

本資料は2000年3月31日付で登録区分
変更する。

東濃地科学センター【研究調整グループ】

物理検層手法による花崗岩部の 透水係数の推定に関する作業

報告書

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1997年2月

株式会社 物理計測コンサルタント

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1997

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒509-51 岐阜県土岐市泉町定林寺字園戸959-31
動力炉・核燃料開発事業部
東濃地科学セシタ 樹木開発課

1997年2月



物理検層手法による花崗岩部の透水係数の推定に

関する作業報告書

橋本憲和* 鈴木正芳* 松岡清幸*

要旨

1. 本報告書は、岩盤の透水係数分布を推定する手法の開発の一環として、岐阜県土岐市泉町河合地内のDH-4号孔及び瑞浪市明世町月吉地内のAN-1号孔で実施した孔内物理検層のデータと原位置透水試験結果との相関性について取りまとめたものである。
2. 物理検層は、ガンマ線検層、密度検層、中性子検層、音波検層、電気検層、マイクロ検層、温度検層、フローメータ検層を実施した。
花崗岩岩体の中の変質・フラクチャーの検出を目的として、上記検層データの内、5種目を用い4岩相モデルで複合岩相解析を試みた。
3. ポホルレーガーとポホルテビを比較し、亀裂についての解析を行った。
4. JFT試験による透水係数と物理検層より算出した浸透率の相関（相関式 $\text{LOG}(K)=0.98 \times \text{LOG}(1.0 \times 10^{-6} \times (F_c/F_d)^{+1.5}) - 1.34$ ）とフローメータ検層から算出した浸透率の相関（相関式 $\text{LOG}(K)=1.28 \times \text{孔内流速变化} + 8.4$ ）は、良い対応を示した。

本報告書は、株式会社物理計測コンサルタントが動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号 : 08C1209

事業団担当部課室 : 東濃地科学センター 地質環境研究室

室長 坪田浩二

* (株) 物理計測コンサルタント

~~OFFICIAL USE ONLY~~
PNC ~~T~~J7586 96-003
Febru. 1997

THE ESTIMATION OF PERMEABILITY IN THE GRANITE BODY
BY GEOPHYSICAL LOGGINGS

Norikazu Hashimoto*, Masayoshi Suzuki *, Kiyoyuki Matsuoka *

A b s t r a c t

1. The paper presents summarized one method of the estimation of permeability in the granite body by the results of Geophysical loggings and the permeability test (JFT) of DH-4 drill hole, operated in Izumi cho, Toki-City, and AN-1 drill hole, operated in Akiyo-cho, Mizunami City, Gifu Prefecture, Japan.
2. The logging suite consisted of the Gamma Ray, Density, Neutron, Acoustic, Electric, Micro, Temperature Log and Flowmeter Log. Statistical complex lithology analysis, called OPTIMA, which provides the ability to estimate petrophysical parameters by using all available log. Four(4) lithology models are adopted to detect alternation and fracture zones in the Granite body using five(5) kinds of logging data.
3. A comparision of the results from BHTV and BHRD shows very similar relationship.
4. A comparision of the results from the permeability test (JFT), the permeability estimatied Geophysical log ($\text{LOG}(K)=0.98 \times \text{LOG}(1.0 \times 10^{-6} \cdot ^0 \times (\text{Fc}/\text{Fd})^{+1.5}) - 1.34$) and the permeability from the flowmeter log ($\text{LOG}(K)=1.28 \times \Delta \text{flowrate} + 8.4$) show very similar rerationships.

Work performed by Geophysical Surveying Co., Let under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

Contract Number : 07C1397

PNC liaison : Tono Geoscience Center Geological Environment Research Section — Koji Tsubota

* Geophysical Surveying CO., Let.

目 次

1.	はじめに	1
2.	調査概要	1
2.1	一般事項	1
2.2	位置図	2
3.	物理検層データ解析	3
3.1	データ処理と検層解析の概要	3
3.1.1	解析に使用したデータ・機器・ソフトウェア	3
3.1.2	解析手順	4
3.2	複合岩相解析（オプテマ）	8
3.2.1	解析プログラムの概要	9
3.2.2	解析に使用した検層種目	9
3.2.3	解析の前処理（プレオプテマ）	10
3.2.4	岩相モデルおよびマトリックス・パラメータ	10
3.2.5	解析処理	12
3.2.6	解析結果	15
4.	検層データからの亀裂評価	41
4.1	ボアホールテレビ及びボアホールレーダー解析結果を用いた亀裂評価	41
4.2	ボアホールテレビ及びボアホールレビュア解析結果を用いた亀裂評価	51
5.	検層データと割れ目（透水性）との比較・検討	86
5.1	A N - 1 号井の物理検層データと現位置透水試験結果の比較・検討	86
5.2	D H - 4 号井の検層データと現位置透水試験結果の比較・検討	122
5.3	D H - 4 号井の流量検層データと現位置透水試験結果の比較・検討	154
6.	ま と め	167
6.1	複合岩相解析（オプテマ）	167
6.2	フラクチャ一解析	170
6.3	ボアホールレーダ再解析による亀裂評価	173
6.4	検層データと割れ目（透水性）との比較・検討	180
7.	あ と が き	193

図 目 次

図 2.1	調査位置図	2
図3.1.1	解析手順フロー・チャート	4
図3.2.1	オブテマ解析処理フロー・ダイヤグラム	13
図3.2.2a	ヒストグラム GR (AN-1)	27
図3.2.2b	ヒストグラム GR (DH-4)	27
図3.2.3a	ヒストグラム ΔT (AN-1)	28
図3.2.3b	ヒストグラム ΔT (DH-4)	28
図3.2.4a	ヒストグラム ρ_b (AN-1)	29
図3.2.4b	ヒストグラム ρ_b (DH-4)	29
図3.2.5a	ヒストグラム ϕ_N (AN-1)	30
図3.2.5b	ヒストグラム ϕ_N (DH-4)	30
図3.2.6a	クロスプロット $\rho_b - \phi_N$ (頻度) (AN-1)	31
図3.2.6b	クロスプロット $\rho_b - \phi_N$ (頻度) (DH-4)	31
図3.2.7a	クロスプロット $\rho_b - \phi_N$ (Z) (AN-1)	32
図3.2.7b	クロスプロット $\rho_b - \phi_N$ (Z) (DH-4)	32
図3.2.8a	クロスプロット $\rho_b - \Delta T$ (頻度) (AN-1)	33
図3.2.8b	クロスプロット $\rho_b - \Delta T$ (頻度) (DH-4)	33
図3.2.9a	クロスプロット $\rho_b - \Delta T$ (Z) (AN-1)	34
図3.2.9b	クロスプロット $\rho_b - \Delta T$ (Z) (DH-4)	34
図3.2.10a	クロスプロット $\Delta T - \phi_N$ (頻度) (AN-1)	35
図3.2.10b	クロスプロット $\Delta T - \phi_N$ (頻度) (DH-4)	35
図3.2.11a	クロスプロット $\Delta T - \phi_N$ (Z) (AN-1)	36
図3.2.11b	クロスプロット $\Delta T - \phi_N$ (Z) (DH-4)	36
図3.2.12a	クロスプロット M-N (頻度) (AN-1)	37

図3.2.12b	クロスプロット M-N (頻度) (DH-4) ······	37
図3.2.13a	クロスプロット M-N (Z) (AN-1) ······	38
図3.2.13b	クロスプロット M-N (Z) (DH-4) ······	38
図3.2.14a	クロスプロット $\rho_b - \phi_N$ (Z) と マトリックス・ポイント (AN-1) ······	39
図3.2.14b	クロスプロット $\rho_b - \phi_N$ (Z) と マトリックス・ポイント (DH-4) ······	39
図3.2.15a	クロスプロット $\rho_b - \Delta T$ (Z) と マトリックス・ポイント (AN-1) ······	40
図3.2.15b	クロスプロット $\rho_b - \Delta T$ (Z) と マトリックス・ポイント (DH-4) ······	40
図 4.1.1	ボアホールレーダ解析柱状図 ······	42
図 4.1.2	ボアホールレーダ反射波解析図 ······	44
図 4.2.1	主応力軸の配置による断層の分類 ······	51
図 4.2.2	断層の分類と主応力の配置 ······	52
図 4.2.3	ボアホールテレビュアー測定記録図 (1 ~14) ······	55
図 4.2.4	ボアホールテレビ測定記録図 (1 ~14) ······	69
図 5.1.1	中性子検層孔隙率変化図 (AN-1) ······	87
図 5.1.2	透水係数クロスプロット図 (AN-1 : NLSch. (1)-(2)) ···	88
図 5.1.3	透水係数クロスプロット図 (AN-1 : NLKats. (1)-(3)) ···	89
図 5.1.4	透水係数クロスプロット図 (AN-1 : NLKats. (7)-(3)) ···	91
図 5.1.5	音波検層速度変化図 (AN-1) ······	92
図 5.1.6	音波検層孔隙率変化図 (AN-1) ······	93
図 5.1.7	透水係数クロスプロット図 (AN-1 : SL.Wyll. (4)-(1)-(2)) ···	94
図 5.1.8	透水係数クロスプロット図 (AN-1 : SL.Ray. (5)-(1)-(2)) ···	96
図 5.1.9	透水係数クロスプロット図 (AN-1 : SL.Ray. (5)-(1)-(3)) ···	97
図 5.1.10	透水係数クロスプロット図 (AN-1 : SL.Acou. (6)-(1)-(2)) ···	98

図 5.1.11	透水係数クロスプロット図 (AN-1 :SL.Acou.(6)-(1)-(3))	99
図 5.1.12	透水係数クロスプロット図 (AN-1 :SL.Katsu.(7)-(3))	100
図 5.1.13	密度検層変化図 (AN-1)	101
図 5.1.14	透水係数クロスプロット図 (AN-1 :FD.Schl.(10)-(1)-(2))	102
図 5.1.15	透水係数クロスプロット図 (AN-1 :FD.Schl.(10)-(1)-(3))	103
図 5.1.16	電気検層(LONG NORMAL)変化図 (AN-1)	105
図 5.1.17	電気検層(SHORT NORMAL)変化図 (AN-1)	106
図 5.1.18	電気検層(MICRO NORMAL)変化図 (AN-1)	107
図 5.1.19	透水係数クロスプロット図 (DL/ES Katube(7)-(8)-(9))	108
図 5.1.20	中性子-密度検層孔隙率変化図 (AN-1)	109
図 5.1.21	透水係数クロスプロット図 (DL-NL Katube(7)-(3))	110
図 5.1.22	中性子-音波検層孔隙率変化図 (AN-1)	111
図 5.1.23	透水係数クロスプロット図 (SL-NL Katube(7)-(3))	112
図 5.1.24	岩相解析孔隙率変化図 (AN-1)	113
図 5.1.25	透水係数クロスプロット図 (OPTM Katube(7)-(3))	114
図 5.1.26	透水係数クロスプロット図 (FC/FD Katube 变形式)	116
図 5.1.27	透水係数クロスプロット図 (FC/FD Katube 变形式)	117
図 5.1.28	透水係数クロスプロット図 (AN-1 :亀裂分類)	118
図 5.1.29	透水係数クロスプロット図 (AN-1 :風化帯)	119
図 5.1.30	透水係数補正クロスプロット図 (AN-1 :花崗岩)	120
図 5.1.31	透水係数補正変化図 (AN-1)	121
図 5.2.1	中性子検層孔隙率変化図 (DH-4)	123
図 5.2.2	透水係数クロスプロット図 (DH-4 :NL.Sch.(1)-(2))	124
図 5.2.3	透水係数クロスプロット図 (DH-4 :NL.Kats.(1)-(3))	125
図 5.2.4	透水係数クロスプロット図 (DH-4 :NL.Kats.(7)-(3))	126
図 5.2.5	音波検層変化図 (DH-4)	128
図 5.2.6	音波検層孔隙率変化図 (DH-4)	129
図 5.2.7	透水係数クロスプロット図 (DH-4 :SL.Wyll.(4)-(1)-(2))	130

図 5.2.8	透水係数クロスプロット図 (DH-4 :SL-Ray. (5)-(1)-(2))	131
図 5.2.9	透水係数クロスプロット図 (DH-4 :SL-Ray. (5)-(1)-(3))	132
図 5.2.10	透水係数クロスプロット図 (DH-4 :SL.Acou. (6)-(1)-(2))	133
図 5.2.11	透水係数クロスプロット図 (DH-4 :SL.Acou. (6)-(1)-(3))	134
図 5.2.12	透水係数クロスプロット図 (DH-4 :SL.Katsu. (7)-(3))	136
図 5.2.13	密度検層変化図 (DH-4)	137
図 5.2.14	透水係数クロスプロット図 (DH-4 :FD.Schl. (10)-(1)-(2))	138
図 5.2.15	透水係数クロスプロット図 (DH-4 :FD.Schl. (10)-(1)-(3))	139
図 5.2.16	電気検層(SHORT NORMAL)変化図 (DH-4)	140
図 5.2.17	電気検層(LONG NORMAL)変化図 (DH-4)	141
図 5.2.18	電気検層(MICRO NORMAL)変化図 (DH-4)	142
図 5.2.19	透水係数クロスプロット図 (DL/ES Katsube (7)-(8)-(9))	144
図 5.2.20	中性子-密度検層孔隙率変化図 (DH-4)	145
図 5.2.21	透水係数クロスプロット図 (DL-NL Katsube (7)-(3))	146
図 5.2.22	中性子-音波検層孔隙率変化図 (DH-4)	147
図 5.2.23	透水係数クロスプロット図 (SL-NL Katsube (7)-(3))	148
図 5.2.24	岩相解析孔隙率変化図 (DH-4)	149
図 5.2.25	透水係数クロスプロット図 (OPTM Katsube (7)-(3))	150
図 5.2.26	透水係数クロスプロット図 (FC/FD Katsube 変形式)	152
図 5.2.27	透水係数補正変化図 (DH-4)	153
図 5.3.1	フローメータ検層図-1 (DH-4)	155
図 5.3.2	フローメータ検層図-2 (DH-4)	156
図 5.3.3	フローメータ検層図-3 (DH-4)	157
図 5.3.4	フローメータ検層図-4 (DH-4)	158
図 5.3.5	フローメータ解析図 (例) (深度65~190m)	159
図 5.3.6	流体速度変移図 (10cm毎) (DH-4)	160

図 5.3.7	流体速度変移図 (1 m毎) (DH-4)	161
図 5.3.8	流体速度変化図 (1 m毎) (DH-4)	163
図 5.3.9	補正流体速度変化図 (1 m毎) (DH-4)	164
図 5.3.10	透水係数補正クロスプロット図 (FLOW METER-PERMIAB.)	165
図 5.3.11	透水係数補正変化図 (DH-4)	166
図 6.3.1	ボアホールレーダ解析柱状図	174
図 6.3.2	ボアホールレーダ反射波解析図	175
図 6.4.1	透水係数クロスプロット図 (風化帶)	184
図 6.4.2	透水係数補正クロスプロット図 (花崗岩)	185
図 6.4.3	透水係数補正変化図 (AN-1)	186
図 6.4.4	透水係数補正クロスプロット図	188
図 6.4.5	透水係数補正変化図 (DH-4)	189
図 6.4.6	透水係数補正クロスプロット図 (FLOW METER-PERMIAB.)	191
図 6.4.7	透水係数補正変化図 (DH-4)	192

表 目 次

表 3.1.1 使用検層記録	5
表 3.2.1 各造岩鉱物に対する検層レスポンス(マトリックス・パラメータ)	11
表 3.2.2a 各検層データの平均、標準偏差等(AN-1)	16
表 3.2.2b 各検層データの平均、標準偏差等(DH-4)	16
表 3.2.3a 岩相解析結果(AN-1)	22
表 3.2.3b 岩相解析結果(DH-4)	23
表 3.2.4a フラクチャー解析結果(AN-1)	25
表 3.2.4b フラクチャー解析結果(DH-4)	26
表 4.1.1 ボアホールレーダ・テレビ解析結果一覧表	45
表 4.1.2 透水区間のボアホールレーダ・テレビ割れ目評価一覧表	48
表 4.2.1 DH-4号孔透水試験結果一覧表	53
表 4.2.2 AN-1号孔透水試験結果一覧表	54
表 4.2.3 ボアホールテレビ割れ目一覧表(No1~9)	83
表 6.1.1a 岩相解析結果(AN-1)	168
表 6.1.1b 岩相解析結果(DH-4)	169
表 6.2.1a フラクチャー解析結果(AN-1)	171
表 6.2.1b フラクチャー解析結果(DH-4)	172
表 6.3.1 ボアホールレーダ・テレビ解析結果一覧表	177

1. はじめに

本調査は、岐阜県東濃地区に掘削されたAN-1号孔とDH-4号孔を利用して、物理検層で得られた物性値と原位置の透水試験で得られた透水係数との間に何らかの相関性を見いだすことで、原位置の透水試験結果のデータの間を埋めることを目的とし、本調査は、物理検層データを複合岩相解析プログラムで解析した結果や既存の式を用いて透水係数に変換し、その結果をとりまとめたものである。

2. 調査概要

2.1 一般事項

- (1) 調査件名 : 『物理検層手法による花崗岩部の透水係数の推定に関する作業』
- (2) 調査場所 : 岐阜県瑞浪市月吉正馬様 AN-1号孔
岐阜県土岐市泉町河合 DH-4号孔
- (3) 調査期間 : 自 平成8年10月 1日
至 平成9年 2月 25日
- (4) 調査内容 : AN-1号孔・DH-4号孔の測定データの整理及び解析
- (5) 発注者 : 動力炉・核燃料開発事業団 東濃地科学センター
- (6) 調査担当 : 株式会社 物理計測コンサルタント
本社 〒103 東京都中央区日本橋浜町3-6-3
TEL 03-3668-6261

報告書担当 橋本 憲和
鈴木 正芳
松岡 清幸

2.1 位置図

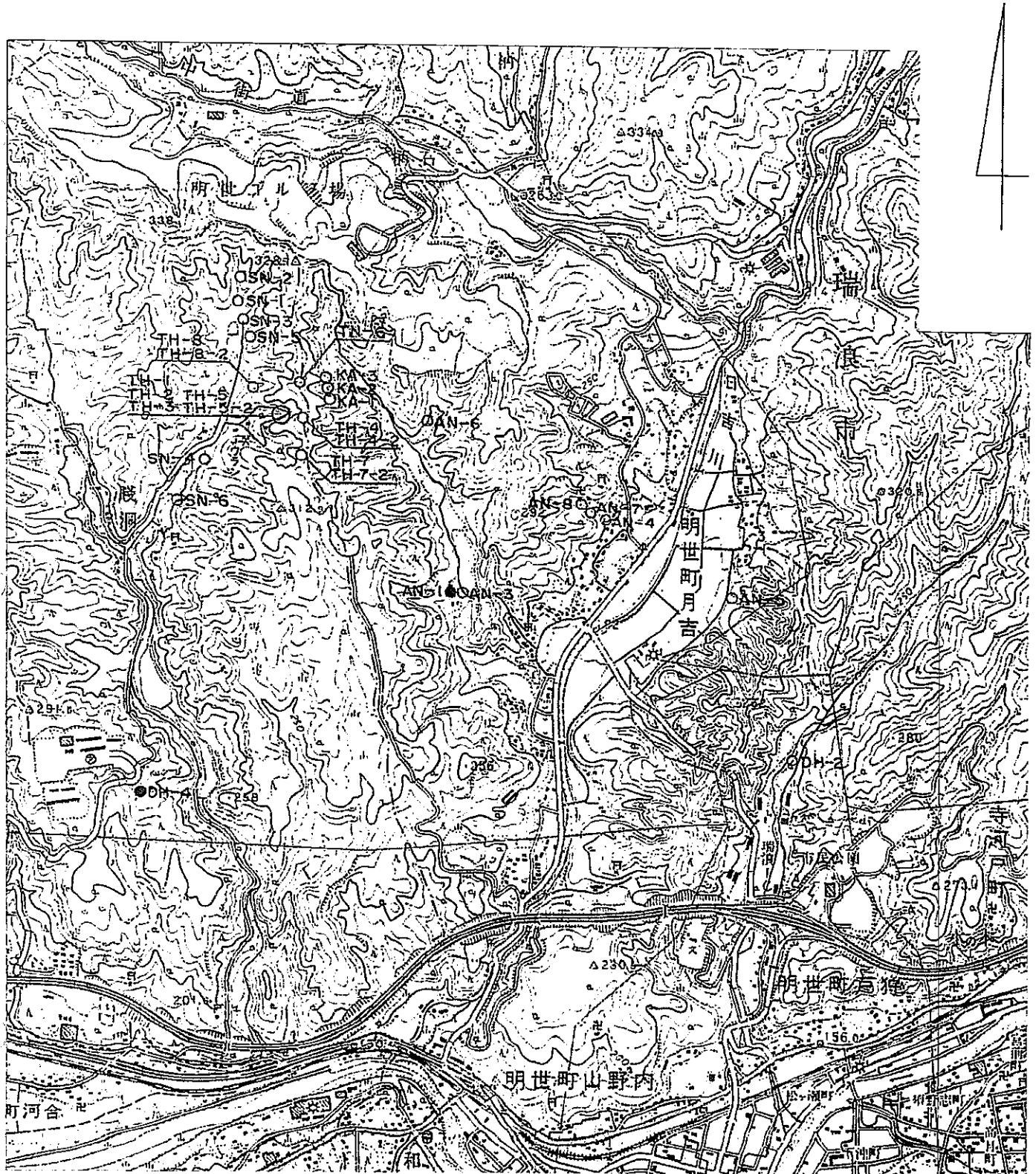


図 2.1 調査位置図

3. 物理検層データ解析

AN-1号孔およびDH-4号孔で得られた物理検層データを用いて複合岩相解析およびフラクチャー解析を行った。解析にはウェスタン・アトラス社の検層解析ソフトウェア“WDS(Well Data System)”を使用した。

3.1 データ処理と検層解析の概要

3.1.1. 解析に使用したデータ・機器・ソフトウェア

(1) データ

両孔の物理検層データを記録した光磁気ディスクの貸与を受けた。

(2) 使用機器

パーソナル・コンピュータ	Compaq Deskpro XE560
カラー・プリンタ	HP Paintjet
光磁気ディスク・ドライブ	SONY MO Disk unit RMO-S360

(3) ソフトウェア

ウェスタン・アトラス社製検層解析ソフトウェア(WDS: Well Data System)は、データ処理・管理用のプログラムと各種のアルゴリズムに基づいた検層解析プログラムから構成されている。今回、主として下記のプログラムを使用した。

WELL MANAGER 坑井データ・ファイル(WDF)の一般管理
CORE テキスト・データのWDFへの変換
LISTER WDFデータのテキスト・データ出力
ADM / SHIFT 自動深度マッチングおよび深度シフト
ENCORR 環境補正(孔径、温度、. . .)
EPIPLT データ及び解析結果のカラー・プロット
CROS クロスプロットおよびヒストグラム
PREOPT OPTIMAプログラムの前処理
OPTIMA 複合岩相解析

3.1.2. 解析手順

解析手順の概念をフロー・チャート（図3.1.1）に示す。

解析は、まず光磁気ディスクにテキスト・ファイルとして記録されている検層データについて内容（種目、深度、スケール等）をチェックし、検層解析ソフトウェア“WDS”に取り込む。“WDS”の中でテキスト・ファイルから“WDF”(Well Data File)という坑井データ処理用のバイナリ・ファイルに変換の上、各種補正や解析処理が実行される。)

使用した検層記録（種目）を表3.1.1に示す。

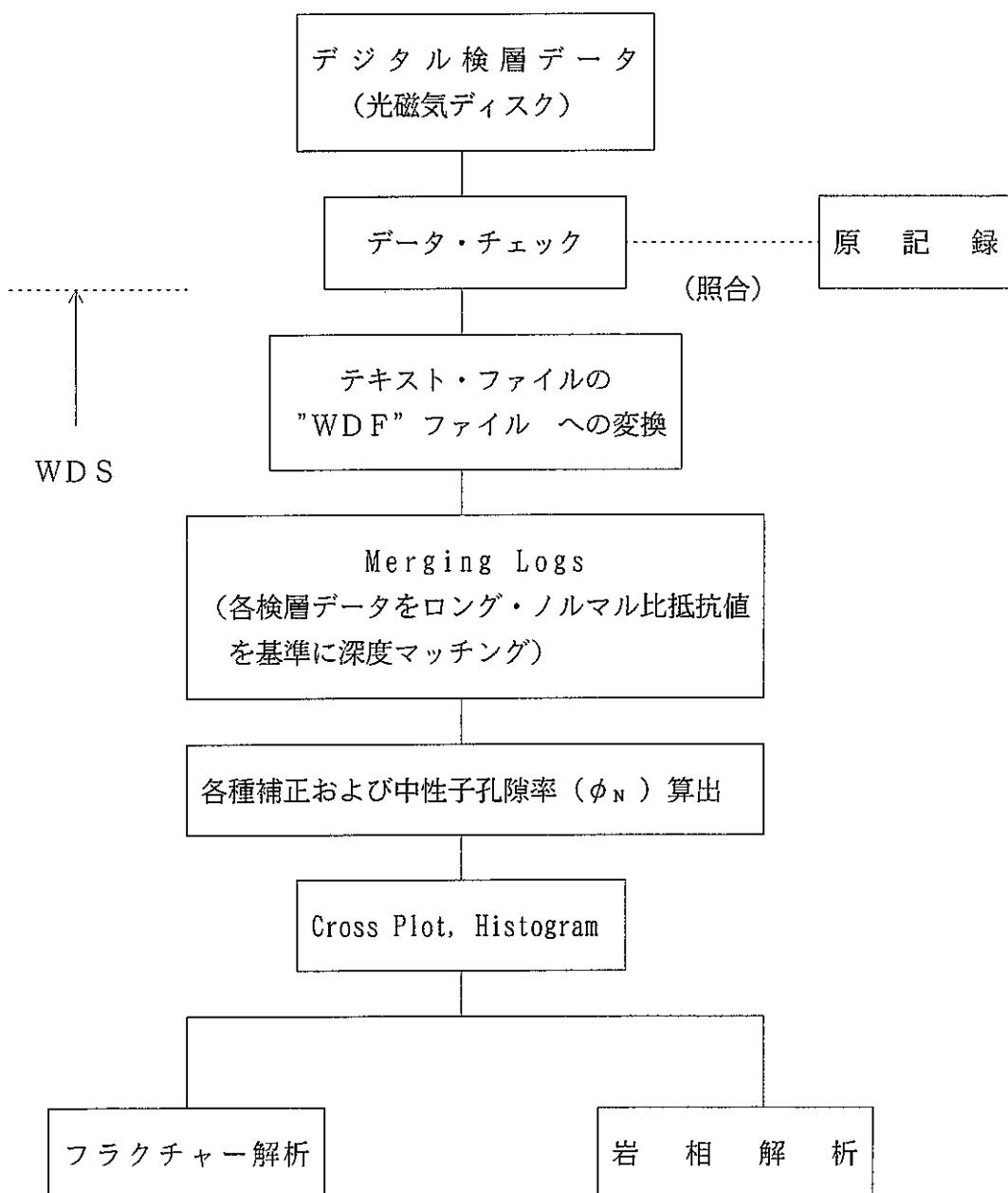


図3.1.1 解析手順フローチャート

表 3.1.1 使用検層記録

種 目	デ 一 タ	深 度	
		A N - 1	D H - 4
温 度 検 層 (Temperature log)	Temp	20.0-1010.0m	59.5- 505.0m
電 気 検 層 (Electrical log)	SP, LN, SN	20.0-1005.0m	59.5- 502.9m
マイクロ検層 (Microresistivity log)	ML1, ML2	20.0-1005.0m	59.8- 502.0m
密 度 検 層 (Density log)	ρ_b	20.0-1005.0m	59.5- 502.0m
中 性 子 検 層 (Neutron log)	ϕ_N	20.0-1005.0m	59.5- 502.0m
音 波 検 層 (Acoustic log)	ΔT	20.5- 995.0m	59.5- 500.0m
自然ガンマ線検層 (Gamma ray log)	GR	20.0-1005.0m	59.5- 500.3m
X Y キャリパー検層(XY Caliper log)	X-CAL, Y-CAL	0.0-1005.0m	0.0- 502.0m

A N - 1 号孔のデータは 0.5 m 毎。 D H - 4 号孔のデータは 0.1 m 毎。

解析は補正等の前処理も含めて、全て WDF ファイルに変換されたデータを使い実施した。まず最初に、電気検層のロング・ノルマル比抵抗値(LN)を基準に各検層記録の深度マッチングを行った。両孔のデータ共、深度補正の必要はなかった。(A N - 1 号孔については、そもそもデータ・サンプリングが 0.5 m 毎なので 10 cm 単位の小さな補正は施しようなかった。D H - 4 号孔については、10 cm 単位の記録を検討の結果、補正の必要はないと判断した。)

次に、中性子検層のカウント数のデータを、孔径補正をした較正曲線により中性子孔隙率 (ϕ_N) (ライムストン孔隙率) に換算。また、自然ガンマ線検層測定値 (API カウント数) にも孔径補正を施した。

尚、孔径補正には X Y キャリパーの平均値 (XCAL+YCAL)/2 を使用した。

この後、以下の手順で処理解析を行った。

(1) ヒストグラム

中性子孔隙率、密度値、音波走行時間、自然ガンマ線 (Total GR) について

ヒストグラムを求めた。

ヒストグラムは、ある深度区間における検層データの頻度として表している。又、次の様な数値を求めている。 平均値、中間値、標準偏差、最大頻度値、ノード値、シンメトリー値、フラットネス値。

ノード値 (NODE)	最大頻度でのデータ値
シンメトリー値 (SYMETRY)	正規分布においては0を示す。負(正)の場合 は左(右)側に分散が大きい。
フラットネス値 (FLATNESS)	正規分布においては0を示す。負の場合は正規 分布より平坦。

(2) クロスプロット

中性子孔隙率－密度値－音波走行時間について、頻度(frequency) プロットと自然ガンマ線(Total GR)を指標としたZプロットを行なった。又、孔隙率の影響を取り除いたM－Nプロットを行なった。その計算式は次の通りである。

$$M = 0.01 \left[\frac{\Delta t_f - \Delta t}{\rho_b - \rho_f} \right] \quad N = \frac{1 - \phi_N}{\rho_b - \rho_f}$$

ここで Δt_f : 水の音波速度 $189 \mu\text{s}/\text{ft}$

Δt : 岩石の音波速度

ρ_b : 岩石の密度

ρ_f : 水の密度 1.0 g/cm^3

ϕ_N : ライムストン孔隙率

(3) 複合岩相解析 (プレオプテマおよびオプテマ)

プレオプテマはオプテマの前処理プログラムで、各検層データについて信頼度を検定し、その結果を不確実さの帯 (uncertainty band)として表示する。

オプテマは、各岩石、又は鉱物の検層に対するマトリックス・パラメータを入力し、検層結果に総合的に最も良く適合する各々の岩石(鉱物)の量比を体積百分率で求める解析プログラムである。

先ずプレオプテマによる前処理を行った後、先に求めたクロスプロットを基に地質学的な妥当性を勘案して岩相モデルを考え、コア試験等の結果も参考にしてマトリックス・パラメータを入力、さらにその値を種々変化させて、より実際の検層結果に適合する岩石比率を求めた。

(4) フラクチャー解析

オプテマで算出された孔隙率、電気検層のロング・ノルマル比抵抗値 (LN) と

ショート・ノルマル比抵抗値 (SN) の比、2次孔隙率（密度・中性子検層から算出された孔隙率－音波検層から算出された孔隙率）をフラクチャー検出の指標としている。

ガンマ線スペクトル検層記録がある場合は、各成分 (K, Th, U) の強度比等もフラクチャーの指標となるが、今回は利用できなかった。

- ① 孔隙率 : オプテマで算出される孔隙率をはじめ、数種類の孔隙率が利用できる。花崗岩ではマトリックスの孔隙率は非常に小さいので、孔隙率が大きいほどフラクチャー孔隙率が大きいと考えられる。
- ② 2次孔隙率 : 密度・中性子検層から算出された孔隙率から音波検層より算出された孔隙率を差し引いた値。この値が正の場合、粒間孔隙以外の2次孔隙を表す。又、ここでは大きな負の部分をオープン・フラクチャーによる音波走行時間 (ΔT) のスキップ発生の指標としている。
- ③ LN/SN : 比抵抗検層による探査深度の異なる比抵抗値の比をとる。フラクチャーの存在による孔内水の地層（岩体）への浸透がある場合、浅部比抵抗値が影響を受ける。比が1に近いほど、浸透がないと言える。しかし、今回検討した電気検層によるロング・ノルマル比抵抗値 (LN) とショート・ノルマル比抵抗値 (SN) の比については、孔内水の影響が大きく逆の結果が得られたしかし、孔内水比抵抗値と地層比抵抗値を総合的に判断する必要はあるが、フラクチャー検出には有効である。
- ④ 孔径拡大 : 大きなフラクチャーのある部分は孔壁の状態が不安定で崩れ易く、孔径が拡大している場合が多い。

3.2 複合岩相解析（オプテマ）

3.2.1 解析プログラムの概要

複合岩相解析（OPTIMA）は検層ログ実測値、その実測値の不確実さ（uncertainties）、既知の変数（岩相あるいは鉱物の検層レスポンス—岩石物性値）と採用した岩相（鉱物）の組合せモデルに基づいて、検層理論値および岩相（鉱物）体積比率等を統計学的・確率論的に求める解析プログラムである。

未知の変数（岩相体積比率、孔隙率）は、ツール・レスポンス式から求められた、検層理論値と実測値との差が最小になるよう、非線形重み付き最小自乗法を用い、繰り返し計算により各深度レベル毎に求められる。又、その結果については、解析者の定める許容範囲に収まるように制約条件（例えば $\phi < 40\%$ ）を課することもできる。

計算モデルの適合性の指標として、クオリティ・インジケータが出力されるが、この値には解析者の定めたパラメータに関する精度の他、各検層結果に対する環境の影響、統計的変動、岩石物理学的特性に起因する不確実さ（uncertainties）、制約条件の有無が考慮されている。

3.2.2 解析に使用した検層種目

オプテマ解析に使用した検層ログの種目と測定項目は下記の通りである。

<u>検層種目</u>		<u>測定項目</u>
① 電気検層	(Electrical log)	Rt (Long Normal)
② 音波検層	(Acoustic log)	ΔT
③ 中性子検層	(Neutron log)	ϕ_N
④ 密度検層	(Density log)	ρ_b
⑤ 自然ガamma線検層	(Gamma Ray log)	Total GR
⑥ XY キャリパー検層	(XY Caliper log)	Hole diameter

上記ログ中、岩相体積比率の決定に使用したのは①～⑤の検層ログのデータである。⑥のキャリパー値は各測定値の孔径補正の他、各測定値の信頼性（不確実さ（uncertainties））の算定に用いられる。

3.2.3 解析の前処理（プレオプテマ）

必要な補正および深度マッチング等の処理を行った各検層データは、プレオプテマというオプテマ解析のための前処理プログラムを使い、その測定値の信頼度の指標として、測定値の“不確実さ”(uncertainties)の巾を求める。（添付図-①a, b ②a, b）

検層ログとして記録された測定値の不確実さの主な要因としては下記のようなものがある。

1) 環境の影響

中性子検層における坑径の影響等は、その補正量が増加するとレスポンスに関する不確実さも同様に増加する。

パッド・タイプの検層機を使用する密度検層では、坑内形状の不規則さがレスポンスに関する不確実さを増加させる。この坑内形状の不規則さを”rugosity”としてキャリバー・ログの変化量から計算し、不確実さを見積もる。

2) 測定の原理

各測定値固有の不確実さは、その測定原理に基づいて推定される。例えば、放射線計測のレスポンスは既知の統計的分散を示す。

3) 測定値の振幅

前処理段階において、個々の検層記録の深度対比を行い、必要な深度補正を行うが、この補正自体の正さについてもある程度の不確実さが残る。測定値の変化が小さい場合は、深度決定に多少の誤差があっても測定値決定の不確実さの程度は小さく、レスポンス振幅が増加するにつれて誤差の可能性は大きくなる。

3.2.4 岩相モデルおよびマトリックス・パラメータ

オプテマでは最大6種類までの岩石（鉱物）を取り扱うことが可能である。しかし、今回の解析では単一の花崗岩体が対象であり、その風化・変質の検出が主要目的であること、小孔径の孔井であることから検層種目が限られていたという制約があることを考慮して、次のような4種類の岩石からなる岩相モデルを採用した。

- ① 花崗岩-1 (Granite-1) 風化・変質を受けた花崗岩
- ② 花崗岩-2 (Granite-2) 一般的な花崗岩
- ③ 花崗岩-3 (Granite-3) 塩基性鉱物に富む花崗岩
- ④ 頁岩 (Shale) 風化・変質が進み粘土化した花崗岩

本地域の花崗岩体は、これまでの地表地質調査や調査孔掘削によって採取されたコアの観察等によると、主要岩相は黒雲母花崗岩で一部地域的に花崗閃緑岩の岩相を示す。解析対象の両孔の岩相はコア観察記録によると概ね細粒～粗粒の黒雲母花崗岩となっている。

同一花崗岩体の中における各種検層レスポンスの変化は、

- 1) 岩体の貫入・冷却時に形成された岩相変化（鉱物組成の変化）
- 2) 岩体の冷却過程における収縮にともない発生した亀裂（節理）
- 3) 岩体貫入後、現在までの間に受けた構造的な力の作用による断層や亀裂
- 4) 岩体貫入後、現在までの間に受けた風化あるいは変質作用による物理・化学的性質の変化
- 5) 岩体に、後に貫入（逆入）した物性の異なる岩脈の存在
- 6) 孔井の掘削によって生じた、岩石の物性に応じた孔壁、孔径の変化

などにより生ずると考えられる。その中で、岩相あるいは岩質の変化としては初生的な鉱物組成の違いと二次的な風化・変質作用によってできる違いの二種類がある。この二種類の変化を反映するよう前述の4岩相モデルを考えた。

つまり、花崗岩体の原岩として、本地域で一般的に分布する花崗岩(Granite-2)と、より塩基性鉱物に富む花崗岩(Granite-3)の二種類を考え、その量比により鉱物組成の違いによる岩相変化を反映させる。さらに、風化・変質作用については風化（変質）花崗岩(Granite-1)と頁岩(Shale)の二種類を考えた。頁岩は比抵抗の変化を岩相変化に反映させる目的で選んだもので、風化（変質）が進み花崗岩が粘土化したと想定した。（頁岩以外の岩石マトリックスの比抵抗は無限大として計算されるので、頁岩を含まないモデルの場合は比抵抗変化は孔隙や亀裂の体積と含有する地層水の比抵抗のみによって決定される。）

各岩相に対する検層レスポンス（マトリックス・パラメータ）として選んだ値は表3.2.1示した通りであるが、これらの値は基本的にはコア・サンプルの試験結果も参考の上、地質学的な常識の範囲内で選ばれているが、本地域の特殊性からガンマ線のレスポンスについては、かなり高い値となっている。

また、このマトリックス・パラメータは両孔（全深度区間）共通とした。各孔独自にモデルおよびマトリックス・パラメータを設定した方が良い計算結果が得られるが、同一岩体内にあり別々のパラメータを決める程の明確な地質条件の差異は認められないことと、両孔の比較のしやすさから共通のモデルとマトリックス・パラメータを使うこととした。

各岩相の量比に関する計算上の制約条件はつけなかった。

表3.2.1 各岩相に対する検層レスポンス
(マトリックス・パラメータ)

	ρ_b (g/cm ³)	ϕ_N (%)	ΔT (μ sec/ft)	GR (API)	Rt (ohm-m)
花崗岩-1 (Granite-1)	2.49	1.0	100.0	740.0	—
花崗岩-2 (Granite-2)	2.63	-1.0	57.0	430.0	—
花崗岩-3 (Granite-3)	2.66	4.0	69.0	260.0	—
頁 岩 (Shale)	2.40	40.0	120.0	740.0	4.0

地層水 (Formation water)	1.00	100.0	189.0	—	50.0
-----------------------	------	-------	-------	---	------

花崗岩-1 (Granite-1) : 風化・変質を受けた花崗岩

花崗岩-2 (Granite-2) : 一般的な花崗岩

花崗岩-3 (Granite-3) : 塩基性鉱物に富む花崗岩

頁 岩 (Shale) : 風化・変質が進み粘土化した花崗岩

マトリックス・パラメータのクロスプロット図上での位置については
図3.2.14 a, bおよび図3.2.15 a, bを参照。

3.2.5 解析処理

オプテマ・プログラムの解析処理のフロー・ダイアグラムを図3.2.1に示す。各検層実測値と上記マトリックス・パラメータ、およびプレオプテマ・プログラムにより求められた測定値の不確実さを入力データとし、実測値とツール・レスポンス式から計算された検層理論値との差が最小になるような岩相体積比率をオプテマ・プログラムを用いて求めた。その結果を下記の各図に示した。

添付図-③ a, b (OPTIMA解析結果およびフラクチャー解析結果

岩相体積比率、孔隙率、WSSE、二次孔隙率等)

添付図-④ a, b (THEORITICAL LOG:不確実さの巾(uncertainty band)付きの

検層実測ログとツール・レスポンス式から計算された理論ログ)

添付図-⑤ a, b (OPTIMA解析結果による各岩相の体積比率)

オプテマ・プログラムで岩石（鉱物）組成および孔隙率を解析するにあたって、計算モデルの適合性の指標として、"NW SSE" (Normalized Weighted Sum of Squared Errors) というクオリティ・インジケータが出力される。これは前述の測定に係わる誤差および解析にあたって採用するパラメータに含まれる誤差も考慮したものであり、通常この値が 1.0 以下であれば良く適合しているとみなされる。(Mezzatesta et al., 1988)

WSSE 関数は数学的には次式による。（実際にオプテマ解析結果で出力している値は、下記の式に解析者の定義する制約条件の項を付け加え、さらに正規化した NW SSE である。）

$$WSSE(\underline{X}) = \sum_{i=1}^{n_t} (b_i - b_{thi})^2 / W_i$$

ここで、 WSSE : Weighted Sum of Squared Errors (残差の重み付き二乗和)

\wedge

X : 求められた岩相（鉱物）体積比率

b_i : 検層実測値

b_{thi} : 検層理論値

W_i : 実測値および計算理論値に含まれる不確実さの合計

n_t : 解析に使用された測定種目数

i : i番目の測定種目

本解析結果では、解析区間平均の NWSSE は AN-1号孔で 0.447、DH-4号孔で 0.787と共にモデル適合の目安である 1.0 を下回っており、数学的には岩相（鉱物）モデルと検層実測値が良く合っていることを示している。

但し、両孔を比較した場合、DH-4号孔の方が明らかに適合の度合いが低いと言える。これは DH-4号孔の方が孔内状況が悪く、かなりの箇所で坑径が拡大していることもあり、ログ・クオリティが劣ることも一因である。

個々の種目の検層実測値とモデルから計算した検層理論値を比較すると、DH-4号孔では密度検層値 (ρ_b) の理論値が全般的に実測値より大きいのが目立つ。AN-1号孔の結果は比抵抗値 (R_t) を除いて非常に良く一致している。比抵抗値については、電気検層での高比抵抗層測定の限界を考慮し、両孔とも概ね傾向を合わせるだけとした。（添付図-④ a, b）

尚、電気検層に関する検層理論値の表示は省略した。

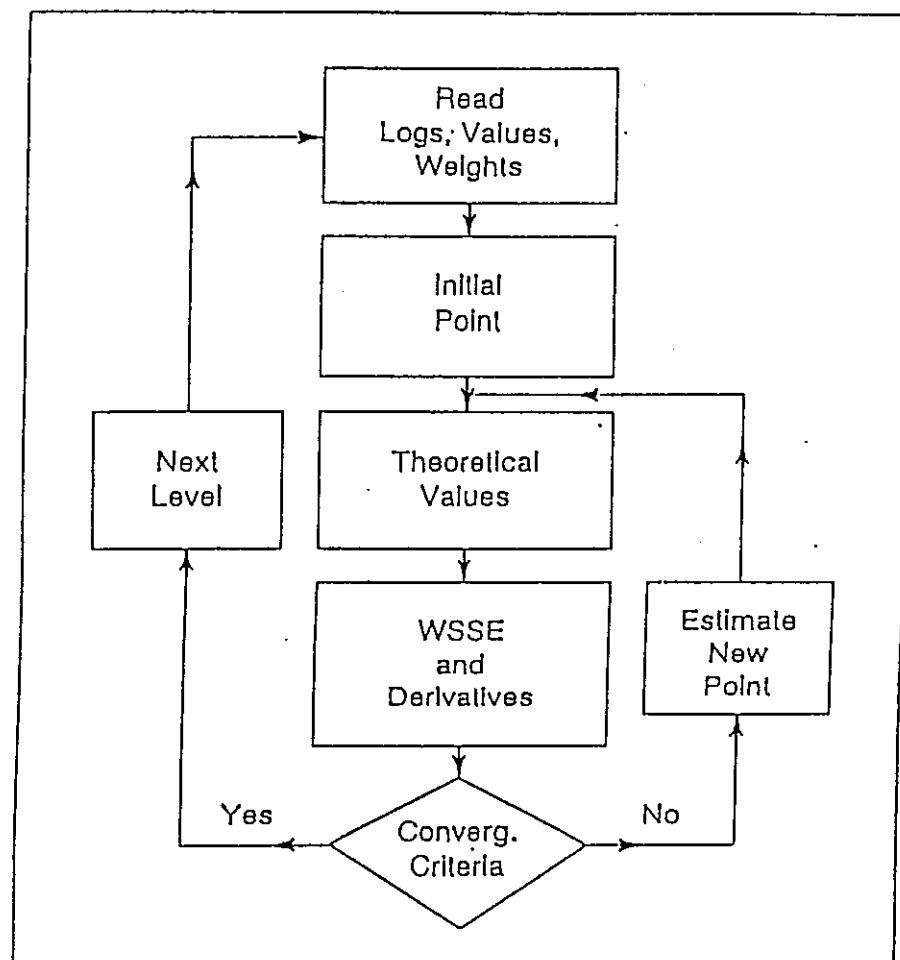


図3.2.1 オプテマ解析処理フロー・ダイヤグラム

[参考]

添付図-③ a , b (OPTIMA解析結果およびフラクチャー解析結果)におけるカーブの説明

1. 表示上のカーブ名 LN/SN

電気検層における LN (Long Normal) > SN (Short Normal) 区間
における LN と SN の比 (LN/SN)

2. 表示上のカーブ名 F I S E C (SECODARY POROSITY)

$$FISEC (\phi_{2ND}) = \phi_{D-N} - \phi_{AC}$$

ϕ_{D-N} : 密度検層値と中性子検層値のクロスプロットから得られた孔隙率
 ϕ_{AC} : 音波検層から得られた孔隙率

3. 表示上のカーブ名 F I A C (AC POROSITY)

音波検層から得られた孔隙率 (ϕ_{AC})

$$\phi_{AC} = \frac{\Delta t - \Delta t_{matrix}}{\Delta t_{fluid} - \Delta t_{matrix}}$$

Δt_{matrix} : 音波検層と中性子検層値の
クロスプロットから得られ
たマトリックス中の音波走
行時間

4. 表示上のカーブ名 R U G W (RUGOSITY)

キャリパー 検層より計算した坑内形状の不規則さ。 XY キャリパー の平均値を採用。

$$RUG = | (CALA - (2*CAL) + CAL) |$$

CALA : 1 サンプル上のキャリパー 測定値
CALB : 1 サンプル下のキャリパー 測定値

RUGW : 上記 RUG の計算に重みを考慮した値

5. 表示上のカーブ名 R A V G (AVERAGE MATRIX DENSITY)

孔隙分を除いた岩石マトリックス部分の密度

3.2.6 解析結果

(1) ヒストグラム図

両孔の検層データについて、自然ガンマ線、音波走行時間、密度、中性子孔隙率のヒストグラム図を作成した。

① 自然ガンマ線 (Total GR) 図3.2.2 a (AN-1), 2 b (DH-4)

花崗岩体の中の値なので両孔とも比較的まとまった単一のピークを示している。ピーク値は 400~425 APIで非常に大きい。DH-4号孔の方が全般的に若干大きい値を示す。AN-1号孔には 250~350 API程度の比較的低い値を示す部分がピークの左脇に "こぶ" をつくっている。これは深度 150 mまでの浅い部分の岩相に対応している。

② 音波走行時間 (ΔT) 図3.2.3 a (AN-1), 3 b (DH-4)

AN-1号孔は $62.5 \mu\text{sec}/\text{ft}$ に、DH-4号孔は $67.5 \mu\text{sec}/\text{ft}$ にピークがある。全般的にDH-4号孔の方が低速度であり、 $80 \mu\text{sec}/\text{ft}$ 以上部分がかなり存在する。

③ 密度 (ρ_b) 図3.2.4 a (AN-1), 4 b (DH-4)

音波走行時間 (ΔT) と同様の傾向を示す。AN-1号孔は 2.55 g/cm^3 に、DH-4号孔は 2.50 g/cm^3 にピークがある。DH-4号孔は低密度(左)側にすそのが広がっており低密度部分の存在を示している。

④ 中性子孔隙率 (ϕ_N) 図3.2.5 a (AN-1), 5 b (DH-4)

両孔ともピークは 3.8% にあるが、DH-4号孔はピークの右脇に "こぶ" をつくりており、6~8%程度孔隙率の部分が多いことを表している。一般に花崗岩ではマトリックス孔隙率は小さく 5%以下と言われているので、風化の影響やフラクチャーの発達が考えられる。

総合的に判断してDH-4号孔の岩質はAN-1号孔に比較して不良であり、風化・変質の進行やフラクチャーの発達が考えられる。AN-1号孔の自然ガンマ線のヒストグラムは岩相の変化(鉱物組成の変化)を示唆している。

各検層データの平均値とその標準偏差、中間値およびノード値（ピーク値）は以下の通りである。

表 3. 2. 2 a 各検層データの平均値、標準偏差等

A N - 1 号孔

	平均値	標準偏差	中間値	ノード値
GR (API)	399.389	71.762	389.641	400.000
ΔT (μ sec/ft)	66.243	6.357	63.531	62.500
ρ_b (g/cm ³)	2.550	0.038	2.539	2.550
ϕ_N (%)	5.0	2.3	3.7	3.8

表 3. 2. 2 b 各検層データの平均値、標準偏差等

D H - 4 号孔

	平均値	標準偏差	中間値	ノード値
GR (API)	431.369	62.889	413.320	425.000
ΔT (μ sec/ft)	73.308	11.281	68.540	67.500
ρ_b (g/cm ³)	2.474	0.070	2.482	2.500
ϕ_N (%)	5.2	2.4	4.2	3.8

(2) クロスプロット図

密度値 (ρ_b) - 中性子孔隙率 (ϕ_N)、密度値 (ρ_b) - 音波走行時間 (ΔT)、音波走行時間 (ΔT) - 中性子孔隙率 (ϕ_N) の各クロスプロットと M-N プロットについて、各々頻度プロットと自然ガンマ線 (Total GR) をインデックスとした Z プロットの二種類を作成した。

① ρ_b - ϕ_N クロスプロット (図 3.2.6 a, b ~ 図 3.2.7 a, b)

AN-1 号孔ではほとんどの点が Sandstone line 上を中心に Sandstone line から Limestone line にかけて分布する。Z プロットでは、自然ガンマ線強度の明らかなパターンがみられる。つまり、低孔隙率 - 中ガンマ線値、低密度 - 高ガンマ線値、その他 - 低ガンマ線値の組合せである。低ガンマ線域の内、高密度部分は花崗閃緑岩の特徴を有している。

DH-4 号孔ではほとんどの点が Sandstone line の少し上に分布し、Limestone line 側への分布は少ない。又、低密度側への分散も著しい。孔内の状況が不良であった可能性が考えられる。Z プロットからは、高密度部分が低ガンマ線となっていて、花崗閃緑岩に対応すると考えられる。

② ρ_b - ΔT クロスプロット (図 3.2.8 a, b ~ 図 3.2.9 a, b)

AN-1 号孔では風化・変質の影響とみられる低速度 (ΔT 大) 側への分散が多少みられる他は比較的まとまって分布している。 ρ_b - ϕ_N の Z プロット同様、自然ガンマ線強度にはっきりしたパターンがみられる。つまり、高速度 (ΔT 小) - 中ガンマ線値、低速度・低密度 - 高ガンマ線値、その他 - 低ガンマ線値の組合せである。

DH-4 号孔では低速度 (ΔT 大) 側への分散が非常に著しく、風化・変質の進行と亀裂等の存在も含めて孔内状況の影響も考えられる。

③ ΔT - ϕ_N クロスプロット (図 3.2.10 a, b ~ 図 3.2.11 a, b)

分散の傾向は①、②で述べた通りであるが、AN-1 号孔の Z プロットでは低ガンマ線域が分布の中央にくる。DH-4 号孔では明瞭な傾向は認められない。

④ M-Nプロット

(図3.2.12a, b~図3.2.13a, b)

M-Nプロットでは、大部分の点が Sandstone point の周辺の周囲に分布している。このプロットでは頁岩を含有していくと下方に、二次孔隙がある場合は上方へシフトする。下方（低M値）への分散は風化・変質を反映して部分もあるが、特に N 値に対して M 値の低いものは孔径の影響による音波のスキップ現象が影響していると考えられる。

⑤ マトリックス・パラメータ (図3.2.14a, b~図3.2.15a, b)

オブテマ解析で最終的に採用した各岩相の検層レスポンス、つまりマトリックス・パラメータのクロスプロット ($\rho_b - \phi_N$ および $\rho_b - \Delta T$ の Z プロット) 図上で位置 (マトリックス・ポイント) を示した。

孔隙の影響は Water point の方向への、風化変質の影響は Clay point (Shale) の方向への分散で表される。

(3) 複合岩相解析（オプテマ）

オプテマ・プログラムにより求めた岩相比率等について添付図-③a, bに示した。

先に述べたように、4岩相モデルを考え、鉱物組成の観点からは一般的な花崗岩(Granite-2)とやや塩基性成分に富んだ花崗岩(Granite-3)の二種類を考えた。

この花崗岩(Granite-3)は一般的花崗岩(Granite-2)に比べて密度値が高く、中性子孔隙率が大きく、自然ガンマ線強度が低いとした。又、音波走行時間はやや大きいとした。これらの検層レスポンスは音波走行時間を除いて花崗閃緑岩に特徴的のものであるが、今回のモデルでは音波走行時間をやや大きいとした方が実測値によく合った。(花崗閃緑岩の音波走行時間は、花崗岩に比べて一般にやや小さいか同程度である。)

風化・変質作用に関しては、風化変質花崗岩(Granite-1)と頁岩(Shale)の組合せで評価した。風化変質花崗岩および頁岩の原岩としてはGranite-2とGranite-3の両方を考えている。風化変質花崗岩の特性としては低密度、低速度(音波走行時間大)であるが、物理的に形成されたフランクチャー等は孔隙率の増減で評価する方が適当と考えられるのでマトリックス自体の中性子孔隙率は原岩と同程度とした。一方、頁岩すなわち風化・変質作用によって生成される粘土鉱物の最も重要な特徴は、導電性を有し低比抵抗を示す点である。その他、頁岩の性質としては低密度、低速度、非常に大きい中性子孔隙率(40%)である。自然ガンマ線強度は風化変質花崗岩と頁岩、共に原岩より大きいとした。

以下、解析対象となった孔別に検討する。

AN-1号孔 (添付図-③a および 表3.2.3a 参照)

300m以浅の塩基性鉱物に富んだ花崗岩(Granite-3)が優勢なゾーンと、300m以深の一般的花崗岩(Granite-2)が優勢なゾーンに大別される。しかし、浅部を更に詳しく見ると160m～225m間に、一般的な花崗岩の比率が高い部分を挟んでいる。この部分の解釈としては、225m付近に逆断層が存在してGranite-3・Granite-2の岩相変化が繰り返している可能性が考えられる。

20m～160m: 塩基性鉱物に富んだ花崗岩(Granite-3)を主としたゾーンであるが、上部100m前後までは風化変質花崗岩(Granite-1)および頁岩(Shale)の比率が高い。検層のデータはないが、本孔の地質柱状図によると花崗岩体の上には不整合面(16m)を以て新三紀以降の堆積層が覆っている。したがって、不整合面下のかなりの部分は過去の風化作用の影響を受けていると考えられる。

又、最上部には 20m～26m と 38m～45m の二箇所に自然ガンマ線強度の極めて大きい部分がみられ、岩相図上はガンマ線強度の小さい塩基性鉱物に富んだ花崗岩(Granite-3)が、同強度の大きい一般的花崗岩(Granite-2)に置き換えられて表現されているが、岩相変化ではなく風化部への放射性鉱物の濃集が考えられる。

160m～225m: 岩相が塩基性鉱物に富んだ花崗岩から一般的花崗岩に変わる。又、その上下に比べて風化変質花崗岩+頁岩の割合も高い。深度からみて風化よりは変質鉱物の増加が考えられる。岩相変化の境目に当たる 160m～164m に自然ガンマ線強度の極めて大きいピークがある。各検層記録においてもアノマリーが認められるので、物性の違う岩脈の存在が考えられる。

300m以深、孔底深度 1000mまでは、ほとんど均質な一般的花崗岩(Granite-2)からなっているようであるが、詳しく見ると次のように分帶できる。

300m～440m: ほとんど一般的花崗岩(Granite-2)からなり、変質部(Granite-1+Shale)を伴うが孔隙率も小さく、堅固な岩質。160m～225mと同じ性質。

440m～570m: 一般的花崗岩(Granite-2)を主とするが若干、塩基性鉱物に富んだ花崗岩(Granite-3)相を伴い、変質部(Granite-1+Shale)の割合も本孔では比較的多い。孔隙率もやや大きく比抵抗の比(LN/SN)からもフラクチャー等の発達が考えられる。

570m～950m: ほとんど一般的花崗岩(Granite-2)からなり、変質の度合いも最も小さい堅固・均質な岩質。特に、上部の570m～780mはフラクチャー等の発達も少ない非常に堅固な岩質が考えられる。下部の780m～950mは比抵抗の比等からフラクチャーの発達も推定され、岩質の堅固さも若干劣る。795m付近、825m付近の二箇所にフラクチャーの存在が推定される。845m～850mには自然ガンマ線強度の大きい部分があるが、他の検層値に明瞭な変化はないので岩脈の可能性は低い。

950m～1000m: 300m以深では最も、塩基性鉱物に富んだ花崗岩(Granite-3)の割合が多く、変質部も若干多くなっている。955m以深、自然ガンマ線のレベルが下がっており鉱物組成に変化があると思われる。各種検層値のパターンは 440m～570m 部分と似ており、フラクチャー等もやや発達していると考えられるが、比抵抗値等から判断すると岩質は同部分よりはやや堅固であると推定される。

DH-4号孔 (添付図-③b および 表3.2.3 b 参照)

AN-1号孔とは約2km離れており、基準面(孔口)の標高は50.2m高い。堆積岩層と異なり、深度対比つまり岩相の水平方向の連続性については明確に存在するとは限らないが、両孔に共通のパターンも見受けられるので、AN-1号孔に対比しながら下記のように分帶した。

60m～160m: 塩基性鉱物に富んだ花崗岩(Granite-3)の比率がやや多く、160m以深の同岩をほとんど伴わない部分と岩相が異なる。低比抵抗および低自然ガンマ線強度が特徴である。但し、最上部の60m～90mは比抵抗、自然ガンマ線強度共やや高く、同岩(Granite-3)を含まない。風化変質花崗岩(Granite-1)+頁岩(Shale)の割合は浅くなるにつれ増しており、風化作用の影響と考えられる。

160m～250m: ほぼ一般的花崗岩(Granite-2)からなり、風化変質部(Granite-1+Shale)を伴う。やや高い比抵抗と高自然ガンマ線強度が特徴である。孔隙率は比較的小さく、上下のゾーンに比べて堅固な岩質と見えるが、変質部の割合は上のゾーンより多く、二次孔隙率も高い。186m付近には自然ガンマ線強度の極めて大きい部分があり、各検層記録でもアノマリーが認められるので岩脈の存在が考えられる。

250m～350m: 一般的花崗岩(Granite-2)を主としているが、塩基性鉱物に富んだ花崗岩(Granite-3)および風化変質部(Granite-1+Shale)をかなりの比率で伴う。低比抵抗が特徴であり、密度、音波、中性子の各検層値にも大きなアノマリーがある。孔径拡大等も認められる。孔隙率は異常に大きく、変質部の割合も二次孔隙率も、上の160m～250m間より更に大きい。全て岩質の悪さ、フラクチャーの発達等を示唆している。特に340m～350m間は上記の異常が著しく、断層破碎帯の可能性がある。後述のように、直下350m以深からは岩質が堅固なタイプに急変している。

350m～500m: 一般的花崗岩(Granite-2)を主とし、風化変質部(Granite-1+Shale)の割合は小さい。高比抵抗が特徴で、二次孔隙率も小さく、概ね堅固な岩質といえる。但し、460m～470m間は孔径拡大および二次孔隙率の増加等から大きなフラクチャーの存在が推定される。

両孔の比較

孔井全般の状況として、DH-4号孔の方がAN-1号孔より風化あるいは変質の度合いが大きく、フラクチャーもより多く、総じて岩質が不良である。孔内状況(孔壁状態)もDH-4号孔の方が悪く、検層データ品質(ログ・クオリティ)も悪い。当然、岩質の不良と密接な関連があると考えられる。

表 3.2.3 a 岩相解析結果 (AN-1号孔)

深度 (m)	岩 相			検層測定値						岩質	岩相区分
	Granite-1 + Shale	Granite-2	Granite-3	孔隙率	比抵抗 LN	自然 γ 線 GR	密度 ρ_b	音波 ΔT	中性子 ϕ_N		
20~100m	◎	○	○	大	低	高	中~小	遲	大	風化帶	A
100~160m	—	△	◎			低	中			塩基性鉱物に富む花崗岩	B
160~225m	○	◎	△	中	中	高	中	遲	中	花崗岩 <断層?>	C
225~300m	△	△	◎	中	低	低	大	中~遲	中	塩基性鉱物に富む花崗岩	B
300~440m	○	◎	—	小	高	高	中	中	小	花崗岩 岩質 良	C
440~570m	○	◎	○	中	低	中高	中~小	遲	中	変質帶 岩質 不良	D
570~780m	—	◎	—	小	高	中	中	速	小	花崗岩 岩質 良	E
780~950m	△	◎	△		中~高					花崗岩 岩質 不良	
950~1000m	△	○	○	小	中	低	中	遲	小	塩基性鉱物に富む花崗岩 岩質 不良	F

各岩相の量比 多 ◎>○>△>— 少

Granite-1 + Shale (風化変質花崗岩)

Granite-2 (一般的な花崗岩)

Granite-3 (塩基性鉱物に富む花崗岩)

* 岩相区分 A ~ F は岩相タイプを表し、両孔の対比等のために便宜上つけた記号で岩質の程度には無関係。

* 岩相欄の孔隙率はオブテマで求めた値

表3.2.3 b 岩相解析結果 (DH-4号孔)

深度 (m)	岩 相			検層測定値					岩相区分
	Granite-1 + Shale	Granite-2	Granite-3	孔隙率	比抵抗 LN	自然 γ 線 GR	密度 ρ_b	音波 ΔT	
60～90m	◎	◎	—	中	高	高	中	中	風化帶 A
90～160m	△	△	◎	大	低	低	中～大	遅	塩基性鉱物に富む花崗岩 B
160～250m	○	◎	—	小	高	高	中	中	花崗岩 岩質 良 C
250～350m	◎	◎	○	大	低	中 高	中～小	遅 中	変質帶 岩質 不良 D <断層破碎帶?>
350～460m				中	高	中	大	中～速	花崗岩 岩質 良 E
460～480m	△	◎	△	大	低	中	小	遅	花崗岩 岩質 不良 —
480～500m				中	高	高	大	速	花崗岩 岩質 良 E

各岩相の量比 多 ◎>○>△>— 少

Granite-1 + Shale (風化変質花崗岩)

Granite-2 (一般的な花崗岩)

Granite-3 (塩基性鉱物に富む花崗岩)

* 岩相区分 A～F は岩相タイプを表し、両孔の対比等のために便宜上つけた記号で岩質の程度には無関係。

* 岩相欄の孔隙率はオブテマで求めた値

* 460～480m間は 350～500mの中の部分的なフラクチャー・ゾーンとして岩相タイプ分けから除外した。

(4) フラクチャー解析

① オプテマ孔隙率、② 2次孔隙率、③ 比抵抗の比 (LN/SN)、④ 孔径拡大を指標としてフラクチャーの検出を試み、その結果について表 3.2.4 a (AN-1号孔)、表 3.2.4 b (DH-4号孔) にまとめた。

但し、比抵抗比については以下の考察に基づき検討した。

AN-1号孔の場合

電気検層による見掛け比抵抗の測定値は孔内水の影響を強く受けるため、岩盤状態が悪く、孔内水の浸透がある部分はロング・ノルマル比抵抗値 (LN)、ショート・ノルマル比抵抗値 (SN) が共に低くなり、LN と SN のセパレーションがなくなる。つまり $LN/SN \approx 1$ となる。逆に、岩盤の状態が良く、孔内水の浸透がない場合は LN、SN の両比抵抗値が共に高くなるが、岩盤比抵抗》孔内水比抵抗であれば、LN と SN の間にセパレーションができる。つまり $LN/SN > 1$ となる。

DH-4号孔の場合

全深度区間でほとんどセパレーションが見られず、 $LN < SN$ と比抵抗値の関係が逆転しており、又、比抵抗値それ自身が全般に低い値となっている。(AN-1号孔の高比抵抗部 $8,000 \sim 10,000 \Omega\text{m}$ に対し、DH-4号孔の高比抵抗部は $2,000 \Omega\text{m}$ 。)しかし、低比抵抗部 ($1,000 \Omega\text{m}$ 以下) の一部では、 $LN > SN$ となっており、その箇所は岩盤の状態が悪く、フラクチャーの発達が見られそうである。

このような結果となった原因としては、全般的な岩盤状態の不良と、孔内水比抵抗が非常に高かったことが考えられる。

整理すると下記のようになり、電気検層の比抵抗値の比をフラクチャー指標として用いる場合は、比抵抗値自体の値の高低と孔内水比抵抗値等との関係も考慮する必要がありそうである。

AN-1号孔	岩盤状態 良	-----	比抵抗 高	□	$LN/SN > 1$
	岩盤状態 不良	-----	比抵抗 低	□	$LN/SN \approx 1$

DH-4号孔	岩盤状態 や良	-----	比抵抗 や高	□	$LN/SN \leq 1$
	岩盤状態 不良	-----	比抵抗 低	□	$LN/SN > 1$

表3.2.4 a フラクチャー解析結果 (AN-1号孔)

深 度 (m)	孔隙率 (トータル) ϕ	二 次 孔隙率 ϕ_{2nd}	比 抵 抗		坑 径 拡 大 (XY-CAL)	岩 質	岩相 区分
			比抵抗値 LN, SN	比 LN/SN			
22 - 25 m	○	◎	◎	◎			
79 m	◎	◎	◎	○		風化帶	A
103 m	◎	◎	◎	○	○	塩基性鉱物に富む花崗岩	B
162 - 164 m	◎			○			
220 - 224 m	◎	◎	◎	◎	○	花崗岩	C
270 m	○	◎	○	○	△	塩基性鉱物に富む花崗岩	B
300 - 304 m	◎	◎	○	○		花崗岩	C
455 - 498 m	○	◎	◎	◎	△		
522 - 560 m	◎	○	◎	◎	△	変質帶	D
790 - 800 m	△	△	○	○			
820 - 830 m	△	△	○	○		花崗岩	E
922 - 928 m		○	△	○			
968 - 1000 m	△	△	△	◎	△	塩基性鉱物に富む花崗岩	F

各フラクチャー指標 顕著 ◎>○>△ 若干 (空欄は特に変化無し)

* 岩質および岩相区分は表3.2.3 aによった。

* 岩質にはそのゾーンで優勢な岩相あるいは特徴的な性質を記してあり、必ずしも全体の性質を表していない。

* 孔隙率(トータル)はオブテマで求めた値

表 3.2.4 b フラクチャー解析結果 (DH-4号孔)

深 度 (m)	孔隙率 (トータル) ϕ	二 次 孔隙率 ϕ_{2nd}	比 抵 抗		坑 径 拡 大 (XY-CAL)	岩 質	岩相区分
			比抵抗値 LN, SN	比 LN/SN			
124 - 130 m	◎	○	○	△	○		
148 - 155 m	◎	○	◎	○		塩基性鉱物に富む花崗岩	B
208 - 210 m	△	◎		△	◎		
240 m	○	○	△		○	花崗岩	C
250 - 262 m	○	○	△	△			
274 - 278 m	◎	○	△	△	△		
286 - 300 m	◎	○	○	○	△	変質帶	D
320 - 330 m	◎	○	○	○	○		
340 - 353 m	◎	○	○	○	○		
398 - 408 m		○	○	○	△		
462 - 466 m	◎	○	○		○	花崗岩	E
470 - 475 m	◎	○	○	○	○		

各フラクチャー指標 顕著 ◎>○>△ 若干 (空欄は特に変化無し)

* 岩質および岩相区分は表 3.2.3 b によった。

* 岩質にはそのゾーンで優勢な岩相あるいは特徴的な性質を記してあり、必ずしも全体の性質を表していない。

* 岩相区分 A (風化带) の深度区間にはフラクチャーの微候なし。

* 孔隙率 (トータル) はオプテマで求めた値

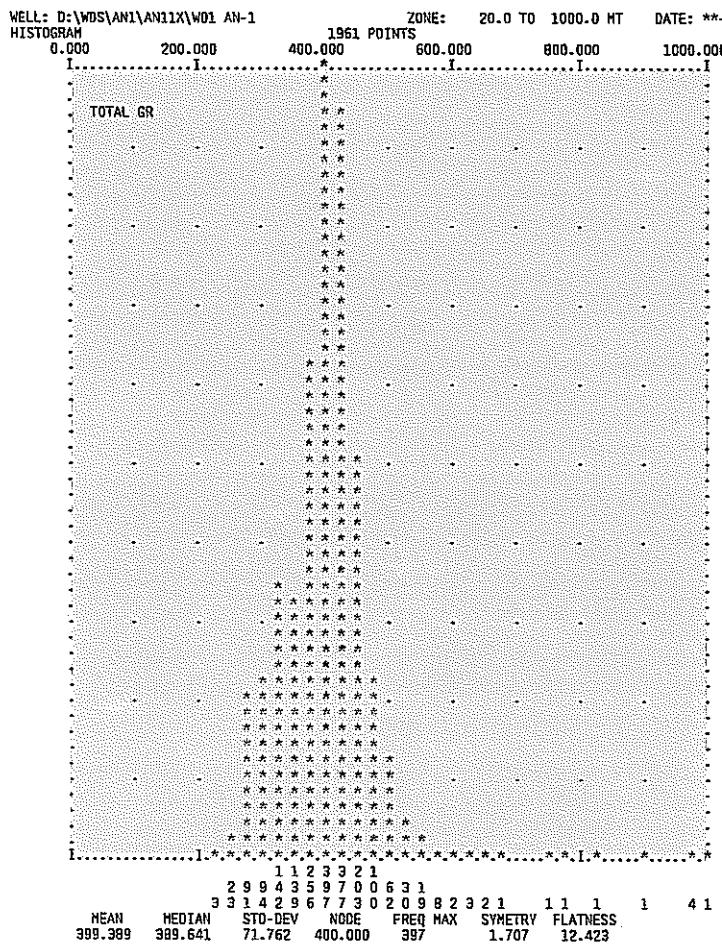


図3.2.2 a ヒストグラム 自然γ線強度 GR
(AN-1号孔)

最大頻度は 400API, 325API 付近にも低γ線の岩相
に対応したピークあり。平均値は 399API。

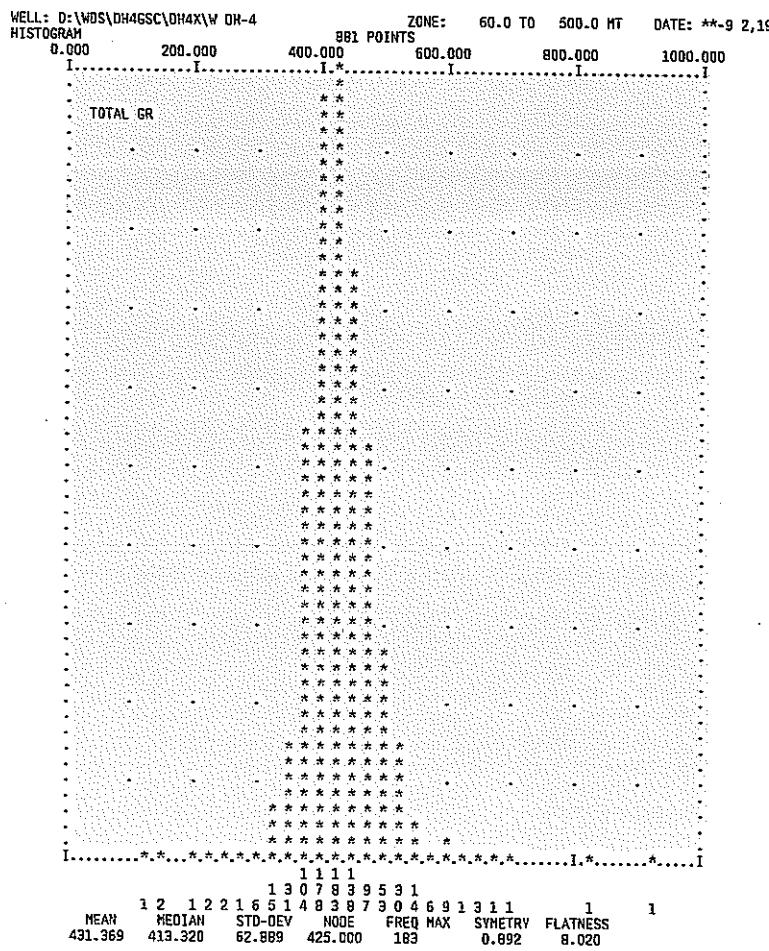


図3.2.2 b ヒストグラム 自然γ線強度 GR
(DH-4号孔)

最大頻度は 425API。平均値は 431APIで AN-1孔より
やや大きい。

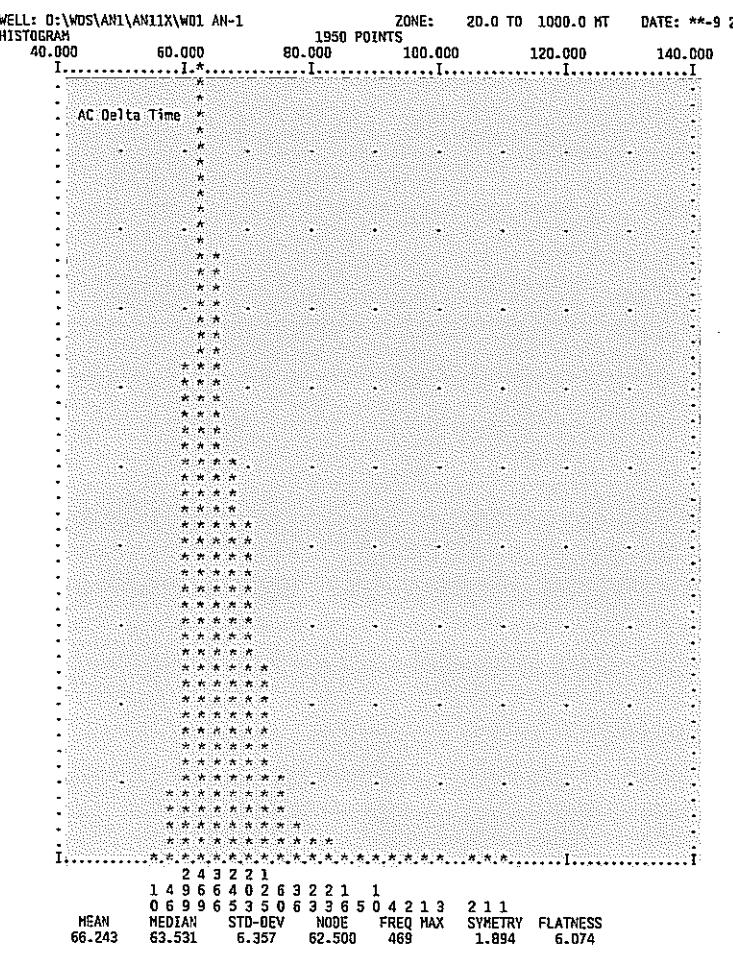


図3.2.3 a ヒストグラム 音波走行時間 ΔT
(AN-1号孔)

最大頻度は $62.5 \mu\text{sec}/\text{ft}$ 。平均値は $66.2 \mu\text{sec}/\text{ft}$ 。

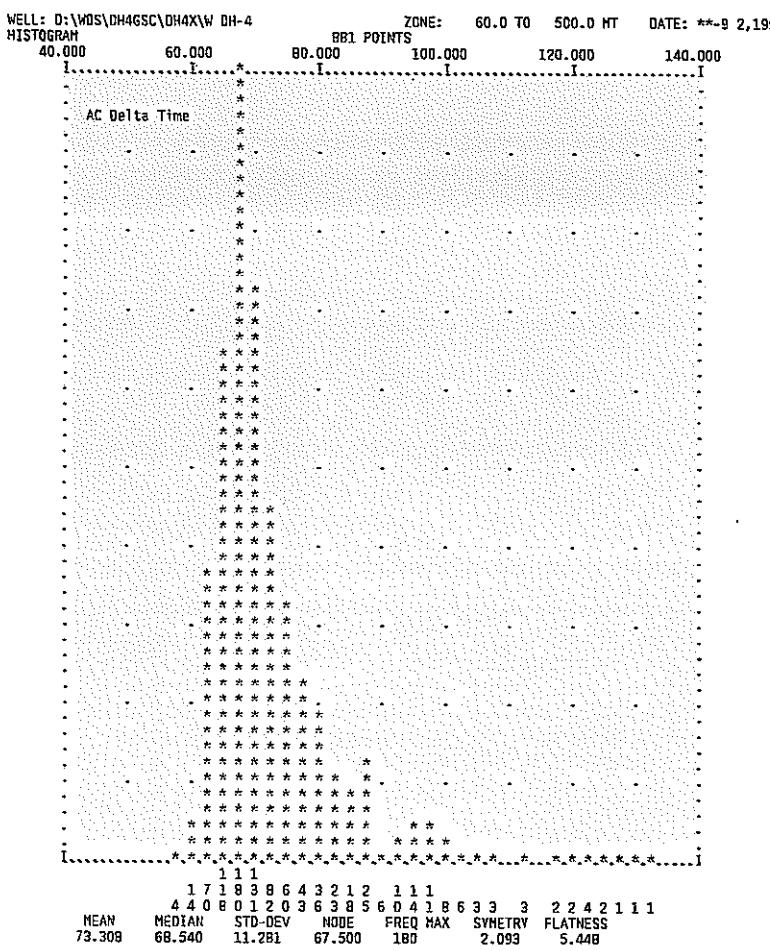


図 3.2.3 b ヒストグラム 音波走行時間 ΔT
(DH-4号孔)

最大頻度は $67.5 \mu\text{sec}/\text{ft}$ 。平均値は $73.3 \mu\text{sec}/\text{ft}$ 。
 $80 \mu\text{sec}/\text{ft}$ 以上の低速度の振度大。

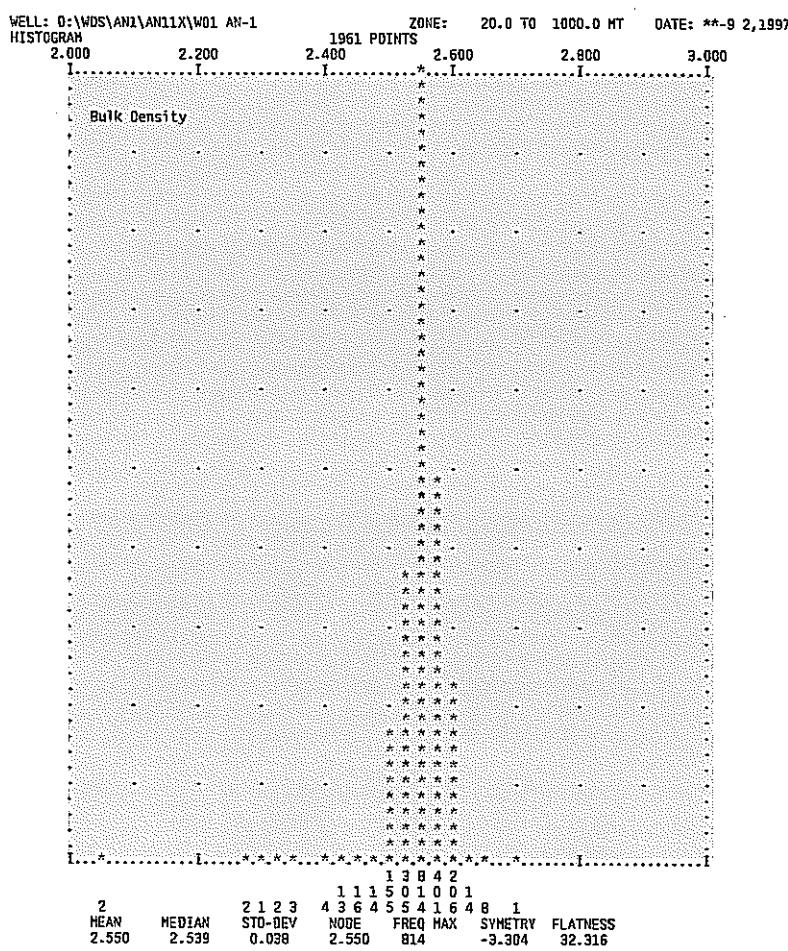


図3.2.4 a ヒストグラム 密 度 ρ_b

(AN-1号孔)

最大頻度および平均値は 2.55 g/cm^3 。

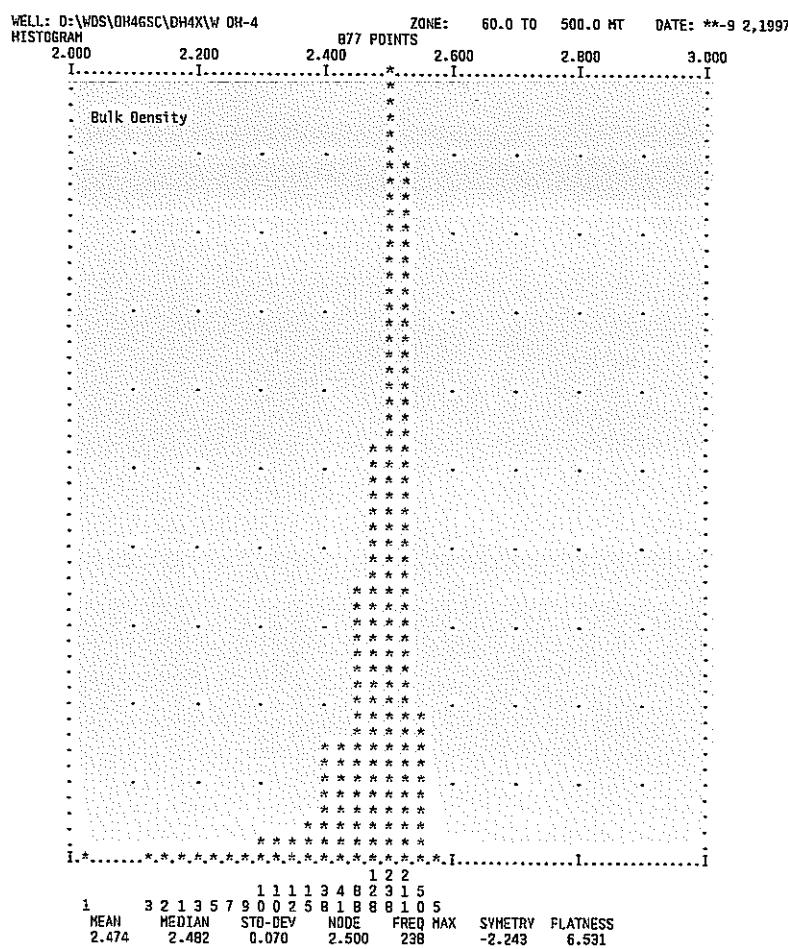


図3.2.4 b ヒストグラム 密 度 ρ_b

(DH-4号孔)

最大頻度は 2.50 g/cm^3 、平均値は 2.47 g/cm^3 。

低密度側への分散が大きく、AN-1孔より密度小。

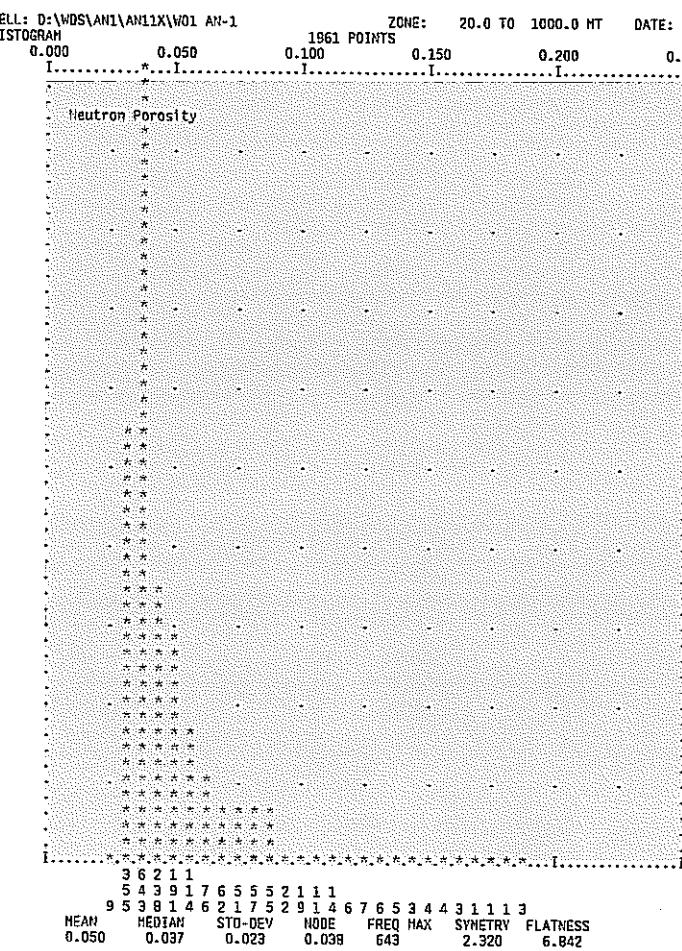


図3.2.5a ヒストグラム 中性子孔隙率 ϕ_n
(AN-1号孔)

最大頻度は 3.85 , 平均値は 5.03 。

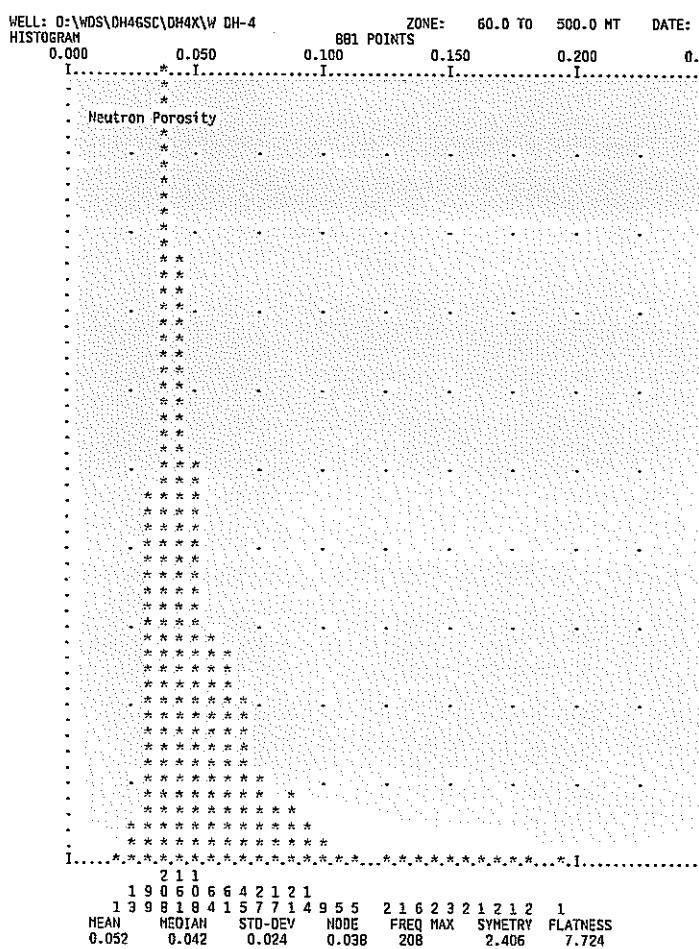


図 3.2.5 b ヒストグラム 中性子孔隙率 ϕ_N
(DH-4号孔)

最大頻度は 3.8%、平均値は 5.2%。6-8%に小ピークあり、ブラックチャーチの発達度が推定される。

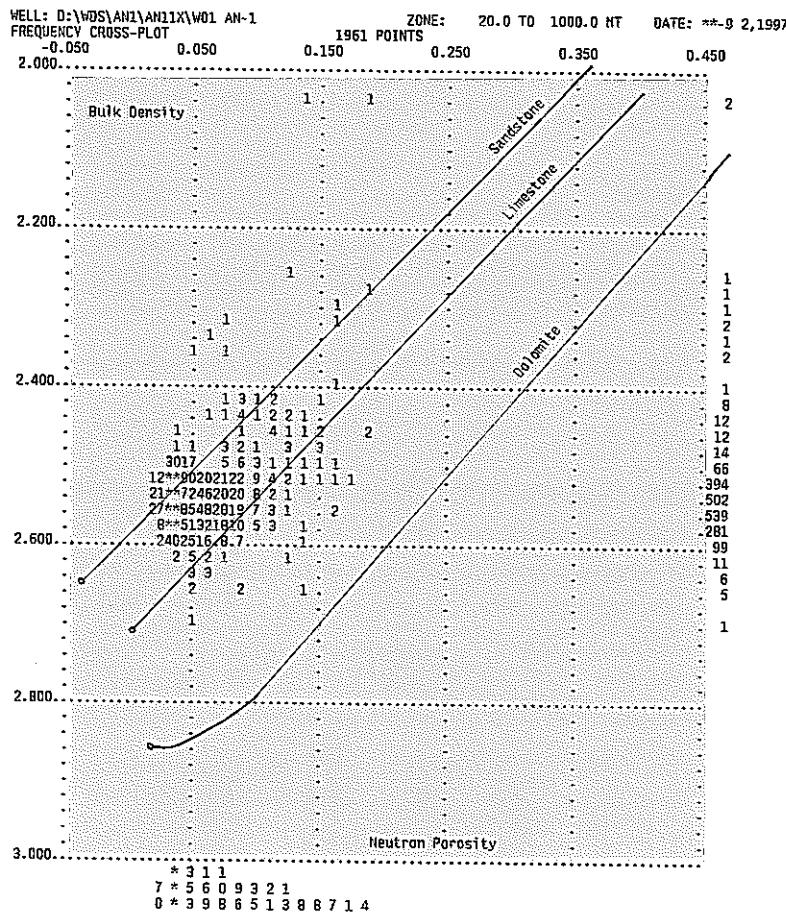


図 3.2.6 a クロスプロット(頻度)
密度-中性子孔隙率($\rho_b - \phi_n$)
(AN-1号孔)

大部分の点がサンドストーン・ライン上を中心同ラインからラムストーン・ラインにかけて分布している。

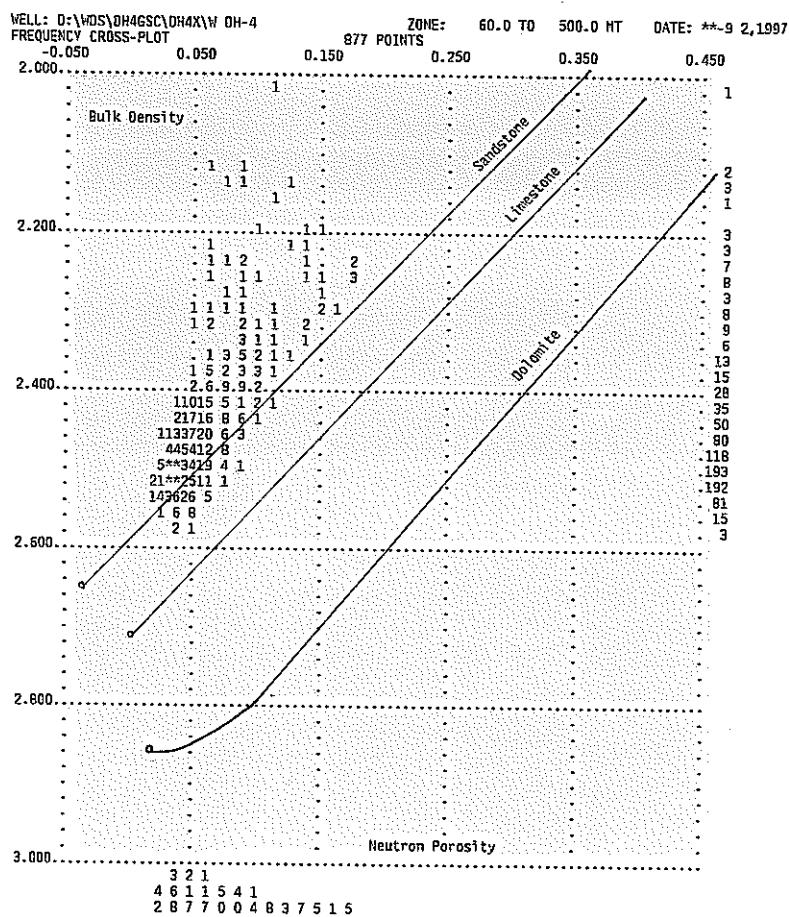


図3.2.6 b クロスプロット(頻度)
密度-中性子孔隙率($\rho_b - \phi_n$)
(DH-4号孔)

大部分の点がサンドストーン・ライクの少し上に分布。低密度側への分散も著しい。

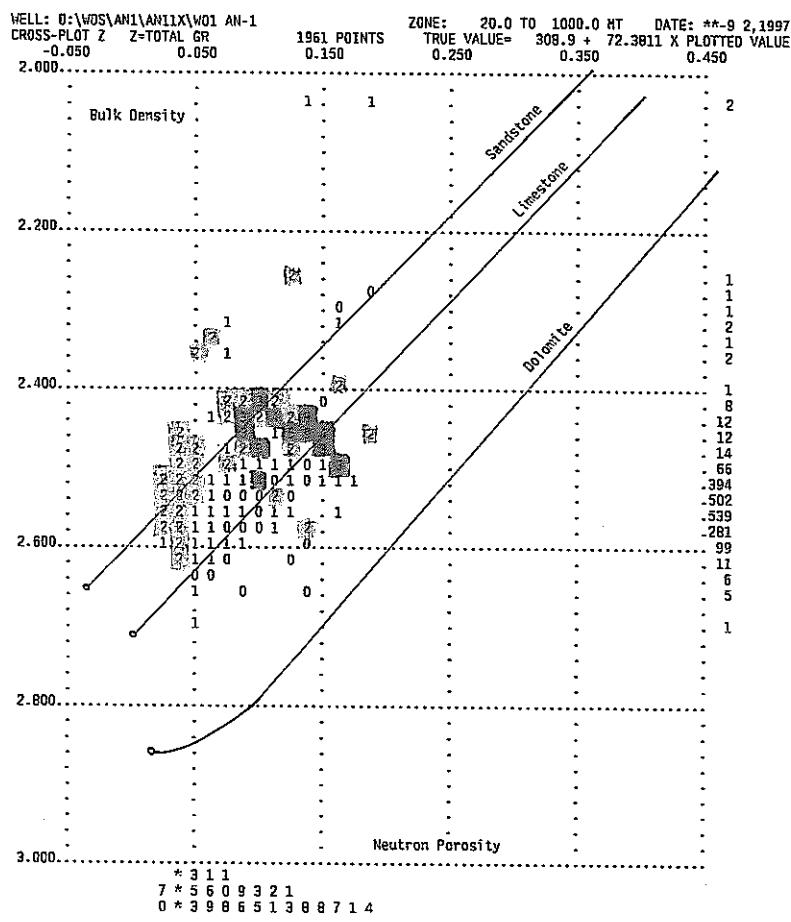


図3.2.7 a クロスプロット (Z)
密度-中性子孔隙率 ($\rho_b - \phi_n$)
(AN-1号孔)

Z: τ 線 ■高 □中 □低

低孔隙率 - 中 τ 線値、低密度値 - 高 τ 線値の組合せが見られる。

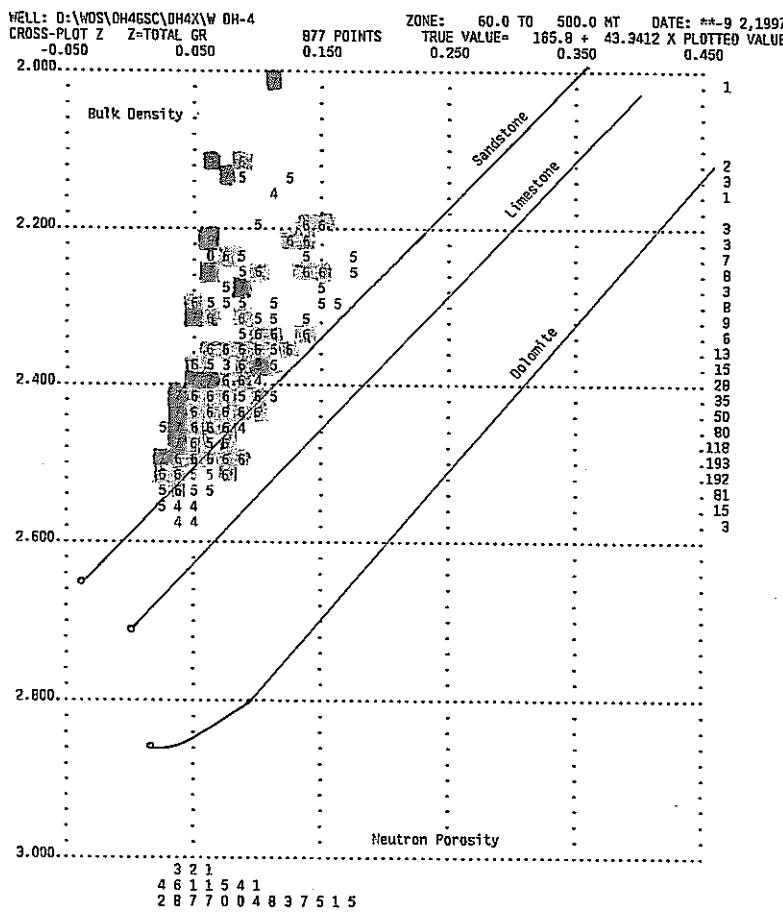


図3.2.7 b クロスプロット (Z)
密度-中性子孔隙率 ($\rho_b - \phi_n$)
(DH-4号孔)

Z: τ 線 ■高 □中 □低

高密度値 - 低 τ 線値、低孔隙率 - 高 τ 線値の傾向。

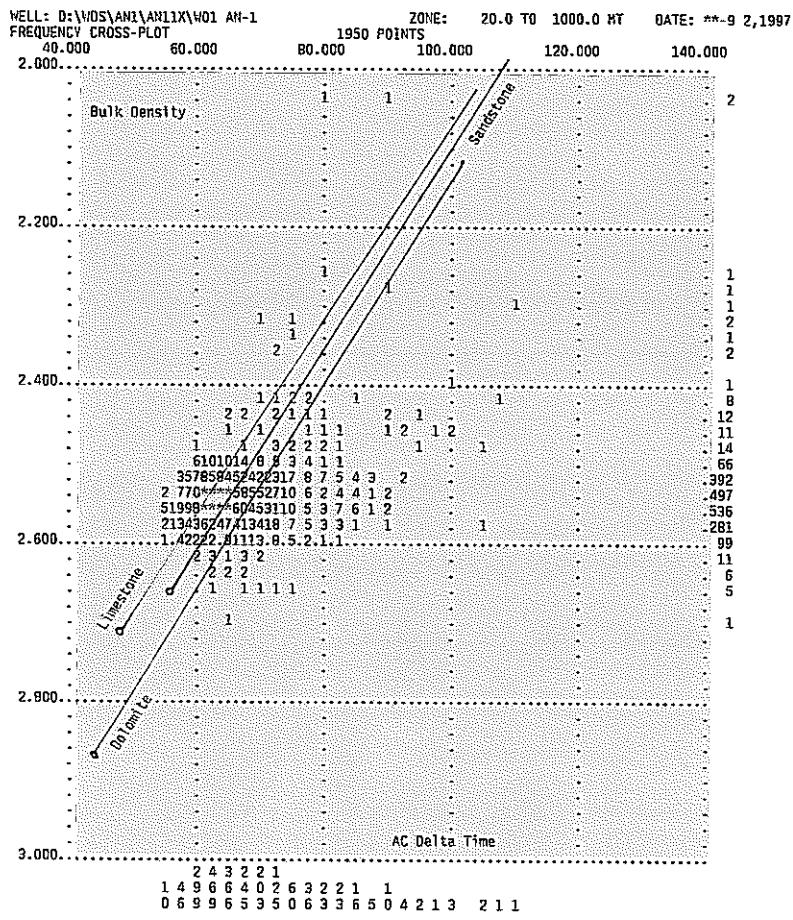


図3.2.8 a クロスプロット(頻度)
 密度-音波走行時間($\rho_b - \Delta T$)
 (AN-1号孔)

風化変質の影響とみられる低速度側(ΔT 大)への分散
 少少し。他はランドストーン・ライク付近にまとまっている。

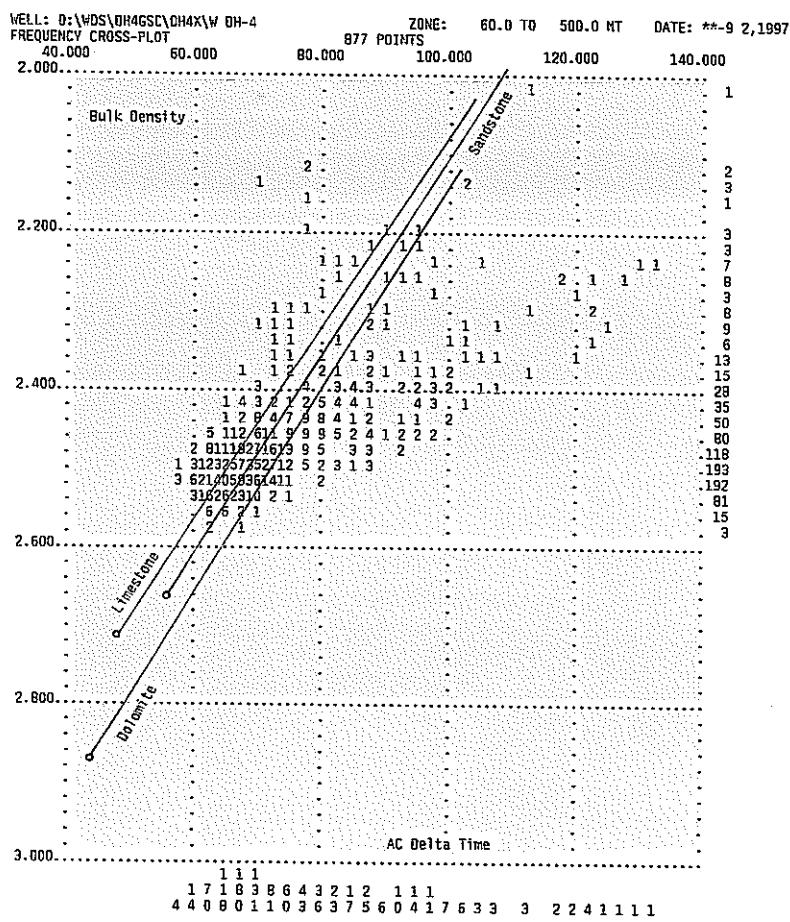


図3.2.8 b クロスプロット(頻度)
 密度-音波走行時間($\rho_b - \Delta T$)
 (DH-4号孔)

低速度側(ΔT 大)への分散が著しく風化変質の影響大。

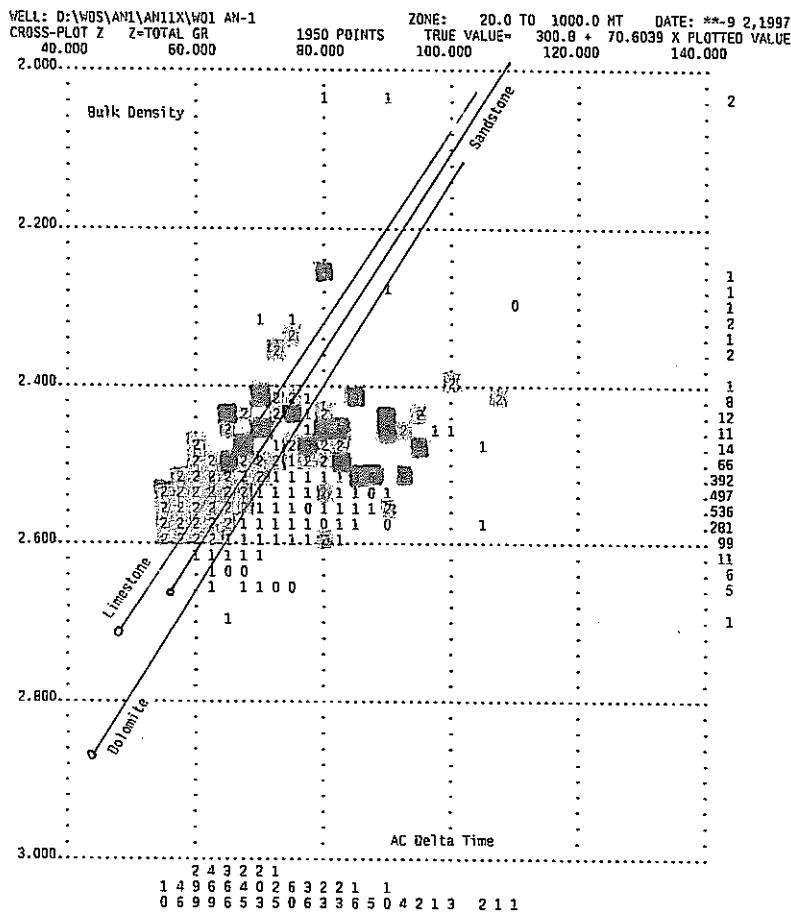


図3.2.9 a クロスプロット (Z)
密度-音波走行時間 ($\rho_b - \Delta T$)
(AN-1号孔)

Z: γ線 高 中 低

高速度(△T小) - 中γ線値、低速度・低密度値 -
高γ線値の組合せが見られる。

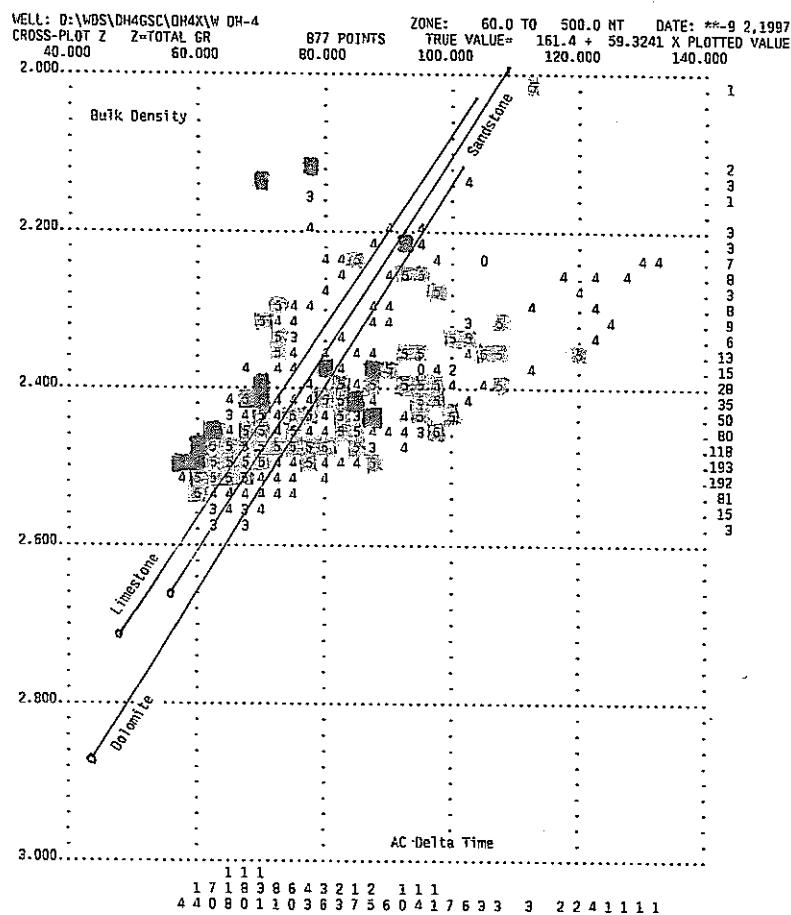


図3.2.9 b クロスプロット (Z)
密度-音波走行時間 ($\rho_b - \Delta T$)
(DH-4号孔)

Z: γ線 高 中 低

高密度 - 低 γ 線値の傾向。

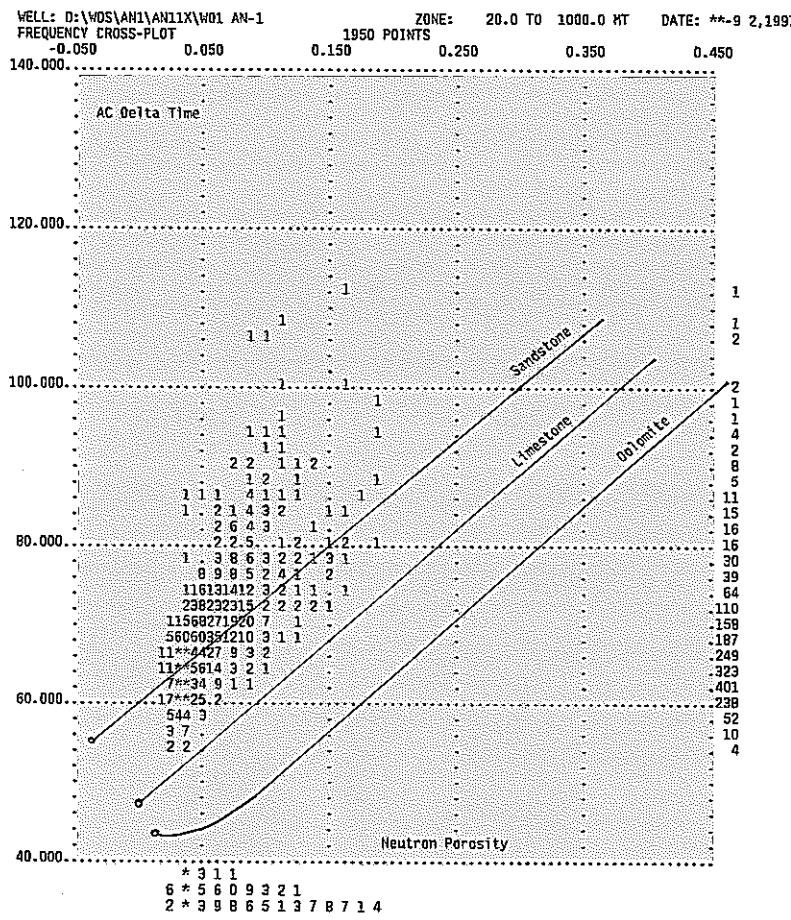


図3.2.10a クロスプロット(頻度)
音波走行時間-中性子孔隙率($\Delta T - \phi_N$)
(AN-1号孔)

風化変質の影響とみられる低速度側(ΔT 大)への分散多少あり。他はサンドストーン・ライン付近にまとまっている。

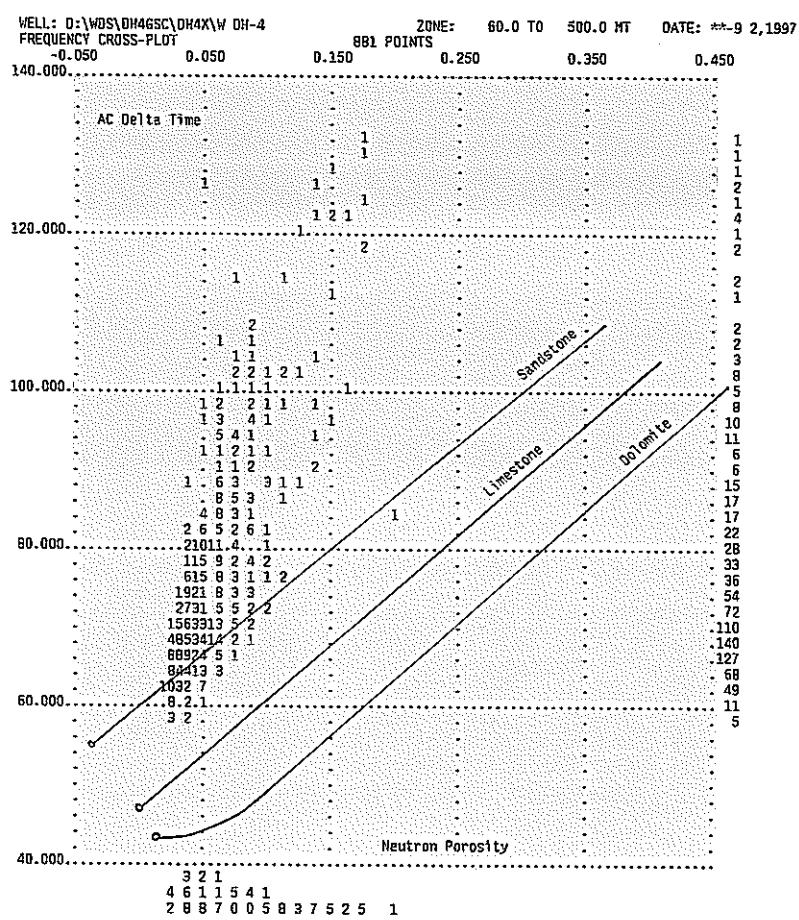


図3.2.10 b クロスプロット(頻度)
音波走行時間-中性子孔隙率($\Delta T - \phi_N$)
(DH-4号孔)

大部分の点がサンドストーク・ラインの少し上に分布。低速度側への分散も著しい。

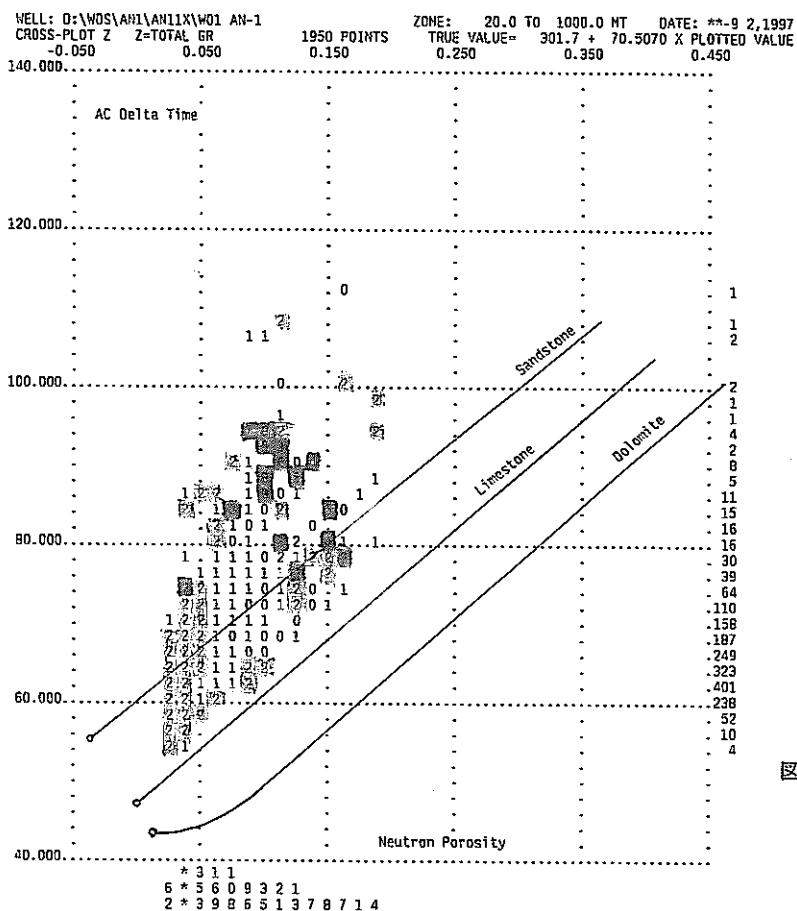


図3.2.11a クロスプロット (Z)
音波走行時間-中性子孔隙率 ($\Delta T - \phi_N$)
(AN-1号孔)

Z: γ 線 圖高 圖中 口述

低々線値の領域が中央（中速度・中孔隙率）にくる。

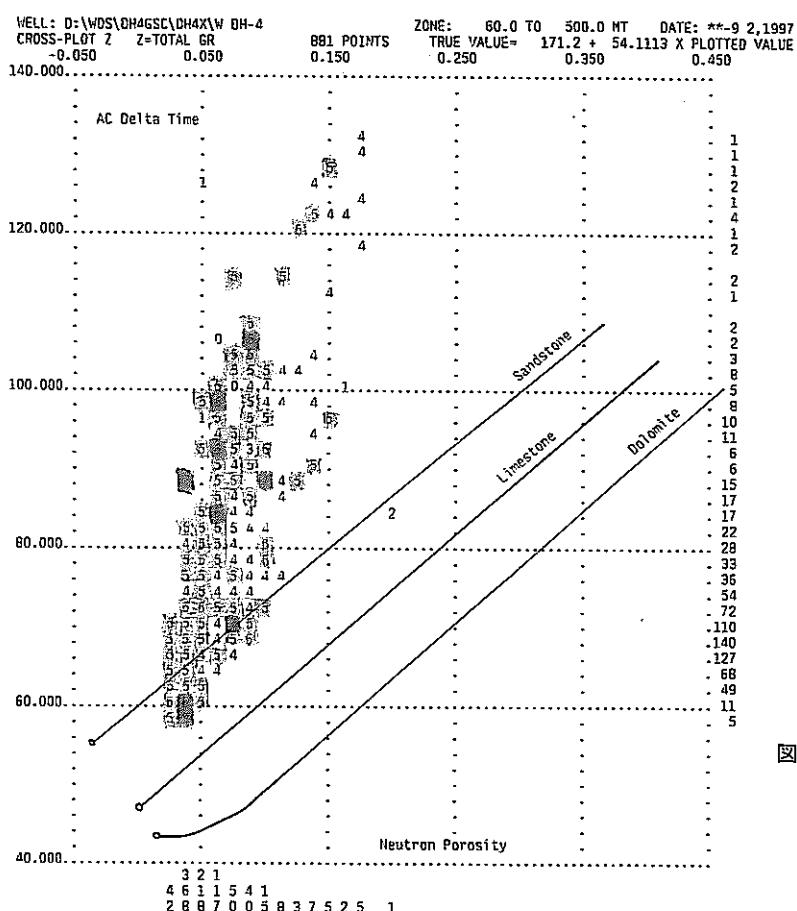


図3.2.11b クロスプロット(Z)
音波走行時間-中性子孔隙率($\Delta T - \phi_n$)
(DH-4号孔)

乙： γ 線圖中所見

低々線値の領域が中央にくる傾向はAN-1孔のように明瞭ではない。

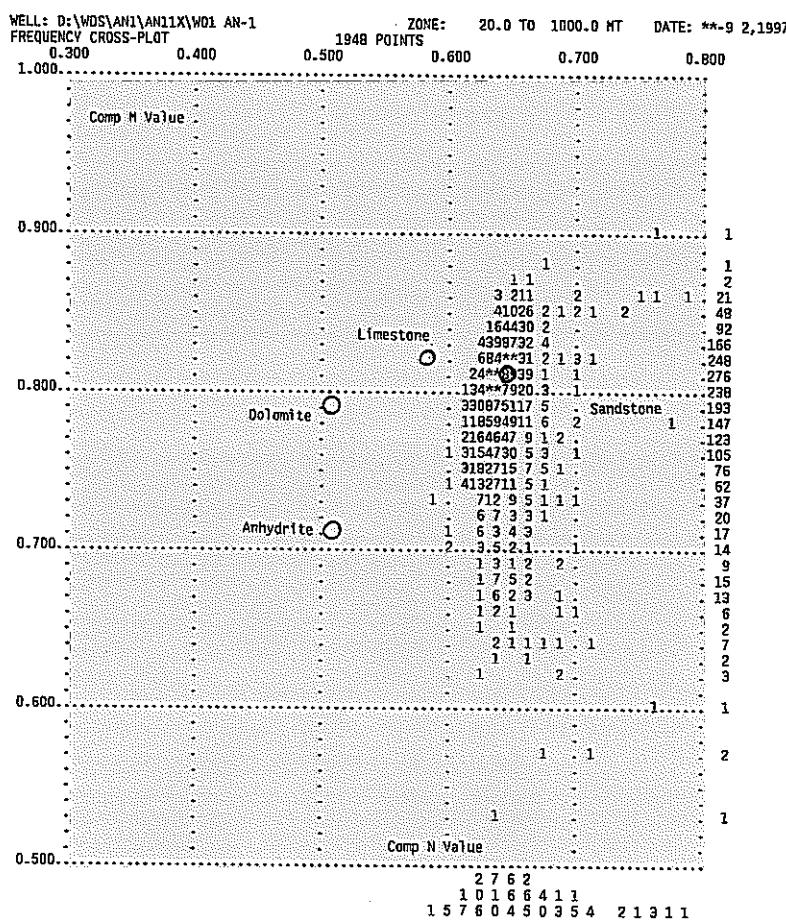


図3.2.12a M-Nクロスプロット(頻度)
(AN-1号孔)

孔隙率の影響を取り除いた岩相識別クロスプロット。

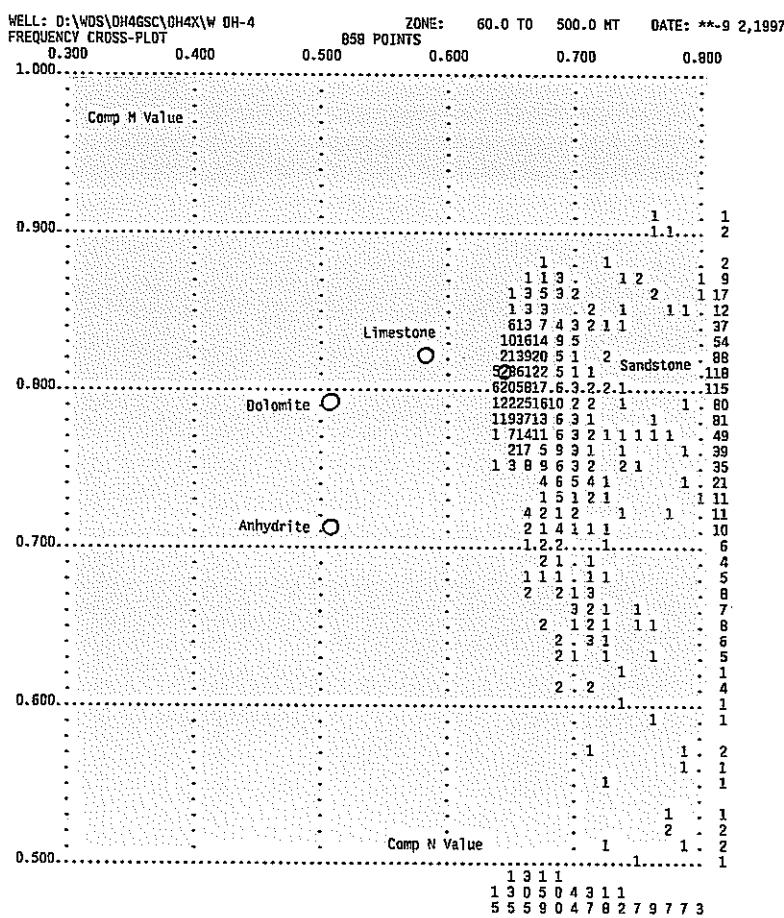


図3.2.12b M-Nクロスプロット(頻度)
(DH-4号孔)

孔隙率の影響を取り除いた岩相識別クロスプロット。

WELL: D:\WDS\AN1\AM11X\W01 AN-1
 CROSS-PLDT Z Z=TOTAL GR 1948 POINTS ZONE: 20.0 TO 1000.0 MT DATE: **-9 2,1997
 0.300 0.400 0.500 0.600 0.700 0.800
 1.000.....

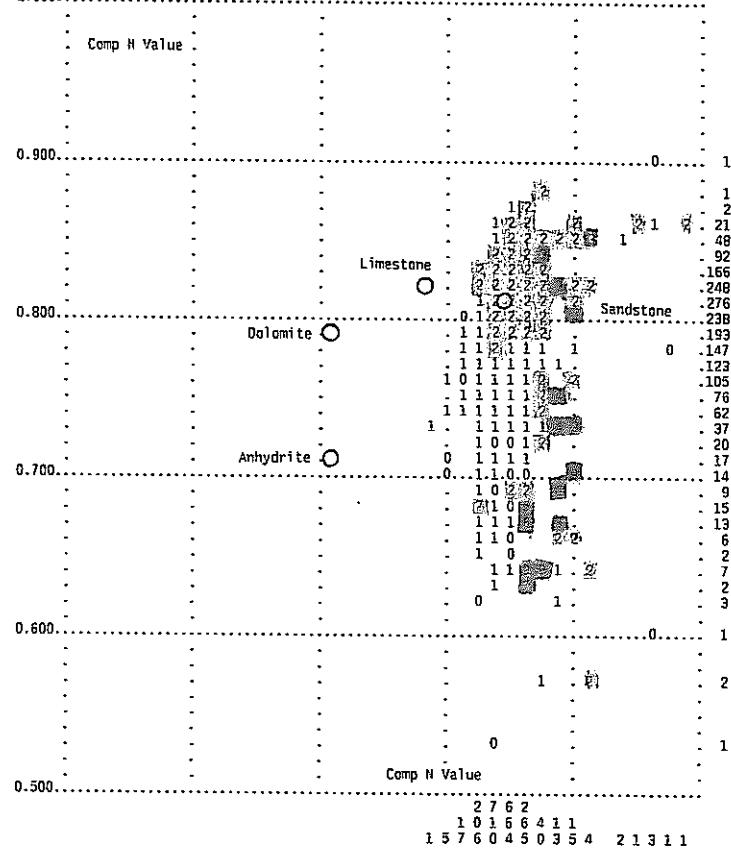


図3.2.13a M-Nクロスプロット (Z)
 (AN-1号孔)

Z: γ線 ■高 □中 □低

孔隙率の影響を取り除いた岩相識別クロスプロット。

WELL: D:\WDS\DH4GSC\DH4X\W DH-4
 CROSS-PLDT Z Z=TOTAL GR 858 POINTS ZONE: 60.0 TO 500.0 MT DATE: **-9 2,1997
 0.300 0.400 0.500 0.600 0.700 0.800
 1.000.....

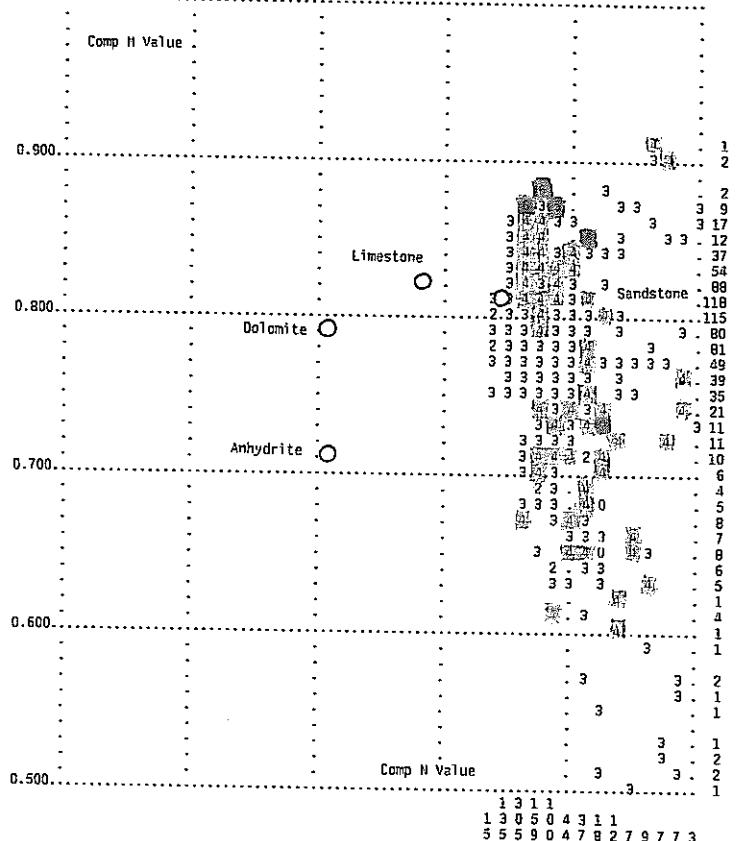


図3.2.13b M-Nクロスプロット (Z)
 (DH-4号孔)

Z: γ線 ■高 □中 □低

孔隙率の影響を取り除いた岩相識別クロスプロット。

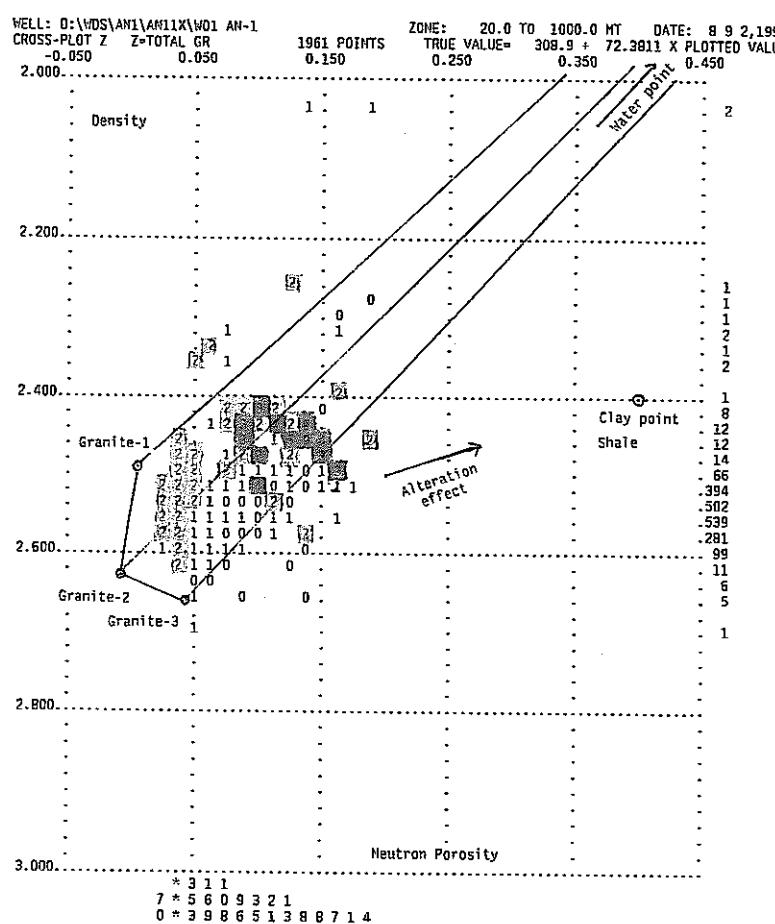


図3.2.14a クロスプロット (Z)
 密度-中性子孔隙率 ($\rho_b - \phi_n$)
 (AN-1号孔)
 と
 マトリックス・ポイント
 Z: r 軸 高 圖中 低

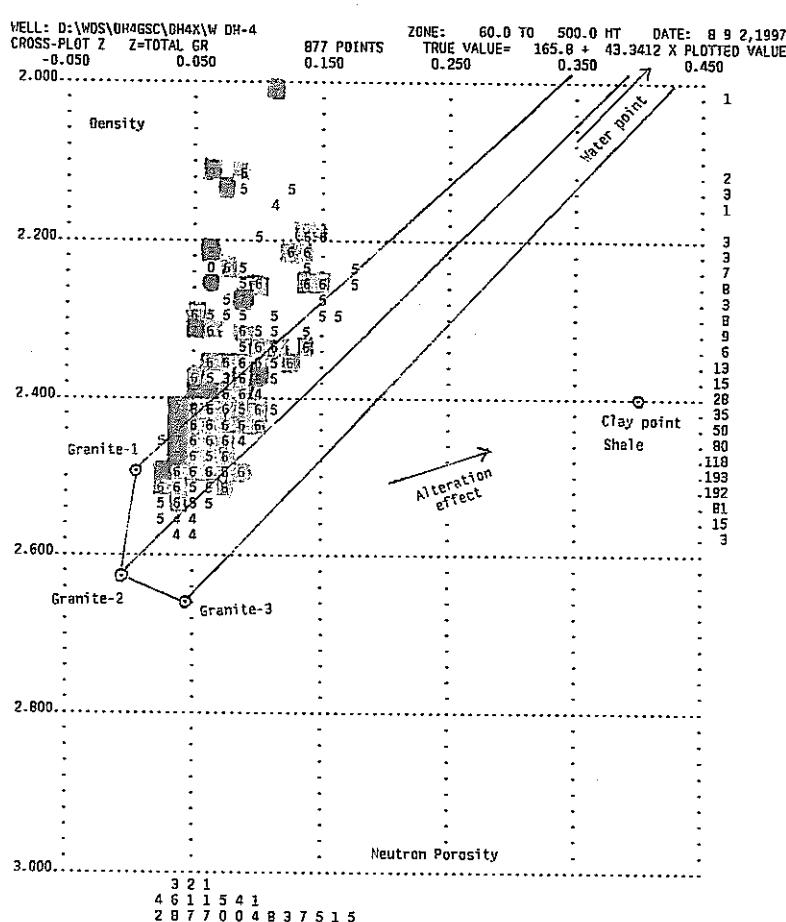


図3.2.14 b クロスプロット (Z)
 密度-中性子孔隙率 ($\rho_b - \phi_N$)
 (DH-4号孔)
 と
 マトリックス・ポイント
 Z: r 線 開高 開中 口低

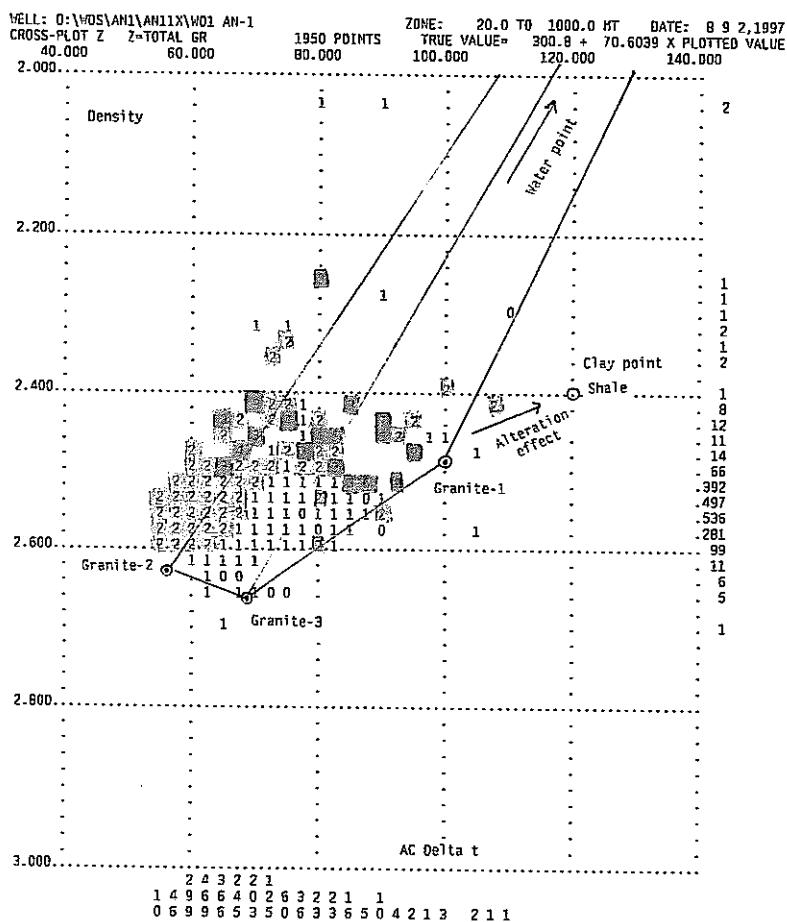


図 3.2.15 a クロスプロット (Z)
密度 - 音波走行時間 ($\rho_b - \Delta T$)
(AN-1号孔)
と
マトリックス・ポイント
Z: ヤ線 ■高 □中 □低

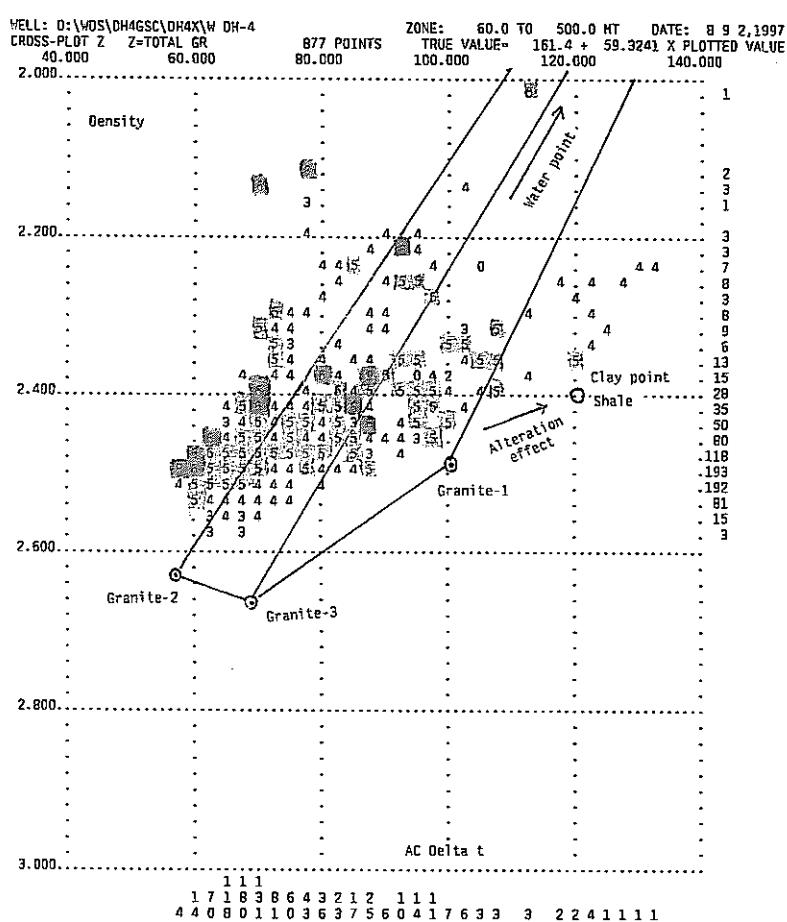


図 3.2.15 b クロスプロット (Z)
密度 - 音波走行時間 ($\rho_b - \Delta T$)
(DH-4号孔)
と
マトリックス・ポイント
Z: ヤ線 ■高 □中 □低

4. 検層データからの亀裂評価

4.1 ボアホールテレビ及びボアホールレーダ解析結果を用いた亀裂評価

A N - 1 号孔についてボアホールレーダによる孔壁近傍の電磁波の岩盤特性を評価するとともに、レーダ反射波より解析された反射角・反射面の伸展とボアホールテレビで解析した亀裂を比較検討し、割れ目の構造及び分布状態について解析した。

この資料は、検層データよりもとめた透水係数と原位置透水試験より求めた透水係数の関係の比較・検討に提供される。

4.1.1 ボアホールレーダ再解析による亀裂評価

(1)ボアホールレーダ直接波による解析(周波数60MHz ゾンデ)

ボアホールレーダ直接波により以下の方法で電磁波速度・減衰率・比誘電・比抵抗・孔隙率を求めた。

①電磁波速度を300 ~ 400mの安定した区間を110m/ μ sと仮定し、発受信間隔が9.3mから発信点(トランシミッターファイアリング)を求め、各々の走時より電磁波速度を求めた。

②減衰率はアンプリチュード2000の時0.25dB/m、900 の時1.0dB/mとして、 α [減衰率] $\propto -\log(A)$ [アンプリチュード] の関係より求めた。

③比抵抗は平面電磁波の方程式より導かれる ρ [比抵抗] = 5.46x 電磁波速度 / 減衰率より求めた。

④比誘電率は平面電磁波の方程式より導かれる次式によって求めた。

$$\varepsilon_r = C^2/V^2 - 30.2 \times \alpha^2/f^2$$

ε_r : 比誘電率 C:真空中の電磁波速度 V:媒質の電磁波速度

α : 減衰率 f:電磁波周波数 (40MHz で計算)

⑤孔隙率は比誘電率より次式によって求めた。

$$\phi = (\sqrt{\varepsilon_r} - \sqrt{\varepsilon_m}) / (\sqrt{\varepsilon_w} - \sqrt{\varepsilon_m}) \times 100$$

ε_r : 比誘電率 ε_m : 岩盤のマトリックスの比誘電率(6.2と仮定)

ε_w : 岩盤の孔隙中の水の比誘電率(80)

以上の解析結果を検層のロングノルマル値と検層解析結果による孔隙率とともにボアホール解析柱状図として図4.1.1に示した。

以下に結果について検討する。

①物理検層解析結果とボアホールレーダ解析結果による孔隙率は概ね一致する。

②物理検層解析結果とボアホールレーダ解析結果による比抵抗値は相対的には一致する。絶対値では概ねロングノルマル比抵抗値の1/4を示す。比抵抗値は周波数依存性をもつて理論的に一致する。

レーダより求めた孔隙率を表4.1.1のボアホールレーダ・テレビ解析結果一覧表に示した。

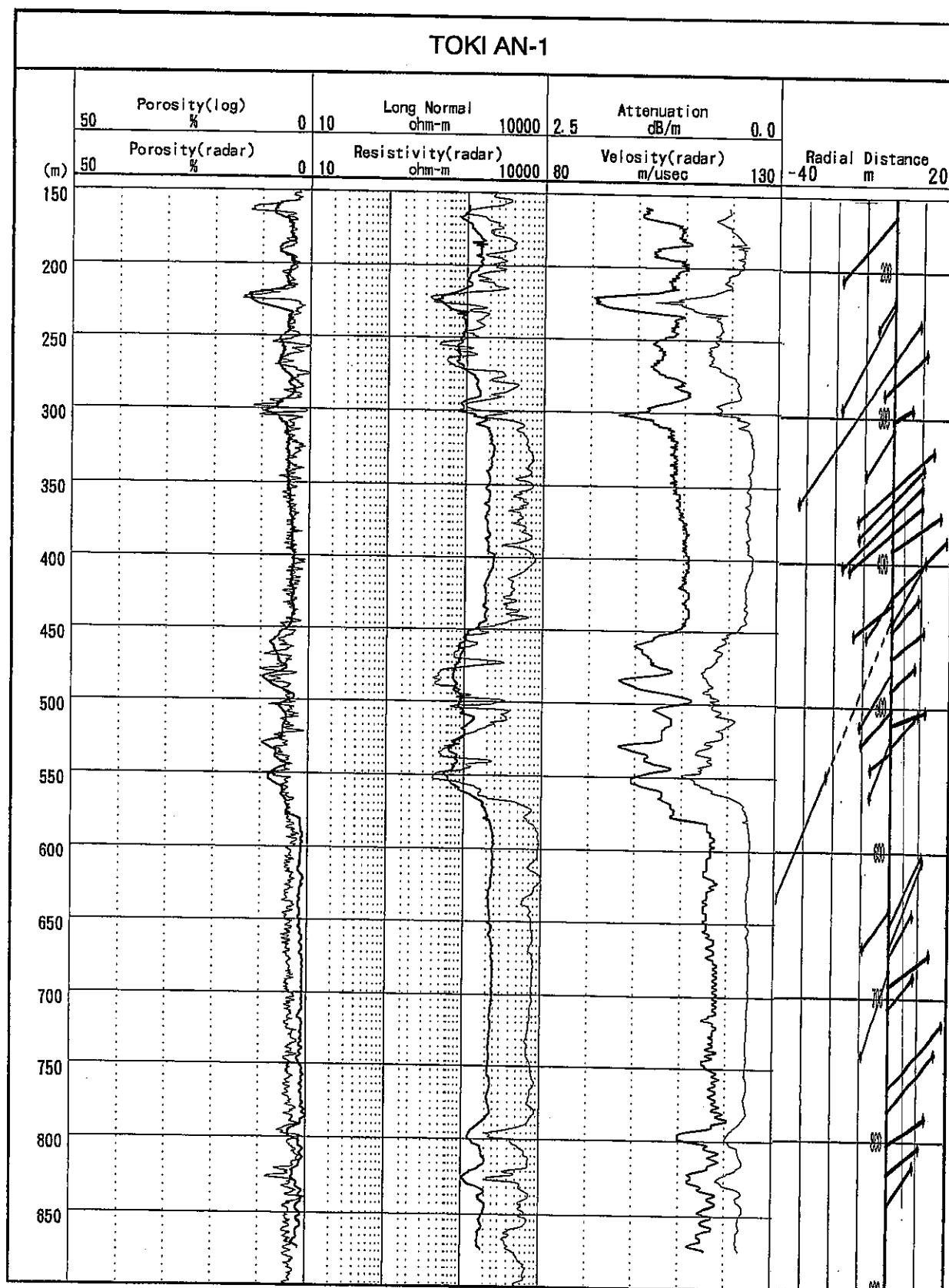


図 4.1.1 ボアホールレーダ解析柱状図

(2)ボアホールレーダ反射波による解析(周波数60MHz ゾンデ)

ボアホール反射波の解析をRADINTER2.1(ABEMソフトウェア)により以下の条件で行った。

Sampling Frequency(MHz): 625.662
Direct Pulse Time (μ s): 0.176
Depth Increment (m): 1.000
Depth of Trace (m): 30.000
Nominal Velocity (m/ μ s): 120.000
T-R Separation (m): 9.300

解析結果の反射面の位置をボアホールレーダ反射波解析図として4.1.2図にその結果を表4.1.1(1)~(3)に示した。

解析結果の反射面の角度とその反射面の伸展の結果を図4.1.1のボアホールレーダ解析柱状図に示した。

反射面の解析結果の図及び表の記号の[u]はアップデップの反射面、[d]はダウンデップの反射面、[du]はアップデップ・ダウンデップの両反射面で解析したことを示す。解析結果表のグレードは以下の様に区分した。

A : 非常に明瞭な反射面で孔壁から10m以上の反射面が連続しているもの

B : 反射面がやや不明瞭であるが孔壁から10m以上の反射面が連続しているか、反射面が明瞭であるが孔壁から10m以内の反射面の連続なもの

C : 反射面が不明瞭なもの

又、ボアホールレーダで解析した反射面とテレビで解析した最も一致すると思われる亀裂について表4.1.1(1)~(3)中に示した。

①反射面の連続性について

レーダで解析された反射面は孔壁から10m以上の連続のものが殆どであり、最大で40mに達する。

②割れ目規模について

レーダで解析可能であった亀裂はテレビ結果による開口性の亀裂かネット状亀裂または破碎部である。密着亀裂や全体的に割れ目が発達しているものは解析不可能であった。

③割れ目傾斜角度について

レーダで解析された亀裂傾斜角はすべて55°(高角度)以上である。

④解析の深度誤差について

レーダで解析した亀裂とテレビで解析した最も一致すると思われる亀裂は22ヶ所ありその最大深度誤差は3.9mであった。22ヶの平均は±1.4mの誤差である。

⑤解析の亀裂傾斜角度誤差について

レーダで解析した亀裂とテレビで解析した最も一致すると思われる亀裂の傾斜角度差は最大10.4であり、その平均は±5°の誤差である。

透水試験区間の割れ目評価にあたってレーダについては深度5m以内のずれを考慮する必要がある。

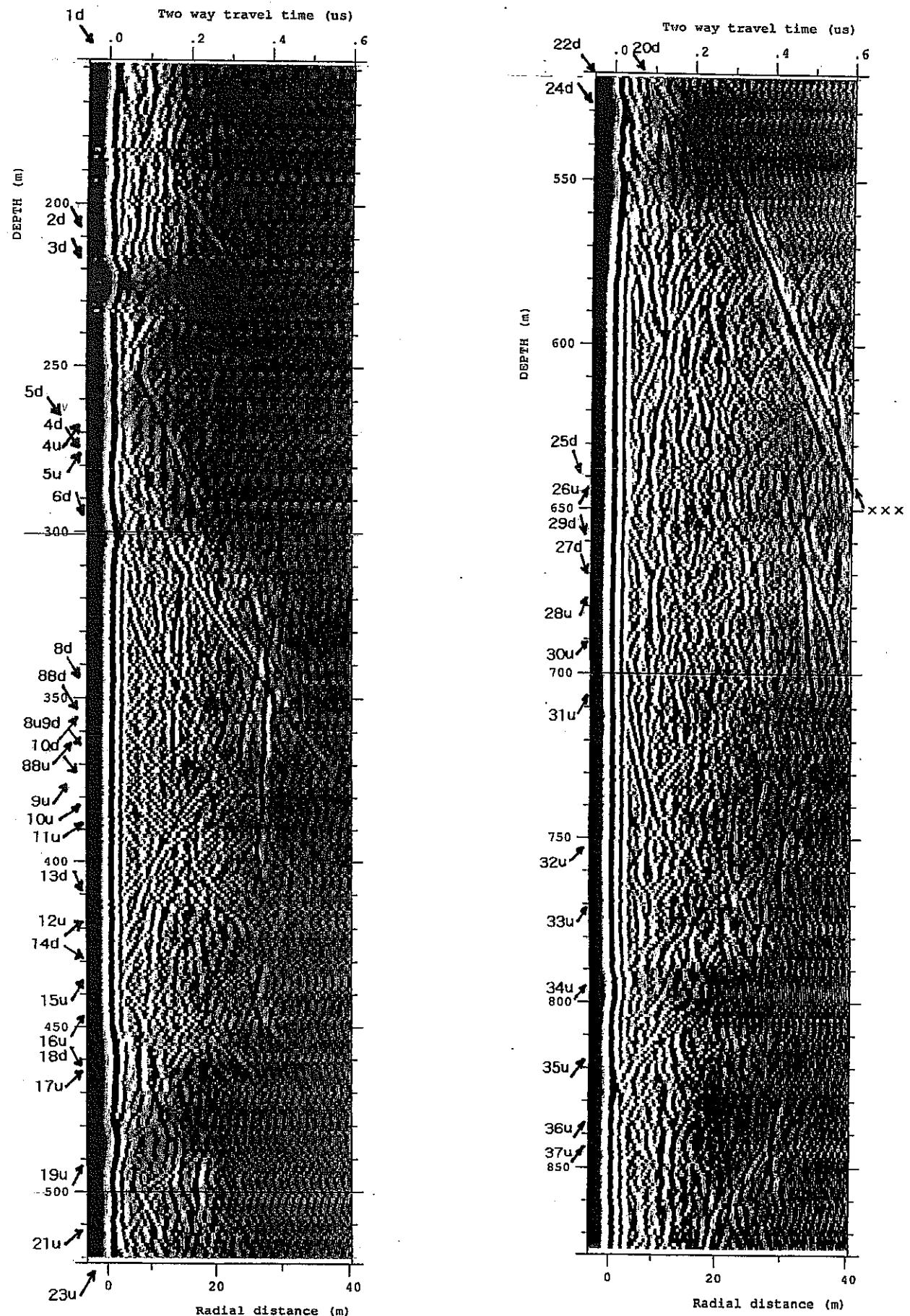


図 4.1.2 ボアホールレーダ反射波解析図

表4.1.1(1) ボアホールレーダ・テレビ解析結果一覧表

ボアホールレーダ解析結果				ボアホールテレビ解析結果			レーダ-孔隙率(%)
番号	深度(m)	反射角(度)	グレード	深度(m)	方位角度(度)	特徴	
1d	161.9	67.5	B	159.8	N78E60S	開口亀裂(幅2~3cm)	7
2d	220.5	74.0	B	222.5	N17W77E	破碎部(幅5~10cm)	14
3d	224.3	75.6	B	223.8	N52W78NE	破碎部(幅10~15cm)	14
4ud	263.2	71.2	A	265.0	N71E78S	高角度のネット状亀裂	6
5ud	278.8	62.7	B	279.2	N52W75NE	開口亀裂(幅10cm)	4
6d	302.3	75.5	B	304.0	N87E80N	ネット状亀裂	9
7u	308.8	64.6	B	312.7	N55W5SW	開口亀裂(幅2~3cm)	5
8ud	348.9	61.2	A	345.8	N50W69NE	開口亀裂(幅0.5~1cm)	4
88ud	357.7	65.1	A	357.5	N50W65NE	開口亀裂(幅2~3cm)	4
9ud	367.7	63.7	A	367.2	N47W64NE	開口亀裂(幅10cm)	4
10ud	378.6	60.4	A	376.1	N48W63NE	開口亀裂(幅3cm)	3
11u	390.7	54.8	A	391.1	N49W51NE	開口亀裂(幅1~2cm)	3
12u	423.4	64.4	B	422.8	N45W68NE	開口亀裂(幅0.5~1cm)2本	3
13d	424.2	71.7	B	—	—	—	3
14d	428.1	58.6	B	—	—	—	3
XXX	437.6	78.5	A	—	—	—	3
15u	441.0	74.6	A	—	—	—	3

表4.1.1(2) ポアホールレーダ・テレビ解析結果一覧表

ポアホールレーダ解析結果				ポアホールテレビ解析結果			レーダ-孔隙率 (%)
番号	深度 (m)	反射角 (度)	グレード	深度 (m)	方位角度 (度)	特 徴	
16u	446.3	67.2	B	—	—	—	3
17u	464.9	59.2	C	—	—	—	6
18d	475.7	73.8	B	478.4	N81W77S	開口亀裂	7
19u	488.4	63.9	B	—	—	—	9
20d	501.7	66.6	A	502.5	N53E73SE	変色の亀裂	6
21u	511.4	37.6	B	510.1	NE41NW	36~44NWの亀裂 3本	5
22d	521.2	79.6	C	523.2	N80W86N	割れ目に充填物	5
23u	527.9	68.1	B	527.4	N2E71E	2cm幅の変質	9
24d	530.3	59.6	C	—	—	—	8
25d	638.8	71.3	C	—	—	—	2
26u	650.4	77.1	B	—	—	—	2
27d	665.6	79.5	B	—	—	—	1
28u	670.9	74.2	C	—	—	—	1
29d	681.3	81.0	A	—	—	—	1
30u	690.4	55.7	C	—	—	—	1
31u	707.5	68.4	B	—	—	—	1
32u	762.7	67.0	C	—	—	—	1

表4.1.1(3) ボアホールレーダ・テレビ解析結果一覧表

ボアホールレーダ解析結果				ボアホールテレビ解析結果			レーダー孔隙率 (%)
番号	深度 (m)	反射角 (度)	グレード	深度 (m)	方位角度 (度)	特徴	
33u	778.7	68.4	C	780.5	N22W75E	密着亀裂1本(前後に無し)	1
34u	802.2	55.9	B	802.5	N34W65NB	密着亀裂3本	3
35u	822.3	59.2	C	—	—	—	3
36u	841.8	70.6	B	841.8	N67W76S	ネット状亀裂	1
37u	846.1	60.7	C	845.8	N77W59S	ネット状亀裂	1

4.1.2 透水試験区間のボアホールレーダ・テレビによる割れ目評価

透水試験区間のボアホールレーダ及びボアホールテレビによる割れ目評価については透水区間のボアホールレーダ・テレビ割れ目評価一覧表として表4.1.2(1)～(3)に示した。表中のボアホールテレビの記号は以下のように分類した。

- A : 開口割れ目の存在するもの
- B : ネット状に割れ目が発達しているもの
- C : 縦の亀裂が顕著なもの
- D : 亀裂が密着しているもの

レーダの反射解析結果の内、深度誤差を考慮して透水試験区間内で同定されたものを●で示した。これら何れもボアホールテレビで観察された開口亀裂部に相当する。

ボアホールテレビとレーダの解析結果において透水係数が異常であると思われるものについて下記に示した。

番号4	深度51.5m	透水係数	小さすぎる
番号5	深度53.5m	透水係数	小さすぎる
番号10	深度78.9m	透水係数	小さすぎる
番号19	深度164.2m	透水係数	大きすぎる
番号31	深度280.2m	透水係数	小さすぎる
番号34	深度399.8m	透水係数	やや大きすぎる
番号35	深度496.1m	透水係数	やや大きすぎる

表4.1.2(1) 透水区間のボアホールレーダ・テレビ割れ目評価一覧表

番号	深度 (m)	透水係数 (cm/s)	ボアホール テレビ 観察	ボアホール テレビ 分類	ボアホール レーダ
1	26.50	3.05E-08	低角度の密着亀裂	D	
2	39.15	4.00E-04	ネット状亀裂及び開口亀裂	A B	
3	45.80	7.70E-09	開口亀裂（最大約5 mm）2本	A	
4	51.50	1.60E-07	ネット状亀裂と開口亀裂	A B	
5	53.50	5.30E-08	開口亀裂（最大約30 cm）	A	
6	58.00	2.50E-05	開口亀裂、縦亀裂あり	A B C	
7	61.65	3.90E-04	ネット状亀裂、開口亀裂、縦亀裂あり	A B C	
8	70.00	7.90E-08	低角度の密着亀裂（7本）	D	
9	78.85	3.90E-04	開口亀裂（最大約10 cm）	A	
10	78.90	4.34E-06	開口亀裂（最大約10 cm）	A	
11	81.95	3.10E-04	低角度開口亀裂（最大約5 cm）	A	
12	89.80	1.21E-06	開口亀裂（最大約2 cm）	A	
13	102.60	3.30E-04	開口縦亀裂（空洞50%以上）	A C	
14	111.50	9.32E-09	ネット密着亀裂	B D	
15	121.70	3.20E-04	高角度の開口亀裂（最大約4 cm）	A	
16	139.50	1.61E-08	密着亀裂	D	
17	146.70	1.05E-07	密着亀裂	D	
18	160.40	1.30E-04	開口亀裂（最大約2 cm）1本	A	●

表 4. 1. 2(2) 透水区間のボアホールレーダ・テレビ割れ目評価一覧表

番号	深度 (m)	透水係数 (cm/s)	ボアホール テレビ 観察	ボアホール テレビ 分類	ボアホール レーダ
19	164.02	1.50E-04	密着亀裂多数 (低角度)	D	
20	174.70	1.28E-07	密着亀裂 (8本)	D	
21	180.00	8.11E-08	密着亀裂 (3本)	D	
22	189.00	9.93E-10	密着亀裂 (14本)	D	
23	206.00	9.49E-08	密着亀裂 (11本)	D	
24	219.20	7.99E-07	縦開口亀裂	A C	
25	222.90	1.83E-06	ネット状, 一部開口亀裂	A B	●
26	230.50	3.27E-10	開口亀裂 (2 cm) 1本	A	
27	245.00	1.27E-08	ネット状密着亀裂	B D	
28	254.50	4.85E-07	密着亀裂	D	
29	266.50	2.14E-04	縦亀裂, ネット状, 開口亀裂	A B C	●
30	270.00	1.95E-06	ネット状, 開口亀裂	A B	
31	280.00	9.25E-08	一部開口亀裂 (最大 5 cm)	A D	●
32	295.40	3.38E-06	一部縦亀裂, 密着亀裂	C D	
33	303.70	6.27E-06	縦開口亀裂, 一部ネット状亀裂	A B C	●
34	399.80	1.90E-06	密着亀裂 (11本)	D	
35	496.10	1.90E-06	密着亀裂 (12本)	D	
36	944.50	4.50E-08	密着亀裂 (2本)	D	

表 4. 1. 2(3) 透水区間のボアホールレーダ・テレビ割れ目評価一覧表

番号	深度 (m)	透水係数 (cm/s)	ボアホール テレビ 観察	ボアホール テレビ 分類	ボアホール レーダ
37	951.55	3.50E-05	縦亀裂, ネット状亀裂	B C	
38	955.30	1.70E-05	縦亀裂, ネット状亀裂	B C	
39	957.04	1.70E-05	開口亀裂, 縦亀裂, ネット状亀裂	A B C	

4.2 ボアホールテレビ及びボアホールレビュア解析結果を用いた亀裂評価

ボアホールテレビ及びボアホールレビュアよりDH-4号孔について亀裂の比較・検討を行った。

先ず、一般的な断層についての概念を記すと、断層は、断層を動かそうとする力で3つの主要な型に分類される。物体に等方的に力が加わるだけでは、特殊な場合を除いて、割れ目ができたりあるいはそれが動くことはない。3次元応力状態の主応力を $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ と表す（ここでは地下での状態を表すため、いずれも圧縮応力を正とする）。これら3つの主応力のどれかが鉛直方向に成るかで、図4.2.1のように3つの場合が生じる。

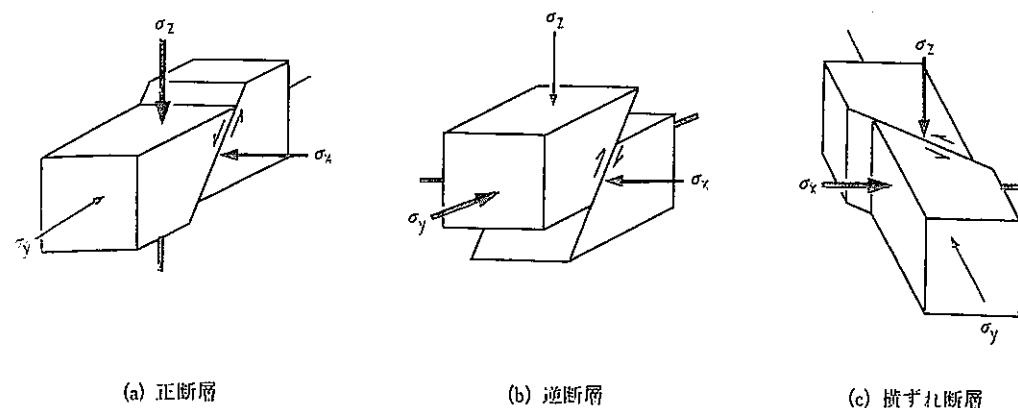


図 4.2.1 主応力軸の配置による断層の分類

最大主応力が鉛直方向の場合、図4.2.1(a)のように上盤が落ち込む正断層となる。

次に、最小主応力が鉛直方向の場合、図4.2.1(b)のように下盤が潜り込んだりあるいは、上盤がせり上がった形の断層となり、それを逆断層あるいは衝上断層という。

更に、最大及び最小主応力が水平方向で、中間主応力が鉛直方向の場合、図4.2.1(c)の横擦れ断層となる。

次に、断層の応力配置と断層形態を図4.2.2に示す。ここで、3つの主応力の応力深度勾配が直線的であれば、浅い部分で σ_x, σ_y が σ_z より大きいとすれば

逆断層の破壊が生じ、それよりやや深く、 σ_z が σ_x σ_y の中間にある場合は、走向ずれ断層型、そして σ_z が σ_x σ_y より卓越するならば正断層型の破壊が期待される。

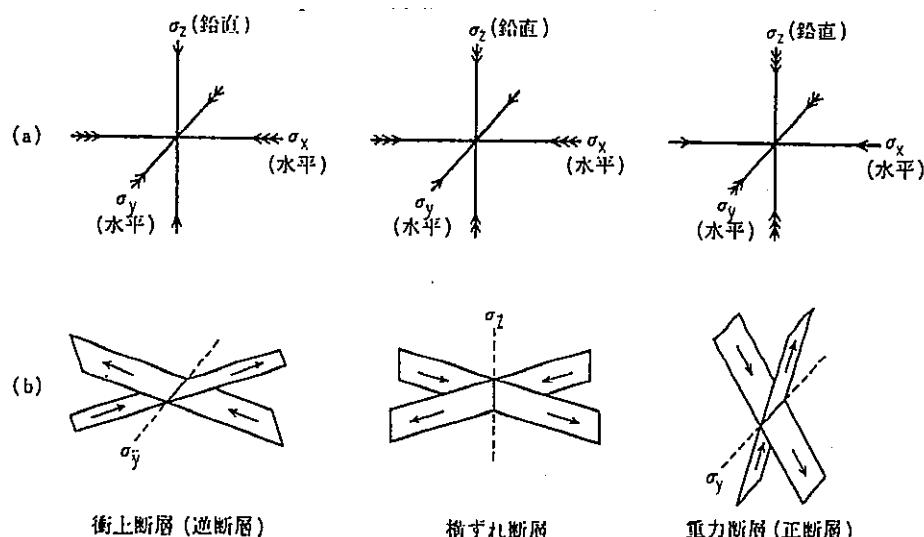


図 4.2.2 断層の分類と主応力の配置

このような、基本的な考え方を基にボホールレビ及びボホールレビュアより DH-4 号の亀裂について比較・検討を行った。

動燃式 J F T 試験による水理学データを表4.2.1 (DH-4号孔) に示し、それぞれの透水試験区間のデータを示した。

また、AN-1号孔の水理学データを表4.2.2 に示し、それぞれの透水試験区間のデータを示した。

表 4.2.1 DH-4号井透水試験結果一覧表

No	測定深度 (G L - m)	地質名	間隙水圧 (平衡水位) (G L - m)	透水係数 : K (m/sec)		
				パルス法	回復法	注入法
1	99.00 ～ 102.00	花崗岩	59.00	6.52E-11	—	—
2	185.50 ～ 188.50	花崗岩	62.01	—	7.18E-06	1.46E-05
3	189.00 ～ 197.00	花崗岩	62.91	—	5.29E-06	7.23E-06
4	239.00 ～ 242.00	花崗岩	61.69	—	1.51E-05	1.17E-05
5	345.00 ～ 353.00	花崗岩	62.91	7.88E-09	5.93E-09	2.74E-09
6	378.50 ～ 381.50	花崗岩	62.59	2.25E-10	—	—
7	413.00 ～ 416.00	花崗岩	62.47	2.86E-10	—	—
8	461.00 ～ 469.00	花崗岩	64.40	2.58E-09	1.91E-09	2.33E-09
9	472.00 ～ 475.00	花崗岩	64.69	1.92E-09	1.89E-09	1.99E-09
10	494.00 ～ 497.00	花崗岩	63.02	1.05E-10	—	—

表 4.2.2 AN-1号孔透水試験結果一覧表

No	測定深度 (G L - m)	透水係数： K (m/sec)	No	測定深度 (G L - m)	透水係数： K (m/sec)
1	25.20 ~ 27.80	3.05E-10	2 1	178.70 ~ 181.30	8.11E-10
2	38.00 ~ 40.30	4.00E-06	2 2	187.70 ~ 190.30	9.93E-12
3	44.65 ~ 46.95	7.70E-11	2 3	204.70 ~ 207.30	9.49E-10
4	50.35 ~ 52.65	1.60E-09	2 4	217.90 ~ 220.50	7.99E-09
5	52.35 ~ 54.65	5.30E-10	2 5	221.60 ~ 224.20	1.83E-08
6	57.85 ~ 60.15	2.50E-07	2 6	227.20 ~ 231.80	3.27E-12
7	60.50 ~ 62.80	3.90E-06	2 7	243.70 ~ 246.30	1.27E-10
8	68.85 ~ 71.15	7.90E-10	2 8	253.20 ~ 255.80	4.85E-09
9	77.60 ~ 80.20	4.34E-08	2 9	265.20 ~ 267.80	2.14E-06
1 0	77.70 ~ 80.00	3.90E-06	3 0	268.70 ~ 271.30	1.95E-08
1 1	80.80 ~ 83.10	3.10E-06	3 1	278.70 ~ 281.30	9.25E-10
1 2	88.50 ~ 91.10	1.21E-08	3 2	294.10 ~ 296.70	3.38E-08
1 3	101.45 ~ 103.75	3.30E-06	3 3	302.40 ~ 305.00	6.27E-08
1 4	110.20 ~ 112.80	9.32E-11	3 4	398.50 ~ 401.10	1.90E-08
1 5	120.55 ~ 122.85	3.20E-06	3 5	494.80 ~ 497.40	1.90E-08
1 6	138.20 ~ 140.80	1.61E-10	3 6	943.47 ~ 945.50	4.50E-10
1 7	145.40 ~ 148.00	1.05E-09	3 7	950.63 ~ 952.56	3.50E-07
1 8	159.25 ~ 161.55	1.30E-06	3 8	950.53 ~ 960.02	1.70E-07
1 9	162.87 ~ 165.17	1.50E-06	3 9	954.06 ~ 960.02	1.70E-07
2 0	173.40 ~ 176.00	1.28E-09			

TOKI DH-4
(SCALE : 1/50)

1

AMPLITUDE

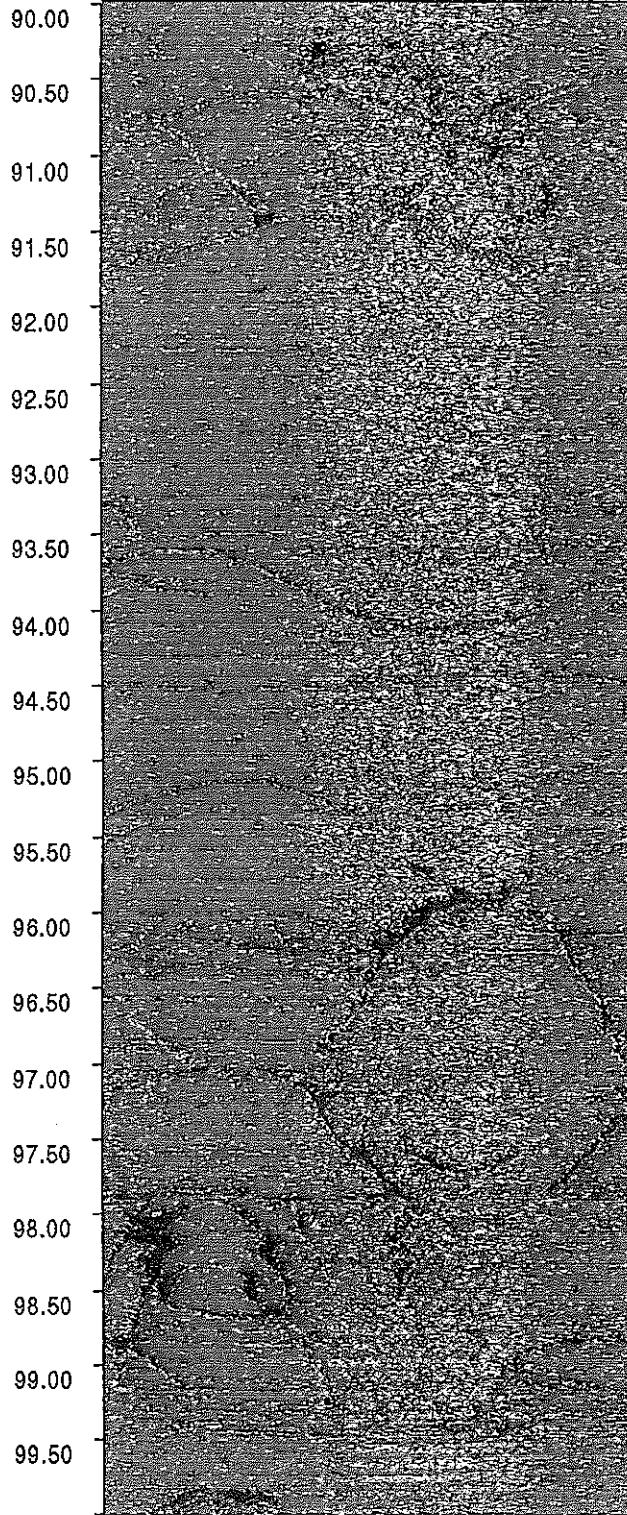
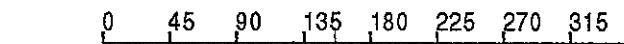


図 4.2.3 ボアホールレビュアー測定記録図(1)、深度 90.00~100.00m

TOKI DH-4
(SCALE : 1/50)
2

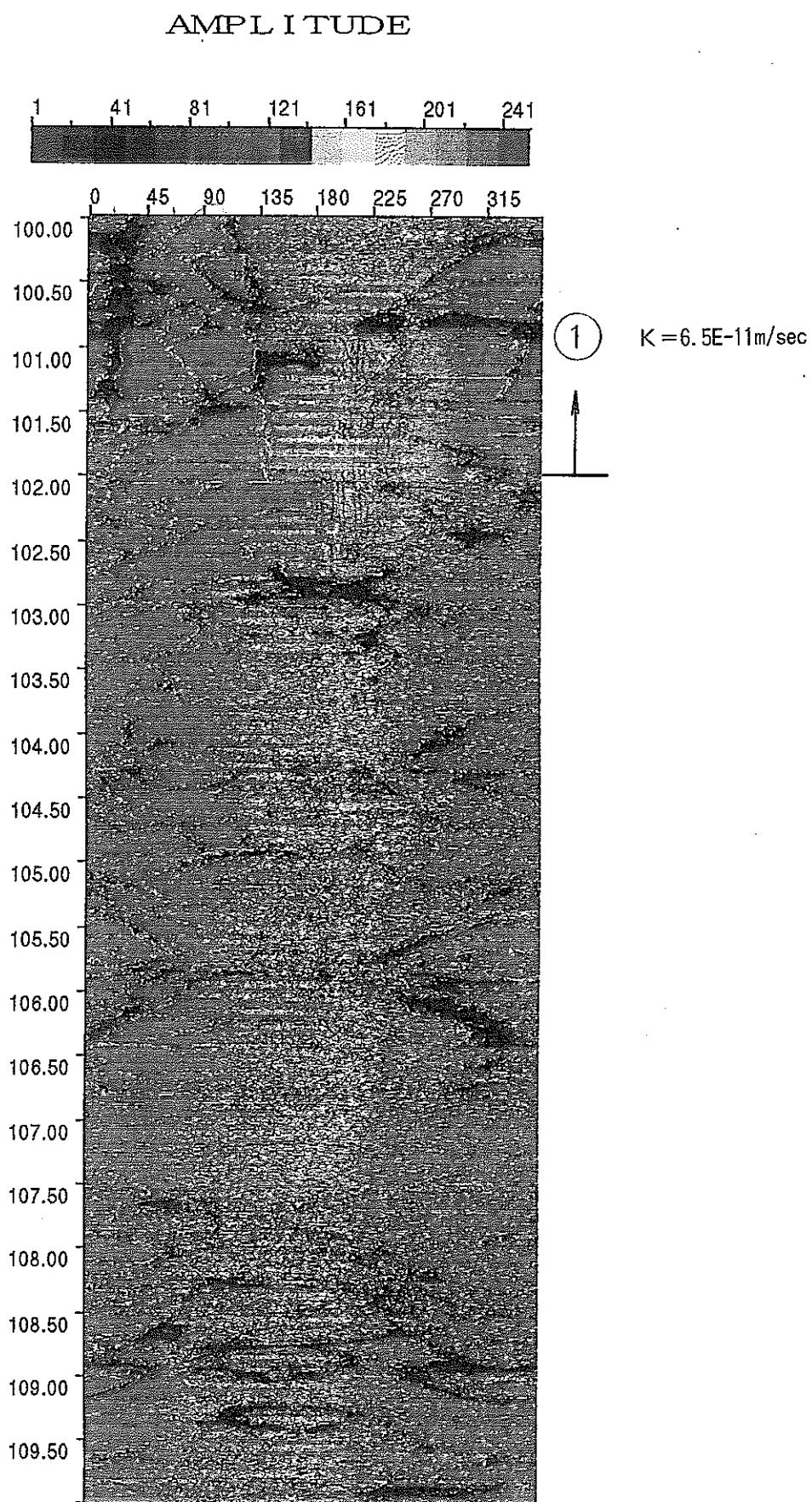


図 4.2.3 ボアホールレビュー測定記録図(2)、深度100.00~110.00m

TOKI DH-4
(SCALE : 1/50)
3

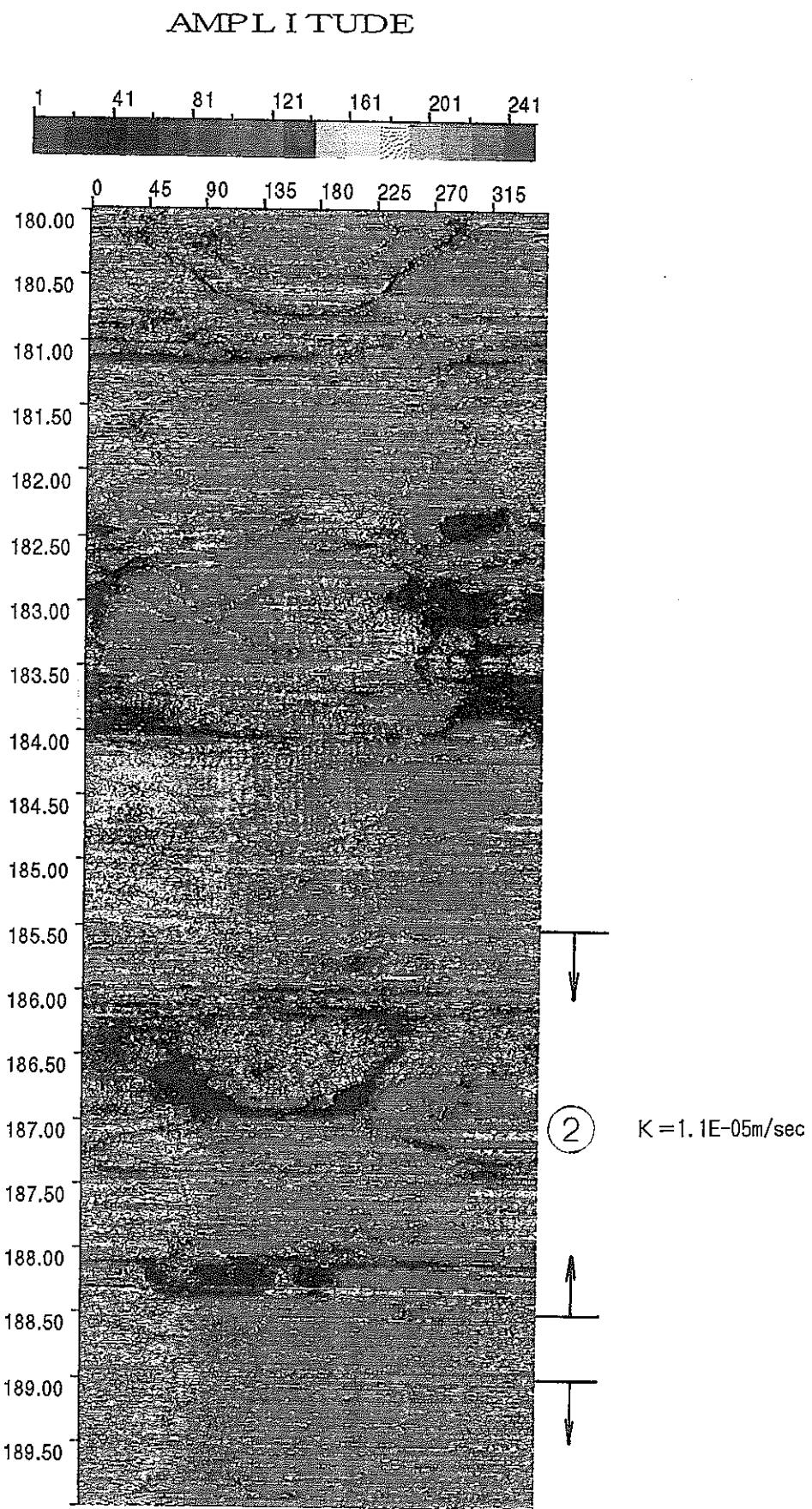


図 4.2.3 ポアホールレビュアー測定記録図(3)、深度180.00~190.00m

TOKI DH-4
(SCALE : 1/50)
4

AMPLITUDE

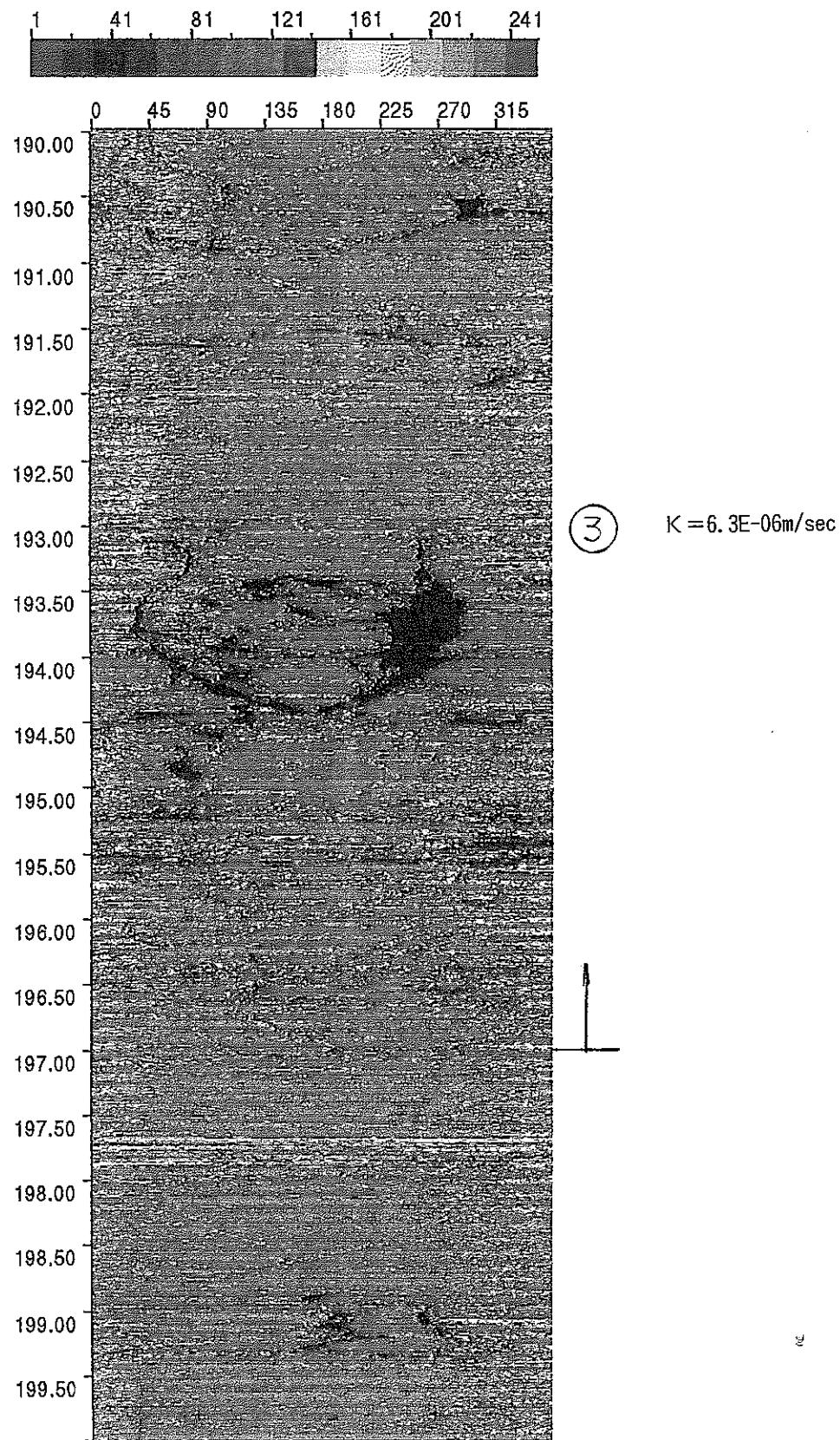


図 4.2.3 ボアホールレビュー測定記録図(4)、深度190.00~200.00m

TOKI DH-4
(SCALE : 1/50)
5

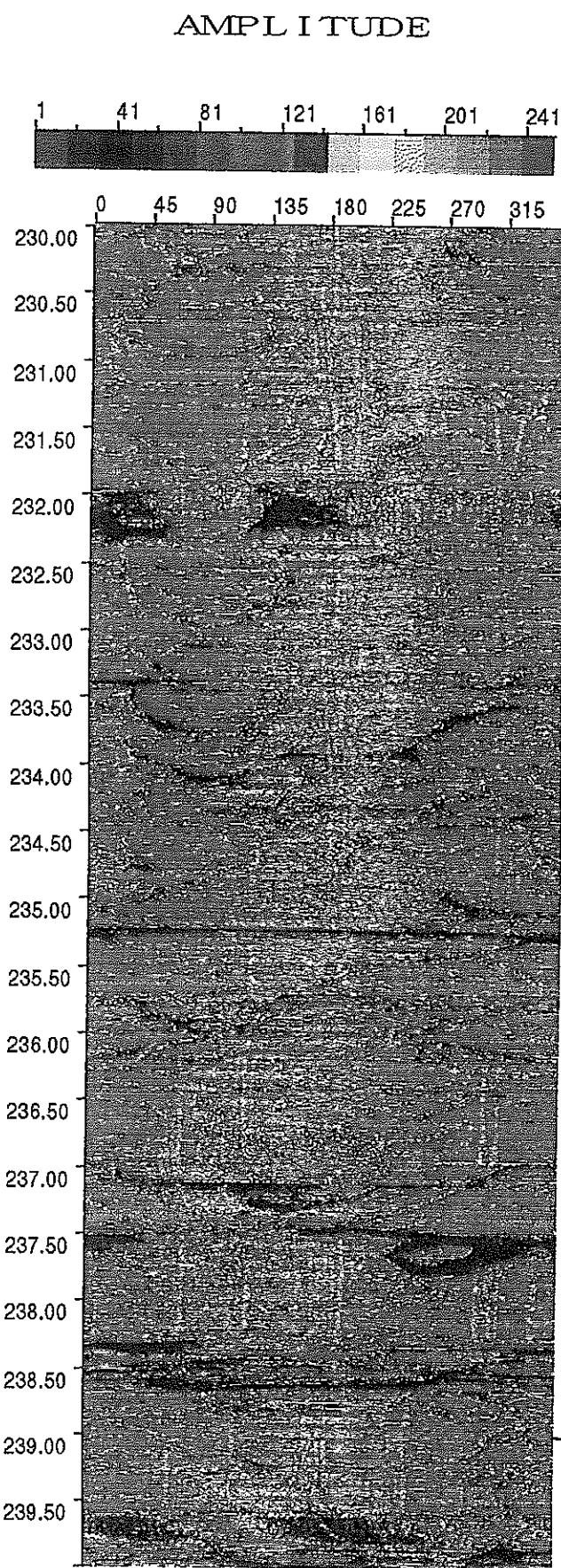


図 4.2.3 ボアホールレビュアー測定記録図(5)、深度230.00~240.00m

TOKI DH-4
(SCALE : 1/50)
6

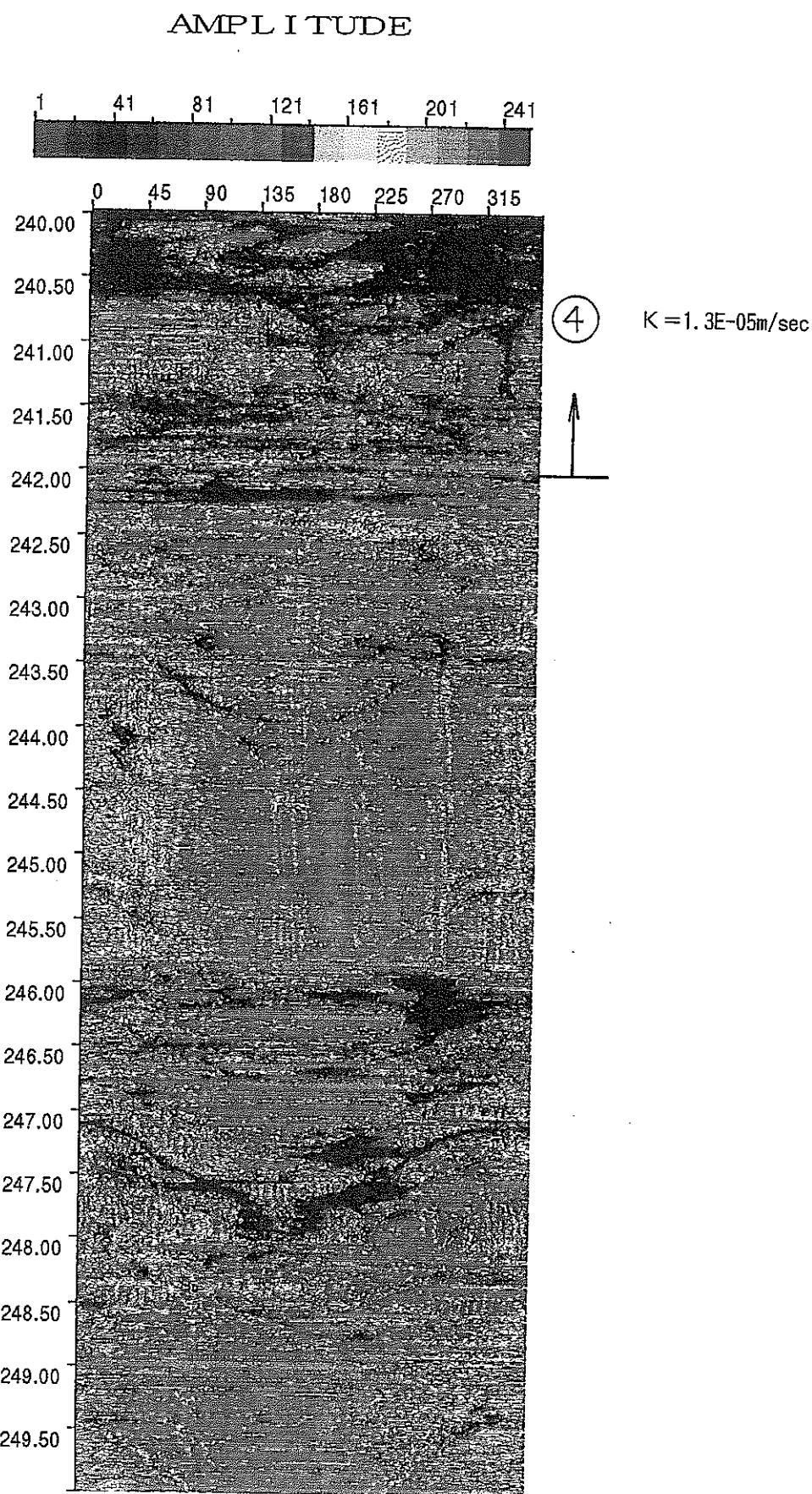


図 4.2.3 ポアホールテレビュア測定記録図(6)、深度240.00~250.00m

TOKI DH-4
(SCALE : 1/50)
7

AMPLITUDE

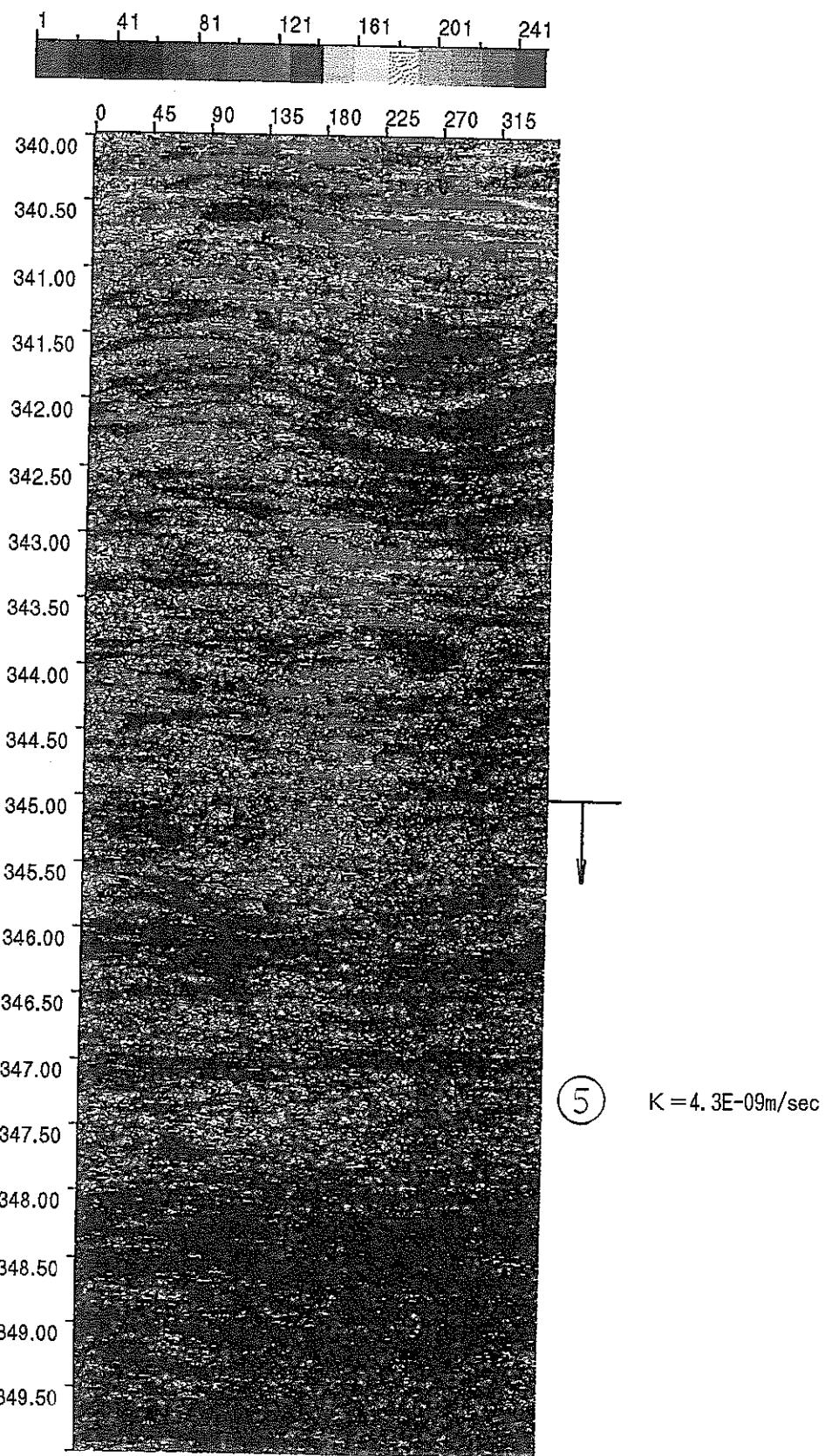


図 4.2.3 ボアホールレビュアー測定記録図(7)、深度340.00~350.00m

TOKI DH-4
(SCALE : 1/50)
8

AMPLITUDE

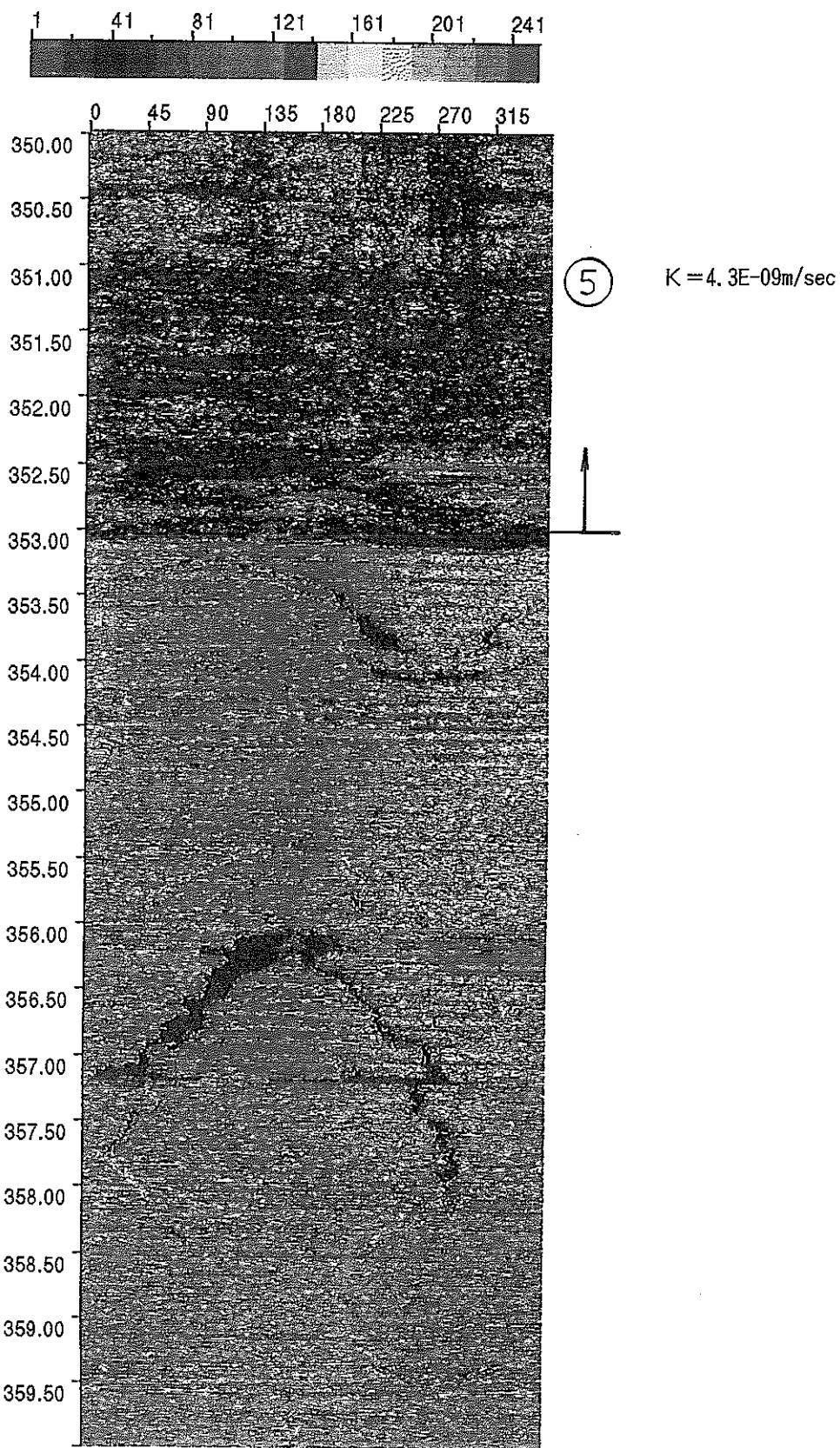


図 4.2.3 ポアホールレビュー測定記録図(8)、深度350.00~360.00m

TOKI DH-4
(SCALE : 1/50)

9

AMPLITUDE

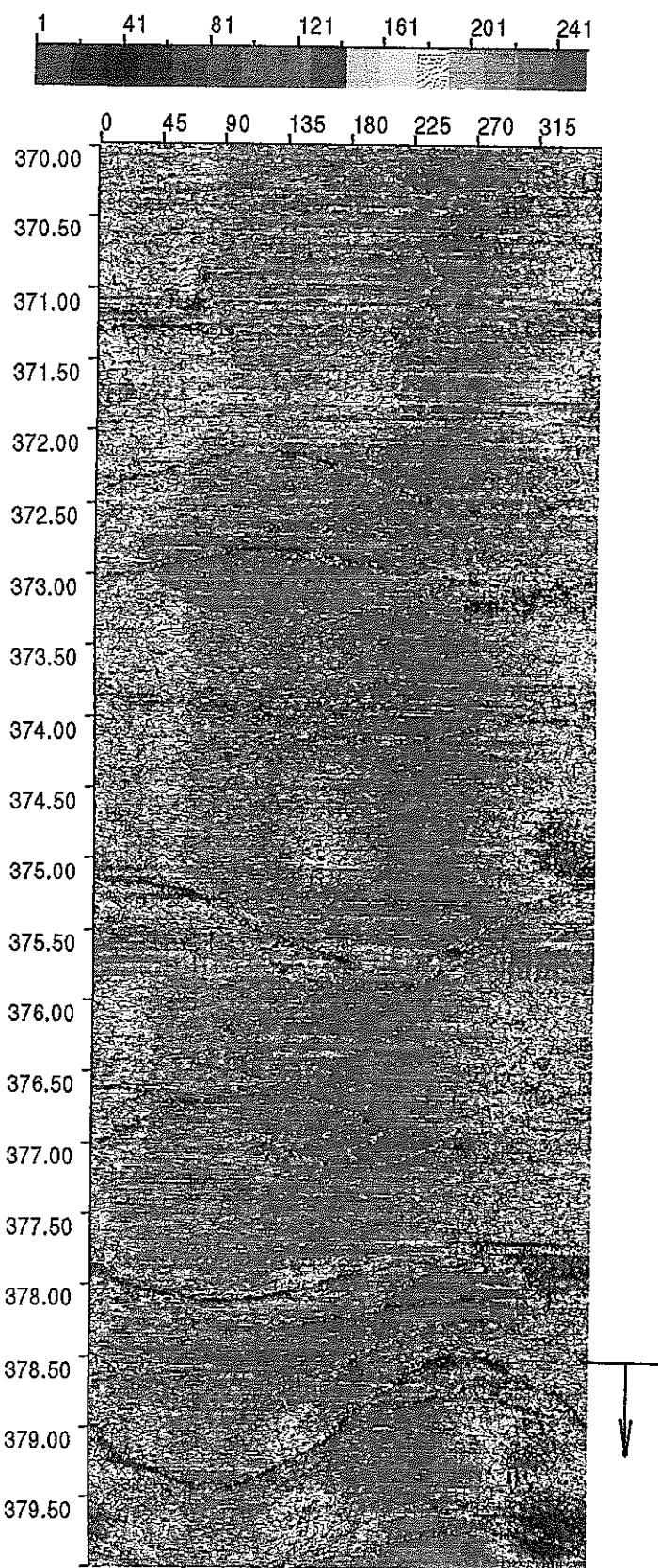


図 4.2.3 ボアホールテレビュアー測定記録図(9)、深度370.00～380.00m

TOKI DH-4
(SCALE : 1/50)
10

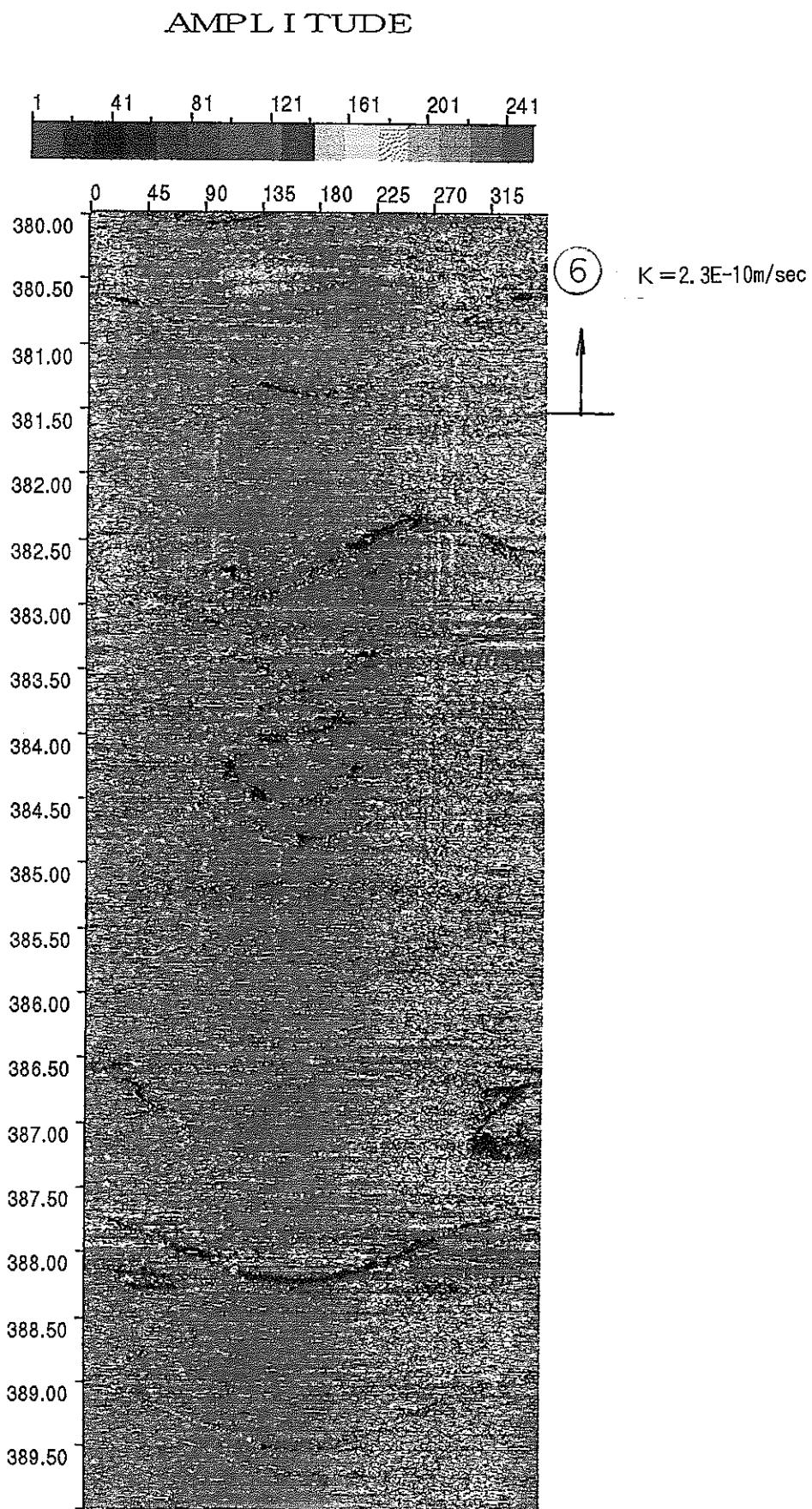


図 4.2.3 ボアホールレビュアー測定記録図(10)、深度380.00~390.00m

TOKI DH-4
(SCALE : 1/50)

11

AMPLITUDE

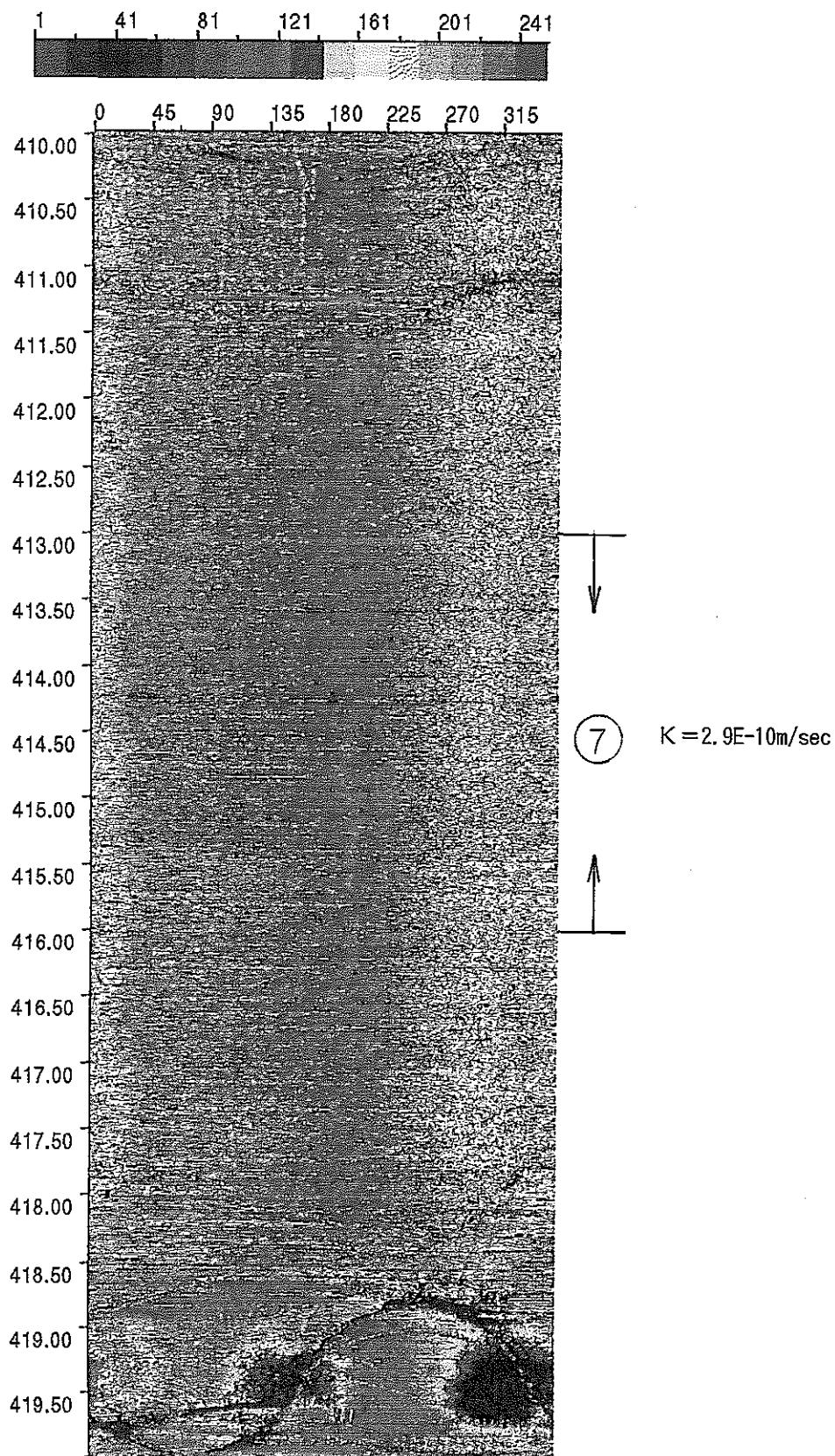


図 4.2.3 ポアホールテレビュア測定記録図(11)、深度410.00~420.00m

TOKI DH-4
(SCALE : 1/50)
12

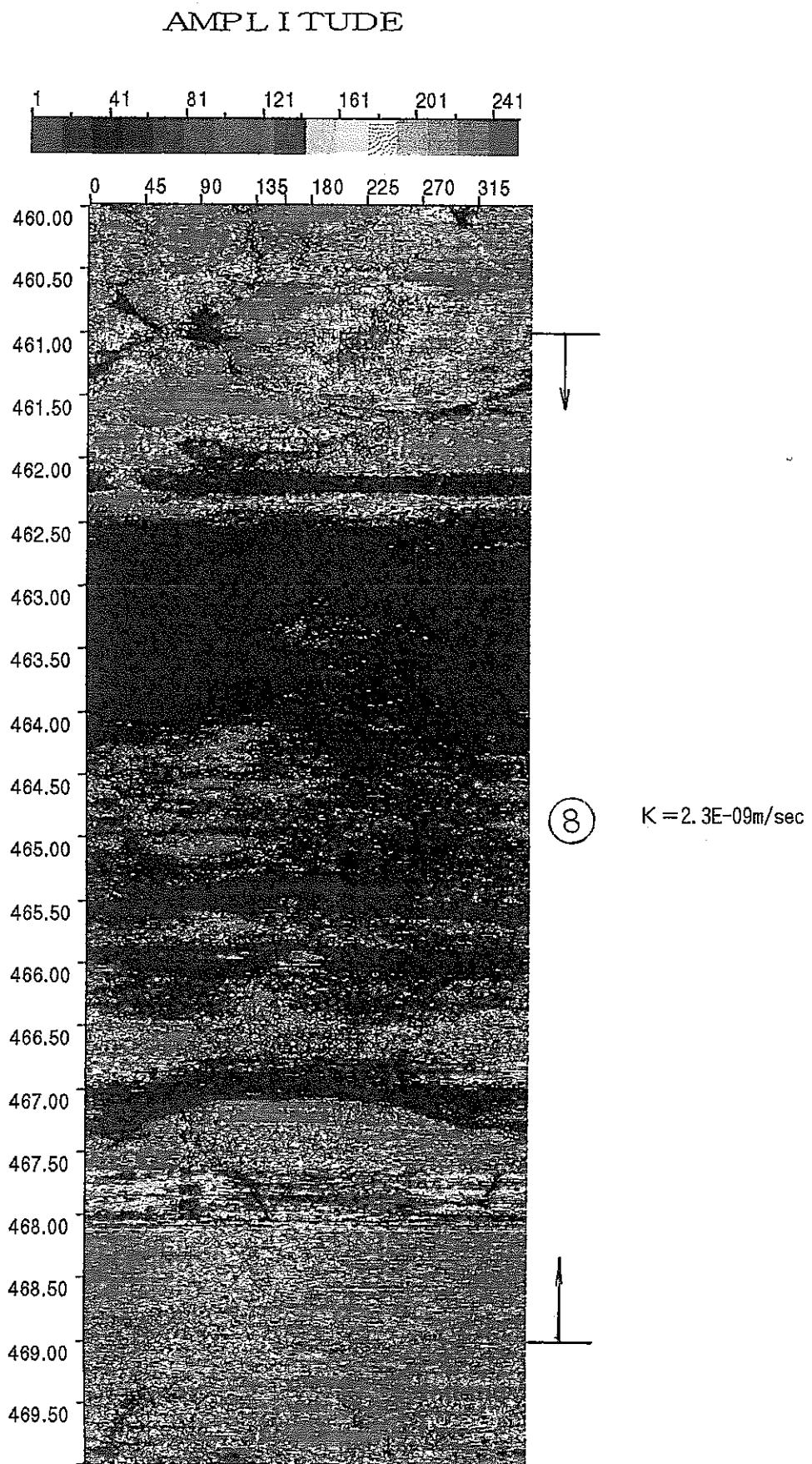


図 4.2.3 ボアホールレビュー測定記録図(12)、深度460.00~470.00m

TOKI DH-4
(SCALE : 1/50)

13

AMPLITUDE

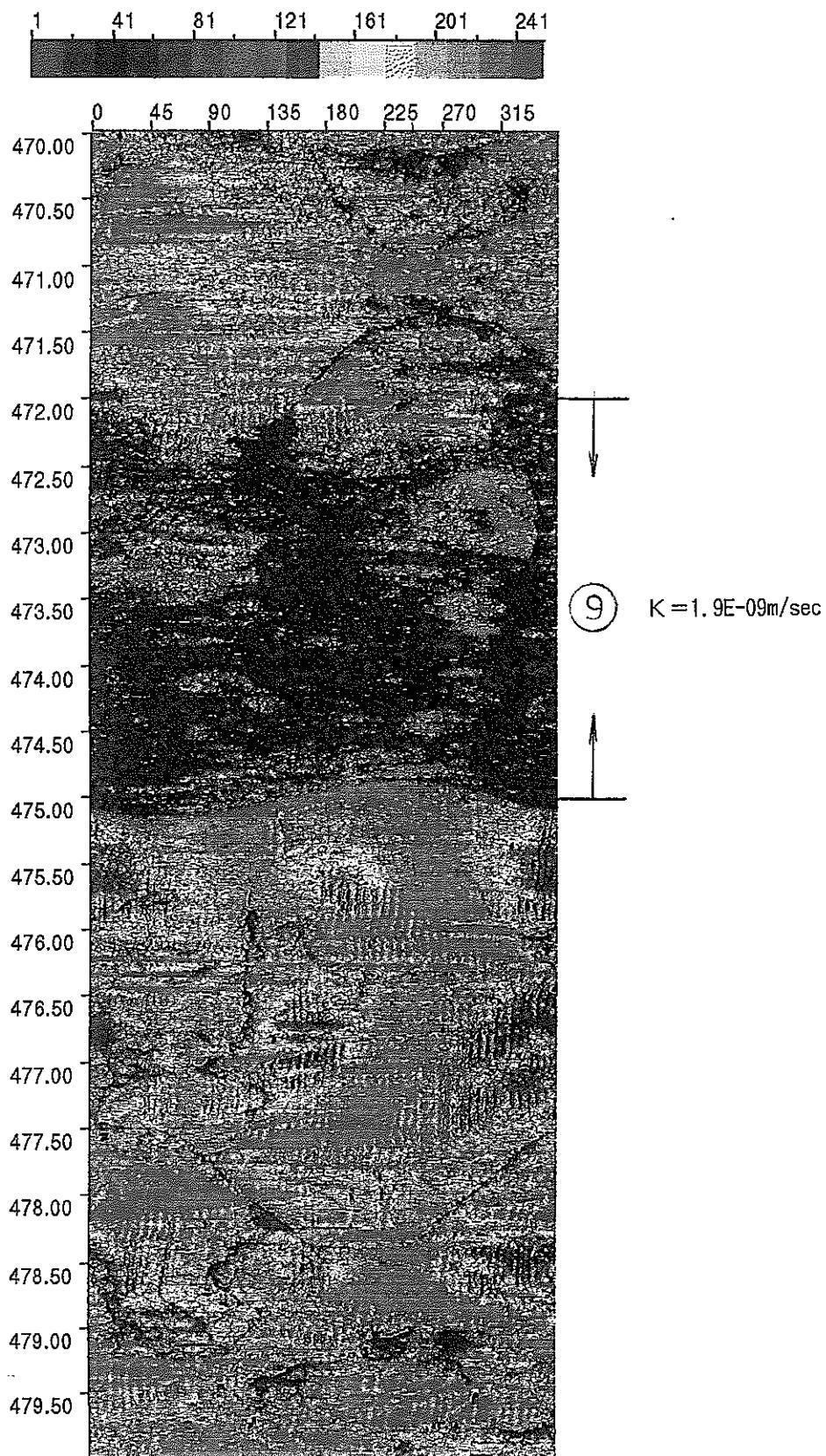


図 4.2.3 ボアホールレビュアー測定記録図(13)、深度470.00~480.00m

TOKI DH-4
(SCALE : 1/50)
14

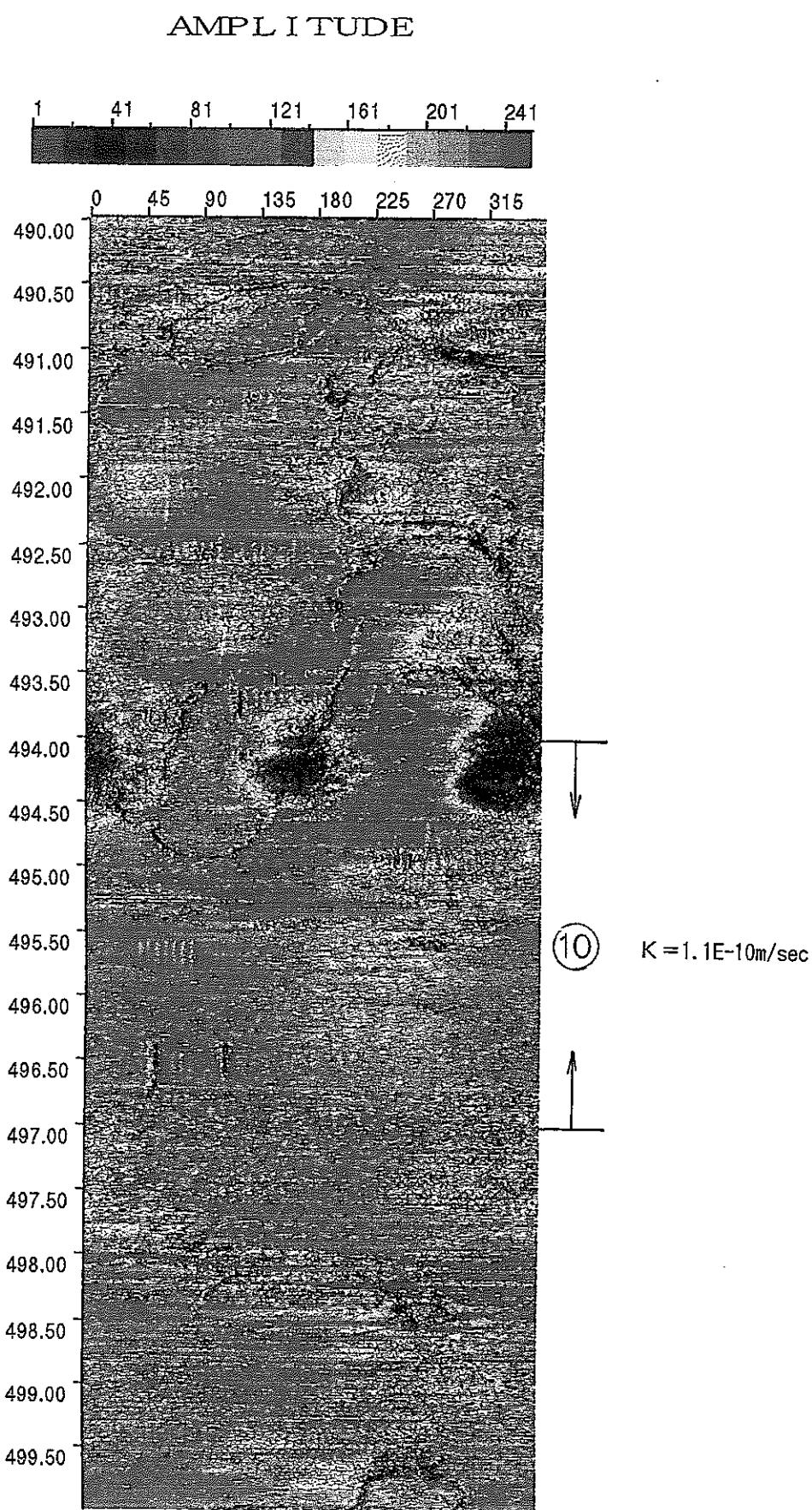


図 4.2.3 ポアホールレビュアー測定記録図(14)、深度490.00~500.00m

図 4.2.4 ボアホールテレビ測定記録図 (1)

DH-4 / 99.00~102.00m 1 (透水区間：深度99.80 ~102.00m、K=6.5E-11m/s)

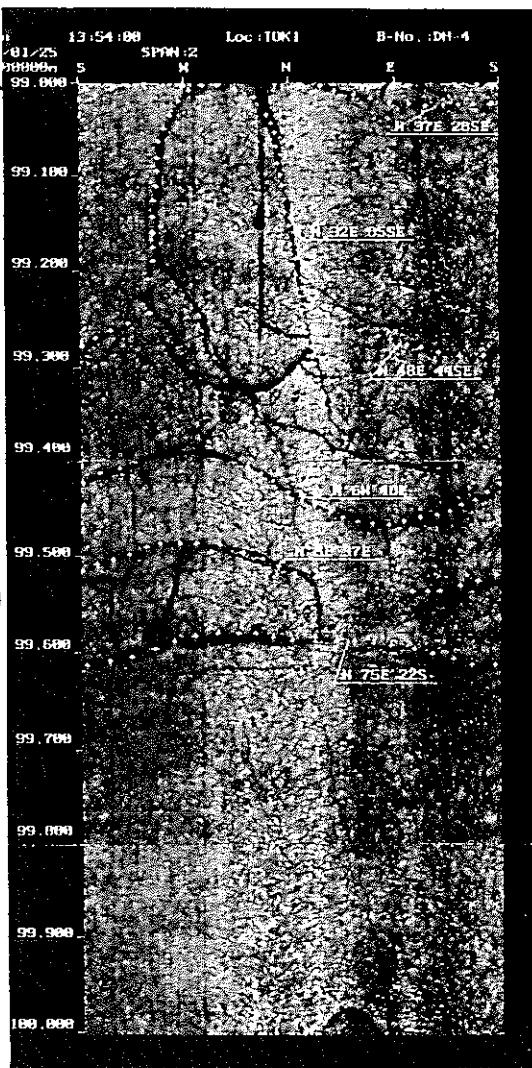


図 4.2.4 ボアホールテレビ測定記録図（2）

DH-4 / 185.50~188.50m 2

(透水区間：深度185.50～188.50m、 $K=1.1 \times 10^{-5}$ m/s)

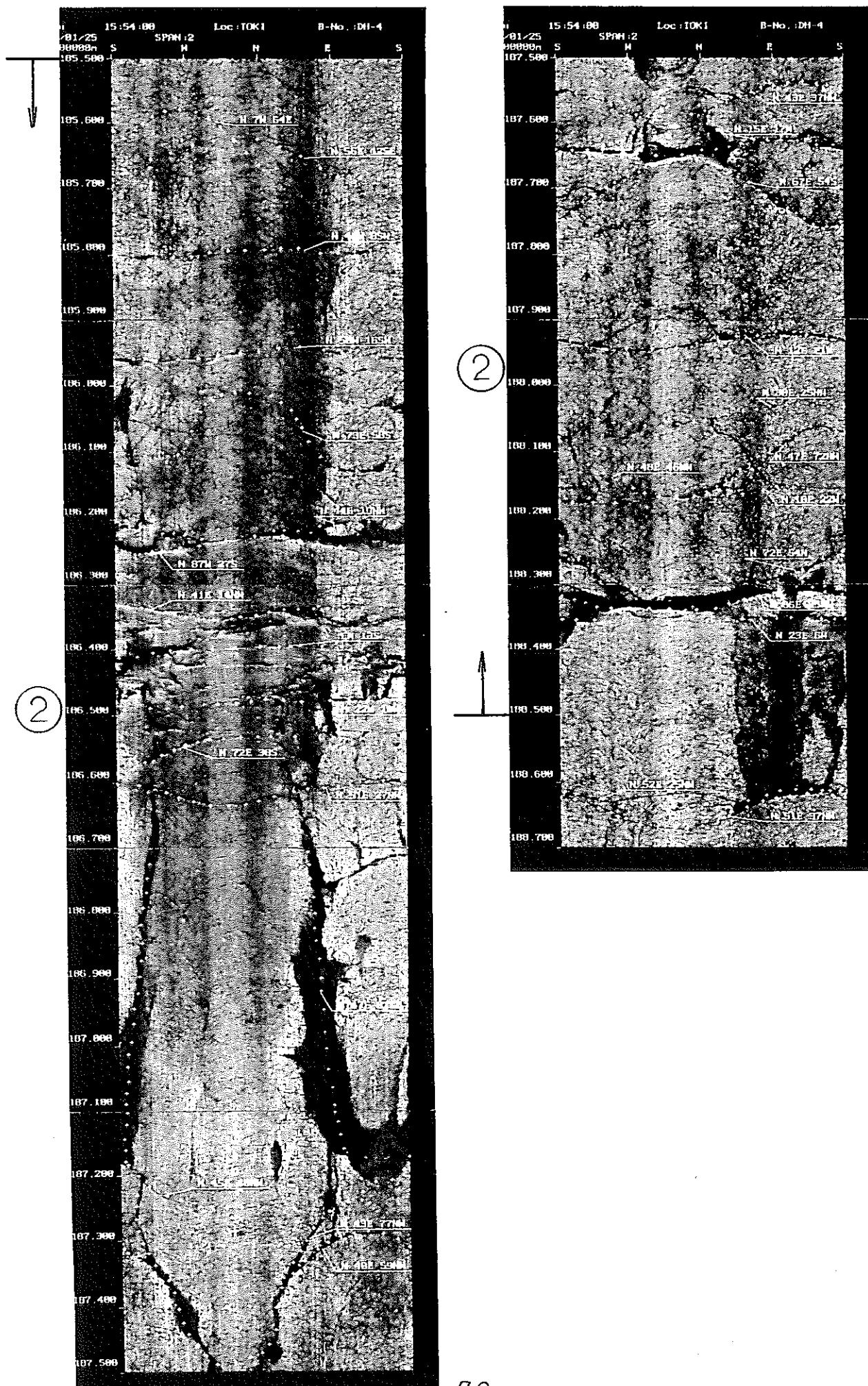


図 4.2.4 ボアホールテレビ測定記録図（3）

DH-4 / 189.00~193.00m 3

(透水区間：深度189.00～197.00m、K=6.3E-06m/s)

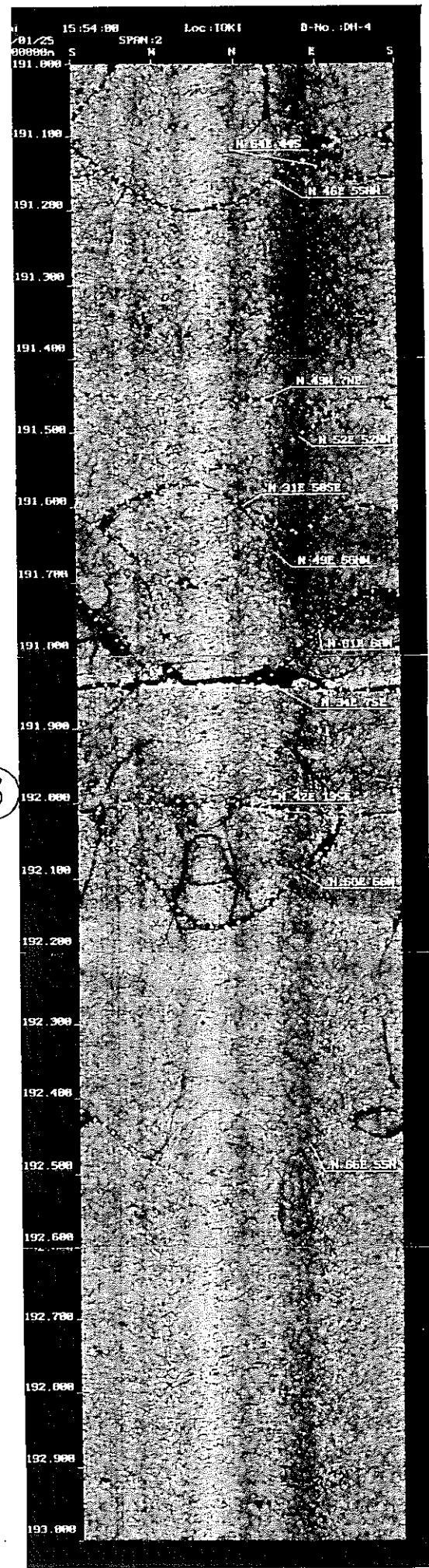
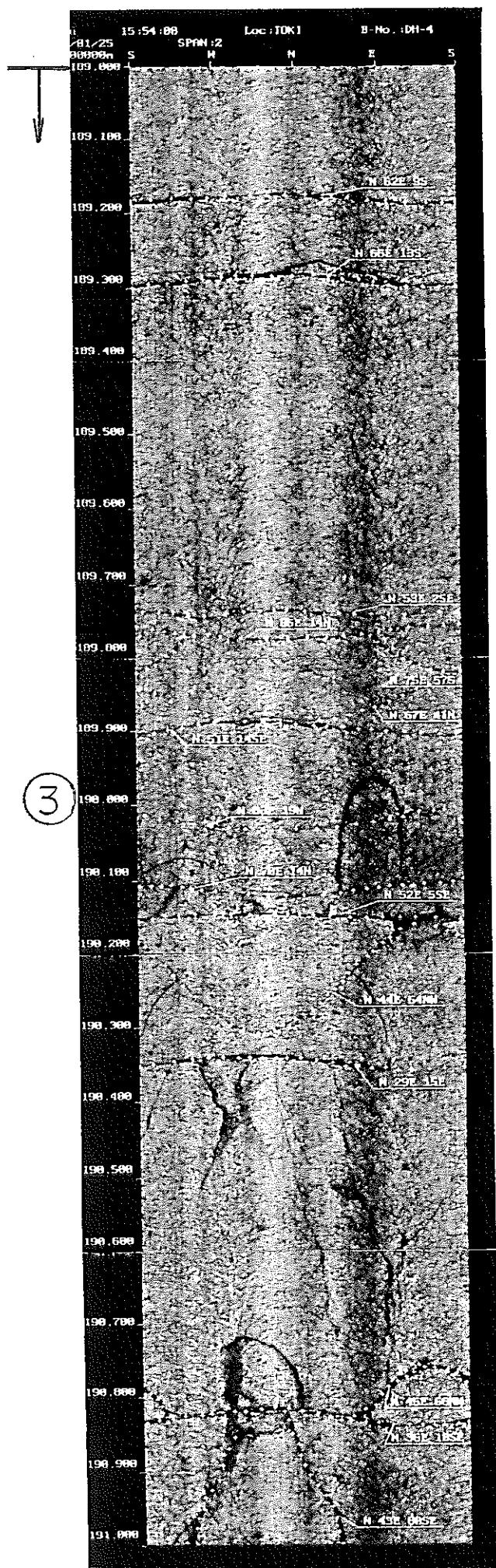


図 4.2.4 ボアホールテレビ測定記録図 (4)

D H - 4 / 193.00 ~ 197.00m 4

(透水区間：深度189.00～197.00m、 $K=6.3E-06\text{m/s}$)

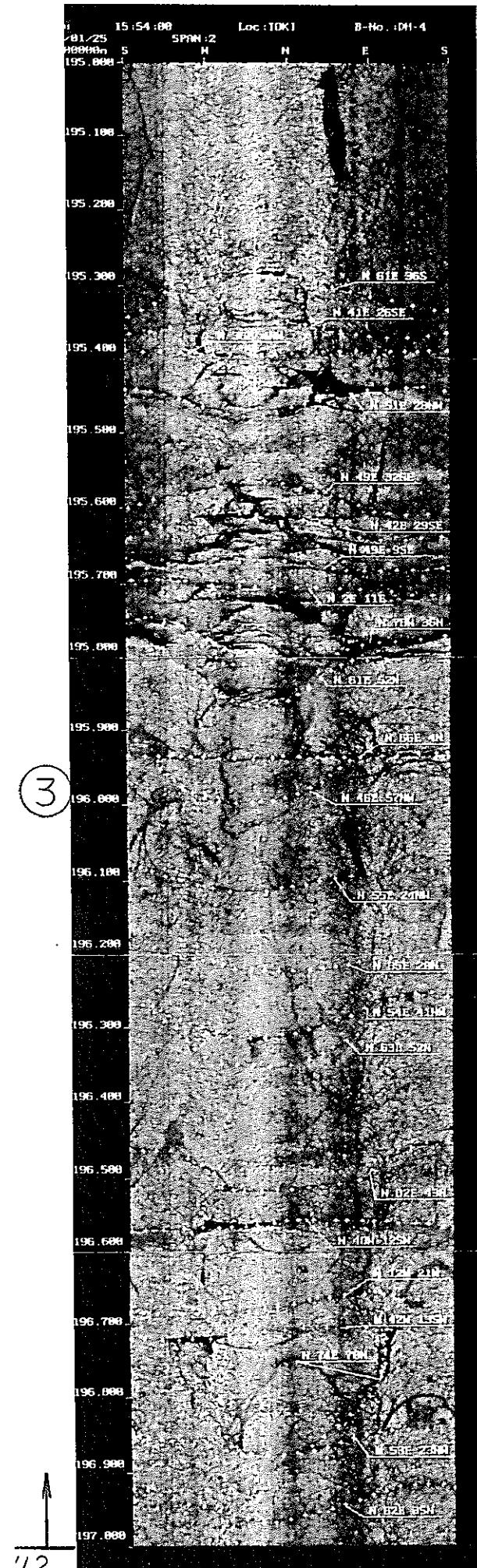
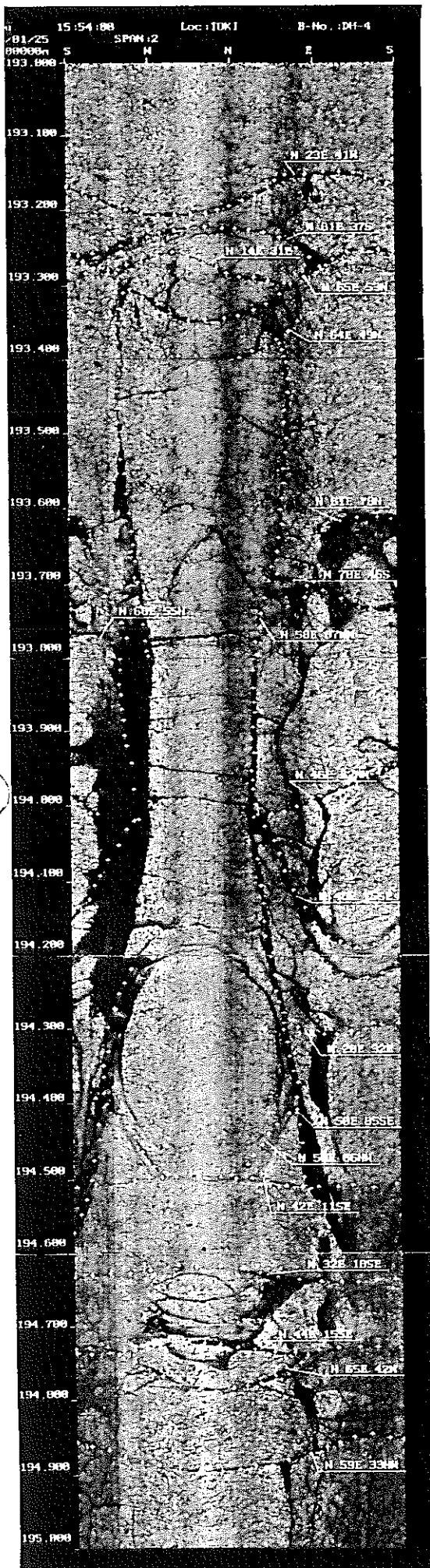


図 4.2.4 ボアホールテレビ測定記録図（5）

(透水区間：深度189.00～197.00m、K=6.3E-06m/s)

D II-4 / 239.00~242.20m 5

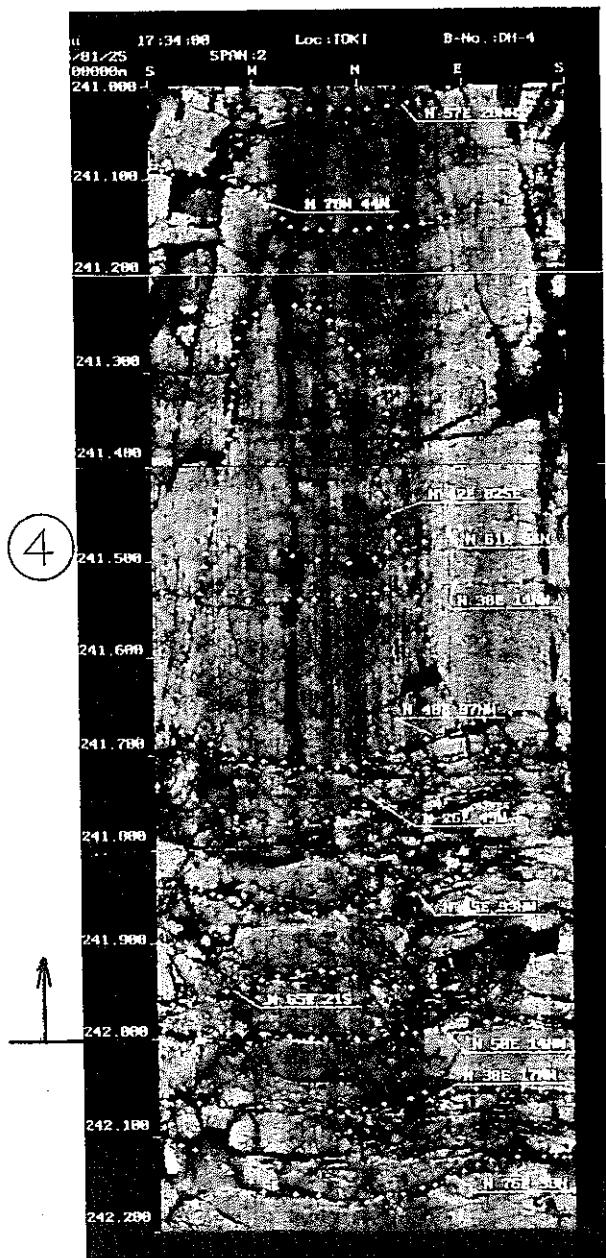
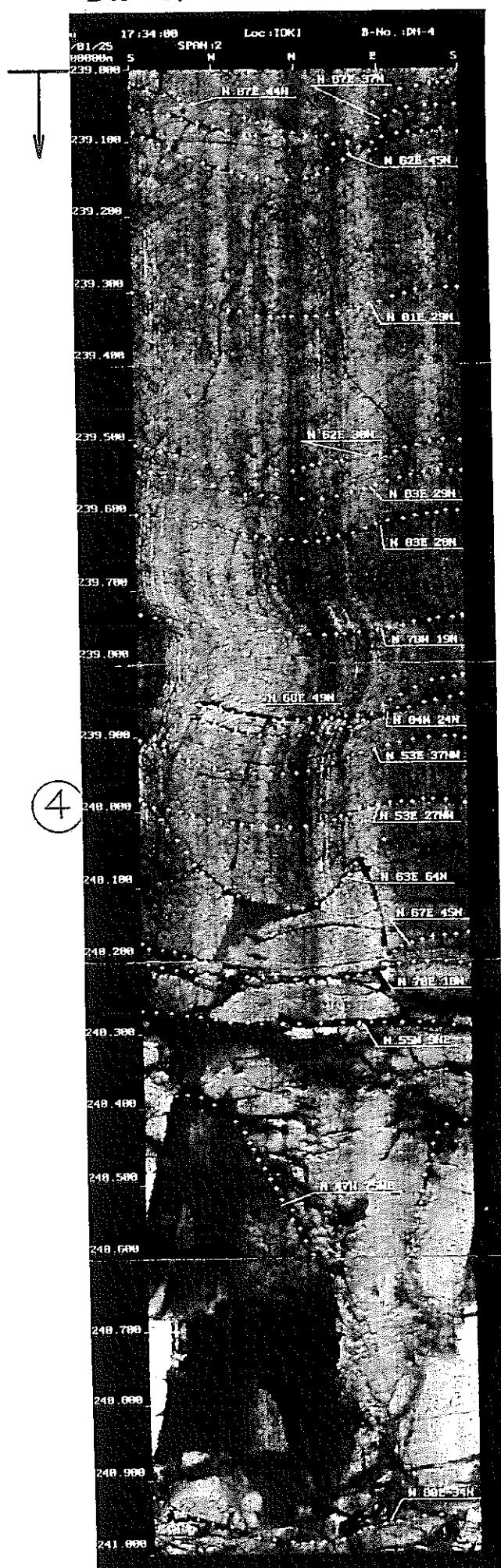


図 4.2.4 ボアホールテレビ測定記録図 (6)

(透水区間：深度345.00～353.00m、K=4.3E-09m/s)

DH-4 / 345.00~349.00m 6

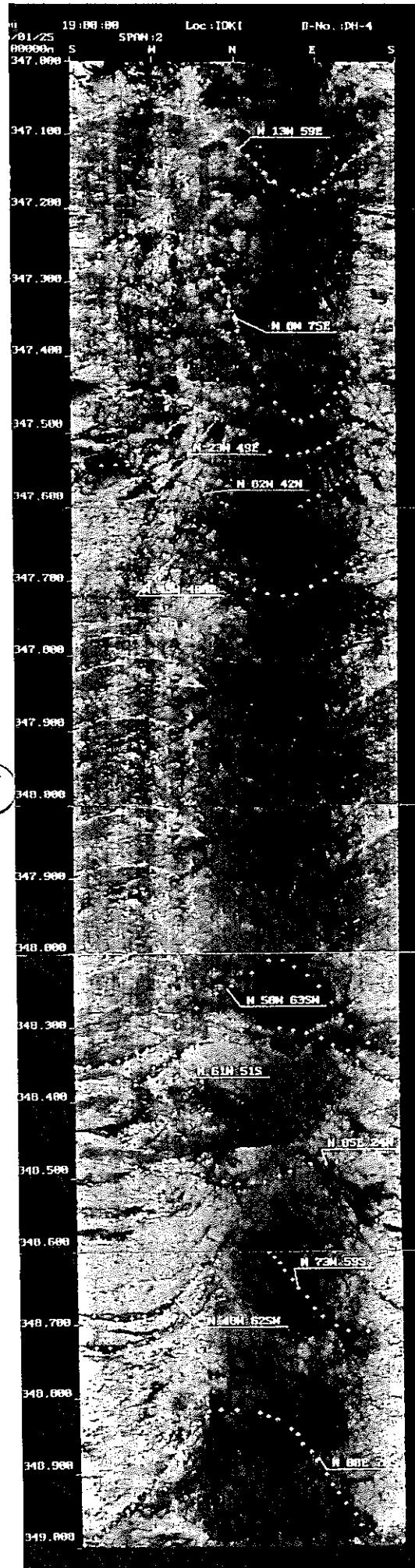
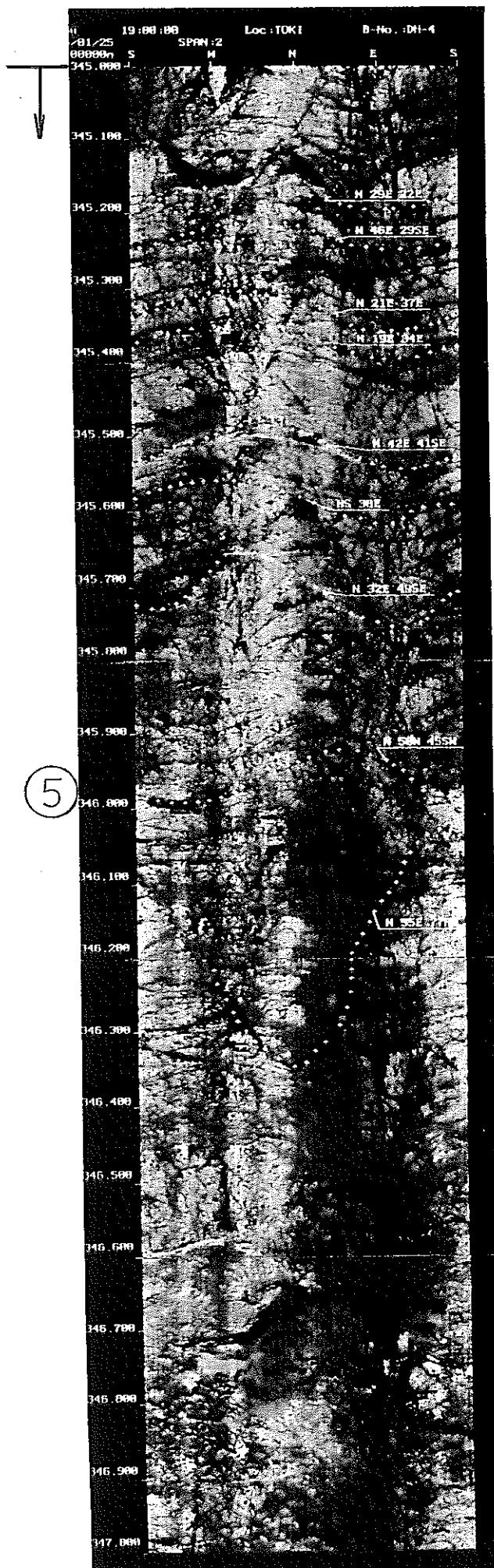


図 4.2.4 ポアホールテレビ測定記録図(7)

DH-4 / 349.00~352.00m 7

(透水区間：深度345.00~353.00m、K=4.3E-09m/s)

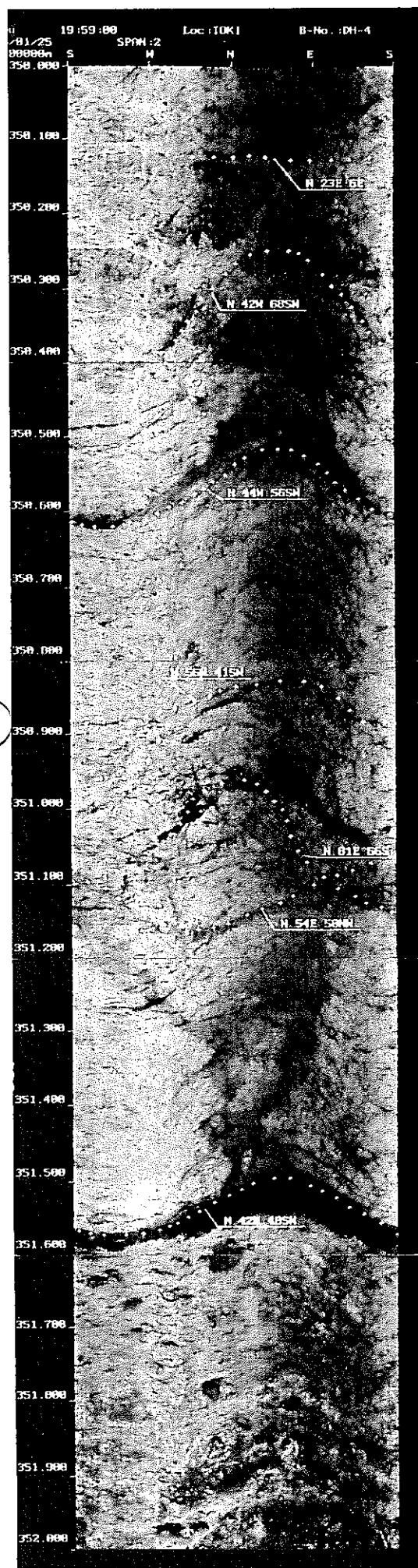
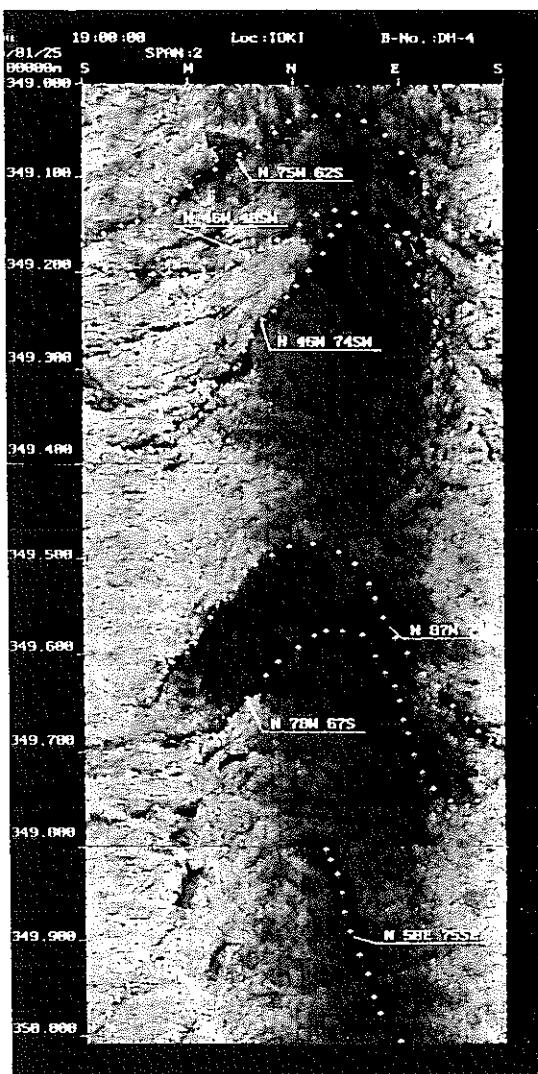


図 4.2.4 ポアホールテレビ測定記録図 (8)

D H - 4 / 352.00~353.20m 8

(透水区間 : 深度345.00~353.00m ; K=4.3E-09m/s)

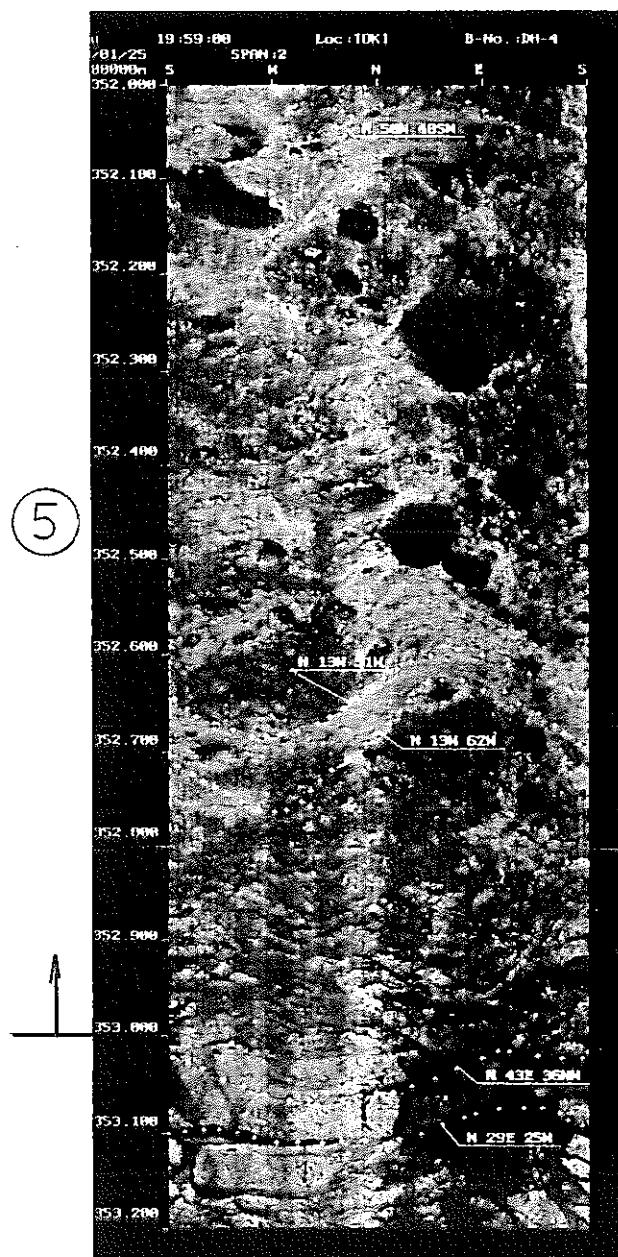


図 4.2.4 ボアホールテレビ測定記録図 (9)

D H - 4 / 378.40~381.60m 9

(透水区間 : 深度378.40~381.60m、K=2.3E-10m/s)

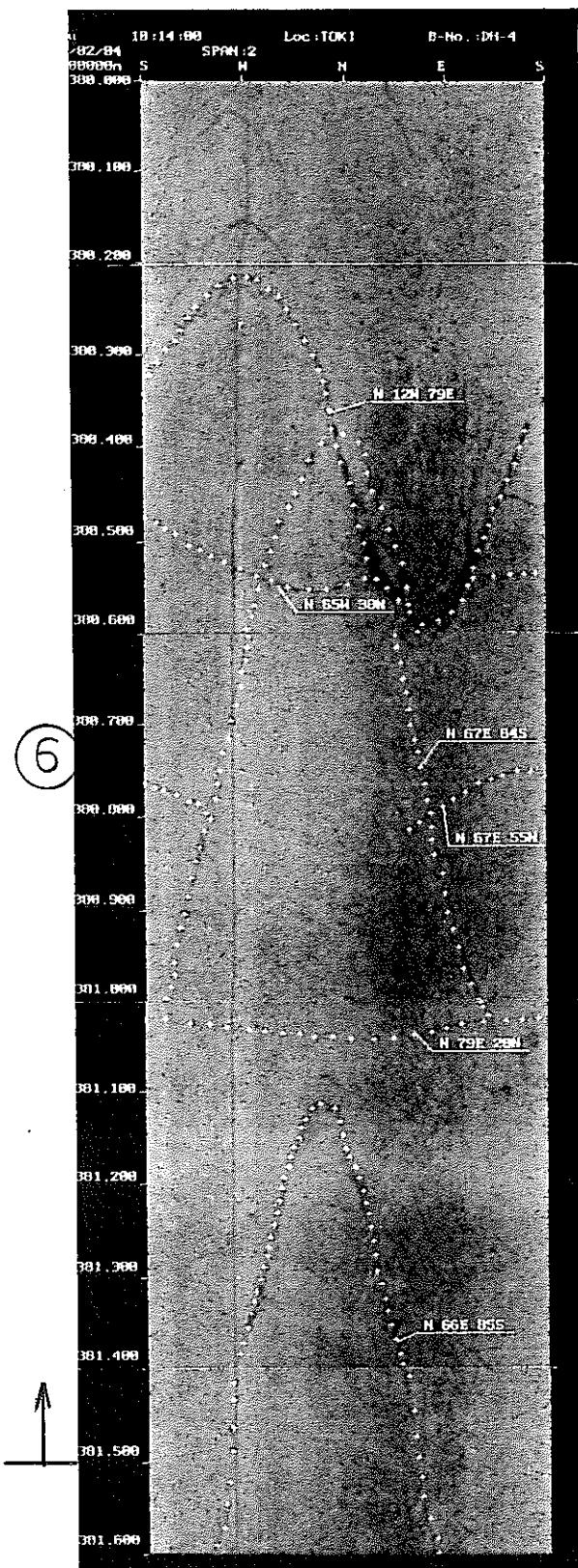
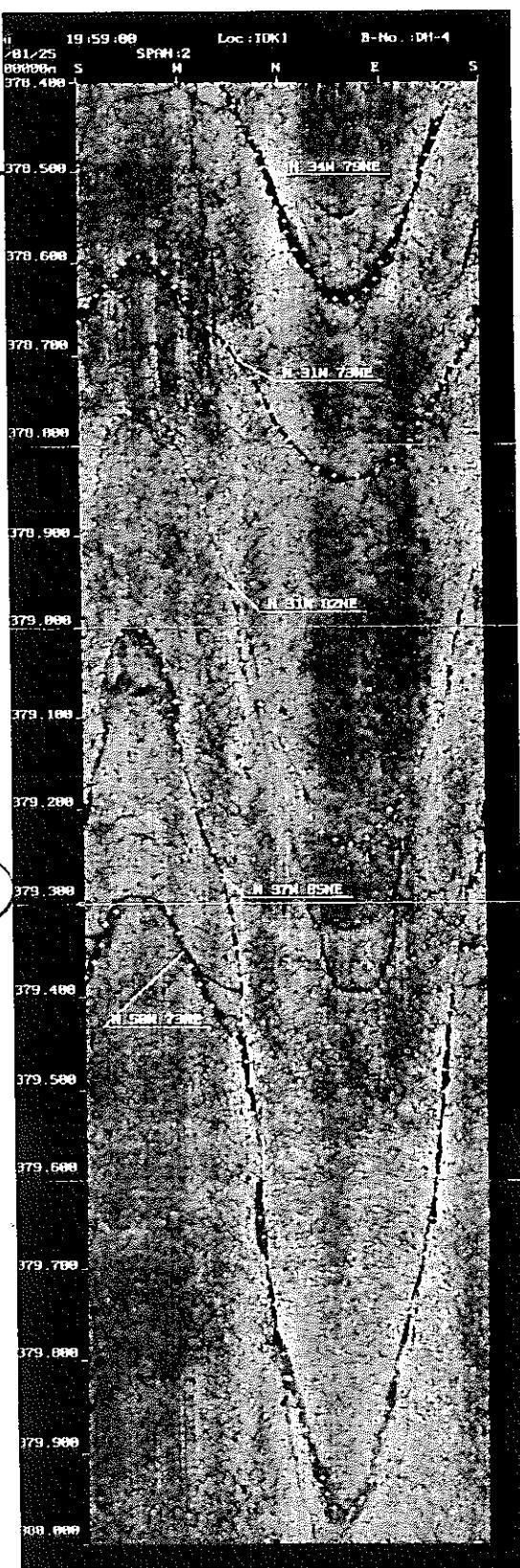


図 4.2.4 ポアホールテレビ測定記録図 (10)

(透水区間：深度413.00～416.00m、K=2.9E-10m/s)

D II - 4 / 413.00~416.20m 10

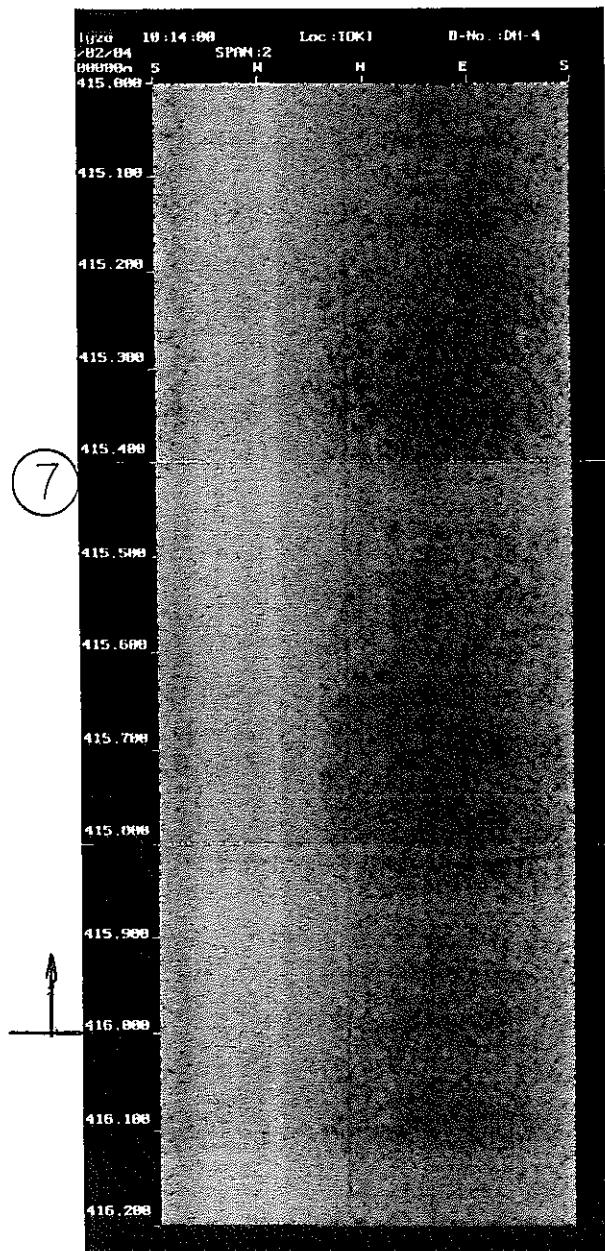
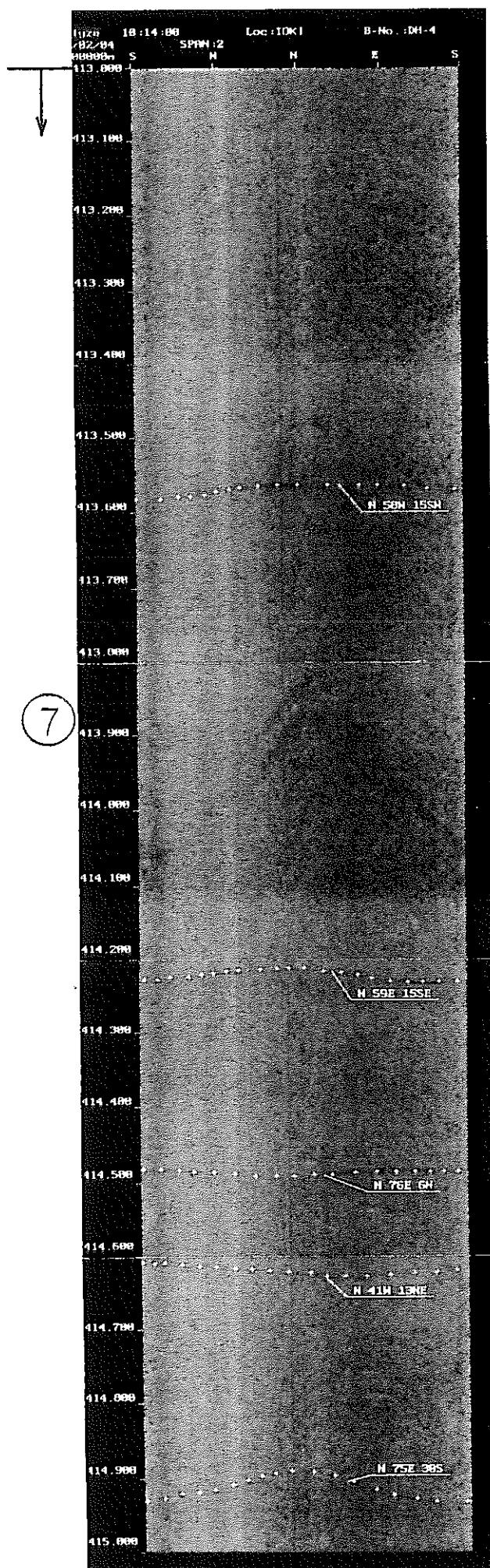


図 4.2.4 ポアホールテレビ測定記録図 (11)

(透水区間：深度461.00～469.00m、K=2.3E-09m/s)

DH-4 / 461.00~465.00m 11

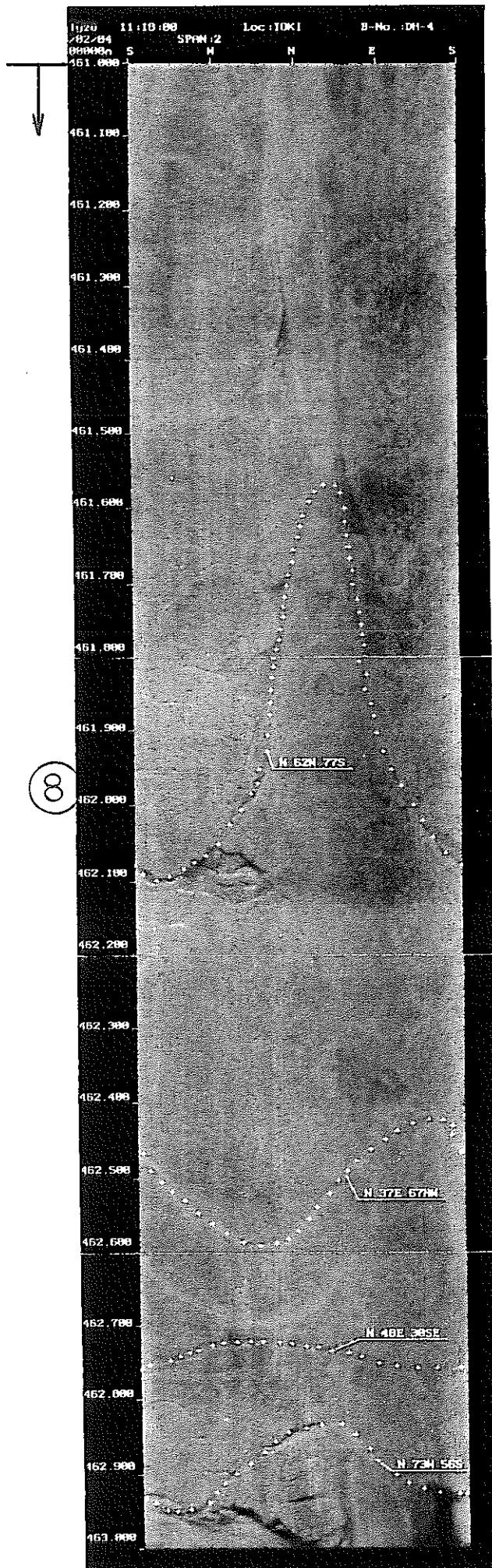


図 4.2.4 ポアホールテレビ測定記録図(12)

D II - 4 / 465.00~469.00m 12

(透水区間 : 深度461.00~469.00m、K=2.3E-09m/s)

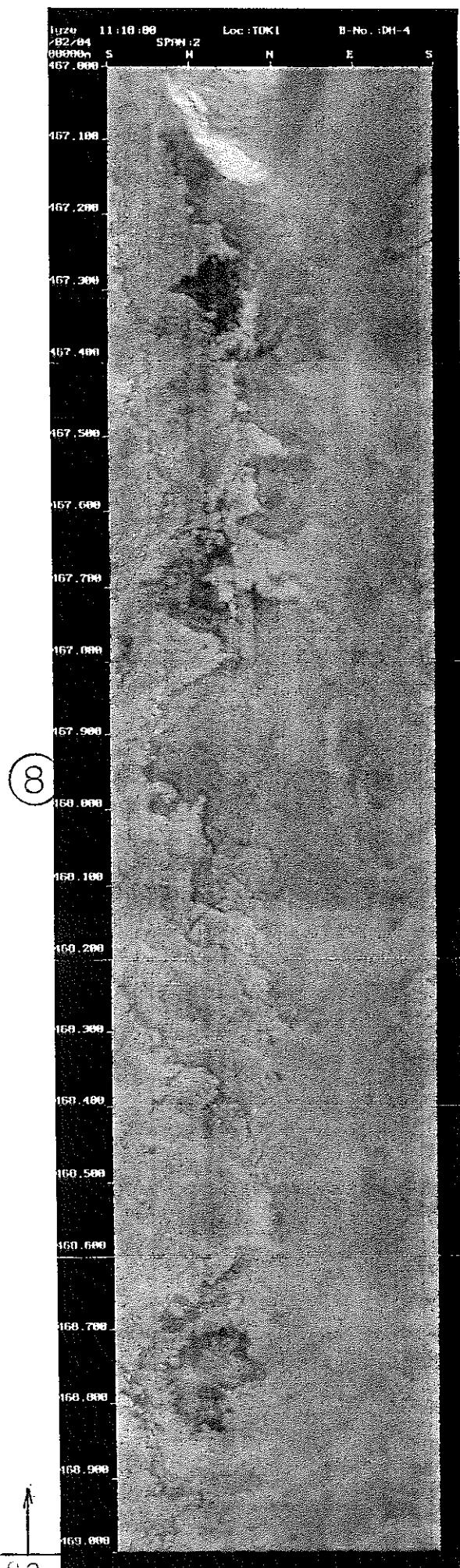


図 4.2.4 ボアホールテレビ測定記録図 (13)

(透水区間：深度461.00～469.00m、K=2.3E-09m/s)

DH-4 / 472.00～475.20m 13

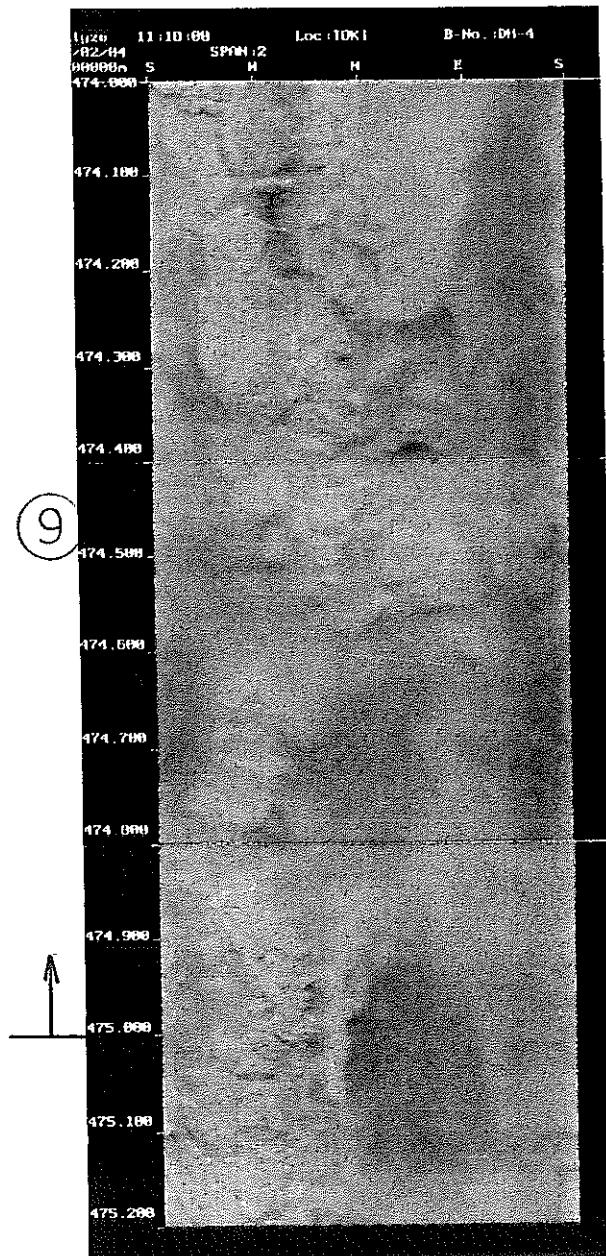
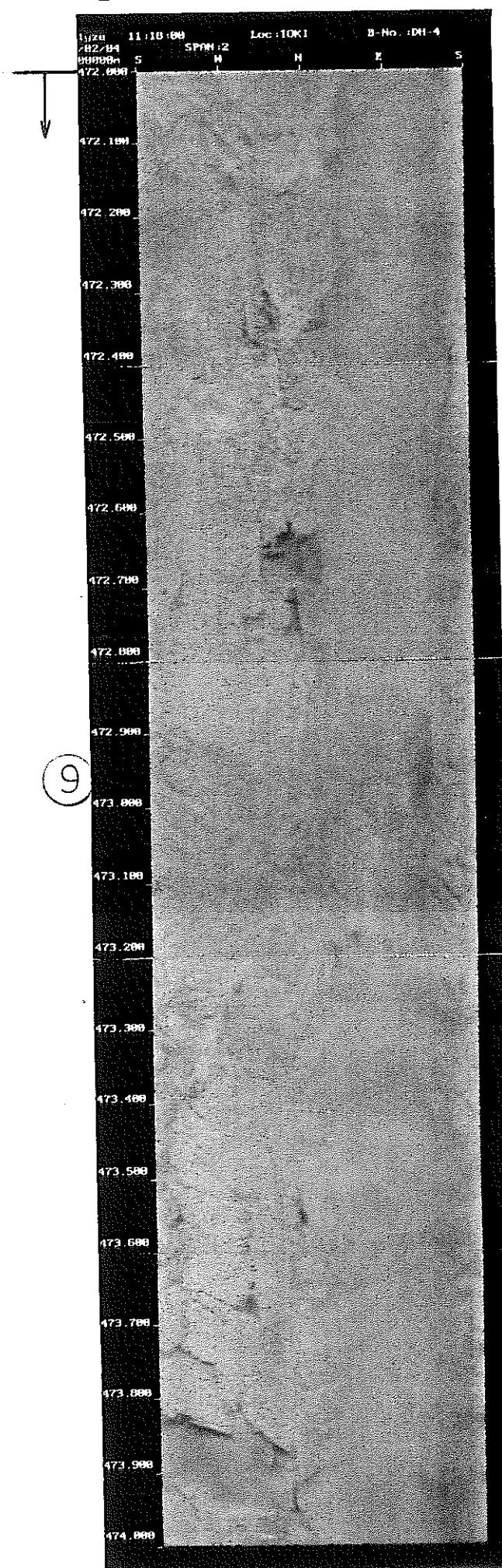
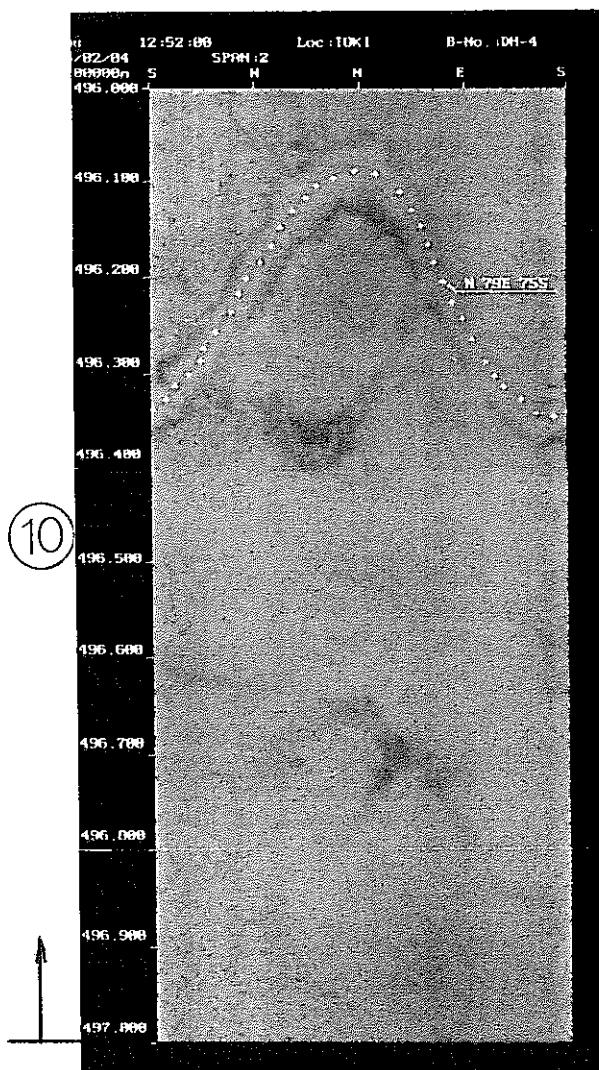


図 4.2.4 ボアホールテレビ測定記録図 (14)

(透水区間 : 深度494.00~497.00m、K=1.1E-10m/s)

DH-4 / 494.00~497.00m 14



亀裂の比較・検討について以下に示す。

◎N O. 1 深度99.00 ~102.00m 間

ボアホールテレビによる解析

表 4.2.3 ボアホールテレビ割れ目一覧表 (1)

番号	上端深度-下端深度	中間深度	走向	傾斜	区分	幅(mm)	形状	状態
313	100.00 - 100.80	100.40	N 41W	88SW	明瞭割れ目	0.0	P -h/j	酸化汚染
314	100.32 - 101.01	100.67	N 39E	84SE	開口割れ目	4.0	P -h/j	酸化汚染

コメント：縦亀裂が発達し、開口割れ目である。

◎N O. 2 深度185.50~188.50m 間

ボアホールテレビによる解析

表 4.2.3 ボアホールテレビ割れ目一覧表 (2)

番号	上端深度-下端深度	中間深度	走向	傾斜	区分	幅(mm)	形状	状態
713	186.38 - 187.20	186.79	N 47E	86SE	開口割れ目	10.0	S -h/j	酸化汚染
714	186.35 - 187.52	186.94	N 44E	75NW	開口割れ目	0.0	S -n/h/j	酸化汚染
722	188.31 - 188.34	188.33	N 41E	13NW	開口割れ目	7.0	S -h/j	酸化汚染

コメント：縦亀裂や低角度の割れ目が発達し、開口割れ目である。

◎N O. 3 深度189.00~197.00m 間

ボアホールテレビによる解析

表 4.2.3 ボアホールテレビ割れ目一覧表 (3)

番号	上端深度-下端深度	中間深度	走向	傾斜	区分	幅(mm)	形状	状態
737	190.82 - 191.09	190.96	N 39E	70SE	明瞭割れ目	0.0	I -h/j	酸化汚染
742	191.72 - 191.84	191.78	N 66E	57N	開口割れ目	2.0	P -n/j	酸化汚染
743	191.83 - 191.85	191.84	N 67E	8S	開口割れ目	3.0	S -j	酸化汚染
750	193.26 - 193.35	193.31	N 64E	42N	開口割れ目	1.0	P -h/j	酸化汚染
764	195.44 - 195.49	195.47	N 55E	21NW	開口割れ目	1.0	P -n/j	酸化汚染
765	195.56 - 195.62	195.59	N 51E	22SE	開口割れ目	1.0	P -n/h/j	酸化汚染

コメント：縦亀裂や低角度の割れ目が発達し、開口割れ目である。

◎N O. 4 深度239.00~242.00m 間

ボアホールテレビによる解析

表 4.2.3 ボアホールテレビ割れ目一覧表 (4)

番号	上端深度-下端深度	中間深度	走向	傾斜	区分	幅(mm)	形状	状態
1025	240.20 - 240.22	240.21	N 76E	7N	明瞭割れ目	0.0	P -h	粘土介在
1033	241.94 - 241.96	241.95	N 65E	15S	明瞭割れ目	0.0	P -h	粘土介在

コメント：縦亀裂が発達し、開口割れ目である。

◎N O. 5 深度345.00～353.00m 間

ボアホールテレビによる解析

表 4.2.3 ボアホールテレビ割れ目一覧表 (5)

番号	上端深度 - 下端深度	中間深度	走向	傾斜	区分	幅(mm)	形状	状態
1677	345.13 - 345.15	345.14	N 23E 13E	明瞭割れ目	0.0	P -n/h/j	酸化汚染	
1678	345.30 - 345.50	345.40	N 18E 26E	明瞭割れ目	0.0	P -n/h/j	酸化汚染	
1679	345.49 - 345.55	345.52	N 45E 30SE	明瞭割れ目	0.0	P -n/h/j	酸化汚染	
1680	345.65 - 345.75	345.70	N 11E 41E	明瞭割れ目	0.0	P -n/h/j	酸化汚染	
1681	346.05 - 346.35	346.20	N 62E 67N	明瞭割れ目	0.0	S -n/h/j	粘土介在	
1682	347.07 - 347.18	347.13	N 14W 45E	ヘーカラック	0.0	P -n/h/j	白色鉱物脈	
1683	347.43 - 347.54	347.49	N 31W 39NE	破碎帶上盤	0.0	P -n/h/j	白色鉱物脈	
1684	348.20 - 348.35	348.28	N 69W 39S	ヘーカラック	0.0	P -n	粘土介在	
1685	348.56 - 348.75	348.66	N 84W 41S	明瞭割れ目	0.0	C -n/h/j	粘土介在	
1686	348.84 - 349.00	348.92	N 85E 54S	明瞭割れ目	0.0	P -n/h/j	粘土介在	
1687	349.14 - 349.39	349.27	N 46W 61SW	明瞭割れ目	0.0	P -n/h/j	粘土介在	
1688	349.50 - 349.75	349.63	N 80W 50S	明瞭割れ目	0.0	P -n/h/j	粘土化	
1689	349.80 - 350.05	349.93	N 83E 73S	明瞭割れ目	0.0	P -n	粘土介在	
1690	350.24 - 350.43	350.34	N 44W 55SW	明瞭割れ目	0.0	P -n/h/j	-	
1691	350.42 - 350.61	350.52	N 39W 59SW	明瞭割れ目	0.0	P -n	-	
1692	350.93 - 351.10	351.02	N 63W 50S	明瞭割れ目	0.0	P -n	-	
1693	350.96 - 351.14	351.05	N 73W 28S	ヘーカラック	0.0	I -n	-	
1694	351.02 - 351.16	351.09	N 54E 38NW	ヘーカラック	0.0	P -n	-	
1695	351.48 - 351.58	351.53	N 39W 36SW	破碎帶上盤	0.0	P -n/h/j	粘土化	
1696	352.62 - 352.75	352.69	N 42W 29SW	ヘーカラック	0.0	P -n/h/j	白色鉱物脈	

コメント：断層破碎帯を境にして、浅部は低角度の割れ目が発達し、深部は高角度の割れ目へと割れ目形態が変化してことが予想される。

◎N O. 6 深度378.50～381.50m 間

ボアホールテレビによる解析

表 4.2.3 ボアホールテレビ割れ目一覧表 (6)

番号	上端深度 - 下端深度	中間深度	走向	傾斜	区分	幅(mm)	形状	状態
1835	378.76 - 379.40	379.08	N 29W 78E	明瞭割れ目	0.0	P -n	酸化汚染	
1836	379.00 - 379.98	379.49	N 40W 84NE	明瞭割れ目	0.0	P -n	-	

コメント：高角度の割れ目が発達し、明瞭な割れ目を示す。

◎N O. 7 深度413.00～416.00m 間

ボアホールテレビによる解析 無

コメント：割れ目の発達は認められない。

◎N.O. 8 深度185.50～188.50m 間

ボアホールテレビによる解析

表 4.2.3 ボアホールテレビ割れ目一覧表 (7)

番号	上端深度-下端深度	中間深度	走向	傾斜	区分	幅(mm)	形状	状態
2085	462.09 - 462.18	462.14	N 33W	58NE	ハーフクラック	0.0	P-n	-
2086	462.41 - 462.57	462.49	N 37E	46NW	明瞭割れ目	0.0	P-n/h/j	白色鉱物脈
2087	462.73 - 462.75	462.74	N 43E	16SE	明瞭割れ目	0.0	P-n/h/j	酸化汚染
2088	462.84 - 462.94	462.89	N 89W	28S	明瞭割れ目	0.0	P-n	-
2089	462.93 - 463.37	463.15	N 46E	78NW	破碎帯上盤	0.0	P-n/h/j	粘土化
2090	465.65 - 467.78	466.72	N 28E	60W	明瞭割れ目	0.0	P-n/h/j	粘土化
2091	466.70 - 467.15	466.93	N 50E	76NW	破碎帯下盤	0.0	P-n/h/j	粘土化

コメント：断層破碎帯及び高角度の割れ目が発達し、明瞭な割れ目である。

◎N.O. 9 深度472.00～475.00m 間

ボアホールテレビによる解析

表 4.2.3 ボアホールテレビ割れ目一覧表 (8)

番号	上端深度-下端深度	中間深度	走向	傾斜	区分	幅(mm)	形状	状態
2092	471.98 - 472.17	472.08	N 56E	69NW	明瞭割れ目	0.0	P-n/h/j	不明
2093	477.23 - 477.31	477.27	N 16W	38E	明瞭割れ目	0.0	P-n/h/j	不明

コメント：高角度の割れ目が認められが、割れ目は密着している。

◎N.O. 10 深度472.00～475.00m 間

ボアホールテレビによる解析

表 4.2.3 ボアホールテレビ割れ目一覧表 (9)

番号	上端深度-下端深度	中間深度	走向	傾斜	区分	幅(mm)	形状	状態
2107	494.80 - 495.06	494.93	N 58E	71SE	明瞭割れ目	0.0	P-n/h/j	不明

コメント：高角度の割れ目が認められが、割れ目は密着している。

5. 物理検層データと割れ目（透水性）との比較・検討

物理検層データと割れ目（透水性）との比較・検討について、次のような分類に従って説明する。

5.1 AN-1号孔の物理検層データと原位置透水試験結果の比較・検討

多孔質岩盤で発達してきた中性子検層、音波検層、電気検層、密度検層のデータの解析手法が、花崗岩のような火成岩の岩盤にも応用出来るかどうか検討する為に、原位置透水試験結果のデータと物理検層データを比較・検討した。

手法としては、孔隙率やフォーメーションファクターを算出する式を示し、また、カナダ（URL）での亀裂性岩盤を対象としたKatsube et al., 1987 の式を用い、それぞれの検層データから透水係数を算出し、原位置透水試験結果と比較・検討した。

5.1.1 中性子検層データから算出した透水性について

まず測定結果より、孔隙率（ ϕ ）を算出する。（図5.1.1）

それから(1)式(Archie, 1942)を用いてフォーメーションファクタFを算出する。ここで、mを2.0と仮定した。

$$F = \frac{1}{\phi^m} \quad (\text{Archie, 1942}) \quad (1)$$

更に、(2)式(Schlumberger, 1972)および(3)式(Katsube et al., 1985)

$$k = \frac{1}{F} \left[\frac{\phi}{1-\phi} \right]^2 \frac{1}{S_w} \quad (\text{Schlumberger, 1972}) \quad (2)$$

$$k = 2.51 \times 10^7 \times F^{-2.22} \quad (\text{Katsube et al., 1985}) \quad (3)$$

から求めた透水係数（k）と原位置透水試験結果を比較・検討した。尚、検

層データから算出した透水係数は、原位置透水試験区間長の平均を示す。

図5.1.2は、(1)と(2)式から算出した透水係数のクロスプロット図を示す。

図5.1.3は、(1)と(3)式から算出した透水係数のクロスプロット図を示す。

更に、(7)式(Katsube et al., 1985)を用いてフォーメーションファクタを算出

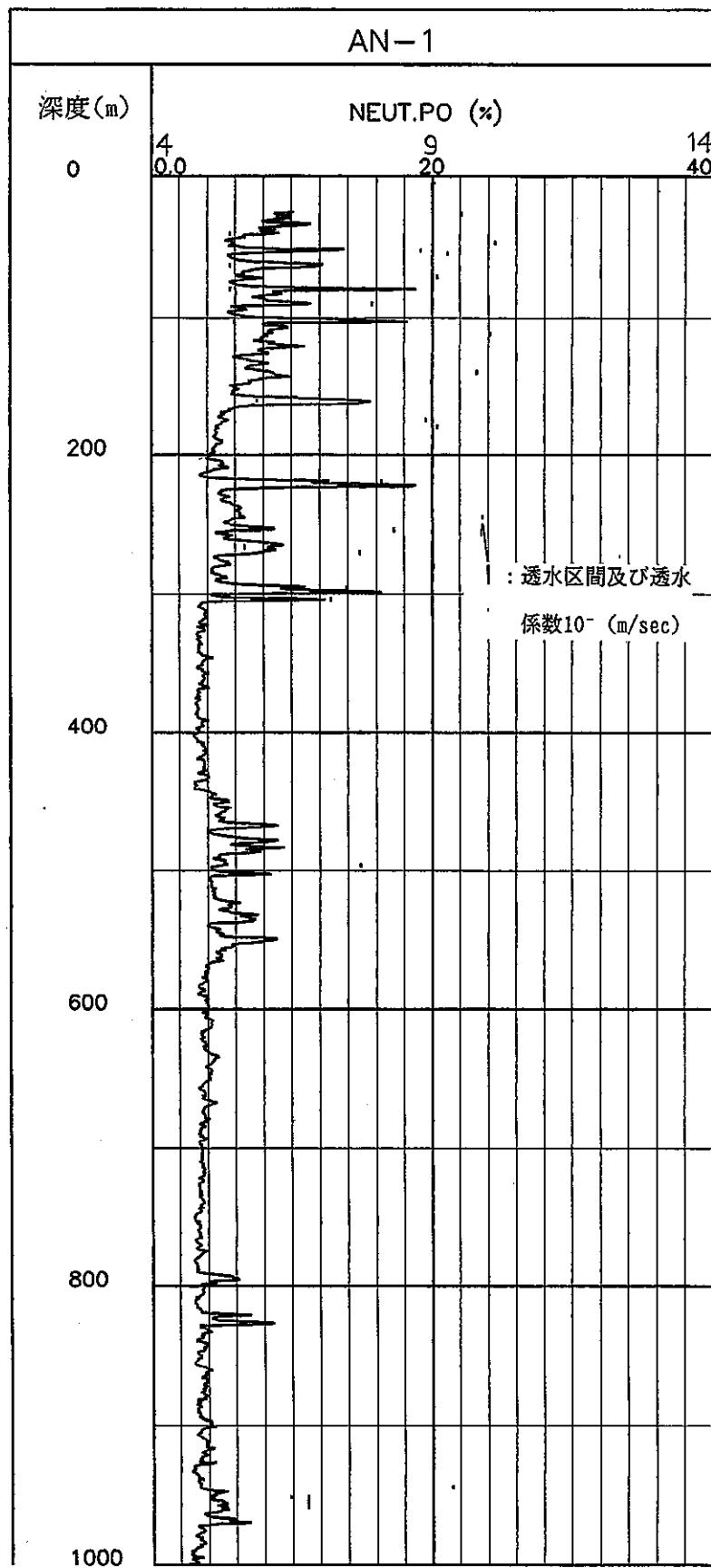


図 5.1.1 中性子検層孔隙率変化図 (AN-1)

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER

Log Scale

孔隙率 ϕ	フリーダイショナル	透水係数 K
中性子	(1) 式	(2) 式

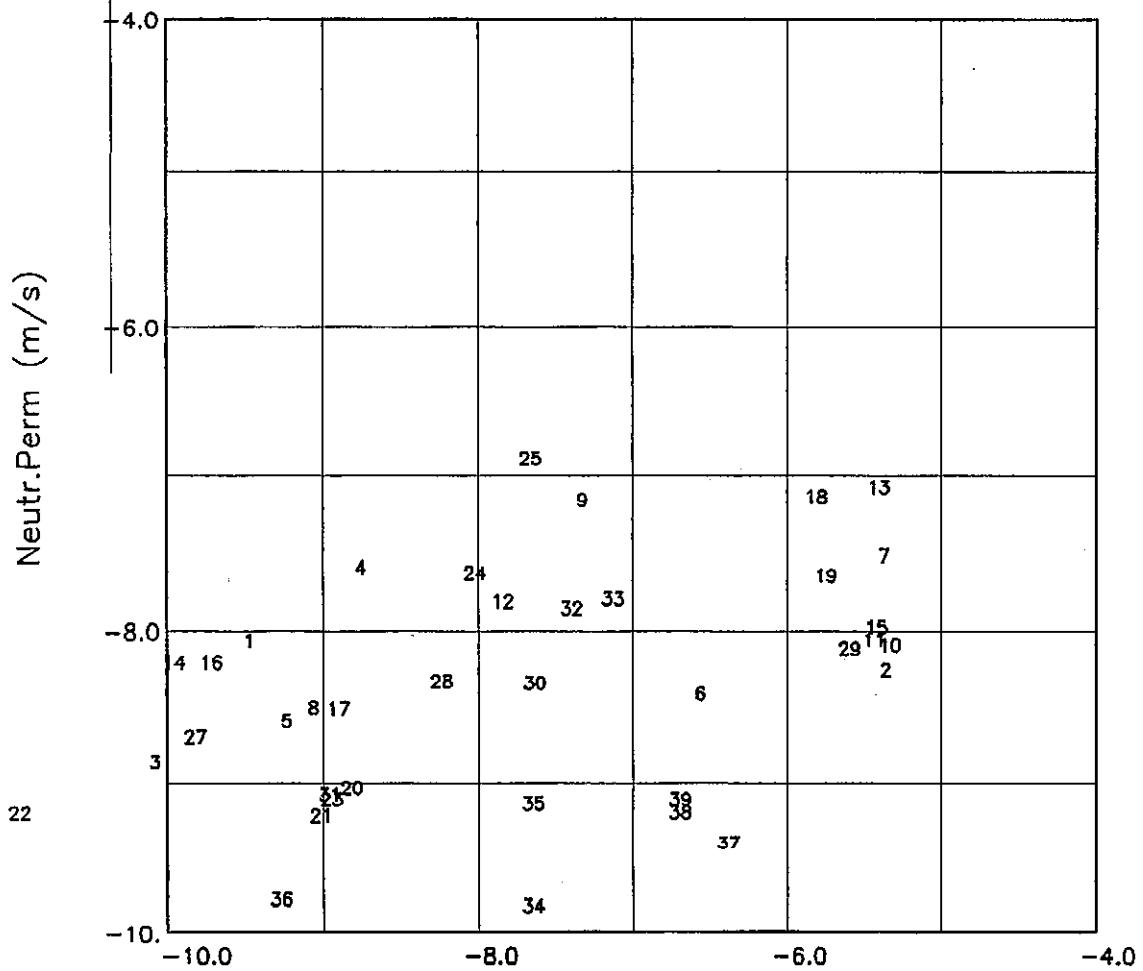


図 5.1.2 透水係数クロスプロット図 (N L Schlumberger(1)-(2))

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER

Log Scale

孔隙率 ϕ	フネーションファクタ	透水係数 K
中性子	(1) 式	(3) 式

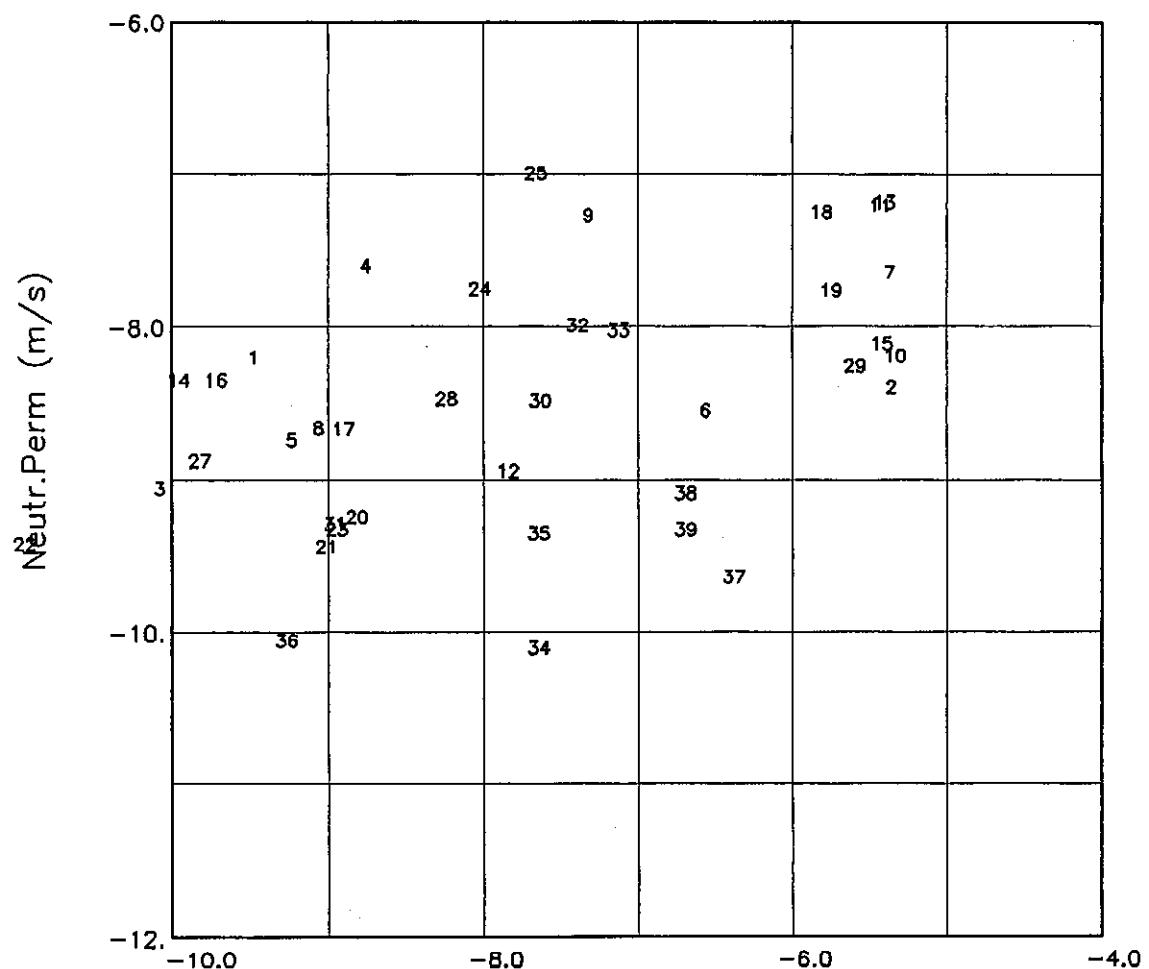


図 5.1.3 透水係数クロスプロット図 (N L Katsube(1)-(3))

し、(3) 式から透水係数を算出した。

$$F = 5.5 \times 10^{-3} \div \phi^{2.21} \quad (\text{Katube et.}, 1985) \quad (7)$$

その結果について、図5.1.4 に原位置透水試験結果と共にクロスプロット図として示す。尚、クロスプロット図上に表示した番号は、表4.2.2 の原位置透水試験結果一覧表のNoと一致している。

5.1.2 音波検層データから算出した透水性について

まず測定結果と、(Wyllie, 1952) の(4) 式を用いて孔隙率を算出した。

(Wyllie, 1952) の(4) 式は下記の通りである。(図5.1.5 ~図5.1.6)

$$\phi_{SL} = \frac{\Delta T - \Delta T_{ma}}{\Delta T_f - \Delta T_{ma}} \quad (\text{Wyllie, 1952}) \quad (4)$$

ϕ_{SL} : 音波検層による孔隙率

ΔT : 1m間のP波走行時間

ΔT_{ma} : マトリックスの1m間のP波走行時間

ΔT_f : 水の1m間のP波走行時間

次に、(5) 式(Raymer, 1952) を用いて孔隙率を算出する。

$$\phi_{SL} = -a - (a^2 + \frac{\Delta T}{\Delta T_{ma}} - 1)^{1/2} \quad (\text{Raymer, 1952}) \quad (5)$$

$$a = \frac{\Delta T_{ma}}{2 \times \Delta T_f} - 1$$

更に、(6) 式を用いて孔隙率を算出する。

$$\phi_{SL} = 1 - [\frac{\Delta T}{\Delta T_{ma}}]^{1/x} \quad (6)$$

X=1.6 for GRANITE

それぞれ算出された孔隙率から、(1) 式(Archie, 1942) を用いてフォーメーションファクタを算出し、それから、(2) 式(Schlumberger, 1972) および(3) 式(Katube et. , 1985) を用いて透水係数を算出する。

(Wyllie, 1952) の式と(1) と(2) 式から算出した透水係数のクロスプロットを図5.1.7 に示す。

AN-1

TOUSUIT-LOG.PER

Log Scale

孔隙率 ϕ	フオーナイショングラフタ	透水係数 K
中性子	(7) 式	(8) 式

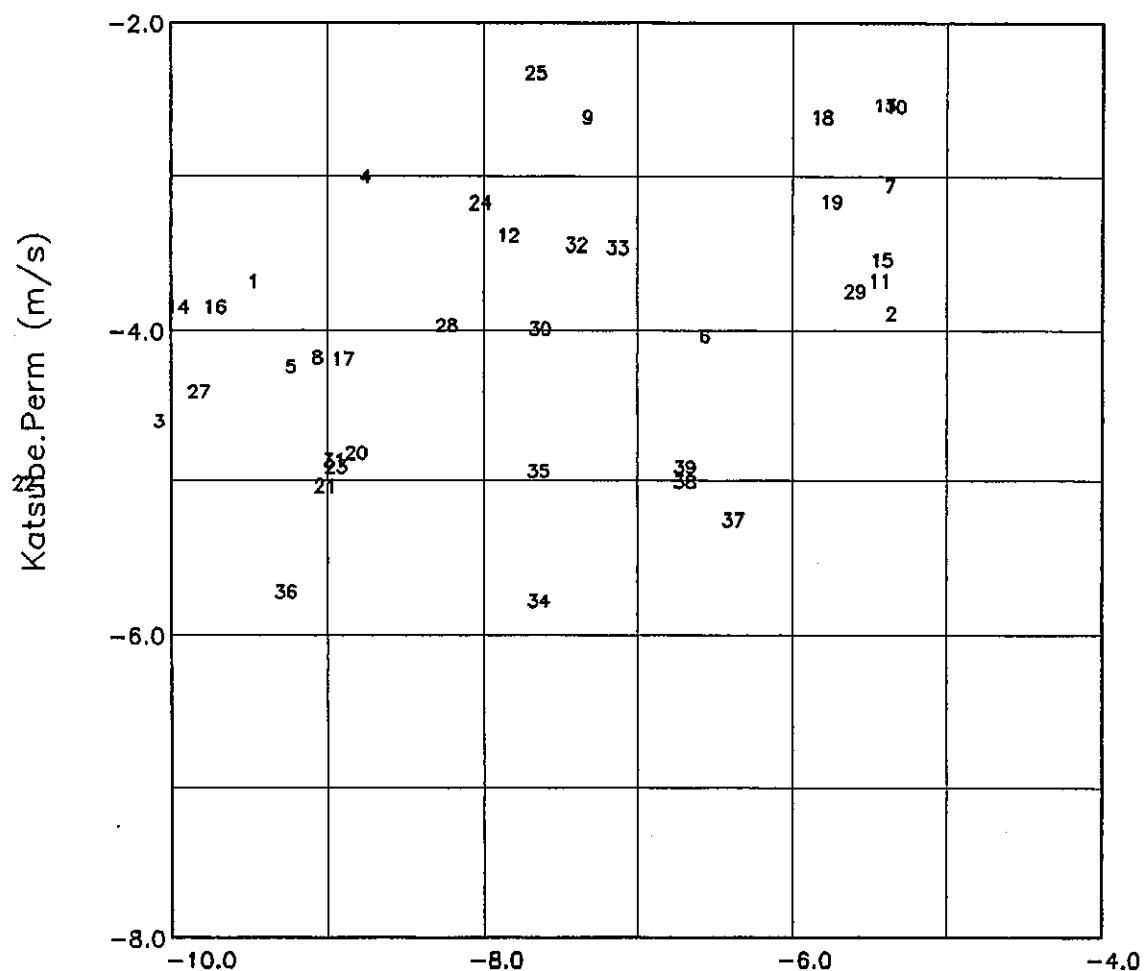


図 5.1.4 透水係数クロスプロット図 (N L Katsube(7)-(3))

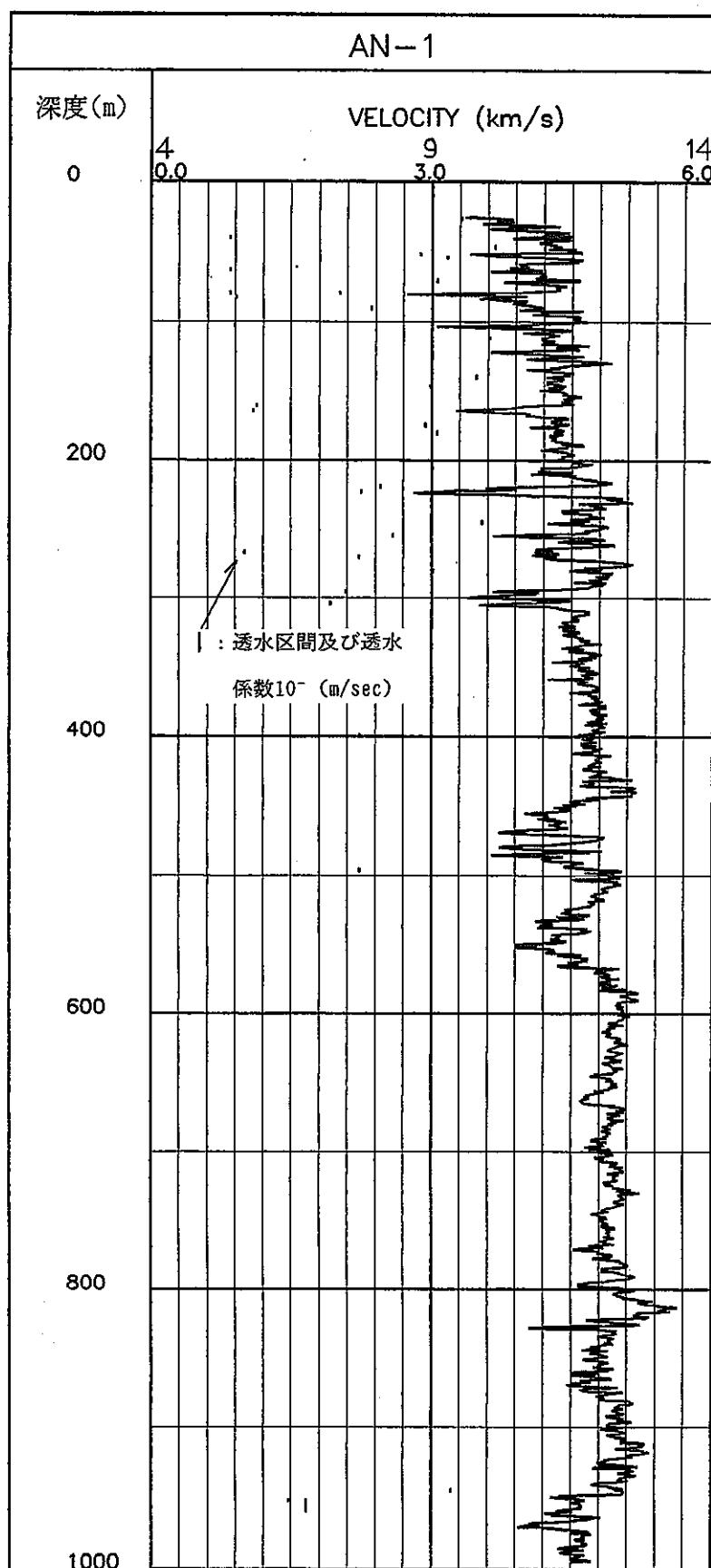


図 5.1.5 音波検層速度変化図 (AN-1)

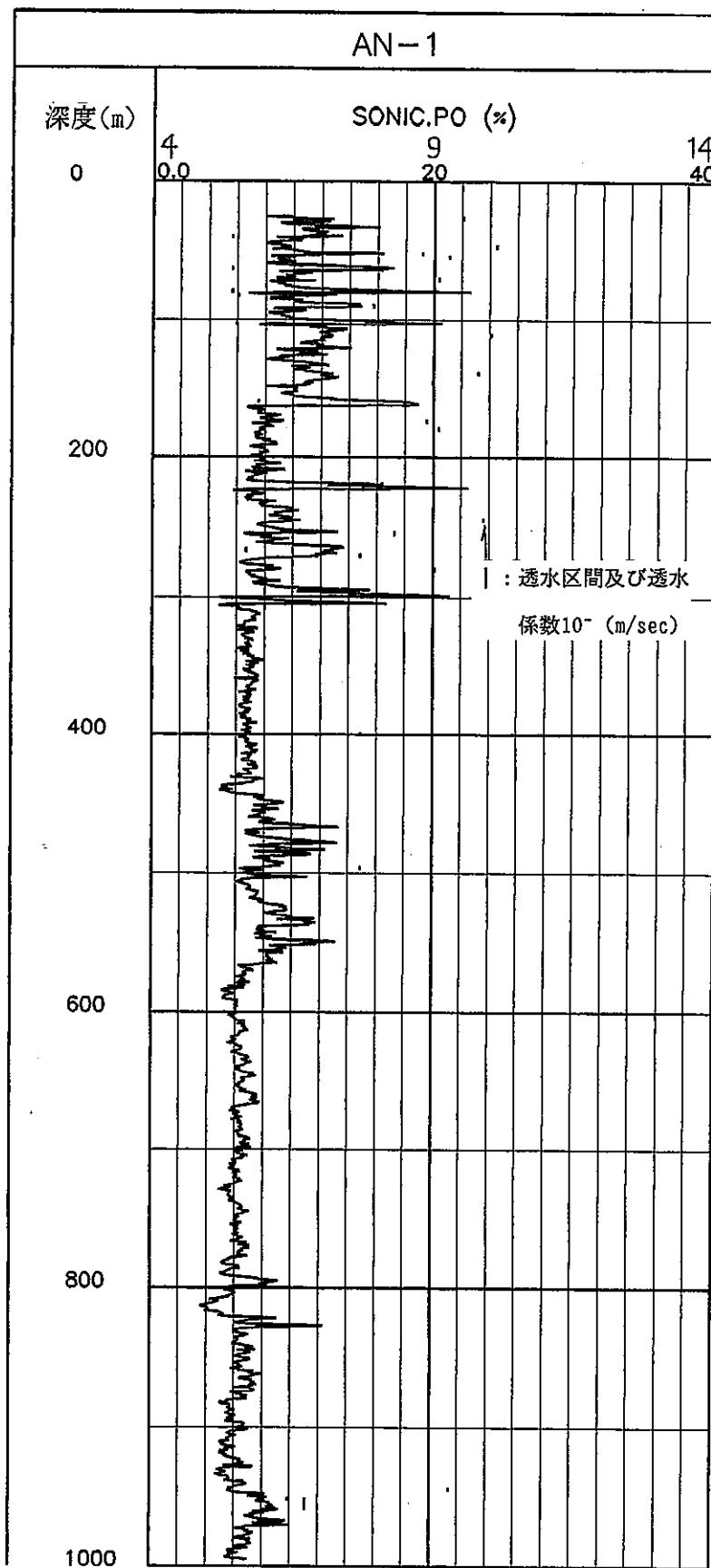


図 5.1.6 音波検層孔隙率変化図 (AN-1)

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER (Wyllie.F-SL)

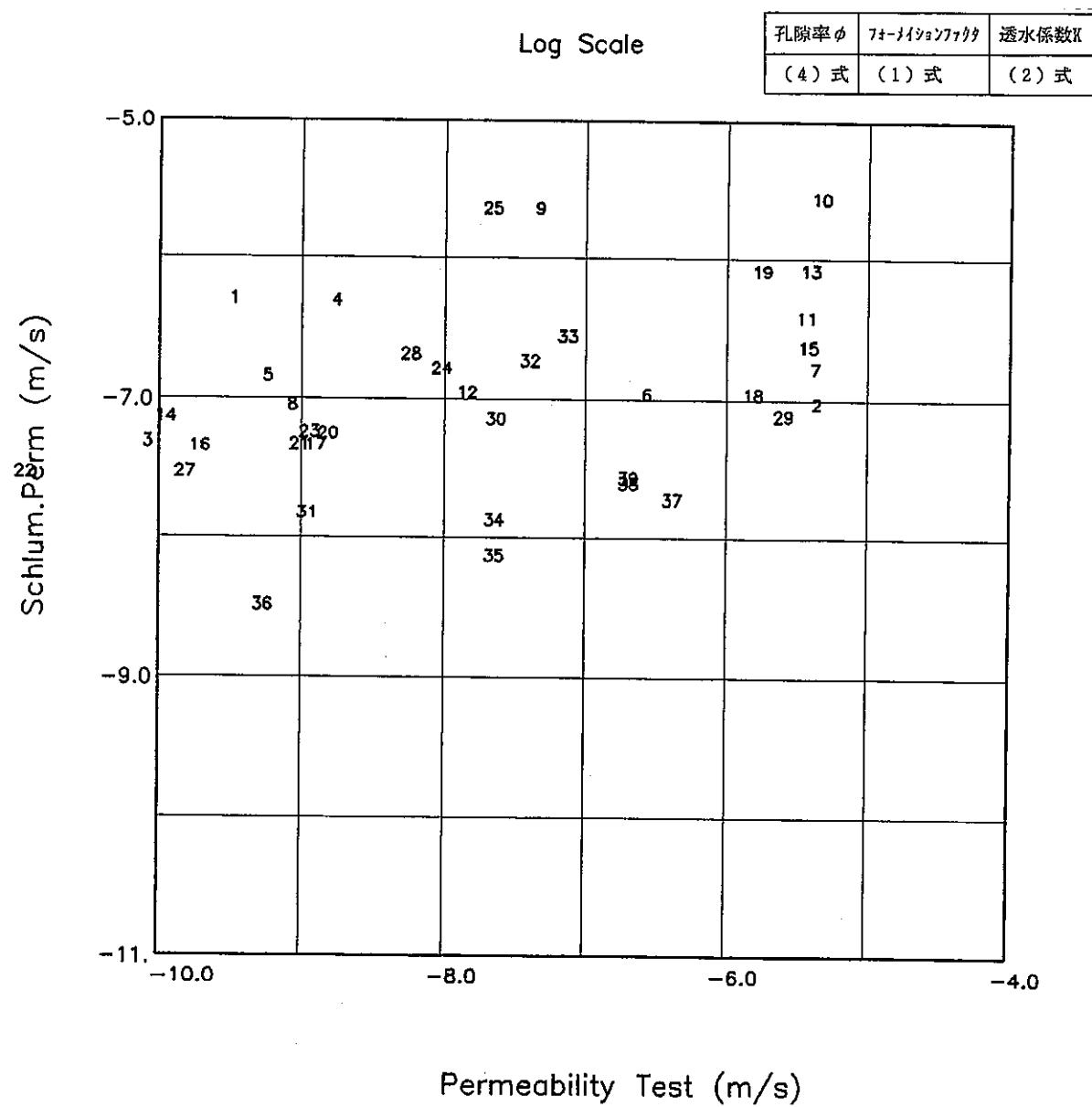


図 5.1.7 透水係数クロスプロット図 (SWyillie(4)-(1)-(2))

(Raymer, 1952) と(5) 式から算出した透水係数のクロスプロットを図5.1.8～図5.1.11に示す。

更に、(7) 式(Katsube et., 1985)を用いてフォーメーションファクタを算出し、(3) 式から透水係数を算出した。

$$F = 5.5 \times 10^{-3} \div \phi^{2.21} \quad (\text{Katsube et., 1985}) \quad (7)$$

その結果を図5.1.12に、クロスプロット図として示す。

5.1.3 密度検層データから算出した透水性について

測定結果を図5.1.13に図示し、そのデータをもとに (10) 式(Schlumberger, 1972) より孔隙率を算出する。

$$\phi_D = \frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma_m - \gamma_f} \quad (\text{Schlumberger, 1972}) \quad (10)$$

ϕ_D : 密度検層による孔隙率(%)

γ_m : 岩盤の気質密度 (g/cm^3)

γ : 検層による密度 (g/cm^3)

γ_f : 水の密度 (g/cm^3)

更に(1) 式を用いてフォーメーションファクタを算出し、(2) 式(Schlumberger, 1972) および(3) 式(Katsube et., 1985)から求めた透水係数(k)と原位置透水試験結果について比較・検討した。

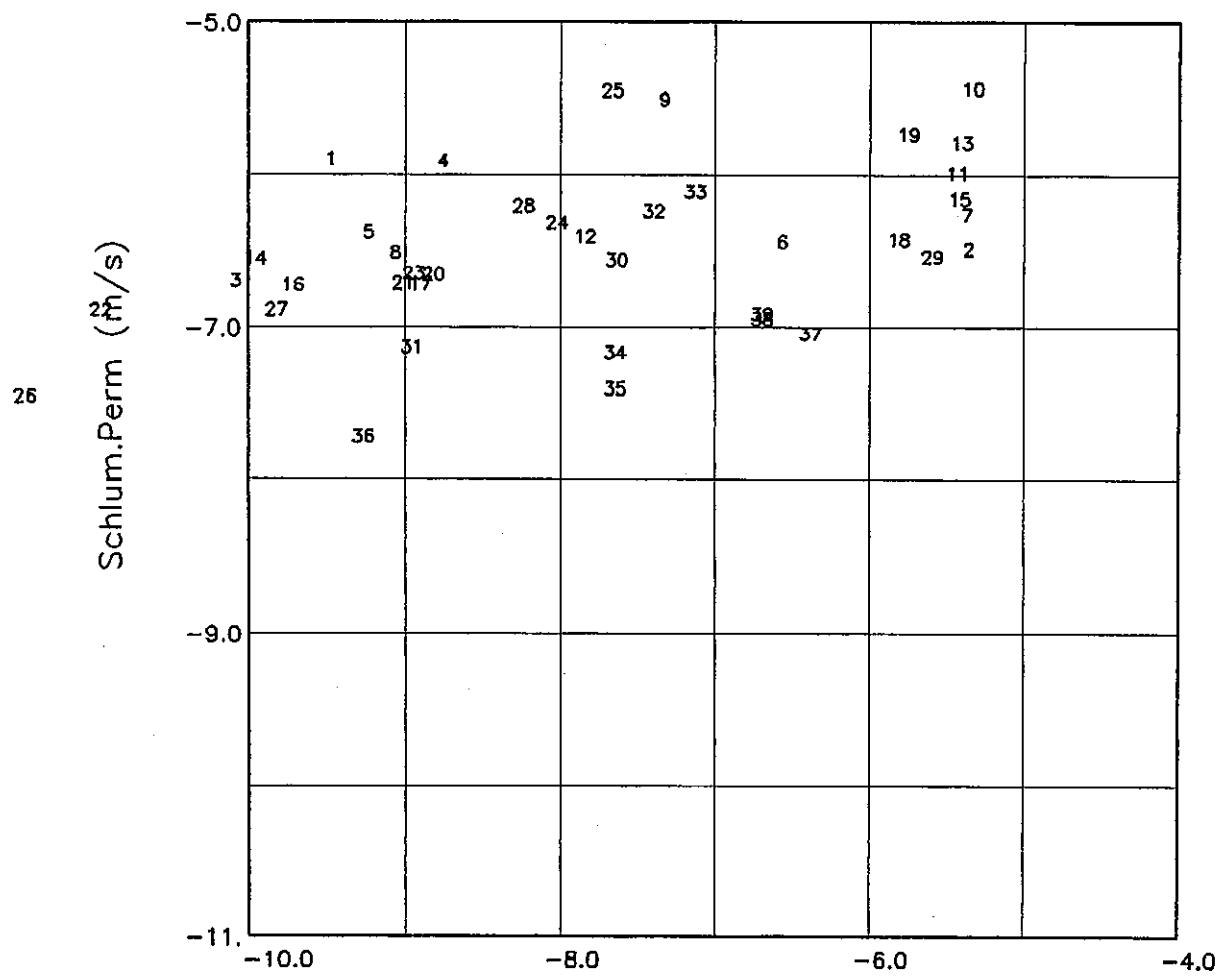
それらを図5.1.14～図5.1.15にクロスプロット図として示した。

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER (Raymer,F-SL)

Log Scale

孔隙率 ϕ	フナーリジョンファクタ	透水係数 K
(5) 式	(1) 式	(2) 式



Permeability Test (m/s)

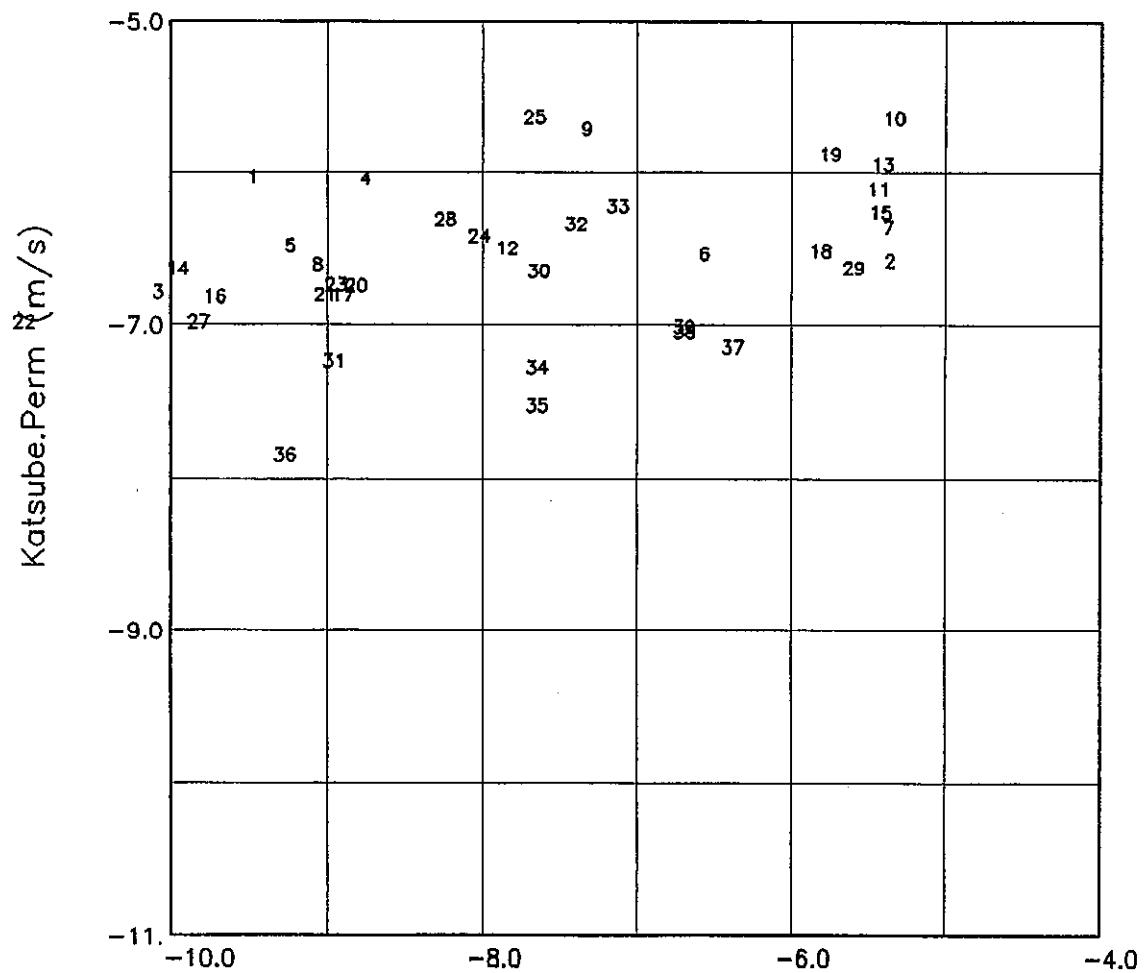
図 5.1.8 透水係数クロスプロット図 (S L Raymer(5)-(1)-(2))

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER (Raymer.F-SL)

Log Scale

孔隙率 ϕ	ナーベイショソフタカ	透水係数 K
(5) 式	(1) 式	(3) 式



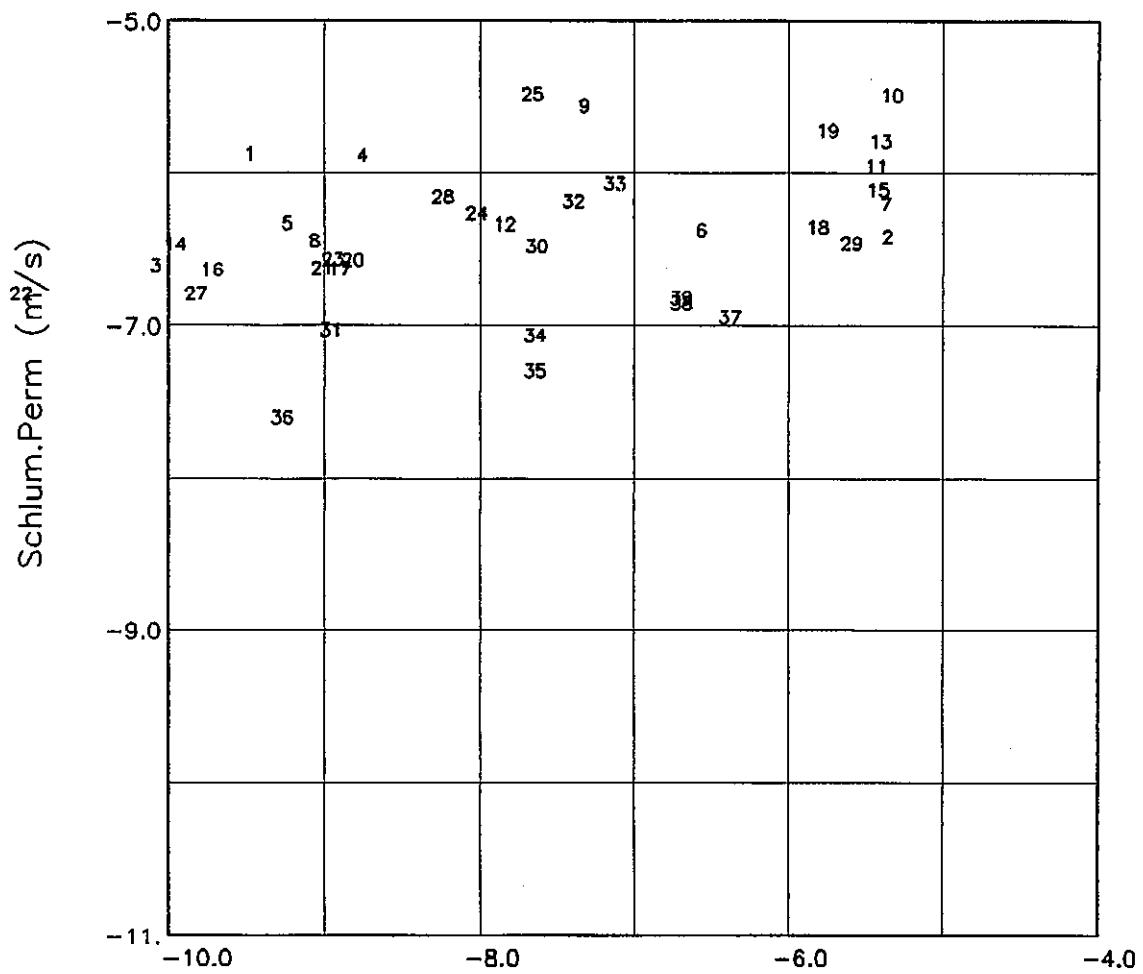
Permeability Test (m/s)

図 5.1.9 透水係数クロスプロット図 (S L Raymer(5)-(1)-(3))

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER (Acous.F-SL)

Log Scale	孔隙率 ϕ	フオーメーションファクタ	透水係数 K
(6) 式	(1) 式	(2) 式	



Permeability Test (m/s)

図 5.1.10 透水係数クロスプロット図 (S L Acous. (6)-(1)-(2))

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER (Acous.F-SL)

Log Scale

孔隙率 ϕ	フライショングラクタ	透水係数 K
(6) 式	(1) 式	(3) 式

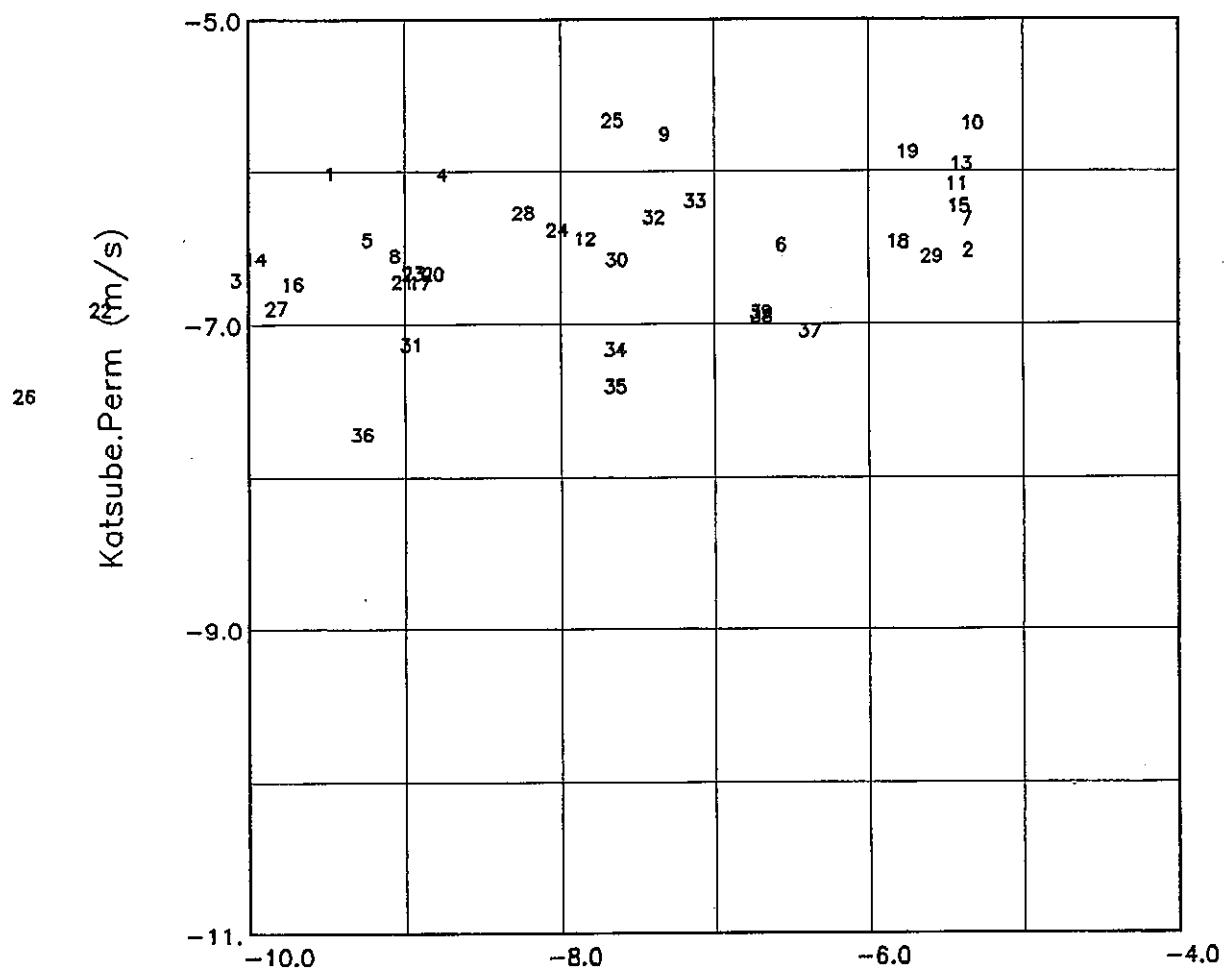


図 5.1.11 透水係数クロスプロット図 (S L Acous. (6)-(1)-(3))

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER (Sonic.Po)

Log Scale

孔隙率 ϕ	フオーメーションフクダ	透水係数 K
(4) 式	(7) 式	(3) 式

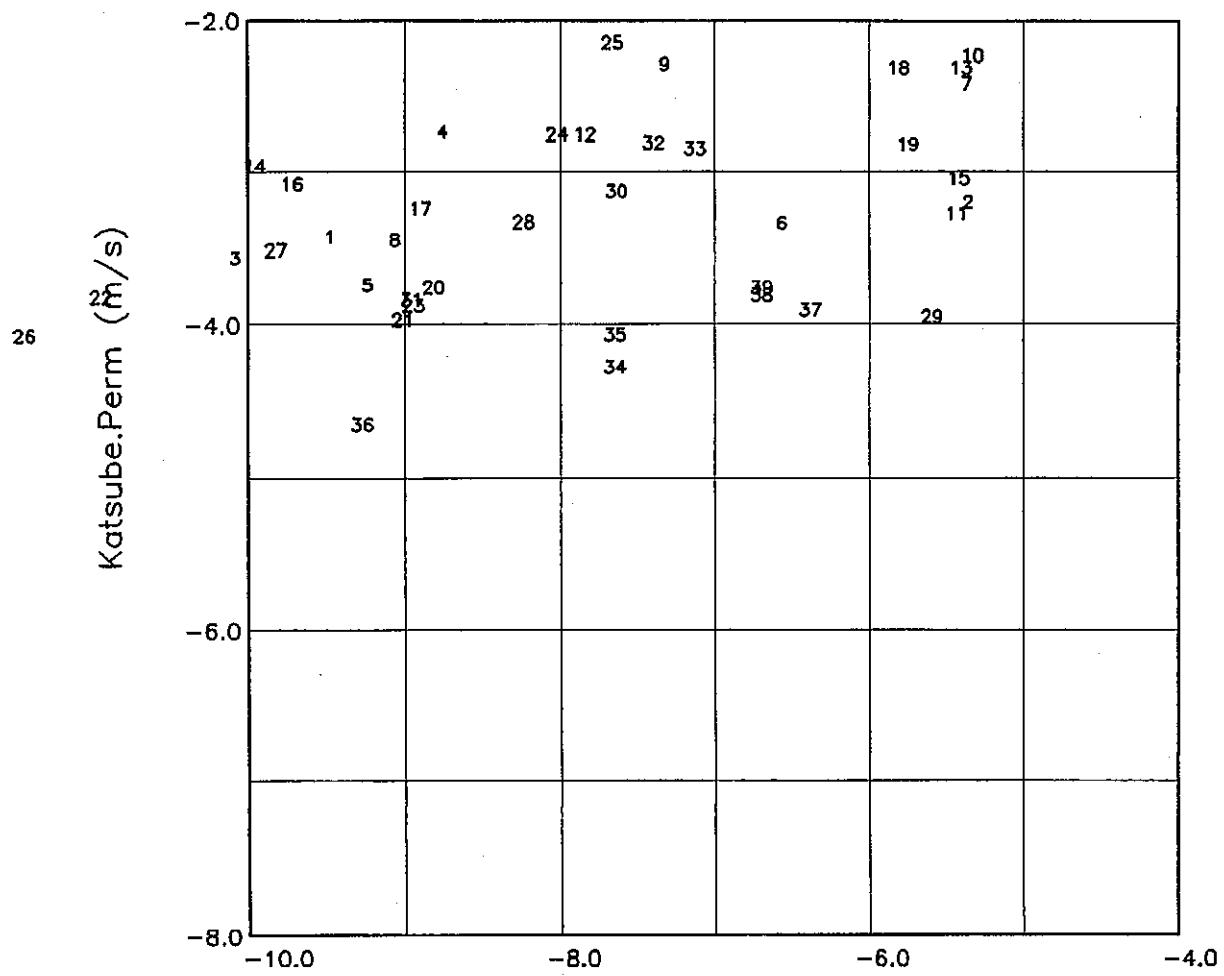


図 5.1.12 透水係数クロスプロット図 (S L Katsube(7)-(3))

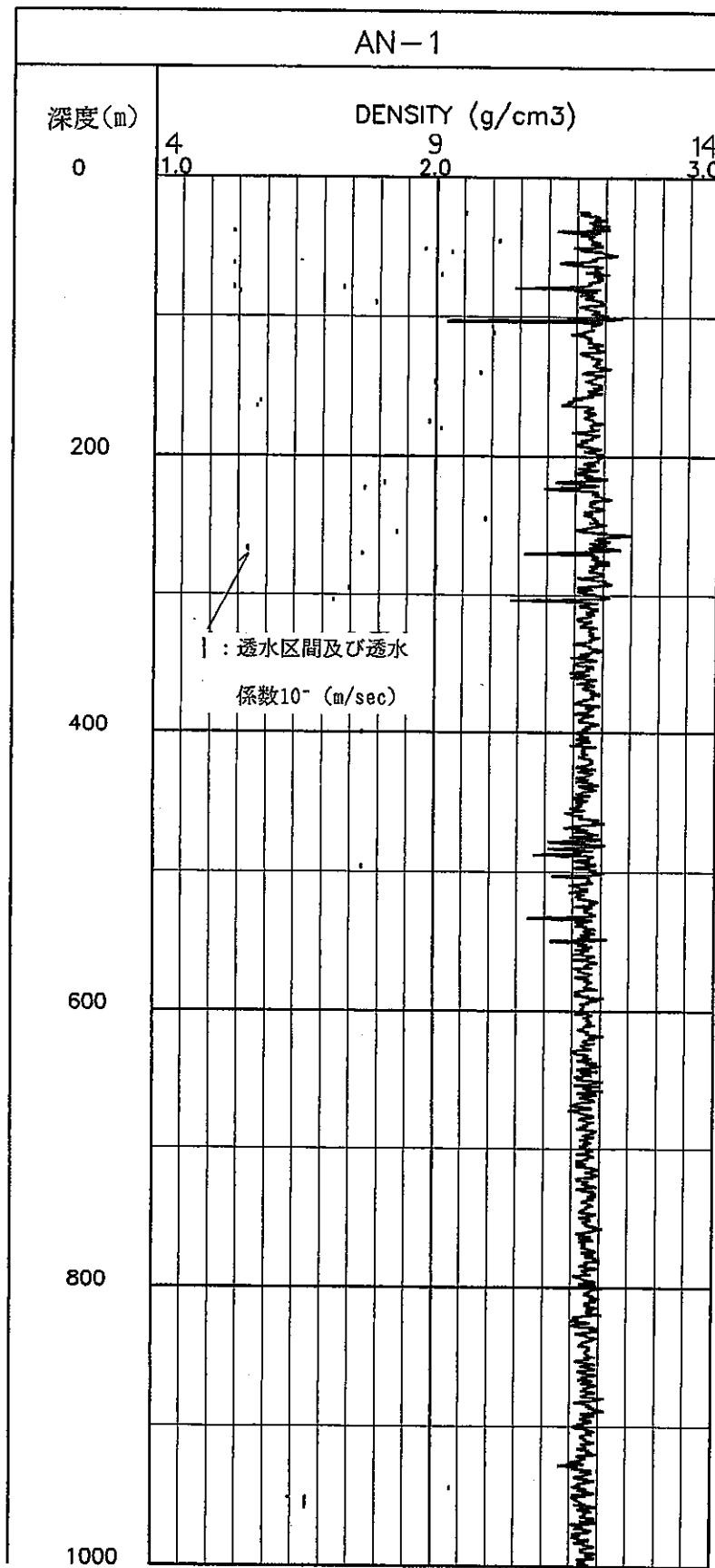


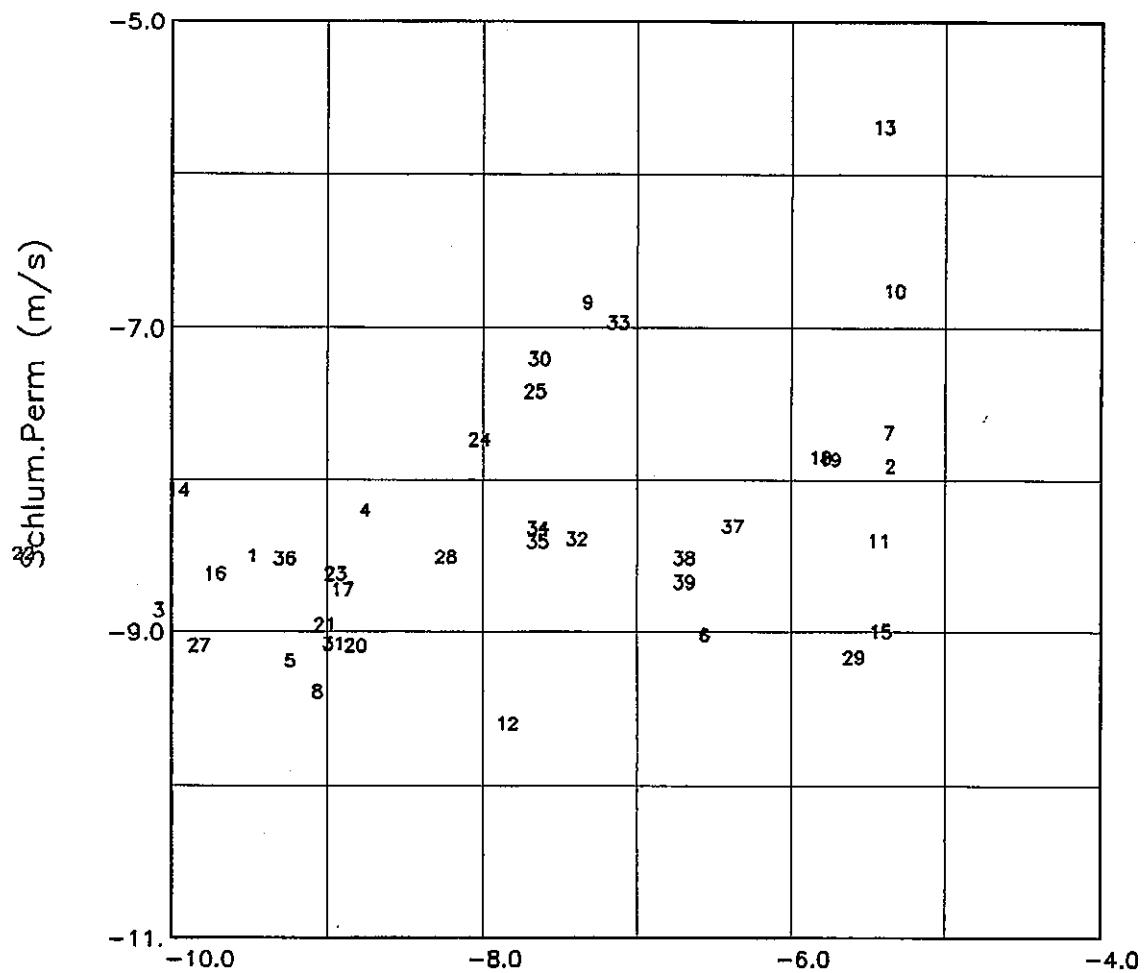
図 5.1.13 密度検層変化図 (AN-1)

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER (Density Po)

Log Scale

孔隙率 ϕ	チャーチソン法	透水係数 K
(10) 式	(1) 式	(2) 式



Permeability Test (m/s)

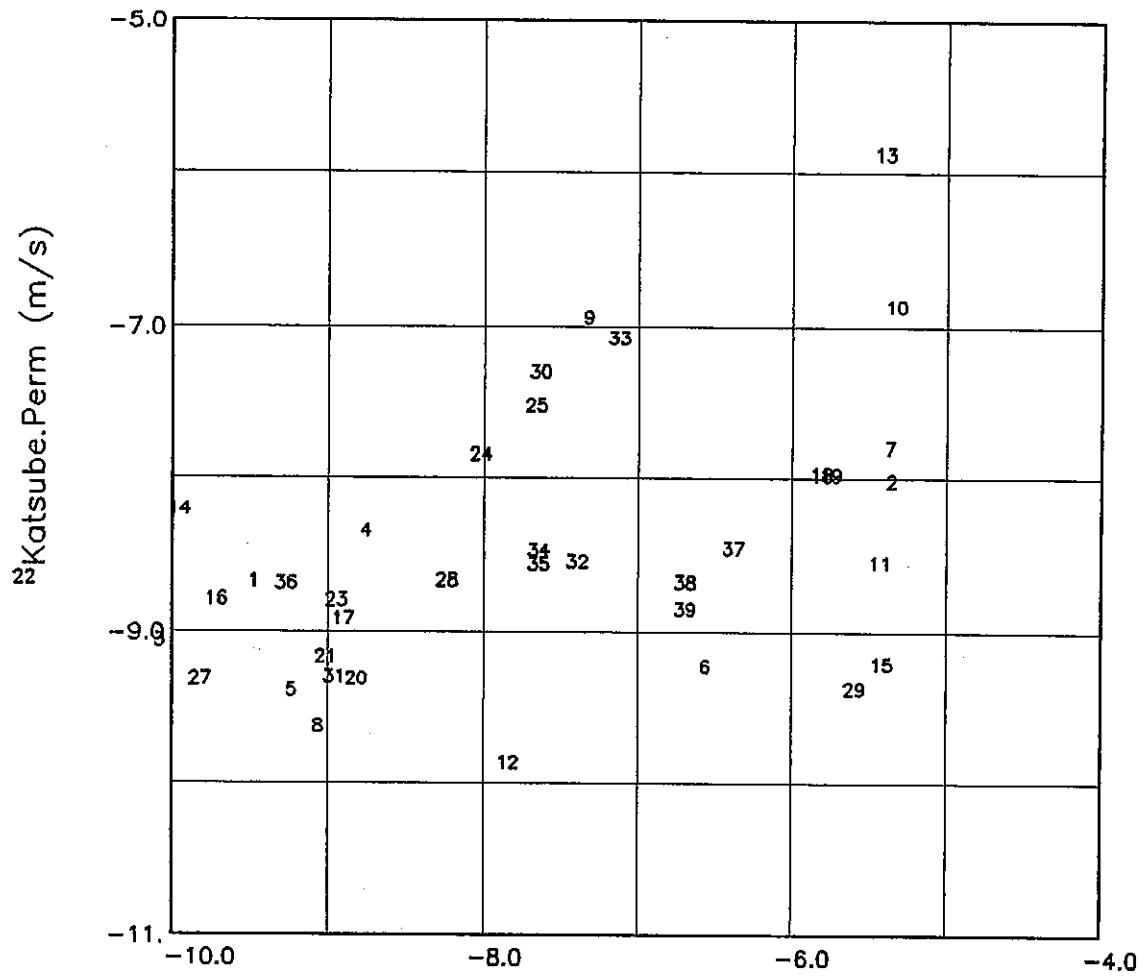
図 5.1.14 透水係数クロスプロット図 (F D Schlumberger(10)-(1)-(2))

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER (Density Po)

Log Scale

孔隙率φ	フオーメイションファクタ	透水係数K
(10)式	(1)式	(3)式



Permeability Test (m/s)

図 5.1.15 透水係数クロスプロット図-(1) (FDKatsube (10)-(1)-(3))

5.1.4 電気検層 (25cm, 100cm ルマル比抵抗, 2.5cm マイクロ比抵抗) の透水性について
検層データを基に測定区間全域について真の比抵抗値を連続的に算出し、そ
れぞれ図5.1.16～図5.1.18に示した。

更に、真の比抵抗値を用いて(8)式(Schlumberger, 1972)よりフォーメーシ
ョンファクタを算出した。

$$F = \text{真の比抵抗値} / \text{孔内水の比抵抗値} \quad (\text{Schlumberger, 1972}) \quad (8)$$

次に、密度検層データを利用して、 $F = 5.5 \times 10^{-3} \div \phi^{2.21}$ (Katube et al., 1985) (7) 式からフォーメーションファクタを算出し、それぞれのフォーメー
ションファクタから(9)式(Katube et al., 1987)を用いて透水係数を算出した。

$$k = 4.1 \times 10^{-7} \left[\frac{F_D}{F_F} \right]^{-1.06} \quad (\text{Katube et al., 1987}) \quad (9)$$

F_D : 密度検層から算出したフォーメーションファクター

F_F : 電気検層から算出したフォーメーションファクター

その結果を、図5.1.19に示す。

次に、中性子検層データと密度検層データから算出した孔隙率(図5.1.20)
を基に、(7)と(3)式を用いて、透水係数を算出し、その結果をクロスプロッ
ト図として図5.1.21に示した。

更に、音波検層データと密度検層データから算出した孔隙率(図5.1.22)に
ついても、(7)と(3)式より透水係数を算出し、そのクロスプロット図を
図5.1.23に示した。又、検層解析ソフトを利用して算出した孔隙率を図5.1.24
に、(7)と(3)式より算出した透水係数のクロスプロット図を図5.1.25に示
した。

以上の結果、得られたそれぞれの孔隙率、フォーメーションファクタや透水
係数について考察し、検層データから求めた透水係数と原位置透水試験結果か
ら、その相関性について検討する為の水理地質学的特性の評価手法の一部とし

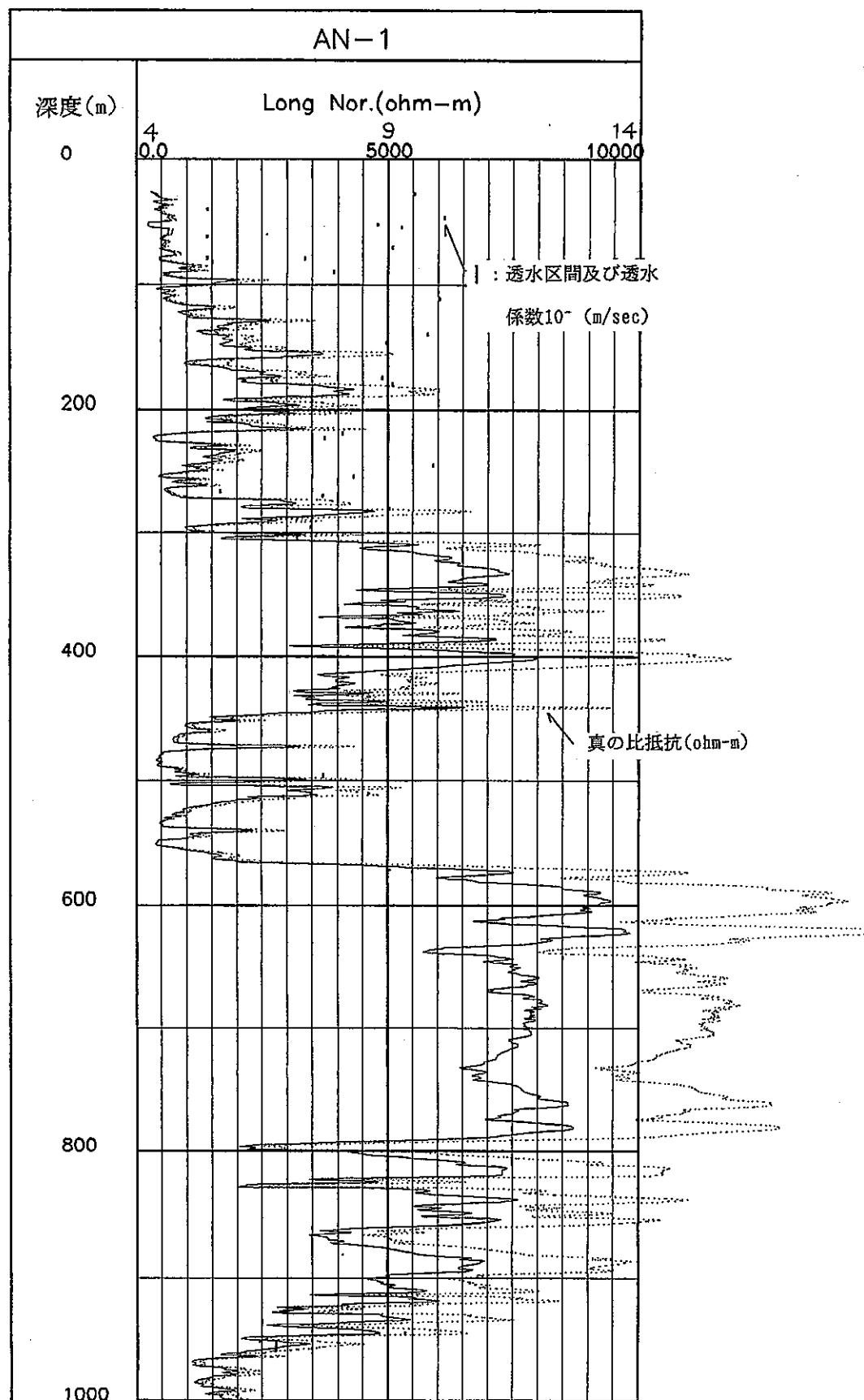


図 5.1.16 電気検層(LONG NORMAL) 変化図 (AN-1)

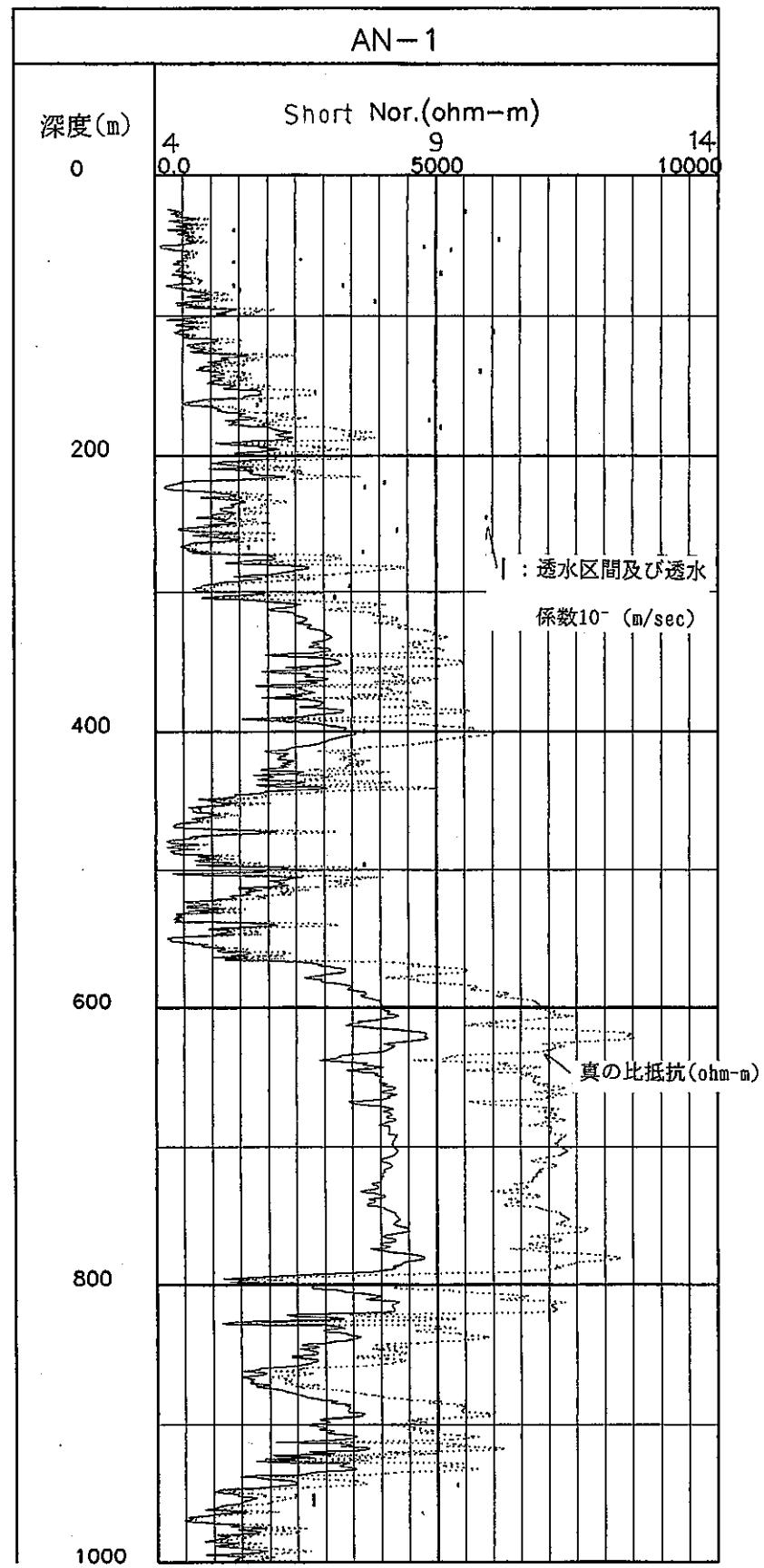


図 5.1.17 電気検層(SHORT NORMAL)変化図 (AN-1)

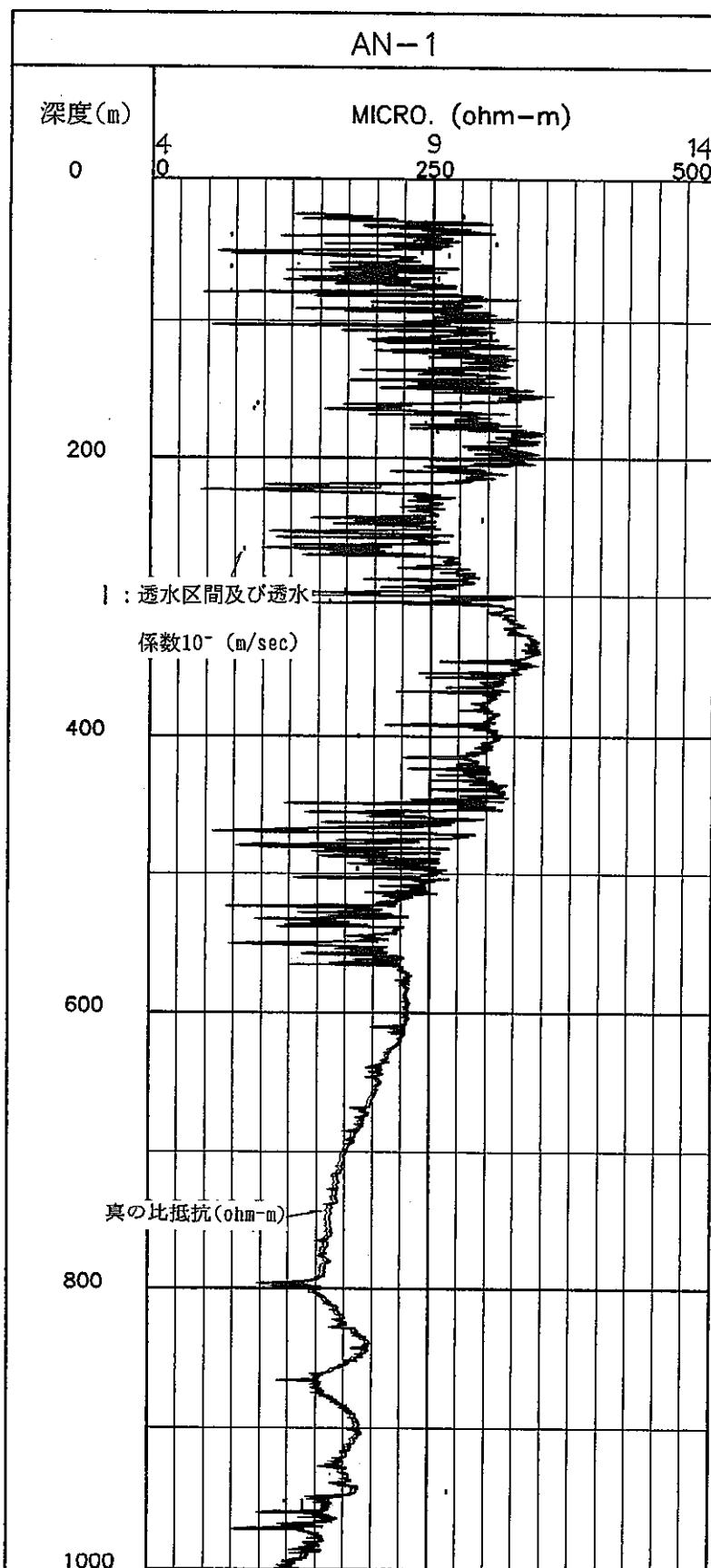


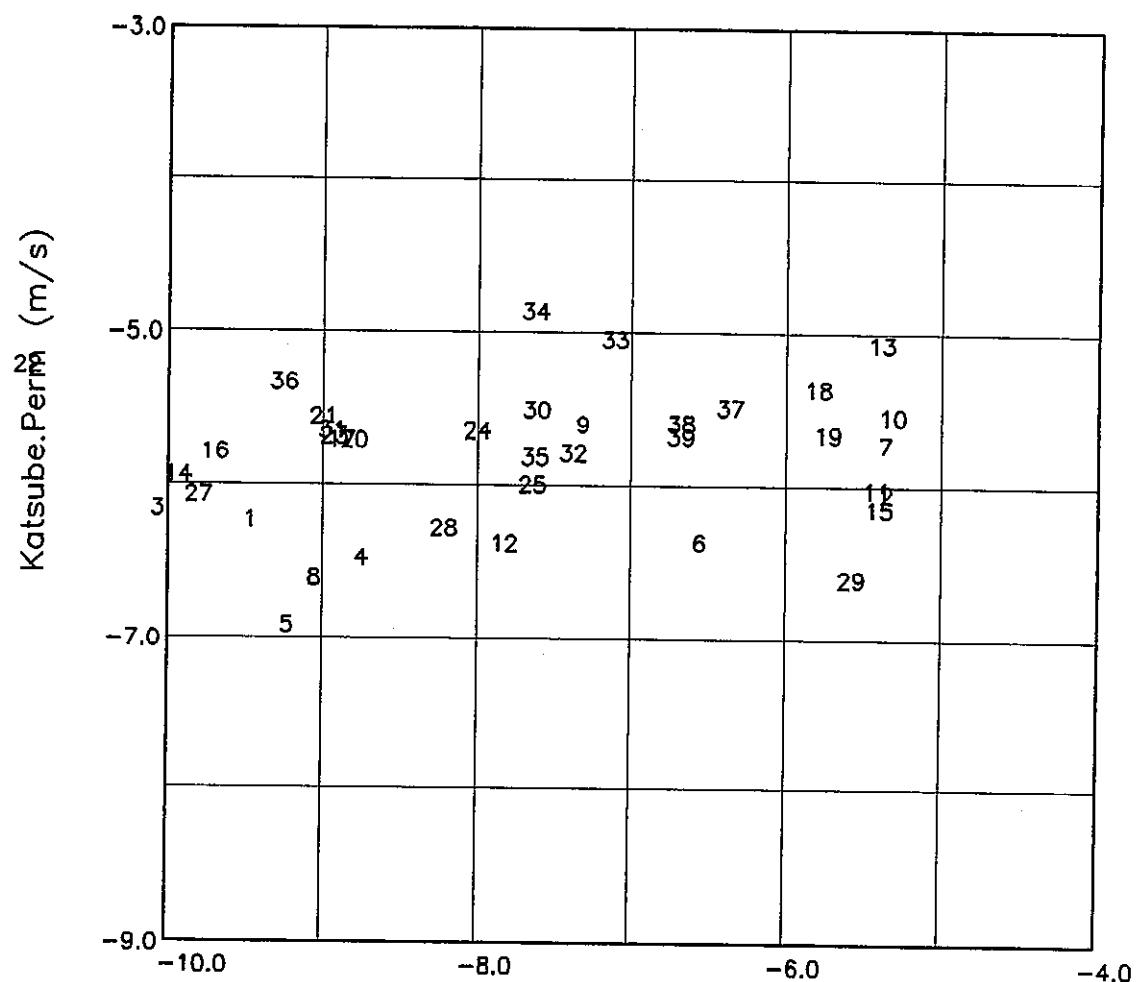
図 5.1.18 電気検層(MICRO NORMAL)変化図 (AN-1)

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER

Log Scale

孔隙率 ϕ	フオ-ノイショソフアク	透水係数 K
(10) 式	(7), (8) 式	(9) 式



Permeability Test (m/s)

図 5.1.19 透水係数クロスプロット図 (DL/ES Katsube)

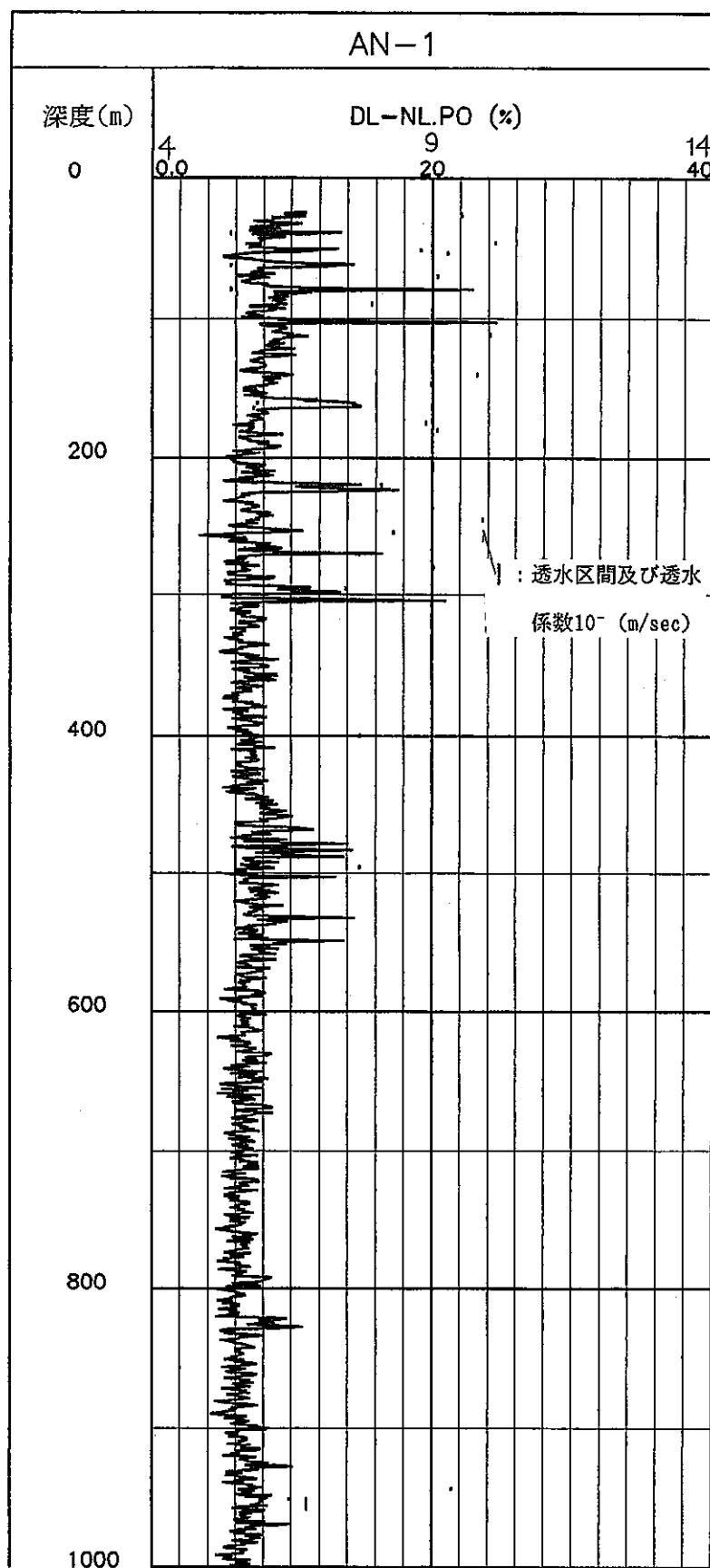


図 5.1.20 中性子-密度検層孔隙率変化図 (AN-1)

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER (DL-NL.PO)

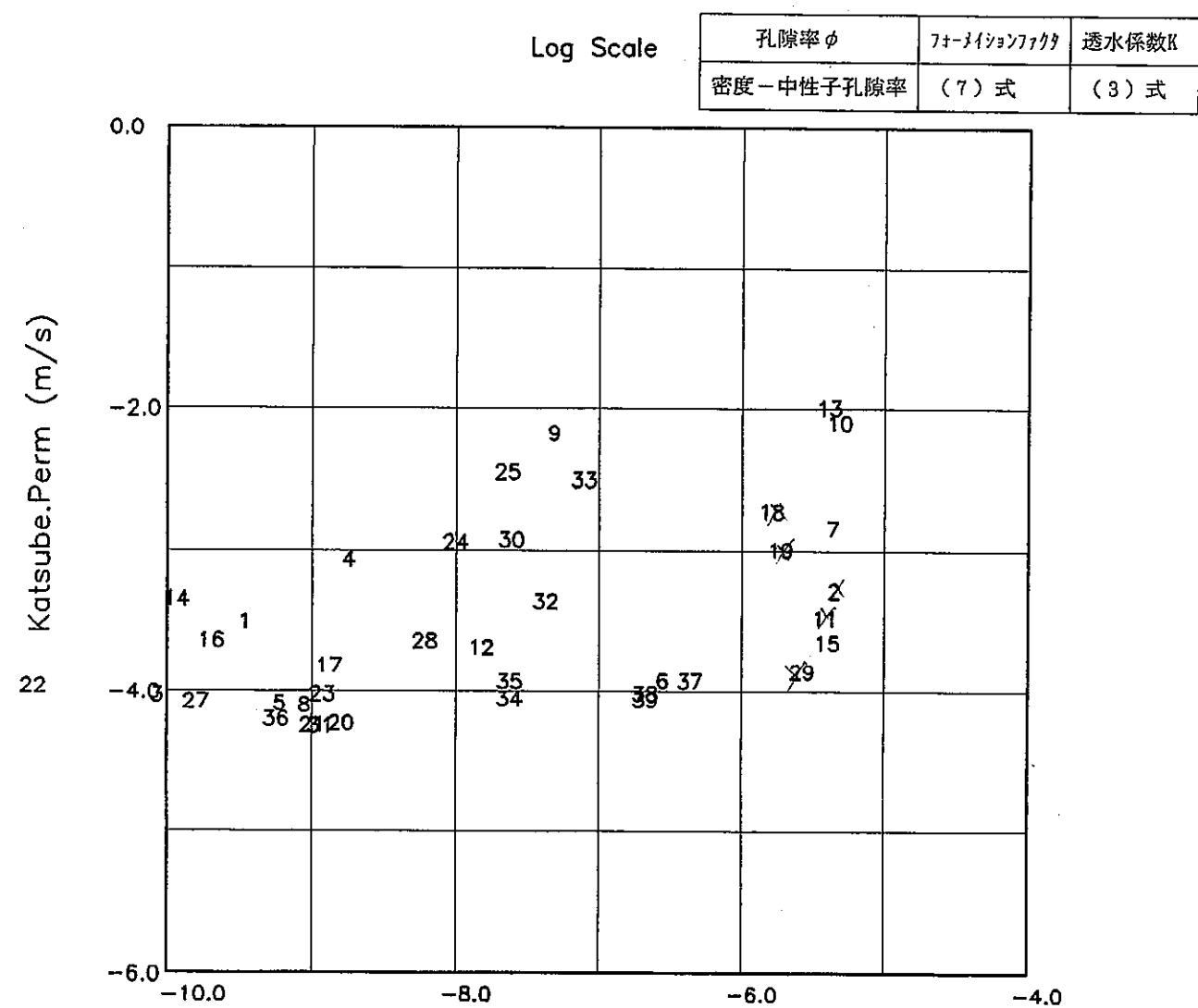


図 5.1.21 透水係数クロスプロット図 (DL-NL Katsube (7)-(3))

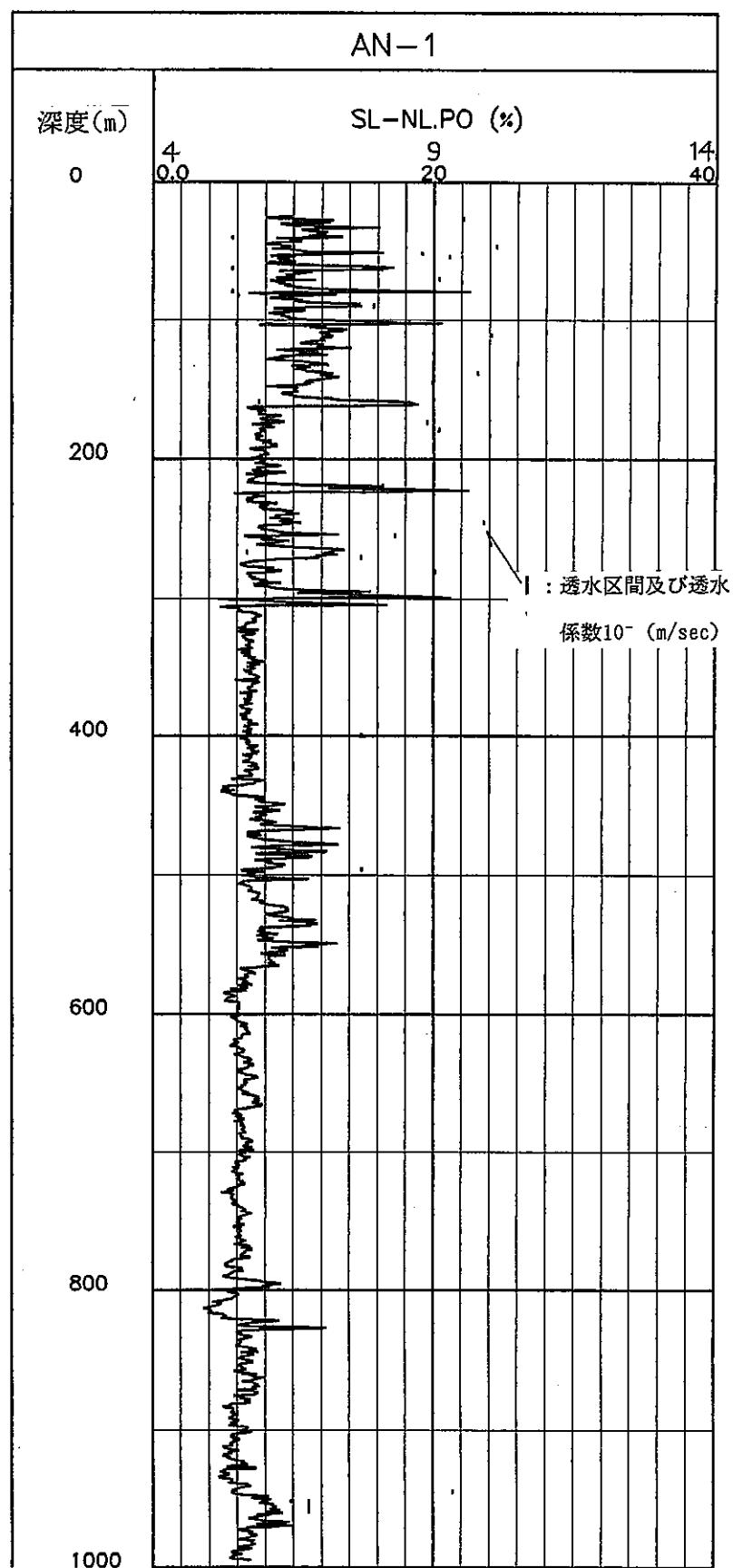


図 5.1.22 中性子－音波検層孔隙率変化図 (AN-1)

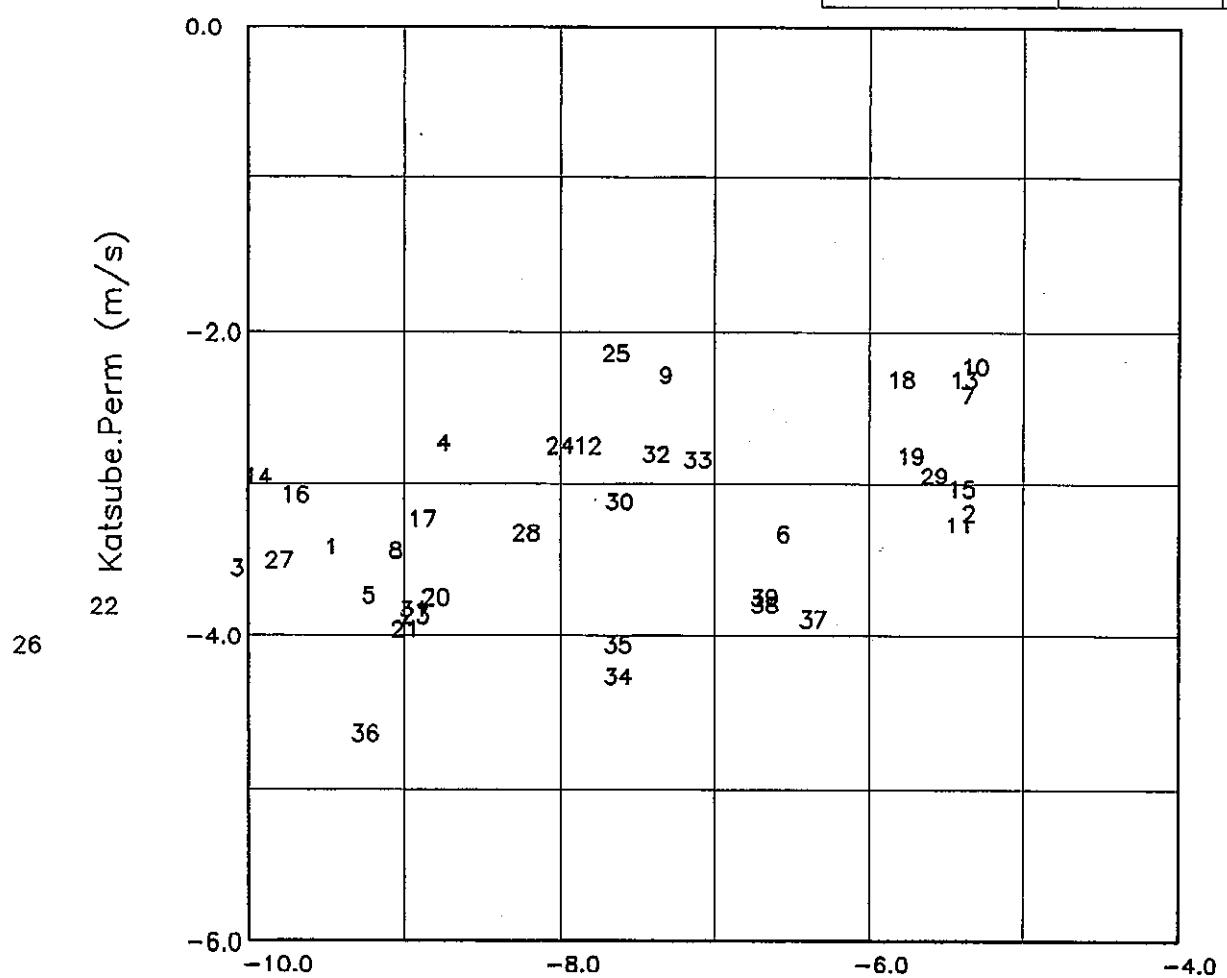
音波

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER (SL-NL.PO)

Log Scale

孔隙率 ϕ	フネーションフクタ	透水係数 K
音波-中性子孔隙率	(7) 式	(3) 式



Permeability Test (m/s)

図 5.1.23 透水係数クロスプロット図 (SL-NL Katsube (7)-(3))

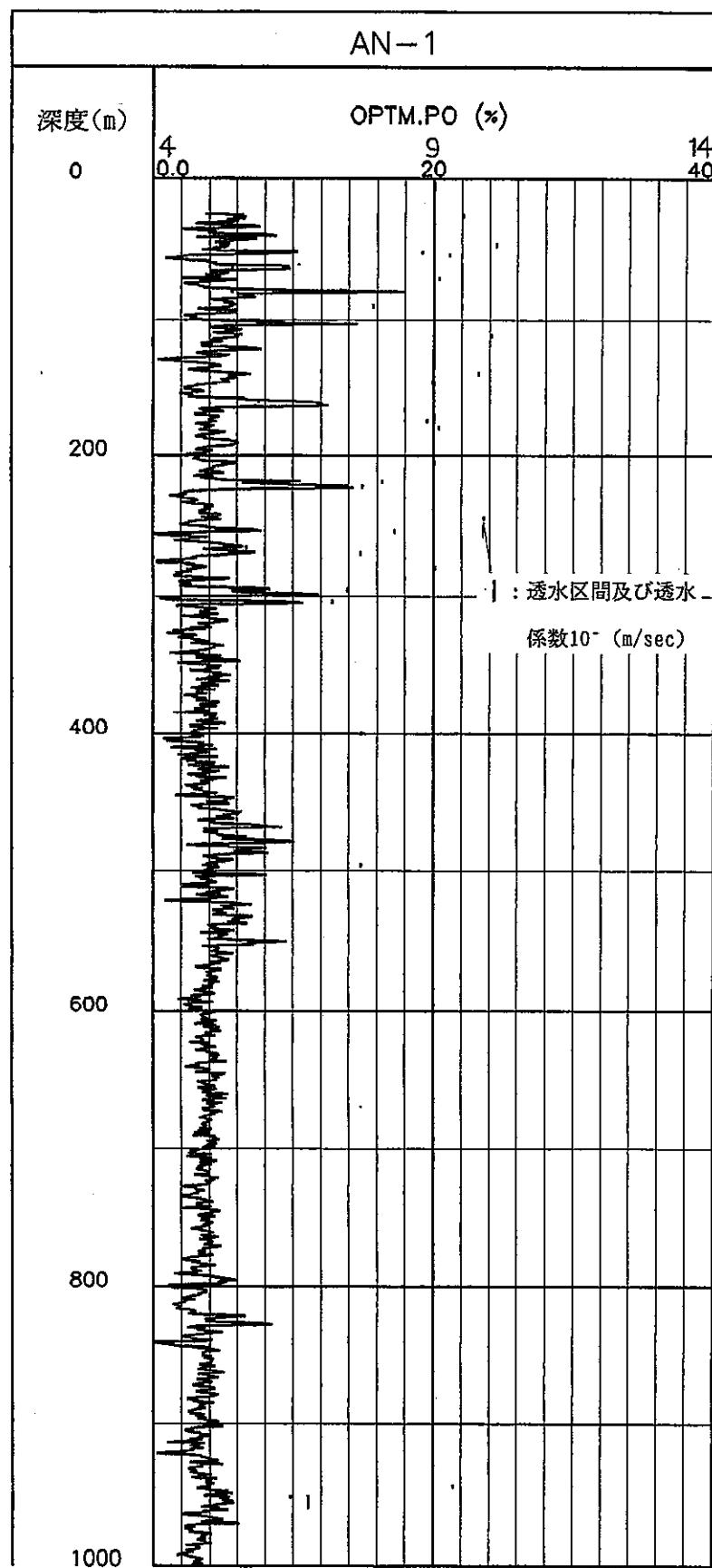


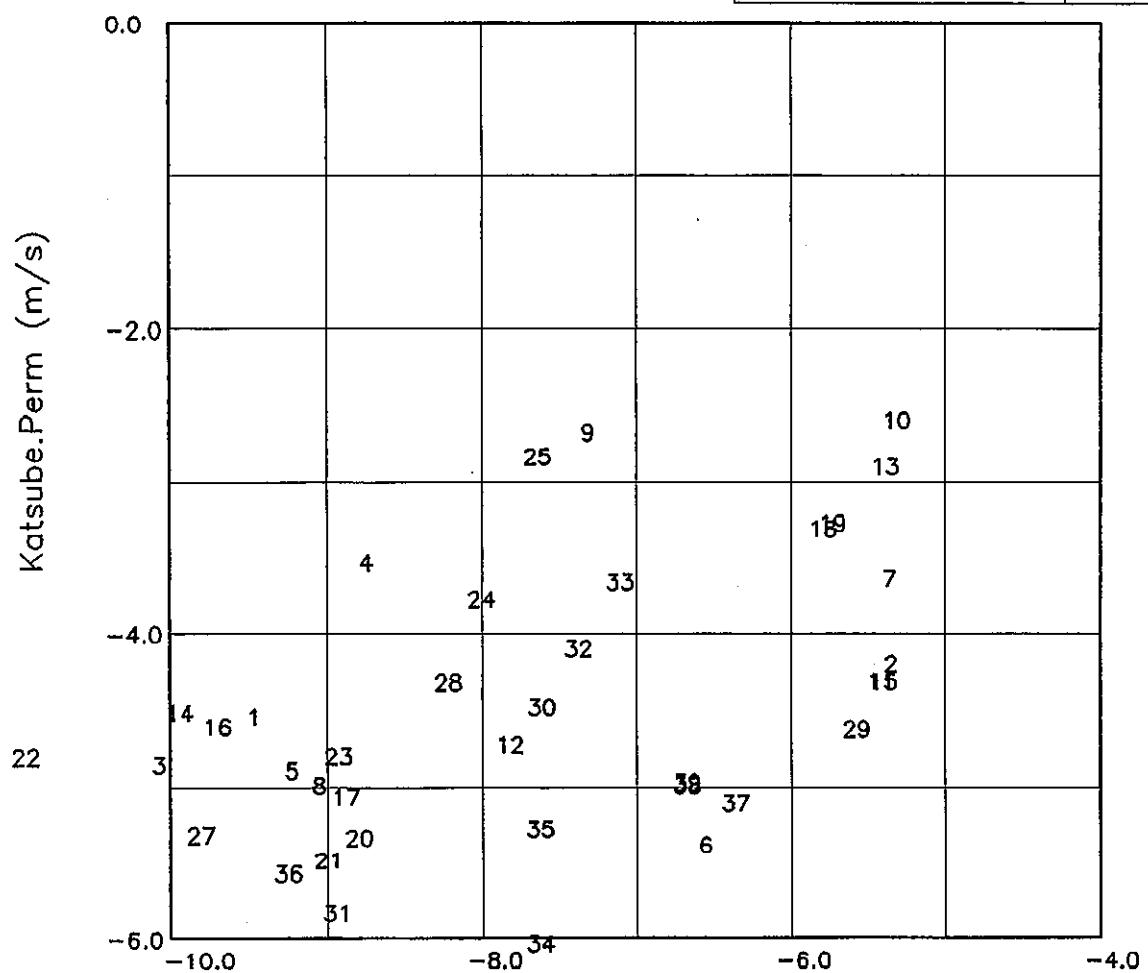
図 5.1.24 岩相解析孔隙率変化図 (AN-1)

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER (OPTM.PO)

Log Scale

孔隙率 ϕ	フォーメーションファクタ	透水係数 K
岩相解析より算出した孔隙率	(7) 式	(3) 式



26

Permeability Test (m/s)

図 5.1.25 透水係数クロスプロット図 (OPTM Katsube (7)-(3))

て、次式のような式を導入し、透水係数を算出した。

$$K_d = 1.0 \times 10^{-6.0} \left(\frac{F_c}{F_d} \right)^{1.5} \quad (11)$$

F_d : 密度検層から算出したフォーメーションファクター

F_c : 電気伝導度から算出したフォーメーションファクター
(8式の逆数)

その結果を図5.1.26~27に示す。

更に、それらの因子である割れ目のファクタ並びに透水係数のファクタと物理検層データを比較・検討する。

図5.1.28には、第4章の亀裂分類に従って、透水区間を亀裂パターンで表示し、図5.1.29~30には、第3章の岩相区分に従って、それぞれ亀裂パターンで図化した。

その結果、亀裂分類で表示した図5.1.28より、亀裂パターンと透水係数の間には、縦状亀裂>開口亀裂=ネット状亀裂>密着亀裂の関係が見出された。

岩相区間で表示した図5.1.29~30より、風化帯とその他（塩基性鉱物に富む花崗岩と花崗岩）の部分に分類し、塩基性鉱物に富む花崗岩と花崗岩部の物理検層データから透水係数を算出した。以下に算出式を示す。

（塩基性鉱物に富む花崗岩と花崗岩）

$$L_o g \text{ 透水係数} = 0.98 \times L_o g \left(1.0 \times 10^{-6.0} \left(\frac{F_c}{F_d} \right)^{1.5} \right) - 1.34 \quad (12)$$

更に(12)式をAN-1号孔の測定区間全体の代表式と見なして、測定区間の透水係数を算出し、図5.1.31に示した。

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER

Log Scale

孔隙率 ϕ	フオーライショナリティ	透水係数 K
(10) 式	(8) 式の変形	(11) 式

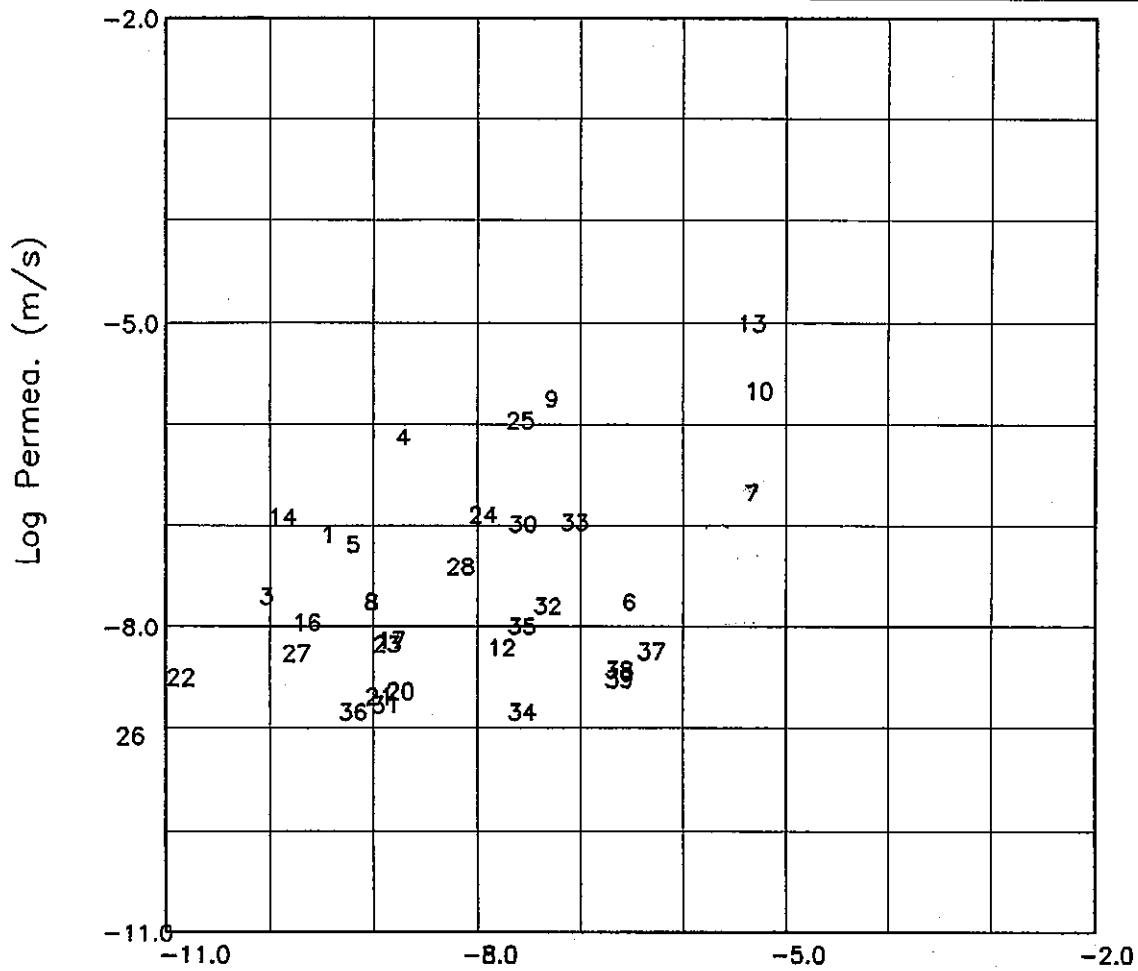
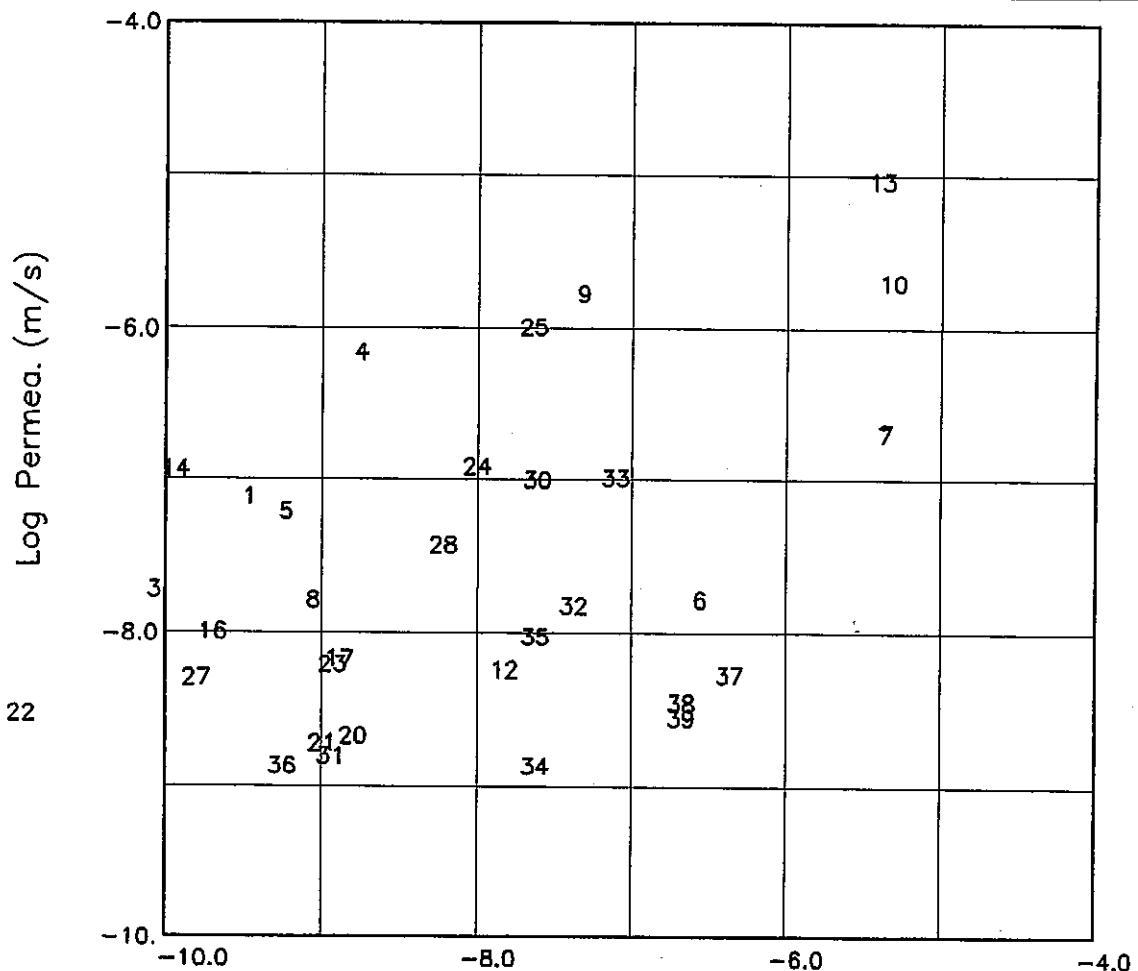


図 5.1.26 透水係数クロスプロット図 (FC/FD Katsube 変形式)

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER

Log Scale	孔隙率 ϕ	フオーメイションファクタ	透水係数 K
	(10) 式	(8) 式の変形	(11) 式



Permeability Test (m/s)

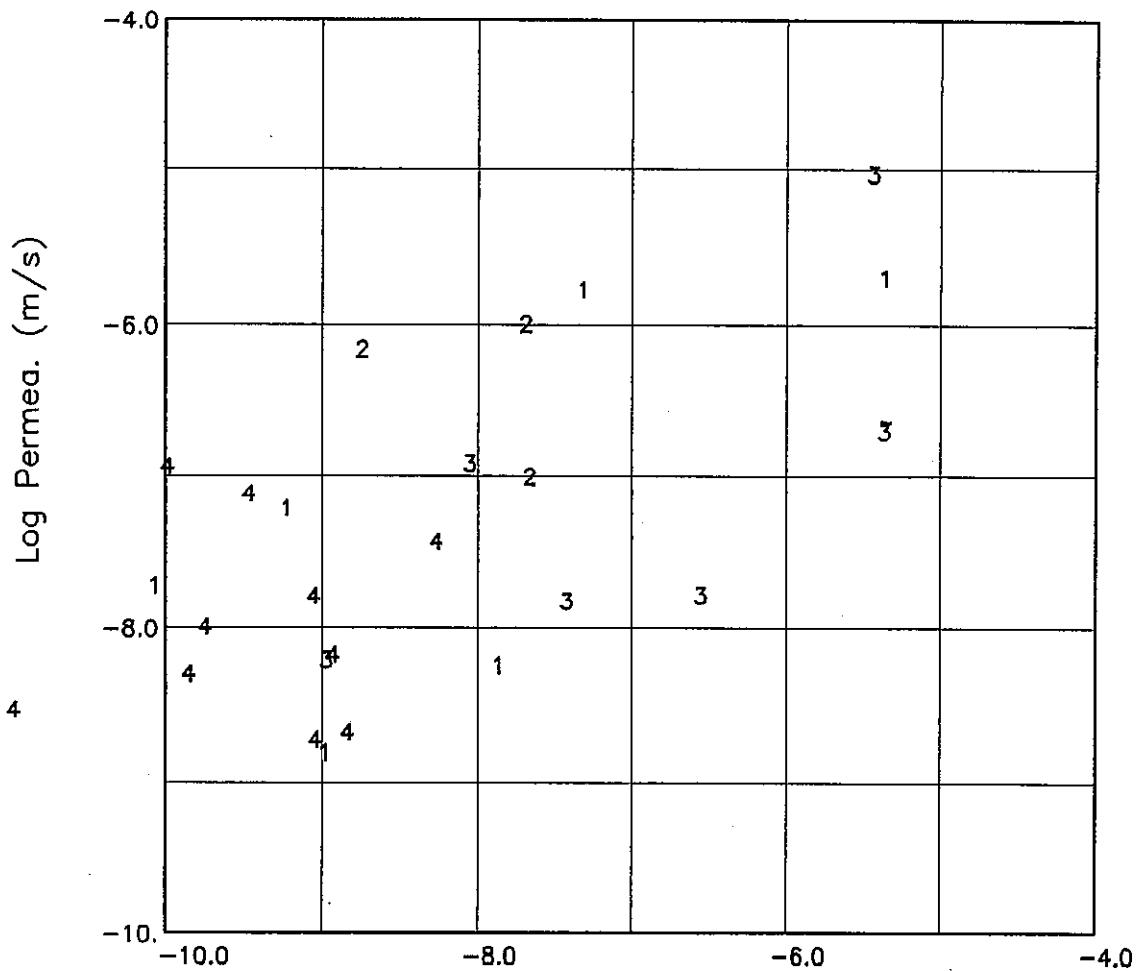
図 5.1.27 透水係数クロスプロット図 (FC/FD Katube 变形式)

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER

Log Scale

孔隙率 ϕ	フリーメイショングラフ	透水係数 K
(10) 式	(8) 式の変形	(11) 式



Permeability Test (m/s)

凡例
亀裂分類

1. 開口亀裂
2. ネット状亀裂
3. 縦状亀裂
4. 密着亀裂

図 5.1.28 透水係数クロスプロット図（亀裂分類）

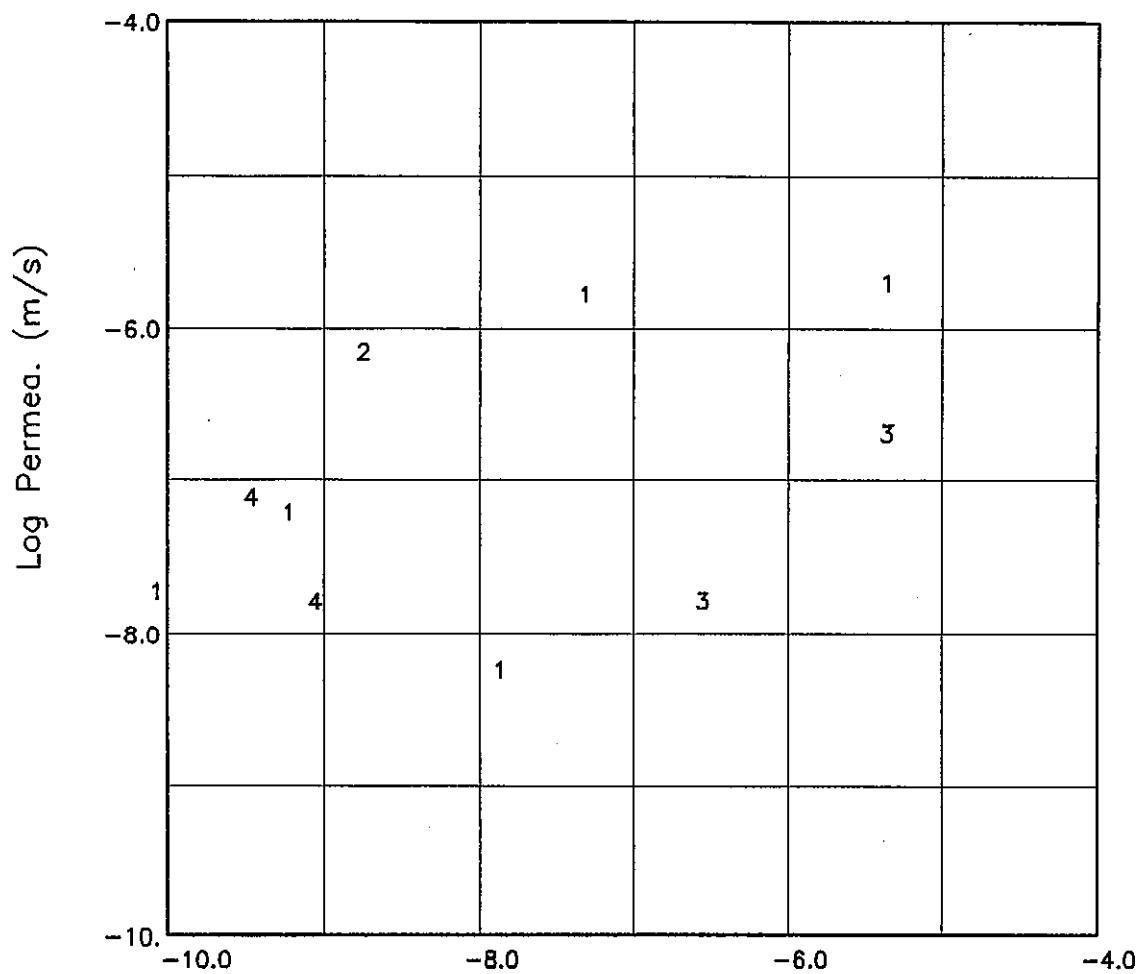
AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER

(風化帶)

Log Scale

孔隙率 ϕ	フオーメイションファクタ	透水係数 K
(10) 式	(8) 式の変形	(11) 式



Permeability Test (m/s)

凡例

亀裂分類

1. 開口亀裂
2. ネット状亀裂
3. 縦状亀裂
4. 密着亀裂

図 5.1.29 透水係数クロスプロット図 (風化帶)

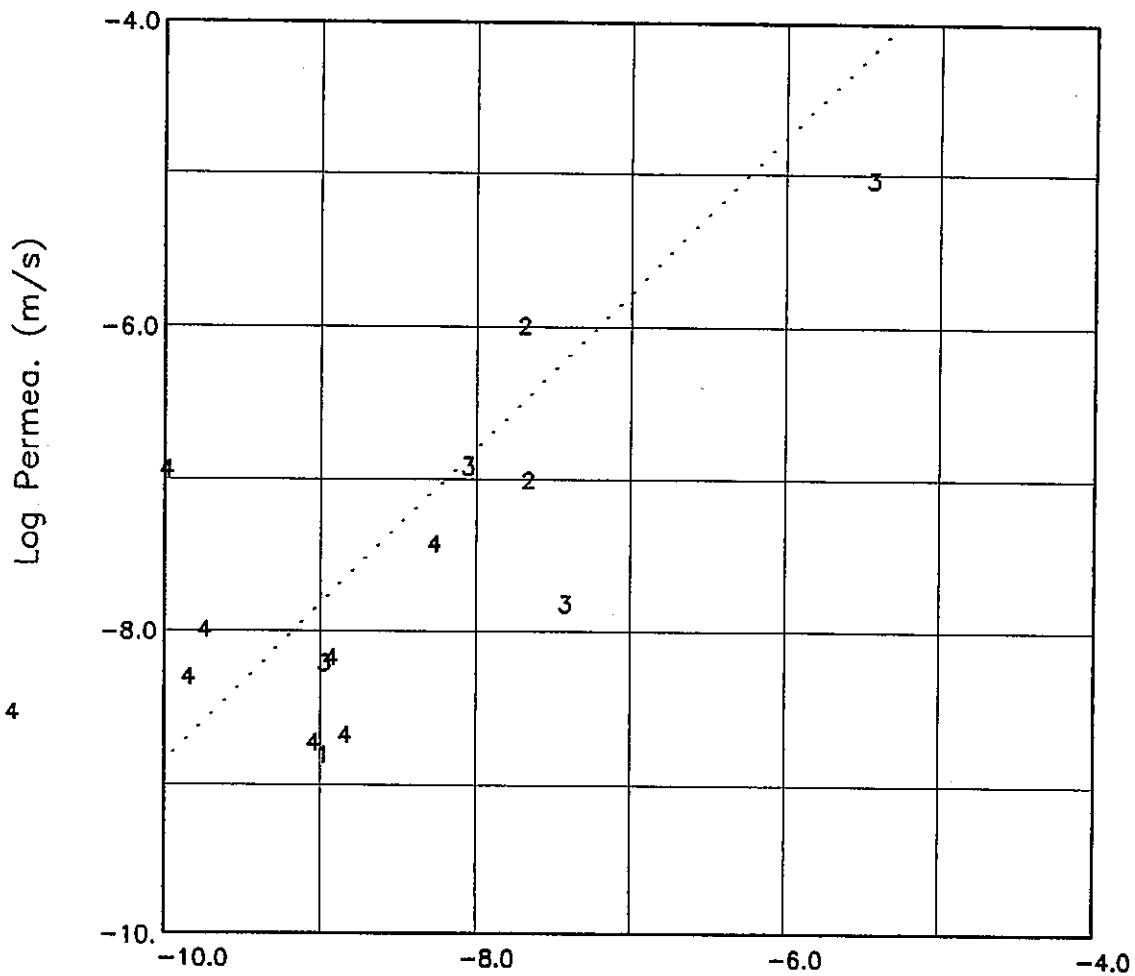
AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER

(塩基性鉱物に富む花崗岩+花崗岩)

Log Scale

孔隙率 ϕ	フオーメイションファクタ	透水係数 K
(10) 式	(8) 式の変形	(11) 式



Permeability Test (m/s)

- 凡例
亀裂分類
1. 開口亀裂
2. ネット状亀裂
3. 縦状亀裂
4. 密着亀裂

図 5.1.30 透水係数補正クロスプロット図（花崗岩）

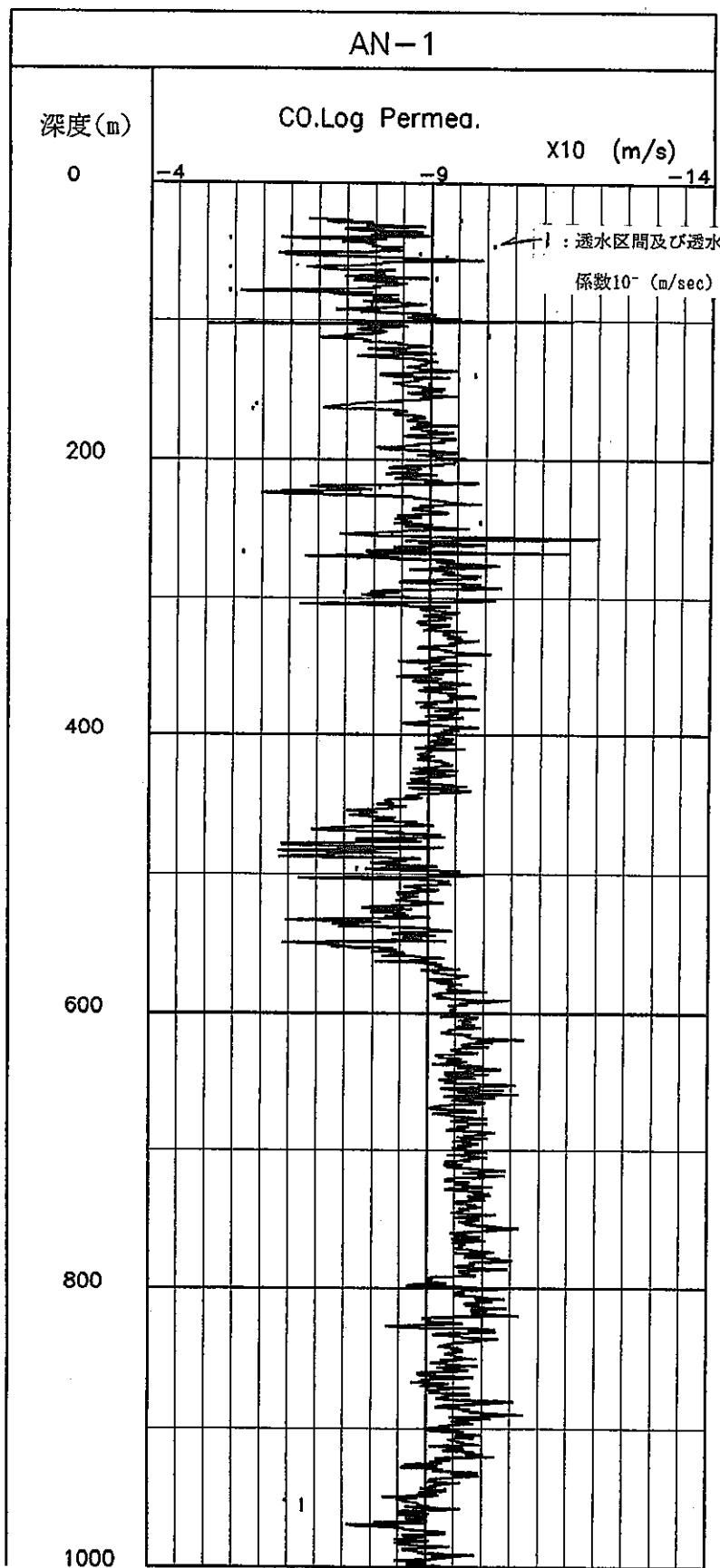


図 5.1.31 透水係数補正変化図 (AN-1)

5.2 DH-4号孔の物理検層データと原位置透水試験結果の比較・検討

DH-4号孔についても、AN-1号孔同様、次のように分類し、比較・検討を行った。

5.2.1 中性子検層データから算出した透水性について

まず測定結果より、孔隙率(ϕ)を算出する。(図5.2.1)

それから(1)式(Archie, 1942)を用いてフォーメーションファクタFを算出する。ここで、mを2.0と仮定した。

$$F = \frac{1}{\phi^m} \quad (\text{Archie, 1942}) \quad (1)$$

更に、(2)式(Schlumberger, 1972)および(3)式(Katsube et al., 1985)

$$k = \frac{1}{F} \left[\frac{\phi}{1-\phi} \right]^2 \frac{1}{S_w} \quad (\text{Schlumberger, 1972}) \quad (2)$$

$$k = 2.51 \times 10^7 \times F^{-2.22} \quad (\text{Katsube et al., 1985}) \quad (3)$$

から求めた透水係数(k)と原位置透水試験結果を比較・検討した。尚、検層データから算出した透水係数は、原位置透水試験区間長の平均を示す。

図5.2.2は、(1)と(2)式から算出した透水係数のクロスプロット図を示し、

図5.2.3は、(1)と(3)式から算出した透水係数のクロスプロット図を示す。

更に、(7)式(Katsube et al., 1985)を用いてフォーメーションファクタを算出し、それを用いて(3)式から透水係数を算出した。

$$F = 5.5 \times 10^{-3} \div \phi^{2.21} \quad (\text{Katsube et al., 1985}) \quad (7)$$

その結果について、図5.2.4に原位置透水試験結果と共にクロスプロット図として示す。

尚、クロスプロット図上に表示した番号は、表4.2.2の原位置透水試験結果一覧表の番号(No)と統一させている。

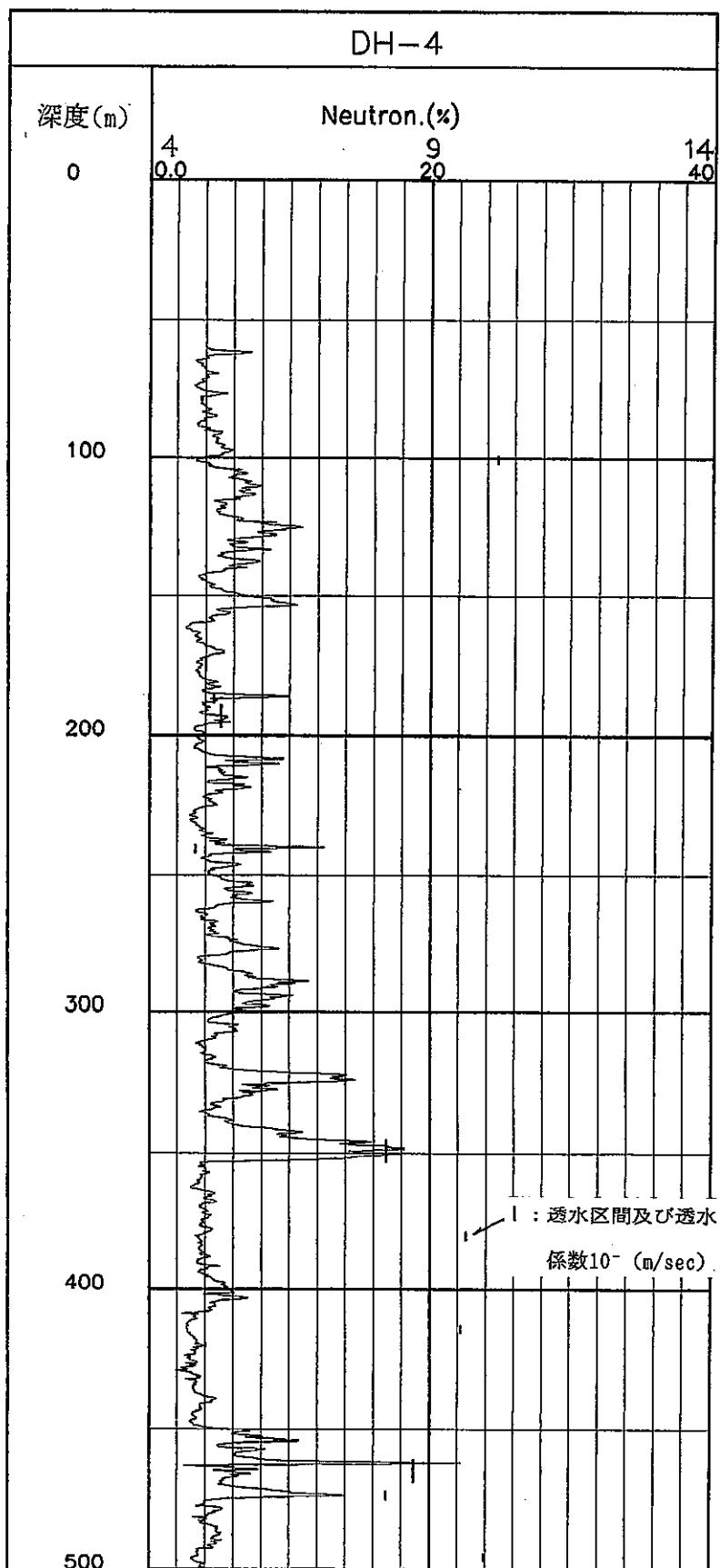


図 5.2.1 中性子検層孔隙率変化図 (DH-4)

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER

Log Scale

孔隙率 ϕ	フネーションワクタ	透水係数 K
中性子	(1) 式	(2) 式

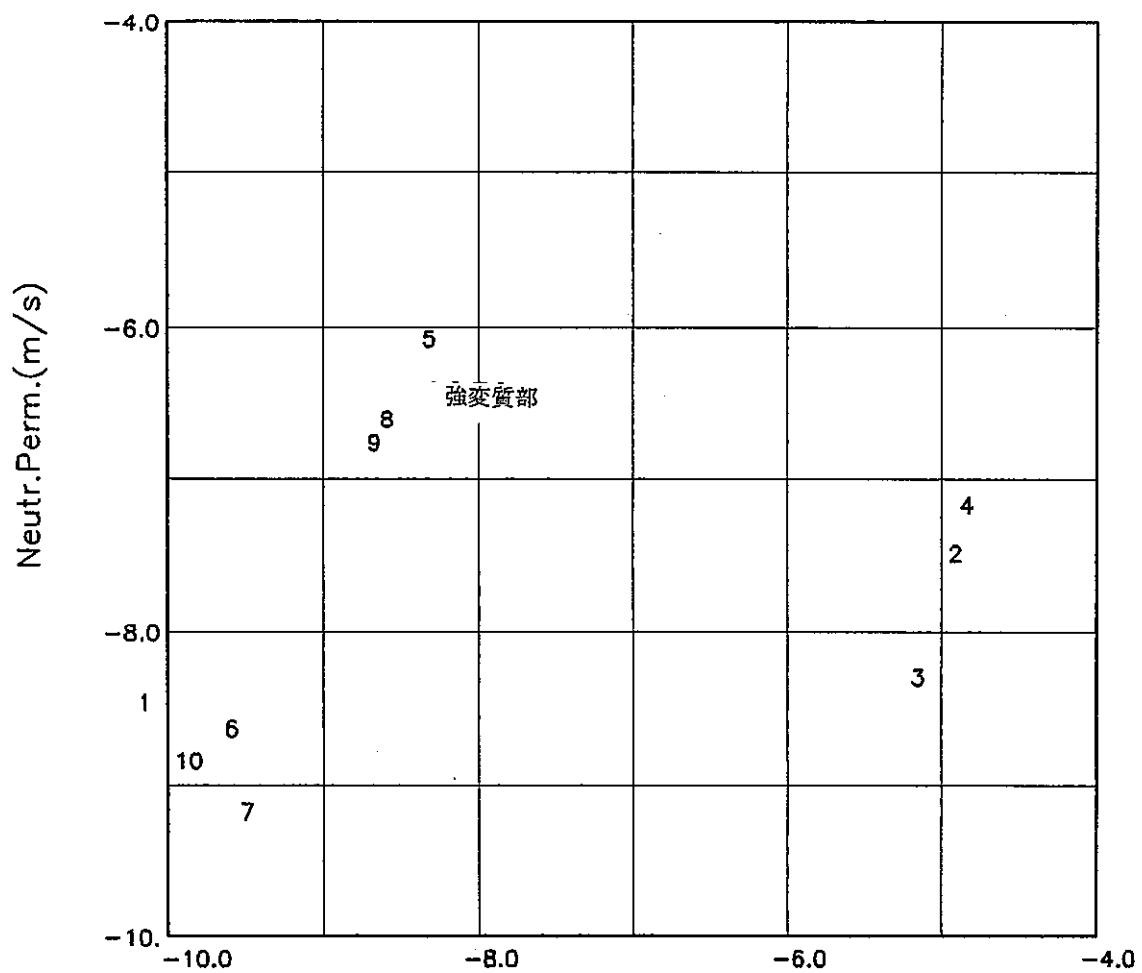


図 5.2.2 透水係数クロスプロット図 (N L Schlumberger(1)-(2))

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER

Log Scale

孔隙率 ϕ	フオーメイションカクタ	透水係数 K
中性子	(1) 式	(3) 式

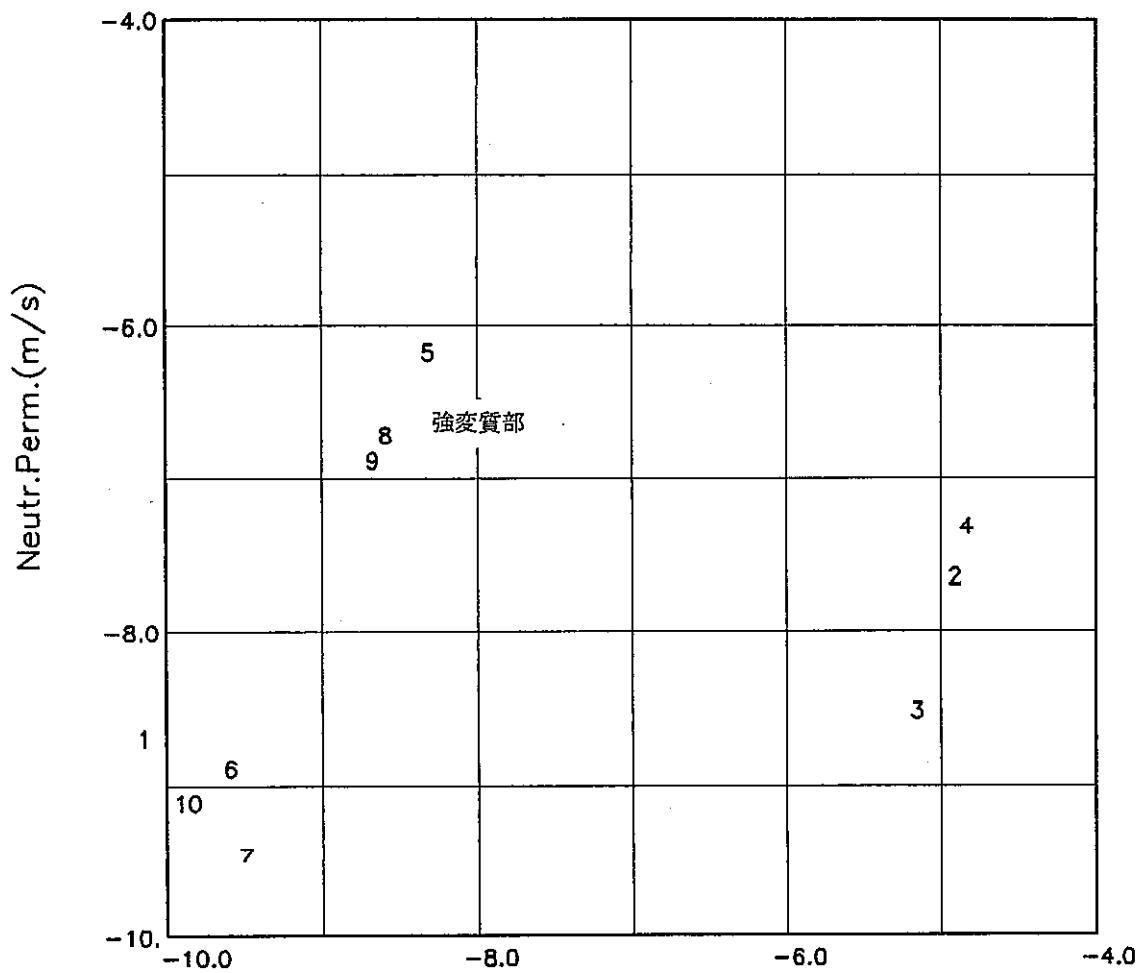


図 5.2.3 透水係数クロスプロット図 (N L Katsube(1)-(3))

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER

Log Scale

孔隙率 ϕ	ナ-メイショウラク	透水係数K
中性子	(7) 式	(8) 式

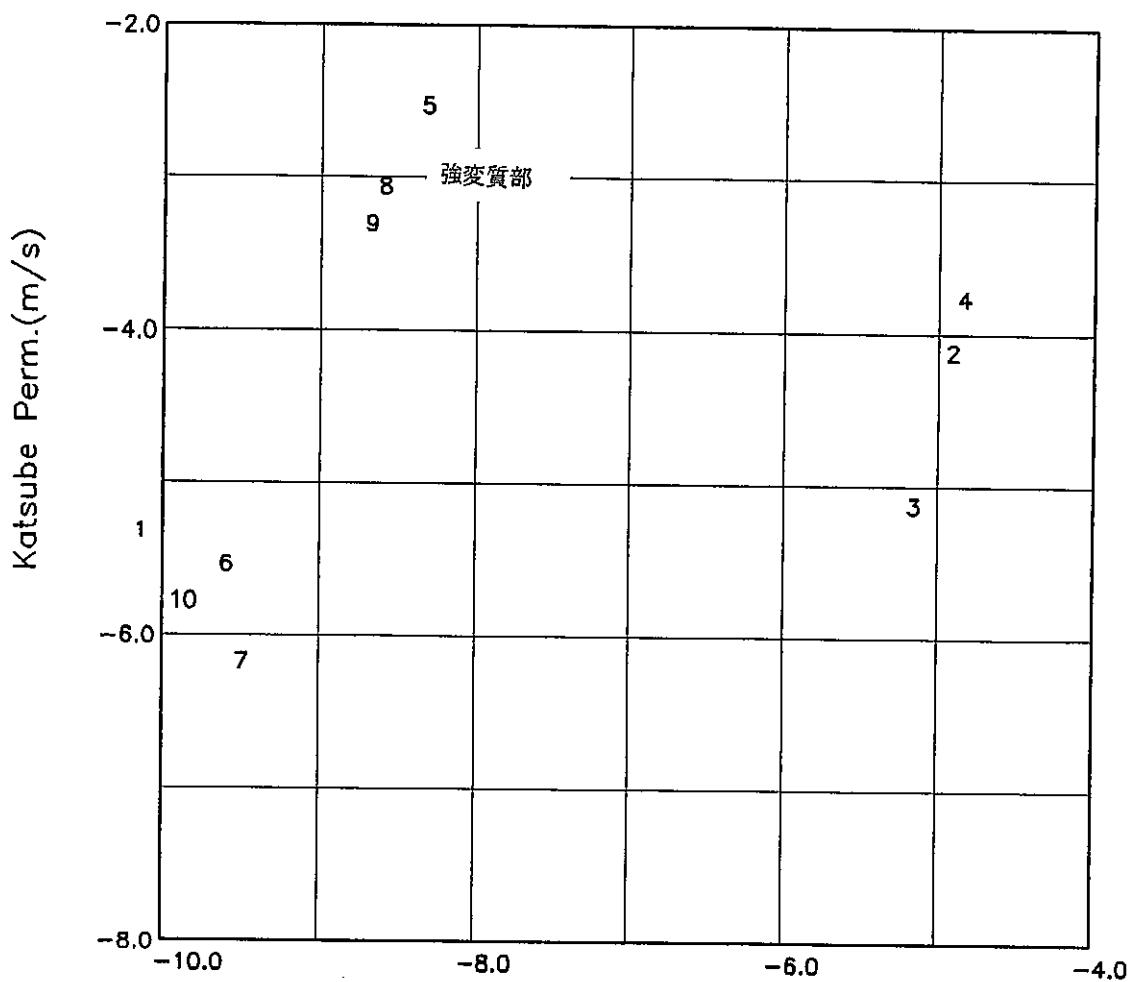


図 5.2.4 透水係数クロスプロット図 (N L Katsube(7)-(3))

5.2.2 音波検層データから算出した透水性について

まず測定結果と、(Wyllie, 1952) の(4)式を用いて孔隙率を算出した。

(Wyllie, 1952) の(4)式は下記の通りである。(図5.2.5～図5.2.6)

$$\phi_{SL} = \frac{\Delta T - \Delta T_{ma}}{\Delta T_f - \Delta T_{ma}} \quad (\text{Wyllie, 1952}) \quad (4)$$

ϕ_{SL} : 音波検層による孔隙率

ΔT : 1m間のP波走行時間

ΔT_{ma} : マトリックスの1m間のP波走行時間

ΔT_f : 水の1m間のP波走行時間

次に、(5)式(Raymer, 1952)を用いて孔隙率を算出する。

$$\phi_{SL} = -a - [a^2 + \frac{\Delta T}{\Delta T_{ma}} - 1]^{1/2} \quad (\text{Raymer, 1952}) \quad (5)$$

$$a = \frac{\Delta T_{ma}}{2 \times \Delta T_f} - 1$$

更に、(6)式を用いて孔隙率を算出する。

$$\phi_{SL} = 1 - [\frac{\Delta T}{\Delta T_{ma}}]^{1/x} \quad (6)$$

X=1.6 for GRANITE

それぞれ算出された孔隙率から、(1)式(Archie, 1942)を用いてフォームーションファクタを算出し、それから、(2)式(Schlumberger, 1972)および(3)式(Katsube et., 1985)を用いて透水係数を算出する。

(Wyllie, 1952)の式と(1)と(2)式から算出した透水係数のクロスプロットを図5.2.7に示す。

(Raymer, 1952)と(5)式から算出した透水係数のクロスプロットを図5.2.8～図5.2.11に示す。

更に、(7)式(Katsube et., 1985)を用いてフォームーションファクタを算出し、(3)式から透水係数を算出した。

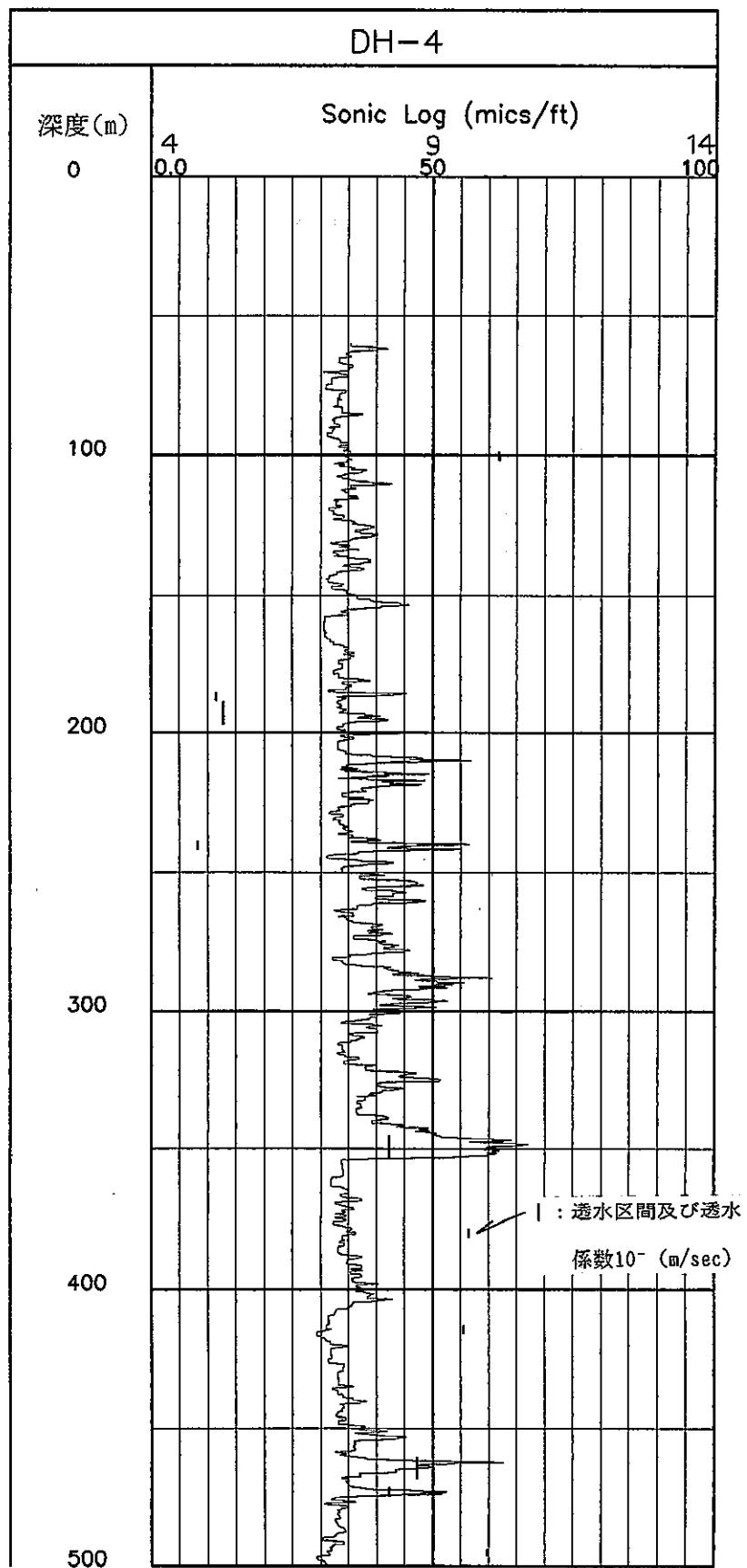


図 5.2.5 音波検層変化図 (DH-4)

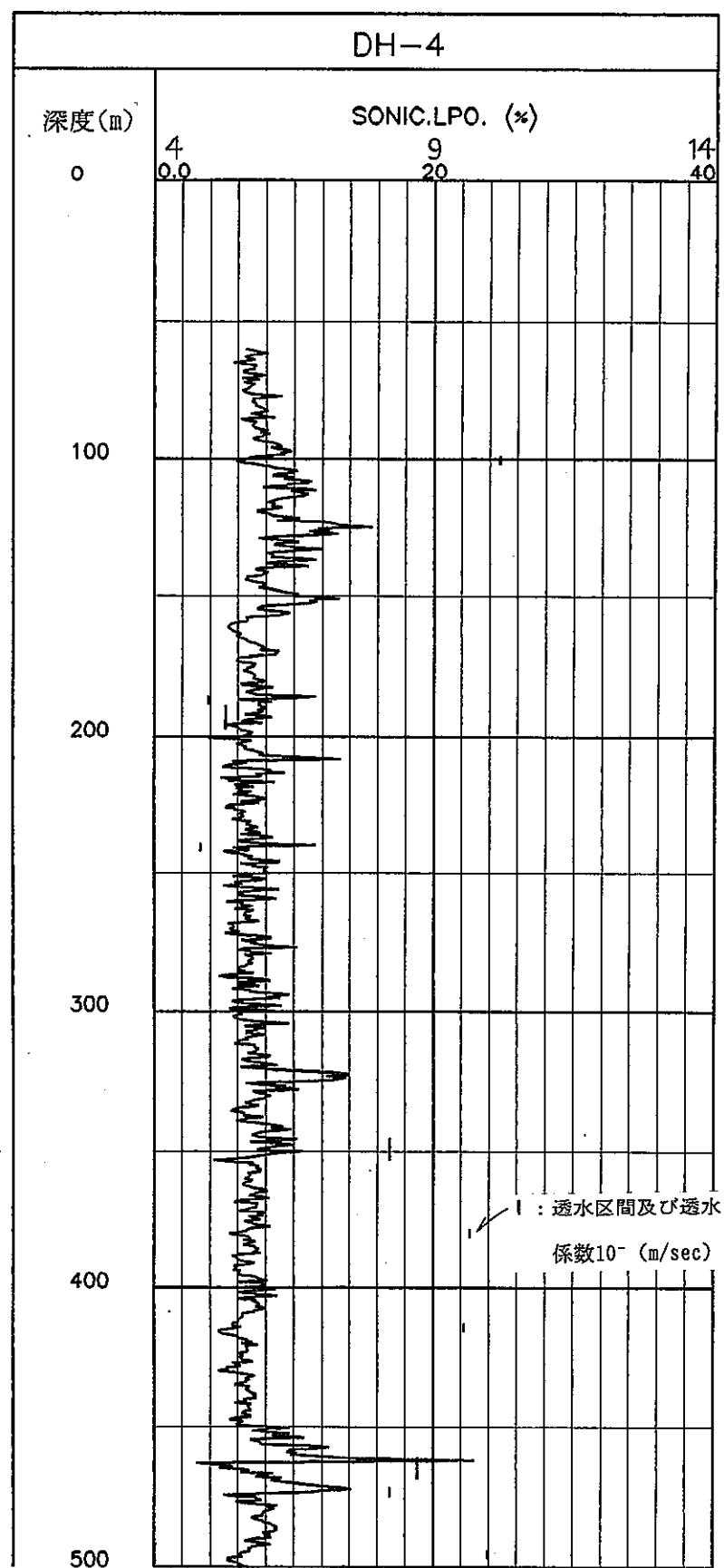


図 5.2.6 音波検層孔隙率変化図 (DH-4)

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER (Wyllie.F-SL.PO)

Log Scale

孔隙率φ	フオーメイションワット	透水係数K
(4)式	(1)式	(2)式

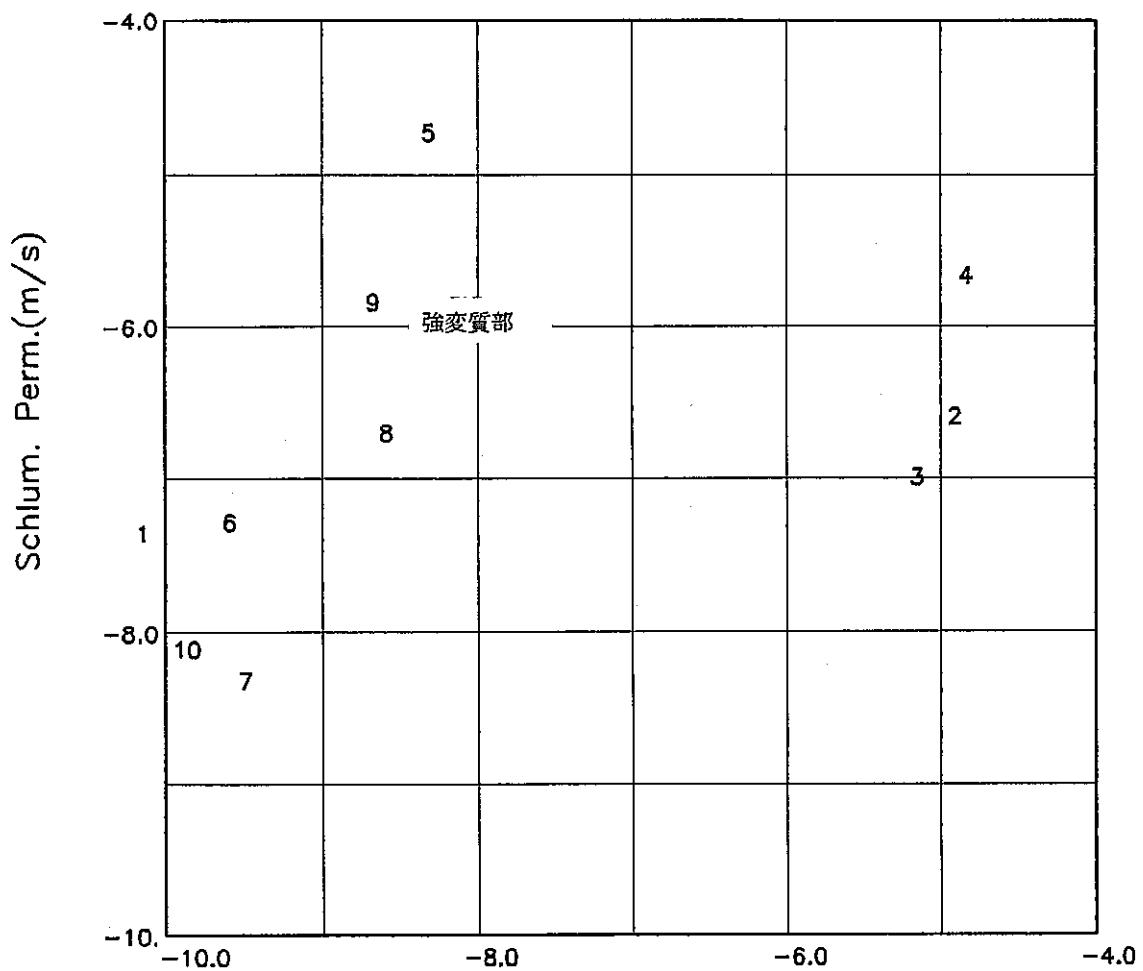


図 5.2.7 透水係数クロスプロット図 (S L Wyllie(4)-(1)-(2))

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER (Raymer.F-SL.PO)

Log Scale

孔隙率φ	フーメイションファクタ	透水係数K
(5)式	(1)式	(2)式

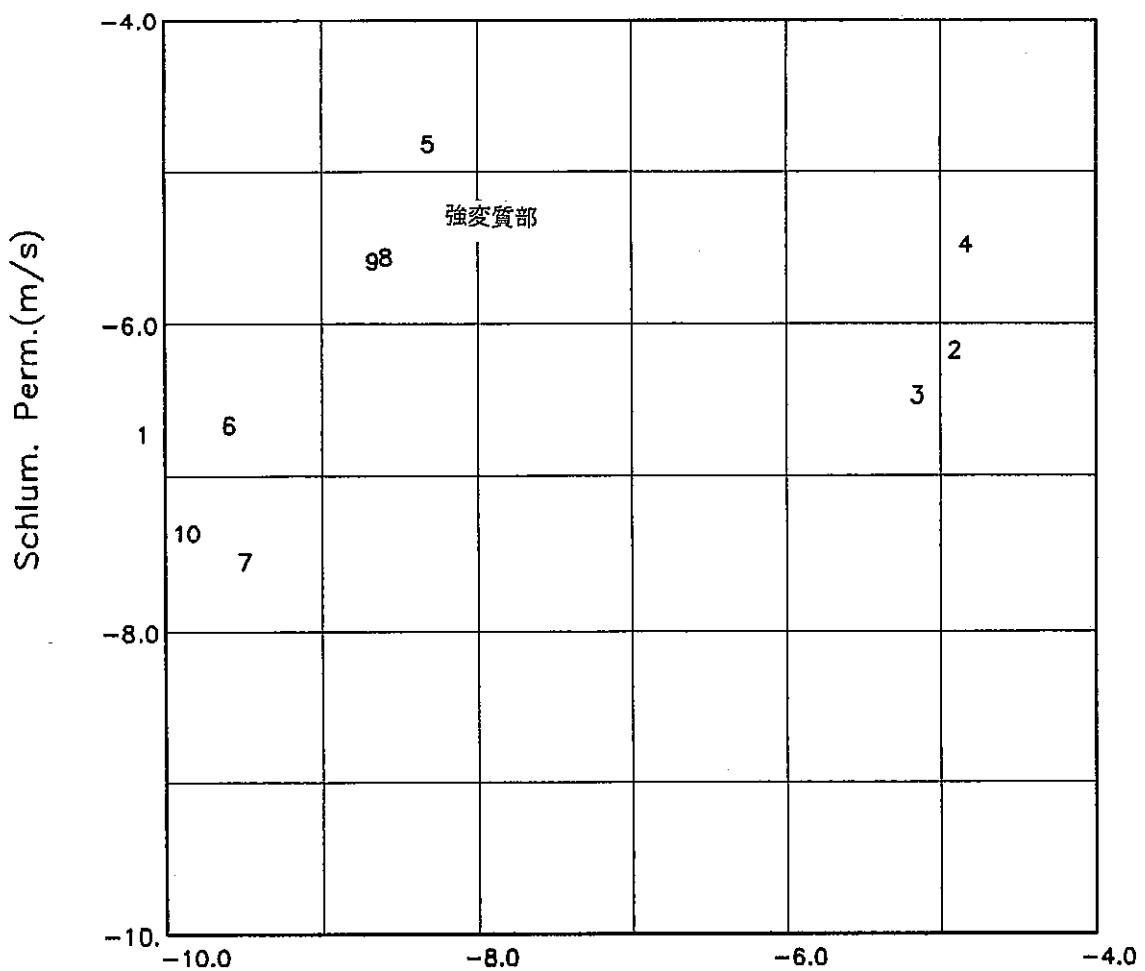


図 5.2.8 透水係数クロスプロット図 (S L Raymer(5)-(1)-(2))

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER (Raymer.F-SL.PO)

Log Scale

孔隙率 ϕ	フォークションファクタ	透水係数 K
(5) 式	(1) 式	(3) 式

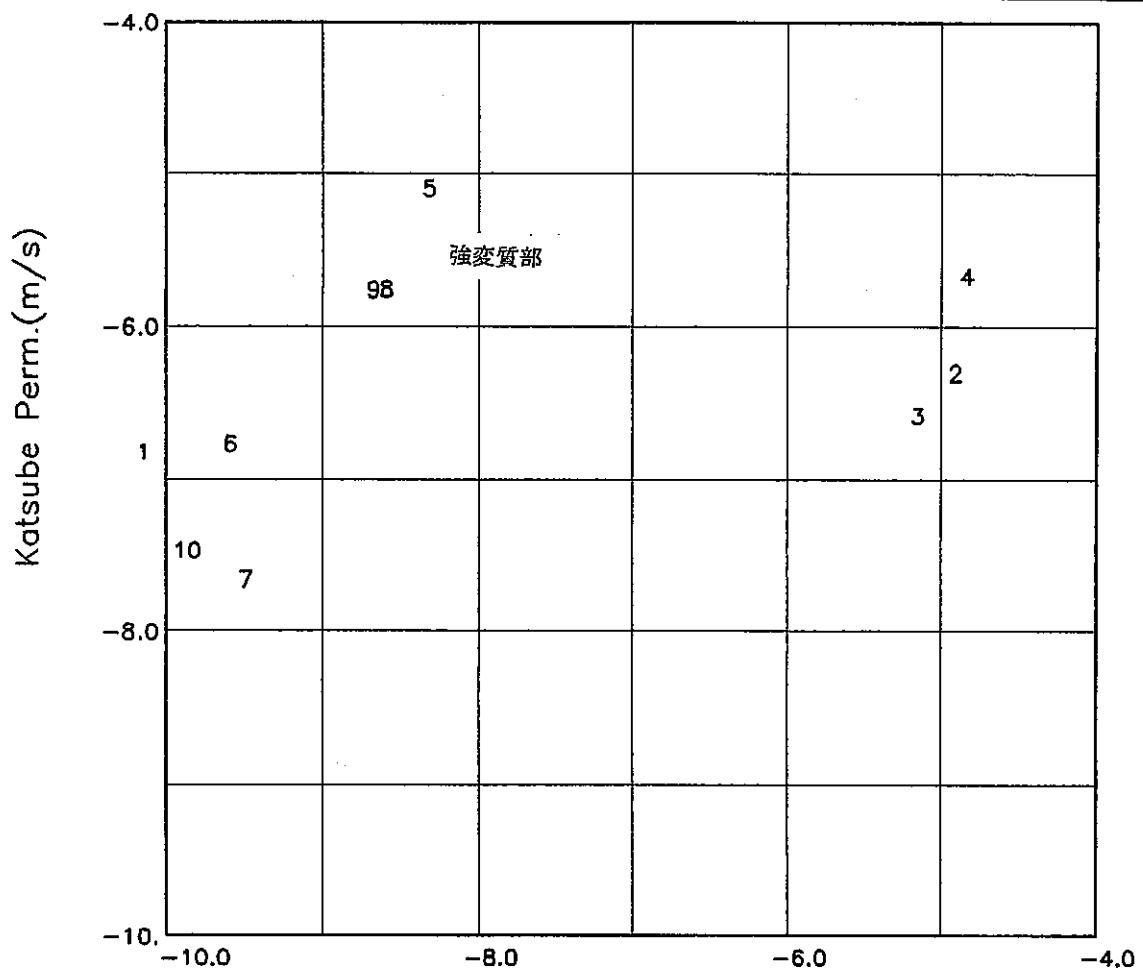


図 5.2.9 透水係数クロスプロット図 (S L Raymer(5)-(1)-(3))

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER (Acous.F-SL.PO)

Log Scale

孔隙率 ϕ	フオーメイションファクタ	透水係数 K
(6) 式	(1) 式	(2) 式

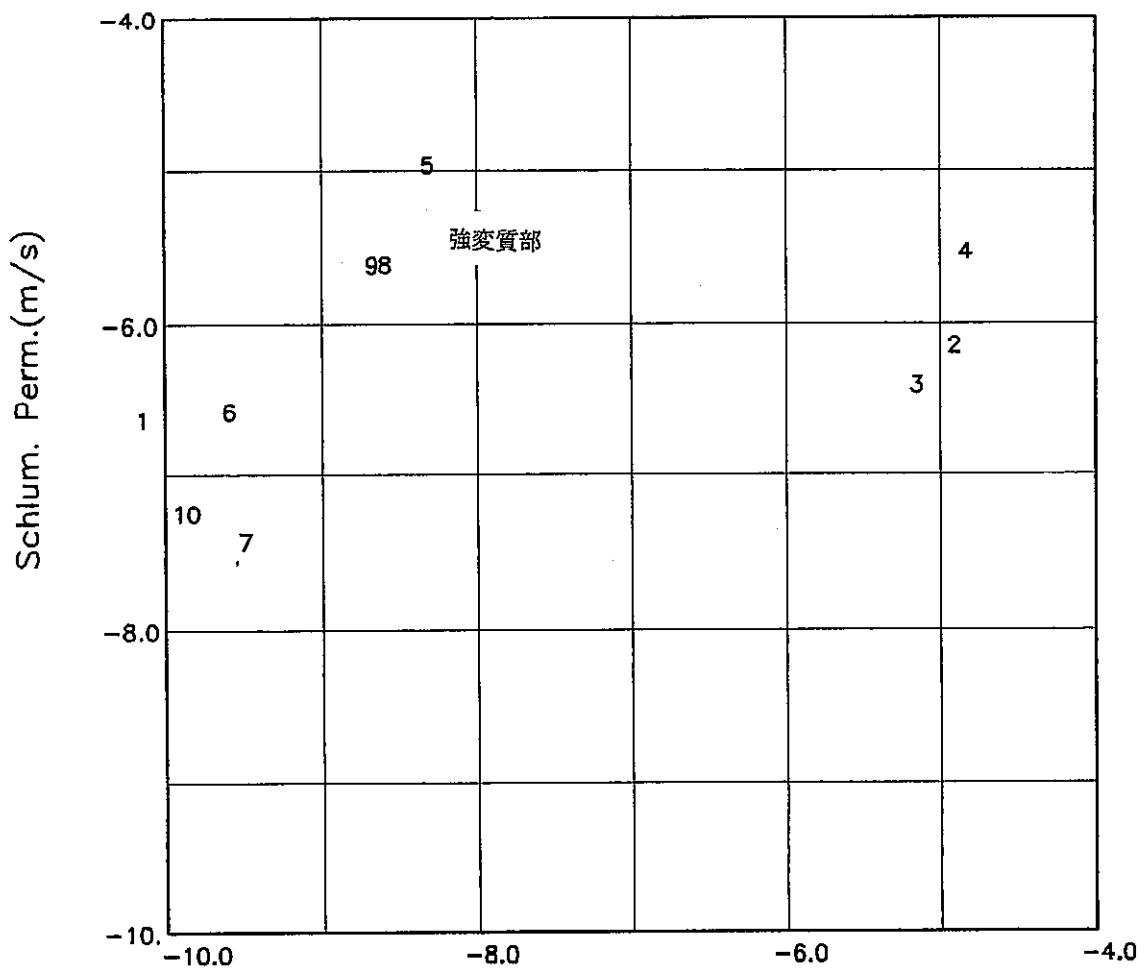


図 5.2.10 透水係数クロスプロット図 (S L Acous. (6)-(1)-(2))

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER (Acous.F-SL.PO)

Log Scale

孔隙率φ	フオーディションファクタ	透水係数K
(6)式	(1)式	(3)式

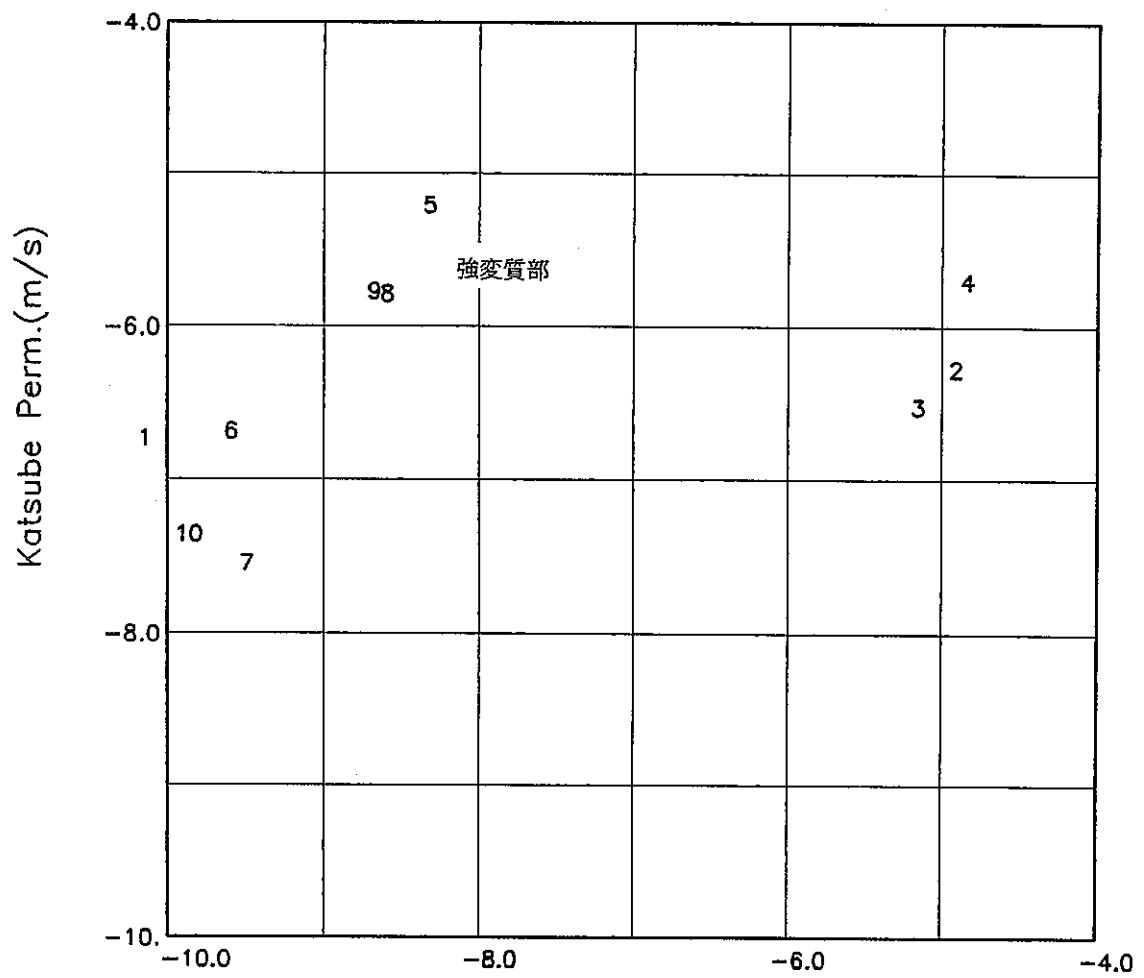


図 5.2.11 透水係数クロスプロット図 (S L Acous. (6)-(1)-(3))

$$F = 5.5 \times 10^{-3} \div \phi^{2.21} \quad (\text{Katube et al., 1985}) \quad (7)$$

その結果を図5.1.12に、クロスプロット図として示す。

5.2.3 密度検層データから算出した透水性について

測定結果を図5.2.13に図示し、そのデータをもとに(10)式(Schlumberger, 1972)より孔隙率を算出する。

$$\phi_D = \frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma_m - \gamma_f} \quad (\text{Schlumberger, 1972}) \quad (10)$$

ϕ_D : 密度検層による孔隙率(%)
 γ_m : 岩盤の気質密度 (g/cm^3)
 γ : 検層による密度 (g/cm^3)
 γ_f : 水の密度 (g/cm^3)

更に(1)式を用いてフォーメーションファクタを算出し、(2)式(Schlumberger, 1972)および(3)式(Katube et al., 1985)から求めた透水係数(k)と原位置透水試験結果について比較・検討した。

それらを図5.2.14～図5.2.15にクロスプロット図として示した。

5.2.4 電気検層(25cm, 100cmルルル比抵抗, 2.5cmマイクロ比抵抗)の透水性について

検層データを基に測定区間全域について真の比抵抗値を連続的に算出し、それぞれ図5.2.16～図5.2.18に示した。

更に、真の比抵抗値を用いて(8)式(Schlumberger, 1972)よりフォーメーションファクタを算出した。

$$F = \text{真の比抵抗値} / \text{孔内水の比抵抗値} \quad (\text{Schlumberger, 1972}) \quad (8)$$

次に、密度検層データを利用して、 $F = 5.5 \times 10^{-3} \div \phi^{2.21}$ (Katube et al., 1985)(7)式からフォーメーションファクタを算出し、それぞれのフォーメーションファクタから(9)式(Katube et al., 1987)を用いて透水係数を算出した。

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER (Sonic.PO)

Log Scale

孔隙率φ	ナーメイションファクタ	透水係数K
(4)式	(7)式	(3)式

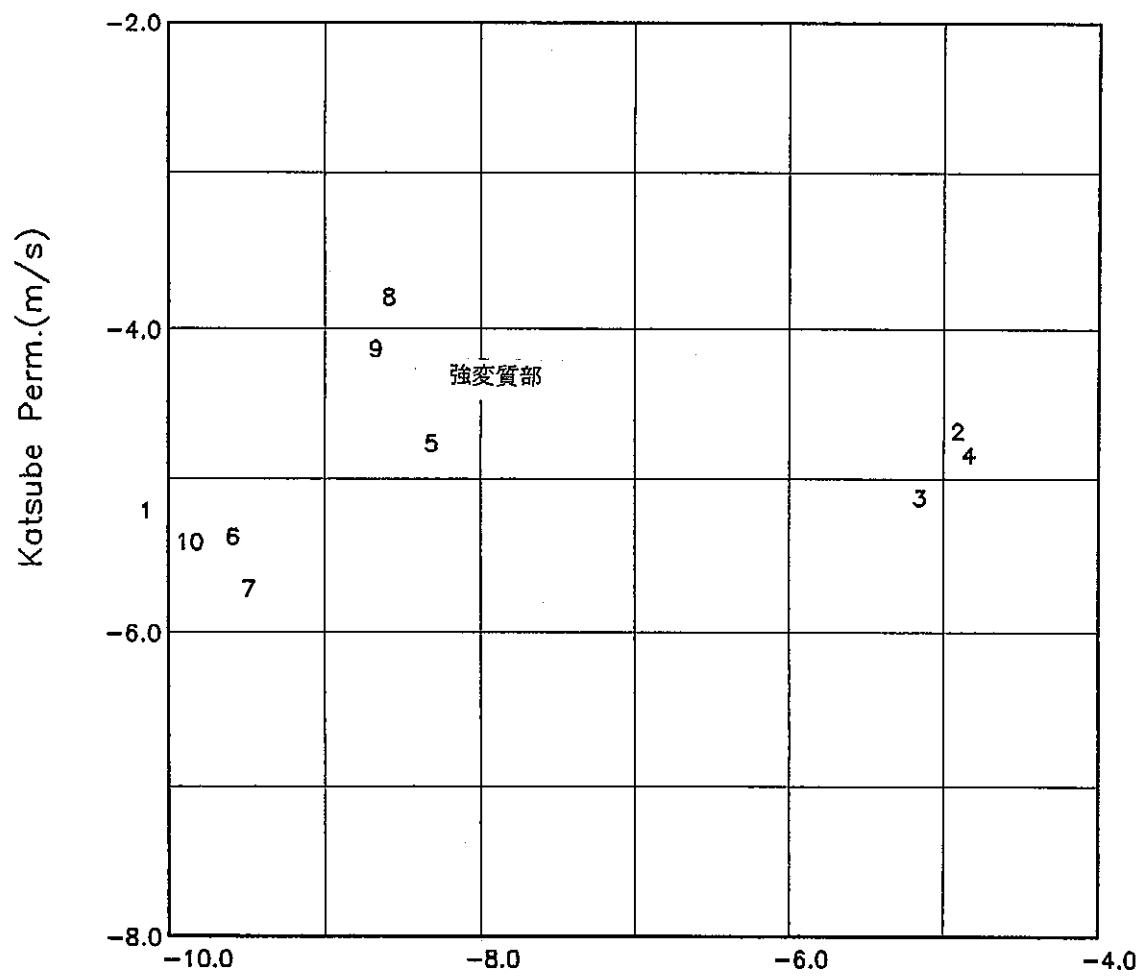


図 5.2.12 透水係数クロスプロット図 (S L Katsube(7)-(3))

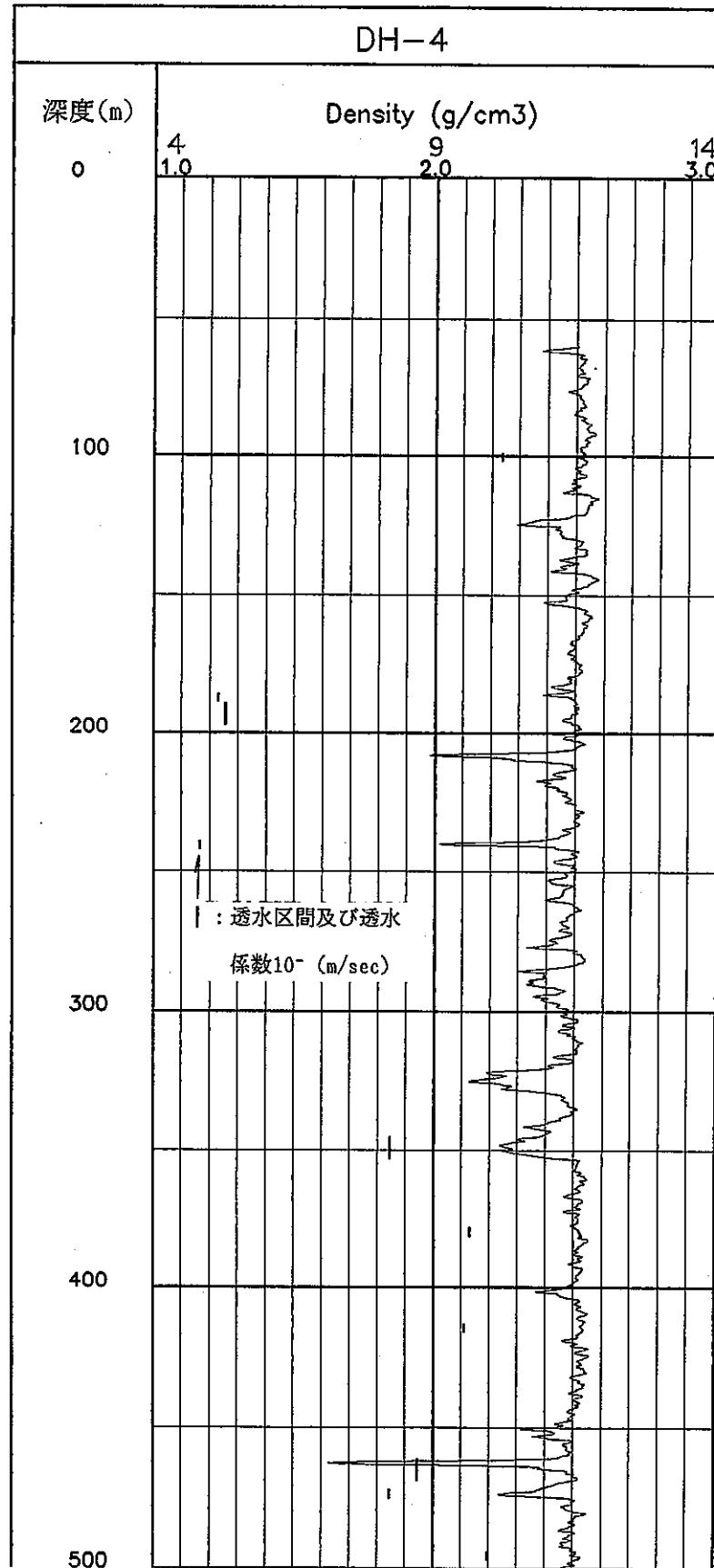


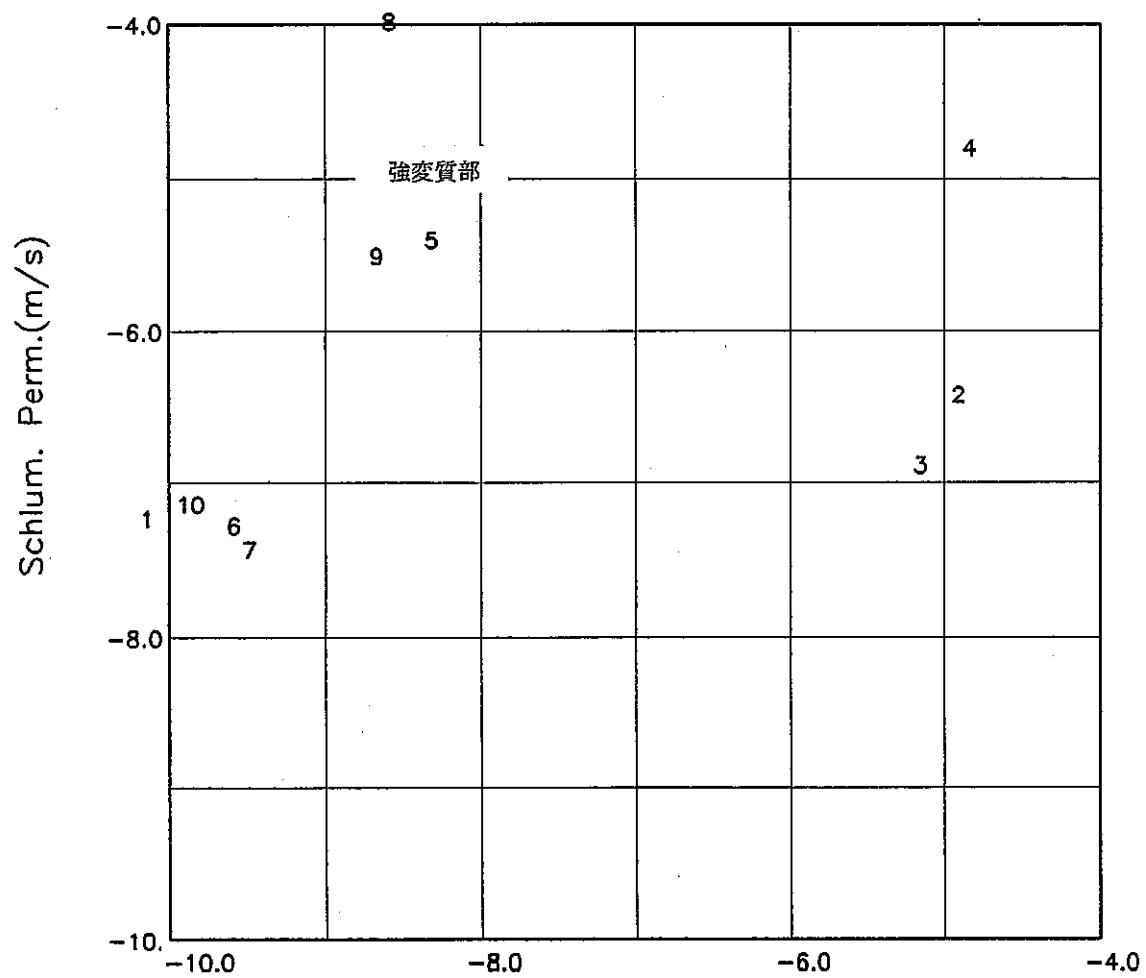
図 5.2.13 密度検層変化図 (DH-4)

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER (Density.PO)

Log Scale

孔隙率 ϕ	ナーノイションファクタ	透水係数 K
(10) 式	(1) 式	(2) 式



Permeability Test (m/s)

図 5.2.14 透水係数クロスプロット図 (F D Schlumberger(10)-(1)-(2))

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER (Density.PO)

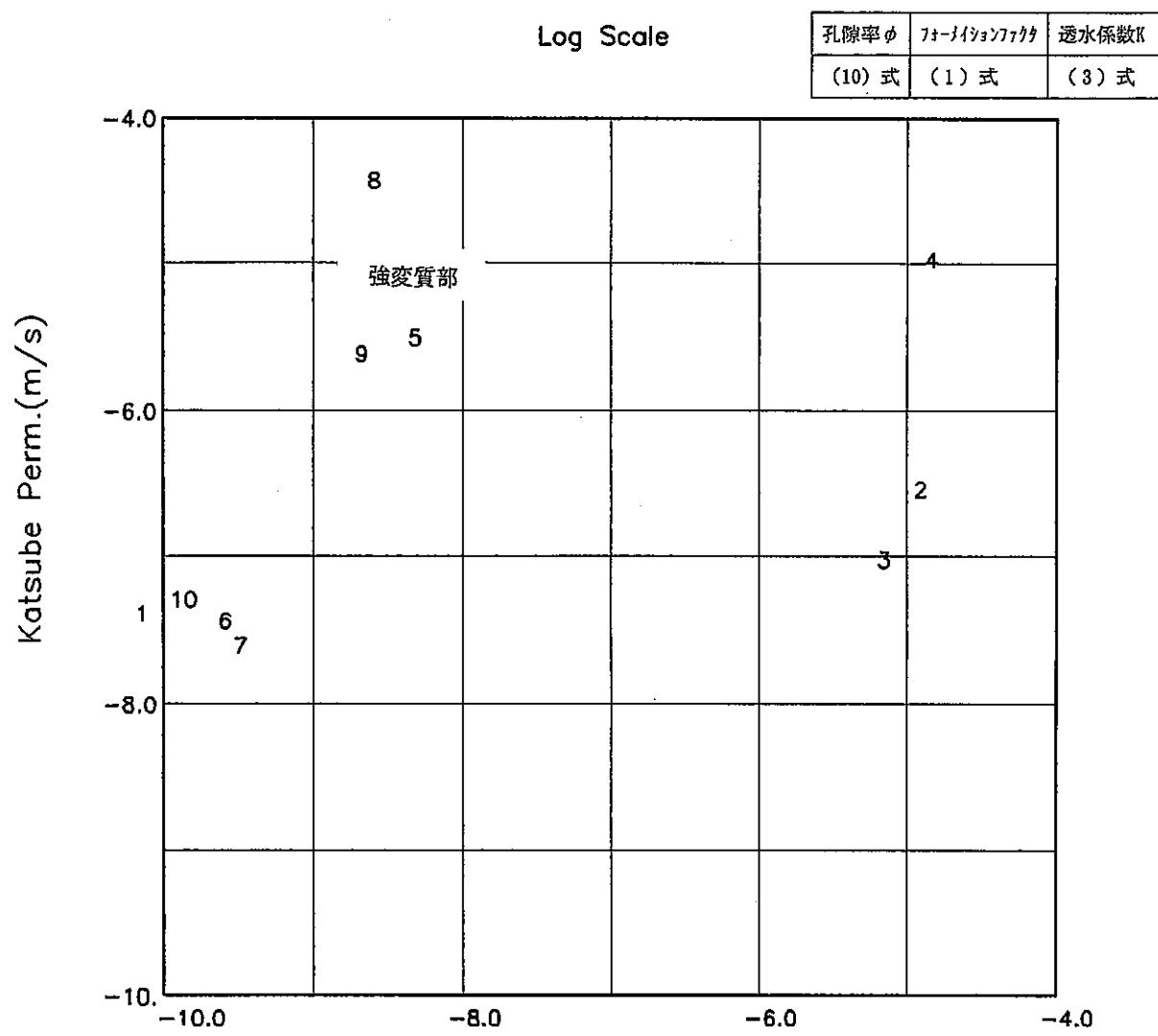


図 5.2.15 透水係数クロスプロット図-(1) (FD.Katsube (10)-(1)-(3))

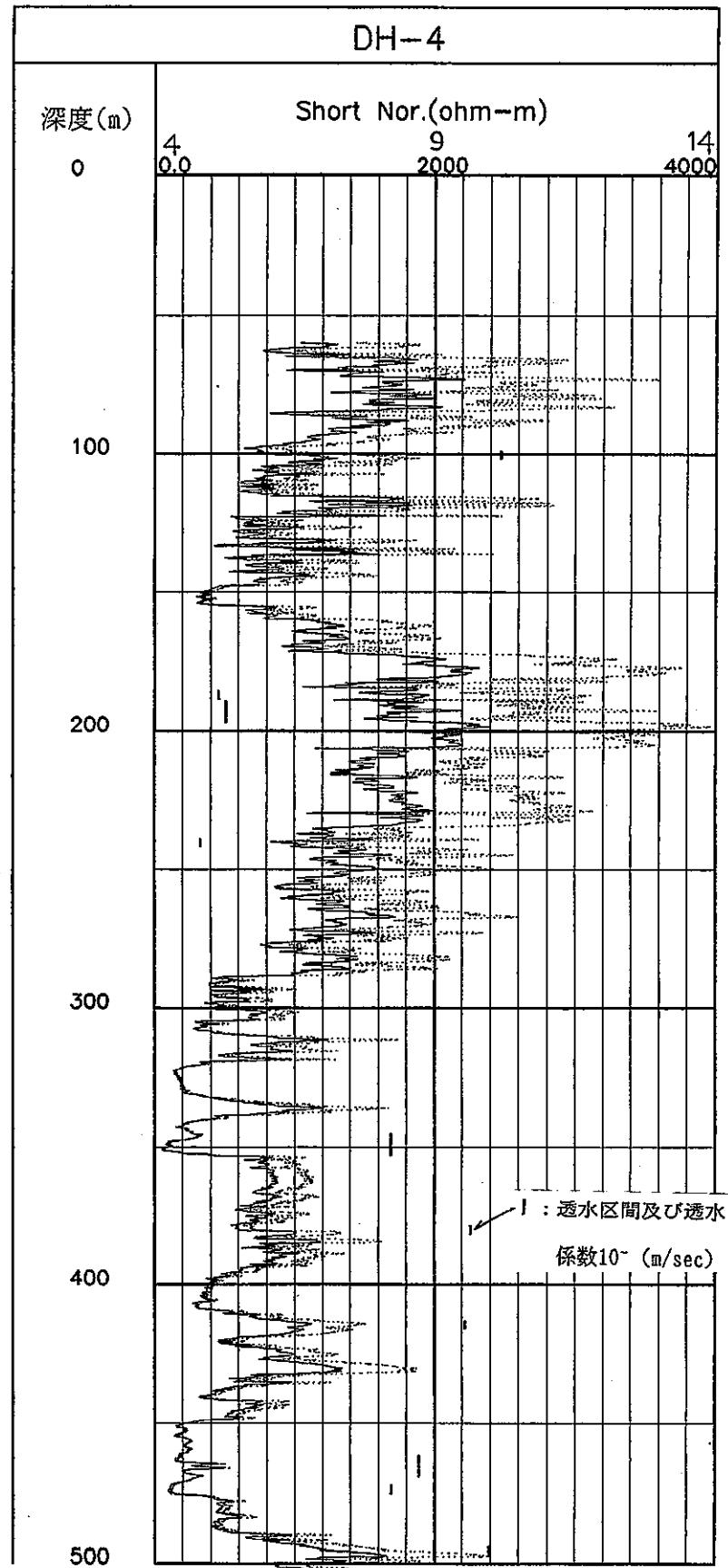


図 5.2.16 電気検層(SHORT NORMAL)変化図 (DH-4)

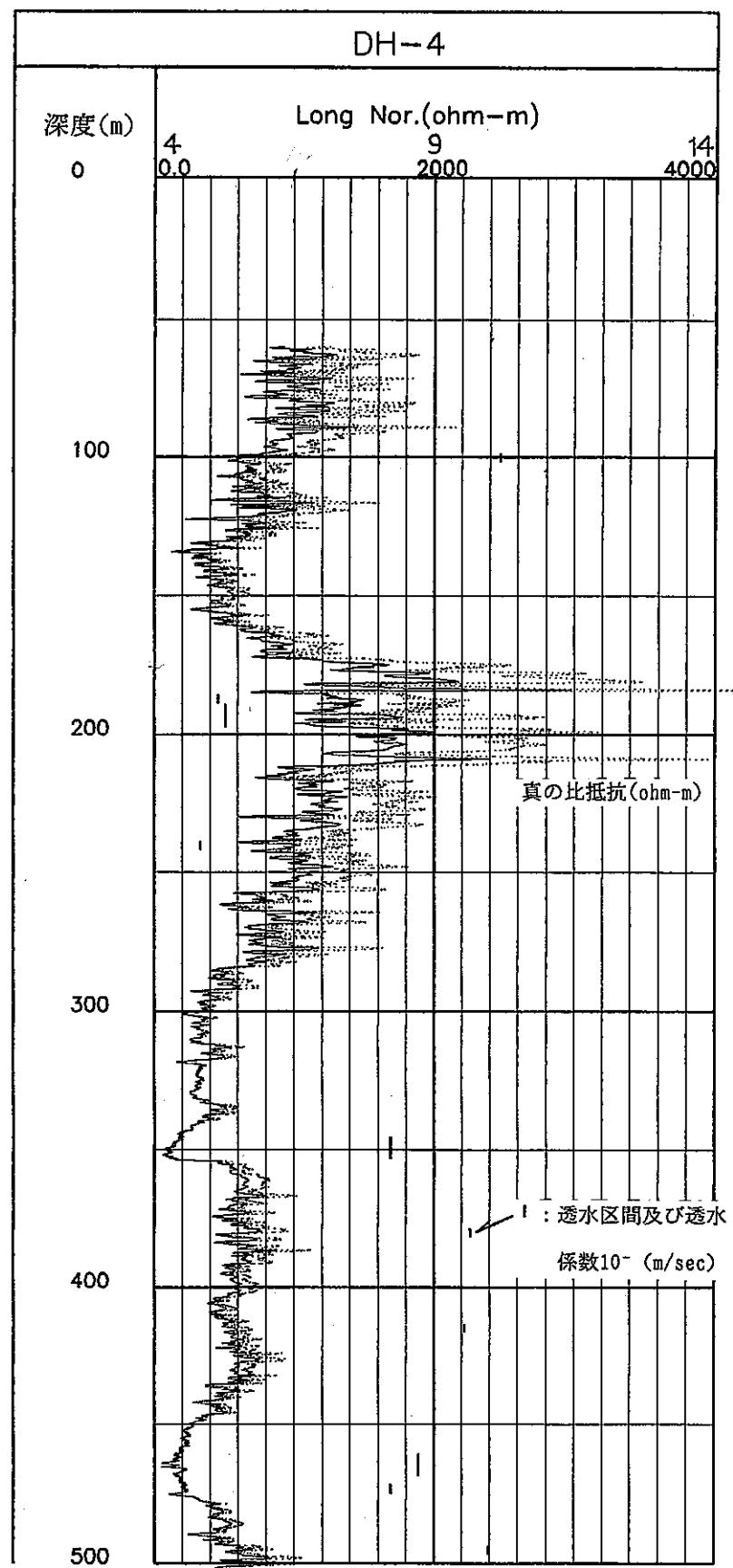


図 5.2.17 電気検層(LONG NORMAL) 変化図 (D H - 4)

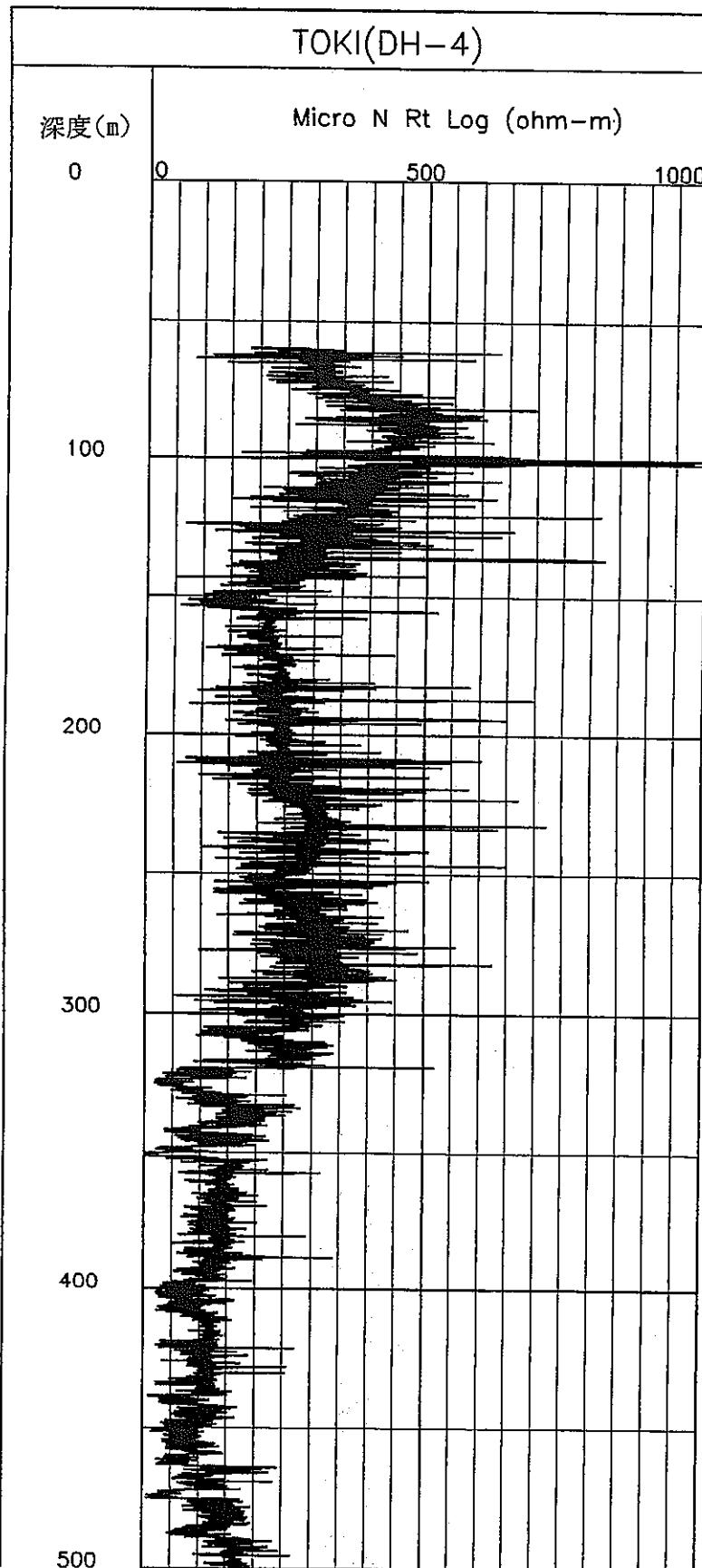


図 5.2.18 電気検層(MICRO NORMAL)変化図 (DH-4)

$$k = 4.1 \times 10^{-7} \left(\frac{F_D}{F_F} \right)^{-1.06} \quad (\text{Katube et al., 1987}) \quad (9)$$

F_D : 密度検層から算出したフォーメーションファクター

F_F : 電気検層から算出したフォーメーションファクター

その結果を、図5.2.19に示す。

次に、中性子検層データと密度検層データから算出した孔隙率（図5.2.20）を基に、(7) と(3) 式を用いて、透水係数を算出し、その結果をクロスプロット図として図5.2.21に示した。

更に、音波検層データと密度検層データから算出した孔隙率（図5.2.22）についても(7) と(3) 式より透水係数を算出し、そのクロスプロット図を図5.2.23に示した。又、検層解析ソフトを利用して算出した孔隙率を図5.2.24に、(7) と(3) 式より算出した透水係数のクロスプロット図を図5.2.25に示した。

以上の結果、得られたそれぞれの孔隙率、フォーメーションファクタや透水係数について考察した。AN-1号孔同様、検層データから求めた透水係数と原位置透水試験結果から、その相関性について検討する為の地質学的特性の評価手法の一部として、次式のような式を導入し、検層データから透水係数を算出した。

$$K_d = 1.0 \times 10^{-3} \left(\frac{F_c}{F_D} \right)^{1.5} \quad (13)$$

F_D : 密度検層から算出したフォーメーションファクター

F_c : 電気伝導度から算出したフォーメーションファクター

m : 孔井常数

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER

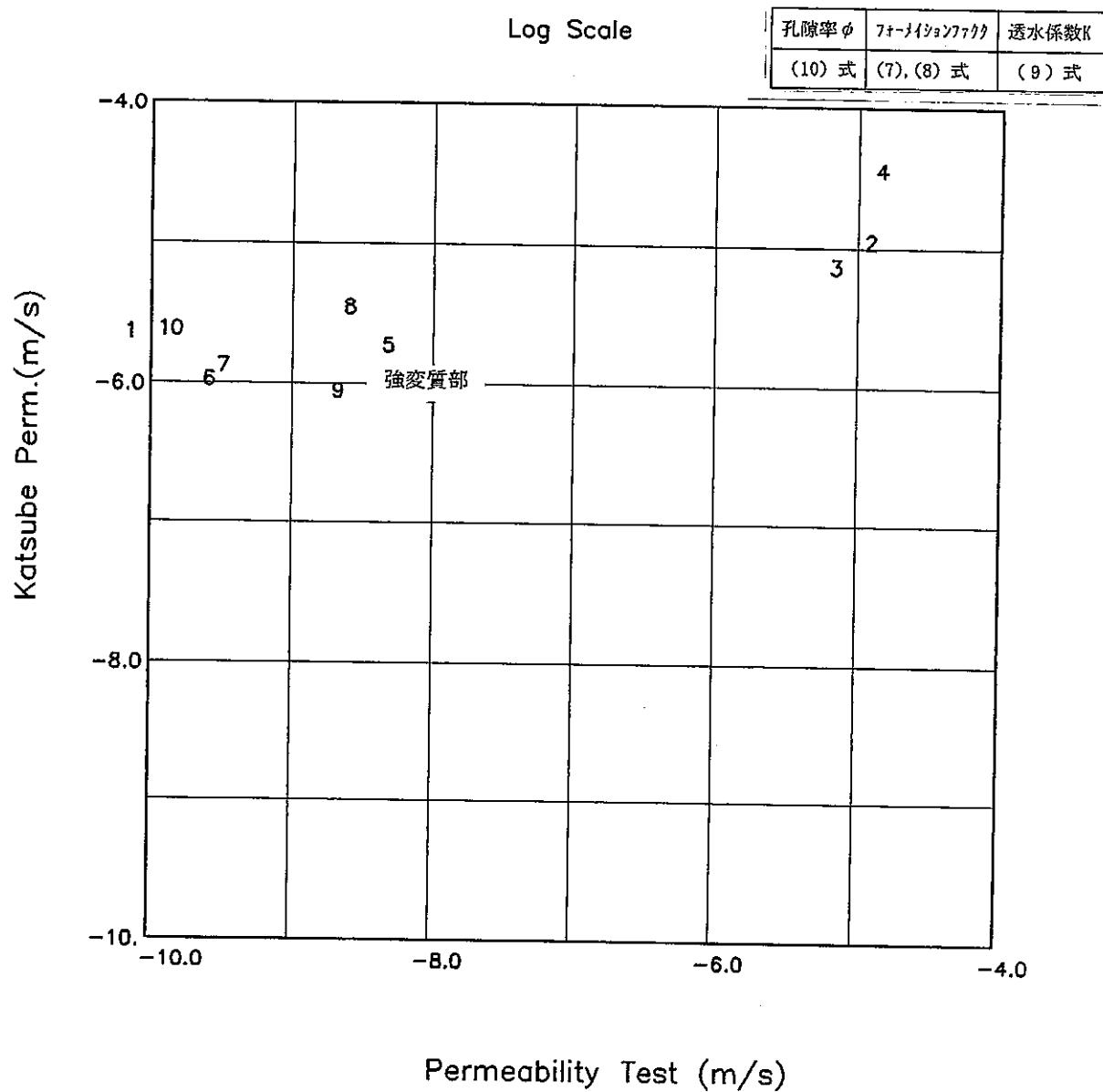


図 5.2.19 透水係数クロスプロット図 (DL/ES Katsube)

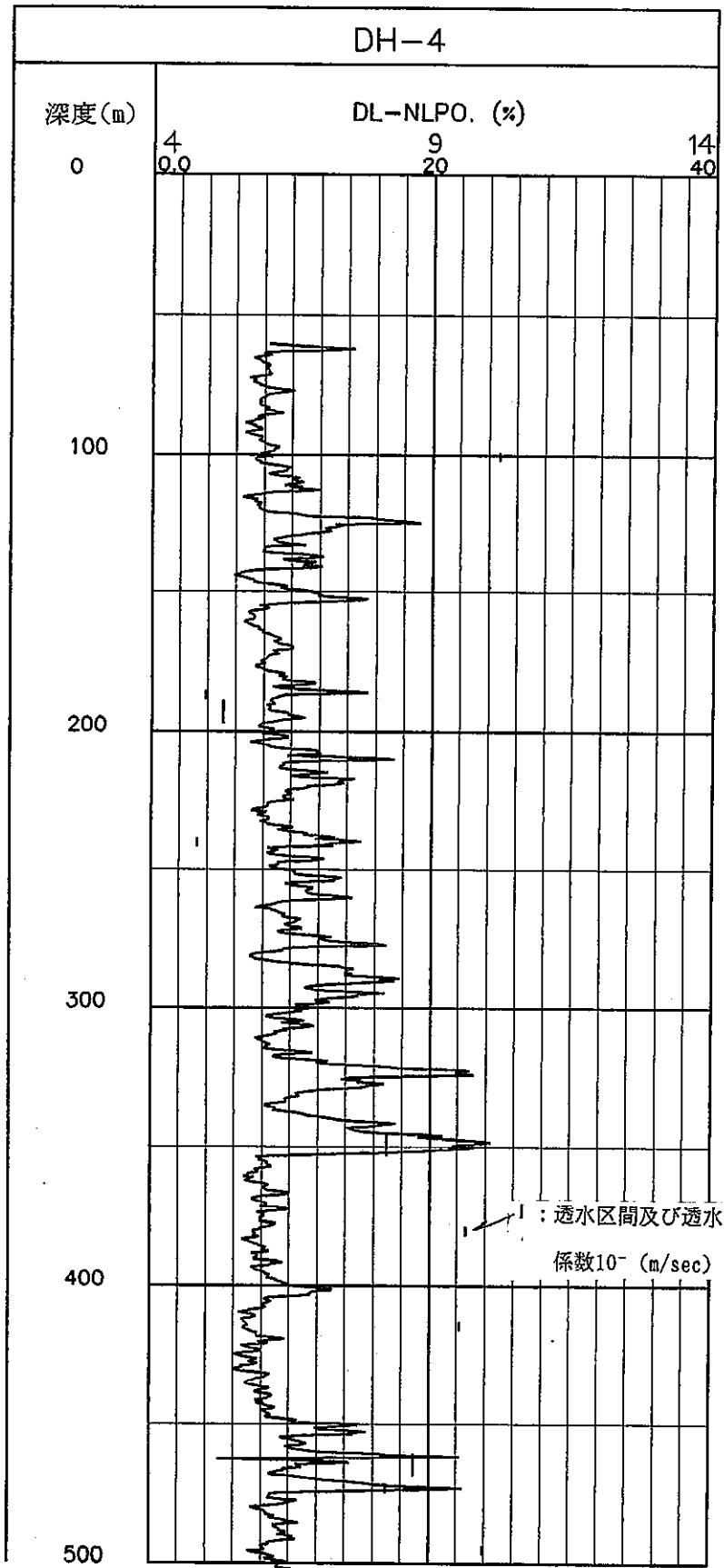


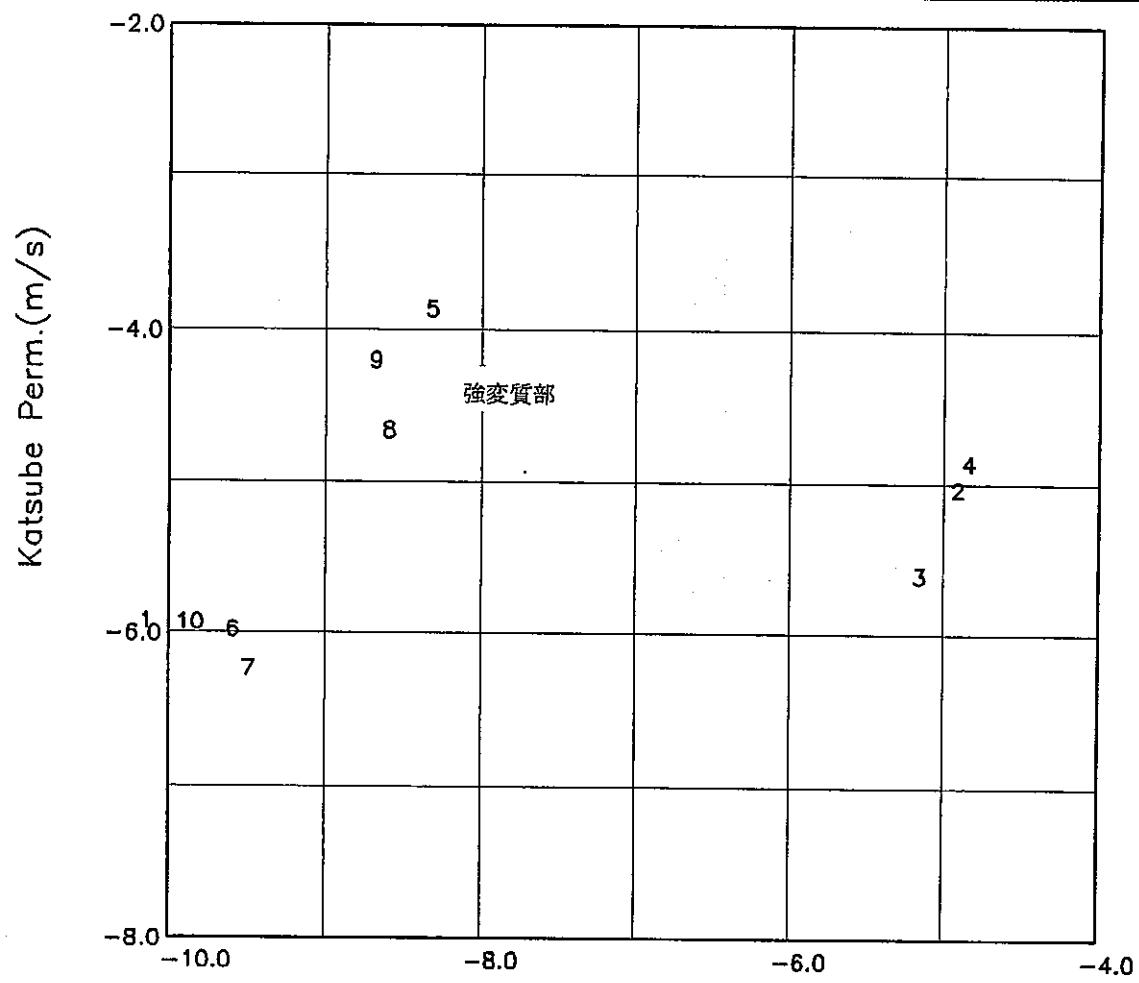
図 5.2.20 中性子-密度検層孔隙率変化図 (DH-4)

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER (DL-NL.PO)

Log Scale

孔隙率 ϕ	ナーナイショナル	透水係数 K
密度-中性子孔隙率	(7)式	(3)式



Permeability Test (m/s)

図 5.2.21 透水係数クロスプロット図 (DL-NL Katsube (7)-(3))

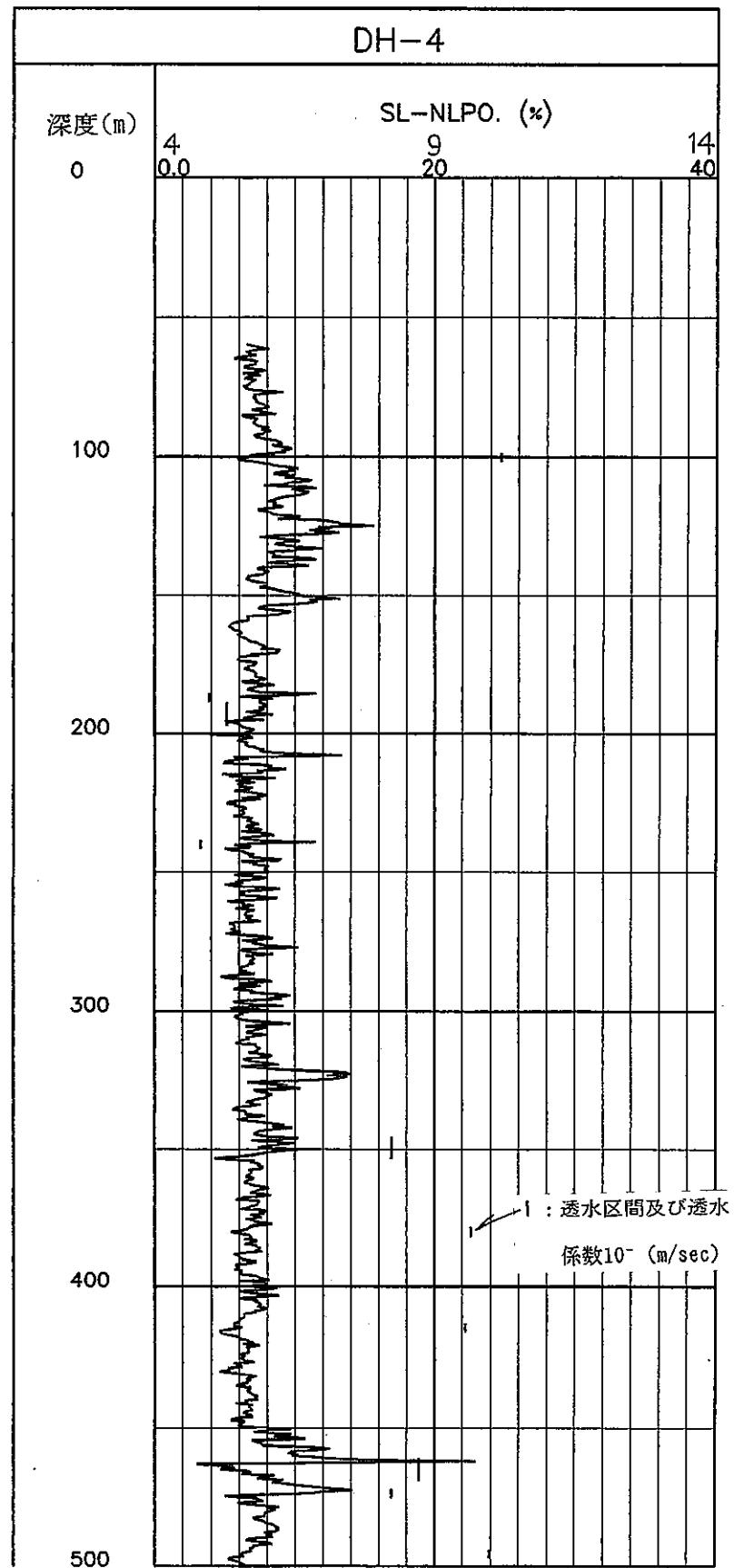


図 5.2.22 中性子一音波検層孔隙率変化図 (DH-4)

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER (SL-NL.PO)

Log Scale

孔隙率 ϕ	ナーマイショングラフタ	透水係数 K
音波-中性子孔隙率	(7) 式	(3) 式

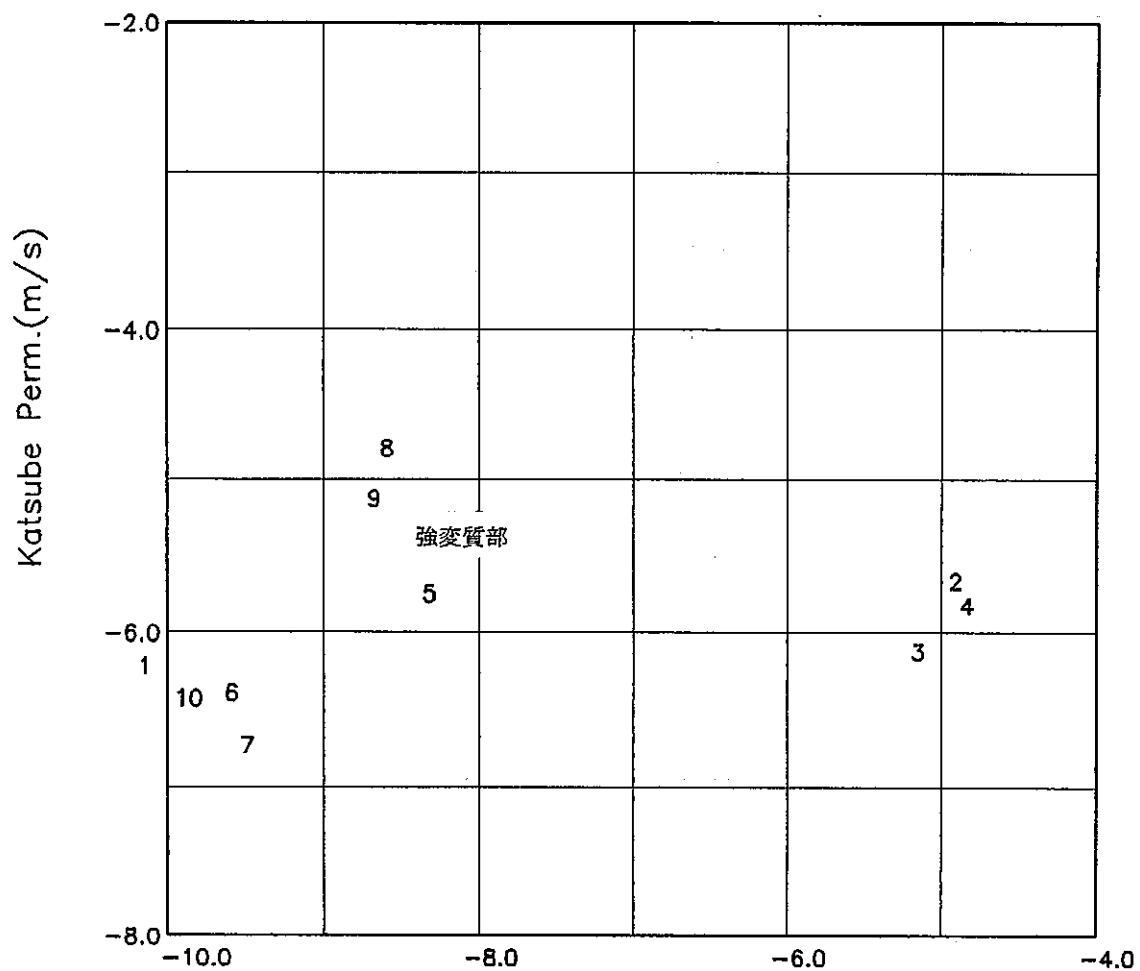


図 5.2.23 透水係数クロスプロット図 (SL-NL Katsube (7)-(3))

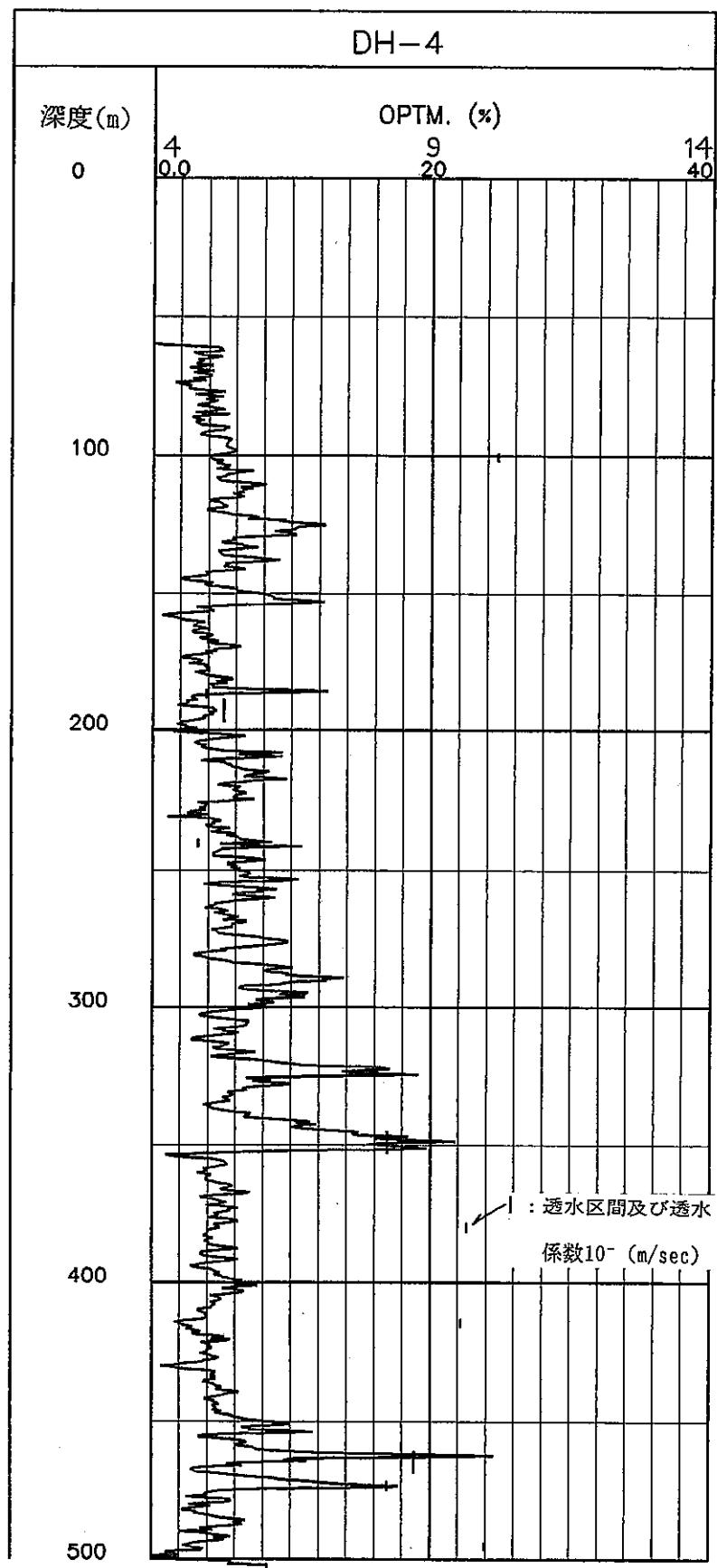


図 5.2.24 岩相解析孔隙率変化図 (DH-4)

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER (OPTM.PO)

Log Scale

孔隙率 ϕ	フォーメーションフラクタ	透水係数 K
岩相解析より算出した孔隙率	(7) 式	(8) 式

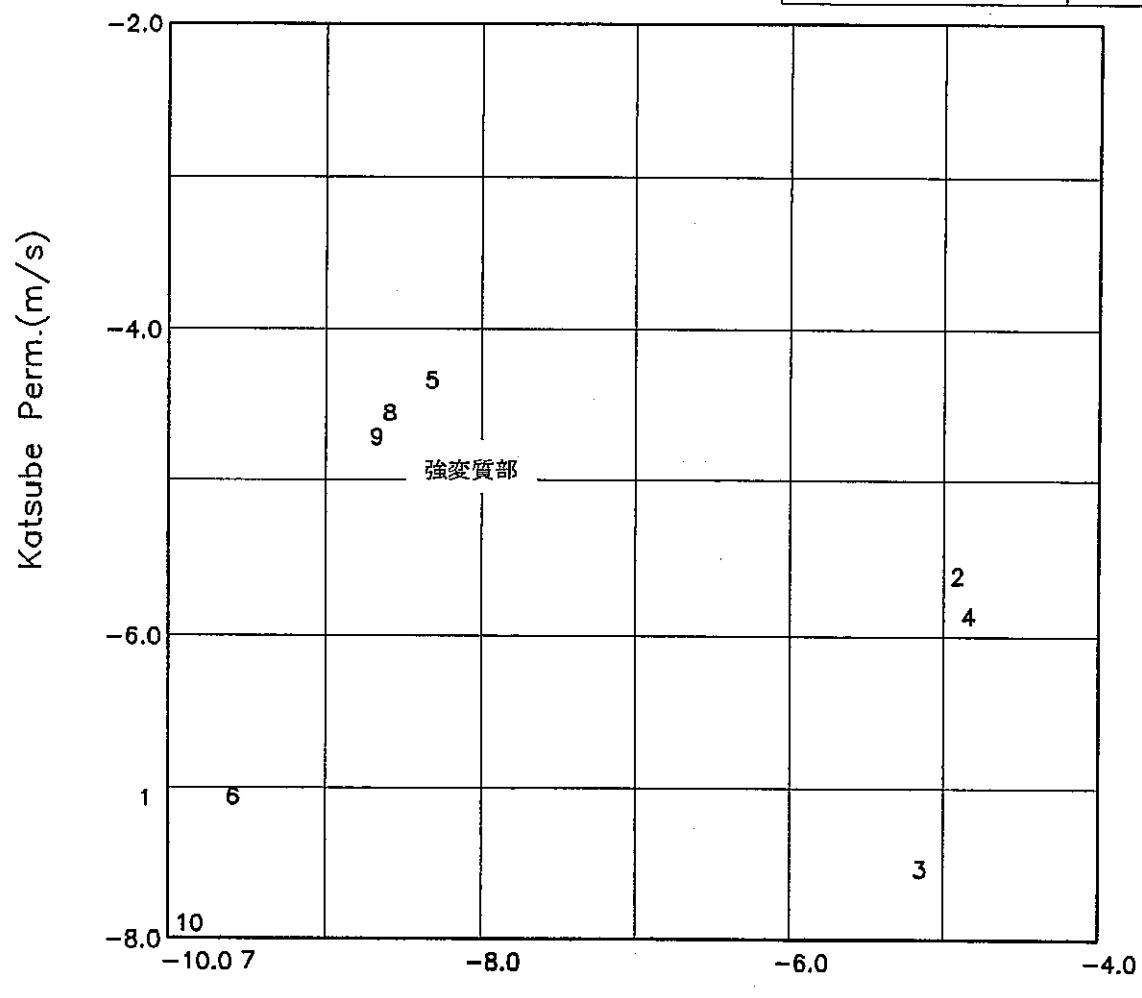


図 5.2.25 透水係数クロスプロット図 (OPTM Katsube (7)-(3))

その結果を図5.2.26に示す。

更に、それらの因子である割れ目のファクタや変質部並びに透水係数のファクタについて物理検層データと原位置透水試験結果について比較・検討した。

その結果、DH-4号孔については、比抵抗値が300ohm-m以上の区間と300ohm-m以下に分割して、物理検層データから透水係数を算出した。

以下にその結果を示す。

(300ohm-m以上の花崗岩部)

$$L_o g \text{透水係数} = 1.50 \times L_o g (1.0 \times 10^{-3} [\frac{F_c}{F_d}]^{1.5}) + 3.00 \quad (14)$$

(300ohm-m以下の強変質の花崗岩部)

$$L_o g \text{透水係数} = 3.90 \times L_o g (4.1 \times 10^{-7} [\frac{F_d}{F_f}]^{-1.06}) + 13.6 \quad (15)$$

更に(14)式と(15)式を用いて、DH-4号孔の測定区間全体の透水係数を算出し、図5.2.27に示した。

DH-4

TOUSUI.T-LOG.PER

9

Log Scale

孔隙率 ϕ	フオーディションファクタ	透水係数 K
(10) 式	(8) 式の変形	(13) 式

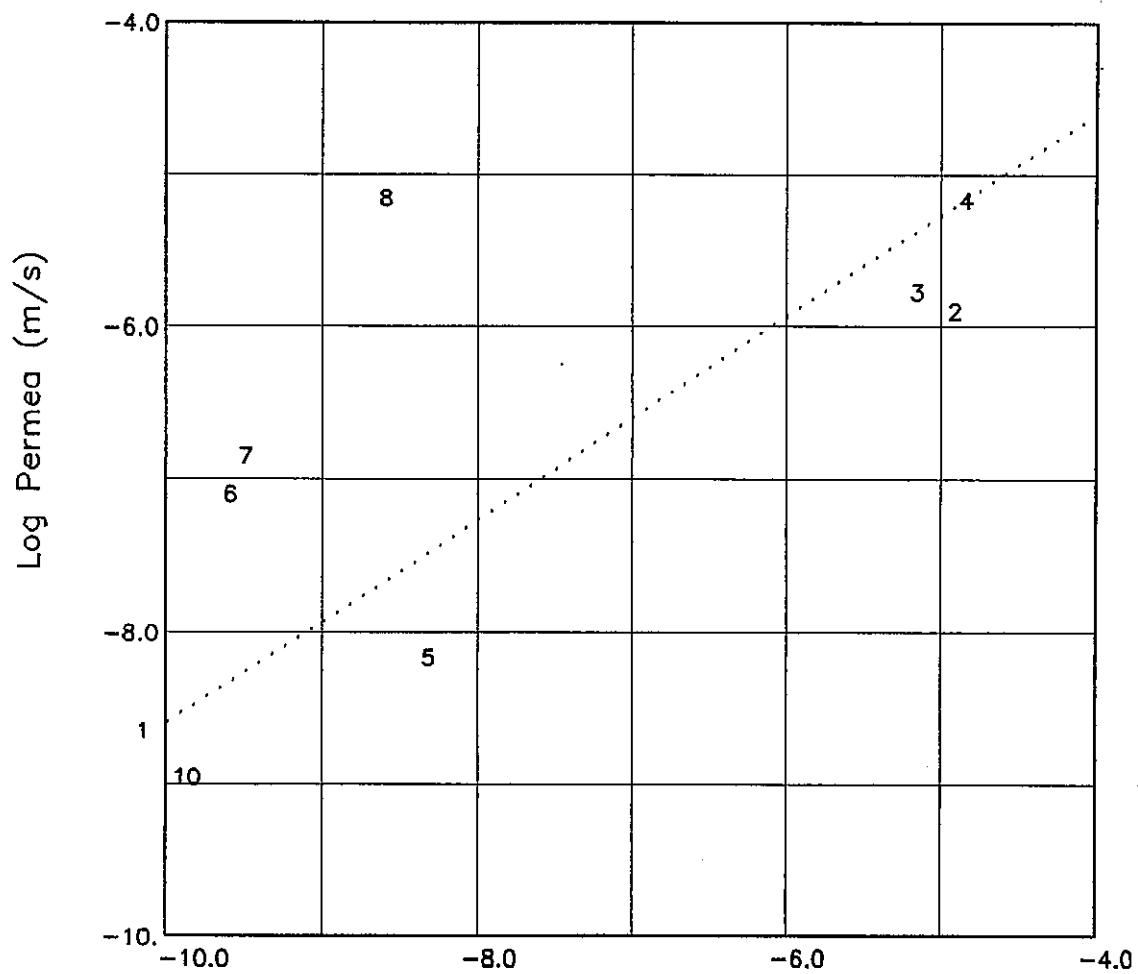


図 5.2.26 透水係数クロスプロット図

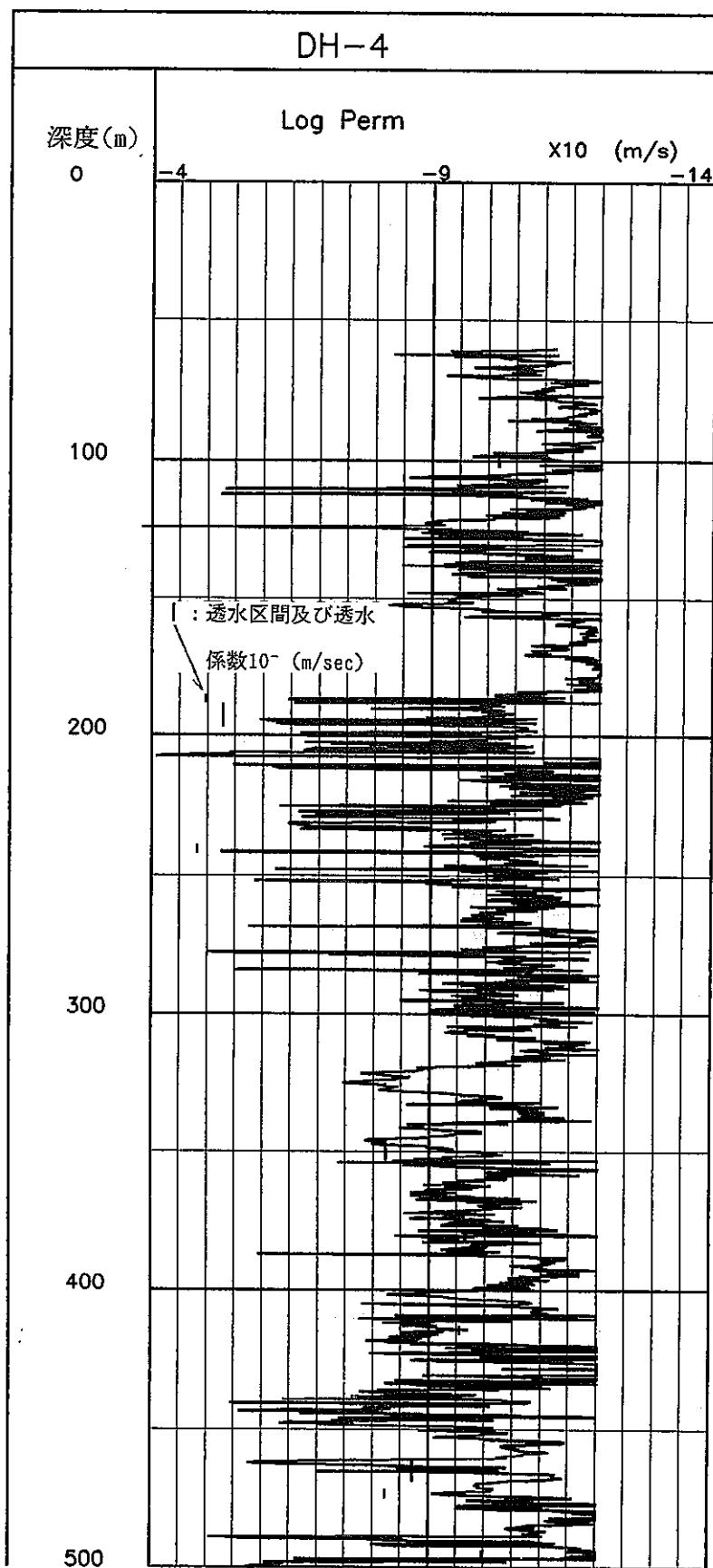


図 5.2.27 透水係数補正変化図 (DH-4)

5.3 DH-4号孔の流量検層データと原位置透水試験結果の比較・検討

解析方法は、一般的に用いられているフローメータ検層解析手法を駆使して流量検層データと原位置透水試験結果の比較・検討を行った。

解析に用いた流量検層データは、注水流量130l/min状態で測定したデータを使用した。流量検層データを図5.3.1～図5.3.4に示す。

フローメータは、孔井断面の直線的な流体の移動をインペラの回転運動に変換する方法で、フローメータの効率はフローメータの摩擦、流体密度および流体の粘性、更に限界速度にも左右される。

限界速度というのは、フローメータのインペラが回転を開始する最小の流体速度である。今回の限界速度はゼロに近い値を示していた。

実際の解析手法として、データ・ポイントを利用して平均的スロープを以下の式を用いて計算した。

$$m = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

但し、 m : スロープ特性(m/min/rps)
 X : ライン速度(m/min)
 Y : rps、回転数/sec

このスロープの切片は、見掛けの流体速度を表している。

$$va = \frac{\sum Y - m \sum X}{n}$$

但し、 n : ポイントの合計
 va : 見掛けの流体速度(m/min)

フローメータから解析された速度 va は、孔径の中心における流体速度を示している。(図5.3.5 参照)

今回の解析では、10cm毎の流体速度と1m毎の流体速度を示した(図5.3.6, 図5.3.7)。しかし、10cm毎の流体速度(図5.3.6)は、変化に富んでいて本来の流体変化の特徴を示していない。そのため、原位置透水試験結果の比較・検討の資料として、1m毎の流体速度を用いた。

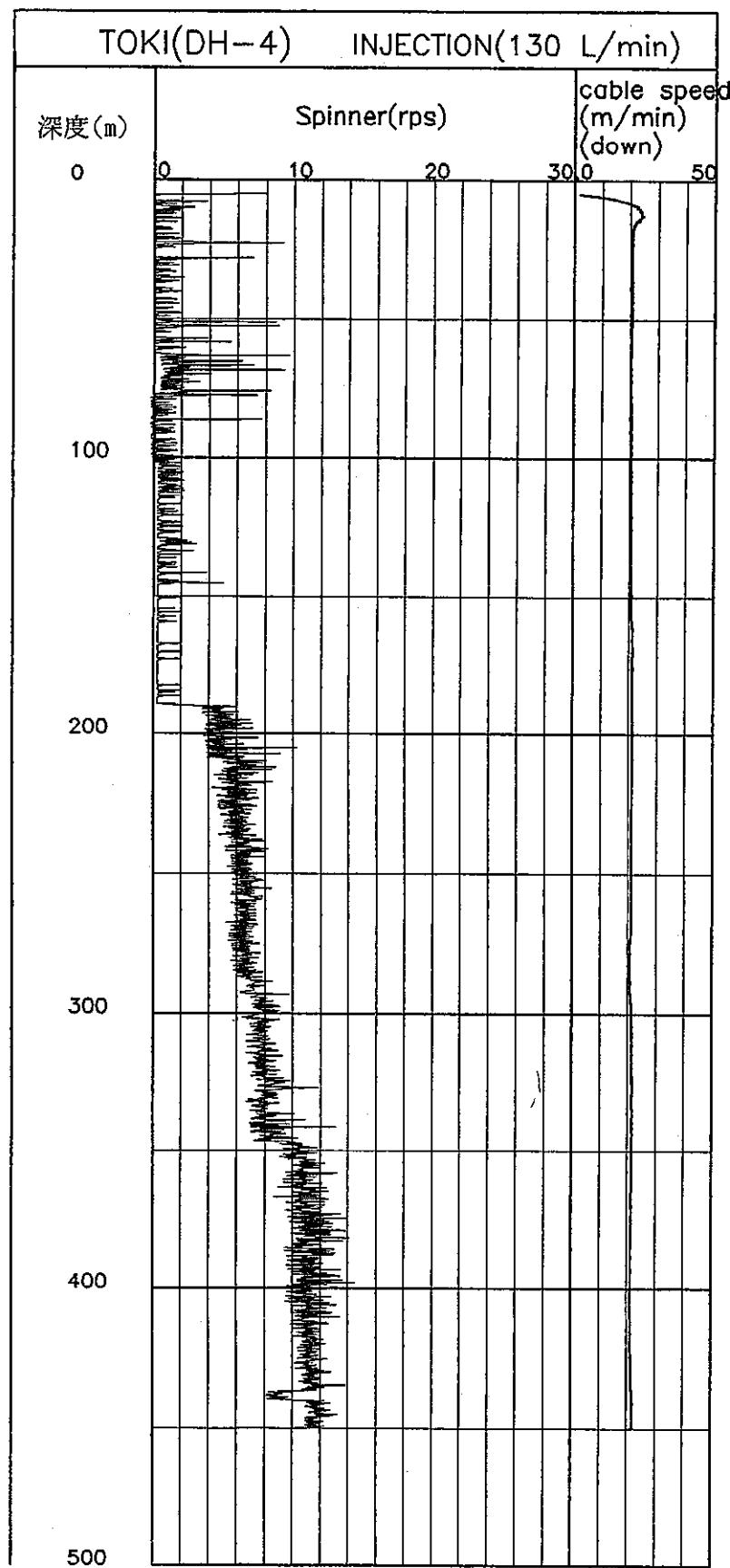


図 5.3.1 フローメータ検査図 (2-1 down:130 ℥/min注水)

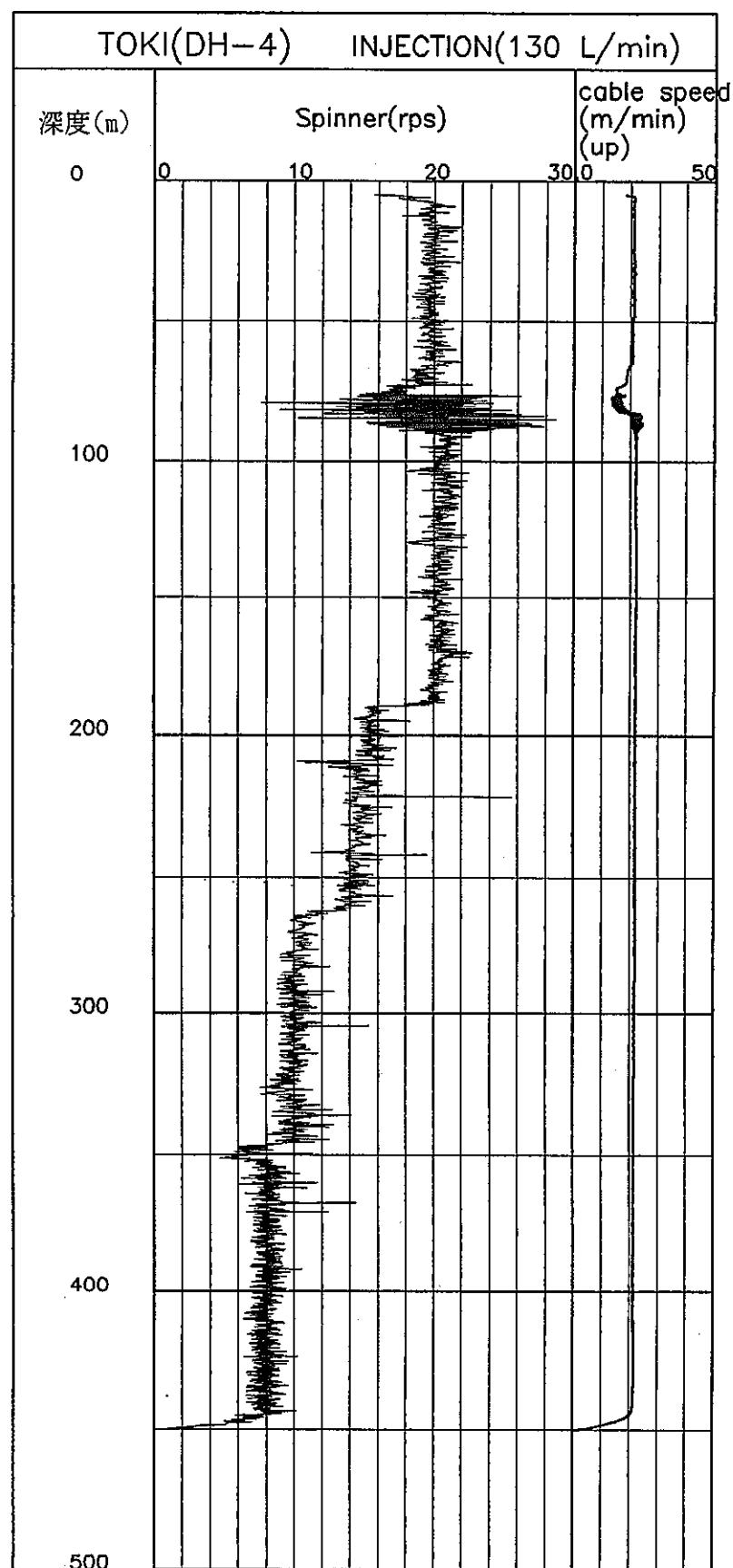


図 5.3.2 フローメータ検層図 (2-2 up:130 l/min注水)

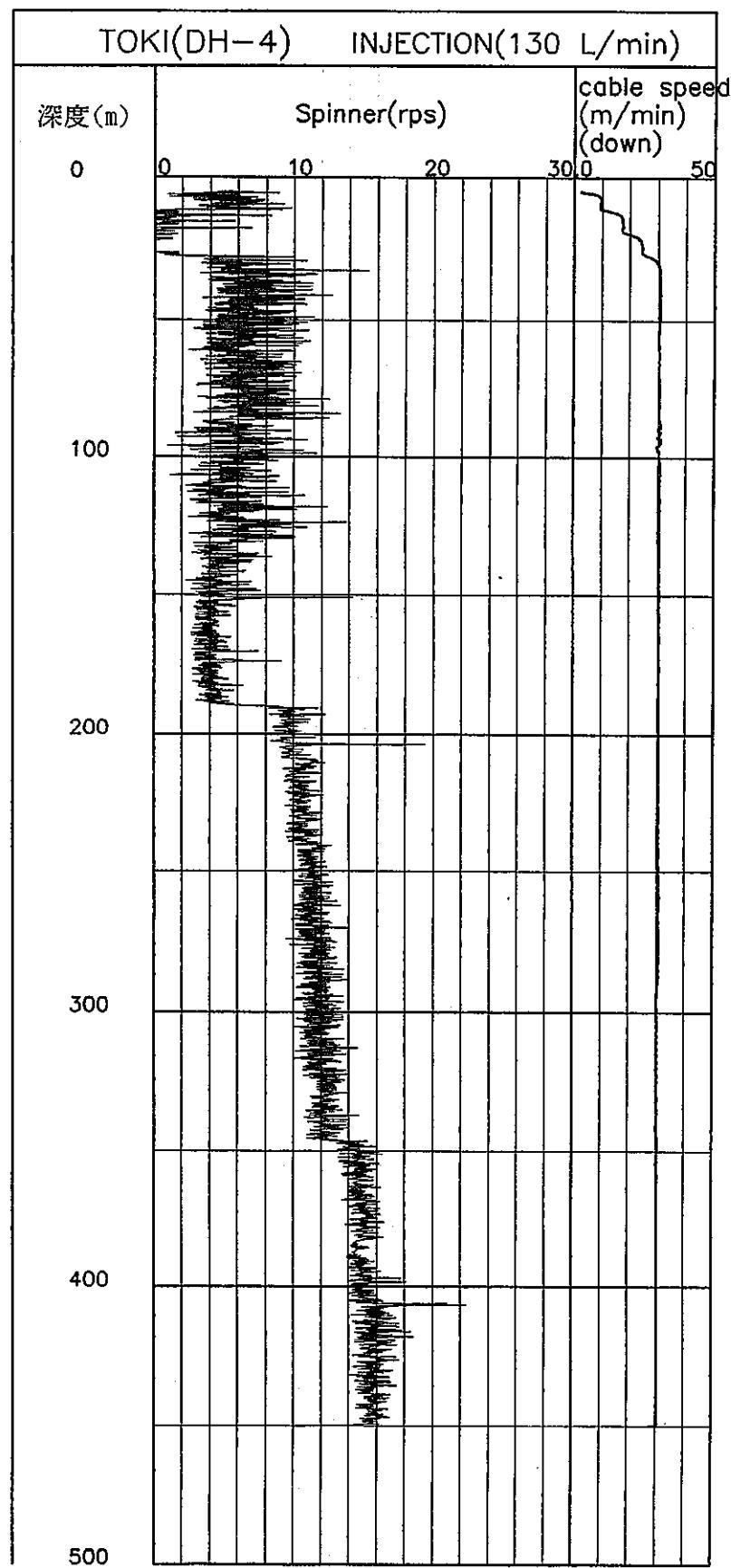


図 5.3.3 フローメータ検層図 (2-3 down:130 ℥/min注水)

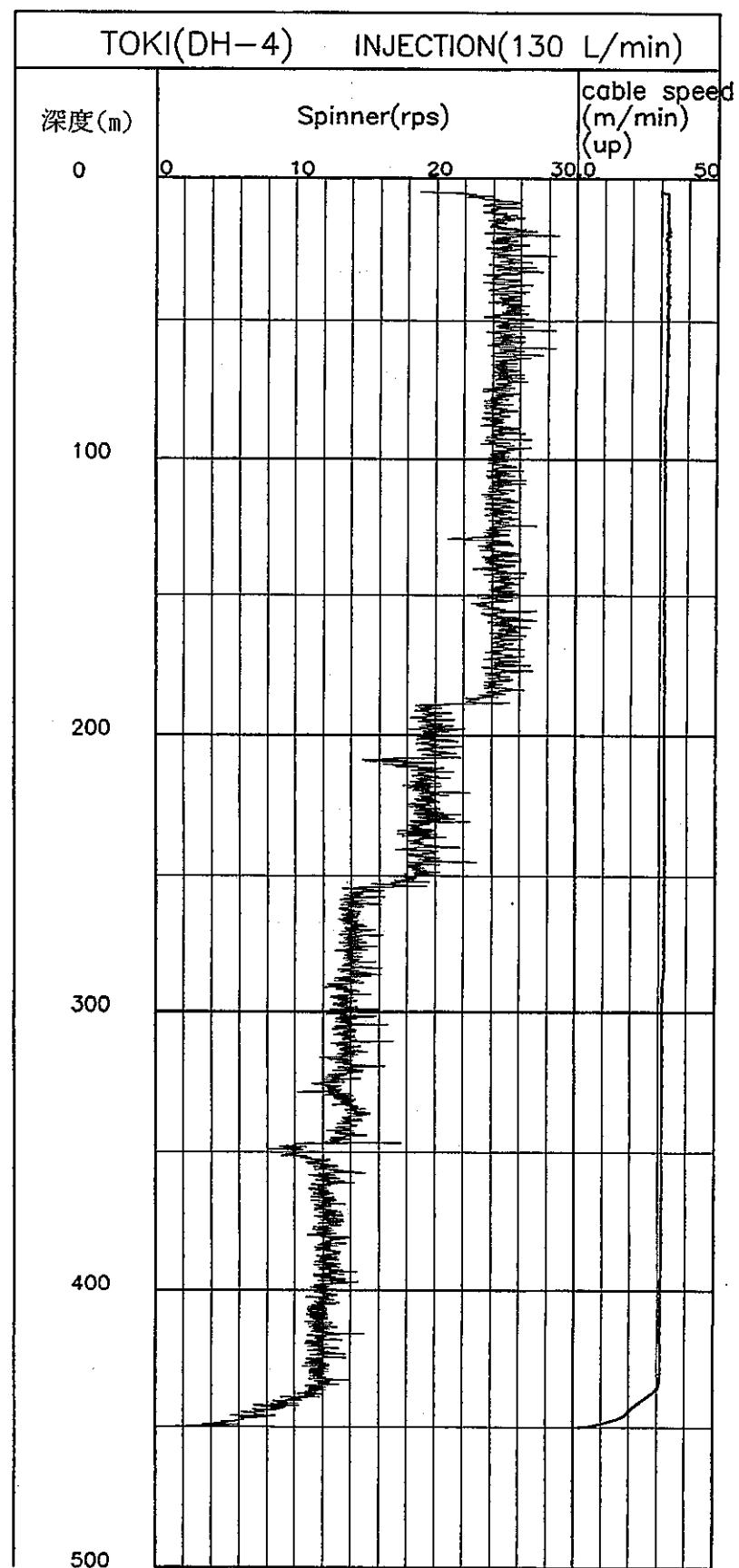


図 5.3.4 フローメータ検査図 (2-4 up:130 ℥/min注水)

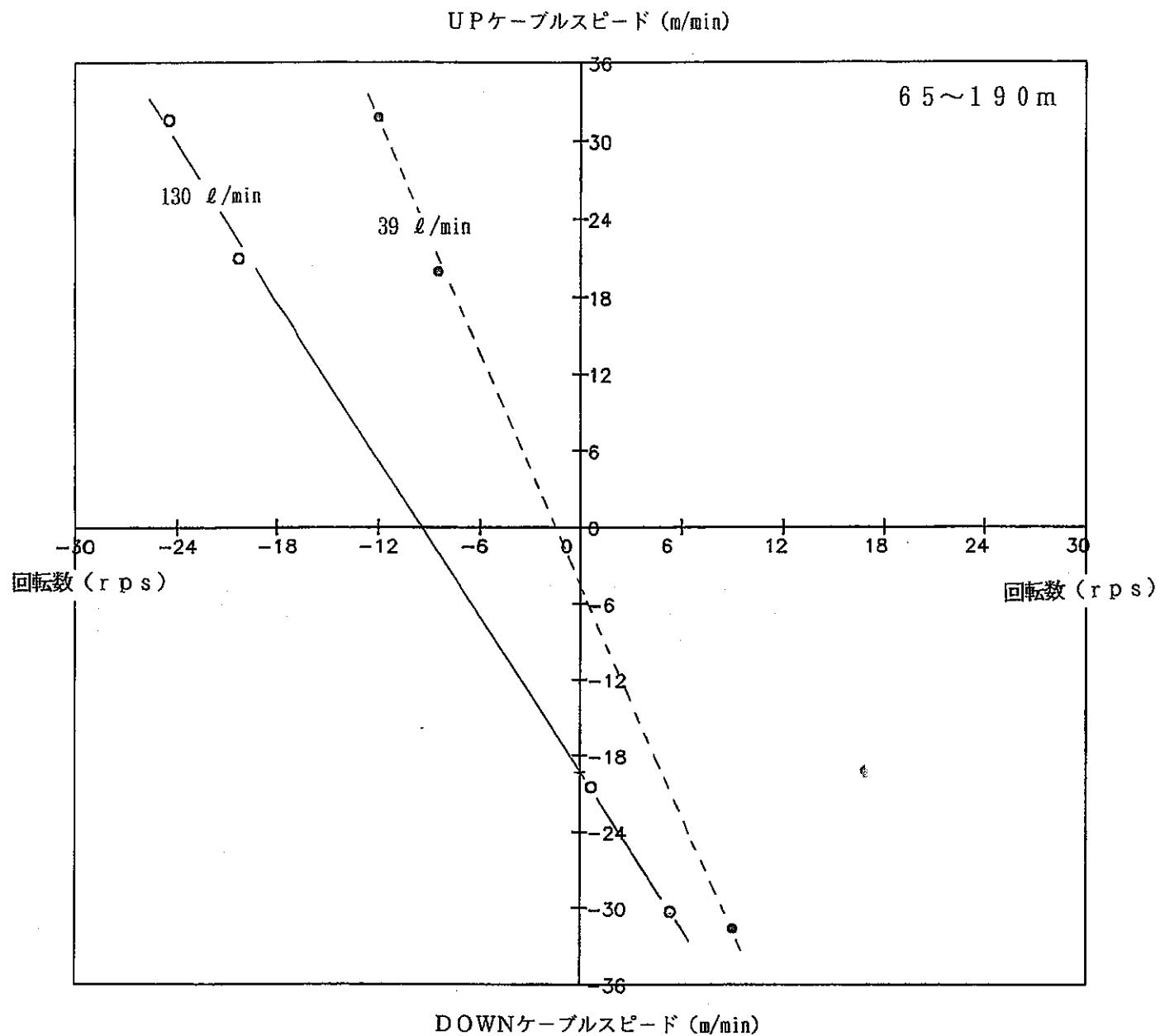


図 5.3.5 フローメータ解析図(深度 65～190m)

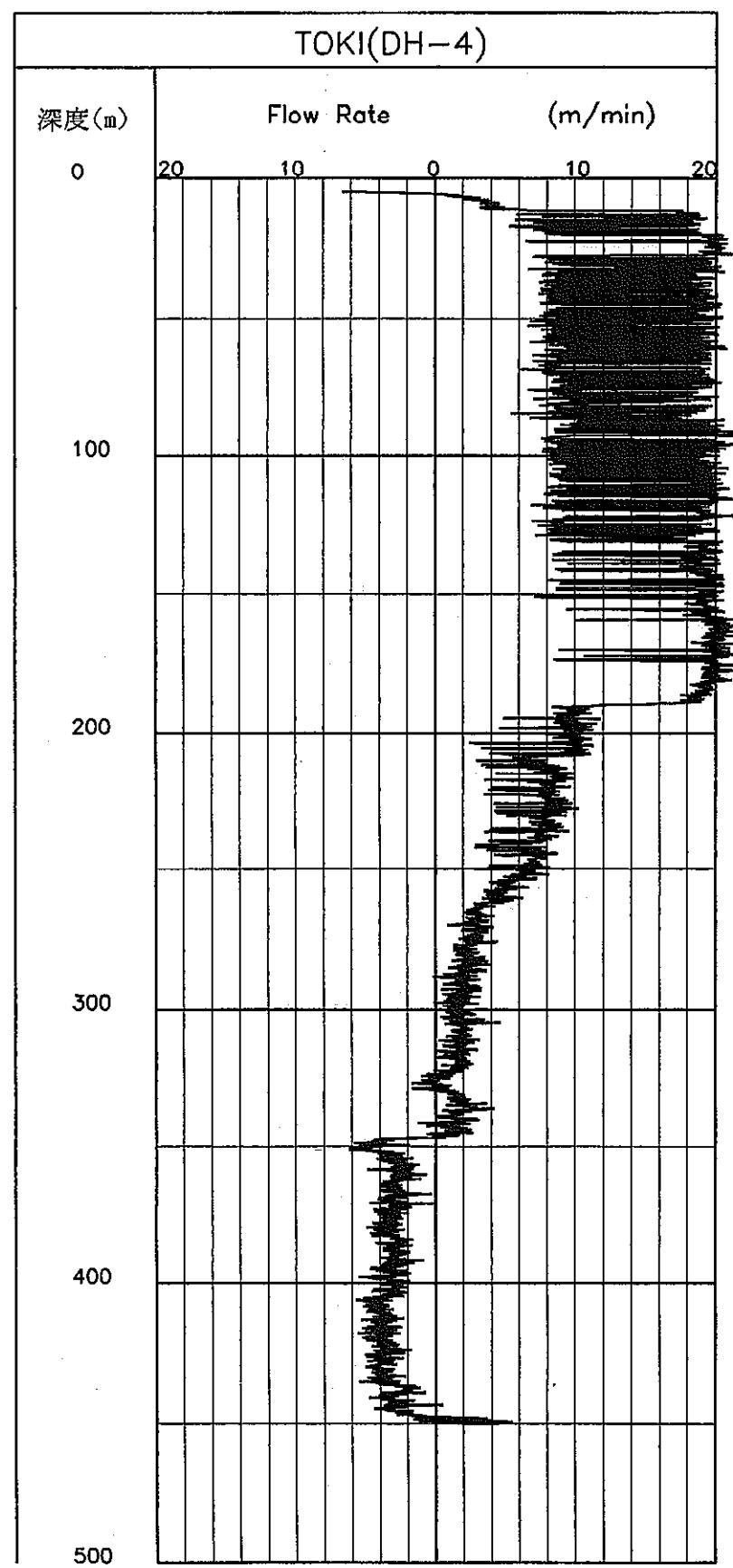


図 5.3.6 流体速度変移図 (10cm毎) (DH-4)

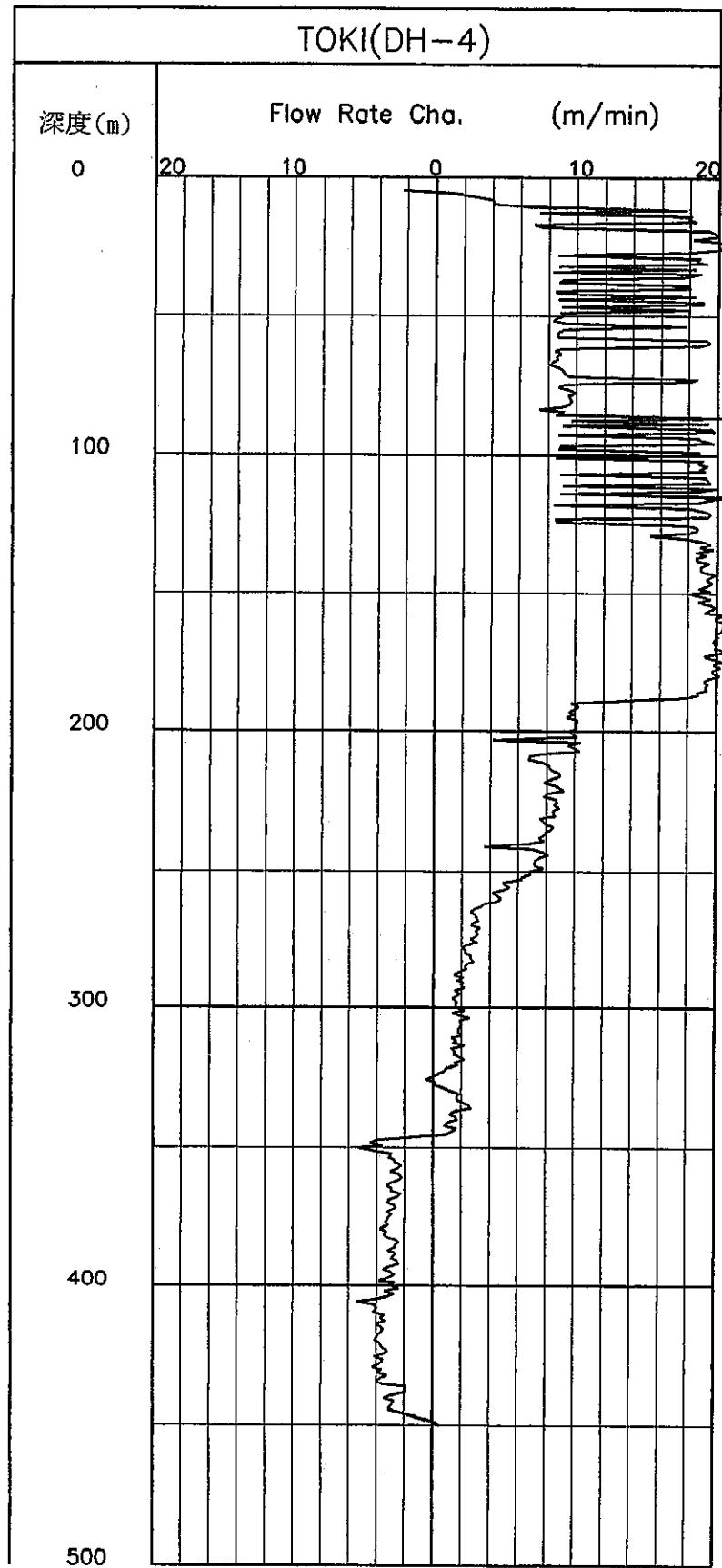


図 5.3.7 流体速度変移図 (1 m毎) (DH-4)

次に、1m毎の流体速度から1m毎の流体速度の変化を図5.3.8に示し、流体速度が減じる箇所で、孔内流体が地層に流入していることを基本とした。

(図5.3.9 参照)

1m毎の流体速度の変化を基に、原位置透水試験結果と比較・検討した。

その結果、図5.3.10のような関係が得られた。

その関係式を以下に示す。

$$\text{透水係数} = 10^{(4.0 \times \text{FLOW RATE} \times 0.32 + 8.4)} \quad (16)$$

その関係式・(16)式より、DH-4号孔の測定区間について透水係数を算出し、図5.3.11に図示した。

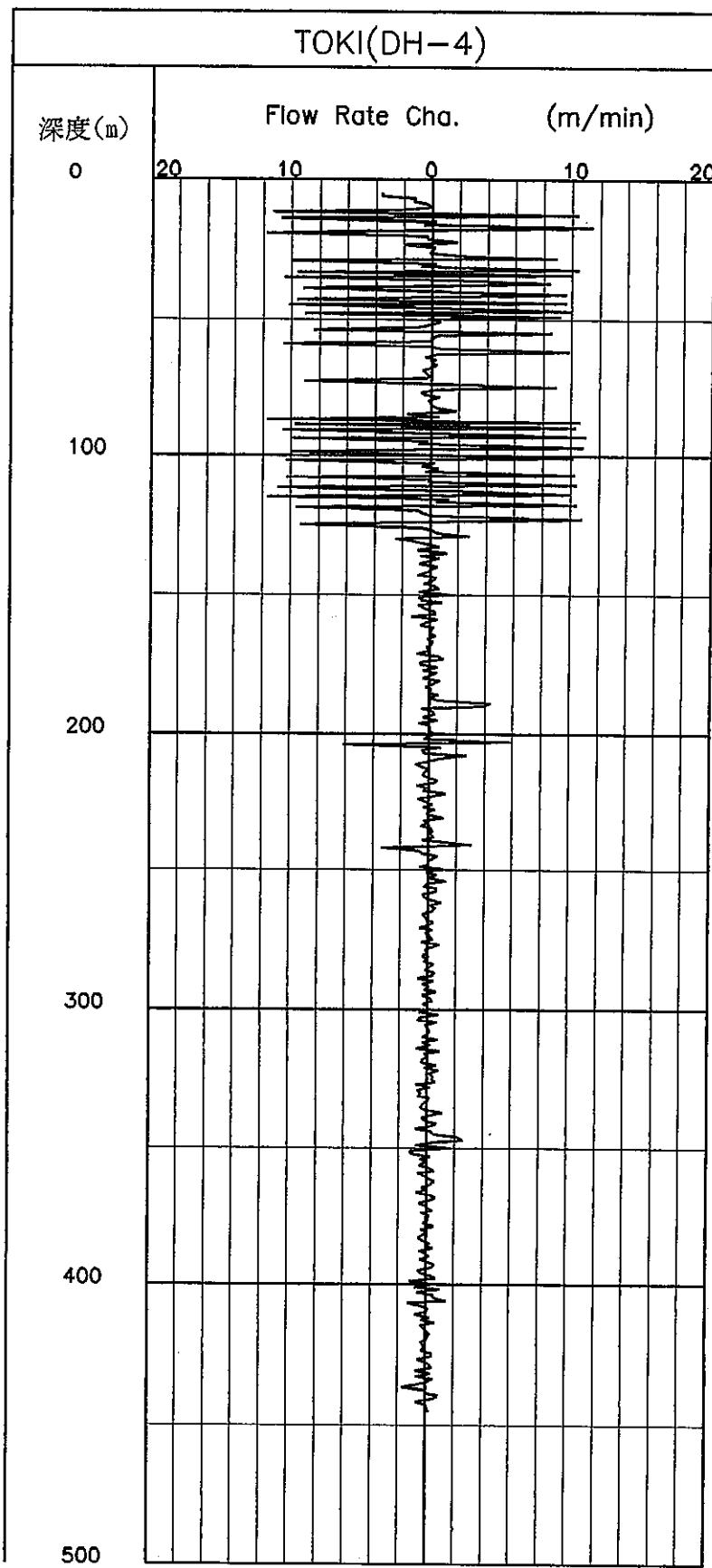


図 5.3.8 流体速度変化図 (1 m毎) (DH-4)

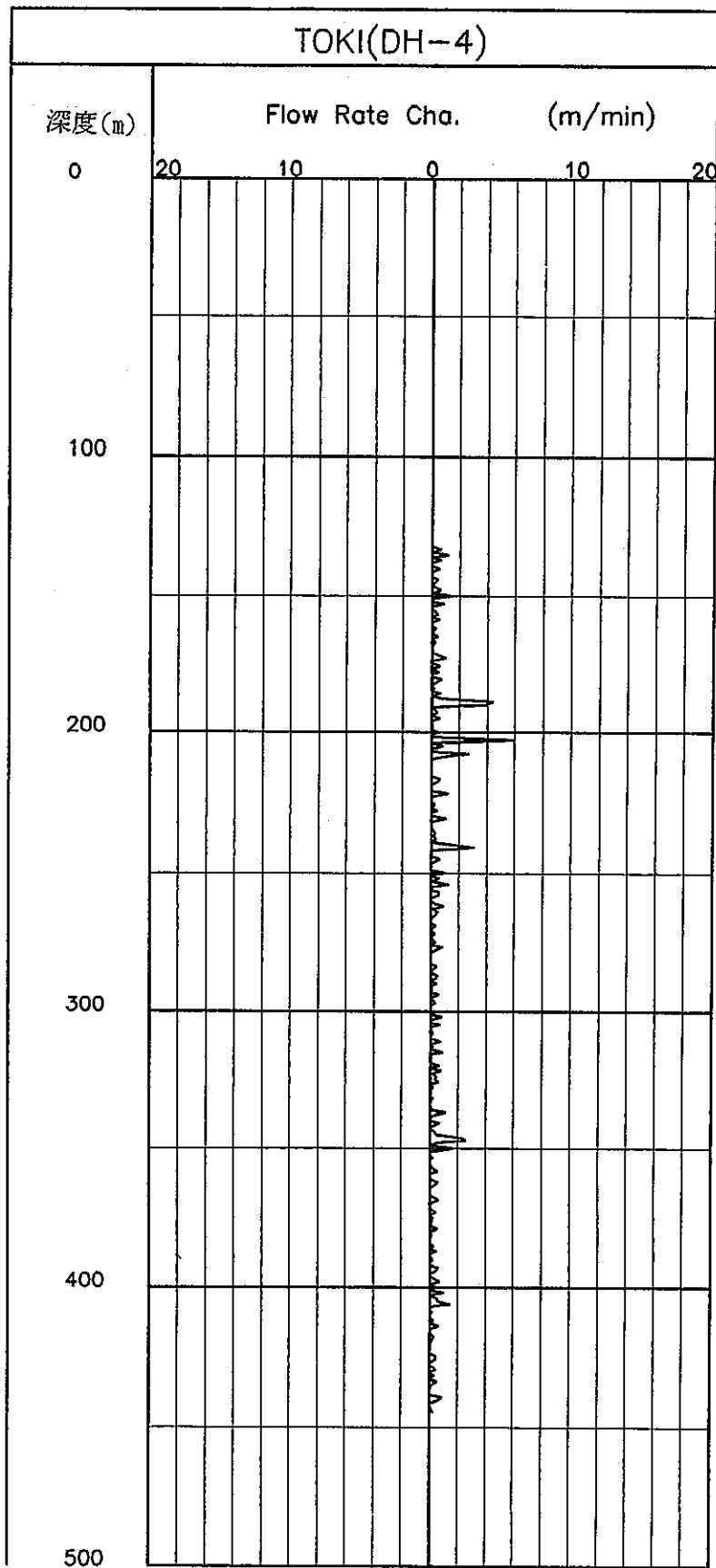


図 5.3.9 補正流体速度変化図 (1 m毎) (DH-4)

DH-4

PERMEA.CO-FLOW.R

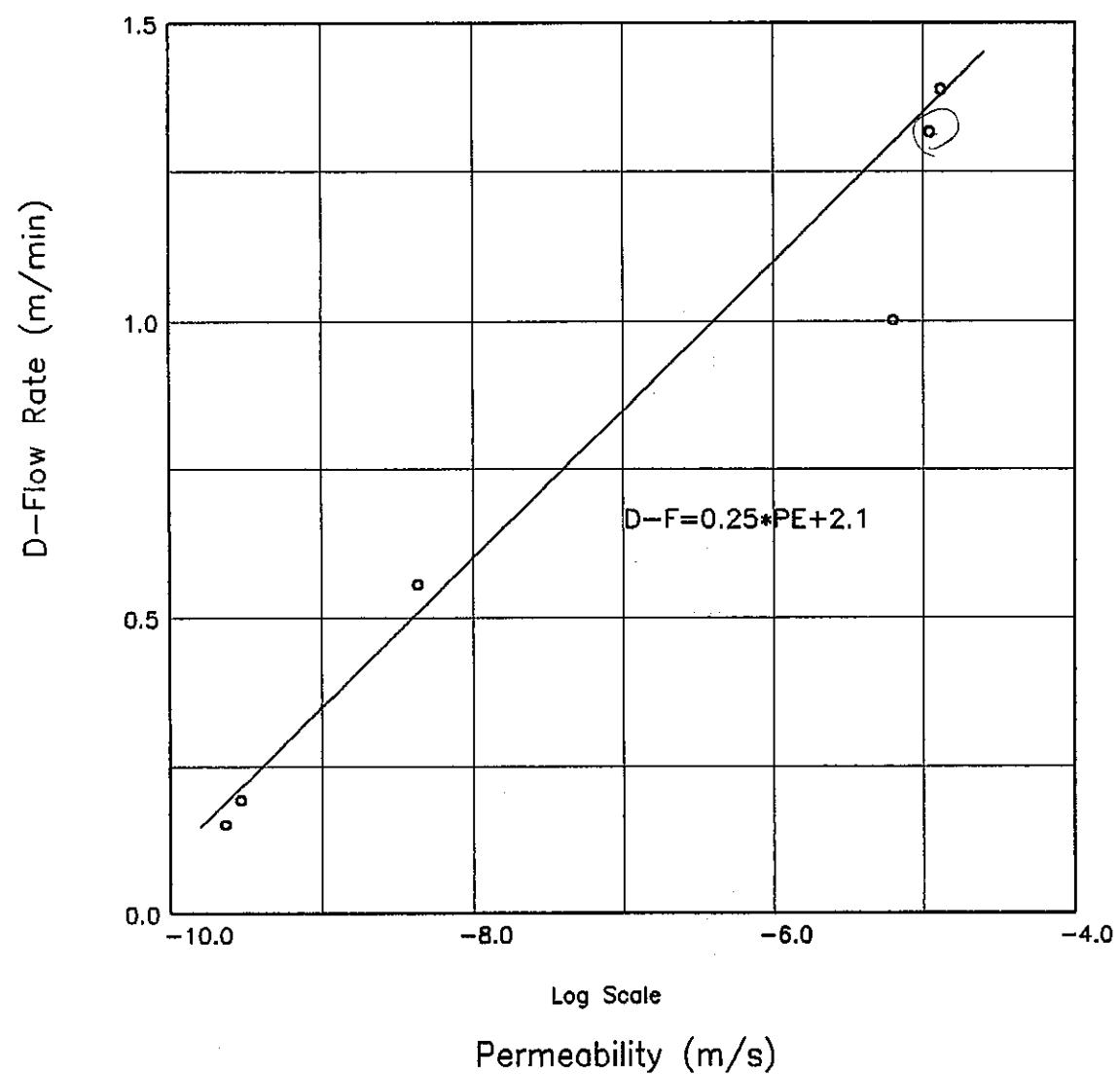


図 5.3.10 透水係数補正クロスプロット図 (FLOW METER-PERMIAB.)

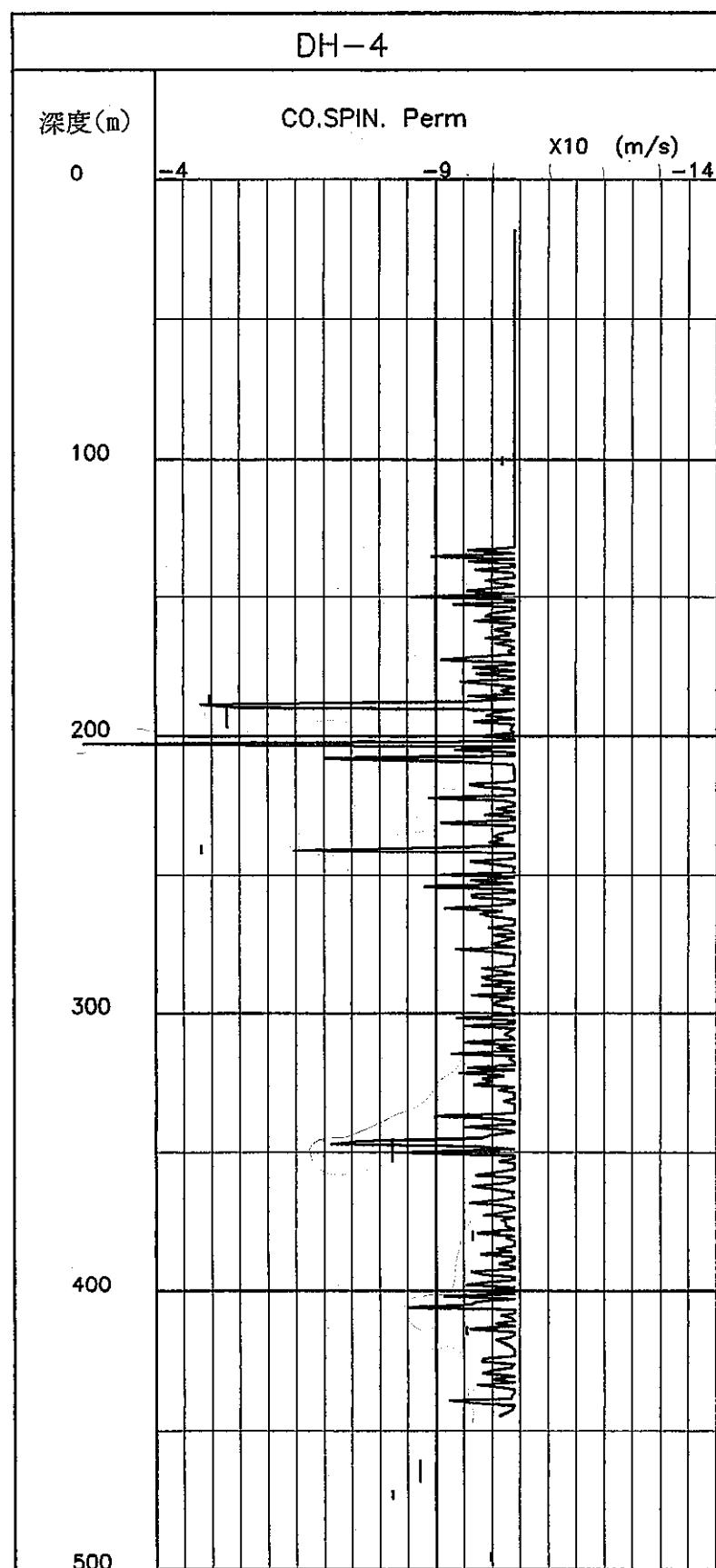


図 5.3.11 透水係数補正変化図 (DH-4)

6.まとめ

6.1 複合岩相解析（オプテマ）

オプテマ・プログラムにより求めた岩相比率等について添付図-③a, bに示した。

先に述べたように、4岩相モデルを考え、鉱物組成の観点からは一般的な花崗岩(Granite-2)とやや塩基性成分に富んだ花崗岩(Granite-3)の二種類を考えた。

この花崗岩(Granite-3)は一般的花崗岩(Granite-2)に比べて密度値が高く、中性子孔隙率が大きく、自然ガンマ線強度が低いとした。又、音波走行時間はやや大きいとした。これらの検層レスポンスは音波走行時間を除いて花崗閃緑岩に特徴的のものであるが、今回のモデルでは音波走行時間をやや大きいとした方が実測値によく合った。(花崗閃緑岩の音波走行時間は、花崗岩に比べて一般にやや小さいか同程度である。)

風化・変質作用に関しては、風化変質花崗岩(Granite-1)と頁岩(Shale)の組合せで評価した。風化変質花崗岩および頁岩の原岩としてはGranite-2とGranite-3の両方を考えている。風化変質花崗岩の特性としては低密度、低速度(音波走行時間大)であるが、物理的に形成されたフラクチャー等は孔隙率の増減で評価する方が適当と考えられるのでマトリックス自体の中性子孔隙率は原岩と同程度とした。一方、頁岩すなわち風化・変質作用によって生成される粘土鉱物の最も重要な特徴は、導電性を有し低比抵抗を示す点である。その他、頁岩の性質としては低密度、低速度、非常に大きい中性子孔隙率(40%)である。自然ガンマ線強度は風化変質花崗岩と頁岩、共に原岩より大きいとした。

AN-1号孔 (添付図-③a および 表6.1.1a 参照)

300m以浅の塩基性鉱物に富んだ花崗岩(Granite-3)が優勢なゾーンと、300m以深の一般的花崗岩(Granite-2)が優勢なゾーンに大別される。しかし、浅部を更に詳しく見ると 160m ~ 225m間に、一般的な花崗岩の比率が高い部分を挟んでいる。この部分の解釈としては、225m付近に逆断層が存在して Granite-3・Granite-2の岩相変化が繰り返している可能性が考えられる。

DH-4号孔 (添付図-③b および 表6.1.1b 参照)

AN-1号孔とは約2km離れており、基準面(孔口)の標高は50.2m高い。堆積岩層と異なり、深度対比つまり岩相の水平方向の連続性については明確に存在するとは限らないが、両孔に共通のパターンも見受けられるので、AN-1号孔に対比しながら考察した。

両孔の比較

孔井全般の状況として、DH-4号孔の方がAN-1号孔より風化あるいは変質

表6.1.1a 岩相解析結果(AN-1号孔)

深度 (m)	岩 相			検層測定値						岩相区分
	Shale Granite-1	Granite-2	Granite-3	孔隙率	比抵抗 LN	自然 γ線 GR	密度 ρ_b	音波 ΔT	中性子 ϕ_N	
20~100m	◎ ○ ○			大	低	高	中~小	遅	大	A 風化帶
100~160m	— △ ○					低	中			B 塩基性鉱物に富む花崗岩
160~225m	○ ○ △	△	○	中	中	高	中	遅	中	C 花崗岩 <断層?>
225~300m	△ △ ○	△	○	中	低	低	大	中~遅	中	B 塩基性鉱物に富む花崗岩
300~440m	○ ○ —	—	—	小	高	高	中	中	小	C 花崗岩 岩質 良
440~570m	○ ○ ○	○	○	中	低	中~高	中~小	遅	中	D 変質帶 岩質 不良
570~780m	— ○ —	—	—	小	高	中	中	速	小	E 花崗岩 岩質 良
780~950m	△ ○ △	○	△		中~高					F 花崗岩 岩質 不良
950~1000m	△ ○ ○	○	○	小	中	低	中	遅	小	F 塩基性鉱物に富む花崗岩 岩質 不良

各岩相の量比 多 ◎>○>△>— 少

Granite-1 + Shale (風化変質花崗岩)

Granite-2 (一般的な花崗岩)

Granite-3 (塩基性鉱物に富む花崗岩)

* 岩相区分 A ~ F は岩相タイプを表し、両孔の対比等のために便宜上つけた記号で岩質の程度には無関係。

* 岩相欄の孔隙率はオブテマで求めた値

表 6.1.1 b 岩相解析結果 (DH-4号孔)

深 度 (m)	岩 相			検層測定値						岩 質	岩相区分
	Granite-1 + Shale	Granite-2	Granite-3	孔隙率	比抵抗 LN	自然 γ 線 GR	密度 ρ_b	音波 ΔT	中性子 ϕ_N		
60～90m	◎	◎	—	中	高	高	中	中		風化帶	A
90～160m	△	△	◎	大	低	低	中～大	遲		塩基性鉱物に富む花崗岩	B
160～250m	○	◎	—	小	高	高	中	中	小	花崗岩 岩質 良	C
250～350m	◎	◎	○	大	低	中高	中～小	遲	中	変質帶 岩質 不良 <断層破碎帶?>	D
350～460m				中	高	中	大	中～速		花崗岩 岩質 良	E
460～480m	△	◎	△	大	低	中	小	遲		花崗岩 岩質 不良	—
480～500m				中	高	高	大	速		花崗岩 岩質 良	E

各岩相の量比 多 ◎>○>△>— 少

Granite-1 + Shale (風化変質花崗岩)

Granite-2 (一般的な花崗岩)

Granite-3 (塩基性鉱物に富む花崗岩)

* 岩相区分 A～F は岩相タイプを表し、両孔の対比等のために便宜上つけた記号で岩質の程度には無関係。

* 岩相欄の孔隙率はオブテマで求めた値

* 460～480m間は 350～500mの中の部分的なフラクチャー・ゾーンとして岩相タイプ分けから除外した。

の度合いが大きく、フラクチャーもより多く、総じて岩質が不良である。孔内状況（孔壁状態）もDH-4号孔の方が悪く、検層データ品質（ログ・クオリティ）も悪い。当然、岩質の不良と密接な関連があると考えられる。

6.2 フラクチャー解析

① オプテマ孔隙率、② 2次孔隙率、③ 比抵抗の比 (LN/SN)、④ 孔径拡大を指標としてフラクチャーの検出を試み、その結果について表6.2.1a (AN-1号孔)、表6.2.1b (DH-4号孔) にまとめた。

但し、比抵抗比については以下の考察に基づき検討した。

AN-1号孔の場合

電気検層による見掛け比抵抗の測定値は孔内水の影響を強く受けるため、岩盤状態が悪く、孔内水の浸透がある部分はロング・ノルマル比抵抗値 (LN)、ショート・ノルマル比抵抗値 (SN) が共に低くなり、LN と SN のセパレーションがなくなる。つまり $LN/SN \approx 1$ となる。逆に、岩盤の状態が良く、孔内水の浸透がない場合は LN、SN の両比抵抗値が共に高くなるが、岩盤比抵抗》孔内水比抵抗であれば、LN と SN の間にセパレーションができる。つまり $LN/SN > 1$ となる。

DH-4号孔の場合

全深度区間でほとんどセパレーションが見られず、 $LN < SN$ と比抵抗値の関係が逆転しており、又、比抵抗値それ自身が全般に低い値となっている。（AN-1号孔の高比抵抗部 $8,000\sim10,000\Omega\text{m}$ に対し、DH-4号孔の高比抵抗部は $2,000\Omega\text{m}$ 。）しかし、低比抵抗部 ($1,000\Omega\text{m}$ 以下) の一部では、 $LN > SN$ となっており、その箇所は岩盤の状態が悪く、フラクチャーの発達が見られそうである。

このような結果となった原因としては、全般的な岩盤状態の不良と、孔内水比抵抗が非常に高かったことが考えられる。

整理すると下記のようになり、電気検層の比抵抗値の比をフラクチャー指標として用いる場合は、比抵抗値自体の値の高低と孔内水比抵抗値等との関係も考慮する必要がありそうである。

AN-1号孔	岩盤状態 良	-----	比抵抗 高	□	$LN/SN > 1$
	岩盤状態 不良	-----	比抵抗 低	□	$LN/SN \approx 1$

DH-4号孔	岩盤状態 中良	-----	比抵抗 中高	□	$LN/SN \leq 1$
	岩盤状態 不良	-----	比抵抗 低	□	$LN/SN > 1$

表 6.2.1 a フラクチャー解析結果 (AN-1号孔)

深 度 (m)	孔隙率 (トータル) φ	二 次 孔隙率 ϕ_{2nd}	比 抵 抗		坑 径 拡 大 (XY-CAL)	岩 質	岩 相 区 分
			比抵抗値 LN, SN	比 LN/SN			
22 - 25 m	○	◎	◎	◎		風化帶	A
79 m	◎	◎	◎	○			
103 m	◎	◎	◎	○	○	塩基性鉱物に富む花崗岩	B
162 - 164 m	◎			○		花崗岩	C
220 - 224 m	◎	◎	◎	◎	○		
270 m	○	◎	○	○	△	塩基性鉱物に富む花崗岩	B
300 - 304 m	◎	◎	○	○		花崗岩	C
455 - 498 m	○	◎	◎	◎	△	変質帶	D
522 - 560 m	◎	○	◎	◎	△		
790 - 800 m	△	△	○	○		花崗岩	E
820 - 830 m	△	△	○	○			
922 - 928 m		○	△	○		塩基性鉱物に富む花崗岩	F
968 - 1000 m	△	△	△	○	△		

各フラクチャー指標 顕著 ◎>○>△ 若干 (空欄は特に変化無し)

* 岩質および岩相区分は表 3.2.3 a によった。

* 岩質にはそのゾーンで優勢な岩相あるいは特徴的な性質を記してあり、必ずしも全体の性質を表していない。

* 孔隙率(トータル)はオブテマで求めた値

表 6.2.1 b フラクチャー解析結果 (DH-4号孔)

深 度 (m)	孔隙率 (トータル) ϕ	二 次 孔隙率 ϕ_{2nd}	比 抵 抗 比抵抗値 LN, SN	比 LN/SN	坑 径 拡 大 (XY-CAL)	岩 質	岩相 区分
124 - 130 m	◎	○	○	△	○	塩基性鉱物に富む花崗岩	B
148 - 155 m	◎	○	◎	○			
208 - 210 m	△	◎		△	◎	花崗岩	C
240 m	○	◎	△		○		
250 - 262 m	○	◎	△	△		変質帶	D
274 - 278 m	◎	◎	△	△	△		
286 - 300 m	◎	◎	◎	○	△		
320 - 330 m	◎	◎	◎	◎	◎		
340 - 353 m	◎	◎	◎	○	◎	花崗岩	E
398 - 408 m		○	◎	◎	△		
462 - 466 m	◎	○	◎		◎		
470 - 475 m	◎	○	◎	○	○		

各フラクチャー指標 顕著 ◎>○>△ 若干 (空欄は特に変化無し)

* 岩質および岩相区分は表 3.2.3 b によった。

* 岩質にはそのゾーンで優勢な岩相あるいは特徴的な性質を記してあり、必ずしも全体の性質を表していない。

* 岩相区分 A (風化带) の深度区間にはフラクチャーの微候なし。

* 孔隙率 (トータル) はオブテマで求めた値

6.3 ボアホールレーダ再解析による亀裂評価

ボアホールレーダ直接波により以下の方法で電磁波速度・減衰率・比誘電・比抵抗・孔隙率を求めた。

- ①電磁波速度を300～400mの安定した区間を110m/ μ sと仮定し、発受信間隔が9.3mから発信点(トランミッタ-ファイアリング)を求め、各々の走時より電磁波速度を求めた。
- ②減衰率はアンプリチュード2000の時0.25dB/m、900の時1.0dB/mとして、 α [減衰率] $\propto -\log(A)$ [アンプリチュード]の関係より求めた。
- ③比抵抗は平面電磁波の方程式より導かれる ρ [比抵抗] = 5.46x 電磁波速度 / 減衰率より求めた。
- ④比誘電率は平面電磁波の方程式より導かれる次式によって求めた。

$$\epsilon_r = C^2/V^2 - 30.2 \times \alpha^2/f^2$$

ϵ_r : 比誘電率 C:真空中の電磁波速度 V:媒質の電磁波速度

α : 減衰率 f:電磁波周波数 (40MHzで計算)

- ⑤孔隙率は比誘電率より次式によって求めた。

$$\phi = (\sqrt{\epsilon_r} - \sqrt{\epsilon_m}) / (\sqrt{\epsilon_w} - \sqrt{\epsilon_m}) \times 100$$

ϵ_r : 比誘電率 ϵ_m : 岩盤のマトリックスの比誘電率(6.2と仮定)

ϵ_w : 岩盤の孔隙中の水の比誘電率(80)

以上の解析結果を検層のロングノルマル値と検層解析結果による孔隙率とともにボアホール解析柱状図として図6.3.1に示した。

以下に結果について検討する。

- ①物理検層解析結果とボアホールレーダ解析結果による孔隙率は概ね一致する。
- ②物理検層解析結果とボアホールレーダ解析結果による比抵抗値は相対的には一致する。絶対値では概ねロングノルマル比抵抗値の1/4を示す。比抵抗値は周波数依存性をもつて理論的に一致する。

レーダより求めた孔隙率を表6.3.1のボアホールレーダ・テレビ解析結果一覧表に示した。

(2)ボアホールレーダ反射波による解析(周波数60MHz ゾンデ)

ボアホール反射波の解析をRADINTER2.1(ABEMソフトウェア)により以下の条件で行った。

Sampling Frequency(MHz): 625.662
Direct Pulse Time (μ s): 0.176
Depth Increment (m): 1.000
Depth of Trace (m): 30.000
Nominal Velocity (m/ μ s): 120.000
T-R Separation (m): 9.300

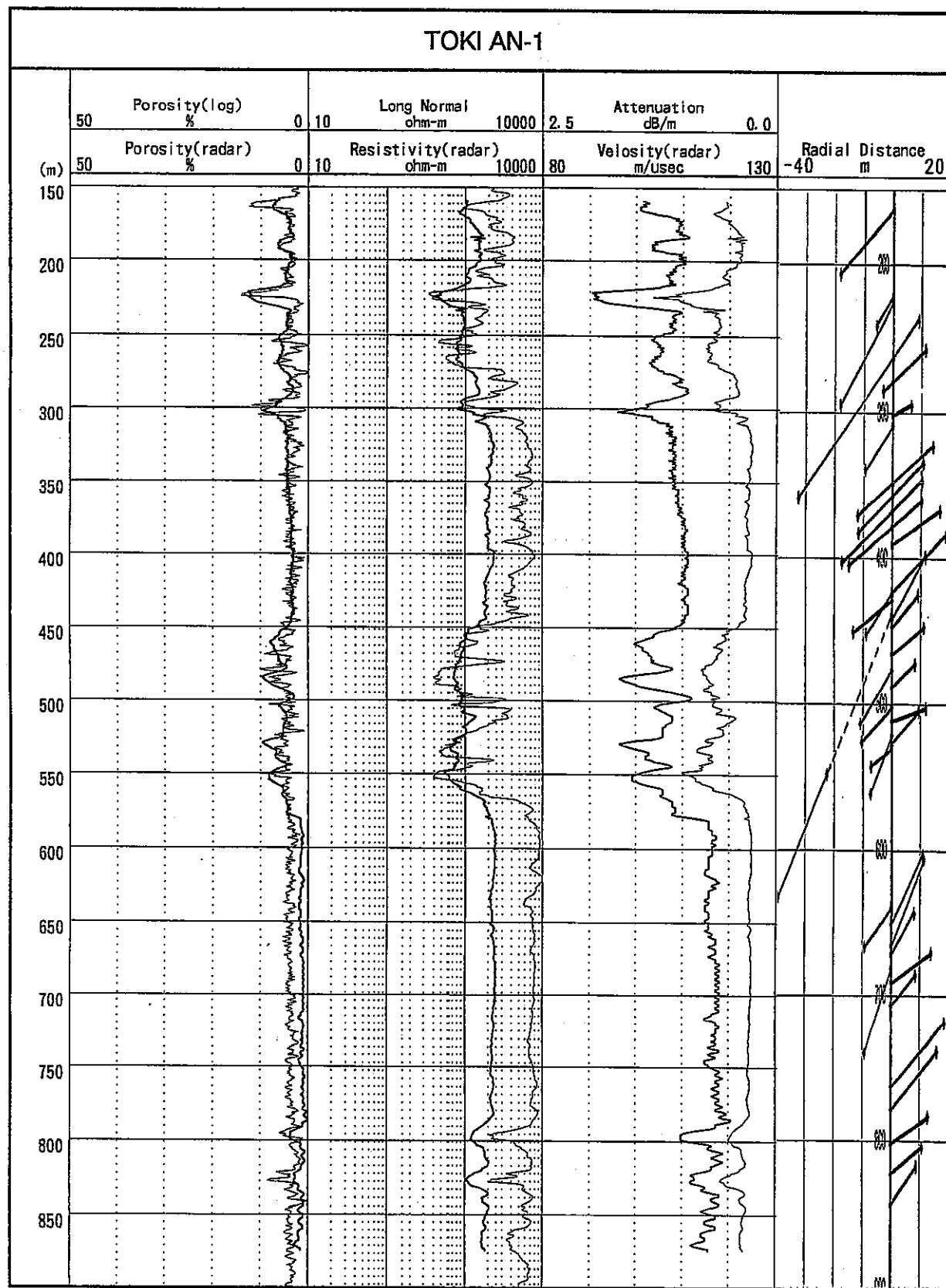


図 6.3.1 ボアホールレーダー解析柱状図

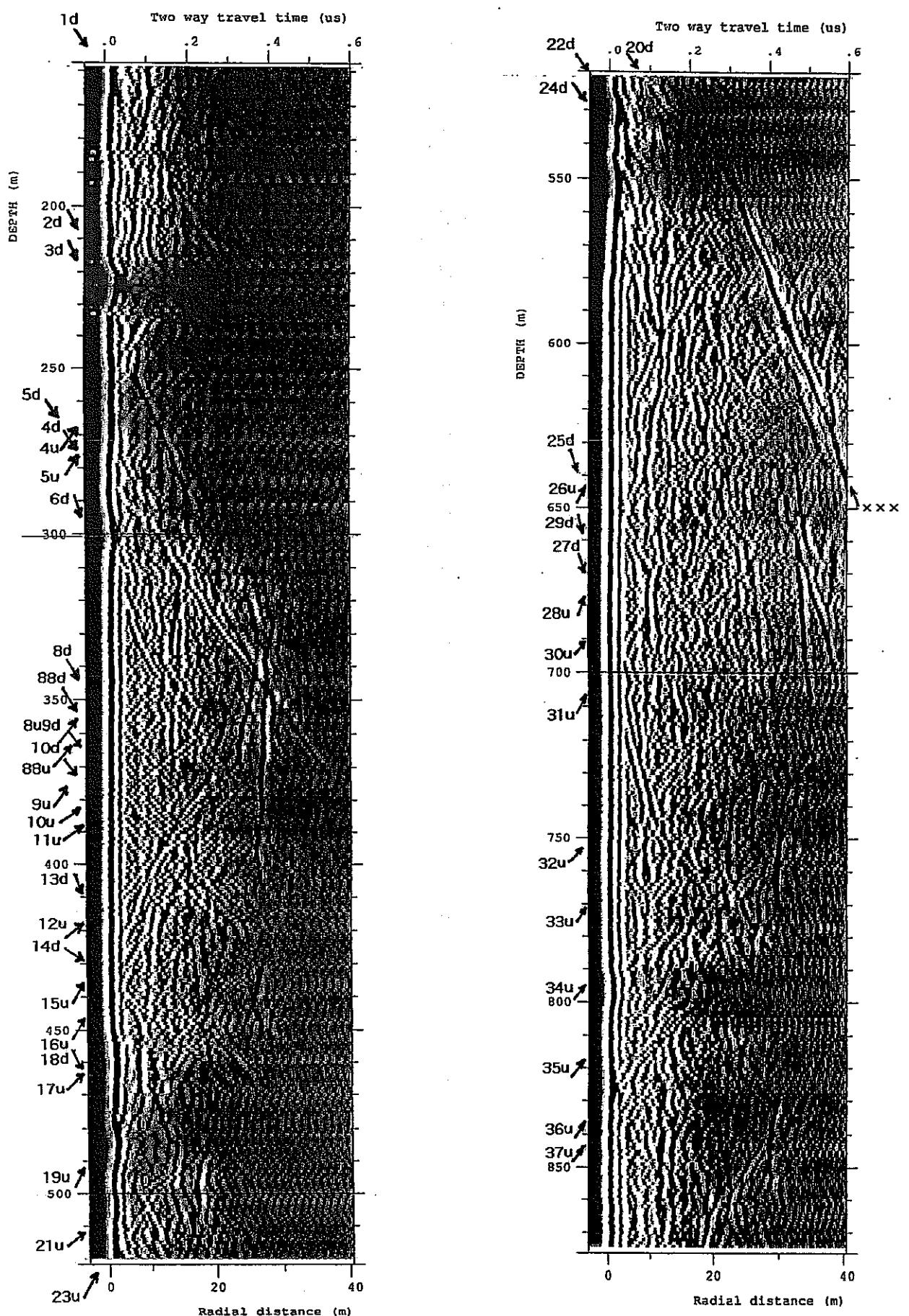


図6.3.2 ボアホールレーダ反射波解析図

解析結果の反射面の位置をボアホールレーダ反射波解析図として6.3.2図にその結果を表6.3.1(1)～(3)に示した。

解析結果の反射面の角度とその反射面の伸展の結果を図4.1.1のボアホールレーダ解析柱状図に示した。

反射面の解析結果の図及び表の記号の[u]はアップデップの反射面、[d]はダウンデップの反射面、[du]はアップデップ・ダウンデップの両反射面で解析したことを示す。解析結果表のグレードは以下の様に区分した。

- A : 非常に明瞭な反射面で孔壁から10m以上の反射面が連続しているもの
- B : 反射面がやや不明瞭であるが孔壁から10m以上の反射面が連続しているか、反射面が明瞭であるが孔壁から10m以内の反射面の連続なもの
- C : 反射面が不明瞭なもの

又、ボアホールレーダで解析した反射面とテレビで解析した最も一致すると思われる亀裂について表6.3.1(1)～(3)中に示した。

①反射面の連続性について

レーダで解析された反射面は孔壁から10m以上の連続のものが殆どであり、最大で40mに達する。

②割れ目規模について

レーダで解析可能であった亀裂はテレビ結果による開口性の亀裂かネット状亀裂または破碎部である。密着亀裂や全体的に割れ目が発達しているものは解析不可能であった。

③割れ目傾斜角度について

レーダで解析された亀裂傾斜角はすべて55°（高角度）以上である。

④解析の深度誤差について

レーダで解析した亀裂とテレビで解析した最も一致すると思われる亀裂は22ヶ所ありその最大深度誤差は3.9mであった。22ヶの平均は±1.4mの誤差である。

⑤解析の亀裂傾斜角度誤差について

レーダで解析した亀裂とテレビで解析した最も一致すると思われる亀裂の傾斜角度差は最大10.4であり、その平均は±5°の誤差である。

透水試験区間の割れ目評価にあたってレーダについては深度5m以内のずれを考慮する必要がある。

表 6.3.1(1) ポアホールレーダ・テレビ解析結果一覧表

ポアホールレーダ解析結果				ポアホールテレビ解析結果			レーダー孔隙率 (%)
番号	深度 (m)	反射角 (度)	グレード	深度 (m)	方位角度 (度)	特 徴	
1d	161.9	67.5	B	159.8	N78E60S	開口亀裂(幅2~3cm)	7
2d	220.5	74.0	B	222.5	N17W77E	破碎部(幅5~10cm)	14
3d	224.3	75.6	B	223.8	N52W78NE	破碎部(幅10~15cm)	14
4ud	263.2	71.2	A	265.0	N71E78S	高角度のネット状亀裂	6
5ud	278.8	62.7	B	279.2	N52W75NE	開口亀裂(幅10cm)	4
6d	302.3	75.5	B	304.0	N87E80N	ネット状亀裂	9
7u	308.8	64.6	B	312.7	N55W75SW	開口亀裂(幅2~3cm)	5
8ud	348.9	61.2	A	345.8	N50W69NE	開口亀裂(幅0.5~1cm)	4
88ud	357.7	65.1	A	357.5	N50W65NE	開口亀裂(幅2~3cm)	4
9ud	367.7	63.7	A	367.2	N47W64NE	開口亀裂(幅10cm)	4
10ud	378.6	60.4	A	376.1	N48W63NE	開口亀裂(幅3cm)	3
11u	390.7	54.8	A	391.1	N49W51NE	開口亀裂(幅1~2cm)	3
12u	423.4	64.4	B	422.8	N45W68NE	開口亀裂(幅0.5~1cm)2本	3
13d	424.2	71.7	B	—	—	—	3
14d	428.1	58.6	B	—	—	—	3
xxx	437.6	78.5	A	—	—	—	3
15u	441.0	74.6	A	—	—	—	3

表6.3.1(2) ポアホールレーダ・テレビ解析結果一覧表

ポアホールレーダ解析結果				ポアホールテレビ解析結果			レーダー孔隙率 (%)
番号	深度 (m)	反射角 (度)	グレード	深度 (m)	方位角度 (度)	特 徴	
16u	446.3	67.2	B	—	—	—	3
17u	464.9	59.2	C	—	—	—	6
18d	475.7	73.8	B	478.4	N81W77S	開口亀裂	7
19u	488.4	63.9	B	—	—	—	9
20d	501.7	66.6	A	502.5	N53E73SE	変色の亀裂	6
21u	511.4	37.6	B	510.1	NE41NW	36~44NWの亀裂 3本	5
22d	521.2	79.6	C	523.2	N80W86N	割れ目に充填物	5
23u	527.9	68.1	B	527.4	N2E71E	2cm幅の変質	9
24d	530.3	59.6	C	—	—	—	8
25d	638.8	71.3	C	—	—	—	2
26u	650.4	77.1	B	—	—	—	2
27d	665.6	79.5	B	—	—	—	1
28u	670.9	74.2	C	—	—	—	1
29d	681.3	81.0	A	—	—	—	1
30u	690.4	55.7	C	—	—	—	1
31u	707.5	68.4	B	—	—	—	1
32u	762.7	67.0	C	—	—	—	1

表6.3.1(3) ボアホールレーダ・テレビ解析結果一覧表

ボアホールレーダ解析結果				ボアホールテレビ解析結果			レーダー孔隙率 (%)
番号	深度 (m)	反射角 (度)	グレード	深度 (m)	方位角度 (度)	特 徴	
33u	778.7	68.4	C	780.5	N22W75E	密着亀裂1本(前後に無し	1
34u	802.2	55.9	B	802.5	N34W65NE	密着亀裂3 本	3
35u	822.3	59.2	C	—	—	—————	3
36u	841.8	70.6	B	841.8	N67W76S	ネット状亀裂	1
37u	846.1	60.7	C	845.8	N77W59S	ネット状亀裂	1

6.4 物理検層データと割れ目（透水性）との比較・検討

物理検層データと割れ目（透水性）との比較・検討について、次のような分類に従って説明する。

6.4.1 AN-1号孔の物理検層データと原位置透水試験結果の比較・検討

多孔質岩盤で発達してきた中性子検層、音波検層、電気検層、密度検層のデータの解析手法が、花崗岩のような火成岩の岩盤にも応用出来るかどうか検討する為に、原位置透水試験結果のデータと物理検層データを比較・検討した。

手法としては、孔隙率やフォーメーションファクターを算出する式を示し、また、カナダ（URL）での亀裂性岩盤を対象としたKatsube et al., 1987 の式を用い、それぞれの検層データから透水係数を算出し、原位置透水試験結果と比較・検討した。

中性子検層データから算出した透水性について

まず測定結果より、孔隙率（ ϕ ）を算出しそれから(1)式(Archie, 1942)を用いてフォーメーションファクタFを算出する。

ここで、mを2.0と仮定した。

$$F = \frac{1}{\phi^m} \quad (\text{Archie, 1942}) \quad (1)$$

更に、(2)式(Schlumberger, 1972)および(3)式(Katsube et al., 1985)

$$k = \frac{1}{F} \left[\frac{\phi}{1-\phi} \right]^2 \frac{1}{S_w} \quad (\text{Schlumberger, 1972}) \quad (2)$$

$$k = 2.51 \times 10^7 \times F^{-2.22} \quad (\text{Katsube et al., 1985}) \quad (3)$$

から透水係数（k）を求め、原位置透水試験結果と比較・検討した。

更に、(7)式と(3)式から透水係数を算出した。

$$F = 5.5 \times 10^{-3} \div \phi^{2.21} \quad (\text{Katsube et al., 1985}) \quad (7)$$

音波検層データから算出した透水性について

検層データから、(Wyllie, 1952) の(4) 式を用いて孔隙率を算出する。

(Wyllie, 1952) の(4) 式は下記の通りである。

$$\phi_{SL} = \frac{\Delta T - \Delta T_{ma}}{\Delta T_f - \Delta T_{ma}} \quad (\text{Wyllie, 1952}) \quad (4)$$

ϕ_{SL} : 音波検層による孔隙率

ΔT : 1m間のP波走行時間

ΔT_{ma} : マトリックスの1m間のP波走行時間

ΔT_f : 水の1m間のP波走行時間

次に、(5) 式(Raymer, 1952) を用いて孔隙率を算出する。

$$\phi_{SL} = -a - [a^2 + \frac{\Delta T}{\Delta T_{ma}} - 1]^{1/2} \quad (\text{Raymer, 1952}) \quad (5)$$

$$a = \frac{\Delta T_{ma}}{2 \times \Delta T_f} - 1$$

更に、(6) 式を用いて孔隙率を算出する。

$$\phi_{SL} = 1 - [\frac{\Delta T}{\Delta T_{ma}}]^{1/x} \quad (5)$$

X=1.6 for GRANITE

それぞれ算出された孔隙率から、(1) 式(Archie, 1942) を用いてフォーメーションファクタを算出し、それから、(2) 式(Schlumberger, 1972) および(3) 式(Katsube et., 1985)を用いて透水係数を算出する。

密度検層データから算出した透水性について

検層データから (10) 式(Schlumberger, 1972) を用いて孔隙率を算出する。

$$\phi_D = \frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma_m - \gamma_f} \quad (\text{Schlumberger, 1972}) \quad (10)$$

ϕ_D : 密度検層による孔隙率(%)

γ_m : 岩盤の気質密度 (g/cm³)

γ : 検層による密度 (g/cm³)

γ_t : 水の密度 (g/cm³)

次に(1) 式を用いてフォーメーションファクタを算出し、(2) 式(Schlumberger, 1972) および(3) 式(Katsube et., 1985)から求めた透水係数 (k) と原位置透水試験結果について比較・検討した。

電気検層 (25cm, 100cm ルマル比抵抗, 2.5cm マイクロ比抵抗) の透水性について検層データを基に測定区間全域について真の比抵抗値を連続的に算出し、その値を用いて(8) 式(Schlumberger, 1972) よりフォーメーションファクタを算出する。

$$F = \text{真の比抵抗値} / \text{孔内水の比抵抗値} \quad (\text{Schlumberger, 1972}) \quad (8)$$

次に、密度検層データを利用して、 $F = 5.5 \times 10^{-3} \div \phi^{2.21}$ (Katsube et., 1985) (7) 式からフォーメーションファクタを算出し、それぞれのフォーメーションファクタから(9) 式(Katsube et al., 1987) を用いて透水係数を算出する。

$$k = 4.1 \times 10^{-7} \left[\frac{F_D}{F_F} \right]^{-1.06} \quad (\text{Katsube et al., 1987}) \quad (9)$$

F_D : 密度検層から算出したフォーメーションファクタ

F_F : 電気検層から算出したフォーメーションファクタ

さらに中性子検層データと密度検層データから算出した孔隙率を基に、(7) と(3) 式を用いて、透水係数を算出したり、音波検層データと密度検層データから算出した孔隙率についても、(7) と(3) 式より透水係数を算出した。

以上の結果、得られたそれぞれの孔隙率、フォーメーションファクタや透水係数について考察し、検層データから求めた透水係数と原位置透水試験結果から、その相関性について検討する為の水理地質学的特性の評価手法の一部として、次式のような式を導入し、透水係数を算出した。

$$K_d = 1.0 \times 10^{-6.0} \left[\frac{F_c}{F_d} \right]^{1.5} \quad (11)$$

F_d : 密度検層から算出したフォーメーションファクター

F_c : 電気伝導度から算出したフォーメーションファクター
(8式の逆数)

更に、それらの因子である割れ目のファクタ並びに透水係数のファクタと物理検層データを比較・検討する。

岩相区間で表示した図6.4.1～2より、風化帶とその他（塩基性鉱物に富む花崗岩と花崗岩）の部分に分類し、塩基性鉱物に富む花崗岩と花崗岩部の物理検層データから透水係数を算出した。以下に算出式を示す。

（塩基性鉱物に富む花崗岩と花崗岩）

$$L_o g \text{透水係数} = 0.98 \times L_o g \left(1.0 \times 10^{-6.0} \left[\frac{F_c}{F_d} \right]^{1.5} \right) - 1.34 \quad (12)$$

(12)式をAN-1号孔の測定区間全体の代表式と見なして、測定区間の透水係数を算出し、図6.4.3に示した。

6.4.2 DH-4号孔の物理検層データと原位置透水試験結果の比較・検討

DH-4号孔についても、AN-1号孔同様、検層データから透水係数を求め原位置透水試験結果と比較・検討を行った。

その結果、AN-1号孔同様、その相関性について検討する為の地質学的特性の評価手法の一部として、次式のような式を導入し、検層データから透水係数を算出した。

$$K_d = 1.0 \times 10^{-3} \left[\frac{F_c}{F_d} \right]^{1.5} \quad (13)$$

F_d : 密度検層から算出したフォーメーションファクター

F_c : 電気伝導度から算出したフォーメーションファクター
(電気検層から算出した F_r の逆数)

m : 孔井常数

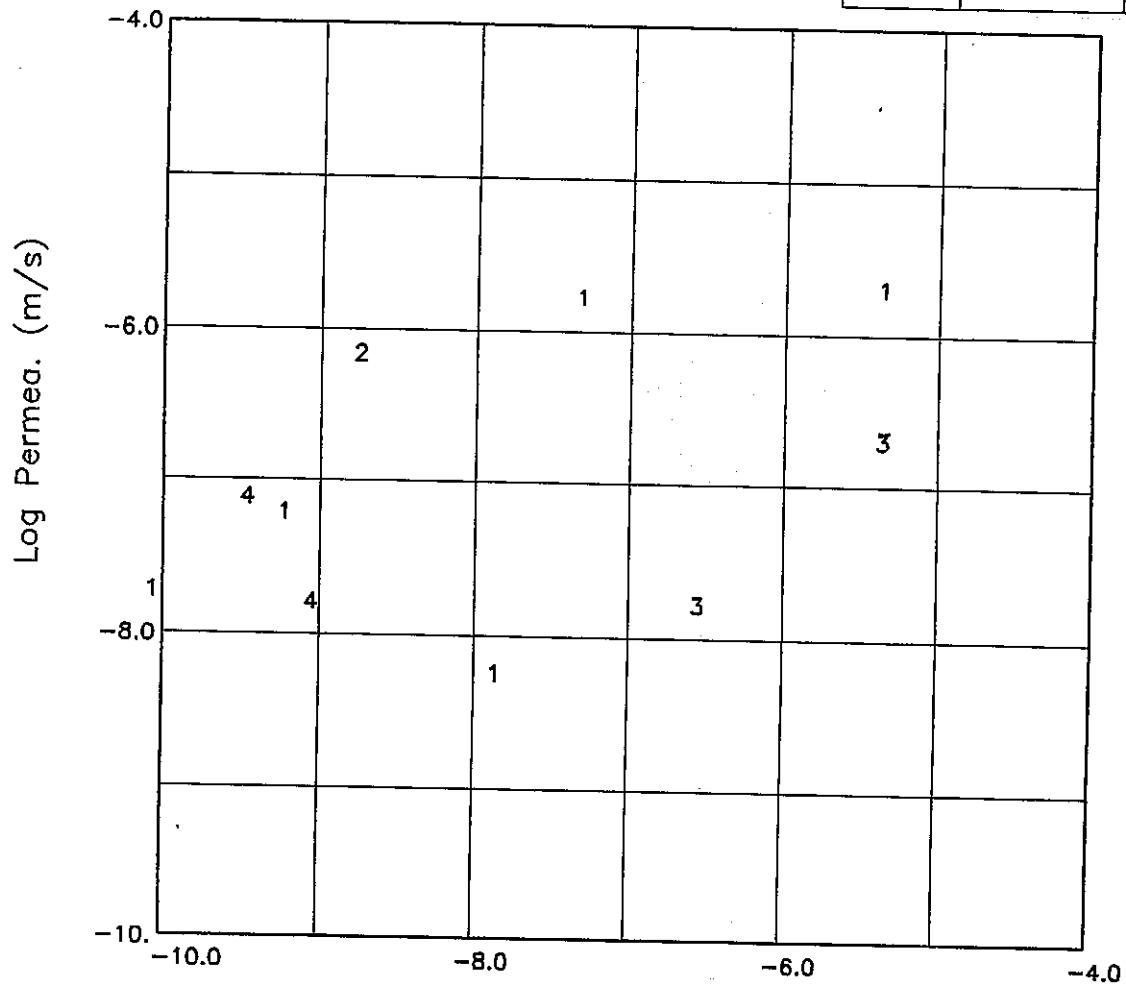
AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER

(風化帶)

Log Scale

孔隙率 ϕ	フリーメイソンファクタ	透水係数 K
(10) 式	(8) 式の変形	(11) 式



Permeability Test (m/s)

凡例

亀裂分類

1. 開口亀裂
2. ネット状亀裂
3. 縦状亀裂
4. 密着亀裂

図 6.4.1 透水係数クロスプロット図 (風化帶)

AN-1

TOUSUI.T-LOG.PER

(塩基性鉱物に富む花崗岩+花崗岩)

Log Scale

孔隙率 ϕ	フーメイションファクタ	透水係数 K
(10) 式	(8) 式の変形	(11) 式

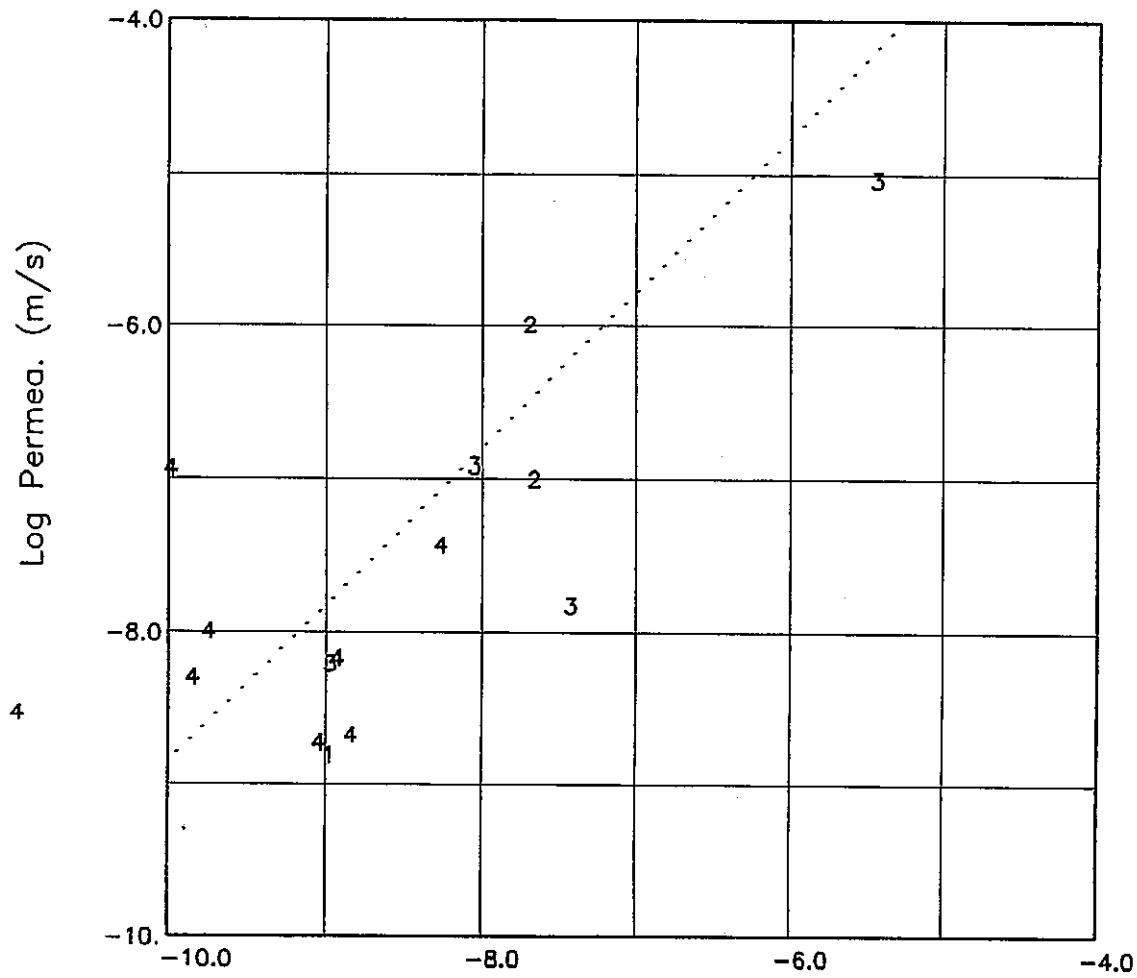


図 6.4.2 透水係数補正クロスプロット図(花崗岩)

- 凡例
亀裂分類
1. 開口亀裂
2. リト状亀裂
3. 縦状亀裂
4. 密着亀裂

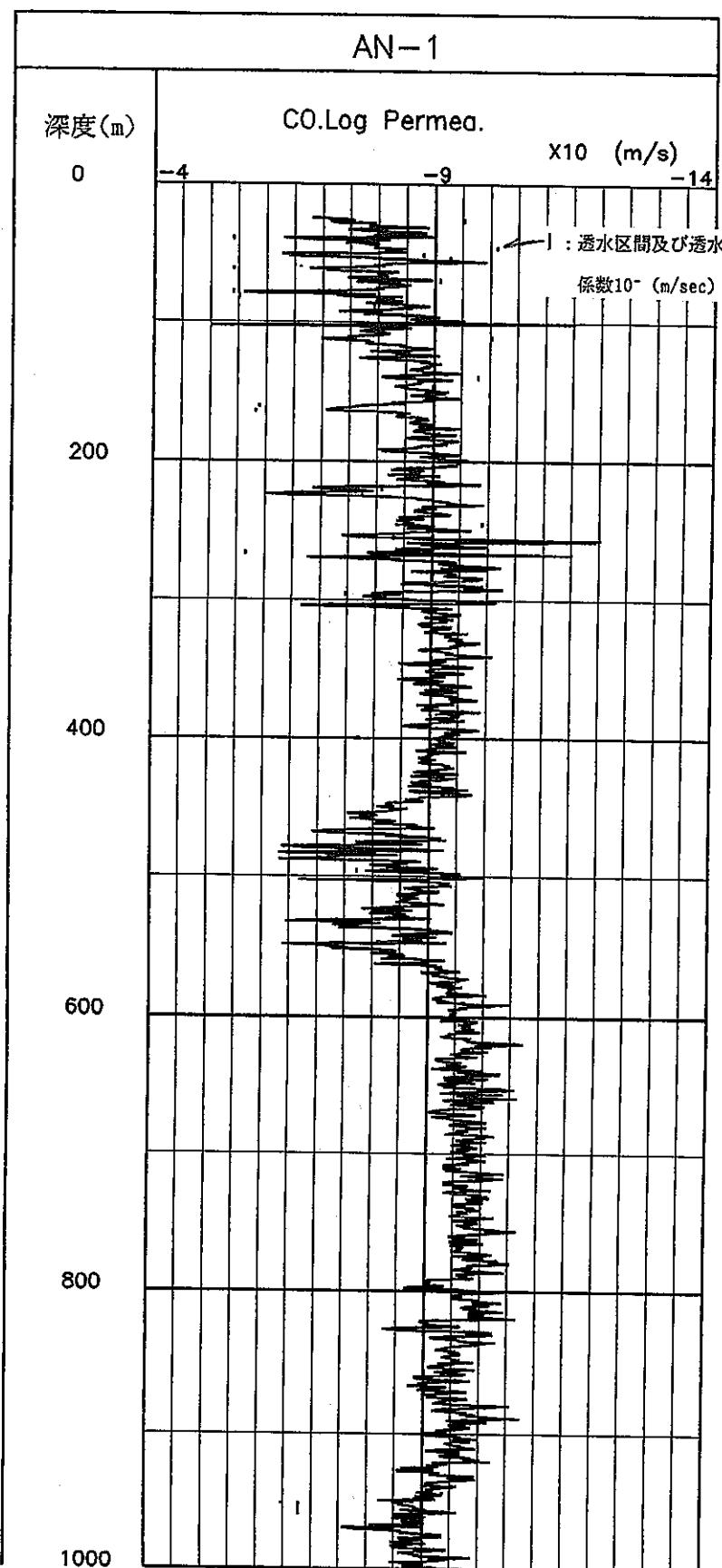


図 6.4.3 透水係数補正変化図 (AN-1)

その結果を図6.4.4に示す。

更に、それらの因子である割れ目のファクタや変質部並びに透水係数のファクタについて物理検層データと原位置透水試験結果について比較・検討し、その結果、DH-4号孔については、比抵抗値が300 ohm-m以上の区間と300 ohm-m以下に分割して、物理検層データから透水係数を算出した。

以下にその結果を示す。

(300 ohm-m以上の花崗岩部)

$$\text{Lo g 透水係数} = 1.50 \times \text{Lo g} \left(1.0 \times 10^{-3} \left[\frac{F_c}{F_d} \right]^{1.5} \right) + 3.00 \quad (14)$$

(300 ohm-m以下の強変質の花崗岩部)

$$\text{Lo g 透水係数} = 3.90 \times \text{Lo g} \left(4.1 \times 10^{-7} \left[\frac{F_d}{F_p} \right]^{-1.06} \right) + 13.6 \quad (15)$$

更に(14)式と(15)式を用いて、DH-4号孔の測定区間全体の透水係数を算出し、図6.4.5に示した。

6.4.3 DH-4号孔の流量検層データと原位置透水試験結果の比較・検討

解析方法は、一般的に用いられているフローメータ検層解析手法を駆使して流量検層データと原位置透水試験結果の比較・検討を行った。

解析に用いた流量検層データは、注水流量130l/min状態で測定したデータを使用した。

フローメータは、孔井断面の直線的な流体の移動をインペラの回転運動に変換する方法で、フローメータの効率はフローメータの摩擦、流体密度および流体の粘性、更に限界速度にも左右される。

限界速度というのは、フローメータのインペラが回転を開始する最小の流体速度である。今回の限界速度はゼロに近い値を示していた。

実際の解析手法として、データ・ポイントを利用して平均的スロープを以下の式を用いて計算した。

$$m = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad \begin{array}{l} \text{但し、} m : \text{スロープ特性} (m/min/rps) \\ X : \text{ライン速度} (m/min) \\ Y : rps \text{ 回転数/sec} \end{array}$$

DH-4

TOUSUIT-LOG.PER

9

Log Scale

孔隙率 ϕ	フライショク	透水係数 K
(10) 式	(8) 式の変形	(13) 式

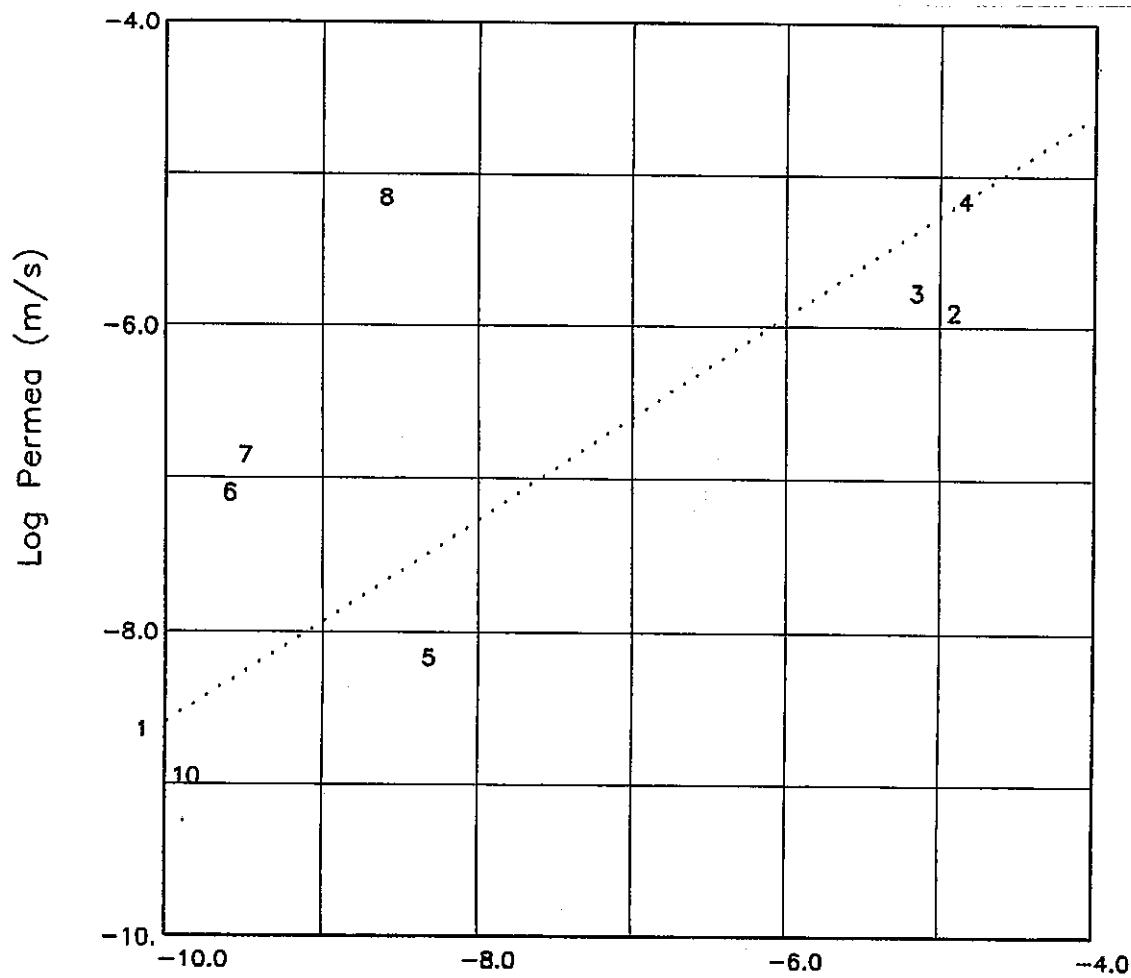


図 6.4.4 透水係数補正クロスプロット図

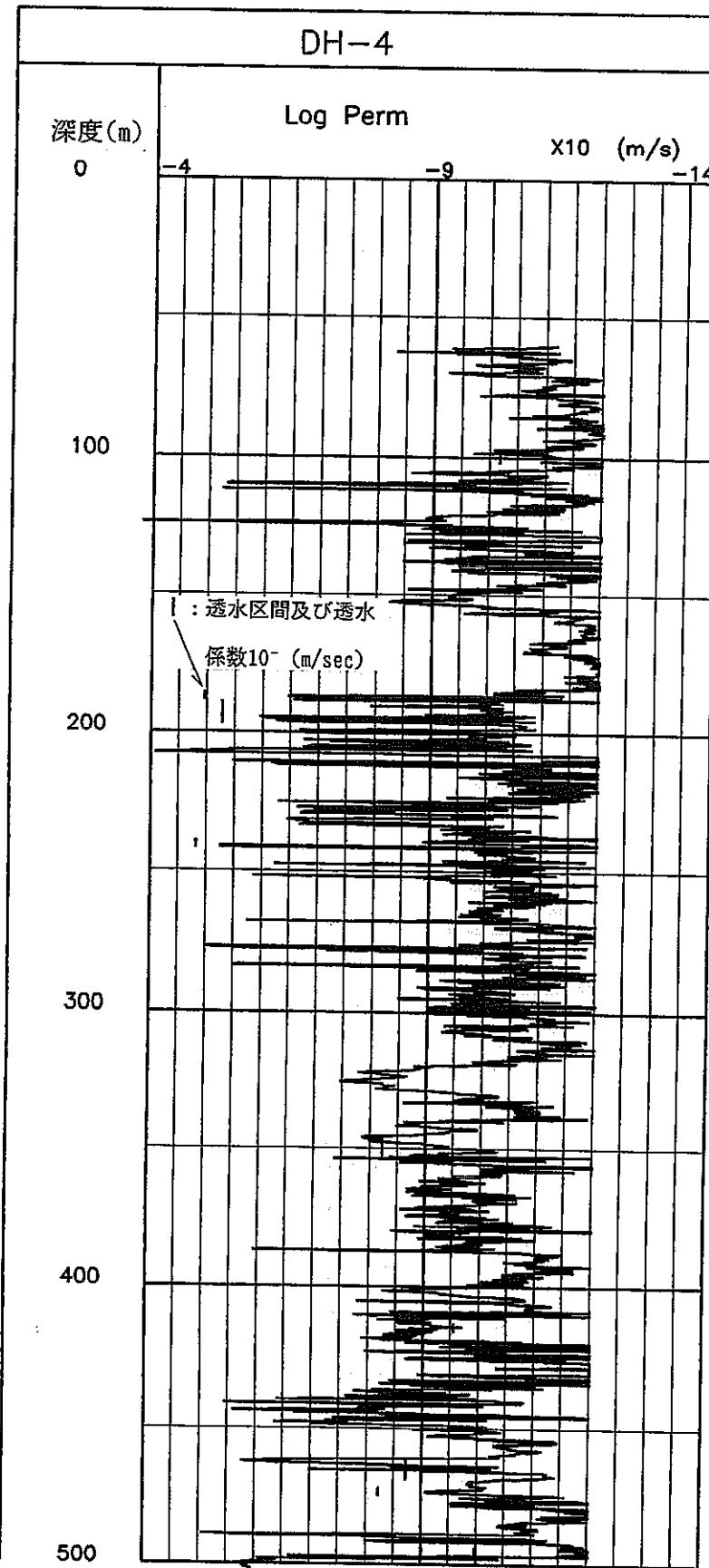


図 6.4.5 透水係数補正変化図 (DH-4)

このスロープの切片は、見掛けの流体速度を表している。

$$v_a = \frac{\sum Y - m \sum X}{n}$$

但し、n : ポイントの合計

v_a : 見掛けの流体速度(m/min)

フローメータから解析された速度v_aは、孔径の中心における流体速度を示している。

今回の解析では、10cm毎の流体速度と1m毎の流体速度を示したが、10cm毎の流体速度は、変化に富んでいて本来の流体変化の特徴を示していない。

そのため、原位置透水試験結果の比較・検討の資料として、1m毎の流体速度を用いた。

次に、1m毎の流体速度から1m毎の流体速度の変化を示し、流体速度が減じる箇所で、孔内流体が地層に流入していることを基本とした。

1m毎の流体速度の変化を基に、原位置透水試験結果と比較・検討し、図6.4.6のような関係が得られた。

その関係式を以下に示す。

$$\text{透水係数} = 10^{(4.0 \times \text{FLOW RATE} \times 0.32 + 8.4)} \quad (16)$$

その関係式・(16)式より、DH-4号孔の測定区間について透水係数を算出し、図6.4.7に図示した。

6.4.4 今後の課題について

今回、原位置透水試験結果のデータと物理検層データを比較・検討した結果、多孔質岩盤で発達してきた中性子検層、音波検層、電気検層、密度検層のデータの解析手法が、その儘の方法で花崗岩のような火成岩の岩盤に応用する事は難しこ事が判明した。しかし、Katube et al., 1987 の式や新たに導入した式等を用いることで、検層データから透水係数を算出する手法を見出せることが明らかになった。今後は、岩相解析のファクタを駆使しながら、精度の高い算出式に近づけて行きたい。

DH-4

PERMEA.CO-FLOW.R

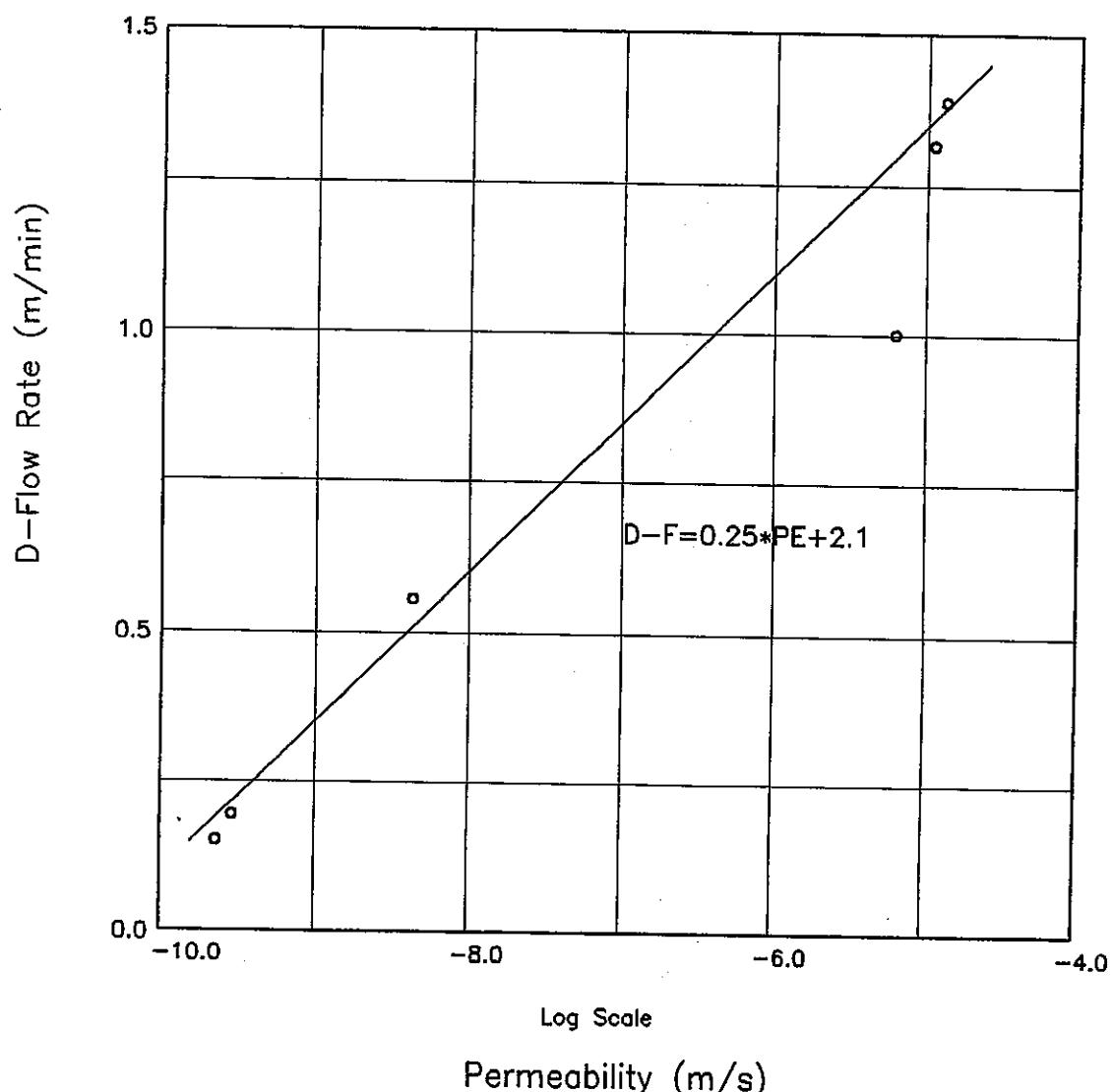


図 6.4.6 透水係数補正クロスプロット図 (FLOW METER-PERMIAB.)

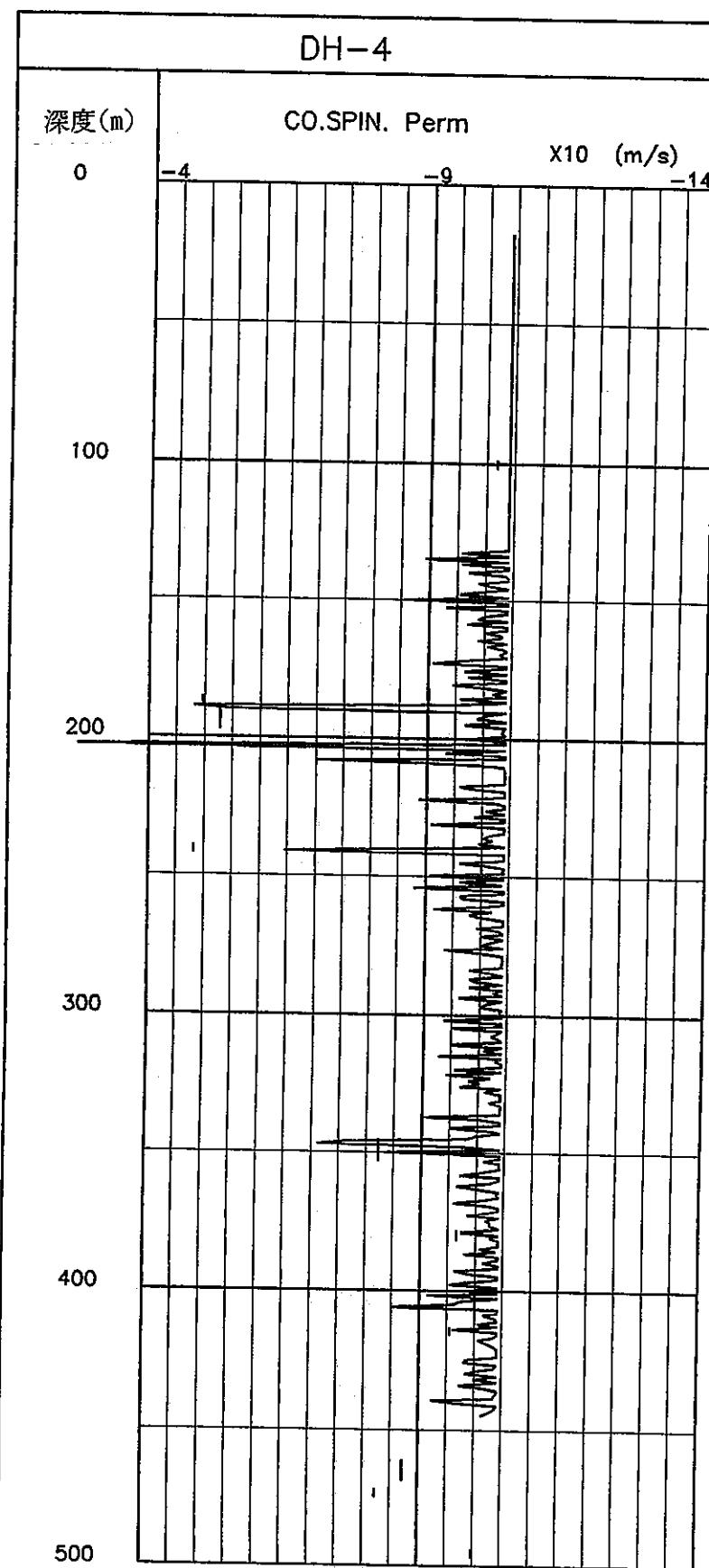


図 6.4.7 透水係数補正変化図 (DH-4)

7. あとがき

今回の報告書『物理検層手法による花崗岩部の透水係数の推定に関する作業』では、東濃地区に掘削されたAN-1号孔とDH-4号孔を利用して、物理検層で得られた物性値と原位置透水試験で得られた透水係数の間に、相関性を見いだした。

本調査は、物理検層データを解析プログラムや既存の式を用いて透水係数に変換し、その結果を取りまとめたものである。

7.1 謝 辞

本作業を遂行するにあたり、関係各所の方々にご指導並びにご協力を賜りました。ここに、心から謝意を表します。

7.2 参考文献

- (1) Schlumberger Log Interpretation 1972 Edition
- (2) 検層技術説明書 (株) 物理計測コンサルタント 1981
- (3) Katsube et GEOPHYSICS, VOL. 52 NO3 1987
- (4) RADINTER MANUAL ABEM AB 1990
- (5) Mezzatesta, A., Rodriguez, E., and Frost E., 1988 :
OPTIMA - A Statistical Approach to Well Log Analysis. Geobyte,
August.
- (6) Quinn, T., Hashimoto, N., Suzuki, M., and Takagi, S., 1988 :
Mineralogy evaluation in a geothermal well logging statistical
probabilistic log evaluation techniques,
Transactions, Volume 13, Geothermal Resources Council, 1989
Annual Meeting, Santa Rose, California.
- (7) Serra, O., 1984 :
Fundamentals of Well-log Interpretation, Elsevier.