

幌延深地層研究センターの 350mポンプ座における初期地圧測定

In Situ Stress Measurements at the 350 m Pumping Station
in the Horonobe Underground Research Laboratory

青柳 和平 櫻井 彰孝 丹生屋 純夫

Kazuhei AOYAGI, Akitaka SAKURAI and Sumio NIUNOYA

バックエンド研究開発部門

幌延深地層研究センター

深地層研究部

Horonobe Underground Research Department

Horonobe Underground Research Center

Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

October 2015

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

幌延深地層研究センターの 350m ポンプ座における初期地圧測定

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門

幌延深地層研究センター 深地層研究部

青柳 和平、櫻井 彰孝※、丹生屋 純夫*

(2015 年 6 月 19 日 受理)

幌延深地層研究センターの地下施設周辺岩盤の応力場を把握することを目的として、350m ポンプ座にて水圧破碎法による 3 次元初期地圧測定を実施した。初期地圧を評価するにあたっては、異なる方向へ掘削した 4 本のボーリング孔の 31 深度で水圧破碎により造成された横き裂に作用する法線応力、1 深度で生じたブレイクアウト発生位置および 12 深度で生じた縦き裂の開口圧に関する観測方程式を用いた。

水圧破碎試験結果の解析では、ボアホールブレイクアウトの発生条件を加味した場合と、加味しない場合の 2 ケースで初期地圧を評価した。その結果、ブレイクアウト発生条件を加味した場合、最大主応力が約 12MPa と、推定される土被り圧約 6MPa の 2 倍程度の値となる。また、最大主応力と最小主応力の比が約 6 と、差応力が大きな結果となった。また、ブレイクアウトの発生条件を加味しない場合は、最大主応力が 6MPa 程度であり、推定土被り圧と同程度の値を示す。また、最大主応力と最小主応力の比も、2.7 程度であり、主応力差がそれほど生じなかったという観点から見ると、地上からの調査段階の結果に整合する傾向となった。主応力の方位に関しては、両ケースにおいて、最大主応力が北方向から約 30° 西寄りで、鉛直方向から約 45° 傾いた結果となった。

幌延深地層研究センター：〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進 432-2

※ 技術開発協力員

* 大成・大林・三井住友特定建設工事共同企業体

**In Situ Stress Measurements at the 350 m Pumping Station in the Horonobe Underground
Research Laboratory**

Kazuhei AOYAGI, Akitaka SAKURAI[※] and Sumio NIUNOYA^{*}

Horonobe Underground Research Department
Horonobe Underground Research Center
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received June 19, 2015)

The objective of this report is to investigate the three dimensional stress state in the 350 m pumping station at the Horonobe Underground Research Laboratory. For the measurement, four boreholes were drilled; three 20.0m long boreholes and one 6.0m long borehole. Hydraulic fracturing was applied as a stress measurement method. For the analysis, shut-in pressure of transverse fractures, reopening pressure of longitudinal fractures and stress condition causing borehole breakouts were integrated into the equation; then stress state was calculated by inversion technique.

As a result, considering the stress condition causing breakouts, the value of the maximum principal stress (σ_1) was 12 MPa, two times larger than overburden pressure. Furthermore, the ratio between σ_1 to minimum principal stress (σ_3) was 6. On the other hand, without considering the stress condition causing breakout, σ_1 was 6MPa; almost same as overburden pressure. The ratio between σ_1 to σ_3 was 2.7, thus the result was almost coincided with the result of surface-based investigation. The orientation of the σ_1 was N30°W, dipping 45° from vertical axis.

Keywords: In Situ Stress, Hydraulic Fracturing, Borehole Breakouts, Fracture Observation

※Collaborating Engineer

* Taisei-Obayashi-MitsuiSumitomo Joint Venture Group

目 次

1. はじめに.....	1
2. ボーリング孔掘削.....	2
2.1 ボーリング孔孔口の位置.....	2
2.2 ボーリング資機材.....	4
2.3 ボーリング資機材の設置.....	5
2.4 給電・給排水.....	6
2.5 メタンガスの湧出および酸欠対策.....	8
2.6 ボーリング孔口切.....	10
2.7 ボーリング孔掘削.....	10
2.8 掘削の経過.....	10
3. 地質記載.....	15
3.1 コア観察結果.....	15
3.2 BTV 観察結果.....	23
4. 水圧破砕法による初期地圧測定.....	100
4.1 試験装置.....	101
4.2 試験方法.....	103
4.3 解析方法.....	107
4.4 試験結果.....	112
4.5 初期地圧の評価.....	156
4.6 水圧破砕法による測定結果まとめ.....	170
5. コア物性測定試験.....	171
5.1 試験概要.....	171
5.2 力学試験方法.....	172
5.3 試験結果.....	179
6. 結言.....	188
謝辞.....	189
参考文献.....	189
付録 CD-ROM	

Contents

1. Introduction	1
2. Core boring	2
2.1 Location of the borehole	2
2.2 Carring-in the materials and the equipments	4
2.3 Setting the equipments	5
2.4 Power and water supply&drainage	6
2.5 Countermeasure against the methane gas and the lack of the oxygen	8
2.6 Starting the core boring	10
2.7 State of the boring	10
2.8 Boring data	10
3. Statement of the geology	15
3.1 Core investigation	15
3.2 BTV investigation	23
4. In situ stress measurement by the hydraulic fracturing technique	100
4.1 Equipment	101
4.2 Method	103
4.3 Analysis	107
4.4 Result	112
4.5 Evaluationg the in situ stress	156
4.6 Conclusion of the measurement	170
5. Laboratory rock core test	171
5.1 Outline of the test	171
5.2 Method of the test	172
5.3 Result of the test	179
6. Conclusion	188
Acknowledgement	189
References	189
Appendix CD-ROM	

1. はじめに

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構は、北海道天塩郡幌延町において新第三紀堆積岩を対象として幌延深地層研究計画と称する地下施設建設を伴う研究プロジェクトを進めている。この計画は、平成 12 年度から開始し、全体で約 20 年間の研究プロジェクトであり、地上からの調査研究段階（第 1 段階）、坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第 2 段階）および地下施設での調査研究段階（第 3 段階）の 3 つの段階から構成される。

地上からの調査研究段階では、幌延町北進地区に 3km 四方程度の領域を研究所設置地区として選定し、この領域およびその周辺を対象に地上物理探査、地質調査、ボーリング調査などを実施した¹⁾。一般に地下には、土壌や岩盤の自重のほか、地殻変動などにより初期地圧と呼ぶ応力が生じている。初期地圧は、地下構造物の合理的で安全な設計・施工法の検討や坑道周辺岩盤中に発生する掘削影響領域の性状と密接な関係があることから、地上からのボーリング調査において研究所設置地区内に分布している初期地圧の評価を行った。

初期地圧の測定方法は、主に応力解放法や水圧破碎法などのボーリング孔を利用した原位置での計測と、AE 法・DSCA 法・DRA 法などのボーリング孔から採取したコアを利用した計測（コア法と呼ばれる）とに大別される。地表から実施される水圧破碎法の場合、主応力の 1 つがボーリング孔軸に等しく、原位置に作用する土被り圧と等しいと仮定され解析されるため、水平面内の主応力のみが同定され地下深部に作用する正確な初期地圧状態を知ることが出来ない。地下深部に作用する三次元的な応力状態を評価可能な手法である応力解放法は、深部に位置する調査坑道などからの水平ボーリング孔を利用した計測がほとんどを占めており、地表からの計測は技術的な困難さからほとんどなされていない。そのため、第 2 段階の調査段階においては、地下施設を利用した三次元初期地圧状態の正確な評価を実施し、さらに地上からのボーリング調査において評価した初期地圧の妥当性の確認ならびに更新を目的とした。

平成 23 年度までに、幌延深地層研究センターの 140m 調査坑道の 2 か所、250m 調査坑道の 3 か所で水圧破碎試験や応力解放法による初期地圧測定を実施し、地上からの調査段階で得られた地圧状態との比較と、設定した地質環境モデルの妥当性について検討してきた²⁾。平成 24 年度から 26 年度は、350m 調査坑道の 2 か所で水圧破碎法と応力解放法により初期地圧を測定している。本件では、350m 調査坑道のうち、ポンプ座で実施された水圧破碎試験結果の詳細について報告する。なお、本件で報告する水圧破碎試験は、平成 24 年 9 月 24 日から 10 月 26 日の期間に実施した。

2. ボーリング孔掘削

2.1 ボーリング孔孔口の位置

水圧破碎法による初期地圧の評価を目的として、350m 坑道ポンプ座に 12-P350-M01 孔（水平）、12-P350-M02 孔（水平）、12-P350-M03 孔（傾斜）および 12-P350-M04 孔（水平）を掘削した。これら 4 本のボーリング孔の方位（真北基準）・傾斜、掘削深度などは表 2.1 に示すとおりである。表 2.2 には、各ボーリング孔の孔口座標を示す。図 2.1 は、各ボーリング孔の配置図である。12-P350-M01 孔の孔口は切羽の中央部に、12-P350-M02 孔および 12-P350-M04 孔の孔口は切羽に向かって坑道左側壁に、そして 12-P350-M03 孔の孔口は坑道右側の床面に設定した。図 2.2 に各ボーリング孔の孔口位置の現場状況写真を示す。

表 2.1 350m 坑道ポンプ座に掘削したボーリング孔

孔 名	方位・傾斜	掘削深度(m)	備 考
12-P350-M01 孔	S50°W 水平から上向き 5°	21.5	・φ76 コアパック使用 ・水圧破碎法を適用
12-P350-M02 孔	S30°E 水平から上向き 5°	21.5	・φ76 コアパック使用 ・水圧破碎法を適用
12-P350-M03 孔	N30°E 水平から下向き 54°	21.5	・φ76 コアパック使用 ・水圧破碎法を適用
12-P350-M04 孔	S30°E 水平から上向き 5°	6.1	・φ76 コアパック使用 ・水圧破碎法を適用

表 2.2 各ボーリング孔の孔口座標（平面直角座標系）

孔名	X	Y	Z
12-P350-M01	116173.04	-30751.66	349.25
12-P350-M02	116172.75	-30748.26	349.25
12-P350-M03	116176.16	-30749.07	350.35
12-P350-M04	116173.75	-30746.53	349.25

– 3 –

2.2 ボーリング資機材

ボーリング資機材は、東立坑櫓内まで 2t トラックで運搬し、東立坑のキブルで搬入した。地上において付属の天井クレーン、移動台車を利用して立坑キブルのフックに資機材を玉掛けした。立坑の 350m 深度においては、東坑道への横引き作業を伴うため、安全に作業をおこなえるように資機材の梱包を行った。なお、キブルの最大吊荷寸法には制約があるので、搬入資機材はすべてキブルの最大収納寸法以下に梱包した。表 2.3 に使用機材の一覧を示す。

表 2.3 使用機材一覧表

資機材名称	メーカー・型式	公称能力 および規格	寸法(高さ×幅×奥行) あるいは長さ(mm)	重量あるいは 数量
試錐機	TEC-1	5.5kW (防爆)	1400×730×1205	4900N
2 インチ防爆水中ポンプ		100V×1.5kW		1 台
防爆送風機		100V×510W	φ300	1 台
防爆ダクト			φ300	35m
配電盤			1100×600×890	490N
タンク			920×920×1220	1 基
ドラム缶		100l		1 缶
92mm シールド管			1500	3 本
92 mm メタルクラウン			150	1 個
40.5 mm ロッド			1000	22 本
40.5 mm ロッド			500	2 本
40.5 mm ロッド			300	1 本
76 mm コアパック			1500	1 本
アウターチューブ他	掘削ツール		400×500×2500**	1 個
コア箱		5m/箱		15 箱
水圧破碎試験装置 押し込み器具他	(株)明間 ボーリング		300×200×1800	1 個
水圧破碎パッカー	(株)明間 ボーリング		3500	2 本
小型プランジャポンプ	日本精密 科学(株)	470ml/min	570×380×320	490N

**：縦吊り

2.3 ボーリング資機材の設置

キブルから資機材設置場所までの運搬・設置作業は、東立坑深度 350m 坑底での機材の取り出し・引き込み、および東立坑坑底から 350m 坑道ポンプ座への機材搬入・設置の 2 段階でおこなった。その作業手順は次の通りである。

- (1) キブルから東立坑坑底に資機材を取り出し、仮置きする。このとき、機材に体を挟まれないように、できるだけ広い作業スペースを確保するとともに、統一合図の遵守と搬入手順の周知徹底をおこなった。
- (2) 立坑坑底に仮置きした資機材のうち、試錐機などの重量物は、ローラコンベアーに載せて東坑道坑口の天井クレーン直下まで移動させたあと、天井クレーンで吊上げ、ポンプ座まで運搬した。他の軽い資材は人力によってポンプ座まで運搬した。ポンプ座への資機材の搬入・設置は、ボーリングの資機材、タンクおよび試錐機の順に行った。

図 2.3 にポンプ座における資機材の配置図を示す。試錐機のベースは、アンカーボルトによってコンクリート床面に固定した。350m 坑道ポンプ座に、図 2.3 に示すように配電盤を設置し、試錐機、試錐ポンプ等の電気設備に配電した。配線は歩行や小資材運搬の邪魔にならないように配慮した。また、カラーコーンとコーン・バーによって作業区域境界を明確に表示した。

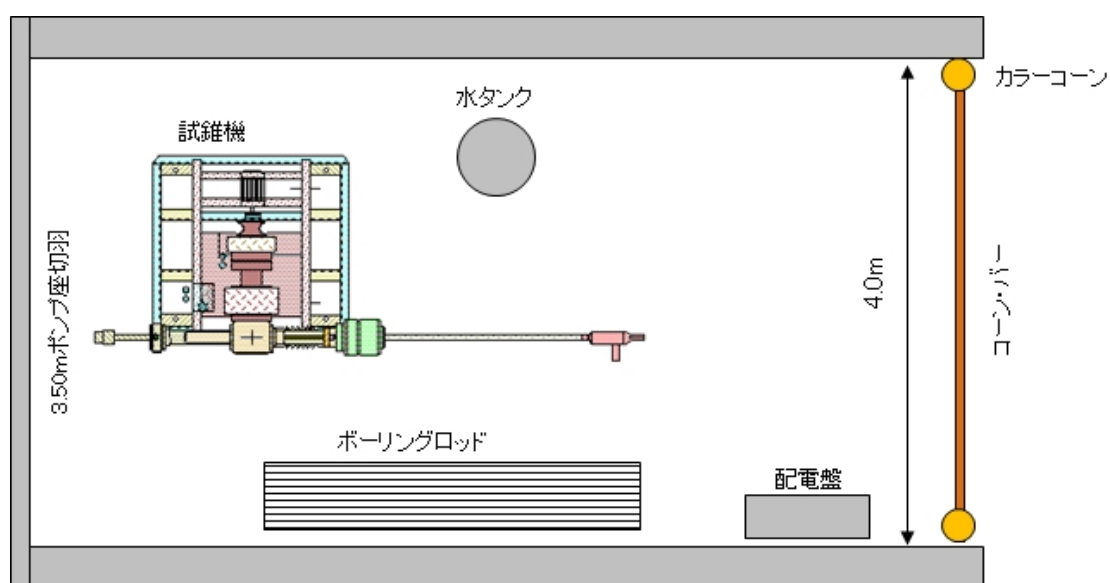


図 2.3 ボーリング資機材の設置平面図

2.4 給電・給排水

(1) 給電

ボーリング孔掘削時に使用した電力は、表 2.4 に示すとおりである。図 2.4 に示すように、電源は 350m 東坑道に設置されている分電盤からキャプタイヤケーブルを介して 350m 坑道ポンプ座の配電盤まで導いた。

表 2.4 ボーリング孔掘削時の使用電力

種類	電圧(V)	台数	消費電力(kW)
試錐機	三相 200	1	5.5
2 インチ防爆水中ポンプ	単相 100	1	0.4
換気ファン	単相 100	1	0.5
照明	単相 100	2	0.3
		合計	6.7

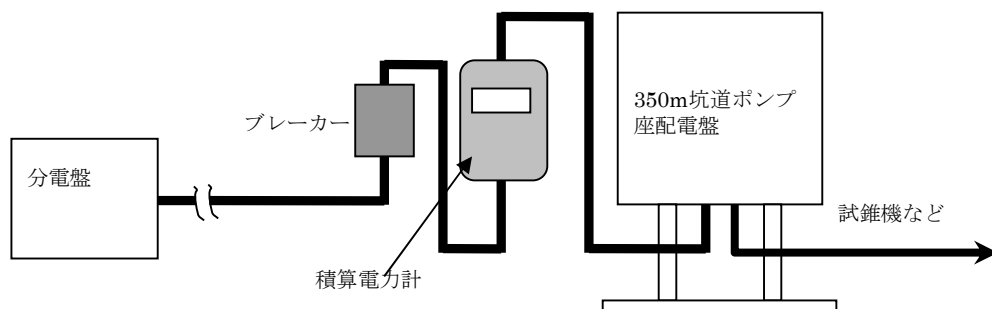


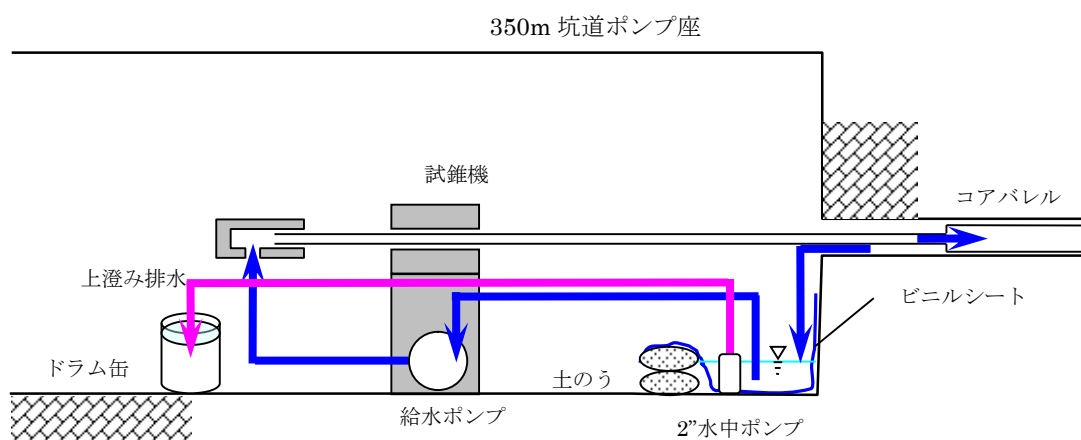
図 2.4 給電系統図

(2) 給水および排水

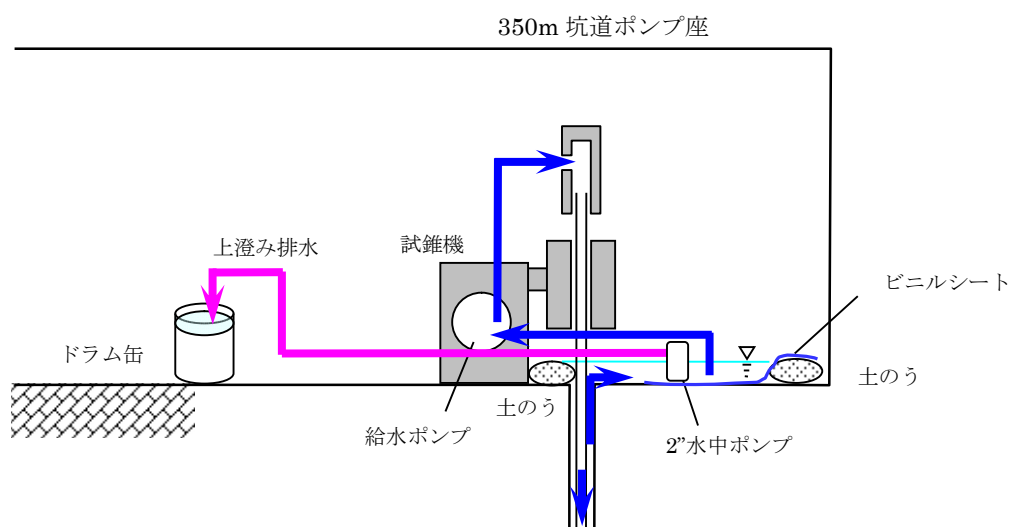
ボーリングのための掘削水（清水）は、東立坑坑底の給水箇所から給水ホースによって 350m 坑道ポンプ座まで導き、原則として以下に示す手順で循環使用した。

- ①掘削水を土のうとビニルシートで作った釜場に溜める。
- ②図 2.5 に示すように、釜場に溜めた水を試錐機に内蔵した給水ポンプによってビット先端まで送水しながらボーリングを行なう。
- ③孔底から孔口に戻った掘削水を再び釜場に溜め、給水ポンプによって循環させる。

排水は 2 インチ防爆水中ポンプでドラム缶にポンプアップし、上澄みのみを指定された仮受槽に排水するものとした。タンクに沈殿したスライムは土のう袋に回収し、坑外に搬出・処分した。



(a) 水平ボーリング孔の給水系統図



(b) 下向きボーリング孔の給水系統図

図 2.5 水平および下向きボーリング孔の給水系統図（断面図）

2.5 メタンガスの湧出および酸欠対策

350m 坑道ポンプ座の換気系統を図 2.6 に示す。3.7kW 送風機によって送り込まれた新鮮な送気は、送風管を通じて 350m 坑道ポンプ座切羽に送風され（ 印参照）、当該切羽付近のボーリング孔から発生する可能性のある可燃性ガスを希釈した後、坑外に排出される。

350m 坑道ポンプ座でボーリング作業をおこなうときは、図 2.6 に示すようにボーリング孔口に接近して吸気風管と可燃性ガスセンサー（ 印参照）を設置した。吸気風管に接続した小型換気ファンは、ボーリング掘削中は常時運転し、東坑道まで可燃性ガスを誘導・排出した（ 印参照）。表 2.5 は、小型換気ファンの仕様である。

表 2.5 小型換気ファン（防爆型送風機）の仕様

メーカー	サンキテクノス
型 式	PFE-282Y
風量	60m ³ /min
静圧	480Pa
電源	単相 100V、0.5kW
風管	直径 300mm、ジャバラ型
台数	1 台

坑内作業中は、防爆区間であるボーリング孔口近傍の 2 箇所以上にメタンガスおよび酸素濃度計を設置し、メタンガス濃度と酸素濃度を常時監視した。局所的な吸気によるメタンガスの排出に加え、さらに以下に示す 2 つの基本ルールに従って坑内作業を行なうものとした。

【メタン・酸素濃度の測定】

- ・酸欠作業主任者により、朝の作業開始前、昼休み後の作業開始前および作業終了後にメタン・酸素濃度の測定を実施した。
- ・コアチューブ引上げごとに腰高においてメタン・酸素濃度を測定した。
- ・メタンガス濃度が 0.25 vol%以下のときは通常作業をおこなうが、それ以上の場合は表 2.6 の対応基準に従った。

【危険作業の除去】

- ・入坑前の火気類の持ち込みを禁止した。
- ・使用時以外の電源は停止した。
- ・原則的に防爆型機器を使用した。
- ・作業に支障のないボーリング孔口は閉鎖した。

表 2.6 メタンガス濃度対応基準*

メタンガス濃度対応基準値(vol%)	作業基準
0.25～0.5	火気使用作業の禁止 非防爆電動工具の使用禁止
0.5～1.0	火薬取り扱い作業の禁止
1.0	第1次警報（パトライト点灯）
1.0～1.5	作業員退避
1.3	第2次警報（パトライト点灯＋ブザー）
1.5 以上	坑内電源遮断

*：幌延深地層研究計画地下施設工事（第Ⅰ期）施工要領書（東立坑・換気立坑 立坑一般部）より抜粋

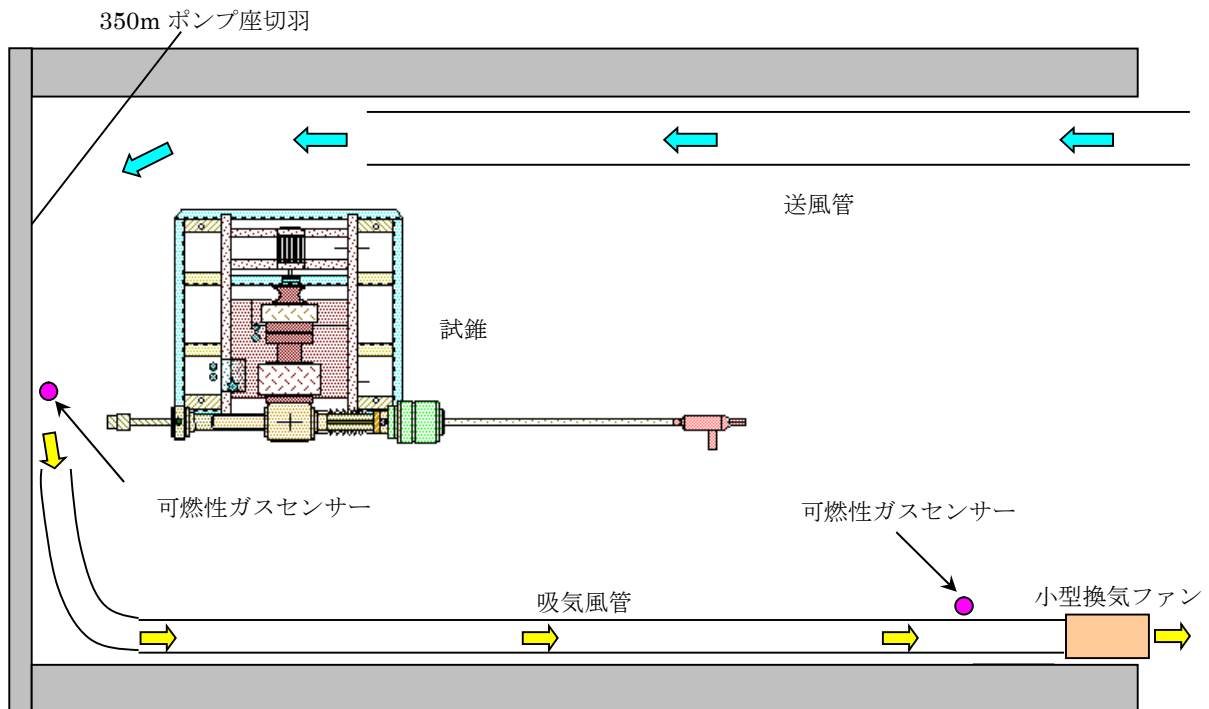


図 2.6 350m ポンプ座での初期地圧評価における換気計画図（平面図）

2.6 ボーリング孔口切

試錐機のスピンドルを所定の方位および傾斜角度に設定し、350m 坑道ポンプ座壁面の吹き付けコンクリートあるいは床コンクリートを 92mm シールド口切ビット（メタルクラウン）によって約 1.5m 掘削した。1.5m 以深のボーリング孔を掘削する前に、孔口に長さ 1.5m の片側ねじ切りのケーシングを挿入し、ケーシング外周と孔壁の間隙をセメントモルタルで充填・固定した。ただし、12-P350-M04 孔のみ口元孔の長さを 0.8m としたため、ケーシングの長さは 0.8m である。

2.7 ボーリング孔掘削

深度 1.5m 以深の掘削は、76mm 二重管掘削（コア径 55mm）装置のコアパックを使用しておこなった。掘削編成は、76mm メタルクラウンビット＋アウターチューブ＋40.5mm ロッドを基本とした。40.5mm ロッドは、狭い坑内で作業しやすいように原則として長さ 1.5m ものを使用した。掘削水は、土のうを積んで作った釜場に坑内湧水を溜め、試錐機に内蔵した給水ポンプでビット先端に送水するとともに、孔口から釜場に還流した掘削水を前記給水ポンプでくみ上げ、再度送水して循環させた。ボーリング孔掘削中、各孔で顕著な湧水および逸水は認められなかった。掘削作業終了後、湧水・ガスの発生を低減させるため、ケーシング先端に高圧バルブ付きのステンレス製キャップをねじ込んでボーリング孔口を密閉した。

2.8 掘削の経過

各ボーリング孔掘削時のポンプ流量、ポンプ圧力、掘進荷重およびスピンドル回転数を図 2.7 から図 2.10 に示す。

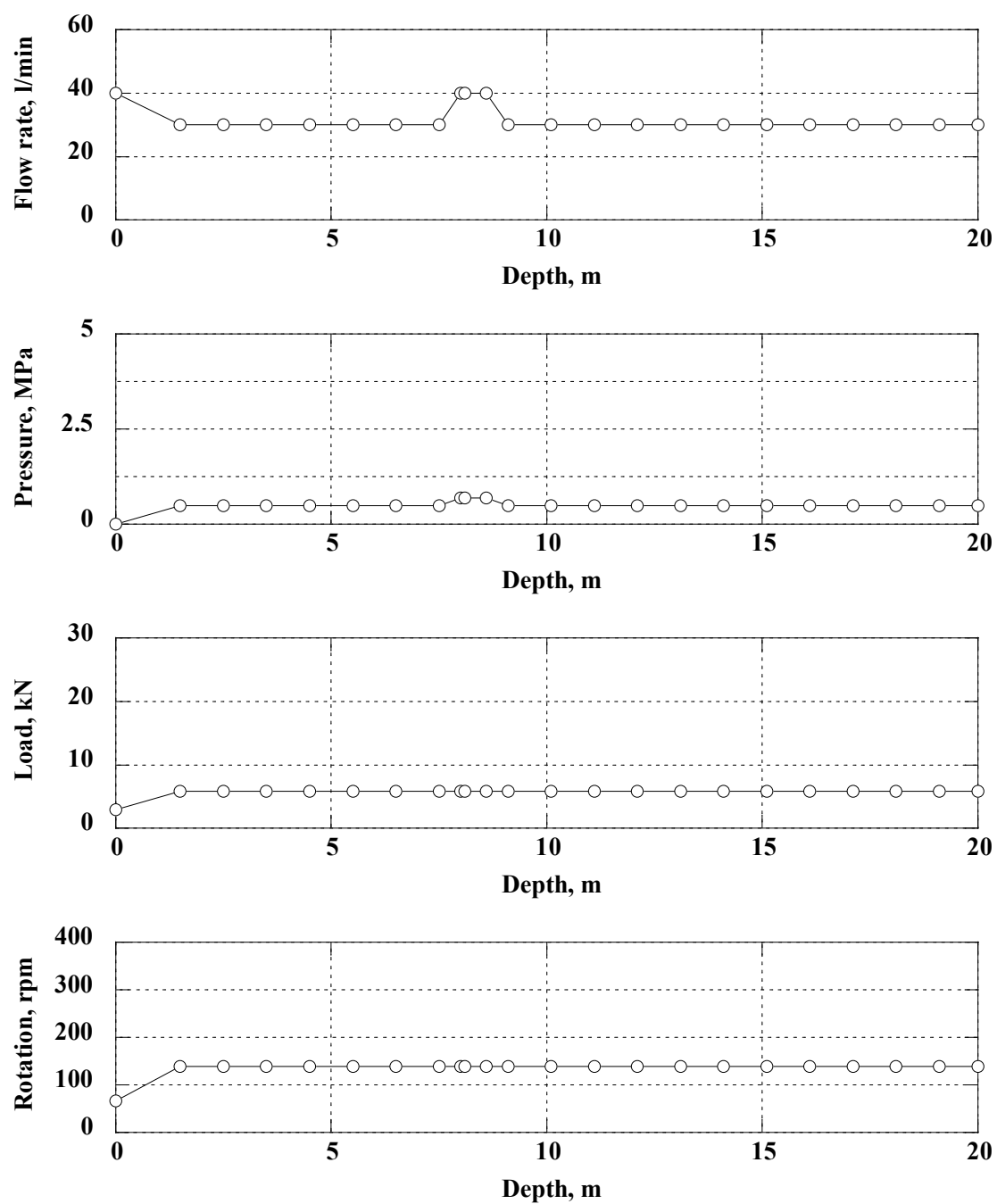


図 2.7 12-P350-M01 孔掘削時のポンプ流量、ポンプ圧力、掘進荷重およびスピンドル回転数と掘削深度との関係

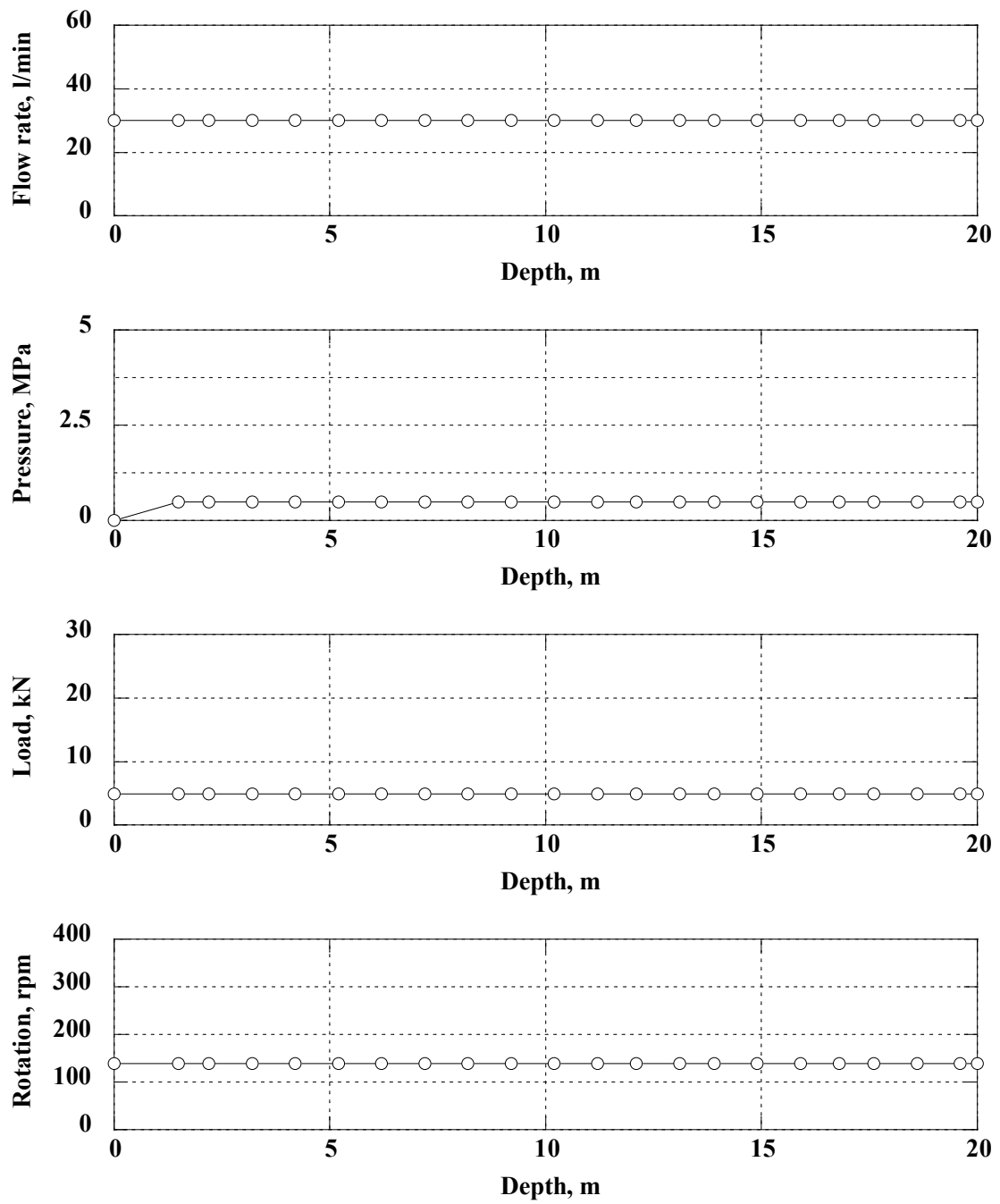


図 2.8 12-P350-M02 孔掘削時のポンプ流量、ポンプ圧力、掘進荷重およびスピンドル回転数と掘削深度との関係

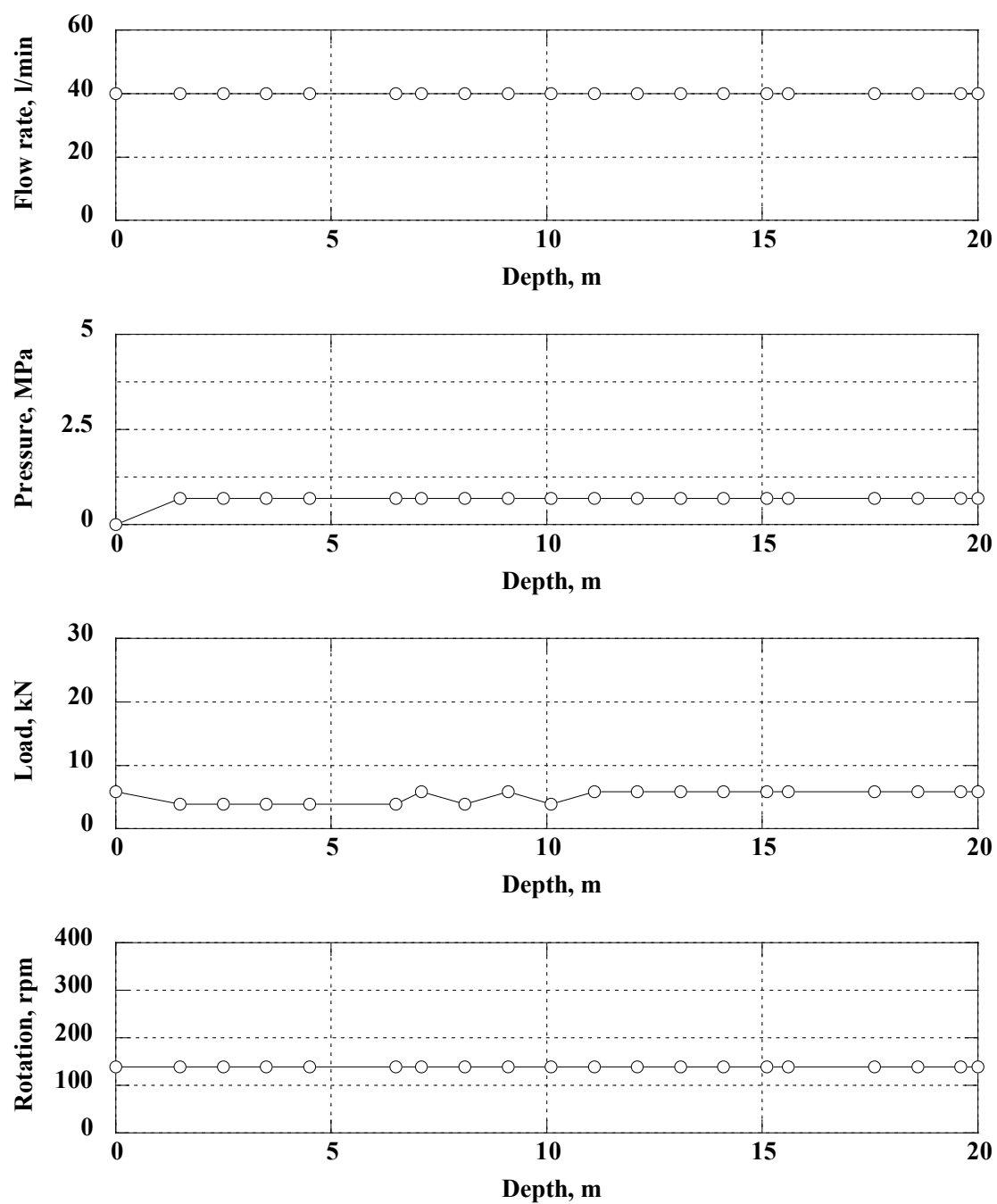


図 2.9 12-P350-M03 孔掘削時のポンプ流量、ポンプ圧力、掘進荷重およびスピンドル回転数と掘削深度との関係

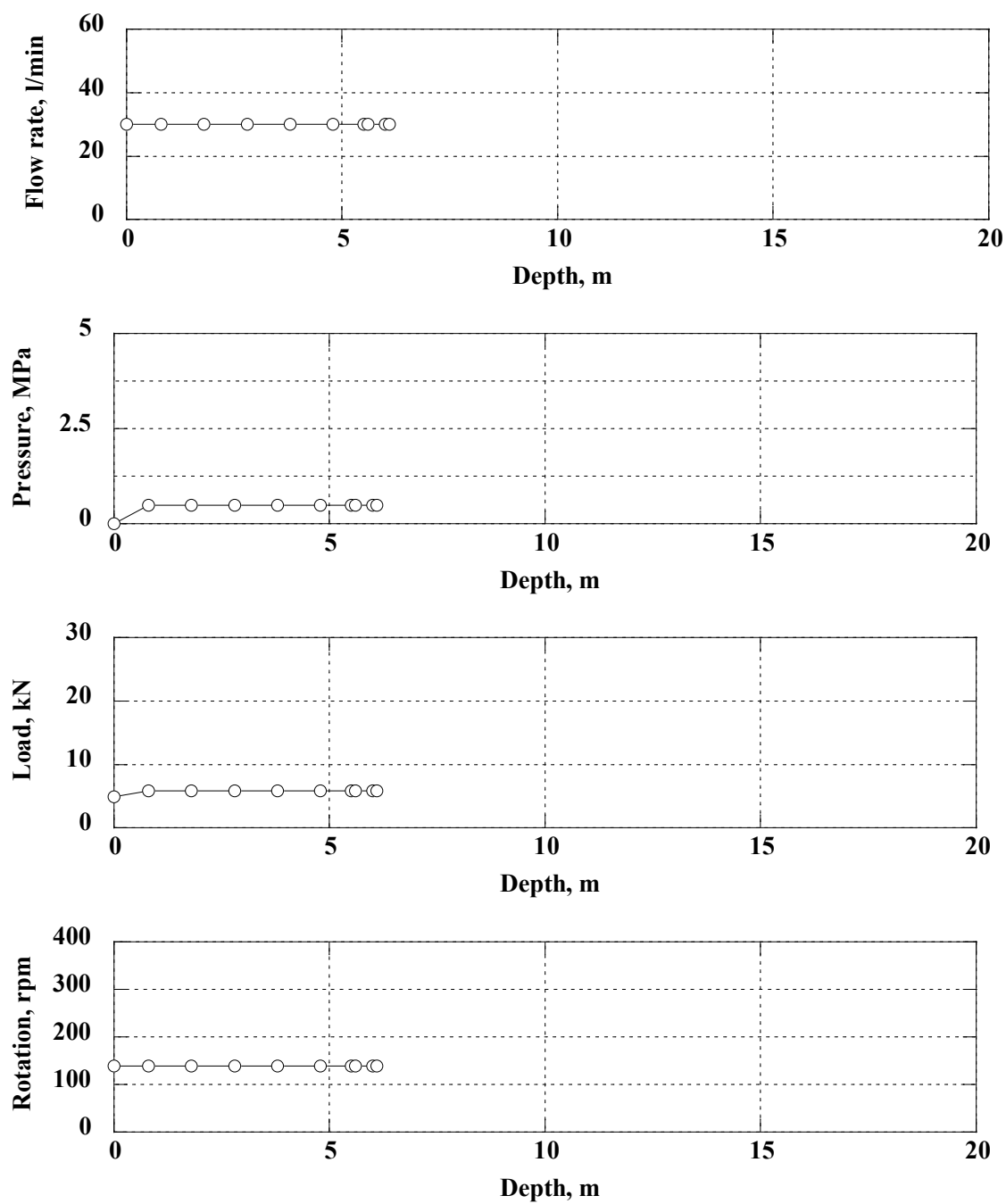


図 2.10 12-P350-M04 孔掘削時のポンプ流量、ポンプ圧力、掘進荷重およびスピンドル回転数と掘削深度との関係

3. 地質記載

3.1 コア観察結果

初期地圧測定孔の 12-P350-M01～04 孔の計 4 孔についてコア観察を実施し、その結果を取りまとめた。観察結果をまとめた総合柱状図を図 3.1～3.4 にそれぞれ示す。表 3.2 には割れ目リスト一覧を示した。なお、コアの 1/5 スケール記載柱状図については、付録 CD-ROM として別途電子データに収録した（付録 6）。

(1) 岩相

各孔、帯緑暗灰色を呈する珪質泥岩より構成される。全区間にわたり弱い生物擾乱が発達する。均質で砂・礫等の粗粒碎屑物の混入は少ない。層理構造は、不明瞭ではあるが色調変化による層構造や砂粒子等の配列などから読み取ることができる。各孔の層理構造の孔芯短軸に対する交差角を以下に示す。

- ・ 12-P350-M01：約 45°～55°斜交
- ・ 12-P350-M02：約 60°～75°斜交
- ・ 12-P350-M03：約 5°～25°斜交
- ・ 12-P350-M04：約 60°～75°斜交

(2) エコーチップ反発硬度および色彩値

エコーチップ反発強度(L 値)および色彩値の測定結果を総合柱状図(図 3.1～3.4)にグラフ化し、各測定値の平均値を表 3.1 に示した。

表 3.1 エコーチップ反発強度(L 値)および色彩値(L*、a*、b*)の平均

孔名	硬度	色彩値		
	L 値	L*	a*	b*
12-P350-M01	473	24.2	0.5	6.5
12-P350-M02	471	24.8	0.4	6.2
12-P350-M03	449	23.9	0.4	6.8
12-P350-M04	465	24.3	0.4	6.4

色彩値 L*：明度、a*：正の値が赤、負の値が緑、b*：正の値が黄色、負の値が青

測定間隔：10cm

各孔の硬度 (L 値) と色調とも大きな変化はなく均質であった。硬度 (L 値) の平均は 465～473 を示し、色彩値の L*(明度)の平均は 23.9～24.8 であった。

(3) コア形状および岩盤等級

12-P350-M01 : 本孔は短柱状～長柱状のコアを主体とし、全体的にディスクキングの発達、応力解法により分離したとみられる割れ目が連続して認められる。2mabh 以浅（口元付近）、7～12mabh 間と 15～16mabh 間は比較的ディスクキングの発達が弱い。岩片状コアを示す区間は、1mabh 以浅（口元付近）にのみ認められる。岩盤等級は、ディスクキングが比較的発達する 2～3、12～13、14～15、16～21mabh 区間では CM-M であり、ディスクキングの発達が弱いその他の区間では CM-H であった。

12-P350-M02 : 本孔は長柱状コアを主体とし、その他の孔と比べディスクキングの発達がほとんど認められない。部分的に岩片状コアを示す区間が認められる。岩盤等級は、ディスクキングが発達する 16～17mabh 区間のみを除いて、CM-H であった。

12-P350-M03 : 本孔は短柱状～長柱状のコアを主体とし、全体的にディスクキングの発達、応力解法により分離したとみられる割れ目が連続して認められる。岩片状コアを示す区間は、1.5mabh 以浅（口元付近）と 6～12mabh 区間に数箇所認められる。岩盤等級は、ディスクキングの発達が弱い 2～3、9～11mabh 区間を除いて CM-M。1mabh 以浅（口元付近）については岩片状コア主体であり CM-L である。

12-P350-M04 : 本孔は短柱状～長柱状のコアを主体とし、全体的にディスクキングの発達、応力解法により分離したとみられる割れ目が連続して認められる。岩片状コアを示す区間は、1mabh 以浅（口元付近）にのみ認められる。2mabh 以浅（口元付近）、4.5mabh 以深は比較的ディスクキングの発達が弱い。岩盤等級は、ディスクキングが比較的発達する 2～4.5mabh 区間では CM-M であり、ディスクキングの発達が弱いその他の区間では CM-H であった。

(4) RQD 及び割れ目本数

12-P350-M01 : 割れ目本数は 0 ～ 3 本/m、平均 1 本/m。割れ目の集中する区間は、特に認められない。認められる割れ目の成因は、引張性、剪断性または引張性と剪断性複合割れ目であった。RQD は、0～100 の範囲を示し、平均は 63 であった。

12-P350-M02 : 割れ目本数は 0 ～ 3 本/m、平均 1 本/m。割れ目の集中する区間は、特に認められない。認められる割れ目の成因は、引張性、剪断性または引張性と剪断性複合割れ目であった。RQD は、17～100 の範囲を示し、平均は 91。長柱状コアを主体であり、全体的に高い値を示す。

12-P350-M03 : 割れ目本数は 0 ～ 2 本/m、平均 1 本/m 以下。割れ目の集中する区間は、特に認められない。認められる割れ目の成因は、引張性または剪断性割れ目であった。RQD は、0～76 の範囲を示し、平均は 27。全体的にディスクキングが発達するため、全体的に低い値を示す。

12-P350-M04 : 割れ目本数は 0 ～ 3 本/m、平均 1 本/m。割れ目の集中する区間は、特に認められない。認められる割れ目の成因は、引張性割れ目のみであった。RQD は、7～86 の範囲を示し、平均は 59 であった。

*各孔口元付近で認められる引張性割れ目については、ポンプ座掘削影響による緩み割れ目であったと推察される。

(5) 断層岩

全孔を通し、断層岩は認められない。

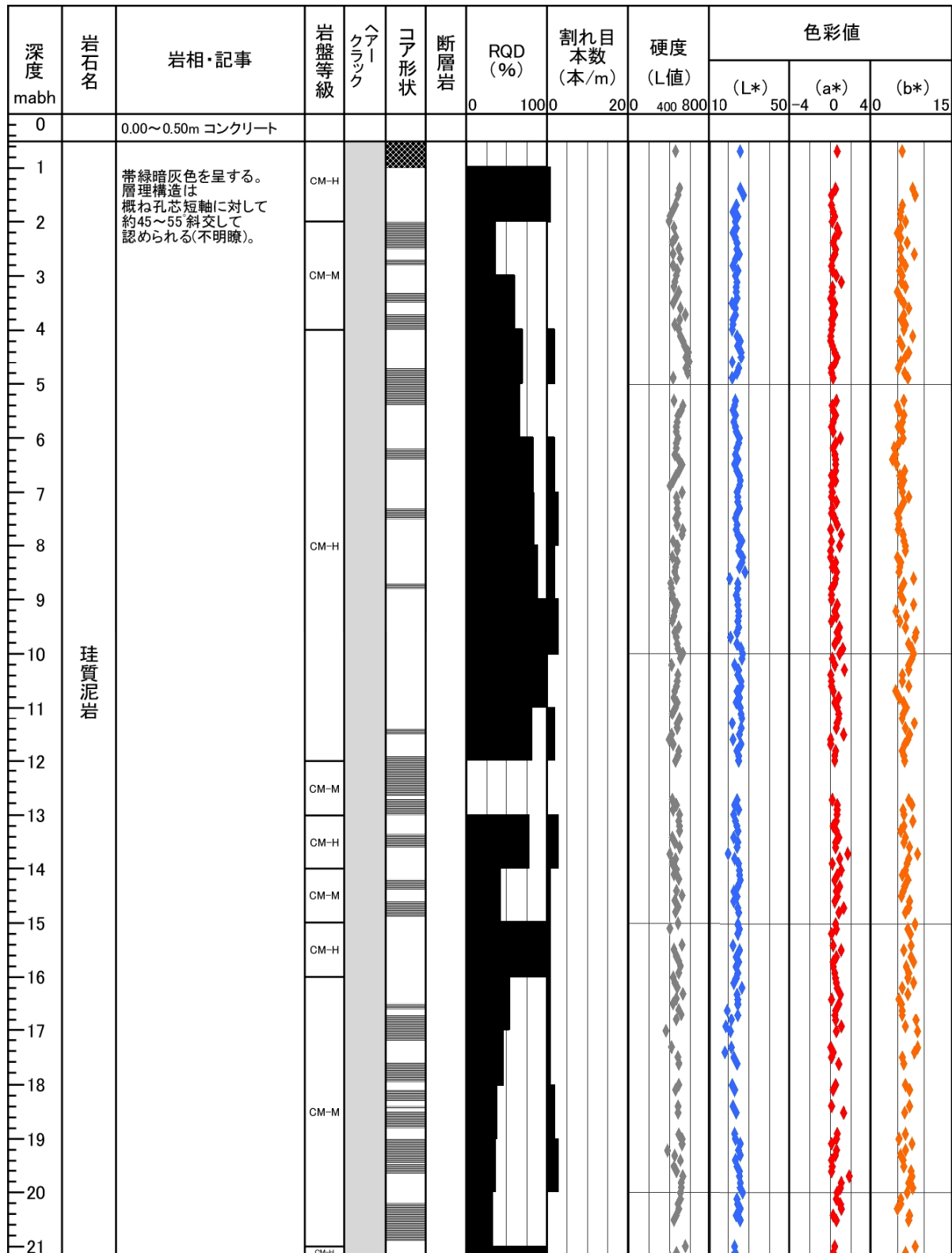


図 3.1 総合柱状図 (1) [12-P350-M01]

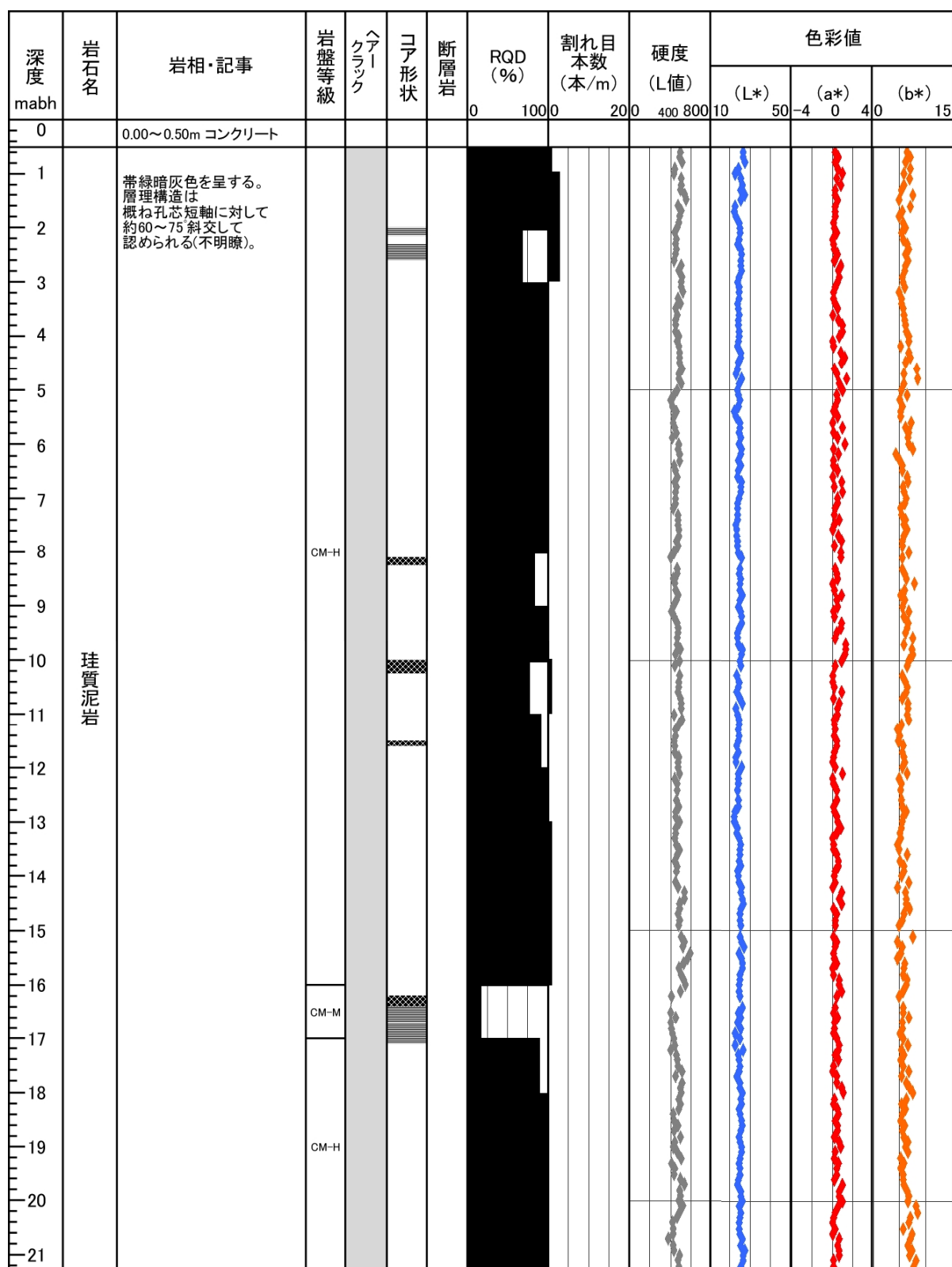


図 3.2 総合柱状図 (2) [12-P350-M02]

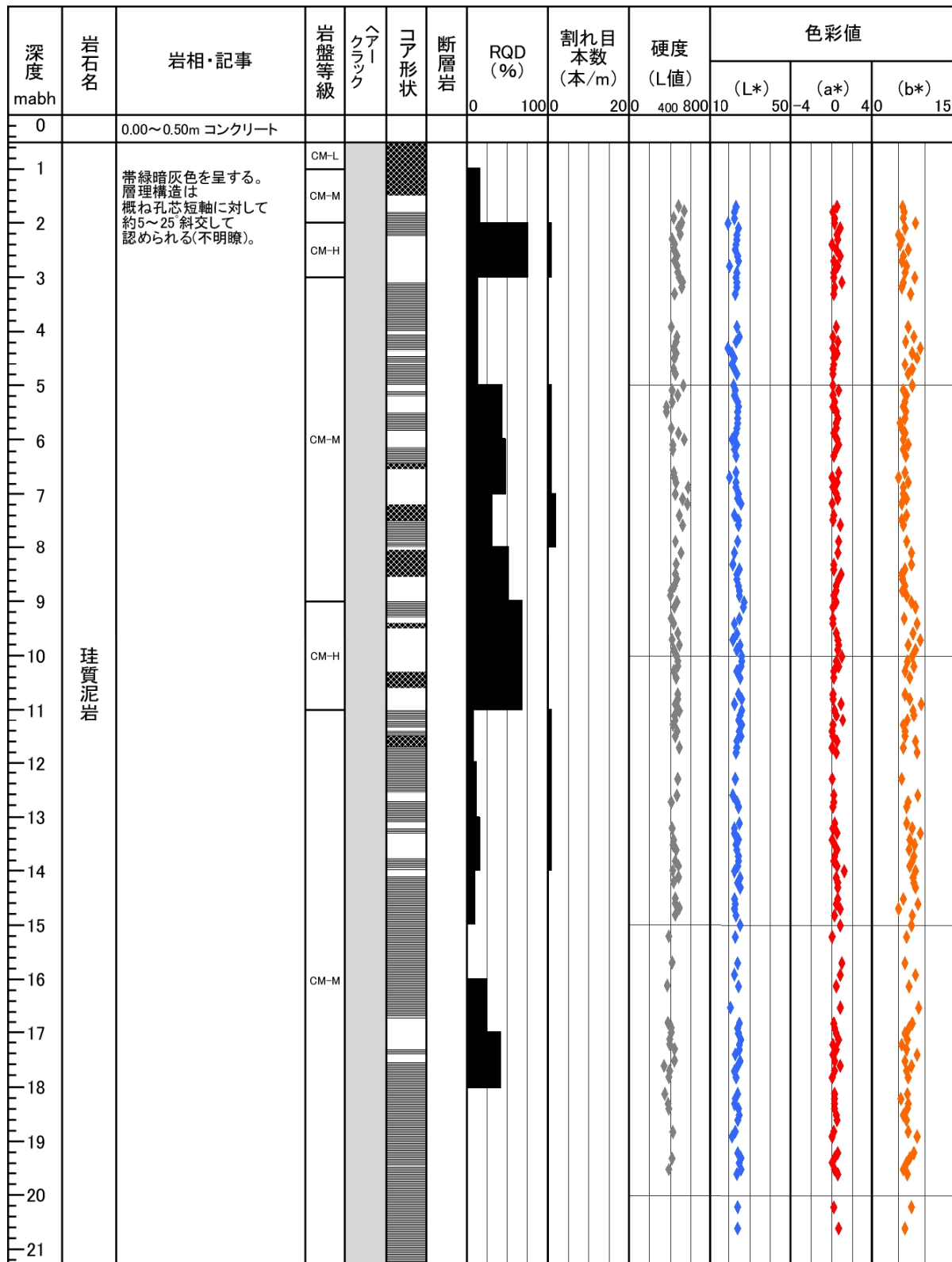
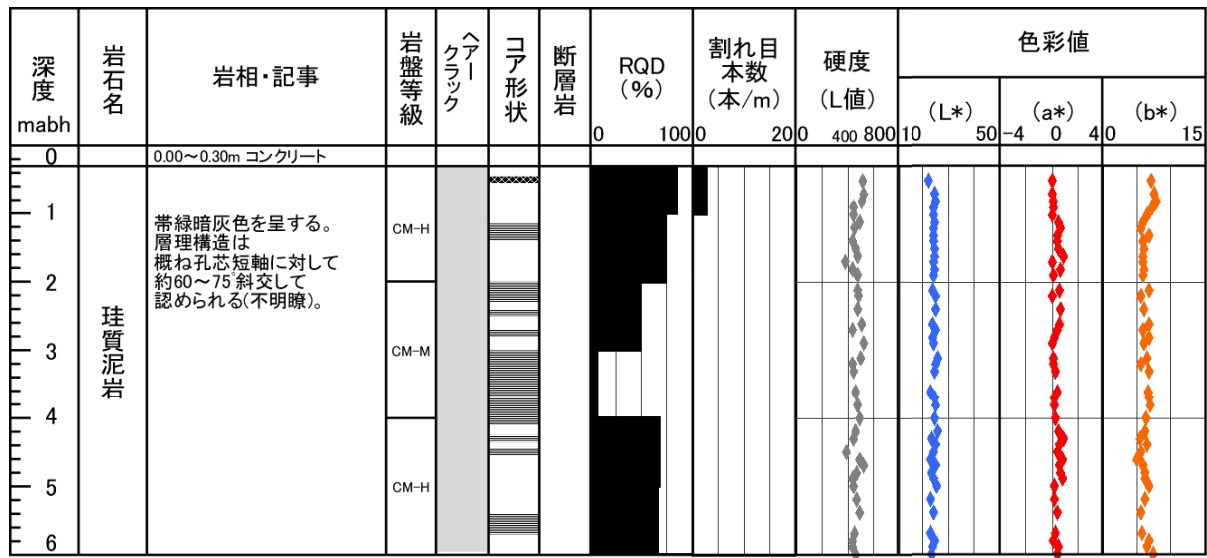


図 3.3 総合柱状図 (3) [12-P350-M03]



(ヘアークラック) あり なし

(コア形状) 破碎状コア(岩片状, 角礫状, 細礫状, 土砂状, 粘土状等) ディスキング

(断層岩) 断層角礫 断層ガウジ 葉片状岩片化

(色彩値) L*: 明度, a*: 正の値が赤, 負の値が緑, b*: 正の値が黄色, 負の値が青

図 3.4 総合柱状図 (4) [12-P350-M04]

表 3.2 割れ目リスト

12-P350-M01								
割れ目 番号	中央深度 (mabh)	記載深度(mabh)		タイプ	傾斜角度	割目面の特徵	断層岩	成因
		上端	下端					
1-1	1.30	1.30	1.30	f	0	-,-,-	-	T
4-1	4.47	4.40	4.53	f	75	-,-,-	-	T
4-2	4.50	4.45	4.55	f	50	SS,-,-	-	T,S
6-1	6.65	6.62	6.68	f	50	SS,-,-	-	T,S
6-2	6.83	6.80	6.85	f	50	SS,-,-	-	T,S
7-1	7.03	7.00	7.05	f	40	SS,-,-	-	S
7-2	7.72	7.69	7.74	f	50	-,-,-	-	T
7-3	7.99	7.97	8.00	f	40	SS,-,-	-	S
8-1	8.14	8.12	8.16	f	40	SS,-,-	-	T,S
8-2	8.95	8.93	8.97	f	40	SS,-,-	-	T,S
9-1	9.35	9.33	9.37	f	40	-,-,-	-	T
9-2	9.63	9.61	9.64	f	35	-,-,-	-	T
9-3	9.83	9.80	9.86	f	45	SS,-,-	-	T,S
11-1	11.11	11.09	11.12	f	25	SS,-,-	-	T,S
11-2	11.79	11.77	11.81	f	40	-,-,-	-	T
13-1	13.24	13.21	13.27	f	35	SS,-,-	-	T,S
13-2	13.87	13.84	13.89	f	40	SS,-,-	-	T,S
13-3	13.89	13.86	13.91	f	40	SS,-,-	-	T,S
14-1	14.48	14.45	14.50	f	35	SS,-,-	-	T,S
15-1	15.57	15.55	15.59	f	25	SS,SL(120),-	f-gs	S
16-1	16.20	16.18	16.22	f	30	SS,-,-	-	S
17-1	17.18	17.17	17.18	f	5	-,-,-	-	T
18-1	18.46	18.46	18.46	f	30	SS,-,-	-	S
18-2	18.54	18.52	18.55	f	30	SS,-,-	-	S
19-1	19.12	19.06	19.17	f	70	SS,-,-	-	T,S
19-2	19.34	19.27	19.40	f	55	SS,-,-	-	T,S
19-3	19.61	19.57	19.64	f	40	SS,-,-	-	T,S

12-P350-M02								
0-1	0.89	0.85	0.92	f	45	-,-,-	-	T
13-3	13.89	13.86	13.91	f	40	SS,-,-	-	T,S
14-1	14.48	14.45	14.50	f	35	SS,-,-	-	T,S
15-1	15.57	15.55	15.59	f	25	SS,SL(120),-	f-gs	S
16-1	16.20	16.18	16.22	f	30	SS,-,-	-	S
17-1	17.18	17.17	17.18	f	5	-,-,-	-	T
18-1	18.46	18.46	18.46	f	30	SS,-,-	-	S
18-2	18.54	18.52	18.55	f	30	SS,-,-	-	S
19-1	19.12	19.06	19.17	f	70	SS,-,-	-	T,S
19-2	19.34	19.27	19.40	f	55	SS,-,-	-	T,S
19-3	19.61	19.57	19.64	f	40	SS,-,-	-	T,S

12-P350-M03								
2-1	2.69	2.66	2.72	f	40	SS,-,-	-	S
5-1	5.07	5.00	5.13	f	70	SS,-,-	-	S
6-1	6.78	6.67	6.89	f	80	-,-,-	-	T
7-1	7.02	7.00	7.04	f	60	SS,SL(100),ST(100)	-	S
7-2	7.37	7.31	7.42	f	65	SS,SL(50),ST(50)	-	S
11-1	11.17	11.13	11.20	f	70	SS,SL(45),ST(45)	-	S
12-1	12.89	12.85	12.93	f	85	SS,SL(5),ST(5)	-	S
13-1	13.53	13.31	13.74	f	85	-,-,-	-	T

12-P350-M04								
0-1	0.34	0.30	0.37	f	50	-,-,-	-	T
0-2	0.57	0.55	0.59	f	50	-,-,-	-	T
0-3	0.69	0.65	0.73	f	50	-,-,-	-	T

<記載深度> 赤字の記載深度は、コアの端に達していない割れ目の上下端の深度。

<タイプ> f: 非癒着性割れ目、o-f: 開口割れ目

<割れ目の特徴> SS: 鏡肌、SL: 条線のレーク角、ST: スリッケンステップから判定した上盤の移動方向

<成因> S: せん断割れ目、T: 引張割れ目

<断層岩> f-b: 断層角礫を伴う割れ目。断層角礫は基質と岩片が未固結、破碎岩片の含有率が 30%以上。

f-bt: 断層角礫の上端を構成する面、f-bb: 断層角礫の下端を構成する面。

f-g: 断層ガウジを伴う割れ目。断層ガウジは基質と岩片が未固結、破碎岩片の含有率が 30%以下。

3.2 BTV 観察結果

初期地圧測定用ボーリング孔の 12-P350-M01 孔～M04 孔の計 4 孔について BTV 観察を実施した。撮影した BTV 画像、解析評価を本節で示す。

3.2.1 目的

BTV 計測は、ボーリング孔内の以下の壁面情報を連続的かつ詳細に取得・解析することを目的とする。

- ・ 割れ目の位置・方向等の分布特性
- ・ 割れ目の開口幅や形状に関する特性

3.2.2 使用機器

BTV 計測の使用機器・機材一覧を表 3.3 に示す。

表 3.3 BTV 計測使用機器・機材

名称	型式	機能	数量	備考
BIP システム コントロール ユニット	BIP-V	展開画像作成・記録 プローブ制御機能	1	300m5 芯ケブラーケーブル 有効計測長 300m プローブ φ50mm×L1.03m 計測可能口径 φ120mm 以下
展開画像専用 プローブ	BPR-553 /ODS	ボーリング孔壁画像 撮影カメラ	1	CCD カメラ (NTSC 準拠) 円錐ミラー LED 照明 磁気方位センサ アクリル窓 φ48mm
深度測定プーリー ・電動押し込み機	SCR-125	深度測定カウンター ケーシング取り付け 機構	1	0.25mm/Pulse
バックアップ用 VTR デッキ	ソニー社製	円周画像記録	1	デジタルビデオ録画

BTV 装置は、株式会社レアックス社製 BIP-V システムを使用した。本システムは耐圧 10MPa (10N/mm²) のプローブと有効長 300m ケブラーケーブルを組み合わせ使用し、最大長 300m までのボーリング孔の全周を、連続孔壁展開画像として観察および記録することができる。

展開画像専用プローブ(以下 ODS)は孔壁展開画像取得のためのツールであり 1 ライン 720 画素、1 画素あたり RGB3 バイトのデジタルデータとして孔壁画像を記録することができる。このデジ

タルデータを、専用ソフトウェアを用いて解析することにより、不連続面の走向傾斜や幅などの値を求める。システム構成を図 3.5 に示す。

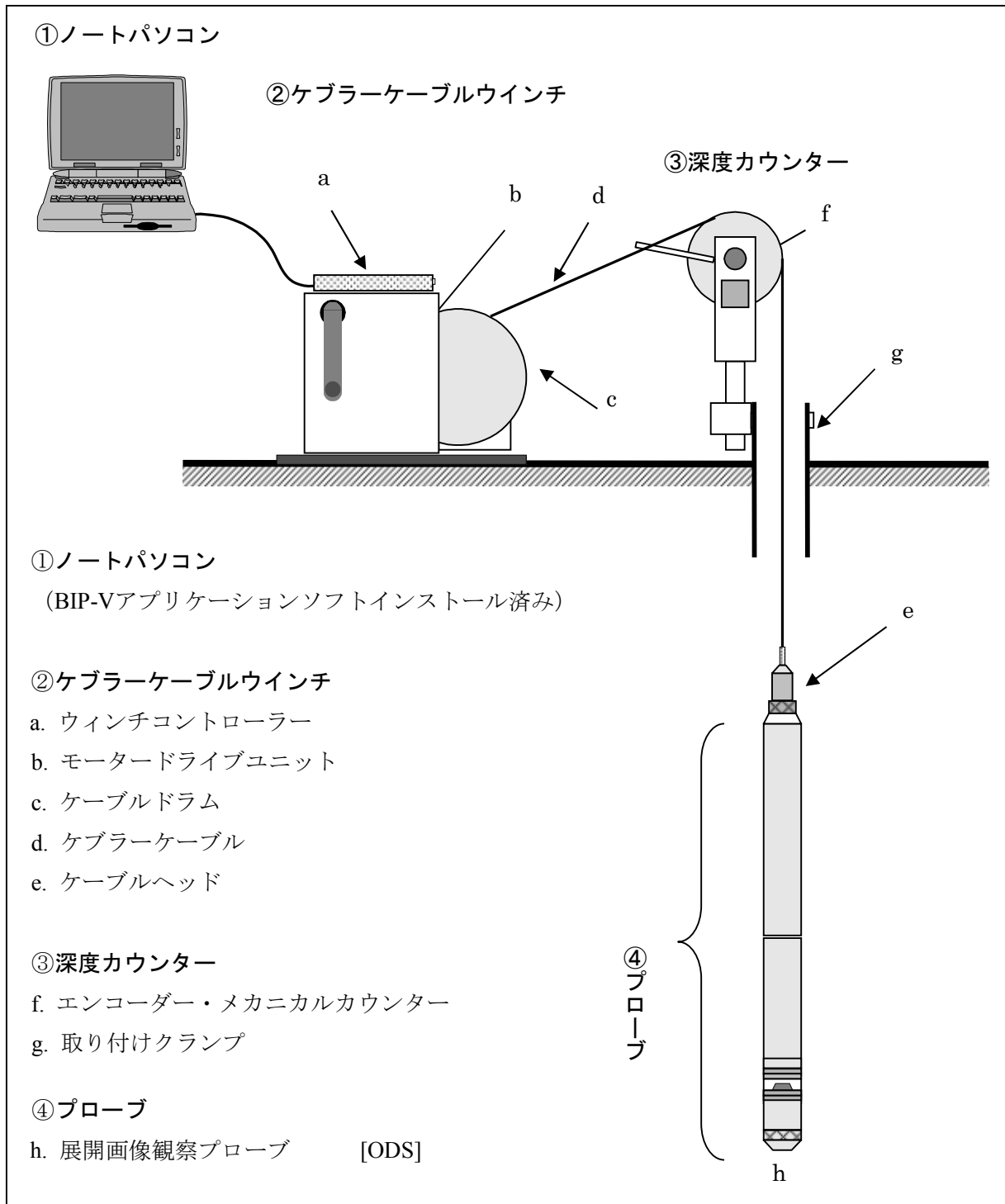


図 3.5 BTV システム構成

3.2.3 計測方法

計測方法は以下である。

(1) 下向き孔（水平より -70° ～ -90° ）の場合：12-P350-M03 孔

孔口付近に深度測定プーリーを設置して孔内にプローブを吊り下げ、プローブの自重降下により計測する。降下速度は $0.0\sim 0.9\text{m/min}$ の範囲で調節し、割れ目からの湧水やガスの噴出状況などはプローブを停止させての計測が可能である。

装置のセッティングは図 3.5 と同様である。

(2) 傾斜孔および上向き孔（下向き孔以外）の場合：12-P350-M01,M02,M04 孔

プローブの自重降下が見込めない場合は、専用押し込み装置を用いて押し込むことにより計測する。深度のカウントは、ボーリングマシンで押し込む場合は深度カウンターを孔口付近に設置して行なう。押し込み装置は深度カウンターを内蔵している。

装置のセッティングは図 3.6、図 3.7 の通りである。

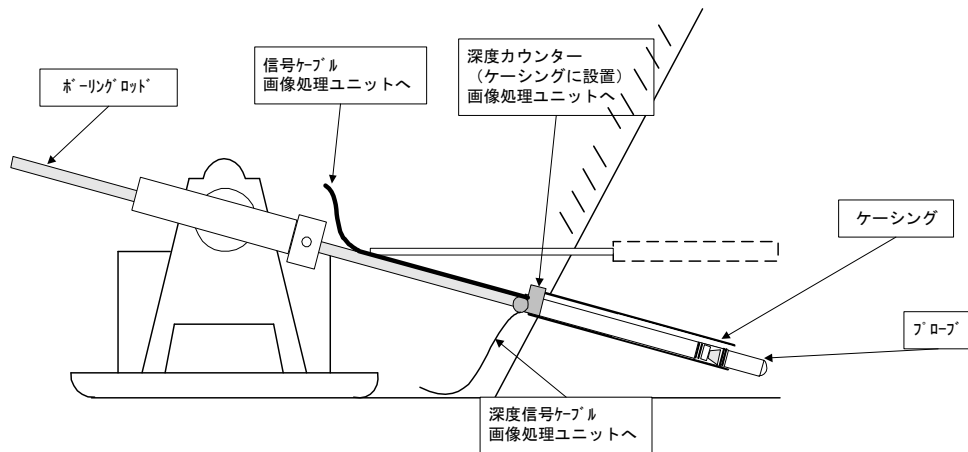


図 3.6 ボーリングマシンによる斜孔の計測

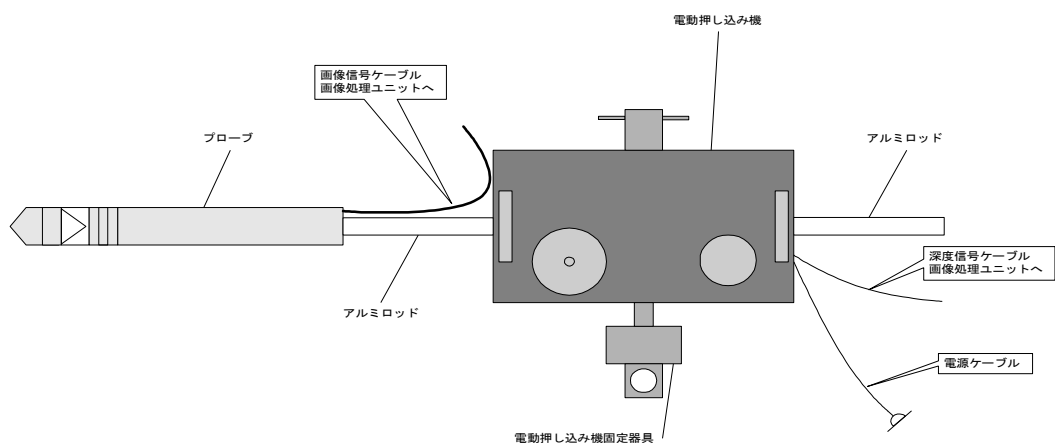


図 3.7 押し込み装置による計測

3.2.4 解析方法

(1)画像処理および不連続面データの取得

不連続面の解析は、パーソナルコンピュータのモニター上に展開画像を表示し、展開画像に示される不連続面にフィットするトレースライン(サインカーブ)を求めることによって行なう。走向傾斜の計算は図 3.8 に示す解析ルーチンの通りである。割れ目幅や充填幅の測定は任意の 2 点間をマウスカーソルでポインティングすることで計算される(実距離による表示および記録)。

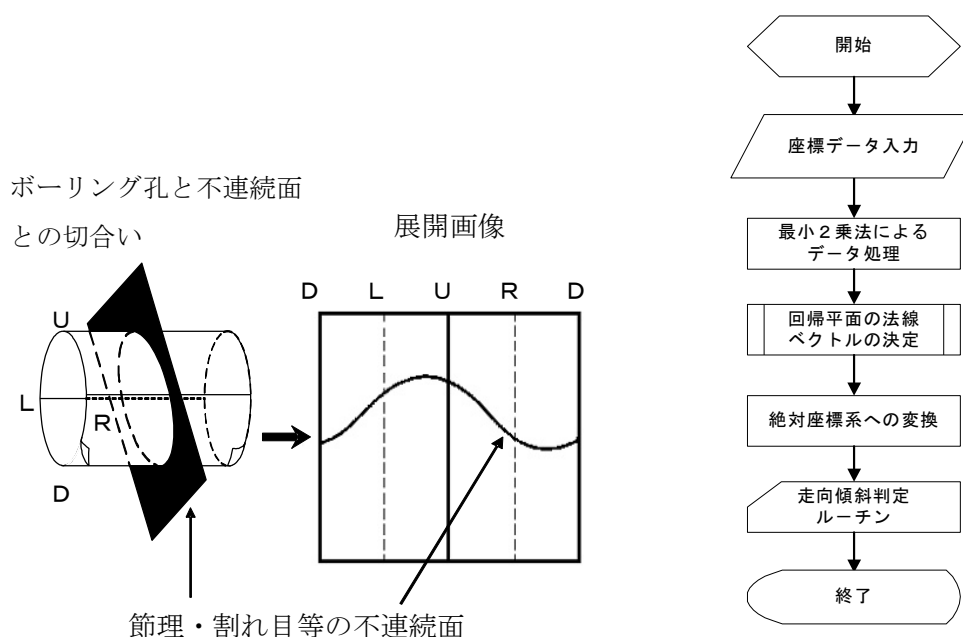


図 3.8 不連続面の走向傾斜の解析ルーチン

(2)深度表記

深度は掘削基準面からボーリング孔に沿った距離として表す。

(3)不連続面データの整理

孔壁画像データより取得した不連続面データは以下の要領で整理し、不連続面の方向性、不連続面密度等の解析をする際の基本データとした。

①分布深度

- ・ 不連続面と孔壁の切合線の上端深度、中間深度、下端深度を記載し、計測時の誤差を補正する。
- ・ 表記は m 単位とし、0.01m(=1cm)精度とする。
- ・ 表記深度は孔壁画像と岩芯を対比させ地質的に深度基準となる個所(境界面等)において深度検証をし、岩芯深度を基準として孔壁画像深度を補正した結果を記載する。

②走向傾斜

- ・ 孔全周の 70%以上連続する不連続面を対象として計測する。

- ・ 破碎帯や変質帯等、ある程度の厚さを有する不連続面については、その上盤および下盤の走向傾斜を計測する。
- ・ 走向傾斜は、測量等により提供されるボーリング孔の掘進方位および傾斜角度を用いて補正する。

③区分

不連続面は以下の 9 つに区分する。

(a)明瞭割れ目

亀裂・節理等のうち、破断面の形状、連続性ともに極めて明瞭なもの。

(b)開口割れ目

明瞭割れ目のうち、特に 1.0mm 以上の開口性が認められ、画像上で開口幅の測定が可能なもの。

(c)ヘアークラック

亀裂・節理等のうち、形状・連続性ともやや不明瞭なもの、または変質鉱物等の充填物、面沿いの風化・変質等が顕著でない微細な割れ目。

(d)破碎带上盤

断層破碎帯もしくは破碎部の上盤。

(e)破碎帯下盤

断層破碎帯もしくは破碎部の下盤。

(f)鉱物脈

方解石や石英等脈状の構造。

(g)葉理面

堆積時の層状構造（初生構造）のうち、層理面に平行または斜交する 1cm 以下の成層構造。

(h)層理面

堆積時の層状構造（初生構造）で、明瞭な破断面が認められず、周囲の岩盤と一体化しているもの。

(i)境界面

岩相境界および貫入岩と母岩との境界、方解石や石英等などの充填鉱物と母岩との境界面で、明瞭な破断面が認められず周囲の岩盤と完全に一体化しているもの。

④開口量

開口量は以下の基準で計測した。

- ・ 孔壁面と不連続面との切合線の最大傾斜部分の幅を計測する。
- ・ わずかな凹凸のあるものに対しては全体の平均を求める。
- ・ 幅の計測は拡大画像モードを使用する。
- ・ 表記は mm 単位とし、1.0mm 精度とする。

また、充填物が見られる割れ目では、その充填幅を計測、記載した。

⑤形状

形状区分は図 3.9 に拠り、以下の 4 つを基本形とする。

P----平 滑 planar type

I----不規則 irregular type

C----波 状 curved type

S----ステップ状 stepped type

さらに、これの派生形として以下の細分類を記載した。

-n :周方向に不連続なもの

-h :付随割れ目(*) を伴うもの

-j :他の主要な割れ目(**)と交差するもの

-n/h :周方向に不連続で付随亀裂を伴うもの

-n/j :周方向に不連続で他の主割れ目と交差するもの

-h/j :付随割れ目を伴いかつ他の主割れ目と交差するもの

-n/h/j :不連続でかつ付随割れ目を伴い他の主割れ目とも交差するもの

(*)ここでの付随割れ目とは、主割れ目から派生した不規則で微細な割れ目で、走向傾斜の計測が不可能な割れ目である。

(**)ここでの主要な割れ目とは、周方向に 70%以上の連続性を有し、走向傾斜の計測が可能な割れ目である。

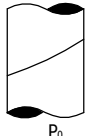
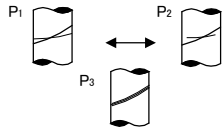
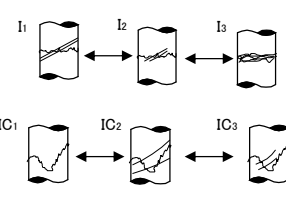
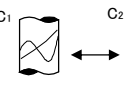
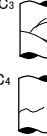
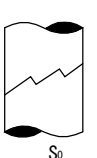
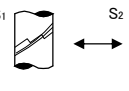
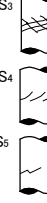
主要割れ目形状	割れ目タイプ		
	連続割れ目	不連続割れ目	割れ目形態の名称
P グループ  P ₀			P ₀ :Planar Type P ₁ :Planar with major splays Type P ₂ :Planar with minor splays Type P ₃ :Parallel Type P ₄ :Nonpersistence Planar Hairline Type
I グループ  I ₀			I ₀ :Irregular Type I ₁ :Irregular with major splays Type I ₂ :Irregular with minor splays Type I ₃ :Braided Type I ₄ :Short nonpersistence Hairline Type I ₅ :Microfracture IC ₁ :Irregular and Curved Type IC ₂ :Irregular and Curved with major splays Type IC ₃ :Irregular and Curved with minor splays Type
C グループ  C ₀			C ₀ :Curved Type C ₁ :Curved with major splays Type C ₂ :Curved with minor splays Type C ₃ :Braided Type C ₄ :Nonpersistence Curved Hairline Type
S グループ  S ₀			S ₀ :Stepped Type S ₁ :Stepped with major splays Type S ₂ :Stepped with minor splays Type S ₃ :Meshwork Type S ₄ :En echelon Type S ₅ :Nonpersistence Stepped Hairline Type

図 3.9 割れ目形状区分³⁾

⑥状態

充填物の有無、面沿いの褐色化、変質等の状況、および境界面の細区分等を以下の要領で記載する。

- (a)充填物介在 : 割れ目内に充填物が認められるもの。
- (b)褐色化 : 割れ目沿いに褐色変色しているもの。
- (c)粘土化 : 割れ目沿いに粘土化を伴うもの。下記(d)と比較すると、岩盤の堅硬な部分へ漸移し、境界がやや不明瞭なもの。
- (d)粘土介在 : 割れ目内に粘土が充填されている場合で、岩盤の堅硬な部分との境界が明らかなもの。
- (e)角礫状 : 主割れ目周辺の岩盤が付随割れ目の発達により、角礫化している場合。
- (f)変質帯上盤 : 画像上で著しい変色を伴う、変質帯とみられるゾーンの上盤。
- (g)変質帯下盤 : 画像上で著しい変色を伴う、変質帯とみられるゾーンの下盤。
- (h)白色鉱物 : 割れ目沿いに白色鉱物の脈、あるいは付着物がみられるもの。石英、方解石、粘土鉱物等が考えられる。
- (i)有色鉱物 : 割れ目沿いに暗緑色の鉱物脈、あるいは付着がみられるもので、画像上で境界が明瞭なもの。緑泥石等が考えられる。
- (j)岩相境界 : 岩石の色調や組成、粒度の違いによる境界面。
- (k)セメンチング : 割れ目等にセメントが付着または開口部に充填しているもの。
- (l)礫・マトリックス : 母岩と礫の境界面。

⑦備考

BTV によって取得された割れ目情報とコア観察により作成された岩芯柱状図に記載された割れ目情報とを対比させ、特定の割れ目同士に一致または相関が認められるものについて、岩芯柱状図記載の割れ目番号を記した。

(4)不連続面データの解析

BTV 計測の結果得られた画像記録は孔壁展開画像カラープリントとして、割れ目等の不連続面は一覧表としてまとめた。また、画像解析で得られた不連続面データを用いてステレオネット図、割れ目密度図、岩盤状態図等を作成した。

① ステレオネット図 (シュミットネット下半球投影)

ステレオネット図は不連続面の立体像を、三次元空間の中に置いてその方向(方位)と角度(仰角、伏角)を赤道面に投影して、二次元的に表現しその実像をわかりやすくした方法である(図 3.10 参照、走向 N25W、傾斜 30W の場合)。

シュミットネットの特徴は、球面上での等しい面積が、投影面上においても等しく表現される。したがって、多数のデータの分布状況等を統計処理する場合に有効な手法となる。

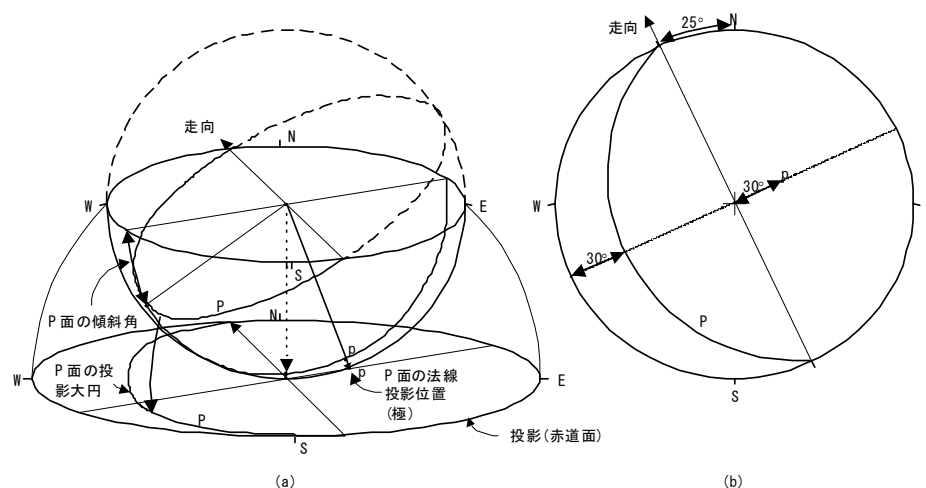


図 3.10 シュミットネット投影説明図 (a:各部の名称 b:投影法)

ステレオネット図はシュミットネットの他に以下のものを作成した（図 3.18～図 3.65 参照）。

- ・ π ダイアグラム：極をシュミットネットにプロットしたもの。
- ・ カウントダイアグラム：投影面内のグリッド上で、投影面外周の 10 分の 1 の小円内にある極の個数(あるいは全体の個数に対する百分率)をプロットしたもの。
- ・ コンターマップ：カウントダイアグラムを元に等分布線を描いたもの。
- ・ 大円：投影点を連ねた線で、傾斜の構造を示したもの。
- ・ ローズダイアグラム：一定の方位角度毎の統計値をステレオネット中心より放射状にプロットしたもの。

② 岩盤状態図

岩盤状態図は、ボーリング孔内の孔壁観察結果から岩盤の状態を定量的に評価するために提案している一手法である。本図は総合的に岩盤評価を行うために、以下の各チャートを複合して示している（図3.11参照）。

- (1) 割れ目分散図：割れ目の出現位置（深度）と開口量をプロット
- (2) 1m 当たりの割れ目頻度図：1m当たりの割れ目の出現頻度
- (3) 累積開口量曲線図：孔底を基準点として開口量を累積したもの
- (4) 累積割れ目本数曲線図：孔底を基準として割れ目数を累積したもの

このうち、累積開口量曲線図および累積割れ目本数曲線図は岩盤性状の変化、特に割れ目に着目し、岩盤の状態を判定するために考案された方法である。これらの傾きは岩盤内部に一定確率で割れ目が発達するならば一定に表現され、断層破碎帯や地質変化等で岩盤状態が変化した場合には変曲点として表現される。

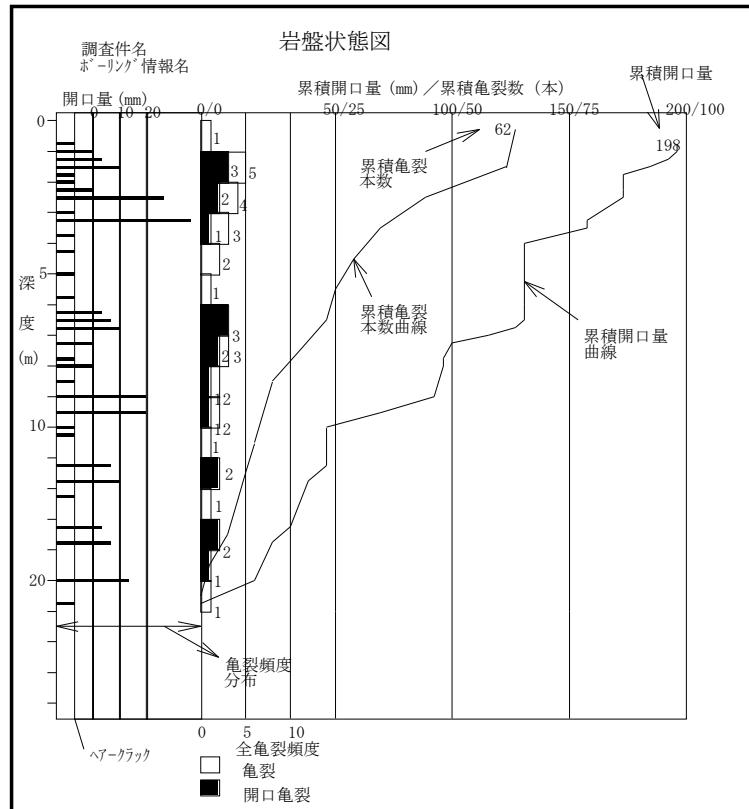


図 3.11 岩盤状態図

③ 見掛け傾斜図

割れ目等の不連続面の走向傾斜から、そのボーリング孔の掘進方位線上で垂直に切断した断面での不連続面の見掛け傾斜を求めることができる（図 3.12 参照）。

見掛け傾斜図はボーリング孔(掘削方向断面)に対し左右対称または直交する 2 つの視点から見たものが作成される。

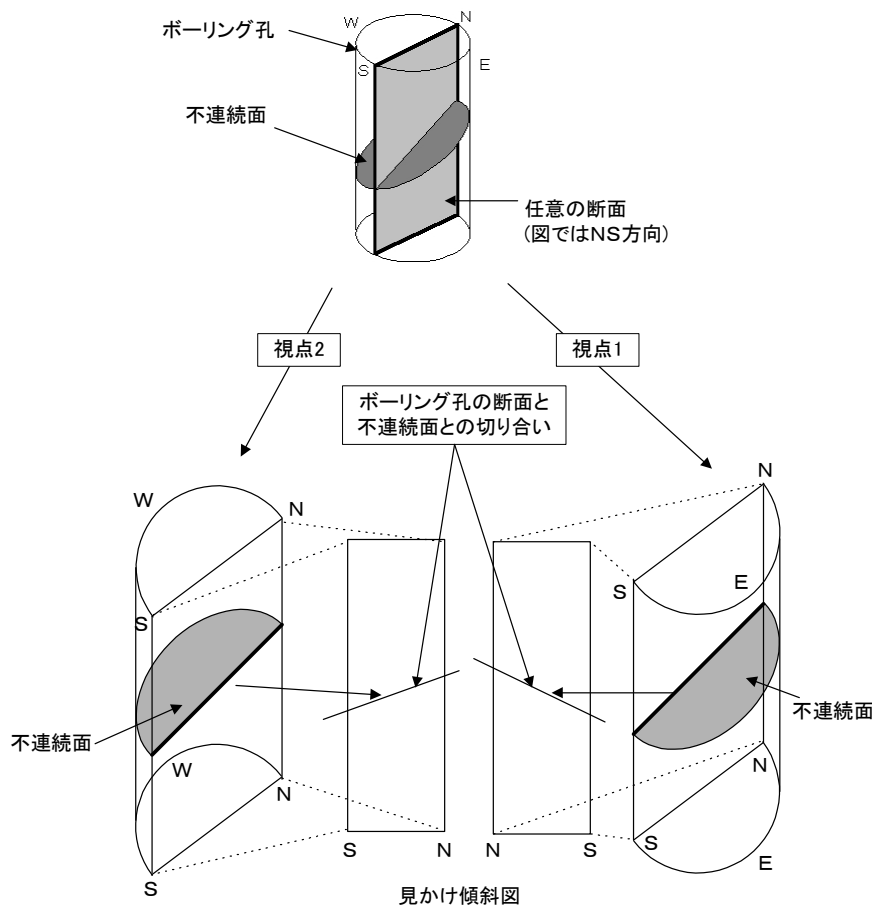


図 3.12 見掛け傾斜図・断面イメージ

④ AVTD分散図

深度と不連続面との関係を把握するために、不連続面一覧表データより AVTD 分散図を作成した (図 3.13)。

AVTD 分散図は、縦軸に深度、横軸に傾斜方位を示し、深度と不連続面の関係を二次元的に表現したものである。それぞれの不連続面のポイントは、傾斜方位※の考えにより図中に表現されている。傾斜方位を採用する事で、従来走向と傾斜の二つの図面により表現されていた各不連続面を一つの図面で表現できる。傾斜は、不連続面の傾斜角の傾向をつかむために、低・中・高角度の3種類に分類して表している。

表 3.4 および図 3.14 に走向傾斜と傾斜方位の関係を示す。

※傾斜方位とは、不連続面の方位角および傾斜角を表示する形式の1つで、不連続面の傾斜方位と傾斜角の2つのパラメーターで表現するものである。傾斜方向はNを0°として東周りに○○°と表し、傾斜角は水平を0°とした、不連続面と水平面との間の角度（傾斜量）を表す。一部、Vとの表記があるが、これは不連続面が鉛直方向に立った状態（傾斜角90°）を表す。

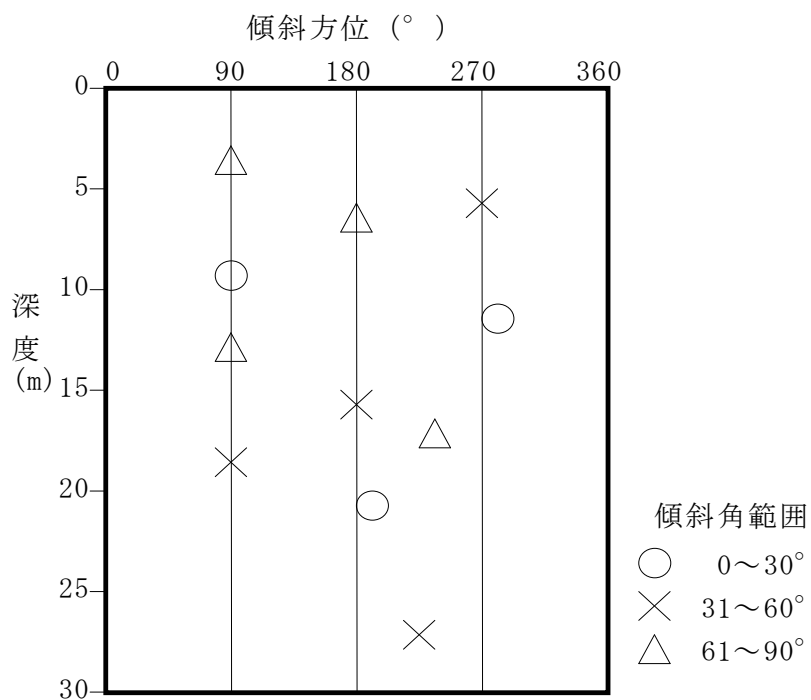


図 3.13 AVTD 分散図

表 3.4 走向傾斜と傾斜方位の関係

走向	傾斜	傾斜方位 (°)
EW	N	0
N89W~N1W	N~NE~E	1~89
NS	E	90
N1E~N89E	E~SE~S	91~179
EW	S	180
N89W~N1W	S~SW~W	181~269
NS	W	270
N1E~N89E	W~NW~N	271~359

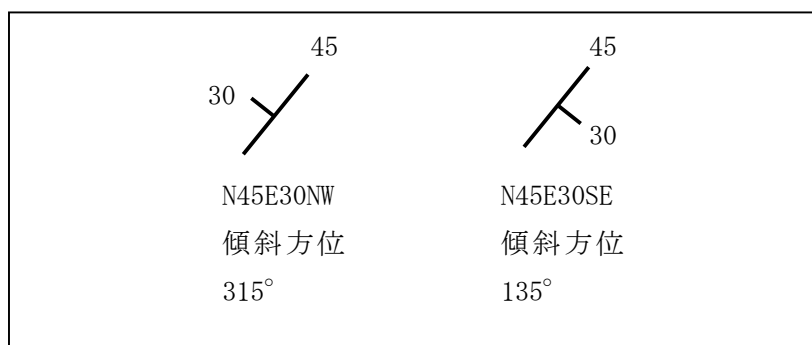


図 3.14 走向傾斜と傾斜方位の関係

例) 走向傾斜 EW ○○N 傾斜方位 0°
 N89W○○N 傾斜方位 1°
 N88W○○N 傾斜方位 2°

 N45E○○SE 傾斜方位 135°

 N45E○○NW 傾斜方位 315°

⑤ AVTD密度図

AVTD 密度図は、Azimuth Versus Traverse Distance Plots 法により、割れ目の方向を方位傾斜で代表させ、深度位置と割れ目の構造関係を二次元的に表現した AVTD 法⁴⁾によるカウントダイアグラム（AVTD 密度図と表示）であり、割れ目の傾斜方位を示している。カウントダイアグラムは深度方向 5.00m、方位方向 10° のグリッドを用いて、グリッド内の割れ目密度を示したものである（図 3.15）。

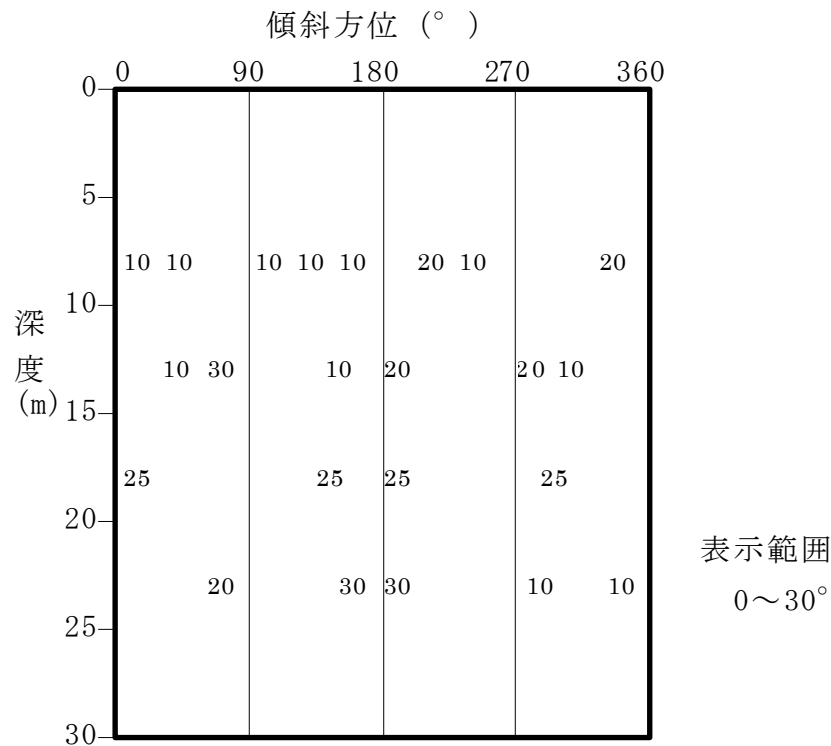


図 3.15 AVTD 密度図

3.2.5 BTV 計測工程および作業数量

BTV 計測における調査数量を表 3.5 に示す。

表 3.5 調査数量

孔番	計測日	開始深度 (m)	終了深度 (m)	計測長 (m)	備考※1
12-P350-M01	2012 年 10 月 9 日	1.500	21.489	19.989	傾斜孔 (N230E、5°)
12-P350-M02	2012 年 10 月 9 日	1.481	21.600	20.119	傾斜孔 (N150E、5°)
12-P350-M03	2012 年 10 月 9 日	1.500	21.389	19.889	傾斜孔 (N30E、-54°)
12-P350-M04	2012 年 10 月 9 日	0.800	5.959	5.159	傾斜孔 (N150E、5°)

※1：深度補正後の計測深度。孔傾斜は水平を 0°とする。

3.2.6 BTV 作業手順

(i) 計測準備

計測準備の手順は以下である。

- ①電源の確保・・・ 外部装置（記録装置、モニター、ケーブルウインチ等）に要する AC100V の電源を、坑内の配電盤から確保した。
- ②機材の接続・・・ 外部装置にプローブを接続。
- ③機材の動作確認・・・ プローブ接続後、通電して装置の動作確認をする。
- ④孔内状況の確認・・・ 装置動作確認後、プローブを試錐孔内に挿入し、孔内が計測可能な状態にあるかどうかをモニター上で確認。孔内は湧水も少なく、濁水等によって計測不可能な状態ではなかった。

(ii) 計測

モニター上で孔壁が十分に計測可能な状態にあることを確認した後、計測を開始。計測された展開画像をノートパソコンにデジタル情報として記録し、ODS による計測では、VTR 装置でバックアップ画像を記録した。

(iii) 記録データの確認・機材回収

計測終了後、取得データ（VTR および内蔵ハードディスク）の精度を確認し、機材を回収。

(iv) 割れ目情報の整理・解析

割れ目情報の整理・解析は、以下のような統計学的な処理を行なった。

(a) 割れ目情報の整理

孔壁面から取得された割れ目等の不連続面情報を一覧表にまとめる。

(b) 割れ目情報の解析

ステレオネット、 π ダイアグラム、カウントダイアグラム、コンターマップ、大円、ローズダイアグラム、累積図、分布図、分散図、傾斜図等を用いて統計学的に解析した。全ての解析結果は、図 3.18～図 3.65 に記している。

以上の作業手順をフローチャートとして図 3.16 に示す。

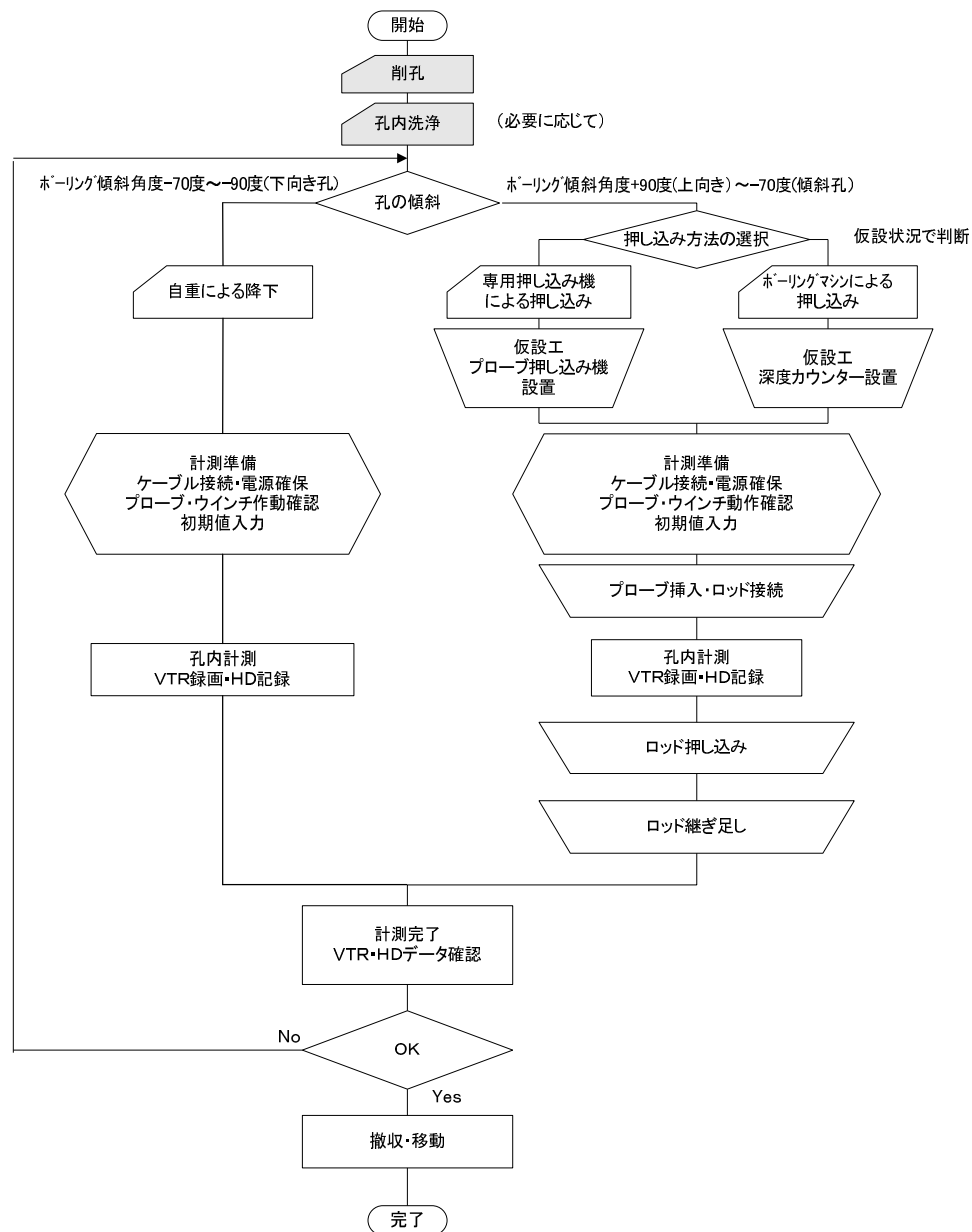


図 3.16 BTV 作業手順フローチャート

3.2.7 BTV 画像の深度補正

孔壁画像記録は岩芯深度に極力一致させるとの観点から岩芯深度に対し深度誤差がある場合は補正をする必要がある。掘削基準面、ケーシング下端深度、計測時の孔底深度を確認しながら計測し、岩芯柱状図や岩芯写真を入手した後、以下の手順に従って深度を補正した。

(1)基準深度の決定

岩芯観察結果と孔壁画像とを対比し、明らかに両者が一致すると分かる不連続面または特徴的な模様（ノジュール等）を抽出して深度補正の基準点（以下リファレンスポイント）とした。

(2)深度補正

孔壁画像記録は岩芯深度に極力一致させるとの観点から、岩芯深度に対し深度誤差がある場合は補正をする必要がある。

本業務では、掘削基準面、ケーシング下端深度、計測時の孔底深度により深度を補正した。深度誤差表を表 3.6～表 3.9 に示す。

表 3.6 12-P350-M01 孔深度誤差表

No.	BTV深度(m) ①	岩芯深度(m)②	深度誤差(m) (①-②)※	備考
1	1.50	1.50	0.00	検尺
2	4.73	4.71	0.02	割れ目下部
3	7.77	7.74	0.03	割れ目(7-2)下部
4	11.10	11.09	0.01	割れ目(11-1)上部
5	13.88	13.91	-0.03	割れ目(13-3)下部
6	18.52	18.52	0.00	割れ目(18-2)上部
7	21.49	21.49	0.00	検尺

※：マイナスの深度誤差は岩芯が深いことを示す。

表 3.7 12-P350-M02 孔深度誤差表

No.	BTV深度(m) ①	岩芯深度(m)②	深度誤差(m) (①-②)※	備考
1	1.48	1.48	0.00	検尺
2	2.72	2.70	0.02	割れ目(2-3)下部
3	4.29	4.29	0.00	掘削痕下部
4	12.33	12.40	-0.07	ノジュール上部
5	14.72	14.92	-0.20	ノジュール上部
6	18.02	18.29	-0.27	掘削痕下部
7	21.60	21.60	0.00	検尺

※：マイナスの深度誤差は岩芯が深いことを示す。

表 3.8 12-P350-M03 孔深度誤差表

No.	BTV深度(m) ①	岩芯深度(m)②	深度誤差(m) (①-②)※	備考
1	1.50	1.50	0.00	検尺
2	9.50	9.38	0.12	ノジュール上部
3	14.02	14.02	0.00	割れ目上部
4	17.58	17.62	-0.04	ノジュール下部
5	20.39	20.39	0.00	検尺

※：マイナスの深度誤差は岩芯が深いことを示す。

表 3.9 12-P350-M04 孔深度誤差表

No.	BTV深度(m) ①	岩芯深度(m)②	深度誤差(m) (①-②)※	備考
1	0.80	0.80	0.00	検尺
2	5.96	5.96	0.00	検尺

※：マイナスの深度誤差は岩芯が深いことを示す。

3.2.8 画像状況

得られた画像は割れ目の抽出に支障はないが、孔壁画像が不明瞭な箇所があるので、その状況と原因について説明する。

展開画像上に白線が見られる箇所があるが、これはプローブ挿入時に気泡がアクリル窓に付着したため記録されたもので、孔壁の条痕ではない。

また、横線状の白線が見えるが、これは水中の気泡が反射しているものである。

上記の状況の代表例を図 3.17 に示す。

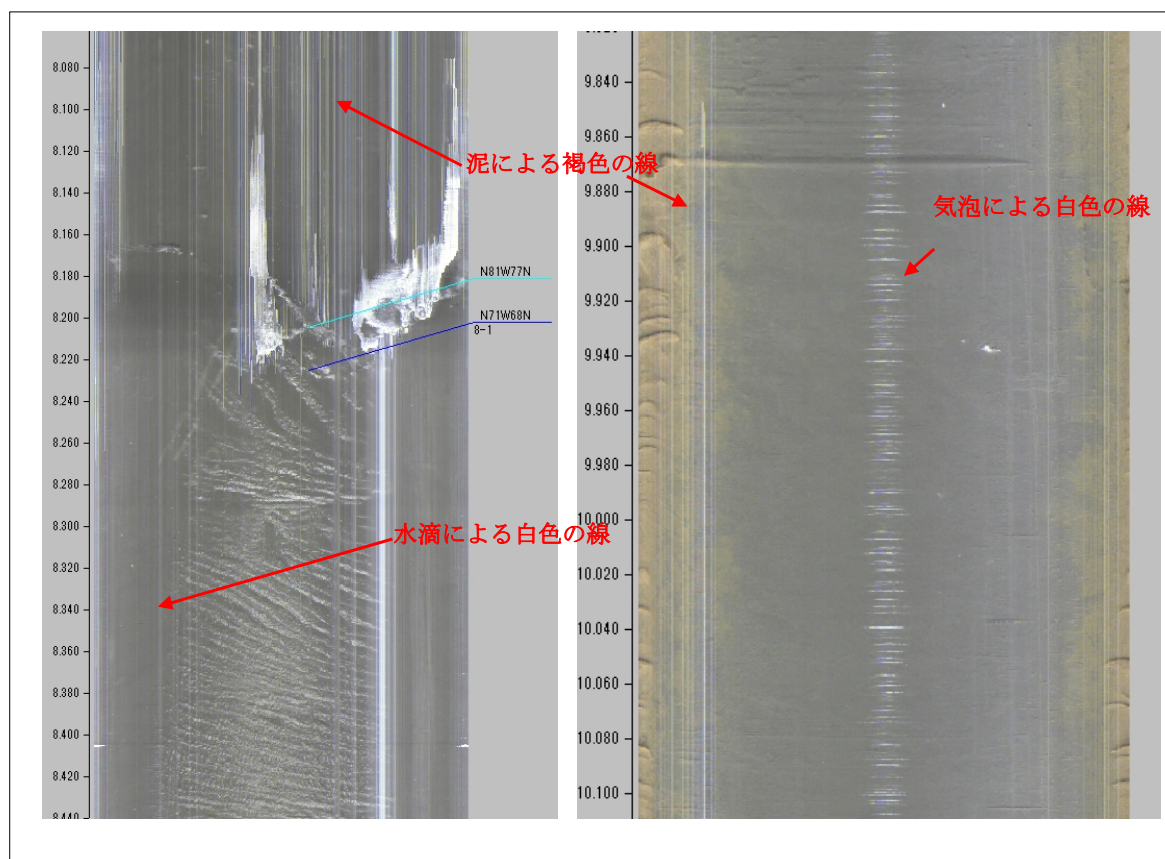


図 3.17 画像状況代表例（左：12-P350-M01 孔 右：12-P350-M03 孔）

3.2.9 計測結果

BTV 計測の結果得られた記録深度は岩芯深度に合わせて補正した。孔壁展開画像は巻末の付録 7 にまとめた。また、画像解析で得られた各不連続面データを用いてステレオネット投影図、見掛け傾斜図、岩盤状態図等を作成した。報告書では、特に記載のあるものを除き補正後の深度を記した。

(1) 孔壁の概要

全計測区間を対象に不連続面解析をした。

計測区間の岩種は珪質泥岩で、孔壁はやや軟質である。

【12-P350-M01】

セメンチングは 1.5m まで施工されている。

一部の不連続面からは湧水が確認された。湧水が確認された不連続面を以下に示す。

- ・ 深度 7.690m、走向傾斜：N69W 83N、区分：明瞭割れ目。

・深度 7.690m、走向傾斜：N69W 83N、区分：明瞭割れ目。

【12-P350-M02】

セメンチングは 1.481m まで施工されている。

16.25~16.97m にブレイクアウトがみられる。

【12-P350-M03】

セメンチングは 1.5m まで施工されている。

【12-P350-M04】

セメンチングは 0.8m まで施工されている。

(2) 不連続面の状況

12-P350-M01 で角礫状を呈す箇所が見られた。不連続面の状態を表 3.10~3.13 に示す。

表 3.10 不連続面の状態 (12-P350-M01)

状態区分	本数(本)	比率(%)	密度(本/m)	備考
充填物介在	0	0.0	0.00	
褐色化	0	0.0	0.00	
角礫状	2	4.8	0.10	
その他	0	0.0	0.00	
無し	40	95.2	2.00	
合計	42	100.0	2.10	

表 3.11 不連続面の状態 (12-P350-M02)

状態区分	本数(本)	比率(%)	密度(本/m)	備考
充填物介在	0	0.0	0.00	
褐色化	0	0.0	0.00	
角礫状	1	7.1	0.05	
その他	0	0.0	0.00	
無し	13	92.9	0.65	
合計	14	100.0	0.70	

表 3.12 不連続面の状態 (12-P350-M03)

状態区分	本数(本)	比率(%)	密度(本/m)	備考
充填物介在	0	0.0	0.00	
褐色化	0	0.0	0.00	
角礫状	0	0.0	0.00	
その他	0	0.0	0.00	
無し	18	100.0	0.91	
合計	18	100.0	0.91	

表 3.13 不連続面の状態 (12-P350-M04)

状態区分	本数(本)	比率(%)	密度(本/m)	備考
充填物介在	0	0.0	0.00	
褐色化	0	0.0	0.00	
角礫状	0	0.0	0.00	
その他	0	0.0	0.00	
無し	4	100.0	0.78	
合計	4	100.0	0.78	

(3) 不連続面の方向性

計測された各不連続面データを用いてシュミットネット（下半球投影）を作成し、割れ目の方向性について解析した。各孔の割れ目の方向性は、以下に示す通りである。それぞれの割れ目の集中点は、表 3.14 に示した。

【12-P350-M01】

①全不連続面

全不連続面の走向傾斜は、N74W 71N に集中する。

②割れ目（開口割れ目、明瞭割れ目、ヘアークラック）

全不連続面と同様である。

③開口割れ目

なし。

④明瞭割れ

明瞭割れ目の走向傾斜は、N71W 70N, N72W 60N に集中する。

⑤ヘアークラック

ヘアークラックの走向傾斜は、N76W 72N に集中する。

⑥破碎帯（破碎帯上盤、破碎帯下盤の合計）

なし。

⑦鉱物脈

なし。

⑧葉理面

なし。

⑨層理面

なし。

⑩境界面

なし。

【12-P350-M02】

①全不連続面

全不連続面の走向傾斜は、N87E 89S に集中する。

②割れ目（開口割れ目、明瞭割れ目、ヘアークラック）
全不連続面と同様である。

③開口割れ目
なし。

④明瞭割れ目
明瞭割れ目は1本みられた。

⑤ヘアークラック
ヘアークラックの走向傾斜は、N87E 89S に集中する。

⑥破砕帯（破砕帯上盤、破砕帯下盤の合計）
なし。

⑦鉱物脈
なし。

⑧葉理面
なし。

⑨層理面
なし。

⑩境界面
なし。

【12-P350-M03】

①全不連続面
全不連続面の走向傾斜は、N39W 50SW に集中する。

②割れ目（開口割れ目、明瞭割れ目、ヘアークラック）
割れ目の走向傾斜は、N39W 50SW に集中する。

③開口割れ目
なし。

④明瞭割れ目
明瞭割れ目は1本確認された。

⑤ヘアークラック
ヘアークラックの走向傾斜は、N39W 50SW に集中する。

⑥破砕帯（破砕帯上盤、破砕帯下盤の合計）
なし。

⑦鉱物脈
なし。

⑧葉理面
なし。

⑨層理面
層理面の走向傾斜は N58W 73SW に集中する。

⑩境界面

なし。

【12-P350-M04】

①全不連続面

全不連続面はヘアークラックと同様である。

②割れ目（開口割れ目、明瞭割れ目、ヘアークラック）

割れ目はヘアークラックと同様である。

③開口割れ目

なし。

④明瞭割れ目

なし

⑤ヘアークラック

ヘアークラックは4本確認された。

⑥破碎帯（破碎帯上盤、破碎帯下盤の合計）

なし。

⑦鉱物脈

なし。

⑧葉理面

なし。

⑨層理面

なし。

⑩境界面

なし。

表 3.14 不連続面の集中点

12-P350-M01					12-P350-M03				
不連続面区分	集中点	データ数	ピーク値(%)	備考	不連続面区分	集中点	データ数	ピーク値(%)	備考
全不連続面 ^{※1}	N74W 71N	42	30	—	全不連続面 ^{※1}	N39W 50SW	18	16	—
割れ目 ^{※2}	N74W 71N	42	30	—	割れ目 ^{※2}	N39W 50SW	16	18	—
開口割れ目	—	—	—	—	開口割れ目	—	—	—	—
明瞭割れ目	N71W 70N N72W 60N	9	44	—	明瞭割れ目	—	1	100	—
ヘアークラック	N76W 72N	33	30	—	ヘアークラック	N39W 50SW	15	20	—
破碎帯 (上盤、下盤)	—	0	—	—	破碎帯 (上盤、下盤)	—	—	—	—
層理面	—	0	—	—	層理面	N58W 73SW	2	100	—
12-P350-M02					12-P350-M04				
不連続面区分	集中点	データ数	ピーク値(%)	備考	不連続面区分	集中点	データ数	ピーク値(%)	備考
全不連続面 ^{※1}	N87E 89S	14	28	—	全不連続面 ^{※1}	—	4	25	—
割れ目 ^{※2}	N87E 89S	14	28	—	割れ目 ^{※2}	—	4	25	—
開口割れ目	—	—	—	—	開口割れ目	—	—	—	—
明瞭割れ目	—	1	100	—	明瞭割れ目	—	—	—	—
ヘアークラック	N87E 89S	13	30	—	ヘアークラック	—	4	25	—
破碎帯 (上盤、下盤)	—	—	—	—	破碎帯 (上盤、下盤)	—	—	—	—
層理面	—	—	—	—	層理面	—	—	—	—

※1: 全不連続面: 割れ目とその他の区分の合計

※2: 割れ目: 開口割れ目、明瞭割れ目、ヘアークラックを合計したものの総称

(4) 割れ目頻度と岩盤状況

岩盤状態を示す主要なパラメータと考えられる割れ目の分布状況・幅・頻度等について、岩盤状態図を作成し取りまとめた(図 3.21、図 3.34、図 3.48、図 3.60)。

【12-P350-M01】

①割れ目頻度

割れ目頻度は 0～5 本/m であった。深度による顕著な集中はみられなかった。

②岩盤状況

開口割れ目はみられなかった。「(2)不連続面の状況」で記載した不連続面の状態が角礫状のものは 4m～5m にみられた。

【12-P350-M02】

①割れ目頻度

割れ目頻度は 0～2 本/m であった。深度による顕著な集中はみられなかった。

②岩盤状況

開口割れ目はみられなかった。

「(2)不連続面の状況」で記載した不連続面の状態が角礫状のものは 7m～8m にみられた。

【12-P350-M03】

①割れ目頻度

割れ目頻度は 0～4 本/m であった。深度による顕著な集中はみられなかった。

②岩盤状況

開口割れ目はみられなかった。

【12-P350-M04】

①割れ目頻度

割れ目頻度は 0～3 本/m であった。

②岩盤状況

開口割れ目はみられなかった。

(5) 不連続面の密度

解析区間における不連続面の密度を表 3.15 に示す。

【12-P350-M01】

解析の結果、明瞭割れ目が 0.45 本/m、ヘアークラックが 1.65 本/m であった。

【12-P350-M02】

解析の結果、明瞭割れ目が 0.05 本/m、ヘアークラックが 0.65 本/m であった。

【12-P350-M03】

解析の結果、明瞭割れ目が 0.05 本/m、ヘアークラックが 0.75 本/m、層理面が 0.10 本/m であった。

【12-P350-M04】

解析の結果、ヘアークラックが 0.20 本/m であった。

表 3.15 不連続面の密度

12-P350-M01 (計測帳:19.989m)					12-P350-M03 (計測帳:19.889m)				
不連続面区分	本数 (本)	比率 (%)	密度 (本/m)	備考	不連続面区分	本数 (本)	比率 (%)	密度 (本/m)	備考
開口割れ目	0	0.0	0.00		開口割れ目	0	0.0	0.00	
明瞭割れ目	9	21.4	0.45		明瞭割れ目	1	5.6	0.05	
ヘアークラック	33	78.6	1.65		ヘアークラック	15	83.3	0.75	
破碎帯	0	0.0	0.00		破碎帯	0	0.0	0.00	
層理面	0	0.0	0.00		層理面	2	11.1	0.10	
合計	42	100.0	2.10		合計	18	100.0	0.91	
割れ目※1	42	100.0	2.10		割れ目※1	16	88.9	0.80	

12-P350-M02 (計測帳:20.119m)					12-P350-M04 (計測帳:5.159m)				
不連続面区分	本数 (本)	比率 (%)	密度 (本/m)	備考	不連続面区分	本数 (本)	比率 (%)	密度 (本/m)	備考
開口割れ目	0	0.0	0.00		開口割れ目	0	0.0	0.00	
明瞭割れ目	1	7.1	0.05		明瞭割れ目	0	0.0	0.00	
ヘアークラック	13	92.9	0.65		ヘアークラック	4	100.0	0.78	
破碎帯	0	0.0	0.00		破碎帯	0	0.0	0.00	
層理面	0	0.0	0.00		層理面	0	0.0	0.00	
合計	14	100.0	0.70		合計	4	100.0	0.78	
割れ目※1	14	100.0	0.70		割れ目※1	4	100.0	0.78	

※1 割れ目: 明瞭割れ目、開口割れ目、ヘアークラックを合計したものの総称

(6) 深度方向の不連続面の傾向

深度方向の不連続面の傾向を把握するため、AVTD 分散図ならびに AVTD 密度図を作成した (図 3.22、図 3.23、図 3.35、図 3.36、図 3.49、図 3.50、図 3.61、図 3.62)。

【12-P350-M01】

①深度方向の分布状況

深度 11m～18m 区間に 31～60°の中角度の割れ目が集中している。

②傾斜方位の分布

傾斜方位 90～180°間、270～360°間に割れ目が少ない。

③傾斜角度の分布

61°以上の高角度は 0～30°間に多くみられた。

【12-P350-M02】

①深度方向の分布状況

深度による分布の偏りはみられなかった。

②傾斜方位の分布

傾斜方位 150～210°間に割れ目が多くみられた。

③傾斜角度の分布

61～90°の高角度が多くみられた。

【12-P350-M03】

①深度方向の分布状況

深度による分布の偏りはみられなかった。

②傾斜方位の分布

傾斜方位 180~270°間に割れ目が多くみられた。

③傾斜角度の分布

31~60 度の中角度の割れ目が多くみられた。

【12-P350-M04】

①深度方向の分布状況

4m 以深で割れ目がみられた。

②傾斜方位の分布

傾斜方位 120~300°間で割れ目がみられた。

③傾斜角度の分布

61~90°の高角度が 3 本、31~60°の中角度の割れ目が 1 本みられた。

(7) 見かけ傾斜

不連続面区分毎に深度と見かけ傾斜の関係を把握するため、見かけ傾斜図を作成した（図 3.24~図 3.26、図 3.37~図 3.39、図 3.51~図 3.55、図 3.63）。各図はボーリング孔を掘進方位で切断し、それぞれ左右からの視点で見たものである。

また、ボーリング孔を水平面で切断し、上からの視点で見た水平断面図（＝走向を表す）を作成した（図 3.27、図 3.40、図 3.56、図 3.64）。水平断面は各ボーリング孔の計測深度の中間点のレベルで作成した。

12-P350-M01 の断面方位：N230E、孔傾斜角：5°

①全不連続面・・・・・・中～高角度の見かけ傾斜を示すものが多い。

②明瞭割れ目・・・・・・中～高角度の見かけ傾斜を示すものが多い。

③ヘアークラック・・・・中～高角度の見かけ傾斜を示すものが多い。

12-P350-M02 の断面方位：N150E、孔傾斜角：5°

①全不連続面・・・・・・中～高角度の見かけ傾斜を示すものが多い。

②明瞭割れ目・・・・・・中角度の見かけ傾斜を示す。

③ヘアークラック・・・・中～高角度の見かけ傾斜を示すものが多い。

12-P350-M03 の断面方位：N30E、孔傾斜角：-54°

①全不連続面・・・・・・中～高角度の見かけ傾斜を示すものが多い。

②明瞭割れ目・・・・・・中角度の見かけ傾斜を示す。

③ヘアークラック・・・・中～高角度の見かけ傾斜を示すものが多い。

④層理面・・・・・・中角度の見かけ傾斜を示す。

12-P350-M04 の断面方位：N150E、孔傾斜角：5°

①ヘアークラック・・・・低角度が 1 本、中角度が 2 本、高角度が 1 本みられた。

(8) 割れ目形状タイプ別の傾向

割れ目形状が平滑な形状の P 型と不規則な形状 (I 型・C 型・S 型) という 4 つに分類して検討した。割れ目形状タイプ別の方向性は、以下に示す通りである。また、各タイプの割れ目の集中点を、表 3.16 に示す。

【12-P350-M01】

P 型および S 型は、それぞれ 2 本および 4 本確認されたが明瞭な集中は確認できない。

C 型の走向傾斜は、N75W 71N に集中する。

【12-P350-M02】

P 型は 1 本確認された。

C 型の走向傾斜は、N88E 89S に集中する。

【12-P350-M03】

P 型は 1 本確認された。

C 型の走向傾斜は、N39W 50SW に集中する。

【12-P350-M04】

C 型は 4 本確認されたが明瞭な集中は確認できない。

表 3.16 割れ目形状別の集中点

12-P350-M01			
割れ目形状区分	集中点	本数(本)	比率(%)
P型	—	2	4.8%
I型	—	0	0.0%
C型	N75W71N	36	85.7%
S型	—	4	9.5%
合計	—	42	100.0%

12-P350-M02			
割れ目形状区分	集中点	本数(本)	比率(%)
P型	—	1	7.1%
I型	—	0	0.0%
C型	N88E89S	13	92.9%
S型	—	0	0.0%
合計	—	14	100.0%

12-P350-M03			
割れ目形状区分	集中点	本数(本)	比率(%)
P型	—	1	6.3%
I型	—	0	0.0%
C型	N39W50SW	15	93.8%
S型	—	0	0.0%
合計	—	16	100.0%

12-P350-M04			
割れ目形状区分	集中点	本数(本)	比率(%)
P型	—	0	0.0%
I型	—	0	0.0%
C型	—	4	100.0%
S型	—	0	0.0%
合計	—	4	100.0%

12-P350-M01

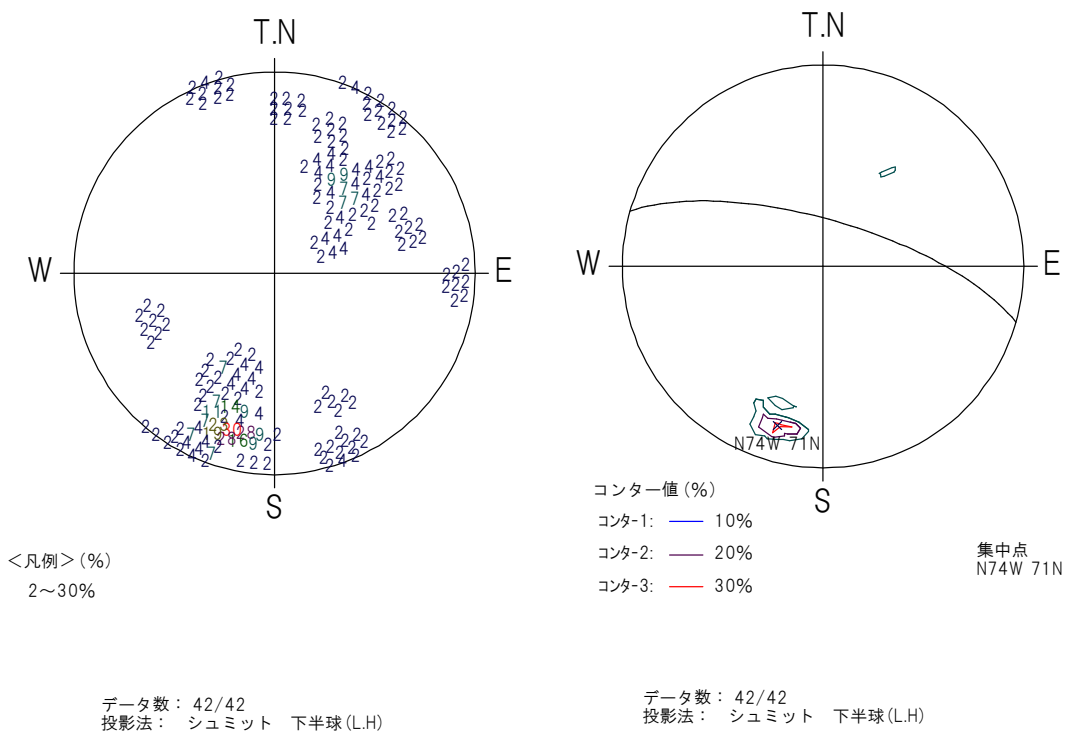
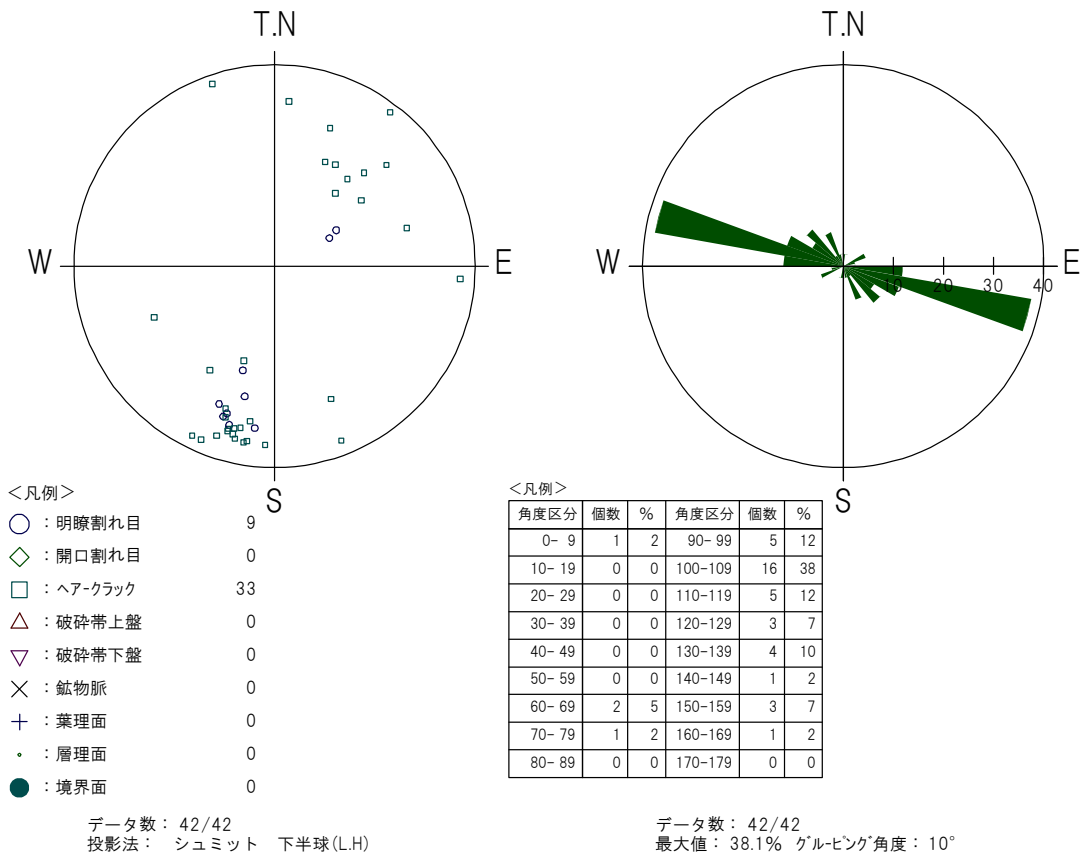


図 3.18 ステレオネット投影図 (12-P350-M01)
(全不連続面)

12-P350-M01

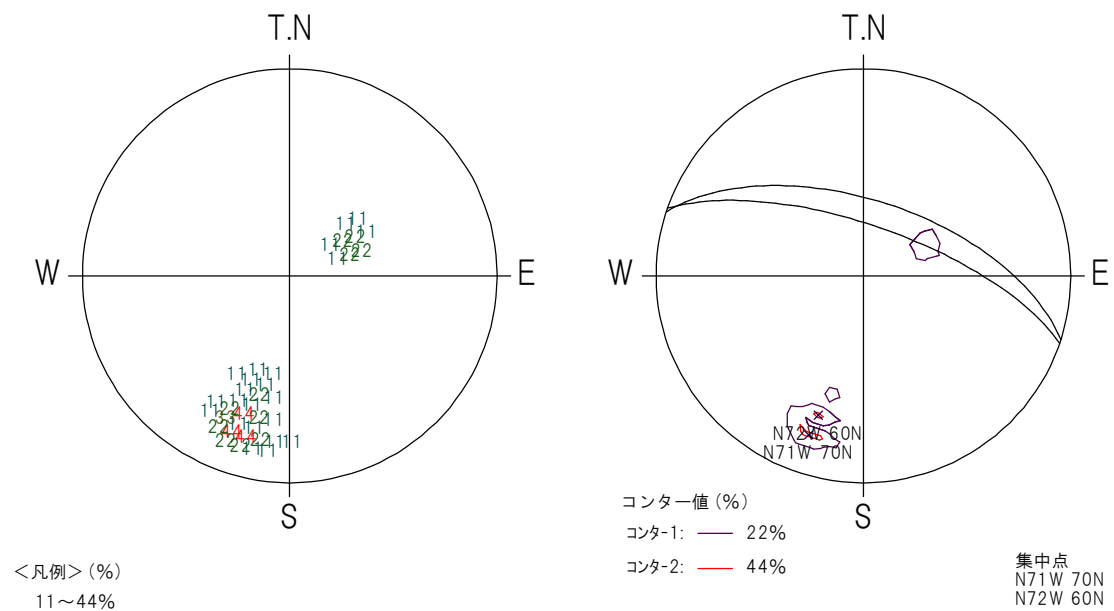
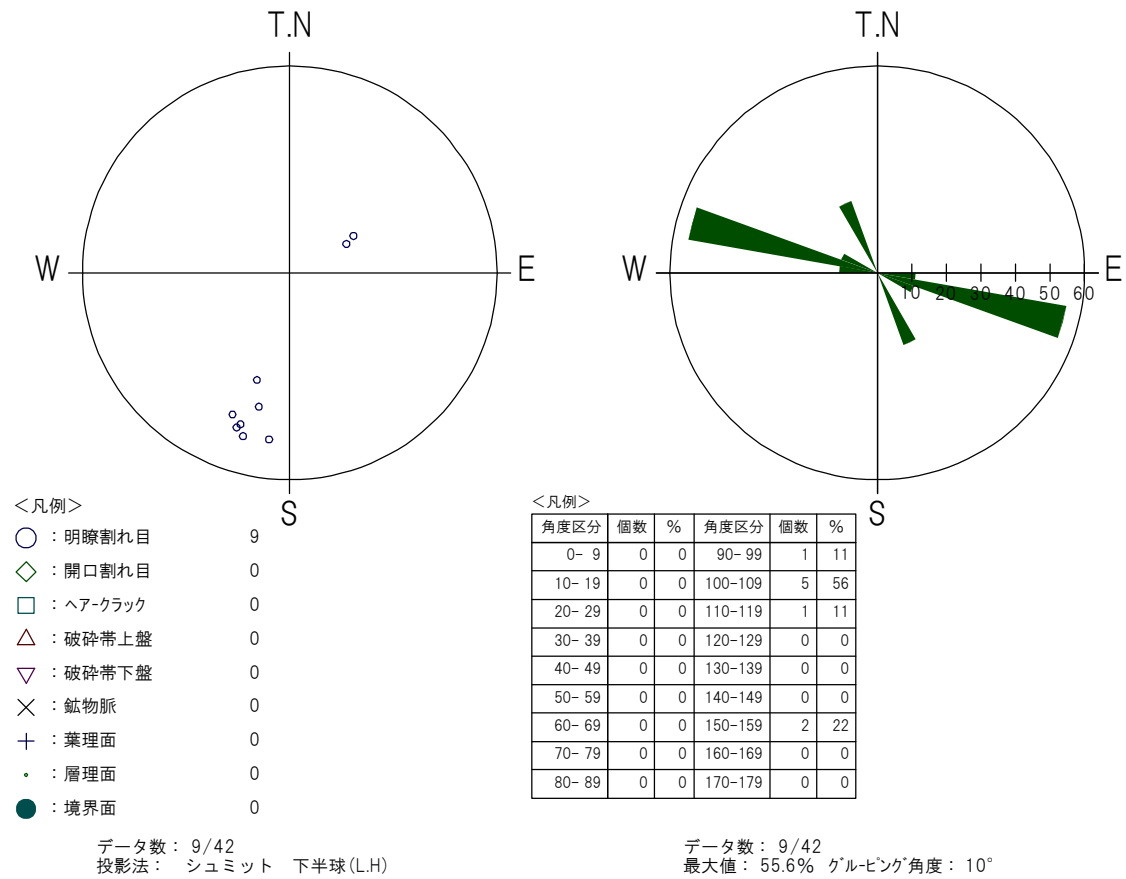


図 3.19 ステレオネット投影図 (12-P350-M01)
(明瞭割れ目)

12-P350-M01

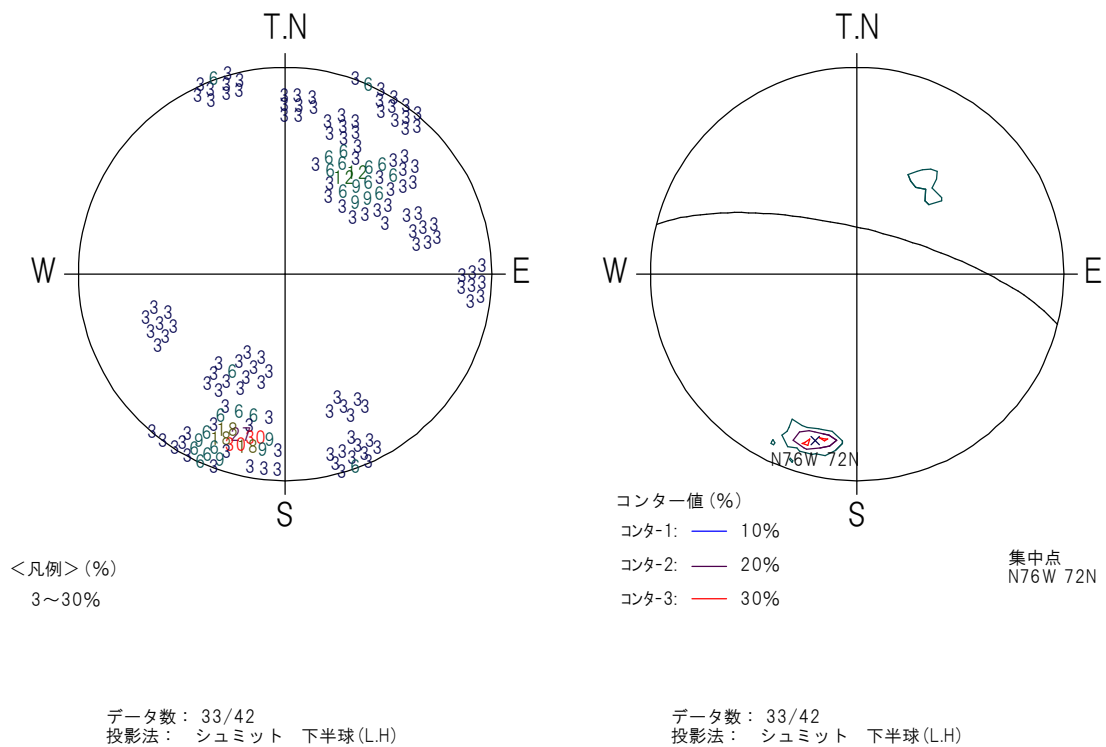
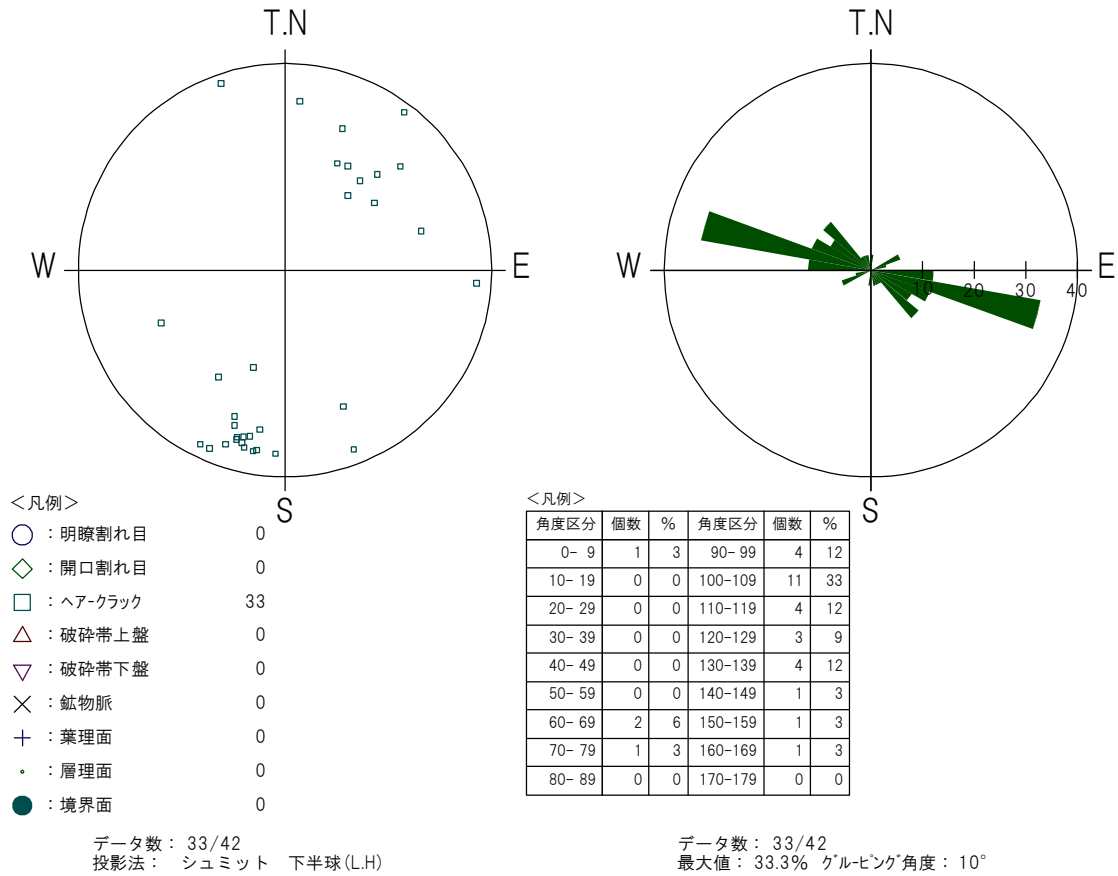


図 3.20 ステレオネット投影図 (12-P350-M01)
(ヘアークラック)

12-P350-M01

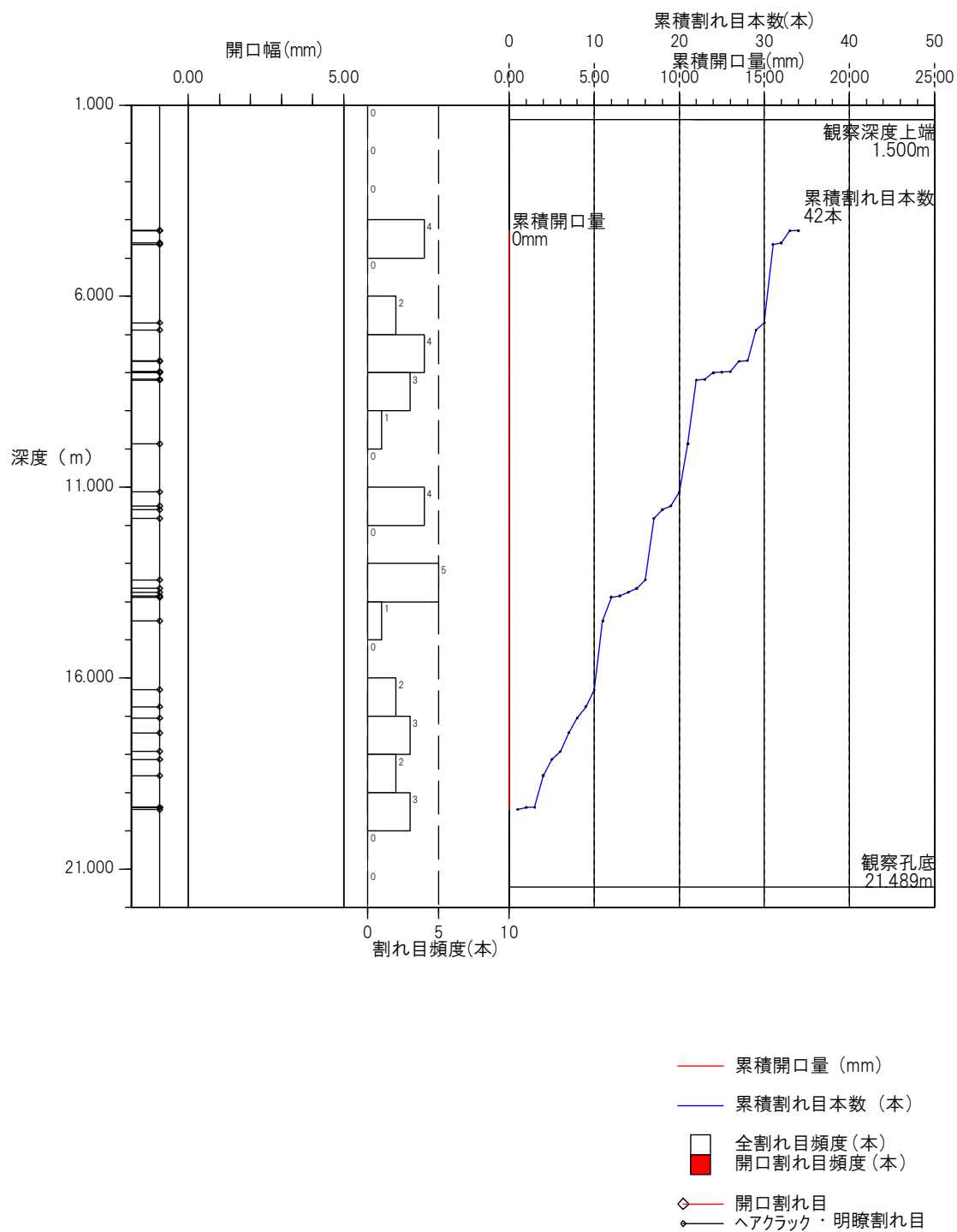
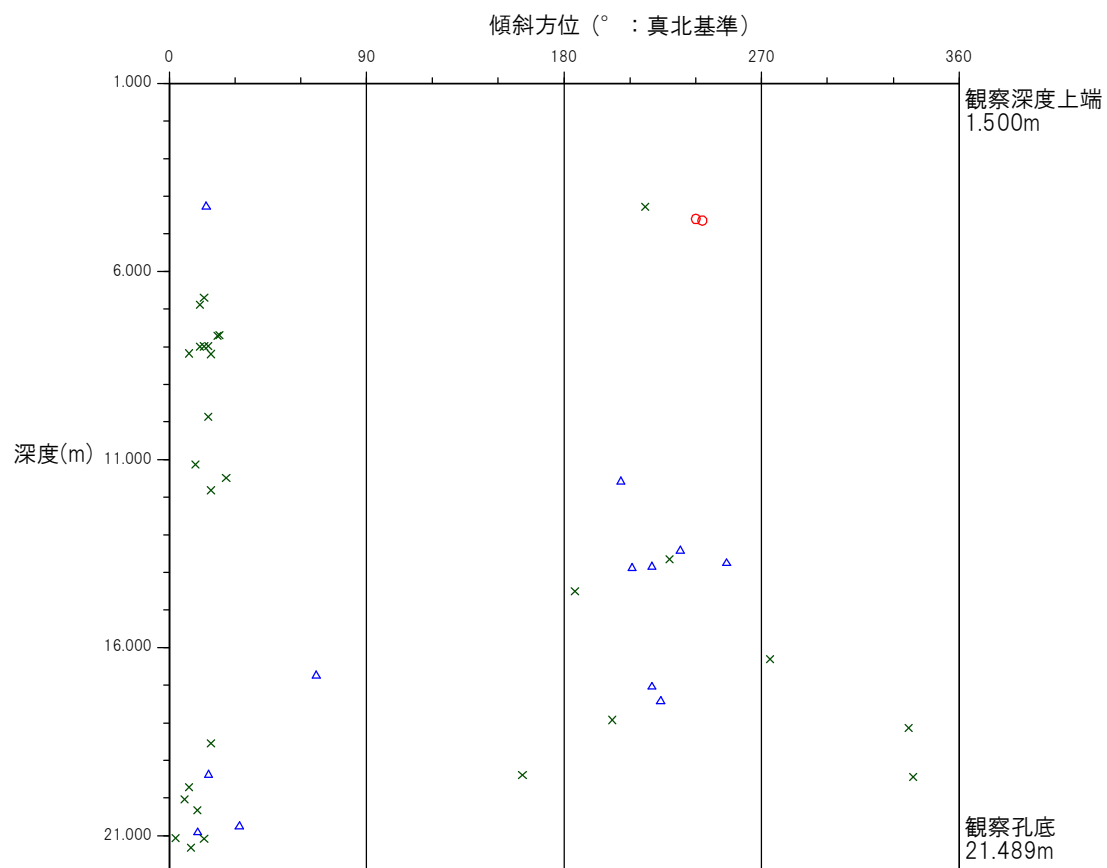


図 3.21 岩盤状態図 (12-P350-M01)
(明瞭割れ目+ヘアークラック)

12-P350-M01

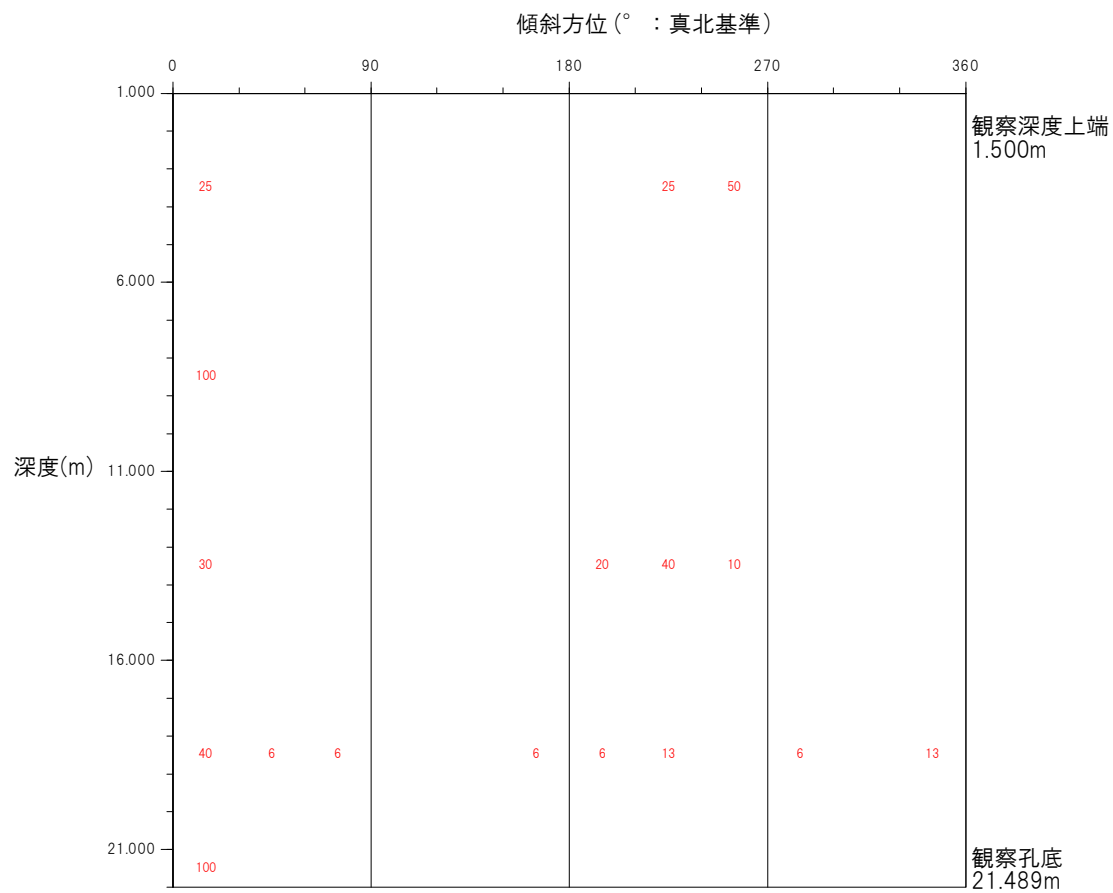


<凡例>

○	傾斜範囲 : 0 ~ 30°
△	: 31 ~ 60°
×	: 61 ~ 90°

図 3.22 AVTD 分散図 (12-P350-M01)
(明瞭割れ目+ヘアークラック)

12-P350-M01



<凡例>
表示範囲 : 6 ~ 100 %

図 3.23 AVTD 密度図 (12-P350-M01)
(明瞭割れ目+ヘアークラック)

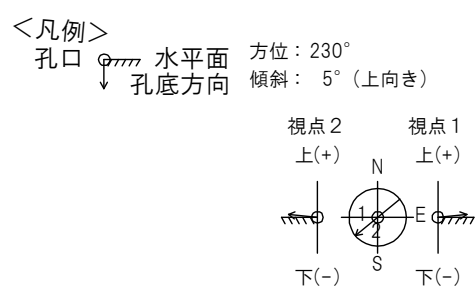
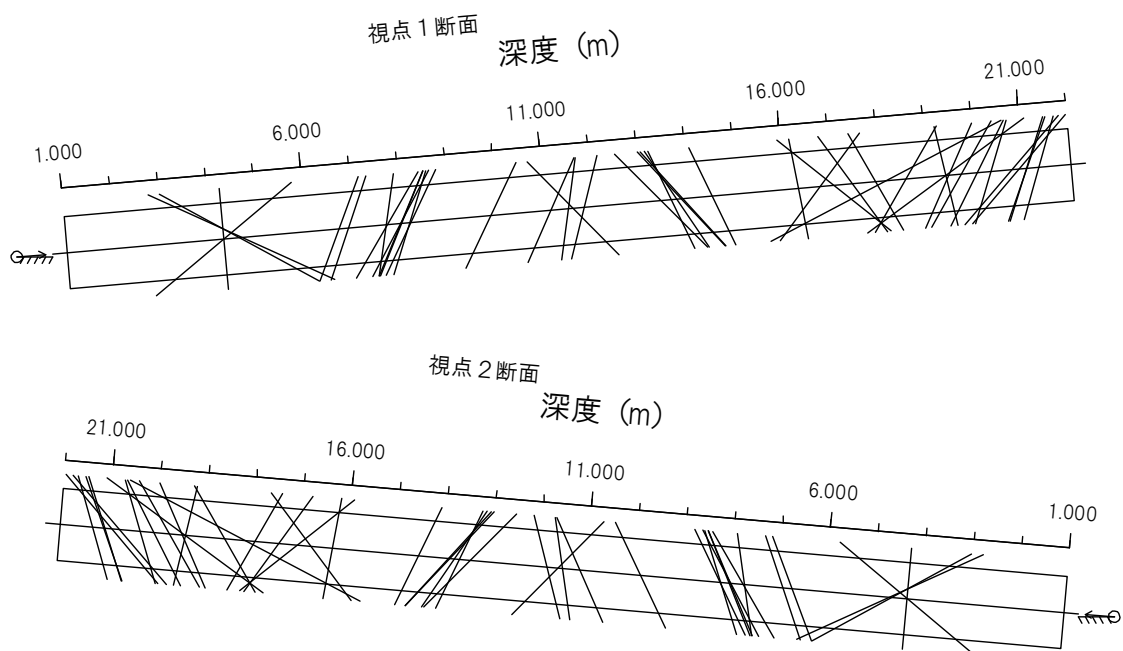
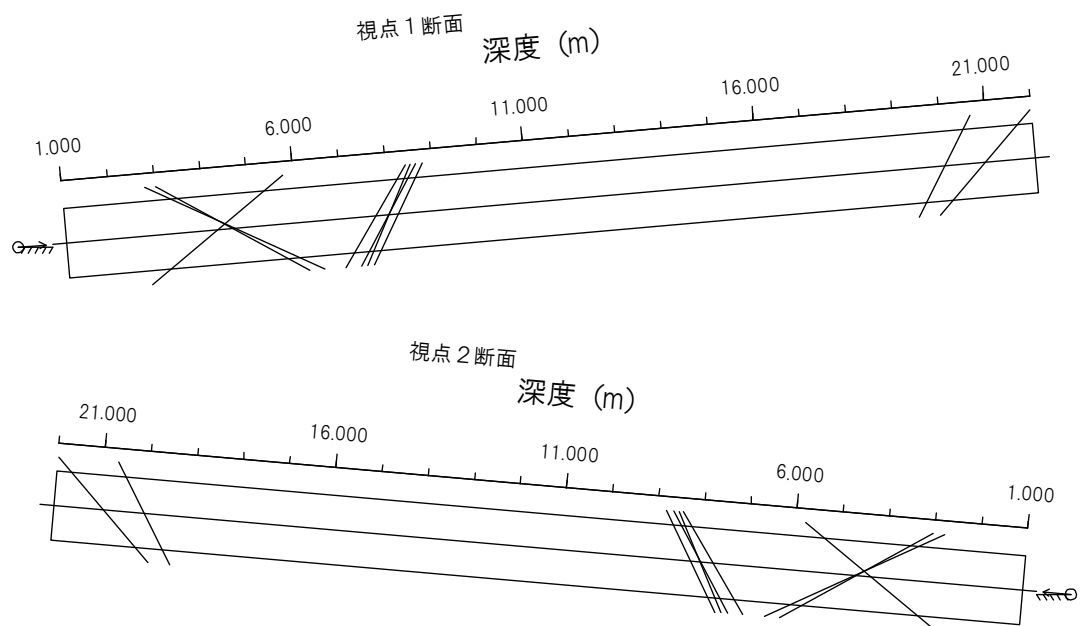


図 3.24 見掛け傾斜図 (12-P350-M01)
(全不連続面)



<凡例>

孔口 水平面 方位：230°
 ↓ 孔底方向 傾斜：5°（上向き）

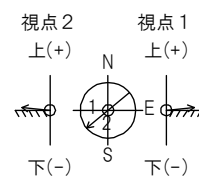


図 3.25 見掛け傾斜図（12-P350-M01）
 （明瞭割れ目）

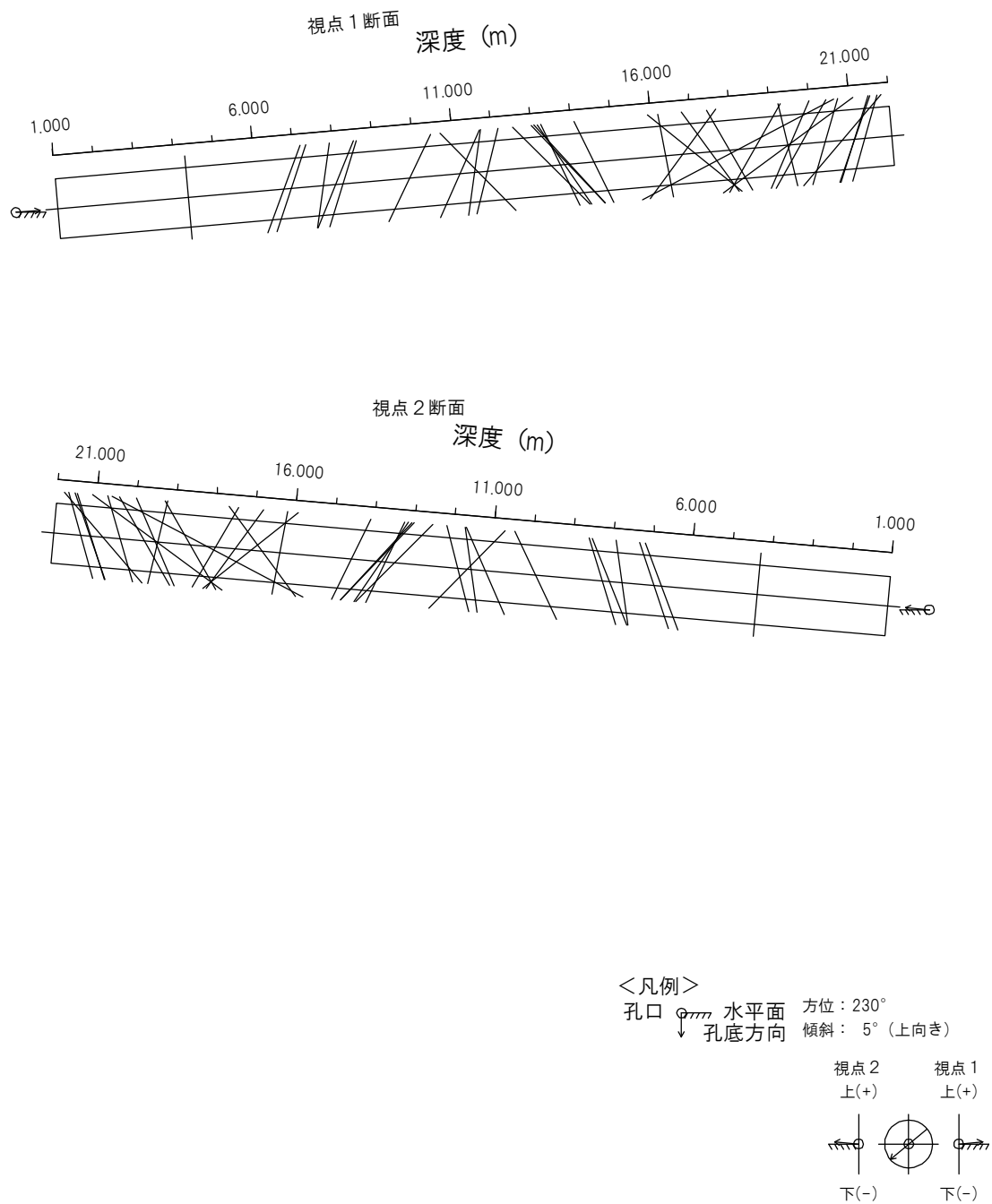


図 3.26 見掛け傾斜図 (12-P350-M01)
(ヘアーラック)

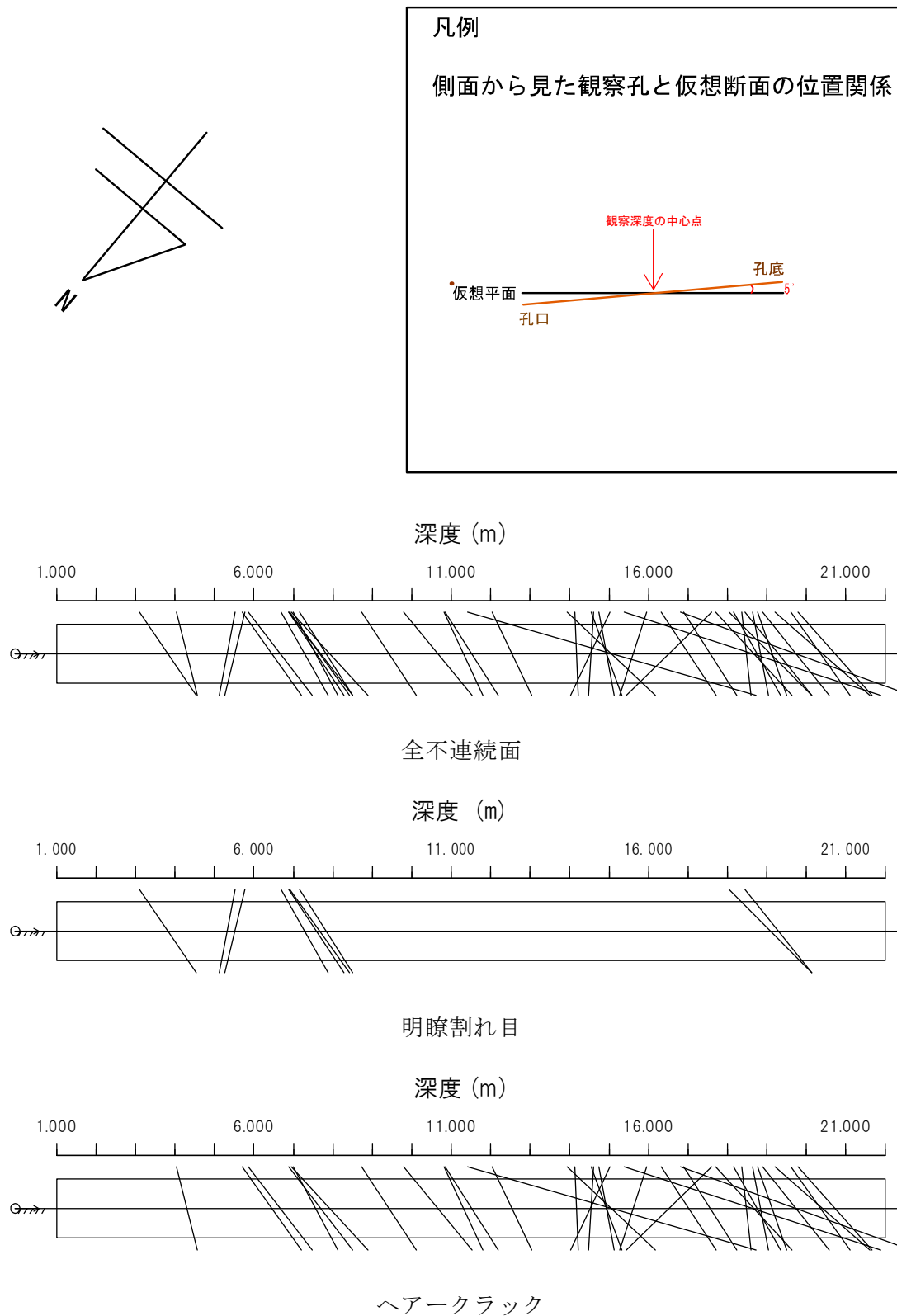


図 3.27 水平断面図 (レベル: ボーリング孔中間点) (12-P350-M01)

12-P350-M01

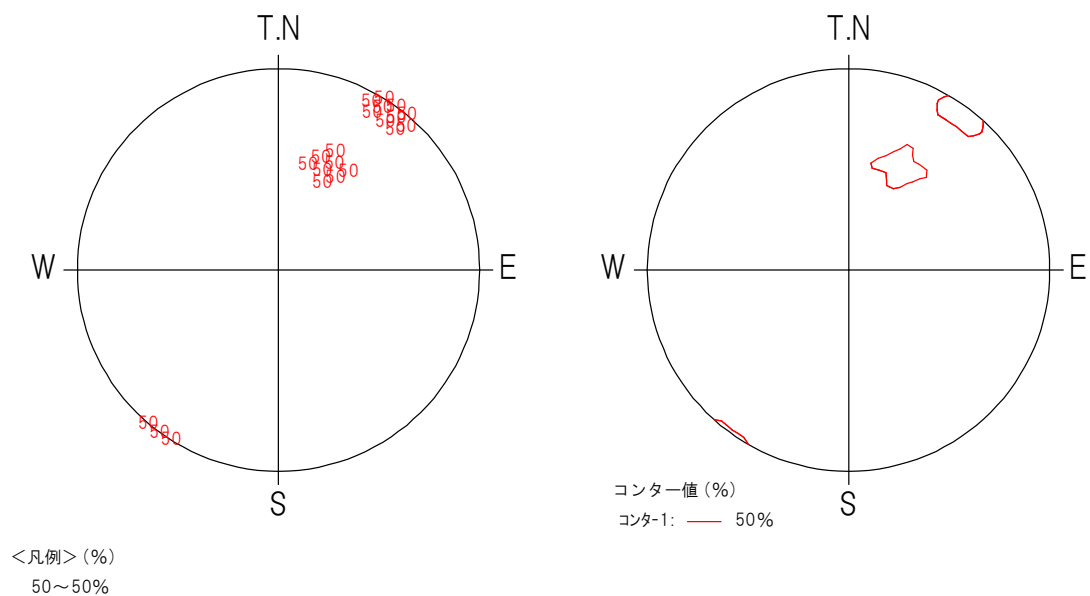
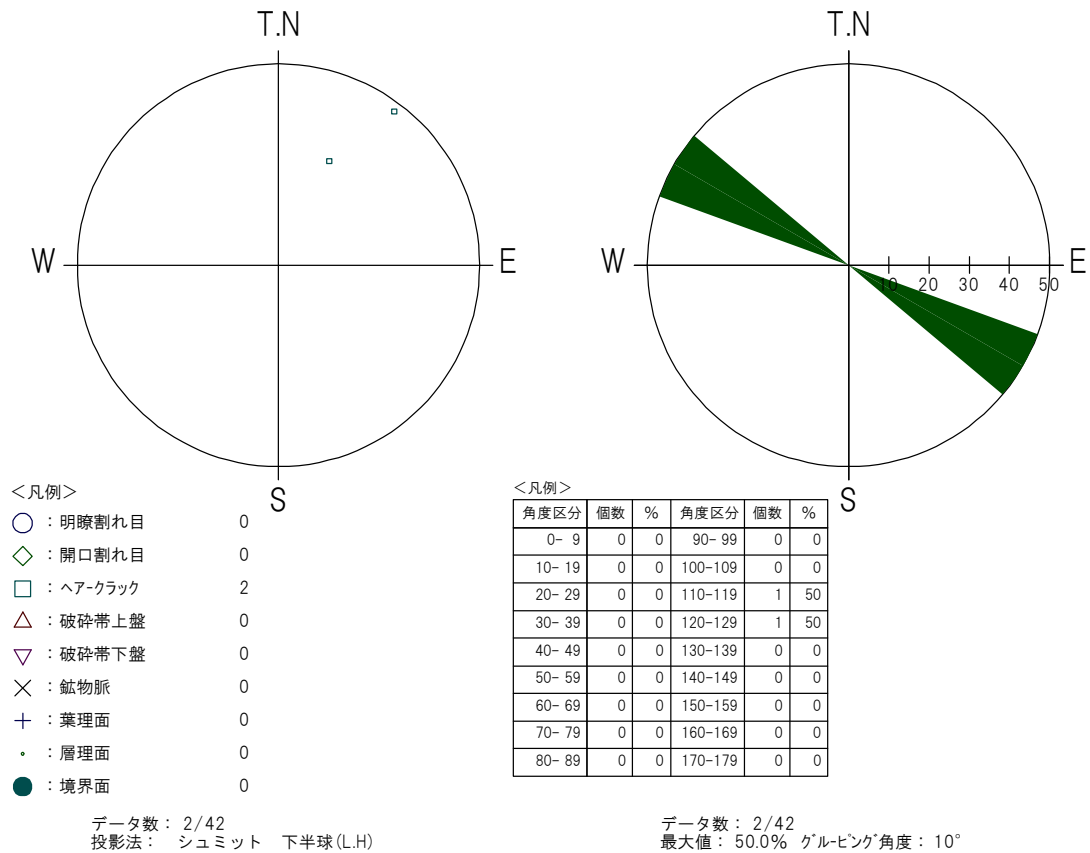


図 3.28 割れ目形状タイプ別のステレオネット投影図 (12-P350-M01)
(明瞭割れ目+開口割れ目+ヘアークラック、形状 P)

12-P350-M01

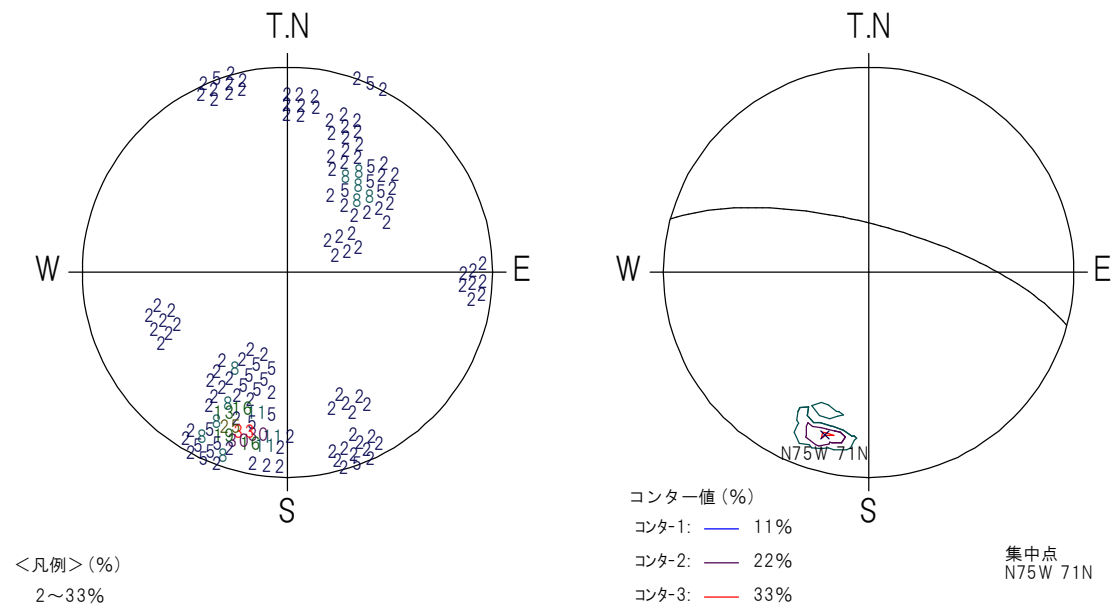
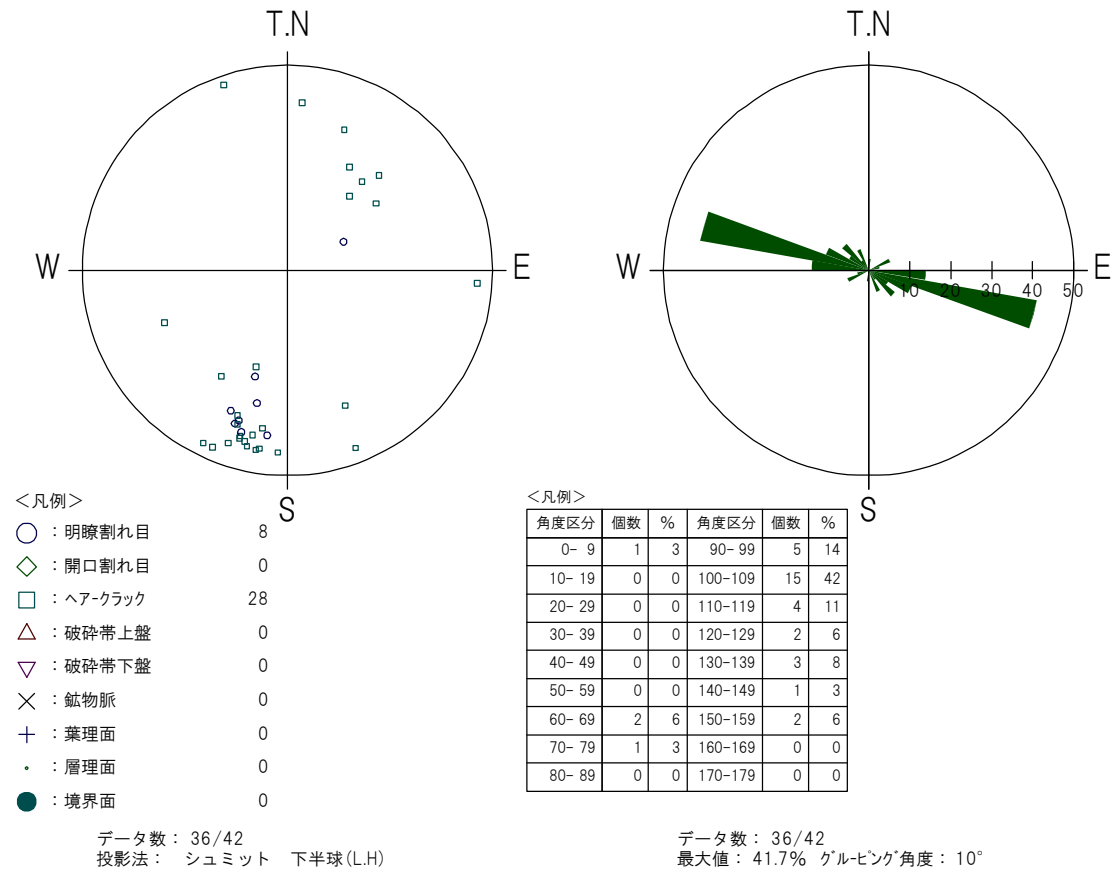


図 3.29 割れ目形状タイプ別のステレオネット投影図 (12-P350-M01)
(明瞭割れ目+開口割れ目+ヘアークラック、形状 C)

12-P350-M01

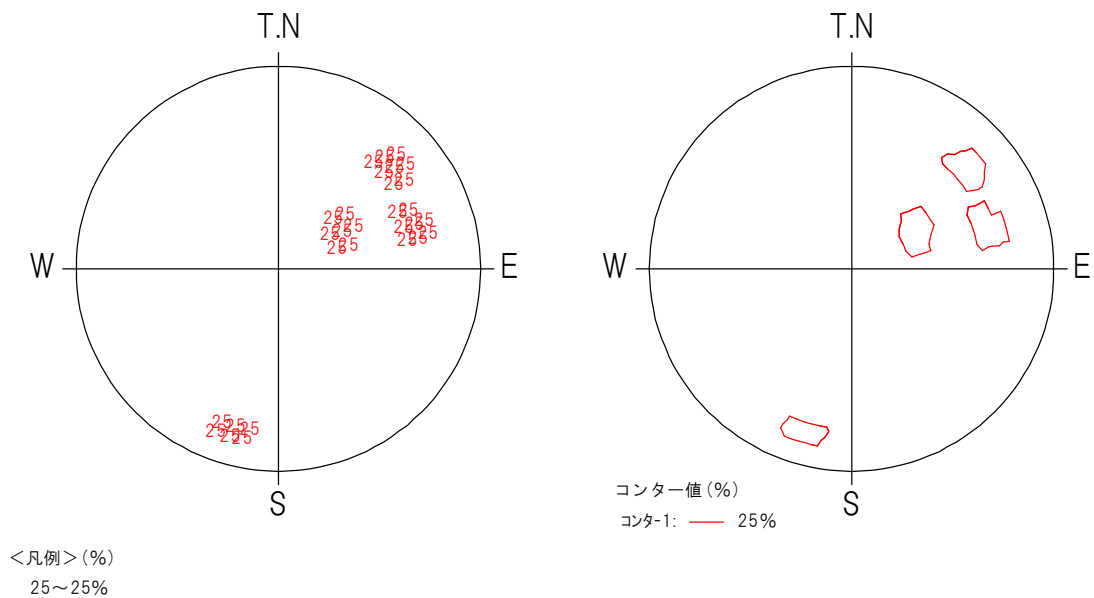
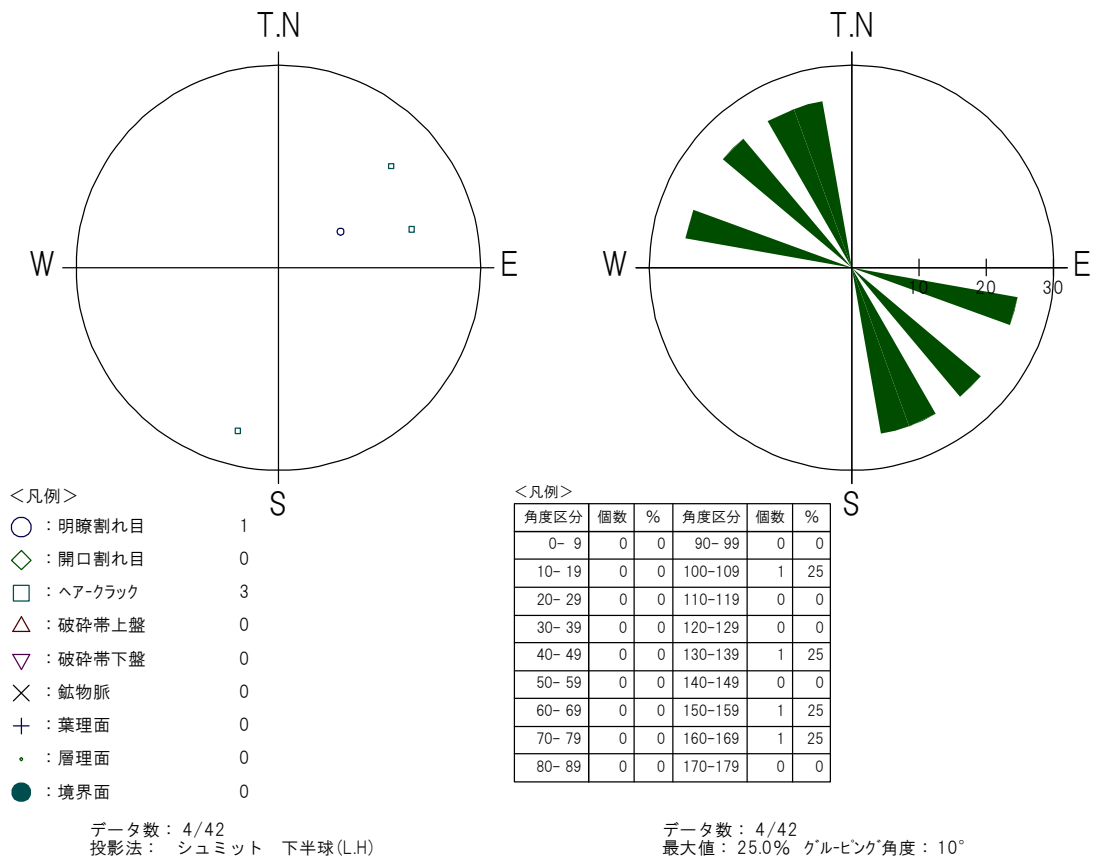


図 3.30 割れ目形状タイプ別のステレオネット投影図 (12-P350-M01)
(明瞭割れ目+開口割れ目+ヘアークラック、形状 S)

12-P350-M02

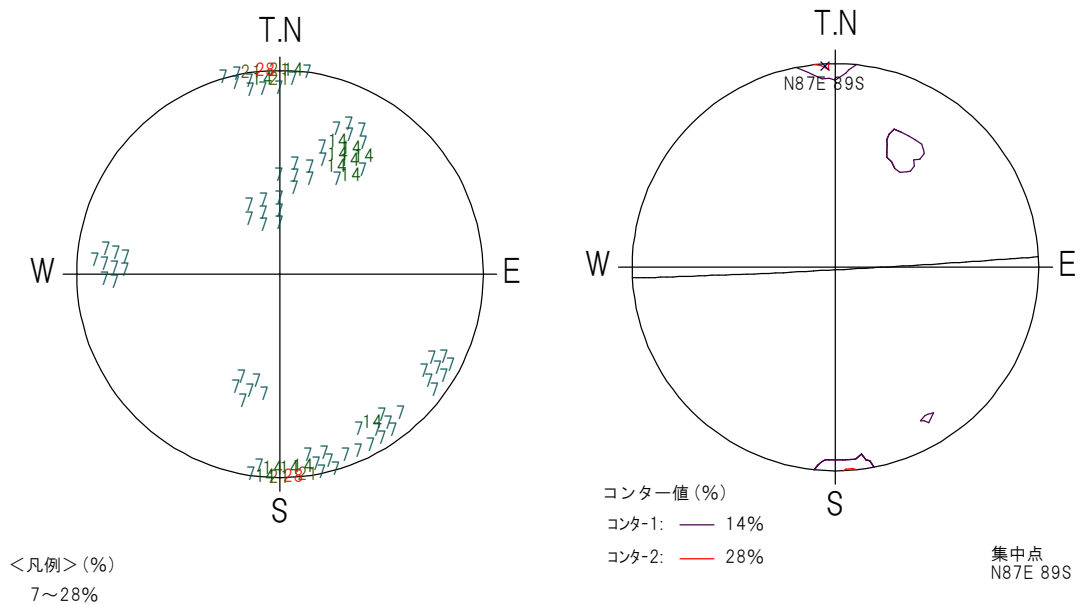
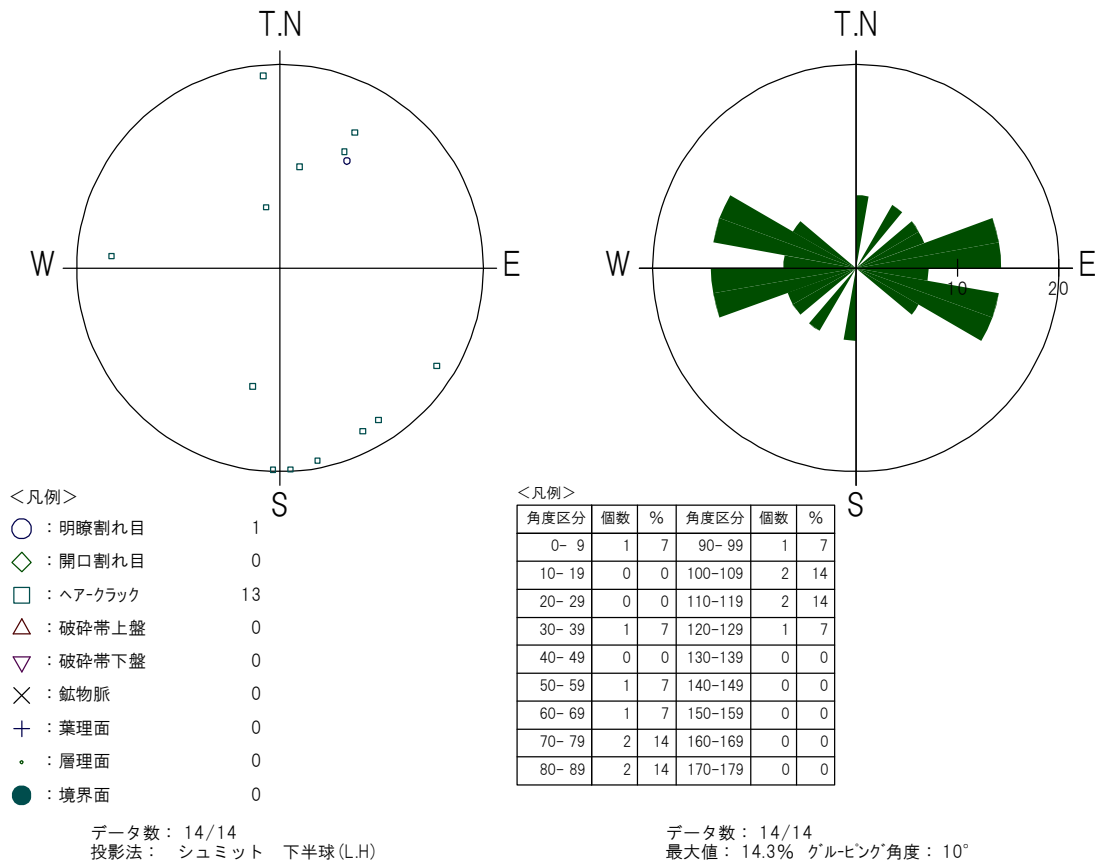


図 3.31 ステレオネット投影図 (12-P350-M02)
(全不連続面)

12-P350-M02

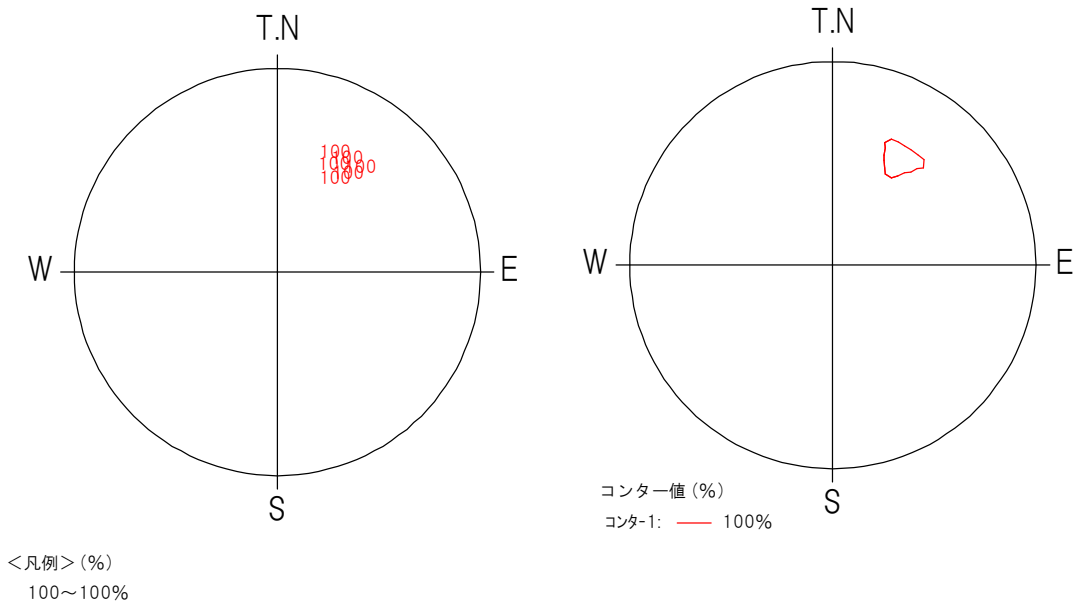
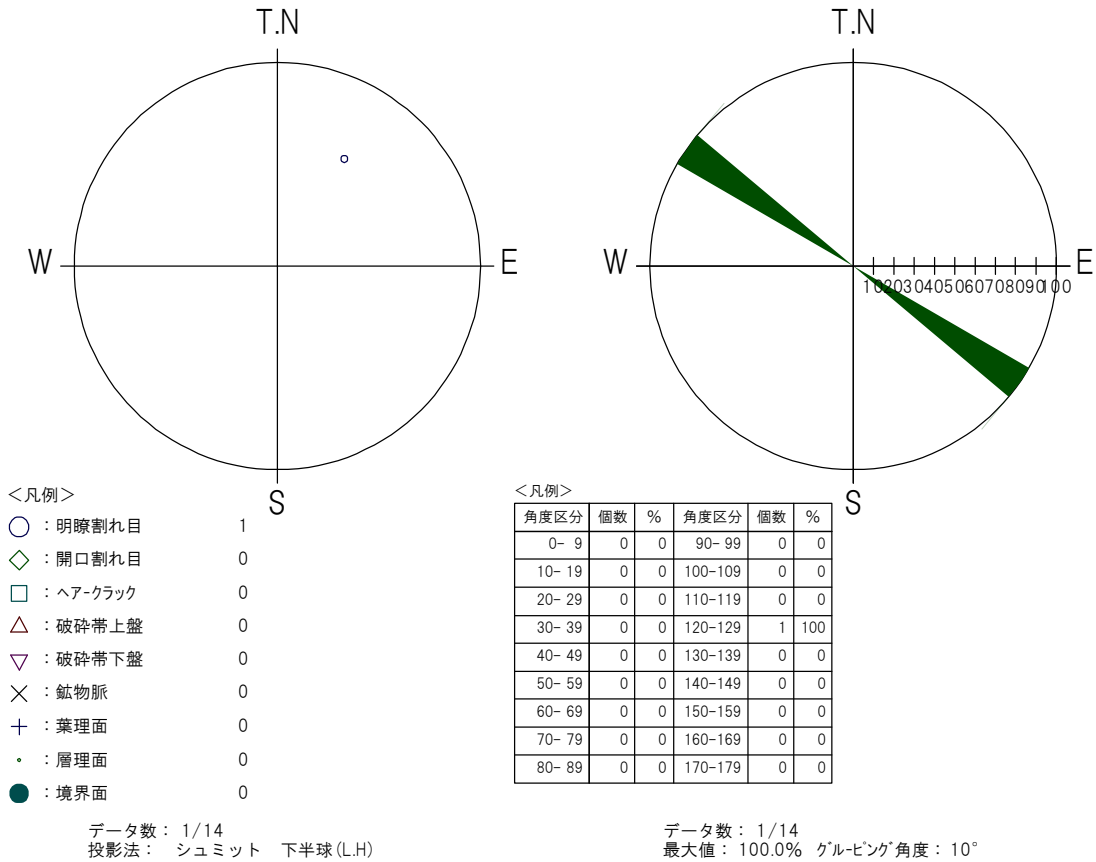


図 3.32 ステレオネット投影図 (12-P350-M02)
(明瞭割れ目)

12-P350-M02

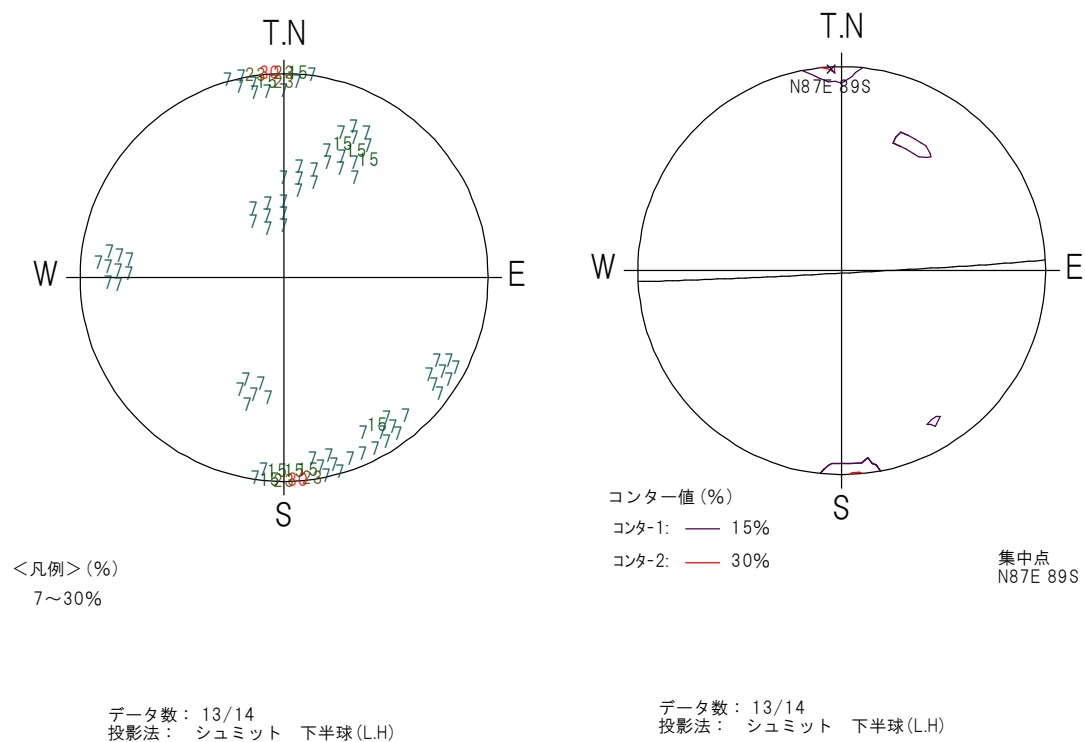
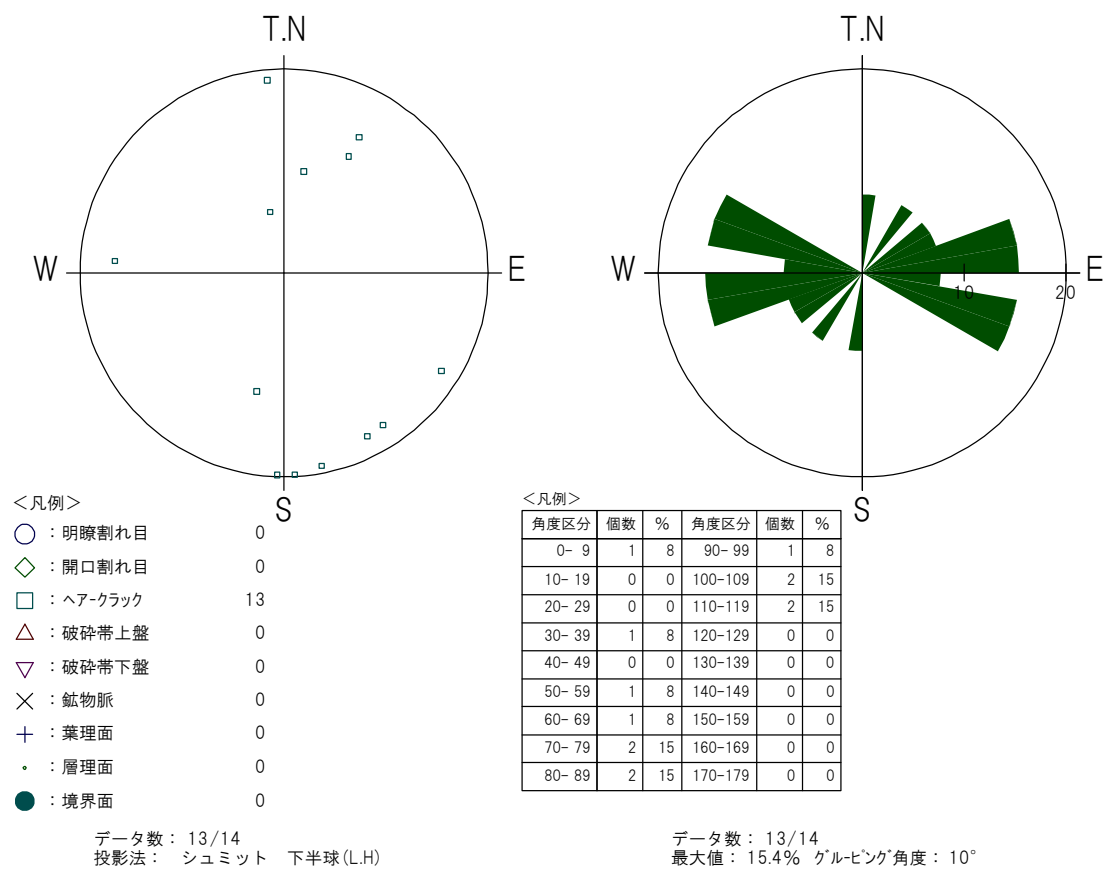


図 3.33 ステレオネット投影図 (12-P350-M02)
(ヘアクラック)

12-P350-M02

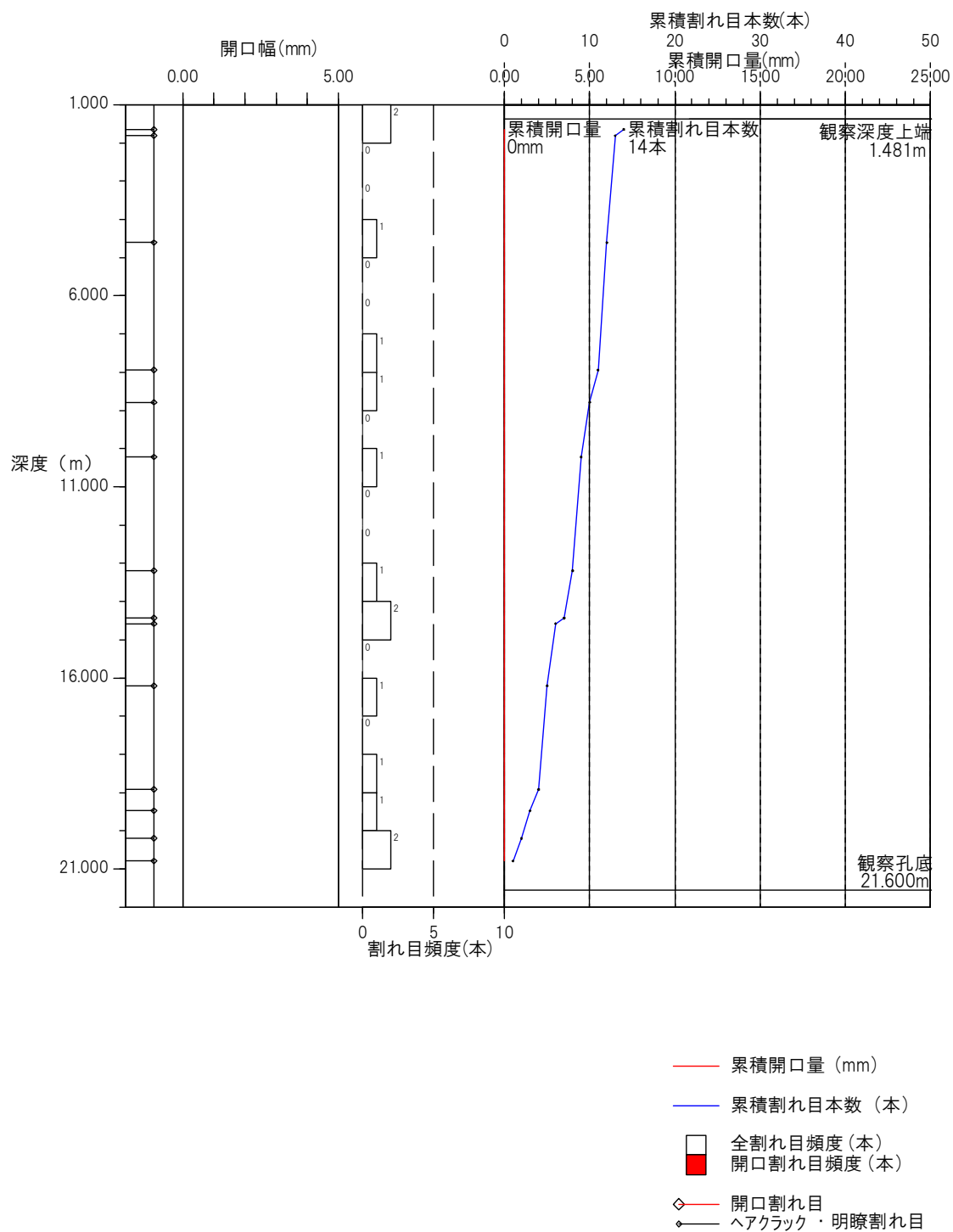
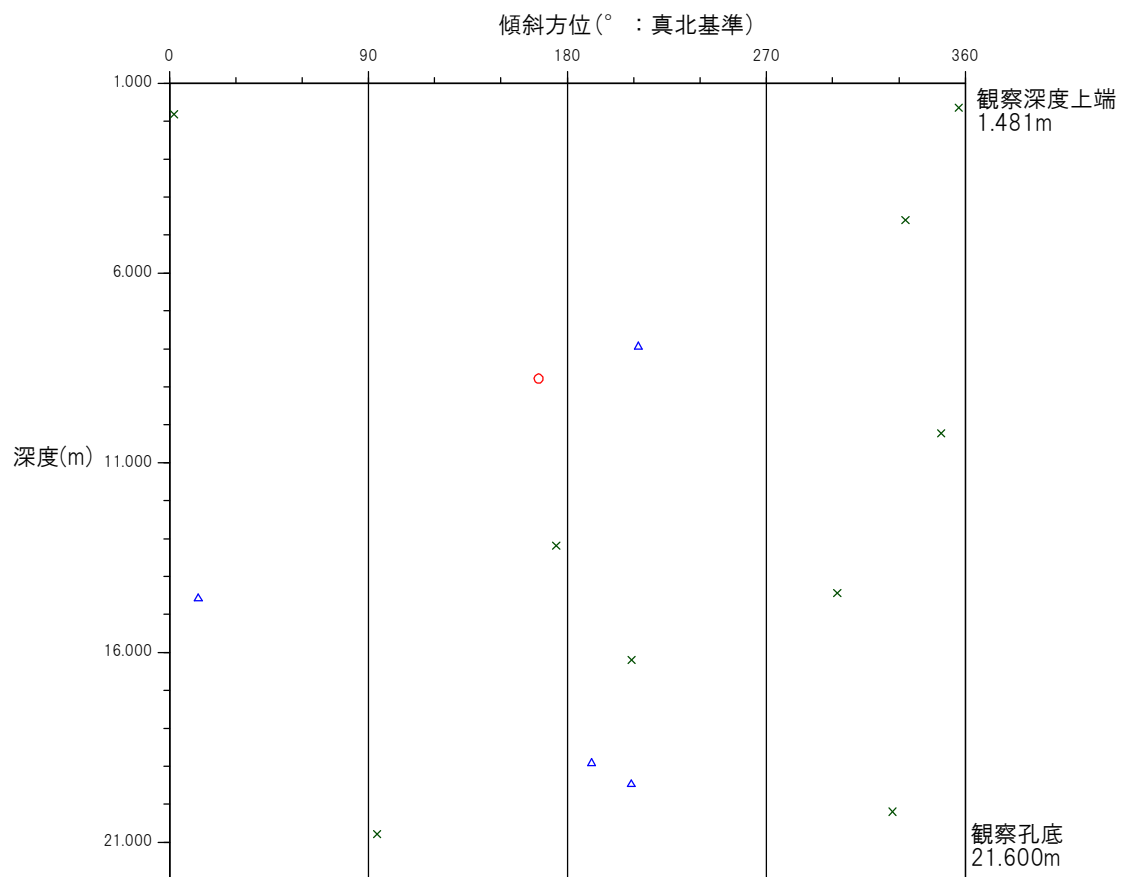


図 3.34 岩盤状態図 (12-P350-M02)
(明瞭割れ目+開口割れ目+ヘアークラック)

12-P350-M02



<凡例>

傾斜範囲

○ : 0 ~ 30°

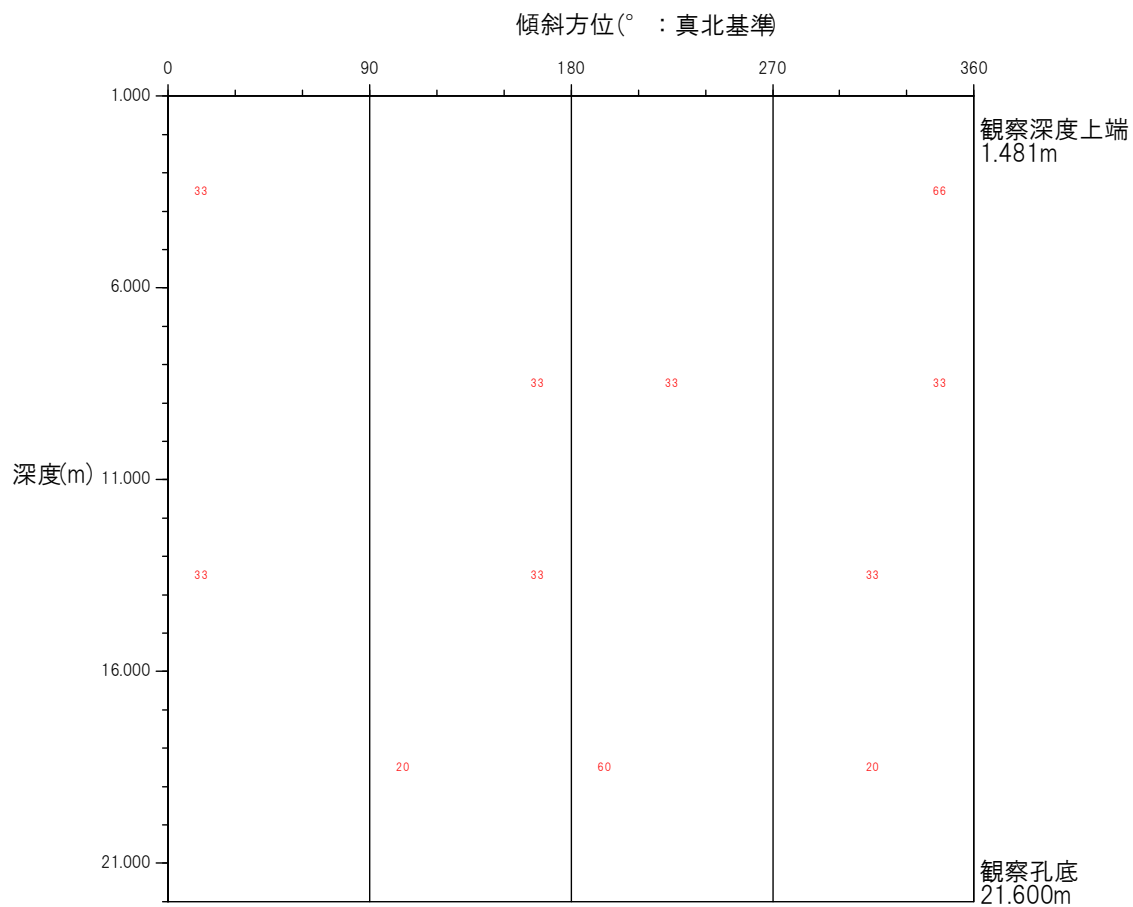
△ : 31 ~ 60°

× : 61 ~ 90°

図 3.35 AVTD 分散図 (12-P350-M02)

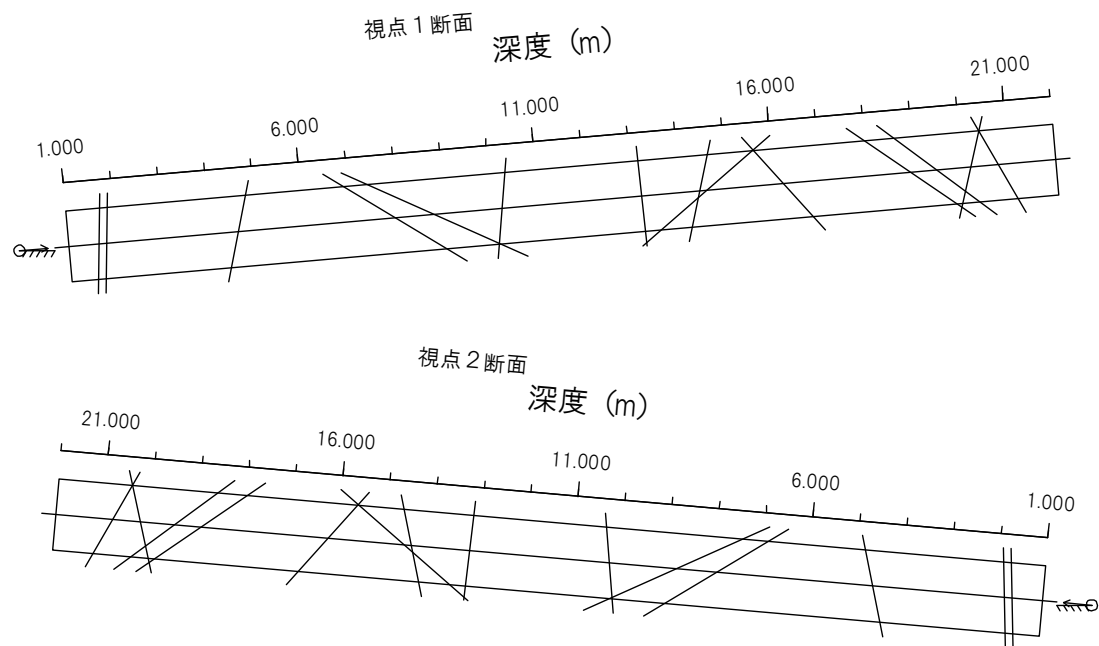
(明瞭割れ目+開口割れ目+ヘアークラック)

12-P350-M02



<凡例>
表示範囲：20 ~ 66 %

図 3.36 AVTD 密度図 (12-P350-M02)
(明瞭割れ目+開口割れ目+ヘアークラック)



<凡例>

孔口 水平面 方位：150°
 ↓ 孔底方向 傾斜：5° (上向き)

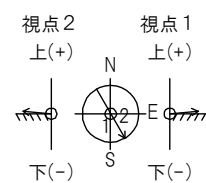
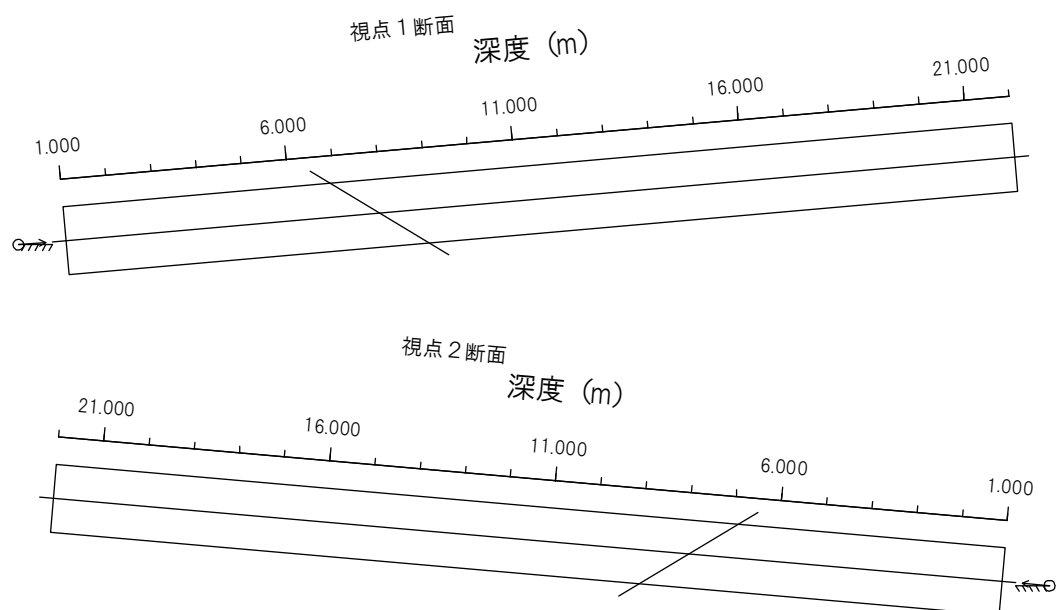


図 3.37 見掛け傾斜図 (12-P350-M02)
 (全不連続面)



<凡例>

孔口 水平面 方位：150°
 ↓ 孔底方向 傾斜：5°（上向き）

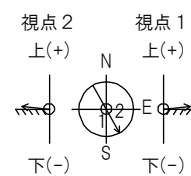
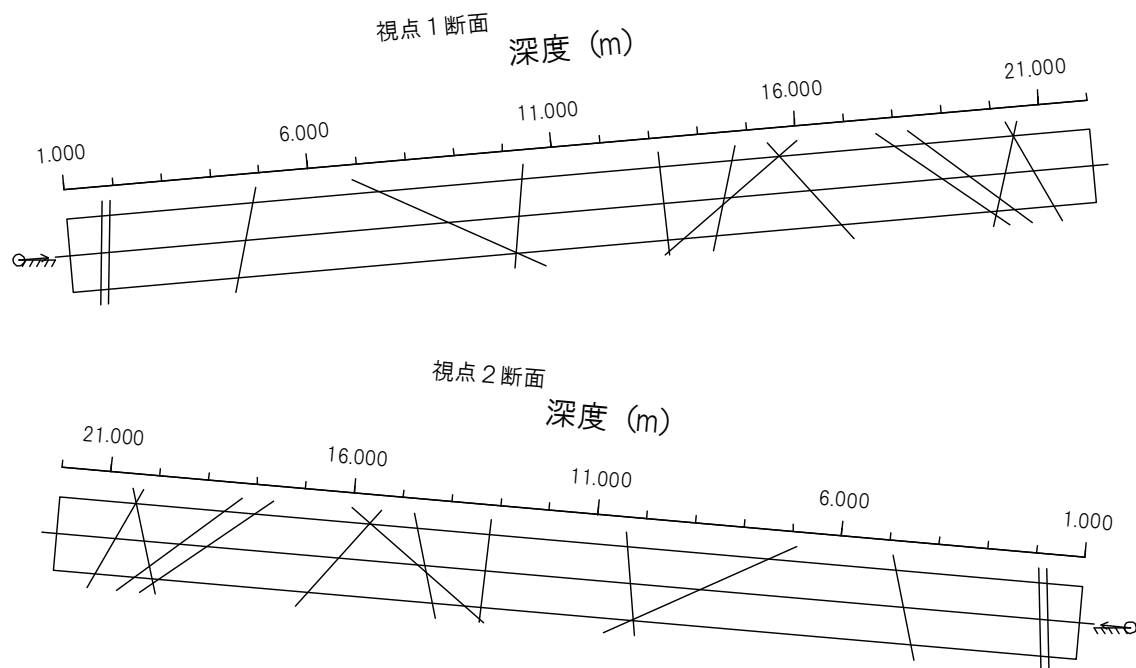


図 3.38 見掛け傾斜図（12-P350-M02）
 （明瞭割れ目）



<凡例>

孔口 水平面 方位：150°
 ↓ 孔底方向 傾斜：5°（上向き）

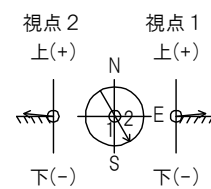


図 3.39 見掛け傾斜図（12-P350-M02）
 （ヘアーラック）

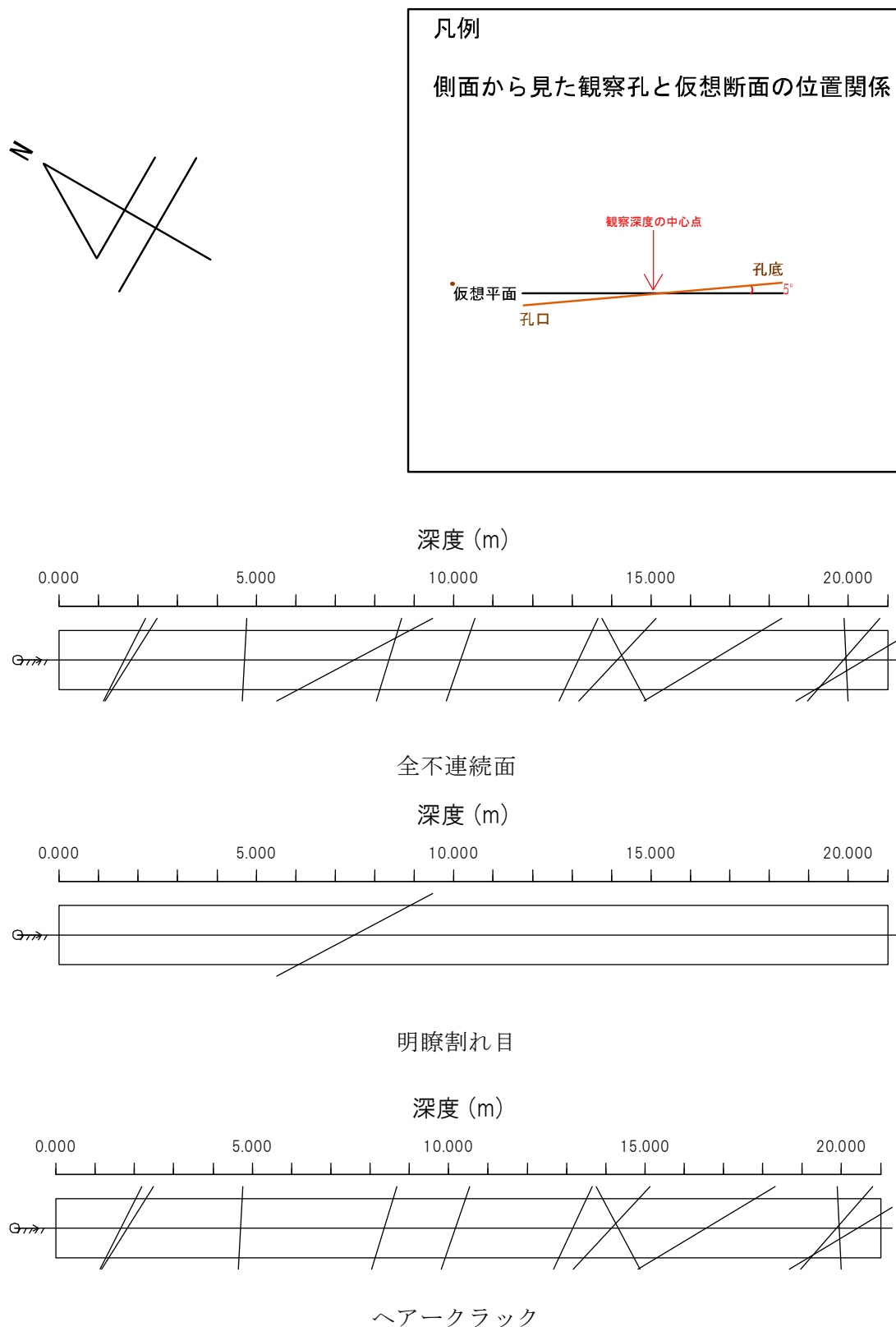


図 3.40 水平断面図（レベル：ボーリング孔中間点）（12-P350-M02）

12-P350-M02

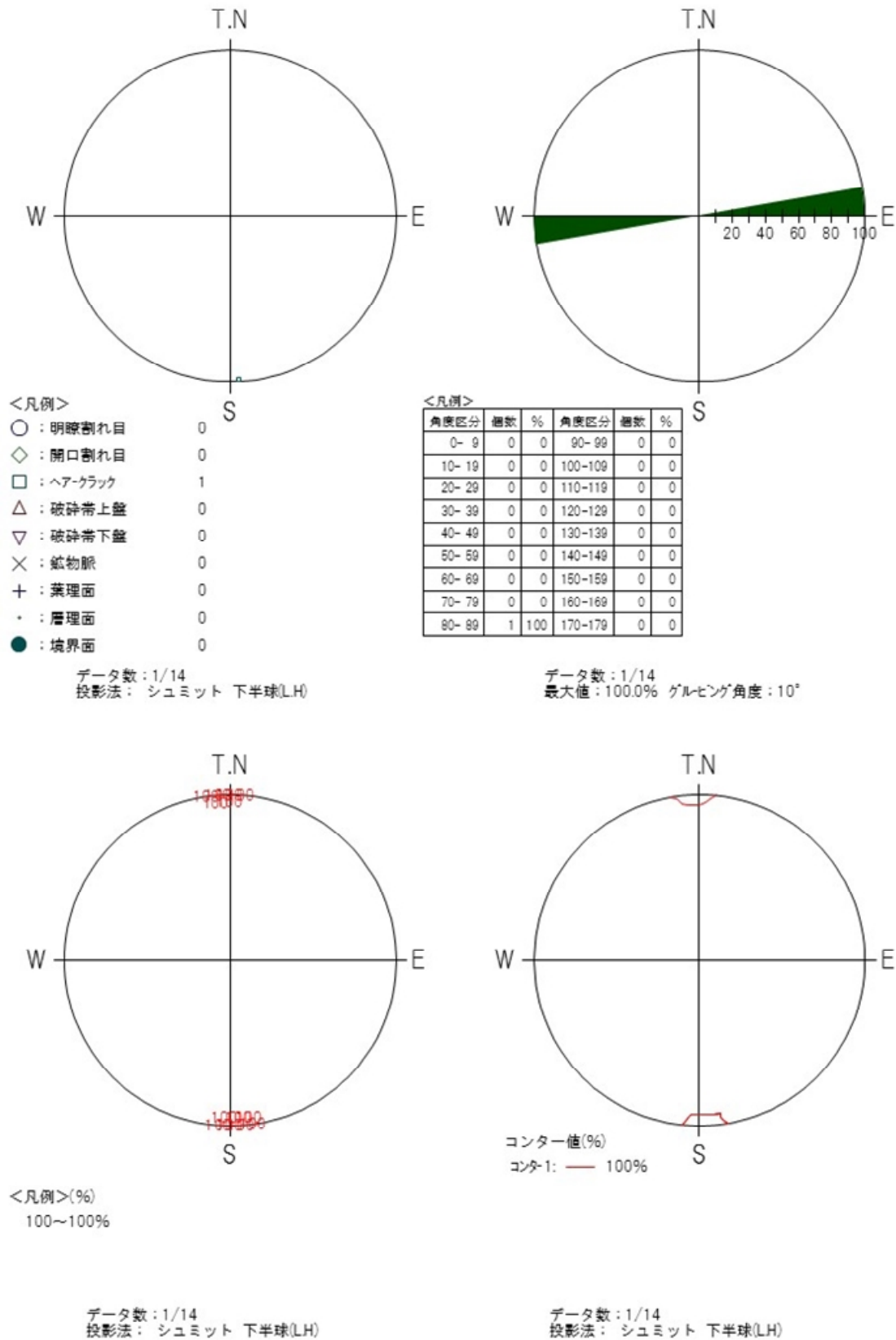
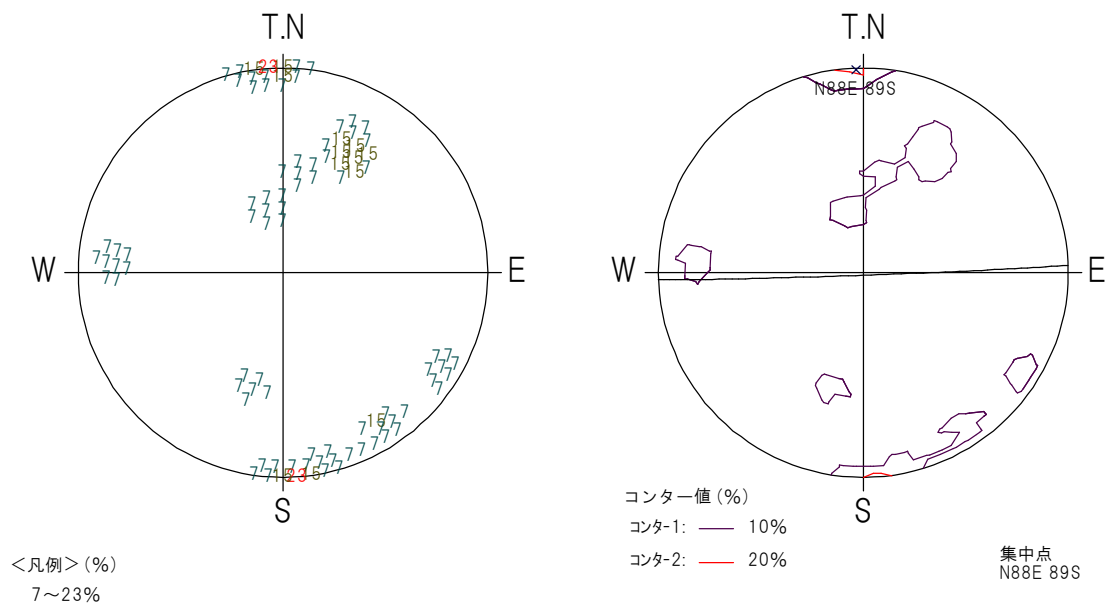
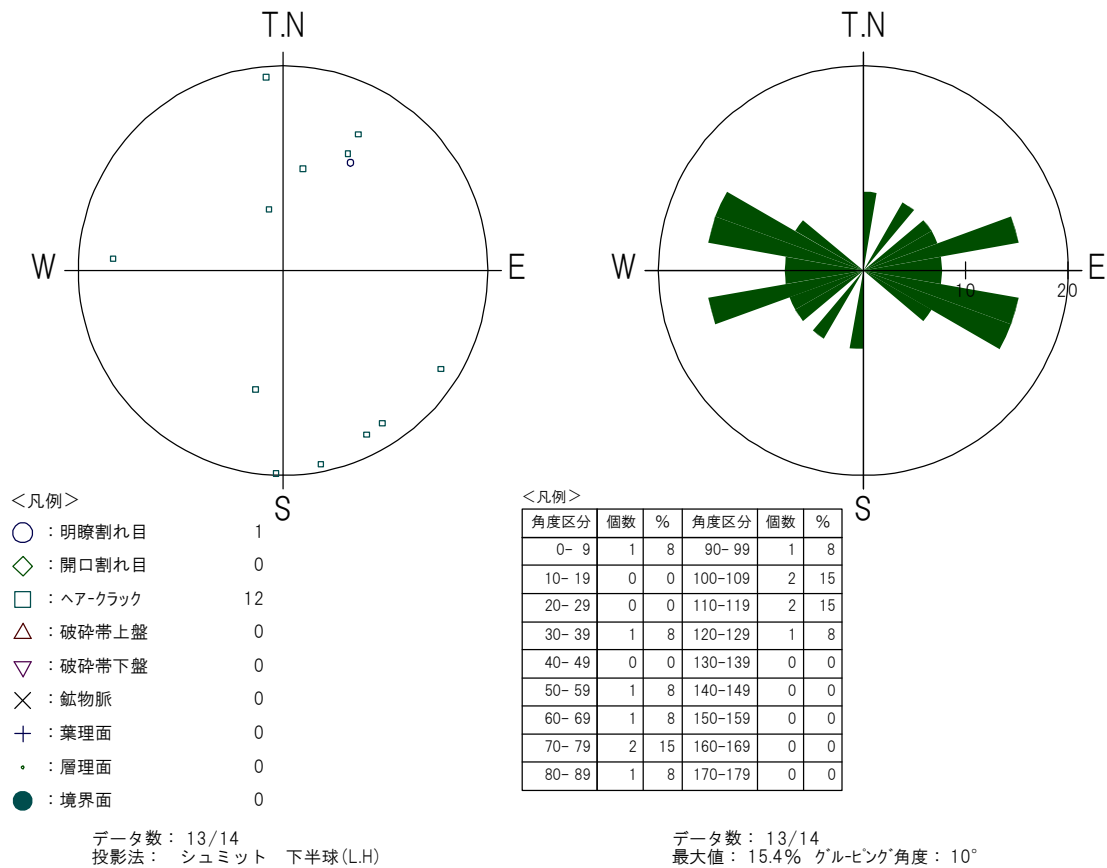


図 3.41 割れ目形状タイプ別のステレオネット投影図 (12-P350-M02)
(明瞭割れ目+開口割れ目+ヘアークラック、形状 P)

12-P350-M02

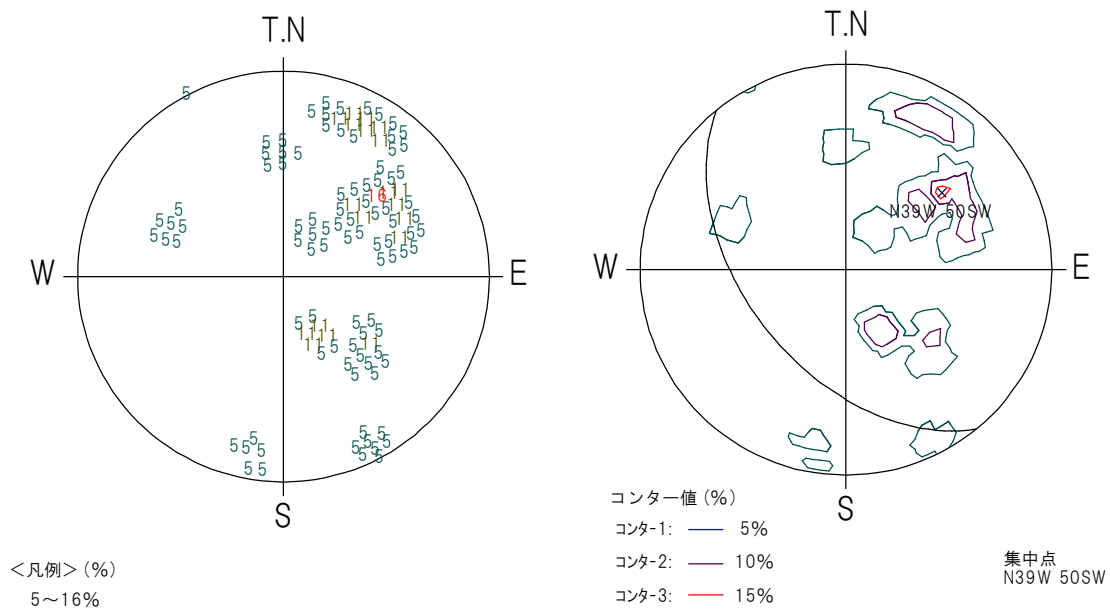
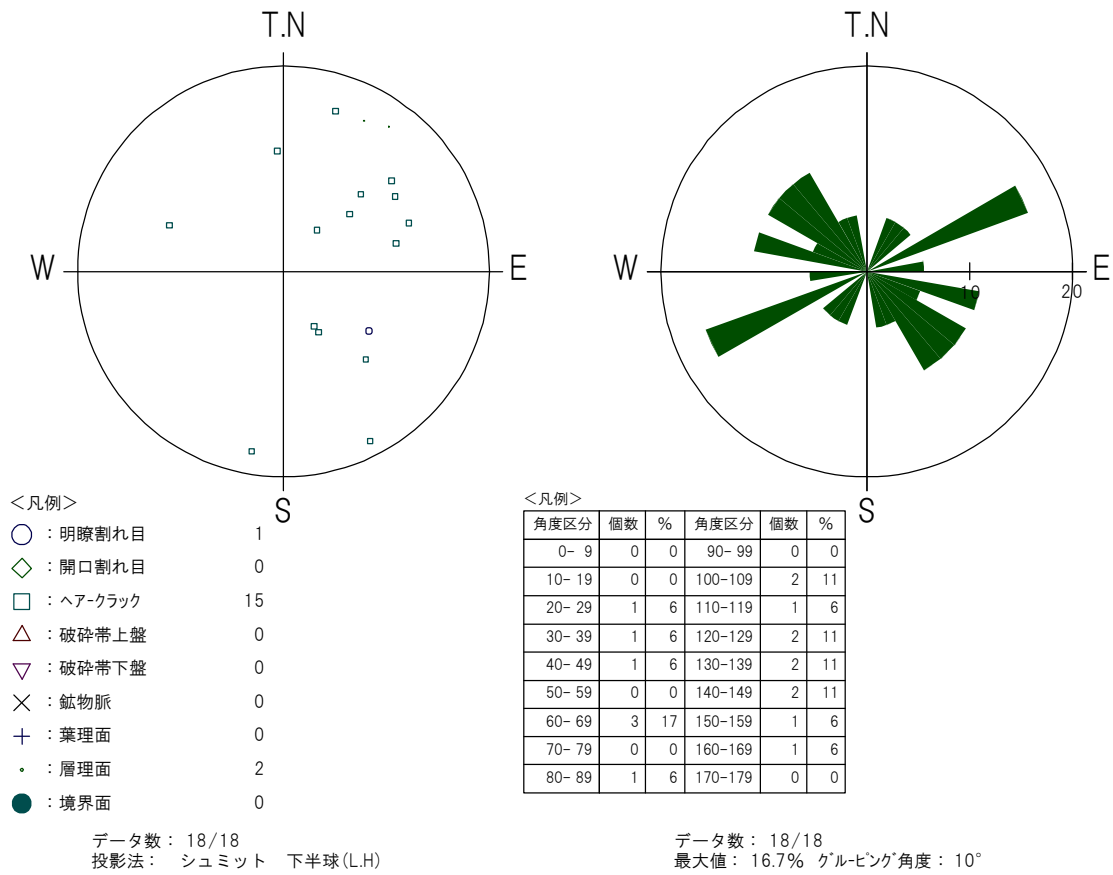


データ数: 13/14
投影法: シュミット 下半球 (L.H)

データ数: 13/14
投影法: シュミット 下半球 (L.H)

図 3.42 割れ目形状タイプ別のステレオネット投影図 (12-P350-M02)
(明瞭割れ目+開口割れ目+ヘアークラック、形状 C)

12-P350-M03



データ数 : 18/18
投影法 : シュミット 下半球 (L.H)

データ数 : 18/18
投影法 : シュミット 下半球 (L.H)

図 3.43 ステレオネット投影図 (12-P350-M03)
(全不連続面)

12-P350-M03

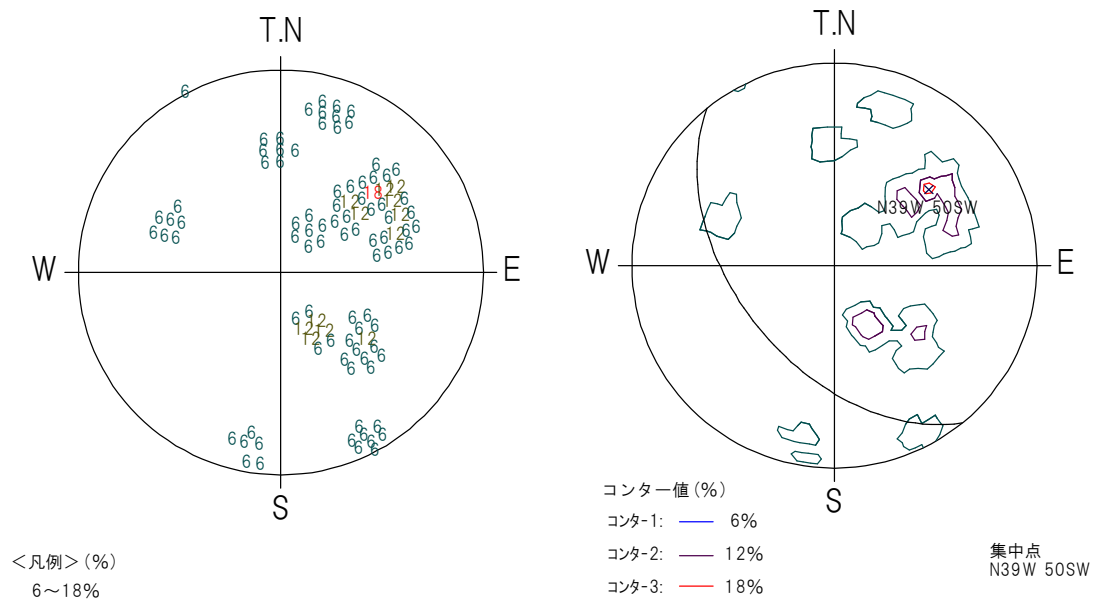
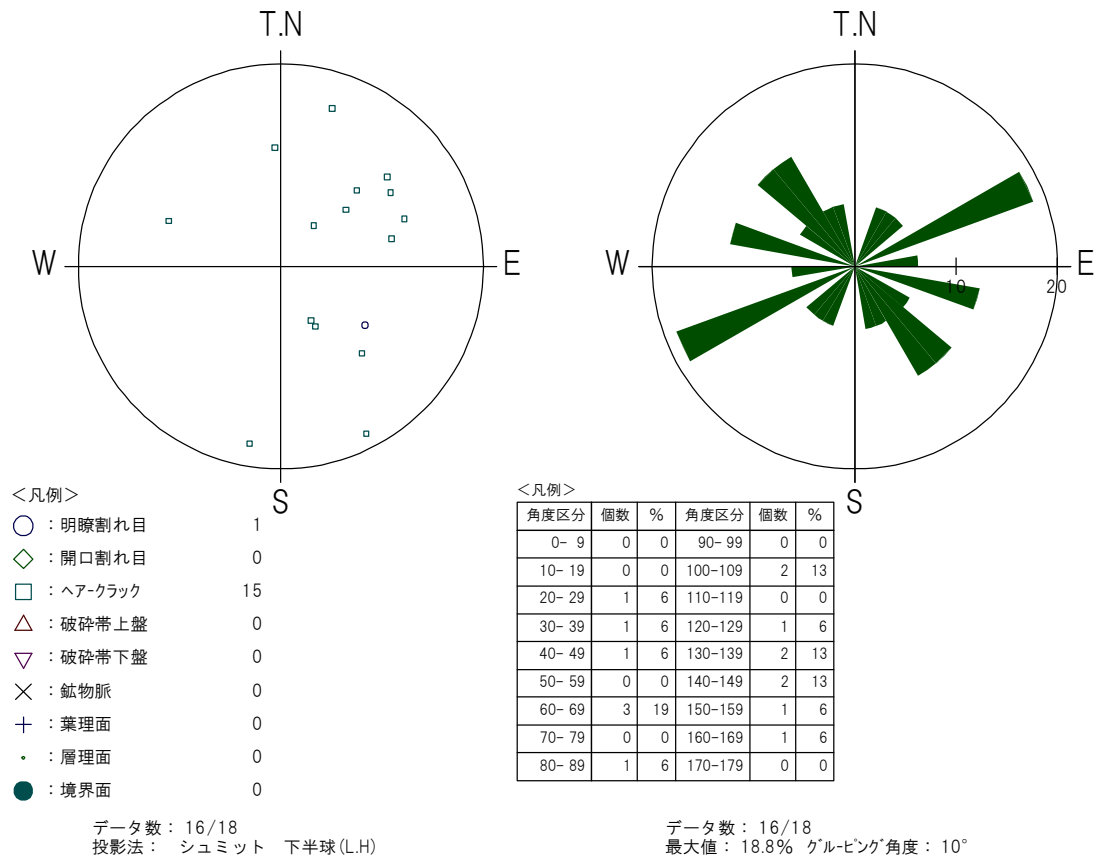


図 3.44 ステレオネット投影図 (12-P350-M03)

(明瞭割れ目+ヘアークラック)

12-P350-M03

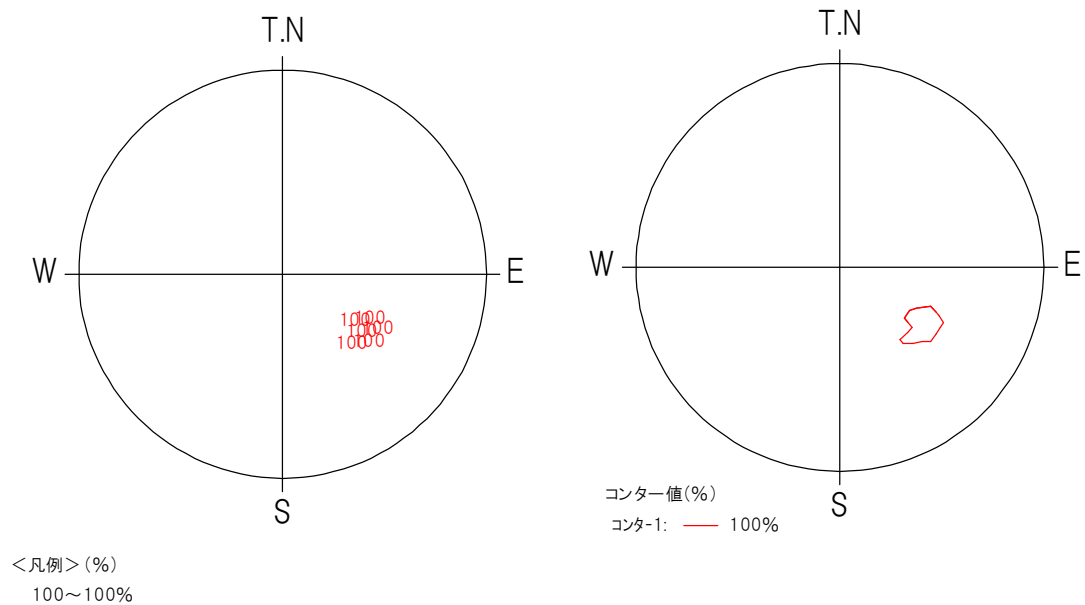
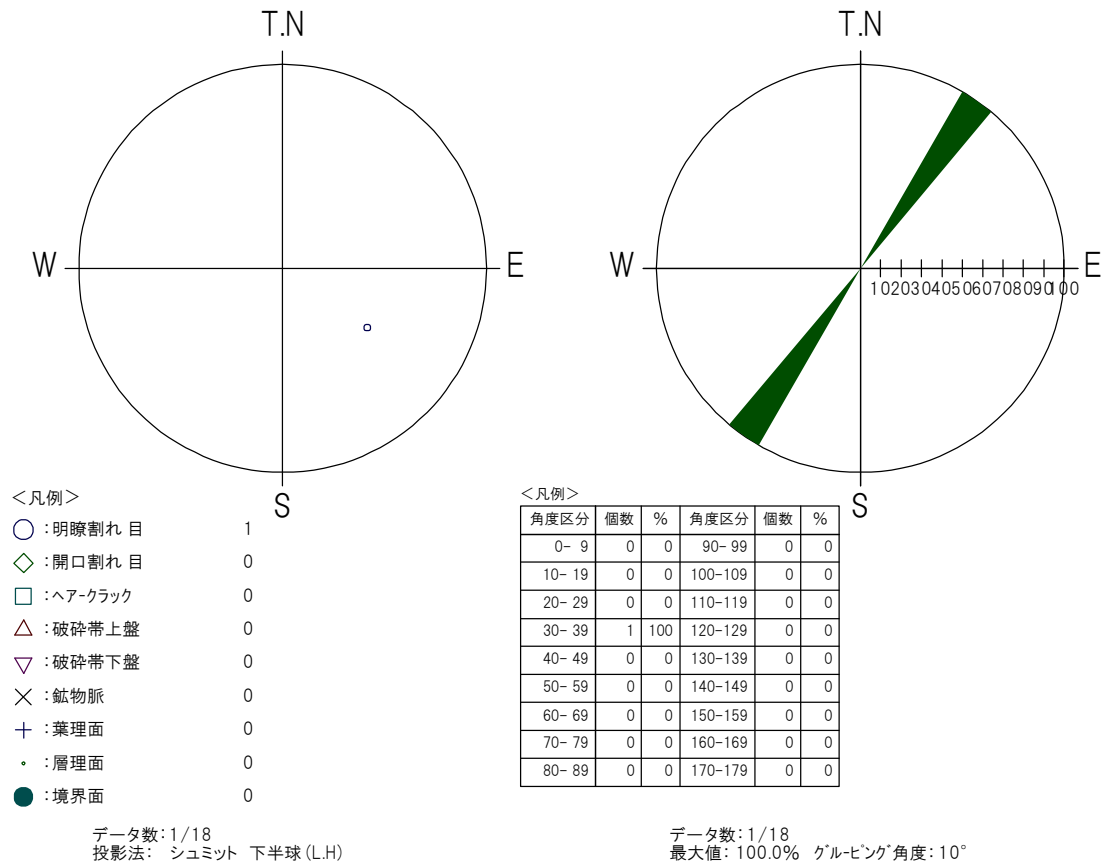


図 3.45 ステレオネット投影図 (12-P350-M03)
(明瞭割れ目)

12-P350-M03

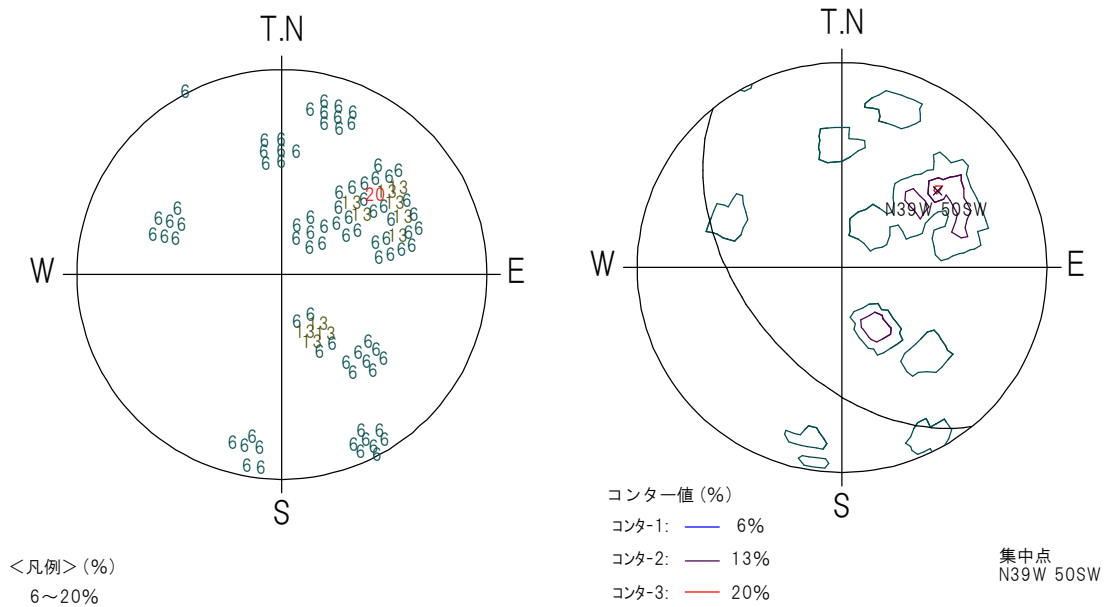
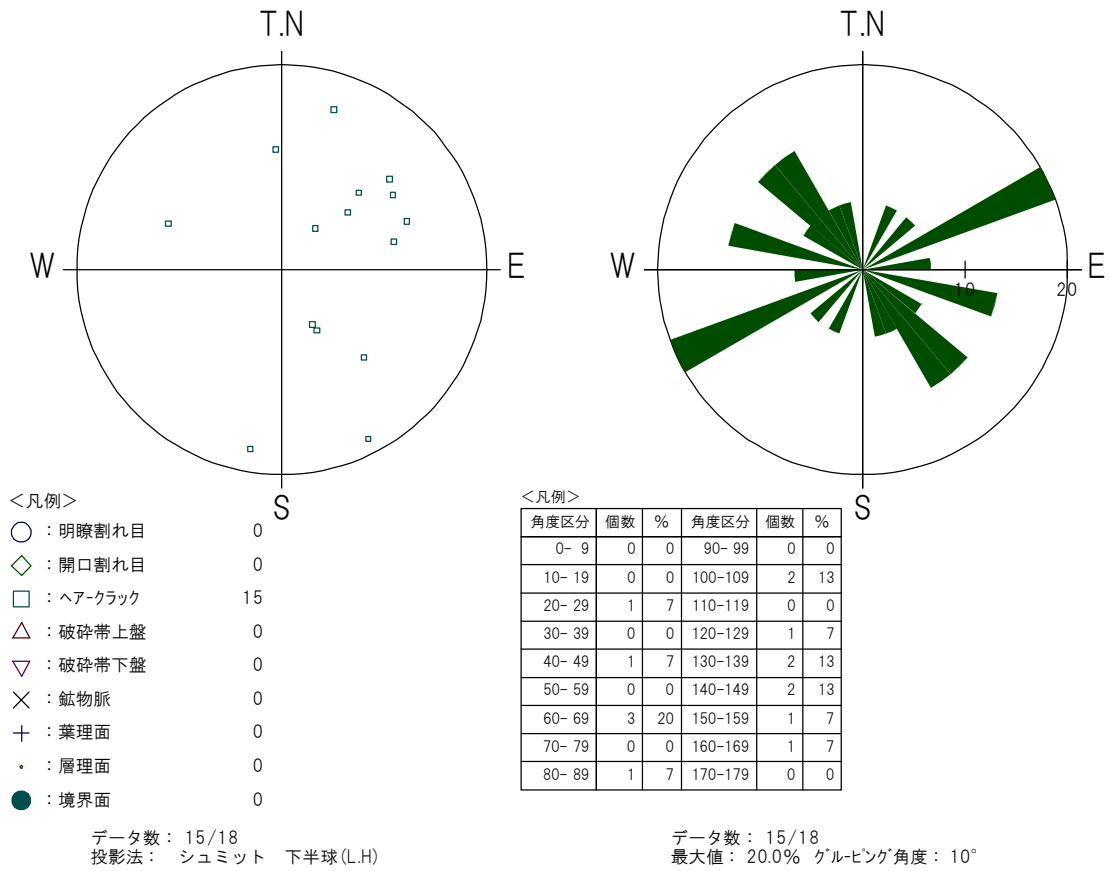


図 3.46 ステレオネット投影図 (12-P350-M03)
(ヘアークラック)

12-P350-M03

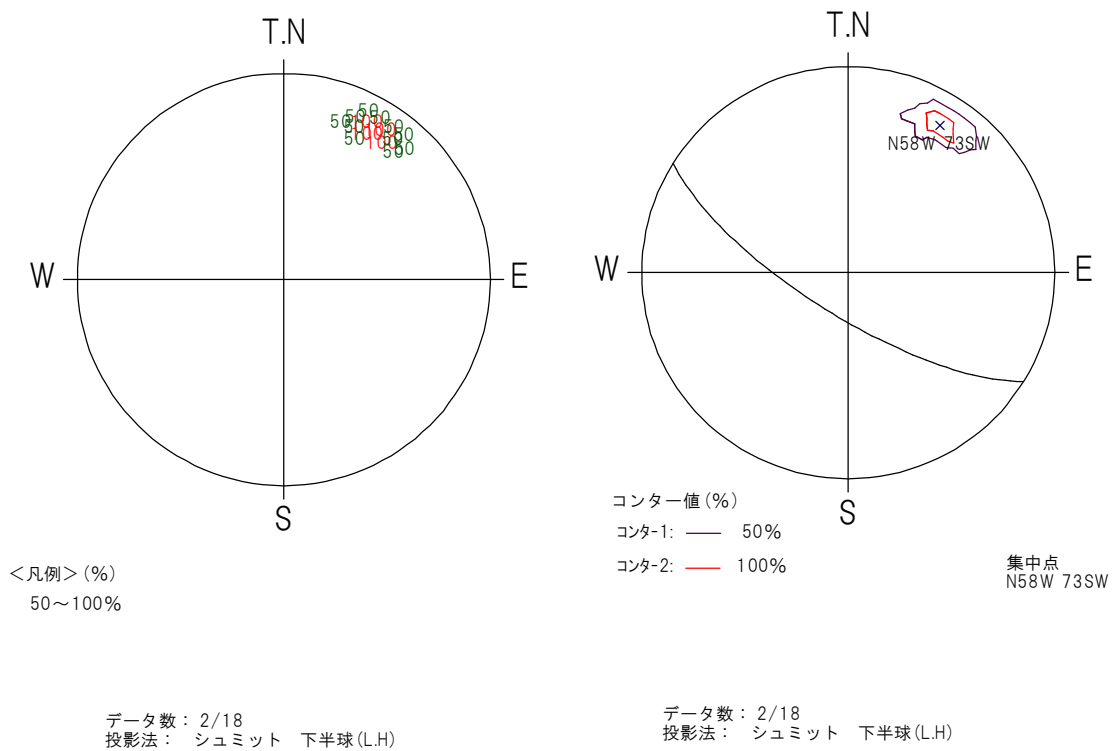
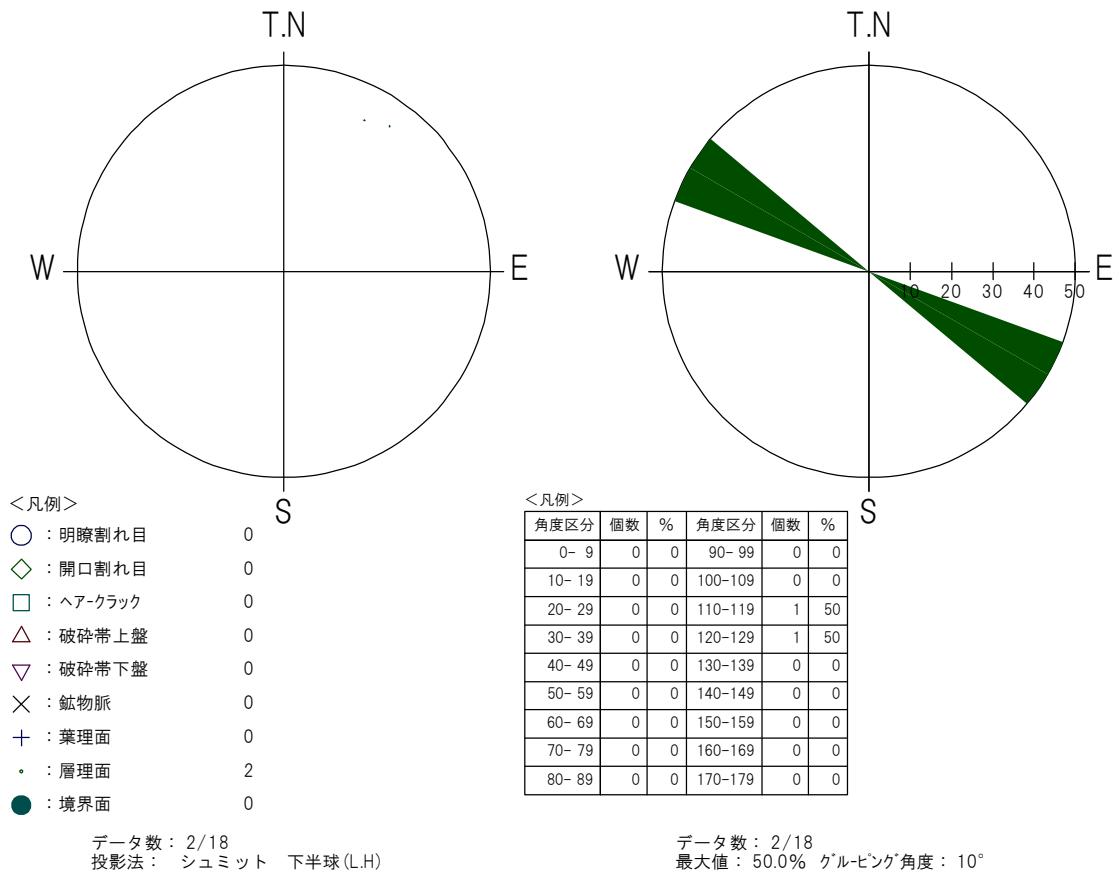


図 3.47 ステレオネット投影図 (12-P350-M03)
(層理面)

12-P350-M03

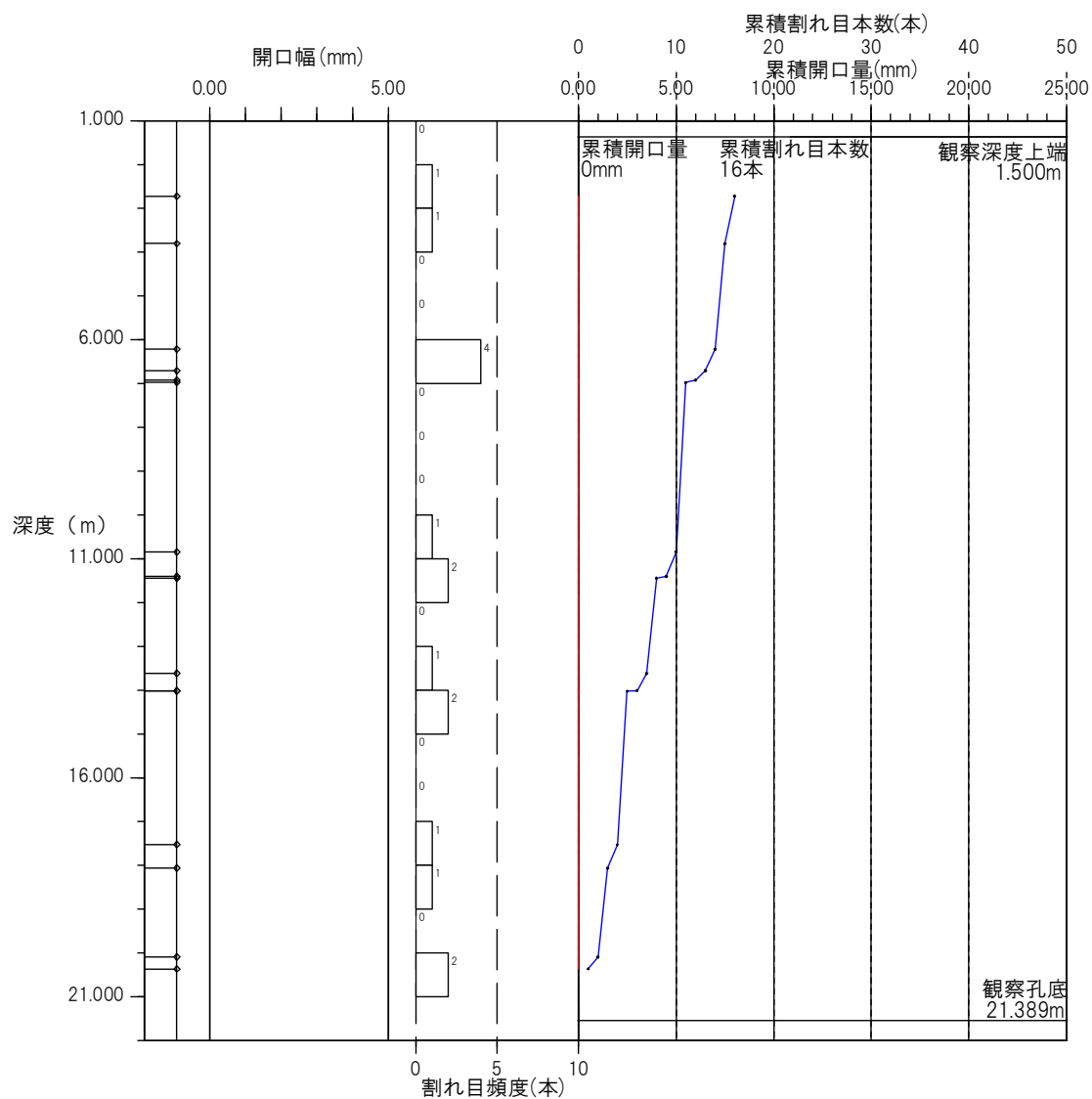
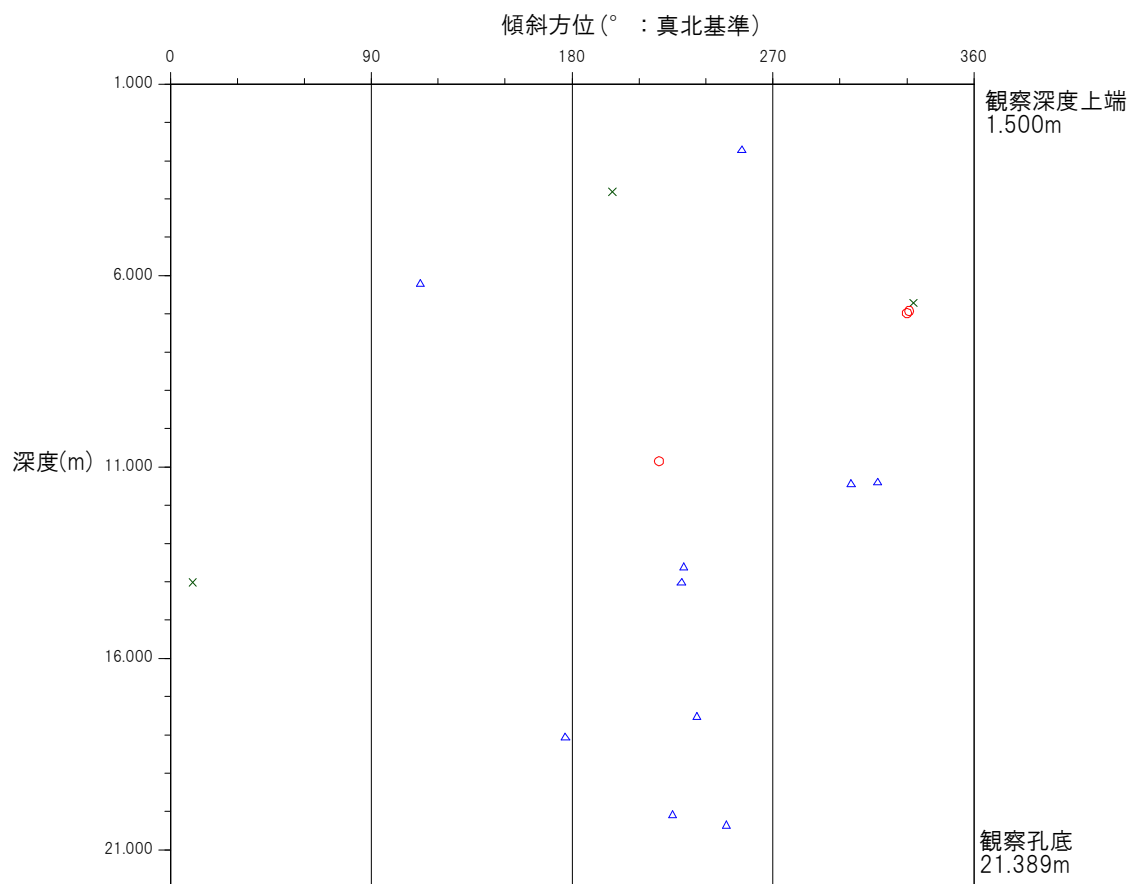


図 3.48 岩盤状態図 (12-P350-M03)
(明瞭割れ目+ヘアークラック)

12-P350-M03



<凡例>

傾斜範囲

○ : 0 ~ 30°

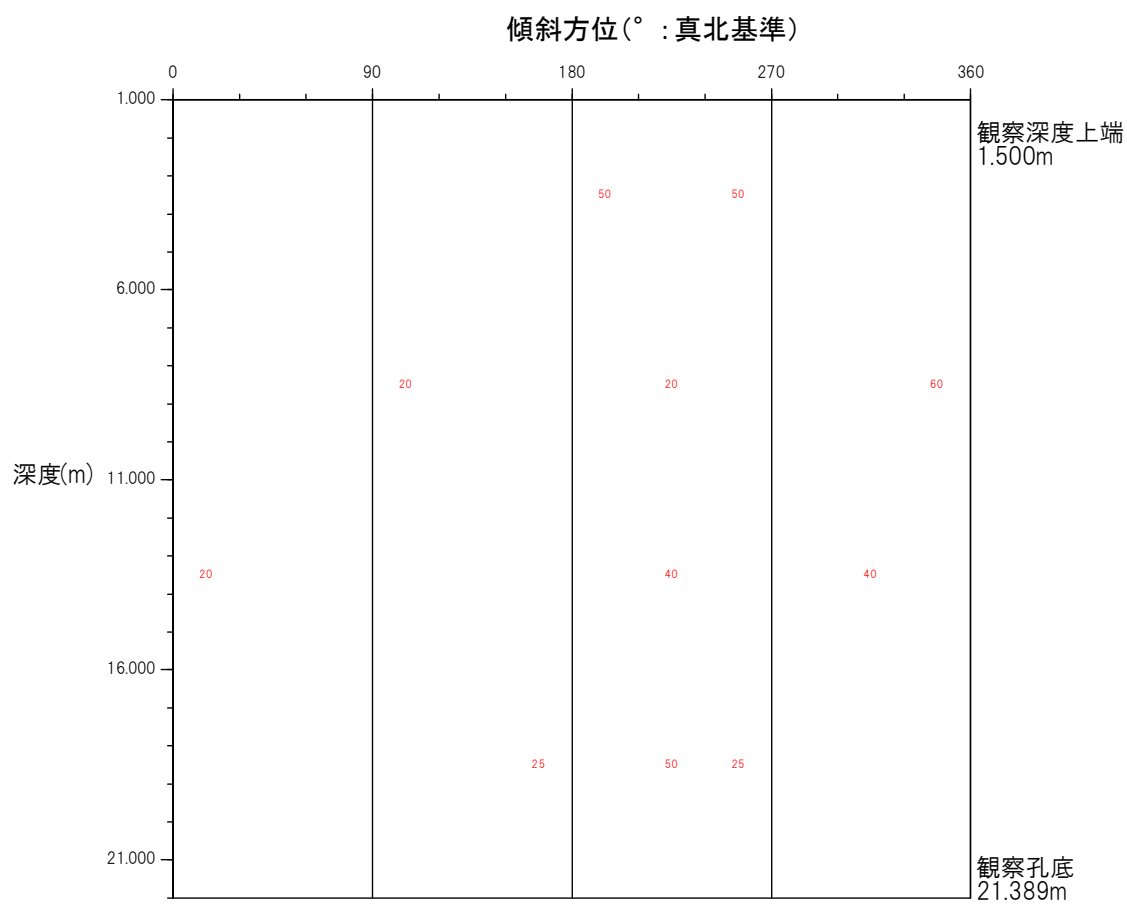
△ : 31 ~ 60°

× : 61 ~ 90°

図 3.49 AVTD 分散図 (12-P350-M03)

(明瞭割れ目+ヘアークラック)

12-P350-M03



<凡例>
表示範囲：20 ～ 60 %

図 3.50 AVTD 密度図 (12-P350-M03)
(明瞭割れ目+へアークラック)

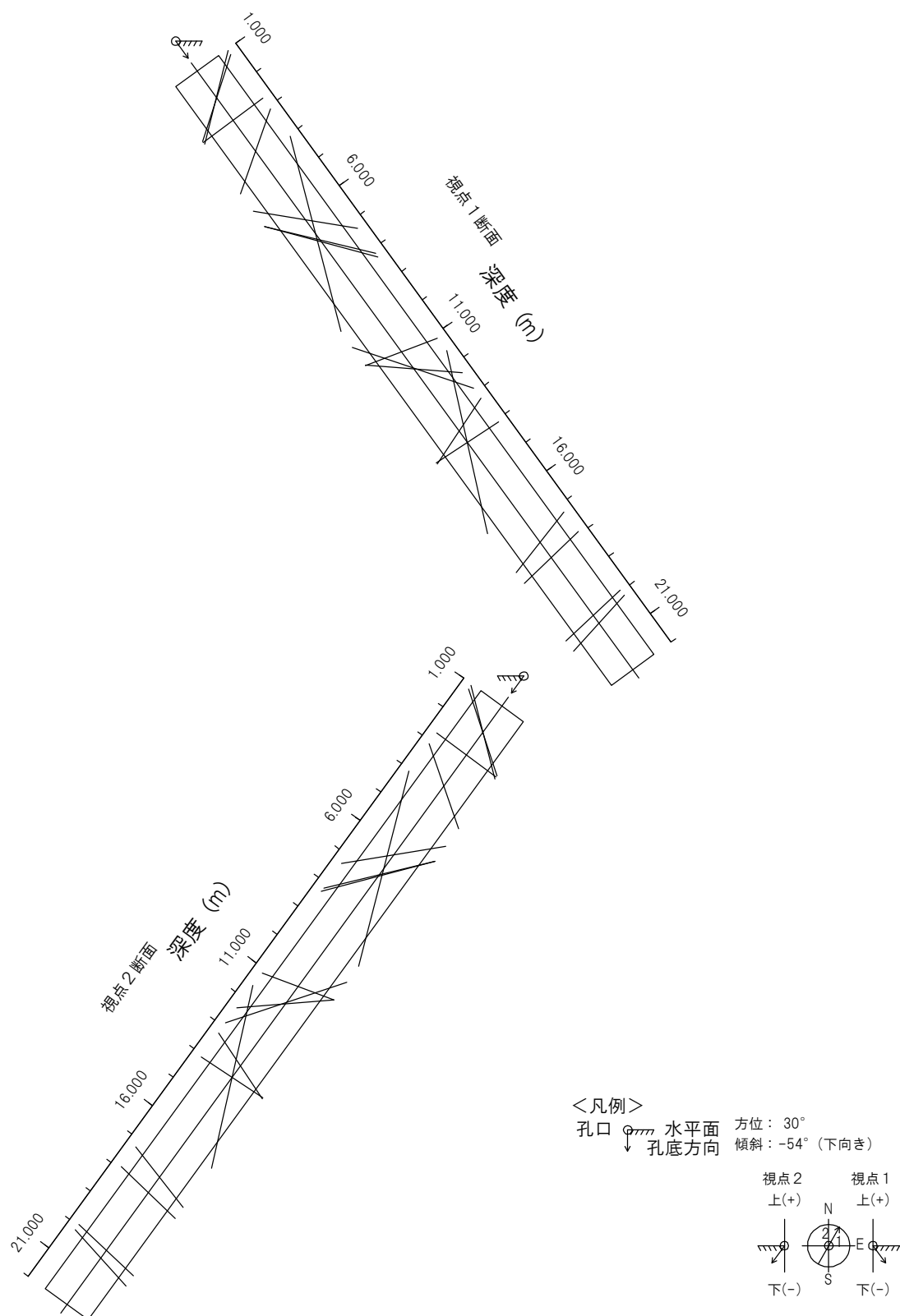


図 3.51 見掛け傾斜図 (12-P350-M03)
(全不連続面)

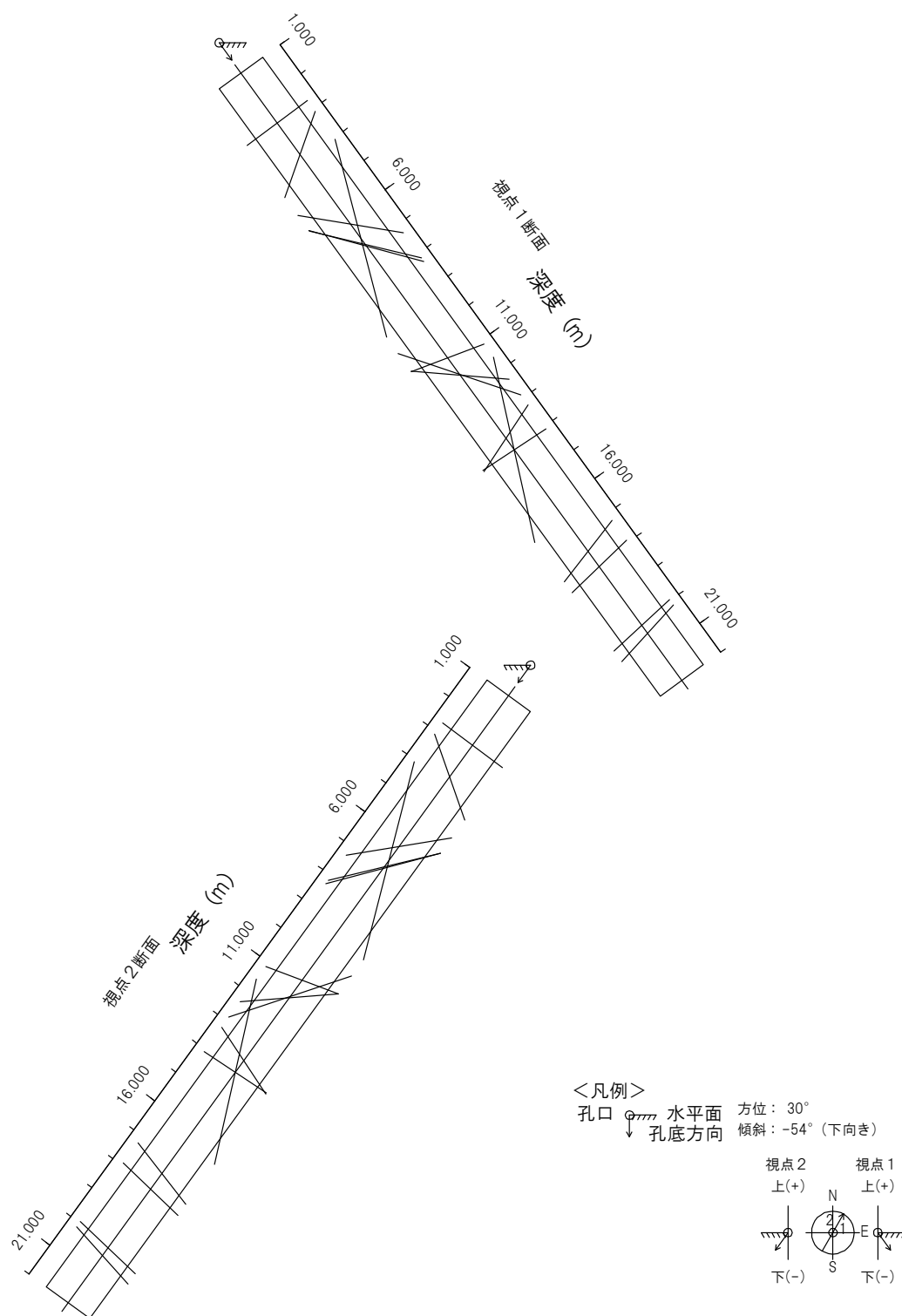


図 3.52 見掛け傾斜図 (12-P350-M03)
 (明瞭割れ目+ヘアークラック)

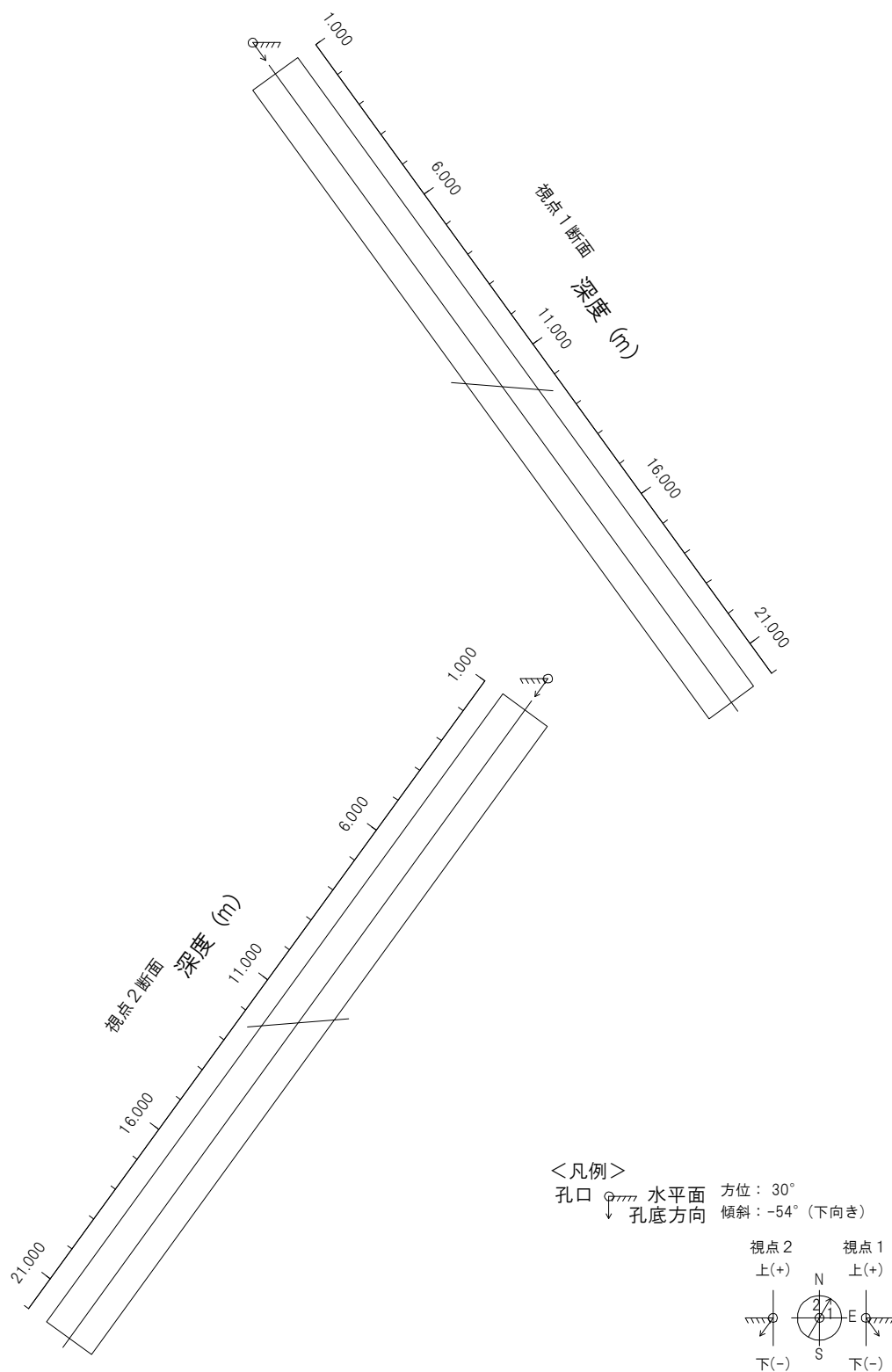


図 3.53 見掛け傾斜図 (12-P350-M03)
(明瞭割れ目)

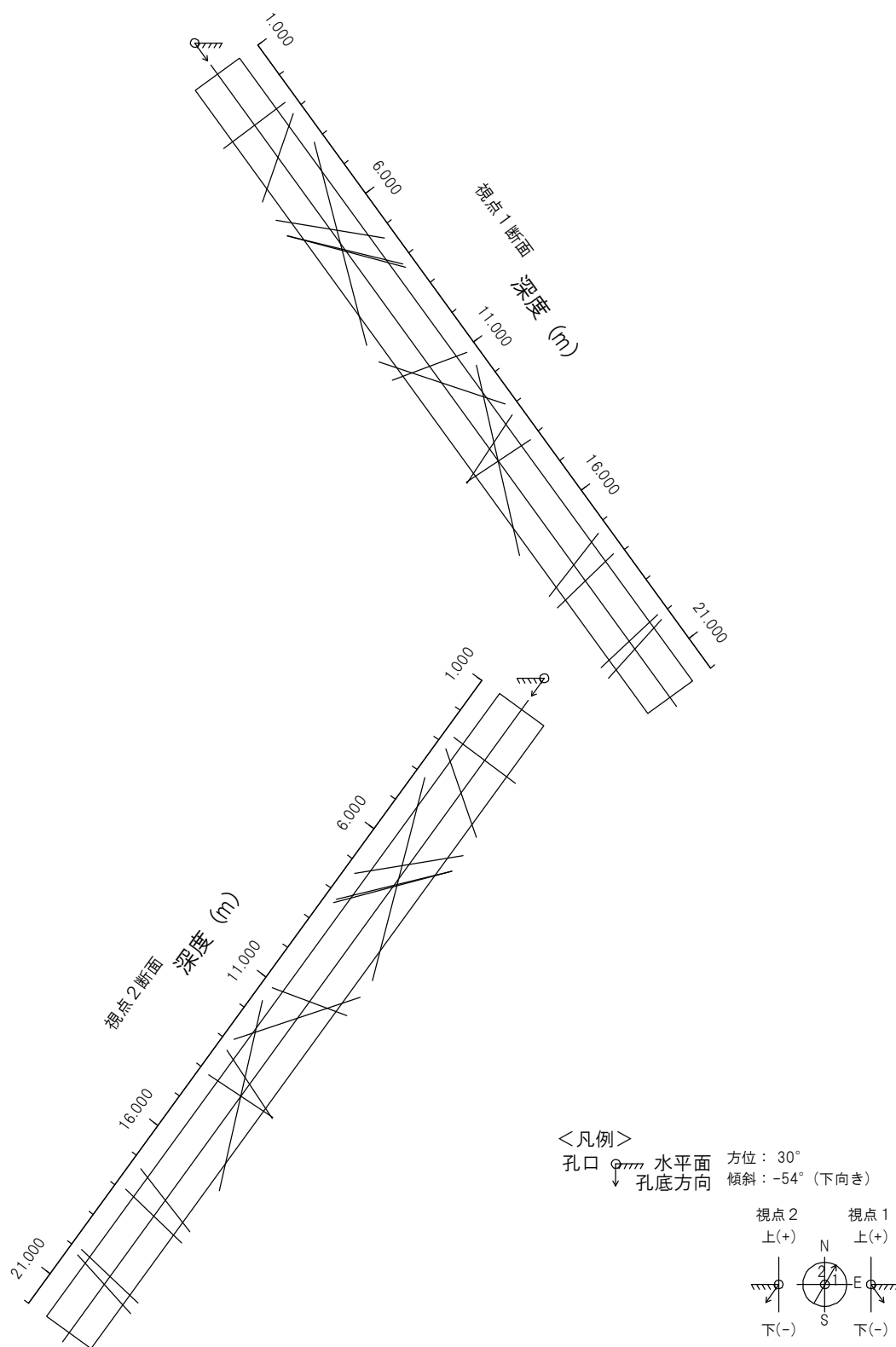


図 3.54 見掛け傾斜図 (12-P350-M03)
(ヘアークラック)

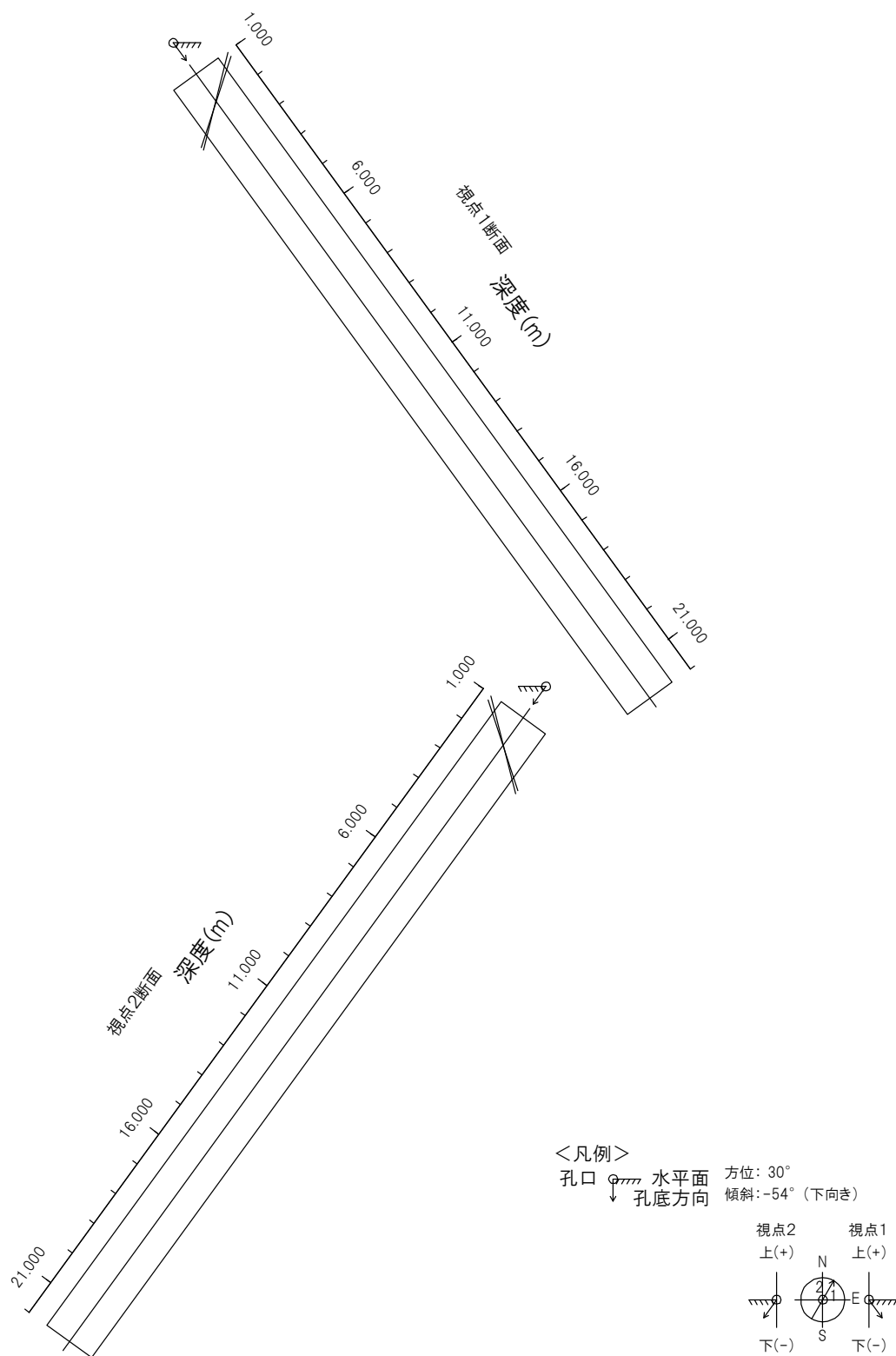


図 3.55 見掛け傾斜図 (12-P350-M03)
(層理面)

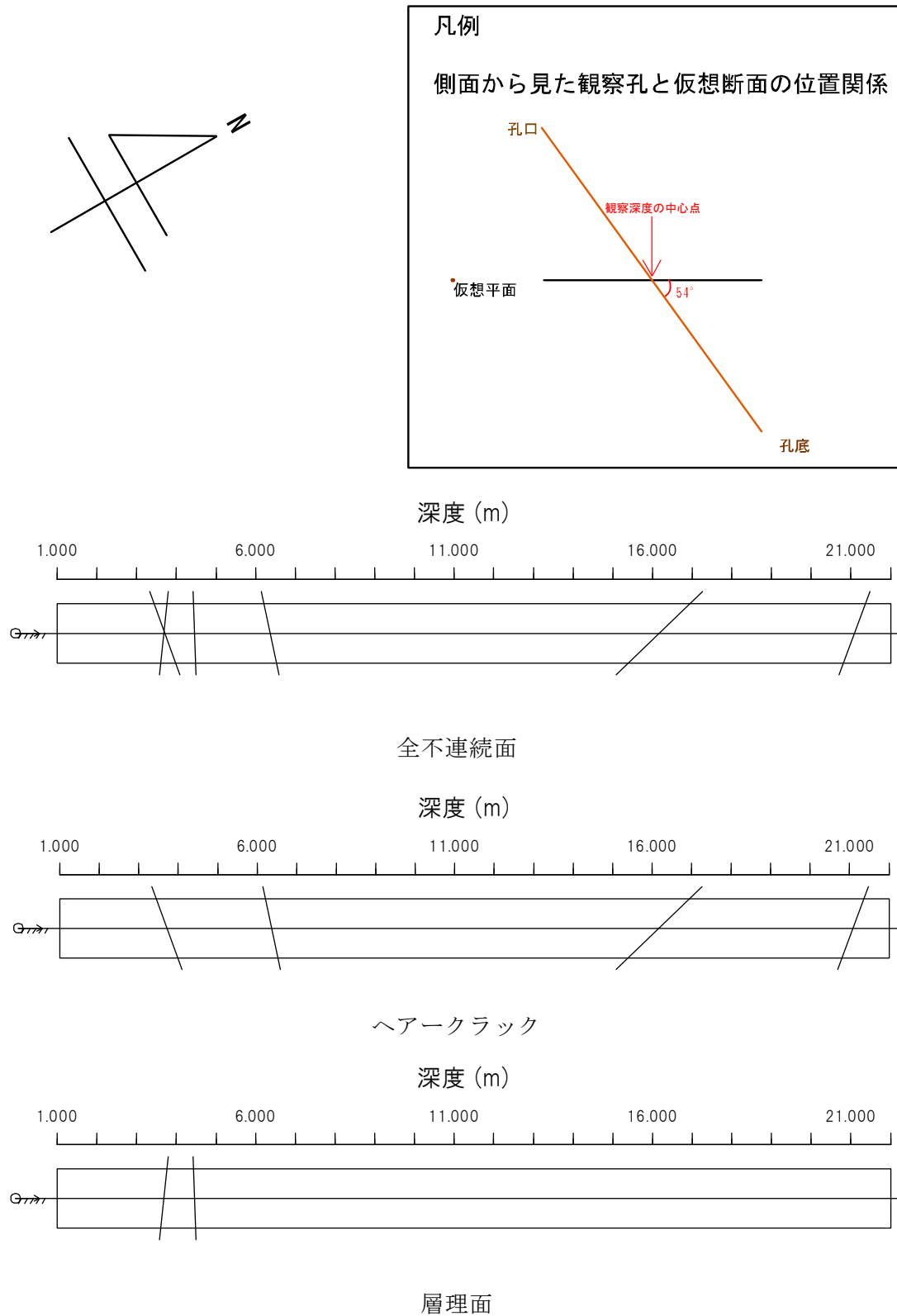


図 3.56 水平断面図（レベル：ボーリング孔中間点）（12-P350-M03）

12-P350-M03

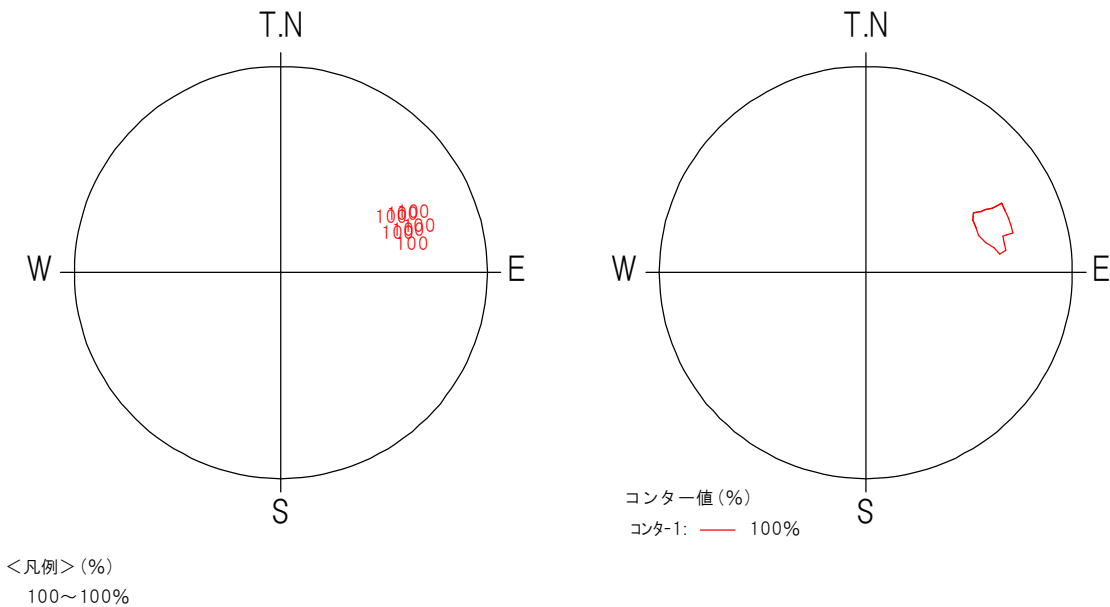
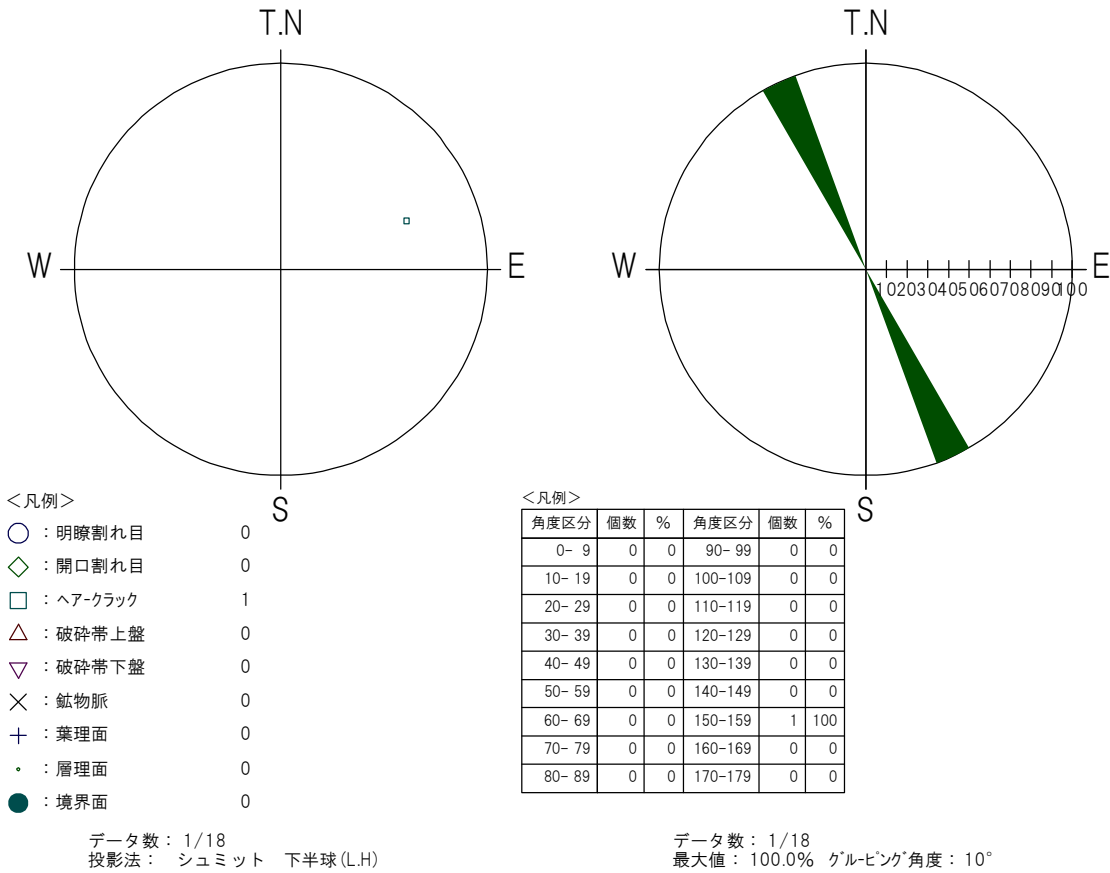


図 3.57 割れ目形状タイプ別のステレオネット投影図 (12-P350-M03)
(明瞭割れ目+開口割れ目+ヘアークラック、形状 P)

12-P350-M03

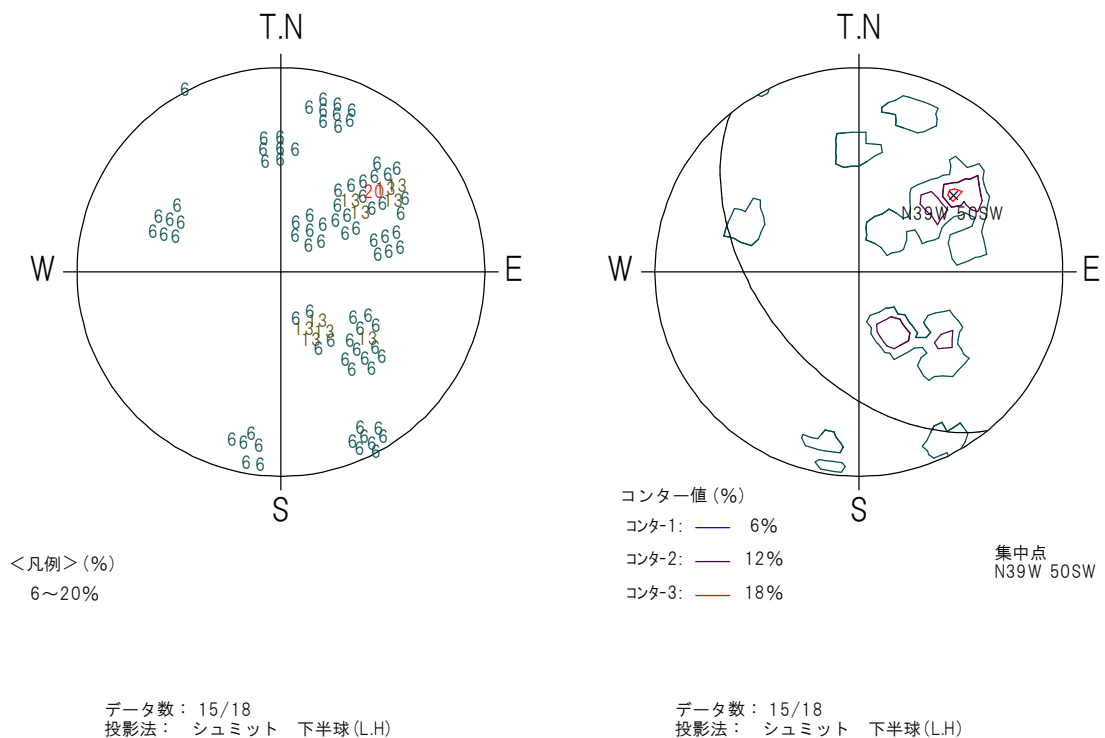
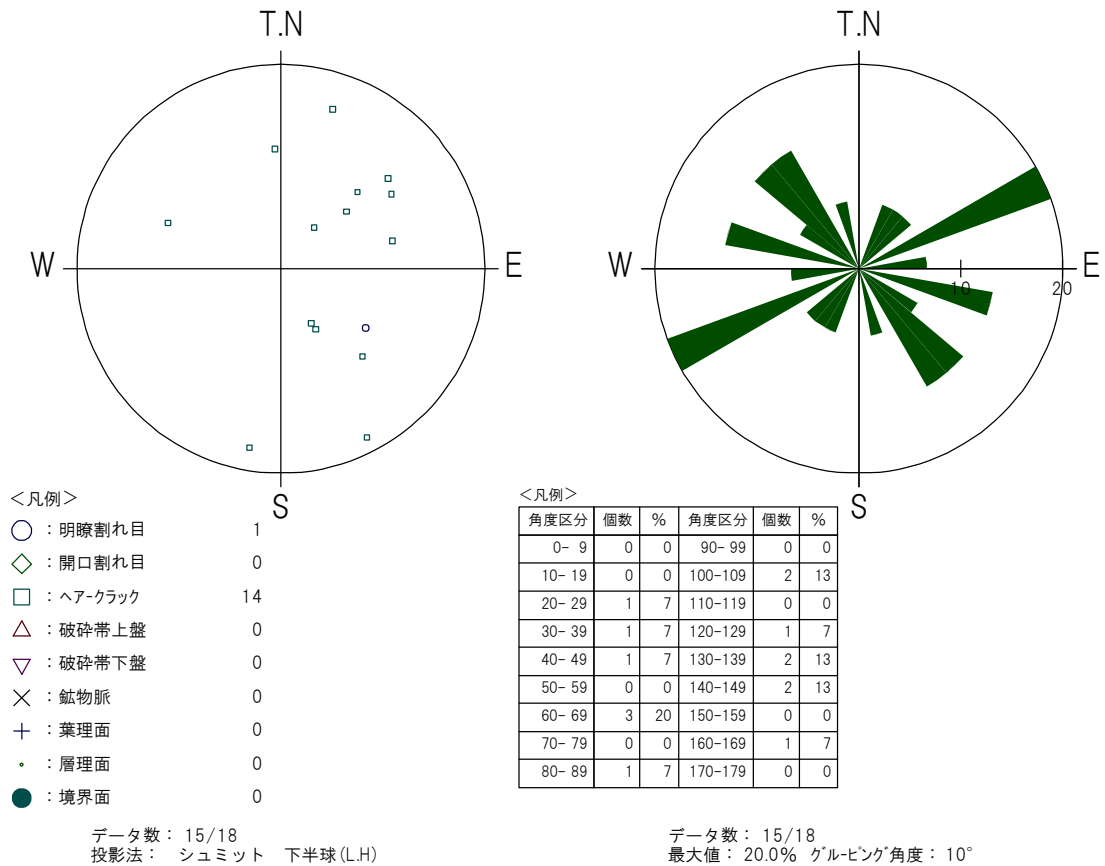


図 3.58 割れ目形状タイプ別のステレオネット投影図 (12-P350-M03)
(明瞭割れ目+開口割れ目+ヘアークラック、形状 C)

12-P350-M04

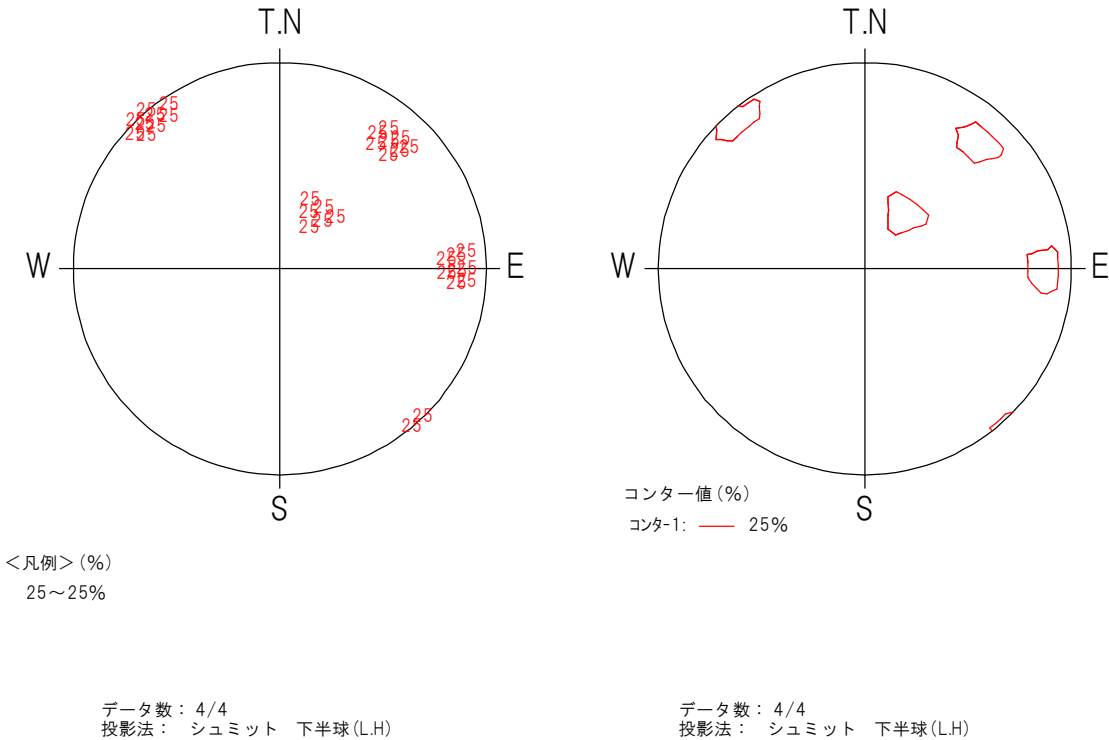
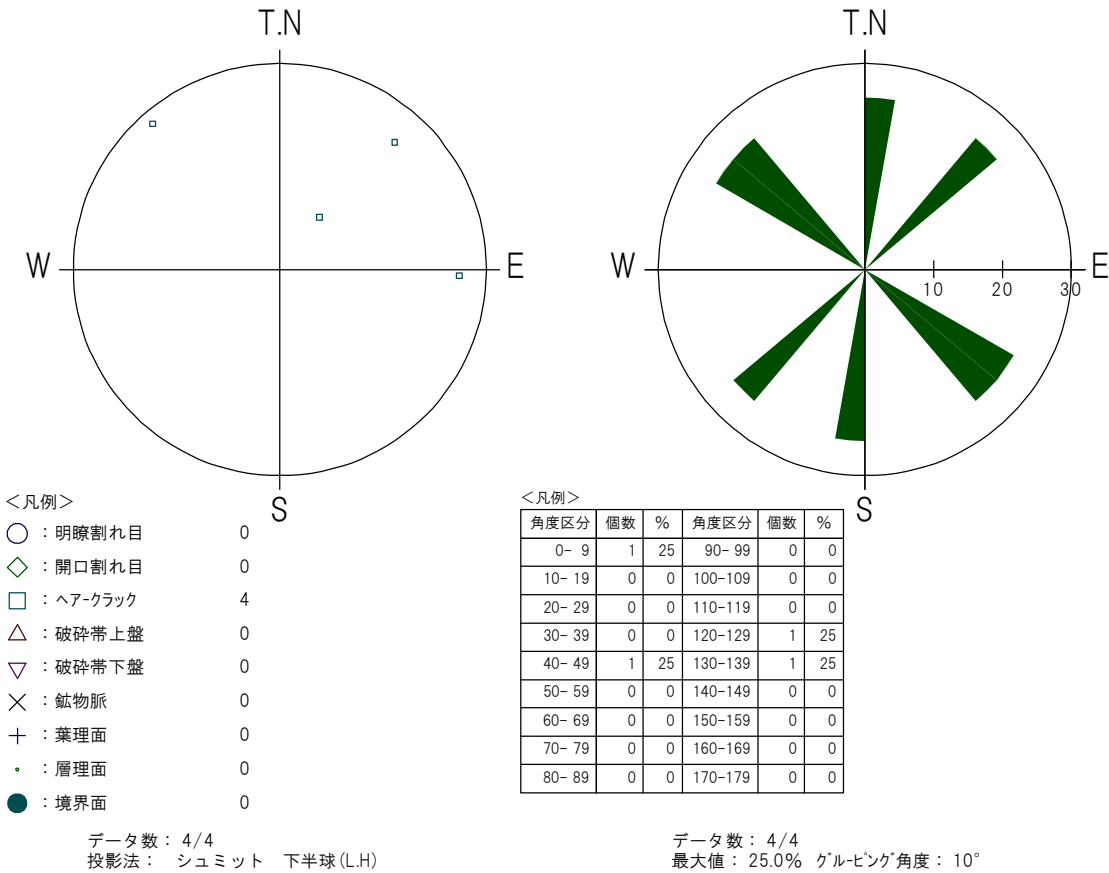


図 3.59 ステレオネット投影図 (12-P350-M04)
(ヘアークラック)

12-P350-M04

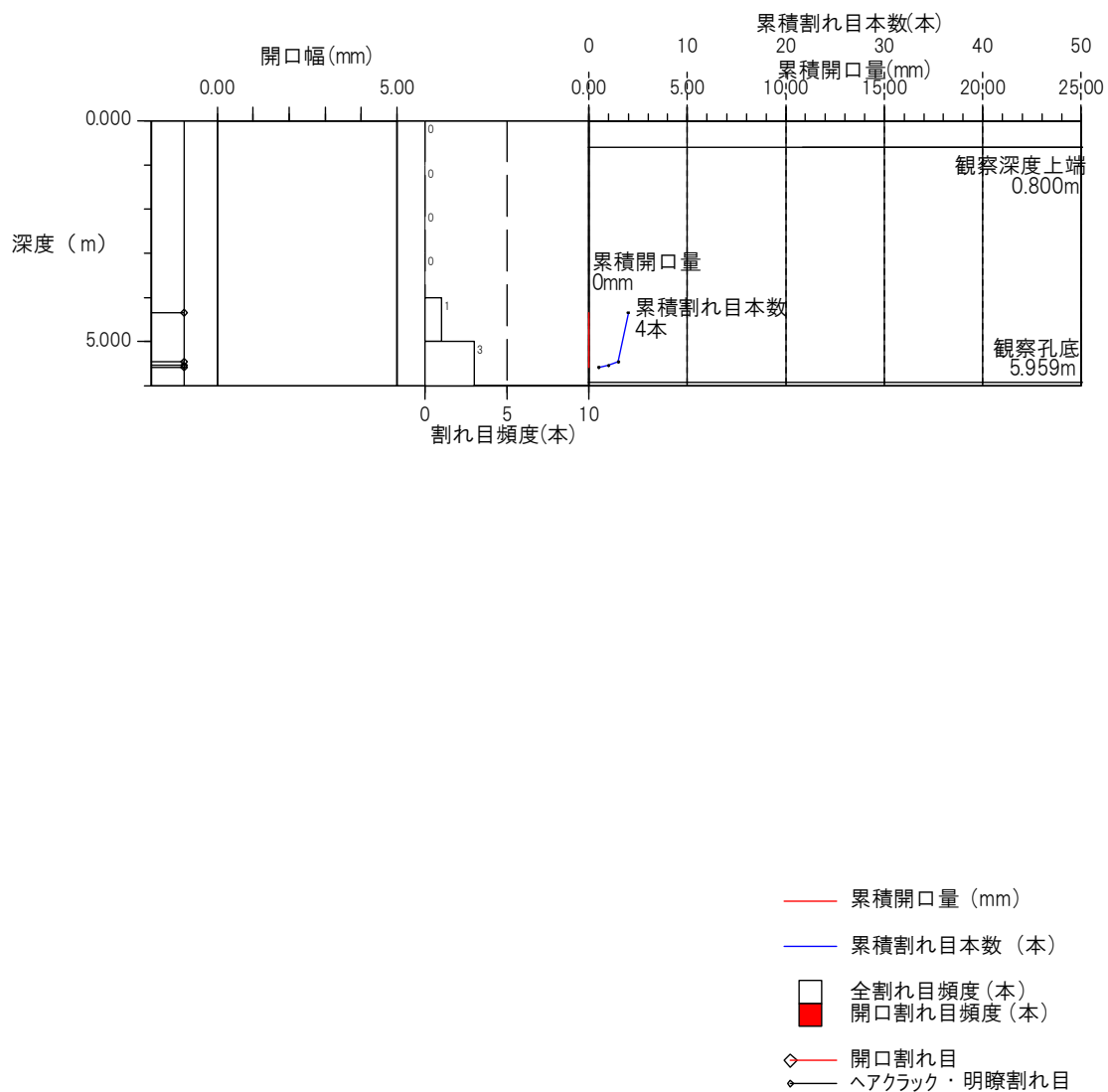


図 3.60 岩盤状態図 (12-P350-M04)
(ヘアークラック)

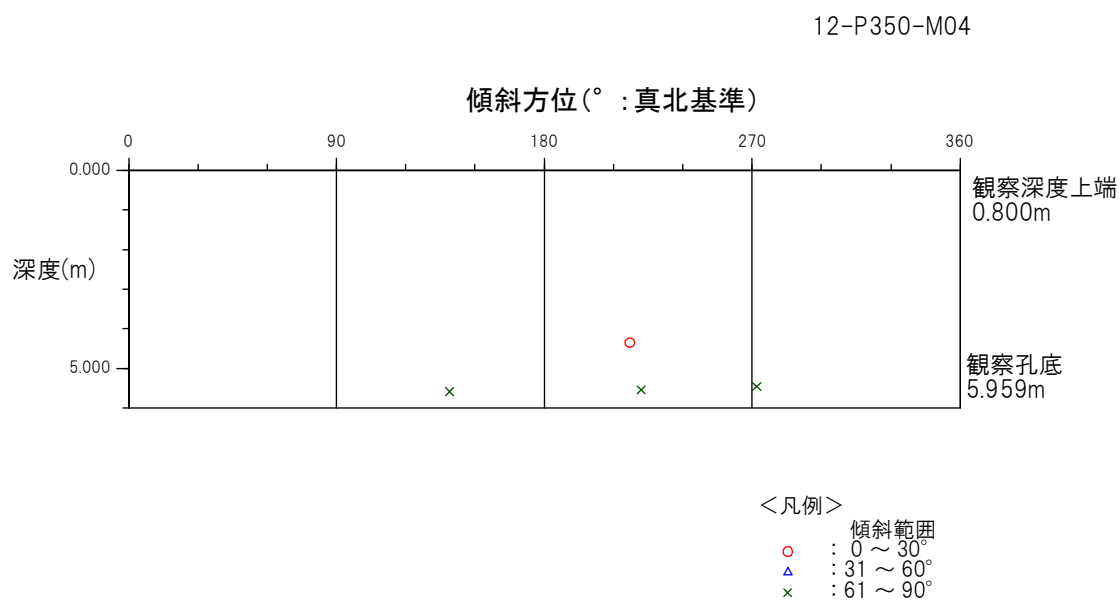


図 3.61 AVTD 分散図 (12-P350-M04)
(ヘアークラック)

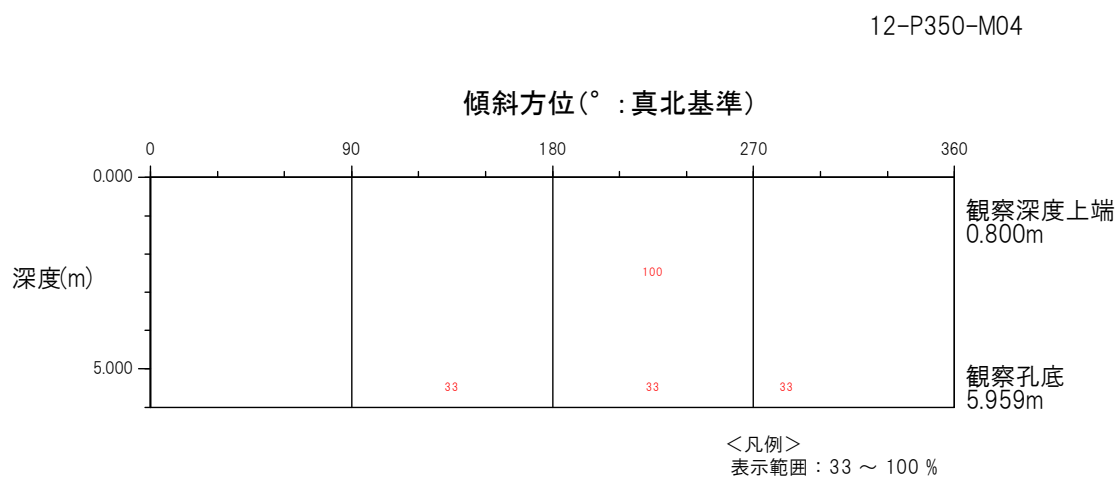


図 3.62 AVTD 密度図 (12-P350-M04)
(ヘアークラック)

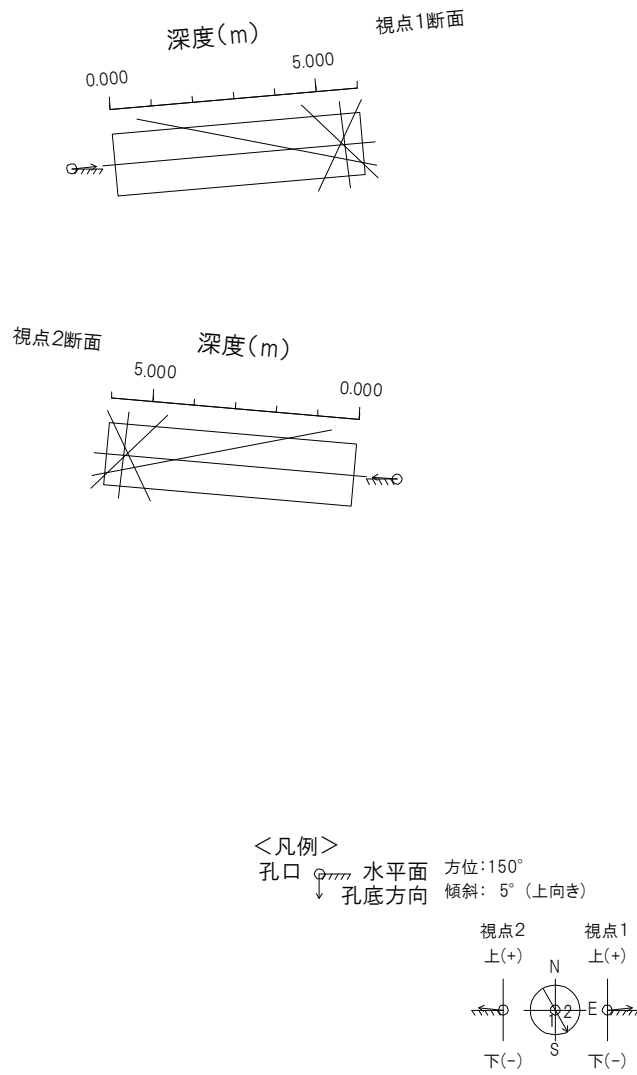


図 3.63 見掛け傾斜図 (12-P350-M04)
 (ヘアークラック)

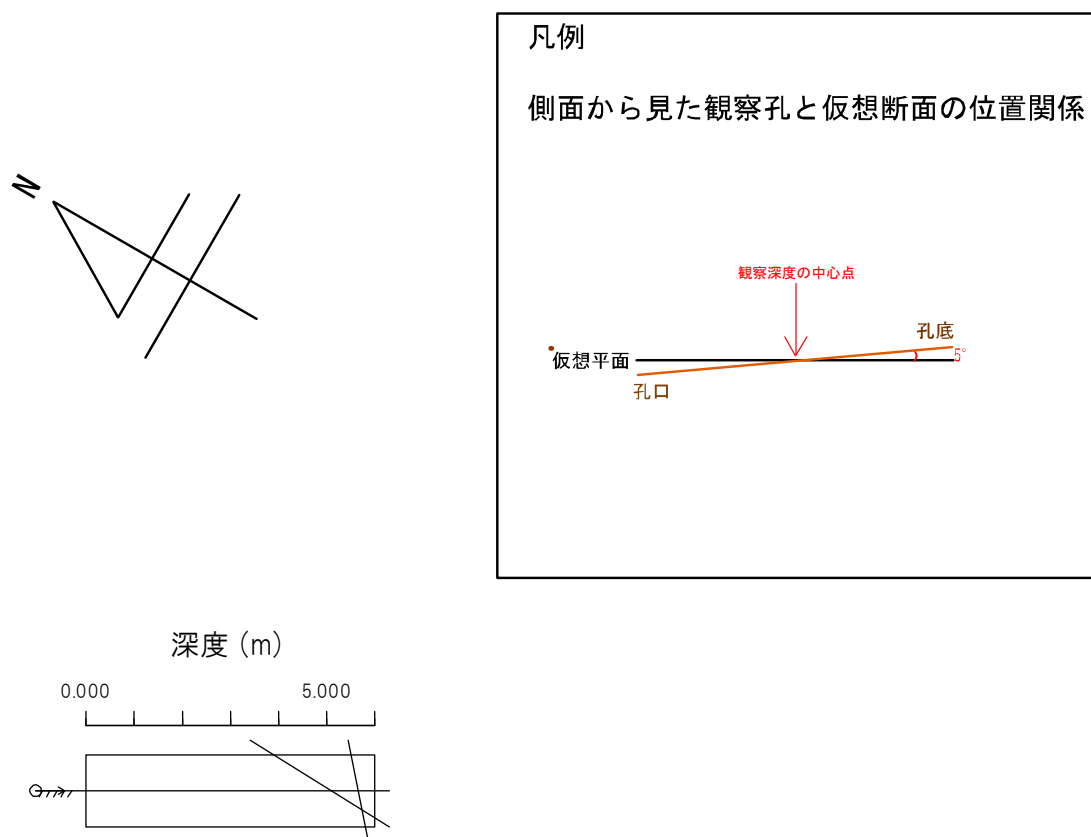


図 3.64 水平断面図（レベル：ボーリング孔中間点）（12-P350-M04）

12-P350-M04

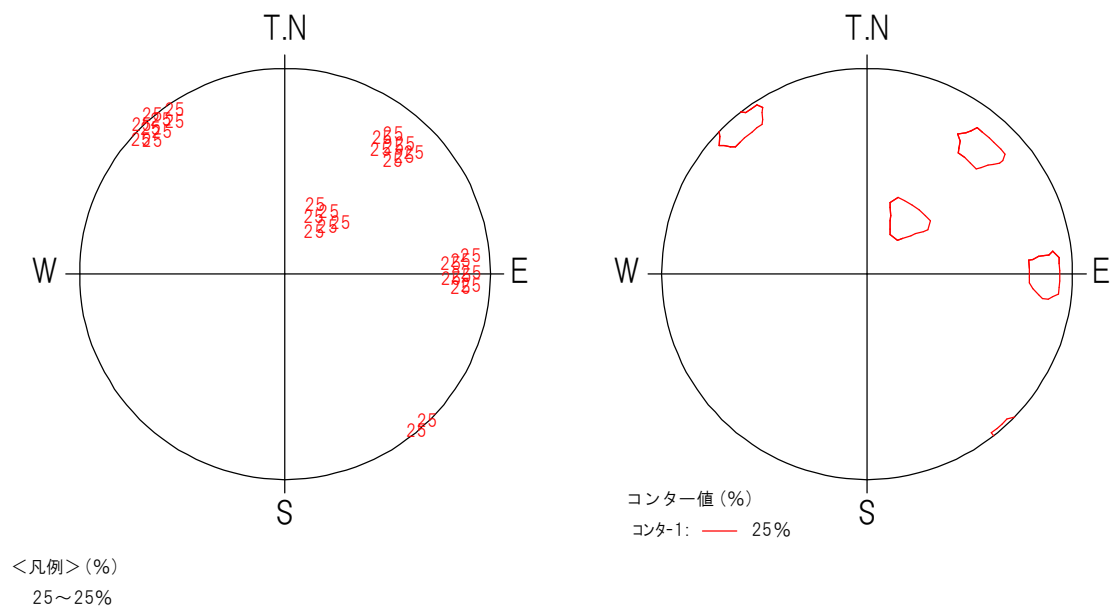
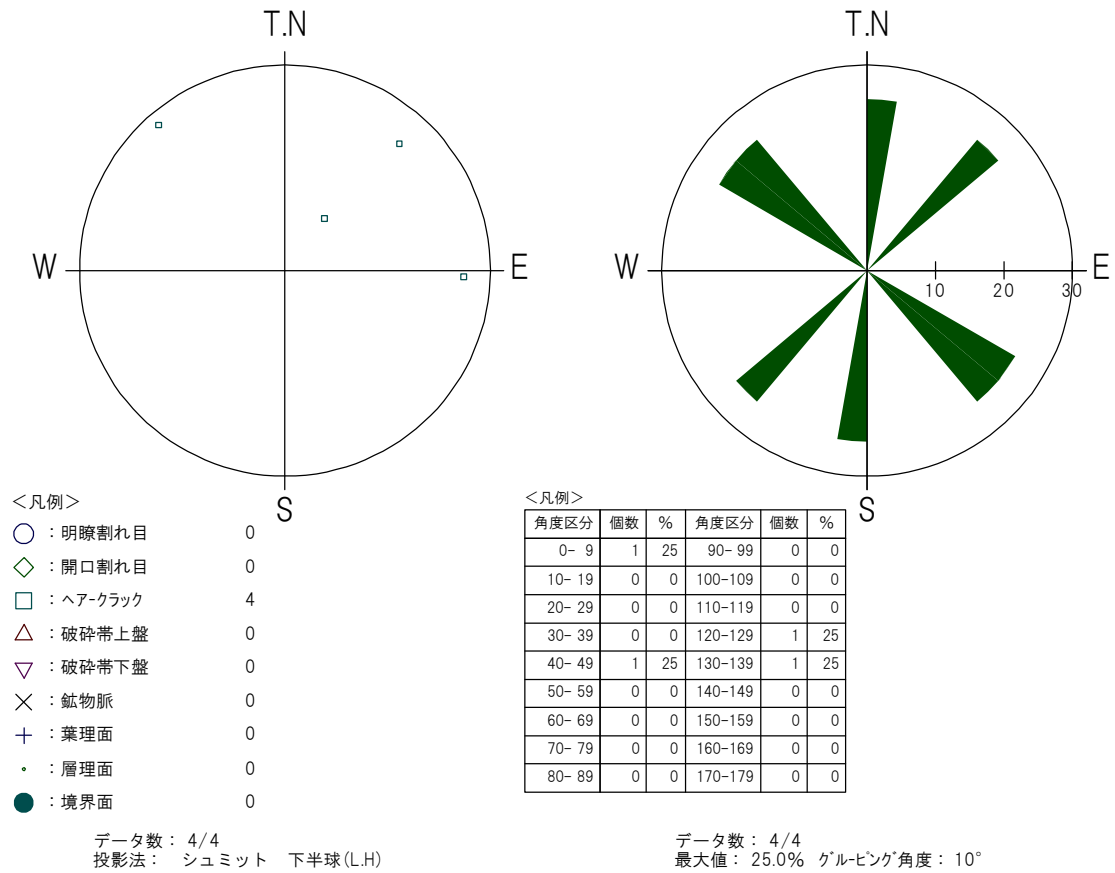


図 3.65 割れ目形状タイプ別のステレオネット投影図 (12-P350-M04)
(明瞭割れ目+開口割れ目+ヘアクラック、形状 C)

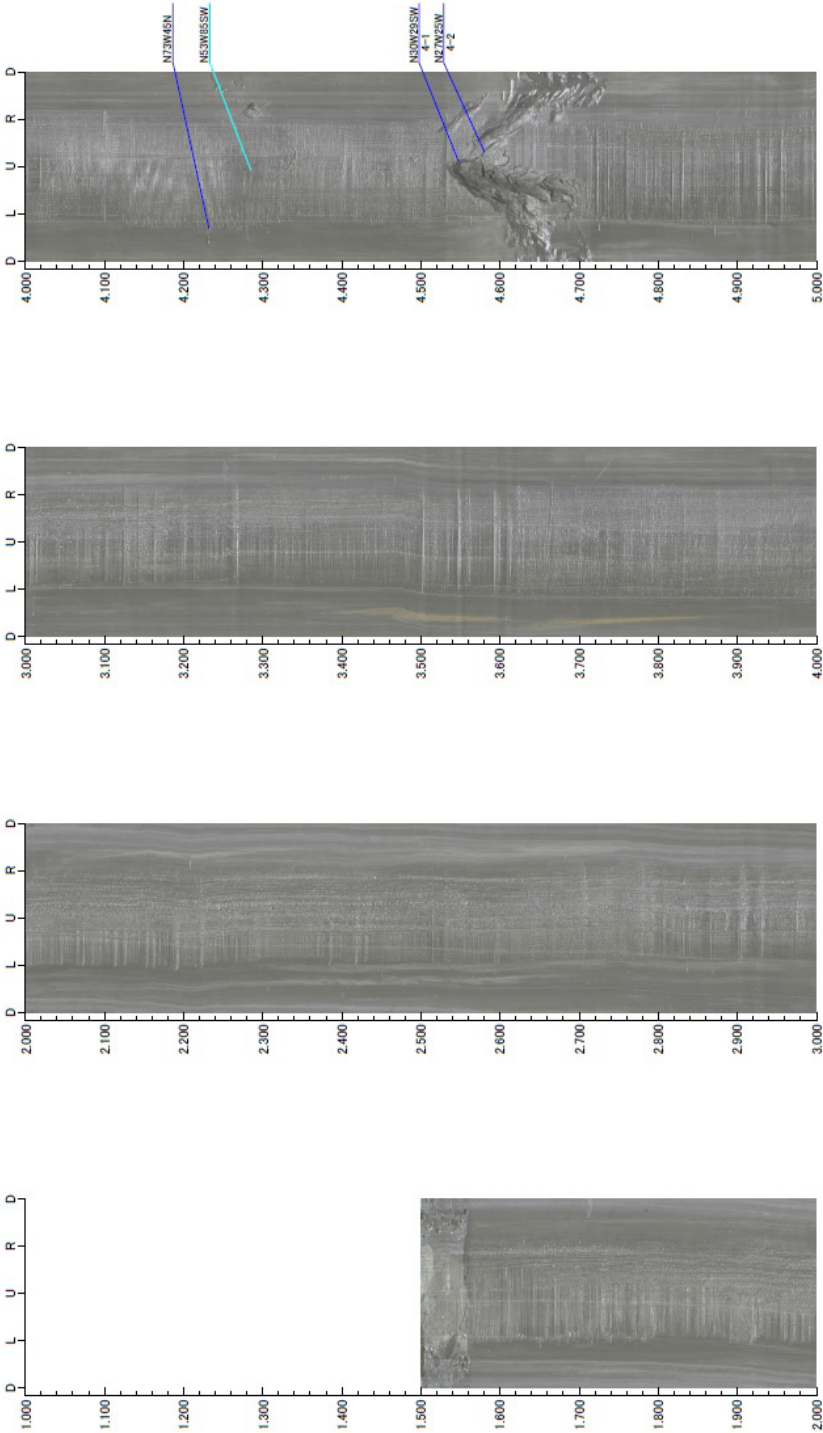
3.2.10 孔壁展開画像および検出した割れ目情報のまとめ

図 3.66 に BTV 観察により得られた孔壁展開画像の一例を、図 3.67 に BTV 画像による割れ目のトレース結果の一例を示す。全孔の孔壁展開画像および割れのトレース結果については、巻末の付録 7 に電子データとして納めてあるので参照されたい。また、BTV 観察により検出された割れ目の検出深度、走向傾斜、割れ目の区分、形状、状態をまとめたものを、表 3.17 ～3.20 に示す。

孔方位：230 孔傾斜：5

1.500m - 5.000m

タイトル：研究支援業務のうち350m初期地圧測定(ポンプ座)
孔番：12-P350-M01
[トレースライン黒]



0 0 0
0 0 0

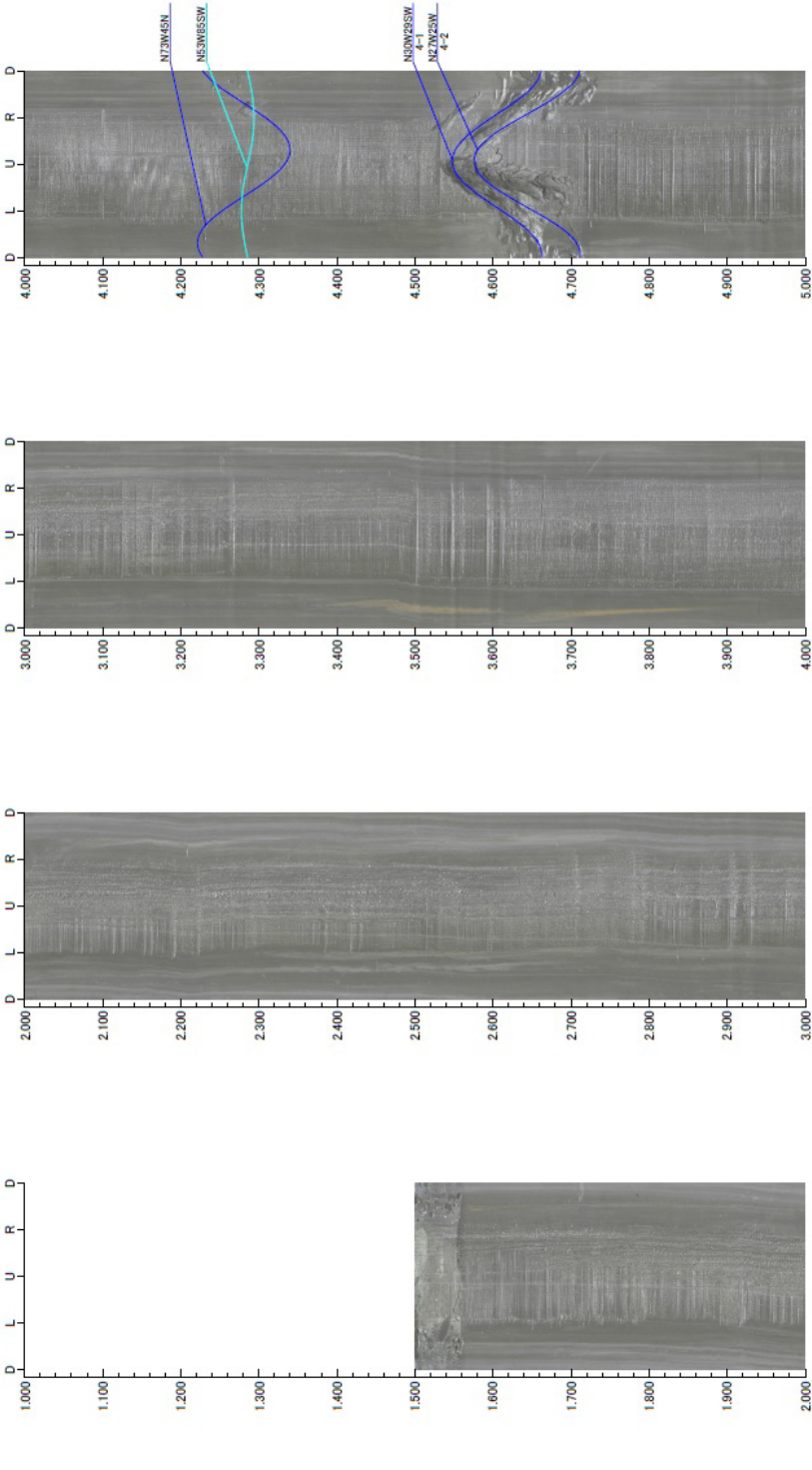
倍率：1/5 アスペクト：100%

図 3.66 BTV 撮影画像一例

孔方位：230 孔傾斜：5

1.500m - 5.000m

タイトル：研究支援業務のうち350m初期地圧測定(ポンプ座)
孔番：12-R350-M01
[トレースライン有]



倍率：1/5 アスペクト：100%

図 3.67 BTV 画像によるトレース結果一例

表 3.17 BTV 観察結果一覧 [12-P350-M01]

通し番号	上端深度 (m)	－	下端深度 (m)	中間深度 (m)	走向傾斜	区 分	形状※ ¹	状 態	岩芯コア観察 との対比※ ²
1	4.22	－	4.34	4.28	N 73W 45N	明瞭割れ目	C -j		
2	4.28	－	4.29	4.29	N 53W 85SW	ヘアークラック	P -n/j		
3	4.55	－	4.66	4.60	N 30W 29SW	明瞭割れ目	S	角礫状	4-1
4	4.58	－	4.71	4.64	N 27W 25W	明瞭割れ目	C	角礫状	4-2
5	6.66	－	6.72	6.69	N 74W 73N	ヘアークラック	C -n		6-1
6	6.85	－	6.92	6.89	N 76W 75N	ヘアークラック	C -n		6-2
7	7.66	－	7.71	7.69	N 67W 83N	ヘアークラック	C -n		
8	7.67	－	7.74	7.71	N 68W 63N	明瞭割れ目	C		7-2
9	7.94	－	8.01	7.98	N 72W 66N	明瞭割れ目	C		
10	7.96	－	8.02	7.99	N 74W 71N	明瞭割れ目	C		7-3
11	7.97	－	8.04	8.00	N 76W 72N	ヘアークラック	S -n		
12	8.14	－	8.21	8.18	N 81W 77N	ヘアークラック	C -n		
13	8.16	－	8.23	8.20	N 71W 68N	明瞭割れ目	C		8-1
14	9.83	－	9.90	9.87	N 72W 68N	ヘアークラック	C -n		9-3
15	11.09	－	11.16	11.13	N 78W 71N	ヘアークラック	C -n		11-1
16	11.47	－	11.51	11.49	N 64W 83N	ヘアークラック	C -n		
17	11.55	－	11.62	11.59	N 64W 48S	ヘアークラック	P -n		
18	11.79	－	11.84	11.82	N 71W 78N	ヘアークラック	C -n		11-2
19	13.39	－	13.46	13.43	N 37W 45SW	ヘアークラック	C -n		
20	13.63	－	13.66	13.65	N 42W 64SW	ヘアークラック	S -n		
21	13.73	－	13.78	13.75	N 16W 58W	ヘアークラック	S -n		
22	13.82	－	13.88	13.85	N 50W 47SW	ヘアークラック	C -n		13-2
23	13.85	－	13.91	13.88	N 59W 49SW	ヘアークラック	C -n		13-3
24	14.46	－	14.54	14.50	N 85W 71S	ヘアークラック	C -n		14-1
25	16.27	－	16.34	16.31	N 4E 82W	ヘアークラック	C -n		
26	16.71	－	16.78	16.75	N 23W 55E	ヘアークラック	C -n		
27	17.00	－	17.08	17.04	N 50W 39SW	ヘアークラック	C -n		
28	17.41	－	17.45	17.43	N 46W 54SW	ヘアークラック	C -n		
29	17.90	－	17.95	17.92	N 68W 63S	ヘアークラック	C -n		
30	17.96	－	18.30	18.13	N 67E 61N	ヘアークラック	C -n		
31	18.52	－	18.59	18.55	N 71W 64N	ヘアークラック	C -n		18-2
32	19.29	－	19.48	19.38	N 71E 85S	ヘアークラック	C -n/j		19-2
33	19.32	－	19.45	19.39	N 72W 41N	ヘアークラック	C -n/j		
34	19.33	－	19.55	19.44	N 69E 82N	ヘアークラック	C -n/j		
35	19.67	－	19.75	19.71	N 81W 67N	ヘアークラック	C -n		
36	19.99	－	20.08	20.04	N 83W 70N	明瞭割れ目	C -h		
37	20.29	－	20.36	20.33	N 77W 77N	ヘアークラック	C -n		
38	20.71	－	20.79	20.75	N 58W 51NE	ヘアークラック	C -n		
39	20.86	－	20.96	20.91	N 77W 56N	明瞭割れ目	C -n		
40	21.02	－	21.11	21.06	N 87W 78N	ヘアークラック	C -n/j		
41	21.05	－	21.11	21.08	N 74W 74N	ヘアークラック	C -n/h		
42	21.29	－	21.36	21.32	N 80W 78N	ヘアークラック	C -n		

表 3.18 BTV 観察結果 [12-P350-M02]

通し番号	上端深度 (m)	下端深度 (m)	中間深度 (m)	走向傾斜	区 分	形状※ ¹	状 態	岩芯コア観察 との対比※ ²
1	1.63	1.67	1.65	N 87E 89N	ヘアークラック	P -n		1-2
2	1.79	1.84	1.81	N 88W 89N	ヘアークラック	C -n		1-3
3	4.60	4.62	4.61	N 63E 79N	ヘアークラック	C -n		
4	7.86	8.03	7.94	N 58W 52SW	明瞭割れ目	C -n	角礫状	
5	8.72	8.85	8.78	N 77E 25S	ヘアークラック	C -n		
6	10.20	10.23	10.22	N 79E 86N	ヘアークラック	C -n		
7	13.17	13.21	13.19	N 85E 84S	ヘアークラック	C -n		13-1
8	14.41	14.46	14.43	N 32E 80NW	ヘアークラック	C -n		14-1
9	14.51	14.64	14.58	N 77W 50N	ヘアークラック	C -n		14-1
10	16.14	16.27	16.21	N 61W 65S	ヘアークラック	C -n		16-1
11	18.86	18.97	18.92	N 79W 42S	ヘアークラック	C -n		
12	19.40	19.55	19.47	N 61W 55S	ヘアークラック	C -n		
13	20.19	20.21	20.20	N 57E 78NW	ヘアークラック	C -n		
14	20.73	20.84	20.79	N 4E 72E	ヘアークラック	C -n		

表 3.19 BTV 観察結果 [12-P350-M03]

通し番号	上端深度 (m)	下端深度 (m)	中間深度 (m)	走向傾斜	区 分	形状※ ¹	状 態	岩芯コア観察 との対比※ ²
1	1.89	1.95	1.92	N 54W 76SW	層理面	C -n		
2	1.91	1.96	1.94	N 62W 72S	層理面	C -n		
3	2.70	2.75	2.73	N 14W 47W	ヘアークラック	C -n		2-1
4	3.78	3.84	3.81	N 72W 71S	ヘアークラック	C -n		
5	6.15	6.30	6.22	N 22E 50E	ヘアークラック	C -n/h		
6	6.54	6.88	6.71	N 63E 82N	ヘアークラック	C -n/j		6-1
7	6.87	6.98	6.93	N 61E 25N	ヘアークラック	C -n/h/j		
8	6.93	7.04	6.98	N 60E 28N	ヘアークラック	C -n/h		7-1
9	10.84	10.86	10.85	N 51W 21SW	ヘアークラック	C -n		
10	11.32	11.50	11.41	N 47E 49NW	ヘアークラック	C -n		
11	11.39	11.51	11.45	N 35E 42NW	明瞭割れ目	C -h		
12	13.61	13.64	13.63	N 40W 58SW	ヘアークラック	C -n		
13	13.92	14.11	14.02	N 80W 78N	ヘアークラック	C -n/j		
14	14.02	14.03	14.03	N 41W 35SW	ヘアークラック	C -n/j		
15	17.51	17.55	17.53	N 34W 55SW	ヘアークラック	C -n		
16	18.05	18.09	18.07	N 87E 49S	ヘアークラック	C -n		
17	20.09	20.11	20.10	N 45W 44SW	ヘアークラック	C -n		
18	20.35	20.39	20.37	N 21W 55W	ヘアークラック	P -n		

表 3.20 BTV 観察結果 [12-P350-M03]

通し番号	上端深度 (m)	下端深度 (m)	中間深度 (m)	走向傾斜	区 分	形状※ ¹	状 態	岩芯コア観察 との対比※ ²
1	4.19	4.50	4.34	N 53W 26SW	ヘアークラック	C -n		
2	5.39	5.52	5.46	N 2E 76W	ヘアークラック	C -n/j		
3	5.42	5.66	5.54	N 48W 72SW	ヘアークラック	C -n/j		
4	5.58	5.59	5.58	N 49E 83SE	ヘアークラック	C -n/j		

※1 3.2.4 節(3)⑤形状を参照 (p.27-28)

※2 表 3.2 (p.22) の割れ目番号に対応

4. 水圧破碎法による初期地圧測定

水圧破碎法は、応力解放法と異なりオーバーコアリングを必要とせず、ボーリング孔さえあれば適用できるため、これまで地下深部の初期地圧の計測および評価に最も一般的に用いられてきた。また、水圧破碎法は岩盤内部に係る地下水圧も含めた岩盤への水圧負荷なので、その観点から、得られる応力は間隙水圧も含有した全応力である。この方法は、岩盤内に掘削したボアホールの所要区間を二つの詮（パッカーエレメント）により仕切り、この区間（以下、加圧区間）に高水圧を負荷して岩盤内に人工き裂を作成し、このときに観察されるき裂開口圧およびき裂閉口圧という二つのボアホール水圧からボアホール軸と直交する面内に作用する二つの主応力の大きさを決定する。最近の研究⁵⁾⁶⁾によれば、従来の水圧破碎法によるき裂開口圧の観測方程式 $P_r = 3S_h - S_H - P_0$ は誤りであり、また、同式から求められるき裂開口圧は、通常の水圧破碎試験で観測されるき裂開口圧とは異なり、実際にき裂が開き始めるときの水圧にも一致しないことが指摘されている。ここで、 S_H および S_h ($S_H \geq S_h$) はボアホールと直交する面内に作用する初期主応力である。 P_0 はき裂開口時のき裂の中の圧力であり、開口時は $P_0 = P_r$ である。さらに、き裂開口圧の測定値と真の値とが異なってしまう原因は、水圧破碎システムのコンプライアンス C が大きすぎるためであり、 C が十分に小さなシステムを用いれば、き裂開口圧の測定値が真の値に等しくなることが分かっている。

以上の知見に鑑み、深度 350m ポンプ座では、できるだけコンプライアンス C の小さい配管系を用いた高剛性水圧破碎法を実施することで、見かけのき裂開口圧 P_r を精度よく測定するとともに、縦き裂への加圧水の浸透を考慮したき裂開口圧力の観測方程式を用いて 3 次元初期地圧を評価した。なお、初期地圧の評価に当たっては、ボーリング孔軸と初期主応力軸の関係は任意であると仮定した。以下では 12-P350-M01 孔、12-P350-M02 孔、12-P350-M03 孔および 12-P350-M04 孔を、それぞれ M01 孔、M02 孔、M03 孔および M04 孔と呼ぶ。

4.1 試験装置

試験に使用した水圧破碎システムの配管および配線図を図 4.1 に示す。また、試験に用いた主要機器名をまとめて表 4.1 に示す。見かけのき裂開口圧から真のき裂開口圧を近似的に評価して孔軸と直交する平面内の最大応力 S_H の大きさを評価するには、測定システムのコンプライアンスを小さくするために、流量計から加圧区間までの加圧系の体積をできるだけ小さくする必要がある。そこで、流量計とストラドルパッカーをコンプライアンスの小さい長さ 30m、内径 2mm のステンレスパイプで接続した。加圧区間への水の圧入は、最大吐出量 400ml/min の小型高压プランジャーポンプによっておこなった。加圧区間の水圧はストラドルパッカーの直上に設置した圧力変換器によって測定し、地表で測定された流量とともに A/D 変換し、5Hz のサンプリング周波数でパーソナルコンピュータに記録した。

表 4.1 測定機器一覧

測 定 機 器	メーカー	数量
φ76mm ストラドルパッカー、ウレタンゴム、耐圧 30MPa	(株)明間ボーリング	1 本
φ76mm インプレッションパッカー、ウレタンゴム、耐圧 30MPa	(株)明間ボーリング	1 本
高压ポンプ、NP-GXL-400、400ml/min、最高吐出圧力 30MPa	日本精密科学(株)	1 台
システムコントローラー、ソニー VAIO	ソニー	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-200KD、測定範囲 20MPa	(株)共和電業	1 台
流量計、MF 30、測定範囲 500ml/min	日本フローコントロール(株)	1 台
坑井方位傾斜儀計（シングルショット）、最小読取り精度 1 度	(株)村田製作所	1 台

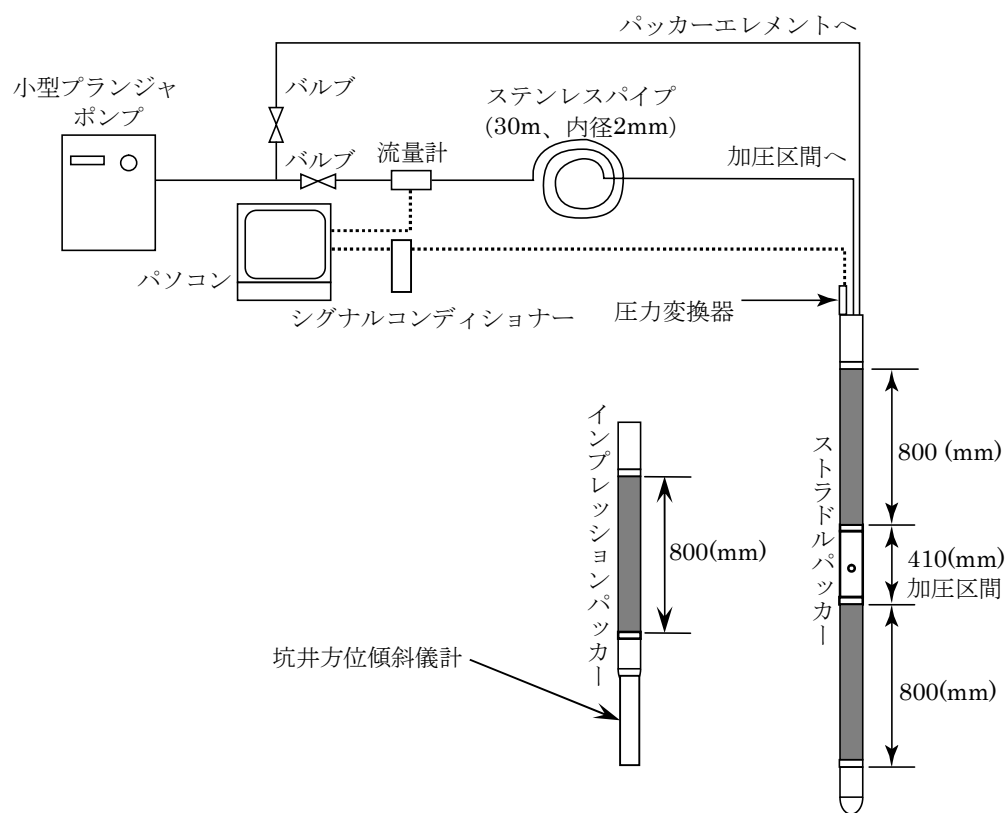


図 4.1 コンプライアンス C の小さな高剛性水圧破碎システム。実線が配管、点線が配線。

4.2 試験方法

水圧破碎法によって初期地圧を評価する手順は、以下の通りである。

4.2.1 水圧破碎前の孔壁の型取り

水圧破碎法は、等方均質弾性体中の円孔まわりの応力分布に基礎を置いて解析理論が構築されているので、加圧区間は岩盤に割れ目のない均質な位置を選定する必要がある。そこで、ボーリングコアの観察結果とボアホールテレビによる孔壁の観察結果とを総合的に判定し、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（型取りパッカー）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（図 4.2 参照）。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、所定の深度でパッカーエレメントを膨張させ、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。加圧予定区間に天然き裂が認められた場合は、さらに別の深度で型取をおこない、適切な加圧区間を探す。ただし、岩盤に含まれる天然き裂が非常に多いためき裂のない加圧区間をみいだすことが困難な場合、ボーリング孔と天然き裂が交差する箇所を加圧区間として選定し、き裂に作用する法線応力を測定することもおこなわれる。



図 4.2 可塑性のチューブによって被覆した型取パッカーの挿入

4.2.2 水圧破碎試験

孔口付近に設置した小型プランジャーポンプとコンプライアンスの小さいステンレスパイプで接続したストラドルパッカーを、ボアホール内の測定対象深度まで挿入する（図 4.3 参照）。その後、ストラドルパッカーのパッカーエレメントに水を圧入してそれを膨らませ、ボアホール壁面に密着させることにより、二つのパッカーエレメントによってはさまれた加圧区間を隔離する。以上のセットアップ終了後、①加圧配管を通して地表の電動小型プランジャーポンプから加圧区間に一定の流量（200ml/min あるいは 400ml/min）で水を圧入する、②プランジャーポンプと流量計の間にあるバルブを閉じ、水の圧入を停止する（以下、この操作をシャットインと呼ぶ）、③加圧系の圧力を開放する等の操作をおこなうことにより、加圧区間のボアホール壁面からき裂が発生、伸展し、またそのき裂が開口、閉口する。最初の加圧サイクルにおいて水を圧入してボアホール内の水圧を上昇させていくと、破碎圧（breakdown pressure）と呼ばれる水圧 P_b を越えた直後にボアホール内の水圧は急激に減少する。そこでシャットインして水の圧入を停止すると、ボアホール内の水圧は下降し、やがて、き裂閉口圧（shut-in pressure）と呼ばれる水圧 P_s に落ちつく⁷⁾。一方、二回目以降の加圧サイクルにおいて、き裂閉口圧（reopening pressure）と呼ばれる水圧 P_r に達したところでボアホール内の水圧と時間の関係が線形から非線形に変わる⁸⁾。このようにして水の圧入、シャットイン、水の排出を数回繰り返し、三種類の水圧データ、すなわち破碎圧、き裂閉口圧、ならびにき裂閉口圧を測定する。

なお、第 1 回目の加圧サイクルでは、天然き裂が開口する前に縦き裂ができやすいようにするため、プランジャーポンプの最大流量である 400ml/min を採用し、2 回目以降の加圧サイクルにおける加圧流量は 200ml/min とした。コンプライアンスの小さいシステムを用いて水圧破碎試験をする場合、加圧流量が大きいと極めて短時間に加圧区間の圧力が上昇する。データのサンプリング速度にもよるが、圧力上昇速度が大きすぎると圧力勾配の変化からき裂閉口圧を検出しにくくなることが考えられる。逆にき裂面内の水圧勾配が小さくなるように、極端に小さい流量で加圧すると、加圧流体の岩盤への浸透を無視できなくなる。これらのことを考慮して、直径 76mm 程度のボーリング孔では、経験的に 200 ml/min 程度の流量でき裂の再開口をおこなっている。



図 4.3 ストラドルパッカーの挿入

4.2.3 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加圧区間の型取りをおこない、4.2.1 で得られたき裂のトレースと比較することにより新たに造成されたき裂を判定する。このインプレッションパッカーの先端には坑井方位傾斜儀計が取り付けられており、熱収縮チューブの表面に印された基準線の方位が測定される。この方位とき裂のトレースから、造成されたき裂の走向・傾斜を決定することができる。破碎後の型取で得られたき裂のトレースの例として、M01 孔の深度 8.70m で実施された水圧破碎により造成された結果を図 4.4 に示す。

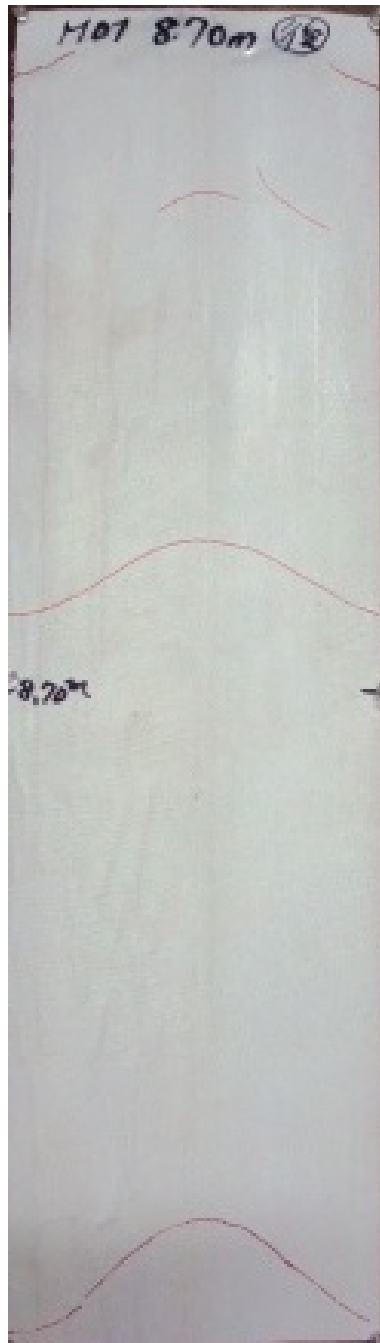


図 4.4 破碎後の型取で得られたき裂のトレースの例（M01 孔深度 8.70m）

4.3 解析方法

一般に、水圧破碎試験によって2種類のき裂が生じる。すなわち、縦き裂と横き裂である。縦き裂はボーリング孔軸と平行な面として伸展し、横き裂は既存の弱面あるいは岩脈などの境界面に沿って伸展する。非常に多くの弱面を有する岩盤で水圧破碎試験をおこなうと、誘起されるき裂はほとんど横き裂であり、縦き裂ができることは稀である。良く知られているように、き裂閉口圧はき裂面に作用する法線応力と等しく、その信頼性は高い。一方、縦き裂が初生する孔壁上の位置は、初期地圧の指標として信頼性が高いと考えられる。なぜならば、縦き裂が初生する位置は、岩石の強度に無関係に、加圧区間の圧力と初期地圧だけで決まるからである⁹⁾。

また、ボーリング孔まわりの応力集中によってボーリング孔壁が破壊するボアホールブレイクアウトが生じた場合、その破壊条件を観測方程式として解析に加えることができる。縦き裂の初生する位置と同様に、ブレイクアウトが生じる方向も岩石の強度と無関係に初期地圧だけで決まるので、その信頼性は高いと考えられる。

ここでは、まず、横き裂のき裂閉口圧と初期地圧の関係、初期地圧と孔壁面上で縦き裂が初生する位置およびそれを開口させるときの開口圧力について述べる。これら2種類のき裂について測定される圧力データと初期地圧との関係を表わす観測方程式を別々に記述する理由は、き裂閉口圧がき裂の向きだけで決まるのに対して、縦き裂の初生はボーリング孔まわりの応力集中によって支配されるからである。次に、初期地圧とボアホールブレイクアウトの発生条件との関係について述べる。最後にこれらの関係を用いて初期地圧を評価する方法を示す。

4.3.1 横き裂のき裂閉口圧と初期地圧の関係

ボーリング孔を掘削する前の岩盤の応力状態は、いたるところで一様であると仮定する。この一様な応力場を、図4.5に示すカーテシアン座標系 ($x_i: i=1, 2, 3$) に関して $\tau_{ij} (i, j=1, 2, 3)$ と表記する。ここで、圧縮応力を正とする。水圧破碎試験をおこなって生じた横き裂のき裂閉口圧は、横き裂に作用する法線応力成分であると考えられるので、次式が得られる。

$$\sum_{i,j=1}^3 \tau_{ij} \lambda_i^{(k)} \lambda_j^{(k)} = P_s^{(k)} \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (4.1)$$

ここで、 K は水圧破碎試験によって生じた横き裂の総数、 $P_s^{(k)}$ は k 番目のき裂のき裂閉口圧力、そして $\lambda_i^{(k)}$ は k 番目のき裂面の外向きの単位法線ベクトルである。式(4.1)は、次のような単純な式に書き換えることができる。

$$\sum_{l=1}^6 a_{kl} s_l = P_s^{(k)} \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (4.2)$$

ここに、

$$a_{k1} = \lambda_1^{(k)} \lambda_1^{(k)}, \quad a_{k2} = \lambda_2^{(k)} \lambda_2^{(k)}, \quad a_{k3} = \lambda_3^{(k)} \lambda_3^{(k)}, \quad a_{k4} = 2\lambda_1^{(k)} \lambda_2^{(k)}, \quad a_{k5} = 2\lambda_2^{(k)} \lambda_3^{(k)}, \\ a_{k6} = 2\lambda_1^{(k)} \lambda_3^{(k)} \quad (4.3)$$

$$s_1 = \tau_{11}, \quad s_2 = \tau_{22}, \quad s_3 = \tau_{33}, \quad s_4 = \tau_{12}, \quad s_5 = \tau_{23}, \quad s_6 = \tau_{13} \quad (4.4)$$

式(4.2)は6つの応力成分を未知数とする線形連立方程式である。したがって、走向・傾斜の異なる6つ以上の横き裂に関して式(4.2)が得られれば、初期地圧を評価することができる。なお、ボーリング孔軸を含む縦き裂の閉口圧力についても式(4.2)を適用することができる。

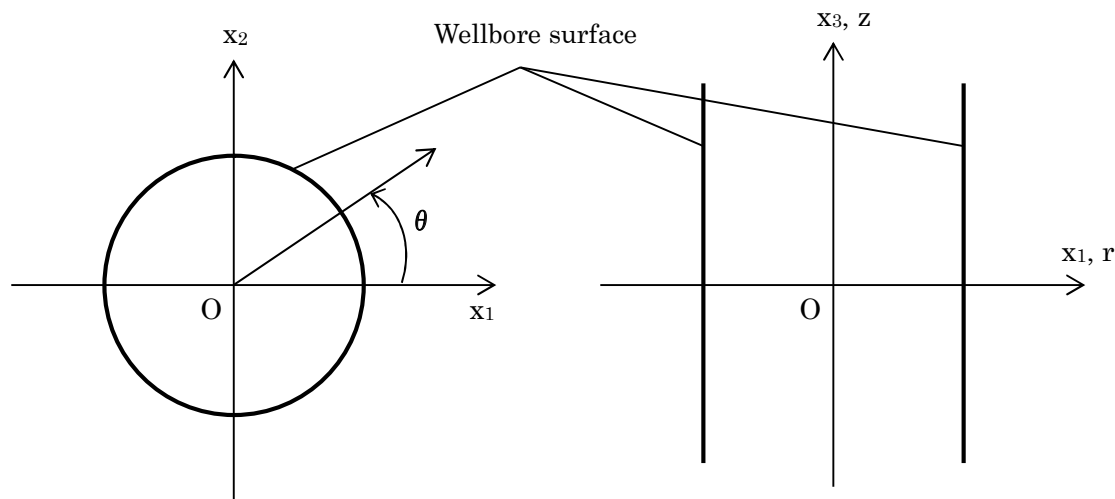


図 4.5 ボーリング孔と座標系の関係⁹⁾

4.3.2 縦き裂が初生する位置およびき裂閉口圧力と初期地圧の関係

図 4.6 に示すような円筒座標系 (r, θ, z) および直交座標系を導入すると、ボーリング孔壁面に静水圧 p を加えたときのボーリング孔壁面の応力は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\sigma_r &= p \\ \sigma_\theta &= \tau_{11} + \tau_{22} - 2(\tau_{11} - \tau_{22})\cos 2\theta - 4\tau_{12}\sin 2\theta - p \dots\dots\dots(4.5) \\ \sigma_z &= -2\nu(\tau_{11} - \tau_{22})\cos 2\theta - 4\nu\tau_{12}\sin 2\theta + \tau_{33} \\ \sigma_{\theta z} &= -2\tau_{31}\sin \theta + 2\tau_{23}\cos \theta, \quad \sigma_{r\theta} = \sigma_{rz} = 0\end{aligned}$$

ここで、 ν はポアソン比、そして $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \sigma_{r\theta}, \sigma_{rz}$ および $\sigma_{\theta z}$ は円筒座標系 (r, θ, z) に関する応力成分である。ここでも圧縮応力を正とする。図 4.6 において、 σ_t は孔壁に作用する最大引張応力であり、次式で与えられる。

$$\sigma_t = -\frac{1}{2} \left\{ \sigma_\theta + \sigma_z - \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\sigma_{\theta z}^2} \right\} \dots\dots\dots(4.6)$$

式(4.6)において、周方向の位置を表す θ は $\sin 2\theta$ および $\cos 2\theta$ の形で現れる。したがって、 $\theta = \theta_0$ で σ_t が最大値をとるとき、 $\theta = \theta_0 + \pi$ でも最大値をとる。第1回目の加圧サイクルにおいて $\theta = \theta_0$ で引張応力 σ_t が引張強度に達すると、 σ_t の方向と直交する方向に微小なき裂が生じ、図 4.7 に示すように、これらが連結して $\theta = \theta_0$ および $\theta = \theta_0 + \pi$ に孔軸と平行な縦き裂ができる。したがって、次式が得られる。

$$\left. \frac{\partial \sigma_t}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_0^{(l)}, p=P_b^{(l)}} = 0 \quad (l=1, 2, \dots, L) \dots\dots\dots(4.7)$$

ここで、 L は誘起された縦き裂の総数、 $\theta_0^{(l)}$ と $P_b^{(l)}$ は l 番目の縦き裂の周方向の位置および破砕圧である。

第2回目以降の加圧サイクルにおいて、上述の縦き裂が開口する条件は次式で与えられる。

$$\sigma_{\theta}|_{\theta=\theta_0, p=P_r} - P_0 = 0 \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

ここで、 P_0 はき裂内水圧である。ただし、いったん生じた縦き裂は、閉じていても向かい合うき裂面上の凹凸が完全にかみ合わず、かみ合わない部分が連なって水の通路となる¹⁰⁾¹¹⁾。このためき裂が閉じていても加圧水がき裂内に浸入し得るので、 P_0 はき裂開口圧 P_r と等しくなる¹²⁾。すなわち、

$$\sigma_{\theta}|_{\theta=\theta_0, p=P_r} - P_r = 0 \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

上式に式(4.5)の σ_{θ} を代入すると、

$$P_r = \{\tau_{11} + \tau_{22} - 2(\tau_{11} - \tau_{22})\cos 2\theta_0 - 4\tau_{12} \sin 2\theta_0\}/2 \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

したがって、次式を用いて初期地圧を評価すれば良いことになる。

$$P_r^{(m)} = \{\tau_{11} + \tau_{22} - 2(\tau_{11} - \tau_{22})\cos 2\theta_0^{(m)} - 4\tau_{12} \sin 2\theta_0^{(m)}\}/2 \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad \dots\dots (4.11)$$

ここに、 M はき裂開口圧が測定された縦き裂の総数、 $\theta_0^{(m)}$ と $P_r^{(m)}$ は m 番目の縦き裂の周方向の位置およびき裂開口圧である。

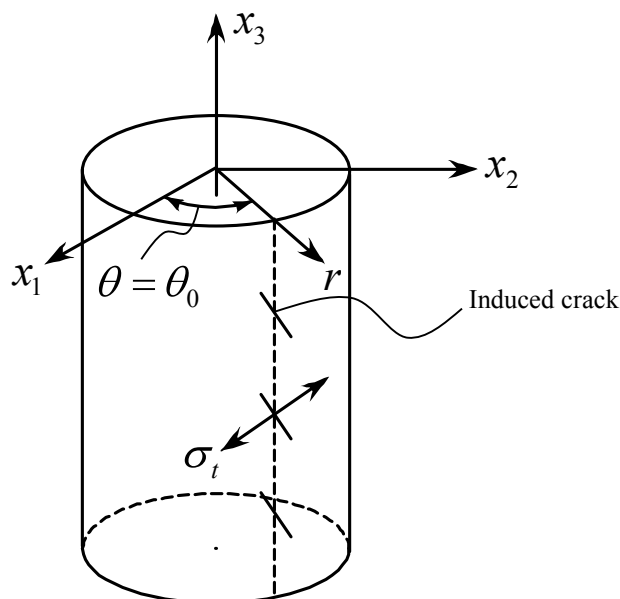


図 4.6 ボーリング孔壁面における縦き裂の初生

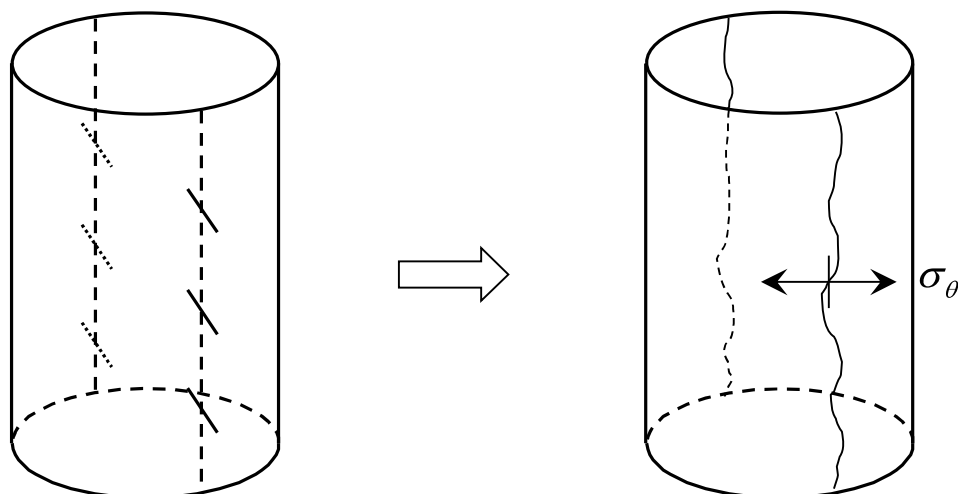


図 4.7 微小き裂の初生と連結

4.3.3 ボアホールブレイクアウトが生じる位置と初期地圧の関係

図 4.8(a)に示すような円筒座標系 (r, θ, z) および直交座標系を導入すると、ボーリング孔壁面の応力は次式で与えられる¹³⁾。

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta} &= \tau_{11} + \tau_{22} - 2(\tau_{11} - \tau_{22})\cos 2\theta - 4\tau_{12}\sin 2\theta \\ \sigma_z &= -2\nu(\tau_{11} - \tau_{22})\cos 2\theta - 4\nu\tau_{12}\sin 2\theta + \tau_{33} \quad \cdots \cdots \cdots (4.12) \\ \sigma_{\theta z} &= -2\tau_{31}\sin \theta + 2\tau_{23}\cos \theta, \quad \sigma_r = \sigma_{r\theta} = \sigma_{rz} = 0\end{aligned}$$

ここで、 ν はポアソン比、そして $\sigma_r, \sigma_{\theta}, \sigma_z, \sigma_{r\theta}, \sigma_{rz}$ および $\sigma_{\theta z}$ は円筒座標系 (r, θ, z) に関する応力成分である。図 4.8(a)に示すようなボーリング孔壁の任意の位置に作用する最大圧縮応力 σ_c は、上記の応力の円筒座標表示を用いて次式で与えられる。

$$\sigma_c = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\theta} + \sigma_z + \sqrt{(\sigma_{\theta} - \sigma_z)^2 + 4\sigma_{\theta z}^2} \right\} \quad \cdots \cdots \cdots (4.13)$$

ブレイクアウトが Mohr-Coulomb の破壊基準にしたがって起こるものと仮定し、 C_0 を岩石の一軸圧縮強度とすると、 $\sigma_c \geq C_0$ を満足する位置にブレイクアウトができる。したがって、ブレイクアウトの発生位置に関して次式が得られる。

$$\sigma_c \Big|_{\theta=\theta_b^{(n)}} = C_0^{(n)} \quad (n=1,2,\dots,N) \quad \cdots \cdots \cdots (4.14)$$

さらに、ブレイクアウトの方向に関して次式が得られる。

$$\frac{\partial \sigma_c}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_{min}^{(o)}} = 0 \quad (o=1,2,\dots,O) \quad \cdots \cdots \cdots (4.15)$$

ここで、 $\theta_b^{(n)}$ および $\theta_{min}^{(o)}$ は、図 4.8(b)に示すように、それぞれブレイクアウトが開始する位置および破壊域中央の方向である。また、 N と O は、それぞれ $\theta_b^{(n)}$ および $\theta_{min}^{(o)}$ が既知であるブレイクアウトの総数である。

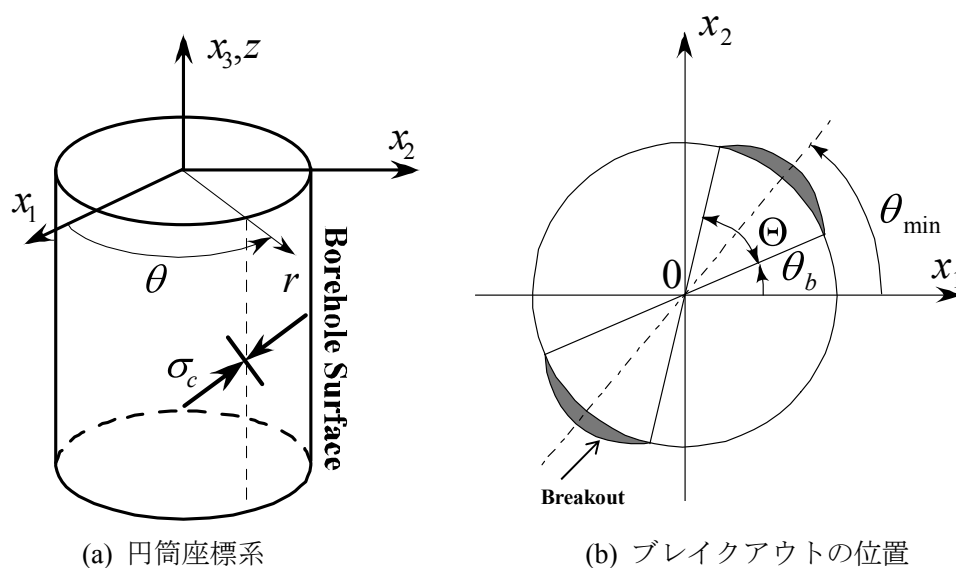


図 4.8 円筒座標系およびブレイクアウトの位置

4.3.4 逆解析

初期地圧を評価するために、以下のような逆解析の問題を考える。まず、観測方程式として $d_s (s=1, 2, \dots, S; S=K+L+M+N+O)$ を定義する。横き裂の場合、 $d_s (s=1, 2, \dots, K)$ は s 番目のき裂開口圧 $P_s^{(s)}$ に等しく、 d_s と初期応力場の関係は式(4.2)のとおりである。縦き裂の場合、式(4.7)が得られ、 $d_s (s=K+1, \dots, L)$ はゼロである。さらに、縦き裂のき裂開口圧が測定されれば式(4.11)が得られ、 $d_s (s=L+1, \dots, M)$ はき裂開口圧 $P_r^{(s)}$ に等しい。ボアホールブレイクアウトの発生位置に関する式(4.14)を観測方程式として採用する場合、 $d_s (s=M+1, \dots, N)$ は孔壁の強度と関係づけられ、ブレイクアウトの方向が明らかな場合、 $d_s (s=N+1, \dots, O)$ はゼロである。したがって、次のような非線形の観測方程式が得られる。

$$d_s = f_s(\lambda_1^{(s)}, \lambda_2^{(s)}, \lambda_3^{(s)}, \tau_{11}, \tau_{22}, \dots, \tau_{13}) \dots\dots\dots (4.16)$$

先験的に推定した応力 $\tau_{ij}^0 (i, j=1, 2, 3)$ のまわりに式(4.16)を Taylor 展開し、二次以上の項を省略して線形に引き直し、逐次近似法によって初期地圧 $\tau_{ij} (j=1, 2, 3)$ の最確値を求める。

4.4 試験結果

4.4.1 水圧破碎システムのコンプライアンス C の評価

図 4.1 に示した水圧破碎システムの、流量計から加圧区間までのコンプライアンス C を測定するために、工場においてき裂のない鋼管内にストラドルパッカーを設置して加圧試験をおこなった（図 4.9 参照）。水圧破碎システムのコンプライアンス C とは、流量計よりも下流の圧力を単位量だけ上昇させるのに必要な水の量のことである。パッカー圧を 10MPa に設定しておこなった加圧試験の結果の一部を示すと図 4.10 のとおりである。ここで、横軸は総圧入流量 Q_{total} 、縦軸は加圧区間の圧力 P である。加圧区間の圧力がパッカー圧を越えるとパッカーが変形を開始し、加圧区間の体積は増加する。このため、水圧破碎システムのコンプライアンスが増加し圧力曲線の勾配は小さくなる。このことから、水圧破碎試験においては、測定しようとする水圧よりもパッカー圧を十分に高く設定する必要がある。加圧区間の圧力がパッカー圧に達する前の Q_{total} と P の直線の傾きからコンプライアンスを測定した結果をまとめると表 4.2 のとおりである。本水圧破碎システムのコンプライアンスの平均値は $2.20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{MPa}$ である。

き裂開口圧力 P_r の測定誤差は、 C に加えて孔径および岩石の弾性率によって変化する。仮に、孔径と岩石の弾性率が Ito ら⁶⁾の仮定と同じだとすると、当該試験装置のコンプライアンスを有する水圧破碎システムでは、約 20% の誤差の範囲内で真のき裂開口圧を評価できる。原理的には流量計をパッカーに直接に接続するか、あるいはパッカーとボーリング孔とのクリアランスを小さくすることで流量計からき裂までの水の体積を減少させ、 C を小さくすることができる⁵⁾。ただし、今回用いた水圧破碎システムは、クリアランスの限界に近いほどパッカーを太くしている。



図 4.9 水圧破碎システムのコンプライアンス測定状況

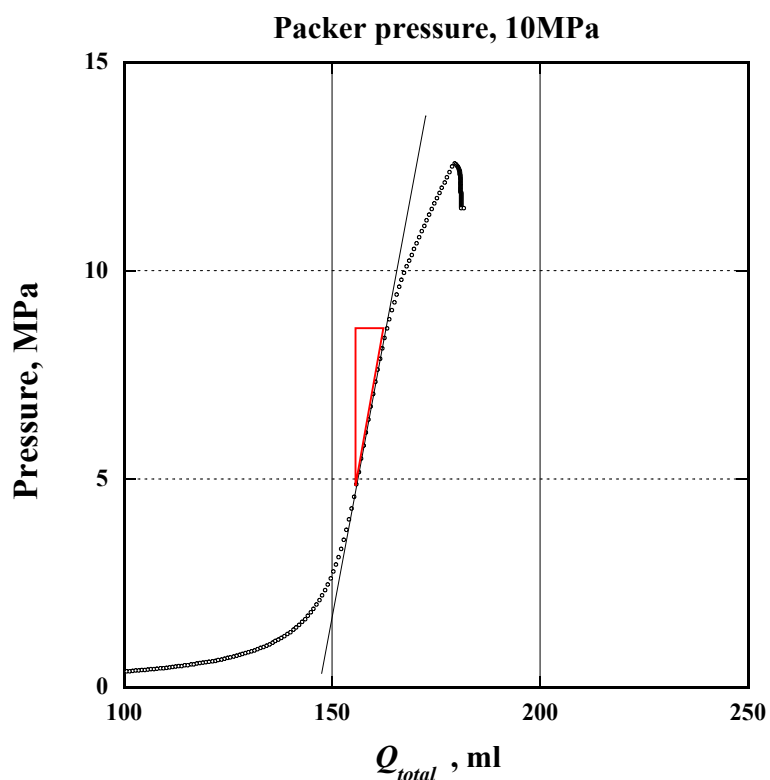


図 4.10 高剛性水圧破砕システムを用いた鋼管内における加圧試験の例

表 4.2 高剛性水圧破砕システムのコンプライアンス測定結果

加圧流量 (m ³ /s)	パッカー圧 (MPa)	コンプライアンス (m ³ /MPa)
2.0×10^{-6}	10	1.93×10^{-6}
2.0×10^{-6}	13	2.19×10^{-6}
2.0×10^{-6}	13	2.61×10^{-6}
2.0×10^{-6}	10	1.91×10^{-6}
2.0×10^{-6}	10	2.35×10^{-6}
平均値		2.20×10^{-6}

4.4.2 水圧破碎試験

ボーリングコアの鑑定結果およびボアホールテレビ観察結果に基づいて、31 箇所の加圧区間で水圧破碎試験を実施した。各ボーリング孔の試験深度は表 4.3 に示すとおりである。ただし、M02 孔の深度 16.30m では、ボアホールテレビ観察結果にブレイクアウトが観察されたので、孔壁の型取りのみをおこない、ブレイクアウトの方向と形状を測定した。

これら 31 深度における圧力・流量－時間曲線は、図 4.11 から図 4.41 に示すとおりである。ここで、横軸は測定開始後の時間である。下段の曲線はストラドルパッカー直上に設置した圧力変換器で測定した加圧区間の圧力（左縦軸）、上段の曲線は孔外の高圧ポンプ吐出口で測定した加圧区間に圧入される水の流量（右縦軸）である。各グラフの上部中央に記載したタイトルは、最初の 3 文字が孔名、ハイフンの次の数値が試験深度、そして最後のアルファベットが加圧サイクルの順序を表す。すなわち、a は第 1 回目のき裂発生試験、b、c、d などは、それぞれ第 2 回目、第 3 回目、第 4 回目のき裂再開口試験であることを意味する。圧入流量を 400ml/min に設定しておこなった第 1 回目のき裂発生試験における破碎圧 P_b 、および圧入流量を 200ml/min に設定しておこなったき裂再開口試験のときのき裂開口圧 P_r とき裂閉口圧 P_s は、下段の圧力－時間曲線において時間軸に平行な破線で示すとともに、その近傍に圧力値を表示した。これらの三種類の圧力の求め方については、4.5.2 で述べる。図 4.11 から 4.41 に示す圧力・流量－時間曲線の電子データは、巻末の付録 8 に収録した。

表 4.3 水圧破碎試験深度

孔名	方位・傾斜	試験深度 (m)	破碎試験状況	き裂の形状
M01	S50°W、 水平から 上向き 5°	8.70	ブレイクダウンあり	横き裂
		9.90		横き裂
		10.50	ブレイクダウンあり	横き裂
		11.60		横き裂
		12.60		横き裂
		14.20	ブレイクダウンあり	縦き裂
		15.20		横き裂
		17.05	ブレイクダウンあり	横き裂
		18.00		横き裂
		19.20		横き裂
M02	S30°E、水 平から上 向き 5°	6.40	ブレイクダウンあり	横き裂
		7.40		縦き裂
		8.40	ブレイクダウンあり	横き裂
		9.40	ブレイクダウンあり	横き裂+斜めき裂
		10.90	ブレイクダウンあり	横き裂+斜めき裂
		13.05	ブレイクダウンあり	横き裂+斜めき裂
		15.30	1回目と2回目の加圧にブレイクダウンあり	横き裂+斜めき裂
		17.40	ブレイクダウンあり	横き裂+斜めき裂
		18.30	ブレイクダウンあり	横き裂
		19.50	1回目と2回目の加圧にブレイクダウンあり	横き裂+斜めき裂
M03	N30°E、水 平から下 向き 54°	7.60		縦き裂
		8.70		縦き裂
		9.90		縦き裂
		11.40		縦き裂
		12.35		縦き裂
		14.50		縦き裂
		15.50		縦き裂
		16.50		縦き裂
		18.05	ブレイクダウンあり	縦き裂
		19.50		縦き裂
M04	S30°E、水 平から上 向き 5°	4.80	ブレイクダウンあり	横き裂+斜めき裂

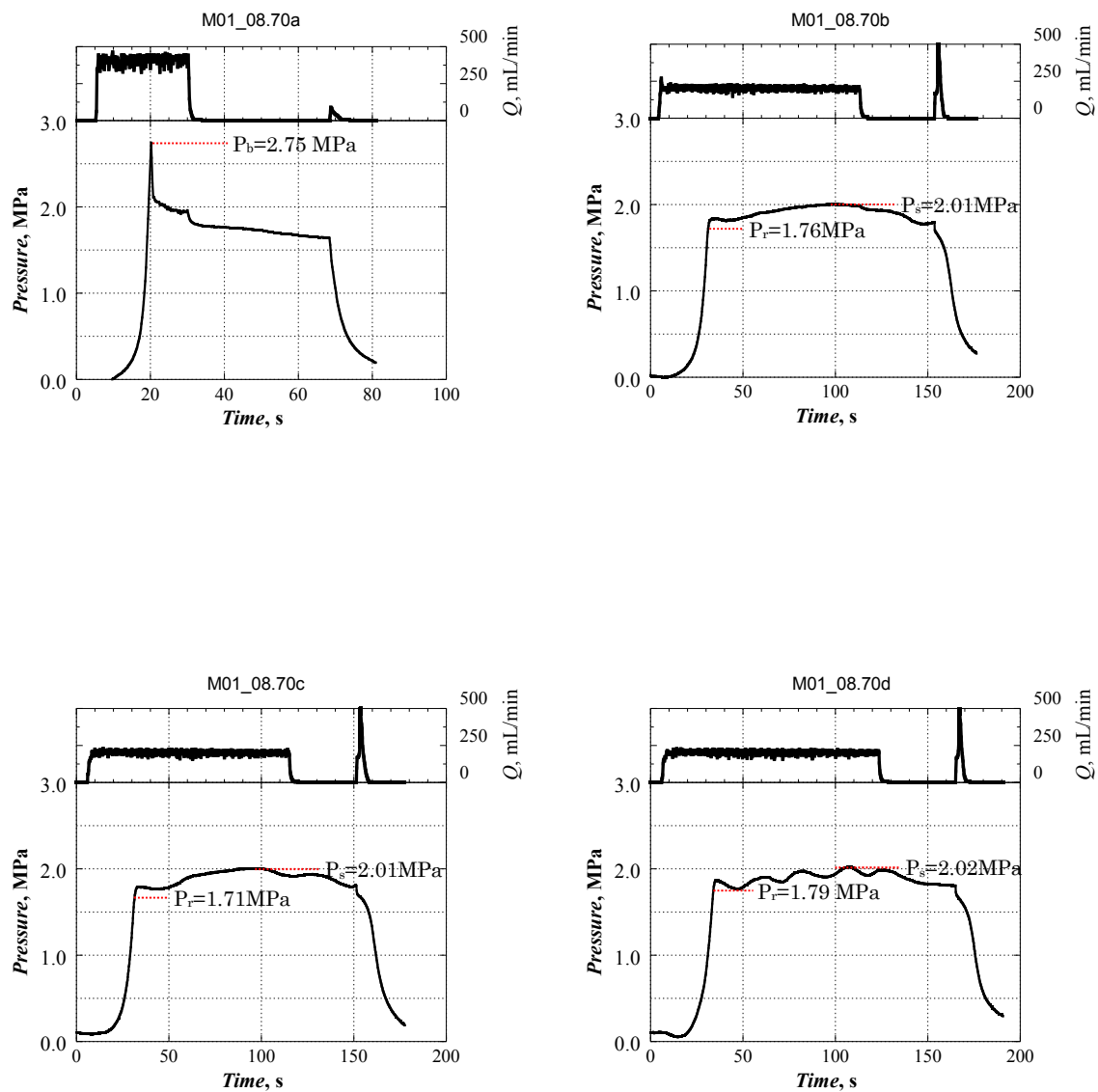


図 4.11 M01 孔の深度 8.70m における圧力・流量-時間曲線

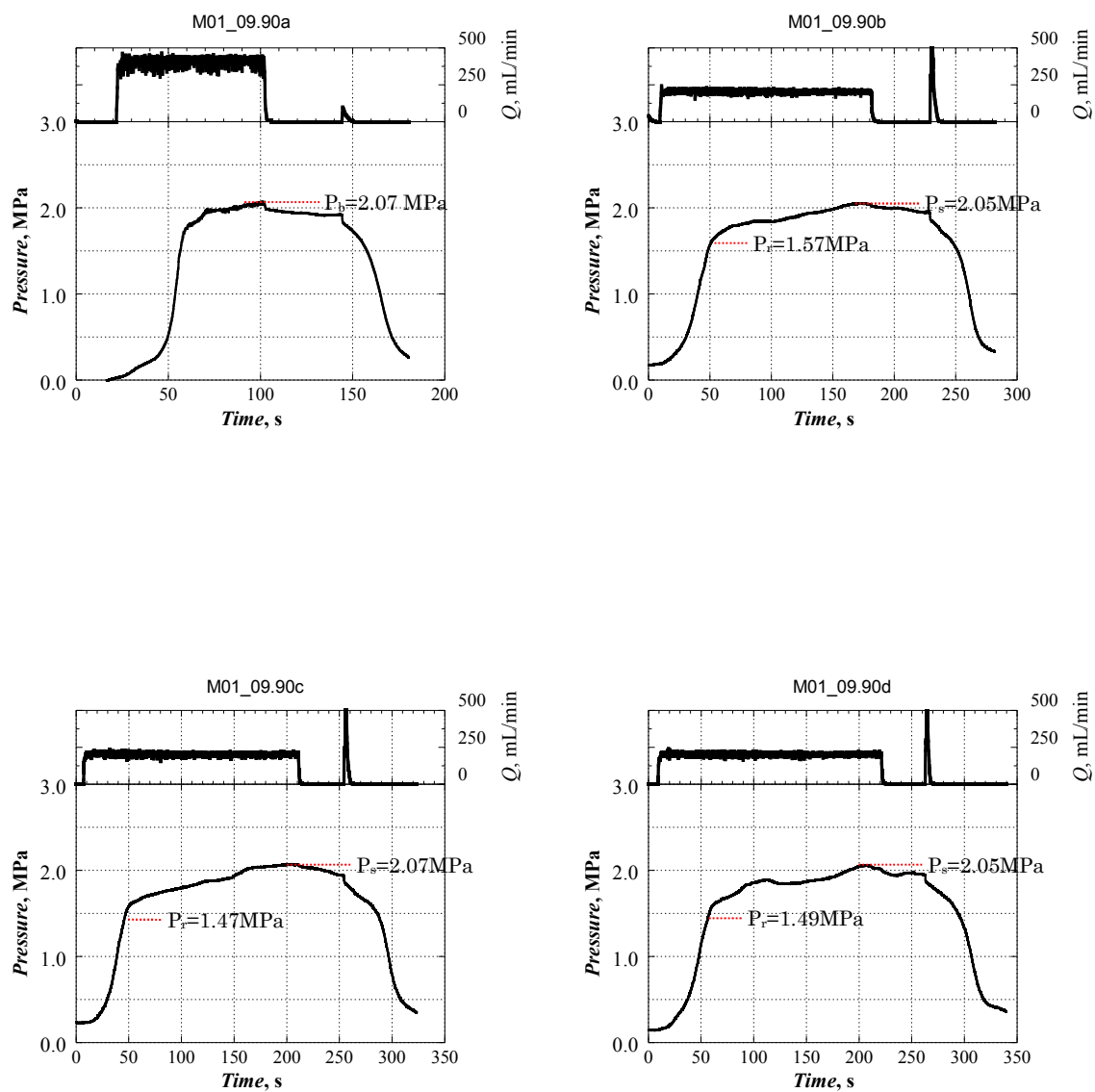


図 4.12 M01 孔の深度 9.90m における圧力・流量-時間曲線

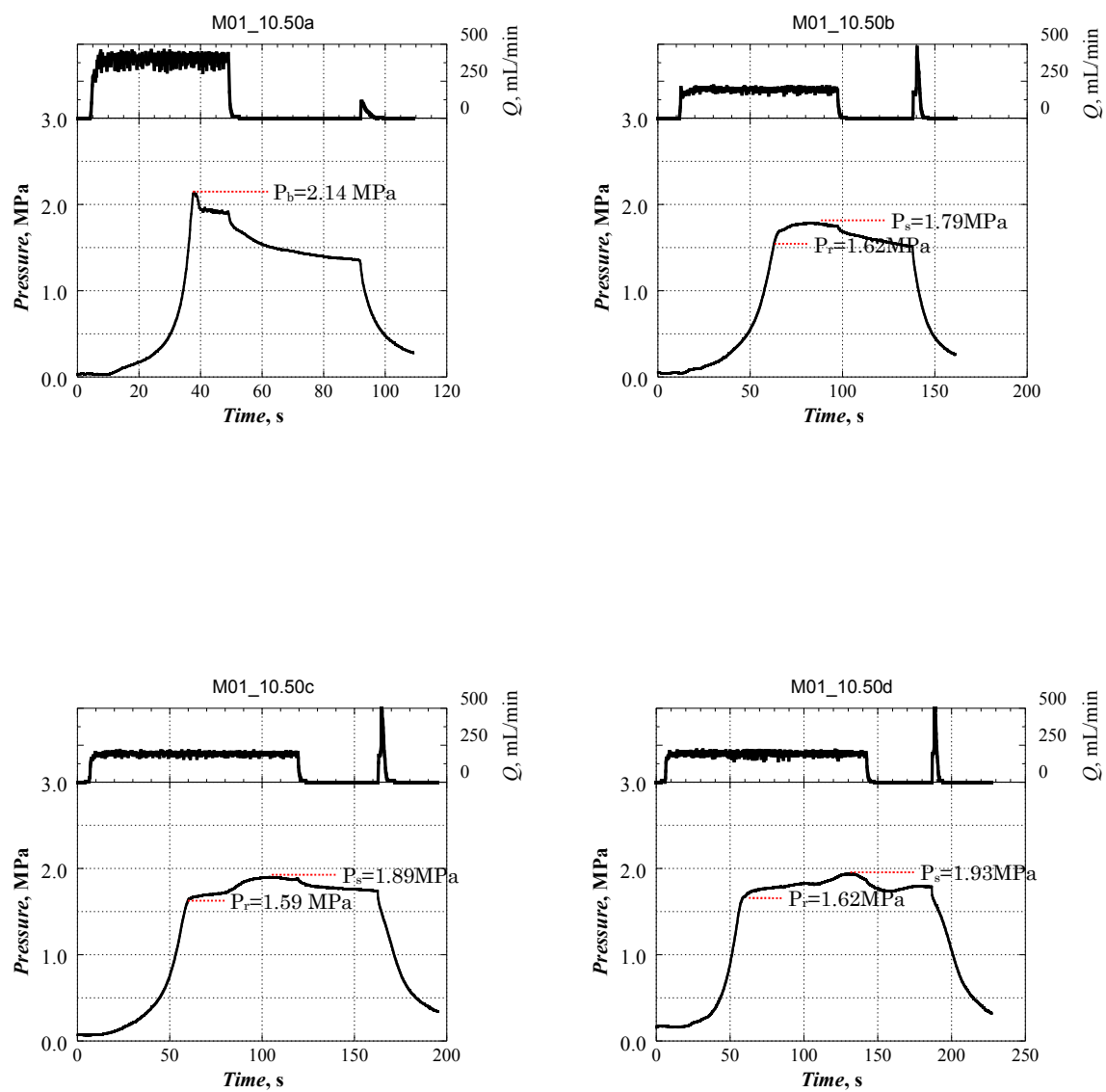


図 4.13 M01 孔の深度 10.50m における圧力・流量-時間曲線

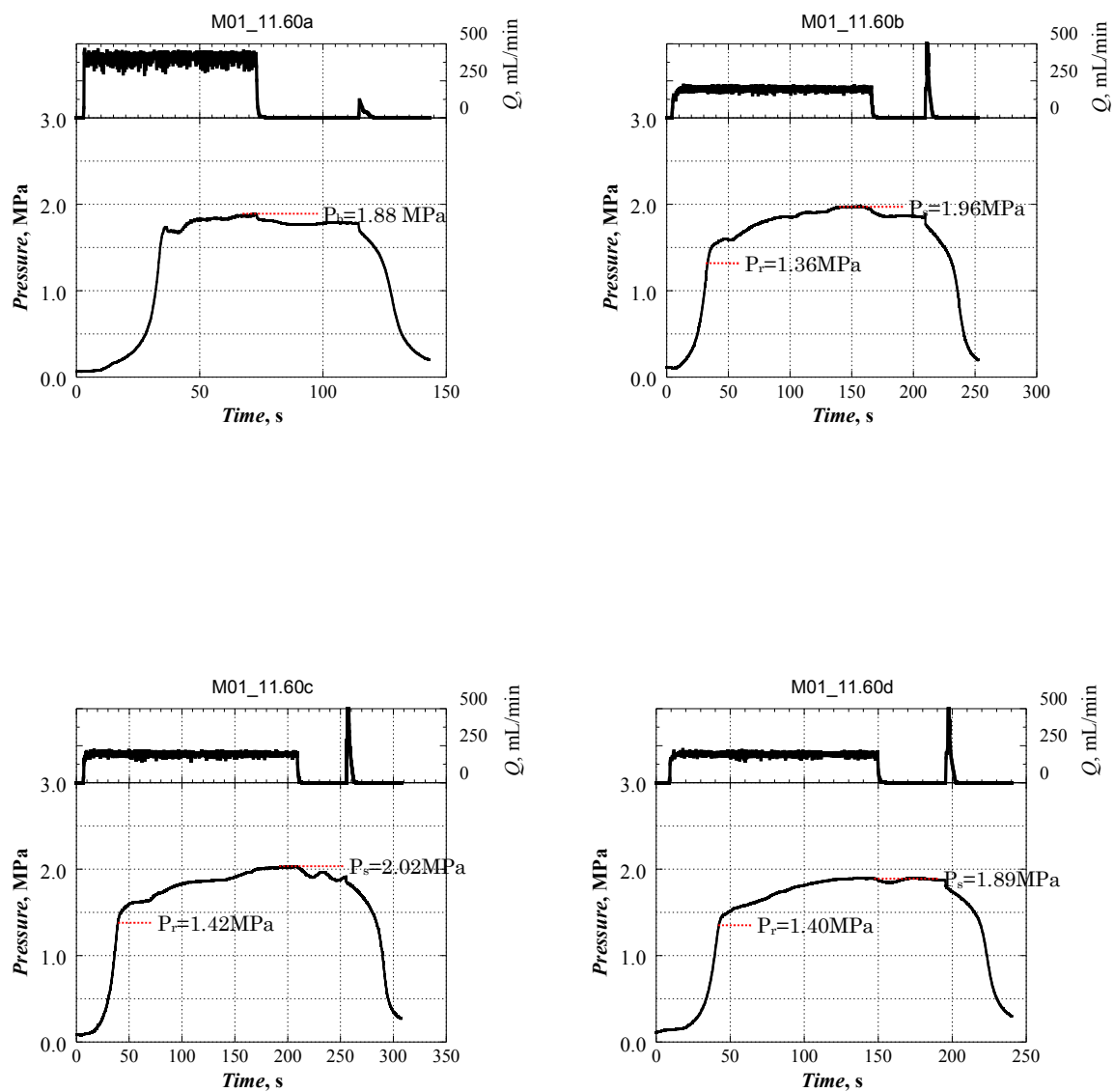


図 4.14 M01 孔の深度 11.60m における圧力・流量-時間曲線

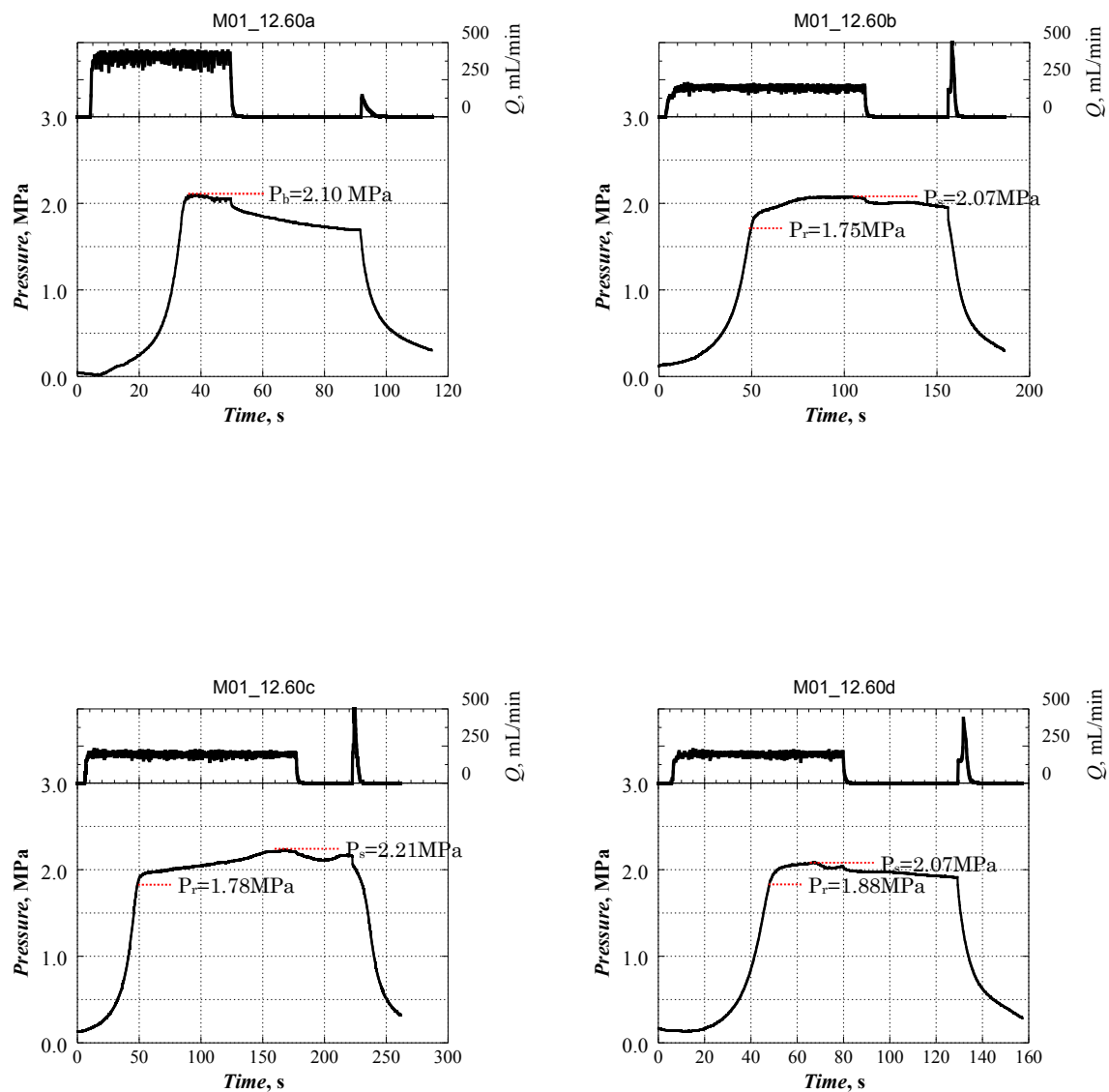


図 4.15 M01 孔の深度 12.60m における圧力・流量-時間曲線

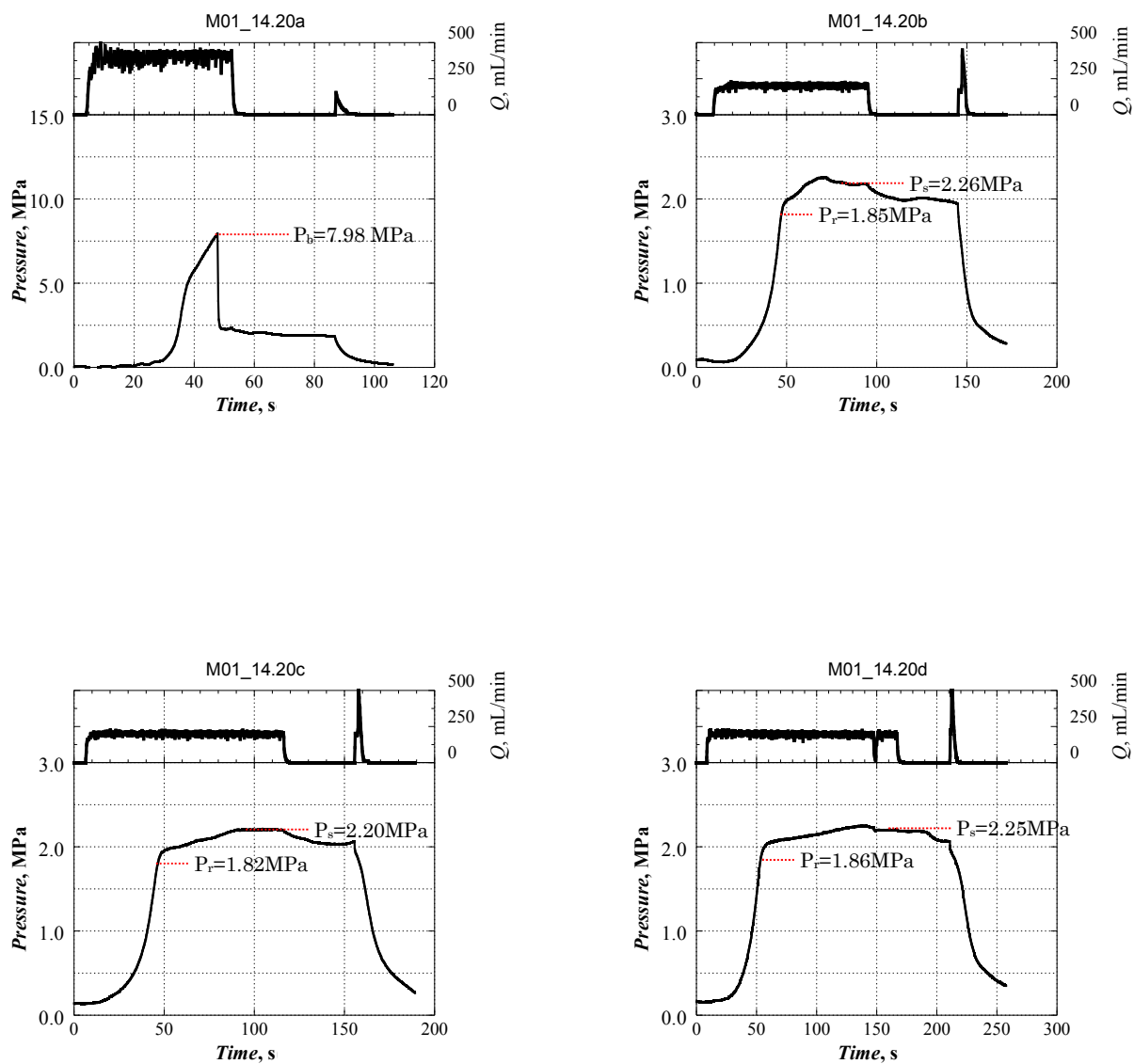


図 4.16 M01 孔の深度 14.20m における圧力・流量-時間曲線

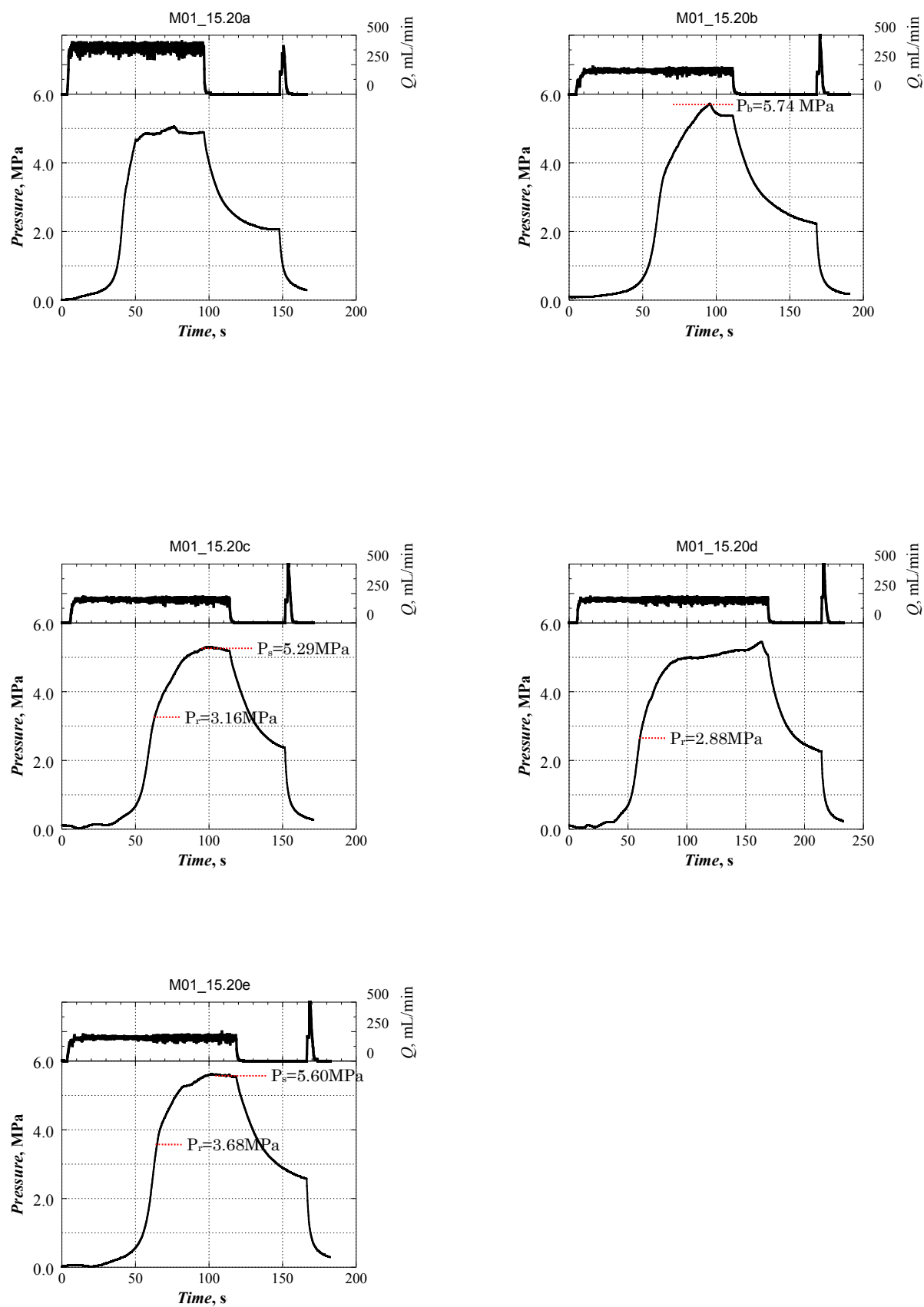


図 4.17 M01 孔の深度 15.20m における圧力・流量-時間曲線

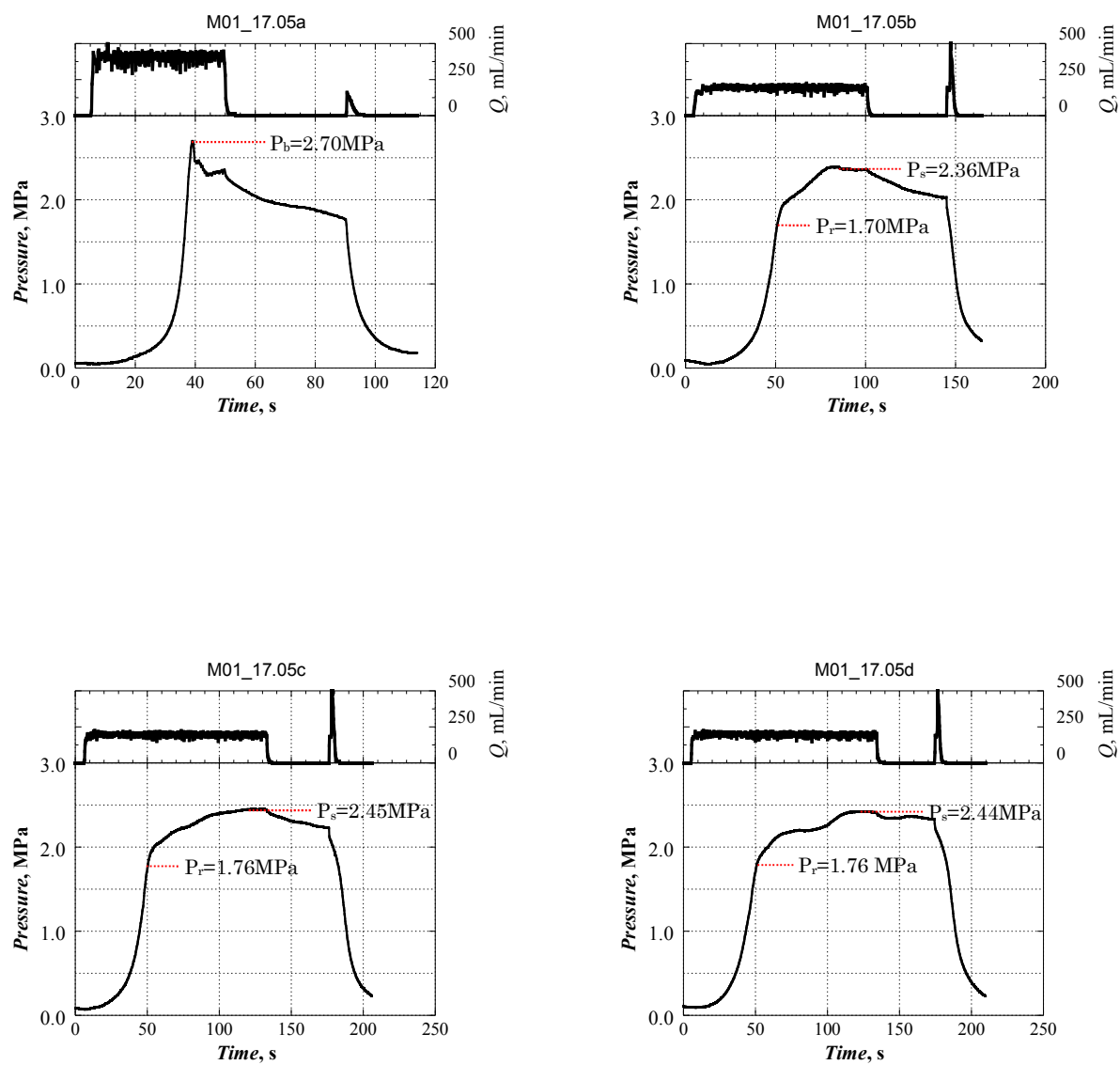


図 4.18 M01 孔の深度 17.05m における圧力・流量-時間曲線

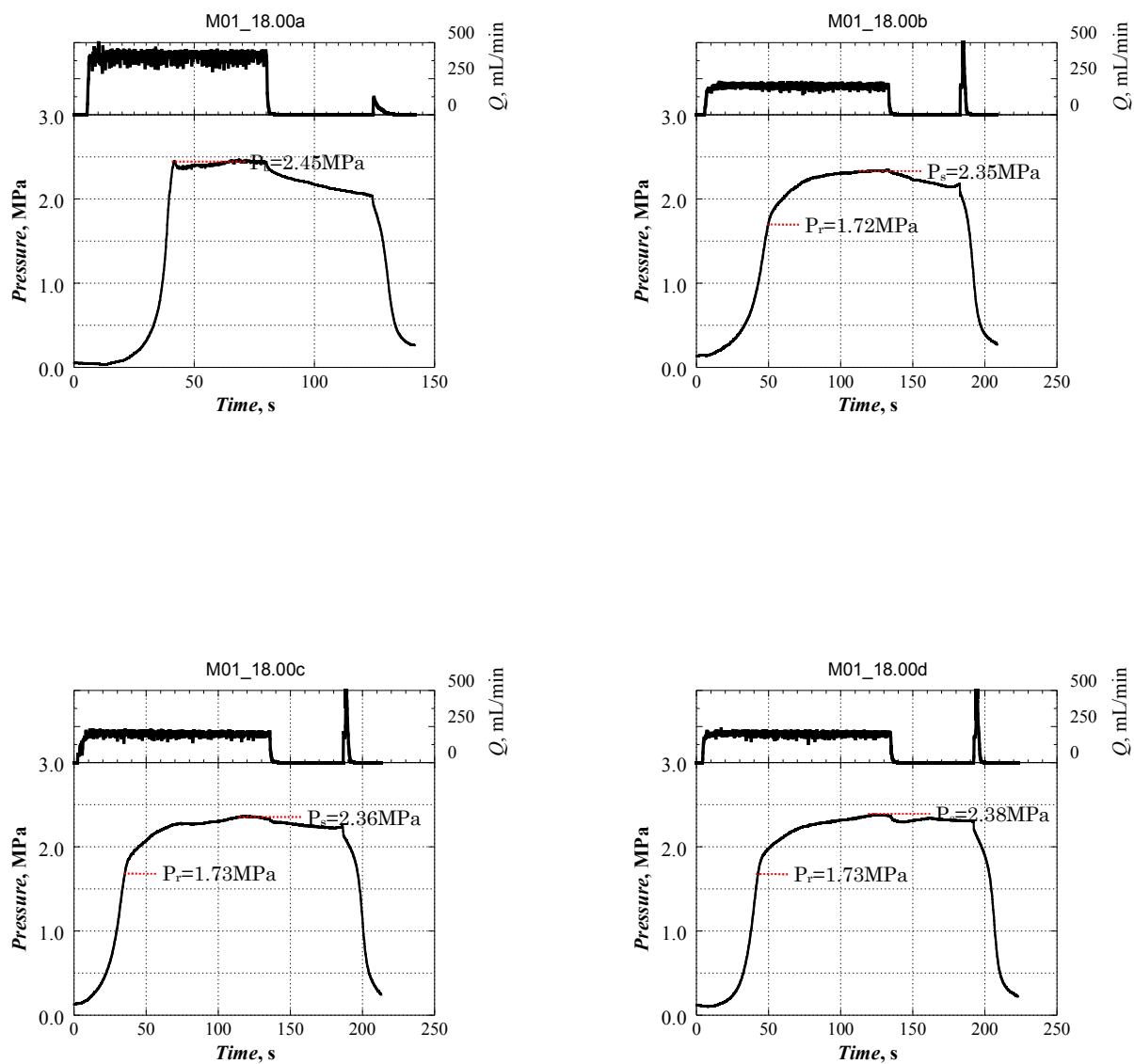


図 4.19 M01 孔の深度 18.00m における圧力・流量-時間曲線

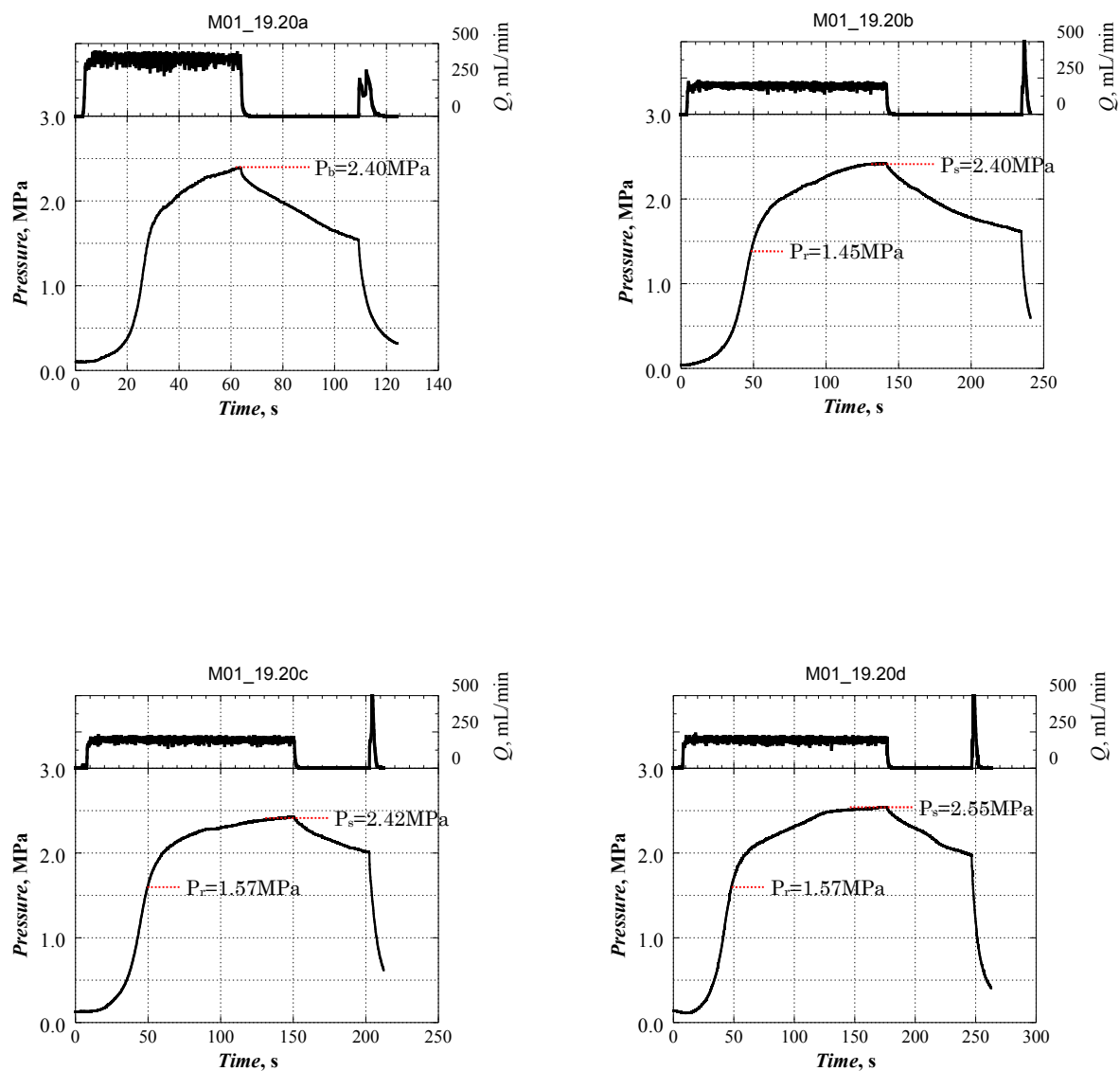


図 4.20 M01 孔の深度 19.20m における圧力・流量-時間曲線

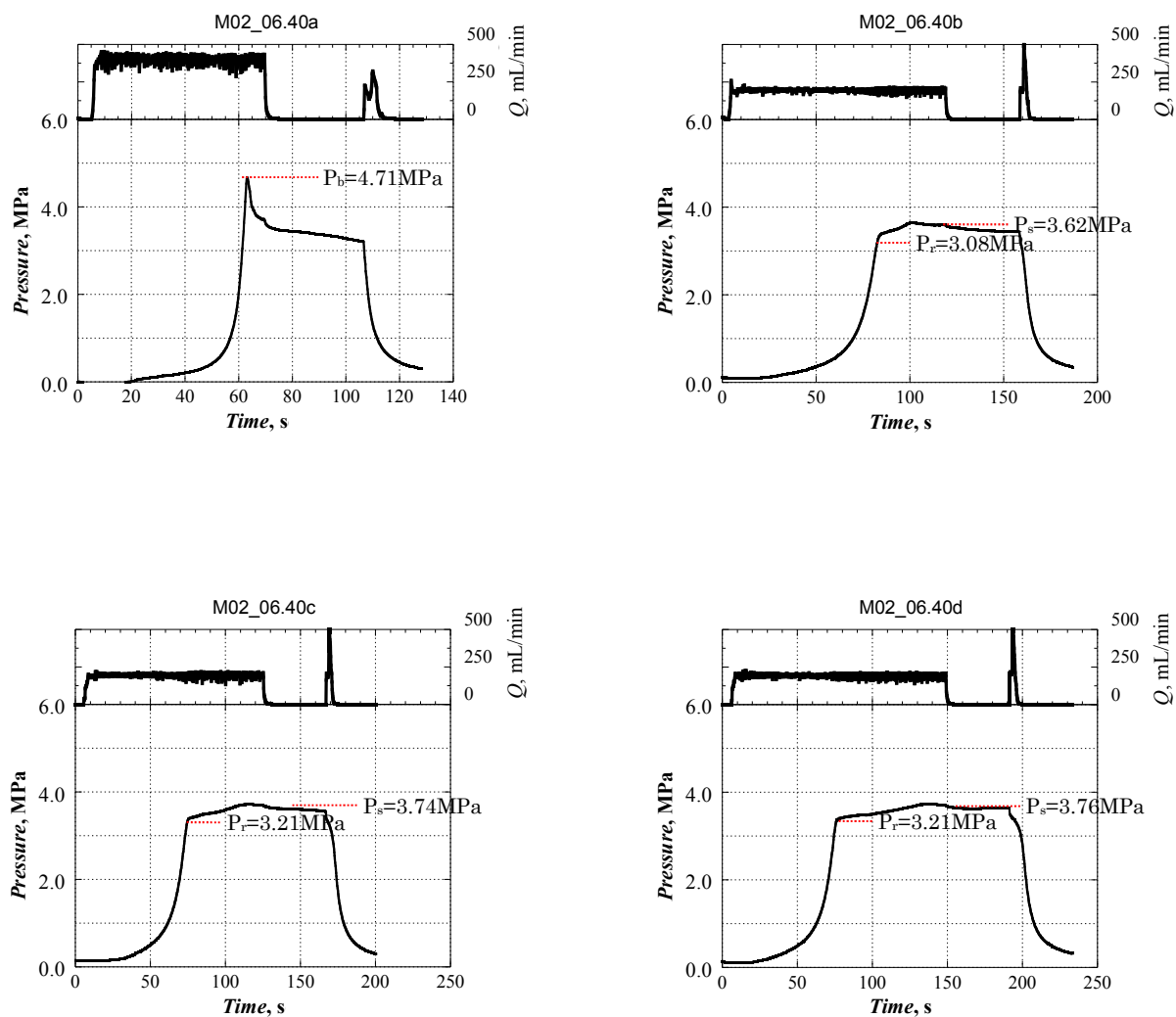


図 4.21 M02 孔の深度 6.40m における圧力・流量-時間曲線

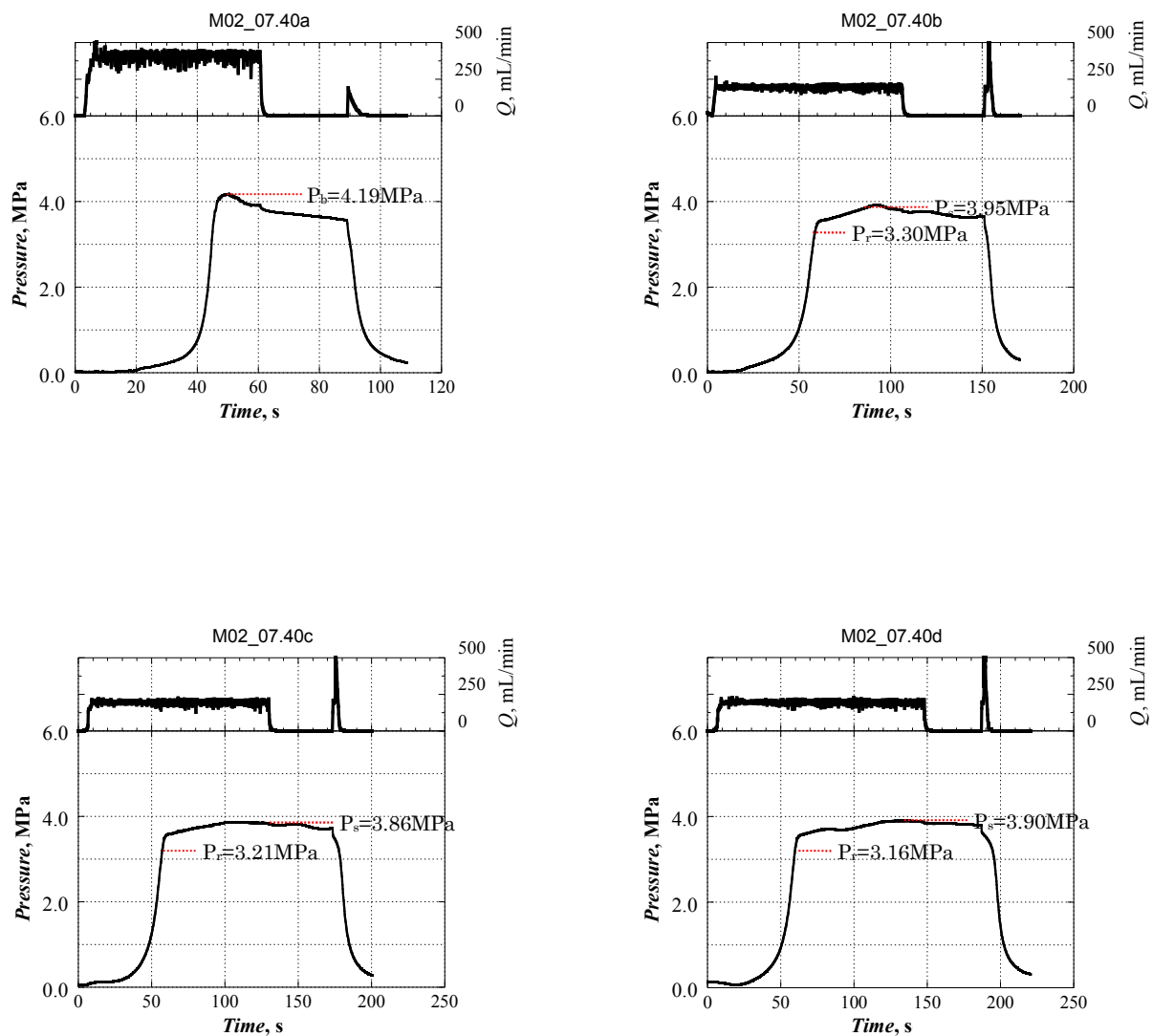


図 4.22 M02 孔の深度 7.40m における圧力・流量-時間曲線

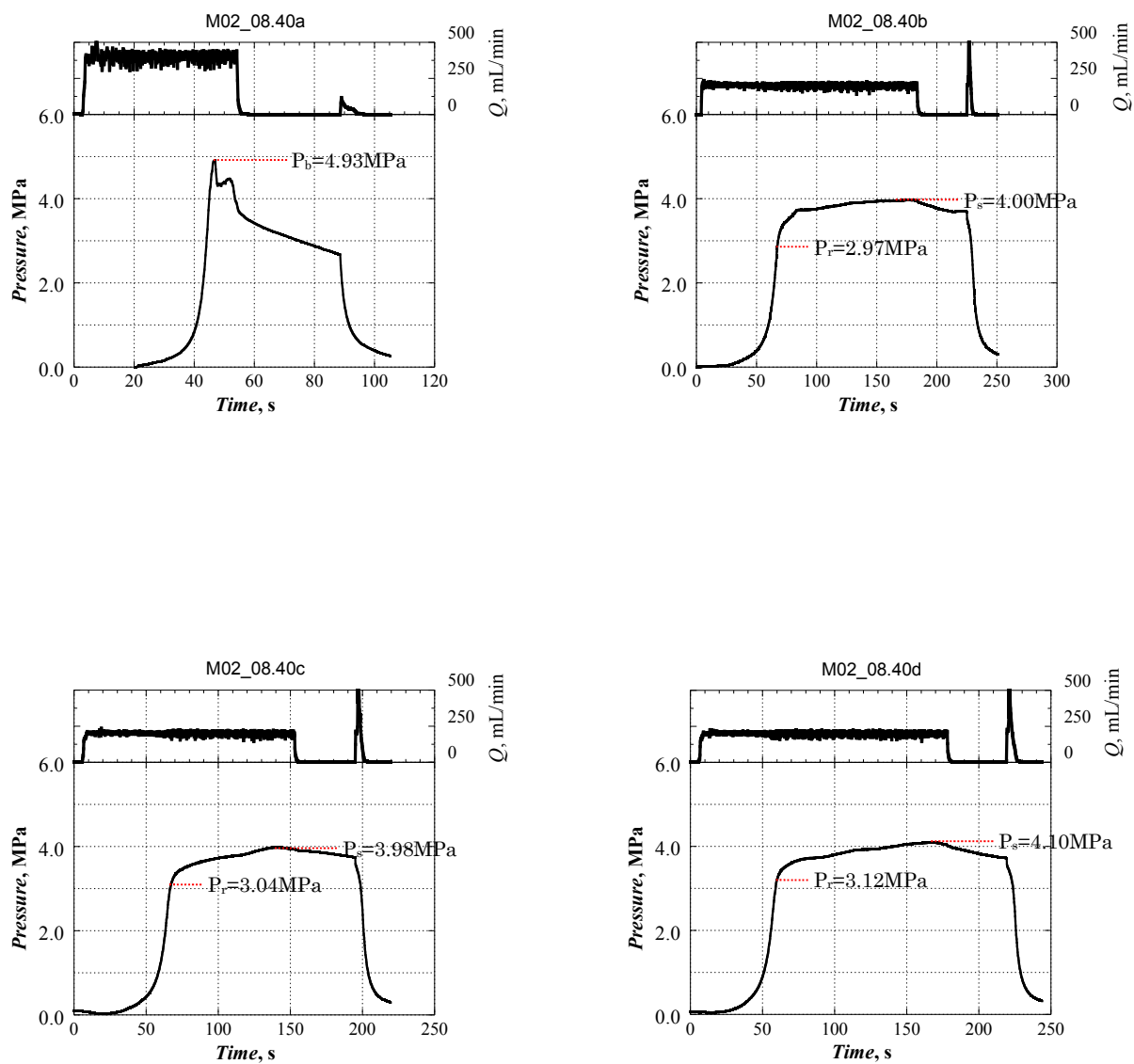


図 4.23 M02 孔の深度 8.40m における圧力・流量-時間曲線

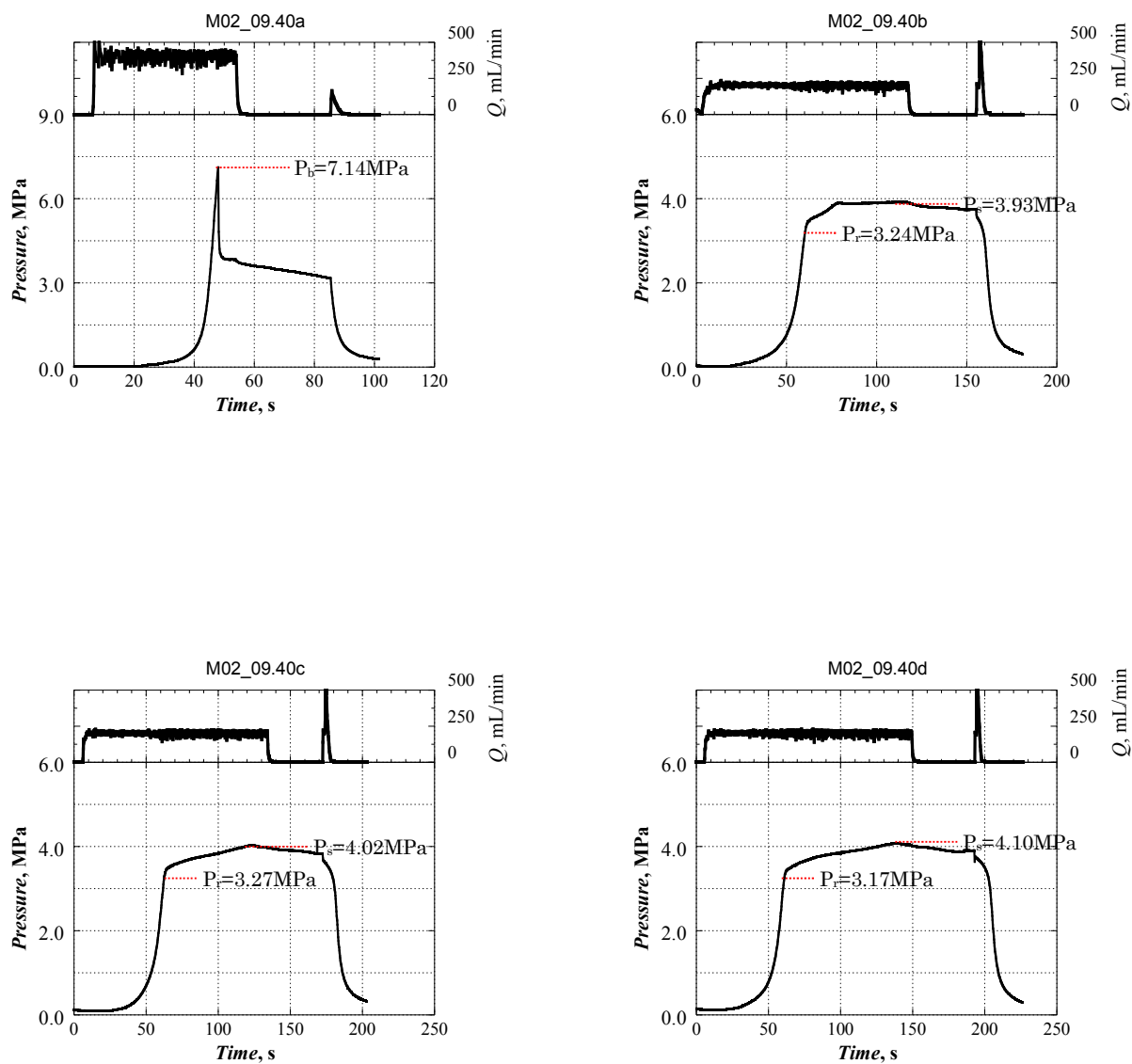


図 4.24 M02 孔の深度 9.40m における圧力・流量-時間曲線

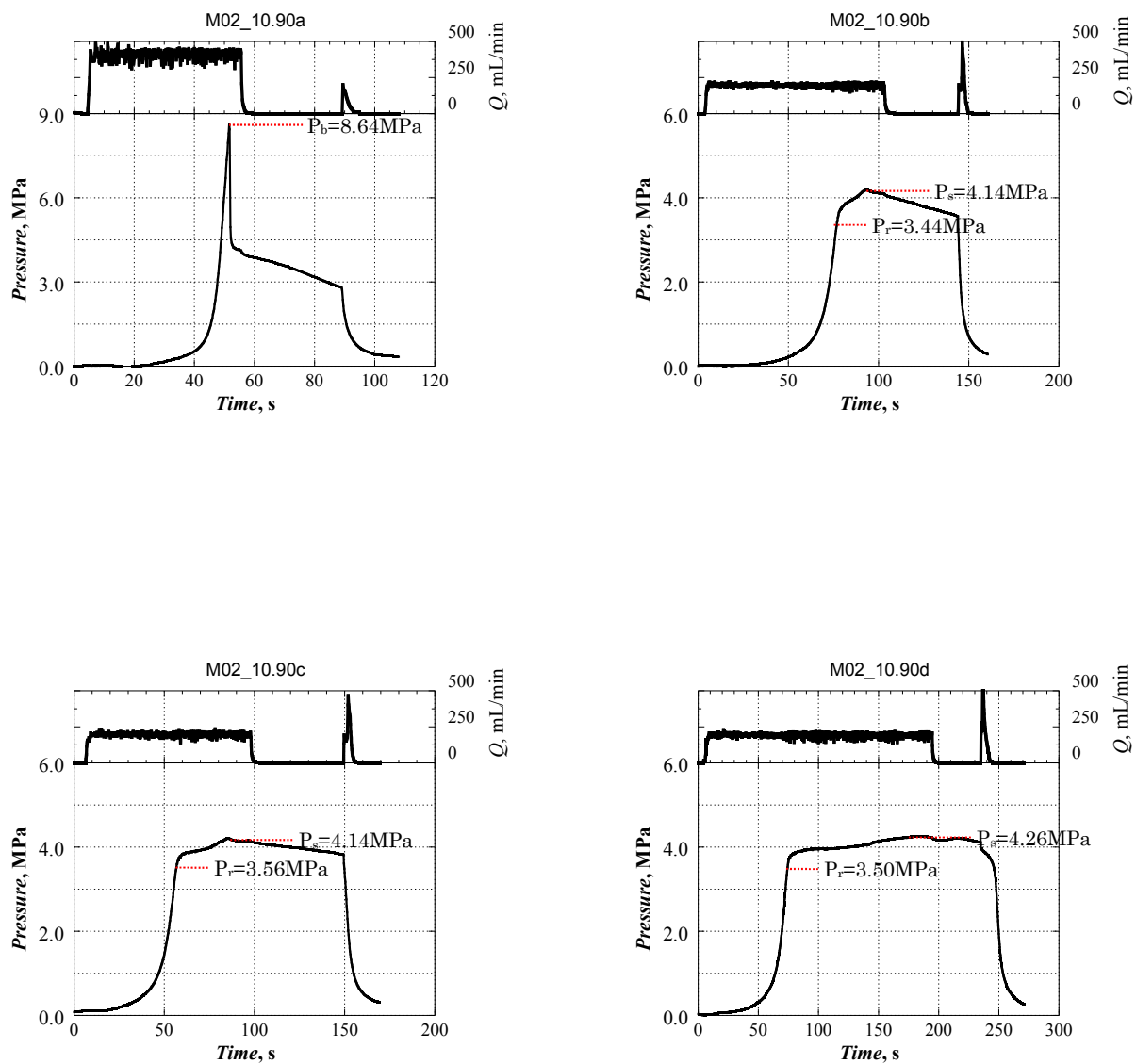


図 4.25 M02 孔の深度 10.90m における圧力・流量-時間曲線

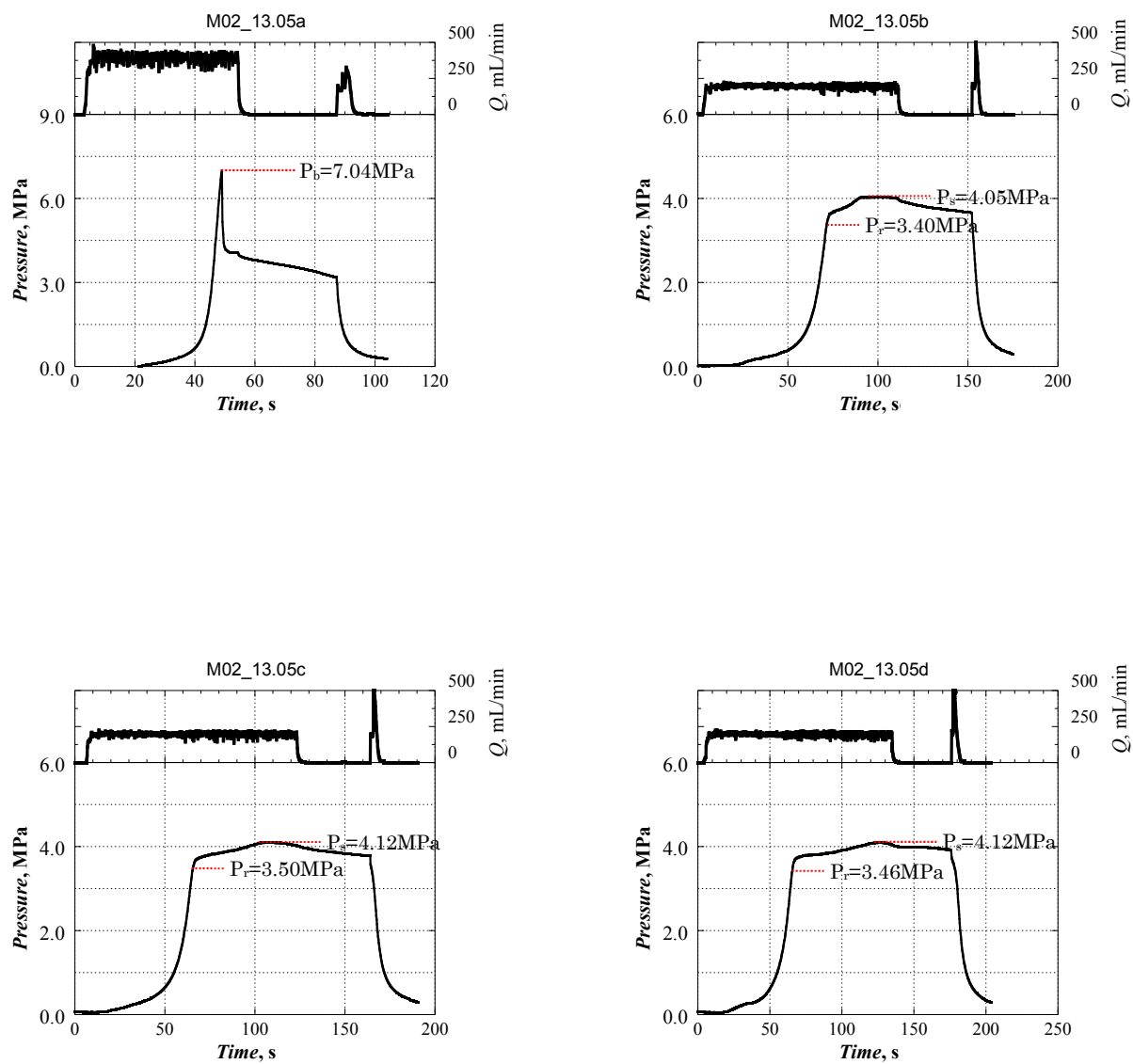


図 4.26 M02 孔の深度 13.05m における圧力・流量-時間曲線

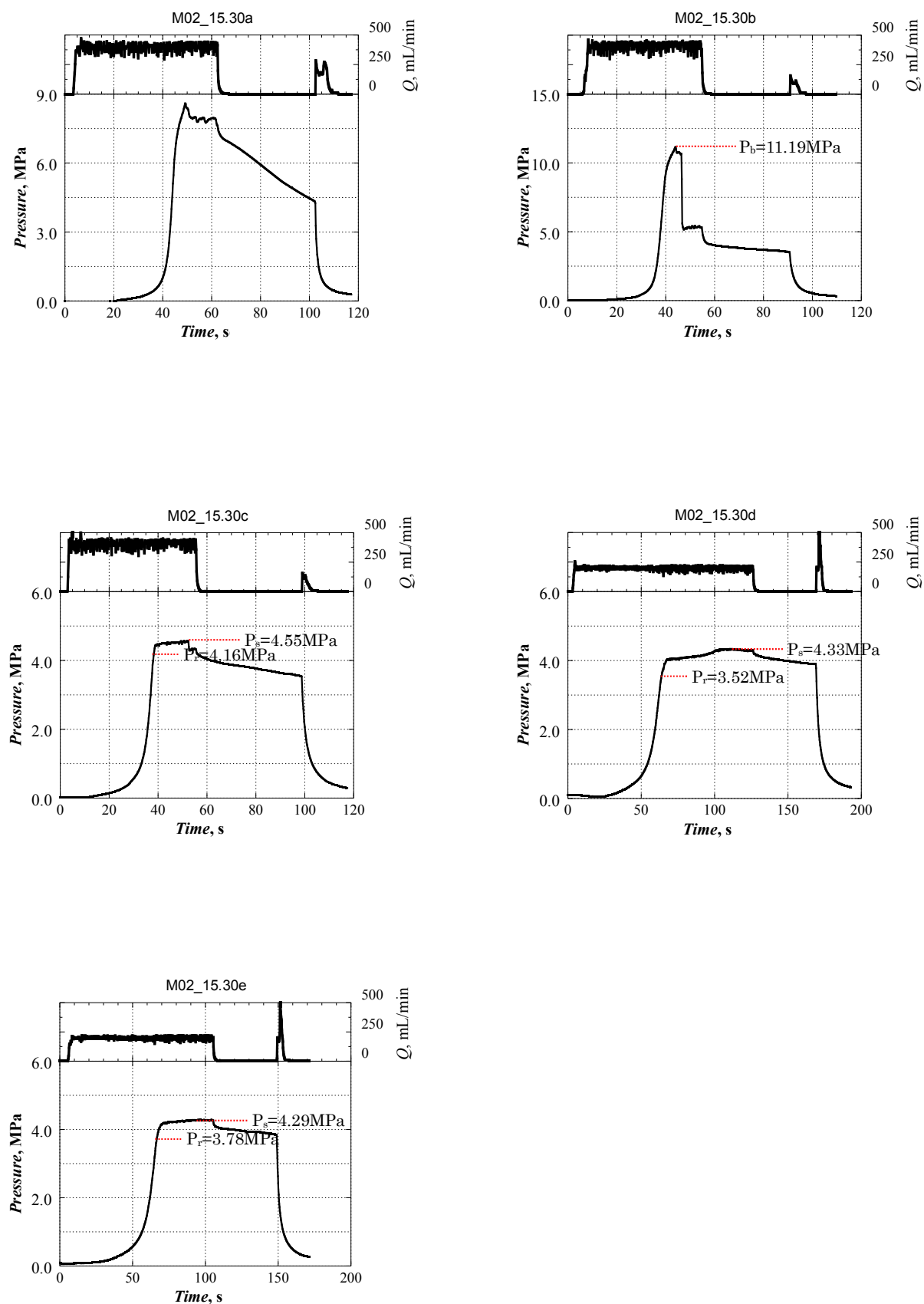


図 4.27 M02 孔の深度 15.30m における圧力・流量-時間曲線

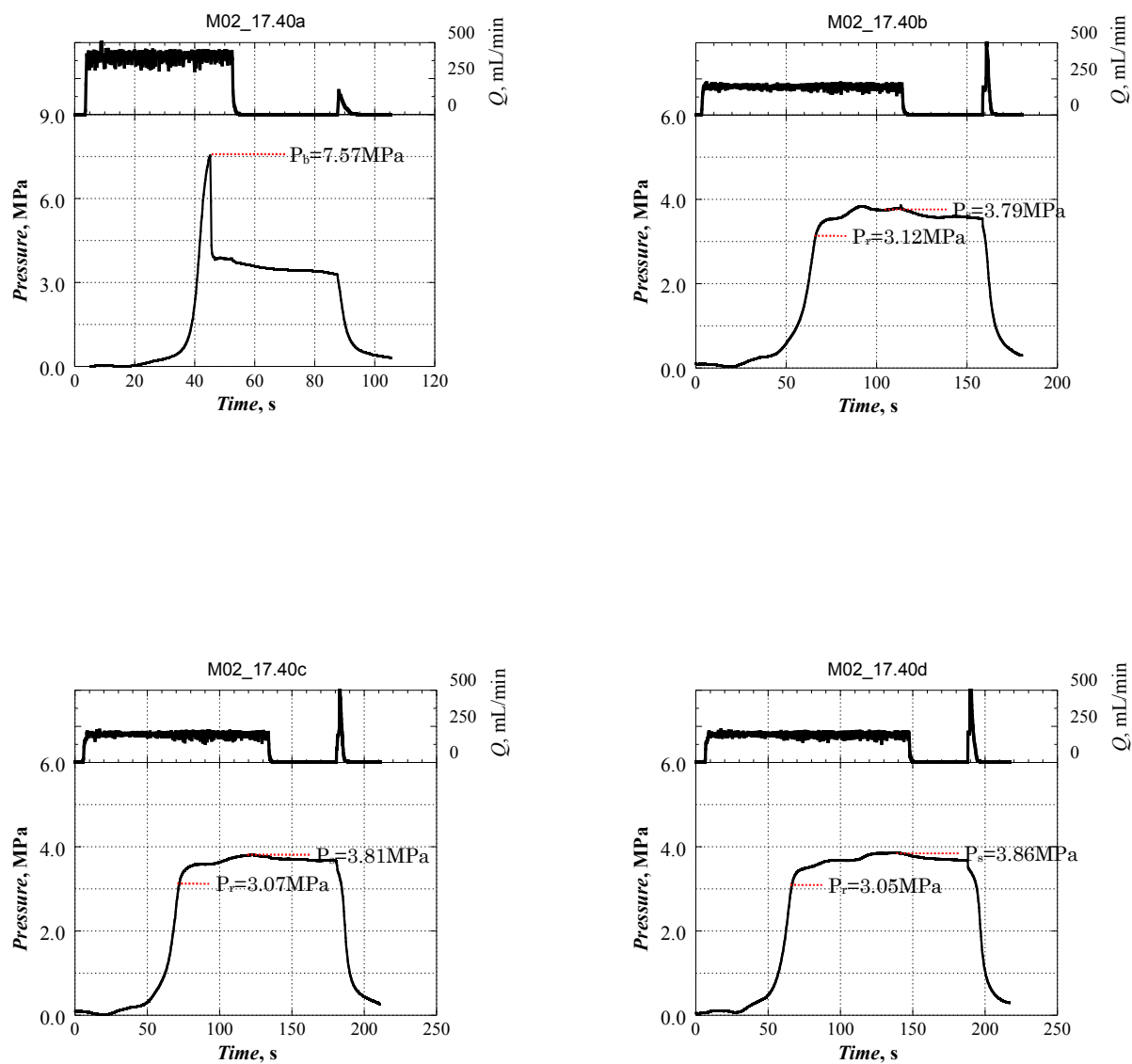


図 4.28 M02 孔の深度 17.40m における圧力・流量-時間曲線

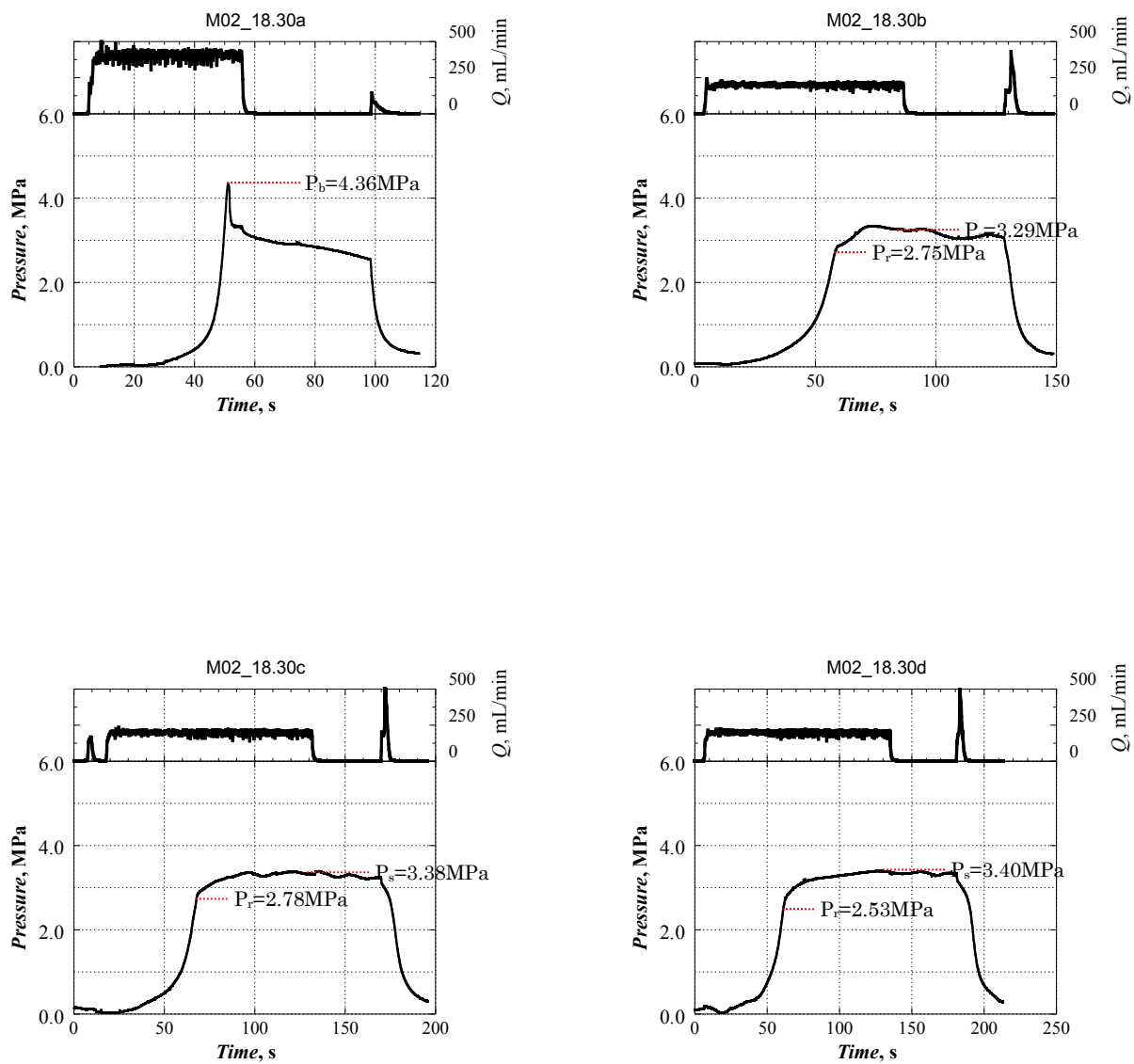


図 4.29 M02 孔の深度 18.30m における圧力・流量-時間曲線

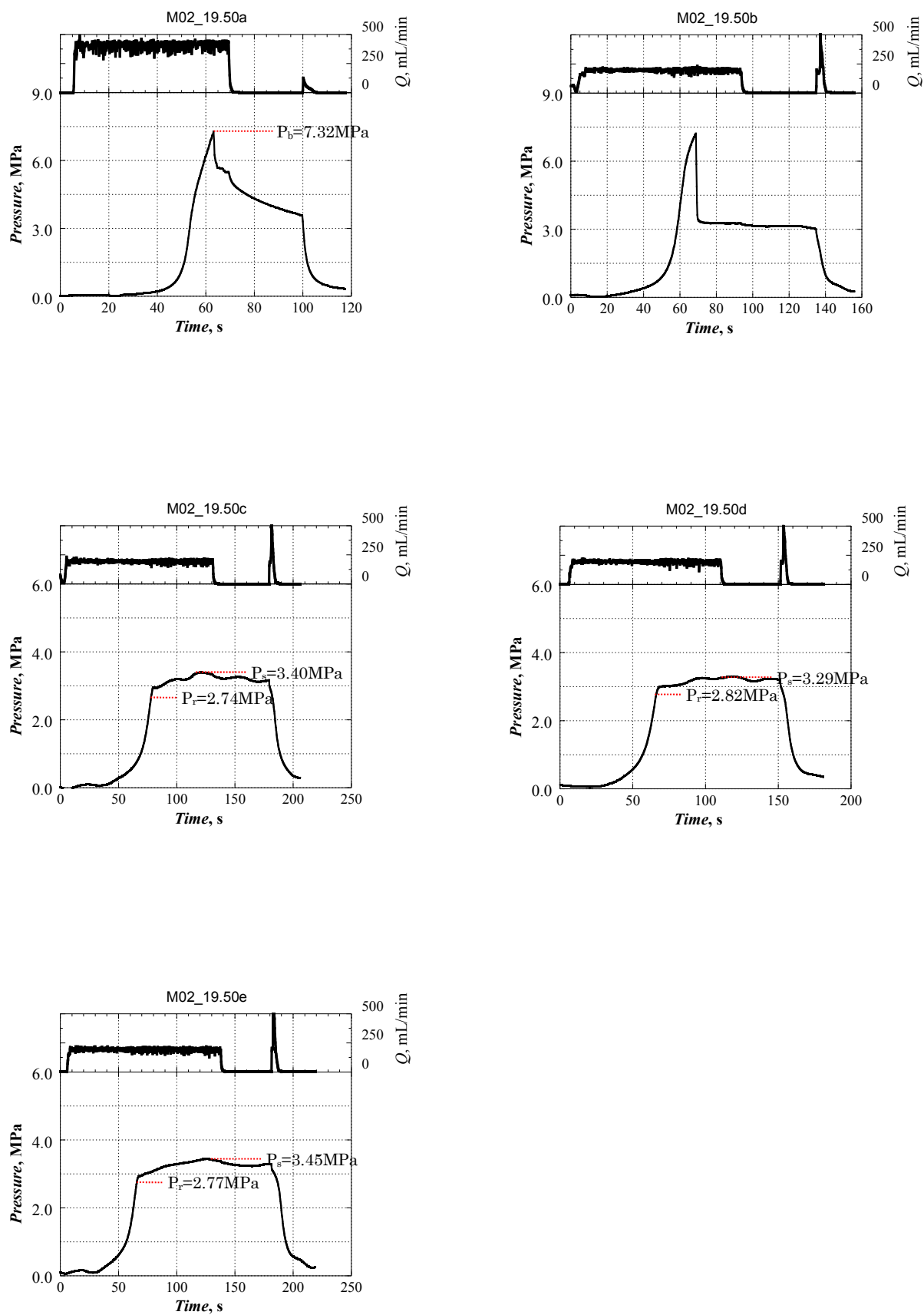


図 4.30 M02 孔の深度 19.50m における圧力・流量-時間曲線

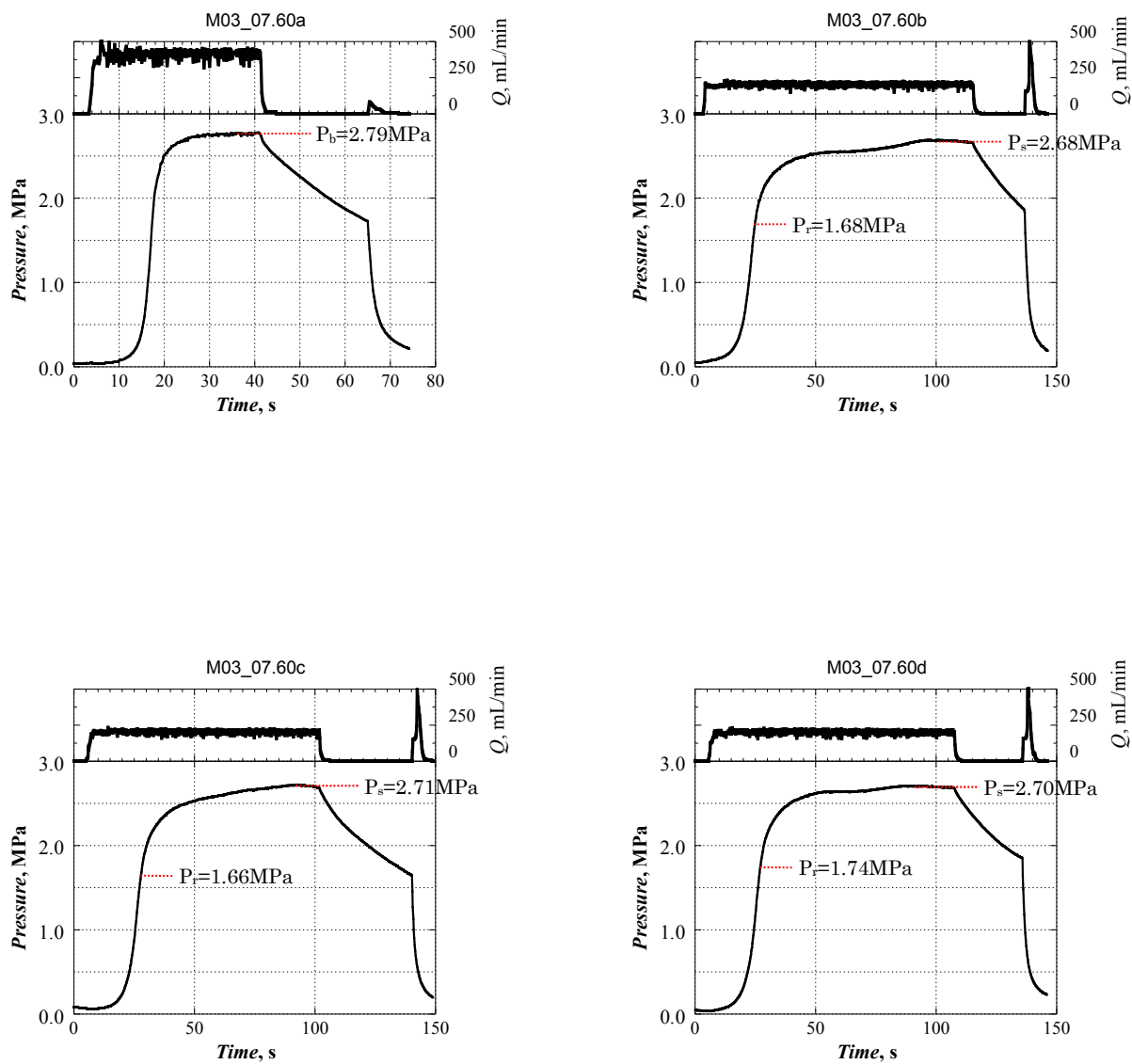


図 4.31 M03 孔の深度 7.60m における圧力・流量-時間曲線

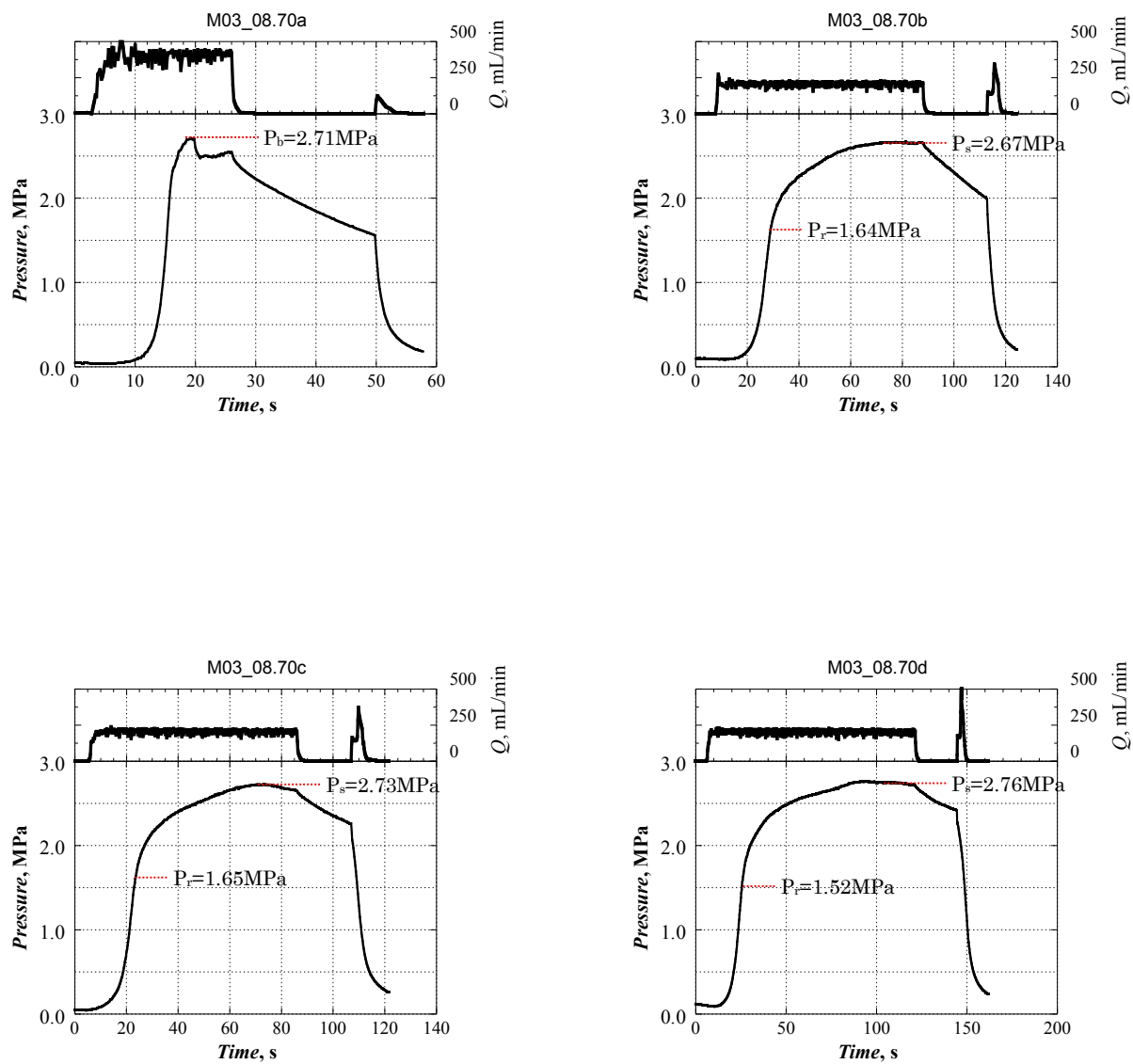


図 4.32 M03 孔の深度 8.70m における圧力・流量-時間曲線

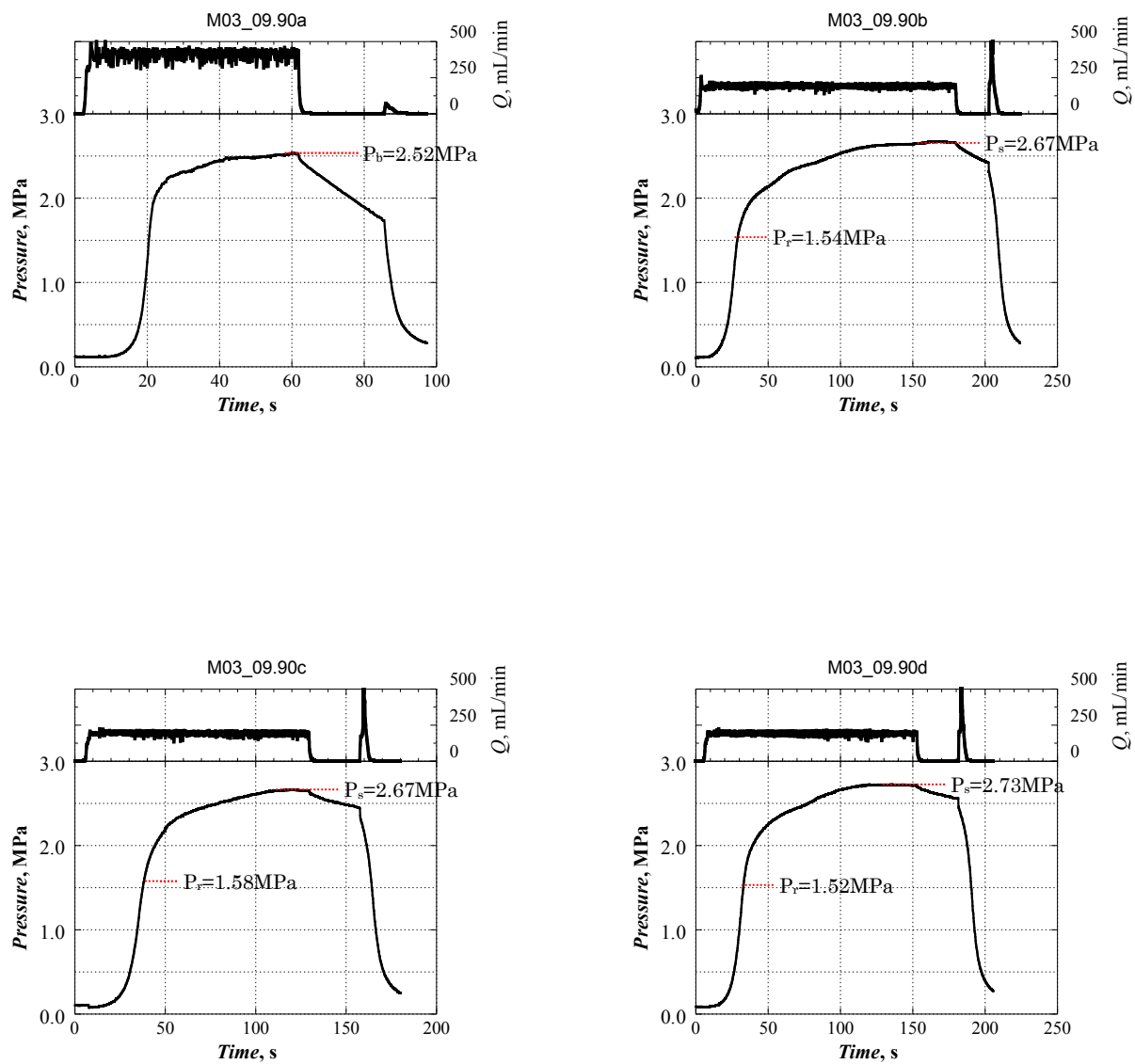


図 4.33 M03 孔の深度 9.90m における圧力・流量-時間曲線

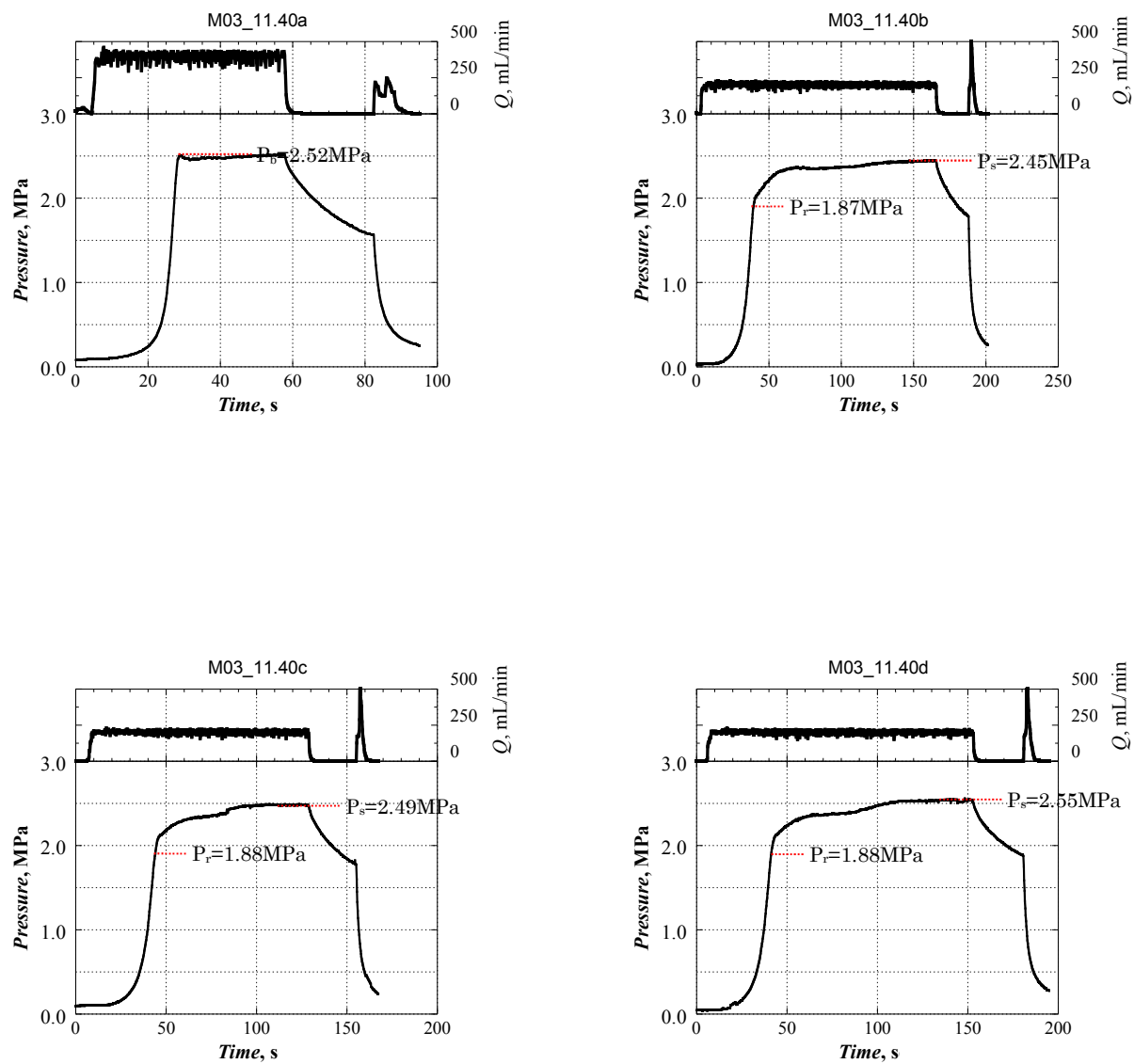


図 4.34 M03 孔の深度 11.40m における圧力・流量-時間曲線

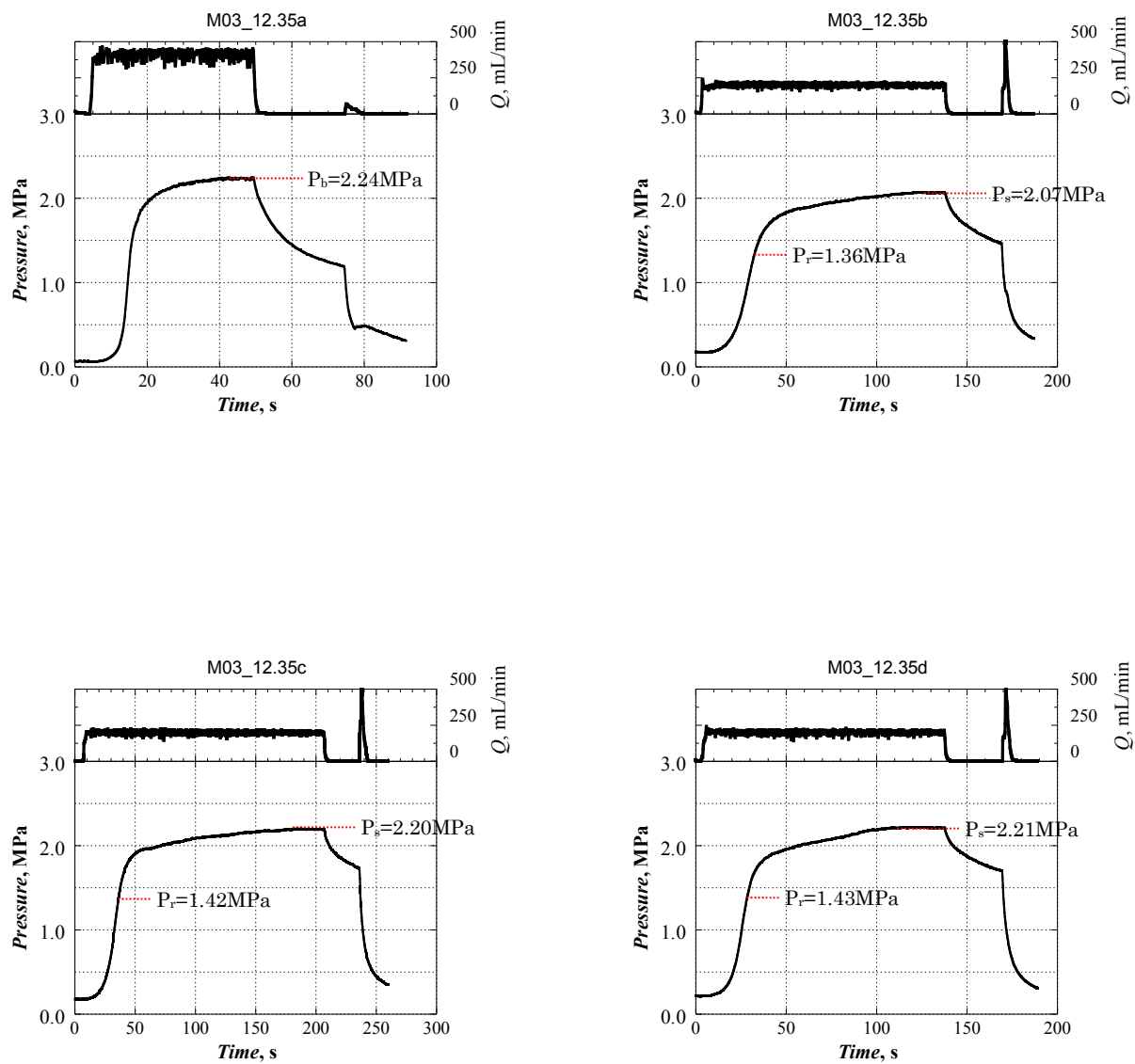


図 4.35 M03 孔の深度 12.35m における圧力・流量-時間曲線

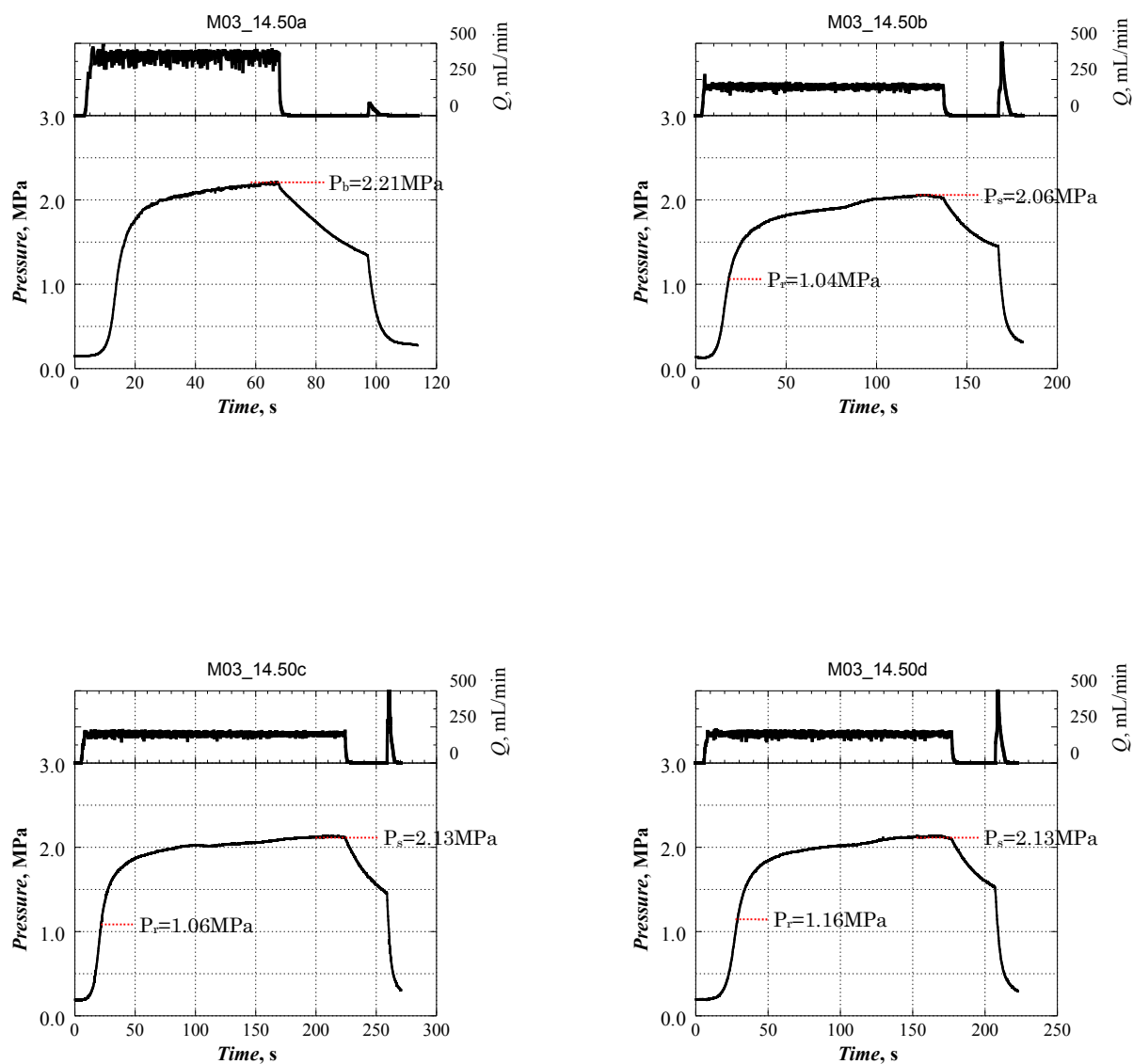


図 4.36 M03 孔の深度 14.50m における圧力・流量-時間曲線

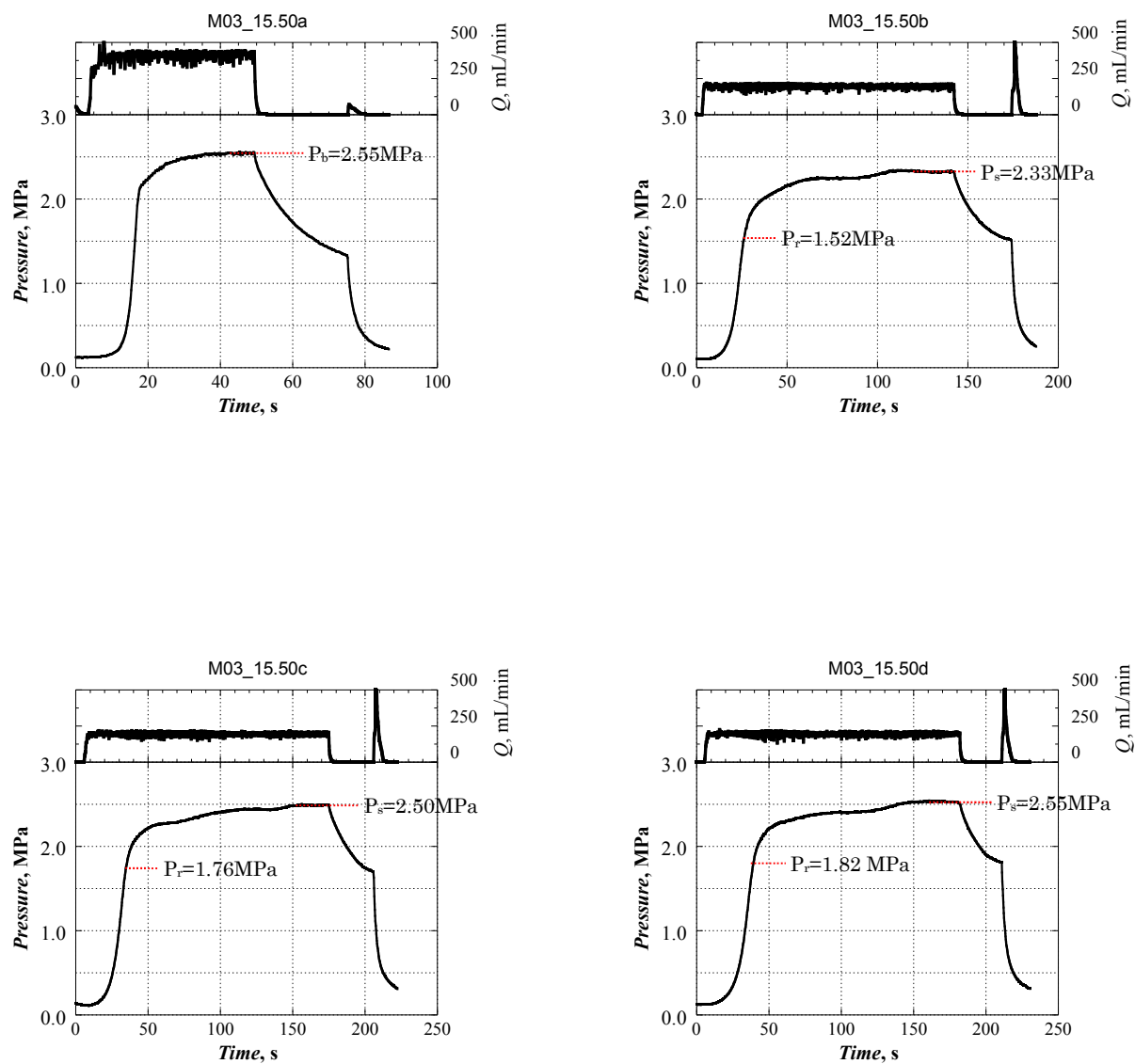


図 4.37 M03 孔の深度 15.50m における圧力・流量-時間曲線

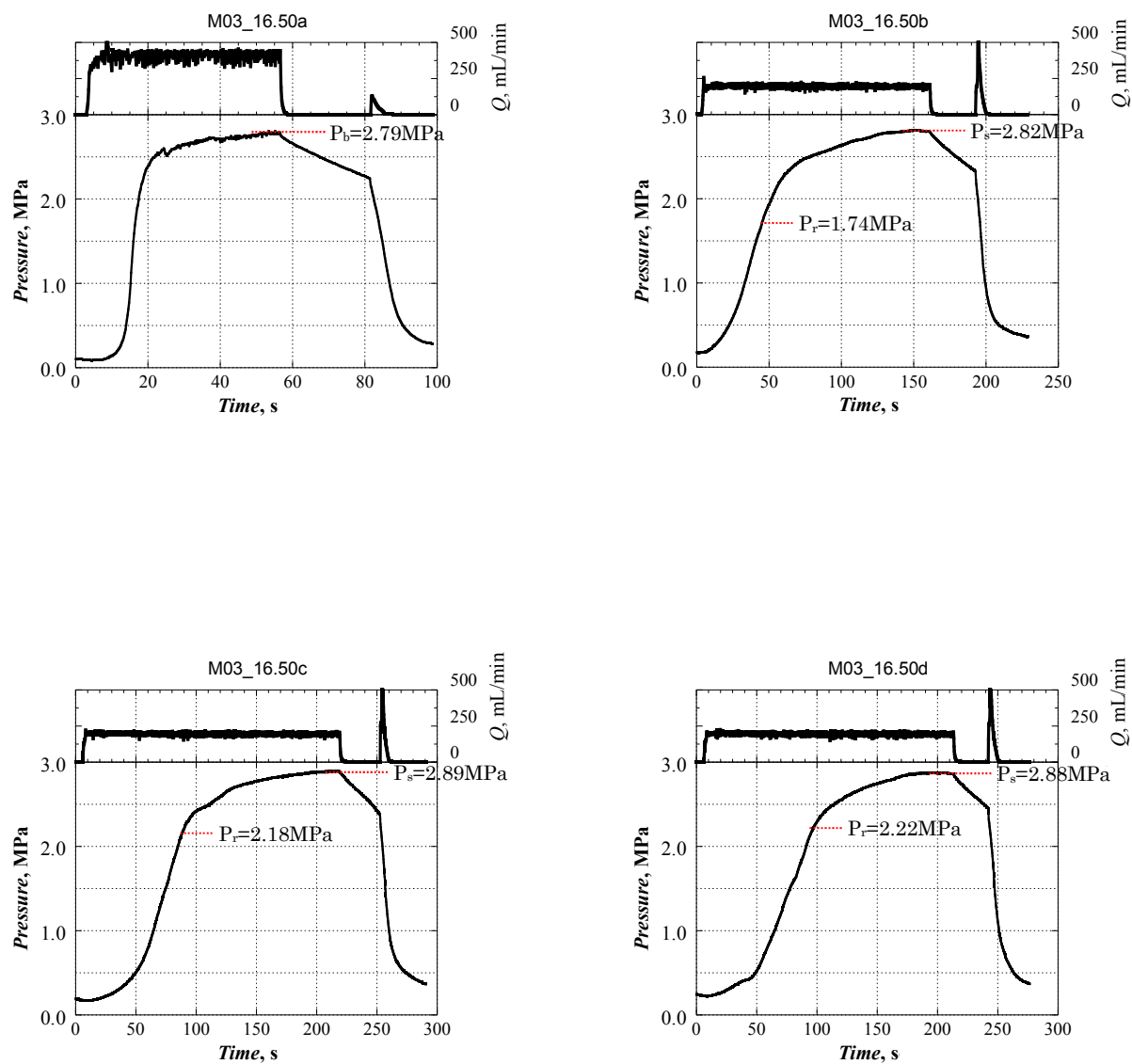


図 4.38 M03 孔の深度 16.50m における圧力・流量-時間曲線

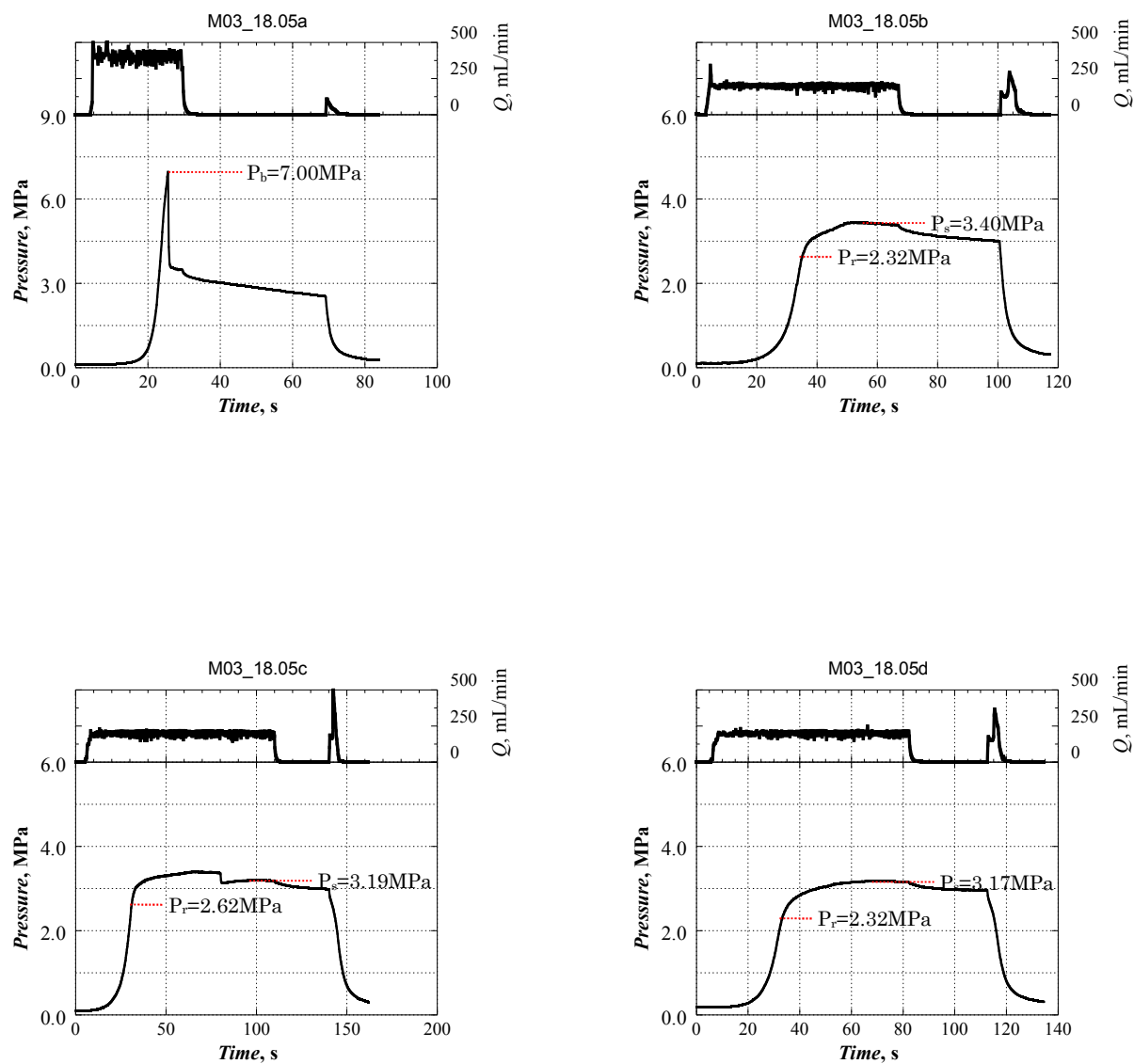


図 4.39 M03 孔の深度 18.05m における圧力・流量-時間曲線

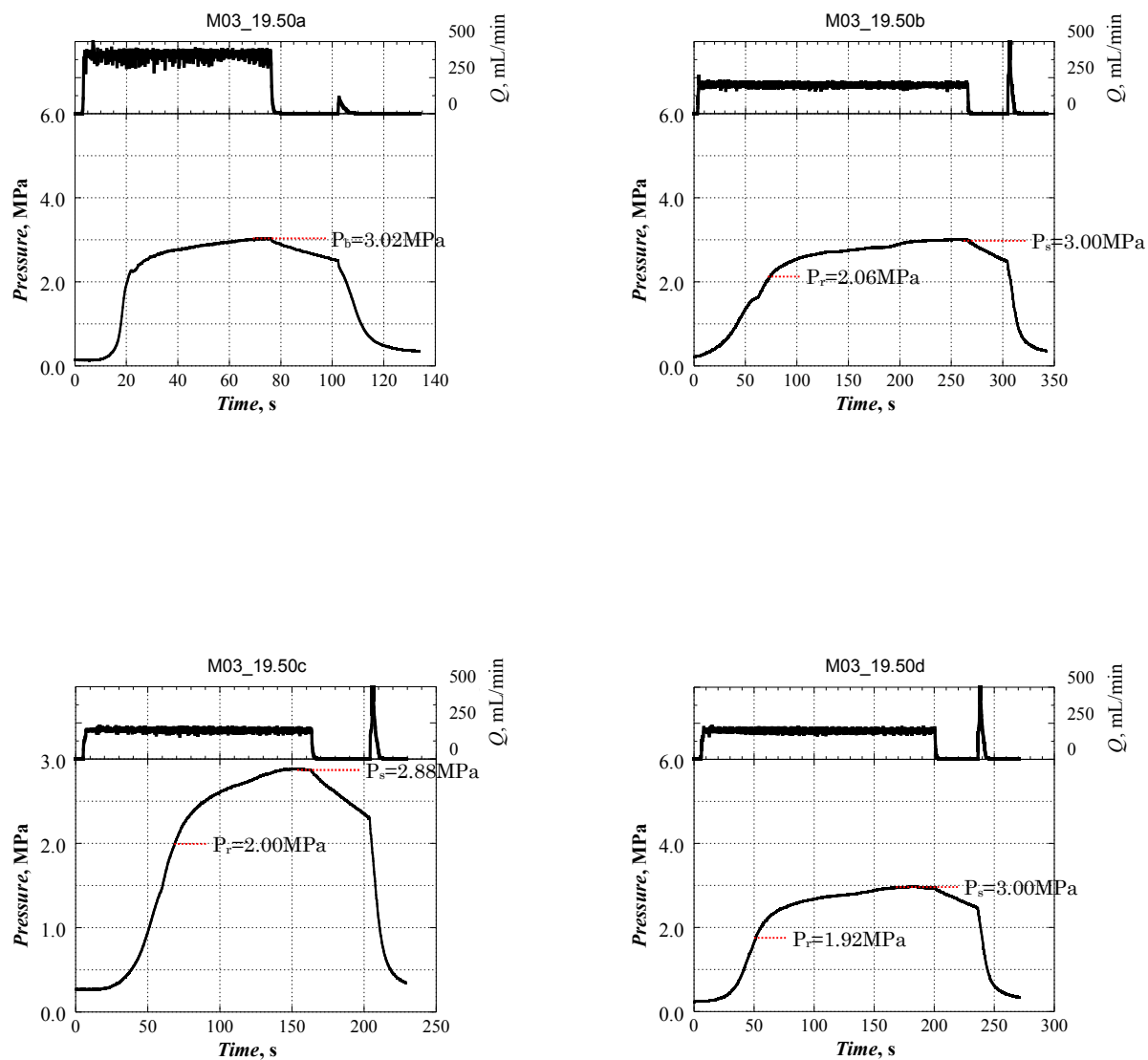


図 4.40 M03 孔の深度 19.50m における圧力・流量-時間曲線

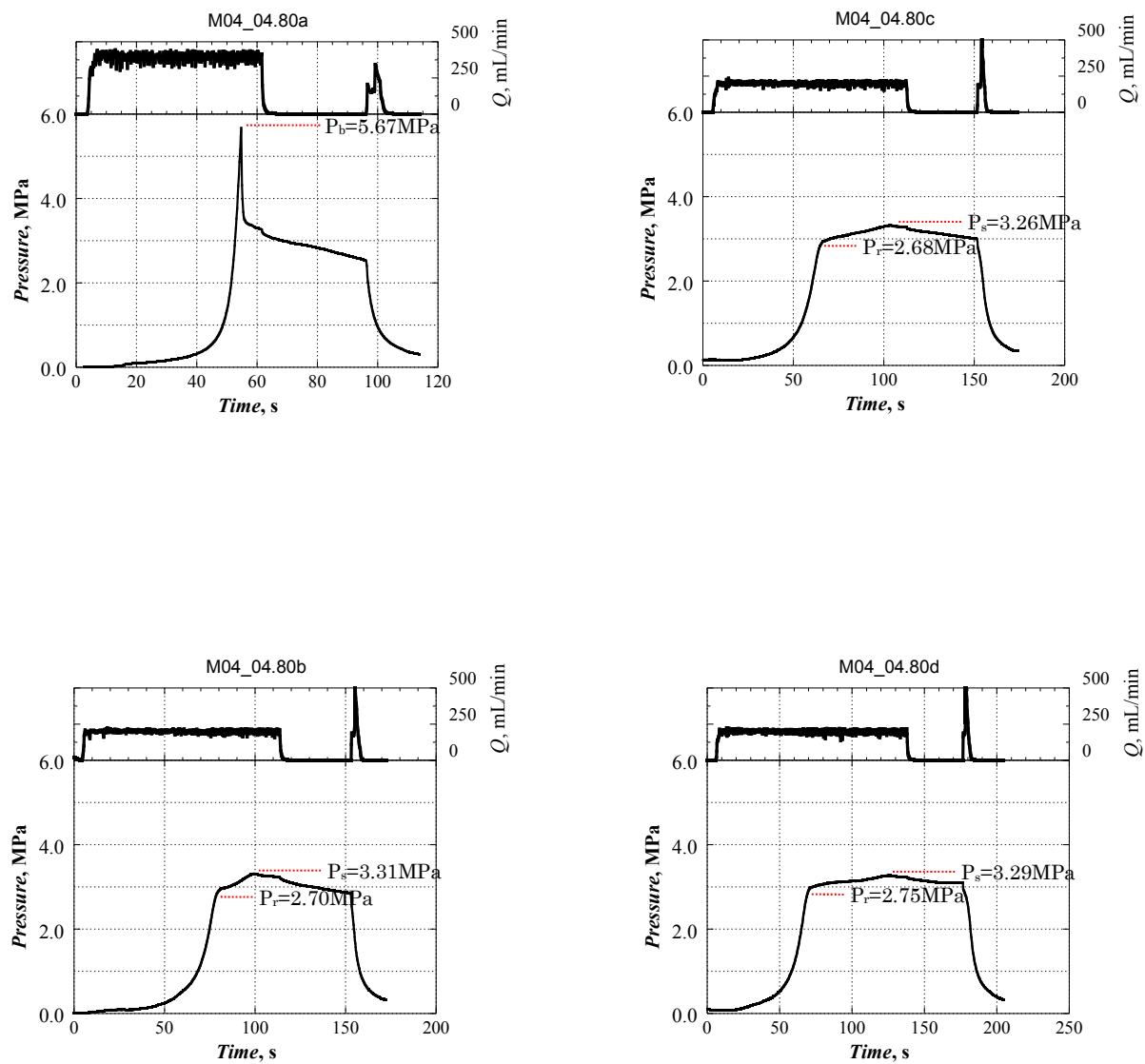


図 4.41 M04 孔の深度 4.80m における圧力・流量-時間曲線

4.4.3 水圧破碎試験によって生じたき裂

水圧破碎試験終了後、図 4.11 から図 4.41 に示した 31 の試験深度に加えて、ボアホールテレビ観察結果にブレイクアウトが記録されていた M02 孔の深度 16.30m でインプレッションパッカーによるき裂の型取りをおこなった。型取りの記録は図 4.42 から図 4.49 に示すとおりである。これらはパッカーエレメントに熱収縮チューブを巻きつけてき裂の型取りをした後、そのチューブに軸方向の切れ目を入れてパッカーからはがし、それを周方向に展開したものである。赤色の曲線は、チューブに写し取られたき裂をマジックでトレースした結果である。また、赤色で塗りつぶした領域は、孔壁が岩盤に向かって拡大していることを意味する。ここで、紙面の上側が孔口、下側が孔底側である。図中の黒矢印（）は、き裂の方向余弦を算定するために用いたトレースを示している。また、青矢印（）は、初期地圧の評価に用いたボアホールブレイクアウトを示している。各型取り結果の左隅部に表示した数値は、前記の切れ目を入れた位置の回転角度である。すなわち、孔口から孔底をのぞいたとき、鉛直上方向（12 時）から切れ目までの孔軸まわりの回転角度を時計回りに測定した角度である。

型取りの記録を概観すると、M01 孔の 10 深度の加圧区間に存在するき裂は、深度 14.20m の縦き裂を除いて、すべてボーリング孔軸と交差する横き裂である。M02 孔では、深度 7.40m と深度 16.30m を除く 9 深度の加圧区間で横き裂が生じている。通常、ボーリング孔と平面状のき裂が交差してなす曲線は、トレースの周方向に周期 2π の正弦曲線として記録される。しかし、深度 9.40m、10.90m、13.05m、15.30m、17.40m および 19.50m の 6 深度で生じた横き裂のトレースには、 2π の周期が認められないようである。深度 16.30m には、孔壁の周方向に 180° 離れた位置に分布する破壊領域が認められる。これは、孔壁の集中応力が岩盤の強度を越えてできたボアホールブレイクアウトであると考えられる。M03 孔では、10 深度すべてで縦き裂が生じている。M04 孔の深度 4.80m で生じた横き裂には、M02 孔の横き裂と同様に、トレース全体としてみると周方向に 2π の周期が認められないようである。破碎前後の型取りの比較は、付録 CD-ROM の電子データ（付録 9）を参照されたい。

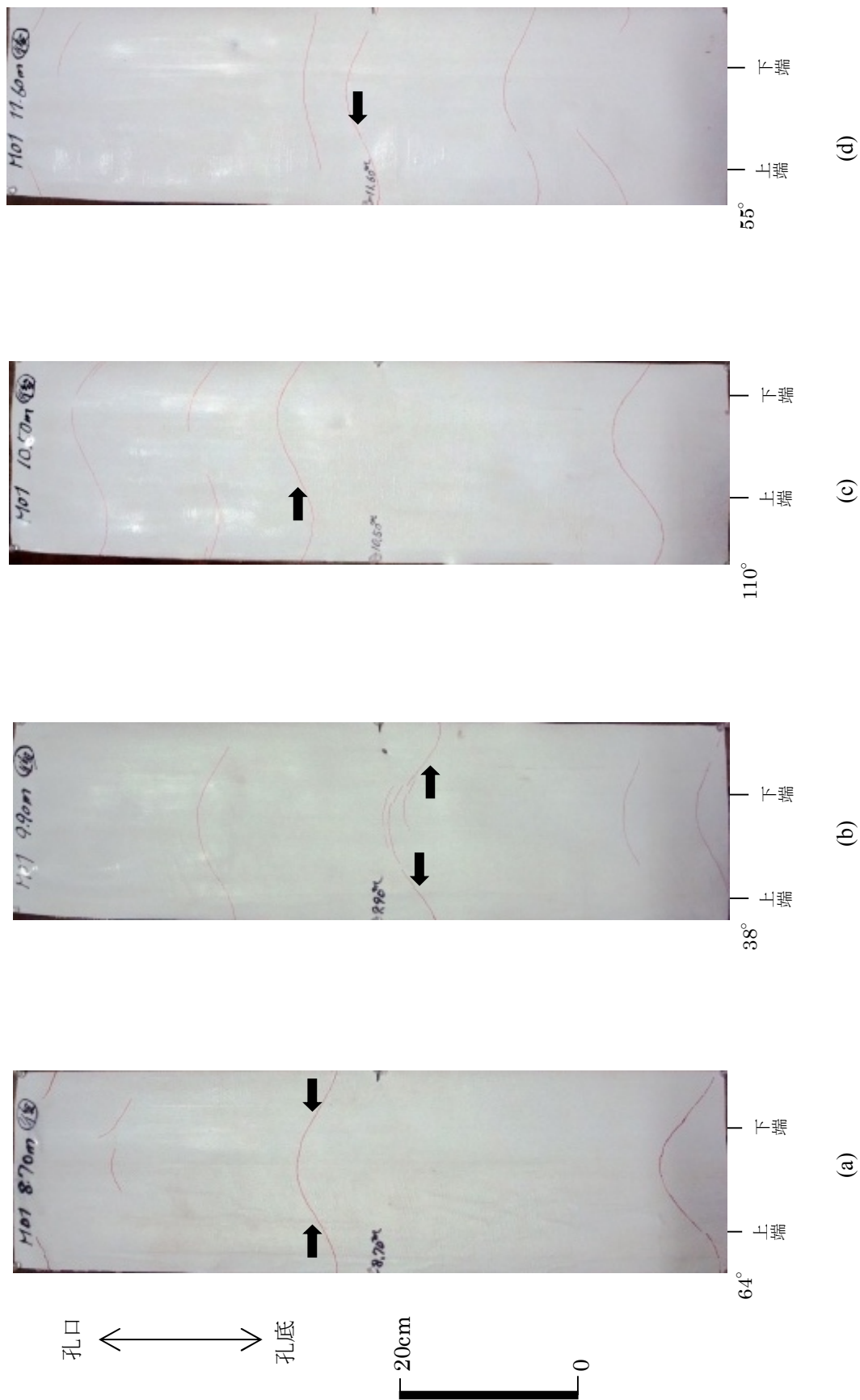


図 4.42 (a)M01 孔の深度 8.70m、(b)M01 孔の深度 9.90m、(c)M01 孔の深度 10.50m および (d)M01 孔の深度 11.60m で採取したき裂の型取の記録

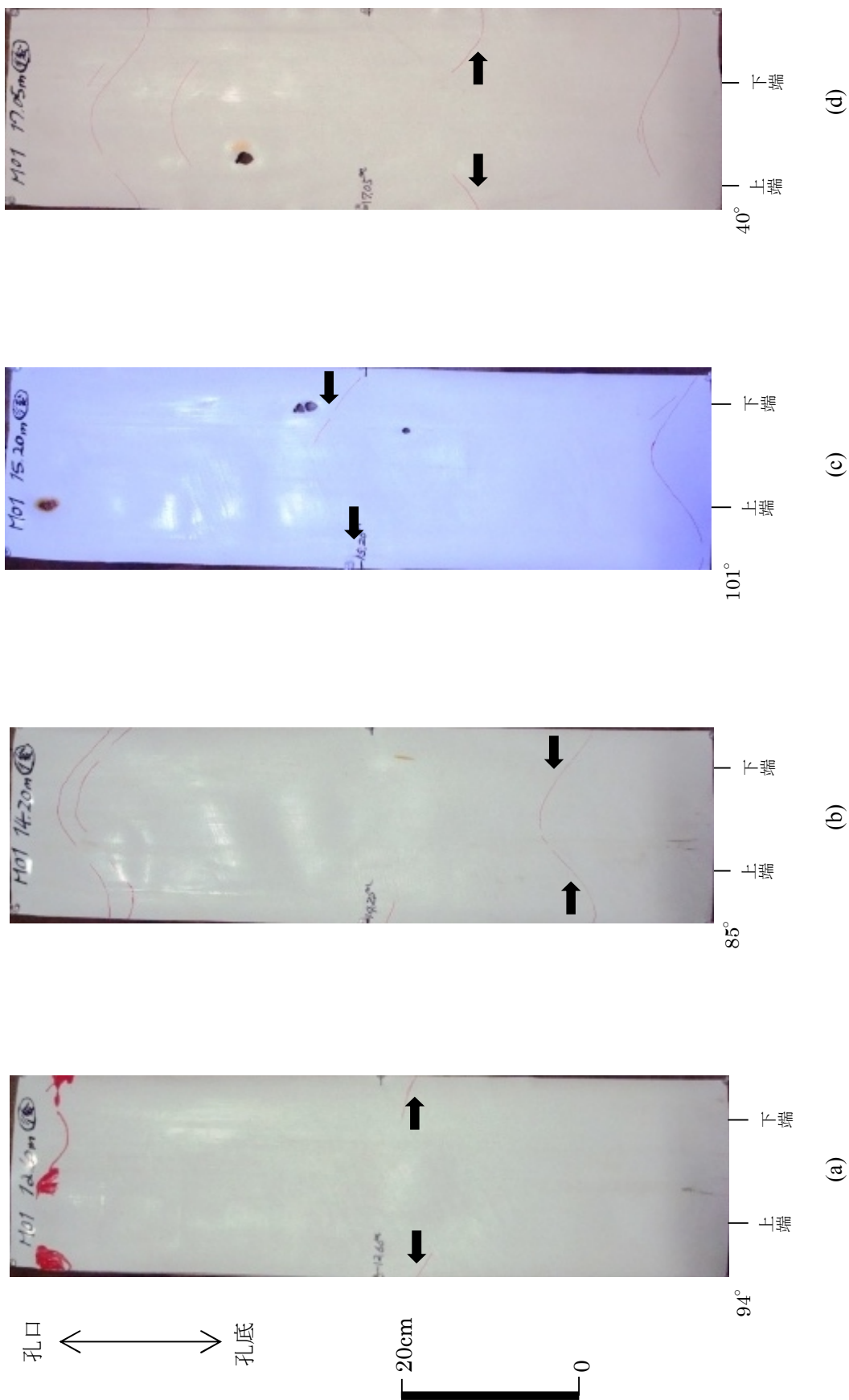


図 4.43 (a)M01 孔の深度 12.60m、(b)M01 孔の深度 14.20m、(c)M01 孔の深度 15.20m および (d)M01 孔の深度 17.05m で採取したき裂の型取の記録

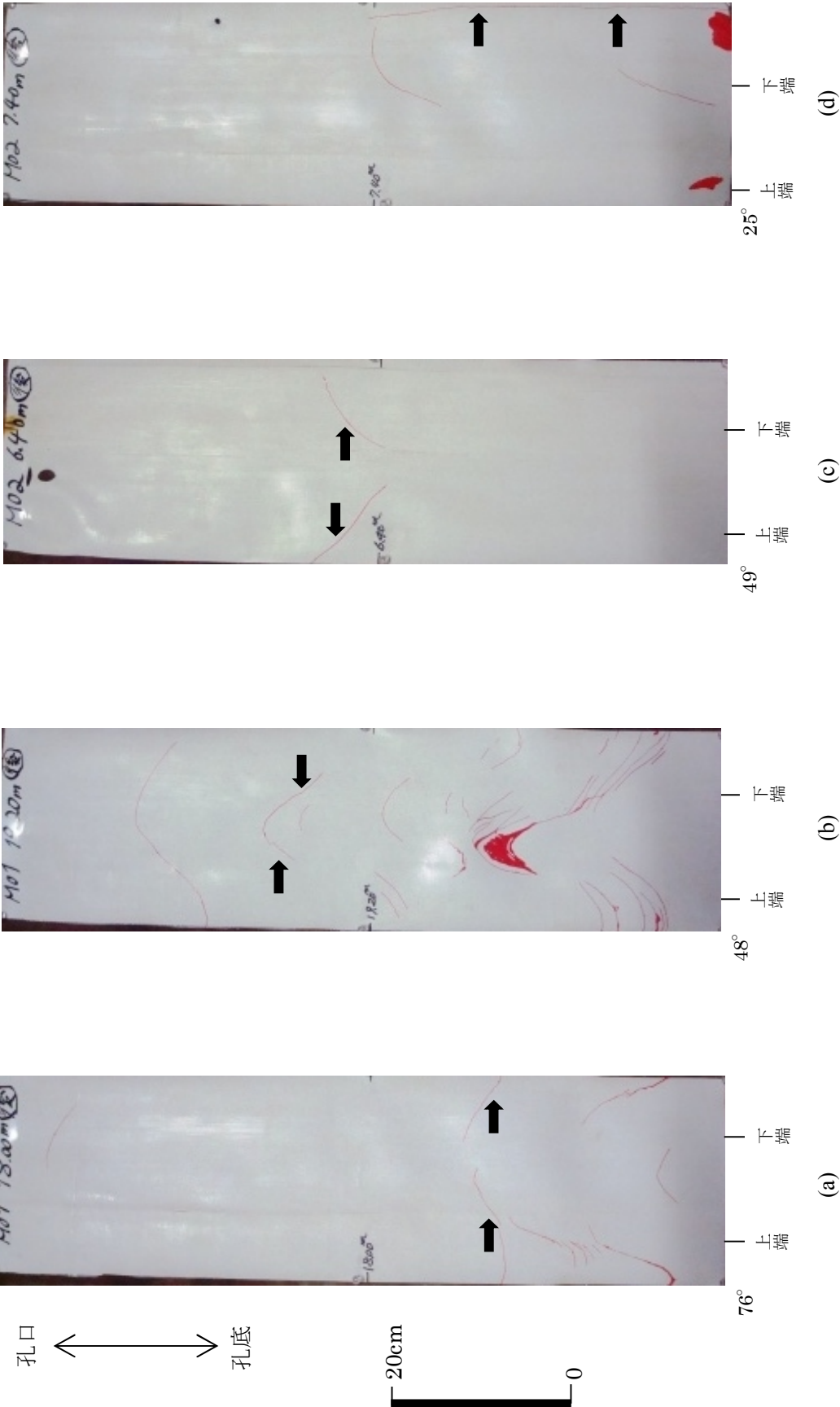


図 4.44 (a)M01 孔の深度 18.00m、(b)M01 孔の深度 19.20m、(c)M02 孔の深 6.40m および (d)M02 孔の深度 7.40m で採取したき裂の型取の記録

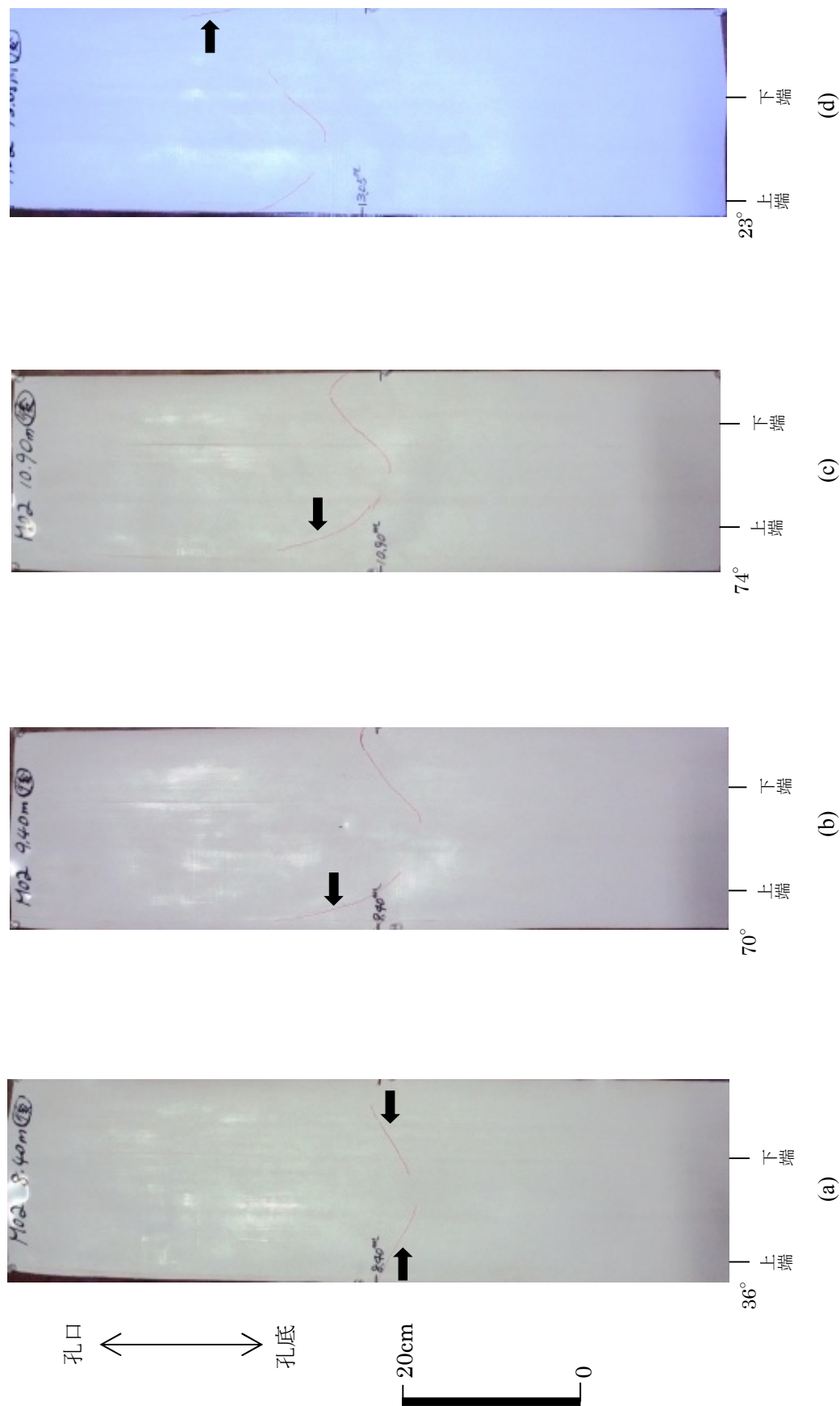


図 4.45 (a)M02 孔の深度 8.40m、(b)M02 孔の深度 9.40m、(c)M02 孔の深度 10.90m および (d)M02 孔の深度 13.05m で採取したき裂の型取の記録

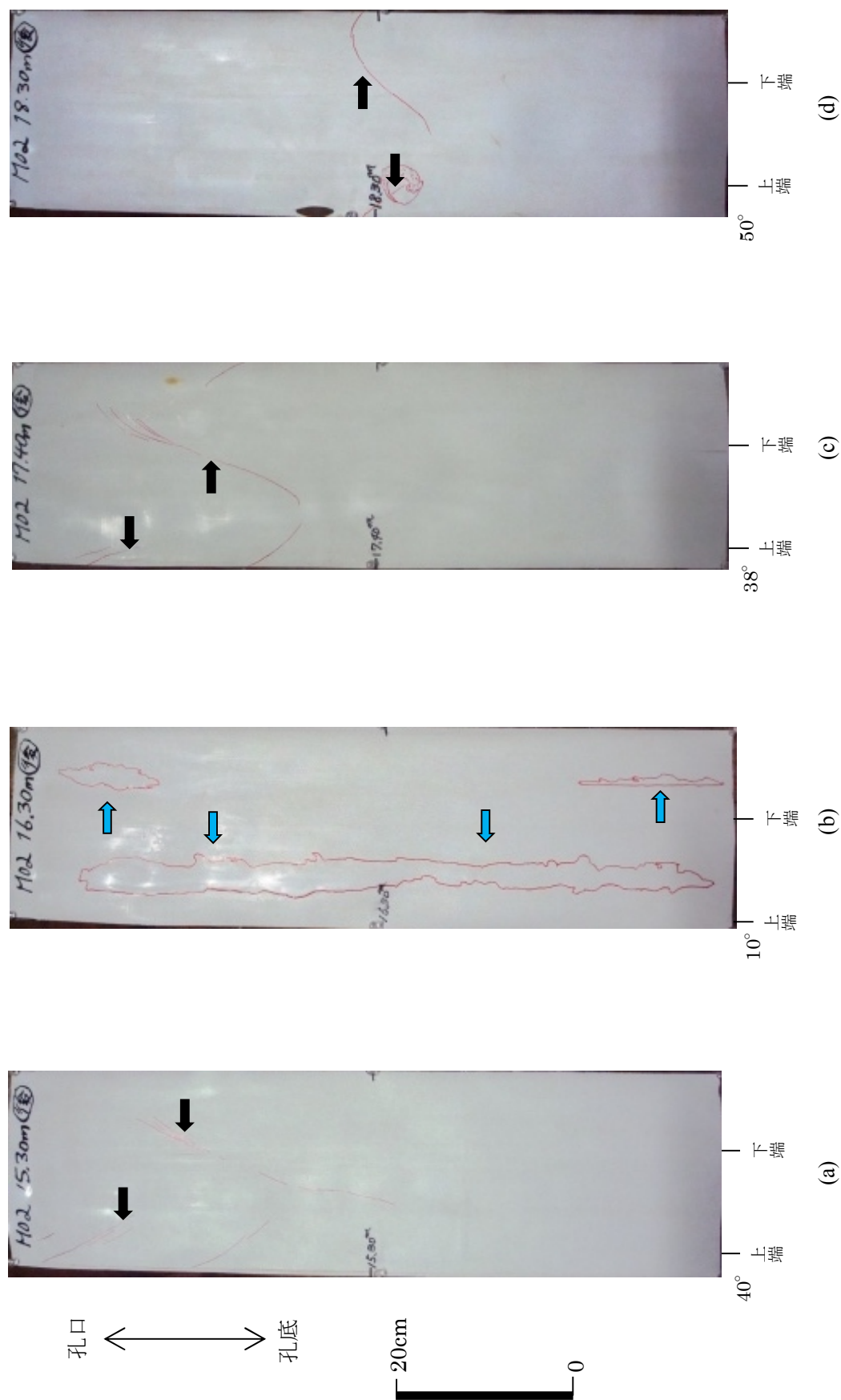


図 4.46 (a)M02 孔の深度 15.30m、(b)M02 孔の深度 16.30m、(c)M02 孔の深度 17.40m および (d)M02 孔の深度 18.30m で採取したき裂の型取の記録

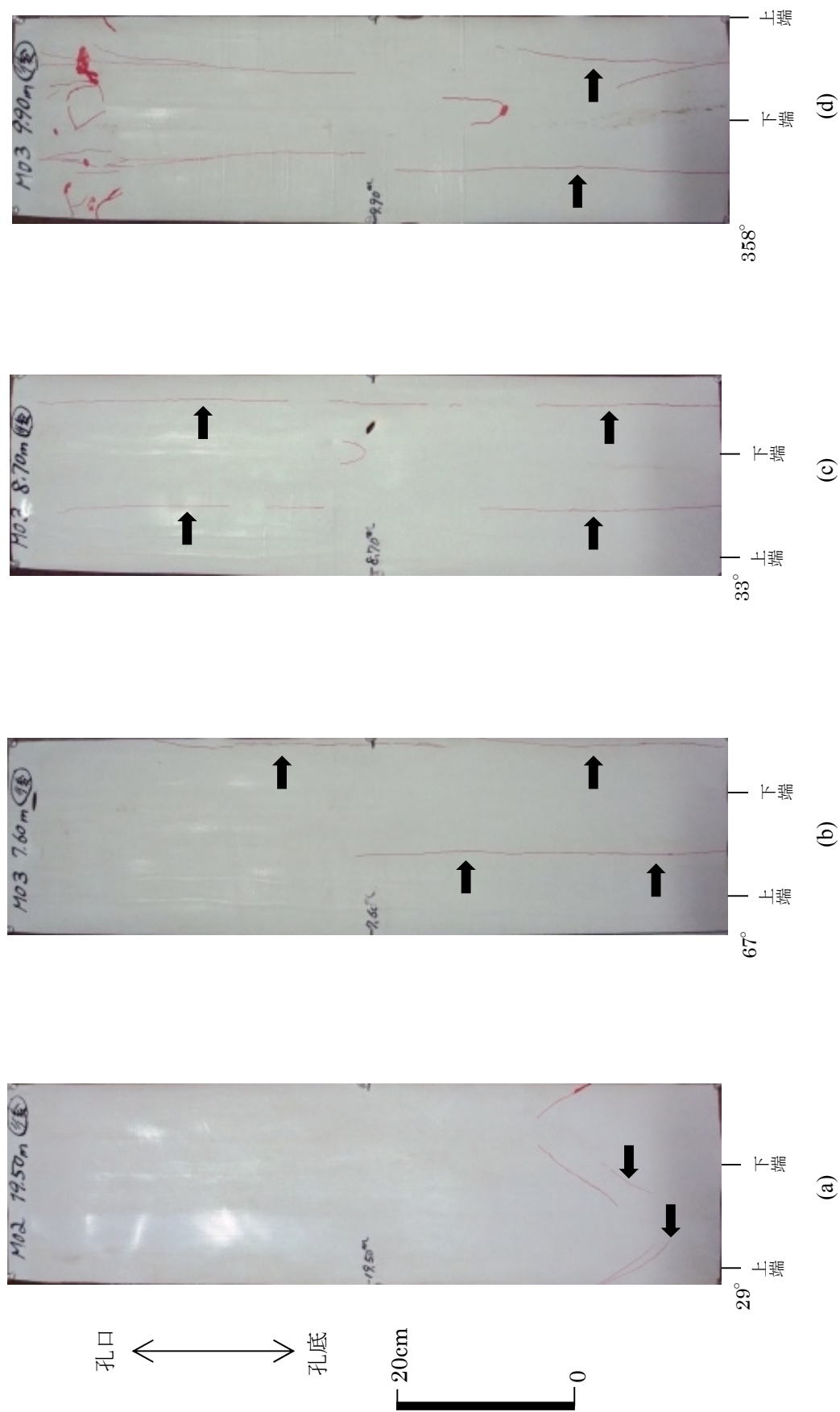


図 4.47 (a)M02 孔の深度 19.50m、(b)M03 孔の深度 7.60m、(c)M03 孔の深度 8.70m および (d)M03 孔の深度 9.90m で採取したき裂の型取の記録

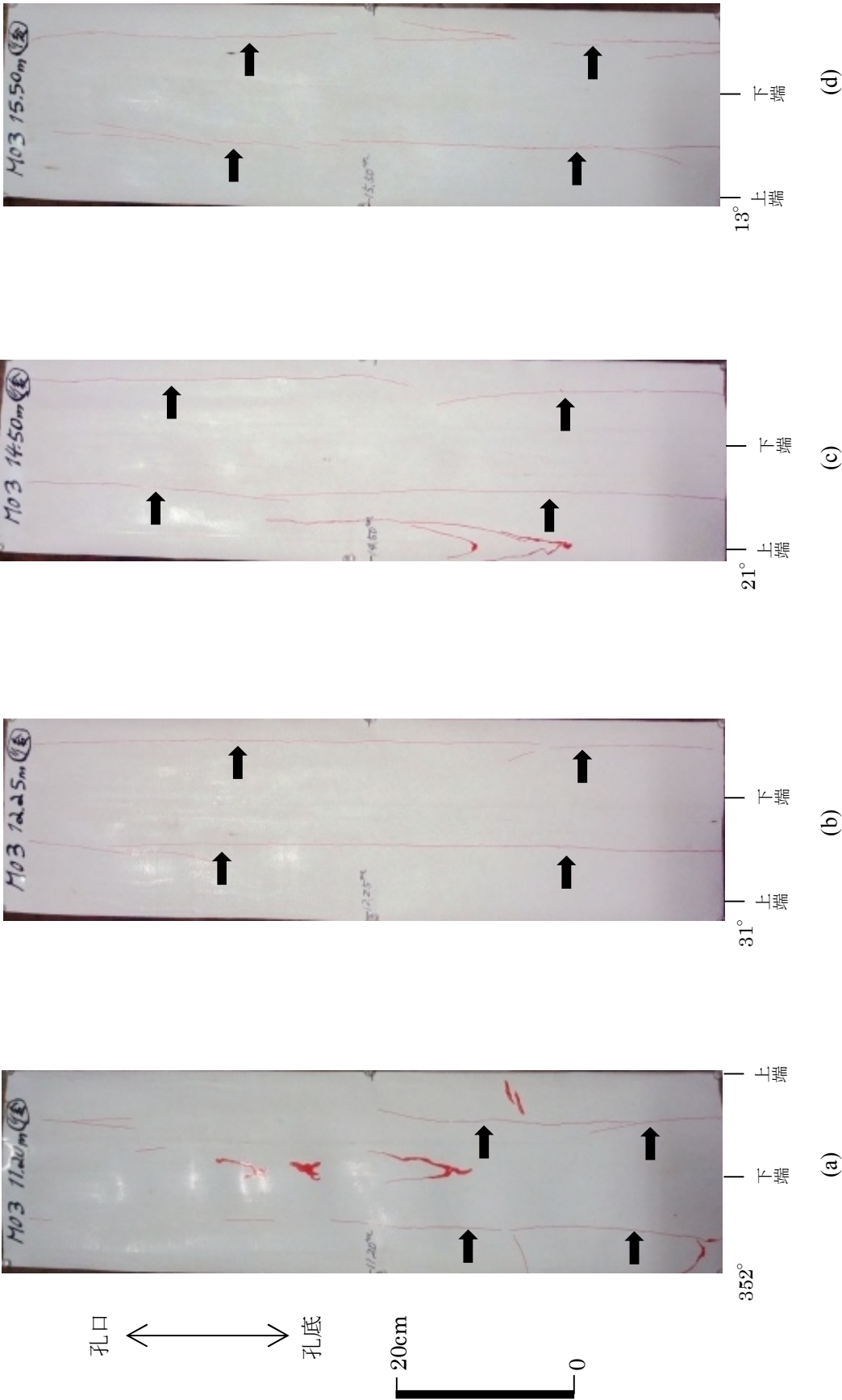


図 4.48 (a)M03 孔の深度 11.20m、(b)M03 孔の深度 12.25m、(c)M03 孔の深度 14.50m および (d)M03 孔の深度 15.50m で採取したき裂の型取の記録

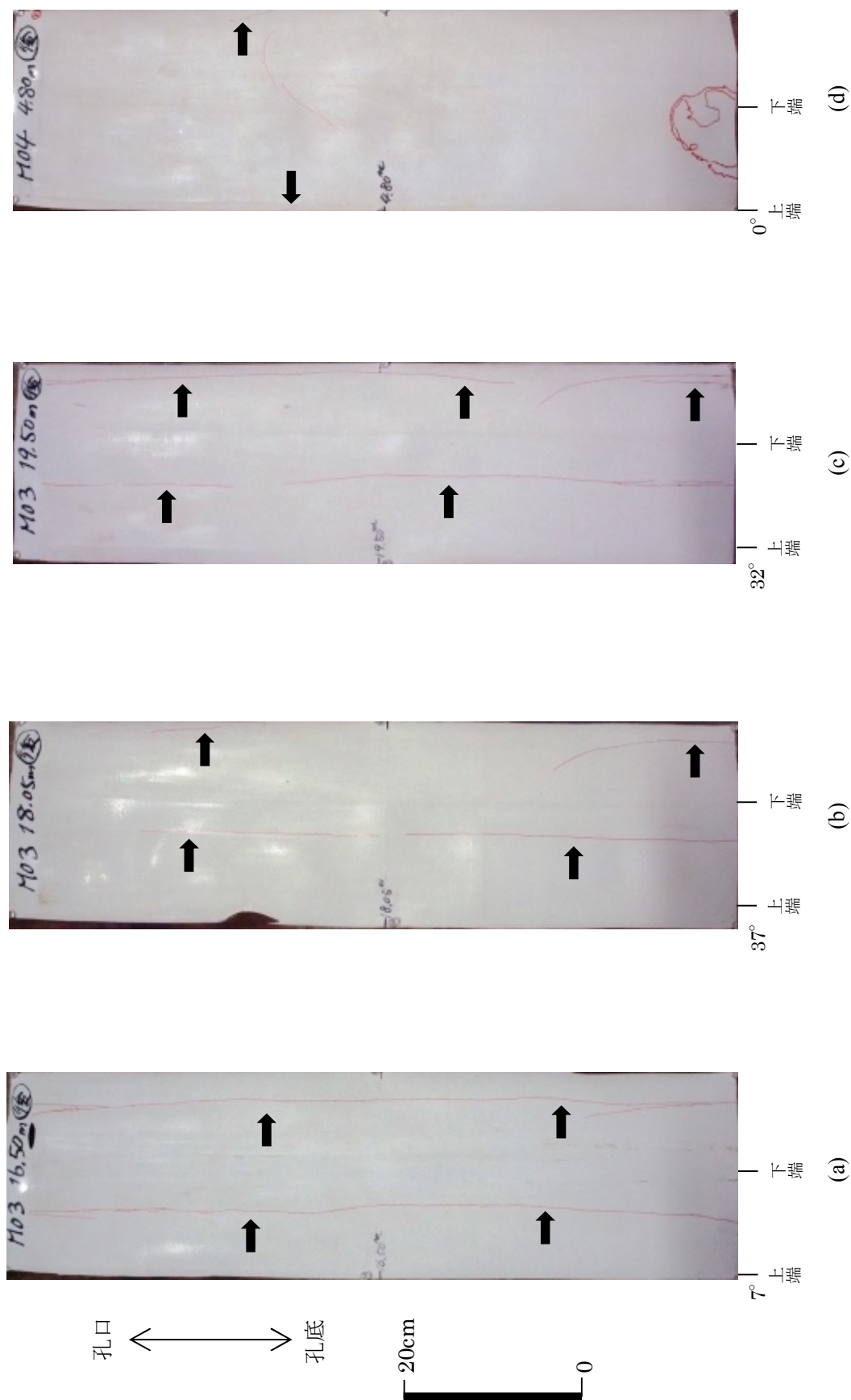


図 4.49 (a)M03 孔の深度 16.50m、(b)M03 孔の深度 18.05m、(c)M03 孔の深度 19.50m および (d)M04 孔の深度 4.80m で採取したき裂の型取の記録

4.5 初期地圧の評価

4.5.1 き裂の方向余弦

水圧破碎によって生じるき裂は、一般に、ボーリング孔軸と交差する横き裂か孔軸を含む縦き裂である。これら 2 種類のき裂に加えて、ボーリング孔軸と主応力軸の方向が異なる場合、孔壁の母線に対してある角度で斜交し雁行型を呈するき裂が生じることがあり、エショロン型（あるいはシェブロン型）き裂と呼ばれる。

M02 孔の 6 深度および M04 孔の 1 深度で生じたき裂は、上記の 3 種類のき裂のいずれにも分類できない。図 4.50 は、M02 孔の深度 10.90m におけるき裂の型取り結果である。残り 6 深度のトレースもほぼ同様のパターンを示す。すなわち、水圧破碎によって生じたき裂は、孔壁の母線と緩い角度で交差する連続性のない a のき裂と、周期 2π の正弦曲線の一部と思われる b のき裂から構成されるようにみえる。a のき裂は図の左上側に 10cm 程度伸びているが、それ以上伸展しない（以下、それぞれき裂 a、き裂 b と呼ぶ）。

測定されたき裂閉口圧 P_s やき裂開口圧 P_r が、き裂 a とき裂 b のうちいずれに作用する応力をより大きく反映したと考えるかによって、解析モデルは異なるので評価される初期地圧は変化するであろう。しかし、孔壁の母線と斜交するき裂と周期 2π の横き裂が混在するき裂を対象とした解析方法は、今のところみあたらないように思われる。

そこで、き裂 a とき裂 b のいずれが水圧破碎によって新たに生じたき裂であるかを判断するため、まず、周期性があると思われるき裂 b を抽出して横き裂として取り扱い、その法線方向と M01 孔および M02 孔の天然の横き裂の法線方向との関係を調べる。図 4.51 は、M02 孔の深度 10.90m のき裂 b のみに周期 2π の正弦曲線をあてはめた結果である。ここで、●印および○印は、それぞれき裂 a とき裂 b のトレースを離散化した座標のプロットである。同様に、M02 孔の残り 5 深度および M04 孔の 1 深度の b のき裂に周期 2π の正弦曲線をあてはめてき裂の法線方向を求めた（別途電子データとして収録した付録 1 および 2 を参照）。

求めたき裂 b の法線方向を、M01～03 孔で生じたき裂の法線方向とともに下半球投影図にプロットすると、図 4.52 のとおりである。なお、横き裂と縦き裂の方向余弦の算定方法¹⁴⁾は付録 1 と付録 2 に示した。ここで、○印、△印、および□印は、それぞれ M01 孔の横き裂、M02 孔の横き裂および M03 孔で生じた縦き裂の法線方向である。▲印および◇印は、それぞれ M02 孔および M04 孔のき裂 b の法線方向である。また、●印は M02 孔の 16.30m で生じたボアホールブレイクアウトの方向と孔軸を含む平面の法線方向である。これをみると、M01 孔と M02 孔の加圧区間にある横き裂の法線方向（○印および△印）は、いずれも SSW 方向の狭い範囲に集中している。また、M02 孔と M04 孔で生じたき裂 b の法線方向（▲印および◇印）の分布範囲は、M01 孔と M02 孔の天然き裂の法線方向のそれとほぼ一致することが読み取れる。このことから、き裂 b は当該岩盤に含まれる天然き裂である可能性が高いと判断できる。したがって、初期地圧の評価に当たっては、水圧破碎試験によって新たに生じたと考えられるき裂 a を解析に加えることがより妥当であると考えられる。

ここでは、図 4.6 に示すように、き裂 a は縦き裂と同様に孔壁に作用する最大引張応力に垂直に生じたものの、単一の斜めき裂となったと考える。すなわち、き裂 a を図 4.7 に示すように、近似的に縦き裂として取り扱うものとする。

図 4.42 から図 4.49 に示したき裂の法線の E-N-V 座標系（V 軸は鉛直上向き）における方向余弦を表 4.4 に示す。ただし、M02 孔の深度 9.40m、深度 10.90m、深度 13.05m、深度 15.30m、深度 17.40m、深度 19.50m および M04 孔の深度 4.80m では、前述のとおり、き裂 a を縦き裂として近似し、その方向余弦を示した。



図 4.50 M02 孔の深度 10.9m におけるき裂の型取り結果

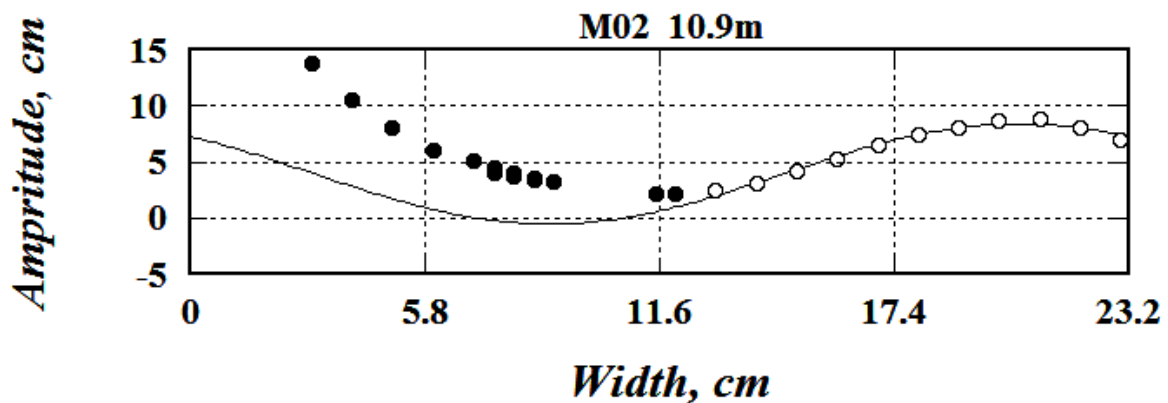


図 4.51 周期 2π のき裂 b への正弦曲線のあてはめ

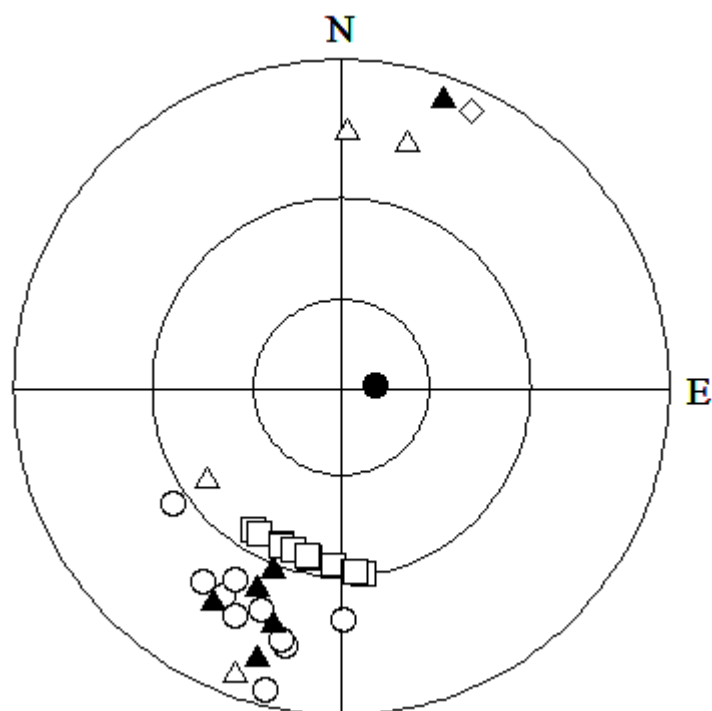


図 4.52 加圧区間に生じたき裂の法線方向の下半球投影図。○印、△印、および□印は、それぞれ M01 孔の横き裂、M02 孔の横き裂および M03 孔で生じた縦き裂の法線方向である。▲印および◇印は、それぞれ M02 孔および M04 孔のき裂 b の法線方向である。●印は M02 孔の 16.30m で生じたボアホールブレイクアウトの方向と孔軸を含む平面の法線方向である。

4.5.2 破碎圧、き裂開口圧およびき裂閉口圧

4.3 で述べた解析方法によって初期地圧を評価するためには、き裂の方向余弦に加えて、き裂閉口圧 P_s 、縦き裂の破碎圧 P_b および縦き裂のき裂開口圧 P_r が必要となる。破碎圧 P_b は、通常、第 1 回目の加圧サイクルにおいて、き裂発生に伴う急激な圧力低下が生じる直前の最大圧力として求めることができる。ただし、第 2 回目の加圧サイクルでも急激な圧力低下が認められた場合は、第 1 回目の加圧サイクルと比較して、より高い圧力を破碎圧 P_b とした。

き裂開口圧 P_r は、圧入流量 $Q(t)$ が一定であればボアホール内の水圧の経時変化が線形から非線形に変わる時のボアホール内の水圧として定義される。圧入流量 $Q(t)$ が変動する場合であっても、流量計より下流部分の配管系と加圧区間の孔壁の変形を含むコンプライアンス C が水圧によらず一定であれば、き裂が開かない状態での加圧区間水圧 P は加圧開始からの総流量 Q_{total} に対して線形に増加するはずである。したがって、ここでは第 2 回目以降の加圧サイクルにおいて P - Q_{total} の関係が線形から非線形に変わるときの加圧区間水圧としてき裂開口圧 P_r を求めた。ただし、第 2 回目の加圧サイクルでも急激な圧力低下が認められた場合は、第 3 回目以降の加圧サイクルにおける P - Q_{total} の関係からき裂開口圧 P_r を求めた。各試験深度で測定した加圧区間水圧 P と圧入流量 $Q(t)$ の関係を積分して P - Q_{total} の関係に書き換え、き裂再開口圧を求めた結果を付録 CD-ROM (付録 3) に示した。

き裂開口圧 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)した後の加圧区間の圧力が急激に減少する場合、シャットイン後の圧力-時間曲線を用いて図式的にき裂開口圧を求める方法がいくつか提案されている。このうち、Hayashi and Haimson¹⁵⁾の方法は、一般にシャットイン後の圧力-時間曲線から求められる加圧区間水圧 P とその時間変化率の逆数 dt/dP 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水圧をき裂開口圧 P_s として求める。ただし、シャットイン後の圧力が急激に低下せずに緩やかに減少する場合や、圧力が直線的に減少する場合、区間水圧 P に対して dt/dP は必ずしも上に凸に分布しないため、必ずしも 3 直線で近似できない。一方、き裂面内の水圧勾配ができるだけ小さくなるような小さい流量で加圧し、加圧区間の圧力がほぼ一定になったときの圧力からき裂面に垂直な応力を評価する方法¹⁶⁾¹⁷⁾がある。この方法は、シャットイン後の圧力-時間曲線を用いないので、シャットイン後の圧力の減衰挙動に関わらずき裂開口圧を求めることができる。また、シャットイン後の圧力-時間曲線に湧水やガスの湧出による圧力の変動が現れ、 dt/dP の計算が困難な場合でも適用できる。

図 4.11 から図 4.41 の圧力-時間曲線をみると、シャットイン後の圧力の低下が緩やかなため、Hayashi and Haimson の方法を適用できないデータが数多く認められる。例えば、M01 孔の深度 8.70m、深度 9.90m、深度 11.60m、深度 12.60m、深度 14.20m、深度 17.05m、深度 18.00m、あるいは M02 孔の深度 6.40m、深度 7.40m、深度 8.40m、深度 9.40m、深度 10.90m、深度 13.05m、深度 17.40m、深度 18.30m、深度 19.50m などである。そこで、ここでは、き裂面内の水圧勾配ができるだけ小さくなるように、かつ、き裂開口圧が検出できる程度に極力小さい流量（本試験においては 200ml/min）で加圧したときの定常圧力からき裂開口圧を求めることにした。

以上のようにして評価した破碎圧 P_b 、き裂開口圧 P_r およびき裂開口圧 P_s は、図 4.11 から図 4.41 の圧力-時間曲線に表示するとともに、表 4.4 にまとめて示した。

表 4.4 水圧破砕試験結果 (1/2)

孔名	方位・傾斜	試験 深度(m)	P_b^* (MPa)	P_{i-1}^{**} (MPa)					P_{i-2}^{***} (MPa)					き裂 の 種類	$\varphi^\#(^{\circ})$	き裂の方向余弦 ** (E-N-V 座標系)		
				2nd	3rd	4th	5th	平均値	2nd	3rd	4th	5th	平均値			λ_1	λ_2	λ_3
M01	S50°W、 水平から 上向き 5°	8.70	2.75	1.76	1.71	1.79		1.75	2.01	2.01	2.02		2.01	T		0.406976	0.877296	0.254404
		9.90	2.07	1.57	1.47	1.49		1.51	2.05	2.07	2.05		2.06	T		0.322940	0.892198	0.315741
		10.50	2.14	1.62	1.59	1.62		1.61	1.79	1.89	1.93		1.87	T		0.472922	0.827194	0.303472
		11.60	1.88	1.36	1.42	1.40		1.39	1.96	2.02	1.89		1.96	T		0.550415	0.776545	0.306628
		12.60	2.10	1.75	1.78	1.88		1.80	2.07	2.21	2.07		2.12	T		0.741172	0.509714	0.436870
		14.20	7.98	1.85	1.82	1.86		1.84	2.26	2.20	2.25		2.24	T		0.210018	0.955078	0.209090
		15.20	5.74		3.16	2.88	3.68	3.24		5.29	?	5.60	5.45	T		0.241506	0.969090	0.050389
		17.05	2.70	1.70	1.76	1.76		1.74	2.36	2.45	2.44		2.42	T		0.227620	0.946903	0.227076
		18.00	2.45	1.72	1.73	1.73		1.73	2.35	2.36	2.38		2.36	T		0.444166	0.809999	0.382908
		19.20	2.40	1.45	1.57	1.57		1.53	2.40	2.42	2.55		2.46	T		-0.011020	0.942699	0.333462
M02	S30°E、 水平から 上向き 5°	6.40	4.71	3.08	3.21	3.21		3.17	3.62	3.74	3.76		3.71	T		0.248199	0.935910	-0.249939
		7.40	4.19	3.30	3.21	3.16		3.22	3.95	3.86	3.90		3.90	L	142.3	0.658243	0.441627	0.609657
		8.40	4.93	2.97	3.04	3.12		3.04	4.00	3.98	4.10		4.03	T		0.021937	0.972018	-0.233879
		9.40	7.14	3.24	3.27	3.17		3.23	3.93	4.02	4.10		4.02	TE	150.9	-0.735469	-0.473576	-0.484573
		10.90	8.64	3.44	3.56	3.50		3.50	4.14	4.14	4.26		4.18	TE	175.7	-0.860278	-0.504267	-0.075081
		13.05	7.04	3.40	3.50	3.46		3.45	4.05	4.12	4.12		4.10	TE	140.1	0.636259	0.431921	0.639233
		15.30	11.19		4.16	3.52	3.78	3.82		4.55	4.33	4.29	4.39	TE	198.3	-0.836108	-0.451210	0.311983
		17.40	7.57	3.12	3.07	3.05		3.08	3.79	3.81	3.86		3.82	TE	161.6	-0.807736	-0.498192	-0.315228
		18.30	4.36	2.75	2.78	2.53		2.69	3.29	3.38	3.40		3.36	T		0.348788	0.934113	0.076024
		19.50	7.32		2.74	2.82	2.77	2.78	3.40	3.29	3.45		3.38	TE	173.6	-0.855772	-0.505297	-0.111036

表 4.4 水圧破砕試験結果 (2/2)

孔名	方位・傾斜	試験 深度(m)	P_b^* (MPa)	P_r^{**} (MPa)					P_r^{***} (MPa)					き裂 の 種類	$\varphi^\#(^{\circ})$	き裂の方向余弦## (E-N-V 座標系)		
				2nd	3rd	4th	5th	平均値	2nd	3rd	4th	5th	平均値			λ_1	λ_2	λ_3
M03	N30°E、 水平から 下向き 54°	7.60	2.79	1.68	1.66	1.74		1.69	2.68	2.71	2.70		2.70	L	88.3	0.430584	0.685145	0.587515
		8.70	2.71	1.64	1.65	1.52		1.60	2.67	2.73	2.76		2.72	L	90.4	0.398481	0.704087	0.587771
		9.90	2.52	1.54	1.58	1.52		1.55	2.67	2.67	2.73		2.69	L	97.3	0.291666	0.758269	0.583060
		11.40	2.52	1.87	1.88	1.88		1.88	2.45	2.49	2.55		2.50	L	97.5	0.288293	0.759772	0.582781
		12.35	2.24	1.36	1.42	1.43		1.40	2.07	2.20	2.21		2.16	L	100.9	0.233900	0.782362	0.577235
		14.50	2.21	1.04	1.06	1.16		1.09	2.06	2.13	2.13		2.11	L	105.9	0.151305	0.810948	0.565217
		15.50	2.55	1.52	1.76	1.82		1.70	2.33	2.50	2.55		2.46	L	105.1	0.164912	0.806699	0.567486
		16.50	2.79	1.74	2.18	2.22		2.05	2.82	2.89	2.88		2.86	L	112.5	0.041842	0.838732	0.542934
M04	S30°E、水 平から上 向き 5°	18.05	7.00	2.32	2.26	2.32		2.30	3.40	3.19	3.17		3.25	L	121.0	-0.099472	0.858087	0.503777
		19.50	3.02	2.06	2.00	1.92		1.99	3.00	2.88	3.00		2.96	L	119.0	-0.066863	0.855270	0.513850
M04	平から上 向き 5°	4.80	5.67	2.68	2.70	2.75		2.71	3.26	3.31	3.29		3.29	TE	171.7	0.850597	0.505660	0.144196

*:第1回目と第2回目の加圧サイクルにおける最大圧力

**:第2回目あるいは第3回目以降の加圧サイクルにおけるき裂再開口圧力 (付録 CD-ROM (付録 3) 参照)

***:第2回目あるいは第3回目以降の加圧サイクルにおけるき裂再開口圧力

L:ボアホール孔軸を含む縦き裂 (例えば、図 4.47(b))

T:ボアホール孔軸と交差する横き裂(例えば、図 4.42(a))

TE:き裂 a (例えば、図 4.45(b))

: x1 軸から縦き裂までの角度 (付録 CD-ROM (付録 2) 参照)

##: 付録 CD-ROM (付録 1 および付録 2) 参照

4.5.3 ブレイクアウトの形状

深度 350m ポンプ座で掘削した 4 本のボーリング孔のうち、M02 孔のみでブレイクアウトが発生し、その範囲は深度 16.0m から深度 16.7m と狭い（図 4.43(b)の青矢印（）参照）。ブレイクアウトは、孔壁の周方向に 180°離れた位置に発生し、孔壁上側に近いブレイクアウトだけが孔軸方向に連続性を持って分布している。ここでは、熱収縮チューブの左の切れ目からブレイクアウト縁部までの距離を孔軸方向に約 1cm 間隔で測定し、その平均値からブレイクアウトの破壊開始位置と破壊中央の位置を求めた。図 4.53 は、ボーリング孔中心から見たブレイクアウトの挟み角度（図 4.8(b)参照）の頻度分布である。周方向に 180°離れた位置にあるブレイクアウトの幅が互いに異なるため、挟み角度のばらつきはかなり大きい。鉛直下向きの x1 軸からブレイクアウトの破壊開始位置まで反時計回りに測定した角度 $\theta_b^{(n)}$ およびブレイクアウトの破壊中央までの角度 $\theta_{min}^{(o)}$ は、表 4.5 に示すとおりである。

表 4.5 の一軸圧縮強度とポアソン比は、M02 孔の深度 10.30m、14.04m および 14.16m から採取した試験片を用いて、第 5 章で述べる岩石の力学試験から求めた平均値である。ただし、一軸圧縮強度は 14.50MPa から 38.57MPa と、採取深度によってばらつきが大きいことに注意する必要がある。すなわち、強度のばらつきは、挟み角度のばらつきと同様に、ブレイクアウトの発生条件を加味して初期地圧を評価する際の誤差の原因となりうる。

表 4.5 ブレイクアウトの破壊開始位置 $\theta_b^{(n)}$ および破壊中央の位置 $\theta_{min}^{(o)}$

孔名	方位・傾斜	深度 (m)	$\theta_b^{(n)}$ (deg)	$\theta_{min}^{(o)}$ (deg)	一軸圧縮強度 C_0 (MPa)	ポアソン比 ν
M02	S30°E、水平から上向き 5°	16.0～16.7	61.3	79.6	28.85	0.32

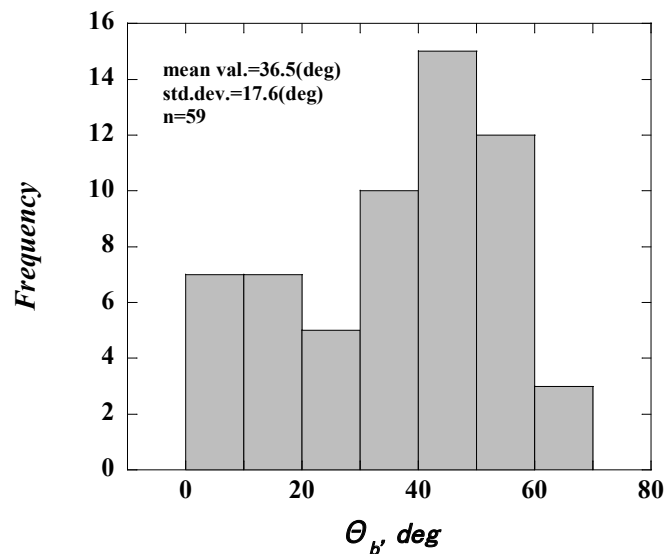


図 4.53 ボーリング孔中心から見たブレイクアウトの挟み角度の頻度分布

4.5.4 解析結果

水圧破碎試験で取得したデータから、4.3 節で述べた解析方法によって初期地圧を評価する場合、採用するデータによっていくつかの解析パターンが考えられる。まず、信頼性が高いといわれる横き裂の閉口圧力、すなわち式(4.2)のき裂に作用する法線応力と初期地圧の関係は、縦き裂も含め、加圧区間に方向余弦が既知のき裂が存在する場合に適用できる。

次に、加圧区間に新たに縦き裂が生じ、その方向が初期地圧に支配されていると考えられる場合は、縦き裂が生じた方向と初期地圧の関係である式(4.7)を用いることができる。ただし、当該岩盤を対象とした水圧破碎試験では、M02 孔の 1 深度と M03 孔の 10 深度縦き裂が生じたものの、第 1 回目の加圧サイクルにおいて圧力が鋭いピーク（破碎圧 P_b ）に達した後、き裂進展に伴って急激に低下するという典型的な圧力-時間曲線が得られたのは、M03 孔の深度 18.05m のみである。すなわち、前記の 11 深度のうち、破碎圧 P_b が測定されて式(4.7)が適用できるのは、M03 孔の深度 18.05m のみである。一方、M02 孔の 6 深度と M04 孔の 1 深度で生じたと考えたき裂 a は縦き裂として取り扱うとともに、これらの深度では第 1 回目あるいは第 2 回目の加圧サイクルで鋭い圧力のピークとして破碎圧が測定されているので式(4.7)を適用する。また、すべての縦き裂でき裂開口圧が測定されているので、式(4.11) が適用できる。なお、M03 孔と M04 孔のコアについてはポアソン試験をおこなっていないため、それぞれのコアの性状により近いと思われる M01 孔と M02 孔のポアソン比を用いた。

ボアホールブレイクアウトが生じる位置と初期地圧との関係は、M02 孔の深度 16.30m に適用できる。以上のことから、ここではき裂の閉口圧力、縦き裂が生じた方向、縦き裂のき裂開口圧およびボアホールブレイクアウトが生じる位置から初期地圧を評価する。

(1) き裂閉口圧、縦き裂の発生方向、縦き裂のき裂開口圧、ボアホールブレイクアウトの破壊開始位置および方向から評価した初期地圧

き裂閉口圧と初期地圧の関係から初期地圧を評価するために、表 4.4 に示した各深度におけるき裂閉口圧の平均値とき裂の方向余弦 $\lambda^{(k)}$ を式(4.2)に代入する。そうすると、6 つの初期地圧成分を未知数とする 31 本の観測方程式が得られる。M02 孔、M03 孔および M04 孔の 8 深度では、き裂 a あるいは縦き裂の破碎圧が測定されたので、式(4.7)の観測方程式が適用できる。また、縦き裂のき裂開口圧が測定された M02 孔、M03 孔および M04 孔の 1 深度および M03 孔の 18 深度の測定データに式(4.11)の観測方程式が適用できる。最後に、表 4.5 に示した M02 孔のブレイクアウトの破壊開始位置 $\theta_b^{(m)}$ 、破壊中央の位置 $\theta_{min}^{(o)}$ およびポアソン比を式(4.14)と式(4.15)に代入すると 2 本の観測方程式が得られる。初期地圧を算定するために用いた以上の観測方程式を表 4.6 に示す。これらの観測方程式に非線形最小二乗法を適用して 6 つの応力成分と主応力を求めた（付録 CD-ROM 中の付録 6 参照）。

結果を表 4.7 および図 4.54 に示す。ここで、図 4.54(a)は、主応力の方角を下半球等角投影網にプロットした結果である。すなわち、各主応力の法線が球の中心を通り、球体の下半球面と交差する点を主応力の極として表示した。●印、▲印および■印は、それぞれ、最大主応力、中間主

応力および最小主応力の方位を意味し、これらの印の近傍に記載した数値は主応力の最確値とその確率誤差である。図 4.54(b)は水平面内の主応力分布図である。

主応力の下半球投影図をみると、最大主応力の方向（●印）は鉛直方向から約 45°傾斜している。また、主応力比 σ_1/σ_3 は 6 とかなり大きい。この解析モデルで用いたブレイクアウトの発生条件は、岩石の圧縮強度を含むので、岩石強度に含まれる誤差は評価される初期地圧の大きさに直接に影響する。M02 孔のボーリングコアを用いた一軸圧縮試験の結果は、試験片の採取深度によって強度がかなり変化することを示していた。また、当該岩石の強度には異方性もあるので、モデルに採用すべき岩石強度の設定は難しい問題である。

表 4.6 初期地圧の評価に用いたデータと観測方程式(1/3)

孔名	試験 深度(m)	使用したデータ			用いた観測 方程式
M01	8.70	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	9.90	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	10.50	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	11.60	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	12.60	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	14.20	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	15.20	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	17.05	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	18.00	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	19.20	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
M02	6.40	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	7.40	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	8.40	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	9.40	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	10.90	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	13.05	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	15.30	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	17.40	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	18.30	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	19.50	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
M03	7.60	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	8.70	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	9.90	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	11.40	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	12.35	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	14.50	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	15.50	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	16.50	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	18.05	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
	19.50	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)
M04	4.80	孔の方位・傾斜	表 4.4 の方向余弦	表 4.4 の P_s	式 (4.2)

表 4.6 初期地圧の評価に用いたデータと観測方程式(2/3)

孔名	試験 深度(m)	使用したデータ			用いた観測 方程式
M02	9.40	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_b と ν	式 (4.7)
	10.90	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_b と ν	式 (4.7)
	13.05	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_b と ν	式 (4.7)
	15.30	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_b と ν	式 (4.7)
	17.40	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_b と ν	式 (4.7)
	19.50	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_b と ν	式 (4.7)
M03	18.05	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_b と M01 孔の ν	式 (4.7)
M04	4.80	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_b と M02 孔の ν	式 (4.7)
M02	7.40	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
	9.40	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
	10.90	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
	13.05	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
	15.30	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
	17.40	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
	19.50	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)

表 4.6 初期地圧の評価に用いたデータと観測方程式(3/3)

孔名	試験 深度(m)	使用したデータ			用いた観測 方程式
M03	7.60	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
	8.70	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
	9.90	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
	11.40	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
	12.35	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
	14.50	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
	15.50	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
	16.50	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
	18.05	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
	19.50	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
M04	4.80	孔の方位・傾斜	表 4.4 の ϕ	表 4.4 の P_r	式 (4.11)
M02	16.30	孔の方位・傾斜	表 4.5 の破壊開始位置	表 4.5 の C_0 と ν	式 (4.14)
	16.30	孔の方位・傾斜	表 4.5 の破壊中央位置	表 4.5 の ν	式 (4.15)

表 4.7 き裂閉口圧、縦き裂の発生方向、縦き裂開口圧、ブレイクアウトの破壊開始位置および方向から評価した初期地圧状態

応力成分	σ_E	3.86 ± 0.21
	σ_N	6.87 ± 0.34
	σ_V	6.89 ± 0.41
	τ_{EN}	-0.94 ± 0.21
	τ_{NV}	-4.58 ± 0.28
	τ_{VE}	2.02 ± 0.16
3次元主応力	σ_1 (方位/傾斜)	12.01 ± 0.38 (339°/44°)
	σ_2 (方位/傾斜)	3.71 ± 0.26 (240°/10°)
	σ_3 (方位/傾斜)	1.92 ± 0.35 (141°/44°)
平面応力	σ_H	7.14 ± 0.33
	σ_h	3.59 ± 0.22
	E から σ_H までの角度	-74°

(応力の単位は MPa、方位は北を起点として時計回りを正とする角度、傾斜は水平面からの角度)

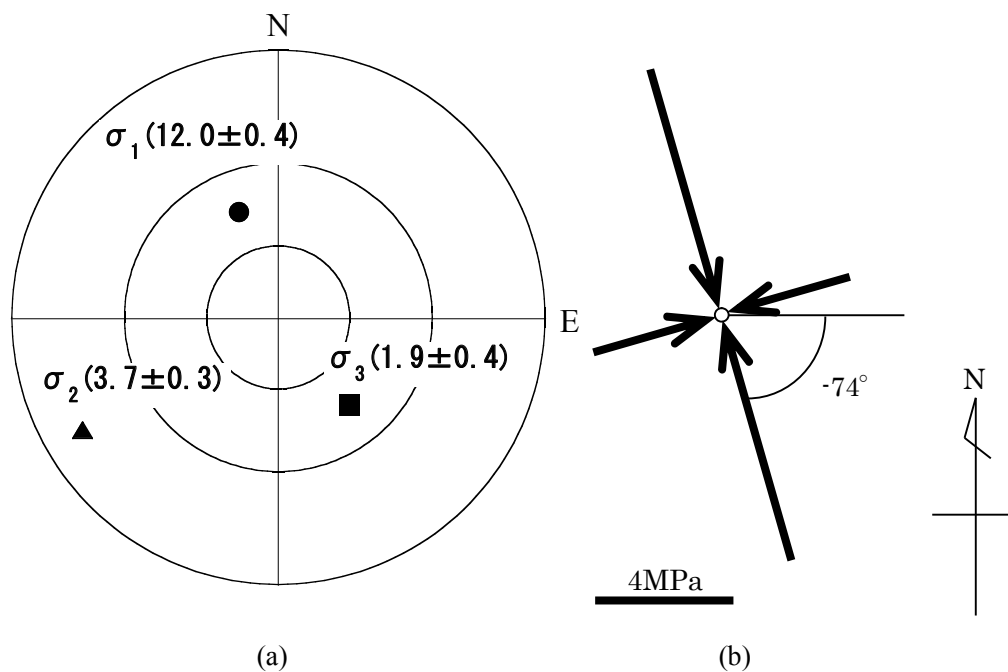


図 4.54 (a) き裂閉口圧、縦き裂の発生方向、縦き裂開口圧、ブレイクアウトの破壊開始位置および方向から評価した主応力の下半球投影図および(b)水平面内の主応力分布

(2) き裂閉口圧、縦き裂の発生方向、縦き裂のき裂開口圧、ボアホールブレイクアウトの方向から評価した初期地圧

ここでは、前節で述べた解析モデルから、M02 孔のボアホールブレイクアウトの破壊開始位置 $\theta_b^{(n)}$ に関する観測方程式を除いて初期地圧を評価した。すなわち、表 4.6 の下から 2 行目の式 (4.14)だけを除く観測方程式から初期地圧を評価した。

結果を表 4.8 および図 4.55 に示す。ここで、●印、▲印および■印の意味は、図 4.54 と同じである。主応力方向の分布傾向は、破壊開始位置に関する観測方程式を用いた前節のモデルとほぼ同じであるが、最大主応力の大きさは 6MPa と小さい。この解析モデルは、M02 孔まわりの応力集中によって孔壁が破壊した事実が加味されていないため、初期地圧が小さめに評価されていると考えられる。

表 4.8 き裂閉口圧、縦き裂の発生方向、縦き裂開口圧およびブレイクアウトの方向から評価した初期地圧状態

応力成分	σ_E	3.38 ± 0.10
	σ_N	3.98 ± 0.19
	σ_V	3.91 ± 0.19
	τ_{EN}	-0.42 ± 0.08
	τ_{NV}	-1.65 ± 0.18
	τ_{VE}	0.92 ± 0.09
3次元主応力	σ_1 (方位/傾斜)	5.95 ± 0.20 (332°/43°)
	σ_2 (方位/傾斜)	3.16 ± 0.12 (240°/1°)
	σ_3 (方位/傾斜)	2.16 ± 0.20 (149°/47°)
平面応力	σ_H	4.20 ± 0.17
	σ_h	3.16 ± 0.11
	E から σ_H までの角度	-63°

(応力の単位は MPa、方位は北を起点として時計回りを正とする角度、傾斜は水平面からの角度)

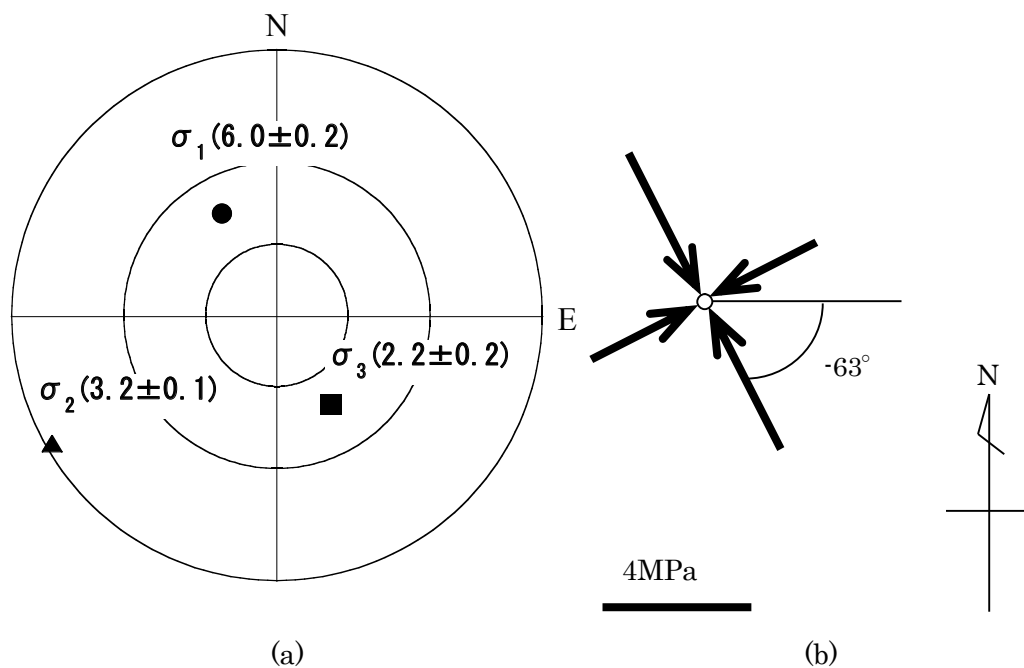


図 4.55 (a) き裂閉口圧、縦き裂の発生方向、縦き裂開口圧およびブレイクアウトの方向から評価した主応力の下半球投影図および(b)水平面内の主応力分布

4.6 水圧破碎法による測定結果まとめ

幌延深地層研究センターの地下施設周辺岩盤の応力場を把握するため、深度 350m ポンプ座から直径 76mm、長さ 21.5m のボーリング孔である M01 孔、M02 孔、M03 孔および長さ 6.1m の M04 孔を掘削し、コンプライアンス C の小さな配管系を用いた高剛性水圧破碎試験を 31 深度で実施した。

水圧破碎法による初期地圧測定試験を、31 深度を対象として実施した。

M01 孔では、10 深度の加圧区間すべてでボーリング孔軸と交差する横き裂が認められた。M02 孔の 10 深度のうち、1 深度で縦き裂、3 深度で横き裂が生じた。残りの 6 深度で生じたと考えられたき裂のトレースは、全体を周期 2π の正弦曲線で表現できなかった。M04 孔でも同一のパターンを示すき裂のトレースが得られた。ここでは、孔壁の母線と緩い角度で交差するこれらのき裂（き裂 a）を、孔壁に作用する最大引張応力に垂直に生じたものの、単一の斜めき裂となったと考え、縦き裂と同様に取り扱って初期地圧を評価した。初期地圧の評価では、M02 孔の深度 16.30m で生じたボアホールブレイクアウトの発生条件を加味した場合と、加味しない場合について初期地圧を評価した。その結果、主応力の方位の分布傾向に大きな違いは見られなかった。各主応力値の値に関しては、ブレイクアウト発生条件、すなわちブレイクアウト発生時の応力状態を考慮した場合、 σ_1 が約 12MPa と、推定される土被り圧約 6MPa の 2 倍程度の値となる。また、最大主応力と最小主応力の比が約 6 と、差応力が大きな結果となった。また、ブレイクアウトの発生条件を考慮しない場合は、最大主応力が 6MPa 程度であり、推定土被り圧と同程度の値を示す。また、最大主応力と最小主応力の比も、2.7 程度であり、主応力差がそれほど生じなかったという地上からの調査段階の結果に整合する傾向となった。ただし、これら 2 つの解析において、ブレイクアウトの発生条件と縦亀裂の式には、線形弾性論の過程という前提条件があり、これらの採択に関して検討の余地がある。

今回得られた初期地圧状態に関して、解析時の前提条件が異なることで、算出される地圧状態が大きく異なることが示された。今後は、より正確に原位置の初期地圧状態を検討するために、解析を実施する際には、前提とすべき条件を整理して、地山状況や岩盤物性に適合した条件で行うことが望ましいといえる。

5. コア物性測定試験

5.1 試験概要

水圧破碎試験実施深度近傍のボーリングコアのうち、できるだけ天然き裂を含まないインタクトなコアを用いて、表 5.1 に示す物性測定試験をおこなった。また、表 5.2 にそれぞれの物性試験に使用した供試体を採取した孔名、供試体名および採取深度を示す。なお、三軸圧縮試験（圧密排水条件）も 3 供試体行っている。結果は別途報告書¹⁸⁾に取りまとめたので、参照されたい。

表 5.1 ボーリングコアの物性測定試験

試験名	測定項目	数量	備 考
力学試験	一軸強度試験	6 個	自然乾燥状態、ポアソン比測定を含む
	繰返し載荷試験	3 個	自然乾燥状態、ポアソン比測定を含む
	圧裂引張強度試験	6 個	自然乾燥状態

表 5.2 供試体の採取深度

測定項目	孔名	供試体番号	供試体 中心深度(m)	供試体 直径(mm)	供試体長 (mm)
一軸強度試験	12-P350-M01	U1-a	4.02	53.90	107.93
		U1-b	6.11	53.45	107.83
		U1-c	6.39	53.68	107.88
	12-P350-M02	U2-a	10.30	53.95	107.18
		U2-b	14.04	53.87	107.90
		U2-c	14.16	53.87	107.93
繰返し載荷試験	12-P350-M02	CU2-a	8.27	54.85	104.98
		CU2-b	8.39	53.95	105.25
		CU2-c	8.50	54.85	105.85
		T2-b	19.25	49.70	97.00
		T2-c	19.37	49.80	100.20
圧裂引張 強度試験	12-P350-M01	B1-a	7.14	53.75	53.67
		B1-b	7.21	53.77	51.77
	12-P350-M02	B2-a	10.42	53.98	53.85
		B2-b	10.54	54.03	53.88
	12-P350-M03	B3-a	9.72	53.08	52.27
		B3-b	9.79	53.17	52.97

5.2 力学試験方法

5.2.1 供試体の作製

一軸圧縮試験および繰返し載荷試験に用いる試験片を製作するときは、まずボーリングコアの長軸方向と垂直に切断し、次にその両端面を平面研削盤によって成形した。当該ボーリングコアは、湿潤した状態で表面を摩擦すると容易に溶解する場合があるので、カーボランダムによる端面の研磨仕上げはおこなわなかった。成形した試験片は、湿潤状態のままポリプロピレンシートで被覆・保管し、試験開始前にシートから取り出して室内で1日間自然乾燥させ、表面が乾燥した段階で測寸、重量測定および箔ひずみゲージの貼付をおこない、その後すぐに試験に供した。

圧裂引張試験に用いる試験片は、ボーリングコアをその軸方向と垂直に切断したあと、両端面を平面研削盤によって成形した。成形した試験片は、一軸圧縮試験片と同様、湿潤状態のままポリプロピレンシートで被覆・保管し、試験開始前にシートから取り出して室内で1日間自然乾燥させたあと測寸および重量測定をおこない、試験に供した。以上の供試体の写真を図 5.1 から図 5.3 に示す。



図 5.1 一軸圧縮試験供試体の写真



図 5.2 繰返し載荷試験供試体の写真



図 5.3 圧裂引張試験供試体の写真

5.2.2 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験における試験装置および測定系統の概念図は図 5.4 の通りである。また、図 5.5 は、一軸圧縮試験状況の写真である。試験片をセットするときは試験片、エンドピースおよび球座の中心を一致させ、アムスラー型材料試験機（島津製作所製 Universal Testing Machine、RH-100T.V、最大荷重 980.7kN）によって約 0.02%/min の载荷速度で軸圧を加えた。エンドピースと材料試験機の間に取り付けたロードセル（共和電業製 LC-10TF、容量 98.1kN）によって軸圧を検出し、試験片の軸ひずみと横ひずみは円柱型試験片の側面に 180°間隔に接着した 2 枚の 2 軸直交ひずみゲージ（共和電業製 KFG-10-120-D16-11、ゲージ長 10 mm）で検出した。使用した接着剤は、シアノアクリルレート系の瞬間接着剤（共和電業製 CC-33A）である。各ひずみゲージは 1 ゲージ 3 ワイヤ法でホイートストンブリッジの一辺に組み込んだ。軸圧とひずみはデータロガー（NEC 三栄製、DC3100）によって検出し、パーソナルコンピュータに記録した。一軸圧縮試験の試験方法を、表 5.3 に示す。

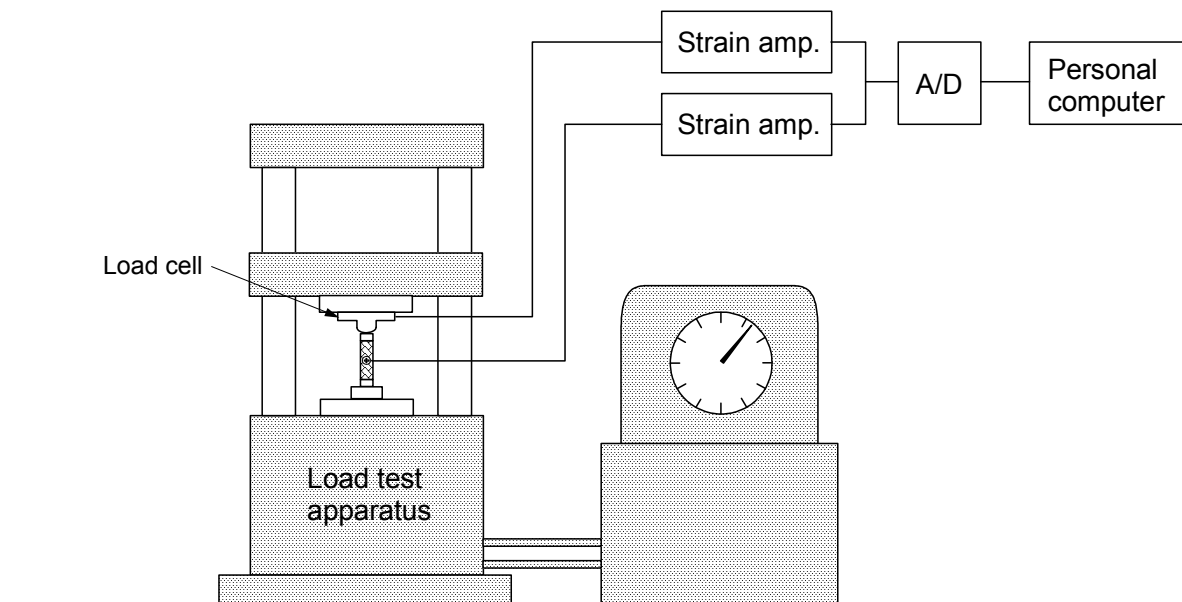


図 5.4 力学試験における試験装置および測定系統



図 5.5 一軸圧縮試験状況の写真

表 5.3 一軸圧縮試験の試験方法

試験片	形状	円柱形
	平均寸法	直径 5.4cm×高さ 10.8cm
	成形の仕方、精度	側面：未処理 端面：ダイヤモンドホイール付平面研削盤、1/20 mm 以下
	乾燥状態	端面成形後、24 時間室内自然乾燥
試験機の型式	アムスラー型 材料試験機	許容最大荷重 980.7kN
試験方法	制御方式	軸圧力：材料試験機、手動調整
	載荷速度	平均ひずみ速度 0.02%/min
測定法および 計算法	ひずみ	軸ひずみ：試験片にひずみゲージを貼付 横ひずみ：試験片にひずみゲージを貼付 体積ひずみ：軸ひずみと横ひずみから求める
	軸圧力	ひずみゲージ式ロードセル

5.2.3 繰返し载荷試験

繰返し载荷試験における試験装置および測定系統は、5.2.2 で述べた一軸圧縮試験と同一である。図 5.6 は、繰返し载荷試験の载荷パターンである。繰返し载荷試験の载荷・除荷の過程は 5 回繰り返した。すなわち、第 5 回目の最大応力を $\sigma_{\max}$ とすると、第 1 回目の载荷における最大応力を $1/5 \sigma_{\max}$ 、第 2 回目の最大応力を $2/5 \sigma_{\max}$ とし、以後、最大応力を $1/5 \sigma_{\max}$ ずつ増加させ、最大応力が $\sigma_{\max}$ に達するまで载荷・除荷の過程を繰り返した。第 5 回目の最大応力は、予想される一軸圧縮強度の 40% 程度を目安とした。

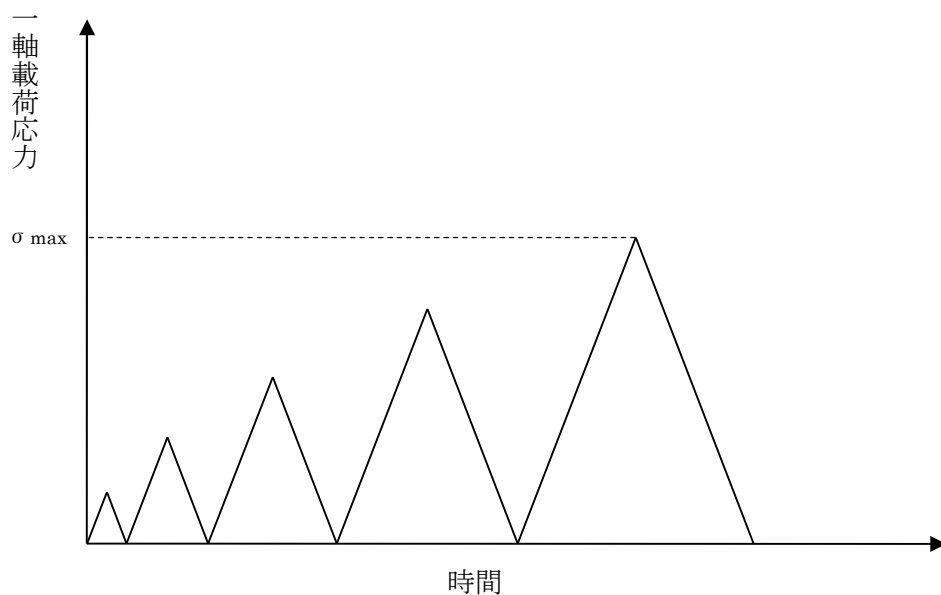


図 5.6 繰返し一軸圧縮試験の载荷パターン

5.2.4 圧裂引張試験

圧裂引張試験の試験装置、測定系統および試験方法は、一軸圧縮試験と基本的に同じである。円板形の岩石試験片の中心と球座の中心を载荷軸に一致させ、アムスラー型材料試験機（(株)島津製作所製 Universal Testing Machine、RH-100T.V.、最大荷重 980.7kN）によって約 0.3MPa/min の载荷速度で円板の中心線に沿って载荷した。エンドピースと材料試験機の間に取り付けたロードセル（共和電業製 LC-10TF、容量 98.1kN）の出力をデータロガー（NEC 三栄製 DC3100）によって検出し、パーソナルコンピュータに記録した。

5.3 試験結果

5.3.1 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線は、図 5.7 に示すとおりである。各グラフの上部中央に記載したタイトルは、最初の 4 文字が試験片名であり、U1 および U2 は、それぞれ M01 孔および M02 孔から採取したことを意味する。試験片名の次の数値は試験片が採取されたボアホール深度を表し、試験片の上端面の深度と一致する。 ε_a 、 ε_θ および ε_v は、それぞれ軸ひずみ、横ひずみおよび体積ひずみである。応力-ひずみ曲線を概観すると、軸ひずみは低応力から破壊直前までほぼ線形に増加し、典型的な脆性破壊挙動を示す試験片が多い。応力-ひずみ線図の電子データは、別途巻末の付録 10 に収録した。

一軸圧縮試験の結果を、試験片を採取したボーリング孔別にまとめると表 5.4 のようである。ここで、破断荷重 P_c とは圧縮試験における最大荷重である。 S_c は一軸圧縮強度であり、破断荷重 P_c を試験片の初期の断面積 A で除した値である。 E_{50} は、 S_c の 1/2 の応力における応力-軸ひずみ曲線上の接線ヤング率である。Poisson 比 ν は、原点と最大荷重の近傍を除いた中間部分の応力-軸ひずみおよび横ひずみ曲線から、次式にしたがって計算される。

$$\nu = -(\Delta\sigma_a / \Delta\varepsilon_a) / (\Delta\sigma_a / \Delta\varepsilon_\theta) \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、 $\Delta\sigma_a$ は選定された応力-ひずみ曲線の範囲における軸方向の応力の増分、 $\Delta\varepsilon_a$ および $\Delta\varepsilon_\theta$ は同一の範囲における軸ひずみおよび横ひずみの増分である。M02 孔の試験片 U2-a の一軸圧縮強度は、他の試験片の半分以下と小さい。これは、試験片 U2-a の堆積構造が他の試験片と比較して明瞭であり、この構造面に沿って破壊したためである。一軸圧縮試験後の試験片のスケッチを表 5.5 に示す。

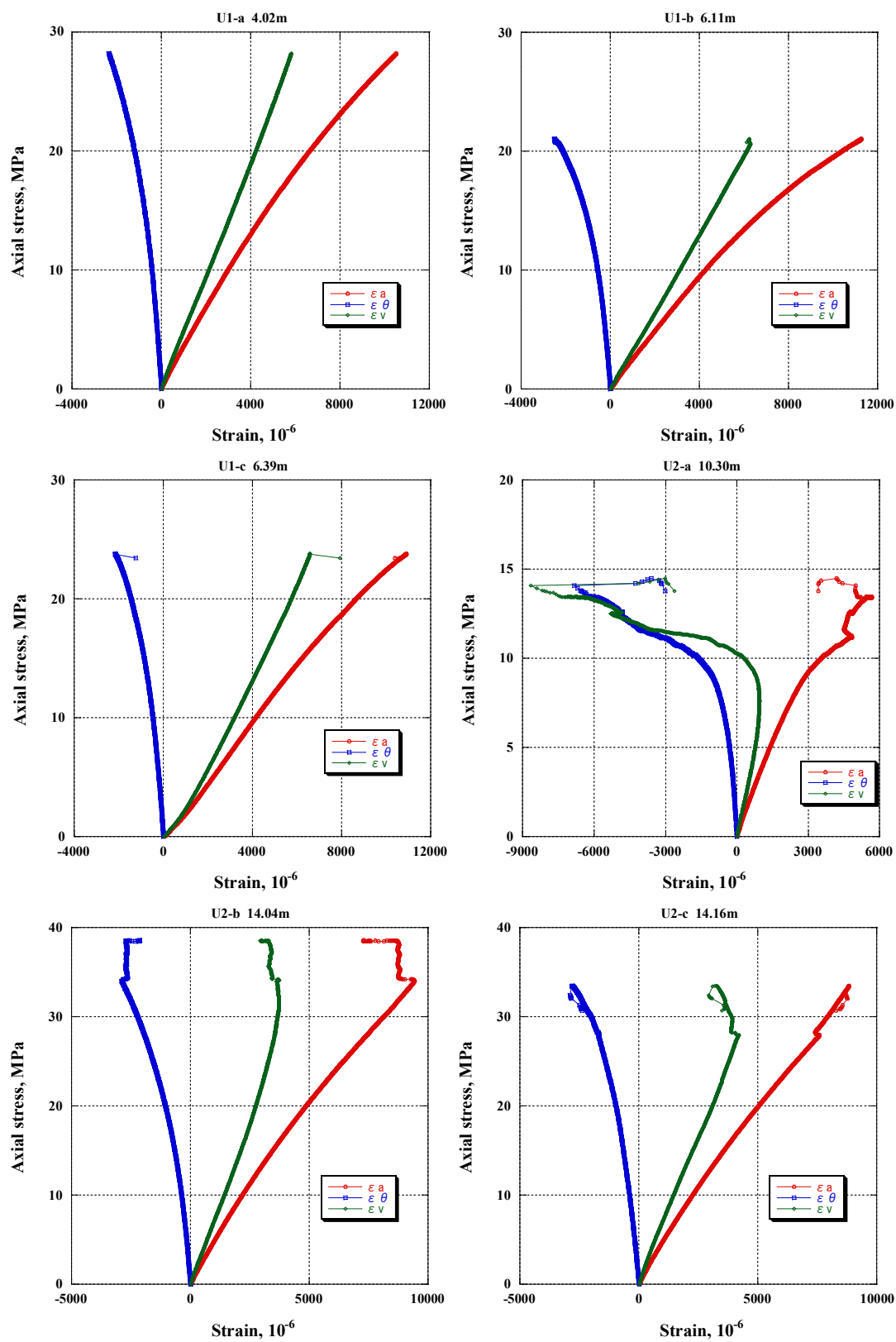


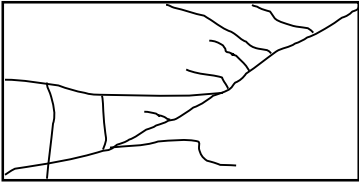
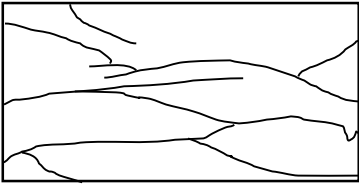
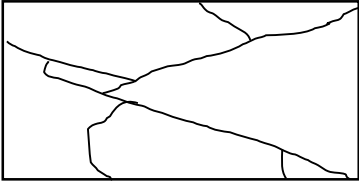
図 5.7 一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線

ϵ_a : 軸ひずみ
 ϵ_θ : 横ひずみ
 ϵ_v : 体積ひずみ

表 5.4 一軸圧縮試験結果

孔名	供試 体名	採取 深度 (m)	直径 (mm)	長さ (mm)	見かけ 質量(g)	単位体 積重量 (g/cm ³)	破断 荷重 P_c (kN)	一軸圧縮 強度 S_c (MPa)	$S_c/2$ 時の接 線ヤング率 E_{50} (GPa)	ポアソン 比 ν
M01	U1-a	4.02	53.90	107.93	448.63	1.82	64.39	28.22	2.84	0.21
	U1-b	6.11	53.45	107.83	447.30	1.85	47.15	21.01	2.09	0.19
	U1-c	6.39	53.68	107.88	451.44	1.85	53.92	23.82	2.45	0.18
	平均値							24.35	2.46	0.19
	標準偏差							3.63	0.37	0.01
M02	U2-a	10.30	53.95	107.18	455.51	1.86	33.15	14.50	2.70	0.47
	U2-b	14.04	53.87	107.90	446.56	1.82	87.89	38.57	3.43	0.30
	U2-c	14.16	53.87	107.93	449.18	1.83	76.32	33.49	3.49	0.20
	平均値							28.85	3.21	0.32
	標準偏差							12.69	0.44	0.14

表 5.5 一軸圧縮試験結果 (スケッチ)

孔名	M01	M01	M01	M02	M02	M02	M02
供試体番号	U1-a	U1-b	U1-c	U2-a	U2-b	U2-c	
採取深度(m)	4.02	6.11	6.39	10.30	14.04	14.16	
試験後の状態							
試験前	き裂なし	き裂なし	き裂なし	き裂なし	き裂なし	き裂なし	
試験後	せん断	せん断	せん断	堆積面に沿って割れ	せん断	せん断	
破断荷重 (kN)	64.39	47.15	53.92	33.15	87.89	76.32	
破断角度(度)	30	30			25	20	
備考							

5.3.2 繰返し载荷試験

M02 孔のボーリングコアから採取した供試体を用いた繰返し载荷試験における応力－ひずみ曲線は、図 5.8 の左側に示す通りである。繰返し载荷における最大応力 $\sigma_{\max}$ は通常、一軸圧縮強度の 40%程度を目安とする。ここでは、一軸圧縮試験の結果から M02 孔の試験片の一軸圧縮強度を 28.85MPa（表 5.4 参照）と仮定し、その約 40%、すなわち 11MPa を最大応力に設定した。そして、最初に供試体 CU2-b の繰返し载荷試験をおこなった。ところが、図 5.8 に示す通り、供試体 CU2-b は 4 回目以降の载荷サイクルで非弾性的なひずみ挙動を示した。これは、载荷によって供試体にき裂が生じたためである。そのため、供試体 CU2-a と CU2-c の繰返し载荷試験では、破壊を防ぐために最大応力を 6MPa まで低減させた。

図 5.8 の右側のプロットは、隣接する左側の応力－ひずみ曲線を整理し直した応力－弾性回復ひずみの関係である。すなわち、まず、各繰返し载荷の除荷開始時から次の载荷開始直前までの応力と各軸ひずみの変化量を読み取る。次に、読み取った応力の変化量と各軸ひずみの変化量（弾性回復ひずみ、●印）をそれぞれ縦軸と横軸にとって再度プロットし、5 つのプロット点を直線で最小二乗近似する。このときの傾きを当該岩石の除荷時のヤング率とする。このようにデータ処理することによって、除荷時の永久ひずみによる非線形性がヤング率の評価に及ぼす影響を排除するようにした。同様にして、除荷時の横ひずみの変化量（○印）から直線の傾きを求め、軸ひずみの傾きを横ひずみの傾きで除した値を除荷時のポアソン比とした。表 5.6 は、繰返し载荷試験の結果である。

表 5.6 除荷時のヤング率、ポアソン比

孔名	供試体名	採取深度 (m)	直径 (mm)	長さ (mm)	見かけ質量 (g)	単位体積重量 (g/cm ³)	ヤング率 E (GPa)	ポアソン比 $\nu(-)$
M02	CU2-a	8.27	54.85	104.98	449.50	1.81	4.17	0.16
	CU2-b	8.39	53.95	105.25	449.87	1.87	3.67	0.43
	CU2-c	8.50	54.85	105.85	448.78	1.79	4.02	0.23
	平均値						3.95	0.27

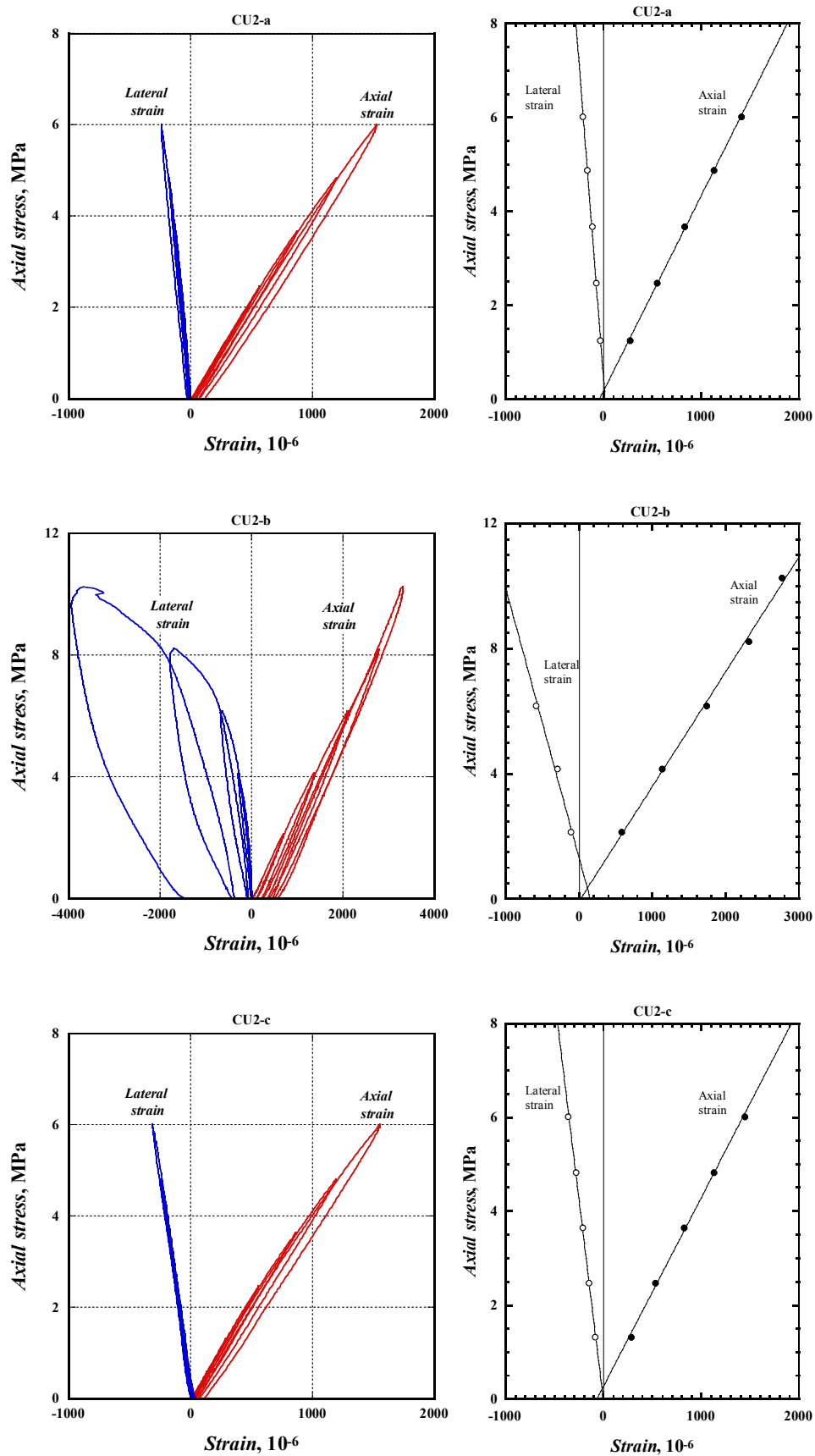


図 5.8 繰返し载荷試験における応力-ひずみ曲線および応力-弾性回復ひずみ

5.3.3 圧裂引張試験

引張強度 S_t は、円板形の岩石供試体を上下から圧縮し、円板の中心線にそって生じる引張応力によって引張破壊が起きたときの応力であり、このときの破断荷重 P 、円板の直径 d および円板の厚み l から次式で与えられる。

$$S_t = 2P/\pi dl \quad \dots\dots\dots (5.11)$$

圧裂引張試験の結果は、表 5.7 に示すとおりである。ここで、載荷方向の⊥印と//印は、供試体の端面で観測された泥岩の堆積構造面に対して垂直および平行に載荷したことを意味する。同一のボーリング孔から採取した供試体を比較すると、堆積構造面に対して垂直に載荷した時の引張強度は、平行に載荷した時よりも常に大きい。このことは、当該泥岩の引張強度に明瞭な強度異方性があることを示している。圧裂引張試験後の供試体のスケッチは、表 5.8 に示すとおりである。

表 5.7 圧裂引張試験結果

孔名	供試体名	採取深度 (m)	直径 (mm)	長さ (mm)	見かけ 質量(g)	単位体積 重量 (g/cm ³)	破断荷重 P_c (kN)	引張強度 S_t (MPa)	載荷 方向
M01	B1-a	7.14	53.75	53.67	221.42	1.82	13.32	2.94	⊥
	B1-b	7.21	53.77	51.77	213.37	1.82	7.31	1.67	//
	平均値							2.31	
	標準偏差							0.90	
M02	B2-a	10.42	53.98	53.85	229.38	1.86	12.05	2.64	⊥
	B2-b	10.54	54.03	53.88	229.38	1.86	10.17	2.22	//
	平均値							2.43	
	標準偏差							0.29	
M03	B3-a	9.72	53.08	52.27	210.29	1.82	14.56	3.34	⊥
	B3-b	9.79	53.17	52.97	174.30	1.48	5.98	1.35	//
	平均値							2.35	
	標準偏差							1.41	

⊥ : 堆積構造面に垂直に載荷

// : 堆積構造面に平行に載荷

表 5.8 圧裂引張試験結果 (スケッチ) (1/2)

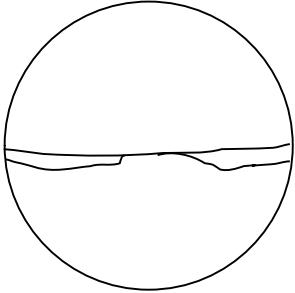
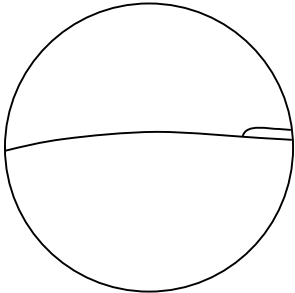
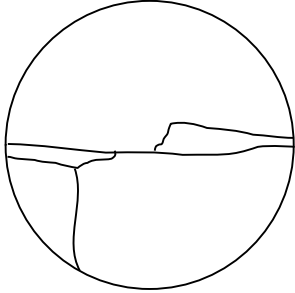
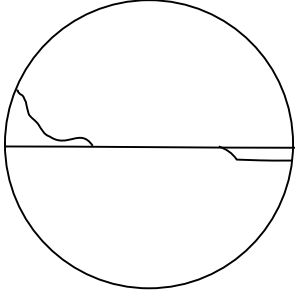
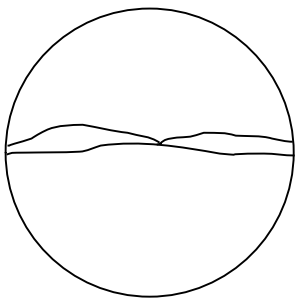
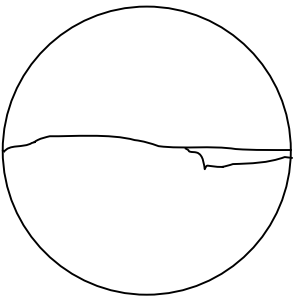
孔名	M01	M01	M02	M02
採取深度 (m)	7.14	7.21	10.42	10.54
試験後の状態				
試験前	き裂なし	き裂なし	き裂なし	き裂なし
破断加重 (kN)	13.32	7.31	12.05	10.17
備考	層理面に垂直に載荷	層理面に平行に載荷	層理面に垂直に載荷	層理面に平行に載荷

表 5.8 圧裂引張試験結果（スケッチ）(2/2)

孔名	M03	
採取深度 (m)	9.72	9.79
試験後の状態		
	き裂なし	き裂なし
試験前		
破断加重 (kN)	14.56	5.98
備考	層理面に垂直に載荷	層理面に平行に載荷

6. 結言

幌延深地層研究センターの地下施設周辺岩盤の応力場を把握するため、深度 350m ポンプ座において水圧破碎法による 3 次元初期地圧測定を実施した。

ボーリング削孔は、当初の予定に基づき、直径 76mm、長さ 21.5m のボーリング孔である M01 孔、M02 孔、M03 孔を削孔し、その後、追加で直径 76mm、長さ 6.1m の M04 孔を削孔した。削孔した全てのボーリング孔において、BTV 観察および採取岩石コアの観察を実施し、孔内のき裂分布状況を確認すると共に、ボアホールブレイクアウトの発生についても確認を行なった。その結果に基づき、各測定実施箇所を選定した。

水圧破碎法による初期地圧測定試験は、コンプライアンス C の小さな配管系を用いて、31 深度で実施した。M01 孔では、10 深度の加圧区間すべてでボーリング孔軸と交差する横き裂が認められた。M02 孔の 10 深度のうち、1 深度で縦き裂、3 深度で横き裂が生じた。残りの 6 深度で生じたと考えられたき裂のトレースは、全体を周期 2π の正弦曲線で表現できなかった。M04 孔でも同一のパターンを示すき裂のトレースが得られた。ここでは、孔壁の母線と緩い角度で交差するこれらのき裂（き裂 a）を、孔壁に作用する最大引張応力に垂直に生じたものの、単一の斜めき裂となったと考え、縦き裂と同様に取り扱って初期地圧を評価した。初期地圧の評価では、M02 孔の深度 16.30m で生じたボアホールブレイクアウトの発生条件を加味した場合と、加味しない場合について初期地圧を評価した。その結果、主応力の方位の分布傾向に大きな違いは見られなかった。各主応力値の値に関しては、ブレイクアウト発生条件を加味した場合、 σ_1 が約 12MPa と、推定される土被り圧約 6MPa の 2 倍程度の値となる。また、最大主応力と最小主応力の比が約 6 と、差応力が大きな結果となった。また、ブレイクアウトの発生条件を加味しない場合は、最大主応力が 6MPa 程度であり、推定土被り圧と同程度の値を示す。また、最大主応力と最小主応力の比も、2.7 程度であり、主応力差がそれほど生じなかったという地上からの調査段階の結果に整合する傾向となった。ただし、これら 2 つの解析において、ブレイクアウトの発生条件と縦亀裂の式には、線形弾性論の過程という前提条件があり、これらの採択に関して検討の余地がある。

岩石コアを用いた室内試験では、一軸圧縮試験、繰り返し載荷試験および圧裂引張強度試験を実施し、各種物性値を取得した。試験に使用した供試体の直径は全て 50mm を基本とし、その長さは圧裂引張強度試験の 50mm 以外は、100mm を原則とした。主な試験結果として、一軸圧縮強さは 14.50～38.57MPa、圧裂引張強さは 1.35～3.34MPa の幅を持って得られた。また、繰り返し載荷試験では、平均ヤング率 3.95GPa、平均ポアソン比 0.27 を得た。

謝辞

350m ポンプ座におけるボーリング孔の掘削、水圧破碎試験の実施・解析に際して、株式会社明間ボーリング（現：株式会社 3D 地科学研究所）の加藤春實氏にご尽力いただいた。ここに謝意を表す。水圧破碎試験の計画立案、現場監理に関しては、当時幌延深地層研究センター深地層研究ユニットに所属していた、稲垣大介氏、津坂仁和氏、近藤桂二氏、杉田裕氏にご尽力いただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗: “幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書分冊「深地層の科学的研究」”, JAEA-Research 2007-044 (2007), 434p.
- 2) 近藤桂二, 津坂仁和, 稲垣大介, 杉田 裕, 加藤春實, 丹生屋純夫: “幌延深地層研究所における珪藻質泥岩を対象とした水圧破碎法による初期地圧の測定”, 第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.583-588 (2013).
- 3) 吉田英一, 大澤英昭, 柳澤孝一, 山川稔: “深部花崗岩中の割れ目解析-岐阜県東濃地域に分布する花崗岩類を例にして-“, 応用地質, 30, pp.11-22 (1989).
- 4) 渡辺邦夫: “割れ目系の確率的連続性の評価法と AVTD 法に基づく岩盤調査の試み, 昭和 60 年度応用地質学会シンポジウム予稿集”, pp.36-39 (1985).
- 5) Ito T., Igarashi A., Kato H., Ito H. and Sano O.: “Crucial effect of system compliance on the maximum stress estimation in hydrofracturing method : Theoretical considerations and field-test verification”, Earth Planets Space, 58, pp.963-971, (2006).
- 6) Ito, T., Evans, K., Kawai, K., and Hayashi, K.: “Hydraulic Fracture Reopening Pressure and the Estimation of Maximum Horizontal Stress”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 36, pp.811-826 (1999).
- 7) Kehle, R.O.: “The Determination of Tectonic Stresses through Analysis of Hydraulic Well Fracturing”, J. Geophys. Res., 69, pp.259-273 (1964).
- 8) Hardy, M.P. and Asgian, M.I.: “Fracture Reopening During Hydraulic Fracturing Stress Determinations”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 26, pp.489-497 (1989).
- 9) Hayashi K., Sato A. and Ito T.: “*In situ* stress measurements by hydraulic fracturing for a rock mass with many plane of weakness”, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 34, pp.45-48 (1997).
- 10) Cornet, F.H.: “Analysis of Injection Tests for In Situ Stress Determination”, Proc. Wkshp Hydr. Fract. Stress Measur., pp.414-443 (1982).
- 11) Zoback, M.D., Rummel, F., Jung, R. and Raleigh, C. B.: “Laboratory Hydraulic Fracturing Experiments in Intact and Pre-fractured Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 14, p.49-58 (1977).
- 12) 伊藤高敏, 林一夫: “水圧破碎地殻応力計測における縦き裂開口挙動の解析”, 日本機械学会論文集(A 編), 57, pp.1715-1719 (1991).

- 13) 加藤春實, 中村隆浩, 真田祐幸, 杉田裕, 伊藤高敏: “水圧破碎およびボアホールブレイクアウトのデータを用いた初期地圧の算出”, 資源・素材学会 2008 年秋季大会, A31-6 (2008).
- 14) Lee, M.Y. and Haimson, B.C.: “Statistical Evaluation of Hydraulic Fracturing Stress Measurement Parameters”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 26, pp.447-456 (1989).
- 15) 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, pp.18311-18321 (1991).
- 16) Hickman S.H. and Zoback M.D.: “The interpretation of hydraulic fracturing pressure-time data for in situ stress measurement” Proc. Workshop on Hydraulic Fracturing Stress Measurements, 1, pp.103-146 (1982).
- 17) Cornet F.H. and Vallette B.: “In situ stress determination from hydraulic injection test data”, J. Geophys. Res., 89, p.11527-11537 (1984).
- 18) 青柳和平, 石井英一, 近藤桂二, 津坂仁和, 藤田朝雄: “幌延深地層研究所における三軸圧縮試験による岩石強度特性の検討”, JAEA-Research 2015-001 (2015), 46p.

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

(a) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≡ 」は対応関係を示すものである。

表 10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15℃」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

