

広域地下水流动研究
年度報告書（平成 15 年度）

(研究報告)

2004 年 7 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

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)

2004

広域地下水流动研究 年度報告書（平成 15 年度）
(研究報告)

天野 健治*, 岩月 輝希*, 太田 久仁雄*, 大澤 英昭*, 竹内 真司*, 藤内 聰*

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、地下水の流动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、「広域地下水流动研究」を平成 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、ボーリング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・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を蓄積してきた。

平成 15 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、より現実的な地質構造モデルに基づきリージョナルスケールにおける地下水流动解析を実施し、リージョナルスケールでの解析条件の違いが結果に与える影響について検討した。また、ローカルスケールを対象とした調査として、リニアメント解析、ボーリング調査（DH-14 号孔、DH-15 号孔、RT-03 号孔）を実施した。さらに、既存ボーリング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

July, 2004

Tono Regional Hydrogeological Study Project
Annual Report 2003
(Research Report)

Kenji Amano*, Teruki Iwatsuki*, Kunio Ota*, Hideaki Osawa*,
Shinji Takeuchi* and Satoshi Yabuuchi*

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 2003, as the research for regional scale, groundwater simulation using realistic geological model 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. Lineament analysis, borehole investigations (DH-14, DH-15 and 03RT-03) were carried out in the local scale domain. 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	広域地下水流动研究の概要	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	8
5.1	断層・割れ目帯を考慮した調査技術の構築	8
5.1.1	目標	8
5.1.2	実施内容および主な成果	8
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	18
5.2.1	目標	18
5.2.2	実施内容および主な成果	18
5.3	ローカルスケールにおける地下水流动モデル化技術の構築	23
5.3.1	目標	23
5.3.2	実施内容および主な成果	23
5.4	地下水流动モデルと地球化学モデルの整合性の確認	28
5.4.1	目標	28
5.4.2	実施内容および主な成果	28
6	調査技術・調査機器の開発	34
6.1	目標	34
6.2	実施内容および主な成果	34
7	まとめ	36
	参考文献	37

図目次

図 2.1	スケールの概念	2
図 2.2	広域地下水流动研究の研究実施領域および領域周辺の地質図	3
図 4.1	超深地層研究所用地を通過する地下水の流線	7
図 5.1-1	露頭に分布する割れ目とリニアメントの長さ別頻度分布	9
図 5.1-2	調査測線図	10
図 5.1-3	詳細解析のフロー図	10
図 5.1-4	既存の反射断面記録（左図）と詳細解析結果（右図）との対比	11
図 5.1-5	高密度電気探査測線およびボーリング位置図	12
図 5.1-6	高密度電気探査解析結果	12
図 5.1-7	電気検層の比抵抗値を拘束条件とすることによる解析結果の改善	13
図 5.1-8	地質構造考察図	13
図 5.1-9	03RT-03号孔におけるマルチオフセットVSP探査のレイアウト（左図） と反射面抽出の原理	14
図 5.1-10	反射イメージング解析結果	14
図 5.1-11	DH-14号孔周辺に分布するリニアメントおよび次月断層の分布	15
図 5.1-12	DH-14号孔の地質柱状図	16
図 5.1-13	DH-15号孔周辺の推定断層	17
図 5.1-14	DH-15号孔周辺の地質柱状図	17
図 5.2-1	日吉側流域ならびに河川流量観測位置	19
図 5.2-2	日吉側河川流量と降水量	19
図 5.2-3	広域地下水流动研究における地下水圧モニタリングシステム位置図	20
図 5.2-4	DH-2号孔の各区間における水圧モニタリング結果	21
図 5.2-5	DH-7号孔の観測区間1, 2における水圧モニタリング結果	22
図 5.2-6	DH-7号孔のピエゾ水頭分布（水圧モニタリング開始前）	22
図 5.3-1	DH-14号孔における流体検層結果	23
図 5.3-2	DH-15号孔における流程検層および水理試験結果	24
図 5.3-3	モデル化・解析領域とボーリング孔位置	25
図 5.3-4	地下水流动解析結果（水頭分布）	25
図 5.3-5	間隙水圧測定結果	26
図 5.3-6	水頭分布と水質分布の比較	27
図 5.3-7	地下水流动解析結果（地下水温分布と地下水の移行経路）	27
図 5.4-1	多変量解析（主成分分析）による地下水の水質分析	29
図 5.4-2	M3解析手法に基づく地下水混合割合の定量的解析	29
図 5.4-3	東濃地域の地下水中の希ガス同位体組成と水質の相関	31
図 5.4-4	地下水中的塩素同位体比と塩素濃度の相関	32

表目次

表 2.1	広域地下水流动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 4.1	地下水流动解析ケース（平成 15 年度）	6
表 5.2-1	DH-2 号孔における測定区間	21
表 5.2-2	DH-7 号孔における測定区間	22
表 5.4-1	東濃地域の岩石中の希ガス量	30
表 5.4-2	東濃地域の岩石中の希ガス同位比	30

1. はじめに

広域地下水流动研究は、広域における地質環境、特に地下水の流动特性・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「広域地下水流动研究基本計画書」（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、地下水の流动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、「広域地下水流动研究年度計画書（平成15年度）」（サイクル機構、2003a）に従って、東濃地科学センターが平成15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. 広域地下水流动研究の概要

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动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、広域地下水流动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、2003a）。

このうち、広域地下水流动研究では、平成4年度から東濃鉱山周辺の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、地下水の流动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）。この目標に向け、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）。広域地下水流动研究は、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。

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。

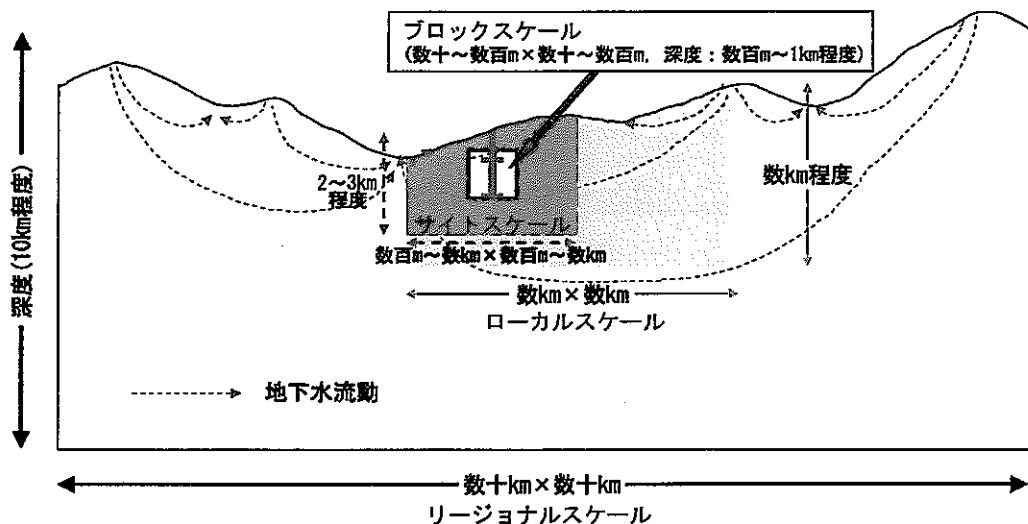


図2.1 スケールの概念

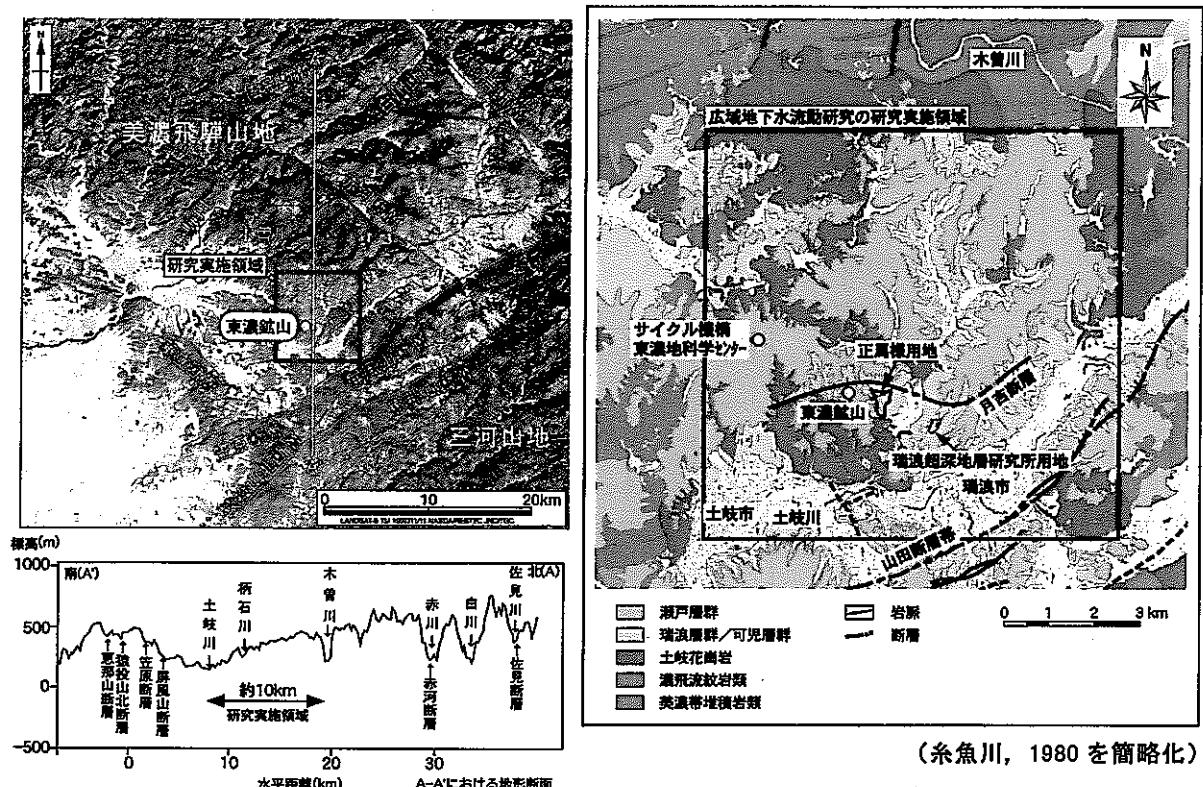


図 2.2 広域地下水流动研究の研究実施領域および領域周辺の地質図

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动を理解しつつ、地層区分システム全体の安全評価を考える上で重要な一つの地下水流动系を包含した領域（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动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动解析などを行い、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、本領域の地下水流动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动経路、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动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 広域地下水流动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	
研究対象 広域地下水流动	リージョナル (Regional Scale)	<ul style="list-style-type: none"> 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 <ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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
	ローカル (Local Scale)	<ul style="list-style-type: none"> 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 <ul style="list-style-type: none"> 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3 km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 	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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略的分布 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略的な記述 	平面： 数10km ² (数km×数km) 深度： 3km程度まで	

平成 15 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ローカルスケールにおける地下水流动モデル化技術の構築、④地下水流动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、断層を対象として高密度電気探査やボーリング調査を行うとともに、これまで行ってきた精密空中写真判読調査、長さ数 km～数百 m のリニアメントの解析、反射法弾性波探査、およびボーリング孔調査結果をあわせて断層・割れ目や主要な水みちの位置や透水性の確認、地下水流动解析、地下水の水質分布と水質形成機構などの検討を行った。

2. 3 調査技術・調査機器の開発

地質環境の調査技術・調査機器の開発では、深度約 1,000m までの地質構造、地下水の流动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 15 年度は、ローカ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を実施した。

3. 平成 15 年度の研究実績

本研究の平成 15 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 15 年度											
	平成 15 年											平成 16 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
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
・物理探査（VSP 調査等）
・ボーリング調査
DH-14,15
VSP
VSP 調査のためのボーリング掘削
(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动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
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・地球化学特性調査機器開発

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动解析については、ローカルスケールの地下水流动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. 1. 2 実施内容および主な成果

平成 14 年度は、ローカルスケールの地下水流动解析におけるモデル化領域および境界条件を設定するために、後背地地形が地下水流动へ及ぼす影響を考慮した複数の領域における飽和状態による地下水流动解析を実施した。この地下水流动解析においては、一般に取得できる文献による情報に基づき、地形および広域的な地下水流动へ与える影響が大きいと考えられる大規模な断層をモデル化の対象とした。その結果、超深地層研究所用地周辺の地下水流动系は、35km 四方に含まれる地形の影響を受けていること、標高-2000m 程度付近に流动系境界があり、それより浅い領域では土岐川と木曽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。この検討では、地形面に地下水面を固定した飽和地下水流动解析であるため、山頂部などの地下水面が低い箇所が地下水流动系に与える影響を適切に考慮していない可能性が考えられる。また、水理地質を 1 つのユニットとしてモデル化しているが、水理地質毎の透水性の違いが地下水流动系に与える影響を検討する必要があると考えられた。

平成 15 年度は、平成 14 年度の地下水流动解析結果を補完するために、水理地質区分をモデル化するとともに、地下水面分布を考慮した飽和不飽和地下水流动解析を実施した（表 4.1）。水理地質は、堆積岩部、花崗岩上部割れ目帶部、花崗岩低密度割れ目帶部に 3 区分した。その結果から得られた研究所用地周辺の地下水流动系は、平成 14 年度での推定結果と整合的であることが明らかとなった（図 4.1）。

表 4.1 地下水流動解析ケース（平成 15 年度）

解析ケース	解析条件				
	飽和/不飽和	涵養量	透水係数($\text{Log}_{10} [\text{m/s}]$)		
			堆積岩	上部割れ目帶	割れ目低密度帶
Case A	飽和 (地表に地下水位固定)	-	-7.0 (horizontal) -9.0 (vertical)	-6.4	-7.3
Case B	不飽和	$3.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$	-7.0 (horizontal) -9.0 (vertical)	-6.4	-7.3
Case C	不飽和	$1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$	-7.0 (horizontal) -9.0 (vertical)	-6.4	-7.3
Case D	不飽和	$3.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$	-7.0 (horizontal) -7.0 (vertical)	-6.4	-7.3
Case E	不飽和	$3.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$	-7.0 (horizontal) -9.0 (vertical)	-6.4	-8.0

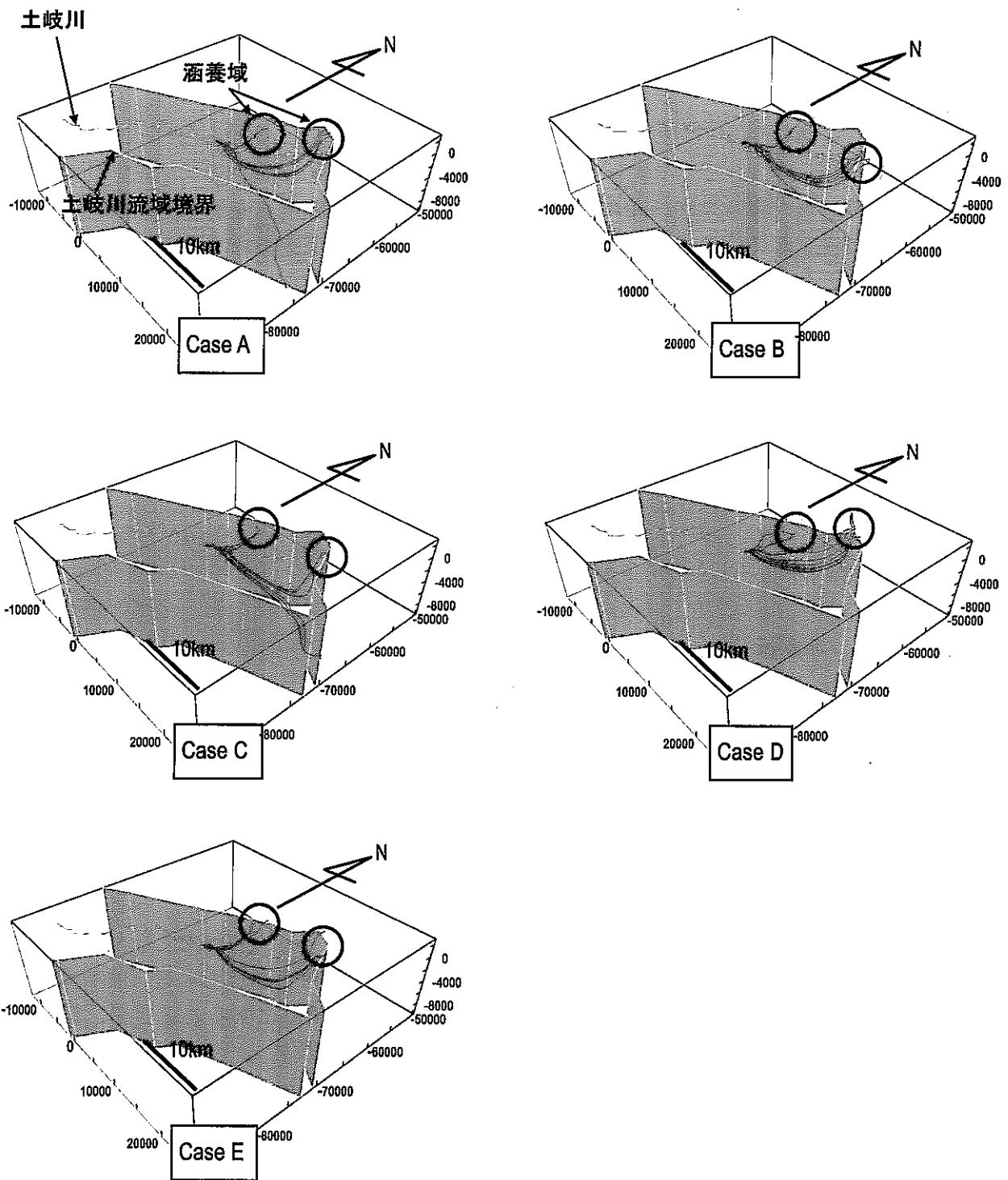


図 4.1 超深地層研究所用地を通過する地下水の流線

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・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 15 年度は、これまでに分布が推定された不連続構造ならびに地質構造を対象に、リニアメント解析、反射法弹性波探査結果を用いた詳細解析、およびボーリング孔における地質学的・地球物理学的調査を実施し、数 km～数百 m およびそれより小さい規模の不連続構造の分布や地質学的特性を把握するとともに、その調査に必要な技術を開発・整備した。

5. 1. 2 実施内容および主な成果

(1) 地質調査

① リニアメント解析

平成 14 年度に実施した大縮尺の空中写真（1 万分の 1 スケール）の判読により抽出した、長さ数 km～数百 m のリニアメント（472 本）と断層や割れ目との関係を検討するために、既往の調査（地表踏査、ボーリング調査、地上弹性波探査）で確認もしくは推定された断層や割れ目とリニアメントの分布や方向性を比較した。その結果、両者の分布および方向性が概ね整合的であること、および両者の長さと頻度の関係が両対数グラフ上でほぼ同一の直線上に分布する（図 5.1-1）ことが明らかになった。この結果は、べき乗分布に従うとされる割れ目の長さと頻度の関係（大野・小嶋、1992）と同じ傾向であり、抽出されたリニアメントが断層や割れ目帯の分布を反映している可能性を示唆する（佐々木ほか、2004）。また、割れ目の長さと頻度は両対数グラフ上で直線関係にあることから、地表踏査およびリニアメントでは確認が比較的困難な、長さ数 m～数百 m 程度の割れ目の頻度（図中の点線枠部）を推定することができる可能性がある（佐々木・梅本、2004）。

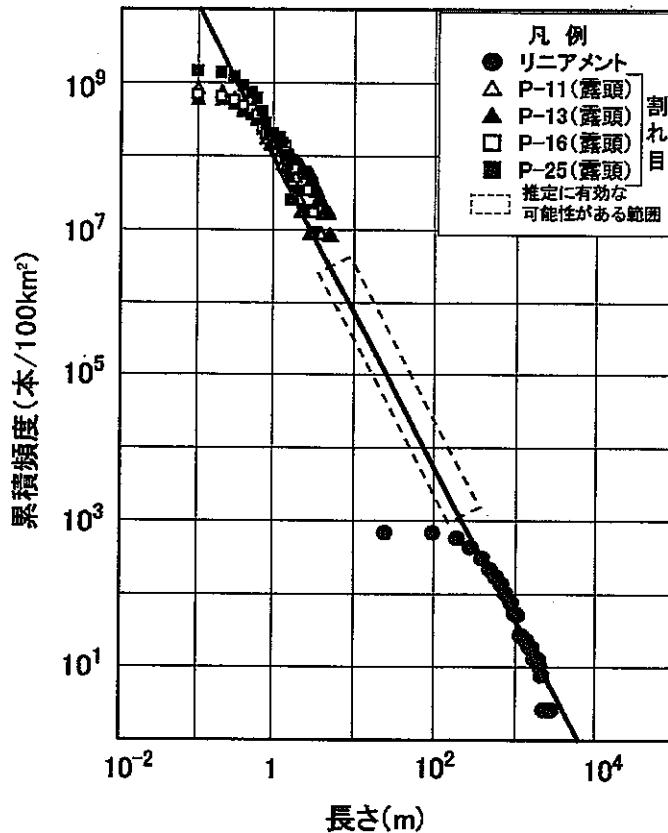


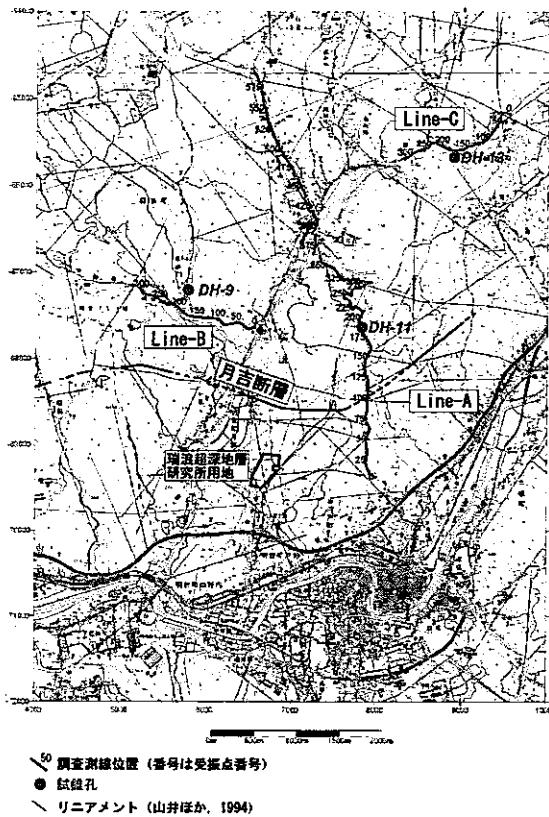
図 5.1-1 露頭に分布する割れ目とリニアメントの長さ別頻度分布

(2) 地上物理探査

① 反射法弾性波探査結果を用いた詳細解析

広域地下水流动研究において実施した反射法弾性波探査では、被覆堆積岩と基盤花崗岩の不整合面や被覆堆積岩中の地層境界面および断層や割れ目帯などの分布を確認することができた（サイクル機構、2003b）。しかしながら、解析により抽出された花崗岩中の反射イベントは、大局的には実際の地質構造と一致するものの、詳細なスケールにおいては若干の不整合が認められていた。

平成 15 年度は、詳細なスケールをより精度良く可視化することを目的として、既存結果の詳細解析を実施した（図 5.1-2 に示す Line-B を対象）。実施した詳細解析のフロー図を図 5.1-3 に示す。これまでの解析との主な違いは、相対振幅を保存し、マイグレーションを重合前に適用したことにある（図 5.1-3 中の下線部）。詳細解析の結果（図 5.1-4）から、既存の反射断面記録に比べて詳細解析による反射断面記録の方が、反射イベント（とくに図 5.1-4 中の赤点線で囲った範囲）と合成反射記録と良く一致しており、かつ断層や割れ目帯の規模に対応すると考えられる反射振幅の強弱が適切に表現されていることが明らかとなった。これは、重合後に実施していたマイグレーションを重合前に行うことにより、真の反射波をより正しい位置で重合することができた結果と解釈される。



※ 黒実線はリニアメント（山井ほか, 1994）を示す。

図 5.1-2 調査測線図

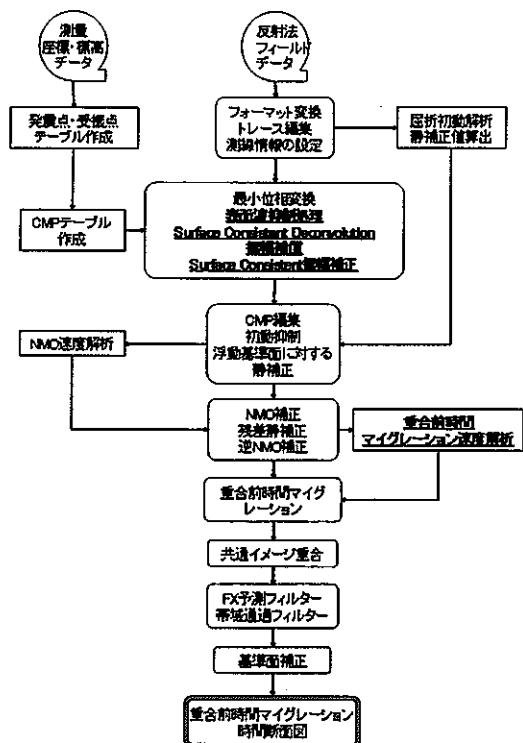
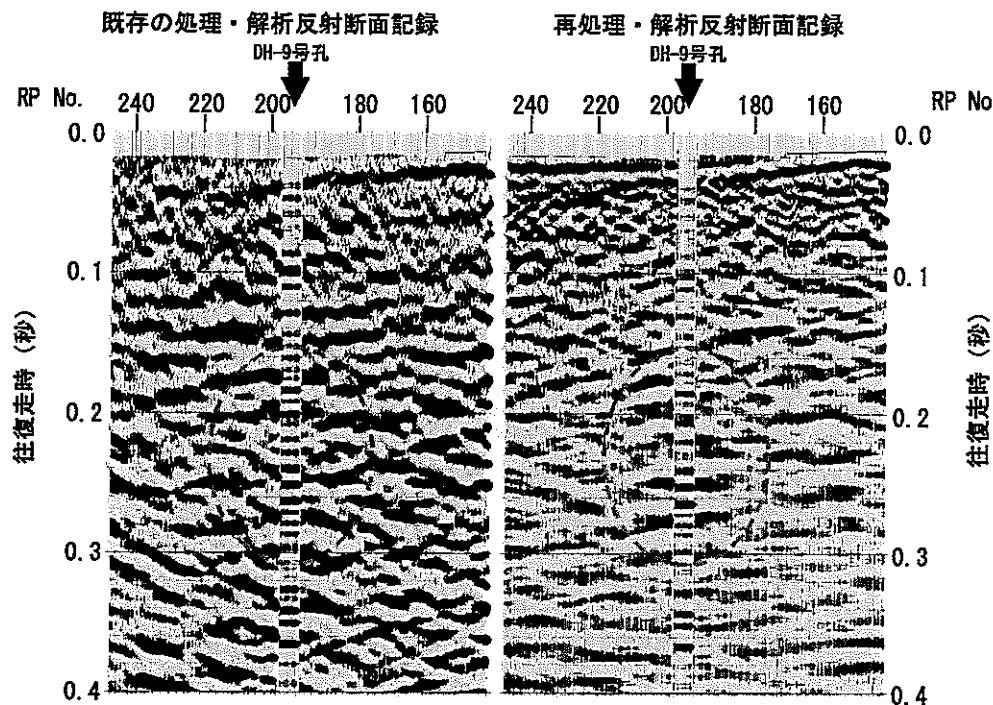


図 5.1-3 詳細解析のフロー図



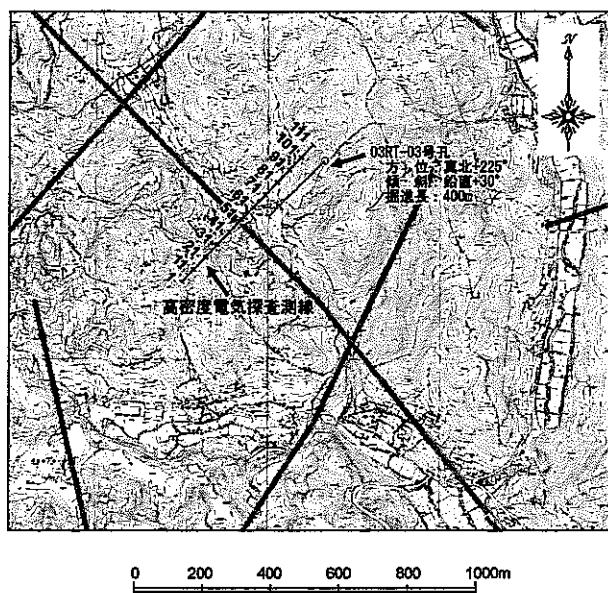
※DH-9号孔における合成反射記録は、音波検層および密度検層の結果から作成

図 5.1-4 既存の反射断面記録（左図）と詳細解析結果（右図）との対比

② 03RT-03号孔における高密度電気探査の有効性確認調査

本調査では、高密度電気探査により検出されたリニアメント近傍の低比抵抗部（杉本・山田, 2002）に対応する地質構造を明らかにすること、ならびに高密度電気探査の有効性を確認することを主な目的として、03RT-03号孔（斜孔、掘削長 400 m）を掘削し、岩芯観察や物理検層などの地質学的・地球物理学的調査を実施した（図 5.1-5）。その結果、高密度電気探査から予想されていた深度約 100 m 以深における低比抵抗値（数 10 $\Omega \cdot m$ ）を有する区間に大規模な断層の存在は確認されず、その区間の比抵抗値は、反対に非常に高い値（2,000～5,000 $\Omega \cdot m$ ）を示すことが明らかになった（図 5.1-6 左図）。この不一致は、高密度電気探査の再解析（図 5.1-6 右図）およびその信頼性を確認するためのシミュレーション解析の結果（図 5.1-7）から、測線延長方向に低比抵抗層が分布する場合などに、測線端部においてその影響が現れるものと考えられる。岩芯観察結果や物理検層などの結果に基づき再解析結果を解釈すると、花崗岩健岩部と花崗岩風化部の境界に相当する約 2,000 $\Omega \cdot m$ の高比抵抗の分布（図 5.1-8 中の黒色破線部）から、中～高角度に傾斜する 3 条の不連続構造の存在が推定することができる（図 5.1-8 中の黒色および桃色実線部）。このうち、右端の不連続構造（図 5.1-8 中の桃色実線部）は、その位置や傾斜からボーリング孔の深度 340 m 付近に分布する断層（図 5.1-8 中の桃色破線部）に連続していると考えられる。一方、リニアメント（図 5.1-8 中の白矢印）近傍においても、2 条の不連続構造（図 5.1-8 中の黒色実線部）の地表延長が分布するものの、これらの不連続構造は、ボーリング孔内の深度 340 m 付近で確認された断層と同等もしくはそれより小さい規模と考えられ、リニアメントで判読されるような長さ 3 km を超える規模の不連続

構造ではないものと推察される。



※1:2,500 瑞浪市都市計画基本図（平成 11 年測量）を使用。黒実線はリニアメント（山井ほか, 1994）。電気探査測線上の数値は電極番号。

図 5.1-5 高密度電気探査測線およびボーリング位置図

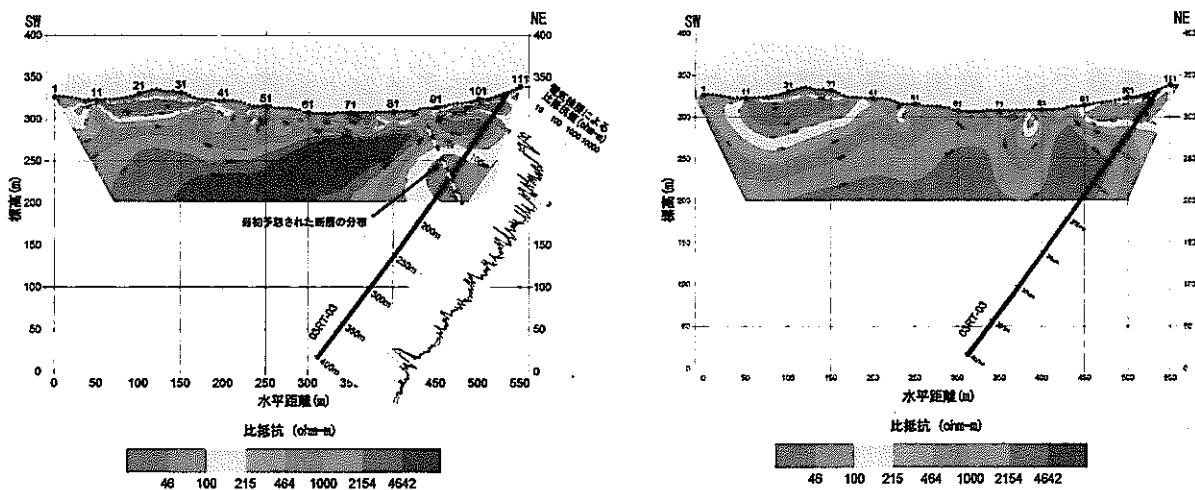


図 5.1-6 高密度電気探査解析結果
(左図：初期解析結果および電気検層結果,
右図：電気検層結果を拘束条件とした解析結果)

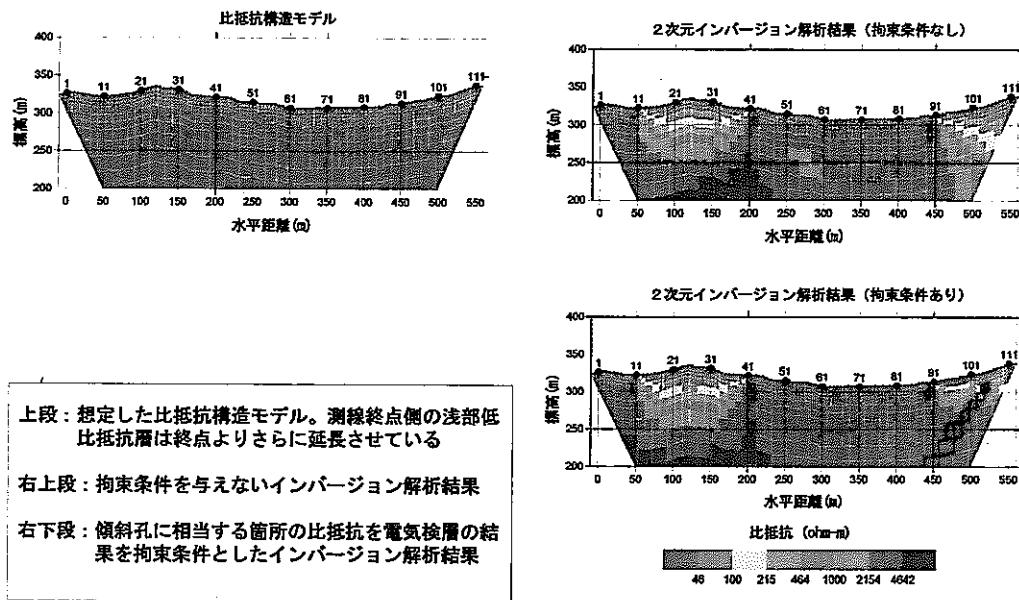


図 5.1-7 電気検層の比抵抗値を拘束条件とすることによる解析結果の改善

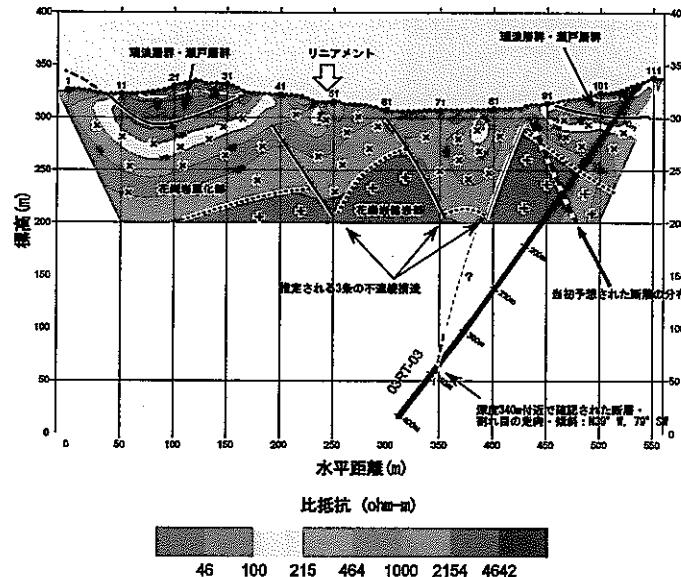


図 5.1-8 地質構造考察図

③ 03RT-03 号孔におけるマルチオフセット VSP 探査

ボーリング孔で遭遇する断層や割れ目帯の連続性を把握する手法の適応性を確認することを目的として、03-RT03 号孔におけるマルチオフセット VSP 探査を実施した。本調査では、地質構造の三次元的な可視化を行うために、複数の地表発振点からの波動をボーリング孔内に設置した 3 成分受振器（ジオフォン）にて計測し（図 5.1-9），その結果をマイグレーション処理の一種を用いて解析した。具体的には、受振した波動の等走時面の共

通接面が反射面に相当することを利用し、複数個の等走時面から反射面となりうる不連続構造を抽出するものである。反射面のイメージング結果図（図 5.1-10）から、硬質岩盤から軟質岩盤に変化する比較的大きな反射面（図 5.1-10 中の赤色で示される面）が発信点 P1 よりやや北西部の地表～地表下約 100m の深度に確認された。抽出された反射面の深度方向への延長が 03RT-03 号孔の深度 340m 付近で確認されている断層の位置とほぼ一致することから、この反射面は、03RT-03 号孔で確認されている断層である可能性が示唆される。

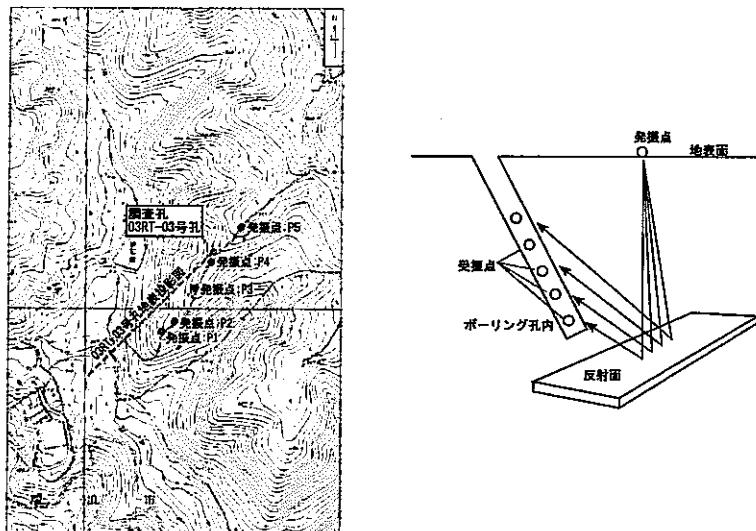
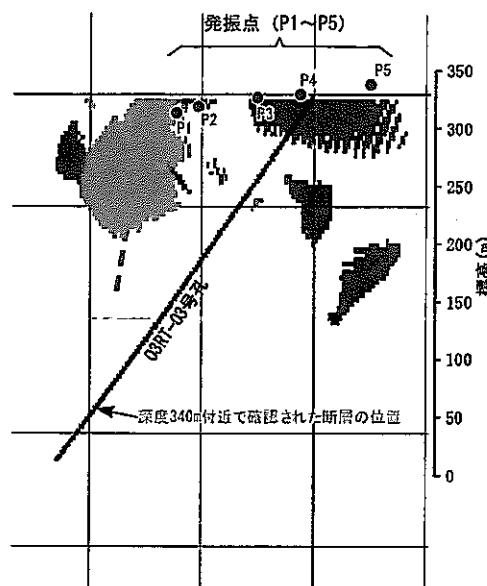


図 5.1-9 03RT-03 号孔におけるマルチオフセット VSP 探査のレイアウト（左図）および反射面抽出の原理（右図）



※赤色で示す反射面は、硬質岩盤から軟質岩盤に変化する特性を有し、灰色で示す反射面は軟質岩盤から硬質岩盤に変化する特性を有する。

図 5.1-10 反射イメージング解析結果

(3) ボーリング調査

① DH-14 号孔における断層・割れ目調査

広域地下水流动研究実施領域の北西部には、実際にその存在が確認されている次月断層（動燃事業団、1994）をはじめ、次月断層と同方向を有する北北西走向のリニアメントが高い頻度で分布する（図 5.1-11；山井ほか、1994）。次月断層をはじめとするこれら北北西走向の不連續構造は、瑞浪超深地層研究所用地周辺の露頭やボーリング孔でも実際に認められるほか（Kumazaki et. al., 2003），その変位が数十 m 規模を有することから（太田ほか、1999），月吉断層（Matsuzawa and Uemura, 1967）と同様に、数 km と比較的大きな規模を有する重要な地質構造と考えられる。DH-14 号孔（垂直孔、掘削深度 1,012 m；図 5.1-11）は、北北西走向の不連續構造の連続性ならびにその地質学的特性の把握を主な目的として掘削し、平成 15 年度においては、岩芯観察や BTV（ボアホールテレビ）観察、物理検層などの結果の解析とともに室内分析・調査を継続して実施している。これまでに実施した岩芯観察や BTV 観察、物理検層などの結果、孔底まで中粒～粗粒黒雲母花崗岩からなる基盤岩およびアプライト、ペグマタイト、石英脈などの岩脈が認められた。また、基盤岩中において、十数箇所の断層や割れ目帯が確認でき、割れ目の密度（本数）および変質などに関する地質学的情報が取得できた（図 5.1-12）。BTV 観察による割れ目の同定および走向・傾斜の判読結果から、約 2,600 本の割れ目（割れ目密度：約 2.7 本/m）が認められ、とくに北北西走向の割れ目の卓越が確認された。また、断層・割れ目帯のうち比較的大きな規模の断層岩を介在する 3 区間（深度 97 m 付近、347 m 付近、582 m 付近）は、いずれもボーリング孔東側に分布するリニアメントもしくは次月断層と同様に北北西走向を有しており、それらと連続する可能性が高いと考えられる。

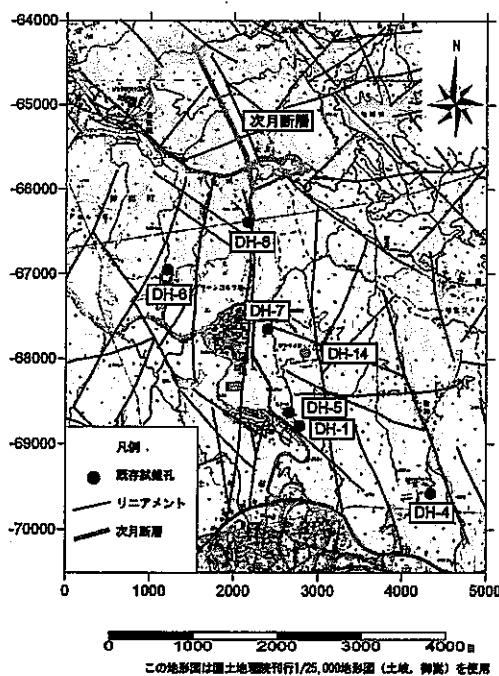


図 5.1-11 DH-14 号孔周辺に分布するリニアメントおよび次月断層の分布

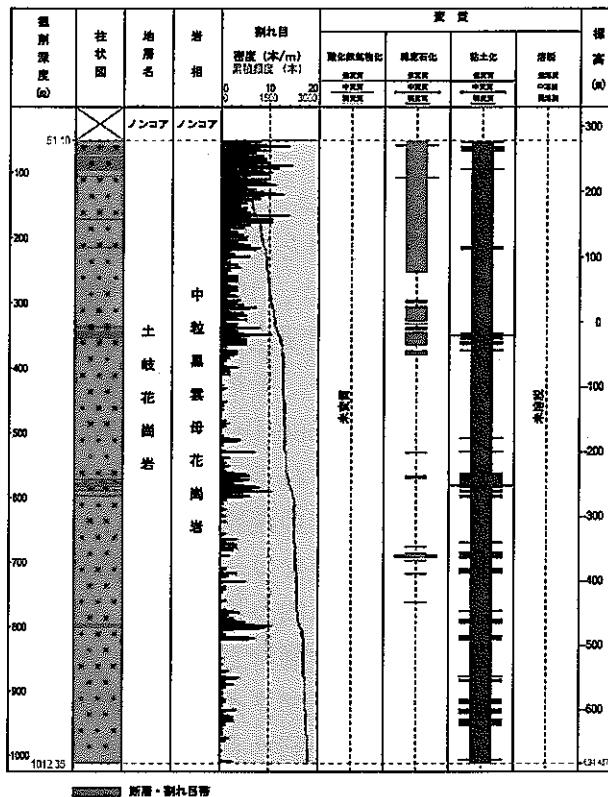
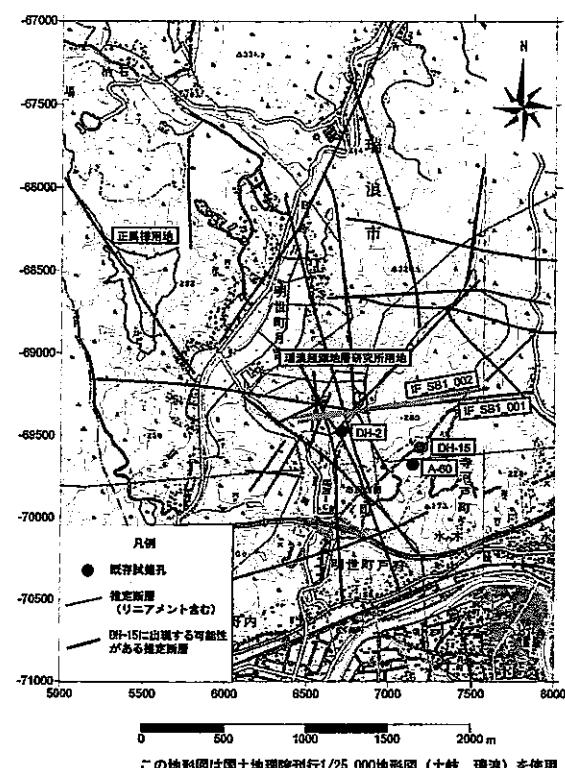


図 5.1-12 DH-14 号孔の地質柱状図

② DH-15 号孔における断層・割れ目調査

DH-15 号孔（垂直孔、掘削深度 1,012 m；図 5.1-13）では、地下水流动に影響を及ぼすと考えられる地質・地質構造（特に、断層や割れ目帯）の分布および特性を把握することを主な目的として調査を進めている。具体的には、瑞浪超深地層研究所用地の近傍で掘削された DH-2 号孔（垂直孔、掘削深度 501 m）で確認された 2 条の東西走向の断層（図中の緑色線）の連続性およびその地質学的特性を把握することを主な目的に調査を実施した。これまでに、掘削深度 1,012 m までの掘削、岩芯観察、BTV 観察、物理検層などを実施し、岩相、割れ目の密度（本数）および変質などの地質学的情報を取得するとともに、十数区間の断層や割れ目帯を確認した（図 5.1-14）。具体的には、深度 230.90mabsh まで堆積岩（瑞浪層群）が分布すること、深度 230.90～232.65mabsh において花崗岩風化部が分布すること、割れ目の密度が堆積岩中で約 0.7 本/m、花崗岩中で約 2.2 本/m であること、花崗岩上部（深度約 330m 以浅）においては、低角度傾斜を有する割れ目が卓越する割れ目帯が分布することなどが確認された。これまでに得られた結果の概略的な解釈により、4 区間（深度 456 m 付近、595 m 付近、619 m 付近、1,000m 付近）に認められる断層・割れ目帯は、DH-2 号孔で確認された 2 条の東西走向の断層と同様な方向性、規模・構造を有しており、それらと連続する可能性が高いと判断される。



この地形図は国土地理院刊行1/25,000地形図(土岐、環瀬)を使用

図 5.1-13 DH-15号孔周辺の推定断層

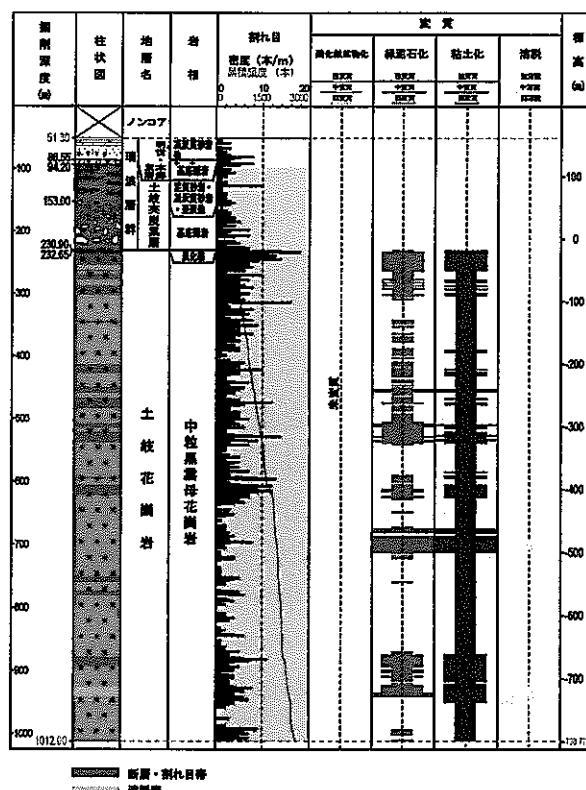


図 5.1-14 DH-15号孔の地質柱状図

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。

5. 2. 2 実施内容および主な成果

広域地下水流动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、ボーリング孔による原位置透水試験、地下水位・間隙水圧の長期観測、および地下水流动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动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15年度は、ローカルスケールの地下水流动解析に資する表層水理観測を継続し境界条件の設定に資する検討を行うとともに、既存ボーリング孔における地下水位・間隙水圧の長期観測を継続した。

(1) 表層水理調査

① 日吉川における河川流量観測

ローカルスケールのモデル化領域の中央部を流れる日吉川において平成15年3月より河川流量を観測した(図5.2-1)。図5.2-2は、観測された月間の河川流量を、サイクル機構正馬様用地で観測された月間降水量とともに示したものである。この結果から、河川流量が降水量の変化に応じて増減することがわかった。なお、月間最大河川流量は7月の $6.2 \times 10^6 \text{m}^3$ 、月間最小河川流量は2004年1月の $0.8 \times 10^6 \text{m}^3$ 、年間平均河川流量は $2.5 \times 10^6 \text{m}^3$ 、総河川流量は $32.0 \times 10^6 \text{m}^3$ であった。

また、比較的流域面積の大きい日吉川流域を対象として適切な水収支解析を行うには、流域外からの水の流入、流出の影響を考慮する必要があると考えられる。日吉川流域内に整備されている簡易水道の供給量を調べた結果、日吉川の河川流量の0.7%程度であり、水収支解析においてはほとんど影響しないことが明らかになった。



図 5.2-1 日吉川流域ならびに河川流量観測位置

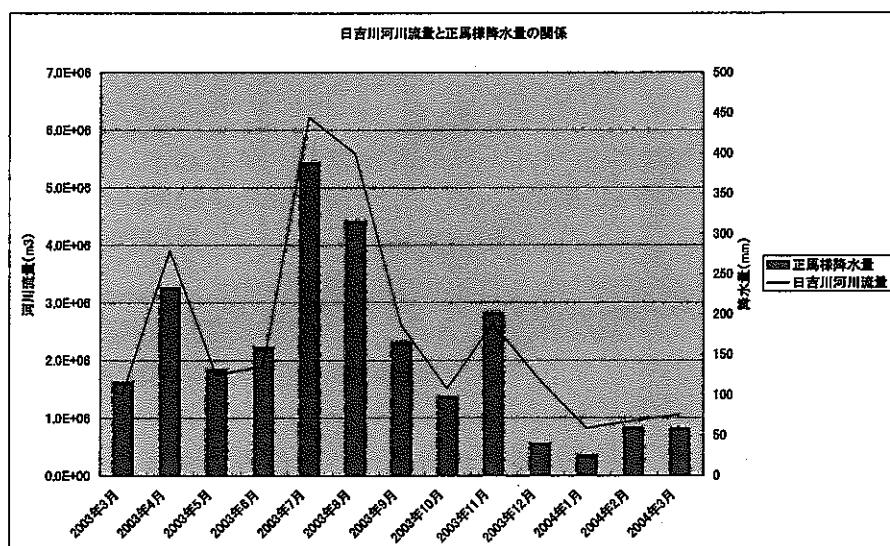


図 5.2-2 日吉川河川流量と降水量

② 日吉川流域を対象とした面積雨量の設定

日吉川流域を対象とした水収支解析を行うにあたって、流域内の降雨量を適切に設定する必要がある。降雨量の設定に関して、有効であると考えられる代表値法、単純平均法、荷重平均法（ティーセン法、支配圏法、等雨量線法）による手法で面積雨量を算出し、日吉川の河川流出高との相関を計算することにより、各手法の比較検討を行った。その結果、東濃鉱山で観測された降雨量を採用した代表値法が最も相関が高く（相関係数 0.9768）、日吉川流域を対象とした水収支解析においては本手法は有効な方法であると考えられる。なお、その他の手法についても、高い相関係数（0.80～0.976）が得られている。

(2) 深層水理調査

深層水理調査では、既存のボーリング孔を用いて水圧のモニタリングを実施した。広域地下水流动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）の設置ボーリング孔位置を図 5.2-3 に示す。

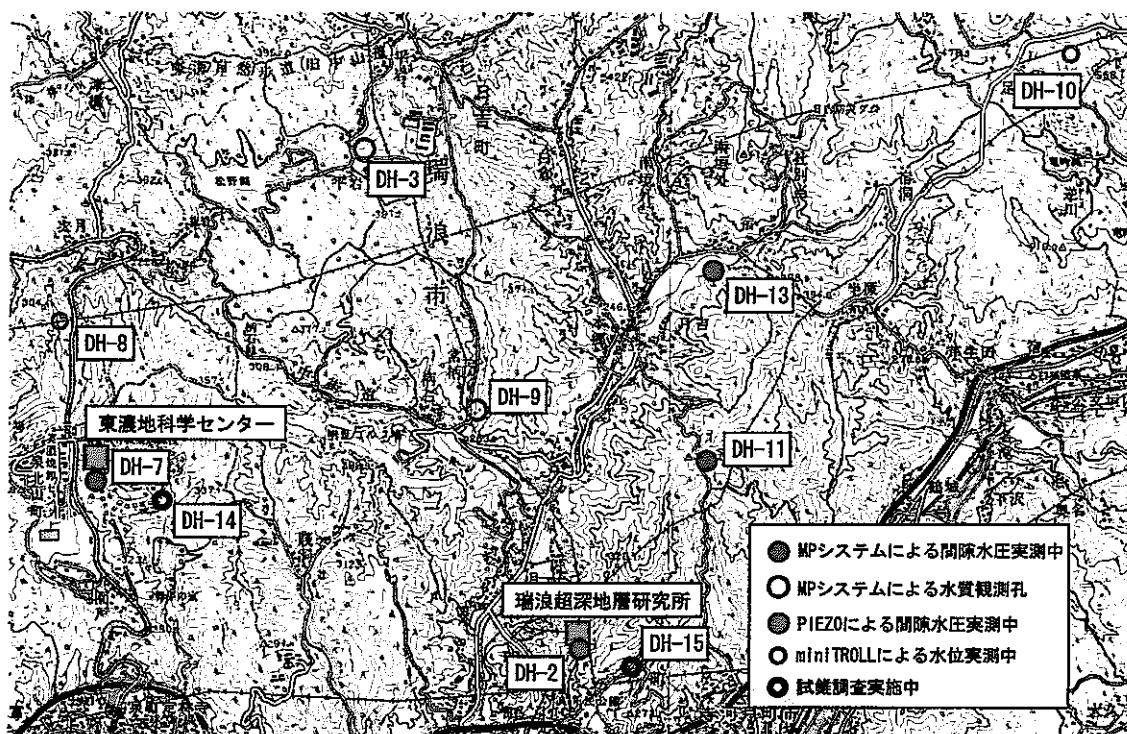


図 5.2-3 広域地下水流动研究における地下水圧モニタリングシステム位置図

DH-2 号孔に設置されている 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。

DH-2 号孔の測定区間は表 5.2-1 に示す 7 区間であり、平成 15 年 8 月から平成 15 年度末までの水圧モニタリング結果を図 5.2-4 に示す。同図において、平成 15 年 9 月末に発生した十勝沖地震に関連すると推測される間隙水圧の変化が認められる。平成 15 年度末までの観測結果からは、地震の影響を受けて変化を示した間隙水圧が平成 16 年 3 月以降、地震発生前の間隙水圧値と比較して水頭にして約 0.6m 低い値で収束しつつある傾向が認められる。

表 5.2-1 DH-2 号孔における測定区間

区間番号	区間深度(m)		区間長 (m)	センサー設置深度		地質
	G.L.(~m)	E.L.(m)		G.L.(~m)	E.L.(m)	
1	176.0 ~ 226.0	17.6 ~ -32.4	50.0	50.69	142.94	土岐花崗岩
2	227.0 ~ 292.0	-33.4 ~ -98.4	65.0	50.44	143.19	土岐花崗岩
3	293.0 ~ 308.7	-99.4 ~ -115.1	15.7	50.47	143.16	土岐花崗岩
4	309.7 ~ 343.9	-116.1 ~ -150.3	34.2	50.61	143.02	土岐花崗岩
5	344.9 ~ 414.0	-151.3 ~ -220.4	69.1	50.47	143.16	土岐花崗岩
6	415.0 ~ 448.4	-221.4 ~ -254.8	33.4	50.62	143.01	土岐花崗岩
7	449.4 ~ 501.0	-255.8 ~ -307.4	51.6	50.37	143.26	土岐花崗岩

孔口標高 E.L.(m); 193.629

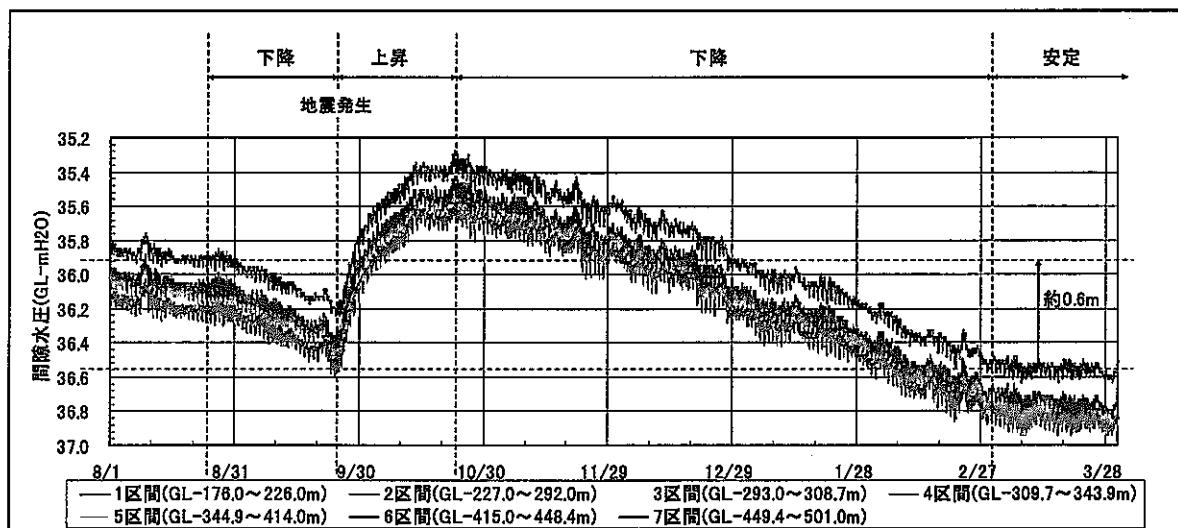


図 5.2-4 DH-2 号孔の各区間における水圧モニタリング結果

また、DH-14 号孔におけるボーリング調査で生じるイベントに対する水圧応答を把握するため、MP システムが設置されている DH-7 号孔に水圧連続観測用のプローブを設置して平成 15 年 7 月より水圧モニタリングを開始した。観測区間は表 5.2-2 に示す 5 区間であり、いずれの区間も土岐花崗岩である。観測区間 1 および 2 において、DH-14 号孔の掘削に関連する可能性のある水圧変化が認められる一方（図 5.2-5），観測区間 3 ～ 5 においてはこのような水圧変化は認められない。これらの観測区間で異なる水圧応答を示す結果は、水圧モニタリング開始前において各観測区間で異なるピエゾ水頭分布（図 5.2-6）を示していることと調和的であると考えられる。

表 5.2-2 DH-7 号孔における測定区間

区間番号	区間深度(m)		区間長(m)	マッヤメントポート設置深度		センサー深度		ポンピングポート設置深度		地質
	G.L.(m)	E.L.(m)		G.L.(m)	E.L.(m)	G.L.(m)	E.L.(m)	G.L.(m)	E.L.(m)	
1	438.0 ~ 444.5	-97.8 ~ -104.3	6.5	441.4	-101.2	441.8	-101.4	442.9	-102.7	土岐花崗岩
2	479.0 ~ 484.4	-138.8 ~ -144.2	5.4	482.4	-142.2	482.6	-142.4	483.9	-143.7	土岐花崗岩
3	598.0 ~ 604.5	-257.8 ~ -264.3	6.5	601.3	-261.1	601.5	-261.3	602.8	-262.6	土岐花崗岩
4	614.5 ~ 621.0	-274.3 ~ -280.8	6.5	617.8	-277.6	618.0	-277.8	619.3	-279.1	土岐花崗岩
5	660.0 ~ 666.5	-319.8 ~ -326.3	6.5	663.3	-323.1	663.5	-323.3	664.8	-324.6	土岐花崗岩

孔口標高 E.L.(m); 340.186

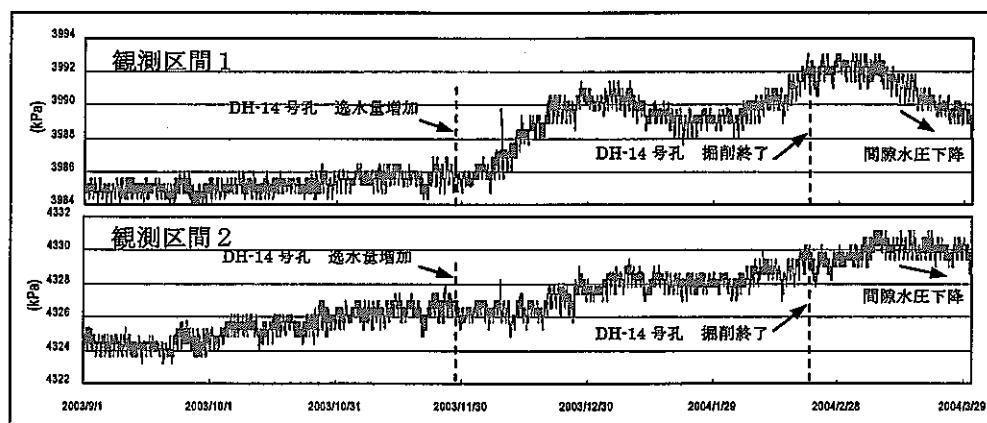


図 5.2-5 DH-7 号孔の観測区間 1, 2 における水圧モニタリング結果

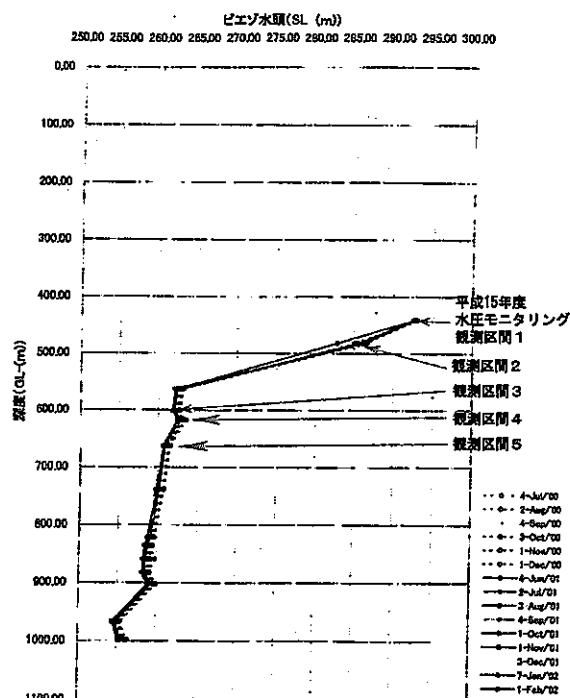


図 5.2-6 DH-7 号孔のピエゾ水頭分布(水圧モニタリング開始前)

5. 3 ローカルスケールにおける地下水流动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、および地下水流动解析手法（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动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指している。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动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

① 深層ボーリング調査 (DH-14 号孔, DH-15 号孔)

平成 14 年度に開始した深層ボーリング調査のうち、DH-14 号孔では深度 51m～1,010m まで流体検層を実施した（図 5.3-1）。なお、流体検層は深度 51～110maboh までの区間の測定を平成 15 年 10 月に実施し、深度 102～1012maboh までの区間の測定を平成 16 年 2 月に実施した。揚水状態におけるスピナー式および電磁式フローメーター検層の結果から、孔径変化による影響を考慮して、11箇所において孔内流速の変化点（地下水の流入点）が確認された。また、流体検層後のビルドアップ試験の結果から DH-14 号孔全体で $2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ 程度の透水量係数が得られた。現在、抽出された地下水流入箇所における透水量係数の解析を実施中である。

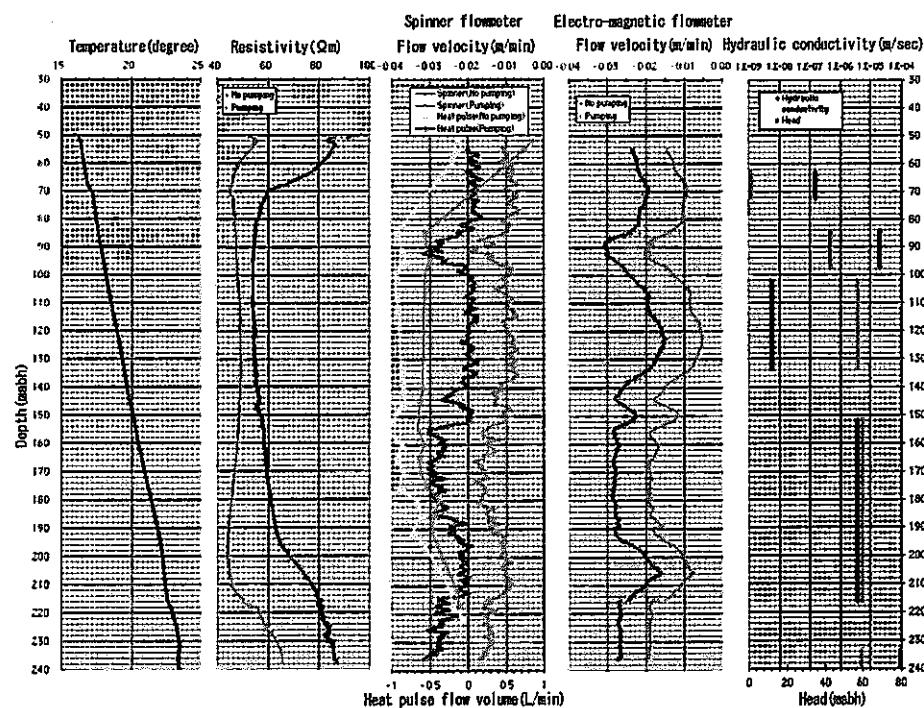


図 5.3-1 DH-14 号孔における流体検層結果

また、DH-15号孔では、主に堆積岩を対象とした深度51m～240mまでの流体検層および同区間ににおいて5点の水理試験を実施した（図5.3-2）。流体検層結果に認められる孔内流速の変化箇所は、孔径変化による影響が大きいと考えられることから、顕著な地下水の流入箇所を特定するには至っていない。主要な地層層序毎に実施した水理試験の結果から、透水係数や水頭などの水理パラメータは、約500m（DH-15号孔の孔口と主立坑坑口の直線距離）離れた瑞浪超深地層研究所用地内の既存ボーリング孔（MSB-1,3号孔）で測定された値と同様の分布を示すことが明らかになった。また、DH-15号孔での明世累層基底礫岩層における揚水に伴う水圧応答がMSB-3号孔の同じ層で観測されたことから、同層は相対的に水平方向に大きな水理学的連続性を有することが確認された。

なお、図5.3-3に示した透水係数は、グラフ上にプロットされた水理試験データの傾きを求め、Jacobの方法などの解析式を用いて算出された値である。水理試験で得られる水理パラメータの信頼性や見込まれる誤差などを定量的に評価するために、浸透流解析コードを用いて水理試験データとのフィッティングを行う逆解析を現在実施中である。

また、DH-15号孔は平成15年3月に掘削を終了し（掘削長1,012m）している。

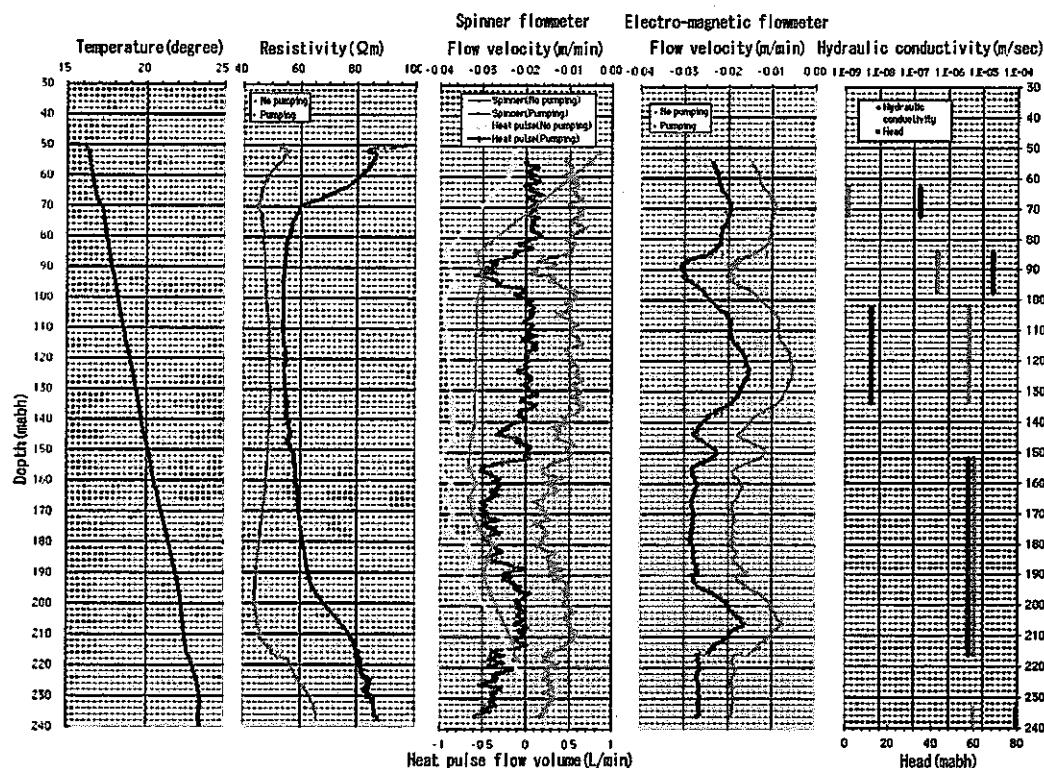


図5.3-2 DH-15号孔における流体検層および水理試験結果（深度51～240m）

② ローカルスケールにおける地下水流动モデル化技術

ローカルスケールを対象とした地質構造モデルに基づき水理地質構造モデルの構築および三次元地下水流动解析を実施した。地下水流动解析より、地下水の主流動方向は、概ね北東から南西であり、モデル化・解析領域（図5.3-3）の北東部を涵養域とし、土岐川を

流出域としていることが推定された（図 5.3-4）。

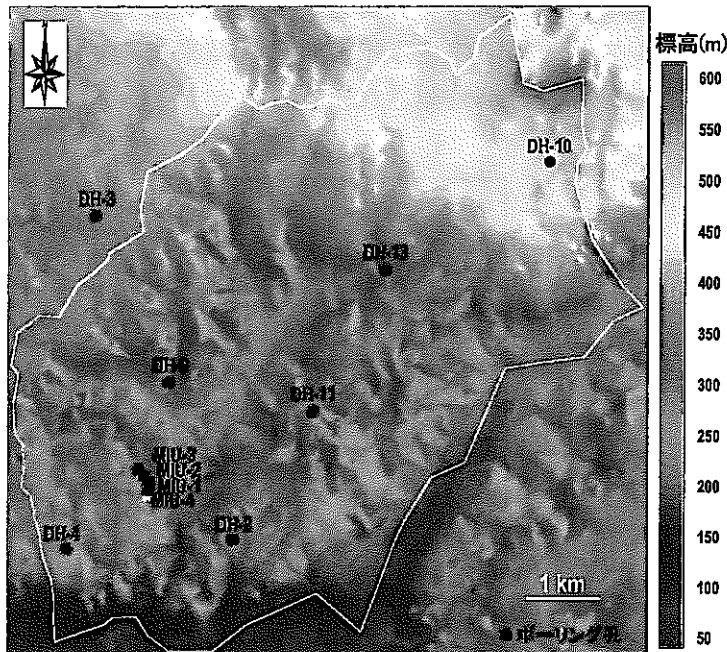


図 5.3-3 モデル化・解析領域とボーリング孔位置

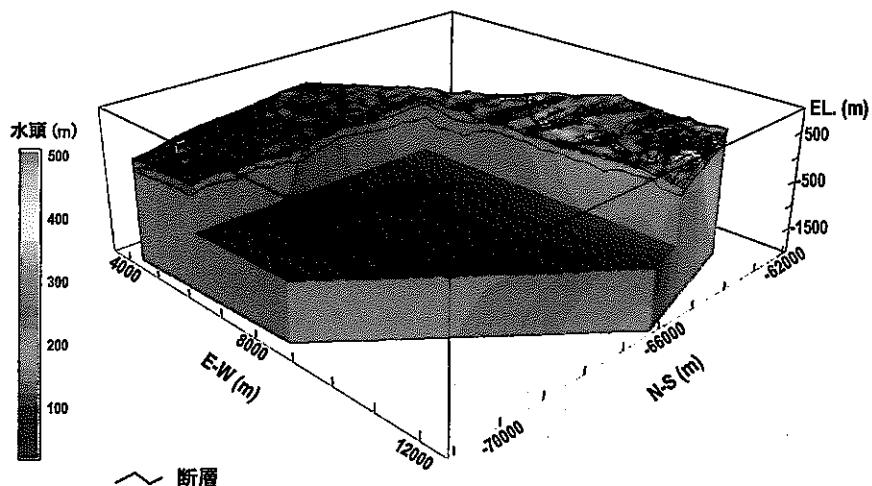


図 5.3-4 地下水流動解析結果（水頭分布）

次に、この地下水流动解析結果の妥当性の評価を試みた。地下水流动解析結果の妥当性の評価方法としては、ボーリング孔における水頭分布を用いた実測値と解析値の比較の他に、地下水の水質および起源・年代（OECD/NEA, 1999），さらに地下水温に関する情報の利用が考えられる（Doughty and Karasaki, 2003）。

図 5.3-5 にボーリング孔における水理試験から得られた間隙水圧測定結果を示す。地下水流动解析で推定された涵養域と流出域以外のボーリング孔では概ね静水圧分布を示している。一方で涵養域と推定された地点でのボーリング孔の間隙水圧分布は、地表付近で静水圧分布より低い水圧を示し、深度が深くなるに従い静水圧分布に近づいている。これは、このボーリング孔付近で下降流が生じていることを示している。一方、流出域と推定

されたボーリング孔での間隙水圧分布は、深度が浅くなるほど静水圧分布より高い水圧となっている。これは、このボーリング孔付近で上昇流が生じていることを示している。このことから、ローカルスケールでの地下水流动解析結果は、ボーリング孔における間隙水圧測定結果と整合的であることが確認された。

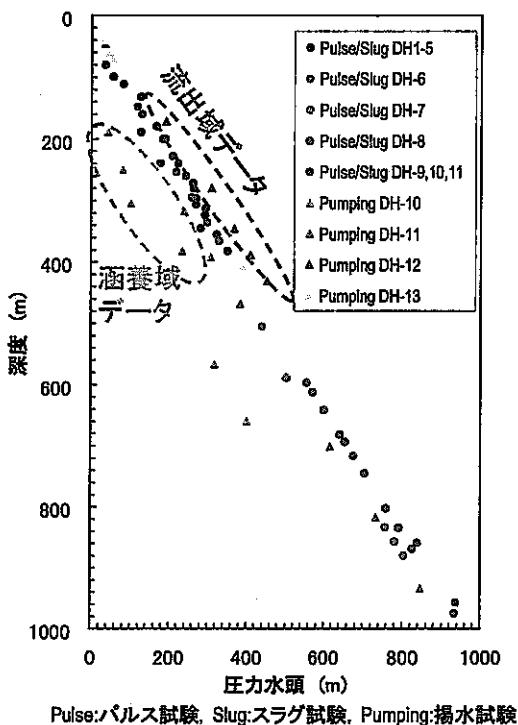


図 5.3-5 間隙水圧測定結果

水質から推定される地下水の涵養域から流出域までの地下水の流动方向は地下水流动解析結果と概ね整合的であることが明らかとなった（図 5.3-6）（Metcalfe ほか, 2003, 三枝ほか, 2003）。

さらに、地下水温を活用した水理地質構造のモデル化および地下水流动解析結果の妥当性評価方法の有効性を検討するために、前述の水理地質構造モデルを用いた地下水温の影響を考慮した三次元の地下水流动解析を実施した（図 5.3-7）。その結果、地下水の温度分布は、地表から涵養される比較的温度の低い地下水の下降流と比較的温度の高い地下水の地下深部からの上昇流の混合に支配されており、この混合の程度は、地表からの涵養量や地下水の流动方向ならびに流速に大きく影響を受けることが明らかとなった。このことから、水理地質構造のモデル化および地下水流动解析結果の妥当性の評価方法として利用できることが明らかになった。

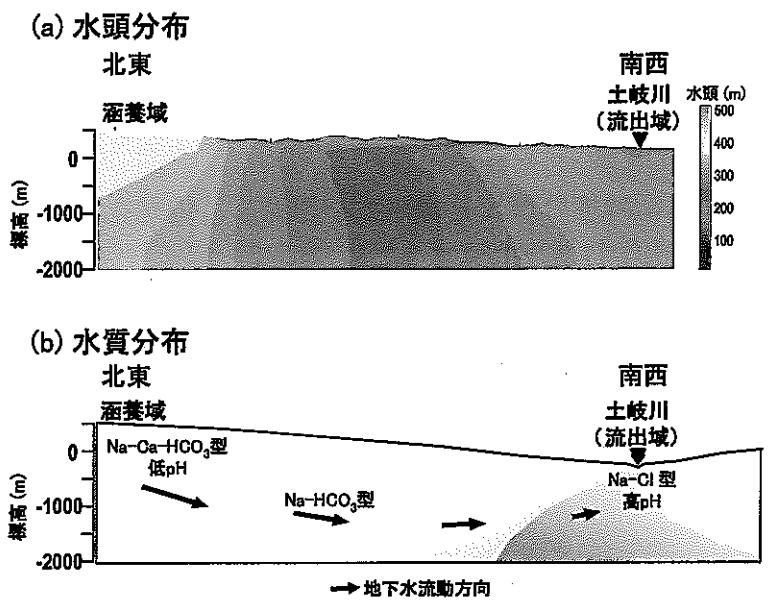


図 5.3-6 水頭分布と水質分布の比較

(a) 水頭分布, (b) 水質分布

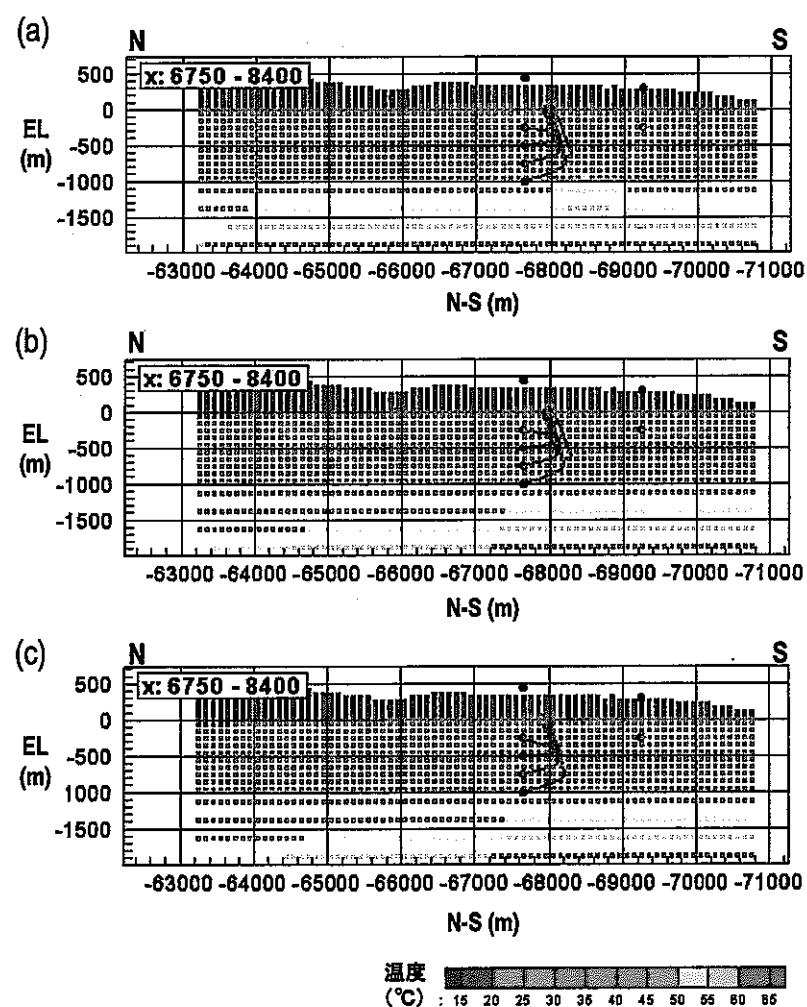


図 5.3-7 地下水流動解析結果
(地下水温分布と地下水の移行経路)

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

深部地下水の地球化学特性の三次元的分布を把握し、地球化学モデルの構築を行うことで、地下深部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ことを目的としている。そのため研究実施領域の土岐花崗岩を対象に、

- ・地下水の物理化学パラメータ、化学組成および同位体組成の三次元的分布、それらと地質構造との相関の把握
 - ・地球化学的情報に基づく地下水流動解析結果の妥当性評価
- を主要課題として研究を進めている

5. 4. 2 実施内容および主な成果

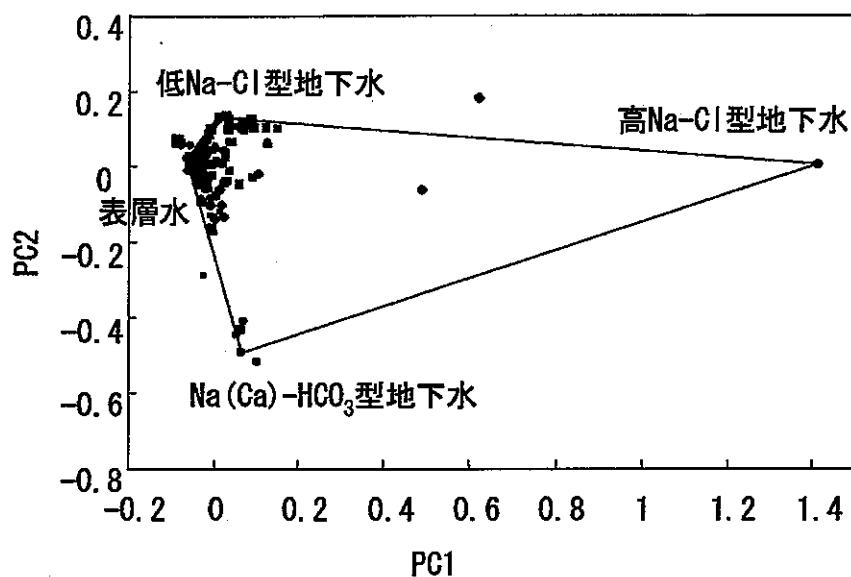
平成 15 年度は、これまでの研究成果を踏まえ、研究実施領域全体の地下水水質データを用いた多変量解析や希ガス同位体比等に基づく解析によって、各々の地下水の分布状態、水質形成メカニズムについて詳細な解析を行った。また、長期的な水理・地球化学環境の変遷を推測する手法として、炭酸塩鉱物を指標とした解析手法の検討を試みた。

(1) 多変量解析による水質分類手法の検討

これまでに地下水の化学組成に基づいて水質分類および地下水の分布状態の解析を行った結果、研究実施領域の南方領域においては、塩分濃度の異なる複数の地下水の混合により Na-C1 型地下水が存在することが明らかになっている。このような異なる地下水の混合により水質が形成される場合、特定の成分間の相関（例えば、Na-C1 の関係など）などに着目した解析が有効である。一般的に、溶存する複数の成分を同一の場で考察する手法として、多変量解析の一手法である主成分分析 (Principal Component Analysis) が行われている。平成 15 年度は、東濃地域と同様に結晶質岩体、Na-C1 型地下水が分布する研究サイトを有するスウェーデン SKB によって開発された、主成分分析に混合とマスバランス計算を組み合せた M3 解析手法 (Multivariate Mixing and Mass balance modelling analysis; Laaksoharju et al., 1999) を適用し解析を行った。

その結果、研究実施領域の地下水について、混合による水質形成の端成分として、以下の 4 種類の成分を抽出できた（図 5.4-1）

- ・地表水：表層の河川水等で代表される水
- ・低 Na-C1 型地下水：土岐川周辺の花崗岩最上部に分布する低 Cl 濃度の Na-C1 型の地下水
- ・高 Na-C1 型地下水：土岐川周辺の高砂温泉（瑞浪市北小田町）に代表される高塩濃度の Na-C1 型地下水
- ・Na(Ca)-HCO₃型地下水：DH-9 号孔周辺の Na-Ca-HCO₃型～Na-HCO₃型地下水



$$PC1 = 0.54[\text{Na}] + 0.23[\text{K}] + 0.54[\text{Ca}] + 0.16[\text{Mg}] - 0.01[\text{HCO}_3] + 0.003[\text{SO}_4] + 0.16[\text{F}] + 0.55[\text{Cl}]$$

$$PC2 = 0.10[\text{Na}] - 0.21[\text{K}] - 0.05[\text{Ca}] - 0.59[\text{Mg}] - 0.44[\text{HCO}_3] - 0.53[\text{SO}_4] + 0.31[\text{F}] + 0.12[\text{Cl}]$$

図 5.4-1 多変量解析（主成分分析）による地下水の水質分析

南方領域の Na-Cl 型地下水は、M3 解析においても、概略的に「低 Na-Cl 型地下水」と「高 Na-Cl 型地下水」の混合で表現することができる。更に、広域的な地下水の混合割合について定量的に解析した結果、「高 Na-Cl 型地下水」は南方領域の DH-2, DH-12 号孔の深部の地下水に 20% 程度混合していると推測された。また、浅くなるにしたがって割合が低くなる傾向にあり、北方領域の DH-10, DH-13 号孔付近では、浅部から深部まで「高 Na-Cl 型地下水」の寄与がほとんどないことが明らかになった（図 5.4-2）。

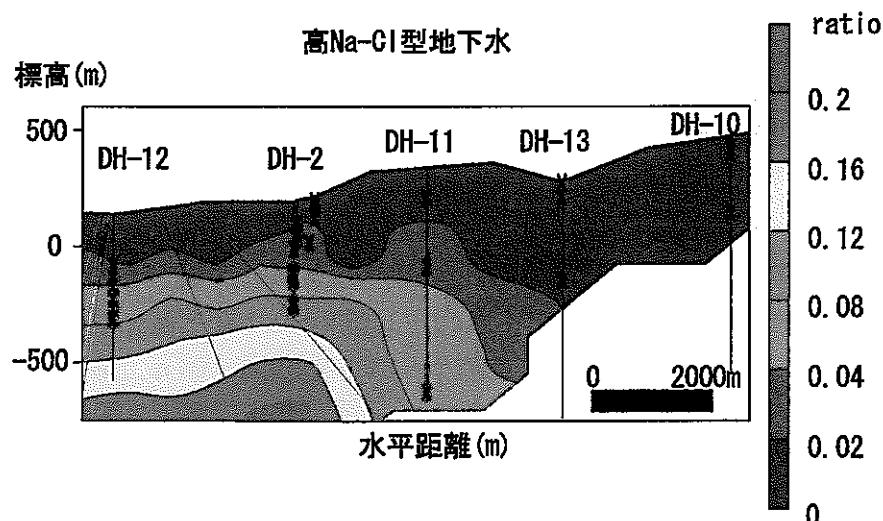


図 5.4-2 M3 解析手法に基づく地下水混合割合の定量的解析

(2) 希ガス同位体比に基づく調査解析技術の検討

溶存希ガスは、その化学的な特性から周辺岩盤との反応も少なく、地下水に溶存している限り地下水と共に移動するので、地下水の起源や流動状態を反映するトレーサーとして有効である。また、各希ガスの発生起源はそれぞれ異なり、同位体にそれらの違いが反映され易いため、その特性を十分に理解した上で調査に活用することで地下水の流動状態に関するより多くの情報を得ることができる（五十嵐ほか、2000）。これまでに東濃地域では、岩盤から地下水への He フラックス見積もり値に基づいて、地下水の涵養域と流出域の解析等を行っており、水理学的な解析結果と矛盾しない結果が得られている。平成 15 年度は、各々の水質の地下水中の希ガスの濃度・同位体比に関わる情報を整理し、希ガスを用いた地球化学的調査・解析技術について検討した（長尾ほか、2004）。

表 5.4-1 東濃地域の岩石中の希ガス量

孔名	採取深度 (maboh)	重量 (g)	${}^4\text{He}$ E-9cc/g	${}^{20}\text{Ne}$ E-9cc/g	${}^{40}\text{Ar}$ E-9cc/g	${}^{84}\text{Kr}$ E-12cc/g	${}^{132}\text{Xe}$ E-12cc/g
DH-3	208.4-208.6	0.6430	3540	5.63	13100	242	14.8
DH-3	329.9-330.1	0.4031	11600	2.88	12100	69.4	6.83
DH-3	481.0-481.2	0.4352	6130	1.78	9780	83.5	15.5
DH-3	509.5-509.6	0.5116	8150	1.44	10400	73.6	7.08
DH-3	882.1-882.3	0.4413	10800	3.45	12300	111	7.88
DH-3	996.0-996.2	0.5539	9600	4.87	11100	105	8.43
KNA-6	96.0-101.0	0.5019	13600	1.34	10200	95.9	7.96

表 5.4-2 東濃地域の岩石の希ガス同位比

孔名	深度 (maboh)	${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 10^{-6}	$e^{-3/4}$ 10^{-6}	${}^{20}\text{Ne}/{}^{22}\text{Ne}$	$e^{-20/22}$	${}^{21}\text{Ne}/{}^{22}\text{Ne}$	$e^{-21/22}$	${}^{38}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$	$e^{-38/36}$	${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$	$e^{-40/36}$
DH-3	208.4-208.6	0.0039	0.0034	9.804	0.047	0.0314	0.0007	0.1894	0.0010	1597	4
DH-3	329.9-330.1	0.0050	0.0030	9.428	0.060	0.0350	0.0008	0.1924	0.0016	6107	37
DH-3	481.0-481.2	0.0080	0.0028	9.463	0.052	0.0341	0.0009	0.1891	0.0009	2543	7
DH-3	509.5-509.6	0.0054	0.0030	9.261	0.047	0.0377	0.0011	0.1909	0.0014	4882	12
DH-3	882.1-882.3	0.0045	0.0032	9.478	0.043	0.0323	0.0006	0.1910	0.0018	3445	15
DH-3	996.0-996.2	0.0041	0.0028	9.559	0.048	0.0304	0.0006	0.1895	0.0016	3295	12
KNA-6	-160m	0.0108	0.0032	9.343	0.085	0.0420	0.0013	0.1911	0.0021	3931	15

東濃地域の岩石の希ガス濃度及び同位体比の一例を表 5.4-1 と表 5.4-2 に示す。 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比が約 5×10^{-9} と極めて小さい値、 ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$ が 1,600～6,100 と高い値を示し、放射性起源 ${}^4\text{He}$ と ${}^{40}\text{Ar}$ に富むと推察された。更に、岩石中での核反応 ${}^{18}\text{O}(\alpha, n){}^{21}\text{Ne}$ や ${}^{24}\text{Mg}(\alpha, \alpha){}^{21}\text{Ne}$ により生成される ${}^{21}\text{Ne}$ の過剰も検出された。地下水中の希ガス同位体比は、地下へ浸透する前段階で混入した大気起源の希ガスの同位体比と、その後、地下に浸透していく過程で、岩盤や地下深部から地下水へ付加する希ガスの同位体比を反映した値となる。図 5.4-3 に ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比 - ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$ 比の関係を示す。図中の 2 つの線は、大気あるいは水に溶解した大気中の He が、花崗岩中の放射性物質起源の He と混合した場合（大気成分と

花崗岩成分を結ぶ下側の線）と、地下深部から上昇してきたマントル起源の He との混合した場合（大気成分とマントル[MORB]成分を結ぶ上側の線）を示している。

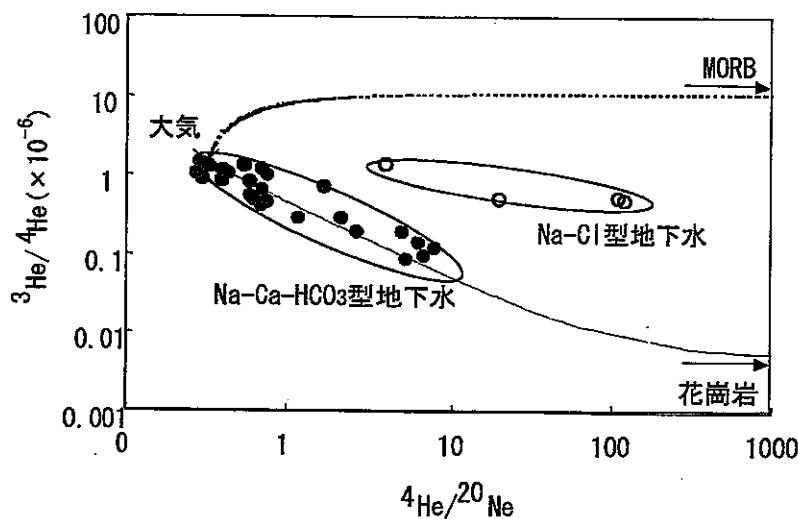


図 5.4-3 東濃地域の地下水中の希ガス同位体組成と水質の相関

東濃地域の地下水は、希ガス同位体比が大気成分の He と花崗岩成分の He との混合線上にプロットされるものと、大気成分の He と花崗岩成分および MORB 成分の He の中間的値との混合線上にプロットされる地下水に大別される（長尾ほか, 2004）。地下水の水質と比較すると、北方領域の Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水が前者の、南方領域の Na-Cl 型地下水が後者の傾向を示す。この前者の相関については、Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水が、主に水-岩石反応で水質形成されているというこれまでの研究結果と整合的である。一方、Na-Cl 型地下水中的希ガスの特徴を説明する仮説として、同地下水が分布する広域地下水流动下流域において、未確認の断層等を経路として地下深部からマントル起源の He が供給されている可能性や同地下水が Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水と比較して滞留時間が長く MORB 成分の He をより蓄積する条件にあった可能性等が挙げられる。これらの仮説について、今後、He, Ne 以外の希ガス成分も用いて解析を行う必要がある。

(3) 塩素同位体比を用いた Na-Cl 型地下水の成因解析

研究実施領域北方領域の Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水の水質形成機構が比較的明確であるのに対して、南方領域の Na-Cl 型地下水については、地下深部に高塩素濃度の地下水が存在し、それとの混合により水質が形成されていると推測されるものの、混合相手の高塩素濃度地下水について素性が明らかになっていない。平成 14 年度までの解析では、高塩素濃度地下水の成因として、1) 長期にわたる水-岩石反応、2) 化石海水、3) 高温環境での水-岩石反応（温泉水）などを想定し、化学成分比 (Na, Br, Cl 等) や水素・酸素安定同位体比等に基づく解析を行ったが (Metcalfe et al., 2003)，高塩素濃度地下水の混合割合が低いため、その起源や成因を明確にできなかった。平成 15 年度は、近年分析可能になった塩素の安定同位体比 (³⁷Cl/³⁵Cl 比) を用いて、解析手法としての適用性を検討する観点も含めて、予察的に分析および解析を行った。塩素の安定同位体比は、塩

素濃度の低い地下水との混合による希釈の影響をほとんど受けないことから、化学成分比や水素・酸素安定同位体比等と違い、直接的に高塩素濃度地下水に関する情報を得られる可能性がある。

この地域で最も塩素濃度が高く高塩素濃度地下水の寄与率が高いと考えられる高砂温泉の地下水、水一岩石反応によりその水質が形成されている北方領域の $\text{Na}-\text{Ca}-\text{HCO}_3$ 型～ $\text{Na}-\text{HCO}_3$ 型地下水 (DH-9／深度 150 m [花崗岩浅部], KNA6S [堆積岩最下部]), および参考試料として現在の海水の塩素安定同位体比を分析・比較し、高塩素濃度地下水の成因について考察した。

各々の値は図 5.4-4 のように求められた。塩素同位体比と塩素濃度には、直線的な相関が認められた。高砂温泉の地下水は、 $\text{Na}-\text{Ca}-\text{HCO}_3$ 型～ $\text{Na}-\text{HCO}_3$ 型地下水と海水の中間的な塩素同位体比を示した。この事実は、化石海水が $\text{Na}-\text{Ca}-\text{HCO}_3$ 型～ $\text{Na}-\text{HCO}_3$ 型地下水によって希釈されることで、高砂温泉の塩素同位体組成が形成された可能性を示唆する。以上のことから、塩素安定同位体比を用いた解析は、 $\text{Na}-\text{Cl}$ 型地下水の起源・成因を考察する上で非常に有効であると考えられた。今後、この地域の様々な塩素濃度の地下水について塩素同位体比を測定するとともに、水一岩石反応で生成される高塩素濃度地下水についても塩素同位体比に関わる情報を取得し、それらの相関に基づいて、この地域の $\text{Na}-\text{Cl}$ 型地下水の起源・成因について詳細に解析していく予定である。

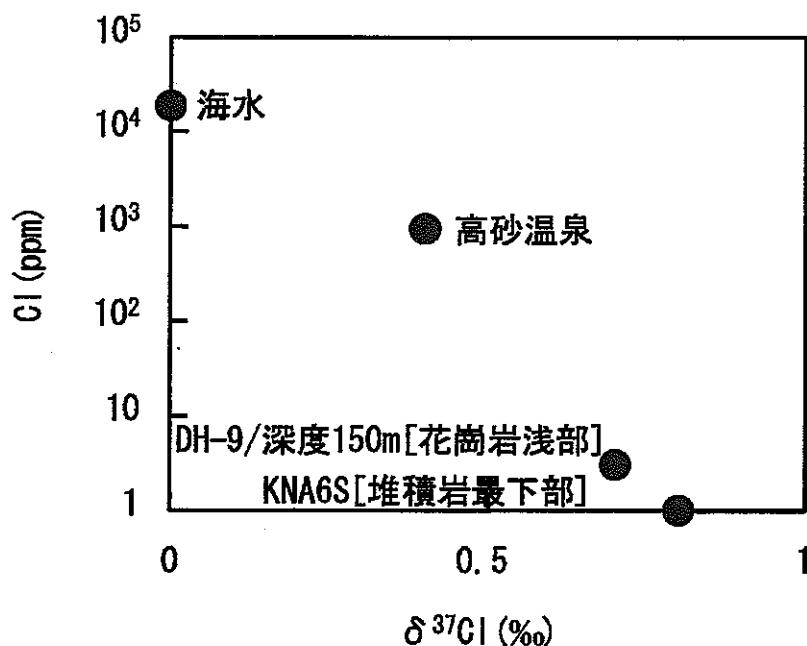


図 5.4-4 地下水中の塩素同位体比と塩素濃度の相関

(4) 長期的な pH, 酸化還元状態の変遷を推測する手法の検討

これまでに岐阜県東濃地域の基盤花崗岩を対象に、複数のボーリング孔で花崗岩中の割れ目表面の方解石を採取し、方解石の結晶形や炭素・酸素同位体比および地史に基づいて、地下水の pH の長期的変遷を推測する手法を開発してきた。その結果、東濃地域の地

下深部には、中期中新世に沈殿した方解石など、様々な時代に様々な水質の地下水から沈殿した方解石が長期間保存されている事が判っている。平成 15 年度は、これまでの研究を更に発展させ、方解石中の金属元素濃度に基づき、放射性元素の挙動に影響するもう一つの重要な因子である地下水の酸化還元状態の長期的変遷を推測する手法の開発を試みた。

溶液中の溶存成分濃度が方解石に対して飽和状態に達し、方解石の沈殿が形成される時、溶液中の微量元素がある分配係数に従って方解石内に共沈することが知られている。この場合、方解石中の微量元素濃度と分配係数から方解石を沈殿させた溶液中の微量元素濃度を逆算する事ができる。したがって、酸化還元電位を反映し易い金属元素に注目し、方解石中の金属元素濃度から方解石沈殿時の溶液中の金属元素濃度を求め、その金属元素の酸化還元平衡式を仮定してやることで、方解石が沈殿した時点の酸化還元電位を推測できる可能性がある。本研究では、現在、強還元環境にある深度約 500~800m の花崗岩中の割れ目表面から採取した方解石中の金属元素濃度を LAMP(Laser Ablation Micro Probe)により分析し、方解石が沈殿した時点の酸化還元電位の推測を試みた。対象とした試料は、結晶形から、現在と同様の淡水環境で形成したと判断できる方解石 5 試料であり、方解石中の金属元素濃度から理論的に推測できる酸化還元電位と現在の酸化還元電位を比較することで、前述の手法が適用可能かどうか予察的に検討した。ここでは方解石中のウラン濃度に基づく解析結果について述べる。

方解石中のウラン濃度は、0.1 ~ 10 ppm と分析された。ウランの方解石に対する分配係数 λ ([方解石中の U] [溶液中の Ca] / [方解石中の Ca] [溶液中の U]) は Curti, 1999 により、 $\lambda = 0.04$ と求められている。溶液中の Ca 濃度は、地下水の pH に依存し、現在と同様の pH 条件 8-10 を仮定した場合、ウランの分析値から方解石沈殿時の地下水中のウラン濃度は $5.6 \times 10^{-11} \sim 6.1 \times 10^{-8}$ M と求める事ができる。現在の地下水は熱力学的に $UO_2(\text{am.})$ と平衡状態にあると考えられており、 $UO_2(\text{am.})$ の酸化還元平衡式 $[UO_2(\text{am.}) = UO_2^{2+} + 2e^-]$ に求められた地下水中のウラン濃度を代入することで、地下水の酸化還元電位を見積もる事ができる。方解石中のウラン濃度から求められた方解石沈殿時の地下水中のウラン濃度と前式から、方解石が沈殿した時の地下水の酸化還元電位は理論的に約 -200 ~ -440 mV と求められる。現在の地下水の酸化還元電位は約 -270 ~ -400 mV であり、理論的にほぼ同等の値を得る事ができた。今後、様々な時代に沈殿した方解石中の金属元素濃度に基づいて、酸化還元状態の長期的変遷について考察していく予定である。

6. 調査技術・調査機器の開発

6. 1 目標

地質環境の調査技術・調査機器の構築は、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15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、これまでに分布が推定された不連続構造等を対象に、リニアメント調査や反射法弹性波探査結果を用いた詳細解析のほか、400m級のボーリング孔を用いた物理探査ならびに1,000m級のボーリング孔を用いた断層・割れ目調査を実施した。それらの結果(5. 1. 2 (1)～(3)を参照)から、各調査に用いた調査手法は数km～数百m規模の断層や割れ目帯を把握可能な技術であることが明らかとなった。

(2) 地下水の水理特性・地球化学特性調査機器開発

平成14年度においては、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(FGB: Fiber Bragg Grating)を用いた地下水圧および温度に関するモニタリングシステムの開発に着手した。このシステム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結果、短期間の観測においては所定の機能を発揮することが確認された(竹内ほか2003)。

平成15年度は、前年度の観測の結果、課題として抽出されたセンサーの高塩分濃度環境下での適用性、長期耐久性ならびにセンサーの圧力精度について確認するための試験を実施した。

高塩分濃度環境下の試験では、海水と同等の高塩分濃度環境(3.5%NaCl)下にセンサーを1週間設置し、設置の前後でセンサーの性能を確認した。また長期耐久性試験では温度環境の加速試験として、水圧センサーを恒温槽内に設置し、5°Cと70°Cの条件でそれぞれ1日間ずつ繰り返した。これを1サイクルとして合計4サイクル(8日間)を連続的に繰り返す試験を合計2回実施した。個々のサイクルの試験実施後にセンサーの性能を確認した。センサーの圧力精度の検討では、今回使用している水圧センサーと電気式水圧センサー(DRUCK社製)をボーリング孔の同じ深度に同時に約90時間設置し、水圧変化を比較した。

以上の試験の結果、今回使用しているFBGのセンサーは温度センサーと圧力センサーが示す値は必ずしも安定していないことが明らかとなった。今後はこの不安定性の要因に

についてセンサーの構造や材質等について詳細に検討する予定である。

7. まとめ

平成 15 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、平成 14 年度の地下水流动解析結果を補完するために、水理地質区分を堆積岩部、花崗岩上部割れ目帶部、花崗岩低密度割れ目帶部に 3 区分してモデル化し、地下水面分布を考慮した飽和不飽和地下水流动解析を実施した。

ローカルスケールにおいて分布が推定された不連続構造ならびに地質構造を対象に、リニアメント解析、反射法弾性波探査、およびボーリング孔における地質学的・地球物理学的調査を実施し、これまでの研究成果とあわせながら数 km～数百 m およびそれより小さい規模の不連続構造の分布や地質学的特性の把握をするとともに、その調査に必要な技術の開発・整備した。さらに、その結果に基づき、これまでの地質構造の解釈の妥当性を確認し、その信頼性の向上を図った。

ローカルスケールの地下水流动解析に資する表層水理観測を継続し境界条件の設定に資する検討を行うとともに、既存ボーリング孔における地下水位・間隙水圧の長期観測を継続した。また、ローカルスケールを対象とした地質構造モデルに基づき水理地質構造モデルの構築および三次元地下水流动解析を実施した。

研究実施領域全体の地下水水質データを用いた多変量解析や希ガス同位体比等に基づく解析によって、各々の地下水の分布状態、水質形成メカニズムについて詳細な解析を行った。また、長期的な水理・地球化学環境の変遷を推測する手法として、炭酸塩鉱物を指標とした解析手法の検討を試みた。

さらに、技術開発として、地質構造調査技術開発と地下水の水理特性・地球化学特性調査技術開発を継続した。

参考文献

- Curti, E. (1999) Co-precipitation of radionuclides with calcite: Estimation of partition coefficients based on review of laboratory investigations and geochemical data. *Applied Geochemistry*, 14, pp. 433–445
- Doughty, C. and Karasaki, K. (2003): 熱解析による水理モデルの境界条件の検討, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 377–382.
- 動力炉・核燃料開発事業団 (1994) : 日本のウラン資源, サイクル機構技術資料, PNC TN7420 94-006.
- 動力炉・核燃料開発事業団 (1997) : 広域地下水流动研究基本計画書, 動燃事業団技術資料, PNC TN7020 98-001.
- 五十嵐敏文, 馬原保典, 塩崎 功 (2000) : 地下水モデリングのためのデータ解析手法の基礎, 地下水学会誌, 42, pp. 243–262.
- 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) : 広域地下水流动研究の現状－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 (2003a) : 広域地下水流动研究年度計画書(平成15年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-004.
- 核燃料サイクル開発機構 (2003b) : 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
- 小出 錠, 前田勝彦 (2001) : 東濃地域を対象とした広域地下水流动研究の現状(その2), サイクル機構技報, No. 12, pp. 107–122.
- Kumazaki, N., Ikeda, K., Goto, J., Mukai, K., Iwatsuki, T. and Furue, R. (2003) : Synthesis of the Shallow Borehole Investigations at the MIU Construction Site, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2003-005.
- Laaksoharju, M., Skårman, C., and Skårman, E. (1999) : Multivariate Mixing and Mass-balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information. *Applied Geochemistry*, 14, pp. 861–871.

Matsuzawa, I. and Uemura, T. (1967) : Geotectonic studies on the Toki Miocene sedimentary basin, central Japan, Jour. Earth Planet. Sci., Nagoya Univ., 15, pp. 35-79.

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

村上由紀, 長沼 豪, 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.

長尾敬介ほか (2004) : ストロンチウム同位体比及び希ガスを用いた地球化学的研究手法の確立, サイクル機構技術資料 (公募型研究報告書), 印刷中

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.

OECD/NEA(1999) : Use of Hydrogeological Information in Testing Groundwater Flow Models, Workshop Proceedings, Borgholm, Sweden, 1-3 September 1997.

大野博之・小島圭二 (1992) : 岩盤割れ目のフラクタル (その1), 応用地質, Vol. 33, No. 3, pp. 133-146

太田久仁雄, 天野健治, 須山泰宏, 三枝博光 (1999) : 広域地下水流动における三次元地質構造モデルの構築, サイクル技報, No. 4, pp. 101-110.

三枝博光, 稲葉薰, 天野健治, 竹内真司 (2003) : 広域地下水流动特性評価に関する調査研究の現状と今後の取り組みについて, 第 58 回年次学術講演会論文集, CS7-065, pp. 407-408.

佐々木圭一, 梅本和裕 (2004) : リニアメントによる割れ目の累積頻度の推定, 土木学会中部支部平成 15 年度研究発表会講演概要集, pp. 439-440.

佐々木圭一, 太田久仁雄, 小出 馨 (2004) : 大縮尺の写真により判読したリニアメントに関する検討, サイクル機構技術資料 (準備中).

杉本芳博・山田直之 (2002) : 花崗岩地域を対象とした高密度電気探査による地質構造調査, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社ダイヤコンサルタント), JNC TJ7420 2002-002.

竹内真司, 平田洋一, 西垣 誠 (2003) : 光ファイバーを用いた地下水圧観測装置の開発, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨, pp6-9.

山井忠世・角南基亮・小林公一 (1994) : 東濃地域を対象に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.