

TM-2孔における水圧破碎法による初期応力測定

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務)

平成10年3月

同和工営株式会社

複製またはこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒509-51 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

動力炉・核燃料開発事業団

東濃地科学センター

技術開発課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to : Exploration and Mining Technology Development Section, Tono Geoscience Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 959-31, Jorinji, Izumi-machi, Toki-shi, Gifu-ken 509-51, Japan

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

TM-2孔における水圧破砕法による初期応力測定

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務)

平成10年3月

同和工営株式会社

TM-2 孔における水圧破碎法による初期応力測定

加藤春實*

要 旨

東濃鉾山の 300m×300m×深度 200m 程度の領域における初期応力状態を把握するために、TM-2 孔において水圧破碎法による初期応力測定を実施した。ボアホールの直径は孔口から深度 165m にわたって拡大していたので、ボアホールの直径に適合するように直径の異なる 3 種類のゴムパッカーが用いられた。水圧破碎試験は、堆積岩、風化花崗岩および花崗岩を含む 32m から 185m までの深度で合計 11 回おこなわれた。すべての測定深度において $S_v < S_h < S_H$ となり、TM-2 孔における初期応力の環境は逆断層型である。水平面内の主応力および最大せん断応力の大きさは、堆積層および風化花崗岩で小さく、下部の花崗岩で大きかった。誘起された縦き裂の方位から決定された水平面内の最大主応力 S_H の平均方位は $N22^\circ W$ である。この方位は逆断層である月吉断層の走向とほぼ垂直である。すなわち、水圧破碎法によって決定された初期応力の環境と方位はこの断層の生成時の応力状態と整合性がある。

本報告書は、同和工営株式会社が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の結果である。

契約番号：09C0704

事業団担当部課室および担当者：東濃地科学センター 地質環境研究室長 坪田浩二

*：同和工営株式会社ジオサイエンス事業部

+： S_v 、 S_h および S_H はそれぞれ鉛直方向の被り地圧、水平面内の最小主応力および最大主応力である。

***In situ* stress measurement in TM-2 borehole using hydraulic fracturing**

H.Kato

ABSTRACT

Hydraulic fracturing tests were conducted in vertical borehole TM-2 at Tono mine to characterize the state of in situ stress in the area which is about 300m×300m in surface area and extends to a depth of 200m. Three types of inflatable packer rubber with different outer diameters had to be used since the diameter of the NQ size hole was elongated down to 165m depth. Eleven hydraulic fracturing tests have been completed in sandstone, conglomerate, weathered granite and granite at depths ranging from 32 to 185m. The individual test results indicate that the stress regime at TM-2 is reverse faulting tectonic environment ($S_v < S_h < S_H$ +). They also show that horizontal principal stresses and maximum shear stress in the lower granite are much higher than those in the upper sedimentary formations and weathered granite. The orientation of the hydraulic fracture traces in TM-2 was found to give an average azimuth for the maximum horizontal stress S_H of $N22^\circ W$ which is approximately perpendicular to the strike direction of Tsukiyoshi reverse fault. Overall, the current state of stress determined by the hydraulic fracturing tests is in accord with tectonic stress state with respect to orientation and stress regime when Tsukiyoshi reverse fault has developed.

This report has been drawn up by Dowa Engineering Co., Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison: Koji Tsubota, Geological Environment Research Section, Tono Geoscience Center.

* : Dowa Engineering Co., Ltd., Geoscience Consulting Division.

+ : S_v , S_h and S_H are vertical stress, minimum horizontal and maximum horizontal stress, respectively.

目 次

1. 水圧破碎試験	1
1.1 目的	1
1.2 測定位置	1
1.3 水圧破碎法	2
1.4 測定方法	4
1.5 計測システム	7
1.6 測定結果	8
1.6.1 ダミーパッカーの降下および破碎前の型取り	8
1.6.2 水圧破碎試験結果	9
1.6.3 解析結果	11
1.7 まとめ	16
参考文献	17
APPENDIX	18
2. 物理検層	42
2.1 物理検層作業概要	42
2.1.1 温度検層	47
2.1.2 電気検層	48
2.1.3 マイクロ比抵抗検層	49
2.1.4 密度検層	50
2.1.5 孔径検層（キャリパー検層）	51
2.1.6 ガンマ線検層	52
2.1.7 中性子検層	53
2.1.8 音波検層	54
2.1.9 フローメーター検層	55
2.2 物理検層結果	57
2.2.1 温度検層結果	57
2.2.2 電気検層結果	59
2.2.3 マイクロ比抵抗検層結果	61
2.2.4 密度検層結果	63
2.2.5 孔径検層結果	65
2.2.6 中性子検層結果	67
2.2.7 自然放射能検層（ガンマ線検層）結果	70
2.2.8 音波検層結果	72
2.2.9 物理検層結果のまとめ	78

2.2.10 フローメーター検層	80
2.3 解析	91
2.3.1 物性値の相関性	91
2.3.2 物理検層データより算出した透水性について	99

付表目次

表 1.5.1 測定機器一覧	7
表 1.6.1 TM-2 孔における水圧破碎試験の測定結果	10
表 1.6.2 TM-2 孔における水平面内の最小主応力 S_h 、最大主 応力 S_{Hmax} 、 S_{Hmin} および最大主応力の方位 ψ	12
表 2.1.1 物理検層作業工程表	42
表 2.1.2 物理検層使用機器一覧表	45
表 2.2.1 フォール・オフ孔底圧測定表	88

付図目次

図 1.2.1 TM-2 孔位置図	1
図 1.3.1 ワイヤライン方式による水圧破碎システム	3
図 1.4.1 水圧破碎法による初期応力測定手順	6
図 1.6.1 ボアホール深度と RQD および破碎前の型取りをおこな った深度との関係	8
図 1.6.2 水平面内の最大、最小主応力および最大せん断応力と ボアホール深度の関係	14
図 1.6.3 TM-2 孔で誘起されたき裂の走向とボアホール深度の関係	15
図 2.1.1 温度検層概念図	47
図 2.1.2 電気検層概念図	48
図 2.1.3 マイクロ比抵抗検層原理図	49
図 2.1.4 密度検層概念図	50
図 2.1.5 キャリパー検層概念図	51
図 2.1.6 ガンマ検層概念図	52
図 2.1.7 中性子-孔隙率相関図	53
図 2.1.8 中性子検層概念図	53
図 2.1.9 音波検層概念図	54
図 2.1.10 フローメータゾンデ外観図	55
図 2.1.11 フローメータ検層機スピナー部	56
図 2.1.12 フローメータ検層概念図	56
図 2.2.1 温度曲線図	58
図 2.2.2 自然電位・見掛け比抵抗曲線図	60
図 2.2.3 マイクロ比抵抗曲線図	62
図 2.2.4 密度曲線図	64
図 2.2.5 孔径検層曲線図	66
図 2.2.6 中性子強度曲線図	68

図 2.2.7 中性子孔隙率曲線図	69
図 2.2.8 ガンマ線強度曲線図	71
図 2.2.9 P波速度曲線図	73
図 2.2.10 インテンシティ曲線図	74
図 2.2.11 総合柱状図	79
図 2.2.12 フローメータ検層図 (自然状態 : Down)	81
図 2.2.13 フローメータ検層図 (自然状態 : Up)	82
図 2.2.14 フローメータ検層図 (注水 4.8l/min : Down)	83
図 2.2.15 フローメータ検層図 (注水 4.8l/min : Up)	84
図 2.2.16 フローメータ検層図 (注水 3.126/min : Down)	85
図 2.2.17 フローメータ検層図 (注水 3.126/min : Up)	86
図 2.2.18 フォール・オフテスト	87
図 2.2.19 孔内流速曲線図	90
図 2.3.1 比抵抗 (ショート・ノルマル) - 中性子 (%) クロスプロット図	92
図 2.3.2 比抵抗 (ショート・ノルマル) - P波速度クロスプロット図	93
図 2.3.3 比抵抗 (マイクロ) - P波速度クロスプロット図	94
図 2.3.4 中性子 (%) - ガンマ線強度クロスプロット図	95
図 2.3.5 中性子 (%) - 密度クロスプロット図	96
図 2.3.6 中性子 (%) - P波速度クロスプロット図	97
図 2.3.7 中性子 (%) - 密度 (%) クロスプロット図	98
図 2.3.8 中性子検層より算出した透水係数	100

APPENDIX

APPENDIX I 圧力-時間、流量-時間曲線	18
APPENDIX II 水圧破碎によって造成されたき裂のスケッチ	30
APPENDIX III Breakdown および re-opening における 圧力-時間曲線の重ね合わせ	34
APPENDIX IV Shut-in 後の圧力減衰速度の逆数と圧力の関係	38

1. 水圧破碎試験

1.1 目的

東濃鉱山の 300m×300m×深度 200m 程度の領域における初期応力状態を把握するためのデータのひとつとして、TM-2 孔における初期応力状態を把握する。

1.2 測定位置

東濃鉱山敷地内の TM-2 孔（深度 200m）。図 1.2.1 参照。TM-2 孔は深度 126m で月吉断層（逆断層）と交差している。

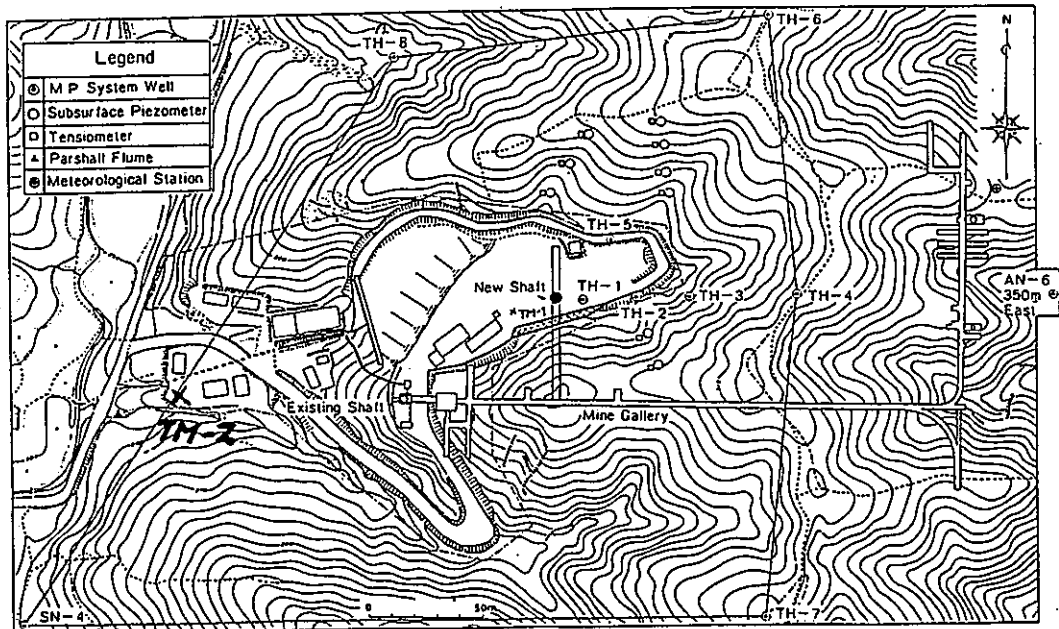


図 1.2.1 TM-2 孔位置図。

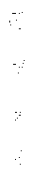
1.3 水圧破砕法について

地下深部の初期応力状態を定量的に把握することは、地下構造物を建設するときの岩盤の挙動を推定するうえで欠かすことができない。岩盤の初期応力測定法としては、応力解放法、水圧破砕法、応力補償法、ボーリングコアを用いる手法などがおこなわれている。このうち水圧破砕法は、地表あるいは坑道からボーリングされた大深度ボアホールのある区間をパッカーによって密閉し、この密閉区間に水を圧入してボアホールの壁面を引張応力によって破壊させ、き裂を岩盤内に進展させるものである。この方法は、応力解放法と異なりオーバーコアリングを必要とせず、接近点から相当深いところにも適用できる点で他の測定方法に勝る長所を有している。しかも、岩盤内部の広い範囲に比較的容易にき裂を進展させることができるので、ボアホールまわりの平均的な応力分布を調査するのに適している。また、破壊条件を観測方程式としているので、応力の評価に弾性定数を必要とせず直接に応力を測定できる。

水圧破砕法による初期応力測定においては、人間が地下深部に降りていき、坑道からボーリングされた比較的浅いボアホールを利用して計測をおこなう場合がある。このとき用いられるパッカーは、ゴムパッカーと破砕区間への流路が独立した 2 本の圧力系統から構成されている。このシステムは比較的簡単な試験設備であるから経済的に計測できるという利点はあるが、人力によってプローブを出し入れするために適用できるボアホールの長さは最大でも 30m 程度であるという欠点がある。

いっぽう、地下空洞の建設にとりかかる前の初期応力測定、地熱開発あるいは地震予知のための初期応力測定においては、地表から大深度のボーリング（たとえば深度 500m）をおこなわなければならない。しかし、石油掘削のための技術や設備をそのまま応用した従来の方法によれば、掘削やぐら、掘削パイプ、動力などの大規模な設備が必要である。また、従来の水圧破砕システムでは、パッカーを膨張させるための流路と破砕のための流路の切り替えが非可逆的であったため、ボアホール内で連続的に水圧破砕をおこなうことはできなかった。

このような問題を解決するために、大深度においてしかも小規模な設備によって水圧破砕ができる測定システムが開発された^[1]。このシステムは図 1.3.1 に示すように、高圧ホース、ワイヤラインおよびストラドルパッカー（水圧破砕用パッカー）から構成され、ゴムパッカーへの加圧から破砕区間への加圧へと流路を切り替えるためのプッシュ・プルバルブと呼ばれる機構を備えている。このためパッカーシステムにつながる高圧ホースは 1 本で済み、大深度のボアホールへの適用が容易である。また、ボアホール内の水位が低い場合でもホース内に残っている流体の水頭によってパッカーが膨張したままにならないように、パッカーにはリリースバルブが取り付けられている。破砕区間の流体圧はストラドルパッカーの近傍に設置された圧力変換器によって測定するので、この流体が長い高圧ホースの中を通過することによって生じる圧力降下は測定される圧力にほとんど影響をおよぼさない。



- 3 -

1.4 測定方法

ここではプッシュ・プルバルブシステムを用いた水圧破碎試験の手順を図 1.4.1 にしたがって説明する。

(1) ダミーパッカーによるボアホール直径の調査

岩盤内部に存在する断層、天然き裂および岩質が変化する箇所とボアホールとが交差するところでは、ボアホール壁面からの崩壊物や壁面の変形によってボアホール直径が小さくなったり閉塞する場合がある。そのような箇所ではパッカーが自重で降下できないばかりか抑留される恐れがある。そこで、まずストラドルパッカーとその外形が同じダミーパッカーをボアホールの所定の深度まで降下させ、パッカーが自重だけで通過できるだけの直径が確保されているかを調査する。

(2) 水圧破碎前の孔壁における型取り

ボーリングコアの目視による鑑定、RQD の深度分布およびキャリパー検層の結果を総合的に判定し、天然き裂が少なく孔壁の安定した区間を選定する。このようにして選定した位置で、インプレッションパッカー（ボアホール壁面の凹凸を写し取るためのゴムパッカー）を用いた水圧破碎前の孔壁の型取りをおこない、天然き裂の状態をさらに詳しく調査する。インプレッションパッカーの表面は可塑性のチューブによって被覆されているので、所定の深度でインプレッションパッカーを膨張させ、その表面をボアホール壁面に押し付けることで壁面の凹凸がチューブの表面に記録される。インプレッションパッカーの膨張圧力は岩盤および初期応力の状態によって異なるが、通常、50 から 100bar で、保持時間は約 30 分である。ボアホール壁面に天然き裂が認められた場合は、これを避けるためにさらに破碎地点を移動させる。

(3) 水圧破碎試験

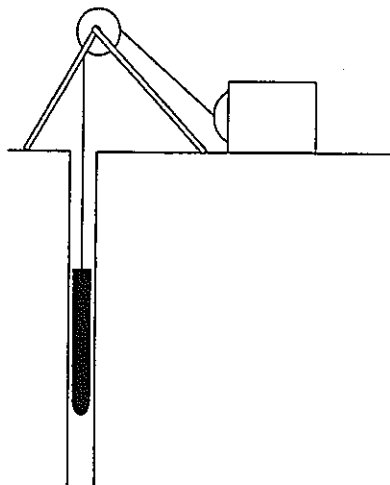
所定の深度までストラドルパッカーをおろし、水圧破碎試験をおこなう。まず、ストラドルパッカーの加圧区間に比較的大きな流量（3～6l/min）で破碎流体（清水）を圧入し、破碎区間の水圧を上昇させる。ボアホールの壁面にき裂が生じて破碎区間の圧力が急激に低下したら高压ポンプによる流体の圧入を停止し、圧力の経時変化を観測する。その後、地表の圧力パネルのバルブを操作して加圧区間に通じる流路を大気に解放し、き裂に圧入されていた破碎流体を排出する。次に再び同じ流量で流体を圧入し、先に生じたき裂がボアホール壁面において再開口するときの圧力 P_r (re-opening pressure) を測定する。き裂の再開は最低 4 回実施して、圧力-時間挙動の再現性を調べる。水圧破碎によって誘起されたき裂を再開してからポンプを停止し、加圧区間に通じる流路のバルブを大気に解放すると破碎区間の圧力は低下し、き裂は再び閉じようとする。このためき裂に圧入されていた破碎流体は破碎区間に逆流する。このとき大気に解放されているバルブを閉じると破碎区間の圧力は回復する (pressure rebound)。造成されたき裂に破碎流体が封じ込められて岩盤あるいはボアホールへのリークが少ない場合、とくに明瞭な圧力の回復がみられるので、このような破碎区間

では造成されたき裂に作用する法線応力と破碎流体の圧力が釣り合うときの圧力 P_s (shut-in pressure) が容易に決定できることが多い。

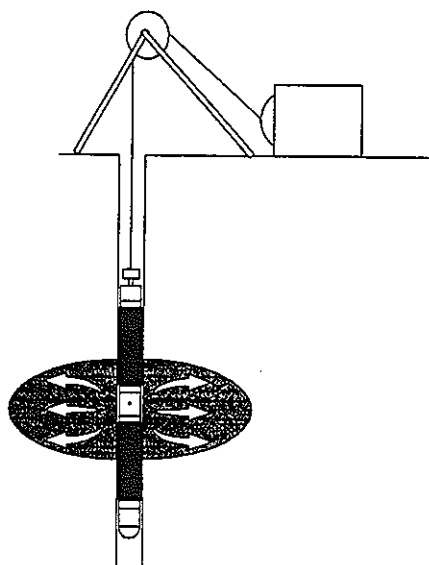
(4) 破碎後の型取りによる人工き裂の方位測定

水圧破碎後、再びインプレッションパッカーを用いて破碎地点の壁面における型取りをおこない、(2) で得られたインプレッションと比較することにより新たに造成されたき裂が判定される。このインプレッションパッカーの下端には坑井方位傾斜儀計が取り付けられているので、インプレッションの表面に印された基準線の方位が測定される。したがって、インプレッションの表面に写し取られたき裂の走向傾斜を決定することができる。

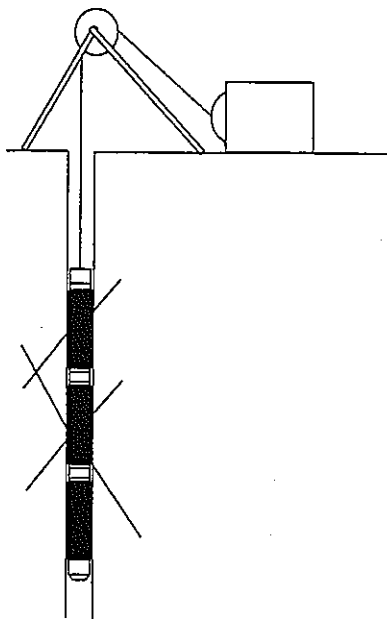
(1) Inserting a dummy packer.



(3) Hydraulic fracturing.



(2) Impression test before hydrofrac.



(4) Impression test after hydrofrac .

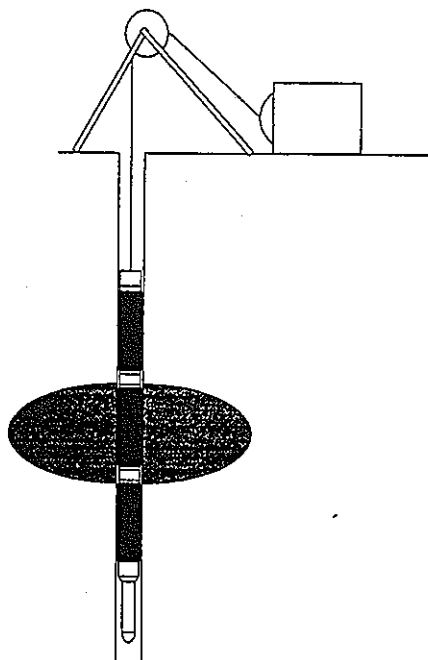


図 1.4.1 水圧破碎法による初期応力測定手順。

1.5 計測システム

水圧破碎試験のための計測システムは、図 1.3.1 に示す通りである。破碎流体は圧縮空気動高圧ポンプによって流量計および高圧ホースを通じてストラドルパッカーの加圧区間まで送られる。ボアホールの破碎区間における破碎流体の圧力は、ケーブルヘッドに内蔵された圧力変換器によって測定され、そのデータはアーマードケーブルを通じて地表の動ひずみ測定器まで転送される。破碎区間への圧入流量は圧力パネルに設置された流量計によって測定される。動ひずみ測定器および流量計の出力はいずれも A/D 変換器を介してパーソナルコンピュータに転送され記録される。データの取り込み速度は 50ms である。水圧破碎によって誘起された人工き裂の方位は、インプレッションおよびインプレッションパッカーの下端に取り付けられた坑井方位傾斜儀計のデータから決定される。水圧破碎試験に用いた主な計測機器は表 1.5.1 のようである。

表 1.5.1 測定機器一覧

測 定 機 器	メーカー	数量
ストラドルパッカー、ウレタンゴム、耐圧 30MPa	同和工営 (株)	1 本
インプレッションパッカー、ウレタンゴム、耐圧 30MPa	同和工営 (株)	1 本
ケーブルウィンチ、1.5kW、1000m 用	同和工営 (株)	1 台
高圧ポンプ、JHP-500W、3.5l/min、35MPa	(株) フジキン	3 台
システムコントローラー、PC-9801T	日本電気 (株)	1 台
A/D コンバーター、ADC-116C	(株) 共和電業	1 台
シグナルコンディショナー、CDA-230C	(株) 共和電業	1 台
圧力変換器、PGM-500KD、測定範囲 49.03MPa	(株) 共和電業	1 台
流量計、MP-MCF-SLE、測定範囲 3.5l/min	流体工業 (株)	1 台
坑井方位傾斜儀計、TYPE-SS、最小読取り精度 0.5°	(株) 村田製作所	1 台

1.6 測定結果

1.6.1 ダミーパッカーの降下および破碎前の型取り

ストラドルパッカーと外径の等しい重量 30kg のダミーパッカーは、孔口から深度 185m までスムーズに降下し、少なくともこの深度範囲で孔壁からの地層の押し出しあるいは崩壊物によって孔径の減少した箇所や閉塞した箇所はないことが確認された。

天然き裂の影響を受けない測定データを得るために、水圧破碎試験はできるだけ天然き裂の少ないボアホール区間で実施することが望ましい。このためコアの目視による鑑定と RQD の深度分布に基づいて天然き裂が少ないと判定された次の 11 深度で水圧破碎前の型取りをおこなった。すなわち、深度 32、46、73、80、85、95、170、174、179、182 および 187m である。ボアホール深度と RQD および破碎前の型取りをおこなった深度との関係は図 1.6.1 の通りである。これらの深度のうち、深度 174m では長さ 1.6m にわたって天然の縦き裂が認められたので水圧破碎の予定深度から除外した。

TM-2 孔は NQ (直径 76mm) のビットで掘削されているが、後で述べるキャリパー検層の結果をみると孔口から深度 165m にわたってボアホールの直径はビットの直径よりも拡大していて、深度が浅く強度の小さい地層でこの傾向が顕著である。このため、種々の大きさに拡大したボアホールの直径にインプレッションパッカーが適合するように、直径の異なる 3 種類のゴムパッカーを使用しなければならなかった。後で述べる水圧破碎試験においても破碎前の型取りと同様に、ボアホールの直径に合わせて直径の異なる 3 種類のゴムパッカーを使用した。

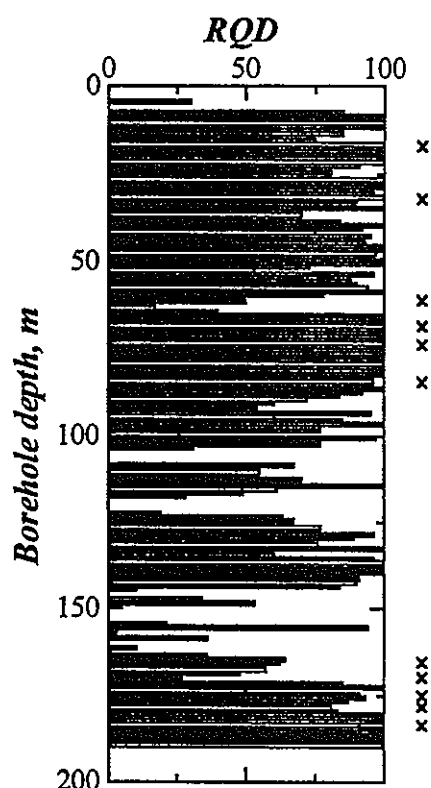


図 1.6.1 ボアホール深度と RQD および破碎前の型取りをおこなった深度 (×印) との関係。

1.6.2 水圧破碎試験結果

水圧破碎試験は、深度 32m から 185m にわたって 11 回おこなった。

造成されたき裂のタイプ（縦き裂、横き裂、人工き裂、天然き裂）、き裂の走向および傾斜、ボアホール壁面において最初にき裂が発生するときの圧力 P_b (Breakdown pressure)、それを同じ流量で再開するときの圧力 P_r (Re-opening pressure)、造成されたき裂に作用する法線応力と破碎流体の圧力が釣り合うときの圧力 P_s (Shut-in pressure)などは表 1.6.1 のようである。深度 46m では圧力－時間曲線に明瞭な P_b および P_s が現れなかったため、測定データは表に記載されていない。これを補うために深度 40m において追加の水圧破碎試験をおこなった。試験を実施した深度が破碎前の型取りの深度と若干異なる場合があるのは、破碎前の型取り結果に基づいて天然き裂のより少ない深度を選定したためである。水圧破碎試験中の圧力－時間曲線、流量－時間曲線および破碎前後の型取りから判定された人工き裂および天然き裂は APPENDIX I および II に示す通りである。

ここで、表 1.6.1 に示した P_b 、 P_r および P_s の決定方法について述べる。まず P_b は第 1 回目の加圧サイクルにおける最高圧力として求められる。 P_r は、第 1 回目の加圧サイクルによってボアホールの壁面にき裂が生じるときに得られる圧力－時間曲線と、次に同一の流量でそのき裂を再開したときに得られる圧力－時間曲線とを重ね合わせ、後者の曲線が前者の曲線からそれるときの圧力として求めることができる^{[2][3]}。ただし、き裂を再開するときの圧力－時間曲線は、再開を何回か繰り返し、ボアホール壁面における岩盤の引張強度 T が完全にゼロとなった後の曲線を用いなければならない。各深度で測定された第 1 回目およびき裂を再開したときの圧力－時間曲線を重ね合わせた図を APPENDIX III に示す。

P_s は、水圧破碎によって誘起されたき裂に作用する法線応力と破碎流体の圧力が釣り合うときの圧力である。ポンプを停止(shut-in)した後の破碎区間の圧力－時間曲線に明瞭な変曲点がみいだされるとき、すなわち shut-in 直後いったん急激に低下した圧力がそれ以降時間とともにほとんど低下しないとき P_s は比較的容易に決定できる。しかし多くの場合、shut-in 後の圧力の減衰速度は急激に低下しないので P_s を圧力－時間曲線の変曲点として決定することはむずかしい。そこで圧力－時間曲線から図式的に P_s を求めるいくつかの方法^{[3][4][5][6]}が提案されているが、ここでは P_s の評価に Hayashi and Haimson^[6]の方法を用いた。すなわち、shut-in 後の圧力－時間曲線から求められるボアホールの水圧とその時間変化率の逆数との関係を 3 直線で近似し、高圧側の 2 直線の交点におけるボアホールの水圧を P_s とした (APPENDIX IV 参照)。

縦き裂の走向および横き裂の走向傾斜は、インプレッションに写し取られたこれらのき裂のトレースに最も適合する平面を最小 2 乗法によって決定して求めた^[3]。ただし、深度 32.0、40.0 および 80.0m では、地層が軟弱であるためにボアホール壁面の写りが不鮮明になり、人工き裂をみいだすことはできなかった。これらの深度では、APPENDIX II に示すように、ボアホール壁面の写り方はボアホールの全周にわたって一様でなく、円周方向

の角度がほぼ 90° 変化するたびに写り方が相対的に鮮明な部分とそうでない部分が周期的に現れた。このことはボアホールの断面形状が真円でなく楕円状になっているために、短軸方向におけるインプレッションとボアホール壁面との接触圧力が長軸方向のそれよりも大きかったことを示唆していた。そこで、これらの深度ではインプレッションの写りが相対的に鮮明な短軸方向の方位を求めて表示した。

表 1.6.1 をみると、 P_b と P_r の差として求めた破砕区間の引張強度 T は深度とともに増加していることが認められ、地質が上部から順に堆積層、風化花崗岩および花崗岩へと変化するにしたがってその強度が大きくなることを反映していると推定される。 P_r および P_s にも深度の増加にともなう圧力の増加傾向が認められるが、深度 95.4m までは P_r のほうが P_s よりも大きく、深度 171.0m よりも深部ではこの大小関係が逆転している。このことは、初期応力の分布傾向が水圧破砕試験をおこなった深度の範囲で一様でないことを示唆している。

表 1.6.1 TM-2 孔における水圧破砕試験の測定結果

Borehole depth (m)	Lithology	Fracture type*		Fracture orientation(deg)**			Measured pressure(MPa)			
		L/T	N/J	Transverse		Long	P_b	P_r	P_s	T
				ϕi	θi	ϕi				
32.0	細粒砂岩	L(?)	—			-38.6*	2.2	1.6	0.9	0.6
40.0	細粒砂岩	L(?)	—			42.1*	3.0	2.1	1.5	0.9
73.0	中粒砂岩	L	N			-19.1	3.4	2.4	1.8	1.0
80.0	中粒砂岩	L(?)	—			34.5*	3.7	2.5	1.9	1.2
84.5	礫岩	L	N			-27.6	6.3	2.8	2.5	3.5
95.4	風化花崗岩	L	N			-16.3	6.3	3.2	2.0	3.1
171.0	花崗岩	L	N			-22.9	5.3	3.3	4.7	2.0
179.1	花崗岩	L	N			-24.3	7.8	4.4	5.4	3.4
182.0	花崗岩	T	J	-171.8	7.1		7.6	3.5	4.4	4.1
185.0	花崗岩	T	N	-124.3	22.5		8.3	3.6	5.1	4.7

P_b : Break down pressure. P_r : Re-opening pressure.

P_s : Shut-in pressure. T : Tensile strength; $T=P_b-P_r$.

L(?): 円周方向の角度が約 90° 変化するたびに写りの鮮明な部分とそうでない部分が現れた。

*: ボアホール壁面の写りが相対的に鮮明な方向を磁北から時計まわりに測定した角度。

+ : Long、Transverse、N および J はそれぞれ縦き裂、横き裂、新たに造成されたき裂および既存のき裂を意味する。

++: ϕi は縦き裂の走向を磁北から時計まわりに測定した角度、 ϕi は横き裂の法線を水平面上に投影した直線を磁北から時計まわりに測定した角度、そして θi は横き裂の法線と水平面のなす角度を水平面から下向きに測定した角度である。

1.6.3 解析結果

ここでは、ボアホール軸がひとつの主応力軸の方向と一致していると仮定し、円孔まわりの弾性解を用いる解析方法に基づいて各測定深度における水平面内の主応力を求める。

Break down pressure P_b 、ボアホール軸と直交する水平面内の最大主応力 S_H 、最小主応力 S_h 、pore pressure P_o および破砕区間の岩盤の引張強度 T から、よく知られた次式が導かれる。

$$P_b = 3 S_h - S_H - P_o + T \quad \dots\dots\dots (1.6.1)$$

水圧破砕によって生じた縦き裂をボアホール壁面において再開するときの圧力を P_r ($T = 0$) とすると

$$P_r = 3 S_h - S_H - P_o \quad \dots\dots\dots (1.6.2)$$

したがって、多孔質岩盤における水平面内の最大主応力の下限 S_{Hmin} は次式で与えられる。

$$S_{Hmin} = 3 S_h - P_r - P_o \quad \dots\dots\dots (1.6.3)$$

空隙率の小さい結晶質岩盤に対する水平面内の最大主応力の上限 S_{Hmax} は P_o を無視することによって次式のように推定される。

$$S_{Hmax} = 3 S_h - P_r \quad \dots\dots\dots (1.6.4)$$

ここで、最小主応力 S_h は shut-in pressure P_s として水圧破砕試験における圧力-時間曲線から決定される。すなわち、

$$S_h = P_s \quad \dots\dots\dots (1.6.5)$$

表 1.6.1 の P_r および P_s を式 (1.6.3) から (1.6.5) に代入して水平面内の最大主応力 S_H および最小主応力 S_h を求めると表 1.6.2 のようである。先に述べたようにボアホールの断面形状が楕円状になっていると考えられる深度 32.0、40.0 および 80.0m ではインプレッションが不鮮明なために誘起されたき裂のタイプははっきりしない。しかし、これらの深度で誘起されたき裂と垂直な応力成分 S_h ($= P_s$) は、後で述べる岩盤の密度から推定される被り地圧よりも大きいので、水平なき裂が誘起された可能性は小さい。また、深度 182.0 および 185.0m で誘起されたき裂は横き裂であるが傾斜は 68° 以上の急傾斜である。厳密に言えば、このような横き裂に関して得られた圧力データに式 (1.6.1) ~ (1.6.4) を適用することはできない。しかし、例えば Haimson は初期応力状態を計算するためのデータベースを拡張することを目的として、急傾斜の横き裂を鉛直なき裂とみなして初期応力の推定をおこなっている¹⁷⁾。本試験から得られた縦き裂のデータは十分に多いとはいえないので、ここでも上述の 5 深度で誘起された急傾斜の横き裂をすべて縦き裂として取り扱って水平面内の主応力を求めた。ただし、 P_o は、TM-2 孔の地下水面の深度 18m と水圧破砕深度の間の水頭圧に等しいと仮定した。

表 1.6.2 TM-2 孔における水平面内の最小主応力 S_h 、最大主
応力 S_{Hmax} 、 S_{Hmin} および最大主応力の方位 ϕ

Borehole depth(m)	Principal stress(MPa)			Direction of S_H * ϕ (deg)
	S_h	S_{Hmin}	S_{Hmax}	
32.0	0.9	1.0	1.1	-38.6 ⁺
40.0	1.5	2.2	2.4	42.1 ⁺
73.0	1.8	2.5	3.0	-19.1
80.0	1.9	2.6	3.2	34.5 ⁺
84.5	2.5	4.0	4.7	-27.6
95.4	2.0	2.0	2.8	-16.3
171.0	4.7	9.3	10.8	-22.9
179.1	5.4	10.2	11.8	-24.3
182.0	4.4	8.1	9.7	-81.8 [#]
185.0	5.1	10.1	11.7	-34.3 [#]

*: ϕ は磁北から時計まわりに計った回転角度。

+ : 深度 32、40 および 80m では誘起されたき裂を判定できなかったの
で楕円状ボアホール断面の短軸方向を表示した。

#: 急傾斜の横き裂の走向。

まず、水平面内の主応力の大きさをボアホール深度の関数として表示すると図 1.6.2 の
ようである。ここで、○印は水平面内の最小主応力 S_h 、■印は P_v を考慮して式 (1.6.3)
から求めた水平面内の最大主応力 S_{Hmin} 、そして□印は式 (1.6.4) から求めた最大主応力 S_{Hmax}
である。被り地圧 S_v の大きさは、密度検層の結果を深度方向に積分して求め、点線で
表示してある。 S_h は水圧破碎試験をおこなったボアホール深度の範囲で深度とともにほぼ
線形に増加していることが読み取れる。一方、 S_H の分布をみると、深度 150m 以深の花崗
岩における S_H の大きさは、地表から深度 100m までの堆積層における S_H の分布を同じ深度
勾配でより深い深度まで外挿したときの値よりも明らかに大きい。すなわち、地質が下部
に向かって堆積層から花崗岩へと変化するにつれて S_H はボアホール深度に対して非線形な
分布をしている。水平面内の主応力および鉛直方向の被り地圧の大きさを比較すると、 S_v
 $< S_h < S_H$ の関係が成り立ち、応力環境は逆断層型である。

図 1.6.2 の右側の図は、最大せん断応力と深度の関係である。いまの場合、初期応力状
態は逆断層型なので、最大せん断応力 τ_{max} は $(S_H - S_v) / 2$ から求められる。深度 95.4m
までの堆積層および風化花崗岩における τ_{max} は小さく、深度の増加に伴う増加傾向もはっ
きりしない。一方、深度 171m よりも深い花崗岩における τ_{max} は、上部の τ_{max} よりも
4 倍以上の大きさがある。これは、浅部の柔らかい堆積層ほどまさつ滑りによる非弾性変
形の割合が高く [8]、深部の硬い花崗岩では弾性変形が卓越しているためであると考えられ
る。

次に各深度において決定された水平面内の最大主応力 S_H の方位とボアホール深度の関係
を描くと図 1.6.3 のようである。ここで、●印は縦き裂と判定されたき裂の走向であり、
ボアホール軸と垂直な平面内の最大主応力の方向と一致する。 S_H の方位は深度および地質
と無関係にほぼ一定で、その平均値は $N22^\circ W$ である。月吉断層（逆断層）の走向はほぼ
E-W 方向であるから、 S_H の方位はこの断層の走向とほぼ垂直である。すなわち、この断

層の生成時の応力状態と整合性がある。TM-2孔から水平距離で東に約 150 m 離れた TM-1 孔の下部における水圧破碎試験でも、 S_H の方位は深度および地質と無関係にほぼ N-S 方向である^[9]から、これら 2 本のボアホールにおける S_H の方位は調和的である。

□印は急傾斜の横き裂の走向である。深度 185m の新たに誘起された横き裂の走向は縦き裂の走向とほぼ一致するが、深度 182m の天然き裂の走向は一致しない。△印はインプレッションの写り方に鮮明な部分とそうでない部分が 1/4 周期ごとに現れたときの鮮明な部分の方位を示している。すなわち楕円状のボアホール断面の短軸方向を表している。初期応力を受ける岩盤にボーリングをおこなうと、ボアホールの近傍に応力集中が発生し、弾性ひずみエネルギーは局所的に大きくなる。この弾性ひずみエネルギーがある限界値に達するとボアホール壁面の圧縮応力による破壊が始まり、ボアホール軸と垂直な最小主応力 S_h の方向に拡大する。この破壊過程はボアホールブレイクアウトと^[10]呼ばれ、初期応力場の主軸の方向を決定するのに利用されている。TM-2 孔の場合、ボアホール直径の楕円状の拡大がもしもボアホールブレイクアウトによるものであれば、ボアホール断面の短軸方向 (△印) は S_H の方位と一致しなければならない。しかし、図 1.6.3 からは S_H の方位である縦き裂の走向 (●印) と短軸方向 (△印) とのあいだにはっきりした対応性をみいだすことはできない。さらに、キャリパー検層の結果によればボアホールの直径は全周にわたってビットゲージよりも拡大している。したがって、初期応力ではなくウォッシュアウトによってボアホールの断面が楕円状になった可能性が高い。

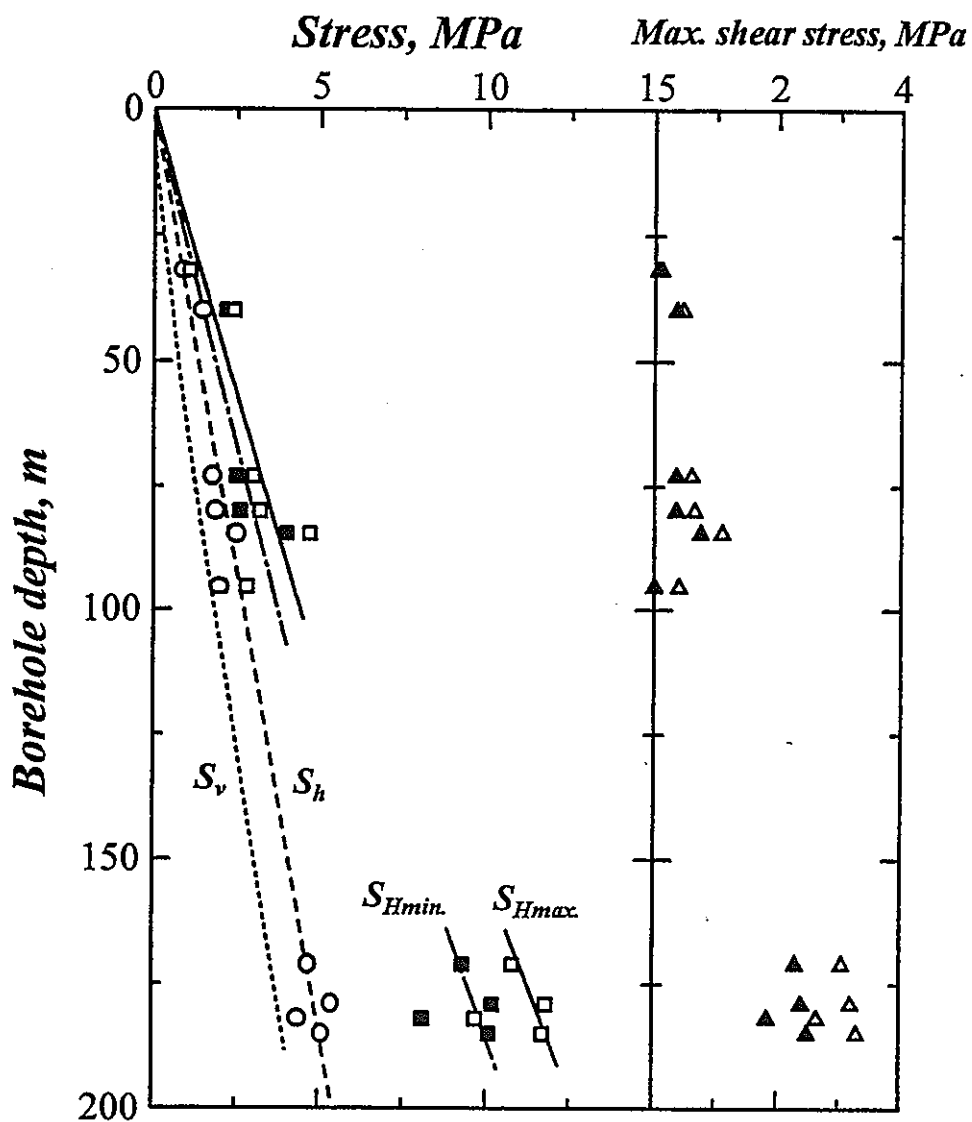


図 1.6.2 水平面内の最大、最小主応力および最大せん断応力とボアホール深度の関係。点線は密度検層の結果を積分して求めた被り地圧 S_v である。○印は最小主応力 S_h 、■印は $S_{Hmin.}$ 、□印は $S_{Hmax.}$ である。▲印および△印は、それぞれ $S_{Hmin.}$ および $S_{Hmax.}$ と S_v から求めた最大せん断応力である。

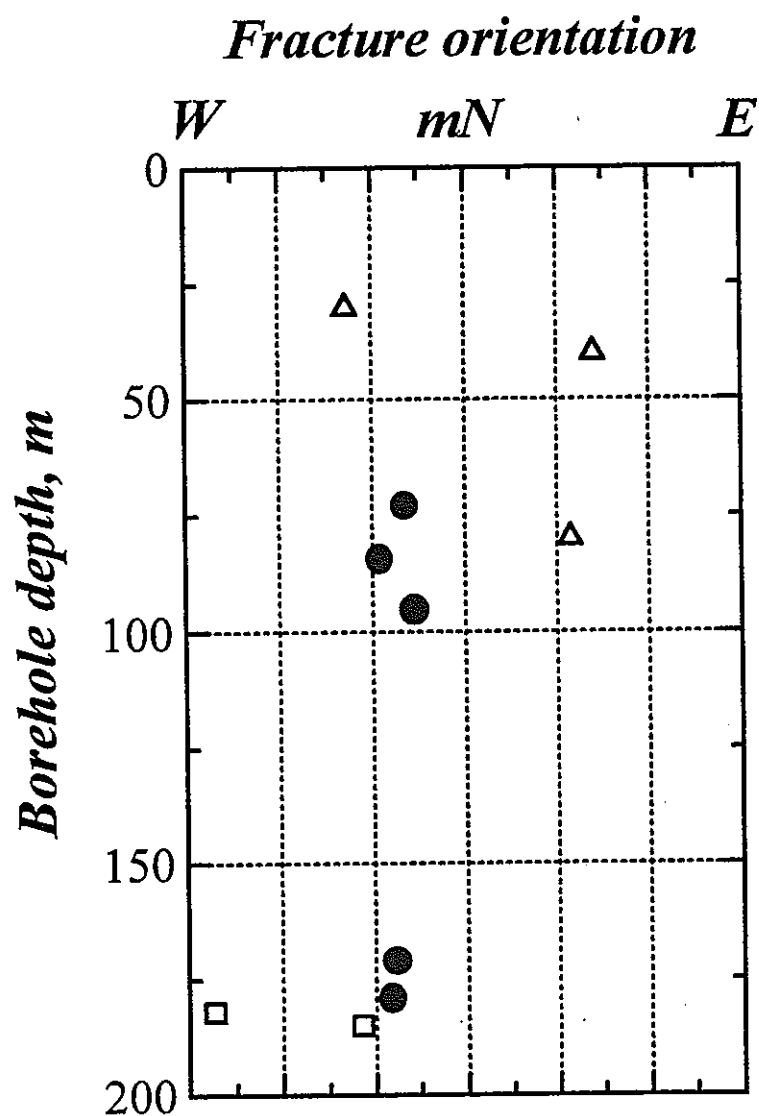


図 1.6.3 TM-2 孔で誘起されたき裂の走向とボアホール深度の関係。●印は縦き裂の走向、△印はインプレッションの写り方に鮮明な部分とそうでない部分が周期的に現れたときの鮮明な部分の方位、そして□印は急傾斜の横き裂の走向である。

1. 7 まとめ

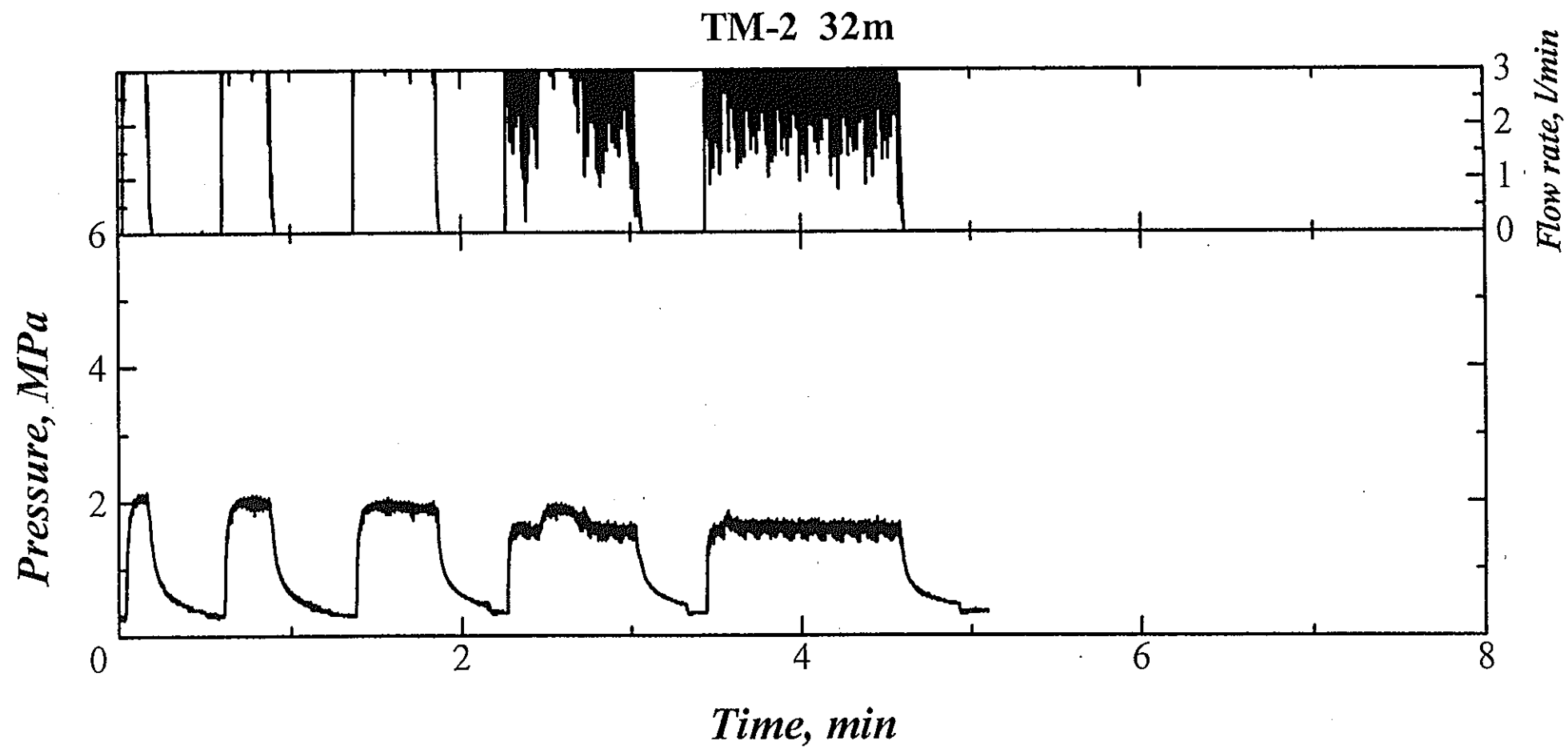
東濃鉾山の 300m×300m×深度 200m 程度の領域における初期応力状態を把握するために、TM-2 孔において水圧破碎法による初期応力測定がおこなわれた。ボアホールの直径は孔口から深度 165m にわたって拡大していたので、ボアホールの直径に適合するように直径の異なる 3 種類のゴムパッカーが用いられた。水圧破碎試験は、堆積岩、風化花崗岩および花崗岩を含む 32m から 185m までの深度で合計 11 回おこなわれた。すべての測定深度において $S_v < S_h < S_H$ となり、TM-2 孔における初期応力の環境は逆断層型である。水平面内の主応力の大きさは、堆積層および風化花崗岩で小さく、下部の花崗岩で大きかった。最大せん断応力の分布についても同様の傾向が認められた。誘起された縦き裂の方位から決定された水平面内の最大主応力 S_H の平均方位は $N22^\circ \text{ \#}$ である。この方位は逆断層である月吉断層の走向とほぼ垂直である。すなわち、水圧破碎法によって決定された初期応力の環境と方位はこの断層の生成時の応力状態と整合性がある。

参考文献

1. Rummel F., Baumgartner J. and Alheid H. J., Hydraulic fracturing stress measurements along the eastern boundary of SW-German Block, Proc. of a Workshop on Hydraulic Fracturing Stress Measurements, U.S. National Committee of Rock Mechanics, National Academy Press, Washington, D.C., p.3-17, 1981.
2. Haimson B.C., Near surface and deep hydrofracturing stress measurements in Waterloo quartzite, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.17, p.81-88, 1980.
3. Lee M.Y. & Haimson B.C., Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameter, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.26, No.6, p.447-456, 1989.
4. Baumgartner J. & Zoback M.D., Interpretation of hydraulic fracturing stress measurement parameter, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.26, No.6, p.461-469, 1989.
5. Vik G. & Tunbridge L., Hydraulic fracturing - a simple tool for controlling the safety of unlined high pressure shafts and headrace tunnels, Proc. of the Int. Symp. On Rock Stress and Rock Stress Measurements/Stockholm, 1986.
6. Hayashi K. and Haimson B.C., Characteristics of shut-in curves in hydraulic fracturing stress measurements and determination from hydraulic injection test data, J. Geophys. Res., 96, p.18311-18321, 1991.
7. Haimson B.C., Hydraulic fracturing measurements in New York City reaffirm the uniformity of the stress regime in Northeastern United States, Proc. 33rd US Symposium on Rock Mechanics, Santa Fe, p.59-67, 1992.
8. 塚原弘明, 池田隆司, 地殻応力測定値から推定した堆積岩岩盤中の応力状態, 地質学雑誌, p.571-578, 1989.
9. 佐藤稔紀, 杉原弘造, 水田義明, 水圧破碎法と AE 法による深度別初期応力測定 - 東濃鉾山の軟岩における測定の例について -, 資源・素材 '94(春季大会), p.331-332, 1994.
10. Zoback M.D., Barton C., Brudy M., Moos D., Peska P. and Vernik L., Utilization and analysis of multiple modes of borehole failure estimation of in situ stress magnitudes, Proc. International Workshop on Rock Stress Measurement at Great Depth, Tokyo, p.30-34, 1995.

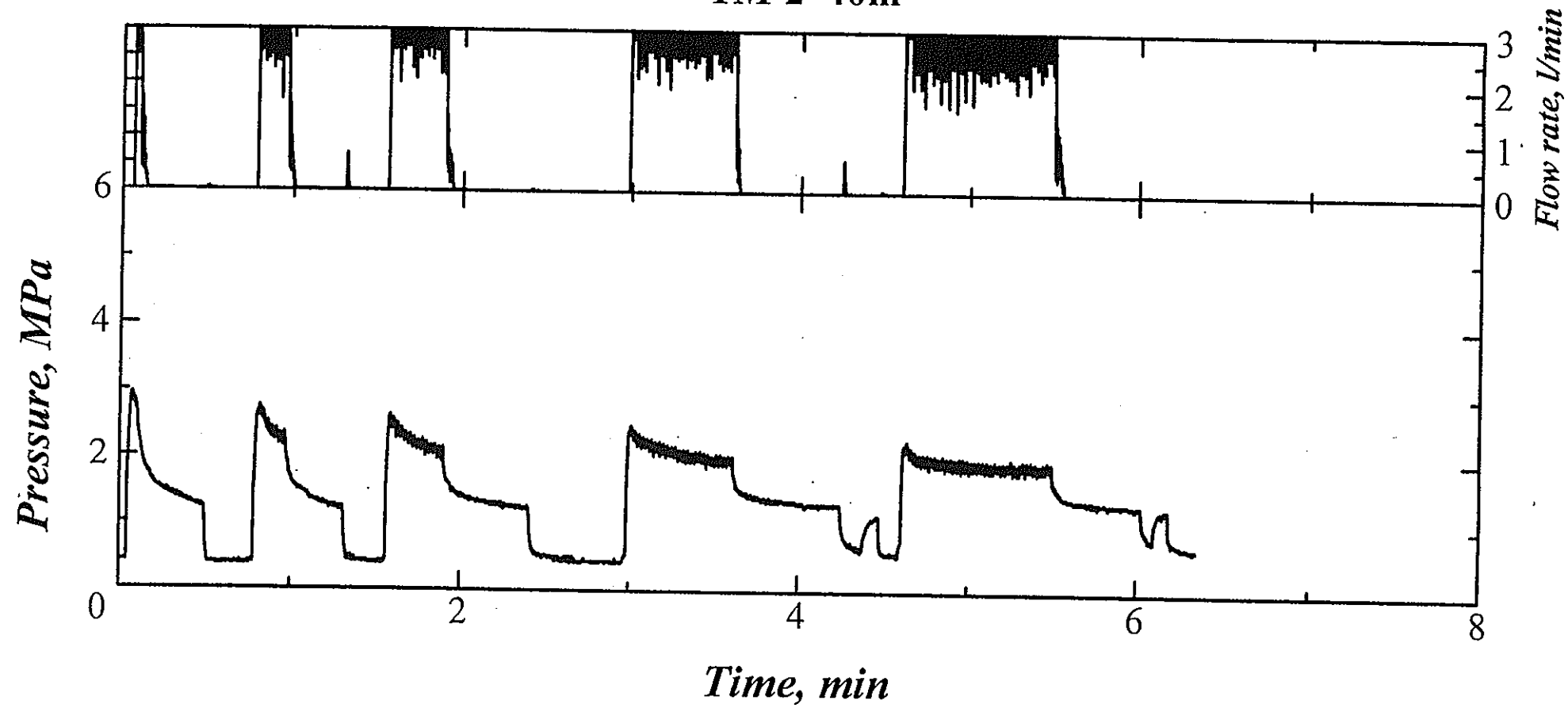
APPENDIX I

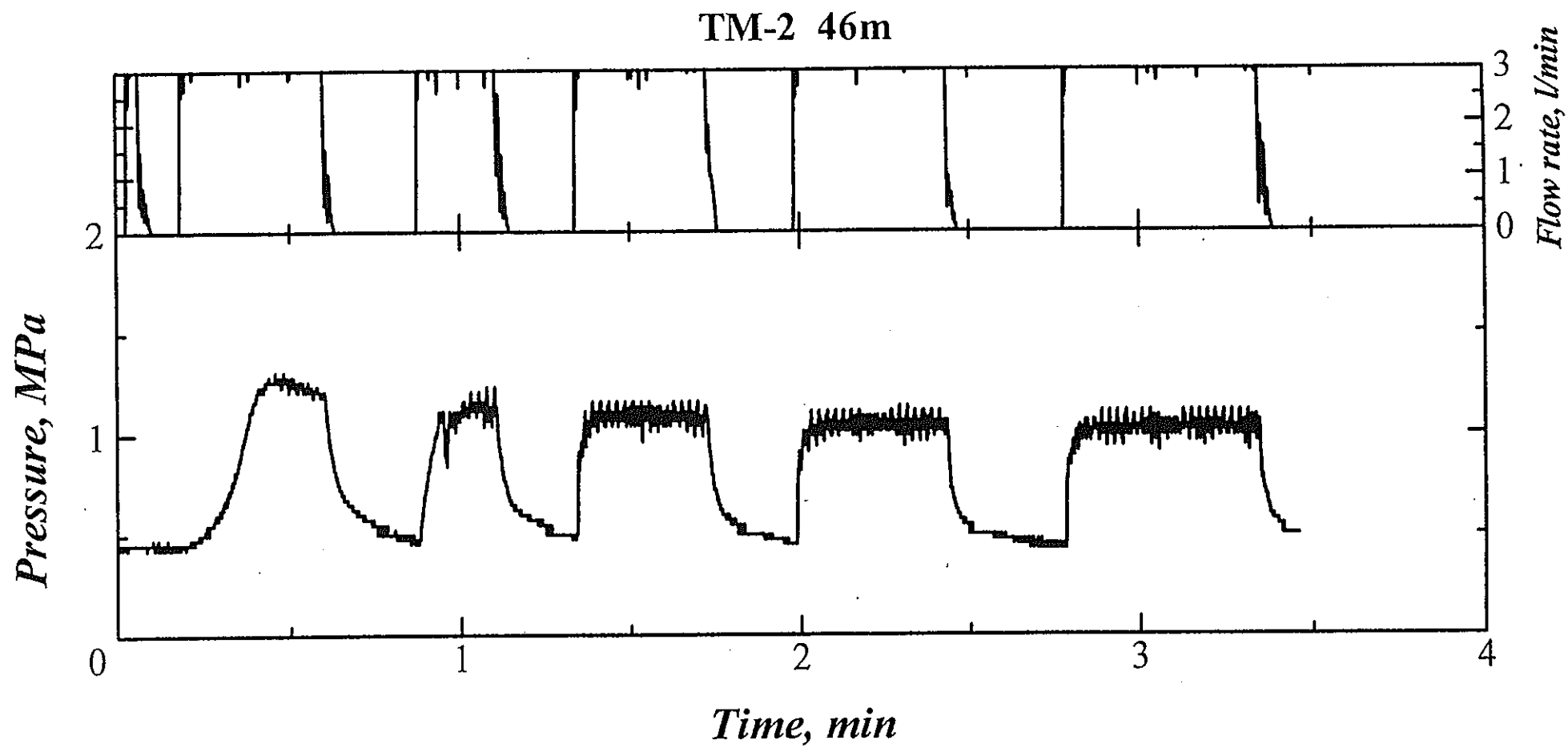
圧力－時間、流量－時間曲線



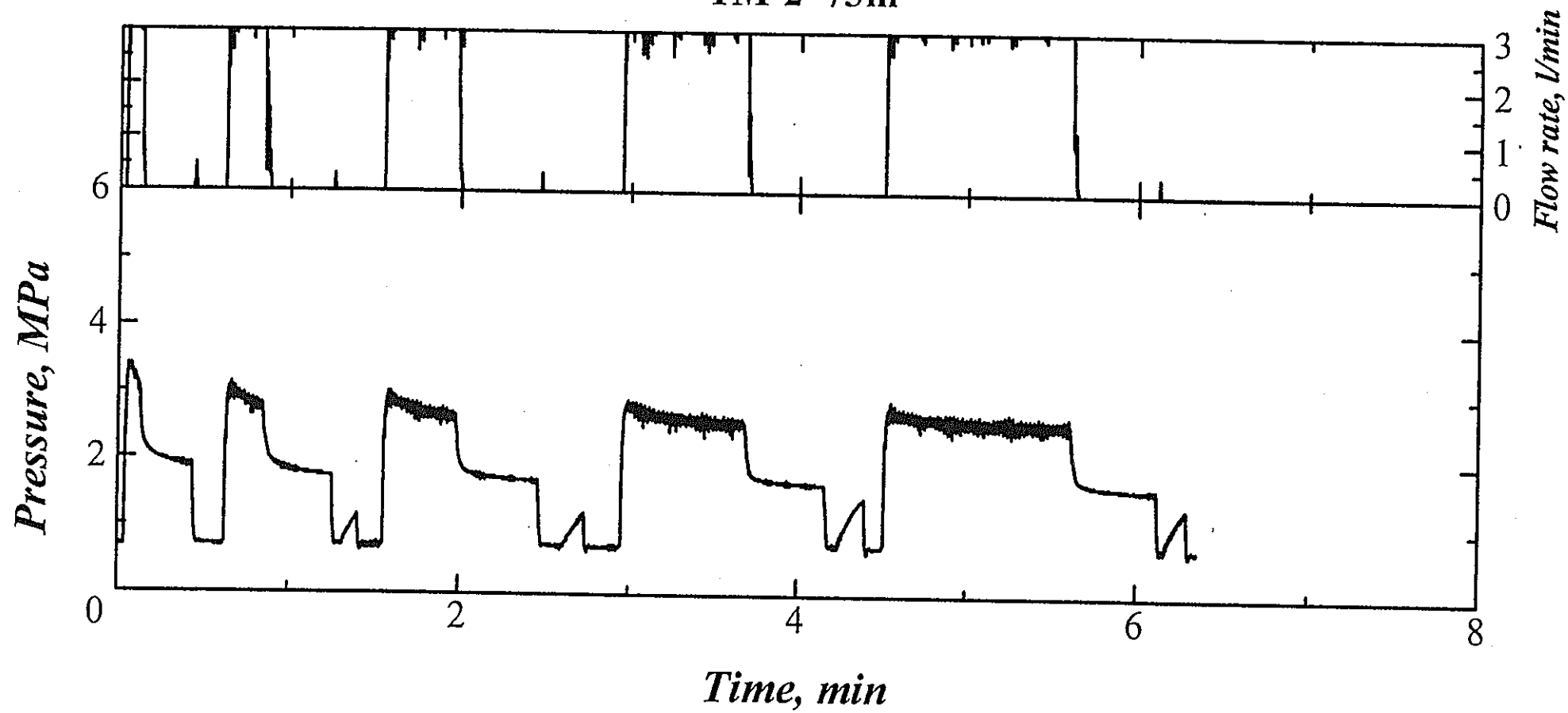
TM-2 40m

-20-

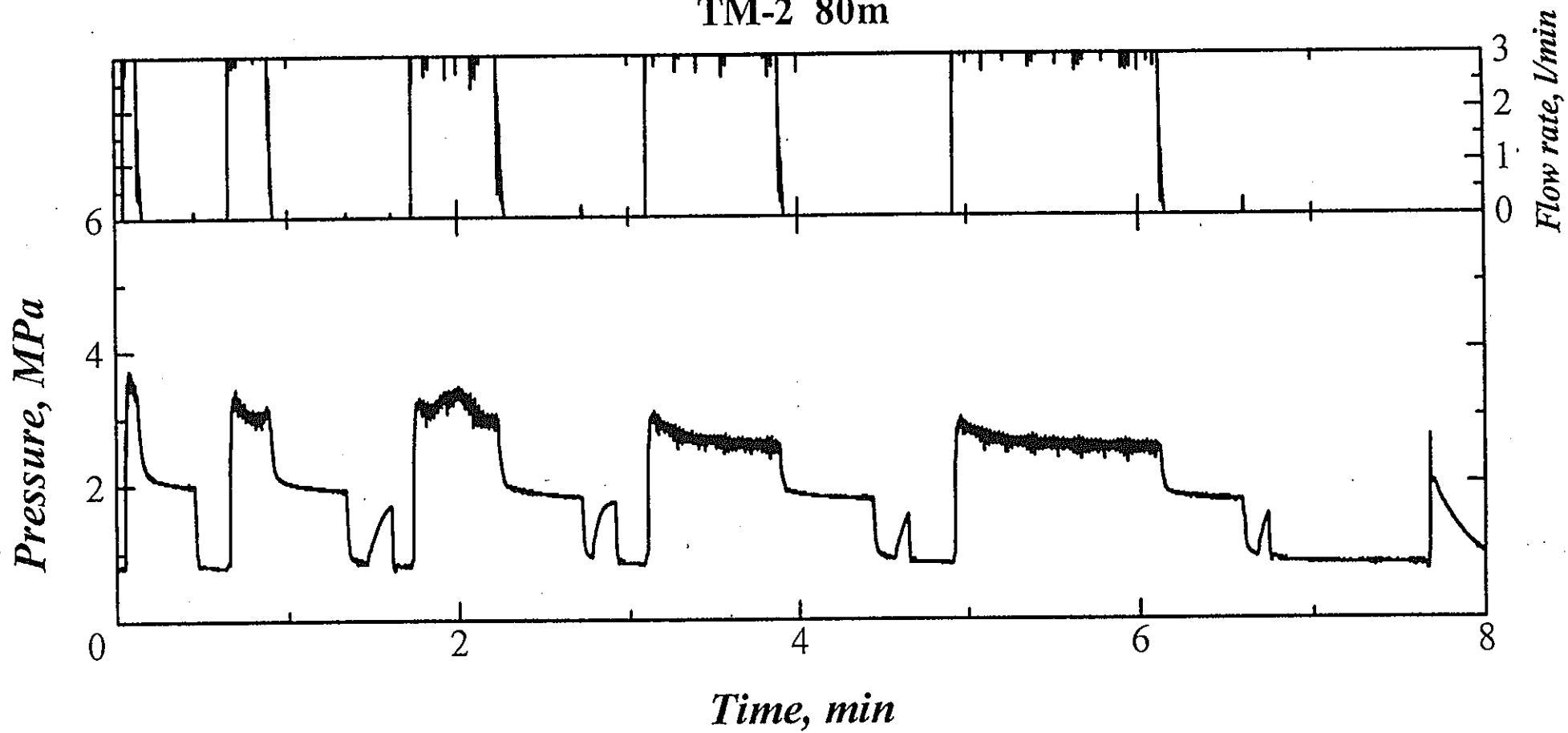


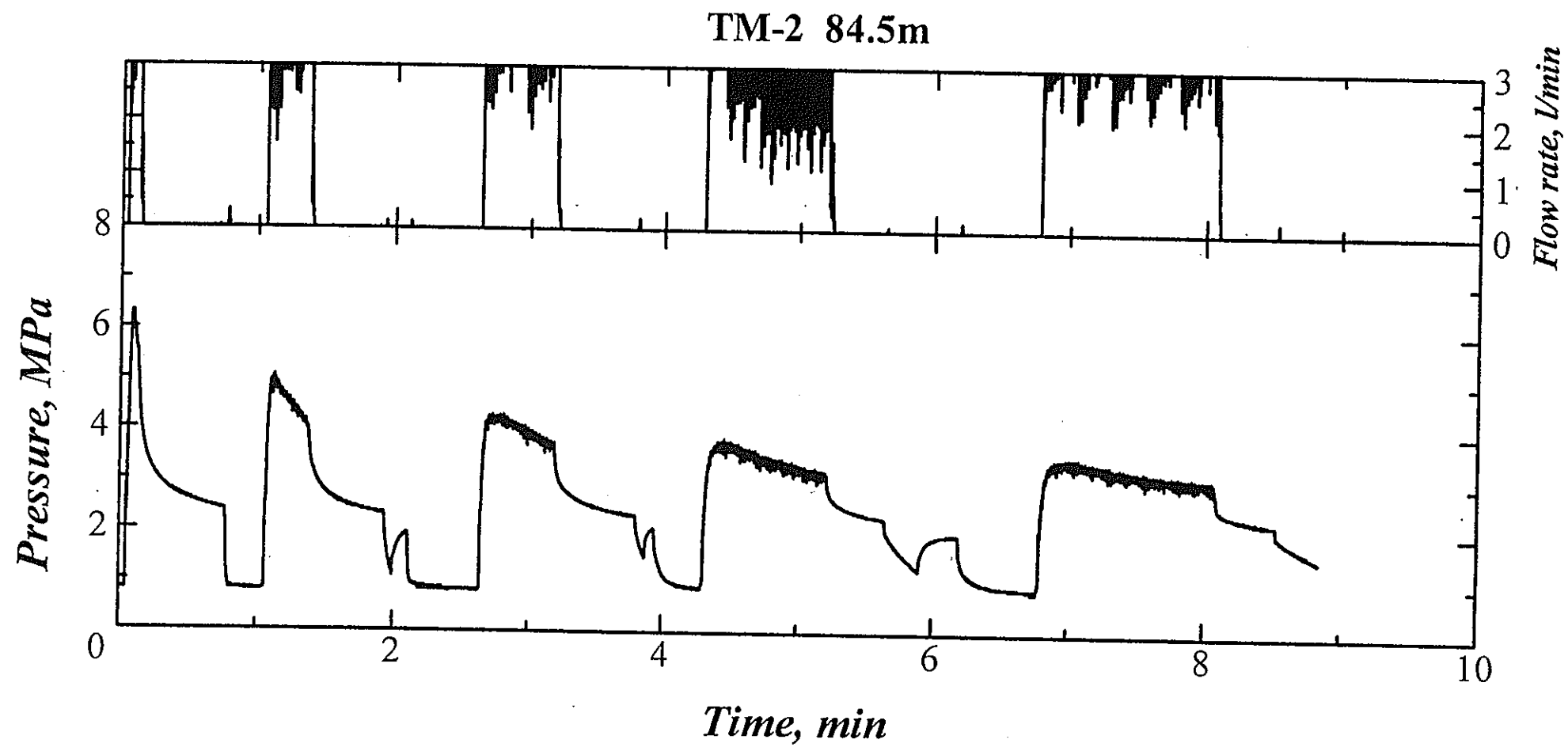


TM-2 73m

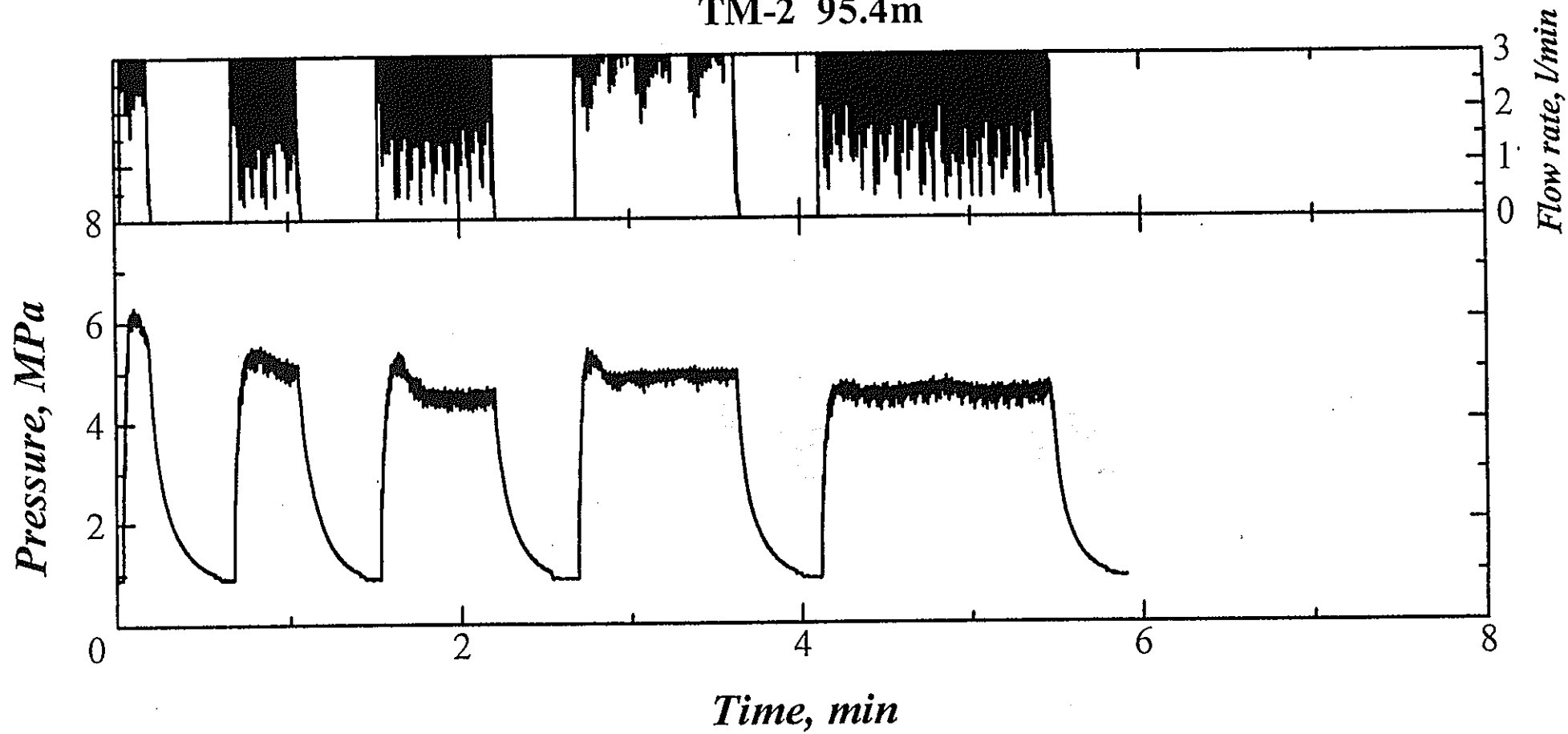


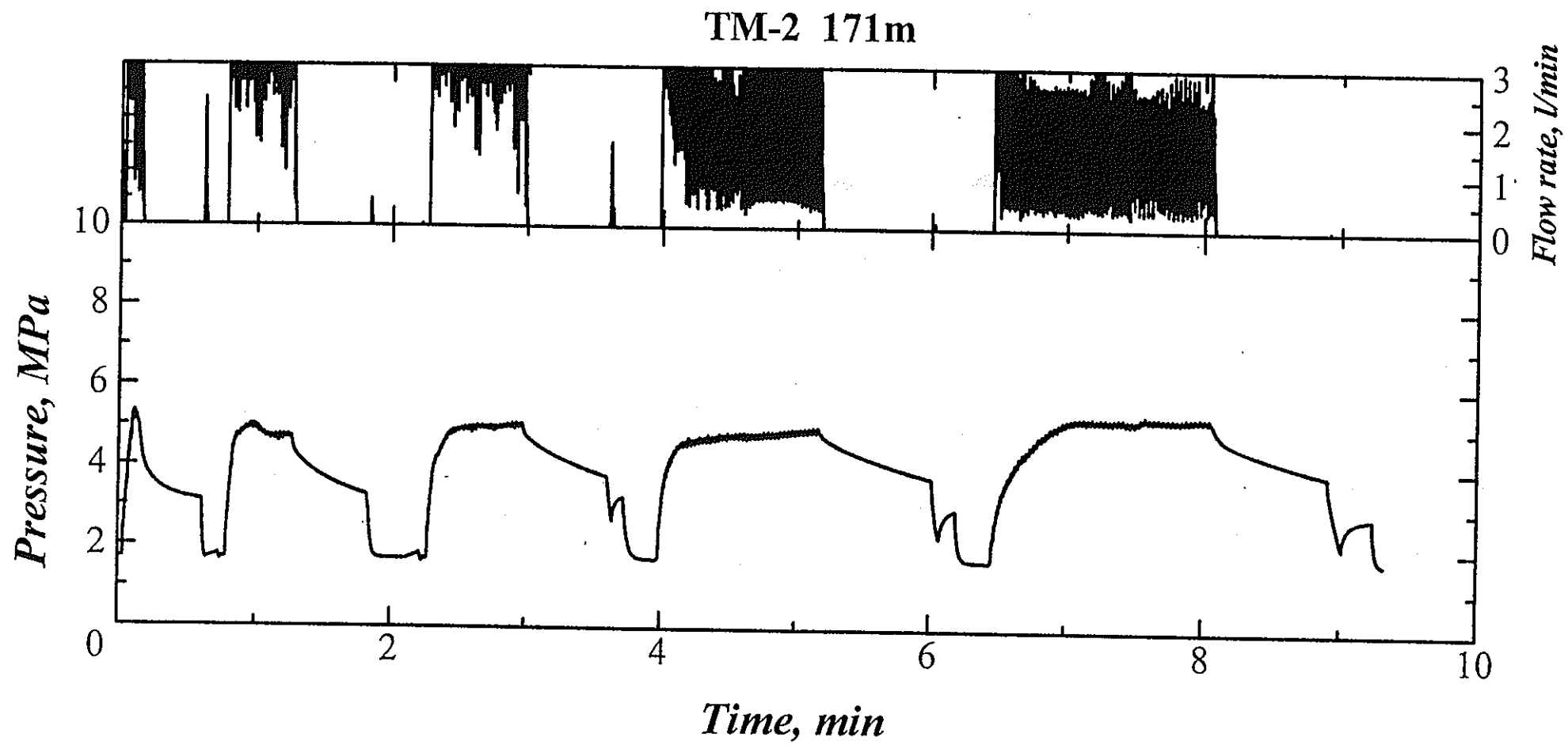
TM-2 80m

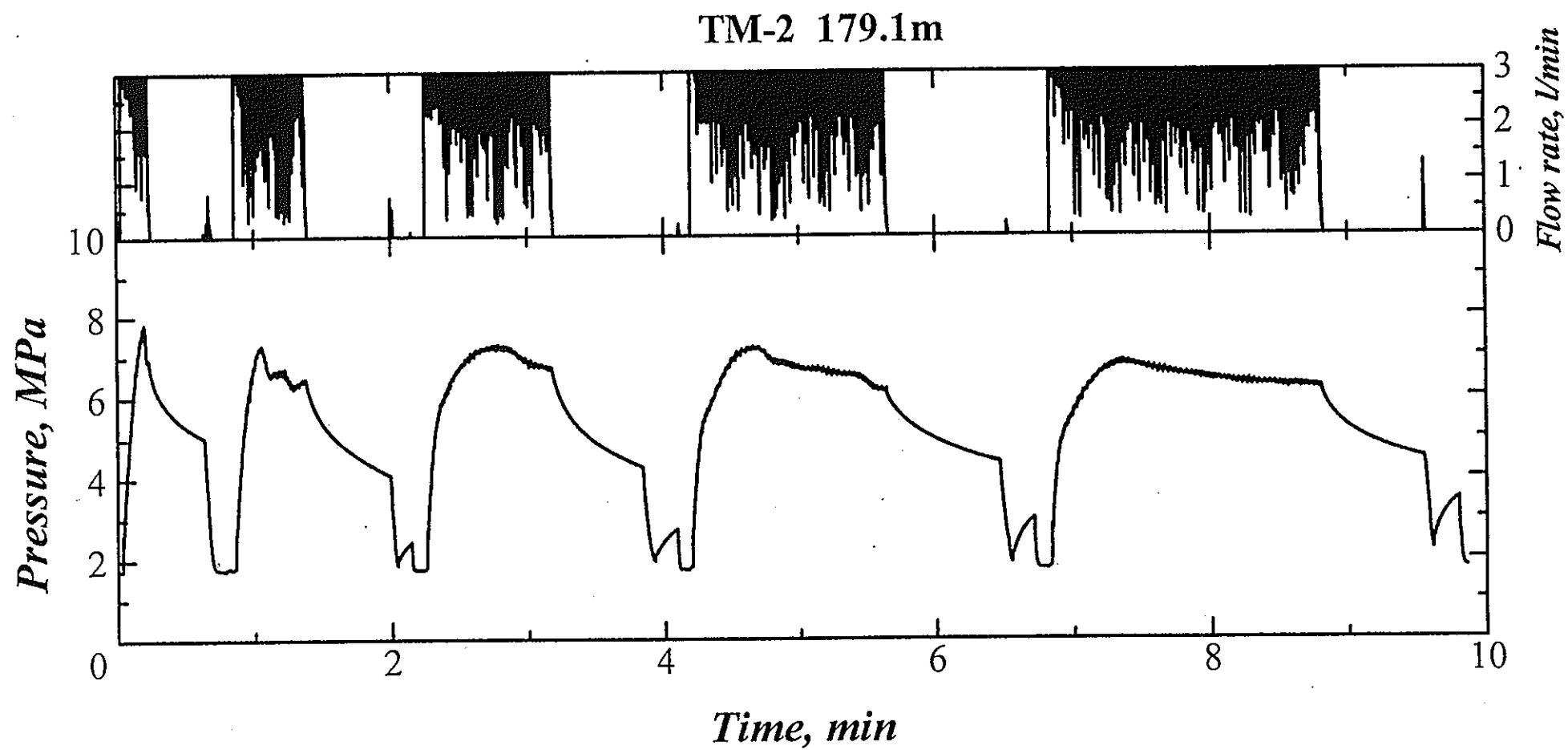


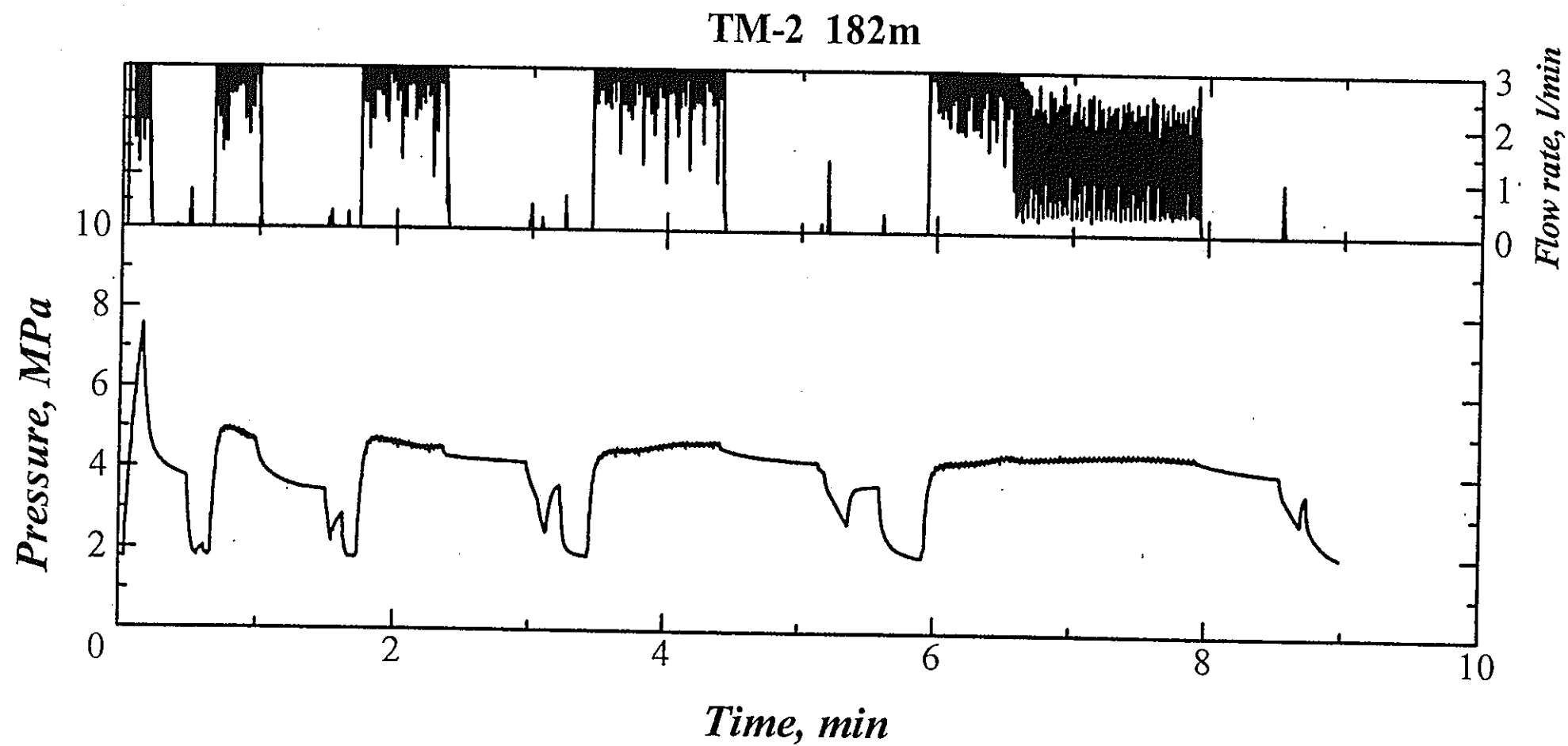


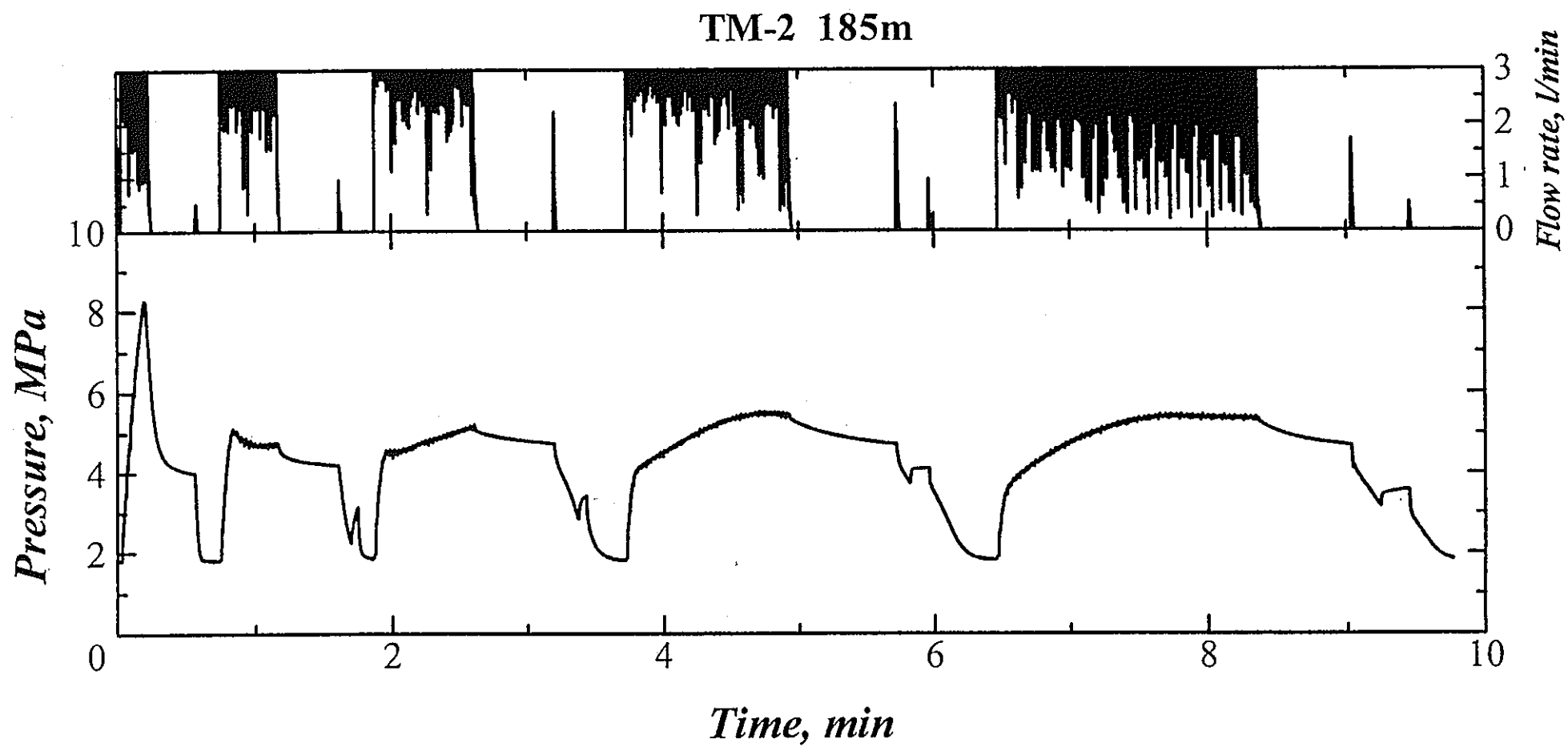
TM-2 95.4m





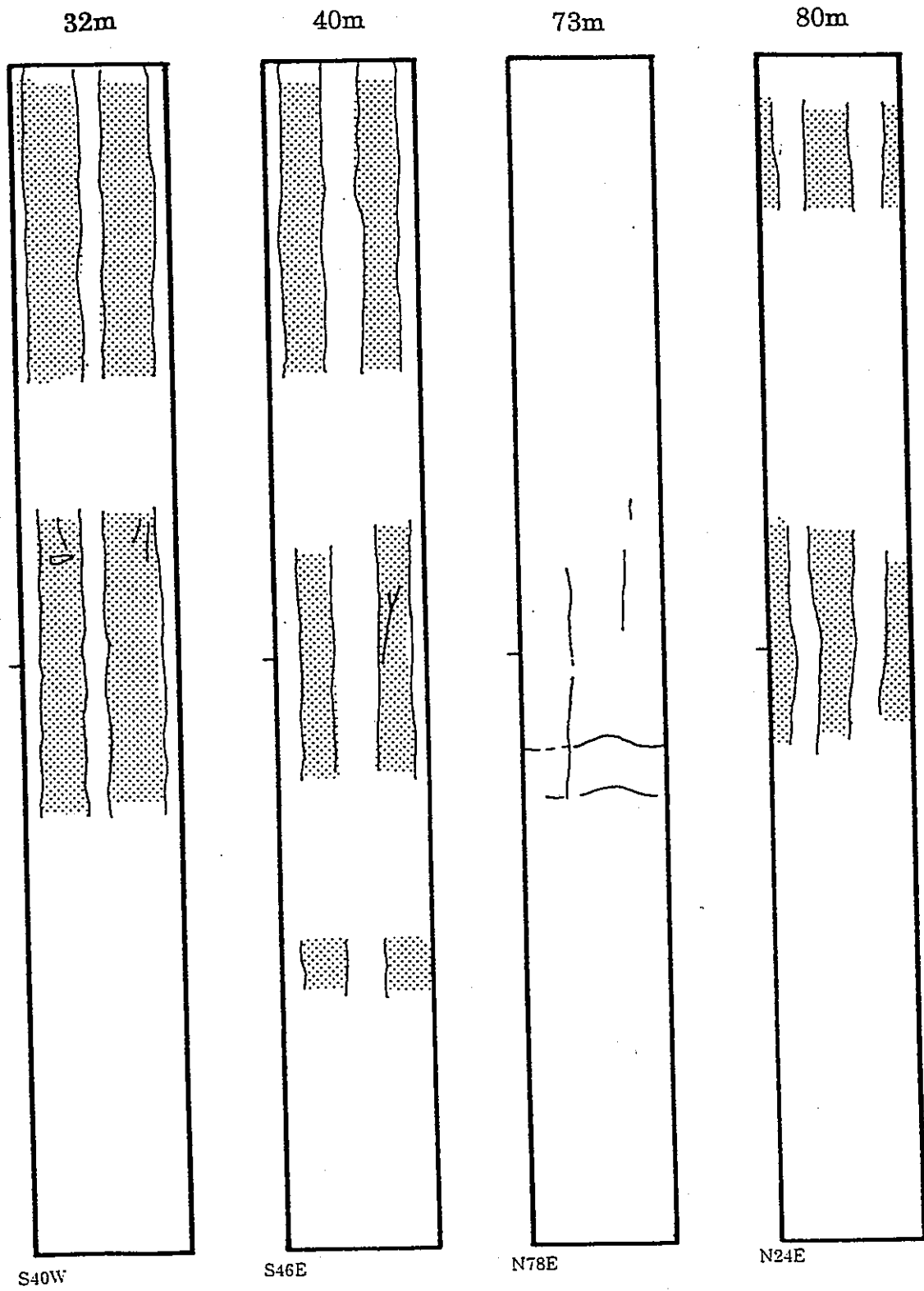






APPENDIX II

水圧破碎によつて造成されたき裂のスケッチ
薄墨は写りが鮮明な部分を表す。



0 0.2m

84.5m



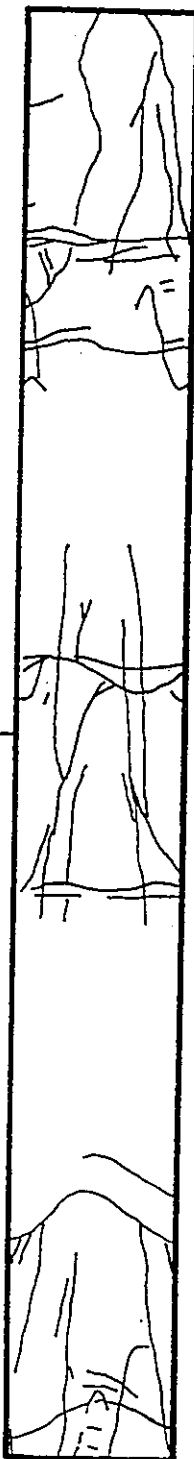
N35W

95.4m



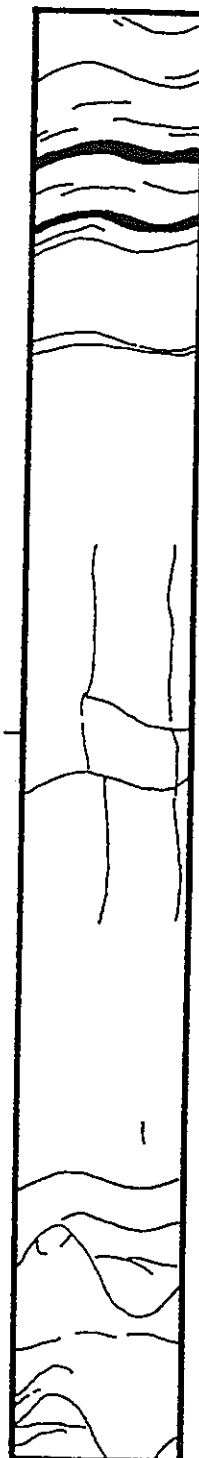
N55W

171m



N54E

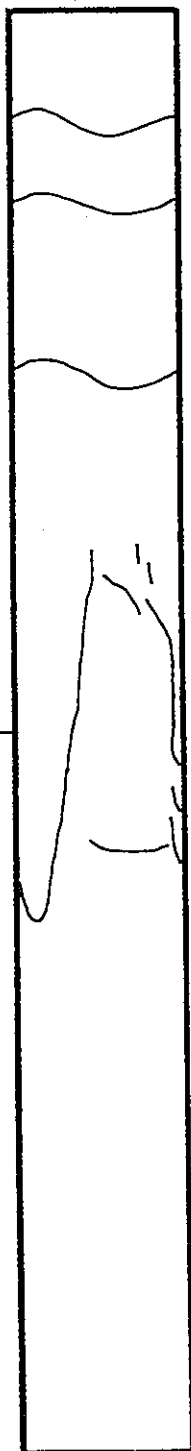
179.1m



S67E

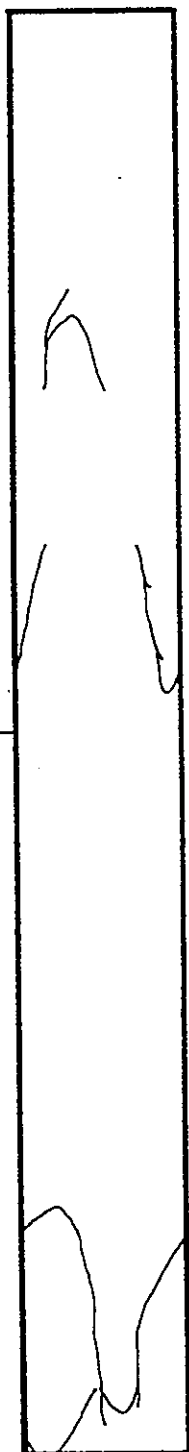
0 0.2m

182m



N49E

185m

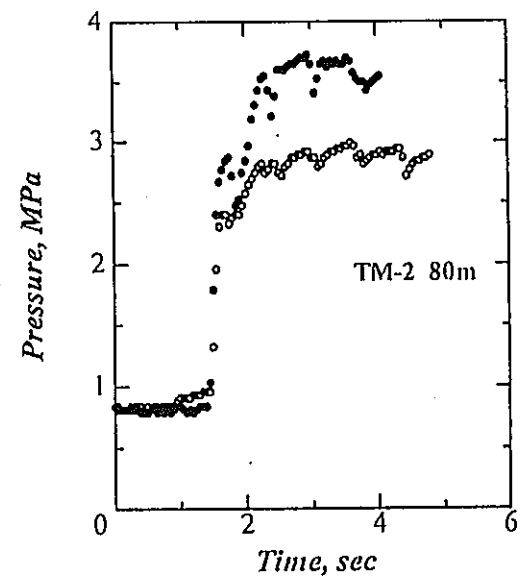
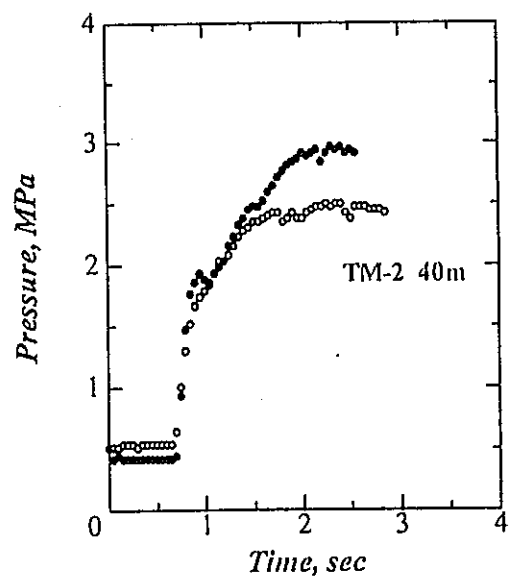
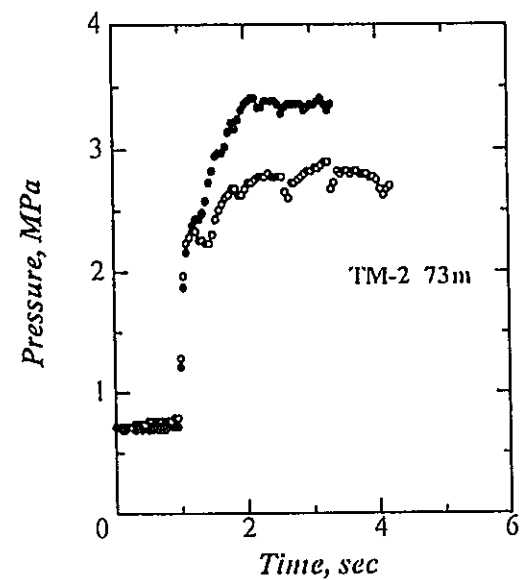
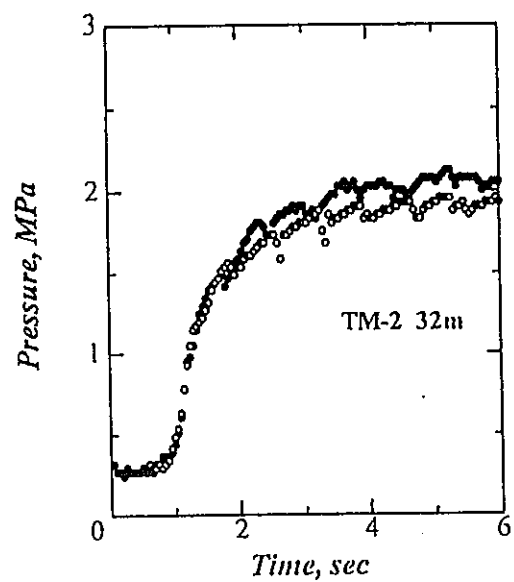


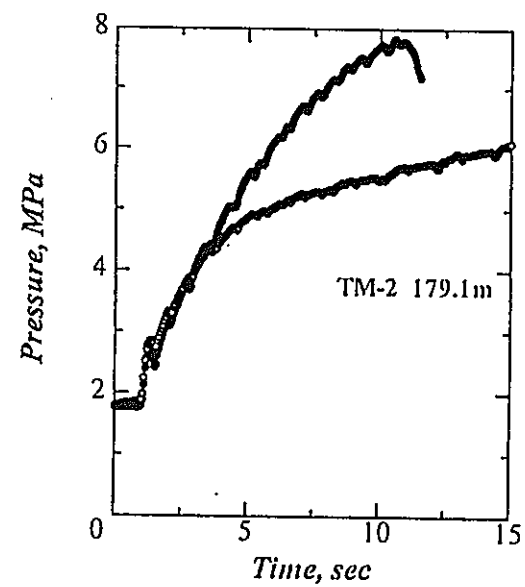
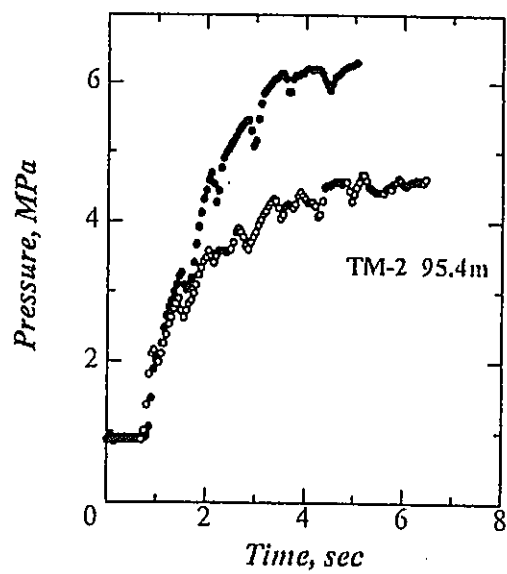
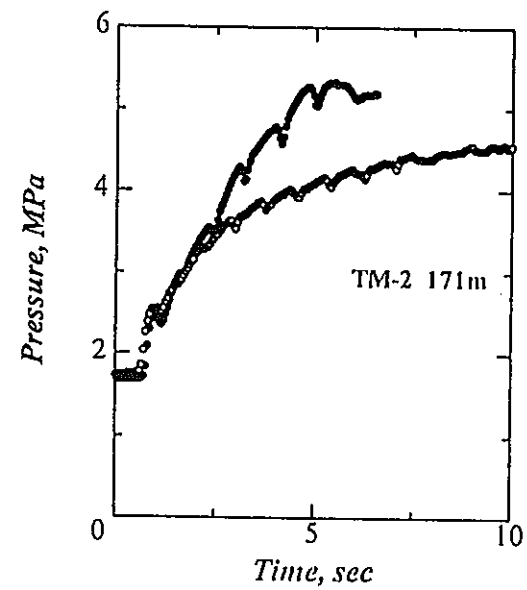
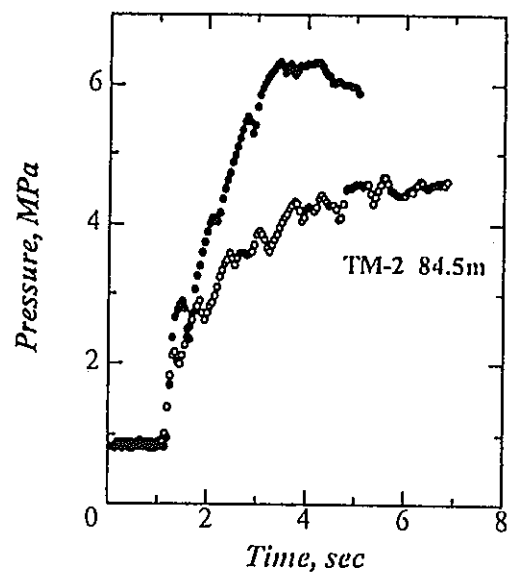
N26E

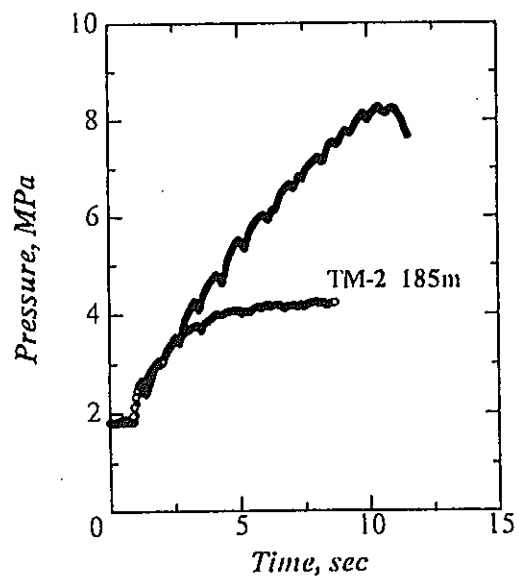
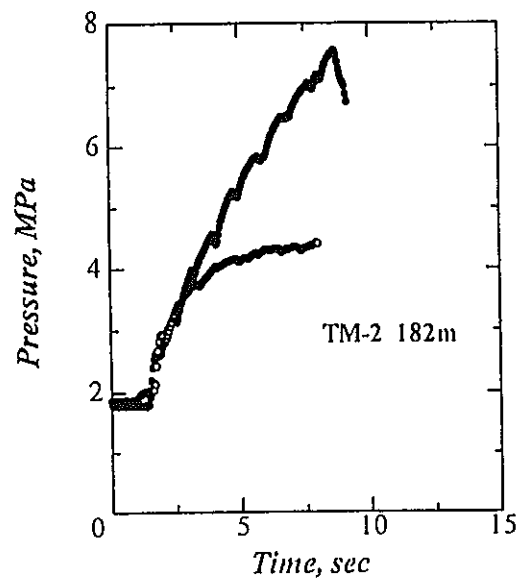
0 0.2m

APPENDIX III

Breakdown および re-opening における圧力-時間曲線の重ね合わせ

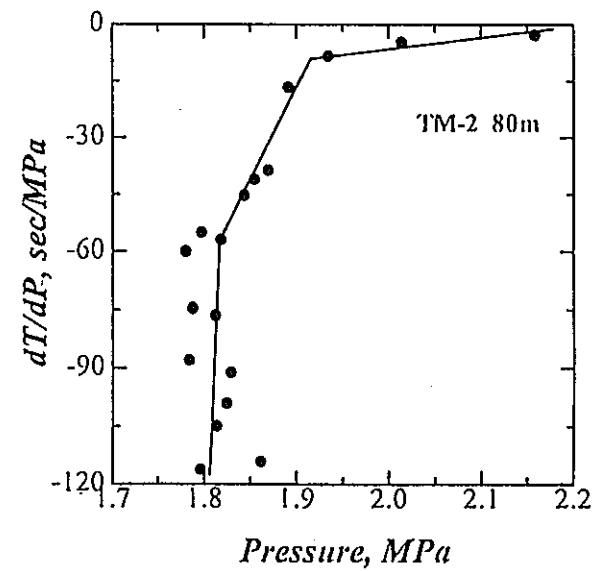
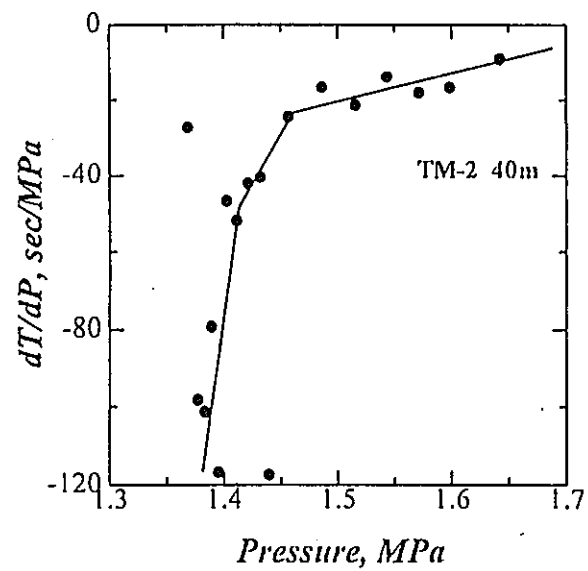
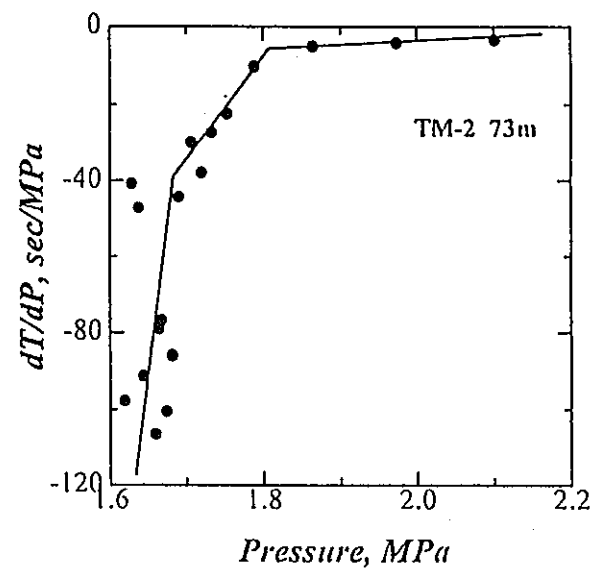
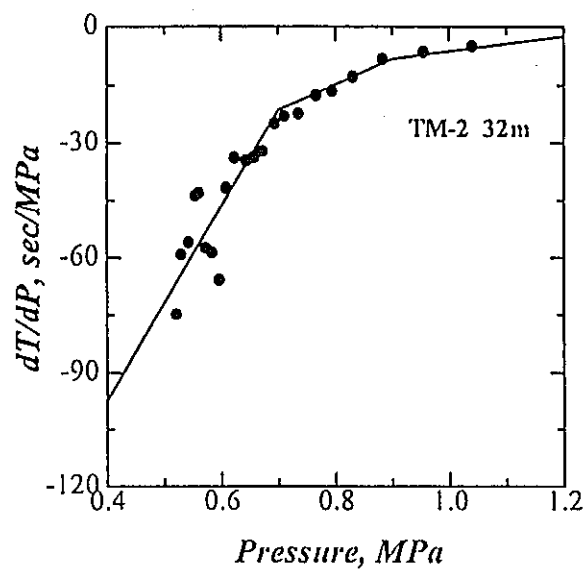


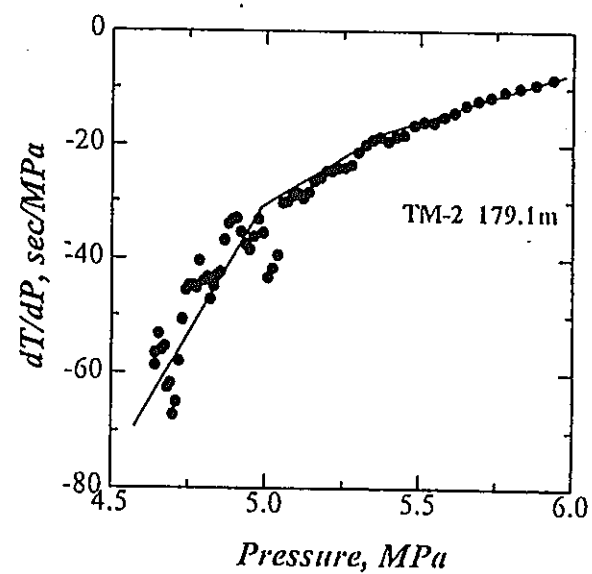
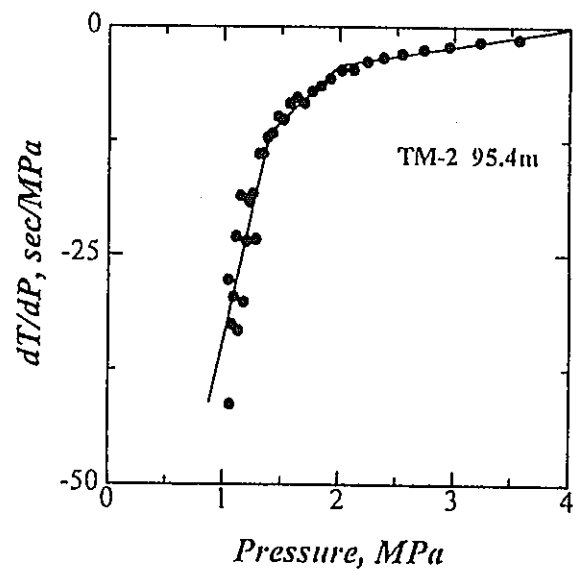
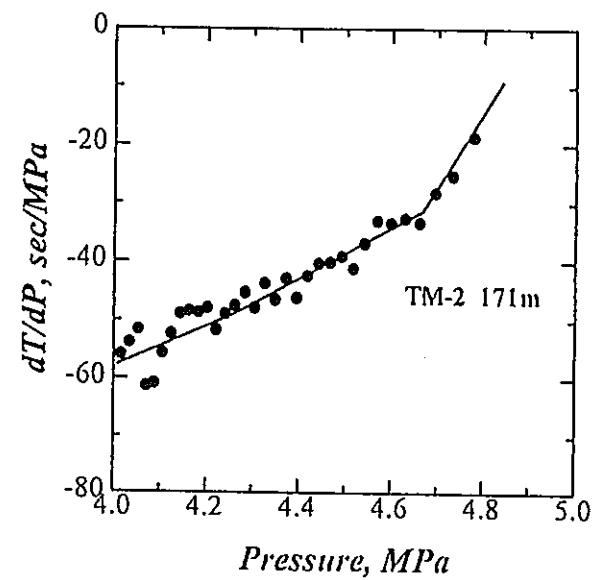
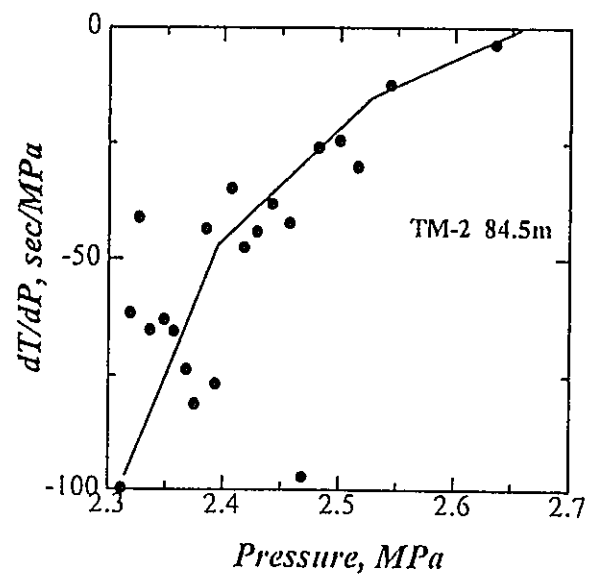


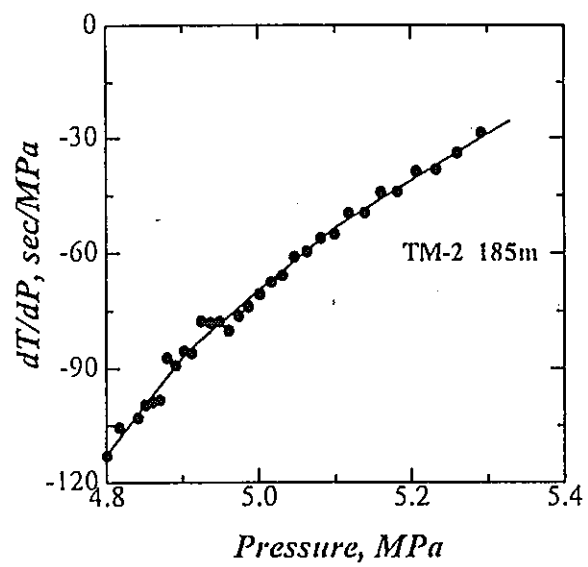
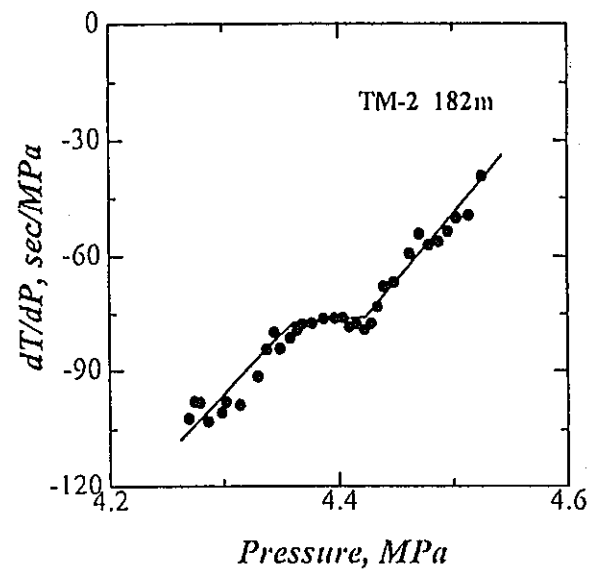


APPENDIX IV

Shut-in 後の圧力減衰速度の逆数と圧力の関係







2. 物理検層

2.1 物理検層作業概要

第1回目の物理検層作業は、平成10年1月26日から1月29日の4日間で実施した。ボアホールが断層破碎帯を貫ぬいているため、崩壊が著しく断層の上下に分けて測定作業をおこなった。

1回目の作業で測定できなかった音波・マイクロ・密度とフローメータ検層を平成10年3月10日から3月11日の2日間で行った。崩壊の著しかった個所はセメント保孔による改修工事によって改善されていた。表2.1.1に物理検層作業工程表を、表2.1.2には、機器一覧表を示す。

表 2.1.1 物理検層作業工程表 (1)

測定種目	測定深度 (m)	測定年月日	測定時間	測定速度 (m/分)	記 録	孔内状況
温 度	0.0 ～ 121.3	H10.01.26	11:25 ～ 11:40	8.1	1/200	・ 孔 長 190.6m ・ 孔 径 76 mm ・ 孔内水 清 水 比抵抗 (53.2Ω・m (2.1℃) ・ ケーシング 深度 6.8m 径 100.0mm
電 気	8.5 ～ 120.6	H10.01.26	12:20 ～ 12:27	16.0	1/200	
マイクロ	10.3 ～ 120.4	H10.01.27	10:25 ～ 10:55	3.7	1/200	
密 度	0.0 ～ 120.1	H10.01.26	14:35 ～ 15:00	4.8	1/200	
孔 径	0.0 ～ 120.4	H10.01.26	16:07 ～ 16:20	9.3	1/200	
中性子・ ガンマ線	0.0 ～ 120.5	H10.01.26	13:35 ～ 14:05	4.0	1/200	
音 波	6.9 ～ 117.5	H10.01.27	9:45 ～ 10:00	7.3	1/200	

注) 中性子・ガンマ線検層は、コンビネーションゾンデを使用し、記録は同時に収録した。

表 2.1.1 物理検層作業工程表 (2)

測定種目	測定深度 (m)	測定年月日	測定時間	測定速度 (m/分)	記 録	孔内状況
温 度	0.0 ～ 189.0	H10.01.28	14:20 ～ 14:40	9.5	1/200	・ 孔 長 190.6m ・ 孔 径 76 mm ・ 孔内水 清 水 比抵抗 53.2Ω・m (2.1℃) ・ ケーシング 深度 6.8m 径 100.0mm
電 気	131.0 ～ 188.7	H10.01.28	12:20 ～ 12:25	11.5	1/200	
マイクロ	16.5 ～ 189.0	H10.03.10	11:30 ～ 12:05	4.9	1/200	
密 度	6.9 ～ 188.2	H10.03.10	12:55 ～ 13:20	7.3	1/200	
孔 径	0.0 ～ 189.4	H10.03.10	15:40 ～ 16:00	9.5	1/200	
中性子・ ガンマ線	100.0 ～ 188.8	H10.01.28	12:55 ～ 13:15	4.4	1/200	
音 波	13.0 ～ 186.6	H10.03.10	10:05 ～ 10:30	6.9	1/200	

注) 中性子・ガンマ線検層は、コンビネーションゾンデを使用し、
記録は同時に収録した。

表 2.1.1 物理検層作業工程表 (3)

測定種目	測定深度 (m)	測定年月日	測定速度 (m/分)	注水流量 (l/分)	測定状況	孔内状況
フロメータ-(1)	10.0 ～ 185.0	H10.03.10	15	0	降下	・孔長 190.6m ・孔径 77mm ・孔内水 清水(注水) ・ケーシング 深度6.8m 径100.0mm
フロメータ-(2)			15	0	引揚げ	
フロメータ-(3)			25	0	降下	
フロメータ-(4)			25	0	引揚げ	
フロメータ-(5)			35	0	降下	
フロメータ-(6)			35	0	引揚げ	
フロメータ-(1)	10.0 ～ 185.0	H10.03.11	15	4.8	降下	
フロメータ-(2)			15	4.8	引揚げ	
フロメータ-(3)			25	4.8	引揚げ	
フロメータ-(4)			25	4.8	降下	
フロメータ-(5)			35	4.8	引揚げ	
フロメータ-(6)			35	4.8	降下	
フロメータ-(1)	10.0 ～ 185.0	H10.03.11	15	31.26	降下	
フロメータ-(2)			15	31.26	引揚げ	
フロメータ-(3)			25	31.26	引揚げ	
フロメータ-(4)			25	31.26	降下	
フロメータ-(5)			35	31.26	引揚げ	
フロメータ-(6)			35	31.26	降下	
圧力測定 フォール・オフ・テ スト	120.0	H10.03.11	0	31.26	停止	

表 2.1.2 物理検層使用機器一覧表 (1)

種 目	機 器	型 式	仕 様
全種目共通	検 層 車	三菱ファイター	三菱自動車・軽油車
	ケーブル	5 芯鋼線	外径:8.4mm 耐熱:260℃
	収 録	FD-6 RV型多ペンコーダー	FD-6 デジタル収録器 5ペン・エンコーダー連動
	処 理	NEC/PC シリーズ	プリンター:キャノン BJC-35V
電気検層 Electrical Survey	地 上 機 器	ELM-204 SCM-304	電源:AC100V $\pm 10\%$ 50/60Hz 出力電圧:150V 出力電流:0~50mA 測定動作周波数:240Hz ± 10 Hz 出力:25cm ノルマル/100cm ノルマル/SP 動作範囲: 比抵抗 (0~20K Ω -m) S. P. (0~200mV)
	坑 内 機 器		外径:50mm 全長:1.5m 電極:25cm ノルマル/100cm ノルマル/SP
音波検層 Sonic-Log	地 上 機 器	LPM-SVCM A/DCM-ELK-7125	電源:AC100V $\pm 10\%$ 50/60Hz BIN DC300V 出力: ΔT , WAVE FORM, VDL 分解能:12bit 500ns/W 最大サンプリング周波数:2MHz 最小サンプリング深度:10cm 毎 ワード 長:1kw/ch WAVE FORM データタイプ :MSDOS ASCII
	坑 内 機 器	COMPENSATED SONIC TOOL	外径:54mm 全長:488cm T-R1 :3feet T-R1 :1m T-R2 :5feet 発信機を中心周波数20kHz
孔径検層 Caliper- Log	地 上 機 器	LPM RMM (x2)	電源:AC100V $\pm 10\%$ 50/60Hz BIN DC 300V ・測定電源90mA
	坑 内 機 器	X-Y AXIS	外径:45mm 全長:127cm 測定範囲:5 ~71cm 耐圧15000psi 測定温度:max190 °C
密度検層 Density- Log	地 上 機 器	DPM-1 LRM-2A (x2)	電源:AC100V $\pm 10\%$ 50/60Hz BIN DC ± 24 V ・測定電源50mA 出力:DENSITY/SS. FS PULSE
	坑 内 機 器	DUAL SPACED	外径:54mm 全長:160cm 線源:Cs137 FAR デテクター:シンチレーション (5.55GBq) NEAR デテクター:GM カウンター

表 2.1.2 物理検層使用機器一覧表 (2)

種 目	機 器	型 式	仕 様
自然ガンマ線 検 層	地 上 機 器	LPM-203 RMM-204	電源:AC100V $\pm 10\%$ 50/60Hz 測定電源:60mA
Gamma Ray Log	坑 内 機 器		外径:43mm 全長:1.5m 耐圧:15000psi デテクター:シンチレーションカウンター
中 性 子 検 層	地 上 機 器	LPM-203 RMM-204	電源:AC100V $\pm 10\%$ 50/60Hz 測定電源:60mA
Neutron- Log	坑 内 機 器		外径:43mm/全長:1.5m/線源:Am-Be デテクター:プロポーションナルデテクター
温度検層 Teperature Survey	地 上 機 器	TSM-200	電源:AC100V $\pm 10\%$ 50/60Hz 出力電圧:0~100mv 測定温度範囲:0~300 $^{\circ}\text{C}$ 測定精度: ± 1.0 %/F.S. 分解能:0.1 出力:TEMP(300 $^{\circ}\text{C}$) DIF(10 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$) MAG(40/80/120/160/200 $^{\circ}\text{C}$)
	坑 内 機 器		外径:43mm 全長:1.5m センサー:サーミスター
マイクロ検層 Micro-Log	地 上 機 器	LPM-201 MRM	電源:AC100V $\pm 10\%$ 50/60Hz 測定電源:60 mA
	坑 内 機 器		外径:53mm 全長:1.5m 電極間隔: 1"×1"インパース 2"ノルマル
フローメー タ検層	地 上 機 器	LPM-203 スタックコントロール モジュール	電源:AC150V $\pm 10\%$ 50/60Hz FLOW METER・DENSITY・HYDRO TEMPERATURE・PRESSURE GAMMA RAY 対応
Flowmeter- Log	坑 内 機 器	フローメータ	インペーラ型
		圧力ツール (Paine圧力計)	圧力範囲: 0 ~ 10000 PSI 精度 : $\pm 0.6\%$ FS 耐熱 : 170 $^{\circ}\text{C}$

2.1.1 温度検層

温度検層は、孔内の温度を深度に対して連続的に測定して地層の温度を決定することによって、地層の対比、逸水層、出水層、帯水層などの位置判定に利用する。

また流体産出層、あるいは流体圧入層の温度も測定する。孔内温度の測定は、単にその地層の地温勾配あるいは最高温度を知るだけでなく地層中の流体の出入により生ずる微細な温度変化を記録することが重要である。測定原理の等価回路を図2.1.1に示す。図に示すように地上から1 mAの定電流を供給し、サーミスター両端の電位降下を地上で測定して抵抗変化を求める。ケーブル抵抗 R_1 、 R_2 の抵抗が充分小さくサーミスター R に比べて電位差計の入力インピーダンスが充分大きければ、測定電圧 V は $V=IR$ となりケーブル抵抗に関係なくサーミスターの抵抗を知ることができる。しかし、実際にはケーブル抵抗が存在するので、ケーブル補償回路が付加されている。温度検層機の感熱素子としては、サーミスターを使用している。サーミスターの感熱応答は約 0.5秒である。

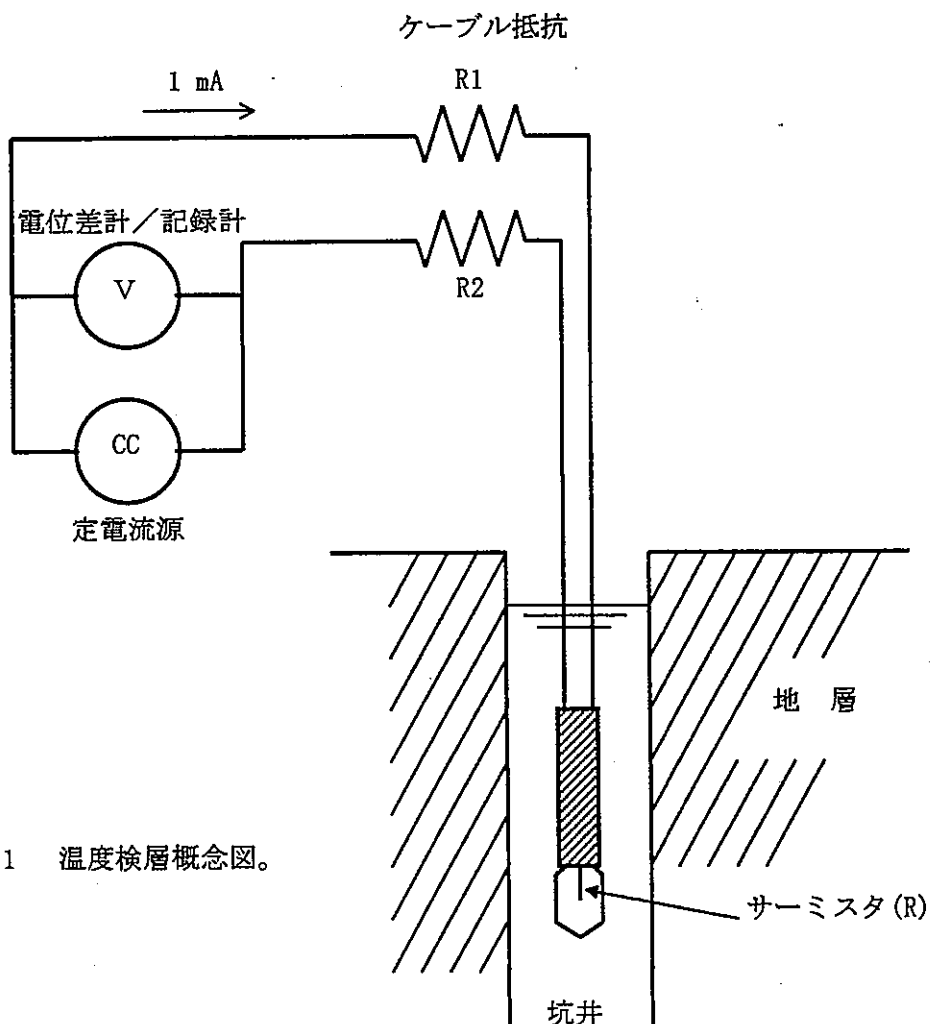


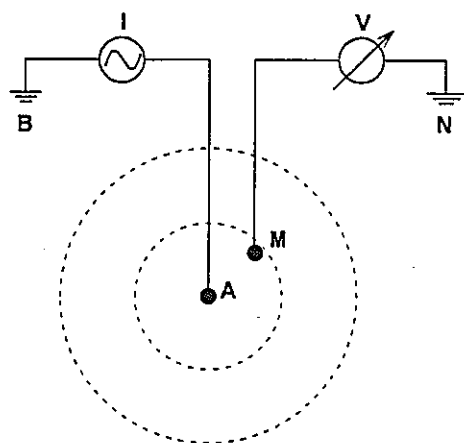
図2.1.1 温度検層概念図。

2.1.2 電気検層

電気検層は、導電性のある液体に満たされた孔井内で地層に電流を流し、地層の比抵抗を連続して測定する方法である（図2.1.2 参照）。地層の比抵抗 ρ の等方均質媒体の地層では、電流電極Aのまわり等電位面は球面となり、その電位は均質の地層の比抵抗に比例する。つまり、 $\rho = 4 \pi AM \cdot V / I$ である。AMは電極間隔あるいはスペーシングといわれ、電極間隔の大きさに比例して地層の探査深度は深くなるが、鉛直（孔井軸）方向の分解能が悪くなる。当社の電気検層は2極法（ノルマル法）を採用しており、異なる電極間隔（25cm, 100cm）のものを使用することにより、異なる探査深度の地層の比抵抗が得られる。実際の地層は均質でなく、また孔径や泥水比抵抗などに影響され、電流電極Aのまわりの等電位面が歪み、見掛けの比抵抗が測定される。

電気検層では、同時に地層の自然電位（SP）を連続的に測定する。自然電位は、孔井内電極Mと地上の電極Nの間の電位差を記録する。自然電位の発生機構としては、イオンを含む地層水が流動するときに生ずる流動電位と、濃度の異なる地層水によって生じる電気化学的電位があり、大部分が後者の効果である。

電気化学的電位には、拡散電位と膜電位がある。砂岩などの浸透層と頁岩からなる堆積層では、浸透層の泥水濾過水と地層水が接触し、拡散電位が生じる。また、頁岩には膜電位が生じる。普通、頁岩と砂岩の自然電位差をSP偏差と呼び、頁岩を零位として表す。



電流電極：A、B、電位電極：M、N、電極間隔：AM

図 2.1.2 電気検層概念図。

2.1.3 マイクロ比抵抗検層

この検層は、電気検層のノルマル法およびラテラル法比抵抗測定において電極A、M、Nの間隔をそれぞれ1インチ(2.54cm)という短い間隔で、ゴム性の絶縁パットの中央に埋め込み、これを孔壁に圧着しながら孔壁近傍の比抵抗を連続的に測定する。

測定は、薄層や泥壁の影響を取り除くために、2インチノルマル値(2極法)と1インチラテラル値(3極法)をパルスの切換えによって入力している。また、測定電極内には、小型モータを装備し、地上のコントロール装置からこのモータでパットのアームを開閉できるシステムとなっており、このアームの動きにより孔径の変化も測定できる。

泥水を利用した掘削では、浸透面にできたマッドケーキの比抵抗(1インチラテラル法)と泥水濾過水を含んだ浸透層の比抵抗(2インチノルマル法)の関係より浸透層の判定に利用される。泥水を利用しない掘削ではこの様な関係は認められないが、電極間隔の長いノルマル法で検知できない割れ目等の検出に有効である。

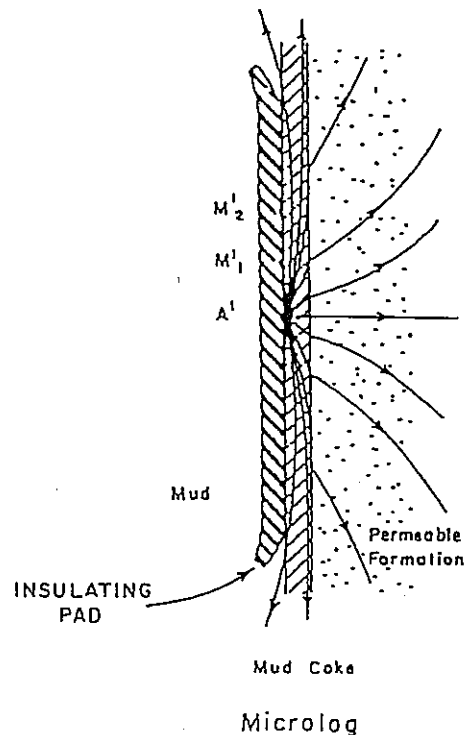


図2.1.3 マイクロ比抵抗検層原理図。

2.1.4 密度検層

地層中に中程度のエネルギーを持ったガンマ線を照射すると、ガンマ線は地層を構成する物質の原子の軌道電子と衝突し、そのエネルギーの一部を軌道電子に与えて進路を変えながら減衰する（コンプトン散乱）。

ガンマ線エネルギーの減衰は照射する地層の電子密度に関係するため、ガンマ線線源よりある間隔に置かれた検出器により衝突・散乱したガンマ線の強度を測定することにより地層の見掛け密度を求めることができる。

照射されたガンマ線の減衰度は地層の単位体積当たりの密度（陽子数）に比例し、ガンマ線強度が強い部分は地層密度が低く、ガンマ線強度が弱い部分は地層密度が高い。

密度検層は孔内測定器にガンマ線の線源（セシウム ^{137}Cs ）と検出器を装着し、この線源より地層に照射され衝突・散乱したガンマ線の強度を各深度ごとに測定することにより連続的に地層密度の変化を記録する。

線源および検出器面は、図2.1.4に示すように、デセラライザー（バックスプリング）の働きによって裸孔壁の地層に直接接触する。

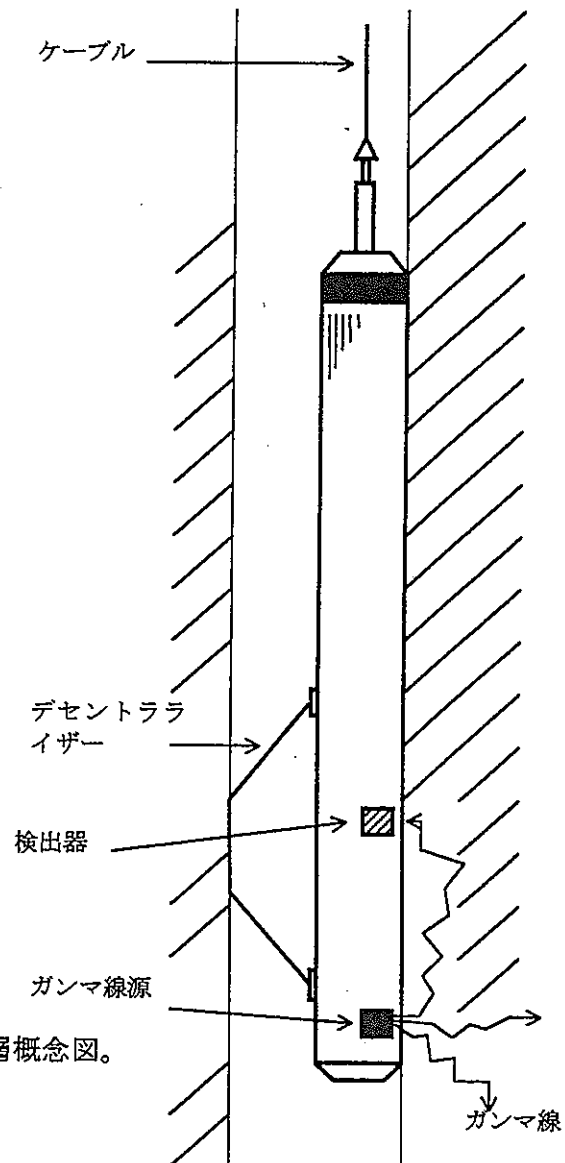


図2.1.4 密度検層概念図。

2.1.5 孔径検層（キャリパー検層）

キャリパー検層は孔径の変化を深度に対して連続的に測定記録し、孔径補正を必要とする検層の補助的役割をする。

孔内ツールに小型モーターを内蔵し、地上からのコントロールで測定用アームを開閉する。測定はアームを閉じた状態で孔内にツールを降下し、測定箇所（ヘッド最深部）でアームを開き、測定ツールを捲き上げながら孔径の変化を測定する。

一般に破砕帯や断層、軟弱地質においては孔壁が崩壊し易く孔径拡大が顕著である。キャリパー検層で測定した孔径値より、坑内容量等を算出し、孔径拡大部セメンチング作業の情報として利用することもできる。キャリパー検層の測定概要を図2.1.5 に示す。

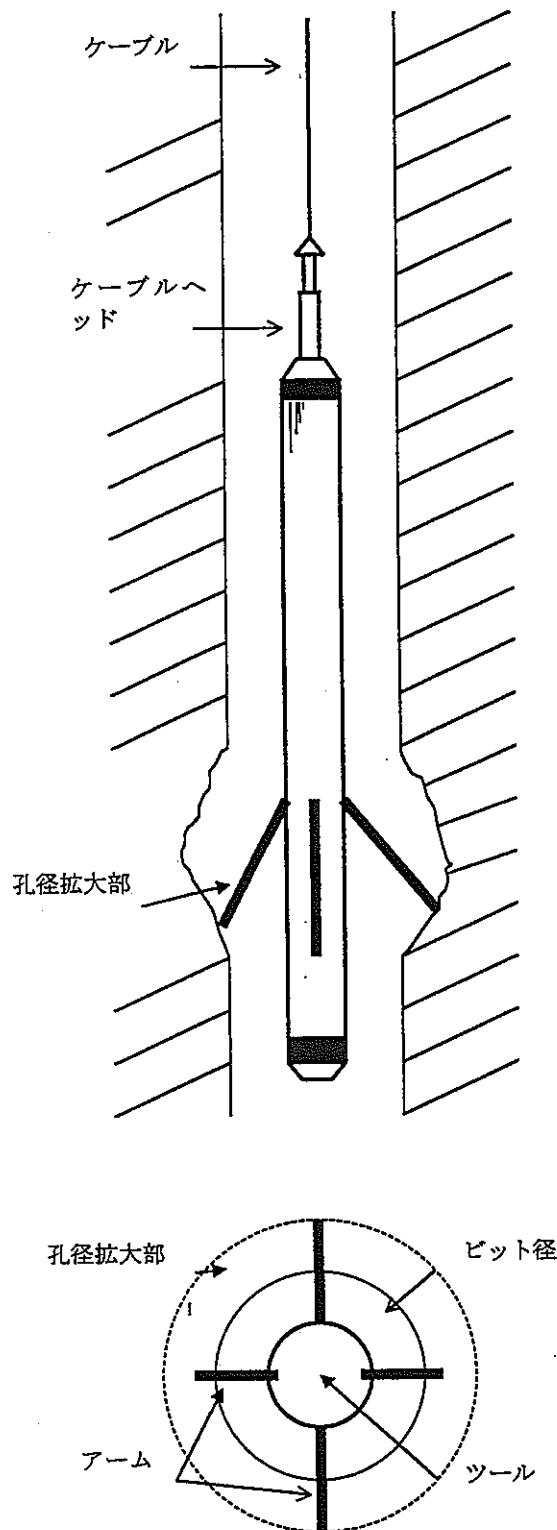


図2.1.5 キャリパー検層概念図。

2.1.6 ガンマ線検層

一般に岩石中には、微量ではあるが放射性物質が含まれており、自然ガンマ線が放出されている。

放射性物質の含有量は岩石の種類によって異なるため、地層から放射される自然ガンマ線量の変化を見ることにより地層の同定、対比を行うことが出来る。

また、地層の堆積過程で放射性物質は頁岩などの粘土鉱物に集中しやすい傾向があるので、ガンマ線量を測定することにより、粘土含有率を判定することも可能である。

ガンマ線検層に用いられる検出器は、ナトリウム・ヨウ化物であるシンチレーションクリスタルと電気信号に変換する光電子増倍管とから構成されている。

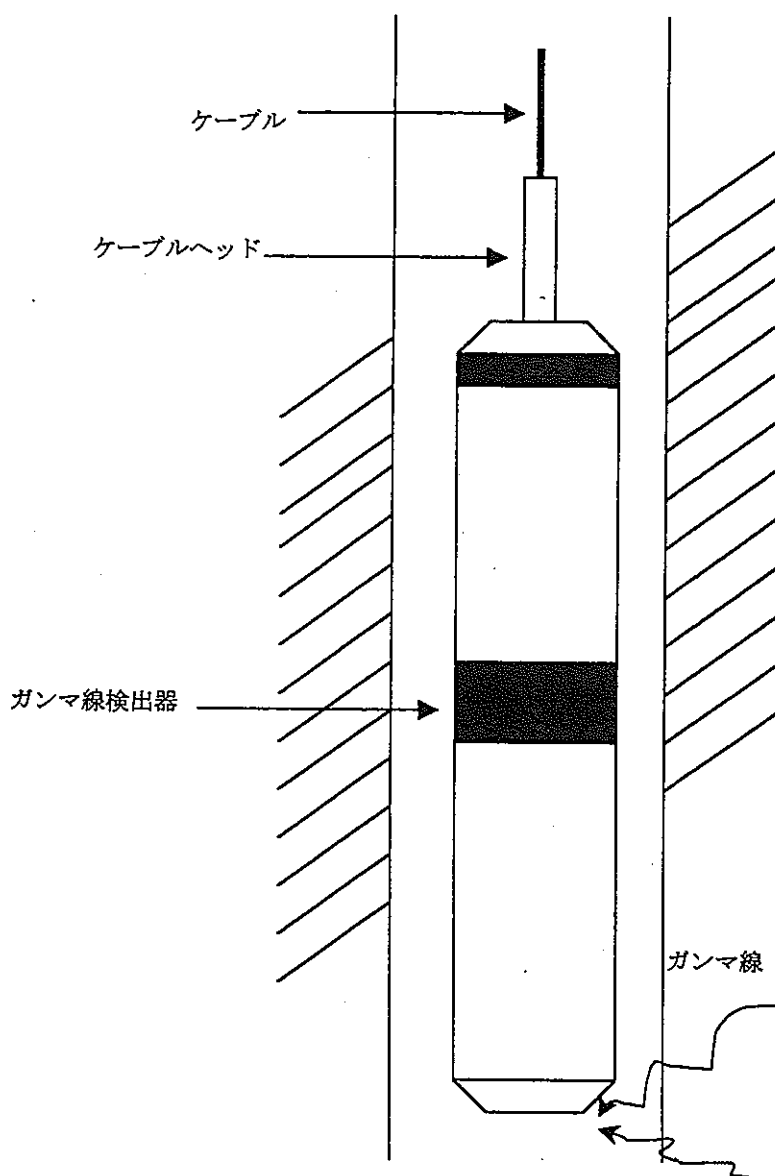


図2.1.6 ガンマ線検層概念図。

2.1.7 中性子検層

地層中に高速中性子を照射すると、高速中性子は地層を構成する物質の原子核との弾性あるいは非弾性散乱によってそのエネルギーの一部を失いながら拡散（減衰過程）し、熱中性子になる。

地層中での中性子の減衰過程は、地層内の水素原子核密度に関係し、水素原子核密度は地層の孔隙を満たす地層流体（ H_2O ）の水素原子により決定される。したがって、中性子線源から一定距離の位置にある検出器により、中性子線源から出て地層中を伝わってくる熱中性子の量（ニュートロンAPI）を測定することで、地層の孔隙率を求めることができる（図2.1.7参照）。

中性子の減衰効果は、地層の孔隙率に比例し、測定される熱中性子強度が強い部分は地層孔隙率が低く、熱中性子強度が弱い部分は地層孔隙率が高い。

中性子検層は、孔内測定器に中性子線の線源（アメリシウム-ベリリウム $Am-Be$ ）と検出器を装着し、この線源より地層に照射され衝突・散乱した熱中性子の強度を各深度ごとに測定することにより、連続的に地層孔隙率の変化をすることができる（図2.1.8参照）。

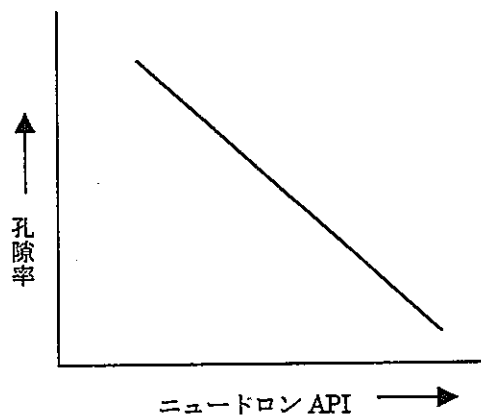


図 2.1.7 中性子－孔隙率相関図。

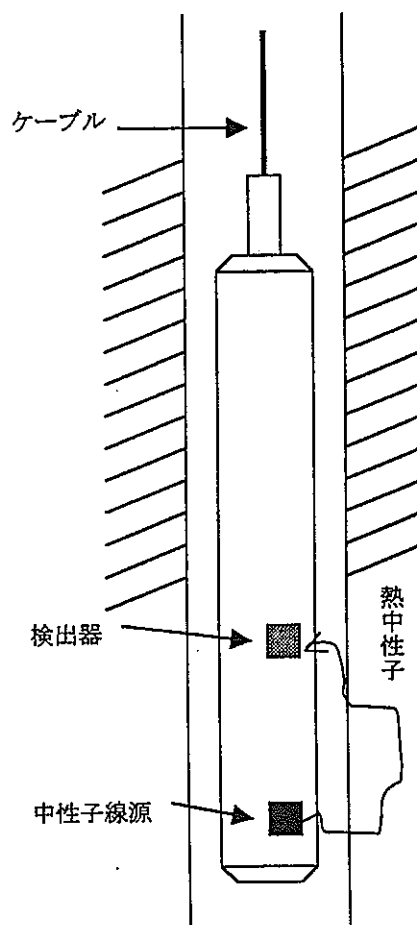


図 2.1.8 中性子検層概念図。

2.1.8 音波検層

孔井内に超音波発振器および受信器を持ったツールを降下し、発振器より超音波を孔壁に発射すると、音波は孔内水を伝播して孔壁に達し、その一部は屈折して孔壁（地層）を伝播し、再び孔内水に輻射された音波が受信器に到達する。音波検層は受信器に到達した受信波より地層内を伝播してきた音波の区間走時、振幅量等の変化を深度に対応させて連続的に記録する。

坑内ツールは1つの発振器と、これより 3feetおよび 5feet 離れた場所に設置された2つの受信器、エレクトロニクス部より構成される。測定信号波形にはP波、S波等が含まれるが、一般に音波検層ではP波の初動が測定される。

測定された区間走時（一定区間を走行する音波の走行時間）より地層の速度値が求められるほか、音波信号には地層の硬軟やフラクチャーの発達、孔径変化などによる信号振幅の変化や地層内の反射面からの反射波の位相変化など様々な情報が含まれている。

音波信号による地層情報としてインテンシティーログがある。インテンシティーログは、受信された波形を輝度変調によって濃淡表示し、深度に対応させたものである。この受信波の変化を連続的に記録し、振幅や区間走時の全体的な傾向を視覚的に判断することができる。

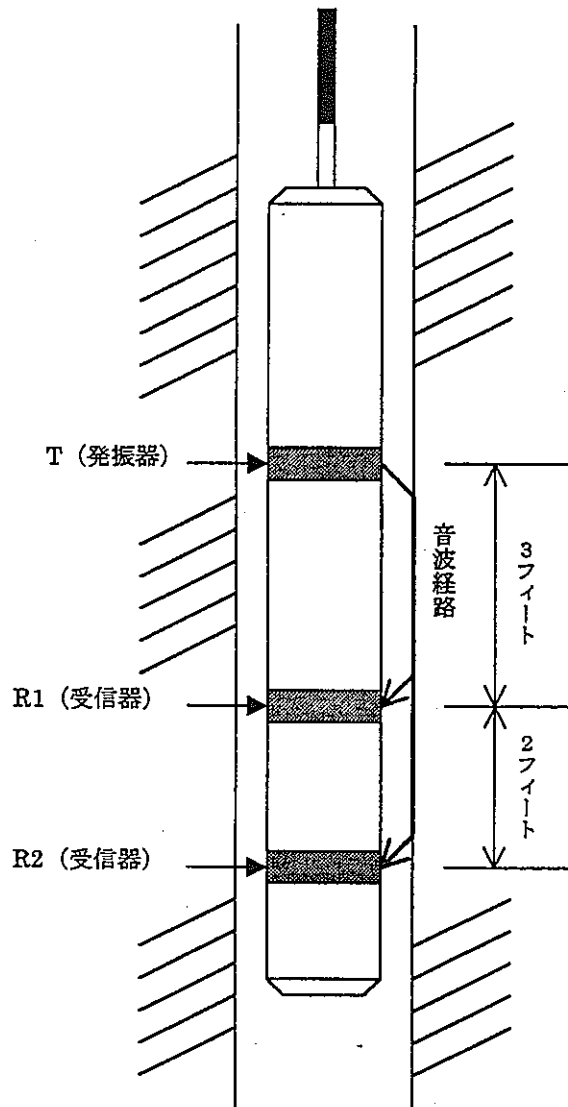


図 2.1.9 音波検層概念図。

2.1.9 フローメーター検層

フローメーター検層は、ケーシングパイプ中、あるいはケーシングパイプのない孔内の流体の流量を深度に対応させて測定するための検層である。

スピナー型の検層機は流量計であり、検層の際は一定の速度で孔内を移動し、測定電極に対する流体の相対速度や検層速度を記録し、孔径のデータを加えて孔内流体の流量を求める。

装置は、図2.1.10および11のように測定電極の孔内移動あるいは流体の流れによるインペラーの回転をピックアップコイルで電氣的信号に変換し、最終的にはパルス数 (C. P. S) で記録できるように設計されている。

測定電極は2インチのチュービング内でも通過できるように直径は1-7/16インチである。また測定電極は種々の裸孔径の変化に対して最適のオペレーションができるように種々のスカート型の流体ガイドが付属されている。この流体ガイドはインペラーのブレードの面積に対して、流体の移動を制限するために外側に広がっている。また、チュービングおよびケーシング間では、スカート無しに検層することも可能である。

この測定では、孔内の逸水層や湧水層を検出し、それぞれの箇所での透水性に関する評価をおこなう。図2.1.12 は、注水状態でのケーシング中のスピナー測定例で、パーフォレーション区間A、B、C、Dのうち、注水の84%がCゾーンに圧入されていることを示している。

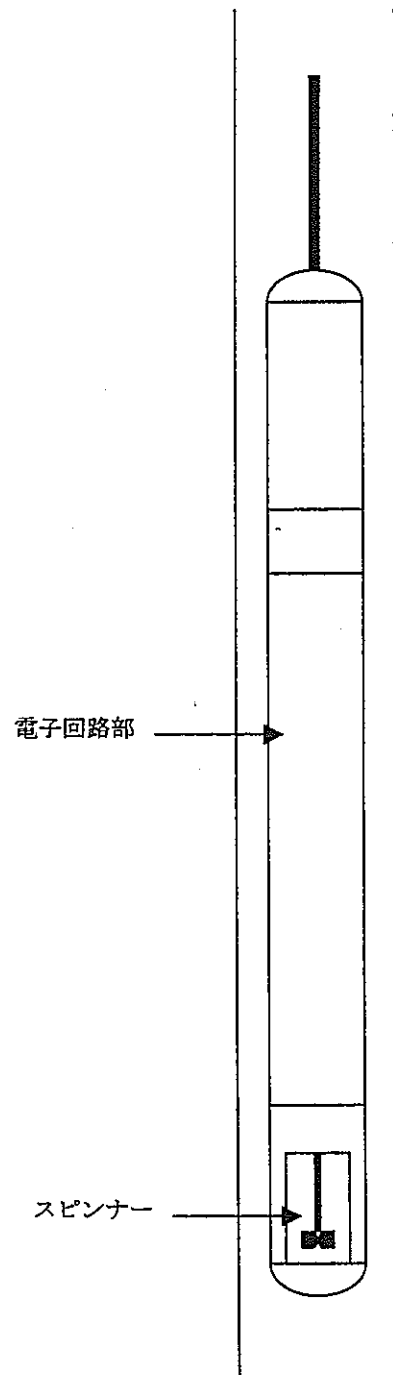


図 2.1.10 フローメータゾンデ外観図。

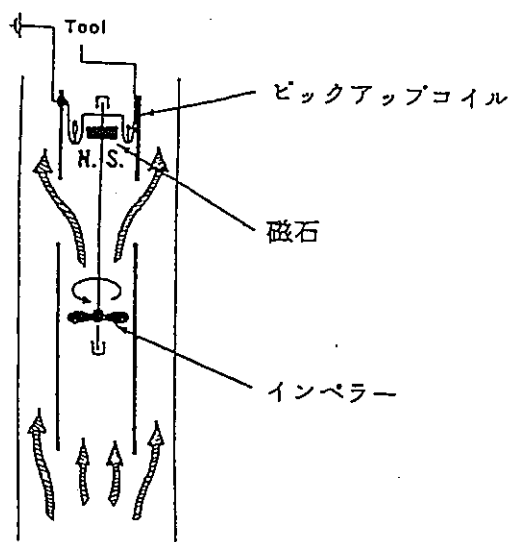


図2.1.11 フローメータ検層機
スピナー部。

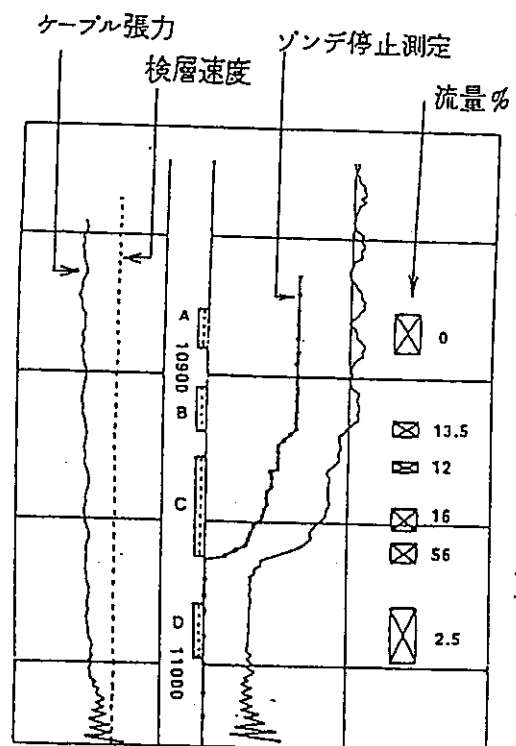


図2.1.12 フローメータ検層概念図。

2.2 物理検層結果

2.2.1 温度検層結果

温度検層結果については、測定区間全体の温度曲線を図2.2.1 に示す。孔内温度は、地表付近の気温の影響を除けば、比較的なだらかな温度勾配を示し、その平均値は $0.42^{\circ}\text{C}/10\text{m}$ でDH-4号孔（平均温度勾配 $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{m}$ ）と比較して高い値を示す。検層時の孔内水位は、深度21.5mであった。また、孔内の最高温度は、孔底（深度189.1m）で 19.0°C を記録した。孔内温度のアノマリーは、深度123.3m付近に認められ、上下の温度より約 1°C 減少した。

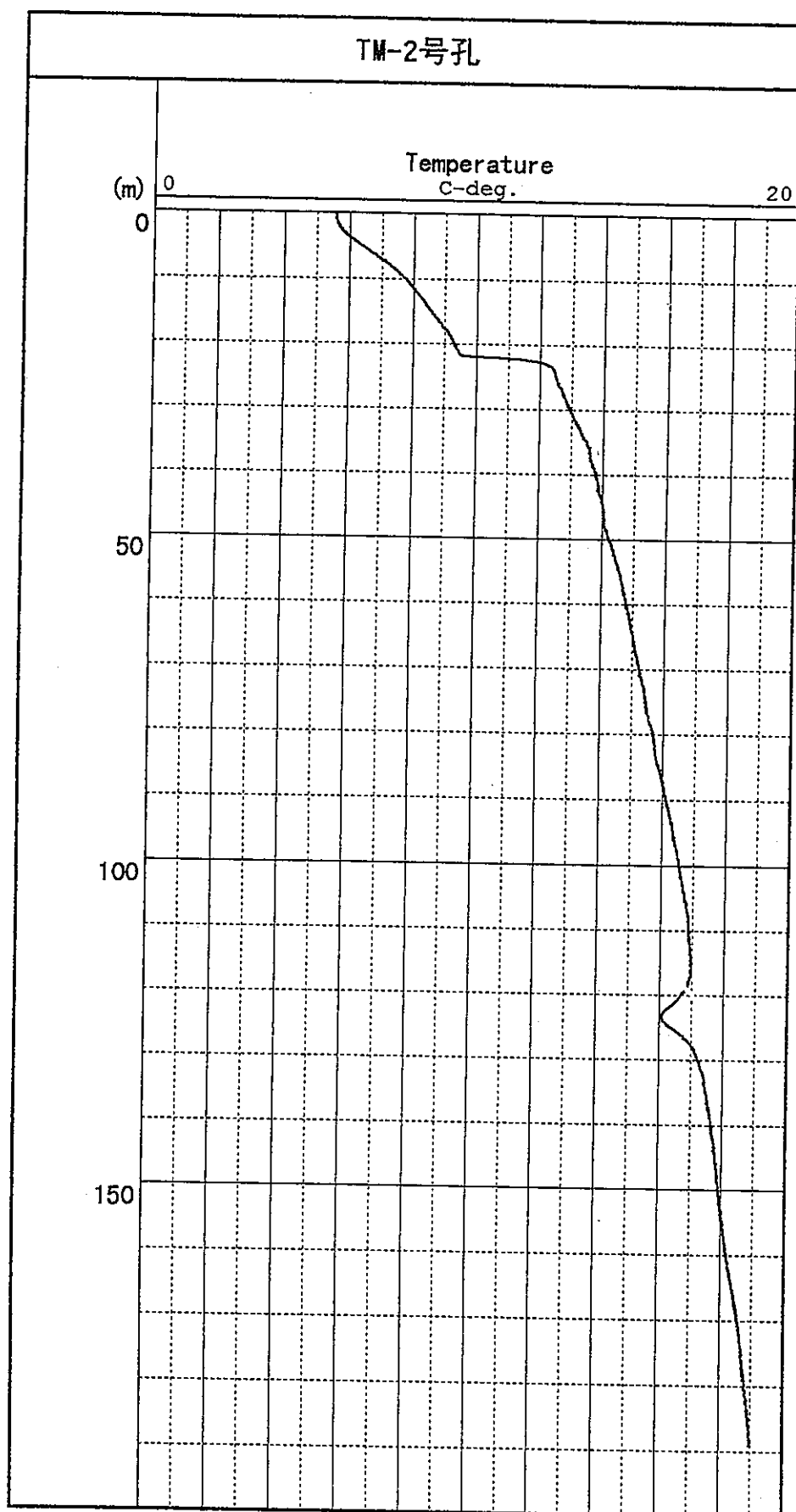


图 2.2.1 温度曲线图

2.2.2 電気検層結果

測定区間全体の自然電位・見掛け抵抗曲線を図2.2.2に示す。自然電位検層は、孔井内で発生する電位を測定する方法で、孔内水と地層水の塩分濃度によって、正（＋側）、負（－側）に変移するが、通常は孔内水より地層水の塩分濃度が低いので正（＋側）に振れる。また、孔内水が地層へ出入りする場合など、負（－側）の流動電位も観測される。

本孔の自然電位曲線の特徴として、深度72m付近、深度78m付近、深度142m付近で負側へ移行する傾向が認められる。特に深度142m付近の変化（50mV）が最大であった。

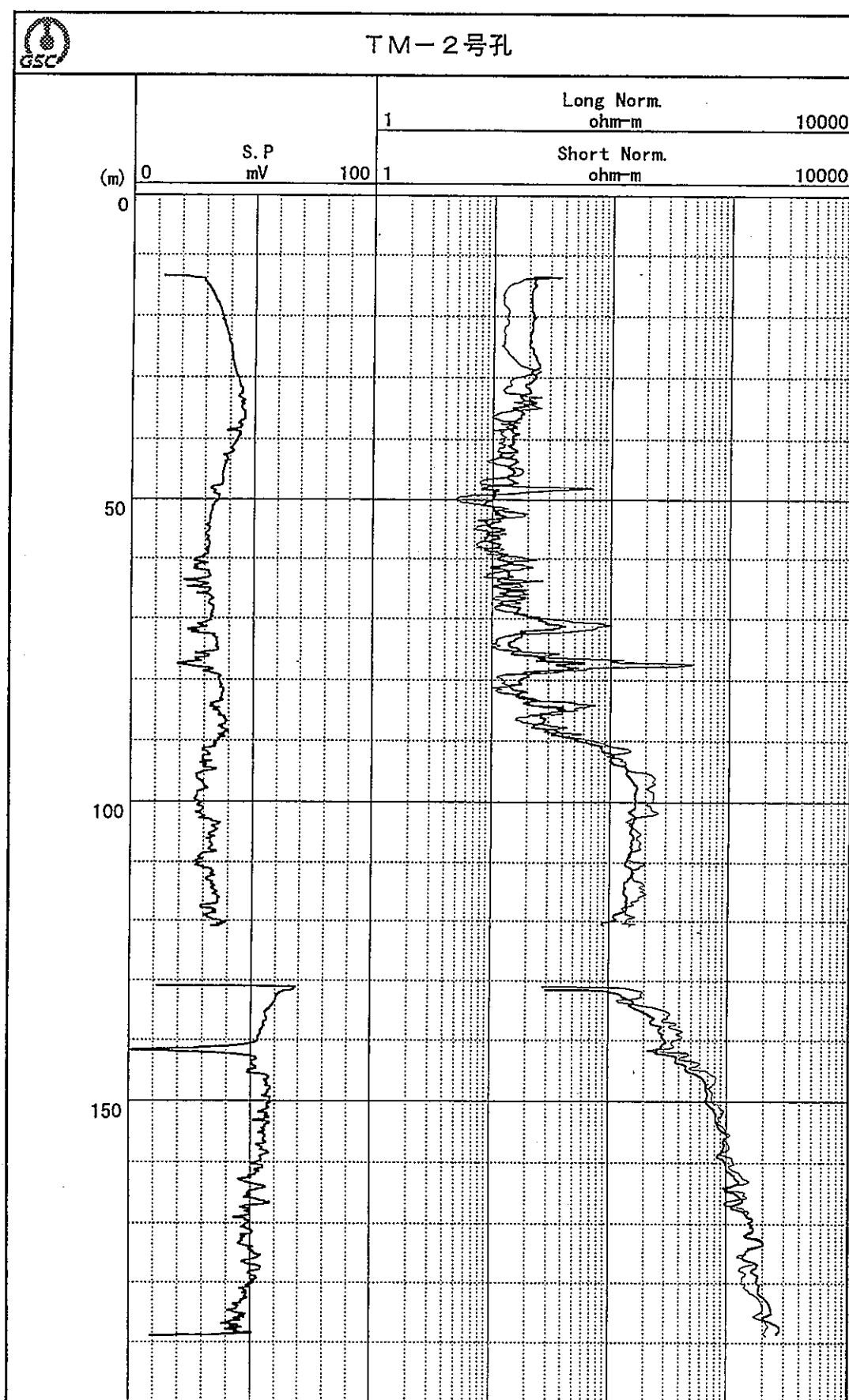
次に見掛け抵抗曲線の変化より、同じ傾向を示す区間を1つのグループと見なすと、本孔はA層からE層の5層のグループに分割される。

グループ毎の特徴について検討する為、見掛け抵抗曲線のショート・ノルマル値（SN値）並びにロング・ノルマル値（LN値）の平均値を示す。

グループ名			SN値の平均値	LN値の平均値
A 層	14.0 ～	47.5m	13.9 ohm-m	18.7 ohm-m
B 層	47.5 ～	88.0m	28.3 ohm-m	17.4 ohm-m
C 層	88.0 ～	120.0m	164.8 ohm-m	133.6 ohm-m
D 層	120.0 ～	130.5m	未測定区間	未測定区間
E 層	130.5 ～	189.0m	1094.7 ohm-m	1112.8 ohm-m

見掛け抵抗の特徴として、A層は瑞浪層群の泥岩層が優勢な地層で低比抵抗値を示す。B層はレキ岩を含む地層に対応し、高比抵抗を示す区間が存在する。C層・E層は、すべて土岐花崗岩類の地層に対応しているわけではないが、高比抵抗を示す区間である。D層は、月吉断層を挟む断層破碎帯に相当し、崩壊の著しい区間であった。測定中は、ケーシングで保孔していたため、測定できなかった。

圖 2.2.2 自然電位・見掛比抵抗曲線圖



2.2.3 マイクロ比抵抗検層結果

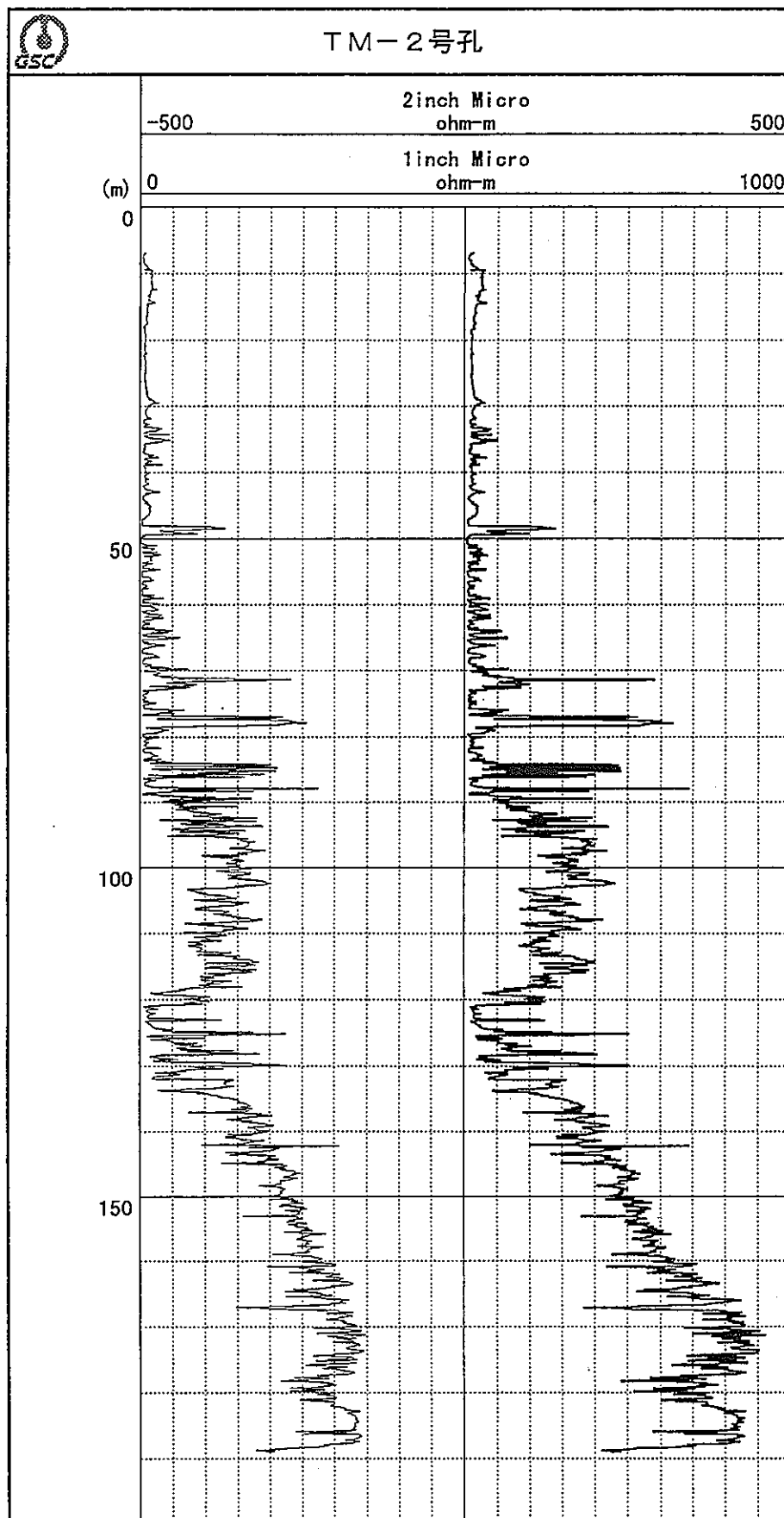
マイクロ比抵抗検層結果についても、電気検層結果と同様に測定区間全体の1インチ・2インチの見掛け比抵抗曲線を図2.2.3 に示す。

以下に本孔の見掛け比抵抗曲線の特徴を述べるとともにグループ毎の見掛け比抵抗曲線の1インチ・2インチの平均値を示す。

グループ名			1インチ 値の平均値	2インチ値の平均値
A 層	14.0 ～	47.5m	10.7 ohm-m	13.9 ohm-m
B 層	47.5 ～	88.0m	34.2 ohm-m	38.9 ohm-m
C 層	88.0 ～	120.0m	103.4 ohm-m	133.2 ohm-m
D 層	120.0 ～	130.5m	欠測区間	欠測区間
E 層	130.5 ～	189.0m	245.5 ohm-m	291.9 ohm-m

マイクロ検層の特徴として、電気検層同様、比抵抗値は変化に富んでおり、特にA層、B層（レキ岩を除く）に比較してC層、E層の比抵抗変化が著しい。この区間は花崗岩部に相当し、岩相の変化が予想される。

図 2.2.3 マイクロ比抵抗曲線図



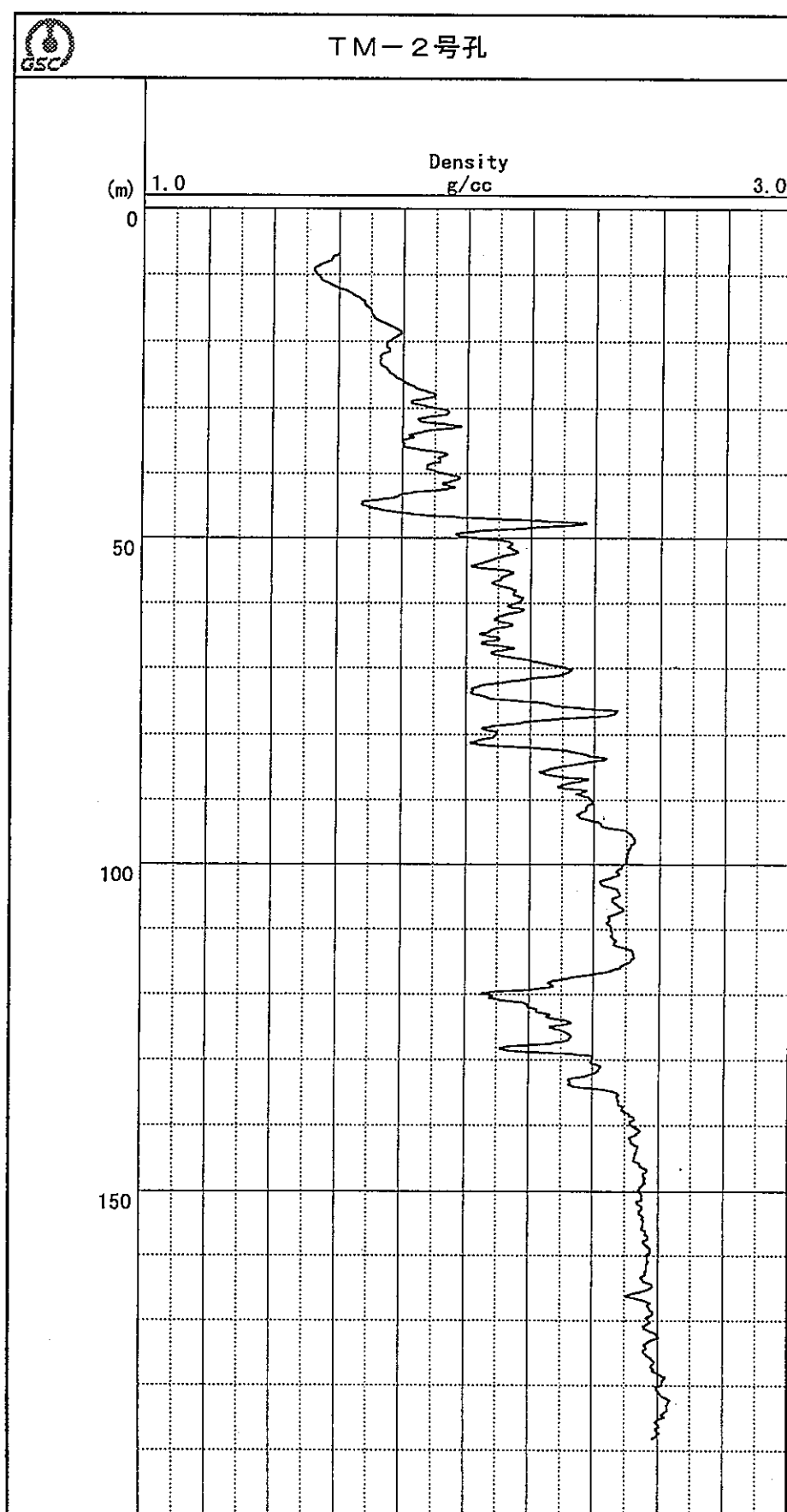
2.2.4 密度検層結果

図2.2.4 に示すように、水位以深では密度が $1.6 \sim 2.6 \text{ g/cm}^3$ と広範囲にわたり、岩相変化の著しいことを反映している。グループ毎の平均密度値を示すと次のようになる。

グループ名			密度値の平均値
A 層	14.0 ~	47.5m	1.83 g/cm^3
B 層	47.5 ~	88.0m	2.17 g/cm^3
C 層	88.0 ~	120.0m	2.34 g/cm^3
D 層	120.0 ~	130.5m	欠測区間
E 層	130.5 ~	189.0m	2.55 g/cm^3

本孔の密度値は、深度47.5m以浅で 2.0 g/cm^3 以下の低密度を示す。B層はレキ質部が 2.4 g/cm^3 前後の値を示すのと対照的にマトリックス部は 2.0 g/cm^3 前後の低密度値を示す。C層、E層は、 2.3 g/cm^3 以上の高密度値を示している。

图 2.2.4 密度曲线图



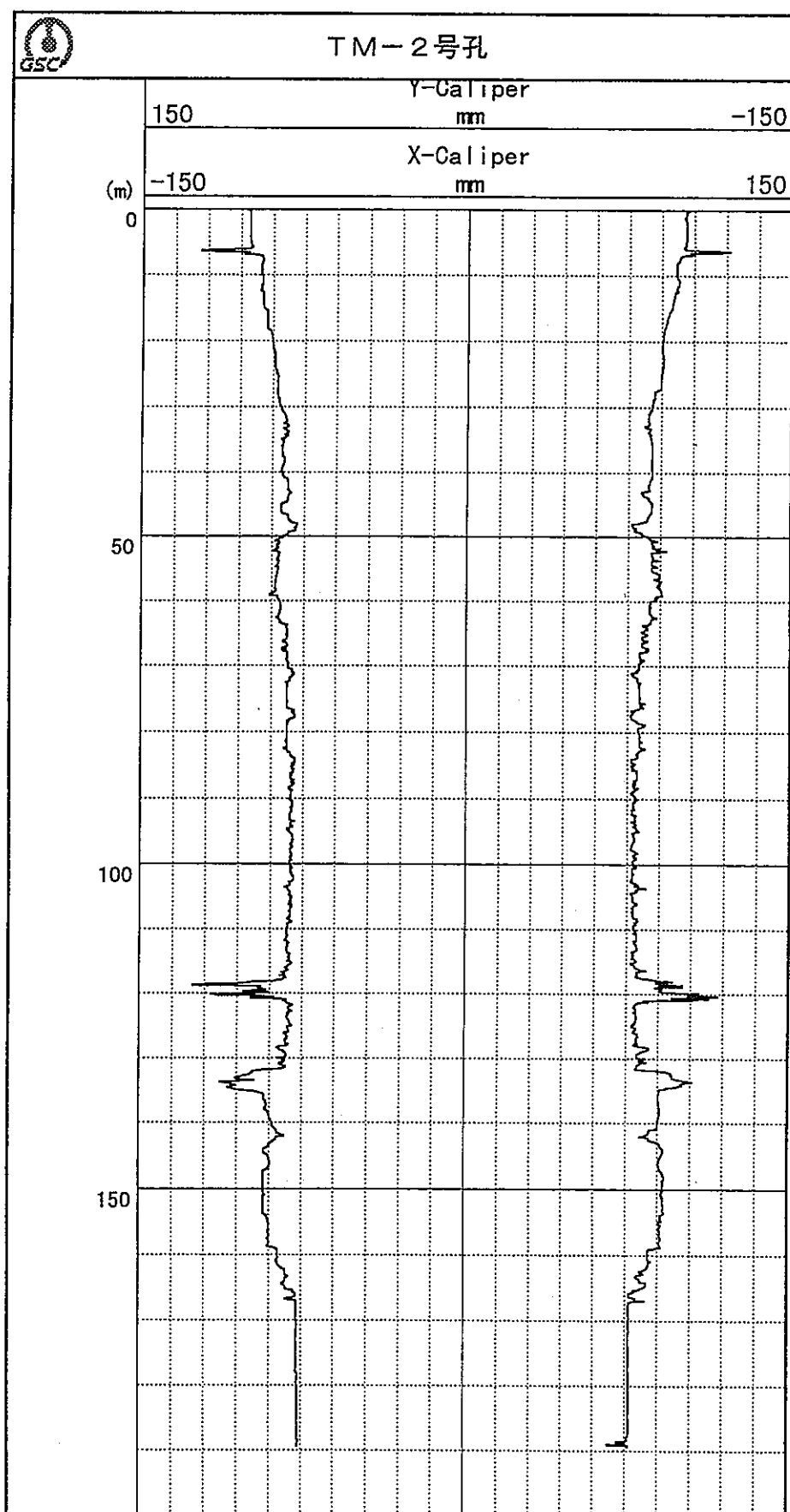
2.2.5 孔径検層結果

孔径検層結果は、図2.2.5 に示す通りである。なお、本孔の掘削孔径は孔口から孔底（深度190.6m）まで直径 78.0mm で掘削されている。本孔の掘削孔径に対する孔径の変化は、次のようである。

グループ名			X方向とY方向の相加平均値
A 層	14.0	～ 47.5m	87.2 mm
B 層	47.5	～ 88.0m	83.0 mm
C 層	88.0	～ 120.0m	81.2 mm
D 層	120.0	～ 130.5m	83.1 mm
E 層	130.5	～ 189.0m	84.8 mm

本孔の孔径は、全般的に掘削孔径より約 3～10mm程度拡大し、深度120～131m区間では崩壊が著しく、特に深度120mでは120mmまで大きく拡大していた。

图 2.2.5 孔径检层曲线图



2.2.6 中性子検層結果

中性子検層結果は、図2.2.6 に示す通り、変化に富んだ曲線を示す。中性子検層結果より算出した地層孔隙率の変化曲線は、図2.2.7に示す通りである。本孔の地層孔隙率は2～51%と広い範囲の孔隙率を示している。一般的に、中性子強度が高い程、孔隙率あるいは含水率が低いことが知られている。

本孔の地層孔隙率の算出は、つぎのような孔径補正を含む換算式を用いた。

$$NL\% = 10 \left[(-0.000128803 - 0.0000459006 \times \text{孔径}) \times \text{中性子強度} + \log 58 \right] \quad (2.2.1)$$

ここで NL% : 地層孔隙率

孔径 : 孔径検層 (inch)

中性子強度 : 中性子検層より求めた中性子強度

出典 : Schlumberger 1972 log interpretation

本孔の地層孔隙率の平均をグループ毎に示すと次のようになる。

グループ名			地層孔隙率の平均値
A 層	14.0 ～	47.5m	49.2 %
B 層	47.5 ～	88.0m	37.4 %
C 層	88.0 ～	120.0m	18.4 %
D 層	120.0 ～	130.5m	欠測区間
E 層	130.5 ～	189.0m	6.0 %

図2.2.6 に示すように、A層、B層の中性子強度は低く、電気検層の結果と良い整合性が認められる。また、C層、E層の地層孔隙率とA層、B層の孔隙率のコントラストが大きく、この間での地層の変化が大きいと予想される。

图 2.2.6 中性子强度曲线图

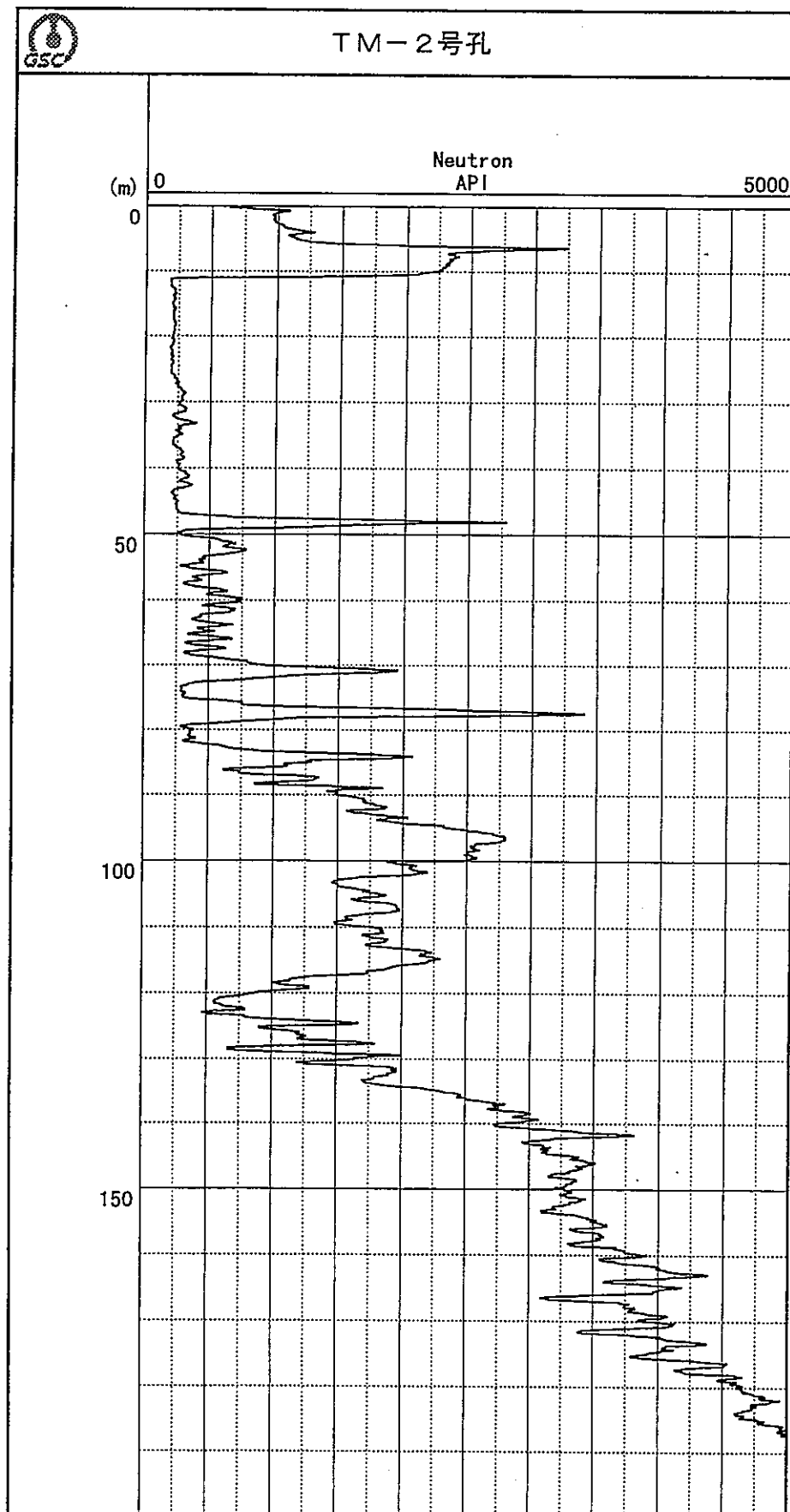
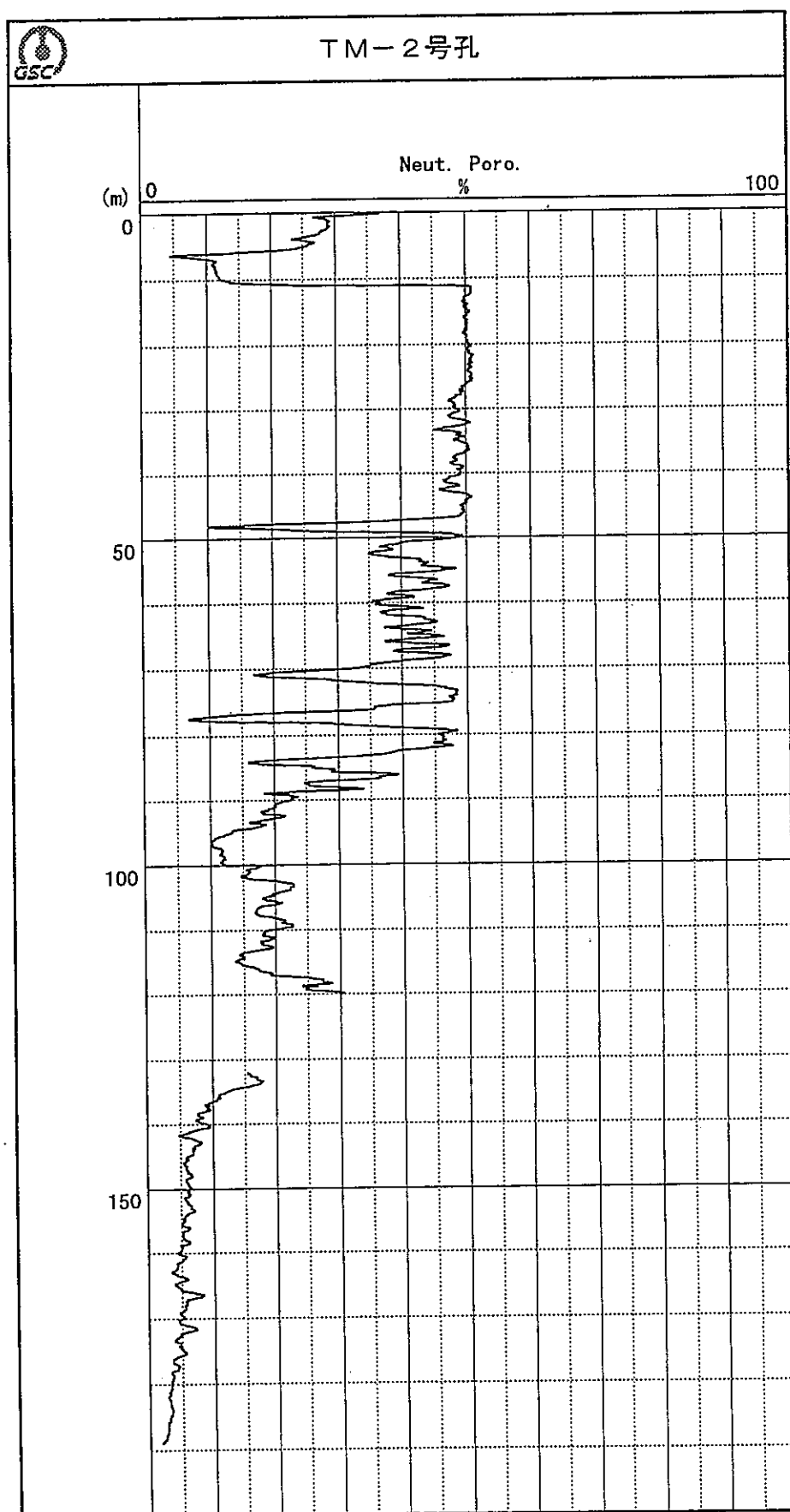


图 2.2.7 中性子孔隙率曲线图



2.2.7 自然放射能検層（ガンマ線検層）結果

自然放射能検層結果は、図2.2.8に示す通りである。測定されたガンマ線強度の範囲は40～5138 API（ただし 1 CPS= 5.5 API）と非常に広い範囲に渡り、特に高い数値を示す区間が存在している。

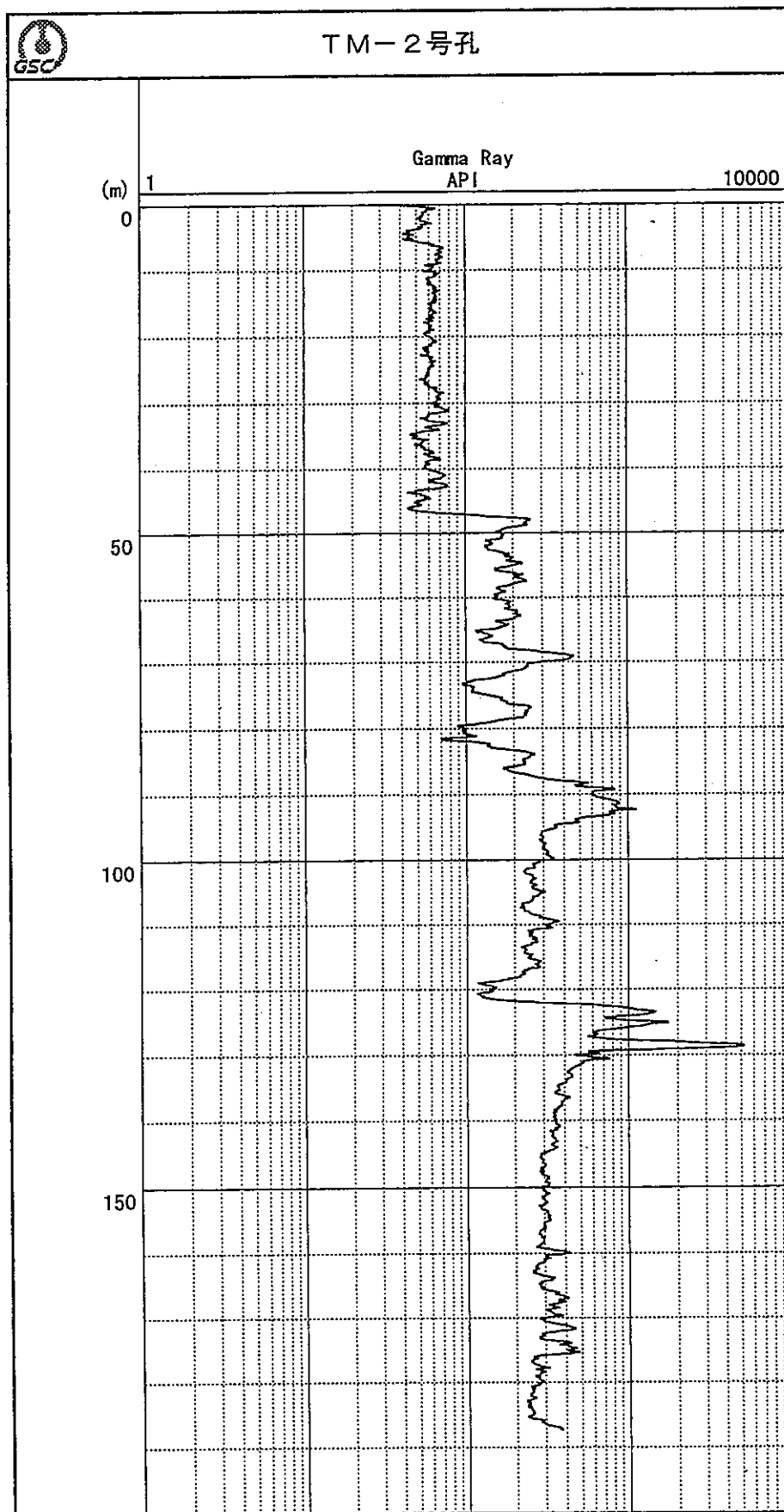
本孔の平均ガンマ線強度とグループ毎の関係は、次のようである。

グループ名			ガンマ線強度の平均値
A 層	14.0 ～	47.5m	63 API
B 層	47.5 ～	88.0m	188 API
C 層	88.0 ～	120.0m	348 API
D 層	120.0 ～	130.5m	1069 API
E 層	133.5 ～	189.0m	326 API

ただし 1 CPS= 5.5 API

本孔のガンマ線強度は、上記に平均値を示したように、かなり高い強度を示している。特に、D層のガンマ線強度は、最高値が5138APIと高く、この区間に存在する断層破碎帯に放射能鉱物が濃集しているものと考えられる。

図 2.2.8 ガンマ線強度曲線図



2.2.8 音波検層結果

ここで述べる地層の速度とは、P波が発信器から受信器に到達するまでに要した伝播時間をもとに算出される値で、受信間隔が3フィートと5フィート間の走行時間から地層のP波速度を算出する。すなわちP波速度は、

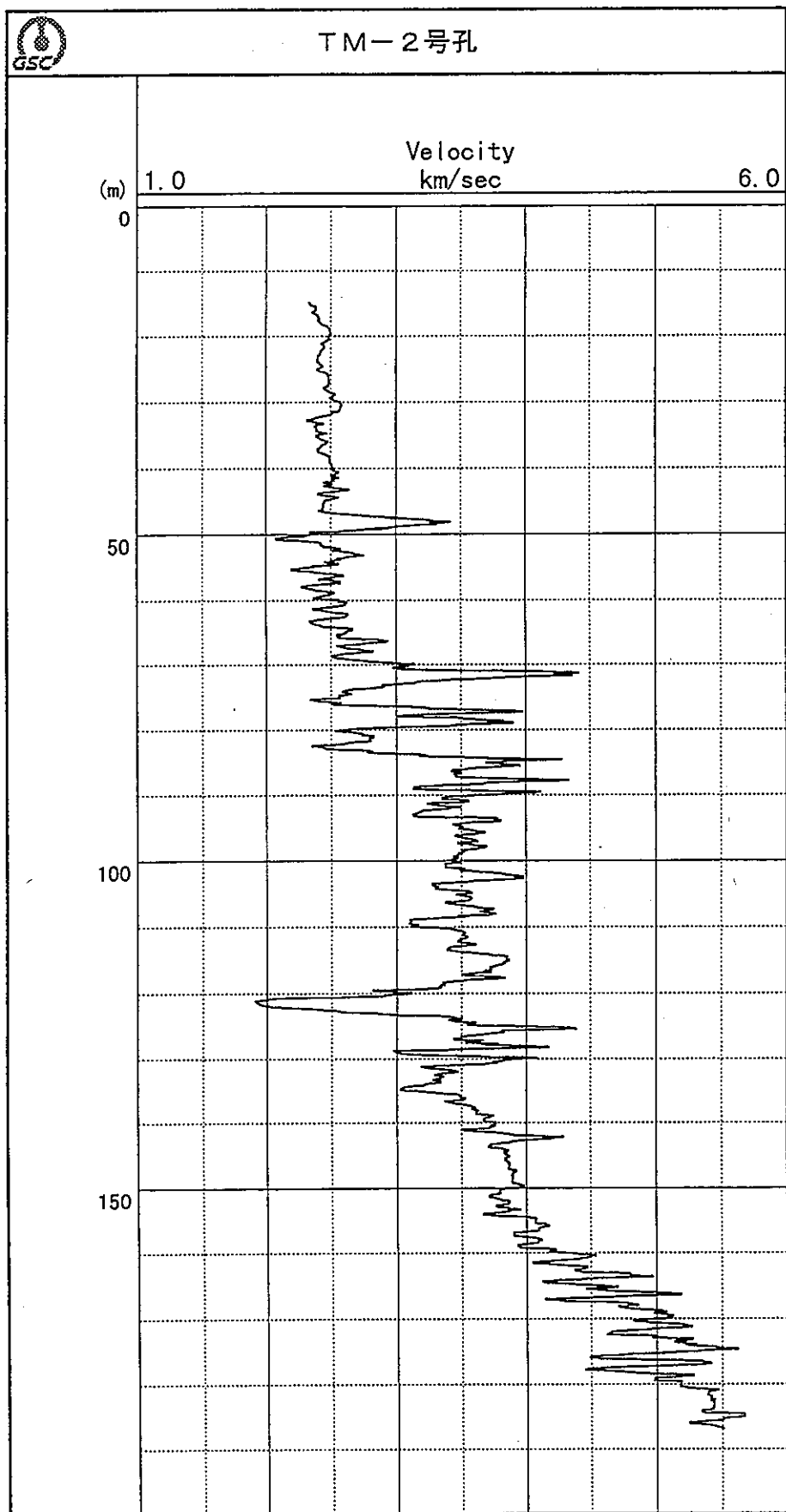
$(5\text{フィート間の走行時間} - 3\text{フィート間の走行時間}) \div 2$ の逆数

をMKS単位に変換して算出する。音波検層結果を図2.2.9に示し、波形記録（インテンシティー）を図2.2.10に添付する。本孔の速度値は、1.9～5.6km/secの速度値を示す区間で占められている。地層のP波速度の平均値は次のようである。

グループ名			P波速度の平均値
A 層	14.0	47.5m	2.47 km/sec
B 層	47.5	88.0m	2.85 km/sec
C 層	88.0	120.0m	3.51 km/sec
D 層	120.0	130.5m	3.24 km/sec
E 層	130.5	189.0m	4.33 km/sec

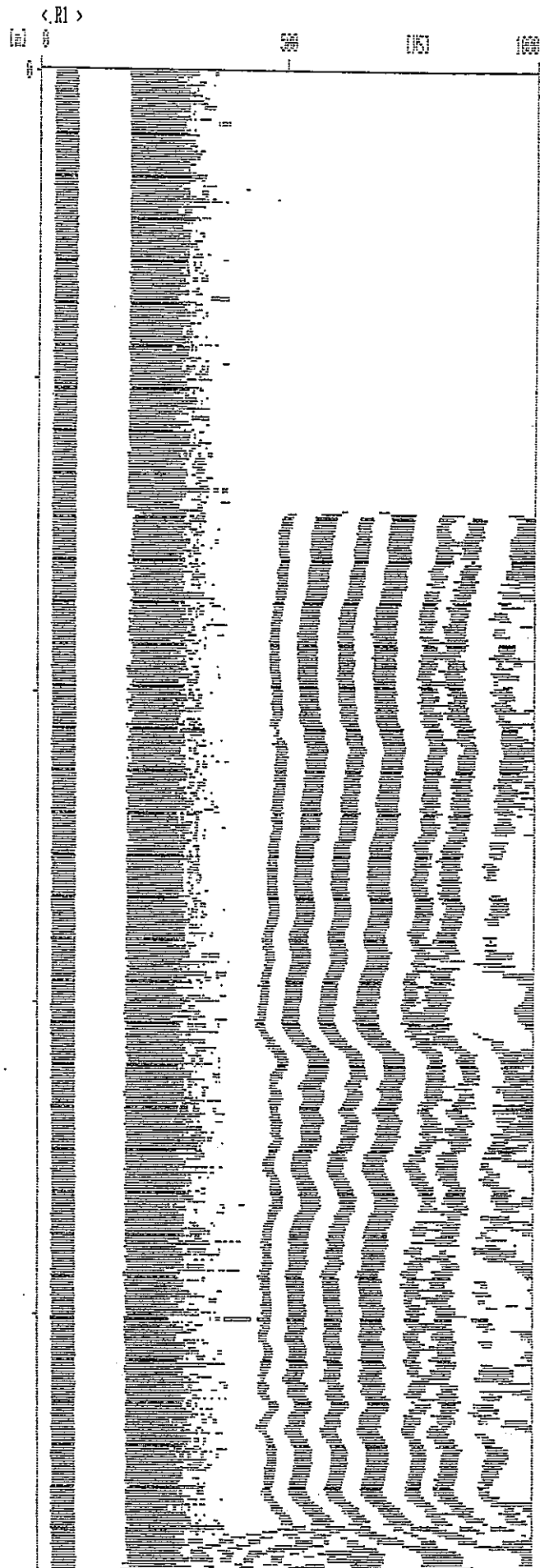
各層の平均的なP波速度は、2.47 ～4.33 km/sec であり、P波速度の大きさはA層<B層<C層<E層の順に大きくなる。D層は、断層破碎帯に相当する地層で低速度部に対応する。P波速度曲線は、中性子検層曲線と良い整合性が見られた。

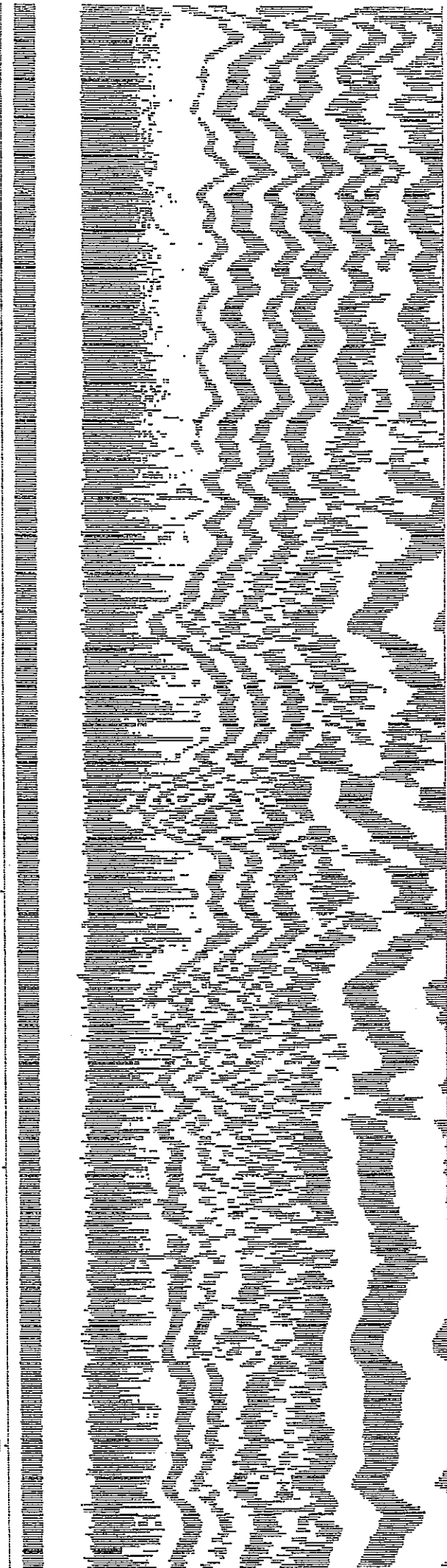
图 2.2.9 P 波速度曲线图

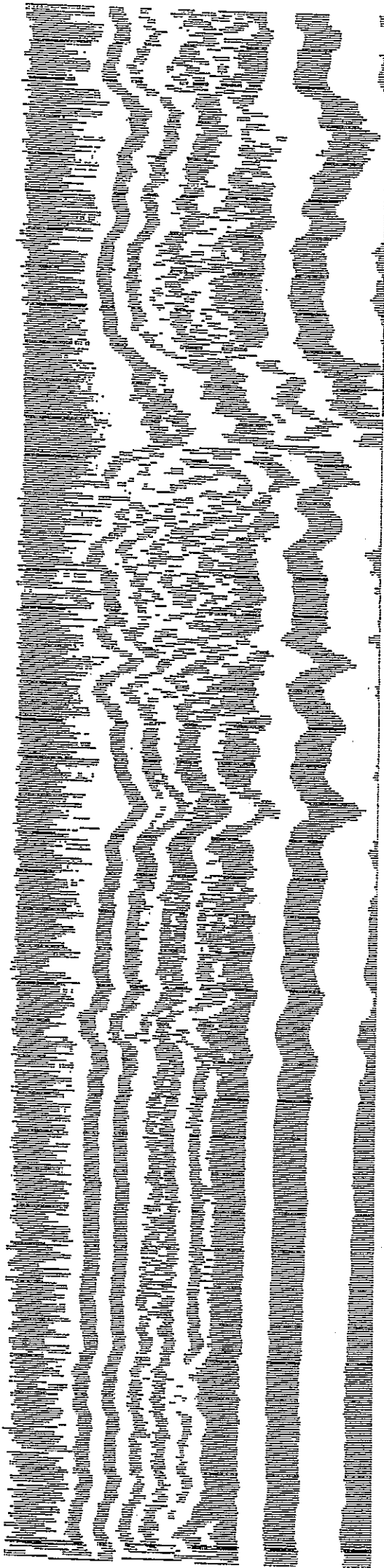


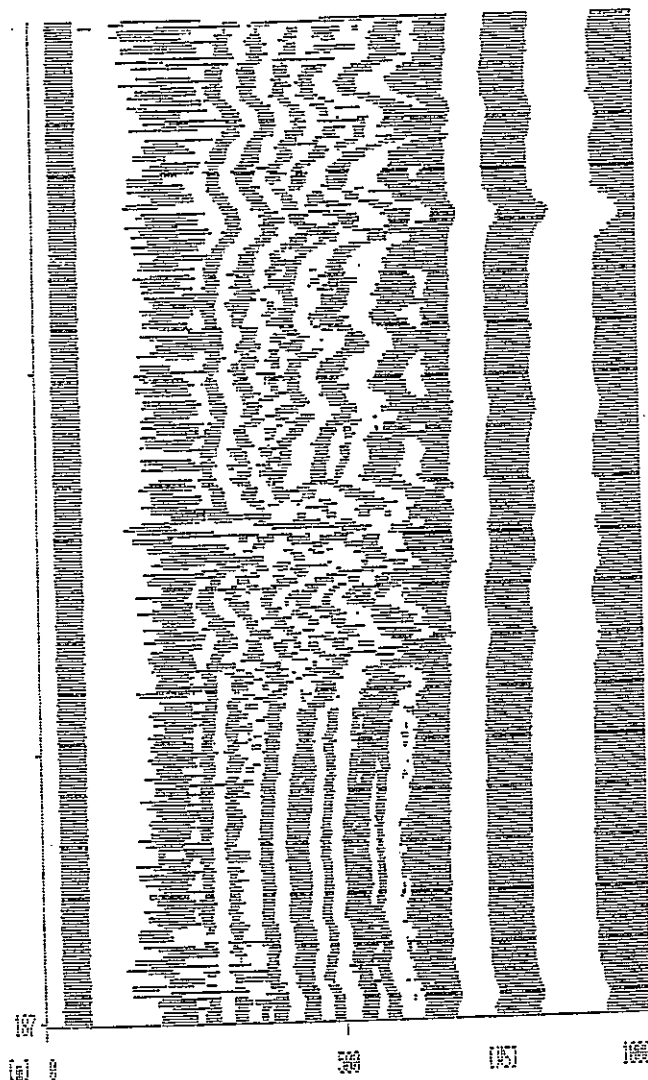
774h= SONIC8D (98/03/10 10:27)

深さ = 0.1 - 187.0 [m]
 送信電圧 = 0.6 [V]
 スケール = 1/200





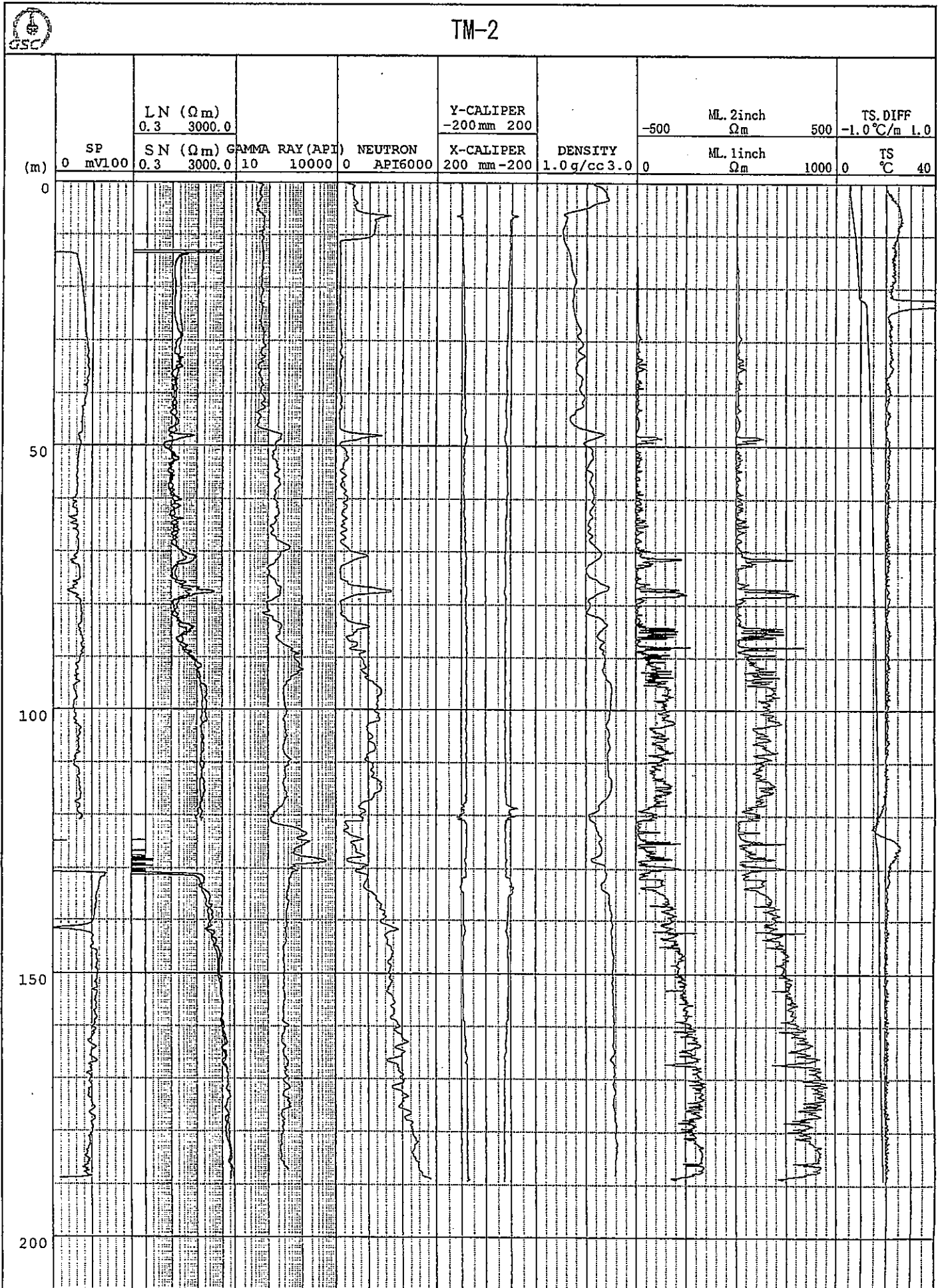




2.2.9 物理検層結果のまとめ

物理検層結果のまとめとして、図2.2.11に総合柱状図を示した。各検層結果の項で述べたように、検層より得られた物性値は、孔内の地質状況を良く反映していた。

図 2.2.11 総合柱状図



2.2.10 フローメーター検層

フローメーター検層については、自然状態での測定結果（図 2.2.12～図 2.2.13）と注水流量 4.8 l/min の測定結果（図 2.2.14～図 2.2.15）ならびに注水流量 31.26 l/min の測定結果（図 2.2.16～図 2.2.17）を示す。注水流量 31.26 l/min の測定終了後、注水を停止させながら圧力変動測定（図 2.2.18）した結果も示した。

フローメーター検層では、スピナーの回転数は、孔内流体の流速とケーブルスピードとの相対運動の差によって変化する。そのため、同一流量での異なるケーブルスピードの測定を 3 回以上おこなう。精度の高い解析を行うためには、できるだけ大流量の状態でケーブルスピードに変化を持たせて測定することが望ましいことから、フローメーター検層の解析では、最大流量の 31.26 l/min のデータを用いた（図 2.2.19 参照）。その結果、深度 15m 付近で注水の流出が認められたが、深度 120～130m 間の断層破碎帯では、流量変化はほとんど認められなかった。したがって、この断層破碎帯は水の流路にはなっていないと考えられる。キャリパー検層で孔径拡大が認められた 133m 付近の亀裂は、フローメーター検層でも、僅かに流量変化が測定された。それ以外の深度については、ほとんど流量変化が認められなかった。

図 2.2.12 フローメータ検層図 (自然状態: Down)

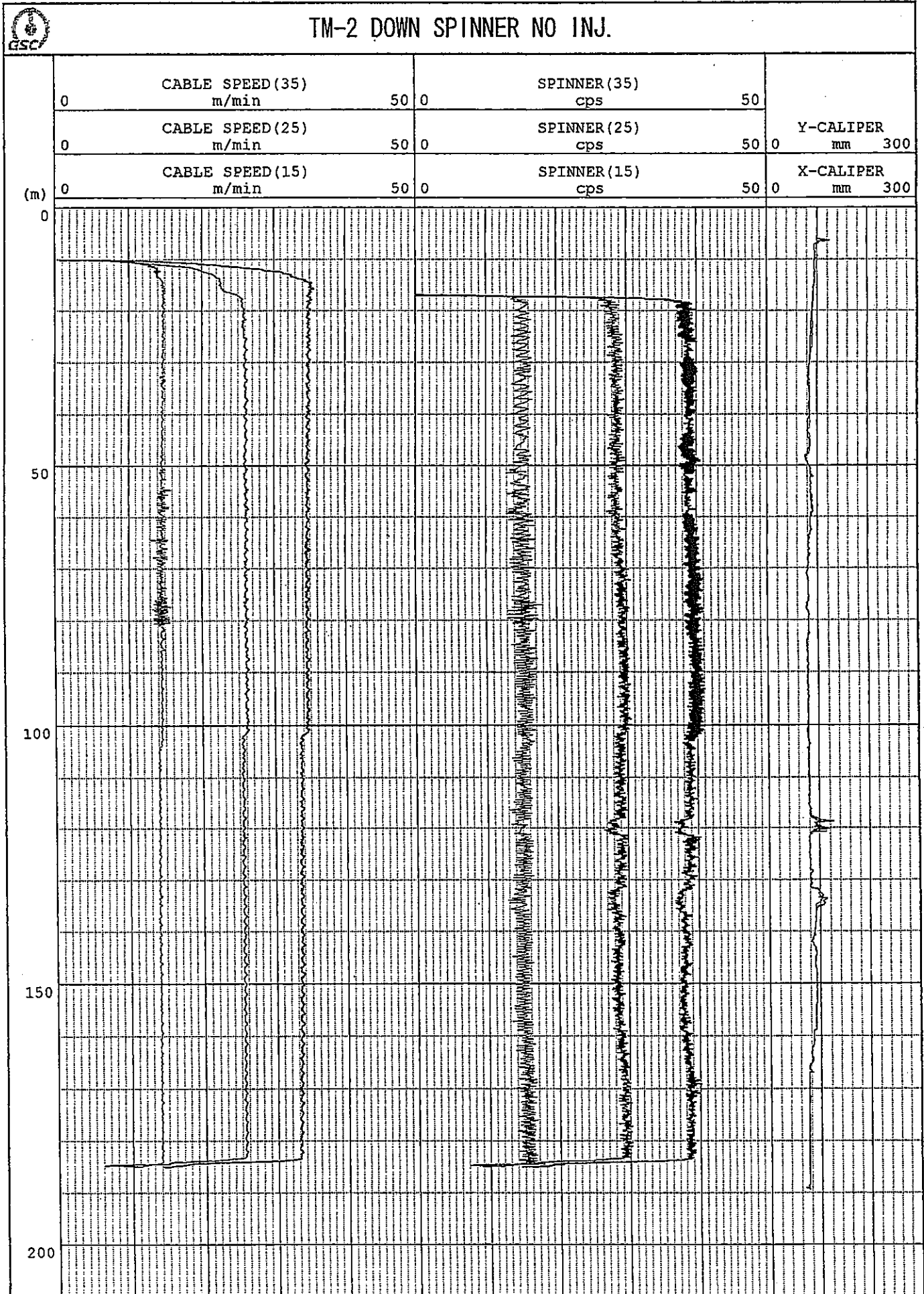


図 2.2.13 フローメータ検層図 (自然状態 : Up)

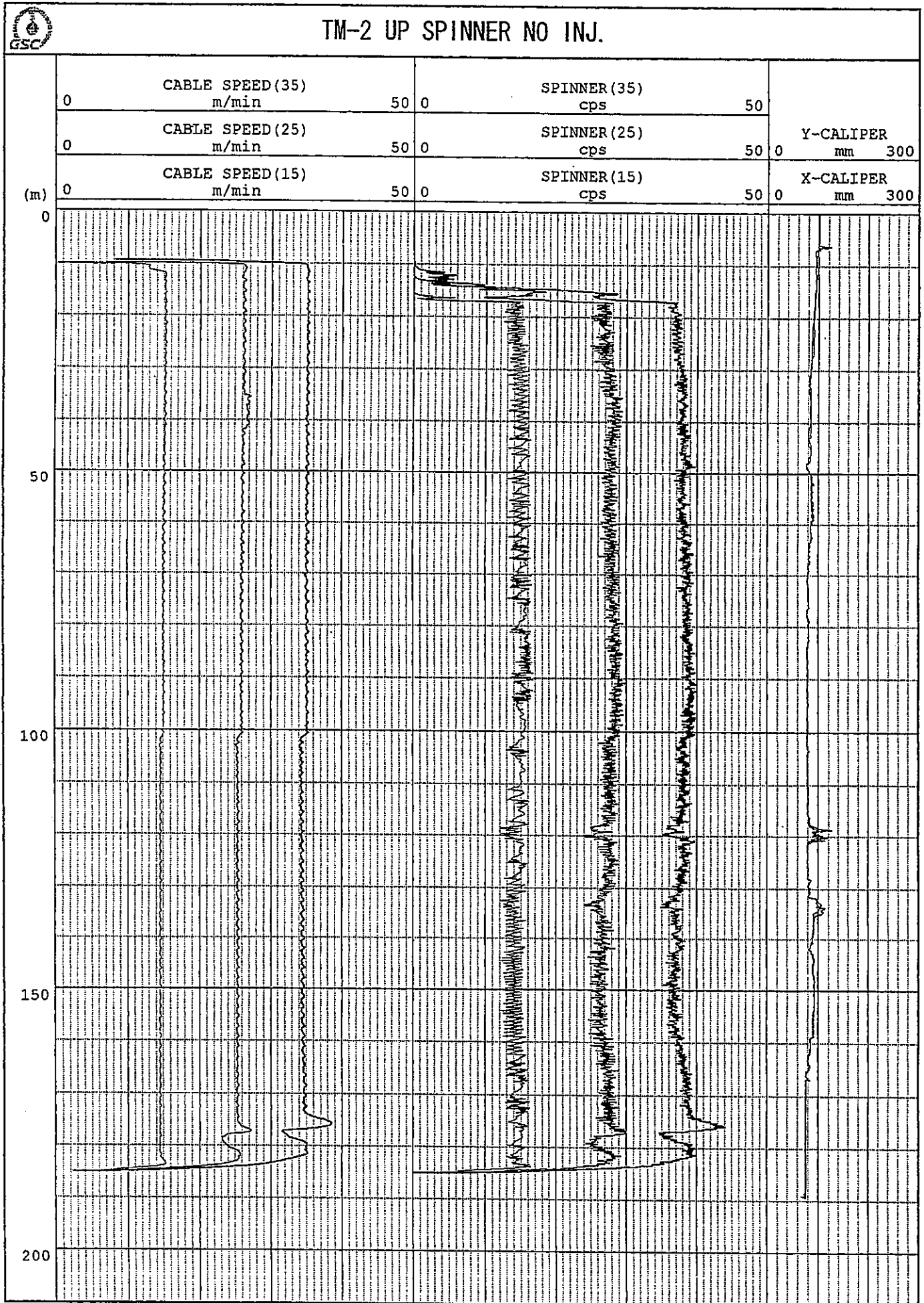


図 2.2.14 フローメータ検層図 (注水 4.8l/min : Down)

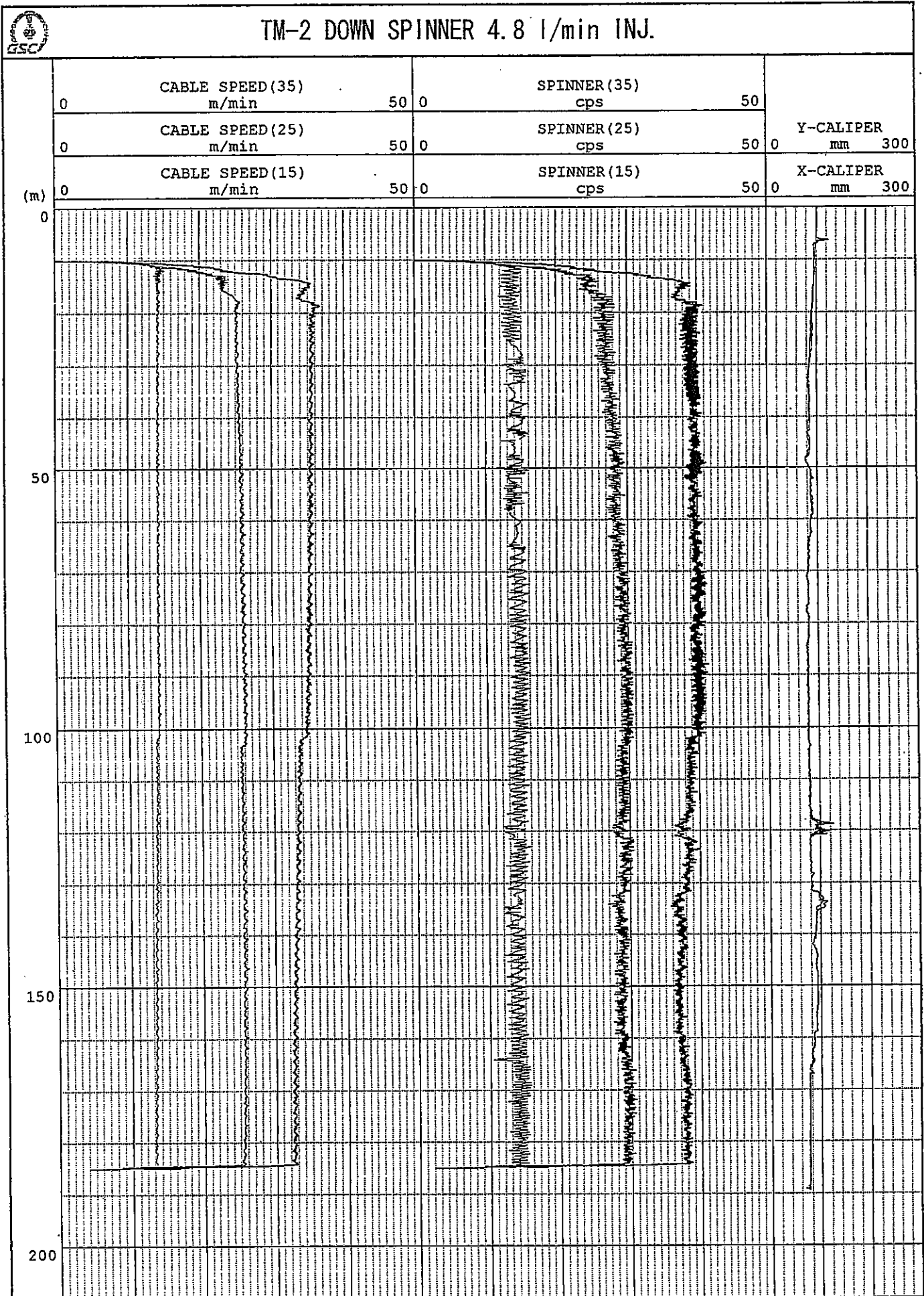


図 2.2.15 フローメータ検層図 (注水 4.8l/min: Up)

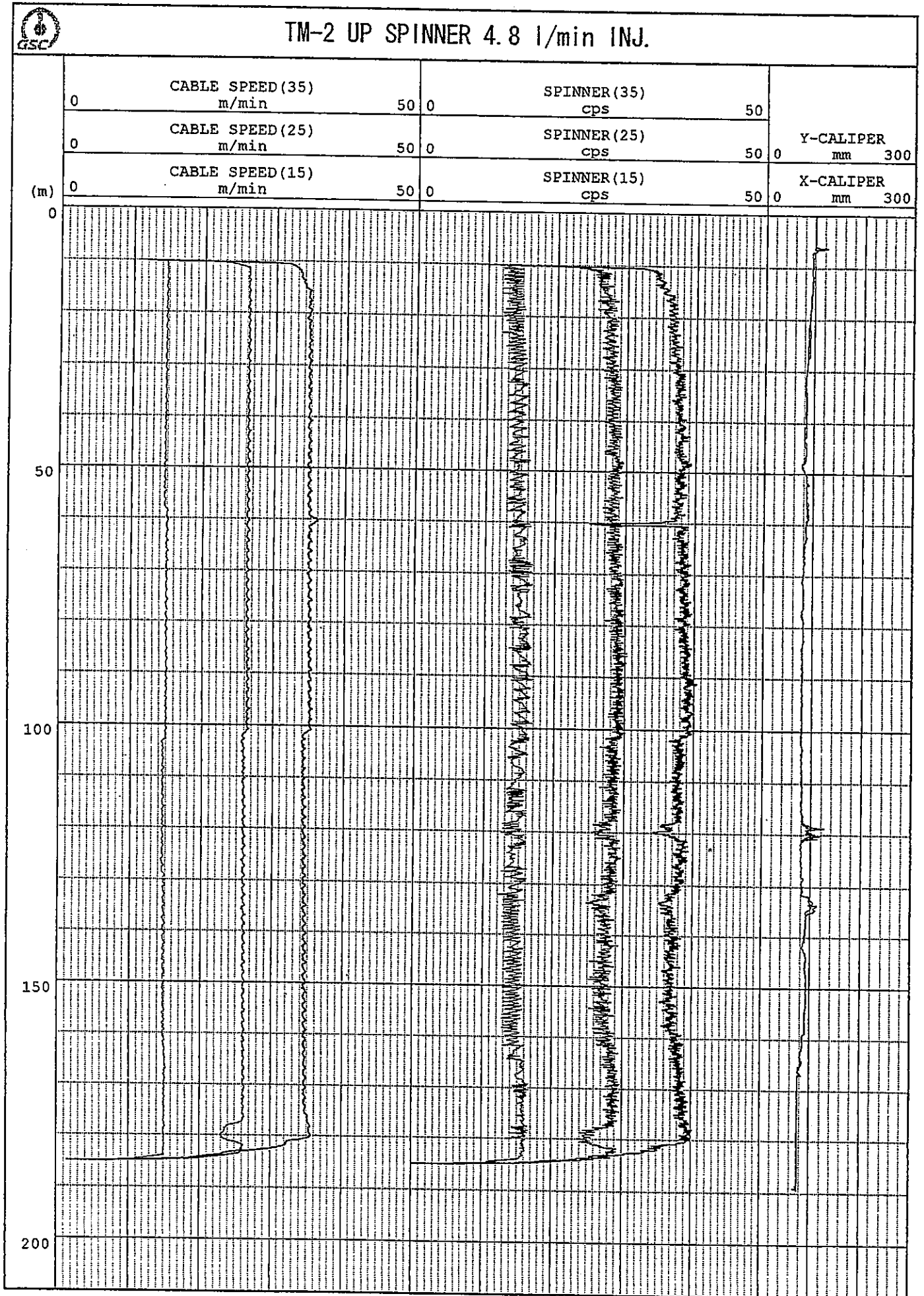


図 2.2.16 フローメータ検層図 (注水 3.126/min : Down)

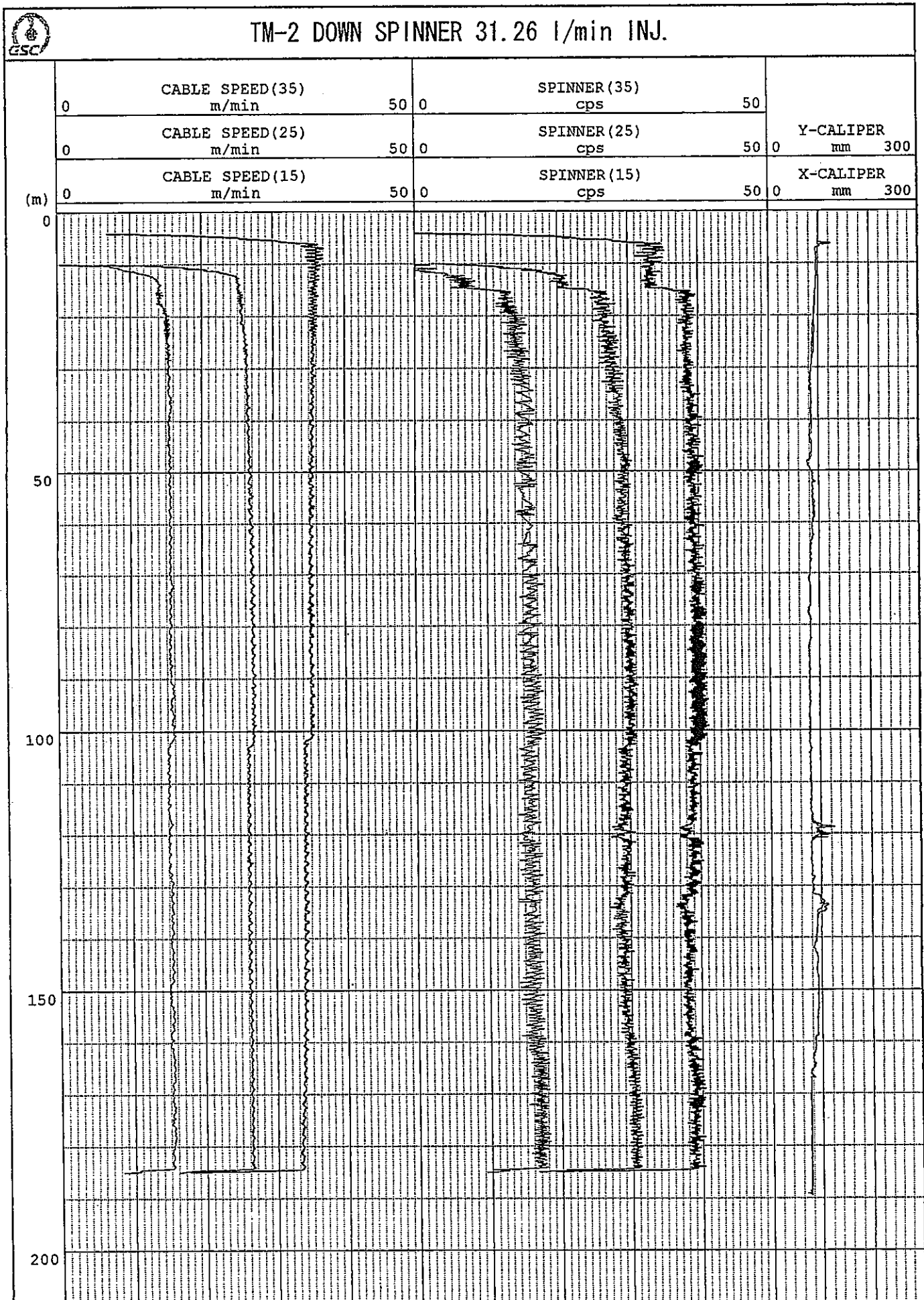
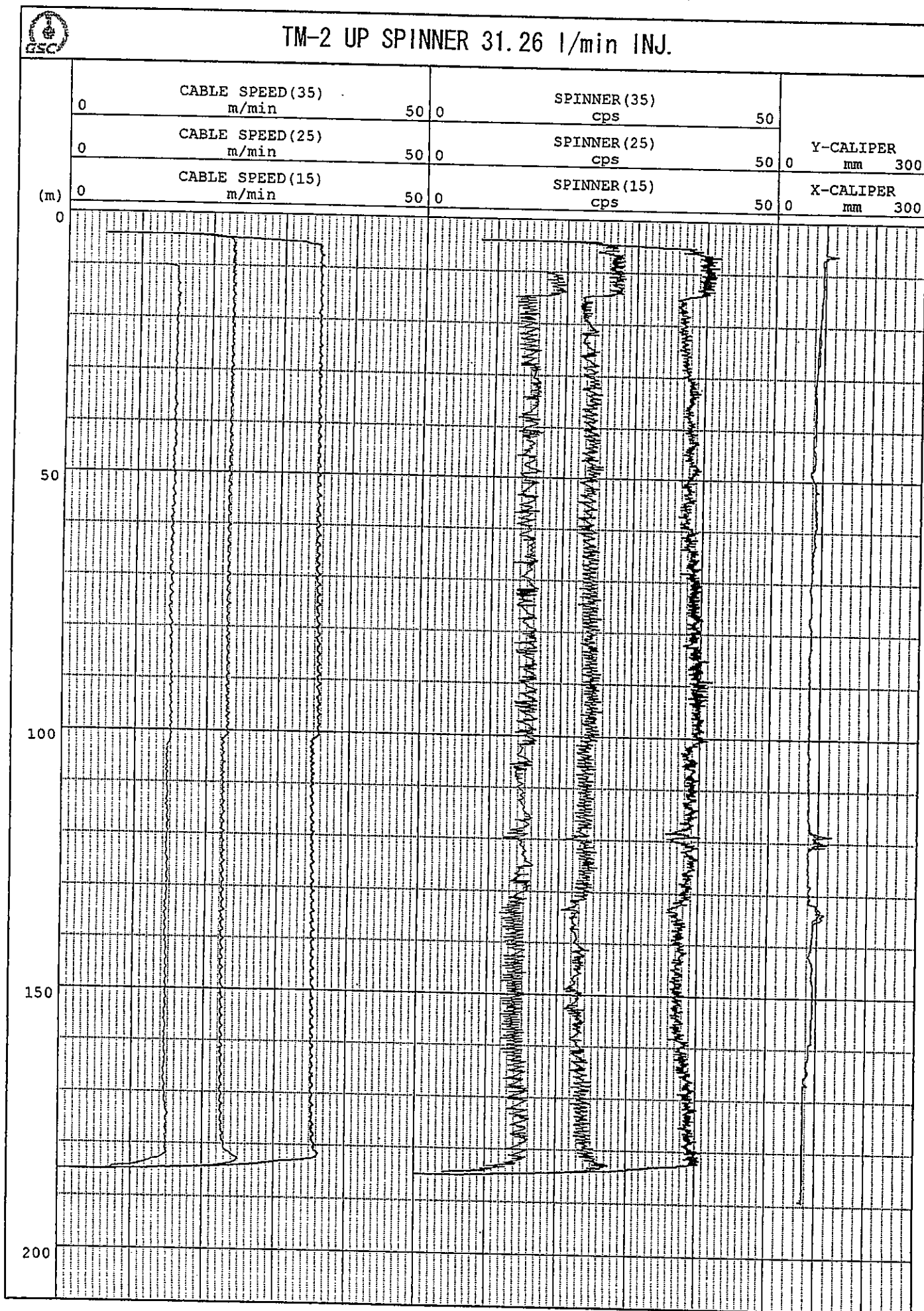


図 2.2.17 フローメータ検層図 (注水 3.126/min : Up)



TM-2 フォール・オフ

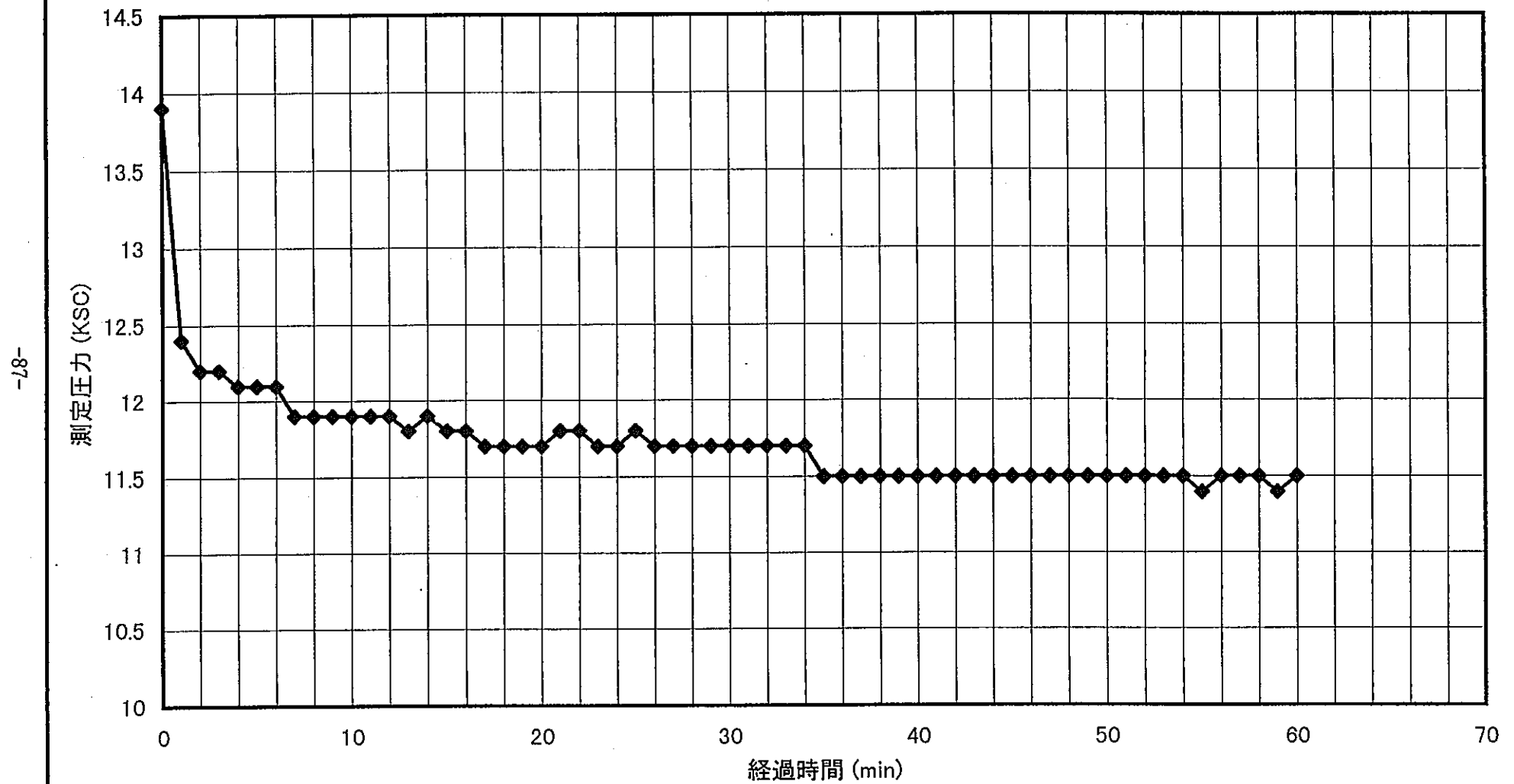


図 2.2.18 フォール・オフテスト

表 2.2.1 フォール・オフ孔底圧測定表

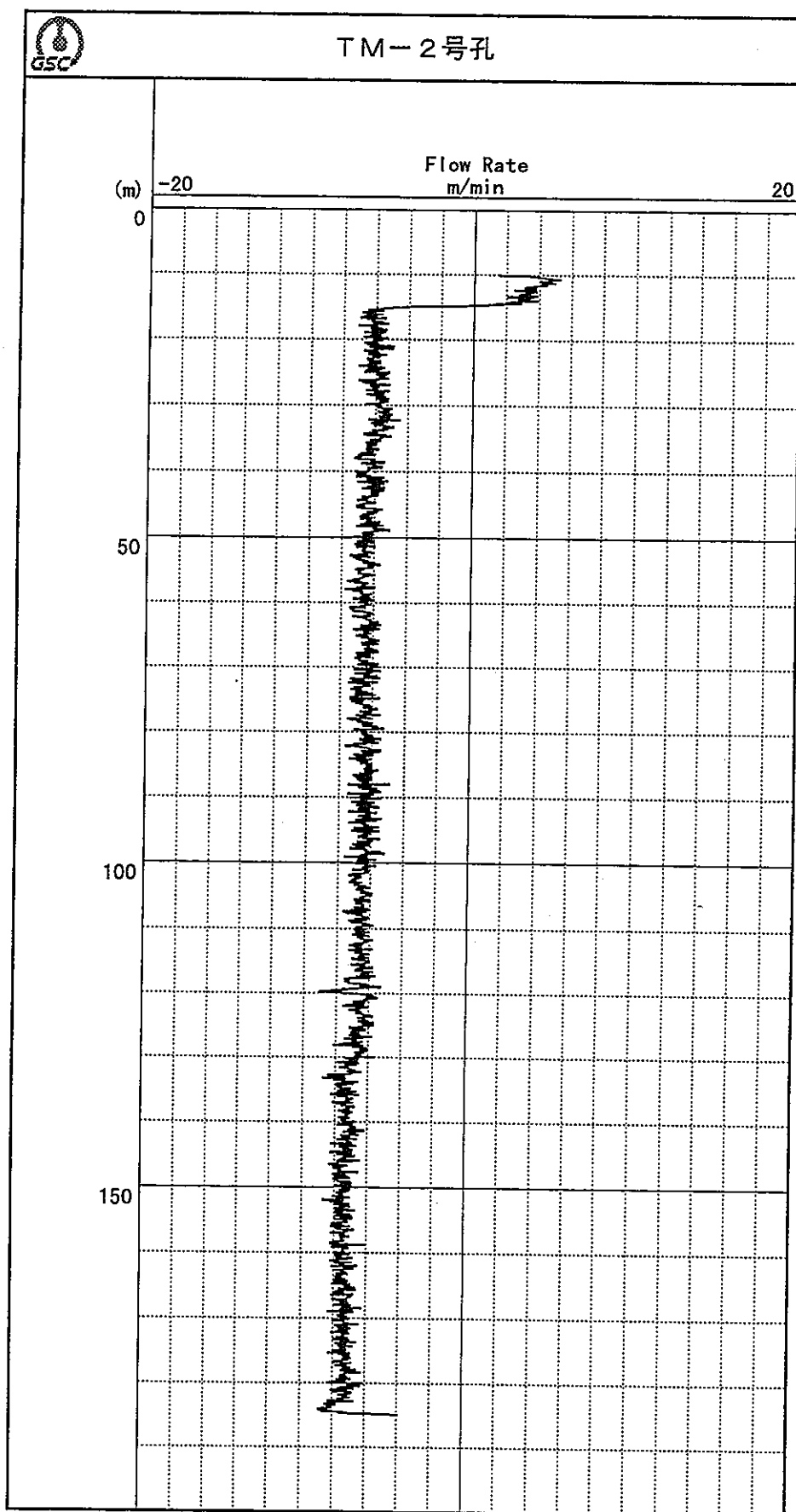
TM-2 フォール・オフ孔底圧測定 (ツール設置深度: 120.0 m)

注水停止後 31.26 1/min 圧入後
経過時間 (分) 測定圧力 (KSC)

-15	14.0
-14	14.0
-13	14.0
-12	14.0
-11	14.0
-10	14.0
-9	13.9
-8	13.9
-7	13.9
-6	14.0
-5	13.9
-4	13.9
-3	13.9
-2	13.9
-1	13.9
0	13.9
1	12.4
2	12.2
3	12.2
4	12.1
5	12.1
6	12.1
7	11.9
8	11.9
9	11.9
10	11.9
11	11.9
12	11.9
13	11.8
14	11.9
15	11.8
16	11.8
17	11.7
18	11.7
19	11.7
20	11.7
21	11.8
22	11.8
23	11.7
24	11.7
25	11.8
26	11.7
27	11.7
28	11.7
29	11.7
30	11.7
31	11.7

32	11.7
33	11.7
34	11.7
35	11.5
36	11.5
37	11.5
38	11.5
39	11.5
40	11.5
41	11.5
42	11.5
43	11.5
44	11.5
45	11.5
46	11.5
47	11.5
48	11.5
49	11.5
50	11.5
51	11.5
52	11.5
53	11.5
54	11.5
55	11.4
56	11.5
57	11.5
58	11.5
59	11.4
60	11.5

图 2.2.19 孔内流速曲线图



2.3 解 析

2.3.1 物性値の相関性

検層結果から得られた物性値を比較検討するために、各検層の相関図（クロスプロット）を示す。クロスプロットのサンプリング間隔は、10cm毎のデータを読み取った。

（１）比抵抗値と各物性値との岩相区分による相関性

① 比抵抗（ショート・ハル）—中性子孔隙率プロット図（図 2.3.1）

比抵抗と中性子孔隙率の間には、負の相関が認められる。そして、A層、B層、C層、E層の順に低比抵抗、高孔隙率の領域からE層の高比抵抗、低孔隙率まで漸移的に変化している。なお、D層は未測定区間のため、プロットから除いた。

② 比抵抗（マイクロ）—ガンマ線強度プロット図（図2.3.2）

D層の断層破砕帯のガンマ線強度は広い範囲に分散し、ガンマ線強度が 5000API以上の数値を記録する個所も認められた。

③ 比抵抗（マイクロ）—P波速度プロット図（図2.3.3）

全体的に正の相関性が認められる。A層、C層、E層の順に低比抵抗、低P速度から高い数値（460 ohm-m, 5.6km/s）へと移行している。B層およびD層は、広い範囲に分散し、岩相変化が著しいことがうかがえる。

（２）中性子孔隙率と各物性値との岩相区分による相関性

① 中性子孔隙率—ガンマ線強度プロット図（図2.3.4）

中性子孔隙率とガンマ線強度の間には、負の相関が認められる。C層では孔隙率20%付近に高ガンマ線強度（600API以上）のピークが存在することより、放射性鉱物の濃集している地層は、比較的砂質分を含んでいることが予想される。

② 中性子孔隙率—密度プロット図（図2.3.5）

中性子孔隙率と密度値の間には、負の相関が認められる。A層の孔隙率50%、密度値1.6 g/cm³からE層の孔隙率10%、密度値2.4 g/cm³の領域までほぼ漸移的に変化している。

③ 中性子孔隙率—P波速度プロット図（図2.3.6）

中性子孔隙率とP波速度の間には、負の相関が認められる。

（３）孔隙率による岩相の相関性

① 中性子孔隙率—密度孔隙率プロット図（図2.3.7）

中性子孔隙率と密度孔隙率の間には、当然な結果であるが、正の相関が認められる。

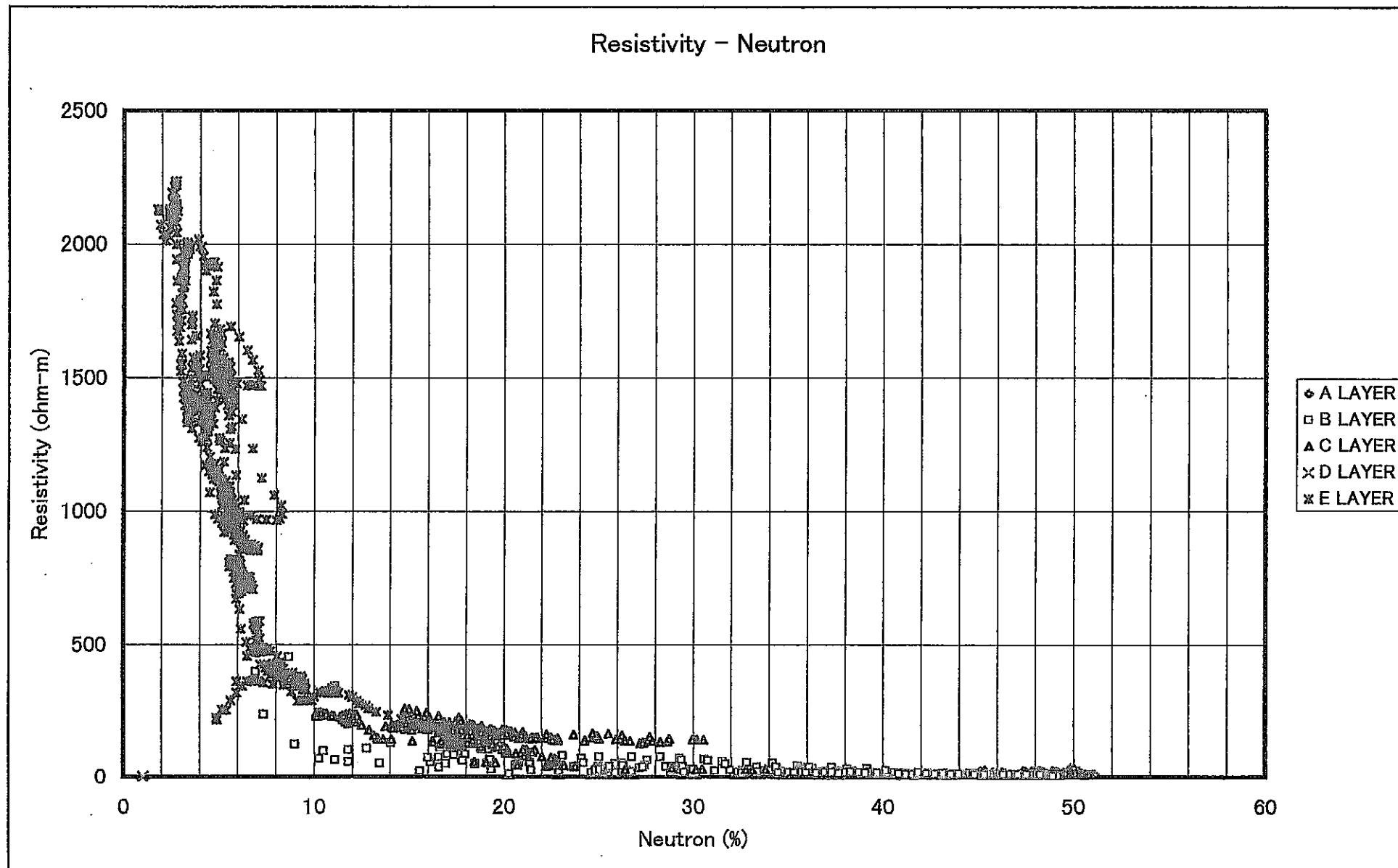


図 2.3.1 比抵抗 (ショート・ノルマル) - 中性子 (%) クロスプロット図

Micro Resis. - Gamma Ray

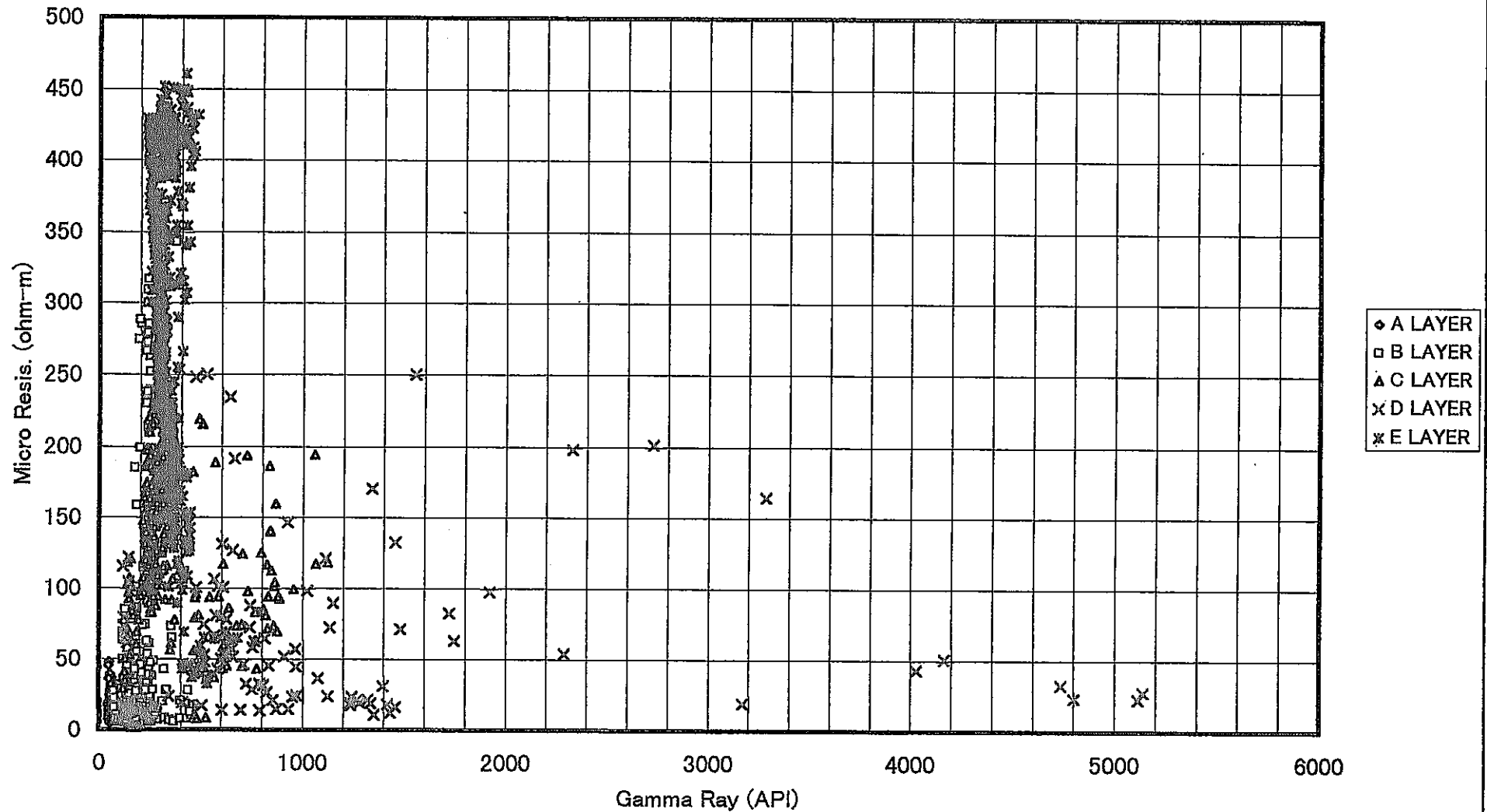


図 2.3.2 比抵抗 (ショート・ノルマル) - P 波速度クロスプロット図

Micro Resis. - Velocity

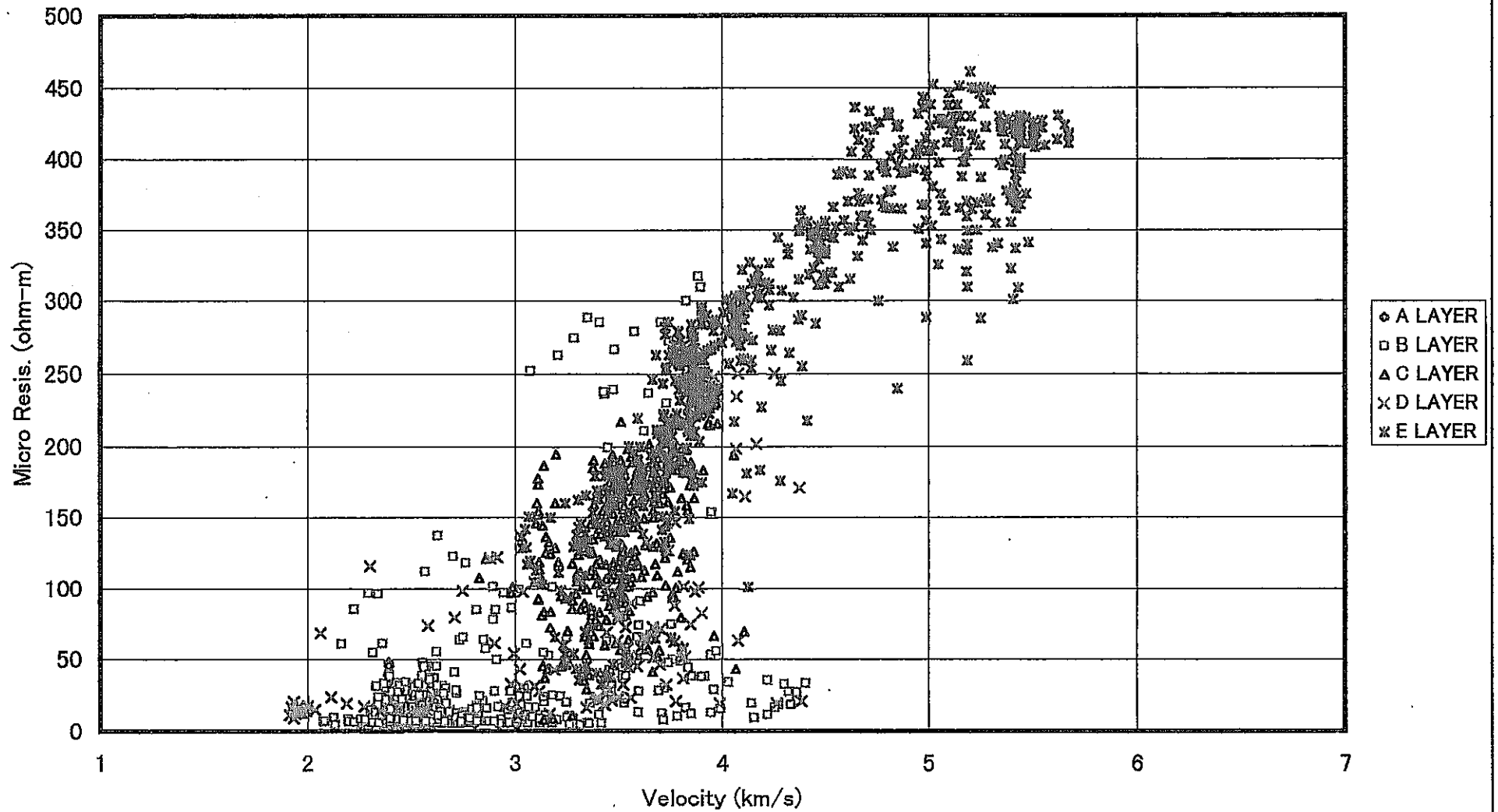


図 2.3.3 比抵抗（マイクロ）－P波速度クロスプロット図

Neutron - Gamma Ray

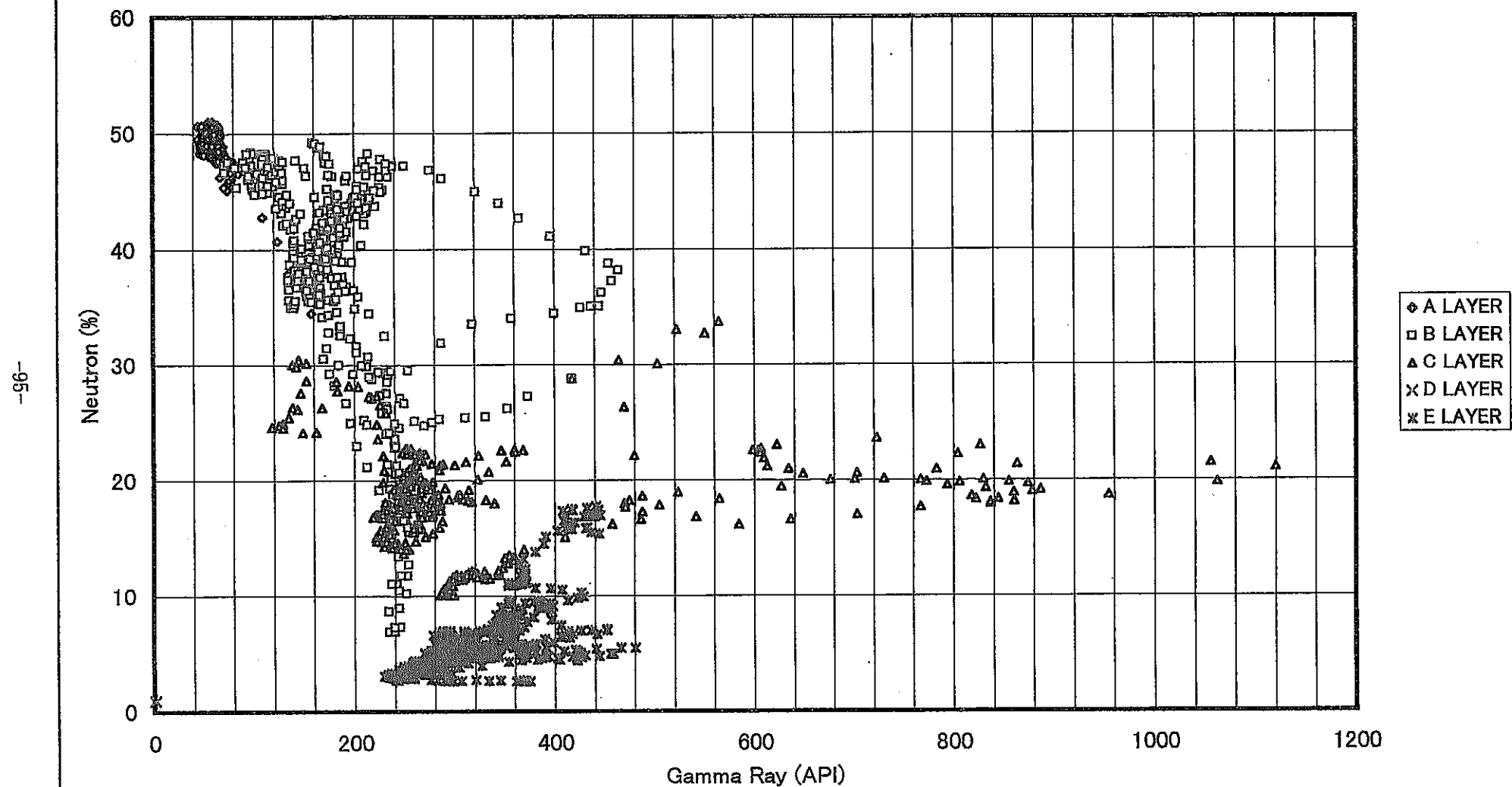


図 2.3.4 中性子 (%) - ガンマ線強度クロスプロット図

Neutron - Density

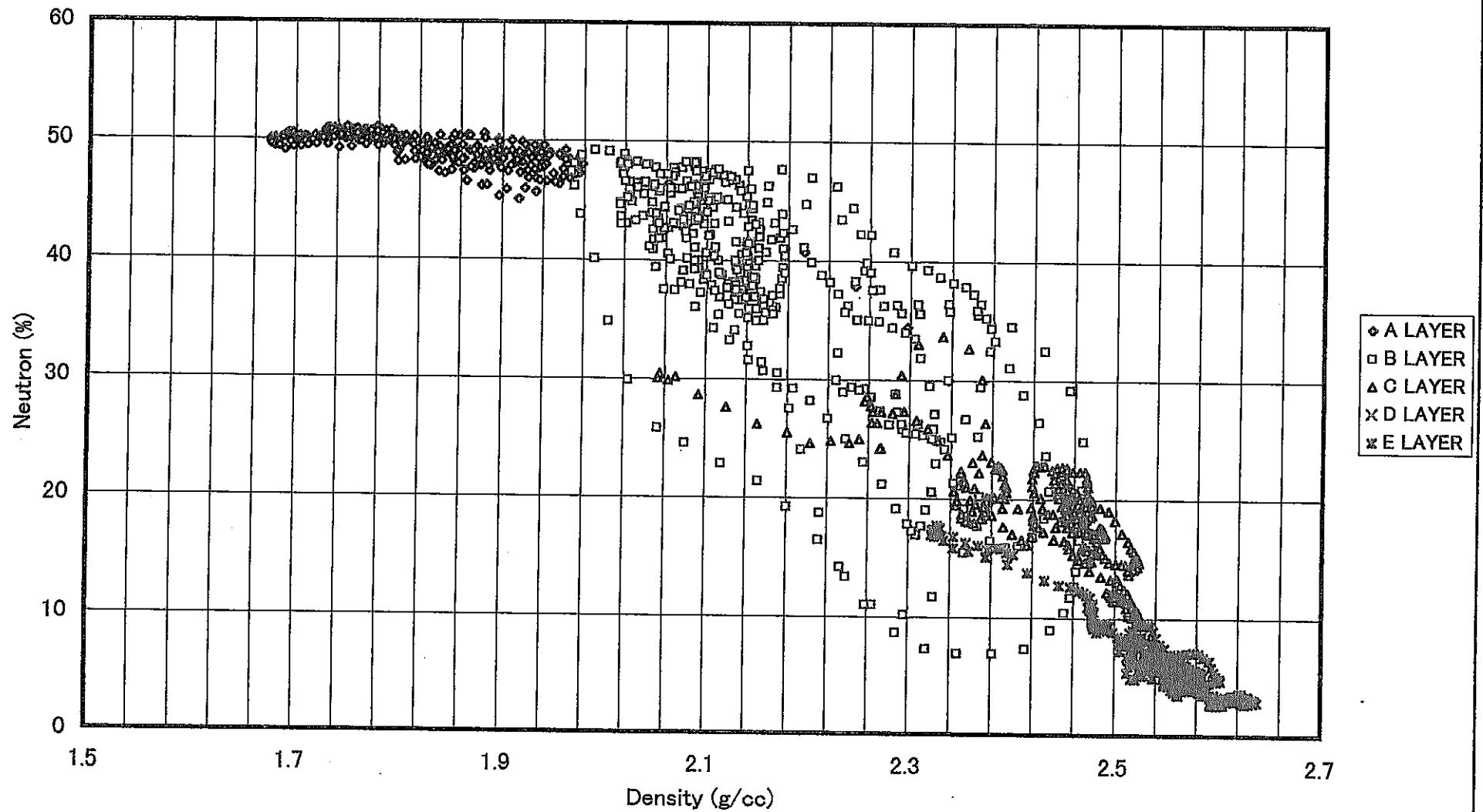


図 2.3.5 中性子 (%) - 密度クロスプロット図

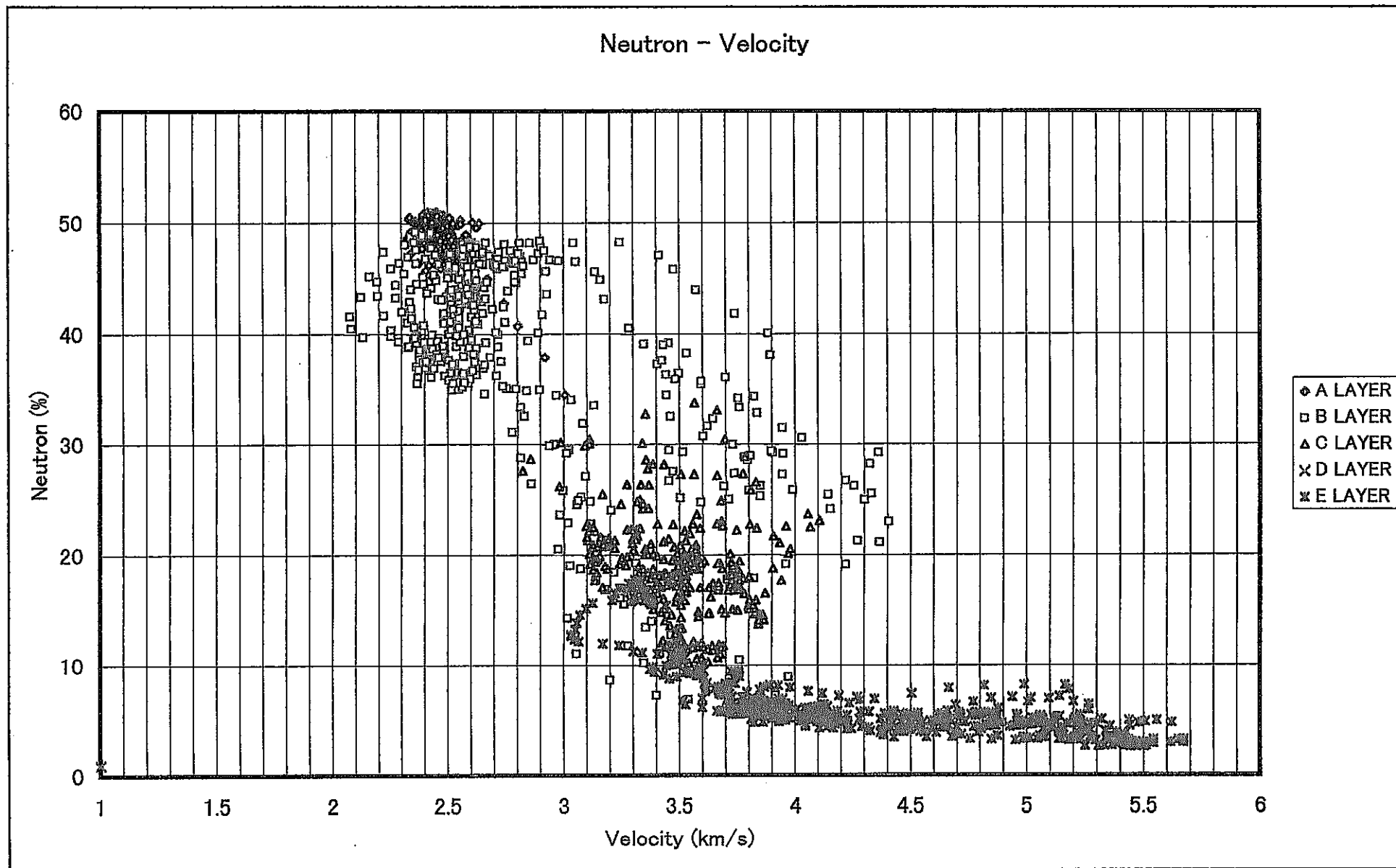


図 2.3.6 中性子 (%) - P 波速度クロスプロット図

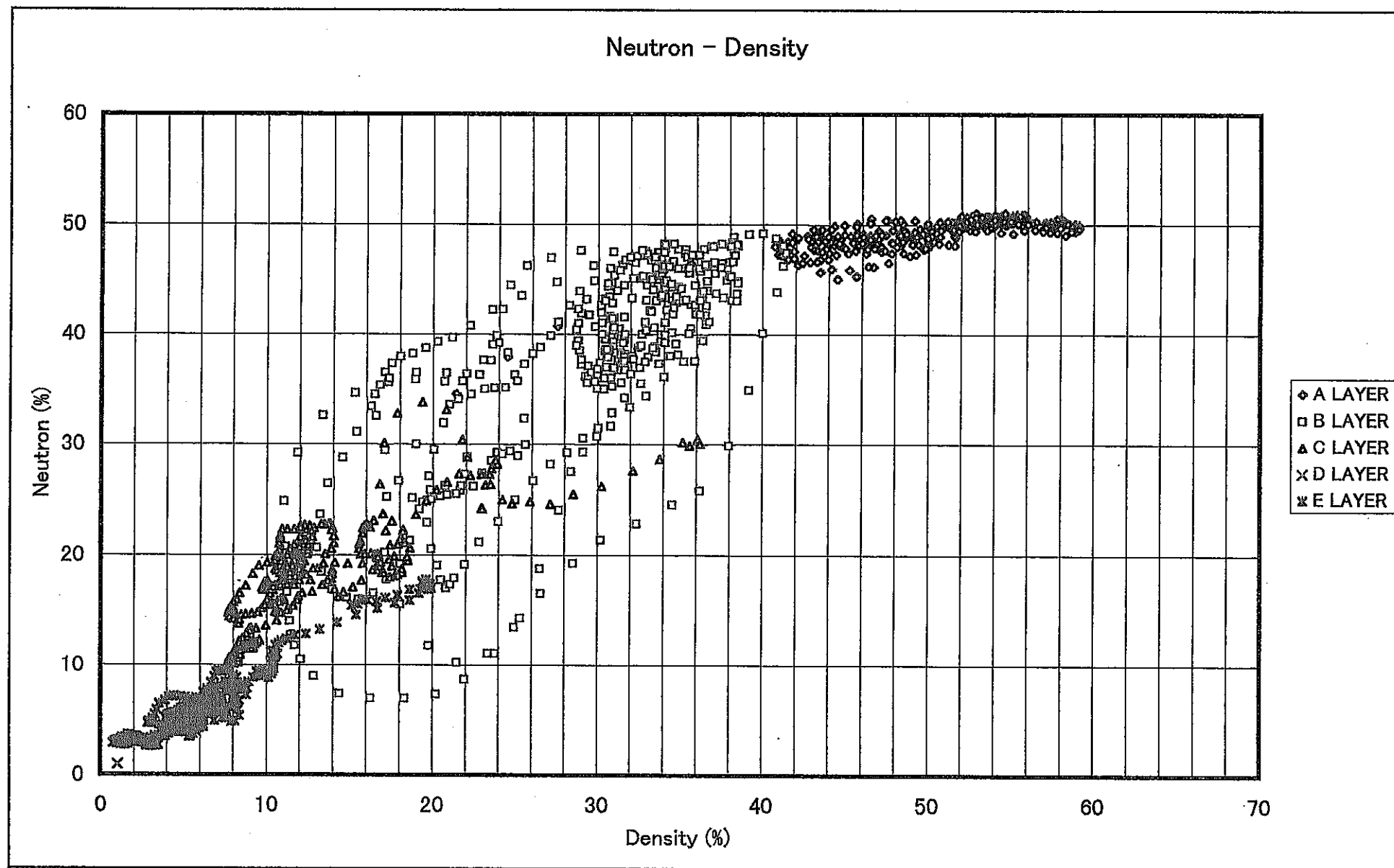


図 2.3.7 中性子 (%) - 密度 (%) クロスプロット図

2.3.2 物理検層データより算出した透水性について

物理検層データから次のような手法を用いて、岩盤の透水性について検討した。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（U R L）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た。

(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 ）を算出し（図 2.2.7参照）、次に(2.2.2) 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Humble Formulaより 2.15 と仮定した。

$$F = 0.62 / \phi^m \quad (\text{Archie, 1942}) \quad (2.2.2)$$

さらに、次式(Katsube et al., 1985)

$$k = 2.51 \times 10^7 \times F^{-2.22} \quad (\text{Katsube et al., 1985}) \quad (2.2.3)$$

から透水係数（k）を求めた（図 2.3.8）。中性子検層データから算出した透水係数は、 $10^{-4} \sim 10^{-11}$ m/sの範囲を示し、良好な透水性岩盤から深くなる程、難水性岩盤へと移行する傾向が認められた。

図 2.3.8 中性子検層より算出した透水係数

