

平成 29 年度

高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業

(岩盤中地下水移行評価確証技術開発)

-ボーリング調査技術の確証-

平成 25 年度～平成 29 年度 とりまとめ報告書

APPENDIX

コントロールボーリング掘削・調査技術の体系化

— コントロールボーリングによる掘削・調査の基本的考え方 —

平成 30 年 3 月

一般財団法人 電力中央研究所

目次

本書について

1. はじめに.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 目的.....	1
1.3 開発目標.....	2
1.4 掘削・調査技術の特長.....	2
2. 精密調査地区選定段階の概要調査.....	4
2.1 概要調査の概要.....	4
2.1.1 概要調査の位置づけ、目的.....	4
2.1.2 調査項目、調査の流れ.....	5
2.1.3 ボーリング調査.....	7
2.2 概要調査における考慮すべき事項（要件）.....	7
2.2.1 考慮すべき事項.....	7
2.2.2 検討項目.....	8
3. 概要調査におけるコントロール掘削、調査.....	8
3.1 概要調査におけるコントロール掘削・調査の位置づけ.....	8
3.2 コントロール掘削・調査による地質環境特性の評価.....	11
4. 掘削・調査の手順.....	13
4.1 掘削・調査計画の立案.....	13
4.2 コントロール掘削.....	17
4.2.1 コントロール掘削の構成と概要.....	17
4.2.2 ダウンホールモーター.....	19
4.2.3 コアビット・コアバレル.....	20
4.2.4 拡径装置（アンダーリーマ）.....	21
4.2.5 ケーシング.....	22
4.2.6 ケーシング追従装置.....	23
4.2.7 押し込み補助装置.....	24
4.2.8 試錐機.....	25
4.2.9 コントロール掘削手順.....	27
4.2.10 掘削時の危機対策.....	29
4.3 掘削時検層.....	30
4.3.1 掘削時検層（MWD）の概要.....	30
4.3.2 掘削時検層装置（MWD）の構成.....	31
4.3.3 掘削時検層（MWD）のデータ取得.....	32

4.3.4	位置情報の補正	33
4.3.5	掘削時検層 (MWD) のデータ活用	34
4.3.6	掘削時検層 (LWD) の概要	35
4.3.7	掘削時検層 (LWD) のシステム構成	37
4.3.8	音波検層モジュール	38
4.3.9	電磁波検層モジュール	38
4.3.10	マイクロ電気検層モジュール	39
4.3.11	自然 γ 線検層モジュール	40
4.3.12	地上制御部	40
4.3.13	掘削時検層 (LWD) システムの設置手順	42
4.4	透水試験・採水・イメージング	43
4.4.1	透水試験・採水・イメージングの概要	43
4.4.2	透水試験・採水・イメージング装置の構成	45
4.4.3	透水試験ツール	46
4.4.4	採水ツール	47
4.4.5	イメージングツール	47
4.4.6	パッカーシステム	48
4.4.7	透水試験実施手順	48
4.4.8	透水試験区間の設定	50
4.4.9	採水実施手順	51
4.4.10	採水区間の選定	52
4.5	孔内応力・力学	53
4.5.1	孔内応力・力学測定の概要	53
4.5.2	孔内応力測定の構成	54
4.5.3	亀裂計測システム	57
4.5.4	送水システム	58
4.5.5	送り込み装置・ラッチシステム	59
4.5.6	孔内応力測定手順	60
4.5.7	孔内力学測定	62
4.6	孔井内トモグラフィ	65
4.6.1	孔井内トモグラフィの概要	65
4.6.2	孔井内トモグラフィの構成	65
4.6.3	孔井内トモグラフィの実施手順	70
4.6.4	孔井内トモグラフィデータの解析手順	73
4.7	モニタリング	84
4.7.1	モニタリングシステムの概要	84
4.7.2	モニタリングシステムの構成	86
4.7.3	モニタリングシステムの設置手順	91
4.7.4	観測区間 (裸孔区間) の選定	92
4.7.5	ケーシングロッド拡管	93

4.7.6	ケーシングロッド切断	94
4.7.7	ケーシングロッド引上げ	95
4.7.8	モニタリング計測開始までの手順	96
4.7.9	地下水及びガスの採取	97
4.7.10	分析・測定項目ならびに方法	102
4.7.11	モニタリングシステムの回収	104
4.8	モニタリング無人計測システム	106
4.8.1	モニタリング無人計測システムの概要	106
4.8.2	発電システム	106
4.8.3	蓄電池	111
4.8.4	データロガー	112
4.8.5	通信システム	115
4.8.6	遠隔監視・制御機能	117
4.8.7	ウェブカメラ	119
4.8.8	システム制御	120
4.8.9	筐体等	124
4.8.10	複数の調査孔の無人計測	124
5.	掘削・調査結果の評価	127
5.1	コントロール掘削の評価	127
5.1.1	孔跡の正確性	127
5.1.2	採取コアの評価	127
5.1.3	孔壁の保持	128
5.2	調査結果の評価	128
5.2.1	掘削時検層（LWD）データの分析評価	128
5.2.2	試験区間における透水性の評価	130
5.2.3	採水試料の分析・評価	130
5.2.4	孔内応力測定の評価	131
5.2.5	孔井内トモグラフィ測定結果の評価	132
5.2.6	モニタリングデータの整理	136
5.2.7	モニタリングデータの評価	136
5.2.8	取得データの解析	137
5.2.9	コアによる測定結果の評価	138

図表目次

図 2.1-1	三段階のサイト選定プロセス (NUMO, 2009 より)	4
図 2.1-2	処分地選定プロセス各段階の目的	5
図 2.1-3	概要調査における調査・評価フロー (工学特性)	6
図 3.1-1	堆積軟岩を対象とした概要調査	9
図 3.1-2	地形の制約下でのボーリング調査 (沿岸域)	10
図 3.1-3	効率的な地質情報取得のためのボーリング調査	10
図 3.1-4	坑道調査に先立つボーリング調査	10
図 3.2-1	コントロール掘削・調査と地質環境特性情報の取得	12
図 3.2-2	コントロール掘削・調査におけるデータフローダイアグラム	12
図 4.1-1	コントロール掘削・調査の概略手順	16
図 4.2-1	コントロールボーリングによる掘削概念	17
図 4.2-2	掘削用ダウンホールツールス	18
図 4.2-3	ダウンホールモーターの短尺経過	19
図 4.2-4	ダウンホールモーター性能試験結果	20
図 4.2-5	ウォーターウェイの変更状況	21
図 4.2-6	3重管コアバレル	21
図 4.2-7	水圧拡張装置改良と現状	22
図 4.2-8	ケーシングロッドの比較	23
図 4.2-9	ケーシング追従装置模式図	24
図 4.2-10	押し込み補助装置	25
図 4.2-11	弾性波トモグラフィハンドリングツール	25
図 4.2-12	試錐機概要と名称	26
図 4.2-13	断層掘削における危機回避、対応図	29
図 4.3-1	MWD ツールス全体図	32
図 4.3-2	ドリラーディスプレイの配置	33
図 4.3-3	方位・傾斜計測のためのジャイロ検層システム	33
図 4.3-4	MWD による方位計測値の補正とジャイロによる検証	34
図 4.3-5	掘削時検層 (LWD) システム概要図	36
図 4.3-6	計測システム構成	37
図 4.3-7	音波検層の発振概念	38
図 4.3-8	マイクロ電気検層の概念図	39
図 4.3-9	測定した音波・電磁波の受信波形および深度プロファイル	41
図 4.3-10	掘削時検層 (LWD) システム設置手順	42
図 4.4-1	透水試験・採水・イメージング装置の概要	44
図 4.4-2	透水試験・採水・イメージング装置の全体写真	46
図 4.4-3	透水試験・採水・イメージングの標準的な作業手順	50
図 4.4-4	断層による逸水の場合のパッカー設置から透水試験・採水までの手順例	51
図 4.5-1	孔内応力ユニットの挿入手順	54

図 4.5-2	孔内応力測定ユニットの全体構成の概念図	55
図 4.5-3	カメラの構造概念	58
図 4.5-4	ラッチシステム図面	60
図 4.5-5	統合化ツールの測定手順	64
図 4.5-6	変位計測の仕組み	64
図 4.5-7	孔内力学測定装置	64
図 4.5-8	計測結果の一例	64
図 4.6-1	中型バイブレータ震源	67
図 4.6-2	ハイドロフォンアレイツールの構成図	68
図 4.6-3	データ取得機器の接続概要図	70
図 4.6-4	ハイドロフォンアレイツールとデータロガーとの接続図	71
図 4.6-5	リグアップ装置の配置概要図	72
図 4.6-6	平成 23 年度データ取得試験における地表発振点及び受振点の配置図	72
図 4.6-7	データ解析の流れ	74
図 4.6-8	平成 23 年度データ取得試験における共通発振点記録の例	75
図 4.6-9	F-K フィルター適用前後の発振記録例	75
図 4.6-10	屈折波データ取得試験における発受振点の位置図	76
図 4.6-11	屈折波データ取得試験における取得波形の例	76
図 4.6-12	屈折波データ取得波形に対する前処理後の記録例	77
図 4.6-13	P 波初動走時トモグラフィ解析に用いたデータ取得範囲	79
図 4.6-14	P 波初動走時トモグラフィ解析における初期速度構造	80
図 4.6-15	P 波初動走時トモグラフィ解析の結果	81
図 4.6-16	フルウェーブインバージョンの流れ	81
図 4.6-17	屈折波トモグラフィ解析により更新された P 波速度構造	82
図 4.6-18	屈折波トモグラフィ解析の初期値に対する更新量（変化した割合）	82
図 4.6-19	CRS 法、MDRS 法の概要	82
図 4.6-20	反射法データ処理の流れ	83
図 4.6-21	既存処理により得られたマイグレーション深度断面	83
図 4.6-22	今回の処理により得られたマイグレーション深度断面	84
図 4.7-1	モニタリングシステム概要図	86
図 4.7-2	計測システム構成例（HMD-1 孔写真）	89
図 4.7-3	計測システム構成例（HMD-1 孔の例）	90
図 4.7-4	モニタリングシステム設置手順	91
図 4.7-5	火工品ツールス	93
図 4.7-6	電動カッターによる切断作業	94
図 4.7-7	チューブドラム	98
図 4.7-8	ポンプコントロールユニット	98
図 4.7-9	ダブルバルブポンプ作動原理	99
図 4.7-10	サンプラー	100
図 4.7-11	ウィンチ	101

図 4.7-12	クランプ止め装置	101
図 4.7-13	フロースルー型サンプラー断面図	101
図 4.7-14	フローセルによる物理パラメーター測定	102
図 4.7-15	パッカー収縮作業手順 (HCD-3 孔)	105
図 4.8-1	モニタリング無人計測システム概念図	106
図 4.8-2	賦存エネルギーの推定	109
図 4.8-3	蓄電池構成例 (HCD-3 孔向けシステムの場合)	112
図 4.8-4	HCD-3 孔向け無人計測システム用システムバッテリー	112
図 4.8-5	データロガー機能ブロック図	114
図 4.8-6	3G/4G 通信キャリア別サービス提供エリア	115
図 4.8-7	クラウドサーバーメニュー画面	118
図 4.8-8	計測データ表示 (現在データ)	118
図 4.8-9	計測データ表示 (トレンド)	119
図 4.8-10	ウェブカメラ画像 (左: 低解像度、右: 高解像度)	120
図 4.8-11	ウェブカメラによる積雪量測定	120
図 4.8-12	構成機器の動作タイミングチャート	122
図 4.8-13	システム制御フロー	123
図 4.8-14	筐体設計例	124
図 4.8-15	複数測定ポイント対応システム構成図	125
図 4.8-16	ローカル通信モジュール	126
図 5.2-1	堆積軟岩試料による間隙率と比誘電率との関係	129
図 5.2-2	掘削時検層による深度プロファイルと岩石コア試料による試験結果との対比例	129
図 5.2-3	トモグラフィ解析により得られた P 波速度とコア試料の P 波速度との比較	134
図 5.2-4	得られたコア試料、地表地質等から推定した地質構造断面図	135
図 5.2-5	反射断面と地質構造との比較	135
図 5.2-6	区間圧力データに対する影響要因	138

表 4.2.1-1	掘削システムの仕様	18
表 4.3.1-1	掘削時検層 (MWD) システムの概要	31
表 4.3.6-1	掘削時検層 (LWD) システムの概要	36
表 4.4.1-1	透水試験・採水・イメージング装置の概要	44
表 4.6.2-1	バイブレータ震源の仕様	67
表 4.6.2-2	ハイドロフォンセンサの仕様	69
表 4.6.2-3	データ収録装置の仕様	69
表 4.6.3-1	平成 23 年度データ取得試験における発振パラメーター一覧	73
表 4.6.3-2	平成 23 年度データ取得試験における記録パラメーター一覧	73
表 4.7.1-1	モニタリングシステムの概要	85
表 4.7.6-1	DECT ツールの仕様	95
表 4.7.9-1	ダブルバルブポンプ仕様	97
表 4.7.9-2	サンプラーの仕様	100
表 4.7.10-1	分析・測定項目及び採取方法	103
表 4.7.10-2	分析方法	103
表 4.8.2-1	全国 8 箇所の賦存エネルギー推定結果	108
表 4.8.2-2	HCD-3 孔向け無人計測システムの予想消費電力	110
表 4.8.2-3	HCD-3 孔向け無人計測システム発電機	110
表 4.8.2-4	豊富町日射量予測 (NEDO HP より抜粋)	111
表 4.8.4-1	モニタリング計測システム計測点仕様例	113
表 4.8.5-1	3G 通信装置	116
表 4.8.5-2	衛星通信装置比較	117
表 5.2.3-1	一般水質分析は分析項目および分析方法	131

本書について

本事業は平成12年度からコントロール掘削、調査技術に関する技術開発を実施してきており、各年度の機器開発とその適用性を検討するための現地での掘削・試験内容は受託報告書として取りまとめられている。また、開発過程を考慮して3つのフェーズに分割して行った技術開発が開発目標に到達したか、またその際にどのような課題が抽出されたかを確認して、フェーズ毎に電中研の総合報告書として機器開発状況や現地での適用性検討の結果が取りまとめられている。

これらの報告書は技術開発に焦点を当てて記述されており、実際にこれらの技術を運用する際これまでの個々の開発項目の開発経緯や全体システムの開発進展状況を概観することは容易でない。そのため、コントロール掘削、調査技術を実際に運用する際の参考に供するよう体系化をはかり、平成25年度にはそれまでの開発成果を掘削・調査手順書として取りまとめ、おおよそその実用化の目途をつけた。平成26年度からは、平成25年度に設置した孔内モニタリング装置による計測を開始した。平成26年度は、掘削、調査のための地上設備の撤去を行った後に孔内での間隙水圧計測を継続実施するとともに、概要調査を想定したモニタリングの無人観測システムの概念設計を実施した。平成27年度は孔内での計測を引き続き実施し、①無人観測システムを設置・運用および②地下水水質のベースラインを評価するための孔内採水と水質分析を開始した。平成28年度に、これらの孔内モニタリングの技術開発で得られた知見に基づき、コントロールボーリングに適用可能なモニタリングシステムの構築、維持管理、データ解析を含むモニタリングの体系化をはかり、実運用する際の基本的な考え方を孔内モニタリング手順書として取りまとめた。また、平成29年度にはモニタリングシステムの回収を通して得られた知見を孔内モニタリング手順書に追記するとともに、二つの手順書を統合した。

本書は二つの手順書を統合したもので、これまでに開発したコントロール掘削、孔内モニタリングを含めた調査技術を実際の処分地選定に際して実運用する際の手引書としてまとめている。実際にサイト選定調査を実施する技術者や管理者を想定しており、概要調査などの掘削、調査計画の立案に資するものである。

1. はじめに

1.1 背景

- (1) 概要調査は地表調査、物理探査と数少ないボーリングにより実施される。
- (2) 堆積軟岩、沿岸域における調査技術の開発が必要とされている。

(1) 処分場選定の第2段階での精密調査地区選定段階では、前段階の文献調査の結果を受けて、設定された概要調査地区において地表地質踏査、物理探査、トレンチ調査および数少ないボーリングにより地点の処分場としての適正を評価する必要があり、特に地下の情報を直接取得できるボーリング調査が重要となる。数キロ程度の敷地内で効率的なボーリング掘削、調査が求められる。

(2) 日本における処分場の対象岩体として新第三紀の堆積岩は、細粒の碎屑物からなる泥岩などが低透水（水密性）であること、構造的な変形が少ないことから、好ましい岩体と考えられている。また日本においてはこのような地層は海岸沿いに分布することが多い。処分の観点からは、沿岸域は廃棄体の輸送、フラットな動水勾配、人間侵入の困難さから有望な地形条件である。このような地質、地形条件における調査技術の開発が急務となっている。

1.2 目的

堆積軟岩にも適用できる、効率的（方向性をコントロールできる）ボーリング掘削技術および調査技術を開発する。

ボーリング掘削に際して軟岩は硬岩に比べて孔壁が不安定で崩れやすいことから、掘削が困難な岩体である。さらに、方向性をコントロールしながらの掘削に際しては、直進性の掘削に比べて孔壁をより痛めやすく、保孔がより困難になる。このような条件下で、安定した掘削を可能とする掘削技術を確立する。

孔内における調査技術は、主として鉛直孔井を対象として開発が進められてきており、コントロール掘削特有の掘削方法や孔跡を含むケーシングプログラムに対応した調査技術の開発が必要となる。また、堆積軟岩の特性を評価するためには、採取したコアを用いた調査、測定、分析などが有効となるために、コアを用いた効率的かつ合理的な調査システムを構築する。

1.3 開発目標

- (1) 対象岩体：新第三紀堆積岩
- (2) 孔曲げ掘削：孔長1000m、深さ500mのコントロール掘削
- (3) コアによる調査の重要性：フルコア掘削
- (4) 効率性と安全性：スリムホール掘削
- (5) 各種特性調査：孔内での掘削時調査およびモニタリングが可能

(1) コントロール掘削の困難な地質として、さらに処分の対象岩体となりうる地質として、一軸圧縮強度100kg/cm²程度の新第三紀堆積岩を掘削対象岩体とする。

(2) 堆積岩地域での処分深度が300m~500mと想定されていることから、掘削深さを500mに設定する。また地上のリグの能力の観点から掘削孔長を1000mと設定する。

(3) 堆積性軟岩では、地下水の一般水質や岩盤の物理特性はコアを用いた試験により評価が可能と考えられる。このために、フルコアによる掘削を行う。なお、コア採取時の各特性に関する乱れを極力少なくするための手法を採用する。

(4) 石油業界では同様の掘削技術が既に確立されているが、孔井の口径が8~10インチである。本開発では、土木調査用に開発されている技術を転用することから、よりスリムな口径(6インチ程度)を採用する。

(5) 本技術開発は高レベル放射性廃棄物の処分地選定の第2段階である概要調査に供することから、その際に必要な地質環境特性を評価できる調査機器の開発を行う。

1.4 掘削・調査技術の特長

- (1) 主に堆積軟岩を対象として、方位および傾斜（鉛直~水平）を制御した掘削が可能である。
- (2) 回転系がコアバレルの直上にあり、従来の掘削に比べ軸のブレが少なく、かつ地下における掘削情報をMWDにより取得することが出来る。

(1) 回転系と孔曲げ用のサブストラクチャー、さらに方位・傾斜情報をリアルタイムで取得できるMWDを掘削先端に取り付け、ケーシングがこれらを追随することで、正確な方位コントロールおよび安定した保孔を可能とする。なお、孔曲げ曲率はダウンホールツールの直径と長さおよびケーシングの内径の関係から約1.5°/10mである。

(2) 地上での回転力を鋼管ロッドで地下に伝える従来の工法に比べると、回転系であるモーターがコアバ

レルの直上にあることから、軸のぶれが少ない。また、MWDにより掘削箇所での孔内圧力、掘削荷重、トルクなどの掘削情報をリアルタイムに取得ができ、情報化施工が可能である。コアバレルの軸のぶれが少ないことと孔内情報により掘削を最適化することにより、コア採取が飛躍的に向上する。

2. 精密調査地区選定段階の概要調査

2.1 概要調査の概要

2.1.1 概要調査の位置づけ、目的

高レベル放射性廃棄物処分のサイト選定は①概要調査地区の選定、②精密調査地区の選定、③最終処分施設建設地の選定の三段階の過程を経て、処分施設建設地が決定される。概要調査はのうち②精密調査地区を選定するための調査である。

概要調査の目的は、地層処分を行おうとする地層において「地質環境の長期安定性」と、「多重バリアシステムの成立性」の確保が可能であることを確認することである。

サイト選定のための三段階の選定プロセスを以下に示す。

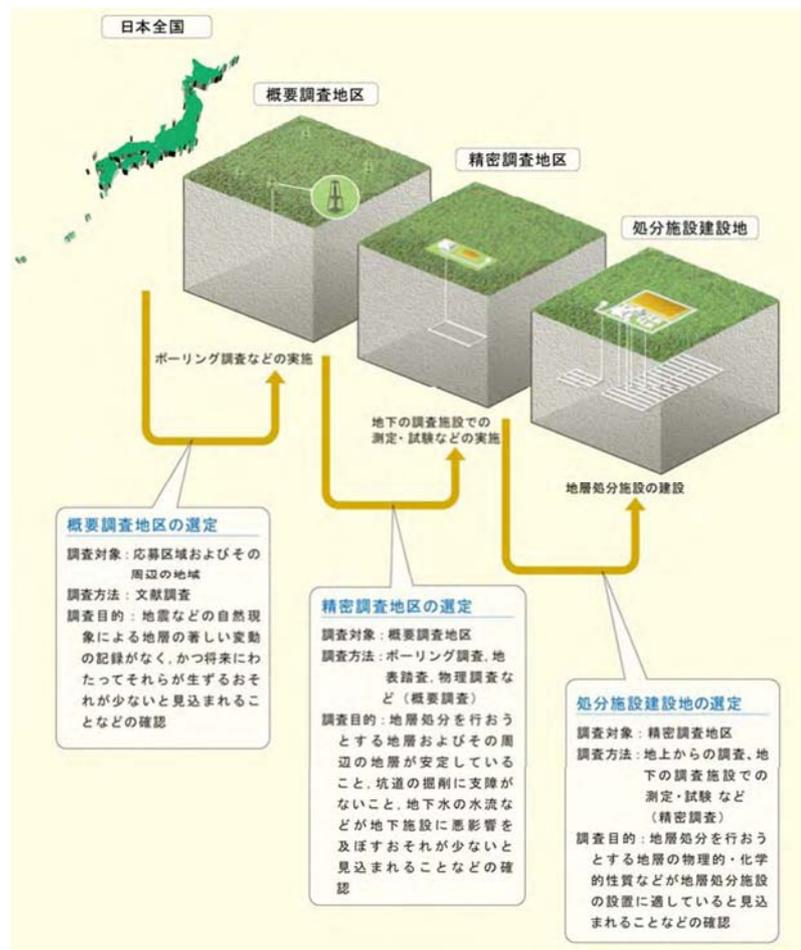


図 2.1-1 三段階のサイト選定プロセス (NUMO, 2009 より)

概要調査は、地点選定の中間段階であり、その後実施される精密調査によって2つの特性に関する最終確認がなされ、最終処分場候補地が選定される。

「地質環境の長期安定性」については、文献調査段階でその可能性についてほぼ解決できると考えられるため、本段階では現地において文献調査結果を補完、確認することが主体となる。

「多重バリアシステムの成立性」のうち「施設の成立性」については、文献調査の予察に引き続き、本段階でその可能性を確認することとする。「処分システムが期待性能を発揮できる事」については、地下の詳細情報が取得できる精密調査段階にその確認を待つことになり、本段階では予備的な確認を行うこととなる。

調査対象地域	調査手法	選定段階	調査目的		
			地質環境の長期安定性の確認	施設の成立性の確認	処分システムが期待性能を発揮できる事の確認
全国	文献調査	概要調査地区選定段階	ほぼ解決	予察	予察
概要調査地区		精密調査地区選定段階	補完・確認	ほぼ解決	概略の確認
精密調査地区	ボーリング調査等	最終処分施設建設地選定段階	補完・確認	補完・確認	解決
処分地					

図 2.1-2 処分地選定プロセス各段階の目的

2.1.2 調査項目、調査の流れ

- (1) 実施される調査は、地表踏査、物理探査、トレンチ調査、ボーリング調査である。
- (2) 段階的に広域から狭域(応募区域内)に地区を絞り込む調査を基本とする。

概要調査においては、予備的な設計、性能評価を実施する。このために概要調査地区やそれより広域な調査範囲から、最終的には処分候補箇所を選定する必要がある。このためには、広域での地表調査や物理探査から、狭域でのトレンチ調査、ボーリング調査と地点を効率的かつ合理的に順を追って絞り込む調査を実

施する必要がある。また、このような調査手順により、調査結果を用いた地質特性モデルの精度を順を追って高めることができる。

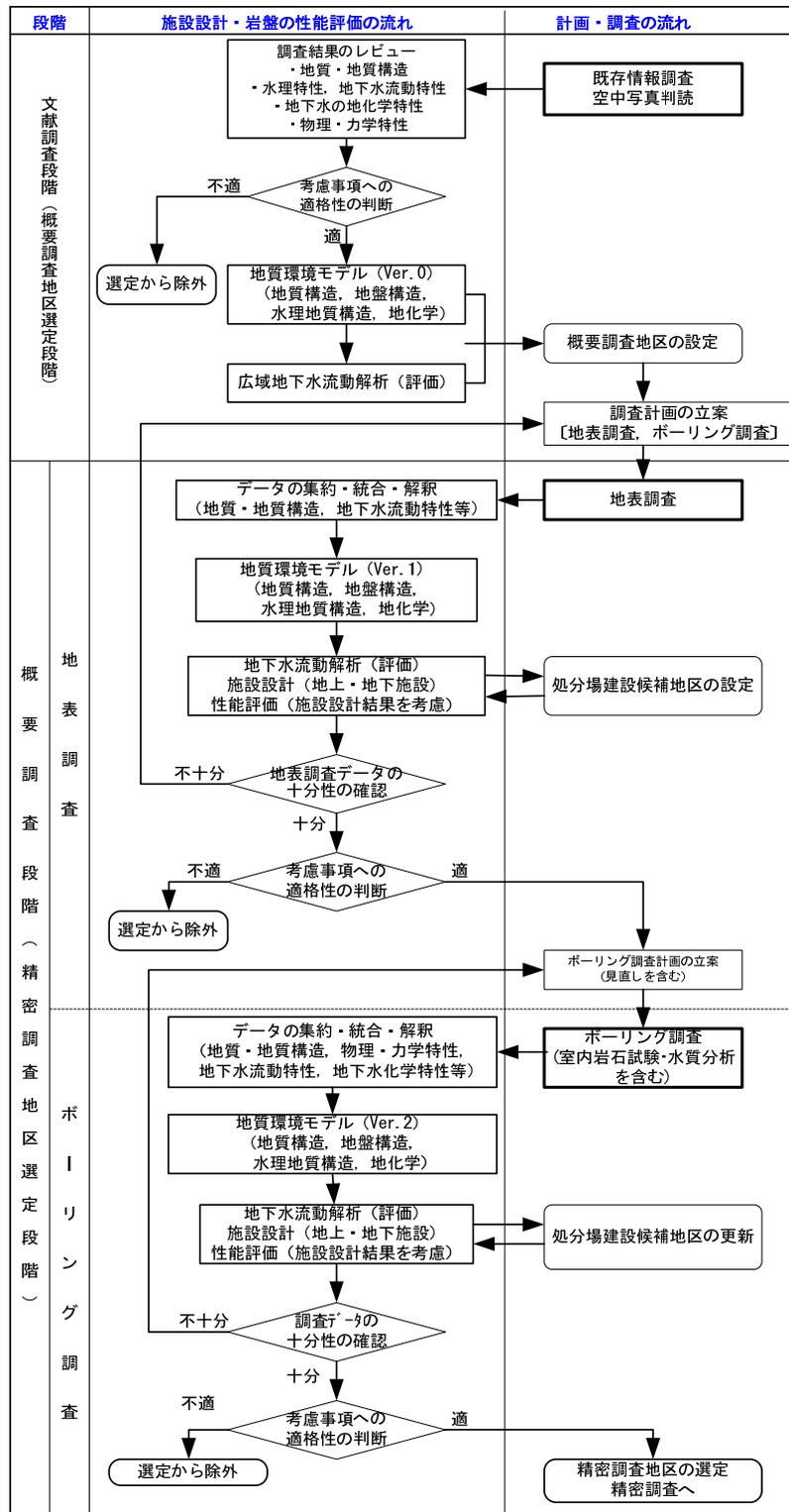


図 2.1-3 概要調査における調査・評価フロー (工学特性)

2.1.3 ボーリング調査

概要調査において、ボーリング調査は地下の地質環境特性に関わる情報を直接取得できる手段として重要である。時間的、予算的な制約を考慮すると、効率的な掘削・調査が望まれる。

ボーリング調査では地質環境特性に関わる以下の情報を取得する。

- ・堆積物、地層の分布・性状
- ・不連続面(断層破碎帯、割れ目)や弱層の分布・性状
- ・水理特性、地下水化学特性
- ・物理・力学特性、初期地圧

ボーリング掘削は以下のように2段階に分けて実施するのが望ましい。

(1) 1次：物理探査の結果を踏まえて、これまでの結果の確認と地質および処分場候補個所の概略を把握する。一方、物理探査、特に反射法地震探査の結果を参照するために、事前に孔井掘削することが効率的調査につながる場合がある。

(2) 2次：1次調査の結果を踏まえ、処分場候補個所における概念設計や予備的な評価に必要な情報を取得する。

効率的な掘削のため、一箇所の掘削で多くの目的を満足させため、掘削個所は、物理探査測線の交点を基本とする。鉛直掘削を基本とするが、沿岸域、山岳地などの地形的な制約がある場所や地質情報を取得するためには傾斜掘削やコントロール掘削を実施するのが望ましい。

2.2 概要調査における考慮すべき事項（要件）

2.2.1 考慮すべき事項

概要調査に当たっては、「考慮すべき事項」および「好ましい条件」を設定し、これに基づき調査、評価を行う。

明らかに処分場として適さない地域が適切に除外されているか確認し、追加して除外すべき地域がないか検討するための条件を「考慮すべき事項」と呼ぶ。また、処分施設の建設や、閉鎖後の安全性を考える上で好ましいと思われる諸条件を「好ましい条件」と呼ぶ。

2.2.2 検討項目

処分場に関連する施設のうち、地下施設に関する検討項目は「火山・火成活動」、「地震活動」、「断層活動」、「隆起・沈降、侵食」、「地下水流動」、「地化学特性」、「岩体の形状・規模と岩盤の力学特性」、「膨張性地山」、「山はね」、「有毒ガス湧出」、「泥火山」などである。

各検討項目について、除外すべき事項に関わる調査項目を優先し、これを評価するための調査手法を主体として調査を実施する。

3. 概要調査におけるコントロール掘削、調査

3.1 概要調査におけるコントロール掘削・調査の位置づけ

本掘削・調査システムは堆積性の軟岩を対象に開発されたもので、このような地質を対象とした地域での概要調査に適用する。

本システムは、①地形的な制約のある箇所、②効率的な地質情報の取得、③調査坑道に先立つ事前情報の取得などに有効な掘削・調査手法である。

概要調査においては、文献情報収集や地表地質踏査、さらには物理探査を実施し、当該地域の対象岩体の概略地質構造モデルから概略水理地質構造モデルを構築した後に、ボーリング掘削と孔内での各種調査により、詳細な水理地質構造モデルを構築し、さらにこれを基に地下水流動モデルや地下空洞安定性評価を実施することとしている。特に堆積性軟岩である新第三紀堆積岩を対象岩盤としたボーリング掘削および調査では、孔内調査はもとよりコアを用いた調査・分析により、地質分布、透水分布、水質分布、岩盤物性、応力のそれぞれの分布を調査、評価する（図 3.1-1）。

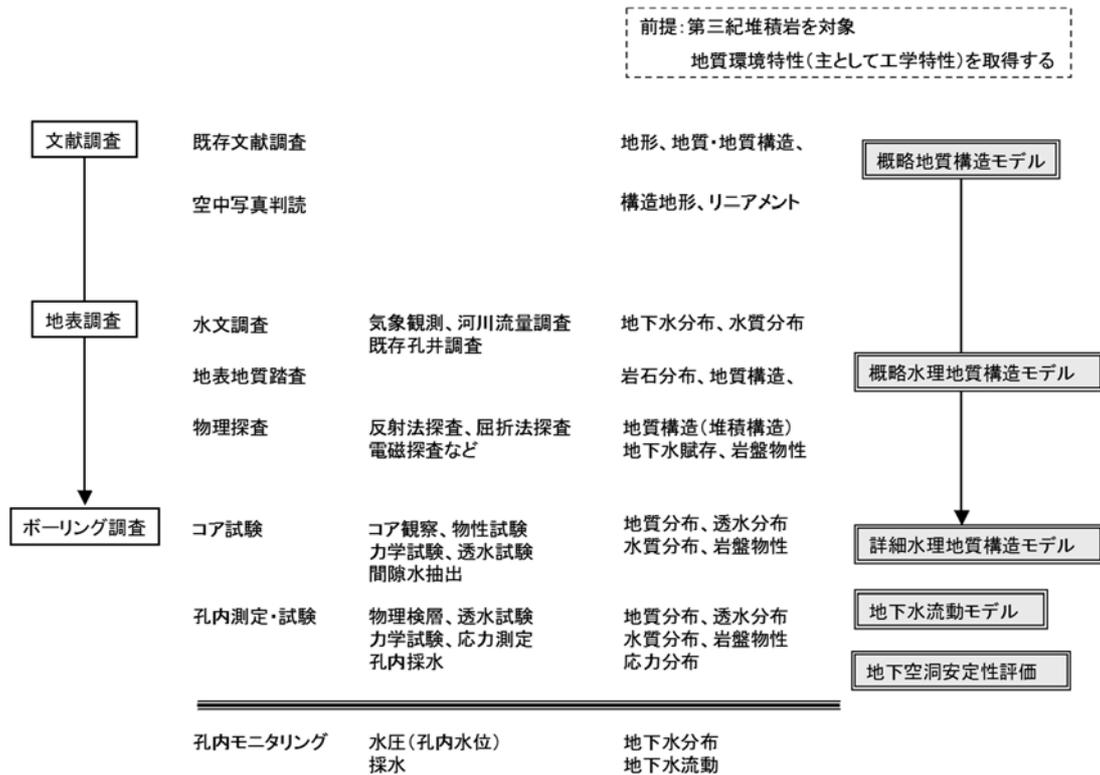


図 3.1-1 堆積軟岩を対象とした概要調査

コントロール掘削は鉛直掘削に比べて、その方位や傾斜をある程度の尤度をもって変化させることが出来る。このため、

- ①地形の制約を受けない掘削が可能となる。すなわち、沿岸地域において海底下での調査を行う際に、陸域から海底下の調査が可能となる。また山岳地において、大型の試錐機などの運搬が困難な場合、可搬可能箇所から調査箇所への指向性掘削が可能である（図 3.1-2）。
- ②地質状況に依存するが、高角傾斜の断層破碎帯が多数分布する場合などでは、鉛直掘削の調査に比べて地質の不確実性をより低減できる（図 3.1-3）。
- ③概要調査終盤に処分場候補箇所において概念設計などのためのボーリング調査を実施することとなった場合、コントロール掘削により、将来に想定される調査坑道の事前調査として水平掘削をすることにより、より高精度の地質環境特性を評価することが可能となり、調査坑道の設計に資することができる（図 3.1-4）。

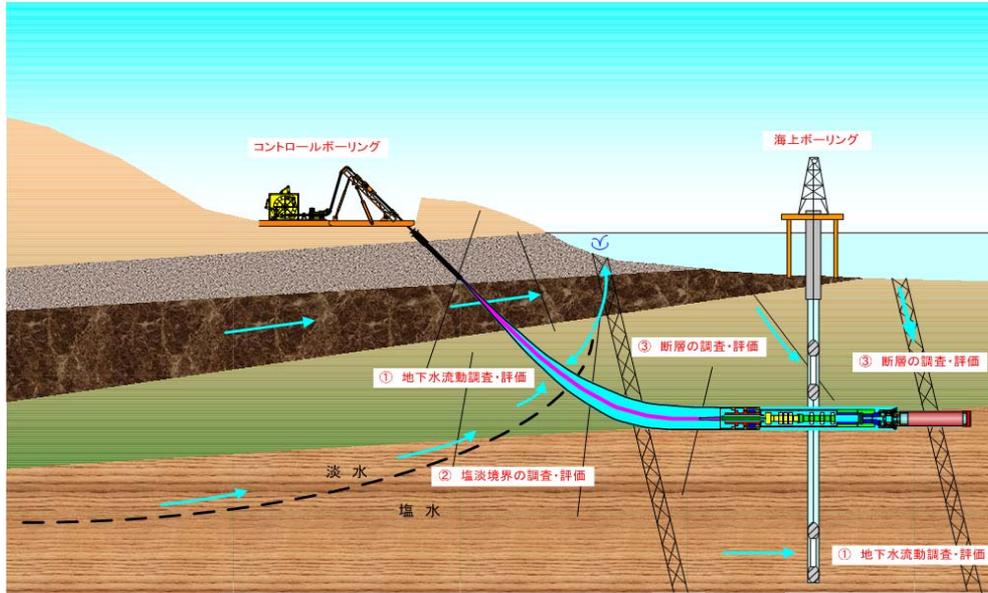


図 3.1-2 地形の制約下でのボーリング調査（沿岸域）

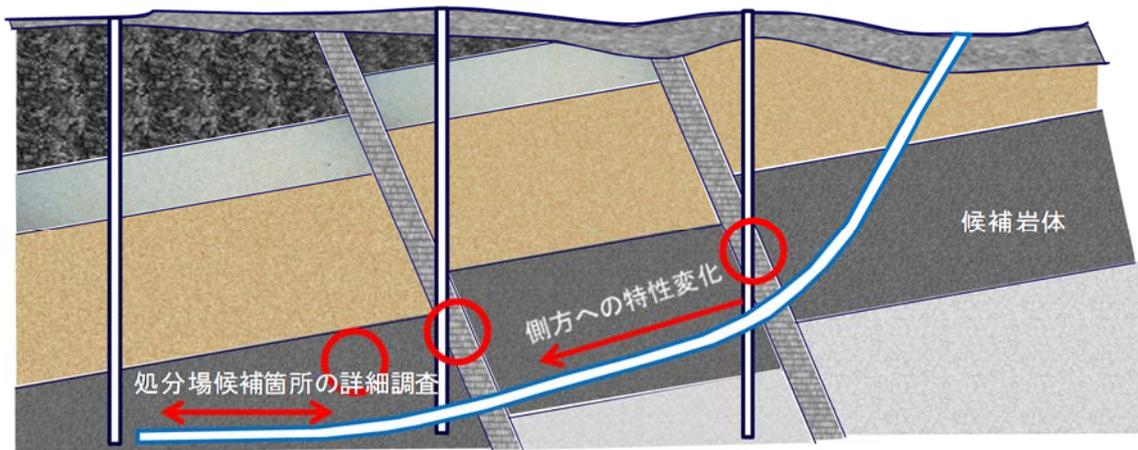


図 3.1-3 効率的な地質情報取得のためのボーリング調査

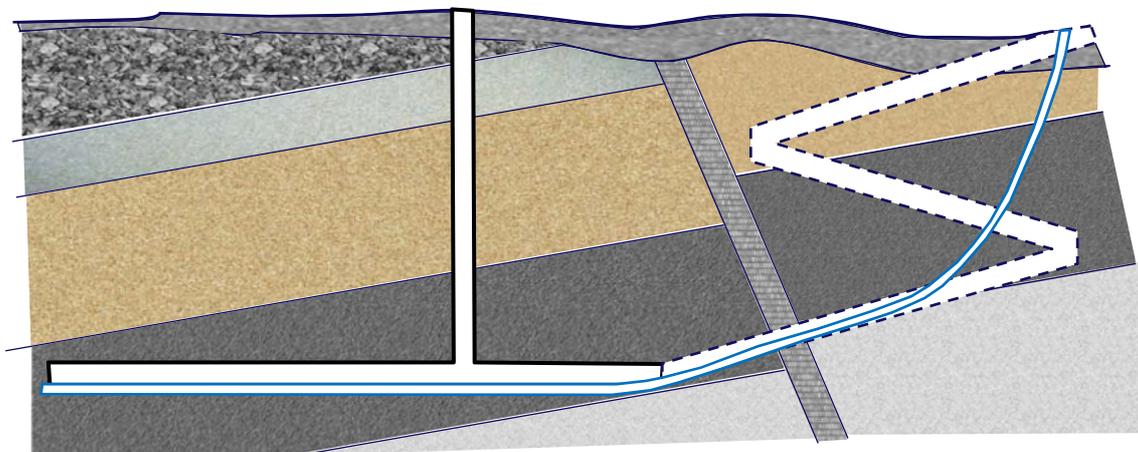


図 3.1-4 坑道調査に先立つボーリング調査

3.2 コントロール掘削・調査による地質環境特性の評価

コントロール掘削・調査により、概要調査において設定された検討項目をほぼ評価するに足る情報を取得する。

コントロール掘削・調査では、掘削時検層、掘削後の孔内における検層、測定、取得したコアを用いた測定、分析などにより、地下の地質環境特性に関する情報を取得する。

コントロールボーリングによる掘削時に常時取得できる情報としては、マッドログ（泥水の送、排水量、泥水中のガス量、地上のロッド回転数など）、WL-LWD（孔内検層：音波、電磁波など）および WL-MWD（先端位置、ビット加重、トルク、孔内圧力など）である。

これらの情報、さらには取得されるコアの地質情報を基に、スポット調査をする必要のある深度が決定される。孔内でのスポット調査としては、①透水試験、②地下水採取、③孔内観察、④孔内応力測定および⑤孔内載荷である。このうち①～③、④～⑤は同一の装置により実施が可能な装置を開発している。また、②により採取された地下水や溶存ガスは室内で分析される。

コントロールボーリングはコア掘削を基本としており、連続したコアが採取できる。このコアを用いて、①コア観察（写真撮影を含む）、②現地計測、測定および③室内測定、分析を実施する。測定項目としては①色彩、帯磁率および硬度、②透水係数、間隙水抽出および水質分析、岩石物性（弾性波伝播速度、密度など）、岩石強度（一軸圧縮強度など）、鉱物分析などである。

掘削終了時には、孔井の形状を利用して、地表と孔井に取り囲まれた範囲において、弾性波トモグラフィを実施し、範囲内の速度構造を詳細に決定し、地点選定や孔跡決定のために実施された反射法地震探査の結果を再評価する。

これらの測定、分析などの調査を通して、地点の地質構造、水理構造、岩盤物性および応力場を評価することが可能となる。また、これらの結果を踏まえ、孔内でのモニタリング深度が決定される。モニタリング項目としては、孔内における水圧および地下水採取であり、長期間のモニタリングにより水圧の長期的な変動や掘削直後には取得できない初生的な地下水を取得する（図 3.2-1）。

コントロール掘削に伴い実施される調査項目と、それにより取得されるデータ、これらのデータにより評価できる特性項目をデータフロー（図 3.2-2）として示した。

4. 掘削・調査の手順

4.1 掘削・調査計画の立案

地表からの調査、さらには他のボーリング調査の結果から構築された初期地質モデルの不確実性を効率よく低減できる孔跡を設定し、これに沿った掘削、調査計画を立案する。

掘削・調査は時系列的に、準備作業、ノンコア掘削、コアリングコントロール掘削および孔内調査、孔内長期モニタリングに区分される。

(1) 準備作業

準備作業としては、①それまでに実施される地表地質踏査や物理探査などの調査結果で構築された地質モデルに基づき不確実性を効率よく低減するための孔跡の設定、②浅層の堆積物や風化状況、基盤の断層破碎帯などの劣化部の分布などを考慮したケーシングプログラムの策定、③敷地の造成、地上設備の設置などがある。特に①については、敷地の確保を踏まえた孔跡決定の必要がある。

(2) ノンコア沿角掘削

ケーシングプログラムに沿って、地表の浅層で、地盤の状態の悪い箇所の孔壁崩壊を防ぐために、NL140 ロッドが通過できるケーシングパイプを挿入するための孔井を掘削し、フルホールセメンチングを行う。当該区間は掘削孔径が大きくなるために、コントロール掘削のためのダウンホールツールが適用できないため、

(3) コアリングコントロール掘削およびコア・孔内調査

予め設定された孔跡に沿って掘削編成のワイヤラインダウンホールツールによりコントロール掘削を行う。孔内透水試験・採水および孔内応力測定は、事前に作成した試験区間設定マニュアルに沿って試験を実施する。なお、掘削中に想定外の地質事象に遭遇し、情報収集の必要性が認められた場合は、適宜試験、測定を追加する。

採取されたコアは急速な劣化を防ぐために、真空パックにより保存し、必要に応じて真空パックから取り出し、コア観察、コア写真撮影、現地測定、室内分析用のコア採取を行い、その後は再度真空パックにより保存する。

掘削が終了した時点で、孔井と地表間での速度構造を決定するための弾性波トモグラフィを行うため、ケーシングで保孔された孔内に多連のハイドロフォンを降下させる。得られたデータにより速度構造を高精度化し、これにより予め実施された反射断面を再解析する。

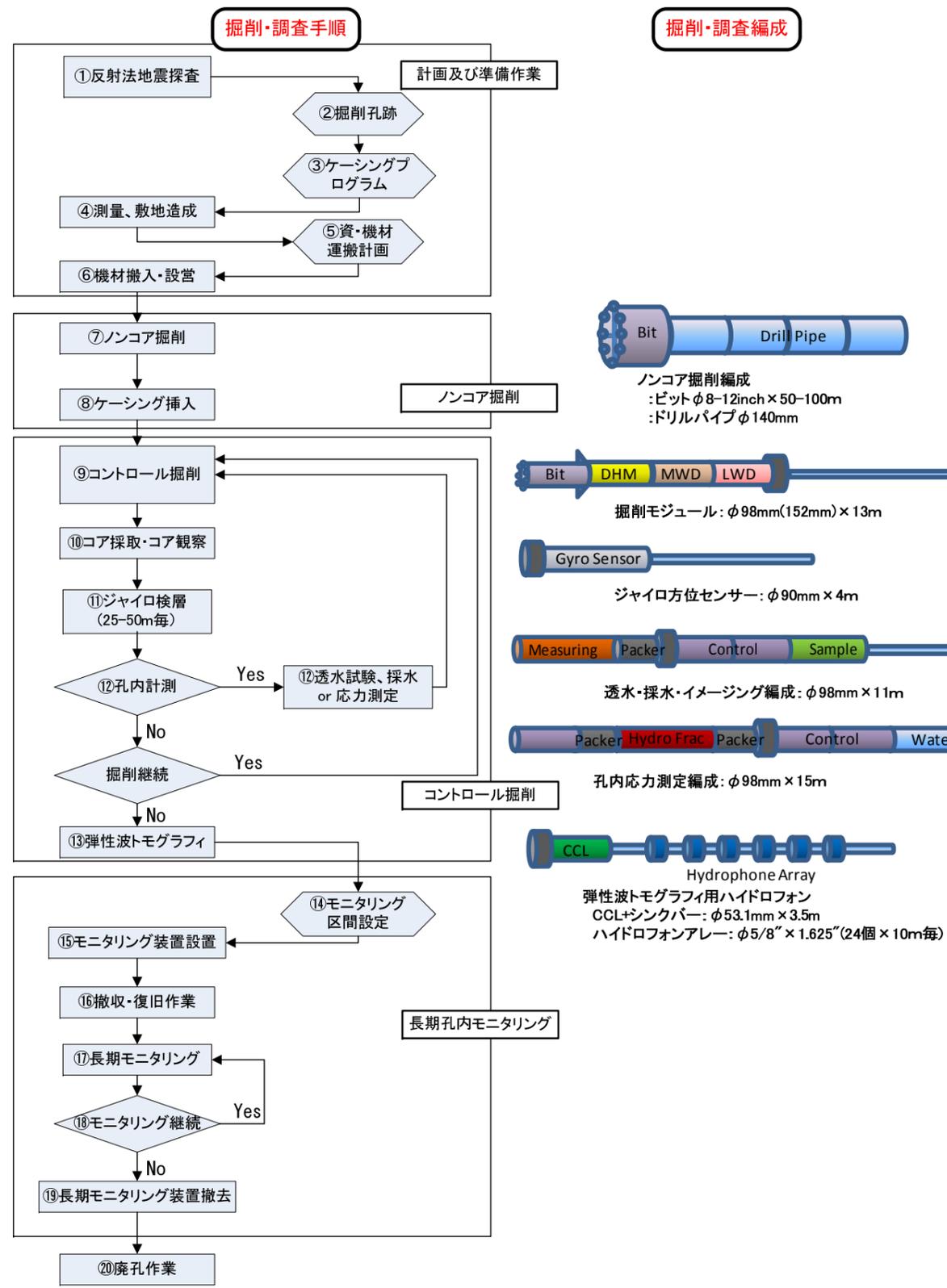
(4) 孔内長期モニタリング

孔内調査、コア調査の結果に基づきモニタリング区間を仮設定し、キャリパー検層により孔内状況を確認

認したうえで計測区間を設定する。孔内において裸孔を構築した上で、モニタリングシステムを設置する。

その後掘削用の地上設備を撤去した上で、無人モニタリング観測システムを設営し、長期のモニタリングを開始する。

設定された期間が終了したのちに、廃孔作業を行い、敷地を原形復旧する。



- ### 掘削・調査編成
- ①反射法地震探査
 ・堆積岩の分布する地域では、効率的な孔跡を計画するために反射法地震探査で地質構造を把握する。
 ②掘削孔跡、③ケーシングプログラム
 ・地表からの沿角、ノンコア掘削とその後のコントロールコアリング掘削の組み合わせを基本とする。
 ・処分場箇所の深度や周辺の地質構造を考慮して、孔跡、ケーシングプログラムを決定する。必要な情報としては、沿角掘削の初期傾斜角、掘削長、孔径およびコントロール掘削の曲率などである。
 ④測量、敷地造成
 ⑤資・機材運搬計画
 ⑥機材搬入・設営
 ⑦ノンコア掘削
 ・浅部における地質環境に関する情報が必要のないと判断された区間はノンコア掘削とする。
 ⑧ケーシング挿入
 ・ノンコア掘削後に、最終孔径がNL140ロッドを許容する孔径のロッドを所定深度まで挿入する。
 ・ケーシング挿入後、フルホールセメンティングでケーシングを固定する。
 ⑨コントロール掘削
 ・MWDおよびLWDを装着したDHAとしてコントロール掘削を実施する。なお、水平区間でのコントロールが困難な場合は、LWDを編成からはずし剛性を高めて掘削する。
 ・掘進率を上げるために水圧を高めトルクを上げることにより、水圧破砕が生じて掘削水が逸脱する危険性がある。このため、水圧を適正にすることが肝要である。
 ・コアバレルを短くすることにより、短期間に孔曲げを行うことが可能となるが、急激な孔曲げによるコアの破断やコアぼそりに注意する必要がある。
 ⑩コア採取、コア観察
 ・堆積軟岩は風化により急速劣化することから、写真撮影や観察は短時間に実施し、それ以外のときは、真空中で冷暗所での保存が望まれる。
 ・また、現地計測、実験室での測定・分析のためのサンプリングなどは、体系的に実施するためのマニュアルを作成し、それに沿って迅速に実施する。
 ⑪方向確認、ジャイロ検層
 ・MWDの方位誤差を補正するために、50~100mごとにジャイロによる計測を行い、全体の方向を補正し、掘削を継続する。
 ⑫透水試験・採水 or 応力測定
 ・あらかじめ構築した計測区間設定フローに沿った深度において試験を実施する。
 ・パッカーの設置に際しては、採取されたコアの割れ目状況を考慮する。
 ⑬弾性波トモグラフィ
 ・反射法地震探査の解析精度を向上させるための速度構造情報を取得するために、孔内に降下させたハイドロフォンアレーと地表の発信を利用した弾性波トモグラフィを実施する。
 ⑭モニタリング区間設定
 ・掘削時に実施した透水試験(間隙水圧)結果や、地質分布を考慮して、区間設定する。
 ・裸孔を構築しモニタリングする場合は、各種装置が自重で降下する区間内に設定する。
 ⑮モニタリング装置設置
 ・モニタリング装置はインチにより挿入するが、トラブル対応のためにリグを残しておく。
 ⑯撤収・復旧作業
 ・モニタリング装置の設置には掘削リグが必要なため、現地撤収はモニタリング装置設置後とする。
 ・孔井周り(セーラー)はモニタリング中は撤去しない。
 ⑰長期モニタリング
 ・モニタリング項目は、間隙水圧および水質とする。
 ・間隙水圧は、初期にはバックランドを計測し、その後周囲の環境変化に伴う間隙水圧変化により周辺の水理構造を評価する。
 ・水質については、長期モニタリングにより、掘削水の影響を排除した水質を評価する。
 ⑱モニタリング継続
 ・モニタリング期間は、目的により異なる。ただし周辺の環境変化を捉えることが主眼となる場合は、モニタリング期間は精密調査の後半以降までとなる。
 ⑲モニタリング装置撤去
 ・パッカー圧を解放したのちに、インチにより引き抜く。
 ・装置を撤去したのちに孔井を閉塞する場合は、ケーシングを抜管する必要があるが、その方法は未検討である。
 ⑳廃孔作業
 ・鉱山法に則り実施する。孔内を重泥水などで置換し、上部はセメントでプラグする。
 ・処分候補地では、ケーシングの抜管を含めた、孔井の閉塞作業が必要となる。
 ・孔口付近のケーシングをカットし、覆土により原形復旧する。

図 4.1-1 コントロール掘削・調査の概略手順

4.2 コントロール掘削

4.2.1 コントロール掘削の構成と概要

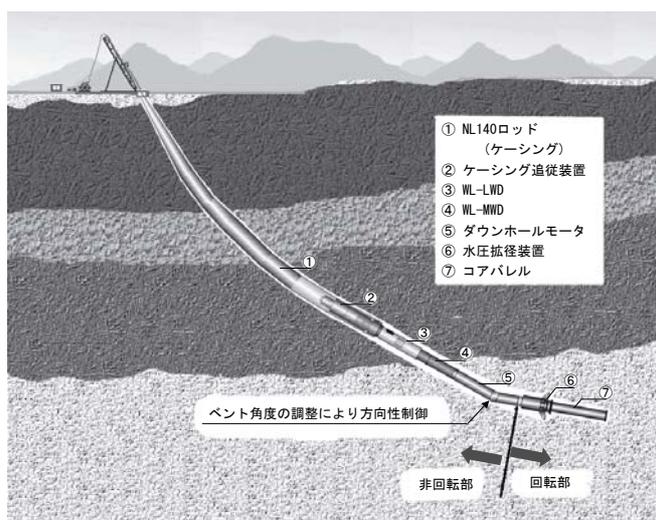
(1) コントロール掘削の構成

本システムは、①ケーシングパイプ、②ダウンホールツールズ、③ワイヤラインおよび地上での④掘削リグより構成される。

(2) 掘削概要

回転力を有し、方向性を制御できるワイヤラインダウンホールツールズをケーシングパイプの先端に取り付け、孔壁を保護しながら方向性を変化させる掘削工法である。

コントロールボーリングシステムは概略①掘削した孔壁を保孔するためのケーシングパイプ(以下CP)、②掘削や先端探知を行うためのダウンホールツールズ、③ダウンホールツールズを上げ下げするためのワイヤラインおよび地上の④掘削リグから構成される(図 4.2-1)。



ダウンホールツールズは下部よりコア採取のためのコアビットおよびコアパレル、拡張のためのアンダーリーマ、掘削の動力のためのダウンホールモーター (DHM)、先端の位置や掘削情報を得るための WL-MWD (Wire Line - Measurement While Drilling)、孔底における地質情報を得るための WL-LWD (Wire Line - Logging While Drilling) より構成される(図 4.2-2)。

図 4.2-1 コントロールボーリングによる掘削概念

掘削時のダウンホールツールズはラッチシステムによりケーシングシュー (ケーシング先端) に固定される。CP 内に圧入された泥水は WL-LWD および WL-MWD の内部を通過し DHM に回転力を与え、さらに一部がコアビットに供給される。これらの泥水は孔壁と CP の隙間 (アニュラス) から地表に戻る。

DHM には 0~3° 程度軸を傾斜させることのできるベントサブが併設されており、この組み合わせによってビットをある方向に傾斜させたまま掘削することが可能となる。常時 WL-MWD により傾斜角と方位角を計測し、座標位置を継続して計算することにより孔跡を把握することができ、方位のコントロー

ルが可能となる。

コアバレルにコアが充填した時点で、コアを回収するためにダウンホールツールスをワイヤラインにより引き上げる。孔井が最終的に水平孔になるため、押し込み力を伝達することが可能になるように泥水の圧入によりダウンホールツールスを押し込むことが出来る送り込み装置（ポンプ-インシステム）を開発・採用した。またダウンホールツールからの情報の伝送、ダウンホールツールスへの電力の供給のために、ワイヤライン（アーマードケーブル）内部に電源線や光ファイバーなどが内蔵される。



図 4.2-2 掘削用ダウンホールツールス

表 4.2.1-1 掘削システムの仕様

編成	コアビット・バレル、水圧拡張装置、ダウンホールモーター、WL-MWD、WL-LWD（必要に応じて）、ラッチ、送り込み補助装置（緩傾斜～水平）、ケーブルヘッド
装置寸法	長さ：16m（最大）、外径：φ89~104mm
掘削径	コアリング：φ89mm 拡張径：152mm
コアリング	コア径：φ52mm（HQ） コアバレル長さ：1m、2m、3m（コア採取長に応じ）
ケーシング	NL140 ロッド 外径：φ140mm 内径：φ125~130mm（内アップセット） 長さ：3m
材質	スチール、MWD 外郭は非磁性材料(Nibron)
その他特記事項	拡張装置は水圧により拡張が可能

4.2.2 ダウンホールモーター

孔内で回転力を得るために、泥水の送水圧で回転が可能なダウンホールモーター（DHM）を採用し、本体に偏角用のベントハウジングを設けた。

通常のボーリング掘削のように地上での回転動力および推力をケーシングロッドにより地下に伝達する手法をコントロール掘削に適用すると、特に軟岩では孔壁をロッドにより打撃し、孔壁崩壊の原因となる。このために、掘削先端部で回転力を得るために、ダウンホールアセンブリーの一部としてダウンホールモーターを採用した。

DHMは既存製品を以下の条件に合うように改良すること前提として開発を進めた。

- ①本体長さは、2.5m以内とする、②本体外径は他の装置にあわせ 88.9mm とする、③送水量は分水装置により減衰できる範囲内で 400L/min 以下を目標とする、④回転トルクは最大値で 40kgf-m 以上とする、⑤回転数は 300r. p. m. 以下で送水量により調節可能であること。

以上の条件を踏まえて、装置の短縮および改良を実施し、地上および模擬孔井出の試験を行い、最適な使用条件を確認した（図 4.2-3、図 4.2-4）。

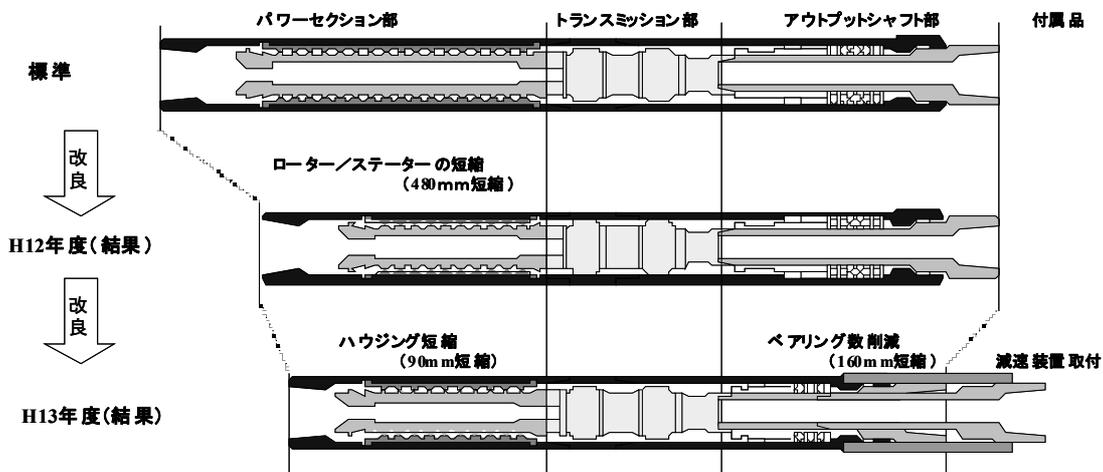
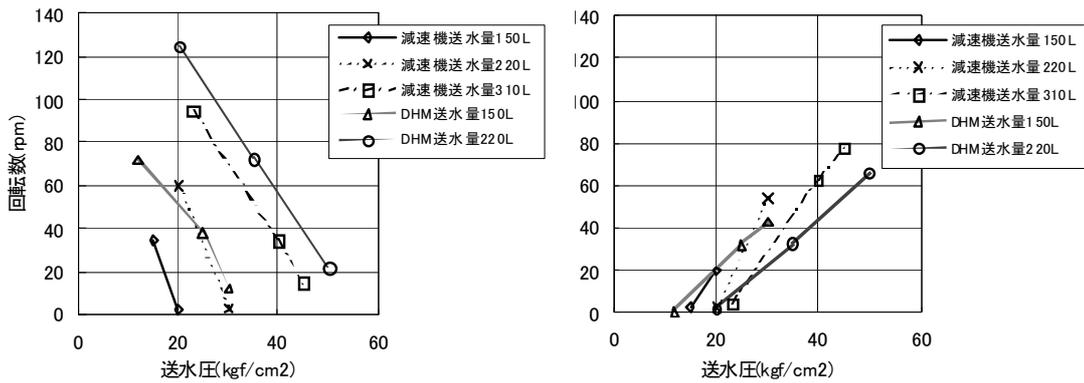


図 4.2-3 ダウンホールモーターの短尺経過



(左：送水圧-回転数 右：送水圧-回転トルク)

図 4.2-4 ダウンホールモーター性能試験結果

ベントハウジングのベント角を $0.39^\circ \sim 0.78^\circ$ にすることで、掘削の偏角を $1^\circ / 10\text{m}$ とすることが可能である。なお、対象地質、コアバレルの長さや掘進スピードにより偏角は変化し、特に掘進スピードを上げることで、またコアバレルを短くすることにより偏角が増す傾向が確認できた。

4.2.3 コアビット・コアバレル

採取された堆積軟岩のコアは様々な地質環境情報を有していることから、コア採取率を向上し掘削泥水の影響を排除した不攪乱試料を採取するために、コアビットおよびコアバレルの改良を行う。

コアビット・コアバレルの概念設計時の条件は、①本体の長さが 3.6m 以内であること、②本体の外径が 86mm 以内であること、③採取コア径が 50mm 以上であること、④採取コア長が 1m 以上であること、⑤不攪乱コアの採取ができること、⑥掘削中にできるだけ泥水にコアが触れないこととして、開発を進めた。

掘削泥水がコアに触れないこと、ノズルの目詰まりによる水圧上昇を防止する観点から、ウォーターウェイの切れ込みをビットの外側まで伸ばし (図 4.2-5)、かつ掘削泥水によるコアの流出防止のため、3重管式のコアバレルを用いて泥水が採取コアへ接触しない構造にした (図 4.2-6)。

さらに、未固結層に対応するビットとして、ビット先端部からリフターが飛び出したリフターケースシューの開発も行った。リフターケースシューにあわせビットの内径を大きくし、コアバレル内側にはコアを収納するアクリル管を配置した。また、掘削中にコアバレル管体が孔壁に接することで回

転抵抗が生じたため、ビット外周のゲージサイズを拡大したオーバーサイズビット（外径 89mm）を採用した。これにより、コア流出の防止、1回あたりの掘進長、コアの回収率に改善が認められた。

コア回収率を向上させるために、コア収納部のインナチューブを回転させないための機構として堆積軟岩に不向きなクラッチ機構に変わりオイルレスドライベアリングを採用した。また、不攪乱のコアを採取するために、シリンダー機構によりコア頭部に一定の圧力をかけて、コアの膨潤を防止した。

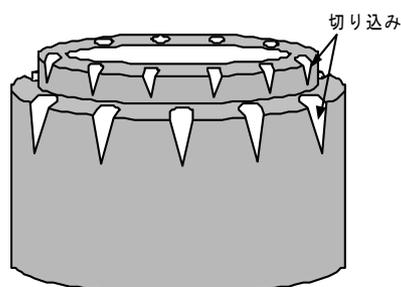


図 4.2-5 ウォーターウェイの変更状況



アウタチューブ(ビット含)
ミドルチューブ
インナチューブ
アクリル管

図 4.2-6 3重管コアバレル

4.2.4 拡径装置（アンダーリーマ）

コアリング掘削した孔井をその径より大きなケーシングが迫降するため、水圧により拡縮が可能な拡径装置によりコアリング径をケーシング径より大きく拡孔する。

本プロジェクトでは、住友金属鉱山(株)が保有していた特許である“ウェルマン”を基に拡径装置を開発することとした。ウェルマンではコントロールボーリングにそのまま適用させることは難しい。そのため、全体システムに適用するために以下のような改良を2004年度までに行った。

- ①圧力（水圧）のON/OFFにより拡径ビットが拡縮する機構
- ②ケーシングがスムーズに通過できるよう、拡径装置による掘削孔内を真円に保つこと
- ③泥水の分水装置を拡径装置に組み込み、全体の長さを短縮すること
- ④ビット収納箇所でのスライム排除を容易にすること

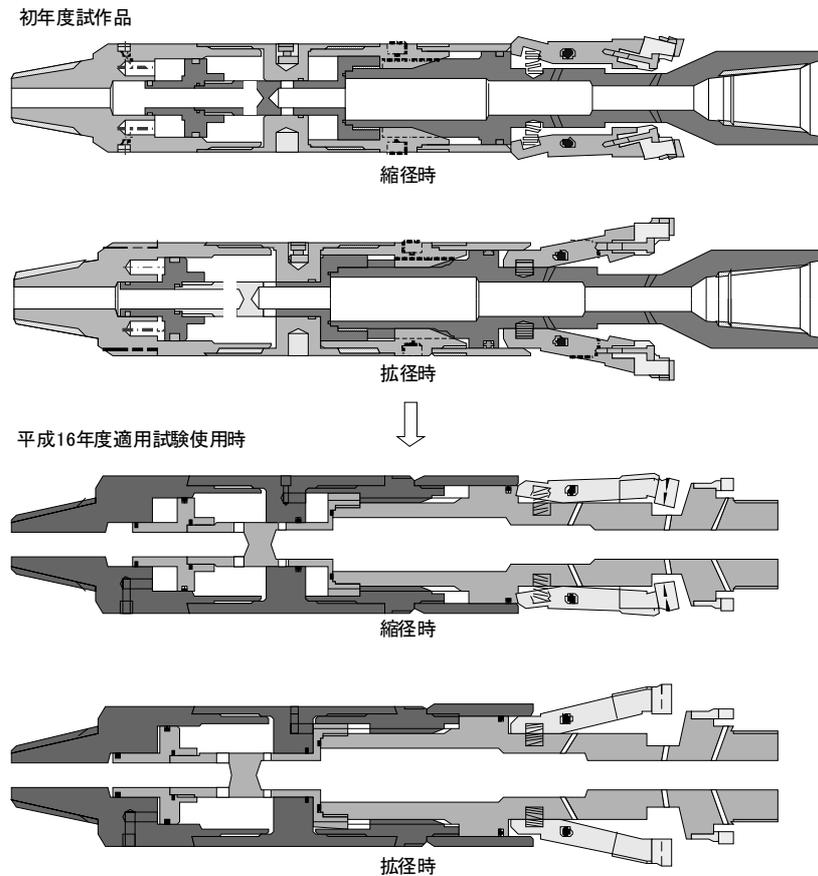


図 4.2-7 水圧拡張装置改良と現状

4.2.5 ケーシング

本システムの掘削孔跡が曲線を描くため、これに追従するよう、曲がりやすいケーシングを採用する。

本掘削システムでは、ケーシングは掘削機器を追降し、孔壁を保孔すると共に、ケーシングロッド内に圧入された泥水をダウンホールモーターへと導入する役割を担っている。また、孔跡が曲線を描くため、これに追従するよう、曲がりやすくする必要がある。

上記を踏まえ、以下のような開発目標を設定した。

- ①ケーシングが曲がることの負担がジョイント部に集中し、それによるジョイント部からの漏水を防止する。
- ②想定される掘削時の引っ張り、撓みなどの強度特性を確保する。

開発目標に沿って、コントロール掘削の曲げに対する柔軟性・長尺掘削に対する重量・強度などの取

扱性を考慮し、TR140 およびNL140 の2種類のパイプを選択し（図 4.2-8）、工場内において比較検討した。その結果、NL140 ロッドが TR140 ロッドに比べ直進性に優れ、かつ荷重に対する柔軟性を持っていることが判明し、模擬孔井での試験で掘削ロッドとしての能力を有することを確認した。また、ピンネジエンドに O-ring の装着ができるようにし漏水防止を行った。

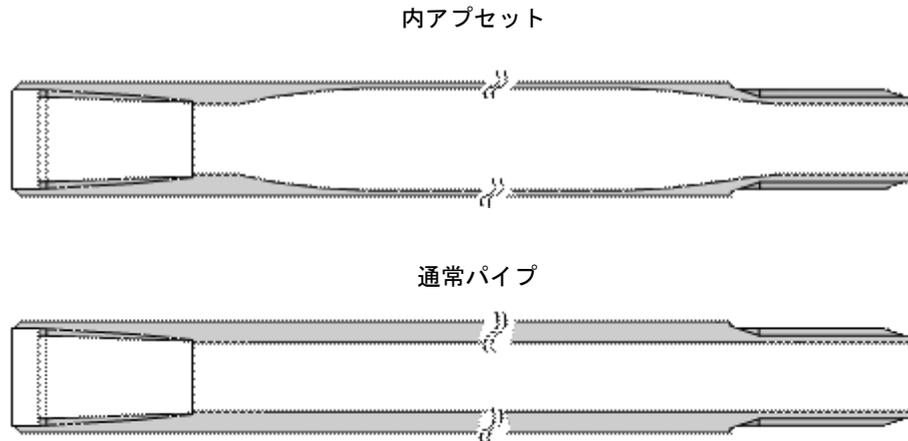


図 4.2-8 ケーシングロッドの比較
(上：NL140 ロッド、下 TR140 ロッド)

4.2.6 ケーシング追従装置

ケーシング追従装置はケーシング先端部とダウンホールツールスを掘削時に固定し、ケーシング内を圧入され流下する泥水をダウンホールツールスへ導入するための装置で、ラッチ機構を持つインナーヘッドアセンブリおよびラッチを固定するアウターチューブアセンブリより構成される。

本装置によりケーシングとダウンホールアセンブリーを確実に固定することにより、

- ①本装置接続部の泥水の漏出を防止する。
- ②ケーシングを介して地上からの推力をダウンホールツールスに伝える。
- ③ダウンホールツールスのツールフェースを制御する。

ことが可能となる。

本装置の開発に当たっては、ラッチの確実な固定はもとより、ラッチが確実に分離しないことは孔内での大きなトラブルとなることから、ワイヤラインの牽引でラッチが確実に分離する機構を目指した。

当初に開発した追従装置はラッチの枚数が 1 枚であるために水平な状態で使用した場合に安定性に欠ける懸念があること、また、ラッチを複数枚にすることにより強度を高めることができることから、ラッチの枚数を 2 枚にした追従装置に改良した。改良の結果、伝送ケーブルの通り道を装置の中央に配置することが可能となり、現地での適用試験によりその性能を確認することができた。

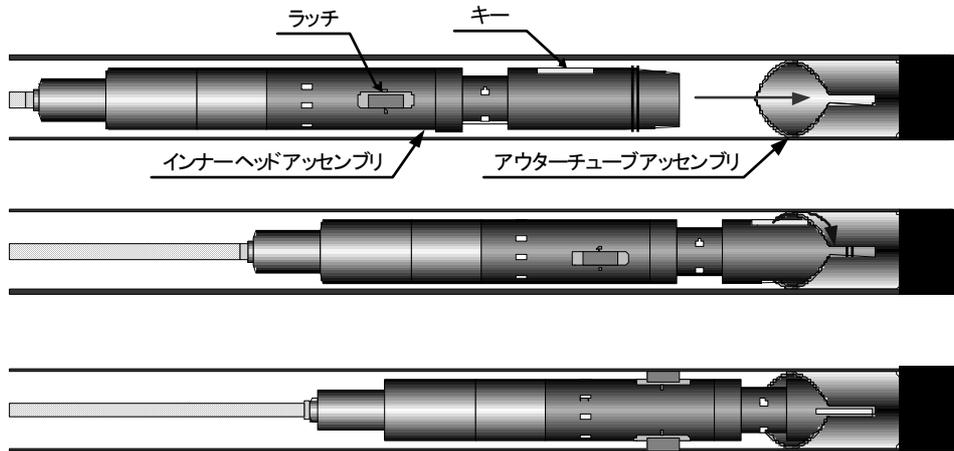


図 4.2-9 ケーシング追従装置模式図

4.2.7 押し込み補助装置

押し込み補助装置は、自重でダウンホールツールスが降下しない緩傾斜～水平孔において、ツールスを降下させるもので、泥水圧入により生じる水圧をツール스에設置されたラバーにより受圧して押し込みを可能にする装置である。

押し込み補助装置は泥水圧入により生じる水圧をツール스에設置されたラバーにより受圧して押し込みを可能にする装置である。受圧用のラバーの受圧効率強化を検討するために、ラバー形状の異なる 2 種類の押し込み装置（羽根式タイプとリング式タイプ）を試作し、2 回の地上試験の結果を考慮して、羽根式タイプを用いて現地適用を行った。しかし、孔内（ロッド管内）での摩擦抵抗により、ツールスがロッド管内で停止してしまう現象が認められたため、水圧を受ける力を強化するため、ラバー装着箇所を 1 箇所から 2 箇所へ増設し、さらに形状をテーパ状ラバーへ改良した。（図 4.2-10）。改良した装置を用いて、水平孔井部分を含めた孔長 1000m までの運用が可能となった。



図 4.2-10 押し込み補助装置

(上：当初試作、下：改良(白い部分がテーパ状ラバー))

本押し込み補助装置と同様のシステムをジャイロ検層装置（図 4.3-3）および弾性波トモグラフィ用のハンドリングツール（図 4.2-11）などにも適用している。



図 4.2-11 弾性波トモグラフィハンドリングツール

4.2.8 試錐機

試錐機は、地上においてケーシングロッドの挿入、回収およびダウンホールツールスの上昇、下降や泥水の圧入などを行うための装置である。従来の試錐機と比較して、孔口の角度を可変にすること、孔内に動力があるため地上では大きな回転動力を持たないことが特徴である。

試錐機に関しては、従来の鉛直掘削用の試錐機を適用することも可能であるが、比較的短い孔長で水平に到達することを考慮して、孔口で傾斜掘削ができるスラントリグを開発することとした。試錐機は、①1000mの傾斜および水平掘削に対応可能であること、②コントロールボーリング専用の試錐機であることを前提とし、掘削技術を構成する装置の組み合わせや操作性を考慮し設計・開発を行なった。

掘削のためのダウンホールツールスはコアバレル、水圧拡張装置、ダウンホールモーター、WL-MWD、WL-LWD およびケーシング追従装置であり、これらの編成による全長が 16m 程度となるため、試錐機の

マストの長さはフィード部分を含め 18m とした。掘削に使用するケーシングを NL140 としたため、スピンドル内径は 140mm 以上のものとした。さらに、適用試験における敷地面積および搬入路等が制限されるサイトにおいても運搬・搬入が可能となるように可能な限りコンパクトかつ細分化できる構造を持てるように設計した（図 4.2-12）。

試錐機の特徴を以下に示す。

- ①掘削ドリルと一体型マストにより掘削装置の組立が容易に行なえる。
- ②垂直から水平までの傾斜角度の変更が容易に行なえる。
- ③掘削ロッドのフィード能力が 245 kN である。
- ④フィードストロークが 3、700mm である。
- ⑤最大トルクは 19.6kN-m である。
- ⑥油圧ロッドレンチ・油圧ロッドホルダによりネジの切離しが容易に行なえる。
- ⑦ロッドハンドリング装置などのオプションが装着可能である。

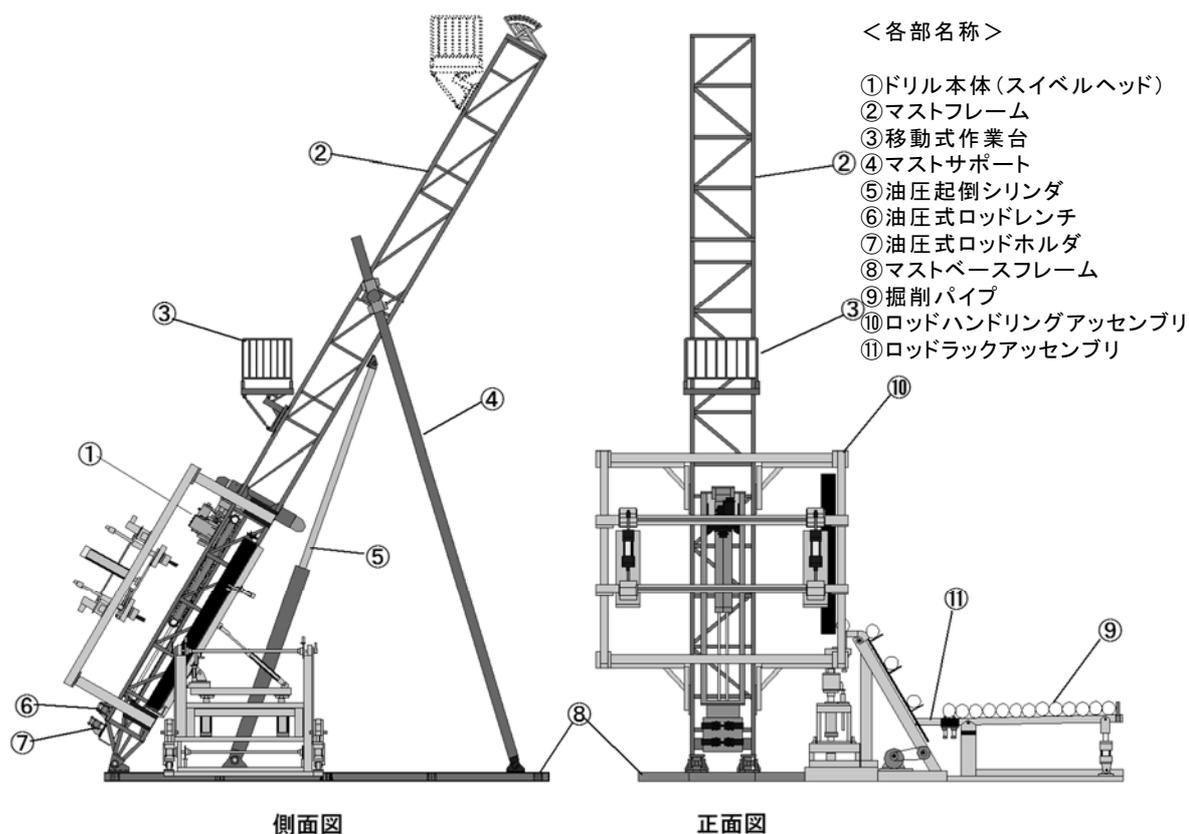


図 4.2-12 試錐機概要と名称

4.2.9 コントロール掘削手順

地質状況に応じて予め策定した掘削予定孔跡、それを考慮した掘削手順に沿ってコントロール掘削を実施する。

概要調査段階の地表からの地質調査により想定される地質状況に基づき計画された効率的な掘削孔跡およびケーシングプログラムに沿って、掘削手順を策定する。

【掘削準備】

(1) 掘削孔跡

調査個所で想定される地質分布および地質構造（特に断層破碎帯）、処分場の設置深度、さらには孔口位置などを考慮して、効率的な掘削孔跡を計画する。

(2) ケーシングプログラム

地表の被覆層や表層基盤の風化状況、さらには最終孔径を考慮して、ケーシングプログラムを計画する。孔内状況が安定する深度までは沿角、ノンコア掘削とし、その後 NL140 ロッドが通過可能なロッドを挿入しセメンチングで固定した後に、コントロール掘削による掘削を開始する。

(3) 泥水の種類および作泥

対象となる地質が堆積性の軟岩であること、傾斜掘りであることから、孔壁が崩壊しやすいため、孔壁崩壊防止の観点からの泥水を選択する必要がある。また、孔壁やコアへの泥水の侵入を防ぐため、また泥水の孔壁への侵入による孔内の脱水を防ぐ観点から低脱水の泥水を選択する必要がある。さらに、水質の評価を乱すような化学成分が少ないことが望ましい。

作成された泥水には、その後の各種調査の際に泥水の影響を評価するため、一定濃度のトレーサー物質を投入し、常時一定濃度範囲になるように管理するとともにトレーサー濃度の変化を記録する*。

※ 孔内モニタリングとして平成 28 年度に HCD-3 孔で実施した採水では、モニタリング区間のデッドボリュームの数十倍もの量の揚水を行ったにもかかわらず掘削泥水のコンタミ率が 60%より下がらなかった。一方、採水した水質は圧縮抽水とほぼ同等の値を示した。孔内モニタリングで採取した水が掘削水なのか地山の水なのか判断がつかない齟齬が生じた原因として、掘削中の泥水の影響が残っていたことが考えられる。しかしながら、掘削水が岩盤にどれくらい入ったかを見積もることは難しい。このため、掘削泥水には複数の異なるトレーサーを添加し、掘削中のトレーサー濃度の変化を記録しておくこと、モニタリングシステム設置時にモニタリング区間のトレーサー濃度をあらかじめ調べておくこと、がモニタリングによる水質の初期ベースライン評価のために重要である。

【コントロール掘削：傾斜～水平】

(1) NL140 ロッドの降下

NL140 ロッドの単管（3m）を繋ぎながら所定の深度（孔底より 10～13m 手前：ダウンホールツールの編成長に依存）まで降下する。

(2) ベント角の調整

掘削の偏角は地質状況、掘削スピード、先端のコアバレル長により変化するため、その時点での状況に応じてダウンホールモーターに設置されたベント角を調整する。

(3) ダウンホールツールの降下、ラッチによる固定

掘削用のワイヤラインダウンホールツールを降下させ、ケーシングシューにおいてラッチによりダウンホールツールとケーシングを固定させる。自重で降下しない（低傾斜）場合は、ダウンホールツールに押し込み用補助装置を設置し、泥水を送水して水圧により降下させ、ラッチにより固定させる。ラッチの固定確認は、送水圧（150ℓ/min 送水時に 10ksc 以上の圧力上昇が得られれば固定したと判断できる）、により行う。

(4) ツールフェースの調整

ケーシングに固定されたダウンホールツールのツールフェースを地上のロッドを回転することにより調整する。

(5) コントロール掘削

ドリラーディスプレイにリアルタイムに表示される MWD の情報をモニタリングすることにより、最適な条件で掘削を行う。特に掘進能率（以下 「ROP」という）を高くするためには適正なビット荷重（以下「WOB」という）を与えることが必要となる。特に拡張ビットに岩盤強度に応じた適正な WOB を与えることが重要であり、このため先進掘削されたコアの強度を反映させながら掘削管理を行う。また、掘削中には、WOB の調整のほか MWD の情報から得られるトルクの増減および水圧の変動に注視し、コア詰まりの発生や逸湧水の兆候が確認できるように管理する。

掘削中には MWD の方位、傾斜情報により適正な指向性掘削が行われているかをチェックする。

(6) アンラッチ、ダウンホールツールのつり上げ

当該長さの掘削が終了した時点、何らかのトラブルが生じた時点において泥水の送水を停止させ、ロッドの後退によりコアバレルをコア孔から引き抜いた後、拡張ビットを閉じ、地上のウィンチによりワイヤラインを引き上げ、ダウンホールツールをケーシングのラッチから外し地上まで吊り上げ、コアバレルから採取されたコアを回収する。

回収したコアの状況や、その他の情報を基に、掘削区間で他の調査が必要と判断された場合は、掘削用の編成から調査用の編成に交換し調査を行う。

さらにコアリングが必要な場合には (1) へ戻り、同様の作業を実施する。

4.2.10 掘削時の危機対策

掘削時の危機対策は、危機の予知とその回避策の検討、回避できない危機発生時の対応に区分して、それぞれ実施する。

(1) 危機の予知と回避策

孔内掘削においては、地質状況や掘削状況に応じて様々な危機（トラブル）の発生が想定される。このため、特に地質状況に起因する危機のうち、最も遭遇の可能性の高い断層破砕帯を想定し、その事前予知方法とその回避策、さらには危機発生時の対策に関して検討し（図 4.2-13）、これに基づき現地での掘削を実施した。

また、安定した孔内圧力環境を確保して極力孔内でのトラブルを回避するため、掘削に先立つ準備作業の一環として孔内状況確認のためのロッド降下時に洗浄を行い、逸泥の発生を防止した。

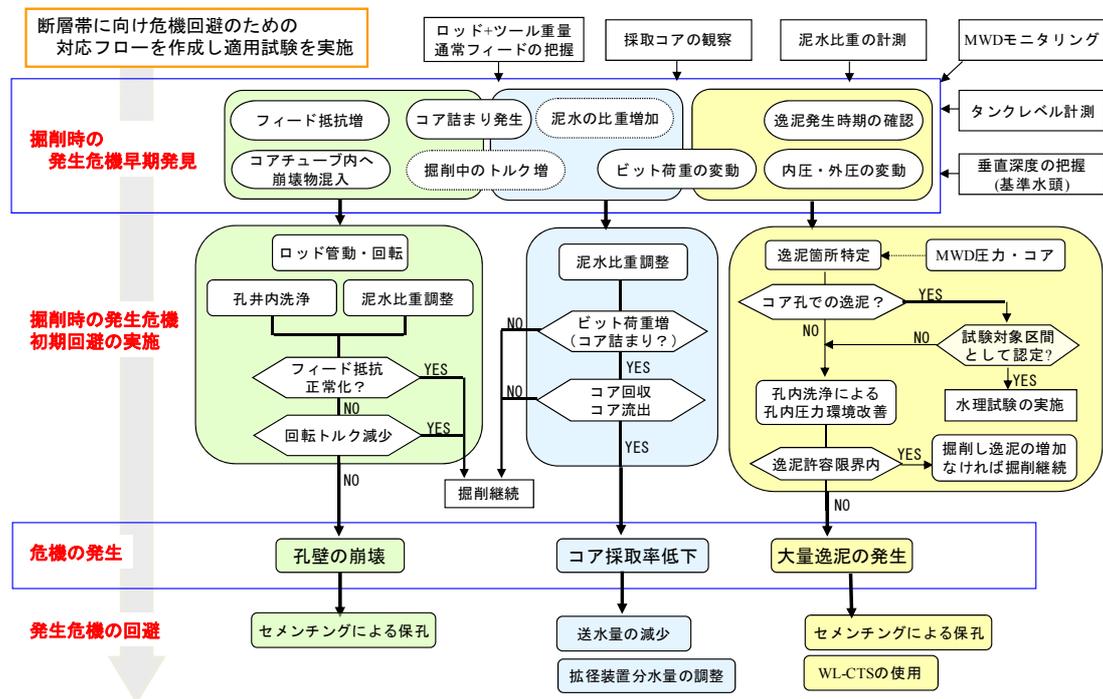


図 4.2-13 断層掘削における危機回避、対応図

(2) サイドトラック

孔内において地質状況に起因する大量な逸泥が生じた場合、泥水によるスライム排除が困難とな

り、そのため掘削が困難となる。このような場合、一般的にはセメンチングにより逸泥を防止した上で、再掘削を実施する。再掘削に際してもさらに逸泥する場合は、逸泥上部より新たな孔井を掘削（サイドトラック）することとなる。

4.3 掘削時検層

4.3.1 掘削時検層（MWD）の概要

掘削時検層（MWD）はコントロール掘削中に搭載した各種センサーにより掘削状況をリアルタイムに連続的に計測することを可能とするサブシステムである

(1) 目的

掘削時検層（MWD）は、コントロール掘削中に、孔内状況すなわち先端位置および掘削状況に関する情報を連続的に計測し、測定データをリアルタイムに表示することを目的とする。

(2) 適用

掘削時検層（MWD）システムは、コントロール掘削システムにより掘削された内径 150mm 前後のボーリング孔内において常時適用することを基本とする。

掘削時検層（MWD）装置は、掘削システムの中ではダウンホールモーターの上部に位置しており、ダウンホールモーターを回転させるための泥水を供給するための流路（泥水パス）が検層装置の中心部に設けられており、センサー類は装置外郭と流路の間の円周部に配置される。

孔内で取得された各種データは、ワイヤラインに内装された電気信号用ケーブルにより地上へと伝送され、地上において情報化掘削のためにリアルタイムでドリラーディスプレイに表示される。

表 4.3.1-1 掘削時検層（MWD）システムの概要

構成概要	孔内に下す「プローブ部」と計測・制御する「地上部」より構成
測定項目	方位、傾斜、トルク、ビット荷重、孔内圧力、孔内温度
測定範囲・精度	方位：360°（範囲）、±0.3°（精度） 傾斜：120°（範囲）、0.1°（精度） トルク：±2000N・m（範囲）、1%F.S.（精度） ビット荷重：1000kg（範囲）、1%F.S.（精度） 孔内圧力：0~30MPa（範囲）、0.75%F.S.（精度） 孔内温度：-20~100℃（範囲）、0.5%F.S.（精度）
耐圧・耐熱	耐圧：30MPa 耐熱：100℃
装置寸法・形状	プローブ長 1875mm、外径φ90mm（非磁性カラー） 中心部に内径17mmの泥水パス
データ伝送	ワイヤラインに内装されたケーブルを介して伝送
その他	地上制御部（制御用 PC およびデータ処理用 PC）ではリアルタイムに測定データをドリラーディスプレイとして表示

4.3.2 掘削時検層装置（MWD）の構成

掘削時検層（MWD）システムは次の諸装置により構成される
(1) 孔内部
① 方位計（方位磁針） ② 傾斜計
③ トルクセンサー ④ 荷重計（WOB :Weight On Bit）
⑤ 圧力センサー ⑥ 温度センサー
(2) 地上部
① データ処理用 PC ② ドリラーディスプレイ

MWD 装置(プローブ部)の概念図および写真を図 4.3-1 に示す。後述する LWD とダウンホールモーターとの間に本システムを連結できる構造としている。本システムは、5 種類の測定（方位、傾斜、トルク、ビット荷重、孔内圧力）の小型化を図った各モジュールが組み込まれたプローブ部とデータ収録・表示を行う地上制御部より構成される（表 4.3.1-1）。

プローブ部には、ボーリング掘削の先端位置を探知するための、方位・傾斜計が設置されており、常時計測により孔席と現在位置を確認することができる。また、トルク、ビット荷重、圧力をリアルタイ

ムに計測、表示し、孔内状況の変化に対応することで地上での情報化掘削に援用されている。

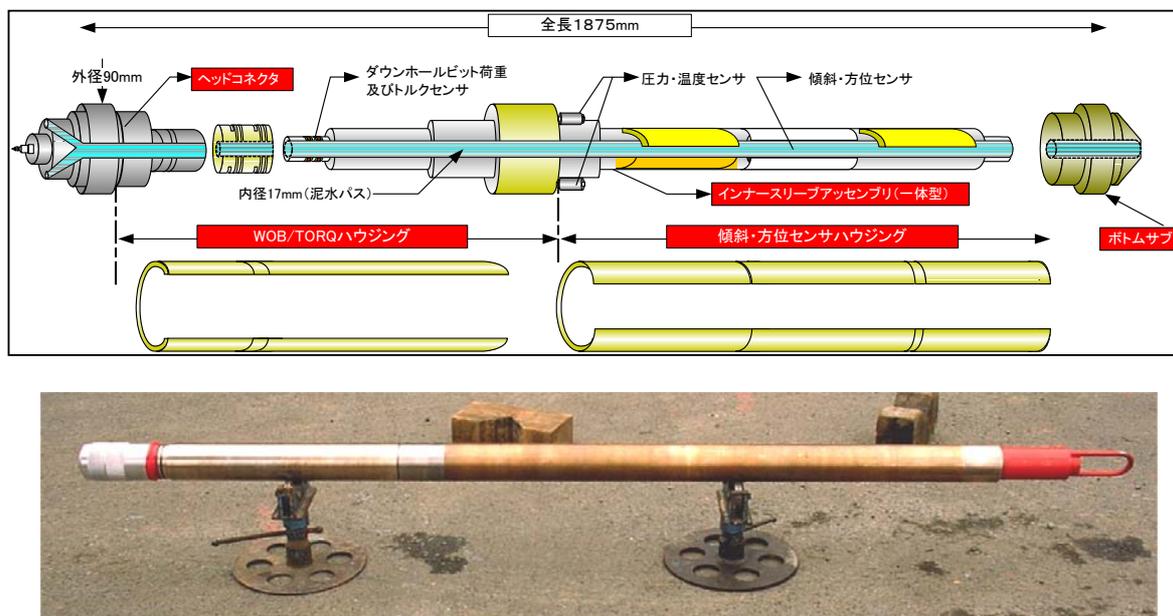


図 4.3-1 MWD ツールス全体図

4.3.3 掘削時検層 (MWD) のデータ取得

プローブ内の各種センサーにより取得されたデータは、ワイヤラインに内装されたケーブルにより伝送され、地上で PC によりリアルタイムに解析され、その結果がドリラーディスプレイにより表示される。

プローブ内の各センサーにより取得されたデータは 50kbps の伝送速度でワイヤライン内のケーブルにより地上に伝送される。伝送されたデータは PC により ASCII フォーマットのデータとして取り込まれる。各センサーの生データはそれぞれ取得された時間と関連付けられ、さらにその時間での孔内深度情報を取り込むことにより深度と関連付けられる。データの取り込みレートはおおよそ 2 秒毎である。PC に取り込まれた深度と関連付けられた生データは PC により解析された上で、ドリラーディスプレイに表示され、掘削管理に用いられる。

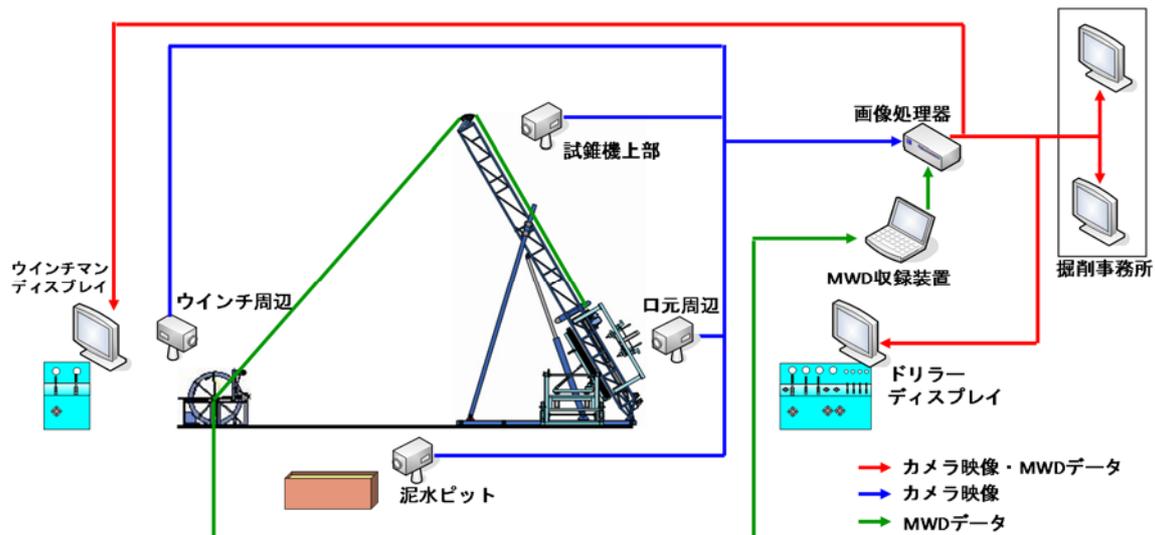


図 4.3-2 ドリラーディスプレイの配置

4.3.4 位置情報の補正

掘削先端位置情報の基となる方位情報は磁気影響を受けるために、事前に磁気影響を補正し計測を実施する。さらに高精度の位置探知を行うために、適宜ジャイロ検層装置により方位、傾斜を計測し、これにより位置補正を行う。

本装置では方位磁針の周辺のダウンホールモーターなどの機器に磁性体が多く存在することから磁気影響が懸念された。このために、計測前に地上において磁気影響を補正することにより、信頼性の高い計測を目指した。一方、ジャイロによる方位測定は磁気の影響を受けないことから方位磁針による測定に比べて高精度であるが、ドリフトにより常時計測が不可能である。

このため、MWDでの掘削時の計測後にジャイロ検層システム（図 4.3-3）による計測を実施し、ジャイロでの計測結果に基づき補正を行うことにより、MWDでの計測値がジャイロ計測値とほぼ同様の値を示す結果を得た。このように、MWD装置の常時運用とジャイロ検層システムの特定深度での計測との併用により MWD データを補正する手順を構築し、これにより掘削時の精度の高い先端位置情報を取得することが可能である。

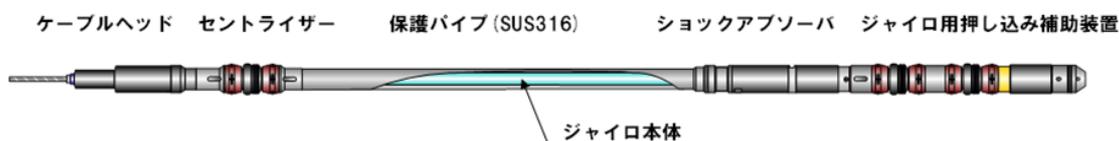


図 4.3-3 方位・傾斜計測のためのジャイロ検層システム

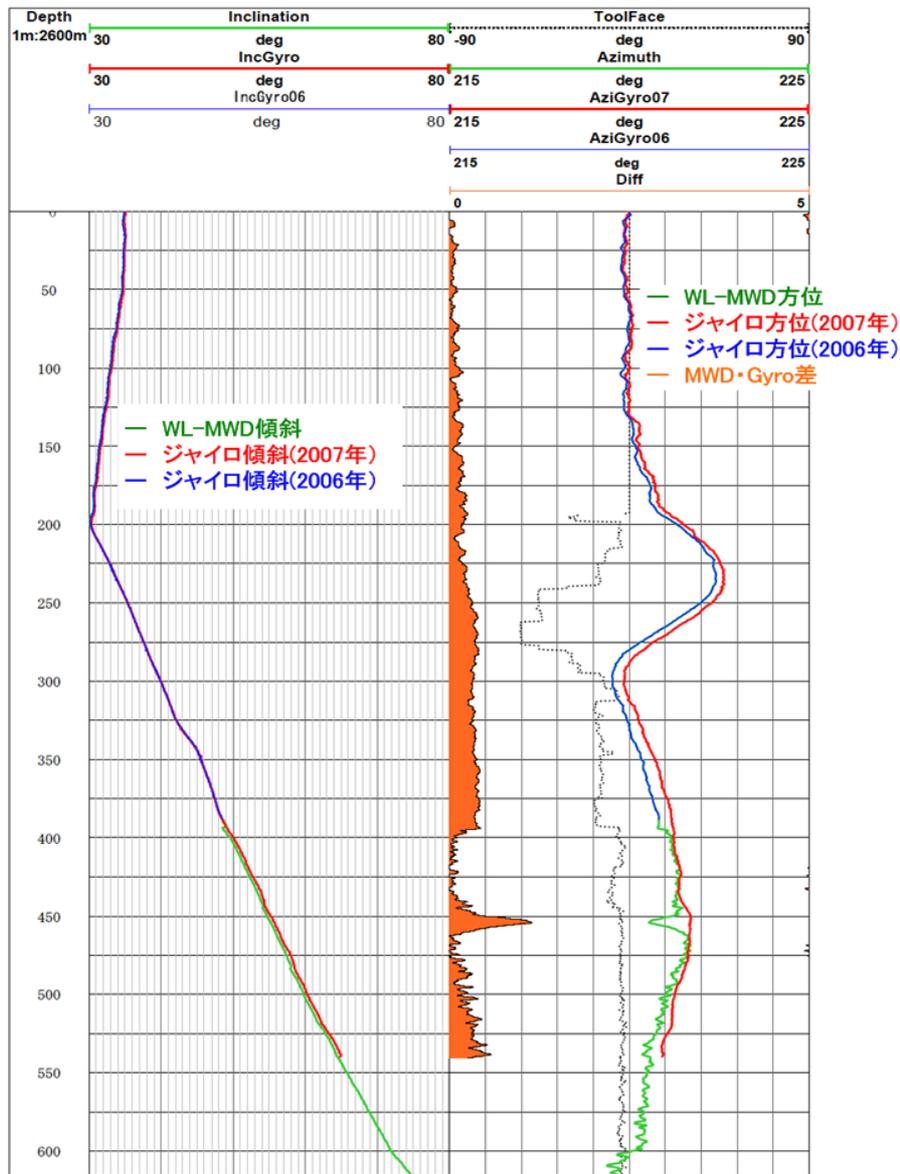


図 4.3-4 MWD による方位計測値の補正とジャイロによる検証

4.3.5 掘削時検層 (MWD) のデータ活用

掘削時検層 (MWD) により通常の掘削では期待できない以下のような観点での情報活用が可能となる。

- (1) 先端位置の探知
- (2) 情報化掘削

本検層装置の所期の目的は、孔曲げ掘削のための先端位置の探知であり、これに関する方位・傾斜に関する情報は4.3.4において述べたとおり高精度化しており、これら情報を活用することにより精度の高い指向性掘削を可能としている。

一方、情報化掘削に関するデータとしてはトルク、ビット荷重、孔内圧力などである。従来の掘削工法では、これらはドリルビットを介して地上において取得するため品質に課題があったが、本工法では孔内の掘削箇所近傍で取得するため高品質なデータを取得することが可能となる。これらの情報をリアルタイムでモニタリングし、総合的に解釈することにより、掘削障害（DHMのストール、ビットの目詰まり、水圧拡張装置アームの縮径不良の発生など）や逸泥・溢泥などの早期検知が可能となる。これにより効率的かつ安全な掘削作業を継続することを可能にするとともに、逸泥の検知により高透水箇所を認識することができ水理試験やモニタリング区間の決定に寄与することもできる。

4.3.6 掘削時検層（LWD）の概要

掘削時検層（LWD）はコントロール掘削中にツールフェースに搭載した各種センサーにより孔内壁面の岩盤物性値をリアルタイムに連続的に計測することを可能とするサブシステムである。本システムは、①コントロールボーリング掘削時の連続計測、②長さ3m前後の限られたスペースにできるだけ多くの物理検層項目を組み込み基本的な地盤の物理特性を計測、③リアルタイムに計測データを表示、の各作業を実施する。

(1) 目的

掘削時検層（LWD）は、コントロール掘削中に、孔内壁面の各種岩盤物性値を連続的に計測し、測定データをリアルタイムに表示することを目的とする。

(2) 適用

掘削時検層（LWD）システムは、長さ1000m、深度500mまでの内径120mm以上のボーリング孔内に適用する。

掘削時検層（LWD）を実施するために、ボーリング孔内の裸孔部に各種センサーを押し付ける必要がある。このため、①各種センサー類を搭載したパッド部を作成し、非計測時はそのパッドは閉じられ、計測時にだけパッド部が開き孔壁に押し付ける機構、②パッド部に泥水中に含まれる掘削ずりが混入してパッドが閉じないトラブルを回避する機構を実用化した。

本システムの概要は表4.3.6-1および図4.3-5のとおりである。

表 4.3.6-1 掘削時検層 (LWD) システムの概要

構成概要	孔内に下す「プローブ部」と計測・制御する「地上部」より構成
検層項目	音波、電磁波、マイクロ電気、自然γ線、泥水比抵抗・温度
パッド部	開閉・押し付け機構 (電磁波、マイクロ電気センサー搭載)
装置寸法・強度	プローブ長 3080mm、外径 φ100mm 孔内水圧：10MPa (102kgf/cm ²) 圧縮強度：78.4kN (8000kgf)、引張強度：78.4kN (8000kgf) ねじり強度：1764N-m (180kgf-m)
泥水水圧	15MPa (153kgf/cm ²) < 路徑 φ17mm >
その他	地上制御部(制御用 PC およびデータ処理用 PC)ではリアルタイムに測定データを表示

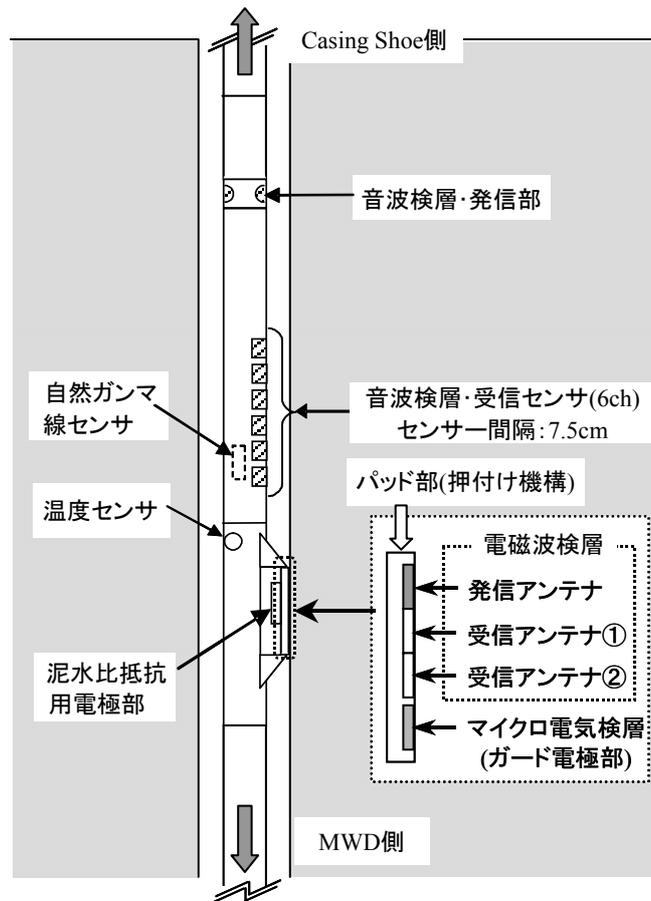


図 4.3-5 掘削時検層 (LWD) システム概要図

4.3.7 掘削時検層（LWD）のシステム構成

- 掘削時検層（LWD）のシステムは次の諸装置により構成される
- (1) 孔内部
 - ① 音波検層
 - ② 電磁波検層（パッド部にセンサー搭載）
 - ③ マイクロ電気検層（パッド部にセンサー搭載）
 - ④ 自然γ線検層
 - ⑤ 泥水比抵抗・温度検層
 - (2) 地上部
 - ① 計測制御用 PC
 - ② データ処理用 PC

本システムの構成を図 4.3-6 に示す。前述した MWD とケーシングシューの間本システムを連結できる構造としている。本システムは、4 種類の検層（音波、電磁波、マイクロ電気、自然ガンマ線）の小型化を図った各モジュールが組み込まれたプローブ部とデータ収録・制御を行う地上制御部より構成される（表 4.3.6-1）。以下に各モジュールの仕様を述べる。

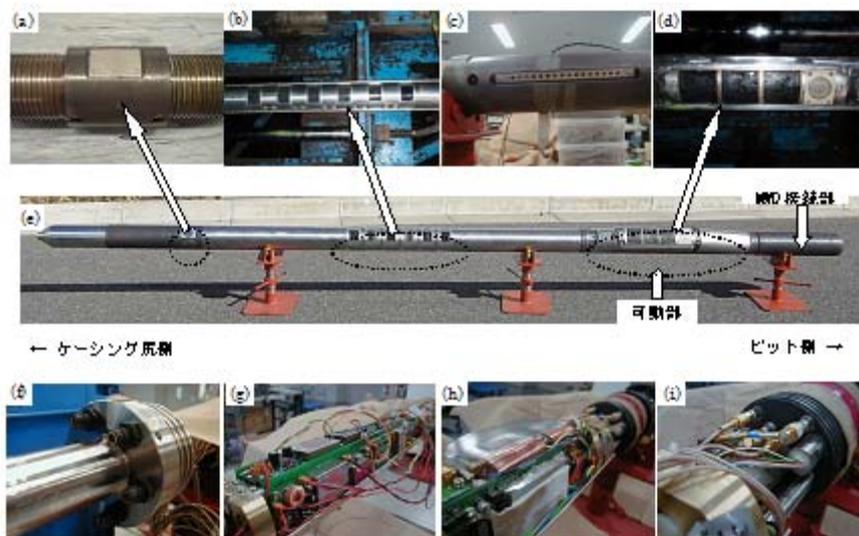


図 4.3-6 計測システム構成

(a) 音波検層送信部、(b) 音波検層受信部、(c) 泥水比抵抗センサー部、(d) 電磁波アンテナおよび電極部（パッド部）、(e) プローブ全体、(f) 音波検層同軸防水コネクタ、(g) 音波検層基盤部、(h) 電磁波検層基盤部、(i) コネクタ部

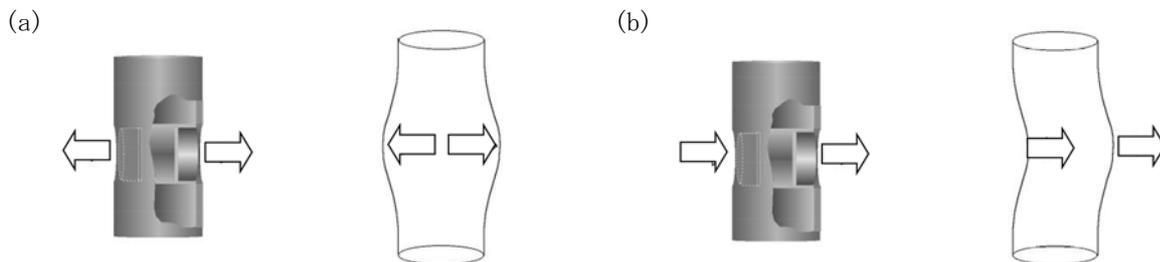
4.3.8 音波検層モジュール

発信部として2組のコンポジット振源を使用する。P波発振時は1組のモノポールソース、S波発振時は2組のダイポールソースとして発振する。

受信センサーを6個装備。各センサー間隔は10cmとする。

発信部として2組のコンポジット振源を使用した。P波発振時は1組のモノポールソースとし、S波発振時は2組のダイポールソースとして発振を行う（（上：当初試作、下：改良(白い部分がテーパースタラバー)）

図 4.3-7)。発振器のバックング材としてプローブと発振器の間に弾性体を挟み、プローブへ伝わる振動や反射を抑えた。さらに、発振エネルギーをロスしないよう発振器を薄い金属板で押さえる固定方法とした。受信センサーとしてPVDF（ポリフッ化ビニリデン）フィルムを使用した。6個の受信センサーを装備し、各センサー間隔は10cmである。また、掘削時のビット先端からのノイズや泥水循環に伴うノイズなどの対策として、ハイパスフィルタおよび積算平均化機能を持たせた。



(上：当初試作、下：改良(白い部分がテーパースタラバー))

図 4.3-7 音波検層の発振概念

4.3.9 電磁波検層モジュール

電磁波の減衰が激しい塩分濃度が大きい地層環境下でのインパルス波の計測を可能とするため、広帯域特性をもつ板状ダイポール型アンテナとする。

アンテナ部は1個の発信アンテナおよび2個の受信アンテナより構成され、開閉可能なパッド上に装備される。

電磁波の減衰が激しい塩分濃度が大きい地層環境下でのインパルス波の計測を可能とするため、広帯域特性をもつ板状ダイポール型アンテナ(中心周波数 1.0~1.5GHz)を製作した。耐水圧性能を持たせ

るため、アンテナと電波吸収体の外周をエポキシ接着材でモールド処理し、十分な耐水圧性能（ $120\text{kg}/\text{cm}^2$ ）を持たせた。表面は孔壁に密着させるため円弧型とする。また、アンテナ背面へ電波吸収体（金属磁性材配合樹脂およびソフトフェライト樹脂）を装着することで、アンテナ前面の放射特性への影響を極力抑制することができる。アンテナ部は1個の発信アンテナおよび2個の受信アンテナより構成され、開閉可能なパッド（押し付け機構）上に装備されている。このパッドは計測時のみ孔壁面に押し付け、センサー部を地盤に接触させながら計測する。

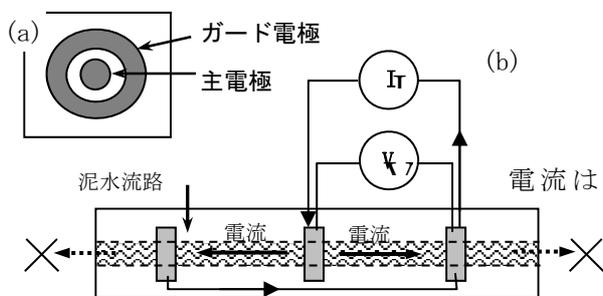
4.3.10 マイクロ電気検層モジュール

孔内水（泥水）比抵抗の影響を受けにくい電流収束型電極配置を採用する。
 地層の比抵抗と同時に泥水の比抵抗を計測する。
 比抵抗の温度補正用として泥水の温度測定を行う。

(a) ガード電極部、(b) 泥水比抵抗センサー部

図 4.3-8 に電極部の概念図を示す。孔内水（泥水）比抵抗の影響を受けにくい電流収束型電極配置を採用し、主電極からの電流密度とガード電流密度の比が一定になるようにフィードバック回路を入れた自動制御方法とする。また、電位測定回路、ガード電位測定回路およびガード電流制御回路にアイソレーションアンプを組み込んだ。ガード電極部は電磁波検層と同様、パッド部に装備されており、計測時は孔壁に接触しながら計測できる。

地層の比抵抗と同時に泥水の比抵抗を計測するため、円筒型3極電極を製作した。3極電極では円筒内の閉じた領域で電流を流すため、電流が円筒外部にほとんど漏れず、正確な泥水比抵抗の測定が可能となる。ノイズ対策として、通電電流の周波数となる 1KHz を通す帯域のバンドパスフィルタと整流後の直流整形用に 200Hz のローパスフィルタを組み込む。比抵抗の温度補正用として3線式白金測温抵抗体を用いた温度測定回路を組み込む。



(a) ガード電極部、(b) 泥水比抵抗センサー部

図 4.3-8 マイクロ電気検層の概念図

4.3.11 自然 γ 線検層モジュール

粘土鉱物に多く含まれるカリウムや放射性物質であるウラン、トリウム等から出るガンマ線が検出の対象とする。

粘土鉱物に多く含まれるカリウムや放射性物質であるウラン、トリウム等から出るガンマ線が検出の対象となる。掘削時に大きな振動や衝撃を受けるため、衝撃に強い放射線検出器部の実装方法を開発する必要がある。そこで、ヨウ化セシウム結晶と光電子増倍管を組み合わせた小型検出部を製作した。振動対策としてウレタン材で検出部を固定し、温度 70℃までの正常に動作する。

4.3.12 地上制御部

地上制御部はプローブ制御用 PC とデータ処理専用 PC より構成される。

孔内プローブとの通信は RS-485 方式を使用し、通信ボードを介して各検層モジュールと通信を行う。通信ボードは各モジュールとの通信の他、パッドの制御を行う。

現場でリアルタイムに測定データを確認するためのデータ処理ソフトウェアと処理した全検層データの深度プロファイル表示用のソフトウェアより構成される。

孔内プローブとの通信は RS-485 方式を使用し、通信ボードを介して各検層モジュールと通信を行う仕様とした。通信ボードは各モジュールとの通信の他、パッドの制御を行う。なお、自然ガンマ検層モジュールは、直接通信ボードとは接続せずに、マイクロ電気検層モジュールによって制御し、プローブ全体の小型化を図った。プローブでの計測データは、ノート PC にインストールした制御ソフトウェアによりリアルタイム表示、及びハードディスクへの保存（ASCII 形式）が行なわれる。

現場において測定データを確認するためのデータ処理ソフトウェアと処理した全検層データの深度プロファイル表示用のソフトウェアを作成した。また、地上装置でデータ処理ソフトウェアを動作させると負荷過剰状態になるため、データ処理専用の PC を導入した。音波速度では、画面上で P 波、S 波と考えられる個所をマウスで線を引くことにより算出することができる（図 4.3-9(a)(b)）。電磁波速度では自動的に初動を読み取ることができる（図 4.3-9(c)）。データ表示ソフトウェアでは、各検層項目の深度プロファイルを表示することができる（図 4.3-9(d)）。

4.3.13 掘削時検層（LWD）システムの設置手順

- 掘削時検層（LWD）システムは次の手順で設置する。
- ① 地上動作確認
 - ② 掘削編成への組み付け
 - ③ 計測の開始
 - ④ データ確認、データ処理・解析
 - ⑤ 計測の終了

掘削時検層（LWD）システムの設置手順は図 4.3-10 を標準とする。

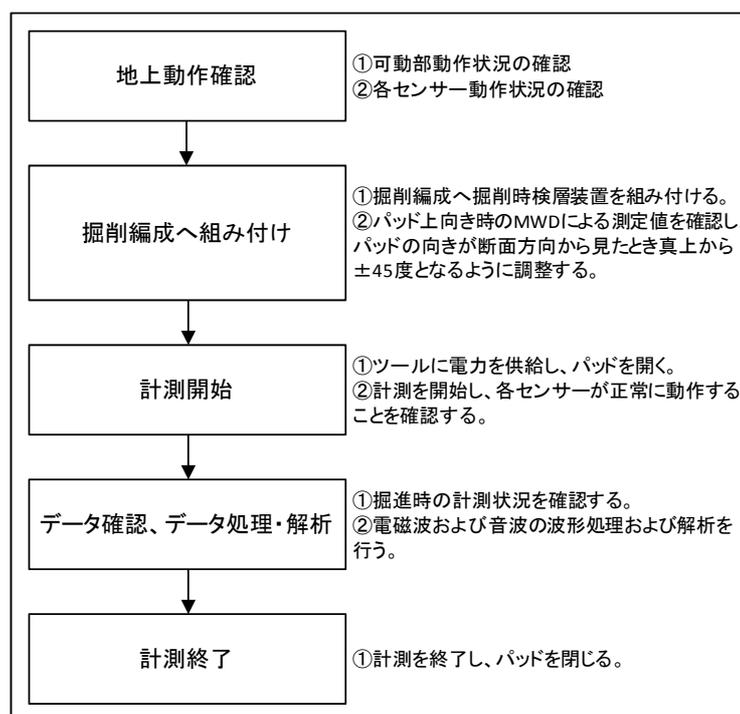


図 4.3-10 掘削時検層（LWD）システム設置手順

掘削時検層システムを掘削編成に組み付ける前に、地上で動作確認を行う。動作確認内容は、可動部の動作状況および各センサーによる取得データの確認である。正常に動作することを確認した後、掘削編成に組み付ける。このとき、パッドが上向きになる場合の MWD ツールフェースを確認し、パッドの向きが断面方向から見たとき真上から±45度となるように調整する。つぎに、LWD を含めた掘削編成を降下させ、掘削用ロッドにラッチされたことを確認する。その後、MWD のツールフェースを調整し、

LWD に電力を供給する。供給電圧に問題がないことを確認したら、パッドを開くとともに、計測を開始する。計測中は、各センサーの出力値を確認するとともに、電磁波および音波の波形処理および解析を行う。掘進終了時は計測を停止し、パッドを閉じてから掘削編成を回収する。

4.4 透水試験・採水・イメージング

4.4.1 透水試験・採水・イメージングの概要

透水試験・採水・イメージングはコントロール掘削中または掘削後のボーリング孔において、逸水箇所などの孔内壁のイメージングを行い、その箇所の透水性評価を行なうとともに、採水を可能とするシステムである。

透水試験・採水・イメージングは①試験区間のイメージング、②パッカーの設置、③透水試験、④採水の各作業を実施する。

(1) 目的

透水試験・採水・イメージングは、コントロールボーリングにより掘削されたボーリング孔を利用して、透水試験を行なうこと、また、採水を行なうこと目的とする。

(2) 適用

透水試験・採水・イメージングシステムは、孔径 80mm～175mm の掘進長 1000m、深度 500m までのボーリング孔内に適用する。

透水試験および採水を実施するためには、ボーリング孔内の試験箇所にパッカーを設置し、試験区間を設ける必要がある。このため、①ボーリング孔のパッカー設置箇所の孔壁状態の確認する技術（イメージング技術）、②パッカーを拡張し、水理的に隔離した試験区間を形成する技術（パッカー止水技術）、③掘削時の逸水、湧水箇所の透水性を計測する技術（透水試験技術）、④湧水箇所などにおいて地下水を採取する技術（採水技術）を実用化した。

したがって、透水試験・採水・イメージングは、試験区間を決定し、パッカーをかけて試験区間を密閉し、原位置での透水性を把握し、地下水の採水を可能としたものである。

システムの概要は表 4.4.1-1 および（拡張孔用シングルパッカー装着、光学カメラ搭載の場合）

イメージングツール（Imaging tool）は装置先端に装着されている。

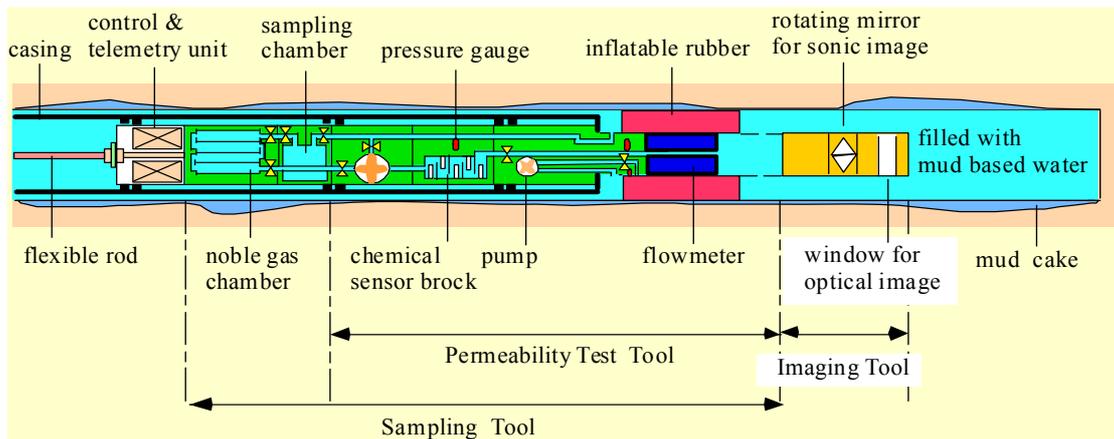
透水試験ツール（Permeability Test Tool）および

採水ツール（Sampling Tool）はパッカー、ポンプなどを共用する。

図 4.4-1 のとおりである。

表 4.4.1-1 透水試験・採水・イメージング装置の概要

形 式	透水試験・採水・イメージング装置
イメージングツール	計測区間長：10m 対象孔径：φ80mm～φ175mm 計測精度：1mm 計測項目：泥水使用時は音響映像（travel time、amplitude） 清水掘削時は光学映像
透水試験ツール	計測区間長：0.5m～2.0m（コア孔用シングルパッカー） 2.0m～（拡径孔用シングルパッカー） 1.0m（拡径孔用ダブルパッカー） 対象孔径：φ80mm～φ175mm、 試験方法：スラグ試験、揚水・注水試験、回復試験
採水ツール	採水区間長、対象孔径：透水試験ツールと同様 採水量：希ガスサンプラー25cc×3本、採水サンプラー2.7L×1本 水質計測項目：濁度、水質、トレーサー濃度



(拡径孔用シングルパッカー装着、光学カメラ搭載の場合)

イメージングツール (Imaging tool) は装置先端に装着されている。

透水試験ツール (Permeability Test Tool) および

採水ツール (Sampling Tool) はパッカー、ポンプなどを共用する。

図 4.4-1 透水試験・採水・イメージング装置の概要

4.4.2 透水試験・採水・イメージング装置の構成

透水試験・採水・イメージング装置は次の諸装置により構成される。

- (1) 透水試験ツール
 - ① ポンプ
 - ② 圧力計
- (2) 採水ツール
 - ① ケミカルセンサー
 - ② 採水チャンバー
 - ③ 希ガス用チャンバー
- (3) イメージングツール
 - ① 音響映像ユニット
 - ② 光学カメラユニット
- (4) パッカーシステム
 - ① パッカーシステム（シングルパッカーまたはダブルパッカー）
- (5) 制御・通信ユニット
 - ① コントロールおよびテレメトリーユニット
 - ② 地表データロガー

透水試験・採水・イメージング装置は、機能で分類した場合、透水試験ツール、採水ツール、イメージングツールのほかパッカーシステムと制御・通信ユニットによって構成される。透水試験と採水ツールは同一試験区間で行なうため、パッカーシステムや、透水試験ツールにあるポンプなどは採水と共用となっている。実際の使用に際しては、ハンドリングと組み立てを容易にするため、さらに細分割されている（図 4.4-2）。



図 4.4-2 透水試験・採水・イメージング装置の全体写真

4.4.3 透水試験ツール

透水試験ツールは以下のポンプと圧力計で構成される。

- (1) ポンプ（中流量用モノポンプ、小流量用シリンジポンプ）
- (2) 圧力計（パッカー圧用、区間圧用、先端圧用、アニュラス圧用、孔管内圧用）

(1) ポンプ

透水試験は試験区間で想定される透水性によって使用するポンプを使い分ける。モノポンプは流量をローターの回転数で制御できるもので、孔内の泥水を利用してパッカーを拡張する際も使用する。流量 100cc/min～350cc/min、吐出圧は最大 2.5MPa である。シリンジポンプはステッピングモーターの回転数により流量を制御するもので、流量 0.136cc/min～150cc/min、吐出圧は最大 0.1MPa である。

(2) 圧力計

圧力計はパッカー圧用、区間圧用、先端圧用（ダブルパッカーの場合）、アニュラス圧用、孔管内圧用が設置されている。計測範囲は 10MPa で精度は 0.015%FS である。

4.4.4 採水ツール

採水ツールは以下のケミカルセンサー、採水チャンバー、希ガス用チャンバーで構成される。

- (1) ケミカルセンサー（濁度計、水質センサー、トレーサー濃度計）
- (2) 採水チャンバー
- (3) 希ガス用チャンバー

(1) ケミカルセンサー

ケミカルセンサーでは濁度、水質、トレーサー濃度を計測することが可能である。濁度は光学式で区間内の地下水をアニュラス側へ排出する管路に設置され、掘削泥水の残存による濁りを小型カメラで計測する。水質は pH、EC（電気伝導度）、ORP（酸化還元電位）、DO（溶存酸素）、温度を採水チャンバーの入口で計測する。また、分光光度計を内蔵し、掘削水にドーブされているアミノ H 酸などのトレーサー濃度を計測する。

(2) 採水チャンバー

水質分析用のタンクで、容量は 2.7L である。

(3) 希ガス用チャンバー

採水タンクの後に設置され容量 25cc の銅管が 3 本設置され、原位置圧力が保持したまま採水が可能である。

4.4.5 イメージングツール

イメージングツールは光学カメラユニットまたは音響映像ユニットで構成される。

- (1) 光学カメラユニット
- (2) 音響映像ユニット

(1) 光学カメラユニット

光学カメラユニットは清水掘削などがされた場合に使用する。孔底方向を監視する固定カメラと孔壁方向に任意の画角画像を地上からのコントロールで得るカメラと 2 台装着されている。コア孔への適用の場合の計測精度は 0.1mm である。

(2) 音響映像ユニット

超音波によって孔の側壁方向の音響映像を得るもので、主に泥水掘削の場合に使用する。音響映像

は反射の大きさに応じて映像を得るアンプリチュードの映像と、トラベルタイム（音波を反射して帰ってくるまでの時間）による映像の2通りを得ることができる。また、このトラベルタイムを用いて音響キャリパーとして用いることも可能である。コア孔への適用の場合の計測精度は1mmである。

4.4.6 パッカーシステム

パッカーシステムは以下の3つのパッカー種のいずれかを用いて試験を行なう。

- (1) コア孔用シングルパッカー
- (2) 拡径孔用シングルパッカー
- (3) 拡径孔用ダブルパッカー

(1) コア孔用シングルパッカー

コア孔(89mm)用のシングルパッカーである。パッカー長は970mmのノンスライドで孔径80mm～100mmまで対応可能である。

(2) 拡径孔用シングルパッカー

拡径孔(152mm)用のシングルパッカーである。パッカー長は670mmのスライドタイプで孔径100mm～170mmまで対応可能である。

(3) 拡径孔用ダブルパッカー

拡径孔(152mm)用のダブルパッカーである。パッカー長は1000mm、区間長は1000mmのスライドタイプで、孔径100mm～175mmまで対応可能である。

4.4.7 透水試験実施手順

透水試験の標準的な手順は以下の通りである。

- (1) パッカーの設置
- (2) スラッグ試験
- (3) 揚水試験

透水試験・採水・イメージング装置を適用する際の実施手順は一連の作業によって行なわれる（図4.4-3）。

(1) パッカーの設置

試験位置が決定し、イメージングによってパッカーの設置が可能であることを判断した上で、パッカーの拡張を行なう。使用するパッカーの選択は、ボーリング掘削中での逸水や湧水が認められた場合は、コア孔での試験、あるいは拡張孔内の試験を行なうこととなり、コア孔用ノンスライドシングルパッカー、拡張孔用スライドシングルパッカーをそれぞれ用いる。また、ボーリング掘削終了後に透水試験を行なう場合は、任意の試験箇所を選択し、拡張孔用スライドダブルパッカーを適用する。パッカーの拡張は孔内水（泥水）を用いて、標準的には区間圧プラス 1MPa を目安に行なう。パッカーの拡張後、試験区間をシャットイン（試験区間に通じる配管のバルブをすべて閉塞）し、間隙水圧の測定を行なう。

(2) スラグ試験

間隙水圧の測定終了後、透水試験を実施する。透水試験は基本的にスラグ試験、揚水試験の順に行なう。スラグ試験は孔管の水位を下げ、これをスラグとする。地下水からガスの湧出の恐れがある場合は、逆に孔管の水位を上げることでスラグとする。また、時間的な余裕があれば、次に行なう揚水試験の後にもスラグ試験を行い、対象区間の透水性が変化していないことを確認する。

(3) 揚水試験

揚水試験はスラグ試験よりも孔から遠方の透水性状を把握するために行なう。揚水試験に利用するポンプは、スラグ試験より予測される透水性の大きさから決定する。透水性が小さい場合（目安として揚水流量が 100cc/min 以下の場合）はシリンジポンプを用いる。また、100cc/min～300cc/min の場合はモノポンプを用いる。

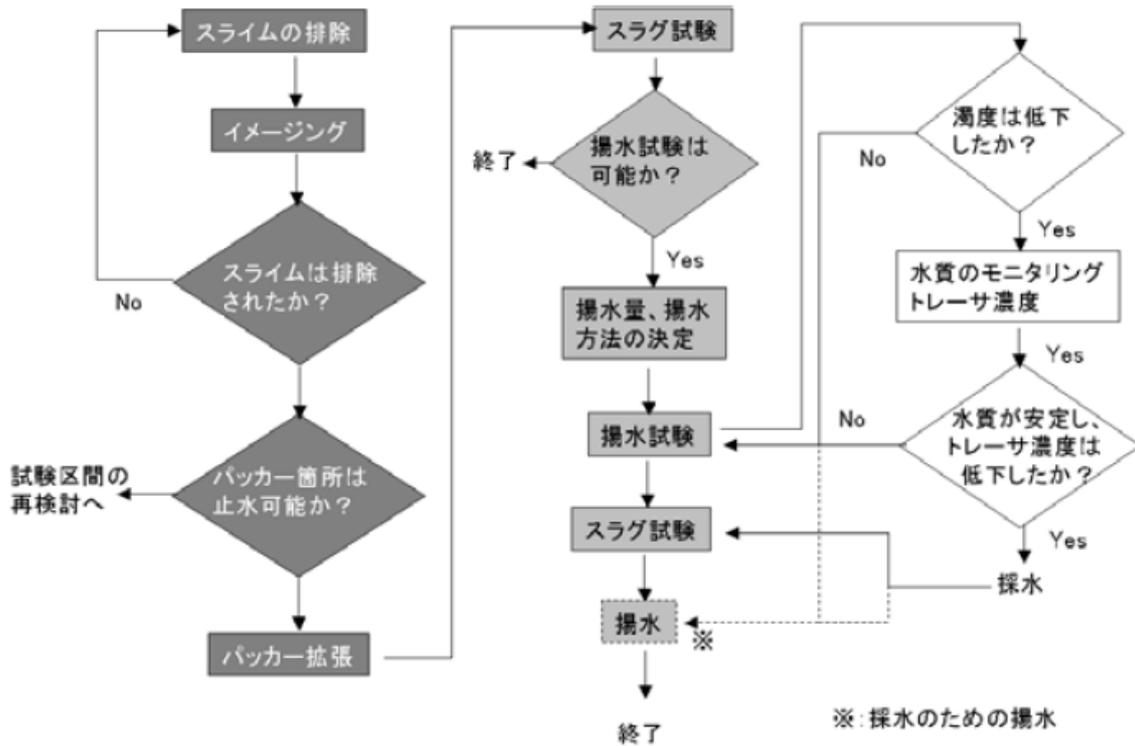


図 4.4-3 透水試験・採水・イメージングの標準的な作業手順

4.4.8 透水試験区間の設定

透水試験区間の設定は以下の手順で行なう。

- (1) コア観察
- (2) イメージング
- (3) スライムの除去

透水試験の実施は、掘削中の逸水・湧水、代表的な地質および水理区分における透水性状の把握など、様々な要求によって行なわれる。透水試験区間の設定はコア観察、スライムの排除、イメージングによるパッカー設置箇所および試験区間の確認の手順で行なう（図 4.4-4）。

(1) コア観察

コア観察は掘削に伴い定常的に行なわれるが、透水試験区間の設定の際は、対象箇所を確認後、想定されるパッカー位置に、止水を妨げる割れ目や断層が存在しないことを確認する。

(2) イメージング

透水試験・採水・イメージング装置を編成し、試験深度に降下させ、イメージングを行なう。この際、孔内水が清水の際は光学式のイメージングツールを用い、泥水の場合は音響式のイメージングツ

ールを用いる。孔が水平～緩傾斜の際は、ラッチによる装置の固定を行わず、パッカーを孔管内で拡張することで固定する。このことにより、イメージングツール付近で装置を固定することが可能になり、イメージングツールのセンタリングが容易となる。イメージングの結果、パッカー箇所には障害物や割れ目がなければ、パッカーの設置・拡張を行なう。

(3) スライムの除去

イメージングの結果、スライム等の障害物があれば、洗浄によって除く。また割れ目などのパッカーによる止水を妨げるものがある場合は、試験位置の再検討を行なう。

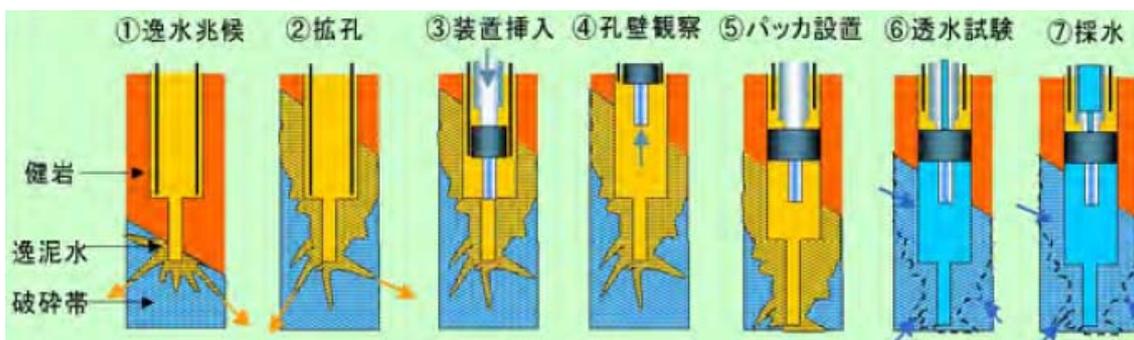


図 4.4-4 断層による逸水の場合のパッカー設置から透水試験・採水までの手順例

4.4.9 採水実施手順

採水は揚水試験の過程とオーバーラップしながら、以下の手順で行なう。

- (1) 濁度計測
- (2) 水質計測
- (3) トレーサー濃度計測

(1) 濁度計測

濁度の計測は揚水試験の過程と並行して行なう。揚水試験中の区間内から排水する水の濁度をモニタリングする。濁度計測の際には泥水中の土粒子の減少と共に、地下水からのガス湧出による気泡が存在しないか留意する。これは、気泡が希ガス用サンプラーに入った場合、分析に支障が生じるためである。

(2) 水質計測

濁度が低下したら、バルブを切り替えて区間内水を採水チャンバーへのラインに通水する。この際、区間内の水の排出先は孔管となる。採水チャンバーの入口にはケミカルセンサーがあり、pH、EC、ORP、DO、温度が計測できる。採水に際してはこれらのデータが安定し、トレーサー濃度が低

下してから採水する。

(3) トレーサー濃度計測

トレーサー濃度センサーは掘削水にドープされているアミノ酸などの蛍光染料の濃度を分光光度計で計測する。分光光度計はケミカルセンサーと同様に採水チャンバーの入口に設置されている。トレーサー濃度が高い間は、揚水された区間内の水を孔管に排出させ、トレーサー濃度および水質が安定した後、バルブを切り替え採水チャンバーへの採水を行なう。

4.4.10 採水区間の選定

採水区間の選定は、透水試験と同様の手順の中で実施する。

採水区間の選定は、図 4.4-4 に示した透水試験と同じ一連の手順の中で実施する。採水の実施には、ボーリング掘削中の逸水・湧水時にはシングルパッカーを、ボーリング掘削後にはダブルパッカーをそれぞれ用いる。

4.5 孔内応力・力学

4.5.1 孔内応力・力学測定の概要

孔内応力・力学測定とは、岩盤内の初期応力（初期地圧）の測定ならびに岩盤の力学特性（変形など）の測定を、ボーリング孔内で行うものである。既往技術としては、ボーリング孔内での初期応力の測定のための水圧破碎法があり、また、ボーリング孔内での力学特性（変形）の測定のための孔内载荷試験法がある。コントロールボーリングによる掘削・調査技術の開発においては、これらの既往技術をコントロールボーリングのシステムに適用できるようにするとともに、初期応力測定と力学特性の測定をひとつのユニットで行えるようなシステム概念を検討した。その上で、まず初期応力測定のためのユニットの開発を行った。そこで、主に孔内応力測定について記述し、孔内力学測定については4.5.7 孔内力学測定に検討した概念を記す。

孔内応力測定の目的、ならびに適用は以下である。

(1) 目的

孔内応力測定は、コントロールボーリングにより掘削されたボーリング孔の先端部のパイロット孔において、水圧破碎法による地圧測定を行う。

(2) 適用

孔内応力測定は、長さ 1000m、深度 500mまでの径 120mmのボーリング孔の先端の、径 100mmのパイロット孔に適用する。

開発したユニットは初期応力測定を水圧破碎法に基づいて行う。この方法ではボーリング孔に加圧区間を設けて、加圧することにより岩盤に亀裂が発生するときの圧力、再度加圧することにより亀裂が再度開口するときの圧力、また開口している亀裂が閉じるときの圧力、などの圧力を測定する。岩盤内の応力とこれらの圧力が力学的に関連付けられることから、岩盤内応力を求める。

図 4.5-1 は、この孔内応力ユニットの挿入手順を示している。

- (1) は、コアリングツールを用いてパイロット孔をコアリングしたあとの状態である。パイロット孔は径 100mm、長さは 3.5m である。コアリングツールは既に引き揚げてある。
- (2) は、水圧破碎ユニットをケーシング内に挿入しているところである。
- (3) は、ユニットがケーシングの底に到達し、ユニットの先端部/ダブルパッカーがケーシング外に出たところ。
- (4) は、ユニットが 5cm スライドして縮み、ラッチがラッチキーにセットされたところである。すなわち、ケーシングと水圧破碎ユニットがメカニカルに一体になった。

(5)は、ケーシングを挿入することにより、ダブルパッカーをパイロット孔に挿入したところである。

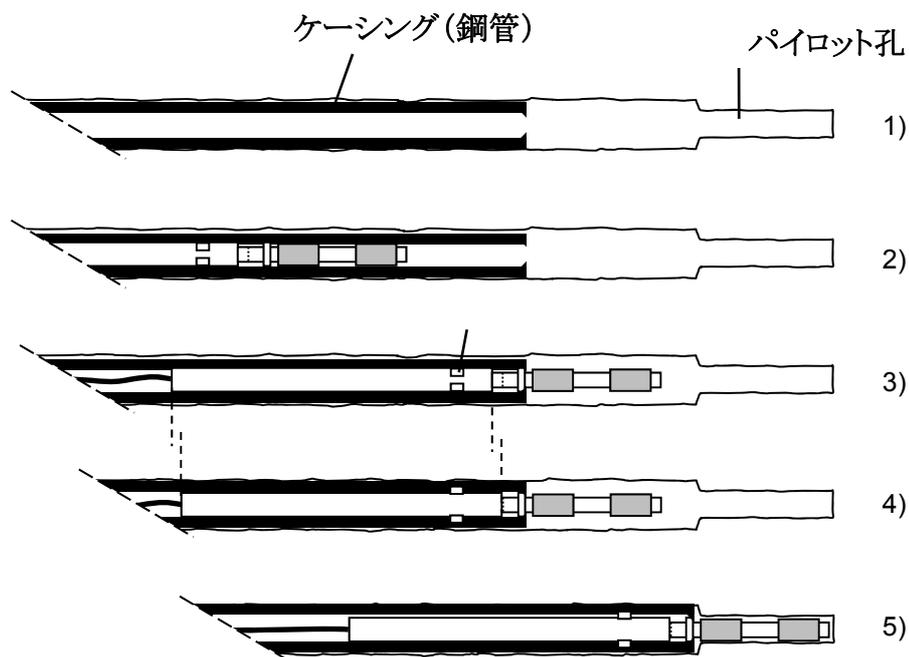


図 4.5-1 孔内応力ユニットの挿入手順

このように孔内応力ユニットを挿入したら、パイロット孔内でダブルパッカーを拡張して加圧区間をつくり、水圧破碎試験を行う。水圧破碎試験は一般的な手順に従うことを基本とし、ここでは詳述しない。

4.5.2 孔内応力測定構成

孔内応力ユニットは次の構成である。

(1) パートA

- ① ダブルパッカー ② 亀裂計測部 ③ 圧力・流量計

(2) パートB

- ① ラッチシステム ② 通信計測制御部 ③ 送水ポンプ (水圧破碎用)
④ 送水ポンプ (パッカー用)

(3) パートC

- ① 水タンク ② 送り込み装置 ③ ケーブルヘッド

(4) 地上機器

- ① 制御部 ② データロギング部

孔内応力測定ユニットの全体構成の概念を図 4.5-2 に示す。

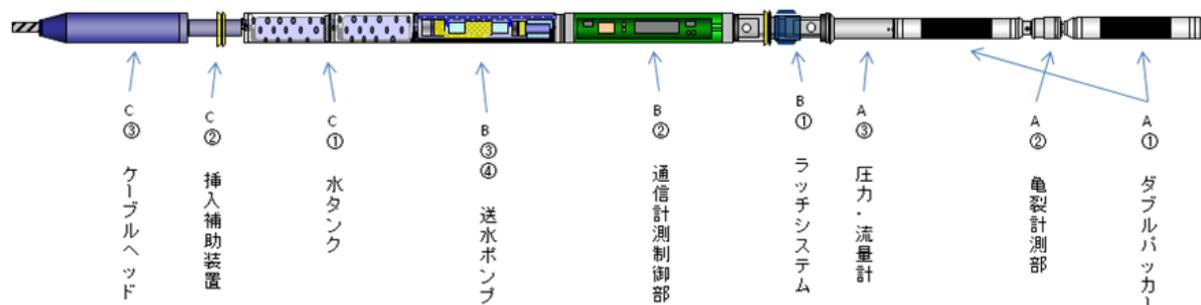


図 4.5-2 孔内応力測定ユニットの全体構成の概念図

以下に各部位ごとに主要な諸元などを示す。

(1) パート A

① ダブルパッカー

上下の各パッカーの有効長は約 50cm、最大圧 20MPa である。どちらかのパッカーに孔壁亀裂の型どりのためのスリーブを被覆して型どりパッカーとして使うこともできる。加圧区間長は 90cm である。

② 亀裂計測部

孔壁の亀裂だけでなく、孔壁状況や測定ユニットを挿入操作中などの状況を確認することを目的として、カメラと AE センサーを設置している。なお、亀裂計測のためには、上記のパッカー部に型どりの被覆材（スリーブ）を巻いて型どりパッカーとして用いることを標準とする。

カメラは、1/7 インチ CCD 34 万画素、8 台が、孔底方向に設置されており、8 面のミラーで孔壁を観察する。画角はおよそ 51°（水平）、39°（垂直）である。

AE センサーは、富士セラミックス製：AE144AU 共振周波数 140kHz、4 個である。

③ 圧力・流量計

圧力センサーは、圧力範囲：0～50MPa であり、測定対象は加圧区間圧、パッカー圧、ケーシング鋼管内圧力の 3 つである。

流量センサーは、流量範囲 0～19L/min または 0～3L/min のどちらかを選択して取付て使用する。水圧破碎送水流量を測定する。

(2) パート B

① ラッチシステム

NL140 鋼管の先端に孔内応力測定ユニットを設置固定する。

② 通信計測制御部

各種計測や通信を制御を行う。計測項目は、A③も含め、方位・傾斜（分解能 1° 、精度 $\pm 3^{\circ}$ ）、圧力 3 チャンネル、流量、試験ポンプモーターの電圧、電流、パッカーポンプモーターの電圧、電流値、ポンプモーター回転数 2 チャンネル、孔内基板温度である。

③ 送水ポンプ（水圧破碎用）

駆動モーター、一次油圧ポンプ、および複動送水ポンプからなる。駆動モーターは、直流希土類磁石モーターである（DC220V、定格 750W、トルク 31.8N.m）。一次油圧ポンプは定格出力 20.6MPa、複動送水ポンプは、圧力 30MPa（約 200cc/min）、圧力 10MPa（約 600cc/min）の複動式であり、片側有効容量約 100cc である。

④ 送水ポンプ（パッカー用）

駆動モーターは、送水ポンプの仕様と同様である。

(3) パート C

① 水タンク

これは水圧破碎に用いる水を貯蔵する。複数台を連結することができる。長さ 2.5m/1 体、有効容量 15L/1 体である。

② 送り込み装置

これは、孔内応力ユニットが自重で降下・挿入できないほどボーリング孔の傾斜が小さくなった際に、地上から鋼管内へ送水しその圧力を受けて挿入させるものである。

③ ケーブルヘッド

これは、孔内応力ユニットと地上機器とをつなぐケーブルを、孔内応力ユニットに接続するものである。アーマードケーブルグリップ、電源線の孔内機器への配線、光変換器およびその DC 電源装置等が収納されている。

また、ウィークポイントの設定箇所でもある。ウィークポイントは、孔内応力ユニットが鋼管内から回収できない事態になったときに、そこで設定荷重 3 トンで切断することにより、ケーブルの破断もしくはユニット内への浸水を防ぐ。

(4) 地上機器

ケーブルのデータ通信は、光ファイバー(MMF)で行う。RS485 信号は光ファイバー 2 本、AE 信号（周波数特性 DC~200kHz、 $\pm 5V_{p-p}$ ）は光ファイバー 4 本、カメラ映像（NTSC、 $1V_{p-p}$ 、 75Ω ）は光ファイバー 8 本で行う。光ファイバー 2 本の予備を含めて 16 本ある。光ファイバー以外に電力線がある。これらの信号を地上機器（①制御部、②データロギング部）で制御する。

4.5.3 亀裂計測システム

亀裂計測システムは、次から構成される。

- (1) カメラ (パートA②亀裂計測部)
- (2) AEセンサー (パートA②亀裂計測部)
- (3) 型どりパッカー (パートA①ダブルパッカー)

上記各要素の目的は次の通りである。

カメラ：ユニット挿入等の操作時の状況確認、孔壁状況の確認、孔壁の亀裂状況の確認。

AEセンサー：ユニット挿入等の操作時の状況確認、孔壁の亀裂挙動の確認。

型どりパッカー：孔壁の亀裂の有無、位置、トレースの確認。

水圧破碎方式による岩盤応力の測定においては、水圧破碎で発生させた亀裂の方向を知ることが必要である。これにより地圧の方向が決定される。そのため、水圧破碎試験の前後に型どりパッカーに亀裂の形を写し取ることが行われる。孔内応力ユニットにおいても、確実な方法として型どりパッカーを用いる。それ以外に、カメラとAEセンサーを搭載している。

(1) カメラ

コントロール掘削調査システムでは、応力測定ユニットを鋼管中に挿入・降下させ、鋼管の先端部にラッチして、鋼管と応力測定ユニットをメカニカルに一体とし、次に鋼管を移動させることによって応力測定ユニットをボーリング孔先端のパイロット孔に挿入する手順になる。通常の水圧破碎試験の場合より、試験実施までの手順が複雑である。また、ボーリング孔は傾斜～水平であるので、降下・挿入が順調であるかどうかの確認が重要である。その確認の一助としてカメラを用いることができる。

また、水圧破碎試験箇所において既存亀裂の有無の確認や、水圧破碎で発生した亀裂の確認などに用いることができる。室内試験においては、花崗岩試料に発生させた水圧破碎亀裂を確認できている。ただ、コントロール掘削調査システムでは泥水を用いること、その他、岩の特性などから亀裂確認が難しい場合も考えられる。

(2) AEセンサー

AEセンサーの目的も基本的にはカメラと同じであり、応力測定ユニットの降下・挿入が順調であるかどうかの確認の一助として用いることができる。AEセンサーでは装置挿入・動作時などの発生音を検出することになる。

また水圧破碎時においては、亀裂発生時、亀裂進展時、亀裂の閉合時に岩から発生するAE、また亀

裂中を水が流れる時に発生するAEを検出することにより、岩盤挙動を確認することも期待する。通常、水圧破碎による地圧評価では、亀裂発生(Pb)、亀裂閉合(Ps)、亀裂再開口時(Pr)の水圧を測定して、岩盤応力を算出する。しかし、観測されるPb、Ps、Prの水圧特徴点が、想定している岩盤挙動に対応しているかについては、議論されている段階である。例えば、亀裂初生と亀裂の不安定成長の開始とは同じでないこと、亀裂閉合過程には亀裂先端閉合と亀裂口元閉合があること、亀裂再開口の基準式の問題点や再開口を圧力変化で検出することの難しさ、などが挙げられる。よって、圧力の測定だけでなく、岩盤挙動に関するできるだけの情報を得ることが重要である。

(3) 型どりパッカー

孔内応力ユニットは、上述したようにカメラとAEセンサーを亀裂の開口や閉合などの挙動を確認することを目的として搭載しているが、亀裂を確認するためのより確実な方法として型どりパッカーを用いる。型どりパッカーは、ダブルパッカーのうちの片側のパッカーに熱可塑性のスリーブを装着したものであり、その使用方法は、通常の水圧破碎における型どりと同様である。

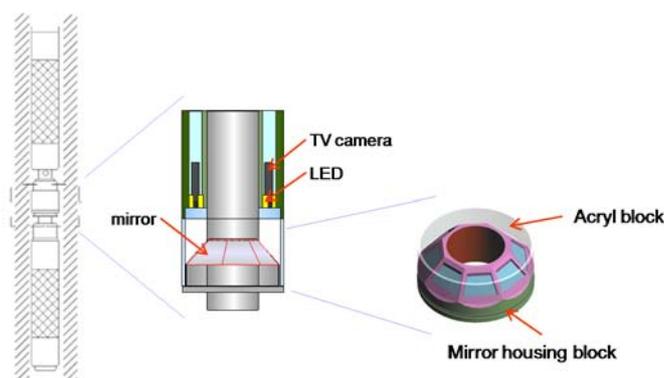


図 4.5-3 カメラの構造概念

4.5.4 送水システム

送水システムは次の2系統ある。

- (1) 水圧破碎用送水システム
- (2) パッカー用送水システム

通常の水圧破碎では、水圧破碎用の水はロッド若しくは送水用ホースを用いて地上から試験箇所へ送水される。水圧破碎では比較的大きな流量と圧力が必要であるが、地上にポンプを設置するので、必要な能力を持つ大きなポンプを用いることができる。一方、コントロール掘削調査システムでは、ロッドでなく可撓性のケーブルを用いる。ケーブルには各種の信号用光ファイバー線や信号線・電力線な

どを通す必要がある。水圧破碎には大きな水量が必要なことから送水管を通すことは困難である。また、ボーリング孔内には泥水があるので孔内水を水圧破碎に用いることも適切でない。このことから、応力測定ユニットでは、水圧破碎用の清水を水タンクに収納してその水を自ら搭載する送水システムにより送水するシステムを開発している。

(1) 水圧破碎用送水システム

水圧破碎に必要な水圧と水量を次のように設定している。

コントロール掘削調査システムは、沿岸域の堆積軟岩地域の深度 500m 程度での適用を想定している。深度 500m での被り地圧 σ_v はおよそ 10MPa となる。軟岩の引張強度を 1MPa と仮定すると、例えば等方的な地圧状態のときには、ブレイクダウン圧力は 16MPa と算出される ($P_b = 3 \cdot \sigma_v - \sigma_H + T - p_0$)。地圧やその他の条件で変化するが、送水ポンプの能力として 30MPa あれば、深度 500m 程度の堆積軟岩で想定される多くの場合をカバーできると考えられる。

必要な流量は岩の透水性によって大きく変わる。試算として、岩の透水係数を 10^{-9} m/s とし、ボーリング孔内の水圧によって孔壁に逸散する定常水量を算出する。孔径と加圧区間を応力測定ユニットに合わせて設定すると、有効水圧として 30MPa 作用させたとき、毎分 0.35 リットルが逸散することになる。応力測定ユニットの送水システムは、最大送水量が 0.8 リットル毎分であるので、送水流量としても堆積軟岩の多くの場合をカバーできると考えられる。

(2) パッカー用送水システム

パッカー用の送水では、水はパッカー拡張に用いられ、閉区間にあるので、特に大きな流量は必要ではない。しかし、圧力は水圧破碎圧力と同等ないしそれ以上が必要である。このため基本的に同様の能力を持つ駆動モーターでパッカー用のポンプを作動させている。

4.5.5 送り込み装置・ラッチシステム

応力測定ユニットを、コントロール掘削調査システムに適用するための機器として、送り込み装置とラッチシステムを搭載している。

(1) 送り込み装置

(2) ラッチシステム

(1) 送り込み装置

ボーリング孔の傾斜が小さく水平に近くなると、応力測定ユニットは自重で降下できなくなる。そのため、鋼管内に泥水を送水しその送水圧により挿入を促す。送り込み装置は、送水圧を受けるための環状のウィングである。

幌延のHCD-3孔や、地上での鋼管試験での実績において、泥水を毎分200リットル程度送水すれば、水平部でも応力測定ユニットを挿入できることを確認している。

(2) ラッチシステム

ラッチシステムは、NL140鋼管の先端に孔内応力測定ユニットを設置固定する。

この動作については、4.5.1 孔内応力・力学測定の概要で、図を用いて説明している。同図の(3)は、送り込みによりユニットがケーシングの底に到達し、ユニットの先端部／ダブルパッカーがケーシング外に出たところである。孔口側パッカーのすぐ左にあるユニットのラッチシューが、鋼管先端のラッチシューマウントに丁度当たった時点の模式図である。(4)では、ユニットが5cmスライドして縮み、ユニットからラッチが飛び出して、鋼管のラッチキーに嵌ったところである。これにより、ケーシングと水圧破碎ユニットがメカニカルに一体になる。(5)は、ケーシングを挿入することにより、ダブルパッカーをパイロット孔に挿入したところである。

ラッチは上述のように機能するので、次のような脱着特性を持つ。

- ① 鋼管を挿入することによりユニットのダブルパッカー部をボーリング孔先端のパイロット孔に挿入するので、そのときの摩擦などによりラッチが解除しないこと。
- ② 試験終了後はケーブルを引き上げることにより、ラッチが解除し、ユニットが鋼管から分離・解放されること。

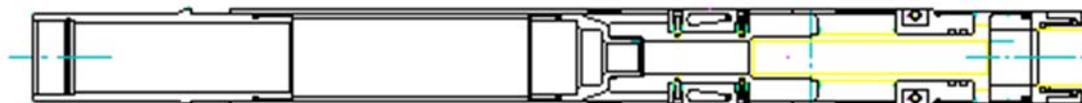


図 4.5-4 ラッチシステム図面

4.5.6 孔内応力測定手順

孔内応力ユニットによる岩盤応力の測定のための手順は次からなる。

- (1) 試験区間の選定
- (2) 水圧破碎試験
 - ① 泥水置換とパッカー拡張
 - ② ブレークダウン圧力の検出
 - ③ リオープニング圧力の検出
 - ④ シャットイン圧力の検出
- (3) 破碎亀裂の型どり

(1) 試験区間の選定

水圧破碎では孔壁に亀裂のない区間を試験区間として選ぶ。

コントロール掘削調査システムにおいては、先端パイロット孔をコア掘りするので試験候補箇所の岩を直接観察することができる。既存の節理などが存在する箇所や、破碎帯などの箇所は水圧破碎試験に適さないのを避ける。

さらに、コアを通らずとも孔壁部に節理等のある場合があるので型どりパッカーやカメラで水圧破碎試験前に孔壁に亀裂がないことを確認することが望ましい。標準的には型どりパッカーの使用を必須とする。また、孔壁に節理などの亀裂がない場合でも、前後区間に観察された地質的弱面の延長が試験候補区間の孔壁奥に出てこないようにして選ぶことが必要である。

なお、特殊な水圧破碎として既存の亀裂を開口・閉合させる試験 (Hydraulic Test at Preexisting Fracture: HTPF) があり、その場合には試験区間に1つの既存亀裂を含むようにする。ここでは特にHTPFは想定しないが、HTPFを採用することも可能である。

(2) 水圧破碎試験

①泥水置換とパッカー拡張

試験区間を選定したらダブルパッカーを挿入する。試験区間内の泥水をできるだけ排出するためにパッカーを拡張しないまま、水圧破碎用の清水を送水する。泥水置換の状況を確認するためにカメラをもちいることができる。

次にダブルパッカーを拡張する。圧力は深度相当の水圧を考慮しそれより少し大きい程度の圧力とする。水圧破碎の加圧区間の圧力を上昇すれば、パッカー圧力は追従して上昇する。なお、最初にパッカー圧を深度相当の水圧よりどれだけ大きく設定すべきかは、岩の孔壁状況により漏水状況なども変化するので一概には決められない。本試験の前の事前の予備試験により確認する。

②ブレイクダウン圧力の検出

パッカーを拡張したら、加圧区間に送水する。送水に伴い加圧区間の水圧が上昇する。水圧が十分に大きくなるとボーリング孔壁には円周接線方向に生じる引張応力により亀裂が発生する。この亀裂は一般的に孔軸と平行であり、その発生位置は最大地圧の方向になる。亀裂が発生すると圧力が低下する。亀裂の発生を認めたら送水を停止する。圧力-時間曲線上において、一般的に最大圧力をブレイクダウン圧力とする。1つの試験区間で1つのブレイクダウン圧力が測定される。

③リオープニング圧力の検出

水圧破碎亀裂が作成された後は、圧力除荷の状態から送水し圧力を上昇していくことによって、リオープニング圧力を複数回測定することができる。リオープニング圧力の検出は、亀裂がない場合の圧力曲線と亀裂が発生した後の圧力曲線を重ねたときに、2つの曲線のかい離が始まる点として読み取ることが1つの方法である。

④シャットイン圧力の検出

大別して2つのシャットイン圧力の評価方法がある。シャットイン試験とステップ流量試験である。

(a) シャットイン試験

これは、亀裂開口状態の圧力で送水系を閉鎖（シャット）して、水が亀裂等を通じて逸散する過程の圧力変化を観察する方法である。このため、上述した②ブレイクダウンの検出後、若しくは、③リオープニング圧力の検出後で、水圧が十分に大きい段階から送水系を閉鎖することにより行われる。シャットイン試験で得られる圧力曲線から、亀裂の閉合圧力を読み取る。この読み取り方法には複数の方法が提案されているので、それぞれの特徴を考慮して複数を併用することが望ましい。

(b) ステップ流量試験

この試験は、ごく小さい流量から十分大きな流量を複数個（例えば5～6点）を設定して行う。まず最小の流量で送水してそのときの定常圧力を求める。順次に流量を増加してそれぞれの定常圧力を求める。このようにして定常圧力ー流量の関係図を描き、その折れ曲がり点の圧力をシャットイン圧力とする。この方法では大きな流量の送水により亀裂が拡大するので、一連の水圧破碎試験の最後に行うのが一般的である。

(3) 破碎亀裂の型どり

一連の水圧破碎試験が終了したら、一旦応力測定ユニットを地上に回収し、型どりパッカーの準備をして再挿入し、破碎亀裂の型どりを行う。水圧破碎後の型どりではパッカーの拡張圧力を十分に大きくして型どりを確実にするのが良い。

4.5.7 孔内力学測定

孔内力学測定の目的、ならびに適用は以下である。

(1) 目的

孔内力学測定は、コントロールボーリングにより掘削されたボーリング孔の先端部のパイロット孔において、孔内载荷試験法による岩盤の変形特性評価を行う。

(2) 適用

孔内力学測定は、長さ 1000m、深度 500mまでの径 120mmのボーリング孔の先端の径 100mmのパイロット孔に適用する。

(3) 測定手順および評価

試験の手順および評価については、一般的なセルフボーリング方式のプレッシャーメータ試験に概ね等しい。

前述（4.5.1 孔内応力・力学測定の概要）に記載のとおり、ダブルパッカーの孔の先端側のパッカーに孔内力学測定用ツール（力学ユニット）を取り付けて使用する。ただし、力学ユニットについては、コントロールボーリングでの適用は実施されておらず、力学ユニットの単体室内試験および応力ユニットと統合化ユニットによる地表付近における現地適用試験のみ実施した。ただし、力学ユニットは、ほぼ実用的な段階に到達したと考えられる。その一方、現地適用については堆積軟岩 1 岩種のみ適用に限られるため、コントロールボーリングでの使用に際しては、原位置の地質や地下環境に合ったビットやウォーターウェイの最適な配置や数量等の検討は今後も必要になるであろう。

上記の前提の元で測定手順を以下に示す（図 4.5-5）。

- ①コントロールボーリングの掘削ツールにより、孔内力学測定を実施する径 100mm よりやや径の小さい（例えば径 89mm の）ボーリングにより予め掘削を行う。
- ②一旦、コントロールボーリングの掘削ツールを引き上げる。
- ③応力と力学の統合化ユニットの先端に付属するセルフボーリング機構により、径 100mm に拡孔しながら力学ユニットを孔内に挿入する。この際、孔壁のマッドケーキの付着を防ぐため、掘削水には泥水でなく清水を利用することが望ましい。
- ④孔内力学測定のための孔内載荷試験を実施する。（その後、応力ユニットによる水圧破碎試験を実施する）
- ⑤応力と力学の統合化ユニットに引き上げを行う。

上記②、③の孔内力学測定の詳細な手順については、基本的には一般的なセルフボーリング方式のプレッシャーメータ試験とほぼ等しい。異なる点は変位の計測方法のみである。一般的なプレッシャーメータ試験では変位計は固定しているのに対して、本力学ユニットは変位計が回転する仕組みになっている（図 4.5-6、図 4.5-7）。よって、パッカー内の内圧を段階的に上げていく過程で内蔵された非接触型変位計を回転させる。これにより回転角度と孔径の関係が得られる（図 4.5-8）。この結果をもとに解析的に岩盤の変形特性の評価を行う。

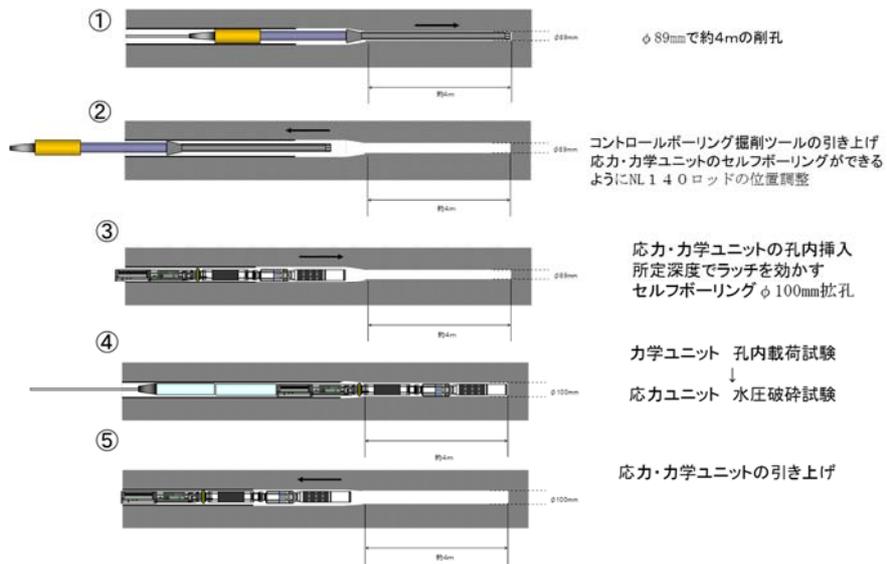


図 4.5-5 統合化ツールの測定手順

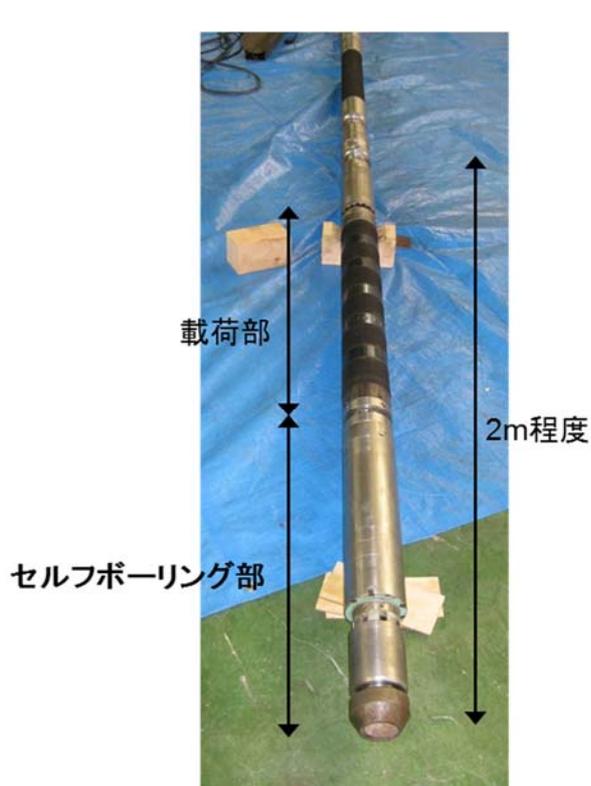


図 4.5-7 孔内力学測定装置

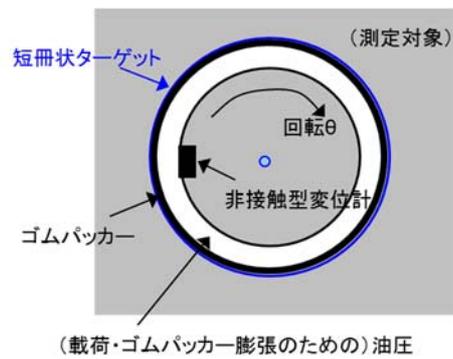


図 4.5-6 変位計測の仕組み

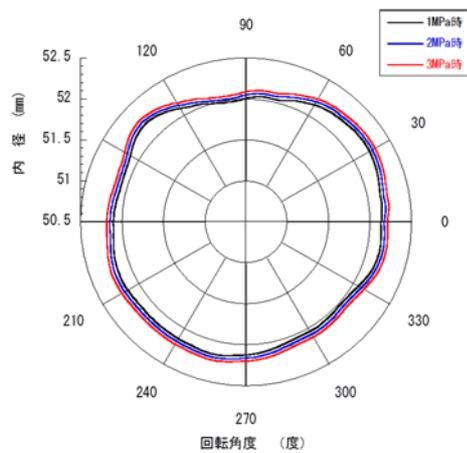


図 4.5-8 計測結果の一例

4.6 孔井内トモグラフィ

4.6.1 孔井内トモグラフィの概要

目的

- (1) 孔井周辺における詳細な地質構造を把握する。
- (2) 反射法地震探査の解析精度を向上させるための速度構造情報を取得する。

適用範囲

地表に発振器（バイブレータ震源）、孔井内に受振器（ハイドロフォンアレイ）を展開したデータ取得を行い、地表－孔井間でのP波速度構造を取得する。

(1) 地質構造の把握や、効率的なボーリング孔跡の計画を目的として、調査の初期段階に反射法地震探査が行われる。一方、コントロールボーリング孔井の掘削後においては、孔井内にセンサーを設置して探査を行うことにより、孔井周辺における詳細な地質構造を得ることが可能となる。そこで、地表とコントロールボーリング孔井間における詳細なP波速度構造を得ることを目的に、孔井に降下させたハイドロフォンアレイ（受振）と地表からの発振を利用した弾性波トモグラフィを実施する。

(2) 反射法地震探査の解析には、P波速度分布が必要であるが、孔井内トモグラフィにより詳細なP波速度分布を得ることにより、より高精度な反射断面を求めることが可能となる。

地表に発振源、孔井内にハイドロフォンアレイを設置して計測を行う。また、押し込み補助装置を利用することにより、水平孔井区間での適用も可能である。トモグラフィ計測を行う観点から、できるだけ孔跡上の地表部に発振点を展開できるような配置とする。

4.6.2 孔井内トモグラフィの構成

- (1) 発振源として、バイブレータ震源を用いる。
- (2) 受振器として、ハイドロフォンアレイを用いる。
- (3) 水平区間へのハイドロフォンアレイの展開を可能とさせるため、押し込み補助装置を利用する。
- (4) データ収録装置として、ダイナミックレンジの大きいデジタル探鉱機を利用する。

(1) 地表からの発振機構に関しては、バイブレータ震源を用いる。一方、計測レイアウトや実施地点の地質状況等に応じては、P波油圧インパクト等の震源を適用できる可能性もある。

HCD-3孔を用いて実施した試験においては、まず平成21年度のデータ取得試験においてP波油圧イ

ンパクタを用いた。その結果、チューブ波に起因すると見られるノイズの振幅が非常に大きく、フィルター処理を施しても初動を捉えられない例が多く見られた。そこで、高出力であり、かつ出力周波数帯を制御できるバイブレータ震源を用いることとし、平成 23 年度にデータ取得試験を実施した。その結果、初動を明瞭に捉えるデータを取得することが可能となった。図 4.6-1 に平成 23 年度に実施したデータ取得試験において使用した使用した中型バイブレータ震源の写真、表 4.6.2-1 にバイブレータ震源の技術仕様を示す。

(2) 一般に孔井内受振器は、孔壁に圧着して計測を行うもの（例えばジオフォン）と、孔壁圧着を要さないもの（例えばハイドロフォン）に大別される。坑壁圧着を要さない機構のほうが多連構成を取りやすく、計測時間の短縮につながるため、受振器としてハイドロフォンアレイを用いる。図 4.6-2 に孔内における受振システム（ハイドロフォンアレイツール）の編成図、表 4.6.2-2 にハイドロフォンセンサの技術仕様を示す。ハイドロフォンの個数は 24 個、ハイドロフォン同士の間隔は 10m であり、1 回の発振で同時に受振できる区間長は 230m である。

一方、多重ケーシングの挿入区間で振動の減衰が大きい場合や、孔内流体によるノイズ（チューブ波）が大きく、ノイズ抑制処理を施しても初動の識別が困難となる場合には、ジオフォンを用いたデータ取得が必要となる。ジオフォンの場合、チューブ波によるノイズの影響をほとんど受けなくなることから、初動をより明瞭に捉えられるとともに、初動に続いて到来する地層境界や断層帯からの微弱な反射波も捉えられることで、後続波を利用した解析が可能となる。一方、圧着のための機構が必要となるため、多連構成を取りにくく、計測に多くの時間を要する。ただし、緩傾斜区間、あるいは水平区間の場合、ジオフォンが自重により孔壁に押しつけられるため、圧着のための機構を有しなくてもデータ取得が可能となり、多連構成を取ることができると考えられる。

(3) ハイドロフォンアレイツールは、急傾斜区間であれば自重により孔井に挿入することができる（図 4.6-2 (a)）。一方、緩傾斜区間、あるいは水平区間の場合は駆動力を利用した押し込みが必要となる。そこで、ハイドロフォンアレイの下端部に押し込み補助装置を取り付けることにより、水平区間まで挿入させることを可能とさせる（図 4.6-2 (b)）。なお、自重で降下できる区間においても、図 4.6-2 (b) の編成によるツールを用いた計測は可能である。

データ取得試験において、押し込み補助装置を取り付けた場合、押し込み補助装置の微小な動作を検出しながら送泥量や圧力を制御しなければ、安全に水平区間まで押し込むことが困難であることが判明した。そこで、CCL の代わりに掘削時に用いる WL-MWD を取り付けた。また、押し込み補助装置により励起されるチューブ波ノイズの影響で初動を把握できない可能性も考えられたことから、押し込み補助装置等とハイドロフォンアレイを 40m 離れた。

(4) HCD-3 孔を用いて実施した試験においては、データ収録装置として GDAPS-4A 探鉱機を利用した。データ収録装置の技術仕様を表 4.6.2-3 に、データ取得機器の接続概要図を図 4.6-3 に示す。GDAPS-

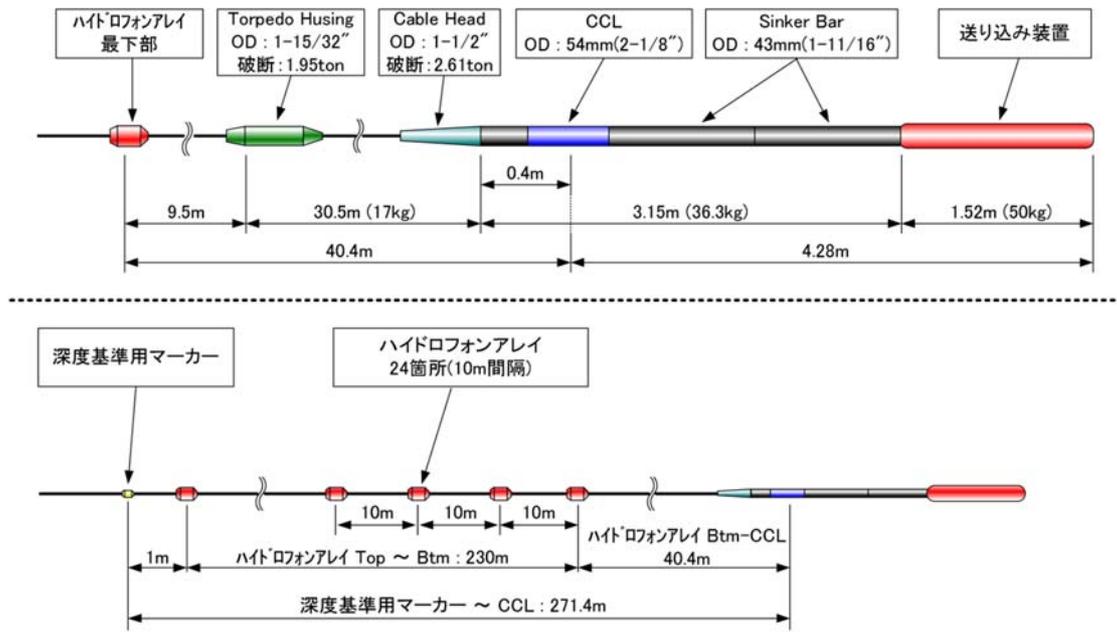
4A 探鉱機は、24 ビットデルタシグマ型の高ダイナミックレンジ AD 変換器と細かいステップでゲイン調整可能なアンプを組み合わせた精度の高いデータ収録装置で、起振波形と受振波形との相互相関処理及び処理波形の表示を準リアルタイムに行うなどの機能を有する。



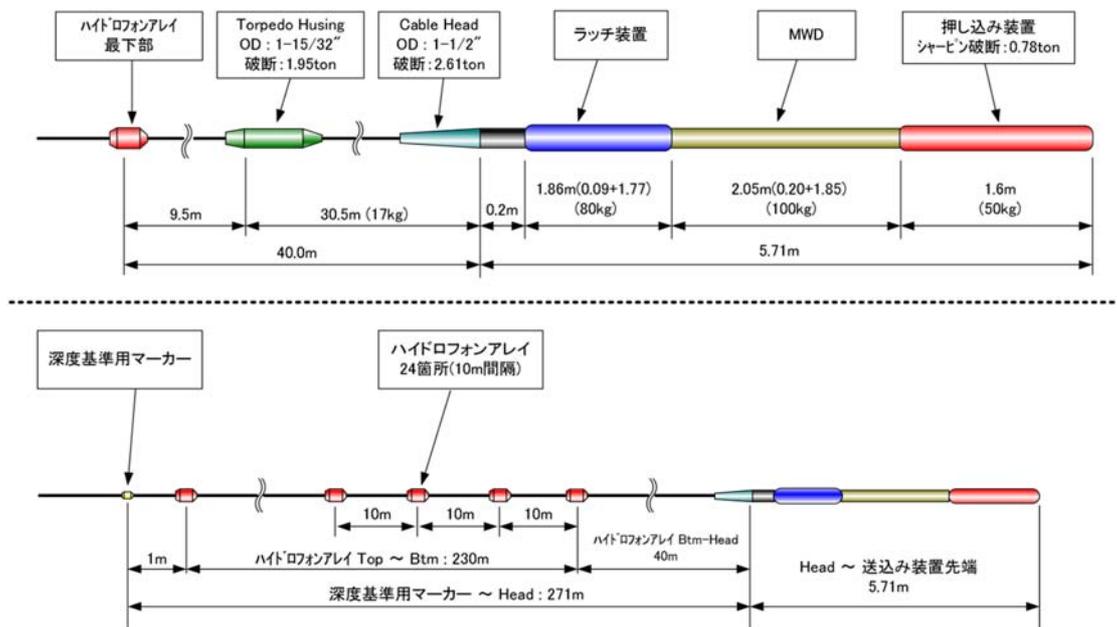
図 4.6-1 中型バイブレータ震源

表 4.6.2-1 バイブレータ震源の仕様

項目	設定値
モデル	IVI 社 EnviroVIB/Minibuggy
起振力	ピークフォース 約 15,000lbs-f
発振周波数帯域	5Hz から 250Hz (カタログ値)
スイープ長	最大 255 秒
スイープタイプ	リニアアップ / ダウンスイープ、ノンリニアスイープ など
全長、全幅、全高、重量	6.1m、1.83m、2.59m、8.1ton



(a) 押し込み補助装置を取り付けない場合（自重で降下できる区間）



(b) 押し込み補助装置を取り付けた場合（水平区間）

図 4.6-2 ハイドロフォンアレイツールの構成図

表 4.6.2-2 ハイドロフォンセンサの仕様

項目	設定値
Model	HTI-96-MIN/V 5/8
Frequency Response	5Hz から 2kHz
Operating Depth	3,000m
Sensitivity	-170dB re 1V/uPa
Number of Array ch	24ch
Array Interval	10m
Power Requirement	12VDC-30VDC
Size	5/8" diameter, 1.625" long

表 4.6.2-3 データ収録装置の仕様

項目	設定値
Model	GDAPS-4A Digital Telemetry System
AD Conversion	24bit delta-sigma converter
Dynamic Range	better than 120dB @2ms/4ms sampling interval
Bandwidth	83% of Nyquist Frequency
Crossfeed Isolation	better than -95dB
Max. Input Level	±2.25V @6dB pre-amplifier
Preamp Gain	6dB/18dB/30dB
Sampling Interval	0.5/1/2/4ms
Record Length	およそ 16,000points

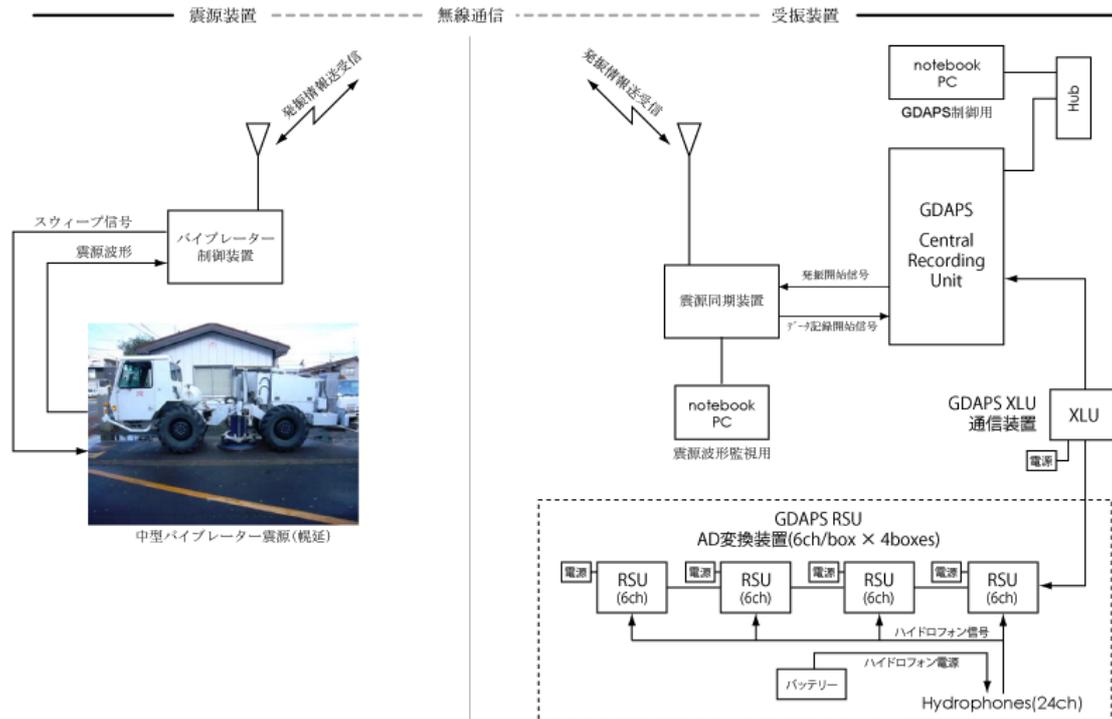


図 4.6-3 データ取得機器の接続概要図

4.6.3 孔井内トモグラフィの実施手順

以下の手順で作業を実施する。

- (1) ハイドロフォンアレイツールとロガーの接続
- (2) ハイドロフォンアレイツールの孔内挿入
- (3) ハイドロフォンアレイとバイブレータ震源の組み合わせによるデータ取得

(1) 図 4.6-4 にハイドロフォンアレイツールとデータロガーとの接続の概要図を示す。ハイドロフォンアレイケーブルはウインチドラムに巻かれ、ウインチシステムの動力により巻き出し、巻き取りを行う。押し込み補助装置等の孔内ツールは、接続ジョイントを介してハイドロフォンアレイケーブルに接続される。CCL 及び WL-MWD は、ハイドロフォンアレイケーブルのスルー線 7 本のうち各 2 本を利用して、ウインチドラムのスリッピングを介してデータロガーに取り込むことで、アーマードケーブル昇降時のリアルタイムモニタを行う。

(2) 1 回の発振で同時に受振できる区間長は 230m であることから、計画する区間長に応じて複数区間にハイドロフォンアレイケーブルを設置して計測する。

図 4.6-5 に HCD-3 孔を用いて実施した試験時におけるリグアップ装置の配置概要図を示す。ハイドロフォンアレイケーブルの先端は、上下滑車を通して孔口付近まで導かれる。孔内ツールは長尺物

のため一気に吊り上げて孔内に挿入することができないことから、構成に応じて適宜孔口部で接続して孔内に送り込む。ハイドロフォンアレイツールを安定して降下させるため、ツール先端部の挙動をCCL（図 4.6-2 (a) に示す編成の場合）あるいはWL-MWD（図 4.6-2 (b) に示す編成の場合）で確認しながら孔内へ挿入する。

(3) (2) においてハイドロフォンアレイツールを孔内に設置した後、地上部からバイブレータ震源を用いて地震波を発生させて、孔内に設置したハイドロフォンを用いてその地震波を受振する。発振間隔や発振させるスイープ波の周波数の範囲は、探査レイアウトや地質状況、現地で実施するパラメータテストの結果を踏まえて決定する。起振により得られた受振記録は都度現地で確認し、初動が読み取れるデータを確実に取得できるように品質管理を行う。例えば、孔内からのガスの発生に伴うチューブ波に起因するノイズや、地上部において発生するノイズ（トラックの通行など）等により取得データの質が良くないことが明らかな場合には、ノイズの少ない時間帯を見ながら発振するなど、データ処理作業が複雑になることを可能な限り低減させるよう工夫する。

平成 23 年度に実施したデータ取得試験における地表発振点及び受振点の位置図を図 4.6-6 に示す。ハイドロフォンアレイを、掘削長 785m～555m の 10m 間隔（区間 1）、掘削長 570m～340m の 10m 間隔（区間 2）、掘削長 330m～100m の 10m 間隔（区間 3）の 3 区間に設置し、各設置時点において、VP. 15（HCD-3 孔口付近）から VP. 117（孔口から約 1km の位置）のうち奇数番号で起振した（起振間隔は 20m）。区間 1 及び区間 2 では押込み補助装置を接続した状態（図 4.6-2 (b)）、区間 3 は CCL を接続した状態（図 4.6-2 (a)）でそれぞれ計測した。表 4.6.3-1 に発振パラメーター、表 4.6.3-2 に記録パラメーターを示す。

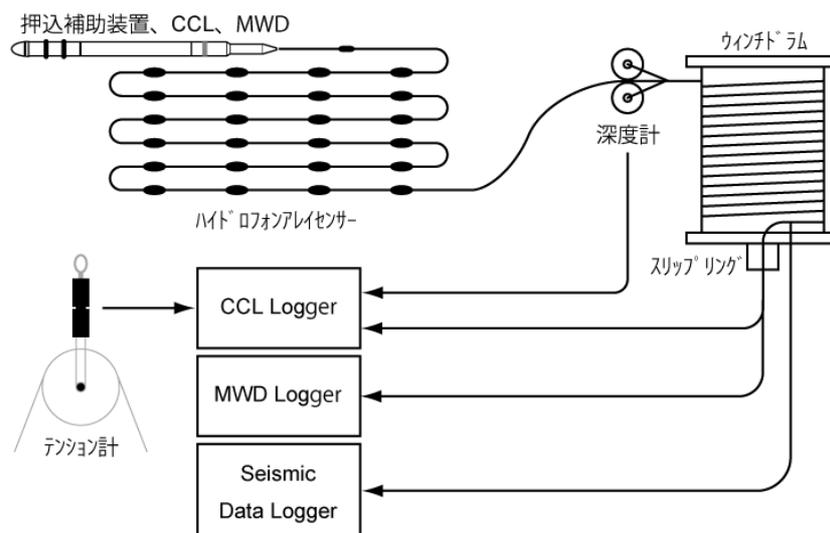


図 4.6-4 ハイドロフォンアレイツールとデータロガーとの接続図

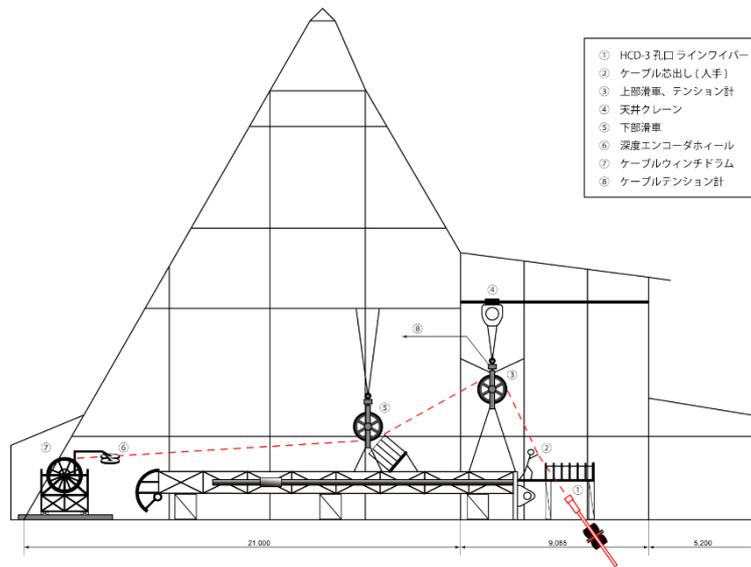


図 4.6-5 リグアップ装置の配置概要図

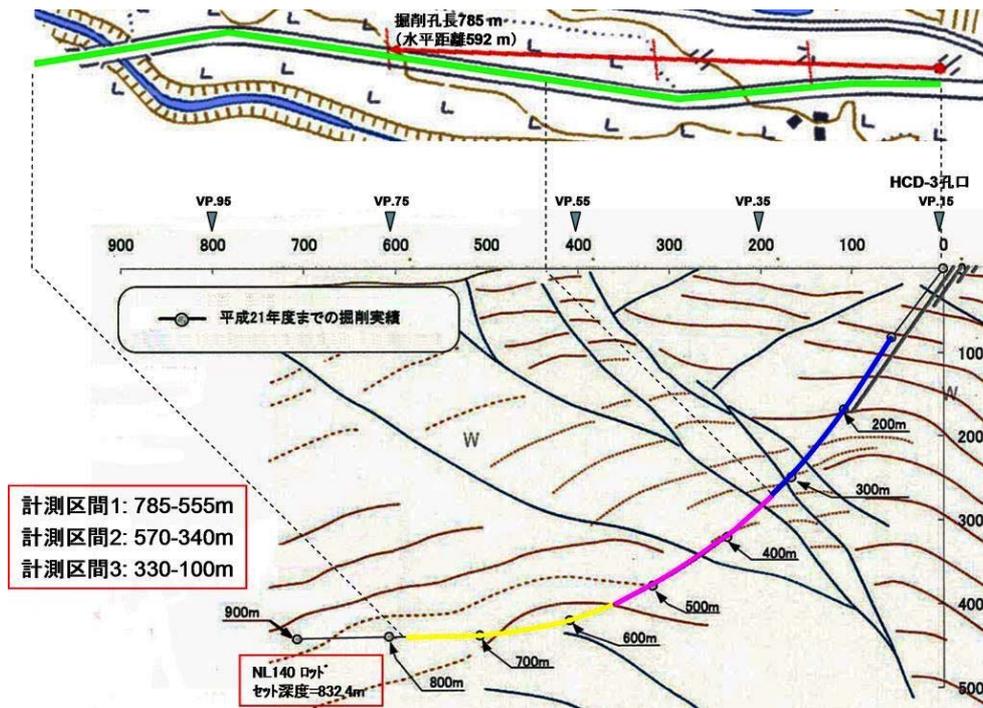


図 4.6-6 平成 23 年度データ取得試験における地表発振点及び受振点の配置図

表 4.6.3-1 平成 23 年度データ取得試験における発振パラメーター一覧

項目名	設定値
スイープ長	12 秒
周波数	8Hz～80Hz
垂直重合	10 回(標準)
スイープタイプ	リニアアップスイープ

表 4.6.3-2 平成 23 年度データ取得試験における記録パラメーター一覧

項目名	設定値
サンプル間隔	1 ミリ秒
記録長	3 秒
チャンネル数	24
プリアンプゲイン	18 dB
ノイズエディット	ファクター2、ゲート 15 秒

4.6.4 孔井内トモグラフィデータの解析手順

取得したデータの評価、波形処理を行い、初動走時トモグラフィ解析を実施する。そして、得られた P 波速度構造もとに既往反射法データの再解析を行い、反射断面を導出する。データ解析の手順は以下の通りである。

- (1) データの評価及び波形処理作業
- (2) 地表－孔井間初動走時トモグラフィ解析
- (3) 得られた P 波速度構造を用いた反射法データの再解析

データ解析の流れを図 4.6-7 に示す。実施した孔井内トモグラフィの取得データを用いて、初動走時トモグラフィ解析を行う。浅層における低速度層を正確に把握することで、解析精度が高まると考えられることから、反射法データ取得時に屈折波データも同時に取得しておき、屈折法トモグラフィ解析により求めた浅層部の速度構造も組み込むことで、詳細な P 波速度構造を求める。そして、求めた速度構造を用いて反射法データの再解析を行い、より詳細な反射断面を求め、地質構造を評価する。

(1) 孔井内トモグラフィにより取得したデータを確認し、初動走時トモグラフィ解析に適用できるデータであるか検討し、必要に応じてノイズの除去などといったデータ処理作業を行う。後続波形の利

用も可能であれば、フルウェーブインバージョンの実施も検討する。また、地表発振—地表受振による屈折法データも組み込んだ解析を行う。

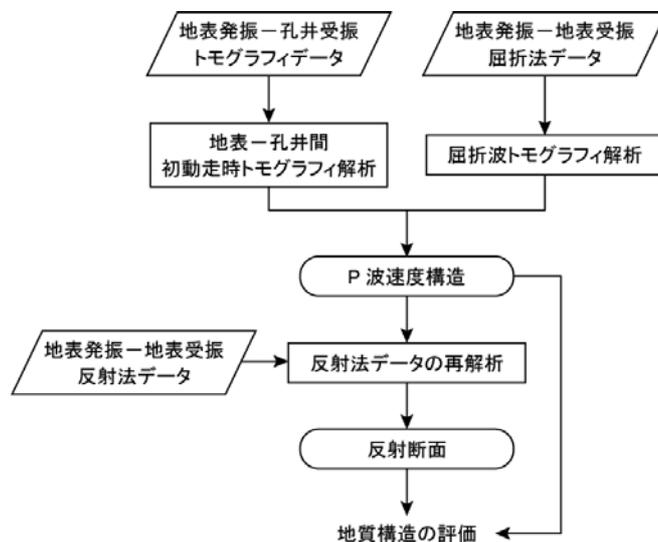


図 4.6-7 データ解析の流れ

平成 23 年度に実施したデータ取得試験において取得した共通発震点記録の例を図 4.6-8 に示す。発震点が孔口に近い記録 (VP19) においては、初動近傍で強振幅のチューブ波 (見かけ速度約 1.4 km/sec) が覆っており、P 波初動を識別することが困難であることが分かる。そこで、強振幅のチューブ波に対応するイベントを F-K パネルから抽出して、これを遮断するフィルターを作成することを試みたが、チューブ波の速度と P 波初動の速度が近接しており、これらを十分に差別化して分離することができなかった (図 4.6-9)。これは、F-K フィルターにより実際の初動部分もフィルターの影響を受けてしまうため、フィルター処理を施しても P 波初動を識別することは困難と結論づけた。また、ハイドロフォンアレイツールが宙吊り状態になる浅部区間のデータは、ケーブルが固定されていないこと、孔内で発生したガスが地下水面に達した際に空気中に放出される音の影響などによるノイズの影響を受けやすく、初動の識別が困難となる例が多く見られた。このように、チューブ波の影響等によるノイズ環境が大きい場合には、ジオフォンを用いたデータ取得を組み合わせる実施することが望ましい。一方、孔口から 200m 以上離れた発震点 (VP49、VP79) では、チューブ波の振幅が比較的小さくなること、チューブ波の傾きと初動の傾きが異なることにより、初動を認識することが可能であったことから、トモグラフィ解析に利用した。

屈折波データに関して、平成 25 年度に地表発振—地表受振によるデータ取得試験を実施し、解析に利用した。発震点の位置を図 4.6-10 に、得られた取得波形の例を図 4.6-11 に示す。初動が明瞭に捉えられているとともに、後続波の波形も明瞭であることから、屈折法データの解析は、フルウェーブインバージョンによる解析を行うこととした。解析の実施にあたり、波形の前処理 (振幅補償、エディット、ミュート) を行った。前処理を行った記録の例を図 4.6-12 に示す。

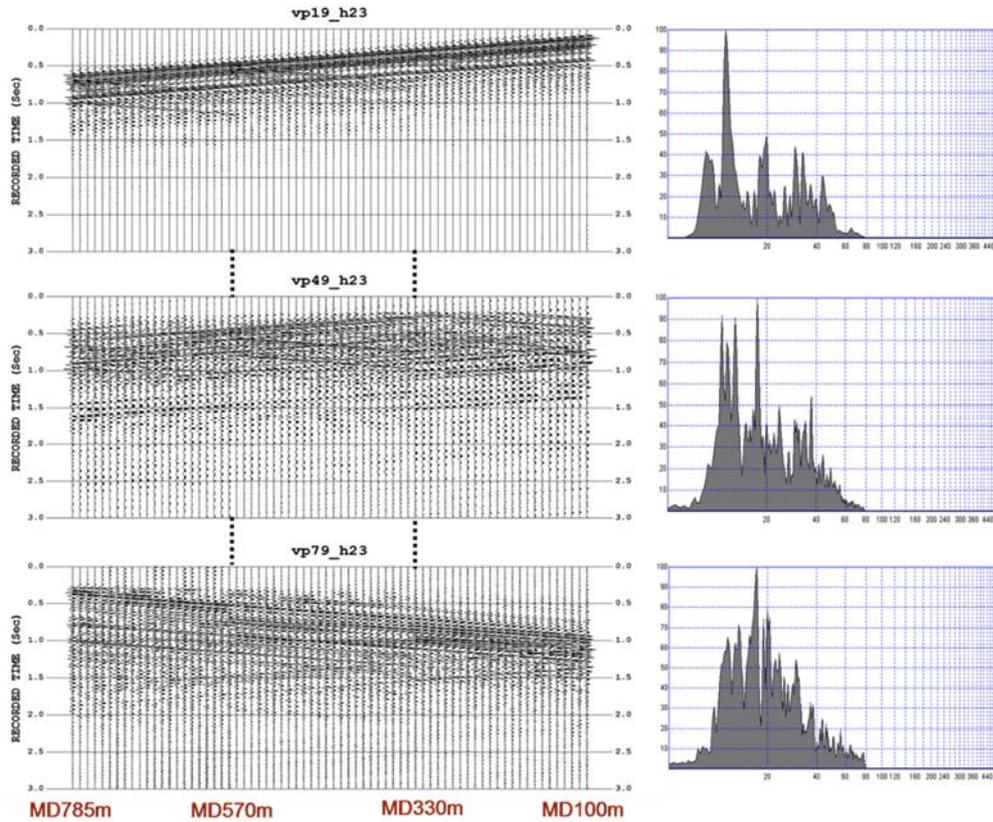


図 4.6-8 平成 23 年度データ取得試験における共通発振点記録の例

(上: VP19、中: VP49、下: VP79 からの発振点における記録例。左: 受振波形。右: 振幅スペクトル。
発振点の位置は図 4.6-6 に示している)

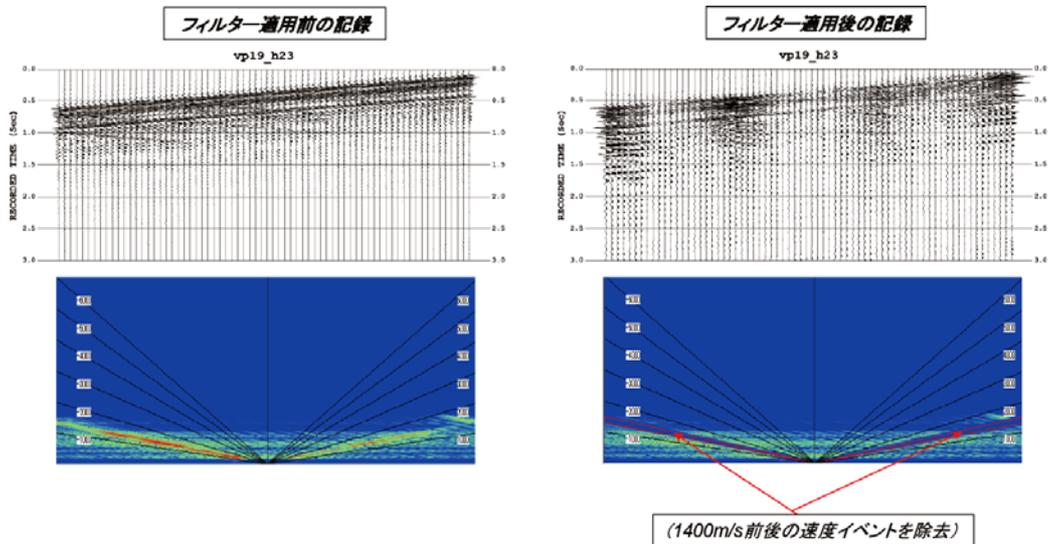


図 4.6-9 F-K フィルター適用前後の発振記録例

(左: フィルター適用前の記録。右: フィルター適用後の記録。上: オフセット VSP 記録。下: F-K スペクトル。VP19 による発振記録を用いた記録例)

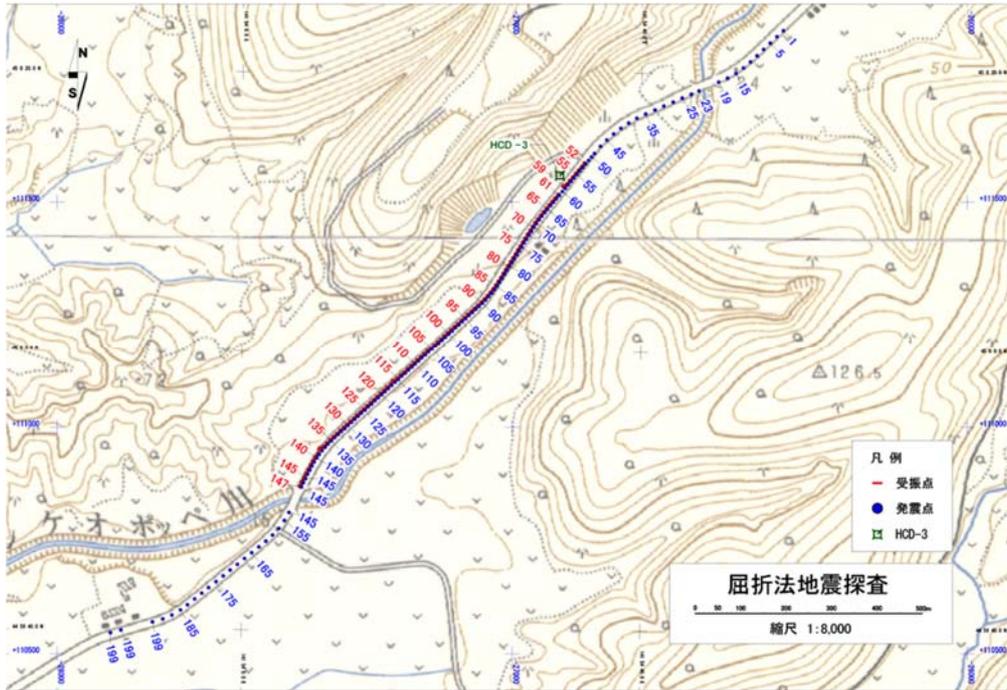


図 4.6-10 屈折波データ取得試験における発受振点の位置図

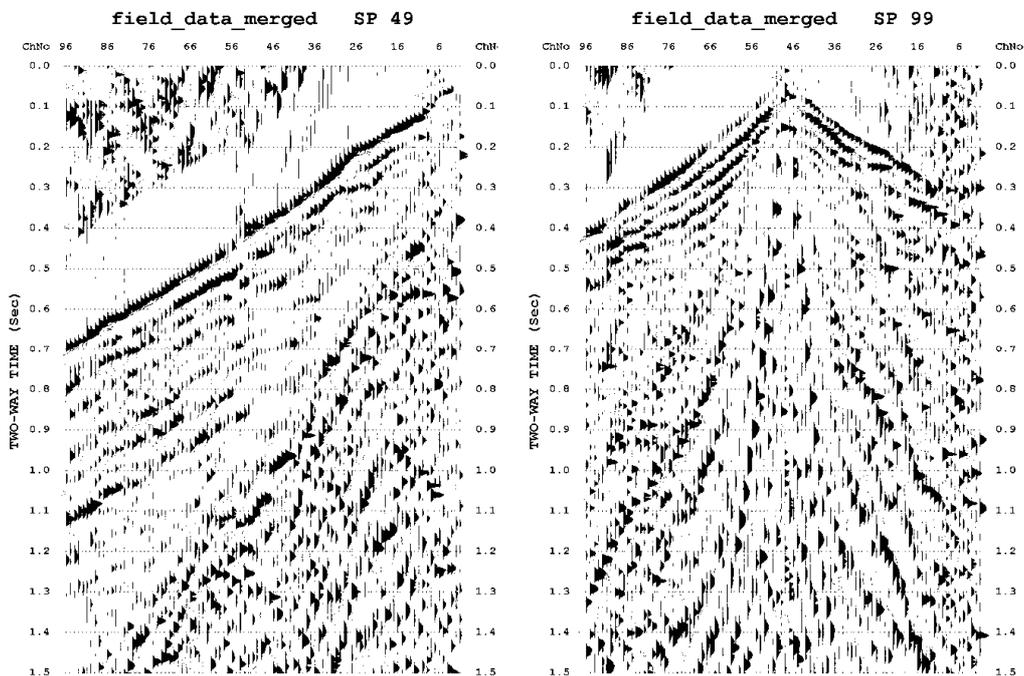


図 4.6-11 屈折波データ取得試験における取得波形の例

(SP49、SP99 における共通発振点記録。300msec の AGC (Automatic Gain Control) 適用後の波形。
発振点の位置は図 4.6-10 に示している)

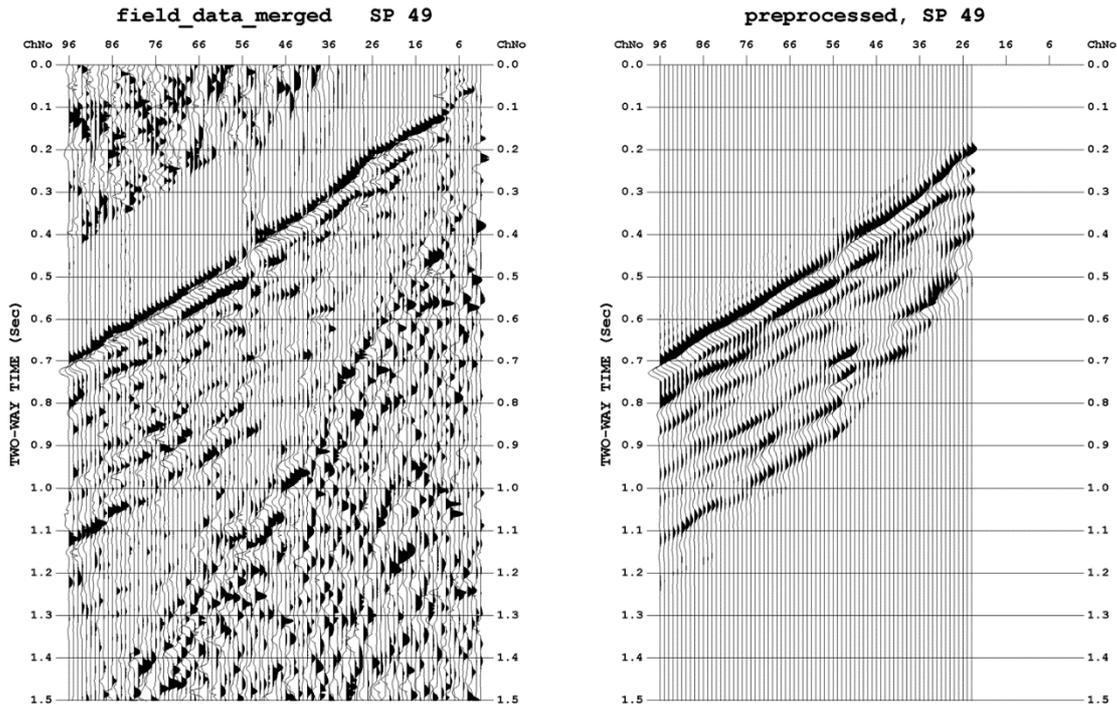


図 4.6-12 屈折波データ取得波形に対する前処理後の記録例

(SP49 における処理記録。左：処理前。右：処理後。振幅は表示用にトレースごとに調整している)

(2) 得られた地表発振－孔井受振トモグラフィデータ及び地表発振－地表受振屈折法データを用いて、P波速度構造を求める解析を行う。得られたデータの品質に応じて、初動走時のみを用いた解析、あるいは後続波形も利用したフルウェーブインバージョンのいずれかを行う。また、トモグラフィデータ及び屈折法データの両者を用いて同時解析するジョイントインバージョンが適用できる可能性もある。

今回取得したデータに関しては、地表－孔井間初動走時トモグラフィ解析を実施した後、得られた速度構造を初期値として屈折波トモグラフィ解析を行うことで、P波速度構造を求めた。

まず、地表－孔井間初動走時トモグラフィ解析を実施した。(1)において示したように、ハイドロフォンアレイツールが宙吊り状態になる浅部区間のデータは初動の識別がほぼ困難であったことから、図 4.6-6 における計測区間 1 及び 2 (受振器深度 340m から 785m) のデータを解析に用いた。図 4.6-13 に解析に用いたデータ取得範囲を示す。解析手順は以下の通りである。

- a) 読みとり走時データを用いて、直線波線を使ったバックプロジェクション法によるトモグラフィインバージョンにより初期速度構造を更新する。今回は、初期モデルとして、既往の反射法地震探査により得られた速度構造 (図 4.6-14) を用いた。
- b) (a) で更新された速度構造に対して、波線追跡法 (LTI ; Linear Travel time Interpolation) を用いて初動の屈折波線を計算する。
- c) (b) で求めた屈折波線を使い、共役勾配法 (CG ; Conjugate Gradient) を用いたインバージョン

ンを実施し、速度構造を更新する。

解析により得られた速度構造を図 4.6-15 に示す。

次に、地表一孔井間トモグラフィ解析により得られた速度構造を初期値として、フルウェーブインバージョンによる屈折法トモグラフィ解析を実施し、P 波速度構造を更新した。解析の流れを図 4.6-16 に示す。与えられた速度モデルを用いて波動場シミュレーションを行い、その結果と実際の観測波形との残差に基づき速度モデルを修正した。残差が十分に小さくなるまでこの操作を繰り返すことで、観測データをよく説明できる速度モデルを求めた。解析には、フランスの国立研究機関である GeoScience AZUR の主催する SEISCOPE コンソーシアムで開発された周波数領域のフルウェーブインバージョン解析ソフトウェア (TOY2DAC) を用いた。1 回のインバージョンで使用した周波数は 5 個で、順次高周波数帯域側にずらしてインバージョンを繰り返した。インバージョンは計 3 回実施し、対象とする周波数の範囲は 6Hz から 24Hz とした。解析により得られた速度構造を図 4.6-17 に、初期値 (地表一孔井間トモグラフィ解析により得られた速度構造 ; 図 4.6-16) に対する更新量 (変化した割合) を図 4.6-18 に示す。図より、屈折波トモグラフィ解析により、地表から約 150m までの速度構造が最大約 15%更新された。

(3) (2) において求めた速度構造を利用して反射法地震探査の再解析を行い、より高精度な反射断面を求める。また、データ処理において、CRS 法 (Common Reflection Surface stack ; Jager et al., 2001 ; Mann et al., 2007 ; Schleicher et al., 1993) を改良した手法である MDRS 法 (Multi-Dip Reflection Surface method ; 青木ほか, 2010) を適用することにより、複雑な反射面の傾斜や曲率を考慮した解析を行うことで、さらなる高精度な反射断面を導出する。

CRS 法では、反射面の傾斜や曲率を考慮しながら、近傍の CMP に属するトレースも重合に利用する。従って、空間分解能の劣化を抑えつつ、より高い SN 比を得ることができる。一方、異なる傾斜の反射波が交差する箇所では、優勢でない反射イベントが消失してしまう可能性がある (図 4.6-19) 。MDRS 法では、反射波の出現角度の範囲を予測していくつかの領域に分割し、それぞれの傾斜領域で CRS 法を適用した CRS 重合記録 (MDRS サブセクション) を作成し、それらの重合断面を加算することで、波の重なり合いが表現された MDRS 重合記録を得ることができ、優勢でない反射イベントの消失を防ぎ、より高精度な反射断面を得ることが可能となる。ここで、傾斜範囲を設定するための検索範囲を決定する際、速度値を RMS 速度形式として与えることになるが、最適な CRS 重合記録を得るためには、ここでより精度の高い速度値を与えることが重要となる。

平成 17 年度における反射法データの取得時に実施したデータ処理 (以下、既存処理) 、及び今回実施したデータ処理の流れを (左 : 平成 17 年度における反射法データの取得時に実施したデータ処理 (既存処理) 。右 : 今回実施したデータ処理)

図 4.6-20 に示す。今回実施した処理では、既往処理における残差静補正までの処理結果を入力とし

て、MDRS 法を中心とした再処理を実施した。また、速度構造は屈折法トモグラフィ解析により更新した P 波速度構造 (図 4.6-17) を用いた。MDRS 法において解析対象とする傾斜範囲を -400msec/km から $+400\text{msec/km}$ とし、これを 61 分割して MDRS サブセクションを作成した。

既存処理により得られたマイグレーション深度断面を図 4.6-21 に、今回実施したデータ処理により得られたマイグレーション深度断面を図 4.6-22 に示す。既存処理による断面 (図 4.6-21) に対して、今回実施した処理による断面 (図 4.6-22) は、反射イベントの連続性が浅部、深部ともに向上しており、振幅の強弱により地質境界の判別がしやすくなっていることが分かる。このように、高精度な P 波速度構造を取り込むとともに、MDRS 法を用いた処理を行うことにより、高精度かつより地質解釈が容易な反射断面を得ることが可能となった。

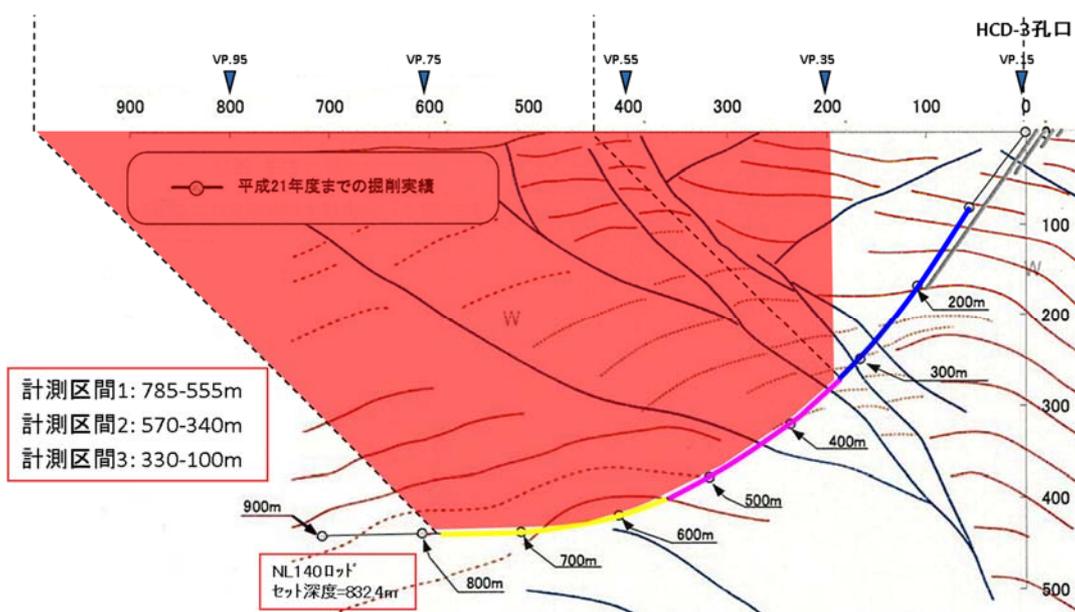


図 4.6-13 P 波初動走時トモグラフィ解析に用いたデータ取得範囲

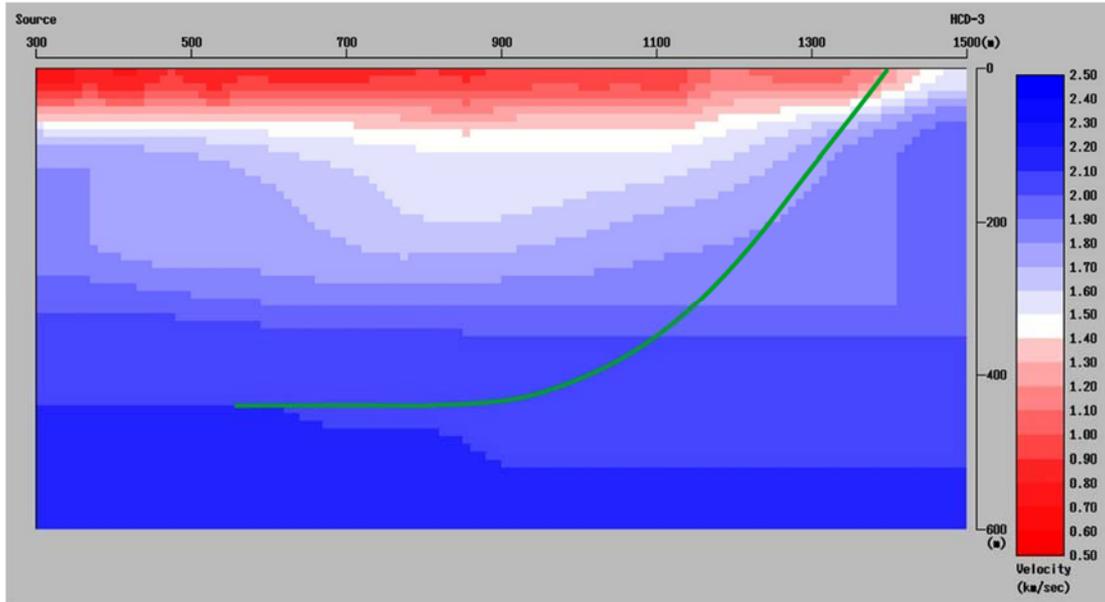
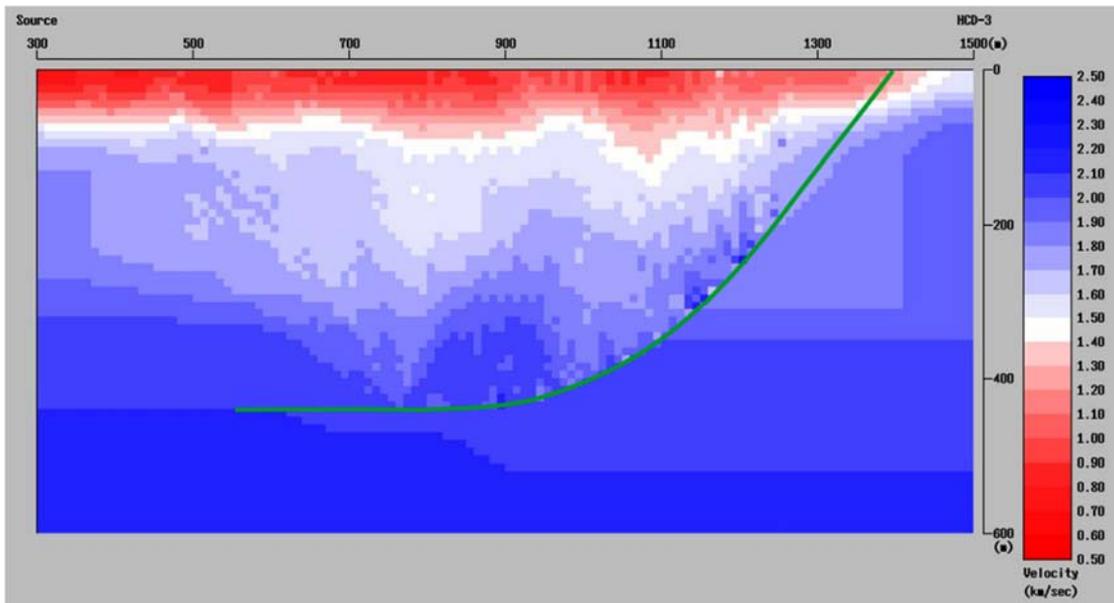
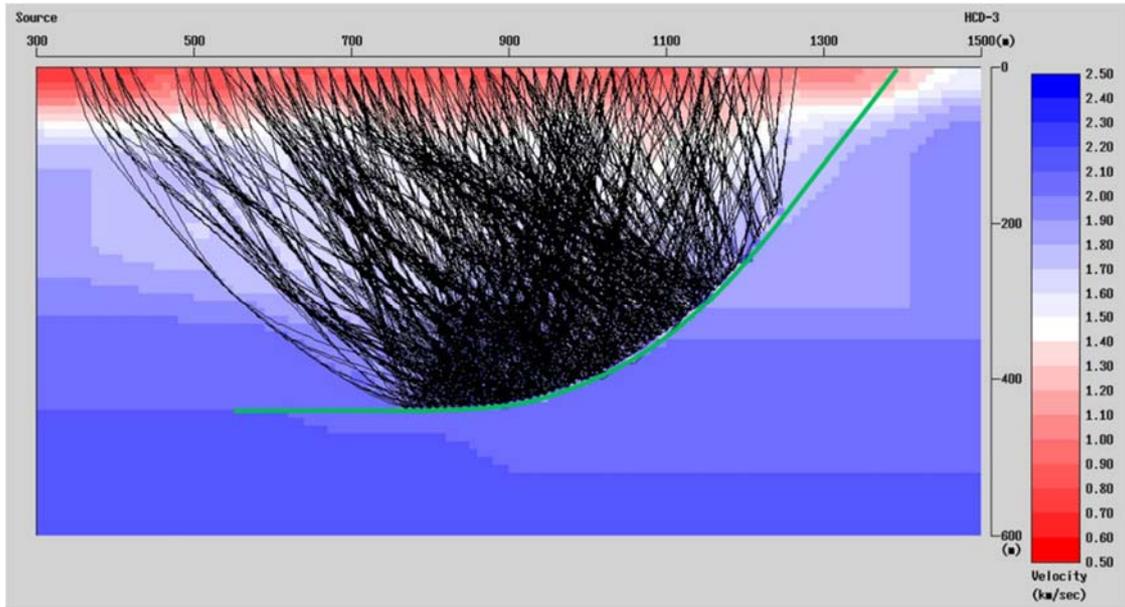


図 4.6-14 P波初動走時トモグラフィ解析における初期速度構造



(a) 解析により得られたP波速度構造



(b) 得られた P 波速度構造に対する屈折波線

図 4.6-15 P 波初動走時トモグラフィ解析の結果

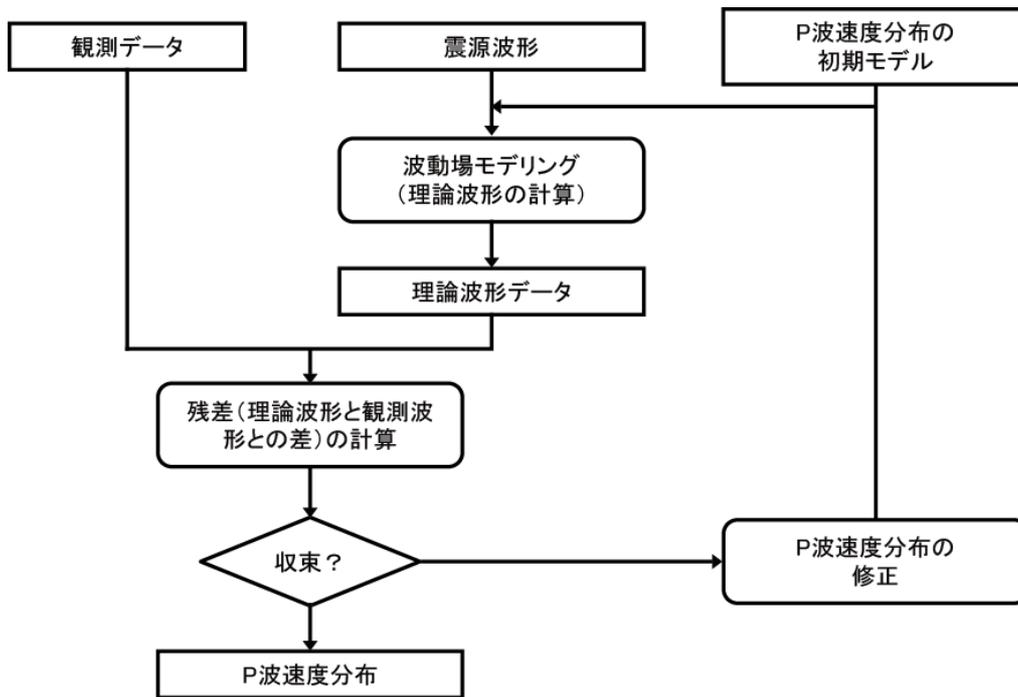


図 4.6-16 フルウェーブインバージョンの流れ

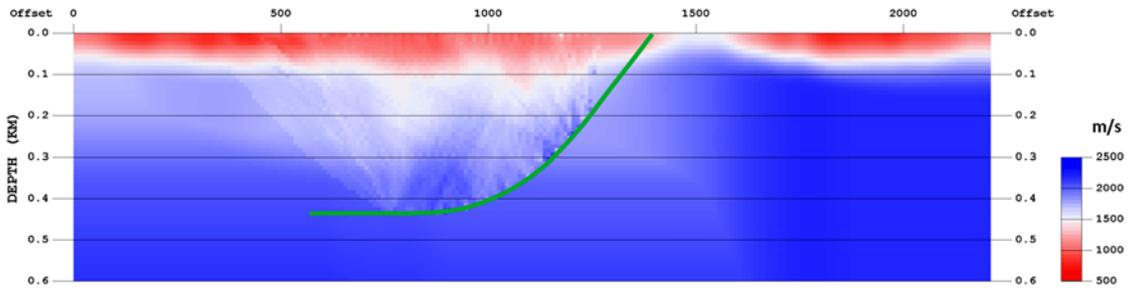


図 4.6-17 屈折波トモグラフィ解析により更新されたP波速度構造

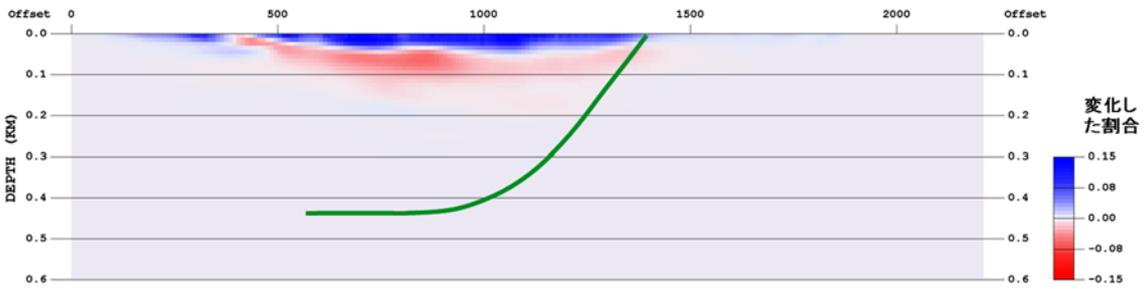


図 4.6-18 屈折波トモグラフィ解析の初期値に対する更新量（変化した割合）

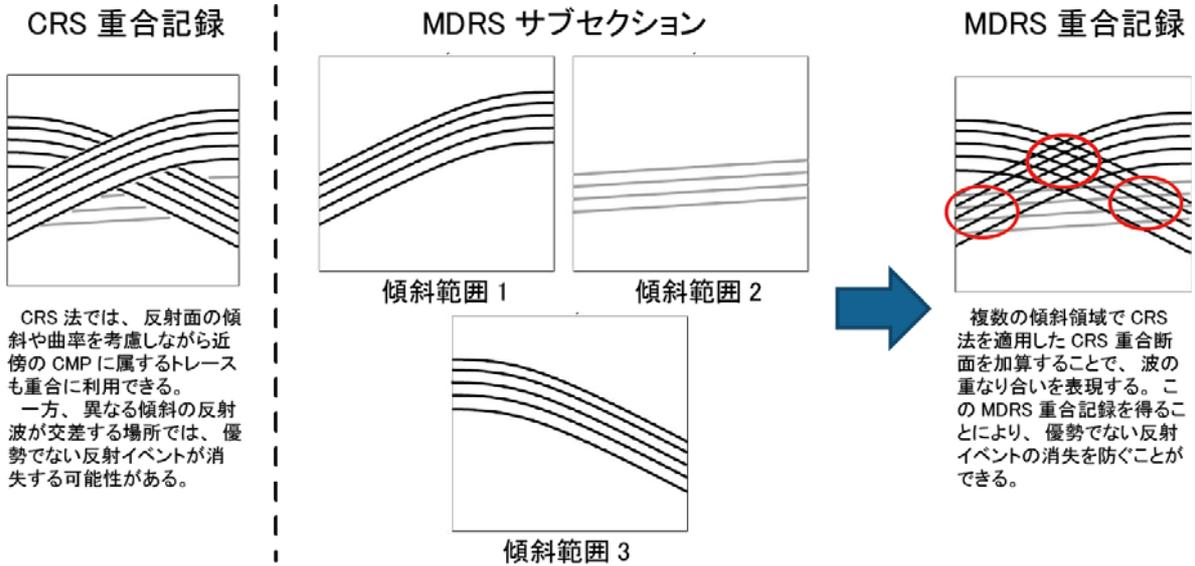
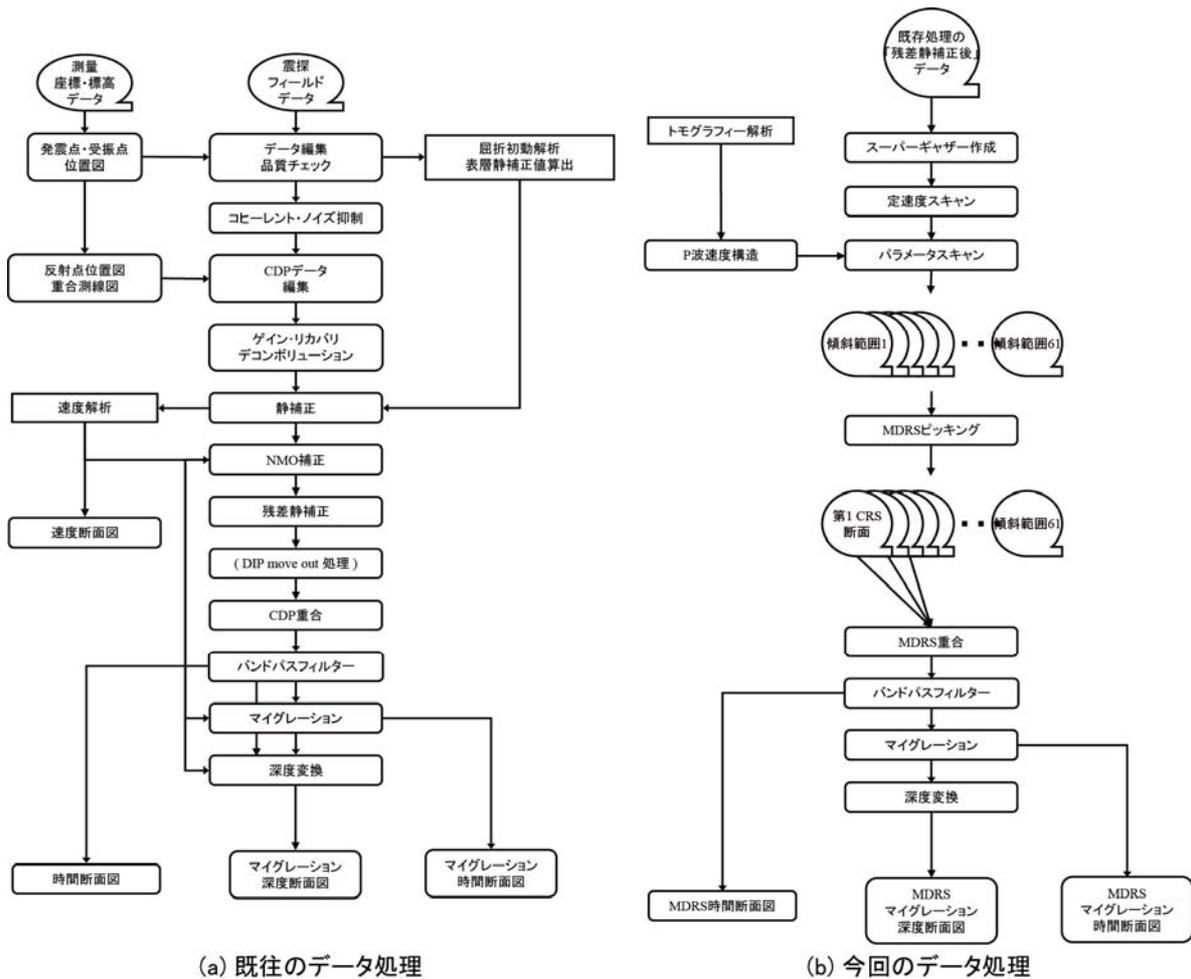


図 4.6-19 CRS 法、MDRS 法の概要



(左：平成 17 年度における反射法データの取得時に実施したデータ処理（既存処理）。右：今回実施したデータ処理)

図 4.6-20 反射法データ処理の流れ

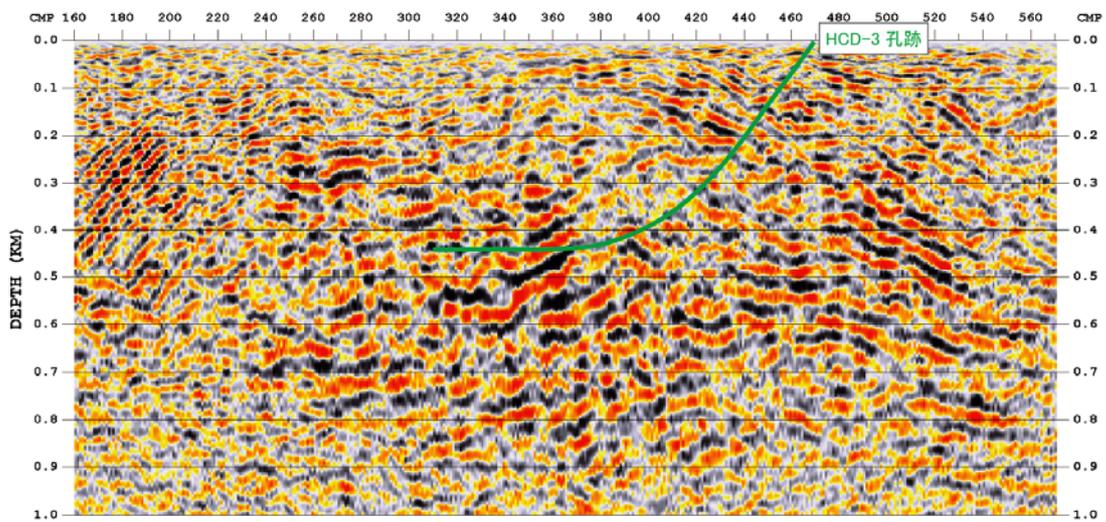


図 4.6-21 既存処理により得られたマイグレーション深度断面

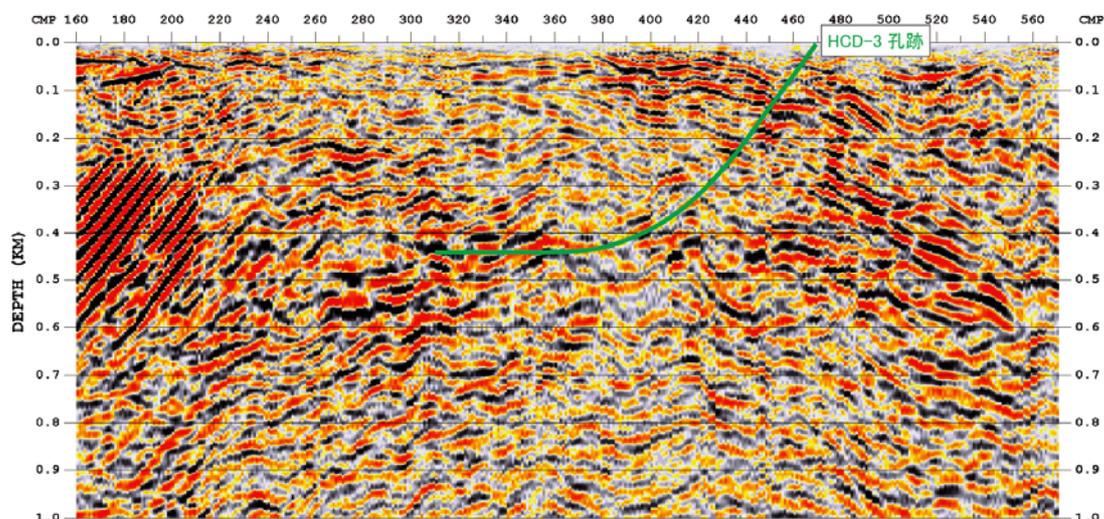


図 4.6-22 今回の処理により得られたマイグレーション深度断面

参考文献

青木直史・檜原省吾・高橋明久・西木司（2010）：MDRS 法によるコンフリクティング・ディップのイメージング、物理探査学会講演会論文集、60-63.

Jager, R., Mann, J., Hocht, G. and Hubral, P. (2001) : Common-reflection-surface stack: Image and attributes, *Geophysics*, 66, 97-109.

Mann, J., Schleicher, J. and Hertweck, T. (2007) : CRS Stacking -A Simplified Explanation, *Extended abstracts of 69th EAGE Conference & Exhibition*, B044.

Schleicher, J., Tygel, M. and dan Hubral, P. (1993) :Parabolic and hyperbolic paraxial twopoint traveltimes in 3d media, *Geophysical Prospecting*, 41, 495-5.

4.7 モニタリング

4.7.1 モニタリングシステムの概要

モニタリングはコントロール掘削完了後のボーリング孔を利用し、孔内圧力を連続計測すること、および孔内にサンプラーを挿入し、原位置で原位置圧力を保持したまま採水を可能とするシステムである。

モニタリングは①ボーリング孔内への観測区間の設置、②モニタリングシステムの設置、および③連続計測の各作業を実施する。

(1) 目的

孔内モニタリングは、コントロールボーリングにより掘削されたボーリング孔を利用して、孔内水の採水および孔内圧力の連続計測を行うことを目的とする。

(2) 適用

モニタリングシステムは、長さ 1000m、深度 500mまでの内径 120mm以上のボーリング孔内に適用する。

モニタリングを実施するためにボーリング孔内に観測区間となる裸孔部分を設ける必要がある。このため、①ボーリング孔に設置されているケーシングパイプを孔内で切断する技術②残存ケーシングパイプの自重を保持するためアンカー部を作成するケーシングパイプ拡管する技術もあわせて実用化した。

表 4.7.1-1 モニタリングシステムの概要

形 式	SPMP (Stand-Pipe Multi-Packer system)
観測 (採水) 区間数	最大 5 点
観測項目	孔内圧力 (温度) 測定、孔内流体の採水、透水試験 (揚水・注水)
装置寸法	ケーシング : 外径 ϕ 76.1mm、内径 ϕ 70.9mm、標準長 3m/本 パッカー : 収縮時外径 ϕ 110mm、内径 ϕ 70.9mm スタンドパイプ : 外径 ϕ 23mm、内径 ϕ 21mm、標準長 3m/本
遮水方法	観測区間の上下に配置されたゴム製パッカー
材質	ケーシング、スタンドパイプ : SUS304
その他特記事項	センサー、サンプラー等は容易に地上への引上げ可能

モニタリングはこのように作成した観測区間 (裸孔区間) の上下端にパッカーをかけて孔内水と観測区間を遮断し、原位置の圧力測定ならびに採水を可能としたものである。

システムの概要は表 4.7.1-1 および図 4.7-1 のとおりである。

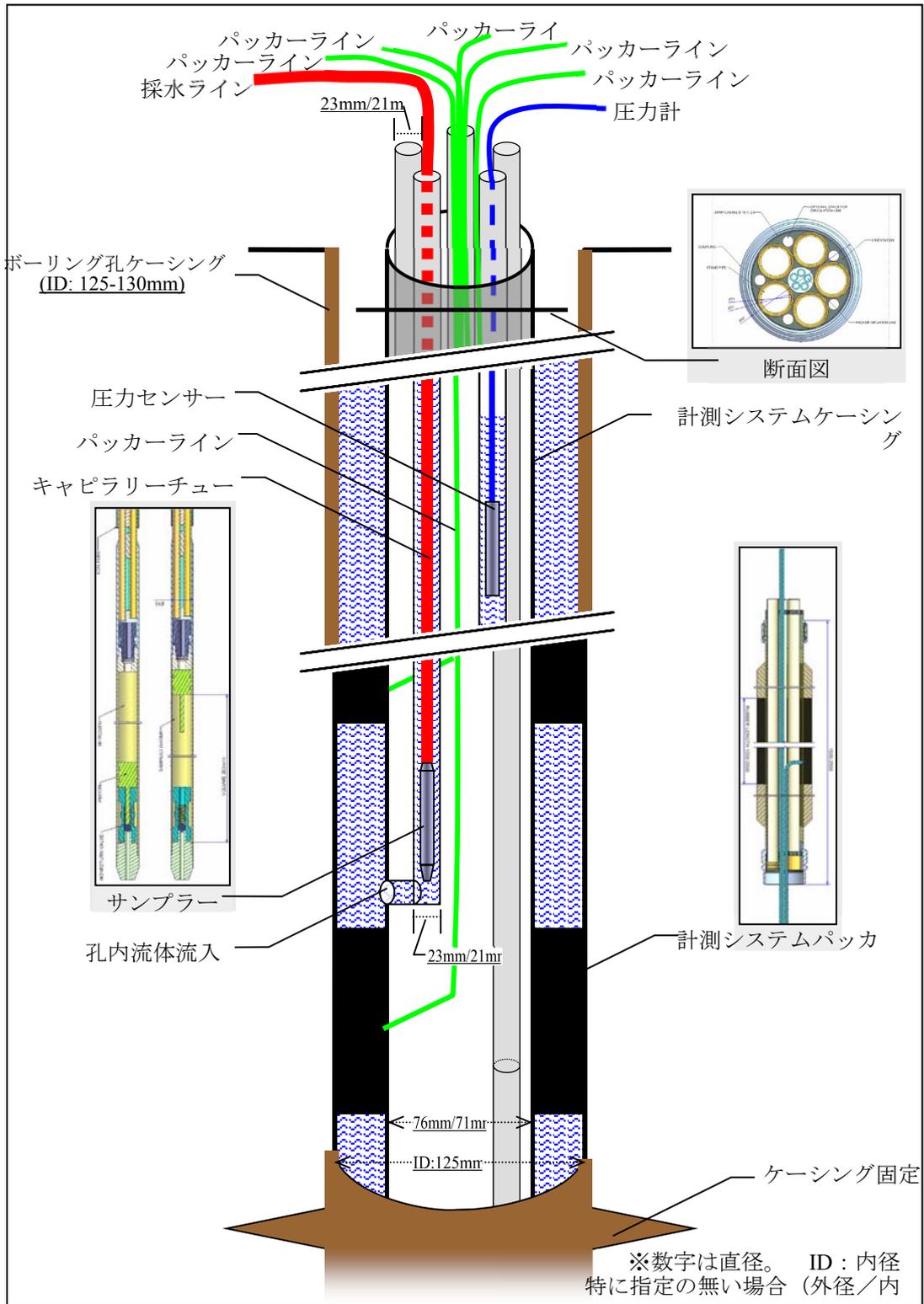


図 4.7-1 モニタリングシステム概要図

4.7.2 モニタリングシステムの構成

モニタリングシステムは次の諸装置により構成される

(1) スタンドパイプ内に設置機器

- ① スタンドパイプ本体 ② スタンドパイプ内圧力センサー
- ③ スタンドパイプ内ミニパッカー ④ サンプラー（採水時に使用）

(2) 計測システム用ケーシング

- ① ケーシング本体 ② エンドロッド
- ③ インターバルアクセスモジュール
- ④ パッカー ⑤ セントラライザー

(3) 地上機器

- ① データロガー
- ② パッカーコントロールユニット（パッカー圧力計含む）
- ③ ダブルバルブポンプ ④ その他設備

モニタリングシステムを設置する場合の機器の接続状況の一例を図 4.7-2、図 4.7-3 に示す。

モニタリングシステムは孔口部にて計測システム用ケーシング内にスタンドパイプを配置し、それぞれを連結しながら孔内の所定位置まで挿入する。ケーシングならびにスタンドパイプの接合部は2重のOリングにより外部との遮水を図るとともに、接続および着脱が容易にできる構造としている。

使用材料は、塩分や溶存ガスなどによる腐食の影響を極力少なくするよう、金属材料にはSUS304を、パッカーについては天然ゴムをそれぞれ主要材料としている。

(1) スタンドパイプ設置機器

計測システム用ケーシング内にはスタンドパイプ設置用の孔が5孔円周状に配置され、中心部にはパッカーライン用の孔が設置されている。スタンドパイプは、計測箇所数分この孔内に配置される。スタンドパイプは標準長3.0mであり、調整が可能なように1.5m、1.0m、0.5mの長さを用意してある。

スタンドパイプ内に設置する圧力センサーはPAA方式の絶対圧計測用の圧力センサーで、測定レンジは0-1MPa、分解能0.002%FSであり、主要寸法は外形φ16mm、長さ0.12m、重量4.5kg（ケーブル90m含む）である。

圧力センサーの上には、スタンドパイプ内の空気・孔内水と遮断するためにミニパッカーを設置する。ミニパッカーは窒素ガスにより拡張するフィックスエンド方式のゴム製パッカーであり、収縮時外形φ16.5mm、全長0.22m、有効遮水長0.1mである。

サンプラーはフロースルータイプのサンプラーで、外径φ10mm、長さ0.5m、容積22mlであり、採水深度までスタンドパイプ内を降下させ、原位置水圧のまま流体を採水し、その後サンプラーを地

上まで引き上げて回収する。

(2) 計測システム用ケーシング

計測システム用ケーシングは外径 ϕ 76.1mm、長さ3m（1m、0.5m用もある）重量15.5kg/3mの鋼管でスタンドパイプ5本設置できるようになっている。ケーシングの接合はスイベル・ナットにより簡単かつ確実に接合・分離が行えるものである。

計測システムを孔内に設置する際には、図4.7-2に例示したように、先端側からエンドロッド（外径 ϕ 76.1mm、長さ1m）、セントラライザー（長さ0.5m）、下部パッカー（長さ1.5m）、セントラライザー、インターバルアクセスモジュール（長さ0.5m）、上部パッカー、セントラライザーの順で各装置を連結し計測部を構成する。

インターバルアクセスモジュールに設けた流体流入孔（ ϕ 15mm）を通して流体がスタンドパイプ内に流入することにより採水・圧力計測ができる。

パッカーは裸孔区間において地山孔壁に密着し、所要の水密性を確保する必要があることから、有効遮水長1.0mのフィックスエンド型のパッカーとした。パッカーの拡張にあたっては、水・不凍液・窒素ガスに対応しており、スタンドパイプ中央部にパッカー拡張・収縮ライン（外径 ϕ 6mm、ポリアミド製）を配置し地上のパッカーコントロールユニットにて拡張・収縮およびパッカー圧力の監視が可能である。

なお、パッカーは拡張後にも地上に引き揚げて点検が可能となるように収縮できる構造となっている。また、収縮ラインによる収縮が不可能な場合にも収縮・回収が可能となるようバーストディスクを装備している。

(3) 地上機器

観測データ収録のためのデータロガー、パッカーの圧力制御・監視のためのパッカーコントロールユニット、採水・透水試験用各種機器を地上に設置する。

データロガーはサンプリング間隔を1分単位で任意に可変である。商用電源が無い場合でも使用できるよう乾電池による使用も可能である。

また、観測データの解析に供するよう、地上にも気温・気圧が測定できるようセンサーを配置することが望ましい。

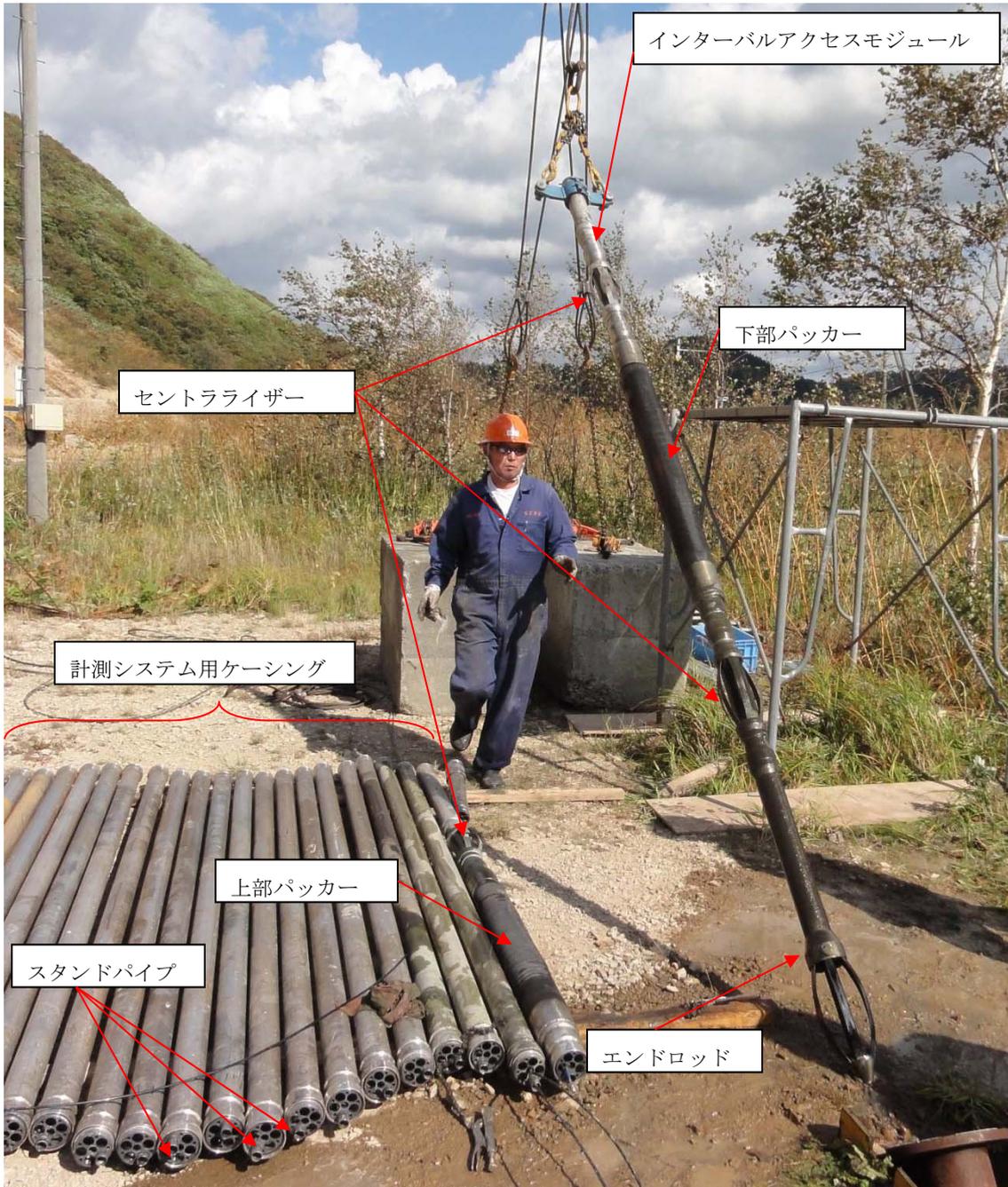


図 4.7-2 計測システム構成例 (HMD-1 孔写真)

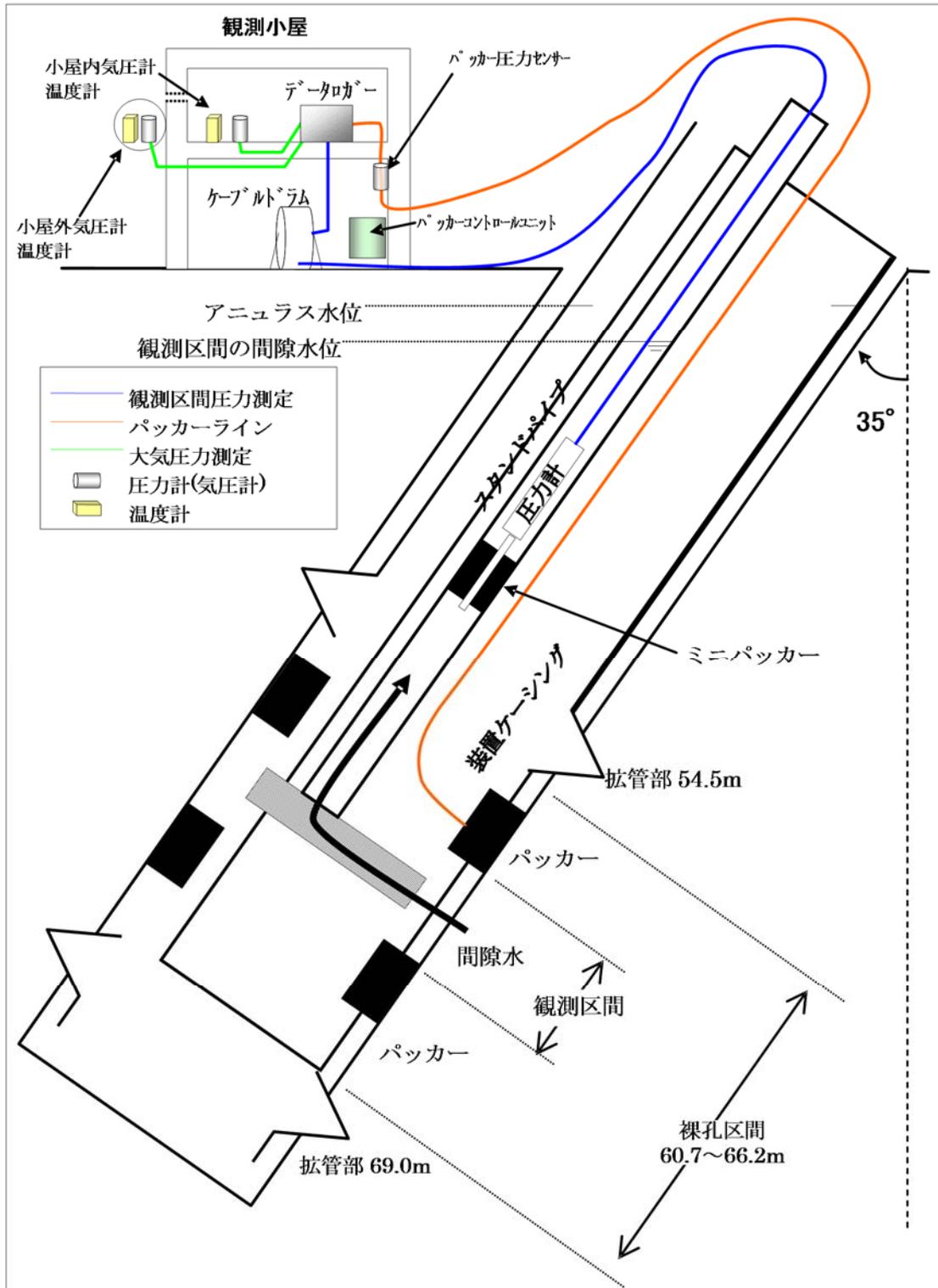


図 4.7-3 計測システム構成例 (HMD-1 孔の例)

4.7.3 モニタリングシステムの設置手順

- モニタリングシステムは次の手順で設置する。
- ① 観測区間（裸孔区間）の決定
 - ② 観測区間下部拡管
 - ③ ケーシングロッド切断
 - ④ ケーシングロッド引き上げ
 - ⑤ 観測区間上部拡管
 - ⑥ 計測システム挿入・計測の実施

モニタリングシステムの設置手順は図 4.7-4 を標準とする。

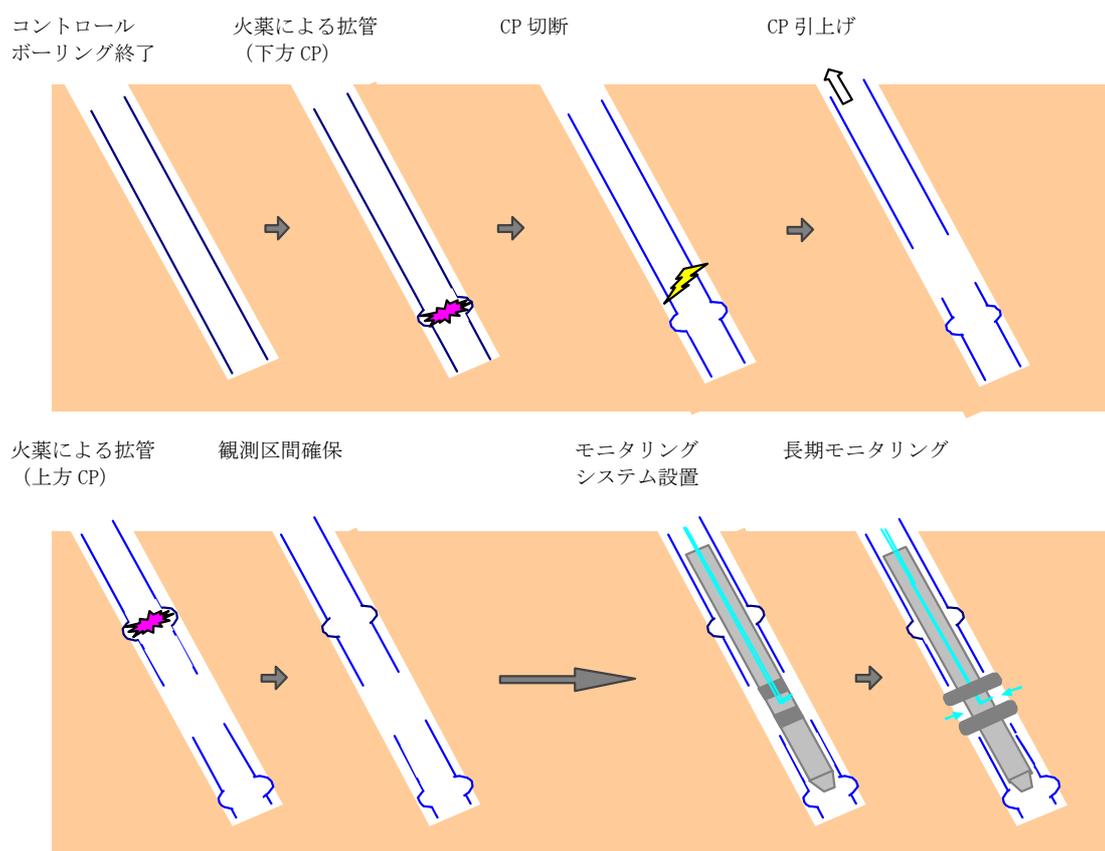


図 4.7-4 モニタリングシステム設置手順

ボーリング孔壁を保持するために設置されているケーシングロッドを切断し観測区間（裸孔区間）を作成するために、ケーシングロッドの自重を支える必要がある。このため、観測区間の下方および上方にケーシングロッドの自重を保持するためのアンカー部を設置する。アンカー部は

火薬によりケーシングロッドを局部的に拡径し周辺地盤に食い込ませることにより作成する（拡管作業）。

拡管作業が終了した後、拡管状況をBHTV（ボアホールテレビュアー）装置等により確認するとともに、ケーシングロッドの引き抜き試験を実施し、自重相当荷重にて変位が観測されないことを確認する。

下方の拡管に引き続き電動カッターによりケーシングロッドを切断する。切断箇所は、電動カッターの次にCCLを接続し、正確な位置計測を行い確定する。

切断後観測区間長分ケーシングロッドを引き抜き裸孔区間を作成する。

その後、観測区間上方の拡管作業、拡管の状況確認を行う。

作成した観測区間に計測システムを設置する際には、計測用ケーシングの接続ログを作成し慎重に設置する。エンドロッドを観測区間下部の残存ケーシングロッド内まで降下させ、所定の位置に計測システムが配置された状態で、パッカーを拡張し観測区間の作成を完了させる。

なお、計測用ケーシング挿入時には計測用スタンドパイプを同時に設置する。

計測システム設置後、スタンドパイプ内に窒素ガス・清水を循環させ孔壁維持のための泥水等を地山地下水に置換する。水位回復を待ち、各種実験・長期計測を開始する。

4.7.4 観測区間（裸孔区間）の選定

モニタリング設置にあたっては、計測目的・計測期間を十分検討したうえで、掘削時に得られたデータ、コア情報および孔内で実施した他の試験データを参考に、長期計測に適した安定した地質部を選定する。

モニタリングシステムは孔内に設置されたケーシングロッドを切断し裸孔区間を設け、その区間にパッカーをかけて観測区間を設けるものである。したがって、長期連続観測期間中に孔壁崩壊のおそれがある箇所はモニタリングシステムの設置を避けることが望ましい。

このため、ボーリング掘削時に得られた掘削データやコア観察から得られる地質状況、孔内透水試験をはじめとする孔井を利用した各種試験結果を参考に、計測計画に一番適合する箇所を選定する。また長期的に安定した計測を行うためには観測区間に設置するパッカーについても、観測期間中その性能を十分発揮する必要がある。このためには上記地質特性の把握の他に、パッカー設置位置の地質の安定性および孔壁の仕上がり状況も勘案する必要がある。

パッカー設置位置の孔壁の仕上がり状況は裸孔区間設置した後にボアホールテレビジョン、音響キャリパーなどで確認することとなるため、実際の裸孔区間の設定にあたっては当該箇所がパッカー設置に不適當となる場合も含めて、多少余裕をもって設定することが望ましい。

4.7.5 ケーシングロッド拡張

ケーシングロッドは、プラスチック爆薬 PBX を使用した発破をケーシングロッド内で行うことにより拡張する。

発破完了後、BHTV（ボアホールテレビュアー）等により拡張寸法、拡張長さを計測し拡張状況を確認する。

また、拡張部分がケーシングロッドの自重を保持できるかどうか確認するために自重相当分の荷重によりケーシングロッドを引き抜き、その変位に異常ないことを確認する。

(1) 発破に用いる火工品ツール

拡張に使用する火工品ツールの編成を図 4.7-5 に示す。

ツールは先端に発破用火薬を設置し、その上方にセントライザー、衝撃吸収用のショックアブソーバー（アルミニウム製）、シンカー、セントライザー、CCL により編成が構成されている。火工品ツールは CCL 上方でアーマードケーブルに接続され孔内所定位置まで吊下ろされる。

発破用火薬は爆速が速く（8000m/秒以上）取り扱いが容易な PBX を 100 g 使用する。

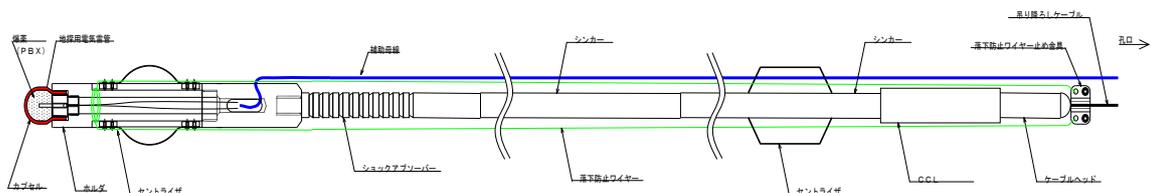


図 4.7-5 火工品ツール

(2) 拡張の状況確認

拡張箇所はケーシングパイプの自重を確実に保持する必要がある、拡張後にテレビュアー（BHTV）による形状・寸法の確認、ケーシング引き抜き試験による変位計測により、拡張の状況を確認する。

BHTV はダウンホールツールに圧電トランスデューサーを搭載したものを孔内に降ろし、ト

ランスデューサーから音波ビームを孔壁に向けて照射し、その反射波強度や音波の伝播時間から孔壁の状況や孔内寸法を計測するものである。

計測により孔径の変化（孔径が掘削径以上かどうか、形状は同心円状かどうか）および拵管長さ（目標長さ 30 c m程度）を把握する。

ケーシング引き抜き試験は孔口に設置してあるボーリングマシン等引き抜き荷重が計測できる装置を使用してケーシングを引き抜き、その際のケーシングの孔口の変位を計測することにより、荷重～変位曲線を求め、ケーシングロッドの弾性変形以降に異常な変位が発生していないことを確認するものである。

4.7.6 ケーシングロッド切断

ケーシングロッドの切断は電動カッターにより行う。

ケーシングロッドの切断には、切断時に使用する劇薬などによる周辺環境への影響がないこと、切断面がパッカーの設置など切断後の作業に悪影響が無いことを確認した電動カッター（Sondex 社製 DECT : Downhole Electric Cutting Tool）を使用する。DECT を使用した切断作業の状況は図 4.7-6 に、また仕様は表 4.7.6-1 のとおりである。

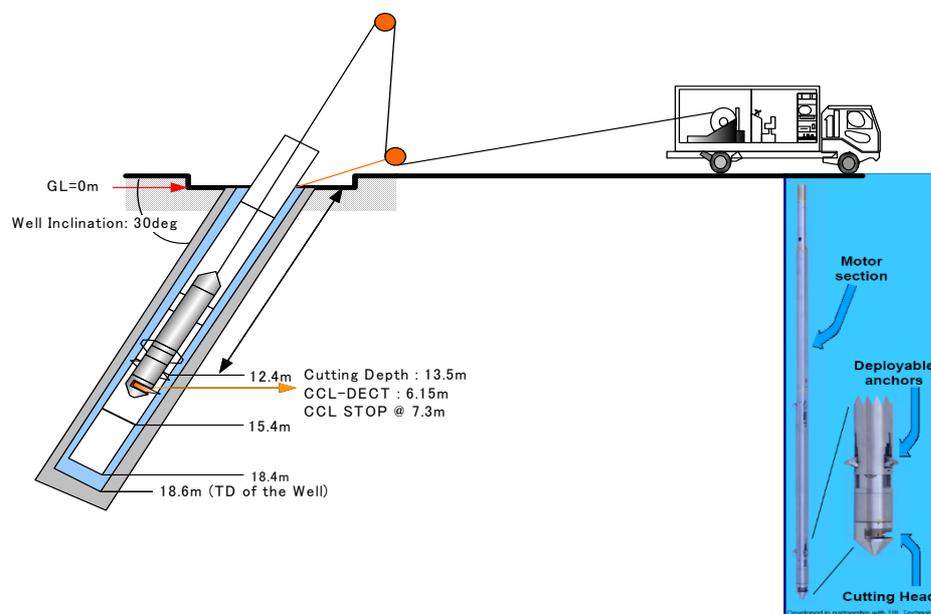


図 4.7-6 電動カッターによる切断作業

表 4.7.6-1 DECT ツールの仕様

Current	2A Max (typical 900mA)	
Supply voltage	650V	
アンカリング最小径	2.867" (7.3cm)	
アンカリング最大径	15.2cm	
切断範囲	7.3-12.9cm	
最大肉厚	1.91cm	
耐圧	103MPa	
耐熱	150°C	
最大孔井傾斜	水平孔(セントライザ [®] 2式使用)	
ツール長	6.8m(セントライザ含む)	
ツール径	6.83cm	
ツール重量	108kg	
Current rating of feedthrough	2	Amps
Voltage rating of feedthrough	500	Volt

4.7.7 ケーシングロッド引上げ

観測区間下部のケーシングロッド拡管・切断が終了した後、ケーシングロッドを所定の深度まで引き上げ、裸孔区間を作成する。

ケーシングロッド引上げ時には、常に引上げ荷重を監視するなど、無理な引上げによるケーシングロッド破断を避けるよう作業手順を定めることが望ましい。

ケーシングロッドを所定の深度まで引上げた後、観測区間上部の拡管作業を行う。

観測区間下部のケーシングロッド拡管・切断が終了した後、裸孔区間を作成するためにケーシングロッドを所定の深度まで引上げる。引上げには、掘削で使用する掘削機やクレーンなどを利用する。ケーシングロッド引上げにあたっては、孔壁とケーシングロッドとの付着・摩擦等によりスムーズな引上げが行えない場合も想定される。このような時に無理な荷重をかけることによるケーシングロッドの孔内での破断や重機の転倒等を防止する必要がある。このため引上げ時には引上げ荷重を常時監視し、ケーシングロッド破断荷重以下での作業を徹底することが必要である。

4.7.8 モニタリング計測開始までの手順

モニタリング装置は次の手順で設置を行い、計測を開始する。

- ①裸孔区間の孔壁の確認
- ②装置ケーシング、スタンドパイプ用ログの作成
- ③装置ケーシング、スタンドパイプ等計測機器の孔内挿入
- ④パッカー拡張
- ⑤スタンドパイプ内水質確認
- ⑥ミニパッカー拡張
- ⑦計測の開始

長期安定した計測を実施するために、特にパッカー設置位置の孔壁の仕上がり状況を調査し、孔壁の凹凸等がパッカー設置に問題が無いことを確認する必要がある。このためボアホールテレビュアー、音響キャリパー等で裸孔区間の孔壁の仕上がり状況を確認することが望ましい。

システムの設置にあたっては、設置位置を検知するためのCCL等の装置が使用できないため、装置ケーシングやスタンドパイプの長さから設置位置を判断することとなる。このため、設置位置から孔口までの装置ケーシングやスタンドパイプのログを作成し、装置の設置位置を正確に把握することが必要である。観測機器の挿入はこのログに従って慎重に実施する。

パッカー拡張にあたっては定格圧力までパッカーを拡張した後、1日程度パッカー内の圧力監視を行い、パッカーの損傷等の有無を確認する。

装置設置後観測区間内を地山地下水に置き換える必要がある。このためスタンドパイプ内に窒素ガスを送り込み既存の孔内水の排水を促進する等の方策を実施する。孔内水が地山地下水に置き換わったかどうかはサンプラーを使用した採水・水質試験を行い適時確認する。

なお計測機器については、孔内測定前に校正試験を行い性能を確認するとともに、計測装置設置後に絶縁抵抗測定等の検査により、機器が正常に動作することを確認する。

4.7.9 地下水及びガスの採取

本システムではスタンドパイプ方式を採用しており、スタンドパイプ内に設置した水圧センサー等を回収し、目的に応じた以下の採水用のツールを挿入することで地下水及びガスの採取を行うことが可能である。

- (1) ダブルバルブポンプ
- (2) 原位置サンプラー

地下水採取に当たっては、予備的な排水により掘削泥水による汚染の影響を小さくする。

(1) ダブルバルブポンプによる採取

表 4.7.9-1 にダブルバルブポンプの仕様を、図 4.7-7 及び図 4.7-8 にダブルバルブポンプ外観（チューブドラムとポンプコントロールユニット）を示す。本ポンプはモーター等の動力を必要としないため、スタンドパイプのような小口径のパイプ内において使用可能で、窒素ガス等により加圧・減圧を交互に行うことで揚水するものである。図 4.7-9 に作動原理を示す。

表 4.7.9-1 ダブルバルブポンプ仕様

項目	仕様	備考
外径	16 mm	
材質	ステンレスチール DIN 1.4301	AISI ss304
重量	16 kg	1/4" チューブドラム含む
ポンプ全長	0.3 m	
チューブ全長	350 ft (105 m)	材質：LDPE
流量	可変	
ポンプコントロール ユニット タイプ 作動圧力 作動流体 重量	電動（タイマー） 250 psi (1.7 MPa) 窒素ガス 7.5 kg	電源：単3電池×8



図 4.7-7 チューブドラム



図 4.7-8 ポンプコントロールユニット

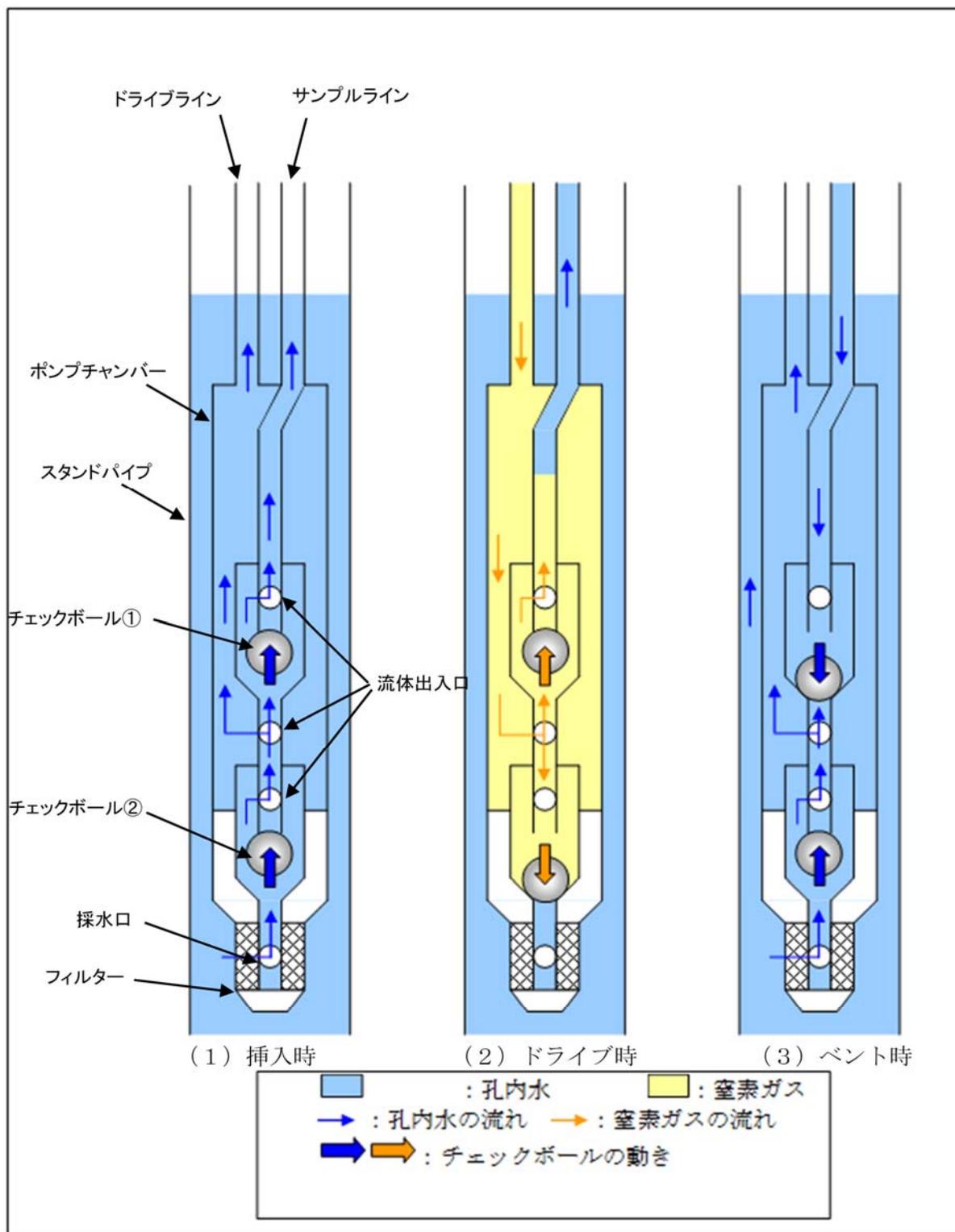


図 4.7-9 ダブルバルブポンプ作動原理

(2) 原位置サンプラーによる採取

表 4.7.9-2 にサンプラーの仕様を、図 4.7-10 から図 4.7-12 に機器写真を示す。本サンプラーはフロースルー式（図 4.7-13 参照）を採用しており、小口径のパイプ内において適用可能で、現位置における地下水の採取を目的としたものである。HMD-1 孔用に試作したものに対し、深度 600m までの適用を考慮してウィンチ及び加圧ラインを改良した。

表 4.7.9-2 サンプラーの仕様

項目	仕様	備考
フロースルータイプ サンプラー タイプ 外径 銅管（外径／内径） 全長 容積 材質 重量 全長 チェックバルブ閉鎖圧力	Flow through 18 mm 10 / 8 mm 0.5 m ca. 22 ml ステンレススチール DIN 1.4301 0.5 kg 0.7 m 48 bar + 地層圧	AISI ss304
ウィンチ タイプ 加圧ライン	手動 ステンレススチール、外径 6mm	
クランプ止め装置 材質 全長 固定点間長 バルブ ガスチャンバー容積 ピストン長 圧力ゲージ	ステンレススチール DIN 1.4301 1.15 m 0.79 m 2-way, ニートバルブ 120 ml 全長：55mm, 有効長：22mm 0-100 bar	AISI ss304 ガスチャンバーの圧力調整



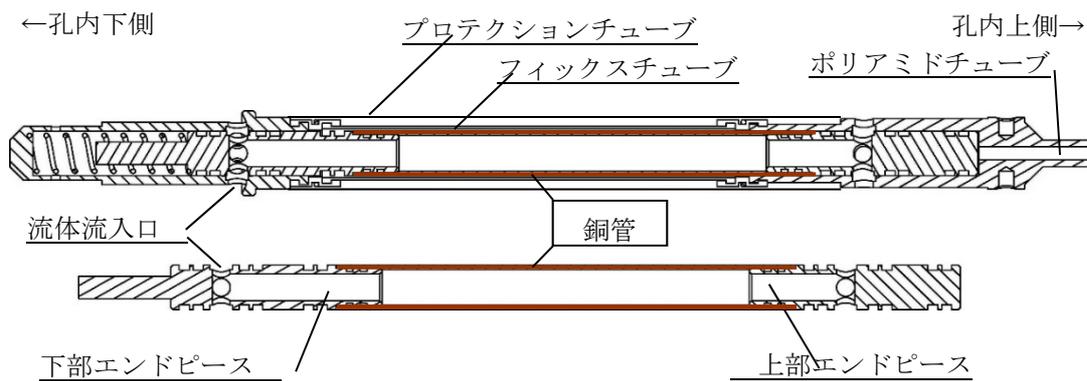
図 4.7-10 サンプラー



図 4.7-11 ウィンチ



図 4.7-12 クランプ止め装置



上：サンプラー全体（左側：孔内下側，右側：坑内上側）

下：サンプラーからプロテクションチューブ、フィックスチューブを外したところ

図 4.7-13 フロースルー型サンプラー断面図

(3) 予備排水

孔内及び周辺岩盤内の地下水は掘削泥水の影響を受けており、分析に供する水試料は極力掘削泥水の影響を排除する必要がある。掘削泥水にはトレーサーとして蛍光染料が一定濃度添加されているため、採取した地下水のトレーサー濃度を計測することでその影響を評価することができる。併せて、掘削時に取得されたコアから抽出された間隙水の水質分析結果と比較することにより、より詳細な評価が可能となる。

4.7.10 分析・測定項目ならびに方法

地下水化学は、地化学状態が核種の移行に深く関与することや、地下水の流動や地下水の起源とその将来を予測するための重要な調査項目であるため、多岐にわたる項目を分析、測定する必要がある。

高レベル放射性廃棄物処分に関わる概要調査や初期の精密調査では、地化学特性は重要な調査項目となる。特に、核種の移行は酸化還元状態や水質などに依存することがあり、さらに地下水の滞留状態や地下水流動を評価する際には地下水年代や各種の水質が重要な手掛かりとなる。

(1) 採取方法

地下水を地表に揚水する過程での減圧などにより物理化学パラメーターは変化する可能性が高いので、原位置での測定が望ましい。しかしながら、スタンドパイプの直径がφ21mmと非常に細いため既存の測定プローブを挿入することが困難な場合は、揚水した地下水を直接フローセルに導入し、空気に触れない状態で各種物理パラメーター（特にpH、ORP）を計測する（図 4.7-14）。

本研究において実施した採取方法を表 4.7.10-1 に示す。



図 4.7-14 フローセルによる物理パラメーター測定

表 4.7.10-1 分析・測定項目及び採取方法

項目名	分析対象	採取方法
一般水質	Na, K, Ca, Mg, Cl, SO ₄ , HCO ₃ , アルカリ度, TOC	ダブルバルブポンプで揚水採水。100mlプラスチックボトルに採取。
微量元素	Br, T-Fe, Mn, Li, Cs, Ba, Sr, Se, Cu, Zn, As, Rb, I, F, Si, Al, B	ダブルバルブポンプで揚水採水。100mlプラスチックボトルに採取。分析前に硝酸を添加し、洗殿や器壁への吸着を防止した。
アンモニア	NH ₄ , NO ₂ , NO ₃	ダブルバルブポンプで揚水採水。100mlプラスチックボトルに数個に分けて採取。アンモニア濃度を変化させないため、採取後速やかに冷蔵および冷凍保管した。また、11月の採水においては硫酸を用いてpH2とした試料も作成した。
オルトフェナントロリン	T-Fe, Fe ²⁺	ダブルバルブポンプで揚水採水。大気が混入しないように十分にオーバーフローさせた水に対し現場で速やかに発色処理をした。
溶存硫化水素	H ₂ S ⁰ , HS ⁻ , S ²⁻	ダブルバルブポンプで揚水採水。大気が混入しないように十分にオーバーフローさせた水に対し現場で速やかに発色処理をした。
水素酸素同位体比	δ D, δ ¹⁸ O	ダブルバルブポンプで揚水採水。20mlガラスビンに採取。
トリチウム	³ H	ダブルバルブポンプで揚水採水。1Lプラスチックボトルに採取。
¹⁴ C	¹⁴ C, δ ¹³ C	ダブルバルブポンプで揚水採水。1LPANボトルに採取。11月の採水のみ。
³⁶ Cl	³⁶ Cl/Cl	ダブルバルブポンプで揚水採水。100mlプラスチックボトルに採取。11月の採水のみ。
一般ガス	O ₂ , N ₂ , CO ₂ , CH ₄ , C ₂ ~C ₆ の濃度分析, CO ₂ とC ₁ ~C ₄ の炭素同位体比分析	水上置換法で100ml褐色ガラスバイアル瓶にセプタムラバーをつけて封入。封入後にマイクロシリンジを用いて、塩化ベンザルコニウムを0.2%となるように添加した。
硫化水素ガス	H ₂ Sガス	水上置換法で100ml褐色ガラスバイアル瓶にセプタムラバーをつけて封入。11月の採水のみ。封入後にマイクロシリンジを用いて、塩化ベンザルコニウムを0.2%となるように添加した。
希ガス	T-He, T-Ne, ³ He/ ⁴ He	専用の採水装置を原位置まで降下させて銅管封入。
蛍光染料	4-アミノ-1-ナフタレンスルホン酸ナトリウム四水和物(通称:ナフチオン酸)	ダブルバルブポンプで揚水採水。100ml褐色ガラス瓶に採取。
物理化学パラメータ	温度, pH, ORP, DO, EC	pH, ORP: 揚水したものをフローセルに通じて測定, DO: 溶存ガスの泡が測定に影響を及ぼすため、100mlポリビンに浸してガスを抜きつつ測定(2016年度)。2015年度はフローセルで測定, EC: フローセルを通過した後の水をポリビンに導入して測定。

(2) 分析方法

本研究において実施した分析方法を表 4.7.10-2 に示す。

表 4.7.10-2 分析方法

分析・測定項目	手法
DO, EC	ポータブルの計測器で地上にて計測
Na, K, Ca, Mg, Cl, SO ₄ , Br, NH ₄ , NO ₂ , NO ₃	イオンクロマトグラフ法
I	JISK0101よう素抽出吸光度法
Si	ICP発光分析法
T-Fe, Mn, Li, Cs, Ba, Sr, Se, Cu, Zn, As, Rb, Al, B	ICP質量分析法
F	JISK0102ランタン-アリザリンコンプレキソン吸光度法
HCO ₃	河川水質試験法(案)II, 燃焼酸化-赤外線分析法
TOC	JISK0102燃焼酸化-赤外線式TOC分析法
δ D, δ O	新実験化学講座(1975)第10巻, 4.6安定同位体比の測定方法
³ H	放射能測定法シリーズ9, トリチウム分析法(平成14年改訂, 文部科学省)電解濃縮法
ナフチオン酸(アミノH酸)	蛍光光度法
He同位体, Ne	中田・長谷川(2009)
一般ガス	GC-IR-MS
硫化水素ガス	GC-ECD
¹⁴ C	パブリング法-加速器質量分析器
δ ¹³ C	IR-MS
³⁶ Cl	加速器質量分析器
アルカリ度	pH4.8滴定法

4.7.11 モニタリングシステムの回収

モニタリングシステムはパッカーにより観測区間を区切っているため、回収作業前にパッカーの収縮を行う。斜孔からのモニタリングシステム引上げは、クレーンを補助として用いながら、ボーリングマシンにより安全に行うことを基本とする。

モニタリングシステムを安全に回収するためには、パッカーがNL140 ロッドの内径（130mm）に対して 10mm 程度のクリアランスが確保できる程度（120mm）まで収縮している必要がある。効率的に安全にモニタリングシステムを引上げるためには把持機能を有するボーリングマシンを主体に、クレーンを補助として使用することが推奨される。

(1) パッカーの収縮手順

パッカーが所要の径まで収縮するために必要なパッカー拡張水の最低量を計算し、パッカー拡張水の回収量の目安を得る。HCD-3 の実績では 80%の拡張水を回収すれば所要径に収縮するとしたが、実際にはパッカーは不均一に収縮したため、モニタリングシステムの引上げ時に想定以上の引上げ力が必要となった。HMD-1 孔でも同様の事象が見られたことから、パッカー拡張水はできるだけ回収することが望ましい。

HCD-3 孔では当初 80%の拡張水回収を計画したが実際は 87～100%の拡張水を回収した。図 4.7-15 に HCD-3 におけるパッカー収縮作業手順を示す。

(2) モニタリングシステムの引上げ

パッカーの収縮を確認した後、モニタリングシステムの引上げに移行する。斜孔に設置されたモニタリングシステムの引上げに際しては、ケーシングとの摩擦力も作用するため水平方向にも大きな反力が生じる。このため、ボーリングマシンは引上げ能力に余裕のあるマシンを選定し、しっかりした基礎あるいは架台に設置する。また、クレーンはモニタリングシステム引上げ時の落下防止として、あるいはボーリングマシンによる引上げの補助として使用するものであり、クレーン単独の強引は厳に避けなければならない。

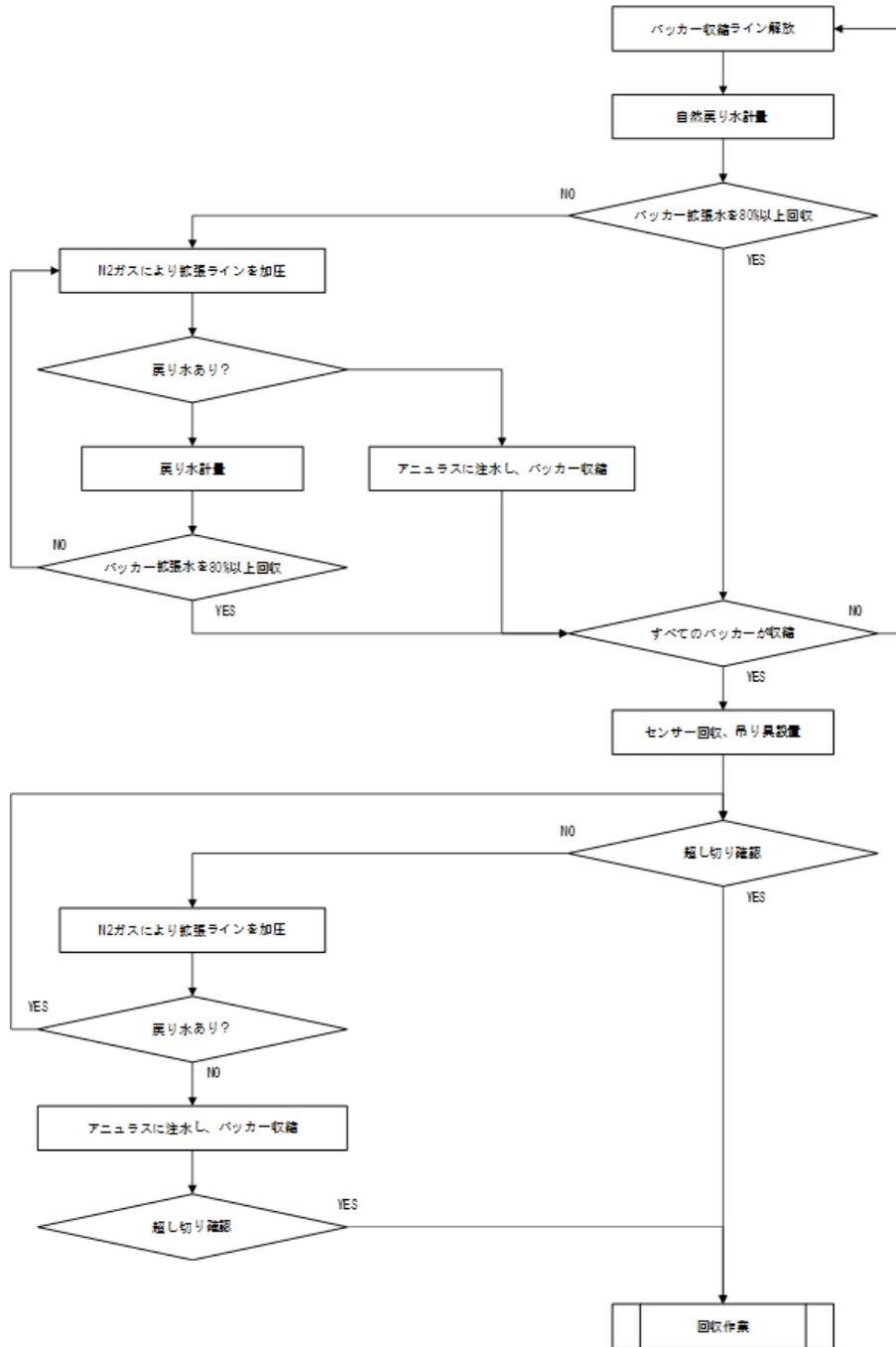


図 4.7-15 パッカー収縮作業手順 (HCD-3 孔)

4.8 モニタリング無人計測システム

4.8.1 モニタリング無人計測システムの概要

モニタリング無人計測システムは電源、通信のインフラがない条件においても電源と通信を確保して無人でモニタリング計測を行う低エネルギー消費のシステムである。

本システムは、①発電システム、②蓄電池、③データロガー、④通信システム及び⑤遠隔監視・制御機能より構成される。

モニタリング無人計測システムは、①再生可能エネルギーをベースとした発電システム、②発電した電気を蓄電しシステムに給電する蓄電池、③データ保存を行うデータロガー、④計測データを集約しインターネット経由でサーバーに送信する通信システム及び⑤サーバーを介してデータの閲覧・現地システムの監視・制御を行う遠隔監視・制御機能から構成される低エネルギー消費のシステムである（図 4.8-1）。

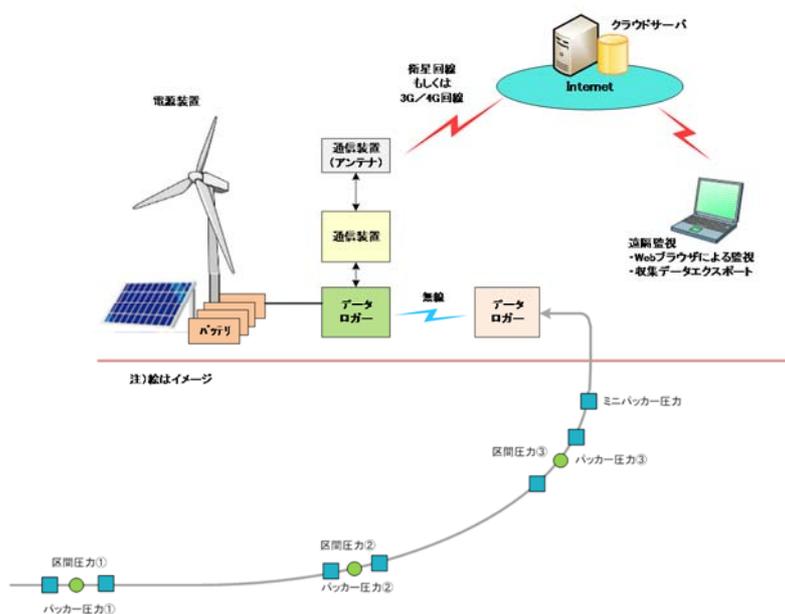


図 4.8-1 モニタリング無人計測システム概念図

4.8.2 発電システム

設置場所の環境をもとに、年間を通して現地計測システムが必要とする電力量を確保できる再生可能エネルギーを選定する。

概要調査地点は生活環境から離れていることが想定されることから、モニタリングの無人計測を行う場合は独立した電源と通信を確保する必要がある。その場合、電源にはその地点環境に応じた再生可能エネルギー（風力発電及び太陽光発電の組合せ）を選定することが合理的である。

風力発電及び太陽光発電で得られる電力量（再生可能エネルギー量）は調査地点の気象条件に大きな影響を受ける。調査地点における風力発電及び太陽光発電の最適な組合せを評価するため、周辺の気象データを収集し、賦存エネルギーを下式により算定する。

※風力の賦存エネルギー算出方法

$$\text{空気密度}(\delta 1) = \delta 0 \times 273.2 / (273.2 + T1) \times (101.3 + P1) / 101.3$$

$\delta 0$: 気体の基準密度=1.185kg/m³(25℃)

T1 : 気体の温度[℃] ←月毎の気温を参照

273.2 : 絶対温度

101.3 : 標準大気圧

P1 : 気体の圧力[kPa] ←0として計算

$$\text{風力のエネルギー密度} = 1/2 \times \text{空気密度}(\delta 1) \times \text{風速}^3$$

$$\text{風力の賦存エネルギー} = \text{風力のエネルギー密度} \times 24 \text{時間}$$

※太陽光の賦存エネルギー算出方法

$$\text{太陽光の賦存エネルギー} = \text{日射量} \leftarrow \text{例えば、NEDO データベースを参照}$$

全国8箇所の賦存エネルギーを推定した結果を表4.8.2-1に示す。また、表4.8.2-1のデータから1日あたりの賦存エネルギーを算出した結果を、図4.8-2に示す。縦軸を風力賦存エネルギー、横軸を太陽光賦存エネルギーとしており、地点毎の最適な発電設備（太陽光/風力/太陽光+風力（ハイブリッド））とバッテリー容量の組み合わせが推定できる。

例えば、北海道（幌延）は太陽光、風力はともに低めながら発電は可能な賦存エネルギーを有しているが、特に太陽光は賦存エネルギーが低く、適用する発電設備としては“太陽光+風力のハイブリッド+大容量バッテリー”の組合せが必要であると予想される。

青森県（むつ）、新潟県（柏崎）、福島県（広野）及び鹿児島県（川内）では風力の賦存エネルギーが低く風力発電では実用的な発電量が得られない可能性が高く、発電設備としては“太陽光+大容量バッテリー”の組合せが考えられる。

一方、静岡県（御前崎）と沖縄県（石垣島）では太陽光・風力共に賦存エネルギーが高く発電設備としては“太陽光+小容量バッテリー”または“風力+小容量バッテリー”でも十分な電力が得られるものと推定できる。

表 4.8.2-1 全国8箇所の賦存エネルギー推定結果

■ 気象データ
(2004年～2013年)平均

* 気象データは気象庁HP(日射データはNEDOのHP)より入手

	北海道 幌延町(豊富)	青森県 むつ市	福島県 広野町	新潟県 柏崎市	静岡県 御前崎市	愛媛県 伊方町(瀬戸)	鹿児島県 薩摩川内市	沖縄県 石垣島
気温								
最高	29.5 °C	33.7 °C	34.8 °C	35.6 °C	33.4 °C	32.7 °C	35.7 °C	34.4 °C
平均	6.4 °C	9.7 °C	13.1 °C	13.4 °C	16.7 °C	16.1 °C	17.1 °C	24.4 °C
最低	-22.5 °C	-16.4 °C	-6.1 °C	-6.7 °C	-1.7 °C	-1.9 °C	-3.8 °C	11.3 °C
風速								
瞬間	25.4 m/s	28.5 m/s	28.5 m/s	26.2 m/s	38.1 m/s	31.9 m/s	20.1 m/s	53.1 m/s
最大	14.4 m/s	15.0 m/s	13.8 m/s	12.6 m/s	22.9 m/s	28.0 m/s	13.7 m/s	34.5 m/s
平均	3.2 m/s	2.6 m/s	1.5 m/s	2.3 m/s	4.9 m/s	4.4 m/s	1.9 m/s	5.4 m/s
降雨量	970.4 mm	1242.5 mm	1640.0 mm	2438.9 mm	2096.8 mm	1557.2 mm	2269.1 mm	2130.0 mm
年間	736.8 mm	476.5 mm	mm	310.3 mm	0.0 mm	0.0 mm	0.0 mm	0.0 mm
降雪量	98.0 mm	92.5 mm	mm	55.6 mm	0.0 mm	0.0 mm	0.0 mm	0.0 mm
日射量	1,113 kWh/m ²	1,186 kWh/m ²	1,267 kWh/m ²	1,197.8 kWh/m ²	1,461 kWh/m ²	1,357 kWh/m ²	1,314 kWh/m ²	1,522 kWh/m ²
雷					18.0			21.6

* 年間日射量はNEDOの日射量データベースから毎月の日射量 kWh/m²・dayを年換算して算出

■ 賦存エネルギー

(2013年)

月	北海道		青森県		福島県		新潟県		静岡県		愛媛県		鹿児島県		沖縄県																	
	風速	太陽光	風速	太陽光	風速	太陽光	風速	太陽光	風速	太陽光	風速	太陽光	風速	太陽光	風速	太陽光																
1	3.5	7.8	0.63	1.21	2.5	-2.9	0.22	1.46	1.6	1.9	0.06	2.35	3.4	1.8	0.56	1.34	6.0	3.0	2.79	3.8	3.8	0.77	2.02	1.6	5.6	0.06	2.10	5.6	18.7	2.34	2.44	
2	4.0	-7.2	0.93	2.24	3.0	-2.2	0.39	2.30	2.1	2.5	0.13	3.06	3.4	1.6	0.56	2.06	6.1	6.6	3.15	3.45	4.3	4.1	1.11	2.79	1.8	7.9	0.08	2.75	5.6	21.2	2.32	2.81
3	5.6	-2.5	2.52	3.43	3.5	1.8	0.61	3.41	2.5	7.9	0.22	3.64	2.8	5.7	0.31	3.06	5.5	12.2	2.26	3.99	4.3	9.5	1.09	3.59	1.9	11.8	0.09	3.42	4.9	22.0	1.55	3.51
4	4.5	3.7	1.28	4.11	3.4	7.1	0.54	4.48	2.1	10.6	0.13	4.44	3.1	9.8	0.41	4.43	6.1	15.1	3.06	4.83	4.8	12.4	1.50	4.62	2.4	14.5	0.19	4.25	4.6	22.3	1.28	4.25
5	3.8	7.5	0.76	4.62	2.5	10.9	0.21	4.95	1.7	14.1	0.07	4.71	2.2	15.4	0.14	4.96	4.1	18.7	0.92	5.11	4.6	17.6	1.30	5.01	2.0	19.6	0.11	4.62	4.3	26.0	1.03	4.99
6	3.2	14.1	0.44	4.88	2.3	16.3	0.16	4.85	0.9	17.9	0.01	4.24	1.9	21.2	0.09	4.68	3.7	21.7	0.67	4.65	3.5	22.9	0.56	4.56	1.9	23.4	0.09	3.99	5.1	29.2	1.70	5.65
7	3.0	19.9	0.36	4.45	2.2	20.2	0.14	4.26	1.0	21.9	0.01	4.26	2.1	24.9	0.12	4.69	4.4	25.4	1.11	5.12	5.0	27.3	1.62	5.17	2.1	28.0	0.12	4.80	5.8	29.5	2.50	6.20
8	3.3	19.9	0.48	3.85	2.1	23.1	0.12	4.02	1.1	24.9	0.02	4.46	1.9	26.2	0.09	4.94	3.5	27.9	0.55	5.47	4.2	28.3	0.95	5.26	2.1	28.5	0.12	4.93	5.6	29.7	2.25	5.63
9	3.5	16.0	0.58	3.51	2.1	19.2	0.12	3.44	1.0	21.3	0.01	3.29	1.9	21.5	0.09	3.50	4.0	25.2	0.83	4.09	3.3	23.6	0.47	3.98	1.7	24.8	0.06	4.13	5.2	28.5	1.81	4.90
10	3.8	10.1	0.75	2.24	2.4	13.6	0.19	2.83	1.2	17.0	0.02	2.80	2.2	17.6	0.14	2.72	4.6	21.1	1.28	3.26	3.2	19.6	0.43	3.27	1.7	20.3	0.07	3.51	6.7	25.7	3.91	4.00
11	4.1	3.6	0.97	1.15	2.8	6.8	0.30	1.71	1.7	10.6	0.07	2.29	3.1	9.7	0.41	1.72	5.3	13.4	2.02	2.68	4.3	11.8	1.08	2.36	1.5	12.6	0.05	2.55	5.5	22.6	2.19	3.03
12	4.0	-1.7	0.92	0.88	2.7	2.4	0.28	1.23	2.0	6.0	0.11	2.10	3.6	5.2	0.65	1.20	6.2	8.2	3.29	2.55	4.2	6.7	1.03	1.91	1.6	7.1	0.06	2.09	5.7	18.7	2.46	2.52
平均	3.9	6.3	0.88	3.05	2.6	9.7	0.27	3.25	1.6	13.1	0.07	3.47	2.6	13.4	0.30	3.28	5.0	16.8	1.85	4.00	4.1	15.6	0.99	3.71	1.9	17.0	0.09	3.60	5.4	24.5	2.11	4.16

* 風力のエネルギー密度 = 1/2 x 空気密度(δ1) x 風速³

* 空気密度(δ1) = δ0 x 273.2 / (273.2 + T1) x (101.3 + P1) / 101.3

δ0 : 気体の基準密度 : 1.185kg/m³(25°C)

T1 : 気体の温度 °C → 月毎の気温を参照

273 : 絶対温度

101.3 : 標準大気圧

P1 : 気体の圧力 kPa → 0 として計算

* 風力の賦存エネルギー = 風力のエネルギー密度 x 24時間

* 太陽光の賦存エネルギー = 日射量(NEDOの日射量データベースを参照)

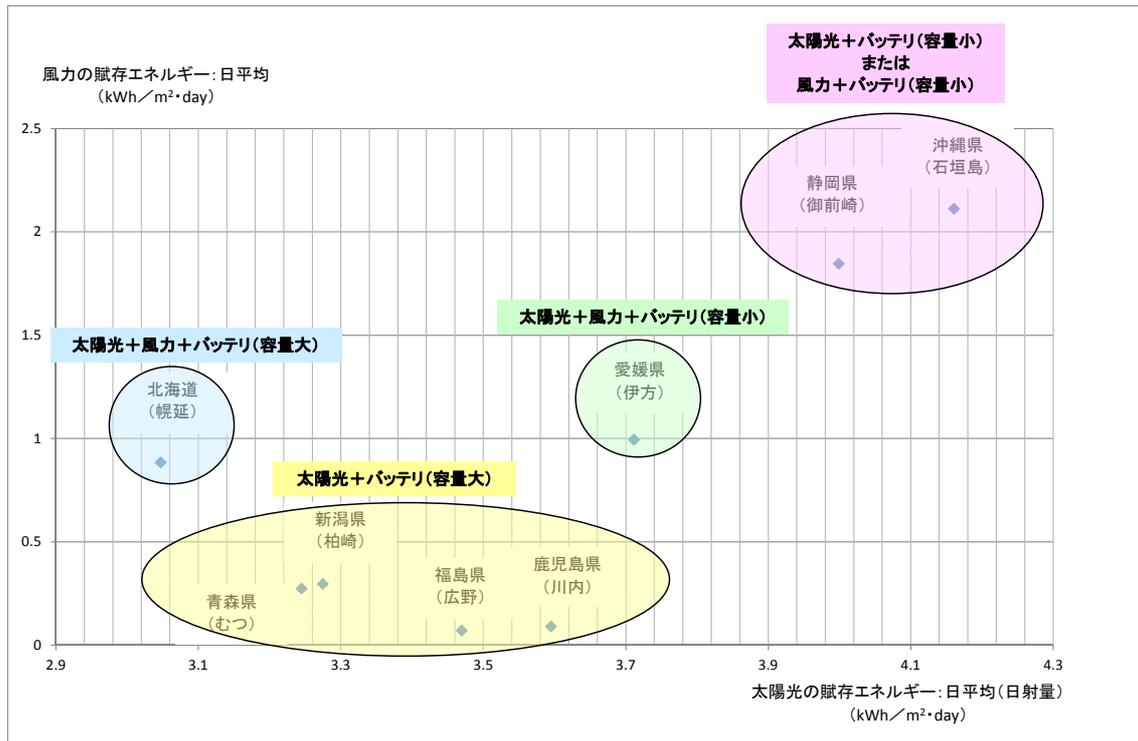


図 4.8-2 賦存エネルギーの推定

発電システムの発電量は、調査地点の賦存エネルギーから下式によって算出することができる。

※風力の発電量算出方法

$$\text{発電量[kWh]} = 1/2 \times \text{空気密度[kg/m}^3] \times \text{風速[m/s]}^3 \times \text{風力発電機受風面積[m}^2] \times \text{風力発電機パワー係数}$$

$$\text{空気密度} : 1.185 \text{kg/m}^3 (25^\circ\text{C})$$

※太陽光の発電量算出方法

$$\text{発電量[kWh]} = \text{日射量[kWh/m]} \times \text{太陽電池容量[kWh]} \times \text{太陽電池システム出力係数}$$

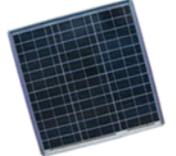
北海道幌延町に設置した調査孔（HCD-3 孔）を対象に無人計測システムの各コンポーネントの消費電力を合算した予想消費電力の一覧表を表 4.8.2-2 に示す。HCD-3 孔向け無人計測システムでは表 4.8.2-2 に示す電力の供給が可能な発電機を選定した（表 4.8.2-3 に発電機仕様を示す）。

表 4.8.2-2 HCD-3 孔向け無人計測システムの予想消費電力

■システムの消費電力

機器	メーカー	型式	電源		3G/4G		備考		
			数量	消費電力 (w)	数量	消費電力 (w)			
衛星通信機器	NTTdocomo	ワイドスターII	1	15.30	15.30	0	15.30	0.00	通信機設置量との通信
3G/4Gルータ	ゼネテック	HSPA-4500	0	2.40	0.00	1	2.40	2.40	通信機設置量との通信
ネットワークコンピュータ	四国技研	新型NC	1	2.25	2.25	1	2.25	2.25	Web閲覧監視制御コントローラ
HUB	アドバンテック	EK3-2525I-AE	0	2.40	0.00	1	2.40	2.40	
ネットワークカメラ	パナソニック	BB-SW175A	1	2.58	2.58	1	2.58	2.58	Webカメラカメラ
信号変換&通信ユニット	東洋電機	MGB10-RRN	2	0.008	0.02	2	0.008	0.02	降雨・降雪量・風向・風速・気圧・日射量
信号変換&通信ユニット	東洋電機	MGB10-RRN	1	0.008	0.01	1	0.008	0.01	発電電力・消費電力
信号変換&通信ユニット	東洋電機	MGB10-RRN	5	0.008	0.04	5	0.008	0.04	区間圧力・バック圧力・ミニバック圧力
信号変換&通信ユニット	東洋電機	MGB10-RRN	1	0.008	0.01	1	0.008	0.01	タイムキーパー
圧力センサ	KUBLER	PAA-22S	3	0.30	0.90	3	0.30	0.90	ミニバック圧力
圧力センサ	KUBLER	PAA-23S	3	0.30	0.90	3	0.30	0.90	バック圧力
圧力センサ	KUBLER	PAA-23S	3	0.30	0.90	3	0.30	0.90	区間圧力
降雨センサ	Davis	#07852	1	0.00	0.00	1	0.00	0.00	
降雪センサ	オーミック電子	OM7-1S	1	0.30	0.30	1	0.30	0.30	
風向・風速計	Davis	#07911	1	0.00	0.00	1	0.00	0.00	
気圧センサ	STマイクロ	LPS331AP	1	0.00	0.00	1	0.00	0.00	
日射センサ	Apogee	SE-SP215	1	0.00	0.00	1	0.00	0.00	
DCDCコンバータ	Cosel	SUS3123R3	2	0.03	0.06	2	0.03	0.06	12V→3.3V(MGB用電源)
DCDCコンバータ	Cosel	SUS6123R3C	1	0.60	0.60	1	0.60	0.60	12V→3.3V(MGBT用電源)
DCDCコンバータ	Cosel	SUS31205	1	0.03	0.03	1	0.03	0.03	12V→5V(センサ用電源)
DCDCコンバータ	Cosel	MGS151205	1	1.80	1.80	1	1.80	1.80	12V→5V(NC用電源)
DCDCコンバータ	Cosel	SUS31212	1	0.60	0.60	1	0.60	0.60	12V→12V(センサ用電源)
消費電力				連続運転	26.29	連続運転	15.78	W	
					630.90		378.90	Wh・day	
				間欠運転	4.43	間欠運転	3.64	W	
					106.34		87.44	Wh・day	
※間欠運転の条件									
通信周期					60分				
センサ動作周期					1分				

表 4.8.2-3 HCD-3 孔向け無人計測システム発電機

メーカー	MARLEC
型式	FM910-4
ファーンリング機構	側方偏向方式
発電電力	72W(風速10m/s時)
出力電圧	DC12V または DC24V (機種選択指定)
運転開始風速	風速2.0m/s
耐風速強度	風速60m/s
ローター直径	910mm
本体重量	約13.1kg
写真	
メーカー	京セラ
型式	KC32T-02
発電素子	多結晶シリコン
発電電力	32W
最大動作電圧	17.4V
最大動作電流	1.84A
サイズ	517mm×512mm×17mm
本体重量	2.8kg
写真	

太陽光パネルの設置角については、設置個所における日射量予測データ（表 4.8.2-4 に豊富町日

射量予測（NEDO HP より抜粋）を例示）の最適角度で設置する。冬季に積雪が予想される場合は、最適角度よりも傾斜が急になるように設置することで落雪を促し積雪の影響を緩和させることを検討することも大切である。

HCD-3 孔においては、通常時（積雪が無い状態）では傾斜角 25 度が最も発電電力が大きかったが、積雪時は傾斜角 45° が最も発電電力が大きくなった。

表 4.8.2-4 豊富町日射量予測（NEDO HP より抜粋）

方角: 南 [単位: kWh/m²・day]

傾斜角	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	月平均
10°	1.37	2.55	3.76	4.3	4.7	4.9	4.49	3.94	3.78	2.52	1.28	0.98	3.214
20°	1.53	2.84	4.04	4.42	4.7	4.85	4.45	3.98	3.97	2.74	1.4	1.07	3.333
30°	1.66	3.08	4.25	4.45	4.6	4.7	4.34	3.94	4.07	2.9	1.5	1.14	3.386
40°	1.77	3.27	4.4	4.4	4.41	4.46	4.13	3.82	4.08	3	1.56	1.2	3.375
50°	1.85	3.4	4.48	4.26	4.14	4.15	3.87	3.63	4	3.03	1.59	1.24	3.303
60°	1.9	3.46	4.47	4.05	3.8	3.78	3.53	3.37	3.83	2.99	1.6	1.26	3.170
70°	1.92	3.47	4.4	3.77	3.39	3.34	3.15	3.05	3.57	2.89	1.56	1.26	2.981
80°	1.9	3.41	4.25	3.41	2.92	2.86	2.71	2.69	3.24	2.71	1.5	1.24	2.737
90°	1.85	3.29	4.02	3	2.44	2.37	2.27	2.28	2.84	2.48	1.41	1.19	2.453

4.8.3 蓄電池

蓄電池はシステムバッテリーと計測用バッテリーの二つに分けて設置する。通常はシステムバッテリーのみでシステム全体をカバーし、計測用バッテリーはシステムバッテリー消費時のみ使用する。

発電システムの発電量の変動をカバーできるように、システムバッテリーは充電なしで1週間はシステム稼働させられる容量を確保する。

長期にわたる天候不順やシステム構成機器の想定以上の電力消費などによりバッテリー電圧が不足する場合に備えて、センサーとデータロガーによる計測動作は最低限継続できるように、蓄電池はシステムバッテリーと計測用バッテリーの二つで構成することが望ましい。

HCD-3 孔向けのシステムでは、通常時は計測処理についてもシステムバッテリーからの給電で動作するが、システムバッテリー消費時は計測用バッテリーからの給電で計測動作を継続させ、計測動作に関与しない通信系の機器には、計測用バッテリーから給電はされない構成とした。

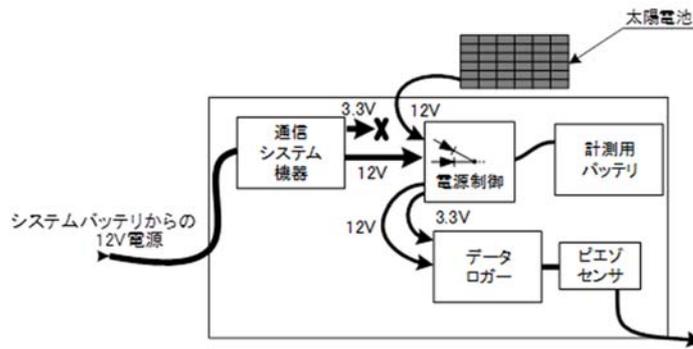


図 4.8-3 蓄電池構成例 (HCD-3 孔向けシステムの場合)

システムバッテリーの容量は発電システムによる発電量の変動分をカバーできるだけの容量を確保する。HCD-3 孔向けに採用した 12V 50Ah の鉛電池では、間欠運転の条件で 3G 通信を 1 週間（7 日間）充電なしで行える容量を確保している。

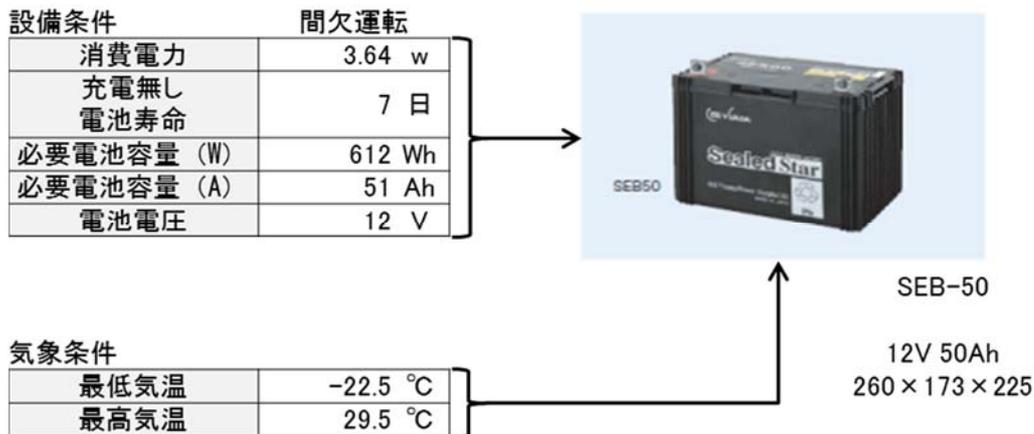


図 4.8-4 HCD-3 孔向け無人計測システム用システムバッテリー

4.8.4 データロガー

モニタリング無人計測システムではセンサーネットワークの構築機能を有する低消費電力のデータロガーを採用する。

データロガーは、モニタリング無人計測システムで使用する各種センサーや使用環境に求められる計測点仕様（表 4.8.4-1 に例示）を満足するとともに、計測点の追加や削除などにも容易に対応し

て無線ネットワークを柔軟に構築できる機能を有していることが望ましい。

表 4.8.4-1 モニタリング計測システム計測点仕様例

計測内容	測定範囲	根拠		
		既製の圧力センサの出力仕様		4-20mA/0-10V
1 圧力	4-20mA/0-10V			4-20mA/0-10V
2 蓄電池電圧	0~30V	蓄電池電圧		12V/24V
3 気温	-30℃~60℃	気象データ:最低気温	幌延	-22.5℃
		:最高気温	川内市	+35.7℃
4 気圧	850HPa~1050HPa	気象データ:最低気圧	御前崎	1002HPa 瞬間最低気圧のデータなし (台風通過を考慮して850HPa~とする)
		:最高気圧	石垣島	1018HPa 瞬間最高気圧のデータなし
5 風向	0~360度(東西南北)			
6 風速	0~70m/s	気象データ:最大瞬間風速	石垣島	53.1m/s
7 日射量	0~500w/m ²	気象データ:最大日射量	石垣島	6.2kWh・m ² ・day ⇒ 258w/m ²
8 降雨量	0~200mm(時間降雨量)	気象データ:最大降雨量	柏崎市	最大降雨量:2438mm
9 積雪量	0~1500mm	気象データ:最大積雪量	幌延	最大積雪量:980mm

ネットワーク機能についての要求仕様は以下のとおりである。

- ・複数の測定ポイントがある場合に複数のデータロガーを無線接続してデータ収集可能なセンサーネットワーク機能を有すること
- ・データロガー機の増減があっても無線ネットワークを柔軟に構築できること
- ・センサーネットワークと上位通信システムとのインターフェースが容易なこと

また、発電システムで動作をさせることから、データロガーも低消費電力であることが求められる。消費電力に関する要求仕様は以下のとおりである。

- ・システム全体が低消費電力で連続稼働すること
- ・データロガー及びセンサーの電源制御機能を有し、間欠動作で計測が可能であること

HCD-3 孔向けのシステムではこれらの要求仕様を満たすデータロガーとして東洋電機製の MAGIC BEE (MGB) を選定した。データロガーの選定では MGB を含む 5 つのデータロガーが要求仕様に沿ったものとして候補に挙がった。MGB は上位通信システムの電源制御機能を有している。他のデータロガーは上位通信機器との通信に対応しておらず別途機器が必要となる点やセンサーの電源制御機能を有していないなど、シンプルかつ省電力のシステムを構成する上で MGB より優位な評価を得られなかった。

HCD-3 孔向け無人計測システムにおけるネットワークコンピューター(NC)と MGB の機能ブロック図を図 4.8-5 に示す。

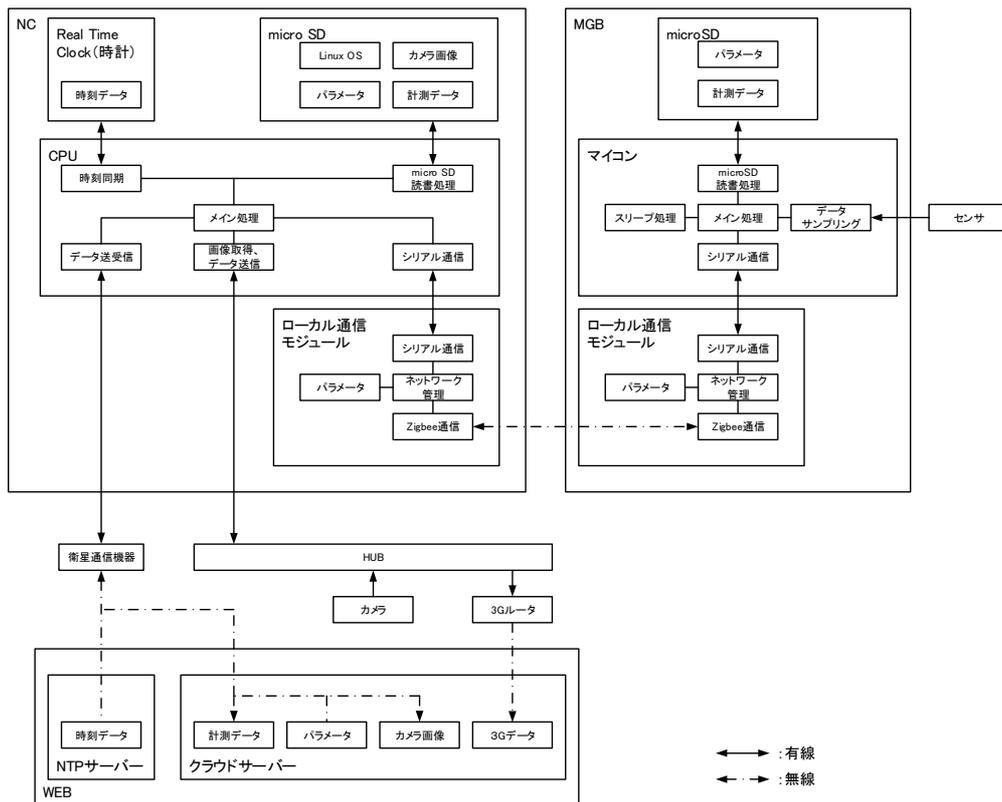


図 4.8-5 データロガー機能ブロック図

MGBは1分毎にデータを計測し各MGBに接続されたmicroSDにデータを保存し、1時間毎にローカル通信(センサーネットワーク)を介して1時間分の計測データをNCに送信する。ローカル通信には低消費電力な無線通信規格であるZigBeeを採用している。

NCはシステムの連続運転、間欠運転の全体制御を行い、運転中にローカル通信で各MGBからデータを受信し、さらに上位通信システムを起動しクラウドサーバーに計測データを送信している。

本システムは屋外に設置されることから、周辺温度変化の影響や落雷などの電氣的な外来ノイズを受けやすい。また、バッテリーからの給電は屋内用の安定した電源からの給電とは異なり、発電システムの発電状況や機器の動作状況によって変動することがある。各構成機器はこれらの影響に対して安定して動作することが求められる。

例えば、落雷などの電氣的なノイズに対しては、microSDの有線通信ラインへのシールドディング(電磁波ノイズ対策)やCRC(Cyclic Redundancy Check)などの誤り検出処理の実装を行い通信の信頼性を高めるとともに、エラー発生時にはソフトウェアリセットないしハードウェアリセット等の復旧処理を自発的に行う機能などを実装することが望ましい。

また動作温度等の周辺環境への対応については、機器単位の確認だけでなく個々の周辺部品についても確認を行う必要がある。

4.8.5 通信システム

NC に集約した計測データをクラウドサーバーに送信するための上位通信手段は、設置個所における通信状況に応じて 3G/4G 通信または衛星通信から品質の良い通信手段を採用する。

現地システムからクラウドサーバーへの上位通信手段は現地の通信状態、機器価格・通信料を踏まえて 3G/4G 通信あるいは衛星通信などから選択する。

(1) 3G 通信装置

北海道幌延町HCD-3孔付近の3G/4G通信の各キャリアのサービス提供エリアを図 4.8-6 に示す。

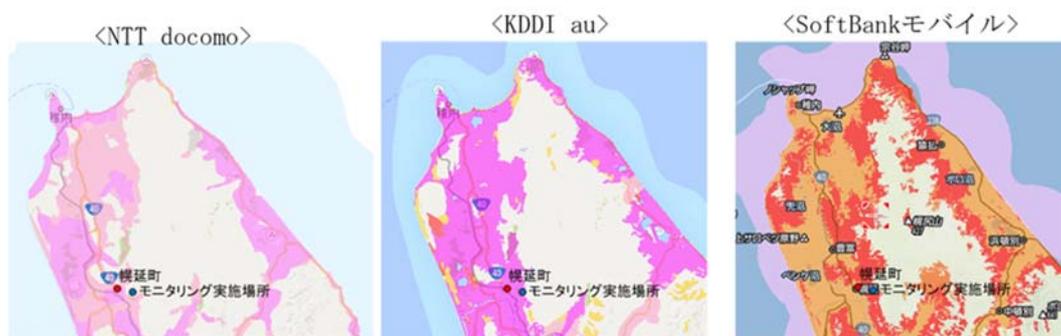


図 4.8-6 3G/4G 通信キャリア別サービス提供エリア

HCD-3 孔地点は、各キャリアともにサービス提供エリアとの境界にあり、いずれのキャリアを選んでも通信感度に大きな優位性は得られないものと考えられたが、現地調査を行った結果、受信感度に大きな差があることが判明した。ソフトバンクモバイルが最も良好であった。

3G 通信装置としては、表 4.8.5-1 のような一般汎用品を採用した。

表 4.8.5-1 3G 通信装置

サービス提供	NTTdocomo/ソフトバンクモバイル
機種名	HPSA-450C-JU/JA
サービス	音声+データ通信(パケット)
音声+データ同時利用	不可
通信速度	上り:最大5.7Mbps 下り:最大7.2Mbps
通信外部接続	RJ-45コネクタ
消費電力	待ち受け パケット通信
	15mW 平均5W以下
使用温度範囲	-40°C～+70°C
サイズ(奥行×幅×高さ)	105mm×75mm×25mm
重量	125g
価格(税込)	
写真	

(2) 衛星通信装置

日本における衛星通信サービスとしては、NTT DoCoMo ワイドスター II と KDDI インマルサットがある。表 4.8.5-2 に示すとおり、通信速度は KDDI が優勢であるが、NTT DoCoMo でも HCD-3 孔向けには必要十分な速度であると判断した。

NTT DoCoMo の端末は、KDDI の端末に比べて低消費電力であり、また、車載用としてバッテリー駆動、電源制御の機能を持っている。これらの特徴は無人計測システムに適合すると考えられることから、NTT DoCoMo ワイドスター II を採用した。

NTT DoCoMo ワイドスター II は国内専用サービスであるが、KDDI インマルサットはグローバルサービスとなっている。概要調査地点は日本国内に限定されるので、どちらのサービスを選定しても問題ない。

緯度が高くなるほど通信衛星への仰角が低くなる。特に高緯度で衛星アンテナの方向に山があると電波の送受信感度が大きく低下する場合がある。また、屋外アンテナと内蔵アンテナには指向性等に特性差があり、使用するアンテナによって受信品質に差が出ることがある。このため、衛星通信システムの選定には現地で通信品質の確認を行う必要がある。

表 4.8.5-2 衛星通信装置比較

サービス提供	NTTdocomo	KDDI(日本デジコム)
機種名	ワイドスターⅡ	インマルサットBGAN Explorer500
サービス	音声+データ通信(パケット)	音声+データ通信(パケット)
音声+データ同時利用	不可	可能
通信速度	上り:最大144kbps 下り:最大384kbps	上り:最大448kbps 下り:最大464kbps
通信外部接続	RJ-45コネクタ	イーサネット
消費電力 待ち受け パケット通信	1.2W 13.1W	38W
使用温度範囲	-20°C～+60°C	-25°C～+55°C
サイズ(奥行×幅×高さ)	197mm×180mm×39mm	218mm×217mm×52mm
重量(電池を含む)	1.3kg	1.5kg
価格(税込)	369,075円	399,000円
写真		

4.8.6 遠隔監視・制御機能

クラウドサーバー上に集約されたデータを介して現地状況を遠隔監視し、必要に応じて現地システムの動作制御を行う。

HCD-3 孔の遠隔監視におけるデータ表示例を図 4.8-7 から図 4.8-9 に示す。

HCD-3 孔向けのシステムでは現地システムを遠隔制御する機能として間欠運転の動作周期設定、連続運転モードへの動作モード変更、上位通信方式の変更（衛星/3G）機能を設けた。また、データは CSV 形式でダウンロードできる機能を設けた。クラウドサーバーにアクセスして遠隔監視するが、サーバー上のデータは間欠運転の動作周期でしか更新されない。リアルタイムでの現地状況のモニターが必要となる場合は現地システムを連続運転モードに切り替え、応答性を上げて連続監視する機能を持たせることも検討する。

システムの設置個所は生活環境から離れていることが想定されることから、計測データだけでなくシステムの状態を遠隔監視することが望ましい。また、これにあわせて不具合発生時に構成機器をハードウェア的にリセットするなどの遠隔復旧機能を設けることで、より安定的にシステムを運用することが可能になる。

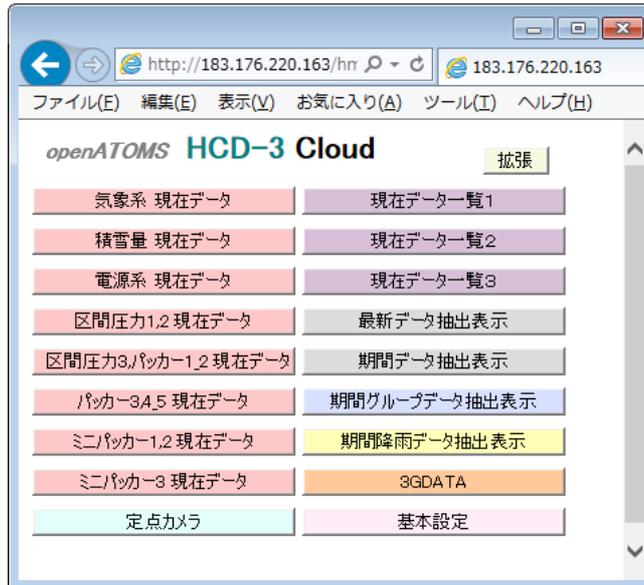


図 4.8-7 クラウドサーバーメニュー画面



図 4.8-8 計測データ表示（現在データ）

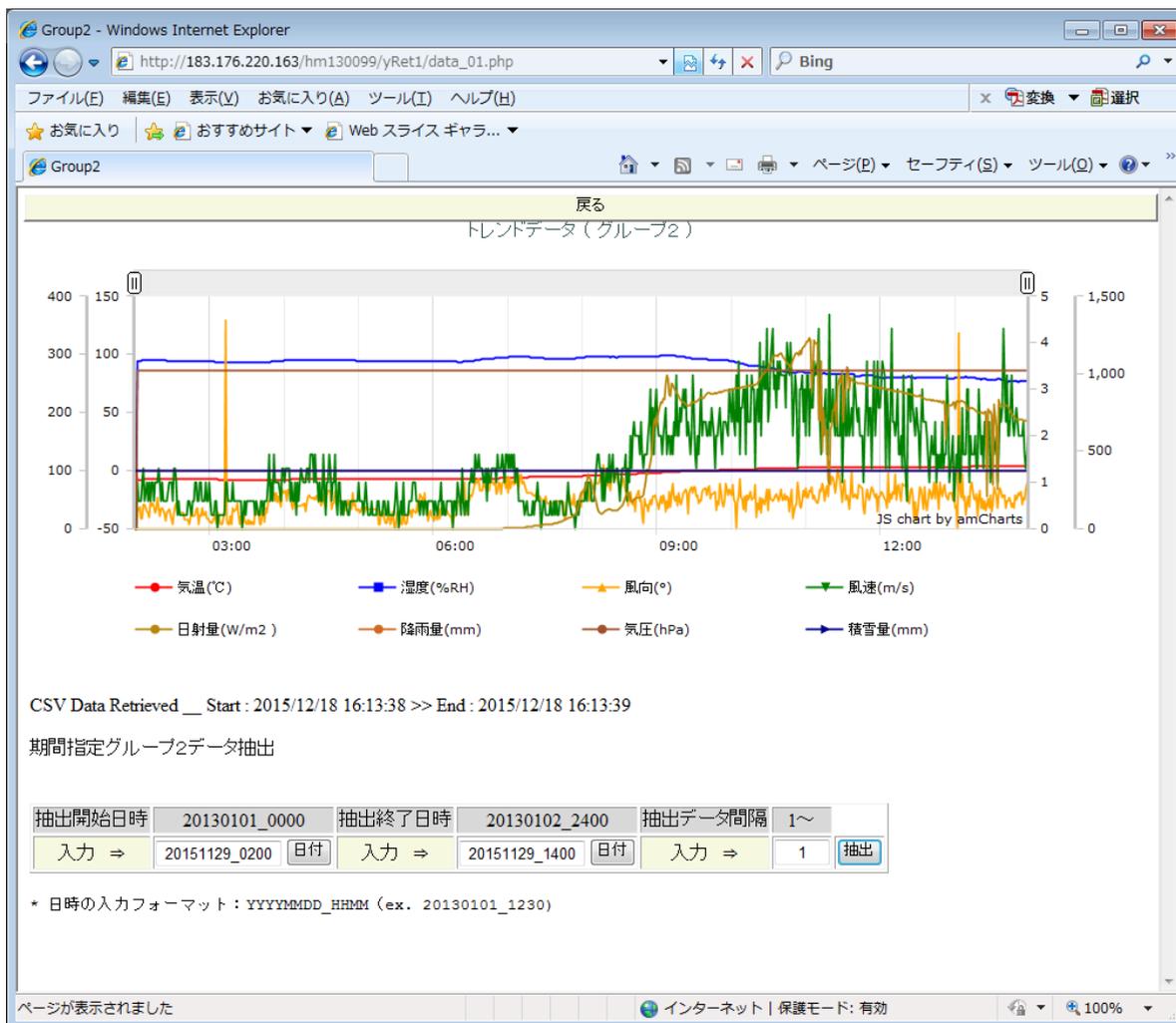


図 4.8-9 計測データ表示 (トレンド)

4.8.7 ウェブカメラ

現地環境の監視や防犯用にウェブカメラを設置し、計測データとともにクラウドサーバーへアップロードし現地を遠隔監視する

HCD-3 孔では間欠運転周期ごとにウェブカメラで現地の画像を撮影し、計測データとともにクラウドサーバーへアップロードする機能を設けた。画像データは現状の現地環境を把握する上で非常に有用であった。

画像データは他の計測データに比べデータサイズが大きいため、解像度によっては上位通信の動作時間が長期化するなど消費電力への影響が大きくなることに留意する。現地状況を詳細に把握するためには高解像度の画像が必要となるため、遠隔制御で解像度を変更設定が行えるようにすることが望ましい。



図 4.8-10 ウェブカメラ画像（左：低解像度、右：高解像度）

なお、低消費電力かつ高精度の積雪計がないため、積雪量を正確に自動計測することが難しかった。自動計測にはならないが、ウェブカメラの撮影範囲に積雪量計測用標尺を複数設置することにより撮影範囲内の積雪量を面的に正確に把握することは可能である。



図 4.8-11 ウェブカメラによる積雪量測定

4.8.8 システム制御

システムの稼働時間を短時間に収め低消費電力化を実現するため、システムの各コンポーネントの動作タイミングを設定し、それぞれに割り当てられた時間内で処理を行うよう制御する。

1年半ほどのHCD-3孔向けのモニタリング無人計測システムの運用を通して、データ取得率が高

いシステムに調整・改良を行った。その中で、システム制御上工夫した事項を以下に記す。

システム構成機器の動作タイミングチャート（3G 通信の事例）を**エラー！参照元が見つかりません**。に示す。衛星通信機器を使用する場合は、図中 3G ルーターの制御チャートを使用する衛星通信機器に合わせて調整すればよい。

NC は間欠動作のタイミングで起動し上位通信の制御を開始する。同時にウェブカメラの撮影処理と各 MGB とのセンサーネットワークを構築しローカル通信を始める。各 MGB からの計測データの送信は 1 分に 2 台が割り当てられており、順次 NC へ送信される。NC は計測データを受信しながら、NC 内の micro SD へのデータ保存と上位通信によるクラウドサーバーへの送信を行い、全 MGB からの計測データをクラウドサーバーに送信した後、上位通信用機器の電源を落とし、自身をシャットダウンする。

NC 及び各 MGB はそれぞれに時刻データを内蔵しており、このデータをもとに動作している。この時刻データが大きくずれると MGB と NC の通信が行えなくなりデータ送信等ができなくなってしまう。このため、間欠周期のタイミングでシステム全体の同期をとるための時刻合わせが行われている。ローカル通信が失敗する場合には、MGB が定期的に NC へアクセスして時刻同期を自ら復旧させる機能を実装させた。

このような時刻ずれや電源不足が発生した場合、ローカル通信あるいは上位通信が行えなくなることでクラウドサーバーへのデータ未送信が発生する。未送信データの発生を防ぐため、各通信に再送信機能を設けた。NC 及び MGB は計測データの送信履歴を管理し、未送信データが生じた場合には最新の計測データとともに、未送信データをクラウドサーバーまたは NC に送信する。ただし、各コンポーネントには動作タイミングが設定されており、この時間内で処理を完了する必要があるため、通常の最新計測データ（間欠周期 1 周期分）の送信に加えて、未送信データがある場合は最も古い未送信データ（間欠周期 1 周期分）のみを送信するようにした。

クラウドサーバー、上位通信機器（3G）、NC、MGB の制御フローチャートを図 4.8-13 に示す。この図は上位通信を行う場合の制御フローである。毎分の計測時は MGB のみが計測動作を担い、他の機器は動作しない。

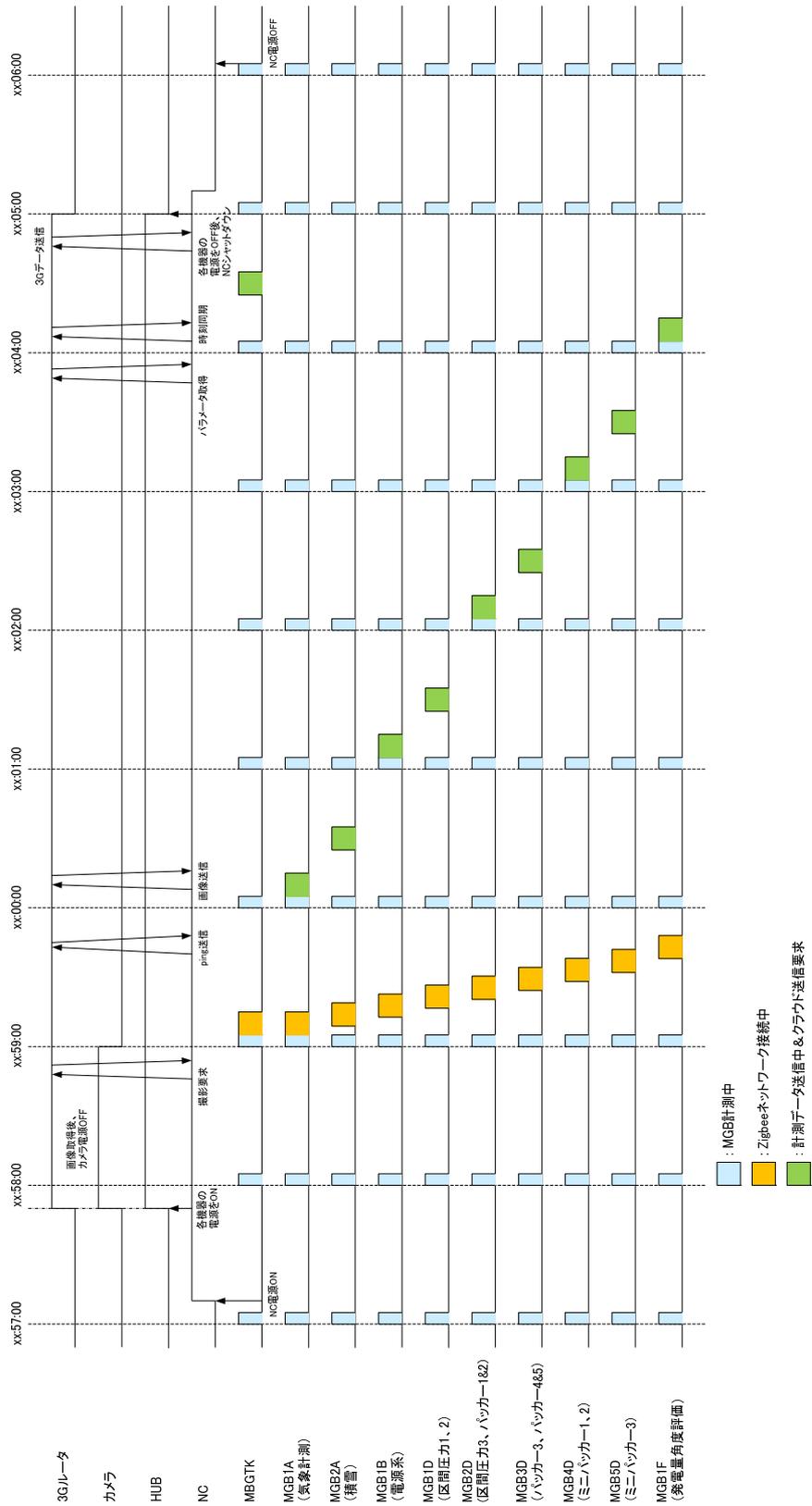
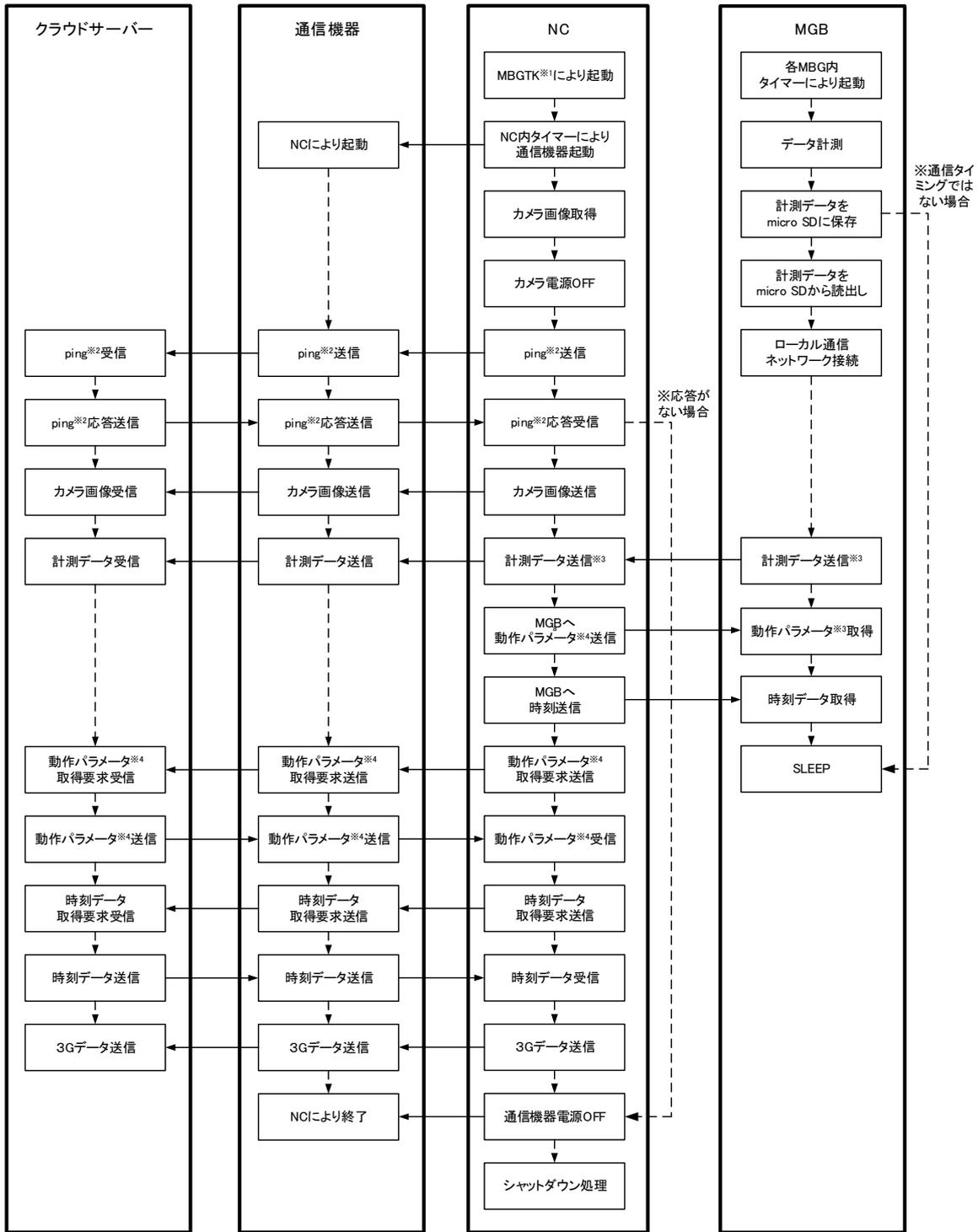


図 4.8-12 構成機器の動作タイミングチャート



- ※1. NCは自立起動用のタイマー機能を持っていないため、MGB (MGB TK)を用いて起動する。
- ※2. IPネットワークにおいてデータの到達性を確認するための仕組みであり、上位通信の接続確認に用いている。
- ※3. MGB、NCの送信処理は未送信データの再送信機能を含む。
- ※4. 現地に設置された無人計測システムを遠隔制御するためのパラメータ(コマンド)

図 4.8-13 システム制御フロー

4.8.9 筐体等

屋外に設置する筐体（機器の収納ボックス）は現地の気象条件から各機器を保護できるように設計及び設置を行う。

屋外に設置する機器は風雨や積雪による故障を防ぐため、防水ケース内に設置し、ケーブル口などからケース内部へ浸水しないようコーキング処理等を施す。

発電機を含めた各機器を設置するためのフレーム等は必要に応じてステンレス製品を使用するか、防錆用の塗装を施す。

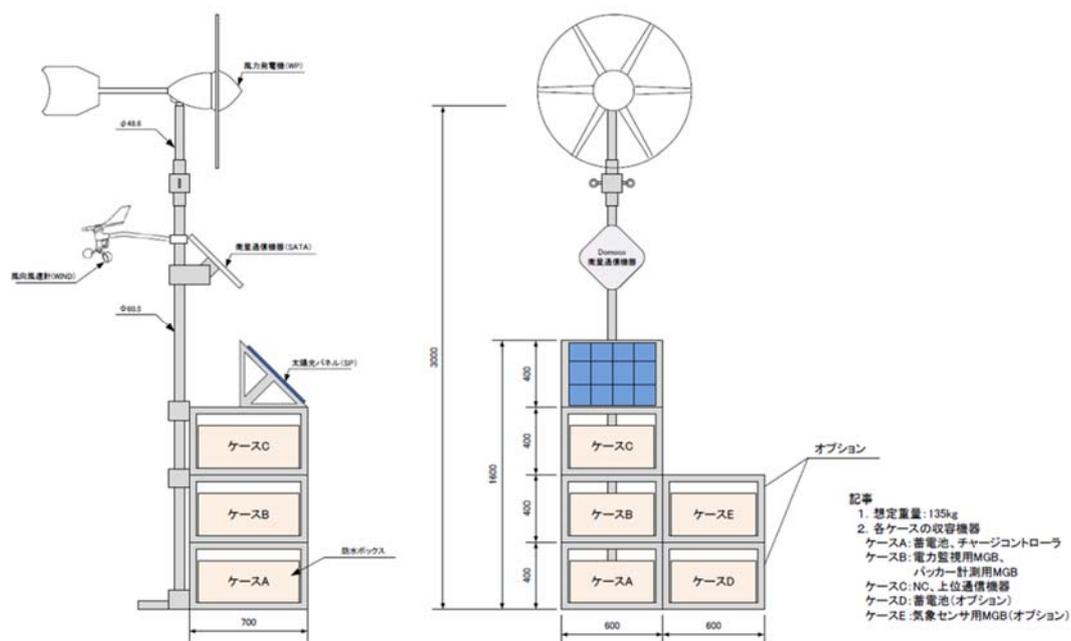


図 4.8-14 筐体設計例

4.8.10 複数の調査孔の無人計測

概要調査対象地内の複数の調査孔に測定ポイント局を設置し、センサーネットワークに参加させることで、モニタリングの無人計測を行うことができる。

測定ポイント局を追加してセンサーネットワークに参加させることで、同一の調査地点で複数の坑道を測定することができる。測定ポイント局の基本構成は発電システム、蓄電バッテリー、データ

ロガーを備え、上位通信機能を持たないことを除いて標準の計測システムと同一構成である。

追加の測定ポイント局は本局の計測システムを中心に構成されるセンサーネットワークにデータロガーのローカル通信機能を用いて無線接続する。測定データをローカル通信で本局に送信し、本局は追加された測定ポイント局のデータを含めた全データを集約してクラウドサーバーへ送信する。

複数測定ポイントシステムのシステム構成図を図 4.8-15 に示す。測定ポイント局のセンサーネットワークへの接続は本局と直接無線通信を行うほかに、別の測定ポイント局や中継局を経由して接続を行うことを可能とする。また通信ルート上の測定ポイント局や中継局が停止した場合は、他に通信可能なルートを探し自動的にルーティングし直す機能を持った設計とする。

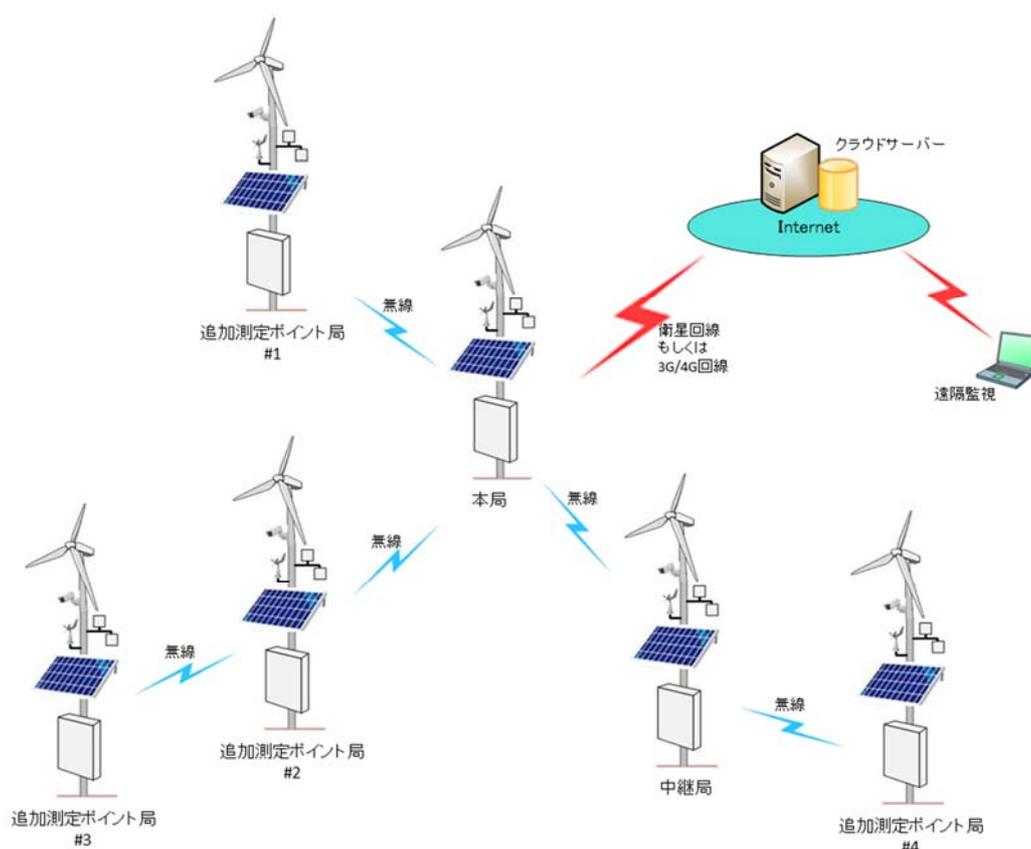


図 4.8-15 複数測定ポイント対応システム構成図

本局の基本設計は前項までに示したとおりの設計とする。ただし、追加測定ポイント局からのデータ受信と同データをクラウドサーバーへ送信するための機器の動作時間を考慮して消費電力量の算出を行う必要があり、それに伴う発電システム・蓄電池の強化が必要となる。

追加の測定ポイント局の基本設計は上位通信機能を持たないことを除いて本局の計測システムと同一設計である。発電システム、蓄電バッテリー、データロガー及び遠隔監視・制御機能より構成される。本局における上位通信処理が本局または中継局へのローカル通信に変わることで、ならびに他の

追加測定ポイント局からの中継局として利用される場合の中継処理に対応する必要がある点で本局とは制御が異なる。中継ポイントとして使用される可能性がある測定ポイント局については、他の測定ポイントからのデータの送受信を考慮した発電システム、蓄電池、システム制御の設計が必要となる。測定を行わない中継局はセンサーを持たないことを除いて、測定ポイント局と同一設計となる。遠隔監視・制御機能については本局を介して遠隔地からの要求を受信する。

本システムで使用したローカル通信モジュール（図 4.8-16）は見通しの良い場所であれば 1.5km まで通信が可能である。通信局間が 1.5km 以上離れている場合は両者の中間地点に中継局を設ける。また、見通しが悪く通信感度が悪化する場合についても同様に中間地点に中継局を設けるか、両者から見通しが良い地点を迂回するように中継局を設ける。複数ポイントの測定システムの信頼性を確保するためには、通信ルートが 1 つしかないような状況を避け、複数のルートで通信可能となるよう中継局を設けることが望ましい。

メーカー	Digi International
型式	XBee-PRO ZB
室内／アーバンレンジ	最大60m
屋外／見通しレンジ	最大1.5km
電源電圧	2.1～3.6V DC
周波数帯域	2.4GHz
RFデータレート	250kbps
写真	

図 4.8-16 ローカル通信モジュール

5. 掘削・調査結果の評価

5.1 コントロール掘削の評価

5.1.1 孔跡の正確性

コントロール掘削している孔井の計画孔跡との離間が極力小さいことを確認することにより、孔井の正確性を評価する。

通常の鉛直掘削における孔跡は、任意の深度（孔長）における水平2次元座標により決定し、スポット位置での離間を評価することが一般的である。これに対してコントロール掘削では、継続した孔跡を計画することが可能であり、継続して計画孔跡との離間を確認した評価が可能となる。

なお、方向性制御の精度を勘案すると、計画孔跡からの離間が5m以内に収まることが望ましい。

5.1.2 採取コアの評価

採取されたコアにより、掘削（コアリング）の妥当性について評価する。

堆積性の軟岩のコアは地下の地質環境特性に関する情報を多く含んでおり、このためコアリングは非常に重要な要素となる。

このため、採取されたコアの形状や孔内水混入状況から、採取されたコアの品質ならびにコア採取の妥当性について評価する。

(1) コアの形状

本掘削工法では、孔井を曲げるためにコアの軸方向と掘進方向が若干ずれる。このため孔井の曲げ角が大きくなるとコリングの際にコアバレル内でコアへの摩擦抵抗が増大し、人工的な割れ目（連続的なねじり割れ目）が発生することがある。このような割れ目が確認された時点で、MWDの位置情報などと照合のうえ、曲げ角が大きくなっている場合は、曲げ角を減少させて掘削する。

(2) 掘削水の影響

堆積軟岩のコアは、コアの空隙中に地下水を含有することから、一般的に地下水化学を評価する上で掘削水の影響を評価することが重要である。掘削水には予め既知のトレーサーを一定濃度添加しており、コアの周囲をトリミングして、その中の地下水のトレーサー濃度を測定することにより、掘削水の影響範囲を評価することが可能となる。このような観点で地化学的な側面からの品質を評価する。

なお、孔内モニタリングとして平成 28 年度に HCD-3 孔で実施した採水では、モニタリング区間のデッドボリュームの数十倍もの量の揚水を行ったにもかかわらず掘削泥水のコンタミ率が 60%より下がらなかった。一方、採水した水質は圧縮抽水とほぼ同等の値を示した。孔内モニタリングで採取した水が掘削水なのか地山の水なのか判断がつかない齟齬が生じた原因として、掘削中の泥水の影響が残っていたことが考えられる。しかしながら、掘削水が岩盤にどれくらい入ったかを見積もることは難しい。このため、掘削泥水には複数の異なるトレーサーを添加し、掘削中のトレーサー濃度の変化を記録しておくこと、モニタリングシステム設置時にモニタリング区間のトレーサー濃度をあらかじめ調べておくこと、がモニタリングによる水質の初期ベースライン評価のために重要である。

5.1.3 孔壁の保持

孔壁の保持に関しては、孔壁の崩壊と孔径の拡大の有無の観点から評価を行う。

孔壁の保持に関しては、孔内での作業危機管理の観点から孔内崩壊の有無を評価することが必要となり、孔内試験、特にパッカーによる区間閉塞を伴う試験の区間設定の観点から孔径を計測し、孔径拡大の有無を評価することが必要となる。

(1) 孔壁崩壊

一般的に、コントロール掘削による孔井は傾斜～水平となるため、鉛直孔井に比較して孔壁が崩壊しやすく、また孔壁が崩壊した場合岩片がその場にとどまり、その後の孔内調査に対して著しい障害となる。そのために、掘削の準備段階や孔内調査に先立ちロッドの揚管、降管に伴うフィード力を地上においてモニタリングし、孔内での孔壁崩壊状況を評価する。

(2) 孔径拡大

傾斜～水平区間での掘削に際しては、ロッドの降管、揚管により孔壁の下部が削剥されやすい。このため、孔内調査、特にパッカー拡張により区間を隔離して実施する試験に際しては、事前に孔内キャリパー検層や BHTV により孔内状況を確認することにより孔径拡大の有無を評価する。

5.2 調査結果の評価

5.2.1 掘削時検層（LWD）データの分析評価

掘削時検層（LWD）データは、別途採取したコア試料で計測した各種物理特性と対比することにより、その妥当性を評価する。

掘削時検層（LWD）データは、音波検層によるP波速度、S波速度、電磁波検層による電磁波速度（→間隙率に換算）、マイクロ電気検層による比抵抗、泥水の比抵抗・温度センサーによる泥水比抵抗と温度、自然γ線検層によるγ線強度の各深度プロファイルとして表示される。

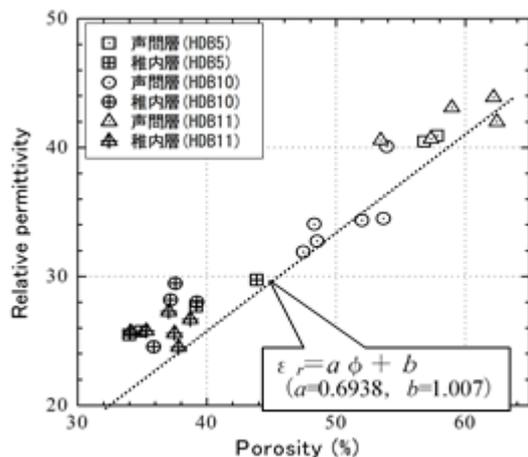
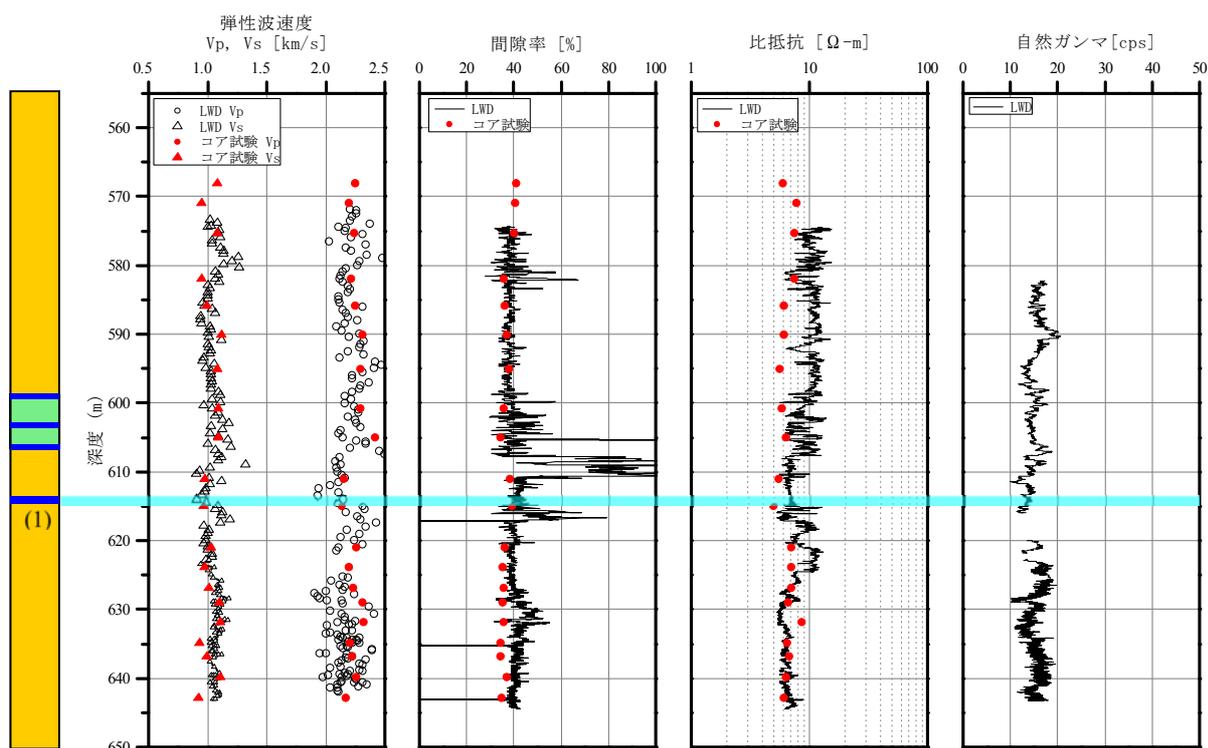


図 5.2-1 堆積軟岩試料による間隙率と比誘電率との関係



断層ガウジ・角礫

図 5.2-2 掘削時検層による深度プロファイルと岩石コア試料による試験結果との対比例

計測した電磁波速度 v より以下の近似式で比誘電率 ϵ_r に換算できる。

$$\epsilon_r = (c/v)^2 \quad (\text{ここで、} c \text{ は真空中の電磁波速度}) \quad (1)$$

間隙率と比誘電率には図 5.2-1 に示す正の相関性が認められる。よって、次式（回帰式）に基づき電磁波速度より求めた比誘電率 ϵ_r から間隙率 ϕ に換算することができる。

$$\epsilon_r = a\phi + b \quad (a=0.6938, b=1.007) \quad (2)$$

掘削時検層（LWD）により得られた深度プロファイルの妥当性は、別途採取したボーリングコア試料を使った室内試験結果（P波・S波速度、間隙率、比抵抗）と対比することにより、その妥当性を評価することができる（図 5.2-2 参照）。

5.2.2 試験区間における透水性の評価

試験区間では異なる試験方法、異なる解析方法によりそれぞれ解析を行い、相互のデータ比較により相補的にデータの信頼性を得る。

標準的な透水試験ではスラグ試験と揚水試験を行なう。スラグ試験では Hvorslev の方法、揚水試験では、揚水過程では Jacob の方法、回復過程では Agarwal の方法を用いて、それぞれ解析的に透水性の評価を行なう。それぞれの解析方法で得られた透水性評価結果を比較し、相補的にデータの信頼性を担保する。

5.2.3 採水試料の分析・評価

採取された地下水は標準的に以下の分析がされる。

- (1) 採水チャンバー内サンプル
- (2) 希ガスチャンバー内サンプル

これらの結果、特に(1)の結果に基づき、現位置地下水であること、すなわち掘削泥水の影響や浅層地下水の混入の状況について評価する。

(1) 採水チャンバー内サンプル

一般水質を評価するためにイオン分析を行なう。また、表層地下水や掘削水の混入を評価するためにトリチウム分析、地下水が降水起源の場合、涵養環境を評価するために酸素水素同位体比を分析する。イオンおよび同位体の分析項目および手法を表 5.2.3-1 に示す。また、掘削水にドーブさ

れたトレーサーの濃度分析を室内の分光光度計で計測し、孔内で計測したトレーサー濃度を確認する。

(2) 希ガスチャンバー内サンプル

分析する希ガスは蓄積法による地下水年代や地表水の混入などを評価するために He-3、4、Ne-20、21、22、Ar-36、38、40 を質量分析計で分析する。

表 5.2.3-1 一般水質分析は分析項目および分析方法

	分析項目	分析精度	単位	分析方法
溶存イオン	ナトリウムイオン	0.3	mg/L	JIS K 0101 -1998- 47.4 イオンクロマトグラフ法
	カリウムイオン	0.4	mg/L	JIS K 0101 -1998- 48.3 イオンクロマトグラフ法
	カルシウムイオン	0.2	mg/L	JIS K 0101 -1998- 47.4 イオンクロマトグラフ法
	マグネシウムイオン	0.02	mg/L	JIS K 0101 -1998- 47.4 イオンクロマトグラフ法
	塩化物イオン	2	mg/L	鉱泉分析法指針 -2002- 7-36(1) イオンクロマトグラフ法
	硫酸イオン	1	mg/L	JIS K 0101 -1998- 42.4 イオンクロマトグラフ法
	炭酸水素イオン	2	mg/L	河川水質試験方法(案)-1997- 57 標準法2 赤外線分析法
	臭化物イオン	0.5	mg/L	鉱泉分析法指針 -2002- 7-36(1) イオンクロマトグラフ法
	ヨウ化物イオン	0.2	mg/L	JIS K 0101 -1998- 33.1 よう素抽出吸光度法
同位体	トリチウム	0.04	Bq/L	文部科学省放射能測定法(平成14年)トリチウム分析法(電解濃縮法)
	水素同位体組成	精度±1	%	新実験化学講座(1975) 第10巻 4.6 安定同位体比の測定方法
	酸素同位体組成	精度±0.1	%	新実験化学講座(1975) 第10巻 4.6 安定同位体比の測定方法

5.2.4 孔内応力測定の評価

- (1) 岩盤応力の大きさの評価
- (2) 岩盤応力の最大方向の評価

水圧破碎法による岩盤応力の評価は、1957年に Hubbert らが初めて試行して以来、ボーリング孔さえあれば大深度で、かつ簡易に実施できることから、世界中で最も適用実績の多い方法とって間違いないだろう。一方、その後の研究により、前節で述べたブレイクダウン圧力 Pb、 リオープニング圧力 Pr、 シャットイン圧力 Ps と、地圧との関連づけに関する見直しの必要性なども指摘されている。その課題の一部に対しては、地盤工学会で基準化に関する検討が進められているところである。

ここでは、従来のエンジニアリングの実務で多く適用されている方法について簡単に記す。

(1) 岩盤応力の大きさの評価

ボーリング孔軸に垂直な面内の2次元応力場において、最大地圧を σ_H 、最小地圧 σ_h とする。

P_b 、 P_r 、 P_s と、 σ_H 、 σ_h の関係は次式で与えられる。

$$P_b = 3 \cdot \sigma_h - \sigma_H + T - p_0 \quad (1)$$

$$P_r = 3 \cdot \sigma_h - \sigma_H - p_0 \quad (2)$$

$$P_s = \sigma_h \quad (3)$$

ここで、 T は岩の引張強度、 p_0 は間隙水圧である。式(1)は送水による加圧により孔壁面の円周接線方向に生じる引張応力の最大値が、岩の引張強度と等しくなる条件である。式(2)は、一旦亀裂が発生しているので式(1)で $T=0$ として得られる式である。式(1)と(2)のみに σ_H が含まれており、 σ_H の評価のためにどちらかを用いる必要がある。一般的には、 T を用いる必要のない式(2)が用いられる。

式(3)は、水圧により開口している亀裂は、水圧がその亀裂に垂直方向の地圧以下になると閉合するであろう、ということから得られている。なお、水圧破碎亀裂は力学的に σ_H 方向の孔壁で発生するので、亀裂に垂直方向の地圧は σ_h となる。

なお式(2)においては、一旦亀裂ができたあとは再開口直前の亀裂内の水圧は p_0 でなく、 P_r と等しいと考える方が合理的であり、その場合には式(2)は次式(2')になる。

$$P_r = (3 \cdot \sigma_h - \sigma_H) / 2 \quad (2')$$

(2) 岩盤応力の最大方向の評価

ボーリング孔軸に垂直な面内の2次元応力場において、最大地圧を σ_H 、最小地圧 σ_h としたとき、前項でのべたように、水圧破碎亀裂は最大地圧 σ_H の側の孔壁に発生することから、 σ_H と σ_h の方向を知る。

もし、方向の異なる複数のボーリング孔があつてそれぞれで2次元応力場(大きさと方向)を評価していれば、3次元での応力評価を行うことも可能である。

5.2.5 孔井内トモグラフィ測定結果の評価

孔井内トモグラフィにより得られたP波速度断面及び反射断面をもとに、地質構造を評価する。

解析により得られたP波速度断面、反射断面を用いて、地質構造の評価を行う。

地表-孔井間初動走時トモグラフィ解析で得られたP波速度断面においては、掘削時検層(LWD)に

より得られた速度値や、採取したコア試料を用いて計測した速度値との比較を行うことで、妥当性の評価を行う。また、コントロールボーリング孔井を利用したゼロオフセット VSP を実施した場合、解析により孔井近傍の P 波速度が得られることから、解析結果の評価に用いることが可能である。また、地層に応じて P 波速度が異なる場合や、断層破碎帯において周囲との速度が異なる場合には、P 波速度の分布から地層境界や断層破碎帯を評価できる。

4.6.4 に示したように、反射法データの再解析により、地表測線のみを用いた解析結果に対して、より高精度かつ地質解釈が容易な反射断面を得ることが可能となる。そこで、調査領域近傍における表層からの地質調査、ボーリング調査の結果や、コントロールボーリング孔井から得られたコア試料などから推定した地質構造分布との比較を行い、反射断面から詳細な地質構造を評価する。また、ゼロオフセット VSP を実施した場合には、解析により得られる孔井近傍の反射面との比較を行い、結果の妥当性の検討や地質構造の評価に用いることができる。

以下、4.6.4 で示したデータ取得試験に対する解析結果を用いて実施した、妥当性の検証及び地質構造の評価の結果について述べる。

a) P 波速度断面を用いた評価

トモグラフィ解析により得られた速度値の妥当性を検討するため、HCD-3 孔の孔跡に沿って抽出した P 波速度の解析値と、採取したコア試料を用いて求めた P 波速度との比較を行った。比較した結果を図 5.2-3 に示す。図より、浅部、特に掘削深度約 300m から 400m 付近を除き、両者の値は概ね整合していることが分かる。後述のように、掘削深度約 300m から 400m 付近にかけては断層帯が分布しており、破碎に伴う速度の低下が予想される一方、コア試料を用いた室内試験では破碎されていない健岩部を選択して計測していることから、破碎による速度の低下は見られず、トモグラフィによる解析値に対して高速度であったと考えられる。また、掘削深度約 850m において、約 500m/sec の急激な速度低下が見られる。これは、コア試料の分析から地質境界（稚内層から声問層）であることが明らかになっているが、トモグラフィにおける受振器の設置深度が最深部でも 785m と地質境界に達していないことから、速度分布ではこの境界は判別できていない。

b) 反射断面を用いた評価

図 5.2-4 に、得られたコア試料や地表地質等から推定した地質構造断面図を示す。大曲断層の主断層は、掘削深度約 330m から 450m の区間で孔井を横断していると考えられている。得られた反射断面（図 4.6-22）では、掘削深度 270m 以深の孔井が主断層に差し掛かる区間において、反射イベントの振幅、連続性が低下していることが分かる。振幅や連続性が低下した要因としては、断層による破碎が反射波の散乱をもたらしたことが考えられる。再解析により得られた反射断面は、既存処理で得られた断面に対して、反射イベントの連続性が向上しているとともに、振幅の強弱による判別がしやすくなっていることから、この反射イベントの振幅や連続性が低下している区間も以前より認識しやす

なっていることが分かる。また、CMP280 から 400、深度 300m から 500m 付近の区間において強振幅の反射イベントが認められるが、これは地質構造断面図における潜在背斜構造に対応している。一方、この反射イベントは既存処理による反射断面（図 4.6-21）では判別が困難である。このように、再解析により、個別の断層面の判別まではできていないと考えられるものの、既存の処理断面に対してより高精度な地質解釈が可能になったといえる。反射断面（図 4.6-22）に地表地質及びコア試料等から推定した破碎帯の位置などを追記した解釈図を図 5.2-5 に示す。

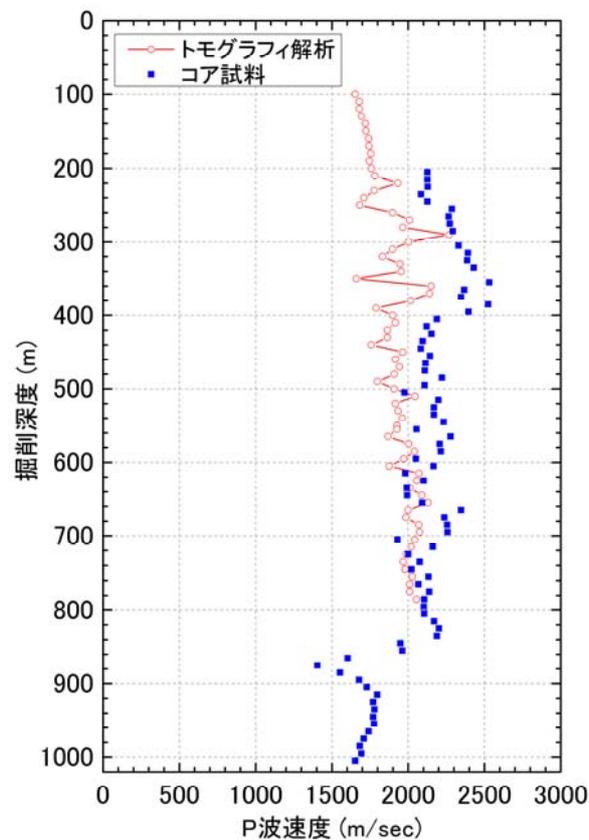


図 5.2-3 トモグラフィ解析により得られた P 波速度とコア試料の P 波速度との比較

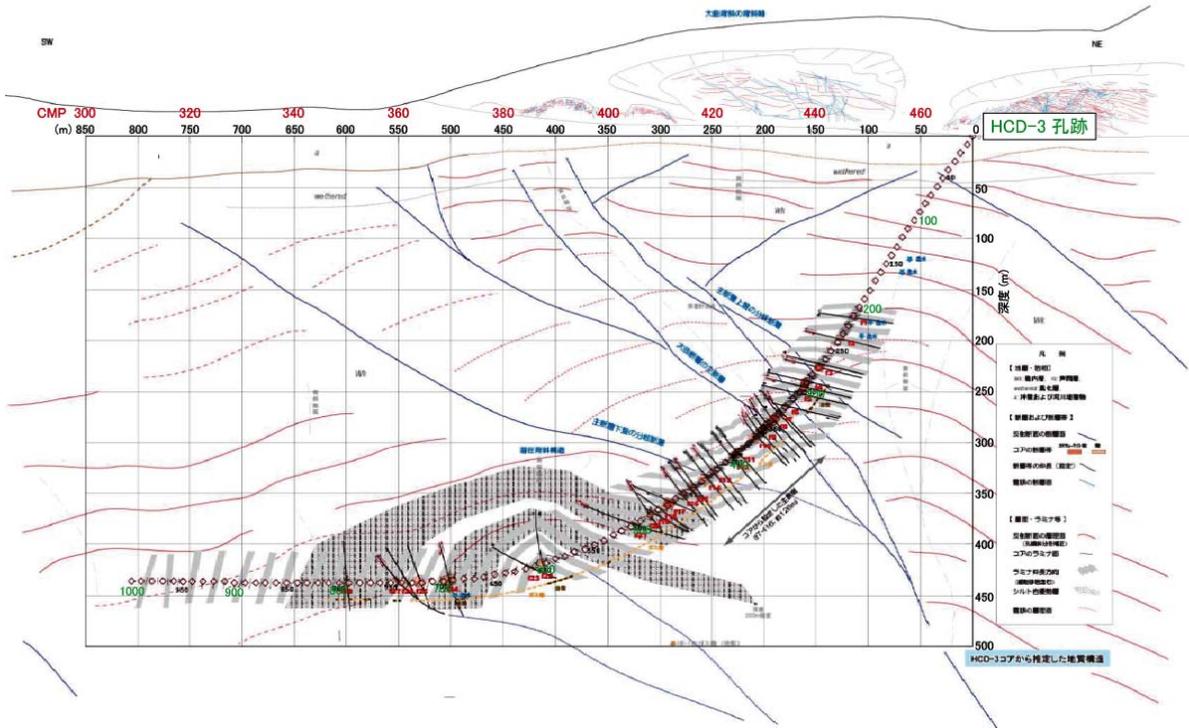


図 5.2-4 得られたコア試料、地表地質等から推定した地質構造断面図

(マイグレーション深度断面 (図 4.6-22、図 5.2-5) における水平方向の CMP 値を、水平距離の上に併記している)

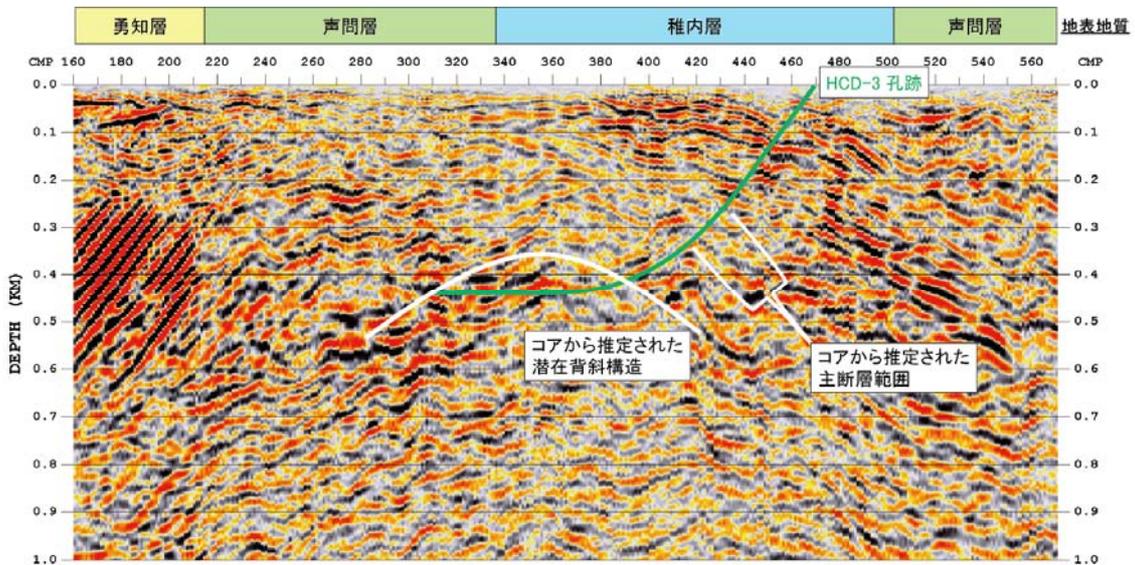


図 5.2-5 反射断面と地質構造との比較

(今回の処理により得られたマイグレーション深度断面 (図 4.6-22) に、地表地質及びコア試料等から推定した破碎帯の位置などを追記している)

5.2.6 モニタリングデータの整理

計測された圧力データは、必要な補正を施す。

連続計測される流体の圧力データには、潮汐の影響等が混在している。このため、これらのデータに一次処理を施し、工学データに変換する。

データ一次処理の代表的な手法として潮汐解析プログラム（BAYTAP-G）による潮汐の影響の除去がある。

また、パッカー、ミニパッカー、パッカーライン等が気温や気圧によって影響を受ける場合があり、それらの影響が計測値に含まれる場合もありうる。このため観測データの評価をきちんと行う観点から、計測機器の設置場所における温度、気圧のデータも合わせて記録し、上記潮汐解析後にこれらの影響を取り除く。

特に地表近くの観測を行う場合などは、大気圧の変動の他に降雨や融雪による地下水の変動も考えられるので、計測計画を立案するうえで、これらの影響が評価できるよう予め検討することが望ましい。

5.2.7 モニタリングデータの評価

孔内長期モニタリングではパッカーにより閉塞された区間において、間隙水圧および水質の長期変化をモニタリングするために、(1)パッカーによる区間閉塞の確認、(2)間隙水圧データの信頼性および(3)地下水水質の信頼性に関して評価する。

(1) パッカーシステムによる区間閉塞の確認

パッカーの区間閉塞については、閉塞区間から立ち上げたスタンドパイプに設置された圧力センサーによる圧力測定により評価する。予め透水性が測定されている区間についてはスタンドパイプ内の水位を強制的に変動させその回復状況を計測することにより簡易的に透水性を確認し、既知の透水性との比較により区間閉塞の信頼性を評価する。

区間の透水性が未知の場合は、任意の測定区間のスタンドパイプにおける水位を強制的に変動させ、他の計測区間のスタンドパイプ内の水位変動の有無を確認することで区間を跨いだパッカーの閉塞性を評価する。

(2) 間隙水圧データの信頼性

5.2.6 モニタリングデータの整理で述べたように、間隙水圧データには様々なノイズの影響を受け

ている。このため、これらの影響を除去したうえでデータ解析に供する。

(3) 地下水水質の信頼性

孔井掘削に際しては、掘削泥水に既知濃度のトレーサー物質[※]を添加してあり、区間から採水した地下水のトレーサー濃度を測定することにより、掘削水の影響を把握することが可能であり、このような観点から地下水水質の信頼性を評価する。

※ 孔内モニタリングとして平成 28 年度に HCD-3 孔で実施した採水では、モニタリング区間のデッドボリュームの数十倍もの量の揚水を行ったにもかかわらず掘削泥水のコンタミ率が 60%より下がらなかった。一方、採水した水質は圧縮抽水とほぼ同等の値を示した。孔内モニタリングで採取した水が掘削水なのか地山の水なのか判断がつかない齟齬が生じた原因として、掘削中の泥水の影響が残っていたことが考えられる。しかしながら、掘削水が岩盤にどれくらい入ったかを見積もることは難しい。このため、掘削泥水には複数の異なるトレーサーを添加し、掘削中のトレーサー濃度の変化を記録しておくこと、モニタリングシステム設置時にモニタリング区間のトレーサー濃度をあらかじめ調べておくこと、がモニタリングによる水質の初期ベースライン評価のために重要である。

5.2.8 取得データの解析

地下水の間隙水圧は種々の要因に影響されている可能性があり、これらの影響を除去した上で、間隙水圧のベースラインを評価する必要がある。

(1) 影響要因について

本モニタリングシステムは地下の間隙水圧の変動に連動したスタンドパイプ内の水圧変動を測定しているため、取得データに対する変動の要因としては大気圧、潮汐、降水などが挙げられる(図 5.2-6 参照)。したがって、取得データを適切に評価するためには、これらの影響要因を取り除く必要がある。そのための手法として BAYTAP-G に代表される潮汐解析プログラムが挙げられる。

(2) BAYTAP-G について

BAYTAP-G は、統計数理研究所と緯度観測所(現:大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 国立天文台 水沢 VLBI 観測所)が共同で開発した潮汐解析プログラムで、地球潮汐データの解析をはじめ、地殻変動連続観測データの解析にも広く使われている。本プログラムは、地殻変動、潮汐解析に Bayesian Model を組み込んだ総合解析プログラムで、以下の機能が備わっている。

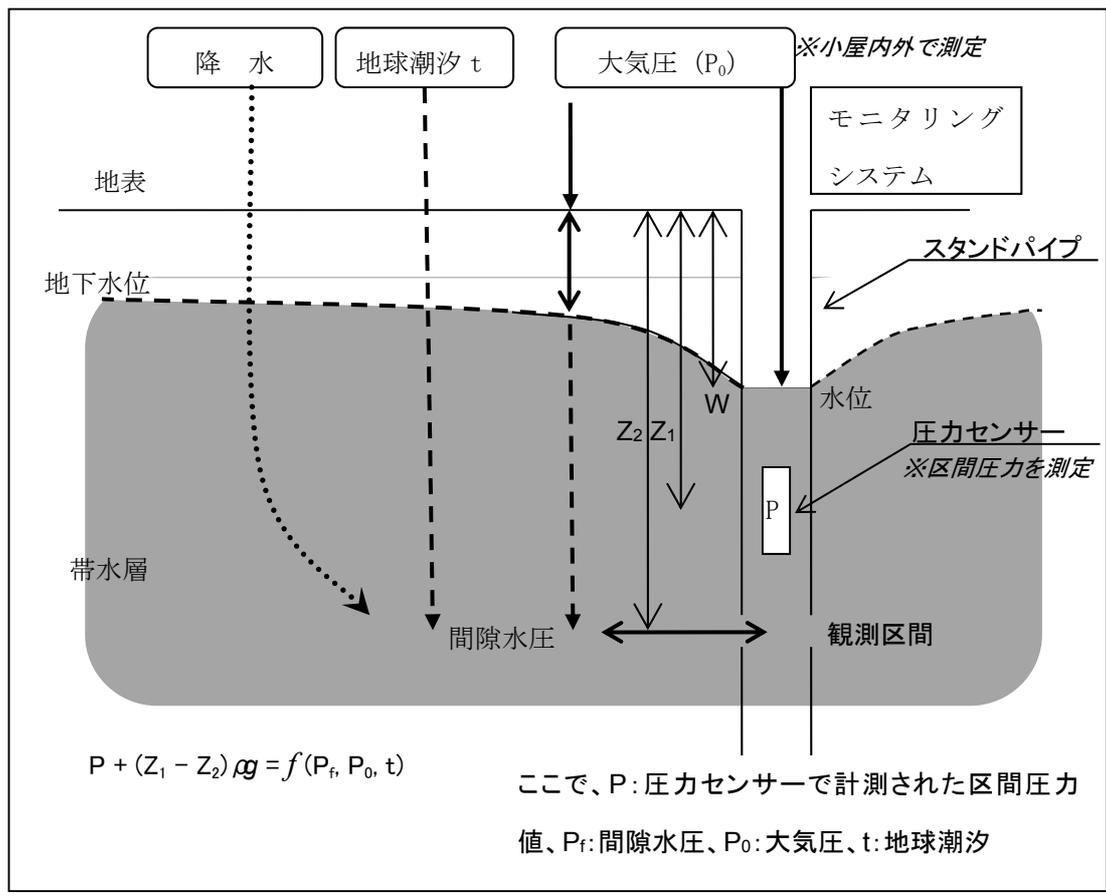


図 5.2-6 区間圧力データに対する影響要因

- ① 潮汐定数の推定
- ② トレンド及びそのパワースペクトルの見積もり
- ③ 大気圧などの並行観測データとのレスポンスをみる
- ④ 欠測値の補間、ステップ量の推定
- ⑤ 異常値のラフな検出
- ⑥ モデルの良否をみる ABIC の計算

5.2.9 コアによる測定結果の評価

コアにより測定された結果は、孔内において計測された各種データと相互比較することにより、その品質を評価する。

コアを用いた測定、分析としては、物性、力学および地化学的な特性に関する情報を取得する。このうち物性に関しては、孔内検層により取得された各種データと相互比較することによりコア調査デー

タの品質を評価する。力学データに関しては、今後実施される孔内力学測定結果と比較検討することにより、コア試験結果の品質を評価する。

地化学的な情報はコア間隙水の抽出による水試料の水質分析により取得される。この際に間隙水に対する掘削泥水の影響を確認する必要があり、このために掘削泥水中にあらかじめ投入されているトレーサー物質の濃度を測定し^{*}、影響が小さくなることを確認したうえで水質分析を実施する。また、分析されたデータと同一区間の孔内で採取された地下水の水質分析結果を相互比較することにより、その品質を評価する。

※ 孔内モニタリングとして平成 28 年度に HCD-3 孔で実施した採水では、モニタリング区間のデッドボリュームの数十倍もの量の揚水を行ったにもかかわらず掘削泥水のコンタミ率が 60%より下がらなかった。一方、採水した水質は圧縮抽水とほぼ同等の値を示した。孔内モニタリングで採取した水が掘削水なのか地山の水なのか判断がつかない齟齬が生じた原因として、掘削中の泥水の影響が残っていたことが考えられる。しかしながら、掘削水が岩盤にどれくらい入ったかを見積もることは難しい。このため、掘削泥水には複数の異なるトレーサーを添加し、掘削中のトレーサー濃度の変化を記録しておくこと、モニタリングシステム設置時にモニタリング区間のトレーサー濃度をあらかじめ調べておくこと、がモニタリングによる水質の初期ベースライン評価のために重要である。