

釜石鉱山における深部地質環境特性調査

(平成9年度)

(概要)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1998年3月

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
T	J1380 98-002	1998.9.30
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

日鉄鉱業株式会社

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107-8445 東京都港区赤坂1-9-13
動力炉・核燃料開発事業団
技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Technology Management Division, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-8445, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成9年度)

米田吉宏*、高原弘幸*、中村直昭*、秋山真介*、守屋俊文*、根木健之*

要 旨

釜石鉱山における原位置試験の第2フェーズ(H5～H9年度)では、次の5つの領域が研究対象とされている。すなわち、①深部地質環境特性の把握(TASK-1)、②深部岩盤における掘削影響領域の評価(TASK-2)、③結晶質岩中の水理・物質移行特性の把握(TASK-3)、④人工バリアに関する研究(TASK-4)、⑤地震に関する研究(TASK-5)である。本報告書は、主に①の深部地質環境特性の把握を目的として実施された調査・試験結果をまとめたものであり、同時にこれは他の研究のための基礎的な資料を提供するものである。

本年度は大別して5つの調査項目からなり、以下のような成果を得た。

- (1) 年代測定の調査: 栗橋花崗閃緑岩中に発達する割れ目や割れ目帯の形成史を把握することを目的とし、放射年代測定を実施した。その結果、250mL原位置試験場の11m地点に分布する単一割れ目に関しては、母岩である栗橋花崗閃緑岩が約100°C以下まで冷え固まった約85Ma頃に形成されたものと推定された。一方、550mL原位置試験場の62.5m地点に分布する割れ目帯に関しては、約95Maと約70～85Ma頃の2度の割れ目形成ステージにより形成されたものと推定された。また、ESR年代測定の結果、同割れ目帯は最近100万年以内に再活動していないことが明らかとなった。
流体包有物の調査: ブドウ石—濁沸石に代表される割れ目形成ステージ(Stage1)および緑泥石—束沸石に代表される割れ目形成ステージ(Stage2)の地質環境条件の相違を明らかにすることを目的とし、流体包有物の調査を実施した。その結果、Stage1に関しては約300°Cの栗橋花崗閃緑岩の根源流体が岩盤中の破碎帯を循環する地質環境下で、Stage2に関しては地表水により希釈された約200°Cの栗橋花崗閃緑岩の根源流体が岩盤中の破碎帯を循環する地質環境下で形成されたものと推定された。
- (2) KF-3孔周辺における地球物理学的調査: KF-3孔の削孔期間中に周辺坑道壁面においてSP観測を行なった。KF-3孔が湧水の急激に増加する深度に達したところで、坑道壁面の一部の領域においてSPの変化が検出された。このことにより、坑道壁面と孔井間の水理構造をおおよそ推定できた。また、任意深度においてもパッカーシステムを用いることにより、坑道壁面でのSP変化が検出できた。流電電位法においては、孔口開放時に見掛比抵抗の低下が観測された。
- (3) 岩石の基本物性の深度依存性: 単位体積重量、有効間隙率、粘着力、内部摩擦角について深度依存性が確認され、鉱物分析により得られた鉱物組成、鉱物の平均粒径等と調和的な関係を示した。
弾性波速度測定の適用性評価: 測定値は振動子の共振周波数と測定位置といった因子の違いよりも、潜在クラックあるいは含水状態に大きく影響されることが判明した。その影響度合に関しては、潜在クラックの影響が約20%、含水状態の影響が飽和状態から乾燥状態に至る過程で約10～15%程度と見積られた。
割れ目帯(断層破碎帯)の力学特性調査: N60°W系(Group 1)とN50°E～EW系(Group 2)を対象割れ目帯として試験を実施した結果、健岩部の変形係数、接線弾性係数と比較して1オーダー程度低い値を示した。また、Group 1とGroup 2との間には顕著な差は認められなかったが、Group 2では変質の程度および幅により不均一性が生じ、試験実施箇所により変形特性が異なる傾向が認められた。
- (4) 降水量・気温・坑道湧水量・間隙水圧の経時変化の把握: KG-1孔の間隙水圧の経時変化と降水量の季節変動に関連性が認められ、降水の影響は水頭の上昇という形でKG-1孔浅部から深部へと徐々に伝播していくことが確認された。
- (5) 深部岩盤の地球化学特性の調査・解析: 調査の結果より、深部岩盤中の地下水は非常に還元的な状態であることが判明した。水質形成機構においては、初期段階で地下水中のCaイオンが増加し、その後にCaイオンと鉱物中のNaイオンが交換するという反応系列の存在が推定された。地下水流動機構に関しては、550mLのNW坑道の湧水は直上部付近の表層で涵養された可能性が推定された。

本報告書は、日鉄鉱業株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した調査・試験の結果である。
原契約番号: 090D0134

事業団担当部課および担当者: 環境技術開発推進本部

地層科学研究グループ 武田精悦

*: 日鉄鉱業株式会社

Investigation of Geological Environments of Deeper Granitic Rock at The KAMAISHI Mine (H9)

Yoshihiro YONEDA*, Hiroyuki TAKAHARA*, Naoaki NAKAMURA*, Shinsuke AKIYAMA*, Toshifumi MORIYA*, Tateyuki NEGI*

Abstract

The objects of investigation in the Kamaishi in-situ test Phase II consist of following 5 regions, study on geological environment(Task-1), study on effect of drift excavation(Task-2), study on migration(Task-3), study on engineered barrier(Task-4), influence of earthquakes for hydrology and stability of drifts(Task-5). This report describes results of Task-1. As the last year of the Phase II, studies on geological, hydrological, geochemical environments of the in-situ test were carried out.

Those results of this study were summarized as follows :

(1) Investigation of dating: We have been dating for understanding the formation history of single fracture and fracture zone distributed in Kurihashi granodiorite. According to the result, it was inferred that single fracture observed at 11m in 250mL drift have been formed at about 85Ma when Kurihashi granodiorites have been completely cooled under 100°C. Whereas fracture zone observed around 625m in 550mL drift have been formed by the two fracture formation stages at 95Ma and 70~85Ma. And it was presumed that the fracture zone could not have been reactivated within a million years by ESR method.

Investigation of fluid inclusion: We investigated homogenization temperature and salinity of fluid inclusions in quartzes, making clear the geological conditions of the fracture formation stage characterized by prehnite-laumontite and stage II characterized by chlorite-stilbite. According to the result, it was inferred that fractures of stage I had been formed under the condition that the thermal water at about 300°C derived from Kurihashi granodiorite magma had been cycled along the fractures. On the other hand, fractures of stage II had been formed under the condition that the thermal water at about 200°C derived from Kurihashi granodiorite magma diluted by the ground-water had been cycled along the fractures.

(2) Geophysical tests around the KF-3 borehole: Spontaneous Potential was measured during the KF-3 drilling. When groundwater began to flow out, spontaneous potential also changed in several areas. So, behavior of the fluid-flow was roughly estimated. And it was also recognized that the spontaneous potential changes by carrying packer system. According to the results of charged potential method, it was recognized that resistivity fall down apparently during flowing out operation.

(3) Dependence of rock characterization on the depth: Dependence of the unit weight, effective porosity, cohesion and angle of friction on the depth was confirmed, and it conforms in the mineral assemblage and the grain size.

Evaluation of the applicability on the elastic wave velocity measurement: Elastic wave velocity is influenced significantly the amount of microcrack and the water content, compared with dependence on the frequency of transducer and difference of measurement point. It was estimated that the amount of microcrack influenced the measurement value about 20 percent and the water content influenced it from 10 to 15 percent approximately.

Characterization of deformation at fracture zone: Two fracture system was chosen as the subject of the investigation. The fracture zone belong to Group I strikes N60W approximately. And the fracture zone belong to Group II has the strike of N50E~EW approximately. Modulus of deformation and elasticity at these fracture zones decreased one order compared with the results of intact rock. There was not clear difference of two groups, the fracture zone belong to Group II had heterogeneity according to the degree and width of alteration.

(4) Monitoring of precipitation, temperature, drift seepage, pore water pressure: It was recognized that there were existed relationship between the change of pore water pressure in KG-1 borehole and the precipitation. It was estimated that static head increase by effect of rainfall had traveled gradually from the surface to depth.

(5) Investigation on groundwater chemistry: Groundwater in deep crystalline rock is highly reduced. The chemical change of groundwater quality is summarized as follows. At first Ca ion increases, then Ca ion is exchanged by Na ion gradually. At the same time, pH increases and Mg ion and SiO₂ concentrations decrease. Concerning characteristics of groundwater flow, it is estimated that seepage at NW drift is recharged upper surface area.

Work performed by Nittetsu Mining Co., Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison : Geoscience Research Program, Seietsu Takeda

* : Nittetsu Mining Co., Ltd.

目 次

まえがき	1
第1章 調査・試験の概要	4
1.1 調査・試験名	4
1.2 調査・試験の目的	4
1.3 調査・試験箇所	4
1.4 調査・試験の期間	4
1.5 調査・試験の項目とその目的	4
第2章 調査・試験のための準備作業	12
2.1 試験場の整備	12
2.2 試験孔の掘削	13
2.2.1 試験実績	13
2.2.2 孔曲がり測定	14
第3章 地質構造の調査・解析(1)	18
3.1 調査の目的および概要	18
3.2 割れ目および割れ目帯の特性調査	19
3.2.1 年代測定調査	19
3.2.2 流体包有物の調査	32
3.2.3 KG-1孔の調査	37
3.2.4 割れ目および割れ目帯の特性調査のまとめ	40
第4章 地質構造の調査・解析(2)	42
4.1 調査の目的および概要	42
4.1.1 試験領域	42
4.1.2 実施試験項目とその目的	43
4.2 断層破碎帯、割目帯の連続性把握技術の適用性	44
4.2.1 流体流動電位法結果と他調査手法結果との比較	44
4.2.2 流電電位法により推定された比抵抗構造と 弾性波トモグラフィにより得られた速度構造との比較	49
4.2.3 流体流動電位法結果と他調査手法結果との比較	51

4.2.4	各種調査手法の適用性の評価	56
4.3	まとめ	61
第5章	深部岩盤の力学特性の調査・解析	62
5.1	調査の目的および概要	62
5.2	力学特性調査	62
5.2.1	室内試験	64
5.2.2	鉱物分析	72
5.2.3	マイクロクラックの観察	74
5.2.4	力学特性調査のまとめ	79
5.3	弾性波速度測定	82
5.3.1	試験方法および供試体採取位置	82
5.3.2	試験結果と考察	85
5.3.3	弾性波速度測定のまとめ	97
5.4	割れ目帯（断層破碎帯）における力学特性の把握	100
5.4.1	試験対象の割れ目帯の選定	100
5.4.2	試験結果と考察	103
5.4.3	まとめ	108
第6章	深部岩盤の水理特性の調査・解析	109
6.1	調査の目的および概要	109
6.2	降水量・気温・坑道湧水量の経時変化の把握	109
6.2.1	降水量・気温の経時変化	109
6.2.2	坑道湧水量の経時変化	109
6.3	間隙水圧の経時変化	114
6.3.1	KG-1孔での間隙水圧の経時変化	114
6.3.2	坑道周辺での間隙水圧の経時変化	125
6.3.3	KF-3孔試錐時におけるKF-1, 2の間隙水圧の経時変化	130
6.4	データファイルの作成	136
6.5	まとめ	141
第7章	深部岩盤の地球化学特性の調査・解析	143
7.1	目的と概要	143
7.2	各種調査の結果	143

7.2.1	原位置試験場周辺の地下水および地表水の温度測定結果	143
7.2.2	既存坑道湧水の物理化学パラメータ・化学成分の 経時変化の調査結果	143
7.2.3	坑道湧水の採水・分析の結果	155
7.2.4	溶存硫酸中の同位体分析結果	155
7.2.5	KF-1、2孔における物理化学パラメータ調査の結果	164
7.2.6	KH-19、20孔にける採水分析調査の結果	164
7.2.7	KG-1孔における採水分析調査の結果	174
7.2.8	地表水の採水分析結果	174
7.3	考察	179
7.3.1	水質形成機構に関して	179
7.3.2	地下水の流動機構	198
7.3.3	細菌の分布状況	200
7.4	まとめ	203
第8章	総合まとめ	204
参考文献		210

表 目 次

第 1 章

表-1.4.1	平成9年度原位置試験 調査・試験実績表	11
---------	---------------------	----

第 2 章

表-2.2.1	試錐に使用した機器の仕様	13
表-2.2.2	新たに錐進した試錐孔	13
表-2.2.3	新規試錐孔の試錐実績	14
表-2.2.4	孔曲がり測定に使用した機器の仕様	14
表-2.2.5	KF-3孔の孔曲がり測定結果	16
表-2.2.6	KCH-3孔の孔曲がり測定結果	17
表-2.2.7	KCH-4孔の孔曲がり測定結果	17

第 3 章

表-3.2.1	流体包有物の調査の対象試料および分析項目一覧表	33
---------	-------------------------	----

第 4 章

表-4.2.1	各種調査手法の適用性	59
---------	------------	----

第 5 章

表-5.2.1	力学特性の深度依存性の検討に用いた試験結果	64
表-5.2.2	一般的な造岩鉱物の比重	72
表-5.2.3	STAによるマイクロクラック抽出結果一覧	75
表-5.3.1	弾性波速度測定に用いた供試体の採取位置	82
表-5.3.2	周波数依存性試験試験パターン	84
表-5.3.3	含水比依存性試験試験パターン	85
表-5.3.4	透過パルスの周波数および波長と試料の制約条件	91
表-5.3.5	試験指針・基準で示されている振動子の共振周波数	91

表-5.4.1	平成7年度に定義した割れ目帯分類	101
表-5.4.2	試験深度と試験位置の地質状況	103
表-5.4.3	schneiderによる岩盤区分	107

第6章

表-6.3.1	ベントポートおよび計測ポートの設置深度	115
表-6.3.2	ピエゾ水頭のピークに影響したと推測される降水日と降水量	121
表-6.3.3	KF-3孔の試錐実績	130

第7章

表-7.1.1	深部岩盤の地球化学特性の調査・解析の実施項目一覧表	144
表-7.2.1	地下水・地表水温および降水量の統計値一覧表	148
表-7.2.2	KH-19, 20孔における主要成分の分析結果一覧表	170
表-7.2.3	KH-19, 20孔における微量成分の分析結果一覧表	172
表-7.2.4	KH-19, 20孔における微量成分の分析結果の統計値一覧表	174
表-7.2.5	KG-1孔の採水の分析結果一覧表	176
表-7.2.6	KG-1孔における硫酸塩還元菌の分析結果表	178
表-7.2.7	地表水の環境同位体分析結果一覧表	180
表-7.2.8	地表水の細菌の分析結果一覧表	182
表-7.2.9	地表水の硫酸塩還元菌の分析結果(1)	183
表-7.2.10	地表水の硫酸塩還元菌の分析結果(2)	184

目 次

第 1 章

図-1.3.1	釜石鉱山位置図	6
図-1.3.2	原位置試験場位置図	7
図-1.3.3	原位置試験場付近の地質概要図	8
図-1.3.4	550mL原位置試験場および各調査・試験項目	9
図-1.3.5	250mL原位置試験場および各調査・試験項目	10

第 2 章

図-2.1.1	試験場整備箇所とKCH-3,4孔の位置	12
---------	---------------------	----

第 3 章

図-3.2.1	栗橋花崗閃緑岩の冷却史 (250mL : 11m地点)	21
図-3.2.2	単一割れ目の形成史 (250mL : 11m地点)	22
図-3.2.3	栗橋花崗閃緑岩の冷却史 (550mL : 629m地点)	24
図-3.2.4	割れ目帯の形成史 (550mL : 625~642m地点)	25
図-3.2.5	ESR信号強度測定結果 (その1)	27
図-3.2.6	ESR信号強度測定結果 (その2)	28
図-3.2.7	1Mタイプセリサイトの形成年代 (550mL : 600m地点)	30
図-3.2.8	流体包有物の測定結果 (全試料)	35

第 4 章

図-4.1.1	試験領域周辺図	43
図-4.2.1	各種調査手法結果の比較(1)	45
図-4.2.2	SPデータの仮想点電流源シミュレーションモデル	46
図-4.2.3	SPデータの仮想点電流源シミュレーション結果 (均質媒質)	47
図-4.2.4	SPデータの仮想点電流源シミュレーション結果 (推定モデル)	47
図-4.2.5	各種調査手法結果の比較(2)	50
図-4.2.6	KF-1孔とKF-3孔でのスピナー、流量検層の比較	52

図-4.2.7	KF-1, 3孔での音波検層と弾性波トモグラフィ結果の比較	53
図-4.2.8	KF-1, 3孔での電気検層と弾性波トモグラフィ結果の比較	54
図-4.2.9	各種調査手法結果の比較(3)	57

第5章

図-5.1.1	原位置試験場と試験実施箇所	63
図-5.2.1	単位体積重量と被り高さの関係	64
図-5.2.2	飽和度と被り高さの関係	66
図-5.2.3	有効間隙率と被り高さの関係	66
図-5.2.4	P波伝播速度と被り高さの関係	67
図-5.2.5	S波伝播速度と被り高さの関係	67
図-5.2.6	一軸圧縮強度と被り高さの関係	68
図-5.2.7	静弾性係数と被り高さの関係	69
図-5.2.8	圧裂引張強度と被り高さの関係	69
図-5.2.9	粘着力と被り高さの関係	70
図-5.2.10	内部摩擦角と被り高さの関係	70
図-5.2.11	各試料における有色鉱物のモード比	73
図-5.2.12	クラック密度とクラック平均長さの関係	76
図-5.2.13	抽出されたクラックの方位分布(550mレベル原位置試験場)	77
図-5.2.14	抽出されたクラックの方位分布(250mレベル原位置試験場)	78
図-5.3.1	振動子とひずみゲージの貼付位置(周波数依存性試験)	83
図-5.3.2	振動子とひずみゲージの貼付位置(含水比依存性試験)	85
図-5.3.3	P波速度と拘束圧の関係(F1)	86
図-5.3.4	P波速度と拘束圧の関係(F2)	87
図-5.3.5	P波速度と拘束圧の関係(F3)	88
図-5.3.6	P波速度と拘束圧の関係(F4)	89
図-5.3.7	拘束圧と V_p に及ぼす含水状態の影響(0.5MHzを例として)	90
図-5.3.7	P波速度と振動子周波数の関係(F1)	93
図-5.3.8	P波速度と振動子周波数の関係(F2)	93
図-5.3.9	P波速度と振動子周波数の関係(F3)	94
図-5.3.10	P波速度と振動子周波数の関係(F4)	94
図-5.3.11	V_p に及ぼす共振周波数の影響(150MPa)	95
図-5.3.12	含水比とP波速度、S波速度の関係	96

図-5.3.13	含水比とP波速度、S波速度の低下割合の関係	96
図-5.4.1	試験深度と変形係数D1の関係	104
図-5.4.2	試験深度と変形係数D2の関係	104
図-5.4.3	試験深度と接線弾性係数E1の関係	105
図-5.4.4	試験深度と接線弾性係数E2の関係	105
図-5.4.5	試験深度とE/Dの関係	107

第6章

図-6.2.1	月平均気温と月間降水量（平成元年度～平成9年度）	110
図-6.2.2	月平均気温と平均月間降水量（例年）	110
図-6.2.3	月平均気温と月間降水量（平成9年度）	110
図-6.2.4	堰流量観測位置	111
図-6.2.5	坑道湧水量の経時変化（No.1）	112
図-6.3.1	KG-1孔の位置	114
図-6.3.2	MPケーシングシステムの設置図	115
図-6.3.3	KG-1孔におけるピエゾ水頭分布	117
図-6.3.4	KG-1孔におけるピエゾ標高分布	117
図-6.3.5	区間1におけるピエゾ水頭の経時変化	119
図-6.3.6	区間7におけるピエゾ水頭の経時変化	119
図-6.3.7	区間13におけるピエゾ水頭の経時変化	119
図-6.3.8	区間16におけるピエゾ水頭の経時変化	119
図-6.3.9	ピエゾ水頭のピーク日時と計測震度との関係	124
図-6.3.10	KG-1孔周辺の地下水流動機構	124
図-6.3.11	KD-90坑道の位置	126
図-6.3.12	KD-90坑道周辺の試錐孔の位置	126
図-6.3.13	KH-1孔間隙水圧観測結果	127
図-6.3.14	KH-16孔間隙水圧観測結果	127
図-6.3.15	KF-1孔間隙水圧観測結果	127
図-6.3.16	KF-2孔間隙水圧観測結果	127
図-6.3.17	割れ目ゾーンの位置	129
図-6.3.18	KF-1,2孔における間隙水圧の経時変化（7/14～7/16）	131
図-6.3.19	KF-1,2孔における間隙水圧の経時変化（7/17～7/19）	132
図-6.3.20	KF-1孔周辺の割れ目構造	134

図-6.3.21	試験場周辺の水理的連続性	135
図-6.4.1	間隙水圧のデータセット例	137
図-6.4.2	坑道湧水量のデータセット例	138
図-6.4.3	降水量・気温のデータセット例	139
図-6.4.4	事象データセット例	140

第7章

図-7.1.1	深部岩盤の地球化学特性の調査・解析の実施箇所	145
図-7.2.1	地温および坑内湧水温調査の計測位置図	146
図-7.2.2	地下水・地表水温の経時変化および降水量との関係	147
図-7.2.3	W-3地点における物理化学パラメータの経時変化	149
図-7.2.4	W-10地点における物理化学パラメータの経時変化	150
図-7.2.5	W-25地点における物理化学パラメータの経時変化	151
図-7.2.6	W-25地点における主要化学成分の経時変化(1)	152
図-7.2.7	W-25地点における主要化学成分の経時変化(2)	153
図-7.2.8	W-25地点における主要化学成分の経時変化(3)	154
図-7.2.9	NW坑道の基点からの距離とパラメータとの関係(1)	156
図-7.2.10	NW坑道の基点からの距離とパラメータとの関係(2)	157
図-7.2.11	NW坑道の基点からの距離と主要成分組成との関係(1)	158
図-7.2.12	NW坑道の基点からの距離と主要成分組成との関係(2)	159
図-7.2.13	NW坑道の基点からの距離と主要成分組成との関係(3)	160
図-7.2.14	NW坑道の基点からの距離と主要成分組成との関係(4)	161
図-7.2.15	NW坑道の基点からの距離と環境同位体組成との関係	162
図-7.2.16	NW坑道の基点からの距離と溶存硫酸の同位体組成との関係	163
図-7.2.17	溶存硫酸中の $\delta^{34}\text{S}$ と $\delta^{18}\text{O}$ との関係	163
図-7.2.18	KF-1-1,2区間の物理化学パラメータの経時変化	165
図-7.2.19	KF-1-3,4区間の物理化学パラメータの経時変化	166
図-7.2.20	KF-1-5,6区間の物理化学パラメータの経時変化	167
図-7.2.21	KF-2-1,2区間の物理化学パラメータの経時変化	168
図-7.2.22	KF-2-3区間の物理化学パラメータの経時変化	169
図-7.2.23	KH-19,20孔の各区間のヘキサダイアグラム	171
図-7.2.24	KG-1孔における予備採水時の分析結果	175
図-7.2.25	KG-1孔の各区間におけるヘキサダイアグラム	177

図-7.2.26	地表水の環境同位体組成と標高との関係	181
図-7.3.1	地下水の分析結果のヘキサダイアグラム(平成8年度までの結果)	185
図-7.3.2	地下水の水質区分図	186
図-7.3.3	地下水の水質区分図と今年度の分析結果のヘキサダイアグラム	188
図-7.3.4	地下水の水質組成のトリリニアダイアグラム	189
図-7.3.5	地下水の水質組成のトリリニアダイアグラムと水質区分	190
図-7.3.6	採水分析結果におけるNaとCaのイオン当量濃度の関係	192
図-7.3.7	SiO ₂ 濃度とNaイオン当量濃度の関係	192
図-7.3.8	Mgイオン当量濃度とNaイオン当量濃度の関係	194
図-7.3.9	TR濃度とNaイオン当量濃度の関係	194
図-7.3.10	pHとNaイオン当量濃度の関係	195
図-7.3.11	水温とNaイオン当量濃度の関係	195
図-7.3.12	各地下水と岩石サンプルの $\delta^{34}S$ の値	197
図-7.3.13	NW坑道内での環境同位体組成と標高との関係	199
図-7.3.14	各採水地点における細菌の生息数	201

まえがき

釜石原位置試験第1フェーズ(昭和63～平成4年度)の試験においては地層科学研究の一環として割れ目系岩盤である花崗岩(結晶質岩)を対象に、地下の基礎的な地質環境特性の把握と現象の理解、および現有調査試験技術の適用性の確認を目的とした試験研究が実施された。

第2フェーズ(平成5～平成9年度)においては、第1フェーズで明らかになった課題を解決していくことが重要課題であることから、深度依存性や岩体の不均一性を把握するために試験対象領域を拡大して各種データを体系的に取得すること、さらには、調査技術および機器の改良・開発に取り組むことが重要な課題として設定された。

以上のような観点から、第2フェーズにおいては、地下深部のより詳細な地質環境特性の把握と現象の理解および調査技術の高度化とその確立を目指して、以下の5項目の研究領域が設定されている。

- | | |
|----------------------|----------|
| ① 深部地質環境特性の把握 | 【TASK-1】 |
| ② 深部岩盤における掘削影響領域の評価 | 【TASK-2】 |
| ③ 結晶岩中の水理・物質移行に関する研究 | 【TASK-3】 |
| ④ 人工バリア試験 | 【TASK-4】 |
| ⑤ 地震に関する試験研究 | 【TASK-5】 |

本委託研究は、上記の5つの研究領域の内 TASK-1 に属するものであり、栗橋花崗閃緑岩の分布する釜石原位置試験場とその周辺の地質環境特性を把握することを目的として、深部岩盤の地質構造、力学特性、水理特性、地球化学特性の調査・解析を実施している。本年度は第2フェーズの最終年度であり、昨年度までに取得されたデータを含めてそれぞれの項目毎に総合的な解釈を行った。以下では、各項目別に本年度実施した試験内容の概要を示す。

地質構造の調査・解析では、主に550mレベル坑道における割れ目形成史を把握するために、年代測定を行うとともに、これまでの割れ目調査で推定された各形成ステージの割れ目毎に流体包有物調査を実施した。また、地表から深部岩盤へ連続すると推定される割れ目帯について、その妥当性を保証するデータを蓄積するため、地表から掘削された試験錐孔(KG-1孔)のコアを用いた岩石鉱物調査を行った。それらの結果および平成8年度までの成果をもとに、釜石原位置試験場周辺において観察される割れ目帯についてのとりまとめを実施した。一方、割れ目および割れ目帯の検出技術の適用性を確認するために、既存試験錐孔(KF-1孔)と坑道壁面を利用した地球物理学的調査を実施した。また、

これまでにKF-1孔周辺で実施した各種地球物理学的調査結果の妥当性を確認するための新規試錐孔(KF-3孔)を掘削し、新規試錐孔を利用した地質学的調査と地球物理学的調査を実施した。

深部岩盤の力学特性の調査・解析では、原位置試験場周辺の力学特性に係わるデータを取得するために、250mレベルおよび550mレベルの既存試錐孔のコアを用いて室内試験を実施するとともに、力学特性の深度依存性を考察する際の基礎情報の取得を目的として、250mレベルおよび550mレベル坑道に掘削された既存試錐孔のコアを用いてマイクロクラック観察・鉱物分析を実施した。これとは別に、250mレベルおよび550mレベル坑道に掘削された既存試錐孔のコアを用いて、測定条件を変えた弾性波速度測定を実施し、測定条件の変化に対応する弾性波速度を把握した。さらに、断層破碎帯あるいは割れ目帯の力学特性を把握するために、平成9年度に新規に掘削するKF-3孔を用いて孔内載荷試験を実施した。以上の結果および平成8年度までの結果をとりまとめ、力学特性の深度依存性の考察を行うとともに、測定手法の適用性の評価を行った。

深部岩盤の水理特性の調査・解析では、間隙水圧や坑道湧水量の経時変化、透水性に関する知見を蓄積するために、昭和63年～平成9年度の間に定常業務および委託研究で取得された坑道湧水量・間隙水圧、および釜石鉱山周辺の降水量・気温のデータを取りまとめ、データファイル化した。また、原位置試験とそれ以外の試験・工事が間隙水圧などに及ぼす影響を把握するために、釜石鉱山内で実施する全ての試験・工事および鉱山活動等の作業内容とその開始日時・終了日時をとりまとめてデータファイルを作成した。これらのデータに基づき、観測された間隙水圧の変化の原因と試験場周辺の水理的連続性について考察した。

深部岩盤の地球化学特性の調査・解析では、深部岩盤の地下水の地球化学特性を把握するために、既存試錐孔や地表で採水を行い、物理化学パラメータの測定、化学成分分析、同位体分析およびバクテリア分析を実施した。さらに、前年度までのデータおよび定常業務で取得されたデータをとりまとめ、地球化学特性の経時変化や深度依存性を把握するとともに、原位置試験場周辺の水質区分図を作成した。

以下にこれらの調査・試験の結果を報告する。各章の執筆の担当は以下のとおりである。

第1章	調査・試験の概要	米田吉宏
第2章	調査・試験のための準備作業	米田吉宏
第3章	地質構造の調査・解析（1）	守屋俊文
第4章	地質構造の調査・解析（2）	根木健之・米田吉宏

第5章	深部岩盤の力学特性の調査・解析	中村直昭
第6章	深部岩盤の水理特性の調査・解析	秋山眞介
第7章	深部岩盤の地球化学特性の調査・解析	高原弘幸
第8章	総合まとめ	米田吉宏

1. 調査・試験の概要

1.1 調査・試験名

釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成9年度)

1.2 調査・試験の目的

平成9年度は釜石鉱山原位置試験の第2フェーズ(平成5年～平成9年度)の最終年度にあたる。今年度は平成8年度までの成果をもとに、原位置試験場を含む周辺の地質環境特性を総合的に解釈することを目的として、深部岩盤の地質構造、力学特性、水理特性、地球化学特性の調査・解析を行った。

1.3 調査・試験箇所

調査・試験箇所は釜石鉱山の大峰鉱床北部に位置し、行政界では岩手県釜石市橋野町青の木に属する。図-1.3.1は釜石鉱山の位置図である。本年度の調査・試験は地表下約260mの550mL原位置試験場、地表下約730mの250mL原位置試験場、および地表から垂直下向きに約800m掘削したKG-1孔について実施した。図-1.3.2に原位置試験場の位置とその周辺の地形を、また図-1.3.3には原位置試験場周辺の地質概要を示した。図-1.3.4は550mL、図-1.3.5は250mLの原位置試験場付近の拡大図である。各々の図に今年度実施した調査・試験の項目を示した。

1.4 調査・試験の期間

本年度の調査・試験の期間は、平成9年7月1日～平成10年3月13日までである。表-1.4.1に、調査・試験の実績を示した。

1.5 調査・試験の項目とその目的

今年度の調査・試験で行われた試験・調査の実施項目とその目的は以下のとおりである。

①地質構造の調査・解析

原位置試験場周辺の割れ目形成史を把握することを目的とし、分離後各種放射年代測定を行うとともに、原位置試験場周辺の割れ目調査で推定された各形成ステージの割れ目毎に流体包有物調査を実施した。なお、年代測定用の試料については、各種岩石鉱物調査を行い、その鉱物学的特徴を記載した。また、地表から深部岩盤へ連続すると推定される割れ目帯について、その妥当性を検証するために、地表から掘削された試験錐孔(KG-1孔)のコアを用いた各種岩石鉱物調査を行った。

割れ目および割れ目帯の検出技術の適用性を確認することを目的とし、既存試験錐孔(KF-1孔)と坑道壁面を利用した地球物理学的調査を実施した。また、これまでにKF-1孔周辺で実施した各種地球物理学的調査結果の妥当性を確認するための新規試験錐孔(KF-3孔)を掘削し、新規試験錐孔を利用した地質学的調査と地球物理学的調査を実施した。

②深部岩盤の力学特性の調査・解析

原位置試験場周辺の力学特性に係わるデータを取得することを目的とし、250mレベルおよび550mレベルの既存試験錐孔のコアを用いて室内試験(一軸圧縮、圧裂引張、弾性波速度、密度、有効間隙率)を実施した。また、力学特性の深度依存性を考察する際の基礎情報を取得することを目的とし、250mレベルおよび550mレベル坑道に掘削された既存試験錐孔のコアを用いてマイクロクラック観察・鉱物分析(各鉱物の量比、重量比等)を実施した。これとは別に、既存試験錐孔のコアを用いて、測定条件(含水比、周波数)を変えた弾性波速度を実施し、弾性波速度測定の適用性についての基礎的な検討を行った。さらに、断層破砕帯あるいは割れ目帯の力学特性を把握することを目的とし、平成9年度に新規に掘削したKF-3孔を用いて孔内載荷試験を実施した。

③深部岩盤の水理特性の調査・解析

原位置試験場周辺の間隙水圧や坑道湧水量の経時変化、透水性に関する知見を蓄積することを目的とし、昭和63年～平成9年度の間に定常業務および委託研究で取得された坑道湧水量・間隙水圧、および釜石鉱山周辺の降水量・気温のデータを取りまとめ、データファイル化した。また、原位置試験とそれ以外の試験・工事が間隙水圧など地質環境条件に及ぼす影響を把握するために、釜石鉱山内で実施する全ての試験・工事および鉱山活動等の作業内容とその開始日時・終了日時をとりまとめてデータファイルを作成した。これらのデータに基づき、観測された間隙水圧の変化の原因と試験場周辺の水理的連続性についての考察を行った。

④ 深部岩盤の地球化学的特性の調査・解析

深部岩盤の地下水の地球化学特性を把握することを目的とし、既存試錐孔や地表部において採水を行い、物理化学パラメータの測定、化学成分分析、同位体分析およびバクテリア分析を実施した。さらに、昨年度までのデータおよび定常業務で取得されたデータを取りまとめ、地球化学特性の経時変化や深度依存特性を把握するとともに、詳細な原位置試験場周辺の水質区分図を作成し、水質形成機構についての考察を行った。

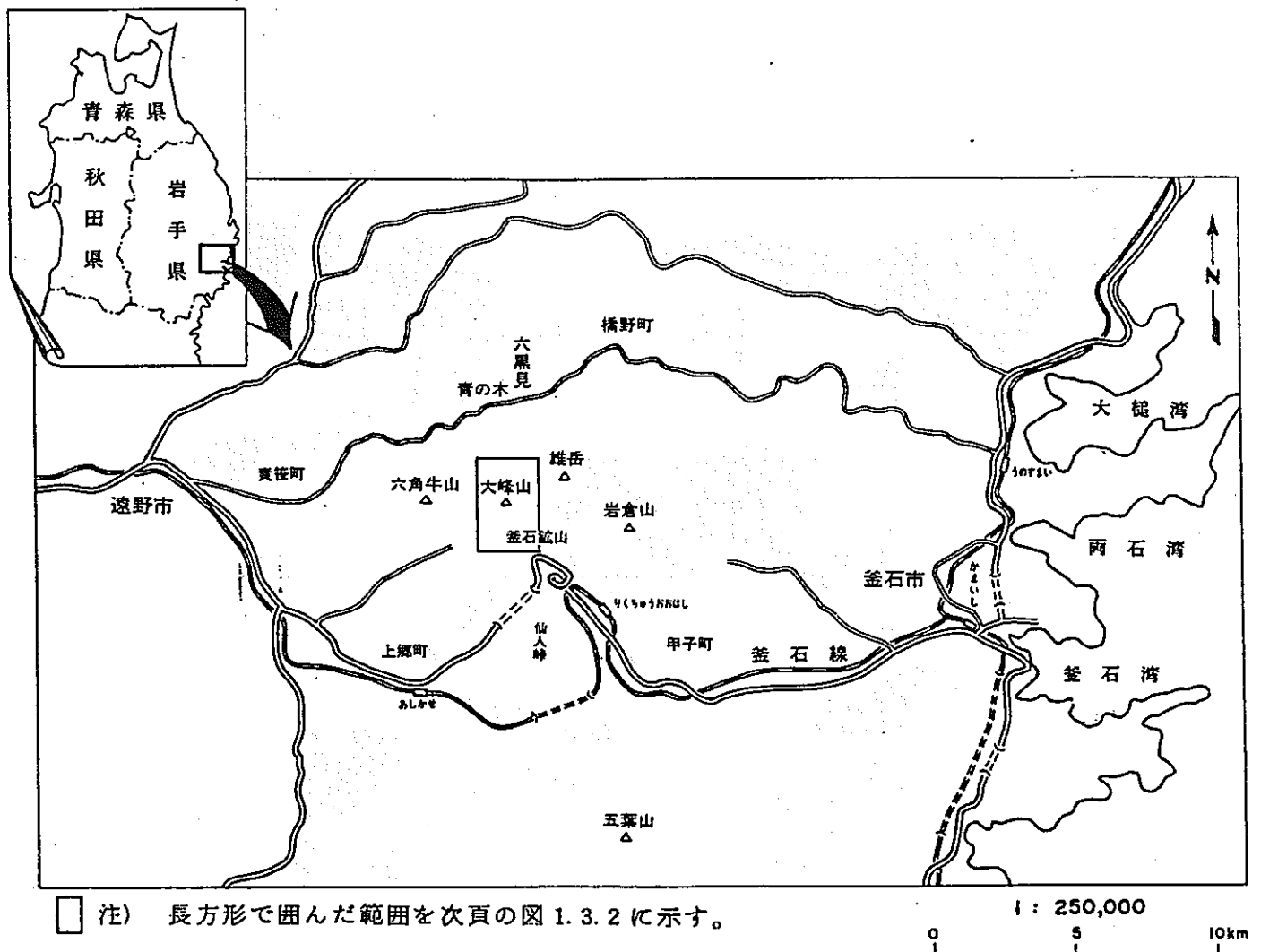
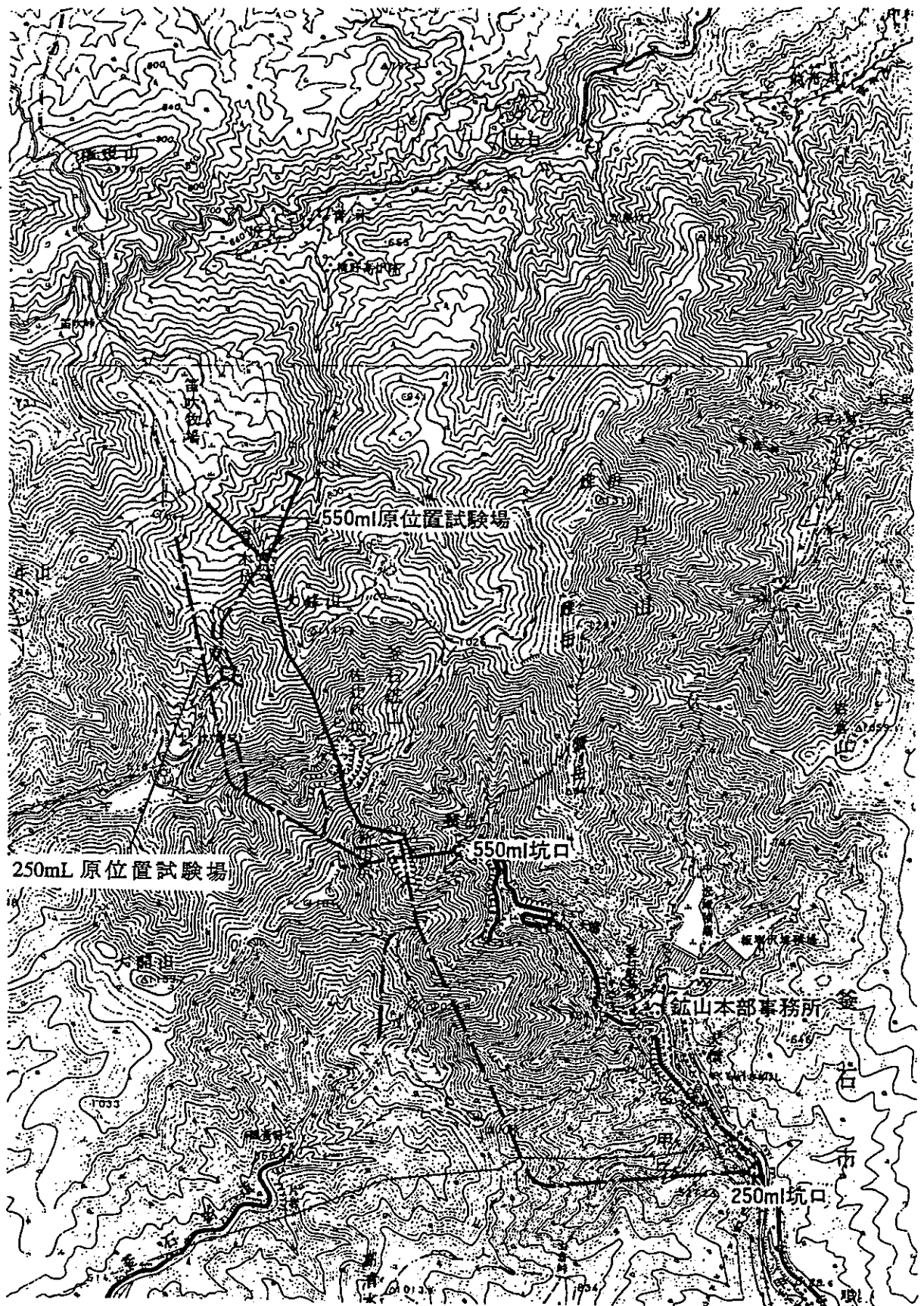


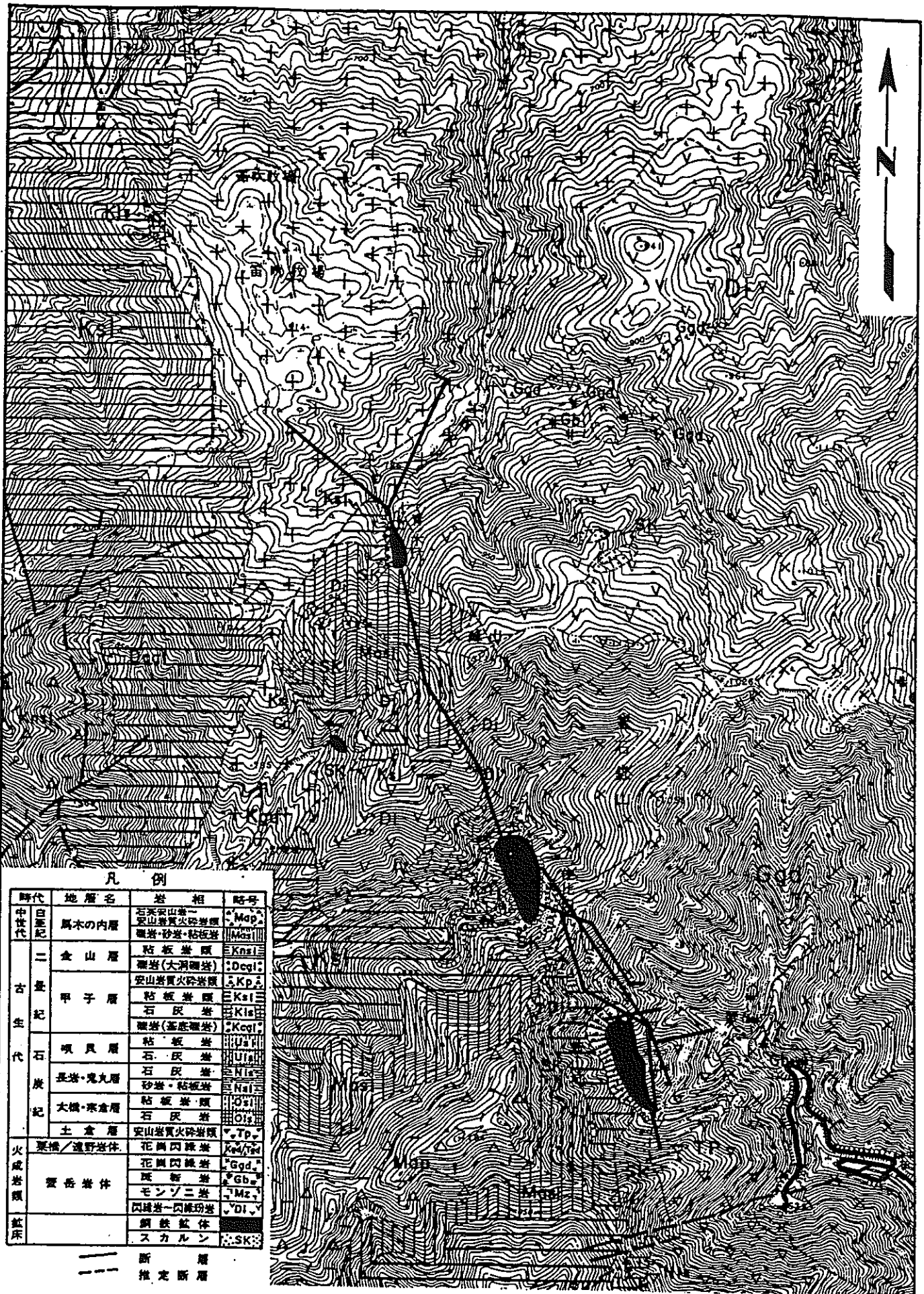
図-1.3.1 釜石鉾山位置図



—— 550ml坑道
 - - - - 250ml坑道

1 : 50,000
 0 1 2km

圖-1.3.2 原位試驗場位置圖



凡例

時代	地層名	岩相	略号	
中生代	白亜紀 馬木の内層	石炭山層一	Map	
		空山岩質火砕岩類 礫岩・砂岩・粘板岩	Mac	
古生代	二畳層	粘板岩類	Kns	
		礫岩(大洞礫岩)	Ocg	
	甲子層	空山岩質火砕岩類	Kp	
		粘板岩類	Ksl	
		石灰岩	Kls	
	石炭紀	噴貝層	粘板岩	Usl
			石灰岩	Uls
長塔・鬼丸層		石灰岩	Nls	
		砂岩・粘板岩	Nsl	
大橋・寒倉層		粘板岩類	Osl	
土倉層	石灰岩	Ols		
火成岩類	栗橋/流野岩体	花崗閃緑岩	Kgd/Tgd	
		花崗閃緑岩	Ggd	
	寶岳岩体	斑岩	Gb	
		モンソニ岩	Mz	
鉱床	閃緑岩-閃緑岩	DI		
	銅鉄鉱体	SK		
	スカルン	SK		

—— 断層
- - - 推定断層

1:25,000

0 500 1000m

図-1.3.3 原位置試験場付近の地質概要図

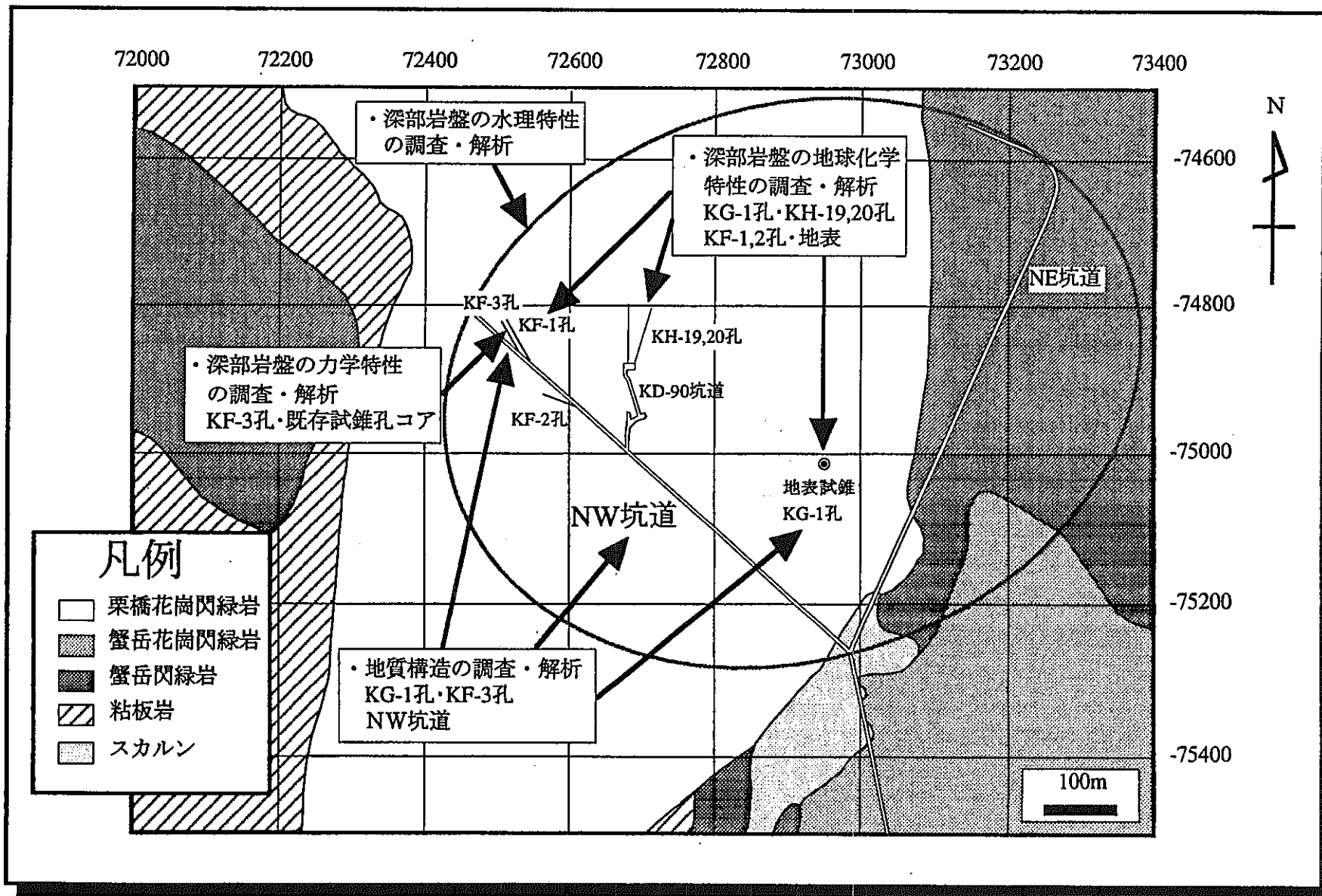


図-1.3.4 550mL 原位置試験場および各調査・試験項目

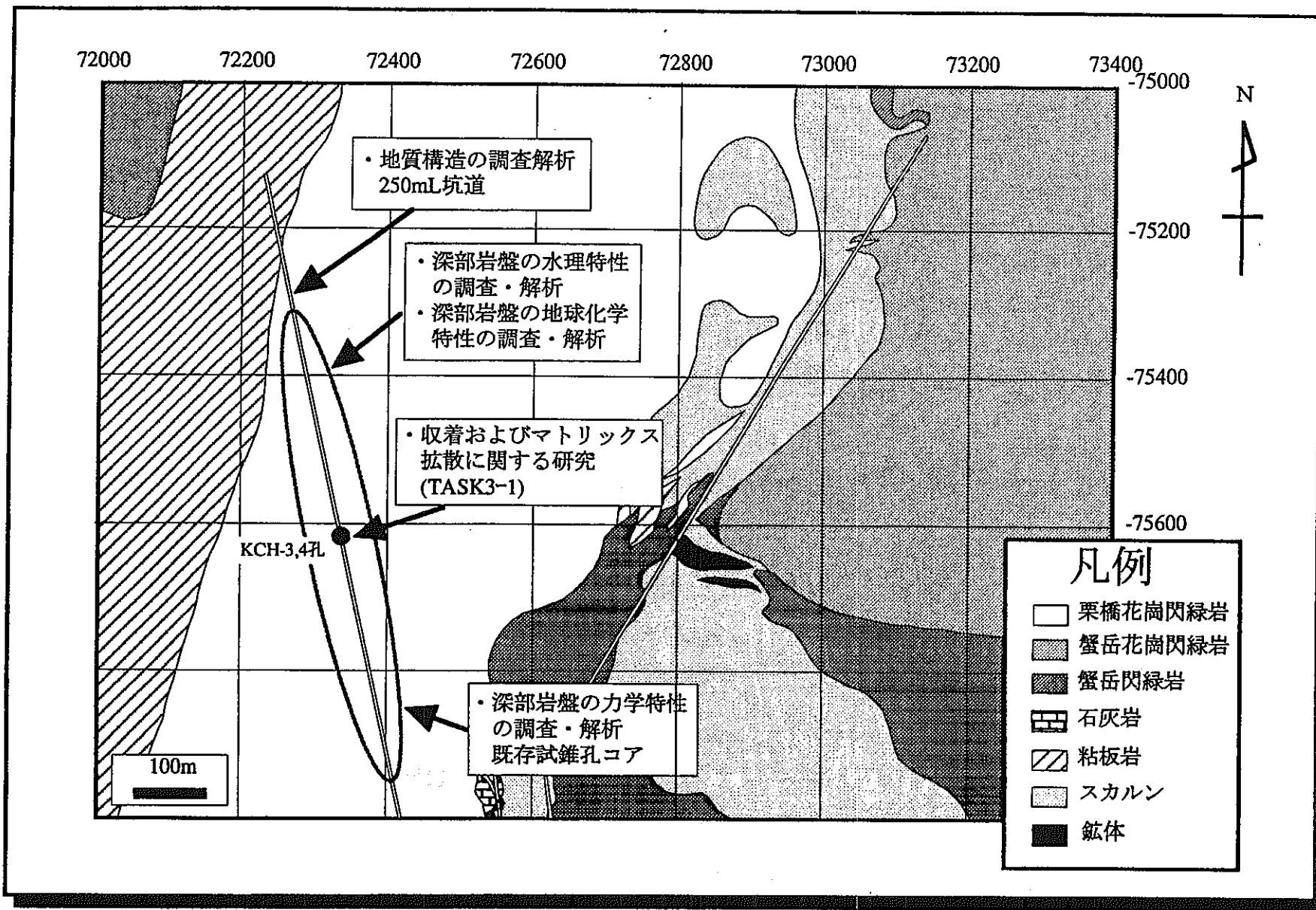


図-1.3.5 250mL 原位置試験場および各調査・試験項目

表-1.4.1 平成9年度原位置試験 調査・試験実績表

調査・試験名	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
原位置試験 場周辺の地質環境の把握 (TASK-1)	地質構造の 調査・解析	— KP-3孔試験工事	— 物理探査準備作業	— 流体流動電位法による 物理探査 (KP-1孔)	— 流体流動電位法、流電電位法による 物理探査 (KP-3孔)	— KP-3孔BTV、孔曲がり測定	— KP-3孔物理検層	— 年代測定・流体包有物試料採取	— KG-1孔破砕部の 試料採取	— データ整理・解析
		— 室内力学試験								
	深部岩盤の 力学特性の 調査・解析	— 弾性波速度試験	— マイクロクラック観察・鉱物分析							
		— 降水量・気温・坑道湧水量・間隙水圧の経時変化の把握、水温調査と地温調査	— KH-1~18孔、KP-1, 2孔の間隙水圧観測	— KP-3孔掘削中の間隙水圧・湧水量測定	— KG-1孔の間隙水圧観測 (20区間/2週)	— データ整理・解析				
深部岩盤の 水理特性の 調査・解析	— KG-1孔採水、分析	— KP-1, 2孔物理化学パラメータ測定	— 地表水の採水、同位体・バクテリア分析	— 坑道湧水の物理化学パラメータの測定・地下水分析	— データ整理・解析					
深部岩盤の 地球化学特 性の調査・ 解析	— 試験場整備	— KCH-3孔掘削	— KCH-3孔掘削中の間隙水 圧・湧水量観測	— KCH-4孔掘削	— KCH-4孔掘削中の間隙水 圧・湧水量観測	— KCH-3孔BTV、孔曲がり測定	— KCH-4孔BTV、孔曲がり測定			
収着および マトリックス 拡散に関 する研究 (TASK3-1)	— 試験場整備	— KCH-3孔掘削	— KCH-3孔掘削中の間隙水 圧・湧水量観測	— KCH-4孔掘削	— KCH-4孔掘削中の間隙水 圧・湧水量観測	— KCH-3孔BTV、孔曲がり測定	— KCH-4孔BTV、孔曲がり測定			

2. 調査・試験のための準備作業

2.1 試験場の整備

単一割れ目の水理特性を把握を目的とした各種調査を実施するために、250mレベル坑道のNo.99割れ目を対象に後述する試験錐孔を2本(KCH-3,4孔)掘削した。試験錐孔を掘削する前に、その準備作業として以下に示す試験場の整備を実施した。試験場整備箇所付近の概要図を図-2.1.1に示す。

- ① 試験錐孔を掘削する付近のズリ、およびNo.99割れ目付近のズリを合計35m³程度除去した。
- ② ズリを除去する部分からのレールの撤去を実施した。
- ③ ズリを除去した箇所の上流部と下流部に堰を設置した。
- ④ 試験機器搬入用に坑道天盤へアンカーを打設した。

なお、堰で区切った箇所の上流部からの湧水および堰内の湧水は、ポンプを用いて下流部へと排水した。

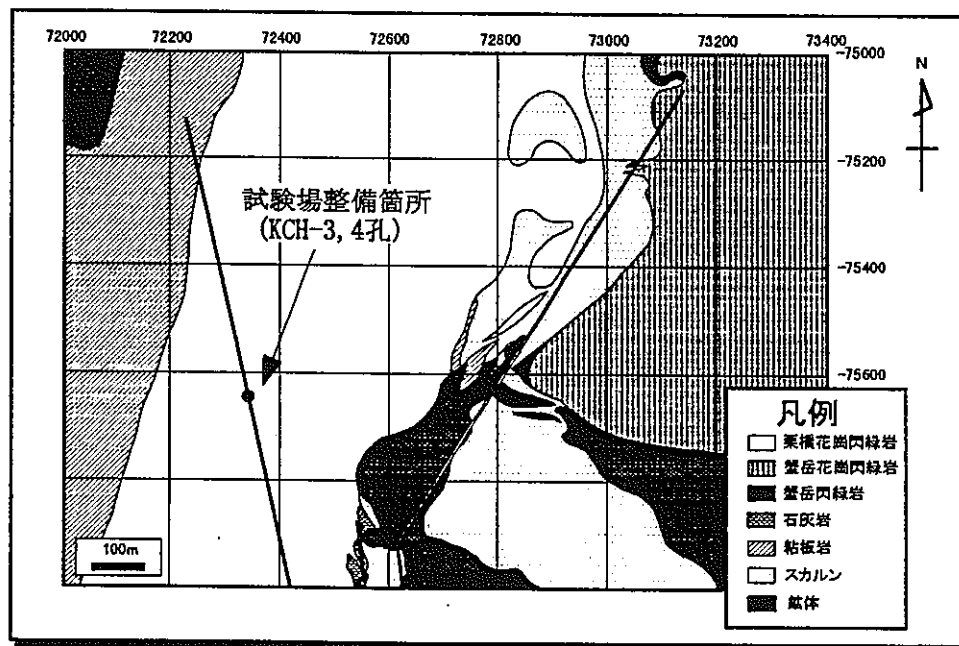


図-2.1.1 試験場整備箇所と KCH-3,4 孔の位置

2.2 試錐孔の掘削

2.2.1 試錐実績

これまでにKF-1孔周辺で実施した各種地球物理学的調査結果の妥当性を確認するために550mレベル坑道にKF-3孔を掘削した。また、TASK3-1に係わる調査・試験のために250mレベル坑道にKCH-3,4孔を掘削した。試錐に使用した試錐機とポンプの仕様を表-2.2.1に示す。

表-2.2.1 試錐に使用した機器の仕様

	試錐機	ポンプ
型式	L-38-98	535RQ
能力など	フィード圧 Max. 7 ton	吐出量 Max. 140 l/min
製造	日本ロングイヤー社	日本ロングイヤー社

試錐孔の実施位置、計画方位・傾斜等をまとめたものを表-2.2.2に示す。KF-3孔は7月8日より掘削を開始し、7月19日に終了した。同様に、KCH-3孔は6月12日に掘削開始、6月23日に終了、KCH-4孔は10月4日に掘削開始、10月21日に終了した。表-2.2.3にKF-3孔およびKCH-3,4孔の試錐実績を示す。なお、KF-3孔の口元には外径83mm、長さ1mの鋼製ケーシングパイプを設置し、KCH-3,4孔の口元には外径120mm、長さ1mの鋼製ケーシングパイプを設置した。また、全孔において岩芯鑑定、BTVによる割れ目調査を実施した。ここで、方位・傾斜の実績および試錐孔の口元座標値は孔曲がり測定の項に記載する。

表-2.2.2 新たに錐進した試錐孔

試錐孔	箇所	孔径	孔長		計画方位*	計画傾斜**
			計画	実績		
KF-3	550mL	76mm	45m	45.55m	326°	-10°
KCH-3	250mL	102mm	30m	30.52m	344°	-45°
KCH-4			30m	30.40m	348°	-45°

*：計画方位は、真北からの時計回りの角度に対応する。

**：計画傾斜は、水平面から上向きを正で表している。

表-2.2.3 新規試錐孔の試錐実績

KF-3 孔		KCH-3 孔		KCH-4 孔	
日 時	深度(m)	日 時	深度(m)	日 時	深度(m)
1997/7/08	1.50	1997/6/12	4.39	1997/10/04	0.67
1997/7/11	7.25	1997/6/16	8.44	1997/10/06	1.00
1997/7/14	13.59	1997/6/17	11.53	1997/10/08	1.57
1997/7/15	21.15	1997/6/18	14.52	1997/10/09	6.70
1997/7/16	27.25	1997/6/19	19.52	1997/10/11	8.85
1997/7/17	35.45	1997/6/20	24.52	1997/10/14	10.40
1997/7/18	41.55	1997/6/21	27.02	1997/10/15	15.40
1997/7/19	45.55	1997/6/23	30.52	1997/10/16	19.40
				1997/10/17	23.55
				1997/10/20	27.70
				1997/10/21	30.40

2.2.2 孔曲がり測定

試錐工事では、一般に試錐機設置時の誤差、あるいは岩盤物性値の不均一性や不連続面などによる錐進時の偏差などが、計画された位置、方位・傾斜からのズレを生じさせる。この量を確認し、試錐孔の正確な位置を知るために孔曲がり測定を実施した。

測定には、コンパスと写真撮影を利用している孔井記録傾斜儀(マルチプルショット)を用いた。その仕様を表-2.2.4に示す。

表-2.2.4 孔曲がり測定に使用した機器の仕様

機器名	孔井傾斜記録儀 (Multiple Shot Sueveying Instrument)
寸 法	外径 35mm、全長 1070mm、重量約 2.6kg
フィルム	10mm ロールフィルム 最大 250 データ記録
コンパス	0 ~ 5°、0 ~ 10°、15 ~ 100° 0 ~ 3°、0 ~ 20°、0 ~ 130°
タイマー	エレクトロニクス可変式 (0.5, 1, 2, 4, 8 min)

測定で得られる傾斜角 ϕ_i と方位 θ_i を次式に用いて計算し、孔口座標を併せて合緯距、合経距を求めた。なお、測定で得られる方位は磁北が基準であるため、 $7^{\circ}10'$ 西偏として、真北基準に換算した。

表-2.2.5～表-2.2.7に各孔の孔曲がり測定の結果を示す。なお、方位角は北から東回りを正、西回りを負とし、傾斜角は、水平より上向きを正、下向きを負としている。また、表中の各項目の計算は以下の式にしたがって行った。

$$\begin{aligned}
 \text{水平距離} \quad C.D_i &= C.D_{i-1} + (D_i - D_{i-1}) \times \cos \phi_i \\
 \text{鉛直距離} \quad V.D_i &= V.D_{i-1} + (D_i - D_{i-1}) \times \sin \phi_i \\
 \text{合経距} \quad X_i &= X_{i-1} + (D_i - D_{i-1}) \times \sin \phi_i \times \cos \theta_i \\
 \text{合緯距} \quad Y_i &= Y_{i-1} + (D_i - D_{i-1}) \times \sin \phi_i \times \sin \theta_i \\
 \text{鉛直距離} \quad Z_i &= Z_{i-1} + (D_i - D_{i-1}) \times \cos \phi_i
 \end{aligned} \tag{2.2.1}$$

ここで、 D_i は*i*番目の測定深度 ($i = 1, 2, 3, \dots$)である。

表-2.2.5 KF-3孔の孔曲がり測定結果

KF-3孔口元位置			合緯距(m)									
			合経距(m)									
			標高(m)									
掘進長(m)	方位角* (°)	傾斜角** (°)	合緯距(予定) (m)	合経距(予定) (m)	標高(予定) (m)	合緯距(実際) (m)	合経距(実際) (m)	標高(実際) (m)	合緯距(誤差) (m)	合経距(誤差) (m)	標高(誤差) (m)	
4	324.83	80.2	-74873.91	72544.61	576.73	-74873.95	72544.54	576.75	-0.05	-0.07	0.01	
6	324.83	80.2	-74872.27	72543.50	576.38	-74872.34	72543.40	576.41	-0.07	-0.11	0.02	
8	325.33	80.2	-74870.64	72542.40	576.04	-74870.72	72542.28	576.07	-0.08	-0.12	0.03	
10	325.83	80.2	-74869.01	72541.30	575.69	-74869.09	72541.18	575.73	-0.08	-0.12	0.04	
12	325.43	80.2	-74867.37	72540.20	575.34	-74867.46	72540.06	575.39	-0.09	-0.14	0.04	
14	326.33	80.3	-74865.74	72539.10	574.99	-74865.82	72538.97	575.05	-0.08	-0.13	0.05	
16	326.83	80.2	-74864.11	72538.00	574.65	-74864.17	72537.89	574.71	-0.06	-0.11	0.06	
18	326.83	80.1	-74862.48	72536.90	574.30	-74862.52	72536.81	574.37	-0.05	-0.09	0.07	
20	326.53	80.1	-74860.84	72535.79	573.95	-74860.88	72535.72	574.02	-0.04	-0.08	0.06	
22	326.53	80.1	-74859.21	72534.69	573.61	-74859.24	72534.64	573.68	-0.03	-0.05	0.07	
24	326.53	80.0	-74857.58	72533.59	573.26	-74857.59	72533.55	573.33	-0.01	-0.04	0.07	
26	326.03	80.0	-74855.94	72532.49	572.91	-74855.96	72532.45	572.98	-0.02	-0.04	0.06	
28	325.83	80.0	-74854.31	72531.39	572.56	-74854.33	72531.34	572.64	-0.02	-0.05	0.07	
30	326.83	80.0	-74852.68	72530.29	572.22	-74852.68	72530.27	572.29	0.00	-0.02	0.07	
32	326.33	80.0	-74851.04	72529.19	571.87	-74851.04	72529.17	571.94	0.00	-0.02	0.07	
34	326.33	80.0	-74849.41	72528.08	571.52	-74849.40	72528.08	571.59	0.01	-0.01	0.06	
36	325.83	79.8	-74847.78	72526.98	571.17	-74847.77	72526.98	571.24	0.01	0.00	0.06	
38	325.83	80.0	-74846.15	72525.88	570.83	-74846.14	72525.87	570.89	0.01	-0.01	0.06	
40	325.83	80.0	-74844.51	72524.78	570.48	-74844.51	72524.77	570.55	0.00	-0.01	0.07	
42	326.03	80.0	-74842.88	72523.68	570.13	-74842.88	72523.66	570.20	0.00	-0.02	0.06	
44	326.83	80.0	-74841.25	72522.58	569.79	-74841.23	72522.59	569.85	0.02	0.01	0.06	
45.55	326.53	80.0	-74840.02	72521.75	569.53	-74840.00	72521.77	569.59	0.02	0.02	0.06	

* 真北方向から時計周りに回転したときの内角

**鉛直方向から水平方向に回転したときの内角

表-2.2.6 KCH-3 孔の孔曲がり測定結果

KCH-3孔口元位置			合緯距(m)	-75645.884							
			合経距(m)	72345.367							
			標高(m)	258.256							
掘進長(m)	方位角* (°)	傾斜角** (°)	合緯距(予定) (m)	合経距(予定) (m)	標高(予定) (m)	合緯距(実際) (m)	合経距(実際) (m)	標高(実際) (m)	合緯距(誤差) (m)	合経距(誤差) (m)	標高(誤差) (m)
2	343.83	46.5	-75644.52	72344.98	256.84	-75644.49	72344.97	256.88	0.03	-0.01	0.03
4	342.53	46.0	-75643.17	72344.59	255.43	-75643.11	72344.53	255.49	0.05	-0.06	0.06
6	343.03	46.0	-75641.81	72344.20	254.01	-75641.74	72344.11	254.10	0.06	-0.09	0.08
8	342.83	46.0	-75640.45	72343.81	252.60	-75640.36	72343.69	252.72	0.08	-0.12	0.12
10	343.03	46.0	-75639.09	72343.42	251.18	-75638.99	72343.27	251.33	0.09	-0.15	0.14
12	343.03	46.1	-75637.73	72343.03	249.77	-75637.61	72342.85	249.94	0.11	-0.18	0.17
14	343.33	46.2	-75636.37	72342.64	248.36	-75636.23	72342.44	248.55	0.13	-0.20	0.19
16	343.33	46.2	-75635.01	72342.25	246.94	-75634.84	72342.02	247.17	0.16	-0.23	0.22
18	343.03	46.3	-75633.65	72341.86	245.53	-75633.46	72341.60	245.79	0.19	-0.26	0.26
20	343.03	46.3	-75632.29	72341.47	244.11	-75632.08	72341.18	244.41	0.21	-0.29	0.29
22	343.23	46.4	-75630.93	72341.08	242.70	-75630.69	72340.76	243.03	0.24	-0.32	0.33
24	343.33	46.5	-75629.57	72340.69	241.29	-75629.30	72340.34	241.65	0.27	-0.35	0.36
26	342.83	46.5	-75628.21	72340.30	239.87	-75627.91	72339.92	240.27	0.30	-0.38	0.39
28	342.83	46.5	-75626.85	72339.91	238.46	-75626.53	72339.49	238.90	0.32	-0.42	0.44
30.52	342.83	46.7	-75625.49	72339.52	237.04	-75625.14	72339.06	237.53	0.35	-0.46	0.48

* 真北方向から時計周りに回転したときの内角 **鉛直方向から水平方向に回転したときの内角

表-2.2.7 KCH-4 孔の孔曲がり測定結果

KCH-4孔口元位置			合緯距(m)	-75645.932							
			合経距(m)	72343.185							
			標高(m)	258.218							
掘進長(m)	方位角* (°)	傾斜角** (°)	合緯距(予定) (m)	合経距(予定) (m)	標高(予定) (m)	合緯距(実際) (m)	合経距(実際) (m)	標高(実際) (m)	合緯距(誤差) (m)	合経距(誤差) (m)	標高(誤差) (m)
4	347.33	46.5	-75643.17	72342.60	255.39	-75643.11	72342.50	255.47	0.05	-0.10	0.08
6	347.83	46.6	-75641.78	72342.30	253.98	-75641.69	72342.20	254.09	0.09	-0.11	0.11
8	347.83	46.8	-75640.40	72342.01	252.56	-75640.26	72341.89	252.73	0.14	-0.12	0.17
10	347.83	47.0	-75639.02	72341.71	251.15	-75638.83	72341.58	251.36	0.18	-0.14	0.21
12	347.83	46.8	-75637.63	72341.42	249.73	-75637.41	72341.27	249.99	0.22	-0.16	0.26
14	347.83	46.8	-75636.25	72341.13	248.32	-75635.98	72340.97	248.62	0.27	-0.16	0.30
16	347.83	46.8	-75634.87	72340.83	246.90	-75634.56	72340.66	247.25	0.30	-0.18	0.34
18	348.33	46.9	-75633.48	72340.54	245.49	-75633.13	72340.37	245.89	0.35	-0.17	0.40
20	348.03	46.9	-75632.10	72340.24	244.08	-75631.70	72340.06	244.52	0.40	-0.19	0.44
22	349.03	47.0	-75630.72	72339.95	242.66	-75630.26	72339.78	243.16	0.45	-0.18	0.50
24	349.33	47.0	-75629.33	72339.66	241.25	-75628.83	72339.51	241.79	0.50	-0.15	0.54
26	348.83	47.1	-75627.95	72339.36	239.83	-75627.39	72339.23	240.43	0.56	-0.14	0.59
28	348.83	47.2	-75626.57	72339.07	238.42	-75625.95	72338.95	239.07	0.61	-0.12	0.65
30.40	348.23	47.3	-75625.18	72338.77	237.00	-75624.51	72338.65	237.72	0.67	-0.13	0.71

* 真北方向から時計周りに回転したときの内角 **鉛直方向から水平方向に回転したときの内角

3. 地質構造の調査・解析

3.1 調査の目的および概要

(1).年代測定調査

原位置試験場周辺に広く分布する栗橋花崗閃緑岩中に発達する割れ目および割れ目帯の形成史を把握することを目的とし、割れ目充填物および栗橋花崗閃緑岩を対象に、Rb-Sr法、K-Ar法、フィッシュョン・トラック法による放射年代測定を実施した。また、原位置試験場周辺に発達する割れ目や割れ目帯が、最近100万年以内に再動や再変質等の再活動をしているのかどうかについて確認することを目的とし、栗橋花崗閃緑岩および再活動の可能性が最も高いと推定される割れ目充填物を対象に、石英を用いたESR年代測定を実施した。

(2).流体包有物調査

平成8年度までの調査により、原位置試験場周辺に分布する割れ目や割れ目帯は、ブドウ石-濁沸石の変質鉱物組み合わせにより特徴づけられる地質環境下、および、緑泥石-束沸石の変質鉱物組み合わせにより特徴づけられる地質環境下の、時代の異なる2つの割れ目ステージから形成されていることが推定されている。これらの2つの割れ目形成ステージに関与した流体の性質を明確にし、割れ目や割れ目帯の形成された地質環境の相違を明確にすることを目的とし、石英中の流体包有物を対象に、均質化温度および固結温度（塩相当濃度）の測定を実施した。

(3).KG-1孔の岩石・鉱物学的調査

地表から深部岩盤へと連続が推定される割れ目帯／破碎帯について、推定の妥当性を保証するデータを蓄積することを目的とし、KG-1孔に分布する割れ目帯／破碎帯を対象に、顕微鏡観察、粉末X線回折、全岩化学分析を実施した。また、栗橋花崗閃緑岩の不均質性や深度依存性を把握することを目的とし、モード分析、粉末X線回折、全岩化学分析、微量元素分析を実施した。

3.2 割れ目および割れ目帯の特性調査

3.2.1 年代測定調査

(1).実施内容

釜石原位置試験の対象岩体である栗橋花崗閃緑岩中に発達する割れ目や割れ目帯の形成史を把握することを目的とし、平成6年度から4年間にわたり、割れ目充填物や栗橋花崗閃緑岩の年代測定を実施してきた。本年度は、「単一割れ目の形成史」および「割れ目帯の形成史」をさらに詳細に把握することを目的とし、以下の3地点において信頼性の乏しいデータの再測定および補足／追加データの取得を行った。

1).250mL原位置試験場 起点から11m地点

「単一割れ目の形成史」を把握することを目的とし、現在までに、主要な割れ目充填物である暗緑色部 (prehnite-laumontite) および栗橋花崗閃緑岩の放射年代測定が実施されている地点である。本地点では、信頼性の乏しい栗橋花崗閃緑岩中の角閃石のK-Ar年代の再測定および同一割れ目内で未分析であった異種の割れ目充填物のフィッシュン・トラック年代測定を実施した。

2).550mL原位置試験場 起点から625～642m地点

本地点は地表リニアメントと連続が推定されている区間であり、現在までに「割れ目帯の形成史」を把握することを目的とし、割れ目充填物の放射年代測定が実施されている地点である。本年度は、割れ目帯の形成史を母岩である栗橋花崗閃緑岩の冷却史と合わせて検討することを目的とし、割れ目充填物、変質した花崗閃緑岩および新鮮な花崗閃緑岩の放射年代測定を実施した。さらに、最近100万年以内の割れ目帯の活動（再動）の有無を確認することを目的とし、割れ目充填物および栗橋花崗閃緑岩のESR年代測定を実施した。

3).550mL原位置試験場 起点から600m地点

平成8年度までの調査より、原位置試験場に発達する大部分の割れ目や割れ目帯は、2Mタイプのセリサイトが生成される地質条件下で形成されたものと推定された。しかし、本地点では、例外的に1Mタイプのセリサイトが生成しているため、他区間よりも低温な地質環境下において割れ目が活動（再変質／再動）した可能性が示唆されている。そのため、1Mタイプのセリサイトの形成年代を把握することを目的とし、割れ目充填物の放射年代測定を実施した。

(2).年代測定調査結果

(a).250mL原位置試験場 起点から11m地点

(i).栗橋花崗閃緑岩の冷却史

栗橋花崗閃緑岩の初生鉱物である角閃石について、ポリ・タングステン酸ナトリウムを用いた高精度の鉱物分離を行い、K-Ar年代の再測定を実施した。

図-3.2.1に、本年度までに取得されている栗橋花崗閃緑岩の初生鉱物の年代値と閉止温度の関係を示す。角閃石については、平成6年度のK-Ar年代値よりも、約5Maほど若い年代が得られた。角閃石よりも閉止温度の低い黒雲母のK-Ar年代値よりも若い年代を示すが、黒雲母が晶出の際に過剰アルゴンを取り込みやすい性質を有すること、他の分析結果と整合性がとれる年代値であること、および、鉱物分離の信頼性が高いことから、本年度得られたK-Ar年代は栗橋花崗閃緑岩の冷却年代を示しているものと判断される。

これらのことから、本地点では、約110Ma頃に栗橋花崗閃緑岩が貫入／定置し、約90Ma頃までに、約25℃/Maの冷却速度で、次第に冷え固まっていったものと推定される。

(ii).「単一割れ目」の形成史

同一割れ目内で未分析であった条線の発達した緑泥石を主体とする割れ目充填物および未固結な粘土質状の割れ目充填物について、ジルコンのフィッシュョン・トラック年代測定を実施した。

図-3.2.2に、本地点において、現在までに取得されている年代値と閉止温度の関係をプロットしたものおよびトラック長解析結果を示す。本年度に分析を実施した割れ目充填物については、何れも母岩である栗橋花崗閃緑岩のジルコンのフィッシュョン・トラック年代値よりも約7Maほど古い年代値が得られた。したがって、これらの割れ目充填物については、残念ながら形成年代が得られなかったものと判断される。そのため、これらの割れ目充填物が主要な割れ目充填物である暗緑色部と同時に形成されたのか、あるいは、異なる時代に形成されたのかについては、本調査で明らかにすることはできなかった。

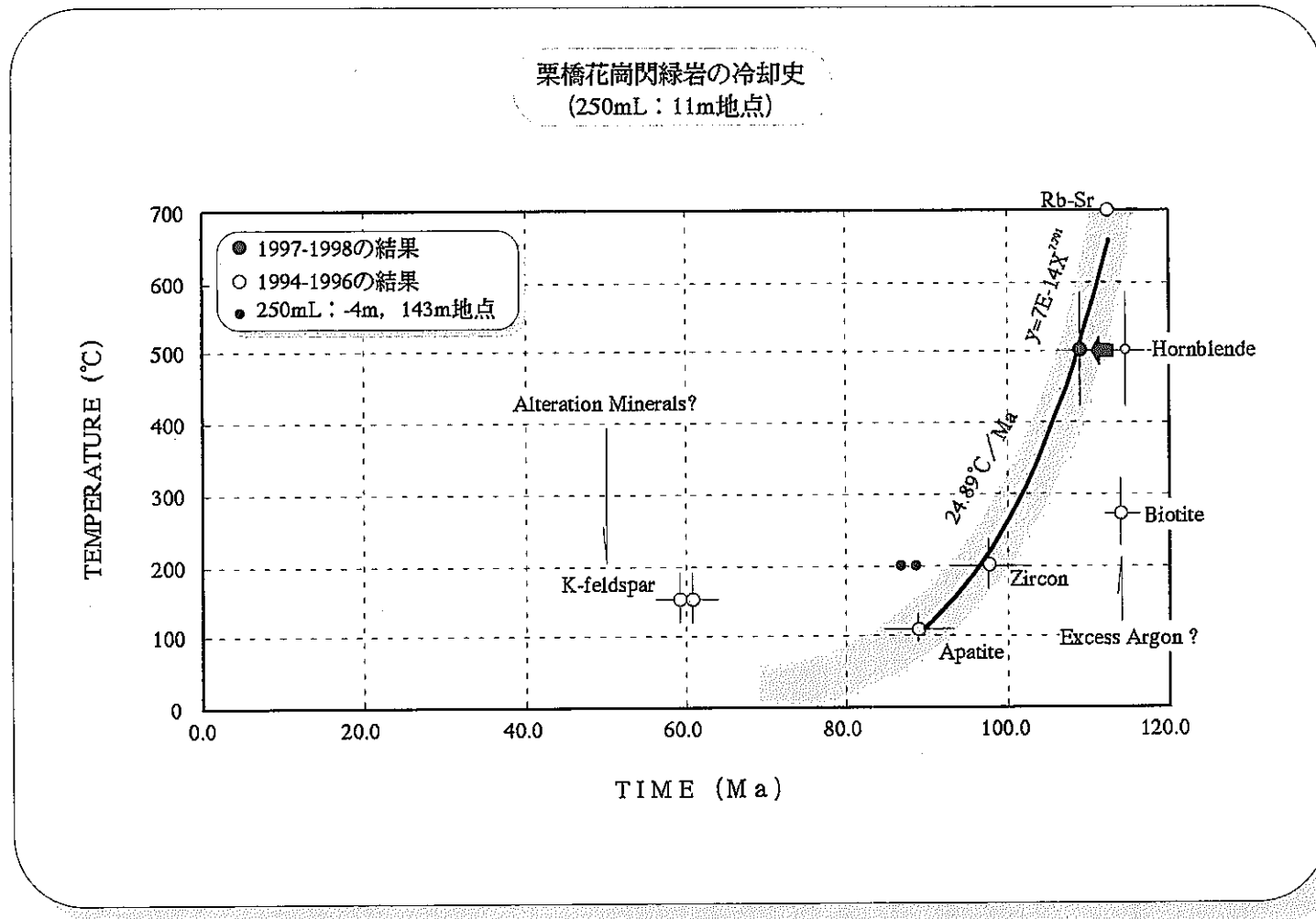
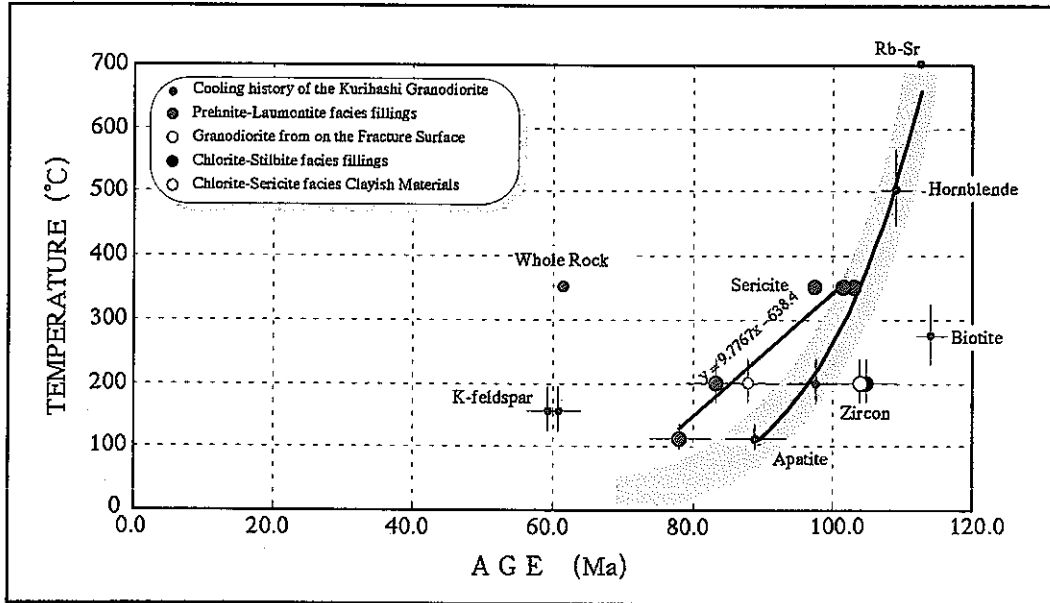


図-3.2.1 栗橋花崗閃緑岩の冷却史 (250mL : 11m地点)

History of Single Fracture
(250mL : 11m)



Track Length Distribution
(250mL : 11m)

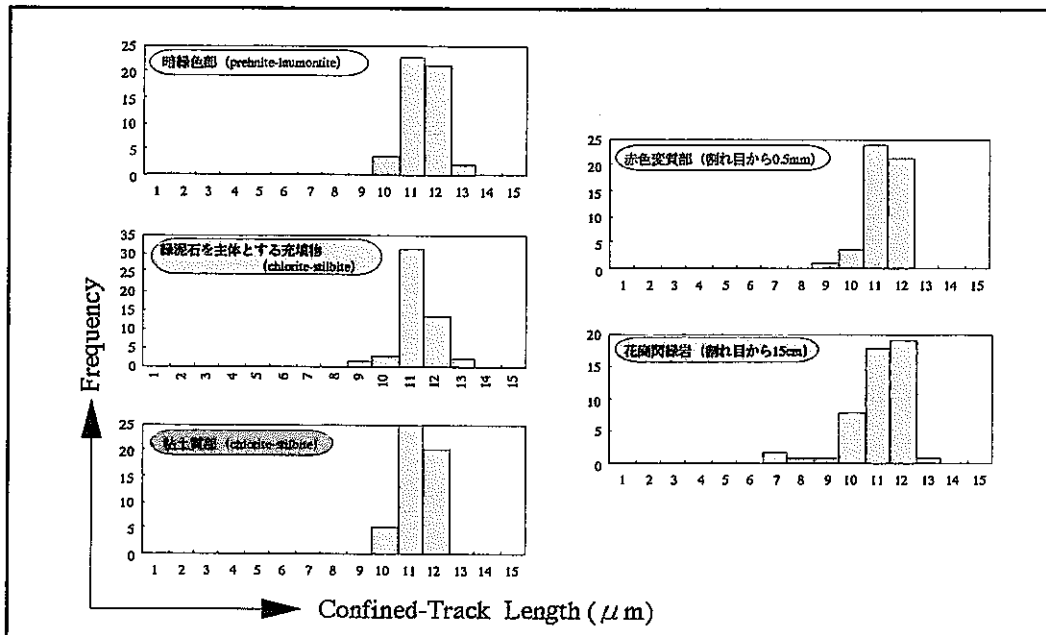


図-3.2.2 単一割れ目の形成史 (250mL : 11m地点)

(b).550mL原位置試験場 起点から625～642m地点

(i).栗橋花崗閃緑岩の冷却史

栗橋花崗閃緑岩および栗橋花崗閃緑岩の初生鉱物である角閃石、黒雲母、ジルコン、アパタイトを対象に放射年代測定を実施した。

図-3.2.3に、年代値と閉止温度の関係およびジルコンのトラック長解析結果を示す。Rb-Sr年代値および角閃石、黒雲母のK-Ar年代値については、250mL原位置試験場の起点から11m地点と同様な年代値が得られたが、ジルコンおよびアパタイトについては、約15～20Maほど古い年代値が得られた。したがって、得られた年代値のみで判断すると、本地点では250mL原位置試験所の起点から11m地点と同様に約110Ma頃に栗橋花崗閃緑岩が貫入／定置したものと推定されるが、冷却速度に関しては全く異なっており、数Ma程度の短期間に約100℃程度まで急速に冷却したものと判断される。

(ii).割れ目帯の形成史

割れ目帯の主要割れ目内でまだ未分析であった黒色部のフィッシュョン・トラック年代測定、および、平成7年度に既にフィッシュョン・トラック年代測定が実施されている灰色部、粘土質部のセリサイトを用いたK-Ar年代測定を実施した。さらに、主要割れ目に斜交する割れ目中の暗緑色部、および、割れ目周辺部に発達する赤色変質部についてもあわせて放射年代測定を実施した。

図-3.2.4に、年代値と閉止温度の関係およびトラック長解析結果を示す。赤色変質部については、変質鉱物であるセリサイトおよびカリ長石では約95MaのK-Ar年代値が、栗橋花崗閃緑岩の初生鉱物である角閃石、黒雲母、ジルコン、アパタイトではそれぞれ栗橋花崗閃緑岩中のものよりも約10Maほど若返ったK-Arあるいはフィッシュョン・トラック年代値が得られた。そのため、変質鉱物であるセリサイトおよびカリ長石のK-Ar年代値は赤色変質部の形成年代を、角閃石、黒雲母、ジルコン、アパタイトのK-Arあるいはフィッシュョン・トラック年代値は赤色変質部形成時の若返り年代を示しているものと推定される。また、主要割れ目中の灰色部および粘土質部のセリサイトのK-Ar年代については、平成7年度に実施したフィッシュョン・トラック年代と調和的な年代値が得られた

栗橋花崗閃緑岩の冷却史
(550mL : 629m)

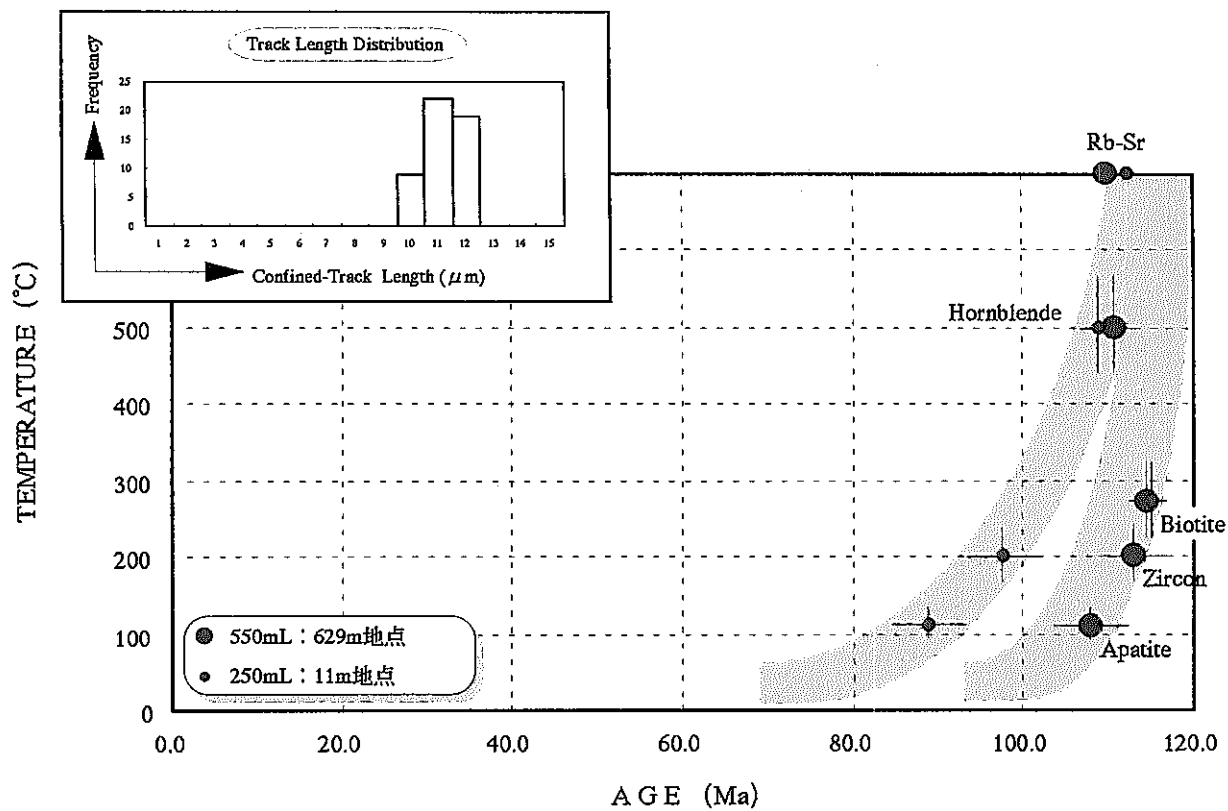
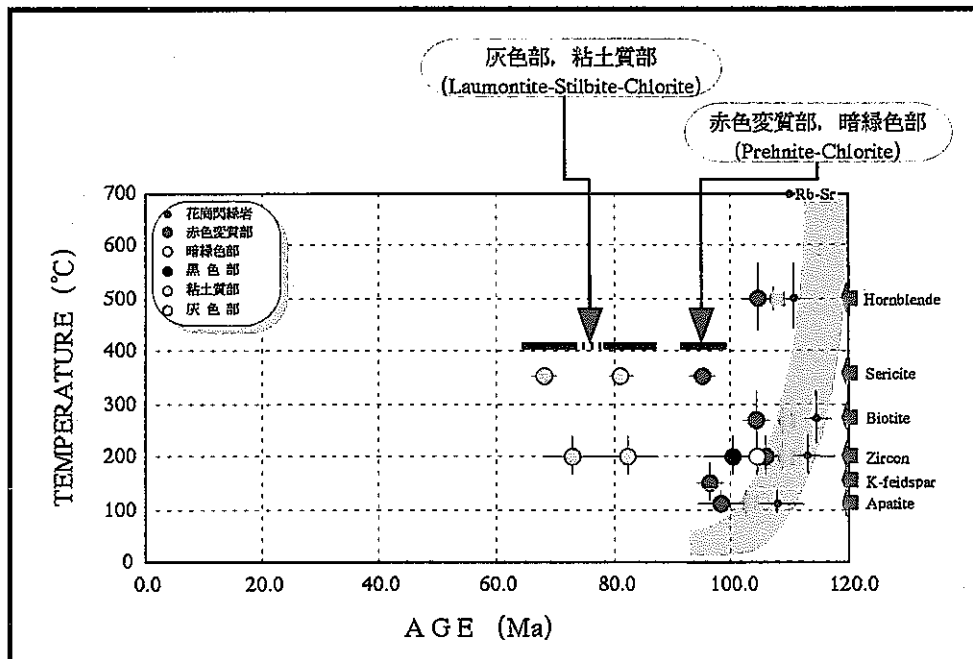


図-3.2.3 栗橋花崗閃緑岩の冷却史 (550mL : 629m地点)

History of Fracture Zone
(550mL : 625-642m)



Track Length Distribution
(550mL : 629m)

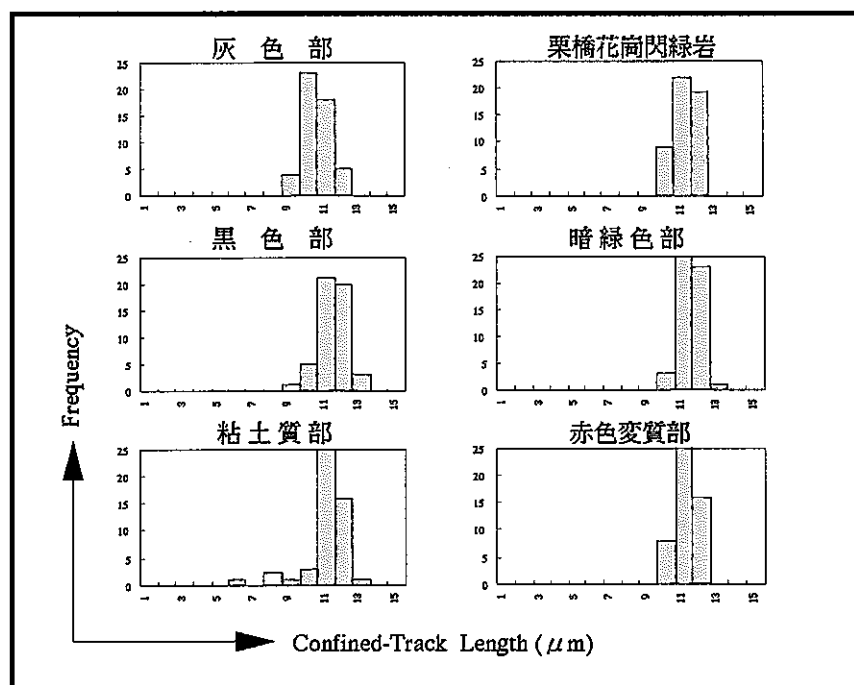


図-3.2.4 割れ目帯の形成史 (550mL : 625~642m地点)

ため、これらの充填物の形成年代を示しているものと推定される。一方、主要割れ目中の黒色部および主要割れ目に斜交する割れ目中の暗緑色部のフィッシュン・トラック年代については、フィッシュン・トラック長に明瞭な短縮が認められないため詳細については不明であるが、栗橋花崗閃緑岩中のジルコンよりも約10Maほど若い年代を示すこと、および、赤色変質部中のジルコンとほぼ同じ年代値を示すことから、赤色変質時、あるいは、灰色部や粘土質部の形成時の若返り年代を示しているものと推定される。

これらのことから、本地点では、栗橋花崗閃緑岩が100℃以下まで完全に冷え固まった約95Ma頃に、栗橋花崗閃緑岩に赤色変質をもたらすほどの高温な割れ目形成ステージが存在したものと推定される。そして、これらのステージでの赤色変質や割れ目形成が完了した約70~85Ma頃に、灰色部や粘土質部を形成するようなより低温な割れ目形成ステージが存在したものと推定される。

(iii). 割れ目の再活動（再動／再変質）の有無の確認

原位置試験場周辺内で、最も再活動の可能性が高いと推定される本地点に分布する割れ目帯の主要割れ目に介在される灰色部、黒色部および主要割れ目周辺に分布する栗橋花崗閃緑岩を対象に、石英を用いたESR年代測定を実施した。

図-3.2.5~図-3.2.6に、 γ 線照射量とESR信号の変化の関係を示す。割れ目の再動等の目安となるE'centerについては、何れの試料においても、 γ 線照射量に対してESR信号強度が非常に安定しており、有効なESR信号が得られなかった。また、熱的な影響の有無の目安となる石英中の不純物信号であるAl-center、Ti-center、Ge-centerについては、栗橋花崗閃緑岩試料のAl-center以外は、 γ 線照射に対するESR信号強度の感度が小さく、有効なESR信号は得られなかった。

栗橋花崗閃緑岩試料のAl-centerについては、獲得線量から約213KaのESR年代値が見積もられる。しかし、見積もられた年代値に関しては、1). Al-centerが約350℃以上でアニーリングすること、2). 栗橋花崗閃緑岩試料でAl-centerよりもアニーリング温度が低いGe-center、Ti-centerのアニーリングが十分でないこと、および、3). 割れ目充填物試料では何れのESR信号もアニーリングされていないことから、地質イベントを反映した年代値ではないものと判断される。

以上のことから、原位置試験場周辺に発達する割れ目や割れ目帯では、最近100万年以内に、ESR信号の構造的リセットおよび熱的リセットが生じていないものと推定される。

室温測定

ESR信号強度とγ線照射量との関係

栗橋花崗閃緑岩

灰色部

黒色部

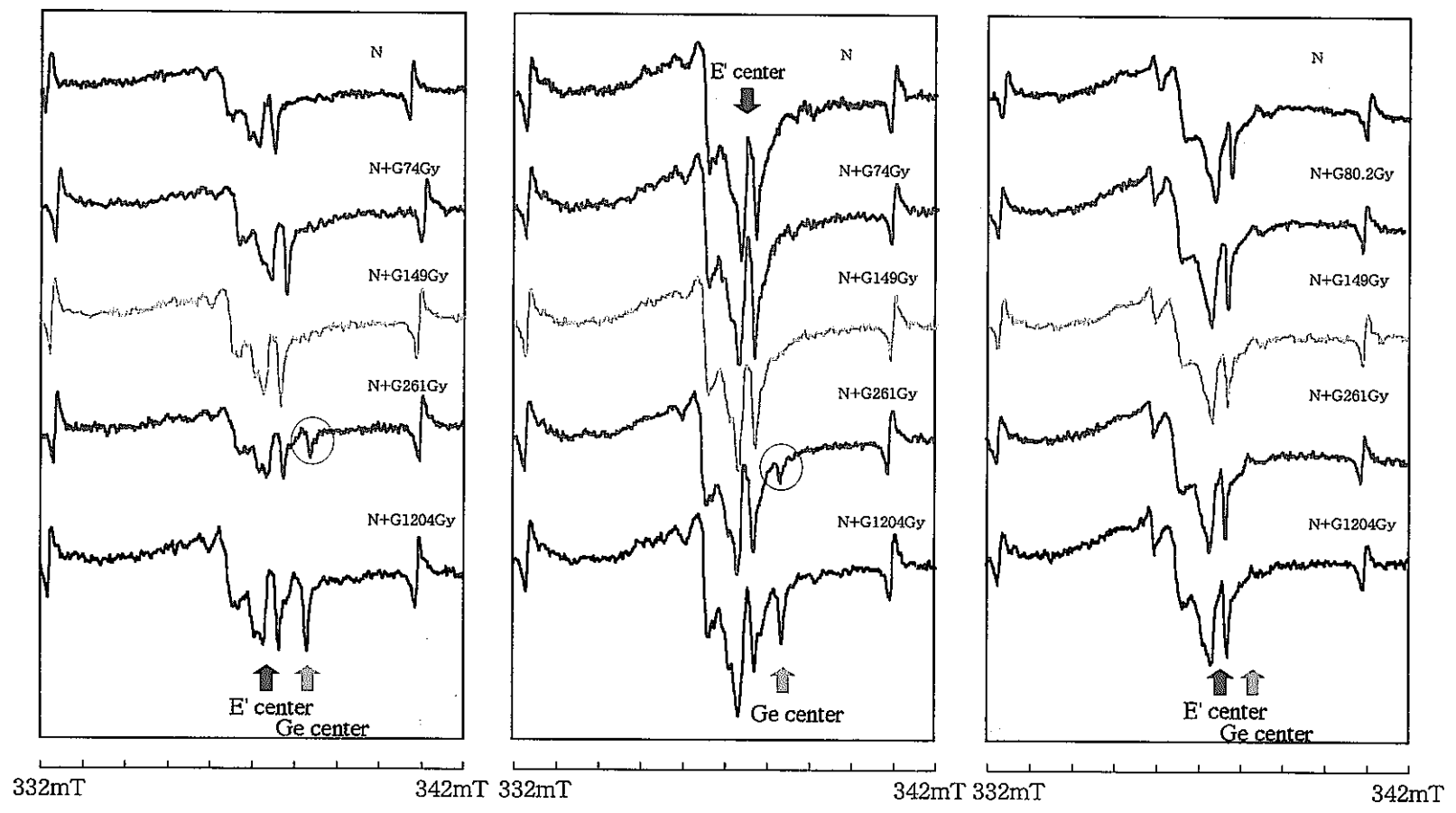


図-3.2.5 ESR信号強度測定結果 (その1)

栗橋花崗閃緑岩

灰色部

黒色部

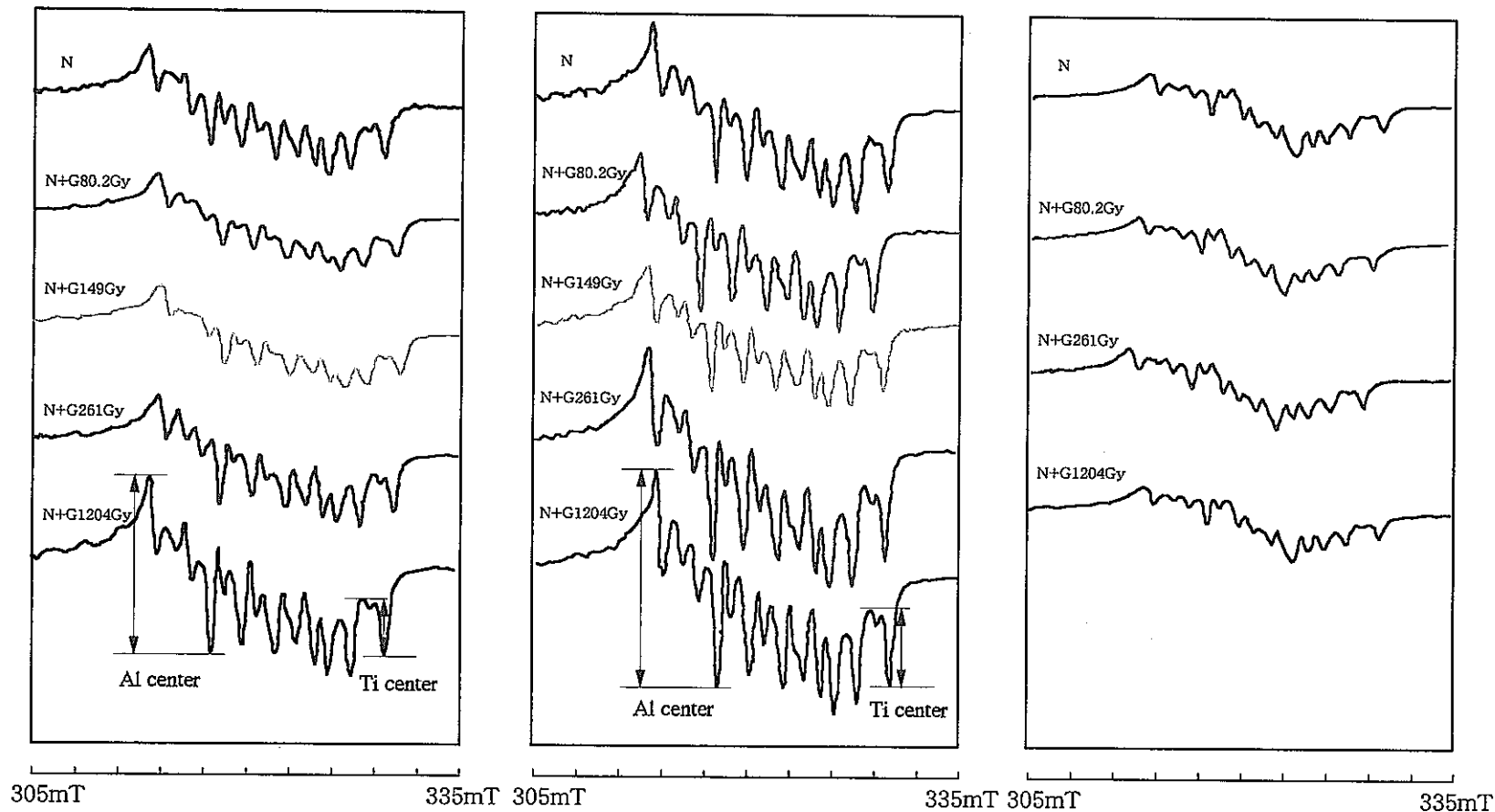


図-3.2.6 ESR 信号強度測定結果 (その2)

(c).550mL原位置試験場 深度600m地点

現在までの調査により、1Mタイプのセリサイトが検出されている本地点に分布する割れ目に介在される粘土質部を対象に、ジルコンのフィッシュン・トラック年代測定を実施した。

図-3.2.7に、閉止温度と年代値の関係およびトラック長解析を示す。粘土鉱物の結晶度に低下が認められる625~642m地点の灰色部や粘土質部よりも約20~30Maほど古い年代を示し、結晶度に低下が認められない赤色変質部や暗緑色部と同様の年代値が得られた。しかし、赤色変質部や暗緑色部とは異なり、フィッシュン・トラックに著しい短縮が認められることから、これらの充填物よりも再加熱の影響を強く被っているものと判断される。したがって、得られたフィッシュン・トラック年代値は、1Mタイプのセリサイトの形成時の若返り年代を示しているものと推定され、形成年代よりも古い年代を示しているものと推測される。

そのため、目的である1Mタイプのセリサイトの形成年代は残念ながら本調査では把握できなかったが、同様な年代値を有する赤色変質部や暗緑色部とは全く異なる熱史を有していることが明らかとなった。

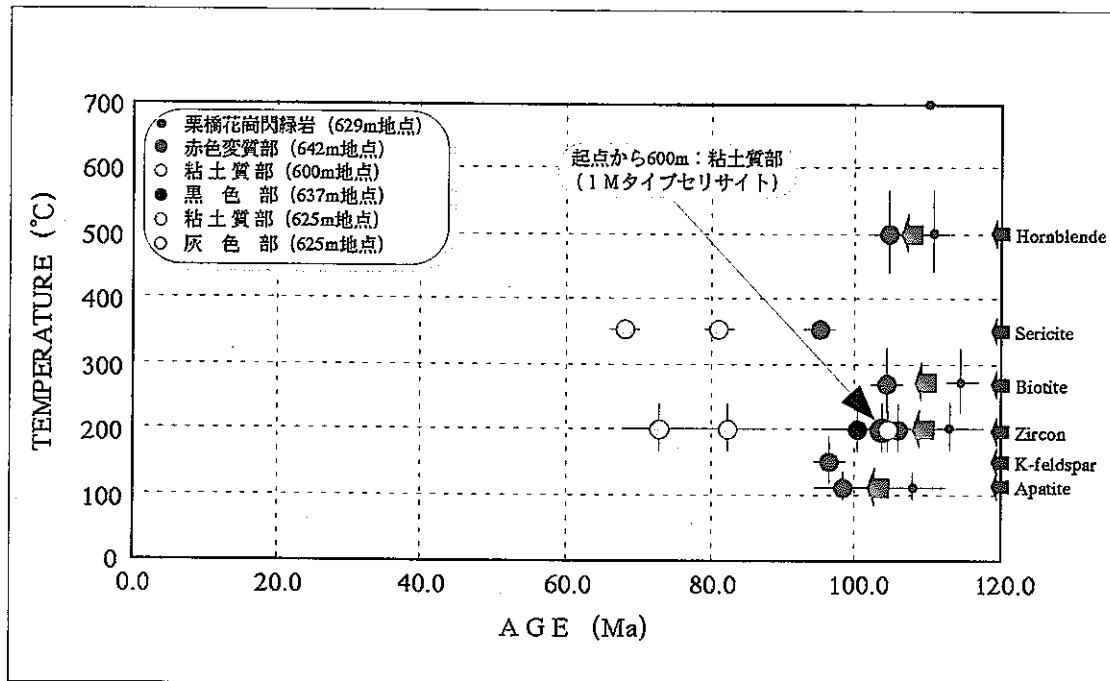
(5).年代測定調査まとめ

(a).単一割れ目の形成史について

釜石原位置試験の対象岩体である栗橋花崗閃緑岩の初生鉱物の放射年代測定を実施した結果、250mL原位置試験場の起点から11m地点では、約110Ma頃に花崗閃緑岩が貫入/定置し、その後、約25℃/Ma程度の冷却速度で、約90Ma頃までに約100℃程度まで冷却したものと推定された。

また、同地点に発達する割れ目に介在される暗緑色部、条線の発達した緑泥石を主体とする充填物、粘土質な充填物の年代測定を行った結果、本割れ目の主要な充填物である暗緑色部に関しては、母岩である栗橋花崗閃緑岩が約100℃以下まで冷え固まった約85Ma頃に、フィッシュン・トラックの完全なリセットをもたらす地質条件下で形成されたものと推定された。しかし、条線の発達した緑泥石を主体とする充填物、および、粘土質な充填物に関しては、フィッシュン・トラックが完全にリセットされていないため、形成年代が求められなかった。そのため、

I M-Type Sericite
(550mL : 600-642m)



Track Length Distribution
(550mL : 600m)

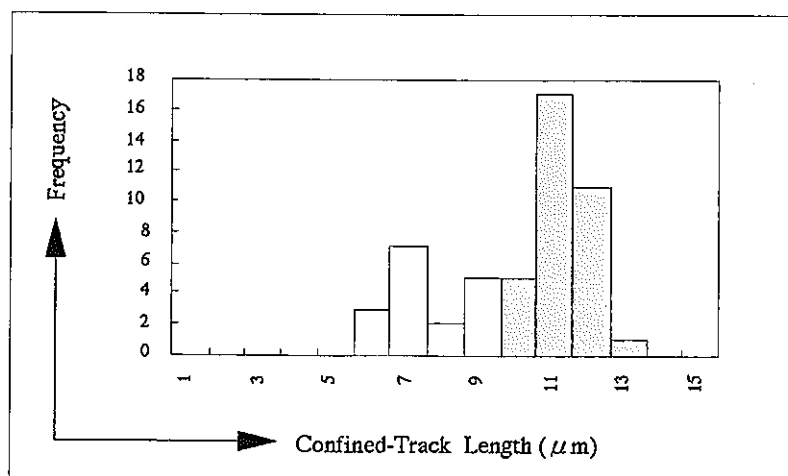


図-3.2.7 I Mタイプセリサイトの形成年代 (550mL : 600m地点)

これらの充填物が、暗緑色部と同時に形成されたのか、あるいは、異なる時代に形成されたのかは、残念ながら本調査では、把握することができなかった。

(b). 割れ目帯の形成史について

栗橋花崗閃緑岩の初生鉱物の放射年代測定の結果、550mL原位置試験場の起点から625~642m地点では、250mL原位置試験場の起点から11m地点と同様に、約110Ma頃に花崗閃緑岩が貫入／定置したものと推定された。しかし、冷却速度に関しては、全く異なっており、数Ma程の間に約100℃程度まで急激に冷却したものと推定された。

また、同地点に発達する割れ目帯中の割れ目充填物や赤色変質部の放射年代測定を実施した結果、栗橋花崗閃緑岩が約100℃以下まで完全に冷え固まった約95Ma頃に、赤色変質部や主要割れ目に斜行する割れ目が形成され (prehnite-laumontite facies fillings)、その後、約70~85Ma頃に主要割れ目中の灰色部や粘土質部 (ともに、chlorite-stilbite facies fillings) が形成されたものと推定された。そして、同地点の栗橋花崗閃緑岩、灰色部、黒色部のESR年代測定を実施した結果、石英中の不純物であるGe、Ti、Alの電気信号は得られたものの、割れ目の再動等の目安となるSi-Siの間をつなぐ酸素原子が欠損してできる格子欠陥信号 (E'信号) は得られなかったため、同地点に発達する割れ目帯は、最近100万年以内に再動や再変質等の活動を行っていないことが明らかとなった。

さらに、550mL原位置試験場の起点から600m地点の1Mタイプのセリサイトが生成されている粘土質部のジルコンのフィッショントラック年代測定を実施した結果、残念ながら、目的である1Mタイプのセリサイトの形成年代は把握できなかったが、同様なフィッショントラック年代を有する550mL原位置試験場の基点から625~642m地点の赤色変質部や暗緑色部とは、全く異なる熱史のもとで形成されたことが判明した。

3.2.2 流体包有物の調査

(1).実施内容

平成8年度までの調査により、原位置試験場周辺に分布する割れ目や割れ目帯は、主として、以下の2つの割れ目形成ステージにより形成されていることが推定されている。

- 1).Stage1 : 顕著な赤色変質を伴うブドウ石-濁沸石に代表される変質鉱物組み合わせを有する割れ目形成ステージ
- 2).Stage2 : 顕著な変質を伴わない緑泥石-束沸石に代表される変質鉱物組み合わせを有する割れ目形成ステージ

本年度の流体包有物の調査では、これらの2つの割れ目形成ステージに関与した流体の性質の相違を明らかにすること、および、割れ目形成時に関与した流体と栗橋花崗閃緑岩の貫入/冷却時の流体の性質の相違を明らかにすることを目的とし、石英中の流体包有物を対象に均質化温度および固結温度(塩相当濃度)の測定を実施した。

表-3.2.1に、対象試料および測定を実施した流体包有物を示す。石英粒子内には、様々な時期に形成された流体包有物が混在しているため、本調査のように地質イベントに対応する流体包有物の特性を把握することを目的とする場合には、各々の流体包有物の形成時期を明らかにし、適切な流体包有物を選定する必要があるものと考えられる。このような理由から、流体包有物の測定に先じて、顕微鏡下で微細構造の観察および石英粒子内に発達するマイクロクラックの調査を実施し、測定の対象とする流体包有物の選定を行った。

Stage1の流体包有物に関しては、同ステージに形成されたと推定される赤色変質部中の石英粒子内に発達するヒールド・クラック(healed crack)にトラップされている流体包有物を対象に調査を実施した。Stage2の流体包有物に関しては、同ステージの割れ目近傍から採取した花崗閃緑岩中の石英粒子内に発達するヒールド・クラックおよび変形構造(deformation lamellae)にトラップされている流体包有物を対象に調査を実施した。また、栗橋花崗閃緑岩の貫入/冷却時の流体包有物に関しては、栗橋花崗閃緑岩およびアプライト脈中の石英粒子内の初生流体包有物およびヒールド・クラックにトラップされている流体包有物を対象に調査を実施した。

表-3.2.1 流体包有物の調査の対象試料および分析項目一覧表

No.	レベル	位置	対象試料	対象とする流体包有物	形成時期	顕微鏡観察	モード分析	X線回折	全岩化学分析
1	550mL	490m	栗橋花崗閃緑岩	初生的な流体包有物 N85E系のヒール・クラック中の流体包有物 N40W系のヒール・クラック中の流体包有物	花崗閃緑岩貫入時の流体包有物 花崗閃緑岩冷却時のヒール・クラック 花崗閃緑岩冷却時のヒール・クラック	○	○	○	○
2	550mL	639m	アプライト	初生的な流体包有物 N80E系のヒール・クラック中の流体包有物	アプライト脈形成時の流体包有物 アプライト脈形成時のヒール・クラック	○	○	○	○
3	550mL	626m	赤色変質部 (Prehnite-Laumontite)	N65E系のヒール・クラック中の流体包有物	赤色変質時に形成されたヒール・クラック	○	○	○	○
4	550mL	515m	割れ目近傍 (Chlorite-Stilbite)	変形ラメラ中の流体包有物 N20E系のヒール・クラック中の流体包有物	割れ目形成時の流体包有物 割れ目形成時のヒール・クラック	○	×	×	×

(2). 流体包有物の調査結果

図-3.2.8に、流体包有物の測定結果を示す。栗橋花崗閃緑岩については、初生的な流体包有物が約140~180℃の均質化温度を有し、ヒールド・クラックにトラップされている流体包有物が約100~150℃の均質化温度を有することから、貫入から約200℃程度まで冷却する間は結晶化作用が継続しており、約150℃程度まで冷却した時点で完全に固結したものと推定される。また、初生的な流体包有物が約5.5~7.0 wt%の均質化温度を有することから、栗橋花崗閃緑岩の形成に関与した根源流体（花崗質岩マグマの結晶分化作用最末期のマグマに由来する熱水）は、約5.5~7.0wt%の塩相当濃度を有していたものと推定される。アプライト脈については、初生的な流体包有物が花崗閃緑岩よりも高い均質化温度を有するため、栗橋花崗閃緑岩の固結後に形成されたものと推定される。また、初生的な流体包有物、および、ヒールド・クラックにトラップされている流体包有物ともに、花崗閃緑岩の初生的な流体包有物と同様な塩相当濃度を有することから、少なくともアプライト脈の貫入/冷却時までは、約5.5~7.0wt%の塩相当濃度を有する栗橋花崗閃緑岩の根源流体が循環する地質環境下（栗橋花崗閃緑岩の冷却過程）であったものと推定される。

ブドウ石-濁沸石に代表される変質鉱物を有する割れ目形成ステージ（Stage1）については、同ステージに形成された流体包有物が約170~290℃の均質化温度と約4.0~7.0wt%の塩相当濃度を有することから、栗橋花崗閃緑岩の固結後に、約300℃程度の栗橋花崗閃緑岩の根源流体に由来する熱水が岩盤中の破碎帯を循環する地質環境下で形成されたものと推定される。それに対し、緑泥石-東沸石に代表される変質鉱物組み合わせを有する割れ目形成ステージ（Stage2）については、同ステージに形成された流体包有物が約100~190℃の均質化温度を有し、栗橋花崗閃緑岩やアプライト脈の初生的な流体包有物よりも有意に低い約2.5~4.0wt%の塩相当濃度を有することから、地表循環地下水により希釈された約200℃程度の栗橋花崗閃緑岩の根源流体が岩盤中の破碎帯を循環する地質条件下で形成されたものと推定される。したがって、両割れ目ステージとも、栗橋花崗閃緑岩の形成に関与した根源流体（花崗質岩マグマの火成活動）と密接な関係があるものと推定されるが、Stage1に関しては栗橋花崗閃緑岩の定置後の地表水が到達する以前に、Stage2に関しては地表水が到達した後に形成されたものと推定される。

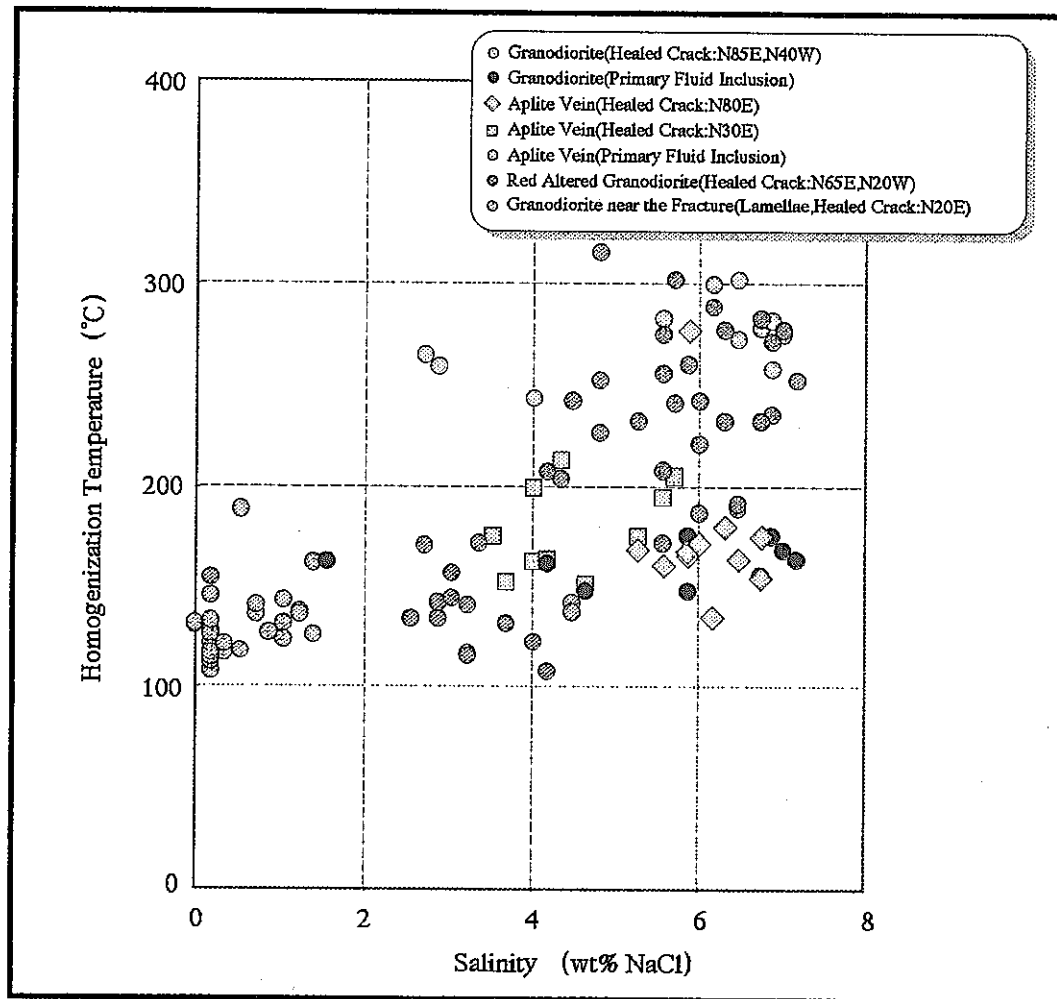


図-3.2.8 流体包有物の測定結果 (全試料)

(3). 流体包有物の調査のまとめ

栗橋花崗閃緑岩の流体包有物の調査の結果、栗橋花崗閃緑岩の根源流体は、一連の火成活動と考えられている蟹岳花崗閃緑岩よりも低温で低塩相当濃度であったものと推定され、栗橋花崗閃緑岩の結晶分化作用の末期には、約5.5~7.0wt%の塩相当濃度を有していたものと推定された。また、アプライト脈の流体包有物の調査の結果、アプライト脈は栗橋花崗閃緑岩の固結後に、約300℃の栗橋花崗閃緑岩の根源流体（残液）の貫入により形成されたものと推定された。そのため、少なくとも、栗橋花崗閃緑岩の結晶分化作用の末期からアプライト脈の形成時にかけては、約5.5~7.0wt%の塩相当濃度を有する栗橋花崗閃緑岩の根源流体が岩盤内を循環する地質条件下であったものと推定された。

また、ブドウ石-濁沸石により代表される変質鉱物組み合わせを有する割れ目形成ステージ（Stage1）および緑泥石-束沸石により代表される変質鉱物組み合わせを有する割れ目形成ステージ（Stage2）に形成された流体包有物の調査を実施したところ、両割れ目ステージとも栗橋花崗閃緑岩の根源流体（火成活動）と密接な関係があるものと推定され、Stage1の割れ目形成ステージについては、アプライト脈同様に約300℃の栗橋花崗閃緑岩の根源流体に由来する熱水が岩盤中の破碎帯等を循環する地質環境下で形成されたものと推定された。それに対し、Stage2の割れ目形成ステージについては、岩盤を循環する地表水により希釈された約200℃の栗橋花崗閃緑岩の根源流体に由来する熱水が岩盤中の破碎帯等を循環する地質環境下で形成されたものと推定された。

3.2.3 KG-1孔の調査

(1).実施内容

地表から深部岩盤へと連続が予想される割れ目帯／破碎帯（断層）について、推定の妥当性を保証するデータを蓄積すること、および、栗橋花崗閃緑岩の不均質性や深度依存性を把握することを目的とし、KG-1孔の岩芯を用いて、以下の岩石・鉱物学的調査を実施した。

(a).割れ目帯／破碎帯（断層）の連続性に関する調査

KG-1孔の主要な割れ目帯／破碎帯（断層）の岩石・鉱物学的な特徴を把握することを目的とし、各割れ目帯／破碎帯（断層）中の主要割れ目を対象に、顕微鏡観察、粉末X線回折および全岩化学分析を実施した。これらのデータを取りまとめ、KG-1孔に分布する割れ目帯／破碎帯（断層）の岩石・鉱物学的な特徴を明らかにするとともに、KG-1孔の深度233～433m区間と連続が予想されている550mL原位置試験場のNW坑道の起点から315m周辺に分布する割れ目帯／破碎帯（断層）との連続性について、岩石・鉱物学的な見地から考察を行った。また、550mL原位置試験場のNW坑道の起点から315m同様に、地表リニアメントと連続が予想されるNW坑道の起点から625m周辺に分布する割れ目帯／破碎帯（断層）についても、あわせて連続性の考察を実施した。

(b).花崗閃緑岩の深度依存性に関する調査

栗橋花崗閃緑岩の地質構造や深度依存性を把握することを目的とし、顕微鏡観察、モード分析、粉末X線回折、全岩化学分析および微量化学分析を実施した。顕微鏡観察およびモード分析については、約50mに1試料の割合で、計17試料について分析を実施した。また、粉末X線回折、全岩化学分析および微量化学分析については、約100mに1試料の割合で、計11試料について分析を行った。これらのデータと550mL原位置試験場および250mL原位置試験場に分布する栗橋花崗閃緑岩の既存データを取りまとめ、原位置試験場周辺における栗橋花崗閃緑岩の不均質性や深度依存性の考察を実施した。

(2).KG-1孔の調査のまとめ

(a).割れ目帯／破碎帯（断層）の連続性について

地表から深部岩盤へと連続が予想される割れ目帯／破碎帯（断層）について、推定の妥当性を保証するデータを蓄積することを目的とし、KG-1孔に分布する主要な割れ目帯／破碎帯（断層）中の主要な割れ目充填物および赤色変質部を対象に岩石・鉱物学的な調査を実施した。その結果、残念ながら本調査では、連続性の妥当性を直接的に保証する岩石・鉱物学的な特性を取得するまでには至らなかった。しかし、550mL原位置試験場のNW坑道の起点から315m周辺に分布する割れ目帯／破碎帯（断層）に関しては、1).KG-1孔の深度518～545mに分布する割れ目帯／破碎帯（断層）と類似した変質鉱物の成因的特性を有すること、および、2).本割れ目帯／破碎帯（断層）中の赤色変質部は、KG-1孔の深度277～433mに発達する割れ目帯／破碎帯（断層）中の赤色変質部と類似した全岩化学特性を有することが判明した。また、550mL原位置試験場のNW坑道の起点から625m周辺に分布する割れ目帯／破碎帯（断層）に関しては、KG-1孔の深度279～293mに分布する割れ目帯／破碎帯（断層）と、類似した変質鉱物特性や全岩化学特性を有することが判明した。

(b).栗橋花崗閃緑岩の不均質性および深度依存性について

原位置試験場周辺に分布する栗橋花崗閃緑岩の不均質性や深度依存性を把握することを目的とし、栗橋花崗閃緑岩の岩石・鉱物学的な調査を実施した。残念ながら、岩石・鉱物学的な見地から、栗橋花崗閃緑岩の不均質性や深度依存性を明確にするには至らなかった。このことは、栗橋花崗閃緑岩が粗粒な岩石であり不均質性が大きいことから、その場に分布する栗橋花崗閃緑岩の岩石・鉱物学的な特性を把握することができなかったことに起因するものと判断される。しかしながら、本調査の結果、原位置試験場周辺に分布する栗橋花崗閃緑岩の岩石・鉱物学的特性について、以下の見解が得られた。

- 1).KG-1孔の深度518～545mの割れ目帯／破碎帯（断層）を境界とし、全岩化学特性に相違が認められる。浅部では550mL原位置試験場周辺の栗橋花崗閃緑

岩と、深部では250mL原位置試験場周辺の栗橋花崗閃緑岩と同様な全岩化学特性を有する

- 2). KG-1孔の深度277～433mの割れ目帯／破碎帯（断層）を境界とし、造岩鉱物のモード比に相違が認められ、深部の試料については、深度518～545mの割れ目帯／破碎帯（断層）周辺部では250mL原位置試験場と、その他の区間では550mL原位置試験場と同様な造岩鉱物特性を有する。

3.2.4 割れ目および割れ目帯の特性調査のまとめ

(1).年代測定の調査

「単一割れ目の形成史」、「割れ目帯の形成史」および「1Mタイプセリサイトの形成時期」を把握することを目的とし、250mL原位置試験場の起点から11m地点、550mL原位置試験場の起点から625m地点および600m地点において、栗橋花崗閃緑岩や赤色変質部、割れ目充填物の放射年代測定を実施した。その結果、「単一割れ目の形成史」については、母岩である栗橋花崗閃緑岩が約100℃以下まで冷え固まった約85Ma頃に、フィッシュン・トラックのリセットをもたらすような地質条件下で形成されたものと推定された。それに対し、「割れ目帯の形成史」については、栗橋花崗閃緑岩が約100度以下まで冷え固まった約95Ma頃に、赤色変質を伴うブドウ石－濁沸石を変質鉱物とする割れ目充填物が形成され、その後、約70～85Ma頃に緑泥石－東沸石を変質鉱物とする割れ目充填物が形成されたものと推定された。また、同割れ目帯を対象とし、最近100万年以内の再動や再変質等の再活動の有無を把握することを目的とし、ESR年代測定を実施したが、割れ目充填物試料では格子欠陥信号であるE'1プライム信号が得られなかった。そのため、原位置試験場周辺に分布する割れ目や割れ目帯は、最近100万年以内に再活動していないものと推定された。

「1Mタイプセリサイトの形成時期」に関しては、平成7年度の粘土鉱物の結晶化学的な調査で1Mタイプセリサイトが検出された粘土質部を対象にフィッシュン・トラック年代測定を実施したが、フィッシュン・トラックのリセットが十分でないものと推定され、形成時期を把握するまでには至らなかった。しかし、フィッシュン・トラックのトラック長解析の結果から、他の試料よりも急速な冷却速度を有していることが推定された。

(2).流体包有物の調査

平成8年度までの調査により、原位置試験場周辺に分布する割れ目や割れ目帯は、1).ブドウ石－濁沸石に代表される変質鉱物組み合わせを有する割れ目形成ステージ、および、2).緑泥石－東沸石に代表される変質鉱物組み合わせを有する割れ目形成ステージにより、主として形成されているものと推定されている。本年度の調査では、これら2つの割れ目形成ステージに関与した流体の特性を明らかにし、形成時の地

質環境条件の相違を把握することを目的とし、石英中の流体包有物の均質化温度および塩相当濃度の調査を実施した。その結果、ブドウ石－濁沸石に代表される変質鉱物組み合わせを有する割れ目形成ステージについては、約300℃程度の栗橋花崗閃緑岩の根源流体に由来する熱水が岩盤中の破碎帯等を循環する地質環境下で形成されたものと推定された。それに対し、緑泥石－束沸石に代表される変質鉱物組み合わせを有する割れ目形成ステージについては、地表水により希釈された約200℃程度の栗橋花崗閃緑岩に由来する根源流体が岩盤中の破碎帯等を循環する地質環境下で形成されたものと推定された。

(3).KG-1孔の調査

地表から地下深部へと連続が予想される割れ目帯／破碎帯（断層）を対象に、推定の妥当性を保証するデータを蓄積すること目的とし、KG-1孔に分布する主要な割れ目帯／破碎帯（断層）を対象に、岩石・鉱物学的な調査を実施した。その結果、直接的に連続性を保証する岩石・鉱物学的特性を得るまでには至らなかったが、550m L原位置試験場のNW坑道の起点から315m周辺の割れ目帯／破碎帯については、KG-1孔の深度277～433mの割れ目帯／破碎帯（断層）や深度518～545mの割れ目帯／破碎帯（断層）と岩石・鉱物学的に類似していることが明確になった。

また、栗橋花崗閃緑岩の不均質性や深度依存性を把握することを目的とし、KG-1孔に分布する栗橋花崗閃緑岩の岩石・鉱物学的な調査を実施した。その結果、全岩化学特性からは、KG-1孔の深度518～545mの割れ目帯／破碎帯（断層）よりも浅部に分布する栗橋花崗閃緑岩と550mL原位置試験場周辺に分布する栗橋花崗閃緑岩が、割れ目帯／破碎帯（断層）よりも深部に分布する栗橋花崗閃緑岩と250mL原位置試験場周辺に分布する栗橋花崗閃緑岩が同様な全岩化学特性を有することが明らかとなった。一方、造岩鉱物特性からは、KG-1孔の深度277～433mの割れ目帯／破碎帯（断層）よりも深部に分布する栗橋花崗閃緑岩の内、蟹岳閃緑岩～ヒン岩が分布する深度518～545mの割れ目帯／破碎帯（断層）の周辺部に分布する栗橋花崗閃緑岩は250mL原位置試験場周辺に分布する栗橋花崗閃緑岩と、その他の区間に分布する栗橋花崗閃緑岩は550mL原位置試験場周辺に分布する栗橋花崗閃緑岩と類似した造岩鉱物特性を有することが明らかとなった。

4. 地質構造の調査・解析(2)

4.1 調査の目的および概要

岩盤中における断層破碎帯、割れ目帯の連続性の探査検出手法として、これまでに流電電位法、弾性波トモグラフィ、物理検層、ボアホールレーダー、流体流動電位法が行われてきた。流電電位法、弾性波トモグラフィ、物理検層、ボアホールレーダーが岩盤の物理的性質の相違から断層破碎帯、割れ目帯の連続性を把握する手法であるのに対し、流体流動電位法は断層破碎帯もしくは割れ目帯中を流体（地下水）が流動することにより発生する自然電位から、断層破碎帯、割れ目帯の連続性を把握する手法である。また、試験の特性から言えば正確には、同手法はみずみちの連続性の探査検出手法と言うことができる。

平成7年度の流体流動電位法適用試験¹⁾では、坑道壁面上の割れ目帯と孔井とのつながりが推定でき、その有効性が確認された。そして、平成8年度の弾性波トモグラフィ²⁾では、得られた速度構造から、水みちの方向性が推定された。

今回は流体流動電位法からも水みちの方向性を推定することで平成7年度の流体流動電位法と平成8年度の弾性波トモグラフィの結果の妥当性の確認を目的としている。なお、自然電位の大きさとその発生する位置は比抵抗構造により変化する³⁾ことも予想されているため、流電電位法により推定された比抵抗構造を流体流動電位法解析にも用いる。また、流電電位法では孔口の開放状態と閉鎖状態での坑道壁面における見掛比抵抗の変化を調べ、同手法の割れ目帯把握技術への適用性を検討する。

4.1.1 試験領域

試験領域は550mL-NW坑道内に試錐されたKF-1孔（平成7年度試錐）の周辺である。本年度は新規試錐孔としてKF-3孔を既存のKF-1孔と平行（坑道から水平に15°、下向きに10°）な向きに削孔した。KF-3孔の口元位置はKF-1孔から坑道壁面上で坑道奥側に10m離され、坑道とKF-1孔に挟まれた位置関係となっている。KF-1孔の削孔深度は60.3mである。KF-3孔は45.5mとなった。図-4.1.1にKF-1孔およびKF-3孔の周辺図を示す。

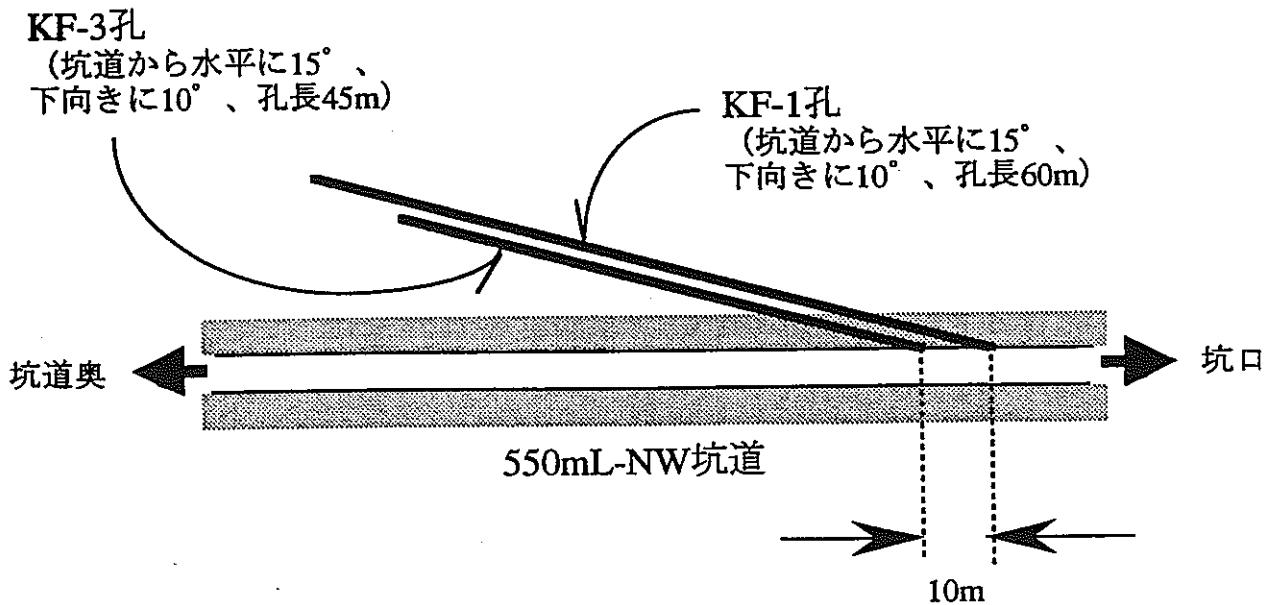


図-4.1.1 試験領域周辺図

4.1.2 実施試験項目とその目的

本試験では、割れ目検出技術の開発を目的として流体流動電位法、流電電位法の適用試験および、物理検層を実施した。これらの試験の目的を以下に記す。

1) KF-1孔、KF-3孔における流体流動電位法

KF-1孔、KF-3孔において流体流動電位法を実施し、孔井周辺の流体の流動に伴う電位変化を観測し、水みちの方向性を推定する。そして、平成7年度の流体流動電位法および平成8年度の弾性波トモグラフィの結果と比較検討することにより、各種探査法の適用性を評価する。

2) KF-3孔における流電電位法

KF-3孔において流電電位法を実施し、KF-3孔周辺の比抵抗構造を推定する。推定された比抵抗モデルは流動電位の解析に用いる。また、孔井の口元で湧水している時と閉鎖している時とで見掛比抵抗の変化を調べ、流電電位法の水みち探査への適用性を検討する。

3) KF-3孔における物理検層

KF-3孔周辺の割れ目帯、物性値分布の把握を目的に物理検層を行ない、各種探査法の結果と比較することで、弾性波トモグラフィ、流体流動電位法、流電電位法の適用性を検討した。実施した検層は、電気検層、自然電位検層、音波検層、温度検層、キャリパー検層、スピナー検層である。

4.2 断層破碎帯、割れ目帯の連続性把握技術の適用性

ここでは断層破碎帯、割れ目帯の連続性把握の各種調査手法の結果を総合的に解釈し、割れ目帯の連続性把握を行ない、各々の調査手法の適用性について検討する。

4.2.1 流体流動電位法結果と他調査手法結果との比較

コア鑑定、坑壁の割れ目観察等の地質調査から確認された割れ目の位置、走向とKF-1,3の孔口開放により発生した自然電位（SP）の変化量を比較した結果を図-4.2.1に示す。ここで示す自然電位（SP）の変化は孔口開放により発生した流動電位によるものと推定される。流動電位の発生原因となった流体の流れを仮想的に2極の点電流源に置き換えたモデルを図-4.2.2に示す。2極間の電流源の大きさは流体の上流と下流での圧力差を仮想的に意味し、負の電流源の位置は流体流動電位法において自然電位変化のピークが現れた地点を、正の電流源は流体流動電位法とスピナー検層の結果から湧水が推定される地点とした。このとき、6000 $\Omega \cdot \text{m}$ の均質媒質で解いた場合と流電電位法で推定したモデルで解いた場合に $\pm 0.01 \text{mA}$ の電流源を仮定して計算した結果を、それぞれ図-4.2.3、図-4.2.4に示す。流電電位法で推定したモデルでは低比抵抗部が存在している為、均質媒質のモデルと比較して発生する電位は小さくなるが電位のカーブは均質媒質で解いた場合とほぼ同様となり、流動電位から流体の流動方向を考察する上では均質媒質で解いても問題はないものと推定される。以下に図-4.2.1についてのコメントを記す。

- (1). 流体流動電位法において推定された2つの湧水区間(KF-3孔)は、KF-1孔の流量検層の結果、多くの湧水が認められる深度6~14mと28~33mの区間にそれぞれ近い位置関係にある。
- (2). スピナー検層において推定された湧水区間(KF-1,3孔)は流体流動電位法において推定された湧水区間(KF-3孔)および流量検層の結果多くの湧水が認められる深度28~33mの区間と一致する。
- (3). KF-1孔とKF-3孔それぞれの孔口開放による坑道壁面のSP変化のカーブは同様なカーブが得られた。これは孔口開放による岩盤中の流体の流れの変化がKF-1孔とKF-3孔ともに同じ水みちによるものであることを示すものと推測される。

KF-1, 3孔流体流動電位法

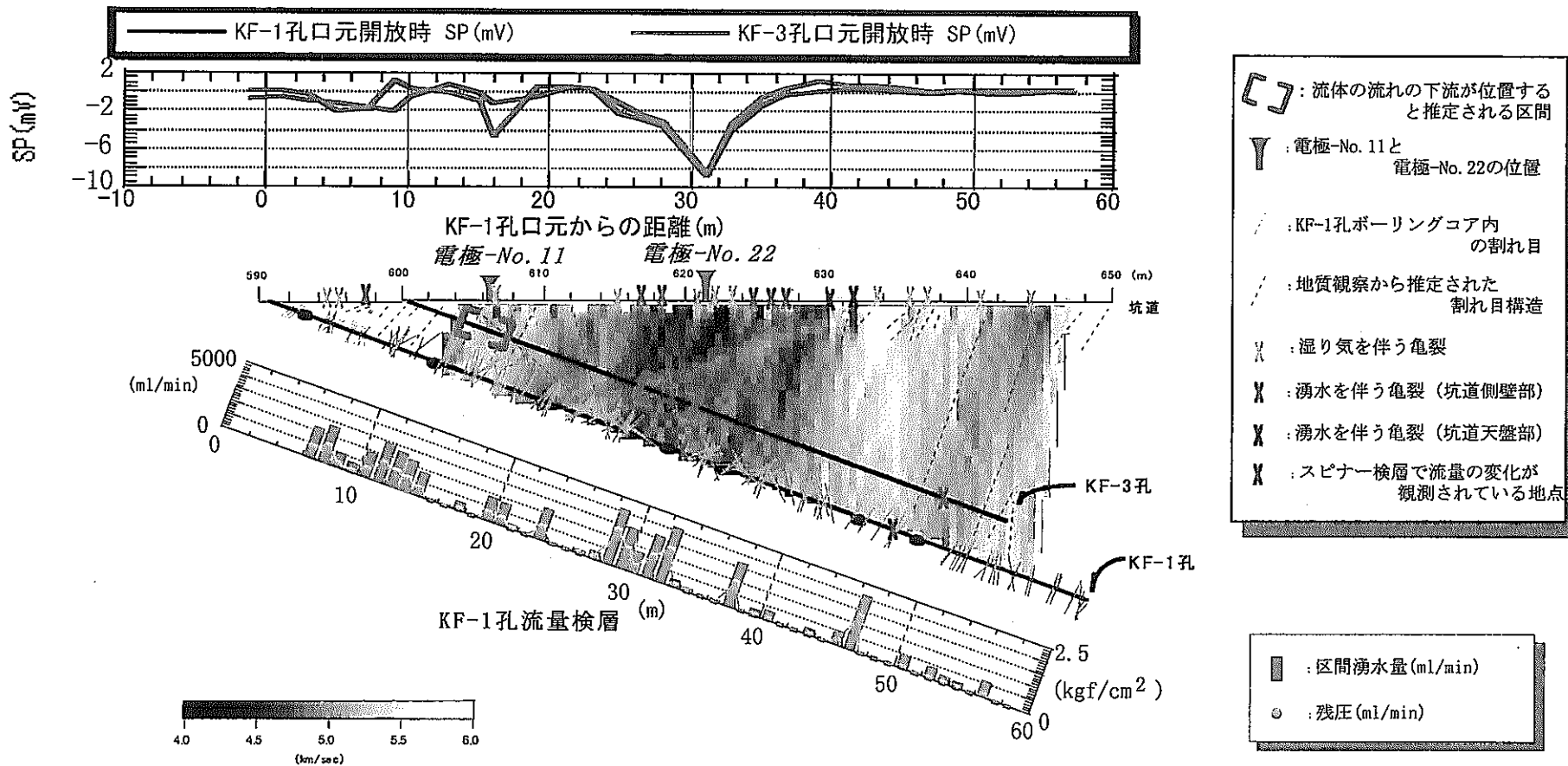


図-4.2.1 各種調査手法結果の比較(1)

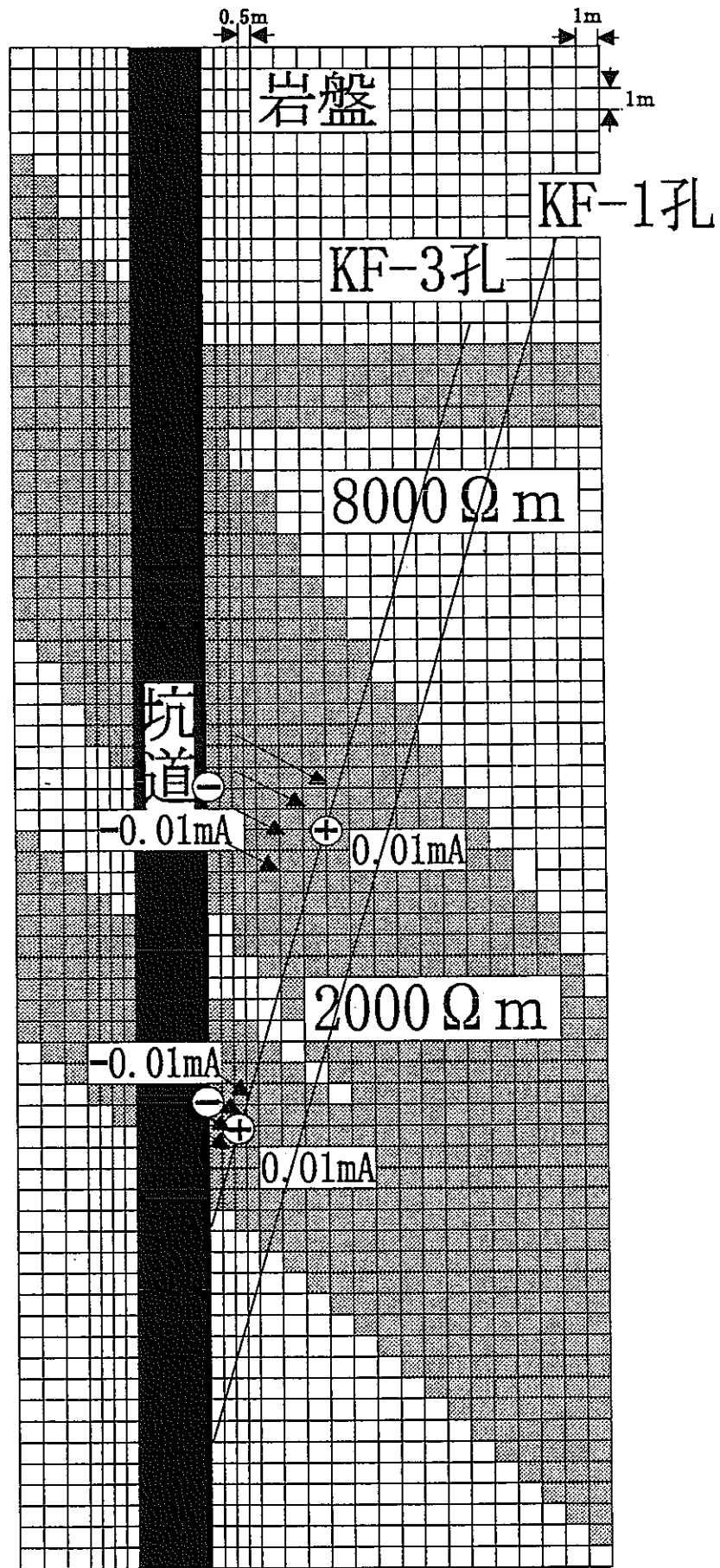


図-4.2.2 SPデータの仮想点電流源シミュレーションモデル

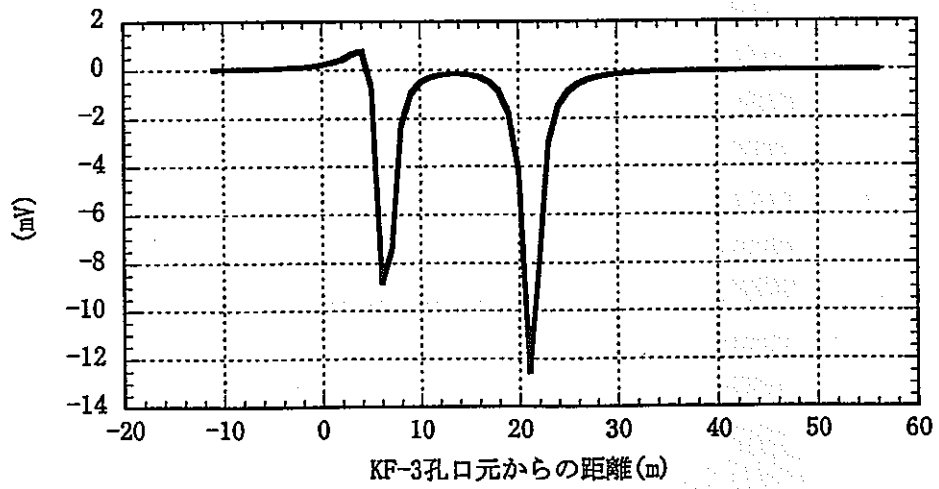


図-4.2.3 SPデータの仮想点電流源シミュレーション結果（均質媒質）

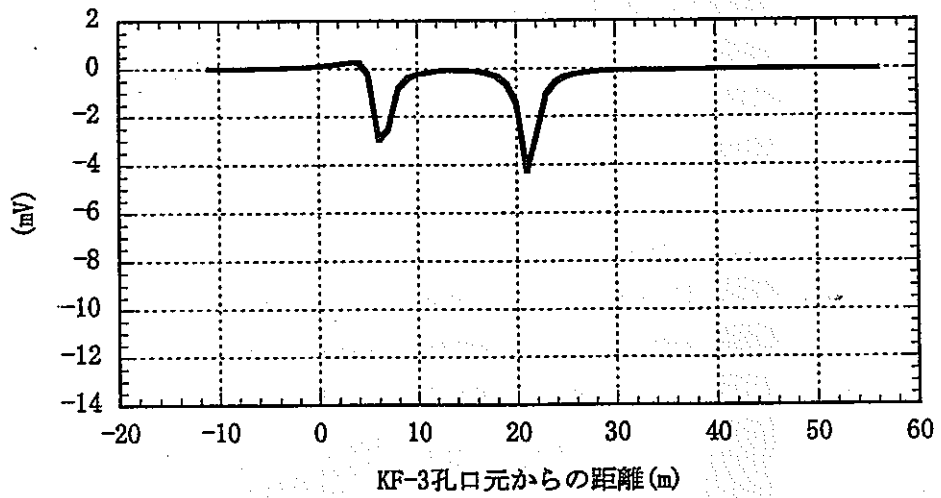


図-4.2.4 SPデータの仮想点電流源シミュレーション結果（推定モデル）

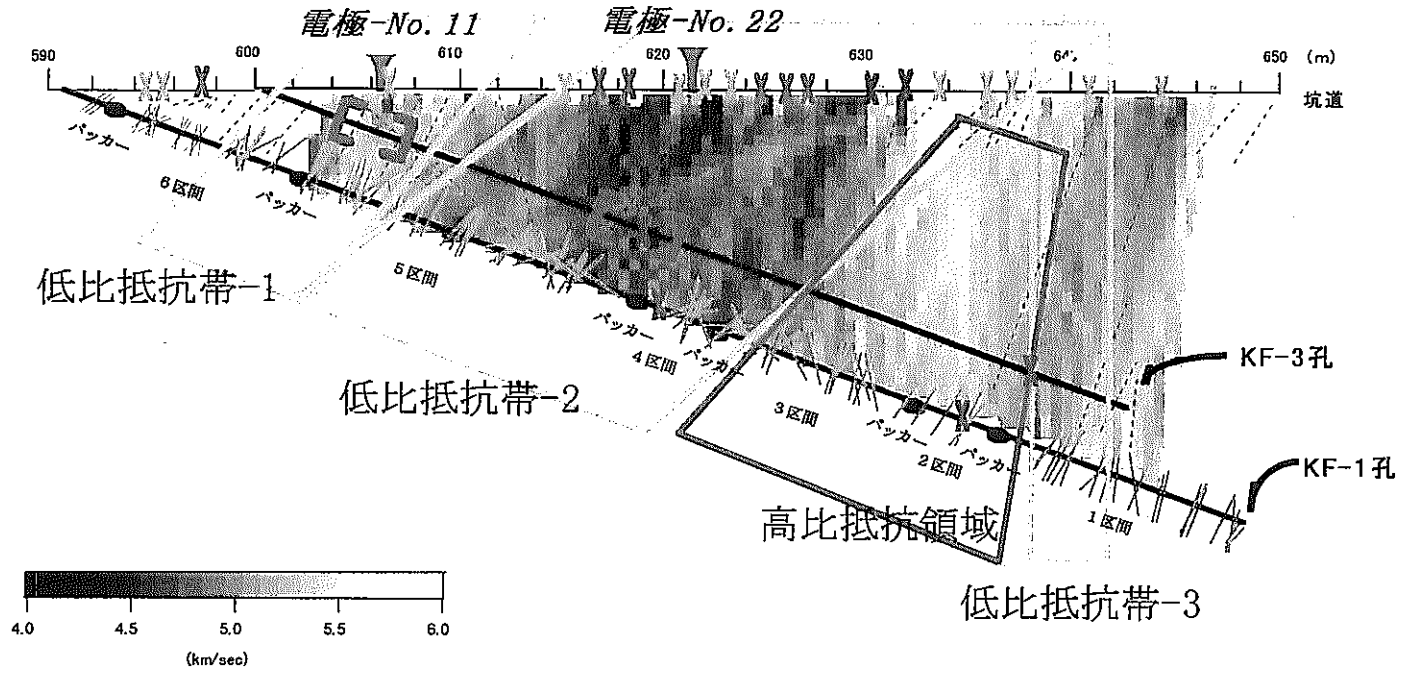
- (4). KF-1,3孔ともに孔口開放による坑道壁面のSP変化が現れているのは604～609m、613～629mとなっている。604～609mでは湿り気を伴う亀裂が存在しており、613～629mでは湿り気を伴う亀裂と坑道側壁から湧水を伴う亀裂が多く存在する区間である。
- (5). SP変化が認められる604～609mの領域はKF-3孔の4.07～7.25mと水理的連続性が推定される。
- (6). SP変化が認められる613～629mの領域はKF-3孔の17.07～21.20mと水理的連続性が推定される。

4.2.2 流電電位法により推定された比抵抗構造と弾性波トモグラフィにより得られた速度構造との比較

地質調査から確認されている割れ目の位置、走向と流電電位法のモデリングにより推定された比抵抗構造モデル、弾性波トモグラフィにより得られた速度構造を図-4.2.5にまとめて示す。比抵抗構造モデルは、大きく4つの領域に区分され、弾性波速度と比較したところ、以下の様になった。

- (1). 低比抵抗帯-1では低速度領域は明瞭に現れていない。
- (2). 低比抵抗帯-2は低速度値領域と一致した。
- (3). 低比抵抗帯-3付近には低速度帯が存在している。
- (4). 高比抵抗領域は高速度領域と一致した。

平成7年度⁴⁾、8年度²⁾の報告書を基にすると、一般的に割れ目帯および断層破碎帯では「低速度」、「低比抵抗」、「湧水割れ目の存在」が予想され、健岩部では「高速度」、「高比抵抗」、「湧水割れ目がほとんどない」が予想される。上記の(2)、(3)、(4)については、整合的であるが、(1)では低比抵抗帯が予想されるにもかかわらず低速度領域が明瞭に現れない結果となっている。



	: 流体の流れの下流が位置すると推定される区間		: 湿り気を伴う亀裂		: 流電電位法で低比抵抗と推定される領域
	: 電極-No. 11と電極-No. 22の位置		: 湧水を伴う亀裂 (坑道側壁部)		: 流電電位法で高比抵抗と推定される領域
	: KF-1孔ボーリングコア内の割れ目		: 湧水を伴う亀裂 (坑道天盤部)		
	: 地質観察から推定された割れ目構造		: スピナー検層で流量の変化が観測されている地点		

図-4.2.5 各種調査手法結果の比較(2)

4.2.3 物理検層結果と他調査手法結果との比較

KF-3孔におけるスピナー検層および流量検層の結果を図-4.2.6に示した。湧水が推定される区間は水色の帯で示した。

KF-1孔のスピナー検層では、深度32~33m付近での流量の変化が最も大きく、流量検層においても湧水が集中している区間である。また、流量検層においては深度46~47mにおいても大量の湧水が認められ、スピナー検層においても流量の変化が認められている。

KF-3孔のスピナー検層はゾンデの引き上げ速度を3m/minと8m/minで分けて測定したが、最も流量の変化が大きいのは、19~21m付近となり、KF-1孔における深度32~33m付近に対応するものと思われる。また、39~42mでも流量の変化が認められる。KF-1孔においても深度46~47m付近で、スピナー、流量検層ともに湧水量の比較的多い区間が存在しており、KF-3孔の39~42mと対応しているものと推定される。

KF-1孔とKF-3孔の音波検層の結果を弾性波トモグラフィ結果と比較し、図-4.2.7に示す。弾性波トモグラフィから推定される緑色の帯で示す低速度領域を緑色の枠で囲み方向性を判定した結果およびスピナー検層等で確認された湧水地点を併せて記している。

音波検層結果は弾性波トモグラフィ結果と比較すると速度変化に富み、緑色に示した低速度領域内においても低速度のはさみは多く存在するが高速度帯が含まれることが判る。このことから弾性波トモグラフィ解析においては割れ目、変質等を個別に表示することは難しく、これらの複雑な低・高速度帯を平滑化して解析されることが判る。また、KF-1孔、KF-3孔の音波検層結果を比較すると、それぞれの低速度帯、高速度帯を検層結果のみでは、つなぐことは難しく、坑内の弾性波速度が複雑に変化することが認められる。

電気検層結果と弾性波トモグラフィ結果を比較し、図-4.2.8に示すが、音波検層の場合と同様に、緑色で示した低速度領域内が一様に低比抵抗値とはならず、比抵抗値は変化に富むことが判る。また、KF-1孔とKF-3孔の低比抵抗帯は検層結果のみでは連続性の確認が難しい。

図-4.2.7と図-4.2.8で示している11番電極と22番電極は流体流動電位法で自然電位の異常が認められた地点であり、特に22番電極は最も異常の大きかった地点である。この22番電極とKF-1孔の深度約32m地点およびKF-3孔の深度約20m地点を結ぶ区間は、低速度構造の中央部に位置し、最も低速度を示す区間を横切るが、速度構造からは、この方向性は見いだせない。また、KF-1、3孔中でスピナー検層

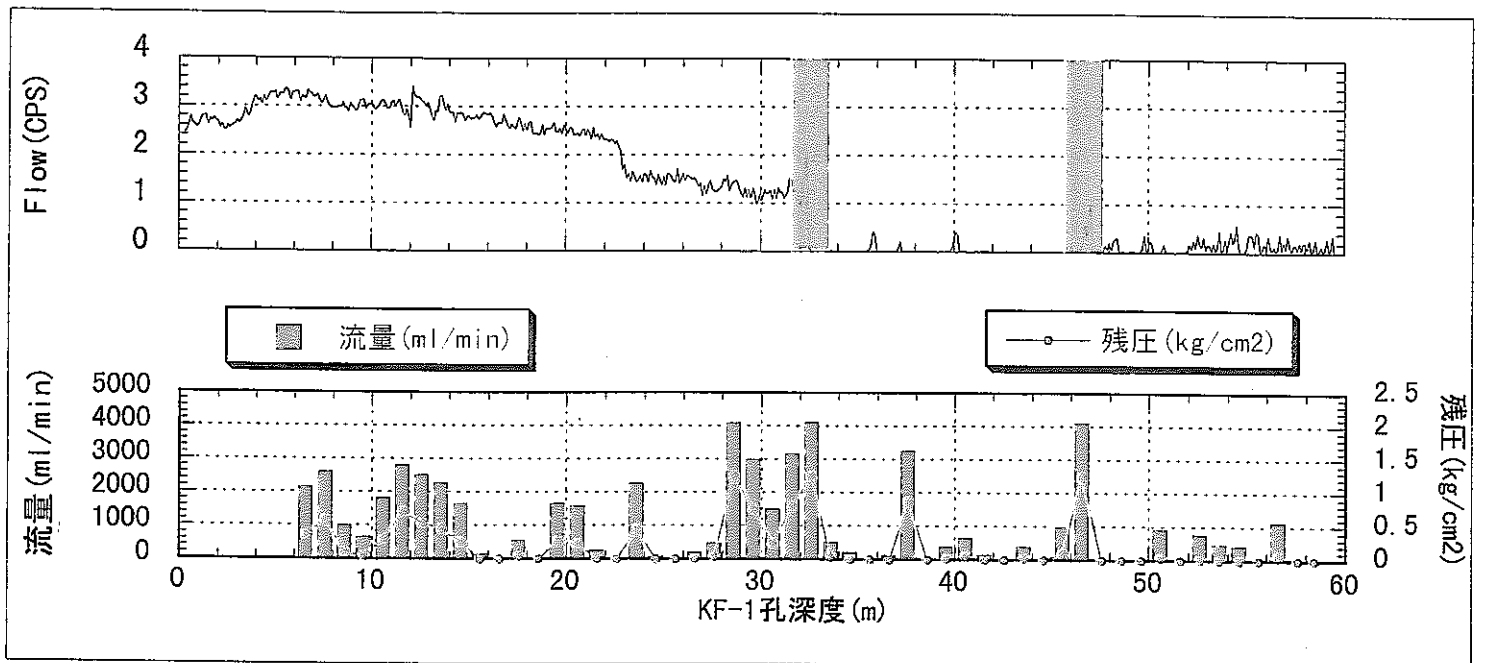
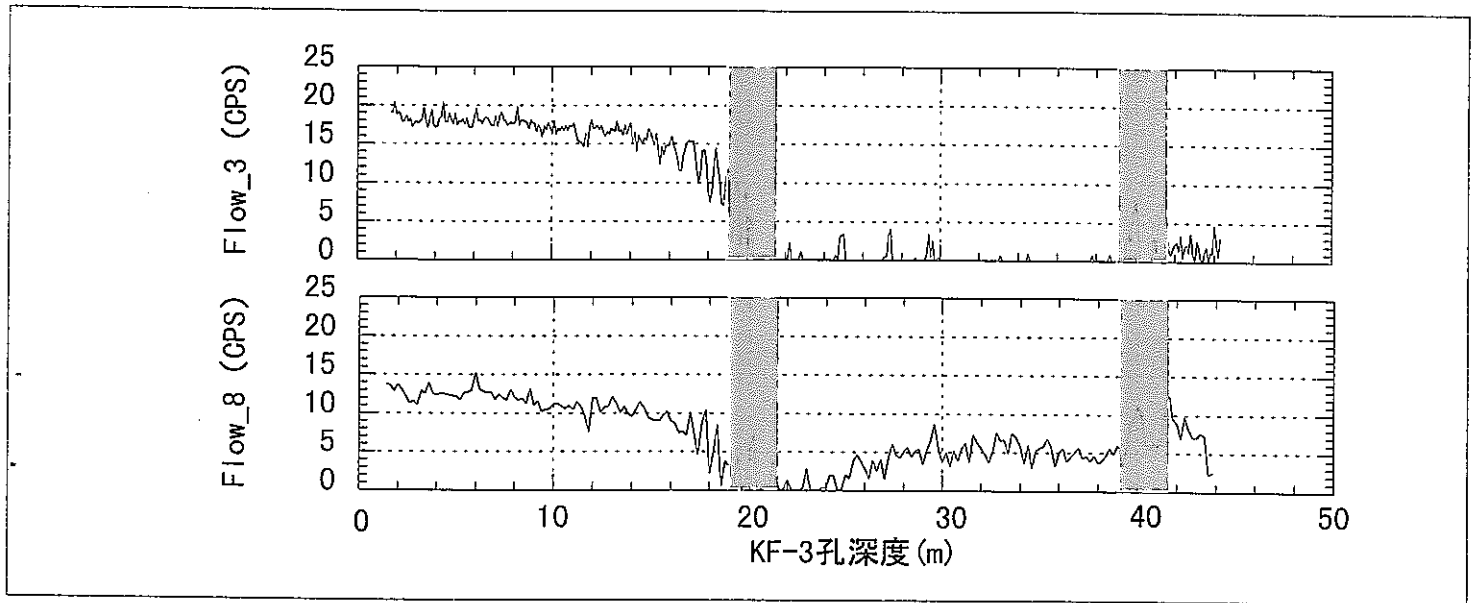


図-4.2.6 KF-1孔とKF-3孔でのスピナー、流量検層の比較

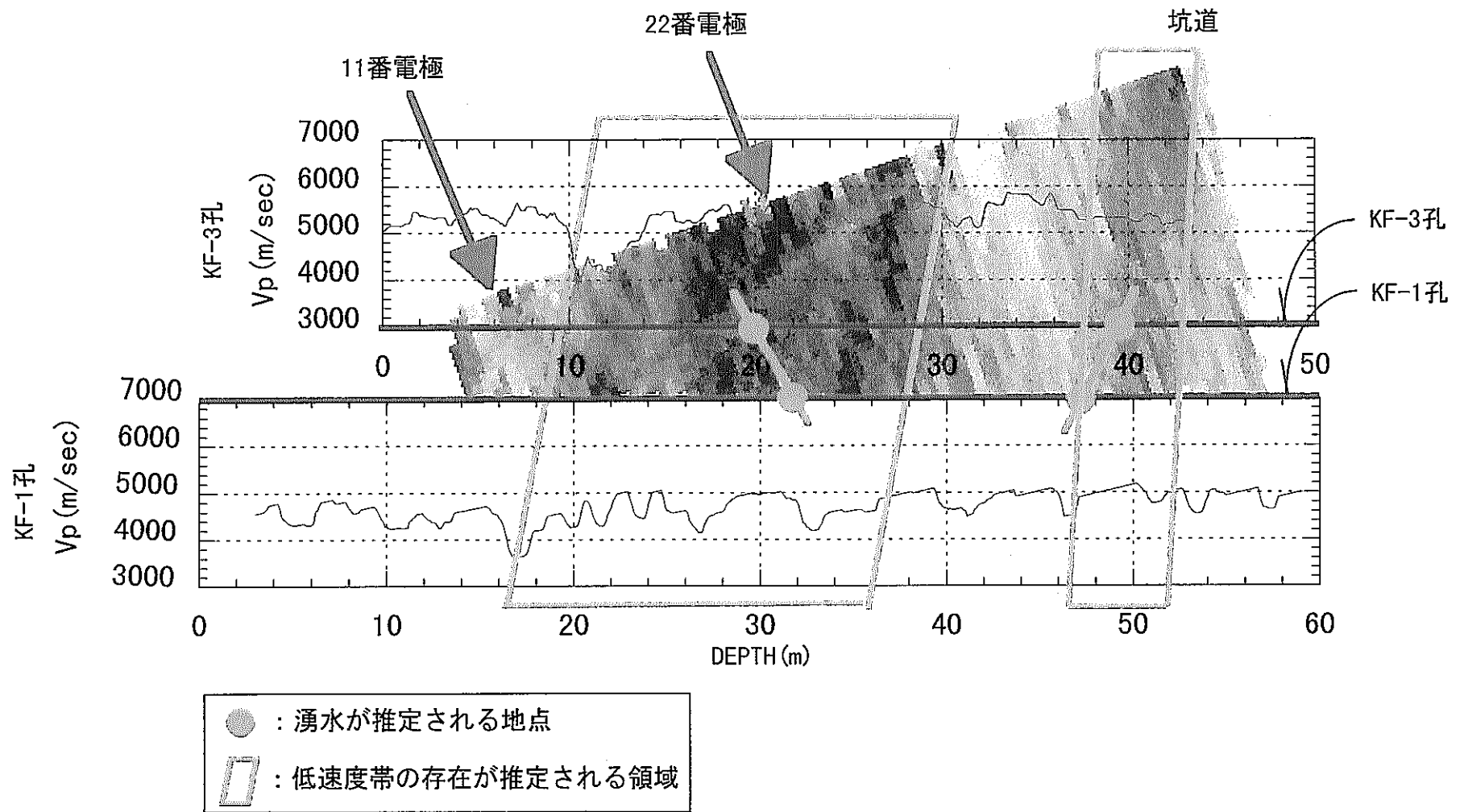


図-4.2.7 KF-1,3孔での音波検層と弾性波トモグラフィ結果の比較

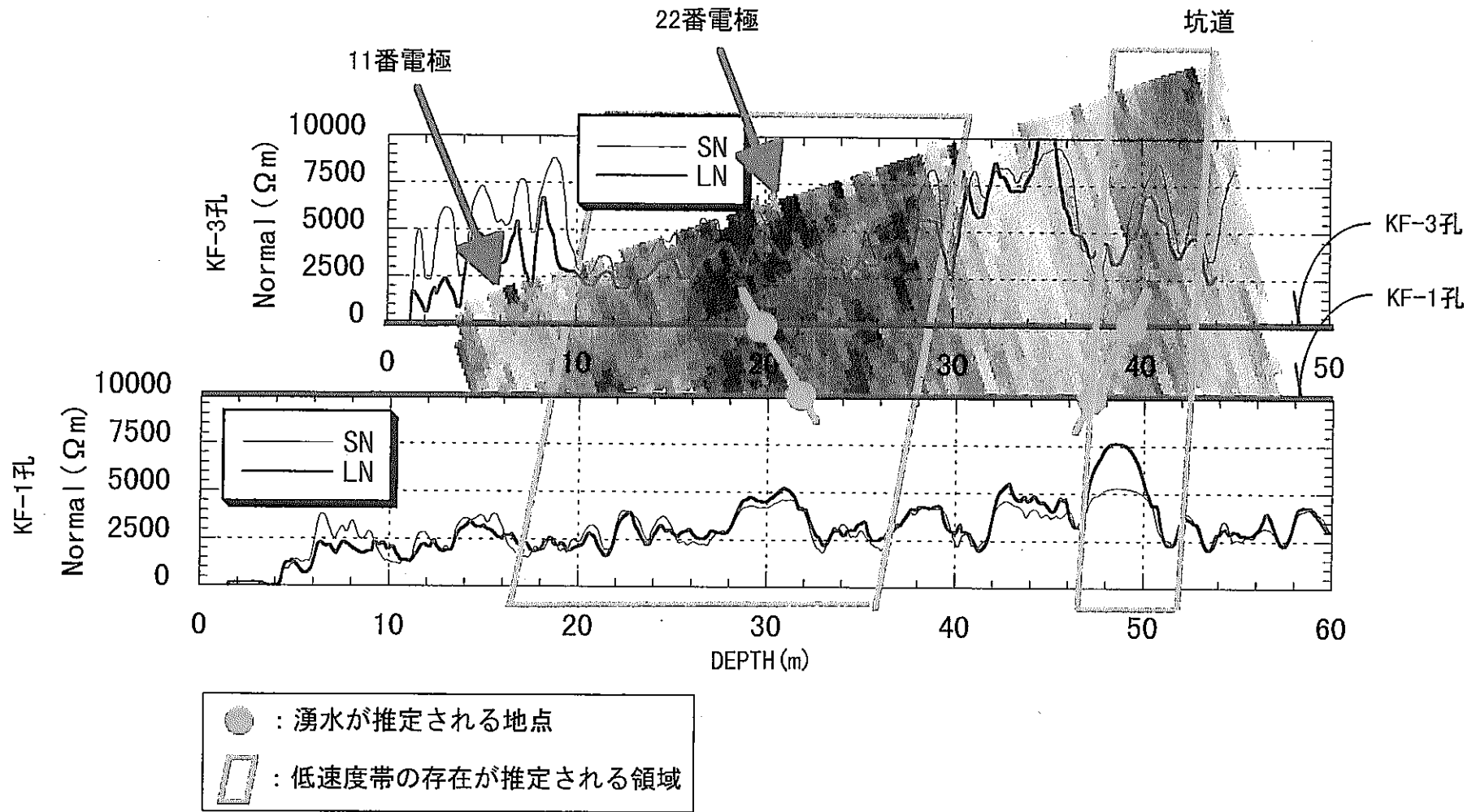


図-4.2.8 KF-1,3孔での電気検層と弾性波トモグラフィ結果の比較

により湧水が認められた各湧水地点を結ぶ区間も低速度帯の中央部に位置するが、速度構造からは、この方向性は見いだせない。これはKF-1、3孔周辺には弾性波トモグラフィで見られる様な大局的な構造の中に、複雑で小規模な構造が存在していることを示唆しているものと思われる。このため、今回測定した流動電位は複雑な地質構造や水みちを把握するのではなく、岩盤中の水みちのつながりの方向を大局的に把握しているものと思われる。また、スピナー検層で流量の変化が観測されているKF-1孔の深度約47m地点とKF-3孔の深度約40m地点に存在する水みちによるものと考えられるSPの応答は認められていない。その原因としては同水みちの方向がSPの測定領域をはずれるためか、もしくは湧水量が少ないためにSPを検出できなかったことによるものと推定される。

4.2.4 各種調査手法の適用性の評価

次に各物理検層データとこれまでの試験結果をまとめて図-4.2.9に示す。同図では弾性波トモグラフィより得られた速度構造から、KF-3孔周辺を(a)～(d)の4領域で大きく区分し、領域ごとでの各調査手法による結果を比較した。その結果を以下に記す。

- (1). 弾性波トモグラフィで高速度である(a)の領域はKF-3孔の電気検層では高比抵抗、音波検層では高速度となっているが、KF-1孔の電気検層では低比抵抗、音波検層では低速度となっている。
- (2). 弾性波トモグラフィで低速度である(b)の領域はKF-1,3孔両孔の電気検層で低比抵抗、音波検層で低速度となっている。
- (3). 弾性波トモグラフィで高速度である(c)の領域はKF-1,3孔両孔の電気検層で高比抵抗、音波検層で高速度となっている。
- (4). 弾性波トモグラフィで低速度である(d)の領域はKF-3孔の音波検層では低速度となっているが、KF-1孔では高速度となっている。
- (5). 弾性波トモグラフィで低速度である(d)の領域はKF-1,3孔両孔の電気検層で高比抵抗となっている。両孔の電気検層では(d)の領域よりもやや深い区間で低比抵抗となっている。
- (6). 弾性波トモグラフィでは高速度である(a)の領域で、流量検層の結果、湧水が認められている。
- (7). 弾性波トモグラフィで低速度である(b)の領域では、流量検層の結果、湧水が認められている。
- (8). 弾性波トモグラフィで高速度である(c)の領域では、流量検層の結果でも湧水は少ない。
- (9). 弾性波トモグラフィで低速度である(d)の領域では、流量検層の結果、

KF-1, 3孔流体流動電位法

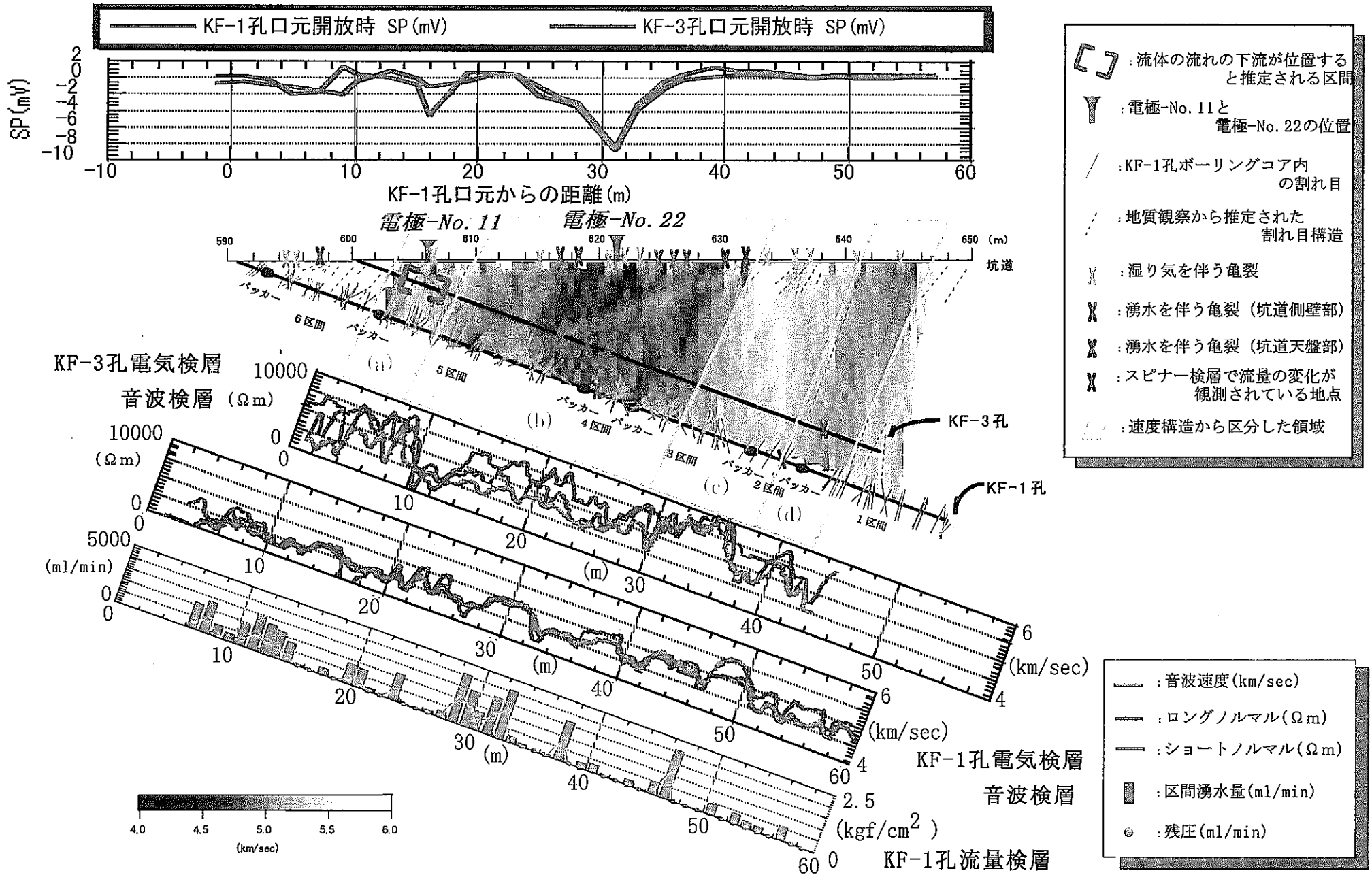


図-4.2.9 各種調査手法結果の比較(3)

湧水が認められている。

(10). 弾性波トモグラフィで高速度である(a)の領域では、流体流動電位法の結果、孔井-坑道間に水理的連続性が推定されている。

(11). 弾性波トモグラフィで低速度である(b)の領域では、流体流動電位法の結果、孔井-坑道間に水理的連続性が推定されている。

これらの領域について各種調査手法の適用性を各々の領域で簡単にまとめ表-4.2.1に示す。また、同表においては、当初の予想に反した結果を得たものに関してはセル内をグレーに塗りつぶしてある。当初の予想については平成7年度、8年度の同報告書を基にすると、一般的に割れ目帯および断層破碎帯では「低速度」、「低比抵抗」、「湧水割れ目の存在」が予想される。そして、健岩部では「高速度」、「高比抵抗」、「湧水割れ目がほとんどない」が予想される。領域(b)と領域(c)については、全ての手法で整合的な結果が得られた。しかし、領域(a)や(d)の様に多量の湧水が認められるにもかかわらず、比抵抗の大小、速度値の大小が調査手法により異なる領域も認められた。このことから、比抵抗と速度値だけの「水みち」の把握は難しいものと考えられる。各種調査手法の適用性を以下に記す。

- 流体流動電位法においては、多量の湧水が認められている領域(a)と(b)において流体の流れの存在が検出された。そして、同手法が岩盤中の大局的な水みちの方向を示唆するものであることが推定された。しかし、検出された電位は数mVと非常に小さく、今後はS/N比の向上が重要な課題となる。
- 流電電位法については、解析方法がモデリングであるために詳細な比抵抗構造の把握は難しかった。坑道壁面における局所的な比抵抗の変化を確認するにはウェンナー法水平探査、坑道と平行でない比抵抗構造の変化ならば孔井-坑道間の比抵抗トモグラフィを実施することが望ましいと思われる。
- 電気検層、音波検層では、孔井内の物性値の分布を詳細に捉えることはできたが、これらの物性値から水みちの有無を推定することはできなかった。
- スピナー検層は、孔井内の湧水地点の把握に有効であることがわかった。

表-4.2.1 各種調査手法の適用性

速度領域 調査手法	(a) 高速度領域	(b) 低速度領域	(c) 高速度領域	(d) 低速度領域
地質調査 (流電電位法モデル)	多くの割れ目帯が存在する。 (低比抵抗領域)	多くの割れ目帯が存在する。 (低比抵抗領域)	割れ目帯はほとんど存在しない。 (高比抵抗領域)	割れ目帯が存在する。 (低比抵抗領域の位置はややずれている)
KF-1-電気検層	おおよそ低比抵抗領域と判断される。	おおよそ低比抵抗領域と判断される。	おおよそ高比抵抗領域と判断される。	低比抵抗領域の位置はややずれている。
KF-3-電気検層	おおよそ高比抵抗領域と判断される。	おおよそ低比抵抗領域と判断される。	おおよそ高比抵抗領域と判断される。	低比抵抗領域の位置はややずれている。
KF-1-P波検層	おおよそ低速度領域と判断される。	おおよそ低速度領域と判断される。	おおよそ高速度領域と判断される。	おおよそ高速度領域と判断される。
KF-3-P波検層	おおよそ高速度領域と判断される。	おおよそ低速度領域と判断される。	おおよそ高速度領域と判断される。	おおよそ低速度領域と判断される。
KF-1-流量検層	多量の湧水が認められる。	多量の湧水が認められる。	湧水は少ない。	湧水が認められる。
KF-1-スピナー検層	明瞭な流速の変化は検出されない。	明瞭な流速の変化を検出	明瞭な流速の変化は検出されない。	流速の変化を検出
KF-3-スピナー検層	明瞭な流速の変化は検出されない。	明瞭な流速の変化を検出	明瞭な流速の変化は検出されない。	流速の変化を検出
流体流動電位法	流体の流れの変化が推定される。	流体の流れの変化が推定される。	流体の流れの変化は推定されない。	流体の流れの変化は推定されない。

しかし、領域(a)での結果の様に、既に流速がある場合の新たなわずかな流速の変化を捉えるのは難しかった。孔井内のわずかな湧水量を検出するにはKF-1孔で行なったダブルバッカーを用いた流量検層が望ましい。

4.3 まとめ

断層破碎帯、割れ目帯の連属性把握技術の開発を目的として流体流動電位法、流電電位法、物理検層を実施した。

流体流動電位法においては平成7年度の試験において推定できなかった坑道壁面と孔井内の各湧水亀裂の連属性を把握する目的で、新規試錐孔の削孔中における坑道壁面でのSP観測、削孔中断時の同孔口元開閉による坑道壁面でのSP観測を行なったところ、湧水が急激に増加する深度に達すると坑道壁面にてSPの変化が認められ、流体流動電位法が岩盤中の水理的連続性の把握に有効な手法であることが確認された。また、既存の試錐孔においてもパッカーシステムを用いることで任意深度での口元開閉による坑道壁面でのSP変化を捉えることができることを確認した。

流電電位法においては本年度は線電流源を用いて実施した。そして平成7年度に推定した比抵抗構造モデルで今回得られた見掛比抵抗曲線はおおよそ説明でき、同モデルの検証ができた。また、同手法においては孔井の口元が開放され湧水中のときと閉鎖中のときの見掛比抵抗の変化を測定したところ、見掛比抵抗はわずかであるが低下傾向を示し、みずみち把握をする上での比抵抗探査適用の可能性が示唆された。

物理検層において得られたデータは変化に富んでおり、弾性波トモグラフィ、流電電位法で推定された大局的な構造の中に極めて複雑な構造が存在していることが推定された。このため、水みちにおいても複雑な構造が予想され、弾性波トモグラフィ、流電電位法で推定することは難しいが、水みちのつながりについては流体流動電位法において推定することができ、流体流動電位法の水みち探査への適用性が示唆された。

5. 深部岩盤の力学特性の調査・解析

5.1 調査の目的および概要

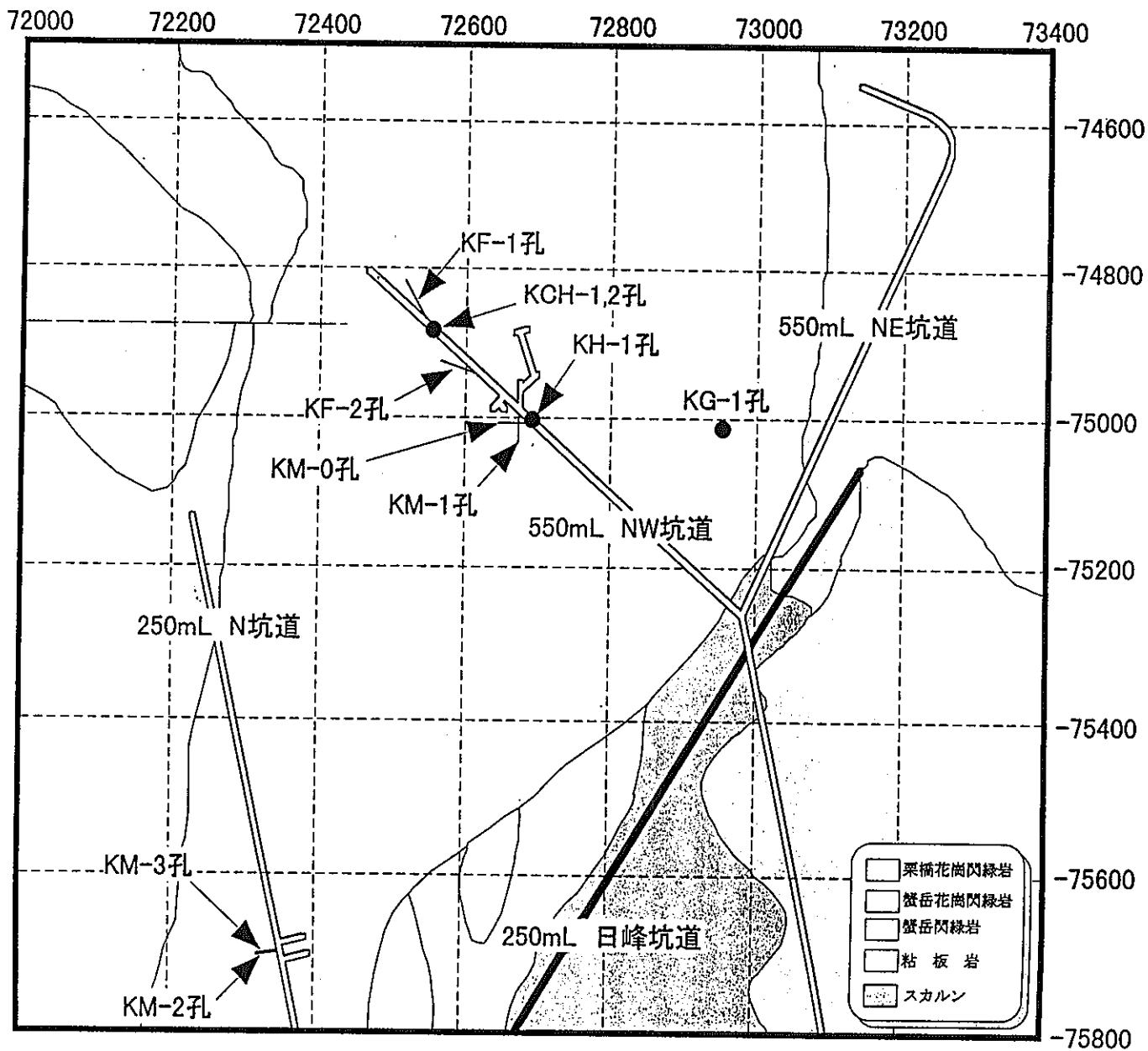
深部岩盤の力学特性の深度依存性の把握を目的として、550mレベル原位置試験場における既存試錐孔（KCH-1,2孔、KM-0,1孔）および250mレベル原位置試験場における既存試錐孔（KM-2孔）の岩芯を用いた室内試験（一軸圧縮、圧裂引張、弾性波速度、密度、有効間隙率、飽和度、含水比）を実施した。さらに、これらの力学特性に関するデータを解釈する上での基礎情報を取得することを目的として、550mレベル原位置試験場における既存試錐孔（KCH-1,2孔、KM-0,1孔）および250mレベル原位置試験場における既存試錐孔（KM-2,3孔）の岩芯を用いてマイクロラック観察および鉱物分析を実施した。一方、平成7年度までに実施された弾性波速度の測定結果については、種々の要因（例えば、使用する発信子、受信子の周波数特性の違い）により測定結果に著しい差が認められることが指摘された。そこで、250mレベル原位置試験場における既存試錐孔（KM-3孔）の岩芯を用いて含水比および発信子、受信子の共振周波数を変えた弾性波速度測定を実施し、測定条件の変化に対応する弾性波速度を測定し、弾性波速度測定の適用性を検討した。

さらに、断層破碎帯あるいは割れ目帯の力学特性を把握することを目的として、平成9年度に新規に掘削した試錐孔（KF-3孔）を用いて孔内載荷試験を実施した。

550mレベルおよび250mレベルの原位置試験場と各試錐孔の位置を図-5.1.1に示す。

5.2 力学特性調査

平成7年度までに実施された室内試験においては、主として550mレベル原位置試験場、250mレベル原位置試験場の既存試錐孔およびKH-1孔の岩芯を用いて試験を実施し、栗橋花崗閃緑岩中における力学特性の深度依存性についての検討を行ってきた。しかしながら、550mレベルの既存試錐孔（KM-0,1孔）で実施した室内試験の結果が他の試錐孔で実施した試験結果と著しく異なる結果を示した。このような背景から、本年度は、550mレベル原位置試験場における既存試錐孔（KCH-1,2孔、KM-0,1孔）および250mレベル原位置試験場における既存試錐孔（KM-2孔）の岩芯を用いた室内試験（一軸圧縮、圧裂引張、弾性波速度、密度、有効間隙率、飽和度、含水比等）を実施し、平成7年度までに取得した室内試験のデータと併



* 地質図は550mL坑道における平断面図

せて栗橋花崗閃緑岩における力学特性の深度依存性について再検討した。さらに、これらの室内試験により得られたデータを地質学的に解釈することを目的として、種々の既存試験錐孔の岩芯を用いて薄片を作成し、マイクロクラック観察・鉱物分析を実施した。

5.2.1 室内試験

平成7年度までに取得した室内試験データと本年度新たに取得した室内試験データを用いて、栗橋花崗閃緑岩における力学特性の深度依存性に関する検討を行う。なお、ここで用いるデータとしては測定データの信頼性、測定機関および測定機器の統一性を考慮して、表-5.2.1に示す試験結果を採用する。

表-5.2.1 力学特性の深度依存性の検討に用いた試験結果

試験錐孔	実施年度	標高	被り高さ
KH-1	平成7年度(1995)	0~500m	260~760m
KM-3	平成7年度(1995)	250m	730m
KM-0,1	平成9年度(1997)	550m	260m
KM-2	平成9年度(1997)	250m	730m

単位体積重量

まず最初に、単位体積重量と被り高さの関係をプロットしたものを図-5.2.1に示す。

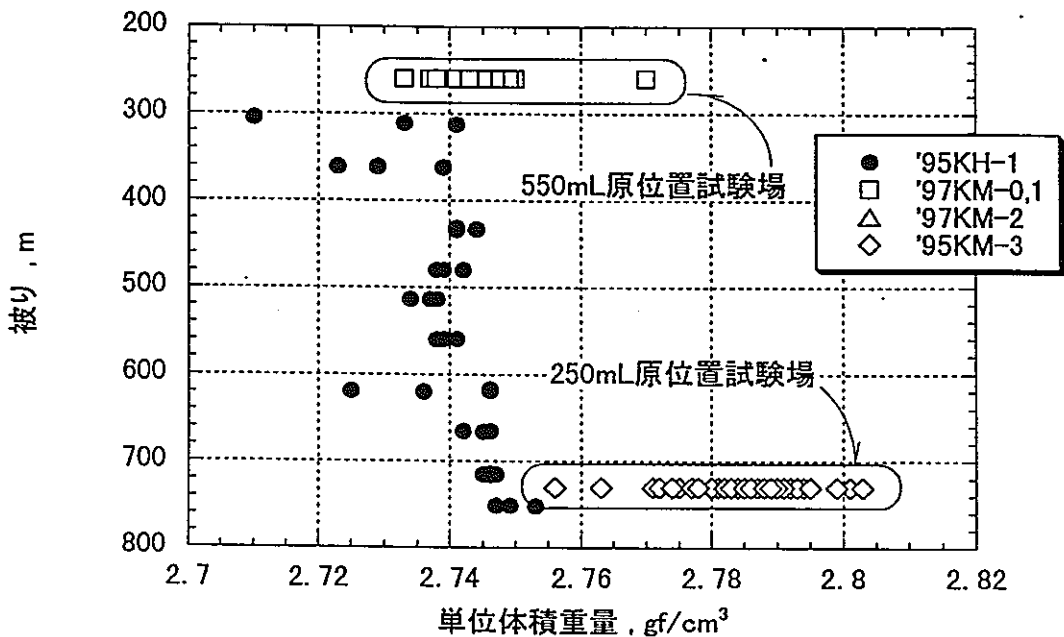


図-5.2.1 単位体積重量と被り高さの関係

図-5.2.1に示すように、単位体積重量については被り高さが増加するにしたがって値が増加する傾向を示す。すなわち、KH-1孔については2.710~2.749gf/cm³の間で被り高さの増加とともに単位体積重量も増加する。これに対して、550mレベル原位置試験場および250mレベル原位置試験場の試験結果はKH-1孔の試験結果と若干異なった位置にプロットされる。具体的には、550mレベル原位置試験場では平均値が2.744gf/cm³、250mレベル原位置試験場では平均値が2.789gf/cm³となり同じ被り高さのKH-1孔のデータと比較して若干大きめの値を示す。これは主として構成鉱物の違いに起因しているものと考えられる。この構成鉱物の違いについての詳細は後述するが、250mレベル原位置試験場の試験孔では550mレベル原位置試験場の試験孔と比較して有色鉱物の多さが肉眼でも観察され、比較的黒っぽく見えるという特徴を有する。

飽和度および有効間隙率

次に、飽和度と被り高さの関係をプロットしたものを図-5.2.2に示し、有効間隙率と被り高さの関係をプロットしたものを図-5.2.3に示す。自然状態の飽和度については、KH-1孔の深度方向さらには550mレベル原位置試験場、250mレベル原位置試験場を比較しても顕著な深度依存性は認められず、概ね40~80%付近に分布している。これに対し、有効間隙率については550mレベル原位置試験場と250mレベル原位置試験場を比較すると、両者の差はほとんど認められず、概ね0.3~0.6%の範囲に分布している。一方、KH-1孔の深度方向に着目すると、若干ではあるが被り高さの増加に伴い有効間隙率が低下する傾向が認められ、その低下率は約0.1%/500mである。

P波、S波速度

P波速度と被り高さの関係をプロットしたものを図-5.2.4に示し、S波速度と被り高さの関係をプロットしたものを図-5.2.5に示す。まず、P波速度については550mレベル原位置試験場の平均値が4.8km/sec、250mレベル原位置試験場の平均値が5.0km/secであり、両試験場さらにはKH-1孔についても顕著な深度依存性は認められない。また、S波速度については550mレベル原位置試験場の平均値が3.0km/sec、250mレベル原位置試験場の平均値が3.1km/secである。S波速度についてもP波速度と同様に顕著な深度依存性は認められない。

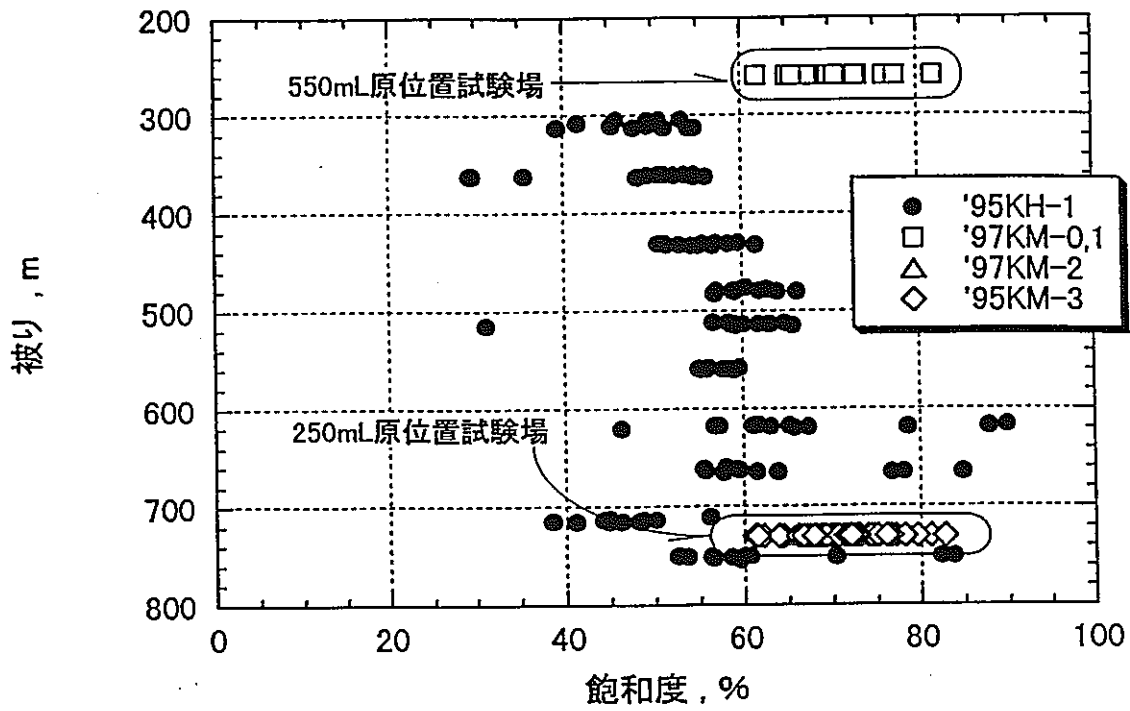


図-5.2.2 飽和度と被り高さの関係

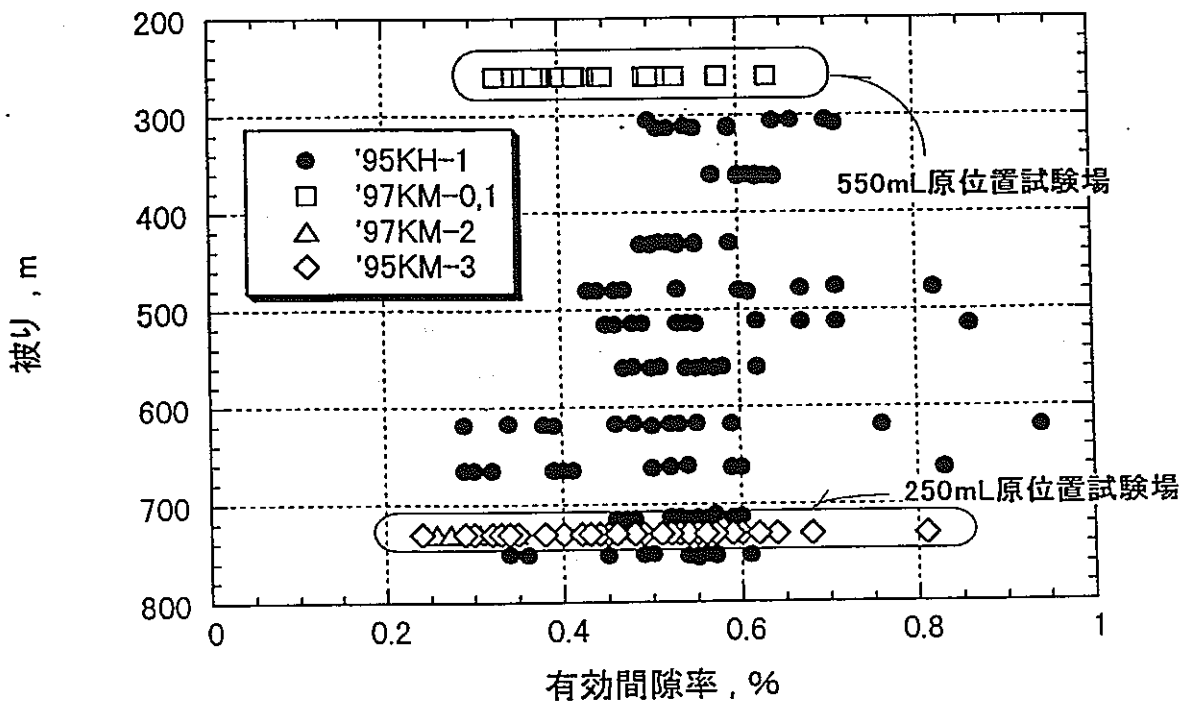


図-5.2.3 有効間隙率と被り高さの関係

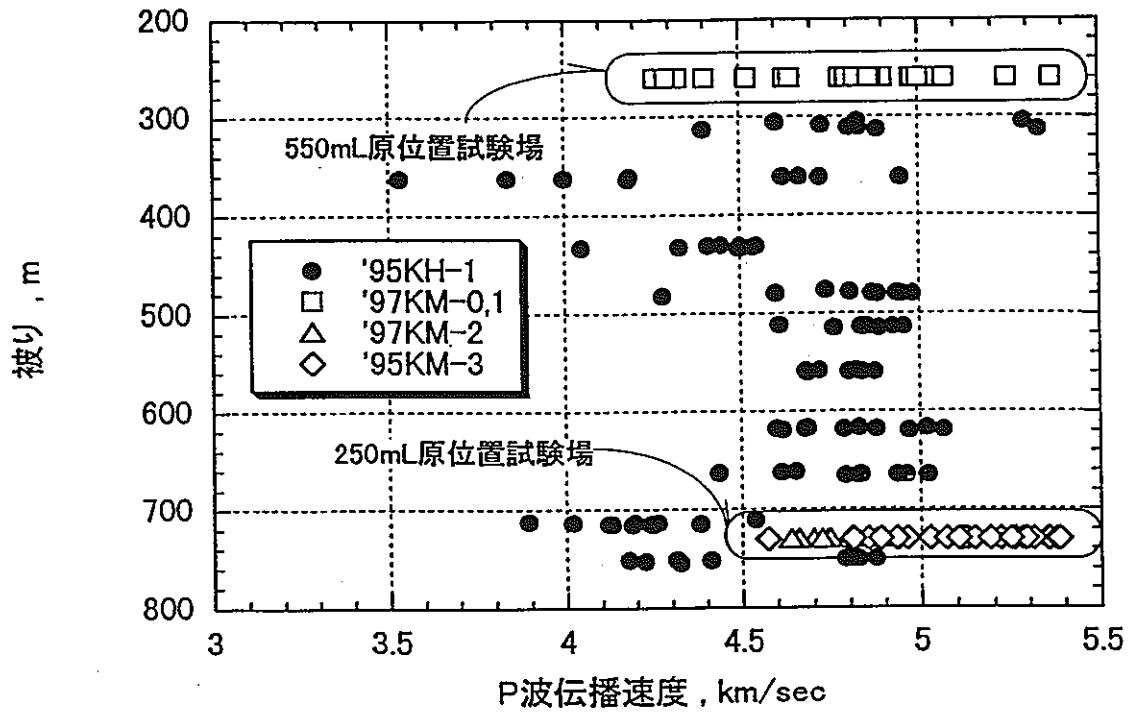


図-5.2.4 P波伝播速度と被り高さの関係

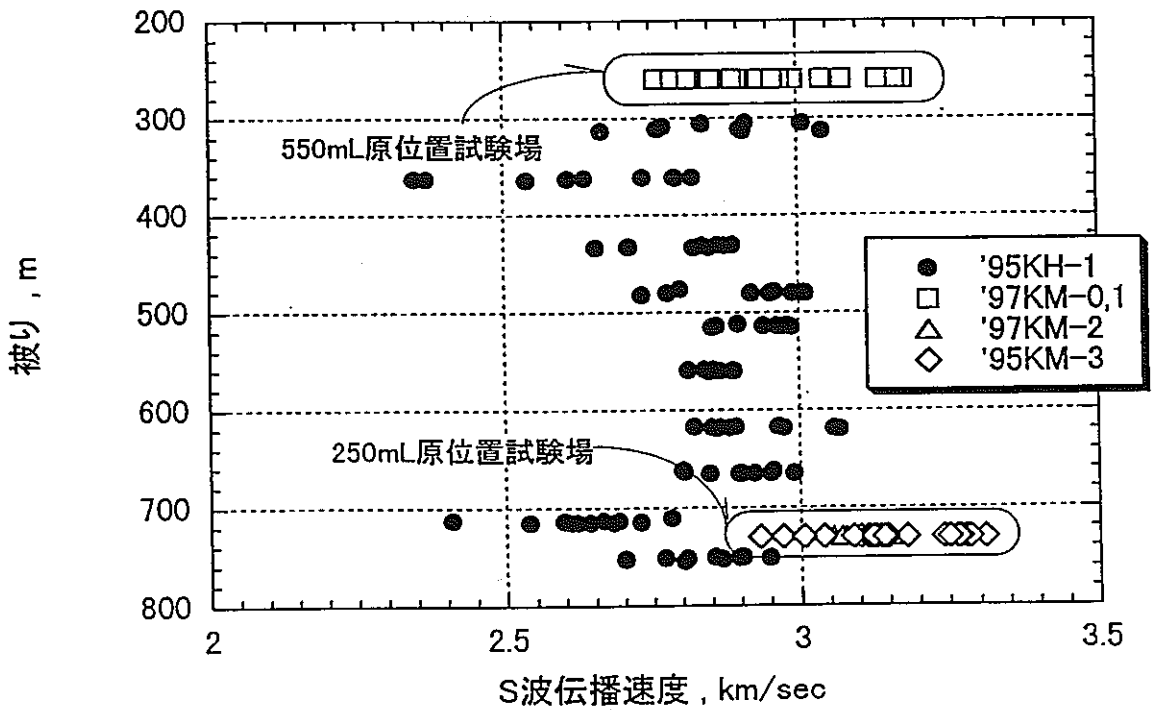


図-5.2.5 S波伝播速度と被り高さの関係

一軸圧縮強度および静弾性係数

一軸圧縮強度と被り高さの関係をプロットしたものを図-5.2.6に示す。さらに、静弾性係数と被り高さの関係をプロットしたものを図-5.2.7に示す。一軸圧縮強度については、550mレベル原位置試験場で最小値が131.3MPa、最大値が179.4MPa、平均値が163.5MPaを示す。これに対し、250mレベル原位置試験場では最小値が128.3MPa、最大値が175.3MPa、平均値が156.8MPaを示すが、両試験場については一軸圧縮強度の深度依存性は認められない。一方、KH-1孔についても同様に、最小値が128.4MPa、最大値が181.2MPa、平均値が163.6MPaを示すが、深度方向に対する一軸圧縮強度の深度依存性は認められない。また、静弾性係数については、550mレベル原位置試験場で最小値が51.6GPa、最大値が68.0GPa、平均値が61.7GPaを示す。これに対し、250mレベル原位置試験場では最小値が53.0GPa、最大値が77.9GPa、平均値が64.7GPaを示すが、両試験場については静弾性係数の深度依存性は認められない。KH-1孔についても同様に、最小値が53.0GPa、最大値が77.9GPa、平均値が64.7GPaを示すが、深度方向に対する静弾性係数の深度依存性は認められない。

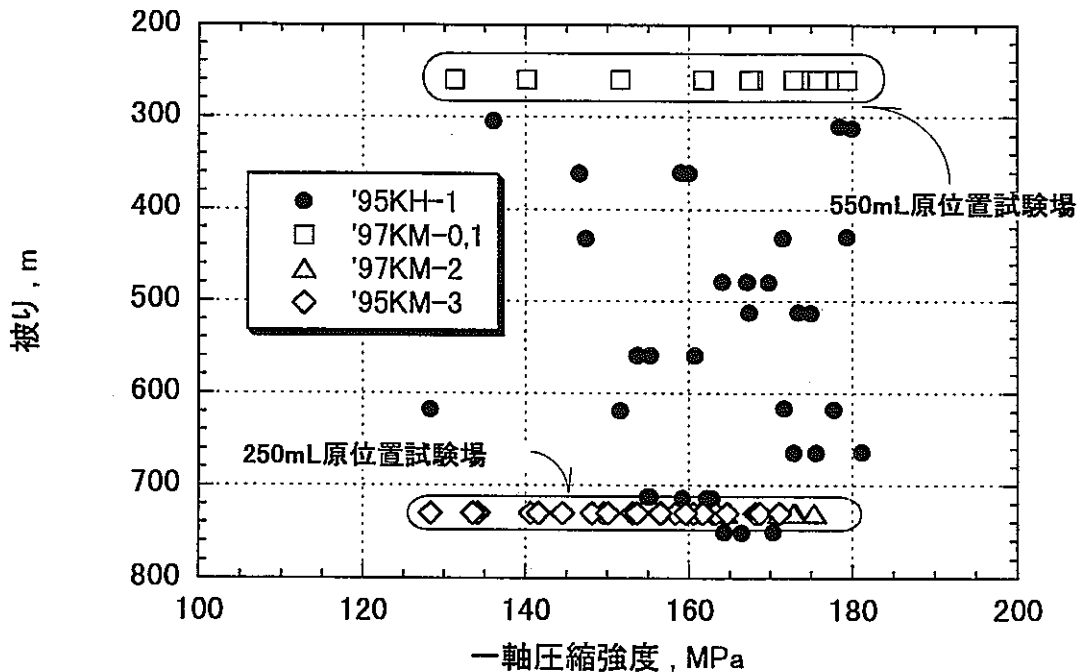


図-5.2.6 一軸圧縮強度と被り高さの関係

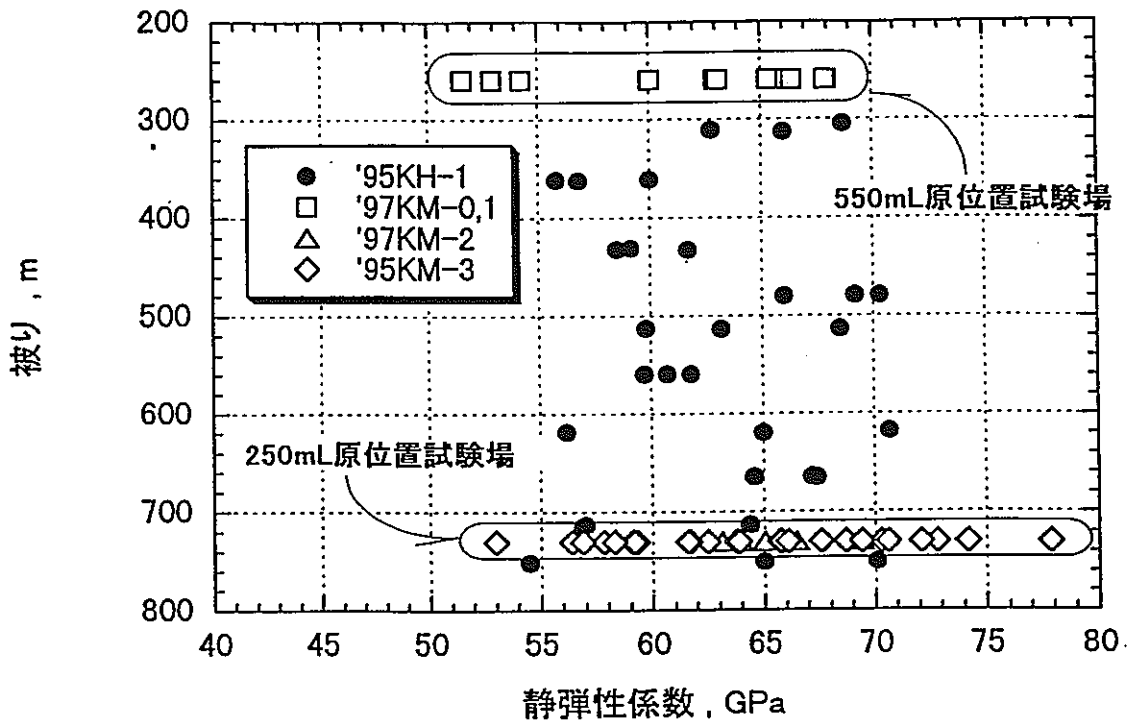


図-5.2.7 静弾性係数と被り高さの関係

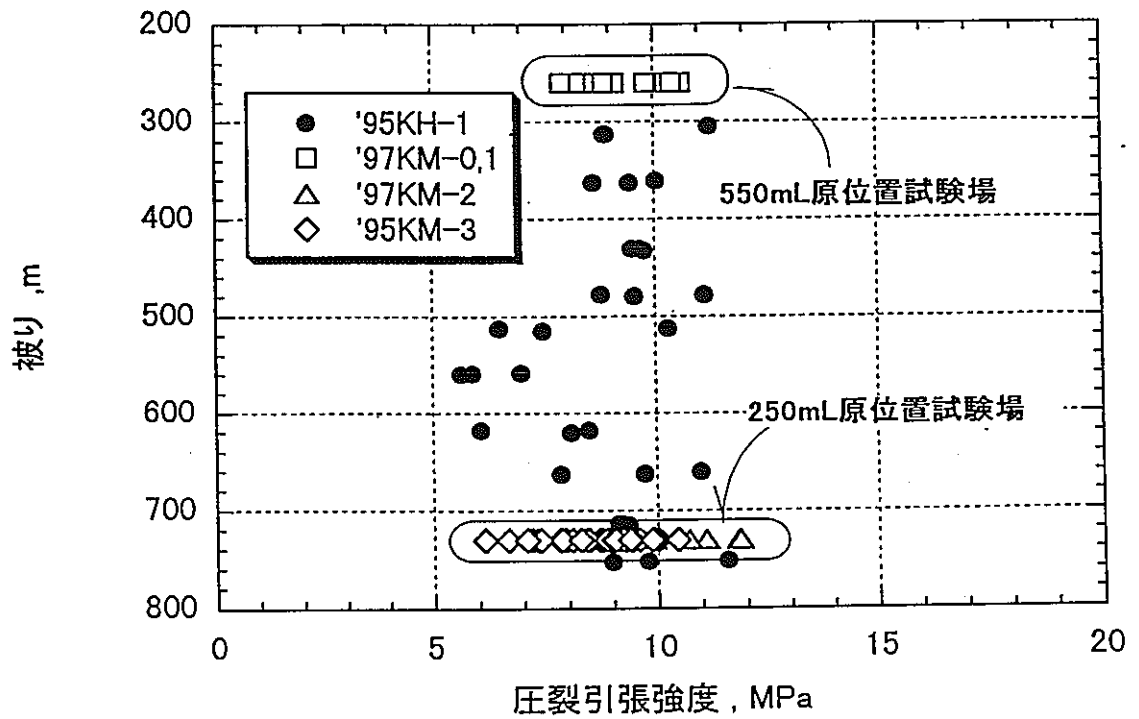


図-5.2.8 圧裂引張強度と被り高さの関係

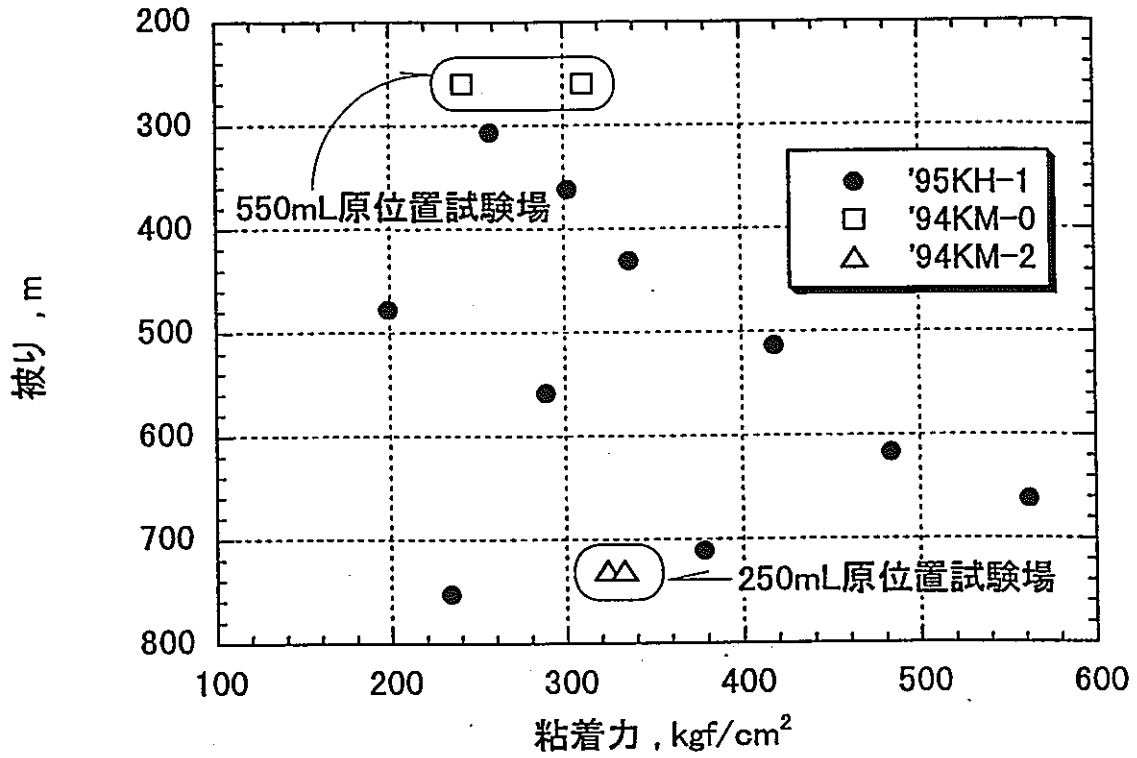


図-5.2.9 粘着力と被り高さの関係

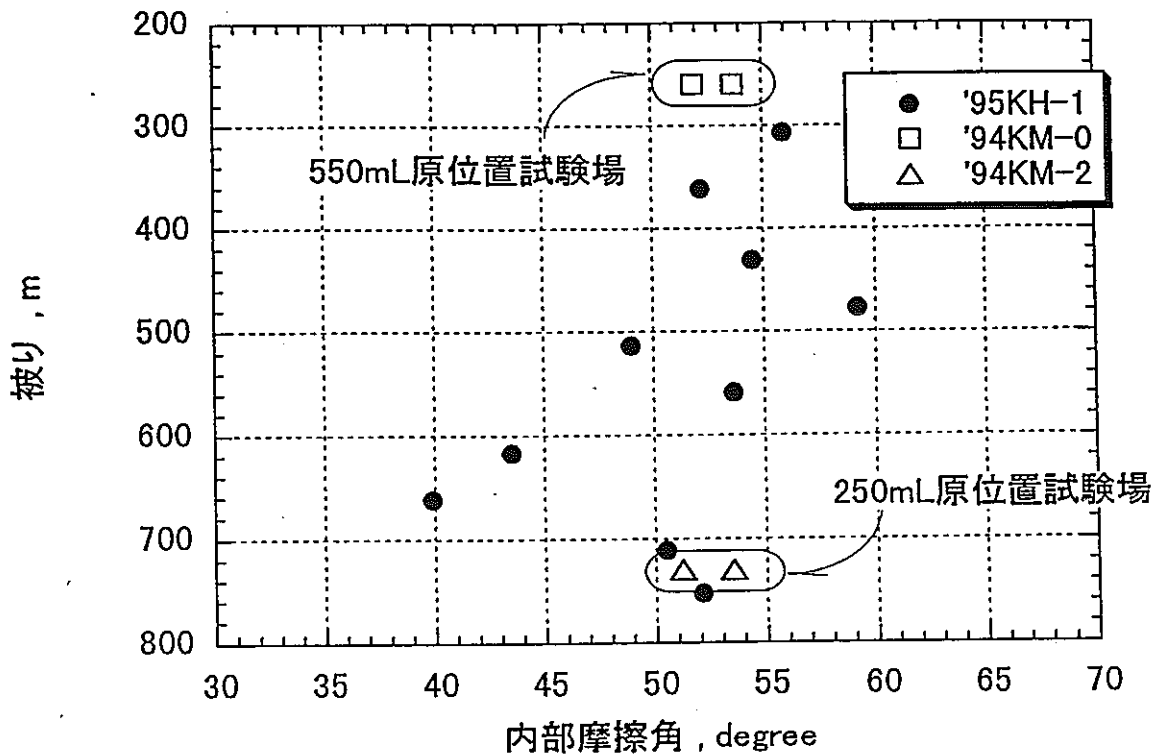


図-5.2.10 内部摩擦角と被り高さの関係

圧裂引張強度

圧裂引張強度と被り高さの関係をプロットしたものを図-5.2.8に示す。圧裂引張強度については、550mレベル原位置試験場で最小値が7.9MPa、最大値が10.6MPa、平均値が9.2MPaを示す。これに対し、250mレベル原位置試験場では最小値が6.1MPa、最大値が11.9MPa、平均値が8.9MPaを示すが、両試験場については圧裂引張強度の深度依存性は認められない。一方、KH-1孔についても同様に、最小値が5.6MPa、最大値が11.6MPa、平均値が8.9MPaを示すが、深度方向に対する圧裂引張強度の深度依存性は認められない。

粘着力および内部摩擦角

平成7年度までに実施した三軸圧縮試験により得られた粘着力と内部摩擦角について被り高さとの関係をプロットしたものをそれぞれ図-5.2.9、図-5.2.10に示す。KH-1孔の試験結果に着目すると、深度方向に粘着力が199～562kgf/cm²、内部摩擦角が39.9～59.2°の範囲に分布し、被り高さが増加するにしたがって粘着力が増加し内部摩擦角が減少する傾向が顕著に認められる。この主たる要因としては、KH-1孔の深度方向に対する有効間隙率の低下に伴う岩石基質部の固結度の増加と鉱物粒子の細粒化等が考えられる。

5.2.2 鉱物分析

鉱物分析では、既存試錐孔のコアを用いて4cm×4cm程度の薄片を作成し、モード分析と粒径の測定を実施した。ここで、モード分析では作成した薄片を用いて検鏡を行い、顕微鏡の十字線下にある鉱物に関してポイントカウントを実施した。なお、計測は1薄片に対して、2000点程度を目安とした。検鏡に使用した顕微鏡は、日本光学工業株式会社（Nikon）製のOPTIPHOT-POLである。また、粒径の測定については、顕微鏡の十字線下にある鉱物における最大粒径を測定した。なお、前述した力学特性の深度依存性との対応関係を把握することを目的としたことから、既存試錐孔としては、550mレベル坑道でKCH-1,2孔、KM-1,2孔、250mレベル坑道でKM-2,3孔を選定した。さらに、KH-1孔についても同様の測定を行い、合計で15個の薄片を作成した。

平成7年度までに実施してきた室内試験では、550mレベルの既存試錐孔から作成した供試体と250mL原位置試験場の既存試錐孔から作成した供試体を比較すると、250mレベルの方が有色鉱物の多さが肉眼でもはっきりと確認された。ここで、一般的な造岩鉱物の比重を表-5.2.2に示す。表-5.2.2にも示すとおり、一般的には角閃石や黒雲母等の有色鉱物の方が石英や斜長石等の無色鉱物と比較して比重は大きい値を示す。前述したように、550mレベル原位置試験場と250mレベル原位置試験場では単位体積重量（密度）に明瞭な差が認められ、250mレベル原位置試験場の方が550mレベル原位置試験場より大きい値を示した。そこで、それぞれの分析試料に対し、有色鉱物、すなわち角閃石と黒雲母のモード比をプロットしたものを図-5.2.11に示す。図に示すとおり、250mレベル原位置試験場と550mレベル原位置試験場を比較すると、有色鉱物のモード比に明瞭な差が認められ、550mレベル原位置試験場では有色鉱物のモード比は概ね20%の値を示すのに対し、250mレベル原位置試験場では有色鉱物のモード比は概ね30%程度の値を示す。

表-5.2.2 一般的な造岩鉱物の比重

造岩鉱物	比 重
石英	2.7
斜長石	2.6
角閃石	3.1~3.3
黒雲母	3.0

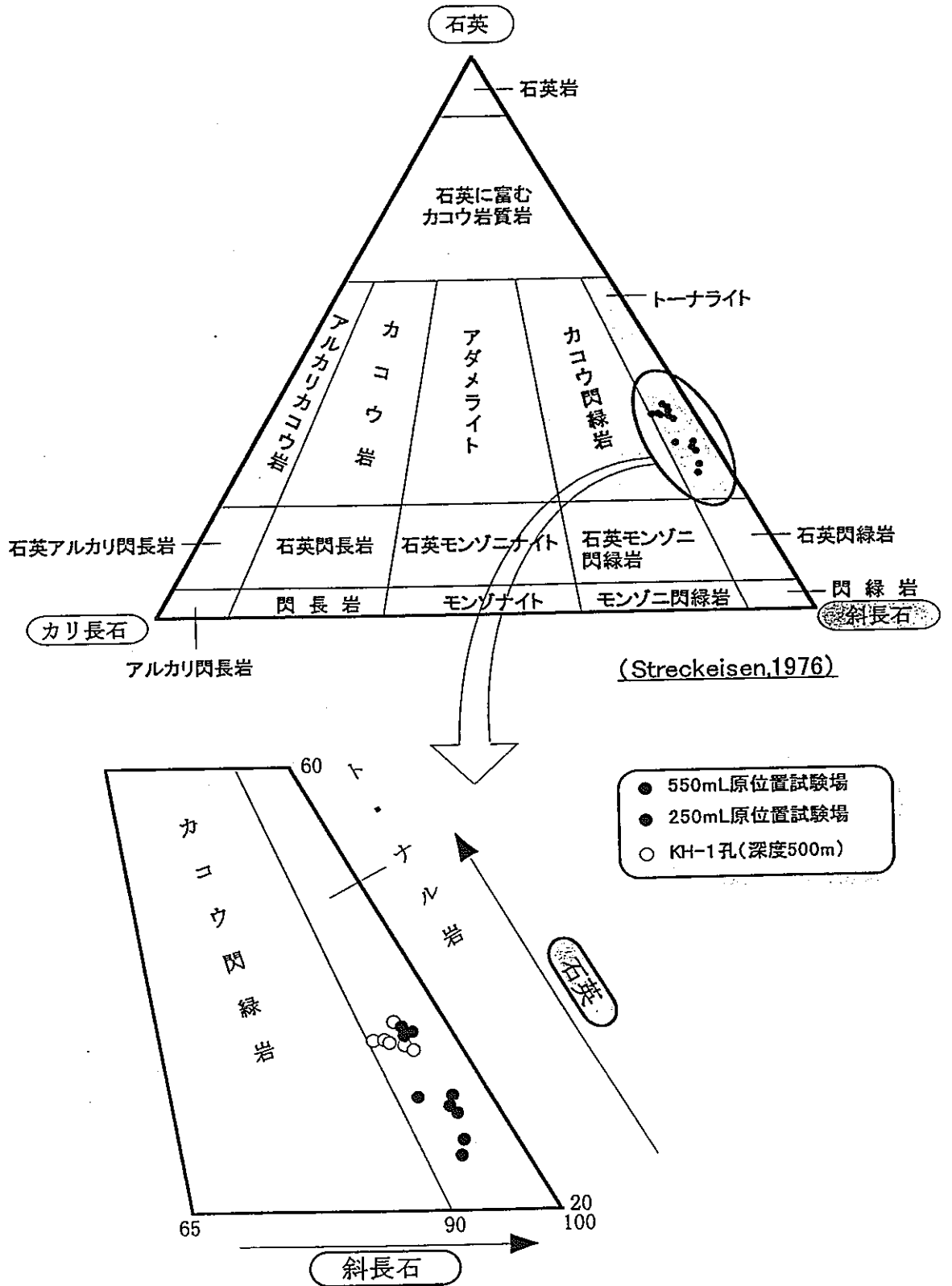


図-5.2.11 各試料における有色鉱物のモード比

5.2.3 マイクロクラックの観察

(1) マイクロクラックの可視化処理と試料作成

マイクロクラック観察では、250mレベルおよび550mレベルで掘削した既存試錐孔の岩芯より岩石試料を作成し、観察を行った。ここで、一般的に、マイクロクラックは岩石内の微視的亀裂であり、結晶粒内および粒界の亀裂に対応する。したがって、岩石表面を拡大視すると同一の色調を有した直線的な構造として判別される。このため、結晶粒界をマイクロクラックと誤認する場合があることから、従来は偏光顕微鏡観察によってマイクロクラックの抽出が行われてきたが、岩石を偏光顕微鏡で調べる場合には標本の寸法を25×20mm以下、厚さ0.03mm以下の薄片を作成する必要があるため、観察する領域が狭く、また、標本を割りとったり、薄く削る段階で、人工的な亀裂（2次クラック）を生じさせる可能性が高い。したがって、この方法によるマイクロクラック抽出はその信頼性に問題がある。そこで、観察領域を広げるために、実体顕微鏡を用いてマイクロクラックを抽出する試みもなされてきたが、結晶粒界とマイクロクラックの判別がつきにくく、2次クラックの影響も取り除かれていない。そこで、これらの問題を解消するために、蛍光剤や染色剤を添加した樹脂を浸透固化させ、マイクロクラックを着色または発光させる手法を採用する。この処理を行うことで、判別しづらかった結晶粒界とマイクロクラックが色による識別ができるようになり、また、試料作成前のマイクロクラックにのみ樹脂が浸透するので、2次クラックの影響を受けなくなるという利点を有する。今回は、種々のマイクロクラック可視化法の中でも小さなクラックまで可視化できる紫外線蛍光法を適用し作成した薄片試料を、偏光顕微鏡を用いて観察を行った。また、マイクロクラックの抽出に当たっては、小池(1995)等が開発した線索追跡アルゴリズム(Segment Tracing Algorithm: STA)を用いた。

各試料におけるマイクロクラックの平均長さおよび1mm²当たりのクラック密度を一覧表にまとめたものを表-5.2.3に示す。表に示したように、550mレベル原位置試験場の試料(KM-0-V1, KM-0-V2, KM-1-V1)と250mレベル原位置試験場の試料(KM-3-V1, KM-3-V2, KM-3-V1)のクラック密度を比較すると、250mレベル原位置試験場の試料が輝度レベルが下限値(0)に近い黒色鉱物を比較的多く含むという理由があるが、明らかに有意な差があり、250mレベル原位置試験場の方が550mレベル原位置試験場よりマイクロクラックの数が少ない傾向を示した。一方、550mレベル原位置試験場において健岩部から作成した試料(KM-0-V1, KM-0-V2, KM-1-V1)と割れ目帯を対象とした試錐孔において作成した試料(KCH-1-V1, KCH-2-V1, KF-1

表-5.2.3 STAによるマイクロクラック抽出結果一覧

試料名	標高 (m)	平均長さ (Pixel)	平均長さ (μm)	全個数 (本)	密度 (本/ mm^2)	備考
KM-0-V1	550	18.7	37.4	61381	4262	健岩部、定方位
KM-0-V2	550	19.0	38.0	61995	4305	健岩部、定方位
KM-1-V1	550	17.3	34.6	45667	3171	健岩部、定方位
KCH-1-V1	550	18.3	36.6	61926	4300	健岩部
KCH-2-V1	550	18.0	36.0	49013	3403	健岩部
KF-1-V1	550	16.5	33.0	43286	3006	健岩部
KF-1-V2	550	18.4	36.8	58782	4082	亀裂近傍
KM-3-V1	250	15.8	31.6	20880	1450	健岩部、定方位
KM-3-V2	250	17.5	35.0	41340	2870	健岩部、定方位
KM-3-V3	250	18.0	36.0	42495	2951	健岩部、定方位

-V1) を比較すると、KCH-1, 2孔の一軸圧縮強度、静弾性係数、圧裂引張強度等の低下に対応するような有意な差は認められず、概ね同じような値を示した。しかしながら、KF-1孔の健岩部の試料 (KF-1-V1) と亀裂近傍の試料 (KF-1-V2) を比較すると、比較的有意な差が認められ、亀裂近傍では健岩部の約1.4倍の値を示した。次に、各試料におけるマイクロクラックの 1mm^2 当たりのクラック密度とクラック平均長さの関係をプロットしたものを図-5.2.12に示す。なお、図にはクラック密度とクラック平均長さの関係を最小二乗法により直線近似したものも併せて示した。図よりクラック密度と平均長さは良好な線形関係 (相関係数90%) を示し、クラック密度が大きくなるにしたがって、クラックの平均長さも長くなる傾向が読みとることができる。これらの結果から、マイクロクラックの密度は、岩盤の巨視的な亀裂密度の大小と関連しているものと推測される。

次に、550mレベル原位置試験場と250mレベル原位置試験場において抽出されたマイクロクラックの方位分布について検討する。抽出されたマイクロクラックを各試験場毎にプロットしたものを図-5.2.13および図-5.2.14に示す。なお、図においては、互いに直交する3断面をそれぞれ別々にプロットしており、 180° を時計まわりに 10° ずつ18分割した場合の割合で表している。図-5.2.13に示した550mレベル原位置試験場では、 $N10^\circ \sim 40^\circ E$ および $N10^\circ \sim 40^\circ W$ の走向の卓越方向が認められ、比較的緩い傾斜のものが多いことがわかる。これに対し、250mレベル原位置試験場では、550mレベル原位置試験場ほど顕著な卓越方向は認められないが、北北東-南南西、北北西-南南東の走向の頻度が相対的に高い傾向を示す。

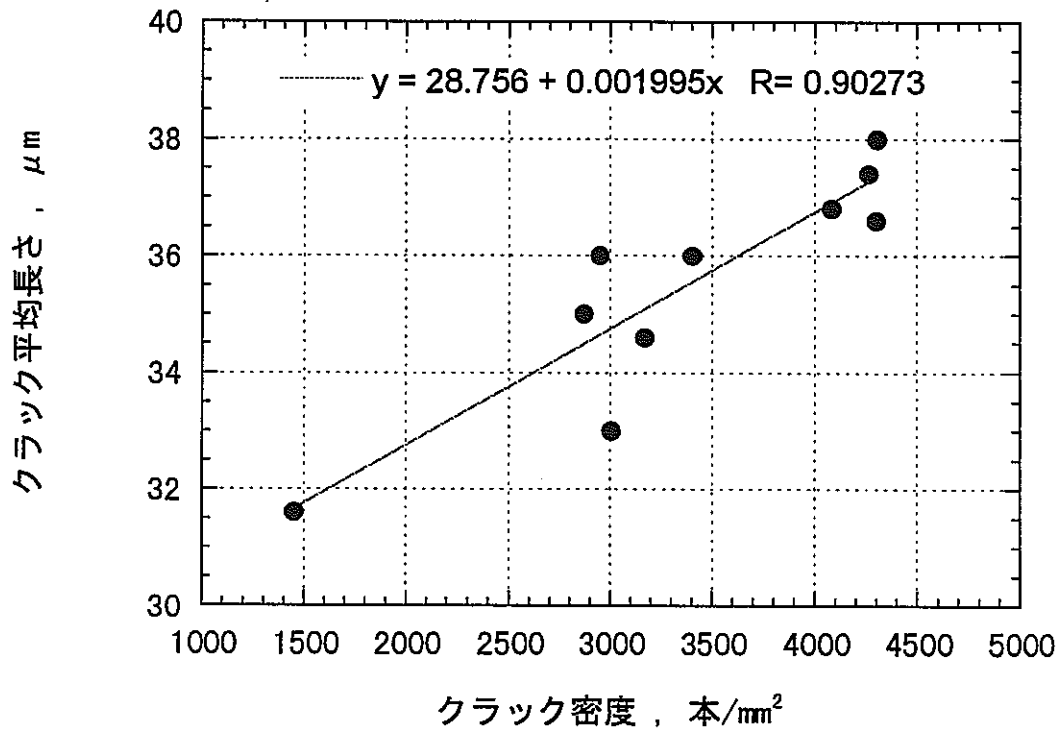


図-5.2.12 クラック密度とクラック平均長さの関係

一方、坑道および試錐孔規模での亀裂調査結果から、550mレベル原位置試験場では走向N50° ~ 70° E, 高傾斜のものが卓越し、250mレベル原位置試験場では走向EW, 高傾斜のものが卓越する。前述したようなマイクロクラックの抽出結果とこの坑道および試錐孔規模での亀裂調査結果とは相関関係は認められず、異なる分布傾向を示した。

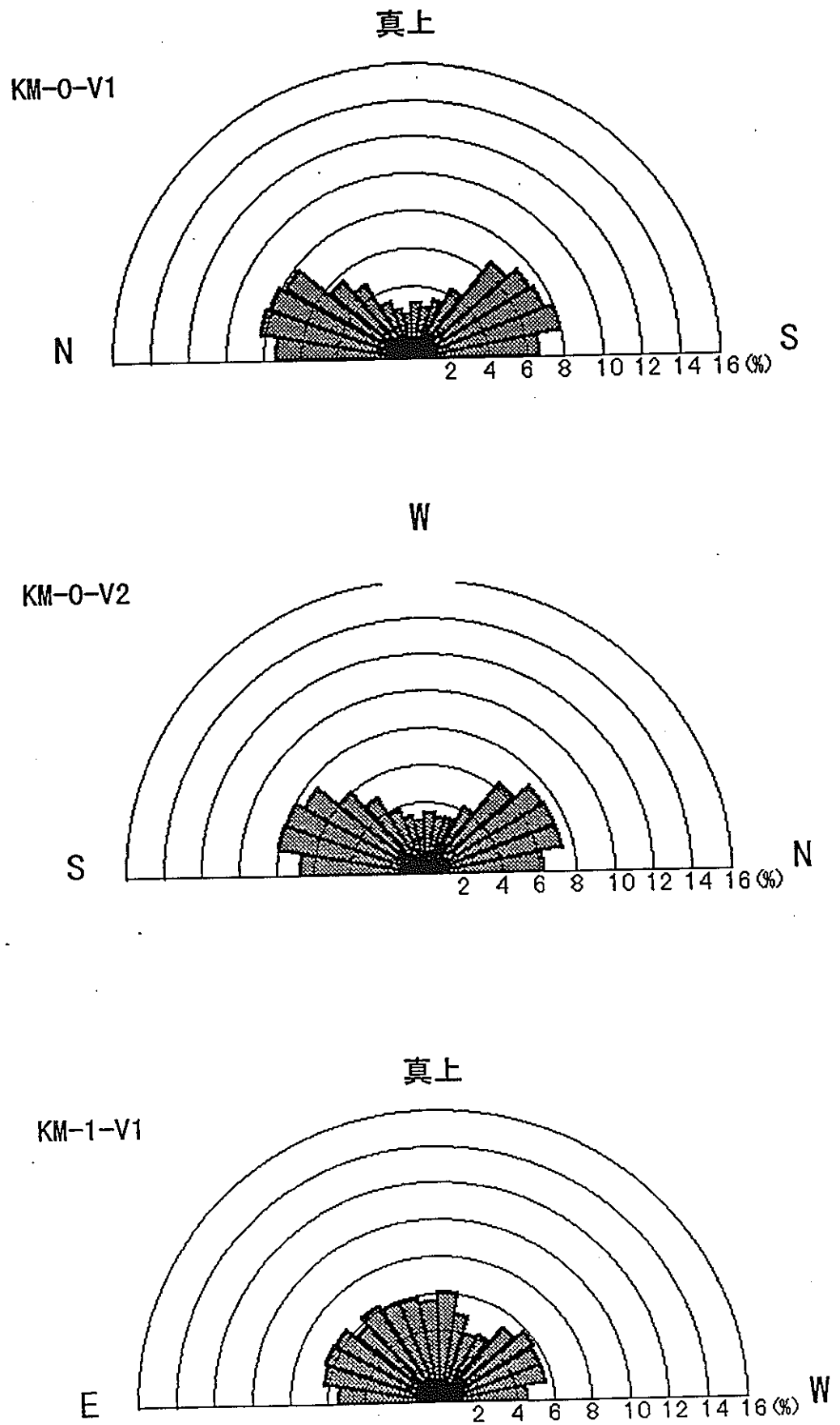


図-5.2.13 抽出されたクラックの方位分布 (550mL原位置試験場)

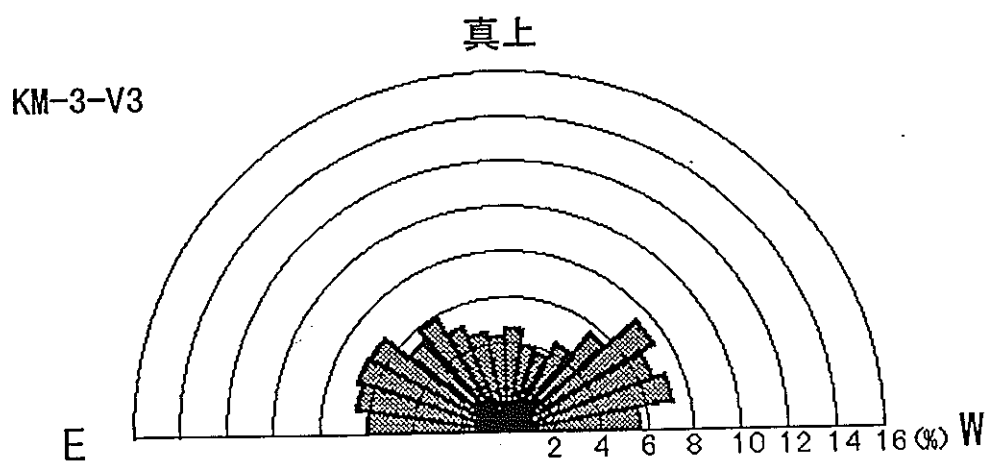
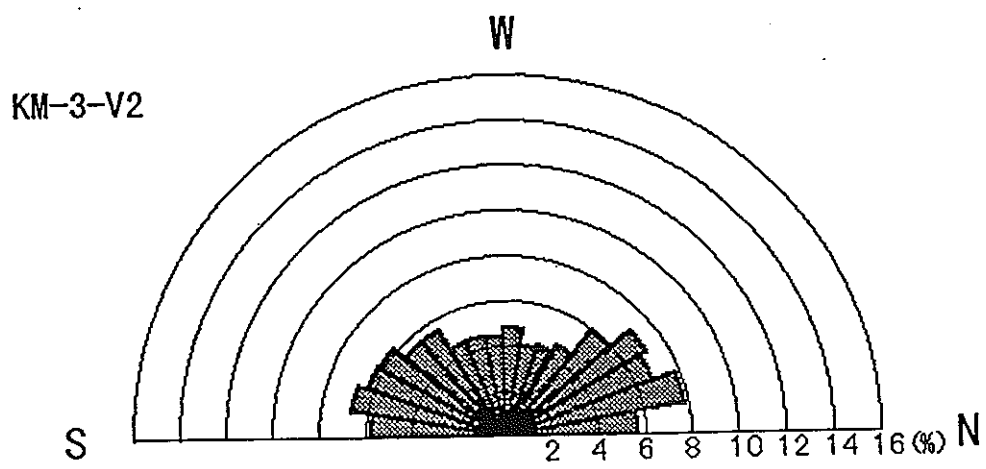
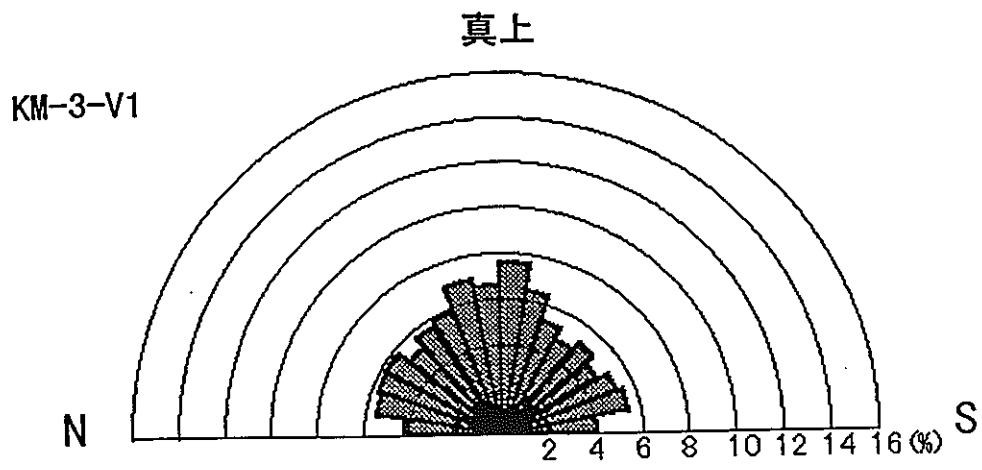


図-5.2.14 抽出されたクラックの方位分布 (250mL原位置試験場)

5.2.4 力学特性調査のまとめ

昭和63年度より実施してきた岩石室内試験，孔内載荷試験，初期応力測定により得られたデータに加えて本年度実施した岩石室内試験，鉱物分析，マイクロクラック観察を踏まえて、栗橋花崗閃緑岩の力学特性について要約すると以下のものである。

【岩石の基本物性】

550mレベル原位置試験場から鉛直方向に掘削（試験錐孔長：500m）されたKH-1孔の岩芯および550mレベル原位置試験場の既存試験錐孔（KM-0,1孔）および250mレベル原位置試験場の既存試験錐孔（KM-2,3孔）の岩芯を用いてに室内試験を実施した。

- ① KH-1孔の試験結果では、単位体積重量，空隙率，粘着力，内部摩擦角について深度依存性が認められた。特に、粘着力，内部摩擦角については構成鉱物の粒径と密接に関連しているものと推測され、鉱物分析の結果では深度が増加するにしたがって、殆どの構成鉱物について平均粒径が減少する傾向を示した。
- ② KH-1孔における試験結果の内、弾性波速度，一軸圧縮強度，静弾性係数，圧裂引張強度等には顕著な深度依存性は認められなかった。
- ③ 本年度室内試験を実施したKCH-1,2孔（550mレベル原位置試験場）では、同じ深度のKM-0,1孔の試験結果と比較して、有効空隙率が大きく一軸圧縮強度，圧裂引張強度が小さい傾向を示した。これは割れ目帯／断層破碎帯の影響が健岩部まで及んだ結果であるものと推測されたが、マイクロクラックの調査により得られたクラック密度，平均クラック長はKM-0,1孔と比較して明瞭な差はなかった。
- ④ 550mレベル原位置試験場の試験結果と250mレベル原位置試験場の試験結果の内、単位体積重量をKH-1孔の試験結果と併せてプロットすると、250mレベル原位置試験場の試験結果がKH-1孔の同一深度と比較して大きめの位置にプロットされた。これは、構成鉱物の量比の違いを反映した結果であるものと推測され、250mレベル原位置試験場の方が550mレベル原位置試験場より黒雲母、角閃石の有色鉱物を含む割合が平均で10%程度大きい値を示した。
- ⑤ マイクロクラックの観察結果から、550mレベル原位置試験場と250mレベル原位置試験場では有意な差が認められ、クラック密度に関しては250mレベル原位置試験場の方が550mレベル原位置試験場より小さい値を示した。一方、マイクロクラックの方向性に関しては、550mレベル原位置試験場では、N10°～40° EおよびN10°～40° Wの走向の卓越方向が認められ、比較的緩い傾斜のも

のが多い。これに対し、250mレベル原位置試験場では、550mレベル原位置試験場ほど顕著な卓越方向は認められないものの、北北東-南南西、北北西-南南東の走向の頻度が相対的に高い傾向を示した。

【原位置岩盤の変形特性】

550mレベル原位置試験場から鉛直方向に掘削（試錐孔長：500m）されたKH-1孔および550mレベル原位置試験場（KM-0孔）および250mレベル原位置試験場（KM-2孔）において孔内載荷試験（KKT）を実施した。

①KH-1孔の試験結果では深度が増加するにしたがって変形係数や弾性係数が大きくなるような傾向は認められず、加えて孔全域に及ぶような特に変形し易い方向、あるいは逆に変形し難い方向、すなわち変形性の異方性も認められなかった。

②550mレベル原位置試験場の試験結果と250mレベル原位置試験場の試験結果を比較すると、平均的に見て550mレベル原位置試験場の方が剛性が高いものと判断できる。これは、栗橋花崗閃緑岩中に存在する割れ目の分布特性の差が一つの要因であると考えられる。すなわち、550mレベル原位置試験場における割れ目頻度が約1.1本/mであるのに対し、250mレベル原位置試験場では約1.8本/mである。

【原位置岩盤の初期応力に関する特性】

550mレベル原位置試験場から鉛直方向に掘削（試錐孔長：500m）されたKH-1孔および550mレベル原位置試験場（KS-2, 3, 5孔, KM-0, 1孔）および250mレベル原位置試験場（KM-2孔）において種々の測定法を用いて初期応力の測定を実施した。

①KH-1孔において水圧破碎法により算定された水平面内の応力状態は最小、最大主応力とも深度とともにほぼ線形的に増加し、水平面内の最小主応力を σ_h 、最大主応力を σ_H 、測定位置の被りから算出した推定被り圧を σ_v とすると、 σ_h 、 σ_H 、 σ_v の間には、 $\sigma_h < \sigma_v < \sigma_H$ の関係が認められた。

②KH-1孔の各深度において決定された水平面内の最大主応力の方位は、真北を中心としてN19.9°W~N2.2°Eの狭い範囲に分布しており、水平面内の最大主応力の方向は深度と無関係にほぼ一定であり、かつ南北方向である。これは、550mレベル原位置試験場および250mレベル原位置試験場における測定結果についても同様であり、最大主応力の方向は深度、測定箇所によらず概ね南北方向で水平的に作用しているものと考えられる。

- ③ 550mレベル原位置試験場と250mレベル原位置試験場の測定結果から平均側圧係数を算出すると、深度が増加するにしたがって平均側圧係数が小さくなる傾向を示し、一般的に言われる深度効果が明らかに認められた。
- ④ 他の地域の測定結果と比較すると、同じ被り深さに対して平均側圧係数が高い位置にプロットされ、原位置試験場周辺では側圧が比較的高い状態にあると考えられる。
- ⑤ 最大主応力の方向は原位置試験場周辺地域の測地学的圧縮方位とは調和的な関係を有しないものの、浅発地震の初動解析から得られる地震学的造構応力の方向とは調和的な関係を有する。

5.3 弾性波速度測定

釜石原位置試験場では、深部岩盤における力学特性の深度依存性や掘削影響試験等の物性評価を目的として各種物理試験、弾性波速度測定、室内力学試験を実施してきた。その結果、各種物理試験および室内力学試験については測定機関や測定機器の違いによる有意な差は認められなかった。これに対し、弾性波速度測定においては、測定機関や測定機器の違いにより、測定結果が著しくばらつく傾向を示した。この原因としては種々の要因が挙げられるが、主として振動子の共振周波数の違いと岩石供試体の含水比の違いが影響しているものと推測される。このような背景に基づき、250mレベル坑道で掘削された既存試験錐孔のコアを用いて振動子の共振周波数および岩石供試体の含水比を変えた弾性波速度を測定し、測定条件の変化に対応する弾性波速度を把握する。以下では、振動子の共振周波数を変えた場合の測定を周波数依存性試験、岩石供試体の含水比を変えた測定を含水比依存性試験と称する。

5.3.1 試験方法および供試体採取位置

試験に用いる供試体は、平成7年度に250mレベル坑道において掘削した試験錐孔（KM-3孔）より作成した。なお、供試体は、5cm×5cm×10cmの角柱供試体とし、端面の平行度は±0.01mmとした。各試験において供試体を採取した位置を一覧表にまとめたものを表-5.3.1に示す。

表-5.3.1 弾性波速度測定に用いた供試体の採取位置

試験名称	数量	供試体名称	採取深度(m)
周波数依存性試験	4	F 1	28.22
		F 2	28.29
		F 3	28.36
		F 4	28.43
含水比依存性試験	3	W 1	27.90
		W 2	27.95
		W 3	28.05

周波数依存性試験に用いる供試体は乾燥状態と湿潤状態の2状態を用いた。なお、乾燥供試体は角柱供試体に整形したものを炉乾燥した。また、湿潤供試体は

角柱供試体に整形したものを真空脱気した試料とした。その後、試料の両端面に振動子、側面にひずみゲージをそれぞれ貼付し、等方圧負荷を行うため、シリコンゴムを供試体周囲に塗布した。ただし、湿潤供試体はシリコンゴムを塗布する過程で水分逸散を極力避けるため、デシケータ内で作業を行った。

含水比依存性試験に使用する供試体は湿潤供試体を用いた。なお、試験準備中の水分逸散を避けるため、振動子とひずみゲージを所定の位置に迅速に貼付するように努めた。

(1) 周波数依存性試験

P波速度に与える透過パルス波の周波数の影響および含有水分の影響を検討した。すなわち、共振周波数は0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0MHzの5種類の振動子を使用した。この内、0.5MHzにおいては、張り付け位置の違いを検討するために、さらに2個の振動子を準備し、計7個の振動子を供試体端面に貼付する。貼付位置を図-5.3.1に示す。

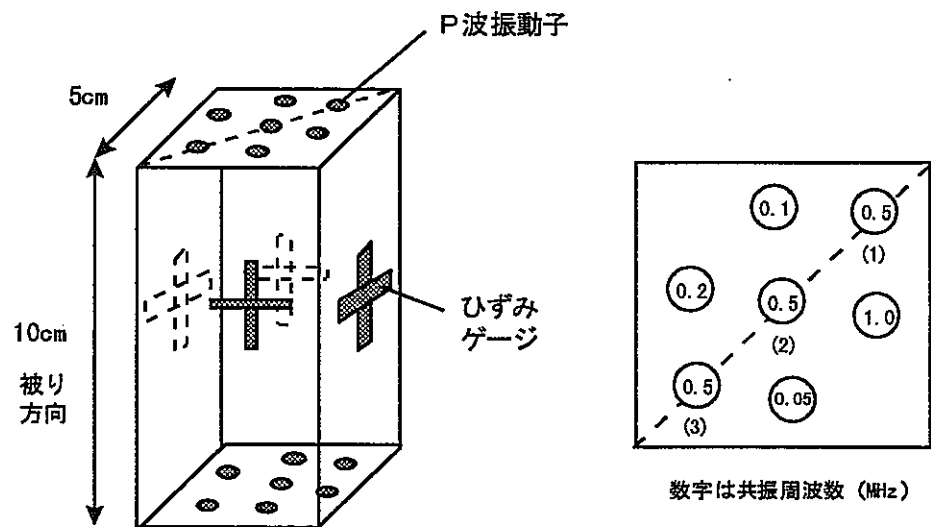


図-5.3.1 振動子とひずみゲージの貼付位置 (周波数依存性試験)

ここで、弾性波速度は岩石内の潜在クラックにも影響を受けると考えられる。したがって、供試体に高圧の等方圧を負荷し、潜在クラックを閉鎖させた状態で弾性波速度を測定した。この時、潜在クラックの閉鎖の判断は供試体側面に貼付したひずみゲージの挙動が圧力に対し収束した時点とした。なお、ひずみゲージの貼付位置は図-5.3.1に示すように、側方4面の中央にクロスして貼付する。また、等方圧の圧力段階は0~50MPaまで5MPa、それ以降150MPaまで10MPaきざみとし(全21ステップ)、各圧力段階でP波速度を測定した。さらに、ひずみの温度補

正のため、圧力セルには熔融石英を入れ、同時にひずみを測定した。

一方、含有水分の影響を併せて評価するために、乾燥状態と湿潤状態の2状態の供試体に対して試験を実施した。表-5.3.2に試験条件を示す。

表-5.3.2 周波数依存性試験試験パターン

拘束圧	試験個数	P波振動子 共振周波数 (MHz)	備考
0～50MPaまで 5MPa ¹ ステップ	乾燥2供試体 (F1, F2)	0.05 0.1 0.2	クロスひずみゲージ 各面貼付
50～150MPaまで 10MPa ¹ ステップ	湿潤2供試体 (F3, F4) (計4供試体)	0.5, 0.5, 0.5 1.0 (計7振動子)	
同上	熔融石英		ひずみゲージ 側面貼付

(2) 含水比依存性試験

P波速度・S波速度に与える岩石試料の含有水分の影響を検討した。ここで、試験時の含水状態は湿潤状態と絶乾状態、およびその間に4状態の計6状態とした。試験の手順を以下に示す。

- ① 供試体をデシケータに水浸させ、2日以上真空脱気し飽和させる。
- ② 供試体を取り出し、迅速にP S振動子を図-5.3.2のように所定の位置に接着した後、大気圧下で初回の V_p , V_s の測定を行う（湿潤状態）。
- ③ 大気中に5日、10日、30日放置した後に同様に測定する。その後、40度程度の熱風で連続的に強制乾燥し、31日目に測定する（40℃強制乾燥）。
- ④ その後、大気中で10日間自然乾燥させた後、90℃の乾燥炉で24時間強制乾燥を行い、測定する（90℃強制乾燥）。

試験条件を表-5.3.3に示す。なお、地盤工学会の試験基準案²⁾によると、測定は受振・発振を入れ替えて2度行うと明記されている。そこで、各測定段階で発振端子と受振端子を入れ替えた測定も実施した。また、自然乾燥時の供試体の含水状態の不均質化を避けるため、測定前日に供試体をラップシールしておき、水分の均質化を図ったのちに測定を実施した。一方、含有水分の変化は弾性波速度測定時に供試体の重量を測定してチェックする。なお、重量測定は0.1g精度の電子天秤を用いた。さらに、弾性波測定に用いるP波、S波の振動子は、ともに共振周

波数0.5MHzのものを使用した。

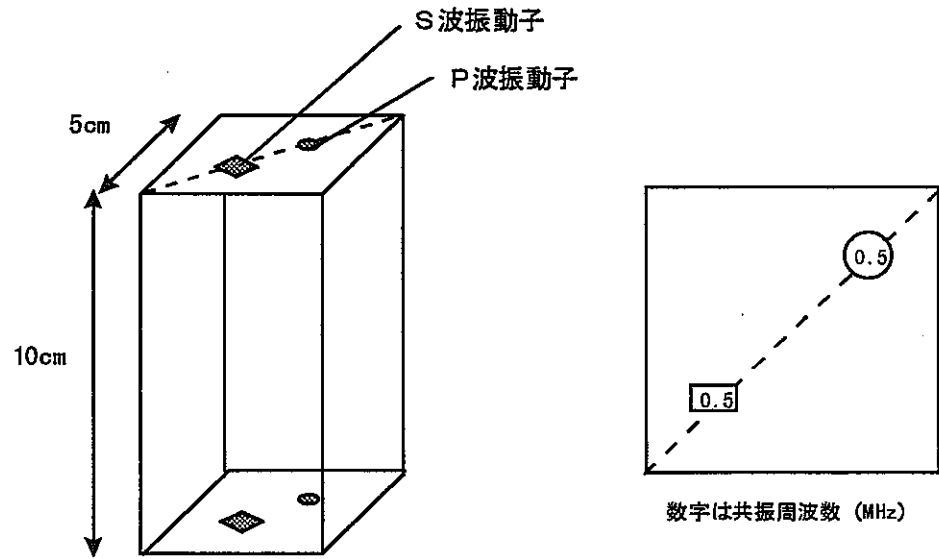


図-5.3.2 振動子とひずみゲージの貼付位置（含水比依存性試験）

表-5.3.3 含水比依存性試験試験パターン

拘束圧	試験個数	含水状態	振周波数	コア重量測定
0	3供試体	湿潤	P波:0.5MHz S波:0.5MHz	○
		5日放置		○
		10日放置		○
		30日放置		○
		40℃強制乾燥 (31日放置)		○
		90℃強制乾燥 (40日放置)		○

5.3.2 試験結果と考察

①周波数依存性試験

図-5.3.3～図-5.3.6に拘束圧とP波速度の関係を示す。測定されたP波速度はいずれの供試体（F1～F4）についても拘束圧の増加に伴い漸増するが、80～100MPaを越える付近から一定値に収束する傾向にある。これは前述したひずみと拘束圧の関係に対応するものである。すなわち、試料中の潜在クラックが拘束圧の増加で徐々に閉塞し、ひずみが増加する一方で、P波速度はクラックの閉塞に伴って速度増を示したものと考えられる。

潜在クラックが完全に閉塞することで上昇するP波速度は、上述のように増加割

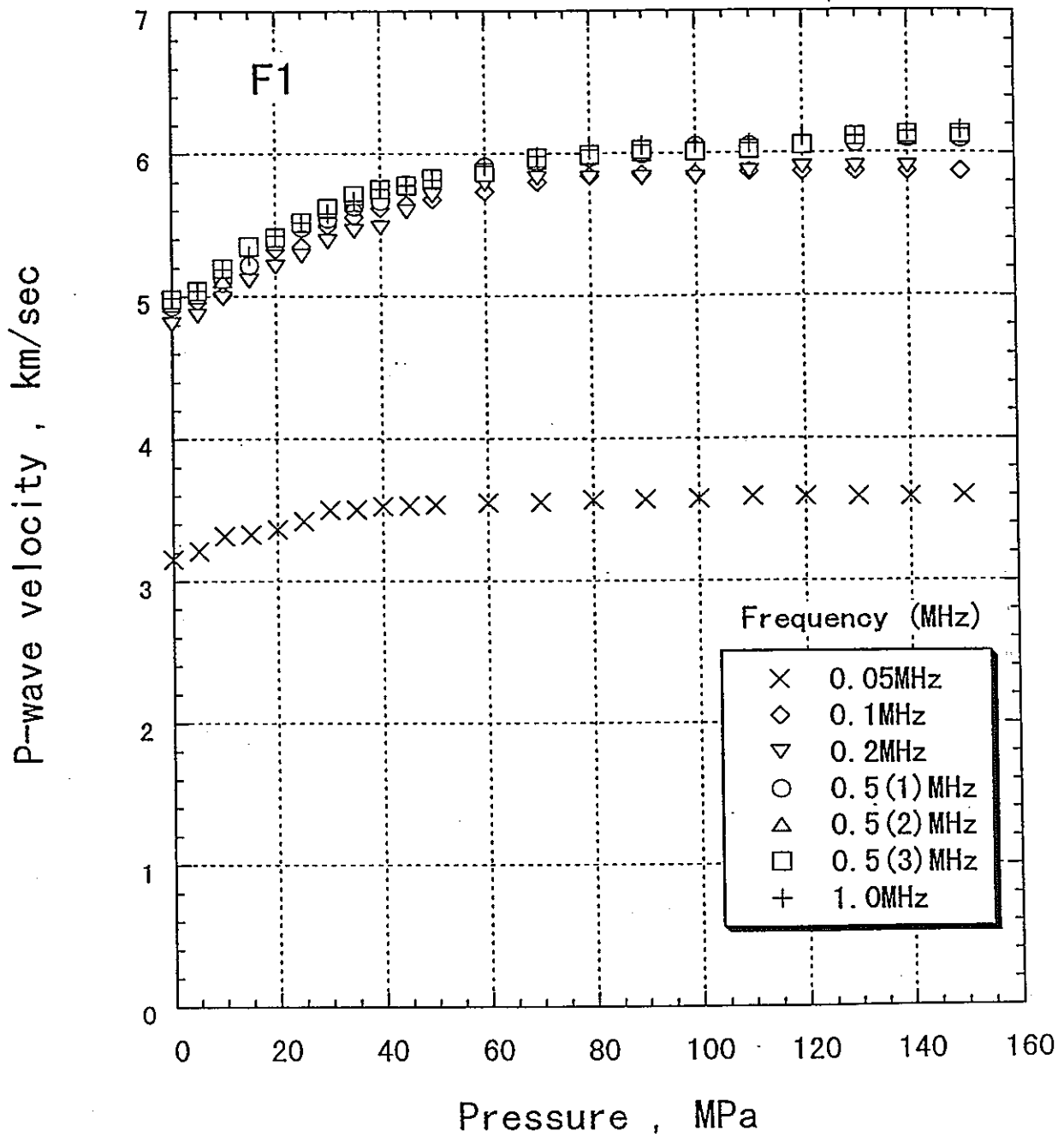


図-5.3.3 P波速度と拘束圧の関係 (F1)

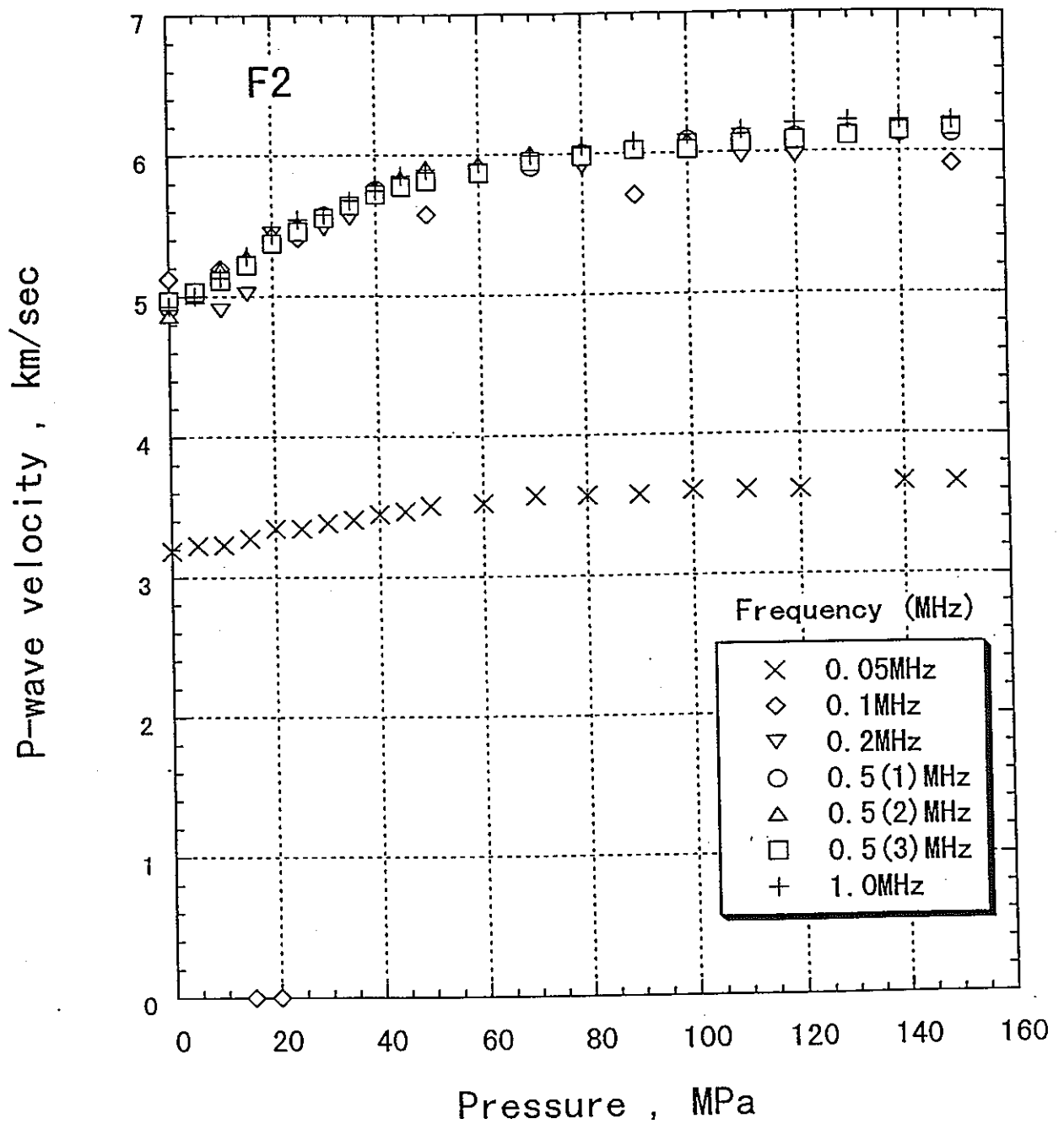


図-5.3.4 P波速度と拘束圧の関係 (F2)

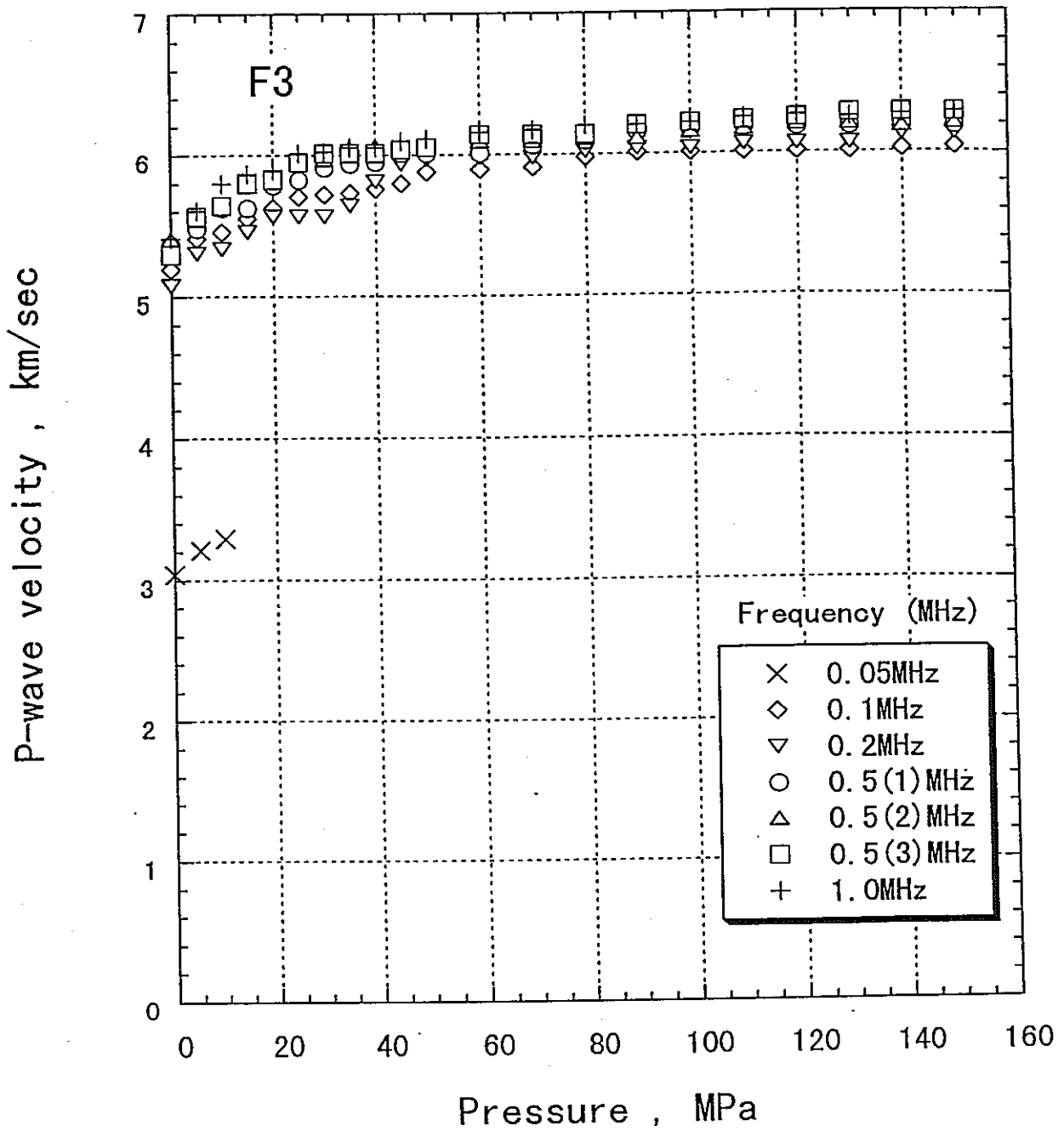


図-5.3.5 P波速度と拘束圧の関係 (F3)

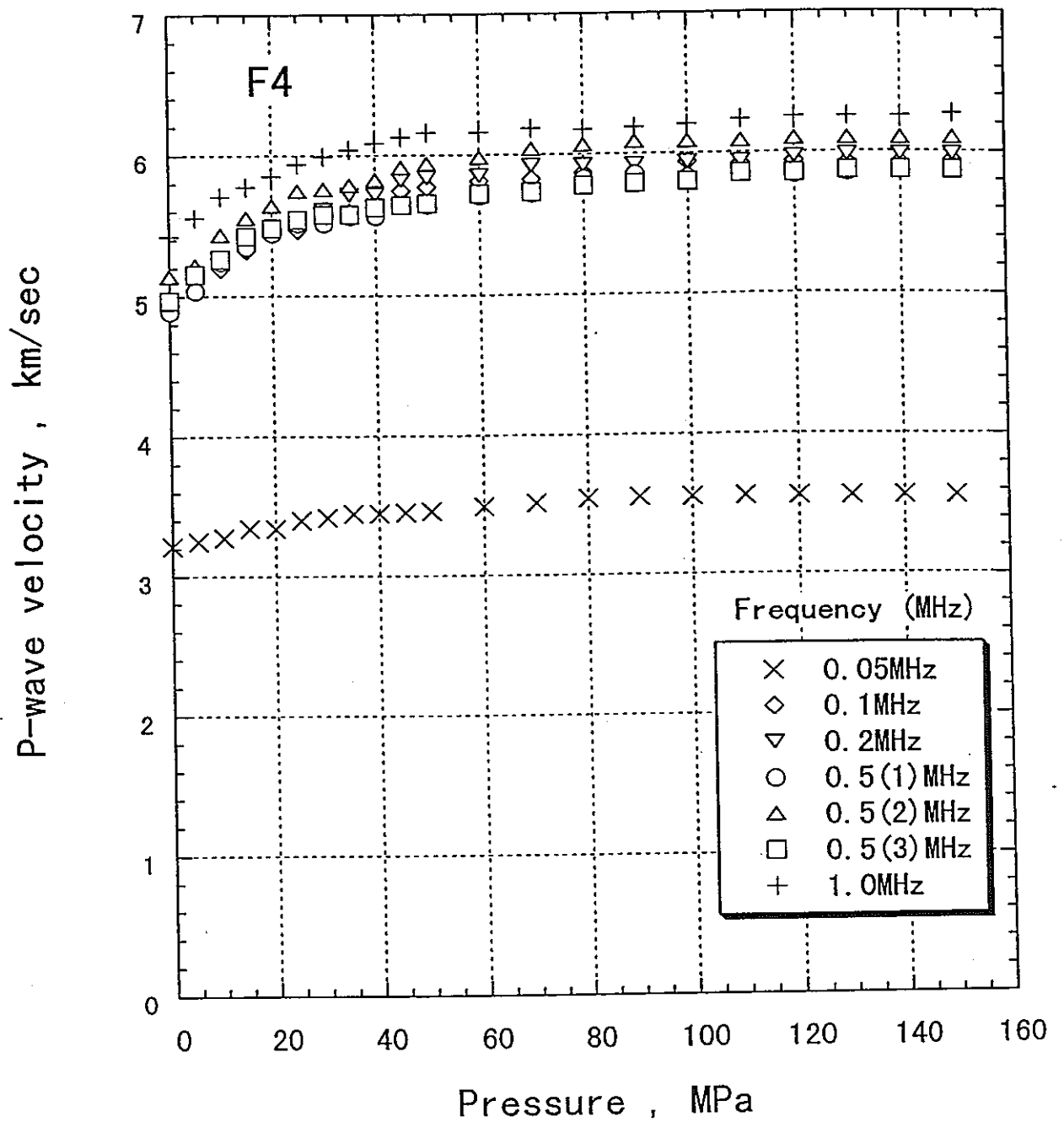
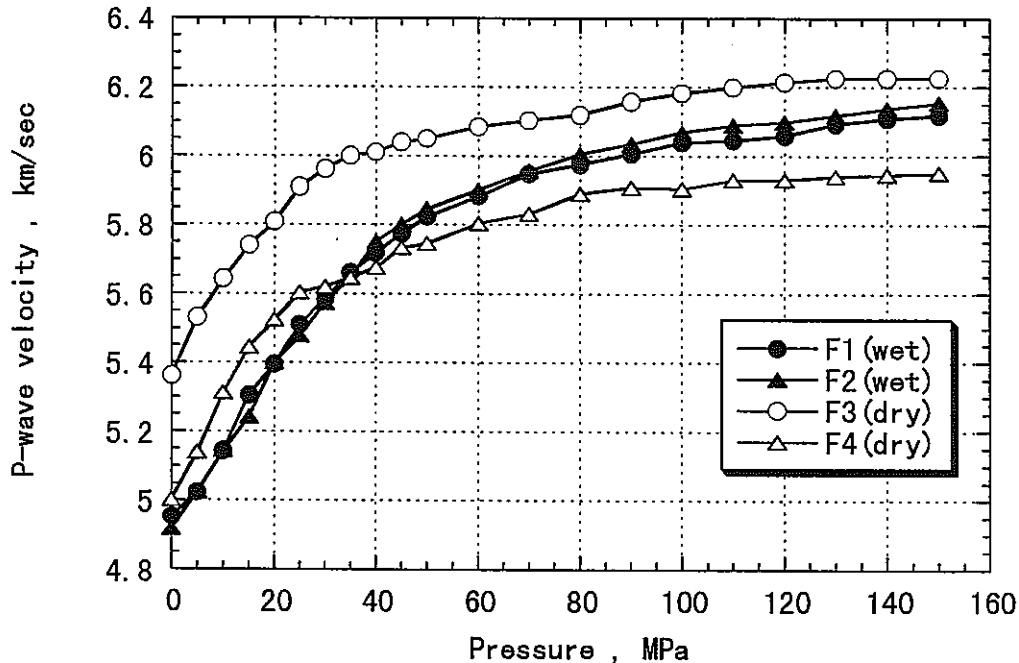


図-5.3.6 P波速度と拘束圧の関係 (F4)

合で20%と比較的大きい値を示した。言い換えれば、目視で顕著なクラックが認められる試料においては、そうでない試料に比べ20%以上の速度低下を示す可能性があることを意味している。

一方、P波速度は試料の含水状態に顕著な影響を受け、含有水分が多いほどP波速度が大きくなることが知られている。そこで、供試体F1, F2と供試体F3, F4で傾向を比較した。図-5.3.7は振動子の共振周波数0.5MHzで測定したP波速度の平均値（3平均）と拘束圧の関係を整理したものである。図のように、供試体F4が25MPa以降折れ曲がっているが、これを除くと、湿潤状態でのP波速度の方が乾燥状態のP波速度より同じ拘束圧で大きい値を示している。また、供試体F4を除けば、その差は低拘束圧ほど顕著であり、無拘束圧下では0.4km/secの差であった。供試体F4のP波速度の挙動については、次に検討する。



拘束圧とP波速度に及ぼす含水状態の影響 (0.5MHzを例として)

図-5.3.7 拘束圧と V_p に及ぼす含水状態の影響 (0.5MHzを例として)

共振周波数とは振動子が振動する時に発生する波の周波数成分のうち、最も卓越する周波数を意味する。透過パルス法では振動子の共振周波数の波が試料内を透過する。透過パルスの周波数（波長）が弾性波速度に及ぼす影響を詳細に検討した例は少ないが、報告されているものを整理すると表-5.3.4のようである。表よりわかるように、弾性波速度測定試験で用いる振動子の周波数（波長）は、厳密には供試体の状態（供試体寸法、平均粒径、亀裂の大きさ）により種々選択しなければならないことがわかる。

表-5.3.4 透過パルスの周波数および波長と試料の制約条件

	共振周波数 f 速度 V	波長 λ	供試体長 L 供試体径 D
供試体径 D	$f \geq 5V/D^*$	$D \geq 5\lambda^*$ $D \geq 10\lambda^{***}$	—
平均粒径 P		$\lambda \geq 3P^{**}$	$D \geq 10P^*$ $L \geq 10P^{***}$ $L \geq (50 \sim 100)P^{****}$
亀裂 C			$d \geq 5C^*$

*:地盤工学会基準部 **:ASTM ***:ISRM ****:Simmons&Brace(1965)

しかしながら、実際の弾性波速度測定試験の指針・基準においては、試料に応じて振動子の共振周波数を規定しているものはなく、表-5.3.5のような推奨範囲が記述されているにすぎない。このような背景から、市販の超音波伝播速度測定システムにおいても使用する振動子の周波数は統一されておらず、測定結果のばらつきに振動子の周波数がどの程度影響を与えるのか、これまで検討された例はない。

表-5.3.5 試験指針・基準で示されている振動子の共振周波数

機 関	共振周波数 (MHz)	備 考
I S R M	0.1~2 0.002~0.03 0.001~0.1	高周波超音波パルス法 低周波超音波パルス法 共振法
物理探鉱技術協会	0.5, 1	1962
建設省	0.02~0.5	KDK S 0503-1968
地質調査標準示方書	規定なし	旧国鉄(1983)
土木学会	物理探鉱・旧国鉄に準	軟岩の調査・設計の指針
地盤工学会	0.02~2	岩の調査と試験
地盤工学会基準部	0.1~3 数10KHz(軟岩)	JGS2111-199X

以上の背景のもと、同じ試料、同じ拘束圧条件下で、振動子の共振周波数を0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1MHzの5種類変えて弾性波速度を測定した。図-5.3.7~図-5.3.10は0, 25, 50, 100, 150MPaの各拘束圧に対して、共振周波数とP波速度の関係を示す。

F1~F4の全ての供試体において、共振周波数0.05MHzはそれ以外の共振周波数の測定結果に比べ、測定されたP波速度はどの圧力段階においても半分程度の値である。資料集に示した波形からわかるように、共振周波数0.05MHzにおいては観測波形は緩やかであり、波形の立ち上がりを精度よく読むことが極めて難しかった。

1周期 $15\mu\text{sec}$ と仮定すれば、周波数は67KHzであり、これは振動子の共振周波数と同等である。

一方、弾性波速度 $V=6\text{km/sec}$ 、供試体 $D=5\text{cm}$ とすれば、表-5.3.4に示した $f \geq 5V/D$ より、周波数 f は0.6MHz以上でなければならない。また、 $D \geq (5 \sim 10)\lambda$ より、波長 λ は0.5~1cm以下、すなわち、周波数換算で0.6~1.2MHz以上でなければならない。したがって、表-5.3.4に示した指針に照らし合わせると、今回測定に用いた供試体寸法では、0.6MHz以上の共振周波数を持つ振動子が適正であると考えられる。実際、0.5, 1MHzの測定結果はどの圧力段階においても、供試体F4を除きほぼ同様な値を示し、測定の安定度は0.5MHz以上で高いものと推定される。

供試体F4においては、どの圧力段階においても0.5MHzと1MHzで明らかに差がある。これは同じ湿潤供試体のF3と比較してわかるように、0.5MHzの値が低いと見ることができる。前述したように、0.5MHzの伝播経路には潜在クラックがあると考えれば、それが150MPaにおいても十分閉塞せず、そのため速度低下を引き起こしたものと想定される。

さて、前述したように、拘束圧とひずみの関係から、潜在クラックは拘束圧80~100MPa以上で閉塞したと考えられる。そこで、潜在クラックの影響が無視できる状態での共振周波数とP波速度の関係を検討するため、図-5.3.11に150MPaにおける共振周波数とP波速度の関係を再度プロットした。なお、縦軸に示したP波速度は1MHzでのP波速度 V_{pi} で除して正規化したもので表した。P波速度の低下率は1MHzでの測定値に対し、0.05MHzで0.58, 0.1MHzで0.95, 0.2MHzで0.97程度であり、0.5MHzでは0.99と、ほぼ1MHzと同等の測定値を示している。したがって、P波速度に与える振動子の共振周波数の影響は、0.5MHz以上の振動子を使っていれば、ほぼ無視できるものと考えられる。

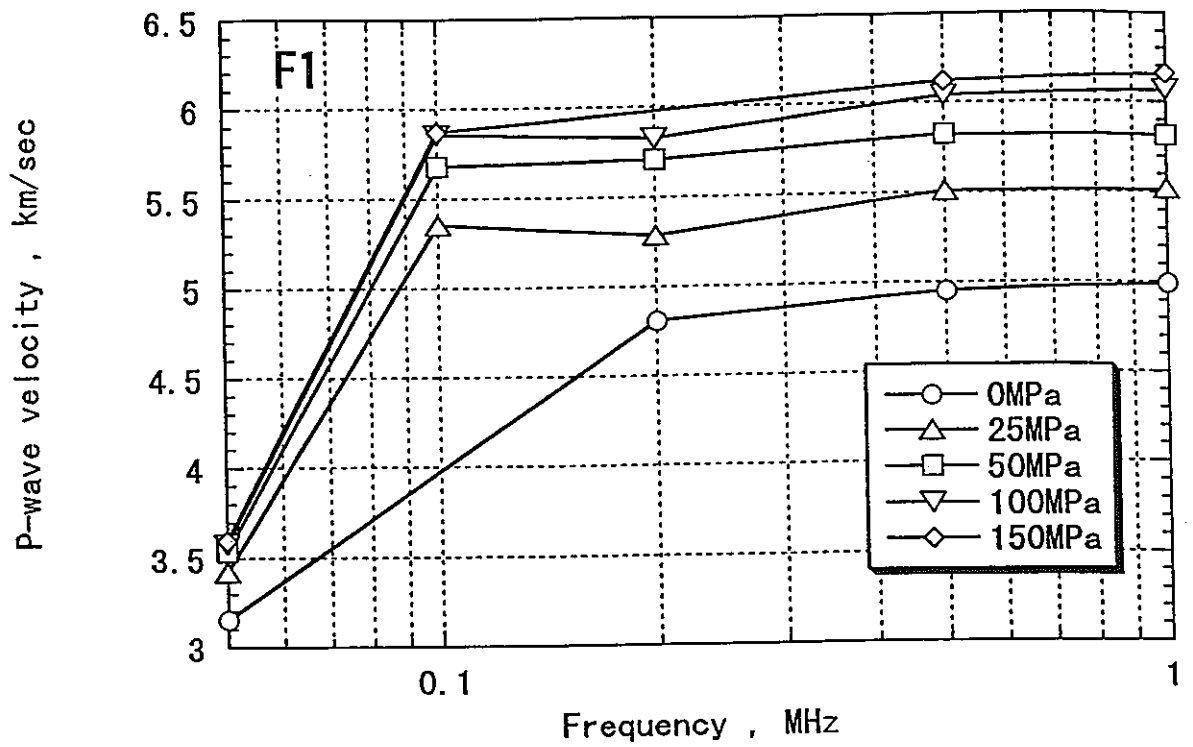


図-5.3.7 P波速度と振動子周波数の関係 (F1)

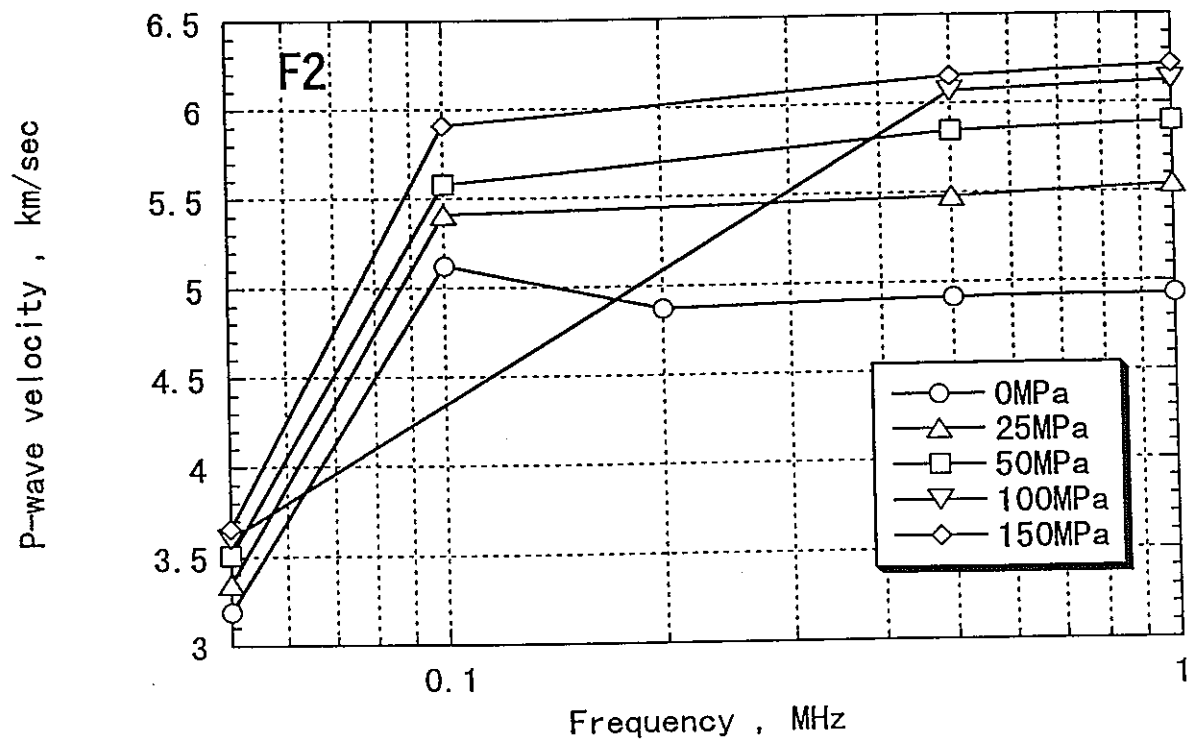


図-5.3.8 P波速度と振動子周波数の関係 (F2)

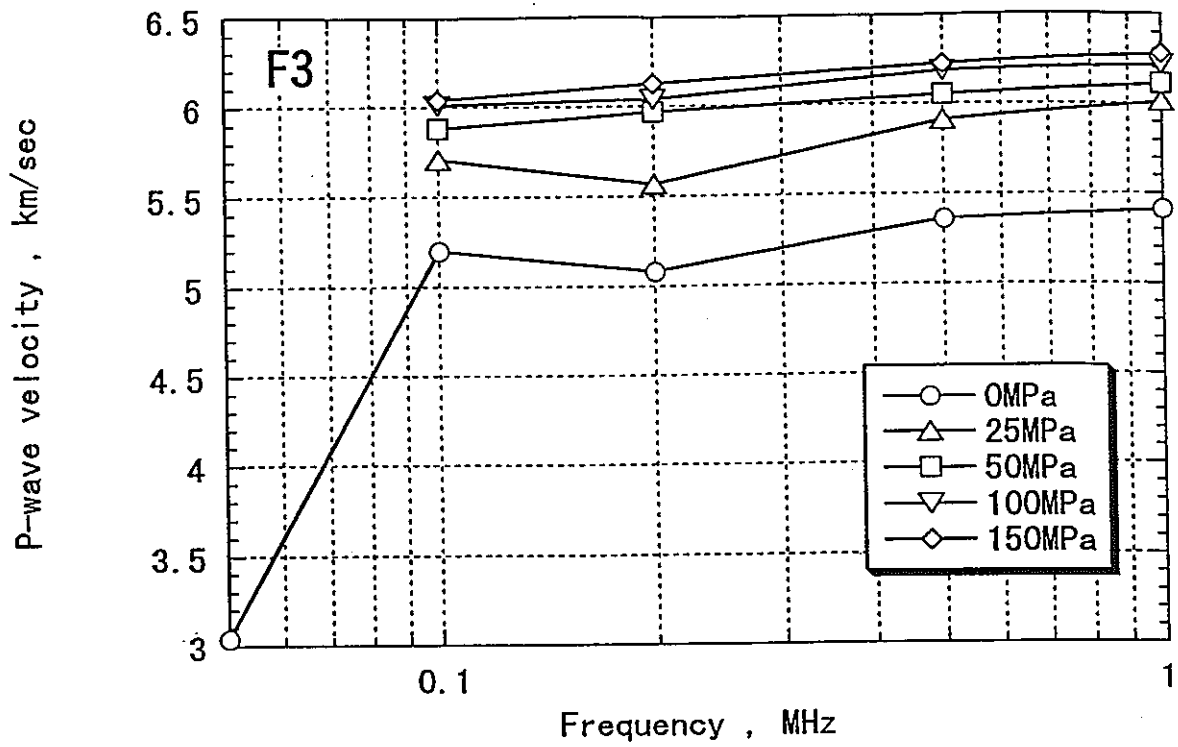


図-5.3.9 P波速度と振動子周波数の関係 (F3)

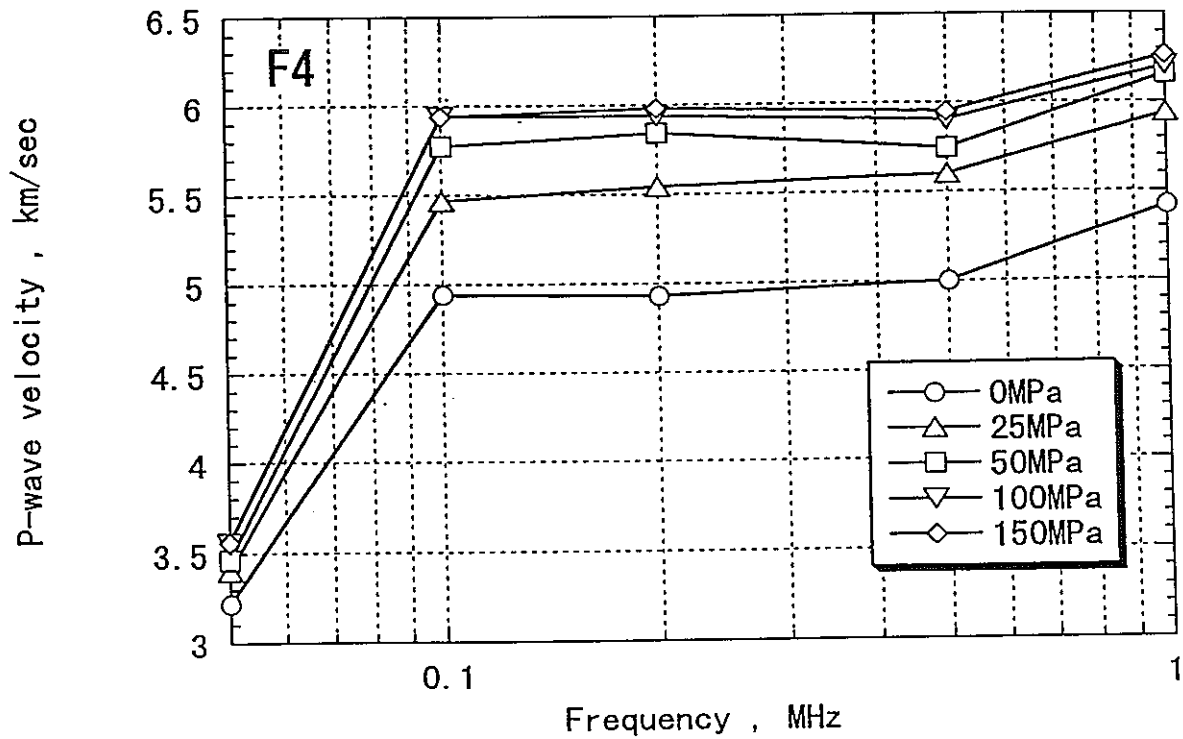


図-5.3.10 P波速度と振動子周波数の関係 (F4)

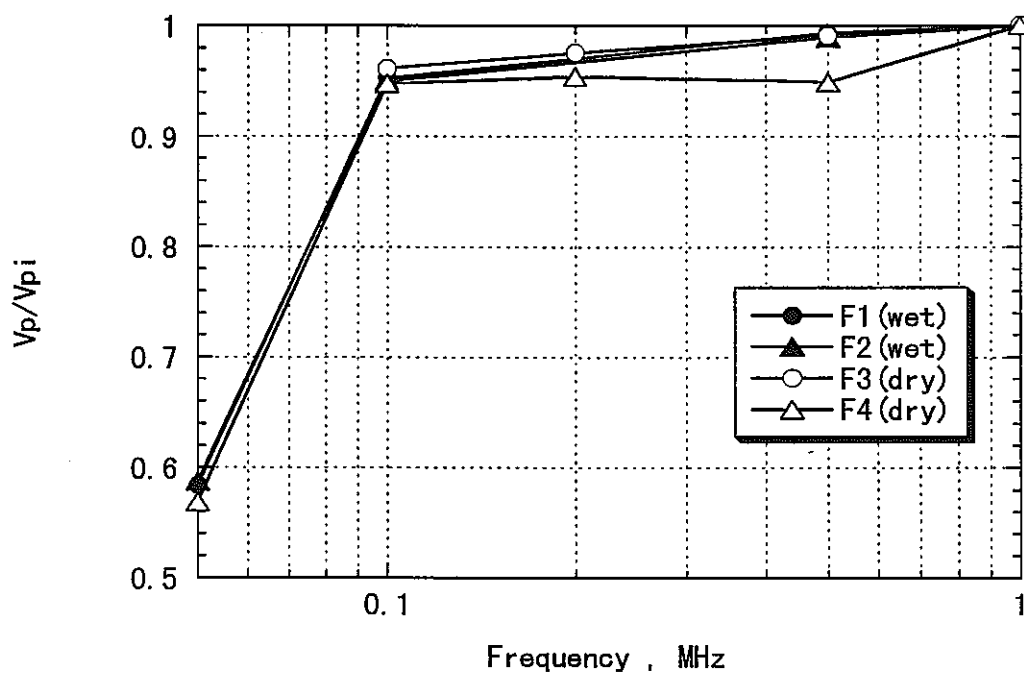


図-5.3.11 V_p に及ぼす共振周波数の影響 (150MPa)

②含水比依存性試験

コアの放置時間を定量化するため、供試体の重量から含水比を計算した。図-5.3.12には含水比とP波速度、S波速度の関係を示し、図-5.3.13には含水比に対する速度低下割合の関係を示す。有効間隙率を計算すると（空隙体積／供試体全体積）、W1, W2, W3の順で0.84, 0.75, 0.84%と小さい値を示す。そのため、含水比変化も同様に微少な変化でしか捉えられない。表より、飽和時の含水比はW1, W2, W3の順で0.3, 0.27, 0.3%であり、これが0%になるまでに、P波速度で15%、S波速度で10%の速度低下が生じる。本試料は含有水分が全体に対し微量であるため、含水比の微少な変化で弾性波速度は大きく変化する。

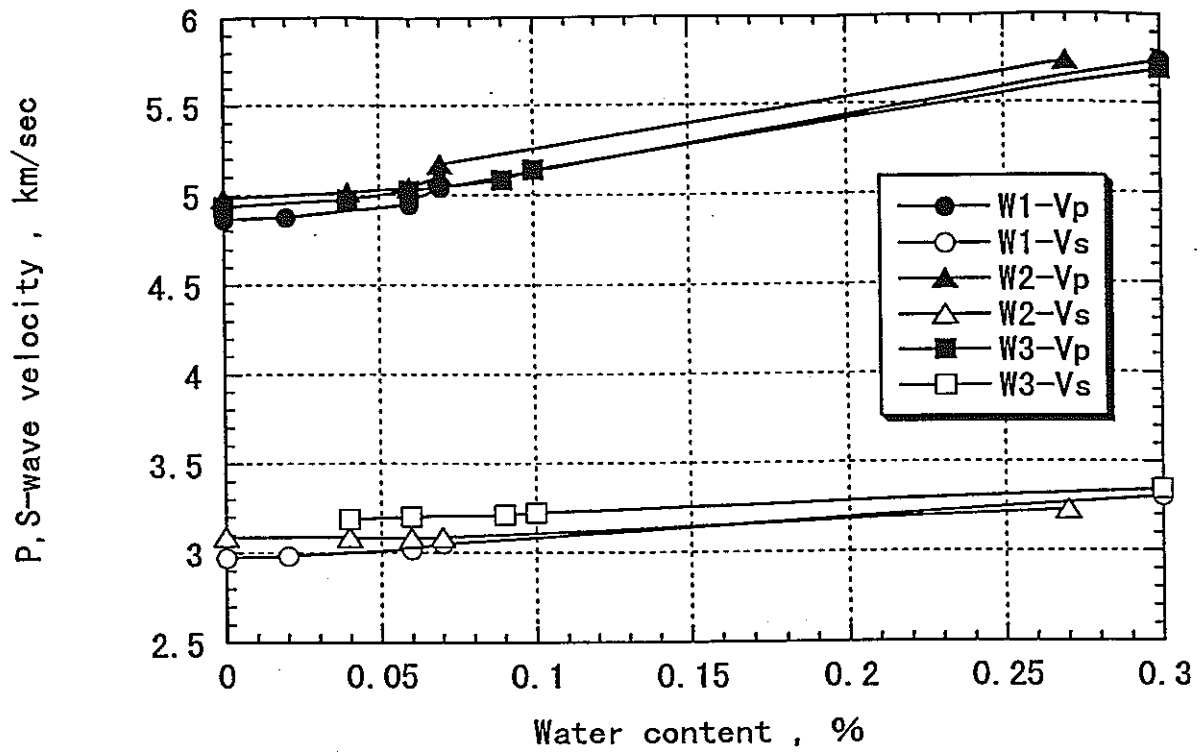


図-5.3.12 含水比とP波速度、S波速度の関係

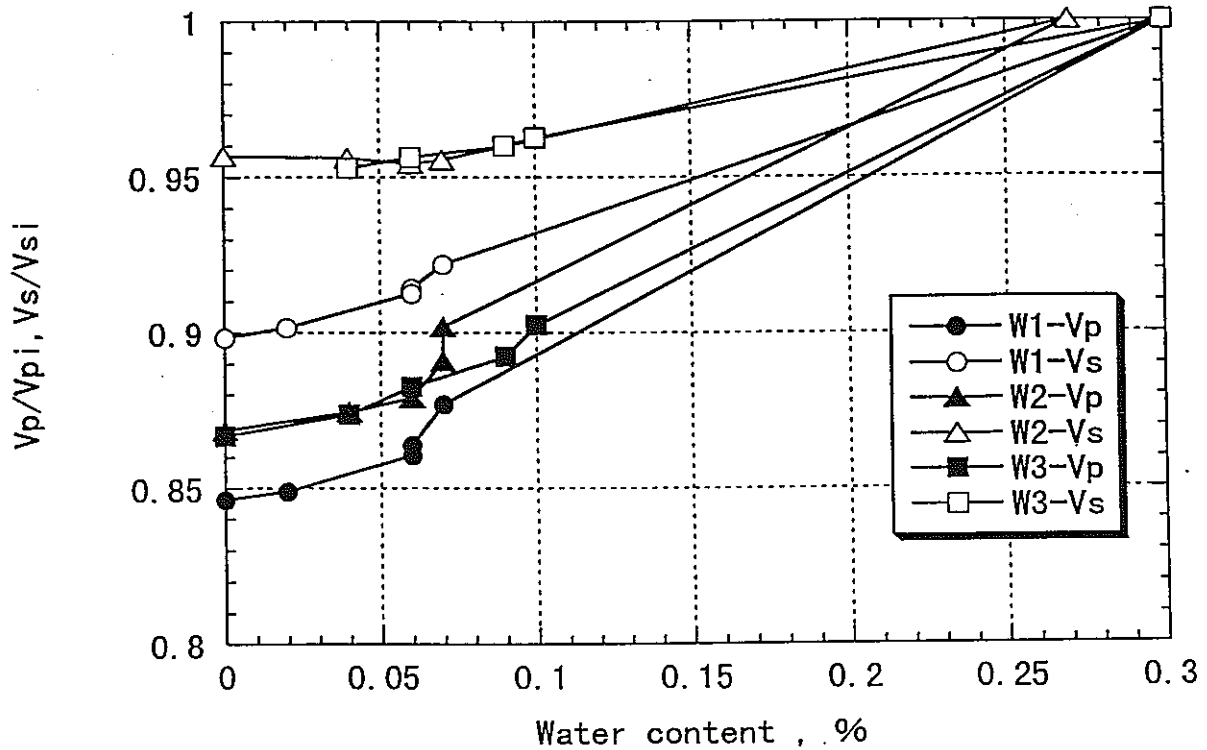


図-5.3.13 含水比とP波速度・S波速度の低下割合の関係

5.3.4 弾性波速度測定のとめ

平成7年度までに釜石原位置試験場において実施された弾性波速度測定結果のばらつきの原因を明らかにし、弾性波速度測定の適用性を把握することを目的として、振動子の共振周波数および岩石供試体の含水比を変化させた弾性波速度測定を実施した。本試験で得られた結果を以下に要約する。

周波数依存性試験

本試験では振動子の共振周波数の違いが測定値に与える影響を検討するのが目的であるが、その他に、潜在クラック、含水状態、測定位置も弾性波速度に影響を与える重要なパラメータである。そこで、クラックの影響を評価するために、拘束圧を等方的に負荷しながら弾性波速度 V_p を測定した。また、含水状態の影響は湿潤供試体と乾燥供試体の2試料を準備することで評価した。さらに、測定位置の影響は振動子の貼り付け位置を3箇所変えることで評価した。以下、それぞれの結果をまとめて示す。

- (1) 拘束圧を等方的に150MPaまで段階的に載荷し、潜在クラックの閉塞効果とP波速度の関係を検討した。拘束圧とひずみの関係から、本試料は拘束圧80~100MPaを境にして両者の関係は曲線から直線関係に移行した。これは、この応力レベル以上では試料内のクラックがすべて閉塞し、岩石実質部分の挙動を示したためと考えられる。一方、等方圧の載荷過程におけるP波速度の変化では、ひずみの挙動と同様に、拘束圧80~100MPaからP波速度が収束する傾向を示した。したがって、潜在クラックの挙動とP波速度が良い対応関係にあるといえる。すなわち、拘束圧80MPa~100MPaまででは潜在クラックの閉鎖によりP波速度が顕著に増加し、それ以降では潜在クラックが閉塞しきったため、P波速度の増加が収束傾向になったと考えられる。

一方、拘束圧0~150MPaの範囲で、潜在クラックの完全閉塞によって上昇するP波速度は無拘束圧下での速度値の20%と大きい値を示した。これを言い換えると、目視で顕著なクラックが認められる場合では、そうでない試料に比べ20%以上の速度低下を示すことを意味している。

- (2) 含水状態を湿潤と乾燥の2状態準備し、それぞれの供試体に対し拘束圧を負荷してP波速度を測定した。その結果、湿潤供試体の方が拘束圧によらず大きい値を示した。この傾向は低拘束圧ほど顕著であり、両者の差は無拘束圧下で0.4km/secであった。超音波伝播速度測定試験は無拘束圧下での測定であり、かつ試料は乾燥しやすい。そのため、飽和試料の測定においてはかなり低め

の結果を得やすい可能性があるといえる。

- (3) 同じ共振周波数(0.5MHz)の振動子を場所を変えて3箇所設置し、拘束圧を負荷してP波速度を測定した。その結果、場所の違いによる測定値のばらつきは0.11~0.17km/sec(測定値に対し3%未満)であり、小さいことがわかった。なお、0.32km/secのばらつきを生じた供試体もあったが、これは潜在クラックの影響と考えられる。したがって、測定箇所の違いによるばらつきは本試料では無視できると考えられる。
- (4) 振動子の共振周波数を0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0MHzの5種類設置し、拘束圧を負荷してP波速度を測定した。その結果、波形の立ち上がりを正しく、しかも安定して読むためには少なくとも0.5MHz以上の共振周波数の振動子を使う必要があることがわかった。また、前述したように、潜在クラックの影響を無視できる拘束圧150MPaにおいて、P波速度に及ぼす振動子の周波数の影響を検討した結果、0.5MHz以上では測定結果にほとんど差が見られないことがわかった。一方、学会指針(地盤工学会基準部)によれば、弾性波速度 V と振動子の共振周波数 f 、試料径 D の関係は $f \geq 5V/D$ を満たす必要があるとされる。本試料の平均 V_p を6km/sec、試料径5cmとすれば、推奨される振動子の共振周波数は0.6MHz以上となり、これは試験結果と傾向的に一致する。なお、S波速度について今回データは取得しなかったものの、P波速度と概ね同様であると推定される。したがって、学会指針で提案されている条件を遵守する範囲の振動子を用いれば、振動子の周波数依存性の影響は無視できるといえる。

含水比依存性試験

弾性波速度は試料の含水状態に依存する。そこで、飽和から乾燥状態に至る過程で、P波速度およびS波速度がどのように変化するかを検討した。測定は大気圧下で行い、飽和直後、5, 10, 30放置後、さらに、31日目、40日目に強制乾燥させた、計6段階の測定を行った。以下、それぞれの結果をまとめて示す。

- (1) 放置日数5日までに、P波速度は飽和時の10~12%の低下、S波速度は4~8%の低下が認められた。また、その後30日まで、P波速度、S波速度とも1%の小さい低下を示した。実際の測定条件では、作業上、供試体作成から室内試験を実施するまで1週間以上の自然放置は普通と考えられる。したがって、室内試験で得られる値は、飽和時よりも5~13%程度は小さい値であると考えておく必要がある。
- (2) 試料を強制乾燥するとさらに速度は低下するが、その割合は飽和時に比べ、

P波速度で15%、S波速度で10%の低下を示した。

- (3) 本試料の有効間隙率は0.75~0.84%と小さい。そのため、飽和時含水比は0.27~0.3%と微少であり、これが0%になるまでに、P波速度で15%、S波速度で10%の速度低下が生じたことになる。間隙が小さい本試料のような場合は、含水比の微少な変化で弾性波速度が大きく変化するため、弾性波速度の低下度合に含水比を尺度とするのは無理がある。むしろ、前述した放置時間を尺度にする方がよいと考えられる。

弾性波速度の測定結果のばらつきに影響を及ぼす因子として、振動子の共振周波数、潜在クラック、測定位置、試料の含水状態について検討した。その結果、測定値は振動子の共振周波数と測定位置といった因子の違いよりも、潜在クラックあるいは含水状態に大きく影響されることが判明した。その影響度合に関しては、潜在クラックの影響が最大で約20%の速度差を生じ、含水状態の影響が飽和状態から乾燥状態に至る過程で約10~15%程度の低下であった。なお、今回の試験では振動子を試料に直接接着しているため、試料と振動子の密着度合の影響は除かれている。実際の測定ではこの影響は無視できないと考えられる。特に、試料が風化変質し、端面の整形精度が不十分な場合は、測定値に少なからず影響を与えることに注意する必要がある。

5.4 割れ目帯（断層破碎帯）における力学特性の把握

岩盤は大小様々の不連続面（割れ目）を含んだ複雑な構造体である。一般に、岩盤の力学挙動は、構成母岩材の材料特性と不連続面の配置状態およびそれら不連続面の力学特性が混ざり合っただけで発揮された結果として具現し、岩石が示す性質とは本質的に異なるものである。このような不連続性岩盤の力学挙動が信頼し得る精度で予測・評価できるためには、不連続面の分布性状および力学特性が明らかにされるとともに、それら不連続面の影響を合理的に評価し得る力学モデルが確立されなければならない。特に、原位置岩盤の変形特性については不連続面の方向性、系の数、分布密度、連続性が載荷幅、載荷荷重の方向と関連して、また面に沿うせん断、引張り、圧縮等の強度特性が載荷荷重の大きさとの関連で作用する。これらの定性的・定量的関係を明らかにするためには、それぞれの要素の把握と実際の変形、応力伝播の特性を把握しなければならない。このような背景から、原位置試験場の割れ目帯を平成7年度に定義したが、本年度は新規に掘削する試験孔（KF-3孔）において選定した割れ目帯（断層破碎帯）において孔内載荷試験を実施し、割れ目帯（断層破碎帯）の主として変形特性に関わるデータを取得した。

5.4.1 試験対象の割れ目帯の選定

試験実施対象の割れ目帯（断層破碎帯）については、550mレベル原位置試験場において平成7年度に定義した割れ目帯の分類に基づき選定を行った。ここで、平成7年度に定義した割れ目帯の分類を表-5.4.1に示す。表-5.4.1に示すように、550mレベル原位置試験場において観察される割れ目帯（断層破碎帯）はその方向性、割れ目の形成ステージに応じてType 1～Type 3の3つのグループに分類される。各々のグループの割れ目帯の特徴は以下のとおりである。

(1) Type 1に分類される割れ目帯

EW系の方位を有する割れ目帯、もしくは、EW系と他の方位の2方位を有する割れ目帯である。この分類に属する割れ目帯は、いずれも顕著な変質が観察され、割れ目帯の幅が比較的大きい特徴を有する。さらに、550mレベル原位置試験場周辺に分布する割れ目充填物の全ての種類が観察されるため、複雑な形成史を有する割れ目帯であると考えられる。

表-5.4.1 平成7年度に定義した割れ目帯分類

	方位 (Strike)	割れ目帯 (No.)	変質		割れ目帯 タイプ	割れ目の形成ステージ				
			色	程度		Alteration		Pre-L-Chl系		L-ST-Chl系
						REa epi+Lau	ORa	WTP Oal+Lau	DGP	GYP Film
Type1	EW系	EW系	14	赤色変質	全体変質	II-4	◎	◎	○	
		EW系 + N70E系	22	オレンジ色変質	中変質	II-4	○	◎	△	
		N50E系 + EW系	21, 25	オレンジ色変質	中変質	II-4	○	○	○	
Type2	N60W系	17, 24	白色変質	弱変質	III-1	×	×	◎		
Type3	N50E系	18, 19, 20, 23	オレンジ～赤色変質	中～強変質	I-2, (III-2)	○	◎	△		

*◎:非常に多い, ○:多い, △:少ない, ×:ほとんど観察されない

(2) Type 2に分類される割れ目帯

N60° W系の方位を有する割れ目帯である。この分類に属する割れ目帯は、いずれも変質を伴わない、主要割れ目と派生割れ目から構成される割れ目帯である。また、また、形成時期が比較的遅いと推定される東沸石-緑泥石系の充填物（灰色部、黒色部）を介在する割れ目により構成され、550mレベル原位置試験場周辺において特徴的に認められるブドウ石-濁沸石-緑泥石系の充填物（白色部、暗緑色部、濁沸石等）が欠如していることも大きな特徴である。

(3) Type 3に分類される割れ目帯

N50° E系の方位を有する割れ目帯である。この分類に属する割れ目帯は、変質を伴う充填幅50mm以上を有する単一割れ目、もしくは変質を伴う主要割れ目と派生割れ目により構成される割れ目帯である。また、この分類に属する割れ目帯は、550mレベル原位置試験場において特徴的に認められるブドウ石-濁沸石-緑泥石系の充填物（白色部、暗緑色部、濁沸石等）と母岩のオレンジ色変質により特徴づけられる割れ目帯である。これらの変質や充填物よりも後期に形成されたと推定される東沸石-緑泥石系の充填物（灰色部、黒色部）がほとんど認められないことから、割れ目帯形成後に再動や再変質等の影響の少ない割れ目帯であるものと推定される。

以上の結果を踏まえて、試験対象の割れ目帯（断層破碎帯）としては以下に示す2つのグループを対象とした。

① Group 1

方位がN50° E~EW系でブドウ石-濁沸石-緑泥石系の充填物（白色部、暗緑色部、濁沸石等）と母岩のオレンジ色~赤色変質により特徴づけられるもの。

② Group 2

方位がN60° W系で東沸石-緑泥石系の充填物（灰色部、黒色部）を介在する割れ目により構成され、母岩が粘土質であるもの。

試験は本年度新規に掘削したKF-3孔において実施した。試験深度を地質状況と合わせて一覧表にまとめたものを表-5.4.2に示す。表-5.4.2に示したとおり、試験に当たっては、深度10.0~14.0m, 16.0~17.0m, 20.0~27.0m, 30.0~33.0mの4区間の割れ目集中域を主な試験対象とした。なお、表-5.4.4に示した試験深度は載荷板中心での深度である。したがって、載荷領域は試験深度を中心として±12.5cmとなる。さらに、地質状況で示した割れ目については、傾斜が30°以下は水平、30°~60°を中間、60°以上を垂直と分類した。

表-5.4.2 試験深度と試験位置の地質状況

試験深度 (m)	地質状況
10.30 (10.175~10.425)	割れ目帯24 (N60W系) との連続性が推定される。載荷位置に水平の割れ目、垂直の割れ目が認められる。また、幅75cm程度の灰色~黒色の粘土質部である。⇒ Group 1
11.15 (11.025~11.275)	割れ目帯24 (N60W系) との連続性が推定される。灰色~黒色の粘土質部である。⇒ Group 1
16.00 (15.875~16.125)	割れ目帯24 (N60W系) との連続性が推定される。垂直な割れ目が多数認められ、その内の1本が開口幅が4mmである。全体に灰色~黒色の粘土質部である。⇒ Group 1
17.00 (16.875~17.125)	N70E系の垂直な割れ目が存在し、開口幅は11mm、赤色変質を伴う。⇒ Group 2
21.40 (21.275~21.525)	N60E系の垂直な割れ目が2本、N60W系の垂直な割れ目が3本存在する。東西系の割れ目の内、1本は開口幅が3mmであり、赤色変質を伴う。⇒ Group 2
24.11 (23.985~24.235)	N70E系の中間の割れ目が4本存在し、赤色変質を伴う。⇒ Group 2
26.32 (26.195~26.445)	N40E~N60Eの中間の割れ目が複数存在し、前後1mにわたり赤色変質を伴う。⇒ Group 2
32.10 (31.975~32.225)	N80E系の垂直な割れ目が1本存在し、開口幅が4mm、赤色変質を伴う。⇒ Group 2

5.4.2 試験結果と考察

試験深度毎の変形係数 ($D1, D2$) と接線弾性係数 ($E1, E2$) を試験深度に対してプロットしたものを図-5.4.1~図-5.4.4に示す。ここで、各図には、同じ550mレベル原位置試験場で平成6年度に実施したKM-0孔の試験結果 (試験実施箇所は健岩部を対象) の平均値も併せてプロットした。なお、KM-0孔における変形係数および接線弾性係数の平均値の算出に当たっては、本年度の試験結果とほぼ同様な荷重範囲のものを用いた。

各試験深度で得られた変形係数に着目すると、深度16.00mおよび深度32.10mでKM-0孔の平均値に比較的近い値を示すが、それ以外の試験深度ではいずれもKM-0孔の平均値より低めの値を示し、健岩部より変形し易い傾向を示す。なお、変形係数の低下割合では、試験深度26.32mが最大でありKM-0孔の平均値と比較して約20%程度の値を示した。これに対して、接線弾性係数では深度16.00mおよび深度32.10mに加えて、深度10.30m、深度11.15m、深度16.00mにおいてもKM-0孔の平均値に比較的近い値を示す。これは、変形係数が各載荷時の変位量と荷重の関係から算出される値であるのに対し、接線弾性係数は各除荷時の変位量と荷重の関係

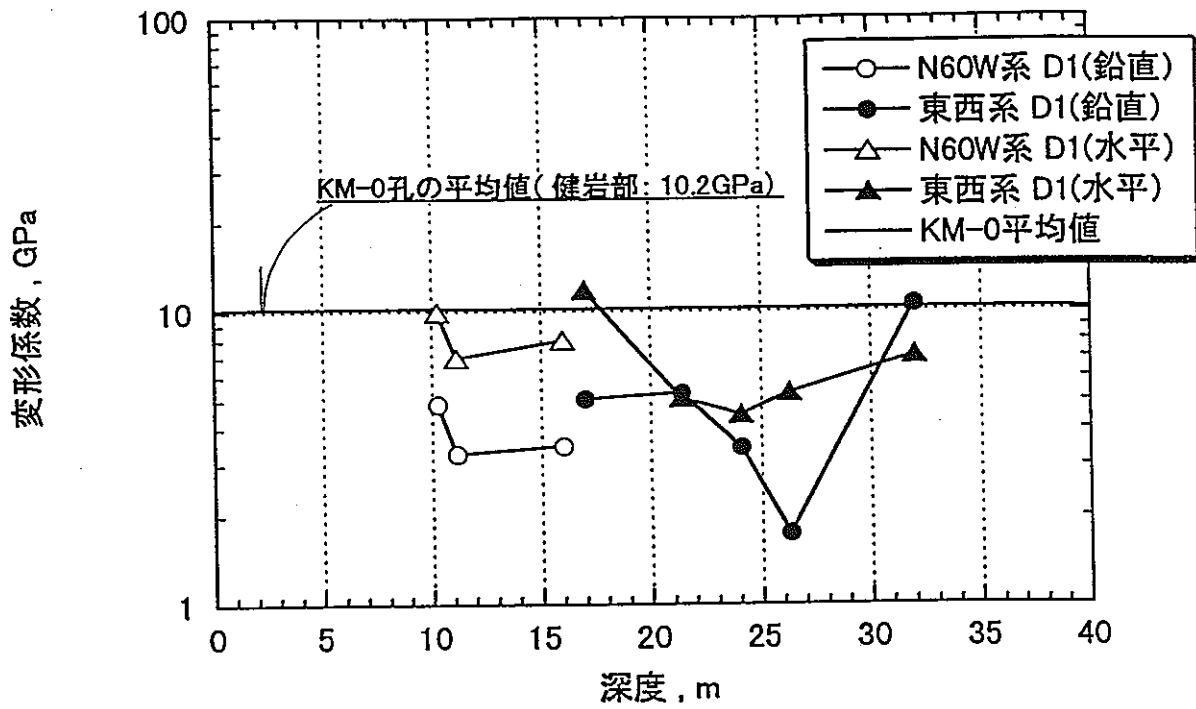


図-5.4.1 試験深度と変形係数D1の関係

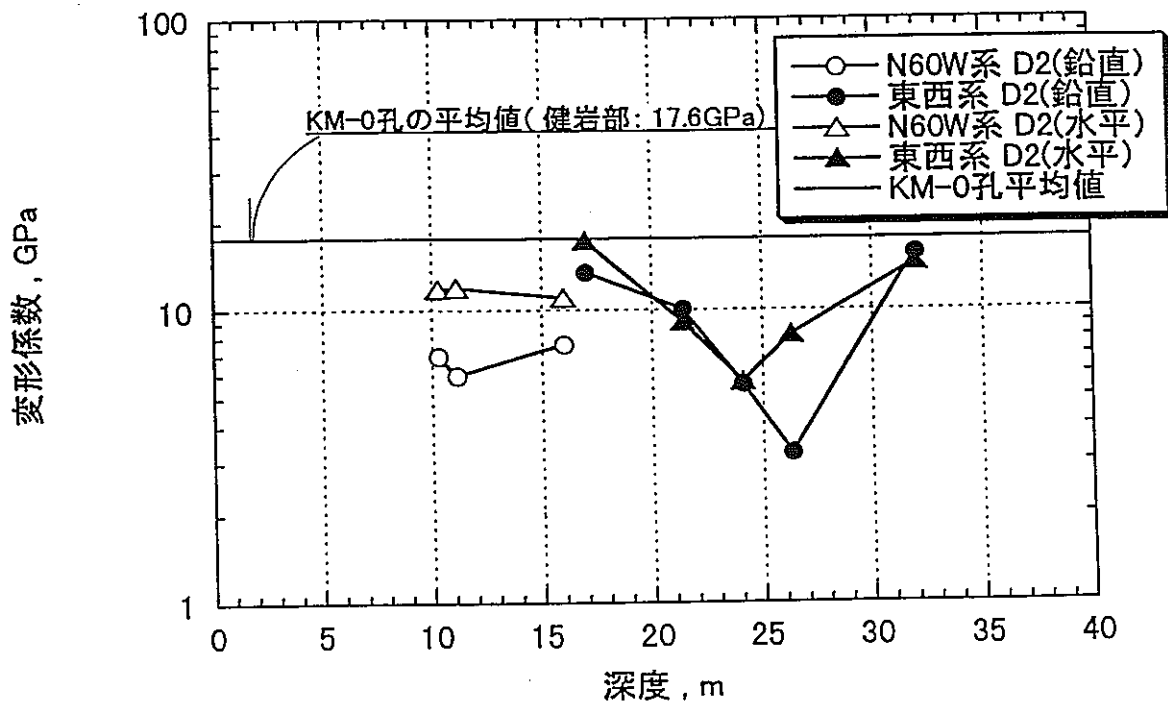


図-5.4.2 試験深度と変形係数D2の関係

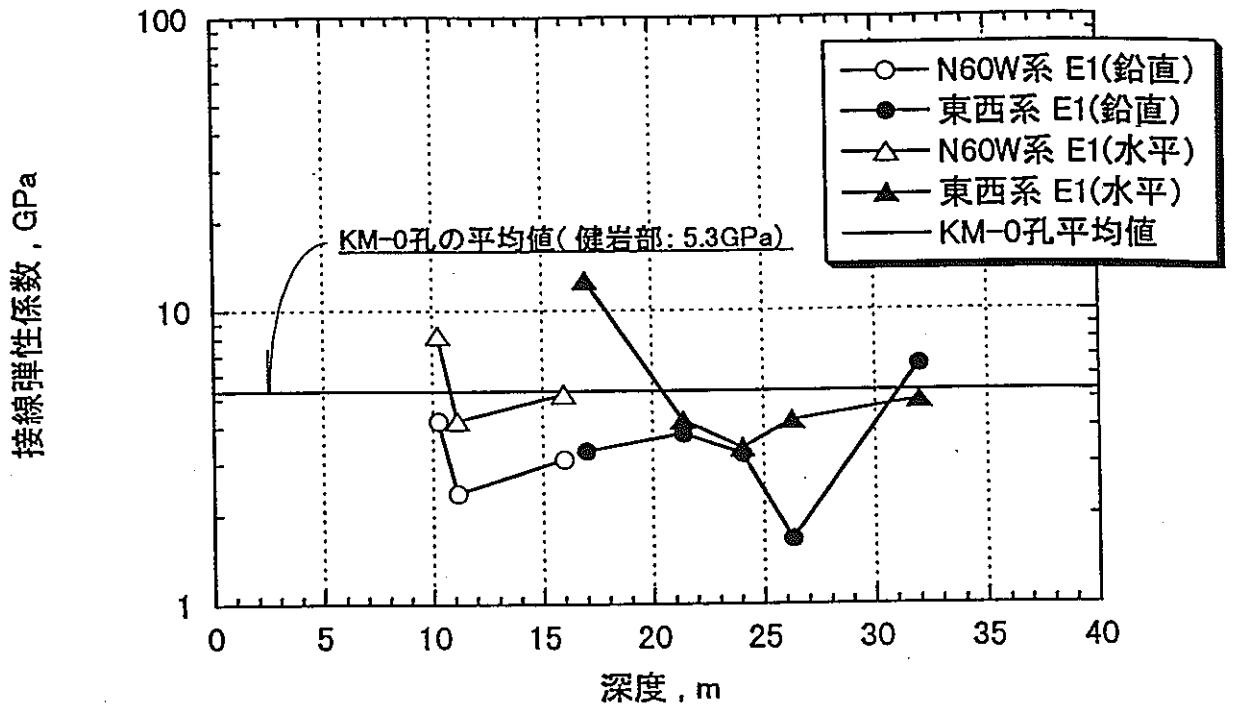


図-5.4.3 試験深度と接線弾性係数 E_1 の関係

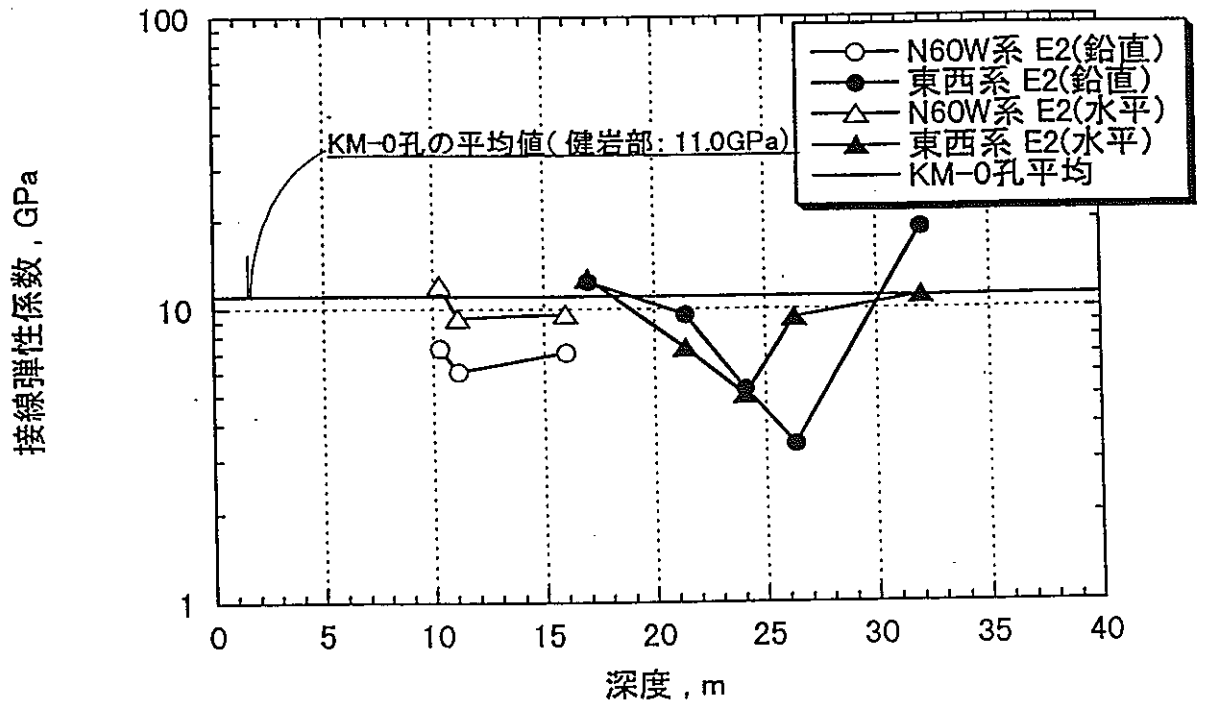


図-5.4.4 試験深度と接線弾性係数 E_2 の関係

から算出される値であることを考慮すれば、当然の結果である。一方、接線弾性係数の低下割合については、変形係数と同様に試験深度26.32mが最大でありKM-0孔の平均値と比較して約30%程度の値を示した。

試験対象とした割れ目帯の性質毎の違いについては、前述したGroup 1とGroup 2では両者を比較して変形係数および接線弾性係数ともに値が極端に異なるといった結果は得られなかった。しかしながら、両グループ内の不均質性には異なった傾向が見受けられる。すなわち、Group 1においては、変形係数および接線弾性係数ともに同程度の値を示し、試験位置の違いによる不均一性は小さい。これに対し、Group 2においては、変形係数および接線弾性係数ともに試験位置の違いによるばらつきがGroup 1と比較して大きく、不均一性が大きい傾向を示す。

載荷方向別の変形特性に関しては、Group 1において、いずれの試験深度についても変形係数および接線弾性係数ともに水平方向の値が鉛直方向の値より大きくなり、鉛直方向に変形し易い傾向を示す。これに対し、Group 2においては、試験深度によって変形し易い方向が異なる傾向を示す。

次に、Schneiderによる岩盤区分の指標を用いて各試験深度における岩盤の状態についての検討を行う。一般的に、変形係数は変形特性の内、岩盤の節理や亀裂の緩みの影響を受けており、それと接線弾性係数との差は岩盤の緩みの程度あるいは締め固まりの程度を表すものとされている。ここで、Schneiderは表-5.4.3に示すような E/D の値を用いて岩盤区分を行っている。すなわち、 $E/D < 2$ で「締まった岩盤」、 $2 < E/D < 10$ で「亀裂が開口している岩盤」、 $E/D > 10$ で「亀裂開口が著しい岩盤」に区分され、一般にこの比が大きいと岩盤が緩んでいることになる。算出した $E2/D1$ の値を各試験深度に対してプロットしたものを図-5.4.に示す。なお、図においては、変形係数および接線弾性係数と同様にKM-0孔の平均値も併せてプロットした。図より明らかなように、KM-0孔（健岩部）における E/D の平均値1.1と比較すると、いずれも大きめ値を示し、特に深度16.00m（鉛直方向）、深度17.00m（鉛直方向）、深度26.32m（鉛直方向）で E/D の値が2.0を越える値を示した。これらの主たる要因として、深度16.00m、深度17.00mでは開口割れ目の影響、深度26.32mにおいては変質の程度および幅の影響が挙げられる。すなわち、深度16.00m、深度17.00mでは、それぞれ開口幅4mm、11mmの開口割れ目が存在し、深度26.32mにおいては試験領域を挟んで前後1mにわたり赤色変質が観察される。

表-5.4.3 Schneiderによる岩盤区分

岩盤区分	E/D
締まった岩盤	< 2
亀裂が開口している岩盤	2~10
亀裂開口が著しい岩盤	> 10

割れ目帯（断層破碎帯）の変形特性について総括すると、次のようである。本年度試験対象とした割れ目帯では、同じ550mレベル原位置試験場で実施された健岩部の変形特性と比較して、概ね1オーダー程度低い値を示し、最大で健岩部の20~30%程度の値であった。また、割れ目帯の属性による違いでは、変形性の絶対値について、今回試験対象としたGroup 1 (N60° W系) とGroup 2 (N50° E~EW系) との間には明瞭な差は認められなかった。しかしながら、各々のグループ内の変形特性に着目すると、Group 1 (N60° W系) では試験実施場所の違いによる不均一性はほとんど認められないのに対し、Group 2 (N50° E~EW系) では変質の程度および幅により不均一性が生じ、試験実施箇所により変形特性が異なる傾向が認められた。

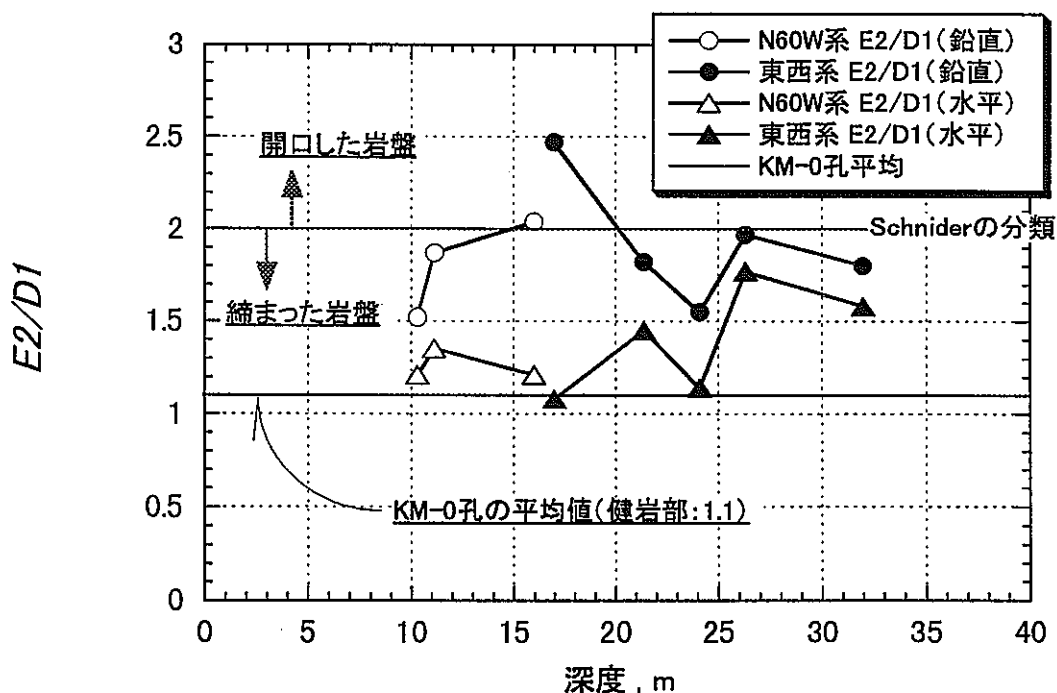


図-5.4.5 試験深度とE/Dの関係

5.4.4 まとめ

割れ目帯（断層破碎帯）の力学特性の把握を目的として、本年度新規に掘削したKF-3孔において孔内載荷試験（KKT）を実施した。調査結果の主なものは次のようにまとめられる。

- (1)平成7年度に定義した割れ目帯（断層破碎帯）に基づきGroup 1（N60° W系）とGroup 2（N50° E～EW系）を対象割れ目帯として試験を実施した結果、同じ550mレベル原位置試験場で実施された健岩部の変形係数、接線弾性係数と比較して1オーダー程度低い値を示し、最大で20～30%の値であった。
- (2)割れ目帯の属性による違いでは、変形性の絶対値について、今回試験対象としたGroup 1（N60° W系）とGroup 2（N50° E～EW系）の間には明瞭な差は認められなかった。
- (3)各々のグループ内の変形特性に着目すると、Group 1（N60° W系）では試験実施場所の違いによる不均一性はほとんど認められないのに対し、Group 2（N50° E～EW系）では変質の程度および幅により不均一性が生じ、試験実施箇所により変形特性が異なる傾向が認められた。
- (4)Schneiderの岩盤区分に試験結果を当てはめると、開口割れ目の有無が岩盤区分に大きく影響を及ぼすものと推測される。
- (5)一般的に、KKTを用いた孔内載荷試験では試錐孔と試験対象領域に存在する割れ目の方向との交差角が測定結果に大きな影響を与える。したがって、割れ目帯の属性毎の変形性を詳細に評価するには、この交差角を同じにするような試錐孔の配置が望まれる。

6. 深部岩盤の水理特性の調査・解析

6.1 調査の目的および概要

原位置試験場周辺の降水量、気温、坑道湧水量および間隙水圧の経時変化を把握し、深部岩盤の水理特性について調査・検討する。具体的には、これまでに原位置試験場において取得された降水量、気温、坑道湧水量および間隙水圧の各データを取りまとめるとともに、本年度新たに錘進された KF-3 孔掘削中における KF-1,2 孔の間隙水圧の経時変化を把握し、これらのデータを釜石鉱山内で実施された試験・工事の内容と比較することによって試験エリアの水理特性について考察した。

6.2 降水量・気温・坑道湧水量の経時変化の把握

6.2.1 降水量・気温の経時変化

これまでに釜石鉱山において観測された降水量、気温のデータを取りまとめ、図-6.2.1 に平成元年 11 月 1 日～平成 10 年 3 月 31 日までの気温と降水量、図-6.2.2 に月別の平均気温と平均降水量、図-6.2.3 に今年度観測した気温と降水量をそれぞれプロットした。なお、降水量は降雨量と融雪量の和とした。平成 9 年度の降水量は 4～6 月までは例年の 1.5 倍程度の降水量であり、逆に 7～8 月は例年の半分以下と非常に少なくなっている。また、9 月は例年同様の降水量であるが、10 月は例年の半分以下、さらに 11 月は例年の 2.5 倍もの降水量を記録した。例年の降水量分布と比較して大きく異なっている。しかしながら、平成元年 11 月 1 日～平成 10 年 3 月 31 日の間の年間平均降水量は 1,216mm であり、それと比較すると平成 9 年の年間降水量は、若干多い 1,303mm である。一方、平成 9 年度の気温は 8 月の平均最低気温と 10 月の平均最高気温が例年よりも 5℃程度高くなっており、特に 8 月の平均最低気温は過去最低を記録した。

6.2.2 坑道湧水量の経時変化

坑道湧水量の経時変化を把握するために、550mL 坑道の 4 箇所において堰による湧水量観測を定常業務で実施している。堰による流量観測を行っている位置を図-6.2.4 に示す。なお、堰 No.4 でのみ平成 7 年度に設置した流量自動計測器による自動観測を行った。観測された堰 No.1～No.4 の流量の経時変化を図-6.2.5 に示す。ここで、各堰の湧水量の経時変化の特徴を以下に示す。

① 堰 No.1

6/21、8/21、10/27、1/8 の 4 回は約 8,000cc/sec と比較的多く、11/29、12/16 の 2 回は

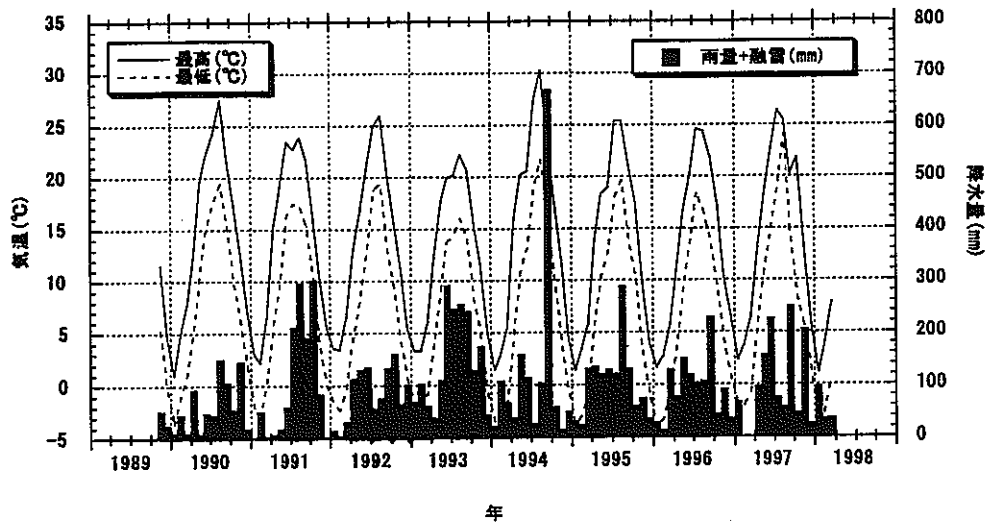


図-6.2.1 月平均気温と月間降水量（平成元年度～平成9年度）

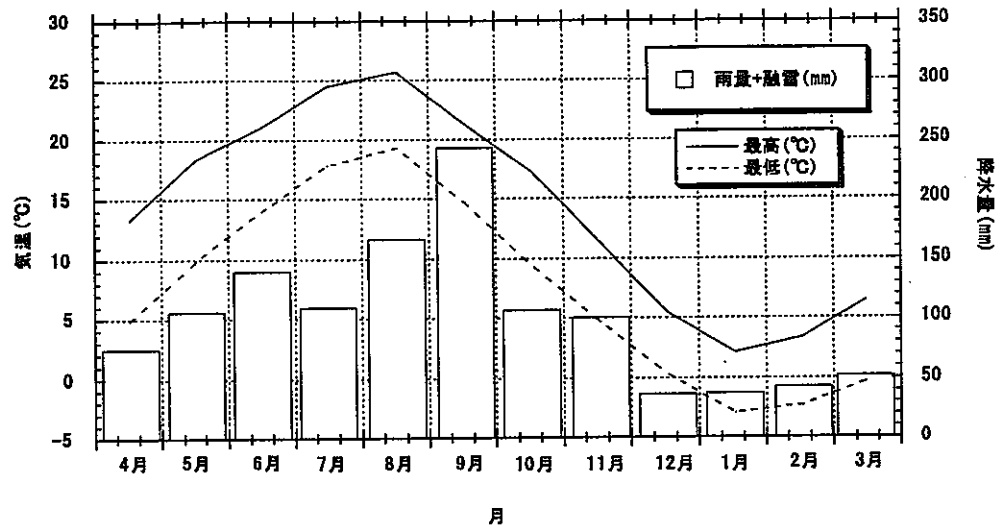


図-6.2.2 月平均気温と平均月間降水量（例年）

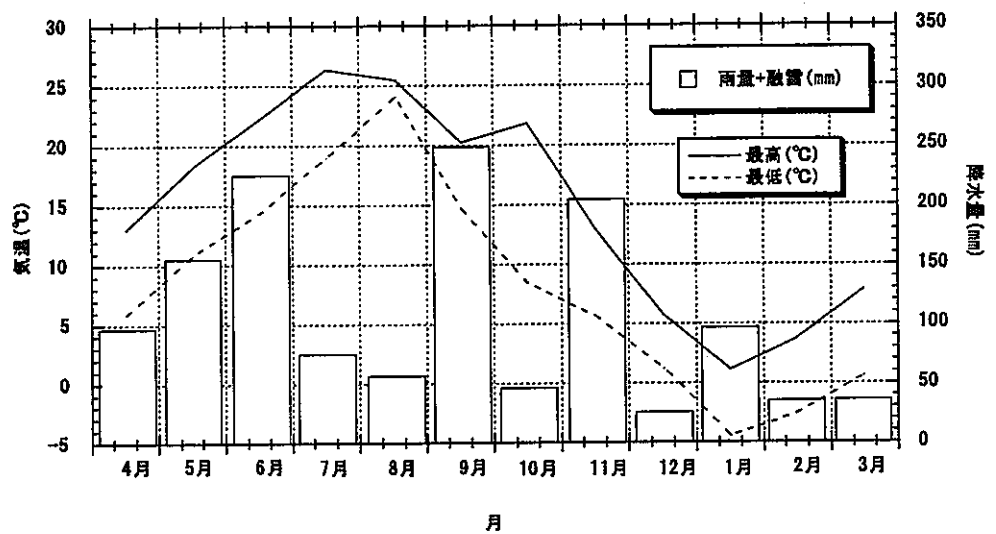


図-6.2.3 月平均気温と月間降水量（平成9年度）

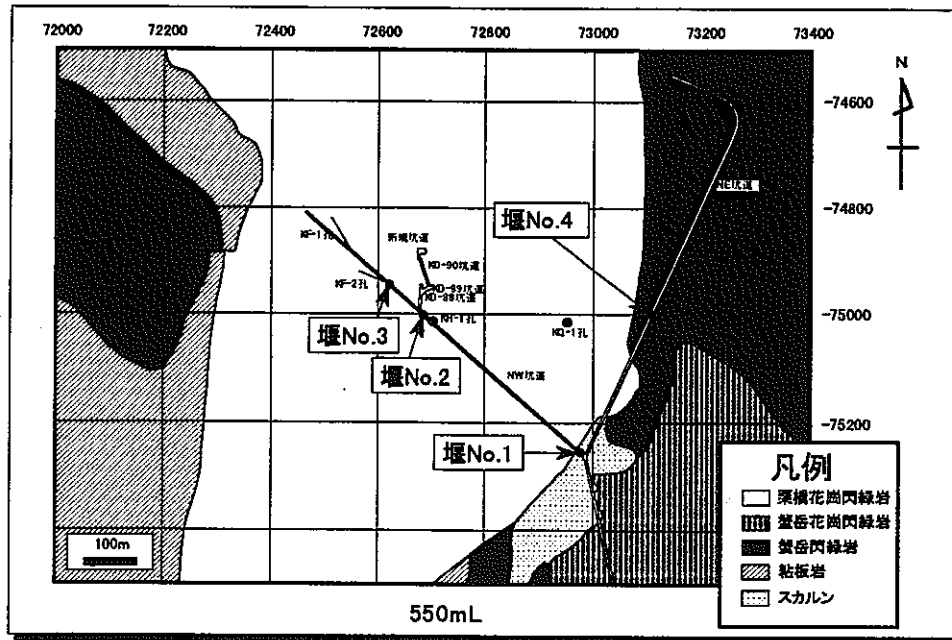


図-6.2.4 堰流量観測位置

約 5,000cc/sec と少ない。堰 No.1 では水頭を測定し、流量に換算する方法を採用していることから測定誤差があり、約 7,000cc/sec 前後の安定した湧水量であったと考えられる。

②堰 No.2

湧水量は 4/10 に 183.2cc/sec と突出して多く、4月中旬から7月までは比較的安定し、8月以降は大きく変動している。堰 No.2 は KD-88 坑道に設置されていることから、4/10 にはトレーサー坑道において KH-23 孔のパッカー交換作業が行われていたため湧水量が突出したものと推測される。また、8月から12月までは、同じくトレーサー坑道においてトレーサー試験が断続的に実施されたことから、このことが8月以降の変動の原因であると思われる。

③堰 No.3

湧水量は年間を通して約 1,000cc/sec と安定しているが、10月下旬に 2,000cc/sec と多くなっている。これは 10/19 ~ 10/29 にかけて KF-3 孔において孔内載荷試験が実施されたことが影響しているものと考えられる。また、12月以降湧水量の変動が大きくなっているが、この時期にNW坑道のグラウト試験坑道において発破孔の試錐と発破後の岩盤の水洗という作業が行われたことから、その影響を受けた結果であると考えられる。

④堰 No.4

大きな変動はなく、年間を通して 950cc/sec と安定しているように見受けられる。

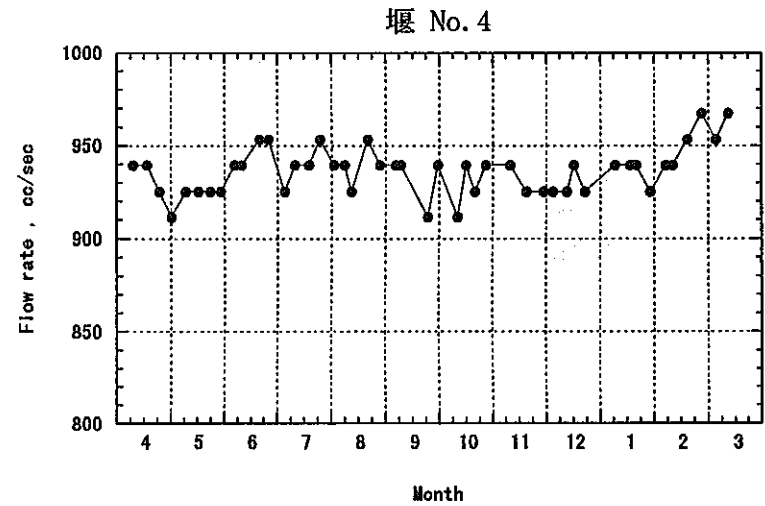
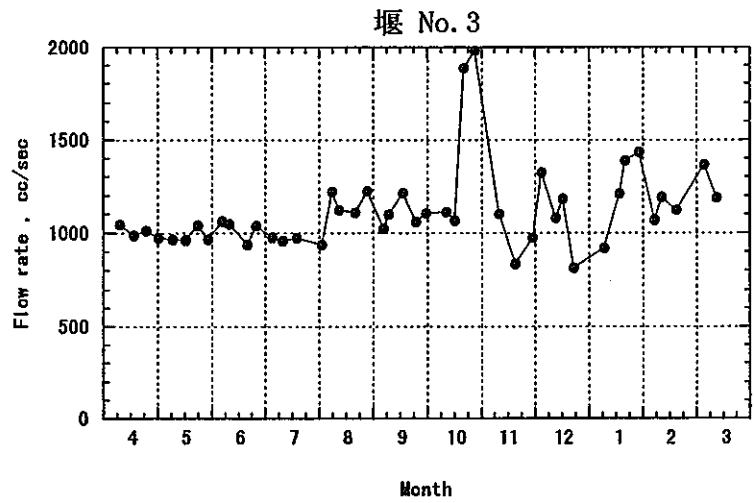
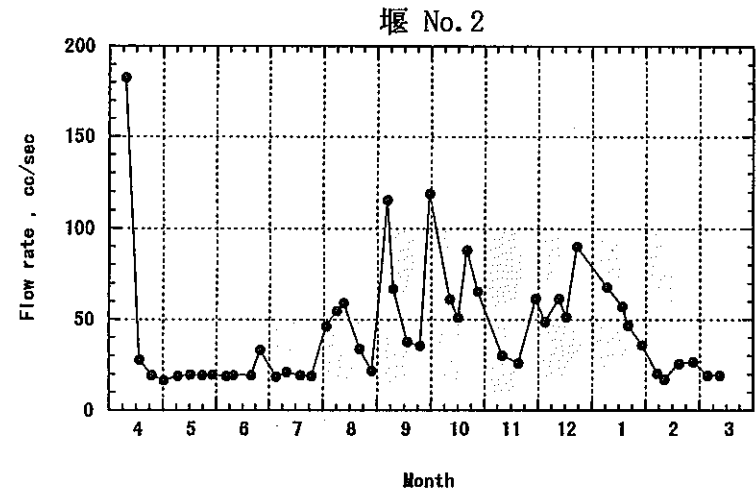
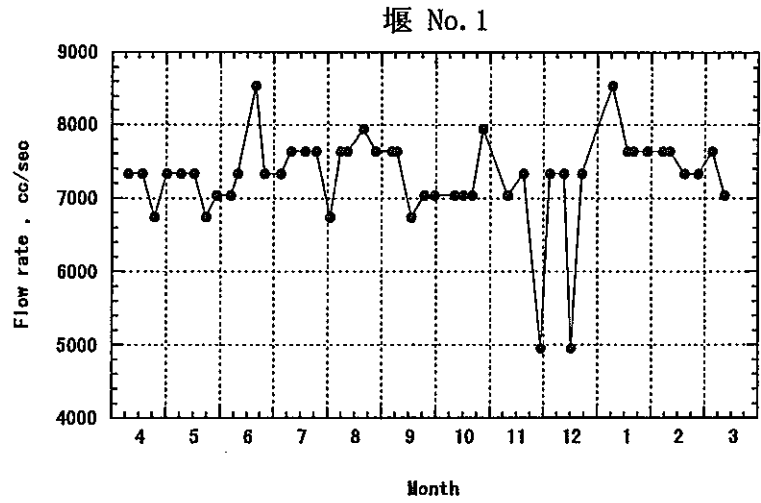


図-6.2.5 坑道湧水量の経時変化

後述の KG-1 孔における間隙水圧計測結果から、ピエゾ水頭は降雨量の季節変動に影響を受けていることが明らかとなっているが、何れの堰とも降雨等の自然要因よりも人為的な要因の影響を強く受けていることが判る。

堰による湧水量の測定において採用した測定方法は、いずれとも測定精度は高くなく定性的な解釈を目的とした定常業務内において観測されている。また、堰 No.4 では流量自動観測器によって観測され、調査・試験の影響も比較的受けていないと思われるが、降雨量の多寡に関連した変動は認められない。これは、以下のように考えることができる。すなわち、堰で観測される湧水は、その全てがある水みちから直接流入しているわけではなく、いったん坑道内に流出すると坑道壁面や坑道床盤を通過し、排水溝に入った後に堰にたどり着く。坑道壁面や坑道床盤を通過する際に、湧水は再度岩盤中に浸透したり、拡散していくことによって量的に平均化されるものと推測する。このことと、観測機器の感度の問題によって年間を通じて変動が少ない結果になったのであろう。

以上より、坑道湧水量は降雨量の季節変動に影響を受けて、実際には変動しているものと推測されるが、観測箇所周辺の調査・試験の影響、および測定手法の精度の問題からその変動を捉えきれなかったものと結論づける。

最後に原位置試験で得られた経験と反省点から、今後、地下岩盤中において湧水量観測を実施する場合に考慮すべきポイントを以下に記す。

- ①定性的な観測よりも定量的な観測手法を採用すべきである。
- ②単一割れ目に近い状態で比較的多量の湧水を伴っているような箇所を観測点として選定すべきである。(原位置試験場で例えると、550mL N W坑道の 625m ~ 650m 地点や 250mL 坑道引立の既存試錐孔など。)
- ③選定する観測点が地表との連続性が推定されるような断層帯に存在すれば、なお望ましい。(地表における降水量の季節変動等と比較しやすいからである。)
- ④周辺で試験や工事が行われないような箇所が望ましい。(人為的な攪乱要因は地下水場に大きな影響を与える。)
- ⑤観測点の湧水は失することなく、できるだけ全ての量を堰あるいは升に導いて計測する。また、その時に観測点以外からの流入もできるだけ排除する。
- ⑥計測機器は大まかな湧水量を推測して、十分な精度と感度を持つものを選択すべきである。
- ⑦観測方法は自動観測にした方が望ましいが、無理ならば計測者の違いによる誤差を少なくするために同じ人で計測を続けるべきである。また、その時は計測者の主観が入らないように、計測手順を細かく定めてマニュアル化しておく。

6.3 間隙水圧の経時変化の把握

6.3.1 KG-1孔での間隙水圧の経時変化

KG-1孔における間隙水圧の測定は平成4年度に設置したMPケーシングシステム¹⁾を用いて行った。計測は平成8年度に引き続き定常業務として、地表から地下深部までの20区間において、ほぼ2週間に1回の頻度で間隙水圧の計測を実施した。

KG-1孔の位置を550mL坑道と併せてプロットしたものを図-6.3.1に示す。なお、KG-1孔は、平成3年度に平面直角座標系の原点より緯距-75,003.392m、経距72,937.954m、海拔784.859mの地点から鉛直下向きに800m錐進された試錐孔である。

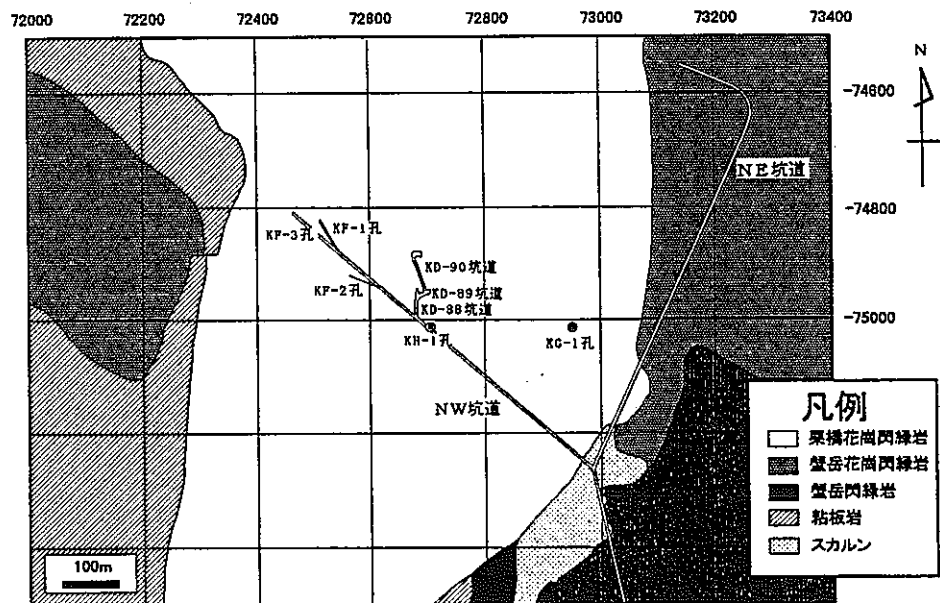


図-6.3.1 KG-1孔の位置

平成4年度にKG-1孔に設置したMPケーシングシステムの設置図を図-6.3.2に示す。また、表-6.3.1にはベントポートおよび計測ポートの位置を示す。表-6.3.1に示したように、KG-1孔に設置したMPケーシングシステムでは合計30箇所のベントポートおよび計測ポートで水圧計測が可能であるが、本年度は昨年度までに引き続き、図-6.3.2に示した合計20箇所のベントポートおよび計測ポートで水圧計測を行った。外水圧は30秒毎にその計測値を読みとり、4回続けて同じ値になるまで計測を続ける。

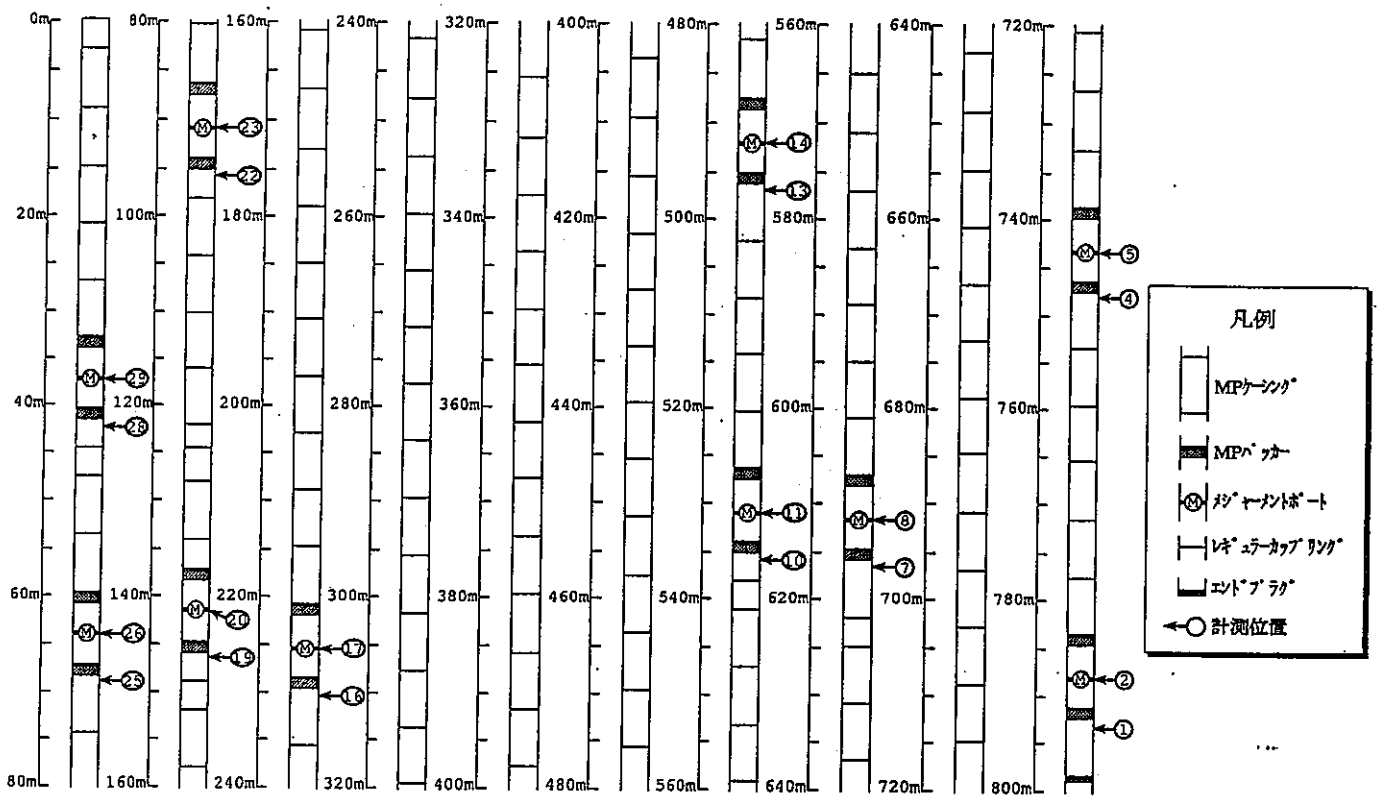


図-6.3.2 MPケーシングシステムの設置図

表-6.3.1 ベントポートおよび計測ポートの設置深度

計測ゾーン	MPパッカー				計測ポート 深度(m)
	設置番号	製造番号	深度(m)	ベンチポート(m)	
①	2	120	791.8~793.0	793.0	788.6
	5	117	784.2~785.5	785.4	
②	12	118	747.0~784.2	748.2	743.7
	15	104	739.4~740.6	740.6	
③	37	116	615.1~616.4	616.3	611.9
	40	115	607.5~608.8	608.7	
④	54	119	534.3~535.5	535.5	531.0
	57	106	526.7~527.9	527.9	
⑤	63	105	495.5~496.7	496.7	492.2
	66	109	487.9~489.1	489.1	
⑥	110	108	228.5~229.7	229.7	225.3
	113	111	220.9~222.2	222.1	
⑦	127	110	144.7~145.9	145.9	141.4
	130	114	137.1~138.3	138.3	
⑧	139	101	93.8~95.1	95.0	90.6
	142	112	86.3~87.5	87.5	
⑨	146	103	67.0~68.3	68.2	63.8
	149	100	59.4~60.7	60.6	
⑩	154	102	40.2~41.4	41.4	36.9
	157	113	32.6~33.8	33.8	

KG-1 孔における間隙水圧の測定は 1997/04/11 ~ 1998/03/18 まで、2 週間に 1 回の頻度で合計 21 回計測した。

MP システムは平成 4 年度に設置されたものであり、設置から約 5 年経過している。そこで、KG-1 孔の水圧分布が時間の経過とともに変化したかどうかを調べてみた。1992/12/23 の計測データと 1997/04/11 の計測データを、それぞれピエゾ水頭とピエゾ標高に換算して KG-1 孔口元からの深度と標高に対してプロットしたものを図-6.3.3 および図-6.3.4 に示す。1992/12/23 と 1997/04/11 の水圧分布を比較すると、概ね同じような水圧分布を示し大きな変化は認められないことがわかる。また、KG-1 孔における水圧分布の全体的な傾向から、大きく分けて以下に示す 4 つの帯水層と各帯水層間の 3 つの難透水層に分けられる。

① 標高 800m ~ 720m のゾーン

地表付近の帯水層でピエゾ標高は約 780m であり、地表面から深度 5 ~ 6 m の位置に地下水面が存在することになる。このゾーンの地下水は、上面（自由水面）で大気圧と平衡状態であることで特徴づけられ、地下水学でいうところの「不圧地下水」の状態を呈していると考えられる。地表の降水はこのゾーンで涵養されて、さらに深部へと供給されているものと推測する。文献²⁾によれば自由水面と地表との間は通気帯と呼ばれる地上と地下水系の緩衝帯が存在し、地表からの降水の浸透はこの通気帯を介して行われる。通気帯は 1 年のうちある期間は水溶性の塩類を一時貯蔵し、他の期間にこれを下方の帯水層に送り出す働きをする。したがって、このゾーンと以下に示すような、さらに深部の帯水層では、溶存酸素量や化学成分に違いがあるものと推測する。

② 標高 710m ~ 570m のゾーン

ピエゾ水頭が標高 680m 付近にあるゾーンである。なお、このゾーンより以下では被圧帯水層であると推測される。

③ 標高 560m ~ 310m のゾーン

ピエゾ水頭が標高 650m 付近にあるゾーンである。ただし、この区間は上下を一組のパッカーでシールされた 258m の長大な 1 区間であり、計測はこの区間の頂部に近いただ 1 点で計測されただけである。なお、この区間はコア観察から変質を伴った破碎帯であることが確認されており、孔径が拡大しているためパッカーは設置されていない。

④ 標高 280m ~ 0m のゾーン

ピエゾ水頭が標高 580m 付近にあるゾーンである。

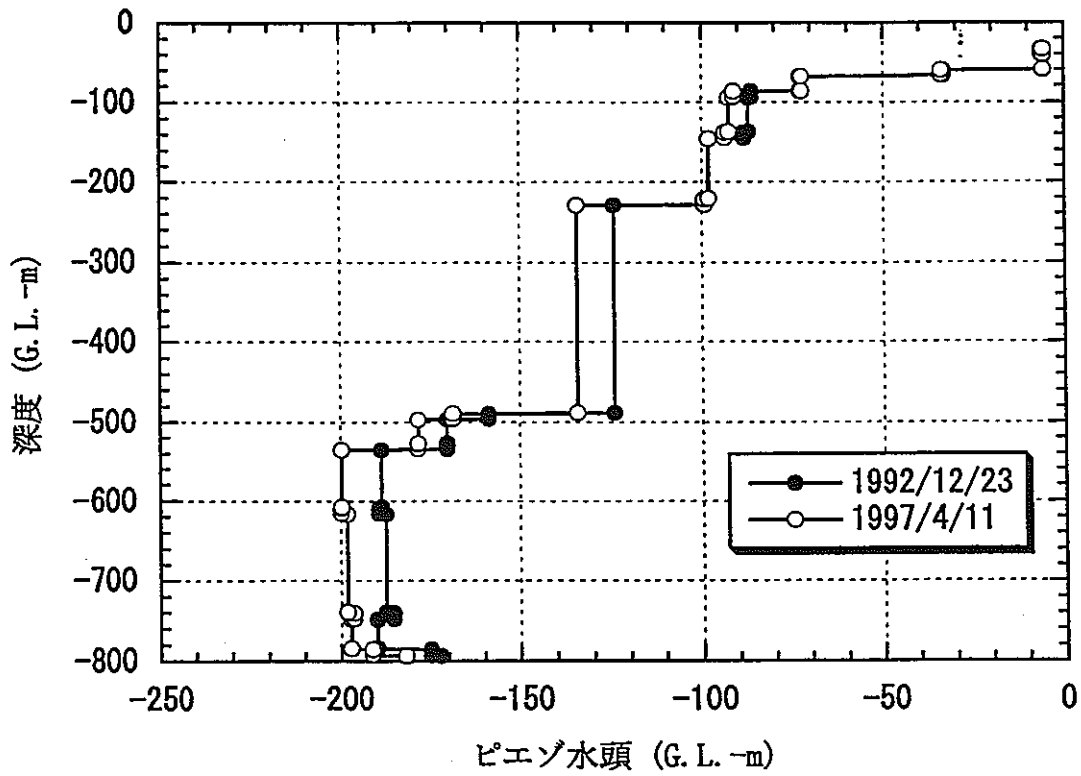


図-6.3.3 KG-1 孔におけるピエゾ水頭分布

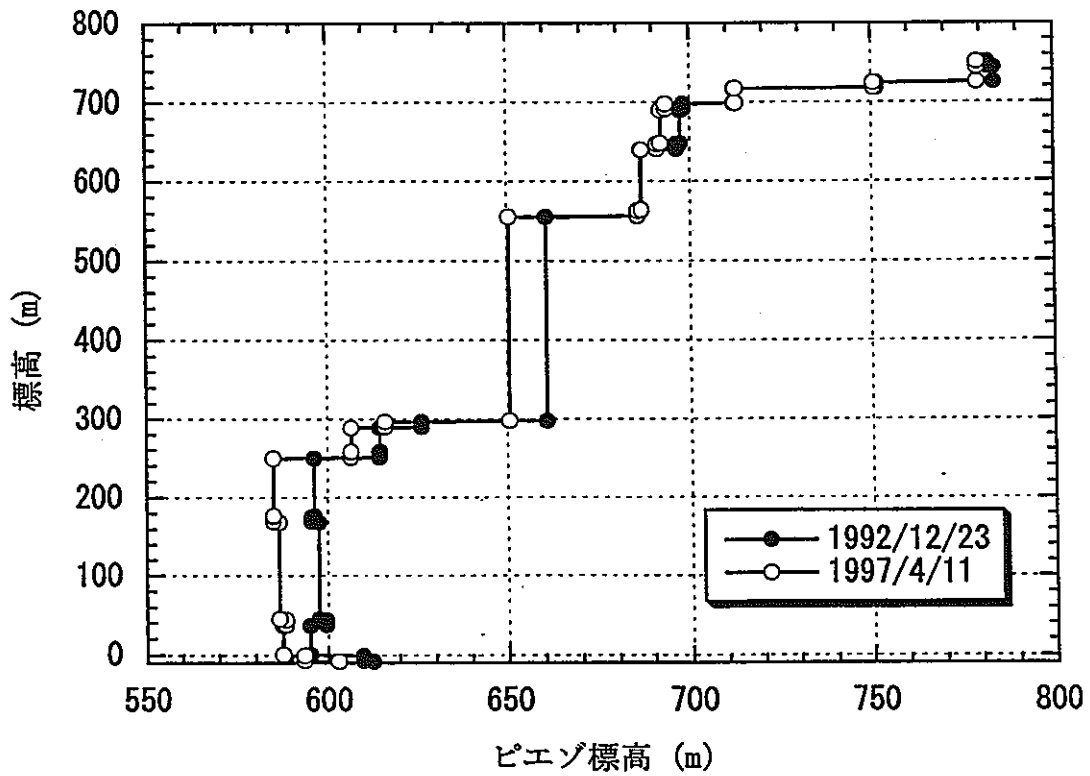


図-6.3.4 KG-1 孔におけるピエゾ標高分布

図-6.3.5～図-6.3.8に各計測区間におけるピエゾ水頭の経時変化の一例を示す。ここでは、各計測区間のピエゾ水頭の経時変化の特徴を以下に示す。

① 区間 1 (G.L.-793.02m), 区間 2 (G.L.-788.56m)

ピエゾ水頭は、4月に一旦低下した後、次第に回復して8/22にピークとなっている。その後、再度低下して10/16以降は大きな変動がなく、ほぼ安定している。

② 区間 4 (G.L.-748.19m), 区間 5 (G.L.-743.73m)

区間 4、区間 5ともに同様な経時変化を示しており、ピエゾ水頭の変動には3回のピークが認められ、最初のピークは8/8に、2回目のピークは10/30に、3回目のピークは1/23において認められる。

③ 区間 7 (G.L.-616.32m), 区間 8 (G.L.-611.87m)

区間 7においては区間 4、区間 5と同様な経時変化を示しており、8/8、10/30、1/23にピエゾ水頭がピークとなっている。一方、区間 8においては大きな変動が認められ、5/8、12/12、1/8のデータが明らかに経時変化と異なる結果を示した。間隙水圧は外水圧（間隙水圧）を30秒間隔で4回測定し、安定していることを確認するが、これらの異常を示したデータは計測の際、安定していたことが確認されている。原因としては、区間 8が比較的深部であることから地表の降雨の影響とは考えにくく、計測システムによるものが考えられるが特定はできなかった。

④ 区間 10(G.L.-535.48m), 区間 11(G.L.-531.02m)

区間 4～区間 7と同様な傾向を示し、ピエゾ水頭には3回のピークが認められた。ピエゾ水頭のピーク時は、区間 10においては8/8、10/30、1/8であり、区間 11においては7/16、10/30、12/25である。区間 4～区間 7のピーク日時と比較すると、浅部の区間になるほどピーク日時が早くなり、ピーク前後のピエゾ水頭の回復と再降下の変動幅が大きくなっていくことが判る。

⑤ 区間 13(G.L.-496.66m), 区間 14(G.L.-492.20m)

区間 10、区間 11と同様な傾向を示した。両区間ともに、ピエゾ水頭のピーク日時は7/16、10/30、12/25である。

⑥ 区間 16(G.L.-229.72m), 区間 17(G.L.-225.26m)

6月以降のピエゾ水頭の変動は区間 10～区間 14と同様な傾向を示したが、両区間ともに5/8に新たなピエゾ水頭のピークが認められる。区間 16のピエゾ水頭のピーク日時は5/8、7/16、10/16、12/25であり、区間 17では5/8、7/4、10/16、12/25である。ピーク値を示した前後の変動幅はさらに大きくなっている。

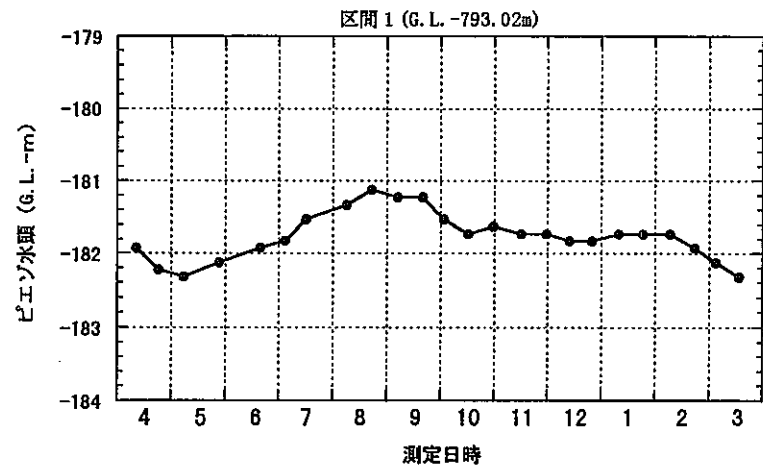


図-6.3.5 区間 1 におけるピエゾ水頭の経時変化

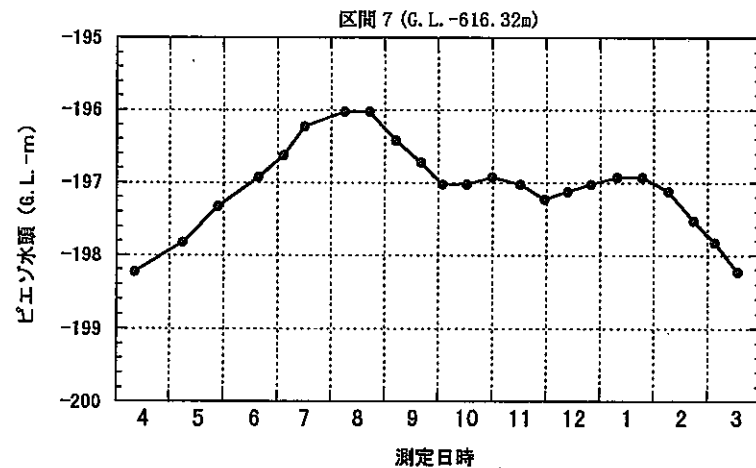


図-6.3.6 区間 7 におけるピエゾ水頭の経時変化

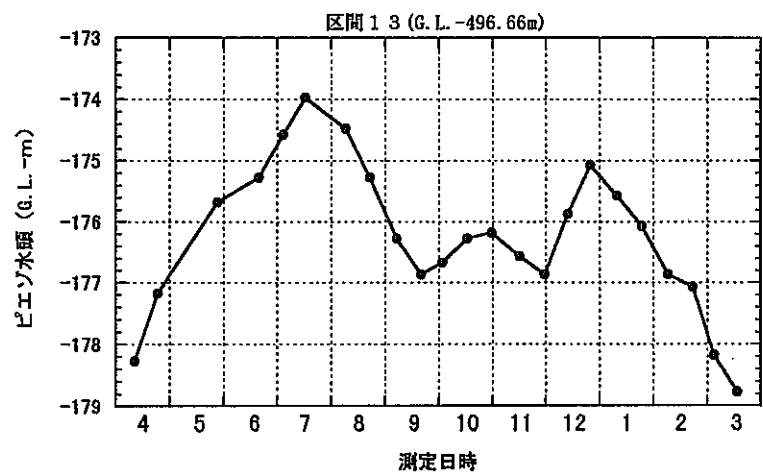


図-6.3.7 区間 13 におけるピエゾ水頭の経時変化

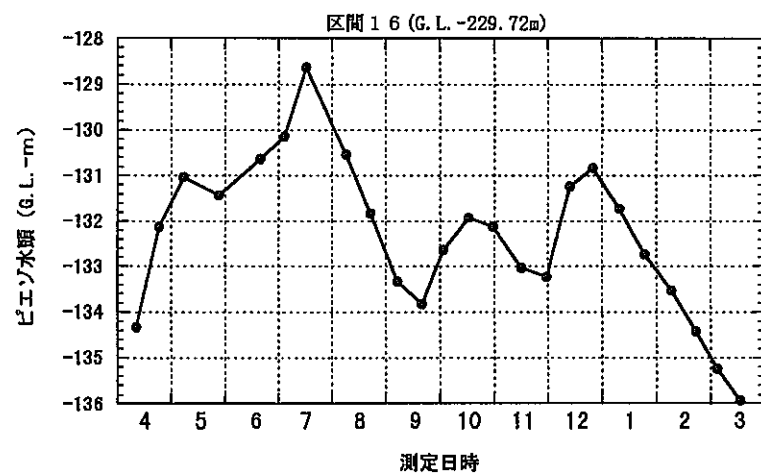


図-6.3.8 区間 16 におけるピエゾ水頭の経時変化

⑦ 区間 19(G.L.-145.87m), 区間 20(G.L.-141.41m)

6 月以降のピエゾ水頭の経時変化は区間 10～区間 14 と同様な傾向を示し、ピエゾ水頭のピーク日時は、区間 19、区間 20 とともに 7/16、10/16、12/25 であった。なお、区間 19 の 5/8 と区間 20 の 4/24 のデータは、明らかに経時変化の傾向と異なっているが原因は不明である。

⑧ 区間 22(G.L.-95.04m), 区間 23(G.L.-90.58m)

区間 16、区間 17 と同様な経時変化を示し、ピエゾ水頭のピークは 4 回認められる。ピエゾ水頭のピーク日時は、区間 22 においては 4/24、7/16、10/16、12/25 で、区間 23 においては 5/8、7/16、10/16、12/25 であった。

⑨ 区間 25(G.L.-68.23m), 区間 26(G.L.-63.77m)

区間 22、区間 23 と同様な経時変化を示し、ピエゾ水頭のピーク日時は、区間 25 においては 5/8、7/16、10/16、12/25 であり、区間 26 においては 5/28、7/16、10/2、12/12 であった。

⑩ 区間 28(G.L.-41.41m), 区間 29(G.L.-36.95m)

ピエゾ水頭の経時変化に大きな変動は認められないが、詳細にみると区間 22～区間 26 と同様に 4 回のピーク点が観察される。両区間ともにピエゾ水頭のピーク日時は、5/8、7/16、9/20、11/29 である。

以上より、ほぼ全ての計測区間においてピエゾ水頭が上昇から下降に転ずる変曲点（ピーク）が、大別して 4 回認められた。その発生時期とピエゾ水頭値を考慮すると、以下のように分類できる。

Group1 : 4/24,5/8,5/28 のグループ

Group2 : 7/4,7/16,8/8,8/22 のグループ

Group3 : 9/20,10/2,10/16,10/30 のグループ

Group4 : 11/29,12/12,1/8,1/23 のグループ

原位置試験場周辺における降水量の月平均は、例年であれば 8、9 月が 200mm を超え最も多く、10、11 月も 100mm を超え、12 月以降は 50mm 以下となる季節変動を示すが、平成 9 年度においては 6.2 でも述べたように、例年とは大きく違い 7 月、8 月、10 月の降水量が 50mm 程度で、9 月と 11 月の降水量が 200mm を超えていた。この降水量の月変動と KG-1 孔のピエゾ水頭の経時変化は傾向が概ね一致しており、上述した 4 つのピークは降水量の月変動の影響を受けた結果であると思われる。

ここで、上述した Group1～Group4 に対して特に影響したと推測される降水日と降水量を調べてみた。結果を表-6.3.2 に示す。

表-6.3.2 ピエゾ水頭のピークに影響したと推測される降水日と降水量

グループ	降水日	降水量(mm)	合計(mm)
Group1	4/5	11.5	64.0
	4/6	15.0	
	4/7	37.5	
Group2	6/20	83.0	166.0
	6/28	56.0	
	6/29	27.0	
Group3	9/17	74.0	143.0
	9/18	39.0	
	9/19	30.0	
Group4	11/17	28.5	171.0
	11/22	73.0	
	11/26	69.5	

Group1 は、4/5(11.5mm),4/6(15.0mm),4/7(37.5mm)、合計 64.0mm の降水の影響、Group2 は、6/20(83.0mm),6/28(56.0mm),6/29(27.0mm)、合計 166.0mm の降水の影響、Group3 は、9/17(74.0mm),9/18(39.0mm),9/19(30.0mm)、合計 143.0mm の降水の影響、最後に Group4 は、11/17(28.5mm),11/22(73.0mm),11/26(69.5mm)、合計 171.0mm の降水の影響をそれぞれ反映しているものと推測される。これらの結果と各グループのピーク日時との関係を計測深度ごとにプロットすると図-6.3.9 のようである。

Group2 ~ Group4 においては、ピーク日時は計測深度が深くなるほど遅くなる傾向が認められるが、Group1 にそのような傾向は認められない。恐らくは Group1 に影響していると予想した降水量が他と比較して少なかったことから、後に続く Group2 の水頭上昇に包含されて不明瞭になったものと推測する。

降水日とピーク日時に着目すると、何れの Group とも、降水日からピエゾ水頭値がピークとなるまでの時間は浅部の区間では 1 ~ 2 週間程度、深部の区間では 1 ヶ月半程度である。この時間的な遅れ (タイムラグ) は過去 3 年間の観測結果^{3),4)}からも浅部の区間では 1 ~ 2 週間程度、深部の区間では 1 ヶ月半 ~ 2 ヶ月程度であることが確認されたことから、地表の降水の影響は水頭の上昇という形で、KG-1 孔浅部から深部へと徐々に伝わっていくことが推察される。

図-6.3.5 ~ 図-6.3.8 からピーク日時前後のピエゾ水頭の変動幅は、計測深度が深く

なるほど小さくなる傾向が認められた。また、各区間のピエゾ水頭の経時変化から、何れの区間においても Group2 に属するピーク日時のピエゾ水頭値が最大になっているが、文献²⁾には年間で最も浸透の激しいのは冬季間地上に積もっていた雪が春の融雪によって下方に透過し始めるときであり、地下水位も飛躍的に上昇すると記されている。恐らくはこのことが影響して Group2 に属するピーク日時のピエゾ水頭値を最大としたのであろう。

以上をまとめて KG-1 孔付近の地下水流動機構を模式的に表現すると図-6.3.10 のようである。図中の矢印は過去に行われた地化学的な調査から推定された地下水の流動方向である。KG-1 孔内の地下水は様々な水質分析から深部においても比較的浅層性の地下水環境であることが明らかになっている。これは、過去の地質構造調査から高角度で存在すると推定された割れ目帯（断層帯）ゾーン2に包含されるように KG-1 孔が掘削されていることから、ゾーン2に沿うように比較的速い速度で浅層性の地下水が流れているためであると推測されている。したがって、地表に降ってきた降水は直接あるいは河川（西又沢）から地中に浸透して地表付近の涵養源に地下水として蓄えられる。降水量が増加すると、その増量分が涵養源から直接的に下方に浸透していくわけではなく、まず水頭（圧力）として徐々に伝播していき、その伝播速度は KG-1 孔深部で1ヶ月～2ヶ月ほどである。また、過去に行った環境同位体の分析結果から、KG-1 孔深部の地下水は約20～30年前の降水であることが推察されているが、文献²⁾によると水頭の伝播速度は水の移動速度の数百倍にもなることが示されている。仮に KG-1 孔付近において水頭の伝播に2ヶ月要するとすれば、水の移動は約200ヶ月すなわち17年程度要するということになり、環境同位体の分析結果と整合的である。総じて、KG-1 孔において計測された間隙水圧の経時変化は、原位置試験場周辺の降水量の多寡による地下水面の変動と密接に関連しているものと考察される。

本節で得られた知見まとめると以下のようになる。

- ・ KG-1 孔における水圧分布の全体的な傾向から、大きく分けて4つの帯水層と各帯水層間の3つの難透水層に分けられた。
- ・ KG-1 孔のピエゾ標高の分布傾向から、口元からの深度が0m～80mの帯水層は上面（自由水面）において大気圧と平衡状態であり通気帯との関係から、このゾーンとさらに深部の帯水層では、水質に違いがあるものと推測した。
- ・ ほぼ全ての計測区間においてピエゾ水頭が上昇から下降に転ずる変曲点（ピーク）が大別して4回認められ、その発生時期とピエゾ水頭値を考慮すると、4/24、5/8、5/28の Group1、7/4、7/16、8/8、8/22の Group2、9/20、10/2、10/16、10/30の Group3、

11/29、12/12、1/8、1/23 の Group4 に分類された。

- 降水量の月変動と KG-1 孔のピエゾ水頭の経時変化は傾向が概ね一致しており、4 つのピークは降水量の月変動の影響を受けた結果であることが示唆された。
- Group1 ~ Group4 に対して特に影響したと推測される降水日と降水量を調べ、その降水日とピーク日時を比較したところ、ピエゾ水頭値がピークとなるまでの時間は KG-1 孔の浅部の区間では 1 ~ 2 週間程度、深部の区間では 1 ヶ月半程度であることがわかった。地表の降水の影響は水頭の上昇という形で、KG-1 孔浅部から深部へと徐々に伝わっていくことが推察された。
- ピーク日時前後のピエゾ水頭の変動幅は、計測深度が深くなるほど小さくなる傾向が認められた。また、何れの区間においても Group2 に属するピーク日時のピエゾ水頭値が最大になっていたが、文献調査からこの時期の融雪が影響した結果であると考察した。
- 過去の原位置試験で得られた結果も参考にして考察すると、KG-1 孔付近の地下水の流れは断層帯ゾーン 2 に沿って比較的速い速度で流れているものと推測した。
- KG-1 孔付近の降水は、直接あるいは河川（西又沢）から地中に浸透して地表付近の涵養源に地下水として蓄えられ、降水による増量分がまず水頭（圧力）として徐々に深部へと伝播していくものと考察し、その伝播速度は KG-1 孔深部で 1 ヶ月 ~ 2 ヶ月ほど要するものと推測した。
- 水頭の伝播速度は水の移動速度の数百倍にもなることから、KG-1 孔付近において地下深部までの水頭伝播に 2 ヶ月要するとすれば、水の移動は約 200 ヶ月すなわち 17 年程度要するということになり、過去に行った環境同位体の分析結果と整合的であった。

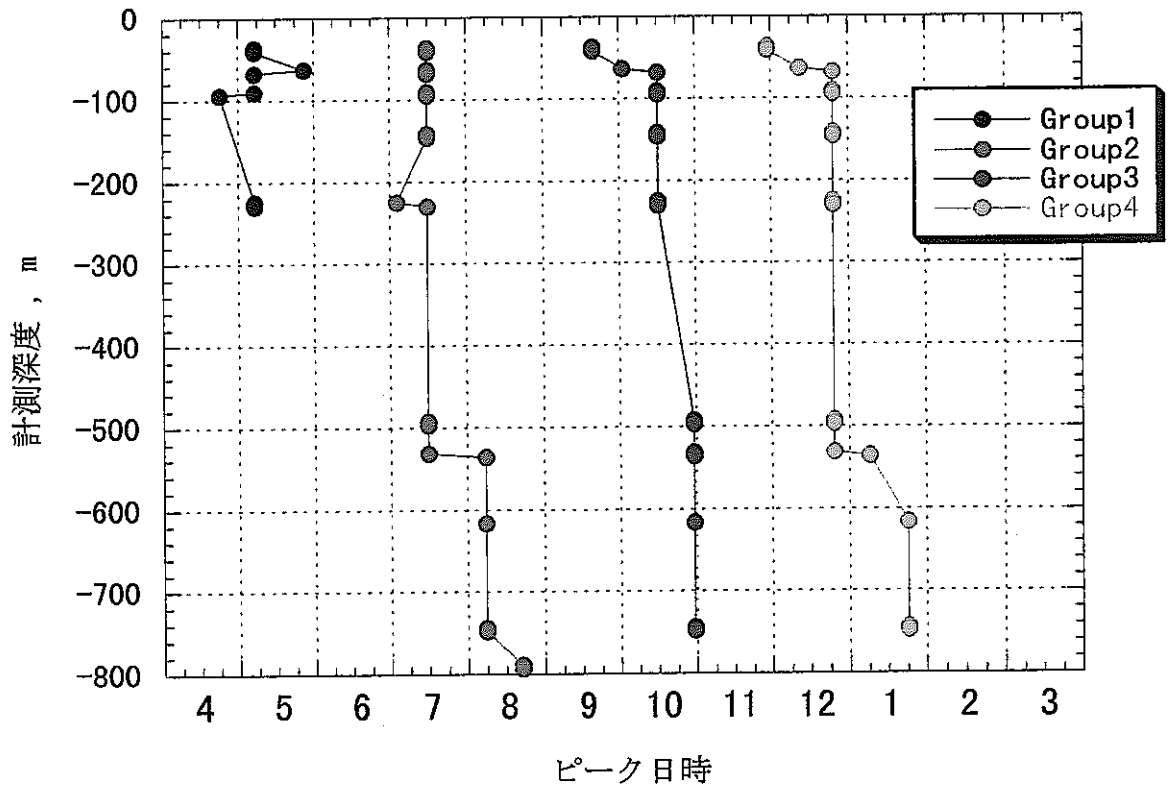


図-6.3.9 ピエゾ水頭のピーク日時と計測深度との関係

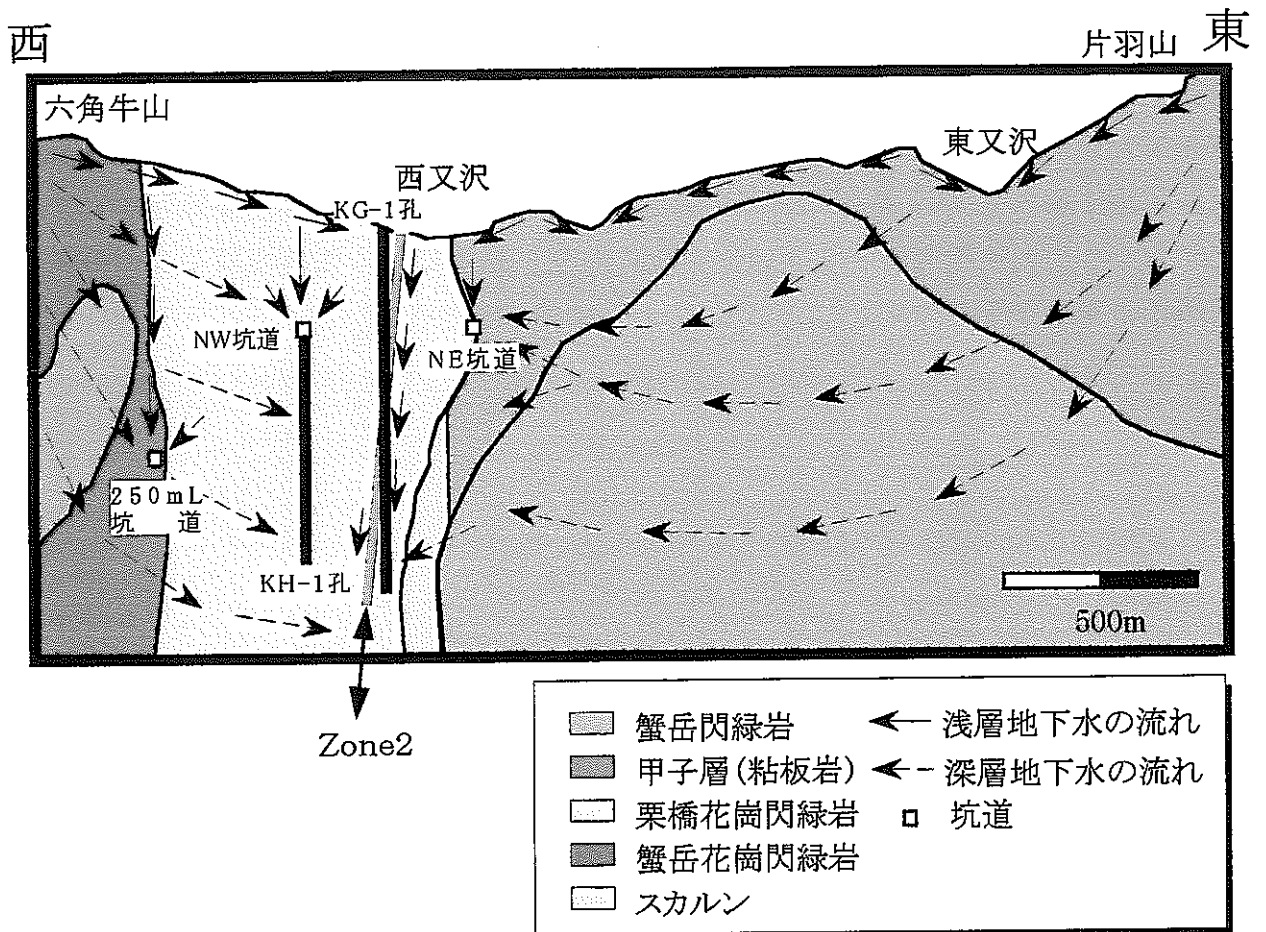


図-6.3.10 KG-1 孔周辺の地下水流動機構

6.3.2 坑道周辺での間隙水圧の経時変化

550mL の KD-90 坑道周辺の試錐孔と KF-1,2 孔においては、多段式パッカーを試錐孔内に設置しパッカーで区切られた区間の間隙水圧計測を実施している。観測される間隙水圧は、原位置試験場周辺で行われるイベントの影響を受け、変動を示すことが予想され、その変動は試験場の地質状況に規制された水理的連続性を反映していると考えられる。そこで、ここでは観測された間隙水圧の経時変化とイベントとの関係を検討した。550mL 坑道と KD-90 坑道の位置関係を図-6.3.11 に示し、その周辺の試錐孔の位置を図-6.3.12 に示す。

間隙水圧観測結果には、様々な圧力変動が示されている。これらの圧力変動は何かの外界の事象を原因として生じた結果であると考えられる。外からの影響としては、①気圧変動、降雨、潮汐、地震等の自然要因、②試錐孔の掘削、坑道掘削、石灰石採掘発破やパッカー交換、各種試験等の人為的要因の二つが考えられる。このうち、気圧変動・降雨を要因とする圧力変動は季節や年単位の長周期の変動を示し、地震の影響は地震発生前に変動の兆候が現れ、発生後、急激に変動するものと推測される。

KD-90 坑道周辺の試錐孔と KF-1,2 孔における間隙水圧の観測結果の一例を図-6.3.13～図-6.3.16 に示す。

図-6.3.13 に示した KH-4 孔の経時変化に着目すると、5月の月上旬に口元側の区間1および区間2の間隙水圧が低下し、10月中旬から下旬にも区間1および区間2の間隙水圧が低下している。また、8月に全区間で間隙水圧が一旦下降した後、回復している。さらに、12月初旬から下旬にかけても全区間で急激な間隙水圧の低下が認められる。このような傾向は、KH-13 孔の区間3、区間5、区間6、KH-16 孔の区間1～区間5、KH-18 孔の区間3、区間5においても認められる。これらの試錐孔における間隙水圧変動時期とイベントとの関連性を調べた結果を以下に示す。

① 5月中旬の水圧低下

この時期に TASK3-2 関連の試験は行われておらず、5/12～5/14にかけて KCH-1,2 孔において比抵抗トモグラフィが実施されている。したがって、この期間に KCH-1,2 孔が開放されていたことが5月中旬の水圧低下に影響したものと推測される。

② 8月の水圧下降と回復

この時期のイベントとしては、TASK3-2 関連のトレーサー試験と8月上旬に NW 坑道で岩大試錐が行われている。トレーサー試験の影響に関しては、これまでの調査からトレーサー坑道奥部の高水圧帯の影響を遮蔽するような水理バ

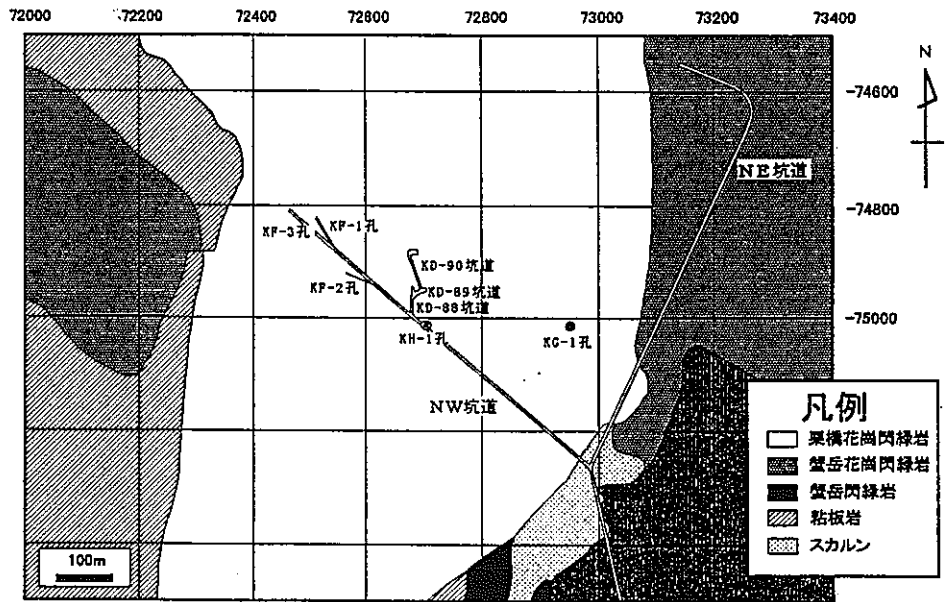


図-6.3.11 KD-90 坑道の位置

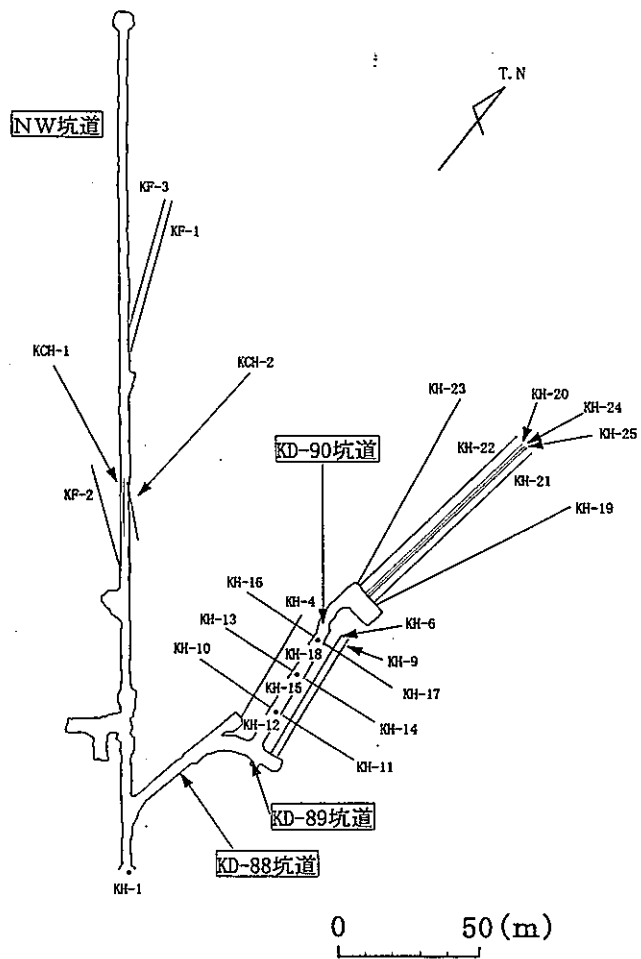


図-6.3.12 KD-90 坑道周辺の試錐孔の位置

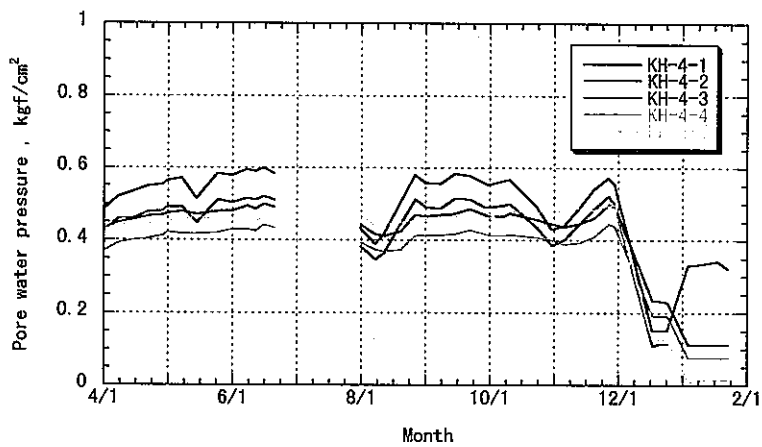


圖-6.3.13 KH-4 孔間隙水圧観測結果

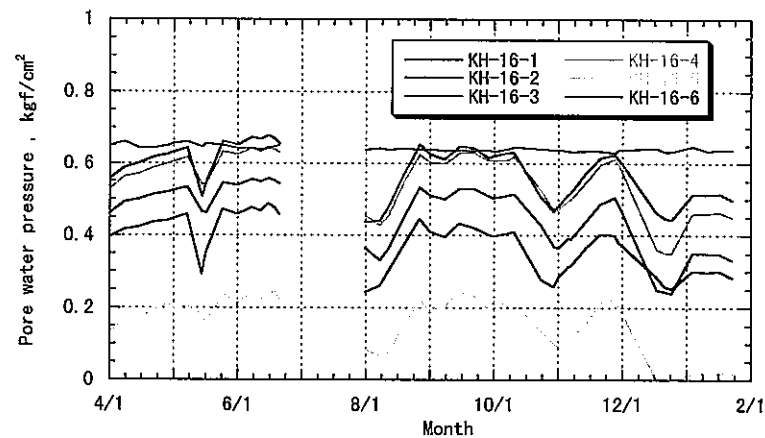


圖-6.3.14 KH-16 孔間隙水圧観測結果

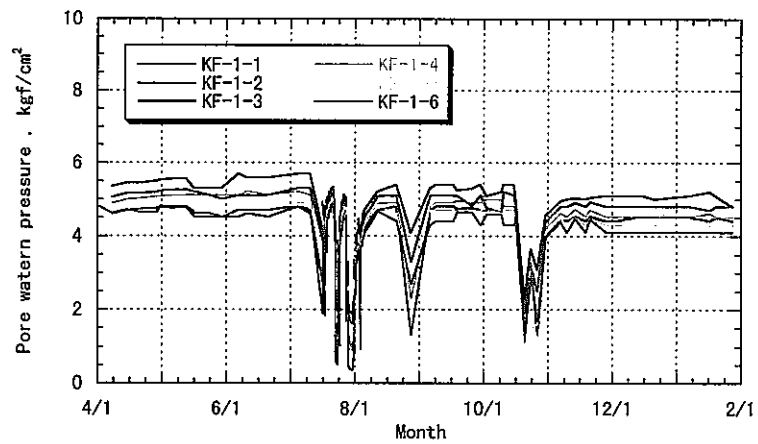


圖-6.3.15 KF-1 孔間隙水圧観測結果

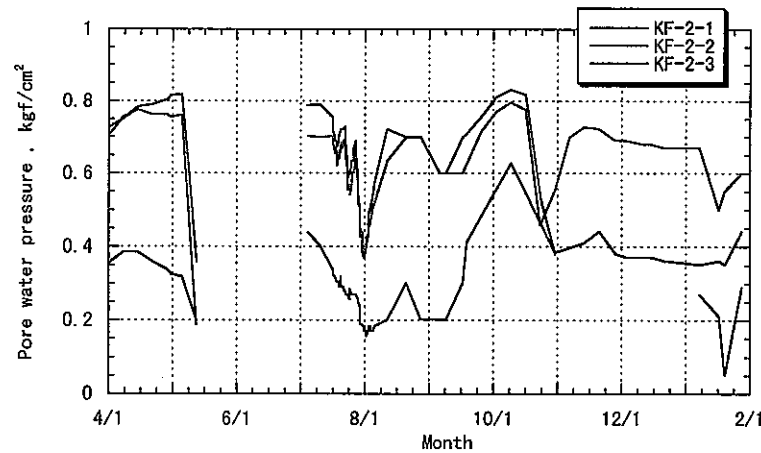


圖-6.3.16 KF-2 孔間隙水圧観測結果

リアの存在が確認されていることから、この影響とは考えにくい。同様に、これまでに実施したイベントと間隙水圧の経時変化との関連性の考察から、KD-90 坑道西側の試錐孔と岩大試錐の水理的連続性が確認されている。今回も岩大試錐が KD-90 坑道西側の試錐孔の間隙水圧に影響を与えたものと推測する。

③ 10月中旬から下旬の水圧低下

この時期には、TASK3-2 のトレーサー試験が行われていたが、水圧の変動幅がそれまでのトレーサー試験実施時の変動幅よりも大きくなっていることから、10/31 にデータロガー交換のため KF-1,2 孔の全区間を開放状態にしたことが影響したものと推測する。

④ 12月下旬の水圧低下

12月中旬から下旬にかけては、12/10 に KCH-1 孔において採水作業が行われ、12/25 には KH-4 孔においてパッカー破裂によるパッカーシステムの撤去および再設置作業が行われている。したがって、これらのことが水圧低下に影響したものと推測する。

ここで、KCH-1,2 孔近傍に位置する KF-2 孔の観測結果である図-6.3.16 に着目すると、上述したような傾向が同時期に認められる。したがって、KH-4 孔、KH-13 孔、KH-16 孔、KH-18 孔と KF-2 孔および KCH-1,2 孔の水理的連続性が推測される。試験場周辺で観察される亀裂の卓越方向は $N45^{\circ}E \sim N80^{\circ}E$ であり、恐らくその割れ目群中に存在する一部が局所的な水みちとなっているのであろう。以上のことは平成 8 年度の間隙水圧計測結果と整合的である。なお、KD-90 坑道の東側に位置する試錐孔においては、上述したような傾向は認められなかった事から、KD-90 坑道が、その東西側に存在する水みちを遮断しているものと思われる。

また、KH-19 ~ KH-25 孔においてトレーサー試験を行っているときに、KD-90 坑道周辺の何れの試錐孔においても明瞭な水圧の変化は認められなかった。先に述べたように、過去に実施した地質構造の調査⁹⁾から KH-19 ~ KH-25 孔近傍にはほぼ東西方向の走向と垂直に近い傾斜を有する割れ目ゾーンの存在が確認されており、ゾーン付近では間隙水圧が 20kgf/cm^2 の高水圧帯となっているが、ゾーンより手前の部分および KD-90 坑道周辺においては、このような高い間隙水圧は観測されておらず水理バリアの存在が推定されている。この水理バリアの存在が KH-19 ~ KH-25 孔と KD-90 坑道周辺の試錐孔との水理的な関連性を不明瞭にしているものと推測する。なお、このゾーンが図-6.3.17 に示すように多量の湧水が認められる KF-1 孔と NW 坑道 650m 地点の方向に連続していることは興味深い。

次に、図-6.3.15 に示す KF-1 孔の観測結果に着目すると、隣接する KF-3 孔で実施された工事・試験の影響を強く受けており、KD-90 坑道周辺の試錐孔との関連性は

認め難い。しかしながら、平成8年度のイベントと間隙水圧の経時変化との考察から、トレーサー試験に関わるイベントと KF-1 孔の間隙水圧に関連性が認められたことから、これらの間は先に述べた割れ目ゾーンを介して水理的に連続しているものと推測する。また、KF-3 孔では 8/28 に物理検層実施のために口元を開放した。その影響で KF-1 孔全区間で間隙水圧が低下している。このイベントに対する影響は、KD-90 坑道周辺の試錐孔では認められないが、KF-2 孔においては変動が認められる。さらに、5/12～5/14 の KCH-1,2 孔における比抵抗トモグラフィーの影響が KF-1 孔においても認められ、KF-1 孔と KF-2 孔が試験場周辺で観察される $N45^{\circ}E \sim N80^{\circ}E$ の卓越亀裂と交差するような亀裂を介して水理的に連続している可能性を示唆しているものと思われる。

以上述べてきたように、観測された各試錐孔の間隙水圧の経時変化には、前述したような自然現象を要因とした変動は検出されず、計測箇所周辺の人為的な要因が間隙水圧の変動に大きな影響を与えていることが判る。

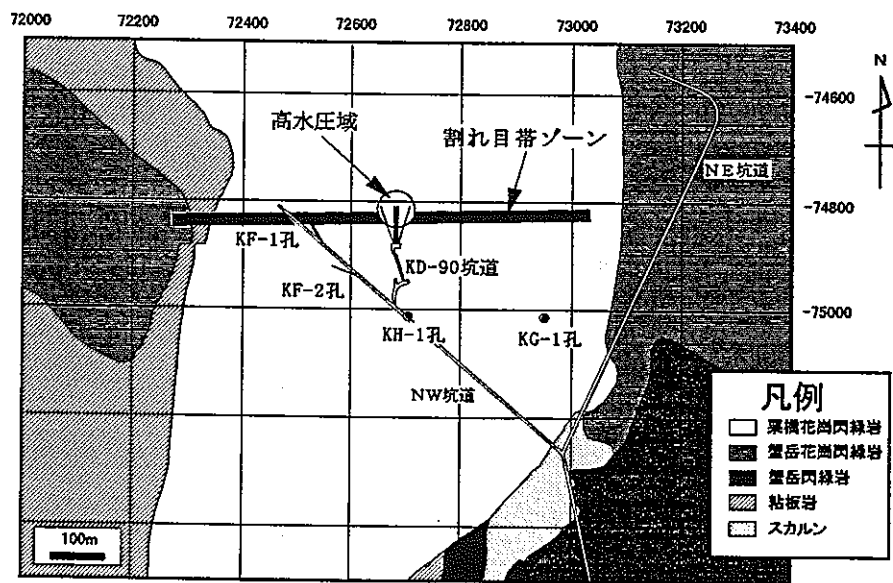


図-6.3.17 割れ目ゾーンの位置

6.3.3 KF-3孔試錐時におけるKF-1, 2孔の間隙水圧の経時変化

前節で、550mL坑道周辺の既存試錐孔における間隙水圧観測結果と原位置試験場周辺で実施された工事・試験等のイベントとの関連性を検討することにより、試験場周辺岩盤の水理的連続性を考察した。その結果、KF-1孔とKF-2孔の間の岩盤に水理的連続性の可能性が示唆された。そこで、KF-1孔に隣接して、本年度新たに錐進されたKF-3孔の掘削時において観測されたKF-1, 2孔の間隙水圧を取りまとめ、試錐の影響やイベントデータと比較し、KF-1, 2孔周辺の水理的連続性の把握を試みた。

KF-3孔は、7月8日より掘削を開始し、7月19日に完了している。試錐実績を表-6.3.3に示した。

表-6.3.3 KF-3孔の試錐実績

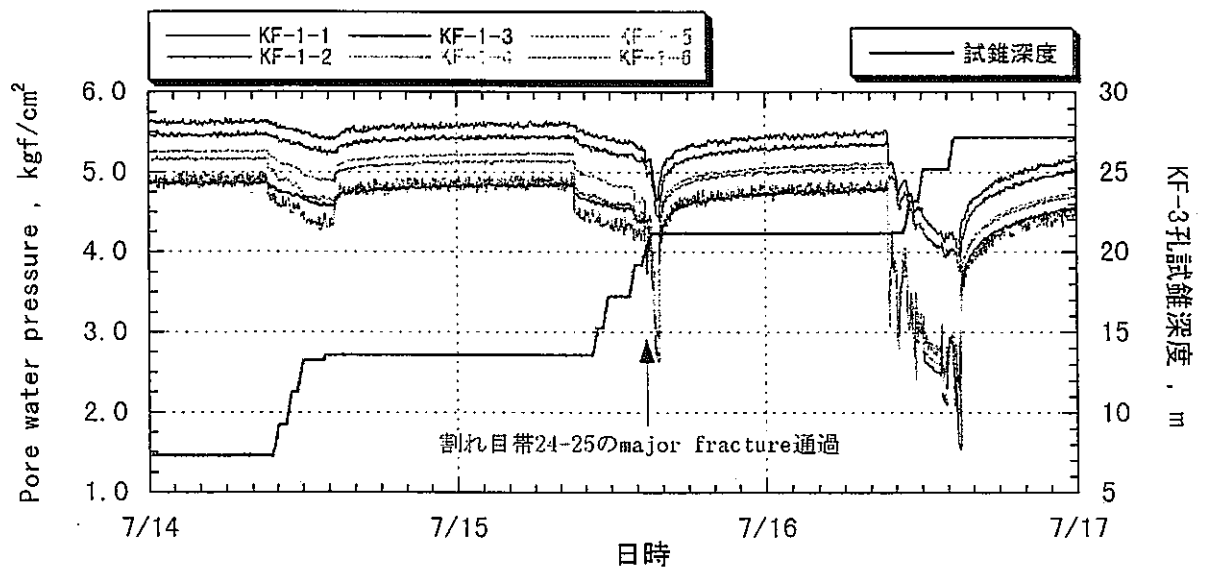
日 時	試錐深度 (m)
1997年7月8日	1.50
1997年7月11日	7.25
1997年7月14日	13.59
1997年7月15日	21.15
1997年7月16日	27.25
1997年7月17日	35.45
1997年7月18日	41.55
1997年7月19日	45.55

1997年7月14日から1997年7月19日の期間についてKF-1,2孔の間隙水圧観測結果とイベントデータを取りまとめた結果を、図-6.3.18および図-6.3.19に示す。それぞれの図では、(a)にKF-1孔の結果をKF-3孔の試錐深度とともに示し、(b)にKF-2孔の結果をKF-3孔の試錐深度とともに示し、(c)に周辺の各種イベントデータをプロットし、3日分のデータを示している。

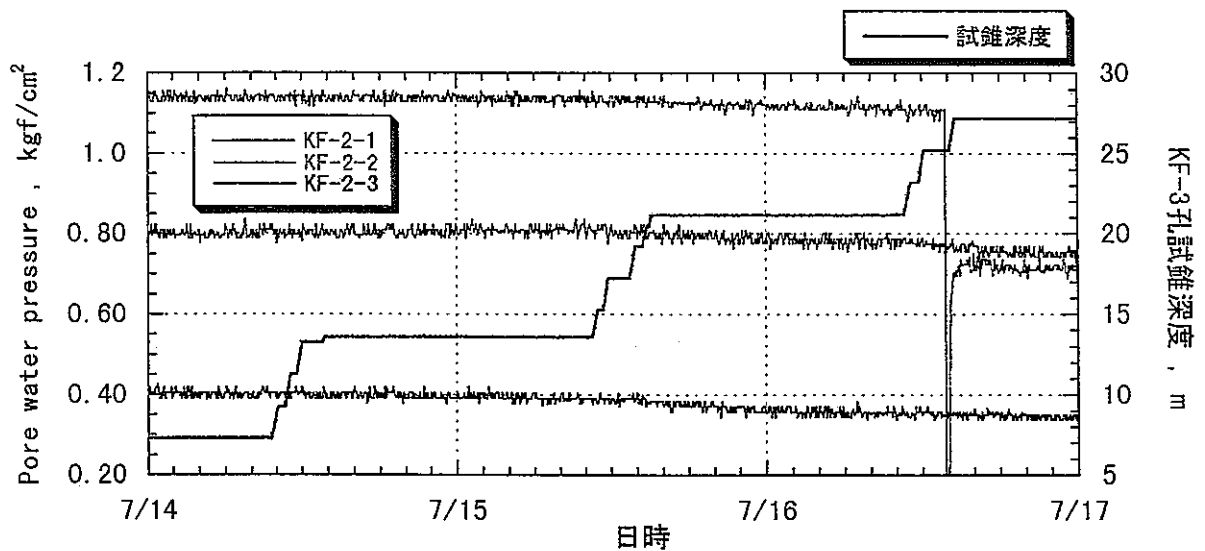
試錐実施中の間隙水圧の経時変化の特徴を以下に示す。

① 7月14日～7月16日

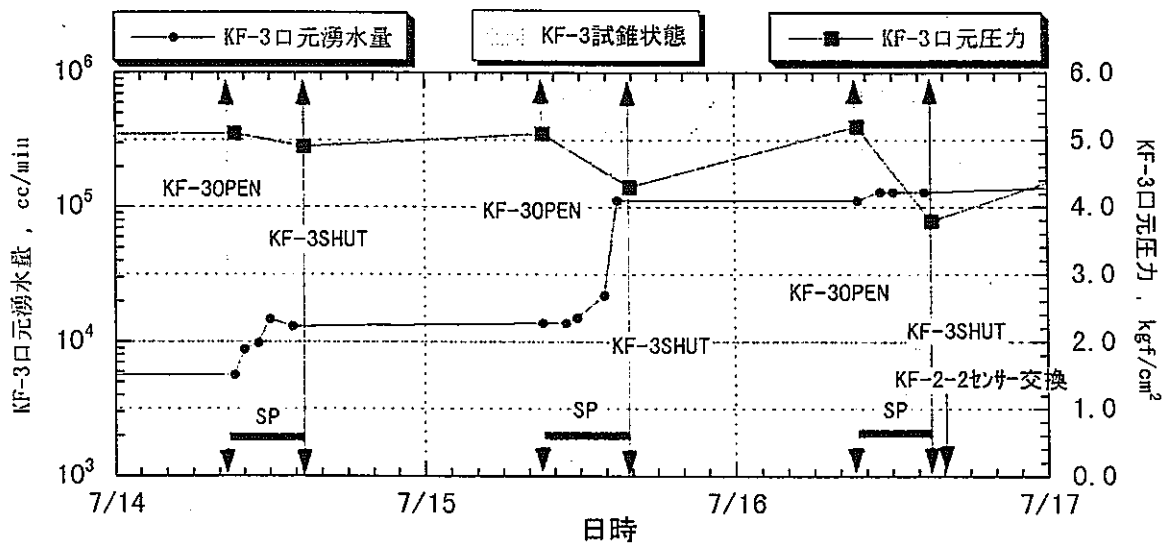
7/15に着目すると、試錐深度19.3m～21.2mを掘削中に間隙水圧が、さらに急激に下降している。これは、図-6.3.20に示すように、NW坑道の割れ目帯24、25で観察される主要割れ目(Major Fracture)との連続性を有する割れ目を、このときにKF-3孔が通過した結果であると推測する。KF-3孔がこの主要割れ目付近通過した時、口元湧水量も大幅に増加し、約120リットル/minとなっている。また、7/16



(a). KF-1孔の間隙水圧の経時変化

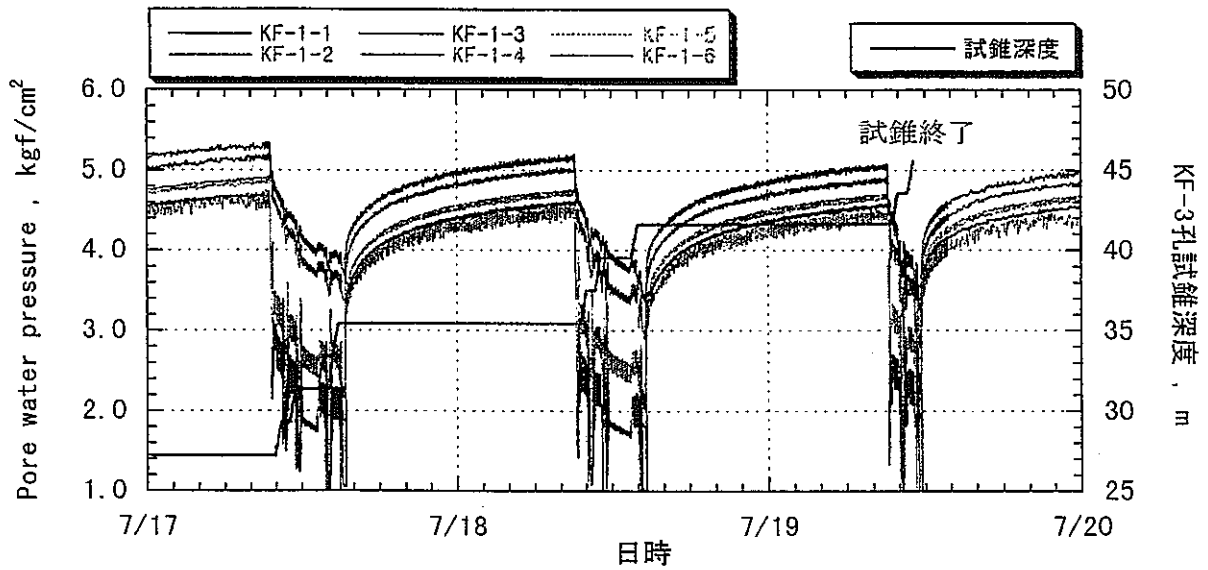


(b). KF-2孔の間隙水圧の経時変化

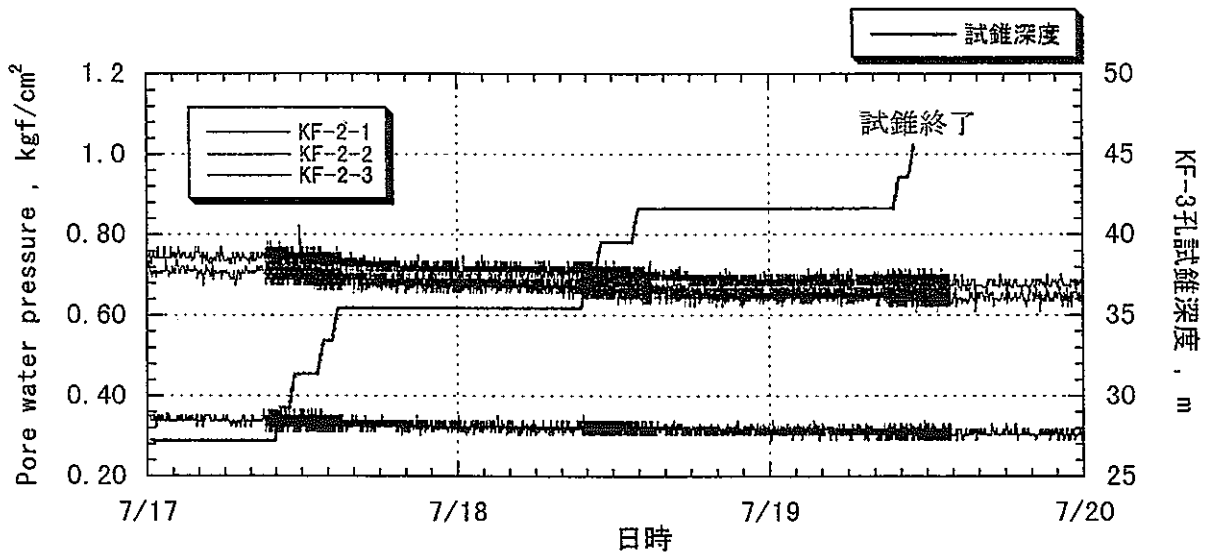


(c). KF-3孔周辺のイベント

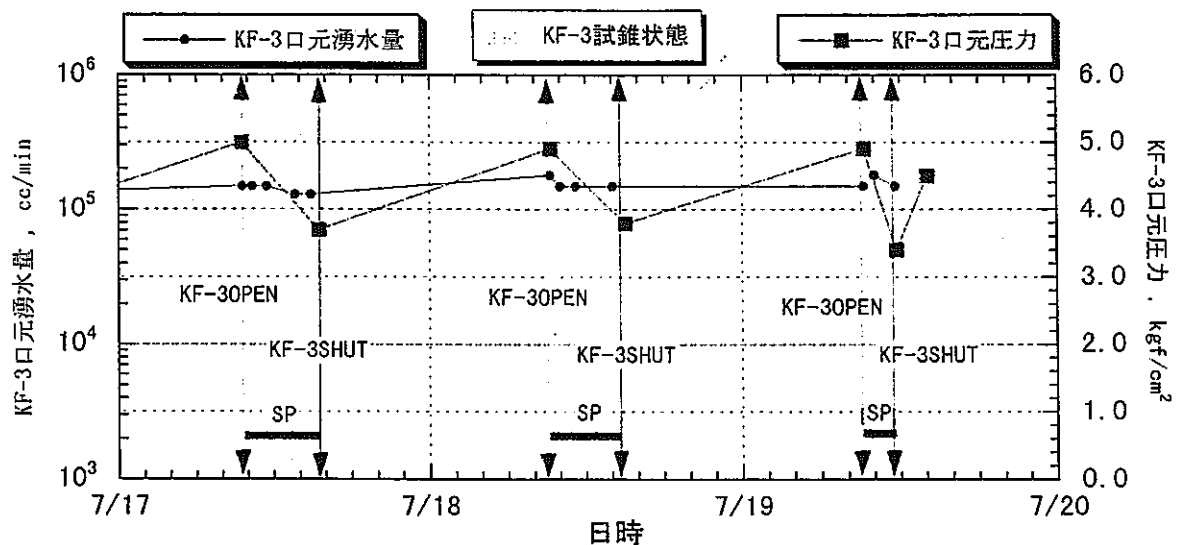
図-6.3.18 KF-1,2孔における間隙水圧の経時変化 (7/14 ~ 7/16)



(a). KF-1孔の間隙水圧の経時変化



(b). KF-2孔の間隙水圧の経時変化



(c). KF-3孔周辺のイベント

図-6.3.19 KF-1,2 孔における間隙水圧の経時変化 (7/17 ~ 7/19)

には KF-3 孔の試錐深度は 27.25 m に達しているが、KF-3 孔の試錐深度が増すにしたがい、KF-1 孔の間隙水圧の下降量は、さらに大きくなっており、KF-3 孔の口元湧水量も 150 リットル/min に増えている。さらに、7/15 の主要割れ目通過後、KF-2 孔においても徐々にではあるが、全区間で間隙水圧が下降していることが判る。これらのことは、割れ目帯 24,25 の主要割れ目が KF-1,2 孔周辺の局所的な水理場を支配している可能性を示唆しているものと思われる。

② 7月17日～7月19日

KF-3 孔の試錐深度は、7/17 に 35.45m、7/18 に 41.55m、7/19 に 45.55m となっているが、7/15 の主要割れ目通過後、KF-1 孔全区間において KF-3 孔試錐時の間隙水圧降下量に大きな変化は認められない。しかしながら、毎日の試錐作業終了時から次の日の朝までに間隙水圧は回復しきれておらず、KF-3 孔の試錐深度が増すにしたがい、全区間で低圧側にシフトしていく傾向が認められる。KF-2 孔においても全区間で間隙水圧が低下し続け、KF-3 孔試錐終了後一定となっている。また、KF-3 孔の口元湧水量は 150 リットル/min 前後でほぼ安定している。したがって、KF-3 孔が掘削された影響で KF-1,2 孔周辺の局所的な水理場は、徐々に変化しており、その水理場には NW 坑道で観察される割れ目帯 24,25 の主要割れ目が関与している可能性がある。

NW 坑道で観察される割れ目帯 24,25 の主要割れ目の方向と交差するような箇所を、KF-3 孔の掘削が通過した時点（試錐深度 19.3m ～ 21.2m）を境に KF-1,2 孔の間隙水圧の経時変化に劇的な変動が認められたことから、KF-1,2 孔周辺の局所的な水理場は、割れ目帯 24,25 の主要割れ目に支配されている可能性が見いだされた。この割れ目帯 24,25 で観察される主要割れ目は、その方向性と湧水量の多さから見て前項の図-6.3.17 に示した大規模な割れ目ゾーンから分岐したものである可能性が高い。割れ目帯 24,25 の主要割れ目の方向と KF-2 孔の位置関係から推測して KF-1 孔と KF-2 孔との間の岩盤に水理的連続性があるとするれば、先に述べた大規模な割れ目ゾーンから分岐した割れ目帯 24,25 の主要割れ目から、さらに派生する割れ目が水みちとなっているものと思われる。実際には、ネットワーク状に発達した割れ目が複雑に絡んで両孔間の水みちを形成しているのであろう。

本項 6.3.3 と前項 6.3.2 で得られた知見から、試験場周辺の水理的連続性をまとめると図-6.3.21 のように表現できる。本年度およびこれまでの調査から水理的連続性が推測された区間を図中に矢印で示した。

大略的にはトレーサー坑道奥部に存在する割れ目ゾーンが、試験場周辺の主要な水みちになっているものと推測されるが、坑道近傍ではこの割れ目ゾーンから分岐

・派生したと考えられる $N45^{\circ}E \sim N80^{\circ}E$ の卓越亀裂群が局所的に主要な水みちになっているものと考察される。また、割れ目ゾーンとの境界部付近に水理バリアの存在が推定され、KH-19 ~ KH-25 孔と KD-90 坑道周辺の試錐孔との水理的な連続を妨げているものと推測する。さらに、KF-1 孔は先に述べた割れ目ゾーン近傍に位置することから、同孔周辺の水理場は割れ目ゾーンに強く規制されていると考える。

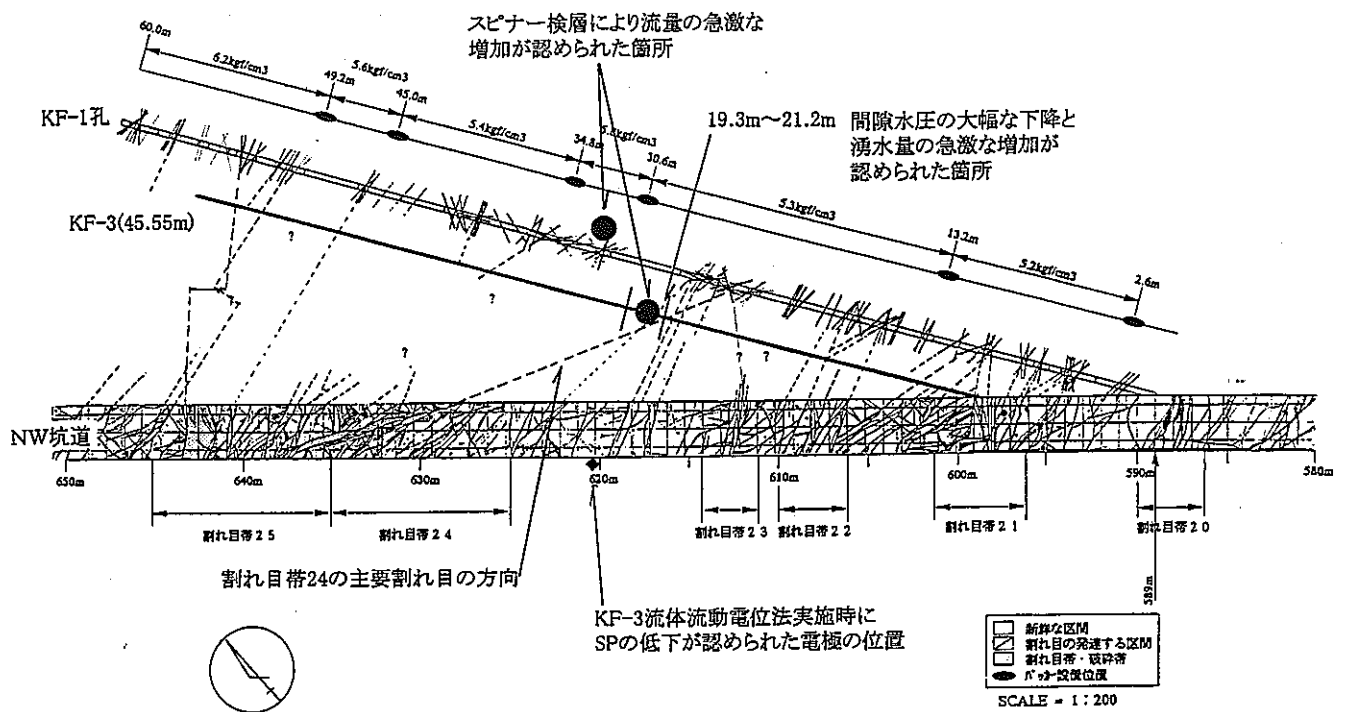


図-6.3.20 KF-1 孔周辺の割れ目構造

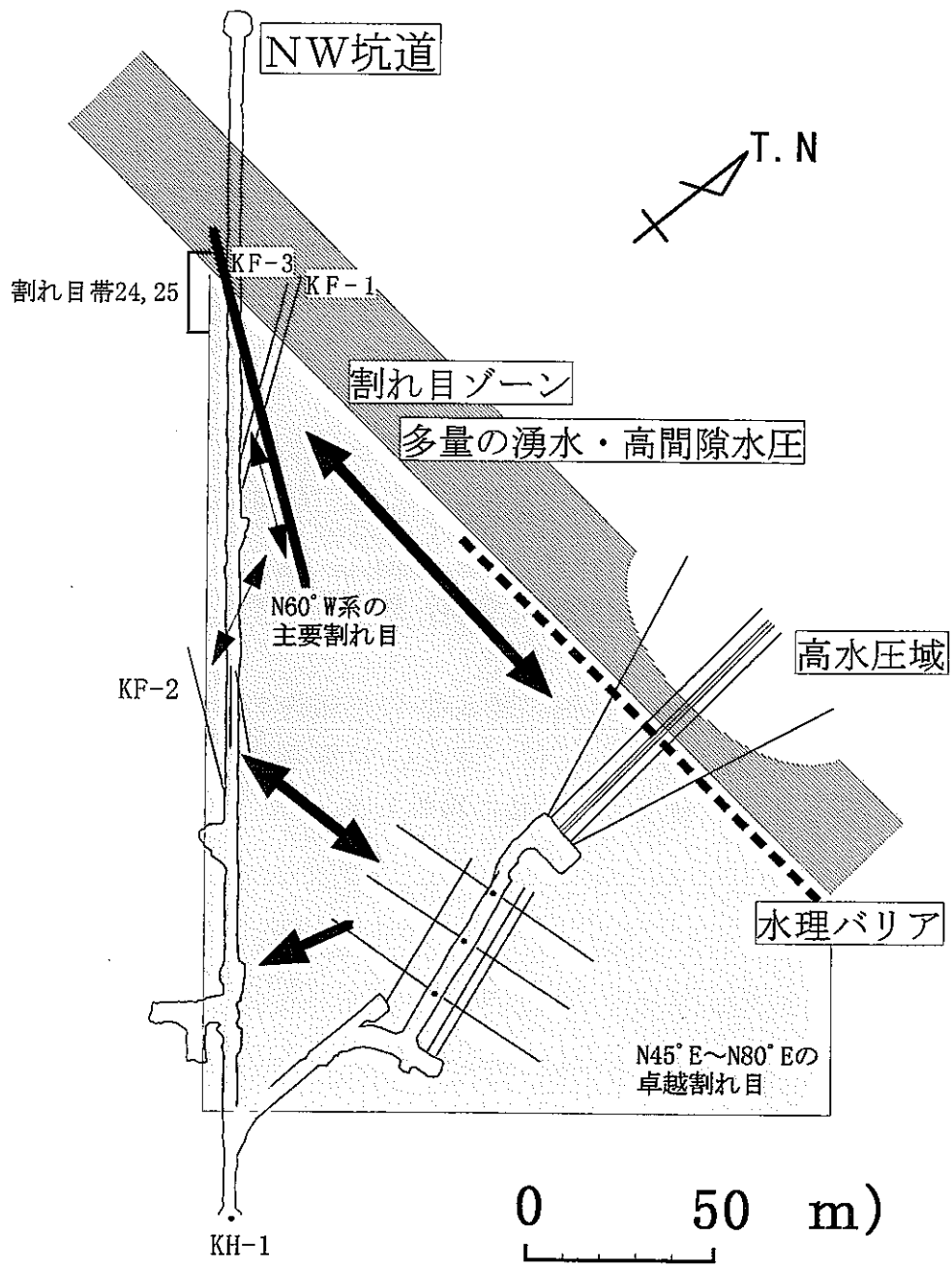


図-6.3.21 試験場周辺の水理的連続性

6.4 データファイルの作成

昭和63年度～平成9年度の間を取得された降水量、気温、坑道湧水量および間隙水圧データのデータファイルを作成した。ファイルはテキスト形式とし、フロッピーディスクに収録した。

間隙水圧のデータセットは測定している試錐孔の孔名、区間番号、孔口座標値、方位、傾斜、パッカー区間深度、岩質、パッカー区間開口亀裂数、RQD、累積開口量、圧力指示計種類をヘッダー部分として記載し、以降、観測年月日、観測データ値を記載した。なお、観測データの欠落した部分は9999.99の値を記入した。

坑道湧水量のデータセットは、堰名、堰設置位置座標値、流量測定方法、流量単位をヘッダーに記載し、以降、観測年月日、観測データ値を記載した。なお、観測データの欠落した部分は9999.99の値を記入した。

降水量・気温のデータセットには、最高気温、最低気温、降雨量、積雪量、融雪量それぞれの単位をヘッダー部分として記載し、以降、観測年月日、観測データ値を記載した。

事象データセットには、日毎に、事象の種類、事象発生時間、事象発生位置座標値を記載した。

図-6.4.1に間隙水圧のデータセット例、図-6.4.2に坑道湧水量のデータセット例、図-6.4.3に降水量・気温のデータセット例、図-6.4.4に事象データセット例を示す。なお、これらのデータセットは全て資料集に掲載した。

WELL NO.	KH-9	KH-9	KH-9	KH-9	KH-9
	5	4	3	2	1
X	72701.78	72701.78	72701.78	72701.78	72701.78
Y	-74941.46	-74941.46	-74941.46	-74941.46	-74941.46
ALT	577.20	577.20	577.20	577.20	577.20
AZIMU	340.9	340.9	340.9	340.9	340.9
DEGLI	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DEP1	12.00	18.00	26.50	33.55	42.00
DEP2	17.00	25.50	32.50	41.00	52.20
PERM cm/sec					
LITHOLOGY	GD	GD	GD	GD	GD
FRACTURE	64	125	92	210	316
FRACTURE OP	21	31	19	32	62
R. Q. D	88.6	93.6	92.3	91.8	84.4
APERTURE	34.0	47.0	26.0	52.0	44.0
INDICATOR	10KSC	10KSC	10KSC	10KSC	10KSC
1990/06/07	0.40	0.60	2.20	2.30	2.35
1990/06/08	0.30	0.60	2.15	2.25	2.30
1990/06/09	0.45	0.65	2.25	2.40	2.40
1990/06/10	0.50	0.65	2.25	2.40	2.40
1990/06/11	0.50	0.70	2.35	2.50	2.50
1990/06/12	0.55	0.75	2.40	2.50	2.55
1990/06/13	0.50	0.70	2.40	2.50	2.55
1990/06/14	0.50	0.70	2.40	2.50	2.60
1990/06/15	0.55	0.75	2.50	2.55	2.60
1990/06/17	0.60	0.80	2.50	2.60	2.70
1990/06/18	0.60	2.85	2.55	2.65	2.70
1990/06/19	0.60	0.85	2.55	2.65	2.75
1990/06/20	0.65	0.85	2.60	2.70	2.75
1990/06/28	0.95	1.20	2.80	2.90	2.90
1990/06/30	1.00	1.20	2.80	2.90	3.00
1990/07/03	1.00	1.25	2.90	3.00	3.00
1990/07/07	1.05	1.30	2.95	3.05	3.10
1990/07/10	1.10	1.40	3.00	3.10	3.20
1990/07/13	1.10	1.40	3.00	3.10	3.20
1990/07/17	1.15	1.40	3.00	3.20	3.20
1990/07/20	1.20	1.40	3.00	3.20	3.30
1990/07/23	1.18	1.40	3.10	3.20	3.30
1990/07/26	1.20	1.40	3.10	3.20	3.25
1990/07/29	1.60	1.80	3.20	3.30	3.35
1990/08/01	1.75	2.00	3.30	3.35	3.40
1990/08/07	1.45	1.65	3.00	3.15	3.25
1990/08/08	1.40	1.80	3.00	3.10	3.25
1990/08/09	1.40	1.60	2.95	3.10	3.15
1990/08/11	1.25	1.50	2.90	3.00	3.10
1990/08/12	1.45	1.70	2.60	2.80	2.85
1990/08/17	1.30	1.55	2.20	2.35	2.40
1990/08/18	1.30	1.50	2.10	2.25	2.30
1990/08/20	1.20	1.40	2.10	2.20	2.20
1990/08/21	1.20	1.40	2.10	2.10	2.20
1990/08/22	1.20	1.40	2.00	2.10	2.10
1990/08/23	1.20	1.40	1.95	2.00	2.10
1990/08/24	1.10	1.30	2.10	2.20	2.20
1990/08/25	1.00	1.20	2.10	2.20	2.30
1990/08/27	1.00	1.20	2.20	2.30	2.35
1990/08/28	1.00	1.30	2.20	2.30	2.35
1990/08/29	1.00	1.20	2.20	2.30	2.35

図-6.4.1 間隙水圧のデータセット例

Weir	550ml No. 1	550ml No. 2	550ml No. 3	550ml No. 4	KD90 No. 1	KD90 No. 2	KD90 No. 3
X	-75262.00	-74988.00	-74945.00	-74877.06	-74900.70	-74908.10	-74915.00
Y	72984.00	72678.00	72617.00	73157.72	72680.50	72683.30	72686.00
ALT	573.70	576.20	576.00	576.49	574.20	574.20	574.20
UNIT	CC/SEC	CC/SEC	CC/SEC	CC/SEC	CC/MIN	CC/MIN	CC/MIN
METHOD	NOTCH	VESSEL	VESSEL	AUTOMATIC	VESSEL	VESSEL	VESSEL
1990/12/10	7638.00	59.00	1316.00		99999.99	99999.99	99999.99
1990/12/17	7638.00	61.00	1316.00		99999.99	99999.99	99999.99
1990/12/24	7638.00	95.00	1316.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/01/04	7638.00	85.00	1316.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/01/14	7638.00	133.00	1250.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/01/21	7638.00	84.00	1316.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/01/28	7638.00	87.00	1316.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/02/05	7638.00	85.10	1316.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/02/12	7638.00	81.60	1250.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/02/19	7638.00	22.90	1250.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/02/25	7638.00	17.00	1190.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/03/09	7638.00	21.70	1250.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/03/14	7638.00	30.30	1250.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/03/16	7638.00	37.70	1250.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/03/23	7638.00	20.50	1190.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/03/26	7638.00	25.00	1190.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/04/02	7638.00	29.60	1190.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/04/10	7638.00	27.60	1250.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/04/16	7336.00	28.20	1250.00		612.00	551.00	21.00
1991/04/22	7336.00	29.40	1250.00		622.00	554.00	22.00
1991/04/30	7336.00	30.20	1250.00		632.00	544.00	32.00
1991/05/06	7336.00	29.20	1250.00		99999.99	99999.99	99999.99
1991/05/07	99999.99	99999.99	99999.99		625.00	544.00	37.00
1991/05/13	7336.00	29.50	1190.00		624.00	546.00	46.00
1991/05/19	7336.00	31.00	1190.00		627.00	528.00	62.00
1991/05/27	7336.00	28.60	1163.00		640.00	544.00	49.00
1991/06/04	7638.00	29.00	1250.00		635.00	517.00	62.00
1991/06/10	7638.00	28.40	1170.00		632.00	536.00	67.00
1991/06/15	7336.00	28.20	1163.00		630.00	524.00	70.00
1991/06/26	7947.00	32.00	1163.00		623.00	589.00	67.00
1991/07/02	7336.00	29.20	1136.00		627.00	563.00	14.00
1991/07/08	7041.00	28.40	1170.00		643.00	552.00	30.00
1991/07/15	7336.00	28.80	1170.00		636.00	559.00	56.00
1991/07/23	7336.00	30.80	1220.00		630.00	535.00	58.00
1991/07/30	7336.00	30.30	1170.00		632.00	502.00	68.00
1991/08/03	7336.00	29.50	1220.00		626.00	491.00	65.00
1991/08/10	7947.00	30.00	1220.00		571.00	475.00	88.00
1991/08/17	7947.00	29.20	1170.00		548.00	486.00	114.00

図-6.4.2 坑道湧水量のデータセット例

年月日	最高(°C)	最低(°C)	雨量(mm)	積雪(cm)	融雪(mm)
1989/11/01	16	8	21.5	0.0	0.0
1989/11/02	13	4	0.0	0.0	0.0
1989/11/03	16	7	0.0	0.0	0.0
1989/11/04	18	9	0.0	0.0	0.0
1989/11/05	14	9	0.0	0.0	0.0
1989/11/06	16	10		0.0	0.0
1989/11/07	17	8	7.0	0.0	0.0
1989/11/08	16	10	0.0	0.0	0.0
1989/11/09	17	10	12.5	0.0	0.0
1989/11/10	15	5	0.0	0.0	0.0
1989/11/11	12	8	0.0	0.0	0.0
1989/11/12	14	10	0.0	0.0	0.0
1989/11/13	17	7	2.5	0.0	0.0
1989/11/14	8	1	0.0	0.0	0.0
1989/11/15	9	2	0.5	0.0	0.0
1989/11/16	8	4	0.5	0.0	0.0
1989/11/17	11	7	0.5	0.0	0.0
1989/11/18	13	7	0.0	0.0	0.0
1989/11/19	9	1	3.0	0.0	0.0
1989/11/20	8	6	0.0	0.0	0.0
1989/11/21	10	6	2.0	0.0	0.0
1989/11/22	10	2	0.0	0.0	0.0
1989/11/23	8	3	0.0	0.0	0.0
1989/11/24	8	5	0.0	0.0	0.0
1989/11/25	12	3	0.0	0.0	0.0
1989/11/26			0.0	0.0	0.0
1989/11/27	11	4	0.0	0.0	0.0
1989/11/28	14	2	0.5	0.0	0.0
1989/11/29	6	0	0.0	3.0	1.0
1989/11/30	2	0	0.0	2.0	0.0
1989/12/01	7	2	0.0	0.0	0.0
1989/12/02	9	5	2.5	0.0	0.0
1989/12/03	12	4	0.0	0.0	0.0
1989/12/04	14	2	3.0	0.0	0.0
1989/12/05	4	2	0.0	0.0	0.0
1989/12/06	5	-2	0.0	0.0	0.0
1989/12/07	8	3	0.0	0.0	0.0
1989/12/08	6	-1	0.0	0.0	0.0
1989/12/09	3	-2	0.0	0.0	0.5
1989/12/10	3	0	0.0	0.0	0.0
1989/12/11	5	0	1.0	0.0	0.0
1989/12/12	1	-2	0.0	0.0	0.0
1989/12/13	2	-4	0.0	0.0	0.0

図-6.4.3 降水量・気温のデータセット例

6.5 まとめ

原位置試験場周辺の水理特性を把握するための基礎データとなる降水量、気温、坑道湧水量および間隙水圧データを取りまとめるとともに、これらのデータに影響を与える可能性がある釜石鉱山内で実施された全ての試験・工事等のイベントデータについて取りまとめ、取得されたデータの相互の関連性から試験エリアの水理特性について検討した。得られた成果を以下にまとめて示す。

- ①今年度の月別降水量および気温（7～10月）で認められた気象異常は、地球規模で観測されたエル・ニーニョ現象によるものと推測された。
- ②坑道湧水量は、降水の影響による変動の可能性が示唆されたものの、観測箇所周辺での試験の影響および観測手法の精度の問題からその変動を捉えきることが出来なかった。
- ③KG-1孔において計測された間隙水圧の経時変化は、ほぼ全ての区間においてピエゾ水頭が上昇から下降に転ずる4回の変曲点（ピーク）が認められ、降水量の月変動との傾向が概ね一致しており、4回のピークは降水量の月変動の影響を受けた結果であることが示唆された。
- ④KG-1孔のピエゾ水頭の経時変化で認められた4回のピーク対して特に影響したと推測される降水日とピーク日時を比較したところ、ピークとなるまでの時間はKG-1孔の浅部の区間では1～2週間程度、深部の区間では1ヶ月半程度であることがわかった。地表の降水の影響は水頭の上昇という形で、KG-1孔浅部から深部へと徐々に伝わっていくことが推察された。
- ⑤KG-1孔付近の降水は、直接あるいは河川（西又沢）から地中に浸透して地表付近の涵養源に地下水として蓄えられ、降水による増量分がまず水頭（圧力）として徐々に深部へと伝播していくものと考察し、その伝播速度はKG-1孔深部で1ヶ月～2ヶ月ほど要するものと推測した。
- ⑥水頭の伝播速度は水の移動速度の数百倍にもなることから、KG-1孔付近において地下深部までの水頭伝播に2ヶ月要するとすれば、水の移動は約200ヶ月すなわち17年程度要するということになり、過去に行った環境同位体の分析結果と整合的であった。
- ⑦550mL坑道周辺の既存試験孔における間隙水圧の経時変化とイベントデータとの関係から試験場周辺の水理的連続性を検討した結果、試験場周辺で観察されるN45°E～N80°Eの亀裂を水みちとして、KH-4孔、KH-13孔、KH-16孔、KH-18孔とKF-2孔およびKCH-1,2孔は水理的に連続しているものと推測した。
- ⑧トレーサ試験場からKD-90坑道の周辺部には、間隙水圧分布を大きく規制する

水理構造が発達していると推定され、このような水理構造の存在が KH-19 ~ KH-25 孔と KD-90 坑道周辺の試錐孔との水理的な関連性を不明瞭にしているものと考察した。また、大量の湧水が認められる KF-1 孔周辺とトレーサー試験エリアとの間には、大きな水みちの空間分布パターンが連続している可能性が示唆された。

- ⑨坑道周辺の既存試錐孔の間隙水圧の経時変化には、自然現象を要因とした変動は検知されず、計測箇所の人為的な要因が間隙水圧の変動に大きく影響を与えていることが判った。
- ⑩本年度新たに掘削した KF-3 孔掘削中における KF-1,2 孔の間隙水圧の経時変化を検討した結果、KF-1 孔と KF-2 孔の間の岩盤は水理的に連続している可能性が示唆された。また、KF-1,2 孔周辺の水理場は、NW坑道の連続性の大きな割れ目帯 24,25 の影響を受けている可能性が見いだされた。
- ⑪試験場周辺の水理的連続性をまとめた結果、大略的にはトレーサー坑道奥部に認められる高水圧部や、KF-1 孔周辺部に認められる大量湧水部等が、試験場周辺における主要な水みちになっているものと推測されるが、坑道近傍ではこの割れ目ゾーンから分岐・派生したと考えられる N45°E ~ N80°E の卓越亀裂群が局所的に主要な水みちになっているものと考察した。また、KH-19 ~ KH-25 孔と KD-90 坑道周辺の試錐孔周辺部においては、水圧の分布状況や水圧応答の調査結果より推定すると、水圧分布パターンを大きく規制する水理構造が存在していると推定した。

7. 深部岩盤の地球化学特性の調査・解析

7.1 目的と概要

本調査の目的は、地下水の地球化学的特性の分布や経時変化を把握を行い、深部岩盤中における水質形成機構と地下水流動の概要を明らかにすることである。

本年度の調査は、地表、250mLと550mLの坑道、及び既存の試錐孔で実施した。実施した調査の概要は表-7.1.1に、また実施個所は図-7.1.1にまとめて示した。

7.2 各調査の結果

7.2.1 原位置試験場周辺の地下水および地表水の温度測定結果

図-7.2.1に調査地点を示した。図-7.2.2は、調査地域での坑内湧水温度と坑内気温、地温、沢水温度及び日降雨量の経時変化の結果である。地温及び沢水の温度に明瞭な年変動が認められる。一方、坑内水温、気温は一年を通じて変動が少ない。550mLの二つ坑内湧水は温度が大きく異なっている。坑内温度は湧水温度より変化幅が大きく、湧水温度に与える影響は小さいと考えられる。

表-7.2.1は平成6年10月18日から平成10年1月23日まで観測されたデータの統計値を示したものである。沢水温度は一年間の観測データがないため正確なことは言えないが、地温よりやや高いことが分かる。

表層地温、沢水の平均温度を涵養水の温度と仮定すると、550mL坑内湧水(E)は、ほぼ涵養水の温度と同程度であることがわかる。このことは、一つの可能性として涵養された水温を保ったまま地下水が山内部を流れていることが考えられる。このような現象は地下水が主に亀裂に沿って流れている場合に生じる可能性がある。広域的な地下水流動を考えた場合、特に坑道に向かう地下水流動には、このようなケースが存在していることが推定される。一方、同じ550mL湧水(D)の平均温度は沢水平均温度より2.807℃高く、地下昇温率として約1.4℃/100mであることが分かる。地下水流動の速度が相対的に小さいと推定される。

7.2.2 既存坑道湧水の物理化学パラメータ・化学成分の経時変化の調査結果

図-7.2.3～5に各測定地点毎の物理化学パラメータの経時変化を、また図-7.2.6～8にW-25地点における各成分の経時変化を示した。なお分析結果の値が、検出限界以下であった項目に関しては除いてある。以下にこれらの結果とイベントとの関係を考察した。

250mLの計測地点の付近で行われた、主なイベントは6月中旬のKCH-3孔掘削、7月中旬～8月中旬にかけて行われたKPSシリーズの試錐掘削6本、10月初旬～中旬のKCH

表-7.1.1 深部岩盤の地球化学特性の調査・解析の実施項目一覧表

調査名	調査箇所	調査項目	地点数
地温及び坑内湧水水温調査	地表	地温・地表水温測定	3地点
	550mL	地下水温・坑内温度測定	3地点
	550mL	地下水温測定	1地点
坑道湧水の物理化学パラメータの経時変化の把握	250mL坑道湧水箇所 W-3、W-10、W-25	物理化学パラメータ測定	3点
坑道湧水の化学成分の経時変化の把握	250mL坑道湧水箇所 W-25	主要化学成分分析 同位体分析	1地点
坑道湧水組成の空間分布把握	550mL坑道湧水箇所	主要化学成分分析 同位体分析	36地点
		溶存硫酸塩中の同位体	6地点
既存試錐孔における地下水の水質	KF-1孔、KF-2孔	物理化学パラメータ測定	9地点
	KG-1孔1区間 深度41.41m地点	物理化学パラメータ測定 主要化学成分分析 同位体分析 ガス分析 細菌分析	1地点
	KH-19孔、KH-20孔	物理化学パラメータ測定 主要化学成分分析 同位体分析 微量成分分析	6地点
地表水の採水分析	西又沢水系	環境同位体	3地点
		細菌分析	2地点

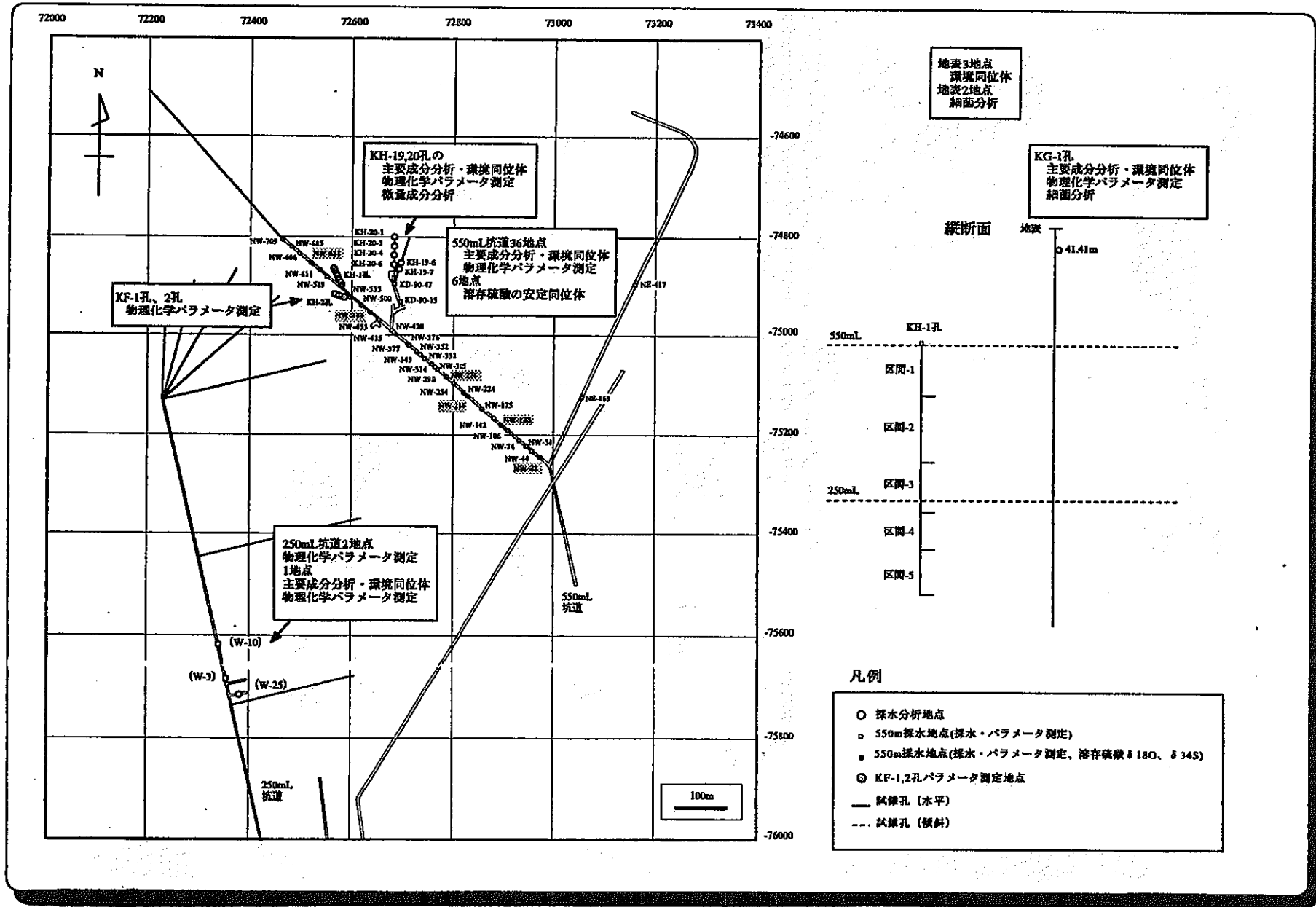


図-7.1.1 深部岩盤の地球科学特性の調査・解析の実施個所

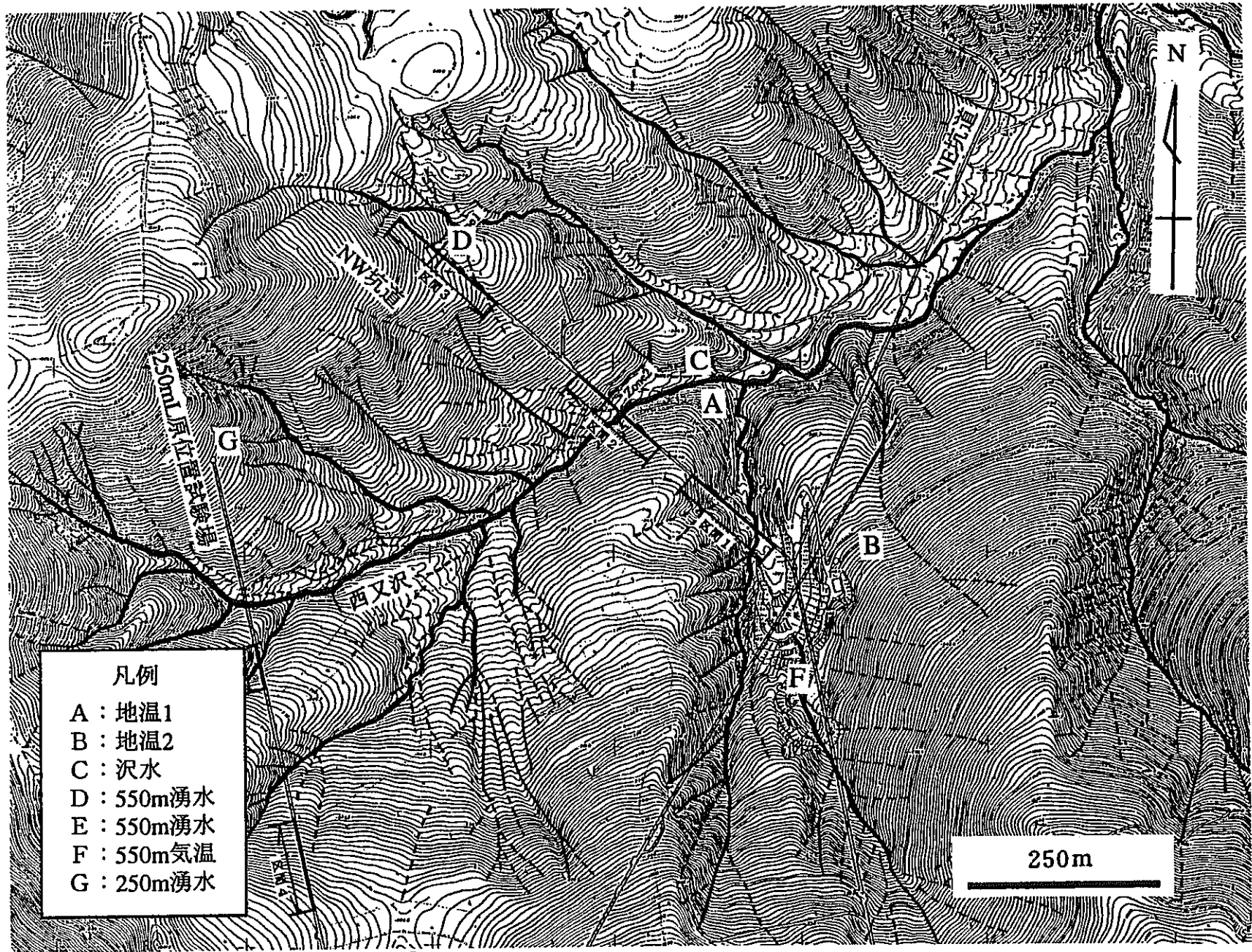


図-7.2.1 地温および坑内湧水温調査の計測位置図

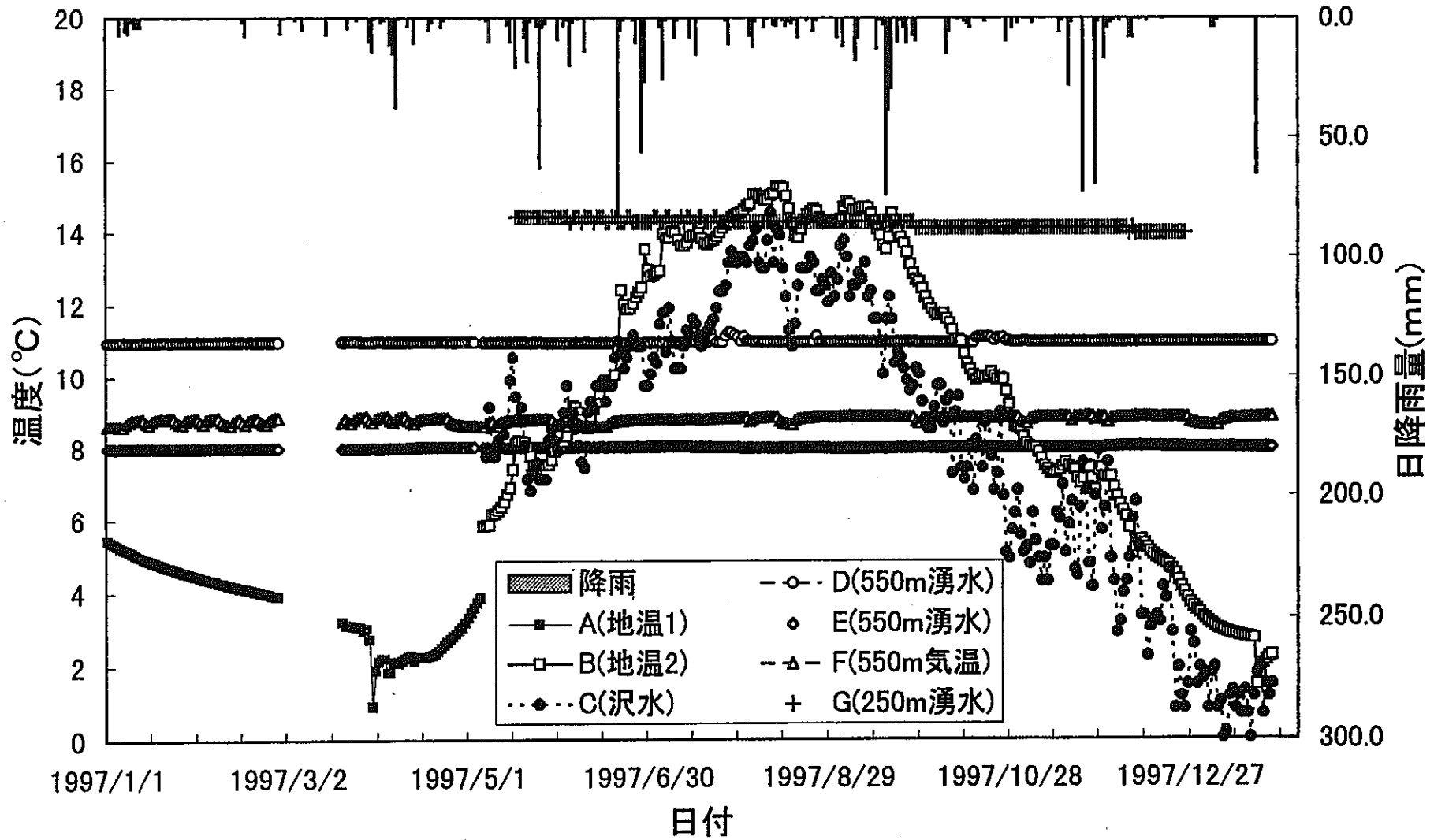


図-7.2.2 地下水・地表水温の経時変化および降水量との関係

表-7.2.1 地下水・地表水温および降水量の統計値一覧表

	平均	標準誤差	標準偏差	分散	最小	最大
A(地温1)(°C)	7.489	0.117	3.525	12.424	0.910	14.310
B(地温2)(°C)	7.540	0.178	4.116	16.939	1.390	15.290
C(沢水)(°C)	8.156	0.237	3.834	14.703	0.030	14.560
D(550mL湧水)(°C)	10.963	0.013	0.460	0.212	8.490	22.010
E(550mL湧水)(°C)	8.072	0.018	0.625	0.391	7.960	22.510
F(550mL気温)(°C)	8.735	0.005	0.112	0.013	8.500	8.870
G(250mL湧水)(°C)	13.589	0.165	2.547	6.487	1.840	14.440
降雨 (mm)	2.963	0.245	8.566	73.381	0.000	97.000

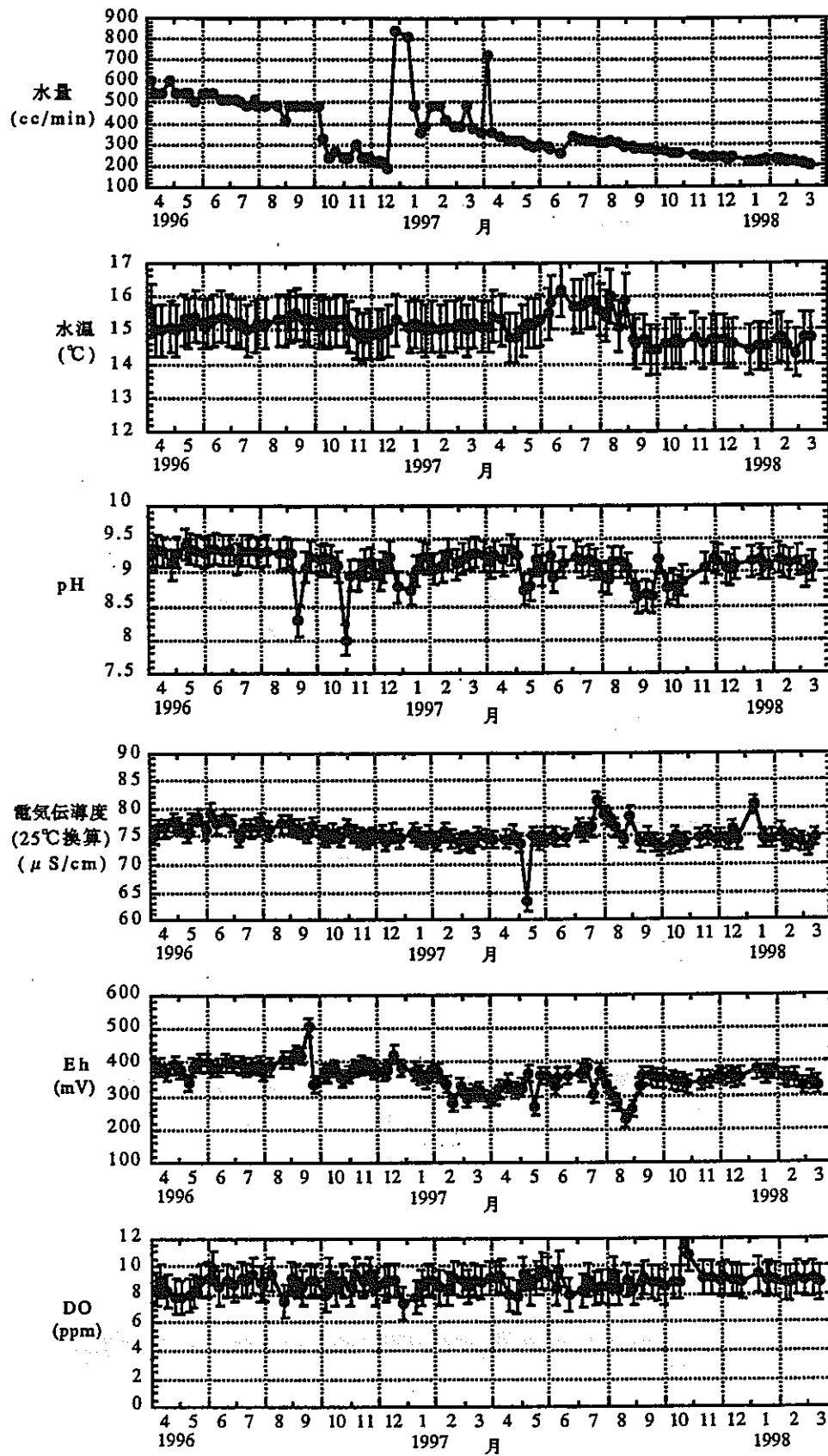


図-7.2.3 W-3地点における物理化学パラメータの経時変化

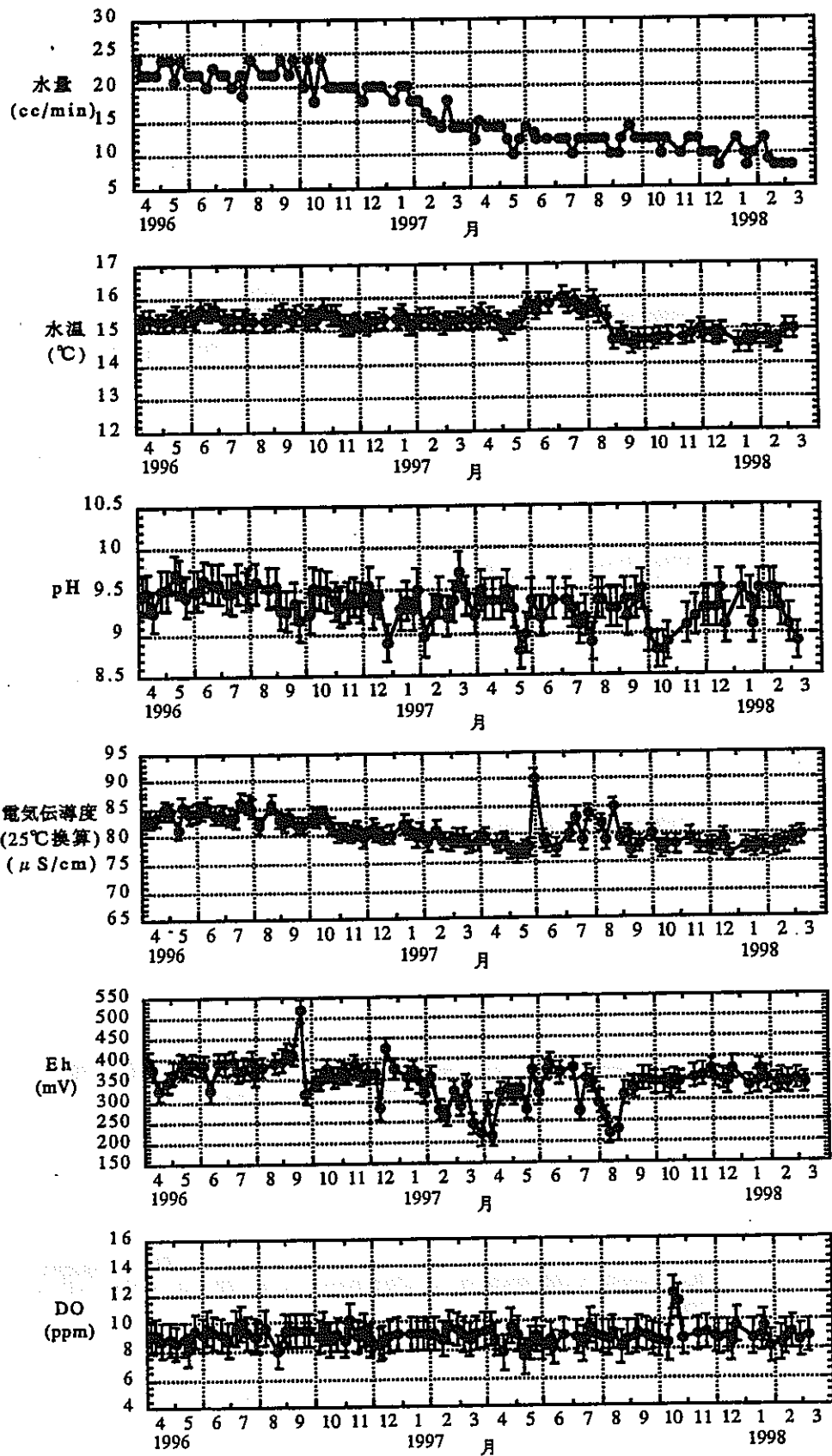


図-7.2.4 W-10地点における物理化学パラメータの経時変化

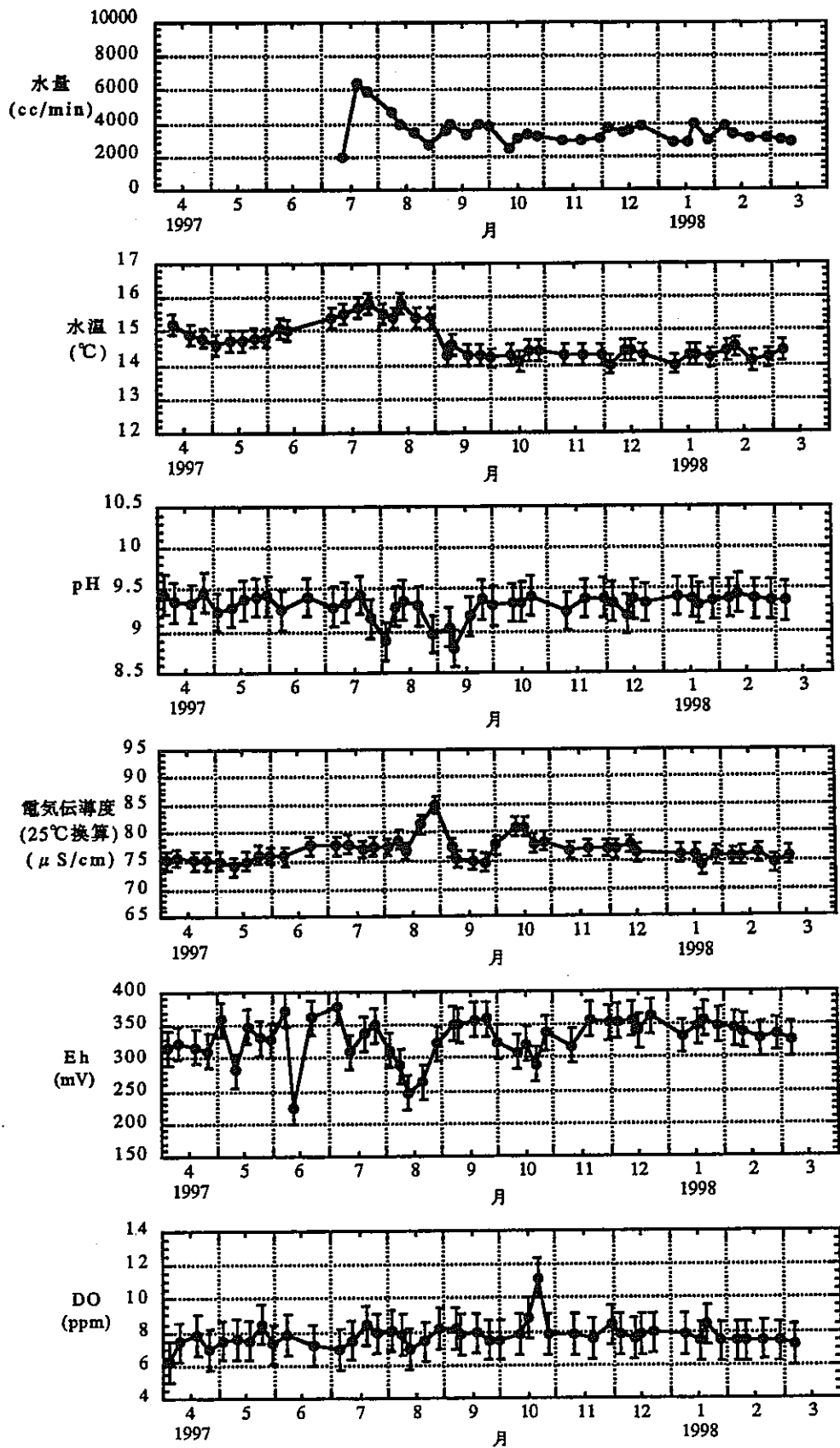


図-7.2.5 W-25地点における物理化学パラメータの経時変化

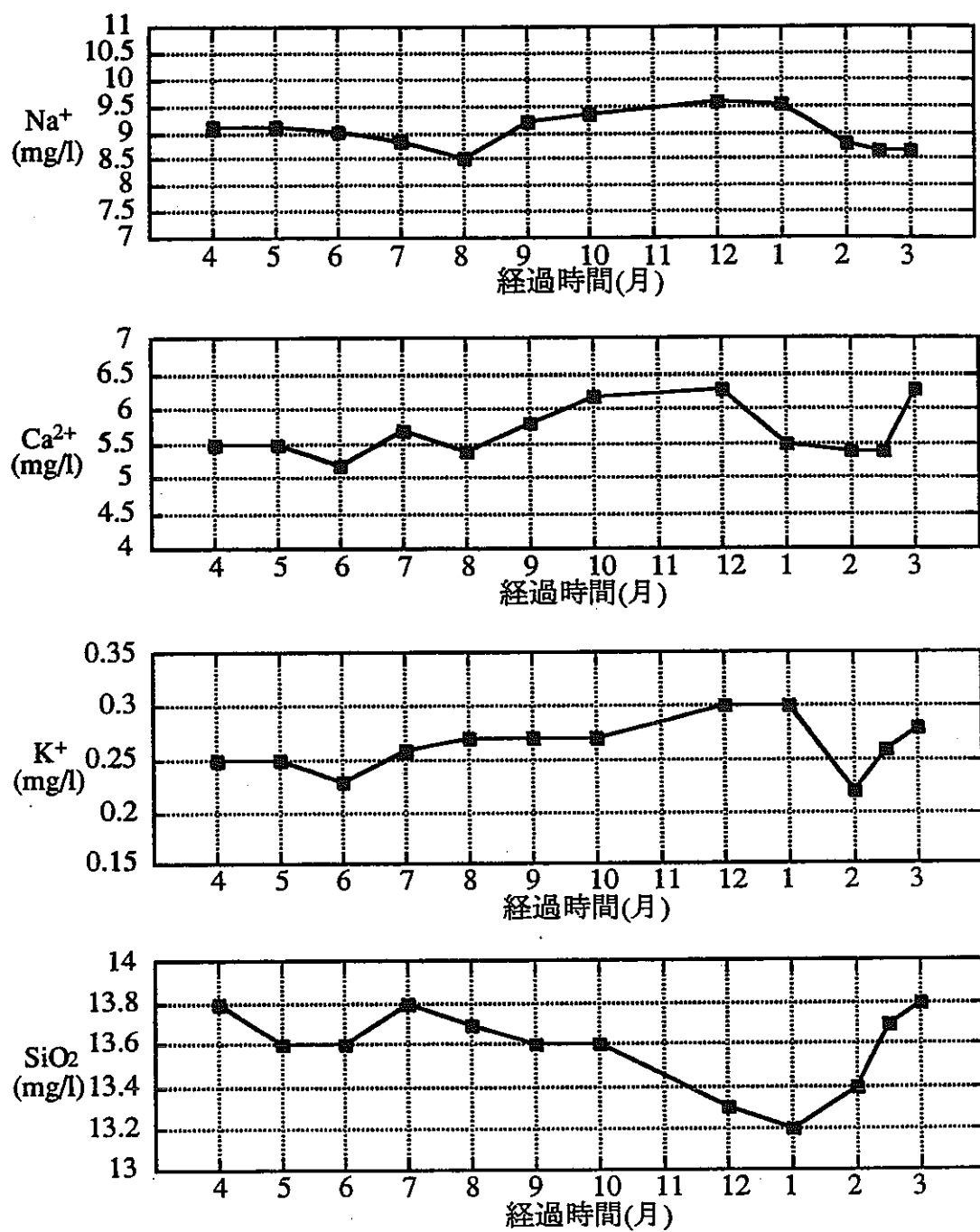


図-7.2.6 W-25地点における主要化学成分の経時変化(1)

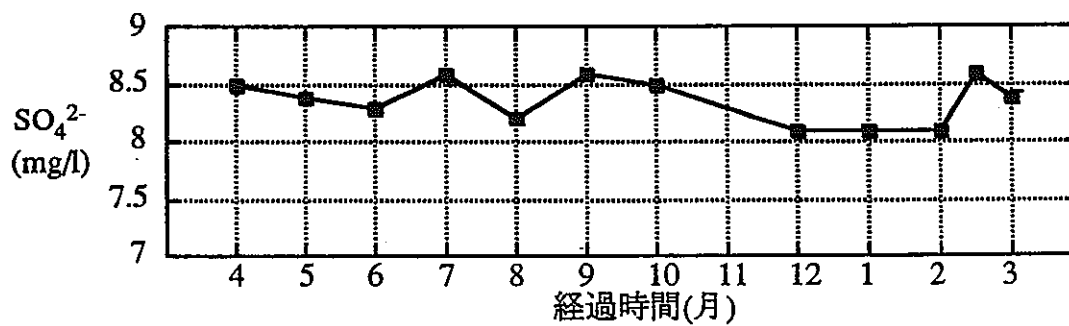
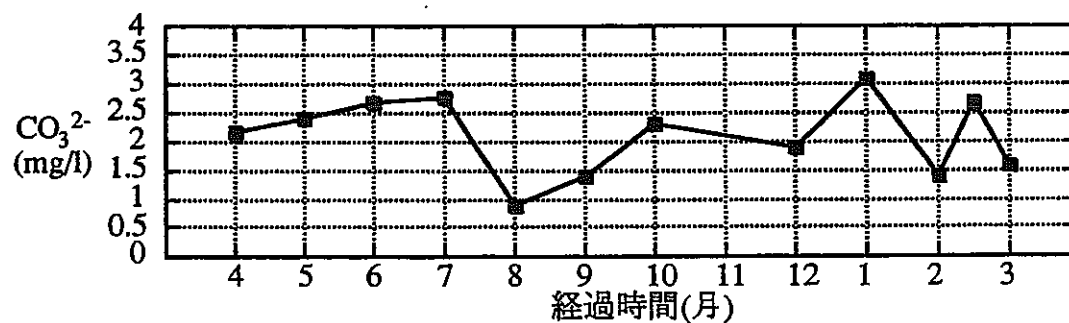
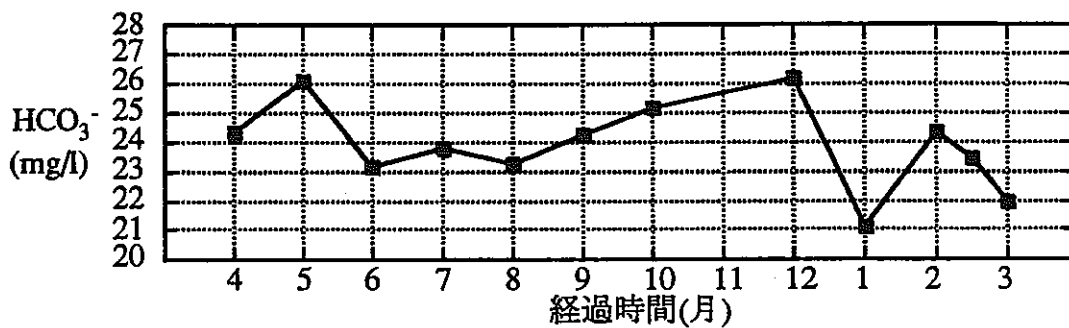
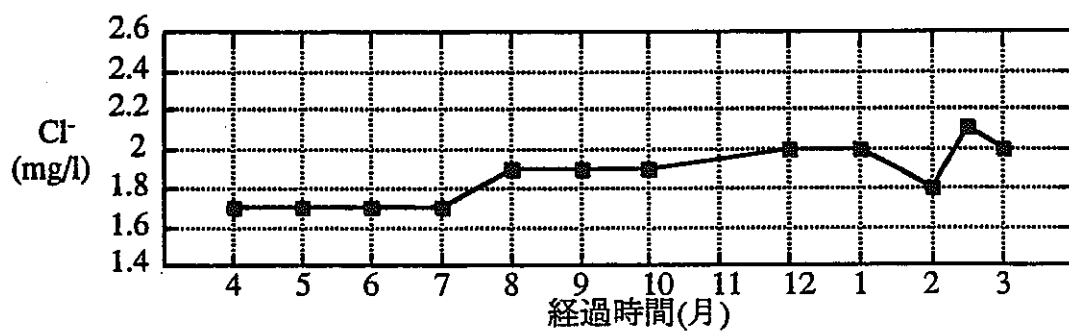


図-7.2.7 W-25地点における主要化学成分の経時変化(2)

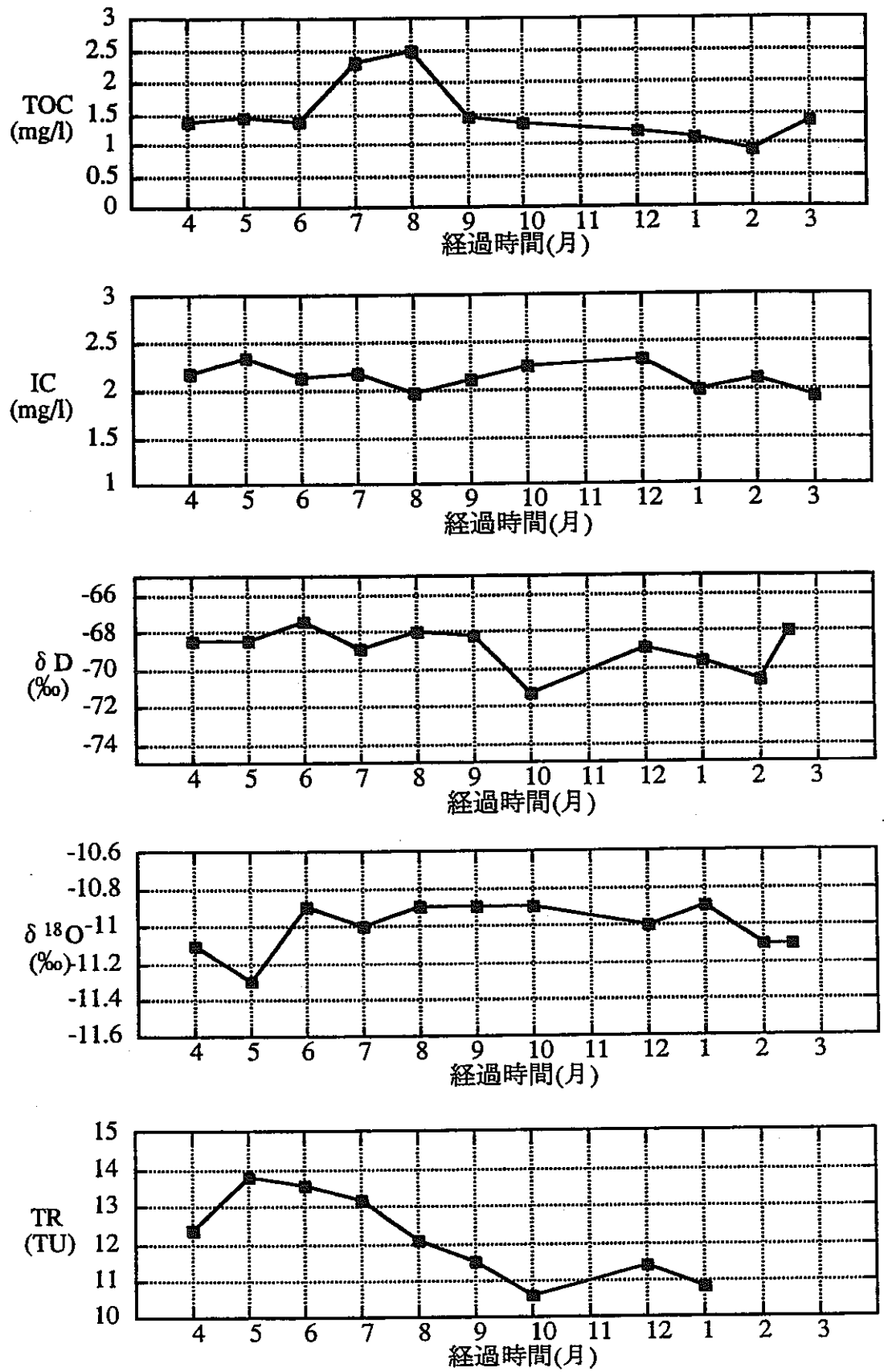


図-7.2.8 W-25地点における主要化学成分の経時変化(3)

-4孔の掘削、12月中旬～1月初旬のTASK3-1の透水試験、そして12月末～1月末のTASK2の透水試験である。

(a)水温に関してみると、全測定地点において、KCH-3孔とKPSシリーズの試錐作業にともなう水みちの変化、あるいは坑内作業に伴う坑道の温度上昇が影響した可能性がある。

(b)pHに関しては、W-3で8月中旬頃、W-10で9月末、またW-25では7月下旬と8月下旬に低下が認められている。試錐掘削の影響がやや遅れて出てきた可能性が推定される。

(c)電気伝導度に関しては、W-3でKPSシリーズの掘削の影響が生じた可能性がある。またW-10もKCH-3孔とKPSシリーズの掘削の影響を受けた可能性がある。

(d)酸化還元電位に関しては、全測定点において7月末～8月にかけて値が低下が認められる。KPSシリーズの掘削が行われた時期と重なるので、これらの影響を受けた可能性がある。

W-25の主要成分に関しては、7月前後より連続的にNa, Ca, K, Cl, HCO₃はやや上昇し、SiO₂は減少し、またCO₃は大きく減少した後上昇する挙動を示している。KCH-3孔やKPSシリーズの掘削の影響による変動である可能性がある。

7.2.3 坑道湧水の採水・分析の結果

NW坑道の基点からの距離とパラメータの関係を図-7.2.9と図-7.2.10に示した。また、図-7.2.11～図-7.2.14、および図-7.2.15には、550mL坑道の36地点における分析結果に関して、NW坑道の基点からの距離と主要成分および環境同位体の分析結果との関係を示した。なお殆どの値が、検出限界以下であったAl³⁺, T-Fe, Fe²⁺, NO₃⁻, NO₂⁻, F⁻は除いた。

各測定項目と分析項目の値には大きな変動が認められるものがあり、地質構造との関連性が推定される。なお、地質構造と水質形成の関連性の詳細に関しては、後で考察する。

7.2.4 溶存硫酸中の同位体分析結果

6地点の地下水成分の硫酸塩中の $\delta^{34}\text{S}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の分析を実施した。図-7.2.16には坑道基点からの距離と、分析値との関係を示した。

(1) $\delta^{34}\text{S}$

$\delta^{34}\text{S}$ の値は、-1.8～7.7%の値をとっている。測定結果からは、214mが最も高い値を示し基点側と坑道奥側に向かい値が低下しているような傾向が認められる。しかし、点数が6点と少ないので、この傾向が坑道全体における分布パターンを反映し

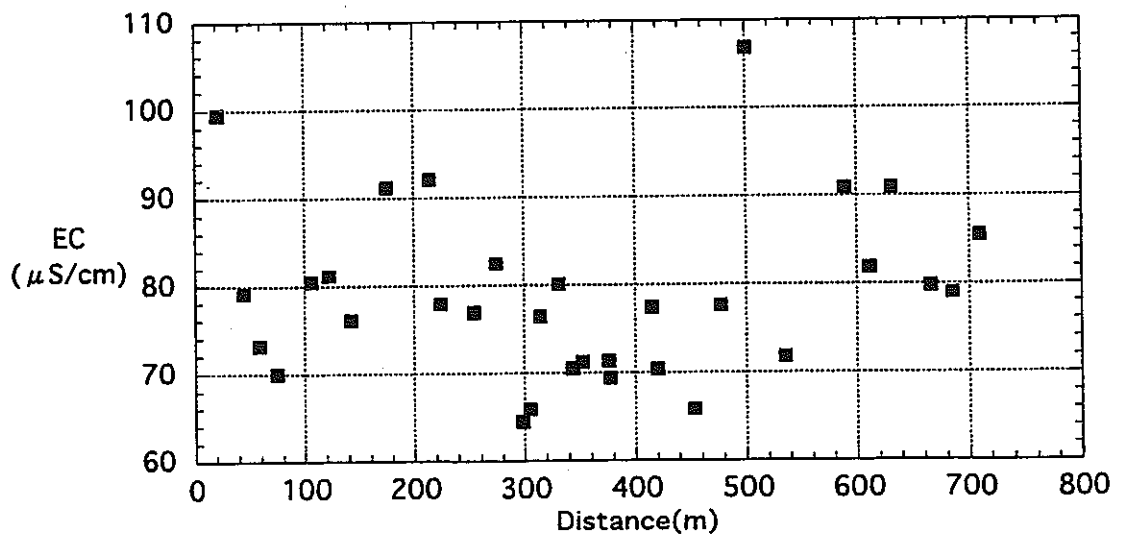
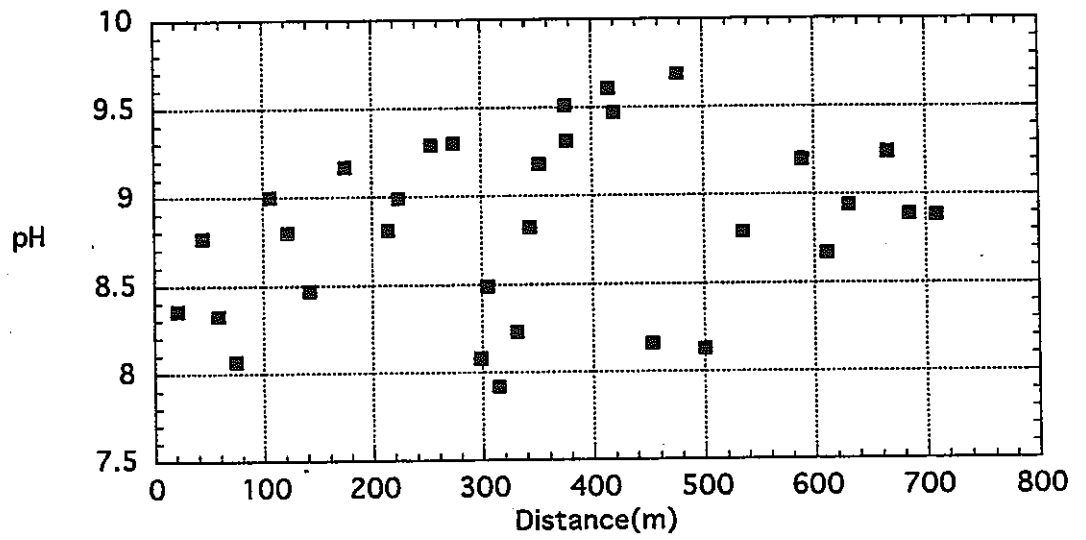
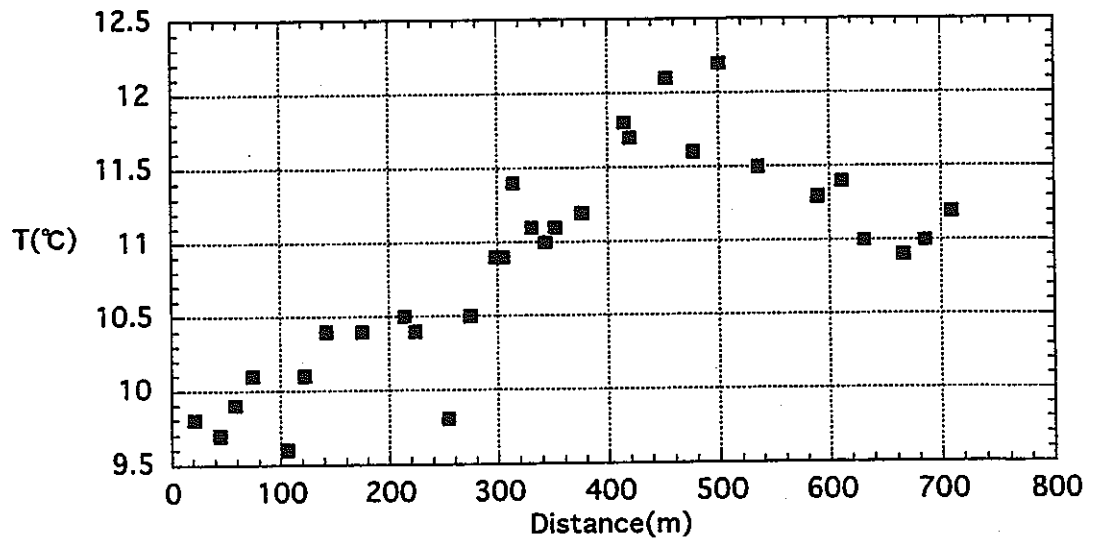


図-7.2.9 NW坑道の基点からの距離とパラメータとの関係(1)

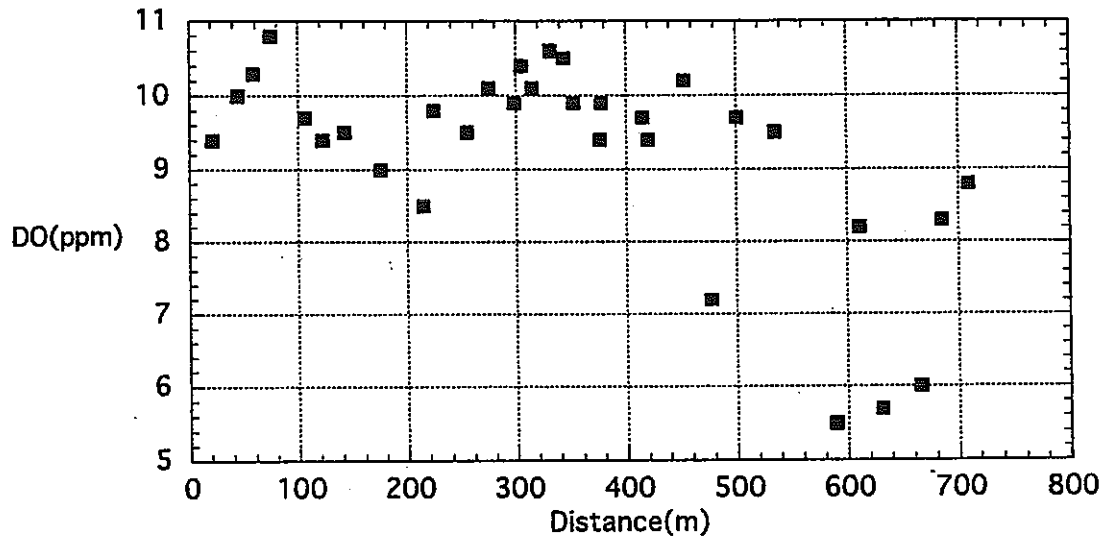
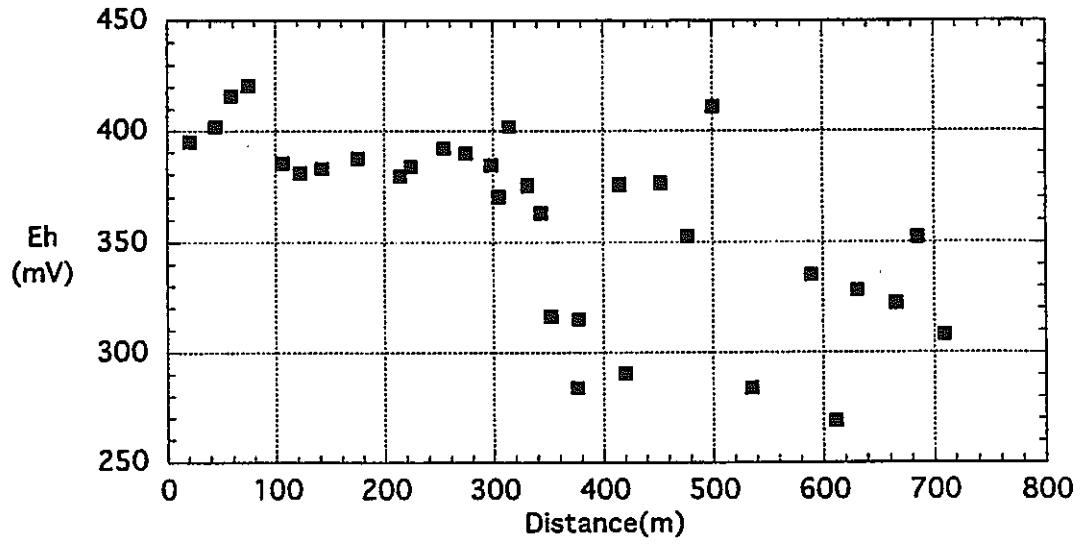


図-7.2.10 NW坑道の基点からの距離とパラメータとの関係(2)

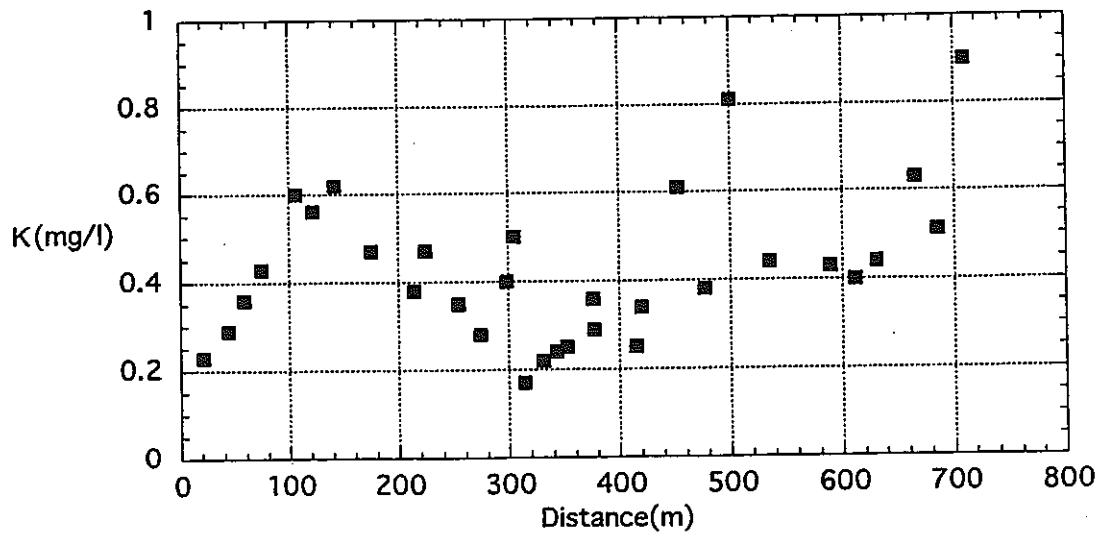
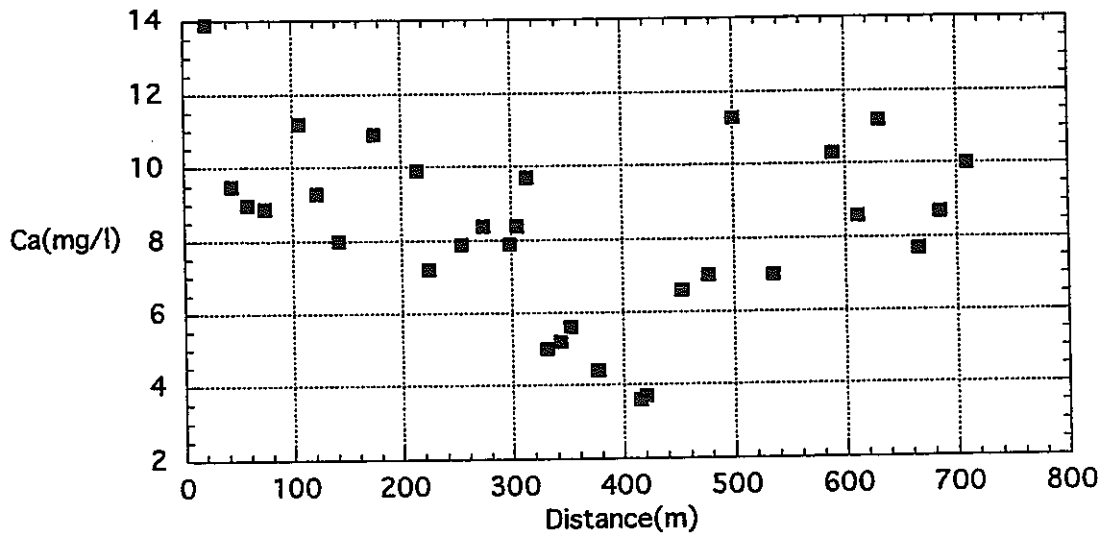
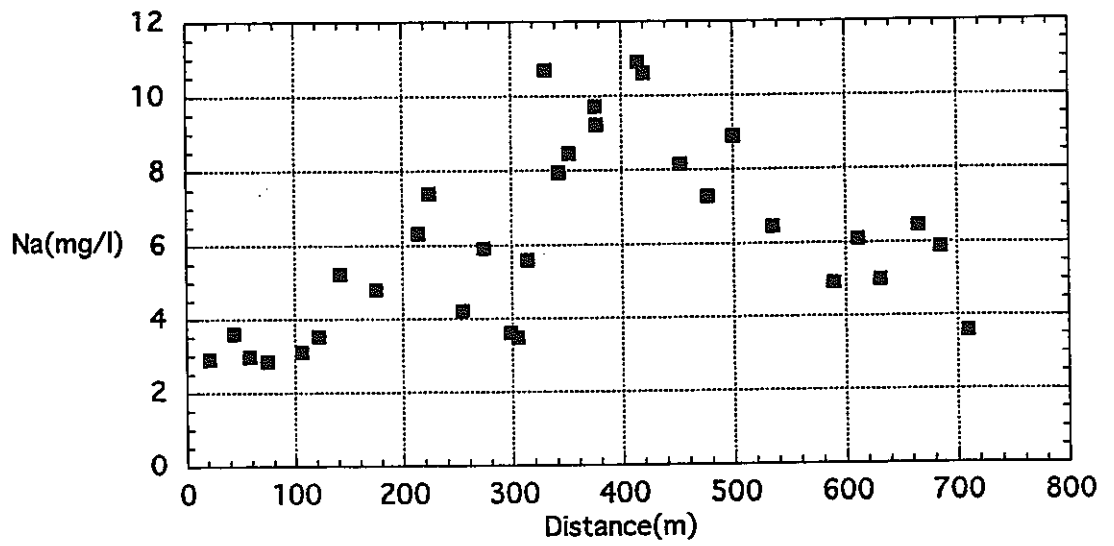


図-7.2.11 NW坑道の基点からの距離と主要成分組成との関係(1)

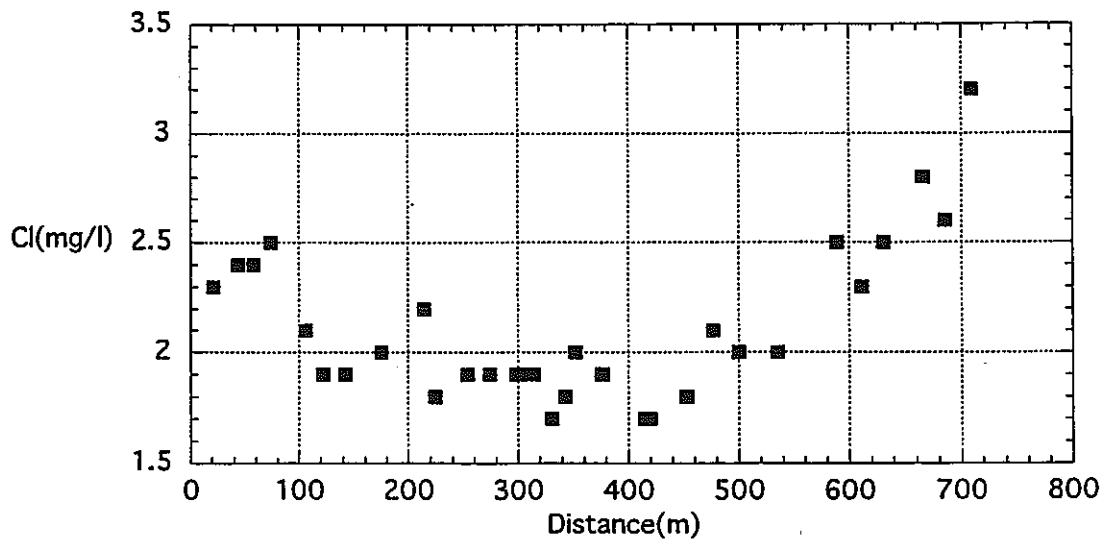
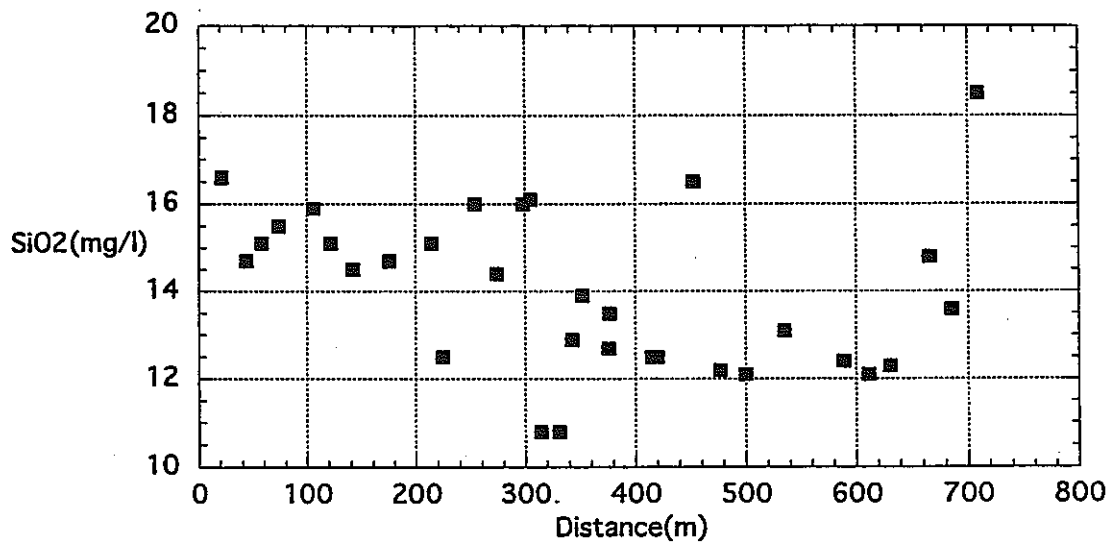
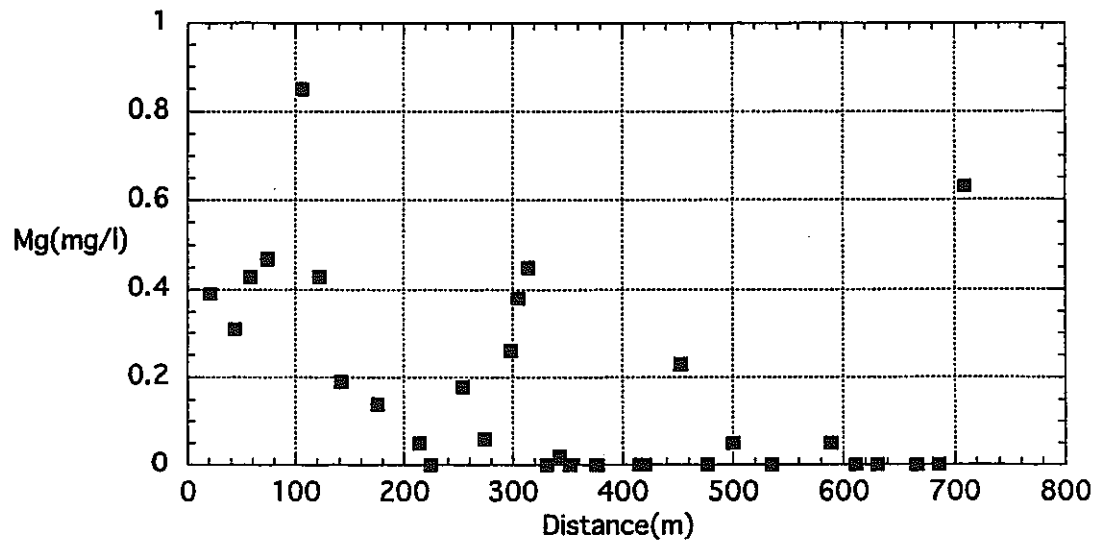


図-7.2.12 NW坑道の基点からの距離と主要成分組成との関係(2)

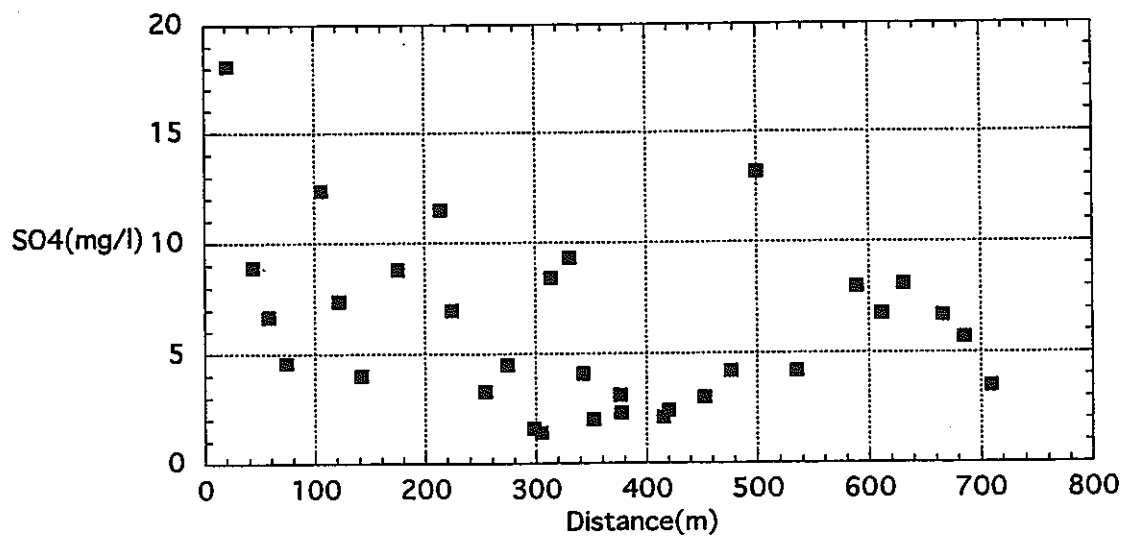
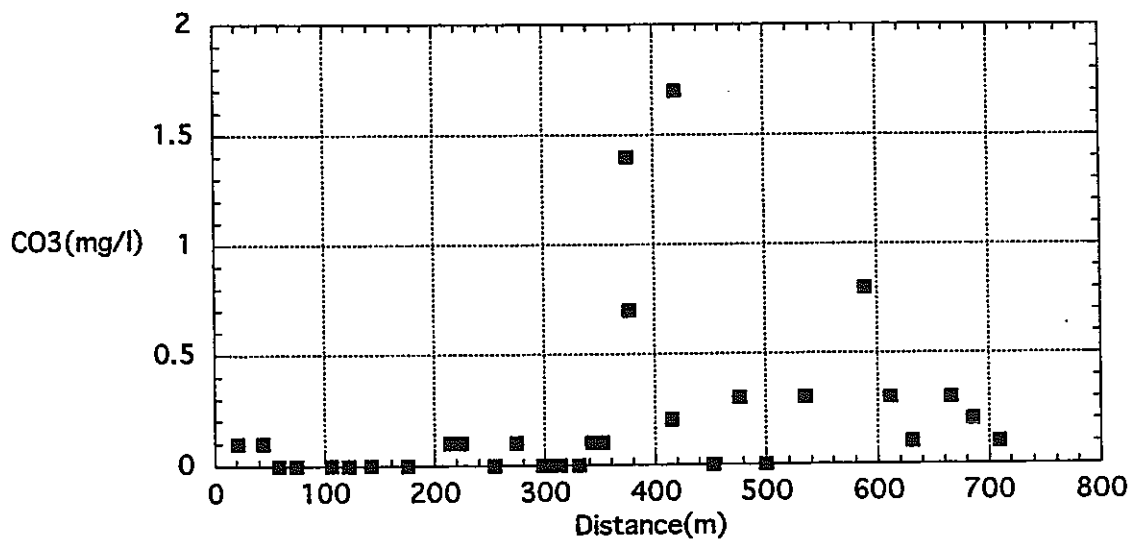
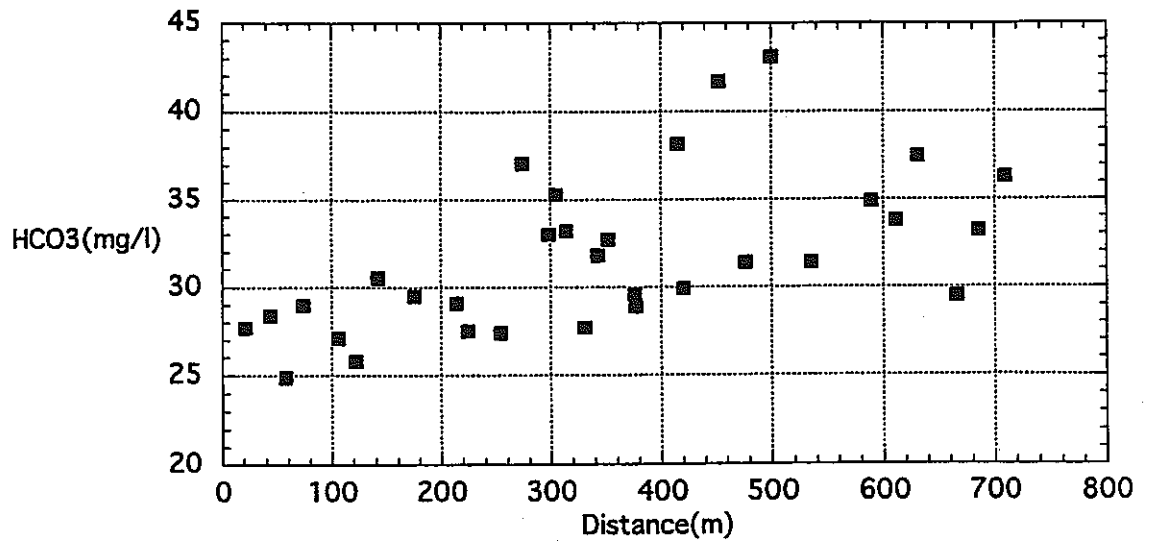


図-7.2.13 NW坑道の基点からの距離と主要成分組成との関係(3)

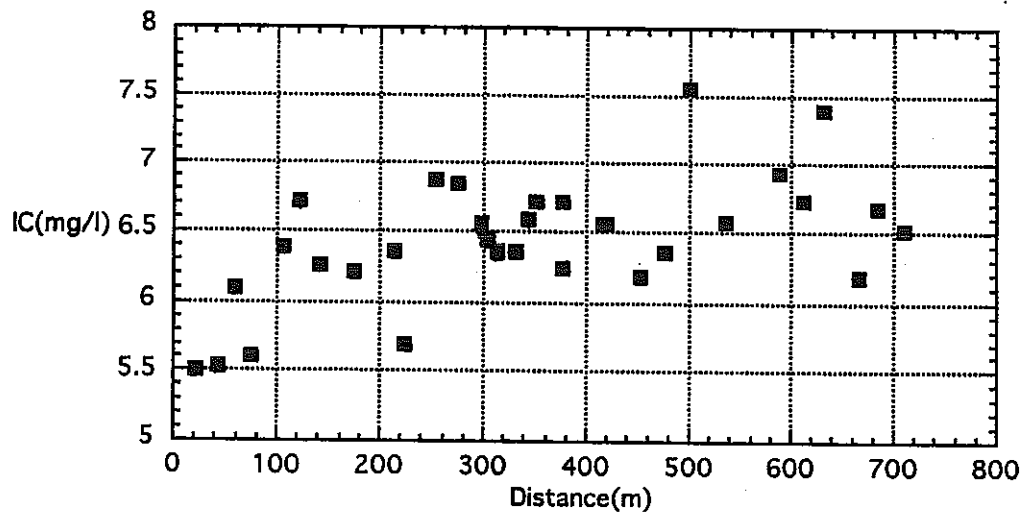
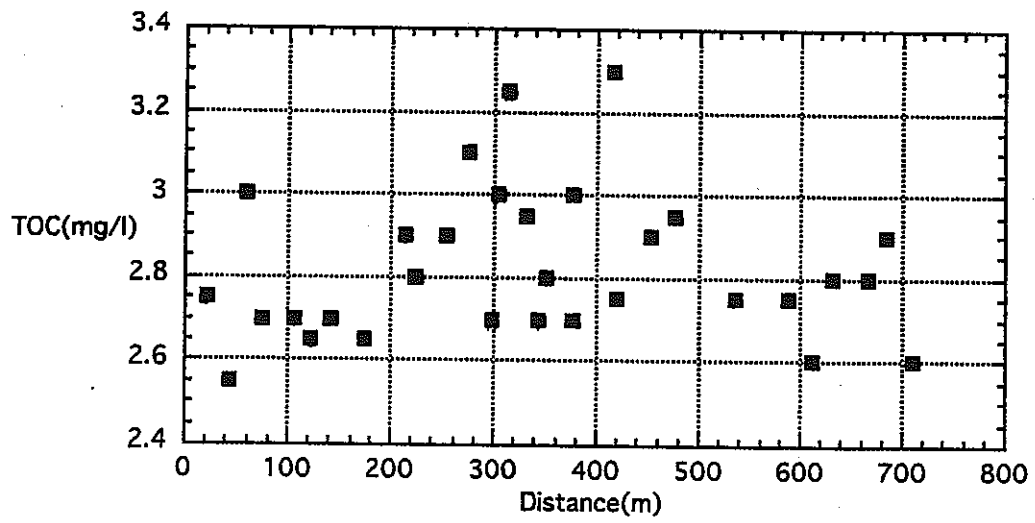


図-7.2.14 NW坑道の基点からの距離と主要成分組成との関係(4)

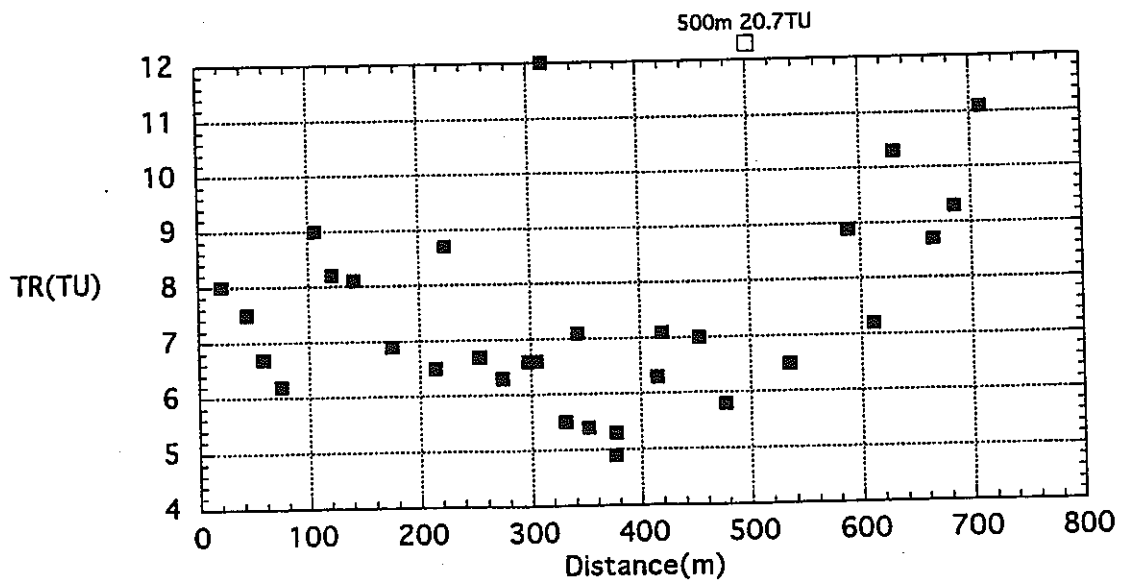
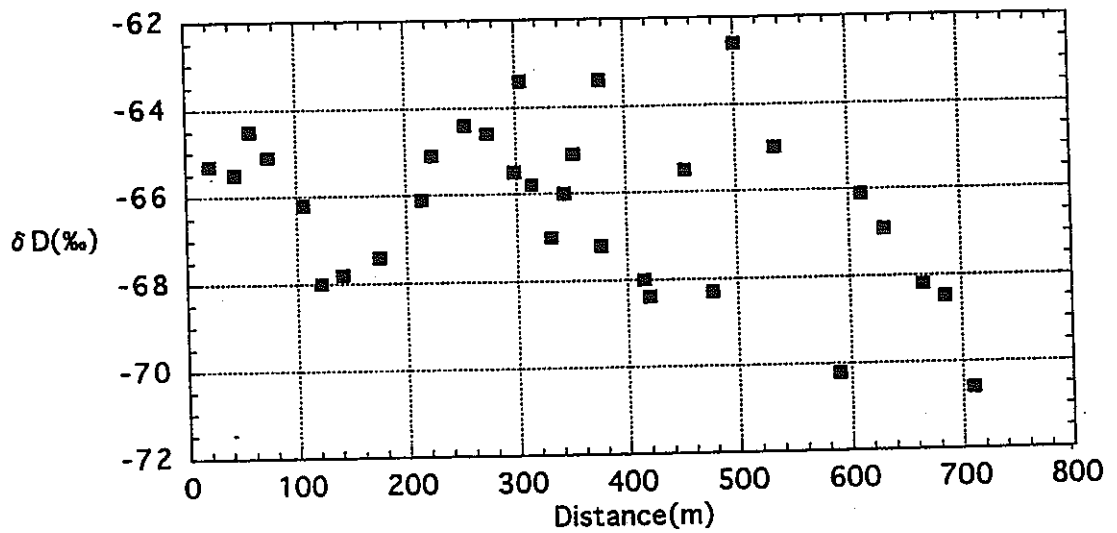
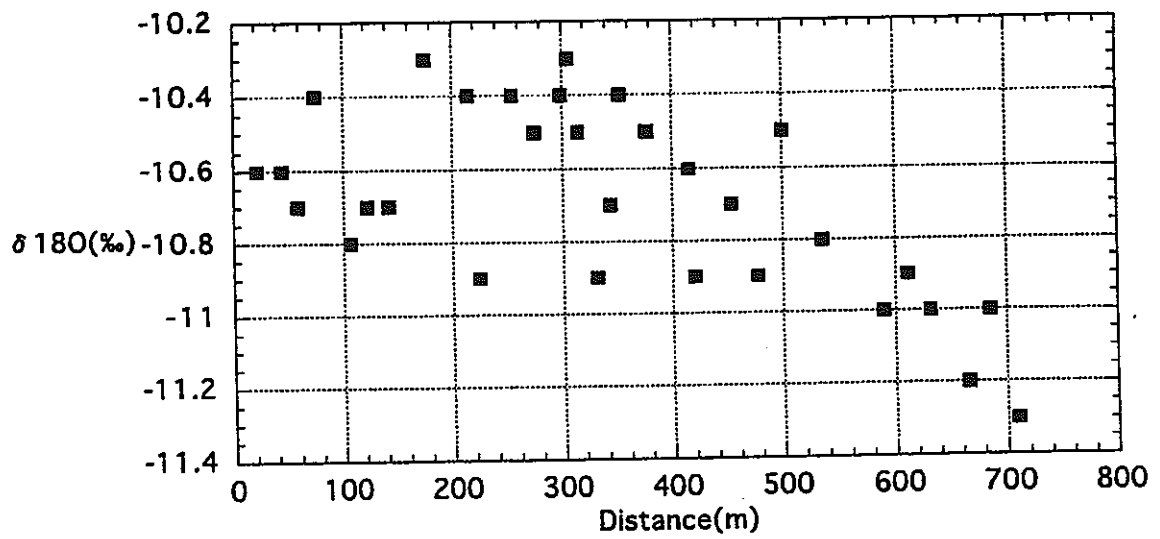


図-7.2.15 NW坑道の基点からの距離と環境同位体組成との関係

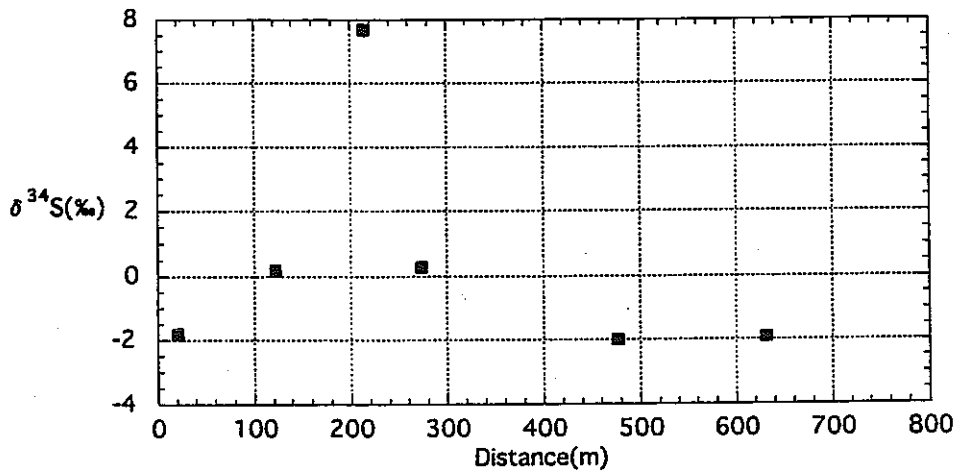
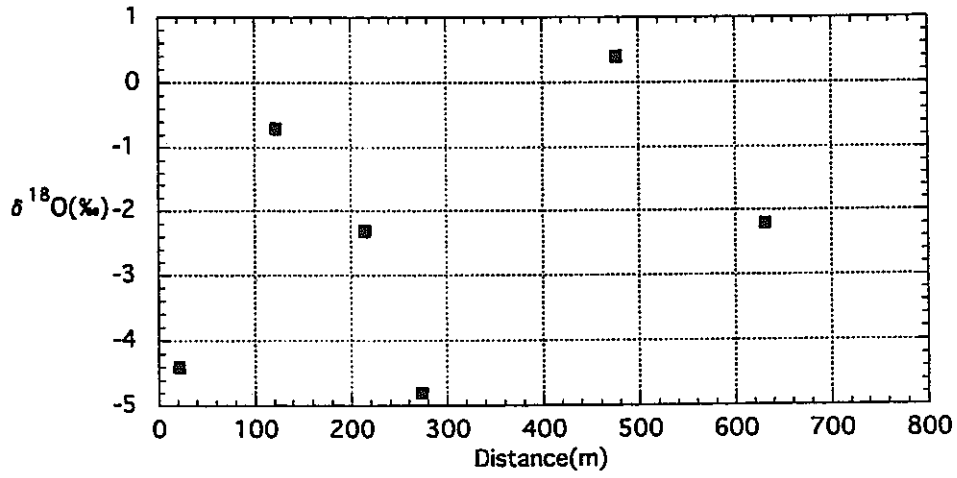


図-7.2.16 NW坑道の基点からの距離と溶存硫酸の同位体組成との関係

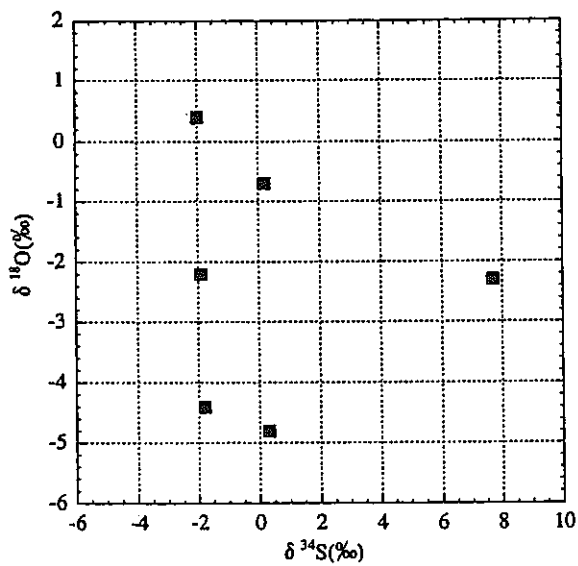


図-7.2.17 溶存硫酸中の $\delta^{34}\text{S}$ と $\delta^{18}\text{O}$ との関係

ているかは明らかでない。なお、214m地点の7.7%という値は、他の地点が-2~0%程度であることに比較して極端に高い値であるといえる。

(2) $\delta^{18}O$

$\delta^{18}O$ の値は、-4.8~0.4%の値をとっており、477mが最も高く、274mが最も低い。坑道の基点からの距離とこれらの値との間には、測定数が少ないこともあり明瞭な関係は認められず、空間分布パターンは不明である。

図-7.2.17には、 $\delta^{34}S$ と $\delta^{18}O$ の関係を示した。 $\delta^{34}S$ の似通った値に対して $\delta^{18}O$ の値は大きく変動しており、両者は独立して挙動しているものと考えられる。

7.2.5 KF-1、2孔における物理化学パラメータ調査の結果

KF-1孔の6区間、KF-2孔の3区間の物理化学パラメータの経時変化の様子を図-7.2.18~22に示す。

測定結果から、全体的な傾向としては、水温とpH値は早い段階で安定して変動が少ないことが解る。また電気伝導度はやや変動するものもあるが、同様の傾向を示している。酸化還元電位は、やや変動が大きく初期段階と比較して上昇する場合と下降する場合の両ケースがある。溶存酸素は、多くの場合ほぼ0ppmに近い値となって安定しており、坑道内の測定結果と比較して非常に小さな値であるといえる。

7.2.6 KH-19、20孔にける採水分析調査の結果

KH-19孔と20孔において実施した、物理化学パラメータ、主要成分濃度、環境同位体組成および微量成分分析の結果に関して説明する。

(1) 主要成分

表-7.2.2に主要成分の分析結果を示した。また、図-7.2.23は各区間の分析結果をヘキサダイアグラムに示したものである。ヘキサダイアグラムの形状より、各区間の水質はNa-HCO₃タイプに属するものであることがわかる。各区間における水質の明瞭な相違は主要成分においては認められない。

(2) 微量成分分析

表-7.2.3に微量分析の結果を示した。各成分は検出限界以下より数ppb程度の値を示しており、分析項目ごとにばらつきがある。表-7.2.4は、各成分の分析値を6区間の平均値で割った値とそれらの最大値、最小値、および標準偏差を示したものである。この結果をみると、ばらつきが大きい上位の10成分は以下のようなものとなっている。

Cd：標準偏差1.907。KH-20-4のみ他の10倍以上の濃度。

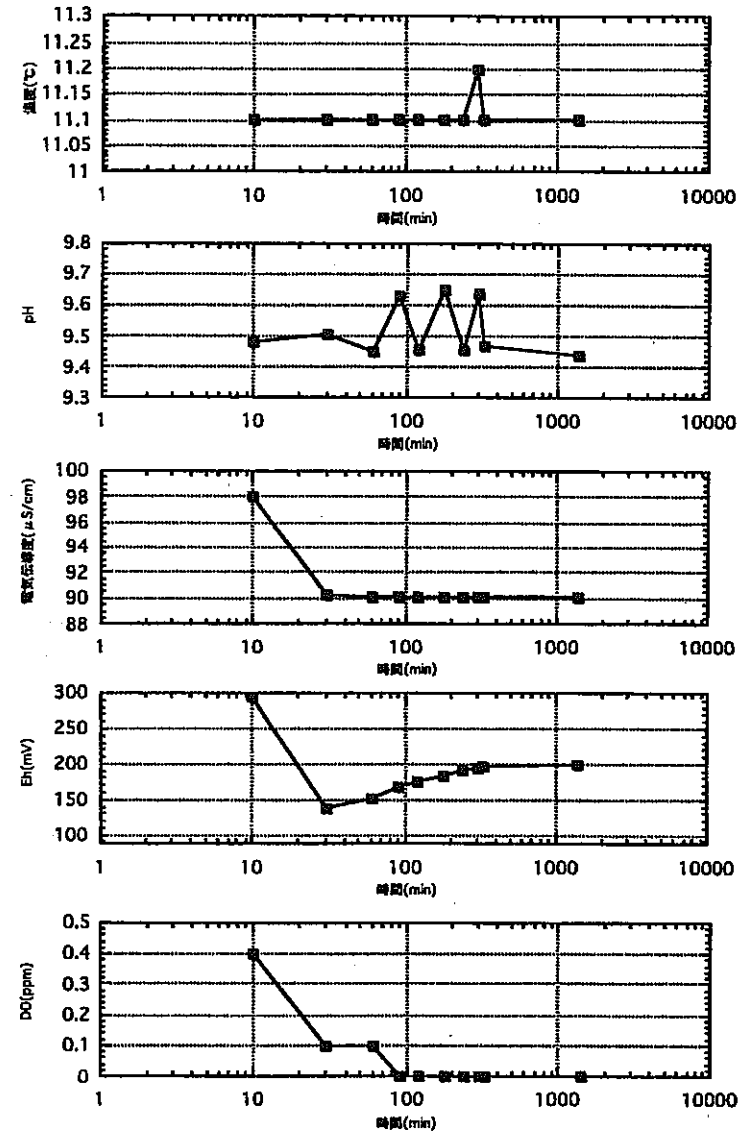
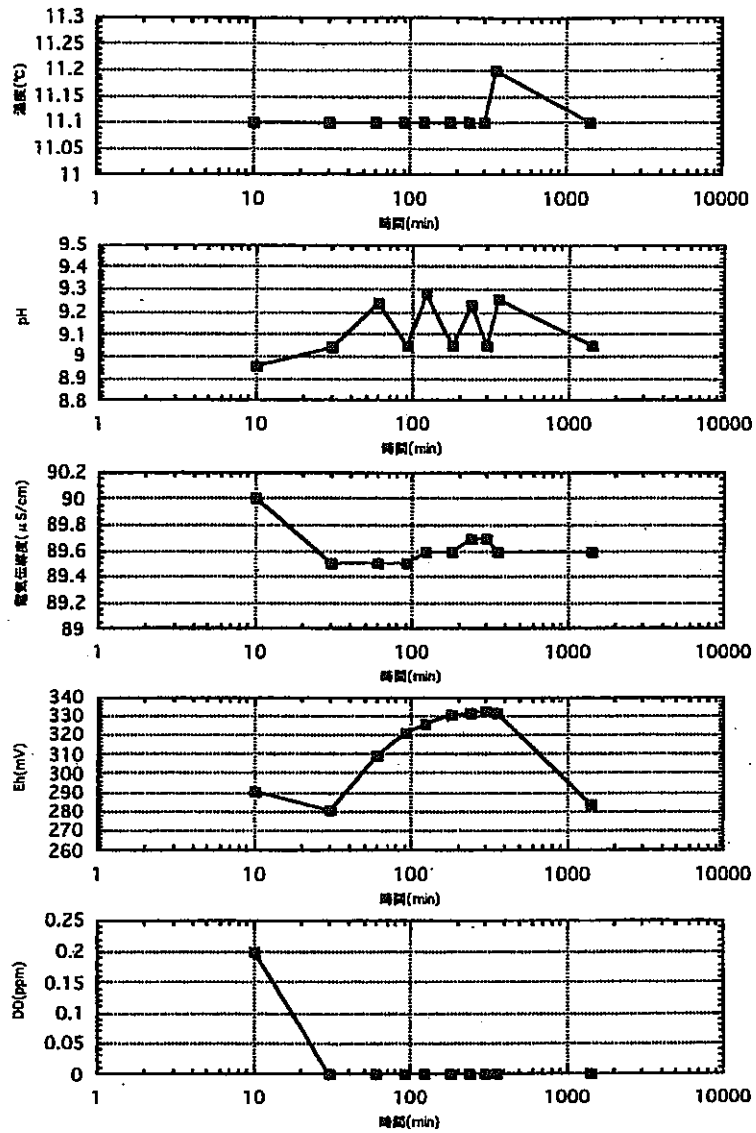


図-7.2.18 KF-1-1,2区間の物理化学パラメータの経時変化

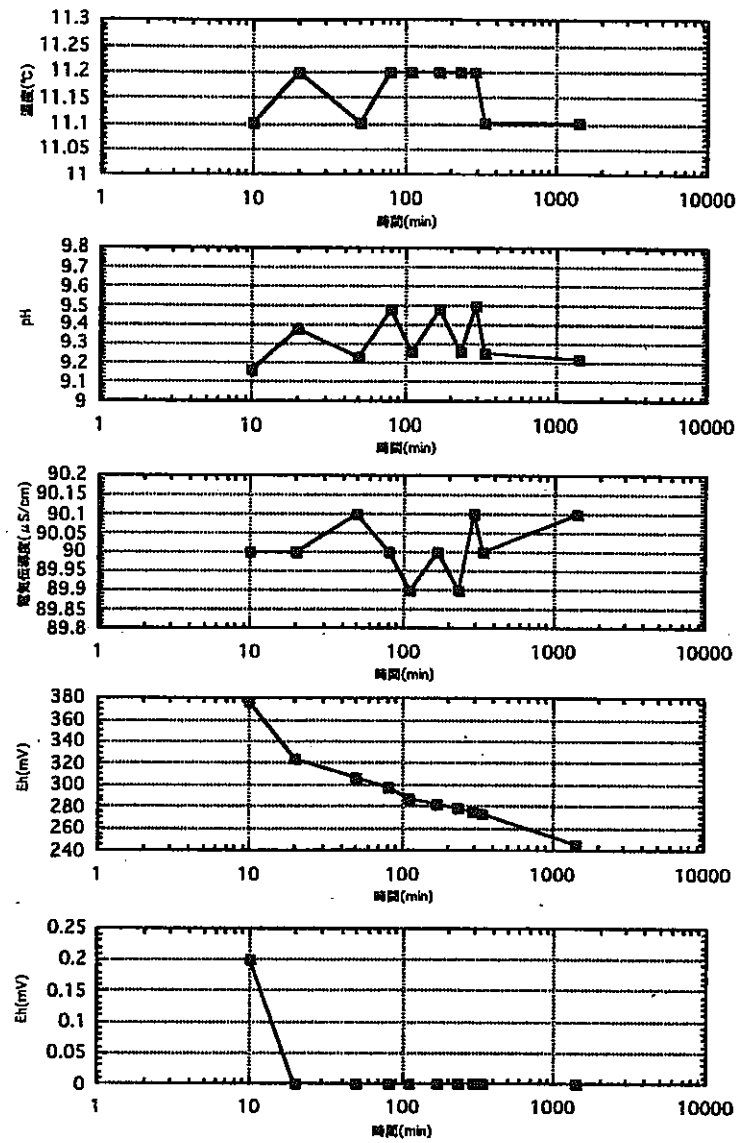
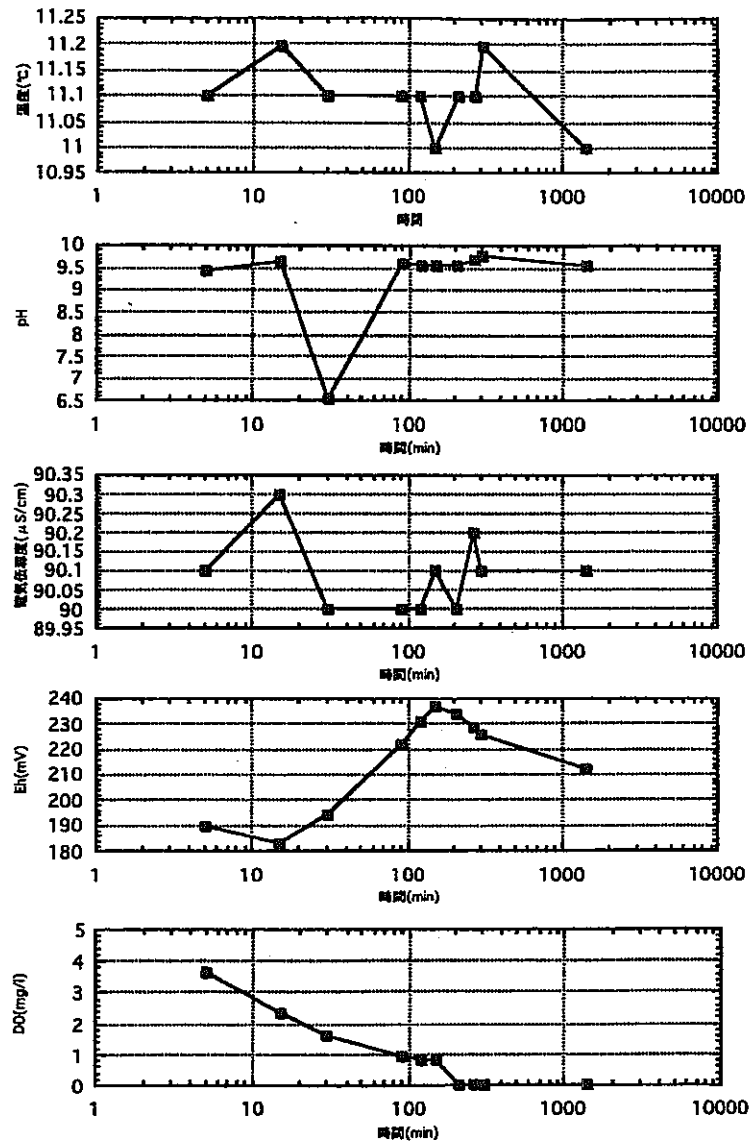


図-7.2.19 KF-1-3,4区間の物理化学パラメータの経時変化

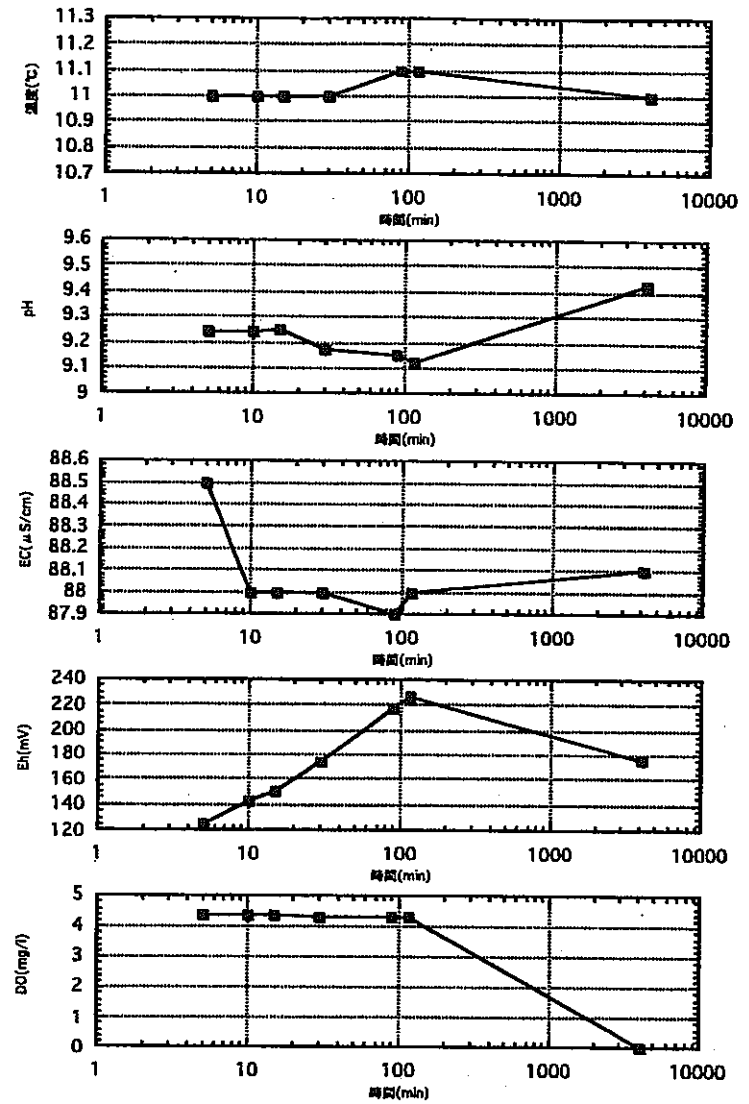
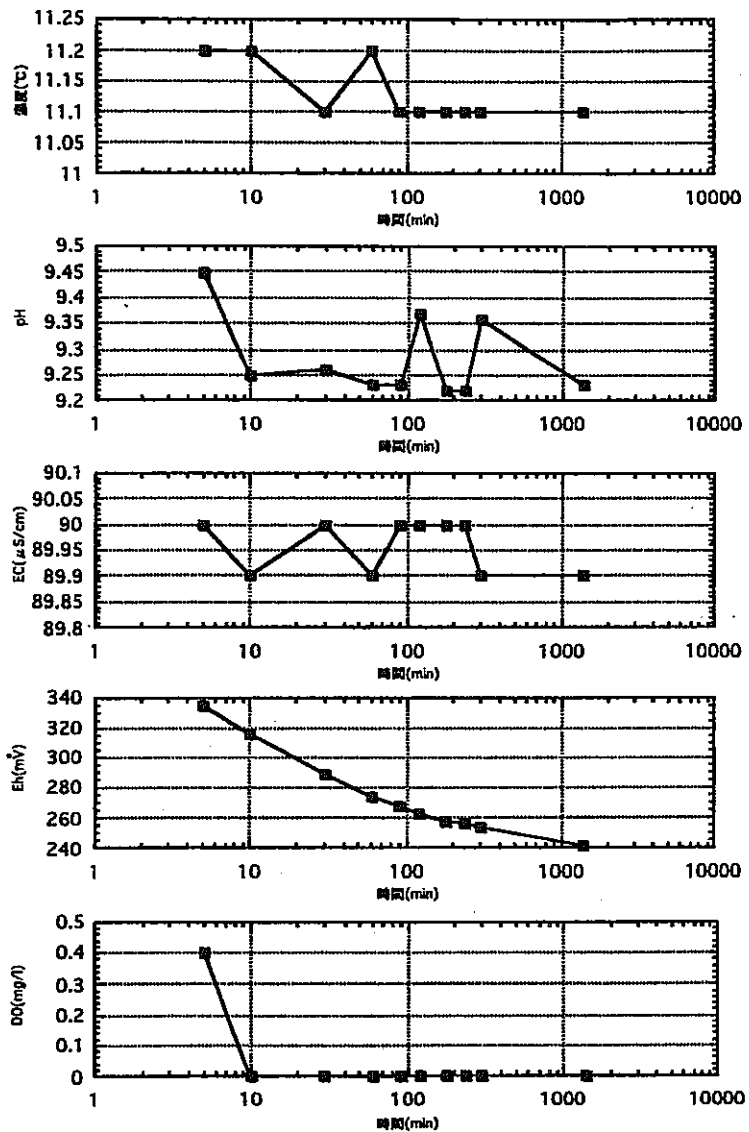


図-7.2.20 KP-1-5, 6区間の物理化学パラメータの経時変化

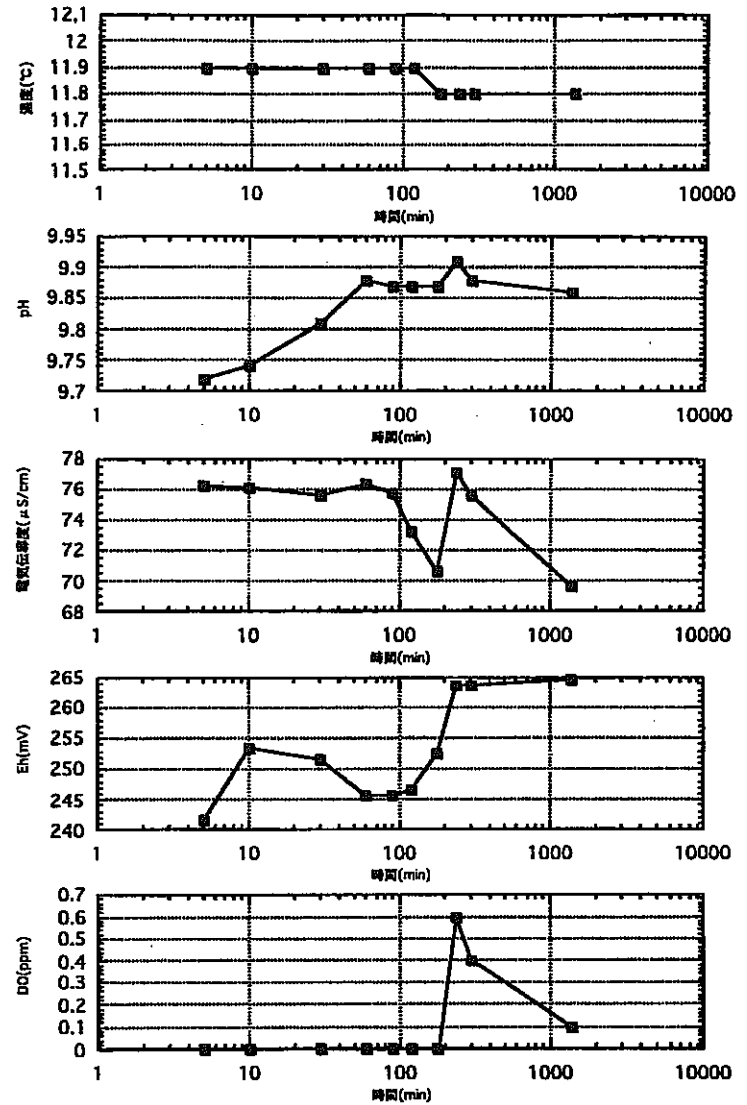
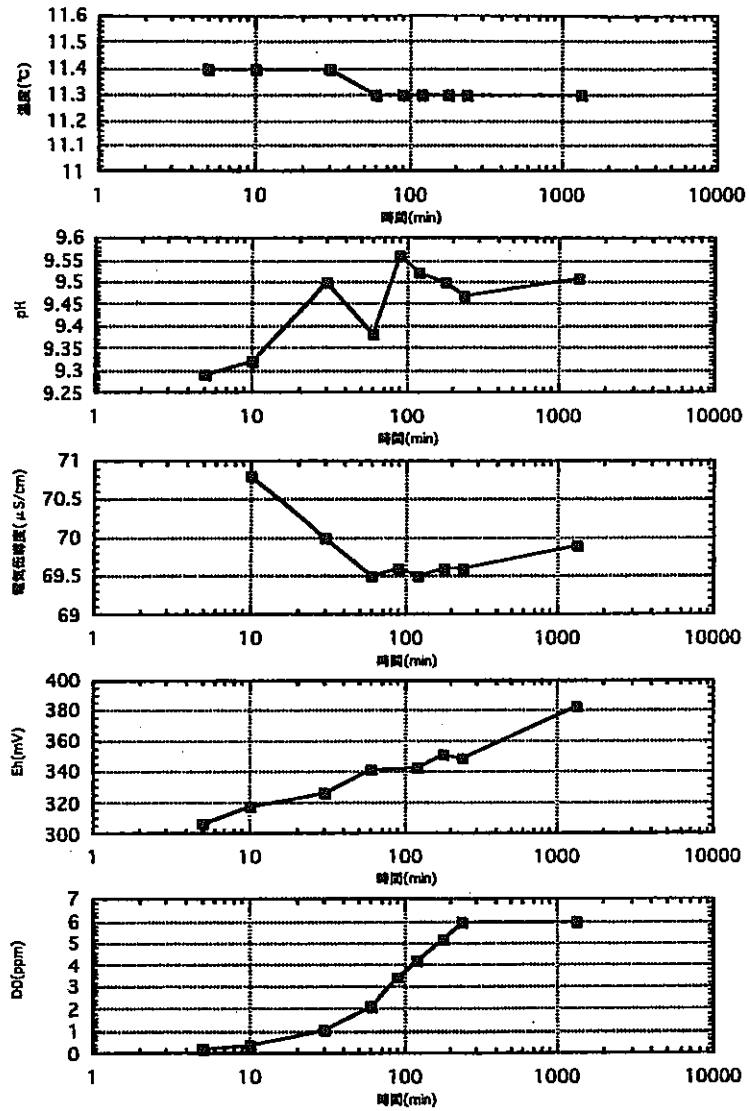


図-7.2.21 KF-2-1, 2区間の物理化学パラメータの経時変化

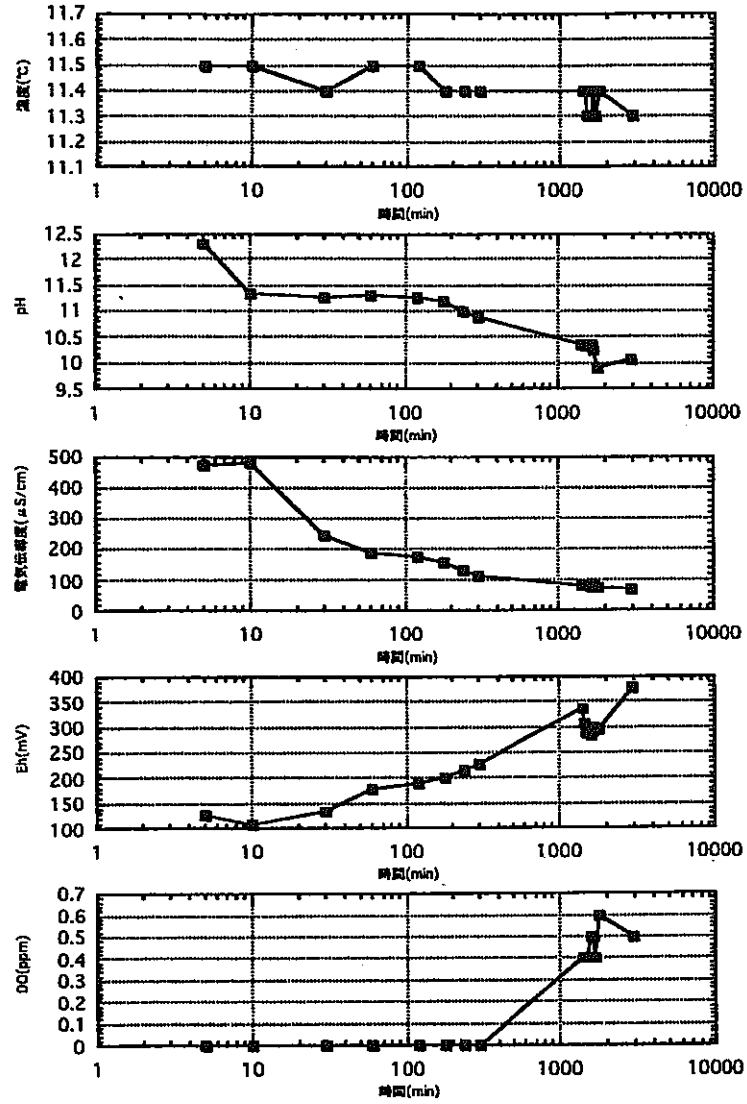


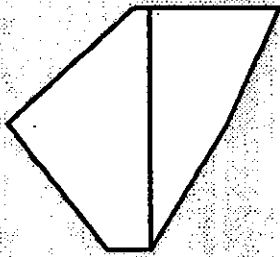
図-7.2.22 KF-2-3区間の物理化学パラメータの経時変化

表-7.2.2 KH-19,20孔における主要成分の分析結果一覧表

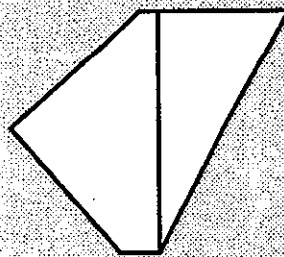
	EC	pH	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO ₃
	μS/cm		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
KH-20-1	87	9.5	12.2	0.17	6.56	0	2.41	39.1
KH-20-3	88	9.5	11.9	0.22	5.47	0	2.44	47.4
KH-20-4	88	9.1	11.9	0.18	5.28	0	2.5	36.2
KH-20-6	86	9.4	11.5	0.23	5.68	0	2.6	37.3
KH-19-6	87	9.5	11.1	0.17	4.96	0	2.56	40.3
KH-19-7	87	9.6	12	0.23	5.01	0	2.49	37

	CO ₃	SO ₄	T-Si	IC	TOC	δD	δ18O	TR
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	‰	‰	TU
KH-20-1	0	9.38	5.88	8.2	1.22	-68.0	-11.1	1.2
KH-20-3	0	9.81	5.86	6.7	0.74	-70.0	-11.1	2.3
KH-20-4	0	8.3	5.74	6.57	0.84	-68.8	-10.8	4.4
KH-20-6	0	8.35	5.89	6.61	1.04	-67.7	-10.8	4.5
KH-19-6	0	8.03	5.49	7.02	0.61	-67.1	-10.9	4.9
KH-19-7	0	9.12	5.69	6.02	1	-67.1	-10.9	3.5

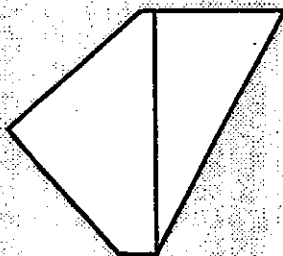
KH-20-1



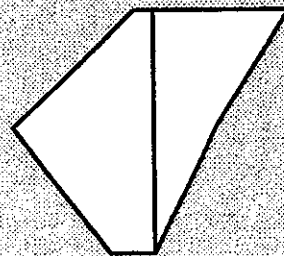
KH-19-6



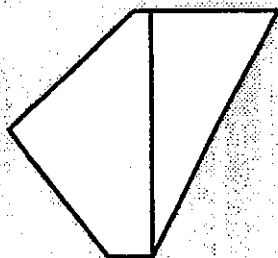
KH-20-3



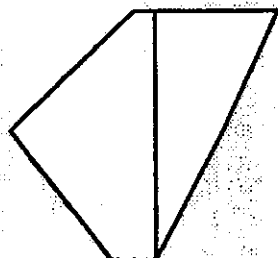
KH-19-7



KH-20-4



KH-20-6



Hexia-diagram

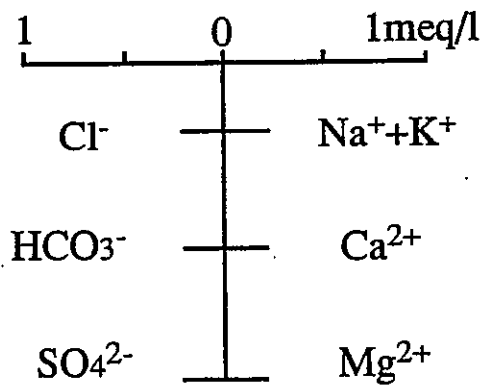


図-7.2.23 KH-19, 20孔の各区間のヘキサダイアグラム

表-7.2.3 KH-19, 20孔における微量成分の分析結果一覧表

成分 区間	Li	B	Ti	Mn	Ni	Cu	Sr	Zr	Nb	Pd	Sn	Sb
	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)
KH-20-1	2.9	8.2	0.52	0.62	0.012	0.2	7.4	<0.0005	<0.0005	0.0093	0.005	0.075
KH-20-3	3.2	9.6	0.64	0.58	0.034	0.15	7	<0.0005	<0.0005	0.0033	0.004	0.026
KH-20-4	3.2	8.8	0.38	0.28	0.055	0.13	9.5	0.008	<0.0005	0.0027	0.0096	0.022
KH-20-6	3	12	1.6	0.66	0.068	0.18	8.4	0.007	<0.0005	0.0067	0.019	0.026
KH-19-6	2.9	11	0.49	0.35	0.009	0.1	2.2	0.007	<0.0005	0.0022	0.018	0.0049
KH-19-7	2.9	9.6	0.7	0.31	0.020	0.13	2.4	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.011	0.0034

成分 区間	Cs	Pb	Bi	Ra	Th	W	U	Cr	Co	Zn	Mo	Rb
	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)
KH-20-1	0.0081	0.045	<0.0005	<0.0005	0.0023	0.86	0.02	0.003	0.06	0.54	6.5	1.7
KH-20-3	0.0072	0.0019	<0.0005	<0.0005	<0.0005	1.5	0.018	0.0093	0.1	0.14	7.1	1.4
KH-20-4	0.0046	0.016	<0.0005	<0.0005	0.0022	1.3	0.0033	0.016	0.14	0.84	6.6	3.7
KH-20-6	0.0084	0.029	<0.0005	<0.0005	0.0006	1.7	0.072	0.018	0.19	0.89	5.9	1
KH-19-6	0.0072	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.92	0.013	0.0065	0.032	0.4	6.6	0.79
KH-19-7	0.012	0.0076	<0.0005	<0.0005	<0.0005	1.1	0.017	0.004	0.059	0.35	6.9	0.9

成分 区間	Ba	Be	V	Ag	Cd	Hg	Total.I	As	Se	NH ₄ ⁺	IO ₃ ⁻
	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppm)	(ppm)
KH-20-1	0.16	<0.0005	0.0074	0.33	0.0065	0.0012	0.077	17	<0.2	<0.1	<0.5
KH-20-3	0.44	0.0006	0.016	0.01	0.017	0.0009	0.25	17	<0.2	<0.1	<0.5
KH-20-4	0.076	<0.0005	0.0076	0.038	0.17	0.0069	0.048	17	<0.2	<0.1	<0.5
KH-20-6	0.48	<0.0005	0.18	0.055	0.0051	0.0009	0.074	17	<0.2	<0.1	<0.5
KH-19-6	0.039	0.0011	0.019	0.013	0.0058	0.0015	0.093	15	<0.2	<0.1	<0.5
KH-19-7	0.23	0.0009	0.014	0.099	0.0045	0.0019	0.089	15	<0.2	<0.1	<0.5

表-7.2.4 KH-19, 20孔における微量成分の分析結果の統計値一覧表

	Li	B	Ti	Mn	Ni	Cu	Sr	Pd	Sn	Sb	Cs	Pb	W
KH-20-1	0.961	0.831	0.721	1.329	0.364	1.348	1.203	2.282	0.450	2.861	1.023	2.707	0.699
KH-20-3	1.061	0.973	0.887	1.243	1.030	1.011	1.138	0.810	0.360	0.992	0.909	0.114	1.220
KH-20-4	1.061	0.892	0.527	0.600	1.667	0.876	1.545	0.663	0.865	0.839	0.581	0.962	1.057
KH-20-6	0.994	1.216	2.217	1.414	2.061	1.213	1.366	1.644	1.712	0.992	1.061	1.744	1.382
KH-19-6	0.961	1.115	0.679	0.750	0.273	0.674	0.358	0.540	1.622	0.187	0.909	0.015	0.748
KH-19-7	0.961	0.973	0.970	0.664	0.606	0.876	0.390	0.061	0.991	0.130	1.516	0.457	0.894
最大	1.061	1.216	2.217	1.414	2.061	1.348	1.545	2.282	1.712	2.861	1.516	2.707	1.382
最小	0.961	0.831	0.527	0.600	0.273	0.674	0.358	0.061	0.360	0.130	0.581	0.015	0.699
標準偏差	0.049	0.143	0.616	0.367	0.729	0.246	0.505	0.813	0.570	0.991	0.304	1.051	0.269

	U	Cr	Co	Zn	Mo	Rb	Ba	V	Ag	Cd	Hg	Total.l	As
KH-20-1	0.837	0.317	0.620	1.025	0.985	1.075	0.674	0.182	3.633	0.187	0.541	0.732	1.041
KH-20-3	0.754	0.982	1.033	0.266	1.076	0.885	1.853	0.393	0.110	0.488	0.406	2.377	1.041
KH-20-4	0.138	1.690	1.446	1.595	1.000	2.339	0.320	0.187	0.418	4.883	3.113	0.456	1.041
KH-20-6	3.015	1.901	1.962	1.690	0.894	0.632	2.021	4.426	0.606	0.146	0.406	0.704	1.041
KH-19-6	0.544	0.687	0.330	0.759	1.000	0.499	0.164	0.467	0.143	0.167	0.677	0.884	0.918
KH-19-7	0.712	0.423	0.609	0.665	1.045	0.569	0.968	0.344	1.090	0.129	0.857	0.846	0.918
最大	3.015	1.901	1.962	1.690	1.076	2.339	2.021	4.426	3.633	4.883	3.113	2.377	1.041
最小	0.138	0.317	0.330	0.266	0.894	0.499	0.164	0.182	0.110	0.129	0.406	0.456	0.918
標準偏差	1.018	0.661	0.612	0.555	0.062	0.691	0.779	1.682	1.339	1.907	1.049	0.691	0.063

V：標準偏差1.682。KH-20-6のみが他の10倍以上の濃度。

Ag：標準偏差1.339。KH-20-1が他の数倍～数10倍の濃度。

Pb：標準偏差1.051。KH-20-1と6が、相対的に高い濃度。

Hg：標準偏差1.049。KH-20-4のみ他の数倍の濃度。

U：標準偏差1.018。KH-20-6のみ他の数倍以上の濃度。

Sb：標準偏差0.991。KH-20-1のみ他区間の数倍以上の濃度。

Pd：標準偏差0.813。KH-20-1と6が相対的に高い濃度。

Ba：標準偏差0.779。KH-20-6と3が相対的に高い濃度。

Ni：標準偏差0.729。KH-20-6と4が相対的に高い濃度。

なお、各区分間において最も高い濃度を示した成分をみると以下の様になる。KH-20-6で13成分、その次がKH-20-1と4の7成分、KH-20-3の4成分、そしてKH-19-6と7の1成分である。なお、最高濃度が2区分間以上で認められた場合は重複してカウントした。微量成分の濃度は区分間により大きな差が存在していることが分かる。

7.2.7 KG-1孔における採水分析調査の結果

(1)予備採水

累積採水量とpH・電気伝導度の変化、および累積採水量とNaイオンとCaイオンの当量濃度の変化を図-7.2.24に示した。これらの分析結果より、累積汲み上げ量35.387リットルの時点で、ほぼ水質が安定したと考え本採水に移行した。

(2)本採水の分析結果

本採水は累積汲み上げ量で49.720リットルの時点まで行った。本採水で汲み上げた地下水に関して、物理化学パラメータ測定、主要化学成分分析、環境同位体分析、ガス分析、および細菌分析を実施した。結果を表-7.2.5に示した。図-7.2.25には、本区間で採水された地下水のヘキサダイアグラムを、前年度までKG-1で採水された区間の結果と一緒に示した。KG-1孔の41.41mの水質は溶解しているイオンが少ないのでヘキサダイアグラムが細い形状となっている。また、KG-1孔のより深部のものが、Na-HCO₃型であるのに対し、Ca-HCO₃型の水質パターンである。これらの事より、水質的には、より地表水に近い性質を有した地下水であるといえる。なお、本区間において存在が認められた硫酸塩還元菌の同定を行った結果を表-7.2.6に示した。本区間に存在する硫酸塩還元菌は、*Desulfomonas pigra*である可能性が高いことが判明した。

7.2.8 地表水の採水分析結果

(1)地表水中の環境同位体組成

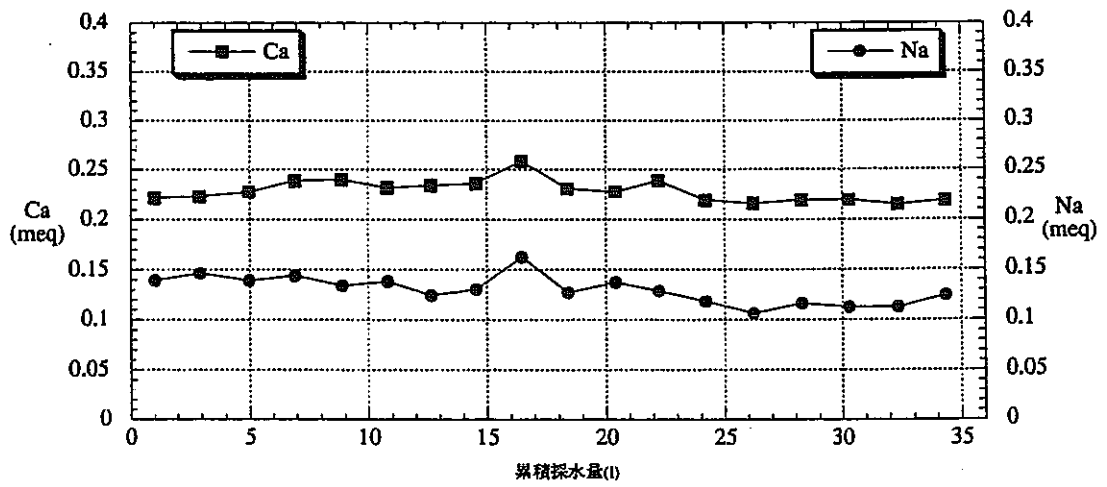
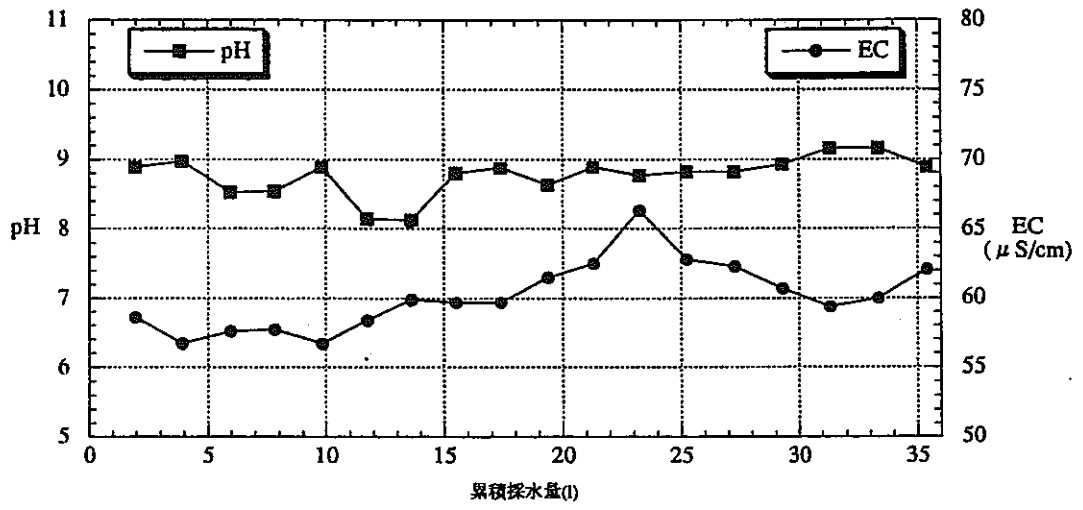


図-7.2.24 KG-1孔における予備採水時の分析結果

表-7.2.5 KG-1孔の採水の分析結果一覧表

分析項目	分析結果	分析項目	分析結果
水温(°C)	17.4	NH ₄ ⁻ -N (mg/l)	0.019
pH	9.14	全N (mg/l)	0.019
電気伝導度(μ S/cm)	59.8	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	2.5
酸化還元電位(mV)	371.5	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	0.1
溶存酸素(mg/l)	2.32	TOC (mg/l)	1.65
Na ⁺ (mg/l)	3.31	IC (mg/l)	1.91
K ⁺ (mg/l)	0.283	δ ¹⁸ O (‰)	-10.2
Mg ²⁺ (mg/l)	0.921	δ D (‰)	-63.1
Ca ²⁺ (mg/l)	5.78	トリチウム (TU)	6.7
Al ³⁺ (mg/l)	0.076	全菌数計数 (cells/ml)	6.70E+06
全Si (mg/l)	6.43	従属栄養細菌 (CFU/ml)	1.80E+05
SiO ₂ -Si ⁴⁺ (mg/l)	6.43	鉄酸化菌 (MPN/ml)	nd
全Fe (mg/l)	0.034	鉄還元菌 (MPN/ml)	nd
Fe ²⁺ (mg/l)	0.03	硫酸還元菌 (MPN/ml)	7.90E+03
Li ⁺ (mg/l)	nd	硫酸還元菌 (CFU/ml)	3.90E+03
Sr ²⁺ (mg/l)	0.0046	硝酸還元細菌 (MPN/ml)	2.80E+04
Mn ²⁺ (mg/l)	nd	硫黄酸化細菌 (MPN/ml)	nd
Cl ⁻ (mg/l)	1.4	メタン生成細菌 (MPN/ml)	2.00E-01
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	1.49	亜硝酸細菌 (MPN/ml)	nd
F ⁻ (mg/l)	nd	アンモニア酸化菌 (MPN/ml)	nd
Br ⁻ (mg/l)	nd	脱窒素細菌 (MPN/ml)	4.60E+01
I ⁻ (mg/l)	nd	O ₂ (mg/l)	nd
S ²⁻ (mg/l)	tr	N ₂ (mg/l)	34.5
PO ₄ ³⁻ -P (mg/l)	0.006	H ₂ (mg/l)	nd
全P (mg/l)	0.007	He (mg/l)	nd
NO ₂ ⁻ -N (mg/l)	nd	CH ₄ (mg/l)	nd
NO ₃ ⁻ -N (mg/l)	nd	CO (mg/l)	nd

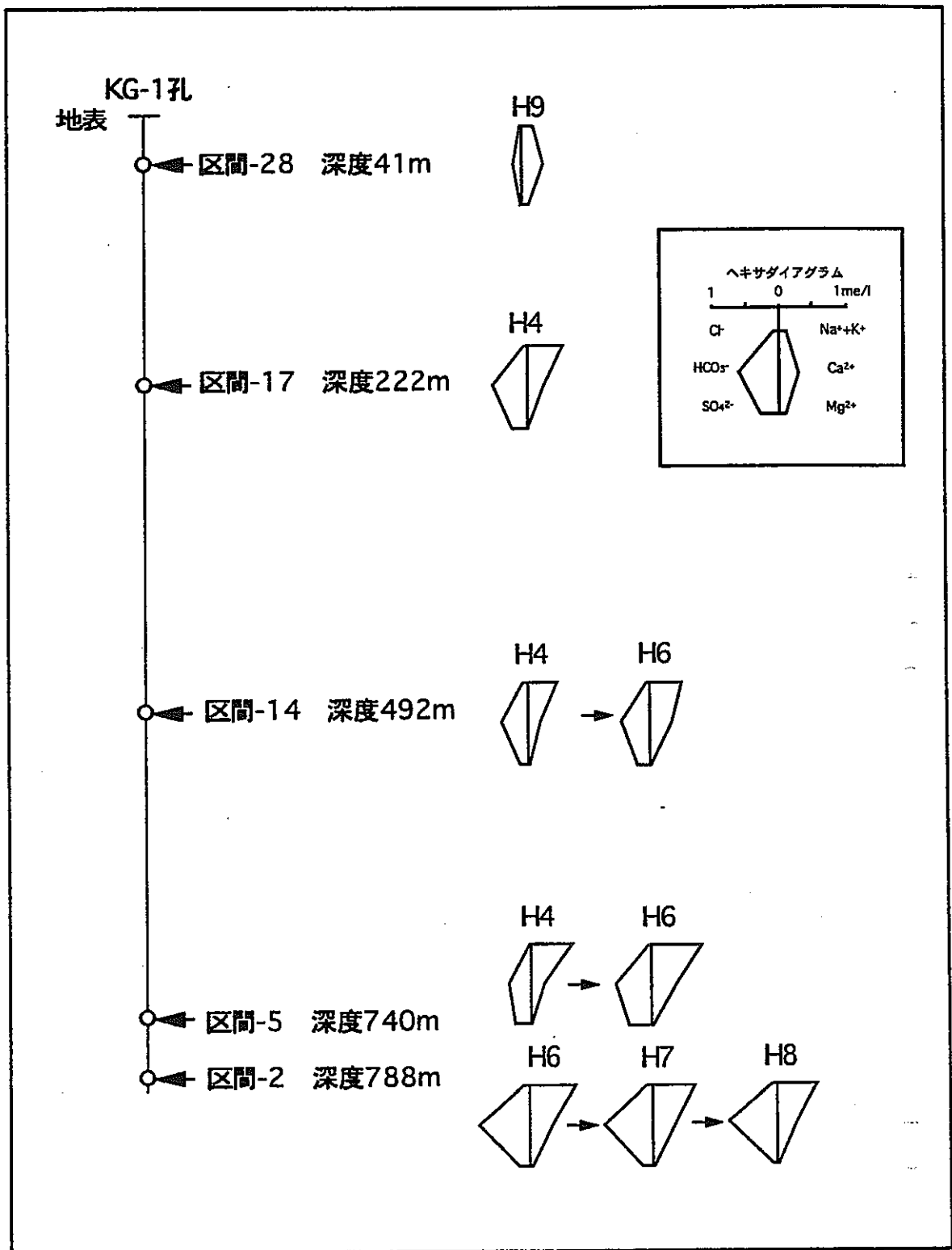


図-7.2.25 KG-1孔の各区間におけるヘキサダイアグラム

表-7.2.6 KG-1孔における硫酸塩還元菌の分析結果

純粋分離した硫酸還元菌の諸特性(試料名:KG-1)

	分離菌 KG-1	<i>Desulfovibrio desulficans</i>	<i>Desulfovibrio vulgaris</i>	<i>Desulfovibrio salexigens</i>	<i>Desulfovibrio africanus</i>	<i>Desulfovibrio gigas</i>	<i>Desulfomona pigra</i>
形態	短桿型	ヒ'フリオ型	ヒ'フリオ型	太いヒ'フリオ型	シ'モイト'型	らせん型	短桿型
幅(um)	0.6	0.5 - 1	0.5 - 2	0.5 - 1	0.5	1.2 - 1.5	0.8 - 1.3
長さ(um)	2.8	3 - 5	3 - 5	1 - 5	2 - 10	5 - 10	1.2 - 5
鞭毛(um)	なし	単極毛	単極毛	単極毛	束毛	束毛	なし
グラム染色		-	-	-	-	-	-
①基質資化性(硫酸塩あり)							
乳酸塩	+	+	+	+	+	+	+
リンゴ酸塩	-	-	+	+	+	+	?
ギ酸塩	-	±	±	±	±	±	-
酢酸塩	-	-	-	-	-	-	-
ブドウ糖	-	-	?	?	?	?	?
①基質資化性(硫酸塩あり)							
リンゴ酸塩	-	-	-	-	-	-	-
ピルビン酸塩	-	+	-	-	-	-	-
コリン	-	+	-	-	-	-	-
NaCl 要求性	-	-	-	-	-	-	-
優占キノ種	MK-6	MK-6	MK-6	MK-6	MK-6	MK-6	MK-6
G+C 含有率 (mol/mol%)	65.3	55.3±1	61.2±1	46.1±1	61.2±1	60.2	66

表-7.2.7に地表水の環境同位体分析結果を示した。また、図-7.2.26には環境同位体の分析結果と標高との関係を示した。3地点の分析結果ではあるが、 $\delta 180$ と δD は標高が高くなるに従って、値が軽い方にシフトする傾向が認められる。またTRに関しては、高度が高くなると濃度が増加する傾向が認められる。

(2) 地表水中の細菌分析

地表の2地点で採水した、地表水の分析の結果を表-7.2.8に示す。KGB-1とKGB-2はオーダー的にはほぼ同様の値を示しており、地表水の間では細菌の生息状況には大きな差は認められない。

なお、硫酸還元菌に関しては種の同定を行った。同定結果を表-7.2.9～表-7.2.10に示す。同定の結果、KGB-1では *Disufovibrio salexigens*、そしてKGB-2では *Desulfomonas pigra*の存在の可能性が高いことが判明した。

7.3 考察

7.3.1 水質形成機構に関して

(1) 水質区分

今年度までの試験で得られている知見に、今年度の分析結果を加えて水質形成機構を考察する。

図-7.3.1は、こらまでに得られた水質分析の結果をヘキサダイアグラムに示したものである。昭和63年度と平成2年度の花崗岩における原位置試験^{9, 10)}において、これらの水質に関しては図-7.3.2の様な水質区分が行われた。結果の概要は以下のようにまとめられる。

550mL坑道湧水

〔水質区分1型〕栗橋花崗閃緑岩中における浅層タイプの地下水。地表水と同様の組成パターン。湧水量が多く透水性の高いゾーンに湧出する。

〔水質区分2型〕栗橋花崗閃緑岩中のやや深層タイプの地下水。低透水性のゾーンに分布する。

〔水質区分3型〕1型よりも Mg^{2+} が多い。1型がスカルンあるいは蟹岳岩体に由来する Mg^{2+} の富化を受けたと推測される。また、1型と4型が混合したものとも考えられる。

〔水質区分4型〕3型または1型がスカルン中の硫化物等から SO_4^{2-} の供給を受けたと考えられ、スカルン中に分布する。

〔水質区分5型〕蟹岳岩体に特徴的な水質。蟹岳岩体中の硫化物から SO_4^{2-} の供給を

表-7.2.7 地表水の環境同位体分析結果一覧表

採水地点	標高	δD	$\delta^{18}O$	TR
	(m)	(‰)	(‰)	TU
KGI-1	980	-66.3	-10.9	6.8
KGI-2	900	-64.2	-10.8	6.6
KGI-3	800	-61.1	-10.1	6.1

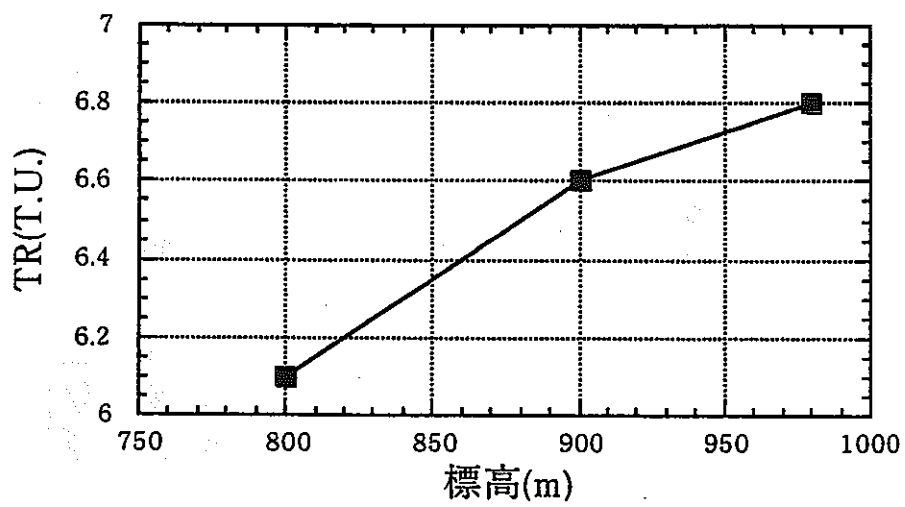
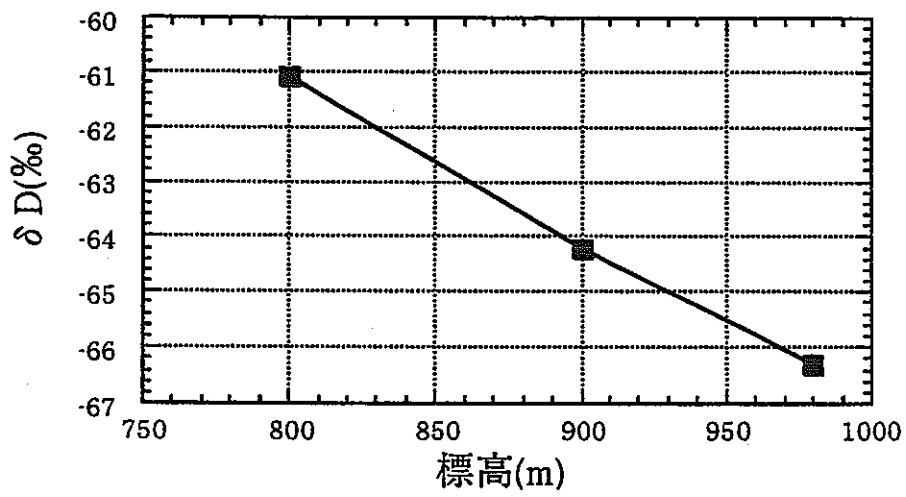
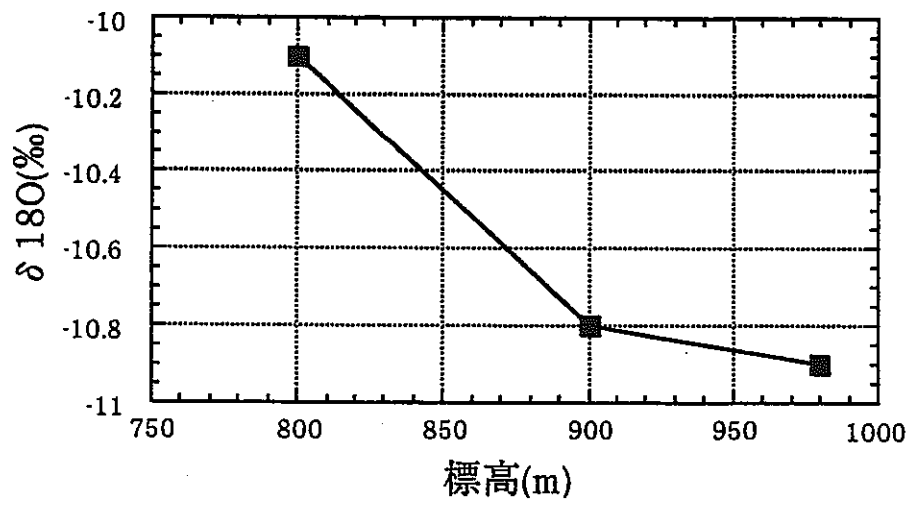


図-7.2.26 地表水の環境同位体組成と標高との関係

表-7.2.8 地表水の細菌の分析結果一覧表

項目	単位	KGB-1	KGB-2
全菌数	No./ml	8.20E+04	9.10E+04
従属栄養細菌	CFU/ml	2.40E+04	3.10E+04
鉄酸化菌	MPN/ml	0.00E+00	0.00E+00
鉄還元菌	MPN/ml	0.00E+00	0.00E+00
硫酸塩還元菌	MPN/ml	4.00E-01	5.00E-01
硫黄酸化菌	MPN/ml	0.00E+00	0.00E+00
メタン酸化菌	MPN/ml	0.00E+00	0.00E+00
アンモニア酸化菌	MPN/ml	0.00E+00	0.00E+00
亜硝酸酸化菌	MPN/ml	0.00E+00	0.00E+00
硝酸還元菌	MPN/ml	2.80E+01	4.60E+01
脱窒菌	MPN/ml	1.70E+00	3.30E+00

表-7.2.9 地表水の硫酸塩還元菌の分析結果(1)

純粹分離した硫酸還元菌の諸特性(試料名:地表水1)

	分離菌 地表水1	<i>Desulfovibrio desulficans</i>	<i>Desulfovibrio vulgaris</i>	<i>Desulfovibrio saalexigens</i>	<i>Desulfovibrio africanus</i>	<i>Desulfovibrio gigas</i>	<i>Desulfomona pigra</i>
形態	太いピブリオ型	ピブリオ型	ピブリオ型	太いピブリオ型	シグモイド型	らせん型	短桿型
幅(um)	0.5	0.5 - 1	0.5 - 2	0.5 - 1	0.5	1.2 - 1.5	0.8 - 1.3
長さ(um)	1	3 - 5	3 - 5	1 - 5	2 - 10	5 - 10	1.2 - 5
鞭毛(um)	単極毛	単極毛	単極毛	単極毛	束毛	束毛	なし
グラム染色	-	-	-	-	-	-	-
①基質資化性(硫酸塩あり)							
乳酸塩	+	+	+	+	+	+	+
リンゴ酸塩	+	-	+	+	+	+	?
ギ酸塩	-	±	±	±	±	±	-
酢酸塩	-	-	-	-	-	-	-
ブドウ糖	-	-	?	?	?	?	?
①基質資化性(硫酸塩あり)							
リンゴ酸塩	-	-	-	-	-	-	-
ピルビン酸塩	-	+	-	-	-	-	-
コリン	-	+	-	-	-	-	-
NaCl 要求性	-	-	-	-	-	-	-
優占キノン種	MK-6	MK-6	MK-6	MK-6	MK-6	MK-6	MK-6
G+C 含有率 (mol/mol%)	45.8	55.3±1	61.2±1	46.1±1	61.2±1	60.2	66

表-7.2-10 地表水の硫酸塩還元菌の分析結果(2)

純粋分離した硫酸還元菌の諸特性(試料名:地表水2)

	分離菌 地表水2	<i>Desulfovibrio desulficans</i>	<i>Desulfovibrio vulgaris</i>	<i>Desulfovibrio salexigens</i>	<i>Desulfovibrio africanus</i>	<i>Desulfovibrio gigas</i>	<i>Desulfomona pigra</i>
形態	短桿型	ビ'フリオ型	ビ'フリオ型	太いビ'フリオ型	シグ'モイト'型	らせん型	短桿型
幅(um)	0.6	0.5 - 1	0.5 - 2	0.5 - 1	0.5	1.2 - 1.5	0.8 - 1.3
長さ(um)	1.8	3 - 5	3 - 5	1 - 5	2 - 10	5 - 10	1.2 - 5
鞭毛(um)	なし	単極毛	単極毛	単極毛	束毛	束毛	なし
グラム染色	—	—	—	—	—	—	—
①基質資化性(硫酸塩あり)							
乳酸塩	+	+	+	+	+	+	+
リンゴ酸塩	—	—	+	+	+	+	?
ギ酸塩	—	±	±	±	±	±	—
酢酸塩	—	—	—	—	—	—	—
ブドウ糖	—	—	?	?	?	?	?
①基質資化性(硫酸塩あり)							
リンゴ酸塩	—	—	—	—	—	—	—
ピルビン酸塩	—	+	—	—	—	—	—
コリン	—	+	—	—	—	—	—
NaCl 要求性	—	—	—	—	—	—	—
優占キノ種	MK-6	MK-6	MK-6	MK-6	MK-6	MK-6	MK-6
G+C 含有率 (mol/mol%)	67.5	55.3±1	61.2±1	46.1±1	61.2±1	60.2	66

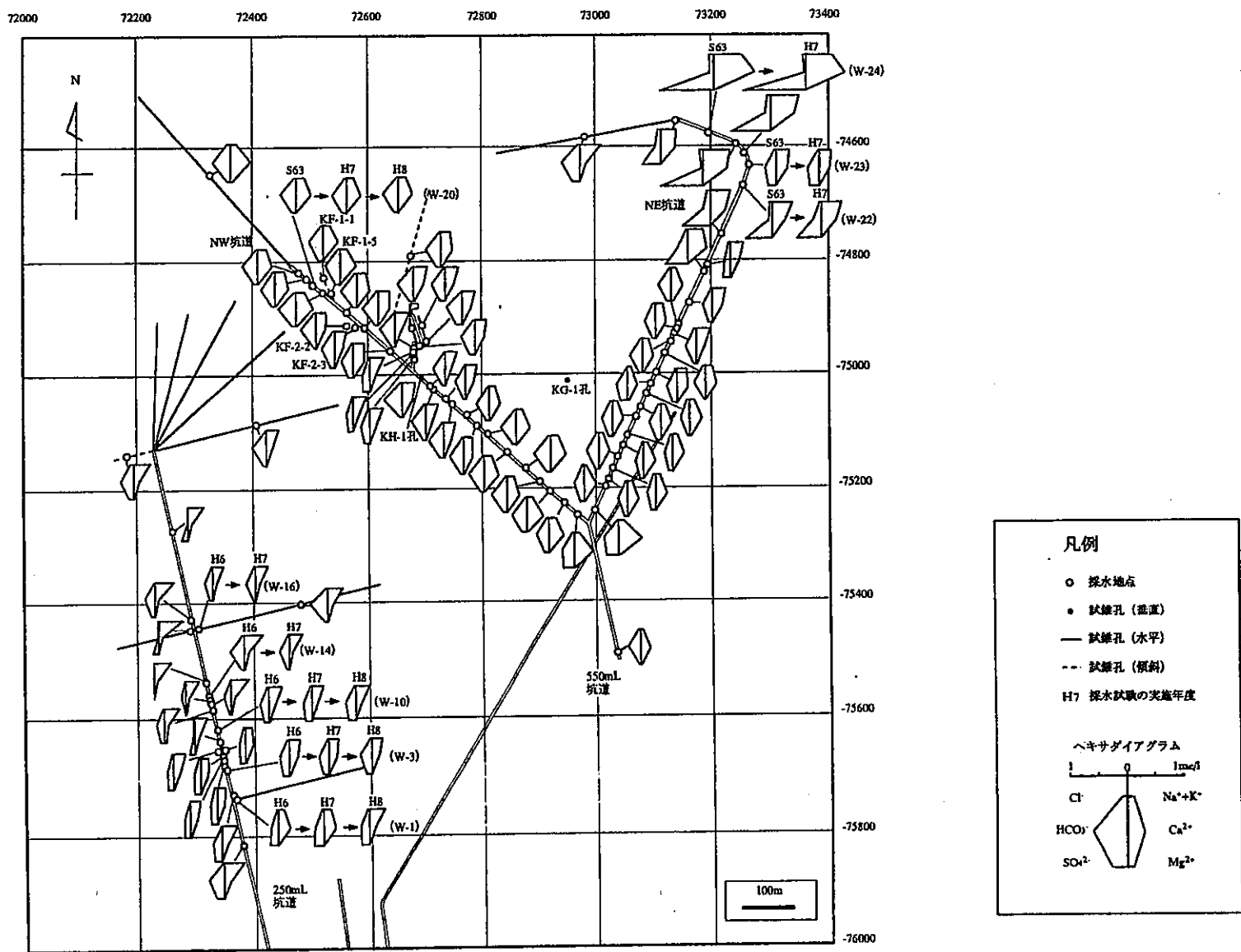


図-7.3.1 地下水の分析結果のヘキサダイアグラム(平成8年度までの結果)

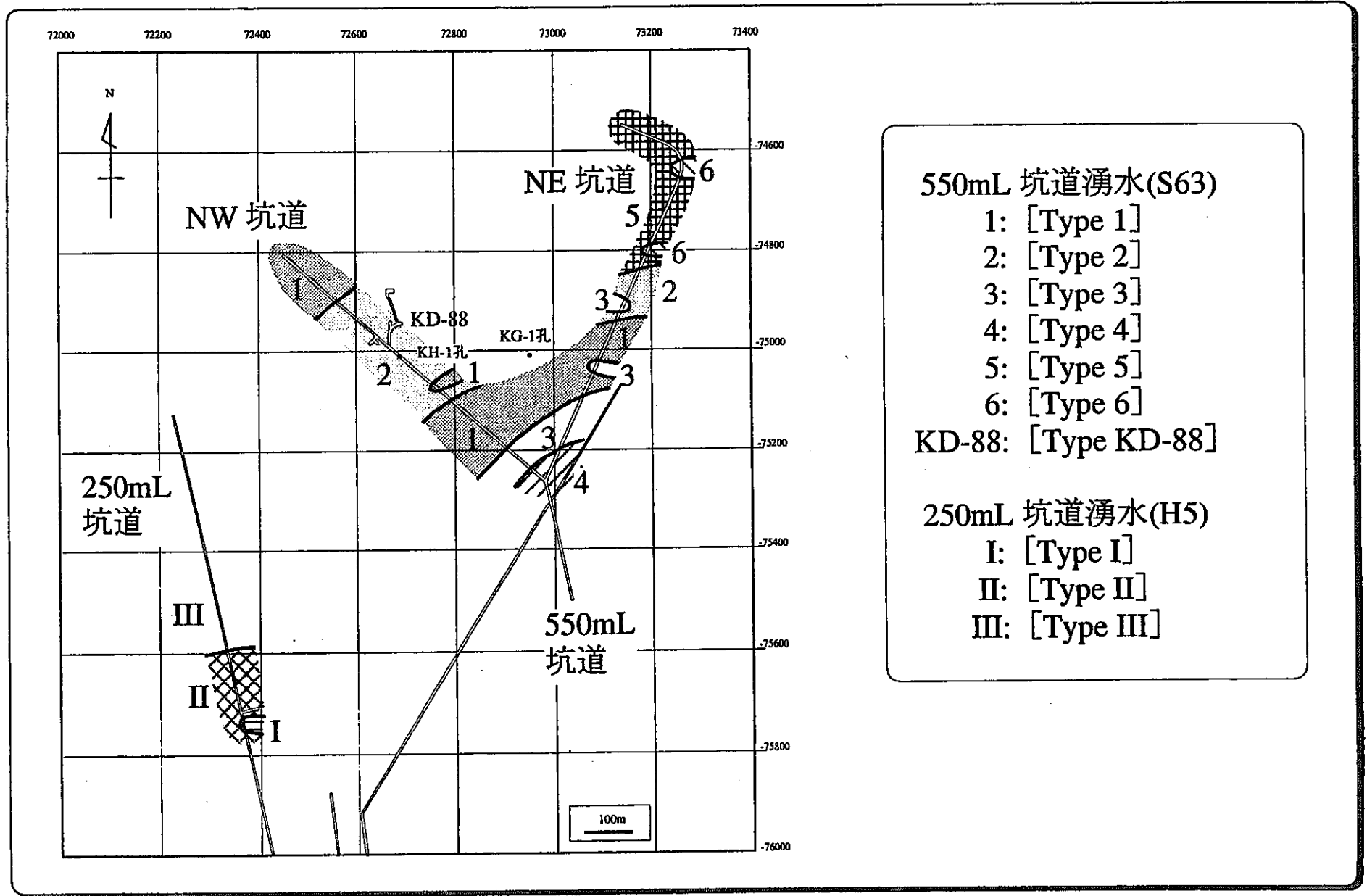


図-7.3.2 地下水の水質区分図

受けた深層タイプの地下水と考えられる。湧出量が少なく、蟹岳岩体中の低透水ゾーンに分布する。

〔水質区分6型〕1型、2型と5型の中間に分布。1型、2型と5型の地下水が混合したものと考えられる。5型の分布域に点在する。

〔新規坑道KD-88〕湧水は6型の付近に分布。付近の既存坑道に湧出する2型の地下水よりも SO_4^{2-} に富化していると考えられる。

250mレベル坑道湧水

〔I型〕浅層性の地下水で550mL坑道の3型よりもやや SO_4^{2-} に富む水質。近隣に存在する日峰鉱床の鉱化作用の影響を受けている。

〔II型〕やや浅層性～やや深層性の地下水。550mLの地下水の2型及び一部1型に類似する水質を示す。全体的に若干 SO_4^{2-} に富む。

〔III型〕深層性の地下水。 Na^+ に富む。

水質形成において、透水性の相違と地質環境の相違、および異なる水質同士の混合が、その多様性を作り出している原因であるとしている。

本年度の結果を、この水質区分図に重ねて表示したものが、図-7.3.3となる。これまでの測定結果と大きく異なるような水質の分布は認められないが、水質1型と2型のバウンダリー付近において水質が2型より1型へ移行した部分が認められる。水質が長い年月の間に変化したものと推定される。

図-7.3.4は、今年度の坑道の36箇所の水質分析の結果をトリリニアダイアグラムに示したものである。また、図-7.3.5には、昭和63年度と平成2年度の水質区分の分布エリアを重ねたものも示した。以前の分析を含む総合的な結果においては、水質は様々な組成を取っているが、本年度の結果においては、組成の大きく異なる水質が幾つか存在するのではなく、組成変化は連続的なものであることが分かる。このことから考えるとそれぞれの水質は、一連の連続的反応のある段階の組成を捉えたものとして捉えられる可能性がある。次にこれらの水質形成に関連している反応に関して考察する。

(2)水質形成に関連する反応に関して

水質形成機構に関しては、平成8年度の深部環境特性調査¹¹⁾において考察を行い、水質形成にイオンの交換反応と鉱物の溶解反応が重要な役割をはたしている事を推測した。概要は以下のようにまとめられる。

(a)NaイオンとCaイオンのイオン交換反応

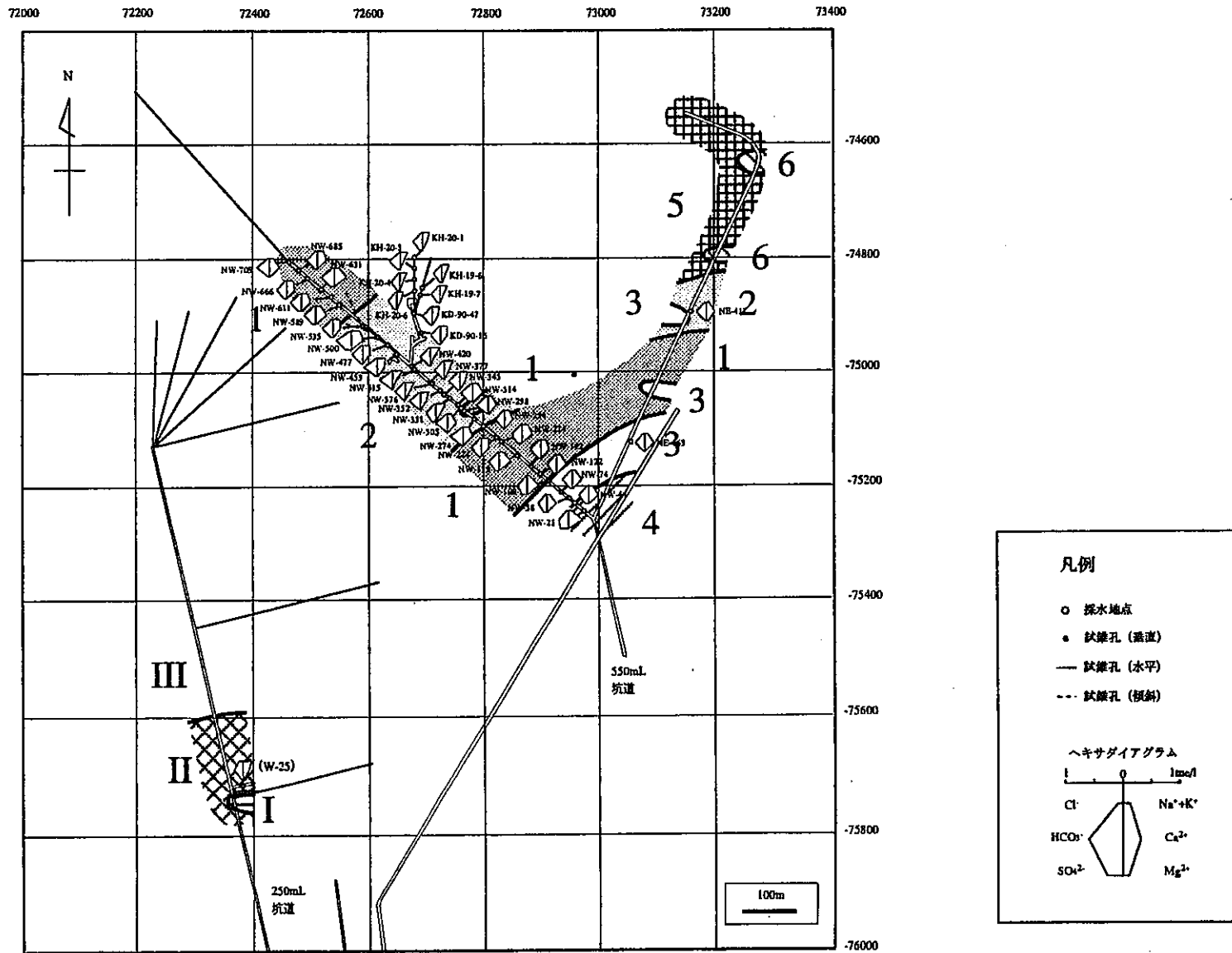


図-7.3.3 地下水の水質区分図と今年度の分析結果のヘキサダイアグラム

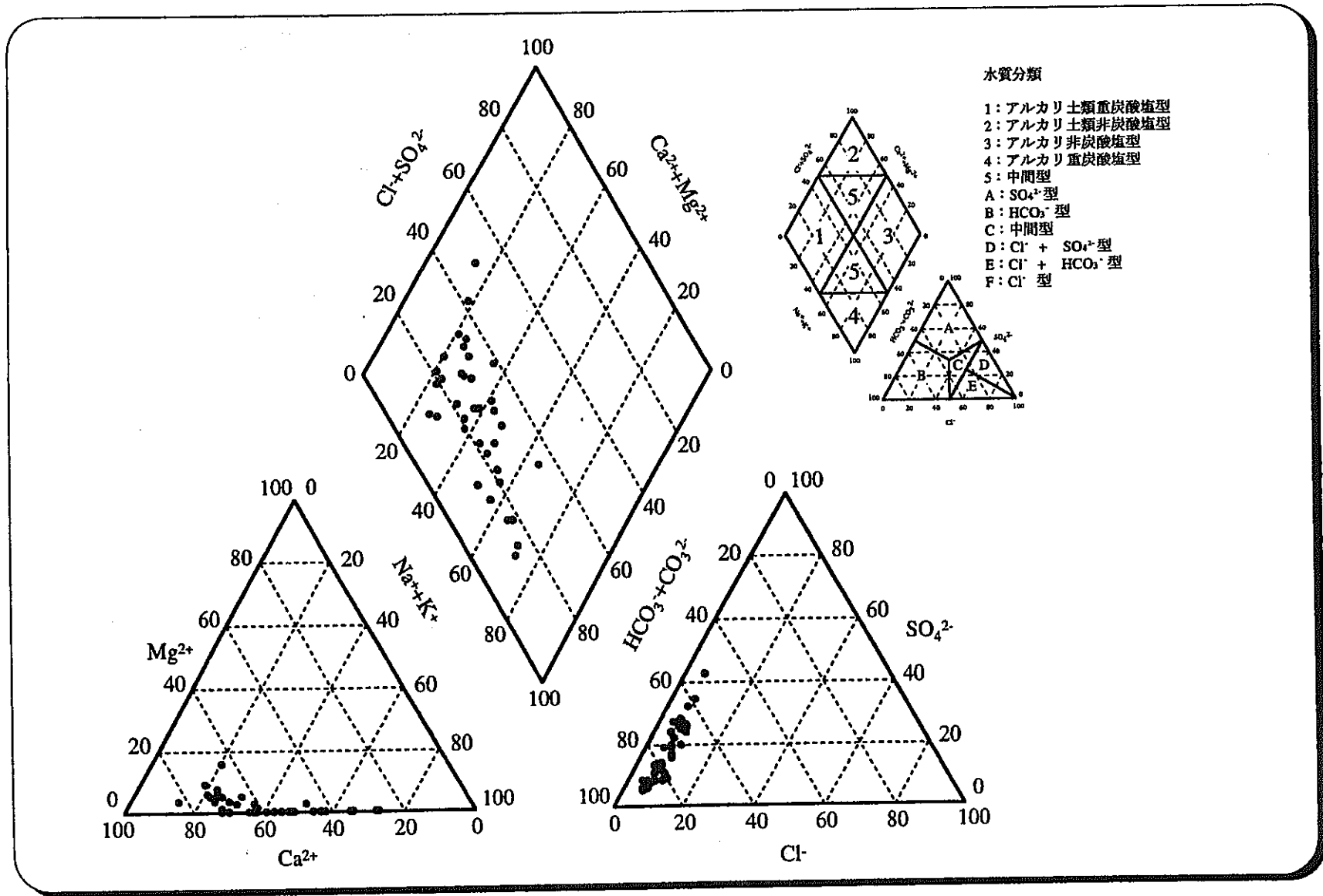


図-7.3.4 地下水の水質組成のトリリニアダイアグラム

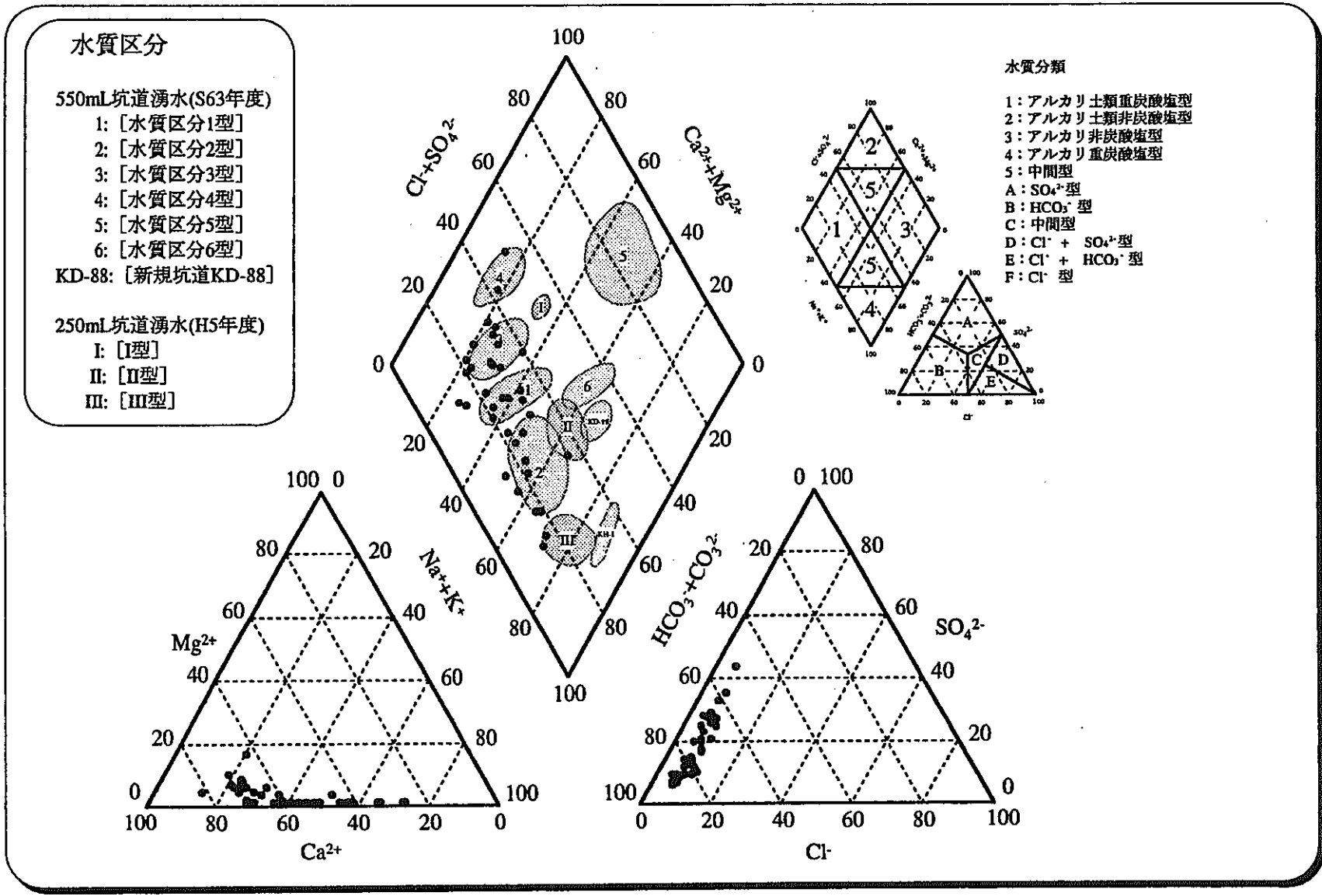


図-7.3.5 地下水の水質組成のトリリニアダイアグラムと水質区分

Na⁺濃度とCa²⁺濃度は、ほぼ-0.9と高い負の相関関係を示し、また両者のイオン当量濃度の関係は切片がCaイオン当量ではほぼ0.7、傾きが-1の直線上にのる様な分布を示す。このことより、Na⁺とCa²⁺間でイオン交換反応が生じている可能性を示唆した。

また、原因となる鉱物として割れ目充填鉱物中に存在している束沸石、土壌中等に存在する粘土鉱物の可能性を示し、イオン交換能力の差が水質形成に重要な役割を果たしている可能性を指摘した。

(b)NaイオンとCaイオンに対する斜長石の組成と溶解の影響

試錐孔内の水質からはNaイオンを増加させる別の反応機構として斜長石の溶解の可能性が推測された。割れ目周辺に認められるNa成分に富む斜長石の存在、また二酸化炭素分圧の相違により変化する灰長石(An)と曹長石(Ab)の溶解度と溶液のpHとの関係が重要な役割をはたしている可能性を指摘した。

(c)Caイオンおよび各種炭酸イオンと方解石との関係

Caイオンの変化する要因として、カルサイトの溶解、晶出が推定された。CaCO₃-CO₂-H₂O系の考察より、水質形成にカルサイトの影響が存在する可能性を示唆した。

(d)硫酸イオンの溶出

黄鉄鉱の溶解により、水質中のSO₄²⁻の含有量は増加する。SO₄²⁻の濃度が高い領域は、地質の相違に起因して黄鉄鉱の存在量が多い部分に認められた。

今年度の結果より、水質形成機構に関して再考察を行う。図-7.3.6は、今年度実際された坑道36箇所、KH-19,20孔、地表で採水を実施した2地点、およびKG-1孔の41.41mの結果に関して、横軸にCaイオン当量濃度を縦軸にNaイオン当量濃度をとって両者の関係をプロットしたものである。Na濃度が0.1~0.15meq程度の範囲では、Ca濃度は0.2~0.7meq程度の広い範囲の値を示して変動している。また地表付近からKG-1孔の41.41m、そして550mLの地下水という順で、深度が深くなるに従いCa濃度が増加していく傾向が認められる。Na濃度が0.15meqを超えた範囲では、Ca濃度はNa濃度の増加とともに減少していく傾向が認められ、概ね切片が0.6~0.7で傾きが-1の直線の近傍に分析結果が分布している。なお、KH-19,20孔内の分析結果は、このラインよりもCa,Naともにやや高い範囲に分布している。

以上の結果から次の様な水質形成機構が推定される。

地表で降った天水は、地下水となって岩盤中に浸透した段階で、まずCaイオンを増加させていく。そして、0.6~0.7meq程度の濃度に達した時点よりイオン交換反応が生じて、次第にCaイオンがNaイオンに置き換えられていく。初期のCaイオン増加のプロセスでは、Caイオンのみが増加していることより、方解石の溶解やCa-モンモリロナイトがカオリンに変化する等の反応が考えられる。そして、これに引き続き

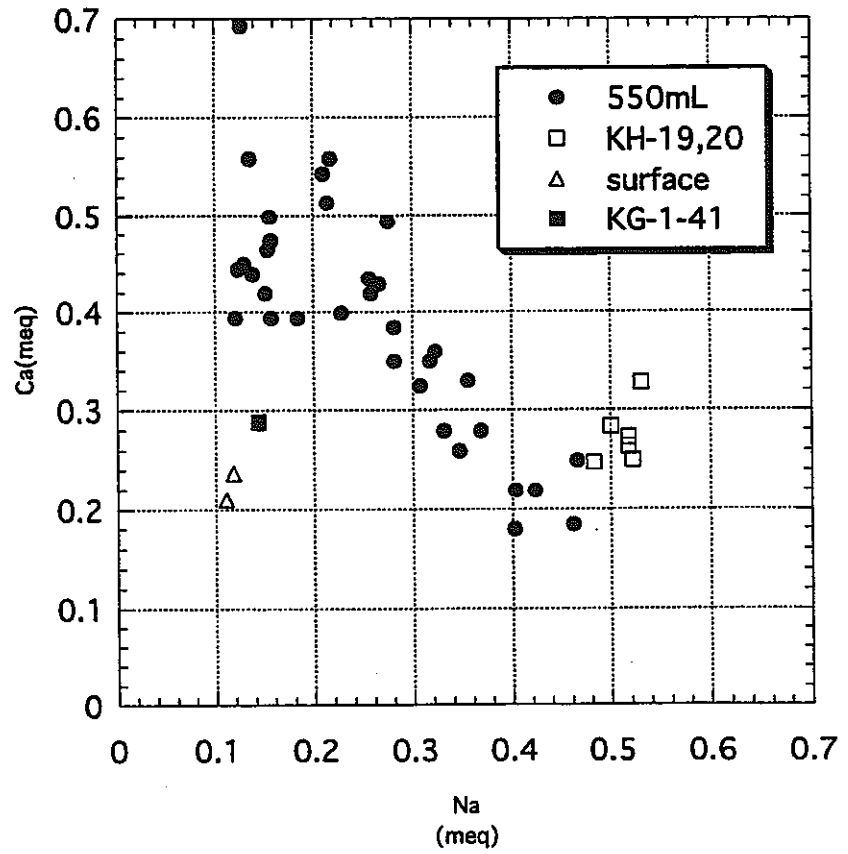


図-7.3.6 採水分析結果におけるNaとCaのイオン当量濃度の関係

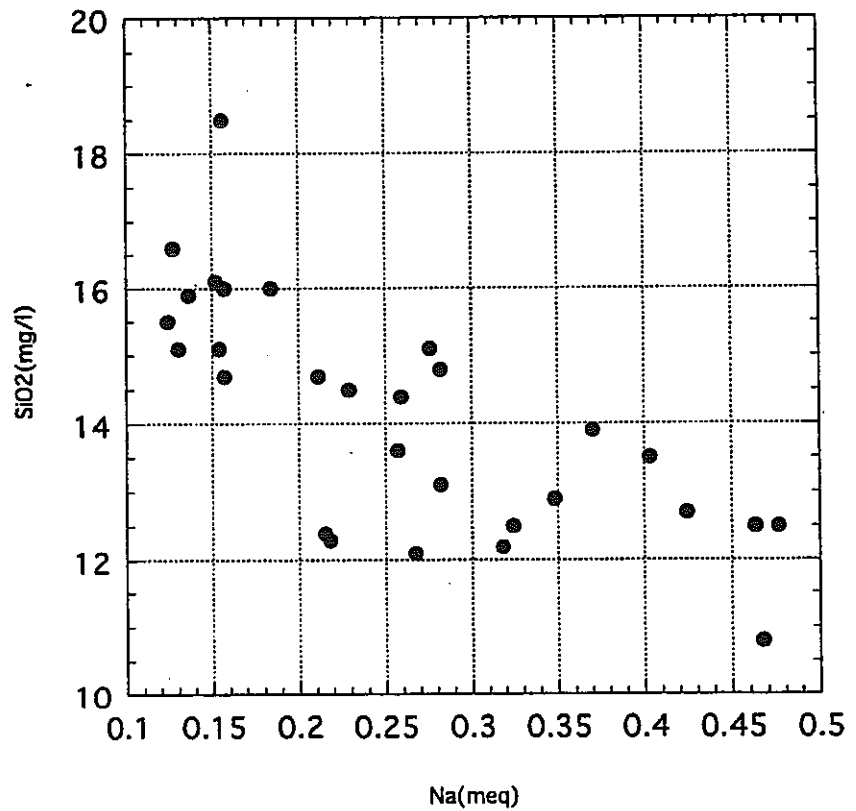


図-7.3.7 SiO₂濃度とNaイオン当量濃度の関係

生じるイオン交換反応には、束沸石あるいは粘土鉱物が大きな役割を果たしていると推定される。

反応の進行に伴いNaイオンが増加する一連の反応系列が存在する可能性が推定された。そこで反応の進行に伴い、他の溶存物質がどのような挙動をとるかをNW坑道の分析結果を中心に考察してみた。以下に主要成分と物理化学パラメータのうちで、特に反応の進行に関連して変化が生じたと推定された項目に関して説明する。

(a)Na-SiO₂

図-7.3.7はSiO₂濃度とNaイオン当量濃度との関係をプロットした図である。地下水の反応の進行にともない、SiO₂濃度が減少していく傾向が存在していることが解る。

(b)Na-Mg

図-7.3.8は、Mgイオン当量濃度とNaイオン当量濃度との関係をプロットした図である。Mgイオン濃度はNaイオン濃度が0.25meq付近で、ほぼ0に近い値となっている。初期段階で溶け込んでいたものが、反応の進行に伴い急激に減少してゆき早い段階でほとんど地下水中から取り除かれてしまっていることが解る。

(c)Na-TR

図-7.3.9はTR濃度とNaイオン当量濃度との関係をプロットした図である。TR濃度の変動は大きいですが、プロットされている領域に注目すると、Naイオン濃度が0.1meq付近では6~12TUのものが、0.5meq付近では5~7TU程度と、全体的な傾向として減少している。反応の進行に伴いトリチウムが崩壊して濃度が減少したことが推定される。

(d)Na-pH

図-7.3.10はpHとNaイオン当量濃度との関係をプロットした図である。pHの値は、反応の進行に従い大きくなっていく傾向があることが解る。すなわち、水素イオン濃度が鉱物との反応に用いられ減少したことが推定される。

(e)Na-T

図-7.3.11は水温とNaイオン当量濃度との関係をプロットした図である。水温は、Naイオン当量濃度の増加に従って、高くなっている傾向が認められる。岩盤中での水の流れやすさの程度が、反応時間と水温に反映された可能性がある。

これらの結果をまとめると、以下のような解釈ができる。

初期段階ではCaイオンが増加する反応が生じているが、その後NaとCaのイオン交換反応が主要反応となる。初期のCa濃度の増加は、地表付近における高い二酸化炭

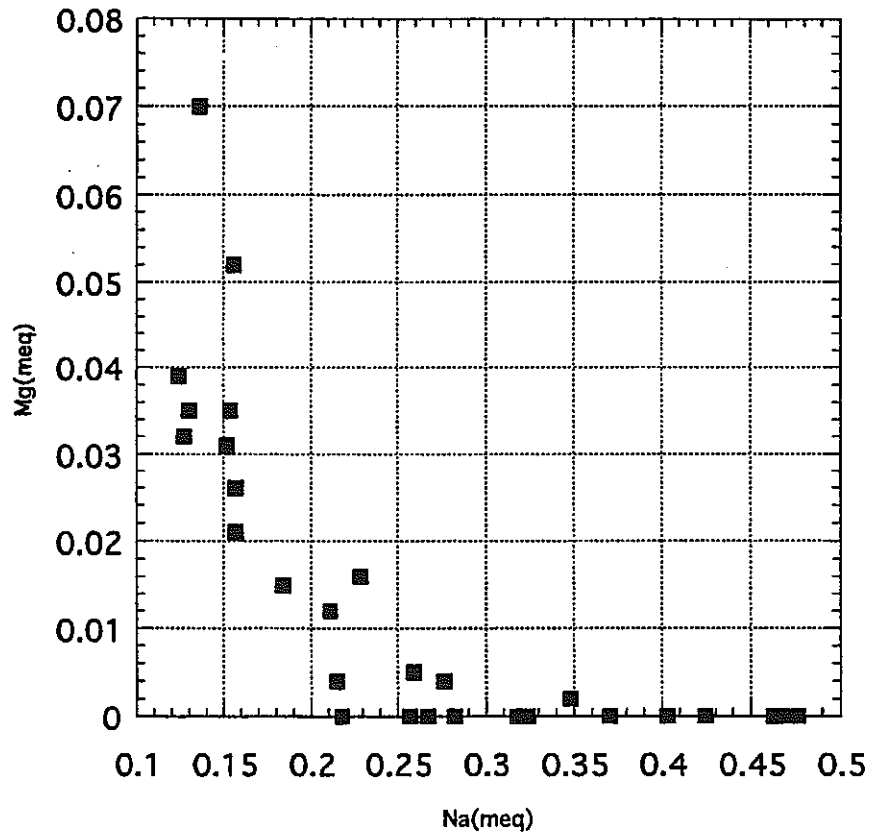


図-7.3.8 Mgイオン当量濃度とNaイオン当量濃度の関係

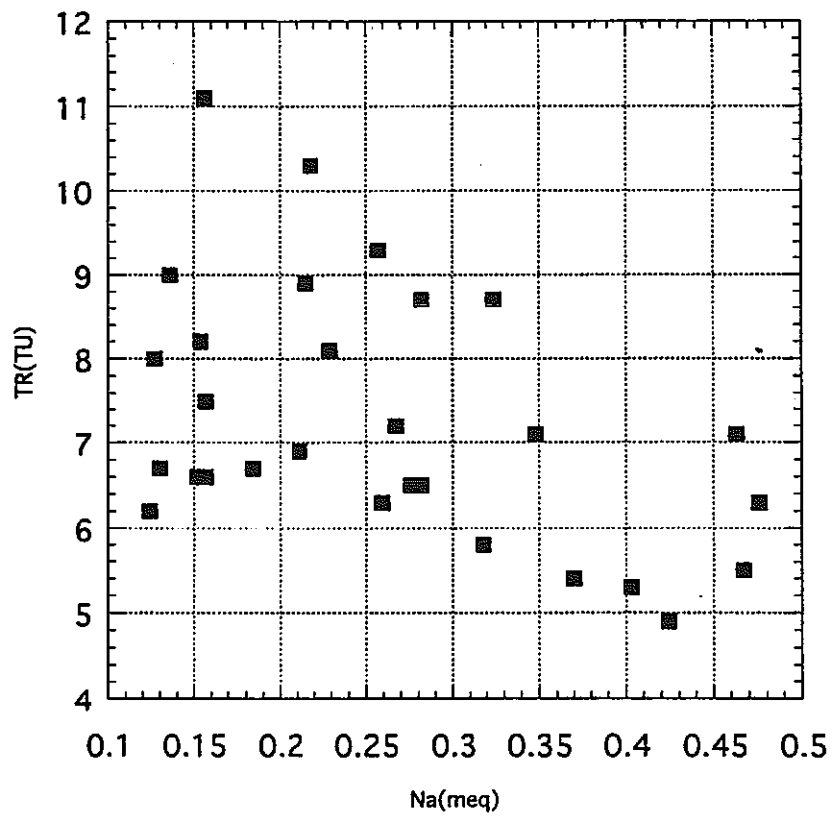


図-7.3.9 TR濃度とNaイオン当量濃度の関係

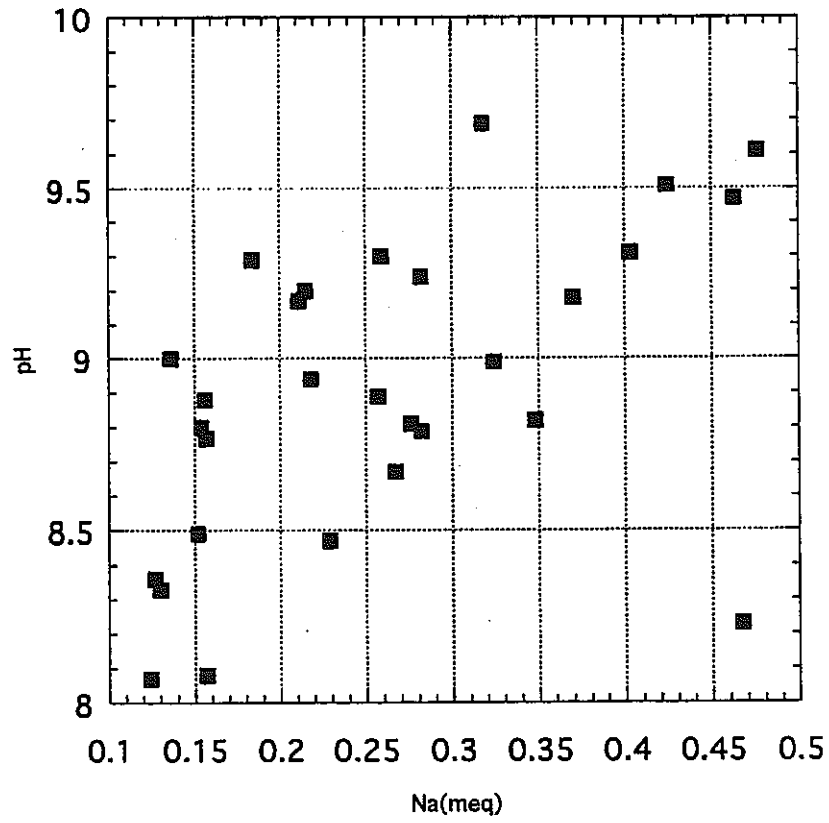


図-7.3.10 pHとNaイオン当量濃度の関係

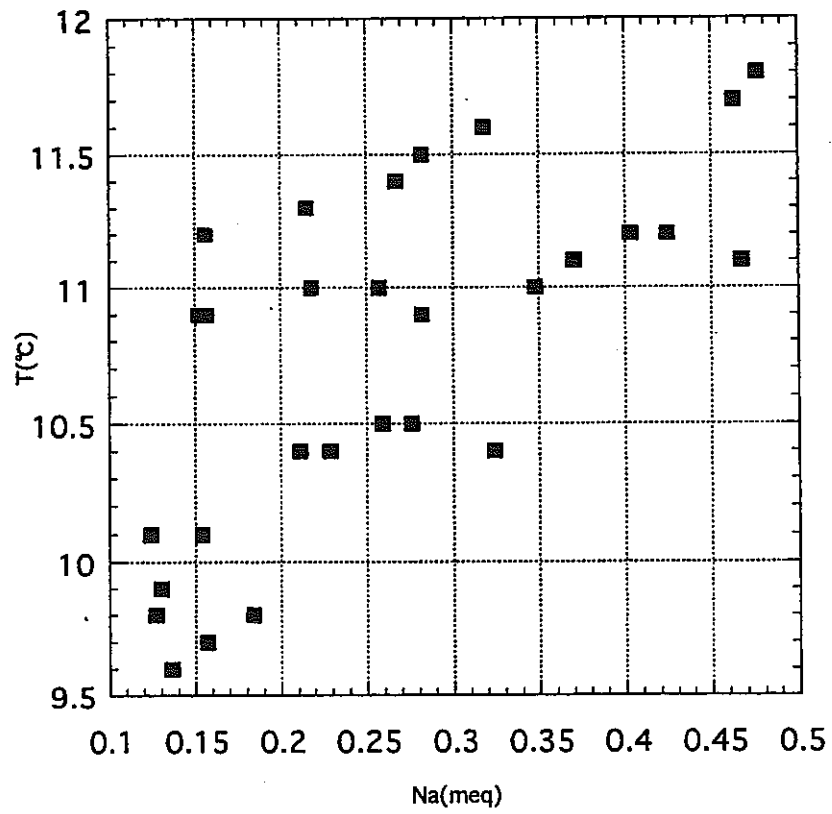


図-7.3.11 水温とNaイオン当量濃度の関係

素分圧に起因すると推定される。すなわち、地表付近では二酸化炭素の溶解により溶液が酸性となり、カルサイトやアノーサイト成分に富む斜長石が溶解しCa成分が増加していく。岩盤内に入った水は二酸化炭素の供給が断たれるために、次第に二酸化炭素を除いた系での平衡に移行してゆき、Caの溶出反応は次第に押しえられていくと考えられる。この反応と前後してイオンの交換反応が主要な反応となる。Ca濃度とNa濃度の比はイオン交換反応を行う鉱物のイオン交換能力、およびそれらの存在量、反応の程度により決定されていると推定される。Mgは反応の初期の段階で地下水中より取り除かれる。またSiO₂は、次第にその濃度を減少させてゆき、pH値は徐々に上昇していく傾向が認められる。これらの変化に関しては、鉱物の晶出反応が関係していると推定されるが、どのような鉱物であるかは明らかでない。TR濃度は、反応の時間の経過を反映して、全体的な傾向としては減少していく。水温は、岩盤中での水の流れの状況を反映していると推定され、水の流れが遅く岩盤との接触時間が長かった場合等に高くなっていると推測される。

なお、以上の結果に関して、地表部付近に存在する鉱物、および岩盤中の湧水割れ目の開口部表面に存在する鉱物に関して、その鉱物組み合わせと組成を丹念に調査すれば水質形成機構の詳細が明らかになると推定される。

(3) 溶存硫酸中の $\delta^{34}\text{S}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の挙動

550mL坑道の湧水における溶存硫酸中の $\delta^{34}\text{S}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の分析結果には、前述したように明瞭な相関関係等は存在しなかった。そこで、平成2年度の花崗岩における原位置試験¹⁰⁾において実施された、地下水中の $\delta^{34}\text{S}$ と岩石中の $\delta^{34}\text{S}$ の測定結果と比較より、今回の測定結果に関しての考察を行う。

図-7.3.12は、平成2年度の試験で行われた $\delta^{34}\text{S}$ の分析結果に、今年度の分析結果を加えてプロットしたものである。今回実施した6地点の測定結果のうち、5地点の値は-2~0%程度の所に集中している。このような値は、KH-1孔の1~4区間のものと似た値である。一方、274m地点の一点のみで認められた高い値は、KH-1の5区間の1990/4/25に測定されたものと近い値となっている。

硫酸塩の起源としては、大気中の硫酸エアロゾルの天水への溶解、および岩盤内に存在する鉱物からの地下水中への溶出が考えられる。天水起源の硫酸塩の $\delta^{34}\text{S}$ は大きく変動することが知られている。たとえば、安定同位体地球化学(1996)¹²⁾によれば、釜石市の南にあたる大船渡市において、数年にわたり観測された降水中の $\delta^{34}\text{S}$ の値は季節変動を示し、-10~10%程度の範囲の値をとっている。一方、岩盤中の鉱物からの溶出を考えた場合、岩石サンプルの値は、-5~0%程度である。硫酸塩の $\delta^{34}\text{S}$ は、このように起源となる天水中での値と、その後溶出してくる硫黄の $\delta^{34}\text{S}$

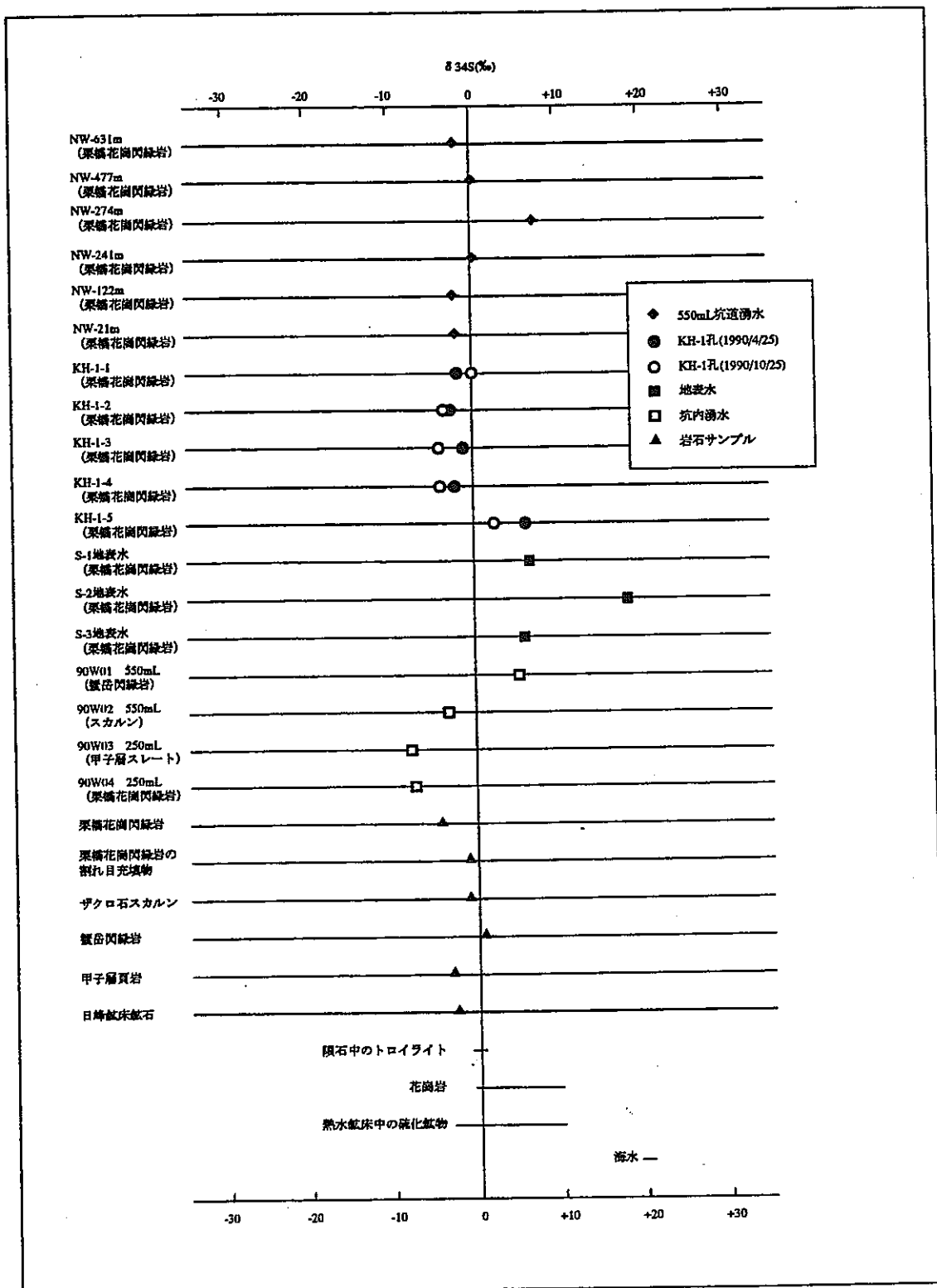


図-7.3.12 各地下水と岩石サンプルの $\delta^{34}\text{S}$ の値

^{34}S の値の両方に影響された結果として値が決定されると思われる。しかし、この他に $\delta^{34}\text{S}$ 値を変える作用として、硫酸塩還元菌の活性に起因する反応も考慮する必要がある。硫酸塩還元菌の存在が試錐孔内の分析結果で確認されていることより、これらの影響を合わせて今後検討する必要があるであろう。

以上述べた要因の組み合わせより $\delta^{34}\text{S}$ の値が決定されると推定されるが、今回の調査では坑道湧水における硫酸還元菌の存在状況等は調査しておらず、その影響がどの程度であるかを推定することは困難である。しかし、坑道湧水中の硫酸塩の $\delta^{34}\text{S}$ の分析結果において、大きな値の相違が認められたことは、地下水形成機構および地下水流動を考察するうえで、有効な手段となる可能性を示唆していると思われる。 $\delta^{18}\text{O}$ も含め、地表水に認められる季節変動、岩盤中からの溶出や交換反応との関連性、および硫酸還元菌の影響等を調査することにより、有効な利用法が確立されられると思われる。

7.3.2 地下水の流動機構

(1)地下水流動機構の解析方法に関して

地下水の流動機構を推測する手法として、天然に存在する環境同位体を一種のトレーサとして解析する手法が有効とされている。水文学の分野で、よく用いられるものとしては $\delta^{18}\text{O}$ と δD があり、天水組成との比較により地下水がどの様な高度で涵養されたかを推定することが良く行われている。

(2)原位置試験場への適用

前述したように、 $\delta^{18}\text{O}$ と δD には高度効果が認められ、標高が上昇することにより同位体組成が軽い方へと変化している。また、トリチウム濃度は高度とともに上昇する傾向が認められた。

図-7.3.13は、550mLNW坑道における湧水の同位体組成および標高を縦軸に、坑道の基点距離を横軸にとってプロットしたグラフである。なお、H1は坑道よりやや南東部での地表の標高値を、H2は坑道の直上の標高値を用いている。同位体の組成の分布パターンと地表の標高変化のパターンとは類似していることが分かる。これらの標高値と同位体組成との相関係数は、 δD とH1が-0.48、H2が-0.58、 $\delta^{18}\text{O}$ とH1が-0.61、H2が-0.75、そしてTRとH1が0.82、H2が0.57となっている。相関係数からは、同位体組成と標高の間に良い相関があることがわかる。このことより考えると、坑道湧水は湧水地点の上部付近で涵養されたものが湧出している可能性が高いといえる。

なお、トリチウム濃度も標高のパターンと良い一致を示しているが、崩壊による濃度変化の影響も高いので、高度効果による影響があるかどうかは明らかでない。

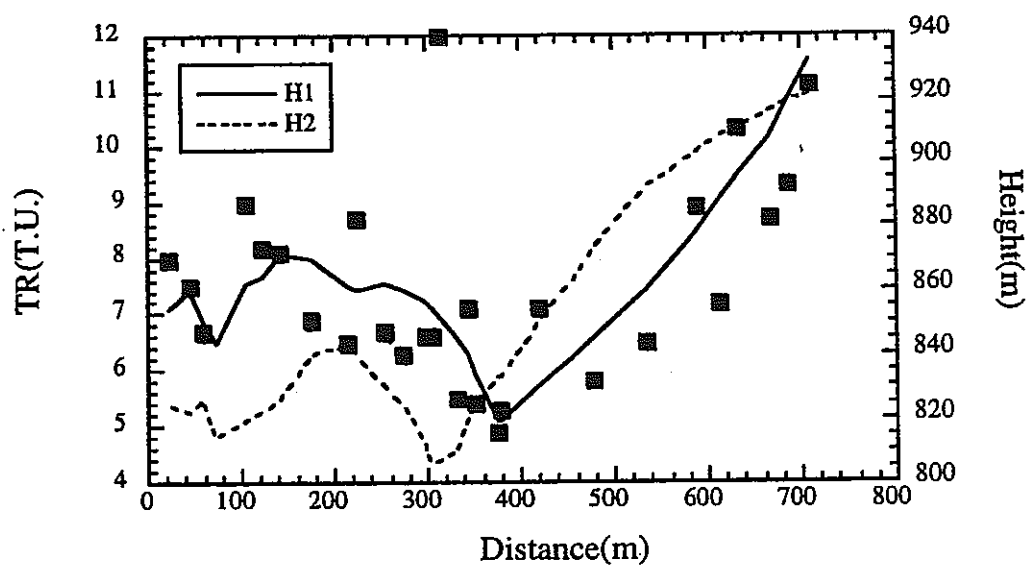
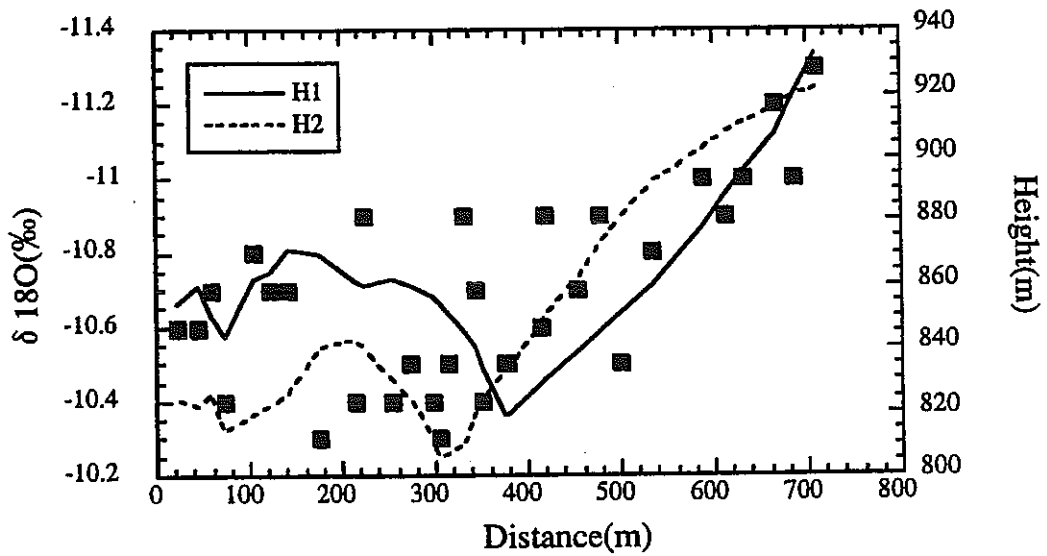
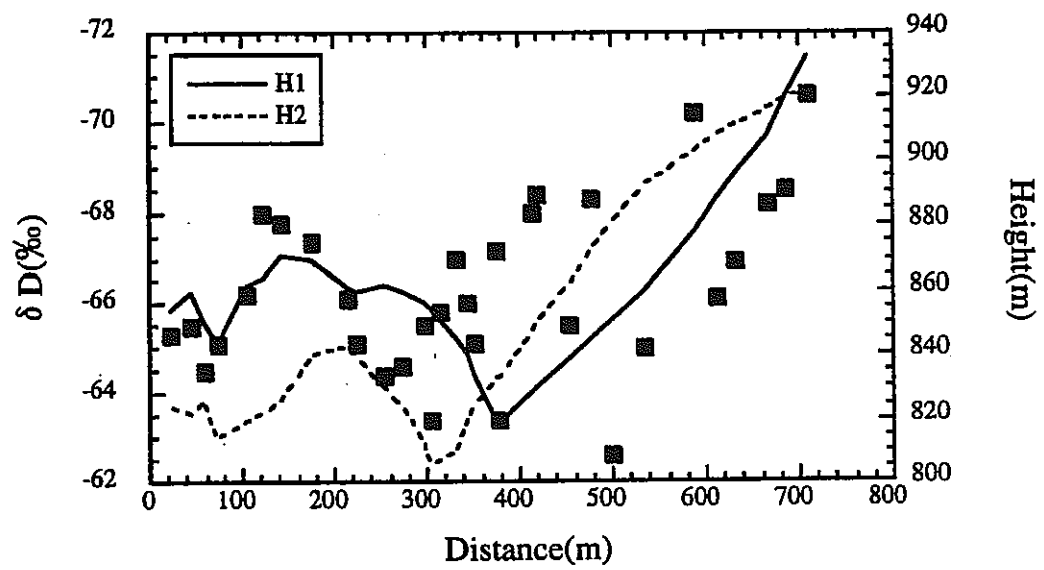


図-7.3.13 NW坑道内での環境同位体組成と標高との関係

しかし、塩素イオン濃度の挙動より以下の様なことが推定される。塩素イオン濃度は、坑道奥にいくに従い増加する傾向が認められる。塩素イオンは岩盤との反応では大きく変化せず、混合等が生じなければ地表部より地下へ流入する時の濃度が、ほぼそのまま地下水の濃度に反映されると考えられる。このような事から考えると、塩素濃度の相違は地表部付近での濃縮により生じたと推定され、トリチウムの濃度差も同様に濃縮により生じた可能性が高いといえる。

7.3.3 細菌の分布状況

細菌の分布状況に関して、これまでの原位置試験において得られた結果をまとめて図-7.3.14に示した。図は試験を実施した各採水地点における全菌数と従属栄養細菌数および各種の細菌数を対数ヒストグラムで示したものである。

(1)全菌数

全菌数を見た場合、KG-1-41における値は地表水での結果と比較して、オーダー的に2桁程度大きな値をとっており、地表よりも細菌が増殖しやすかったことが分かる。なお、KG-1孔内の他区間と全菌数を比較した場合、全菌数はオーダー的に似通った値を示しており、KG-1孔内においては浅部から深部にかけて細菌増殖の程度には大きな相違は認められない。一方KH-1孔内においては全菌数が少なく、細菌の増殖が不活発であることが分かる。また、KF-1孔と2孔はこれらの中間的な値を示しており、オーダー的には地表水的全菌数と似た値である。

KG-1孔の周辺部では、地質構造の解析結果によれば大規模なりニアメントが認められており、規模の大きな割れ目帯が岩盤中に発達していると推測される。また、KF-1孔周辺にも割れ目帯が発達しており坑道内では多量の湧水が認められる。一方KH-1孔の周辺部は健岩部が発達する領域に近接しており、KH-1孔の孔口付近の坑道内においても湧水が少量しか認められない。以上のことより、全菌数は地質構造的には割れ目帯に属し大量の地下水流が流れている箇所で多くなる傾向が存在するといえる。

(2)従属栄養細菌数

従属栄養細菌数の分布の傾向は、ほぼ全菌数のケースと同様であるが、KF-2孔における菌数が全菌数の割に少ないことが特徴的である。KF-2孔は、全体的に湧水が僅かである。このことが、従属栄養細菌の増殖に必要な要因に大きく影響をしているのかもしれない。

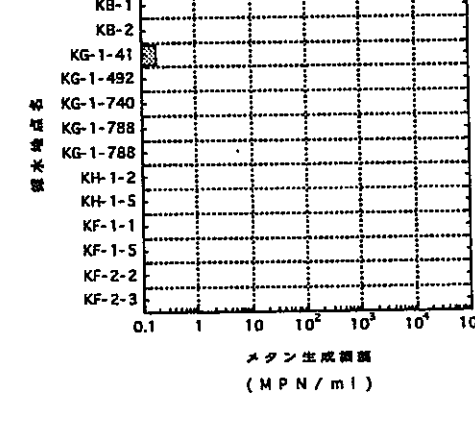
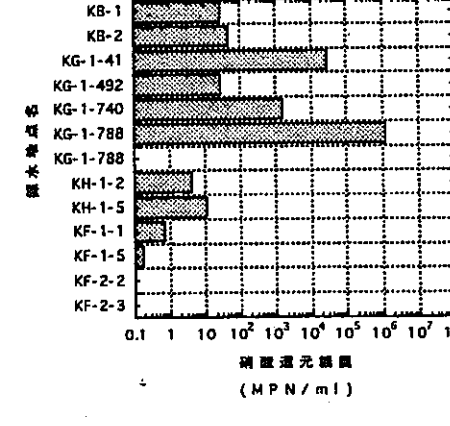
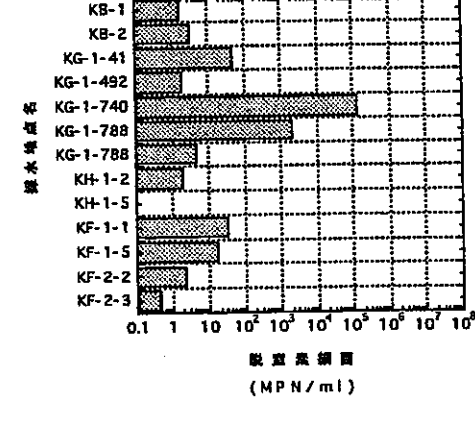
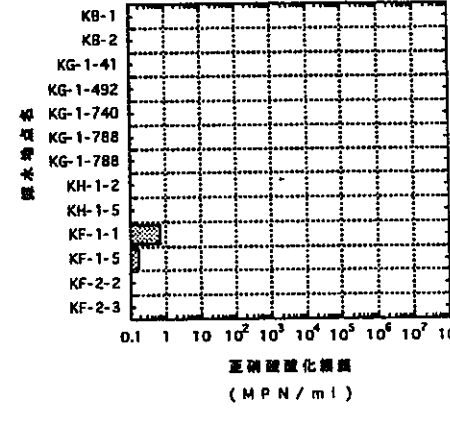
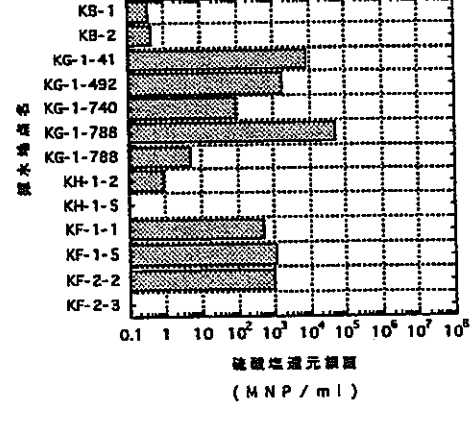
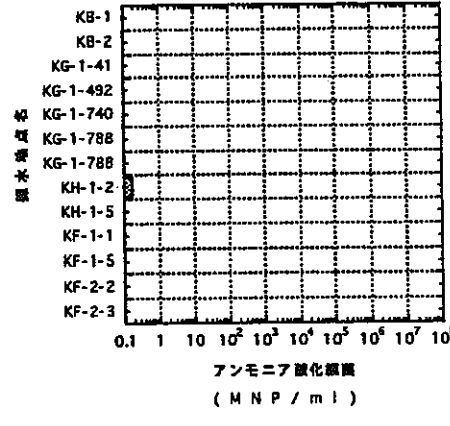
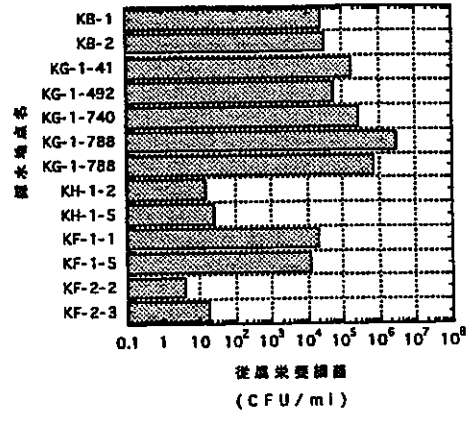
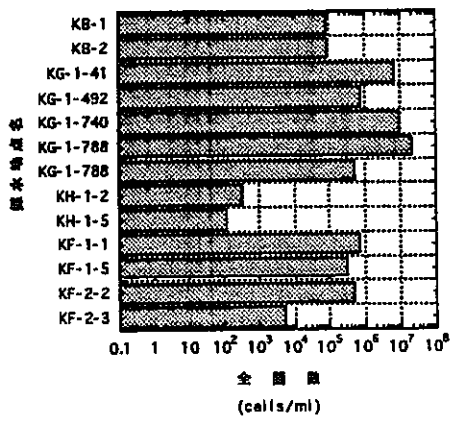


図-7.3.14 各採水地点における細菌の生息数

(3)アンモニア酸化細菌

アンモニア酸化細菌は、KH-1-2でのみ認められたが、その存在量は非常に僅かである。この菌が本区間に認められた原因に関しては明らかでないが、KH-1-2においてのみ、アンモニア酸化細菌が生育可能な環境場が形成されている可能性がある。

(4)亜硝酸酸化菌

亜硝酸酸化菌は、KF-1孔の2区間でのみ認められた。しかし、その存在量は僅かである。KF-1孔周辺の地質あるいは地質構造の特異性により、このエリアでのみ亜硝酸酸化菌が生育できる様な場が形成されているのかもしれない。

(5)硝酸還元菌

硝酸還元菌は、地表水では10の1乗オーダーで存在している。KG-1孔内の数区間における菌数には大きな相違が認められ、地表水よりも数オーダー存在数が大きな区間が存在する一方で、地表水と同等あるいはほとんど存在しない区間が存在する。特にKG-1-788区間においては平成7年度と8年度に採水を実施しているが、平成7年度に多量に存在していた菌が、平成8年度にはほとんど認められないという現象が認められた。環境変化が生じた事に起因すると思われるが、詳細に関しては不明である。KH-1孔やKF-1孔での存在数は、地表と同程度か数オーダー低く、それほど硝酸還元菌が存在し易い環境ではない事がわかる。またKF-2孔では、菌が検出されておらず、硝酸還元菌が存在しにくい環境であることが推測される。

(6)硫酸塩還元菌

硫酸塩還元菌は、地表水では10の-1乗オーダーと非常に少ない。これに対してKG-1孔では多くの区間で10の数乗オーダーで菌が存在しており、硫酸還元菌が生育しやすい環境が整っていると推定される。KH-1孔では、地表水と同程度かそれ以下と存在数は僅かである。KF-1孔と2孔では、KF-2-3を除き、10の3乗程度の菌が認められており、KG-1と同様に硫酸塩還元菌が生育し易い環境が整っていると考えられる。

(7)脱窒素細菌

地表部では、10の0乗のオーダーと僅かしか生育していない。全体的にみた場合、KG-1-740と788の平成7年度の場合以外は、地表部での生育数と同レベルかそれ以下と非常に菌数は少ないといえる。

(8)メタン生成菌

メタン生成菌はKG-1-41のみで認められるが、その存在量は僅かである。

以上、各細菌の存在パターンを見てきたが、それぞれの区間に共通することとして、酸化細菌は少なく、還元細菌が非常に多く存在することがあげられる。水質の相違がこのような存在状況に相違を生じさせていると推定される。今後は、水質形成と細菌活動の相互作用に関して、同位体分析等の手法を取り入れて考えていく必要があるであろう。

7.4 まとめ

今年度の深部岩盤の地球化学特性の調査・解析の結果は以下のようにまとめられる。

(1) 試錐孔における物理化学パラメータ分析結果より、地下水の溶存酸素はほぼ消費尽くされており、非常に還元的な状態であることが判明した。

(2) 水質形成の概要に関して、一連の反応の存在が推定された。初期段階で地下水中のCaイオンが増加し、その後にCaイオンと鉱物中のNaイオンが交換するという主要な反応系列が存在する。この交換反応の初期段階において、Mgイオンは地下水から取り除かれる。またSiO₂濃度も次第に減少する。pH値と温度は上昇し、トリチウム濃度は反応時間を反映して減少する傾向がある。

(3) 地下水流動機構に関して、同位体組成の解析結果より、550mLのNW坑道の湧水は湧出点の直上部付近の表層で涵養された可能性が高いことが推定された。

(4) 細菌の分析結果より、生育範囲は地質構造の相違に起因する環境の違いが大きく影響している可能性が推定された。

8. 総合まとめ

本年度は、釜石原位置試験の第2フェーズ(平成5年度～平成9年度)の最終年度に当たり、昨年度までの調査・試験で得られた結果と併せて原位置試験場周辺の地質環境特性の総合的な解釈を行った。本年度実施した主な調査・解析は以下のようである。

- (1)地質構造の調査・解析
- (2)割れ目帯調査技術の開発
- (3)深部岩盤の力学特性の調査・解析
- (4)深部岩盤の水理特性の調査・解析
- (5)深部岩盤の地球化学特性の調査・解析

地質構造の調査・解析

①年代測定の調査

「単一割れ目の形成史」、「割れ目帯の形成史」および「1Mタイプセリサイトの形成時期」を把握することを目的とし、250mL原位置試験場の起点から11m地点、550mL原位置試験場の起点から625m地点および600m地点において、栗橋花崗閃緑岩や赤色変質部、割れ目充填物の放射年代測定を実施した。その結果、「単一割れ目の形成史」については、母岩である栗橋花崗閃緑岩が約100℃以下まで冷え固まった約85Ma頃に、フィッシュン・トラックのリセットをもたらすような地質条件下で形成されたものと推定された。それに対し、「割れ目帯の形成史」については、栗橋花崗閃緑岩が約100度以下まで冷え固まった約95Ma頃に、赤色変質を伴うブドウ石－濁沸石を変質鉱物とする割れ目充填物が形成され、その後、約70～85Ma頃に緑泥石－束沸石を変質鉱物とする割れ目充填物が形成されたものと推定された。また、同割れ目帯を対象とし、最近100万年以内の再動や再変質等の再活動の有無を把握することを目的とし、ESR年代測定を実施したが、割れ目充填物試料では格子欠陥信号であるE'1プライム信号が得られなかった。そのため、原位置試験場周辺に分布する割れ目や割れ目帯は、最近100万年以内に再活動していないものと推定された。

「1Mタイプセリサイトの形成時期」に関しては、平成7年度の粘土鉱物の結晶化学的な調査で1Mタイプセリサイトが検出された粘土質部を対象にフィッシュン・トラック年代測定を実施したが、フィッシュン・トラックのリセットが十分でないものと推定され、形成時期を把握するまでには至らなかった。しかし、フィッシュン・トラックのトラック長解析の結果から、他の試料よりも急速な冷却速度を有していることが推定された。

②流体包有物の調査

平成8年度までの調査により、原位置試験場周辺に分布する割れ目や割れ目帯は、1).ブドウ石－濁沸石に代表される変質鉱物組み合わせを有する割れ目形成ステージ、および、2).緑泥石－束沸石に代表される変質鉱物組み合わせを有する割れ目形成ステージにより、主として形成されているものと推定されている。本年度の調査では、これら2つの割れ目形成ステージに関与した流体の特性を明らかにし、形成時の地質環境条件の相違を把握することを目的とし、石英中の流体包有物の均質化温度および塩相当濃度の調査を実施した。その結果、ブドウ石－濁沸石に代表される変質鉱物組み合わせを有する割れ目形成ステージについては、約300℃程度の栗橋花崗閃緑岩の根源流体に由来する熱水が岩盤中の破砕帯等を循環する地質環境下で形成されたものと推定された。それに対し、緑泥石－束沸石に代表される変質鉱物組み合わせを有する割れ目形成ステージについては、地表水により希釈された約200℃程度の栗橋花崗閃緑岩に由来する根源流体が岩盤中の破砕帯等を循環する地質環境下で形成されたものと推定された。

③KG-1孔の調査

地表から地下深部へと連続が予想される割れ目帯／破砕帯(断層)を対象に、推定の妥当性を保証するデータを蓄積すること目的とし、KG-1孔に分布する主要な割れ目帯／破砕帯(断層)を対象に、岩石・鉱物学的な調査を実施した。その結果、直接的に連続性を保証する岩石・鉱物学的特性を得るまでには至らなかったが、550mL原位置試験場のNW坑道の起点から315m周辺の割れ目帯／破砕帯については、KG-1孔の深度277～433mの割れ目帯／破砕帯(断層)や深度518～545mの割れ目帯／破砕帯(断層)と岩石・鉱物学的に類似していることが明確になった。

また、栗橋花崗閃緑岩の不均質性や深度依存性を把握することを目的とし、KG-1孔に分布する栗橋花崗閃緑岩の岩石・鉱物学的な調査を実施した。その結果、全岩化学特性からは、KG-1孔の深度518～545mの割れ目帯／破砕帯(断層)よりも浅部に分布する栗橋花崗閃緑岩と550mL原位置試験場周辺に分布する栗橋花崗閃緑岩が、割れ目帯／破砕帯(断層)よりも深部に分布する栗橋花崗閃緑岩と250mL原位置試験場周辺に分布する栗橋花崗閃緑岩が同様な全岩化学特性を有することが明らかとなった。一方、造岩鉱物特性からは、KG-1孔の深度277～433mの割れ目帯／破砕帯(断層)よりも深部に分布する栗橋花崗閃緑岩の内、蟹岳閃緑岩～ヒン岩が分布する深度518～545mの割れ目帯／破砕帯(断層)の周辺部に分布する栗橋花崗閃緑岩は250mL原位置試験場周辺に分布する栗橋花崗閃緑岩と、その他の区間に分布する栗橋花崗閃緑岩は550mL原位置試験場周辺に分布する栗橋花崗閃緑岩と類似した造岩鉱物特性を有することが明らかとなった。

割れ目帯調査技術の開発

割れ目帯／断層破碎帯の検出技術の開発を目的として流体流動電位法、流電電位法および物理検層などの物理探査を実施した。

流体流動電位法では、水みちとなっている割れ目帯／断層破碎帯の連続性を推定することを目的とし、1).新規試錐孔削孔中の坑道壁面におけるSP観測、2).削孔中断時に同孔口元開閉による坑道壁面でのSP観測を行なった。その結果、KF-3孔の削孔深度が湧水の急激に増加する深度に達すると、坑道壁面においてSPの変化が認められた。また、任意深度でもパッカーシステムを用いることによって、坑道壁面でのSP変化を捉えることができることも確認された。

流電電位法については平成7年度は点電流源で実施したのに対し、本年度は感度領域が広範囲となる線電流源を用いて実施した。その結果、平成7年度に構築した比抵抗構造モデルを用いて、本年度得られた見掛比抵抗曲線を再現することができ、同比抵抗モデルの妥当性が確認された。また、同手法においては、孔井が湧水中の時と閉鎖中の時での見掛比抵抗の変化を調査したところ、見掛比抵抗はわずかであるが低下傾向を示した。

深部岩盤の力学特性の調査・解析

①原位置試験場周辺の基本物性

昭和63年度より実施してきた岩石室内試験、孔内載荷試験、初期応力測定により得られたデータに加えて本年度実施した岩石室内試験、鉱物分析、マイクロクラック観察を踏まえて、栗橋花崗閃緑岩の力学特性について検討を行った。

KH-1孔の試験結果より、単位体積重量、空隙率、粘着力、内部摩擦角について深度依存性が認められた。特に、粘着力、内部摩擦角については構成鉱物の粒径と密接に関連しているものと推測され、鉱物分析の結果では深度が増加するにしたがって、殆どの構成鉱物について平均粒径が減少する傾向を示した。また、550mレベル原位置試験場の試験結果と250mレベル原位置試験場の試験結果の内、単位体積重量をKH-1孔の試験結果と併せてプロットすると、250mレベル原位置試験場の試験結果がKH-1孔の同一深度と比較して大きめの位置にプロットされた。これは、構成鉱物の量比の違いを反映した結果であるものと推測され、250mレベル原位置試験場の方が550mレベル原位置試験場より黒雲母、角閃石の有色鉱物を含む割合が平均で10%程度大きい値を示した。

マイクロクラックの観察結果から、550mレベル原位置試験場と250mレベル原位置試験場では有意な差が認められ、クラック密度に関しては250mレベル原位置試験場の方が550mレベル原位置試験場より小さい値を示した。一方、マイクロクラックの方向性に関しては、550mレベル原位置試験場では、 $N10^{\circ} \sim 40^{\circ} E$ および $N10^{\circ} \sim 40^{\circ} W$ の走向の卓越方

向が認められ、比較的緩い傾斜のものが多い。これに対し、250mレベル原位置試験場では、550mレベル原位置試験場ほど顕著な卓越方向は認められないものの、北北東－南南西、北北西－南南東の走向の頻度が相対的に高い傾向を示した。

②原位置試験場の初期応力に関する特性

KH-1孔において水圧破碎法により算定された水平面内の応力状態は最小、最大主応力とも深度とともにほぼ線形的に増加し、水平面内の最小主応力を σ_h 、最大主応力を σ_H 、測定位置の被りから算出した推定被り圧を σ_v とすると、 σ_h 、 σ_H 、 σ_v の間には、 $\sigma_h < \sigma_v < \sigma_H$ の関係が認められた。また、KH-1孔の各深度において決定された水平面内の最大主応力の方位は、真北を中心としてN19.9°W～N2.2°Eの狭い範囲に分布しており、水平面内の最大主応力の方向は深度と無関係にほぼ一定であり、かつ南北方向である。これは、550mレベル原位置試験場および250mレベル原位置試験場における測定結果についても同様であり、最大主応力の方向は深度、測定箇所によらず概ね南北方向で水平的に作用しているものと考えられる。

③割れ目帯（断層破碎帯）の力学特性

平成7年度に定義した割れ目帯（断層破碎帯）に基づきGroup 1(N60°W系)とGroup 2(N50°E～EW系)を対象割れ目帯として試験を実施した結果、同じ550mレベル原位置試験場で実施された健岩部の変形係数、接線弾性係数と比較して1オーダー程度低い値を示し、最大で20～30%の値であった。割れ目帯の属性による違いでは、変形性の絶対値について、今回試験対象としたGroup 1(N60°W系)とGroup 2(N50°E～EW系)の間には明瞭な差は認められなかった。一方、各々のグループ内の変形特性に着目すると、Group 1(N60°W系)では試験実施場所の違いによる不均一性はほとんど認められないのに対し、Group 2(N50°E～EW系)では変質の程度および幅により不均一性が生じ、試験実施箇所により変形特性が異なる傾向が認められた。

④弾性波速度測定の適用性評価

平成7年度までに釜石原位置試験場において実施された弾性波速度測定結果のばらつきの原因を明らかにし、弾性波速度測定の適用性を把握することを目的として、振動子の共振周波数および岩石供試体の含水比を変化させた弾性波速度測定を実施した。すなわち、弾性波速度の測定結果のばらつきに影響を及ぼす因子として、振動子の共振周波数、潜在クラック、測定位置、試料の含水状態について検討した。その結果、測定値は振動子の共振周波数と測定位置といった因子の違いよりも、潜在クラックあるいは含水状態に大きく影響されることが判明した。その影響度合に関しては、潜在クラックの影響が最大で約20%の速度差を生じ、含水状態の影響が飽和状態から乾燥状態に至る過程で約10～15%程度の低下であった。なお、今回の試験では振動子を試料に直接接着しているため、試料と振動子の密着度合の影響は除かれている。実際の測定ではこの影

響は無視できないと考えられる。特に、試料が風化変質し、端面の整形精度が不十分な場合は、測定値に少なからず影響を与えることに注意する必要がある。

深部岩盤の水理特性の調査・解析

①降水量・気温・坑道湧水量の経時変化の把握

今年度の月別降水量は、例年の降水量分布と比較して傾向が大きく異なる傾向を示した。同様に、気温も7月～10月の間は例年の傾向と大きく異なっていた。坑道湧水量は、降水の影響を受けて変動しているものと推定されるが、観測箇所周辺での試験の影響および観測手法の精度の問題からその変動を捉えることができなかった。

②KG-1孔での間隙水圧の経時変化

計測された間隙水圧の経時変化は、ほぼ全ての区間においてピエゾ水頭が上昇から下降に転ずる変曲点(ピーク)が大別して年間で4回認められた。そして、降水量の月変動とピエゾ水頭の経時変化は傾向が概ね一致しており、4つのピークは降水量の多寡の影響を受けた結果であることが示唆される。また、4つのピーク対して特に影響したと推測される降水日とピーク日時を比較したところ、ピークとなるまでの時間はKG-1孔の浅部の区間では1～2週間程度、深部の区間では1ヶ月半程度であり、地表の降水の影響は水頭の上昇という形で、KG-1孔浅部から深部へと徐々に伝わっていくことが推察された。

③坑道周辺での間隙水圧の経時変化

550mL坑道周辺の既存試錐孔における間隙水圧の経時変化とイベントデータとの関係から試験場周辺の水理的連続性を検討した結果、KH-4孔、KH-13孔、KH-16孔、KH-18孔とKF-2孔およびKCH-1,2孔は試験場周辺で観察されるN45°E～N80°Eの割れ目を水みちとして、水理的に連続しているものと推測される。また、昨年度までに実施した地質構造の調査からKH-19～KH-25孔近傍には、ほぼ東西方向の走向と垂直に近い傾斜を有する大規模な割れ目ゾーンの存在が確認され、このゾーンが原位置試験場付近の主要な水みちとなっており、KH-19～25孔とKF-1孔は割れ目ゾーンを介して水理的に連続しているものと推測される。さらに、間隙水圧の経時変化には、自然現象を要因とした変動は検知されず、計測箇所の人為的な要因が間隙水圧の変動に大きな影響を与えていることが判明した。

④KF-3孔試錐時におけるKF-1,2孔の間隙水圧の経時変化

KF-3孔掘削中においてKF-1,2孔の間隙水圧の経時変化をモニタリングした結果、KF-1孔とKF-2孔の間の岩盤は水理的に連続している可能性が示唆された。また、KF-1,2孔周辺の水理場は、NW坑道の割れ目帯24,25で観察される主要割れ目に影響を受けている可能性が見いだされた。さらに、試験場周辺の水理的連続性をまとめた結果、大略的にはトレーサー坑道奥部に存在する割れ目ゾーンが、試験場周辺の主要な水みちに

なっているものと推測されるが、坑道近傍ではこの割れ目ゾーンから分岐・派生したと考えられるN45°E～N80°Eの卓越割れ目群が局所的に主要な水みちになっているものと考察された。

深部岩盤の地球化学特性の調査・解析

試錐孔における物理化学パラメータの計測結果より、地下水の溶存酸素はほぼ消費しつくされており、非常に還元的な状態であることが判明した。一方、水質形成に関与する、一連の反応の存在が推定された。初期段階では地下水中へのCaの溶出反応が生じCaイオンが増加していく。その後にCaイオンとNaイオンとの間でイオン交換反応が生じ、Caイオンが減少しNaイオンが増加していく。この交換反応の初期段階において、Mgイオンは地下水中から急激に取り除かれる。またSiO₂濃度も反応の進行に伴い、次第に減少していく。pHと水温は上昇し、トリチウム濃度は反応の時間を反映して減少する傾向が認められる。次に、地下水の流動機構に関して、環境同位体組成の解析結果より、550mLのNW坑道の地下水は、坑道湧水地点の直上付近の表層部で涵養された可能性が高いことが推定された。さらに、細菌の分析結果より、各種の細菌の生育状況には、地質構造に起因する環境の相違が大きく影響している可能性が推定された。

参考文献

第3章 地質構造の調査・解析(1)

- 1). 日鉄鉱業株式会社: 釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成7年度), pp.22-264, (1996)
- 2). 加賀美寛雄ほか: MAT260によるSr同位体比測定およびRb-Sr定量分析, 岡山大学温泉研報, No.52, pp.52-70, (1982)
- 3). Kagami, H. and et al.: Sr and Nd isotopic compositions and Rb, Sr, Sm and Nd concentrations of standard samples, Tech Rep, ISEL., No.4, pp.16, (1987)
- 4). Kagami, H. and et al.: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios of GSJ rock reference samples; JB-1a, JA-1 and JD-1a, geochem.jour., No.23, pp.209-214, (1989)
- 5). Steiger, R.H., Jager, E.: Subcommission on geochronology: Convection on the use of decay constants in geo- and cosmochronology, Earth Planet. Sci.Lett., No.36, pp.359-362, (1977)
- 6). 川野良信: パーソナルコンピューターを用いたRb-Sr, Sm-Ndアイソクロン計算プログラム, 情報地質, No.5, pp.13-19, (1994)
- 7). York, D.: Least-squares fitting of a straight line, Can Jour. Phys., No.44, pp.1070-1086, (1966)
- 8). 長尾敬介ほか: K-Ar法による年代測定, 岡山大学蒜山研究所報告書, 第9号, pp.19-38, (1984)
- 9). 板谷徹丸: 進歩したK-Ar年代測定技術, Maguma, No.77, pp.1-7, (1986)
- 10). Itaya, T. and et al.: Argon isotope analysis by a newly developed mass spectrometric system for K-Ar dating, Mineralogical J., No.15, pp.203-221, (1991)
- 11). Hurford, A.J.: Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I.U.G.S. Subcommission of Geochronology, Chem.Geol., 80, pp.171-178, (1990)
- 12). Hurford, A.J. and Green, P.F.: The zeta age calibration of fission track dating, Isotope Geosci., 1, pp.285-317, (1983)
- 13). 日鉄鉱業株式会社: 釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成6年度別冊), 一栗橋花崗閃緑岩および割れ目充填物の形成年代一, (1995)
- 14). Foland, K.A.: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ incremental heating plateau for biotite with excess argon, Isotope Geosciences 1, pp.3-21, (1983)
- 15). 田中和広ほか: 花崗岩中の割れ目のキャラクタリゼーション(その1), 電力中央研究所・報告書, U92051, (1993)
- 16). 佐藤興平ほか: 甲斐駒ヶ岳花崗質岩類のK-Ar年代と岩体冷却史, 地質学雑, Vol.95, No.1, pp.33-44, (1989)
- 17). 福地龍郎: ESR法による断層年代測定(原理の見直しと新しい方法論について), 月刊地球, Vol.12, No.1, (1990)
- 18). Motoji Ikeya: New applications of Electron Spin Resonance, World Scientific, (1994)
- 19). 日鉄鉱業株式会社: 釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成7年度), pp.505-515, (1996)
- 20). 村松容一ほか: 釜石鉱山の高温交代銅鉄鉱床および周辺火成岩中の流体包有物に関する研究(I), 岩鉱雑, 77, pp.7-17, (1982)
- 21). 村松容一ほか: 釜石鉱山の高温交代銅鉄鉱床および周辺火成岩中の流体包有物に関する研究(II), 岩鉱雑, 77, pp.181-190, (1982)

第4章 地質構造の調査・解析(2)

- 1). 日鉄鉱業株式会社: 釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成7年度), pp.310-372, (1996)
- 2). 日鉄鉱業株式会社: 釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成8年度), pp.117-191, (1997)
- 3). 佐藤 洋・島 裕雅・櫻井 健: 地下水の汲み上げに伴う流動電位発生に関する検討, 物理探査学会第97回学術講演会論文集, pp.279-282, (1988)

- 4). 日鉄鉱業株式会社: 釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成8年度), pp.291-298, (1997)
- 5). 水永秀樹, 牛島恵輔: 流電電位法のデータ処理に関する研究, 物理探査, Vol.41, No.5, pp.345-359, (1988)
- 6). 日鉄鉱業株式会社: 釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成7年度), pp.265-309, (1996)

第5章 深部岩盤の力学特性の調査・解析

- 1). 日鉄鉱業株式会社: 釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成6年度), (1994)
- 2). 日鉄鉱業株式会社: 釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成7年度), (1995)
- 3). 小池克明, 川場浩二, 永野修一: 衛星画像に基づく断裂系の方位分布の推定法, Geoinform-'95(甲府), (1995)
- 4). 西山 孝: 蛍光法による割れ目の可視化と評価, 資源・素材'97(札幌), pp.29-32, 1997
- 5). 地盤工学会: 新規制定の学会基準「パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法について」, 土と基礎, pp.45-49, 1997
- 6). 岩の力学連合会: 岩石の弾性波速度測定法の指針, pp.46-51, 1982
- 7). 土木学会: 孔内載荷試験法の現状と課題 - 指針化の試み -, 1988

第6章 深部岩盤の水理特性の調査・解析

- 1). 清水建設株式会社: MPシステムによる花崗岩の水理地質モデルの検討, (1992)
- 2). 建設省水文研究グループ編訳: 最新地下水学—調査と実務のガイドライン—, pp.21-75, 山海堂, (1977)
- 3). 日鉄鉱業株式会社: 釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成6年度), pp.410-423, (1995)
- 4). 日鉄鉱業株式会社: 釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成7年度), pp.617-629, (1996)
- 5). 日鉄鉱業株式会社: 釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成8年度), pp.265-285, (1997)
- 6). 日鉄鉱業株式会社: 釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成5年度), pp.55-78, (1994)

第7章 深部岩盤の地球化学特性の調査・解析

- 1). 日鉄鉱業株式会社: 釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成5年度), (1994)
- 2). 小山忠四郎: 湖沼ガス代謝 - 水の環境対策への基礎と応用 -, pp.10-18, 成文堂, (1991)
- 3). Baumann, E. W.: Determination of parts per billion sulfide in water with the sulfide-selective electrode., Anal. Chim., 46(9), pp.1345-1352, (1974)
- 4). 大槻 晃: 湖沼調査指針, 水質汚濁研究会編(1982).
- 5). 大槻 晃: 環境測定分析法注解(第3巻) - 水質汚濁物質及び底質測定分析方法 -, pp.82-91, (1985).
- 6). Murphy, J. and J. P. Riley: A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters, Anal. Chem. Acta., 27, pp.31-36 (1962)
- 7). Mentzel, D.W. and N. Corwin: Limonol. Oceanogr., 10, pp.288, (1965)
- 8). 松田庄蔵, 平木敬三, 西川泰治: フミン酸, リグニン, スルホン酸ナトリウムのけい光法による同時定量 - 堆積物中のフミン酸, フルボ酸の定量 -, 分析化学, 20, pp.1-346 (1979)
- 9). 日鉄鉱業株式会社: 花崗岩における原位置試験(昭和63年度) (1989)
- 10). 日鉄鉱業株式会社: 花崗岩における原位置試験(平成2年度) (1991)
- 11). 日鉄鉱業株式会社: 釜石鉱山における深部地質環境特性調査(平成8年度) (1997)
- 12). 酒井均, 松久幸敬: 安定同位体地球化学, p.403, 東京大学出版会, (1996)