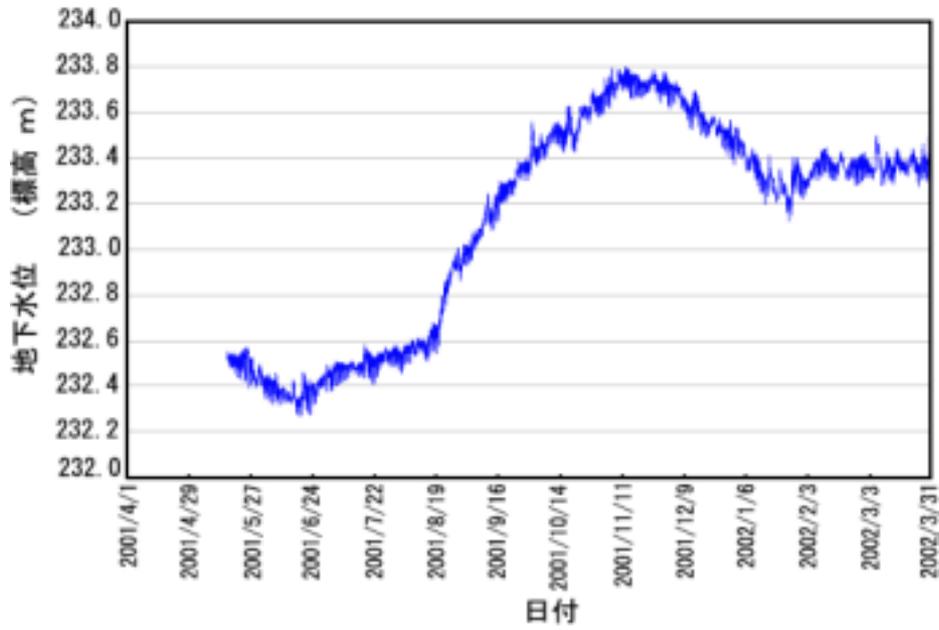


図 5.4.4 DH-8 号孔における地下水位の経時変化

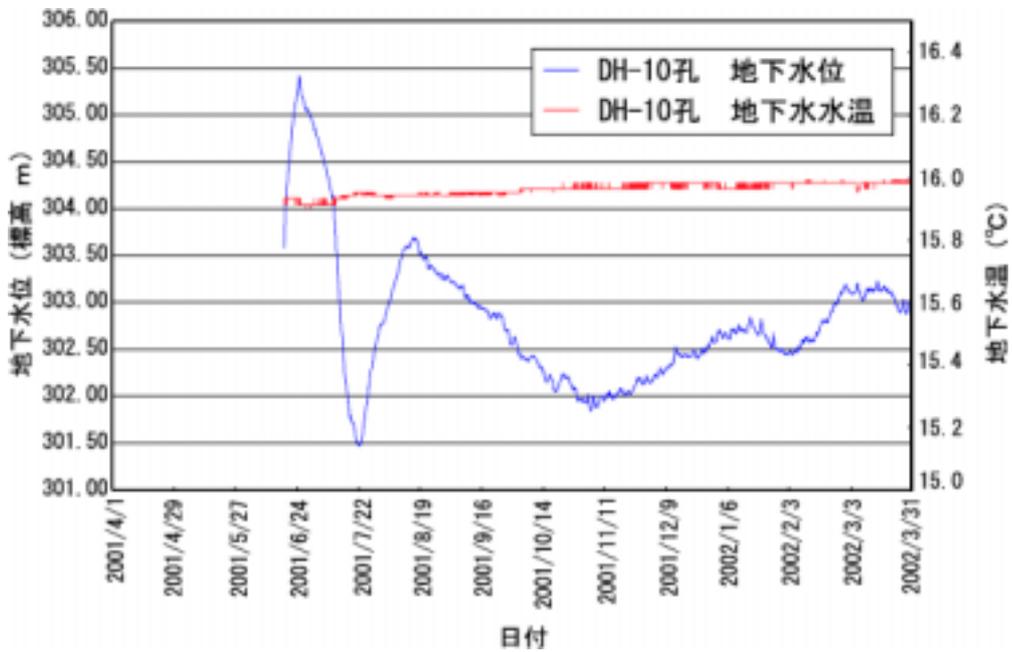


図 5.4.5 DH-10 号孔における地下水位と地下水水温の経時変化

6 . 地下水の地球化学に関する調査・研究

平成13年度においては、主に花崗岩における地下水の地球化学的情報を取得するため、DH-13号孔において水理試験と組み合わせた採水試験を実施すると共に、試錐孔を利用した地下水水質の長期観測を継続した。さらに、解析作業の一環として、これまで取得した地下水の地球化学データをデータベースとして取りまとめた。

6 . 1 地下水を対象とした地球化学調査

研究実施領域の地下水流動系の涵養域と考えられる地点における地下水の地球化学特性を把握する目的で、DH-13号孔において地下水の採水を実施した。DH-13号孔は、平成11～12年度にかけて掘削した試錐孔であり、平成12年度までに深度1,000mまでの岩芯採取、物理検層、BTV観察、深度500mまでの水理試験、採水試験を実施している(サイクル機構、2001b)。平成13年度においては、深度500m以深での水理的・地球化学的情報を取得するための水理試験・採水試験を実施した。

地下水の採水にあたっては、地下水試料の品質を保証するため、地下水と掘削水との混合の程度を定量的に把握できるように掘削水に蛍光染料(ウラニン)を添加した。また、地下水の採水時は、採水区間及び試錐孔周辺の岩盤に浸透した掘削水を除去するために予備排水を実施した。予備排水中は掘削水の混合の割合を把握するため、揚水された地下水の蛍光染料濃度および物理化学パラメータを連続的にモニタリングすると共に水質分析を実施した。なお、物理化学パラメータは地上のフローセルで測定した。水質分析用の採水は、このモニタリングデータに基づき、原則として蛍光染料(ウラニン)濃度の低下(添加濃度の1%以下)及び物理化学パラメータの一定値への収束が認められた時点で実施することとしている。なお、DH-13号孔は平成12年度内に試錐掘削完了を第1優先としたため、深度500m以深の試錐掘削中に逸水が発生した場合でも、保孔などの対策を全く行わずに掘削を継続した。

採水された地下水試料の分析結果を以下に述べる。

【分析結果】

表6.1.1に示すように本孔では合計8深度から地下水を採取した。採水を行った8深度のうち、1深度においてのみ掘削水に添加した蛍光染料の濃度が規定(10 μ g/)以下に減少した。その他の7深度においては、ウラニン濃度が規定値以下にはならなかったため参考値として示す。図6.1.1は深度713.0～783.0mでの揚水試験中のウラニン濃度測定結果である。この深度では、ウラニン濃度が約160 μ g/でほぼ一定となり、低下傾

向が認められていない。前述のように、DH-13号孔の深度 500m 以深の掘削においては、掘削中に逸水が発生した場合でも、保孔などの対策を施していない。また、本孔で実施した地下水採水は、水理試験（揚水試験）の揚水を利用し、試験中に水理的パラメータの質が担保できた時点で試験を終了することとしていたため、試錐掘削水の残留が著しい場合でも水理試験にあわせて終了した。逸水が発生する箇所をそのまま放置すると、逸水にともない掘削水が広い範囲まで浸透するため、土岐花崗岩のような亀裂性媒体を対象に、品質の高い地下水試料を効率的に得るためには、試錐掘削を中断し、掘削水の影響が広がる前に地下水採水を行う必要がある。

表 6.1.1 DH-13 号孔における地下水の水質および物理化学パラメータ

採水年月日		2001.9.6	2001.9.17	2001.9.26	2001.10.1	2001.10.6	2001.10.11	2001.10.25
採水時刻		20:40	10:20	11:20	15:30	9:15	10:30	10:00
採水区間	深度(m)	995.00-1015	856.20-926.20	713.00-783.00	546.00-616.00	474.50-544.50	253.50-323.50	182.00-252.00
	標高(m)	-717.49--737.49	578.69--648.69	435.49--505.49	268.49--338.49	196.99--266.99	24.01--45.99	95.51-25.51
地質		土岐花崗岩	土岐花崗岩	土岐花崗岩	土岐花崗岩	土岐花崗岩	土岐花崗岩	土岐花崗岩
pH	-	8.8	8.4	8.7	8.7	8.2	8.8	8.8
EC	μ S/cm	163	197	200	182	207	178	185
Uranine	μ g/ ·	78.6	49.3	156.0	35.9	3.9	58.7	86.4
Na ⁺	mg/ ·	19.0	20.6	26.9	21.4	17.3	16.8	15.5
K ⁺	mg/ ·	1.21	1.00	1.52	0.68	0.41	1.27	1.04
Ca ²⁺	mg/ ·	11.9	18.2	10.9	11.7	21.6	16.1	17.8
Mg ²⁺	mg/ ·	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	< 0.2	< 0.2	0.20
NH ₄ ⁺	mg/ ·	0.29	<0.2	<0.2	<0.2	0.24	< 0.2	< 0.2
SO ₄ ²⁻	mg/ ·	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3
Mn ²⁺	mg/ ·	<0.005	0.0080	0.0078	0.0091	0.527	0.0093	0.0118
Fe ²⁺	mg/ ·	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Total Fe	mg/ ·	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.482	0.059	< 0.05
Si	mg/ ·	6.59	9.43	12.9	11.2	12.1	11.4	11.1
Al ³⁺	mg/ ·	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	< 0.1	0.14	< 0.1
F	mg/ ·	4.13	4.21	4.92	4.22	3.57	3.51	3.42
Br	mg/ ·	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
NO ₃ ⁻	mg/ ·	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3
NO ₂ ⁻	mg/ ·	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Cl ⁻	mg/ ·	1.37	1.32	1.53	1.22	1.14	1.22	1.16
SO ₄ ²⁻	mg/ ·	5.71	4.10	4.85	5.05	4.93	4.47	4.17
Alkalinity	meq/ ·	1.13	1.44	1.38	1.28	1.57	1.30	1.39
H ₂ S	mg/ ·	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Total Carbon	mg/ ·	14.6	17.3	18.0	16.0	21.5	17.7	21.7
Inorganic Carbon	mg/ ·	12.6	16.8	16.5	14.7	20.1	15.1	18.3
Organic Carbon	mg/ ·	2.1	<1 (0.5)	1.5	1.3	1.4	2.7	3.4
cation	meq/ ·	1.467	1.827	1.751	1.529	1.842	1.566	1.604
anion	meq/ ·	1.508	1.781	1.783	1.642	1.895	1.611	1.688
Cation Anion	meq/ ·	-0.041	0.046	-0.032	-0.112	-0.054	-0.045	-0.084
³ H(TU)	TU	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.5	<0.4
³ H/ ³ H (‰)	‰	-53.8	-54.7	-54.4	-53.9	-53.5	-53.8	-54.5
¹⁸ O/ ¹⁸ O (‰)	‰	-8.0	-8.1	-8.2	-8.2	-8.0	-8.1	-8.1

本孔での地下水の水質については、調査を実施した全ての深度において、Na-Ca-HCO₃型を、pHは8～9の値を示していた。これらの結果は、本孔で実施した深度500m以浅での調査結果（サイクル機構，2001b）と矛盾がなかった。さらに、土岐花崗岩中の地下水水質に関するこれまでの調査結果（サイクル機構，1999）とも整合していた。

本孔においては、地下水中の希ガス（ヘリウムなど）同位体の測定を実施している。測定結果は、後述の地下水長期観測の章で述べる。

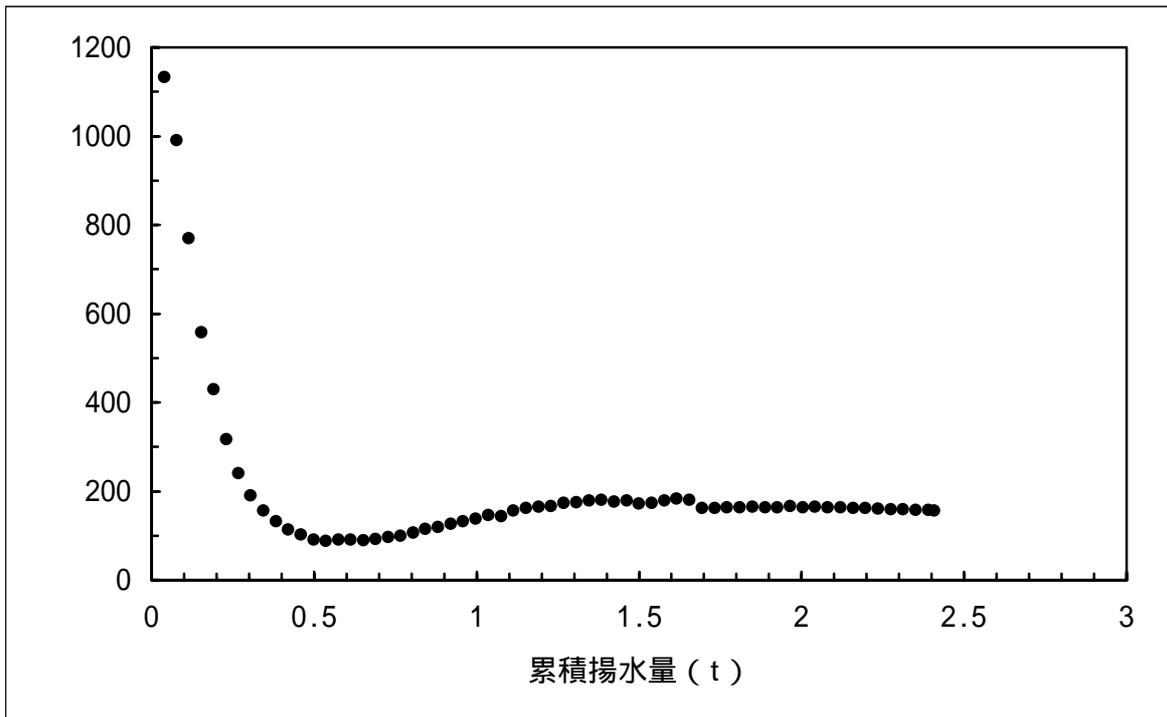


図 6.1.1 揚水試験中のウラン濃度測定結果
（DH-13号孔，深度713.0-783.0m）

6.2 固相を対象とした地球化学調査

固相を対象とした地球化学調査としては、ストロンチウム（Sr）の同位体の測定を行った。岩石と地下水の水・岩石反応が十分進んでいれば、岩石中と地下水中のストロンチウム同位体比（⁸⁷Sr/⁸⁶Sr）が同じになる可能性があるなど、ストロンチウムの同位体比は水・岩石反応の程度の指標となる可能性がある。今回分析を行ったのは DH-3号孔の地下水、岩石試料である。岩石については、岩芯を粉碎後に溶解しストロンチウムの同位体測定を行った。地下水については、ストロンチウムを化学分離を行った後に同位体の測定を行った。なお、本測定は東京大学との共同研究（公募型研究）の一環として実施したものである。

DH-3号孔では，岩石中の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比の分布には幅があり（図 6.2.1），深度や岩相との明確な相関は認められなかった。さらに，岩芯を採取した同一深度の地下水中の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比との明確な関係も認められなかった（図 6.2.1）。今回の岩石試料の測定結果は岩芯全岩を用いた試料のものであり，今後は岩石の中からストロンチウムが多く含まれる鉱物を分離し，その試料を測定に用いるなど， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体を利用した研究に関しては手法の検討が必要であると考えられる。

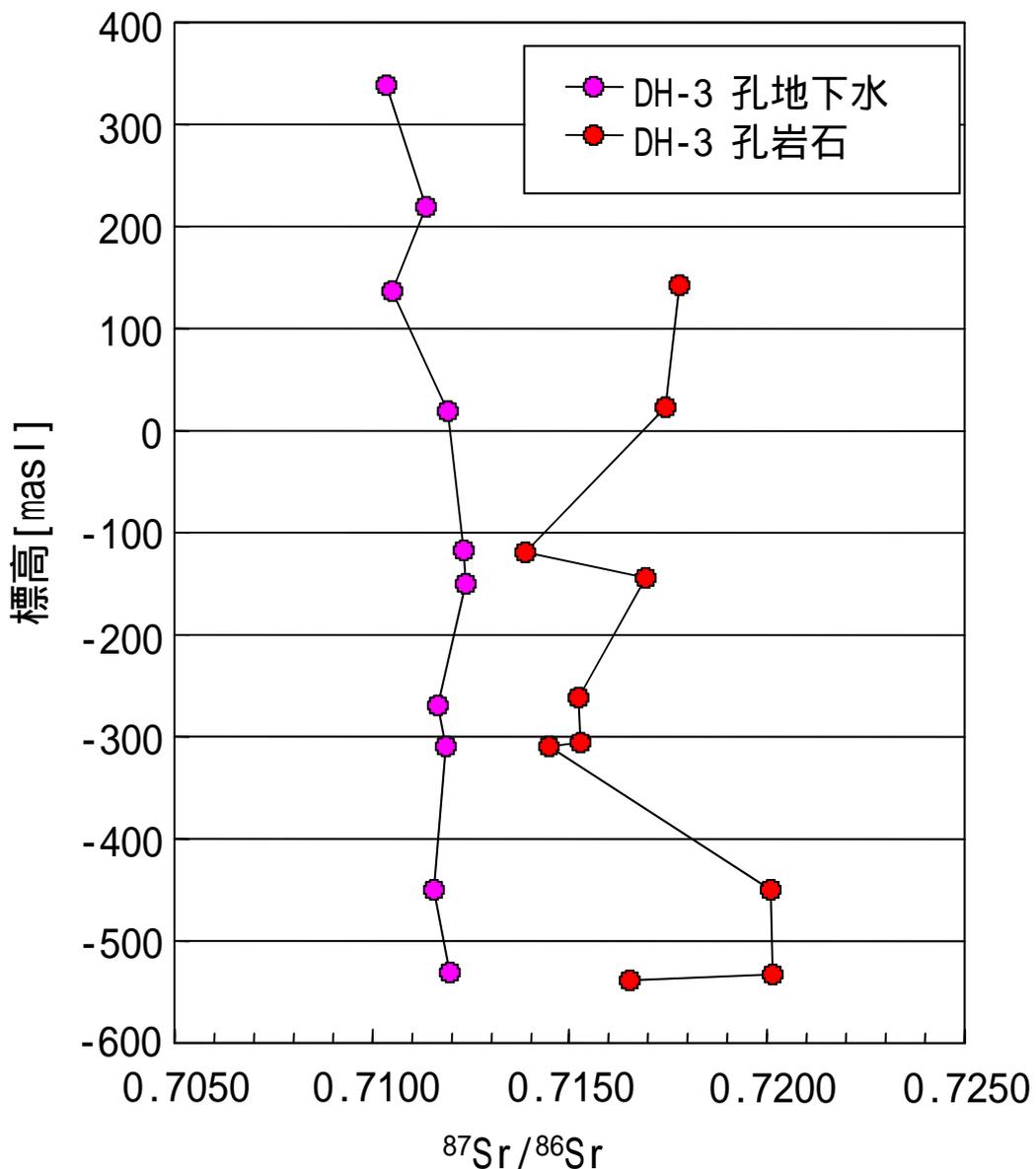


図 6.2.1 DH-3号孔におけるストロンチウム同位体 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 測定結果
 (岩石中のストロンチウム同位体比と地下水中のストロンチウム同位体比の比較)

6.3 地下水の地球化学モデルの構築

平成12年度までに構築でデータベースに、逐次データの追加を行い、データベースの更新を継続して実施した。

6.4 地下水水質の長期観測

既存の試錐孔（DH-3,7号孔）に設置したMPシステムの採水機能を用いて、地下水の水質（主要溶存成分、溶存ガス、環境同位体）に関する長期観測を継続した。以下に、DH-3,7号孔およびDH-13号孔における地下水中の希ガス（ヘリウムおよびネオン）同位体の測定結果の概要を述べる。

【同位体測定結果】

研究実施領域における地下水の起源を検討するため、平成12年度までにTH-6号孔、DH-3, 12, 13号孔、MIU-4号孔で採取された地下水中のヘリウム同位体比を測定してきている（森川, 2001, サイクル機構, 2001b）。その結果、土岐川北岸域に位置する堆積岩および土岐花崗岩中の地下水中の希ガス同位体比は、大気成分と放射壊変成分の混合で説明できることが明らかになっている。平成13年度においては、再現性の確認など、これまでの知見を確認することを目的として、DH-3, 7, 13号孔を対象として調査を行った。なお、本測定も前述のストロンチウム同位体測定と同様に、東京大学との共同研究（公募型研究）の一環として実施した。

今回取得した地下水中の $^3\text{He}/^4\text{He}$, $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 同位体比は、全て大気成分と放射壊変成分の混合ライン上にプロットされる（図 6.4.1）。この結果は、これまでの研究成果と矛盾がないと考えられる。

図 6.4.1 各試錐孔より採取された地下水試料の $^3\text{He} / ^4\text{He}$ 比と
 $^4\text{He} / ^{20}\text{Ne}$ 比との関係

7．調査技術開発

地質環境の調査技術の構築は、広域地下水流動研究の重要な研究課題の一つである。調査技術開発の目標としては、深度約1,000mまでの地質構造、地下水の流動特性および地球化学特性、岩盤の力学特性などを正確に把握できることが挙げられる。このためには、調査を行うことによる地質環境への影響を最小限に留めること、調査機器の測定精度を高めること等が重要である。このような観点から、地質環境の調査・解析に必要な要素技術の開発・改良、並びに体系的な地質環境の調査・解析手法の構築に向けた検討を実施した。

7.1 地質構造調査技術開発

リモートセンシング調査で判読されたリニアメントを対象として高密度電気探査を実施し、断層破碎帯調査における本探査手法の適用性を検討した。本探査手法の結果によると、花崗岩中（高比抵抗層）の中の断層破碎帯（低比抵抗帯）を検出するために適用することは可能で、今回の調査仕様の調査を用いれば地表付近で5～10m程度の分解能で断層破碎帯を検出できると考えることができた。

7.2 地下水の水理特性・地球化学特性調査技術開発

地表から地下深部までの水理特性・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、1,000m対応および高温（70度）対応の調査機器および単孔式揚水試験に対応できる調査機器を開発してきている。

平成13年度までに、パッカーの遮水性をさらに向上させるため、および多数の割れ目を有する岩盤においても遮水性を確保するために、パッカーを多数連結して同時拡張を行える機能を付加する改良を行った。

平成14年度は、1,500mクラスの試錐孔に対応するため、1,000m対応水理試験装置の改良を行う予定である。

7.3 岩盤の力学特性調査技術開発

一般に用いられている初期応力測定手法としては、水圧破碎法や応力解法などの試錐孔を利用する方法や、AE法やDRA法などの岩芯サンプルを利用する方法がある。これらの手法は、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・解析する上

での制約条件があり、さらに適用深度についても制限があるため、深度1,000mにおける3次元初期応力を計測することができる信頼性の高い方法の確立が求められている。

このような観点から国内外の研究事例を対象とした文献調査、手法の選定、装置の設計を経て、平成12年度は装置のプロトタイプを完成させた。

平成13年度においては、深度1,000m対応の3次元初期応力測定装置の原位置での初期応力測定に必要な付帯装置を作成し、原位置において装置の作動を確認した。

7.4 統計解析手法を用いた地質環境解析の不確実性評価手法の開発

地質環境の不均一性評価に伴う不確実性の定量的評価手法の開発を目的に、平成12年度までに、東濃鉱山周辺の地質環境データ（試錐柱状図、検層結果、透水試験結果など）を用いて、2次元の地質環境を対象とした統計解析手法の適用性検討を実施した。その結果、不確実性と調査量の関係を提言できたほか、ファジーデータを用いることにより地質環境の物性値の不均一性に伴う不確実性の大きさを定量的に示すことが可能であることや、物性値の不確実性はファジー変動幅とクリッキング標準偏差を用いて定量化することが可能であることなどがわかった（戸井田ほか、2000；戸井田ほか、2001）。

平成13年度は、これまでの成果をうけ、東濃鉱山周辺での調査結果を基に、広域（約30km四方）、中域（約6km×4km）から小域（約300m四方）へと調査が進展していくことを想定し、地質構造・水理地質構造のモデル化および2次元地下水流動解析を行い、調査量と解析結果（地下水流量等）の不確実性の関係を確認した（戸井田ほか、2002）。

具体的には、広域では中域の水理境界条件の設定と地質学的区分を行うために必要な情報を既存文献に基づき整理した。次に中域では、調査の進展にあわせて、第1段階（文献調査）、第2段階（地表地質踏査）、第3段階（1本の試錐孔を用いた地質・地質構造調査）、第4段階（1本の試錐孔での水理試験）の4つの段階に分け、それぞれの段階において2次元地下水流動解析および不確実性解析を行った。この結果に基づき小域の水理的な境界条件を設定した。小域では3本の試錐孔を利用した地質・地質構造調査と水理試験結果を利用した2次元地下水流動解析および不確実性解析を実施した。中域および小域の地質構造および水理地質構造モデルの不確実性評価はファジー理論により行い、それぞれに含まれる不確実性はメンバーシップ（確からしさ）を用いて評価した。メンバーシップの設定は研究者へのインタビュー結果に基づき実施した。その結果、調査の各段階で想定し得る（あるいは否定できない）モデルやパラメータの全体集合を考えることにより不確実性を定量化でき、調査結果に基づき蓋然性が低いと考えられる選択肢を絞り込むことによってその不確実性を低減できるという新たなアプローチを考案した。また、このアプ

ローチを用いた解析により，調査の進捗度を各段階での不確実性の低減という形で定量的に示すことができることがわかった。

8．研究成果の統合化

平成13年度においては，これまでの調査結果の取りまとめを継続するとともに，平成16年度頃に予定されている研究成果の取りまとめまでに実施すべき研究課題の整理と平成14年度以降の研究計画の検討を開始した。

また，平成12年度までに得られた成果に基づき，広域地下水流動研究の現状のとりまとめを行った（小出・前田，2001）。

9．まとめ

平成13年度は，平成12年度に掘削した試錐孔（DH-13号孔）を利用した水理試験・地下水採水，並びにリモートセンシング調査で判読されたりニアメントを対象とした高密度電気探査などを実施した。また，表層水理調査および既存の試錐孔を利用した地下水の長期観測を継続した。解析作業としては 情報の種類や量の違いによるモデルの詳細さの違いや，それらのモデルを用いた地下水流動解析結果の差異の検討などを実施した。調査技術開発に関しては，調査に適用された要素技術の評価，並びに調査手法・調査機器の開発・改良を継続した。

本年度における各研究分野の調査・研究の実績および主な成果は以下の通りである。

9.1 地質・地質構造に関する調査・研究

(1) 高密度電気探査

リモートセンシング調査で判読されたりニアメントのうち，研究実施領域の地下水を規制している可能性があるリニアメントを対象として本探査を実施した。探査は，花崗岩が地表付近に分布していると推定された場所に測線を設置し実施した。その結果，深度100m程度までの地質分布が推定されるとともに，花崗岩中（高比抵抗層）の中の断層破碎帯（低比抵抗帯）を検出するために適用することは可能で，今回の調査仕様の調査を用いれば地表付近で5～10m程度の分解能で断層破碎帯を検出できると考えることができた。

(2) 地質構造モデルの構築

平成14年1月17日に、瑞浪市と瑞浪市明世町の研究所用地の賃貸借契約を締結し、超深地層研究所の研究坑道および関連施設を設置することとなったことに伴い、広域地下水流動解析の領域を研究所用地の水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析に反映できるような領域に修正することとした。これに応じて広域地下水流動のモデル化・解析実施領域の設定に関する検討に着手し、研究所用地を中心とした20km四方、35km四方、70km四方、115km四方の4つのスケールの正方形領域を設定し、モデル化した。

9.2 地下水の水理に関する調査・研究

(1) 表層水理調査

地下水流動解析の境界条件や初期条件の設定に必要な岩盤浸透量や地下水位などの情報を取得するために、正馬川および柄石川流域で表層水理定数観測システムを用いた水収支観測を継続した。これまでの観測結果から、観測対象面積と岩盤浸透量の関係について検討した結果、流域面積の増加に伴い岩盤浸透量が双曲線状に減少する傾向が認められた。この結果に基づけば地下水流動解析の上部境界条件として与える岩盤浸透量は、数10mm程度となる。

(2) 深層水理調査

平成12年度に掘削されたDH-13号孔を利用して 研究対象領域の涵養域での地下水流動特性を把握するために、地下深部の地下水流動を規制していると考えられる割れ目帯や断層破碎帯を含む区間を対象とした水理試験を8点で実施した。水理試験の結果は、透水係数で 10^{-8} (m/sec) ~ 10^{-6} (m/sec) オーダーを示した。また、間隙水圧観測の結果、土岐夾炭累層から花崗岩上部にかけての試錐孔浅部で比較的水圧が高く、逆に孔底付近で低いことが確認され、涵養域の地下水圧ば分布形態と一致した。

水理試験終了後、DH-13号孔の主要な割れ目帯の間隙水圧などを把握するために、地下水の長期モニタリング装置を設置した。

(3) 地下水流動解析

研究所用地におけるモデル化・解析に反映することを目標とした広域地下水流動のモデル化と解析実施領域の設定に関する検討では、広域地下水流動のモデル化・解析実施領域として、研究所用地を中心とした35km四方の領域として設定できることがわかった。

(4) 地下水位・間隙水圧の長期観測

地下水流動解析での境界条件の根拠および解析結果の検証データとなる地下水位および間隙水圧の分布,およびその季節変動などを把握するため,AN-6号孔,TH-4,6号孔,DH-3,7号孔でMPシステムを用いた間隙水圧観測を継続すると共に,DH-9,11,13号孔に新たにMPシステムを設置し,間隙水圧観測を開始した。また,DH-5,8,10号孔には大気開放型水位計を設置し,地下水位観測を開始した。

9.3 地下水の地球化学に関する調査・研究

(1) 地下水を対象とした地球化学調査

DH-13号孔の深度500m以深の地下水を採水・分析した結果,調査を実施した全ての深度において,水質はNa-Ca-HCO₃型,pHは8~9の値を示し,本孔の深度500m以浅での調査結果と矛盾がなく,これまでの土岐花崗岩中の地下水水質の調査結果と整合した。ただし,掘削終了後に時間が経過した後に採水したため掘削水の影響が広がり,,ほとんどの採水区間において掘削水に添加した蛍光染料の濃度が規定(10 µg/)以下にならなかった。

(2) 固相を対象とした地球化学調査

固相を対象とした地球化学調査としては,DH-3号孔の岩石および地下水を用いてストロンチウムの同位体測定を行い,ストロンチウム同位体比の水・岩石反応の進行程度の指標となる可能性を検討した。その結果,今回の測定は岩芯全岩を用いており,明確な関係を検討する情報を得ることができなかった。今後は,ストロンチウムを多く含む鉱物を分離し,同位体測定を行う必要がある。

(3) 地下水の地球化学モデルの構築

平成12年度までに構築したデータベースに,逐次データを追加した。

(4) 地下水水質の長期観測

既存の試錐孔(DH-3,7号孔)に設置したMPシステムの採水機能を用いて,地下水の水質(主要溶存成分,溶存ガス,環境同位体)に関する長期観測を継続した。また,これまで研究実施領域における地下水の起源を検討するため,希ガス(ヘリウムおよびネオン)同位体測定を行っており,再現性などの確認のためDH-3,7号孔およびDH-13号孔における地下水中の希ガスの同位体の測定を行った。その結果,これまでの結果はこれまでの研究成果と矛盾はなかった。

9.4 調査技術開発

(1) 地質環境調査技術開発

リモートセンシング調査で判読されたりニアメントを対象として高密度電気探査を実施し、断層破碎帯調査における本探査手法の適用性を検討し、検出分解能などを検討した。

(2) 地下水の水理特性・地球化学特性調査技術開発

平成13年度までに、パッカーの遮水性をさらに向上させるため、および多数の割れ目を有する岩盤においても遮水性を確保するために、パッカーを多数連結して同時拡張を行える機能を付加する改良を行った。

(3) 岩盤の力学特性調査技術開発

平成13年度においては、深度1,000m対応の3次元初期応力測定装置の原位置での初期応力測定に必要な付帯装置を作成し、原位置において装置の作動を確認した。

(4) 統計解析手法を用いた地質環境解析の不確実性評価手法の開発

平成13年度においては、調査の各段階で想定し得る（あるいは否定できない）モデルやパラメータの全体集合を考えることにより不確実性を定量化でき、調査結果に基づき蓋然性が低いと考えられる選択肢を絞り込むことによってその不確実性を低減できるという新たなアプローチを考案した。また、このアプローチを用いた解析により、調査の進捗度を各段階での不確実性の低減という形で定量的に示すことができることがわかった。

9.5 研究成果の統合化

平成16年度頃に予定されている広域地下水流動研究の研究成果の取りまとめまでに実施すべき研究課題の整理と平成14年度以降の研究計画の検討を開始するとともに、平成12年度までに得られた成果を取りまとめた。