

広域地下水流動研究
年度報告書（平成14年度）

（研究報告）

2003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

電話：029-282-1122(代表)

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)

2003

広域地下水流動研究 年度報告書（平成14年度）
（研究報告）

天野 健治*, 岩月 輝希*, 上原大二郎*
佐々木圭一*, 竹内 真司*, 中間 茂雄*

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、広域における地表から地下深部までの地質・地質構造、地下水の流動特性や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、ならびに調査・解析結果の妥当性を評価するための技術の開発を主な目的として、「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鉦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において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、試錐調査および地下水長期観測を実施してきた。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・鉦物組成）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を蓄積してきた。

平成14年度においては、リージョナルスケールを対象とした調査・研究として、リージョナルスケールにおける地下水流動解析を実施し、リージョナルスケールのモデル化の領域設定方法の考え方を提示するとともに、リージョナルスケールでの地下水の違いが解析結果に与える影響について検討した。また、ローカルスケールのモデル化・解析領域およびその境界条件の設定方法の考え方を提示し、ローカルスケールを対象とした調査として、リニアメント調査、反射法弾性波探査を実施した。さらに、DH-2号孔を利用したVSP探査、地下水調査などを実施するとともに、既存試錐孔を利用した地下水の長期観測を実施した。調査技術開発として調査に適用された要素技術の評価ならびに調査手法・調査機器の開発・改良を継続した。

* 地質環境研究グループ

Tono Regional Hydrogeological Study Project
Annual Report 2002
(Research Report)

Kenji Amano*, Teruki Iwatsuki*, Daijiro Uehara*, Kei-ichi Sasaki*,
Shinji Takeuchi* and Shigeo Nakama*

Abstract

Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute has been conducting a wide range of geoscientific research in order to build firm scientific and technological basis for the research and development of geological disposal. One of the ongoing geoscientific research programme is a Regional Hydrogeological Study (RHS) project in the Tono region, central Japan. The main goal of the RHS project is to develop and demonstrate the surface-based investigation methodologies to characterize geological environments on regional scale in Japan. The RHS project was initiated in 1992.

To date, remote sensing, geological mapping, airborne and ground geophysical investigations have been carried out and thirteen deep boreholes have been also drilled and investigations include geophysical logging, hydraulic tests etc. using these boreholes have been done in the study area of the RHS project (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 parameters, and evolution of the groundwater geochemistry.

During fiscal year 2002, as the research for regional scale, groundwater simulation was carried out, and the domain setting method of modeling in regional scale was shown and the domain of local scale in the RHS project area was determined. The setting method of modeling/simulation of the local scale domain and its boundary condition were shown. Lineament investigation and reflection seismic survey were carried out in the local scale domain. VSP survey and some investigations concerning groundwater flow and chemistry were conducted in DH-2 borehole. Long-term groundwater monitoring using the existing boreholes was continued. Improvement of the instruments of hydraulic test and groundwater sampling was also continued.

* Geoscience Research Group

目次

1	はじめに	1
2	広域地下水流動研究の概要	2
2.1	リージョナルスケールを対象とした調査・研究	3
2.2	ローカルスケールを対象とした調査・研究	3
2.3	調査技術・調査機器の開発	4
3	平成14年度の研究実績	5
4	リージョナルスケールを対象とした調査・研究	6
4.1	リージョナルスケールにおけるモデル化技術の構築	6
4.1.1	目標	6
4.1.2	実施内容および主な成果	6
5	ローカルスケールを対象とした調査・研究	9
5.1	断層・割れ目帯を考慮した調査技術の構築	9
5.1.1	目標	9
5.1.2	実施内容および主な成果	9
5.2	地質環境のモニタリング技術および調査フローの構築	20
5.2.1	目標	20
5.2.2	実施内容および主な成果	20
5.3	ローカルスケールにおける地下水流動モデル化技術の構築	25
5.3.1	目標	25
5.3.2	実施内容および主な成果	25
5.4	地下水流動モデルと地球化学モデルの整合性の確認	26
5.4.1	目標	26
5.4.2	実施内容および主な成果	26
6	調査技術・調査機器の開発	32
6.1	目標	32
6.2	実施内容および主な成果	32
7	まとめ	35
	参考文献	36

図表目次

図 2. 1	スケール概念	2
図 2. 2	広域地下水流動研究の研究実施領域および領域周辺の地質図	3
図 4. 1	研究所用地からの距離と最大標高との関係	6
図 4. 2	リージョナルスケールのモデル化領域	7
図 4. 3	地下水流動解析結果（研究所用地周辺を通過する地下水の流線）	8
図 5. 1	リニアメント判読結果図	10
図 5. 2	リニアメントの長さ別頻度分布	10
図 5. 3	地表割れ目調査結果	11
図 5. 4	マルチオフセット VSP 探査 調査位置	12
図 5. 5	マルチオフセット VSP 探査（重合断面図，弾性波動モデリング結果）	13
図 5. 6	マルチオフセット VSP 探査（弾性波動モデリング結果）	14
図 5. 7	反射法弾性波探査 調査位置	15
図 5. 8	反射法弾性波探査 マイグレーション深度断面図	16
図 5. 9	DH-2 号孔において抽出された割れ目帯と断層岩の厚さの分布	16
図 5. 10	DH-2 号孔における低角度傾斜を有する割れ目の集中帯の分布	17
図 5. 11	DH-2 号孔において抽出された地下水の流出入箇所と地質構造	17
図 5. 12	DH-2 号孔の地下水の流出入箇所に認められる割れ目の方位分布	18
図 5. 13	DH-2 号孔における検層・水理試験結果	19
図 5. 14	表層水理観測位置図	21
図 5. 15	PIEZO システムの概念図	22
図 5. 16	DH-2 号孔の各区間における水圧連続観測結果	23
図 5. 17	広域地下水流動研究における地下水圧モニタリングシステム位置図	24
図 5. 18	既存試錐孔における MP システム観測結果	24
図 5. 19	ローカルスケールのモデル化領域	25
図 5. 20	地下水の水質形成モデル概念図	28
図 5. 21	Cl ⁻ 濃度と Br ⁻ 濃度の相関図	29
図 5. 22	Cl ⁻ 濃度と F ⁻ 濃度の相関図	29
図 5. 23	河川水および地下水の ³⁶ Cl 濃度	30
図 5. 24	地下水試料の ³ He/ ⁴ He 比と ⁴ He/ ²⁰ Ne の関係	30
図 5. 25	花崗岩中の地下水の pH と無機炭素濃度から計算した Pco ₂ の関係	31
図 6. 1	光ファイバーを用いた地下水圧モニタリング装置	33
表 2. 1	広域地下水流動研究で対象とするスケールと地質環境特性の記述要素	4
表 3. 1	平成 14 年度 調査・研究スケジュール（実績）	5
表 5. 1	DH-2 号孔における原位置透水試験結果	19
表 5. 2	平成 14 年度岩盤浸透量	21
表 5. 3	DH-2 号孔における測定区間	23
表 5. 4	DH-9 号孔の地下水分析結果	27
表 5. 5	DH-2 号孔の揚水試料分析結果	27
表 6. 1	圧力計の測定性能	33

1. はじめに

広域地下水流動研究は、広域における地質環境、特に地下水の流動特性・地球化学特性、およびこれらの特性を規定する地形・地質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、平成4年度から岐阜県土岐市にある東濃鉱山およびその周辺域を研究開発の場として実施している。

本研究では、開始後の5年間（平成4年度～平成8年度）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を行った。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・地質構造、地下水の流動特性および地球化学特性に関する研究を通じて地質環境の調査技術の体系化に向けた研究を進めている（サイクル機構，2000；小出・前田，2001）。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の成果である第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）。

本報告書は、「広域地下水流動研究年度計画書（平成14年度）」（サイクル機構，2002a）に従って、東濃地科学センターが平成14年度に実施した調査・研究の成果を取りまとめたものである。

2. 広域地下水流動研究の概要

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）東濃地科学センターにおいては、結晶質岩（花崗岩）を対象とした地質環境特性に関する研究を広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の2つのプロジェクトが担っている。超深地層研究所計画の瑞浪超深地層研究所用地（以下、研究所用地）と正馬様用地は、広域地下水流動研究の研究実施領域の中に位置しており、双方の研究成果を有機的に組み合わせることにより、地質環境を体系的に調査・評価するための技術の整備を進めている（サイクル機構、2002a）。

このうち、広域地下水流動研究では、平成4年度から東濃鉦山周辺の10km四方程度を調査対象（研究実施領域）（図2.2）に、広域における地表から地下深部までの地質・地質構造、地下水の流動特性や地球化学特などを明らかにするために必要な調査・解析技術ならびに調査・解析結果の妥当性を評価するための技術の開発を主な目的として進めている（動燃事業団、1997）。

「広域地下水流動研究年度計画書（平成14年度）」（サイクル機構、2002a）では、地質環境を体系的に調査・評価するための技術の整備を行うスケールを、「広域スケール（数10km四方）」、「ローカルスケール（数km四方）」、「ブロックスケール（数100m四方）」と区分した上で、広域地下水流動研究の対象スケールを「広域スケール」および「ローカルスケール」とした。本計画書策定後、地層処分研究開発における「安全評価手法の高度化」の基盤となる地質環境特性に関わる情報を体系的に整備する観点から、スケールを図2.1のように「リージョナルスケール」、「ローカルスケール」、「サイトスケール」、「ブロックスケール」とした（サイクル機構、2003a）。広域地下水流動研究は、このうち、リージョナルスケールおよびローカルスケールを対象とする（サイクル機構、2003a）。

本研究では、実際の地質環境を対象にリージョナルおよびローカルスケールの調査研究を通して、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こと、適用した各種調査・解析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、研究全体を通しての主要な研究課題としている。

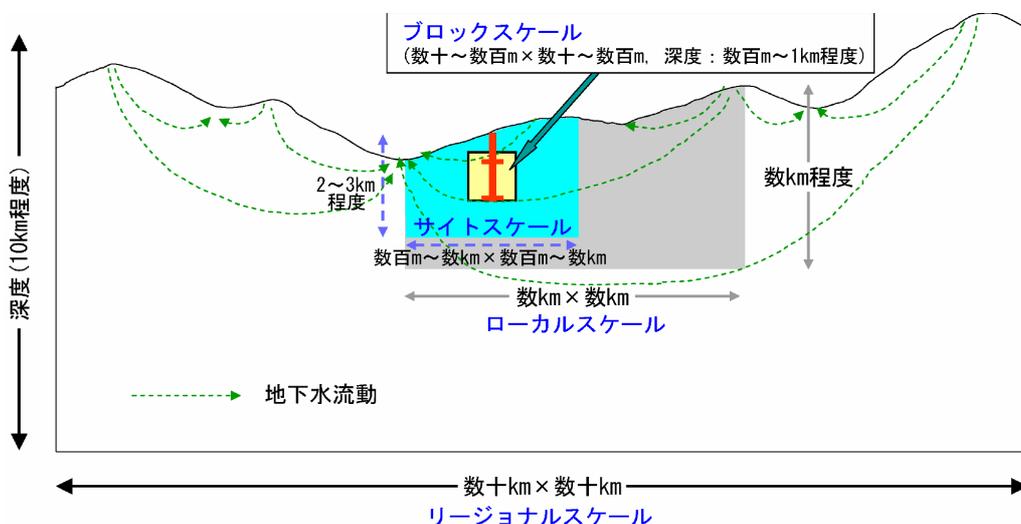


図2.1 スケールの概念

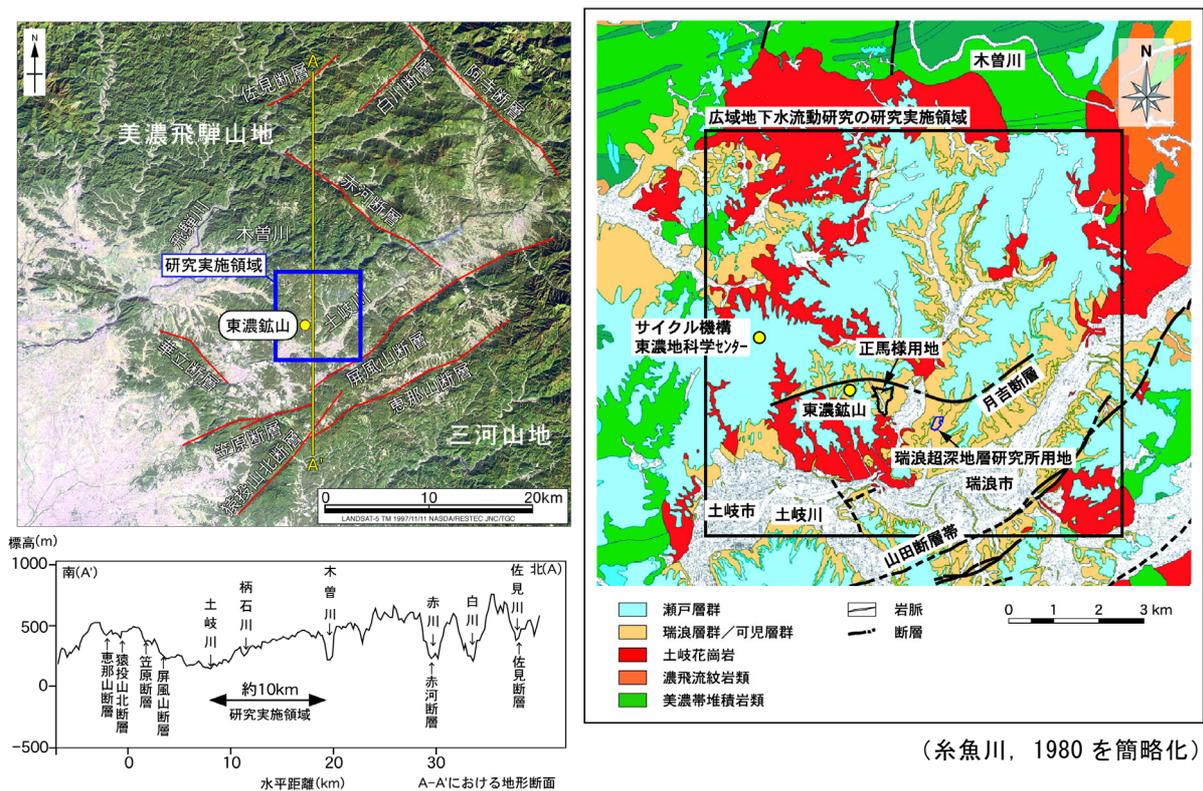


図 2. 2 広域地下水流動研究の研究実施領域および領域周辺の地質図

2. 1 リージョナルスケールを対象とした調査研究

リージョナルスケールは、数 10km 四方以上の広域な領域を対象に大局的な地下水流動を理解しつつ、地層処分システム全体の安全評価を考える上で重要となる一つの地下水流動系を包含した領域（ローカルスケール）を抽出するために設けている。リージョナルスケールを対象とした調査研究では、ローカルスケールの地下水流動系を適切に評価するためのモデル化領域や境界条件の設定方法を構築することが重要な研究課題となる（表 2. 1）。

平成 14 年度は、後背地地形の影響を考慮した領域の異なる複数の水理地質構造のモデル化と地下水流動解析などを行い、ローカルスケールのモデル化・解析領域および境界条件の設定に関する検討を実施した。

2. 2 ローカルスケールを対象とした調査研究

ローカルスケールを対象とした調査研究では、本領域の地下水流動を大きく規制している可能性のある地質構造として、同領域を横断または縦断する規模の長さ数 km 以上の不連続構造の分布と幾何学的性状、領域の概略的な動水勾配や地下水の流動経路、および地下水の地球化学特性を合理的に調査・評価することが重要である。また、この調査を通じて、地質環境が本来持つ不均質性、調査データの品質と量などに依存する地質環境モデルや地下水流動解析結果の不確実性の評価が重要な検討課題となる。

表 2. 1 広域地下水流動研究で対象とするスケールと地質環境特性の記述要素

		地質環境モデル				スケール
		地質構造	水理地質構造	地球化学	岩盤力学	
広域地下水流動研究	リージョナルスケール (Regional Scale)	場のモデル ・文献および既存情報に示された以下の地質構造要素 ①活構造 ②領域内を区分する可能性のある長さ数km以上の大規模不連続構造 ③地形 ④母岩および堆積岩の分布	場のモデル/現象モデル ・文献および既存情報を基に構築した地質構造モデルに示された不連続構造および岩盤構造区分毎の平均透水係数、地下水位など			平面： 数100km ² (数10km×数10km) 深度： 10km程度まで
	ローカールスケール (Local Scale)	場のモデル ・領域内に存在する可能性のある以下の主要な不連続構造 ①領域を横断または縦断する構造 ②Site Scaleの選定を考えた場合、領域を区分する可能性のある長さ3km以上の構造分布と幾何学的性状 ・対象となる岩盤において、割れ目頻度や空隙構造または岩相に明瞭なコントラストが認められ、領域内に広く連続して分布することが予測される構造区分または岩相区分 ・地形および母岩の起伏面 ・層序を基にした堆積岩の区分	場のモデル/現象モデル ・地質構造モデルで記述された不連続構造の内、母岩と対象となる岩盤に比べオーダー単位で平均透水係数が異なると考えられる構造 ・地質構造モデルで区分した構造においてオーダー単位で平均透水係数が異なると考えられる区分 ・希釈層となり得る構造を評価・記述するための情報 ・地下水面または地表からの涵養量 ・Regional Scaleの解析に基づく境界条件	場のモデル/(現象モデル) ・領域内の表層水および河川水の地球化学的特性と分布 ・堆積岩および母岩の対象となる岩盤中の地下水の地球化学的特性の概括的分布 ・地質構造に示された主要な不連続構造中の地下水の地球化学的特性 ・地下水の年代に関する概括的な記述		平面： 数10km ² (数km×数km) 深度： 3km程度まで

平成 14 年度は、①断層・割れ目帯を考慮した調査技術の構築、②地質環境のモニタリング技術および調査フローの構築、③ローカールスケールにおける地下水流動モデル化技術の構築、④地下水流動モデルと地球化学モデルの整合性の確認、に焦点をあてて調査研究を実施した。具体的には、精密空中写真判読調査による長さ数 km～数百 m のリニアメントの抽出および断層や割れ目帯の位置との比較、試錐孔近傍における規模の大きな断層や割れ目帯および主要な水みちの位置や透水性の確認、地下水の水質分布と水質形成機構の検討を行うとともに、これらの調査に必要な手法の構築を実施した。

2. 3 調査技術・調査機器の開発

地質環境の調査機器・調査技術の開発では、深度約 1,000m までの地質構造、地下水の流動特性ならびに地球化学特性を把握できること、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などが重要となる。

平成 14 年度は、ローカールスケールを対象とした調査・研究を通じて①地質構造調査技術開発、②地下水の水理特性・地球化学特性調査技術開発および③データベースの構築、を実施した。

3. 平成 14 年度の研究実績

本研究の平成 14 年度における調査・研究の計画および実績を表 3. 1 に示す。

表 3. 1 平成 14 年度 調査・研究スケジュール（実績）

	平成 14 年度											
	平成 14 年									平成 15 年		
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
1. リージョナルスケールを対象とした調査・研究 (1) リージョナルスケールにおけるモデル化技術の構築										<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> _____ </div>		
2. ローカルスケールを対象とした調査・研究 (1) 断層・割れ目帯を考慮した調査技術の構築 ・地質踏査 ・地表物理探査 ・試錐調査 (2) 地質環境モニタリング技術および調査フローの構築 (3) ローカルスケールにおける地下水流動モデル化技術の構築 (4) 地下水流動モデルと地球化学モデルの整合性の確認												
										_____ 反射法		
										_____ 2 孔 DH-14, 15		
	DH-2							VSP				
	地下水調査											
3. 調査技術・調査機器の開発 ・地質構造調査技術開発 ・地下水の水理特性・地球化学特性調査技術開発 ・データベースの構築												

4 リージョナルスケールを対象とした調査研究

4.1 リージョナルスケールにおけるモデル化技術の構築

4.1.1 目標

リージョナルスケールを対象とした地下水流動解析については、ローカルスケールの地下水流動解析におけるモデル化領域および境界条件の設定方法の構築が主要な目標である。

4.2.2 実施内容および主な成果

これまでの検討により、後背地地形が地下水流動へ及ぼす影響を考慮したモデル化・解析領域の設定が課題として挙げられている（サイクル機構，2002b）ことを踏まえ，研究実施領域周辺の地形的特徴の抽出（図4.1）と，それに応じた複数のスケール領域におけるモデル化・解析を実施し，後背地地形が研究実施領域の地下水流動へ与える影響を検討した。

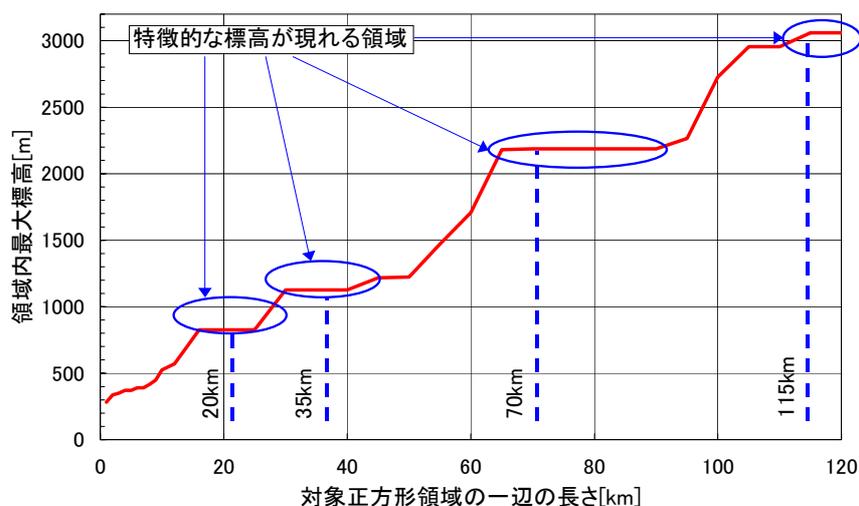


図4.1 研究所用地からの距離と最大標高との関係

本検討では，試錐孔で得られた情報は使用せず，一般に得られる文献による情報を用いてモデルを構築した上で地下水流動解析を実施した。なお，広域的な地下水流動へ与える影響が大きいと思われる大規模な断層についても，文献による情報を用いてモデル化した。

研究実施領域周辺の地形的特徴から，図4.2に示す20 km～115 km 四方の4つの異なるスケールにおいて，モデル化・解析を実施した（稲葉ほか，2002）。

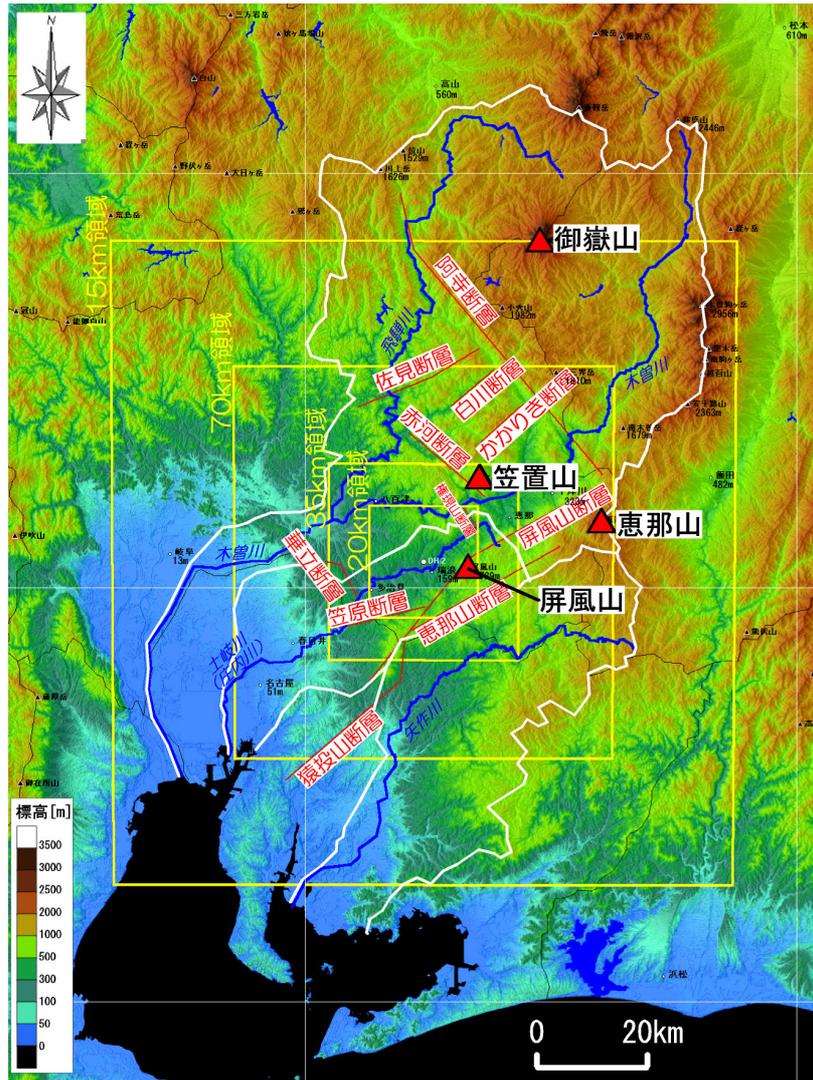
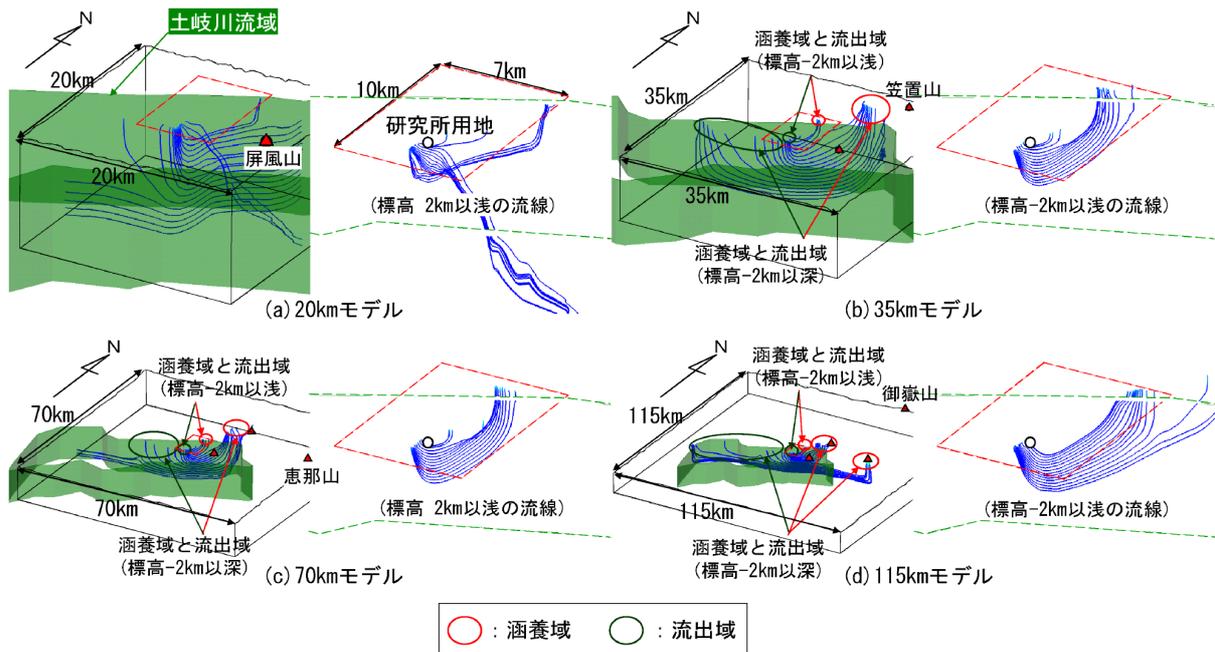


図4. 2 リージョナルスケールのモデル化領域

図4. 3に地下水流動解析結果（標高 - 2,000m 付近より浅い領域を通過する地下水の流線）を示す。この結果から、研究実施領域内にある研究所用地周辺の地下水流動系は、35km 四方に含まれる地形の影響を受けていること、標高 - 2,000m 程度付近に流動系境界があり、それより浅い領域では土岐川と木曾川の流域境界の尾根を涵養域とし、土岐川を流出域とする系であることが推定された。



- 1) 上記4つのスケールの解析結果は、左図が研究所用地の地下（モデル底部境界標高-10kmまで）の領域を通る地下水の流動経路の予測結果（流線）を示す。一方、右図はそのうち標高-2km以浅の領域を通る流線のみを取り出して示している。
- 2) 図中の緑で着色した部分は、土岐川の流域範囲を示す。
- 3) 標高-2km以浅の研究所用地の地下水は、各モデルの解析結果によると研究所用地の北部から涵養し、南側に位置する土岐川に流出する流動系が見取れる。ただし、20kmモデルではその他に東部から涵養する流動系も認められる。

図4.3 地下水流動解析結果（研究所用地周辺を通過する地下水の流線）

5. ローカルスケールを対象とした調査・研究

5. 1 断層・割れ目帯を考慮した調査技術の構築

5. 1. 1 目標

本課題では、ローカルスケールに観察される規模（数 km 程度）を有する断層や割れ目帯の分布や地質学的特性の把握，ならびにその調査に必要な調査技術を整備し，断層や割れ目帯を対象とした調査フローを構築することを目標としている。平成 14 年度は，ローカルスケールからサイトスケールに分布する数 km～数百 m およびそれより小さい規模の断層や割れ目帯の分布の把握を具体的な目標として設定した。

5. 1. 2 実施内容および主な成果

(1) 地質調査

平成 13 年度までに実施したリニアメント調査において，今後の課題として示された数 km～数百 m 規模の断層や割れ目帯（あるいは地下構造に対応するリニアメント）の推定を目的に，大縮尺の航空写真（1 万分の 1 スケール）を用いたリニアメント調査を実施した。また，判読したリニアメントが実際に分布する断層や割れ目帯である可能性を検討するために，地表割れ目調査を実施した。

① リニアメント調査

研究実施領域を対象に 1 万分の 1 スケールの航空写真を用いたリニアメント判読を実施した。判読結果を図 5. 1 に示す。判読結果から，調査対象領域においては，100m～3km 程度の長さを有するリニアメントが計 472 本判読された。また，リニアメントの長さとの関係を両対数グラフにプロットした場合，基盤花崗岩が分布する地域においては 300m～1km（もしくは 2km）程度（図 5. 2 (a)），被覆堆積岩類が分布する地域においては 400m～1km 程度（図 5. 2 (b)）の長さを有するリニアメントの頻度がリニアメント長に対し直線的に減少する傾向が認められた。一般に，リニアメントの長さとその頻度はべき乗分布に従い（大野・小島，1993），対数グラフ上において直線的な相関関係を示すと考えられている（山口・長谷，1983）ことから，直線関係を示さない範囲（基盤花崗岩が分布する地域：リニアメント長約 300m 以下および 1～2km 以上，被覆堆積岩が分布する地域：リニアメント長約 400m 以下および約 1km 以上）においては，実際に分布しているはずの断層や割れ目帯がリニアメントとして過小に抽出されている可能性がある。これは，人工物（造成地やゴルフ場など）や被覆層などの分布により，実際に分布する断層や割れ目帯が抽出されなかった，あるいは実際より短く判読されたことがその原因として考えられる。以上のことから，1 万分の 1 スケールの航空写真で抽出できるリニアメントの長さは 300～400m 程度以上であると考えられ，また，1～2km 程度以上のリニアメントを抽出する場合は，大局的に判断できる小縮尺の画像（または写真）を

併用することが望ましいと言える。

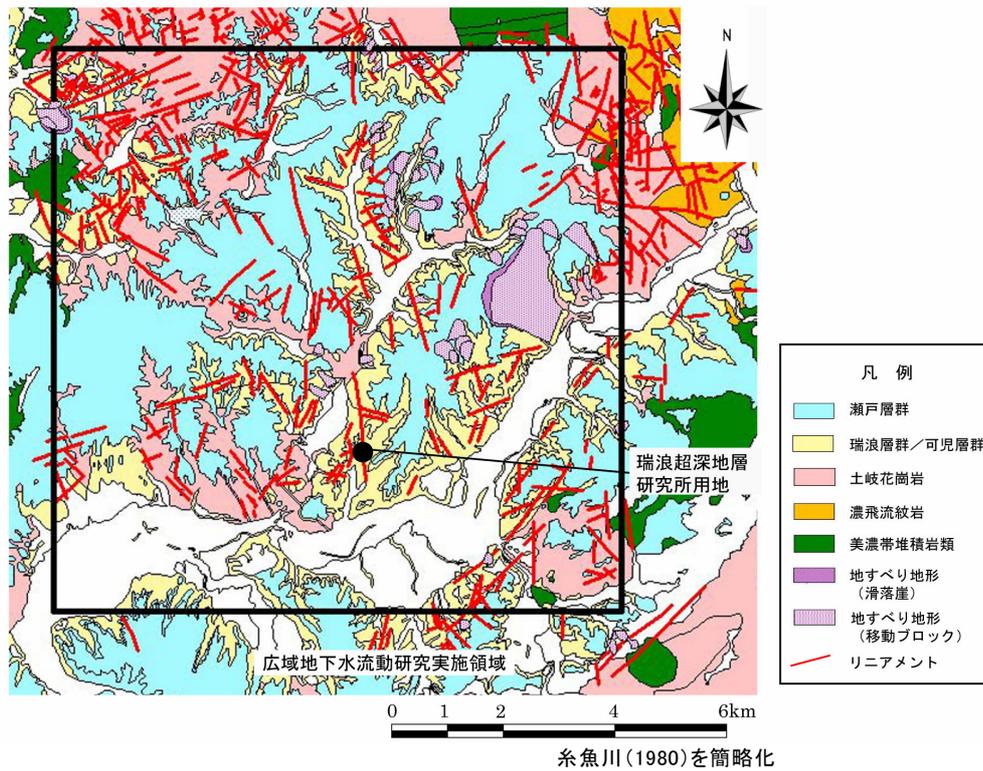
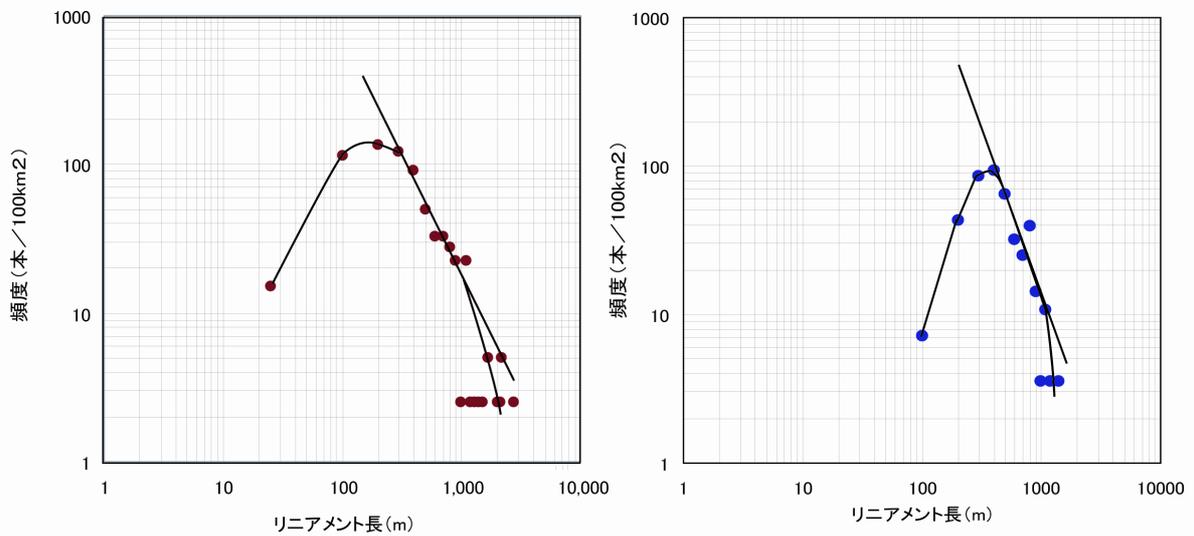


図5. 1 リニアメント判読結果図



(a) 基盤花崗岩分布域

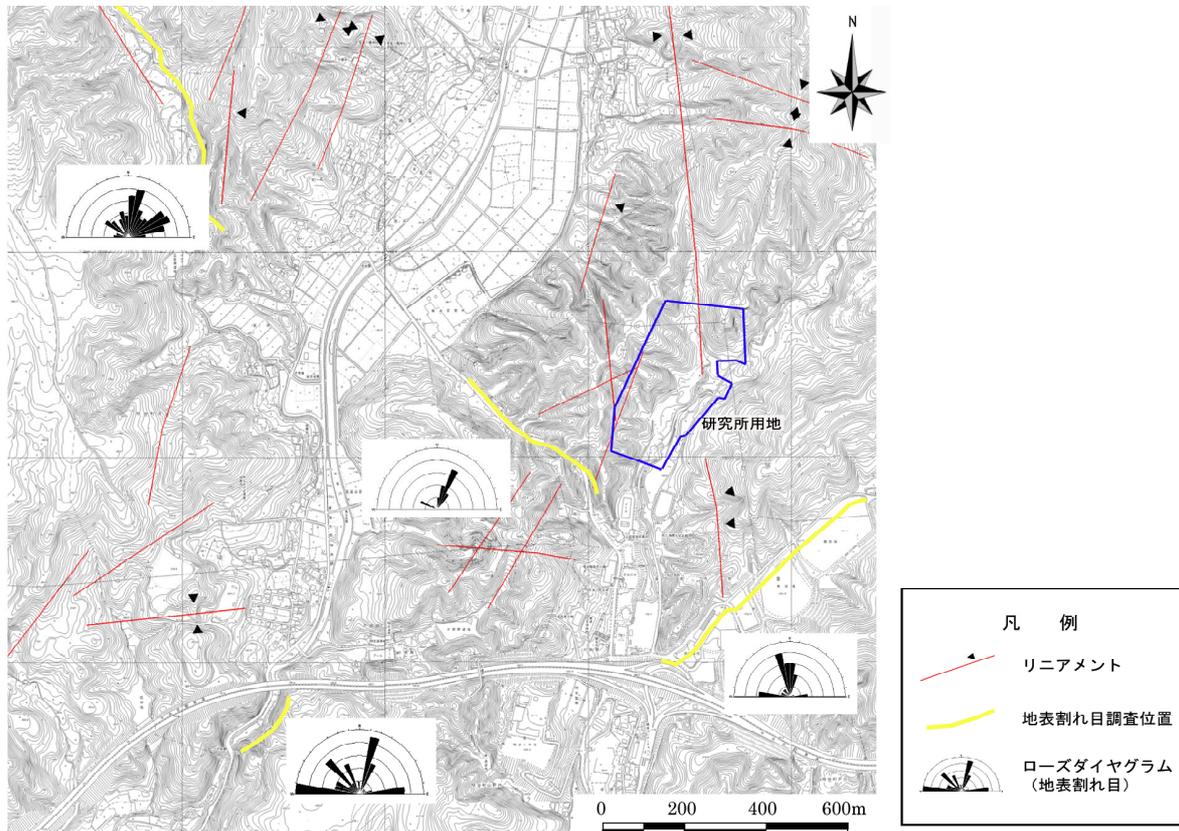
(b) 被覆堆積岩分布域

図5. 2 リニアメントの長さ別頻度分布

② 地表割れ目調査

リニアメントが実際の地質環境において断層や割れ目帯である可能性を検討するために、研究所用地を含む 3km 四方を対象に地表割れ目調査を実施し、同領域における近傍のリニアメントの方向の分布と比較した。その結果、露頭で確認されたせん断割れ目の卓越方

向とその露頭近傍のリニアメントの方向が整合的であることが明らかとなった（図 5.3）。地表で確認される規模のせん断割れ目は、それより規模が大きくかつ近似的な分布形状を示す断層や割れ目帯によって形成されているケースが多い（例えば、Tchalenko and Berberian, 1975）ことから、今回判読したリニアメントの一部は、数百 m 以上の規模を有する断層や割れ目帯の分布を示唆しているものと考えられる。



瑞浪市発行 都市基本計画図を使用

図 5. 3 地表割れ目調査結果

（2）地表物理探査

地表物理探査においては、既存試錐孔（DH-2 号孔）を対象としたマルチオフセット VSP 探査およびローカルスケールに分布する断層や割れ目帯を対象とした反射法弾性波探査を実施した。

① マルチオフセット VSP 探査

基盤花崗岩上に被覆堆積岩類が厚く分布している地質条件下で実施される反射法弾性波探査においては、基盤花崗岩中からの反射波が相対的に少なくなるため、基盤花崗岩中に存在する断層や割れ目帯の抽出精度が低下していると考えられる。基盤花崗岩の上に約 170m の層厚を有する堆積岩が分布している DH-2 号孔を対象にマルチオフセット VSP 探査を実施し、試錐孔周辺における断層や割れ目帯の分布を把握するとともに、反射法弾

性波探査を補完する手法としての有効性の評価を行った。

図5. 4に調査位置を示す。P波発震点を DH-2号孔前の道路沿いに約60m間隔で8箇所、S波震源を DH-2号孔近傍に1箇所それぞれ設け、DH-2号孔内において4mの間隔でジオフォンによる受振を行った。

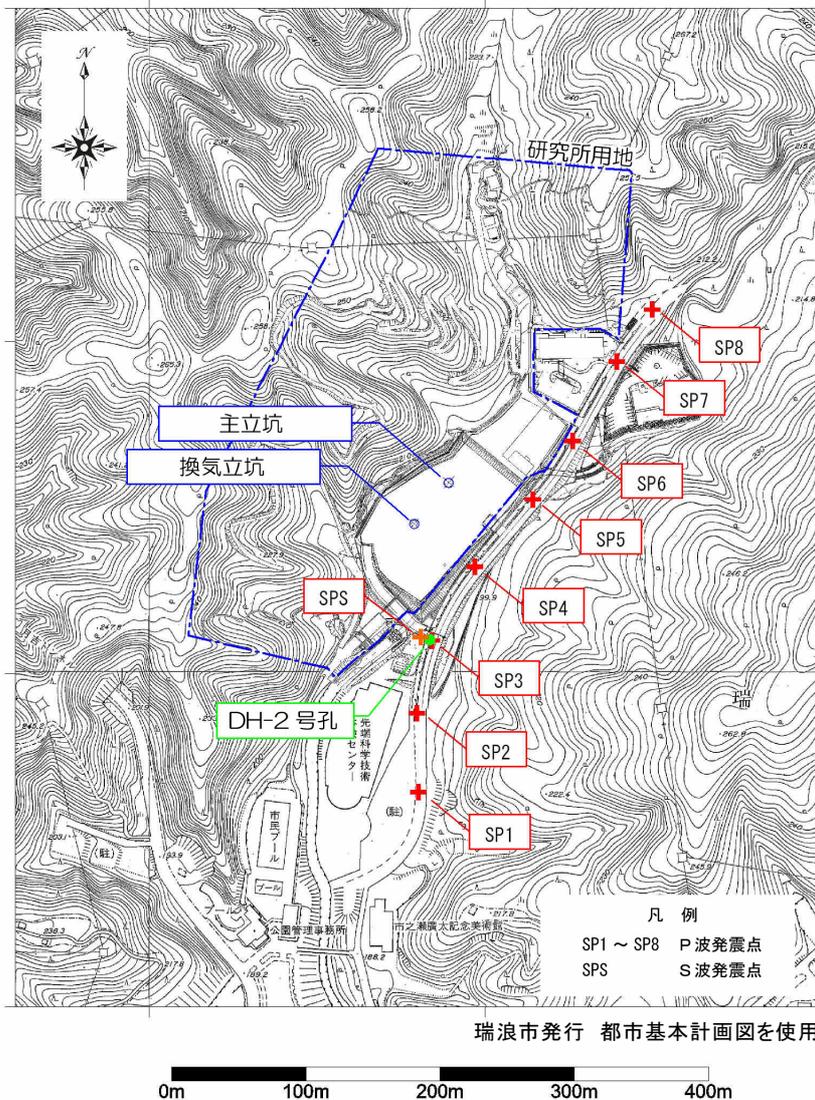


図5. 4 マルチオフセット VSP 探査 調査位置

図5. 5にマルチオフセット VSP 探査の重合反射断面を示す。その結果、被覆堆積岩中の地層境界面（緑色破線、淡青色破線）や被覆堆積岩と基盤花崗岩との不整合面（淡赤色破線）が反射面として捉えられ、それらが岩芯において実際に観察される深度とほぼ一致していることが確認された。また、土岐花崗岩中には被覆堆積岩と基盤花崗岩との不整合面に平行な反射イベントが複数箇所認められ、それらが地質学的調査によって抽出された割れ目帯の分布と整合的な位置を示すことが明らかとなった（5. 1. 2 (3)を参照）。この検証のために弾性波動モデリングを行った結果、割れ目の集中帯を低速度域としたモデル（図5. 6）によってこうした反射イベントが説明可能であることが分かった。また、土岐花崗岩中の反射イベントが水平方向に不連続となる箇所が少なくとも3箇所に

認められ（赤色破線），これらは小規模な断層である可能性が考えられる。

以上の結果から，マルチオフセット VSP 探査は反射法弾性波探査を補完する手法として信頼度が高いと考えられ，弾性波動モデリングを組み合わせた手法は，花崗岩中の断層や割れ目帯を検討する上で有効であることが確認された。

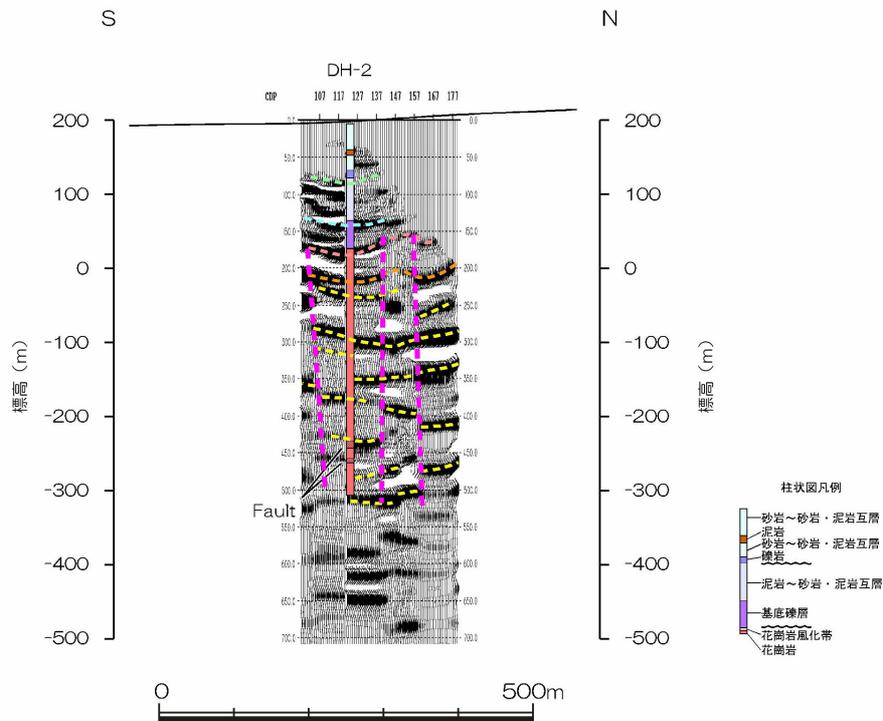


図 5. 5 マルチオフセット VSP 探査（重合断面図，弾性波動モデリング結果）

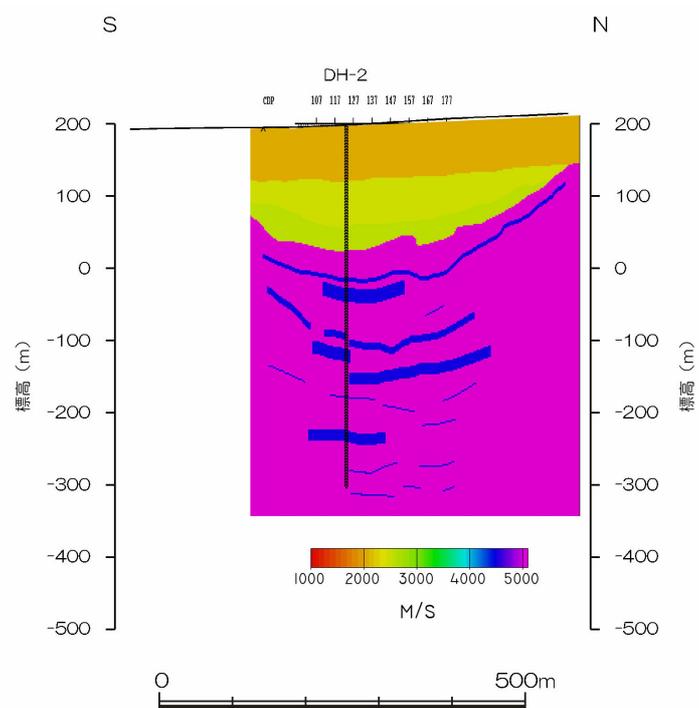


図 5. 6 マルチオフセット VSP 探査（弾性波動モデリング結果）

② 反射法弾性波探査

ローカルスケールに分布する断層や割れ目帯を対象として、既往リニアメント調査や地表地質調査により断層の分布が推定されている地域の地下構造やその周辺における地質構造の把握を目的として反射法弾波探査を実施した。

調査は、3 測線 (Line-A~Line-C ; 図 5. 7) を設置し、Line-A では大型震源を用いた深部探査 (土岐花崗岩を被覆堆積岩が覆っているため)、Line-B, Line-C では中型震源を用いた浅部探査 (花崗岩が直接地表に露出しているため) を実施した。図 5. 8 に各測線のマイグレーション深度断面上で地質構造を解釈した結果を示す (各測線, 等スケール, 縦横比は 1:1)。その結果、Line-A では、被覆堆積岩と基盤花崗岩との不整合面や被覆堆積岩中の地層境界面が反射面として明瞭に捉えられていることが確認された。また、Loc.120~160 付近 (図 5. 8) では被覆堆積岩と基盤花崗岩との不整合面 (淡赤色)、被覆堆積岩中の地層境界面 (黄色) に相当する反射面が変位・撓曲し、上方に放射状を呈する複数の断層の分布が確認された。この断層のうち最も明瞭な不連続部は、Loc.140 付近に位置する南傾斜の逆断層であり、既往情報との位置関係から月吉断層に相当するものと考えられる。この不連続部は、既存の地質図 (糸魚川, 1980 : 図 5. 7) よりも約 300m 北方に位置しており、垂直方向の変位は約 50m 程度と推定される。

一方、基盤花崗岩の中にも不整合面と平行するいくつかの反射イベント (青色実線・破線 : 図 5. 8) が確認されており、これらは、低角度傾斜を有する割れ目の集中帯を反映しているものと考えられる。なお、図 5. 7 で示される既知のリニアメントの近傍においては、反射法弾性波探査によって推定される不連続構造 (赤色破線 : 図 5. 8) が多く分布している傾向が確認された。

(3) 試錐調査

試錐孔における断層や割れ目帯の同定・特性評価技術を開発・整備するために、研究所用地近傍の既存試錐孔 (DH-2 号孔) において、流体検層などと組み合わせた地質学的調査を実施し、地表物理探査結果との比較調査を実施した。また、深層試錐孔調査として新規試錐孔である DH-14, DH-15 号孔 (両孔とも垂直孔, 掘削深度 1,010m) に関する調査計画を策定した。

DH-2 号孔における岩芯観察およびボアホールテレビューア観察による割れ目の分布調査の結果、分布密度が有意に高い区間として、計 5 区間の割れ目帯が抽出された (図 5. 9)。とくに、深度 310m 付近, 425m 付近, 455m 付近の 3 区間の割れ目帯においては、相対的に規模の大きな断層岩の分布が確認され (図 5. 9)、それら断層の長さは、Zhang et al. (2000) による割れ目帯と断層の長さとの相関関係から、数 100m から数 km オーダーであると推定された。また、抽出された割れ目帯の多くは、マルチオフセット VSP 探査の結果抽出された反射面の分布と良く一致している (5. 1. 2 (2) を参照) ことが確認された。さらに、低角度の傾斜 (0~30 度) を有する割れ目の分布密度から、不整合直下から孔底深度 (501m) までの区間は、「上部割れ目帯 (基盤花崗岩の上部において低角度傾斜を有する割れ目の分布密度が有意に高い区間 ; 三枝・須山, 2000)」に該当することが明らかとなった。このうち、深度 200~240m 付近の区間は、

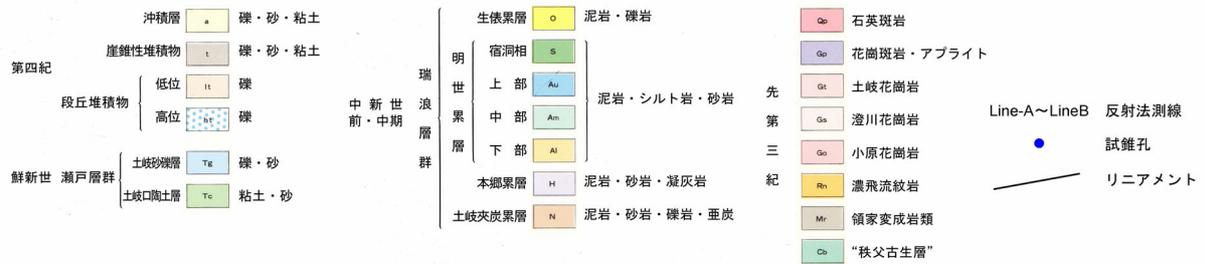
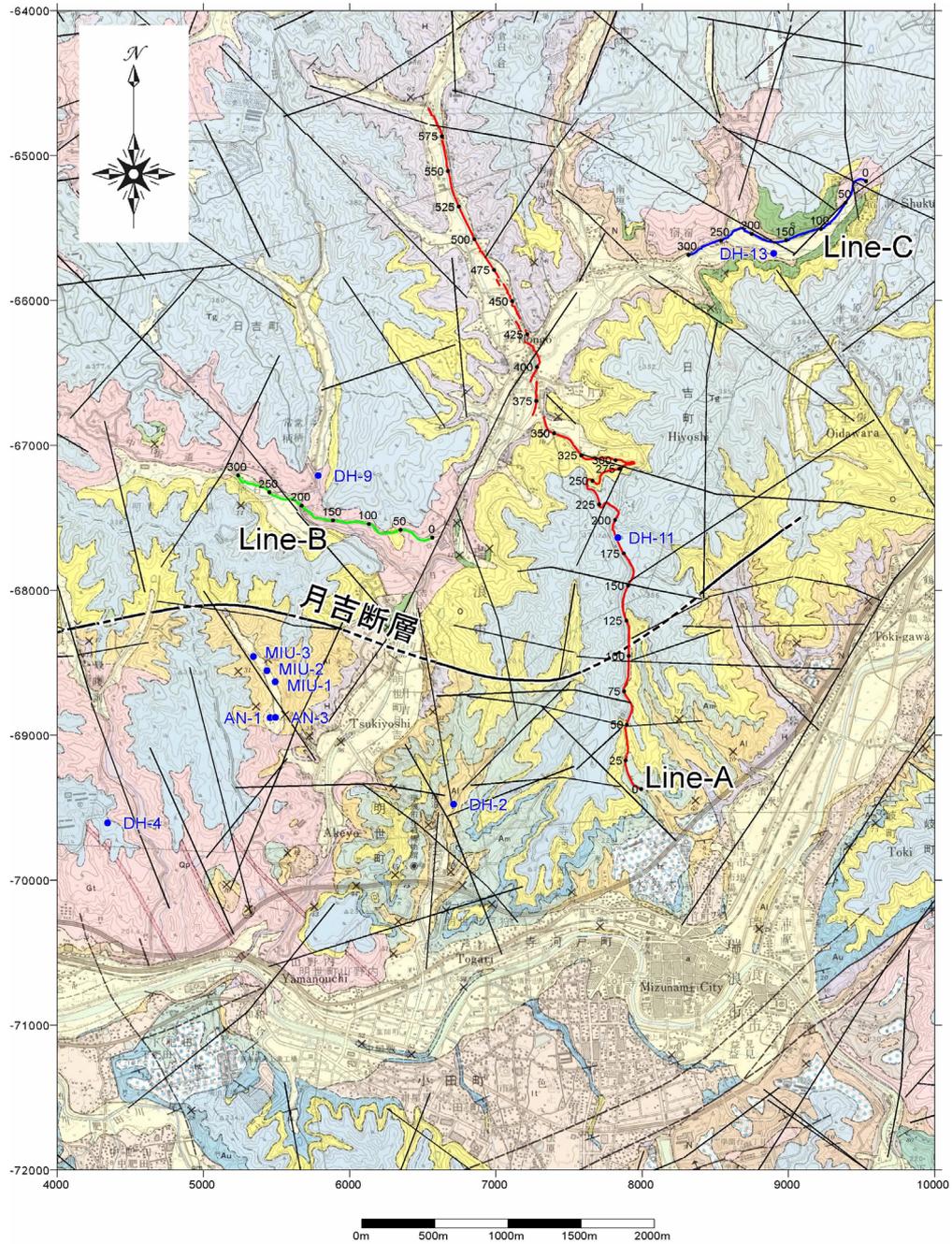


図5. 7 反射法弾性波探査 調査位置

糸魚川（1980）の地質図に加筆。黒実線は山井ほか（1994）に基づくリニアメント分布

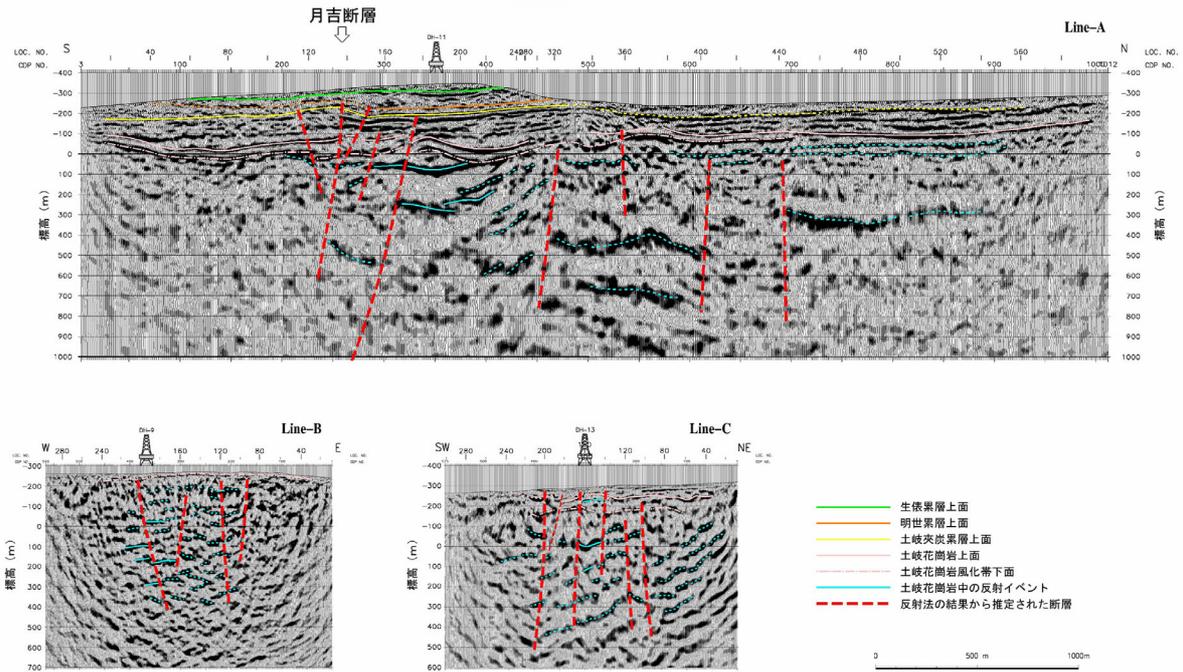


図5. 8 反射法弾性波探査 マイグレーション深度断面図

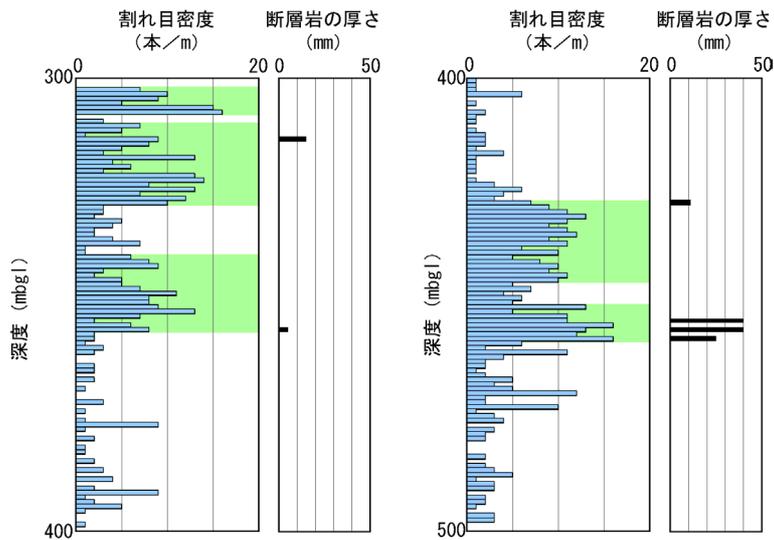


図5. 9 DH-2号孔において抽出された割れ目帯と断層岩の厚さの分布

上部割れ目帯の中でも低角度傾斜を有する割れ目の分布密度が高く、反射法弾性波探査結果においては、この区間に強い反射イベントが確認された(図5. 10)。また、流体検層のうち、電気伝導度検層(試錐孔内の地下水をイオン交換水に入れ替え、その電気伝導度の時間変化から、有意な水みちの位置を検出する検層手法; Doughty and Tsang, 2002)によって抽出された地下水の流出入箇所認められる地質学的特徴を上記の調査結果に基づき評価した結果、抽出された計19箇所のうち16箇所の地下水の流出入箇所

は、割れ目帯あるいは低角度傾斜を有する割れ目の集中帯のいずれかに位置していることが明らかとなった（図5. 11）。これらの地下水の流出入箇所認められる割れ目の多くは、東西走向もしくは東北東走向を示しており（石井ほか，2002），とくに割れ目帯においては，前述の2方向の割れ目に北北西走向を示す割れ目の交差が特徴的に確認された（図5. 12）。

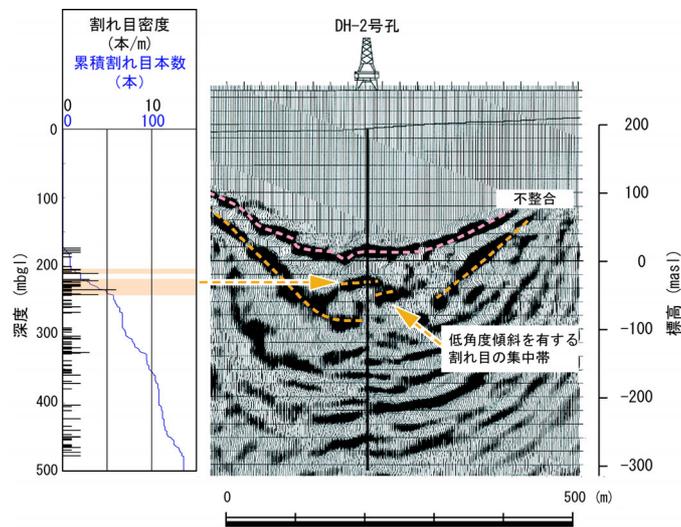


図5. 10 DH-2号孔における低角度傾斜を有する割れ目の集中帯の分布
 左図：ボアホールテレビユーアで観察される低角度傾斜を有する割れ目の密度分布・累積割れ目本数，
 右図：DH-2号孔を測線として通過する反射法弾性波探査結果

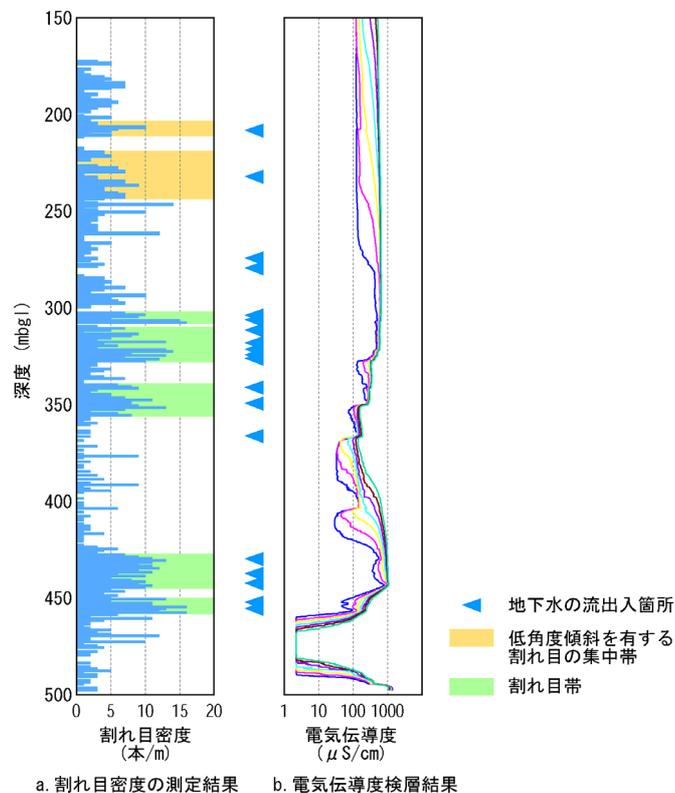


図5. 11 DH-2号孔において抽出された地下水の流出入箇所と地質構造

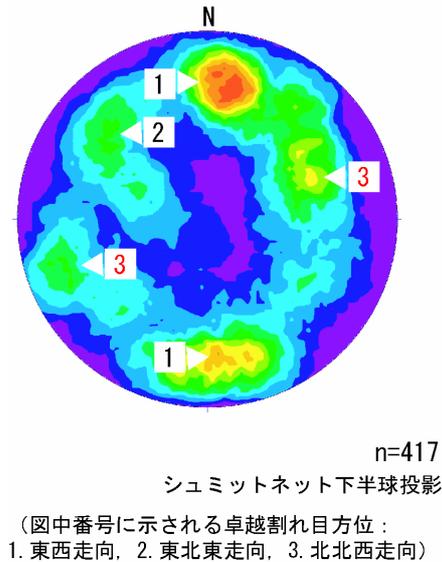


図5. 1 2 DH-2号孔の地下水の流出入箇所に認められる割れ目の方位分布

一方、DH-14、DH-15号孔の調査計画の策定においては、調査対象となる断層や割れ目帯に関する既往分布情報に基づいた地質構造モデルの構築を実施し、試錐孔が遭遇する地質構造の予測を行った。その結果、試錐孔が遭遇する主要な断層として、DH-14号孔に1本の北北西走向の断層（次月断層）が、DH-15号孔に4本の東西～東北東走向の断層の分布が予測された。

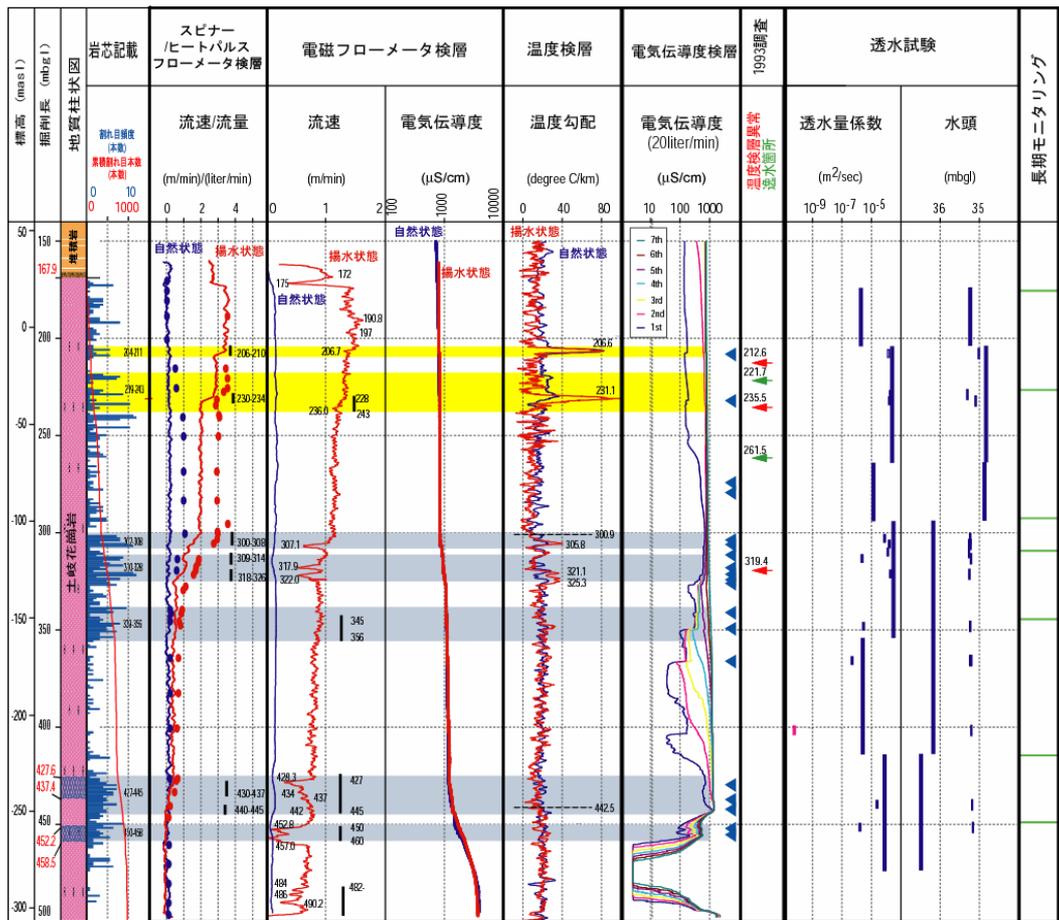
さらに、DH-2号孔における水理学的な特性の把握と詳細な水みちを検出するための技術開発を目的とした水理調査を実施した。調査は岩芯記載、物理検層、ボアホールテレビ観察、ボアホールテレビビューア計測、流体検層（温度検層、各種フローメータ検層、電気伝導度検層）、原位置透水試験を実施した。調査の結果、地質学的観察結果から5区間の割れ目帯と2区間の低角度傾斜を有する割れ目の集中帯が抽出された（図5. 1 3）。また、水みちの検出を目的に実施した温度検層やフローメータ検層においては、主として上記の割れ目帯や低角度傾斜を有する割れ目の集中帯において、孔内流速や流量の変化点（地下水の流入出点）が認められた（図5. 1 3）。とくに、電気伝導度検層は、他の流体検層と比較して、より多くの地下水の流入出点が検出できることが確認された（図5. 1 3）。また、電気伝導度検層で抽出された地下水の流入出点を対象として原位置透水試験を実施した結果、すべての区間において高い透水性を示す結果が得られた（図5. 1 3, 表5. 1）。これらのことから、電気伝導度検層は花崗岩中の水みちを検出する有効な技術の一つであることが明らかとなった。なお、図5. 1 3の深度450～500mの間に電気伝導度の低い領域が存在するが、これはこの区間は割れ目が極めて少ないこと、またイオン交換水は孔底付近まで降下させたホースから注入していることから、初期の低い電気伝導度が保持されているためと推察される。

表 5. 1 DH-2 号孔における原位置透水試験結果

No	試験区間 (GL -m)	区間長(m)	区間中央値	計器設置深度	使用センサー	透水量係数 T	透水係数 K	区間圧力	水位	解析手法
			(GL -m)	(GL -m)						
1	414.42 ~ 474.42	60.00	444.42	407.47	P2 sensor	8.79E-05	1.46E-06	4.0147	35.05	マッチング(p_der) *
2	354.42 ~ 414.42	60.00	384.42	347.47	P2 sensor	2.66E-06	4.43E-08	3.4270	34.97	マッチング(p_der)
3	294.42 ~ 354.42	60.00	324.42	287.47	P2 sensor	4.38E-04	7.30E-06	2.8382	35.01	マッチング(p_der)
4	204.42 ~ 264.42	60.00	234.42	197.47	P2 sensor	4.88E-04	8.13E-06	1.9564	34.93	マッチング(p_der)
5	264.42 ~ 294.42	30.00	279.42	257.47	P2 sensor	1.90E-05	6.33E-07	2.3961	35.09	マッチング(p_der)
6	174.42 ~ 204.42	30.00	189.42	167.47	P2 sensor	1.82E-06	6.08E-08	1.5142	35.02	マッチング(p_der)
7	207.50 ~ 209.50	2.00	208.50	202.97	P2 test section	2.08E-05	1.04E-05	1.6978	35.38	マッチング(p_der)
8	305.55 ~ 307.55	2.00	306.55	301.02	P2 test section	3.90E-04	1.95E-04	2.6610	35.21	マッチング(p_der)
9	309.70 ~ 311.70	2.00	310.70	305.17	P2 test section	2.22E-04	1.11E-04	2.7009	35.29	マッチング(p_der)
10	313.00 ~ 315.00	2.00	314.00	308.47	P2 test section	3.42E-06	1.71E-06	2.7338	35.24	マッチング(p_der)
11	302.70 ~ 304.70	2.00	303.70	298.17	P2 test section	1.65E-04	8.25E-05	2.6325	35.27	マッチング(p_der)
12	347.80 ~ 349.80	2.00	348.80	343.27	P2 test section	3.65E-06	1.83E-06	3.0752	35.23	マッチング(p_der)
13	365.50 ~ 367.50	2.00	366.50	360.97	P2 test section	5.93E-07	2.97E-07	3.2484	35.27	マッチング(p_der)
14	401.40 ~ 403.40	2.00	402.40	396.87	P2 test section	5.81E-11	2.91E-11	3.6009	35.22	マッチング(Cooper**)
15	231.90 ~ 233.90	2.00	232.90	227.37	P2 test section	4.74E-04	2.37E-04	1.9394	35.15	マッチング(p_der)
16	320.90 ~ 328.40	7.50	324.65	316.37	P2 test section	3.77E-03	5.02E-04	2.8384	35.22	マッチング(p_der)
17	228.50 ~ 237.00	8.50	232.75	223.97	P2 test section	2.59E-04	3.04E-05	1.9364	35.30	マッチング(p_der)
18	439.50 ~ 448.00	8.50	443.75	434.97	P2 test section	3.40E-05	4.00E-06	4.0064	35.22	マッチング(p_der)
19	451.20 ~ 459.70	8.50	455.45	446.67	P2 test section	9.12E-07	1.07E-07	4.1216	35.18	マッチング(p_der)

* p_der: 圧力変化と時間微分データの標準曲線へのマッチング

** Cooper: Cooper 法の標準曲線へのマッチング



黄色 低角度傾斜を有する割れ目の集中帯
 灰色 割れ目帯

図 5. 13 DH-2 号孔における検層・水理試験結果

5. 2 地質環境のモニタリング技術および調査フローの構築

5. 2. 1 目標

本課題では、モニタリング技術やデータの解析・評価手法の有効性、観測システムの長期健全性を評価し、モニタリングに関する技術的課題に対する解決策の提示と調査フローの構築を目指すとともに、処分事業の各段階におけるモニタリングの定義や位置づけを明確にした上で、モニタリングの項目や要求される仕様を検討していくことを目標としている。平成 14 年度は、モニタリングシステムの長期健全性を評価するための情報を取得するために、平成 13 年度に引き続き既存の観測装置や新規に設置する観測装置を用いて水収支観測・間隙水圧観測・水質観測などを実施した。

5. 2. 2 実施内容および主な成果

広域地下水流動研究における岩盤の水理に関する調査研究では、「第 2 次取りまとめ」(サイクル機構, 1999)以降の課題に対して設定された全体目標のひとつである「深部地質環境の評価のための調査・解析・評価技術の基盤の整備」の一環として、水収支観測を含む表層水理調査、試錐孔による原位置透水試験、地下水位・間隙水圧の長期観測、および地下水流動解析を実施している。

本研究における今後の主な課題は、ローカルスケールに該当する涵養域から流出域を包含する流動系の特定と同スケールのモデル化・解析結果の妥当性の確認方法の構築である。

上記課題に対し、平成 14 年度は、ローカルスケールの地下水流動解析に資する新たな表層水理観測を開始するとともに、既存試錐孔における詳細な水みちの検出技術を目的とした深層水理調査ならびに同孔への地下水圧長期観測装置の設置を行った。また、既存試錐孔における地下水位・間隙水圧の長期観測を継続して実施した。

(1) 表層水理調査

表層水理調査では、柄石川流域における水収支観測を継続し、岩盤浸透量を算出した(表 5. 2)。この結果、既報(サイクル機構, 2002c)のように、流域面積が大きくなると岩盤浸透量は小さくなる傾向が見られた(宮原・片岡ほか, 2002)ことから、ローカルスケールにおける地下水流動解析の上部境界条件の設定に必要な、より広い流域を対象とした水収支解析を実施するために、同スケールの領域の中央部を流れる日吉川において新たに河川流量観測を開始した(図 5. 1 4)。設置した河川流量観測装置は河川水位を連続的に測定するもので、実測により求めた河川水位と河川流量の対応関係から、河川流量を算出するものである。

表 5. 2 平成 14 年度岩盤浸透量
 (正馬川流域の結果(サイクル機構, 2003b)も参考に掲載)

		14年度				14年度	
P: 降水量(mm)	(正馬様)	1309	P: 降水量(mm)	(柄石尾根)	1422		
	(鉢山)	1337		(柄石谷)	1341		
	(平均)	1322.5		(平均)	1381		
E: 蒸発散量(mm): 鉢山		455.9	E: 蒸発散量(mm): 柄石尾根		706		
降水量に対する蒸発散量の割合(%)	(正馬様)	35	降水量に対する蒸発散量の割合(%)	(柄石尾根)	50		
	(鉢山)	34		(柄石谷)	53		
	(平均)	34		(平均)	51		
R: 河川流出高(mm)	(正馬様)	644	R: 河川流出高(mm)	(柄石尾根)	657		
	(鉢山)	49		(柄石谷)	46		
	(平均)	48		(平均)	49		
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)	46		
	(鉢山)	48		(柄石谷)	49		
	(平均)	49		(平均)	48		
G: 岩盤浸透量(mm)	(正馬様)	208	G: 岩盤浸透量(mm)	(柄石尾根)	59		
	(鉢山)	236		(柄石谷)	-23		
	(平均)	222		(平均)	18		
降水量に対する岩盤浸透量の割合(%)	(正馬様)	16	降水量に対する岩盤浸透量の割合(%)	(柄石尾根)	4		
	(鉢山)	18		(柄石谷)	-2		
	(平均)	17		(平均)	1		
正馬川上流域	R: 河川流出高(mm)	536	柄石川上流域	R: 河川流出高(mm)	703		
	降水量に対する河川流出高の割合(%)	41		(柄石尾根)	49		
	(鉢山)	40		(柄石谷)	52		
G: 岩盤浸透量(mm)	(正馬様)	316	G: 岩盤浸透量(mm)	(柄石尾根)	12,404		
	(鉢山)	344		(柄石谷)	-69		
	(平均)	330		(平均)	-28		
降水量に対する岩盤浸透量の割合(%)	(正馬様)	24	降水量に対する岩盤浸透量の割合(%)	(柄石尾根)	1		
	(鉢山)	26		(柄石谷)	-5		
	(平均)	25		(平均)	-2		
正馬川下流域	R: 河川流出高(mm)	676	柄石川下流域	R: 河川流出高(mm)	655		
	降水量に対する河川流出高の割合(%)	52		(柄石尾根)	46		
	(鉢山)	51		(柄石谷)	49		
G: 岩盤浸透量(mm)	(正馬様)	177	G: 岩盤浸透量(mm)	(柄石尾根)	61		
	(鉢山)	205		(柄石谷)	-21		
	(平均)	191		(平均)	20		
降水量に対する岩盤浸透量の割合(%)	(正馬様)	14	降水量に対する岩盤浸透量の割合(%)	(柄石尾根)	4		
	(鉢山)	15		(柄石谷)	-2		
	(平均)	14		(平均)	1		



図 5. 14 表層水理観測位置図

(2) 深層水理調査

深層水理調査では、既存試錐孔（DH-2 号孔）において、水圧モニタリングシステム（PIEZO システム）を設置した。PIEZO システムは、観測区間をパッカーにより閉鎖し、各区間の水圧をピエゾ水頭により測定するシステムである（図 5. 15）。各区間から立ち上げられたピエゾチューブに圧力センサーを挿入してピエゾ水頭を測定する方式であることから、センサーの測定レンジによらず高精度の計測が可能、センサーの交換が容易なため長期計測においてもデータの品質が確認できる、といった特徴がある。

測定区間は表 5. 3 に示す 7 つの区間とした。PIEZO システム設置後、平成 14 年度末までの水圧連続観測結果を図 5. 16 に示す。この結果から、各区間の観測結果には潮汐による変動と気圧に対する負の相関が認められることが確認された。各区間の水圧観測値より、DH-2 号孔は間隙水圧の観点から大きく、(1)浅い区間 1~2, (2)中間の区間 3~6, (3)深い区間 7 の 3 つに区分され、相対的に(3)深い区間 7 の水頭が最も高く、(1)浅い区間 1,2 が最も低い水頭を示すことが明らかになった。

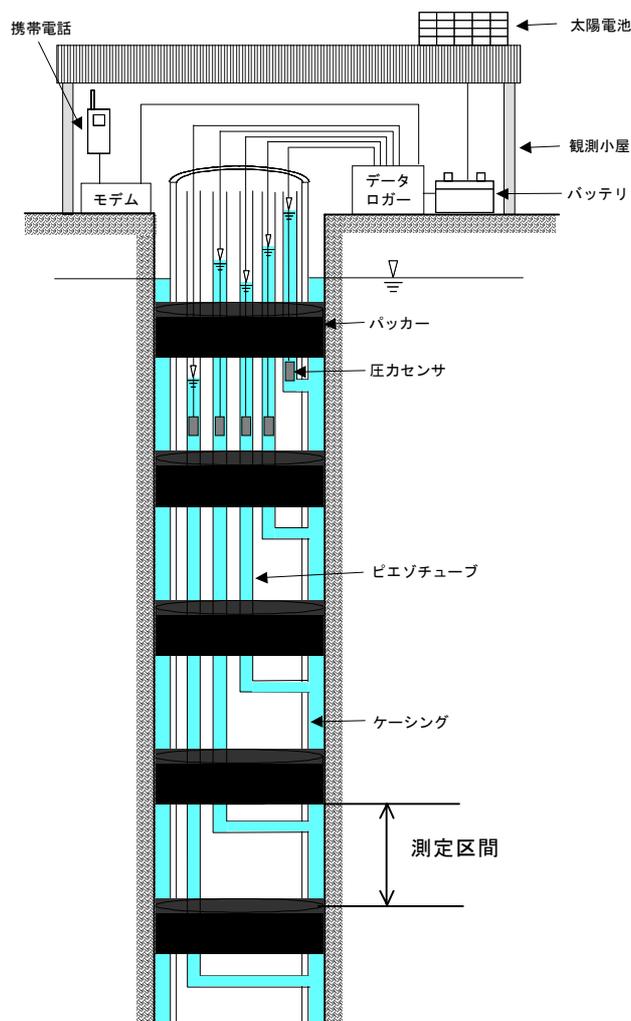


図 5. 15 PIEZO システムの概念図

表 5. 3 DH-2 号孔における測定区間

区間番号	区間深度		区間長 (m)
	G.L.(-m)	E.L.(m)	
1	176.0~226.0	17.6~-32.4	50.0
2	227.0~292.0	-33.4~-98.4	65.0
3	293.0~308.7	-99.4~-115.1	15.7
4	309.7~343.9	-116.1~-150.3	34.2
5	344.9~414.0	-151.3~-220.4	69.1
6	415.0~448.4	-221.4~-254.8	33.4
7	449.4~501.0	-255.8~-307.4	51.6

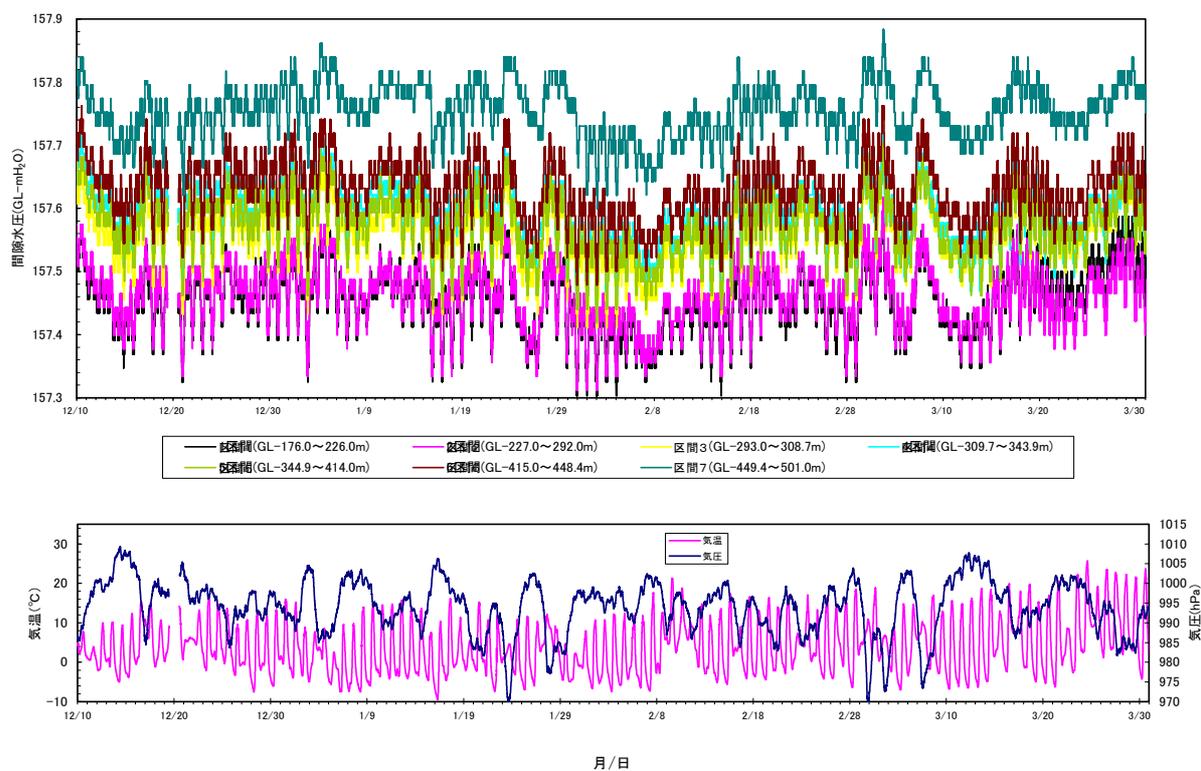
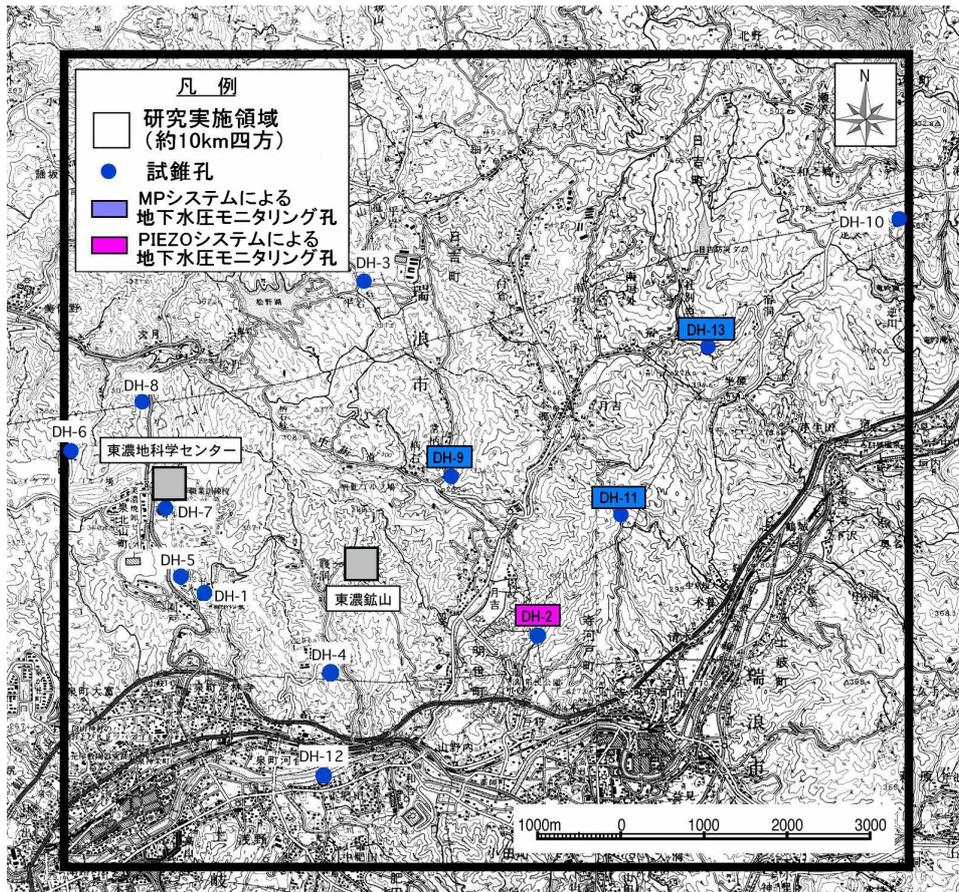


図 5. 16 DH-2 号孔の各区間における水圧連続観測結果

広域地下水流動研究の研究実施領域における地下水圧モニタリングシステム (MP システムおよび PIEZO システム) の設置試錐孔位置を図 5. 17 に示すとともに、平成 14 年度における MP システムによる観測結果を図 5. 18 に示す。この結果から、それぞれの試錐孔において年間を通して区間ごとの水頭値 (標高換算) には著しい変化は認められないことが分かった。また、DH-9 号孔においては相対的に深部ほど水圧が低く、涵養域の水圧分布形態を示していること、堆積岩が 270m 程度被覆する DH-11 号孔は、ほぼ静水圧分布を示すこと、DH-13 号孔においては、標高 300m 程度までは静水圧分布を示すものの、最深部の区間では相対的に低い値を示していることが分かった。



国土地理院 1/50,000 地形図(美濃加茂, 恵那)を使用

図5. 17 広域地下水流動研究における地下水圧モニタリングシステム位置図

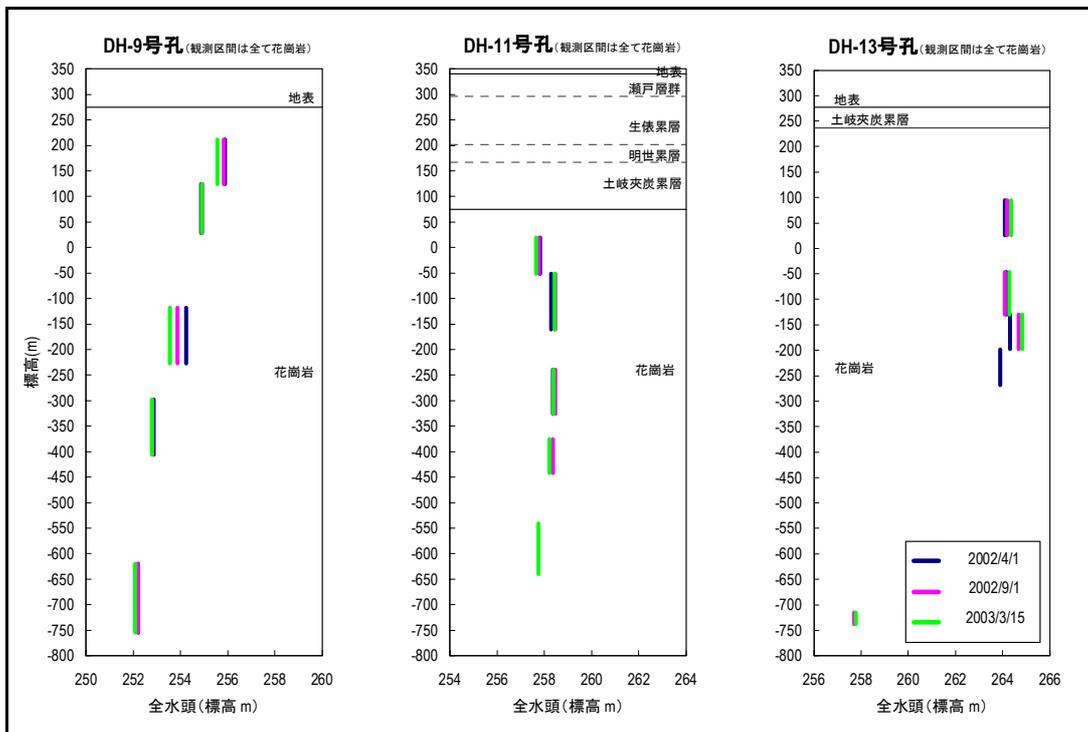


図5. 18 既存試錐孔におけるMPシステム観測結果

5. 3 ローカルスケールにおける地下水流動モデル化技術の構築

5. 3. 1 目標

本課題では、地質媒体が本来持つ不均質性や限定された調査項目・量に起因する調査データ、水理地質構造モデル構築手法、および地下水流動解析手法（解析モデル構築技術）が有する不確実性の評価、およびこれらの地下水流動解析結果への影響を評価し、調査・モデル化技術の体系化を目標としている。さらに、リージョナルスケールにおいて構築された地下水流動モデル化技術と併せて、リージョナルスケールからローカルスケールまでの一連のモデル化技術の構築を目指すとともに、サイトスケールの境界条件を設定するために必要な情報を整備していく。

5. 3. 2 実施内容および主な成果

ローカルスケールのモデル化領域の範囲設定に関しては、研究実施領域の地下水の涵養域から流出域までを包含する観点から、図5. 19に示す領域をローカルスケールのモデル化領域として抽出した。このローカルスケールのモデル化領域において、地形面のみをモデル化し、側方境界条件を固定水頭境界としたケースと不透水境界としたケースを設定し、側方境界条件設定方法に関する予察的な地下水流動解析を実施した（稲葉ほか、2002）。その結果、側方境界条件を変化させても地下水流動解析により得られる研究所用地周辺の移行経路や移行時間に大きな変化は認められず、本検討で抽出されたローカルスケールのモデル化・解析を実施する場合の側方境界条件は、固定水頭境界あるいは不透水境界として設定できると考えられる。また、研究実施領域周辺の地下水流動系は標高 - 2,000m 付近を境に流動系が異なることから、ローカルスケールにおけるモデル化・解析の際は底部境界として標高 - 2,000m に不透水境界を設定できると考えられる。

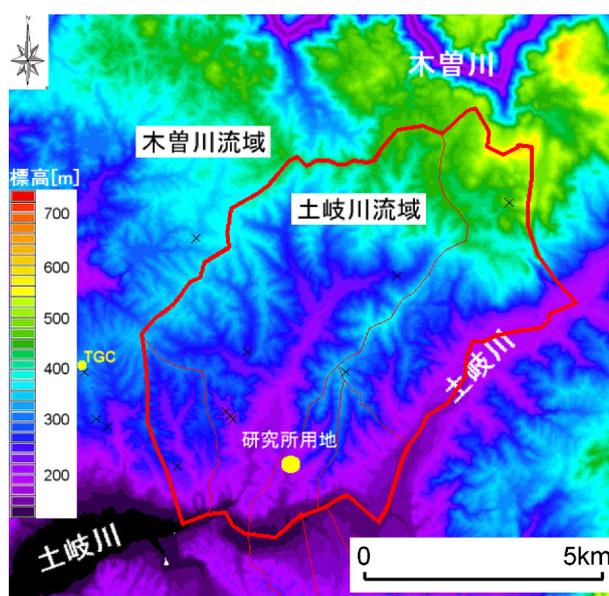


図5. 19 ローカルスケールのモデル化領域

5. 4 地下水流動モデルと地球化学モデルの整合性の確認

5. 4. 1 目標

本課題では、地下水の流動特性に関する情報を考慮し、現在の地球化学的状態を説明し得る水質形成モデルの構築、研究対象領域内に分布する堆積岩および花崗岩の pH や酸化還元緩衝能力に関する定量的な評価を目標としている。

平成 14 年度は、MP システムを用いた水質のモニタリングを継続し、既存試錐孔（DH-9 号孔）に残留している掘削水の排水を行ったほか、溶存化学成分や放射性同位体、希ガス同位体等に基づいて、地球化学的観点から広域地下水流動、岩盤の pH 緩衝能力について解析した。

5. 4. 2 実施内容および主な成果

（1）既存試錐孔における地下水の採水調査

平成 14 年度においては、花崗岩中の地下水の地球化学的情報を取得するため、DH-9 号孔における掘削水の排水作業・分析および DH-2 号孔で地下水の採取・分析を行った。

① DH-9 号孔における地下水の採取・分析

研究実施領域の上流域の地下水の水質を把握する事を目的として、DH-9 号孔（深度約 1,000m）において、MP システムを利用して花崗岩中の地下水の採水および化学分析を実施した。DH-9 号孔は MP システムを設置後、地下水に対する主要な汚染源である掘削水の排除を行っていないため、平成 14 年度は掘削水を除去するための予備排水を実施した。掘削水には、掘削水汚染の指標として、蛍光染料（ウラニン）を 0.1mg/L の濃度で加えている。

予備排水の過程で地下水の採水を実施し、これを分析した結果、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- イオン、または Na^+ 、 HCO_3^- イオンに富む地下水であることが確認された（表 5. 4）。ウラニンの濃度から、地下水に対する掘削水の汚染率は 3~20%であり、より品質の高い地下水の物理化学パラメータ、化学成分濃度および同位体データを得るために掘削水の排水を継続する必要があると考えられた。

② DH-2 号孔における地下水の採取・分析

DH-2 号孔において揚水試験を実施し、揚水試験終了時に揚水試料を採取し化学分析を実施した。この目的は、広域地下水流動下流域の花崗岩中の地下水の水質を把握することである。DH-2 号孔の掘削に使用した掘削水にはトレーサーが加えられていないので掘削水による汚染量を把握することができないため化学分析結果の品質を保証できるデータは無いものの、DH-2 号孔の花崗岩部の地下水は Na^+ 、 Cl^- イオンに富む地下水であり、深部になるほど高塩分濃度であることが推察された（表 5. 5）。

表 5. 4 DH-9 号孔の地下水分析結果

採水区間	区間 1	区間 2	区間 5	区間 7	区間 9	区間 10
深度(m)	62.9-150.7	151.6-546.8	392.9-501.9	573.3-681.6	791.9-894.5	895.5-1030.0
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
pH	7.5	7.3	8.0	7.8	7.8	8.2
電気伝導率 (mS/m)	20.0	17.4	17.5	16.4	15.4	16.9
Si (mg/L)	15	15	16	15	11	12
Na ⁺ (mg/L)	20	14	17	17	23	28
K ⁺ (mg/L)	3.2	3.3	1.7	1.6	1.6	2.2
Ca ²⁺ (mg/L)	23	23	21	20	9.1	6.7
Mg ²⁺ (mg/L)	1.2	1.6	0.4	0.3	0.1	0.1
Cl ⁻ (mg/L)	3.1	2.0	0.9	1.4	1.7	1.8
F ⁻ (mg/L)	2.4	1.4	2.8	3.3	5.8	7.2
NO ₃ ⁻ (mg/L)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.1	< 0.1	< 0.1
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	3.2	1.5	3.1	3.0	1.7	1.3
Alkalinity (meq/L)	2.0	1.9	1.7	1.6	1.3	1.3
Uranine* (mg/L)	0.011	0.012	0.0032	0.0058	0.017	0.020
Tritium T.U.	1.7±0.2	1.6±0.2	<0.3	0.8±0.1	0.9±0.1	0.6±0.1

*ウランin (Uranin) は試錐掘削に用いる掘削水に 0.1mg/L をトレーサーとして添加した。

表 5. 5 DH-2 号孔の揚水試料分析結果

採水区間深度(m)	207.50-	228.50-	302.70-	305.55-	309.70-	313.00-	320.90-	347.80-	365.50-	439.50-	451.20-
	209.50	237.00	304.70	307.55	311.70	315.00	328.40	349.80	367.50	448.00	459.70
pH	8.5	8.7	8.7	8.8	8.8	8.7	8.6	8.7	8.8	8.8	8.7
EC (mS/m)	48.0	53.3	65.0	63.0	65.0	66.0	66.3	76.7	77.5	87.7	102
Eh (mV)	-60	-46	0	-61	-19	-99	-103	-32	-121	-60	-122
DO (mg/L)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Temp. (°C)	24.2	22.4	22.5	23.5	23.2	24.7	23.2	23.7	24.6	23.2	25.0
Si (mg/L)	6.9	6.9	6.6	6.0	6.7	6.6	6.2	6.8	6.4	6.5	6.4
Total Fe (mg/L)	0.02	<0.01	<0.01	0.03	0.01	0.02	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01
Total Mn (mg/L)	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Mg ²⁺ (mg/L)	0.20	0.17	0.12	0.10	0.12	0.11	0.12	0.10	0.10	0.12	0.19
Ca ²⁺ (mg/L)	15	18	19	17	22	22	20	26	25	36	42
Na ⁺ (mg/L)	76	100	99	89	91	97	103	117	114	141	157
K ⁺ (mg/L)	1.1	0.97	0.96	0.56	0.64	0.62	0.65	0.64	0.60	0.86	1.0
F ⁻ (mg/L)	9.7	8.8	9.9	9.2	9.5	9.1	8.8	8.1	7.8	6.5	6.1
Cl ⁻ (mg/L)	94	106	145	138	146	150	158	191	211	228	267
Br ⁻ (mg/L)	0.18	0.21	0.29	0.27	0.28	0.29	0.28	0.34	0.35	0.42	0.47
NO ₃ ⁻ (mg/L)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	6.3	3.6	3.9	3.9	3.9	3.7	3.7	4.0	3.7	3.2	2.3
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	67	57	33	31	33	35	46	35	24	22	25
CO ₃ ²⁻ (mg/L)	<3	<3	4.5	6.6	5.1	3.8	<3	<3	5.1	4.9	2.9
TIC (mg/L)	12	11	3.9	7.1	7.1	7.3	7.2	5.5	5.1	4.7	4.4
TOC (mg/L)	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2

(2) 広域地下水流動状態を考慮した水質形成機構の解析

研究実施領域の下流域において、これまでの調査研究で得られている地下水水質データと異なる地下水水質が観察されたため、地下水の流動特性に関する情報を考慮し、新たに得られた地下水の主要化学成分および同位体データなどを用いて、広域地下水流動研究領域に分布する異なる水質の地下水の分布を統合的に説明し得る水質形成モデルの構築のための解析を実施した。

① 主要化学成分による解析

これまでの調査・研究では、研究実施領域の北方領域に分布する地下水は、深度約 300m 以浅において Na^+ 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- イオンに富む中性の水質であり、深度約 300m 以深では Na^+ 、 HCO_3^- イオンに富む弱アルカリ性の水質であることが確認されている。一方、南方領域の土岐川周辺に位置する DH-12 号孔では、深度 200m 以深において海水の 1% 程度の塩分濃度の Na^+ 、 Cl^- イオンに富む地下水が存在することが確認されている。 Na^+ 、 Cl^- イオンに富む地下水は、前述したように、DH-2 号孔でも確認され、同試錐孔ではこれらの濃度が深度とともに上昇する傾向が観察されている。

以上の結果から、研究実施領域の地下水の化学特性について、北方領域（広域地下水流動解析の上流域）では、 Na-Ca-HCO_3 型～ Na-HCO_3 型地下水が、南方領域（広域地下水流動解析の下流域）では Na-Cl 型地下水が分布する水質分布モデルが構築できる（図 5. 20）。地下水の水質は、北方領域に分布する Na-Ca-HCO_3 型～ Na-HCO_3 型地下水に関しては、長石類や炭酸塩鉱物の溶解反応、粘土鉱物－地下水間のイオン交換反応などにより形成されていると考えられている（Iwatsuki and Yoshida, 1999）。一方、高 Cl^- 濃度の地下水の水質形成機構としては、長期にわたる水－岩石反応による塩水化、化石海

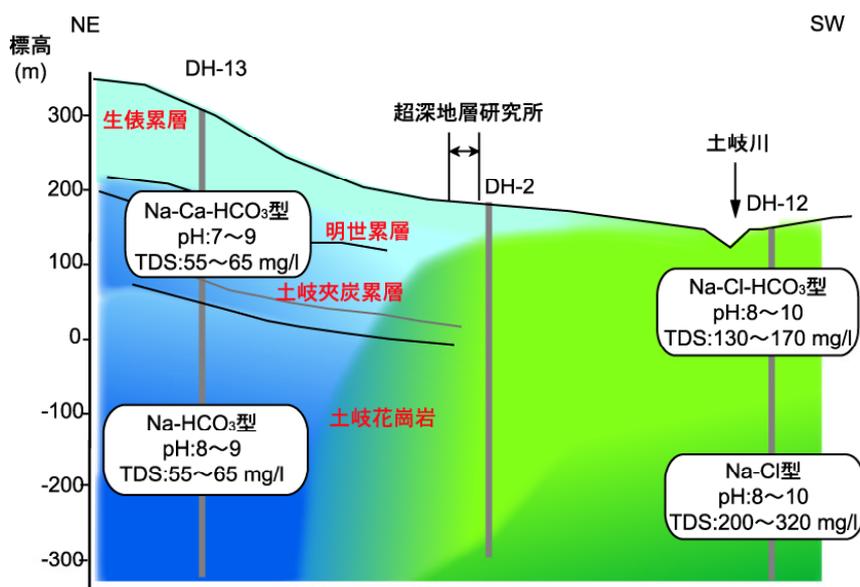


図 5. 20 地下水の水質形成モデル概念図

水、高温環境での水-岩石反応（温泉水）等が想定できるが、その塩分濃度が海水の1%程度と非常に低いため、水質形成機構を理解するに至っていない。そのため、今後、より高塩分の地下水を得て解析を行う必要がある。いずれにせよ南方領域の地下水については、北方領域に分布する低塩分濃度の地下水と土岐川周辺の花崗岩深部に分布する可能性のある高塩分濃度の地下水が混合することによって、水質が形成されていると考えられる（水野ほか，2003）。

図5. 21にこれまでに得られた花崗岩中の地下水のCl⁻濃度とBr⁻濃度の関係を示す。Br/Cl比は約0.002でほぼ一定である。Cl⁻濃度のばらつきは、高Cl⁻濃度の地下水と低Cl⁻濃度の地下水が混合し、その混合割合によるものと推察される。また、Br/Cl比がほぼ一定であることからCl⁻およびBr⁻が同じ起源であると考えられる。F⁻濃度は、図5. 22に示すようにCl⁻濃度が50mg/L以上であれば、ほぼ一定勾配でCl⁻濃度の増加に伴い減少するが、Cl⁻濃度が20mg/L以下である場合、この勾配とは異なる変化を示している。これは、F⁻濃度は高Cl⁻濃度の地下水と低Cl⁻濃度の地下水の混合だけでなく、水-岩石反応によっても変化するためと推測される。これらのことから、研究実施領域の地下水の水質形成機構の考察においては、化学成分によって、水-岩石反応と異なる水質を持つ地下水の混合の2種類の水質形成機構を念頭において解析する必要がある。

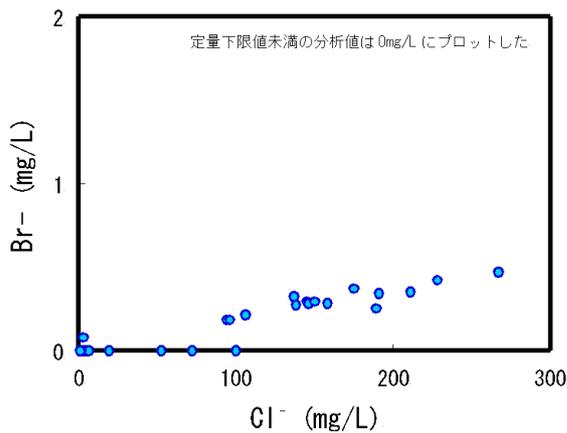


図5. 21 Cl⁻濃度とBr⁻濃度の相関図

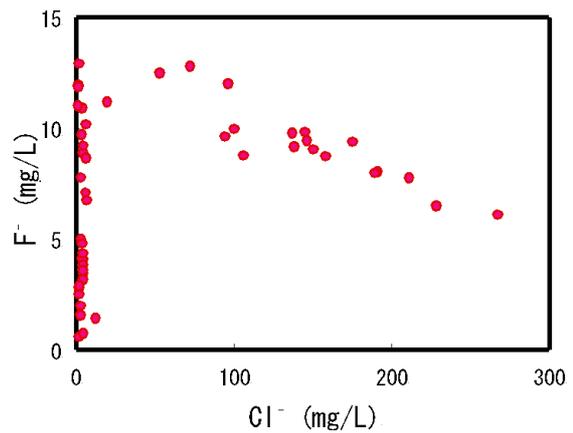


図5. 22 Cl⁻濃度とF⁻濃度の相関図

② 塩素同位体による解析

Clの放射性同位体である³⁶Clを用いて、相対的な地下水の滞留年代に関わる調査を行った。河川水、MIU-4号孔（サイクル機構，2003b）とDH-12号孔の地下水中の濃度を図5. 23に示す。中流域にあるMIU-4号孔と比較すると、下流域に位置するDH-12号孔の高Cl濃度の地下水は、³⁶Cl濃度が岩石と平衡状態である時の値に近い。これは、下流域ほど滞留時間が長いことを意味し、地下水流動解析結果と整合的である（Metcalf et al., 2003）。

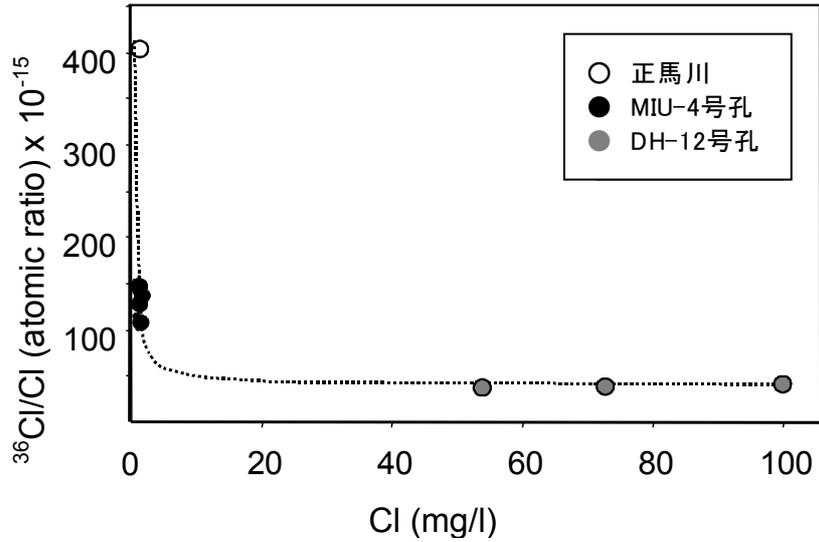


図5. 23 河川水および地下水の ^{36}Cl 濃度

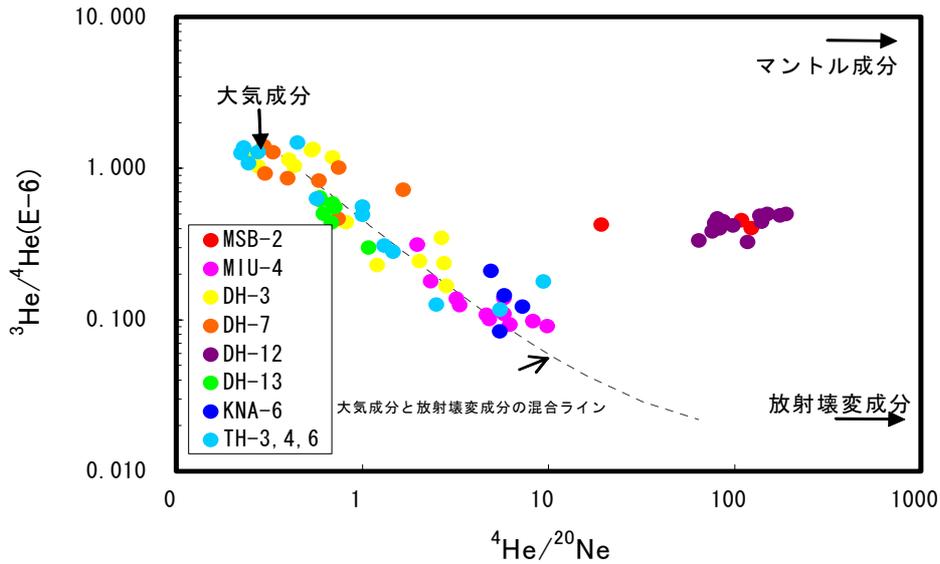


図5. 24 地下水試料の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比と $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ の関係

③ 希ガス同位体による解析

これまでに、東濃鉦山周辺の試錐孔（TH-3, 4, 6 号孔）、DH-3, DH-7, DH-12, DH-13, MIU-4 号孔で採取された Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型の地下水中の希ガス同位体について測定している。図5. 24に示すように、DH-12号孔を除いた試錐孔での地下水中の He および Ne の同位体データは、大気成分と岩石からの放射壊変成分の混合ライン上にプロットされ、この両者を起源にもつことを示している（森川，2001，上田ほか，2002）。一方、DH-12号孔の Na⁺と Cl⁻イオンに富む地下水の希ガス同位体比は、この混合ライン上にプロットされず、Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型の地下水と異なる起源を持つ可能性がある。

図5. 24には Na-Cl 型の地下水中の希ガスの起源を考察するため、Na-Cl 型地下水が観察された研究所用地内に位置する MSB-2 号孔において、希ガス同位体分析を行った結果（サイクル機構, 2003b）もあわせて示す。その結果、MSB-2 号孔の地下水の希ガス同位体比はほぼ DH-12 号孔と同じ位置にプロットされ、Na-Cl 型地下水の希ガスの起源は Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型の地下水のそれとは明らかに異なると考えられた。Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水の希ガス同位体比は水-岩石反応の進行に伴い変化していると推察されるが、Na-Cl 型地下水の希ガス同位体比は水-岩石反応と無関係な位置にプロットされ、水-岩石反応よりもむしろ異なる塩分濃度の地下水の混合により水質が形成されているという水質形成機構の解析（前述）と整合的である。

（3）地下水の pH に関する岩盤の緩衝能力の評価

地下水の pH は酸化還元電位とともに、地下水中の物質移動を支配する重要なパラメータである。特に、溶存成分濃度の低い淡水系の地下水においては、核種の主要な配位子として炭酸イオンが重要な役割を果たすため、炭酸イオン濃度を規制する pH の変動幅を把握する手法を確立しておく必要がある。地下水の pH の長期的な変動幅や安定性に関わる知見を得るためには、第一に地下水の pH の支配要因（反応）を明らかにし、その反応に関わる鉱物等の量や反応速度について解析することが有効である。

平成 14 年度は、東濃地域の花崗岩中の地下水の水質データに基づき、熱力学的に地下水の pH に関わる緩衝反応について解析した。図5. 25に、花崗岩中の地下水の pH と無機炭素濃度から計算された Pco₂ の関係を示す。この pH と Pco₂ は良い相関を示し、図中の黒線に示した相関曲線が描かれる。この相関曲線は、弱アルカリ性～アルカリ性の条件で方解石と水が平衡状態にあると仮定して得られる曲線とほぼ一致している。方解石は花崗岩の割れ目表面に普遍的に観察される鉱物であり、反応速度も他のケイ酸塩鉱物と比べて速く、この地域の地下水の弱アルカリ性～アルカリ性領域では、pH が方解石と地下水の水-鉱物反応により緩衝されていると推察された。

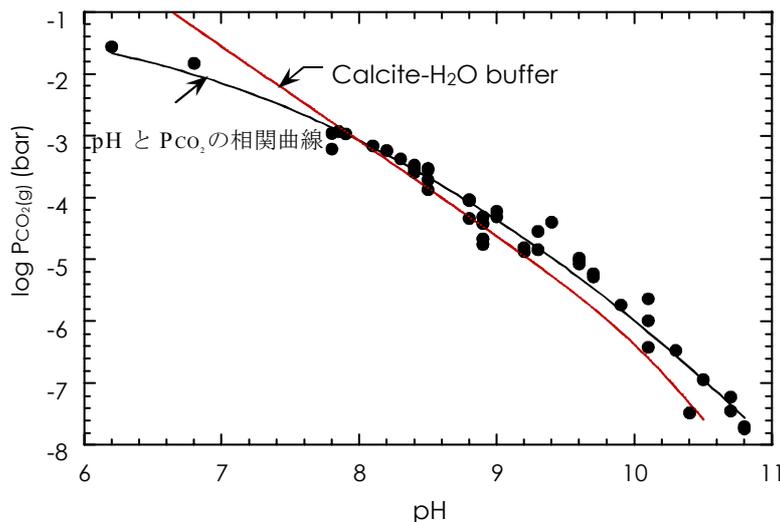


図5. 25 花崗岩中の地下水の pH と無機炭素濃度から計算した Pco₂ の関係

6. 調査機器・調査技術の開発

6. 1 目標

地質環境の調査機器・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、地下水の流動特性ならびに地球化学特性を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となる。

6. 2 実施内容および主な成果

(1) 地質構造調査技術開発

平成 14 年度においては、数 km～数百 m およびそれより小さい規模の断層や割れ目帯を把握する調査技術開発の一環として、大縮尺（1 万分の 1 スケール）の航空写真を用いたリニアメント調査、試錐孔を利用したマルチオフセット VSP 探査のほか、反射法弾性波探査、500m 級の試錐孔を用いた地質学的調査の適用性の評価を実施した。それらの結果（5. 1. 2 (1)～(3)を参照）から、各調査において用いた調査仕様やそれを一部改善した方法を適用することにより、堆積岩が基盤の花崗岩を覆うような地質条件下において、数 km～数百 m およびそれより小さい規模の断層や割れ目帯の位置や分布を把握することが可能であることが明らかとなった。

(2) 地下水の水理特性・地球化学特性調査技術開発

平成 14 年度においては、岩盤の水理特性・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、既存の試験装置を改良し、高透水区間の岩盤の透水性を把握するための装置の改良を実施した。具体的には配管径の最小内径を 20mm 以上とした。さらに揚水のポンプとして大流量(数 10l/min)の揚水が可能でかつ孔内水位が低い場合でも揚水が可能なポンプを採用した。これにより $T=10^{-4}(\text{m}^2/\text{sec})$ 程度のオーダーまでの高透水区間の透水性の測定が可能となった。

また、水理試験データの品質を確保するために、現場調査から水理パラメータ算出に至るマニュアルの策定を行った。今後このマニュアルを用いることにより、現場において客観的に同程度の品質が担保されたデータの取得が期待できる。

さらに、地下深部までの地下水圧のモニタリングシステムの開発の一環として、光ファイバーを用いた地下水圧モニタリングシステムの開発に着手した。光ファイバーケーブルは、長期耐久性やメンテナンスへの負荷の軽減が期待できること、ケーブル径が細いことからボーリング孔への敷設が容易であること、さらには電磁波や落雷に影響されないなどの特長を有することから、これまでに土木分野などで幅広く利用されている。今年度は、そのプロトタイプを製作し、既存のボーリング孔に設置し観測を開始した。

本システムでは、水圧の変化に伴う歪量の変化を高精度に計測できる FBG（Fiber

Bragg Grating) を採用した。製作したシステムを図 6. 1 に示す。本システムの孔内部は、パッカーユニット、水圧・温度測定ユニット、光ファイバー接続ユニットおよびケーシングから構成される。また、孔内部に設置されたシステムは地上部のデータ観測・制御装置（データの記録、装置の制御）に接続される。地上部の装置はさらに制御・観測用 PC、光スイッチ、FBG 測定器から構成される。使用した圧力計の測定性能を表 6. 1 に示す。本装置を DH-5 号孔に設置し、観測を開始した（センサー位置：図 6. 1 参照）。

表 6. 1 圧力計の測定性能

測定項目		
圧力	測定範囲	0.0 ~ 10.0 kgf /cm ²
	精度	± 0.5 %FS
温度	測定範囲	0 ~ 40 °C
	精度	± 0.5 %FS

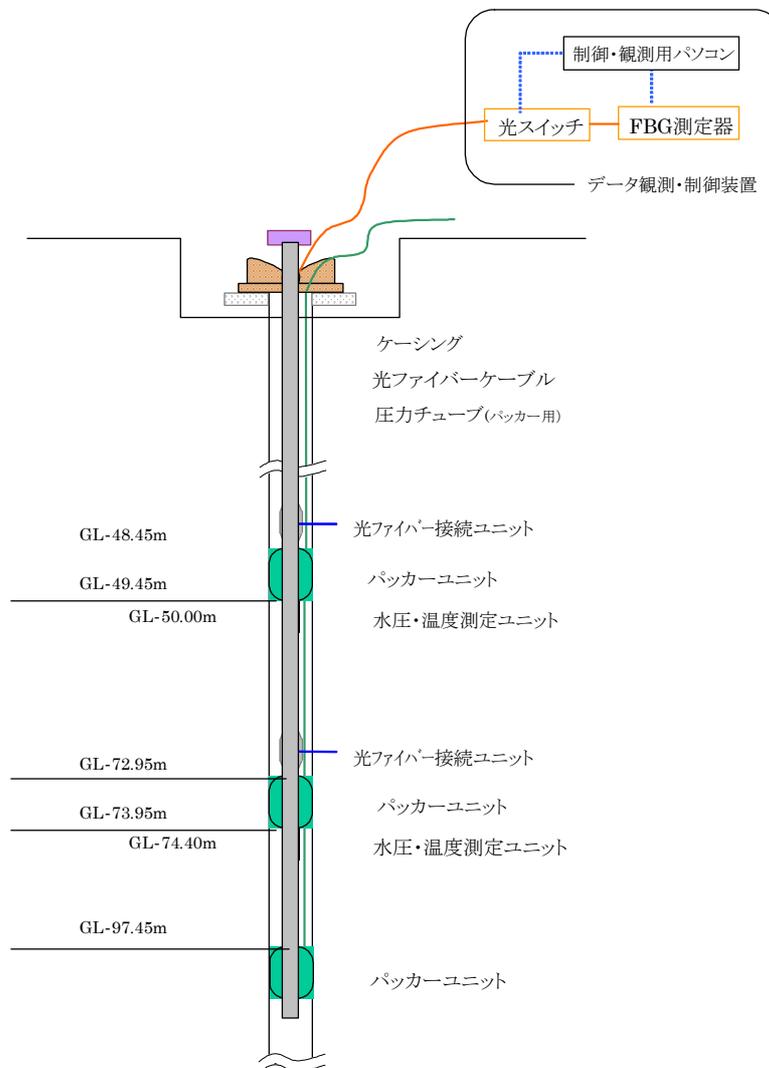


図 6. 1 光ファイバーを用いた地下水圧モニタリング装置

(3) データベースの構築

平成 13 年度までに構築されてきた調査データ用データベースシステム（サイクル機構, 2002d) について, 調査からデータ解釈, モデル化・解析を通じた評価に至るまでのデータの流れに基づいたデータの管理方法に関する検討を実施し, この検討結果に基づいてデータ管理の試験運用を開始した。

また, 地質構造／水理地質構造のモデル化, 地下水流動解析およびモデル化・解析結果の可視化作業を通じて, 抽出されたデータベースシステムの問題点の改善を適宜実施した。

7. まとめ

平成 14 年度は、リージョナルスケールを対象とした調査・研究として、リージョナルスケールにおける地下水流動解析を実施し、瑞浪超深地層研究所用地周辺の地下水流動系に着目したローカルスケールのモデル化・解析領域およびその境界条件を設定した。

ローカルスケールを対象とした調査・研究として、地質・地質構造に関する調査により、数 km～数百 m 規模の断層や割れ目帯の分布が推定でき、それより小さい規模を有する構造の分布に関する知見を得た。また、岩体を区分するような構造として、「上部割れ目帯」ならびに低角度傾斜を有する割れ目の集中帯の分布を把握したほか、水みちとして機能する構造の地質学的特性を評価した。さらに、一連の調査を通して、数 km～数百 m 規模の断層の割れ目帯の同定、ならびに地質学的特性評価のための技術を開発、整備した。ローカルスケールのモデル化・解析に関わる調査研究の一環として、既存試錐孔（DH-2 号孔）において、地質構造および水理地質構造モデルの入力情報の取得などのために再調査を実施し、水みち検出技術の有効性を確認するとともに、複数の地下水の流入出点を把握した。

ローカルスケール内の地下水の化学特性について、DH-9 号孔と DH-2 号孔の地下水の化学データを取得した。また、北方領域（広域地下水流動解析の上流域）では、Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水が、南方領域（広域地下水流動解析の下流域）では Na-Cl 型地下水が分布する水質分布モデルが構築できた。

参考文献

Doughty, C. and Tsang, C.F. (2002) : Inflow and outflow signatures in flowing wellbore electrical conductivity logs, rep. LBNL-51468, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.

動力炉・核燃料開発事業団 (1997) : 広域地下水流動研究基本計画書, 動燃事業団技術資料, PNC TN7020 98-001.

稲葉 薫, 三枝博光, 中野勝志, 小出 馨 (2002) : 深部地下水の流動系を把握するためのモデル化領域とその境界条件の設定に関する検討, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.359-364.

石井英一, 天野健治, 水野 崇, 竹内真司 (2002) : 亀裂性岩盤中の水みちに認められる特徴 —土岐花崗岩を対象とした研究事例—, 日本応用地質学会中部支部平成 14 年度支部研究発表会講演会予稿集, pp. 1-4.

糸魚川淳二 (1980) : 瑞浪地域の地質, 瑞浪市化石博物館専報, 第 1 号, pp.1-50.

Iwatsuki, T. and Yoshida, H. (1999) Water chemistry and mineralogy of fracture systems in the basement granitic rocks in the Tono uranium mine area, Gifu Prefecture, central Japan, *Geochemical Journal*. 33, 19-32.

核燃料サイクル開発機構 (1999) : 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 次取りまとめ—, サイクル機構技術資料, JNC TN1440 99-020.

核燃料サイクル開発機構 (2000) : 広域地下水流動研究の現状—平成 4 年度～平成 11 年度—, サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2000-014.

核燃料サイクル開発機構 (2002a) : 広域地下水流動研究年度計画書 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2002-004.

核燃料サイクル開発機構 (2002b) : 広域地下水流動研究年度報告書 (平成 13 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2002-007.

核燃料サイクル開発機構 (2002c) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成 13 年度報告—, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-003.

核燃料サイクル開発機構 (2002d) : 地層科学研究データベースシステム構築の現状, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2002-003.

核燃料サイクル開発機構 (2003a) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成 14 年度報告—, JNC TN1400 2003-004

核燃料サイクル開発機構 (2003b) : 超深地層研究所計画年度報告書 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料, 印刷中.

小出 馨, 前田勝彦 (2001) : 東濃地域を対象とした広域地下水流動研究の現状 (その 2), サイクル機構技報, No.12, pp.107-122.

Metcalf, R., Hama, K., Amano, K., Iwatsuki, T. and Saegusa, H.(2003) : Geochemical approaches to understanding a deep groundwater flow system in the Tono area, Gifu-ken, Japan, Groundwater Engineering, pp.555-561.

宮原智哉, 片岡達彦, 竹内真司 (2002) : 水収支観測による岩盤浸透量の算出と観測流域スケールの検討, 日本地下水学会 2002 年秋季講演要旨集, pp.202-205.

水野 崇, 古江良治, 岩月輝希 (2003) : 瑞浪超深地層研究所における地球化学研究 (その 2) —花崗岩中の地下水の化学組成について—, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会要旨集 CD-ROM.

森川徳敏(2001) : 地球化学的調査に基づいた地下水流動に関する研究—東濃地域を対象とした溶存希ガスによる地下水調査—, サイクル機構研究報告, JNC TN7400 2001-003

村上由紀, 長沼 毅, 岩月輝希 (1999) : 深部地質環境における微生物群集 東濃地域を例として, 原子力バックエンド研究, Vol.5, No.2, pp.59-66.

大野博之, 小島圭二 (1993) : 岩盤割れ目のフラクタル (その 2) —フラクタル特性と分布のばらつき—, 応用地質, 34 巻, 2 号, pp.12-26.

三枝博光, 須山泰宏 (2000) : 超深地層研究所計画における地質構造モデルの構築及び地下水流動解析, サイクル技報, No.4, pp.101-110.

Tchalenko, J.S., and Brberian, M. (1975) : Dasht-e Bayez fault, Iran: Earthquake and earlier related structures in bed rock. Bull. Geol. Soc. Am., 86, pp.703-709.

上田 晃, 亀井淳子, 後藤綾子, 長尾敬介, 濱 克宏, 川村淳(2002) : 希ガス及び Sr 同位体組成を利用した地下水流動状態の推定の試み—岐阜県東濃地域における事例—, 日本地球化学会年会講演要旨集 (第 49 回), pp.144

山口 靖, 長谷紘和 (1983) : 多様な画像によるリニアメント頻度の解析—レーダー画像の屋久島地域への適用例について—, 写真測量とリモートセンシング, 22, 3, pp.4-13.

山井忠世, 角南基亮, 小林公一 (1994) : 東濃地域を対象としたリニアメント調査 (その1), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書 : アジア航測株式会社), PNC TJ7361 94-002.

Zang, A., Wagner, C.F., Stanchits, S., Jansen, C. and Dresen G. (2000) : The fracture process zone in Granite. *Jour. Geophys. Res.*, 105, B10, pp.23651-23661.