

平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書

追加ボーリングコアを用いた

断層破碎物質の分析

ボーリングコア及びボーリング孔を用いた応力測定

②布田川断層

(3/3)

京都大学

平成 30 年 3 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。



# 目次

1. 業務概要	1
1.1 業務名	1
1.2 目的	1
1.3 調査場所	1
1.4 調査内容及び数量	1
2. 調査地域の概要	3
2.1 地形概要	3
2.2 地質概要	5
2.3 既往調査結果	8
2.4 総合検討	16
3. 調査手法	18
3.2 断層傾斜方向・角度を推定するための物理探査及び解析	19
3.2.1 微動アレー探査（チェーンアレー、多重アレー）	19
3.2.2 電気探査	37
3.2.3 微動観測	42
3.3 断層傾斜方向・角度を推定するための浅部パイロットボーリング調査	45
3.3.1 機械ボーリング	45
3.3.2 ボアホールカメラ観察	46
3.4 深部ボーリング調査による断層内物質のコア試料採取	53
3.4.1 コア採取区間	53
3.4.2 ボーリング調査地点	53
3.4.3 その他	53
3.5 ボーリングコア試料の詳細観察と地質構造解析	60
3.6 各種物理検層及び解析	60
3.6.1 孔径検層（キャリパ検層）	64
3.6.2 温度検層	65
3.6.3 音波検層	66
3.6.4 電気検層（ノルマル検層）	68
3.6.5 方位傾斜測定	70
3.6.6 孔壁観察（ボアホールテレビュア）	71
3.7 水圧破碎試験及び解析	75
4. 調査結果	84
4.1 調査全体工程	84

4.2	物理探査及び解析結果	89
4.2.1	微動アレー探査（チェーンアレー、多重アレー）	89
4.2.2	電気探査	98
4.2.3	微動観測	100
4.3	パイロットボーリング	102
4.3.1	実施概要	102
4.3.2	ドリリングチャート	104
4.3.3	地質観察結果	107
4.3.4	パイロットボーリングのトピックス的記載事項	111
4.4	深部ボーリング	126
4.4.1	実施概要	126
4.4.2	ドリリングチャート	128
4.4.3	地質観察結果	130
4.4.4	本孔のトピックス的記載事項	135
4.5	ボーリングコア試料の詳細観察結果	141
4.5.1	FDP-1 孔	141
4.5.2	FDP-2 孔	142
4.5.3	FDB-1 孔	143
4.5.4	FDB-1 (R) 孔	144
4.6	各種物理検層及び解析結果	154
4.6.1	実施概要	154
4.6.2	測定結果	156
4.7	水圧破碎試験及び解析結果	177
4.7.1	実施概要	177
4.7.2	コンプライアンス測定試験	178
4.7.3	水圧破碎試験結果	180
4.7.4	型取り試験結果	188
4.7.5	水圧破碎データの決定	195
4.7.6	初期応力の評価	204

## 1. 業務概要

### 1.1 業務名

「平成 29 年度原子力施設等防災再作等委託費（追加ボーリングコアを用いた断層破碎物質の分析）事業」のうち、「ボーリング孔を用いた応力測定②布田川断層（3/3）」

### 1.2 目的

本調査は、原子力規制庁の「平成 29 年度原子力施設等防災対策等委託費（追加ボーリングコアを用いた断層破碎物質の分析）事業」の一環として、平成 28 年 4 月 16 日に発生した熊本地震（本震）に際して活動した布田川断層帯において、深部ボーリング調査を行ったものである。

本調査では、断層評価手法の調査・研究の一環とする目的で断層内物質試料を採取して分析すると共に、ボーリング調査孔を用いた各種物理検層や水圧破碎試験、本孔掘削前の物理探査・パイロットボーリング調査等を行った。

### 1.3 調査場所

熊本県益城郡益城町堂園地区（図 1.1 参照）

### 1.4 調査内容及び数量

本業務の調査内容及び数量を下表に示す。

表 1.1 探査内容と数量

調査項目	詳細項目	調査数量
物理探査	微動アレー探査（チェーンアレー配置）	1 測線以上
	微動アレー探査（多重アレー配置）	1 地点（深部ボーリング箇所）
	電気探査（探査深度 200m）	1 測線（L=0.4km）
	微動観測	1 式
浅部 パイロット ボーリング	φ66～86mm オールコア（斜めボーリング）、ボアホールカメラ観察	L=120m ∠70° L=200m ∠78°
深部 ボーリング	①深部ボーリング調査によるコア試料採取	301.9m 以深オールコア
	②ボーリングコア試料の詳細観察と地質構造解析	オールコア採取区間 カッティングス試料の観察含む
	③各種物理検層及び解析	深度 300 以深の 300m 間 （検層種目は表 3.12 参照）
	④水圧破碎試験及び解析	深度 300～700m間の 3 深度

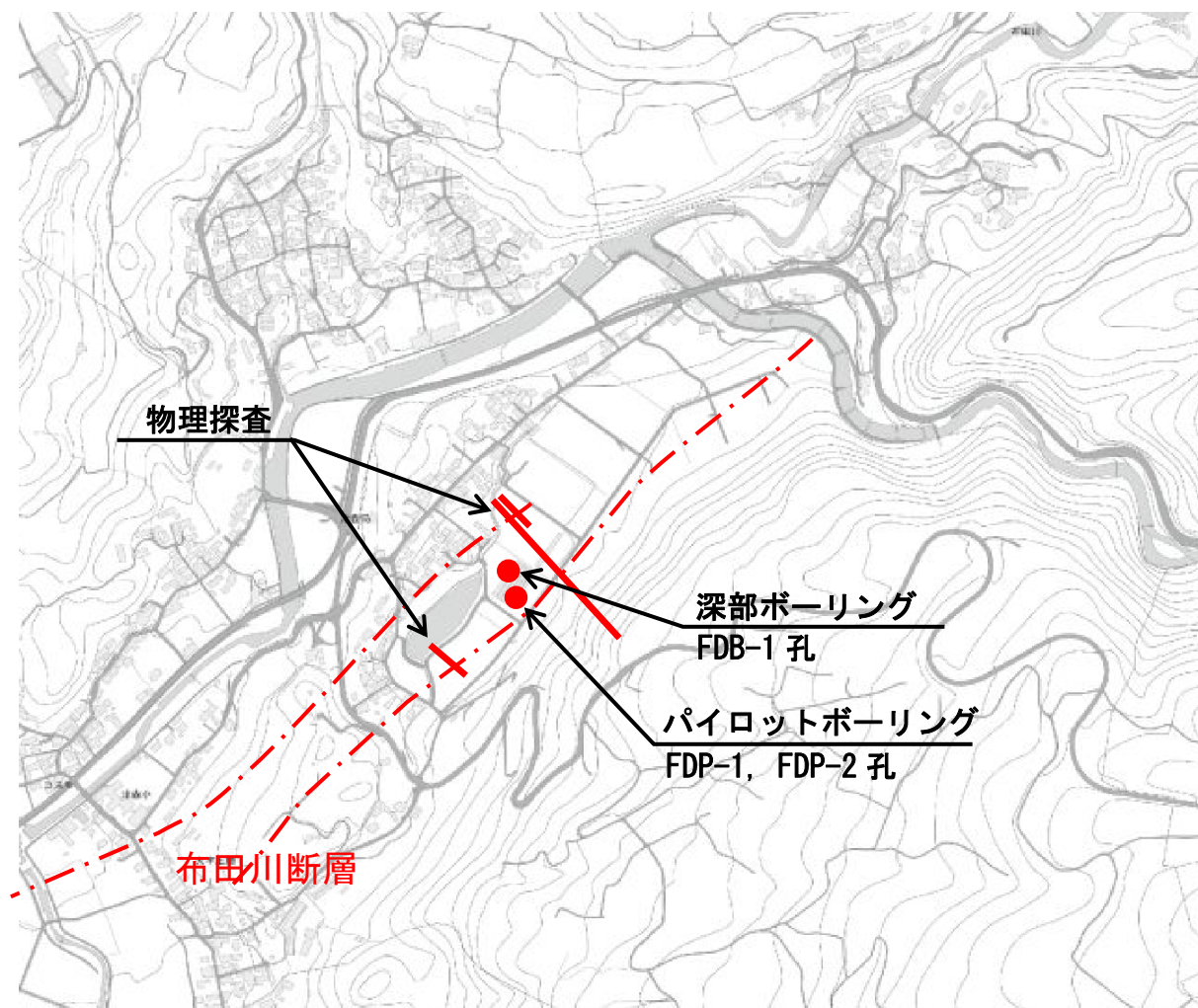


図 1.1 業務地案内図（熊本県益城郡益城町堂園<sup>どうぞん</sup>地区）  
 引用：熊本県発行 1 万分の 1 森林基本図に調査地点を加筆

## 2. 調査地域の概要

### 2.1 地形概要

調査箇所は西流する木山川の左岸側に位置しており、木山川の侵食により形成された沖積低地の農作地を調査箇所としている。

調査箇所の南東には北東-南西方向に伸びる急崖（断層崖）が分布しており、それより南東側は緩やかな丘陵斜面を形成している。また、調査箇所の北西には北東-南西方向に長軸を持つ楕円形の「大蛇ヶ池」と呼ばれる池が分布しており、池と木山川の間は小規模な貫通丘陵を成す。木山川北西部（右岸側）は、高標高部の火砕流台地へ続く丘陵斜面を形成している。

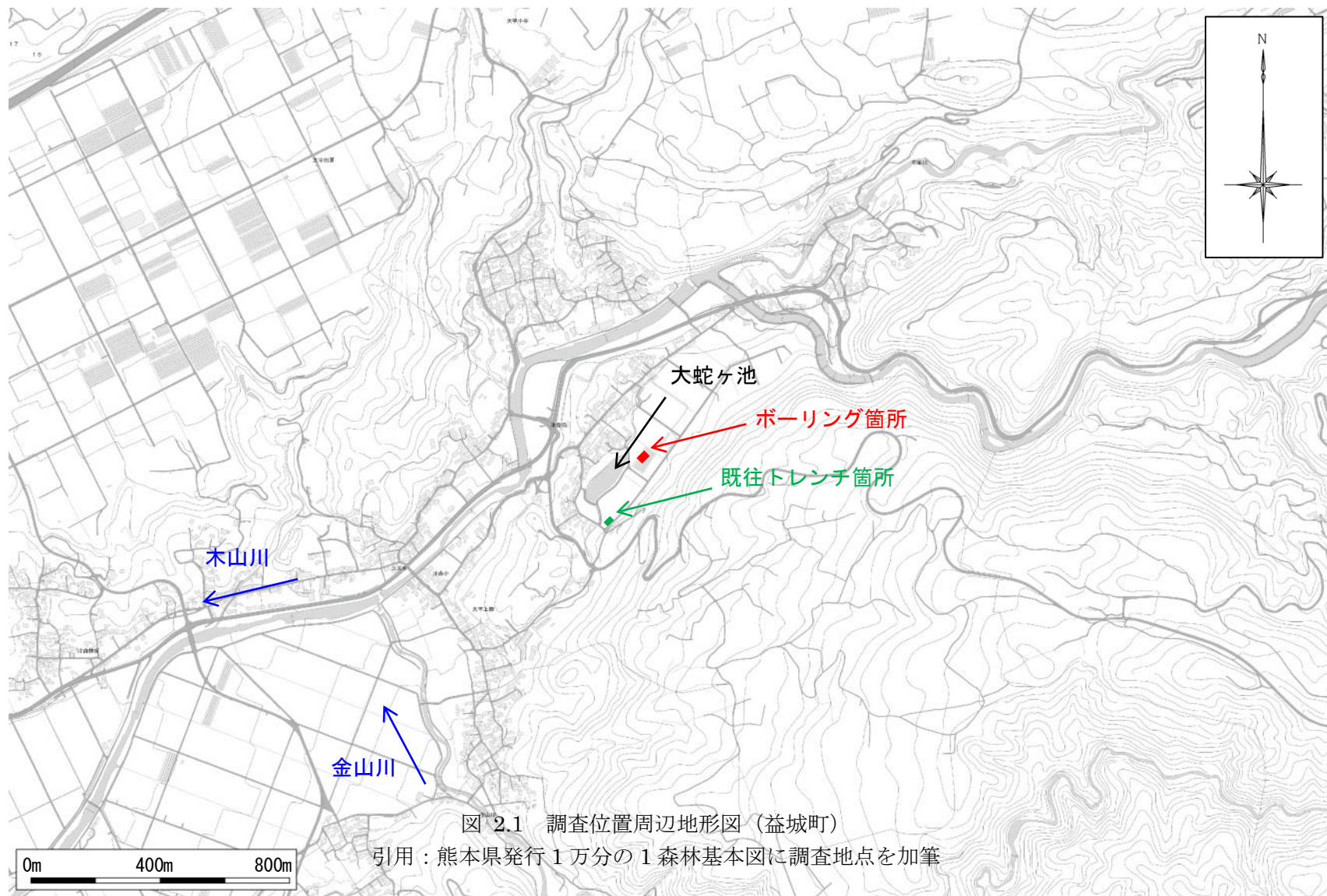


図 2.1 調査位置周辺地形図（益城町）

引用：熊本県発行 1 万分の 1 森林基本図に調査地点を加筆

## 2.2 地質概要

調査地域周辺の地表には主に軽石及び凝灰角礫岩、溶結凝灰岩から成る火山碎屑物が分布しており、部分的に安山岩質溶岩（高遊原溶岩）に覆われる。測線上の低地及び木山川沿いには、河川堆積物（低地堆積物）が分布する。

調査地点の南方を流下する金山川沿いには、下陳礫層や津森層等の第四紀の河川～湖成堆積物ならびに、千枚岩や黒色片岩から成る木山変成岩類が分布し、断層を境に南側には蛇紋岩、さらに南には中生代～古生代の御船層群が分布している。

なお、調査地周辺の深部地質構造や基盤岩については、既往調査の事例が乏しく、詳細は不明である。

今回、調査対象としている断層は、既往の地質図上ではボーリング箇所より南東側の急崖に沿って北東-南西方向に伸びているが、今回の地震断層は低地内の農地にも発生しており、若干位置がずれている。

また、一帯の地質分布は、阿蘇山の火山活動との因果関係が極めて強い。阿蘇山の火山活動に関する総括図を図 2.2 に示す。



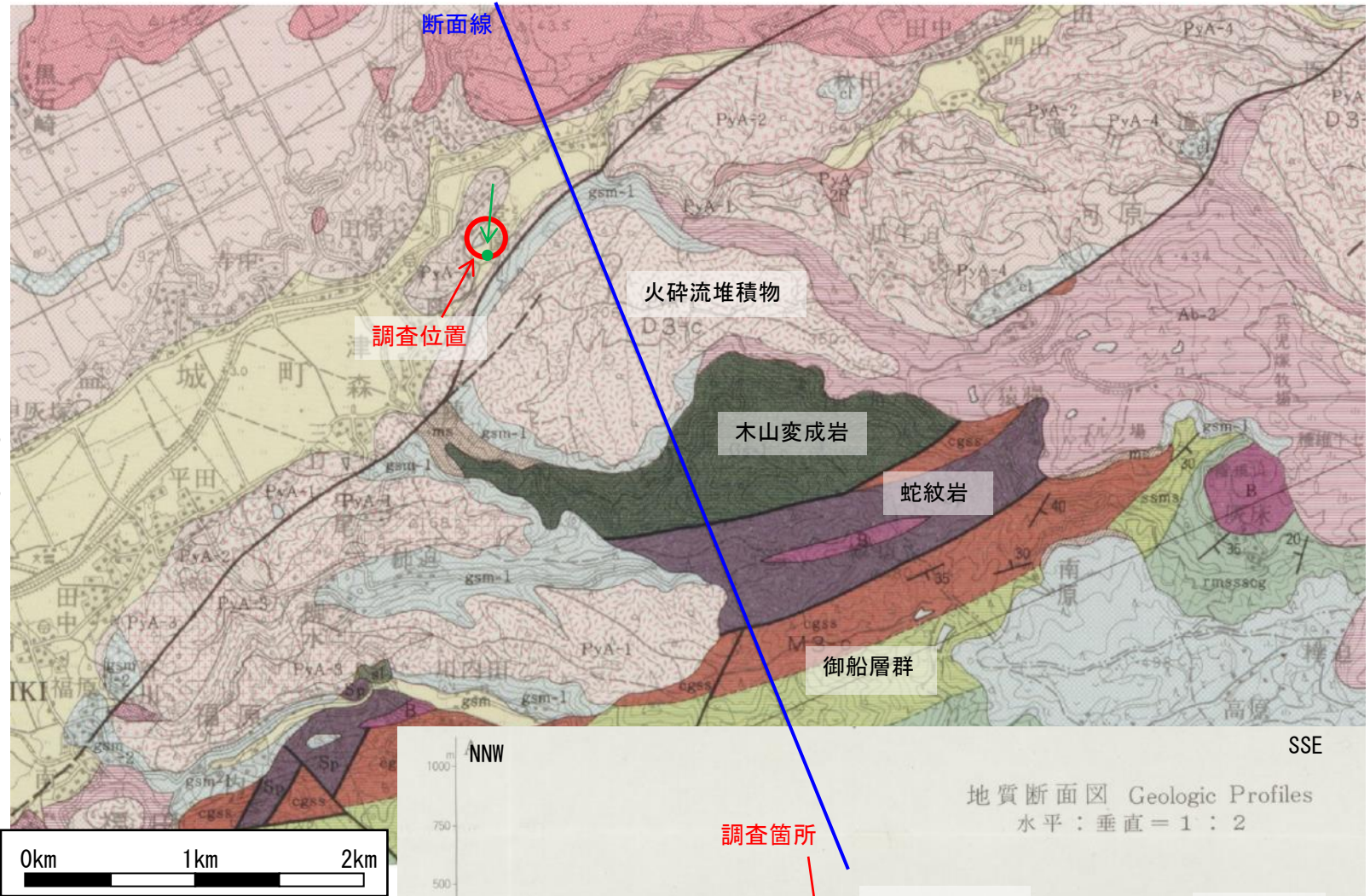


図 2.2 調査位置周辺地質図 (益城町)  
 引用：5 万分の 1 表層地質図「御船」  
 (国土交通省国土政策局公表データ)



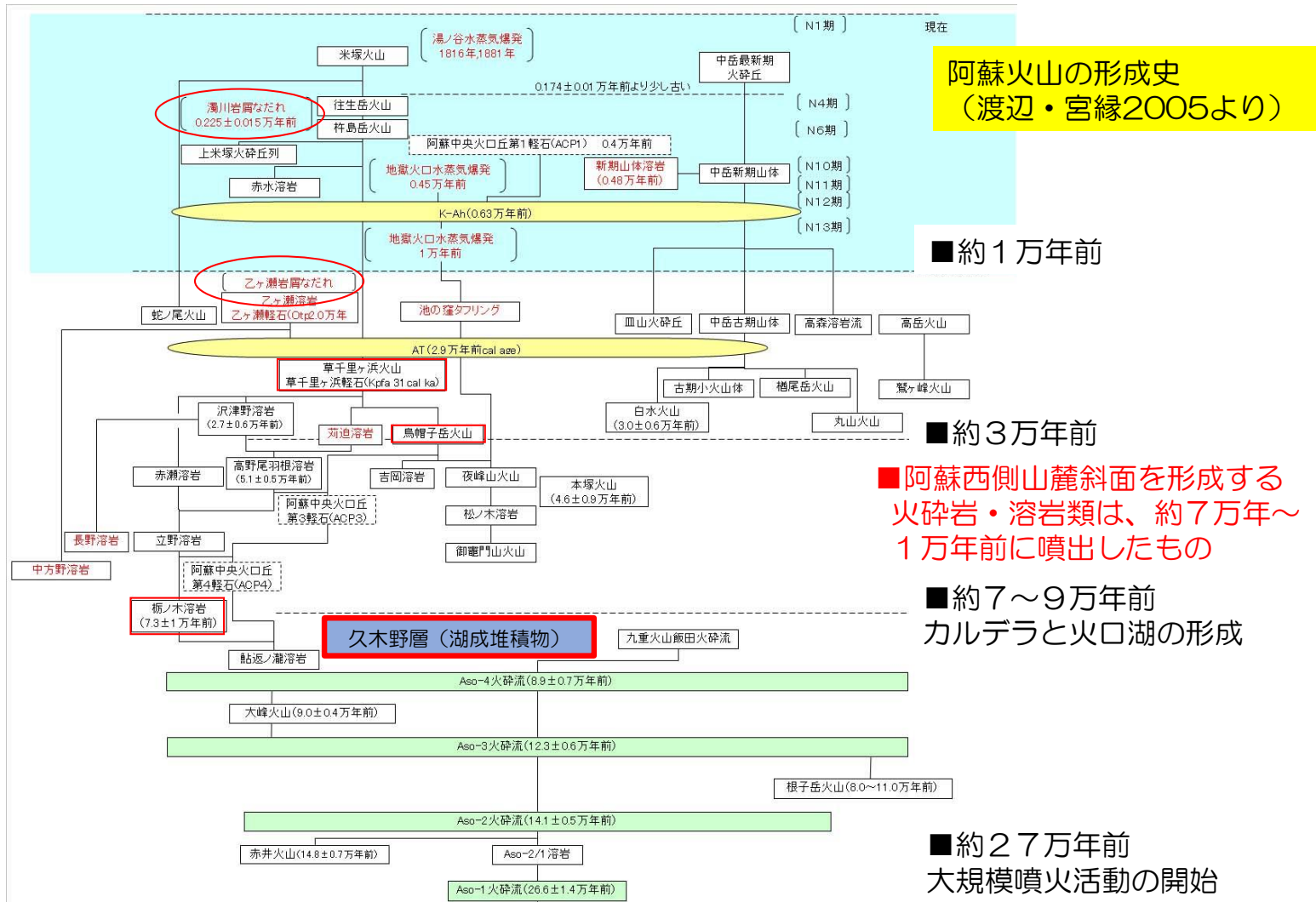


図 2.3 阿蘇火山の形成史

### 2.3 既往調査結果

#### ・電気探査

既往電気探査により求められた比抵抗二次元断面における地質構造解釈図を図 2.4 に示す。地表において横ずれ変位が認められた箇所を境にして断面の北西側と南東側では比抵抗値に大きな差異が確認され、断層による地層のずれが発生していることが想定される。

断層より南東側の高標高部では地表（標高 70m 付近）から 40m 付近で 300( $\Omega \cdot m$ )以上の高比抵抗部が分布し、礫を主体とする堆積物（段丘堆積物）に相当すると考えられる。その下位には 300 ( $\Omega \cdot m$ )より比抵抗が低い層が分布しており、弱溶結の火砕流堆積物に相当すると考えられる。

一方、断層の北西側では、500( $\Omega \cdot m$ )以上の高比抵抗部は無く、地表から 10m 程度は 300~200( $\Omega \cdot m$ )の比抵抗を示す層が分布しており礫~砂から成る河床堆積物に相当すると考えられる。この層は大蛇ヶ池に向かい階段状に深くなる傾向があり、地盤内で地溝帯状の構造を呈しているものと想定される。これら表層付近に分布する堆積層より以深には 140( $\Omega \cdot m$ )以下の低比抵抗帯が分布しており、細粒分を主体とする非溶結の火砕流堆積物に相当すると考えられる。さらにその下位では、160~100( $\Omega \cdot m$ )と比抵抗が上位層よりやや高くなっているが、弱溶結した火砕流堆積物が分布しているものと考えられる。

断層周辺では比抵抗が低くなる傾向があり、断層による影響帯が形成されているものと想定される。

また、断層周辺の既往トレンチ掘削箇所付近において、比抵抗 140~80( $\Omega \cdot m$ )の低比抵抗を示す層が上位方向に盛り上がる箇所がある。これは、図 2.5 に示すトレンチ内に見られた細粒分に富む赤色帯状堆積物に該当する可能性がある。

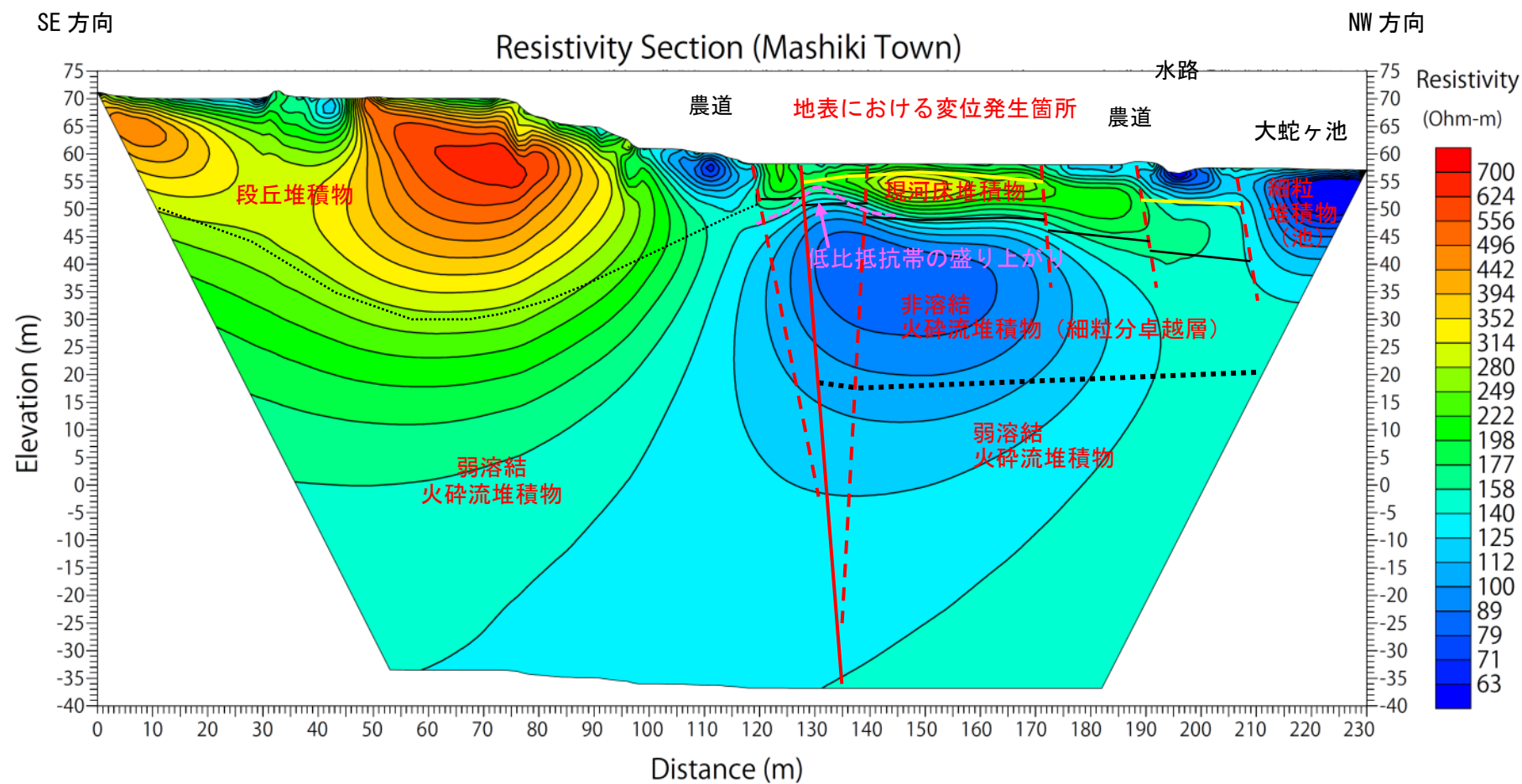
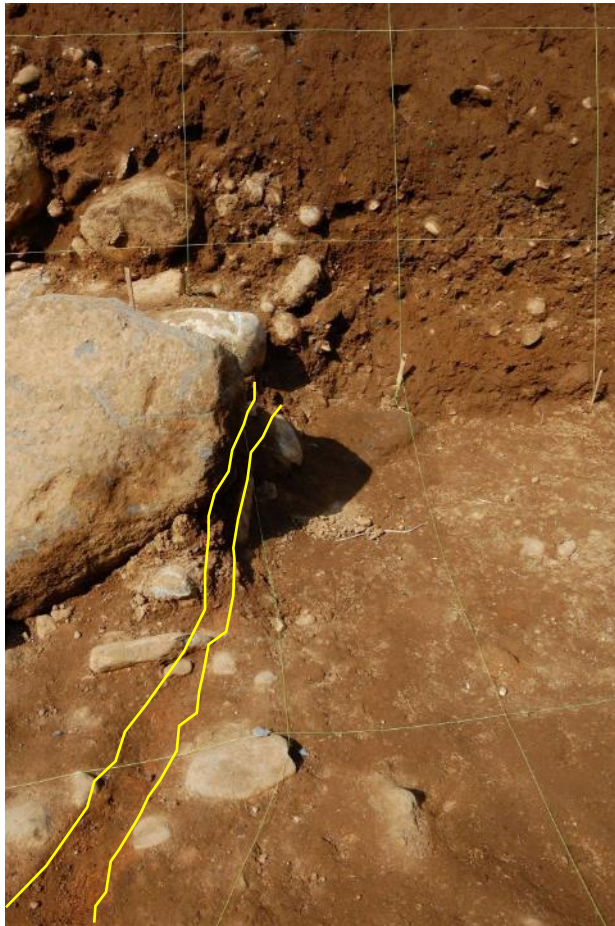


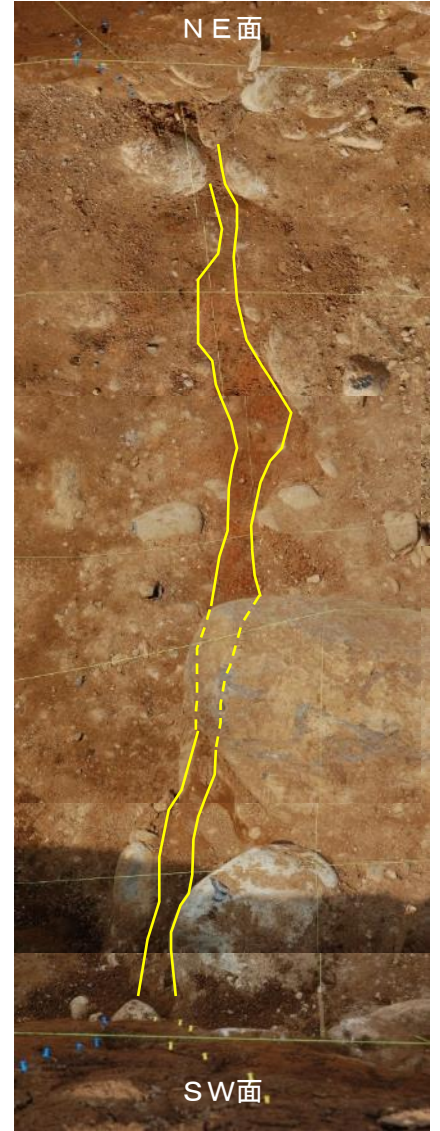
図 2.4 電気探査による比抵抗二次元断面図における地質構造解釈図



NE面



SW面



底面

図 2.5 既往断層トレンチ内での赤色帯状堆積物分布状況  
底面では、断層沿いに分布するが、NE面及びSW面では分布が不明瞭であり、壁面上位へ連続しない。

・地磁気地電流探査 (AMT 法)

地磁気地電流探査により求められた比抵抗二次元断面図を図 2.6 に示す。

電気探査結果と同様に高角の断層を境に比抵抗値に差異が生じている。

断層帯より南東方向の標高が高い部分には地表から段丘堆積物が分布しているものと想定される。その下位には比抵抗  $200\sim 300(\Omega \cdot m)$  のを示す領域が標高-100m 付近まで連続するが、弱溶結火砕流堆積物に相当すると考えられる。さらにその下位の標高-100~-700m 付近には高比抵抗値を示す領域があり、基盤岩が分布するものと想定される。さらにその下位には比抵抗値  $20\sim 50(\Omega \cdot m)$  の低比抵抗を示す領域とその下位には  $50\sim 400(\Omega \cdot m)$  のやや高い比抵抗を示す領域があるが、基盤岩中の岩相変化によるものであると推察される。

一方、断層帯の北西側では、表層の  $75\sim 100(\Omega \cdot m)$  程度の比抵抗値を示す領域は、河床堆積物等に相当すると考えられ、それより以深の標高  $0\sim -300m$  には火砕流堆積物が分布しているものと考えられる。標高  $0\sim -100m$  付近に比抵抗値  $0\sim 40(\Omega \cdot m)$  の低比抵抗帯が分布しているが、断層活動により地盤が乱され、断層破碎帯や擾乱帯がとなっている可能性がある。標高-300 以深では基盤岩が分布するものと想定され、比抵抗の分布は断層を境に南東側と若干の変位が見られるが、深度方向へは概ね同様の地質構造を示すと推察される。



# Resistivity Section (Mashiki)

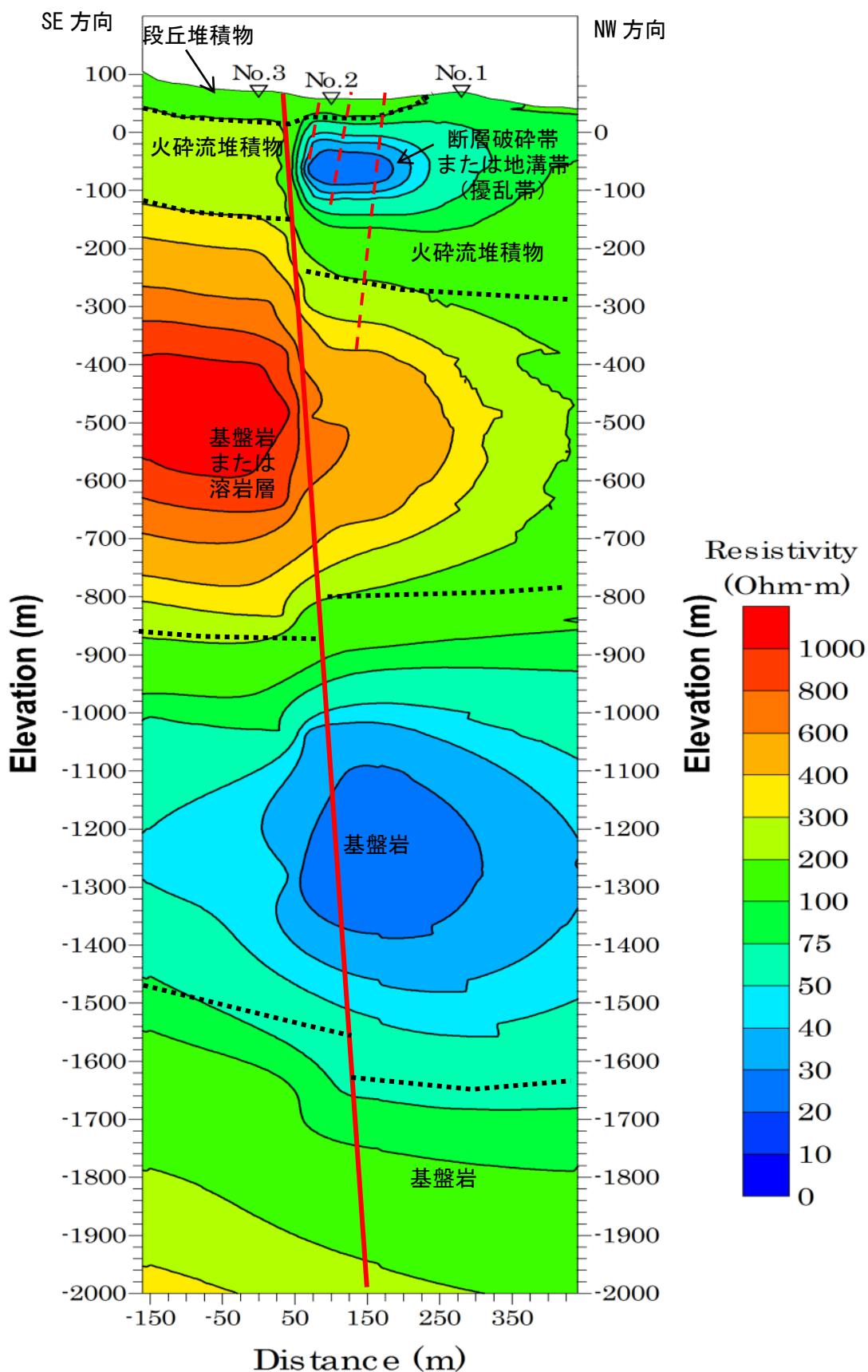


図 2.6 地磁気地電流探査による比抵抗二次元断面図における地質構造解釈図

・微動アレー探査

S波速度構造は地層によって特定の速度を示すことが知られている。

表 2.1 は、これまでに日本の平野部で実測された S 波構造の測定例である（地震防災を目的とした大深度ボーリング孔における S 波検層による値）。これらが示しているものは主に堆積岩の速度であるが、新第三紀層の S 波速度は、中新世が 1.0km/s 以上、鮮新世が 0.5km/s 以上、更新世が 0.5km/s 以下であることがわかる。

表 2.1 日本の平野部における S 波速度構造(単位 : km/s)

Geological Series	Kanto			Sanin	Chugoku	Shikoku	Kinki	
	Fuchu	Iwatsuki	Shimoosa				Osaka	Kyoto
Holocene								
Pleistocene	Late	0.4	0.4					
	Middle	0.5-0.7	0.7	0.7	0.88	0.55	0.55	0.4-0.9
	Early							
Pliocene	Late							0.6-0.9
	Early							
Miocene	Late	1.2		1.1	1.3-1.6			
	Middle		1.2					
	Early	1.5						
Paleogene								
Basement	2.4	2.5	2.5	3.5	3.5	3.5	2.5-3.0	1.9-2.5

各地点における S 波速度構造図を観測点の相対的な標高と地形を考慮し配置した S 波速度分布図を図 2.7 に示す。

MSK1 及び MSK2 に比べて MSK3 の S 波速度構造は、同じ速度層が深い位置に見られ、測線の中央部で基盤岩を含め地層が落ち込んでいることがわかる。今回の地震で地表変位が発生していたのは MSK2 と MSK3 の間の MSK3 に隣接する箇所であるが、S 波速度分布から MSK3 と MSK1 の間にも地層のギャップを発生させている断層が存在していることも推定される。

S 波速度の分布から、地表からの深度 200m 程度から基盤岩が分布すると想定されるが、AMT 探査結果と整合的である。

また、地表変位が生じていた箇所を含む範囲で実施したチェーンアレー探査によって得られた S 波速度分布図を図 2.8 に示す。

地表に範囲が生じている箇所では、地下深部まで低い位相速度が連続しており、周囲との差が明瞭に区別できる。同様に Block2 においても深部まで低い位相速度が連続する箇所があり、断層破碎帯もしくは亀裂帯が存在している可能性がある。

このように、地表において断層位置が不明な場合において、事前断層位置を推定できる探査方法であると言える。

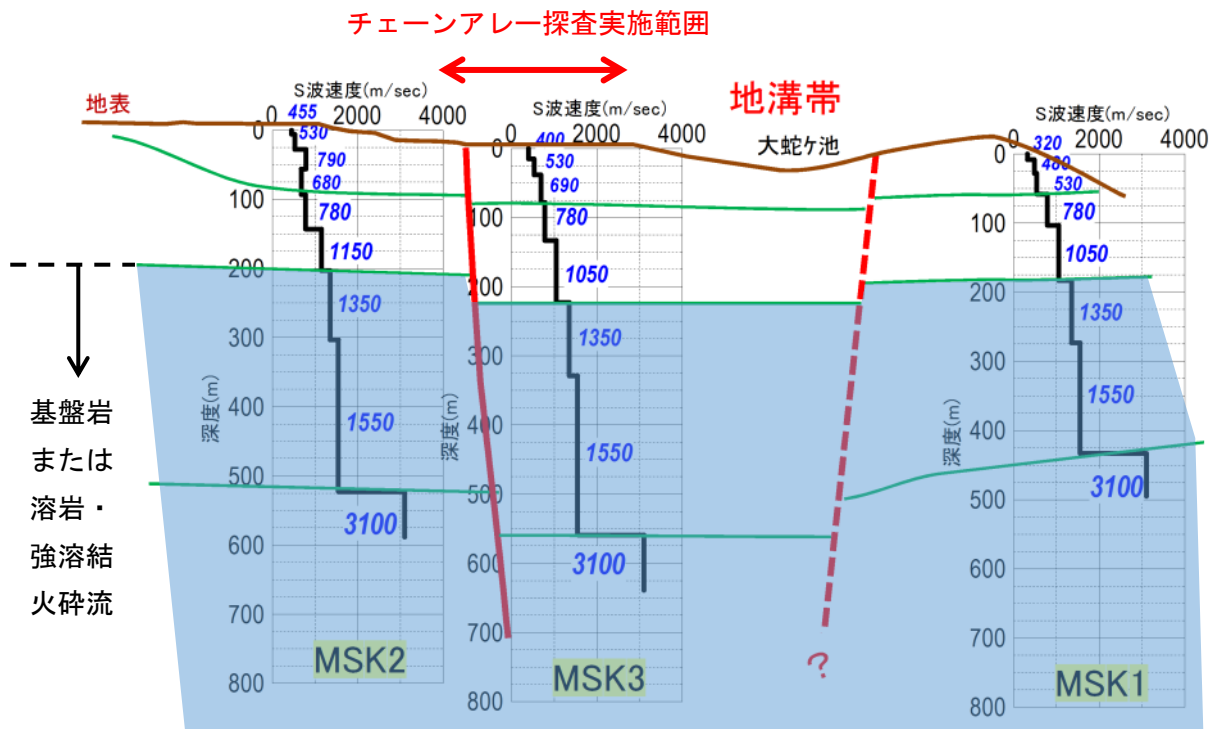


図 2.7 多重アレー計測によるS波速度分布の断層横断方向の対比



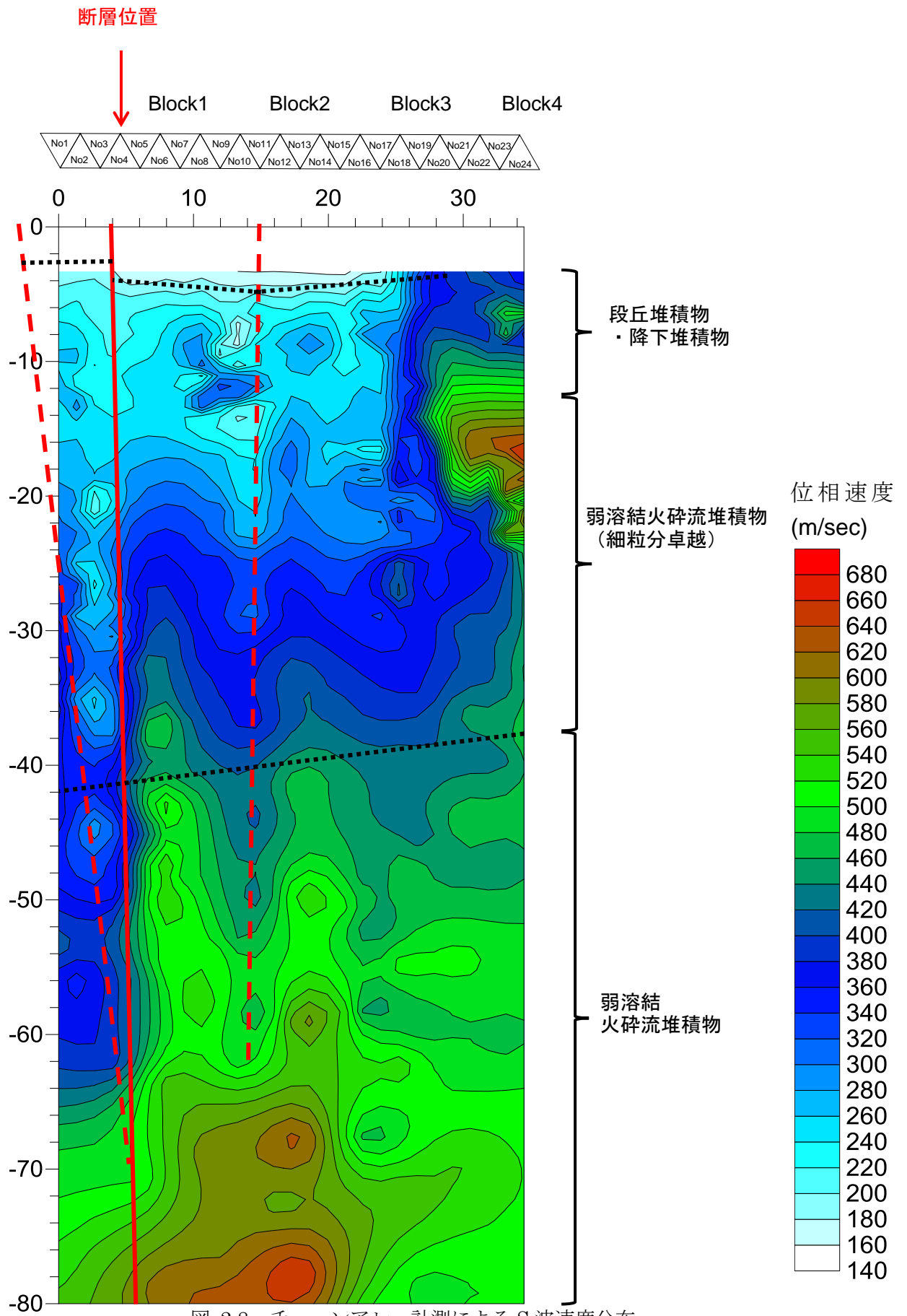


図 2.8 チェーンアレー計測による S 波速度分布

## 2.4 総合検討

AMT 探査結果の比抵抗二次元断面図に微動アレー探査結果の S 波速度分布図を重ね合わせたものを図 2.9 示す。

今回の地震において発生した地表面の変位箇所においては、各探査結果より地下に連続する断層が存在することが想定される。また、比抵抗二次元探査断面図及び S 波速度分布図それぞれから、既述の通り探査測点 No.1 と No.2 の間にも地層を変位させている断層が存在していることが推察される。

地表面から段丘堆積物及び河床堆積物、火砕流堆積物の順に概ね水平に堆積しており断層によって地層が変位しているものと想定される。また、S 波速度の値において、1350(m/s)以上の速度を有する層は基盤岩（木山変成岩）であると推察され、基盤岩中での S 波速度の違いは、岩相の変化によるものと考えられ、標高-100~-400m 付近では緑色片岩を主体とする層、標高-400~-750m 付近では硬質の火成岩もしくはホルンフェルス及び石灰岩層、標高-750 以深では千枚岩又は緑色元主体層が分布すると推察される。

# Resistivity Section (Mashiki)

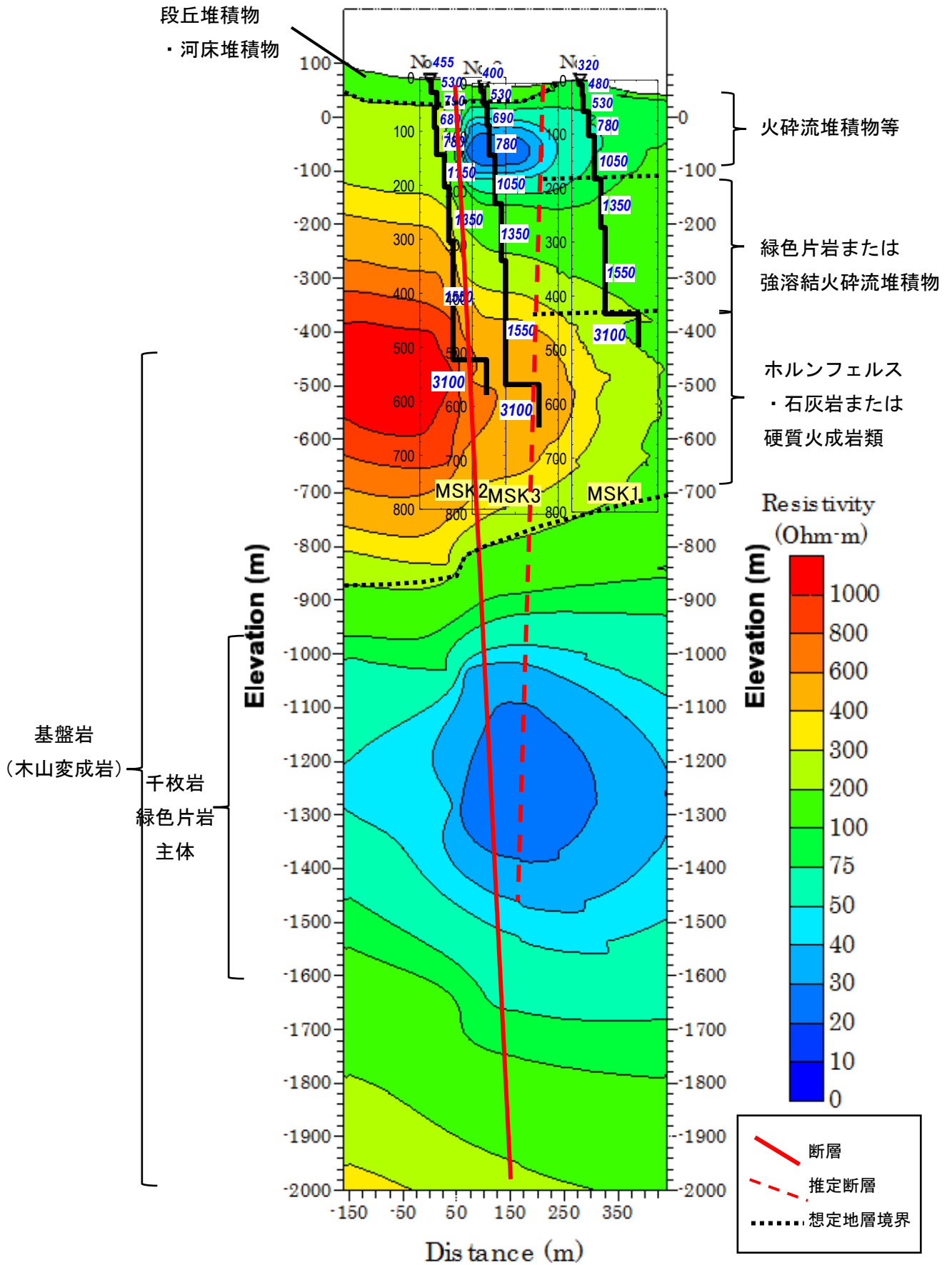


図 2.9 比抵抗分布図(AMT 探索結果)及びS波速度分布(多重アレー)重ね合わせ図

### 3. 調査手法

#### ①調査の流れ

本調査の流れは以下の通りである。

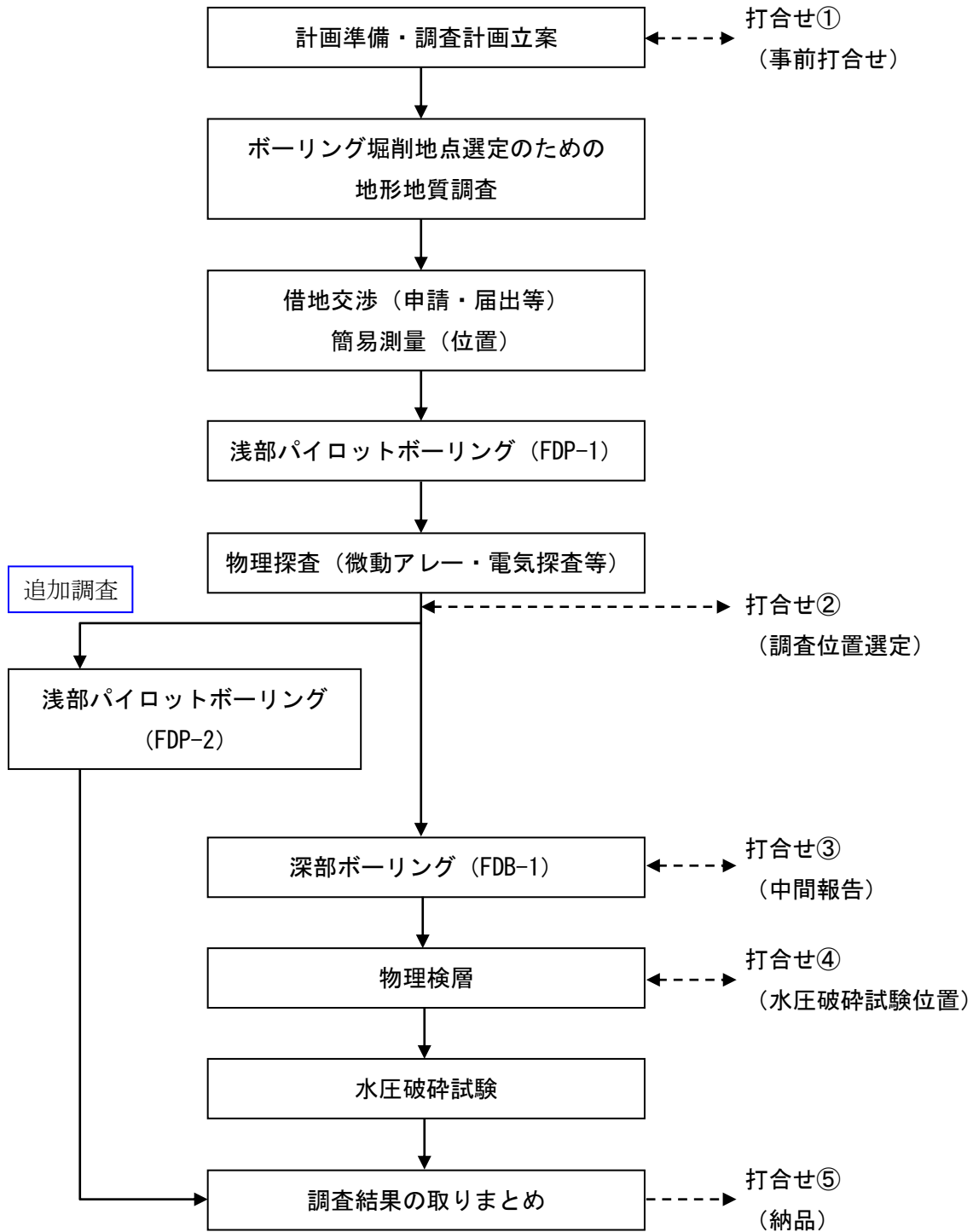


図 3.1 調査フロー

### 3.2 断層傾斜方向・角度を推定するための物理探査及び解析

調査対象断層周辺において、地下のS波速度構造を把握し、事前に断層の傾斜方向ならびに角度を推定する目的で、微動アレー探査（チェーンアレー、多重アレー）と電気探査、ならびに微動観測を実施した。探査に係わる深度、位置等については、既往調査結果や地形、地質状況・測線長を考慮し決定した。

#### 3.2.1 微動アレー探査（チェーンアレー、多重アレー）

##### (1) 目的

微動アレー探査は、地表に展開した複数の地震計で人為的な活動ならびに自然由来の微動を観測するものであり、チェーンアレー配置による測定を実施して、断層破碎帯に相当する低速度帯を検出することを目的に実施した。

##### (2) 探査原理

地震波は、図 3.2 に示す通り複数存在し、伝搬現象は図 3.3 に示す通りそれぞれ異なっている。P 波、S 波の実体波は、物質内を伝播する波動であり、境界波は物質の境界を伝播する波動に分類される。表面波は、自由面に接する物質内を伝播する境界波の一種であり、地球表面においてもレイリー波やラブ波という表面波が存在する。

実体波と境界波の大きな違いは、実体波は分散性を有しないが、境界波は分散性を有する。波動の分散性とは、周波数によって波動の伝播速度が変わることを意味する。

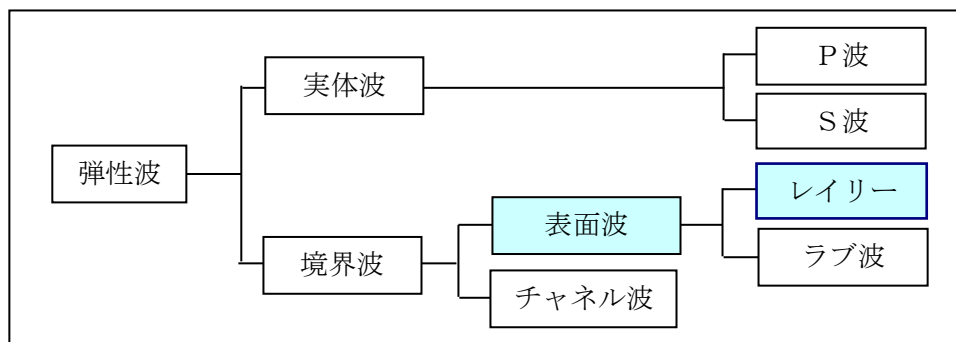


図 3.2 地震波の種類

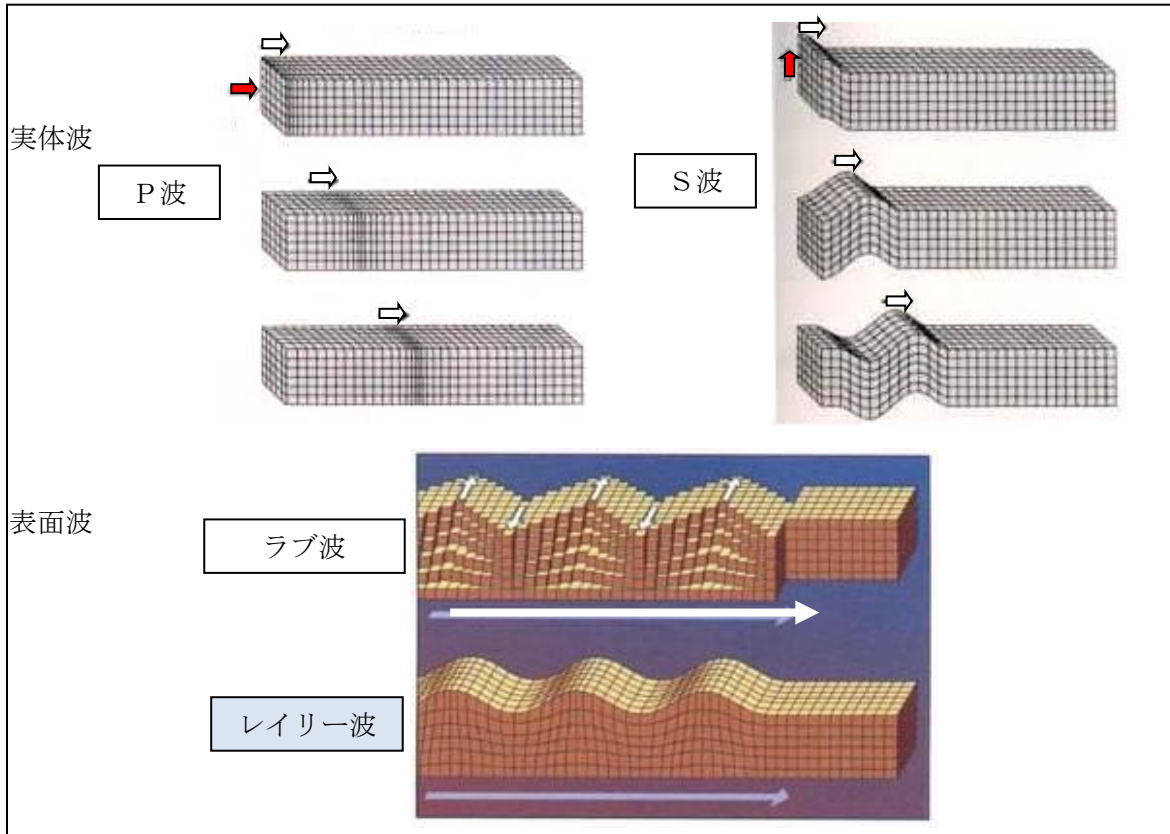


図 3.3 波動の模式図

### 1) 地表の微動と微動探査の原理

地表には、人為的な振動や自然に起因する様々な波動が常時伝播しており、特に震源を特定できない微小な振動を微動と称している。この微動は、実体波や表面波からなり、微動の波動現象には、発生源、伝播経路、地下構造などによる様々な影響因子が含まれる。

人為的な微動は一般的には周期 1 秒以下で車輛振動等に起因し、振幅に明瞭な日変化が認められる特徴がある。自然現象に起因する波動は周期 1 秒以上の波で、主として気圧変化に伴う風や波浪等の自然現象が発生源であり、それらの現象の規模によって振幅は変化する (図 3.4)。

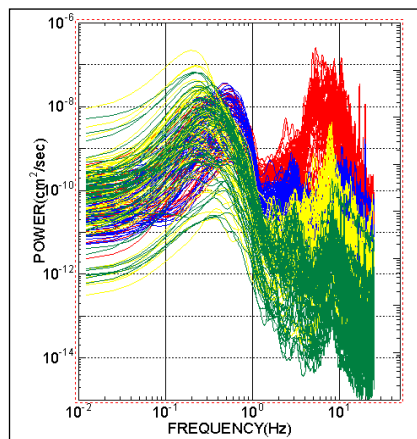


図 3.4 微動のスペクトル

地表の微動は多くの場合、表面波が優勢である。表面波は実体波と異なり、地盤を伝わる速さが周波数によって変化する性質（位相速度の分散現象）がある。この表面波の分散特性（変化のパターン）は、地下のS波速度構造の違いによって異なり、表面波の周波数と伝播速度の関係から地下構造が推定できる（図 3.5）。

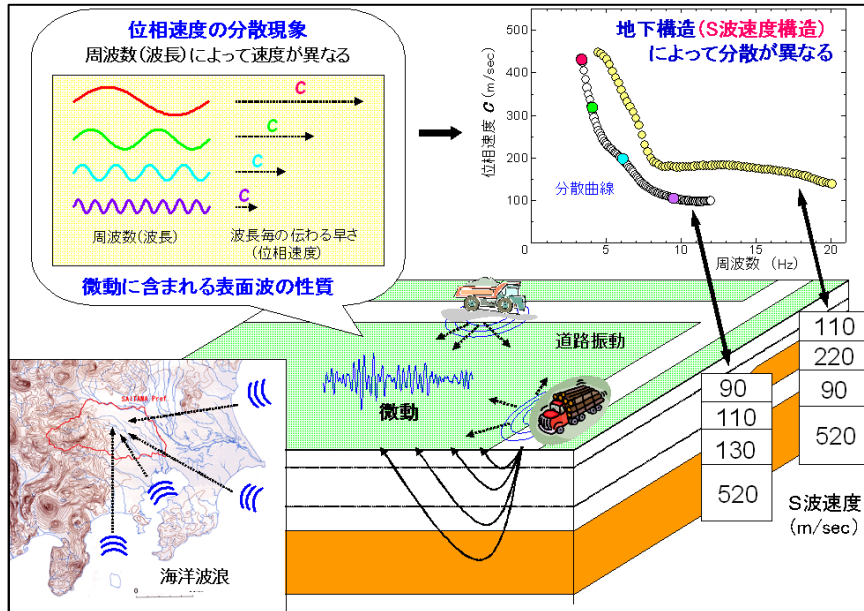


図 3.5 表面波探査の模式図

## 2) 探査深度とアレーサイズ

レイリー波の波長と探査深度の関係を、図 3.6 に示す。縦軸は波長/深度で、上下成分では波長の 1/2 深度内にエネルギーが集中する。波長が短い波動は浅部の、波長が長い波動は深部の構造を反映している。通常、探査深度はアレーサイズ(半径)の 5~10 倍程度であるが、軟弱地盤では「S 波速度が小さい→波長が長い」ので、深い深度まで探査する場合はアレーサイズを大きくする。

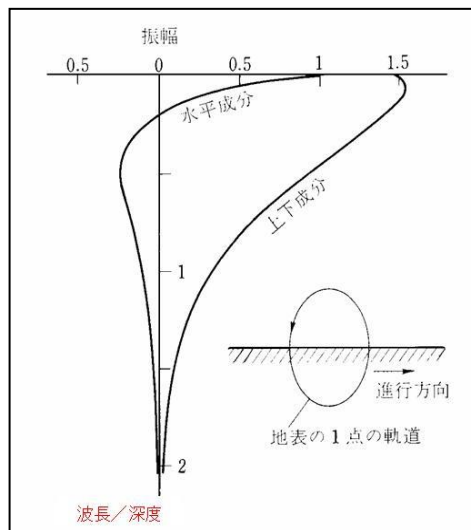


図 3.6 レイリー波の波長と深度の関係

### (3) 探査手順

微動探査は、以下の手順で実施する(図 3.7)。

#### ①ハドルテスト

探査に先立ち、観測地の微動の特徴と各微動計の特性の一致の確認を行う。

#### ②微動アレー観測

様々な方向から伝播してくる微動を対象とし、地表に面的に展開した微動計で観測する。

#### ③S波速度構造の推定

1) 観測した微動から、空間自己相関係数を算出する。

2) インバージョン解析によりS波速度構造モデルを決定する。

i. 空間自己相関係数の観測値と理論値をフィッティングする。

ii. ミスフィット値を基に採用する理論空間自己相関係数を決定する。

iii. 決定した理論空間自己相関係数から分散曲線(位相速度-周期の関係)を算出する。  
分散曲線からS波速度構造モデルを算出する。



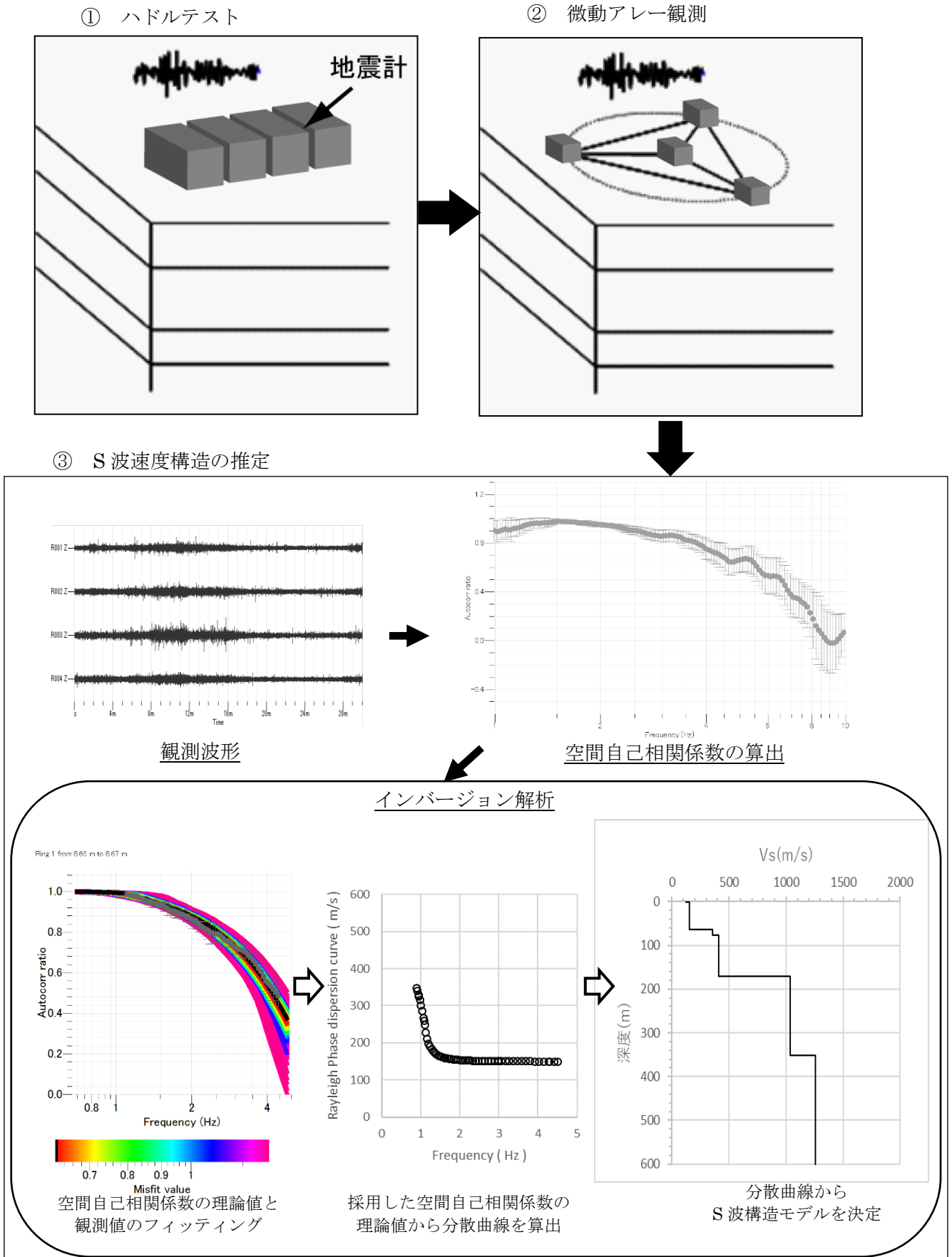


図 3.7 微動アレー探索の手順

### 3) ハドルテスト

微動アレー探査は、各微動計で観測した波形の相関を求める。したがって、各微動計の特性が一致していなければならない。

探査に先立ち、測定地においてハドルテストを実施する。ハドルテストで取得される微動波形（図 3.8）からパワースペクトル、位相特性、コヒーレンスを計算し微動計の相関性を確認する（図 3.9～図 3.11）。

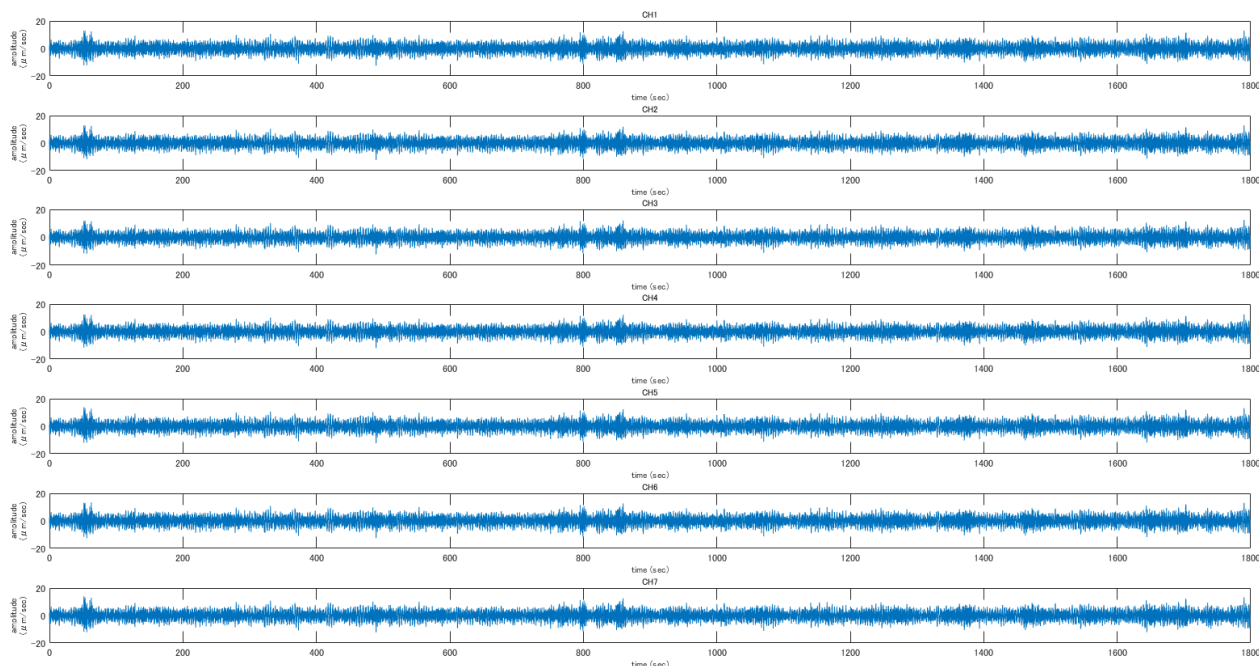


図 3.8 観測波形

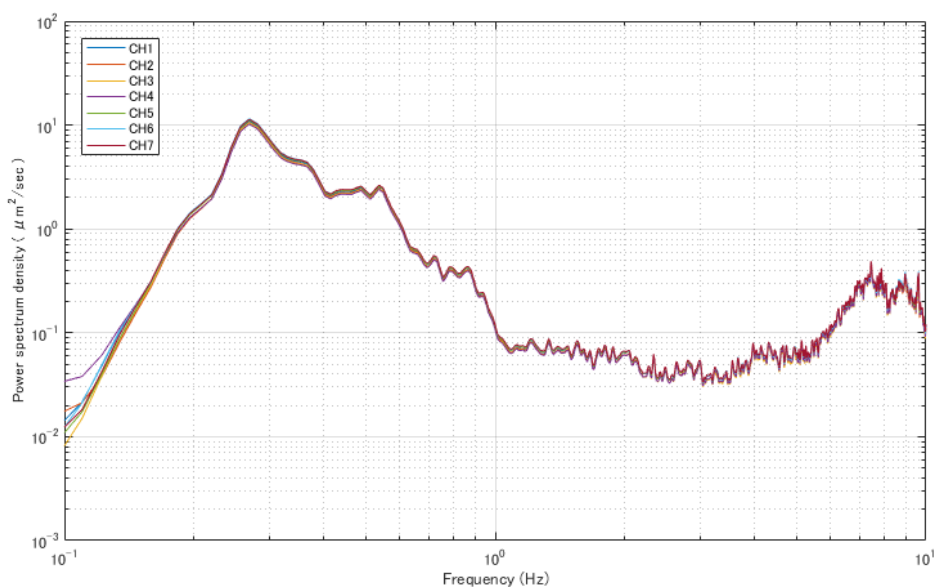


図 3.9 パワースペクトル

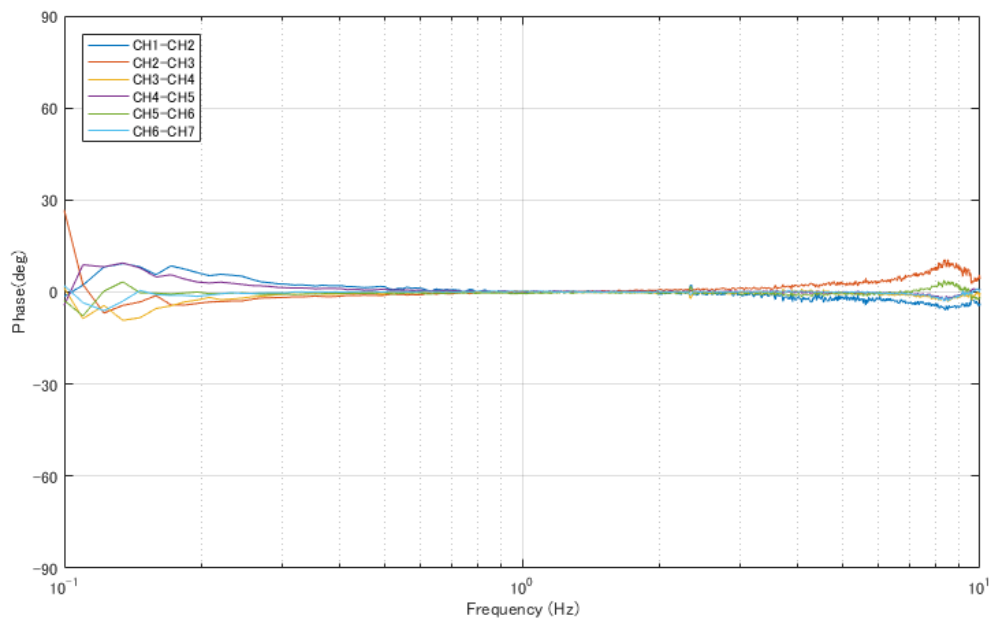


図 3.10 位相特性

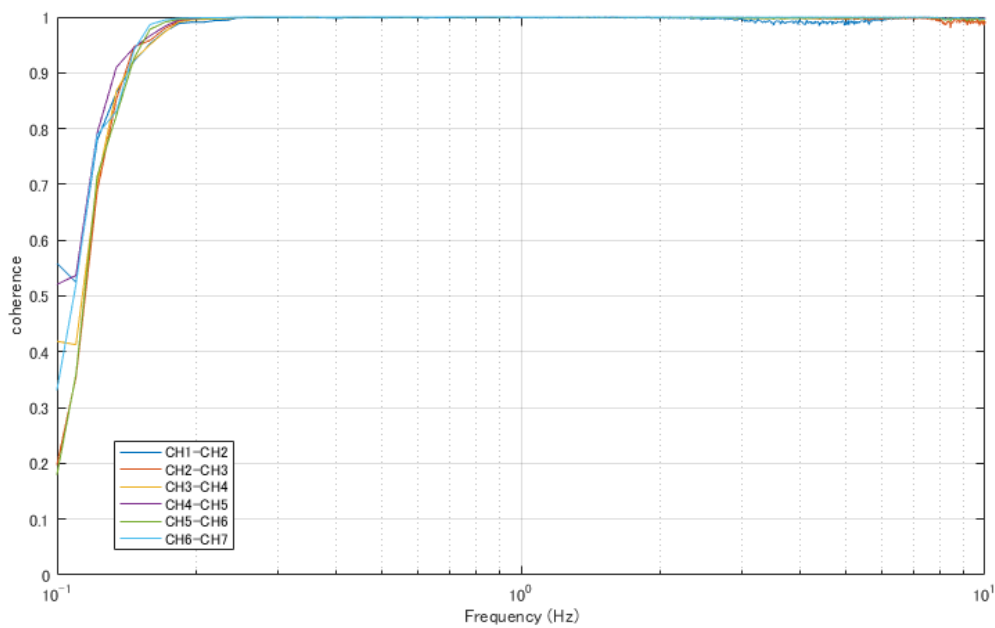


図 3.11 コヒーレンス

#### 4) 微動アレー観測

微動探査では、一般的に表面波の分散特性の抽出に FK 法(周波数-波数法)や空間自己相関法 (Spatial Auto Correlation Method ; 以下 SPAC 法,) が用いられる (岡田他、1990<sup>1)</sup>)。

SPAC 法は FK 法と比較して少ない点数で深くまで探査ができるため、本探査では SPAC 法を適用する。SPAC 法では一つの微動計を中心として、同心円上に等間隔に配置して観測する。微動計のアレー配置は、探査目的や探査深度、地盤状況に合わせて配置する。微動探査の観測配置は、深部構造探査を対象に正三角形アレー配置 (中心点及び頂点に微動計を配置)、浅部構造の 2 次元探査としてチェーンアレー配置を用いる (図 3.12)。

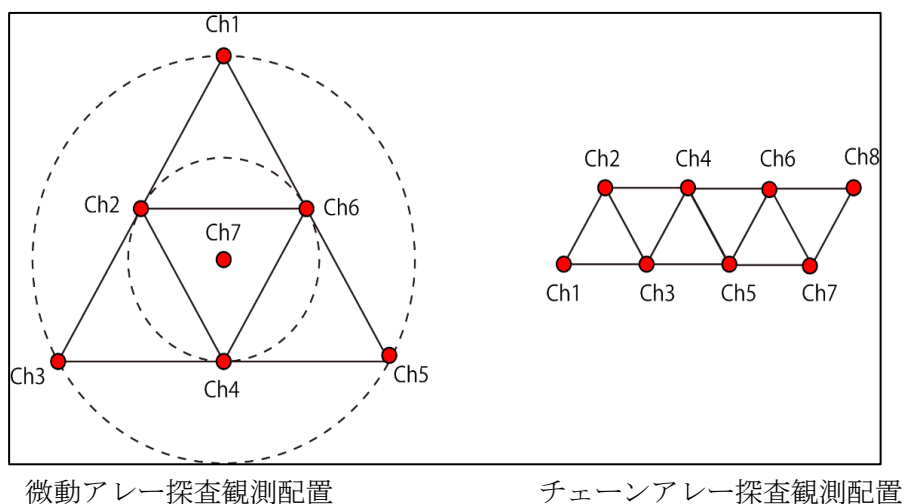


図 3.12 微動計の配置

#### 5) S 波速度構造の推定

観測により得られた微動記録を用いて、SPAC 法を用いて空間自己相関係数を抽出し、位相速度の分散曲線の計算と S 波速度を推定する。空間自己相関係数の抽出から S 波速度構造の推定までの一連のデータ処理は Wathelet、M (2005)<sup>2)</sup>の方法を使用する。

##### ①観測記録から解析区間の選定

解析に使用するデータは、観測記録から使用に適さないノイズの区間を除外し、STA/LTA (LongTimeAverage/SortTimeAverage) 法を用いて STA/LTA 比が小さい区間を解析対象区間 (の緑色四角の区間) として抽出する。解析区間は周波数に応じて解析区間の時間長を変化させる (図 3.13、図 3.14)。

1 岡田廣、松島健、森谷武男、笹谷努 (1990) : 広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法、物理探査、43、402-417.

2 Wathelet, M. , D. Jongmans, and M. Ohrnberger (2005). Direct Inversion of Spatial Autocorrelation Curves with the Neighborhood Algorithm. Bulletin of the Seismological Society of America, 95, 1787--1800.

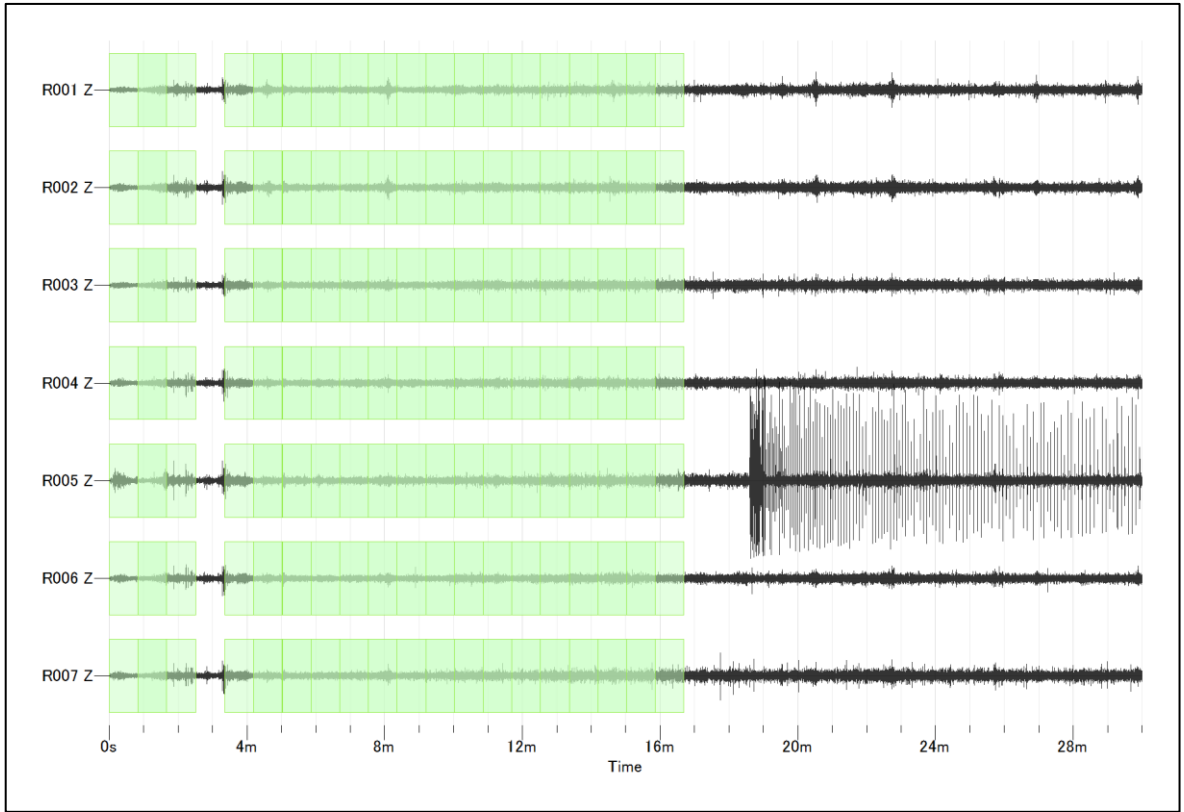


図 3.13 解析区間の選定 (1Hz)

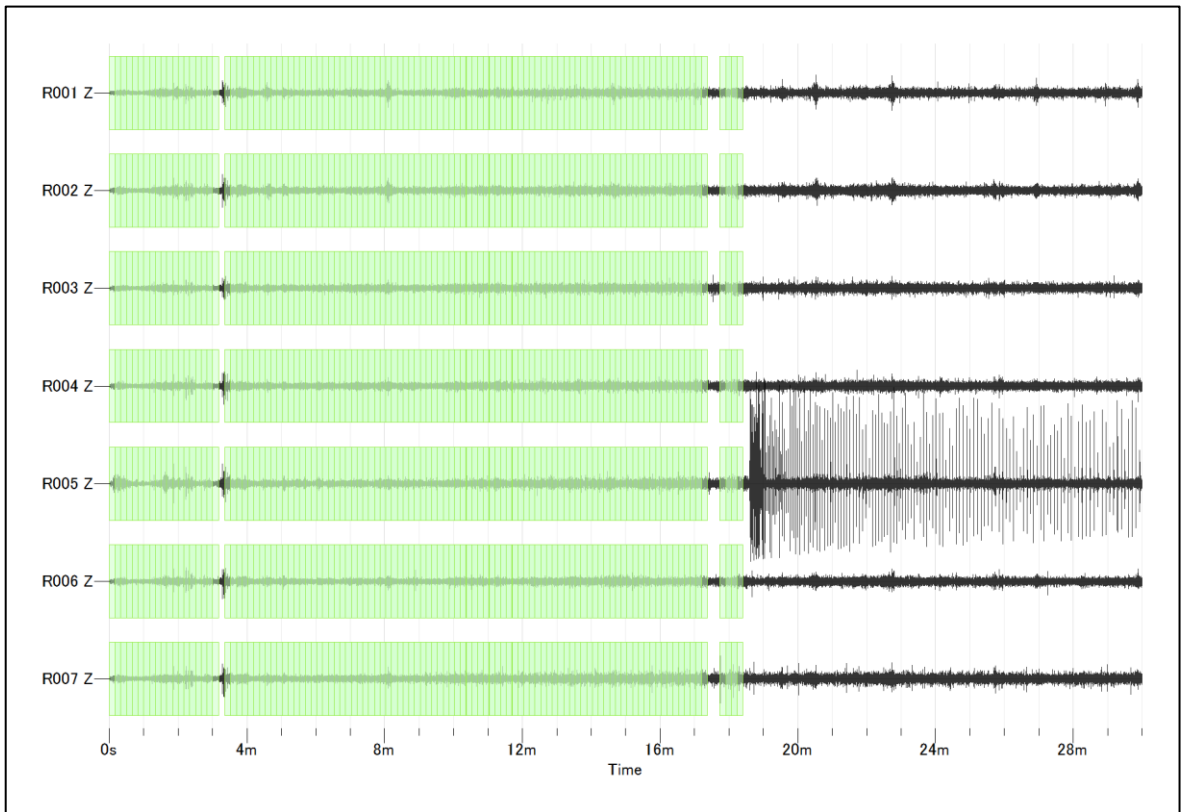


図 3.14 解析区間の選定 (5Hz)

②空間自己相関係数の抽出

空間自己相関法（SPAC 法）は、アレー中心点と各円周上の各点間の波形相関性を複素コヒーレンス関数で表現し、全周平均(方位平均)した値を空間自己相関係数と呼ぶ。Wathelet、M (2005)の方法では、2 対の各観測点間の距離と方位角を計算し、アレーの全ての組み合わせの観測点間距離と方位角を用いて空間自己相関係数を計算する。微動アレー探査では観測点間距離が近い組み合わせをグループ化し（図 3.15）、それらの同心円のグループ（以下、リング）ごとに空間自己相関係数を計算する（図 3.16）。

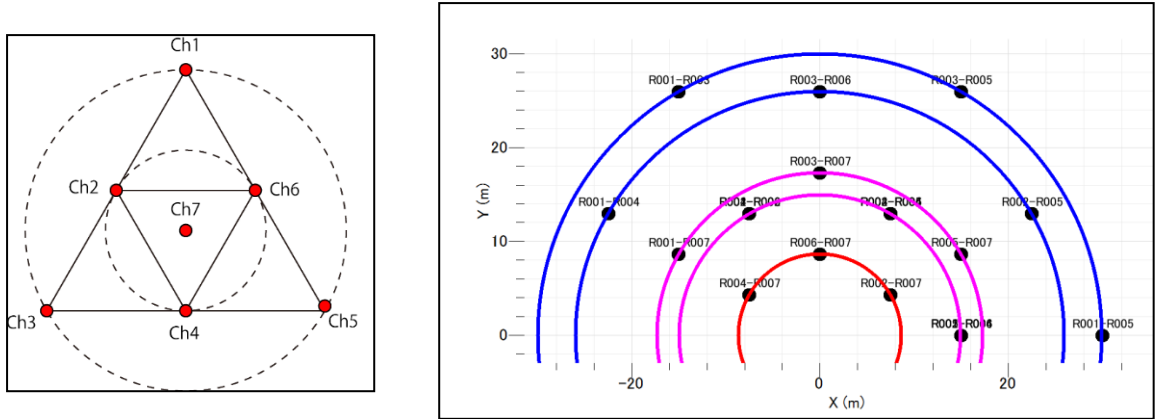


図 3.15 微動アレー探査の観測点配置（左図）とリング（右図）

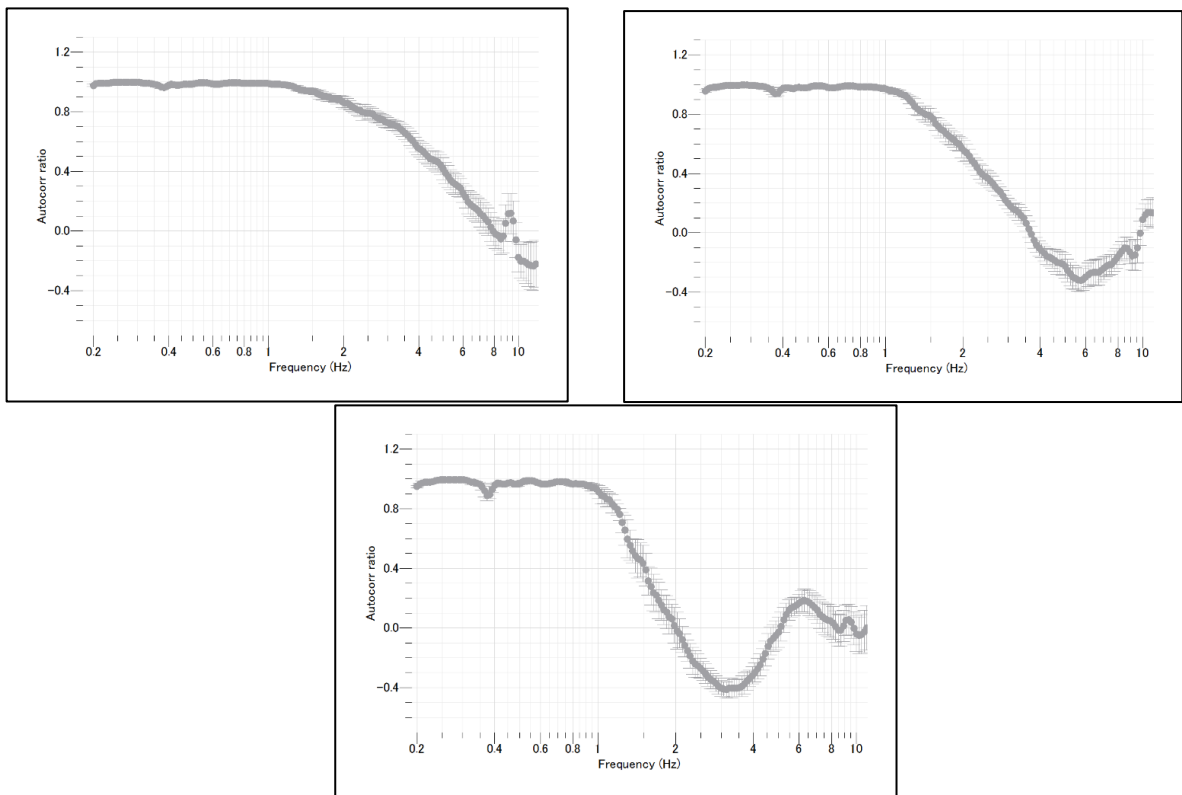


図 3.16 微動アレー探査の空間自己相関係数

<左上図：8.66mのリング、右上図：15～17.33mのリング、下図：26～30mのリング>

チェーンアレー探査では図 3.17 に示すように三角形アレー配置で観測点を選択し 1 つのリングの空間自己相関係数 (図 3.18) を計算する。

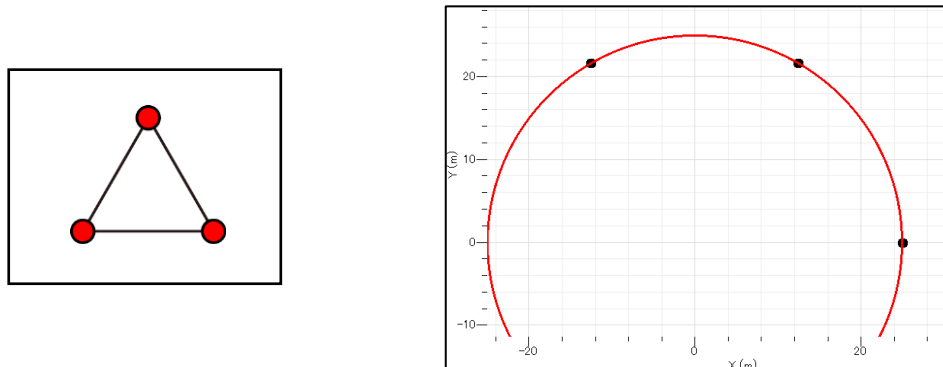


図 3.17 チェーンアレー探査の観測点配置 (左図) とリング (右図)

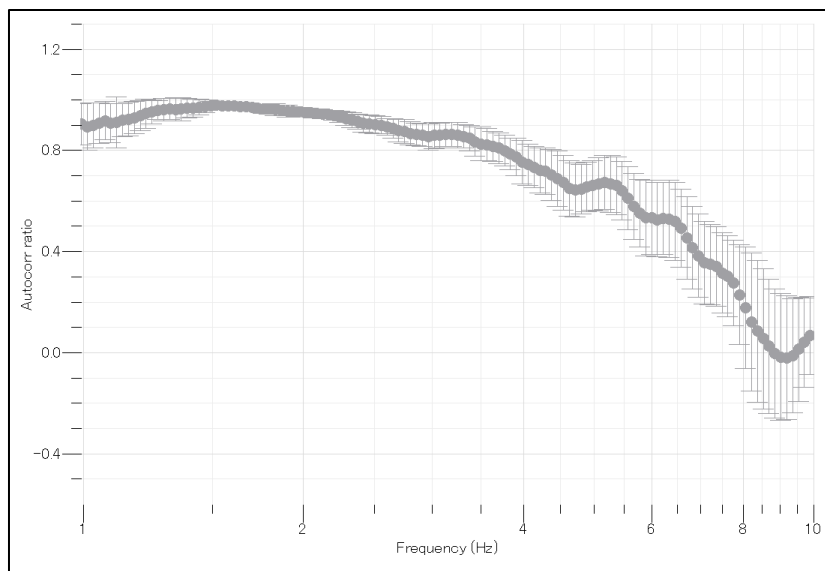


図 3.18 チェーンアレー探査の空間自己相関係数

算出した微動アレー探査の空間自己相関係数から求めた各リングの分散曲線（図 3.19 の赤から緑色の点）と波数を指標に（図 3.19 の黒線・黒破線）空間自己相関係数の範囲を設定し（図 3.19 の黒折線）、S 波速度構造の推定を行うための空間自己相関係数を抽出する（図 3.20）。チェーンアレー探査の空間自己相関係数についても同様の手順で抽出する。

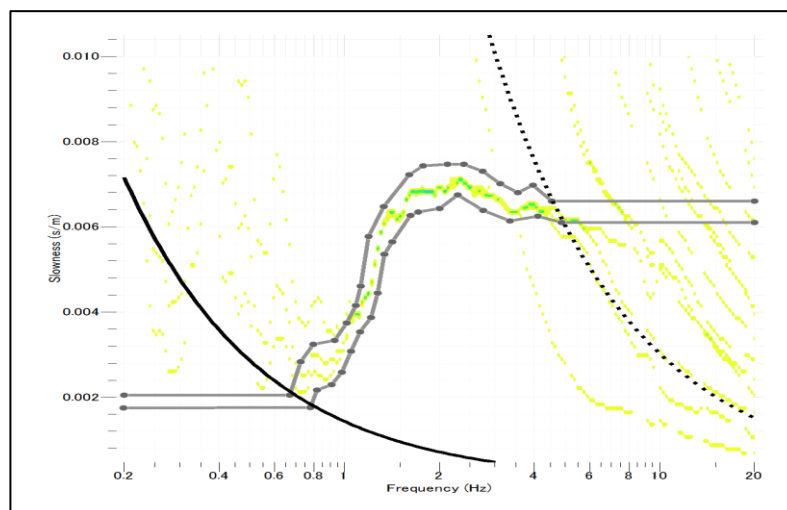


図 3.19 空間自己相関係数の抽出範囲の設定

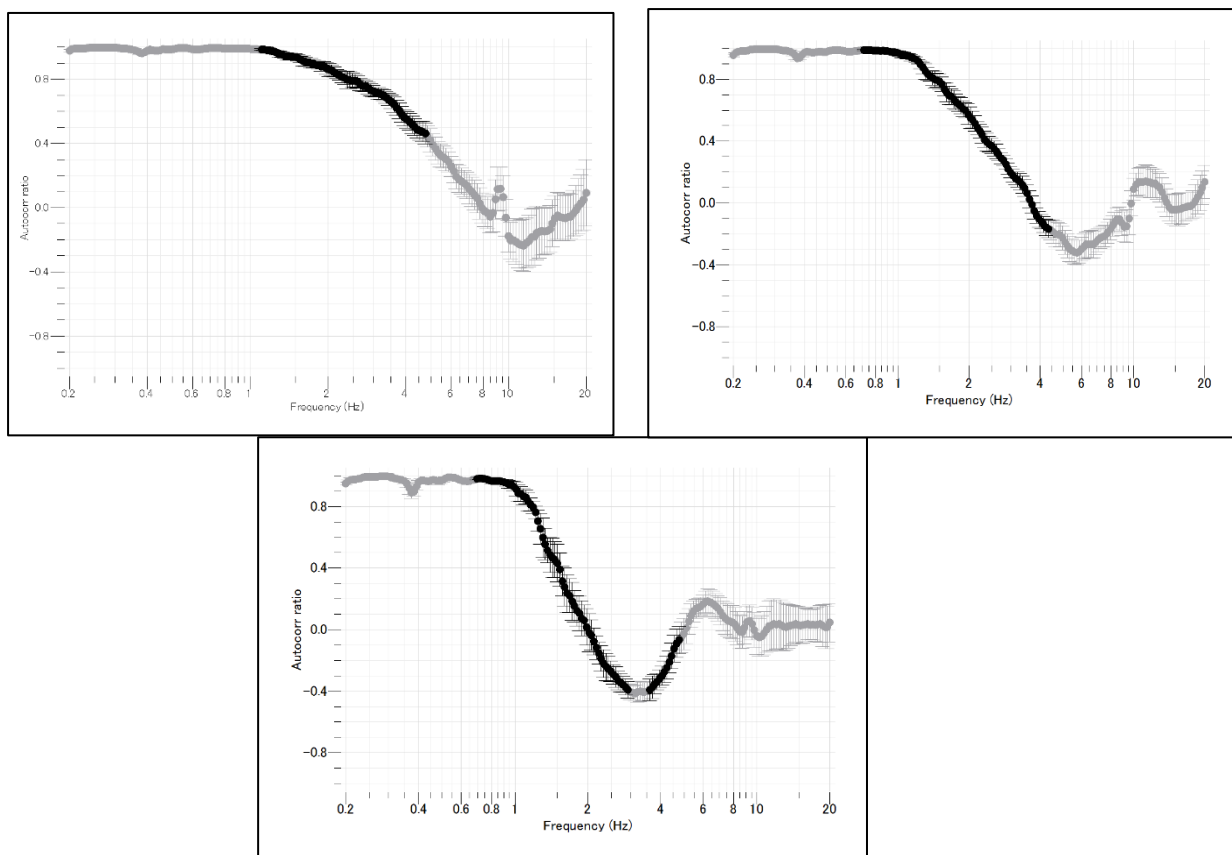


図 3.20 空間自己相関係数の抽出

(上図左 : 8.66mのリング、上図右 : 15~17.33mのリング、下図 : 15~17.33mのリング)



### ③S 波速度構造の推定

前述の空間自己相関係数は、位相速度を変数に含むベッセル関数(第 1 種 0 次)と理論的に等しくなるため、その逆関数から位相速度を計算する。この位相速度から逆解析により S 波速度構造を推定する (以下、逆解析)。Wathelet、M (2005)の手法では、空間自己相関係数から直接 S 波速度構造の推定することができる。この手法は、基本モードだけでなく高次モードも合わせての逆解析が可能である。Wathelet、M (2005)の逆解析手法では、Neighborhood Algorithm 法 (以下、NA 法) を用いる。NA 法は、GA や SA のような広域的最適解を統計的に直接探索する手法であり、ランダムに生成したパラメータから求められた解から最近傍の最小の misfit を探索することができる<sup>3</sup>。逆解析にはに示すパラメータを用いる。逆解析では、図 3.21 の misfit 値や図 3.22 の空間自己相関係数の理論値と観測値の整合性を指標にして S 波速度構造 (図 3.23) を推定する。

表 3.1 逆解析で使用するパラメータ

層数
P波速度 (m/s)
ポアソン比
S波速度 (m/s)
密度 (kg/m <sup>3</sup> )
最大イタレーション数

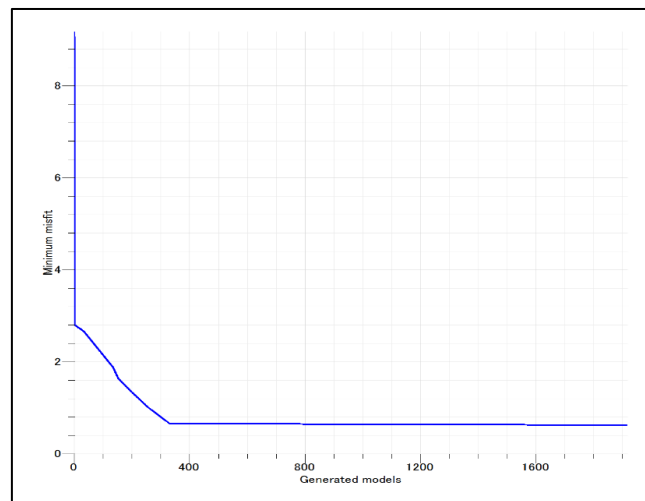


図 3.21 逆解析の misfit

<sup>3</sup> Wathelet, M. (2008). An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*, 35, L09301.

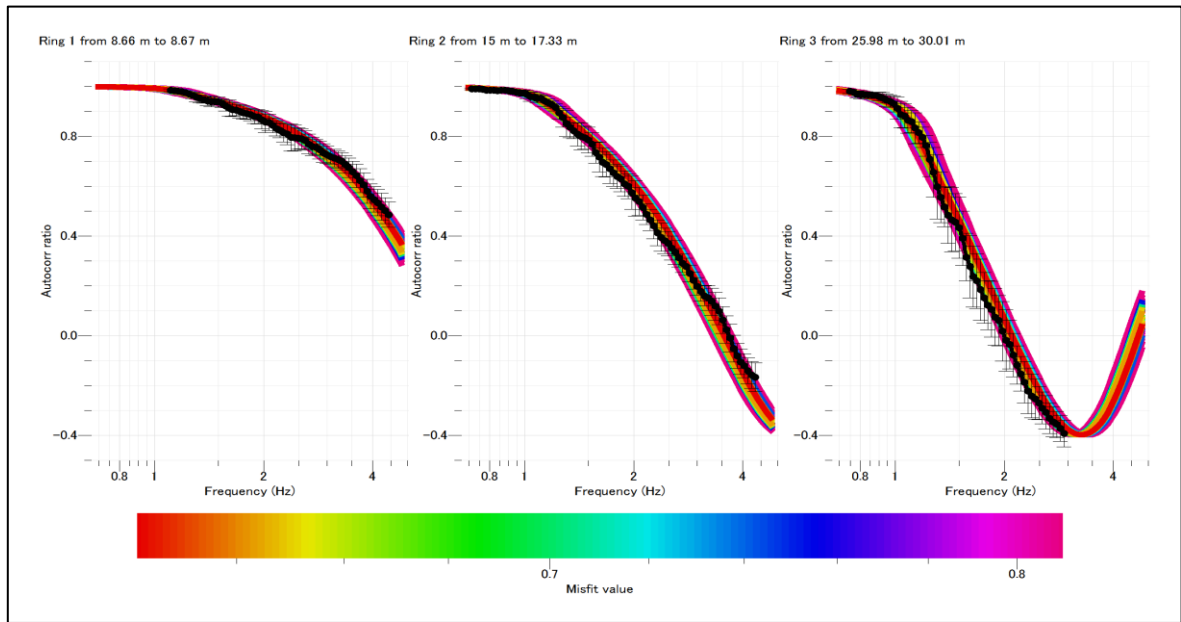


図 3.22 空間自己相関係数の観測値と理論値の整合性の確認

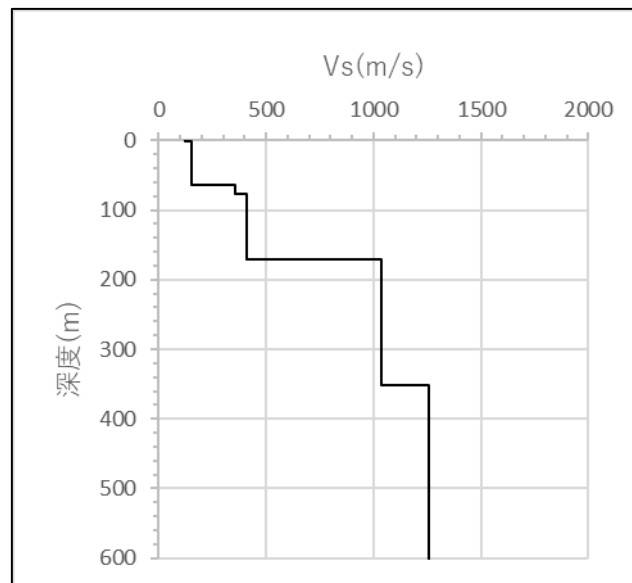


図 3.23 S波速度構造の推定

#### (4) 探査内容

チェーンアレー探査は、布田川断層帯を対象に辺長25m及び30mのアレーを展開した。一方、多重アレー探査は、深部ボーリング調査地点を中心に辺長50m及び25mのアレーを展開した。

微動探査の記録方式は、微動計とアンプからなる微動探査装置を測定器でA/D変換し、全ての微動波形を同時にモニターし記録した(図3.24～図3.25)。観測前には、測定地においてハドルテストを実施し微動計の相関性を確認した。

チェーンアレー探査及び多重アレー探査の仕様を表3.2、表3.3に示す。

表 3.2 チェーンアレー観測仕様

アレー名	測線長 (m)	アレー辺長 (m)
FDCA-1	87.5	25
FDCA-2	105.0	30

表 3.3 微動アレー探査観測仕様

アレー名	アレーの観測配置	大アレー辺長 (m)	小アレー辺長 (m)	微動計の数
FDCA-3	2重三角形配置	50	25	7

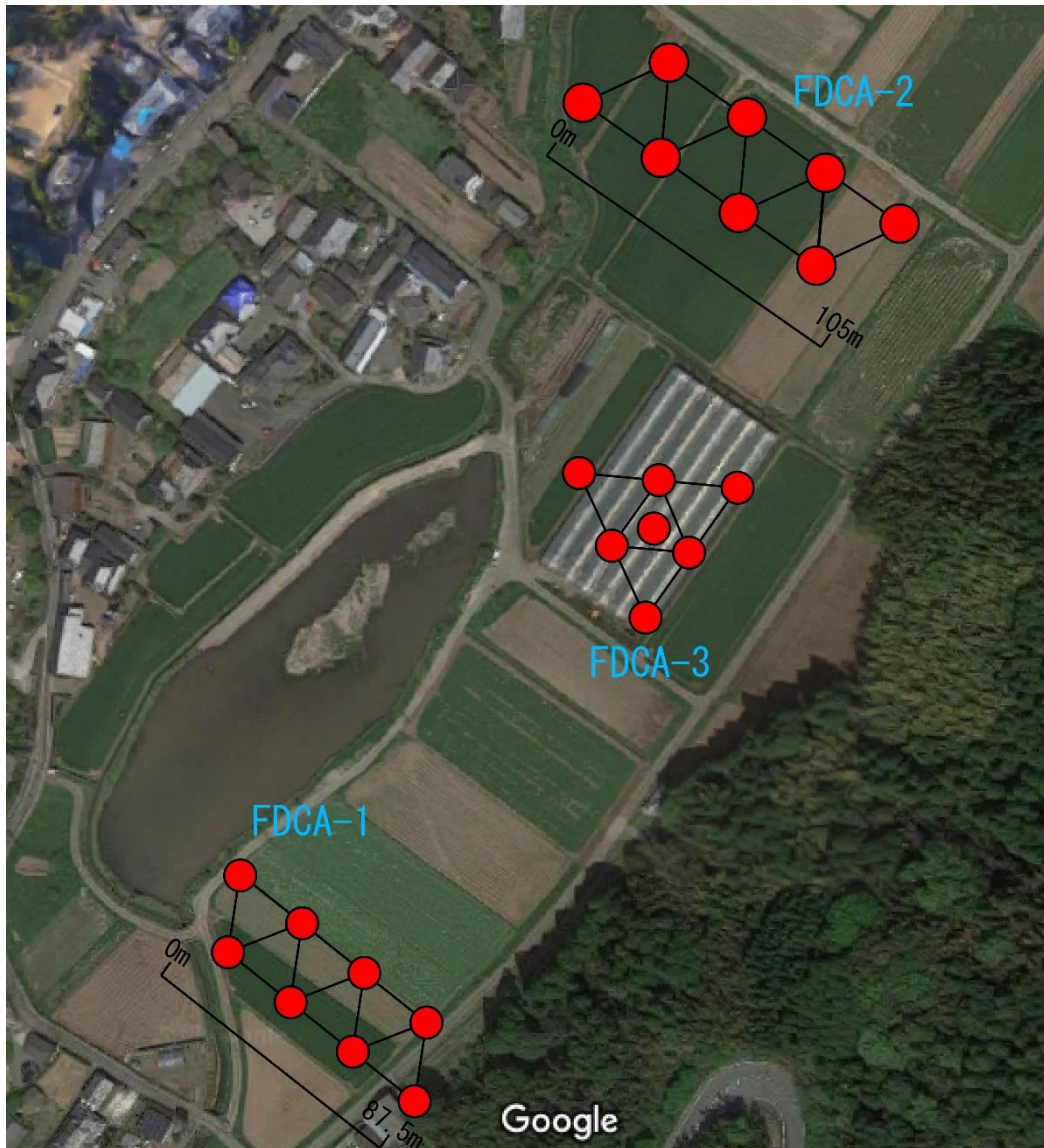


図 3.24 微動アレー探査測点配置

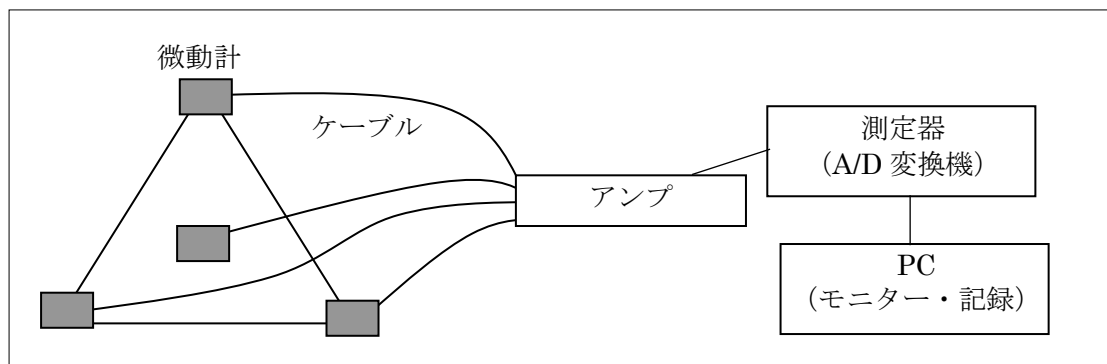


図 3.25 微動探査観測システム

## (5) 使用機器

### 1) 微動探査用増幅器

- ・型式 BU-4
- ・入力数 4ch
- ・入力電圧  $\pm 12V$
- ・ローパスフィルタ 切り替え式(ON:fc=42Hz (-18db/oct)、OFF:フィルタ無し)
- ・DC カット 70 秒より長い周期をカット
- ・ゲイン  $\times 1$ 、 $\times 2$ 、 $\times 5$  (切り替え式)
- ・電源 DC 12V 0.4A 以下
- ・寸法 270(W) $\times$ 240(D) $\times$ 70(H) [mm]
- ・重量 2kg

### 2) 常時微動計

- ・型式 MTKV-1C
- ・特性 速度
- ・固有周期 微動探査用増幅器による切り替え式 (1 秒、7 秒)
- ・感度 13.0947 volt/kine (固有周期 1 秒)、  
0.2697 volt/kine (固有周期 7 秒)
- ・周波数範囲 1 - 70Hz (固有周期 1 秒)、0.14 - 70Hz (固有周期 7 秒)
- ・寸法 90(W) $\times$ 195(D) $\times$ 168(H) [mm]
- ・重量 4.5kg



図 3.26 微動探査用増幅器



図 3.27 常時微動計

### 3) 測定器

- ・ A/D 変換及び制御・収録装置 : GEODAS-15-HS



図 3.28 測定器

測定器の仕様は、表 3.4 に示すとおりである。

表 3.4 測定器の仕様

項目		仕様
機器名称		GEODAS15-HS
入力チャンネル		12チャンネル
プリアンプ	入力インピーダンス	10 [kΩ]
	増幅度	0,20,40,60 [dB]
AD 変換部	分解能	24 [bit] (±符号1bit デルタシグマオーバーサンプリング方式)
	変換速度	50 [kHz]
	許容入力電圧	±2.5 [V]
	AD-PC インターフェース	USBポート
サンプリング周波数		50Hz、100Hz、200Hz、500Hz、1kHz、2kHzなど (測定プログラムによる取り込みデータ数で上限に変動する) (2次オーバーサンプリングはサンプリング周波数に応じて加算される数は変化する)
制御部		ノートPC
電源		DC12 [V]
動作環境	温度	10~45℃
	湿度	20~80%
外径		W 370×H 270×D 90 [mm]
重量		約 4 [kg]

### 3.2.2 電気探査

#### (1) 目的

調査対象断層周辺において、地下の地盤構成等を把握する目的で、二次元比抵抗探査を行なった。

#### (2) 探査原理

比抵抗とは地盤中を流れる電流の流れにくさ（金属などでは抵抗というが、地盤の場合は比抵抗という）を示すもので、図 3.29 のように地質によって比抵抗の分布に違いが見られる。一般的に、土粒子の粒径が小さい（粘土・泥岩など）と比抵抗が小さく、砂・礫と粒径が大きくなるにしたがって比抵抗が大きくなる。同図を見ると、同じ地質・土質でも比抵抗に大きな違いが見られるが、表 3.5 にあるように間隙率・飽和度・粘土鉱物の含有量によって比抵抗が変化することが主な要因である。

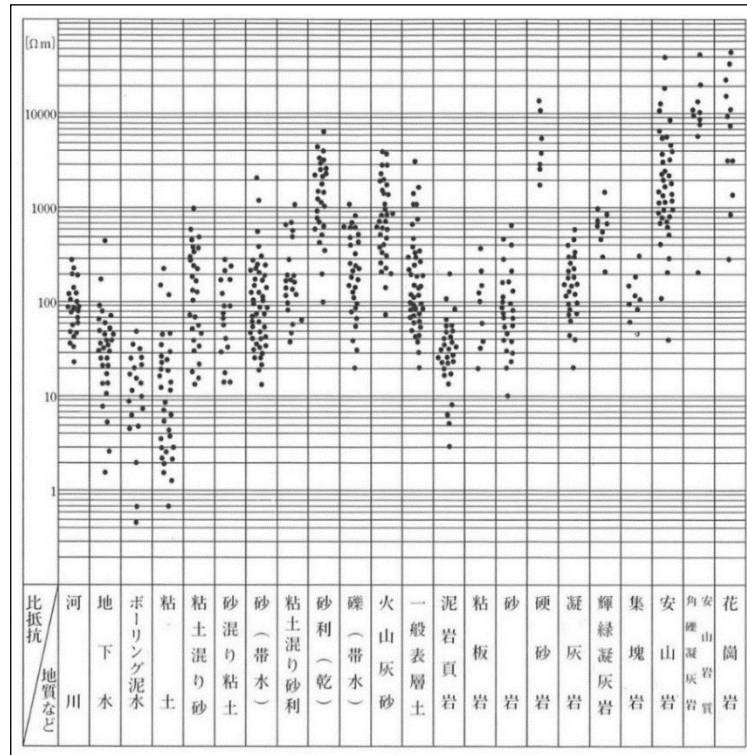


図 3.29 地質・土質と比抵抗の関係の一例（「比抵抗影像法」島ほか）



表 3.5 比抵抗に及ぼす要因

要 因		地盤の比抵抗の高低 低い ←————→ 高い	地盤の関連現象
間隙率	飽和状態	大きい ←————→ 小さい	風化, 破碎帯
	乾燥状態	小さい ←————→ 大きい	
飽和度 (間隙率一定)		大きい ←————→ 小さい	地下水位
体積含水率 (間隙率×飽和度)		大きい ←————→ 小さい	風化, 破碎帯
粘土鉱物含有量 (導電性鉱物)		多い ←————→ 少ない	風化, 変質
地下水の比抵抗		低い ←————→ 高い	塩水楔など
温度 (地温)		高い ←————→ 低い	地熱, 温水

### (3) 探査方法

電気探査の方法には垂直電気探査と比抵抗二次元・三次元探査がある。今回は、比抵抗二次元探査という方法を利用して、測線直下の二次元比抵抗分布から断層構造を把握することを目的とした。

比抵抗二次元探査は、図 3.30 のように等間隔 (今回は 10m) に電極を地面に接地して測線を設けた。

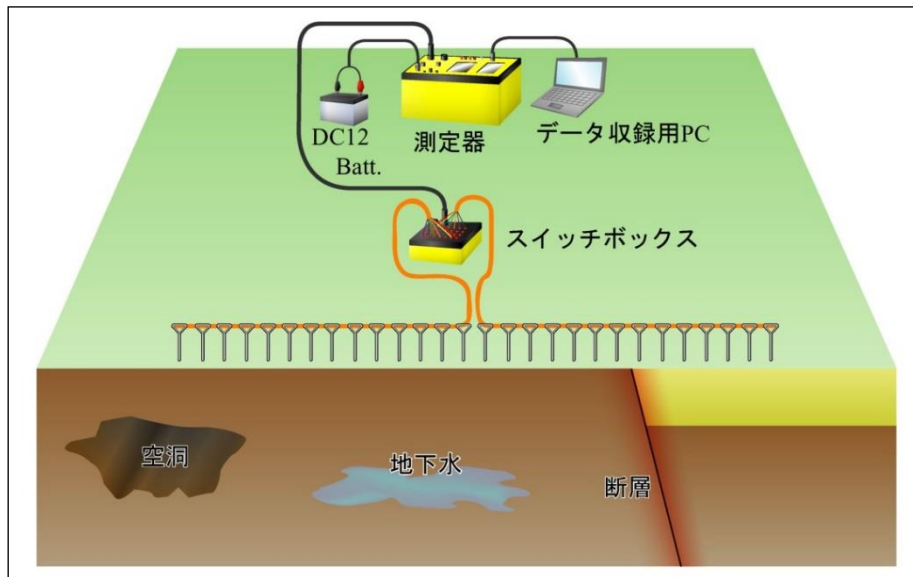


図 3.30 比抵抗二次元探査測線概念図

比抵抗二次元探査のデータ取得パターンには、2極法・3極法・4極法のやり方があるが、今回は2極法を利用した。この方法は、同じ深度を調査対象とする場合に他よりも多くのデータを取得することができ、同じ測線長の場合に両側のデータが欠ける範囲が一番短い。

2極法は測線の他に電流と電位の2極の遠電極が必要になるが、電流遠電極は測線西側の100m程度離れた場所に、電位遠電極は同じく測線南側の1,000m程度離れた山中に設

置した。測定では電流遠電極と測線中の電流電極で電気を流し、測線の電流電極以外の電極と電位遠電極で電位の測定を行ったが、1つの電流電極に対して電流電極から10m・20m・・・100m（20通り）離れた電位電極までの測定が終了（探査深度200m）したら、測線の電流電極を隣に移動して20通りの電位の測定を行った。測線の電流を1つずつずらして同じ測定を繰り返したが、測線長が決まっているので終点に近づくにしたがって19通り、18通り・・・1通りの電位測定を行って測定を終了。データ取得のパターン例を図3.31に示す。

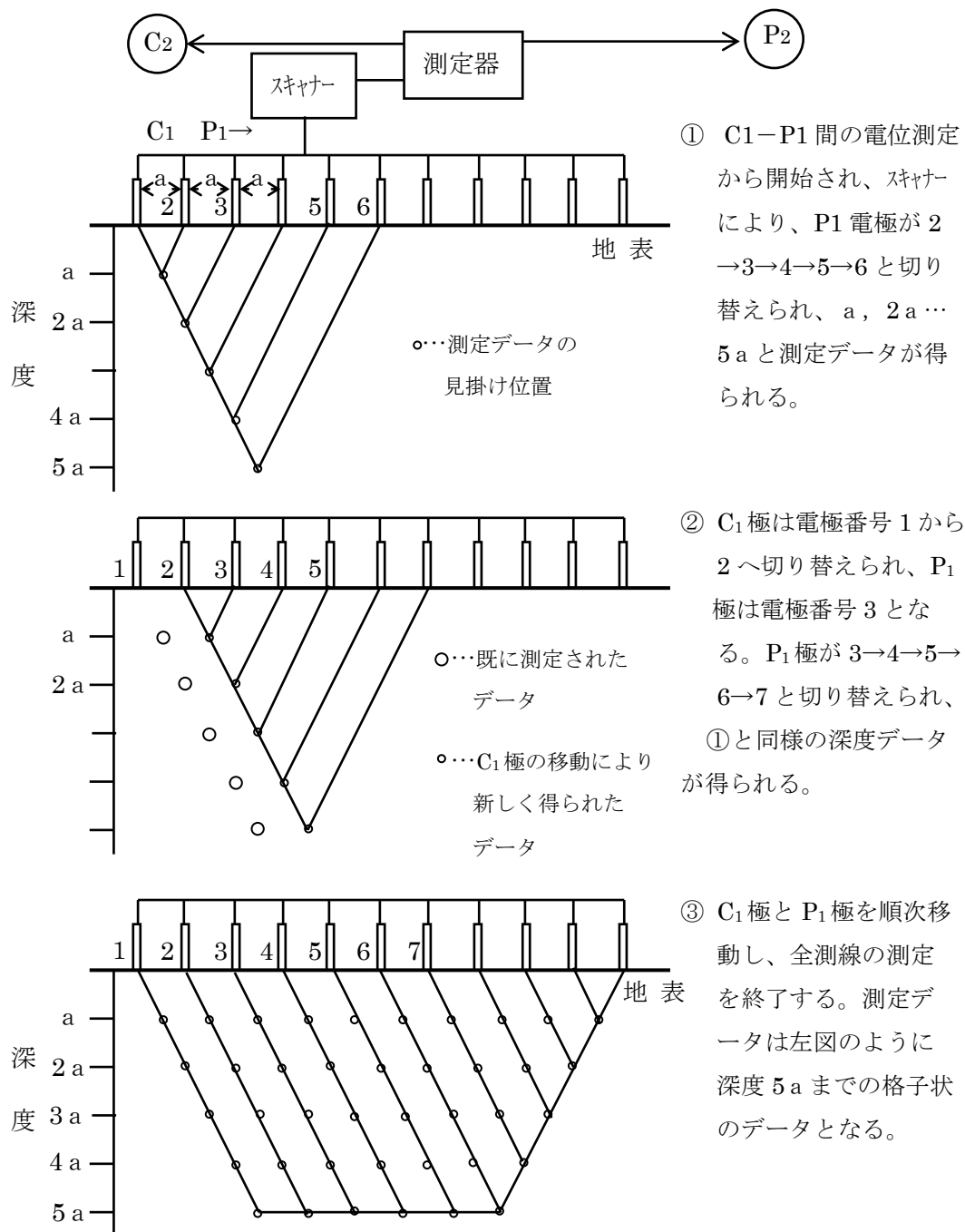


図 3.31 データ取得パターン

#### (4) 解析方法

測定データから計算される見掛け比抵抗値( $\rho_a = 2\pi aI/V$   $a$ : 電極間隔  $I$ : 流れた電流値  $V$ : 測定された電位差)は、各電極間隔( $a$ )に対応する深度までの比抵抗値の平均を示している。従来の解析手法である見掛け比抵抗断面図の表示では、概略の地層の比抵抗分布は把握できるものの、複雑な地層構成や地形条件が加わる場合は必ずしも地層の比抵抗分布を正確には現していない。

そこで測定データに二次元解析を施すことで、地層の比抵抗分布を詳細に求めることができる。具体的には、見掛け比抵抗の平均値を初期モデルとし、有限要素法を用いて初期モデルに対する理論計算を行い、この理論値と測定値との差を用いて初期モデルを修正する。この修正されたモデルを用いて同様の計算を理論値と測定値との差が小さくなるまで繰り返し行う(この過程は逆解析インバージョンと呼ばれている)。測定データと理論値の差が概ね収束したモデルを最終モデルとして採用し、断面図化する。解析の流れは、図 3.32 の通りである。

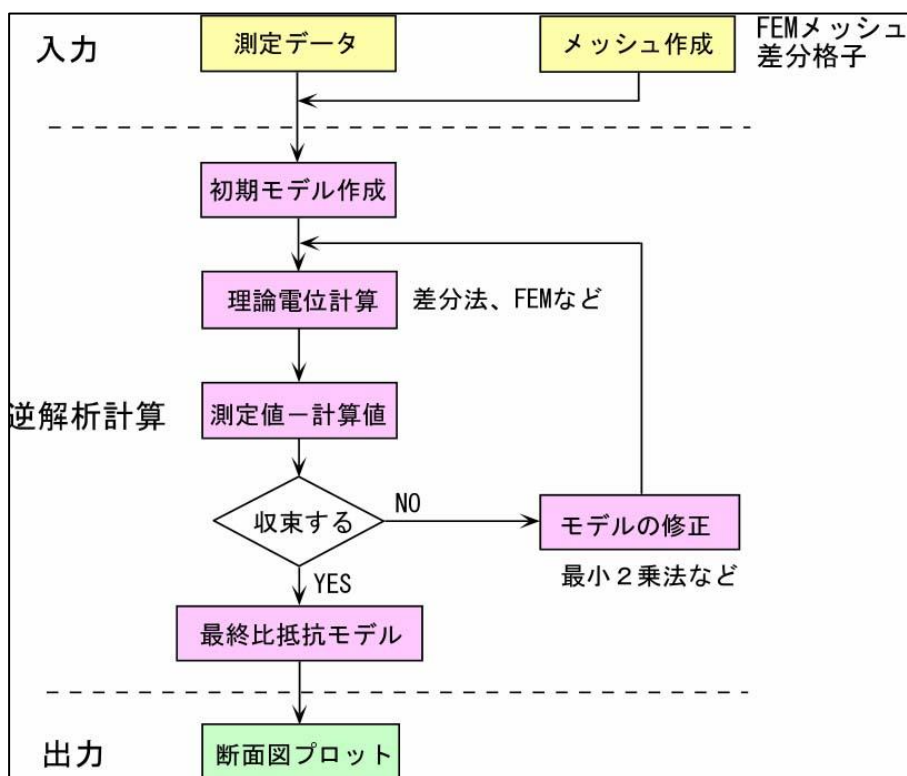


図 3.32 解析フロー

### (5) 探査内容

電気探査では、調査対象断層周辺において、地下の地盤構成等を把握する目的で二次元比抵抗探査を行った。

表 3.6 電気探査観測仕様

比抵抗二次元探査	電極間隔 (m)	探査深度 (m)	測線長 (m)
2 極法	10m	200	400

### (6) 使用機器

測定に利用した測定器は、応用地質社製の McOHM (MODEL 2115) で、仕様は表 3.7 に示すとおりである。

表 3.7 測定器 (McOHM) の仕様

McOHM MODEL-2115	
トランスミッタ部	
出力電圧	400Vp-p (定電圧)
出力電流	1、2、5、10、20、50、100、200 (定電流)
動作電圧	12V DC
レシーバー部	
入力インピーダンス	1M $\Omega$
測定電位	$\pm 0.6V$ 、 $\pm 6V$ (オートレンジ)
分解能	20 $\mu V$
スタック回数	1、4、16、64 (任意停止可能)
サイクルタイム	3.5 秒
データメモリ	
ファイル登録	最大 128 ファイル
データポイント	最大 2、000 データ
1 ファイル最大収録データ	110 データ

### 3.2.3 微動観測

#### (1) 目的

地表に展開した複数の地震計で人為的な活動ならびに自然由来の微動を各測点で1時間程度観測するものであり、既往ならびに本業務で実施した電気探査測線を用いて直線配置による測定を実施した。

#### (2) 観測方法

##### 1) ハドルテスト

毎日測定作業開始前に微動計を平坦な1箇所に集め、約5分間の微動観測を行った。その際、3成分計であるNo.1の微動計はX成分方向を北に向けて設置し、データ取得を行った(図3.33参照)。



図 3.33 ハドルテスト

##### 2) 測定

以下の写真のように、地表面に厚さ60cm、幅30cm×奥行30cmのコンクリート版をなるべく水平になるように置き、その上に微動計を付属の水準器で確認しながら水平に設置した。(図3.34参照)



図 3.34 微動計設置状況



微動計には GNSS 受信機が搭載されており、各々の記録同期は GNSS 時刻によって行われる。記録は 1 分毎のファイルに分かれて連続的に行われる。微動測定は 1 展開 7 台一組とし、測線上に 10m 間隔で 60m 区間の測定を同時に行った。No.1 の 3 成分計は X 成分を南北方向、Y 成分を東西方向とし、必ず各展開の始点側（北西側）に設置し測定を行った。3 成分計の測定記録は、ch1 が X 成分、ch2 が Y 成分、ch3 が Z 成分となっている。展開移動の際には、必ず展開の端点を 1 箇所重複させて測定した。測定時間は約 1 時間とした。

事前に実施された電気探査の測点のうち、下図に示す測点 P1~P4 は麦畑の中にあり立ち入ることができなかつたため、測点 P5~P36 の 310m 区間について測定を行った。

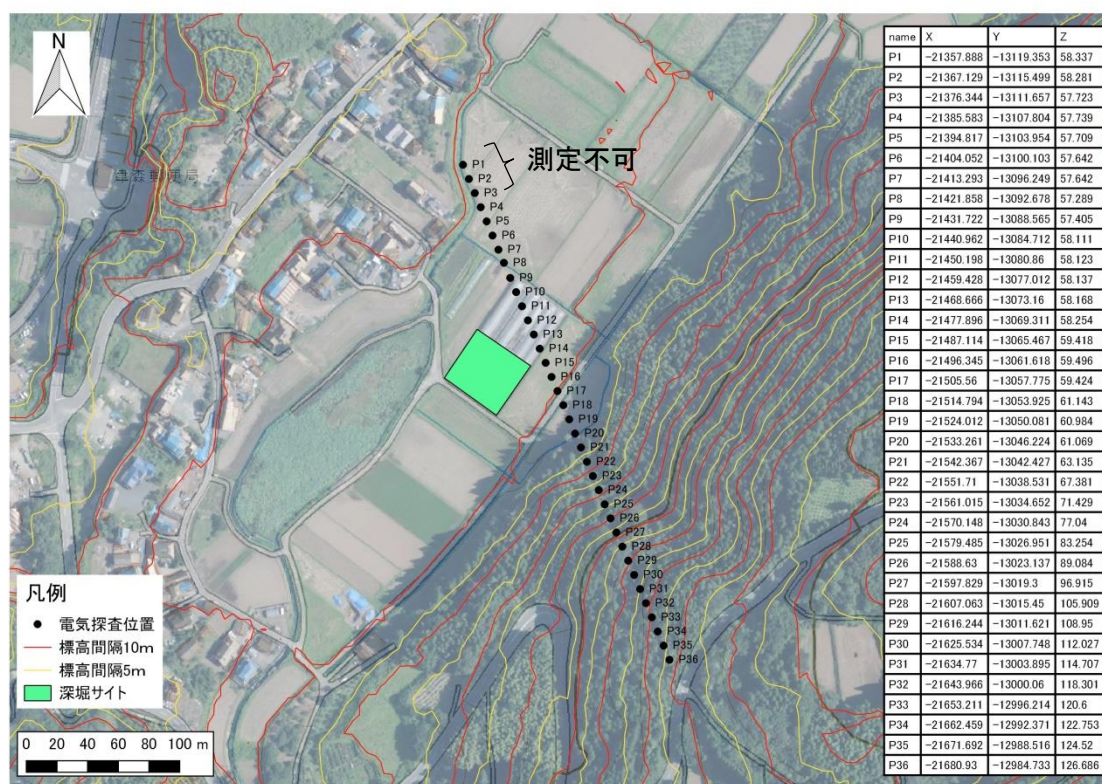


図 3.35 微動観測位置図

(3) 使用機器

名称	項目	仕様	数量
微動計 (McSEIS-MT NEO)	センサ 分解能 感度 測定レンジ チャンネル数 周波数帯域 ダイナミックレンジ A/D変換 サンプリング間隔 データ記録時間 記録媒体 データフォーマット 寸法 重量 消費電力 水平調整 動作温度	サーボ型加速度計 1 $\mu$ G 2.0V/G $\pm$ 4G 1ch/3ch 0.1~200Hz 120dB (実測値) 32ビット $\Delta\Sigma$ 2、4、10、20、50ms 最大 連続 15時間 SDメモリーカード SEG2 220mm(W)x 245mm(D)x 250mm(H) 約 7.5kg 最大 6W 3点式水平調整脚、気泡式水準器 -20~55 $^{\circ}$ C	3成分 1台 1成分 6台





### 3.3 断層傾斜方向・角度を推定するための浅部パイロットボーリング調査

#### 3.3.1 機械ボーリング

調査対象断層周辺において、断層の傾斜方向・角度を推定する目的で、2本のパイロットボーリング（斜めボーリング）を実施した。

ボーリングは、φ66～86mmのオールコアボーリングとした。掘削長及び堀削角度は、FDP-1孔（120m 70°）と、FDP-2孔（200m 78°）で行い、主断層の破砕部を確認した後に発注者と協議を行って、断層帯を貫き、主要な地質構造を確認した上で掘り止めとした。調査終了後のボーリング孔は埋戻しを原則とするが、地下水の自噴が確認されたFDP-1孔は、地権者との協議も踏まえ存置することとした。

採取したボーリングコア試料はコア箱に入れて整理し、ボーリングコア観察により地層区分や岩質、破砕組織等を柱状図に記載し、既往の研究成果により推定された地質構造と対応させ、断層の傾斜方向ならびに角度を推定して地質断面図を作成した。

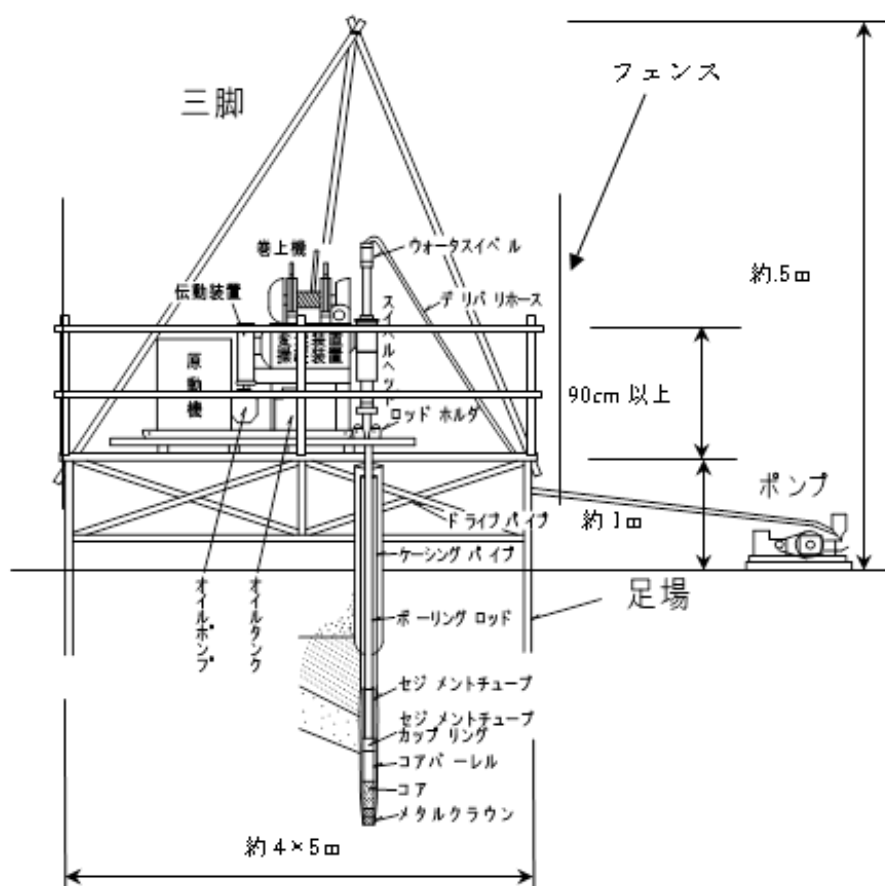


図 3.36 ボーリングマシン概念図

表 3.8 ボーリング機械仕様一覧表

種 目	制作会社名	形 式	性 能
試 錐 機	KANO	KD-1C	堀削能力 150m
エ ン ジ ン	ヤンマー	NFD-10 等	最大出力 10ps
ポ ン プ	鉦研	MG-10	吐出量 50～120 l/min
堀 削 用 具	ロッド、ケーシング、ダイヤモンドビット、メタルクラウン等		Φ66・Φ86
コアチューブ	シングルコアチューブ		Φ66・Φ86
	ダブルコアパックチューブ		Φ66・Φ86
そ の 他	スイベル、給水ホース、ベントナイト、櫓、工具類など		
孔内水位観測	ロープ式水位計		最大 100m

### 3.3.2 ボアホールカメラ観察

FDP-2 孔では、掘削終了後に、ケーシング挿入区間を除く深度での、ボアホールカメラによる孔壁観察を行った。

#### (1) 目的

地下岩盤における不連続面の状況や方向性を確認するには、一般的にボーリングコアの観察に依存している。しかしこの場合、試錐機の性能やボーリングオペレータの技術力の違いが、コアの状態やコア採取率に違いをもたらす可能性があり、原位置での岩盤状態を詳細に把握することが困難であると言える。

このような問題を解決し詳細な岩盤状況を把握するためにボアホールカメラ検層を実施した。また、ボアホールカメラ検層では、ボーリング孔内の岩盤の様子を 360 度展開画像として、詳細に観察することが可能であり、観察された不連続面の走向・傾斜情報を正確に読み取り、統計的解析手法により、不連続面と特徴や傾向を把握した。

#### (2) 測定方法

ボーリング孔内に 360 度全方向の撮影が可能な小型 CCD カメラを挿入し、調査対象区間のボーリング孔壁の状況を連続撮影した。

孔壁画像はケーブルで測定器に伝送され 360 度展開画像として表示される。現場においてはこの 360 度展開画像を直接確認しながら、ボーリング孔内の状況を把握するとともに、測定データの良否を判断した。

図 3.37 にプローブの詳細図を示す。

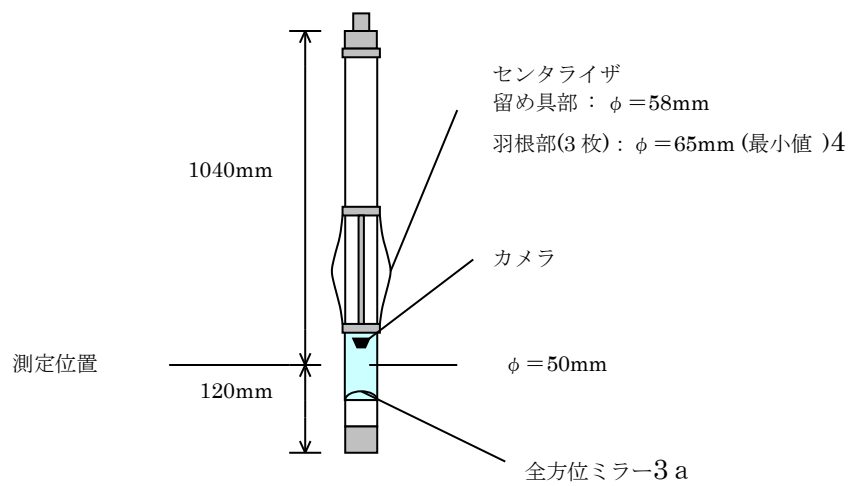


図 3.37 プローブ詳細図

プローブ内には、3 方向のフラックスゲート型磁気センサと傾斜センサが内蔵されており、プローブの回転に伴う方位を自動的に補正することができる。撮影された 360 度展開画像は、測定器のハードディスクに記録される。

図 3.38 に鉛直孔調査概要図を、図 3.39 に水平孔調査概要図を示す。

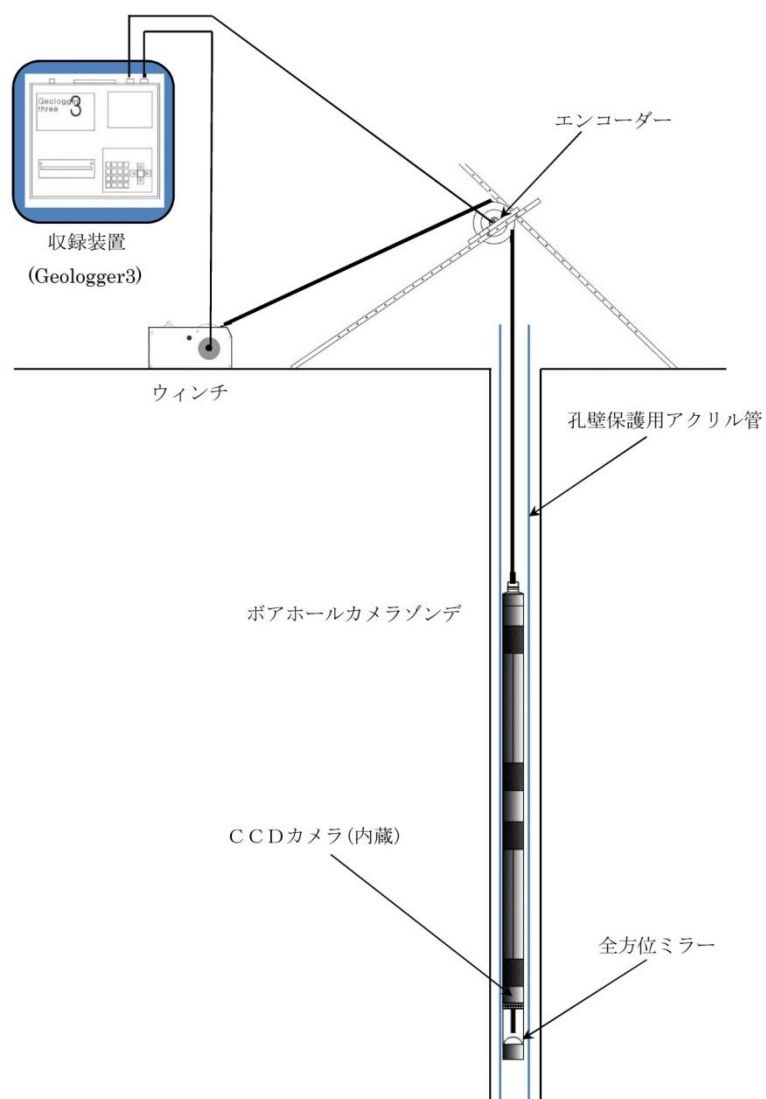


図 3.38 鉛直孔測定概要図

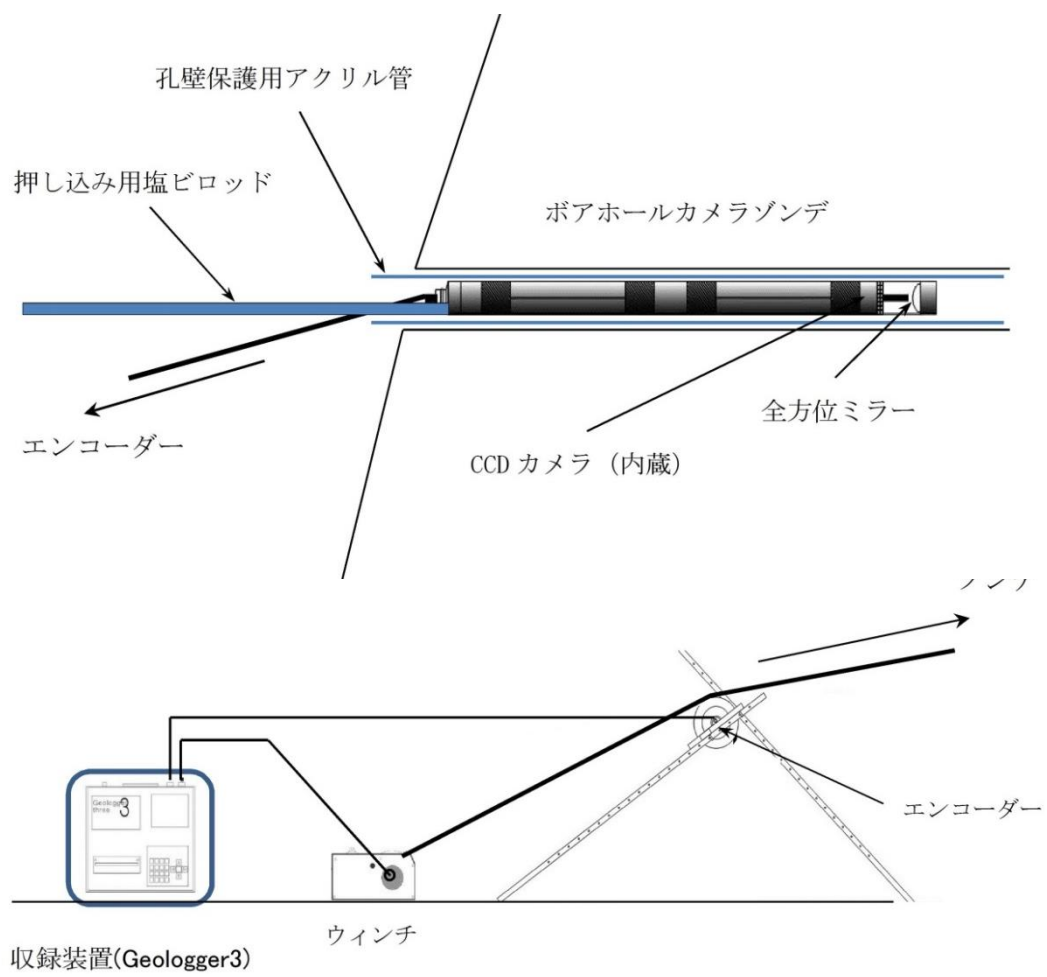


図 3.39 水平孔測定概要図

表 3.9 に測定機器の仕様を示す。

表 3.9 測定機器仕様

項目	機器名称	型式	仕様		メーカー
地上装置	ジオロガー3	Model-3970	CPU	Pentium(100MHz) 32M	OYO
			ディスプレイ	6.5 インチ カラーLCD ピクセル:640×480 サイズ:133×100mm	
			プリンター	サーマルラインプリンター 紙幅:112mm ドット密度:8dots/mm	
			フロッピーディスクドライブ	3.5 インチ 1.44MB	
			ハードディスクドライブ	IDE タイプ 1.2 GB	
			光ディスクドライブ	3.5 インチ 128、230、640 MB	
			外部インターフェイス	SCSI-2 RS-232C マウス、キーボード	
			電源	DC12V	
			環境条件	温度 0~40℃	
プローブ	ボアホールカメラプローブ	Model-3583	映像処理方式	円周ラインスキャン方式	OYO
			画像精度	360 pixel、720 pixel	
			方位補正	自動方位補正	
			測定深度間隔	0.5、1.0、2.0 mm から選択	
			プリンタ出力	モノクロビットイメージ	
			データ収録	ハードディスク、光ディスク	
			電源	DC12V、7A	

### (3) 解析方法 (不連続面データの読み取りとステレオネット)

ボーリング孔内に現われた不連続面を、コンピュータ上で360度展開画面として表示し、測定区間全ての不連続面で任意のサインカーブをフィッティングさせ、走向と傾斜を読み取り、データとして記録した。

このデータをもとに、ステレオネット図、ローズダイアグラム図、亀裂見かけ分布図、岩盤ゆるみ状態図、傾斜角度別の分散図、亀裂間距離頻度図をそれぞれ作成した。

孔壁に現れた不連続面を360度展開画像で見た場合と統計的解析手法で最も一般的なステレオネット図を作成する場合に、シュミットネットにステレオ投影をする時の概念図を図3.40に示す。また、図3.41に走向・傾斜の概念図を示す。

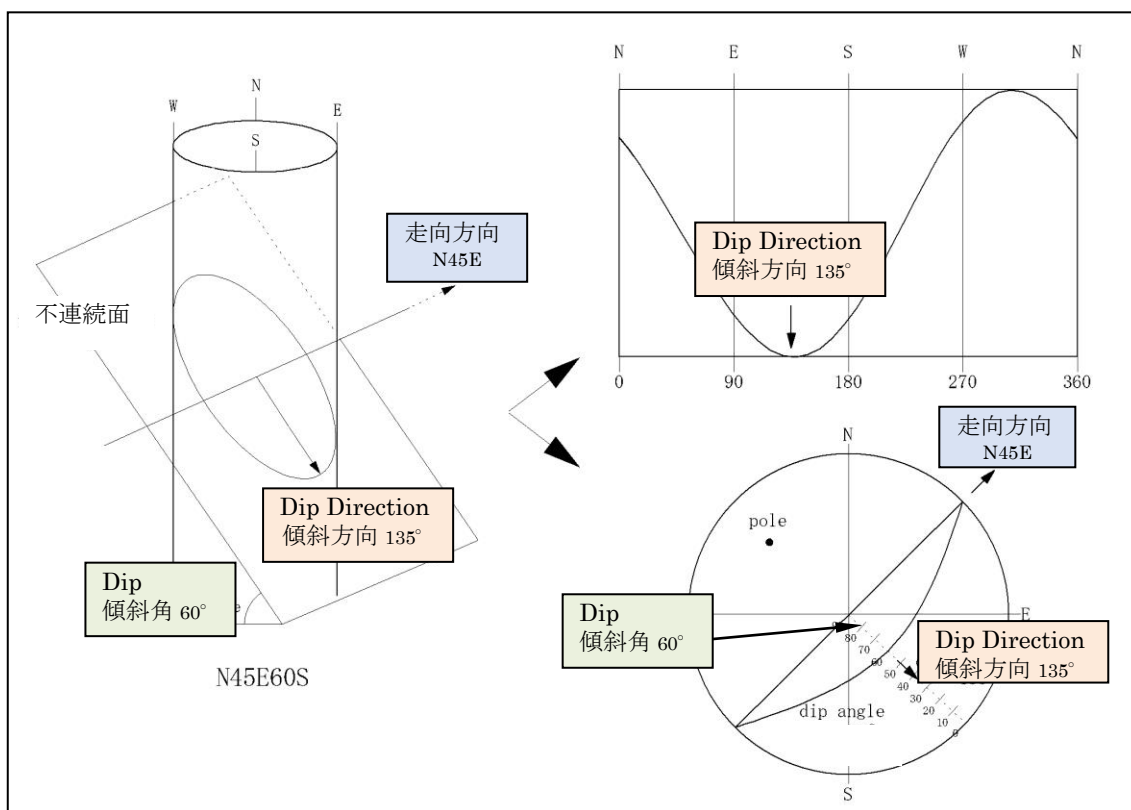


図 3.40 360度展開図とステレオネット



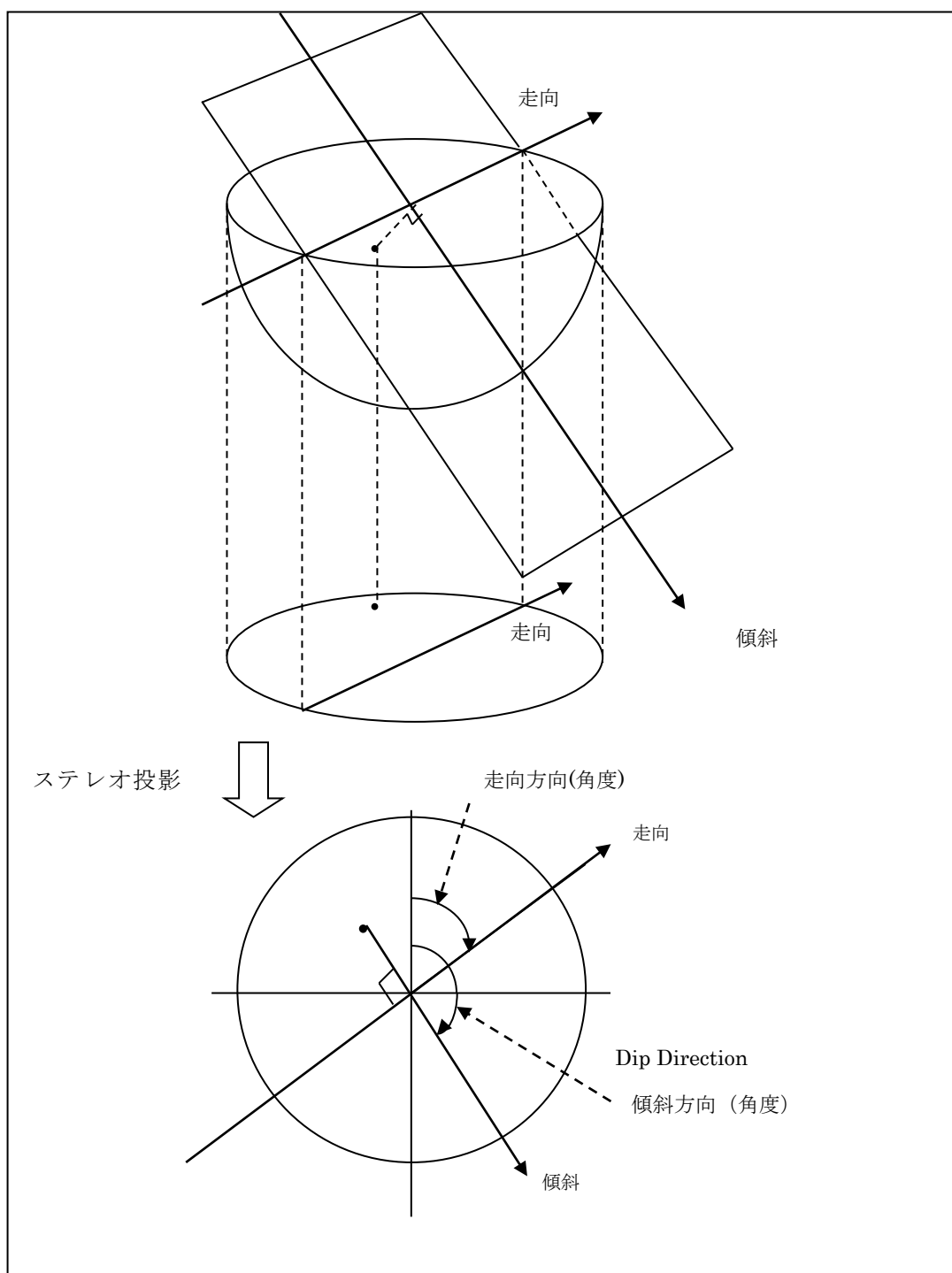


図 3.41 走向・傾斜 概念図

### 3.4 深部ボーリング調査による断層内物質のコア試料採取

布田川断層において深部ボーリング調査を実施し、断層破碎帯のボーリングコア試料を採取した。

#### 3.4.1 コア採取区間

コア採取時の掘削ビットの孔径はHQ-WL（コア径 63.5mm）を基本とし、コア採取区間長はパイロットボーリングの結果を踏まえ、深度 300m 付近から深度 800m までの 300m で実施した。なお、666.2m より深部のコア採取は、孔壁状態や掘削水の返りの確保等を加味してNQ-WLでの掘削とした。

#### 3.4.2 ボーリング調査地点

ボーリング調査地点は、物理探査、パイロットボーリング FDP-1 ならびに FDP-2 の事前調査で確認した断層面の傾斜角度に基づいて選定した。本孔ボーリング（FDB-1）調査位置の地表地震断層からの離隔距離は L=85m である（図 3.42）。

#### 3.4.3 その他

深部ボーリング調査に必要なケーシングプログラムは、図 3.43 のとおり計画した。また、逸水等による孔内抑留事故防止対策としてセメンチングやガイドパイプの建て込みを行った。

採取したボーリングコア試料は、現場倉庫にて保管した。半割や CT スキャン等が必要と判断されたコア試料は、担当者と協議を行って、適切な処理を行った。

掘削終了後のボーリング孔は砂やセメントミルク等による閉塞を基本としていたが、土地所有者との交渉結果も踏まえ、本孔を残置することとした。

なお、本孔掘削時には、掘削中の各種情報（ビット荷重・スピンドル回転数・トルク・掘進速度・送水量・排水量・送排水温度・孔底深度等）をリアルタイムに把握（Web 配信）し、連続データとして記録を残す目的から、マッドロギングシステムを採用した（図 3.44 参照）。

布田川断層と  
深部ボーリング (FDB-1) の関係

【FG①】 FDP-1 53~55m



【FG②】 FDP-1 64~67m



【FG③】 FDP-1 114~116m



【FG④】 FDP-2 127~130m



【FG⑤】 FDP-2 176~178m

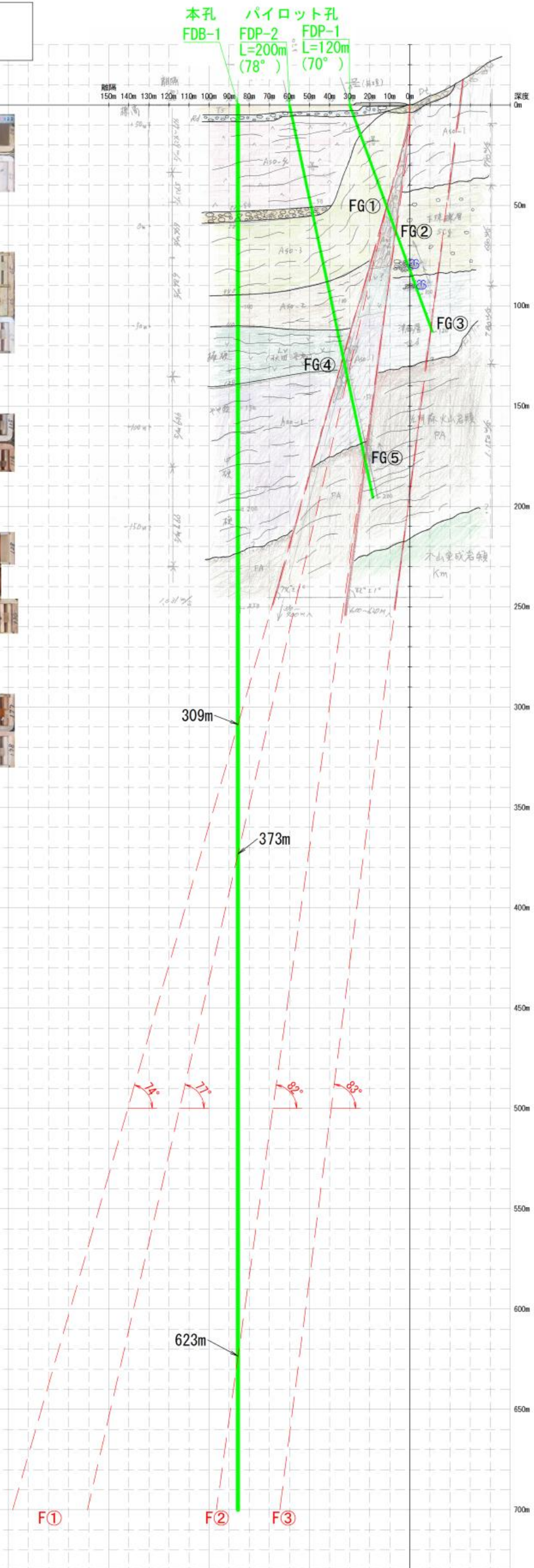


図 3.42 当初の FDB-1 孔掘削計画

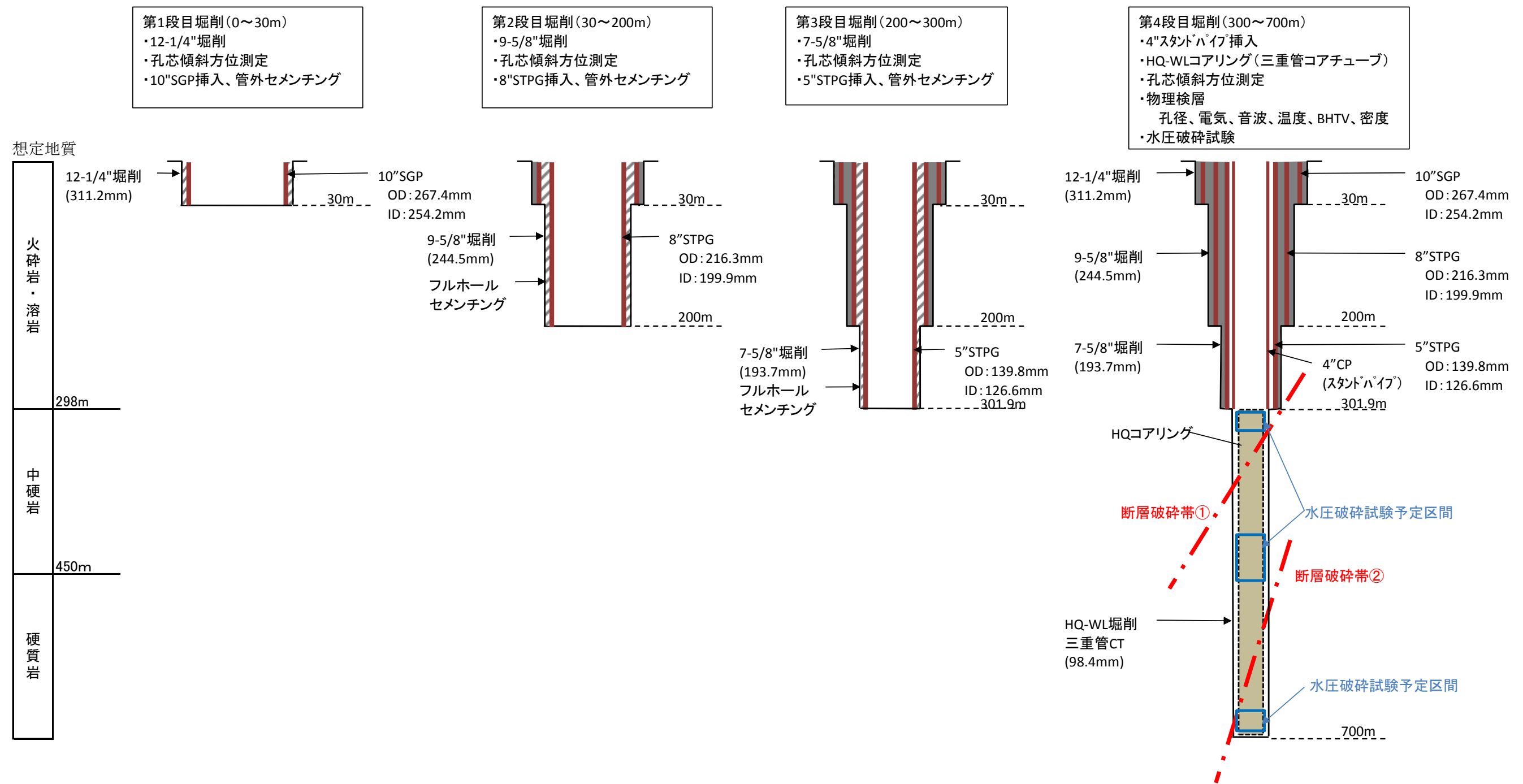
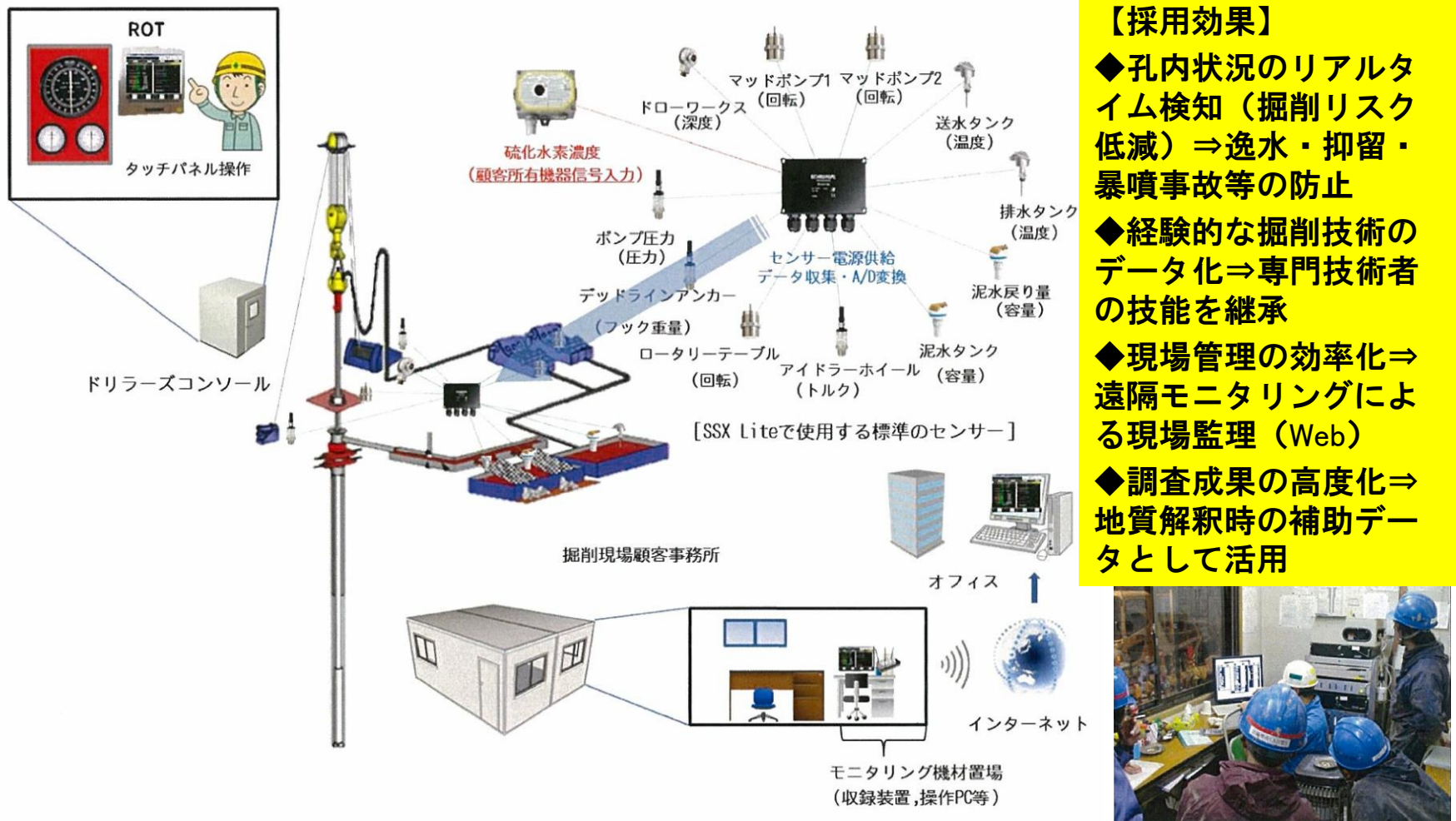


図 3.43 ケーシングプログラム計画





- 【採用効果】**
- ◆孔内状況のリアルタイム検知（掘削リスク低減）⇒逸水・抑留・暴噴事故等の防止
  - ◆経験的な掘削技術のデータ化⇒専門技術者の技能を継承
  - ◆現場管理の効率化⇒遠隔モニタリングによる現場監理（Web）
  - ◆調査成果の高度化⇒地質解釈時の補助データとして活用

図 3.44 マッドロギングシステムの概要

(1) 使用機器

本孔掘削に使用する櫓及びボーリングマシンは下図の通りとした。

なお、ボーリングマシンは、掘削の途中段階で、より掘削性能の高い RESORT21 に交換した。

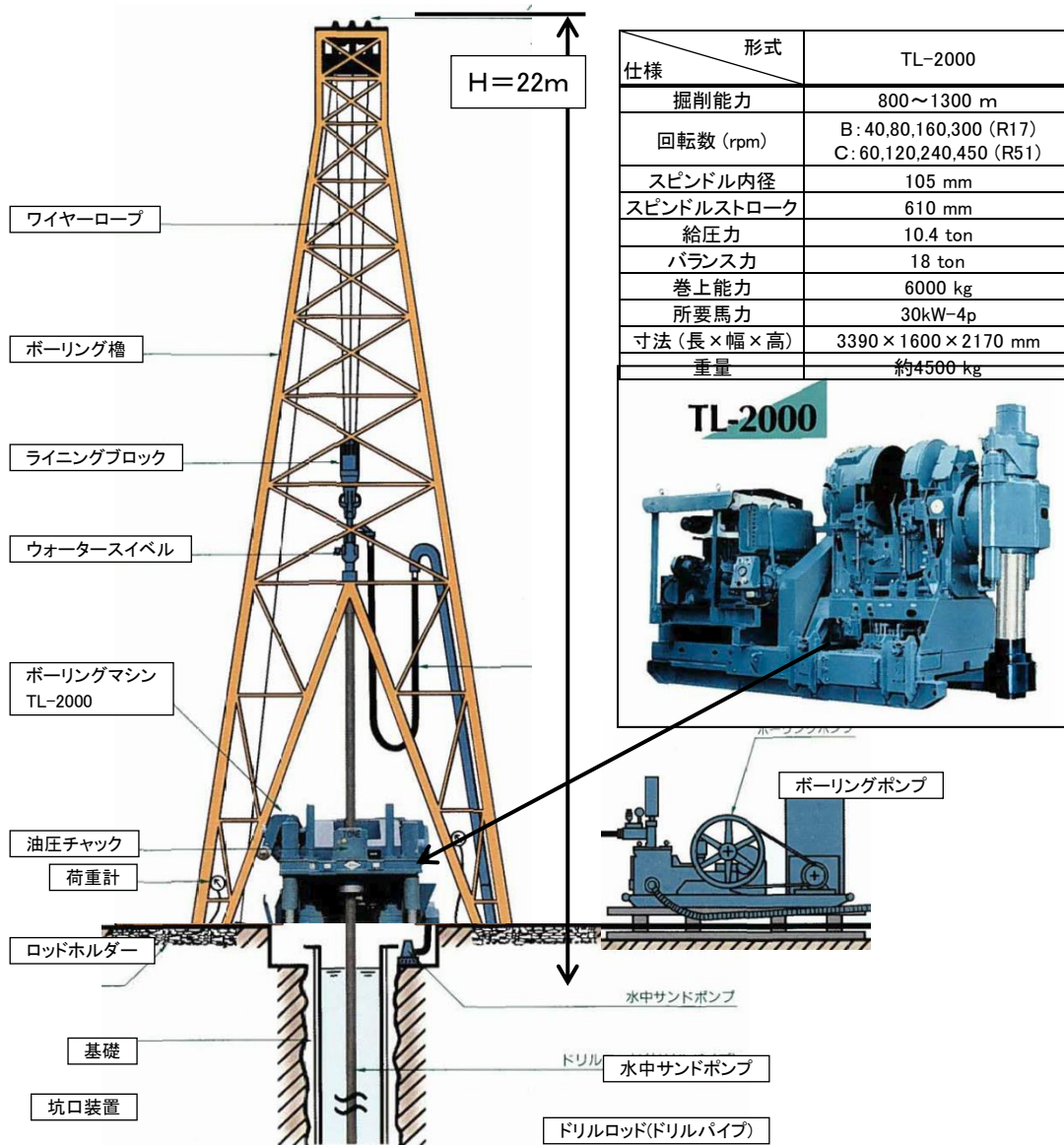


図 3.45 ボーリング櫓及びマシン概要図

表 3.10 主要器械一覧表

機 械 名	型 式 ・ 規 格	単 位	数 量	使 用 工 種	備 考
試錐機	TL-2000	台	1	掘削(泥水掘削)	
同上モーター	35kW	台	1	"	
試錐ポンプ	NP-1000	台	1	掘削(泥水掘削)	
同上モーター	55kW	台	1	"	
試錐ポンプ	MG-15	台	1	WL-HQコアリング	
同上モーター	15kW	台	1	"	
デカンタ(遠心分離機)	MW-4	台	1	全般	
櫓	鉄骨4脚 H=22m	基	1	"	
WLホイスト	6mm×1500m巻	台	1	WL-HQコアリング	
発電機	150KVA	台	1	全般	
フックブロック	3車	台	1	"	
ウォークライン	21mm	m	180	"	
ミキサー	PM-1200(900L練)	台	1	"	
サクシオンタンク	7m <sup>3</sup>	槽	1	"	
貯水タンク	7m <sup>3</sup>	槽	1	"	
排泥タンク	7m <sup>3</sup>	槽	1	"	
マイティプーラー		台	1	"	
ドリルパイプ	2-7/8" 6m/本	本	70	掘削(泥水掘削)	
"	3-1/2" 6m/本	本	210	"	
ロッド	HQ 3m/本	本	210	WL-HQコアリング	
ドリルカラー	6-1/4" ノンマグ	t	6	掘削(泥水掘削)	
"	8" ノンマグ	t	6	"	
ビット	12-1/4"	式	1	"	
"	9-5/8"	式	1	"	
"	7-5/8"	式	1	"	
スタビライザー	12-1/4"	式	1	"	
"	9-5/8"	式	1	"	
"	7-5/8"	式	1	"	
コアバレル	HQ	式	1	WL-HQコアリング	
ウォータースイベル	32GA	台	1	全般	
デリベリホース	2"耐圧140kg/cm <sup>2</sup>	m	20	"	
足場パイプ		式	1	"	
板材		式	1	"	
ロータリートング		式	1	"	
サンドポンプ	4"	台	1	"	
サンドポンプ	2"	台	5	"	
サニーホース	4"	m	100	"	
照明器具		式	1	"	
4tユニック	2.93t吊り	台	1	"	
25tラフター	25t吊り	台	1	仮設・撤去	
傾斜計	村田式 TYPE-SR5°	台	1	孔芯傾斜方位測定	
工具類		式	1	全般	



表 3.11 主要資材一覧表

資 材 名	規 格	単 位	数 量	工 種	備 考
ケーシング管	SGP250A、5.45m/本	本	6	第1段ケーシング	ネジ接合
フロートシュー	SGP250A、0.5m/個	個	1	第1段セメンチング	
セメント	普通ポルトランド 25kg/袋	袋	31	第1段セメンチング	比重1.8 割増1.1
ケーシング管	STPG200A、5.45m/本	本	37	第2段ケーシング	ネジ接合
フロートカラー	SGP250A、0.5m/個	個	1	第2段セメンチング	
フロートシュー	SGP250A、0.5m/個	個	1	第2段セメンチング	
セメント	普通ポルトランド 25kg/袋	袋	108	第2段セメンチング	比重1.8 割増1.1
ケーシング管	STPG125A、5.45m/本	本	74	第3段ケーシング	ネジ接合
フロートカラー	SGP125A、0.5m/個	個	1	第3段セメンチング	
フロートシュー	SGP125A、0.5m/個	個	1	第3段セメンチング	
セメント	普通ポルトランド 25kg/袋	袋	310	第3段セメンチング	比重1.8 割増1.1

### 3.5 ボーリングコア試料の詳細観察と地質構造解析

採取したボーリングコア試料はコア箱に入れて整理し、湿潤状態のコアの写真撮影を行った後に、ボーリングコア観察により地層区分や岩質、破碎組織等を柱状図に記載した。

なお、コア採取を行わない区間の地質状況についても、カッティングス試料の採取・観察や、掘削時の送水圧、送・排水量等の記録を行い、柱状図に記載を行った。

また、既往の研究成果等により推定された地質構造と対応させ、既往成果ならびに本業務成果を総合的に取りまとめた地質断面図を作成した。

### 3.6 各種物理検層及び解析

断層周辺の地層の物性を詳細に把握するために、ボーリング調査においてコア採取を行った区間を対象に、以下に示す(a) 孔径検層、(b) 温度検層、(c) 音波検層、(d) 電気検層、(e) 方位傾斜測定、及び(f)ボアホールテレビュアによる孔壁観察を実施した。

各種物理検層結果は、個々の計測結果を解析・整理すると共に、総合柱状図として取りまとめた。

物理検層(a)～(f)で用いられた標準的な機器の仕様を表 3.12 に示す。本業務の物理検層には同等もしくは同等以上の性能を持つ機器を使用した。

表 3.12 物理検層の項目と標準仕様一覧

項目	試験名	仕様	数量
(a)	孔径検層 (キャリパ検層)	X-Y2 軸のデータを取得すること	深度 300m 以深の 300m 間
(b)	温度検層	0.1℃程度の分解能を有すること	深度 300m 以深の 300m 間
(c)	音波検層	周波数 20kHz 以上、収録深度間隔 10cm 程度とすること	深度 300m 以深の 300m 間
(d)	電気検層 (ノルマル検層)	異なる 2 種類の電極間隔によるデー タと自然電位を同時計測すること	深度 300m 以深の 300m 間
(e)	方位傾斜測定	傾斜角±0.5 度、方位±1～1.2 程度の 分解能を有すること	深度 300m 以深の 300m 間
(f)	孔壁観察 (ボアホールテレビュア)	超音波を用いる装置は 1.2MHz 程度 の周波数で発振すること	深度 300m 以深の 300m 間

表 3.13 物理検層使用機器一覧表

種 目	機 器	型 式	仕 様
孔径検層	地上機器	LPM-202 RMM-2003 (×2)	電源: AC 100V ±10% 50/60 Hz BIN DC 300 V ・測定電源 90 mA
	孔内機器	X-Y AXIS	外径: 89 mm 全長: 318 cm 測定範囲: 127 ~ 444 cm 耐圧: 124MPa 測定温度: Max 150 °C
温度検層	地上機器	SYSTEM VI	電源: AC115V 50/60 Hz 供給電流: 250 mA, 供給電圧: Max180V
	孔内機器	8044	外径: 51 mm 全長: 2.4 m 測定範囲: 0~70 °C 測定精度: ±5.0 %/F. S. 分解能: 0.07°C
音波検層	地上機器	MATRIX Logger	
	孔内機器	FWS50	外径: 5.0cm 全長: 320.0cm 対応坑径: 4-14in 耐圧: 20MPa 耐温: 70°C センサパースピグ: 80, 120, 160cm 基本周波数: 20kHz
電気検層	地上機器	SYSTEM VI	電源: AC115V 50/60 Hz 供給電流: 250 mA, 供給電圧: Max180V
	孔内機器	8044	外径: 51 mm 全長: 2.4 m 電極: 16inch/ルマル / 64inch/ルマル / SP
方位傾斜測定 ホアホル テレビュー 検 層	地上機器	MATRIX Logger	
	孔内機器	ABI40	外径: 40mm 全長: 2.47m 耐圧: 20MPa 耐温: 70°C 音響センサー: トランスデューサー 基本周波数: 1200kHz 方位分解能: 1.25°, 2.5°, 5.0° (任意) 最小深度サンプリング深度: 3mm (方位分解能2.5°, 測定速度2m/min時) 方位センサー: 3軸加速度センサー, 3軸地磁気センサー 精度: 傾斜±0.5°, 方位±1.0°
	解析処理	解析ソフト	WellCAD 5.1 (Advanced Logic Technology)

表 3.14 物理検層使用機器一覧表（全種目共通）

種 目	機 器	型 式	仕 様
全種目共通	検層車	三菱ファイター	三菱自動車・軽油車
	ケーブル	7芯硬鋼線 アーマードケーブル	外径： 9.5 mm 耐熱： 260 °C
	エンコーダ	深度パルスエンコーダ	分解能： 1,000カウント/m 許容速度： 200m/min
	データ収録 ・ データ処理  (SYSTEM VI MATRIX Logger EXCELL 2000-G 使用検層 種目を除く)	BINモジュール型 GSC検層データ 収録システム	多ペンレコーダ (R0-300) Ch数： 6Chs 入力形式： フロティング方式 測定範囲： 0.5mV～50V/F.S. 精度： ±0.25%F.S. 以下 (DC電圧の場合) 感度： ±0.1%F.S. 以下 外部データ出力： 各Ch1V/F.S.  ICカード型データ収録装置 (ID-06 GSC) 収録メディア： SRAM (2MB*2スロット), 内蔵RAM 記録データ分解能： 12bits (0.025%F.S.) サンプリング周期： 1Sample/1外部深度パルス データ形式： ASCII、16進データ  プレイバックスケータ (PBS-mini) 外部深度パルス出力： 深度1cm/10cm毎 (外部分周器により2cm/5cmサンプル可能) 検層深度方向切替機能： Up/Down Survey
	データ収録 データ処理 ツール制御	SYSTEM VI	ツール制御インターフェイス 使用OS: Windows 98 以降 電源： AC115V 50/60 Hz 供給電流： 250 mA, 供給電圧： Max180V
	データ収録 データ処理 ツール制御	MATRIX Logger	ツール制御インターフェイス 使用OS： Windows 2000/XP/Vista 電源： AC100-240V 50/60 Hz Dual DSP

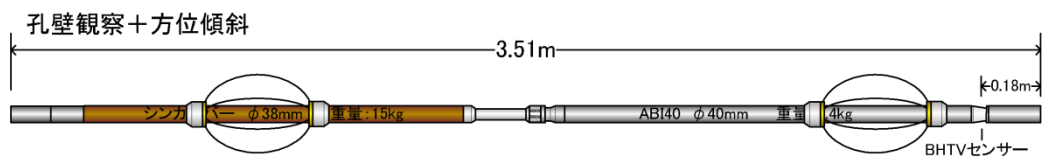
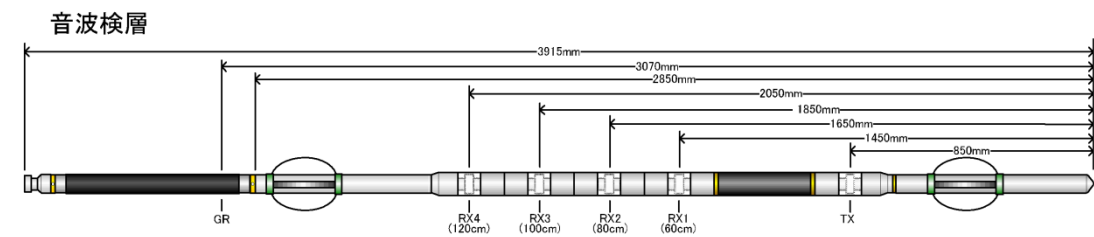
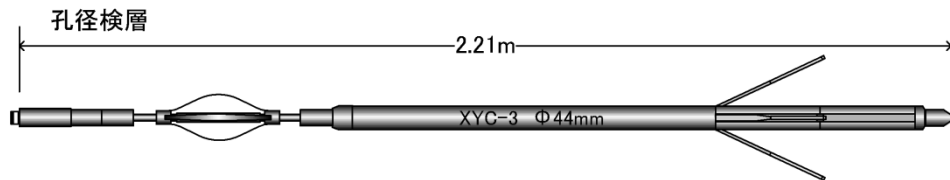
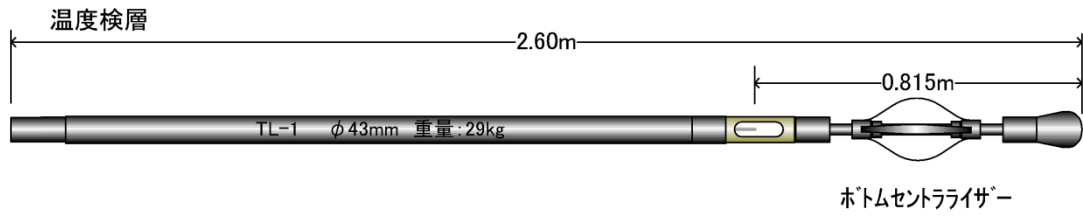


図 3.46 物理検層使用ツール（寸法）一覧図

### 3.6.1 孔径検層（キャリパ検層）

ボーリング孔を利用して、孔径検層（キャリパ検層）を実施し、断層破碎部周辺のボーリング孔径を把握した。孔径データは各種検層の解釈時の基礎データとして利用した。孔径の測定機器はケーシング挿入状況等に合わせて、適切なものを選定した。

#### （1）測定原理及び測定方法

孔径検層は、深度に対して孔径の変化を連続的に測定記録し、孔内における空洞、崩壊の位置やその形状・程度を把握するために実施する。また、孔径による補正を必要とする他の検層結果の解釈などにも用いられる。孔径検層に用いられるゾンデは、内部に小型モーターを内蔵し、地上からの操作によりアームの開閉ができる。キャリパーアームの機械的な開き具合は電気パルスに変換され、地上に伝送される。

測定は、ゾンデのアームを閉じた状態で孔内に降下し、測定区間の最深部となる箇所であらアームを開き、キャリパーアームを孔壁に密着させる。測定器を巻き上げながら、アームに記録される孔壁の凹凸から孔径の変化を測定する。

一般に破碎帯や断層、軟弱地質においては、孔壁が崩壊しやすく孔径拡大が顕著に認められる。また、孔径検層から得られた測定値より孔内容量等を算出し、セメンチング作業の情報として利用されている。



図 3.47 XY-孔径ゾンデ（小孔径用）

### 3.6.2 温度検層

ボーリング孔内の温度を連続的に測定して地層の温度を測定した。流体の流動により生ずる微細な温度変化を記録することにより、地盤の亀裂等を確認した。温度検層に用いる感熱素子には、抵抗式温度測定素子であるサーミスタを用いた。

#### (1) 測定原理及び測定方法

温度検層は、孔内の温度を深度に対して連続的に測定して地層の温度を決定する手法で、一般に逸水層、出水層及び帯水層などの位置判定に利用されている。この温度の測定においては、流体の流動により生ずる微細な温度変化を記録することが重要な要素となる。温度検層器の感熱素子には、抵抗式温度測定素子であるサーミスタを使用している。サーミスタは、温度が上昇すると抵抗値が小さくなる性質があり、この温度特性を利用して孔内水の温度を測定する。

測定の等価回路を図 3.48 に示す。図に示すように、地上から 1mA の一定電流を供給し、サーミスタ両端の電位降下を孔内で測定して、その抵抗変化を求める。ケーブル抵抗  $R1$ 、 $R2$  の抵抗が十分小さくサーミスタ  $R$  に比べて電位差計の入力インピーダンスが十分大きければ、測定電圧は  $V=IR$  となりケーブル抵抗に関係なくサーミスタの抵抗を知ることができる。しかし、実際にはケーブル抵抗が存在するので、ケーブル補償回路が付加された機構になっている。

測定は、降下しながら行なうのが一般的で、地層温度に近い測定値を得るためには孔井を長時間放置しておく必要がある。図 3.49 に本孔で使用した温度検層ツールを示す。

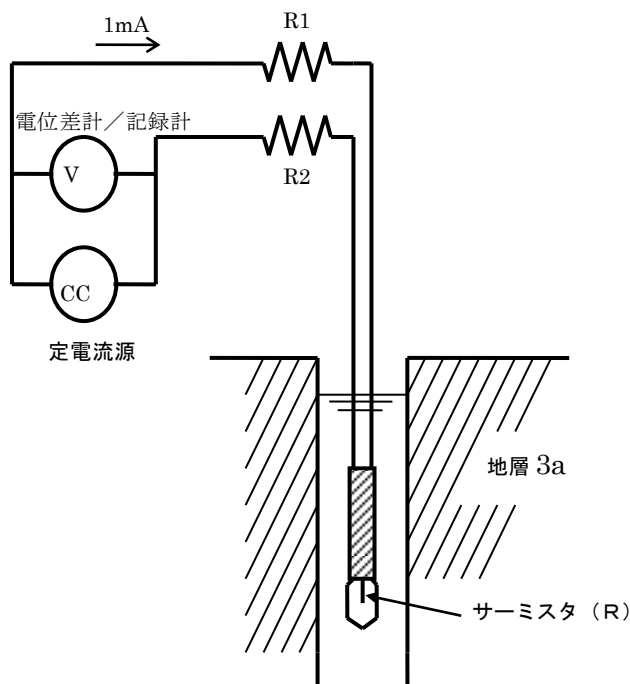


図 3.48 温度検層の測定概念図

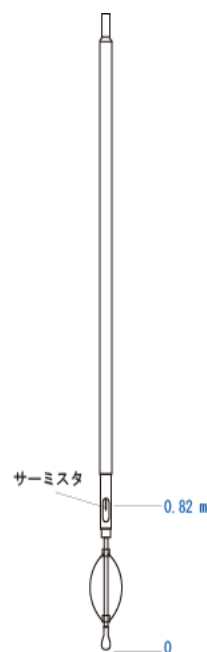


図 3.49 温度検層ツール  
(長さの単位：m)



### 3.6.3 音波検層

ボーリング孔を利用して音波検層（速度検層）を実施することにより、ボーリング孔沿いの弾性波速度（P波）を把握した。得られたP波から地層の硬軟や割れ目の分布、孔径変化などの情報を取得した。

#### （1）測定原理及び測定方法

##### 【測定方法】

音波検層に用いられる測定器は、超音波発振器及び受信器から構成され、発振器から発振した超音波は孔内水を伝播して孔壁に達し、その一部は屈折して孔壁(地層)を伝播し、再び孔内水に輻射された音波を受信器で計測する。計測された受信波からは、音波の区間走時、振幅量等の変化が求められ、それらを連続的に記録する。

本孔では4個の圧電型受信子(60cm、80cm、100cm、120cm)を持ったタイプを使用した(図3.50参照)。

測定されたデータは測定ツール内でデジタル信号化され、アーマード・ケーブルにより地上装置に伝送される。今回の測定では発振時より約4,000 $\mu$ secまでの波形をレシーバごとに収録する。

測定信号波形にはP波、S波等が含まれるが、一般の音波検層においては、P波の初動のみが測定される。測定された区間走時(一定区間を走行する音波の走行時間)からは、地層の速度値が求められ、音波信号は地層の硬軟や割れ目の分布、孔径変化などによる信号振幅の変化や地層内の反射面からもたらされる位相変化には、様々な情報が含まれている。

このようにして得られた弾性波速度は、受信波形を輝度変調し連続的に出力したインテンシティー・ログ(またはVDL(Variable Density Log))と共にログ上に表される。VDLは全受信時間について波形情報が表示されるため、弾性波速度値では把握できない波形の反射や位相ずれ等、多くの孔内情報を知ることができる(図3.51参照)。

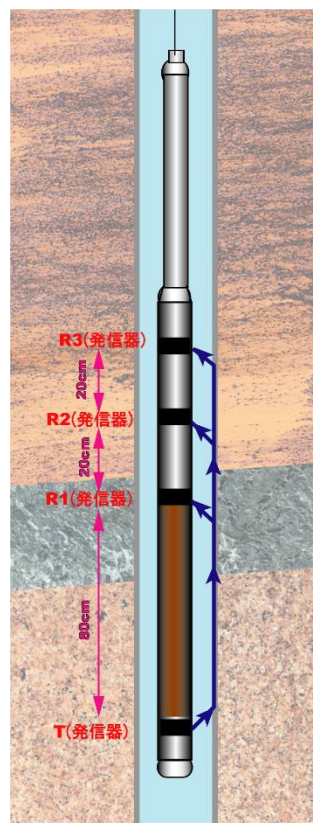


図 3.50 音波検層概念図

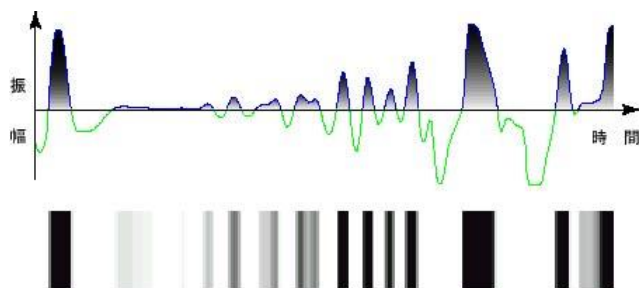


図 3.51 インテンシティー・ログ概念図

【解析方法】

従来の音波検層では受信機が2個であり、それぞれの受信波形の振幅があるしきい値を超えた位置での時間差を区間走時とし弾性波速度に換算していた。

本手法では、複数の波形同士がどの程度数学的に類似しているかを定量的に計算している。類似性を示す指標はセンブランス値と呼ばれる（Kimball 他）。送受信機間の異なる複数の波形からセンブランス値を算出し、最大値に達するまでの時間差を区間走時としている。硬岩における音波波形の一例とセンブランス処理の概念図を図 3.52 に示す。波形同士の類似性の高いピークが3つ現れ、これらは伝播時間の早い順に屈折P波、屈折S波、ストーンレー波の到達を示している。のように到達時間をセンブランスマップとして表示し、得られたスローネス（ $\mu \text{ sec/ft}$  または  $\mu \text{ sec/m}$ ）から弾性波速度(km/sec)に換算する。

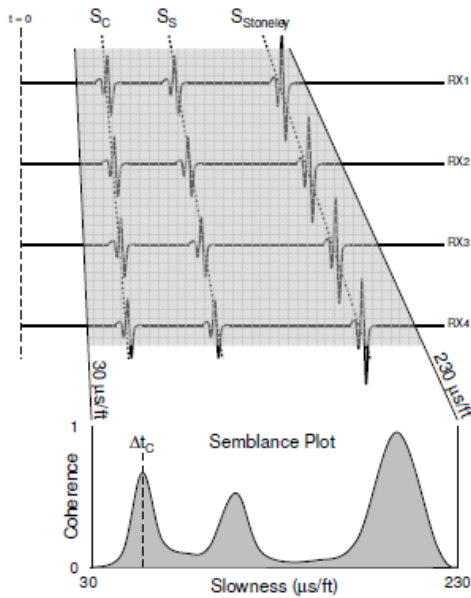


図 3.52 センブランス処理の概念図  
(4 レシーバ、硬岩の場合)

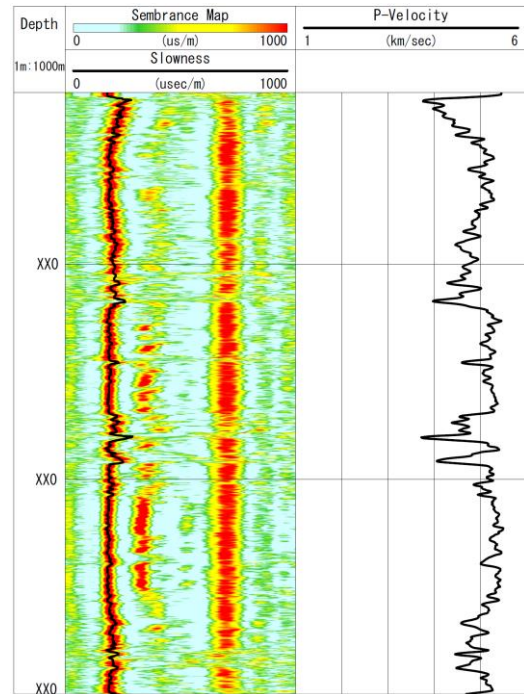


図 3.53 センブランスマップとスローネス  
(硬岩の場合)

【参考文献】

- ・ Christopher V. Kimball and Thomas L. Marzetta 、 Semblance processing of borehole acoustic array data: Geophysics 49(March 1984)、 274-281

### 3.6.4 電気検層（ノルマル検層）

ボーリング孔を利用して電気検層（ノルマル検層）を実施し、ボーリング孔沿いの比抵抗値を連続的に取得した。電気検層は 2 極法（ノルマル法）を用い、2 種類の電極間隔（25cm/100cm または 16inch/64inch）で測定を実施し、電極間隔 25cm（16inch）の比抵抗（ショートノルマル比抵抗）と電極間隔 100cm（64inch）の比抵抗（ロングノルマル比抵抗）を計測した。

#### （1）測定原理及び測定方法

ノルマル比抵抗検層は、導電性の液体に満たされた孔井内で孔壁に電流を流して電位を測定し、孔壁周辺の岩盤の比抵抗データを連続して取得するものである。図 3.54 に測定システムの概略を示す。A、B が電流電極、N、M が電位電極である。

岩盤が等方均質の場合は、電流電極 A のまわりの等電位面は球面となり、比抵抗値  $\rho$  は、電流  $I$  と電位  $V$  から次式で算出される。

$$\rho = 4\pi AM \cdot V / I$$

ここで、AM は電極間隔またはスペーシングと呼ばれる。AM を大きくすると探査深度が深くなり、孔壁から離れた岩盤までが測定対象となる。ただし、この場合は鉛直（孔井軸）方向の分解能が低くなる。一方、AM を小さくとると、探査深度は浅くなり、測定対象は孔壁のごく周辺の岩盤に限られるが、鉛直方向の分解能は高くなる。

通常電気検層は 2 極法（ノルマル法）を用い、2 種類の電極間隔（16inch/64inch または 25cm/100cm）で測定している。電極間隔 16inch（25cm）の比抵抗をショートノルマル比抵抗、電極間隔 64inch（100cm）の比抵抗をロングノルマル比抵抗と呼んで区別している。

実際の岩盤は等方均質でなく、また電位が孔径や孔内水の比抵抗の影響を受けるため、電流電極 A のまわりの等電位面は歪んで球面でなくなることから、上式から算出される  $\rho$  は見掛け比抵抗と呼ばれる。

電気検層では、比抵抗と同時に地層の自然電位(SP)も連続的に測定する。自然電位は孔井内電極 M と地上の電極 N との間の電位差である。自然電位の発生機構としては、イオンを含む地層水が流動するときに生ずる流動電位と、塩分濃度の異なる地層水と掘削泥水によって生じる電気化学的電位があり、大部分が後者の効果であると考えられている。

電気化学的電位には、拡散電位と膜電位がある。砂岩などの浸透層と頁岩からなる堆積層では、浸透層である砂岩中で泥水濾過水と地層水が接触し、拡散電位が生じる。また、砂岩/頁岩境界部では頁岩が陽イオン膜として働くことにより膜電位が生じる。地層水の塩分濃度が掘削泥水よりも高い場合には、砂岩では自然電位が低く、頁岩の自然電位は高い。頁岩と砂岩の自然電位差を SP 偏差と呼び、SP 偏差から粘土成分の含有量を簡易的に算出する。通常、100%頁岩層が連続している地層の SP 曲線は高電位で測定され、その曲線を SP の 100%頁岩ベースラインと呼ぶ。

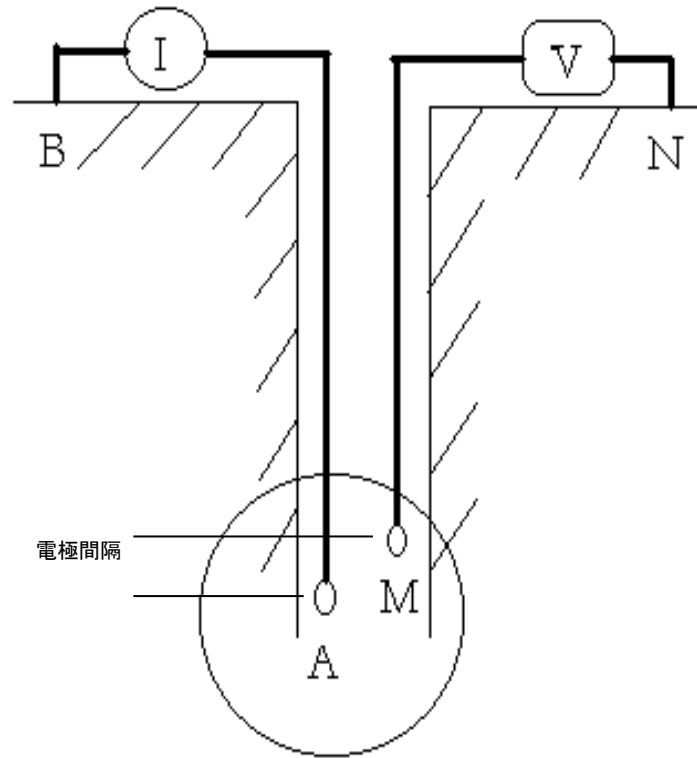


図 3.54 電気検層の概念図

### 3.6.5 方位傾斜測定

ボーリング孔内に方位・傾斜計等を降下し、各深度における方位及び傾斜を測定し、孔井軌跡（孔跡）をした。孔井が計画通りに掘削されているかを検証した。

#### (1) 測定原理及び測定方法

孔曲がり測定は、孔井内に方位・傾斜計を降下し、各深度における方位及び傾斜を測定し、孔井軌跡（孔跡）を計算することを目的としている。孔井が初期の計画通りに掘削されているかを検証する場合や、トモグラフィ測定での正確な孔間距離を計算するときに必要な。従来はフィルム上に振り子センサの位置を撮り、それを読取っていたが、現在ではセンサと電気回路とを組み合わせ、連続的に測定できるようになっている。

方位・傾斜計は、2軸の傾斜計と3軸の磁力計で構成され、精度の高い測定を可能にしている。測定環境は塩ビパイプ等の非磁性ケーシングパイプ内か裸孔内に限定される。データは、デジタル形式で収録され、データ解析も容易にできる。

方位・傾斜の測定値から計算した孔跡断面図の一例を図 3.55 に示す。

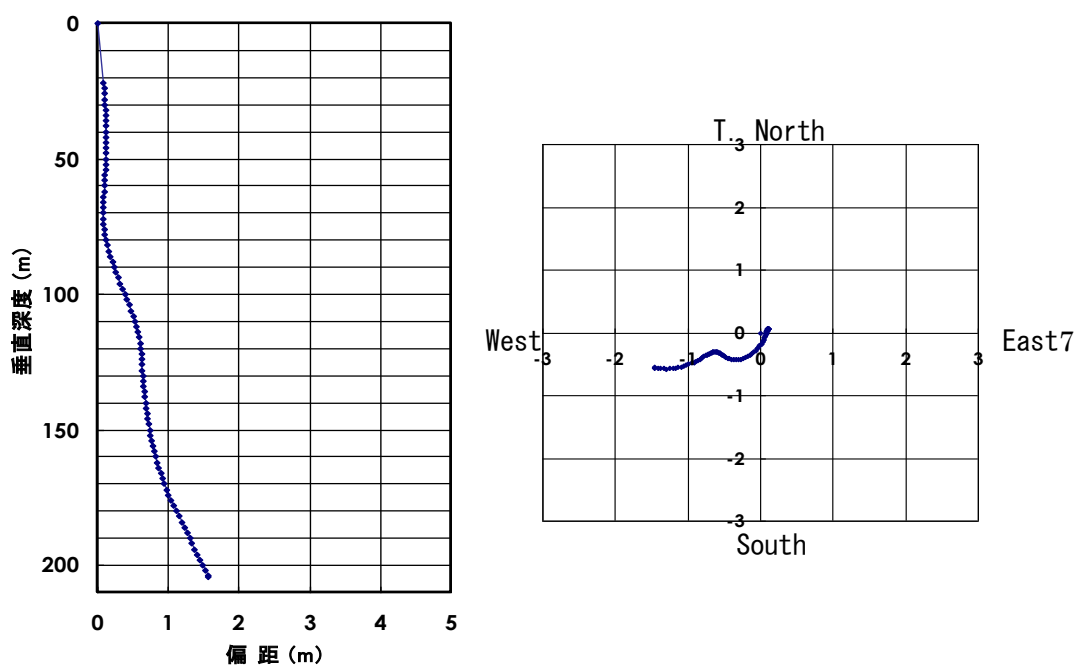


図 3.55 孔跡断面図。(左)：偏距—垂直深度図、(右)：平面孔跡図

### 3.6.6 孔壁観察（ボアホールテレビュア）

ボーリング孔を利用してボアホールテレビュアによる孔壁観察を実施し、孔壁状況を光学式カメラ（テレビュアの場合は音波による走査）で収録することにより、地盤の亀裂及びその方位を把握した。

#### （1）測定原理及び測定方法

##### 【測定方法】

BHTV は流体で満たされた孔井の孔壁を音波で走査することにより、孔壁の状態を画像として表す測定器である。

BHTV ツールは、音波の送受信を行うことによって孔壁の状態を調べる圧電形トランスデューサーと、地磁気及び重力加速度を検出することによってツールの方角・傾斜を調べる 3 軸加速度・地磁気センサにより構成される。受信した孔壁からの反射波は、ツールの内蔵エレクトロニクスにより波形処理した後、地上の収録システムに伝送され、画像化される（図 3.56 参照）。

ツール内のミラーは、毎秒 3～10 回転の速度で高回転しながらトランスデューサー（基本周波数 1,200 kHz）から発振した音波エネルギーを非常に細かいビーム状に収束して孔壁に向けて発射する。そして、音波エネルギーの一部が孔壁から反射し、ミラーを経由してトランスデューサーに受信される。

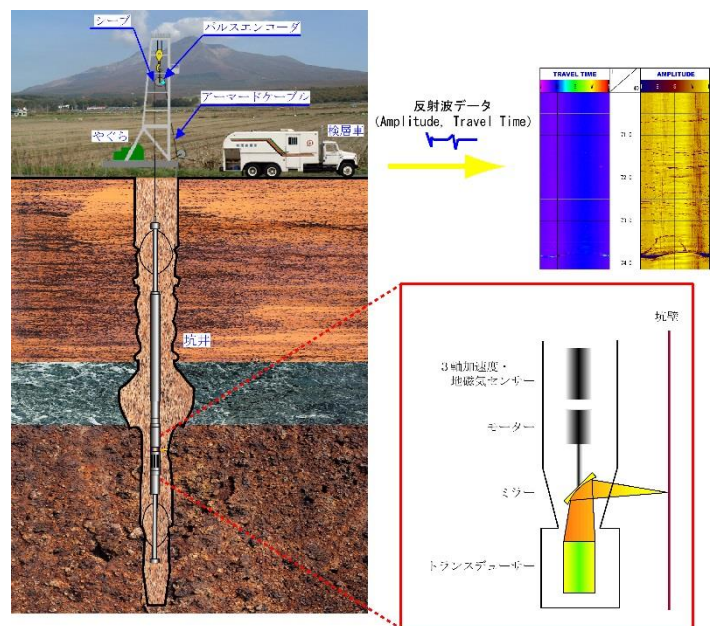


図 3.56 孔壁画像（BHTV）検層の概念図

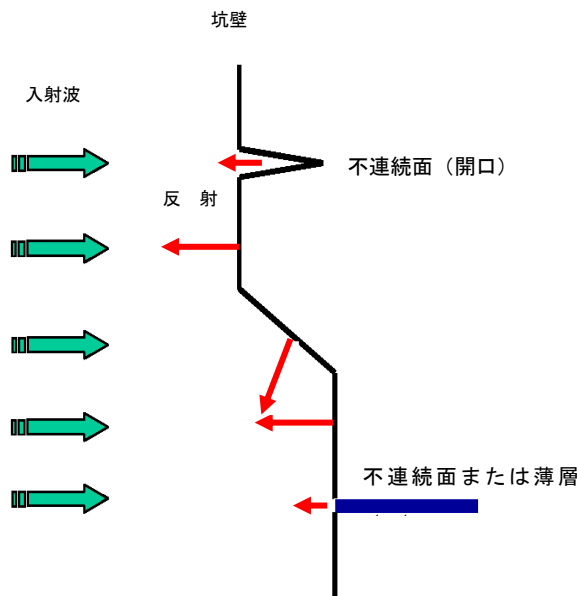


図 3.57 孔壁における反射波の概念図

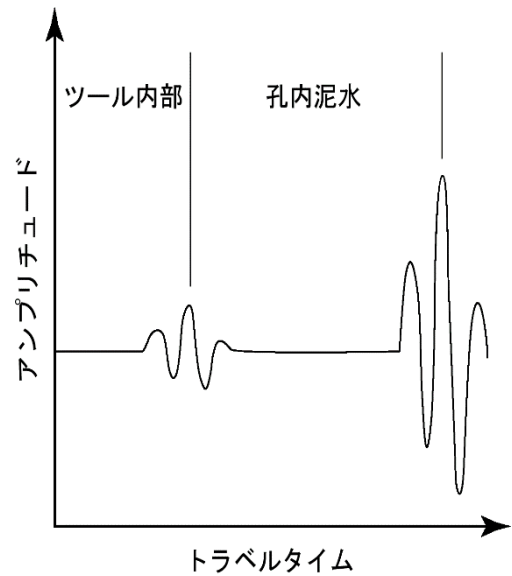


図 3.58 反射波のアンプリチュードとトラベルタイム

孔壁から反射される音波エネルギーの大きさは、孔壁の表面の物理的性質によって左右され、滑らかな表面は粗い表面よりもよく反射し、硬い表面は柔らかい表面よりもよく反射する。更にトランスデューサーに対して反射面が斜めの場合は、反射エネルギーは著しく減少する。一般に表面のどのような不規則さも、反射信号の振幅を減少させる（図 3.57 参照）。

BHTV 検層の測定データ（孔壁からの反射波）は、反射強度（アンプリチュード値）と反射波到達時間（トラベルタイム）の 2 種類である（図 3.58 参照）。反射強度は反射波の強弱を示すので孔壁に亀裂などがあり照射波が吸収されると弱い値を示し、孔壁が硬質で亀裂がなければ強い値を示す。反射波到達時間はツールから孔壁までの距離に変換される。アンプリチュード値及びトラベルタイムを色調の変化に置き換え連続的に表示することにより、孔壁の状況を知ることができる。



## (2) フラクチャー解析

孔壁展開図より肉眼で検知（サインカーブで表せるもののみ）できるフラクチャーのみについて読み取る。フラクチャーの方位（傾斜方位）と、孔径検層データにより算出した傾斜角を整理した（図 3.59 参照）。

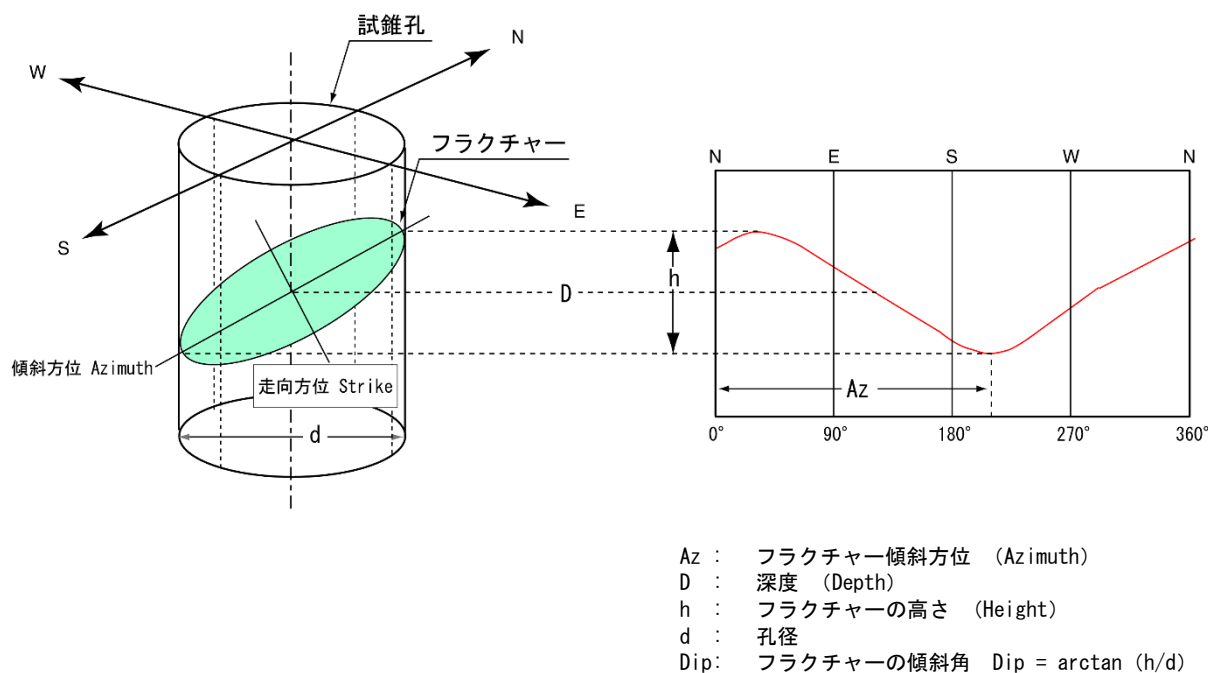


図 3.59 孔壁展開図におけるフラクチャーの形状

BHTV 検層画像から読み取った不連続面は、フラクチャーに関しては信頼度に応じて以下の3つに分類した。また、地層傾斜を示すものとして読み取った層理面や葉理面に関しては、フラクチャー系と区別して取り扱う必要があることから、別途 FD (Formation Dip) として分類した。

- ランク 1 : 坑径画像ログ上に 7 割以上不連続面を現すサインカーブが認められる
- ランク 2 : 坑径画像ログ上に一部でも不連続面を表すサインカーブが認められる
- ランク 3 : 坑径画像ログ上に不連続面を現すサインカーブが認められず、アンプリチュード画像ログ上に不連続面の一部が認められるのみで、信頼度が乏しいもの
- ランク 4 : 地層境界及び地層傾斜 (FD : 層理面や葉理面)

また、フラクチャー解析結果として、以下の表や図を作成する。

フラクチャー結果一覧表：

読み取ったフラクチャーの傾斜方位、傾斜角、明瞭度を一覧にしたもの

ローズダイアグラム：

フラクチャー傾斜方位の 10°ごとの方位分布を示す（円の中心を 0 個、円周上を最大値とする）

シュミットネット投影図：

フラクチャーの傾斜方位（ローズダイアグラムとは逆の投影となる）及び傾斜分布（ポーラープロット）、または傾斜頻度（コンターマップ）を示す（円の中心を 0°、円周上を 90°）

フラクチャー頻度分布：

1m ごとのフラクチャー検出本数を示す

アロープロット・ログ：

深度（縦軸）に対するフラクチャーの傾斜方位と傾斜角度（横軸）を示す（参照図 3.60）

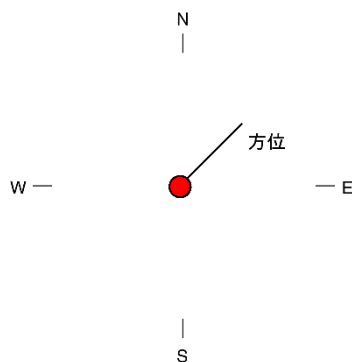


図 3.60 アロープロットとその方位

### 3.7 水圧破碎試験及び解析

断層ならびに破碎帯を確認した深度を参考に、その上・下盤の良好な岩盤区間において、地下深部の初期応力の大きさならびに方向を評価する目的で、水圧破碎試験を実施した。試験区間の孔径は HQ とした。

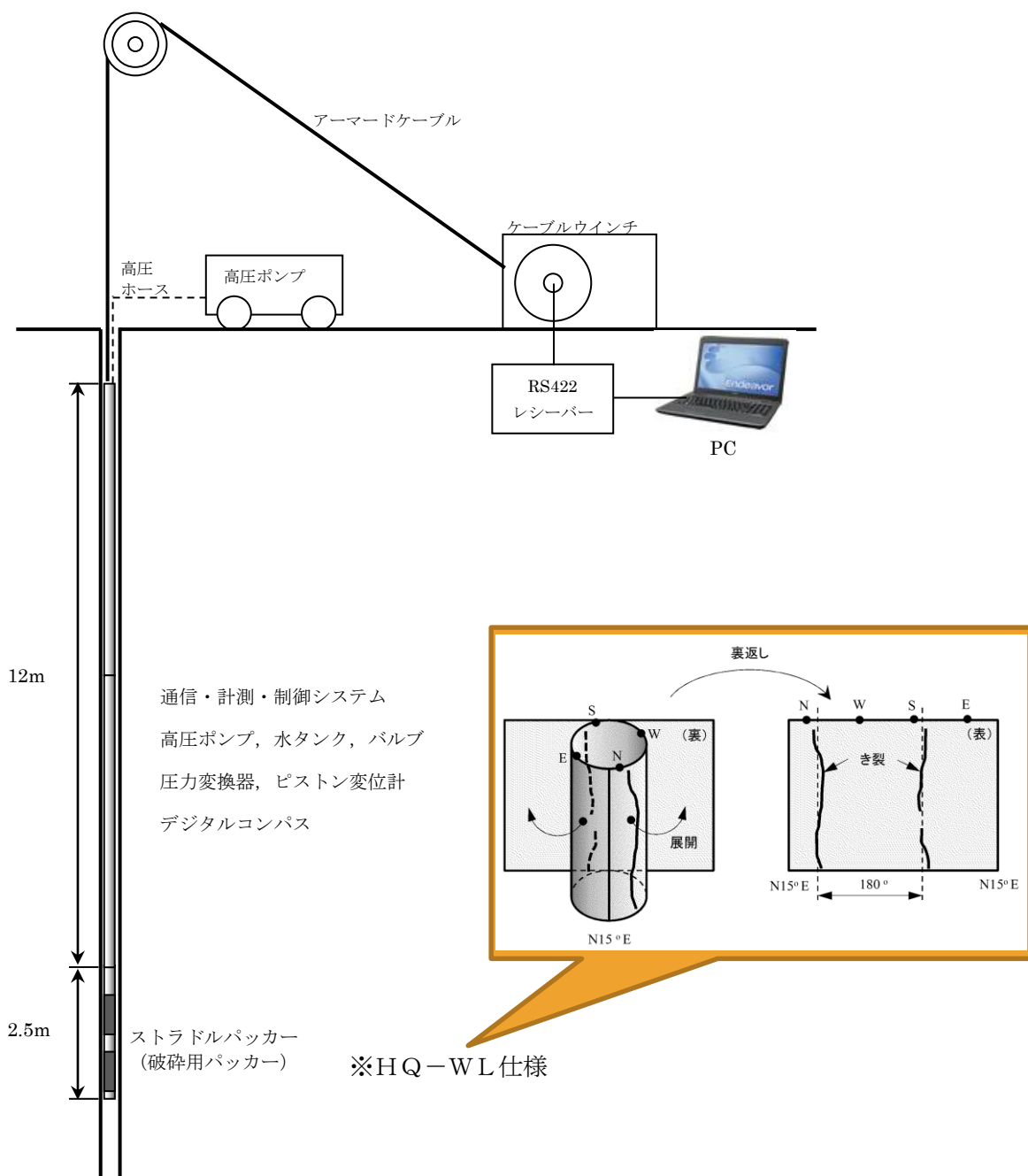
試験深度は、掘削深度 300～700m 間の 3 深度を選定することとした（図 3.43 のケーシングプログラム孔内図参照）。

試験区間の選定にあたっては、ボーリングコアならびにボアホールテレビュアの取得画像、孔径検層結果の評価を行い、特に高角度の亀裂や変質等がなく、良好な岩盤区間を選定し、担当者との協議の上で決定した。

水圧破碎試験の標準的な使用機器と性能を表 3.15 に、装置の概要図を図 3.61 に示す。本業務の水圧破碎試験については、これらと同等もしくは同等以上の性能と既往研究等での使用実績を持つ機器を使用し、下記の①～⑦の手順を基本として試験を実施した。

表 3.15 測定機器と標準仕様一覧

測定機器	メーカー	数量
ストラドルパッカー、耐圧 30MPa 以上	(株)明間ボーリング	1 本
インプレッションパッカー、耐圧 30MPa	(株)明間ボーリング	1 本
ケーブルウインチ、11kW、1500m 用	(有)和田鉄工	1 台
地表高圧ポンプ、JRX-110-400、11kW、10000cc/min、最高吐出圧力 40MPa	(株)荏原製作所	1 台
坑内高圧ポンプ、200cc/min、最高吐出圧力 50MPa	(株)明間ボーリング	1 台
システムコントローラー、Dynabook	東芝電気(株)	1 台
圧力トランスミッタ、PX309、測定範囲 0～517MPa	Omegadyne, Inc.	1 台
流量計（地表）、MP-MCF-SLE、測定範囲 5000cc/min	流体工業(株)	1 台
流量計（孔内）、測定流量範囲 0～200cc/min	(株)明間ボーリング	1 台
坑井方位傾斜儀計、最小読取り精度 1 度	(株)村田製作所	1 台



大深度ワイヤライン式の測定現場



2000m級のウインチ

図 3.61 水圧破砕装置 (WL 方式) 概要図

## (1) 試験方法

水圧破碎法によって初期応力を計測・評価する手順は、以下のとおりである。

### ①水圧破碎システムの加圧系のコンプライアンス測定

水圧破碎地殻応力計測法では、ボアホール壁面の縦亀裂（ボアホール軸方向亀裂）を水圧によって作成および開・閉口させ、その際に観測される幾つかの特徴的なボアホール内水圧と、予め理論的に導かれた観測方程式から地殻応力を決定する。特に、亀裂開口圧  $P_r$  を精度良く測定するためには、使用する水圧破碎システムの加圧系のコンプライアンス  $C$  が亀裂のコンプライアンス  $dV_c/dP$  よりも十分に小さくしなければならない。そこで、現場で使用する水圧破碎システム一式を工場で組み立て、亀裂のない鋼管内でストラドルパッカー（破碎用パッカー）を加圧し、ストラドルパッカー上部に設置した流量計から先の加圧配管およびシーリングエレメントを含む全ての部分のコンプライアンス  $C$  を測定する。このようにして測定される加圧系の  $C$  から  $P_r$  の測定誤差を事前に評価する。

### ②試験区間の選定

水圧破碎法の解析理論は、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構築されているので、BHTV 観察、キャリパーの測定結果、コア観察結果および確認した断層位置に基づき割れ目のない安定した試験区間を選定した。

### ③ダミーパッカーの挿入

ダミーパッカーをボアホール内の所定深度まで降下し、ストラドルパッカーが無理なく通過できることを調査する。

### ④水圧破碎前の型取り試験

インプレッションパッカーを用いて水圧破碎前の孔壁の型取りを実施する。

### ⑤予備加圧試験

通常、水圧破碎試験前には、試験深度の選定を行うため、ストラドルパッカーにより試験区間を隔離し、高圧ポンプで水を圧入して、水頭圧を 2MPa 上回る程度まで加圧する予備加圧試験を実施する。この試験では、水の圧入停止後の水圧変化を 10 分間程度測定し、水圧の低下が無い（リークが無い）ことを確認するものである。ただし、FDB-1 孔では、コア鑑定結果から水圧破碎試験に適した亀裂を含まないインタクトな区間はきわめて少ない状況であったことから、任意の試験深度を選択できる余地がなかった。このため、予備加圧試験による試験深度の選定を省略し、②で選定した試験深度で水圧破碎試験を行った。

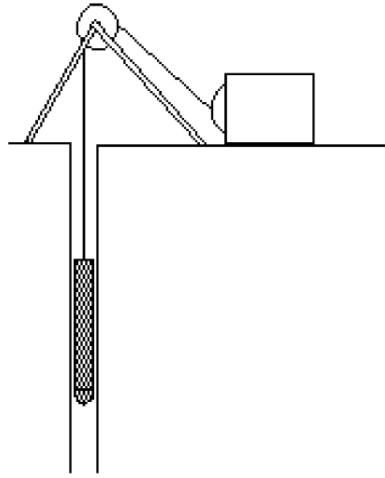
#### ⑥水圧破碎試験

- i) ゾンデ内の高圧ポンプで、試験区間に一定流量（180ml/min 程度）で水を圧入する。
- ii) ゾンデ内の高圧ポンプと加圧区間のバルブを閉じ、水の圧入を停止（シャットイン）する。
- iii) 加圧区間の圧力を開放する等の操作を行い、試験区間の壁面に亀裂を発生・伸展させる。
- iv) 孔内の水圧を上昇させる。岩盤の破碎圧  $P_b$  を越えると孔内水圧は減少する。
- v) シャットインにより孔内水圧を低下・安定させ、亀裂閉口圧  $P_s$  を測定する。
- vi) 圧入とシャットイン、排水を数回繰り返し、破碎圧・亀裂閉口圧・亀裂開口圧を測定する。

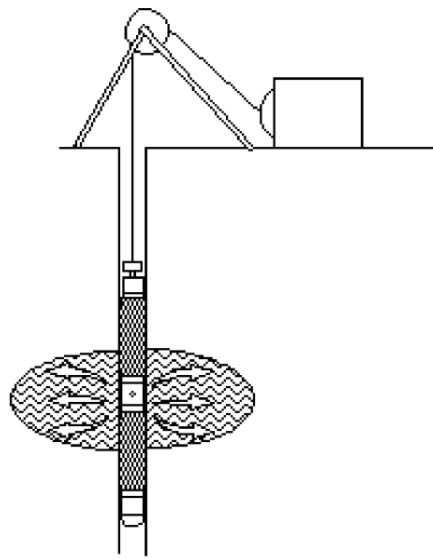
#### ⑦水圧破碎亀裂の型取り試験

水圧破碎後、インプレッションパッカーで亀裂の型取りを行う。インプレッションパッカーには坑井方位傾斜儀計が接続されており、熱収縮チューブの表面に印された基準線の方が測定される。この方位と亀裂のトレースから、新たに発生した亀裂の走向傾斜を決定する。

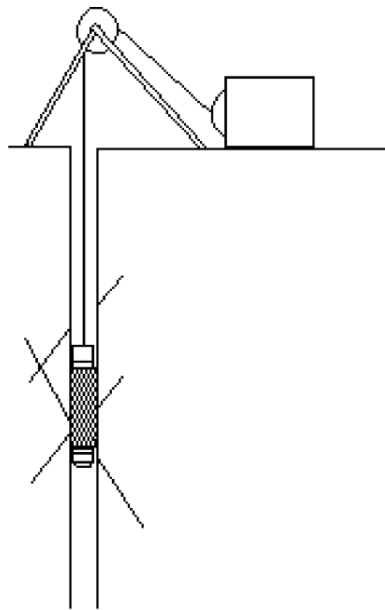
(i) ダミーパッカー挿入



(iii) 水圧破碎試験



(ii) 破碎前の型取り



(iv) 破碎後の型取り

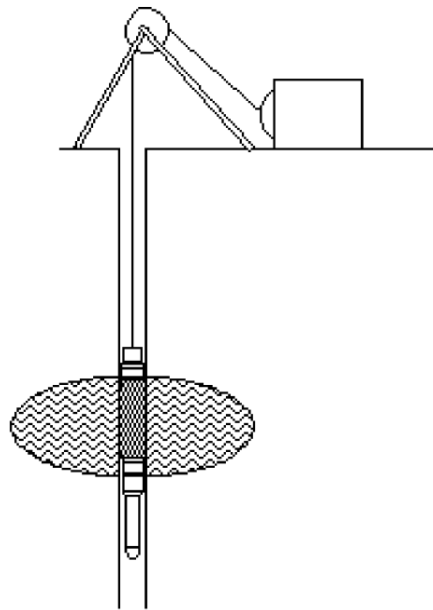


図 3.62 水圧破碎試験の実施手順



## (2) 解析方法

### ①従来の初期応力評価手順

水圧破砕試験によって測定した各観測データから、初期応力の大きさおよび方向を評価する手順は次のとおりである。ただし、初期応力の主軸の一つがボアホール軸に一致しており、かつ、水圧破砕によりボアホール軸と平行ないわゆる縦亀裂が形成された場合を考える。また、岩体中の間隙水圧は 0 であるものとする。このとき、ボアホール内の水圧が破砕圧  $P_b$  に達したときに、孔壁に作用する周方向引張応力が岩体の引張強度  $T$  に達して孔壁から亀裂が発生するものと考え、また、シャットイン後、亀裂内水圧と亀裂面垂直方向の初期圧縮応力が平衡したときにボアホール内の水圧の降下が停止すると考えれば、 $P_b$  および  $P_s$  と初期応力との関係がそれぞれ次式のように与えられる<sup>4,5</sup>。

$$P_b = 3S_h - S_H + T \dots\dots\dots(1)$$

$$P_s = S_h \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $S_H$  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最大主応力および最小主応力である。なお、式(1)と式(2)を含め、以下、初期応力は圧縮を正とする。式(1)と式(2)において  $T$  を既知とすると、未知量は初期圧縮応力  $S_H$  および  $S_h$  の二つになる。したがって、両式の間係を用いれば、 $P_b$  と  $P_s$  の測定値から  $S_H$  および  $S_h$  の大きさを決定できる。ここで、ボアホール中心から見たときの亀裂の方向が  $S_H$  の作用方向である。

式(1)を用いて初期応力を正しく評価するためには、亀裂を作成した原位置岩体の引張強度  $T$  を正確に評価することが前提となる。しかし、ボーリングコアの回収にはマイクロクラックの進展など、必ず不可逆的なプロセスを伴うことから、原位置岩体の  $T$  を正確に評価することは容易でない。そこで、再加圧時にボアホール内の水圧が亀裂再開口圧  $P_r$  に達したときに亀裂が開き始め、この亀裂の開きが  $T = 0$  の孔壁から亀裂が発生する現象と等価であるものと仮定すると次式が成立する<sup>6,7</sup>。

$$P_r = 3S_h - S_H \dots\dots\dots(3)$$

4 Kehle, R.O., "The Determination of Tectonic Stresses through Analysis of Hydraulic Well Fracturing", J. Geophys. Res., 69, p.259-273, (1964)

5 Hubbert, M.K. and Willis, D., "Mechanics of Hydraulic Fracturing", AIME Trans., 210, p.153-168, (1957)

6 Hayashi, K., et al., "In Situ Stress Determination by Hydraulic Fracturing - A Method Employing an Artificial Notch", Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 26, p.197-202, (1989)

7 Breadhoeft, J.D., et al., "Hydraulic Fracturing to Determine the Regional In Situ Stress Field", Geol. Soc. Amer. Bull., 87, p.250-258, (1986)

破碎圧  $P_b$  の代わりに亀裂開口圧  $P_r$  を用い、上式と式(2)の関係を利用すれば、引張強度  $T$  と無関係に  $S_H$  および  $S_h$  の大きさを決定できることになる。このため、式(3)が Zoback ら<sup>8</sup> および Bredehoeft ら<sup>7</sup> によって提案されて以来、水圧破碎法では式(2)と式(3)に基づいて初期応力を評価することが一般的になり、さらに、初期応力の評価に原位置岩体の物性値を必要としないことが水圧破碎法の大きな特長とされてきた。

## ②亀裂開口圧力と初期応力の関係

これまで数多くのフィールド実験や室内実験が実施されてきた結果、亀裂開口圧が圧入流量の大きさに依存して変化すること<sup>9-10</sup>、その一方で本来異なるはずの亀裂開口圧と亀裂開口圧が計測実施地域によらず常に近い傾向にある<sup>11-12</sup>といった従来の理論に反する実験事実が徐々に明らかになってきた。さらに、式(3)の背景には亀裂が開口するまで加圧水は亀裂内に進入しないという仮定があるのに対して、Cornet<sup>10</sup> および Zoback ら<sup>13</sup> は、水圧破碎室内実験の結果から、亀裂が閉じていても加圧水が亀裂内に浸入し得ることを明らかにした。これは、亀裂が閉じていても、向かい合う亀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ためである。このため伊藤ら<sup>14</sup> は、Cornet<sup>10</sup> および Zoback ら<sup>13</sup> の実験結果を基に、亀裂開口以前よりボアホールから亀裂内に加圧水が進入することを考慮した数値解析および室内実験を実施して亀裂開口圧の物理的意味を再検討した。その結果、再加圧時に亀裂が開口し始めるときのボアホール内の水圧（以下、真の亀裂開口圧  $P_{r0}$  と呼ぶ）は、初期応力および圧入流量によらず従来の理論、つまり、式(3)で与えられている亀裂開口圧の半分となることを明らかにした。したがって、式(3)の代わりに次式を用いて初期応力を評価すれば良いことになる。

$$P_{r0} = (3S_h - S_H)/2 \dots\dots\dots(4)$$

8 Zoback, M.D., et al., "Preliminary Stress Measurements in Central California Using the Hydraulic Fracturing Technique", Pure Appl. Geophys., 115, p.135-152, (1977)

9 Ikeda, R. and Tsukahara, H., "Hydraulic Fracturing Technique in Deep Wells and In Situ Stress at Depth", Proc. 2nd Int. Wkshp Hydr. Fract. Stress Measur., Minneapolis, p.141-165, (1988)

10 Cornet, F.H., "Analysis of Injection Tests for In Situ Stress Determination", Proc. Wkshp Hydr. Fract. Stress Measur., Menlo Park, p. 414-443, (1982)

11 Lee, M.Y. and Haimson, B.C., "Statistical Evaluation of Hydraulic Fracturing Stress Measurement Parameters", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 26, p.447-456, (1989)

12 Cheung, L.S. and Haimson, B.C., "Laboratory Study of Hydraulic Fracturing Pressure Data – How Valid is Their Conventional Interpretation?", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 26, p.595-604, (1989)

13 Zoback, M.D., et al., "Laboratory Hydraulic Fracturing Experiments in Intact and Pre-fractured Rock", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 14, p.49-58, (1977)

### ③真の亀裂開口圧力を測定するための水圧破碎システム

伊藤ら<sup>14</sup>は、亀裂が開口してもすぐにはボアホール内の水圧と時間の関係に顕著な変化は現れず、亀裂開口圧、つまりボアホール内の水圧と時間との関係が明らかに非線形になり始めるときのボアホール内の水圧（以下、見かけの亀裂開口圧と呼ぶ）は真の亀裂開口圧よりも大きくなること、そして、見かけの亀裂開口圧は本質的に亀裂閉口圧に等しい水圧であることを明らかにしている。これらのことは、測定のむずかしい岩体物性値  $T$  を用いないことを前提とすると、亀裂閉口圧の測定値と式(2)から  $S_h$  の大きさを評価できても、何らかの方法で真の亀裂開口圧を測定できなければ、亀裂線方向に作用する初期応力  $s_H$  の大きさを評価できないことを意味する。

このため、伊藤ら<sup>15</sup>は真の亀裂開口圧を用いて初期応力を評価することを目的として、数値解析に基づき、真の亀裂開口圧と見かけの亀裂開口圧との間に差が生じる原因について詳細に検討した。この結果、見かけ亀裂開口圧力が真の亀裂開口圧よりも大きく、亀裂閉口圧に近くなるのは主に加圧システム内の水の体積が大きいことが原因であり、その体積を適切に選択すれば、見かけの亀裂閉口圧から真の亀裂開口圧を近似的に評価できることを明らかにした。したがって、亀裂閉口圧を使って  $S_h$  の大きさを決定するものとするれば、その結果と、加圧系体積  $V$  の十分小さい水圧破碎システムを用いて十分に小さい圧入流量で測定した見かけの亀裂開口圧（≒真の亀裂開口圧）から、式(4)の関係に従って  $s_H$  の大きさを評価できる。

15 伊藤高敏,林一夫, “水圧破碎地殻応力計測における縦亀裂の亀裂開口圧と地殻応力の関係”, 日本機械学会論文集(A編),25,p.72-77,(1992)

水圧破碎試験の解析の概念図および試験測定データの例を図 3.63、図 3.64 に示す。

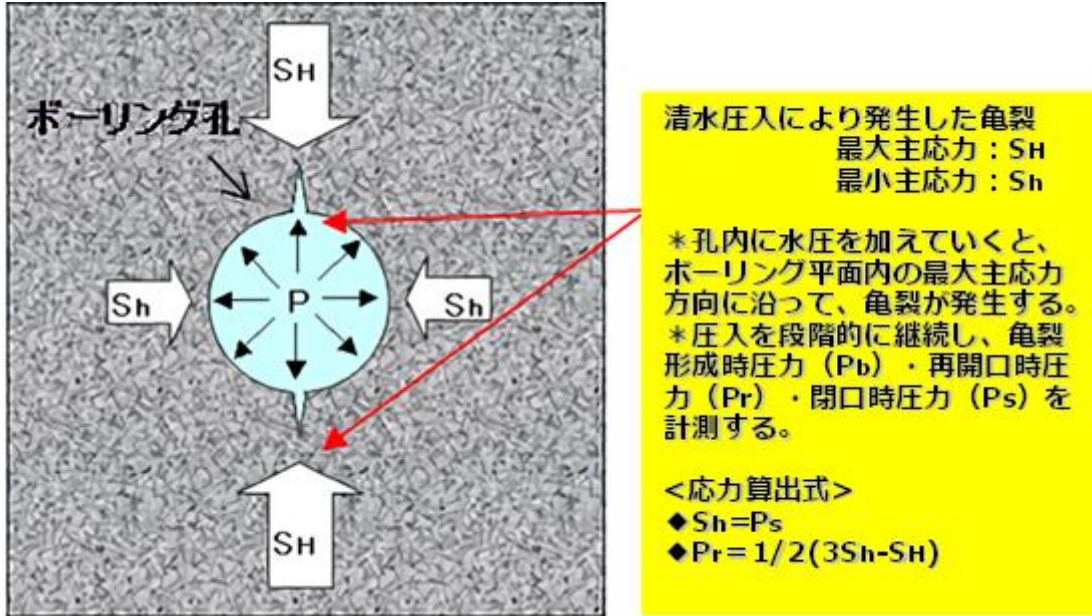


図 3.63 水圧破碎試験の解析概念図

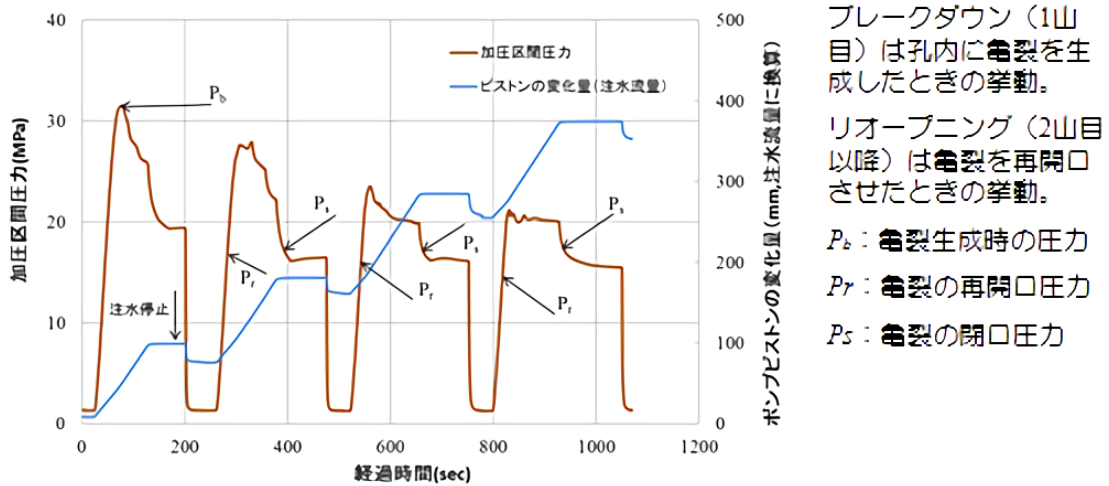


図 3.64 水圧破碎試験測定データの例

## 4. 調査結果

### 4.1 調査全体工程

本調査の全体実績工程を表 4.1～表 4.4 に示す。











## 4.2 物理探査及び解析結果

### 4.2.1 微動アレー探査（チェーンアレー、多重アレー）

#### （1）チェーンアレー探査

##### 1）FDCA-1 測線

FDCA-1 測線のチェーンアレー探査結果について、S 波速度構造を表 4.5 に、深度分布を図 4.1 に、S 波速度構造断面を図 4.2 に示す。FDCA-1 測線の全体的な S 波速度構造は、表層が  $V_s=100\sim 300\text{m/s}$ 、深部は  $400\sim 900\text{m/s}$  が分布している。そして、始点付近では深部まで低速度が分布し、62.5m 付近では地表から標高-150m まで低速度が分布している。62.5m 付近は地表において断層が確認されていることから、この 62.5m 付近の低速度は断層によるものと考えられる。

表 4.5 FDCA-1 測線のチェーンアレー探査の各測定地点の S 波速度構造

12.5m 地点				25m 地点				37.5m 地点			
深度 (m)		$V_s$ (m/s)		深度 (m)		$V_s$ (m/s)		深度 (m)		$V_s$ (m/s)	
0.00	~	0.41	254.39	0.00	~	0.87	184.61	0.00	~	1.38	162.45
0.41	~	1.22	289.58	0.87	~	2.62	204.30	1.38	~	4.14	163.15
1.22	~	2.84	340.72	2.62	~	6.12	226.85	4.14	~	9.67	163.79
2.84	~	26.69	401.16	6.12	~	8.56	274.41	9.67	~	10.43	549.22
26.69	~	74.40	405.60	8.56	~	13.44	298.63	10.43	~	11.94	556.98
74.40	~	169.80	408.65	13.44	~	23.21	320.35	11.94	~	14.98	565.42
169.80	~	199.87	534.96	23.21	~	75.31	843.74	14.98	~	63.01	683.82
199.87	~	260.00	555.25	75.31	~	179.51	858.84	63.01	~	159.06	722.23
260.00	~	380.26	569.42	179.51	~	387.91	869.11	159.06	~	351.17	749.21
380.26	~		588.13	387.91	~		907.54	351.17	~		802.55

50m 地点				62.5m 地点				75m 地点			
深度 (m)		$V_s$ (m/s)		深度 (m)		$V_s$ (m/s)		深度 (m)		$V_s$ (m/s)	
0.00	~	4.38	337.07	0.00	~	0.15	249.82	0.00	~	4.04	161.25
4.38	~	13.14	387.26	0.15	~	0.45	254.05	4.04	~	12.13	168.18
13.14	~	30.66	430.51	0.45	~	1.04	260.81	12.13	~	28.31	173.73
30.66	~	33.85	599.58	1.04	~	1.08	318.18	28.31	~	30.79	251.89
33.85	~	40.24	696.87	1.08	~	1.17	318.52	30.79	~	35.75	264.93
40.24	~	53.01	785.40	1.17	~	1.33	319.15	35.75	~	45.66	276.24
53.01	~	86.55	859.33	1.33	~	32.26	338.49	45.66	~	70.88	405.12
86.55	~	153.63	861.90	32.26	~	94.11	338.85	70.88	~	121.32	433.51
153.63	~	287.80	863.64	94.11	~	217.82	339.10	121.32	~	222.19	453.95
287.80	~		872.84	217.82	~		659.11	222.19	~		687.37

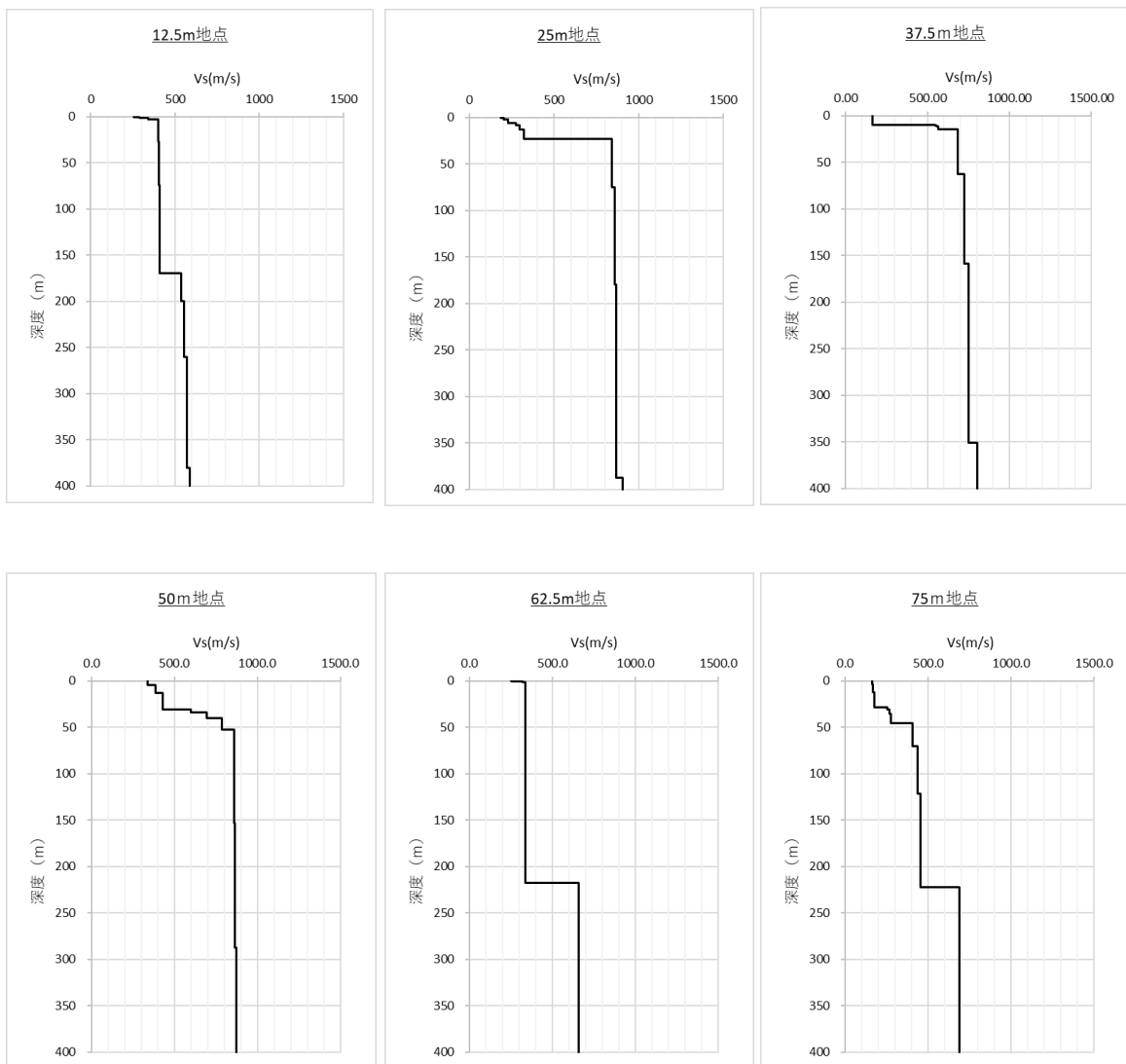


図 4.1 FDCA-1 測線のチェーンアレー探索の各測定地点の S 波速度分布

Shaer Wave Velocity Section (FDCA-1)

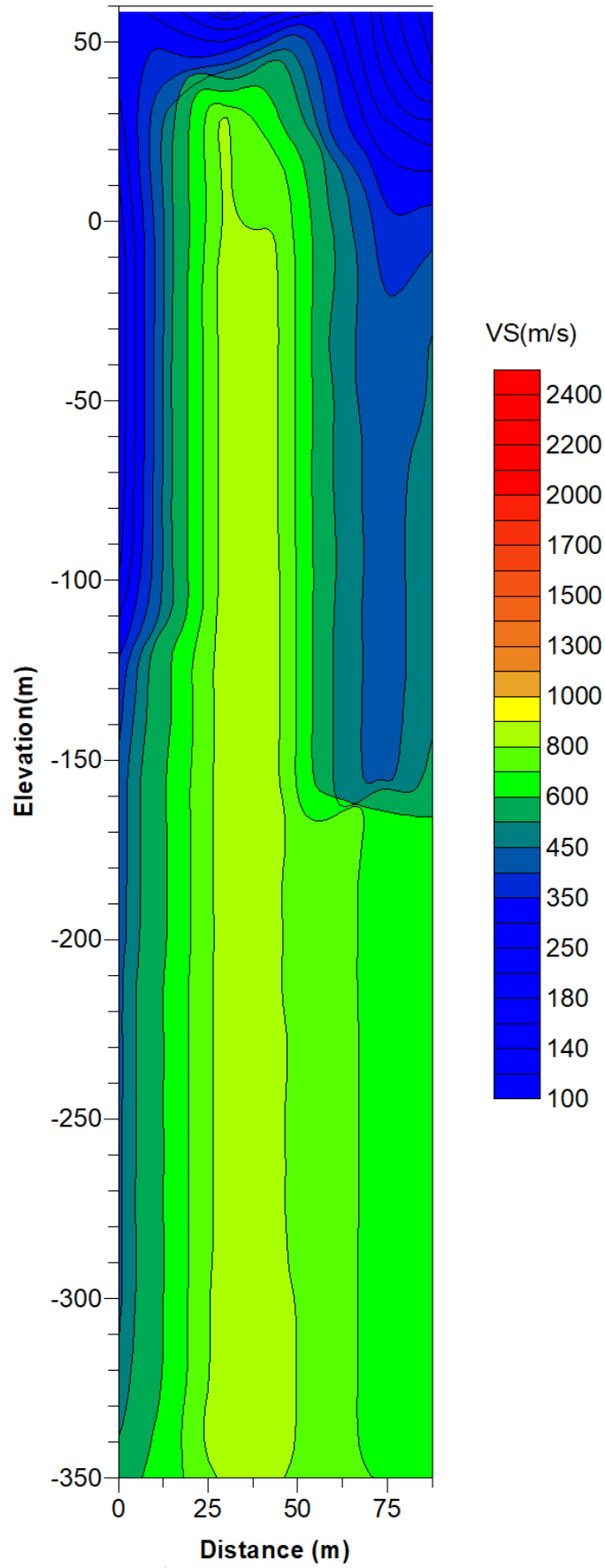


図 4.2 FDCA-1 測線のチェーンアレー探索結果の S 波速度断面図

## 2) FDCA-2 測線

FDCA-2 測線のチェーンアレー探査結果について、S 波速度構造を表 4.6 に、深度分布を図 4.3 に、S 波速度構造断面を図 4.4 に示す。FDCA-2 測線の全体的な S 波速度構造(図 4.4) は、表層が  $V_s=100\sim 300\text{m/s}$ 、深部で  $400\sim 2500\text{m/s}$  が分布している。深部の  $1000\sim 2500\text{m/s}$  の速度は測線の始点及び終点で認められる。そして、終点側の表層～標高-120m で低速度が分布し、75m 地点付近では標高-200m まで低速度の分布が認められる。75m 地点付近では地表の路面に変状が確認されており、75m 地点付近の標高-200m までの低速度の分布は路面の変状と関連する破碎帯によるものと考えられる。

表 4.6 FDCA-2 測線のチェーンアレー探査の各測定地点の S 波速度構造

15m 地点		30m 地点		45m 地点				
深度 (m)	$V_s$ (m/s)	深度 (m)	$V_s$ (m/s)	深度 (m)	$V_s$ (m/s)			
0 ~	1.56	153.62	0 ~	0.31	232.94	0 ~	1.69	169.57
1.56 ~	4.67	156.07	0.31 ~	0.94	253.03	1.69 ~	5.06	178.58
4.67 ~	10.89	158.32	0.94 ~	2.19	282.65	5.06 ~	11.80	187.00
10.89 ~	11.35	312.35	2.19 ~	8.74	375.51	11.80 ~	14.62	352.50
11.35 ~	12.27	325.28	8.74 ~	21.82	398.10	14.62 ~	20.28	359.39
12.27 ~	14.11	341.73	21.82 ~	47.99	415.47	20.28 ~	31.60	365.08
14.11 ~	48.22	551.60	47.99 ~	88.39	885.93	31.60 ~	48.19	627.33
48.22 ~	116.44	675.29	88.39 ~	169.20	906.88	48.19 ~	81.38	717.27
116.44 ~	252.88	774.16	169.20 ~	330.82	921.26	81.38 ~	147.76	786.76
252.88 ~		2294.50	330.82 ~		2550.94	147.76 ~		817.94

60m 地点		75m 地点		90m 地点				
深度 (m)	$V_s$ (m/s)	深度 (m)	$V_s$ (m/s)	深度 (m)	$V_s$ (m/s)			
0 ~	1.33	187.85	0 ~	5.34	157.17	0 ~	0.40	198.80
1.33 ~	3.98	195.58	5.34 ~	16.03	160.53	0.40 ~	1.19	222.10
3.98 ~	9.29	203.11	16.03 ~	37.41	163.08	1.19 ~	2.79	255.42
9.29 ~	10.45	210.50	37.41 ~	47.72	364.75	2.79 ~	16.99	298.79
10.45 ~	12.76	216.75	47.72 ~	68.35	371.63	16.99 ~	45.40	301.46
12.76 ~	17.39	222.97	68.35 ~	109.60	376.57	45.40 ~	102.22	303.33
17.39 ~	18.03	588.15	109.60 ~	131.53	481.26	102.22 ~	115.23	375.95
18.03 ~	19.31	641.39	131.53 ~	175.40	511.46	115.23 ~	141.26	377.21
19.31 ~	21.87	706.63	175.40 ~	263.14	533.18	141.26 ~	193.30	378.10
21.87 ~		867.62	263.14 ~		1019.10	193.30 ~		1291.50

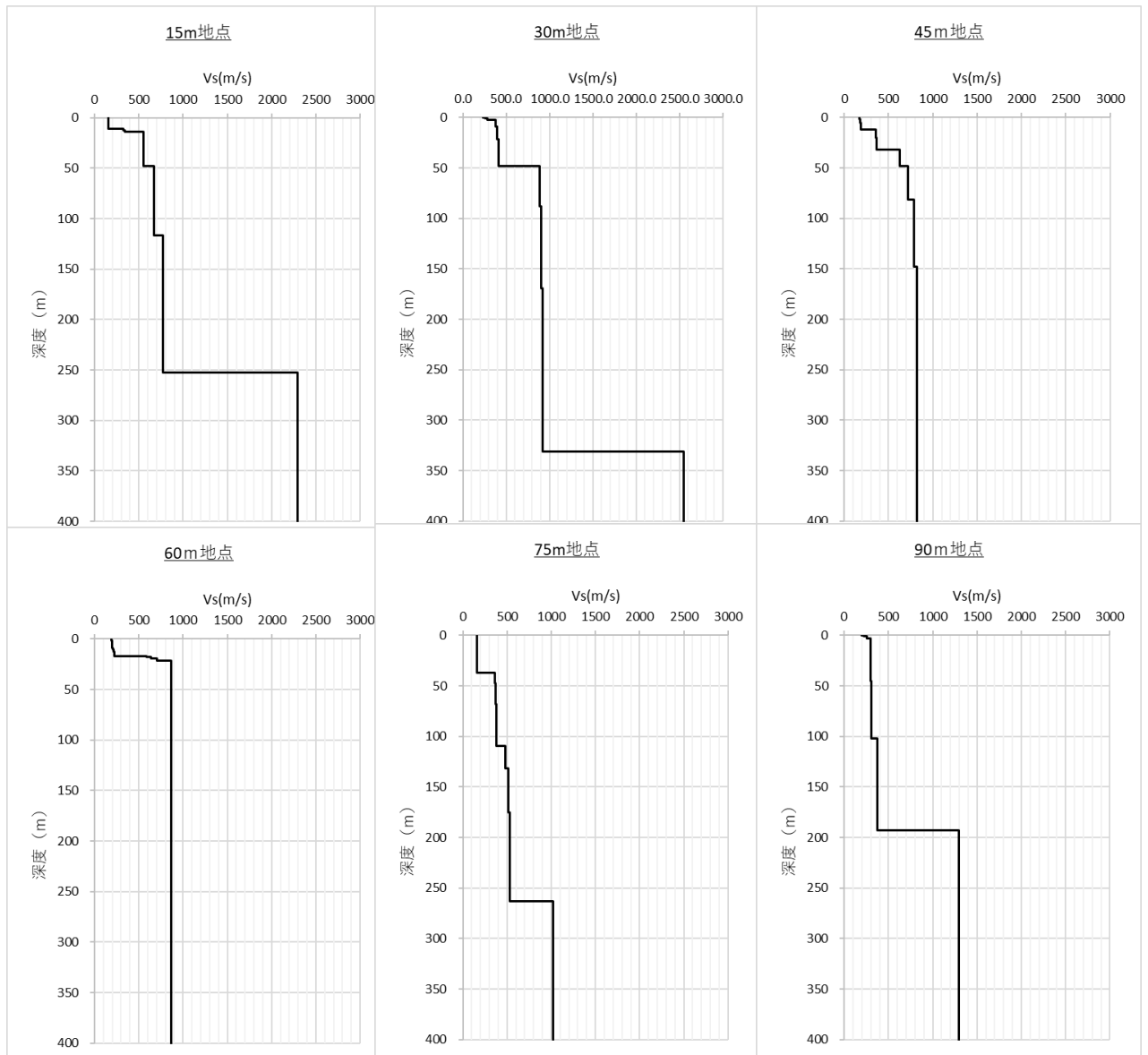


図 4.3 FDCA-2 測線のチェーンアレー探索の各測定地点の S 波速度分布



Shaer Wave Velocity Section (FDCA-2)

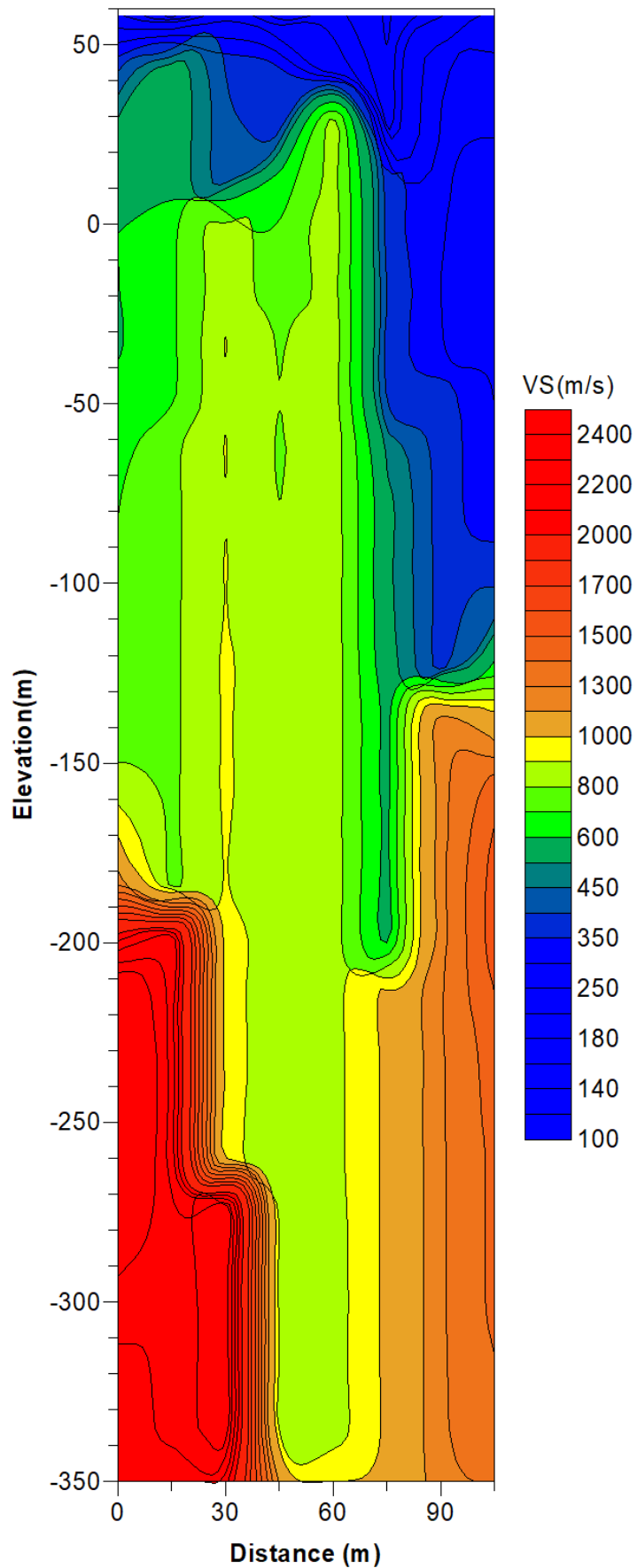


図 4.4 FDCA-2 測線のチェーンアレー探査結果の S 波速度断面図

### 3) 微動アレー探査

微動アレー探査の結果について、S波速度構造を表 4.7 に、深度分布図を図 4.5 に示す。S波速度構造は、地表から深度 1.5m 付近（第 1 層）が  $V_s \approx 100 \sim 300 \text{m/s}$ 、深度 1.5~30m 付近（第 2 層）が  $V_s \approx 400 \text{m/s}$ 、深度 30~130m 付近（第 3 層）が  $V_s \approx 600 \sim 700 \text{m/s}$ 、深度 130~450m 付近（第 4 層）が  $V_s \approx 900 \sim 1000 \text{m/s}$ 、深度 450m 以深（第 5 層）が  $V_s > 2200 \text{m/s}$  の計 5 層構造に区分された。これらの S 波速度構造は微動探査の調査と同時期に掘削していたパイロットボーリングデータの地質資料から、

- ・ 第 1 層 ( $V_s \approx 100 \sim 300 \text{m/s}$ )      ・ ・ ・ ・ 耕作土
- ・ 第 2 層 ( $V_s \approx 400 \text{m/s}$ )            ・ ・ ・ ・ 火砕流堆積物
- ・ 第 3 層 ( $V_s \approx 600 \sim 700 \text{m/s}$ )      ・ ・ ・ ・ 下陣礫層
- ・ 第 4 層 ( $V_s \approx 900 \sim 1000 \text{m/s}$ )      ・ ・ ・ ・ 基盤岩（木山変成岩）
- ・ 第 5 層 ( $V_s > 2200 \text{m/s}$ )            ・ ・ ・ ・ 基盤岩

が対応する。

表 4.7 微動アレー探査の各測定地点の S 波速度構造

深度 (m)		$V_s$ (m/s)
0.00	~ 0.23	176.41
0.23	~ 0.70	210.37
0.70	~ 1.63	270.69
1.63	~ 5.96	417.91
5.96	~ 14.61	424.08
14.61	~ 31.93	428.85
31.93	~ 46.43	593.10
46.43	~ 75.44	646.28
75.44	~ 133.45	685.96
133.45	~ 179.70	948.72
179.70	~ 272.19	997.30
272.19	~ 457.18	1031.32
457.18	~	2283.07

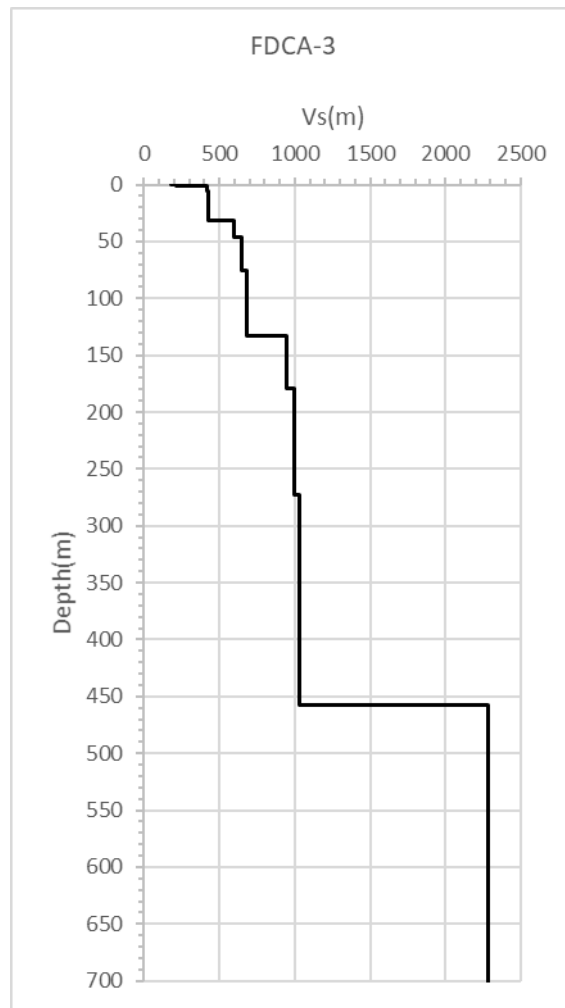


図 4.5 微動アレー探査の各測定地点の S 波速度分布図

本報の微動探査の FDCA-1～FDCA-3 の結果を合成し断面を作成した。その合成断面を 図 4.6 に示す。合成断面から前述の地表で確認されている断層や破碎帯は深部まで高角度で連続しているものと推測される。

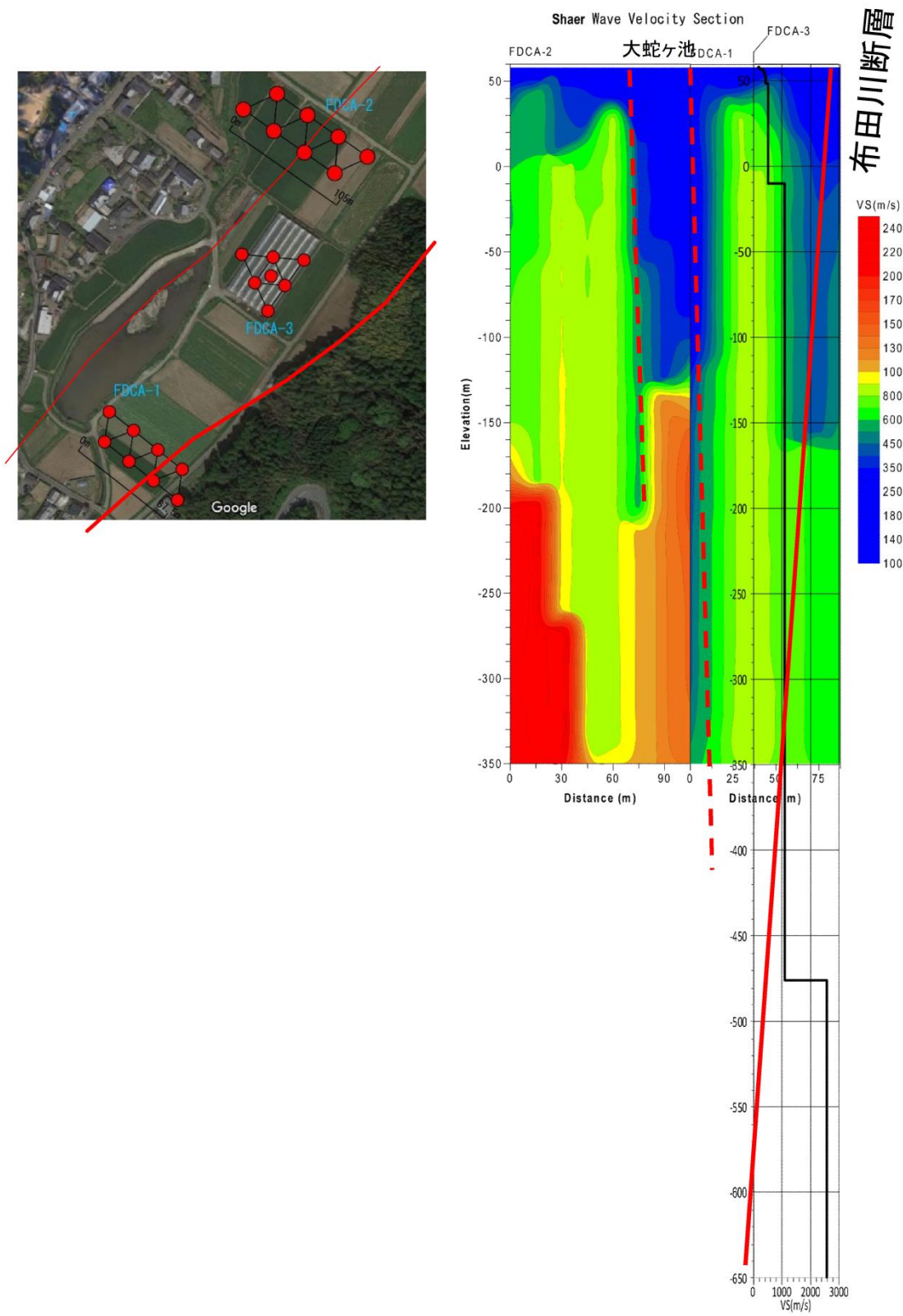


図 4.6 微動アレー探索結果の合成断面図

#### 4.2.2 電気探査

地下浅部の断層構造を明らかにする目的で、ボーリングを通過する測線で比抵抗二次元探査を実施した。測線長は 400m、電極間隔は 10m で深度 200m まで探査を行った。

解析結果は、図 4.7 に示す通りであり、地形変化点から山側の浅い深度に、崖錐もしくは段丘堆積物と思われる  $2,000\Omega\text{m}$  を超える高比抵抗体が分布するが、それ以深及び低地部の比抵抗は数  $100\sim 1,600\Omega\text{m}$  前後である。今回の調査結果で特徴的なのは、最深部の比抵抗  $1,516\sim 1,662\Omega\text{m}$  に階段状の構造が見られることである。

結果の概要を以下に記述する。

- ◆先行実施した FDP-1 孔の地質分布等も踏まえ、比抵抗値の閾値境界を複数検討した結果、木山変成岩類の比抵抗値は  $1,700\Omega\cdot\text{m}$  以上の領域と推定される。また、これらの基盤岩領域中にまで入り込むような低比抵抗帯の存在は、今回の電気探査結果からは検出されない。
- ◆大局的な地質構造として、山側（南）から谷側（北）に向かって、基盤の木山変成岩類の上盤面が、複数の北傾斜の断層を介して階段状に落ち込んでいく状況が推定され、これに伴って形成された谷地形を津森層・下陳礫層・阿蘇火砕流堆積物（Aso-1~4）等の第四紀層が埋積している状況である。また、表層には、これらを被覆して旧河床堆積物（谷部）や崖錐堆積物（山地部）が分布する。
- ◆大局的な地質構造において、南傾斜の不連続面は、測点 280 付近より北側では推定されない。一方、測点 300 付近よりも山側では、岩種境界もしくは断層？の可能性のある比抵抗分布のやや低角度の不連続が認められる。
- ◆上記の大局的な地質構造に加え、熊本地震で発生した「地表断層」の位置、基盤上面の「段差構造」、Aso-2・Aso-3 など低比抵抗を示す「地層のずれ」、FDP-1 で確認した「せん断帯を伴う断層面の分布深度」等を、合理的に説明できる地質構造として、北傾斜の高角度断層が複数並列（F1~F4）していることが推定される。これらのうち、FDB-1（深部ボーリング孔）で確認可能な断層は、F1（地震時に地表面変位が生じた断層）、F2（地震時に地表面変位は生じなかったが、木山川溪岸露頭への連続が確認される断層）と思われる。

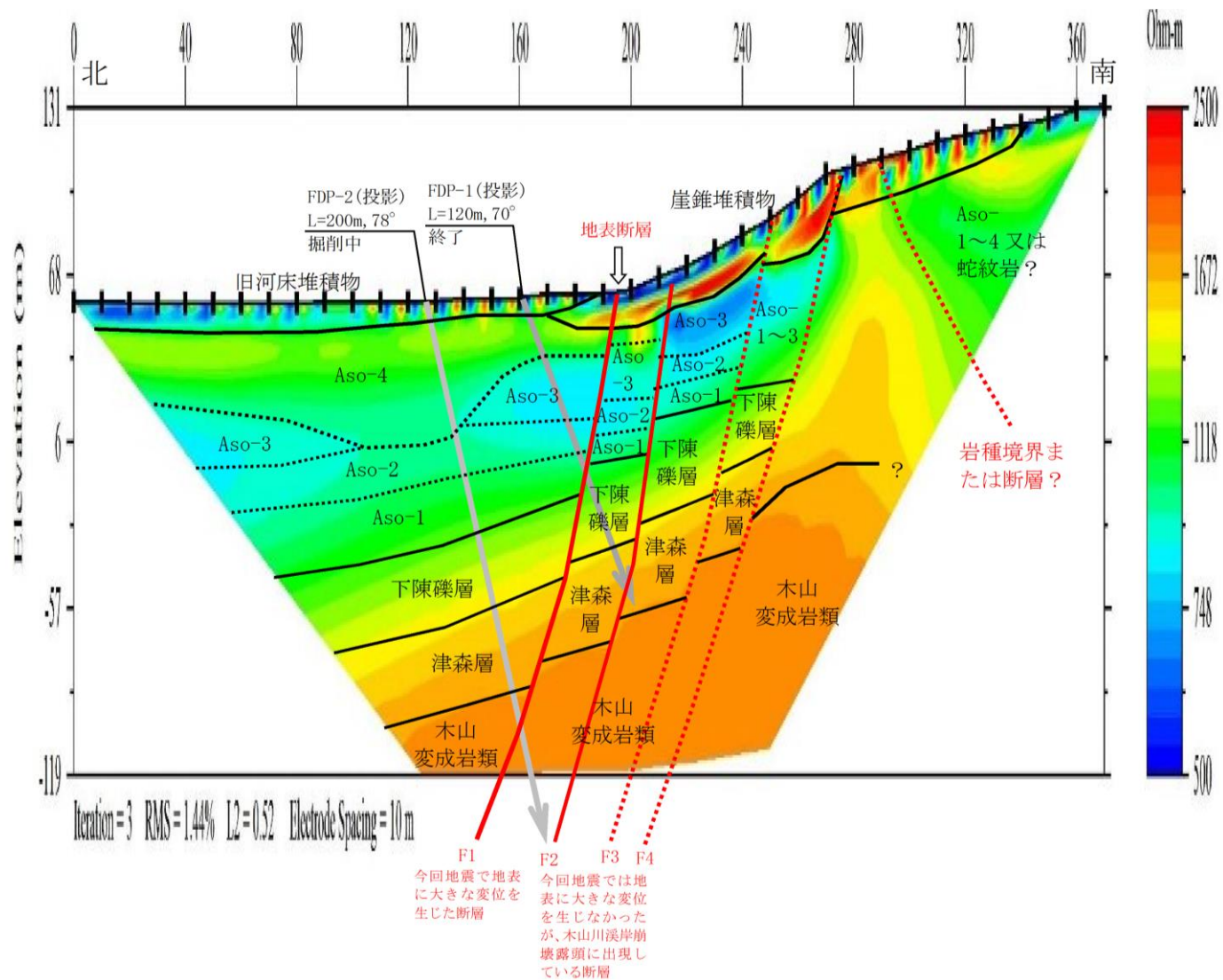


図 4.7 比抵抗断面及び推定断層分布 (縦横比 1 : 1)

### 4.2.3 微動観測

微動観測は、電気探査測線に沿って、表 4.8 及び図 4.8 の位置で実施した。

表 4.8 微動観測地点一覧表

測点	測定日	時刻 (コア時刻)	測定器No	原記録ファイル名	SEG-Yファイル名	備考
ハドルテスト	1月25日	13:27~13:35 (13:27~13:35)	1	00481327.mtn~00481335.mtn	00481327.sgy~00481335.sgy	
			2	00491327.mtn~00491335.mtn	00491327.sgy~00491335.sgy	
			3	00501327.mtn~00501335.mtn	00501327.sgy~00501335.sgy	
			4	00511327.mtn~00511335.mtn	00511327.sgy~00511335.sgy	
			5	00521327.mtn~00521335.mtn	00521327.sgy~00521335.sgy	
			6	00531327.mtn~00531335.mtn	00531327.sgy~00531335.sgy	
			7	00541327.mtn~00541335.mtn	00541327.sgy~00541335.sgy	
ハドルテスト	1月26日	9:14~9:20 (9:14~9:19)	1	00480914.mtn~00480920.mtn	00480914.sgy~00480920.sgy	
			2	00490914.mtn~00490920.mtn	00490914.sgy~00490920.sgy	
			3	00500914.mtn~00500920.mtn	00500914.sgy~00500920.sgy	
			4	00510914.mtn~00510919.mtn	00510914.sgy~00510919.sgy	
			5	00520914.mtn~00520920.mtn	00520914.sgy~00520920.sgy	
			6	00530914.mtn~00530920.mtn	00530914.sgy~00530920.sgy	
			7	00540914.mtn~00540919.mtn	00540914.sgy~00540919.sgy	

測点	測定日	時刻	測定器No	原記録ファイル名	SEG-Yファイル名	備考
P1	-	-	-	-	-	麦畑、測定不可
P2	-	-	-	-	-	麦畑、測定不可
P3	-	-	-	-	-	麦畑、測定不可
P4	-	-	-	-	-	麦畑、測定不可
P5	1月25日	14:47~15:49 (14:48~15:48)	1	00481447.mtn~00481548.mtn	00481447.sgy~00481548.sgy	P8側に1mずらし
P6			2	00491447.mtn~00491548.mtn	00491447.sgy~00491548.sgy	
P7			3	00501447.mtn~00501549.mtn	00501447.sgy~00501549.sgy	
P8			4	00511448.mtn~00511548.mtn	00511448.sgy~00511548.sgy	
P9			5	00521448.mtn~00521548.mtn	00521448.sgy~00521548.sgy	
P10			6	00531448.mtn~00531548.mtn	00531448.sgy~00531548.sgy	
P11			7	00541448.mtn~00541549.mtn	00541448.sgy~00541549.sgy	
P11	1月25日	16:23~17:23 (16:24~17:22)	1	00481624.mtn~00481723.mtn	00481624.sgy~00481723.sgy	
P12			2	00491624.mtn~00491723.mtn	00491624.sgy~00491723.sgy	
P13			3	00501624.mtn~00501723.mtn	00501624.sgy~00501723.sgy	
P14			4	00511624.mtn~00511723.mtn	00511624.sgy~00511723.sgy	
P15			5	00521624.mtn~00521723.mtn	00521624.sgy~00521723.sgy	
P16			6	00531623.mtn~00531723.mtn	00531623.sgy~00531723.sgy	
P17			7	00541623.mtn~00541722.mtn	00541623.sgy~00541722.sgy	
P17	1月26日	9:36~10:48 (9:37~10:38)	1	00480936.mtn~00481038.mtn	00480936.sgy~00481038.sgy	
P18			2	00490936.mtn~00491038.mtn	00490936.sgy~00491038.sgy	
P19			3	00500937.mtn~00501039.mtn	00500937.sgy~00501039.sgy	
P20			4	00510937.mtn~00511038.mtn	00510937.sgy~00511038.sgy	
P21			5	00520937.mtn~00521038.mtn	00520937.sgy~00521038.sgy	
P22			6	00530937.mtn~00531039.mtn	00530937.sgy~00531039.sgy	
P23			7	00540937.mtn~00541048.mtn	00540937.sgy~00541048.sgy	
P23	1月26日	11:37~12:56 (11:40~12:44)	1	00481137.mtn~00481244.mtn	00481137.sgy~00481244.sgy	
P24			2	00491140.mtn~00491244.mtn	00491140.sgy~00491244.sgy	
P25			3	00501140.mtn~00501247.mtn	00501140.sgy~00501247.sgy	
P26			4	00511140.mtn~00511248.mtn	00511140.sgy~00511248.sgy	
P27			5	00521138.mtn~00521249.mtn	00521138.sgy~00521249.sgy	
P28			6	00531137.mtn~00531251.mtn	00531137.sgy~00531251.sgy	
P28			7	00541137.mtn~00541256.mtn	00541137.sgy~00541256.sgy	
P29	1月26日	13:39~14:54 (13:42~14:45)	1	00481341.mtn~00481445.mtn	00481341.sgy~00481445.sgy	
P30			2	00491341.mtn~00491445.mtn	00491341.sgy~00491445.sgy	
P31			3	00501342.mtn~00501449.mtn	00501342.sgy~00501449.sgy	
P32			4	00511339.mtn~00511450.mtn	00511339.sgy~00511450.sgy	
P33			5	00521340.mtn~00521451.mtn	00521340.sgy~00521451.sgy	
P34			6	00531341.mtn~00531452.mtn	00531341.sgy~00531452.sgy	
P35			7	00541342.mtn~00541454.mtn	00541342.sgy~00541454.sgy	
P30	1月26日	15:02~16:16 (15:06~16:13)	1	00481506.mtn~00481616.mtn	00481506.sgy~00481616.sgy	
P31			2	00491506.mtn~00491616.mtn	00491506.sgy~00491616.sgy	
P32			3	00501505.mtn~00501616.mtn	00501505.sgy~00501616.sgy	
P33			4	00511504.mtn~00511615.mtn	00511504.sgy~00511615.sgy	
P34			5	00521504.mtn~00521615.mtn	00521504.sgy~00521615.sgy	
P35			6	00531503.mtn~00531614.mtn	00531503.sgy~00531614.sgy	
P36			7	00541502.mtn~00541613.mtn	00541502.sgy~00541613.sgy	



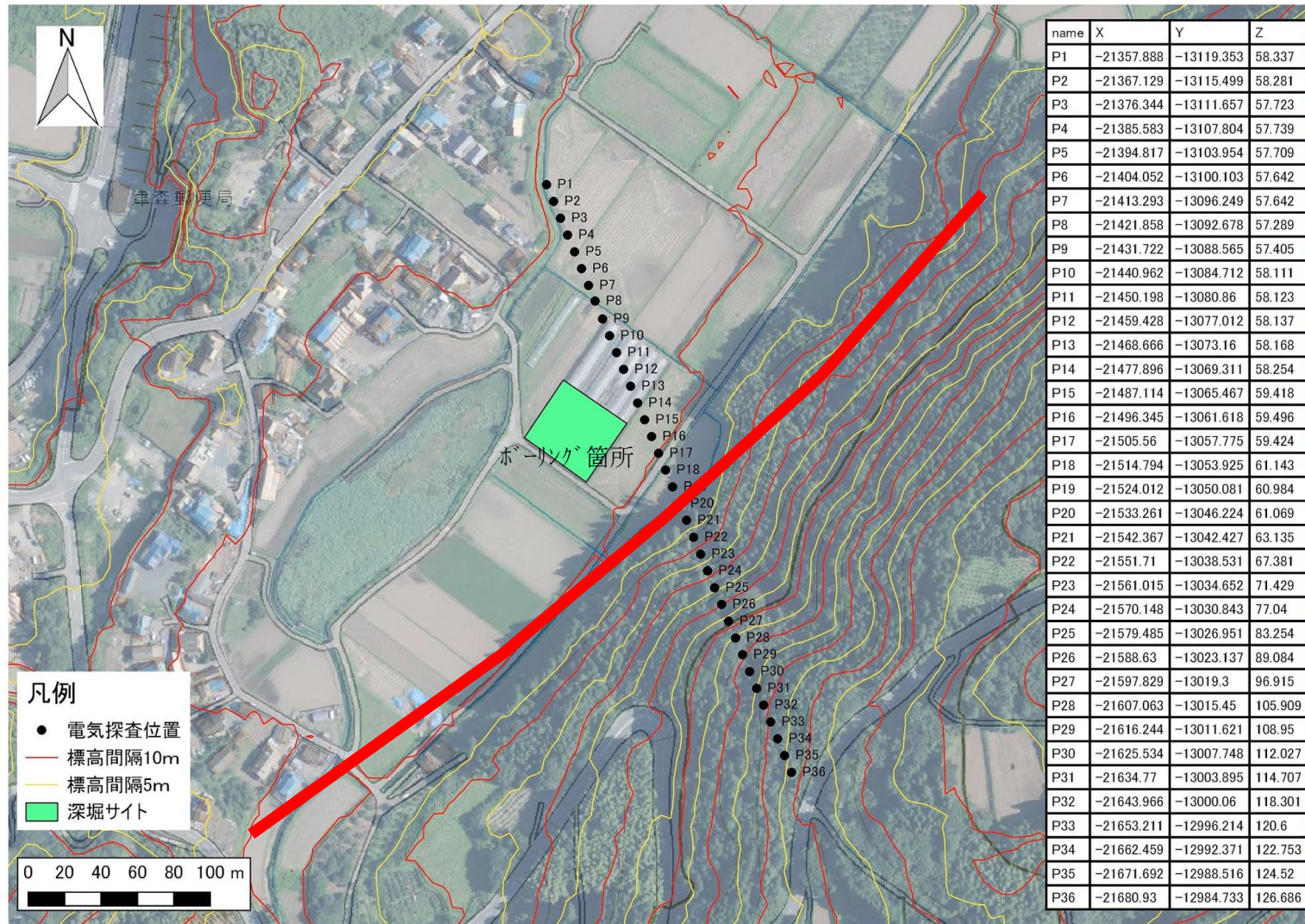


図 4.8 微動観測実施位置図

### 4.3 パイロットボーリング

#### 4.3.1 実施概要

本調査において、2孔のパイロットボーリングは、表 4.9 の位置で実施した。

地表地震断層との離隔は、図 4.9 の検討結果より、協議の上で FDP-1 : 30m (L=120m、下向き 70°)、FDP-2 : 60m (L=200m、下向き 78°) とした。

表 4.9 ボーリング孔口座標一覧表

名 称	X 座 標	Y 座 標	Z 座 標
パイロットBor FDP-1	-21528.5400	-13076.4950	59.2810
パイロットBor FDP-2	-21502.0790	-13090.2890	57.9830
深部Bor FDB-1	-21483.9020	-13099.8080	58.0180



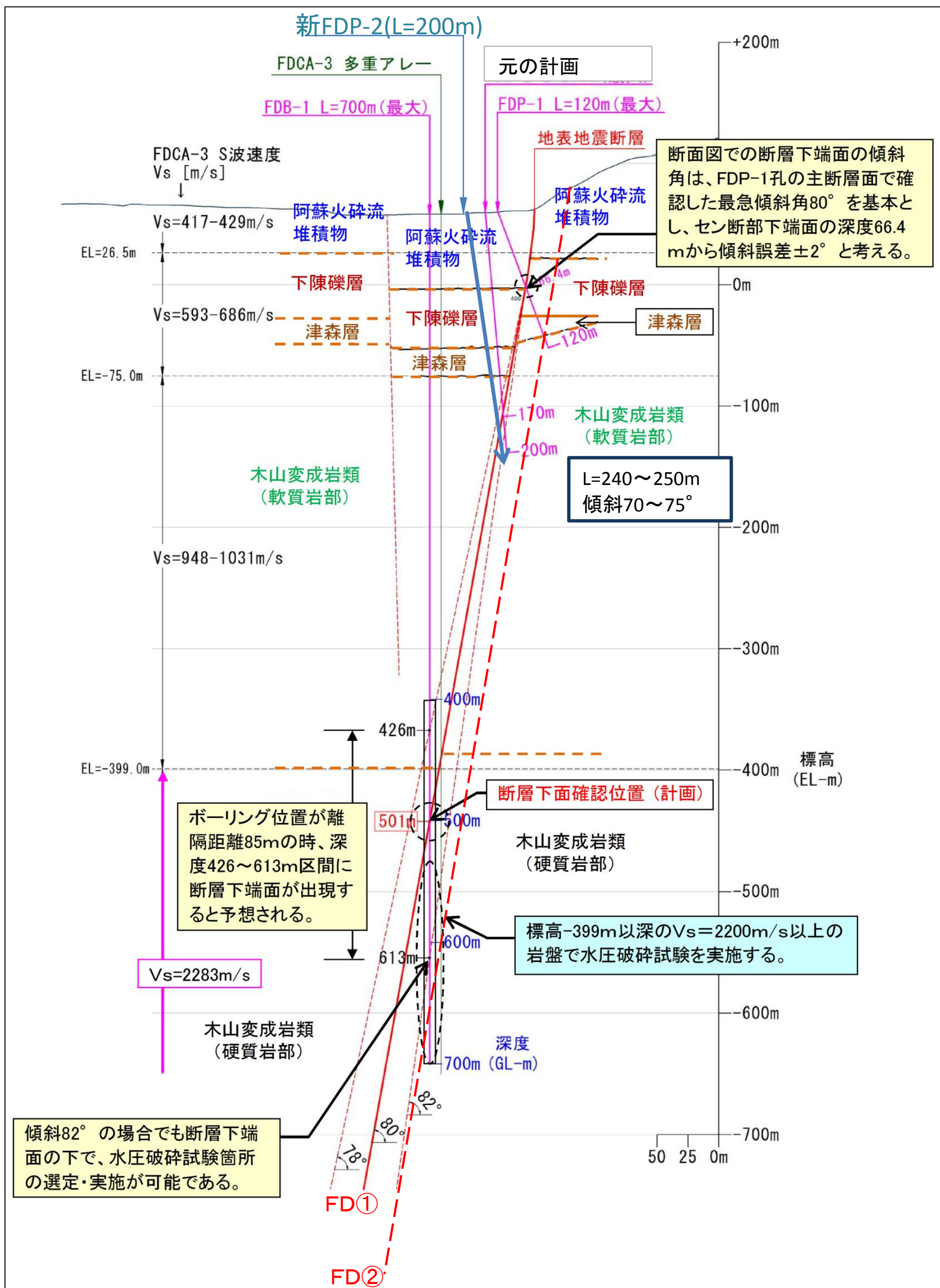


図 4.9 パイロットボーリングと本孔の関係 (当初計画)

#### 4.3.2 ドリリングチャート

FDP-1 孔ならびに FDP-2 孔の掘削仕様を表 4.10 に、ドリリングチャートを、図 4.10、図 4.11 に示す。

表 4.10 パイロットボーリング掘削仕様

孔名	掘進長	掘進方向	備考
FDP-1	120m	下向き 70°	地表断層からの離隔：30m、φ86～66mm オールコア
FDP-2	200m	下向き 78°	地表断層からの離隔：60m、φ86～66mm オールコア

### 孔番 : FDP-1孔

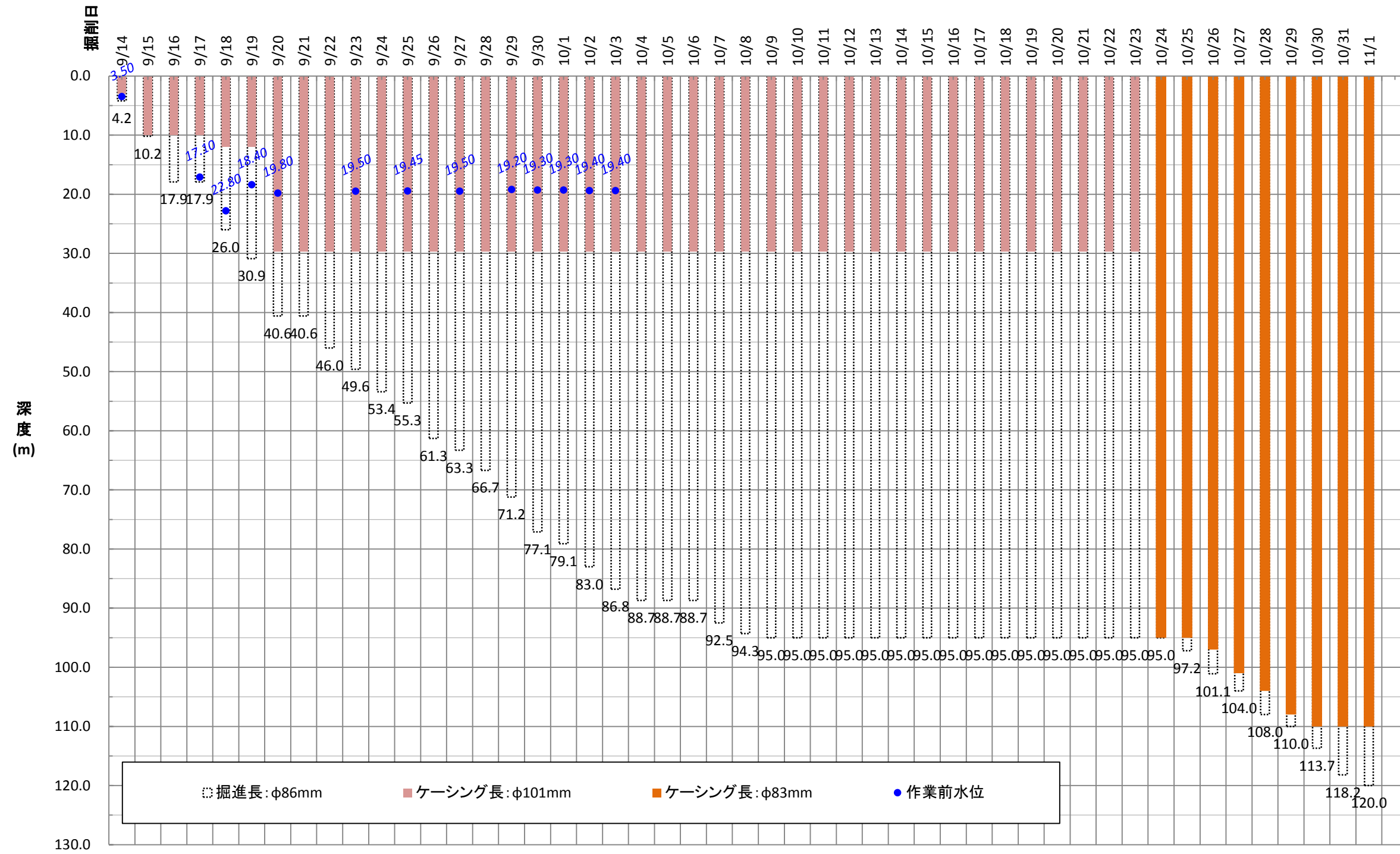


図 4.10 FDP-1 孔のドリリングチャート図

### 孔番：FDP-2孔

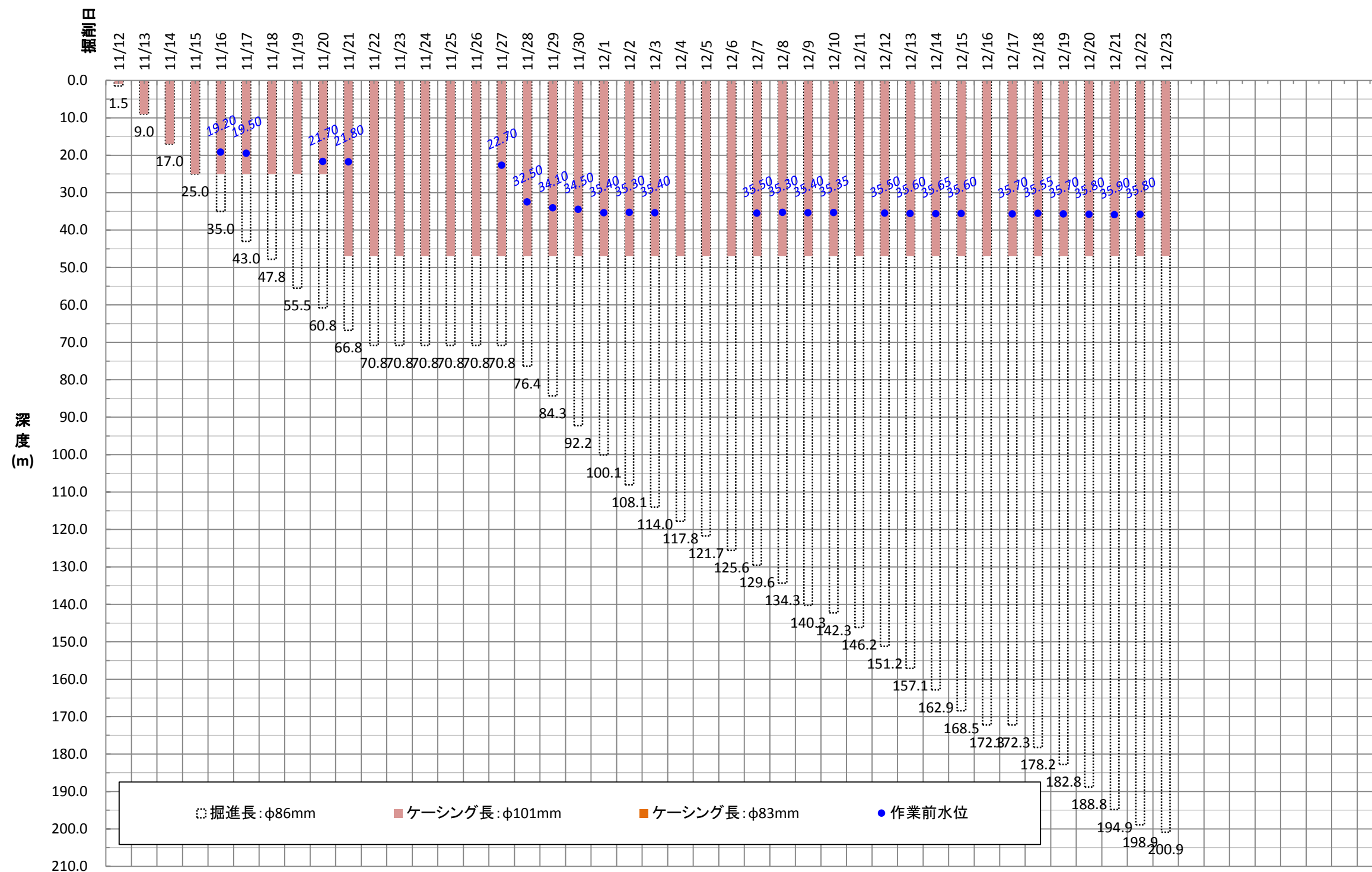


図 4.11 FDP-2 孔のドリリングチャート図

#### 4.3.3 地質観察結果

パイロットボーリング FDP-1 及び FDP-2 孔のコアにおいて観察された、表層未固結堆積物以下の地質は、以下の通りである。

- ①Aso-4 火砕流堆積物（非溶結）
- ②Aso-3 火砕流堆積物（弱溶結）
- ③Aso-2 火砕流堆積物（強溶結）
- ④Aso-1 火砕流堆積物（強溶結）
- ⑤下陳礫層
- ⑥津森層
- ⑦先阿蘇火山岩類
- ⑧秋田溶岩層（③/④間）

上記のうち、①～⑥について、コア写真を添えて図 4.12～図 4.17 に記載する。なお、各層の特徴の記述に当たっては、下記サイトに公開されている地域の地質に関する解説文も参考にした。

■ <http://www.hp1039.jishin.go.jp/danso/Kumamoto2A/2-1-3-2.htm>





- 調査地域全域に断続的に分布し、木山川右岸の台地では広い範囲に分布する。
- 灰白色～淡褐色を呈する細粒～中粒火山灰で、白色～灰色の軽石、岩片が含まれ、角閃石が多量に含まれるのが特徴である。一部では表層部に橙色粗粒な軽石が認められる。西原村小谷付近では軽石の含有率が高い軽石流が認められる。火山灰や軽石には、輝石、斜長石の他に、粗粒の角閃石斑晶が多く含まれる。
- 風化すると全体的に灰色になり、軽石はつぶれて岩片が目立つようになる。さらに風化が進行すると暗褐色に変色し斜長石と角閃石の斑晶以外はほとんど粘土化している。
- FDP-2孔で確認した本層の最大層厚は40m以上である。
- 本火砕流堆積物は町田(1983)が $7.0 \times 10^4$ 年とし、松本ら(1991)は $8.9 \pm 0.7 \times 10^4$ 年を提案し、町田・新井(1992)は既往資料を検討し、 $7 \sim 9 \times 10^4$ 年としている。

図 4.12 調査地域の地質 (Aso-4 火砕流堆積物)



- 西原村葛目付近、医王寺付近、益城町杉堂付近、下陳～福原にかけて広く分布する。
- 黒色～黒灰色の細粒～中粒火山灰中に多種・多量の黒色スコリア、異質岩片、軽石が含まれる。スコリアは斜長石、輝石の斑晶を多く含む。本層の最下部は比較的軽石に富む。
- FDP-1、FDP-2で確認した本堆積物の最大層厚は40m以上であり、Aso-3・4間堆積物、高遊原溶岩以上の堆積物に覆われる。
- 本火砕流堆積物は岡田(1978)が $10.3 \pm 4.2 \times 10^4$ 年とし、松本ら(1991)は $12.3 \pm 0.6 \times 10^4$ 年を提案し町田・新井(1992)は既往資料を検討し、 $11 \sim 12 \times 10^4$ 年としている。

図 4.13 調査地域の地質 (Aso-3 火砕流堆積物)





- 大津町白川沿い～西原村大切畑、西原村医王寺～益城町杉堂および益城町上陳～同町福原等に広く分布する。
- 本火砕流堆積物は主部と最下部(Aso-2R)に2分される。
- Aso-2火砕流堆積物の主部は非溶結～弱溶結状態である。本層は黒色の細粒～中粒スコリア流堆積物であり、スコリアは小さな発泡の多い無斑晶なものであり、異質岩片は少ない。また、表層部は赤色に風化することが多い。
- 最大層厚は分布から150m以上であると推定される。
- 本火砕流堆積物は岡口(1978)が $15.4 \pm 6.0 \times 10^4$ 年を提示し、松本ら(1991)は $14.1 \pm 0.5 \times 10^4$ 年を提案している。

図 4.14 調査地域の地質 (Aso-2 火砕流堆積物)



- 西原村医王寺付近、益城町杉堂南方から赤井川流域にかけて広く分布する。
- 大部分は強溶結の溶結凝灰岩である。基底付近や上部の非溶結部は黒灰色を呈するガラス質、細粒～中粒の火山灰よりなり、一般的に岩片を多く含む。
- 益城町杉堂の木山川と金山川に挟まれる山地は、Aso-1火砕流堆積物の溶結凝灰岩の露頭や転石が多く認められる。木山川の左岸の峡谷部入り口付近の露頭では、下陳礫層の上に強溶結凝灰岩が分布し、基底の1m程度は暗灰色の非溶結部となっている。また、この露頭の上部は風化による赤色化が見られる。
- 本層の平坦面を堆積上面とすると、木山川～金山川間では最大層厚100m以下となり、他の地域の地質分布から、最大層厚50m程度と考えられる。
- 本火砕流堆積物は岡口(1978)が $26 \pm 7.6 \times 10^4$ 年と $35.8 \pm 7.2 \times 10^4$ 年を提示し、松本ら(1991)は $26.6 \pm 1.4 \times 10^4$ 年を提案している。

図 4.15 調査地域の地質 (Aso-1 火砕流堆積物)



- 益城町の赤井川沿い、金山川沿い、西原村井ノ口南方などに広く分布する。
- 礫は亜角～亜円礫の中礫～大礫よりなり、ほとんどが安山岩礫である。礫の一部は風化礫である。非常に良く締まっている。
- 本層の露頭は金山川両岸の標高120m付近まで確認される。
- 金山川右岸の急崖では、本層が水越層の緑色片岩を覆っている。
- 下陳礫層の厚さは、金山川付近で50m程度で、赤井川の右岸では20m以下となり、南西側や下流側で薄くなる傾向がある。

図 4.16 調査地域の地質（下陳礫層）



- 益城町下陳の金山川沿いに小規模に分布する。
- 本層は紫灰色の泥岩を主とし、泥岩は固結度が高い。本層は砂の薄層を多く挟み、一部では細礫層を挟む。また、細かい平行ラミナが発達する。これらの層相から湖成層と判断される。
- 金山川右岸の露頭では基盤岩の水越層の緑色片岩にアバットしている。また、上部は拳大の亜角礫が多い新期の段丘堆積物に覆われる。
- 露頭での最大層厚は8m以上であるが、基盤岩の分布から層厚は20m程度と推定される。
- 本調査では、被圧地下水胚胎層であることが確認された。

図 4.17 調査地域の地質（津森層）

#### 4.3.4 パイロットボーリングのトピックス的記載事項

##### (1) 地下水胚胎層（下陳礫層・津森層）

本調査 FDP-1 孔で確認した下陳礫層下部ならびに津森層中の礫部は、地表から連続すると思われる断層面の下盤（山）側において、顕著な被圧地下水胚胎層となっていることが判明した（被圧 3m 以上）。なお、FDP-1 孔から 30m の離隔をもって掘削した FDP-2 孔や、本孔 FDB-1 孔では、自噴するような高い被圧を持った湧水は認められなかった。

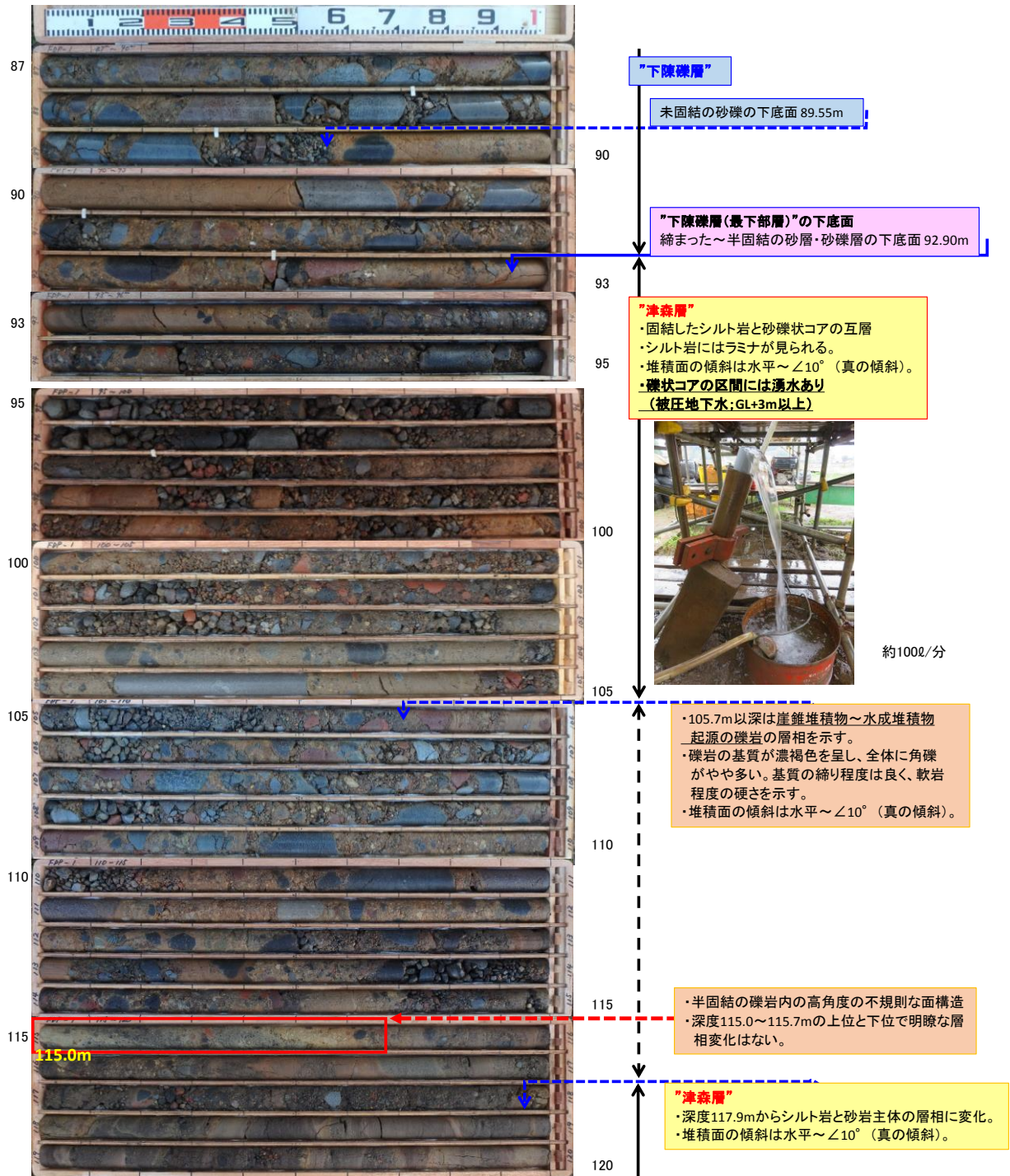
掘削中には、本孔から数十～約 100 ㍓/分の自噴が認められ、渇水期にあたる 1 月～3 月の期間中も、これらの自噴湧水は枯渇・凍結することが無かった。

なお、現場での簡易分析器を用いた 10 月の測定では、湧水の水質等は以下のとおりであり、水道水に近い特徴を持つものであった。

■ EC : 11.01ms/m、■ pH : 7.29、■ 水温 : 17.5℃（厳冬期でも 15℃以上）



FDP-1 コア写真 深度87.0~120.0m



## (2) 下陳礫層・津森層の産状

本調査の FDP-1 孔で確認した下陳礫層ならびに津森層は、調査地周辺にのみ分布する比較的ローカルな地質であり、調査地近傍がかつては谷地形を呈し、溪流や堰き止めによる湖を形成していたことを裏付ける堆積物である。

各層の一般的な特徴は以下の通りである。

### 【下陳礫層】

- 益城町の赤井川沿い、金山川沿い、西原村井ノ口南方などに広く分布する。
- 礫は垂角～垂円礫の中礫～大礫よりなり、ほとんどが安山岩礫である。礫の一部は風化礫である。非常に良く締まっている。
- 本層の露頭は金山川両岸の標高 120m 付近まで確認される。
- 金山川右岸の急崖では、本層が水越層の緑色片岩を覆っている。
- 下陳礫層の厚さは、金山川付近において 50m 程度で、赤井川の右岸では 20m 以下となり、南西側や下流側で薄くなる傾向がある。

### 【津森層】

- 益城町下陳の金山川沿いに小規模に分布する。
- 本層は紫灰色の泥岩を主とし、泥岩は固結度が高い。本層は砂の薄層を多く挟み、一部では細礫層を挟む。また、細かい平行ラミナが発達する。これらの層相から湖成層と判断される。
- 金山川右岸の露頭では基盤岩の水越層の緑色片岩にアバットしている。また、上部は拳大の垂角礫が多い新期の段丘堆積物に覆われる。
- 露頭での最大層厚は 8m 以上であるが、基盤岩の分布から層厚は 20m 程度と推定される。
- 本調査では、被圧地下水胚胎層であることが確認された。

これらの特徴的な堆積物は、FDP-1 孔の深部 (65～120m 間) で確認されたものの、FDP-2 孔 (L=200m) では確認されず、その一方で、FDB-1 孔の 250m 付近から深部に確認される結果となった。このことは、布田川断層による正断層系の累積変位が、横ずれ変位と併せて、200m 以上に及ぶことを示すものである。

図 4.19 に、両層の代表的な層相や境界関係を示す。本調査では、両層は断層ではなく、不整合関係で接していることを確認している。

FDP-1 コア写真 深度87.0~95.0m

「下陳礫層の下底面」と「津森層 シルト岩・礫岩」

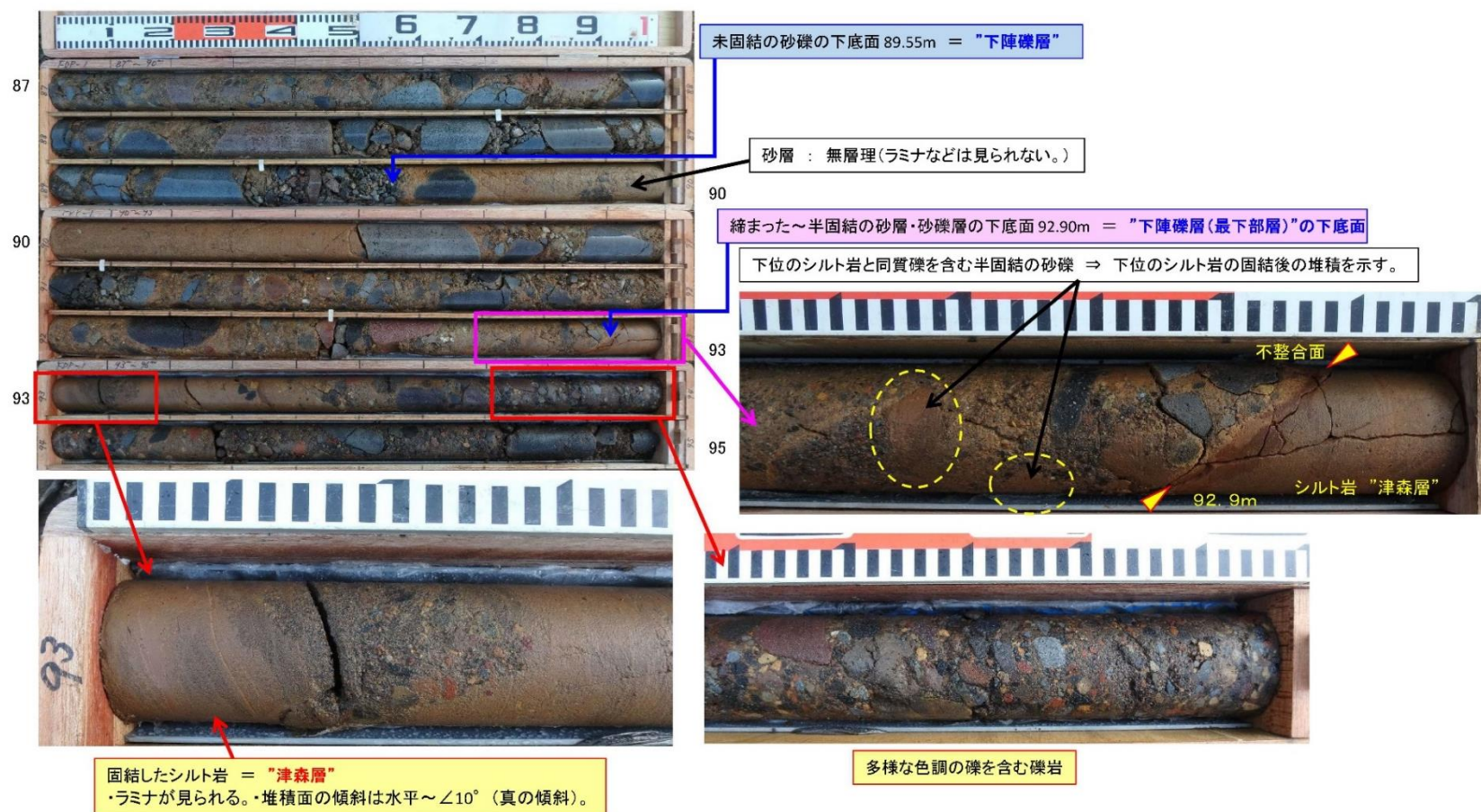


図 4.19 下陳礫層と津森層の関係ならびに層相



### (3) パイロットボーリングで確認した断層面

#### 1) FDP-1 孔

FDP-1 孔では、下記の深度において、断層の可能性が高い、せん断面構造を確認し、コアのスケッチを行った。各区間のスケッチならびにコア写真を、図 4.20～図 4.24 に示す。

■FG①：深度 51～63m 間 (57.4m 付近)

■FG②：深度 63～69m 間 (65.6m 付近)

■FG③：深度 114～116m 間 (115.0m 付近)

【FG①】 深度 51~56m 間

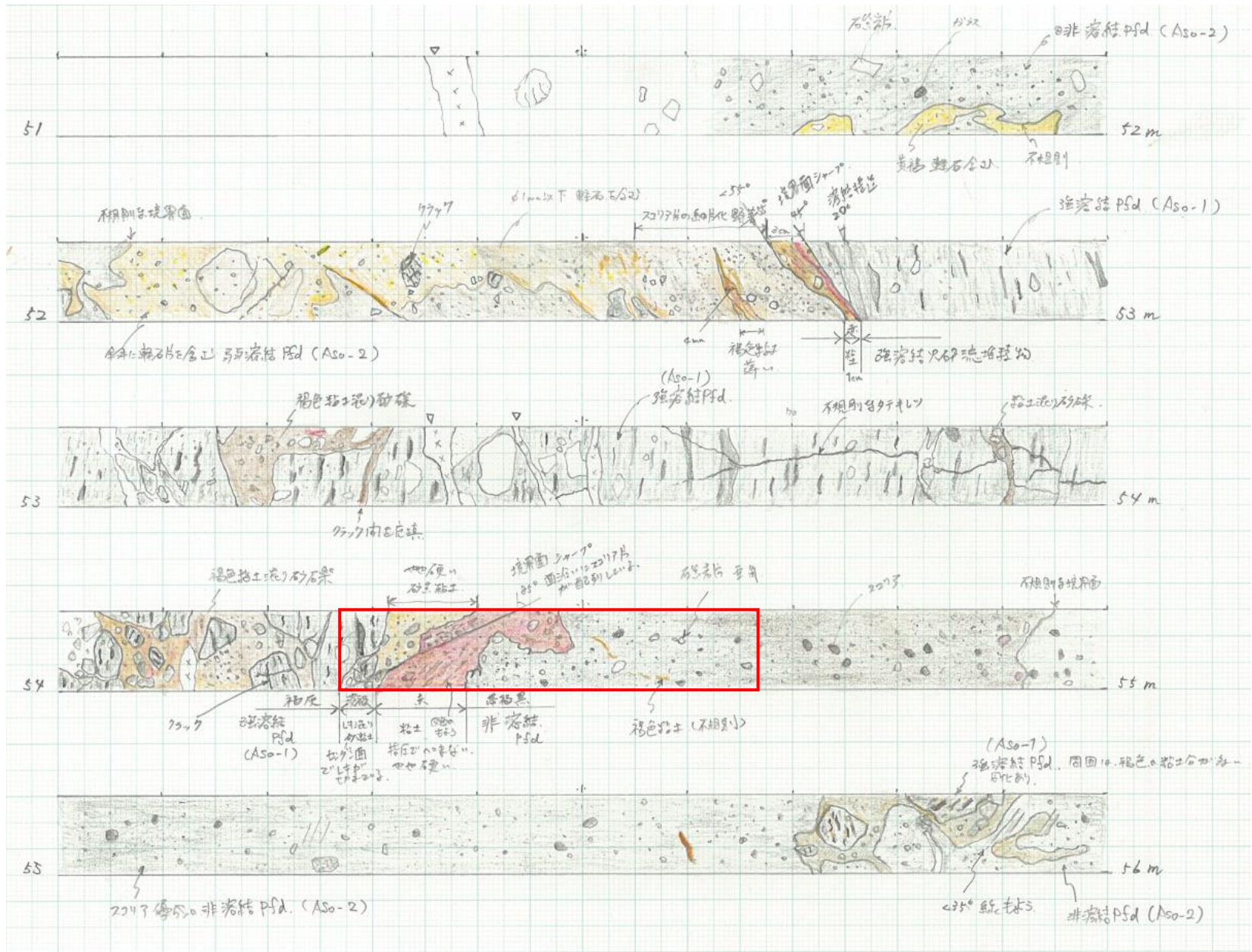


図 4.20 FDP-1 孔 51~56m 間のコアスケッチ及びコア写真



【FG①】深度 56~63m 間

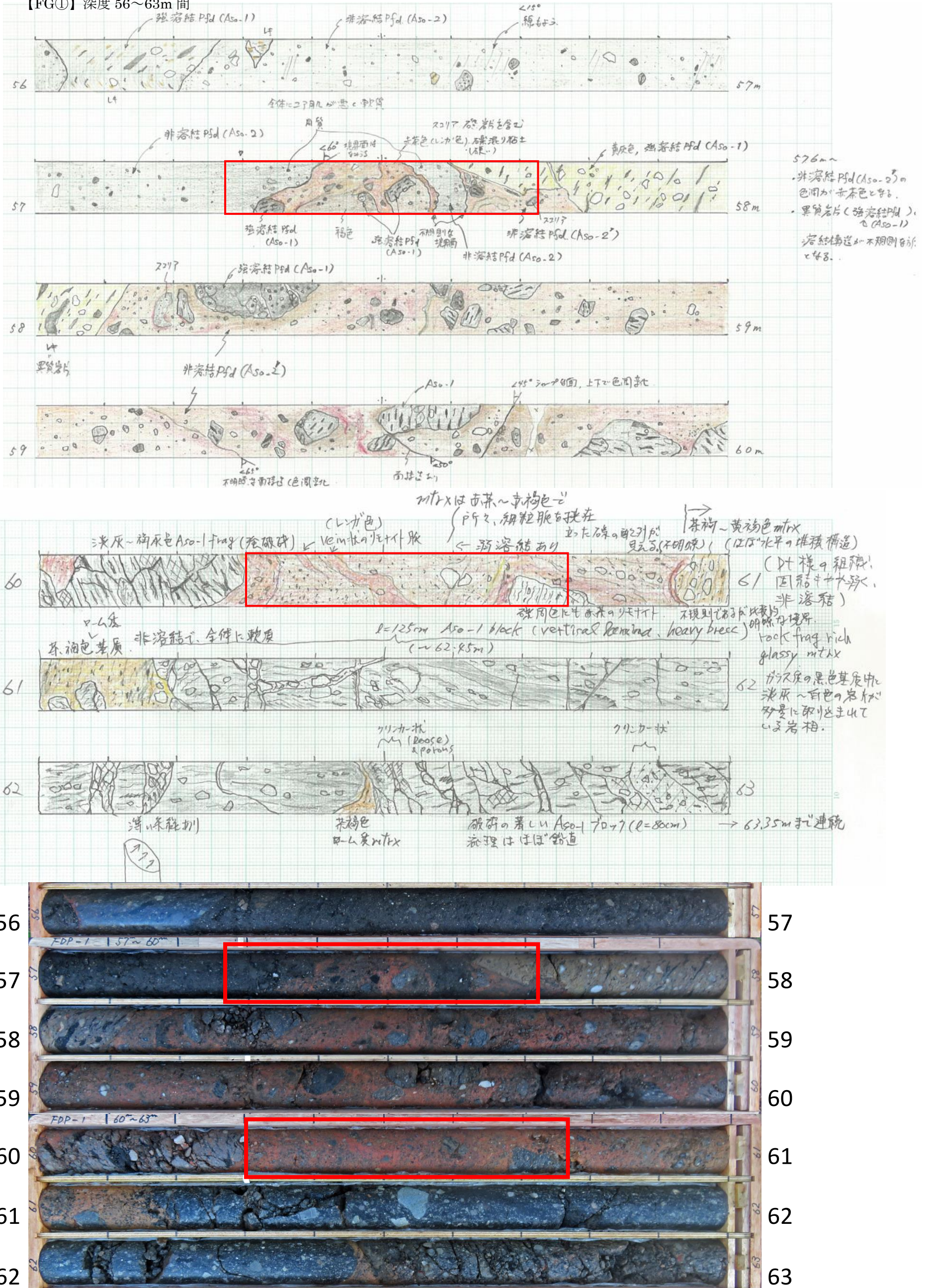


図 4.21 FDP-1 孔 56~63m 間のコアスケッチ及びコア写真



【FG②】 深度 63~69m 間

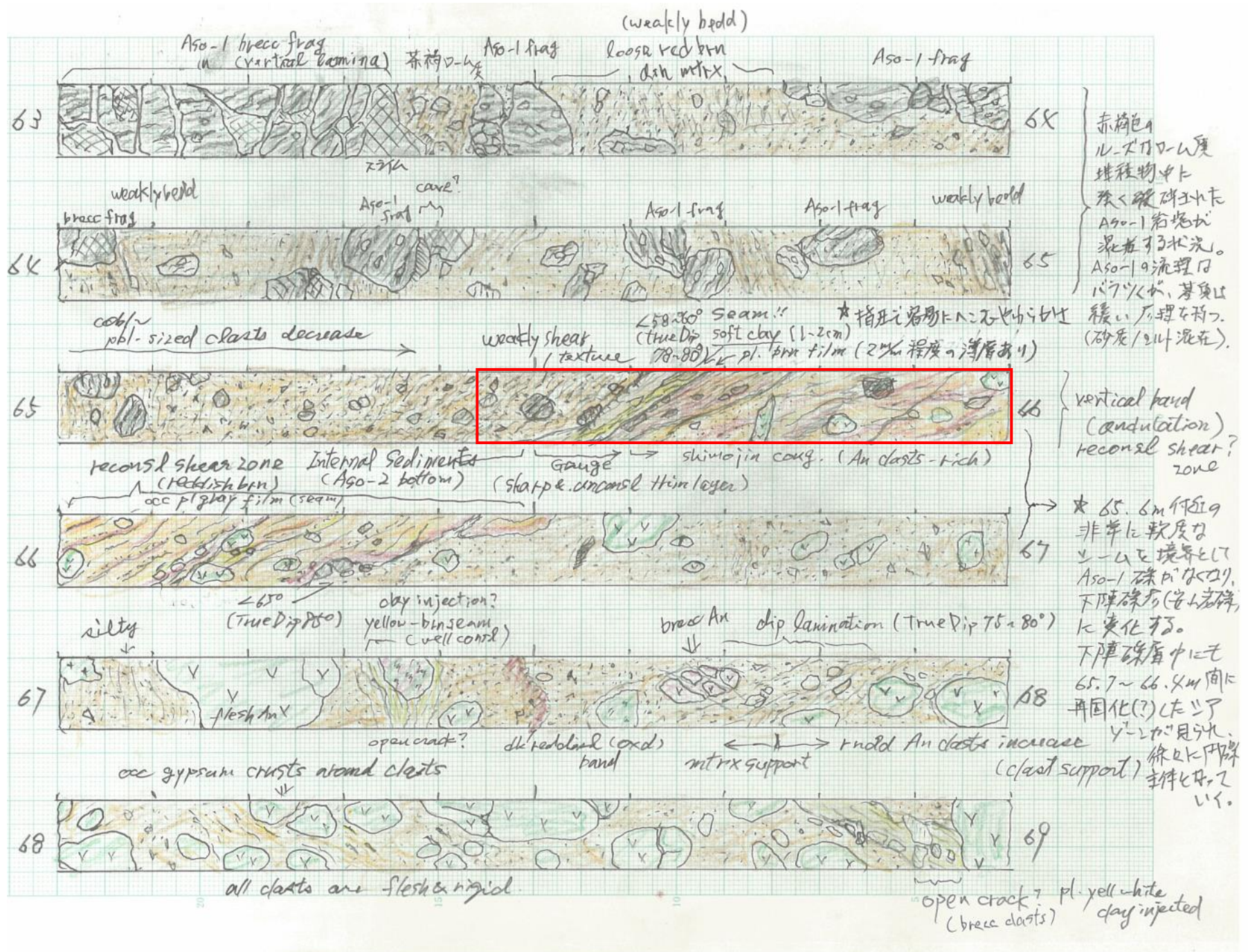


図 4.22 FDP-1 孔 63~69m 間のコアスケッチ及びコア写真



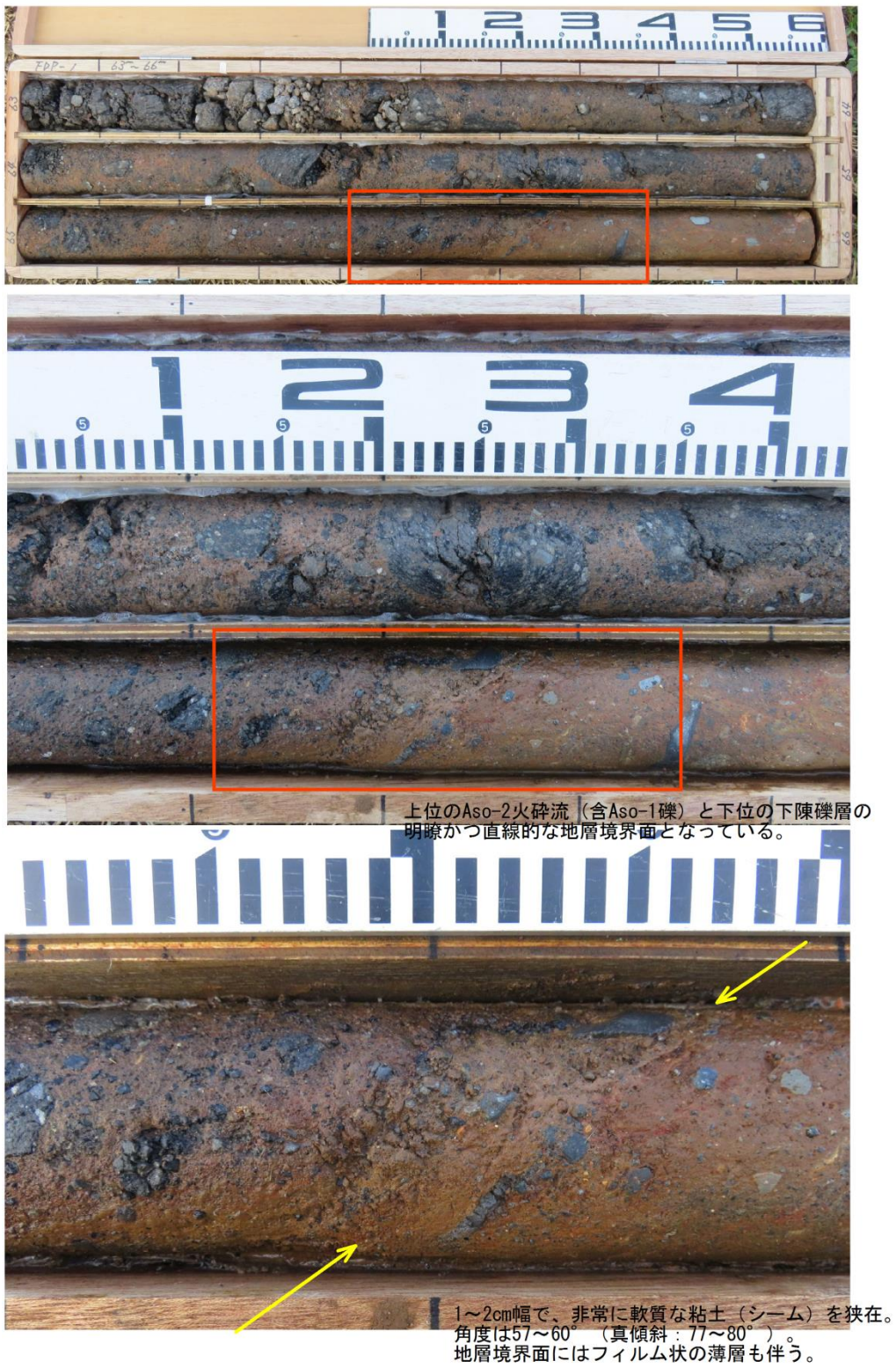


図 4.23 FDP-1 孔 65.6m 付近のせん断面拡大コア写真



【FG③】深度 114～116m 間

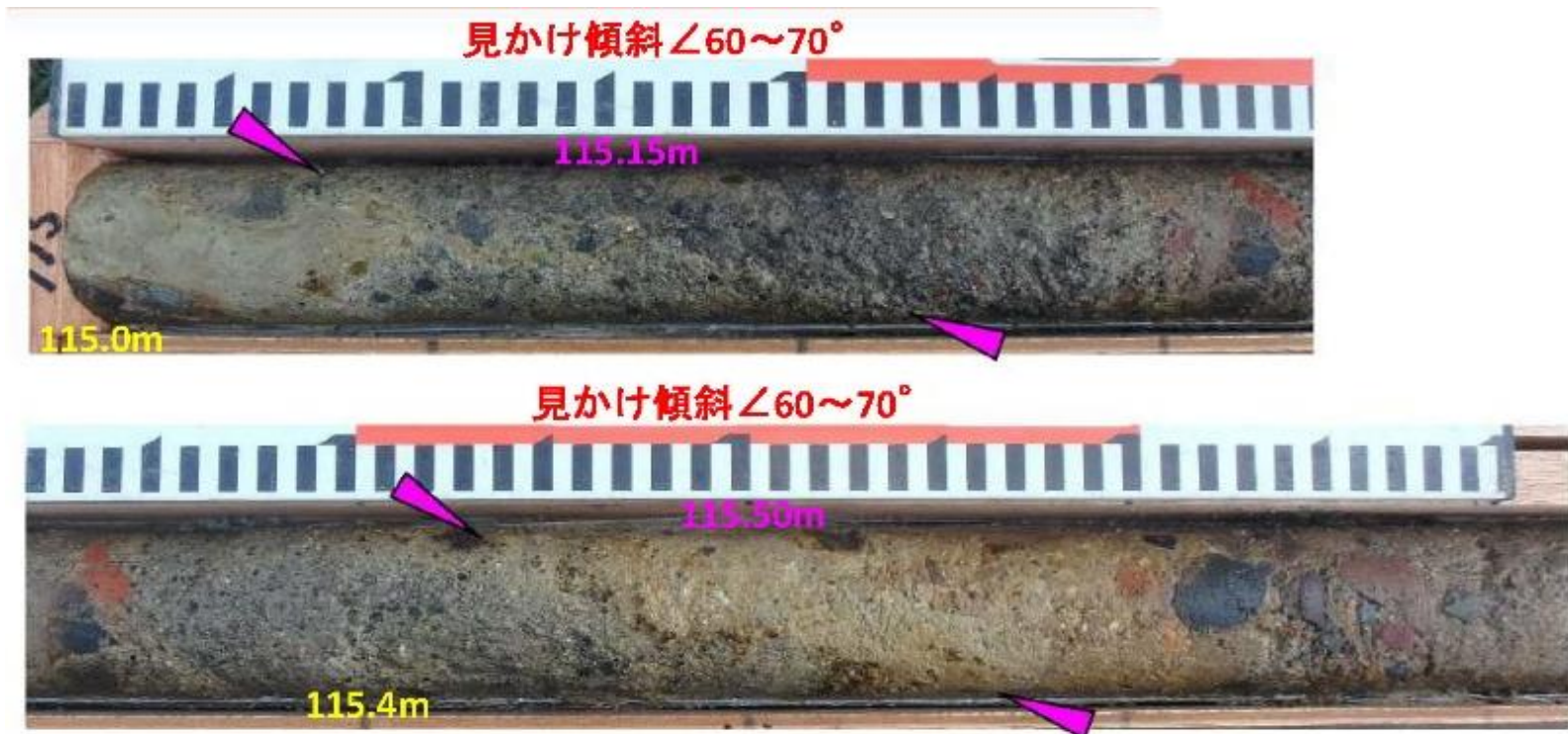
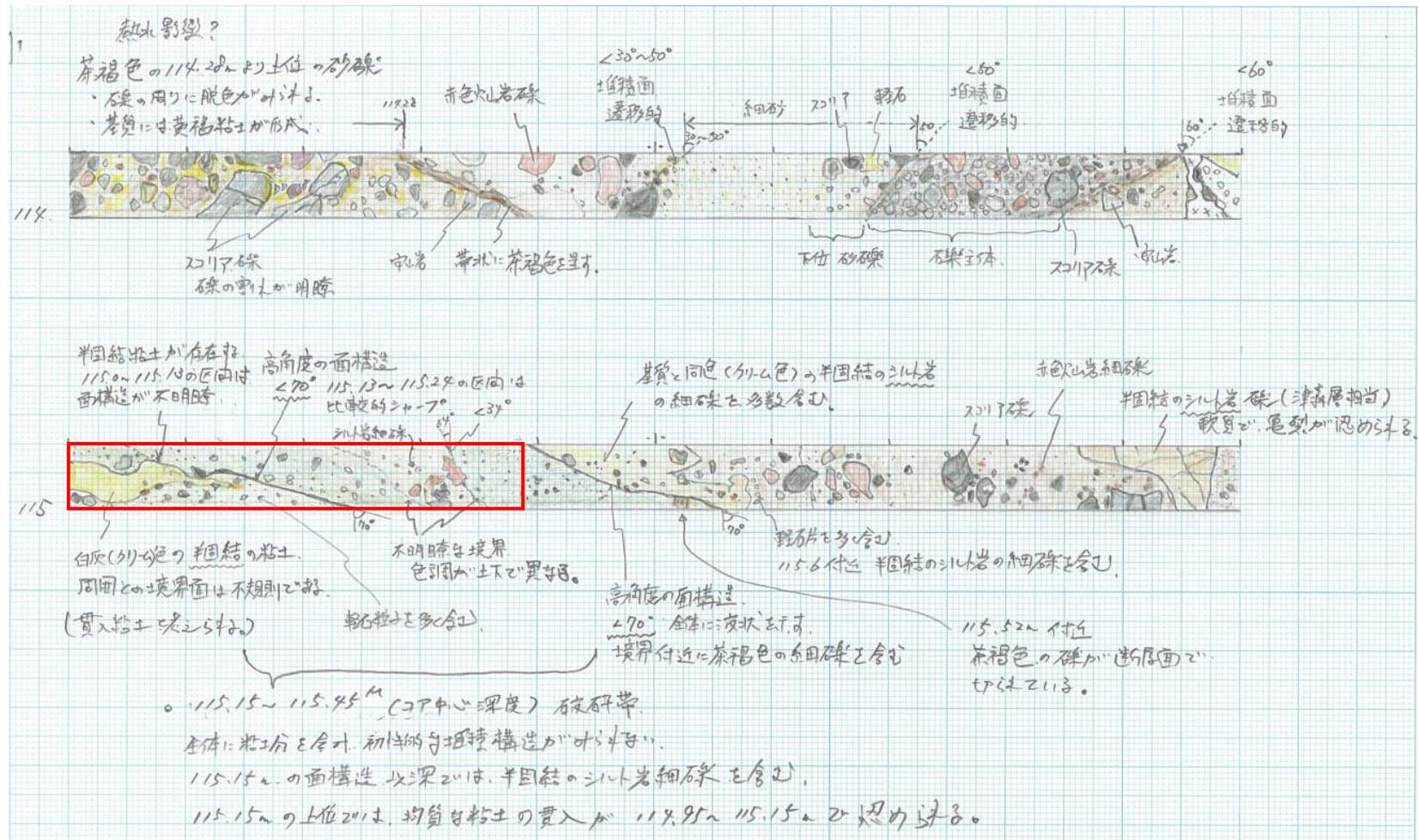


図 4.24 FDP-1 孔 114～116m 間のコアスケッチ及びコア写真



## 2) FDP-2 孔

FDP-2 孔では、下記の深度において、断層の可能性が高い、せん断面構造を確認し、コアのスケッチを行った。各区間のスケッチならびにコア写真を、図 4.25～図 4.26 に示す。

■FG④：深度 127.5～130.0m 間（127.9m 付近）

■FG⑤：深度 176.0～179.0m 間（177.4m 付近）

また、同孔で確認した特徴的な不連続面（せん断面）構造を図 4.27 図 4.28、に示す。

【FG④】 深度 127.50~130.00m 間

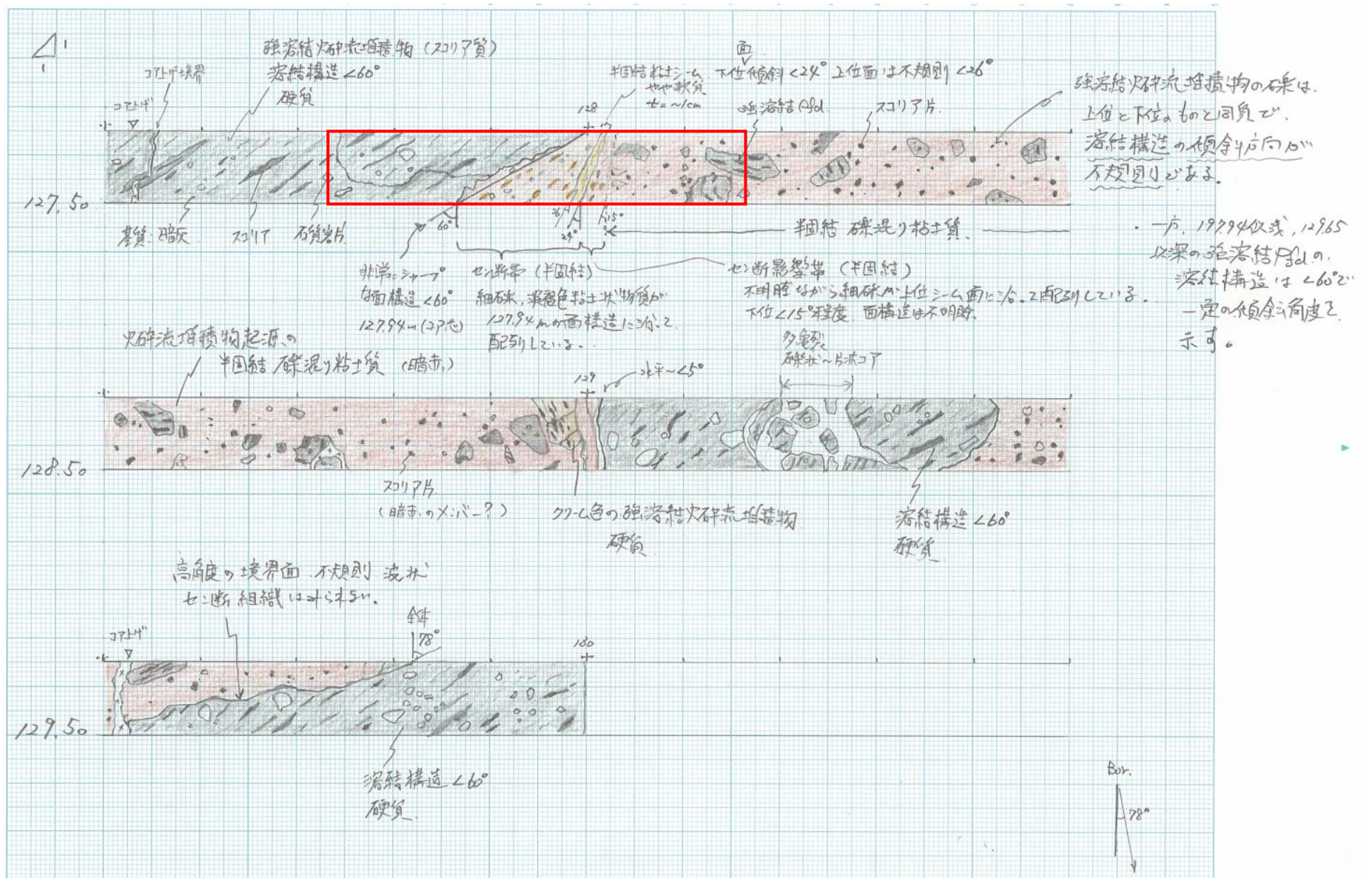


図 4.25 FDP-2 孔 127.5~130m 間のコアスケッチ及びコア写真



【FG⑤】 深度 176.0~179.0m 間

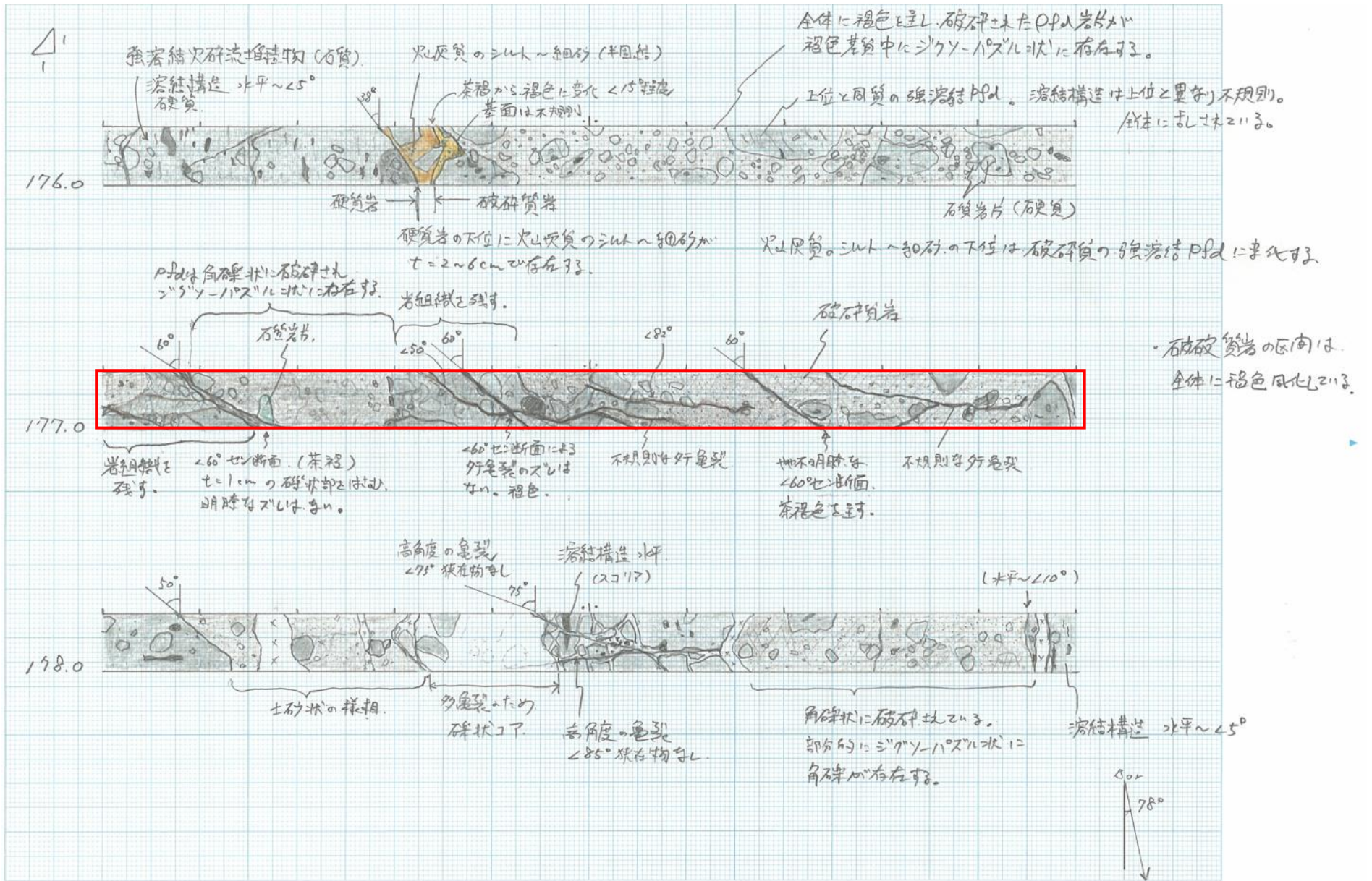


図 4.26 FDP-2 孔 176~179m 間のコアスケッチ及びコア写真



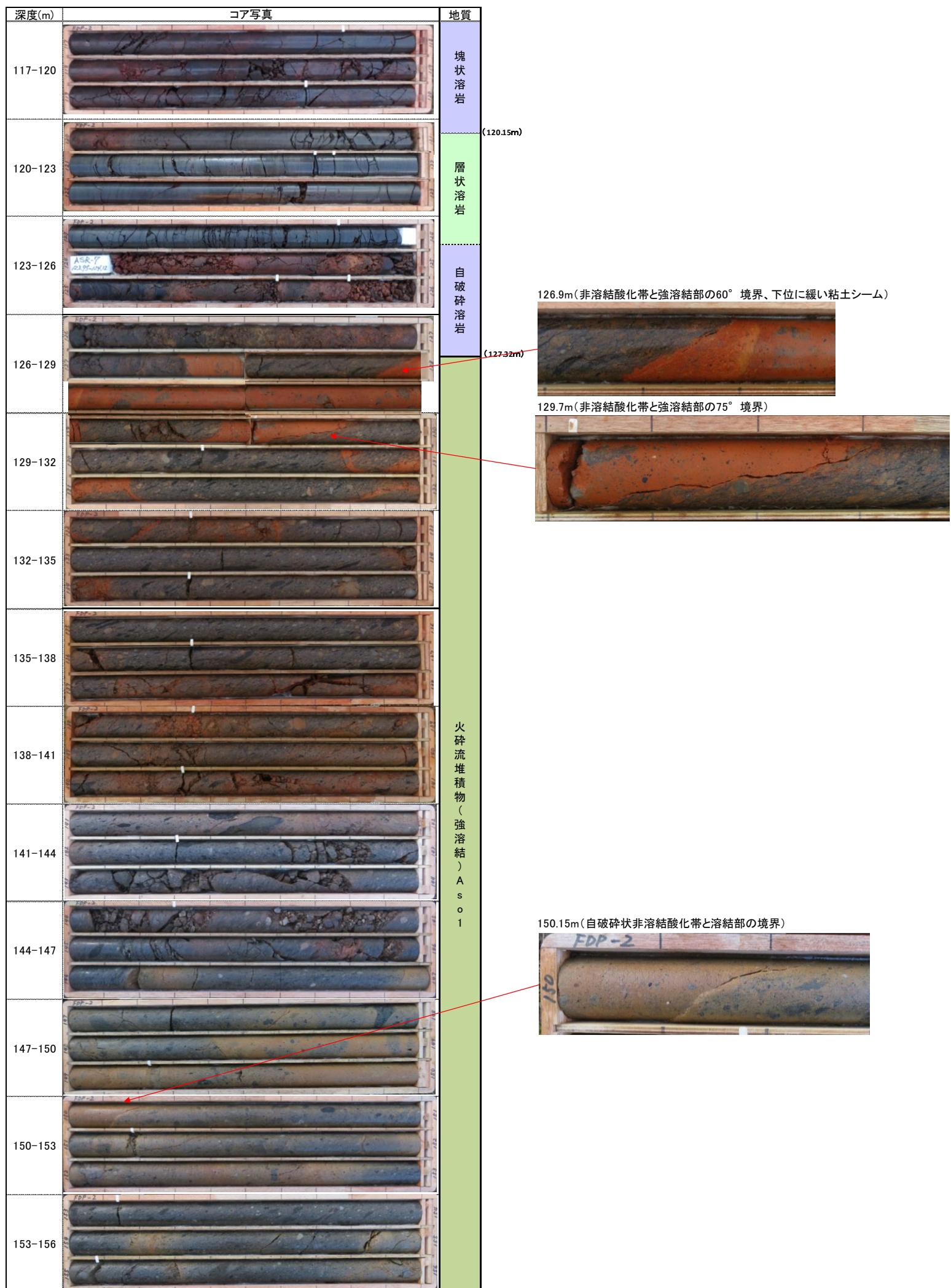


図 4.27 FDP-2 孔で確認された特徴的な不連続面(1)



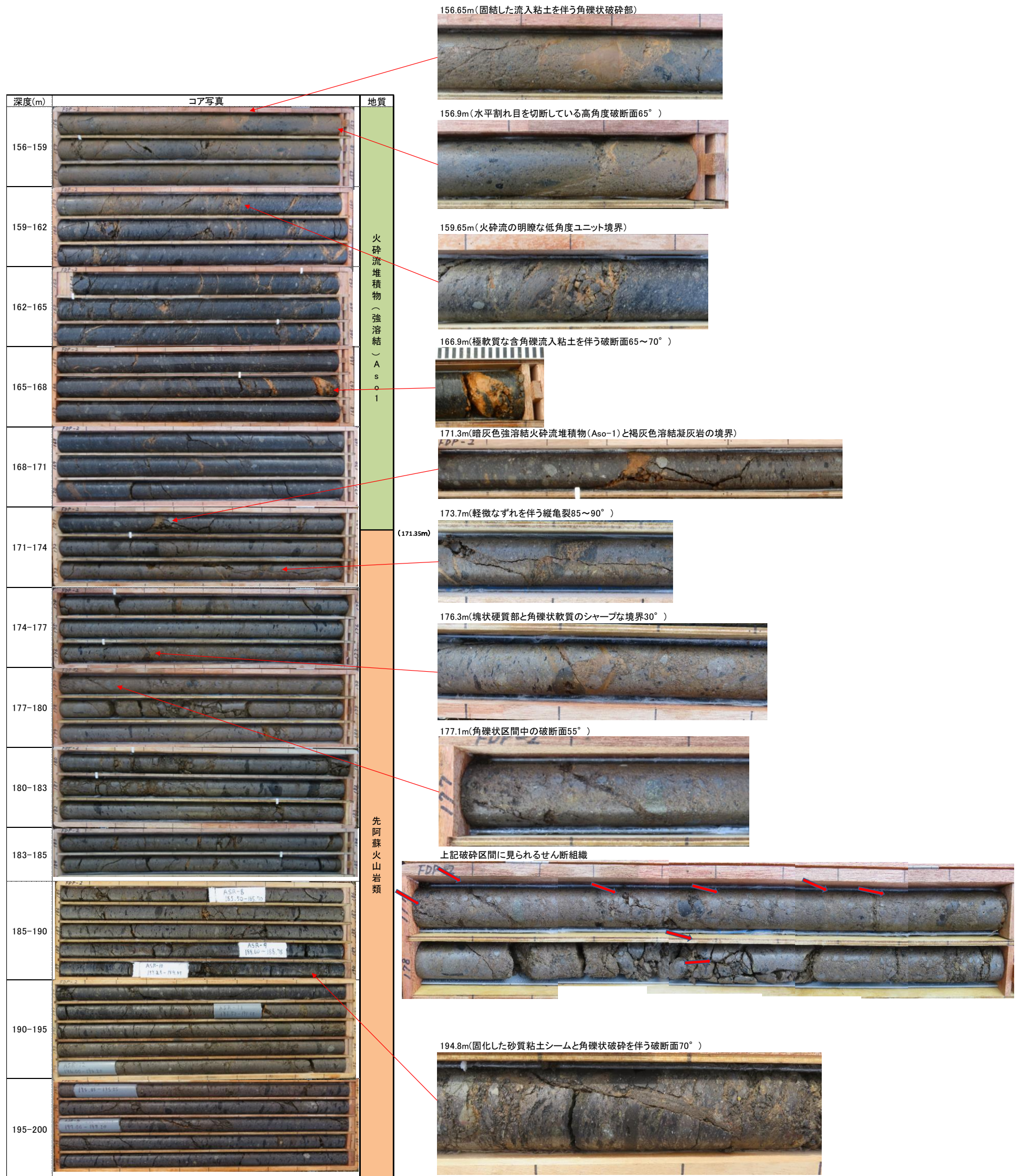


図 4.28 FDP-2 孔で確認された特徴的な不連続面(2)

#### 4.4 深部ボーリング

##### 4.4.1 実施概要

本調査において、本孔 FDB-1 は、表 4.11 の位置で実施した。

地表地震断層との離隔は、パイロットボーリングの結果に基づく図 4.29 の検討結果より、協議の上で 85m とした。

表 4.11 ボーリング孔口座標一覧表

名 称	X 座 標	Y 座 標	Z 座 標
パイロットBor FDP-1	-21528.5400	-13076.4950	59.2810
パイロットBor FDP-2	-21502.0790	-13090.2890	57.9830
深部Bor FDB-1	-21483.9020	-13099.8080	58.0180



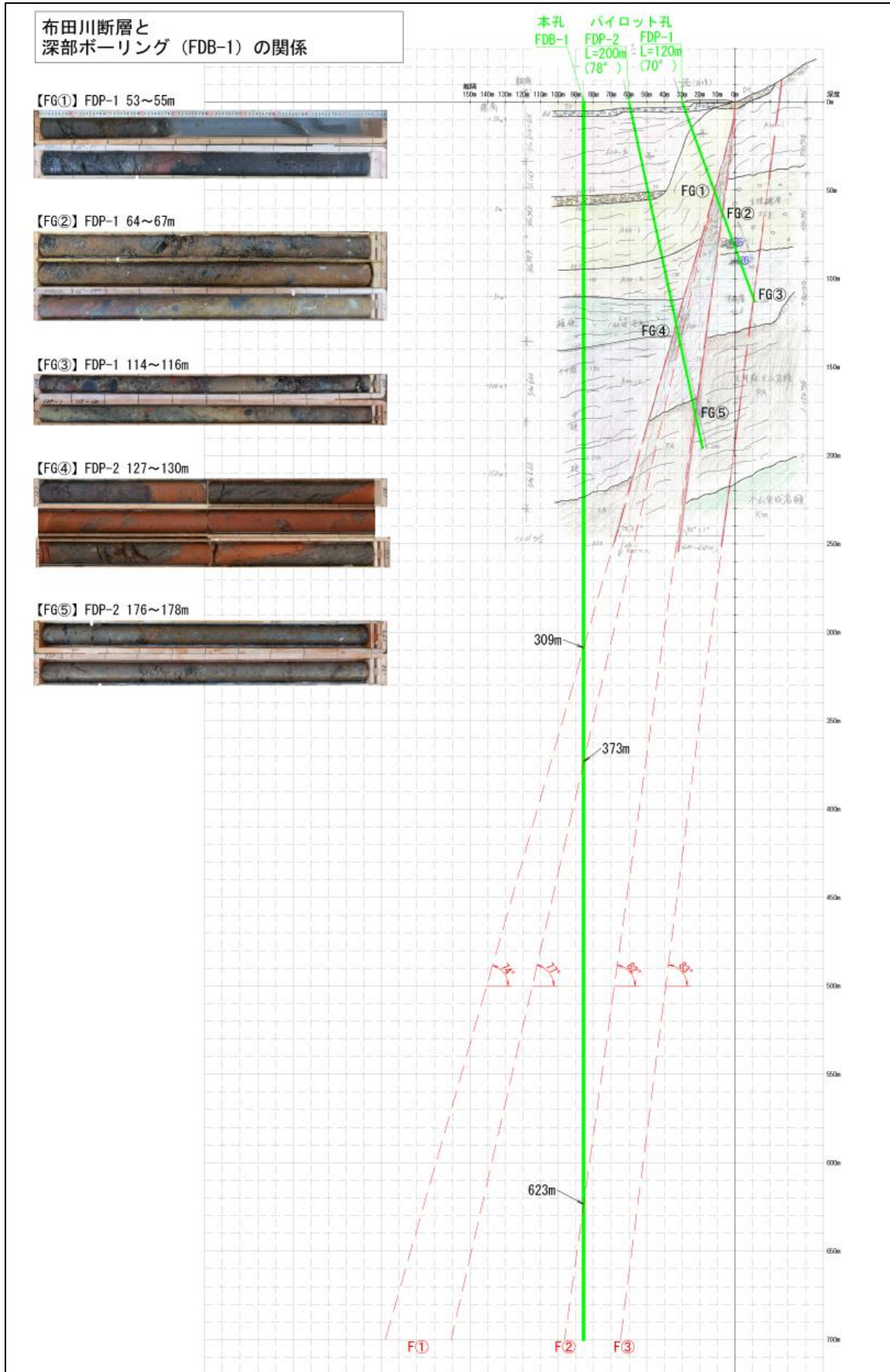


図 4.29 パイロットボーリングと本孔の関係 (当初計画)

#### 4.4.2 ドリリングチャート

FDB-1 孔の掘削仕様を表 4.12 に、ドリリングチャートを、図 4.30 に示す。

表 4.12 本孔 FDB-1 の掘削仕様

孔名	掘進長	掘進方向	備考
FDB-1	800m	下向き 90°	地表断層からの離隔：80m、302m 以深 HQ オールコア

ドリリングチャート

凡例 計画 - - 見直し - - 実績 - -

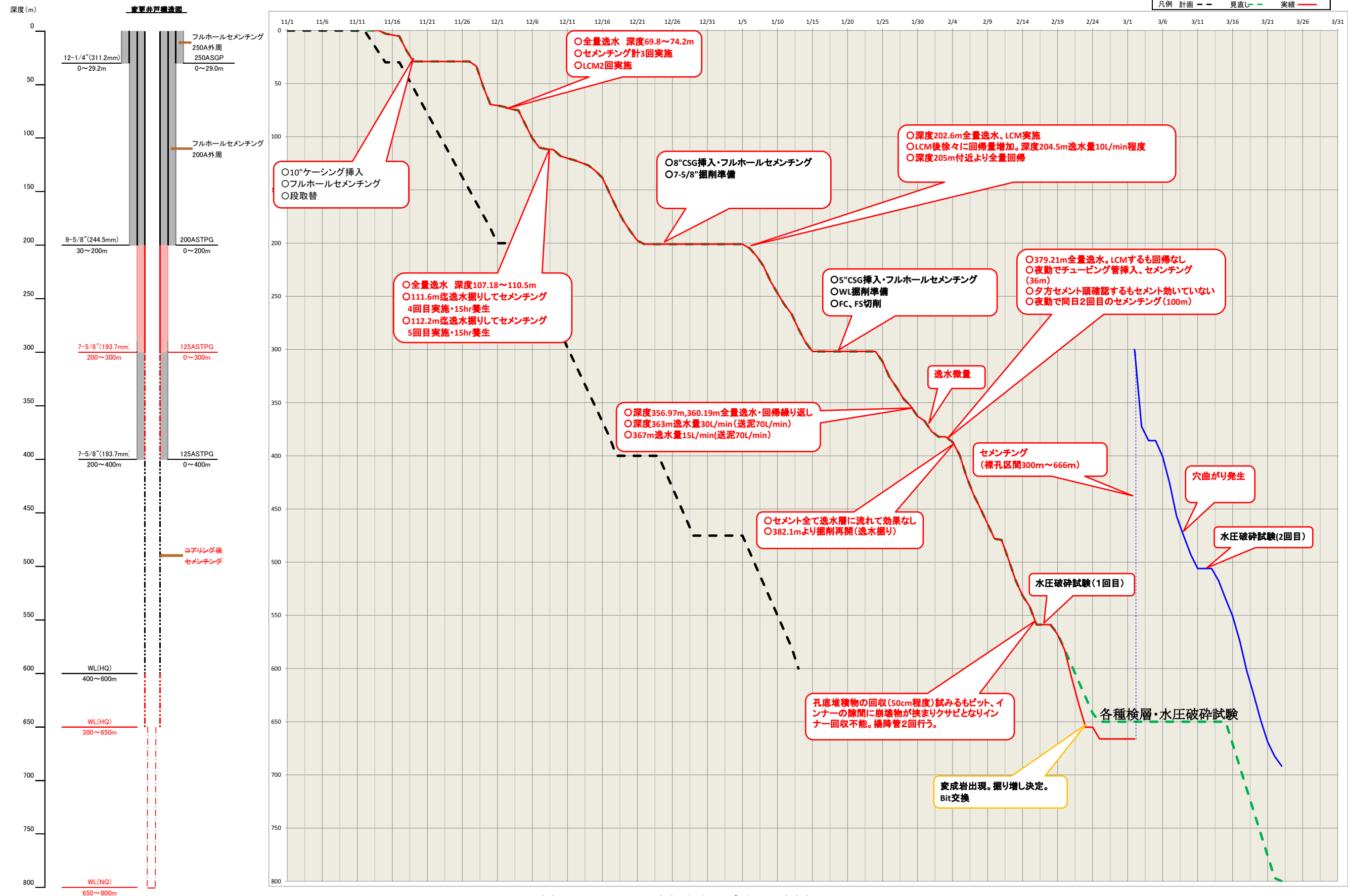


図 4.30 FDB-1 孔ドリリングチャート図

#### 4.4.3 地質観察結果

##### (1) カッティングス観察結果

深度 300m までのカッティングス観察結果は、表 4.13～表 4.15 の通りである。なお、各深度のカッティングスの写真は別冊資料に付した。

表 4.13 カッティングス観察結果表 (1)

試料深度	20m	岩種区分	軽石質火砕流堆積物(Aso-4)
色調	暗灰	構成物	角閃石粒子,軽石粒子を含む
粒径	Φ 2mm以下		
記事			
試料深度	30m	岩種区分	軽石質火砕流堆積物(Aso-4)
色調	乳白灰	構成物	軽石粒子を多く含む
粒径	Φ 5mm以下		
記事	スコリア粒子も含む やや褐色を帯びる ゴマシオ状		
試料深度	40m	岩種区分	軽石質火砕流堆積物(Aso-4)
色調	乳白灰	構成物	軽石粒子を多く含む
粒径	Φ 10mm以下		
記事	スコリア粒子も含む 石質岩片粒子含む ゴマシオ状		
試料深度	50m	岩種区分	軽石質火砕流堆積物(Aso-4)
色調	乳白灰	構成物	軽石粒子を多く含む
粒径	Φ 5mm以下		
記事	スコリア粒子も含む ゴマシオ状		
試料深度	60m	岩種区分	スコリア質火砕流堆積物(Aso-3~2)
色調	黒	構成物	スコリア粒子を多く含む
粒径	Φ 5mm以下		
記事	軽石はみられない(判定不能)		
試料深度	70m	岩種区分	スコリア質火砕流堆積物(Aso-3~2)
色調	褐灰	構成物	スコリア粒子主体
粒径	Φ 2mm以下		
記事			
試料深度	80m	岩種区分	スコリア質火砕流堆積物(Aso-3~2)
色調	褐灰	構成物	スコリア粒子主体
粒径	Φ 5mm以下		
記事			
試料深度	90m	岩種区分	スコリア質火砕流堆積物(Aso-3~2)
色調	褐灰	構成物	スコリア粒子主体
粒径	Φ 5mm以下		
記事			
試料深度	100m	岩種区分	スコリア質火砕流堆積物(Aso-3~2)
色調	帯褐灰	構成物	スコリア粒子主体
粒径	Φ 5mm以下		
記事			
試料深度	100m	岩種区分	スコリア質火砕流堆積物(Aso-3~2)
色調	帯褐灰	構成物	スコリア粒子主体
粒径	Φ 5mm以下		
記事			

表 4.14 カッティングス観察結果表 (2)

試料深度	110m	岩種区分	スコリア質火砕流堆積物(Aso-3~2)
色調	黒	構成物	スコリア粒子を多く含む
粒径	Φ 1mm以下		
記事	細粒石片程度 硬いため粉碎され細径となっている FDP-2 109.15~115.21に対比(強溶結)		
試料深度	112.5m	岩種区分	
色調	白灰	構成物	逸泥防止剤主体
粒径			
記事			
試料深度	120m	岩種区分	秋田溶岩
色調	黒灰	構成物	細粒火山岩?
粒径	Φ 5mm以下		
記事	鱗片状の粒子 褐色した風化面がみられるものもある		
試料深度	130m	岩種区分	秋田溶岩
色調	帯褐灰	構成物	細粒火山岩?
粒径	Φ 5mm以下		
記事	鱗片状の粒子 褐色した風化面がみられるものもある		
試料深度	140m	岩種区分	秋田溶岩
色調	帯褐灰	構成物	細粒火山岩?
粒径	Φ 5mm以下		
記事	角礫状の粒子 褐色した風化面がみられるものもある		
試料深度	150m	岩種区分	石質スコリア質火砕流堆積物
色調	暗灰	構成物	石質岩片粒子が多くみられる
粒径	Φ 5mm以下		
記事	僅かに赤石スコリア粒子(Φ 2mm以下)を含む 褐色化した風化面がみられる		
試料深度	160m	岩種区分	石質スコリア質火砕流堆積物
色調	褐	構成物	褐色の粘土とスコリア礫からなる
粒径	Φ 5mm以下		
記事	粘土は粘性強い 礫は角礫状		
試料深度	170m	岩種区分	石質スコリア質火砕流堆積物
色調	褐	構成物	石質岩片(An),スコリアからなる
粒径	Φ 8mm以下		
記事	全体に褐色を帯びる 褐色の石質岩片が特徴的		
試料深度	180m	岩種区分	石質スコリア質火砕流堆積物
色調	褐灰 やや褐色が強い	構成物	石質岩片(An), スコリアからなる
粒径	Φ 8mm以下		
記事	全体に褐色を帯びる 褐色の石質岩片が特徴的		
試料深度	190m	岩種区分	石質スコリア質火砕流堆積物
色調	褐灰	構成物	石質岩片(An), スコリアからなる
粒径	Φ 8mm以下		
記事	全体に褐色を帯びる 褐色の石質岩片が特徴的		
試料深度	200m	岩種区分	石質スコリア質火砕流堆積物
色調	褐灰	構成物	石質岩片(An), スコリアからなる
粒径	Φ 5mm以下		
記事	全体に褐色を帯びる 僅かに赤色スコリア粒子を含む(Φ 2mm以下)		

表 4.15 カッティングス観察結果表 (3)

試料深度	210m	岩種区分	スコリア質火砕流堆積物・浮石 An alt?
色調	黒	構成物	An(斑晶,Qtz)、スコリア
粒径	Φ 2mm以下		
記事	全体に黒色を呈す 黒色スコリアを含む 不規則な礫状で岩片に含まれる 無斑晶質な細粒岩片あり		
試料深度	220m	岩種区分	安山岩 An lava
色調	黒	構成物	安山岩
粒径	Φ 5mm以下		
記事	全体に黒色を呈す Qtz多く,石英の斑晶を含む安山岩 Hb or Pxと思われる斑晶も含む		
試料深度	230m	岩種区分	溶結凝灰岩～火山角礫岩 An lava 挟む
色調	褐灰	構成物	溶結凝灰岩～火山角礫岩
粒径	Φ 8mm以下		
記事	全体に褐色を帯びる 桃,褐,淡褐,灰の多色の粒子からなる 赤色の岩片を含む粒子ある Hb, 石英(Qtz)結晶を含む岩片		
試料深度	240m	岩種区分	溶結凝灰岩～火山角礫岩 An lava 挟む
色調	褐灰	構成物	溶結凝灰岩～火山角礫岩 僅かにAn(黒)含む
粒径	Φ 5mm以下		
記事	全体に褐色を帯びる 桃,褐,淡褐,灰の多色の粒子からなる 赤色の岩片を含む粒子ある Px(淡緑)半球状の結晶を含む岩片多い		
試料深度	250m	岩種区分	溶結凝灰岩～火山角礫岩 An lava 挟む
色調	褐灰	構成物	溶結凝灰岩～火山角礫岩 僅かにAn(黒)含む
粒径	Φ 5mm以下		
記事	全体に褐色を帯びる 桃,褐,淡褐,灰の多色の粒子からなる 赤色の岩片を含む粒子ある Qtz結晶を多く含む岩片が多い		
試料深度	260m	岩種区分	溶結凝灰岩～火山角礫岩 An lava 挟む
色調	褐灰	構成物	溶結岩～角礫岩
粒径	Φ 2mm以下		
記事	全体に褐色を帯びる 桃,褐,淡褐,灰の多色の粒子からなる 赤色の岩片を含む粒子ある		
試料深度	270m	岩種区分	
色調	茶褐/黄褐混じる	構成物	安山岩片～溶結凝灰岩片
粒径	Φ 3mm以下		
記事	上位に比べて褐色の度合いが増す。 260～270m間で下陳礫層に到達した可能性大。		
試料深度	280m	岩種区分	
色調	黒灰色主体	構成物	黒灰色安山岩片主体
粒径	Φ 3mm以下		
記事	上位にあった黄褐色片は減少する。全体に暗い色調で硬質安山岩片に富む		
試料深度	290m	岩種区分	
色調	黒灰色主体 暗褐岩片がやや増え	構成物	黒灰色安山岩片主体
粒径	Φ 3mm以下		
記事	黒灰色安山岩片主体。白色の石質岩片まばら。上位にあった黄褐色片は減少する。 硬軟が繰り返している。下陳礫層の礫優勢部と思われる。		
試料深度		岩種区分	
色調	黄褐～茶褐	構成物	暗灰色安山岩片
粒径	Φ 5mm以下		
記事	黄褐～茶褐色片が特徴的に混じる。暗灰色安山岩片の他に、指圧でつぶれる褐色シルト片が混在。掘進速度が急激に増大している。非常に軟質な地層に急変している。 291m付近より津森層に入ったと判断される。		
試料深度	300m	岩種区分	
色調	黄褐～茶褐	構成物	暗灰色安山岩片
粒径	Φ 5mm以下		
記事	黄褐～茶褐色片が特徴的に混じる。暗灰色安山岩片の他に、指圧でつぶれる褐色シルト片が混在。291.1mよりも褐色シルト片は減少しているが、おおむね同様のカッティングスよりなる。津森層と判断される。		



## (2) コア観察結果

深部ボーリング FDB-1 孔のコアにおいて観察された、301.9m 以下の地質は、以下の通りである。

- ①津森層 (砂岩・シルト岩・礫岩互層)
- ②基底堆積物 (砂礫層)
- ③先阿蘇火山岩類 (自破碎状～塊状安山岩溶岩)
- ④時代未詳の堆積岩 (礫岩主体：基底砂礫起源)
- ⑤時代未詳の凝灰質岩 (凝灰質礫岩：火砕岩起源)
- ⑥片岩質礫岩 (角礫岩・砂岩・シルト岩互層)

以下に、各層の特徴を述べる。

### ①津森層 (砂岩・シルト岩・礫岩互層)

- ・本層は、全体に茶褐～淡褐色を呈すシルト岩と細粒砂岩の細互層で特徴付けられる。シルト岩には平行ラミナが発達し、堆積面が水平～傾斜 5° 程度を示す。シルト岩は固結度が高い。
- ・シルト岩中には、細礫層と粗粒砂層を挟む。細礫層は、径 1～6cm 大の硬質な安山岩円礫を含み、基質は固結度が低い粗粒砂からなる。
- ・層相の特徴から、FDP-1 孔で確認された津森層と同様の特徴を有し、湖成層と考えられる。

### ②基底堆積物 (砂礫層)

- ・本層は、スコリア礫を多く含む火山礫凝灰岩層、基質の固結度が低い砂礫層、最下部のシルト岩砂岩互層からなる。
- ・火山礫凝灰岩は、全体に黄褐～褐灰色を呈し、最大 8cm 大の不定形のスコリア礫を特徴的に含む軟質な凝灰岩である。固結度は良く、無層理で塊状である。
- ・砂礫層は、火山礫凝灰岩の下位に分布し、黄褐～茶褐色の固結度が低い礫岩である。礫岩は、最大 50cm 大の硬質、新鮮な安山岩円礫を多数含む。基質は粗粒砂主体で、層理面などの堆積構造は認められない。下位のシルト岩砂岩互層との境界は、水平な不整合面で接する。
- ・シルト岩砂岩互層は、淡茶褐色を呈し、固結度の良い岩である。シルト岩中には、潜在亀裂が多数見られ、深度 353.95m 付近の断層の影響を受けていると考えられる。

### ③先阿蘇火山岩類 (自破碎状～塊状安山岩溶岩)

- ・安山岩質の溶岩を主体とし、硬質な塊状部と脆く角礫状の自破碎部からなる。塊状部では、クリッカーと互層状の産状を呈す。

- ・塊状部は、灰～青灰色を呈し、硬質で変質作用の影響がほとんど見られない。弱変質を受けた安山岩は、紫色を帯びる。塊状部の中でも粗粒安山岩、微晶質安山岩は、非常に硬質である。節理面は、塊状部が連続する箇所において、低角度と高角度の卓越部が見られる。
- ・クリンカーは、塊状部と互層状に出現し、主に礫状で採取される。
- ・自破碎部は、全体に強変質作用を受け、黄白～帯赤紫白色を呈し、非常に脆い岩質である。

#### ④時代未詳の堆積岩（礫岩主体：基底砂礫起源）

- ・礫岩主体の堆積岩で、砂岩の薄層を挟む。全体に固結度が良く、半固結～固結した状態である。局所的に基質の締りが悪い箇所があり、礫状で採取される。
- ・礫岩は、径 5～25cm 大の安山岩礫を多く含む。安山岩礫以外には、径 10cm 以下の緑色片岩の角礫～亜円礫を含む。基質は暗灰～灰褐色を呈す砂である。
- ・砂岩の薄層は、厚さ 0.20～1.85m で、褐～帯緑灰を呈す。砂岩は細粒で、シルト岩と互層する場合がある。層理面は傾斜 10～35° を示す。
- ・礫岩の最上部は、砂岩との互層で、層理面が傾斜 30～60° を示す。礫岩の礫は 2mm 以下の細礫主体である。

#### ⑤時代未詳の凝灰質岩（凝灰質礫岩：火砕岩起源）

- ・凝灰質礫岩主体の堆積岩で、全体に固結した状態である。最上部には厚さ 6m 程度の砂岩シルト岩互層が分布する。深度 576m 付近までは、局所的に基質の締りが悪い箇所があり、礫状で採取される。
- ・凝灰質礫岩は、全体に灰褐色を呈し、無層理・塊状である。最大礫径 90cm 大の安山岩巨礫を局所的に含む。礫は径 1～20cm 大の安山岩亜角礫～亜円礫を多く含む。全体にスコリア礫を僅かに含む。凝灰質礫岩の下位では、緑色片岩礫を含む。
- ・凝灰質礫岩の最上部は、帯緑灰色の砂岩シルト岩互層が分布する。層理面は水平～傾斜 20° を示す。

#### ⑥片岩質礫岩（角礫岩・砂岩・シルト岩互層）

- ・片岩質礫岩は、片岩質破碎岩、砂岩・シルト岩からなる緑灰色の堆積岩である。
- ・片岩質破碎岩（礫岩）は、緑色片岩、蛇紋岩、石英脈片が密集する特徴的な岩相を示す。基質は乏しく非常に脆い。片岩礫の片理面構造が不規則な方向を向いており、礫岩が破碎された状態を示す。
- ・砂岩及びシルト岩は、緑色片岩の細礫を含み、互層状をなす。層理面は水平～傾斜 15° の傾斜を示す。



4.4.4 本孔のトピックス的記載事項

(1) 本孔周辺の地震断層

調査箇所周辺の断層露頭等の確認を行った。ロケーションマップを図 4.32 に示す。また、代表的な断層露頭箇所として、今回の地表断層に並行して分布する Loc.2 の露頭写真ならびにスケッチを図 4.31 に示す。

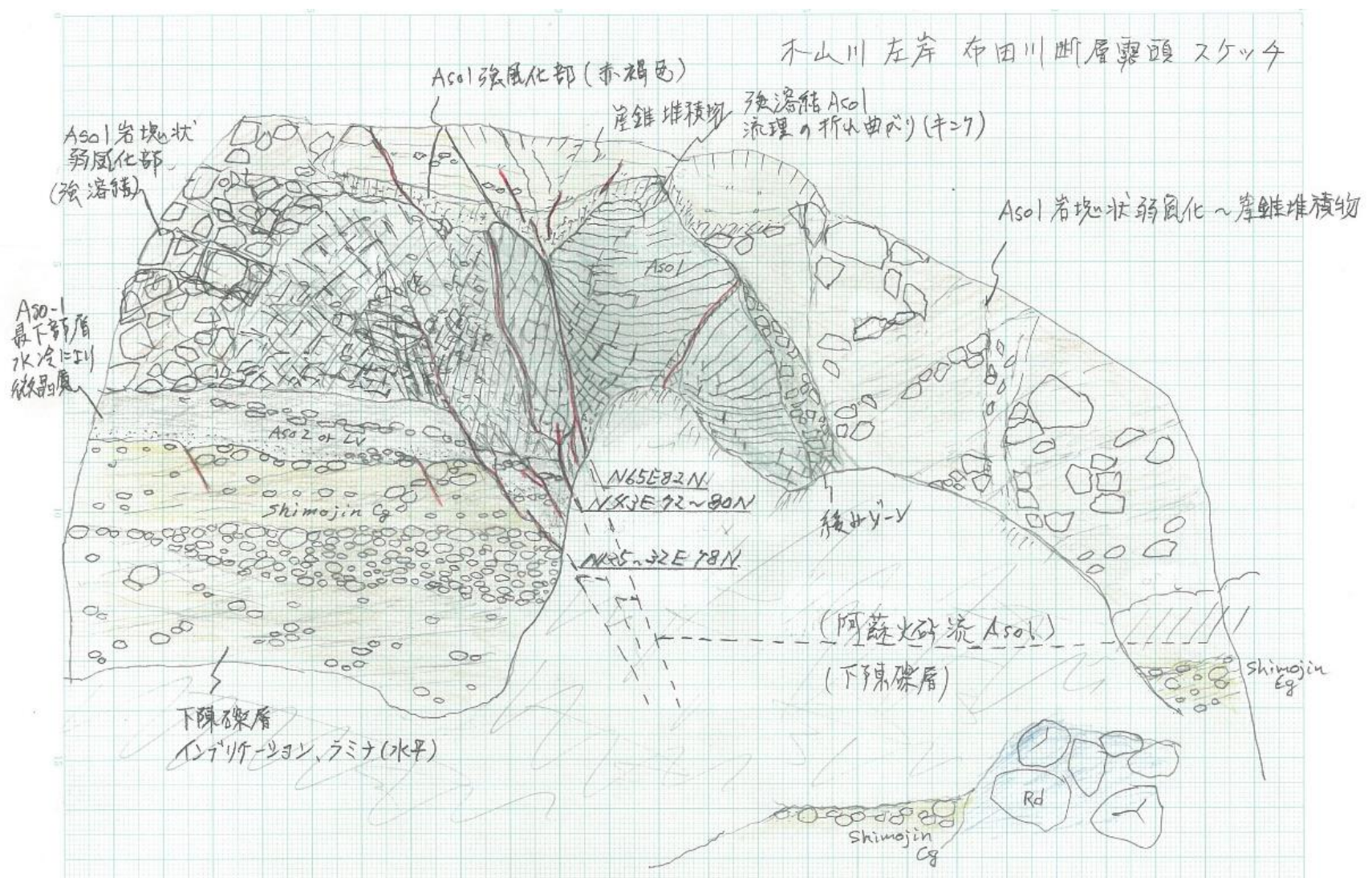


図 4.31 木山川右岸の断層露頭 (Loc.2) 写真及びスケッチ図





図 4.32 調査地周辺の断層のロケーションマップ (GoogleMap に上書き)

## (2) 深部ボーリングで確認した断層面

FDB-1 孔では、下記の深度において、断層の可能性が高いせん断面構造を確認し、コアのスケッチを行った。各区間のスケッチならびにコア写真を、図 4.33～図 4.35 に示す。

■FG⑥：深度 353.5～355.0m 間 (354.0m 付近)

■FG⑦：深度 572.0～577.0m 間 (575.8m 付近)



【FG⑥】 深度 353.5~355.0m

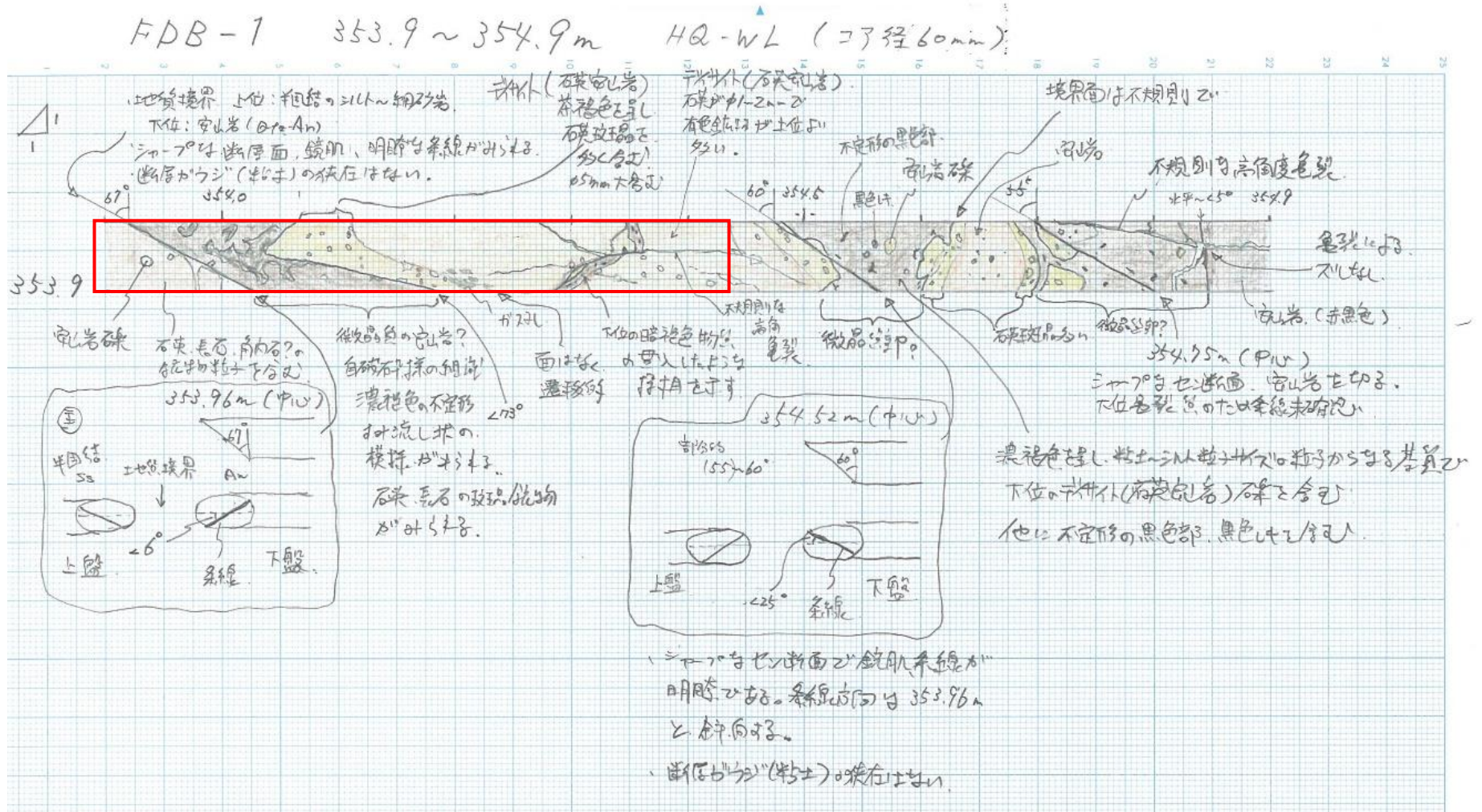


図 4.33 FDB-1 孔 353.9~354.9m 間のコアスケッチ及びコア写真



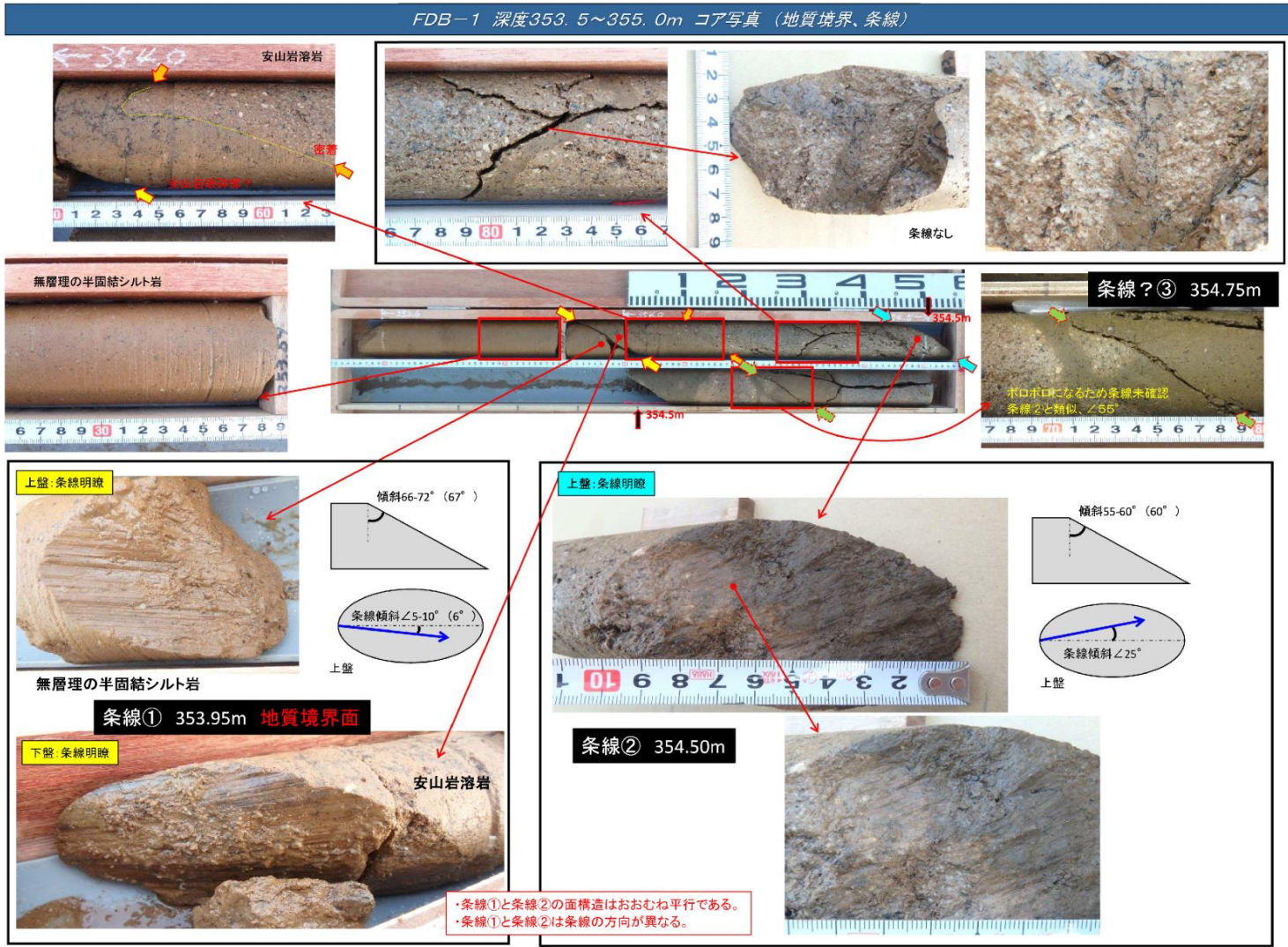


図 4.34 FDB-1 孔 353.9~354.9m 間の詳細観察結果



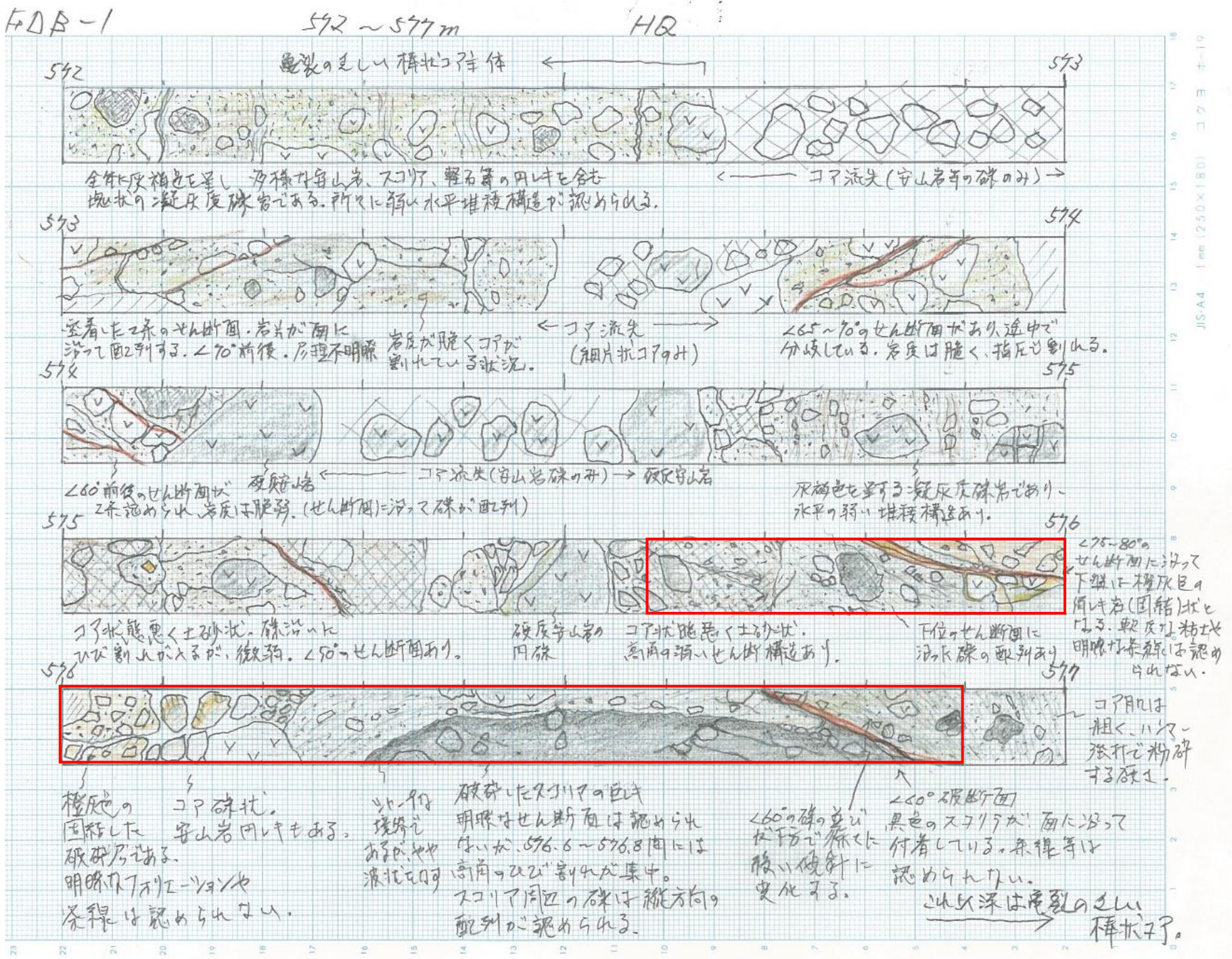


図 4.35 FDB-1 孔 572.0~577.0m 間のコアスケッチ及びコア写真



#### 4.5 ボーリングコア試料の詳細観察結果

ボーリングコアの詳細観察結果として、JACIC 柱状図作成要領に従い柱状図を作成すると共に、地質の硬軟や礫径、せん断面構造等に注目した岩相柱状図を作成した。なお、FDB-1 孔の 300m 以浅については、カッティングス試料の観察とした。

岩盤柱状図ならびに岩相柱状図を別冊資料に付す。

##### 4.5.1 FDP-1 孔

パイロットボーリング FDP-1 孔では以下の地質と断層面を確認した。

岩相柱状総括図を図 4.36 に示す。

###### 【地質】

- ①耕作土
- ②旧河床砂礫層
- ③Aso-4 火砕流堆積物（非溶結）
- ④Aso-3 火砕流堆積物（弱溶結）
- ⑤Aso-2～Aso-1 火砕流堆積物（擾乱帯、強溶結）
- ⑥下陳礫層
- ⑦津森層

###### 【断層面】

- FG①：深度 51～63m 間（57.4m 付近） 地質④/⑤の境界  
FG②：深度 63～69m 間（65.6m 付近） 地質⑤/⑥の境界  
FG③：深度 114～116m 間（115.0m 付近） 地質⑦内

#### 4.5.2 FDP-2 孔

パイロットボーリング FDP-2 孔では以下の地質と断層面を確認した。  
岩相柱状総括図を図 4.37、図 4.38 に示す。

##### 【地質】

- ①耕作土
- ②旧河床砂礫層
- ③Aso-4 火砕流堆積物（非溶結）
- ④旧谷基底砂礫層
- ⑤Aso-3 火砕流堆積物（弱溶結）
- ⑥Aso-2 火砕流堆積物（強溶結）
- ⑦秋田溶岩層（硬質安山岩溶岩）
- ⑧Aso-1 火砕流堆積物（強溶結）
- ⑨先阿蘇火山岩類

##### 【断層面】

- FG④：深度 127.5～130.0m 間（127.9m 付近） 地質⑧内（地質⑦/⑧境界）
- FG⑤：深度 176.0～179.0m 間（177.4m 付近） 地質⑧/⑨境界付近



### 4.5.3 FDB-1 孔

深部ボーリング FDB-1 孔では以下の地質と断層面を確認した。

深度 300m 以深の岩相柱状総括図を図 4.39～図 4.42 に示す。

#### 【地質】

[カッティングス及び掘削記録（マッドロギングデータ含む）より判定]

- ①耕作土
- ②旧河床砂礫層
- ③Aso-4 火砕流堆積物（非溶結）
- ④旧谷基底砂礫層
- ⑤Aso-3 火砕流堆積物（弱溶結）
- ⑥Aso-2 火砕流堆積物（強溶結）
- ⑦秋田溶岩層（硬質安山岩溶岩）
- ⑧Aso-1 火砕流堆積物（強溶結）
- ⑨下陳礫層

[ボーリングコアより判定]

- ⑩津森層（砂岩・シルト岩・礫岩互層）
- ⑪基底堆積物（砂礫層）
- ⑫先阿蘇火山岩類（自破砕状～塊状安山岩溶岩）
- ⑬時代未詳の堆積岩（礫岩主体：基底砂礫起源）
- ⑭時代未詳の凝灰質岩（凝灰質礫岩：火砕岩起源）
- ⑮片岩質礫岩（角礫岩・砂岩・シルト岩互層）

#### 【断層面】

FG⑥：深度 353.5～355.0m 間（354.0m 付近）

FG⑦：深度 572.0～577.0m 間（575.8m 付近）

#### 4.5.4 FDB-1 (R) 孔

深部ボーリング FDB-1(R) 孔では以下の地質と断層面を確認した。

深度 487.3m 以深の岩相柱状総括図を図 4.43～図 4.44 に示す。

##### 【地質】

[ボーリングコアより判定]

- ⑫先阿蘇火山岩類（自破碎状～塊状安山岩溶岩）
- ⑬時代未詳の堆積岩（礫岩主体：基底砂礫起源）
- ⑭時代未詳の凝灰質岩（凝灰質礫岩：火砕岩起源）
- ⑮片岩質礫岩（角礫岩・砂岩・シルト岩互層）

##### 【断層面】

FG⑦：深度 571.0～575.5m 間（574.3m 付近）

FG⑧：深度 597.0～599.2m 間（597.5m 付近）

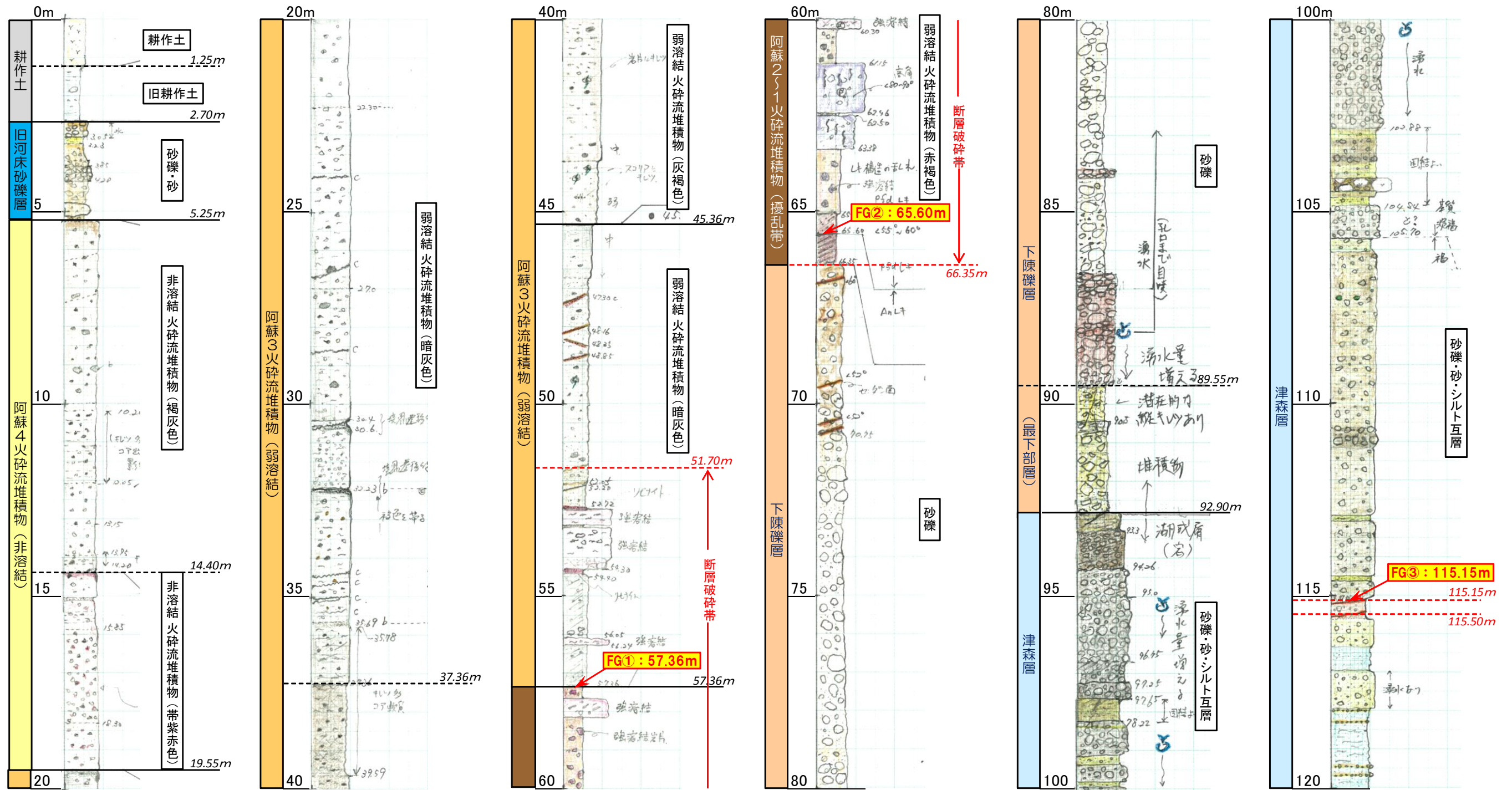


図 4.36 岩相柱状総括図 1/1 (FDP-1 孔)



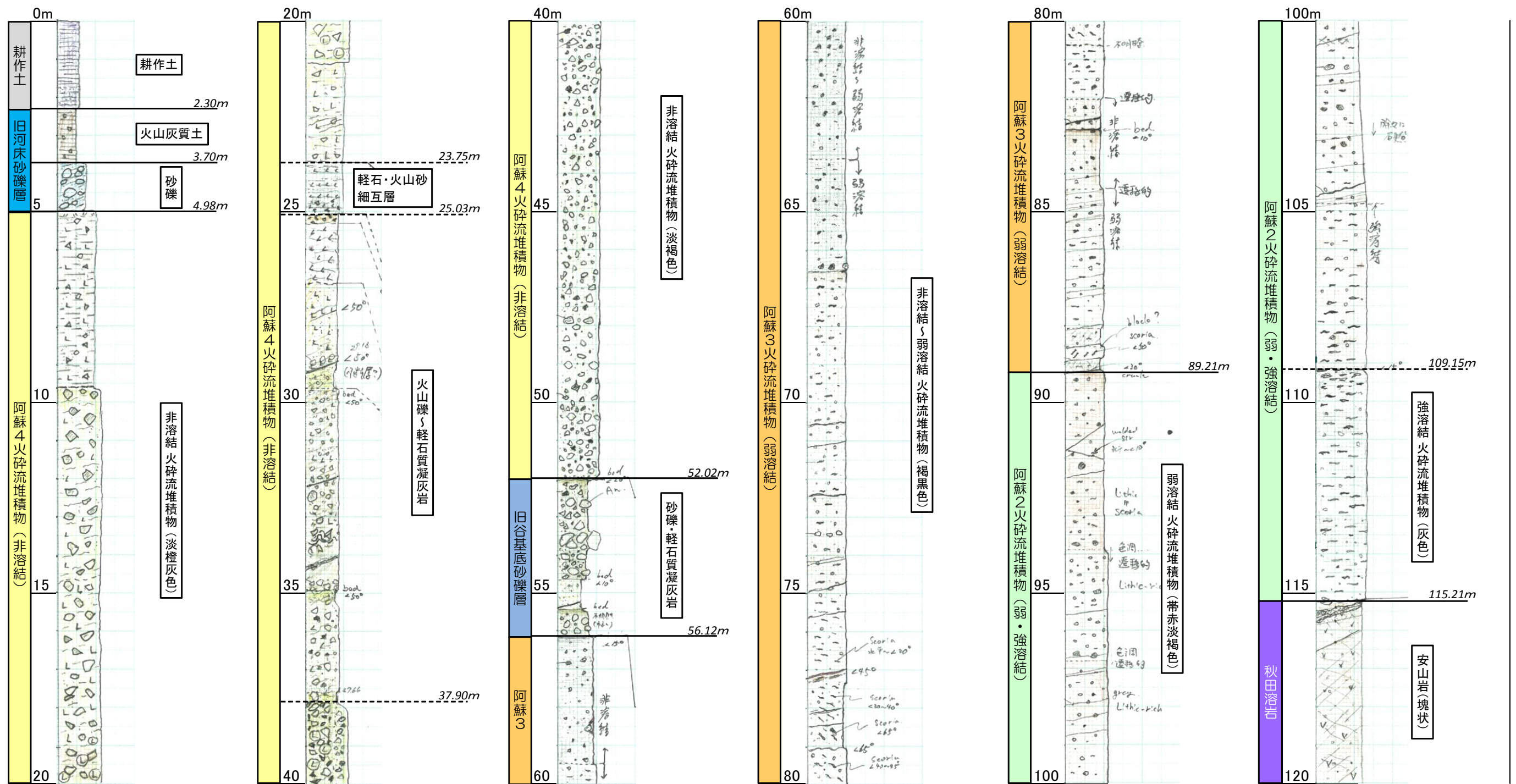


図 4.37 岩相柱状総括図 1/2 (FDP-2 孔)



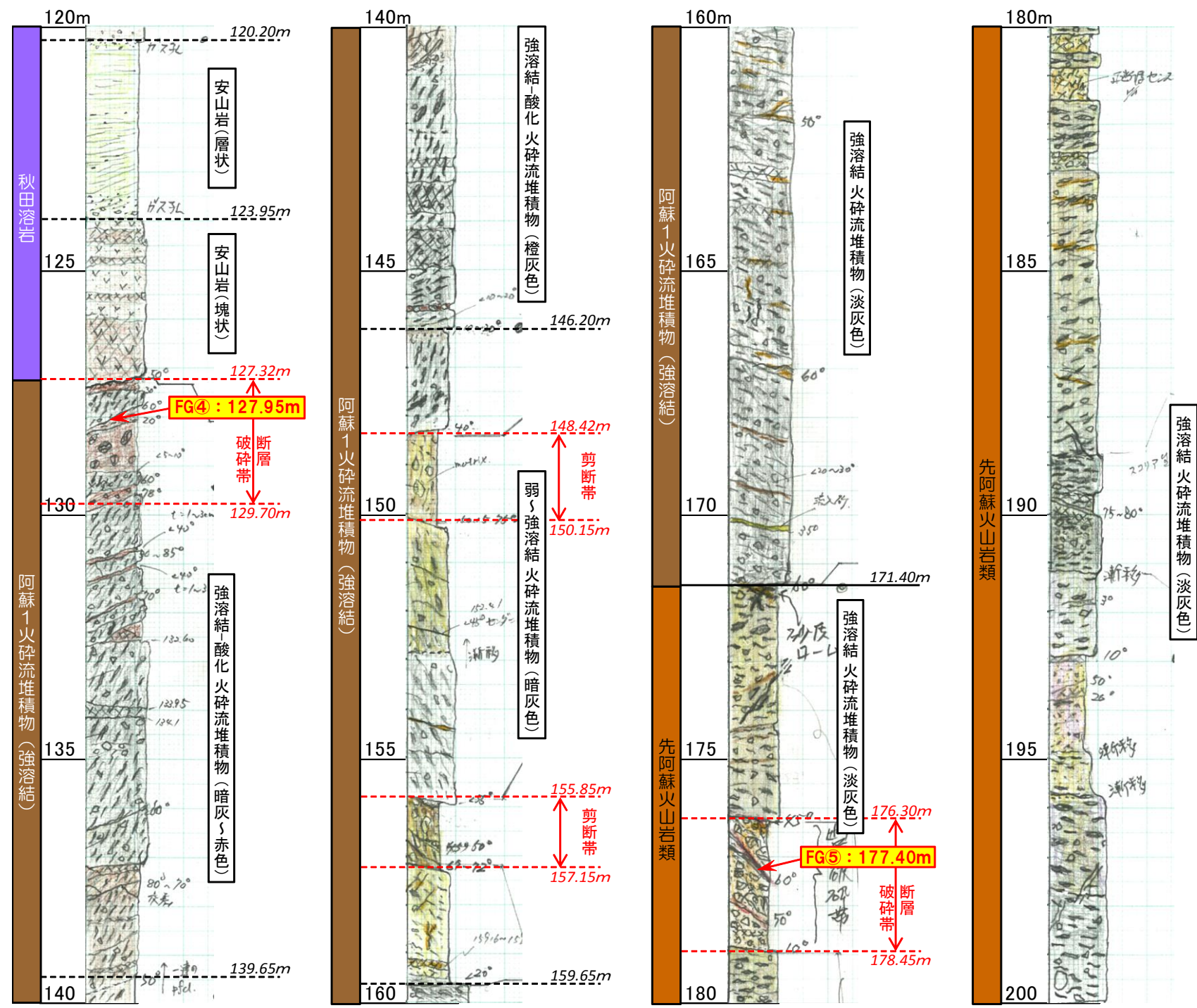


図 4.38 岩相柱状総括図 2/2 (FDP-2 孔)



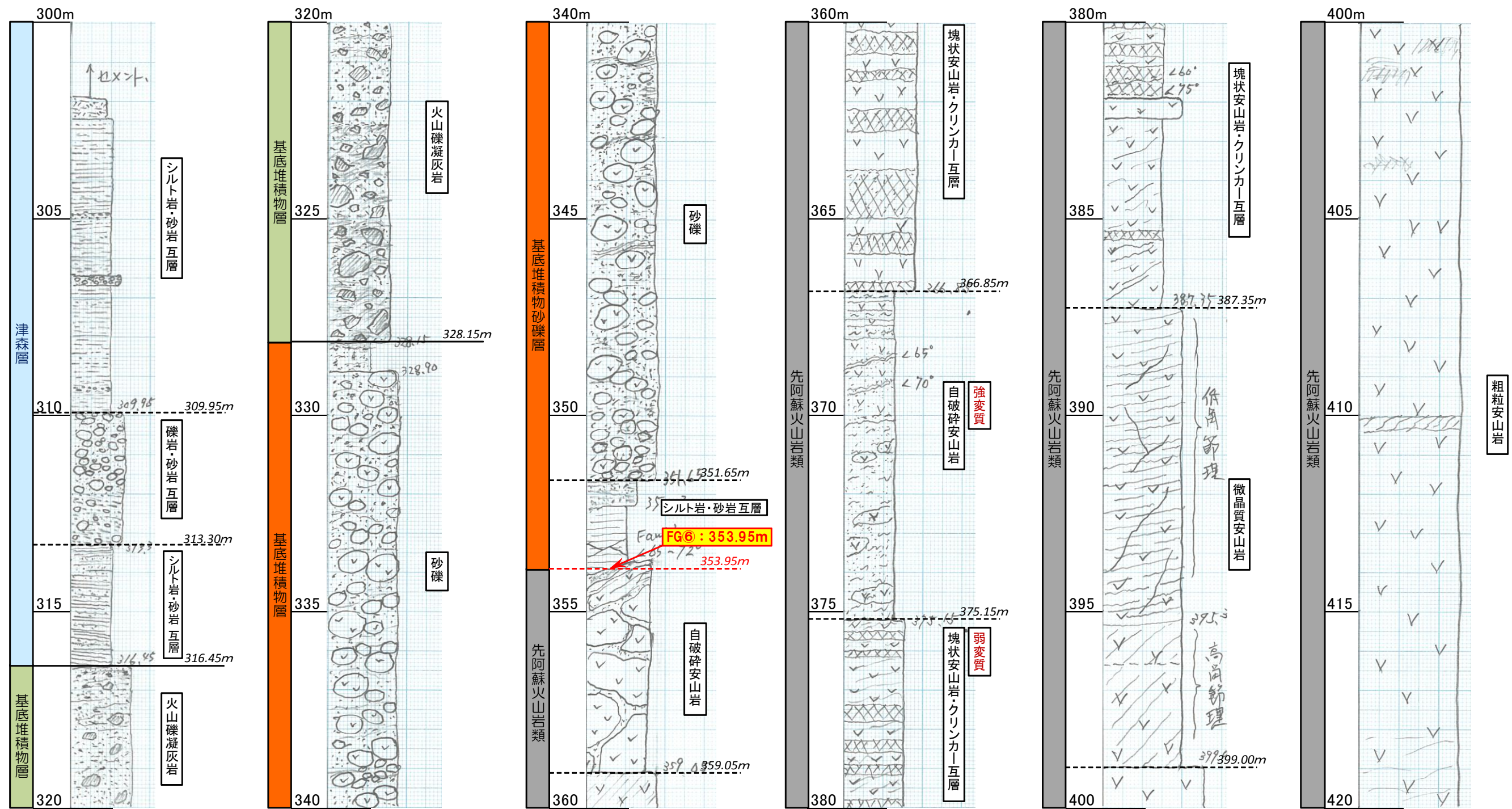


図 4.39 岩相柱状総括図 1/4 (FDB-1 孔)



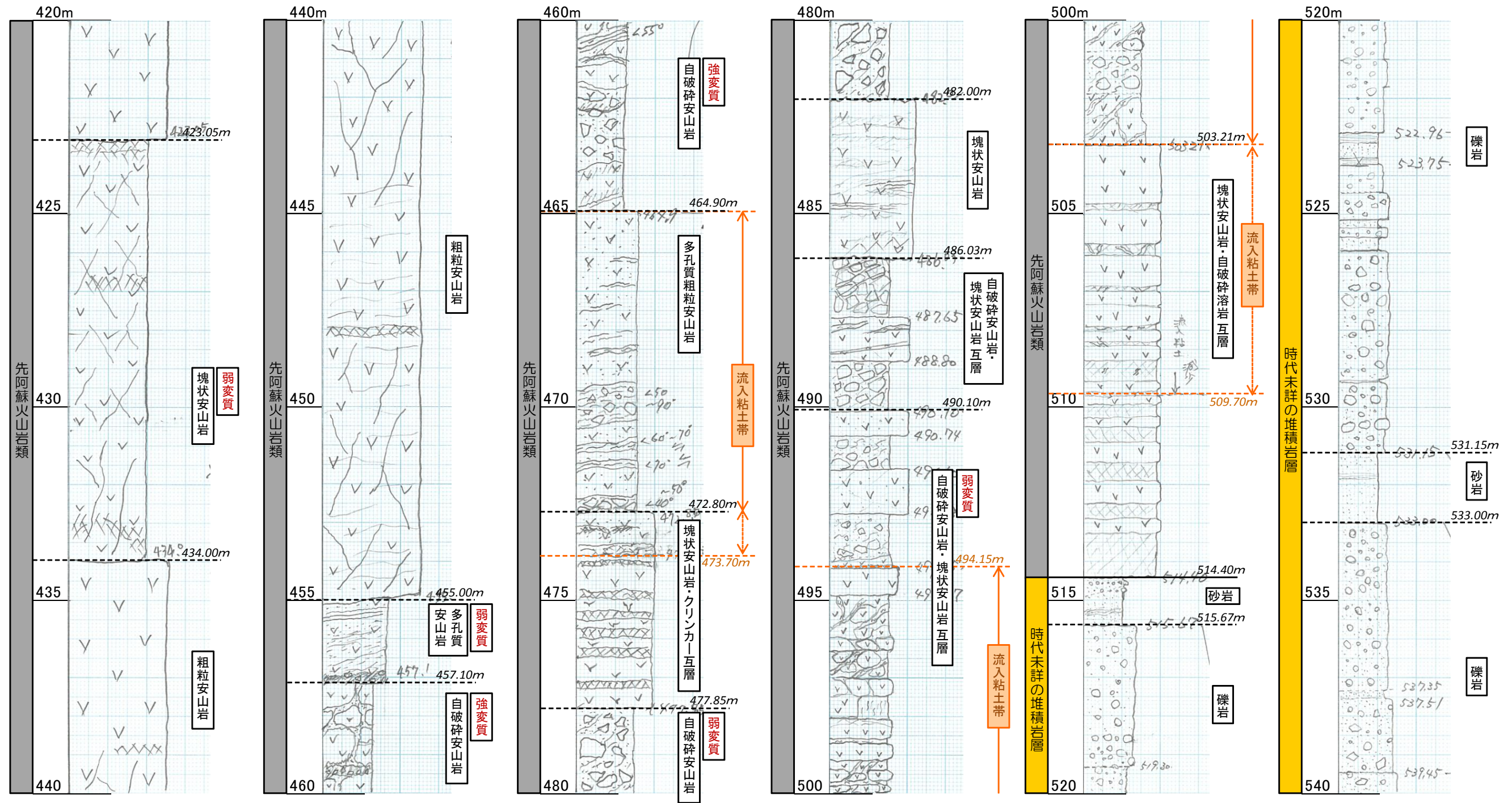


図 4.40 岩相柱状総括図 2/4 (FDB-1 孔)



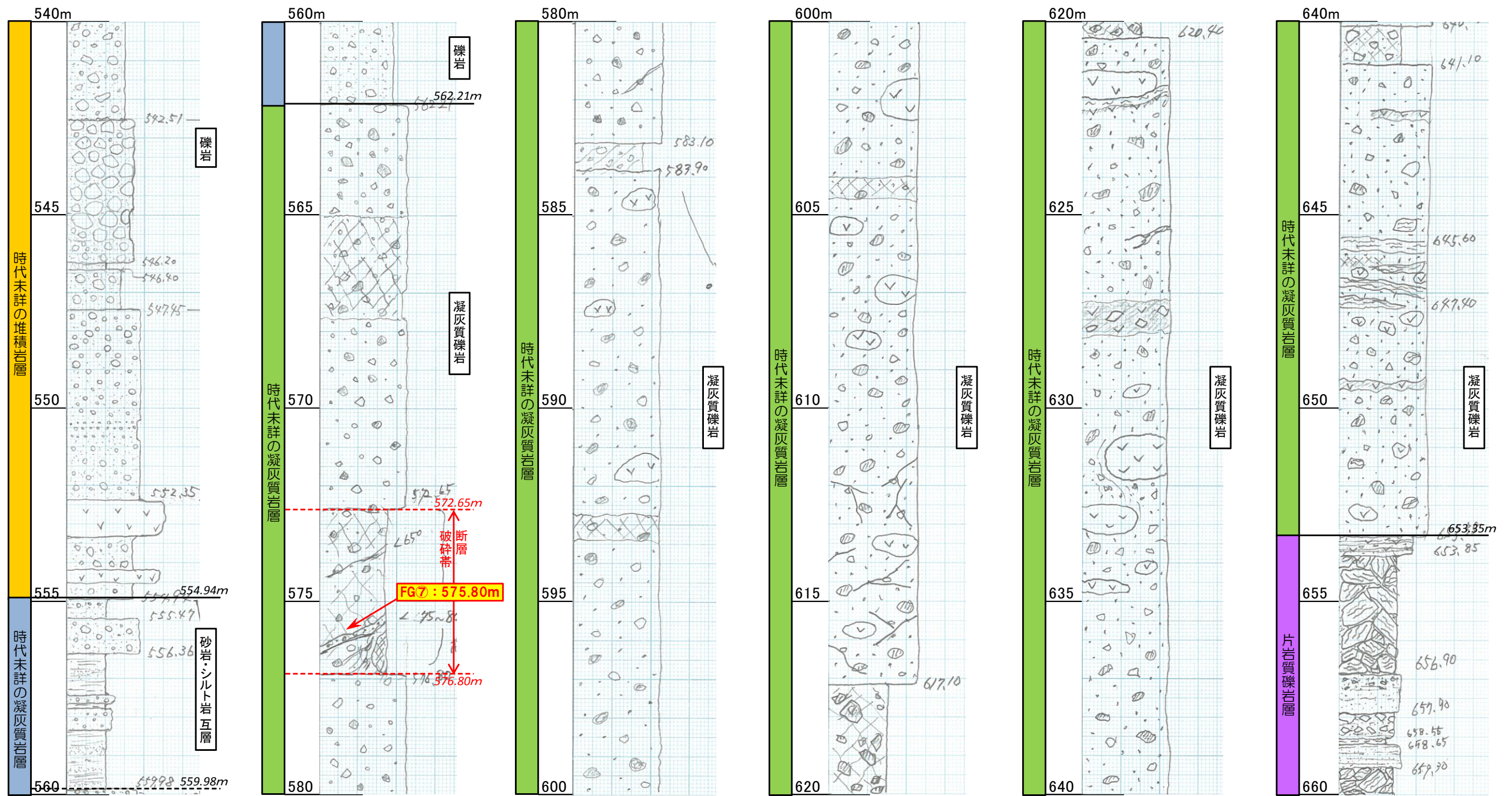


図 4.41 岩相柱状総括図 3/4 (FDB-1 孔)



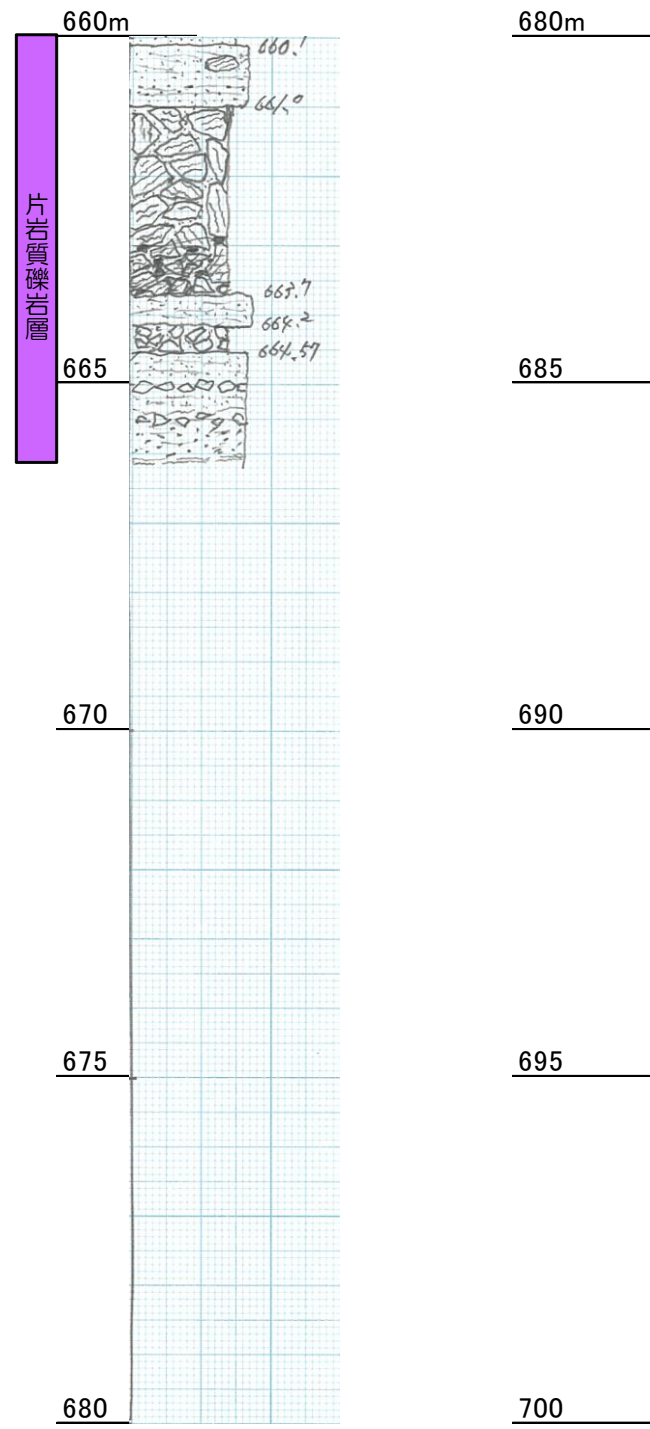


図 4.42 岩相柱状総括図 4/4 (FDB-1 孔)

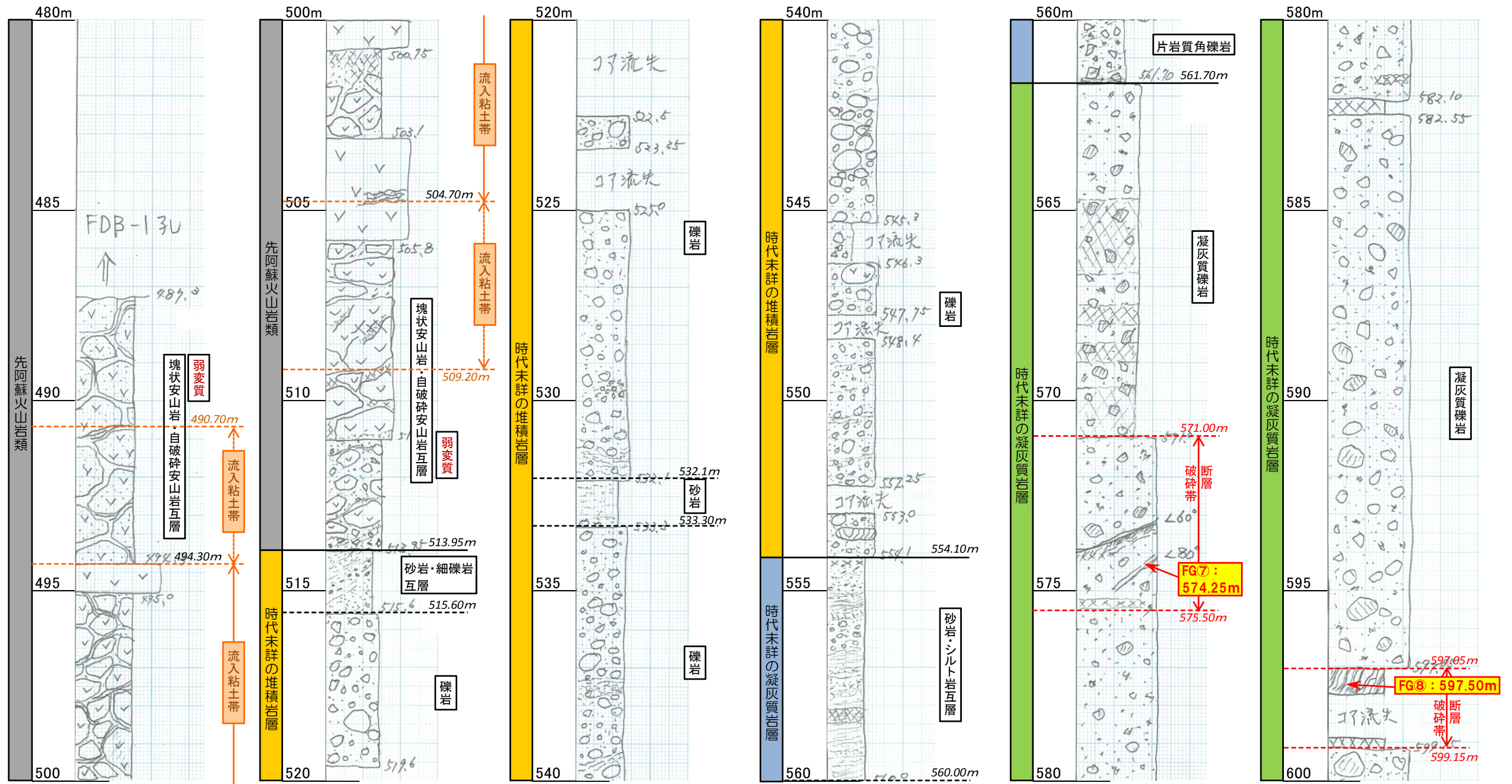


図 4.43 岩相柱状総括図 1/2 (FDB-1(R) 孔)



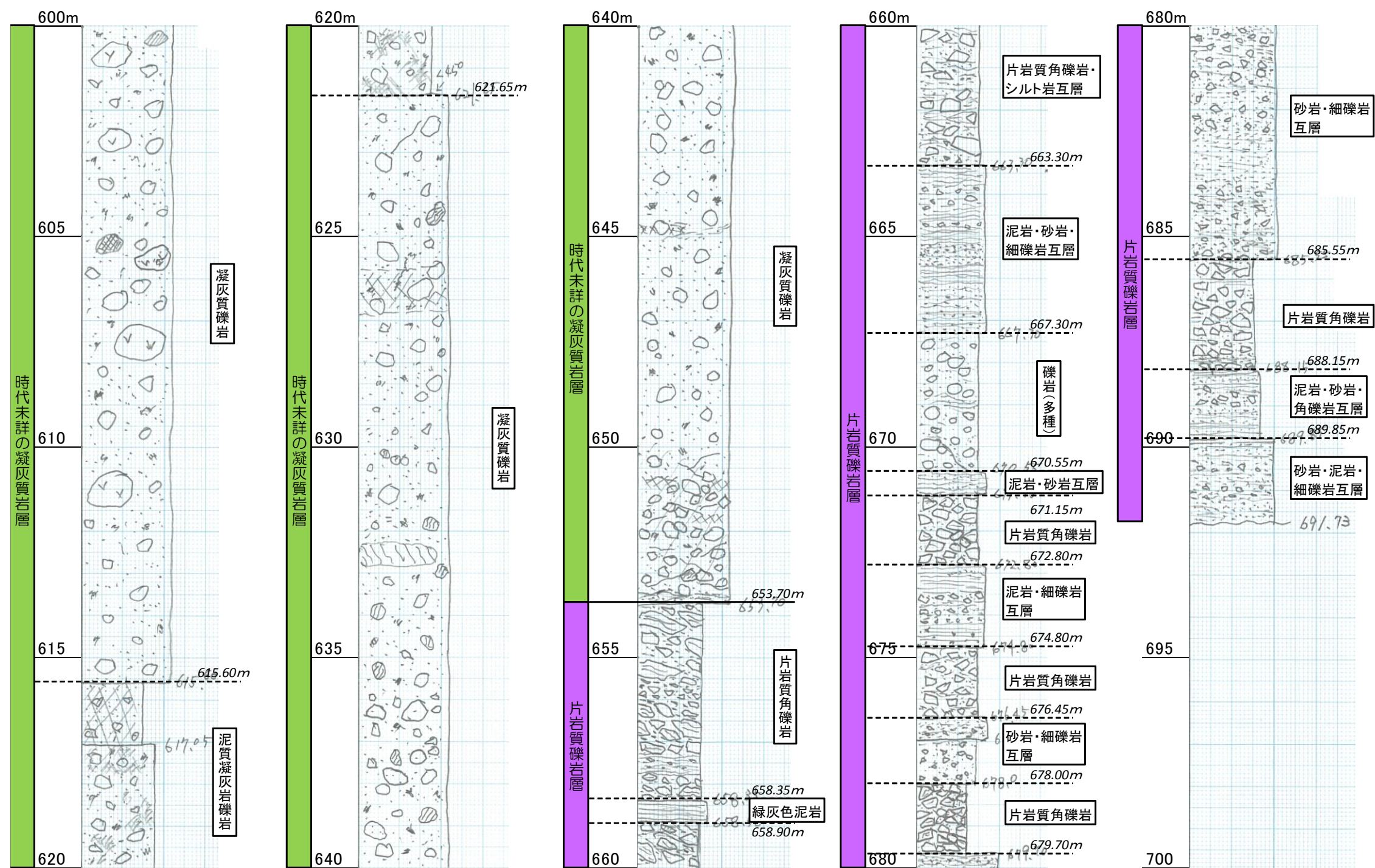


図 4.44 岩相柱状総括図 2/2 (FDB-1(R) 孔)

## 4.6 各種物理検層及び解析結果

### 4.6.1 実施概要

断層周辺の地層の物性を詳細に把握するために、深部ボーリングにおいて断層を確認した 301.9～666.2m 間を対象に、(a) 孔径検層、(b) 温度検層、(c) 音波検層、(d) 電気検層、(e) 方位傾斜測定、及び(f)ボアホールテレビュア (BHTV) による孔壁観察を実施した。

なお、実施手順として、1 回目の測定において物理検層機器が 384m 付近で挿入不能となったため、一旦、この深度付近までの計測を行い、ボーリングにより崩壊抑留岩片を除去して 400m までの HQ ロッドを立込んだ上で、孔底 666.9m (ワイヤー深度) までの 2 回目計測を行った。

各作業の実施工程を表 4.16 と表 4.17 に示す。

表 4.16 作業工程 (その 1)

作業内容	作業年月日 (作業時間)	深度 (m)	備考
温度検層	H30.2.26 (10:29～11:05)	0.0 ～ 384.0	
電気検層	H30.2.26 (11:52～11:58)	301.9 ～ 384.0	
X-Y孔径検層	H30.2.26 (12:55～13:08)	301.9 ～ 384.0	
音波検層	H30.2.26 (14:46～15:02)	301.9 ～ 382.4	
孔壁画像、方位傾斜	H30.2.26 (16:00～16:50)	301.9 ～ 379.9	
坑井深度：666.2m(HQ)、ケーシング径：5inch(301.9m)、 掘削泥水：イーージードリル、比重：1.01g/cm <sup>3</sup> 、粘速：30～40sec 泥水比抵抗：52.1ohm·m(15.8℃)			



表 4.17 作業工程 (その2)

作業内容	作業年月日 (作業時間)	深度 (m)	備考
温度検層	H30.2.27 (8:10~9:04)	0.0 ~ 666.9	
電気検層	H30.2.27 (10:24~10:43)	398.5 ~ 666.4	
X-Y孔径検層	H30.2.27 (11:48~12:25)	398.5 ~ 666.5	
孔壁画像、方位傾斜	H30.2.27 (14:00~16:30)	398.5 ~ 665.7	
音波検層	H30.2.27 (17:48~18:24)	398.5 ~ 663.6	
坑井深度：666.2m(HQ)、ケーシング径：5inch(301.5m)、 掘削泥水：イーゾードリル、比重：1.01g/cm <sup>3</sup> 、粘速：30~40sec、 泥水比抵抗：52.1ohm·m(15.8℃)			

#### 4.6.2 測定結果

総合検層柱状図を図 4.45 に示す。検層実施区間（深度 301.9m～深度 665.7m）を次に示す A～G の 7 区分に分けて検討を行った。区分には比抵抗値、自然ガンマ線、P 波速度、及び別途行われたコア調査を参考にした。すべての種目で、深度 384m 付近において降下不能となり、掘削ロッドを深度 398.5m に挿入し再度検層を行っている。そのため、深度 380m 付近(センサオフセットのため種目により深度が異なる)～398.5m はデータ欠損となっている。

区分 A 深度	301.9 ～ 328.5m	(砂岩、礫岩、シルト岩、スコリア質火山礫凝灰岩)
区分 B 深度	328.5 ～ 351.2m	(火砕岩～堆積岩)
区分 C 深度	351.2 ～ 387.35m	(大礫～巨礫円礫岩)
区分 D 深度	387.35 ～ 455.2m	(変質安山岩 (自破砕状～クリンカー状～塊状) )
区分 E 深度	455.2 ～ 514.4m	(塊状安山岩／自破砕状安山岩)
区分 F 深度	514.4 ～ 562.2m	(砂岩、礫岩)
区分 G 深度	562.2 ～ 665.7m	(凝灰質礫岩)

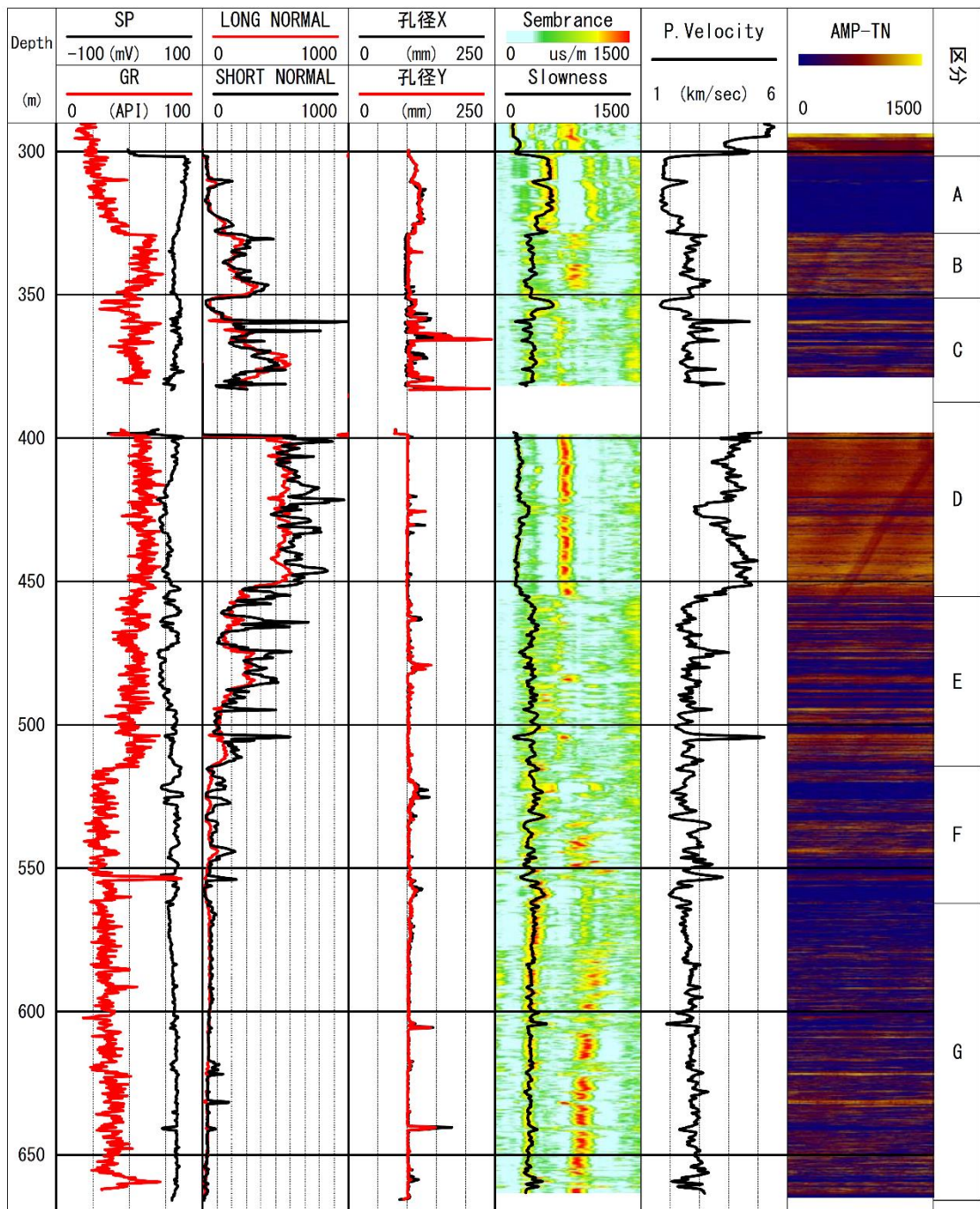


図 4.45 総合検層柱状図(FDB-1孔)

### (1) 温度検層

測定結果を図 4.46 に示す。1 回目の測定(2018.2.26)では、水位が 44.0m 付近であった。最高温度は深度 383.6m で 22.0℃であった。深度 303～307m 付近で温度上昇アノマリーが観測されている。2 回目の測定(2018.2.27)では、水位が 44.2m 付近であった。最高温度は深度 666.9m で 33.3℃であった。深度 305～315m 付近で温度上昇アノマリーが観測されている。

深度 398.5m まで掘削用ロッドを挿入した状態で行った 2 回目の温度検層では、深度 401.7～436.8m で孔内温度がやや低下する傾向が見られるものの、それ以深では温度上昇に転じている。孔底付近では若干ではあるが温度上昇が見られる。

温度検層結果からは、顕著な湧水を示唆する区間は確認されない。また、440m 付近より深部で、通常の地温勾配に沿った温度上昇が認められる。



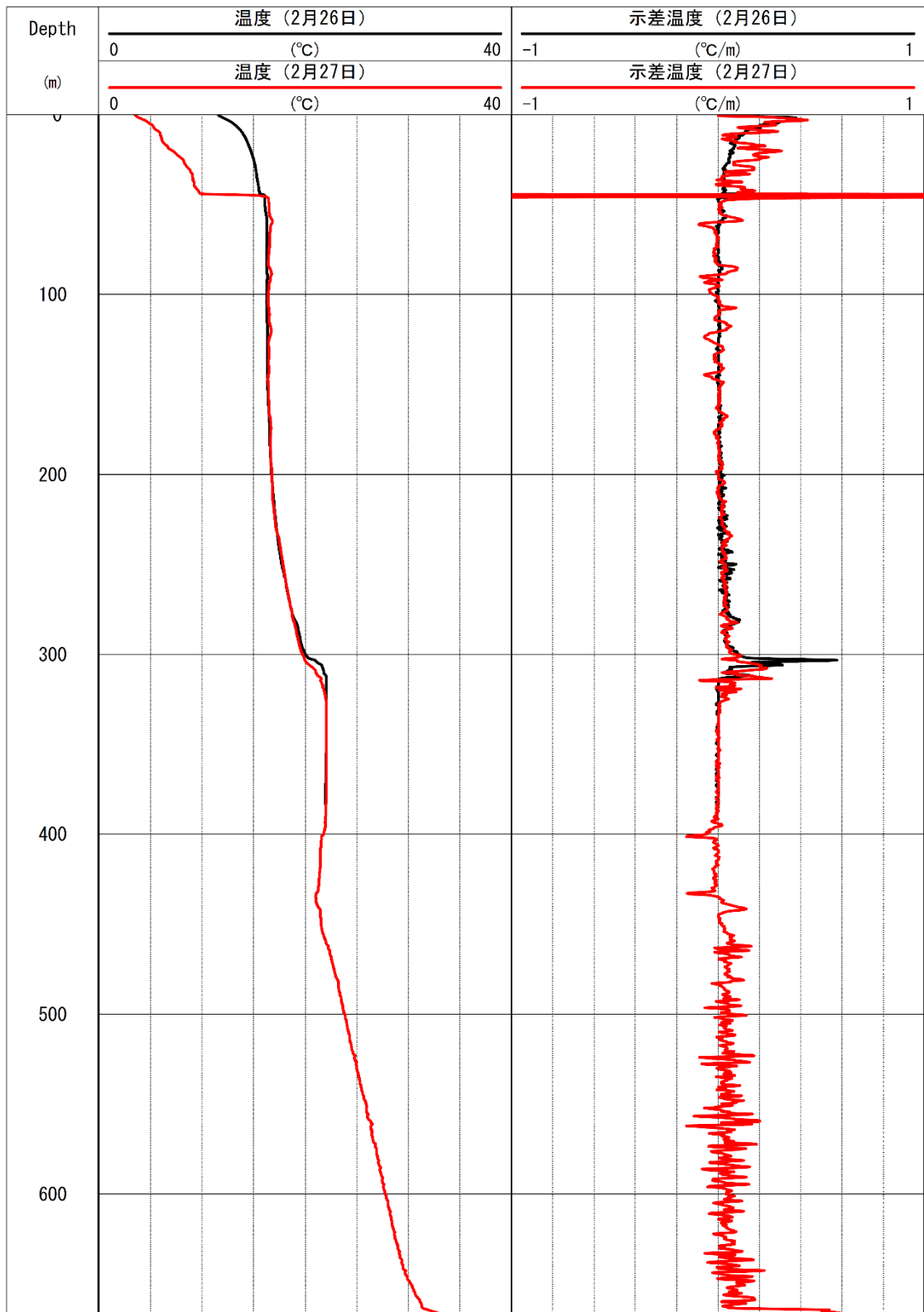


図 4.46 温度検層結果(FDB-1孔)

## (2) 電気検層

### (a) 比抵抗

測定結果及び解析比抵抗の算出結果を図 4.47に示した。各区分における解析ショートノルマル値（以下「 $R_{25cm}$ 」）と解析ロングノルマル値（以下「 $R_{100cm}$ 」）の特徴を表 4.18に示す。

すべての区間でショートノルマルの平均値が高い傾向であった。深度360m、363m、494.8m、504m、554m、621.9m、628.1m、631.5m、640.9m、660mではショート比抵抗値が正のピークになり、ロング比抵抗値が負のピークとなっている。これらは高比抵抗帯がロング比抵抗のスペーシング(100cm)よりも狭いために生じた反転現象である。

表 4.18 区分ごとの平均解析比抵抗値

区分 (深度)	$R_{25cm}$ ( $\Omega m$ )	$R_{100cm}$ ( $\Omega m$ )	検層ログの比較
区分A (301.9 ~ 328.5m)	72.0	67.3	$R_{25cm} > R_{100cm}$
区分B (328.5 ~ 351.2m)	273.4	219.5	$R_{25cm} > R_{100cm}$
区分C (351.2 ~ 387.3m)	272.7	250.1	$R_{25cm} > R_{100cm}$
区分D (387.3 ~ 455.2m)	617.4	434.6	$R_{25cm} > R_{100cm}$
区分E (455.2 ~ 514.4m)	252.5	178.1	$R_{25cm} > R_{100cm}$
区分F (514.4 ~ 562.2m)	75.7	44.6	$R_{25cm} > R_{100cm}$
区分G (562.2 ~ 665.7m)	45.9	39.4	$R_{25cm} > R_{100cm}$

### (b) 自然電位 (SP)

掘削泥水濾過水の比抵抗値が非常に高い ( $52.1\text{ohm}\cdot\text{m}$ 、 $15.8^{\circ}\text{C}$ )のに比べて、地層水はそれよりも低いと推測される。比抵抗値でセパレーションが生じている透水性岩盤領域では、自然電位が負の方向に振れる傾向にある。

### (c) まとめ

電気検層結果は、コアで観察した地質区分とよく対応しており、塊状溶岩区間や砂礫層は高比抵抗、堆積岩区間は低比抵抗を示すと共に、断層を確認している 353m 付近や 575m の直上部付近にごく低比抵抗が認められた。

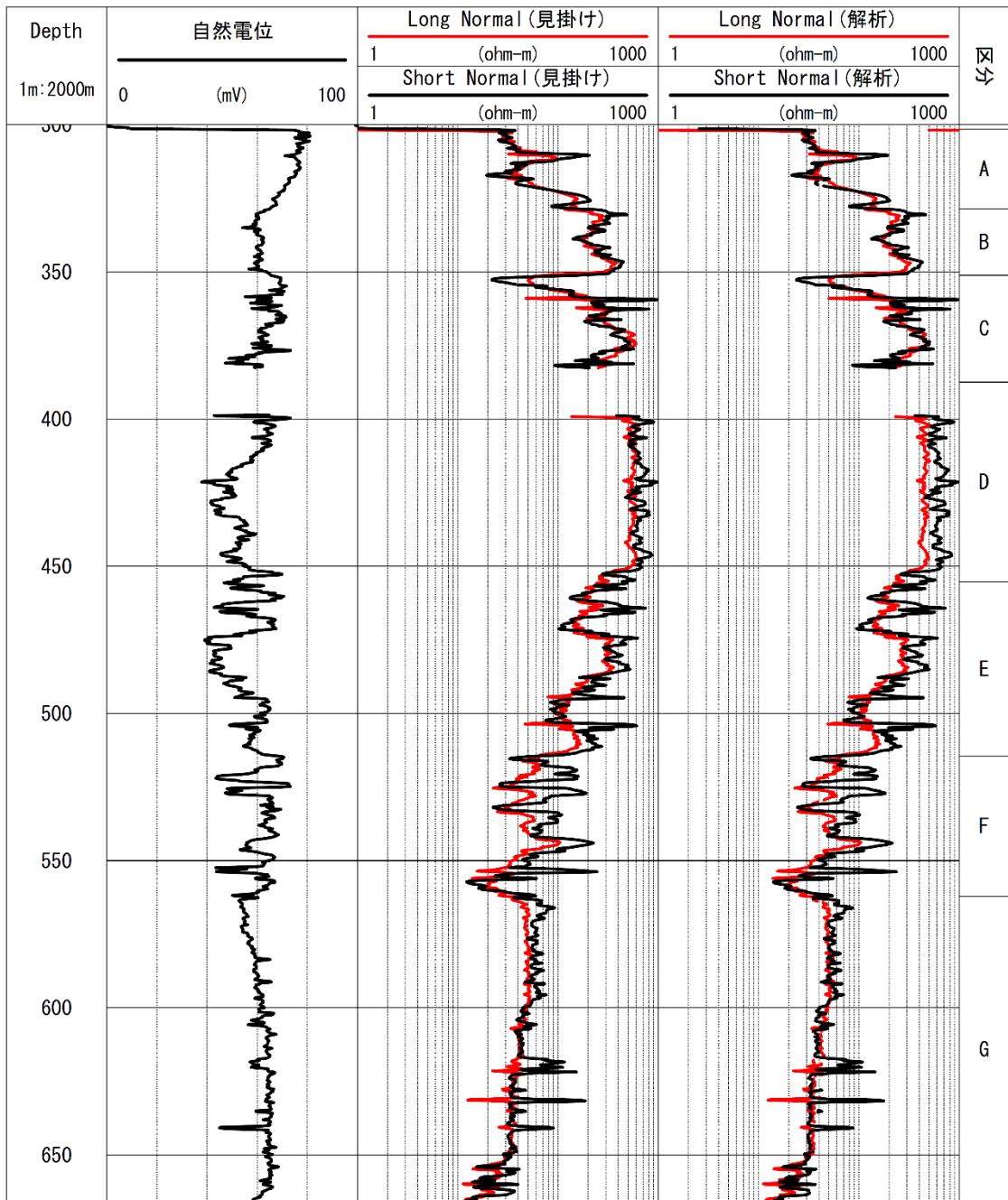


図 4.47 電気検層結果(FDB-1孔)

### (3) XY キャリパー検層

検層結果を図 4.48 に示した。深度 311～329m 間で最大 20mm 程度、深度 365m 付近と深度 379m 付近では最大 250mm に達する拡大が見られた。深度 351～379m では連続した孔壁の崩壊が観測されている。一方、深度 400m 以深では連続した大規模な崩壊は見られず、断続的な断裂が多くで観測されている。深度 420～434m 間、深度 463m 付近、深度 479～481m 間、深度 520～530m 間、深度 554～562m 間、深度 605～606m 間、深度 641m 付近、深度 659m 付近で 10～20mm 程度の拡大が見られ、いずれもボアホールテレビュアのトラベルタイムに現れた拡大箇所と一致する。

キャリパー検層結果より、深度 350～395m 間（353m 付近の断層区間含む）の孔壁崩壊が顕著であり、それ以深では、480m 付近、520～535m 間、550～580m 間（575m の断層破碎帯区間を含む）の孔壁状態が悪い状況である。



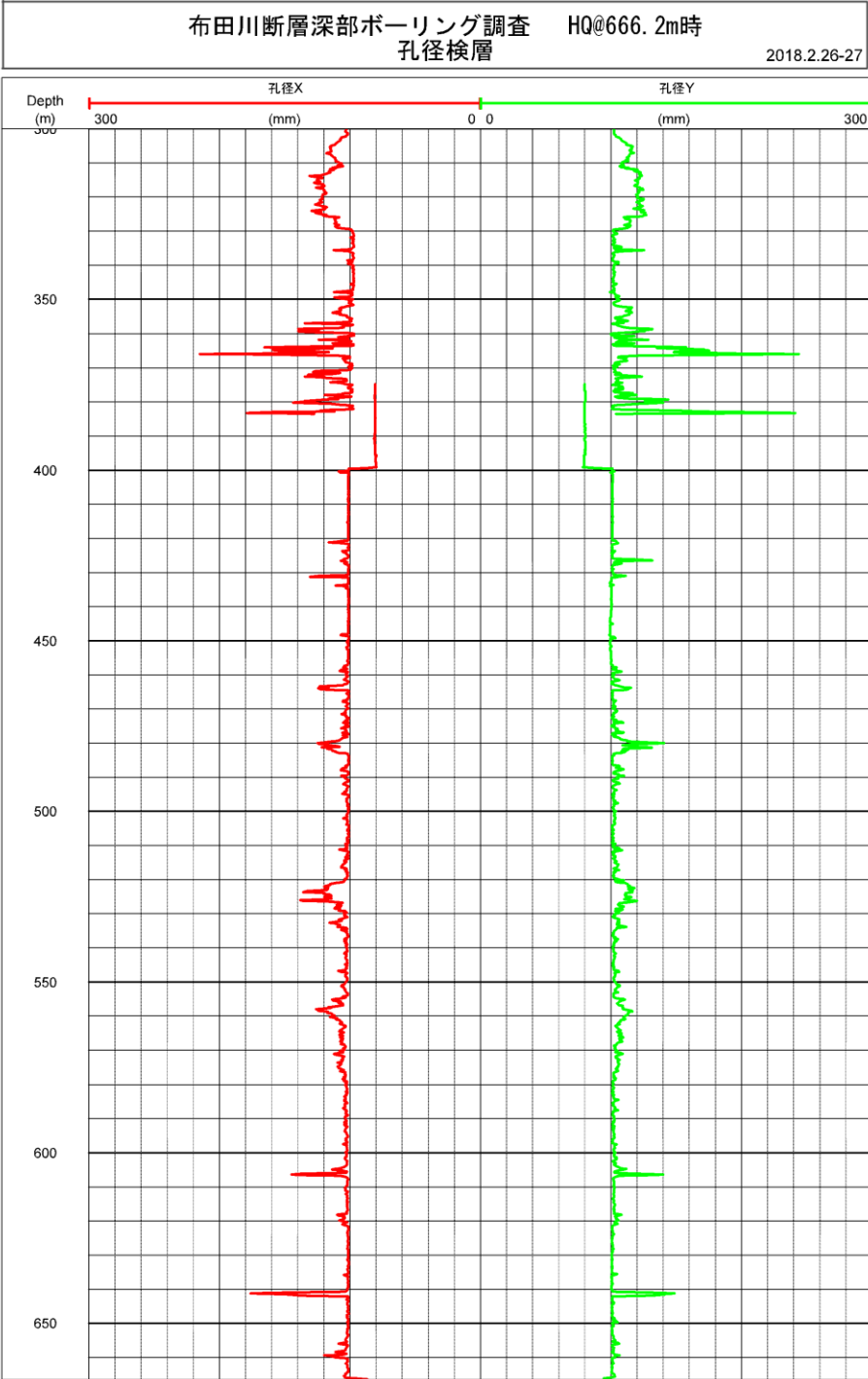


図 4.48 孔径検層結果

#### (4) 音波検層

検層結果を図 4.49 に示した。さらに表 4.19 に区分ごとの平均 P 波速度をまとめた。区分毎に大きく速度が異なっているのが特徴である。深度 301.0~328.5m と深度 560m 以深を除き、観測された初動波の S/N 比が非常に低く、算出された P 波速度の信頼性が低い。センブルスマップ上のピーク(到達時間)も不明瞭である。岩相(特に基質)が未固結であることが音波エネルギーの減衰した原因と推測する。

深度 301.0~328.5m では概ね 2km/sec 以下と、本測定区間では最も P 波速度が小さい。深度 328.5~380m では深くなるにつれて圧密が進み、上昇する傾向にある(ただし深度 354m 付近の低速度領域を除く)。深度 400~450m では平均 4km/sec 程度の高速度区間であり、比抵抗が高い区間でもある。深度 450m 以深では全般的に 3km/sec 以下の低速となるが、深度 504.5m 付近ではピーク状の高速度箇所が見られた。この区間では局所的に比抵抗値が上昇している。その他、深度 360m、362m、366m でも P 波速度と比抵抗値の上昇が見られる。

表 4.19 区分ごとの平均 P 波速度

区分 (深度)	平均P波速度 (km/sec)
区分A (301.9 ~ 328.5m)	1.95
区分B (328.5 ~ 351.2m)	2.73
区分C (351.2 ~ 387.3m)	2.65
区分D (387.3 ~ 455.2m)	4.05
区分E (455.2 ~ 514.4m)	2.74
区分F (514.4 ~ 562.2m)	2.64
区分G (562.2 ~ 665.7m)	2.72

音波検層結果では、380m付近から 460m 間の岩質が堅硬であり、その他の区間は、総じて軟岩(堆積岩)相当の P 波速度であることが伺われる。

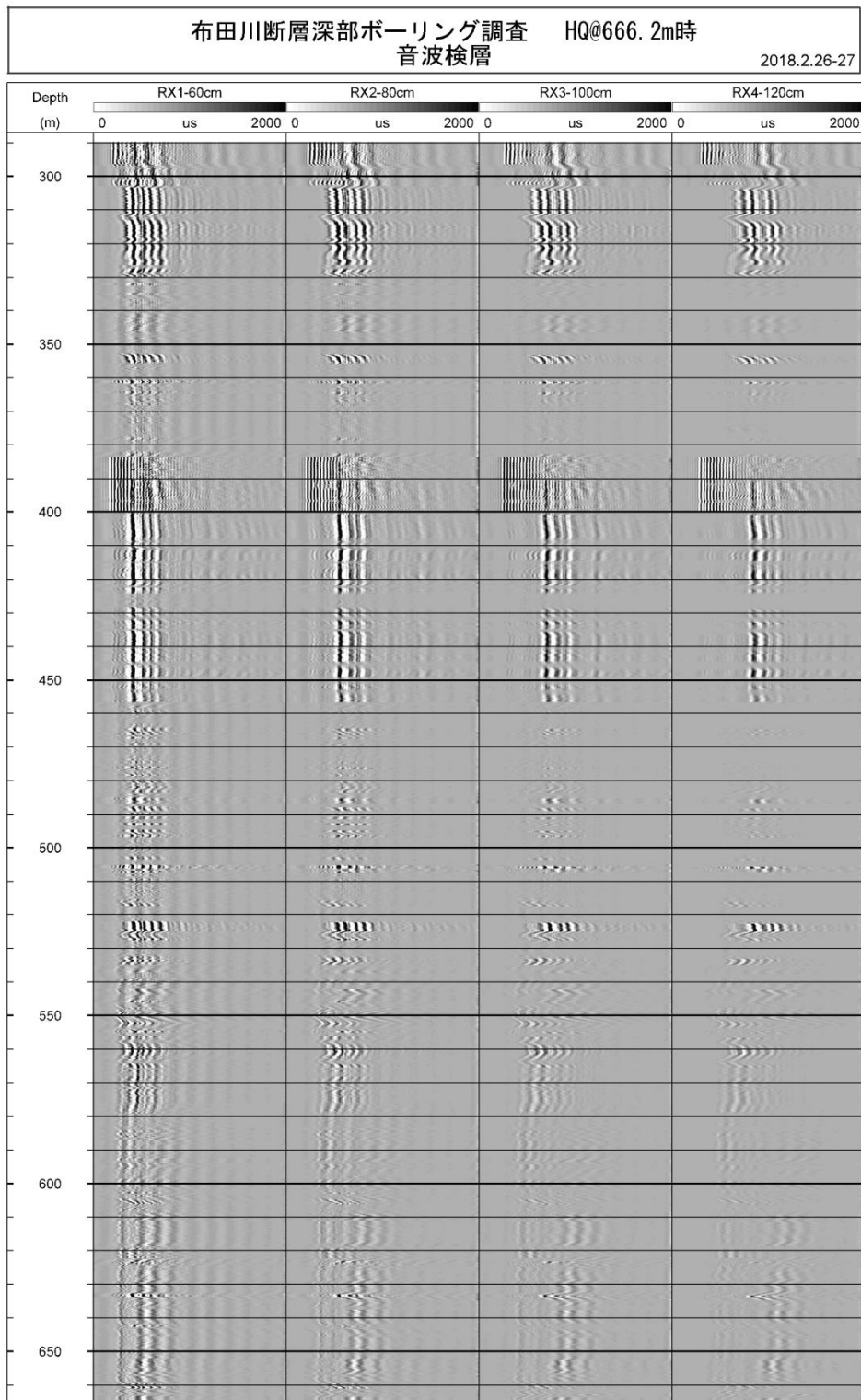


図 4.49 音波検層結果

(5) 孔壁画像検層(ボアホールテレビュア : BHTV)

ボアホールテレビュアによる孔壁観察画像は別冊資料に付す。図 4.50 に一例を示すように、亀裂や礫、薄層の分布や走向傾斜を明瞭に把握することができた。

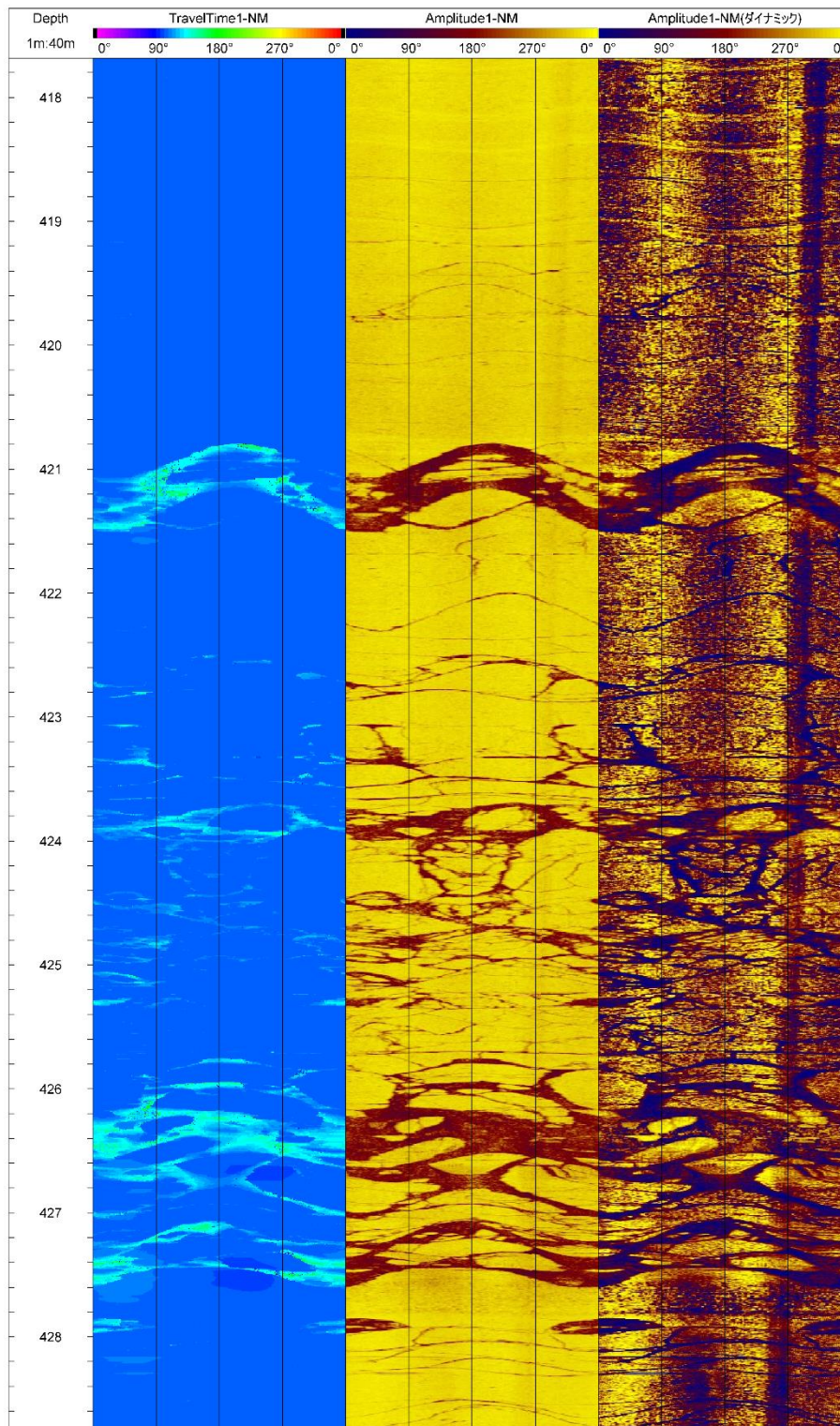


図 4.50 孔壁観察結果の例



不連続面の抽出は概ねサインカーブとして捉えられるものを中心に行なった。その結果、測定区間全体で合計480本の不連続面が抽出された（表 4.20）。このうち、ランク1～4では合計361本が抽出された。

測定結果を付録A（縮尺：1/50）に、読み取った不連続面の傾斜方位と傾斜角の一覧を付録B（ランク1～ランク4）に示す。これらの図表中の不連続面の傾斜方位を表す数値は方位角度となっており、 $0^{\circ} \sim 90^{\circ} \sim 180^{\circ} \sim 270^{\circ} \sim 360^{\circ}$  は、それぞれ真北基準で方位記号N～E～S～W～Nに相当する。

読み取った不連続面は、ローズダイアグラム及びシュミットネット投影図に整理した。その際、フラクチャー系のランク1～3と地層傾斜系のランク4とでは傾斜方位・傾斜角の地質学的意味が全く異なることから、両者の傾向を識別できるよう心掛けた。

その他、基質と礫の境界面を抽出しランク5（黄色のアロープロット）として整理した。その際、境界面に沿ったサインカーブが周方向の全てに連続して観察されるものを中心に抽出した。このランク5については、別途行われるASR試験の補助的データとして利用されるため、ランク1～4とは性質が異なる。したがって不連続面の統計処理からは除外し、付録Aにアロープロットを、付録Cにランク5だけの読み取り表として整理した。

表 4.20 不連続面数（FDB-1 孔）

ランク	1	2	3	4	5
BHTV 深度 301.9～665.7m	17	22	239	83	119

(a) 測定区間全体の不連続面の傾斜方位と傾斜角度について

図 4.51 より、本坑のフラクチャー系（ランク 1～3）は検層実施区間全体で見れば、北北東方向の不連続面が卓越する傾向である。傾斜は  $10 \sim 85^{\circ}$  と広範囲に及んでいる。

地層傾斜系（ランク 4）に関しては、区分毎に傾向が異なっており、主に南南西方向と東落ちの卓越傾向が認められる。傾斜角は  $30^{\circ}$  程度のものと  $50^{\circ}$  程度のものが卓越している。区分毎の傾向の詳細については次項を参照されたい。

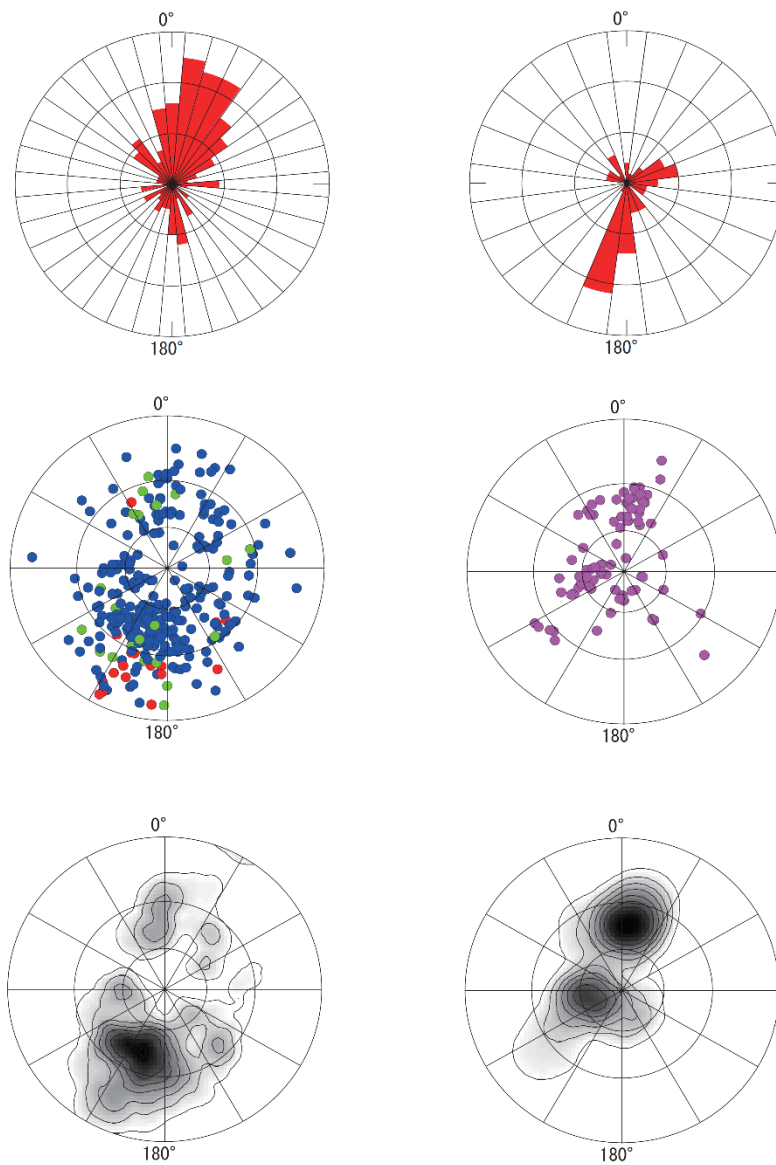


図 4.51 ローズダイアグラムとシュミットネット (深度 : 301.9~665.7m)

上 : ローズダイアグラム (左 : ランク 1~3、右ランク 4)

中 : 傾斜分布のポーラープロット (左 : ランク 1~3、右ランク 4)

下 : 傾斜頻度のコンターマップ (左 : ランク 1~3、右ランク 4)

(b) 区分ごとの不連続面の傾斜方位と傾斜角度について

検層実施区間（深度 301.5m～深度 665.7m）を先に示した A～G の 7 区分に分けて検討を行う。

区分 A 深度	301.9 ～ 328.5m	（砂岩、礫岩、シルト岩、スコリア質火山礫凝灰岩）
区分 B 深度	328.5 ～ 351.2m	（火砕岩～堆積岩）
区分 C 深度	351.2 ～ 387.35m	（大礫～巨礫円礫岩）
区分 D 深度	387.35 ～ 455.2m	（変質安山岩（自破碎状～クリンカー状～塊状））
区分 E 深度	455.2 ～ 514.4m	（塊状安山岩／自破碎状安山岩）
区分 F 深度	514.4 ～ 562.2m	（砂岩、礫岩）
区分 G 深度	562.2 ～ 665.7m	（凝灰質礫岩）

区分ごとに整理した不連続面解析結果（図 4.52～図 4.55）をもとに、不連続面の傾斜方位と傾斜角の分布の特徴について表 4.21 にまとめた。表中ではフラクチャーと地層傾斜をそれぞれ分けて示した。

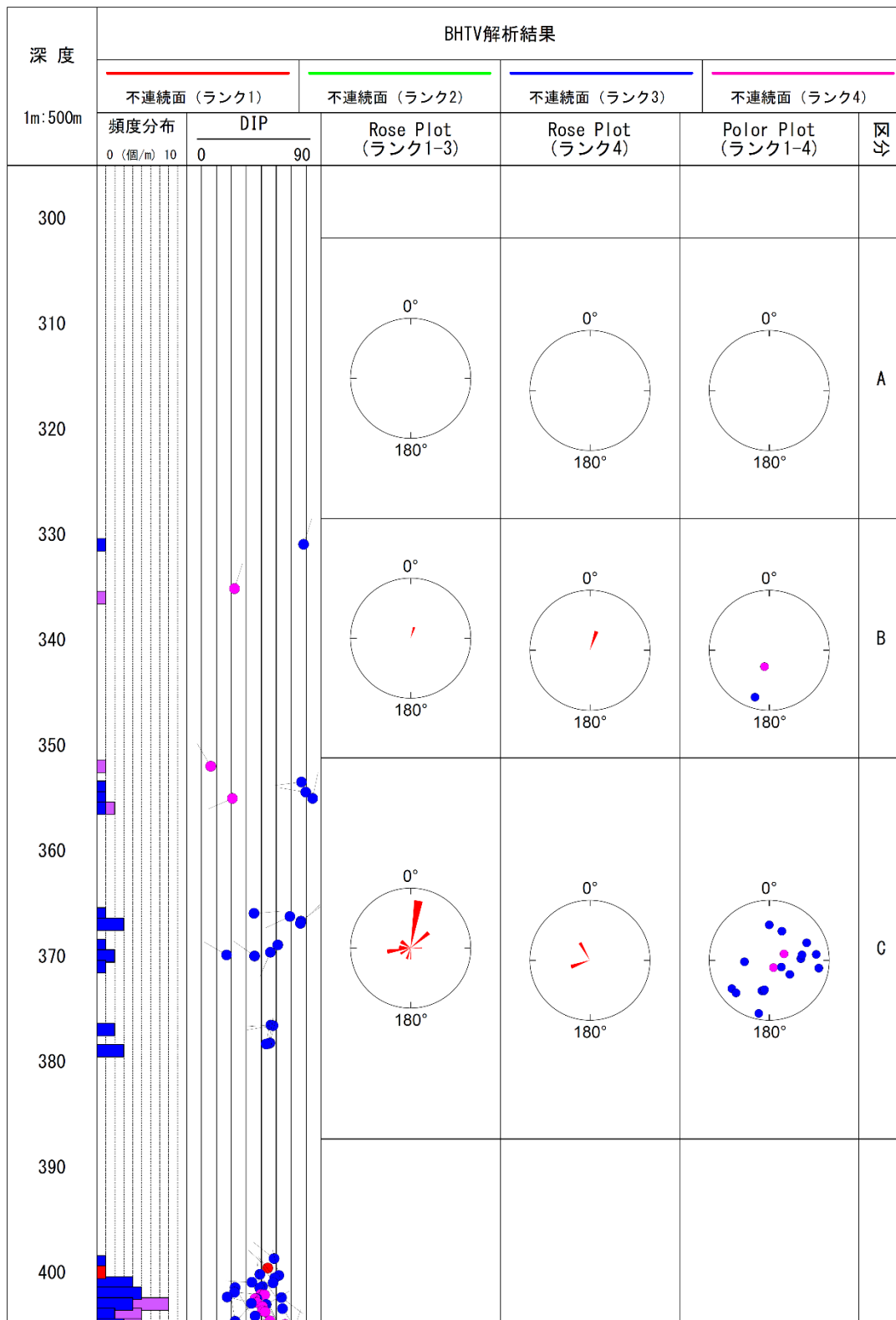


図 4.52 BHTV 解析図(深度 301.9~400.0m)



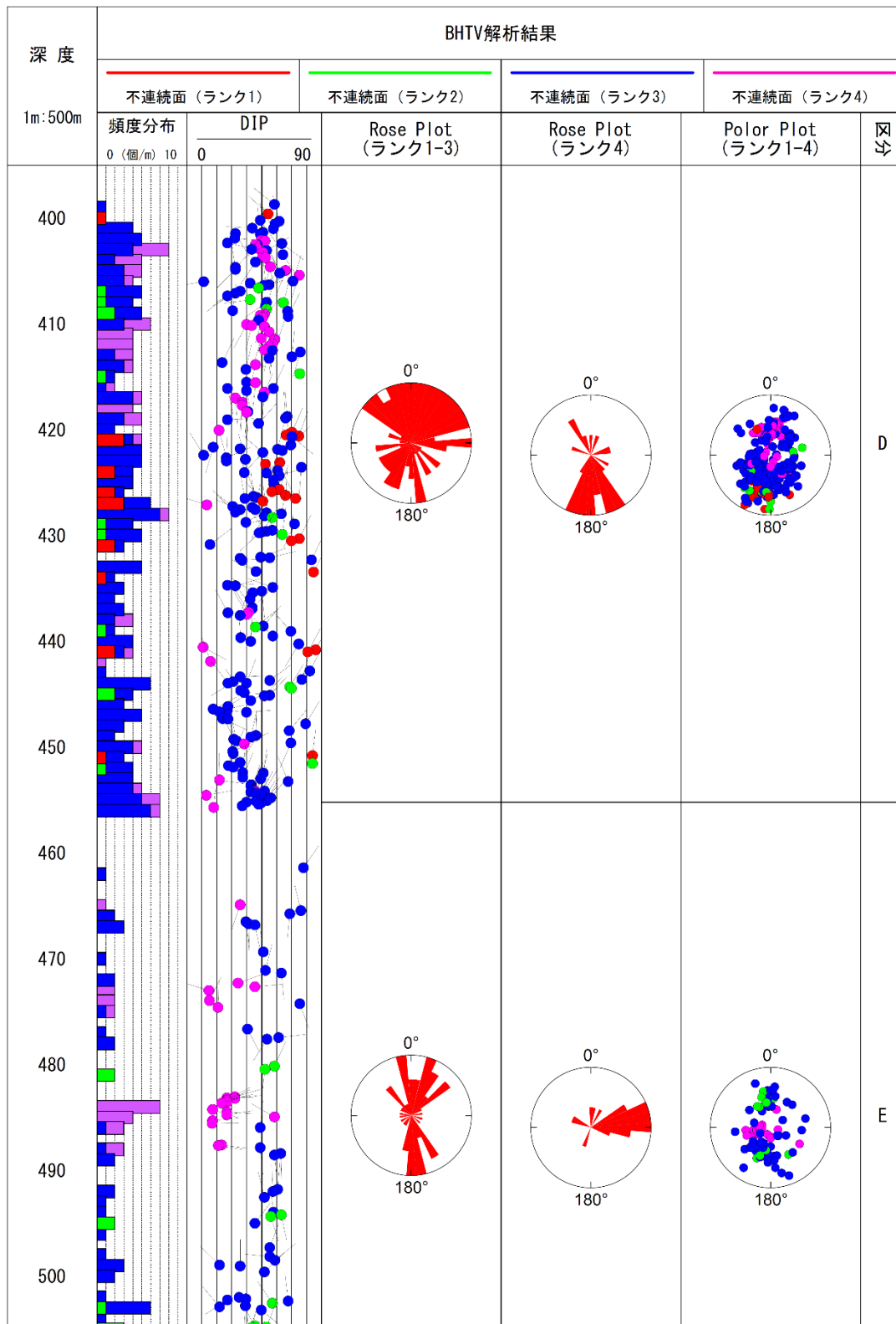


図 4.53 BHTV 解析図(深度 400.0~500.0m)

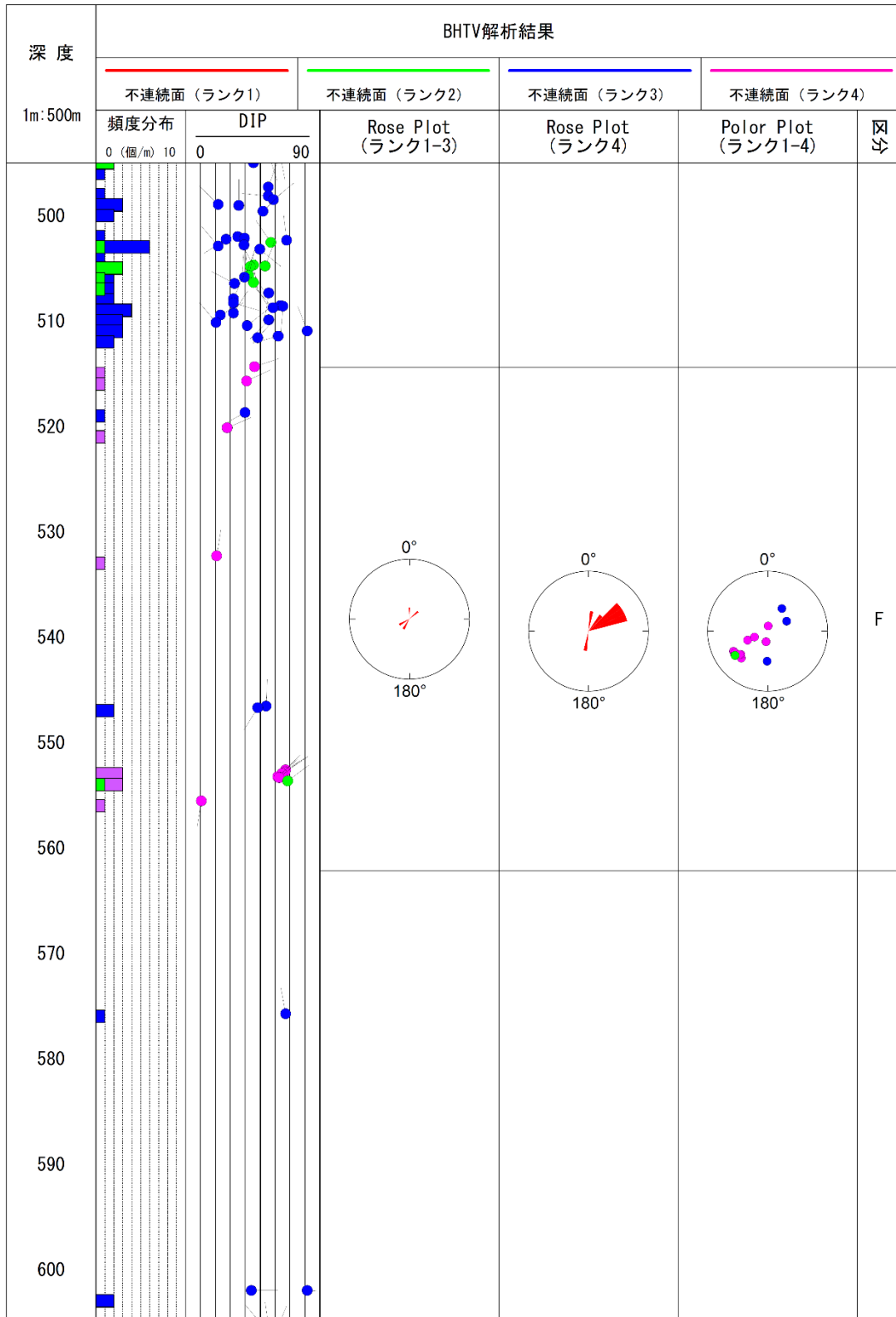


図 4.54 BHTV 解析図(深度 500.0~600.0m)

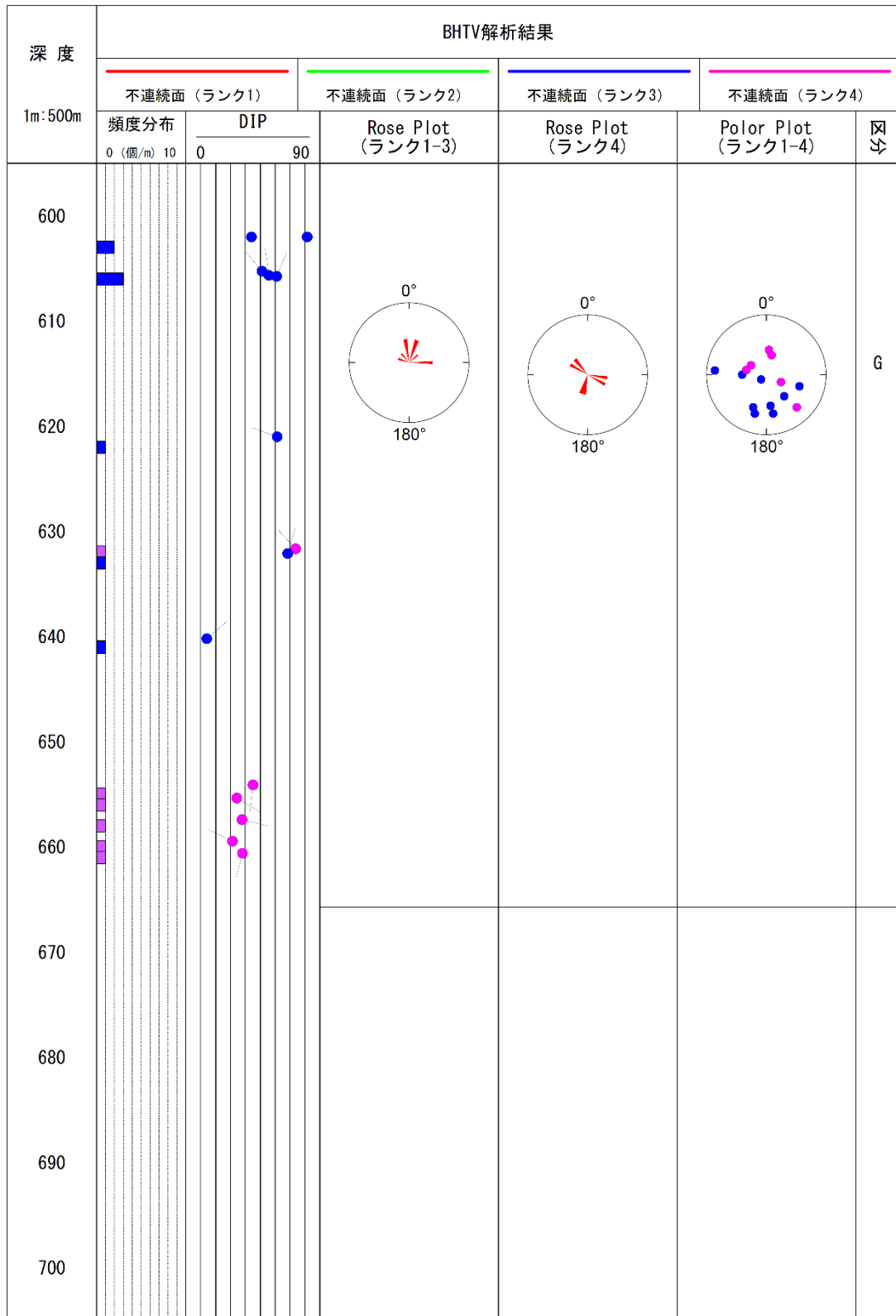


図 4.55 BHTV 解析図(深度 600.0~665.7m)

表 4.21 不連続面の傾斜方位と傾斜角の特徴 (FDB-1 孔 : ランク 1~4)

ゾーン	深度 (m)		検出数		種別	不連続面の特徴	
			実数	10m平均			
全体	301.9	~	665.7	361	10	Fracture	北北東落ちが卓越, 傾斜角は10~85° と広範囲
						DIP	南南西および東落ちが卓越, 傾斜角は30° と50° 程度
A	301.9	~	328.5	0	0	Fracture	抽出されず
						DIP	抽出されず
B	328.5	~	351.2	2	1	Fracture	北北東落ち, 傾斜角80° 程度
						DIP	北北東落ち, 傾斜角は30° 程度
C	351.2	~	387.4	18	5	Fracture	北北東~西落ち, 傾斜角30~80° 程度と広範囲
						DIP	西~北西落ち, 傾斜角20~30° 程度
D	387.4	~	455.2	226	33	Fracture	南南西~南南東落ち, 傾斜角10~80° と広範囲
						DIP	北西~北~東落ち, 南西~南と広範囲, 傾斜角10~80° と広範囲
E	455.2	~	514.2	87	15	Fracture	北北西~北北東, 南落ちが卓越, 傾斜角20~80° と広範囲
						DIP	東落ちが卓越傾向, 傾斜角10~50° 程度
F	514.2	~	562.2	13	3	Fracture	北落ちと南西落ち, 傾斜角50~60° 程度
						DIP	北東落ちが卓越, 傾斜角は10~20° のもの, 70° 以上のものが抽出された
G	562.2	~	665.7	15	1	Fracture	北西~北東と広く分布, 傾斜角50° 以上が多い
						DIP	北西および東南東, 傾斜角30° 以上

(c) まとめ

- ・ 本坑のフラクチャー系の不連続面 (ランク 1~3) は、検層実施区間全体で見れば、北北東方向のものが卓越する傾向があり、傾斜は 10~80° 程度と広範囲に及んでいる。
- ・ 本坑の地層傾斜系の不連続面 (ランク4) は、地質構造単位毎に傾向が異なっているのが特徴である。傾斜角10~40° 程度のものは地層境界面と推定され、傾斜角40° 以上の比較的高角度のものは流理構造が大多数と推定される。



### (6) 方位傾斜測定

前出の BHTV 検層ツールには、3 軸加速度・地磁気センサが設置されている。これらから得られた本孔の方位と傾斜角から孔跡を算出した。計算には最小曲率法を用いた。これらの方位傾斜データは BHTV の不連続面を見掛けの DIP から真の DIP に変換するために使用した。

図 4.56 に本孔の平面孔跡図と偏距—垂直深度図、図 4.57 に方位傾斜測定結果を示した。最大傾斜は深度 661m 付近で  $0.8^\circ$  とほぼ垂直である。孔口から東方向に掘削され、孔底で 2.2m 程度の偏距である。

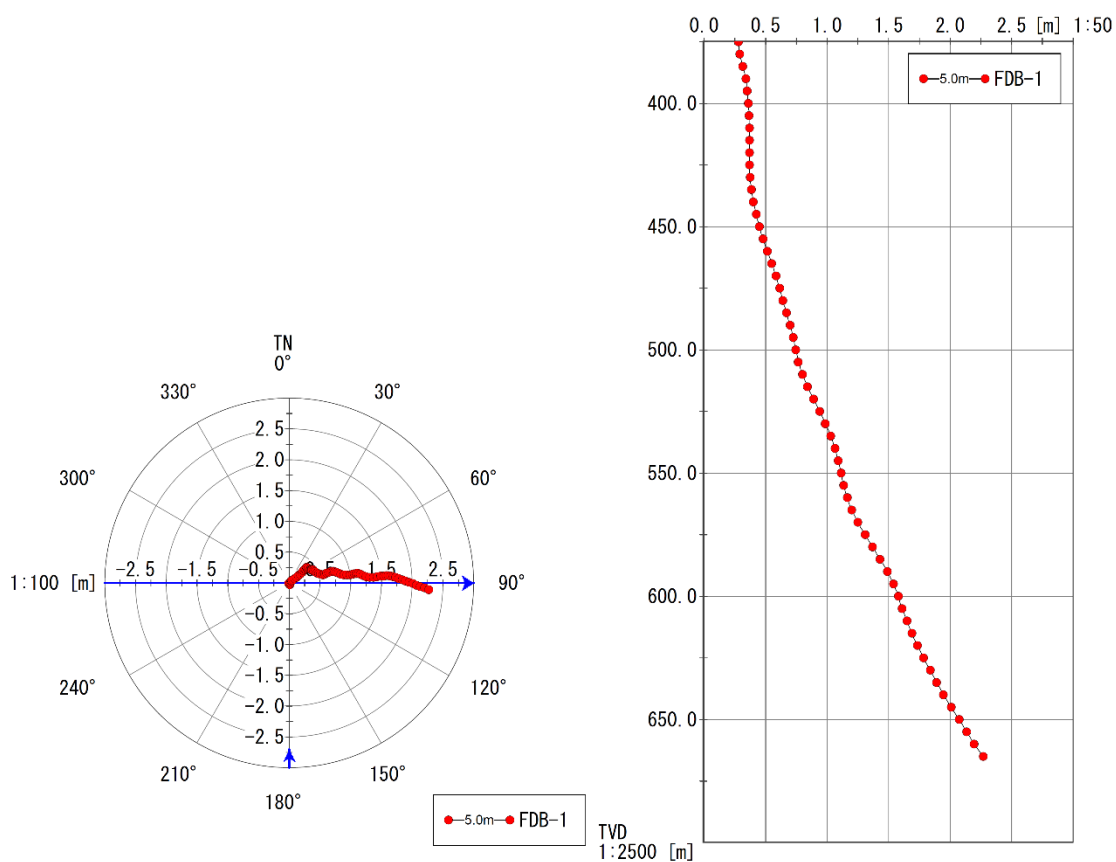


図 4.56 平面孔跡図 (左) と偏距—垂直深度図 (右) (FDB-1孔)

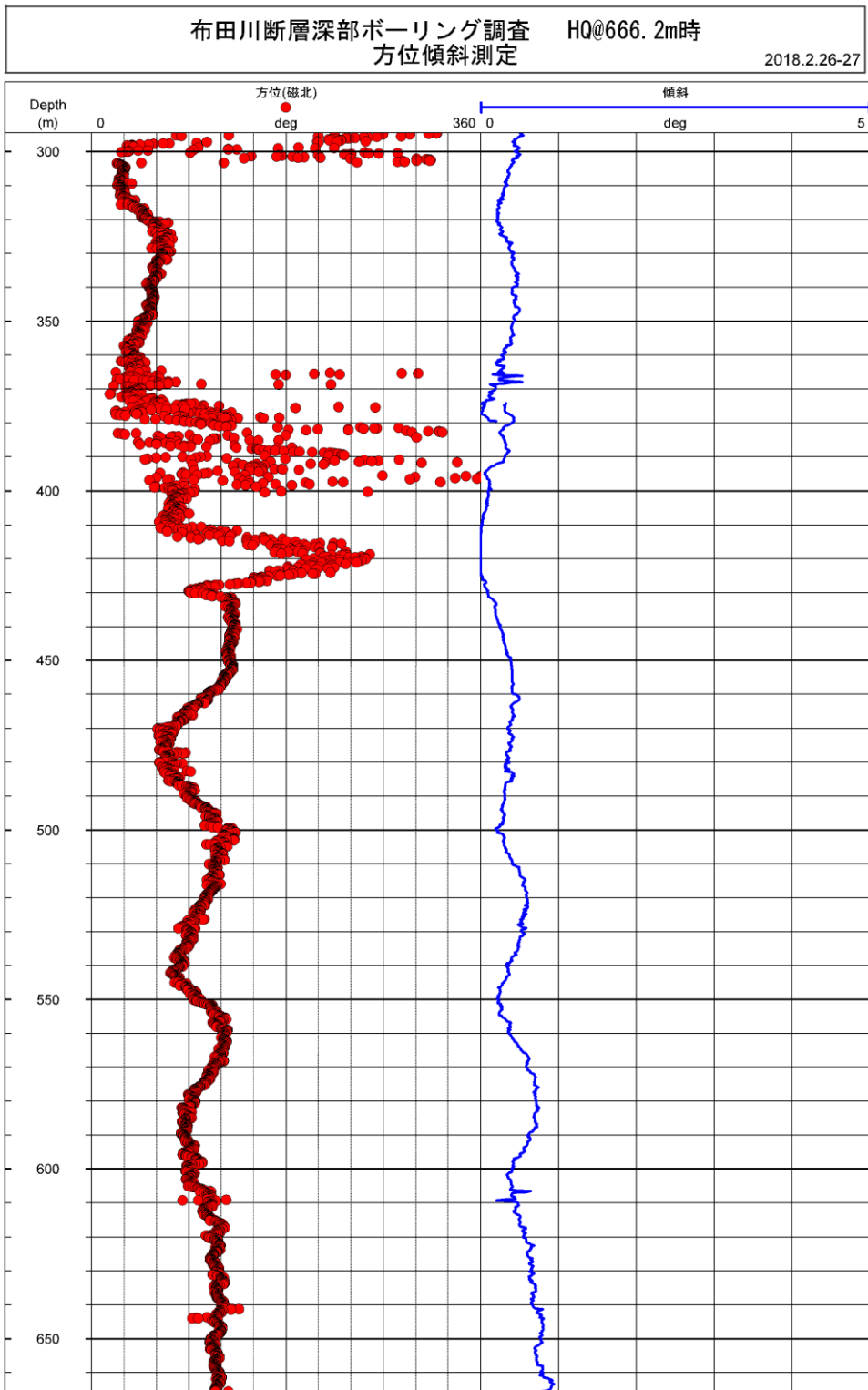


図 4.57 方位傾斜測定結果

## 4.7 水圧破碎試験及び解析結果

### 4.7.1 実施概要

本調査における水圧破碎試験は、表 4.22 のとおり実施した。試験を実施した区間のコア写真を図 4.58～図 4.60 に示す。

表 4.22 水圧破碎試験の実施深度等

実施深度（中心）	実施区間の地質	備考（断層との関係等）
区間①318.75m	津森層（凝灰質礫岩）	F①断層の上盤側
区間②411.50m、417.65m	塊状安山岩	F①断層と F②断層の間
区間③431.60m	塊状安山岩	F①断層と F②断層の間



図 4.58 試験区間①コア写真



図 4.59 試験区間②コア写真



図 4.60 試験区間③コア写真

#### 4.7.2 コンプライアンス測定試験

ゾンデ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、ケーブルウインチに接続したストラドルパッカーを亀裂のない鋼管（内径 102mm）内に設置して、水圧破碎システムの加圧試験をおこなった。コンプライアンスの測定状況を図 4.61 に示す。

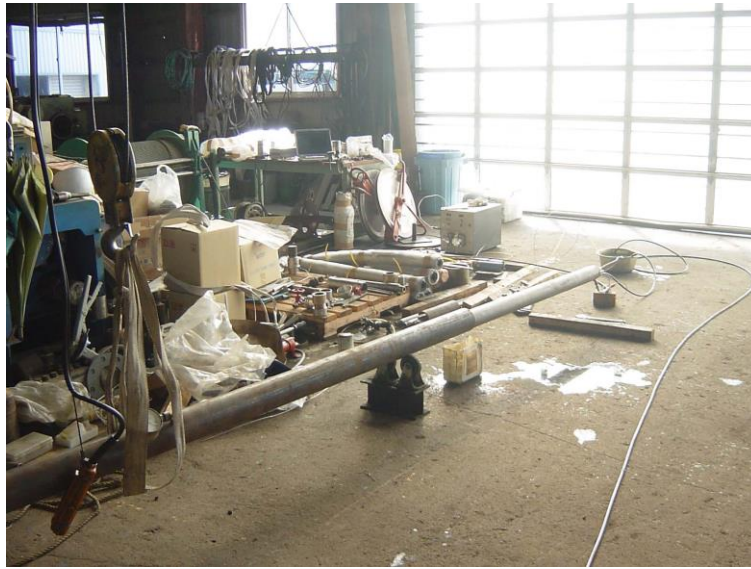


図 4.61 水圧破碎システムのコンプライアンス測定状況

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 23MPa に設定しておこなった加圧試験の結果を次頁の図 4.62 に示す。

図 4.62 の横軸は総圧入流量  $Q_{total}$ 、縦軸は加圧区間の圧力である。圧力が 20MPa 近くまで増加すると、加圧区間に亀裂がなくても圧力曲線の傾きは減少し始め、総圧入流量に対する圧力の線形性は失われる。これは、加圧区間の圧力があるしきい値に達すると、パッカーエレメントが変形を開始し、加圧区間の体積が増加するためであると考えられる。このことは、水圧破碎試験においては、測定され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ことを示している。

区間圧力がパッカー圧に近づく前の  $Q_{total}$  と  $P$  の直線の傾きから求めた本水圧破碎システムのコンプライアンスの平均値は  $3.97 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{MPa}$  である。亀裂開口圧  $P_c$  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<sup>[2]</sup> 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亀裂開口圧を評価できる。



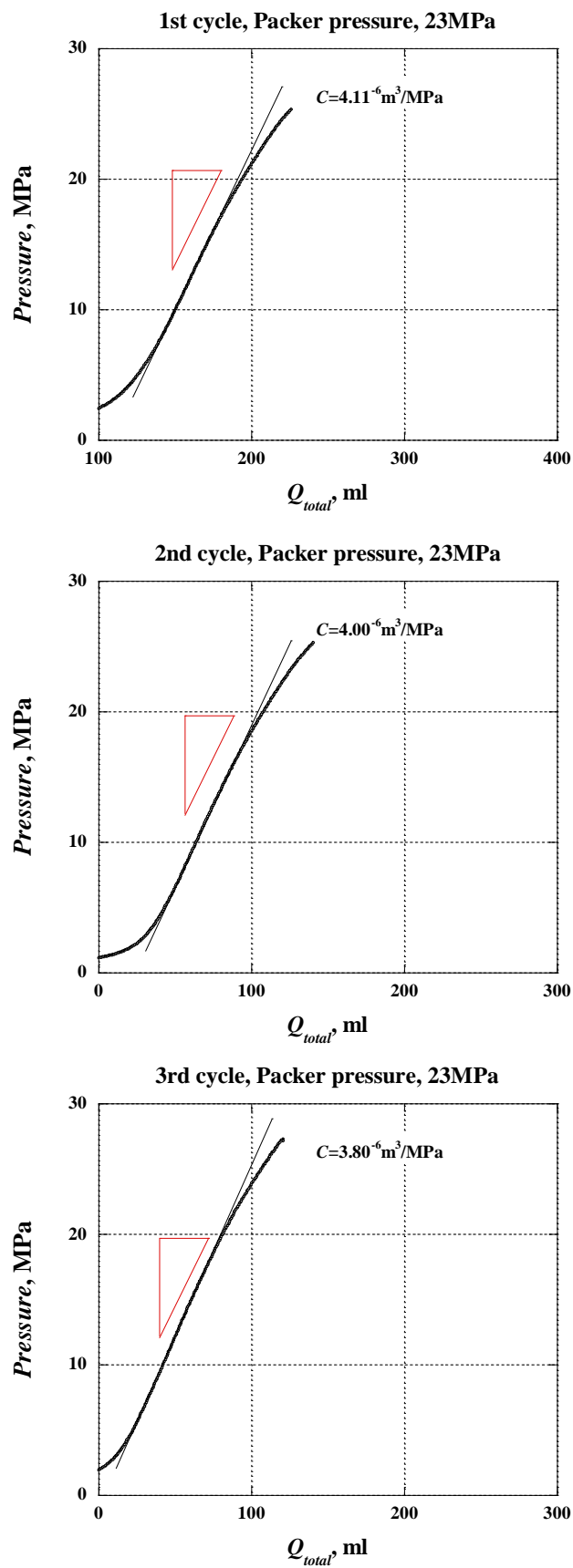


図 4.62 水圧破砕システムを用いた鋼管内における加圧試験結果

### 4.7.3 水圧破碎試験結果

#### (1) 区間①

■試験深度：試験中心深度 318.75m

■試験区間の地質：津森層中の固結した凝灰質礫岩

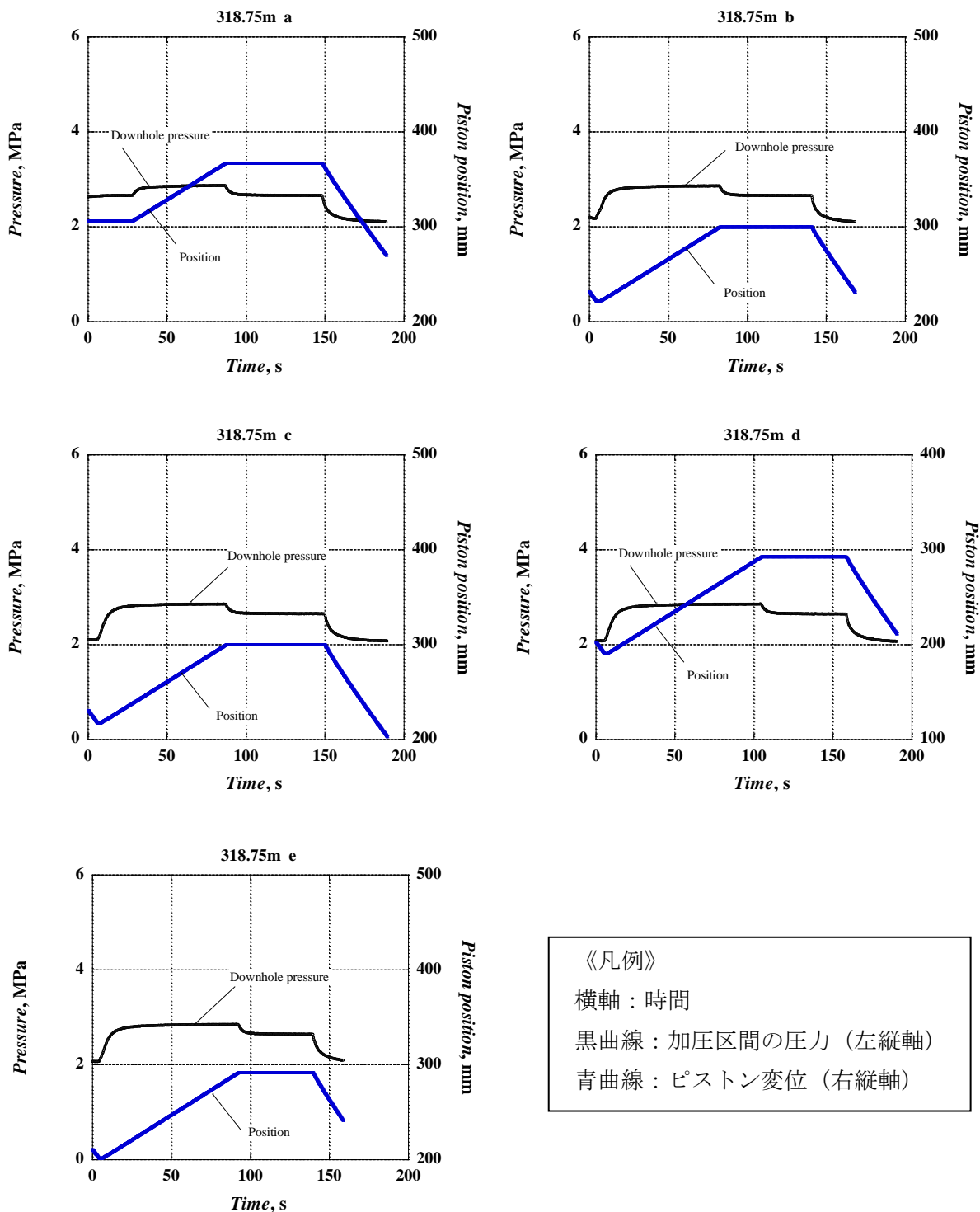
F①断層の上盤に相当

■試験結果：

- ・深度 323.95m で、水圧破碎試験を試みたが、孔径の拡大と推測される原因で、パッカーが破裂し、水圧破碎試験が実施できなかった。
- ・深度 318.75m の水圧破碎試験は、2/17 と 2/18 に同深度で合計 2 回実施し、再現性のある結果が得られた。2 回の試験とも、それぞれ 5 サイクル (5 回繰り返し) の水圧負荷・シャットイン・Bleed-off (加圧区間の解放) を行い、圧力値の再現性も確認できた。
- ・ただし、岩盤 (地層) が軟質であったことから、Break down (孔壁の圧裂現象) は認められなかった。試験結果から想定される最小水平主応力  $Sh_{min}$  は、比較的小さく、正断層型または横ずれ断層型の応力状態に相当するものと推測される。
- ・試験結果の取り扱いについて  
下記の①と②の試験状況から考えて、深度 328.75m の試験ではパッカーによる完全な密閉空間の形成が困難で、パッカーの外側から加圧区間へ水の供給があったことを意味している。試験結果の取り扱い時には、このような厳しい孔壁条件下での試験であったことを考慮する必要がある。

#### 【試験状況】

- ①試験において、パッカー圧を 70kg/cm<sup>2</sup> に設定 (パッカー圧をこれ以上上げると破裂) して加圧区間に水を圧入後、シリンジポンプを停止すると区間水圧は約 2.6MPa で安定した。
- ②試験装置内のバルブを開放するとシリンジポンプのピストンは加圧開始時の位置よりも後ろ側に押し戻された。



《凡例》  
 横軸：時間  
 黒曲線：加圧区間の圧力（左縦軸）  
 青曲線：ピストン変位（右縦軸）

図 4.63 区間①での水圧破碎試験結果(深度 318.75m)

《補足説明》

- ・ピストン変位は、加圧区間に水を押し込むためのピストンの変位を示し、加圧区間に圧入される水の体積を求める際に使用する。
- ・各グラフ上部中央のタイトルは試験深度、加圧サイクルの順序を示す。

a : 1 回目のき裂発生試験、b、c、d、e : 2、3、4、5 回目のき裂再開口試験

## (2) 区間②

■ 試験深度：試験中心深度 411.50m、417.65m

■ 試験区間の地質：先阿蘇火山岩類の硬質安山岩溶岩

F①断層の下盤に相当

■ 試験結果：

- ・ 深度 411.50m で水圧破碎試験を行った結果、**Break down**（孔壁の圧裂現象）はやや不明瞭であるが、4 サイクル（4 回繰り返し）の水圧負荷・シャットイン・**Bleed-off**（加圧区間の解放）を行い、圧力値の再現性を確認できた。
- ・ 深度 417.65m で水圧破碎試験を行った結果、明瞭な **Break down**（孔壁の圧裂現象）が確認され、4 サイクル（4 回繰り返し）の水圧負荷・シャットイン・**Bleed-off**（加圧区間の解放）を行い、圧力値の再現性を確認できた。



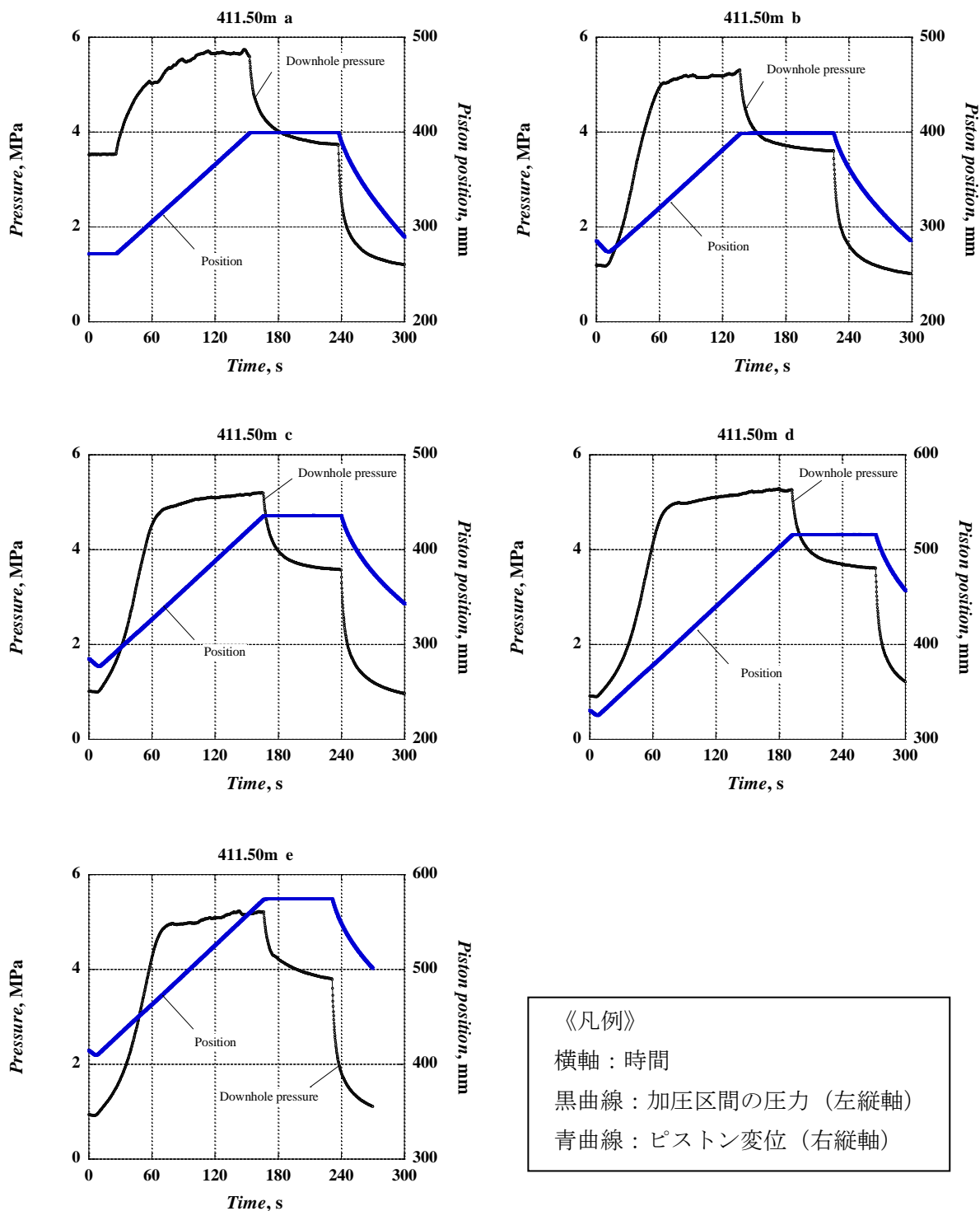


図 4.64 区間②での水圧破碎試験結果(深度 411.50m)

《補足説明》

- ・ピストン変位は、加圧区間に水を押し込むためのピストンの変位を示し、加圧区間に圧入される水の体積を求める際に使用する。
- ・各グラフ上部中央のタイトルは試験深度、加圧サイクルの順序を示す。  
 a : 1 回目のき裂発生試験、b、c、d、e : 2、3、4、5 回目のき裂再開口試験

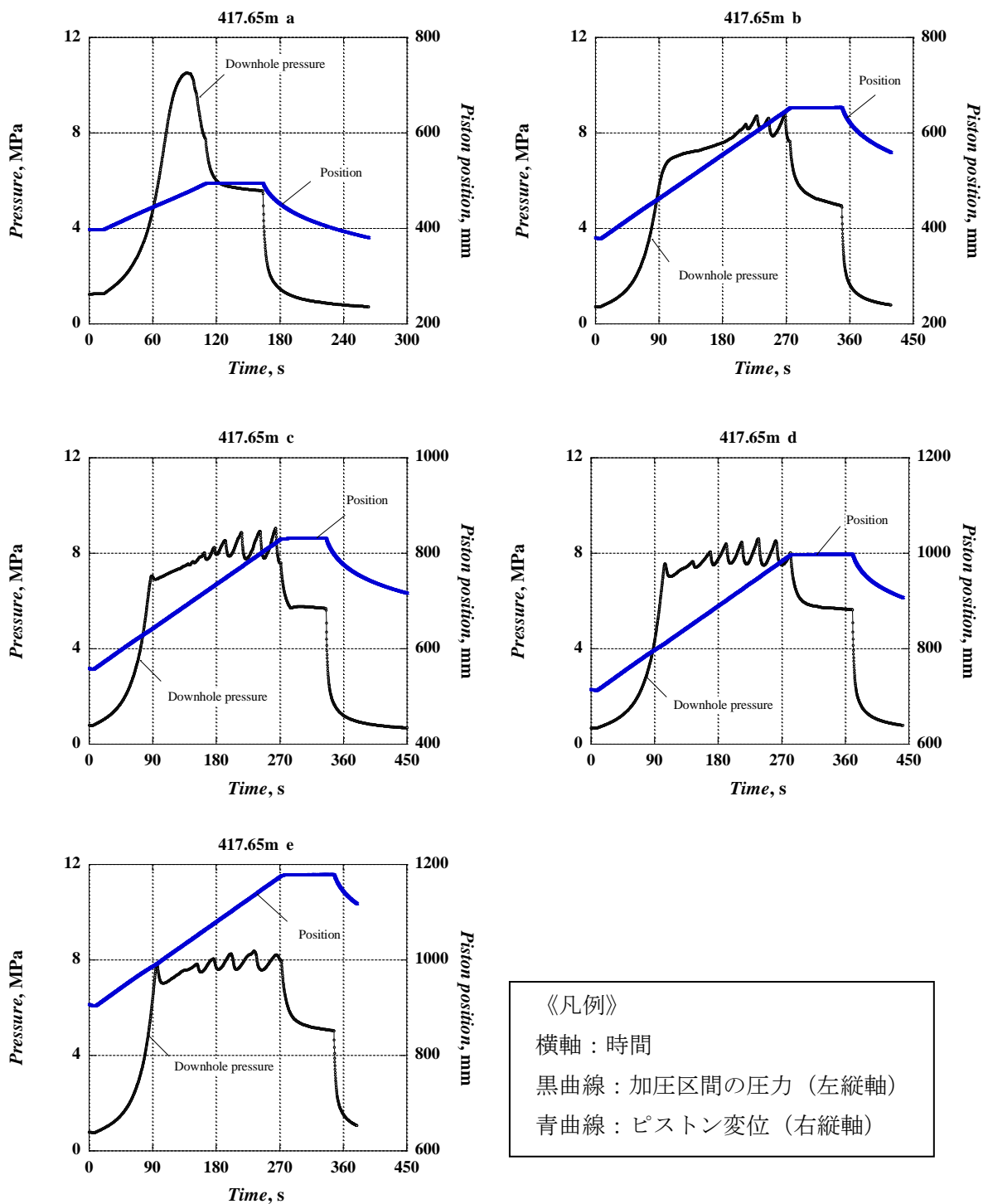


図 4.65 区間②での水圧破碎試験結果(深度 417.65m)

《補足説明》

- ・ピストン変位は、加圧区間に水を押し込むためのピストンの変位を示し、加圧区間に圧入される水の体積を求める際に使用する。
- ・各グラフ上部中央のタイトルは試験深度、加圧サイクルの順序を示す。  
 a : 1 回目のき裂発生試験、b、c、d、e : 2、3、4、5 回目のき裂再開口試験

### (3) 区間③

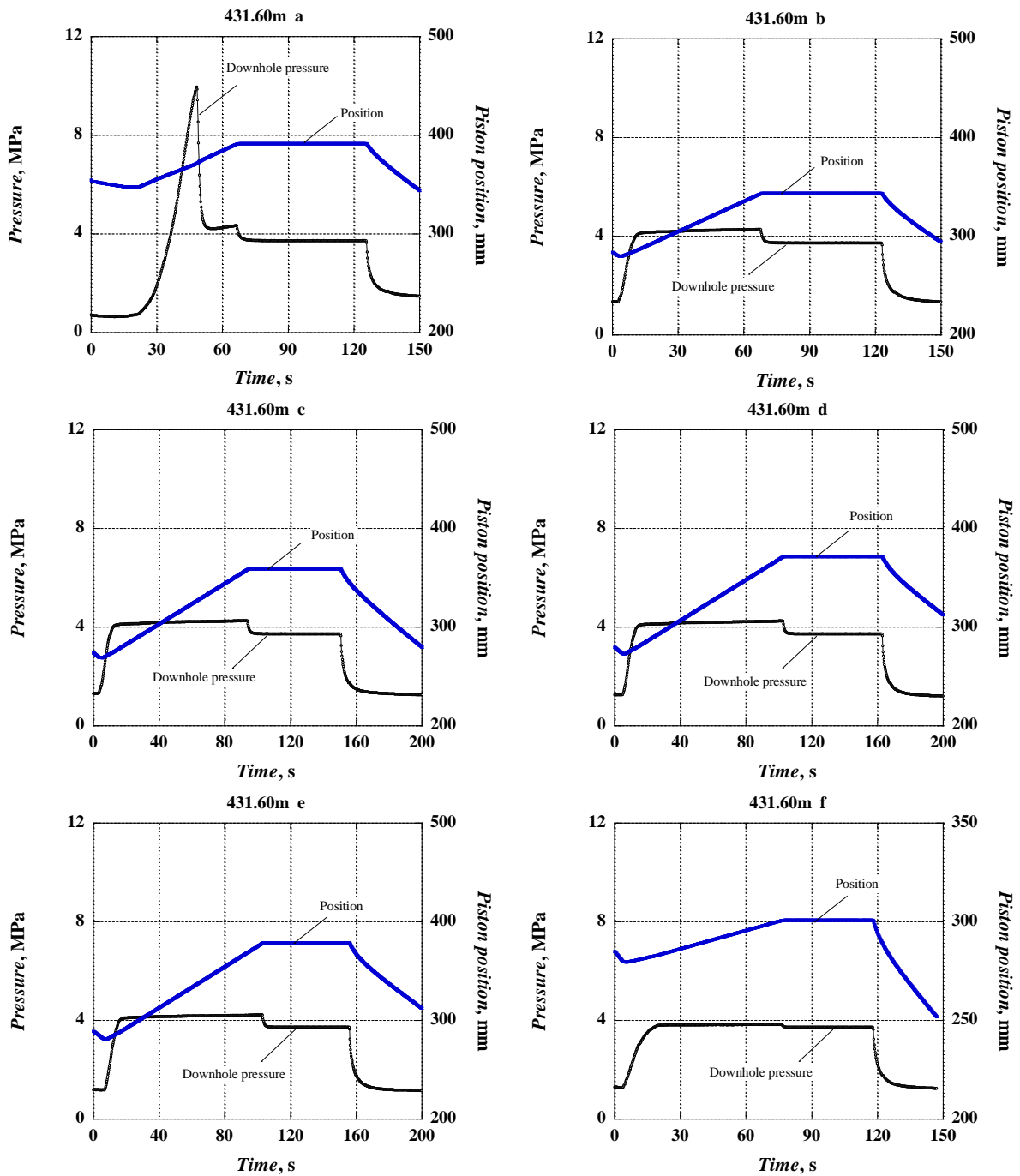
■ 試験深度：試験中心深度 431.60m

■ 試験区間の地質：先阿蘇火山岩類の硬質安山岩溶岩

F①断層の下盤に相当

■ 試験結果：

- ・ 水圧破碎の実施前の型取りで、試験中心深度（431.30m）の上位側に亀裂が確認されたことから、試験区間を 30cm 下げて亀裂がない 431.60m を試験位置とした。
- ・ 深度 431.60m で、水圧破碎試験を行った結果、明瞭な Break down（孔壁の圧裂現象）が確認され、4 サイクル（4 回繰り返し）の水圧負荷・シャットイン・Bleed-off（加圧区間の解放）を行い、圧力値の再現性を確認できた。
- ・ 最小水平主応力  $Sh_{min}$  は 7MPa 程度で、おそらく正断層型または横ずれ断層型の応力状態に相当するものと推測される。
- ・ 縦亀裂の方向は、布田川断層の NE 方向に対して、右横ずれが発生する主応力方向（ほぼ E-W 方向？）であると考えられる。
- ・ 区間③では上記の深度 431.60m の試験区間以外に、深度 438.50m で水圧破碎試験を試みたが、パッカー加圧後の水圧負荷で試験区間の水圧が上昇せず試験を行うことが出来なかった。この原因は、ボーリングコアでは亀裂がない区間であったが、掘削中において潜在的な亀裂がすでに開口しており、試験区間から漏水が発生した結果と考えられる。

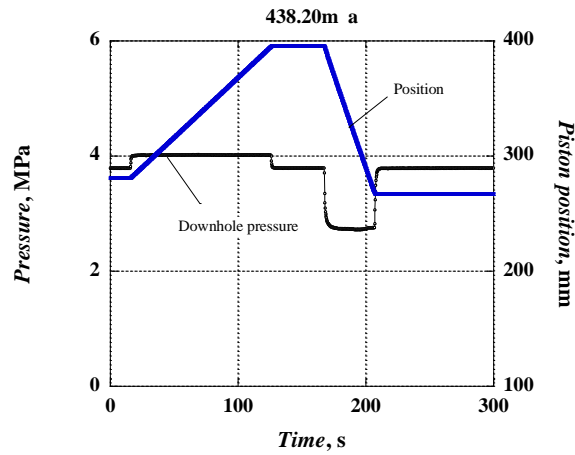


《凡例》  
 横軸：時間 黒曲線：加圧区間の圧力（左縦軸） 青曲線：ピストン変位（右縦軸）

図 4.66 区間②での水圧破碎試験結果(深度 431.60m)

《補足説明》  
 ・ピストン変位は、加圧区間に水を押し込むためのピストンの変位を示し、加圧区間に圧入される水の体積を求める際に使用する。  
 ・各グラフ上部中央のタイトルは試験深度、加圧サイクルの順序を示す。  
 a：1回目のき裂発生試験、b、c、d、e：2、3、4、5回目のき裂再開口試験





《凡例》  
 横軸：時間 黒曲線：加圧区間の圧力（左縦軸） 青曲線：ピストン変位（右縦軸）

図 4.67 区間②での水圧破碎試験結果(深度 438.20m)

《補足説明》

- ・ピストン変位は、加圧区間に水を押し込むためのピストンの変位を示し、加圧区間に圧入される水の体積を求める際に使用する。
- ・各グラフ上部中央のタイトルは試験深度、加圧サイクルの順序を示す。  
 a : 1 回目のき裂発生試験、b、c、d、e : 2、3、4、5 回目のき裂再開試験

#### 4.7.4 型取り試験結果

水圧破碎試験後、深度 318.75m、深度 411.50m、深度 417.65m および 431.60m でインプレッションパッカーによる亀裂の型取りを行った（図 4.70、図 4.73 エラー! 参照元が見つかりません。、図 4.74）。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亀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をトレースした結果である。トレースの左下には、シングルショットで測定した方位（磁北基準）が示されている。

深度 318.75m では、孔径の拡大によって試験区間を加圧することができなかつたので水圧破碎亀裂は生じていない。

深度 411.50m および深度 431.60m で生じた亀裂は、ボアホール軸を含む縦亀裂である。ただし、深度 431.60m の縦亀裂は雁行状を呈している。このことは、当該深度の岩盤が均質等方であれば、ひとつの主応力軸がボアホール軸と厳密に一致していないことを示唆している。

深度 417.65m では、試験区間と交差する横亀裂が生じた。横亀裂からはボアホール軸と直交する水平面内の主応力の方向と大きさに関する情報を得ることはできない。しかし、亀裂閉口圧力は、横亀裂に作用する法線方向の応力の大きさと等しい。なお、横亀裂のトレースは周期  $\pi$  の正弦曲線から若干逸脱している。これは、横亀裂がうねりのある曲面であることによると考えられる。

水圧破碎試験によって生じた縦亀裂の走向を求めた結果を表 4.23 に示す。ここで、縦亀裂の走向は、熱収縮チューブ上の亀裂のトレースに、ボアホール軸を含む平面を最小二乗法によって当てはめて決定した。走向は、熊本県の偏角（ $6.5^\circ$ ）を補正した角度で、真北から時計回りを正とする。

表 4.23 縦亀裂の走向

孔名	番号	試験深度(m)	走向*	備考
FDB-1 孔	1	411.50	-63.3	
	2	431.60	-72.7	雁行状縦亀裂

\*:真北から時計回りを正とする。

(1) 区間①

型取り試験は、水圧破碎の実施前後にそれぞれ行い、高い精度で深度コントロールができ、同じ場所で再現性のある型取りができた。水圧破碎による孔壁両面に一対で形成される縦亀裂は不明瞭であったものの、片面にわずかな亀裂痕跡が確認できた (S71.5E)。

深度 318.75m で実施した型取りの写真を図 4.68～図 4.69 に、型取りの記録を図 4.70 に示す。



図 4.68 型取り写真 (深度 318.75m)

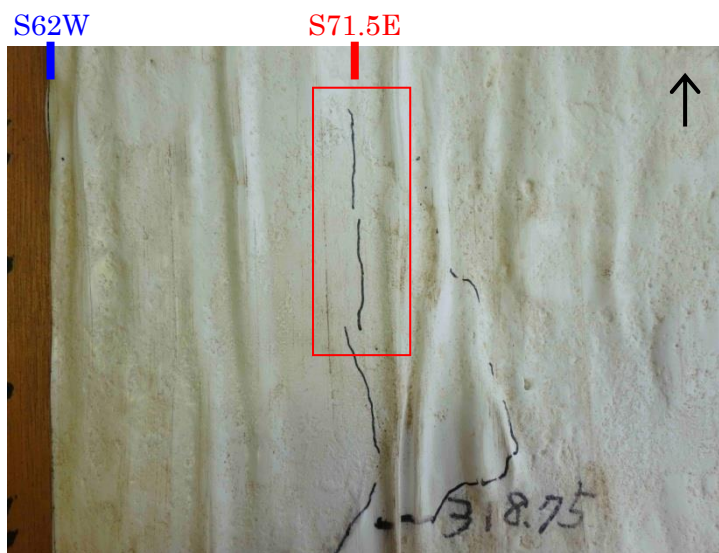


図 4.69 試験後型取り写真 (縦亀裂) (深度 318.75m)

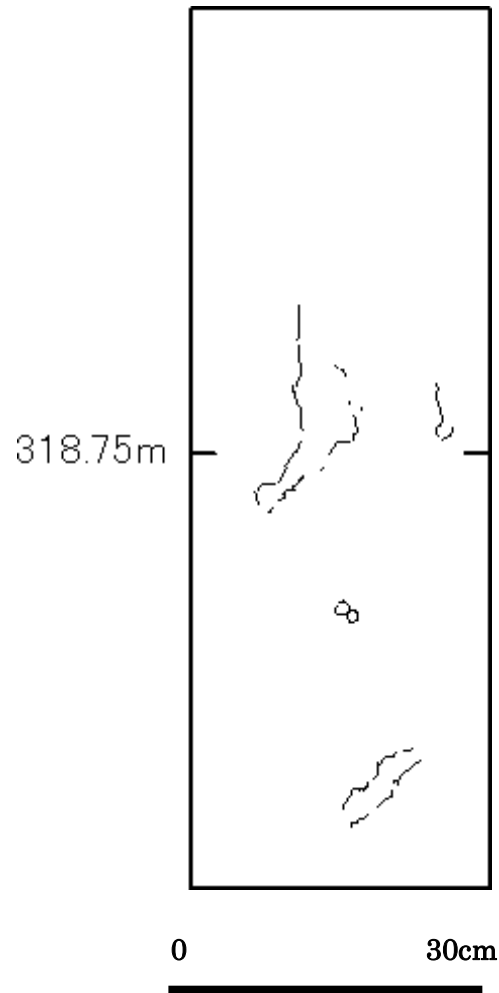


図 4.70 水圧破碎試験後の亀裂の型取りの記録（深度 318.75m）



## (2) 区間②

型取りは、水圧破碎の実施前後にそれぞれ行い、高い精度での深度コントロールができ、同じ場所で再現性のある型取りができた。試験後の型取りで、水圧破碎による孔壁両面に明瞭な縦亀裂が一对で形成されていることを確認することができた。

縦亀裂の方向は、布田川断層のNE方向に対して、主に垂直方向の変位を発生させる主応力方向（NNW-SSE方向？）であると考えられる。

深度 411.50m で実施した型取りの写真を図 4.71 に、型取りの記録を図 4.73 に示す。

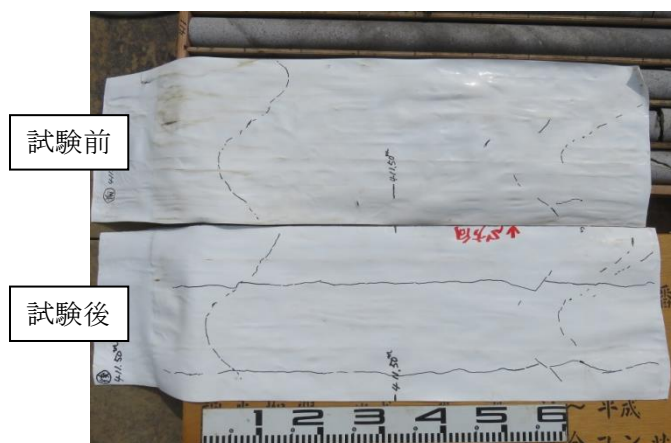


図 4.71 型取り写真 (深度 411.50m)

型取りは、水圧破碎の実施前後にそれぞれ行い、高い精度での深度コントロールができ、同じ場所で再現性のある型取りができた。水圧破碎による孔壁両面には明瞭な縦亀裂は確認されず、低角度の斜め亀裂が形成された。

深度 417.65m で実施した型取りの写真を図 4.72 に、型取りの記録を図 4.74 に示す。



図 4.72 型取り写真 (深度 417.65m)

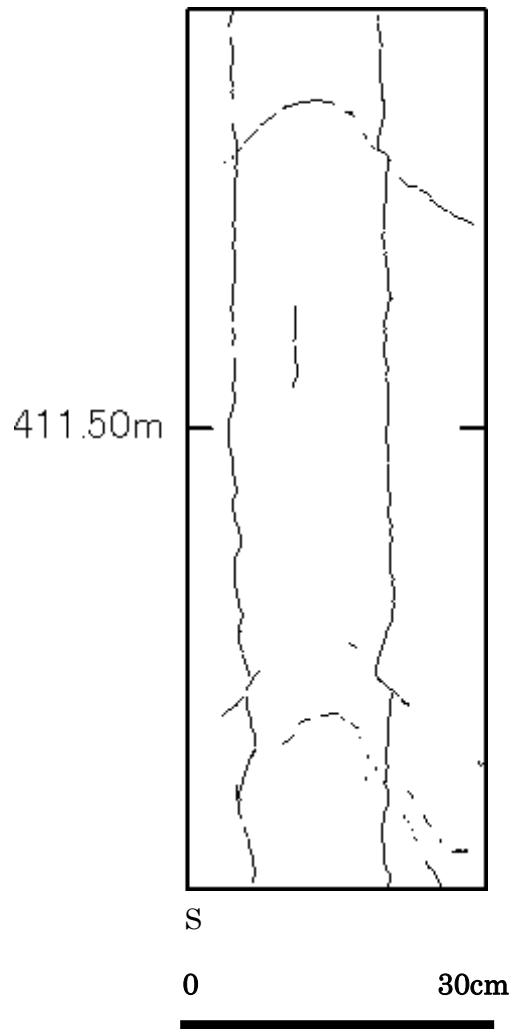


図 4.73 水圧破碎試験後の亀裂の型  
取りの記録（深度 411.50m）

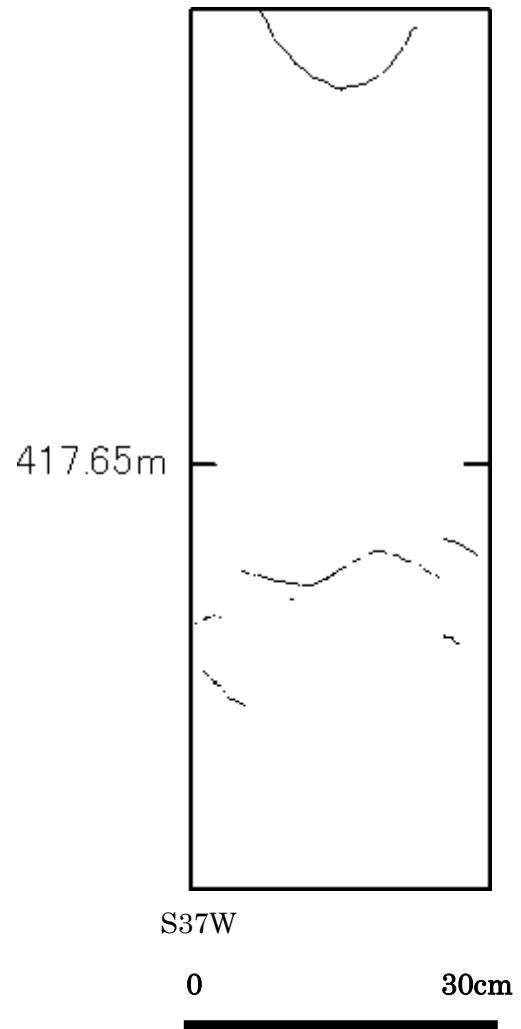
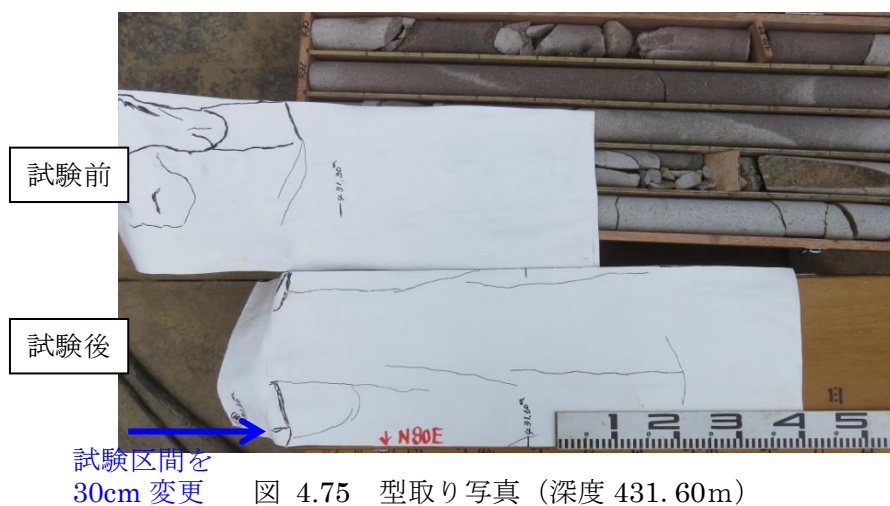


図 4.74 水圧破碎試験後の亀裂の型  
取りの記録（深度 417.65m）

### (3) 区間③

水圧破碎の実施前後の型取りでは、高い精度での深度コントロールができ、水圧破碎の実施前後で試験区間の型取りができた。試験後の型取りで、水圧破碎による孔壁両面に明瞭な縦亀裂が一对で形成されていることを確認することができた。

深度 431.60m で実施した型取りの写真を図 4.75 に、型取りの記録を図 4.76 に示す。



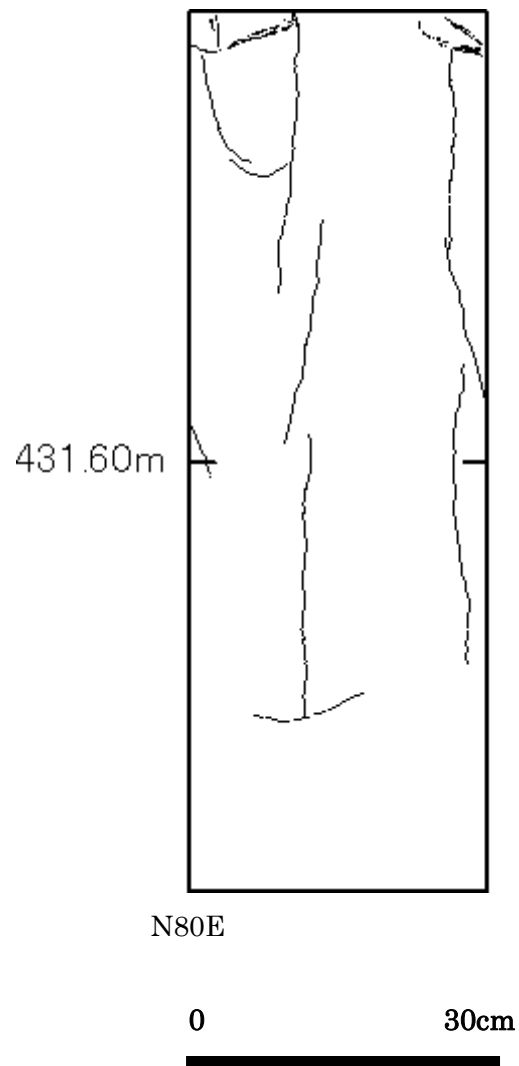


図 4.76 水圧破碎試験後の亀裂の型取りの記録（深度 431.60m）

#### 4.7.5 水圧破砕データの決定

##### (1) 破砕圧

破砕圧  $P_b$  は、通常、第 1 回目の加圧サイクルにおいて、亀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。図 4.63～図 4.67 の亀裂発生試験において、a と表示された第 1 回目の加圧サイクルから求めた破砕圧を表 4.24 に示す。

##### (2) 亀裂再開口圧

見かけの亀裂開口圧  $P_r^{(a)}$  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。しかし、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、亀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、 $P-Q_{total}$  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見かけの亀裂開口圧  $P_r^{(a)}$  を求める。

図 4.77～図 4.79 は、測定した加圧水圧  $P$  とパッカーに設置したポンプのピストン変位の関係を  $P-Q_{total}$  の関係に書き換え、亀裂再開口圧を求めた結果である。各試験深度で測定された亀裂再開口圧の平均値は、表 4.24 に示すとおりである。横亀裂の亀裂再開口圧は、縦亀裂と比較すると有意に大きい。



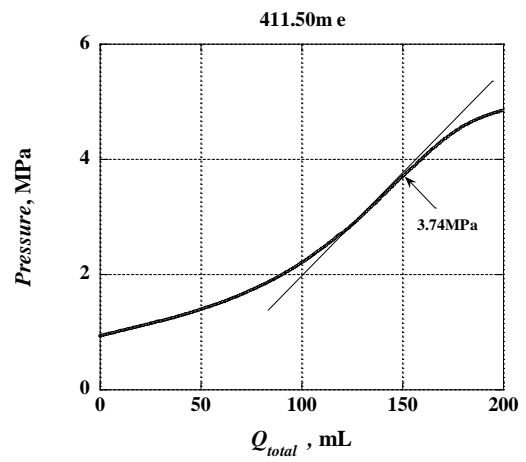
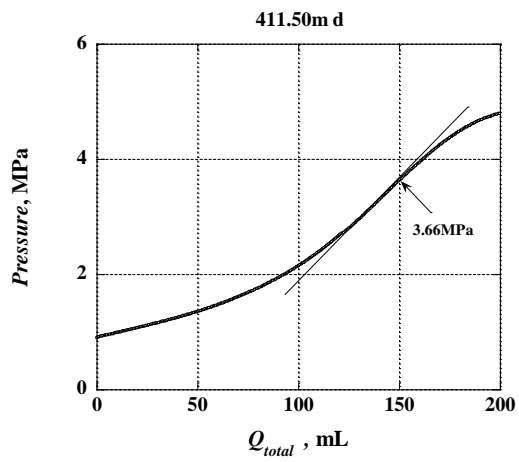
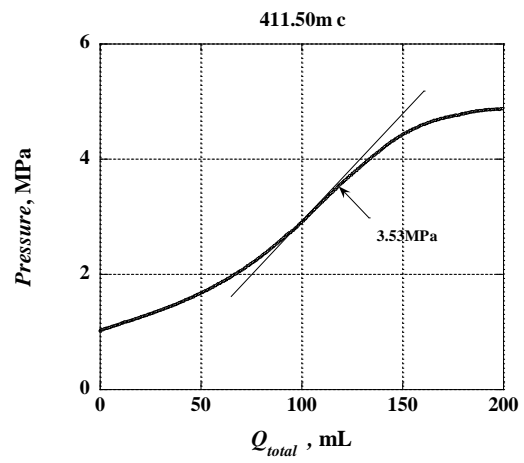
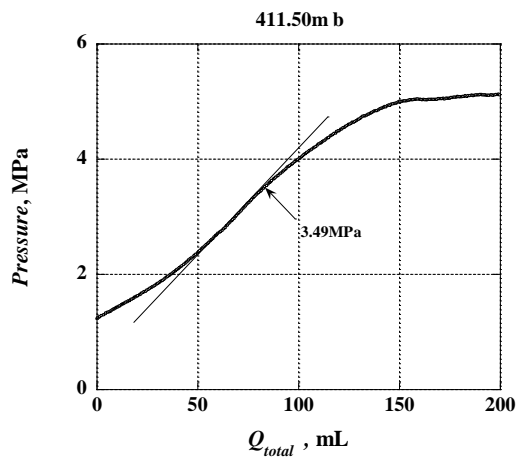


図 4.77 亀裂再開口試験における P-Qtotal 曲線 (深度 411.50m)

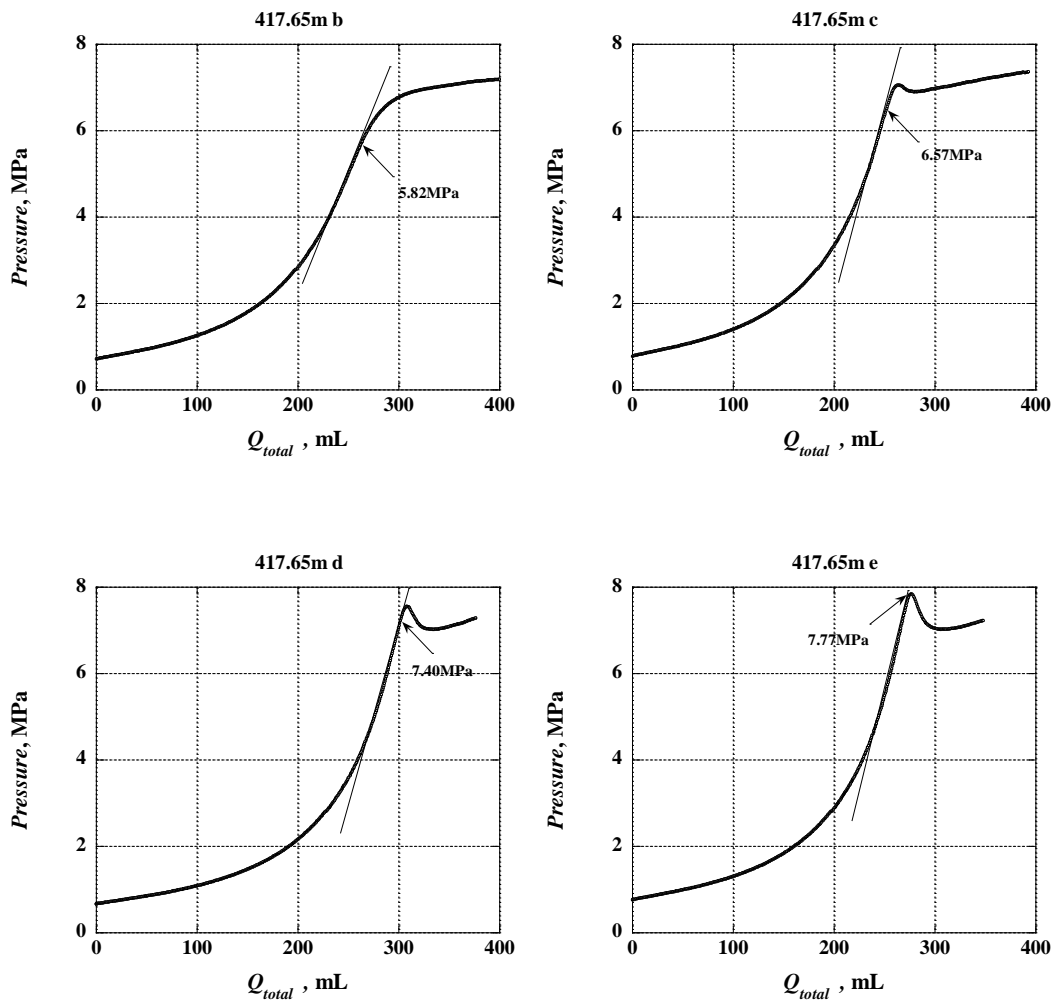


図 4.78 亀裂再開口試験における P- $Q_{total}$  曲線 (深度 417.65m)

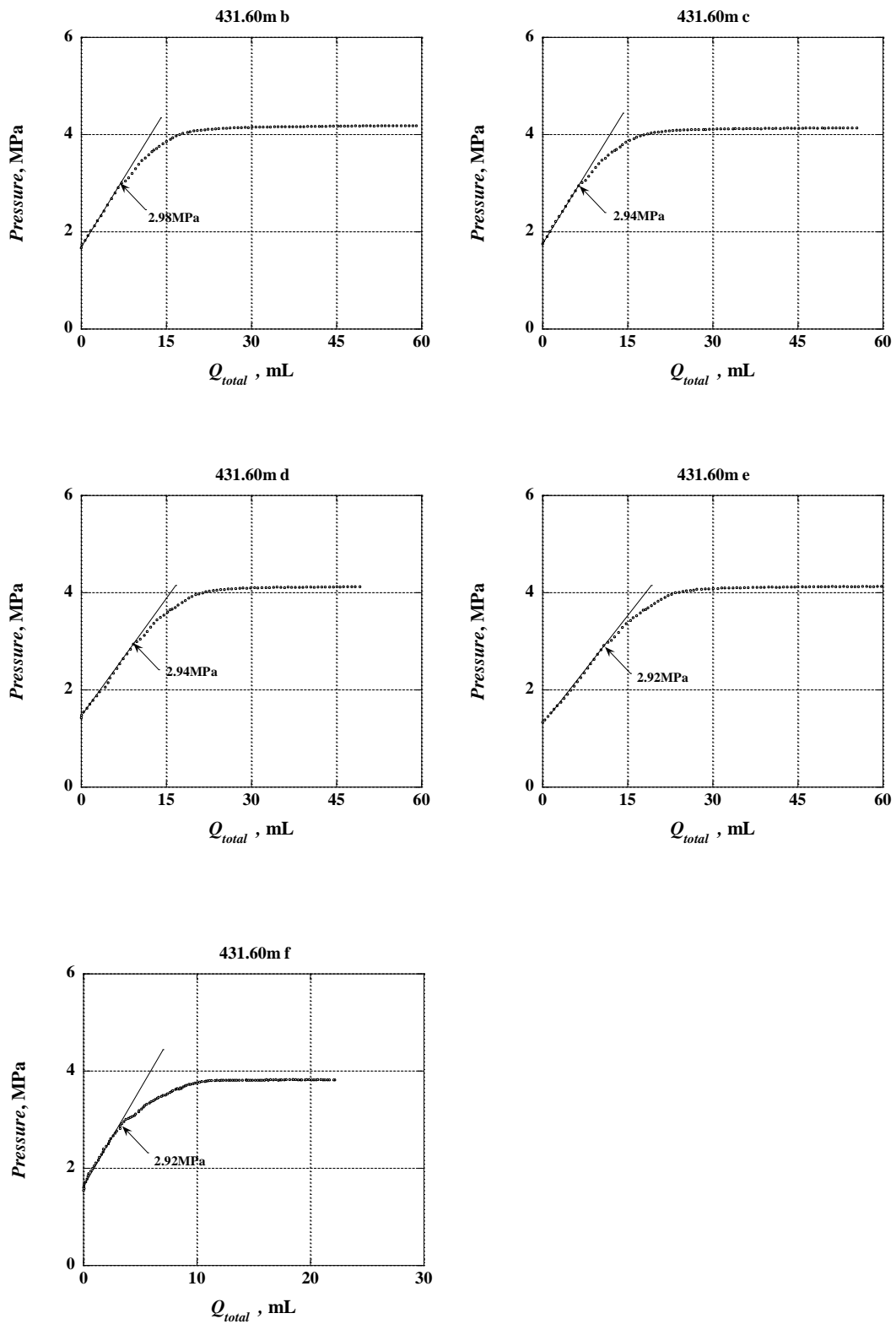


図 4.79 亀裂再開口試験における P- $Q_{total}$  曲線 (深度 431.60m)

### (3) 亀裂閉口圧

亀裂閉口圧  $P_s$  は、水圧破砕によって誘起された亀裂に作用する法線応力と破砕流体の圧力が釣り合うときの圧力である。ポンプを停止(shut-in)した後の破砕区間の圧力-時間曲線に明瞭な変曲点がみいだされるとき、すなわちシャットイン直後いったん急激に低下した圧力がそれ以降時間とともにほとんど低下しないとき  $P_s$  は比較的容易に決定できる。しかし多くの場合、シャットイン後の圧力の減衰速度は急激に低下しないので  $P_s$  を圧力-時間曲線の変曲点として決定することはむずかしい。このため、圧力-時間曲線から図式的に  $P_s$  を求めるいくつかの方法<sup>16-21</sup>が提案されている。ここでは決定方法の基礎となる理論が明快な Hayashi and Haimson<sup>21</sup>の方法 ( $dt/dP - P$ 法)を用いた。

Hayashi and Haimson<sup>21</sup>は、ボアホールから発生した亀裂の閉口挙動の解析を線形弾性論、破壊力学およびシャットイン後の破砕流体のマスバランスに基づいて理論解析し、シャットイン曲線と亀裂閉口挙動との関係を明らかにした。すなわち、シャットイン後の亀裂閉口過程は、亀裂の伸長が停止して亀裂先端が閉じるまでの第1段階、亀裂先端が閉じた直後から亀裂全体が完全に閉じるまでの第2段階、そして、亀裂全体が完全に閉じてから試験が終了するまでの第3段階から構成され、圧力減衰率の逆数は第1および第3段階における流体圧に関して線形である。そして、第1段階の終了時における圧力が亀裂閉口圧  $P_s$  となる。すなわち、この方法で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破砕区間の水圧とその時間変化率の逆数との関係を3直線で近似し、高压側の2直線の交点における破砕区間の水圧が亀裂閉口圧  $P_s$  として求められる。

図 4.80～図 4.82 は、シャットイン後の圧力-時間曲線に  $dt/dP - P$ 法を適用した結果である。この決定方法によって評価した亀裂閉口圧の平均値を表 4.24 にまとめて示した。横亀裂の亀裂閉口圧も縦亀裂と比較すると有意に大きい。

16 Lee M.Y. & Haimson B.C., Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameter, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.26, No.6,p.447-456,(1989)

17 Baumgartner J. & Zoback M.D., Interpretation of hydraulic fracturing pressure-time records using interactive analysis methods, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.26, No.6(1989),461-469.

18 Muskat M., Use of data on the build-up of bottom-hole pressure, Trans., AIME, 123, p.44-48, (1937)

19 Hayashi K. and Sakurai I., Interpretation of Hydraulic Fracturing Shut-in Curves for Tectonic stress measurements, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 26, No. 6, p.477-482,(1989)

20 Vik G. & Tundbridge L., Hydraulic fracturing – a simple tool for controlling the safety of unlined high pressure shafts and headrace tunnels, Proc. of the Int. Symp. On Rock Stress and Rock Stress Measurements/Stockholm (1986).

21 Hayashi K. and Haimson B.C., Characteristics of shut-in curves in hydraulic fracturing stress measurements and determination from hydraulic injection test data, J. Geophys. Res., 96,p.18311-18321, (1991)

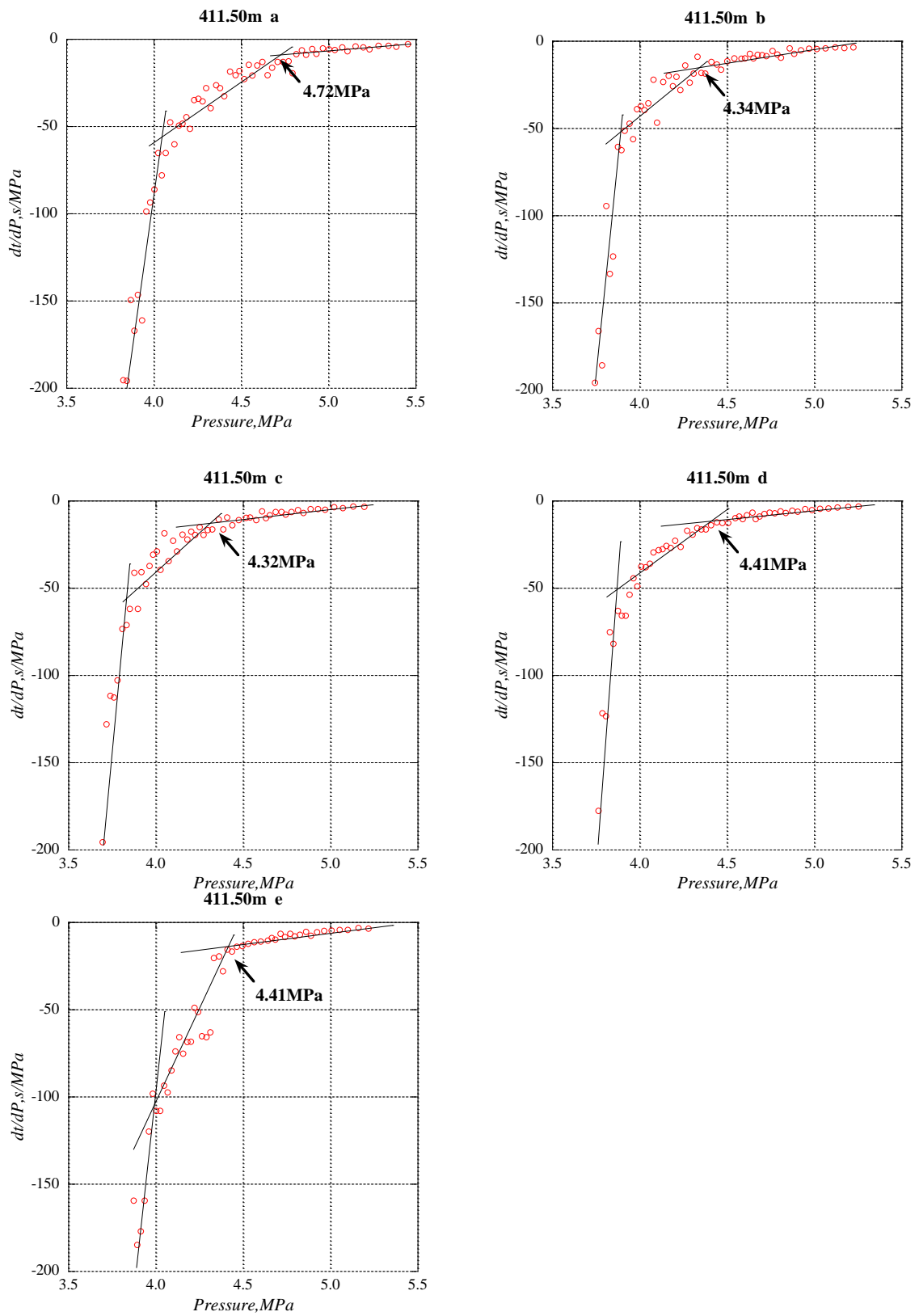


図 4.80 シャットイン後の圧力-時間曲線に  $dt/dP - P$  法を適用した結果 (深度 411.50m)



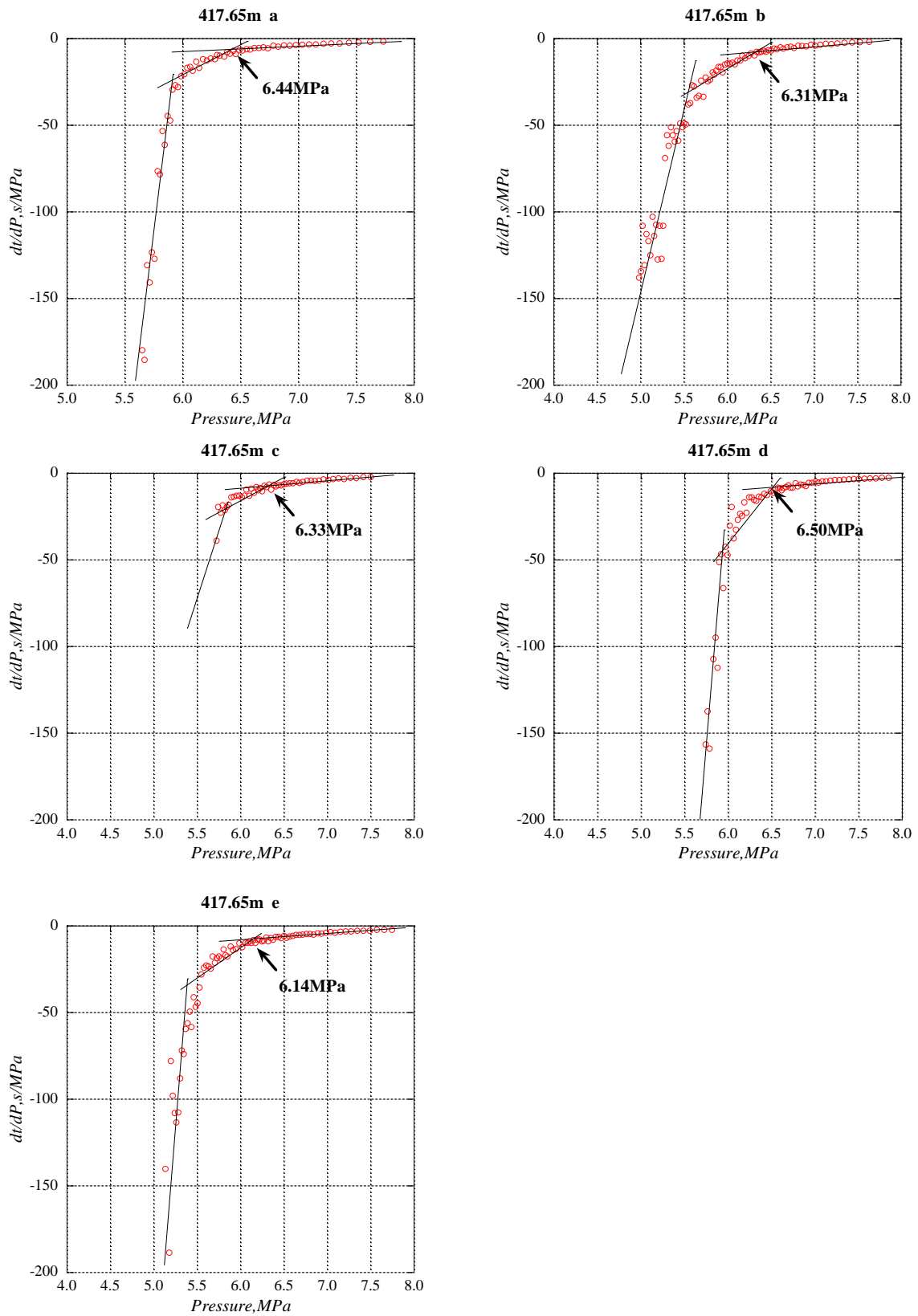


図 4.81 シャットイン後の圧力-時間曲線に  $dt/dP - P$ 法を適用した結果 (深度 417.65m)

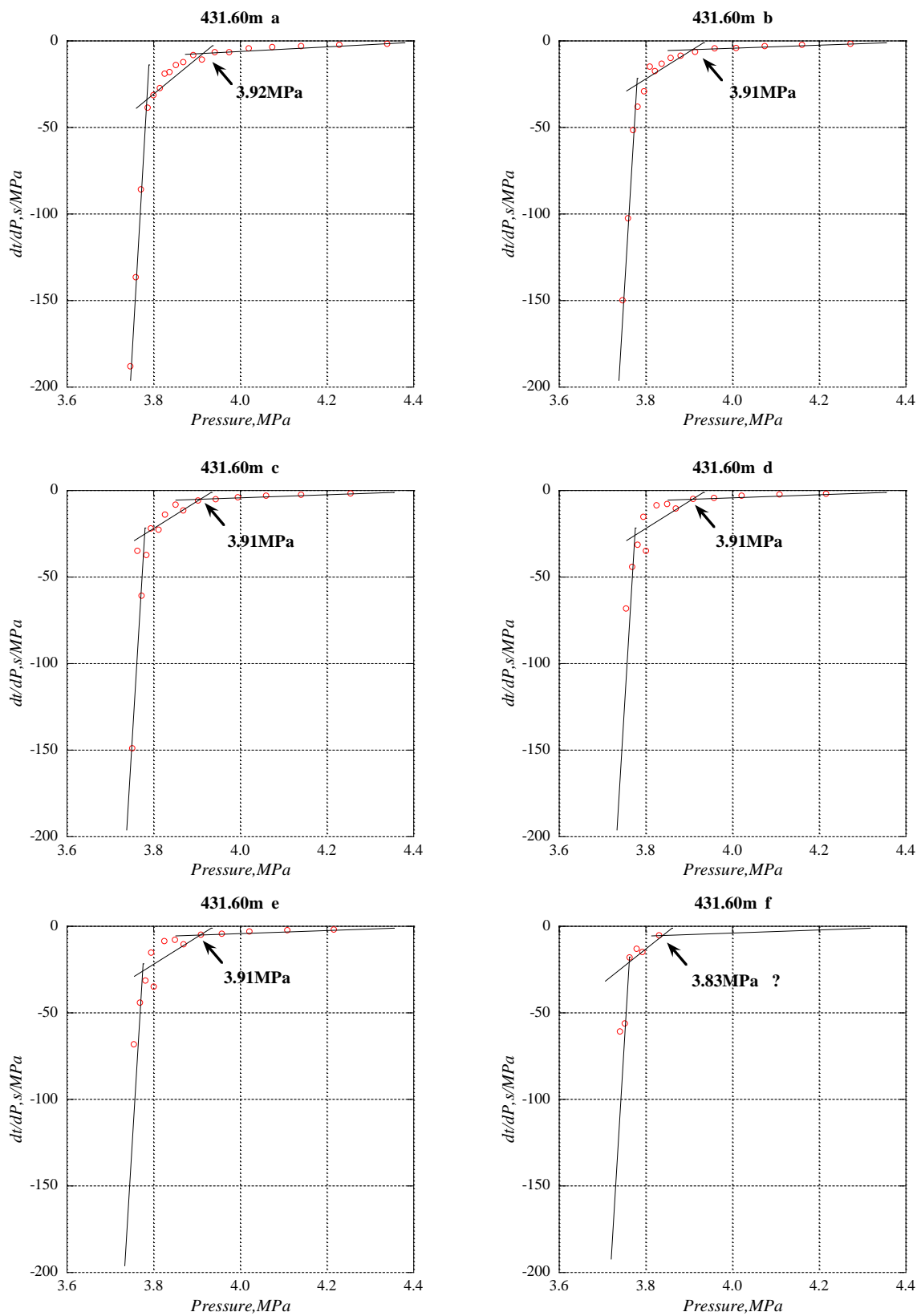


図 4.82 シャットイン後の圧力-時間曲線に  $dt/dP - P$  法を適用した結果 (深度 431.60m)

表 4.24 水圧データ

孔名	試験深度 (m)	破碎圧	亀裂再開口圧	亀裂閉口圧	備 考
		$P_b$ (MPa)	$P_r$ (MPa)	$P_s$ (MPa)	
FDB-1 孔	318.75	—	—	—	
	411.50	5.74	3.61	4.44	縦亀裂
	417.65	10.52	6.89	6.34	横亀裂
	431.60	9.97	2.94	3.91*	縦亀裂
	438.20	—	—	—	

\*:最終加圧サイクルのデータを除く平均値

#### 4.7.6 初期応力の評価

水圧破碎試験によってボアホール軸を含む縦亀裂が生じると、まず、表 4.24 の亀裂開口圧  $P_s$  と式(2)の関係より、ボアホール軸に直交する水平面内に作用する初期応力の最小値  $S_h$  が求まる。また、加圧系体積の十分に小さい水圧破碎システムを用いて十分に小さい圧入流量で測定した見かけの亀裂開口圧  $P_r^{(a)}$  が真の亀裂開口圧の大きさに等しいものと仮定すると、その値と式(4)の関係からボアホール軸に直交する水平面内に作用する初期応力の最大値  $S_H$  が求められ、さらに、ボアホールの中心から見たときに縦亀裂の方向がその作用方向となる。

生じた亀裂が縦亀裂とみなされた 2 深度の水圧データから初期応力を評価すると表 4.25 および図 4.83 のようである。鉛直なボアホール軸とひとつの主応力軸の方向が一致し、その大きさが被り地圧  $S_v$  (岩盤の単位体積重量  $\gamma=2.6 \text{ gr/cm}^3$  とする) に等しいと仮定すると、2 深度において  $S_v > S_H > S_h$  となり、深度 400m 付近の初期応力環境は正断層型である。

次に、応力の方位分布を見るために、縦軸に試験深度をとり、横軸に最大応力の方位を取ってプロットすると、図 4.84 のようである。ここで、○印は水圧破碎試験から評価された最大水平応力の方位であり、誘起された縦亀裂の走向と一致する。深度 400m 付近の最大水平応力の方向は N70W 方向である。

最後に、深度 417.65m の横亀裂で測定された亀裂開口圧が縦亀裂の圧力と比較して有意に大きかったことについて検討する。横亀裂の亀裂開口圧は、亀裂面に作用する法線応力に等しいと考えられる。したがって、初期応力状態と亀裂の法線方向が分かれば、亀裂に作用する法線応力が計算できる。

横亀裂面が平面であれば、ボアホールと交差してできる曲線は楕円形であり、可塑性チューブ全周に写し取った亀裂のトレースを展開すると周期  $\pi$  の正弦曲線となる。図 4.85 (a)は、深度 417.65m の横亀裂のトレースに正弦曲線を当てはめた結果である。ここで、横軸は展開した可塑性チューブの周方向の距離、縦軸は孔軸方向の距離を表し、縦軸の値が増加する方向が孔口側である。横軸の 0 の位置は可塑性チューブを孔軸に平行に切開した位置 (以下、切開線と呼ぶ) である。○印は亀裂のトレースから読み取った亀裂の座標である。横亀裂のトレースに対する曲線の当てはめはあまり良くない。これは、当該横亀裂が平面でなく、うねりのある曲面であることによる。

いま、簡単のために、切開線から 13cm 以上の位置にある横亀裂のトレースの一部を平面と仮定する。この亀裂に正弦曲線を当てはめると図 4.85 (b) のようである。正弦曲線の振幅および正弦曲線が最小となる切開線からの距離から求めた横亀裂の法線方向  $\alpha$  は図 4.86 に示すとおりである。図 4.83 から、深度 417.65m の初期応力の大きさを、それぞれ  $S_h=4.18\text{MPa}$ 、 $S_H=5.98\text{MPa}$  および  $S_v=10.65\text{MPa}$  とし、図 4.84 より  $S_H$  は N70W から作用しているとする。これから、当該横亀裂の法線方向の応力は 8.13MPa と計算される。この値は測定された亀裂開口圧 6.34MPa よりも 28% 大きい。しかしながら、以上のだま

かな計算から、鉛直応力により大きな感度を有する横亀裂で測定された亀裂閉口圧が縦亀裂の閉口圧よりも有意に大きかったのは、深度 400m 付近の応力環境が正断層型であることを反映した結果であると思われる。

表 4.25 FDB-1 孔における最小水平応力  $S_h$ 、最大水平応力  $S_H$  および最大水平応力  $S_H$  の方位  $\phi$

孔名	試験深度 (m)	水平主応力(MPa)		最大水平応力	鉛直応力(MPa) $S_v^{++}$
		$S_h$	$S_H$	$S_H$ の方位 $\phi$ (deg) *	
FDB-1 孔	411.50	4.44	6.10	-63.3	10.49
	431.60	3.91	5.85	-72.7	11.00

\* :  $\phi_i$  は最大水平応力の方位を真北から時計まわりに測定した角度。

++: 岩盤の単位体積重量を  $\gamma=2.6 \text{ gr/cm}^3$  と仮定して推定した鉛直応力。

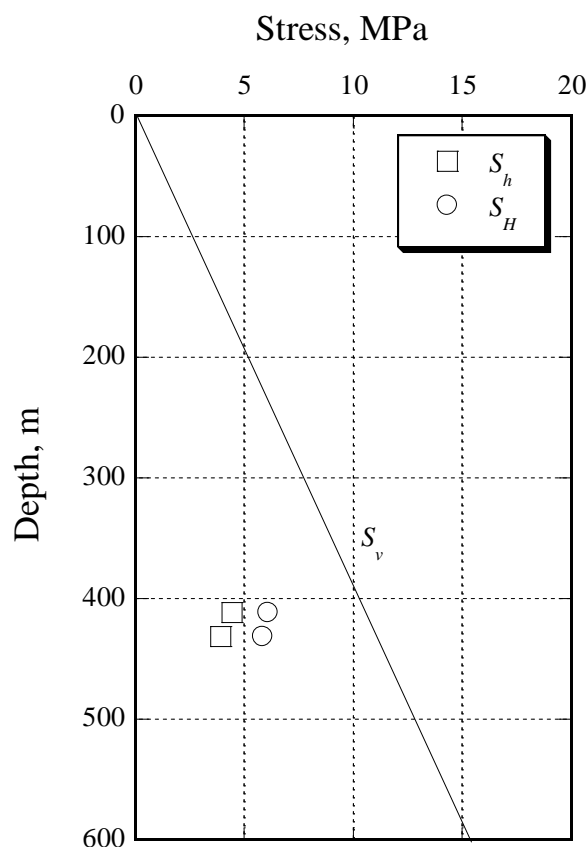


図 4.83 最大水平応力 (○印) および最小水平応力 (□印) と深度との関係。

実線  $S_v$  は  $\gamma=2.6 \text{ gr/cm}^3$  と仮定して求めた被り地圧



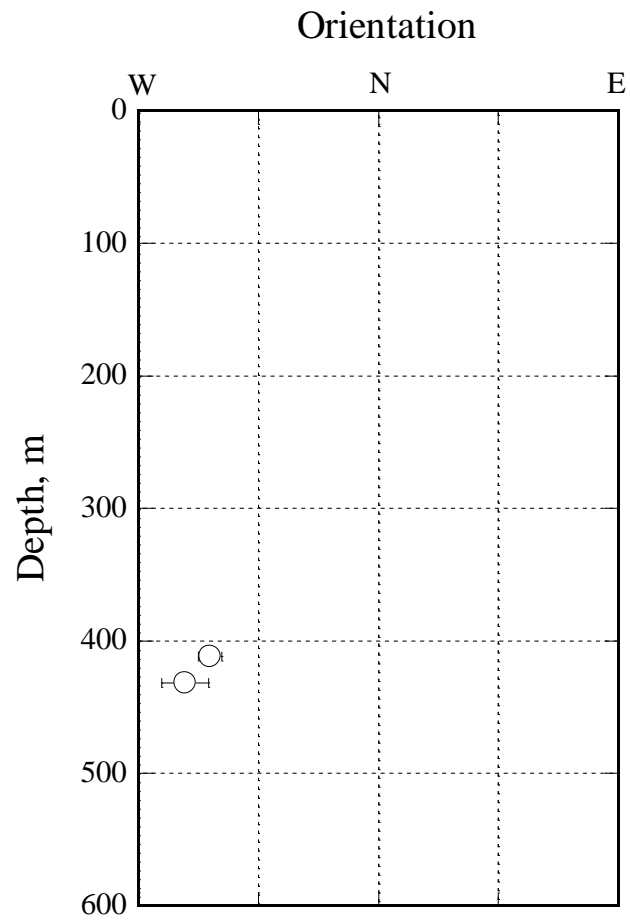


図 4.84 水圧破碎試験から評価された水平面内の最大応力の方位 (真北基準)

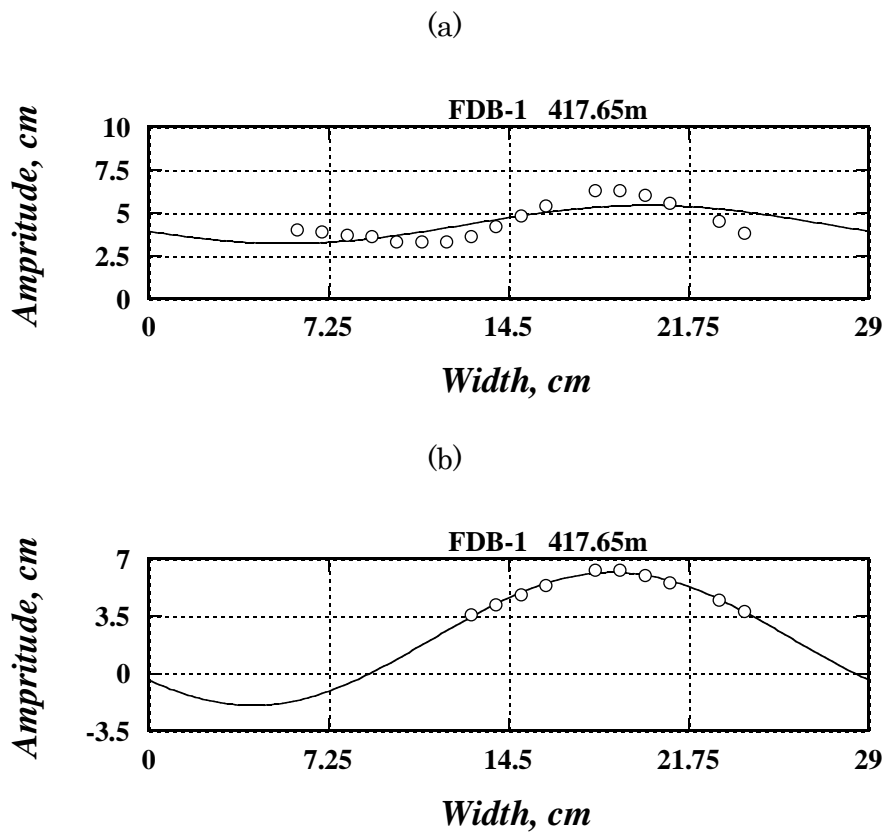


図 4.85 横亀裂のトレースへの正弦曲線のあてはめ

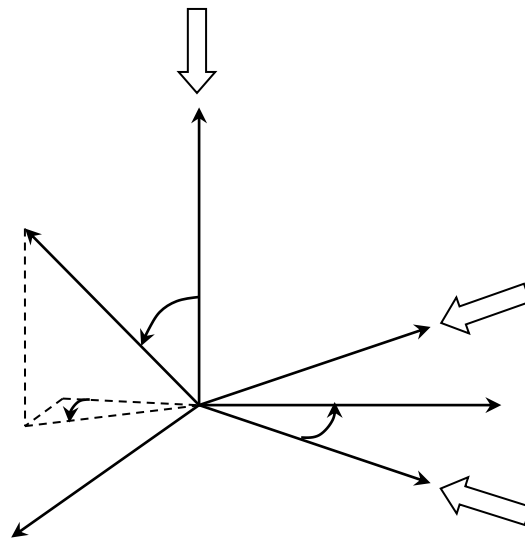


図 4.86 横亀裂の法線方向  $a$  と初期応力の関係

生じた亀裂が縦亀裂とみなされた 2 深度の水圧データから評価された初期応力環境は  $S_v > S_H > S_h$  の正断層型であり, 深度 400m 付近の最大水平応力の方向は N70W 方向であった。



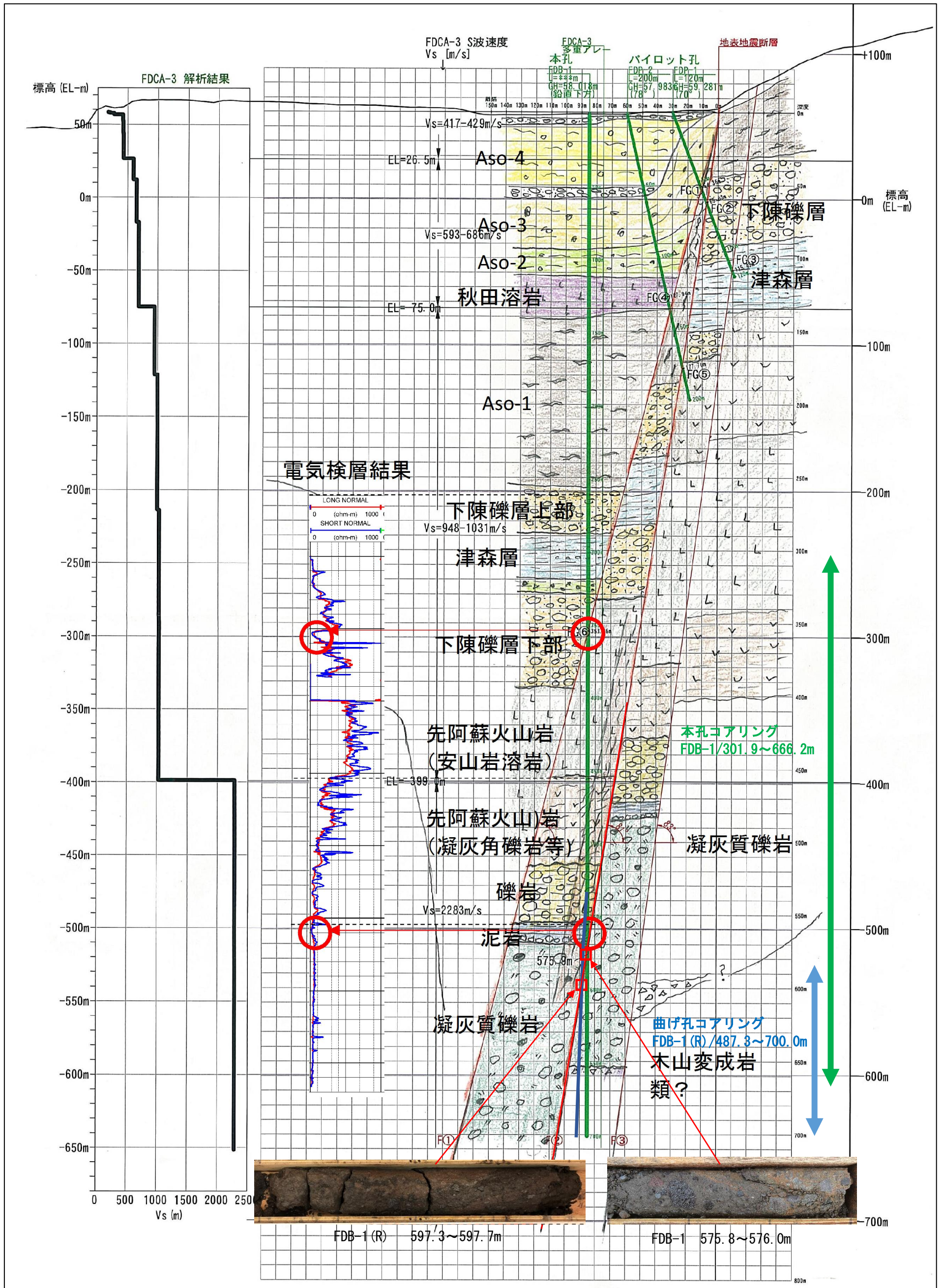


図 4.87 調査地の想定地質断面図