

J A E R I - M
86-044

花崗岩岩盤中における原位置試験

1986年3月

熊田 政弘・木村 英雄・下岡 謙司・中越 章雄^{*1}・村岡 進
柳田 剛・雨宮 清^{*2}・犬竹 章郎^{*3}・中村 治人・荒木 邦夫

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)あて、
お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター(〒319-11 茨城県那珂郡
東海村日本原子力研究所内)で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-
ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日青工業株式会社

花崗岩岩盤中における原位置試験

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

熊田 政弘・木村 英雄・下岡 謙司・中越 章雄^{*}
村岡 進・柳田 剛・雨宮 清^{*2}・犬竹 章郎^{*3}
中村 治人・荒木 邦夫

(1986年2月5日受理)

昭和58年度から花崗岩岩体中に原位置試験室を開設し、これまでの試験技術をもとに原位置での実験手法や評価手法を確立するために岩盤加熱試験、元素移行試験および材料耐久性試験を行なったのでその結果を報告する。

岩盤加熱試験の結果、健岩部での実測温度は計算温度とよく一致すること、また亀裂部では地下水による熱の移動が無視できないことがわかった。ヒーター近傍の亀裂部分では岩盤の歪みおよび透水性の変化が認められた。元素移行試験の結果、亀裂中の元素移行が支配的であること、及び岩体中の拡散も移行要因として重要であることがわかった。材料耐久性試験では、10種の鋼種について熱処理した試料を用いて約75°Cで応力腐食割れ試験を行なったが、12ヶ月経た時点で2・3のVノッチ試験片に応力腐食割れ感受性が認められた。

東海研究所：茨城県那珂郡東海村白方字白根 2 の 4

* 1 外来研究員：間組

* 2 間組㈱

* 3 三井建設株式会社

In-situ Experiments in Granite

Masahiro KUMATA, Hideo KIMURA, Kenji SHIMOOKA, Akio NAKAGOSHI*

Susumu MURAOKA, Takeshi YANAGIDA, Kiyoshi AMEMIYA**

Fumio INUTAKE*** , Haruto NAKAMURA and Kunio ARAKI

Department of Environmental Safety Research

Tokai Research Establishment

Japan Atomic Energy Research Institute

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 5, 1986)

In-situ experiments in granite were started in 1983 as a three-year plan of research and development of the experimental techniques to aim at development of a site assessment methodology and to provide the data for the safety assessment of the disposal of radioactive waste. At the test site of granite, an experimental room was excavated for exclusive use and heater test, migration test and corrosion test were performed.

The heater test showed good agreement between measured and calculated temperatures in the rock where no fracture was found, however, in fractured zone it showed that the heat transfer by the ground water could not be disregarded. Rock deformation and permeability change were found near the heater in the fractured zone. Nuclide transport along the fracture is much faster than the transport in the rock matrix, besides dispersion in the rock matrix has very important role from the migration test. Corrosion test used sensitized specimens showed that some samples have susceptibilities to stress corrosion cracking after 12 months.

Keywords : High-level Waste, Geological Disposal, Granite, In-situ Experiment, Heater Test, Migration Test, Fracture, Permeability, Nuclide Transport Model, Stress Corrosion Cracking

* On leave from HAZAMA-GUMI, LTD

** HAZAMA-GUMI, LTD

*** On leave from MITUI Construction Co. LTD

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験場概要	3
2.1 試験場周辺の地形および地質	3
2.2 試験室	3
2.3 試験場岩石試料の室内試験	3
2.4 試験場周辺の地圧測定	4
3. 岩盤加熱特性試験	17
3.1 健岩部加熱試験	17
3.1.1 試験方法	17
3.1.2 結果と考察	17
3.2 模擬キャニスター加熱試験	34
3.2.1 岩盤内温度測定方法	34
3.2.2 結果および考察	34
3.3 加熱に伴う岩盤及び亀裂の変位と透水性	44
3.3.1 測定方法	44
3.3.2 結果と考察	45
4. 元素移行試験	55
4.1 予備調査	55
4.2 本 試 験	57
4.3 一次元フラクチャー モデルの適用	58
4.4 まとめと今後の課題	61
5. 材料耐久性試験	81
5.1 試験方法	81
5.2 結果と考察	81
6. 今後の試験計画	85
7. 結 言	85
参考文献	87

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Test Site	3
2.1 Geology and Topography	3
2.2 Experimental room	3
2.3 Core Samples	3
2.4 Rock Pressure	4
3. Heater Test	17
3.1 Intact rock	17
3.1.1 Method	17
3.1.2 Results and discussion	17
3.2 With a simulated canister	34
3.2.1 Method	34
3.2.2 Results and discussion	34
3.3 Permeability and displacement of rock	44
3.3.1 Method	44
3.3.2 Results and discussion	45
4. Migration Test	55
4.1 Preliminary test	55
4.2 Main test	57
4.3 Application of a single fracture model	58
4.4 Discussion	61
5. Corrosion Test	81
5.1 Method	81
5.2 Results and discussion	81
6. Future Plan	85
7. Conclusion	85
References	87

表 目 次

表 2.1 物理試験結果	10
表 2.2 力学試験結果	10
表 2.3 热伝導率測定結果	12
表 2.4 化学分析結果一覧表	12
表 2.5 X-Y-Z 座標の応力成分	15
表 2.6 三次元主応力の方向と大きさ	15
表 3.1 試験記録	22
表 3.2 試験孔および計測機器一覧表	23
表 3.3 加熱 1800 時間における岩盤温度の分布	43
表 3.4 加熱 1800 時間における岩盤温度の方向によるちがい	43
表 3.5 解析に用いた物性値	43
表 3.6 L1孔, L2孔の温度歪み量	54
表 4.1 サンプリング区画面積	67
表 4.2 バックグラウンド濃度測定結果	67
表 4.3 フィティング結果	77
表 5.1 供試材料の化学組成と熱処理条件	83
表 5.2 原位置応力腐食割れ試験結果	84

図 目 次

図 2.1 試験場周辺地形図	5
図 2.2 進入路・試験室の平面図および縦断面図	6
図 2.3 進入路・試験室の断面図	7
図 2.4 試験室内の亀裂スケッチ	8
図 2.5 試験室内亀裂のシュミットネット投影	9
図 2.6 温度～比熱関係図	11
図 2.7 温度～熱膨張率関係図	11
図 2.8 基準座標系	13
図 2.9 平面内応力分布図	14
図 2.10 地形断面と最大主応力の関係	16
図 3.1 健岩部加熱試験位置図	20
図 3.2 試験孔配置図	21
図 3.3 歪みゲージ配置図	24
図 3.4 ヒーター温度（加熱-II）	25
図 3.5 岩盤内温度分布図（加熱-II）	25
図 3.6 代表的な測点の実測温度変化と計算値の比較（加熱-II）	26
図 3.7 M A R C による解析—解析条件とメッシュ図	27
図 3.8 ヒーター温度（加熱-III）	28
図 3.9 代表的な測点の実測温度変化（加熱-III）	28
図 3.10 100 °C付近での温度－温度上昇率	29
図 3.11 岩盤内熱流量－F 1（加熱-II）	30
図 3.12 岩盤内熱流量－F 1（加熱-III）	30
図 3.13 壁面熱流量－F 2（加熱-III）	31
図 3.14 热流量から計算した熱伝導率	31
図 3.15 アクティブゲージ歪み測定結果（加熱-II）	32
図 3.16 ダミーゲージ歪み測定結果（加熱-II）	32
図 3.17 歪み測定位置の温度（加熱-II）	33
図 3.18 歪みから換算した熱応力（加熱-II）	33
図 3.19 模擬キャニスタ加熱試験概略図	36
図 3.20 試験孔配置図	37
図 3.21 測温点位置（0°方向）	38
図 3.22 鉛直断面における初期温度分布	39
図 3.23 鉛直断面における1800時間後の温度分布	39
図 3.24 等温線図（加熱1800時間後）	40

図 3.25 要素分割図	41
図 3.26 境界条件	41
図 3.27 実測温度変化と計算値の比較(0°方向, 距離1.3m)	42
図 3.28 実測温度変化と計算値の比較(120°方向, 距離1.3m)	42
図 3.29 岩盤内変位計	48
図 3.30 岩盤表面変位計	48
図 3.31 注入法試験装置	49
図 3.32 回復法試験装置	49
図 3.33 岩盤内変位～時間	50
図 3.34 岩盤内歪み～時間	51
図 3.35 岩盤内歪み分布	52
図 3.36 岩盤表面変位～時間	52
図 3.37 加熱前・中・後の透水係数変化	53
図 4.1 元素移行試験概略図	62
図 4.2 調査ボーリング配置図	63
図 4.3 調査ボーリング結果	64
図 4.4 サンプリング区域	65
図 4.5 サンプリング区画展開図	65
図 4.6 湧水量観測結果	66
図 4.7 元素移行試験注入装置	68
図 4.8 フルオレセン溶液注入圧力・注入量	68
図 4.9 フルオレセン濃度(max C/Co)	69
図 4.10 本試験結果—R側—C/Coおよび湧水量の経時変化	71
図 4.11 本試験結果—L側—C/Coおよび湧水量の経時変化	73
図 4.12 100, 300, 500時間後のC/Co分布	75
図 4.13 トレーサー注入による湧水増分率	76
図 4.14 Fracture-Matrix system	76
図 4.15 各区画の濃度計算法	77
図 4.16 フィッティング結果 1R1-1R2	78
図 4.17 フィッティング結果 3R1-3R2	79
図 4.18 フィッティング結果 4R1-4R2	80
図 5.1 原位置腐食試験概念図	82
図 5.2 ダブルUベント試験片模型図	82

1. 緒 言

高レベル廃棄物の地層処分の安全は人工バリアと天然バリアの多重バリアによって確保される。これらの機能はそれぞれ独立なものではなく相互に影響し合って決るものである。中でも天然バリアである地層は最も大きな影響力を持つ。地層の性質は複雑であり、また特性に大きなバラツキを有する。原位置試験の意義は天然にあるがままの地層の性質を知り、多重バリア相互の影響要因を解明し、重要な要因をより単純な形で引き出し実験室での基礎研究及び安全評価モデル開発の目標を明確にしていくことにある。

相互の影響要因として主なものは、地下水流、熱、地球化学的反応及び力学的影響である。処分候補地の地層に類似する場所で、実際規模で、可能な限り長期に各種相互影響に関する試験を実施することが原位置試験の理想的姿である。米国、カナダ、スイス、スウェーデン、ベルギー等の原子力利用国の主な国では、それぞれ候補処分地層を決め大規模な原位置試験を開始している。

原研においては、昭和53年度宮城県細倉鉱山の変朽安山岩地層で岩盤特性への熱影響を調べる実験を実施した。その結果、ほぼ均質な岩盤中での熱の伝達は熱伝導が主たるもので、コアーサンプルの物性値から岩盤中の温度分布を推定できることを明らかにした⁽¹⁻¹⁾。

昭和55～57年度にわたって明延鉱山の玄武岩質輝緑凝灰岩中で次の項目について実験した⁽¹⁻²⁾。

① 岩盤加熱試験

ほぼ均質な岩盤中では、前実験と同様、温度分布は熱伝導計算結果と良く一致することを確認した。しかし亀裂の存在している岩盤中においては、温度分布は熱伝導のみでは説明できず、地下水の熱伝達に及ぼす影響が大きい事を明らかにした。また、亀裂分布は、岩盤加熱中局部的に増すが、冷却後元に復帰することがわかった。

② 元素移行実験

坑道周辺の緩み領域の亀裂内に I^- , Cs^+ , Sr^{2+} , Ba^{2+} , ZrO_2^{2+} イオンの希釈溶液を流し、流出液中の濃度から分配係数の小さい順に流出すること、一旦吸着したらほとんど溶出しないことを確認した。

③ 緩衝材充填実験

緩衝材（ベントナイト）を通して岩盤への熱伝導、加熱による水分変化及び亀裂からの地下水の浸透状態（2年間）を調べた。乾いたベントナイトには比較的早く水が浸透することがわかった。

④ 材料浸漬実験

コールド模擬ガラス固化体を岩盤内の地下水に1年間浸漬し表面状態を調べ、蒸留水中に浸漬したものより浸出が少ないことを確認した。また応力を掛けたステンレス鋼を浸漬し、応力腐食割れの有無を調べた。各3ヶずつの試料を使ったが割れを生じたものはなかった。

金属鉱山の坑道を使う場合は操業上の制約を受けること、地層が複雑であること等の欠点があ

る。処分候補地が決っていないこと、原研の使命が安全性研究にあることを考えると、単純な地層で評価要因に絞った実験を行いできるだけ普遍的な現象を把握することが重要であると考え、昭和58年度からは花崗岩地層で実験することにした。

また予算上の制約があるので、熱的影響試験等は崖からの横坑内で実施することにし、深地層中の地下水に関連する試験はボーリング孔を使うことにした。本報は昭和58年及び59年度に実施した花崗岩中での試験の内容をまとめたものである。

本報告書は原研の計画に基づき㈱間組を始めとする㈱大林組、㈱熊谷組、三井建設㈱、鹿島建設㈱、清水建設㈱、大成建設㈱、㈱竹中工務店、戸田建設㈱およびフジタ工業㈱の10社に実験を委託し、その結果を検討しまとめたものである。

2. 試験場概要

2.1 試験場周辺の地形および地質

試験場は国内でも有数の花崗岩採石場の中にあり、周囲は低い山地に囲まれている。試験場一帯には、正長石、斜長石、石英、黒雲母を主成分とする粗粒黒雲母花崗岩が広く分布する。また、本花崗岩体の生成年代は約6000万年前、白亜紀から古第三紀にかけた時期であるとされている⁽²⁻¹⁾。

試験場周辺の地形図を図2.1に示す。試験場付近の地表は数mの風化土に覆われている。また、坑口付近の露出壁面にはENE-W SW走向で、高角度傾斜($80^{\circ} \sim 90^{\circ}$)の亀裂およびシーティングに起因すると思われるほぼ水平($\pm 10^{\circ}$)な亀裂が卓越しているのが観察できる。

2.2 試験室

試験室の位置および形状を図2.2、2.3に示す。掘削方法は、周辺岩盤のゆるみを小さくするためSB発破(Smooth Blasting)を採用した。試験室内は、一部のロックボルトや金網補強部分をのぞき、試験実施の妨げとならないように原則として無支保で岩盤面は露出状態とした。また、外界温度の影響をできるだけ少なくするように、あらゆる方向の自由面より40m以上の距離に試験室が位置するようにした。

試験室内の壁面および天盤の亀裂スケッチを図2.4に、シュミットネット投影図を図2.5に示す。NEN-SWS走向で中角度傾斜の亀裂、ENE-W SW走向の高角度の亀裂および水平な亀裂が卓越しており、この傾向は坑口付近の露出壁面観察結果とほぼ一致している。また、亀裂は概ね密着しているが、連続性のよい亀裂や卓越方向の亀裂には幅1mm程度の白色鉱物を伴う場合が多く、その一部は黄褐色に変色したり、モンモリロナイトやフッ石などの風化生成物を伴っている場合もある。

2.3 試験場岩石試料の室内試験

後節で述べる『健岩部加熱試験』のため実施したボーリングコアを用いて、物理試験、力学試験、熱特性試験、化学分析、X線分析を行なった。試験結果は、それぞれ3個ずつの供試体で行なった試験結果を平均したものである。

表2.1に示した物理試験結果、表2.2に示した力学試験結果については、一般的な花崗岩の特性と特に変わった傾向はみられない。

熱特性試験結果として、表2.3の熱伝導率測定結果、図2.6の温度～比熱関係図、図2.7の温度～熱膨張率関係図を示す。温度上昇に伴って比熱、熱膨張率は漸増し、20°Cと80°Cの2点だけではあるが熱伝導率は逆に小さくなっている。これらの傾向は、花崗岩の熱特性について

の過去の研究事例とも一致している⁽²⁻²⁾。

表2.4に化学分析結果について示す。併記した平均化学組成と顕著な違いはみられない。さらに、岩石薄片の観察とX線分析を行なった。試験場の花崗岩は主として石英、長石（カリ長石、斜長石）、黒雲母からなり、少量の角閃石を含んでいる。また、わずかに黒雲母の一部が緑泥石化しているが、概ね風化を受けていない新鮮な花崗岩である。

2.4 試験場周辺の地圧測定

室内試験と同様に、『健岩部加熱試験』のため実施したボーリングコアを用いて、AE法により、試験場周辺の3次元主応力分布の測定を行なった。AE（Acoustic Emission）法とは、固体が塑性変形または破壊するときに蓄積されていた歪みエネルギーが開放されて弾性波が生じる現象を利用したもので、過去にある荷重を経験した材料を再度載荷すると、前に加えられた応力に達するまではほとんどAEが発生しないカイザー効果を応用したものである。⁽²⁻³⁾

基準座標系を図2.8、平面内応力分布図を図2.9、X-Y-Z座標の応力成分を表2.5に示す。この中で、鉛直方向の応力 $\sigma_z = 11.5 \text{ kg/cm}^2$ は、40 mの土被りと、自然状態での単位体積重量（2.64 g/cm³）から予想される応力 10.56 kg/cm²よりやや大きいものの、ほぼ一致した値になっている。

次に、表2.6に示した3次元主応力分布の測定結果と地形との関係を示したのが図2.10である。地形断面と最大主応力の関係をみると、Y-Z平面ではほぼ地形と一致しているが、Z-X平面では地形との対応がはっきりしていない。また、図2.9に示したとおりX-Y面内の応力はほぼ一様で、 σ_z よりかなり大きな値となっている。

これらのことと総合すると、最大主応力を示している方向、つまり試験室からみて西北方向に過去に山頂なり大きな山塊なりがあって、その当時の応力履歴が現在までも残っていると考えられる。

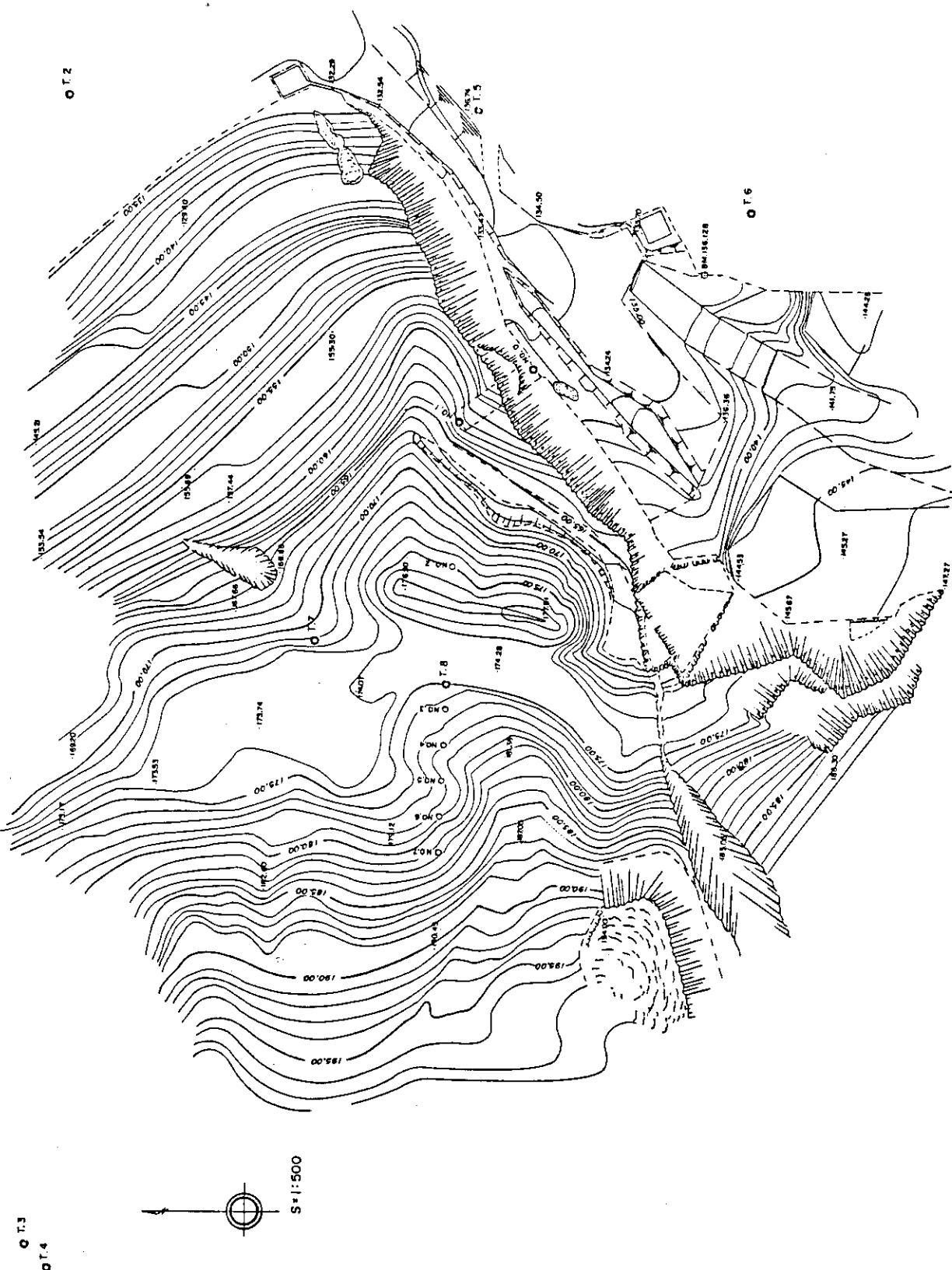


図2.1 試験場周辺地形図

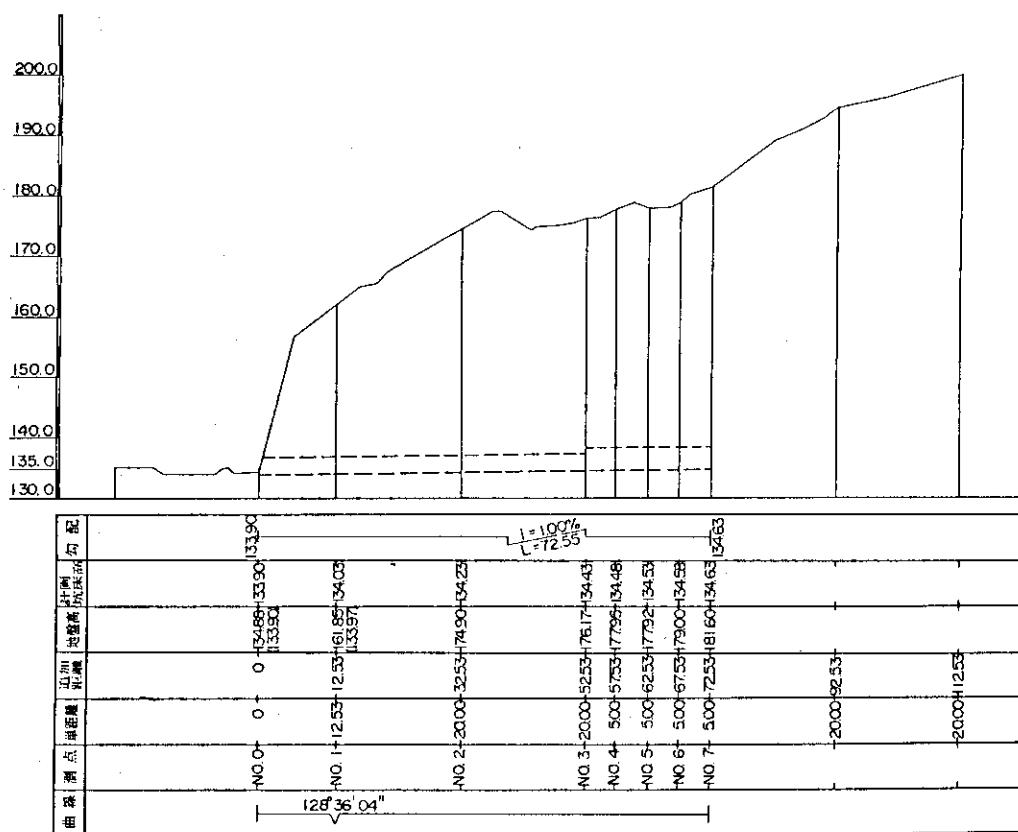
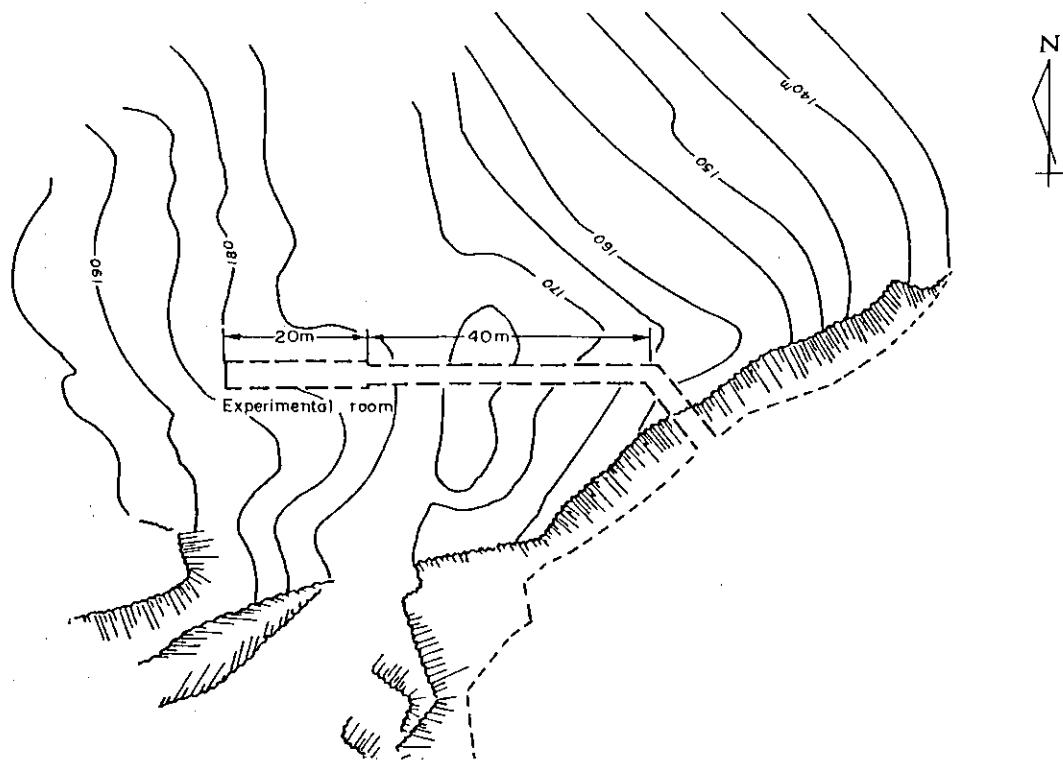


図 2.2 進入路・試験室の平面図および縦断面図

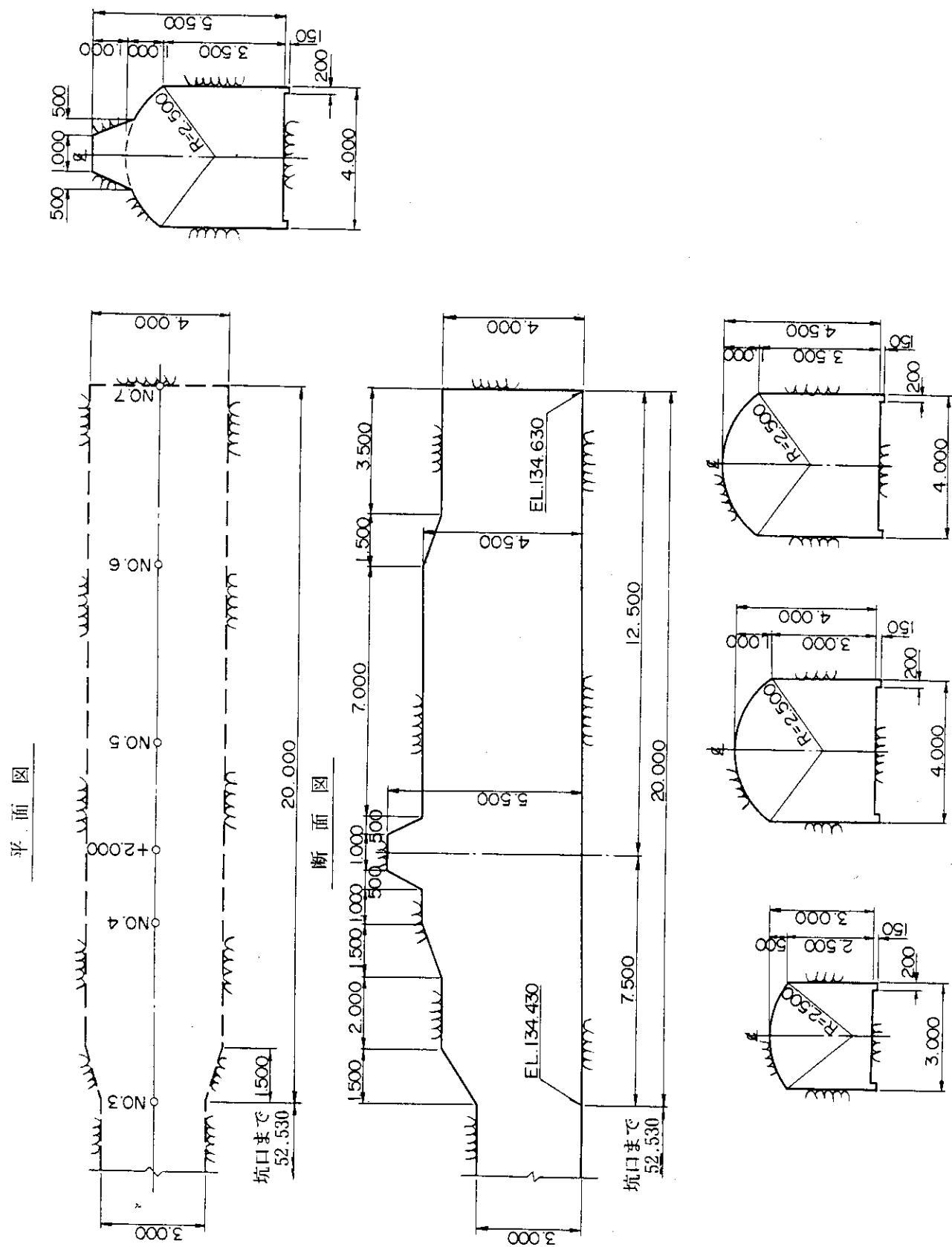
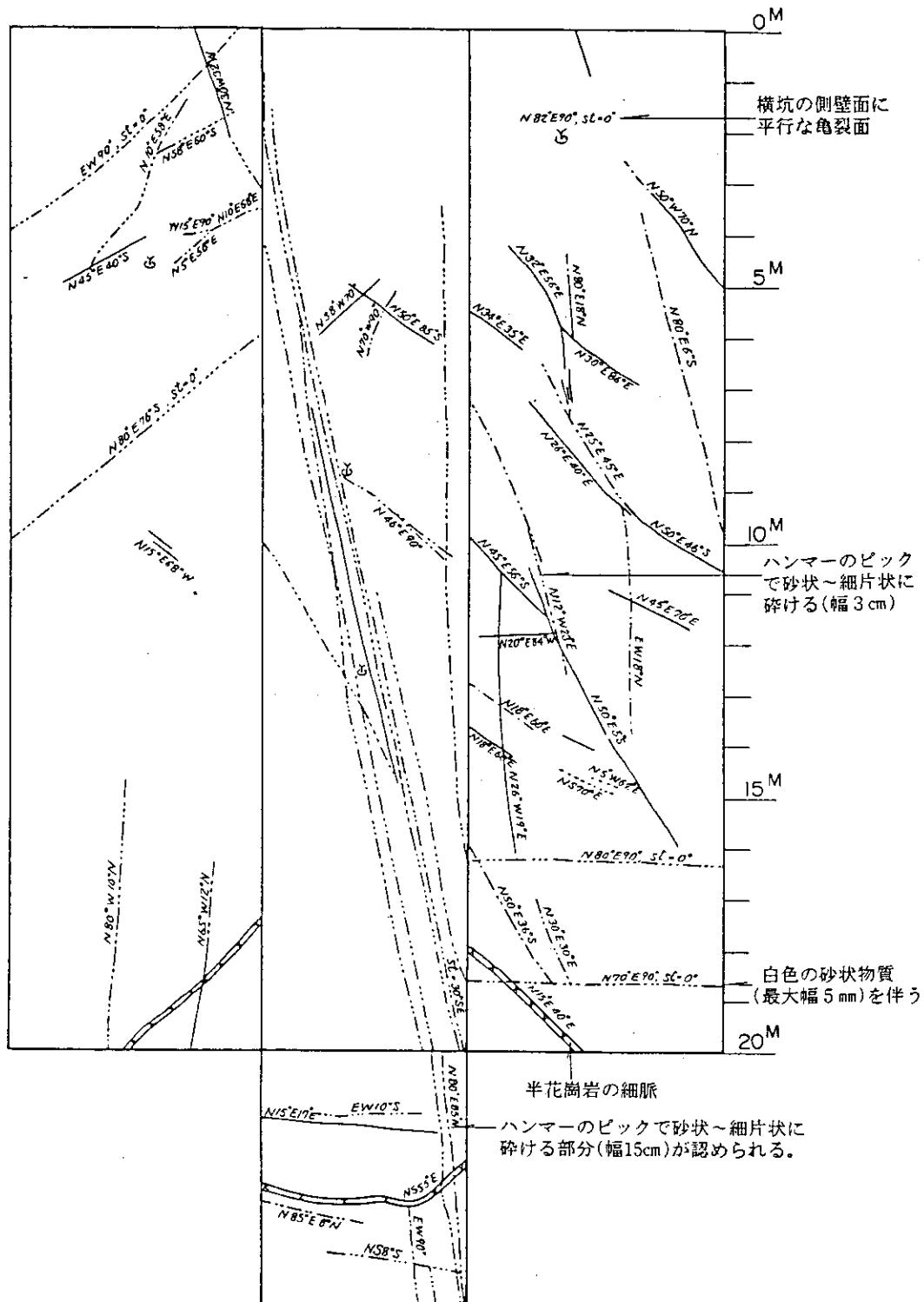


図2.3 進入路・試験室の断面図



凡 例

- 亀裂面が新鲜であり、挟み物質を伴なわない。
- - - - 亀裂面に沿って風化生成物(雲母を主体としたシルト状物質であり、幅は2~3mm程度)が付着。
- — — 亀裂面が黄褐色に変色。
- — — — 亀裂面に沿って白色鉱物(幅1mm以下)が付着。
- — — — — 亀裂面が黄褐色に変色しており、面に沿って白色鉱物が付着。

○ 湧水箇所

図2.4 試験室内の亀裂スケッチ

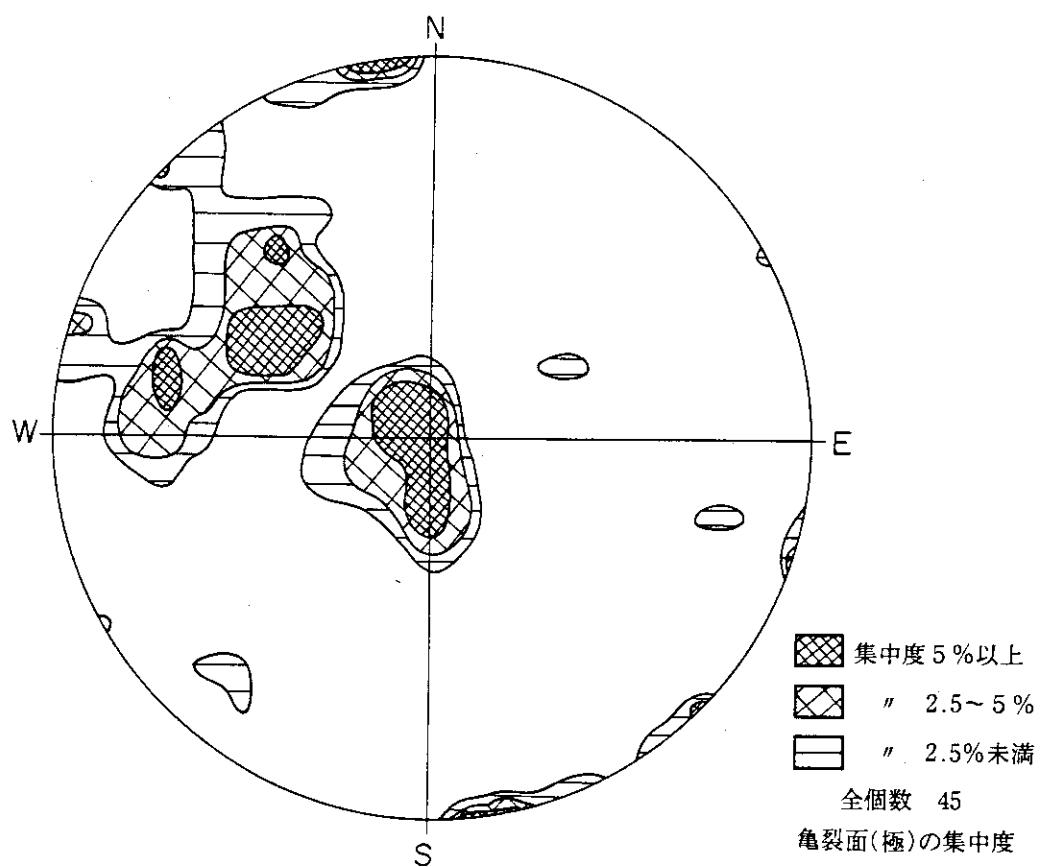
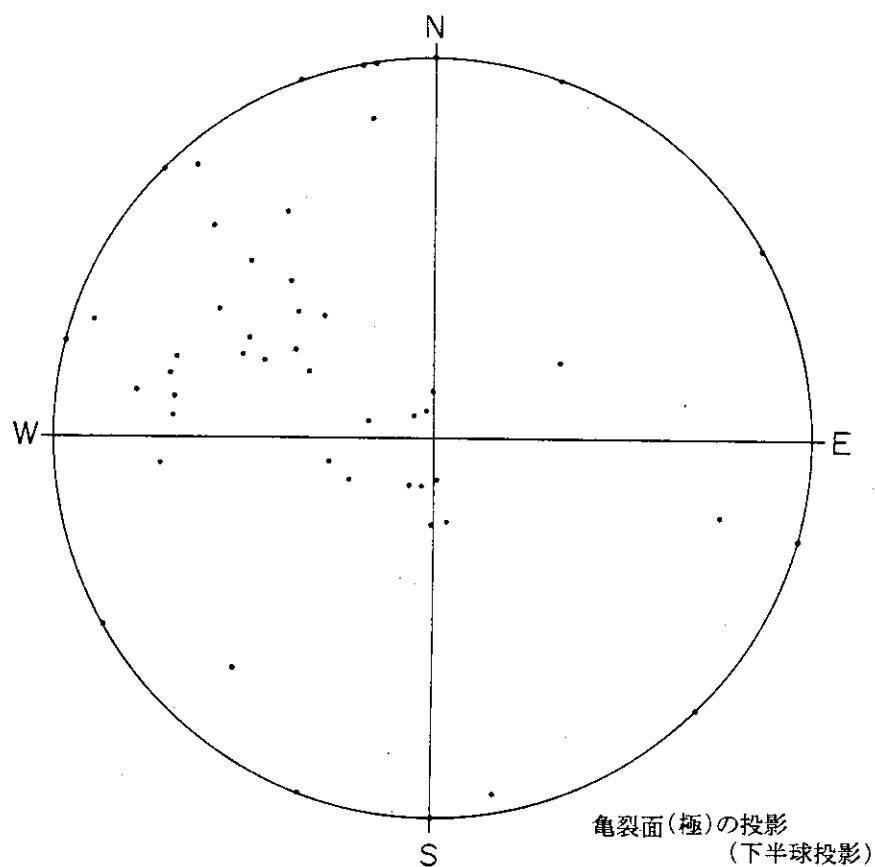


図 2.5 試験室内亀裂のシュミットネット投影

表2.1 物理試験結果

項目	供試体		平均
	自然状態	乾燥状態	
密度 (g/cm^3)	2.64	2.63	2.64
含水比(自然状態)(%)	0.27	0.27	0.27
飽和度(")(%)	76.1	76.1	76.1
有効間隙率(%)	0.93	0.93	0.93
吸水率(%)	0.35	0.35	0.35

表2.2 力学試験結果

項目	供試体		平均
	自然状態	乾燥 "	
P波速度 (km/s)	4.83	3.41	4.83
S波速度 (km/s)	5.29	2.65	5.29
動ボアン比	2.07	2.07	2.07
一軸圧縮強度 (kgt/cm^2)	5.50	1.50 × 10 ³	5.50
静弾性係数 ($\times 10^5 \text{kgt/cm}^2$)	0.19	0.19	0.19
圧裂引張強度	85.1	85.1	85.1

(*1) 破壊時応力の半分の応力での応力～ひずみ曲線における接線勾配をとっている(E_{50})。

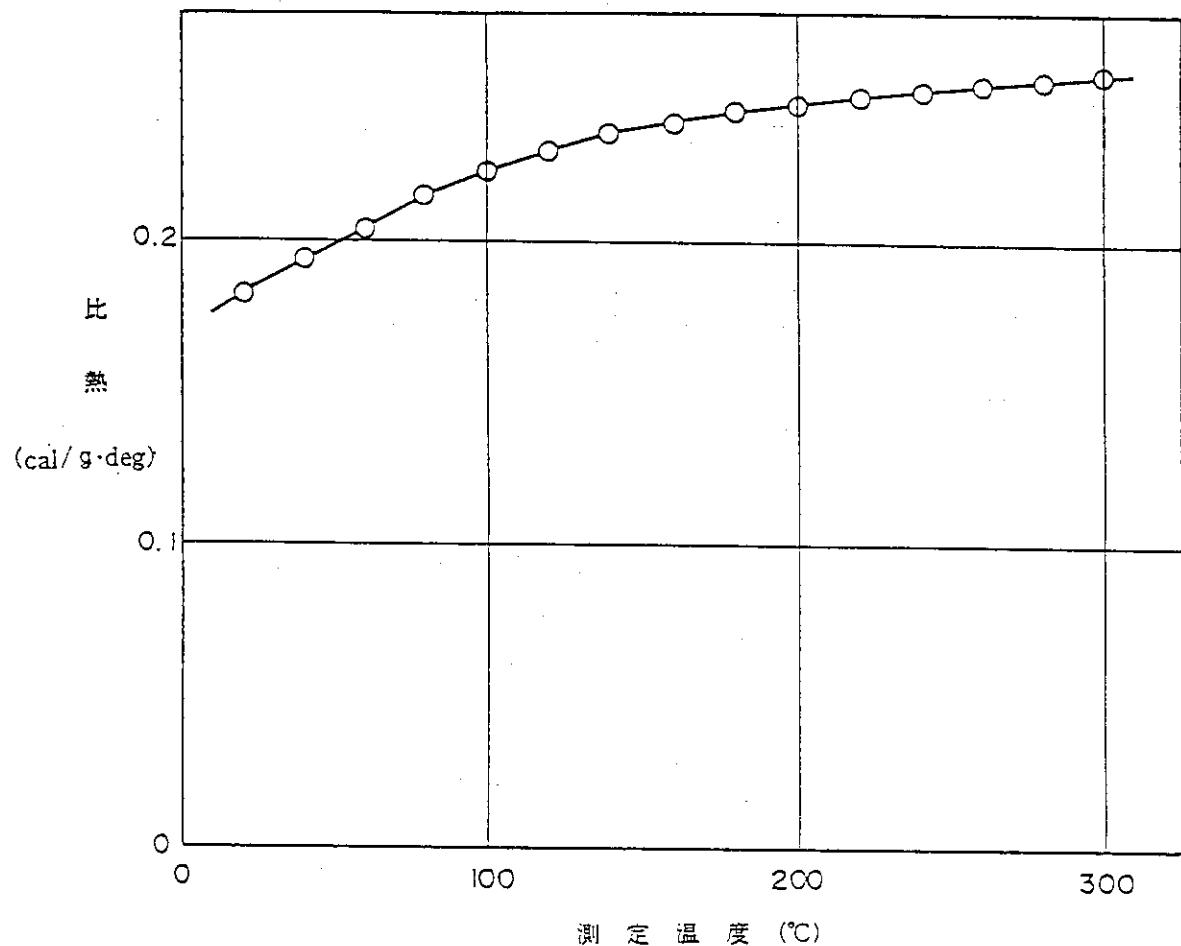


図 2.6 溫度～比熱関係図

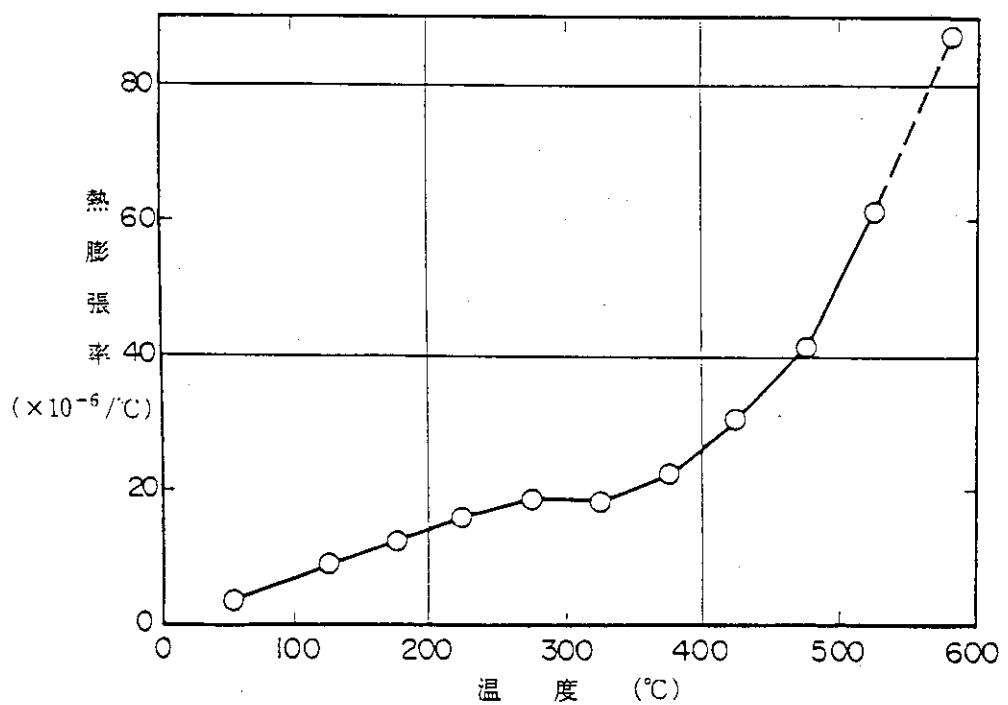


図 2.7 溫度～熱膨張率関係図

表2.3 热伝導率測定結果

測定温度 (°C)	測定状態	測 定 値					供試体等の 平 均 (kcal/m·hr·deg)	換 算 値 $\times 10^{-1}$ cal/m·s·deg	全 体 の 平 均		
		1	2.985	3.450	3.740	2.985	3.267	$\times 10^{-1}$ cal/m·s·deg	$\times 10^{-1}$ cal/m·s·deg	w/m·°C	
20	湿潤	1	2.985	3.450	3.740	2.985	3.267	3.286	9.128	9.177	4.4
		2	3.332	3.701	3.474	2.913	3.448	3.374	9.372		
		3	2.930	3.285	3.605	3.082	3.352	3.251	9.031		
80	湿潤	1	2.978	2.241	3.647	2.943	2.514	2.865	7.958	7.939	3.8
		2	2.645	3.724	3.089	2.154	2.792	2.885	8.008		
		3	3.066	2.184	3.717	2.675	2.490	2.826	7.850		

表2.4 化学分析結果一覧表

(wt, %)

岩石名 No	花 嵐 岩				花嵐岩の平均化学組成 (Nockolds, 1954)
	1	2	3	平均 値	
SiO ₂	72.37	71.78	71.56	71.90	72.08
TiO ₂	0.23	0.27	0.22	0.24	0.37
Al ₂ O ₃	14.58	14.66	14.75	14.66	13.86
Fe ₂ O ₃	0.11	0.14	0.11	0.12	0.86
FeO	1.96	2.25	2.11	2.11	1.67
MnO	0.03	0.04	0.04	0.04	0.06
MgO	0.20	0.22	0.23	0.22	0.52
CaO	1.95	2.09	2.13	2.06	1.33
Na ₂ O	3.36	3.47	3.46	3.43	3.08
K ₂ O	4.28	4.02	4.05	4.12	5.46
P ₂ O ₅	0.05	0.05	0.05	0.05	0.18
H ₂ O(+)	0.03	0.06	0.04	0.04	} 0.53
H ₂ O(-)	0.09	0.11	0.08	0.09	
Total	99.24	99.16	98.83	99.08	100

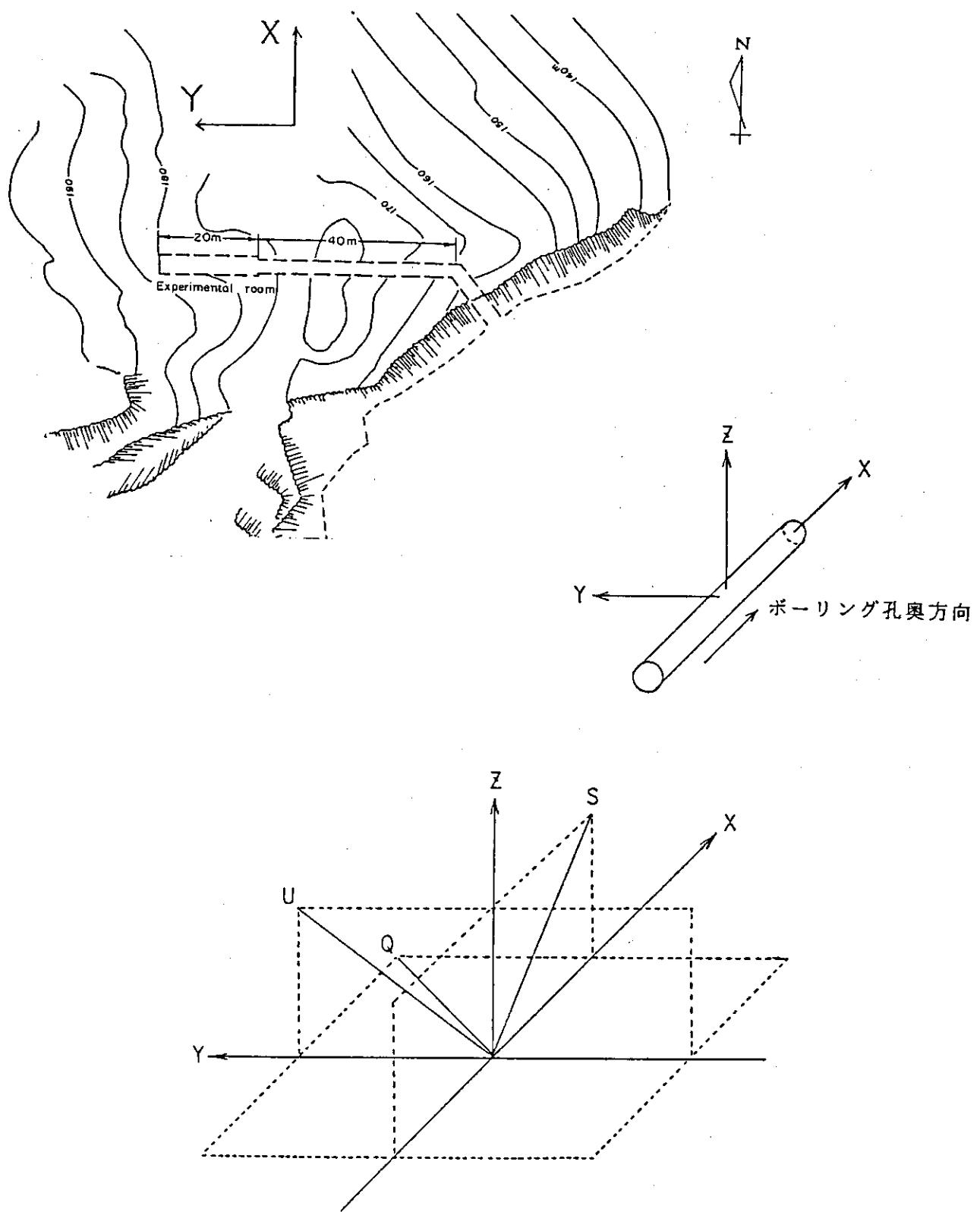
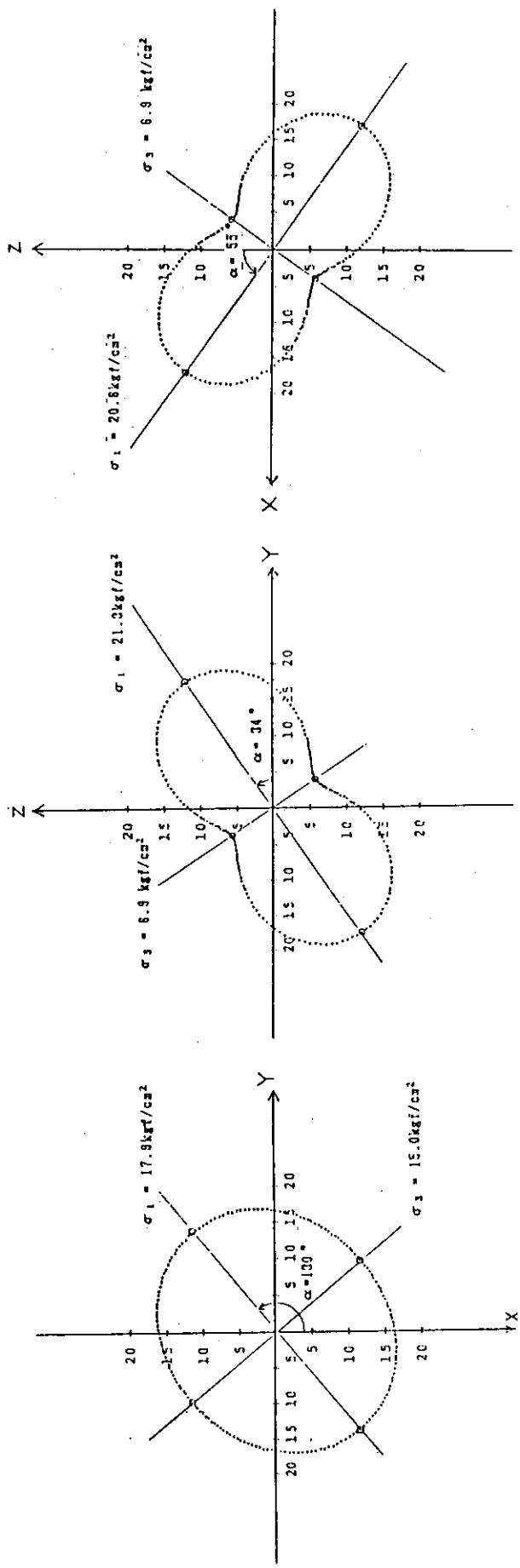


図2.8 基 準 座 標 系



X-Y 平面内応力分布図
Y-Z 平面内応力分布図
Z-X 平面内応力分布図

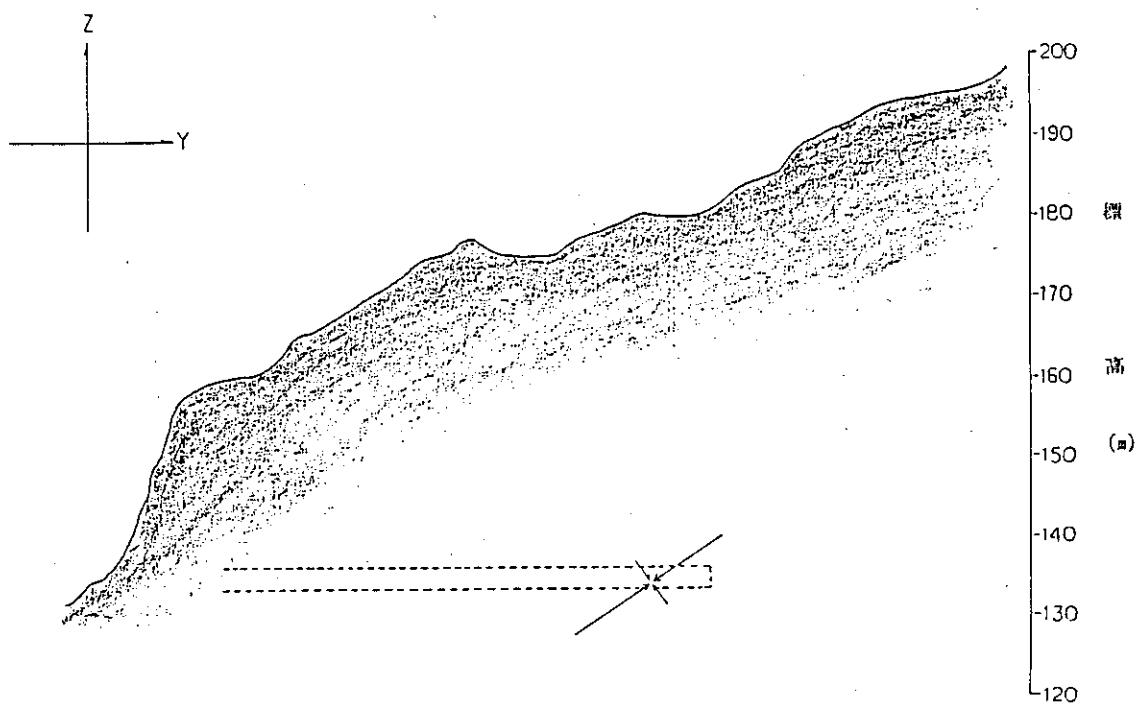
図 2.9 平面内応力分布図

表 2.5 X-Y-Z 座標の応力成分

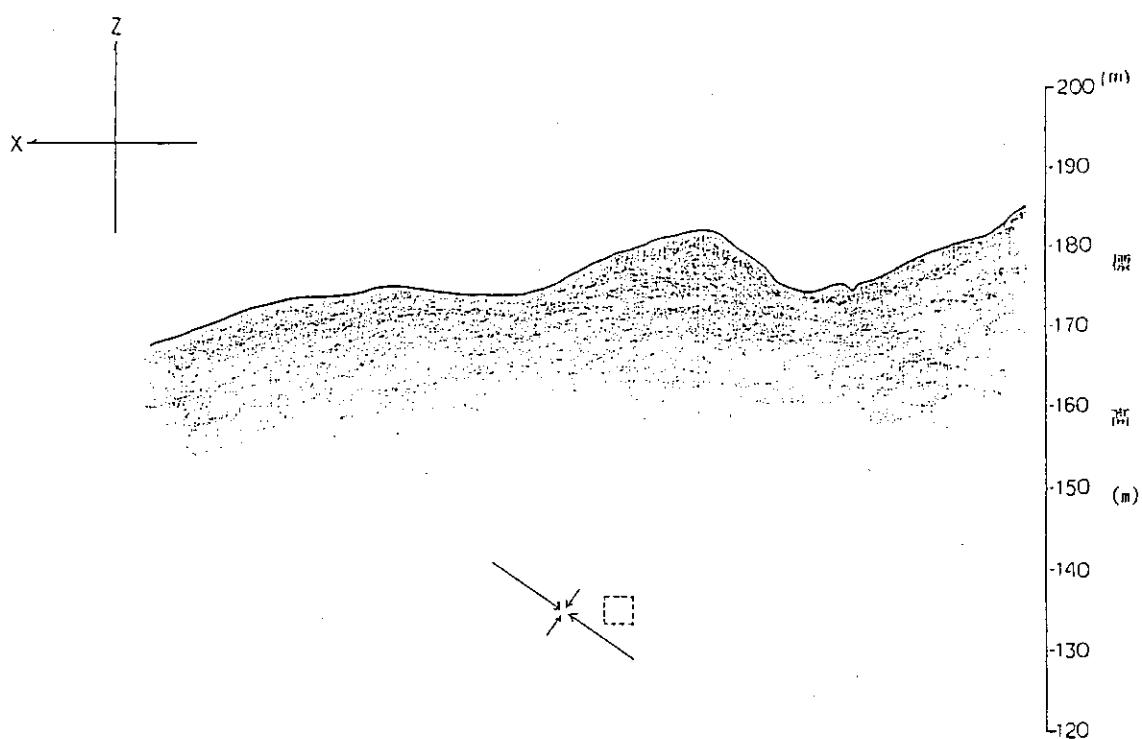
σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
16.2	16.7	11.5	-1.4	6.7	6.5

表 2.6 三次元主応力の方向と大きさ

主応力 (kgf/cm ²)	方 向 余 弦			X 軸からの 水平方向の 角度 ϕ	水平面から の角度 θ
	2	m	n		
$\sigma_1 = 23$	0.503	0.584	0.636	49	47
$\sigma_2 = 18$	0.735	-0.676	0.039	-43	2
$\sigma_3 = 4$	-0.453	-0.448	0.770	-135	52



Y-Z 平面での地形断面図



Z-X 平面での地形断面図

図 2.10 地形断面と最大主応力の関係

3. 岩盤加熱特性試験

3.1 健岩部加熱試験

花崗岩岩盤の熱特性についての評価は、亀裂の影響や周辺の境界条件の影響をも考慮して行なうことが重要であり、コアを用いた室内試験のような“岩石”の熱特性を“岩盤”にあてはめるだけでは不十分である。したがって、原位置での岩盤加熱特性試験により実際に自然界に存在する岩盤について調査することが必要である。本試験においては、亀裂や周辺の境界条件の影響をほとんど受けない岩盤の熱特性調査を目的に、亀裂のほとんどない健岩部岩盤中にヒーターを埋設、加熱し、岩盤温度分布、熱流量、熱歪み、透水性の変化、孔内亀裂の変化について調査した。また、これらの測定をとおして、今後の試験を進めるうえで重要な測定技術についての知見を得ることも目的の一つである。

3.1.1 試験方法

試験位置および配置を図3.1、3.2に示す。ヒーター孔を含む17の試験孔はすべてコアボーリングにより穿孔した。コア観察においてほとんど亀裂は観察されず、R Q Dもすべてのコアで100(%)であった。このことから、岩盤の試験対象領域はほぼ均一な健岩部であると推定される。

試験記録を表3.1に示す。岩盤中に存在する間隙水の岩盤熱特性におよぼす影響を評価する目的で、ヒーターの最近傍測点の温度が100°Cを越える出力と越えない出力での2段階出力を行なった。なお、表中にあるとおり加熱-Iを実施中に主ヒーター(L2孔)が故障したため、本試験(加熱-IIおよびIII)は副ヒーター(L3孔)を用いて行なった。また、加熱-IIIでは3.4kw出力で加熱を開始したが、40.5時間後にヒーター中心温度が、ヒーターの最高使用温度650°Cを上まわる739°Cまで上昇したため、出力を2.55kw、2.4kwと順次落として試験を継続した。加熱岩盤における透水性試験、孔内亀裂観察(ボアホールTV)の実施時も合わせて表中に示した。

図3.2中に示した各測点の番号と位置関係を表3.2に示す。岩盤内の測温点数は76点、熱流計は岩盤内1点と壁面2点の計3点を配置し、歪み測定には図3.3に示したように、アクティブゲージとダミーゲージの組合せによりゲージの温度影響補正を可能にした孔内壁歪み法を用いた。また、透水性試験としてルジオン試験、孔内観察方法として直接目視観察が可能なボアホールTVを採用した。

3.1.2 試験結果と考察

加熱-IIにおける測定結果として、図3.4にヒーター温度、図3.5にヒーターからの距離についての温度分布、図3.6に代表的測点における岩盤内温度の経時変化実測値と汎用解析プログラム“M A R C”による計算値を示す。M A R Cによる解析条件およびメッシュ図は図3.7に示す

とおりで、物性値は基本的に室内試験値を用い、データのない熱伝達率は静止した気体と固体の間の一般値を用いた⁽³⁻¹⁾。

岩盤内の温度はスムースと上昇を示しており、また、ヒーターの左右で対称のようにみえる。しかし、図3.5を厳密にみると、初期温度分布、加熱中の温度分布ともに対称ではなく、右側の方がやや低くなっている。この原因として考えられることに、岩盤中の亀裂・地下水の影響、地表・トンネル壁面などの自由面の影響などがあげられる。しかし、十分に自由面からの距離をとっていることや、後述する岩盤表面熱流計が特に熱流の出入りを記録していないことから、対象岩盤周囲の亀裂分布の不均一性やそこに流れる地下水の影響が考えられる。

また図3.6における実測値と計算値を比較してみると、ヒーターから遠い位置の測点においては全体に計算値の方が低めの値を示しているものの、この種の解析としてはかなりの一一致がみられる。したがって、本試験系においては室内試験から得られた物性値を用いて解析することが可能であったと言える。

次に、加熱-Ⅲにおける試験結果として図3.8にヒーター温度、図3.9に代表的測点における岩盤内温度の経時変化を示す。出力を下げる前に100°Cを越えた2測点(S8-3とS13-3)について温度と温度上昇率の関係を示したのが図3.10である。いずれも102~103°Cの付近で温度上昇率が低下している。これは測温点付近の間隙水が沸騰することによる気化熱の損失があったためと考えられる。しかし、それはかなり短時間で終了しており、水分量はかなり少量であったと考えられる。

加熱-Ⅲにおける岩盤内に設置した熱流計(F1)と壁面に設置した熱流計(F2)の測定結果を図3.11~3.13に示す。壁面に設置したF2では、昼夜の試験室温度変化や作業のためのアイランプなどの影響のみを観測しており、ヒーター加熱の影響は岩盤表面まで達していない。この傾向はF3でも同じであった。また、岩盤内に設置した熱流計F1はヒーター加熱による熱負荷の変動を岩盤温度より早く敏感に反応しており、モニターとして有効であることがわかる。同様の現象は、加熱-I, IIでも観察された。

加熱による温度場が定常状態に達していると仮定すると、熱流量観測値と温度測定値から(1)式により熱伝導率の算出は可能である。ここで、岩盤内に設置した熱流計F1は主ヒーター(L2孔)の方向を向いているため、加熱-Ⅱ, Ⅲにおける観測値(q_m)は副ヒーター(L3孔)の方向に対する傾き($\theta = 61.32$ 度)による補正が必要である。また、熱源、測温点1および2は一直線上にあることが望ましいが、ここではヒーターを中心とする軸対称温度場を形成していると仮定して計算した。

$$q = \frac{q_m}{\cos \theta} = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{L} \quad (1)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

$$L = L_2 - L_1$$

q ; 換算熱流量

q_m ; 実測熱流量

λ ; 热伝導率

T_1 ; 測温点 1 における温度（測温点の温度）

T_2 ; 測温点 2 における温度（熱流計設置位置の温度）

L_1 ; 热源から測温点 1 までの距離（測温点～ヒーター間距離）

L_2 ; 热源から測温点 2 までの距離（熱流計～ヒーター間距離；0.74 m）

最も定常状態に近い場合として、ヒーター OFF 時点（加熱-IIにおける 550 時間、加熱-IIIにおける 1114 時間）の深度 6.5 m におけるデータを用いて計算した熱伝導率を図 3.14 に示す。横軸には測温点からヒーターまでの距離 (L_1) をとっている。測温点の位置がヒーターから離れるに従って熱伝導率計算値は次第に大きくなっている。これは熱伝導率の温度依存性のみでは説明できない差であり、温度場がまだ定常に達していないためと考えられる。つまり、温度勾配 ($\Delta T / L$) がヒーター近傍では定常状態に比べて大きく、逆に遠い位置では小さくなっているためと考えられる。しかし、オーダー的には室内試験値とほぼ一致した値が得られており、定常状態に達していれば直接的な熱伝導率測定方法として有望と考えられる。

次に、岩盤の歪み測定結果として加熱-IIにおけるアクティブ、ダミー両ゲージの経時変化を図 3.15、3.16 に示す。また、深度 6.4 m のアクティブゲージで測定された歪みより、各ゲージと同方向のダミーゲージの歪みをひいた値から求めた熱応力成分の変化を図 3.18 に示す。なお、計算において岩盤物性値（弾性係数 $E = 5.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.19$ ）は室内試験から得られた値を用いた。図 3.15 によれば、A(1)、C(1)のみ圧縮側、他は引張側の歪みを示している。これは加熱にともない L4 孔壁面に応力集中が生じたためと考えられる。つまり、図 3.3 にあるとおり A(1) は孔軸に対して直角方向、C(1) は 45 度方向の伸縮を測定している。したがって、加熱中に孔壁が膨張することにより孔径が縮んだため A(1)、C(1) は圧縮側の歪みを示したと考えられる。図 3.16 より 2 組のダミーゲージ測定値にばらつきがみられる。これは試験場花崗岩の結晶粒径が 0.5 ~ 5 mm 程度であるのに対してゲージ長 5 mm が十分な長さではなく、各鉱物の熱膨張率の差異の影響がそのまま影響しているためと考えられる。今後、このような結晶質岩における同様の試験を行なう際の注意すべき点の一つであり、今回のように複数ゲージの平均値をとるなどの補正が必要であろう。図 3.18 によると、 σ_x が引張、 σ_y が圧縮を示している。また、各応力値が加熱終了後も加熱中と同様の傾向で変化し続けている。これらの現象は熱応力の影響のみで説明することは不可能であり、穿孔による応力状態の変化、クリープの影響などについても考慮する必要性があると考えられる。以上の試験結果より、岩盤の熱歪み - 応力についての定量的評価を行なうためには、器材の耐熱性、温度補正の方法など改良していく必要があり、熱歪み以外の歪み要因の評価なども必要と考えられる。

亀裂の発生などを調査する目的で行なったルジオン試験では、加熱前、中、後のいずれにおいてもルジオン値は 0 であった。また、同様にボアホール TV による孔内観察においても亀裂は認められなかった。このことから、今回の試験で対象としたような健全な岩盤においては、L1、L2 孔で記録したような温度 35 °C 前後では全く亀裂発生などの影響を受けなかったと言える。

以上のことから、亀裂のほとんどない岩盤で、外部からの熱影響がほとんどない今回の試験対象岩盤のような場合、温度場に関する解析は室内試験から得られた熱特性値によりかなりの精度で予測が可能である。しかし測定手法に関する限り、温度測定は比較的容易であるのに対し、熱流量、熱歪みについては定性的な評価はほぼ可能ではあるが、定量的な評価については改善を要する。

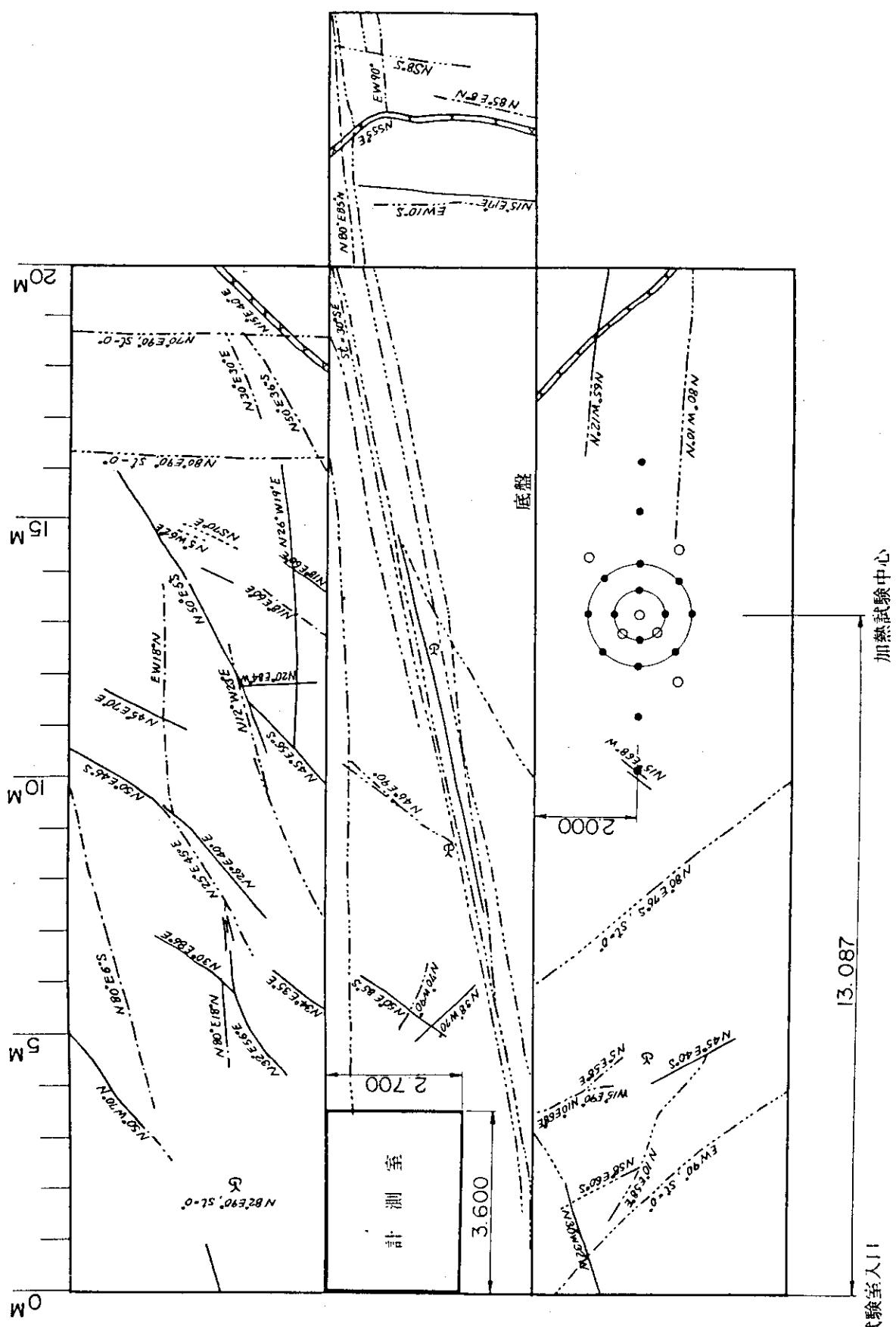


図3.1 健岩部加熱試験位置図

試驗室入門

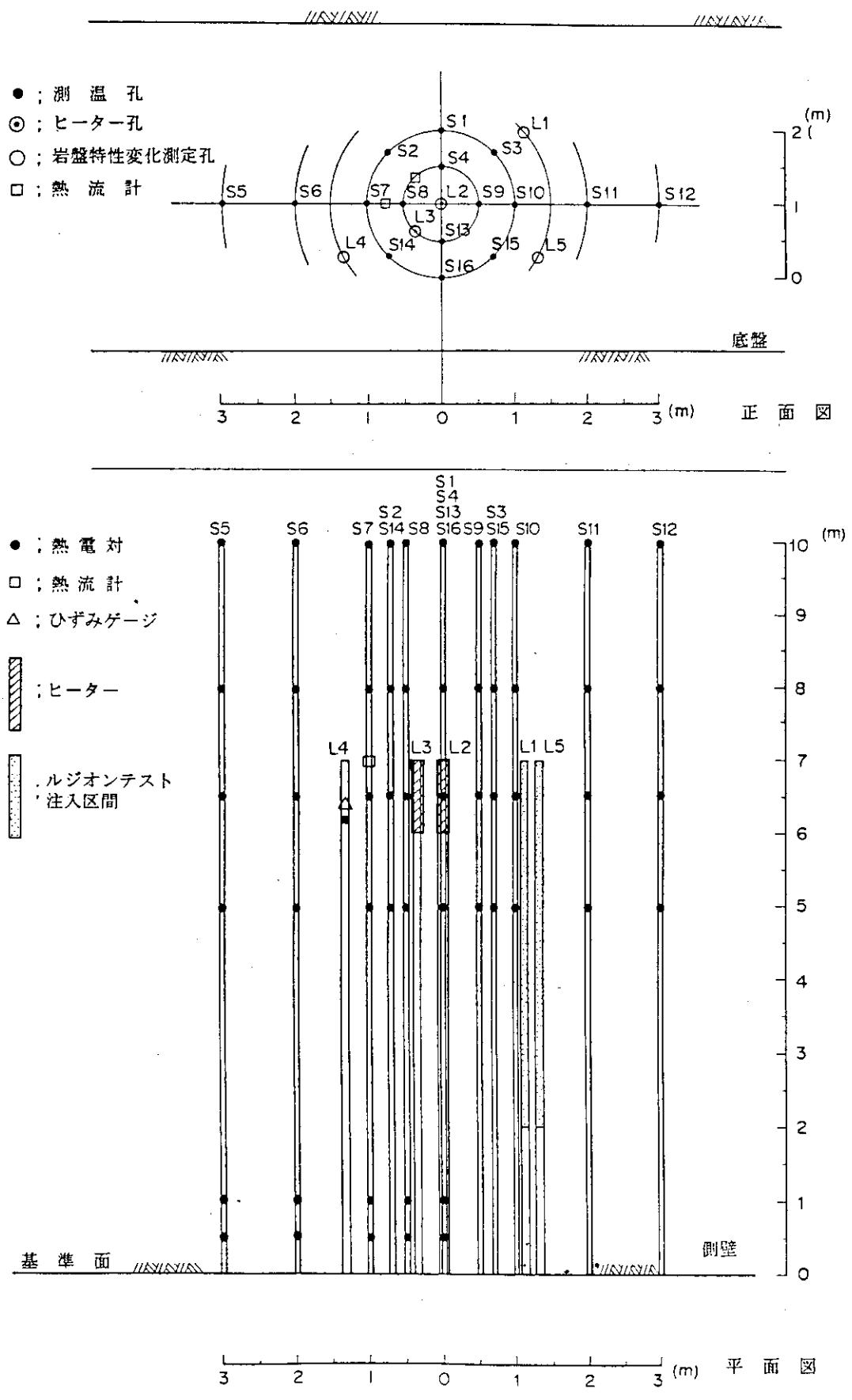


図3.2 試験孔配置図

表 3.1 試驗記錄

通 线 自 动 计 测

加 热 I		加 热 II		加 热 III			
1	2	3	4	5	6	7	8
1.31	5.59	3.17	4.00	3.17	4.00	4.3	4.8
-2.28, 8	-3.2	-3.15	14:00	1.7 Kw on	(L 23L)	1.7 Kw off (乙-丙-故障)	1.7 Kw on (乙-丙-故障)
64.6 Kw·h	16.9 Kw·h	9.35 Kw·h		5.17	00:00	5.18 07:15 *停電1分 5.18 12:35 K2—X断 55分	5.18 07:15 *停電1分 5.18 12:35 K2—X断 55分
				5.1	14:00	1.7 Kw off	3.4 Kw on (L 37L)
				5.17	00:00	5.18 07:15 *停電1分 5.18 12:35 K2—X断 55分	5.19 22:00 5.20 22:00 5.21 00:00 5.22 00:00 2.4 Kw off
				5.18	16:30	5.19 22:00 5.20 22:00 5.21 00:00 5.22 00:00 2.4 Kw off	5.18 16:30 17:00 17:35
				6.27	10:00	6.27, 30 7.2	7.2, 10:00 *停電1分 S工事 電力会社 大修
				7.27	28		

表3.2 試験孔および計測機器一覧表

試験孔	孔 径 (mm)	孔 長 (m)	熱電対番号と深度					ヒーター、埋設計器類			L3孔との 距離(m)	L2孔との 距離(m)
			0.5m	1.0m	5.0m	6.5m	8.0m	10.0m				
S 1	4 6	1 0.0	S 1 - 6	S 1 - 5	S 1 - 4	S 1 - 3	S 1 - 2	S 1 - 1			1.3 8	1.0
S 2	"	"			S 2 - 4	S 2 - 3	S 2 - 2	S 2 - 1			1.1 2	1.0
S 3	"	"			S 3 - 4	S 3 - 3	S 3 - 2	S 3 - 1			1.5	1.0
S 4	"	"	S 4 - 6	S 4 - 5	S 4 - 4	S 4 - 3	S 4 - 2	S 4 - 1			0.9 2	0.5
S 5	"	"	S 5 - 6	S 5 - 5	S 5 - 4	S 5 - 3	S 5 - 2	S 5 - 1			2.6 7	3.0
S 6	"	"	S 6 - 6	S 6 - 5	S 6 - 4	S 6 - 3	S 6 - 2	S 6 - 1			1.6 8	2.0
S 7	"	"	S 7 - 6	S 7 - 5	S 7 - 4	S 7 - 3	S 7 - 2	S 7 - 1	深度 7 m 热流計 F 1		0.7 4	1.0
S 8	"	"	S 8 - 6	S 8 - 5	S 8 - 4	S 8 - 3	S 8 - 2	S 8 - 1			0.3 8	0.5
S 9	"	"			S 9 - 4	S 9 - 3	S 9 - 2	S 9 - 1			0.9 2	0.5
S 10	"	"			S 10 - 4	S 10 - 3	S 10 - 2	S 10 - 1			1.3 8	1.0
S 11	"	"			S 11 - 4	S 11 - 3	S 11 - 2	S 11 - 1			2.3 8	2.0
S 12	"	"			S 12 - 4	S 12 - 3	S 12 - 2	S 12 - 1			3.3 7	3.0
S 13	"	"			S 13 - 4	S 13 - 3	S 13 - 2	S 13 - 1			0.3 8	0.5
S 14	"	"			S 14 - 4	S 14 - 3	S 14 - 2	S 14 - 1			0.5	1.0
S 15	"	"			S 15 - 4	S 15 - 3	S 15 - 2	S 15 - 1			1.1 2	1.0
S 16	"	"			S 16 - 4	S 16 - 3	S 16 - 2	S 16 - 1			0.7 4	1.0
L 1	6 6	7.0							深度 2 m~7 m 加熱前・中・後 ルジオントレスト、ボアホールテレビ	全長 加熱前 中	2.0	1.5
L 2	"	"							深度 6 m~7 m 主ヒーター		0.5	—
L 3	"	"							深度 6 m~7 m 副ヒーター		—	0.5
L 4	"	"	深度 6.2 1 m ひずみ測定位置 温度 LT 4						深度 6.2 m~6.5 m オブザーバークティブミキサー	18ch 全長 ボアホールテレビ	1.0 3	1.5
L 5	"	"							深度 2 m~7 m 加熱前 中・後 ルジオントレスト、ボアホールテレビ	全長 加熱前 中	1.7 1	1.5

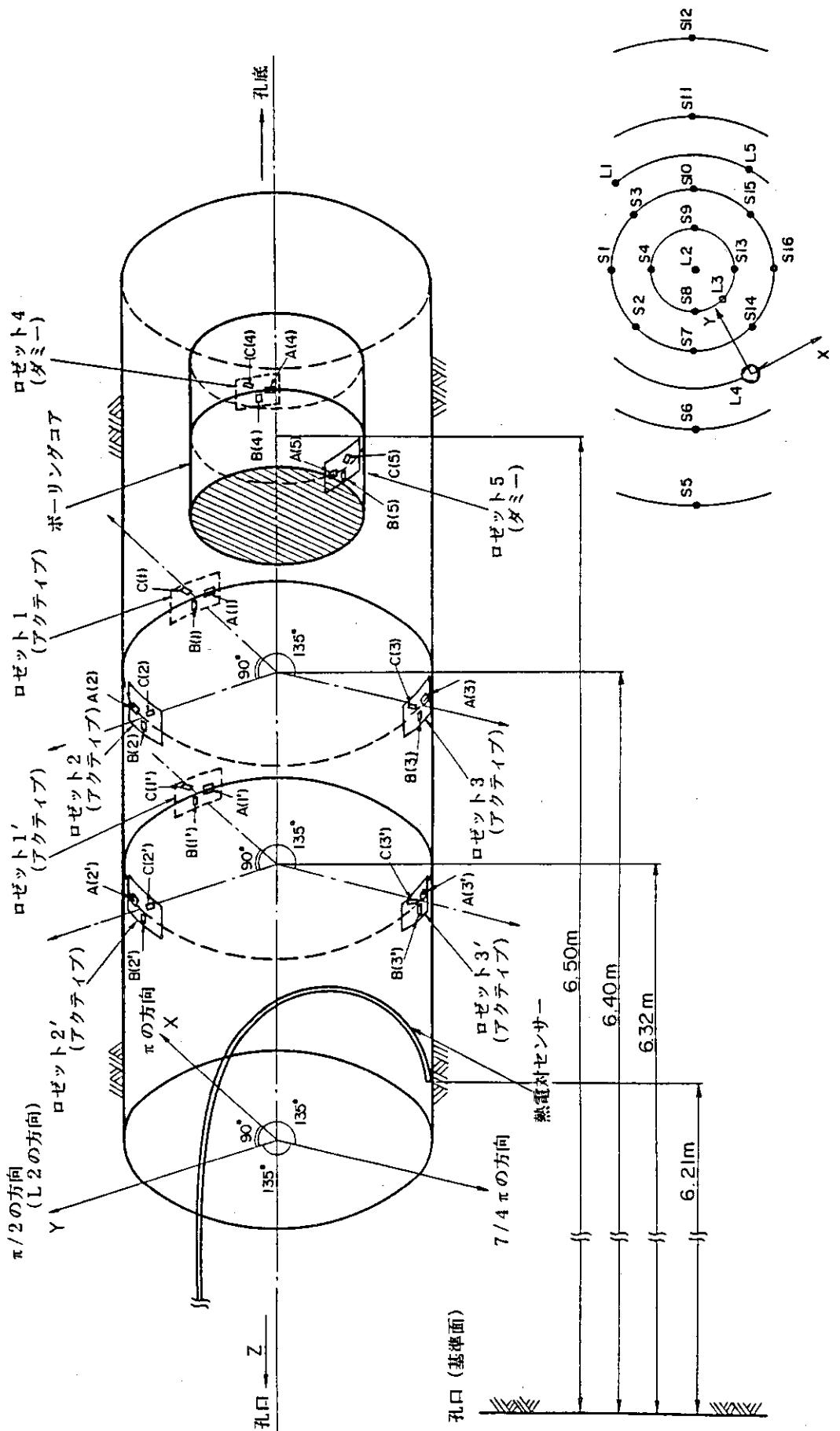


図 3.3 歪みゲー ジ配置図

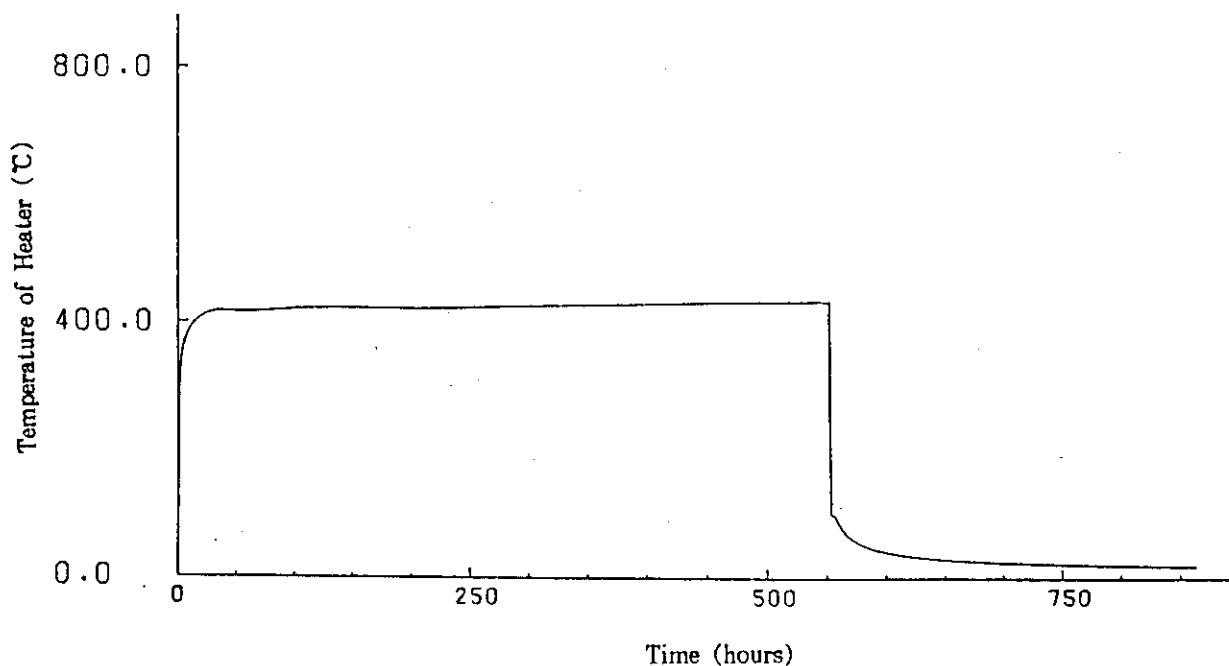


図 3.4 ヒーター温度(加熱-II)

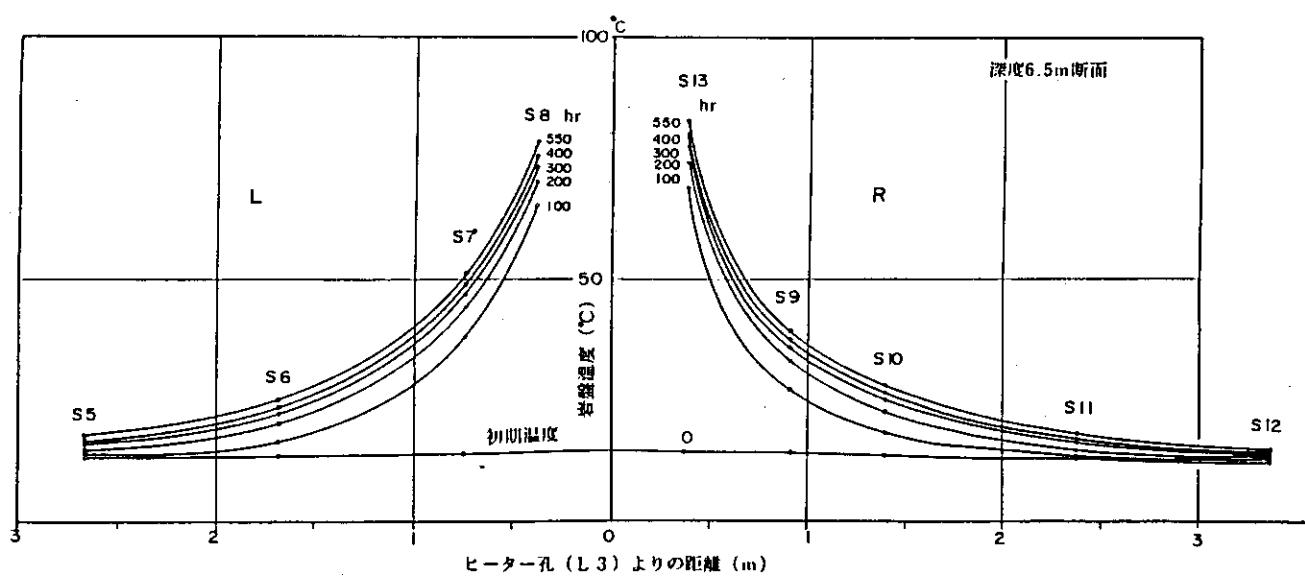


図 3.5 岩盤内温度分布図(加熱-II)

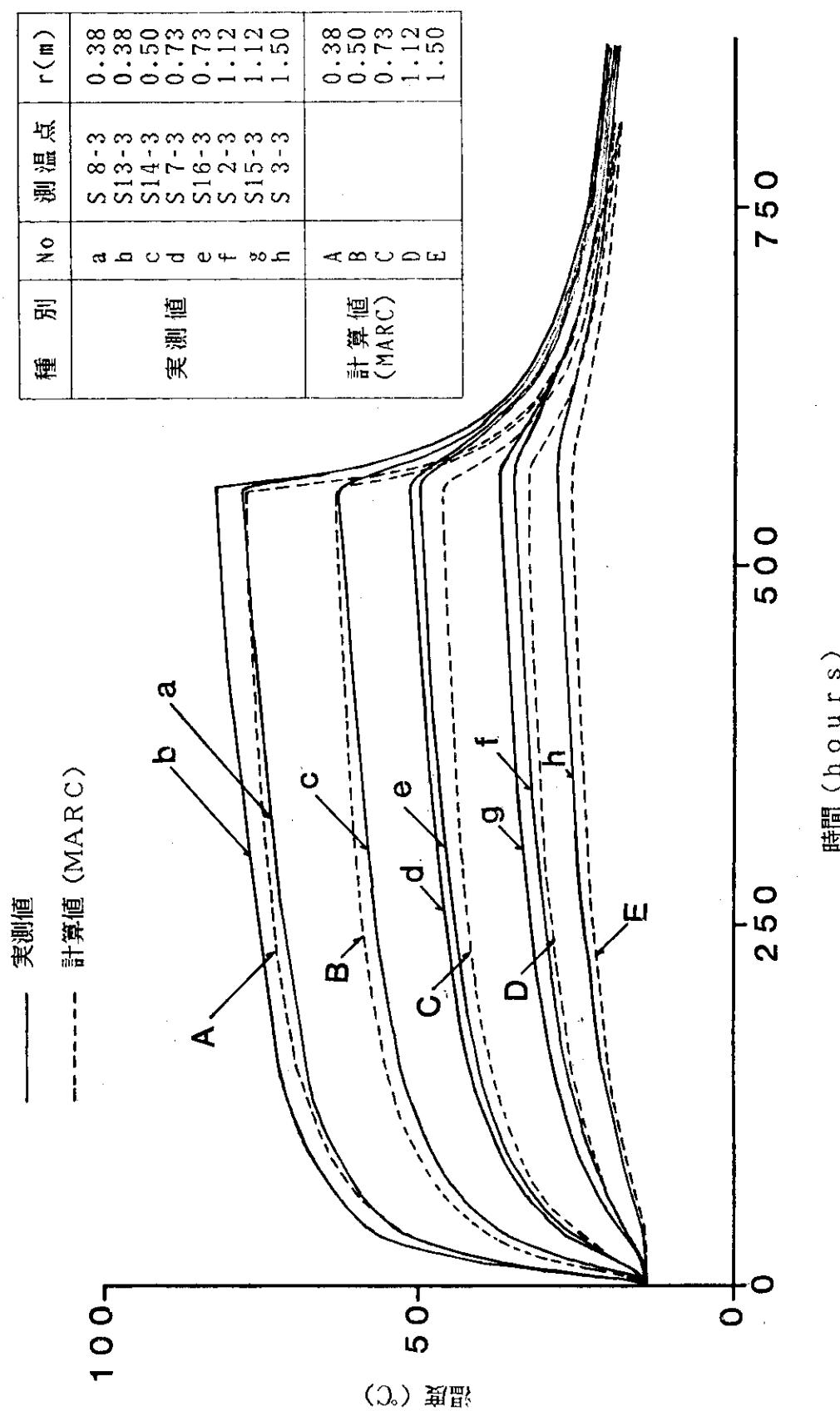


図3.6 代表的な測点の実測温度変化と計算値の比較(加熱-II)

《解析に用いた物性値》

熱伝導率 ; 9.177×10^{-1} (cal/m² · s · °C)
 比 熱 ; 1.83×10^2 (cal/kg · °C)
 密 度 ; 2.64×10^3 (kg/m³)
 热伝達率 ; 2.78 (cal/m² · s · °C)
 気 温 ; 10 (°C)

20°C室内試験値
 20°C室内試験値
 20°C室内試験値
 文献引用値

《解析条件》

A D ; 热伝達境界
 A B , C D ; 断熱境界
 B C ; 一定温度境界

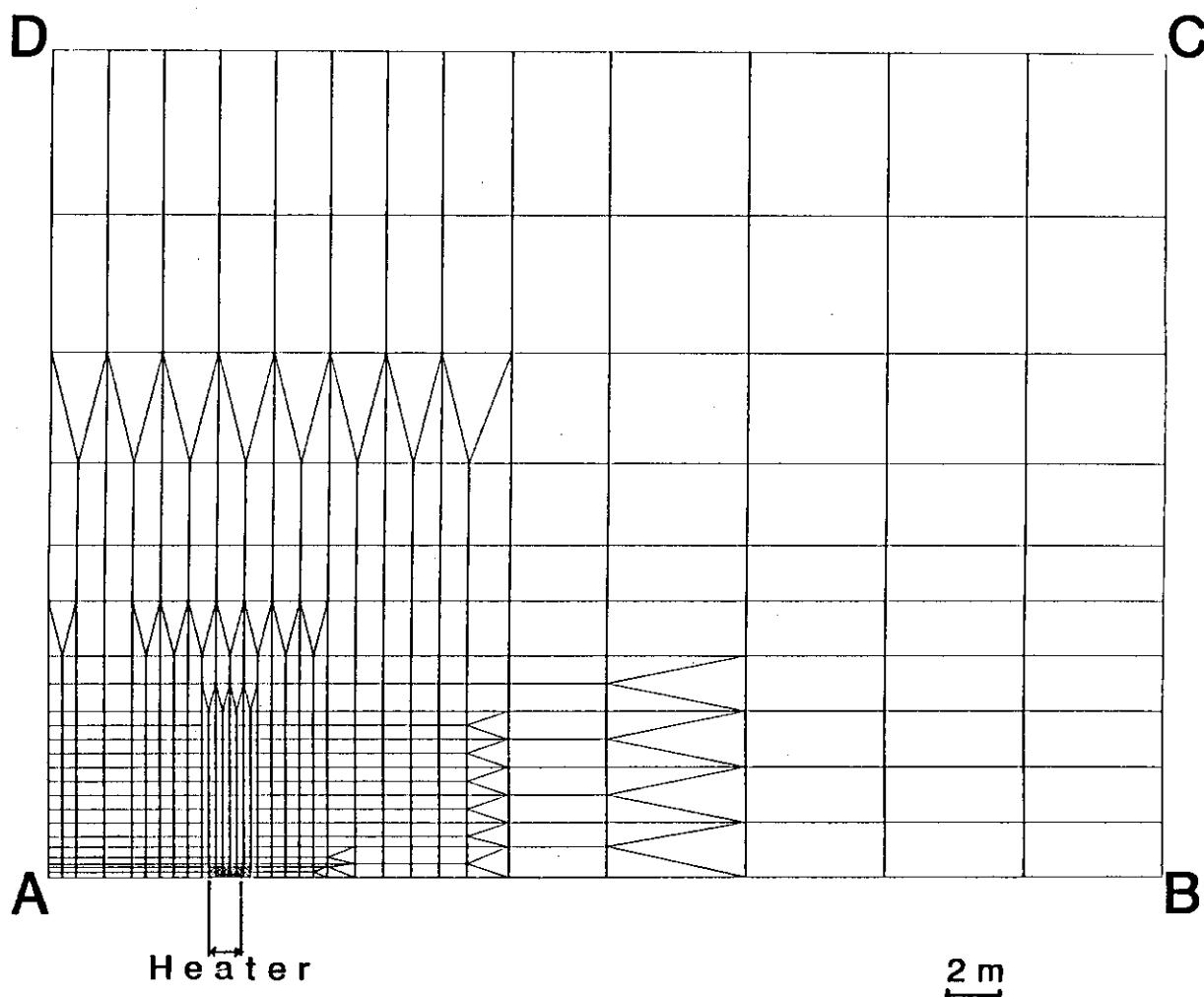


図 3.7 MARCによる解析-解析条件とメッシュ図

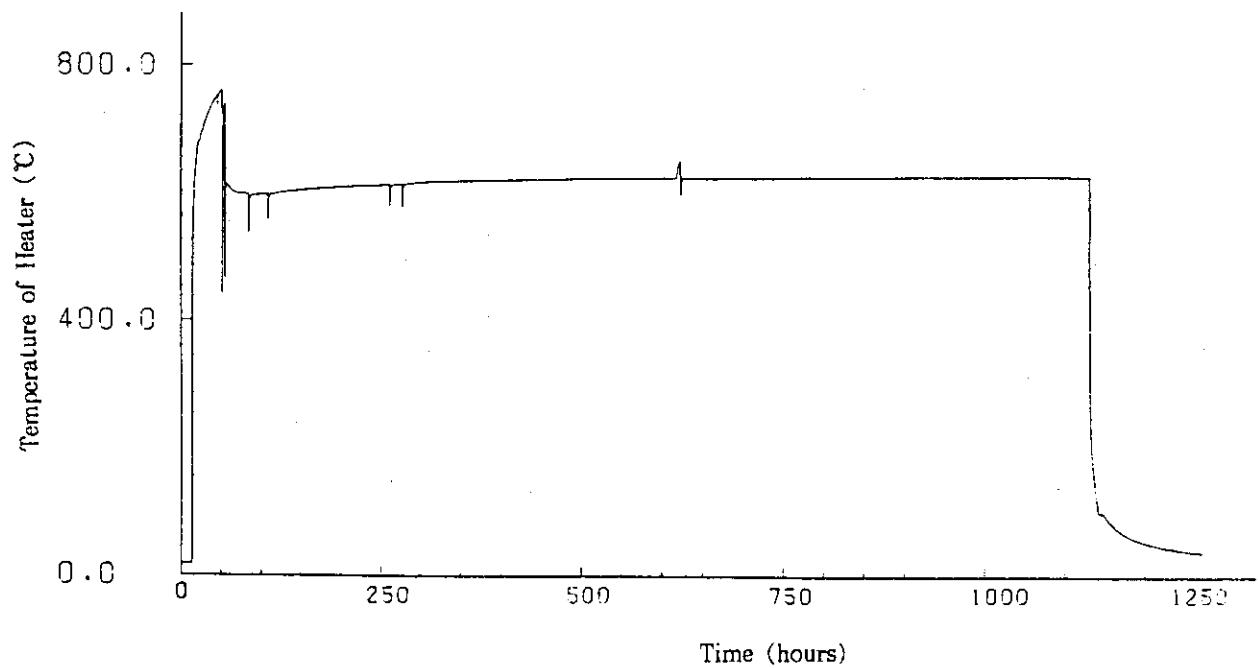


図3.8 ヒーター温度(加熱-III)

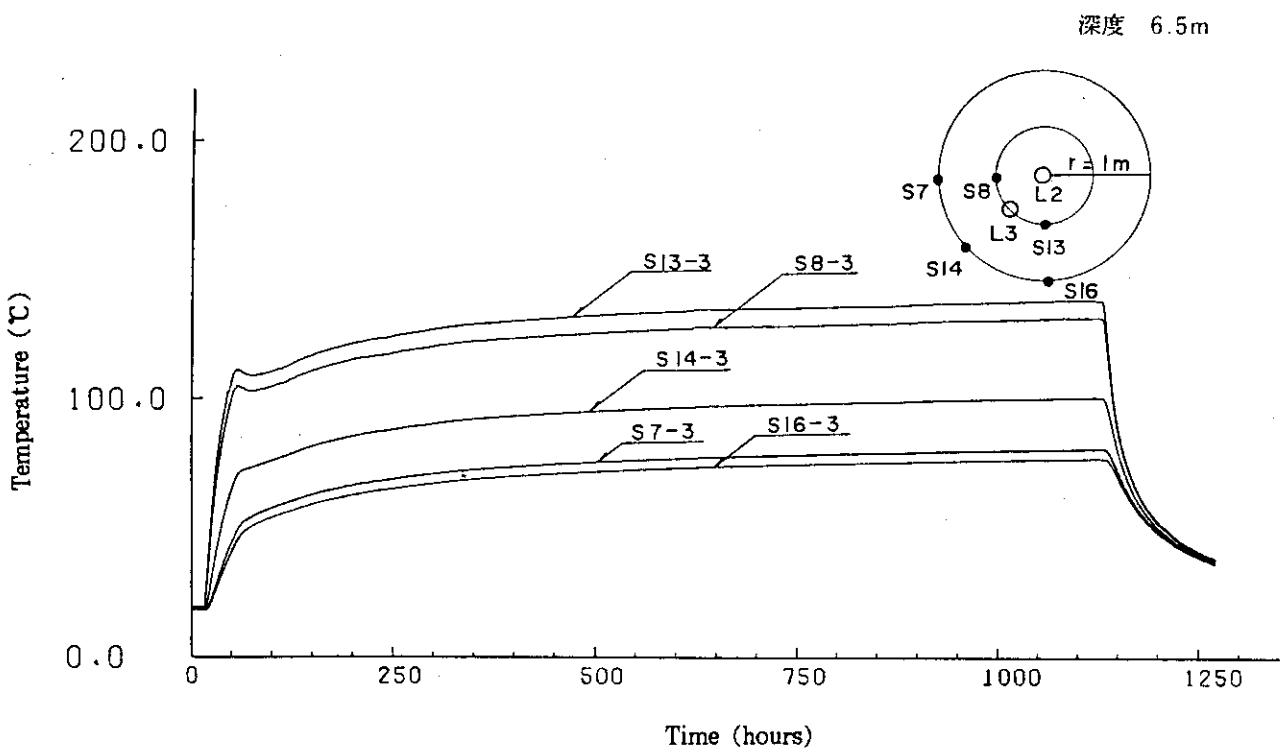


図3.9 代表的の測点の実測温度変化(加熱-III)

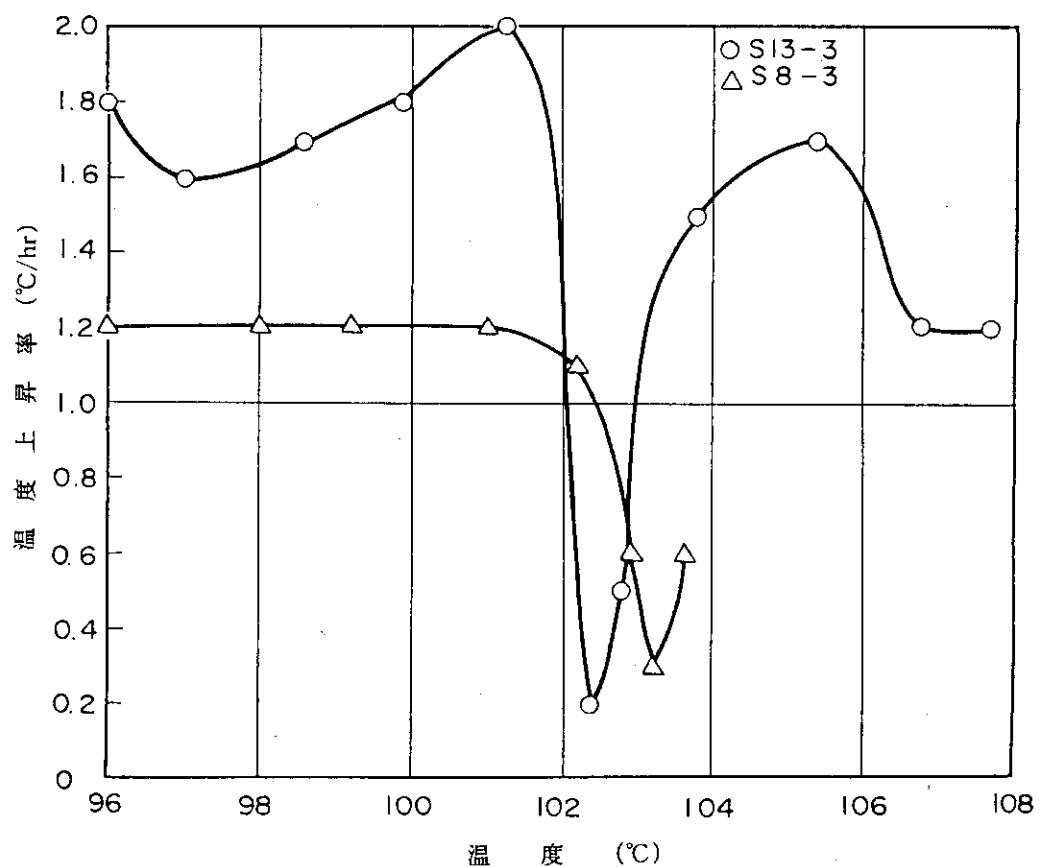


図 3.10 100 °C付近での温度～温度上昇率

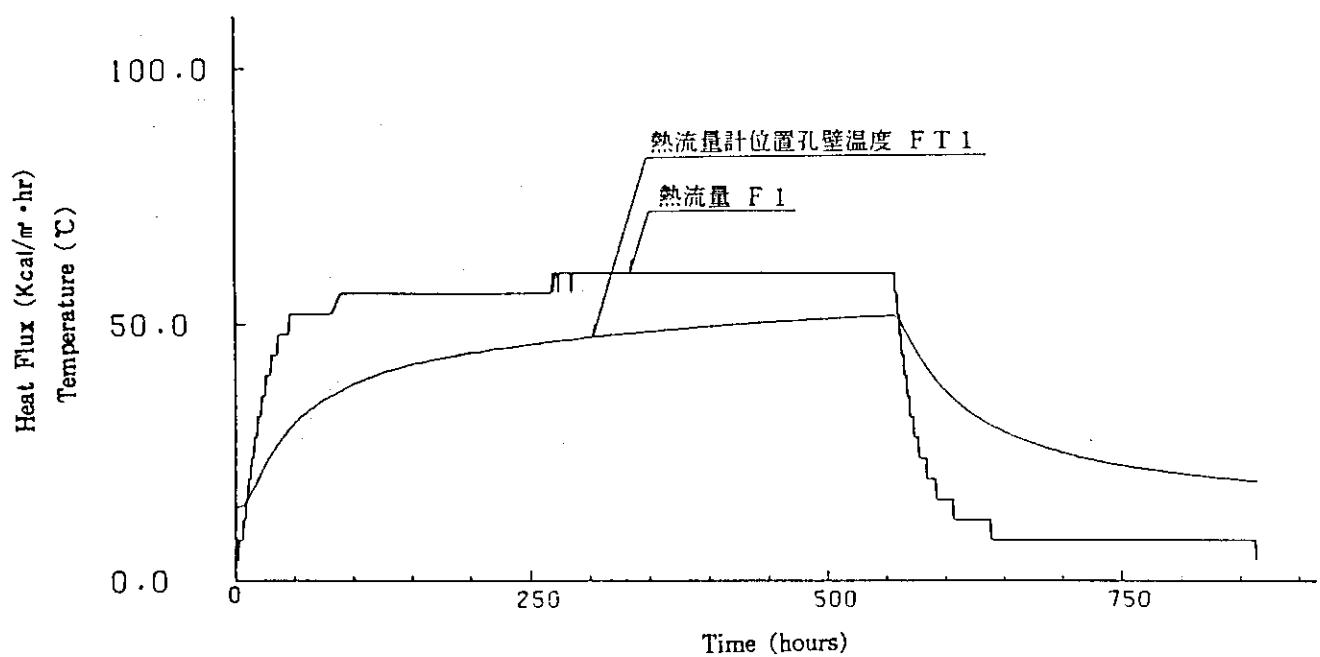


図 3.11 岩盤内熱流量 - F 1 (加熱 - II)

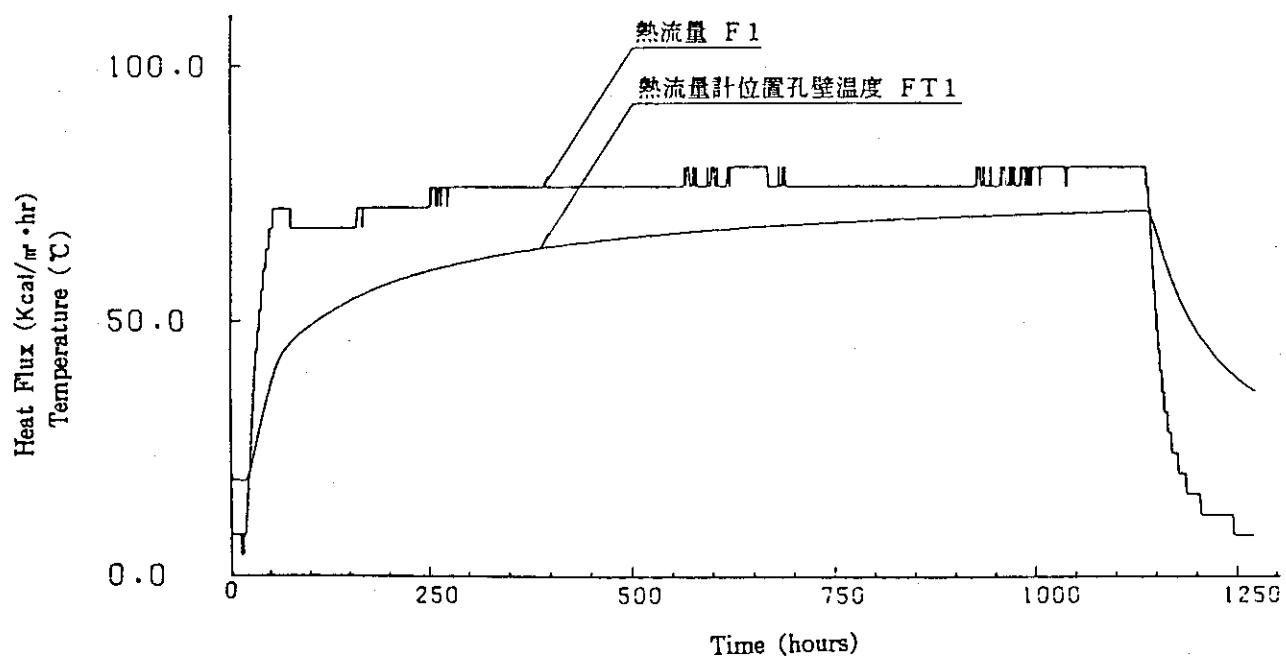


図 3.12 岩盤内熱流量 - F 1 (加熱 - III)

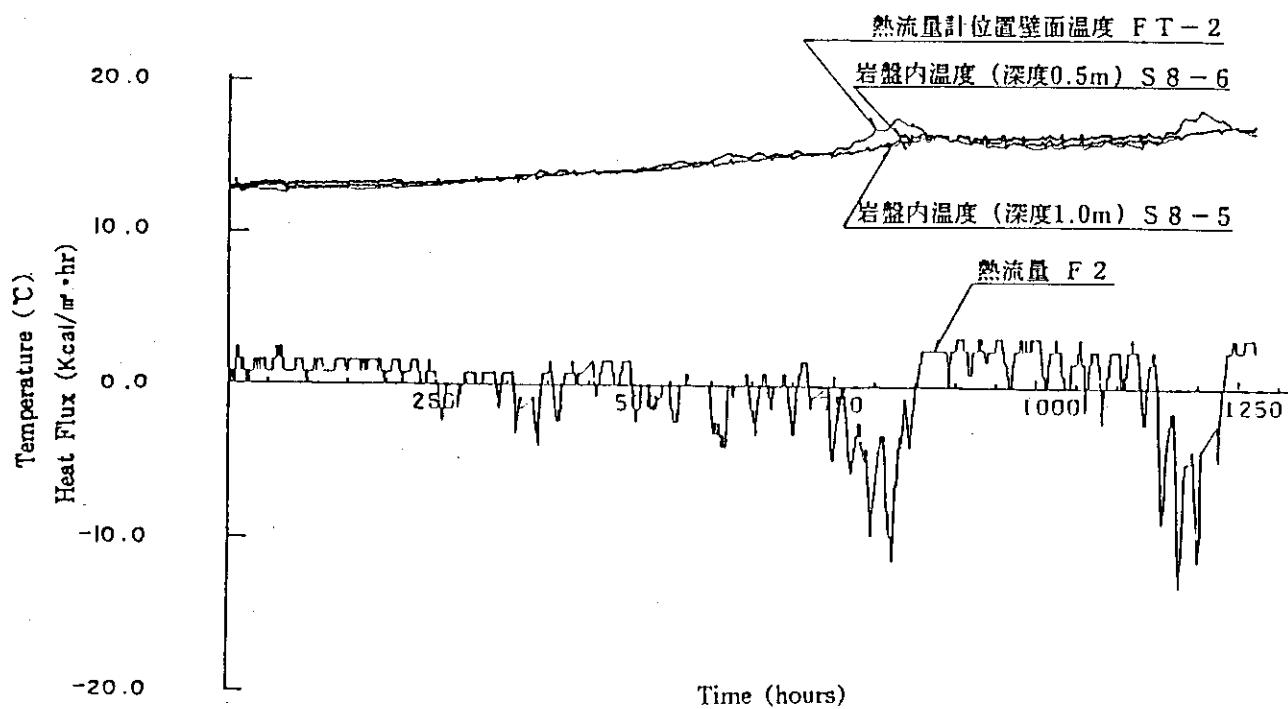


図 3.13 壁面熱流量 - F 2 (加熱 - III)

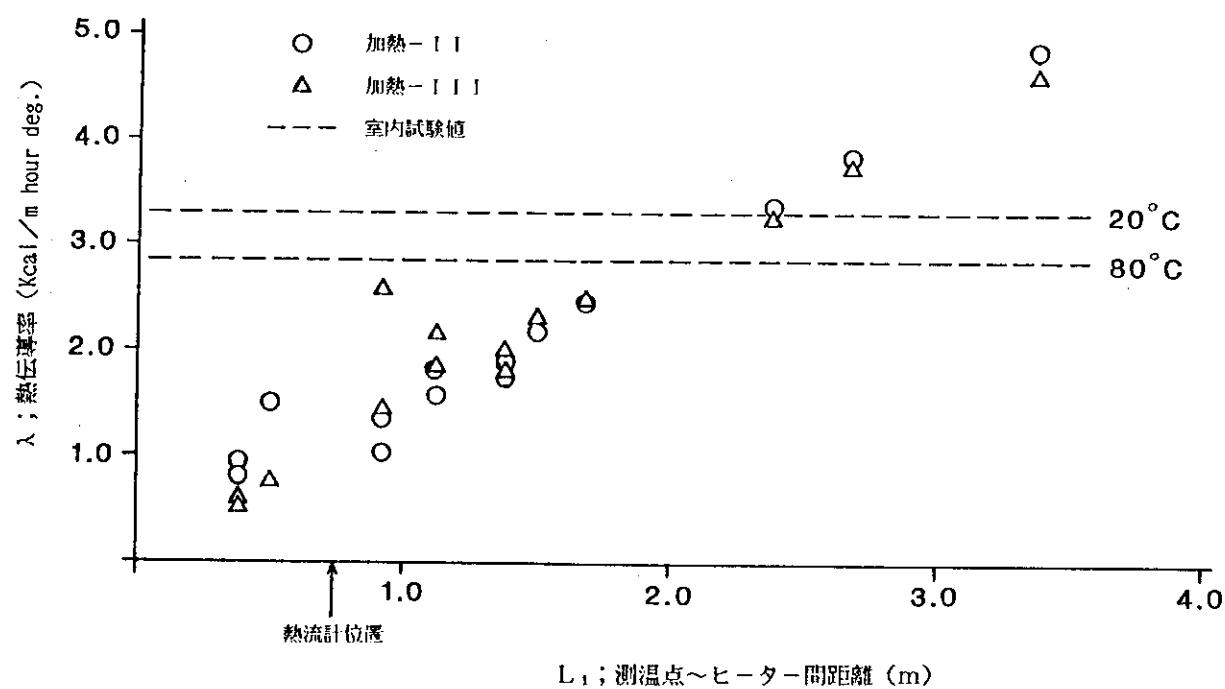


図 3.14 热流量から計算した热伝導率

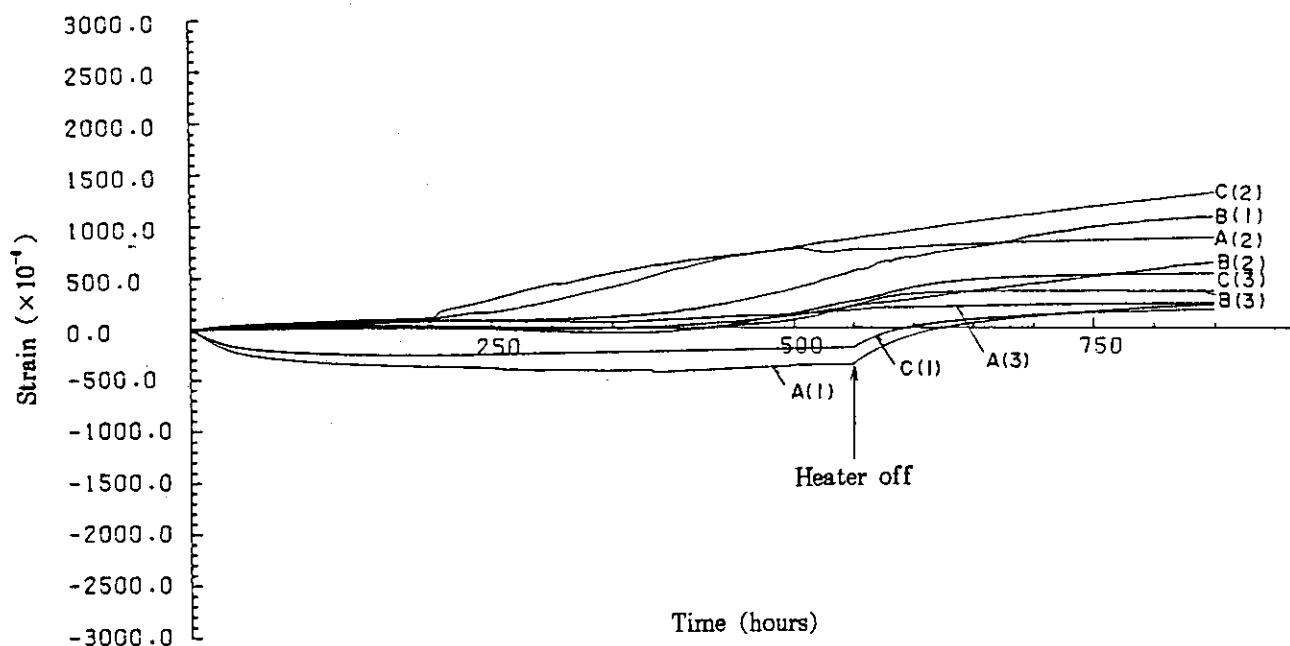


図 3.15 アクティブゲージ歪み測定結果（加熱-II）

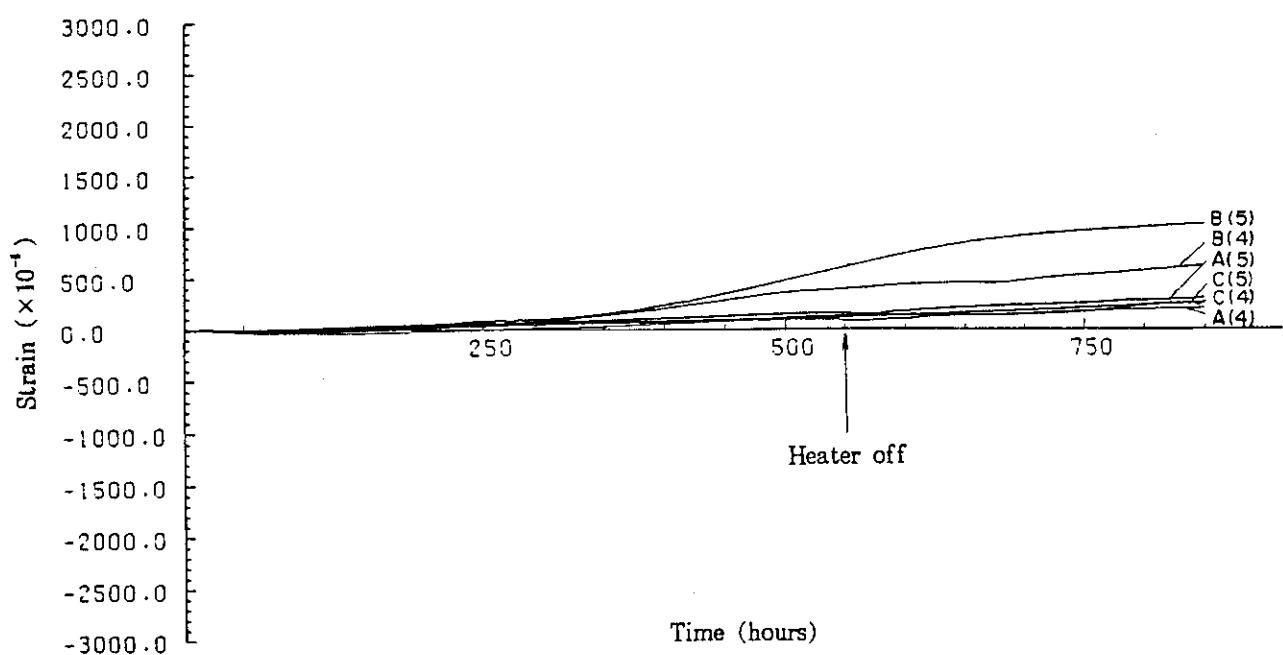


図 3.16 ダミーゲージ歪み測定結果（加熱-II）

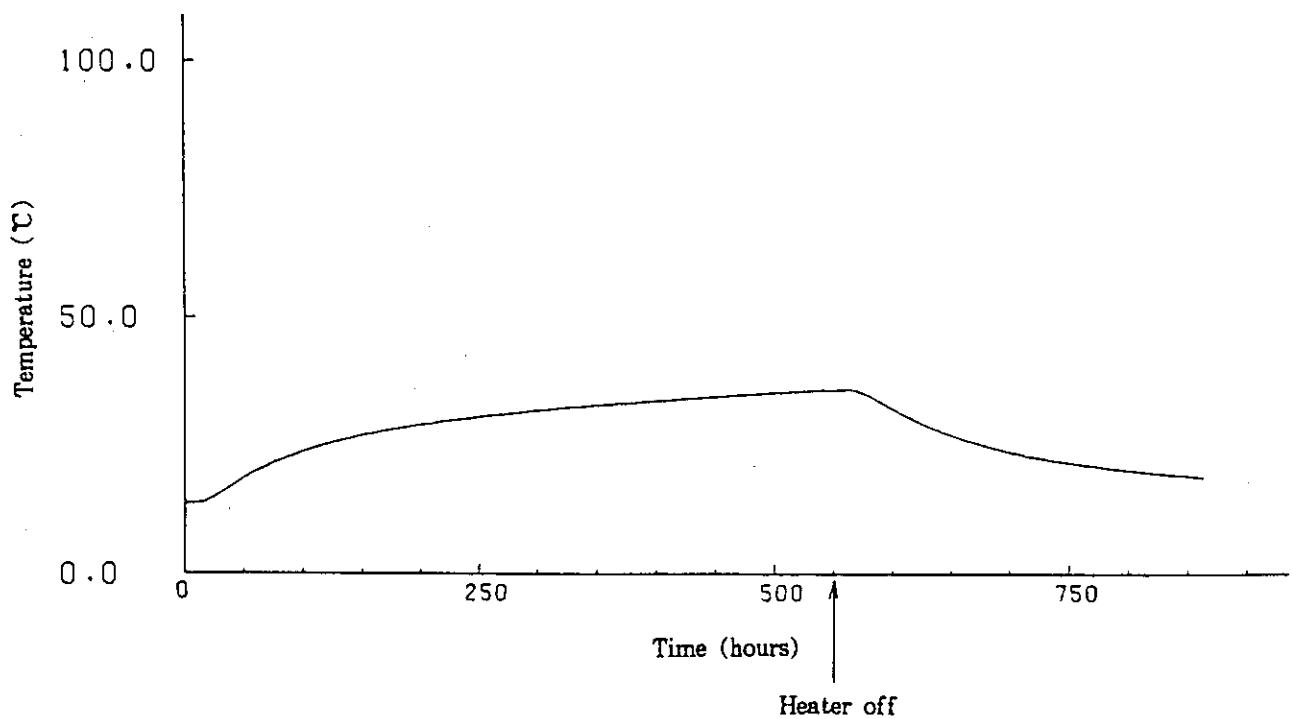


図 3.17 歪み測定位置の温度(加熱-II)

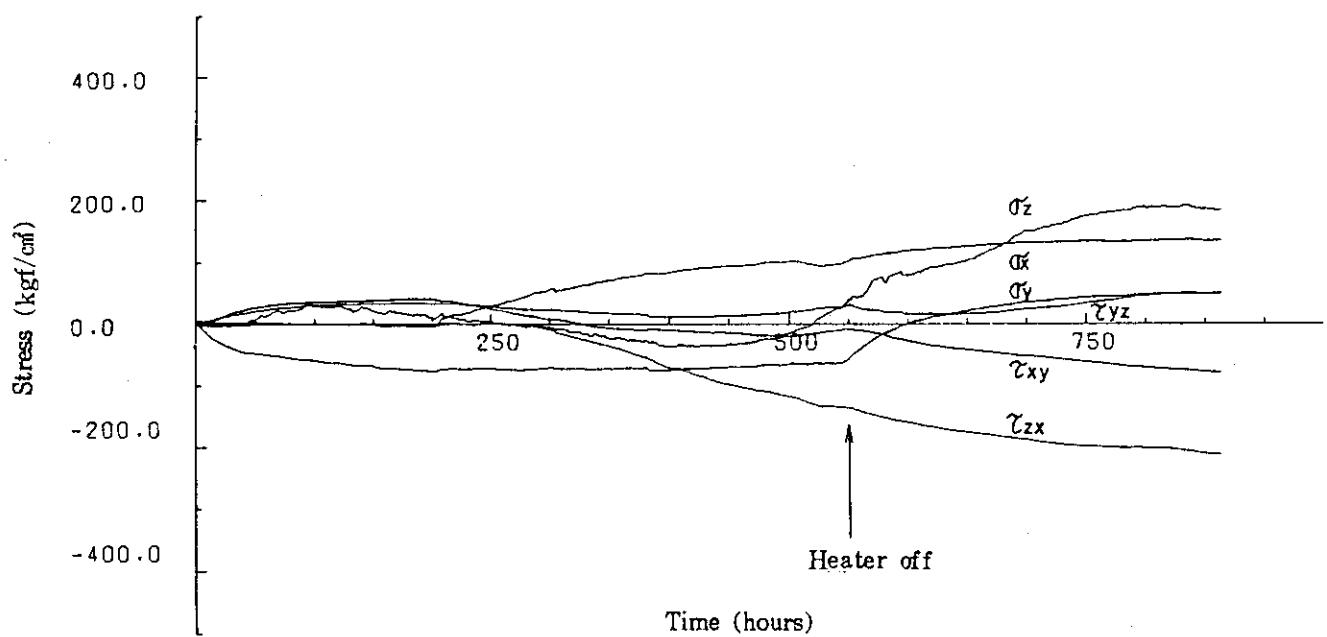


図 3.18 歪みから換算した熱応力(加熱-II)

3.2 模擬キャニスター加熱試験

高レベル廃棄物固化体の崩壊熱を模擬したヒーターと固化体キャニスターを模擬したステンレス容器を組み合わせ、この模擬キャニスターからの熱が周辺の岩盤の中をどのように伝達するかを測定した。熱は、ほぼ均質な岩盤の中では熱伝導によって伝達され、亀裂帯ではそこを流れる地下水によって運ばれる事が確認された。

3.2.1 岩盤内温度測定方法

(1) 模擬処分孔及び模擬キャニスターの配置

模擬処分孔は、亀裂分布を持つ花崗岩の床面に鉛直に設けられた直径 1 m ϕ 、深さ 5 m の孔である。この孔内に遮水鋼管及び模擬キャニスターを図 3.19 に示すように配置した。

模擬キャニスターの設置方法及び位置は次のとおりである。まず外径 914.4 mm、厚さ 7.9 mm、長さ 5 m の遮水鋼管を模擬処分孔内に設置し、岩盤と鋼管の幅約 46 mm の空隙を現地の花崗岩を粉砕した砂で裏込めした。その後、遮水鋼管の底の中央に台座を設け、その上に模擬キャニスターを設置した。模擬キャニスターの底部は深度 4.5 m に、発熱部の中心は深度 3.75 m に位置する。処分孔開口部は熱の損失を極力小さくするため、鋼製の蓋を取り付け、隙間はモルタルで充填した。

模擬キャニスターは S U S 304 製の長さ 1.5 m、外径 0.4 m のケーシング中に 32 本のヒーターエレメントを持ったもので、有効発熱部長は 1.35 m である。

(2) 温度分布測定用熱電対配置

模擬キャニスター加熱に伴い、変化するキャニスター温度を測定するためにシーズ熱電対を 18 本、又遮水鋼管内の温度を測定するために 3 本をそれぞれ設置した。周辺の岩盤温度測定のためには、7 m 深さの測温孔 6 本 (S 1 ~ S 6) を鉛直に設けた。各孔の配置は図 3.20 に示すように、模擬処分孔中心軸を通る $\theta = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ 方向の各平面にそれぞれ 2 孔ずつとした。岩盤内の温度測定は、各測温孔に熱電対を取り付けセメントミルクで閉塞処理後、実施した。各測温点の位置と記号を図 3.21 に示す。図中の測温点の記号は各点の座標を示す。例えば T (r, θ, Z) とは模擬処分孔の中心軸より r cm 離れた θ 度方向の、深度 Z cm の測温点を意味する。

模擬キャニスター内のヒーターエレメントへの通電は、4 kw で出力コントローラーを使用して実施し、1,800 時間継続した。

3.2.2 結果および考察

(1) 温度分布測定結果

岩盤加熱開始前の初期温度分布を図 3.22 に示す。この時の試験室温度は 11.2 °C であった。岩盤初期温度は深度が 7.0 m から 0.5 m と浅くなるにつれて 13.3 ~ 14.3 °C から 11.1 ~ 12.6 °C へと低くなる傾向を見せている。これは試験室の外気温度が約 11 °C で岩盤深部温度より低いので、熱が岩盤表面に向かって逃げる事から生じた温度差であると考えられる。

4 kw で 1,800 時間加熱した後の岩盤の温度分布を図 3.23 に示す。岩盤温度の深度と模擬キャニスター中心からの距離による違いを表 3.3, 3.4 にまた深度ごとの等温線を図 3.24 に示

す。等温線はほぼ同心円状を呈するが、深度 4.75 m 及び 7.0 m では 0° 方向の温度低下が目立ち等温線にゆがみが生じている。この 0° 方向は図 3.19 の亀裂分布図からわかるように、卓越した亀裂帶中に設けられた測温孔の温度分布である。この亀裂帶には地下水が流れていると考えられるので、岩盤の熱が地下水によって運び去られ、温度が周辺の 120° 及び 240° 方向に比較して低くなったものと考えられる。

その他の箇所で等温線が同心円を呈する場所においては、熱の伝達は、熱伝導によるものと考えられる。

(2) 温度分布計算結果

岩盤内の温度分布計算は、汎用解析プログラム M A R C 及び ADINAT を使用した。

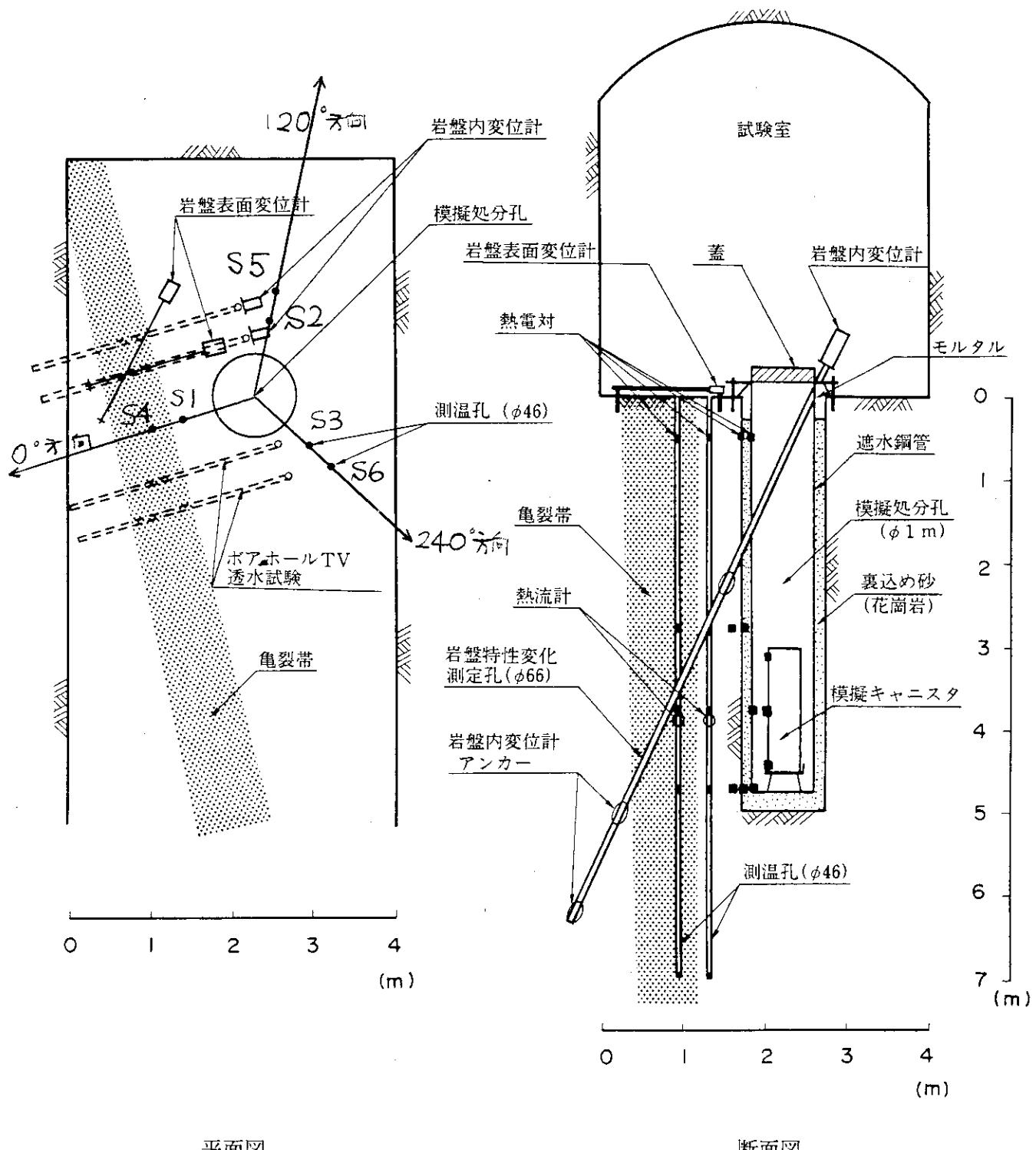
熱伝導解析では、半径 13 m、深さ 19 m の範囲を図 3.25 のように要素分割し軸対称モデルで行った。初期条件として岩盤内の初期温度は、加熱前の実測値をもとにして、各接点に 10.5 ~ 14.5 °C の温度を与えた。境界条件は図 3.26 に示すように強制温度変化、熱伝達境界、断熱境界及び一定温度境界を設定した。強制温度変化は、模擬処分孔壁温度を時間関数として与えた。熱伝導率 κ 、比熱 C 、密度 ρ は湿潤状態のコアの物性値を用いた。これらの物性値を表 3.5 に示す。

岩盤温度の計算値と実測値を、亀裂帯を横断する 0° 方向と亀裂帯を含まない 120° 方向の、それぞれについて、図 3.27 及び図 3.28 に示す。

これらの結果から 120° 方向については、計算値と実測値は良く一致していると言える。即ち 120° 方向のように亀裂の少ない、ほぼ均質な岩盤では、コアの物性値を用いて熱伝導で、岩盤の温度分布を計算できると言える。他方 0° 方向は計算値と実測値は一致しない。これは前述のように亀裂帯の存在やそこを流れる地下水の影響によるものと考えられる。

(3) まとめ

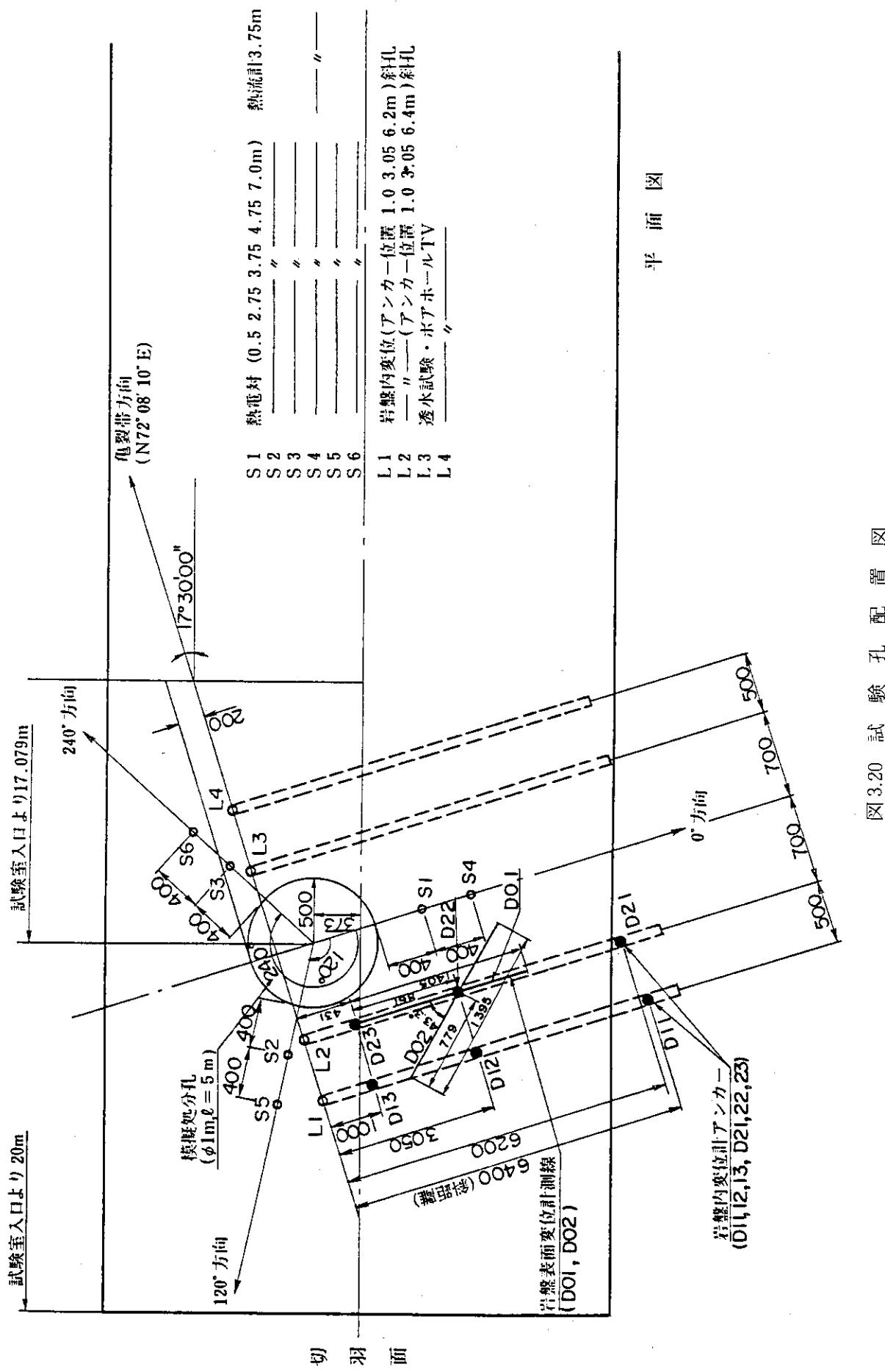
岩盤内の熱伝達は、主として熱伝導によるものであり、温度分布は岩石コアの熱伝導率、比熱、密度から計算できる事がわかった。地下水の流れが認められる亀裂帯での温度分布は、熱伝導のみの計算では不十分で、水による熱の運搬を考慮する必要がある事がわかった。



平面図

断面図

図 3.19 模擬キャニスター加熱試験概略図



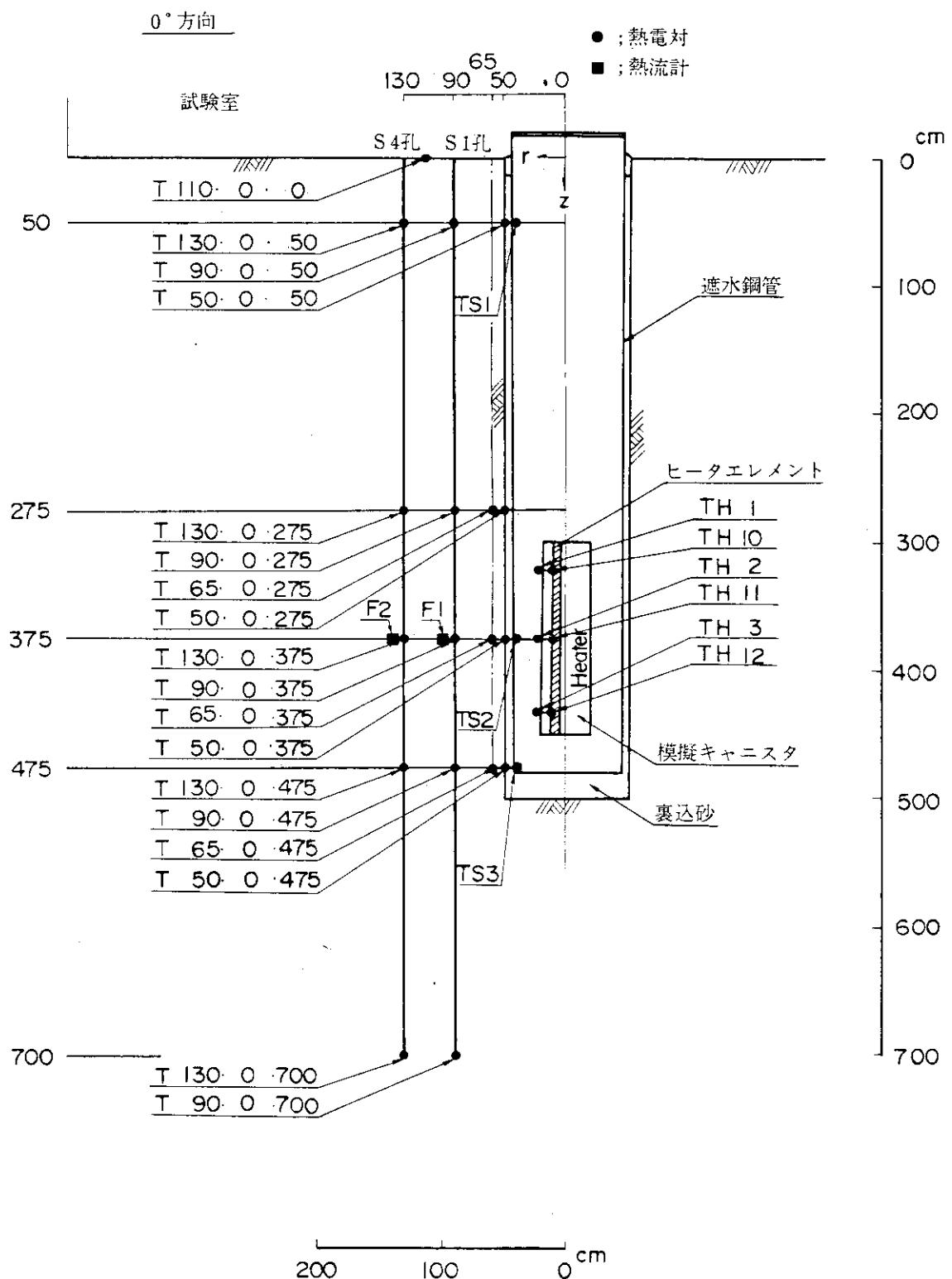


図3.21 測温点位置 (0°方向)

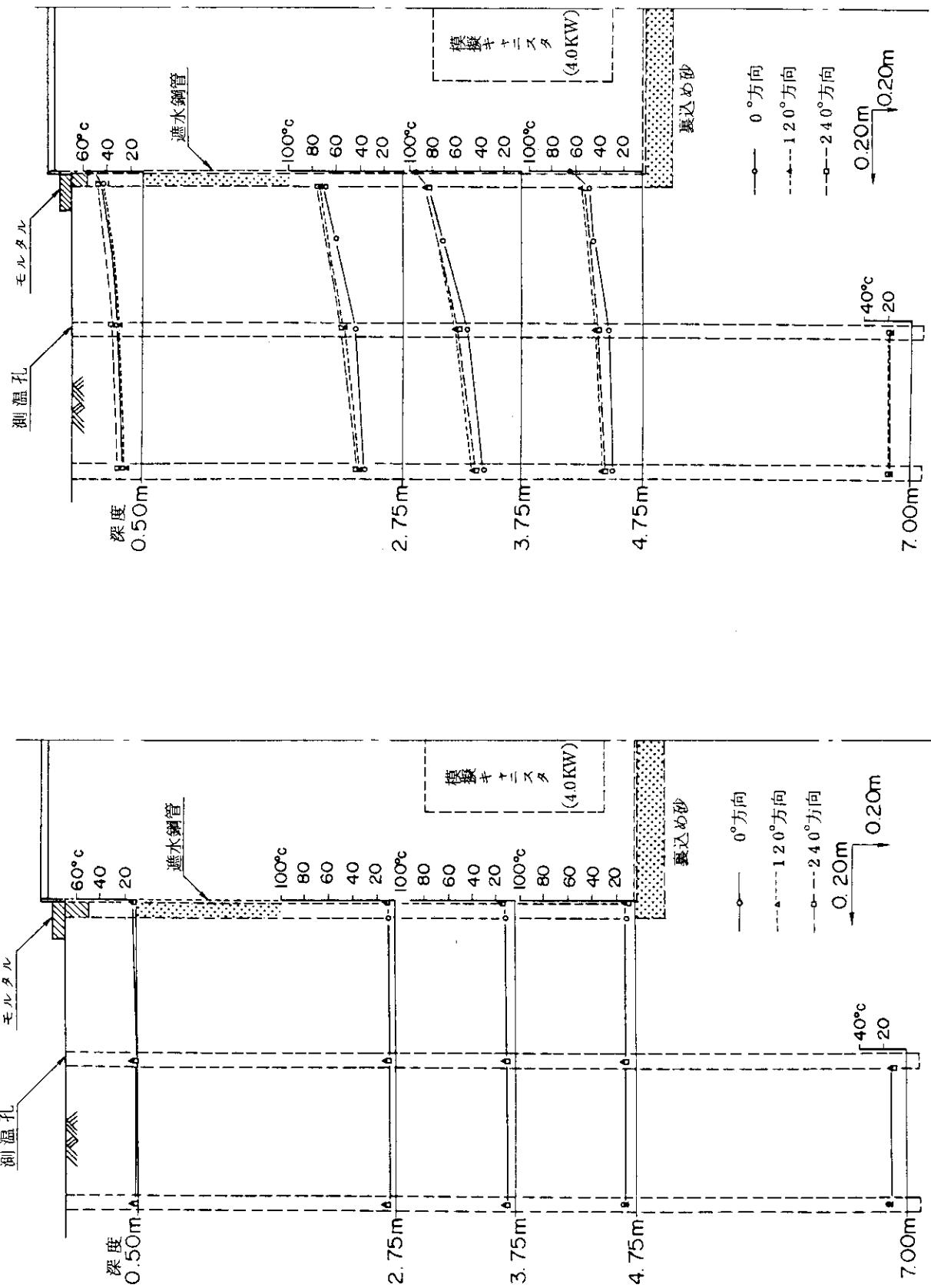
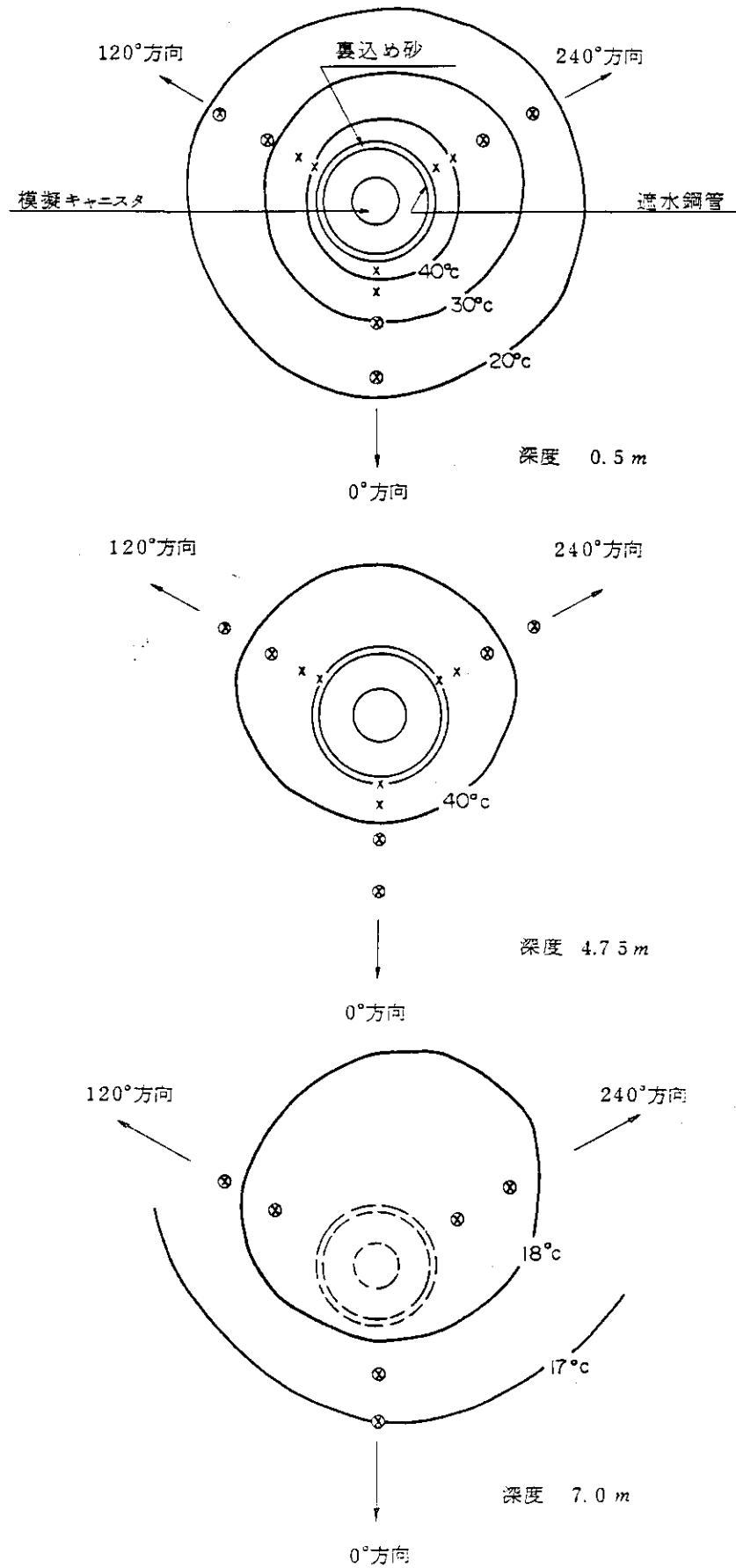


図 3.23 鉛直断面における岩盤温度分布（加熱 1800 時間）

図 3.22 鉛直断面における初期温度分布



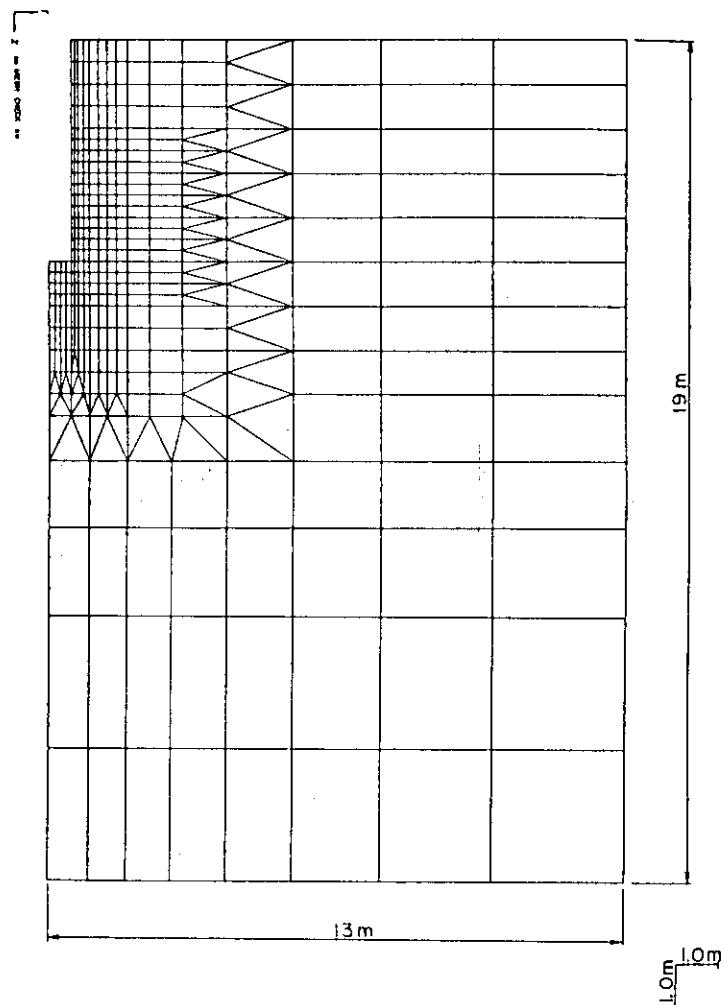
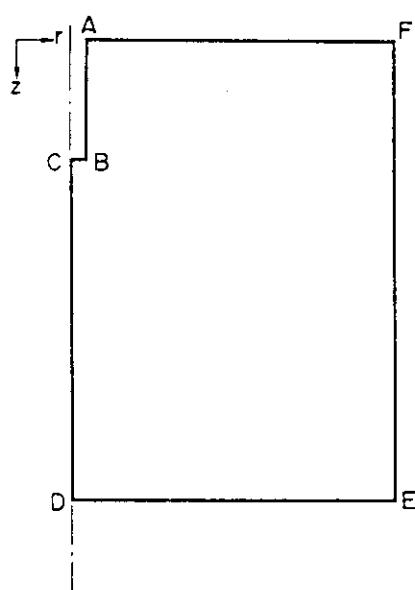


図 3.25 要 素 分 割 図



\overline{AB} , \overline{BC} : 強制温度変化

\overline{AF} : 热伝達境界

\overline{CD} , \overline{EF} : 断熱境界

\overline{DE} : 一定温度境界

図 3.26 境 界 条 件

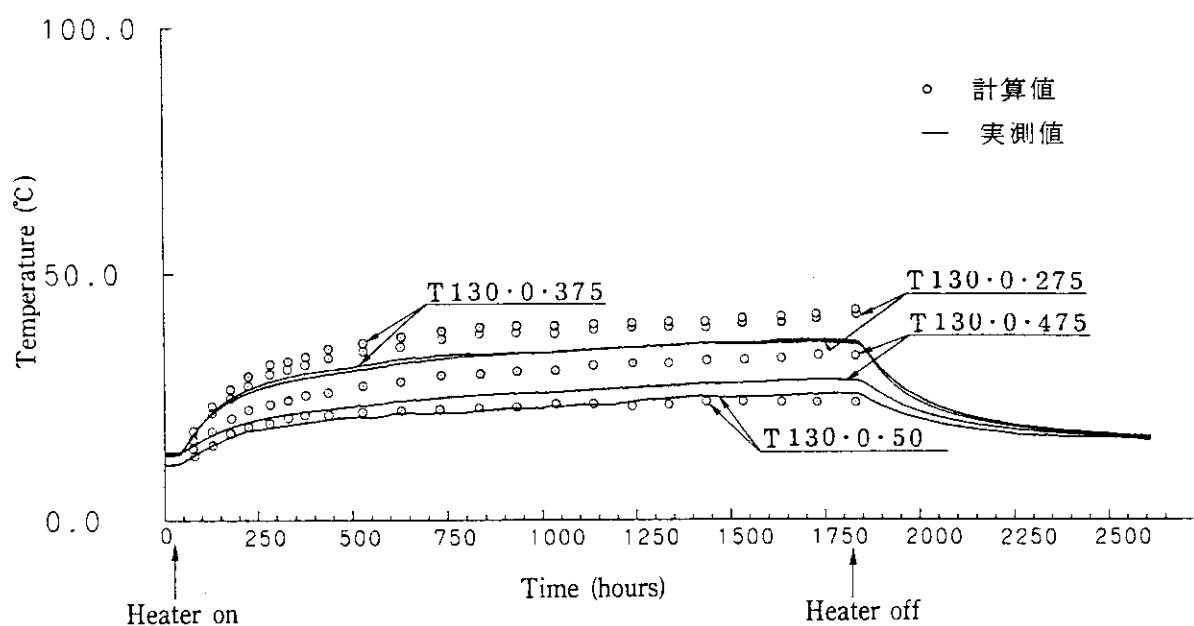


図 3.27 岩盤温度 計算値・実測値～時間 (0° 方向, 距離 1.3 m)

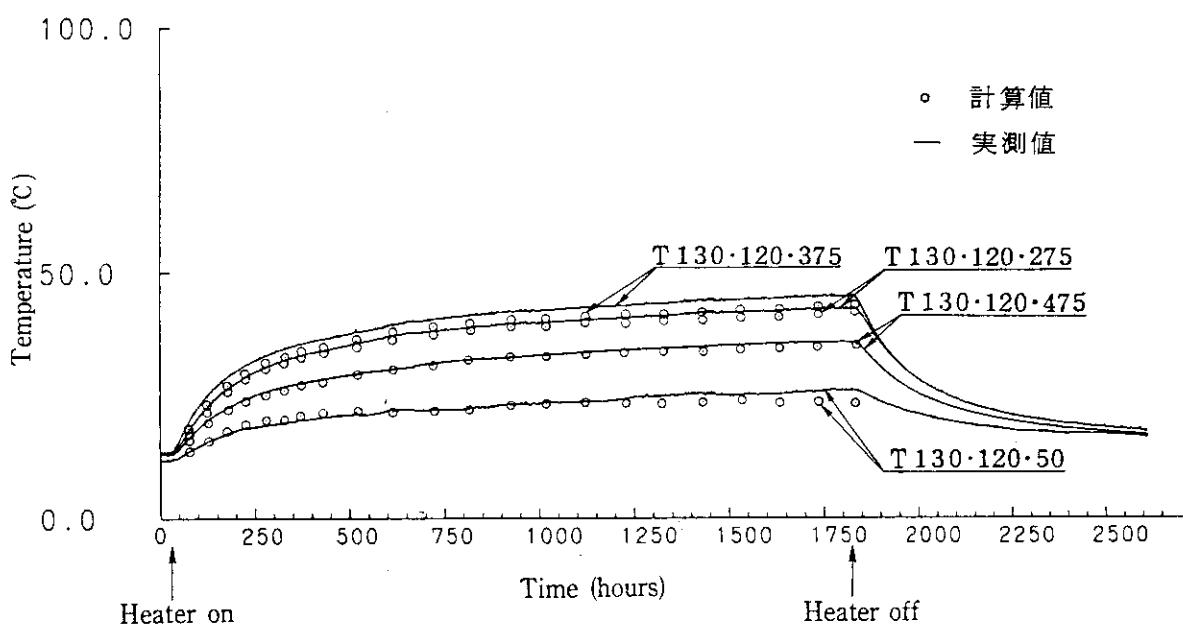


図 3.28 岩盤温度 計算値・実測値～時間 (120° 方向, 距離 1.3 m)

表 3.3 加熱 1800 時間における岩盤温度の分布

(温度 : °C)

深 度 (m)	0.5 0	2.7 5	3.7 5	4.7 5	7.0 0
距 離 (m)	4 4~4 7	7 0~7 5	8 2~8 5	5 1~5 6	—
0.5 0	—	6 0	7 2	4 7	—
0.6 5	—	6 0	7 2	4 7	—
0.9 0	3 2~3 6	4 5~5 6	5 2~6 1	3 4~4 4	1 8~1 9
1.3 0	2 6~3 0	3 6~4 3	3 6~4 5	2 8~3 6	1 7~1 8

表 3.4 加熱 1800 時間における岩盤温度の方向によるちがい

(深度 : 3.7 5 m, 温度 : °C)

方 向	0.5 0	0.6 5	0.9 0	1.3 0
0°	8 3.0	7 1.8	5 1.8	3 6.4
1 2 0°	8 4.9	—	6 1.3	4 5.2
2 4 0°	8 2.4	—	5 9.1	4 3.4

表 3.5 解析に用いた物性値

物 性 値			单 位	備 考
熱伝導率	κ	9.177×10^{-1}	$\text{cal}/m \cdot s \cdot ^\circ C$	20°C コア室内試験 (湿潤状態)
比 熱	c	1.83×10^2	$\text{cal}/kg \cdot ^\circ C$	20°C コア室内試験
密 度	ρ	2.64×10^3	kg/m^3	20°C コア室内試験 (自然状態)
熱伝達率	H	27.8	$\text{cal}/m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$	A F 境界
試験室気温		11.5	°C	

3.3 加熱に伴う岩盤及び亀裂の変位と透水性

地下処分場に埋設する高レベル放射性廃棄物の崩壊熱による廃棄物固化体周辺の岩盤に及ぼす熱影響のうち特に、岩盤亀裂があった場合どのような挙動をするかを調べるために、模擬処分孔近くの亀裂帯に注目し、岩盤内変位計、岩盤表面変位計を用い模擬キャニスターの加熱に伴う岩盤亀裂の動きを計測するとともに、ボアホールTVによる測定孔内の亀裂観察および加熱前後の岩盤透水性試験などを行ない加熱による岩盤の挙動を検討した。試験室底盤から水平面から65°の傾斜で亀裂帯を貫くように、模擬処分孔を挟んで2本ずつ計4本の測定孔を穿孔した（図3.19）。測定孔は変位計の設置やボアホールTV観察のため直径6.6 mmとし、長さ7 mのコアボーリングを行なった。採取したコアの観察から、孔口から約2 m以深には鉛直の亀裂が卓越しており各孔とも亀裂帯を貫いていることが確認された。

3.3.1 測定方法

(1) 岩盤の変位

加熱に伴う岩盤の変位を測定するために岩盤内変位計（図3.29）および岩盤表面変位計（図3.30）を用いた。岩盤内変位計は水圧式アンカーでロッドの先端を岩盤内に固定し、岩盤表面に突出したロッド末端と岩盤表面との相対変位を測定することにより、固定点までの岩盤の変位を測定するものである。ロッドには熱膨張率の小さな($1 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$)インバール(FN315:Fe 6.4%, Ni 3.1%, Co 5%)を用いた。岩盤内変位計を模擬処分孔から奥の2つの測定孔(L1, L2)に設置した。測定孔の孔底付近(L1は孔口から6.20 m, L2は6.40 m)にロッド先端を固定し孔口までの間に3.05 mと1.00 mとの2つのアンカーを入れ加熱に伴う亀裂の変化を測定した。各アンカーはボアホールTV観察の結果からアンカー自身には亀裂がかからずアンカー間に亀裂を挟むように配置した。孔口から3.10 mの地点にはアンカ一直下の岩盤温度を測定するための熱電対を設置し、岩盤内変位の測定期間を通じて測温した。

また、試験室底盤において亀裂帯に直交する方向(長さ1.045 m)と亀裂帯と斜行する方向(直交する方向と43.3°で交叉、長さ1.395 m)との2方向(図3.20)で2本の岩盤表面変位計を設置し、加熱にともなう亀裂帯の変位を測定した。

(2) ボアホールTV

測定孔内の亀裂の分布、性状の調査および加熱による亀裂の変化を調査するため加熱前と加熱中および加熱停止後の3回に亘ってボアホールTVによりカラーモニターで孔内観察を行なった。試験孔口より7 m強の孔底までカメラゾンテを挿入し、引き抜きながら全周方向観察を行なった。観察は水中にて行なった。

(3) 透水性試験

加熱にともなう周辺岩盤、特に亀裂帯の透水性への影響を検討するために注入法(図3.31)および水位回復法(図3.32)の2方法により、加熱前と加熱中および加熱停止後の3回透水性試験を行なった。注入法は、岩盤内に強制的に水を注入し、注入圧力と注入量との関係から透水性を調べるもので、いわゆるルジオン試験を行なった。注入した水の温度は、孔内水温とほぼ一致させた。模擬処分孔を挟んだ4つの測定孔のうち試験室入り口近くのL3およびL4孔の孔口

から 0.7 ~ 1.2 m に 50 cm のパッカーを設置し、孔底までの約 6 m を試験区間とした。注入圧力は、0.4, 0.8, 1.2, 1.6 kgf/cm² の 4 段階とした。水位回復法では岩盤に穿孔したボアホール内の水を排水し、再び孔内に満たされる地下水の水位の回復する速度を測定孔の底に設置した圧力センサーを用いて測定することにより、岩盤の透水性を調べた。

3.3.2 結果および考察

(1) 岩盤の変位

加熱中 1800 時間、加熱停止後 790 時間を通して測定した岩盤内変位計による岩盤の変位の結果を図 3.3.3 に示す。岩盤内の変位は模擬処分孔に近い L 2 孔では加熱後すぐに、L 2 孔より 50 cm ほど遠い L 1 ではおよそ 50 時間後に 2 点間に伸びはじめ、加熱時間とともに伸び量は増加し、定常状態に近付いている。加熱停止後変位は伸びから縮みに変わり、加熱前の初期状態に向かっているが、加熱停止後 790 時間経った時点での変位は依然初期状態にもどっておらず、部分的に変位がマイナスとなり初期状態に比べるとむしろ縮んで圧縮された状態になっている区間が現れた。変位を各アンカー間の歪みとして示したものが図 3.3.4 であるが L 1 孔の深度 1.00 ~ 3.05 m 及び L 2 孔の深度 0.00 ~ 1.00 m の区間で加熱停止後歪みが初期状態を越えてマイナスにひずんでいることを示している。加熱時間 1800 時間における各アンカー間の歪みを測定孔毎に深さ方向に示したものが図 3.3.5 の実線である。L 2 孔の深度 3.05 から 6.40 m までの区間が最も大きく約 250 μ の歪みを示した。また、加熱停止後 790 時間経った時点での各アンカー間の歪みを同図に破線で示したがこの時点ではまだ岩盤の歪みは初期状態に復帰していない。L 1 孔の 1.00 m ~ 3.05 m の区間では歪みがマイナスを示しており、外側の測定区間によって圧迫されている様に見える。岩盤内歪みの分布は L 1 孔と L 2 とでは異なっており、測定された歪みが温度上昇に伴う岩盤の熱膨張によるものだけではなく、測定孔近傍の岩盤亀裂の性状にも依存していることを示している。

試験室底盤において亀裂帯を挟んだ岩盤表面変位計による測定結果を図 3.3.6 に示す。亀裂帯と斜行した D 0.2 は加熱開始後すぐに、亀裂帯に直交した D 0.1 は約 60 時間後に 2 点間の伸びを示し始めた。加熱時間の増加に伴い伸び量は増加し 500 時間程度でほぼ定常に達しているようにも見える。亀裂帯と斜行した D 0.2 の変位は、最大で 240×10^{-3} mm で歪み量にして 170 μ と亀裂帯に直交した D 0.1 に比較して約 4 倍もの値を示し、亀裂帯が加熱中にズレを起こしていることを示している。亀裂帯を斜行する岩盤表面変位計の変位は、加熱停止後岩盤内部に比較して急速に減少しており、温度による変位が内部より敏感であることを示している。

岩盤内変位計および岩盤表面変位計のどちらにおいても岩盤の加熱に伴い歪みも増加し、岩盤温度が定常に近付くとともに歪みも定常に近付いており、また加熱の停止により岩盤温度が低下するとともに歪み量が小さくなっていることから測定された歪みは岩盤温度に起因することは明らかである。岩盤は拘束条件下で加熱されており、ここで測定された歪みは温度歪みのほか弾性歪みや塑性歪みが加算されたもので、それぞれの歪みは岩石部分と亀裂部分とから合成されている。岩石部分の温度歪み量を他の測定孔で測定した孔内水温をもとに試算した結果と実測値とを表 3.6 に示す。試算値と実測値とを比較すると加熱中は全体的に実測値が大きくなっているが、加熱停止後は、試算値とはまるで異なる値となっている。このことから

も測定された歪みが温度上昇に伴う岩盤の熱膨張によるものだけではなく、測定孔近傍の岩盤亀裂の性状にも依存していることが推察される。

(2) ボアホールTV

加熱前に行なった4孔のボアホールTVによる孔内観察の結果、4孔とも孔口から0.1～0.2m前後に幅数mmから10ないし20mmの大きな亀裂がみとめられたが、これは構造性の亀裂ではなく試験室掘削時のゆるみによるものと思われる。孔口から0.5～1.5mは各孔とも新鮮な花コウ岩から形成されていた。1.5～2.0mには幅1mmないしは、密着した亀裂があり、一部には沸石脈が認められた。2.0～3.0mには、沸石脈を充填した0.2～0.5mmの亀裂が3～6本あった。L1孔には、幅10～20mmの亀裂帯があった。3.0～4.5mでは、密着している亀裂が数本認められるが、連続性が無くおおむね新鮮であった。L1, L2孔では、4.5～5.0m前後に亀裂が集中し、一部開口、湧水があるのに対して、L3, L4孔では新鮮であった。5.0～6.0mは各孔とも沸石脈を伴う亀裂が2本程度あった。6.0m以深では、L1, L2孔の6.5～7.0mに幅10～20mmの細粒部を伴う亀裂がある他は新鮮であった。L3, L4孔では、6.0～7.0mに5本程度の0.2～0.3mmの亀裂があった。

加熱中の2回目の観察では、新たにL3孔で3本、L4孔では、1本の亀裂発生が認められた。その内2本はL3孔の3.0～3.5mに発生した。4本はいずれも、0.1mm程度かそれ以下であった。その他L3孔で、1回目連続性がなかった亀裂2箇所の連続性が確認された。加熱停止後の3回目で新たに認められた亀裂は、L3孔で2本、L4孔で2本であった。いずれも0.1mm程度かそれ以下の亀裂である。また加熱中および加熱停止後の観察では亀裂の幅の変化はボアホールTVの精度(0.1mm)内において確認されなかった。

加熱以前には無かった亀裂が、加熱中には4本、計8本の亀裂が新たに確認されたが、連続性があり走行傾斜の判読できたものは4本であった。それぞれの走行傾斜は、N59E75N, N66E80N, N79W70N, N14W25Wであり、加熱前に観測された亀裂群とは異なり、卓越する方向をみいだすことはできなかった。これは、加熱以後に発生した亀裂が熱応力を開放する方向にできたためであると思われる。新たに確認された亀裂の幅はいずれも0.1mm程度かそれ以下で、本数も少なく、岩盤の力学的性質に与える影響は小さいと考えられる。

(3) 透水性試験

注入法および水位回復法による岩盤の透水性試験結果をダルシー単位に換算すると、水位回復法により求めた透水係数は、注入法の結果から求めた透水係数に比較して4倍ほど大きな値となっているが、加熱前・中・後の透水係数の変化(図3.37)を見ると、どちらの方法によっても加熱前の透水係数が加熱中は小さくなり、加熱停止後には再び大きくなっているが、加熱前の値には復帰していない。従って、両方法により求めた岩盤の透水係数の変化は、正しく現象を捉えていると考えられる。

加熱中の透水性試験は加熱1800時間におけるもので、岩盤変位がほぼ定常に達した時点の試験であり、加熱前の岩盤の水みちが主に亀裂を通してのものであるとすれば、一端を固定した岩盤が加熱されることにより測定孔近傍の岩盤中の水みちは岩盤の熱膨張により塞がれてしまったものと考えられる。

亀裂帯を含む岩盤では、多孔質媒体における透水性とは異なり、岩盤の加熱により特定方向の

水みちが塞がり他に別の水みちができる可能性があることがわかった。

(4) まとめ

今回行なった岩盤加熱に伴う亀裂帯の挙動試験の結果、亀裂帯を含む岩盤は温度の上昇に伴い熱膨張し、亀裂自身を狭め水みちを閉ざすことがわかった。また、熱源を取り除いても一旦熱変形した亀裂帯を含む岩盤は元の状態には戻らず新たな応力状態下に置かれることがわかった。

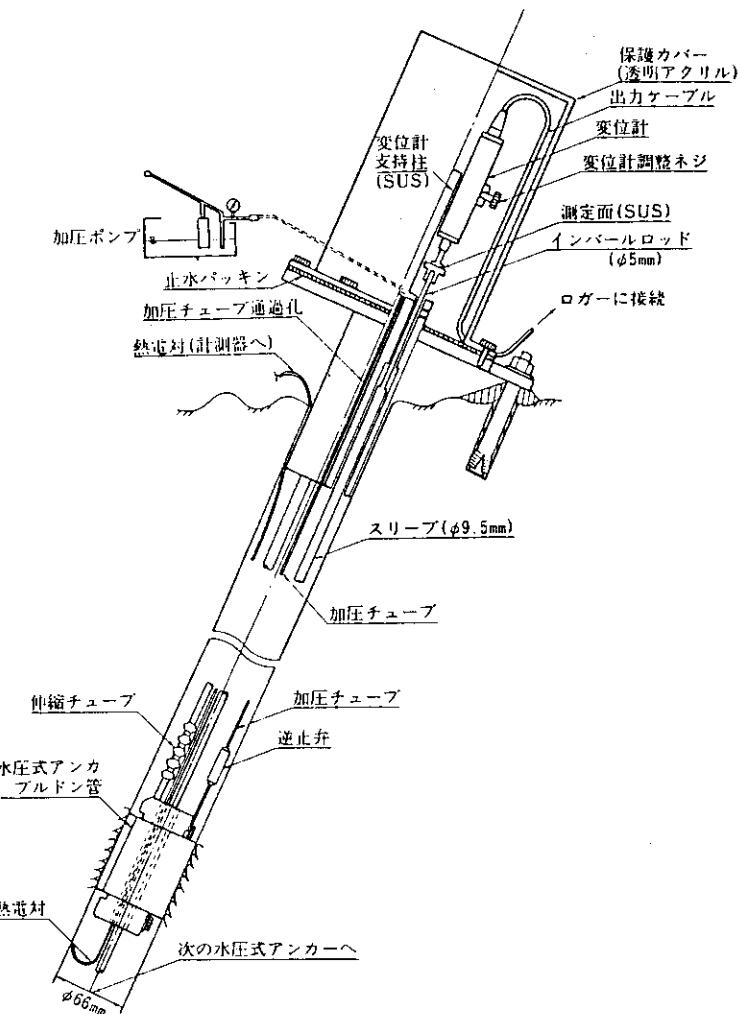


図3.29 岩盤内変位計

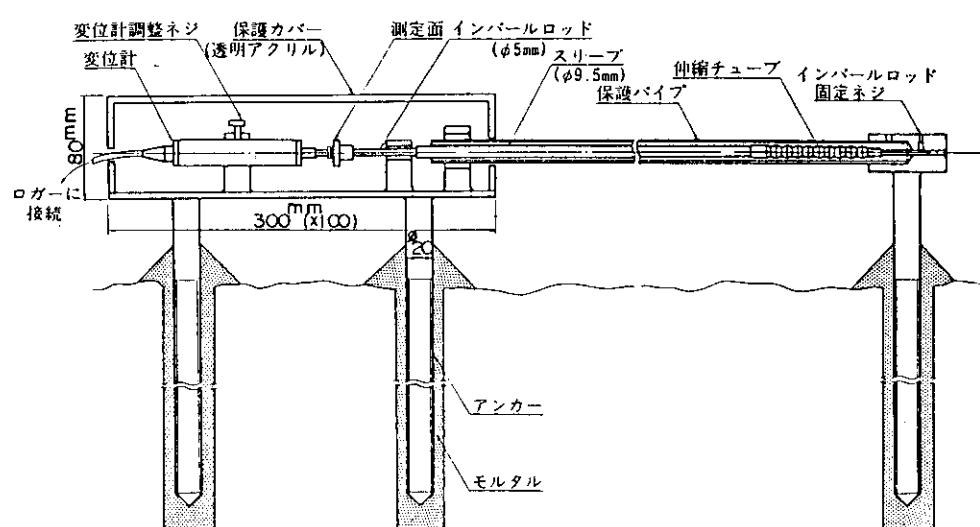


図3.30 岩盤表面変位計

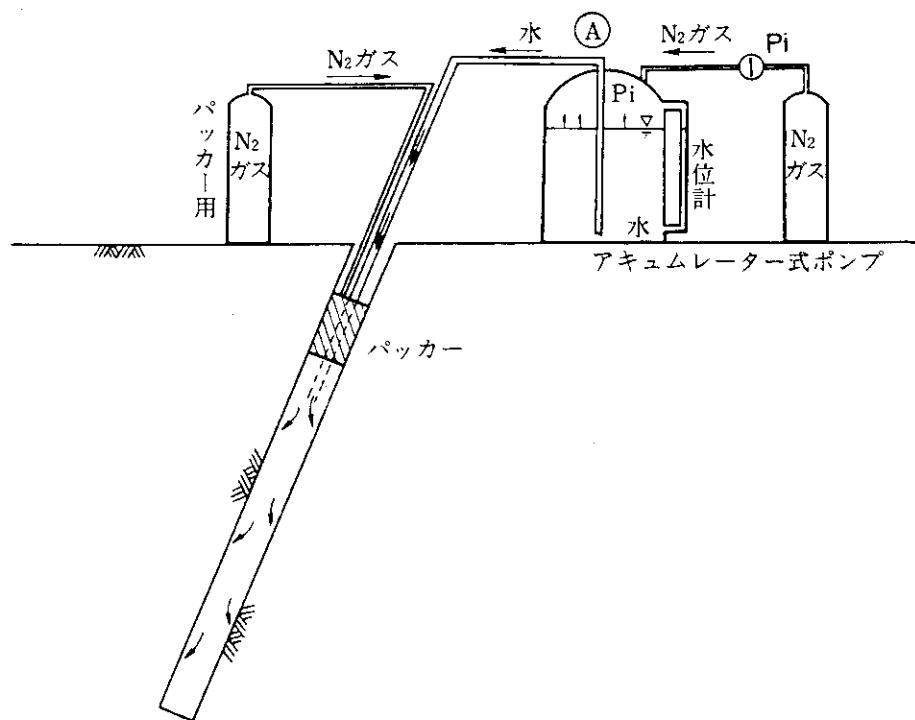


図 3.31 注入法試験装置

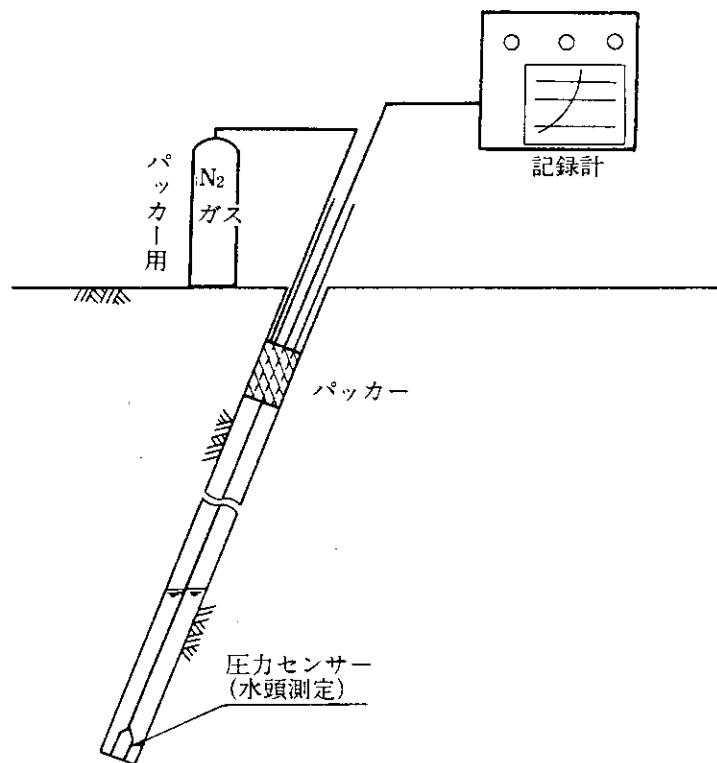


図 3.32 回復法試験装置

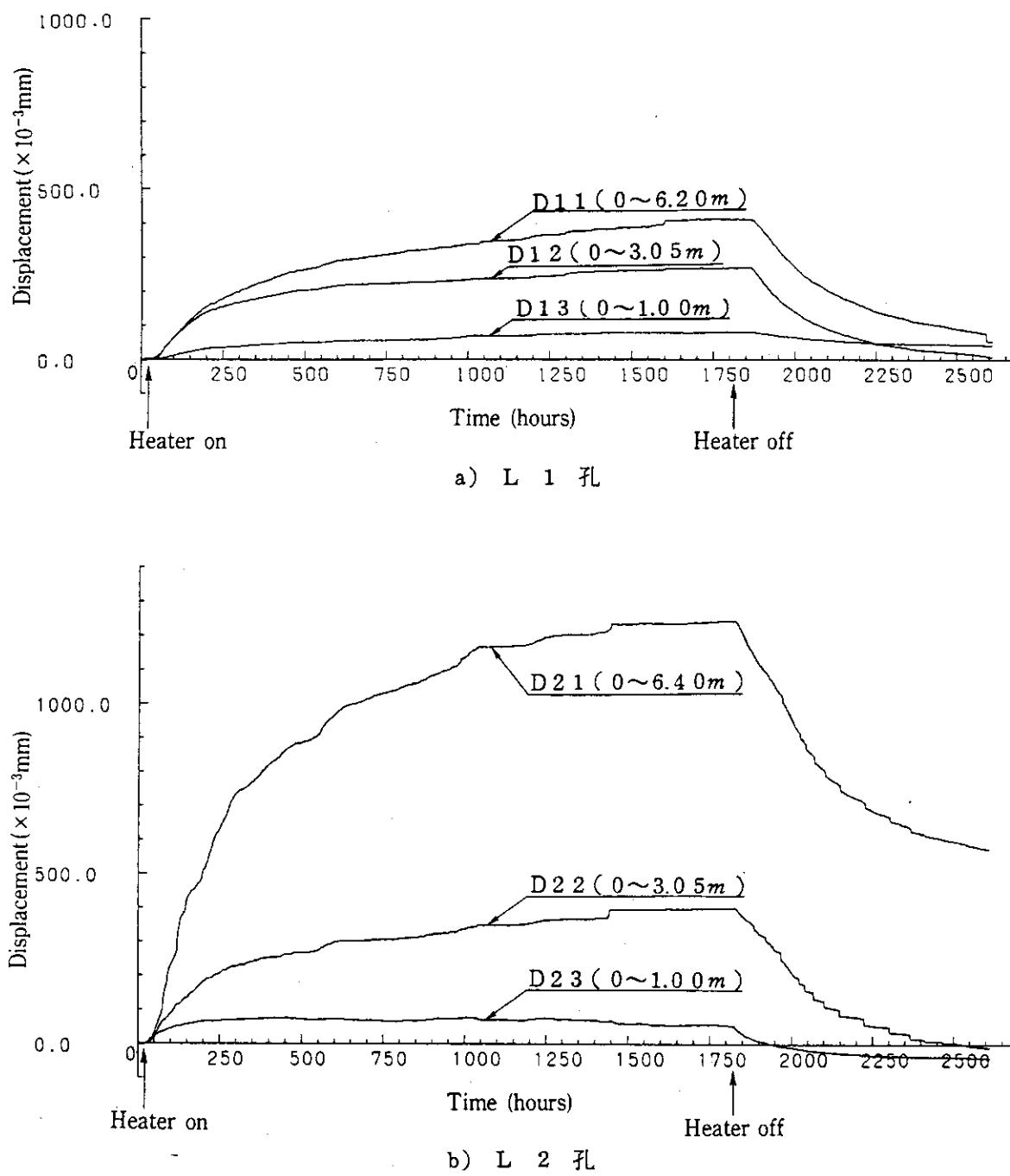


図 3.33 岩盤内変位～時間

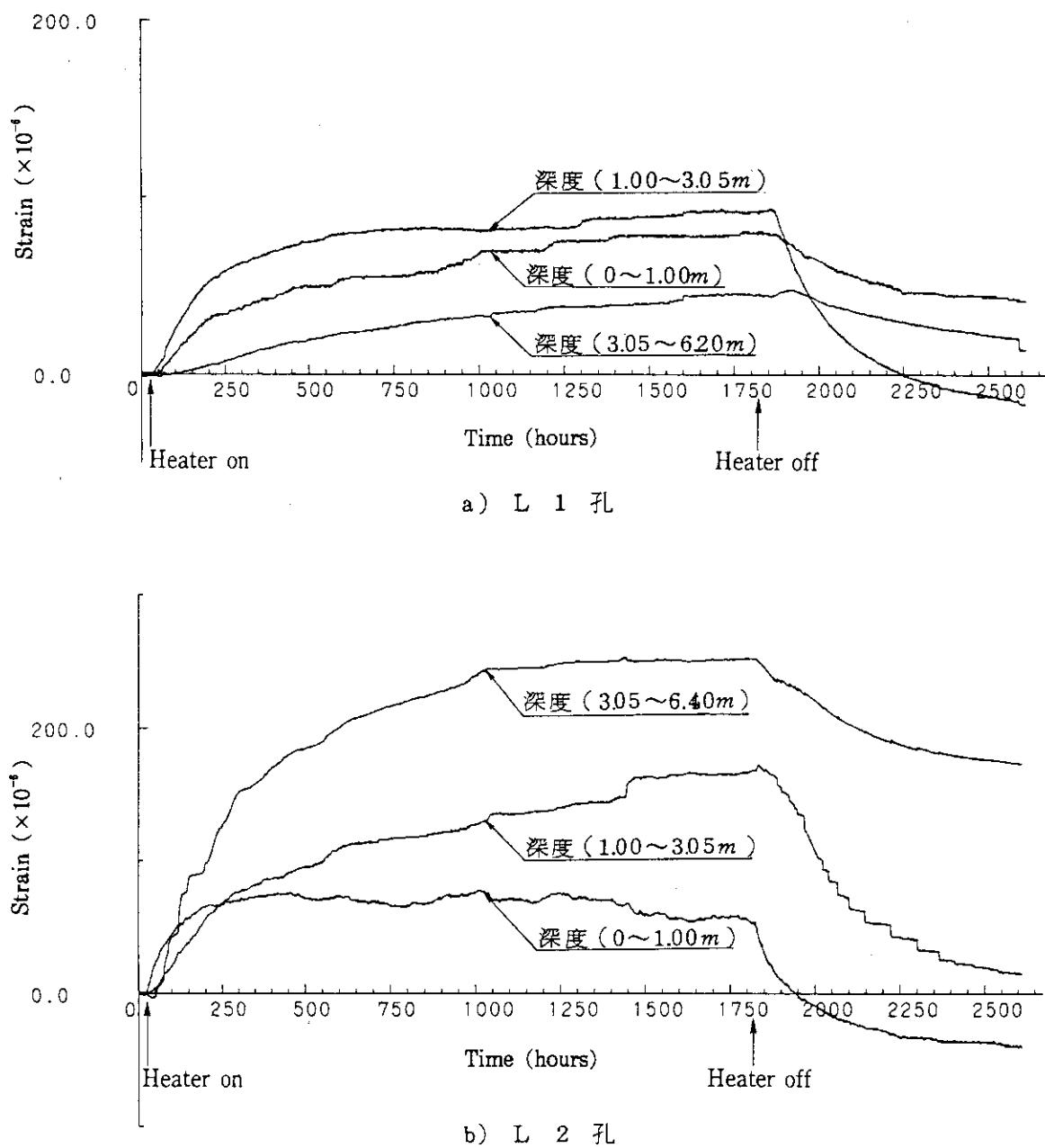


図3.34 岩盤内歪み～時間

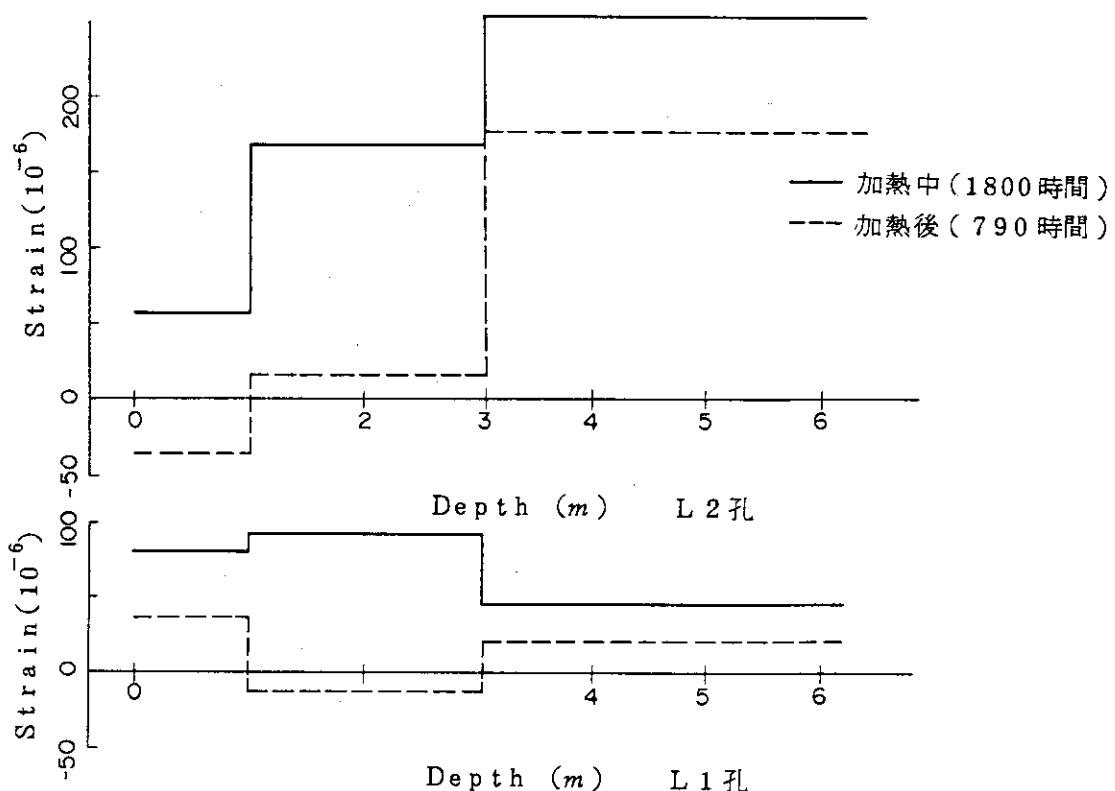


図3.35 岩盤内歪み分布

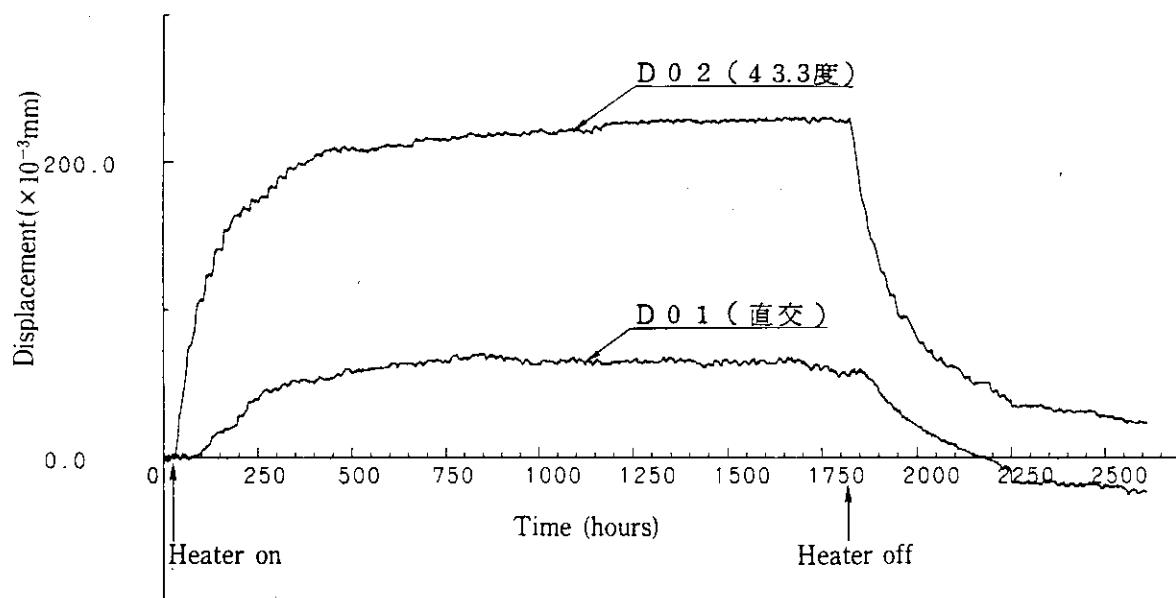


図3.36 岩盤表面変位～時間

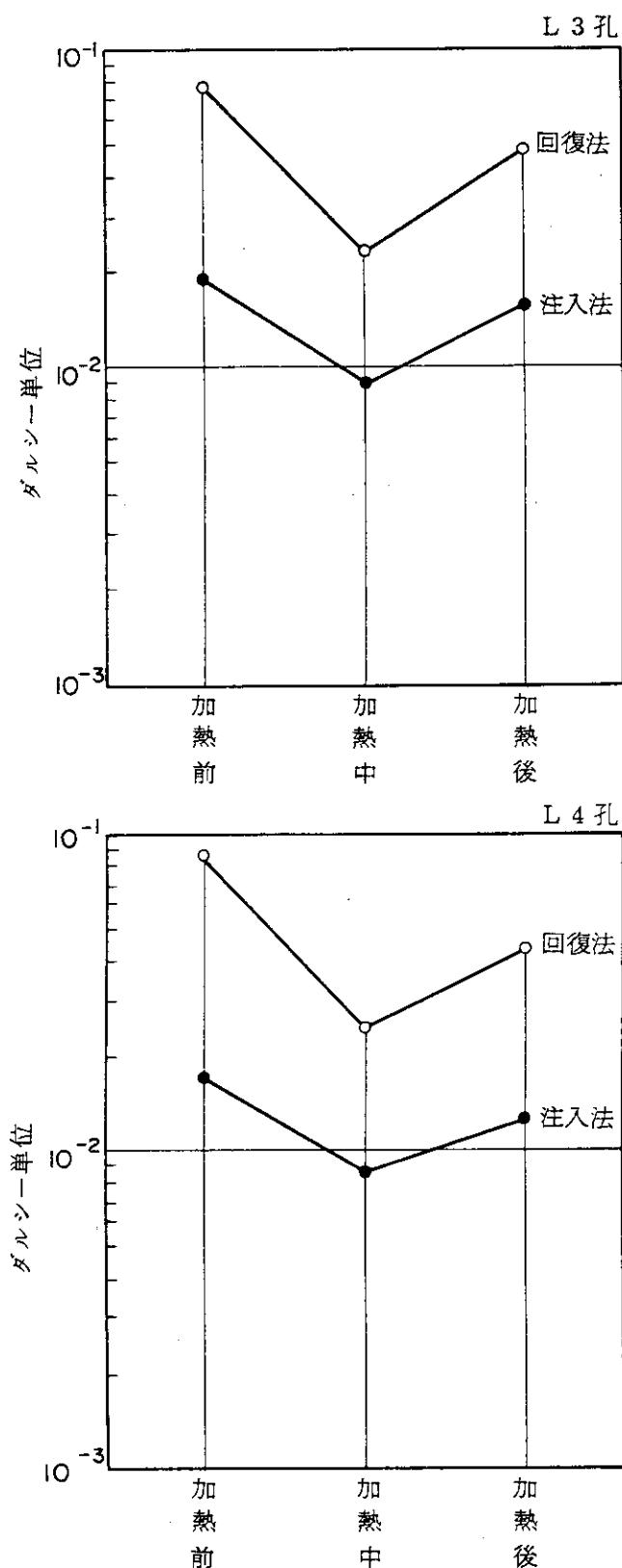


図 3.37 加熱前・中・後の透水係数の変化

表3.6 L1孔, L2孔の温度歪み量

区間	加熱中(1800h)		加熱後(790h)	
	試算ひずみ量 ($\times 10^{-6}$)	実測ひずみ量 ($\times 10^{-6}$)	試算ひずみ量 ($\times 10^{-6}$)	実測ひずみ量 ($\times 10^{-6}$)
L 1 孔				
0 ~1.00m	75.1	80.4	24.1	42.2
1.00~3.05m	70.3	92.6	25.3	-13.0
3.05~6.20m	18.5	46.1	15.7	20.9
L 2 孔				
0 ~1.00m	109.9	56.5	23.7	-37.0
1.00~3.05m	106.9	169.6	22.3	15.7
3.05~6.40m	40.0	254.3	14.7	179.1

4. 元素移行試験

地下深部に処分された高レベル廃棄物固化体より核種が浸出・漏洩し、天然バリアである岩体中を移行していく過程を検討することは重要である。このような地下岩盤中では物質移動の要因として考えられるものに地下水流や分散・拡散現象などがあげられる。一方、岩盤のバリア性能として期待される遅延・希釈効果としては、媒体マトリックス中への拡散、イオン交換、吸収、沈殿、ろ過効果など種々の要因が考えられる。また、各要因の影響度についても岩盤、地下水、元素の各物理・化学特性などによって変わってくると考えられる。このように、移行現象は種々の要因が関与した複合現象としてとらえねばならない。

移行現象のメカニズムに関する調査手法としてトレーサー試験がある。今回実施した元素移行試験では臭素イオン（臭化カリウム溶液）を用い、試験室外より行なった水平調査ボーリング孔をトレーサー注入孔として試験室内へ流れ出てくるトレーサー濃度を測定した。図4.1にその概略を示す。

試験実施にあたっては、注入・サンプリング区域決定のために水平調査ボーリングと試験室内での亀裂調査を行なったほか、サンプリング区域の湧水量調査、影響イオンのバックグラウンド濃度測定、染料（フルオレセン溶液）による注入試験などの予備試験を行ない、注入圧力、注入量、注入濃度、注入期間、採水期間などの実験条件を決定した。

また本試験では、地下水流や分散・拡散などの現象を把握することに主眼をおいて非吸着性のトレーサーと考えられている臭素イオン⁽⁴⁻¹⁾を用いて、39に分割した各採水区域で濃度経時変化、湧水量経時変化を測定した。そして、得られた結果について考察を加えるとともに、簡素化したモデルの適用を試みて諸量の抽出を行ない、検討を加えた。

4.1 予備調査

(1) 亀裂調査

試験室天盤と側壁の亀裂調査結果は、『2.2 試験室』で述べたとおりである。図2.4にあるように試験室天盤には、ほぼ鉛直な亀裂の集中するゾーン（亀裂帯）がみとめられる。一方、トレーサー注入孔として用いた試験室外からの水平調査ボーリング孔については、コア調査、ルジオング試験、ポアホールTV観察などを行ない、亀裂、透水性などを調べた。図4.2にその配置を、図4.3に調査結果を示す。

調査の結果、ボーリング深度47.0～50.0m区間ではほぼ鉛直な亀裂が多く観察されたが、この亀裂集中域は試験室との相対的位置関係から、試験室天盤に観察された亀裂帯と連続しているものと推定された。以上から、あまり亀裂が観察されなかった46.3～46.8m間の50cmにエアパッカーを設置し、これより奥の46.8～50.0m間の3.2mをトレーサー注入区間とした。

サンプリング区域は、図4.4に示すように注入点の下側をほぼカバーするように試験室入口から1.95～8.25m間の天盤および側壁上部とした。そして、それを39の区画に分け、図4.5に

示す展開図のように番号をつけた。各採水区画の面積は表 4.1 に示すとおりである。

(2) 湧水量観測

採水装置の取り付け終了後、ただちに湧水量測定を行なった。測定期間は 408 時間である。測定期間中における各採水区画での平均湧水量を模式的に棒線で示したのが図 4.6 である。採水区域の全区画で湧水が観測されているが、その量にはばらつきがある。また、全般的に亀裂帯にかかった採水区画では比較的大きな湧水量、亀裂帯からはずれた採水区画では比較的小さな湧水量となっているが、亀裂帯からはずれた 1 L 4, 3 R 4 などでは比較的大きな湧水量が観測されている。このことは、現在の試験室近傍の“水みち”が亀裂帯のみではないことを示すものと考えられる。

(3) バックグラウンド濃度測定

本試験において用いたトレーサーは臭化カリウム溶液である。そこで、臭素イオン電極による臭素の分析に影響を与える塩素、臭素、ヨウ素の各イオンについてバックグラウンド濃度の測定を行なった。測定結果を表 4.2 に示す。臭素イオン電極の特性を考慮すると各溶存イオンの濃度は、臭素イオン分析における許容限度以下であった。

(4) 染料（フルオレセン溶液）による注入試験

本試験に先だち、注入期間、採水期間などの実験条件を検討するために、フルオレセン溶液による注入試験を実施した。注入装置は図 4.7 に示したもので、本実験に用いたものと同じものである。試験方法を以下に示す。

- 注入期間； 120 時間
- 採水期間；注入開始より 362.5 時間
- 注入溶液；フルオレセンナトリウム ($C_{20}H_{10}O_5Na_2$) を現地湧水で溶解した 2500 ppm 溶液
- 注入速度；注入量が約 1 (l/h) で一定になるように注入圧力を制御した。図 4.8 に制御状態を示す。
- 濃度測定；トレーサー検出後から 120 時間までは 3 時間間隔、それ以降は 12 時間間隔で採水し、蛍光光度計を用いて直ちに試験室で測定した。

図 4.9 に各区画で採水期間中に検出された最大濃度比を模式的に示す。亀裂帯にかかる区画では、すべて C/C_0 が 0.1 以上の値を示し、1 R 2 では最大 0.986 となった。また、亀裂帯にかかる区画でフルオレセンが検出されたのは亀裂帯近傍に限られている。一方、湧水量観測において大きな湧水を示していた 1 L 4 ではフルオレセンは検出されず、同じく 3 R 4 においても C/C_0 は 0.0014 と小さな値にとどまった。

以上の結果より、試験対象とした岩盤においては亀裂帯が元素移行の主経路となっており、そこからさらに周辺岩盤へ拡散しているものと考えられた。また、最大濃度を示した 1 R 2 において注入開始後 47 時間でフルオレセンが検出され、それに引き続き各区画で検出されていることから、亀裂帯中の移行現象を把握するには 1 ヶ月程度の試験期間が必要であると判断された。

4.2 本 試 験

(1) 試験方法

予備試験結果をふまえて本試験の実験条件を以下のように決定した。注入装置、採水装置などは予備試験と同じものである。

- a. 注入期間；500 時間
- b. 採水期間；注入開始より 958.5 時間
- c. 注入溶液；臭化カリウム（KBr）を現地湧水で溶解した 8900 ppm 溶液
- d. 注入速度；注入量が約 20 (l/h) で一定になるように注入圧力を制御した。その結果、総注入量は 410.07 l (19.7 l/day) となり、注入圧力は 0.19 ~ 0.37 kgf/cm² となった。
- e. 濃度測定；注入開始から検出確認までは連続分析を、検出確認から 120 時間後までは 3 時間間隔で、それ以降は 12 時間間隔で採水し、臭素イオン電極を用いて直ちに測定した。

(2) 試験結果および考察

図 4.10, 4.11 に濃度比 (C/C_0) の経時変化(破過曲線)と単位面積、単位時間あたりの湧水量 (p) を各採取区画ごとに示す。図 4.12 には 100, 300, 500 時間後における C/C_0 の分布状況を模式的に示した。検出濃度は亀裂帯に近い区画ほど早く立ち上がり、高濃度に達している。逆に亀裂帯から遠い区画では立ち上がりは遅く、緩やかで、濃度も低くなっている。つまり、時間の経過とともに亀裂帯に沿って Br が流出してきていることがわかる。しかし、全区画で最大濃度比は 1.0 までには達しておらず、その値にもばらつきがある。また、亀裂帯近傍の区画では注入期間中に湧水量の増大がみられ、注入終了の 500 時間後付近で急激に減少している。その増減状況を明らかにするために湧水の増分率 ($q_a - q_b / q_b$ ここで q_a ; 注入中 0 ~ 500 時間の平均湧水量 q_b ; 注入終了後 500 ~ 958.5 時間の平均湧水量) について模式的に示したのが図 4.13 である。大きな増分率を示しているのは亀裂帯近傍に限られ、中でも注入点のほぼ真下にあたる 3 R 2 などで顕著であることがわかる。このことは、湧水の増大がトレーサー注入によるものであり、亀裂帯が直接の流路となっていることを示している。

一方、試験前に多量の湧水を記録していた 1 L 4 や、亀裂帯からやや離れた位置にあるかなり顕著な亀裂が観察されている 2 L 2 から 5 L 2 にかけての区画では、まったく Br は検出されず、湧水量の変化もほとんどみられない。このことから、これらの亀裂と亀裂帯とは直接つながっていないものと考えられる。しかし、ほとんど亀裂が観察されなかった 1 R 1, 4 R 3, 5 R 3 などの区画でもある程度の時間の後、少量ながらも Br が検出されており、亀裂帯中の移行だけでなく岩体中への拡散などによる移行が生じているものと考えられる。

以上より、今回の調査対象である岩盤においては注入点からサンプリング区域までの亀裂のつながりは比較的単純で、トレーサーはその亀裂中を主経路として移行している。しかし、岩体中へも数 100 時間という比較的早期に、拡散などによりトレーサーは移行していると考えられる。

4.3 一次元フラクチャーモデルの適用

(1) 一次元フラクチャーモデル

今回の試験結果を解析するにあたり、従来より提唱されている“一次元のシングルフラクチャーモデル⁽⁴⁻²⁾”の適用を試みた。本モデルでは、図4.14に示したような飽和状態と仮定できる岩体中に一本の薄い、真っ直ぐな亀裂がある系を考えている。

本モデルにおける主な仮定は以下のとおりである。

- ・亀裂内の地下水流速は一定で、放出源（トレーサー注入地点）からの物質の供給は一定である。
- ・亀裂の幅は、その長さに比べて十分に小さい。
- ・亀裂内において、その横断方向における濃度分布は常時完全に均質である。
- ・岩体はポーラスメディアであるが、透水性は非常に小さく流速は無視できる。
- ・亀裂に沿っての物質移動は、岩体中に比べてはるかに早い。

また、本モデルにおいて考えているプロセスは次のようなものである。

- ・亀裂中での亀裂に沿っての軸方向移流
- ・亀裂中での亀裂に沿っての軸方向分散（mechanical dispersion）
- ・亀裂中での亀裂に沿っての軸方向分子拡散（molecular diffusion）
- ・亀裂から岩体中への拡散

一般的に、mechanical dispersionとは亀裂内流速の放物線分布や亀裂表面の粗度などの相乗効果による分散現象を考えている。そして、このmechanical dispersionとmolecular diffusionを合わせたプロセスが分散・拡散現象全体を支配する hydrodynamic dispersionと定義されている⁽⁴⁻³⁾。

$$D = D' + D_m \quad (1)$$

D : hydrodynamic dispersion coefficient [L²/T]

D' : mechanical dispersion coefficient [L²/T]

D_m : molecular diffusion coefficient [L²/T]

さらに、D'は流速に依存するものとして次のように表わされる。

$$D' = \alpha_L \cdot v \quad (2)$$

α_L : dispersivity [L]

v : 亀裂中の平均流速 [L/T]

ここで、dispersivity (α_L)とは次元[L]を持ったパラメータで、その元素固有のものである。

さらに、図4.14における物質収支より次の関係式が導ける。

(亀裂中)

$$v \frac{\partial C}{\partial z} - D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{q}{b} = 0 \quad 0 \leq z \leq \infty \quad (3)$$

z ; 亀裂に沿っての座標系 [L]

t ; 時間 [T]

C ; 亀裂中の濃度 [M/L³]

2b ; 亀裂幅 [L]

q ; 亀裂軸に対し直角方向への移行量 [M/L²T]

(岩体中)

$$-D^* \frac{\partial^2 C'}{\partial x^2} + \frac{\partial C'}{\partial t} = 0 \quad 0 \leq x \leq \infty \quad (4)$$

x ; 亀裂軸に対し直角方向の座標系 [L]

C' ; 岩体間隙中の濃度 [M/L³]D* ; effective diffusion coefficient [L²/T]

ここで

$$D^* = \tau \cdot D_m \quad (5)$$

 τ ; tortuosity

また、(3)式における移行量は(4)式との間で次のような境界条件となる。

$$q = -\theta D^* \left. \frac{\partial C'}{\partial X} \right|_{x=-b} \quad (6)$$

θ ; 間隙率

さらに放出源からの放出濃度 (C₀)、放出時間 (T) を用いて、その他の境界条件として次のようなものが考慮できる。

$$C(0, t) = C_0 \{ h(t) - h(t-T) \} \quad (3-a)$$

$$C(\infty, t) = 0 \quad (3-b)$$

$$C(z, 0) = 0 \quad (3-c)$$

$$C'(b, z, t) = C(z, t) \quad (4-a)$$

$$C'(\infty, z, t) = 0 \quad (4-b)$$

$$C'(\infty, z, t) = 0 \quad (4-c)$$

(2) 本実験への適用

本実験結果へ本モデルを適用するにあたり、以下の条件を仮定した。

- 4.3(1)において述べた“本モデルにおける仮定”を満たす。
- 亀裂体にかかる区画とかからない区画の組み合せで解析を行ない、同時にフィットする場合についてのパラメータ抽出を行なう。(例; 図4.15における①と④, ②と⑤, ③と⑥)

- ・図4.15に示したとおり、亀裂にかかる区画の濃度は亀裂中の濃度(C)に対応し、亀裂にかかる区画の濃度(C')は図中の計算式によるものとする。
- ・亀裂帯は本モデルで考えているようなシングルフラクチャーの集合体であると考える。そして岩体中への拡散濃度源となるのは、その観測点に一番近い位置(亀裂帯の端)にある亀裂のみである。

以上の仮定のもとで、1R1-1R2, 3R1-3R2, 4R1-4R2の3組の断面について本モデルを適用し、パラメータの抽出をおこなった。ここで、間隙率(θ)は室内試験結果をもとに0.01とし、ジオメトリーに関する値(x_1, x_2, z)などは図4.5に示した展開図をもとに座標計算を行なって決定した。また、dispersivity(α_L)は溶質の固有値であることから3組の適用断面すべてで共通の値であるとした。これらの条件のもとで亀裂中の流速(v)、亀裂中の分散係数(D)、岩体中の拡散係数(D^*)、亀裂幅($2b$)について、現実的な範囲内で試行錯誤してフィッティングを行ない、値を抽出した。なおフィッティングにあたっては、トレーサーの流出開始時間、上昇カーブの形状、最高濃度などに特に留意してカーブの類似性から判断した。

フィッティング結果を表4.3に示す。また、各区画についてのフィッティングカーブを図4.16～4.18に各区画ごとに示す。

亀裂中の流速は、 $v = 0.10 \sim 0.12 \text{ (m/h)} = 2.8 \sim 3.3 \times 10^{-5} \text{ (m/s)}$ というばらつきの少ない値が得られた。また亀裂幅についても、 $2b = 0.7 \sim 1.0 \text{ (mm)}$ とばらつきが少ない。このことから、今回対象とした3組の解析断面においては、亀裂の凹凸や曲がりなどの影響度合がほぼ同程度であり、注入点からサンプリング地点までの直線距離を用いて簡素モデル化できる系であったと言える。つまり、もし亀裂のつながり方や凹凸・曲がり度合などが単純なものではなく断面ごとに異なる複雑なものであれば、 v や $2b$ の値は断面ごとに異なってくると考えられるからである。また、近似的に亀裂帯中の流速を求める方法として、亀裂帯にかかる区画についての最終濃度の1/2濃度到達時間と距離から流速を求める方法として、亀裂帯にかかる区画についての最終濃度の1/2濃度到達時間と距離から流速を求める方法として、亀裂帯にかかる区画についての最終濃度の1/2濃度到達時間と距離から流速を求める方法として、亀裂帯にかかる区画についての最終濃度の1/2濃度到達時間と距離から流速を求める方法として、亀裂帯にかかる区画についての最終濃度の1/2濃度到達時間と距離から流速を求める方法として、 $1.0 \sim 3.0 \times 10^{-5} \text{ (m/s)}$ となる。オーダーからみてほぼ一致した値と言え、このことからも妥当な値が得られたと言える。

次に、亀裂中の分散係数(D)については、dispersivity(α_L)によって間接的にその妥当性を検討できる。そこで今回得られた解析結果、 $\alpha_L = 0.5 \text{ m}$ をスウェーデンにおけるフィールド試験結果と比較してみる⁽⁴⁻¹⁾。このKBSが行なった沃素を用いたトレーサー試験は、花崗岩体中において、深さ約100mの2本のボーリング孔の間で行なわれた試験である。間隔は約30mで、2本の卓越した亀裂でつながっている。この試験では、 $\alpha_L = 0.9 \text{ m}$ が得られている。沃素が臭素と同じく非吸着性の元素で比較的類似した移行挙動をすると思われることから、本実験結果と比較してみるとオーダー的には良い一致がみられたと言える。

岩体中の拡散係数(D^*)については、 $D^* = 0.1 \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{ (m}^2/\text{h)} = 0.3 \sim 2.8 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$ というばらついた値が得られた。試験場周辺が花崗岩一色であることから考えて、このばらつきの原因は微細な亀裂の頻度やつながりの違いによるものと考えられる。つまり、本モデルにおいては卓越した亀裂の集まりである亀裂帯のみを解析上の亀裂として取扱っており、それ以外の細かい亀裂などの影響を一様な特性を持った岩体マトリックスに置き換えている。しかし、実際には3組の解析断面における岩体マトリックスの亀裂特性が異なっていたと考えられ

る。また、得られた値について検討してみると、一般的な水中の分子拡散係数 (D_m) のオーダーと考えられている 10^{-9} (m^2/s)⁽⁴⁻⁴⁾ に比べてかなり大きな値となっている。これは、岩体の微細な亀裂を通じた流れがあるためと考えられ、そのことによる mechanical dispersion の影響により説明でき、岩体マトリックス中は移流よりも分散・拡散のほうが卓越しているとして本モデルを考えることができる。以上のことから、亀裂を含む岩体中の移行評価においては、どの程度の亀裂まで“亀裂”として評価し、その他を均質な特性を持つマトリックスとして評価できるのか、評価目的、評価対象に応じて検討する必要がある。

本モデルはジオメトリーに関する値、亀裂中の流速などにかなり敏感である。したがって、サンプリング区域の表面の凹凸や、図 4.15 中に示したような濃度計算上の位置についての平均化などは誤差を生む原因になると考えられる。よって、ジオメトリーに関する測定精度の向上、観測地点を面ではなく点でとらえるようにすることなどによって、解析の精度はさらに向上するものと考えられる。そして、今回の解析においては濃度の経時変化のみから流速の抽出を行なっているが、自由面や周辺水頭場などの境界条件をおさえ、浸透流解析などの水文学的見地からのアプローチを合わせて行なうことにより、元素移行評価の全体的な精度向上が望めるものと考えられる。

4.4 まとめと今後の課題

(まとめ)

- ・亀裂を含む花崗岩体中の元素移行現象は、亀裂中の移行が支配的である。しかし、亀裂周辺には微細な亀裂が存在すると考えられ、評価目的、評価対象に応じてそれらの影響も考慮しなければならない。
- ・自然界に存在する亀裂を含む岩体中の移行現象を簡素化したモデルに置き換えて解析を行ない、ほぼ妥当なパラメータの抽出を行なうことができた。今後の移行評価研究においても、ジオメトリー、境界条件のおさえ方について測定精度の向上をはかれば、移行現象は簡単なモデルにより評価可能である。

(今後の課題)

- ・亀裂を含む岩体中の移行評価において評価すべき岩体の規模は、精度、モデル化に大きな要因となっていると考えられる。また、自由面や水頭場などの水文学的条件によっても左右されるものと考えられる。したがって、評価目的に応じて、周辺場を乱さないようにボーリング孔を使った深部での実規模試験を行なうことが必要である。
- ・移行の主経路となりうるような地下深部の亀裂ネットワークを精度良く把握できる探査技術の開発が、元素移行についての研究を進める上で重要である。

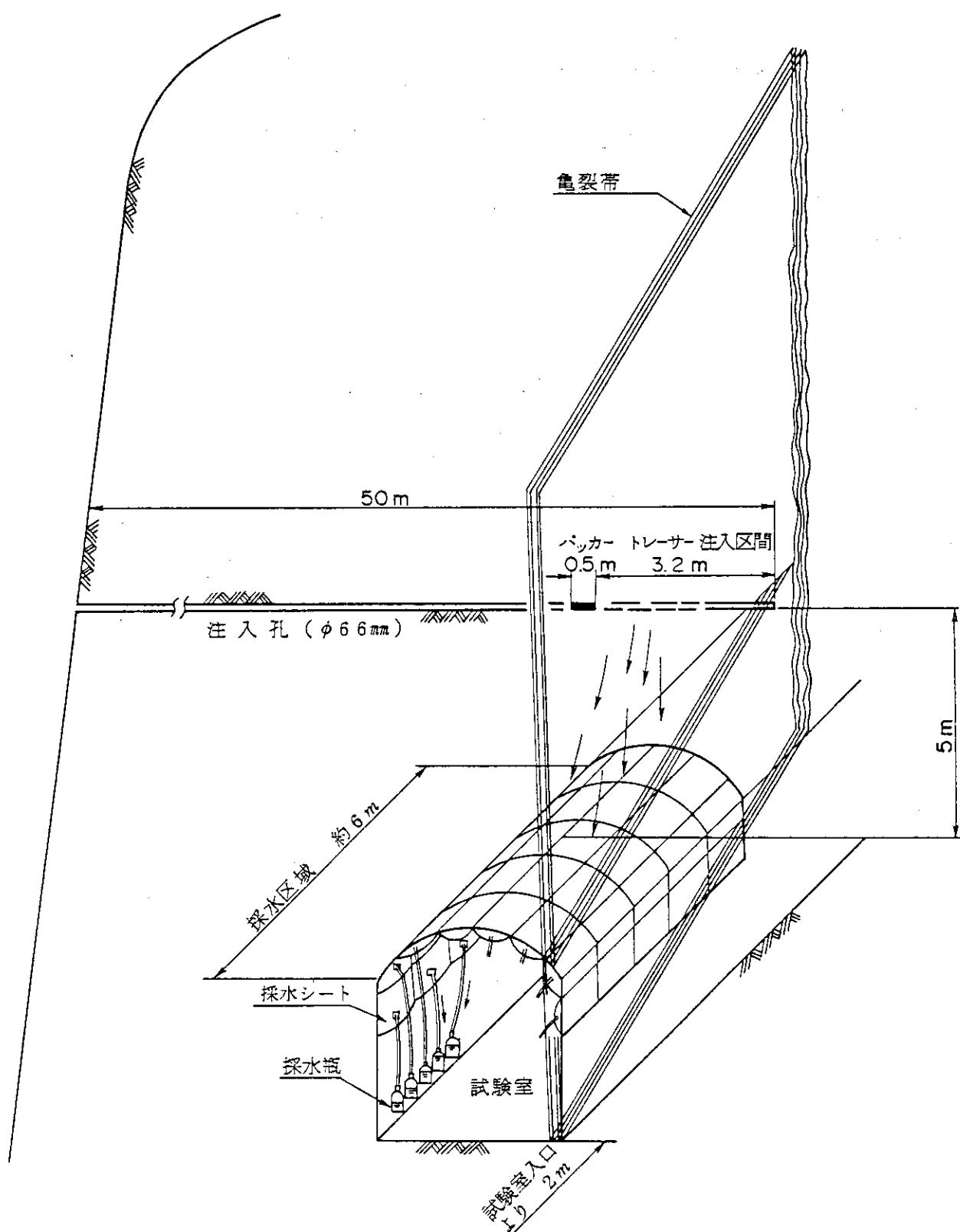


図4.1 元素移行試験概略図

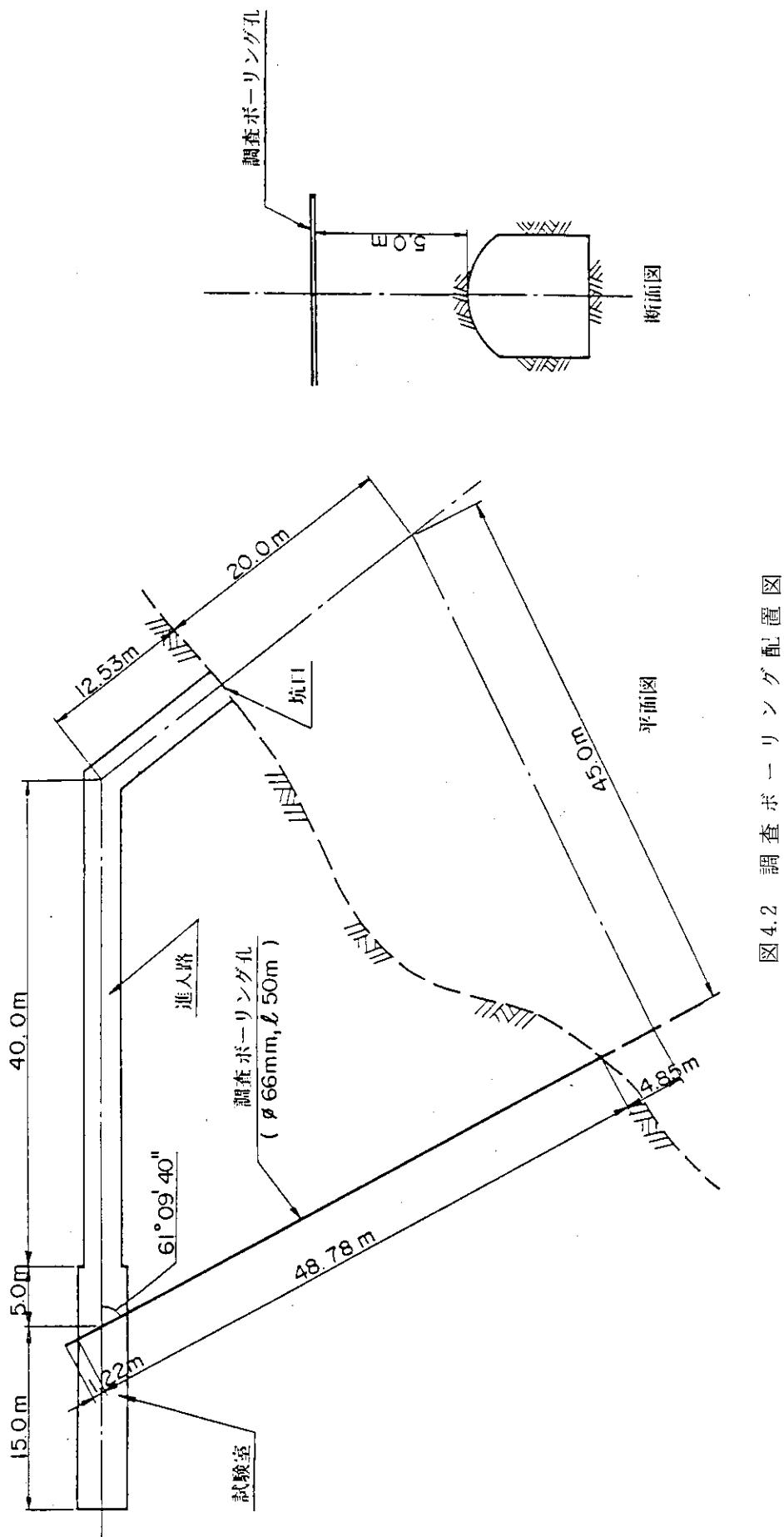


図4.2 調査点一リソダ配置図

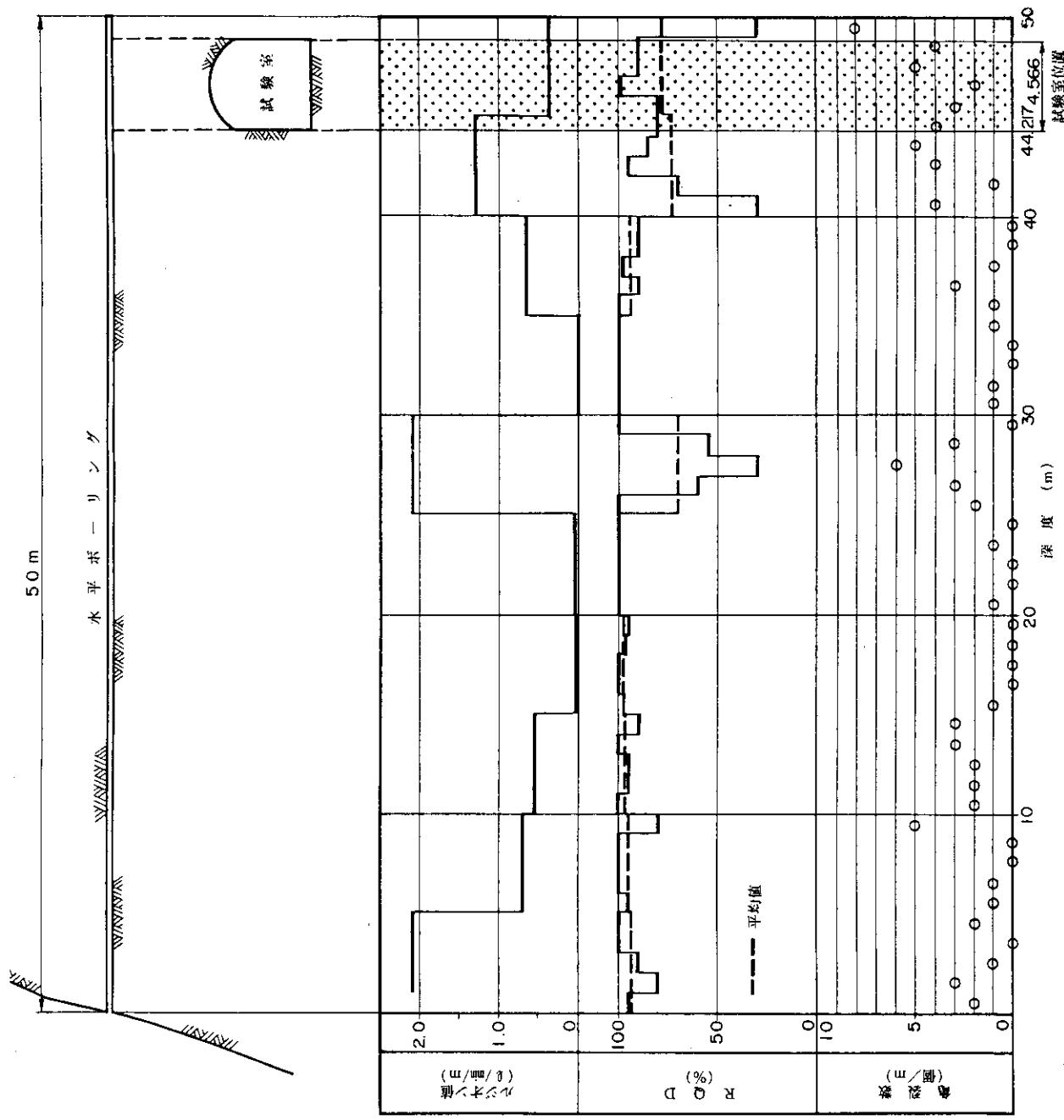


図 4.3 調査ボーリング結果

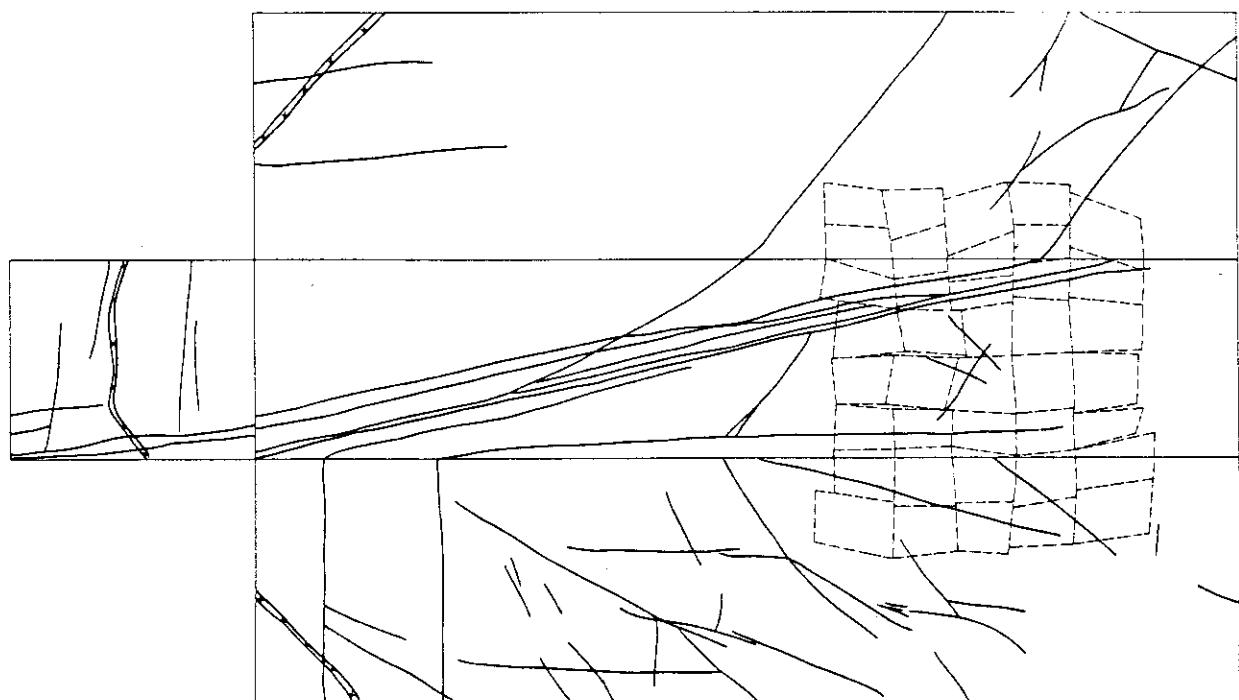


図4.4 サンプリング区域

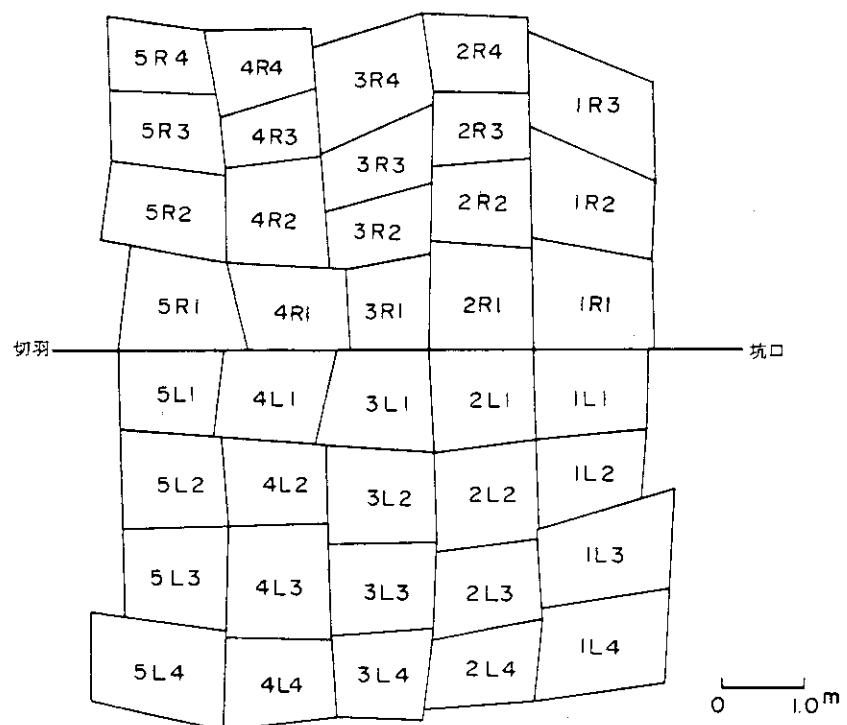


図4.5 サンプリング区画展開図

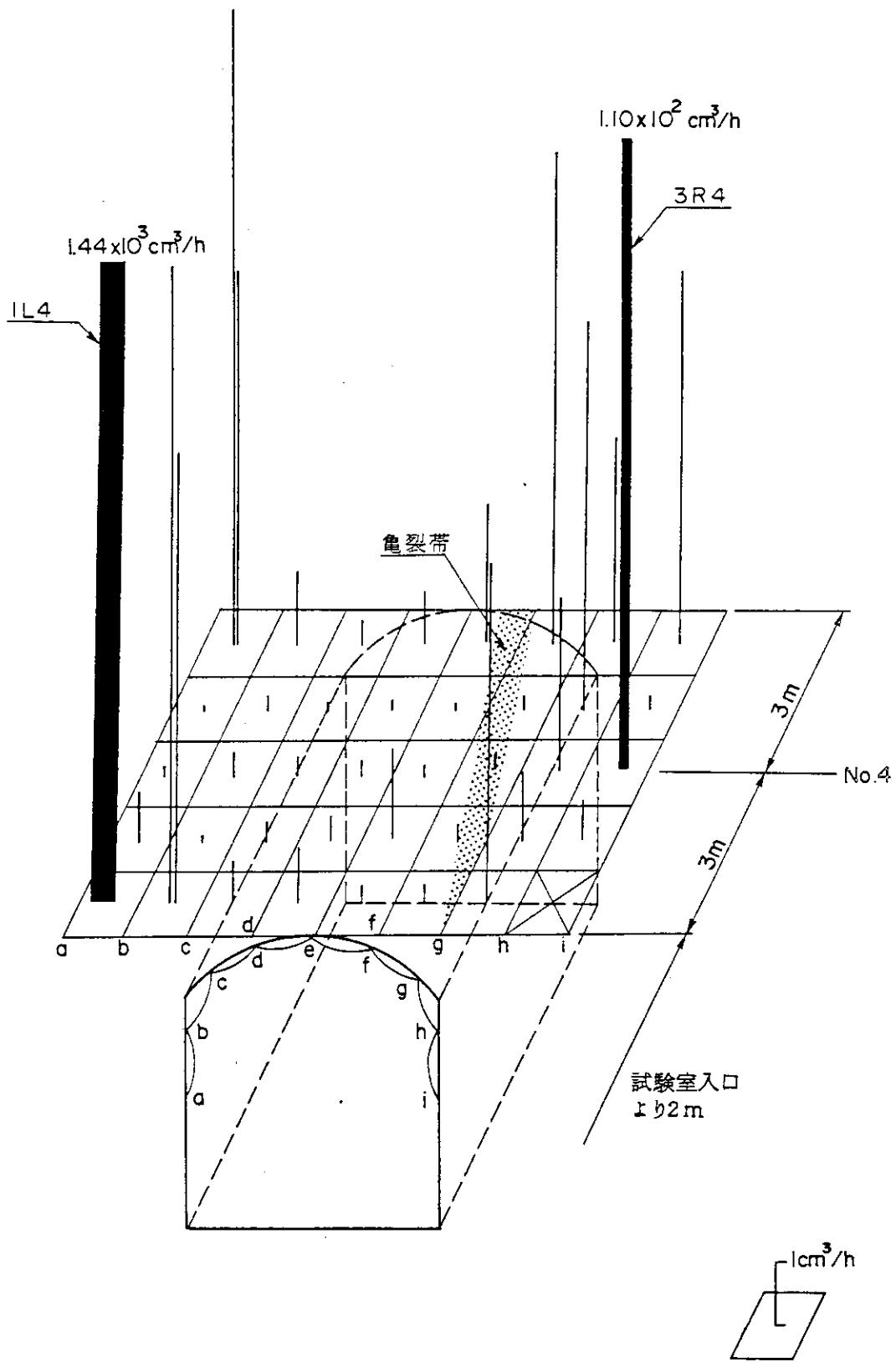


図 4.6 湧水量観測結果

表4.1 サンプリング区画面積

採水区画	面 積 (m^2)	採水区画	面 積 (m^2)
1 R 1	1.49	1 L 1	1.28
2	1.53	2	1.25
3	1.49	3	1.32
		4	1.76
2 R 1	1.29	2 L 1	1.36
2	1.20	2	1.31
3	0.71	3	1.29
4	0.75	4	1.09
3 R 1	0.97	3 L 1	1.58
2	1.17	2	1.38
3	1.04	3	1.19
4	1.47	4	1.10
4 R 1	1.20	4 L 1	1.36
2	1.33	2	1.30
3	1.50	3	1.58
4	0.75	4	1.11
5 R 1	1.53	5 L 1	1.09
2	1.43	2	1.49
3	1.13	3	1.66
4	1.15	4	1.59
R側計	23.13	L側計	27.09
総 計 50.22			

表4.2 バックグラウンド濃度測定結果

n d : 検出限界以下

採水区画	C _{Cl} ⁻	I ⁻	Br ⁻	採水区画	C _{Cl} ⁻	I ⁻	Br ⁻
1 R 1	1.7			1 L 1	2.4		
2	2.3			2	3.7		
3	3.5	検	検	3	5.0		
				4	5.0	検	検
2 R 1	4.2	出	出	2 L 1	1.4	出	出
2	2.3			2	1.7		
3	3.6	限	限	3	n d	限	限
4	3.5			4	2.4		
3 R 1	n d	界	界	3 L 1	1.7	界	界
2	1.8			2	1.5		
3	3.5	以	以	3	n d	以	以
4	4.0			4	3.0		
4 R 1	n d	下	下	4 L 1	3.2	下	下
2	n d			2	1.8		
3	3.6			3	n d		
4	n d			4	3.2		
5 R 1	3.5			5 L 1	2.2		
2	3.4			2	2.9		
3	2.3			3	3.2		
4	3.2			4	4.2		

各イオンの検出限界

C_{Cl}⁻ 0.35 ppmI⁻ 0.013 ppmBr⁻ 0.08 ppm

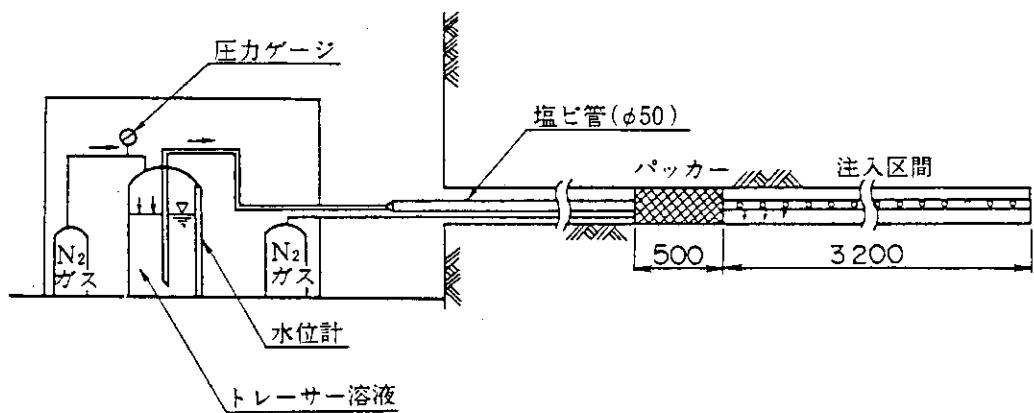


図4.7 元素移行試験注入装置

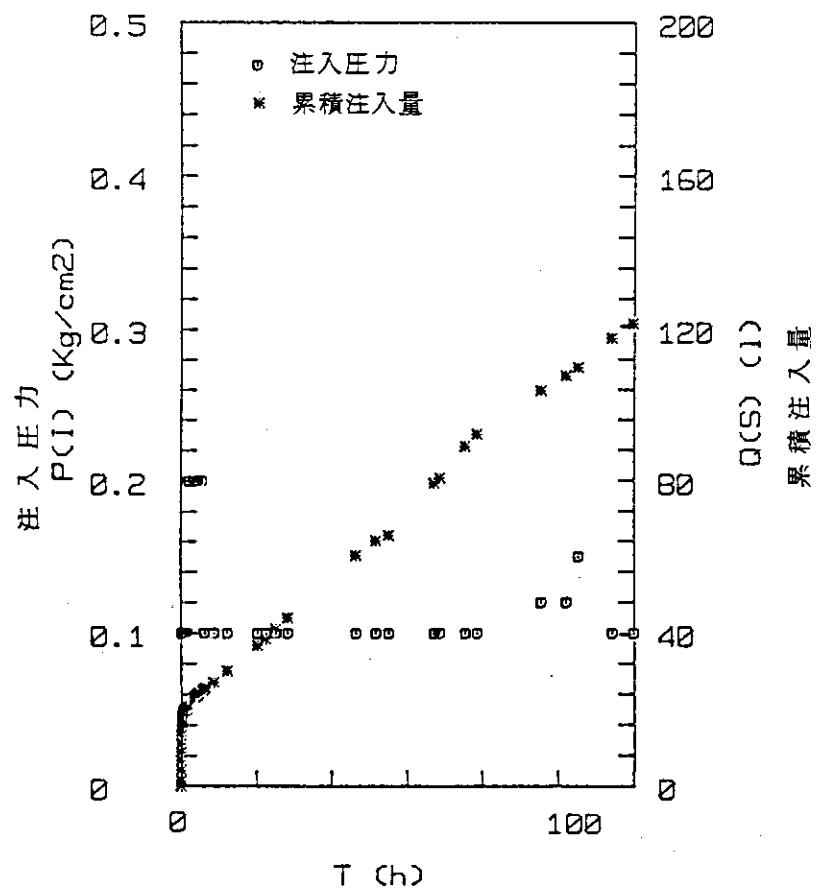


図4.8 フルオレセン溶液注入圧力・注入量

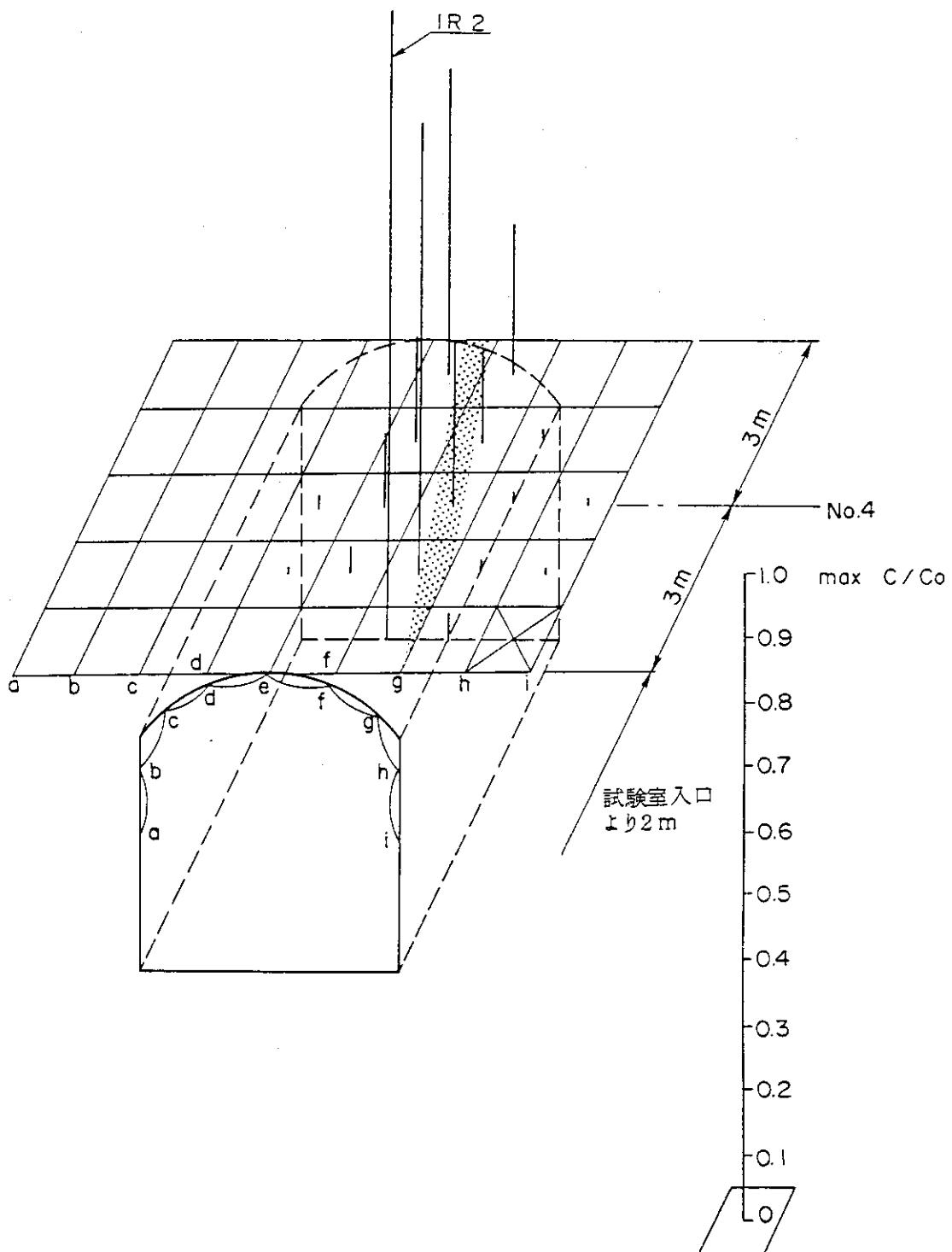
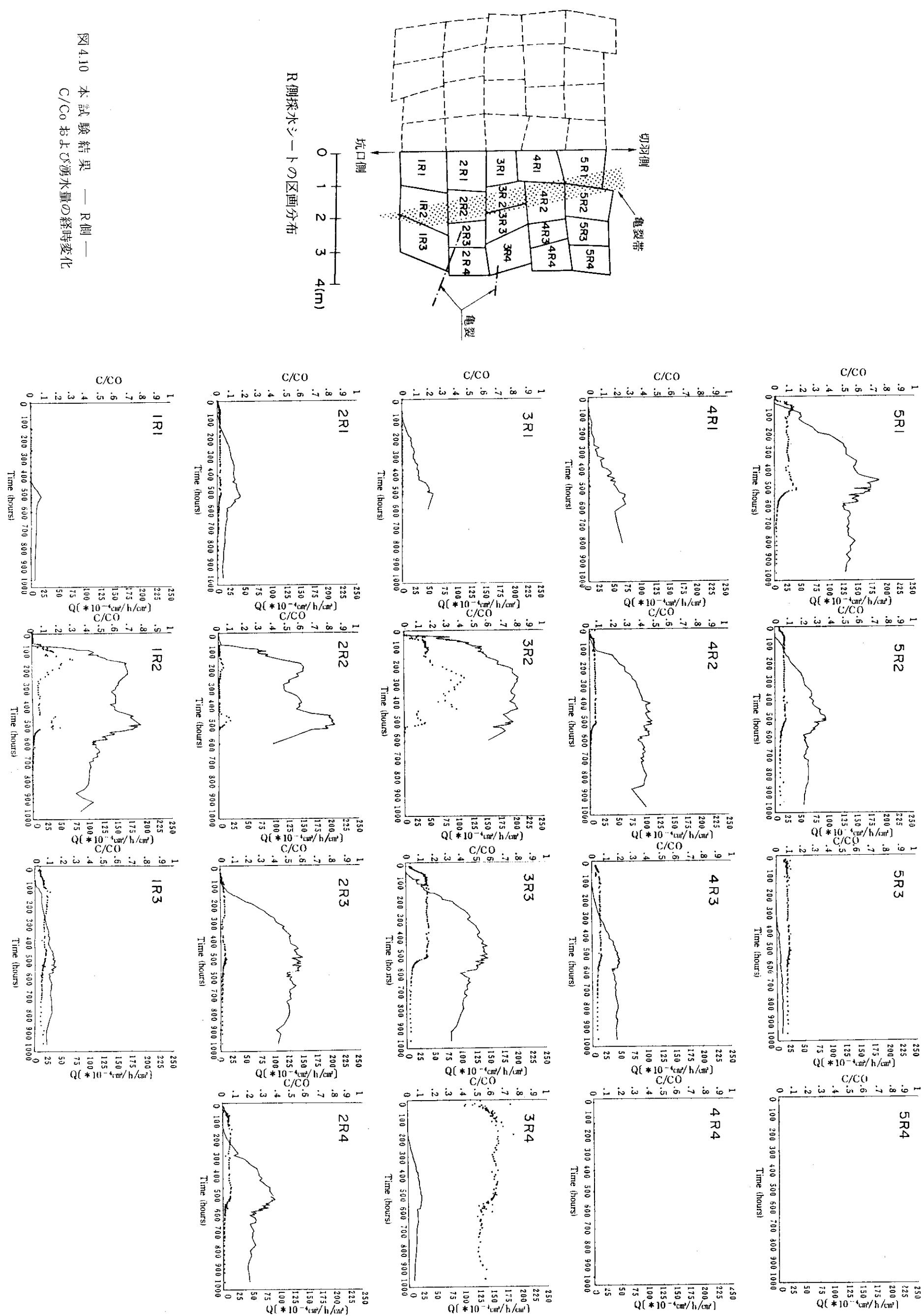


図 4.9 フルオレセン濃度 (max C/Co)



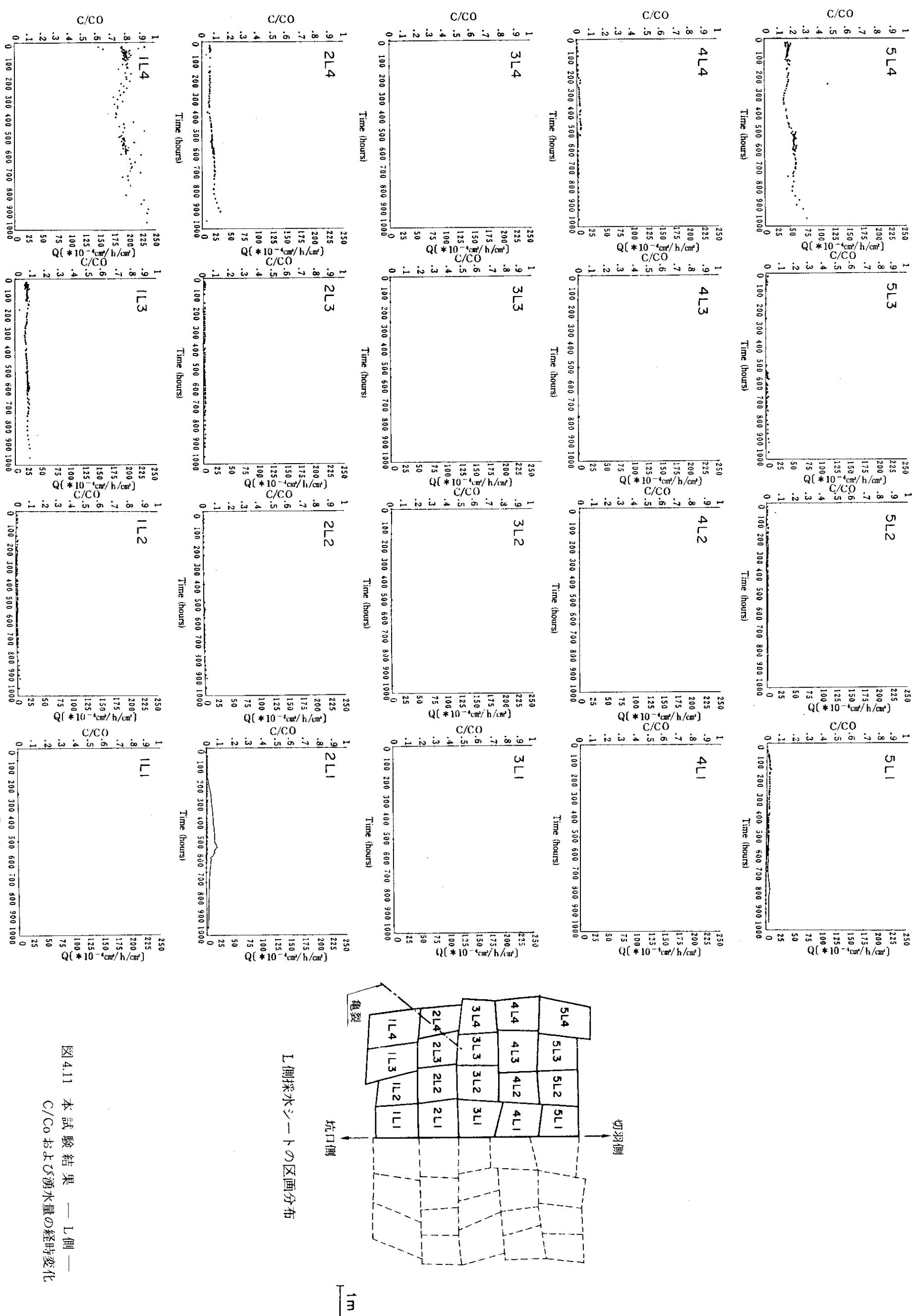
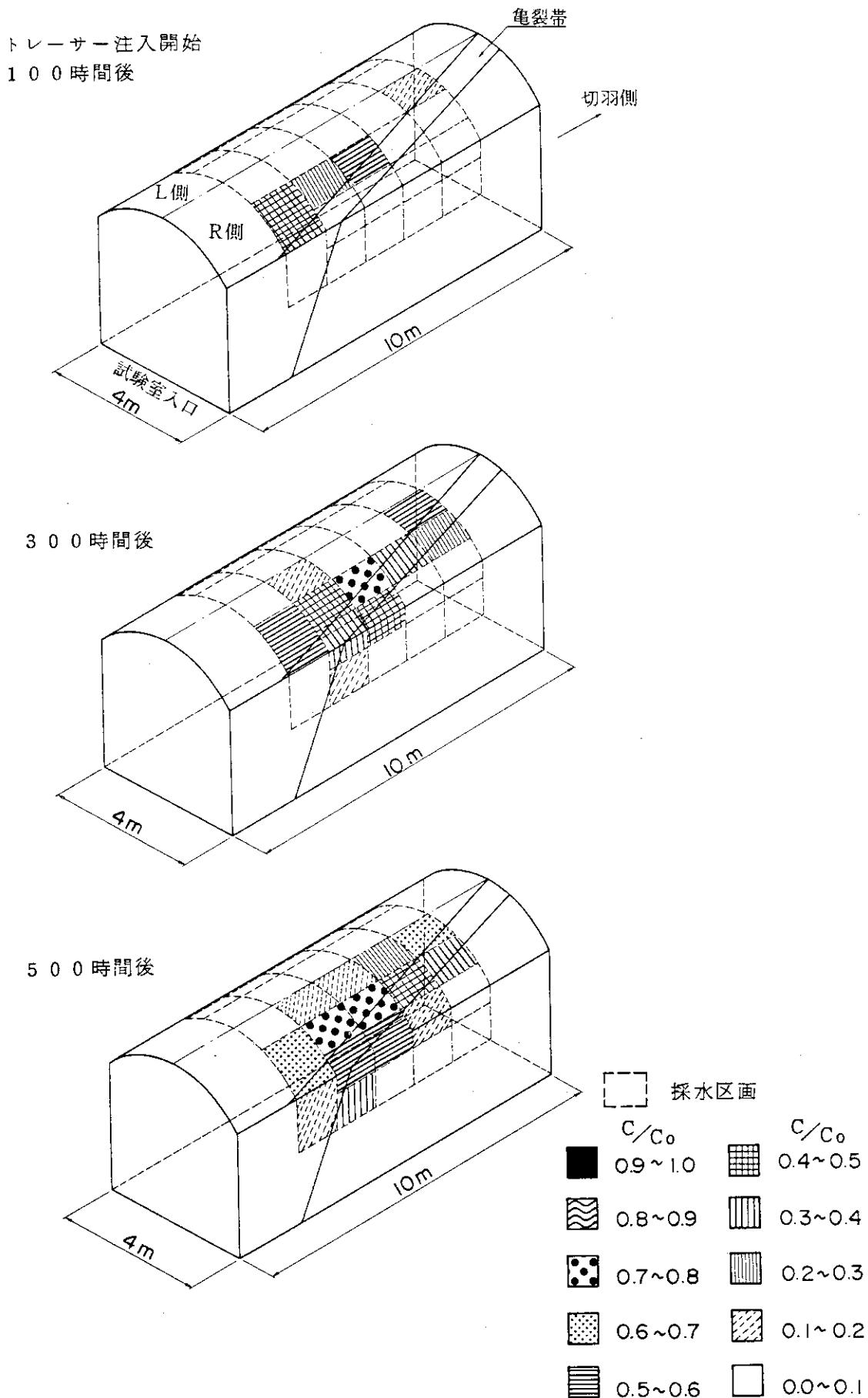


図4.11 本試験結果—L側—
C/Coおよび湧水量の経時変化

図 4.12 100, 300, 500 時間後の C/C_0 分布

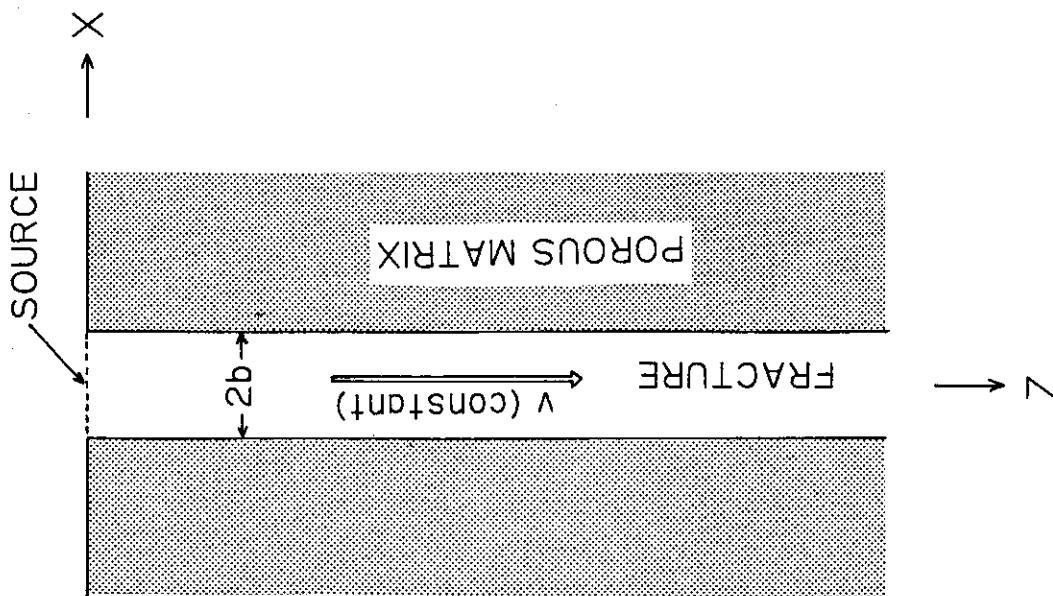


図4.14 Fracture-Matrix system

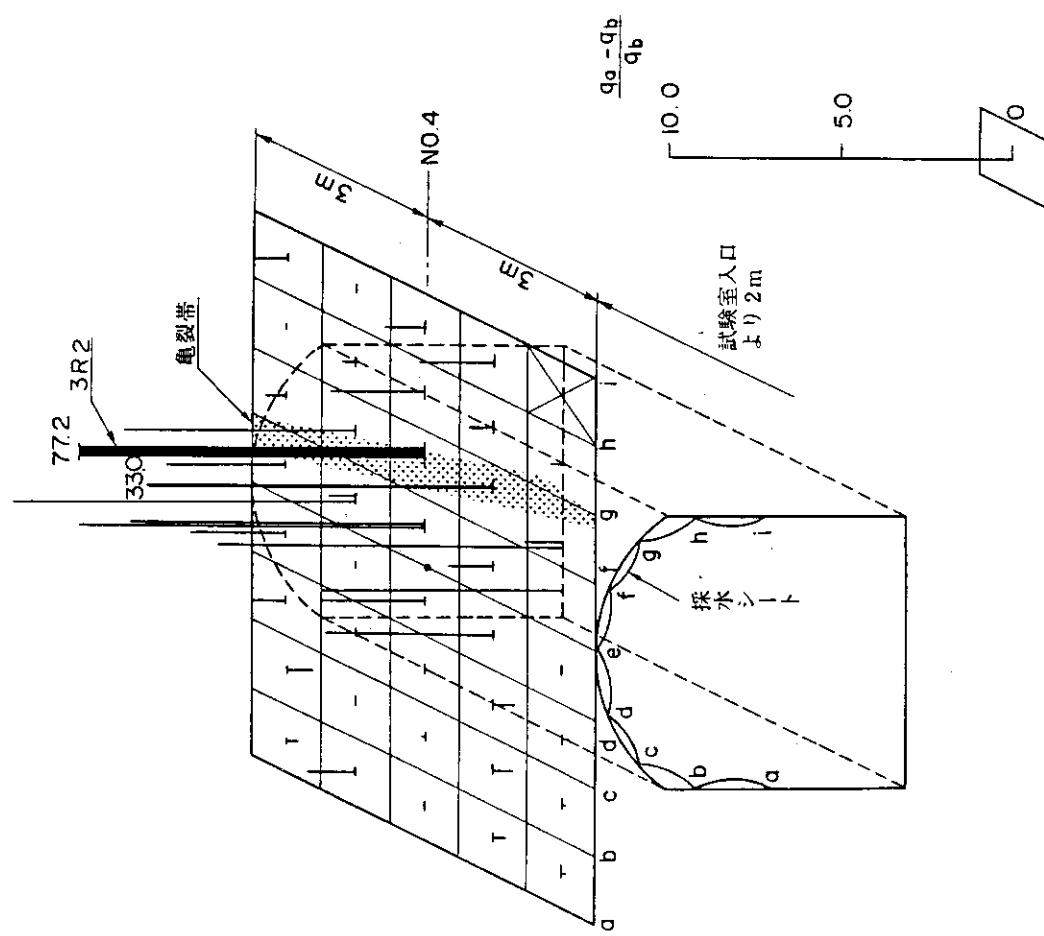


図4.13 ドレーリング注入による湧水増分率

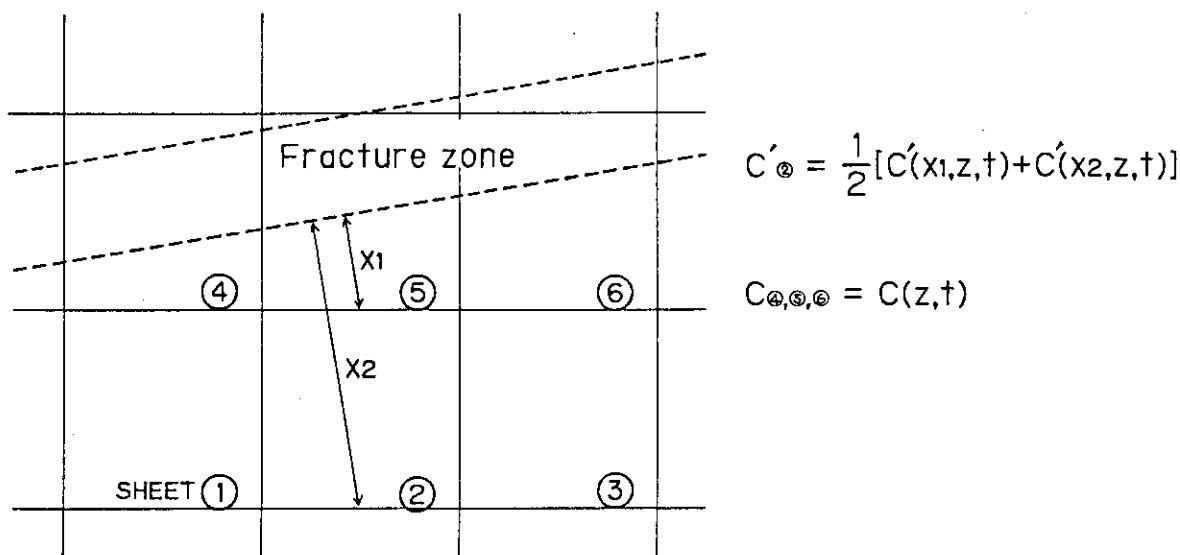


図 4.15 各区画の濃度計算法

表 4.3 フィッティング結果

解析対象区画 (単位)	固 定 値				抽 出 値				
	x (m)	y (m)	z (m)	θ	v (m/h)	D (m ² /h)	D [*] (m ² /h)	2b (m)	α_t (m)
1R1-1R2	0.7	1.7	5.8		0.10	0.05	0.1 E-3	0.0010	
3R1-3R2	0.3	1.3	5.0	0.01	0.12	0.06	0.2 E-3	0.0010	0.5
4R1-4R2	0.2	1.1	5.05		0.10	0.05	1.0 E-3	0.0007	

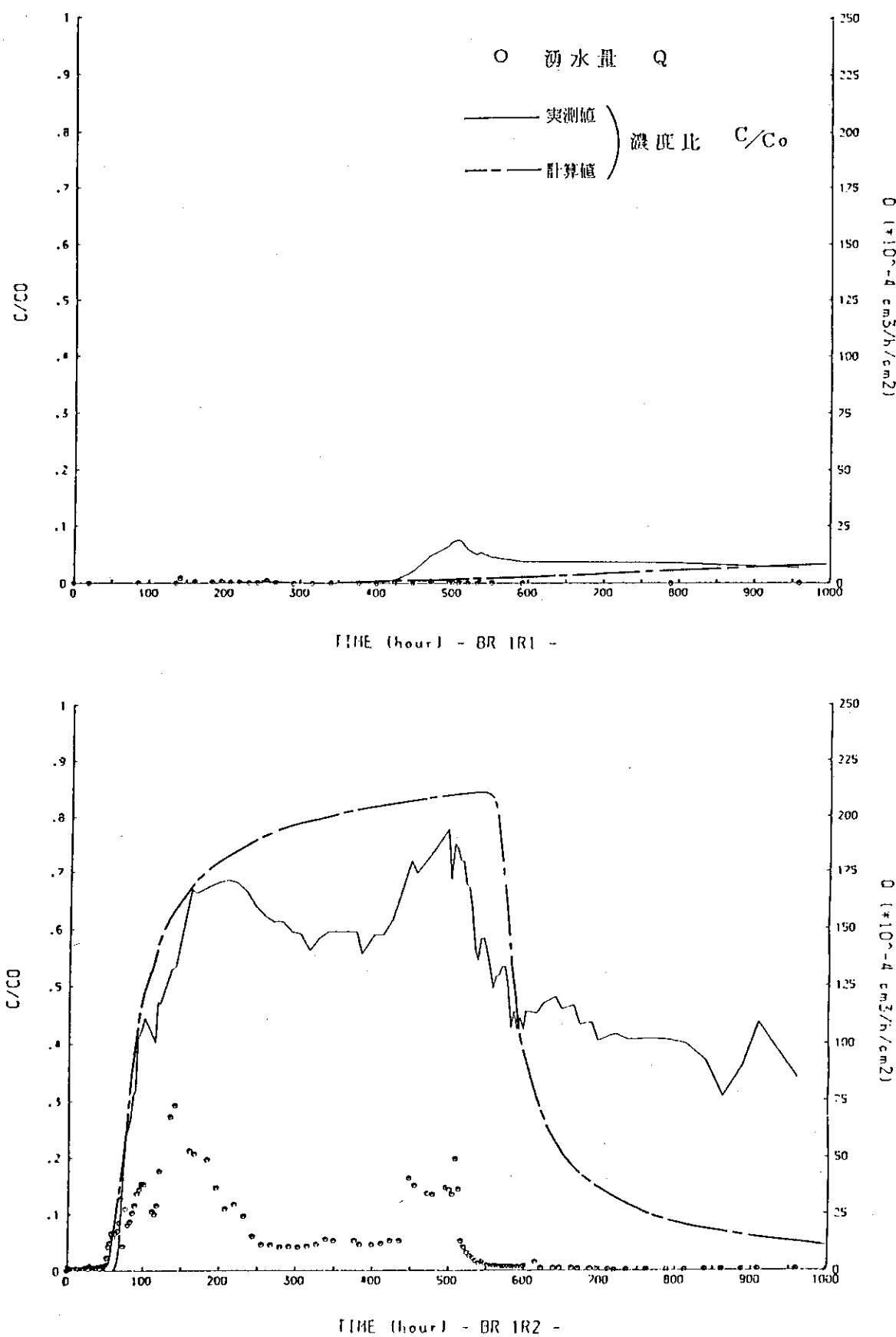


図 4.16 フィッティング結果 1R1 - 1R2

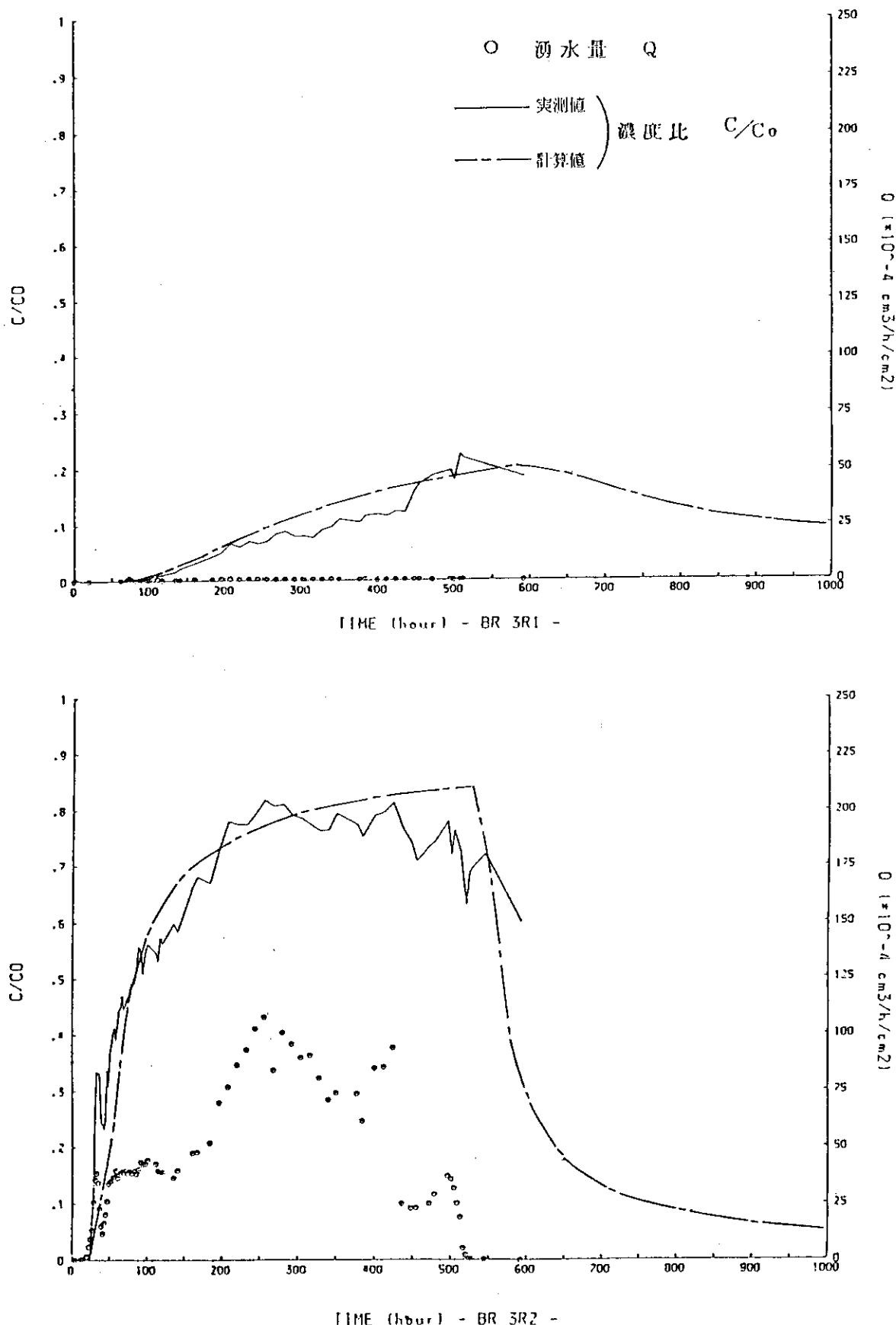


図 4.17 フィッティング結果 3R1 - 3R2

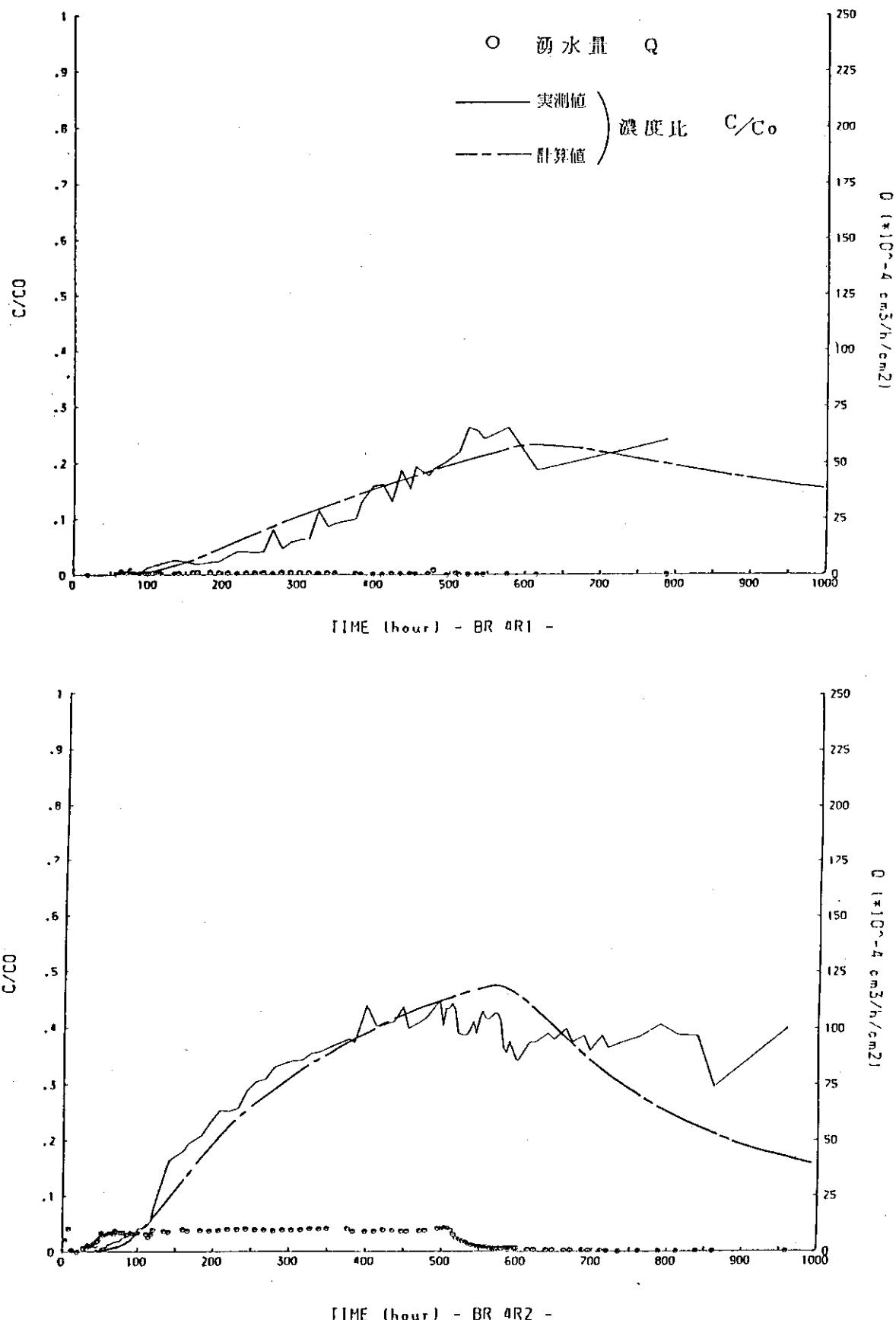


図 4.18 フィッティング結果 4R1 - 4R2

5. 材料耐久性試験

高レベル放射性廃棄物の地層処分において重要な人工バリアであるキャニスター材の性能を評価するため有望視されている金属材料 10 種について、長期に亘る原位置での応力腐食割れ試験を行なった。原位置試験室の側壁にはば水平に 2 つの試験孔を穿孔し、ヒーター加熱による約 75 °C の高温と、加熱を行なわない常温との 2 つの温度条件下で、鋭敏化処理を施した試験片を用いて応力腐食割れ試験を行なった。図 5.1 に原位置試験の概念図を示す。

5.1 実験方法

試験に用いた供試材料は、SUS 304, SUS 304 L, SUS 304 EL, SUS 309 S, Inconel 600, Inconel 625, Incoloy 825, Hastelloy C, Ti および Ticode の 10 種で、その組成と鋭敏化のための熱処理条件を表 5.1 に示す。SUS 304, SUS 309 S, Ti および Ticode の 4 種類の供試材料については肉厚 1 mm の小型ダブル U ベント試験片を用いた。他の 6 種類の材料については肉厚 2 mm の大型ダブル U ベント試験片を用い、さらに応力腐食割れの促進を行なうために V ノッチを入れた大型ダブル U ベント試験片も同時に作成した（図 5.2）。

試験孔は直径 66 mm, 長さ約 7 m で水平から約 4° 下向きに傾いており、孔口をゴム栓で塞ぐことにより、所定の保持治具に吊り下げる挿入した試験片が試験孔内に流入した岩盤中の地下水に浸るようにした。高温実験のための試料保持治具として、1 本のニクロムヒーターを外径 50 mm, 長さ 2 m の棒状になるように螺旋状に巻き、ステンレス鋼製の 3 本の支持棒で周囲を支えたものを用いた。試験片は、スパイラル状のヒーター部分の支持棒の 1 本にステンレス鋼製の細線で吊下げた。ヒーターはスライダックにより出力調整し、試験孔内の温度が約 75 °C になるように設定した。常温試験用の保持治具はステンレス鋼製の 3 本の支持棒だけのもので、その 1 本に、高温試験同様先端から 2 m の区間に試験片を吊り下げる。試験片はおよそ 1 ヶ月毎に試験孔から取り出し割れの有無を肉眼で観察した。試験片が浸っている地下水の温度を測定するために、高温試験で 3 本、常温試験で 1 本の熱電対を孔内に挿入し記録計により継続して温度を計測した。

5.2 結果および考察

試験開始後 12 ヶ月経過した時点での肉眼観察の結果を表 5.2 に示す。ほとんどの試験片には応力腐食割れが見られず顕著な全面腐食もなかったが、高温試験で SUS 304 L, Hastelloy C および Inconel 625 の 3 鋼種の V ノッチ型の試験片に応力腐食割れが発生したほか、加熱を行なわなかった常温試験でも Hastelloy C と Inconel 625 の 2 鋼種には高温試験同様 V ノッチ型試験片に応力腐食割れが認められた。試験孔内に満たされている地下水にはおよそ 3 ppm 程度の塩素イオンが含まれているほか数 ppm 程度の硫酸イオンが存在しており、このような地下水に曝される場合に応力腐食割れの可能性があることがわかった。

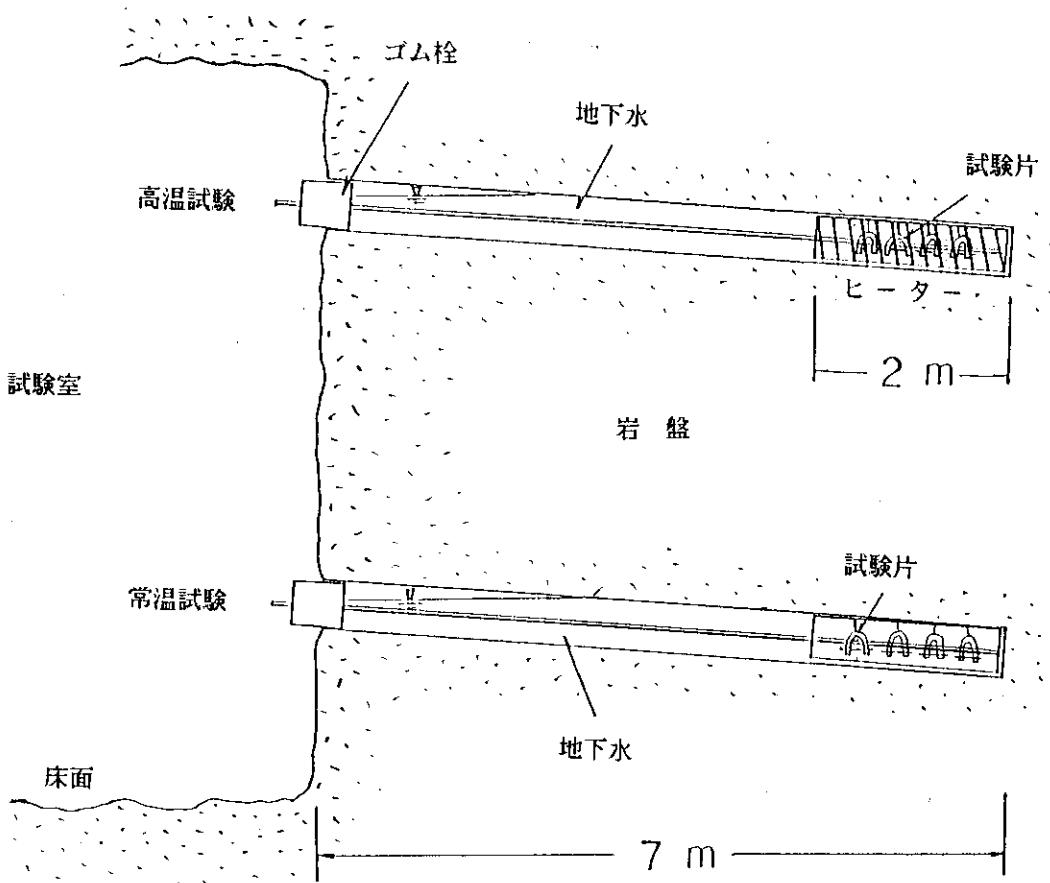


図5.1 原位置腐食試験概念図

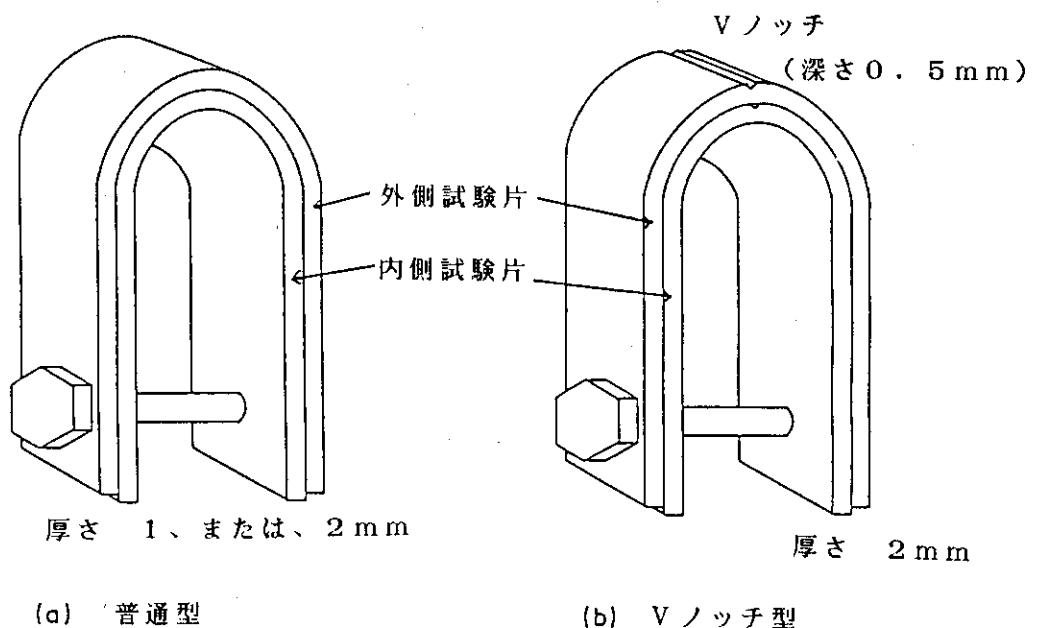


図5.2 ダブルUペント試験片模図

表5.1 供試材料の化学組成と熱処理条件

鋼種	成 分 (%)							熱処理条件		
	C	S i	M n	P	S	N i	C r	F e	M o	その他
SUS 304 ss	0.075	0.52	0.95	0.010	0.024	9.2	18.22	bal.	—	—
SUS 304L ss	0.035	0.46	0.96	0.032	0.004	8.52	18.11	bal.	—	—
SUS 304EL ss	0.015	0.59	1.50	0.034	0.003	10.20	18.16	bal.	—	—
SUS 309S ss	0.14	0.56	1.53	0.023	<0.005	14.30	23.76	bal.	—	—
Incoloy 825	0.003	0.34	0.68	0.020	0.002	40.66	22.41	bal.	3.00	Ti;2.0
Inconel 600	0.050	0.33	0.50	0.004	0.001	bal.	15.37	6~10	—	Al;0.10
Inconel 625	0.05	0.25	0.25	0.007	0.008	61.0	21.5	3.89	9.00	Al;0.16
Hastelloy C*	0.1	0.7	0.7	—	—	57	16	5	17	Nb;3.65
Ticode 12*	0.012	—	—	—	—	0.84	—	0.09	0.34	Al;0.20
Ti	0.045	Fe,	0.069	0,	0.0026	H,	0.0045	Ni,	99.88	Ti

* 規格値

表 5.2 原位置応力腐食割れ試験結果**

鋼種	記号	高温試験	常温試験
SUS 304	A - P *	0 / 3	0 / 3
SUS 304L	B - P	0 / 3	0 / 3
	B - N *	3 / 3	0 / 3
SUS 304EL	C - P	0 / 1	0 / 1
	C - N	0 / 3	0 / 2
Ticode	D - P	0 / 3	0 / 3
Incoloy 825	E - P	0 / 3	0 / 3
	E - N	0 / 3	0 / 3
Inconel 600	F - P	0 / 3	0 / 3
	F - N	0 / 3	0 / 3
SUS 309S	G - P	0 / 3	0 / 3
Hastelloy C	H - P	0 / 3	0 / 3
	H - N	3 / 3	3 / 3
Inconel 625	I - P	0 / 3	0 / 3
	I - N	3 / 3	3 / 3
Ticode	T - P	0 / 3	0 / 3

P * : 普通型ダブルUベント試験片

N * : Vノッチ型ダブルUベント試験片

** : 応力腐食割れを起した試験片の数／試験片総数

6. 今後の試験計画

放射性核種の移行媒体が地下水であることを考えると地下水に関連する試験に力を注ぐ必要がある。化学的性質に関連するものと流れに関するものに大別される。いずれについても浅地層と深地層で異なるので、深地層へのボーリング孔を使った試験が重要である。予算的な制約も考えなければならないので深さ 1000 m 1 本 500 m 数本を掘削することを計画している。これらボーリング孔と既設の実験施設を使って昭和 65 年度までに次の実験を実施する予定である。

1) 地下水挙動試験

- ① 各ボーリング孔についてコアをとり、亀裂分布及び亀裂中の挿在鉱物の同定を行い、地下水の侵入状態についての情報を得る。
- ② 各破碎帯での水頭圧を測定し、水流解析と照合する。
- ③ 物理探査手法による亀裂分布の測定法の開発を進める。
- ④ 深地層からの地下水の採取システムを開発し、地下水の組成及び Eh, pH 等の測定を行う。
- ⑤ ボーリング孔間の元素移行試験をコールドトレーサーを使って行う。

2) 模擬キャニスター加熱試験

これまでの試験では緩衝材に乾いたペントナイトを使っていたが、水を含んだ場合の熱伝導、水の動き、温度勾配による溶解沈着現象を長期にわたって試験する。さらに新しい緩衝材についても時間的余裕があれば熱伝導、元素移行等の試験を行いたい。

3) 材料耐久性試験

現在の試験室内での試験を継続するとともにボーリング孔内の試験を実施する。

地下水挙動試験については、カナダとの協力研究を予定しており、放射性トレーサーを使わなければならない実験はカナダで実施することにし、わが国での実験と相補的になるよう実験を進める。

7. 結 言

岩盤の性質が単純であり、破碎帯と良好な岩盤とが比較的明確な状態で存在し、実験結果を解析しやすい場所で試験したが、簡単なモデルを適用して試験結果を明確に説明するには至らなかった。Br⁻イオンを使った破碎帯中の拡散試験においても模擬処分孔を使った加熱試験においても理論的な解析を正確に適用するに充分な測定値が得られていないといえる。

地層処分の安全性研究の目的を考え、特に将来の処分場に直接結びついていない試験場での試験の役割を考えると現象を正確に把握するという目的以外に複雑な現象を総合的に把握し評価要因の重要性を対数的尺度で実測値を得ることも重要と考える。そのような観点からみると模擬処分孔周辺の水の流れている亀裂を通しての熱伝導及び亀裂の中の変動に対し、実測値が得られたのは重要な成果であり、また、破碎帶でのイオンの希釈状態を簡単なモデルで大略の説明が得ら

6. 今後の試験計画

放射性核種の移行媒体が地下水であることを考えると地下水に関連する試験に力を注ぐ必要がある。化学的性質に関連するものと流れに関するものに大別される。いずれについても浅地層と深地層で異なるので、深地層へのボーリング孔を使った試験が重要である。予算的な制約も考えなければならないので深さ 1000 m 1 本 500 m 数本を掘削することを計画している。これらボーリング孔と既設の実験施設を使って昭和 65 年度までに次の実験を実施する予定である。

1) 地下水挙動試験

- ① 各ボーリング孔についてコアをとり、亀裂分布及び亀裂中の挿在鉱物の同定を行い、地下水の侵入状態についての情報を得る。
- ② 各破碎帯での水頭圧を測定し、水流解析と照合する。
- ③ 物理探査手法による亀裂分布の測定法の開発を進める。
- ④ 深地層からの地下水の採取システムを開発し、地下水の組成及び Eh, pH 等の測定を行う。
- ⑤ ボーリング孔間の元素移行試験をコールドトレーサーを使って行う。

2) 模擬キャニスター加熱試験

これまでの試験では緩衝材に乾いたペントナイトを使っていたが、水を含んだ場合の熱伝導、水の動き、温度勾配による溶解沈着現象を長期にわたって試験する。さらに新しい緩衝材についても時間的余裕があれば熱伝導、元素移行等の試験を行いたい。

3) 材料耐久性試験

現在の試験室内での試験を継続するとともにボーリング孔内の試験を実施する。

地下水挙動試験については、カナダとの協力研究を予定しており、放射性トレーサーを使わなければならぬ実験はカナダで実施することにし、わが国での実験と相補的になるよう実験を進める。

7. 結 言

岩盤の性質が単純であり、破碎帯と良好な岩盤とが比較的明確な状態で存在し、実験結果を解析しやすい場所で試験したが、簡単なモデルを適用して試験結果を明確に説明するには至らなかった。 Br^- イオンを使った破碎帯中の拡散試験においても模擬処分孔を使った加熱試験においても理論的な解析を正確に適用するに充分な測定値が得られていないといえる。

地層処分の安全性研究の目的を考え、特に将来の処分場に直接結びついていない試験場での試験の役割を考えると現象を正確に把握するという目的以外に複雑な現象を総合的に把握し評価要因の重要性を対数的尺度で実測値を得ることも重要と考える。そのような観点からみると模擬処分孔周辺の水の流れている亀裂を通しての熱伝導及び亀裂の中の変動に対し、実測値が得られたのは重要な成果であり、また、破碎帶でのイオンの希釈状態を簡単なモデルで大略の説明が得ら

れた点も大きな成果と考える。今後これらのフィールド試験の結果に基づき基礎的な研究及び大規模な試験へと発展させたい。例えば、破碎帶中の拡散については、そこにある破碎した岩石への拡散について実験室で試験し、さらに正確な評価を行うための基礎的な研究に発展させたい。注入試験については、広い範囲での自然地下水水流中での拡散実験を行い、より実際的な試験へと発展させたい。

参考文献

- (1-1) 下岡謙司, 須田真太郎, 荒木邦夫
 “地下深部における岩盤の熱伝導率測定”
 JAERI-M 82-163
- (1-2) K. SHIMOOKA et al.
 “PILOT RESEARCH PROJECTS FOR UNDERGROUND
 DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE IN JAPAN”
 IAEA-CN-43/129, VIENNA, 1984
- (2-1) 高橋裕平 “筑波地方のカコウ岩質岩類の地質”
 地質学雑誌, 第88巻第3号, 1982
- (2-2) 島田莊平, 外尾善次郎, “熱削孔シミュレーション”
 日本鉱業会誌 / 96 1113 (80-11)
- (2-3) T. KANAGAWA, M. HAYASHI, H. NAKASA
 “ESTIMATION OF SPATIAL GEO-STRESS COMPONENTS
 IN ROCK SAMPLES USING THE KAISER EFFECT OF
 ACOUSTIC EMISSION”
 CRIEPI REPORT, E375004, December 1976
- (3-1) 甲藤好郎 “伝熱概論” 養賢堂
- (4-1) E. GUSTAFSSON, C-E KLOCKARS
 “STUDIES ON GROUNDWATER TRANSPORT IN
 FRACTURED CRYSTALLINE ROCK UNDER CONTROLLED
 CONDITIONS USING NONRADIOACTIVE TRACERS”
 KBS TECNISK RAPPORT 81-07, 1981
- (4-2) D. H. TANG, E. O. FRIND, E. A. SUDICKY
 “CONTAMINANT TRANSPORT IN FRACTURED POROUS
 MEDIA: ANALITICAL SOLUTION FOR A SINGLE
 FRACTURE”
 Water Resources Research, Vol. 17, No. 3, Pages 555-564,
 JUNE 1981
- (4-3) J. BEAR
 “DYNAMICS OF FLUIDS IN POROUS MEDIA”
 ELSEVIER, NEW YORK, 1972
- (4-4) M. M. WADDEN, T. J. KATSUBE
 “RADIONUCLIDE DIFFUSION RATES IN IGNEOUS
 CRYSTALLINE ROCKS”
 CHEMICAL GEOLOGY, 36 (1982) 191-214