

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

平成 30 年 3 月

一般財団法人 電力中央研究所



# 目 次

1. はじめに.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 目的と開発目標.....	2
1.3 調査・試験サイトの地形・地質概要.....	2
1.4 掘削・調査システムの概要.....	5
2. 開発目標とスケジュール.....	6
2.1 研究計画.....	6
2.1 フェーズ 1 <sup>5)</sup> .....	7
2.2 フェーズ 2 <sup>7)</sup> .....	9
2.3 フェーズ 3 前半 (2008 年度～2012 年度) .....	10
2.4 フェーズ 3 後半 (2013 年度～2017 年度) .....	11
3. 掘削・調査機器の開発及び高度化.....	12
3.1 コントロール掘削技術の改良.....	12
3.1.1 サイドトラック掘削軌跡計画.....	12
3.1.2 サイドトラック掘削.....	14
3.1.3 セメント材料.....	15
3.1.4 サイドトラック掘削に使用する治具の試作.....	15
3.2 孔内計測技術の改良.....	16
3.2.1 透水試験・採水・イメージング装置.....	16
3.2.2 孔内応力試験装置.....	16
3.3 物理探査技術の開発・改良.....	19
3.4 孔内モニタリング技術の開発.....	21
3.4.1 孔内モニタリングシステムの設置.....	21
3.4.2 モニタリングデータの取得.....	33
3.5 モニタリング無人計測システムの開発.....	42
3.5.1 無人計測システムの概要とその概念設計.....	42
3.5.2 幌延 HCD-3 向け無人計測システム.....	47
4. 現地適用性検討.....	52
4.1 コントロールボーリング孔内状況の確認.....	52

4.1.1	現地適用性評価試験開始前の孔内状況確認	52
4.1.2	孔径検層(キャリパ検層)	53
4.2	サイドトラック掘削	56
4.3	孔内透水試験・採水	58
4.4	孔内応力測定	58
4.4.1	幌延・横須賀地区における現地適用性試験	58
4.4.2	現地適用性試験結果	58
4.5	物理探査技術	61
4.5.1	孔井内トモグラフィの実施手順	61
4.5.2	孔井内トモグラフィデータの解析手順	67
4.6	孔内モニタリング	78
4.6.1	区間圧力	78
4.6.2	地下水の水質	86
4.6.3	モニタリングシステムの維持、管理	92
4.6.4	無人計測システムの運用と信頼性評価	94
5.	設備の撤去・原形復旧	103
5.1	地上設備撤去	104
5.1.1	組立式プレハブハウス(現場事務所)の撤去	105
5.1.2	防寒施設の外装シート取り外しと撤去	106
5.1.3	防寒施設本体の撤去	107
5.1.4	掘削資機材の撤去	108
5.1.5	試錐機・傾斜櫓の撤去	108
5.1.6	孔口養生	108
5.2	廃孔及び原形復旧	109
5.2.1	無人計測システム撤去	109
5.2.2	モニタリングシステム回収	110
5.2.3	廃孔	116
5.2.4	原形復旧	123
6.	ボーリング調査技術の体系化	123
7.	まとめ	125
7.1	機器の開発及び高度化	125

7.1.1	コントロール掘削技術の改良.....	125
7.1.2	孔内計測技術の改良.....	125
7.1.3	物理探査技術の開発・改良.....	125
7.1.4	孔内モニタリング技術の開発.....	126
7.2	現地適用性検討.....	126
7.2.1	コントロールボーリング孔内状況の確認.....	126
7.2.2	サイドトラック掘削.....	126
7.2.3	孔内透水試験・採水.....	126
7.2.4	孔内応力測定.....	126
7.2.5	物理探査技術.....	127
7.2.6	孔内モニタリング.....	127
7.3	ボーリング調査技術の体系化.....	127
8.	引用文献.....	129
9.	関連資料.....	130

## 図表目次

図 1.1-1	コントロールボーリング概念図.....	1
図 1.3-1	幌延地点の地質と調査位置図.....	4
図 1.4-1	コントロール掘削概要.....	5
図 1.4-2	掘削編成図.....	5
図 3.1-1	サイドトラック掘削の計画軌跡断面図.....	13
図 3.1-2	サイドトラック掘削の概略手順.....	14
図 3.1-3	試作したパッカプラグ切り離し治具.....	16
図 3.2-1	孔内応力専用ケーブルを使った通信確認試験概要.....	17
図 3.2-2	熱収縮ゴムチューブの亀裂痕.....	18
図 3.3-1	屈折法地震探査受発振点位置図.....	20
図 3.3-2	バイプロサイズ震源の路上発振作業.....	20
図 3.4-1	適用性試験実施計画位置(左)と実施位置(右).....	22
図 3.4-2	装薬治具編成図.....	23
図 3.4-3	火工品組み立て図.....	24
図 3.4-4	火工品組み立て状況.....	24
図 3.4-5	装薬状況.....	24
図 3.4-6	発破後の装薬治具状況.....	25
図 3.4-7	発破後のカプセルの残滓状況.....	25
図 3.4-8	電動カッター編成.....	26
図 3.4-9	BHTV 検層(2回目切断部)結果.....	27
図 3.4-10	設置作業状況(1).....	27
図 3.4-11	設置作業状況(2).....	28
図 3.4-12	設置作業状況(3).....	28
図 3.4-13	孔内モニタリングシステム設置完了.....	28
図 3.4-14	孔内長期モニタリング装置概念図(HCD-3孔).....	30
図 3.4-15	スタンドパイプ内圧力センサー.....	31
図 3.4-16	パッカー圧計測センサー.....	31
図 3.4-17	大気圧センサー.....	32
図 3.4-18	データロガー.....	32
図 3.4-19	取得データ(平成26年2月～平成27年3月).....	34

図 3.4-20	最新計測値の表示例.....	35
図 3.4-21	指定期間のグラフ表示例.....	35
図 3.4-22	計測データ取得例.....	36
図 3.4-23	チューブドラム.....	37
図 3.4-24	ポンプコントロールユニット.....	37
図 3.4-25	ダブルバルブポンプ作動原理.....	38
図 3.4-26	サンプラー.....	39
図 3.4-27	ウィンチ.....	40
図 3.4-28	クランプ止め装置.....	40
図 3.4-29	フロースルー型サンプラー断面図.....	40
図 3.5-1	無人計測システム概念図.....	43
図 3.5-2	無人計測システム概念設計フロー.....	45
図 3.5-3	標準スタンドアローンシステム構成図.....	46
図 3.5-4	複数測定ポイントのシステム構成図.....	47
図 3.5-5	幌延 HCD-3 孔向けシステム構成図.....	48
図 3.5-6	HCD-3 孔 無人計測システム機器配置計画.....	51
図 3.5-7	無人計測システム現地据付後の状況 (HCD-3 孔).....	51
図 4.1-1	キャリパー検層結果(区間①).....	54
図 4.1-2	キャリパー検層結果(区間②).....	54
図 4.1-3	キャリパー検層結果(区間③).....	55
図 4.1-4	キャリパー検層結果(追加区間 A).....	55
図 4.1-5	キャリパー検層結果(追加区間 B).....	56
図 4.5-1	中型バイブレータ震源.....	62
図 4.5-2	ハイドロフォンアレイツールの構成図.....	63
図 4.5-3	データ取得機器の接続概要図.....	65
図 4.5-4	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.....	66
図 4.5-5	リグアップ装置の配置概要図.....	66
図 4.5-6	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.....	67
図 4.5-7	データ解析の流れ.....	71
図 4.5-8	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.....	71
図 4.5-9	F-K フィルター適用前後の発振記録例.....	72

図 4.5-10	屈折波データ取得試験における発受振点の位置図	72
図 4.5-11	屈折波データ取得試験における取得波形の例	73
図 4.5-12	屈折波データ取得波形に対する前処理後の記録例	73
図 4.5-13	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	74
図 4.5-14	P波初動走時トモグラフィ解析における初期速度構造	74
図 4.5-15	P波初動走時トモグラフィ解析の結果	75
図 4.5-16	フルウェーブインバージョンの流れ	76
図 4.5-17	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	76
図 4.5-18	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)	76
図 4.5-19	CRS法、MDRS法の概要	77
図 4.5-20	反射法データ処理の流れ	77
図 4.5-21	既存処理により得られたマイグレーション深度断面	78
図 4.5-22	今回の処理により得られたマイグレーション深度断面	78
図 4.6-1	観測データ(全期間)	80
図 4.6-2	区間圧力データに対する影響要因	81
図 4.6-3	各観測区間水位と稚内における潮位	82
図 4.6-4	各観測区間水位と近隣3箇所の降水量	82
図 4.6-5	区間①水位と各種データとのクロスプロット	83
図 4.6-6	区間②水位と各種データとのクロスプロット	83
図 4.6-7	BAYTAP-Gによる解析結果(観測区間①全体)	84
図 4.6-8	BAYTAP-Gによる解析結果(観測区間①詳細)	84
図 4.6-9	BAYTAP-Gによる解析結果(観測区間②全体)	85
図 4.6-10	BAYTAP-Gによる解析結果(観測区間②詳細)	85
図 4.6-11	予備排水に伴う蛍光染料濃度の変化	86
図 4.6-12	ヘキサダイアグラム	88
図 4.6-13	パイパーダイアグラム	88
図 4.6-14	水素酸素同位体比	89
図 4.6-15	希ガスの分析結果の比較	91
図 4.6-16	無人計測システム システム構成図	95
図 4.6-17	システム配線系統図	96
図 4.6-18	ケースA及びケースA内部	97



図 4.6-19	ケース B 及びケース B 内部.....	97
図 4.6-20	ケース C 及びケース C 内部.....	97
図 4.6-21	ケース D 及びケース D 内部.....	98
図 4.6-22	ケース E 及びケース E 内部.....	98
図 4.6-23	ケース F 及びケース F 内部.....	98
図 4.6-24	上位通信取得率.....	101
図 4.6-25	ローカル通信取得率.....	101
図 4.6-26	データ取得率.....	102
図 4.6-27	マイクロ SD 保存取得率.....	102
図 5.1-1	HCD-3 孔試錐調査設備配置.....	104
図 5.1-2	撤去作業の流れと主要な撤去対象品目.....	105
図 5.1-3	現場事務所（組立式プレハブハウス）及び防寒施設.....	106
図 5.1-4	防寒施設内の掘削資機材.....	106
図 5.1-5	外装シート取り外し前と取り外し後.....	107
図 5.1-6	防寒施設本体解体作業状況.....	107
図 5.1-7	試錐機操作盤・掘削用アーマードケーブルウィンチ搬出状況.....	108
図 5.1-8	試錐機本体・マスト基礎鋼解体撤去状況.....	108
図 5.1-9	孔口部養生状況（養生前と養生後）.....	109
図 5.1-10	地上設備撤去後の試験サイト全景（北海道幌延町上幌延地区）.....	109
図 5.2-1	無人計測システム撤去作業前全景.....	110
図 5.2-2	無人計測システム撤去作業完了後の全景.....	110
図 5.2-3	モニタリングシステム回収前状況.....	111
図 5.2-4	回収したミニパッカーと圧力センサーならびに回収したパッカー拡張水.....	111
図 5.2-5	モニタリングシステム回収状況（全景）.....	112
図 5.2-6	モニタリングシステム回収状況①.....	112
図 5.2-7	立ち上げ管回収状況.....	112
図 5.2-8	立ち上げ管回収後の坑口状況.....	113
図 5.2-9	モニタリングシステム回収状況（強引）.....	113
図 5.2-10	パッカー回収状況.....	113
図 5.2-11	回収したパッカー（パッカー⑤）.....	114
図 5.2-12	回収したパッカー（パッカー④）.....	114

図 5.2-13 回収したパッカー（パッカー③） .....	114
図 5.2-14 回収したパッカー（パッカー②） .....	115
図 5.2-15 回収したパッカー（パッカー①） .....	115
図 5.2-16 パッカー変形部（パッカー②） .....	115
図 5.2-17 回収したモニタリングシステム .....	116
図 5.2-18 HCD-3 孔概要図 .....	117
図 5.2-19 HMD-1 孔概要図 .....	118
図 5.2-20 キャリパー検層結果図 .....	119
図 5.2-21 プラグパッカー（ニューマチックパッカー） .....	120
図 5.2-22 プラグパッカー設置・拡張状況 .....	120
図 5.2-23 高圧セメンチング実施状況（HCD-3 孔） .....	120
図 5.2-24 コンクリートによる埋孔状況 .....	121
図 5.2-25 コンクリート打設完了状況 .....	121
図 5.2-26 セメンチング実施状況（HMD-1 孔） .....	122
図 5.2-27 鉄板溶接した孔口とセメントスラリー被覆準備（型枠設置） .....	122
図 5.2-28 HMD-1 孔口コンクリート被覆、埋戻し状況 .....	122
図 5.2-29 コンクリート基礎破碎ならびにコンクリート塊積込・搬出状況 .....	123
図 5.2-30 埋戻し・転圧作業状況ならびに整地作業完了状況 .....	123

表 2.1-1	研究計画（2000～2013 年度）	7
表 2.1-2	フェーズ 3 後半（2013～2017 年度）の研究計画	7
表 2.2-1	研究計画（フェーズ 2 及びフェーズ 3 前半）	9
表 3.2-1	通信確認結果一覧	17
表 3.2-2	鋼管試験検証結果一覧	19
表 3.3-1	屈折法地震探査観測仕様一覧	21
表 3.4-1	設置区間－深度一覧表	30
表 3.4-2	ダブルバルブポンプ仕様	37
表 3.4-3	サンプラーの仕様	39
表 3.4-4	採取項目と採取方法	41
表 3.4-5	分析方法	42
表 3.5-1	データロガーの計測点リスト	48
表 3.5-2	風力発電機の製品候補	50
表 3.5-3	幌延 HCD-3 孔向け機器一覧	50
表 4.1-1	キャリパー検層の実施区間	53
表 4.4-1	地上通信機能検証項目	58
表 4.4-2	現地適用性試験の検証結果一覧	59
表 4.5-1	バイブレータ震源の仕様	62
表 4.5-2	ハイドロフォンセンサの仕様	64
表 4.5-3	データ収録装置の仕様	64
表 4.5-4	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	67
表 4.5-5	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	67
表 4.6-1	トリチウム濃度とコンタミ率	87
表 4.6-2	物理化学パラメーター	90
表 4.6-3	システム改造・調整の内容	100
表 4.6-4	無人計測システムのデータ取得率	103
表 4.6-5	システムの改造・改修後のデータ取得率	103
表 5.2-1	HCD-3 孔のケーシングプログラム	116
表 5.2-2	HMD-1 孔のケーシングプログラム	116

# APPENDIX

## コントロールボーリング掘削・調査技術の体系化 ー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ー

### 第1章 はじめに

- 1-1 背景
- 1-2 目的
- 1-3 開発目標
- 1-4 掘削・調査技術の特長

### 第2章 精密調査地区選定段階の概要調査

- 2-1 概要調査の概要
- 2-2 概要調査における考慮すべき事項（要件）

### 第3章 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
- 3-2 コントロール掘削・調査による地質環境特性の評価

### 第4章 掘削・調査の手順

- 4-1 掘削・調査計画の立案
- 4-2 コントロール掘削
- 4-3 掘削時検層
- 4-4 透水試験・採水・イメージング
- 4-5 孔内応力・力学
- 4-6 孔井内トモグラフィ
- 4-7 モニタリング
- 4-8 モニタリング無人計測システム

### 第5章 掘削・調査結果の評価

- 5-1 コントロール掘削の評価
- 5-2 調査結果の評価

## 1. はじめに

### 1.1 背景

高レベル放射性廃棄物処分場のホストロックとして、わが国で広く分布していることから新第三紀の堆積軟岩が候補のひとつとして考えられる。本岩盤は①地質構造が比較的単純であり、地質モデルを構築しやすい、②水みちとなるような割れ目が少なく、水の流れが地層を構成する岩石の空隙に支配されることから水の流れをモデル化しやすい、③泥岩など比較的細粒な碎屑岩は水密性であり、岩盤として低透水性であることが期待できる、という特徴がある。また処分場の設置個所として沿岸域は、人間侵入の影響が小さいことや海水準により地下での動水勾配が小さく水の動きが少ないことが期待できることなどの特徴を有する。

一方、高レベル放射性廃棄物の処分場の建設までには①概要調査地区選定段階、②精密調査地区選定段階、③最終処分場選定段階の3つのステップを踏むことが予定されており、このうち②の段階から地区の水理地質特性を確認するための現地調査が開始される。②の精密調査地区選定段階の調査では、地表からの各種調査と数少ないボーリング孔を用いた調査により地区の3次元水理地質モデルを構築することが求められる。

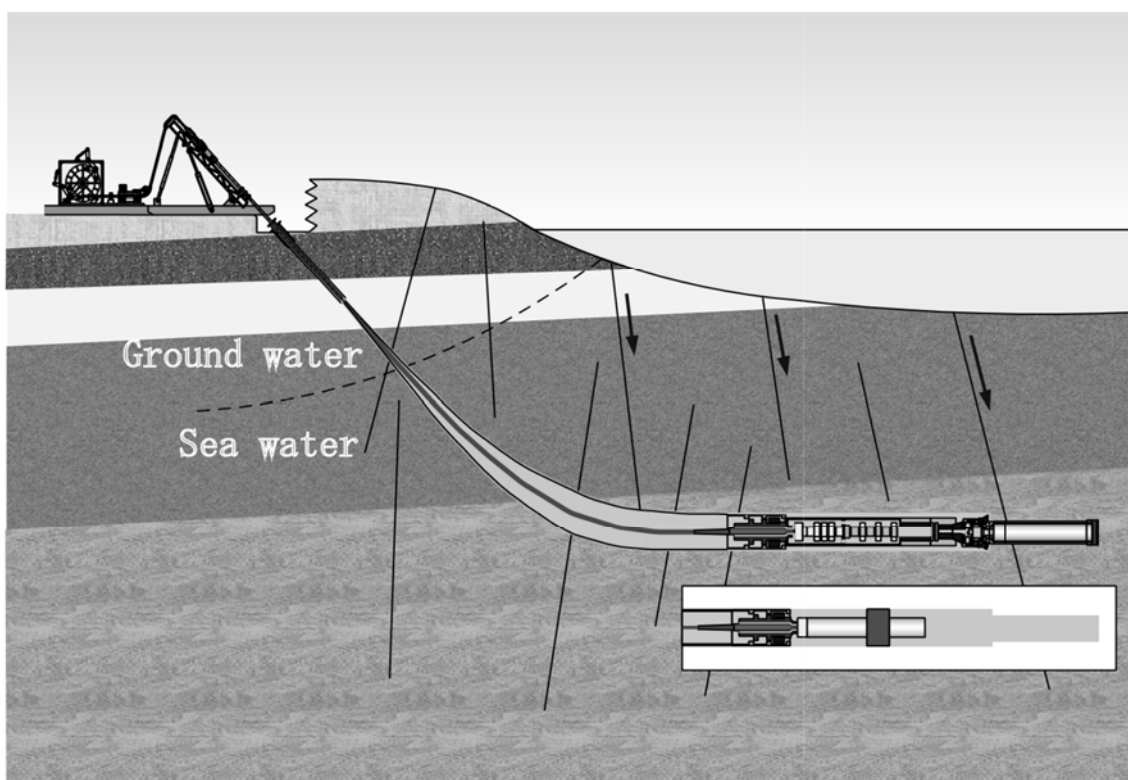


図 1.1-1 コントロールボーリング概念図

当所では2000年度までに、堆積性軟岩地域での地表調査とボーリングによる合理的な地質・地下水調査技術の確立を目指して、各種調査が可能なボーリング掘削技術の開発を行ってきた<sup>1), 2)</sup>。この研究では鉛直ボーリングによる掘削であったが、沿岸域などの限られた地形条件では鉛直掘削のよ

うな従来工法に比べて、方位や傾斜を自由に制御し、コア採取ができるコントロールボーリング掘削技術（図 1.1-1）がより有効になる。さらに、高精度の地質構造モデルを構築する際には、孔内において地質、水理及び地化学環境を乱さないで調査することが必要不可欠である。このような観点から、地下での各種調査が可能なコントロール掘削の開発ならびに合理的な掘削・調査手法の開発が望まれる。

## 1.2 目的と開発目標

背景に述べたように、本研究開発では堆積軟岩分布域において、地形条件に左右されずに調査が可能であり、さらに概要調査の最終段階で地下水平坑道と同様な調査が可能となる、コントロールボーリング掘削、調査手法を開発する。具体的には、地質・地下水調査を行うための効率的なボーリング掘削技術や、掘削した孔井内での地質・地下水調査技術を開発する。特に、①ボーリングの方位・傾斜を自由に制御する技術、②ボーリング先端の3次元位置を探知する技術、③原位置雰囲気のコアを採取する技術、④掘削とあわせて検層や測定を可能にする技術、⑤掘削後の孔井内を利用した物理探査技術、⑥掘削後の地下水環境のモニタリング技術などを開発もしくは高度化し、それらの現地実地盤における適用性を検討することにより、コントロール掘削及び水理地質調査技術を体系化する。

上述の目的に沿って、以下のような開発目標を設定し、研究開発を進めることとした。

- ①沿岸域の新第三紀の堆積岩を対象岩盤とし、孔長 1000m、深さ 500m 級のコントロール掘削技術を開発する。
- ②コアによる各種特性調査の重要性を考慮し、様々な岩盤状況下におけるコア採取を可能なものにする。
- ③安全性、効率性を考慮して、できる限り小口径の孔井（スリムホール）を掘削する。
- ④孔内で各種特性調査を可能にする。
- ⑤孔内の地下水環境のモニタリング技術を開発する。
- ⑥コントロール掘削及び水理地質調査技術を体系化する。

最終フェーズとなる 2013～2017 年度は、④から⑥を目標に研究開発を推進した。

## 1.3 調査・試験サイトの地形・地質概要

岩盤中地下水移行評価確証技術開発の一環としてボーリング調査技術の確証のための適用試験等を実施した北海道幌延地区は日本の最北端に近く、東部には宗谷丘陵が、西部には天塩平野（低湿地帯）が広がっている。宗谷丘陵は周氷河気候下で形成された小起伏地形である。また天塩平野は北海道でも有数な泥炭平野のサロベツ原野が大部分を占め、海岸に沿って発達する砂丘によって日本海から隔てられている。

幌延地区の地質は、道北日本海沿岸部に広く分布する新第三系が主体である。新第三系は東方の神居古潭帯及び白亜系のえぞ累層群、古第三系の幌内層群、石狩層群を不整合に覆う。新第三系は下位より、宗谷挟炭層、鬼志別層、増幌層、稚内層、声間層、勇知層、更別層からなる。適用試験の掘削対象としたのは稚内層、声間層である。

稚内層は“硬質頁岩”で代表される地層で、基底部には東方で含礫部を伴い海緑石やオパサイト化した角閃石を含む粗粒砂岩が発達し、下位の増幌層を不整合で覆う。福沢(1982)<sup>3)</sup>は稚内層を基底部の砂岩と混濁流起源の珪質頁岩及び珪藻質泥岩に限定している。

声間層は、稚内層の上位に整合的に累重する塊状の珪藻質泥岩シルト岩を主体とした地層で、生物擾乱作用(bioturbation)が著しい。一部の地域には下位に細粒砂岩も発達する。天北地域の声間層について福沢(1982)は稚内層の上位にくる砂岩より上位の層相に限定して再定義した。

HCD-3 孔の掘削地点は幌延町市街地より南東約 5km の上幌延地区である。幌延地域は東側の丘陵地と西側の低起伏丘陵及び河刻低地からなっている。上幌延地区は、サロベツ原野にそそぐ天塩川本川の最下流部で、北流してきた河道が西に流向を転じる区間に当たる。上幌延地区は、天塩川左支川ペンケオポッペ川の中流部、谷幅が約 200m の狭窄部の右岸河岸段丘上である。孔口標高は 22.154m、周囲は標高 200m 前後の新第三系褶曲山地(宗谷丘陵)である。幌延市街地東方の丘陵地には、大局的に西～東に向かって順次古い地層が分布し、新第三系の更別層(Sa)・勇知層(Yt)・声間層(Kt)・稚内層(W)・増幌層(Mp)が出現する。しかし、同斜構造ではなく、全体は波長 2～3km で波曲する褶曲構造(褶曲軸 NNW 方向)を呈しており、背斜軸に沿って大曲断層及び幌延断層が分布する。

西フェルゲンツの逆断層である大曲断層の通過位置(石井ほか、2006)<sup>4)</sup>を境に、東側の豊富背斜・大曲背斜に対応する丘陵地は起伏が大きく、背斜軸部に稚内層(W)、両翼部には声間層が分布している。また、両側の向斜軸部には勇知層や更別層が分布して低起伏丘陵を形成しており、岩相と地質構造に対応する組織地形のコントラストが明瞭である。また、各背斜は幅 2～3km で長さ 6～7km の扁平なドーム状構造を呈しており、豊富背斜にはガス・温泉が付随している。このように、天北地域に広く分布する背斜構造は集油・ガス構造と考えられている。掘削地点は稚内層の背斜構造がなす丘陵地の南端部に位置している(図 1.3-1)。

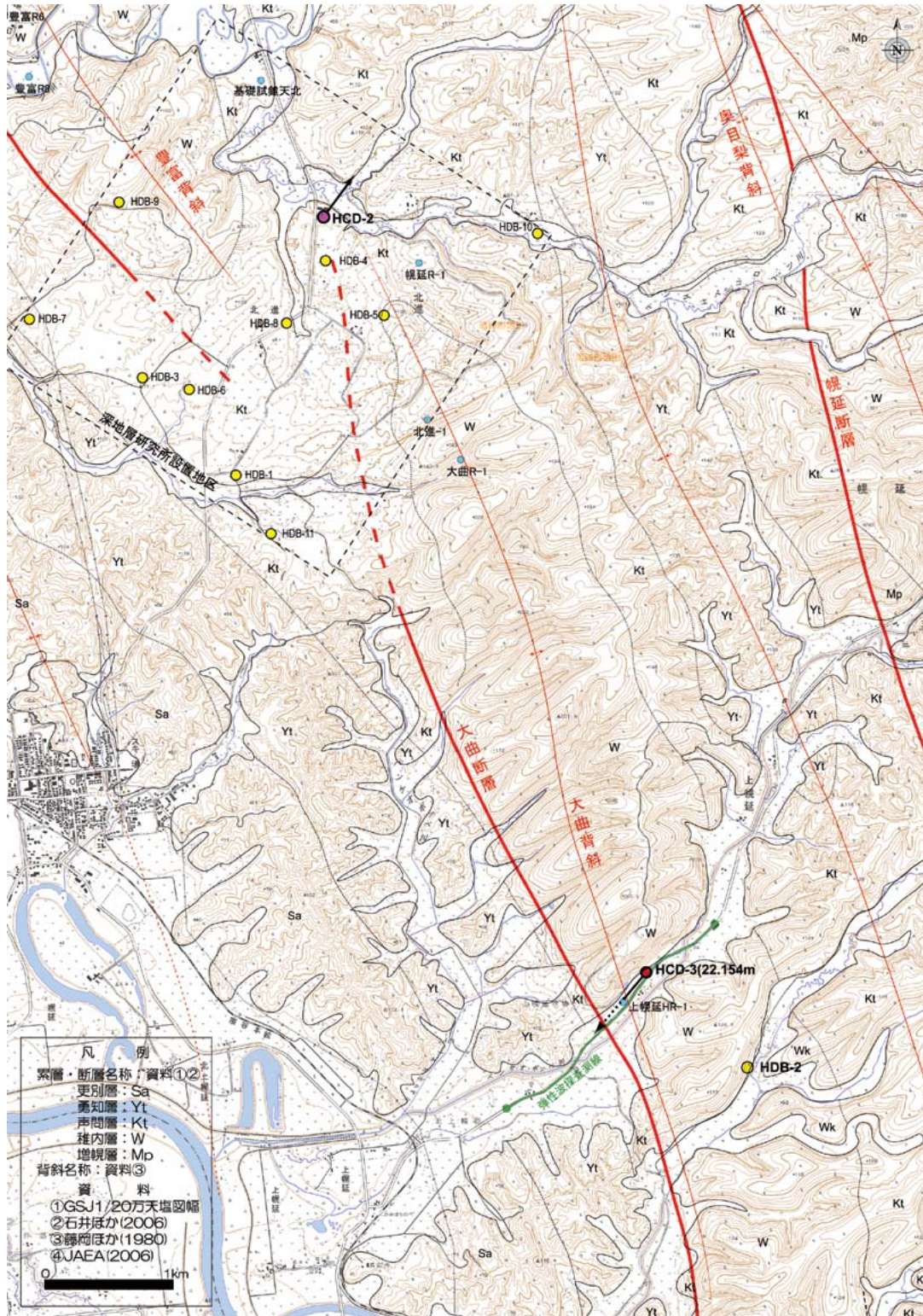


図 1.3-1 幌延地点の地質と調査位置図



#### 1.4 掘削・調査システムの概要

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、②掘削や先端探知を行うためのダウンホールツールス、③ダウンホールツールスを上げ下げするためのワイヤラインから構成される（図 1.4-1）。

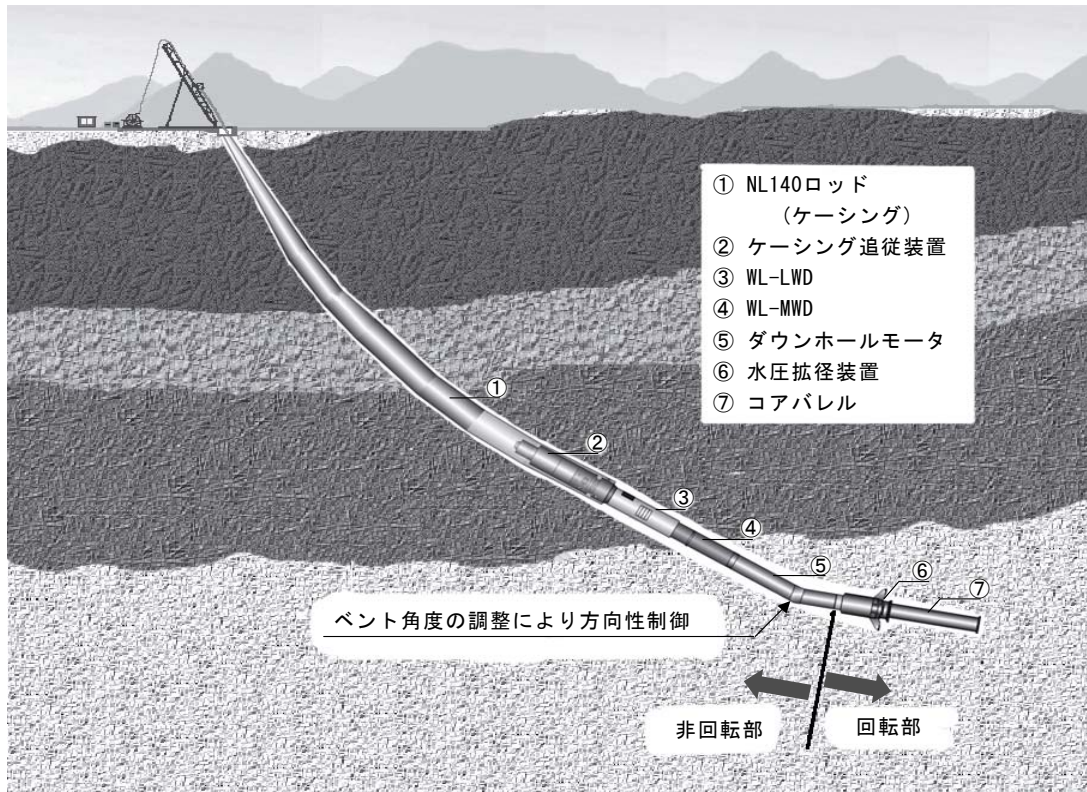


図 1.4-1 コントロール掘削概要

ダウンホールツールスは下部よりコア採取のためのコアビット及びコアバレル、拡張のためのウィングビット、掘削の動力のためのダウンホールモーター（以下「DHM」という）、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 1.4-2）。

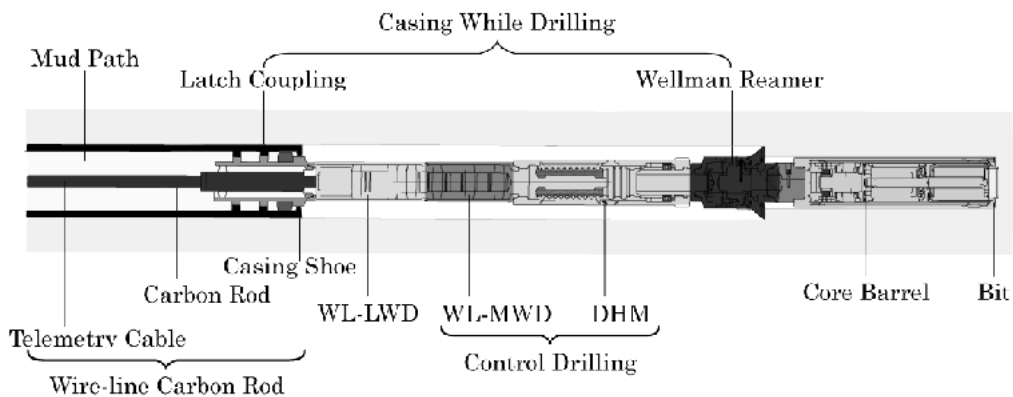


図 1.4-2 掘削編成図

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に固定される。ケーシング内に圧入された泥水はWL-LWD及び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ケーシングの隙間（以下「アニュラス」という）から地表に戻る。

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ズ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ズを押し込むことが出来るポンプインシステムを採用した。またダウンホールツールズからの情報の伝送、ダウンホールツールズへの電力の供給のために、ワイヤライン内部に電源線や光ファイバーなどが内蔵される。

採取されたコアの状況やWL-LWDの情報をもとに孔底の裸孔部において各種の測定が必要と判断された際には、掘削編成に変えて、各種の試験、測定用の編成をワイヤラインにより降下させて、調査を実施する。試験、測定項目は、透水試験、現位置地下水採取、孔内力学（载荷）試験、孔内応力測定である。このうち透水、採水は1つの編成での調査が可能であり、イメージング装置を併設することにより、孔内状況を確認することが可能なシステムとなっている。孔内力学（载荷）試験装置には先端にリーミング装置が設置されており、コントロール掘削による孔壁の泥膜の影響を除去して試験が可能である。孔内応力測定は水圧破碎法による応力測定を行う。力学、応力の両装置は共通部分が多いため統合化システムとして開発しており、1回の昇降により同時に試験を実施することが可能となる。

掘削された孔井の孔跡を考慮し、地表と孔井によって囲まれた区間の速度構造を弾性波トモグラフィにより精緻化することにより、地表からの反射法地震探査結果をより精緻化する。

本システムにより掘削された孔井は、全深度にわたってケーシングにより保孔されるが、掘削後の孔井を有効活用して長期間に亘り水圧、水質などのモニタリングが可能となるよう、裸孔の観測区間を確保して孔内モニタリングシステムを設置する。また、孔内モニタリングシステムの設置、運用を通して孔内モニタリング技術を体系化する。

## 2. 開発目標とスケジュール

### 2.1 研究計画

本プロジェクトの研究開発に当たっては、掘削、調査に関する技術を①孔曲げ掘削技術、②コア採取技術、③先端探知技術、④孔内検層技術、⑤透水・採水技術、⑥孔内応力測定技術、⑦孔内力学測定技術、⑧孔内モニタリング技術、⑨弾性波トモグラフィ技術及び⑩掘削、調査体系化技術に区分けし、それぞれの技術に関する目標を設定し、研究開発を進めた。

プロジェクト期間が長期にわたるため、2000～2013 年度までを節目ごとにフェーズ 1（2000～2004 年度）、フェーズ 2（2005～2007 年度）フェーズ 3（2008～2013 年度）の 3 つのフェーズに区分し掘削・調査技術の開発ならびに体系化をはかれるようにプロジェクト全体の開発目標を考慮して、それぞれのフェーズにおける目標を設定した（表 2.1-1）。さらに 2013～2017 年度をフェーズ 3 の後半と位置付け、孔内モニタリング技術の体系化がはかれるように開発目標を設定した（表 2.1-2）。

表 2.1-1 研究計画（2000～2013 年度）

実施項目/年度	フェーズ1	フェーズ2			フェーズ3					
	12-16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
(1)孔曲げ掘削技術 (孔曲げ、先端探知、コア採取)	システムの構築	システムの高度化			システムの実用化					
(2)測定・検層技術 (LWD、透水・採水、 力学・応力)	装置の開発、改良	システムの高度化			システムの実用化					
(3)モニタリング技術		概念設計	詳細設計と装置の開発		システムの実用化					
(4)物理探査技術 (弾性波トモグラフィー)					システムの構築		システムの実用化			
(5)掘削・調査技術体系化	現地適用性検討(北進)		現地適用性検討(上幌延：大曲断層)			マニュアルの作成				

表 2.1-2 フェーズ 3 後半（2013～2017 年度）の研究計画

	2013(H25)	2014(H26)	2015(H27)	2016(H28)	2017(H29)
モニタリングシステム の設置・撤去	設置				撤去・廃孔
現地計測					
計測結果の評価					
無人計測システム の構築		概念設計	設置	運用	システム信頼性評価
取りまとめ					体系化

## 2.1 フェーズ 1<sup>5)</sup>

初年度である 2000 年度は、本プロジェクトの基本技術である上記の①から⑦の技術の現状をレビューするために国内外における事例を調査し、本研究に適用させるための技術の探索を開始した。調査・探索した技術の中から鍵となる技術（装置）を試作し、全体システムの開発可能性を確認しコントロール掘削・調査技術の概念を構築した。

- ①孔曲げ掘削技術、コア採取技術に関連する機器の開発を行い、これらと先端探知技術を統合化することにより掘削システムを構築した。これらの機器開発に際しては、効率的な開発を目指すとの観点から、既存技術の改良やダウンサイジングを主眼において開発を行い、その都度工場における性能試験を実施し、ほぼ目標の仕様を満たすシステムを構築することができたことを確認した。
- ②先端探知技術として、WL-MWDを開発した。測定項目は、方位、傾斜、トルク、ビット加重、孔内圧力などであり、工場試験などで、測定項目を常時計測することができること、故障が少なくランニングタイムが長いことなど要求性能を満足する完成度の高い測定装置であることを確認した。
- ③泥水存在下で適用が可能であり、掘削工程への影響を低減するために短時間で実施できることを目標に、送水ラインの必要がない、掘削泥水でパッカーを拡張するシステムを開発した。またパッカー区間における透水試験時や採水時の揚水作業への共用を可能とし、装置全体をコンパクトにするとともに、採水区間から揚水しながら水質をモニタリングし、効率的に採水できるシステムを開発した。
- ④WL-LWDの検層項目は、検層結果を複合解析（鈴木ほか、2000）<sup>6)</sup> することにより孔井の透水性や力学強度の評価が可能となるよう、音波、電磁波、マイクロ電気、自然ガンマ線検層の4項目を採用した。各検層については掘削時の適用試験を行い、孔内での掘削動作でプローブは破損せず、各検層種目の動作を現地適用試験で確認でき、WL-LWDサブシステムとして正常に動作することが確認できた。
- ⑤地下深部の応力測定法として適用実績の多い水圧破碎法を採用し、これをコントロールボーリングに適用するために水圧破碎と亀裂検出のためのパッカー载荷を併用する方法を開発するための要素技術の開発に取り組んだ。これらの開発を通して、コントロールボーリングにおいて地下深部の応力測定を行うことのできる新しい測定システムを実現できることを基本的に示した。
- ⑥ボーリング孔内で岩盤の変形特性を求めることを目的として、セルフボーリングタイプの孔内载荷試験装置を試作し、検証実験を行った。試作した装置はセルフボーリングのための適切な性能を有していること、また、模型地盤で測定したヤング率はその試料の室内試験から得られたヤング率と一致することを確認し、新しい測定システムを実現できることを基本的に示した。
- ⑦コントロールボーリング孔掘削完了後に孔内の複数箇所でも水圧、水質の長期間モニタリングを可能とするシステムの開発を目的として、ケーシングパイプ（以下「CP」という）追従掘削工法を前提として開発されているコントロールボーリング技術を用いた孔井内に裸孔区間を設け、その区間をパッカーシステムで遮水して計測区間を構築する手順を検討した。また、これに対応するための開発課題として、CPの切断技術、CP荷重の負担方法、パッカーとCPの接続技術及びパッカーの形式に関する4項目を抽出した。これらのそれぞれについて、検討、設計・試作・試験及び、模擬孔での適用性試験を踏まえて適用技術を絞り込み、パッカーシステムとその設置技術の基本設計を確立し、

パッカーシステムの設置概念を構築した。

## 2.2 フェーズ 2<sup>7)</sup>

フェーズ1での開発実績や課題を考慮して、フェーズ2における各要素技術に関して開発目標を設定するとともに、フェーズ2の開発期間である2005年度から2007年度における開発スケジュールを策定した(表2.2-1)。

孔曲げ掘削、コア採取及び先端探知技術に関する機器から構成される掘削システムをフェーズ1で構築し、堆積軟岩に適用した結果、おおよそ当初の目標どおりに掘削することができたが、孔内圧力の増加による逸泥の発生、WL-MWDによる方位計測値の検証が課題として残った。

検層、測定技術に関してはWL-LWD及び透水試験・採水をコントロール掘削孔内において適用し、それぞれ装置の耐久性、泥水中での割れ目計測が今後の課題となった。モニタリング技術については、個々の要素技術開発とそれに基づく基本システム設計を終了した。孔内応力測定、孔内力学測定技術については、それぞれ成立性を検討したうえでプロトタイプを試作を実施した。

表 2.2-1 研究計画 (フェーズ2及びフェーズ3前半)

	2005 (平成17年)	2006 (平成18年)	2007 (平成19年)	フェーズ2成果/課題	フェーズ3目標	2008 (平成20年)	2009 (平成21年)	2010 (平成22年)	2011 (平成23年)	2012 (平成24年)	2013 (平成25年)
(1)孔曲げ掘削技術	システムの改良(高度化) 大曲層掘削			・水圧送り装置による 疎砕料掘削/水平掘削 でのダブル対策 ・大曲層におけるコン トロール掘削	・水平掘削を含むシステム の実用化	水平掘削の実績・システムの実用化 (水平曲げ・掘削困難箇所回避含む)					
(2)先端探知技術	システムの改良・ジャイロの導入			・MWDによる常時計測/ 前向きな方位計測装置	・ジャイロ併用システム の導入・実用化	システム構築・導入	現地適用 (適宜併用)				
(3)コア採取技術	システムの改良(高度化)			・ほぼ100%のコア採取率 を達成	・水圧でのコア採取実績	現地適用により採取実績の蓄積					
(4)測定・検層技術 (WL-LWD)	システムの現地掘削への適用			・特定区間でのLWDによる 測定・常時使用に向けて の耐久性向上	・耐久性のあるシステム の開発	改良 (耐久性向上)	現地適用				
(5)測定・検層技術 (透水・採水)	現地掘削への適用			・対象区間の透水性評価 および地下水採取/ 低透水測定限界	・より低透水区間を計測 できるシステム改良と 現地適用	改良 (低透水)	現地適用 (低透水)				ダブルパ ッカー適用
(6)測定・検層技術 (応力・力学測定)	孔内応力装置の開発 孔内力学装置の開発	装置の統合化		・力学・応力測定装置の プロトタイプ試作・ 統合化、適用性検討	①孔内応力測定装置の コントロールケー ブリングシステムへの 導入と現地適用 ②孔内力学測定装置の 開発と統合化に向けた 構築	改良・模擬孔試験 装置の開発	装置の開発				孔内応力測定装置 現地適用
(7)モニタリング技術	孔内パッカーシステムの開発			・システムの構築と模擬孔 での適用/実孔井(疎砕 部)でのパッキング	・コントロール掘削孔井 (疎砕部)への設置と 運用	改良・模擬孔試験					実孔井(疎砕 部)適用
(8)物理探査技術 (弾性波・モグラフィー)					・システムの構築と現地適用	システム構築					現地適用 (計測・解析)
(9)掘削・調査技術体系化	マニュアル作成			・掘削マニュアル、危険 回避マニュアル	・「掘削・調査の基本的考え 方」作成 ・標準装置における掘削・ 調査計画最適化手法の構築	統合化システム運用					掘削・調査の体系化

フェーズ3 前半

掘削システム及び一部の測定装置の適用性を北海道幌延サイトの堆積軟岩で検討し、ほぼ当初の目標を達成することができた。

これらの結果を踏まえ、フェーズ2では掘削が困難な地質としての断層・破碎帯を対象とした掘削、

調査技術の開発を前提に、それぞれの実施項目について以下のように重点的に実施する目標を設定し、作業を実施した。

- ①掘削システムに関しては、断層・破碎帯に伴うと予想される脆弱層や逸泥層掘削に必要な技術、緩傾斜から水平掘削に必要な技術、掘削の目標である孔長 1000m に必要となる長尺掘削技術を開発する。また WL-MWD の方位測定値の補正の最適化を図り、得られた方位補正值の検証のためにジャイロシステムを併用する。
- ②WL-LWD については孔内での計測時の耐久性向上及び装置の改良を実施する。
- ③透水試験に関しては適用範囲の拡大、採水については採水時の掘削泥水の混入割合を評価すること、イメージング装置については泥水中の悪条件下でも映像取得ができることを目指した装置の改良を実施する。
- ④孔内応力、孔内力学（孔内载荷）測定については共通する要素技術が多いとの認識の下、統合化設計を行い、統合システムを構築する。
- ⑤孔内モニタリングに関しては、基本設計に沿って、長期間の水圧、水質がモニタリング可能な装置に関する機器開発及びケーシング孔内に裸孔の観測区間を確保するための要素技術開発を行う。これに基づき、傾斜孔井でモニタリングシステムを構築する。
- ⑥現地適用性検討では、幌延サイトに分布する大曲断層を対象として、事前の調査とそれに基づく孔跡決定を経て掘削・調査を実施し、得られたデータにより大曲断層の特性を評価することにより掘削・調査技術の適用性を検討する。また、それに先立ちフェーズ 1 での掘削孔井の逸泥区間において、断層掘削に係る機器の性能を確認する。

以上により、当初目標をおおよそ達成することができたが、以下の課題が抽出された。

- ①掘削技術に関しては、水平掘削時に孔底に溜まったカッティングスによる泥水の排出不良に伴う孔内トラブルへの対策が必要と判断された。
- ②先端探知に関しては、MWD による方位測定誤差を極力小さくするための磁気影響補正方法と、ジャイロとの併用方式の最適化が課題として残った。
- ③LWD については、常時運用に向けての耐久性向上が課題として挙げられた。
- ④透水・採水については、より低透水区間への適用を目指した測定方法及び掘削後に任意の区間を設定できるダブルパッカー方式の開発が望まれた。
- ⑤孔内モニタリングに関しては、実孔井での設置に係わるハンドリングが課題として挙げられた。

### 2.3 フェーズ 3 前半（2008 年度～2012 年度）

フェーズ 2 の開発実績ならびに課題を考慮して、フェーズ 3 における各要素技術に関して開発目標を設定するとともに、フェーズ 3 前半の開発期間である 2008 年度から 2012 年度（一部 2013 年度）

における開発スケジュールを策定した（表 2.2-1）。フェーズ3前半は孔曲げ掘削技術開発の最終フェーズとなることから、本フェーズの開発目標はプロジェクト全体の目標を考慮して以下のように設定し、作業を実施した。

①水平掘削及び水平掘削時の偏距掘削を実施する。掘削トラブルにより前方掘削が困難な場合を想定し、セメンチングとサイドトラックによる復旧を目指した方法の構築と手法の適用性を確認し、2013年度に堆積軟岩に適用可能な孔曲げ掘削の実用化を目指すこととした。

②MWD とジャイロを併用した、精度の高い先端探知手法を構築し、その適用性を確認する。

③孔内のカッティングスなどの影響を受けずデータ取得のできる、耐久性のあるLWDへ改良し、現地に適用し、その性能を検証する。

④より低透水区間を計測できる機器の改良、掘削後に任意の区間を計測するためのダブルパッカーシステムの開発を行い、それらを現地に適用しシステムの適用性を実証するとともに、実用化を目指す。

⑤孔内応力測定装置をコントロールボーリングシステムに導入し、現地に適用するとともに孔内力学測定装置の改良を行い、最終的には統合化に向けての提案を行う。

⑥孔井の形状を活かして地上と孔井間でのトモグラフィ技術を構築し、この結果から従前の反射法地震探査の解析結果を再解析し、より精緻な反射断面を得る。

⑦CP切断技術、CP荷重の負担方法、パッカーとCPの接続技術及びパッカーの形式の4つの開発課題について、それぞれ検討、設計・試作・試験及び、模擬孔での適用性試験を踏まえた適用技術の絞り込みを行い、パッカーシステムとその設置技術の基本設計を確立し、パッカーシステムの設置概念を構築する。

⑧現地において取得できるデータのデータベースと閲覧システムを構築する。2013年度に掘削・調査総合手順書を作成し、概要調査におけるコントロール掘削・調査計画最適化手法を提案することとした。

## 2.4 フェーズ3後半（2013年度～2017年度）

フェーズ3前半（2008年度～2012年度）の実績を踏まえ、フェーズ3後半（2013年度～2017年度）においては、HCD-3孔を利用した掘削・調査機器の開発及び高度化として、2013年度にコントロール掘削技術の改良及び実孔井を用いた調査・試験技術の改良として以下の①及び②を実施するとともに引き続き③物理探査技術の開発を実施することとした。また、5カ年の技術開発を孔内モニタリング技術に絞り、以下の④から⑧を実施し、モニタリング技術の体系化をはかる目標を設定した。

長期にわたる技術開発の最終フェーズとなることから、⑨現地の調査・試験技術の開発の進捗に応じて不要設備の撤去・原形復旧も合わせて実施することとした。

- ①サイドトラック掘削技術の適用性を評価する。
- ②透水試験・採水・イメージング装置・孔内応力試験装置の改良を行い、適用性を評価する。
- ③物理探査技術の開発を継続実施し、適用性を評価する。
- ④実孔井（HCD-3 孔井）深部への複数箇所モニタリング計測区間を設置する。
- ⑤孔内モニタリング装置を設置する。
- ⑥長期（3 年程度）の孔内モニタリング計測を実施し、モニタリングシステムのメンテナンス方策、孔内間隙水圧ならびに水質の評価に資するためのデータを採取する。
- ⑦孔内モニタリングの実適用に配慮し、孔内モニタリングの無人計測化を検討し、実証する。
- ⑧孔内モニタリング技術の現地適用を通して、孔内モニタリングの手順書を作成する。
- ⑨調査・試験技術の開発の進捗に合わせて不要設備の撤去・原形復旧を行う。

### 3. 掘削・調査機器の開発及び高度化

#### 3.1 コントロール掘削技術の改良

コントロール掘削技術は、「孔井曲げ掘削技術」、「先端探知技術」、「コア採取技術」、「掘削システムに必要な共通技術」で構成される。「孔井曲げ掘削技術」における、既存孔井から新規孔井を分岐掘削させるサイドトラック掘削技術の現地適用性評価試験をコントロール掘削技術の改良として行った。

##### 3.1.1 サイドトラック掘削軌跡計画

サイドトラック掘削技術の現地適用性評価試験においては、埋め戻し方法の検討結果などから、開始位置を掘削長 648m 地点と仮定して、計画孔跡の検討を行った。本検討では、掘削方法についての条件整理、平成 23 年度に実施したジャイロ測定結果を基にした計画軌跡座標の算出を行った。

##### (1) サイドトラック掘削作業計画

掘削に用いるコアチューブ先端のコアビット種類をコアリング用からノンコアリング用の全断面ビットに変更した場合の掘削能率増加を検討し、掘削作業手順として次ページに述べる作業計画を立案した。

- ① サイドトラック掘削開始直後は埋め戻し効果確認のためコアリング掘削を実施
- ② セメンチング区間から地山に孔心が逸れた段階でノンコアリング掘削を実施
- ③ 掘削長 660m 以深は孔内応力試験装置による水圧破碎試験実施可否判断のためコアリング掘削を実施

##### (2) サイドトラック掘削の孔跡軌跡計画

軌跡計画は、平成 23 年度に実施したジャイロ測定結果の軌跡座標を用いて設定を行い、掘削長 648m 地点から既存孔井の下方に分岐する計画を作成し、以下の掘削軌跡計画を立案した。



- ① サイドトラック掘削長 648.0m～651.0m：沿角コアリング掘削
- ② サイドトラック掘削長 651.0m～660.0m：沿角ノンコアリング掘削
- ③ サイドトラック掘削長 660.0m～675.0m：沿角コアリング掘削
- ④ サイドトラック掘削長 675.0m～700.0m：1° /10m 増角コアリング掘削

図 3.1-1 にサイドトラック掘削の計画軌跡断面図を示す。

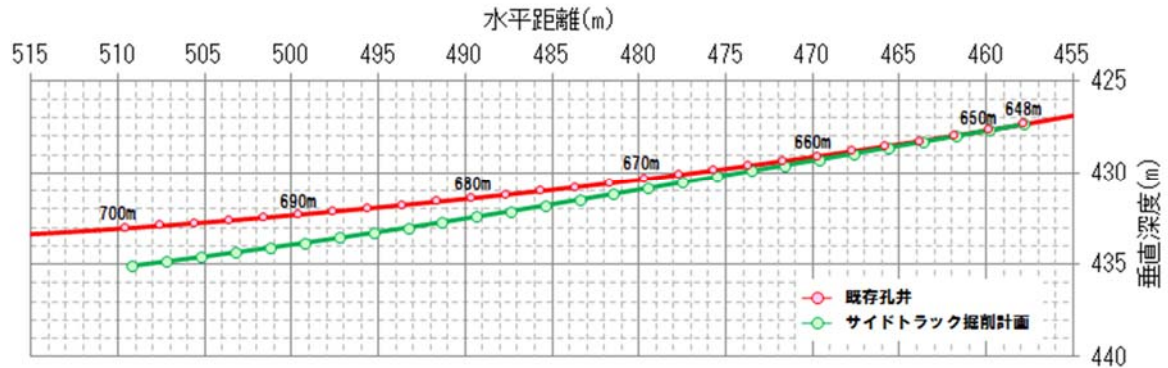


図 3.1-1 サイドトラック掘削の計画軌跡断面図

### (3) サイドトラック掘削手順

サイドトラック掘削手順の検討として、現地適用性評価試験における実作業時における必要な施工方法を検討し、以下の作業手順を計画した。

- ① 孔内閉塞用パッカプラグ(栓)設置のための保護管(NL140 ロッド)降管
- ② 孔内閉塞用パッカプラグ・セメンチング用小口径ロッド(BQ ロッド)降管
- ③ パッカプラグの設置、小口径ロッドとの切り離し
- ④ セメントミルク充填材注入、既存孔井の一部区間埋め戻し
- ⑤ 埋め戻し頂部位置の確認
- ⑥ セメンチング用小口径ロッド(BQ ロッド)全揚管
- ⑦ 保護管(NL140 ロッド)全揚管
- ⑧ セメント端面成形のため、シュービット・NL140 ロッド降管
- ⑨ 埋め戻し区間上部端面成形
- ⑩ シュービット・NL140 ロッド全揚管
- ⑪ 掘削用アウターパイプ・NL140 ロッド降管
- ⑫ 掘削ツールズ組立、ワイヤライン作業(ツールズ降管)
- ⑬ サイドトラック掘削(コアリング掘削)による埋め戻し区間からの偏心状況の確認
- ⑭ サイドトラック掘削(ノンコアリング掘削)による掘削効率の向上(WL 作業の省略)

⑮ サイドトラック掘削(コアリング掘削)による試験実施区間の選定  
 サイドトラック掘削手順の概略を図 3.1-2 に示す。

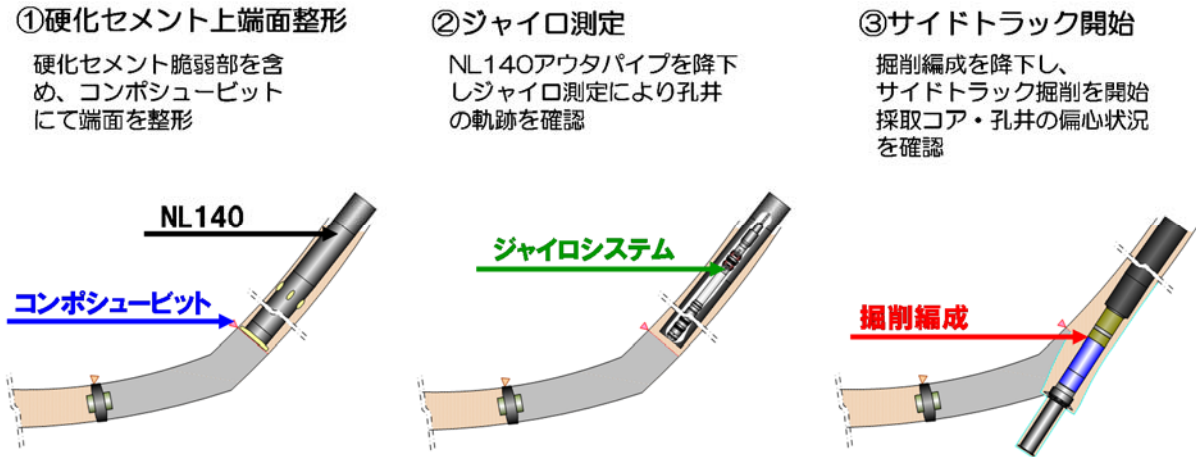


図 3.1-2 サイドトラック掘削の概略手順

### 3.1.2 サイドトラック掘削

サイドトラック掘削手法について、埋め戻し対象区間下部の閉塞方法、セメント充填方法、セメント材料、サイドトラック掘削時の計画孔跡、及びサイドトラック掘削手順を検討し、必要な試作治具として孔内閉塞用パッカプラグを挙げて、実際に試作した。各検討で得られた成果は以下のとおりである。

#### (1) 埋め戻し対象区間下部の閉塞方法

緩傾斜～水平傾斜区間を対象として、セメントミルクを任意の対象区間に充填する方法の検討を行い、埋め戻し対象区間下部の閉塞方法について以下の手作業手順を考案した。

- ① 埋め戻し区間下部の閉塞にパッカプラグ(栓)を用いる。
- ② 埋め戻し区間下部まで降下させた閉塞用パッカプラグを地上から送水して拡張させる。
- ③ 閉塞用パッカプラグの設置に用いた小口径ロッド(注入管)と切り離し可能な構造とする。
- ④ 切り離れた注入管を用いてセメントミルク充填材を注入し、作業効率を向上させる。

#### (2) セメントミルク充填方法

- ① 注入管を用いてセメントミルク充填材を埋め戻し区間に充填する。
- ② 注入管内に残留するセメントミルク充填材を後押し送水により放出する。
- ③ 注入完了後、セメント頂部より注入管を 50m 程度揚管して、充填材の硬化を待つ。
- ④ 充填材の硬化後、注入管を使用してセメント頂部の位置を確認する。
- ⑤ セメント頂部位置が予定位置に達していることを確認して注入管を引き上げる。

### 3.1.3 セメント材料

セメンチング用充填材として、性能、要求される品質及び施工性を検討し、以下の結果を得た。

- ① 配合選定試験の結果、ベントナイト水溶液中での材齢 3 日で 20N/mm<sup>2</sup> 以上の強度で流動性の高い配合を選定した。
- ② 流動性確認事前試験では、選定した配合の充填材を約 200L のホッパより内径 φ40mm の塩ビ管を通し、流下可能であることを確認した。
- ③ 5分フローの経時変化を測定した結果、練り上がり後、3時間までは 250mm 以上であり、3時間の可使用時間を有していることを確認した。
- ④ 流動性確認試験におけるフレッシュ性状及び圧縮強度試験の結果、配合選定試験と同様、かつ目標とする品質を満たす材料であることを確認した。
- ⑤ 水中ポンプによる圧送性を確認した結果、圧送は困難との結論を得た。
- ⑥ ホッパによる打設では、自然流下による作業が可能であるが、配管長が長くなるにつれて流動性が低下するため、流動性向上のための補助機材の使用が不可避との結果を得た。
- ⑦ ベントナイト水溶液中への打設では、自然流下により約 140mm の打設が可能であった。また、打設後の状況ではセルフレベルリング性を有していた。しかし、ベントナイト水溶液に接している部分に関しては、5mm 程度の堆積物及び脆弱層が生じた。
- ⑧ ポンプを用いた水平方向の圧送では、長さ 54m の配管長でも十分圧送が可能であった。また、圧送量低下を比例計算した場合、長さ 300m 程度の水平配管長を 1m<sup>3</sup>/h で圧送可能であると確認できた。
- ⑨ φ75mm 塩ビ管を水で満たした状態の打設では、初期に濁りが認められたが、打設の進行に伴い十分に打設可能であることが確認できた。
- ⑩ φ125mm 塩ビ管をベントナイト水溶液で満たした状態での打設は、水中打設と比べ流動速度が遅くなるとともに、充填不足となる部位が認められた。充填不足に関しては打設速度や機材配置の影響が考えられ、現地施工法により改善できると思われる。

### 3.1.4 サイドトラック掘削に使用する治具の試作

サイドトラック掘削に使用する治具として、孔内閉塞用パッカプラグと同パッカプラグの切り離し用治具（図 3.1-3）を試作し、事前の地上試験を通じて以下の知見を得た。

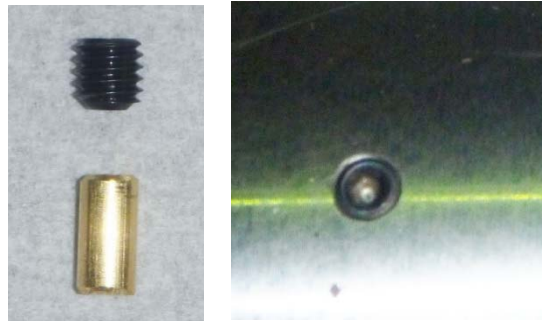
- ① 注水加圧 1.6MPa で φ152mm の外径に拡張することを確認した
- ② ”テンションピン” による切り離し荷重が 500kgf であることを確認した
- ③ ”左ネジ” 構造により、非常時に切り離しを行う際に必要なトルクは約 18kgf-m であることを確認した。



(テンションピン固定前)



(テンションピン固定後)



(左：テンションピンと止めねじ、右：テンションピン固定状況)

図 3.1-3 試作したパッカプラグ切り離し治具

## 3.2 孔内計測技術の改良

### 3.2.1 透水試験・採水・イメージング装置

試験対象の絞り込みを可能にし、効率的な採水を実現するため、従来のシングルパッカーに替ってダブルパッカーを改良製作し、室内においてその拡張性能を確認した。ケミカルユニットのうち分光光度計のキャリブレーションカーブを作成し、分光光度計及びケミカルセンサーの動作を室内において確認した。また、ダブルパッカーの改良製作に伴い、透水試験・採水・イメージング装置の制御に用いるソフトウェアの改良を行なった。

#### 3.2.2 孔内応力試験装置

##### (1) 孔内応力試験装置の現地適用性評価試験のための地上試験

###### ① ウインチケーブルスリッピングケーブルヘッドの接続と通信確認

孔内応力試験装置専用のアーマードケーブルの孔内側となる端末にはケーブルヘッドを接続し、地上部側となる端末には、中継ボックス及びスリッピングの配線を行い、孔内応力試験装置と地上部計測機器との間で通信が可能になるように結線、接続作業を行い、その後に通信試験を実施した。

その結果、結線、接続作業は順調に実施することが出来、孔内応力試験装置と地上部計測機器との通信も問題なく行えることが確認できた。

表 3.2-1 に通信確認結果一覧を、図 3.2-1 に孔内応力専用ケーブルを使った通信確認試験概要を示す

表 3.2-1 通信確認結果一覧

項目	作業・試験内容	結果
ウインチケーブル - スリッピングケーブルヘッドの 接続	孔内側ケーブル 端末処理	専用アーマードケーブルの孔内側端末に ケーブルヘッドを取付た。
	地上部 側中継ボックス 取付	専用アーマードケーブルのウインチドラムに 地上装置へ配線するための光変換器収納ボッ クス 及び光ファイバーケーブルの中継ボックスを 設置した。
	地上部側 ケーブル端末処 理	専用アーマードケーブルの地上部側端末に スリッピング経由で結線を行い、地上部装 置と パネルコネクタで連結できるようにした。
通信確認	通電試験	専用アーマードケーブルの地上部側と孔内側 の端末処理 実施後に AC100V 及び AC200V の通電試験を地 上側と 孔内側が通電していることを確認した。
	通信試験	地上部側計測 PC と孔内計測機器の間で RS485 を使った 通信が出来たことを確認した。
	カメラ映像試験	地上部側計測機器で孔内カメラ (8 台) の映像が モニター出来ることを確認した。
	AE 信号試験	地上部側計測機器で AE センサー周辺を打撃す ると波形が モニター出来ることを確認した。

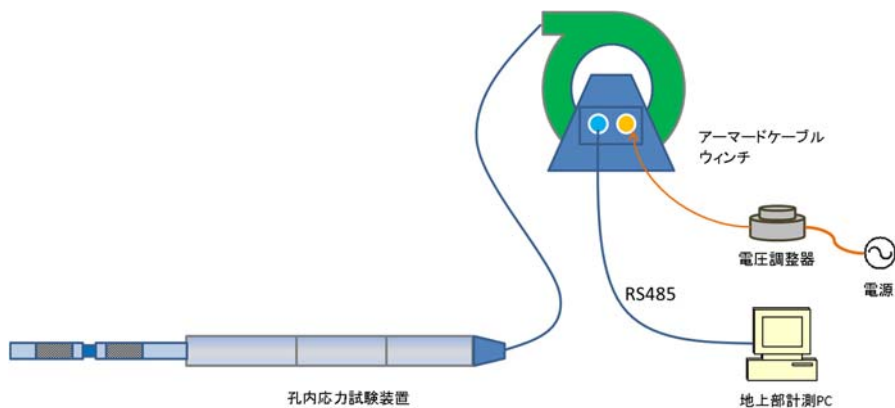


図 3.2-1 孔内応力専用ケーブルを使った通信確認試験概要

## ②型どりパッカーの機能検証

幌延現地試験では、型どり試験の際に試験装置を孔内に挿入して、型どりを実施してから装置を回収するまでに作業の流れによっては1日以上時間を要する場合も想定される。そのため、長時間試験孔内に留置された状態が続いた場合に孔壁面の型どり結果が時間の経過とともに見えにくくなってしまふことが懸念される。そこで、幌延現地試験前に、時間の経過とともに型どり結果がどの程度確認することができるのか検証した。

検証の結果、型どりパッカーの亀裂痕は、型どり実施後2日経過しても亀裂痕を確認することが出来た。ただし、型どり試験後出来るだけ早くパッカーを回収できるようにしたほうが、亀裂痕の確認にはより有利であること、試験後に出来るだけ早く型どりパッカーが回収できる現場作業スケジュールを組むようにすることが望ましいことが明らかとなった。図 3.2-2 に試験で得られた熱収縮ゴムチューブの亀裂痕を示す。



図 3.2-2 熱収縮ゴムチューブの亀裂痕

## ③ケーブルヘッド・ウィークポイント切断荷重検証

試験装置の試験孔内抑留時にはケーブルヘッド部のウィークポイントで装置との切り離しをおこない、アーマードケーブルのみを回収するので、ケーブルの強度よりウィークポイントの切断荷重が小さくなければならない。設定したウィークポイント切断荷重は30kNであり、最適なボルト仕様を検証するためボルト破断試験を実施した。その結果、破断荷重30kNにもっとも近い値を示したボルトの組み合わせとしてウィークポイント部分にM4の10mm長ボルトを4本使用することとした。

## ④ウィークポイント分離箇所の耐圧検証

幌延現地試験において、孔内応力試験装置が試験孔内で抑留時にはケーブルヘッドのウィークポイントで装置との切り離しをおこない、アーマードケーブルのみを回収する。そのため、ウィークポイント部には耐圧性が必要となるため、その耐圧性を確認する試験を行った。ケーブルヘッド用の鋼管(外径φ114mm)を耐圧試験用鋼管(内径φ125mm)内に挿入し、ウィークポイント部の耐圧性検証を実施し、ウィークポイント分離箇所は耐圧性を有することを確認した。

⑤ラッチシステムの通水機能検証

孔内応力試験は、装置のラッチシステムが NL140 ロッド先端シューに接触して、装置を裸孔部に押し込んで行う。試験実施後、装置を回収する際に NL140 ロッド先端シューとラッチシステムが水頭圧で密着した状態で切り離しが出来ないことを避けるため、ラッチシステムの先端に通水溝を設けたが、この通水溝が有効に機能することを確認した。検証試験の結果、ラッチ先端部から通水する機能を有することを確認し、NL140 ロッドのラッチケース先端シューに接触する孔内応力試験装置のラッチシステム先端部に通水用の溝を加工することとした。

(2) 現地適用性評価試験のための鋼管試験

改良試作した孔内応力試験装置を幌延 HCD-3 孔で実適用する前に、表 3.2-2 に示す機能確認を目的に、我孫子地区において鋼管試験を行った。試験の結果、全ての項目で機能が満足するものであることを確認した。。

- ① 試験装置の組立、解体検証
- ② 送り込み装置の機能検証
- ③ 型どりパッカーの機能検証
- ④ ラッチシステムの機能検証

表 3.2-2 鋼管試験検証結果一覧

項目	検証結果
試験装置の組立・解体	分割した装置を架台に搭載して孔底側から装置を順に組立及び解体を行う手順を確認できた
送り込み装置の機能検証	NL140 ロッド内において泥水による送り込みで、装置が鋼管内を推進することを確認した。
型どりパッカーの機能検証	鋼管内を泥水で推進した試験装置から回収した型どりパッカーに損傷が無いことを確認した。
ラッチシステム機能検証	アウターパイプ内ラッチ溝への試験装置ラッチシステムによる固定と解除の動作を確認した。

3.3 物理探査技術の開発・改良

平成 23 年度に実施した地表-孔井間トモグラフィ調査でデータ取得密度が低い地表近辺を補完するため、地表発振-地表受振の屈折法地震探査を平成 25 年度に実施した。HCD-3 孔井南側の北海道道 645 号線路肩にジオフォンを設置し、道道 645 号線上において大型バイブロサイズ震源「Y-2400」により発生させた弾性波を観測した。また、同時に道道 645 号線上に 10 m 間隔で発振点、受振点を設定した。受振点、発振点を図 3.3-1 に、作業状況を図 3.3-2 に示す。データ取得の仕様を表 3.3-1 に示す。

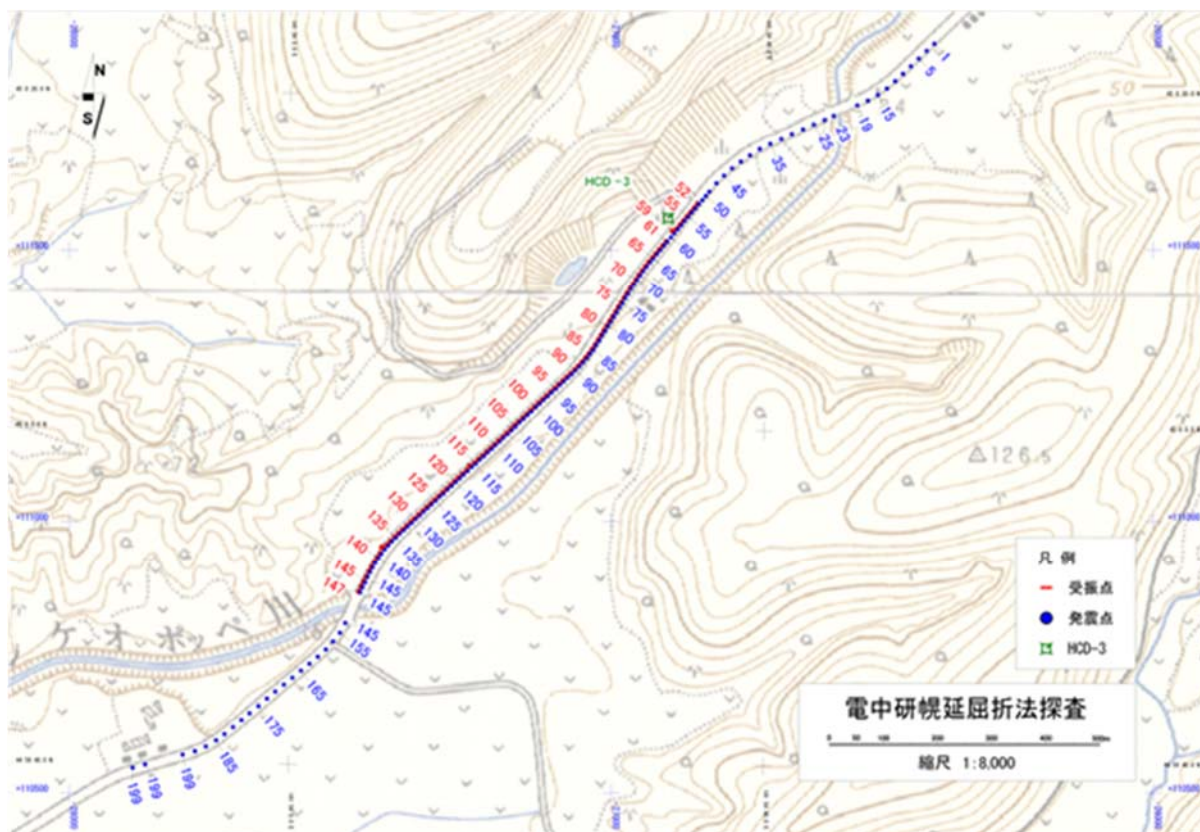


図 3.3-1 屈折法地震探査受発振点位置図



図 3.3-2 バイブロサイス震源の路上発振作業



表 3.3-1 屈折法地震探査観測仕様一覧

発振系仕様	
震源	大型バイプロサイス車(Y-2400) 1台
発振点数	200点(うち143点を解析に使用)
発振点間隔	標準10m
スイープ周波数	4~40 Hz
スイープ長	16秒
スイープタイプ	MD(Maximum Displacement)スイープ
スイープ回数	2~5回
受振系仕様	
受振器	4.5 Hz
受振器数/受振点	3個組をバンチング配置 (受振点51と52は1個)
有効受振点数	95点
受振点間隔	10m(直線の仮想測線に沿って)
展開長	1.0 km
展開パターン	固定展開
記録系仕様	
記録器	GDAPS-4A(有線テレメトリー方式)
サンプル間隔	2ミリ秒
記録長	3秒(相互相関後)
チャンネル数	96(1チャンネルはdead)
プリアンプゲイン	30 dB
ノイズエディット	ウィンドウ長=19秒 冪乗係数=1.0

### 3.4 孔内モニタリング技術の開発

#### 3.4.1 孔内モニタリングシステムの設置

平成24年度までに確立された技術及び既存技術の適用性評価や各作業手法を構築するため、平成25年度に北海道幌延町のコントロールボーリング孔井(HCD-3孔)にて「火薬による拡管～ケーシング

(NL140 ロッド)切断～観測区間確保～孔内モニタリングシステムの設置、試験運用」までの一連の孔内モニタリングシステム適用に際し、その設置作業を実施した。

実施した適用性試験項目を以下に示す。

- ① 火薬による拡管試験
- ② ケーシング(NL140 ロッド)切断試験
- ③ BHTV による拡管部の管径計測
- ④ 孔内モニタリングシステムの設置、データ取得

### (1) 観測区間の設定

北海道幌延町のコントロールボーリング孔井(HCD-3 孔)のどの位置に観測区間を設定するかを採取したコア状況及び孔径検層結果(4.1.2 孔径検層(キャリパ検層)参照)を基に検討した結果、下記に示す3つの観測区間を決定した。

- ・観測区間③：掘削長 208.7m～掘削長 209.7m(透水割れ目を対象)
- ・観測区間②：掘削長 211.2m～掘削長 215.7m(断層帯を対象)
- ・観測区間①：掘削長 249.7m～掘削長 257.2m(主断層の上盤側の健全な稚内層を対象)

観測区間が、上記のように決定したため、各適用試験実施深度を決定したが、掘削径が設計値( $\phi$ 152mm)より拡大していたため、NL140 ロッド保持耐力の不足が起こり、最終的に6箇所での拡管試験を実施した。

図 3.4-1 に適用性試験実施計画位置(左)と実施位置(右)を示す。

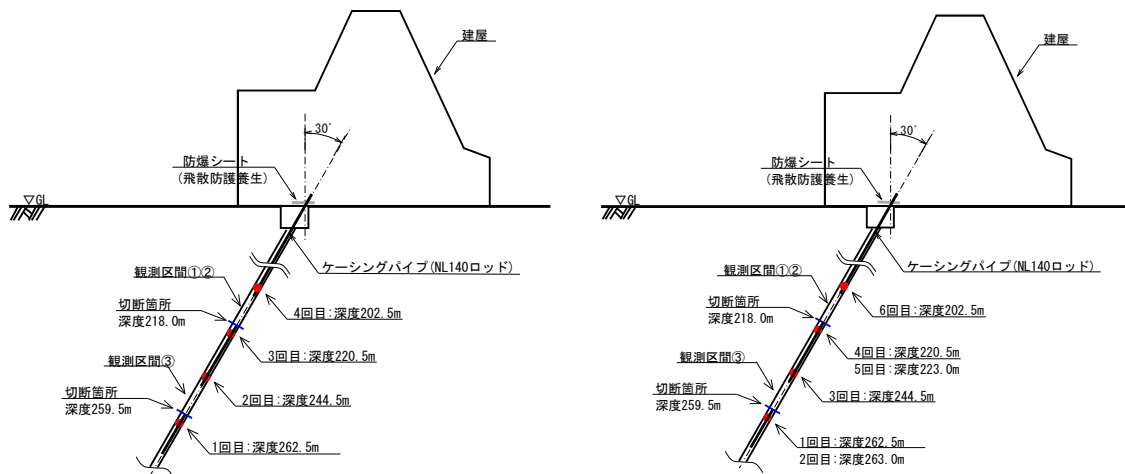


図 3.4-1 適用性試験実施計画位置(左)と実施位置(右)

### (2) 火薬による拡管試験

平成 24 年度までの検討・試験でケーシング(NL140 ロッド)荷重の保持方法は、ケーシング内に設置

した 100 g 程度の火薬を起爆させてケーシングを局部的に拡張し、孔壁に密着もしくは食い込ませる方法が有効であるとの結論を得た。この技術の実岩盤への適用性評価を行うため、平成 25 年度に HCD-3 孔にて火薬による拡張試験を実施した。試験に用いた治具編成、火工品組立図、発破前後の装薬状況等を図 3.4-2 から図 3.4-7 に示す。

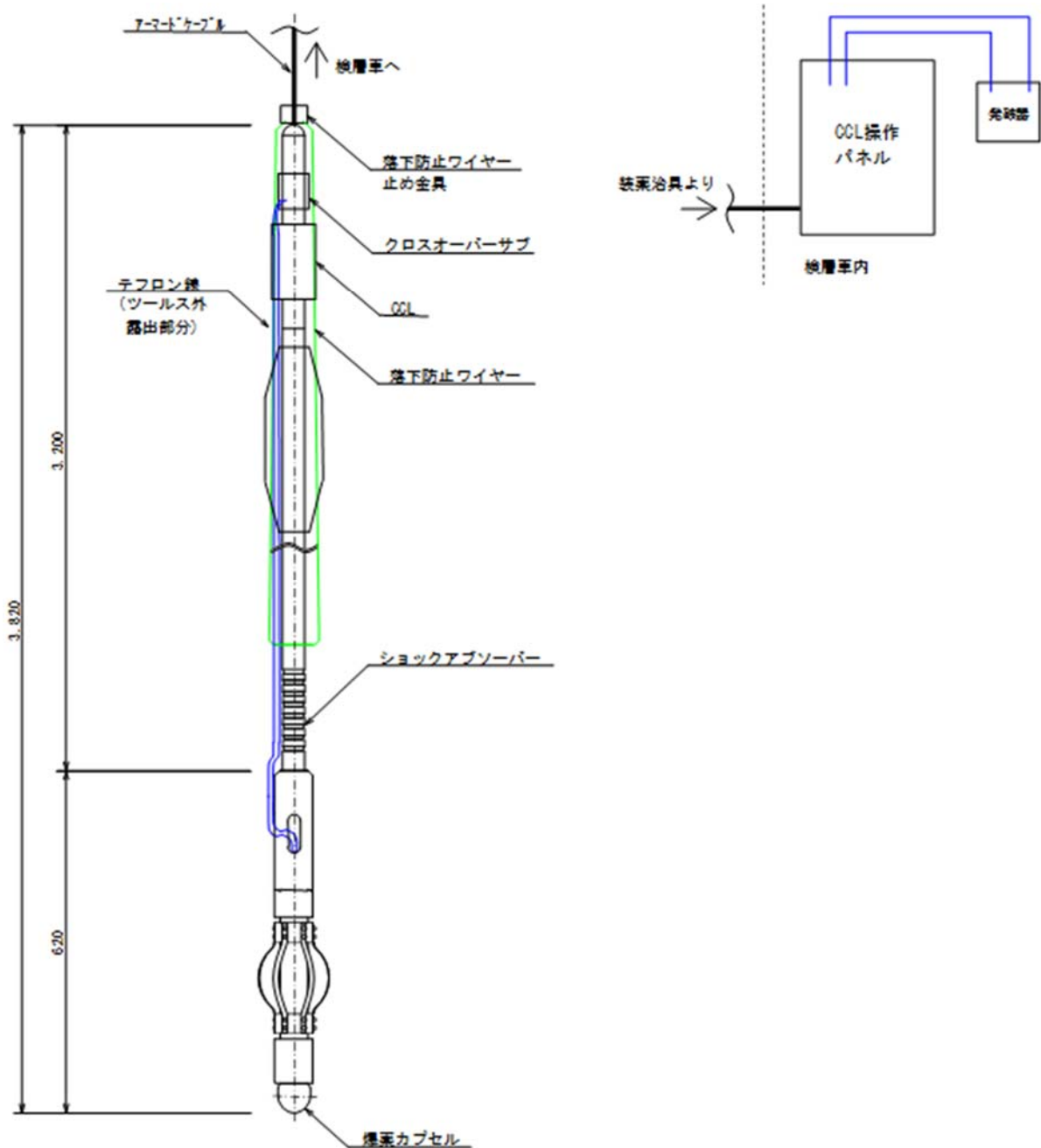


図 3.4-2 装薬治具編成図

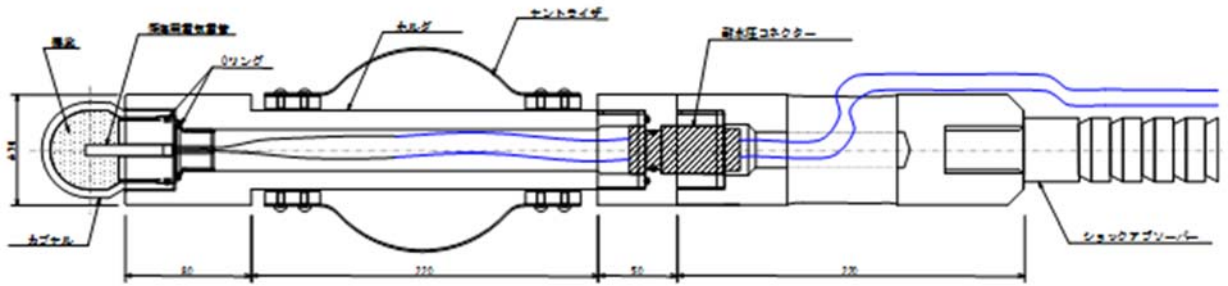


図 3.4-3 火工品組み立て図



図 3.4-4 火工品組み立て状況

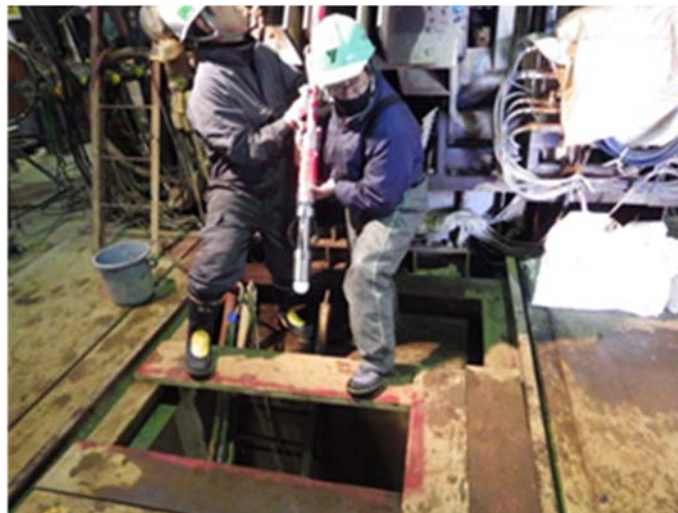


図 3.4-5 装薬状況



図 3.4-6 発破後の装薬治具状況



図 3.4-7 発破後のカプセルの残滓状況

火薬による拡管試験の成果は以下のとおりである。

- ① PBX6201 を使用した場合、薬量 100 g 程度で目標とする拡管径が得られることを確認した。
- ② 装薬治具はショックアブソーバーを装着することで、損傷等は認められなかった。
- ③ 拡管時の耐力として、掘削径が設計値( $\phi 152\text{mm}$ )より拡大していたため、耐力の不足が見受けられた。
- ④ 装薬カプセルとホルダー接続部の残滓については、全て回収された。

### (3) ケーシング切断試験

これまでの検討で、電動式カッターはケーシング(NL140 ロッド)切断ツールとして有効であること

が確認されている。この技術の実岩盤への適用性を評価するため、HCD-3 孔にてケーシング切断試験を平成 25 年度に実施した。切断試験に用いた電動カッターの編成を図 3.4-8 に示す。

実際のコントロールボーリング孔井内においてケーシング (NL140 ロッド) 切断試験の成果を以下にまとめる。

- ① 電動式カッターによる NL140 ロッド切断は、切断時間(カッターを所定深度設置から切断終了まで約 20 分)の短さ、切断面のきれいさから非常に有効であることを確認した。
- ② 切断作業時の情報を地上のモニター画面で確認でき、切断状況の把握が容易であることを確認した。

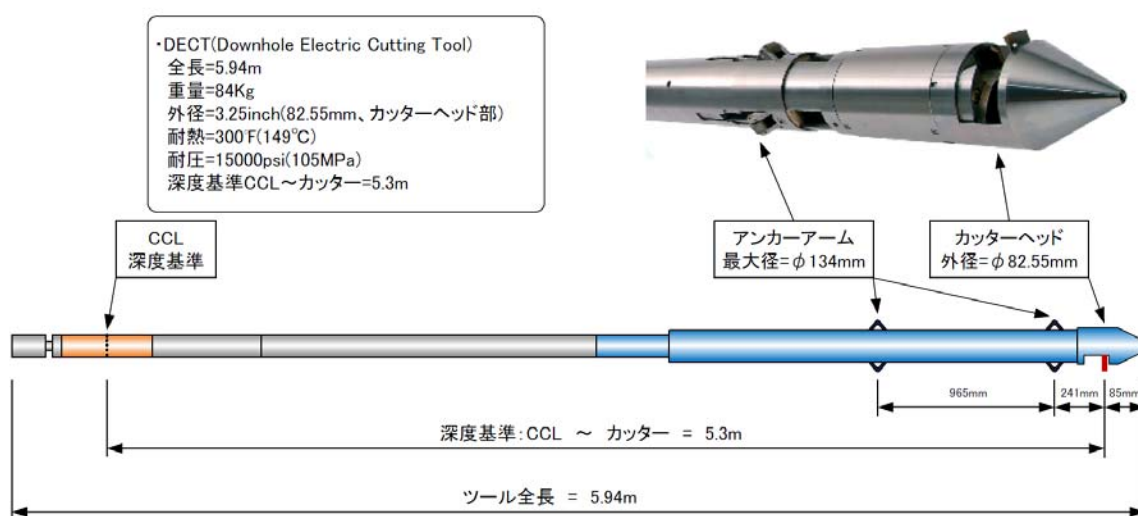


図 3.4-8 電動カッター編成

#### (4) 拡管部の管径計測

BHTV による拡管部の管径計測の成果を以下にまとめる。

- ① BHTV 検層データから NL140 ロッド拡管部の内径及び外径の把握が精度良くできることを確認した。
- ② 拡管部の形状を 3 次元表示することで、視覚的に判り易くなることを確認した。

図 3.4-9 に BHTV 検層(2 回目切断部)の結果を示す。

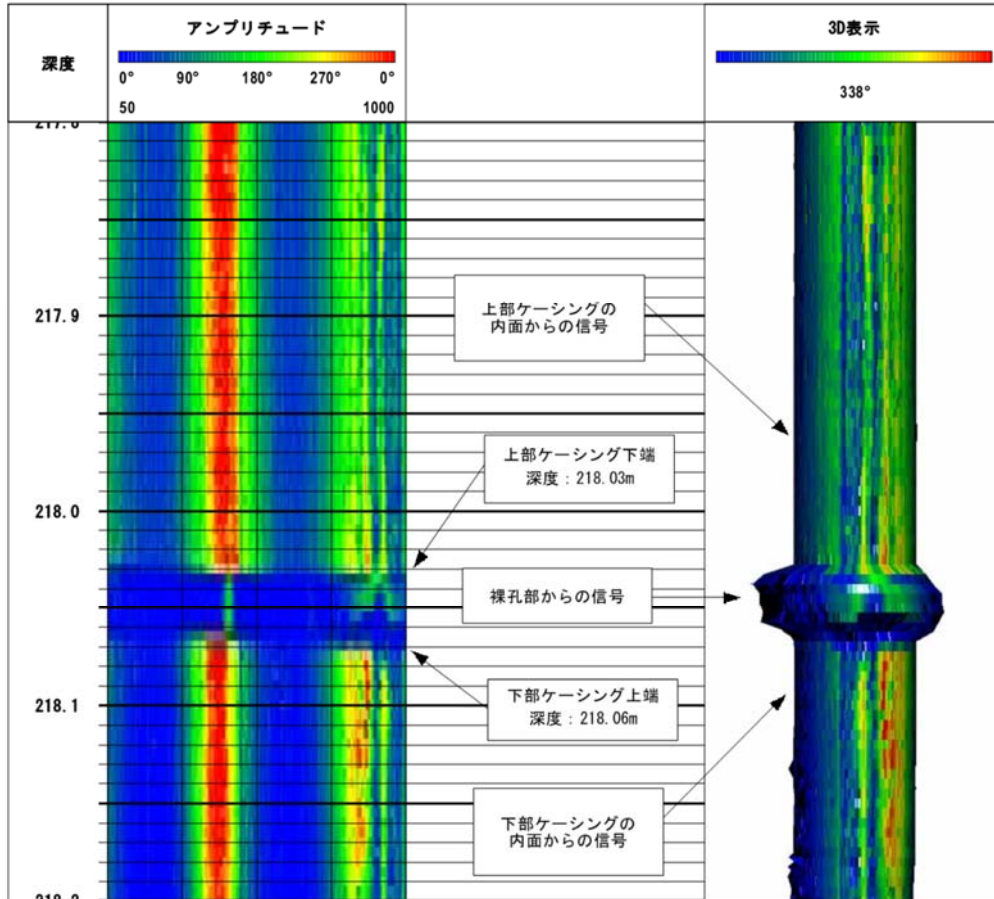


図 3.4-9 BHTV 検層(2回目切断部)結果

(5) 孔内モニタリングシステムの設置

平成 26 年 2 月に北海道幌延町の実孔井(HCD-3 孔)内にモニタリングシステムを設置し、3 区間の間隙水圧の計測を開始した。モニタリングシステムの設置状況を図 3.4-10 から図 3.4-13 に示す。



図 3.4-10 設置作業状況(1)



図 3.4-11 設置作業状況(2)



図 3.4-12 設置作業状況(3)



図 3.4-13 孔内モニタリングシステム設置完了



#### (6) 孔内長期モニタリング装置概要

コントロール掘削孔井 HCD-3 孔における孔内長期モニタリング装置は、いわゆるスタンドパイプマルチパッカー型のモニタリング装置である。ダブルパッカーにより区切られた観測区間は地上まで立ち上げた中空のパイプ（スタンドパイプ）と連結されており、区間の間隙水圧と平衡となるスタンドパイプ内の水位を計測することにより区間の間隙水圧を換算することができる。HCD-3 孔では、各区間ともに水頭が地上より数m高く、スタンドパイプより湧水しているために、スタンドパイプの上部にミニパッカーを設置して遮水し、ミニパッカーの直下に圧力センサーを設置して間隙水圧を測定している。

一方、原位置の地下水を採取する際には、ミニパッカーとセンサーなどを地上に回収し、スタンドパイプ内の孔内水（一般的には作業時に地表水が混入している）を何らかの方法により排除し、その後スタンドパイプ内に流入した地下水を専用の原位置サンプリングツールにより採取する。

HCD-3 孔に設置した孔内モニタリング装置の概念図を図 3.4-14 に、パッカーの設置深度ならびに観測区間を表 3.4-1 に示す。

#### (7) 取得対象データ

本システムにおいて取得対象となるデータを以下に示す。

- ①観測区間①の圧力
- ②観測区間②の圧力
- ③観測区間③の圧力
- ④パッカー1 及び 2 の圧力
- ⑤パッカー3 の圧力
- ⑥パッカー4 及び 5 の圧力
- ⑦ミニパッカーの圧力
- ⑧大気圧
- ⑨観測小屋内温度
- ⑩外気温

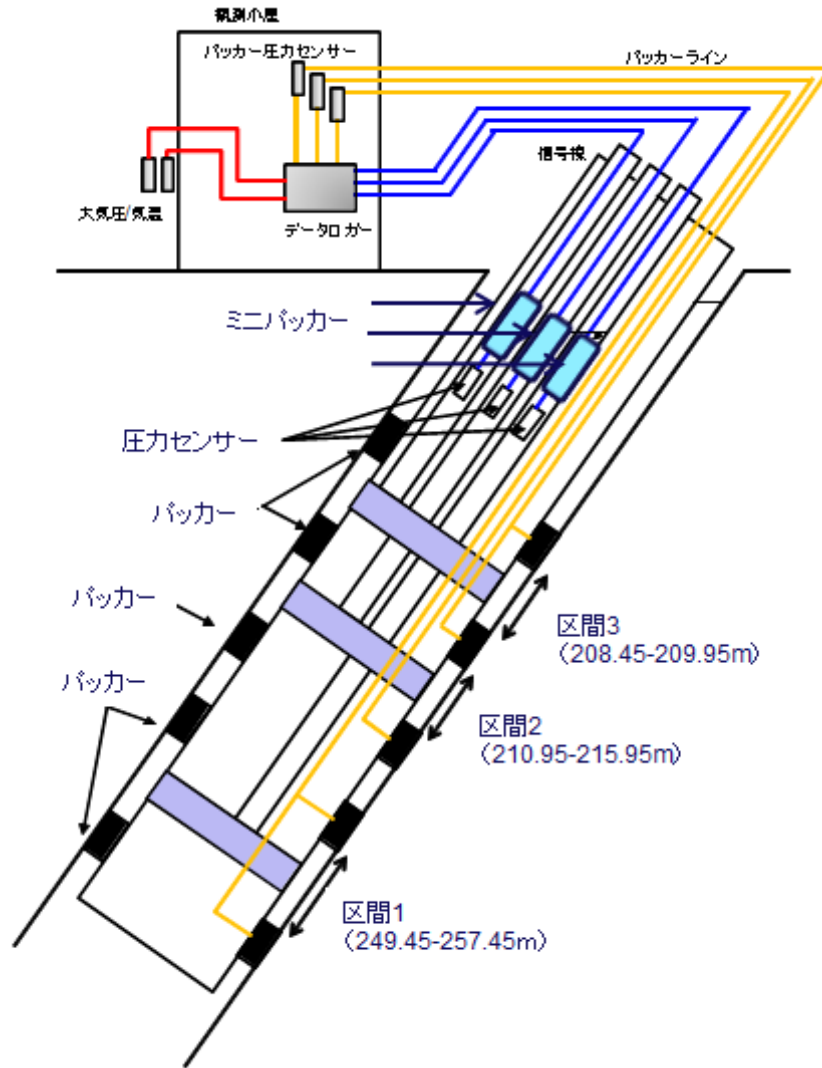


図 3.4-14 孔内長期モニタリング装置概念図 (HCD-3 孔)

表 3.4-1 設置区間-深度一覧表

深度	位置	区間長 (m)	スタンドパイプ	圧力センサー	ケーシングプログラム	上端(m)	下端(m)	区間名
208.45 ~ 209.95	最浅	1.5	SP3	P3 (GL-9.705m)	Packer 5	207.2	208.7	区間③
					Interval 3			
210.95 ~ 215.95	中間	5	SP2	P2 (GL-9.705m)	Packer 4	209.7	211.2	区間②
					Interval 2			
249.45 ~ 257.45	最深	8	SP1	P1 (GL-9.705m)	Packer 3	215.7	217.2	区間①
					Packer 2	248.2	249.7	
					Interval 1			
					Packer 1	257.2	258.7	

### (8) データ取得方法

本システムでは下記のセンサー及びデータロガーによりデータの取得を行っている。

#### ① スタンドパイプ内圧力センサー

項目	仕様	備考
方式	PAA, ピエゾレジスティブ	絶対圧
出力	4-20 mA	
外径	16 mm	
レンジ	0 - 10 bar	
線形性	0.025 %FS	
分解能	0.002 %FS	
重量	4.5 kg	ケーブル (90m) 含む
全長	0.12 m	



図 3.4-15 スタンドパイプ内圧力センサー

#### ② パッカー圧力計測センサー

項目	仕様	備考
方式	PAA, ピエゾレジスティブ	絶対圧
出力	4-20 mA	
外径	22 mm	
レンジ	0 - 50 bar	
線形性	0.05 %FS	
重量	0.5 kg	ケーブル (5m) 含む
全長	0.12 m	



図 3.4-16 パッカー圧計測センサー

③大気圧センサー

項目	仕様	備考
方式	PAA, ピエゾレジスティブ	絶対圧
出力	4-20 mA	
外径	22 mm	
レンジ	0.85 - 1.15 bar	
線形性	0.06 %FS	
重量	0.5 kg	ケーブル (5m) 含む
全長	0.12 m	



図 3.4-17 大気圧センサー

④大気圧センサー

項目	仕様	備考
名称	SDL (Solexperts Data Logger)	
寸法	0.22 × 0.12 × 0.09 m	
入力信号	0-2.5V (5V, 10V), 0-20mA	
分解能	16bit	
記憶容量	100,000 データ	
チャンネル数	11	
測定間隔	>1 分	
電源	6V (単一乾電池×4)	



図 3.4-18 データロガー

### 3.4.2 モニタリングデータの取得

モニタリング技術の開発目的は概要調査時点での処分候補地点におけるベースラインの把握である。本研究開発ではモニタリングの対象を間隙水圧と地下水水質とした。間隙水圧については、処分場建設時の間隙水圧挙動をベースラインとの比較によって評価できるように、間隙水圧のベースラインの把握を目的としている。また、地下水水質については、ボーリング掘削時に採水、分析を実施する場合、掘削水の影響により初期的な地下水水質を評価するのが困難なことから、長期的に水質をモニタリングすることにより初期的な水質を評価することを目的としている。

#### (1) 間隙水圧データの取得

##### 1) 無人システム導入前

無人計測システムを設置するまではバッテリー及びデータロガーの容量を考慮して、バッテリー交換を兼ねて約3カ月毎に現地へ赴き、観測データの取得・回収を行った。回収データは下記の項目である。

- ・間隙水圧：3区間
- ・パッカー圧：3組
- ・大気圧
- ・外気温

回収したデータはその都度整理し、時系列の変化をグラフ化した。長期モニタリング装置設置後一年間の取得データをグラフ表示した例を図3.4-19に示す。

##### 2) 無人計測システム導入後

無人計測システム設置後は、通信によりデータを取得した。無人システム導入に際しては、計測環境情報と設備監視情報を得るため、下記に示す項目を新たな計測対象として追加した。

#### ・計測環境情報

- ①温度、湿度
- ②風向、風速
- ③日射量
- ④降雨量
- ⑤積雪量

#### ・設備監視情報

- ①発電電圧（太陽光、風力）
- ②蓄電池電圧
- ③設備の周囲画像

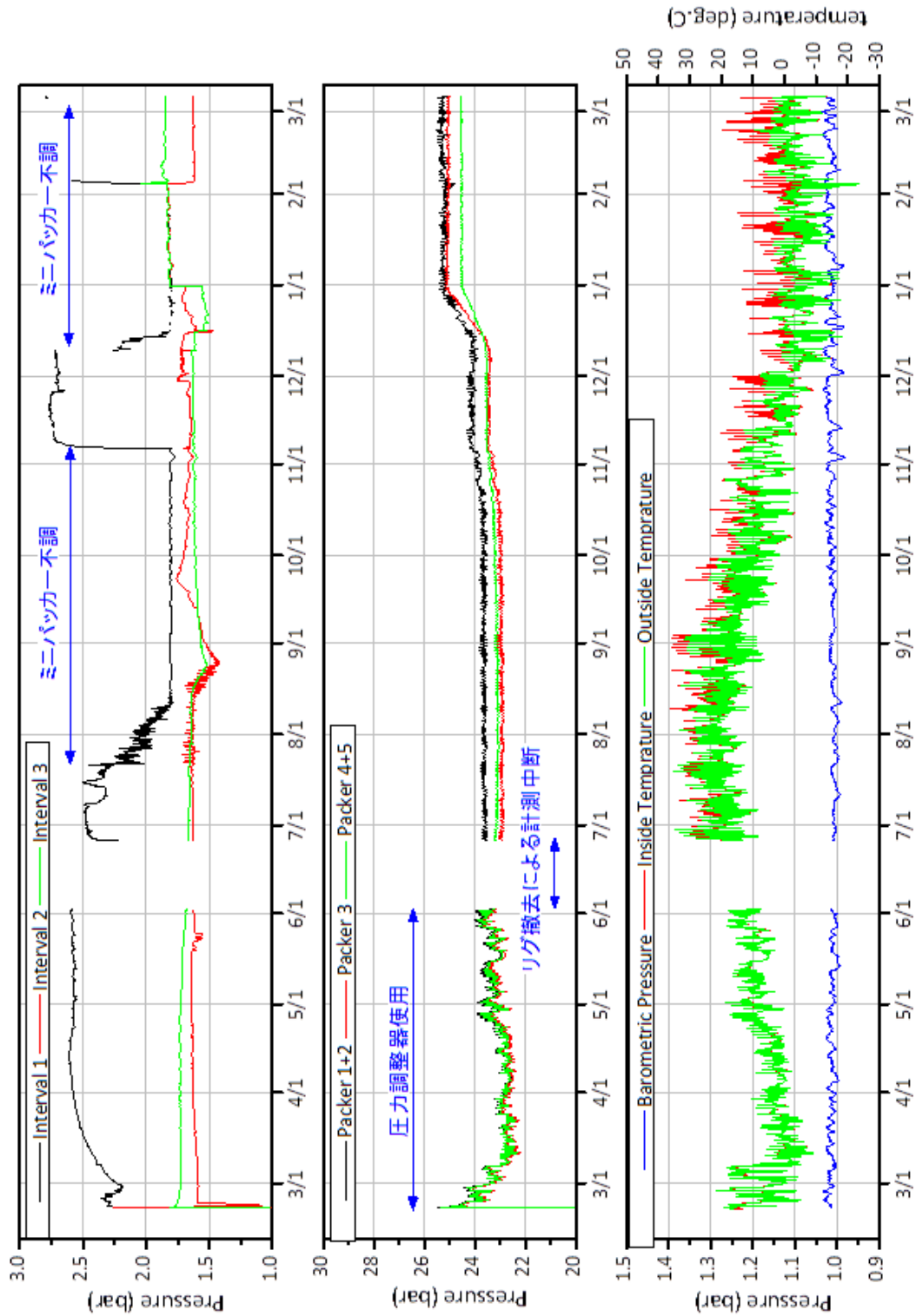


図 3.4-19 取得データ（平成 26 年 2 月～平成 27 年 3 月）

無人計測システムでは各センサーの最新の計測値（図 3.4-20）のほかにも図 3.4-21 に示すように、遠隔監視局から指定した期間のデータをグラフ表示することができる。

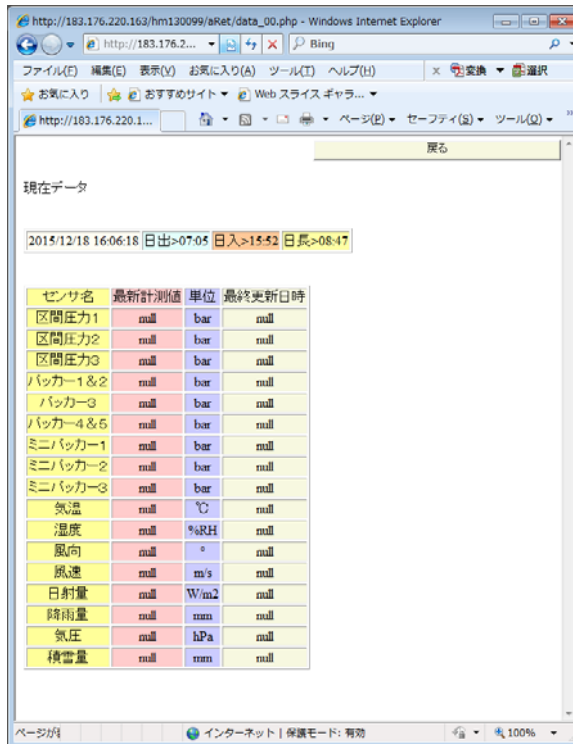


図 3.4-20 最新計測値の表示例

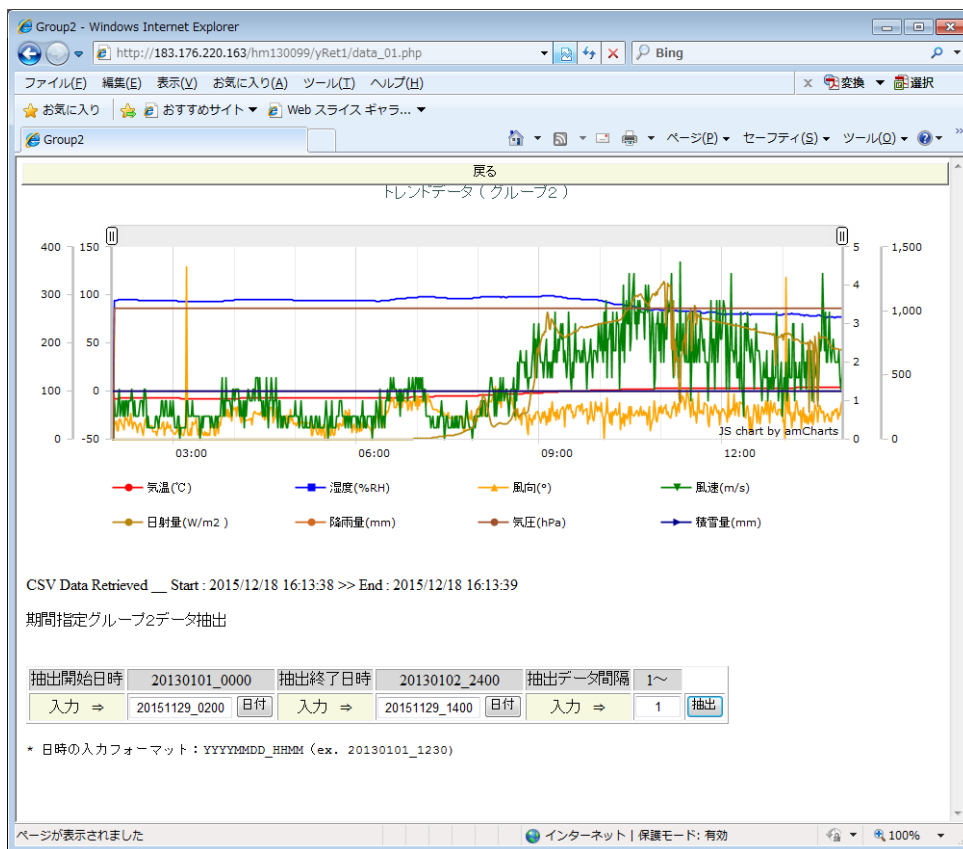


図 3.4-21 指定期間のグラフ表示例

また、指定した任意の期間の各センサーのデータはクラウドサーバーからダウンロードすることができる。データは csv 形式のファイルとしてダウンロードすることができる (図 3.4-22)。

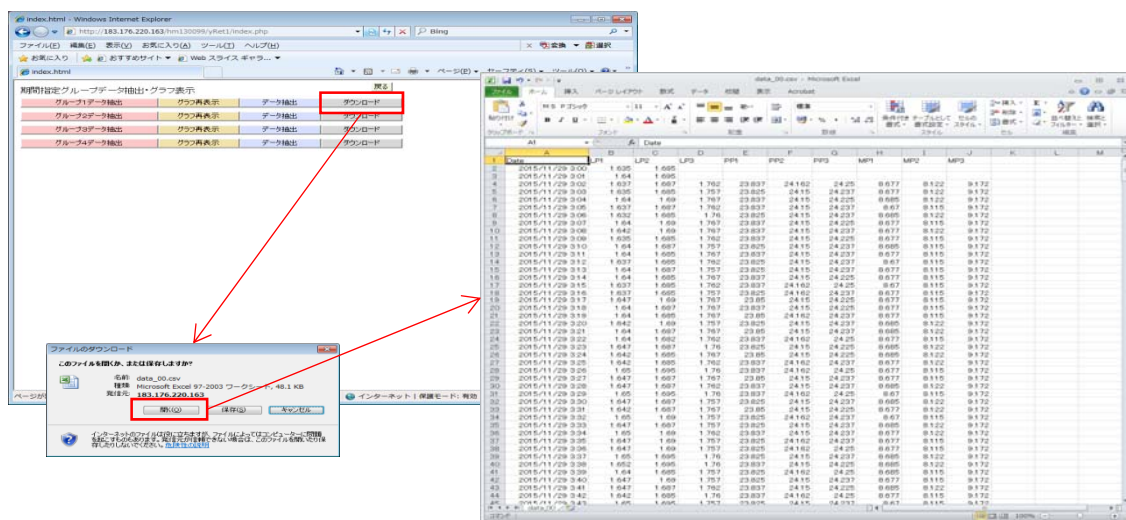


図 3.4-22 計測データ取得例

## (2) 地下水の採取

地下水化学のベースラインを評価する目的で、間隙水圧観測 3 区間のうち透水性の高い区間①(208.7~209.2m)において原位置サンプラーを用いて、溶存ガス分析を目的とした採水を実施した。採水に先立ち観測区間の孔内水を地下水と置換するため、対象区間が被圧していることから湧水状況を確認し、①ミニパッカーをはずして湧水させる、②ダブルバルブポンプによる揚水のうちいずれかを選択した。自然湧水もしくはダブルバルブポンプにより揚水した水を一般水質分析、酸素・水素同位体分析、トリチウム、ラドンなどの分析用に採取した。また、湧水もしくは揚水時に孔口においてフローセルを用いて、pH、溶存酸素濃度、電気伝導度及び酸化還元電位を計測した。

### 1) ダブルバルブポンプによる採取

表 3.4-2 にダブルバルブポンプの仕様を、図 3.4-23 及び図 3.4-24 にチューブドラムとポンプコントロールユニットの外観を示す。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 3.4-25 に作動原理を示す。

このダブルバルブポンプを使用して揚水し、地下水を採取するとともに、水上置換によってガスを採取した。



表 3.4-2 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 3.4-23 チューブドラム



図 3.4-24 ポンプコントロールユニット

2) サンプラーによる採取

溶存希ガスによる年代測定のために、原位置サンプラーにより原位置圧力を保持した地下水を

採取した。

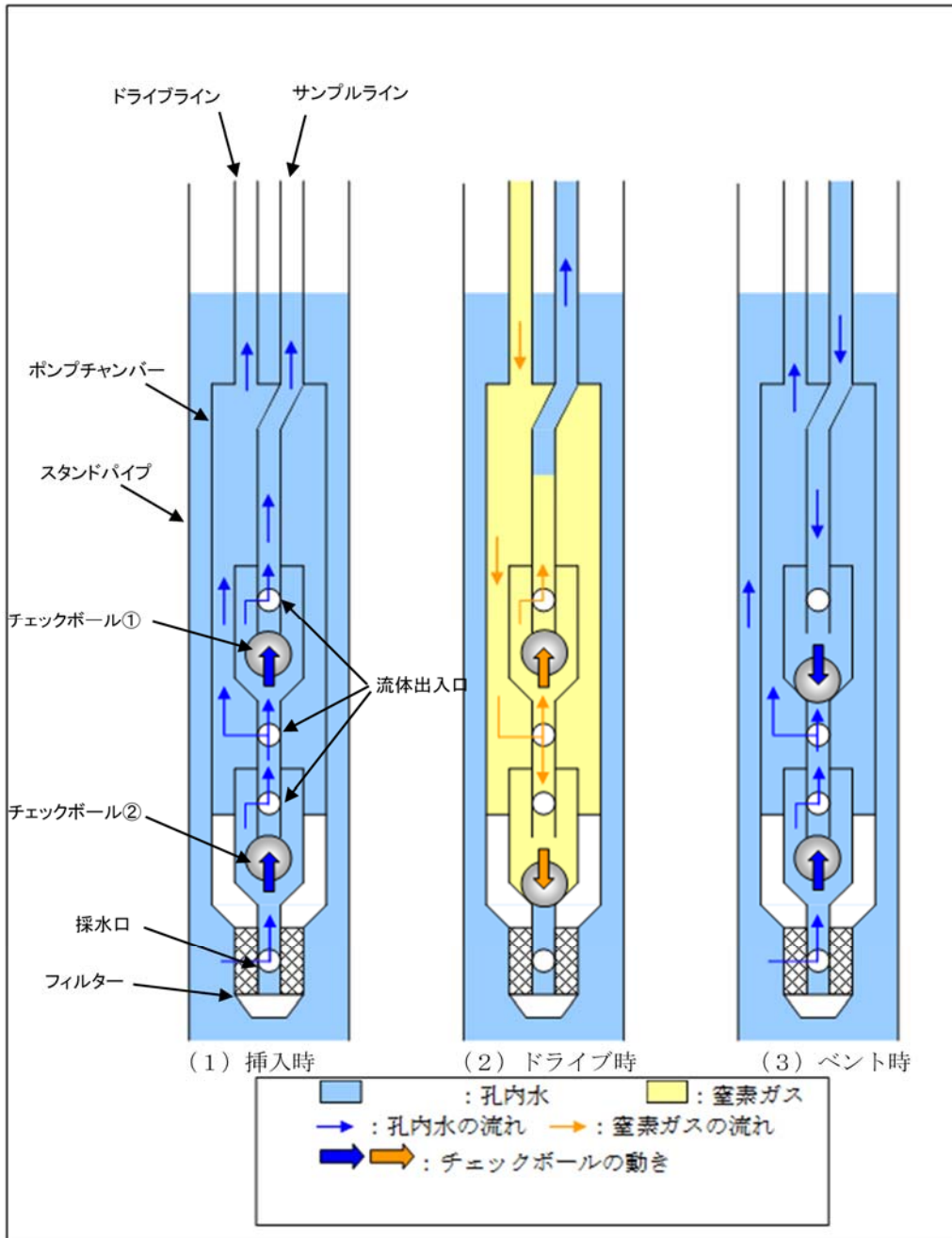


図 3.4-25 ダブルバルブポンプ作動原理

表 3.4-3 にサンプラーの仕様を、図 3.4-26 から図 3.4-28 に使用機器の写真を示す。本サンプラーはフロースルー式（図 3.4-29 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、原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 3.4-3 サンプラーの仕様

項目	仕様	備考
フロースルタイプ 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, ニードルバルブ 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 3.4-26 サンプラー



図 3.4-27 ウィンチ

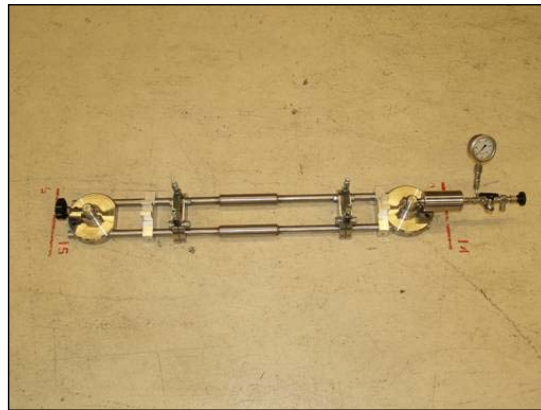
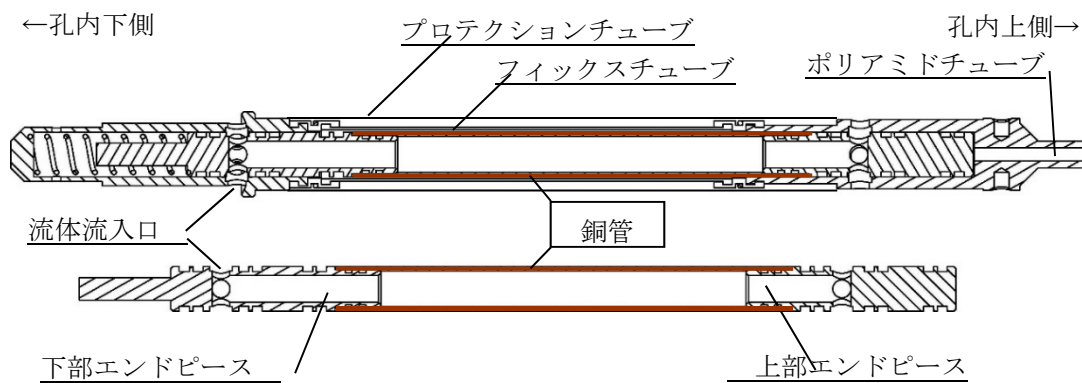


図 3.4-28 クランプ止め装置



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 3.4-29 フロースルー型サンプラー断面図

### (3) ガスの採取

揚水もしくは湧水後にスタンドパイプが地下水と置換したと判断された時点で、原位置サンプラーにより、地下水年代測定用の溶存ガスを採取した。その他の溶存ガスについては、湧水もしくは揚水時に孔口においてガス置換法により採取した。

### (4) 地下水・ガスの分析

地下水・ガスの分析における採取項目と採取方法を表 3.4-4 に、分析方法を表 3.4-5 に示す。

表 3.4-4 採取項目と採取方法

項目名	分析対象	採取方法
一般水質	Na, K, Ca, Mg, Cl, SO <sub>4</sub> , HCO <sub>3</sub> , 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、沈殿や器壁への吸着を防止した。
アンモニア	NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub>	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 <sup>2+</sup>	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 <sub>2</sub> S <sup>0</sup> , HS <sup>-</sup> , S <sup>2-</sup>	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 <sup>18</sup> 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	<sup>3</sup> 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。
<sup>14</sup> C	<sup>14</sup> C, δ <sup>13</sup> 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。
<sup>36</sup> Cl	<sup>36</sup> 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 <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> ~C <sub>6</sub> の濃度分析, CO <sub>2</sub> とC <sub>1</sub> ~C <sub>4</sub> 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 <sub>2</sub> 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, <sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> 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して測定, 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。

表 3.4-5 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 <sub>4</sub> , Br, NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub>	イオンクロマトグラフ法
I	JISK0101よう素抽出吸光光度法
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光度法
HCO <sub>3</sub>	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
δD, δO	新実験化学講座(1975)第10巻, 4.6安定同位体比の測定方法
<sup>3</sup> 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
<sup>14</sup> C	バブリング法-加速器質量分析器
δ <sup>13</sup> C	IR-MS
<sup>36</sup> Cl	加速器質量分析器
アルカリ度	pH4.8滴定法

### 3.5 モニタリング無人計測システムの開発

孔内長期モニタリングにおいてモニタリングシステムがどのような環境下に設置されるか不明であるため、どのような環境下であってもデータ回収が可能である無人計測システムについて検討を行う必要がある。このため、HCD-3 孔のモニタリングを対象として電源、通信システムの検討を行い、モニタリングデータを遠隔で収集する無人計測システムを現地に設置した。

#### 3.5.1 無人計測システムの概要とその概念設計

電源、通信のインフラがない箇所、寒冷地で日照の少ない過酷な条件においてもスタンドアローンの状態で電源と通信を確保した効率的な無人のモニタリングデータ観測・通信システムの概念図を図3.5-1に示す。この無人計測システムを構成する主な装置は下記のとおりである。

- ・電源装置：太陽光/風力ハイブリット型+バッテリー
- ・通信装置：公衆回線または衛星回線通信機
- ・データロガー（データ出入口装置）

システムに影響を及ぼす気象等の自然環境条件を列举し、それぞれの条件に応じたシステム構成のケーススタディを行った。これに基づきシステム構成に影響を及ぼす自然環境特性を分類し、各特性に応じたシステムを例示するとともに幌延HCD-3 孔の自然環境条件に適合するモニタリング計測に対応できる計測システムの概念設計を行った。

#### (1) システムの設計検討項目

概念設計において検討した主な項目は下記のとおりである。

##### ①気象等の自然環境条件

- ②電源装置：太陽光&風力ハイブリッド型+寒冷地仕様大容量バッテリー
- ③通信装置：公衆回線または衛星回線通信機
- ④データロガー（プロセス入出力装置）
- ⑤装置コスト、メンテナンス費用

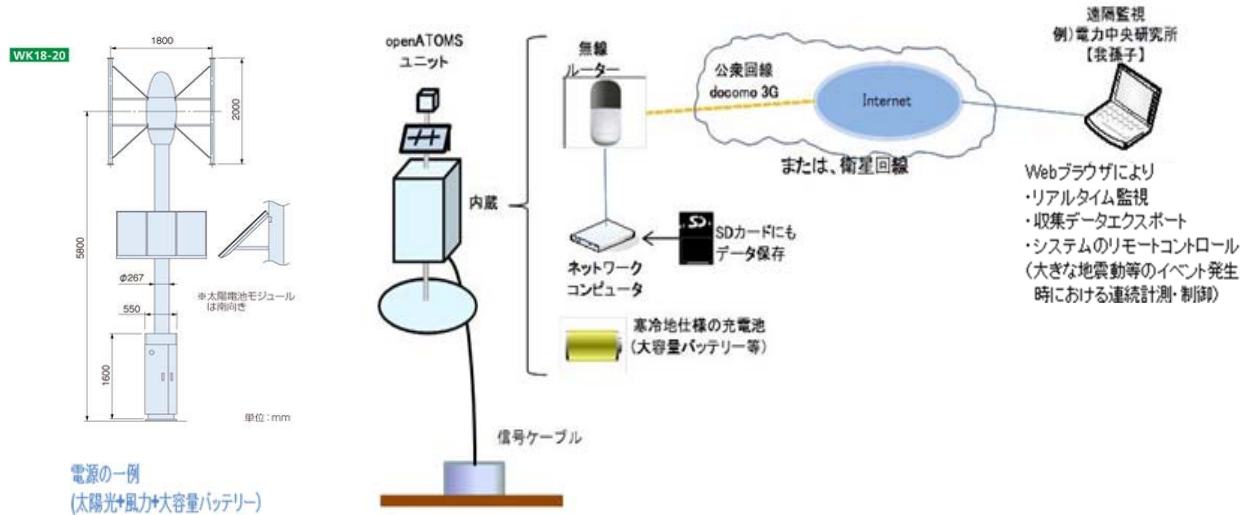


図 3.5-1 無人計測システムの概念図

## (2) システムの設計条件

無人計測システムの設計条件を以下に示す。

### 1) 機能

孔内に設置された複数の圧力センサーのデータを監視、記録、通信する機能を有する。

### 2) 計測項目

- ・ 孔内圧力
  - ① 区間圧力（最大 5 区間）
  - ② パッカー圧力（最大 5 セット）
  - ③ ミニパッカー圧力（最大 5 セット）
- ・ 計測環境情報
  - ① 温度、湿度
  - ② 風向、風速
  - ③ 日射量
  - ④ 降雨量
  - ⑤ 積雪量

## ⑥気圧

### ・設備監視情報

①発電電圧（太陽光、風力）

②蓄電池電圧

③設備の周囲画像

### 3) 機能上の要求仕様

①計測間隔：1分とし、監視データの1年分を記録可能とする

②設備周囲画像：データについては通信周期毎に撮影するものとする。

③通信周期：標準10分とし、発電状況に応じて10分単位で最長1時間まで変更できるものとする。遠隔でも設定可能とする。

④通信手段：3G/4Gを基本とし、そのサービスエリア外であれば衛星通信とする。

⑤電源：一般電力の供給のできないサイトを想定し、太陽光、風力をその手段とする。太陽光、風力のどちらを使うか、ハイブリッドにするかは、設置環境により選択するものとする。

### (3) 無人計測システムの概念設計

無人計測システムの概念設計を①から④の順に従い実施した。

#### ①無人計測システム構成の検討

無人計測システムとして必要なコンポーネントを選定し、標準的な“スタンドアローン構成”と幌延に適合する“幌延HCD-3孔向け構成”の2パターンを設定した。

#### ②システム全体の消費電力の算定

システムを構成する各コンポーネントに何を採用するかを検討し、具体的な機器仕様を定めた上、各コンポーネントの消費電力を算出し、それぞれの積算値から無人計測システム全体の消費電力を求めた。

#### ③地域別の賦存エネルギー<sup>\*</sup>と電気エネルギーの算出

電力インフラの無い地点へ無人計測システムを設置する場合、自然エネルギーから電気エネルギーを得る必要がある。モデルケースとして、設置地点には気象条件が異なる日本国内の複数地域を選定し、その地域の気象データより、設置地点が有する賦存エネルギーを算出した。

賦存エネルギーをもとに、風力発電及び太陽光発電により電気エネルギーとして得られる電力量を算出した。

<sup>\*</sup>：賦存エネルギー：天然資源が持つ利用の可否に関係なく理論上算出されるエネルギー量の事。電気エネルギーに変換する前の自然界に存在する素のエネルギー量。

#### ④電源の組合せの検討

年間を通じて安定して無人計測システムを稼働するために必要な風力発電と太陽光発電なら



びに蓄電の組合せを検討し、地域別にその標準的な仕様を整理した。

無人計測システムの概念設計フローを図 3.5-2 に示す。

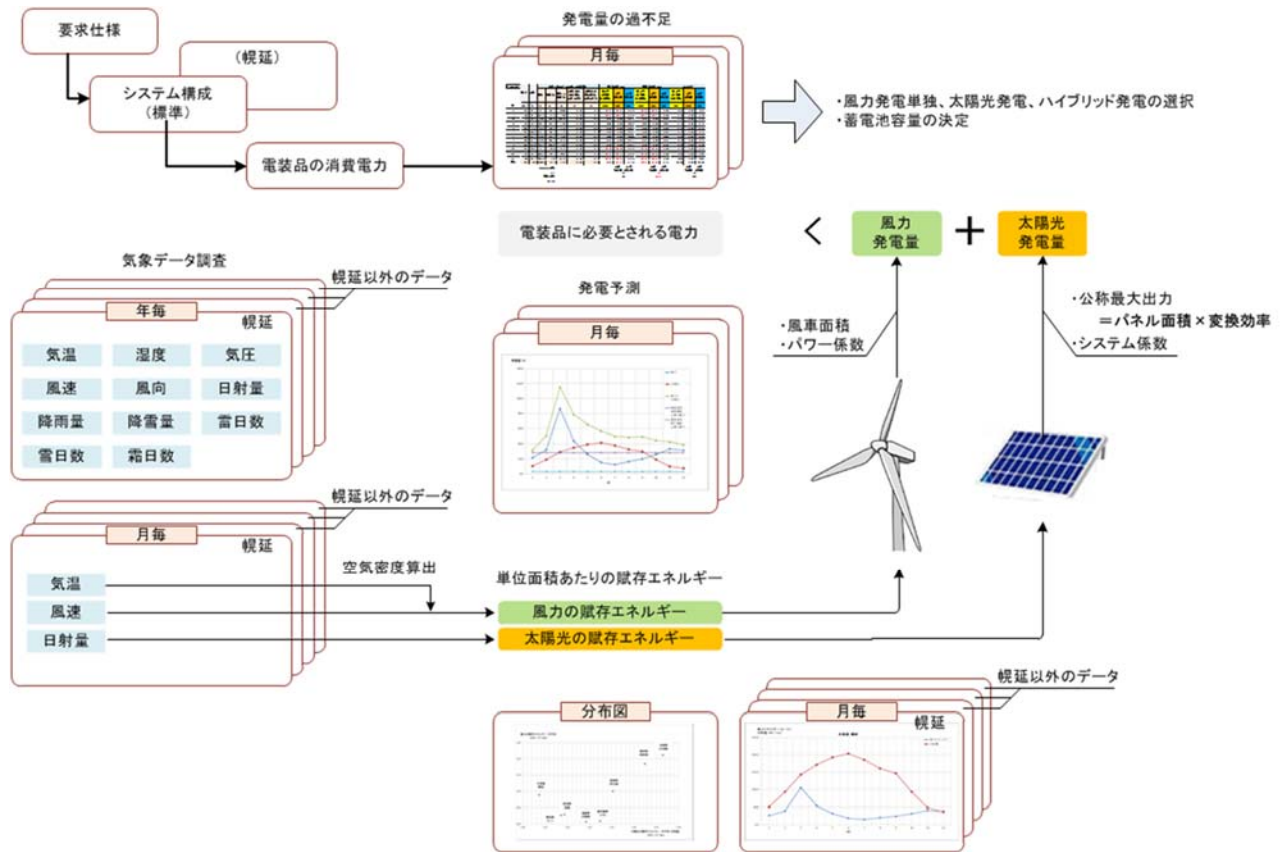


図 3.5-2 無人計測システムの概念設計フロー

#### (4) 概念設計に基づく無人計測システム構成

標準のスタンドアロン構成と複数測定ポイントのシステム構成を以下に示す。

##### 1) 標準スタンドアロンシステム構成

標準の無人計測システムは次の機器により構成される。

###### ① データロガー

- ・ 孔内に設置された圧力センサーの状態を計測し記録する。

###### ② 上位通信

- ・ 計測した圧力センサーのデータを遠隔監視装置に送る。

###### ③ 発電機

- ・ 設置された地域の賦存エネルギーを利用して発電する。
- ・ 風力発電と太陽光発電を想定する。

- ・発電量の不足を補う蓄電池を組み合わせる。

#### ④環境センサー

- ・孔内に設置された圧力センサー以外に、無人計測システムが設置された場所の環境測定を行い遠隔監視地点においても現場の設備稼動状態及び周辺環境状態を検知することができる。

幌延 HCD-3 孔向けを想定した標準スタンドアローンシステム構成を図 3.5-3 に示す。

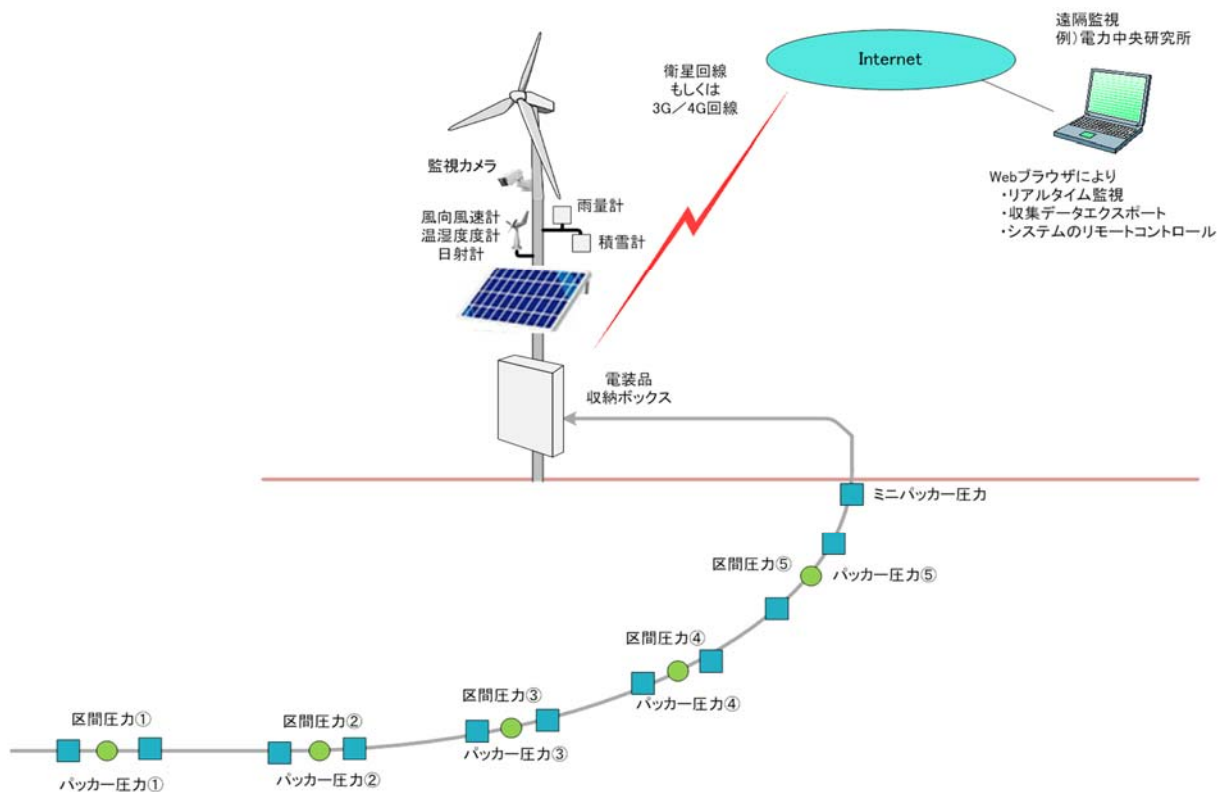


図 3.5-3 標準スタンドアローンシステム構成図

#### 2) 複数測定ポイントのシステム構成

複数の調査孔を同時に測定する必要がある場合、測定ポイント局を追加することで柔軟に対応可能なシステムとなる。複数の測定ポイント局を構成する為のシステムへの要求仕様は以下のとおりである。

- ・各測定ポイント局は同一設計とし、各装置には発電装置、データロガーなど自局機能の他に他局とのルーティング機能を有し、自らが信号中継器を兼ねる機能を持つこと。
- ・測定ポイント局間は無線通信で接続すること。現場でのケーブル工事が不要な構成とすること。

- ・中継局が停止した場合でも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有すること。

複数の測定ポイントの場合のシステム構成を図 3.5-4 に示す。

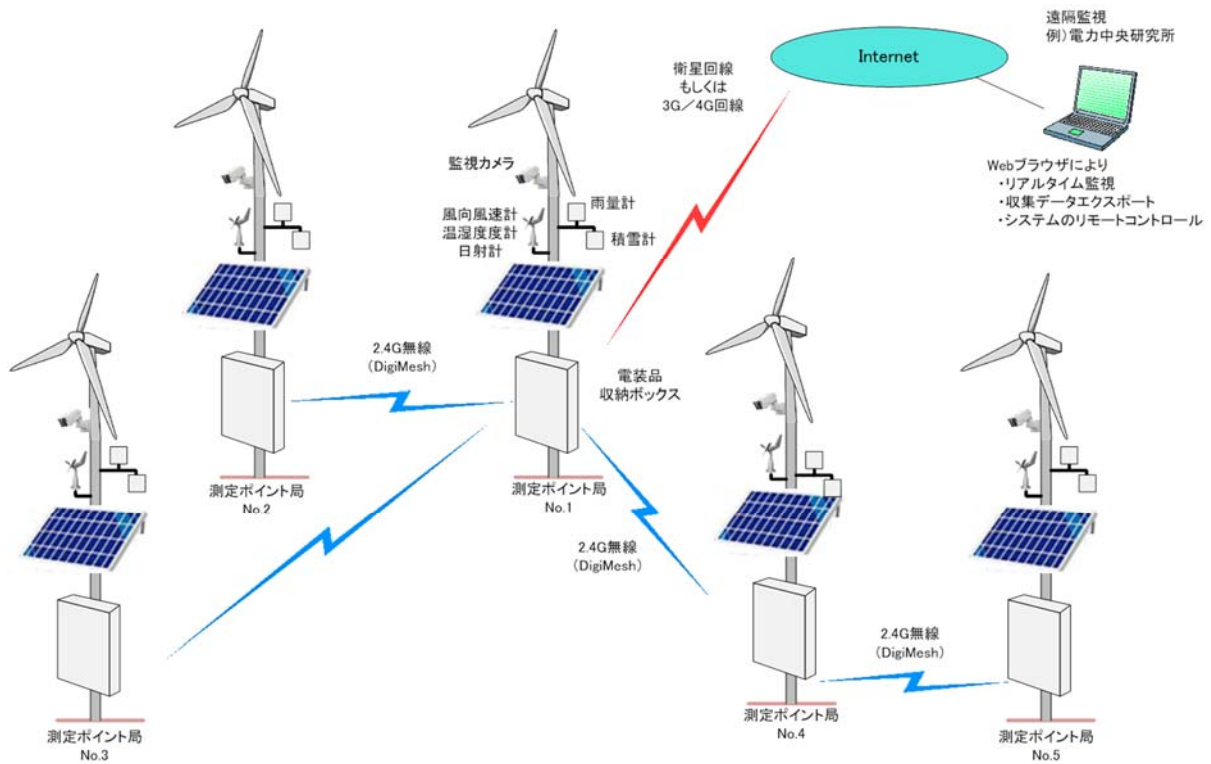


図 3.5-4 複数測定ポイントのシステム構成図

### 3.5.2 幌延 HCD-3 向け無人計測システム

概念設計で得られた地域別の標準的な仕様をベースに、幌延 HCD-3 孔のモニタリングに適合する無人計測システムの具体的な外寸法や基本回路を設計した。

#### (1) 幌延 HCD-3 孔向けシステム構成

幌延 HCD-3 孔については現場に既設の小屋があることから、その中に設置するデータロギング盤と外に設置するハイブリッド発電設備の構成とするのが最適と考えられる。

また、監視する区間圧力等は①～③のとおりである。その他の監視内容は標準と同一とする。

- ①区間圧力：3区間
- ②パッカー圧力：3区間
- ③ミニパッカー圧力

幌延 HCD-3 孔向けシステム構成を図 3.5-5 に示す。

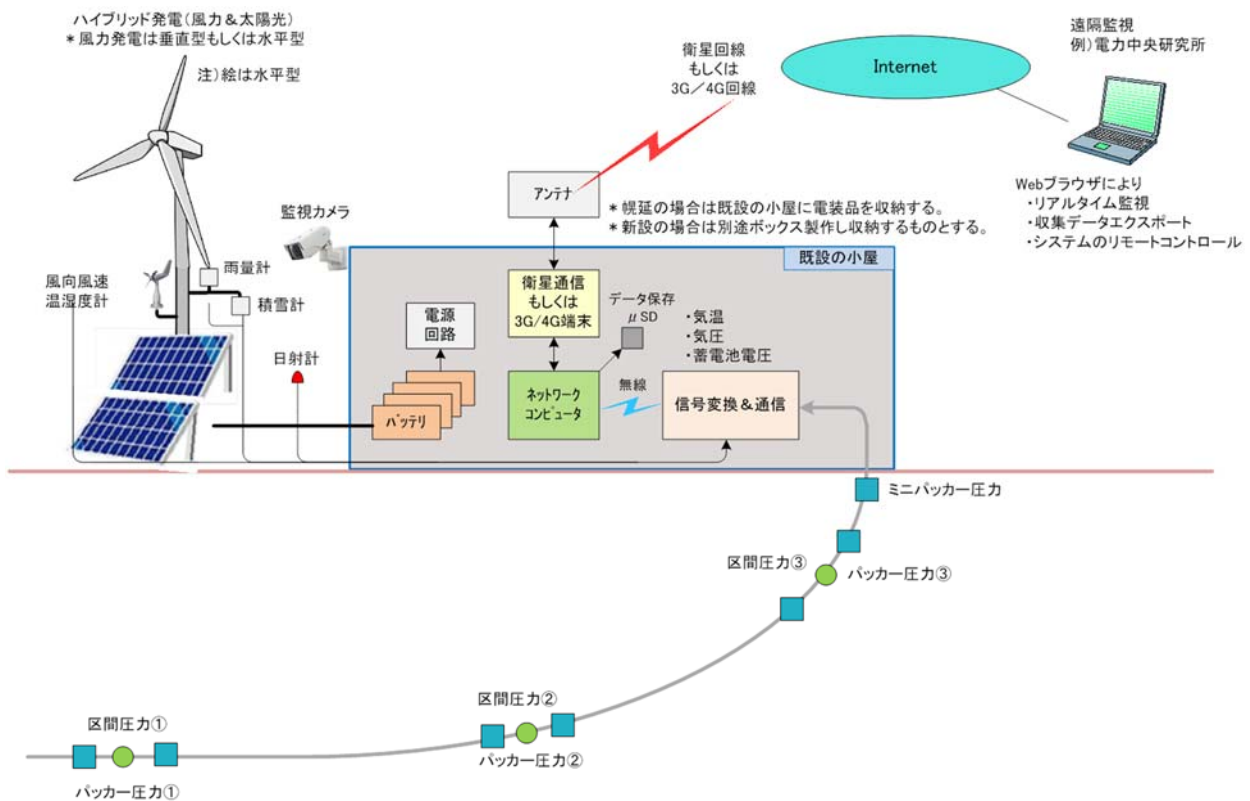


図 3.5-5 幌延 HCD-3 孔向けシステム構成図

(2) データロガーの検討

無人計測システムに使用するデータロガーの要求仕様を以下に示すとおり定義し、要求仕様を満たす可能性のある市販の機器を調達することとした。

データロガーに求められる要求仕様の内、計測点仕様を表 3.5-1 に示す。

表 3.5-1 データロガーの計測点リスト

	計測内容	測定範囲	根拠	
1	圧力	4-20mA/0-10V	既存の圧力センサの出力仕様	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 <sup>2</sup>	気象データ:最大日射量	石垣島 6.2kWh・m <sup>2</sup> ・day ⇒ 258w/m <sup>2</sup>
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

その他の要求仕様として以下を配慮する。

- ①システム全体で低い消費電力で連続稼動すること。
- ②システム全体の消費電力を動的に制御できること。
  - ・消費電力を少なくするために、計測する時だけデータロガーの電源及びセンサーの電源を ON にする機能を持つ。
  - ・上位通信機能も必要なときにだけ電源を ON にして消費電力を少なくすることができる。
- ③上位通信（衛星通信もしくは 3G/4G）との通信機能を持つこと。
- ④複数の測定ポイント（調査孔）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ネットワークを有すること。かつ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。
- ⑤センサネットワークと上位通信手段とのインターフェースが容易なこと。

### (3) データ通信の検討

遠隔監視装置への上位通信手段として HCD-3 孔のある北海道幌延町上幌延現地における衛星通信、3G/4G のサービスの調査を行うとともに通信状況の現地調査を行い、機器選定を行った。

現地調査の結果、3G/4G 公衆回線はサービス提供各社ともにサービス提供エリアの境界にあり、携帯電話の電波が入りにくい場所であることが確認できた。このため、幌延 HCD-3 孔向けのシステムでは安定した通信を確保するため、3G/4G 公衆回線だけでなく衛星通信設備も併用することとした。

### (4) 運転モードの検討

データロガー、上位通信手段、圧力センサー、その他の環境センサーの消費電力を調査しシステム全体の消費電力を算出した。これに基づき、システムの連続運転と間欠運転の消費電力を評価した。

### (5) 発電設備の検討

電装品の消費電力から発電設備容量の検討を行い、発電機を選定した。

北海道：幌延に適合する風力発電機の候補として調査した製品及びそれらの仕様を表 3.5-2 に示す。この表に掲げた製品候補から、太陽光発電と組み合わせたハイブリット発電の親和性及び市場からの調達容易性を考慮して、種類（垂直型と水平型）の異なる風力発電機をそれぞれ一機種ずつ選定した。

試設計を踏まえて幌延 HCD-3 孔のモニタリングに適用する機器として表 3.5-3 に示す機器を選定し、平成 27 年 10 月に現地に設置した。機器配置計画図と設置状況を図 3.5-6 ならびに図 3.5-7 に示す。

表 3.5-2 風力発電機の製品候補

\*一般社団法人 日本小形風力発電協会の会員企業

メーカー	風力発電									太陽光		その他			
	種類	型式	ブレード直径 mm	ブレード長さ mm	カットイン周速 m/s	カットアウト周速 m/s	最大風速 m/s	定格出力 W	定格出力風速 m/s	パワー係数 25℃	種類	公称最大出力 W	蓄電池容量 kWh	使用温度	備考
ゼファー	水平	Z-1000-250	1800		2.5			742	11.0	33.29%	薄膜	120	5.04		検討用
ニココー	水平	NWG-1K	2000		2.5			1000	12.0	31.11%					
CNOパワーソリューションズ	垂直	DM-00-300	1200	1200	2.5			300	12.0	20.35%					
FUJITAビジネスパートナーズ	垂直	DS-700	1930	1600	3	15	60	700	12.0	22.14%	多結晶	130	2.64		
		DS-300	1240	1060	3	15	60	300	13.5	15.66%	多結晶	130	2.64		街灯用
エネルギープロダクト	垂直	ENEPRO-500	2000	1500	2	21	60	450	10.0	25.32%					

\*その他企業

シンフォニアテクノロジー	垂直	WK18-20	1800	2000	2	14	60	1070	13.0	22.83%	結晶	255	2.40	-10~40℃	検討用
		WK-10-12	1000	1200	2.5	12.5	60	300	12	24.42%					

$$\text{発電量(kWh)} = 1/2 \times \text{空気密度(kg/m}^3\text{)} \times \text{風速(m/s)}^3 \times \text{受風面積(m}^2\text{)} \times \text{パワー係数}$$

空気密度(25℃) 1.185

表 3.5-3 幌延HCD-3 孔向け機器一覧

No.	機器名称	要求性能	適合品の例示
1	ネットワークコンピュータ	・システムにおける上位コントロールユニットとしての安定性を有し、低消費電力であること。 ・複数のモニタリング計測ポイントを無線で接続し、システム構成を拡張可能であること。 ・柔軟に機能のカスタマイズが可能であること。	openATOMS(東洋電機)
2	信号変換・通信ユニット(データロガー)	・各種センサの信号変換を低消費電力で行えること。 ・遠隔モードのコントロールが可能であること。 ・計測点数の増減に柔軟に対応できること。	openATOMS(東洋電機)
3	衛星通信端末	・安定した通信を低消費電力で行えること。	NTT Docomo ワイドスターⅡ(三菱電機)
4	衛星屋外設置アンテナ	・衛星通信端末の適合品	AAD68096(三菱電機)
5	公衆回線3G/4Gデータ通信用ルータ	・システム立地地点に適合する3G/4G対応の一般汎用品	HSPA-450C(ゼネテック)
6	ネットワークカメラ	・システム立地地点の環境下で安定して作動する汎用品	BB-SWI75A(Panasonic)
7	風力発電機	・システムが必要とする電力量を確保するために必要な発電能力を有すること ・実績を有すること	WTR-504(MARLEC) 25W ローター直径510mm
8	太陽光発電機	・システムが必要とする電力量を確保するために必要な発電能力を有すること ・実績を有すること	KC-125TJ(京セラ)32W パネル寸法17×512mm
9	蓄電池	・システムが必要とする電力量を確保するために必要な蓄電能力を有すること ・実績を有すること	EB-50(GSユアサ)12V 50Ah
10	発電設備外装	・発電・蓄電設備に合わせた専用設計を行う	-
11	電装品収納箱	・電装品に合わせた専用設計を行う	-

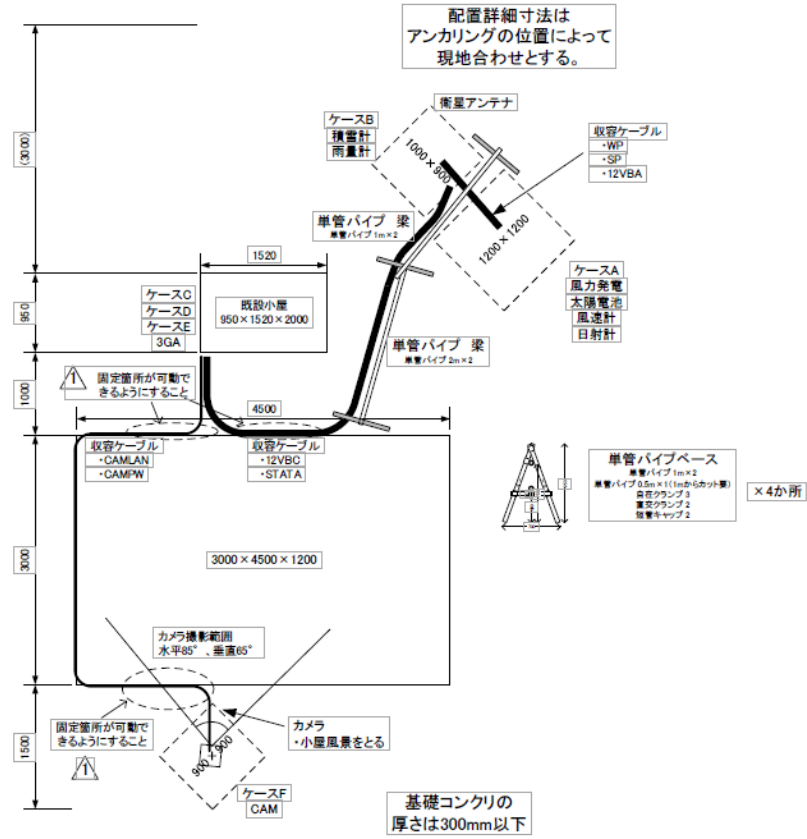


図 3.5-6 HCD-3 孔 無人計測システム機器配置計画



図 3.5-7 無人計測システム現地据付後の状況 (HCD-3 孔)

#### 4. 現地適用性検討

現地適用性評価試験の最終年度となる平成 25 年度は、HCD-3 孔で実施したサイドトラック掘削による既存孔井からの分岐掘削を主な現地適用性評価の対象とした。サイドトラック掘削により分岐掘削した新規孔井において、孔内応力試験装置による水圧破碎試験を実施するための試験区間の選定及び試験孔井の拡孔作業を行った。孔内試験装置の現地適用性評価は、透水試験・採水・イメージング装置と孔内応力試験装置について行った。このうち、透水試験・採水・イメージング装置は、平成 18 年度に測定して透水性が高い区間と判断されている箇所へ新規に開発したダブルパッカーを用いて適用性を評価することを目標とした。また、孔内応力試験装置は選定した試験区間での水圧破碎を目指した。

孔内モニタリングシステムの設置作業は、これまでに検討した一連の設置作業を HCD-3 孔に適用させて、平成 26 年度以降の長期モニタリングを実施することとした。

##### 4.1 コントロールボーリング孔内状況の確認

平成 24 年度の現地適用性評価試験の終了後より、養生期間としていた孔井内の状況確認のために、NL140 ロッドを降下、孔径検層を実施し、各種試験の実施に対して問題がないことを確認した。

###### 4.1.1 現地適用性評価試験開始前の孔内状況確認

幌延試験サイトへの乗込み後、機器関連のメンテナンスなどを実施して、試運転による動作確認を行い、準備作業として孔内状況確認作業を実施した。孔井内状況確認は、NL140 ロッド降下中の 30m 毎に試錐機で停止状態の NL140 ロッドを引揚げるために必要な初動フィード力を計測することで、孔壁との摩擦抵抗の有無を判断して行なった。孔内状況確認時は、NL140 ロッド先端に  $\phi 152\text{mm}$  に加工したコンポジットシュービットを取り付けた。

孔内状況確認作業により、以下の状況を確認した。

- ① 孔内状況確認作業においてビット荷重が減少傾向を示し、送泥作業を要した地点は 4 箇所確認され、それら区間に対して孔内洗浄を実施することで、抵抗の原因は排除できた。
- ② 送泥による洗浄作業中はマッドロギングシステムでの測定を行い、取得したパラメータにより、それぞれの区間でトルク及び回転数が改善し、孔井内状況を改善できたことを確認できた。
- ③ 孔内洗浄は、掘削長 430m～700m までの区間で孔内抵抗を確認した 4 箇所に加え、孔内閉塞用パッカプラグの設置箇所となる掘削長 751m 付近においても実施した。
- ④ 孔内状況確認作業の結果、孔内洗浄の実施により孔内抵抗は排除できたことから、リーミングを必要とする箇所は確認されず、孔内応力試験装置による現地適用試験の実施に問



題がないことを確認し孔内状況確認を終了した。

#### 4.1.2 孔径検層(キャリパー検層)

孔内モニタリングシステムを構成する部材のうち、ダブルパッカーから構成される合計3箇所のモニタリング区間がコントロールボーリング孔井内に設けられる計画であるため、ダブルパッカー拡張区間の孔壁状況(孔径)を把握する事を目的として、表 4.1-1 に示す区間で孔径(キャリパー)検層を行った。

表 4.1-1 キャリパー検層の実施区間

区間	トップ側深度 (m)	ボトム側深度 (m)	計測区間長 (m)
区間①	203.80	232.76	28.96
区間②	299.80	341.62	41.82
区間③	413.80	450.08	36.28
追加区間A	353.95	391.80	37.85
追加区間B	230.80	300.00	69.20

1) 区間①：掘削長 204.80m～掘削長 232.76m 間 (図 4.1-1)

キャリパー-X は 156.12mm～202.20mm、キャリパー-Y は 157.63mm～193.17mm の範囲であり、掘削孔径  $\phi$  152mm に対して 1.03～1.33 倍まで孔径拡大していた。

2) 区間②：掘削長 299.80m～掘削長 341.62m 間 (図 4.1-2)

キャリパー-X は 148.28mm～227.16mm、キャリパー-Y は 156.84mm～252.76mm の範囲であり、掘削孔径  $\phi$  152mm に対して最大 1.66 倍まで孔径が拡大していた。

3) 区間③：掘削長 413.80m～掘削長 450.08m 間 (図 4.1-3)

キャリパー-X は 149.84mm～206.56mm、キャリパー-Y は 164.78mm～229.47mm の範囲であり、掘削孔径  $\phi$  152mm に対して最大 1.51 倍まで孔径が拡大していた。

4) 追加区間 A：掘削長 353.95m～掘削長 391.80m 間 (図 4.1-4)

キャリパー-X は 164.09mm～256.54mm、キャリパー-Y は 144.04mm～257.88mm の範囲であり、掘削孔径  $\phi$  152mm に対して最大 1.70 倍まで孔径が拡大していた。検層結果では、キャリパー-Y に対してキャリパー-X の値が 1.2 倍程度大きく計測されていることから、掘削孔径が楕円形の形状をしていることが考えられた。

5) 追加区間 B：掘削長 230.80m～掘削長 300.00m 間 (図 4.1-5)

キャリパー-X は 159.63mm～291.20mm、キャリパー-Y は 155.70mm～309.18mm の範囲であり、掘削孔径  $\phi$  152mm に対して最大 2.03 倍まで孔径が拡大していた。

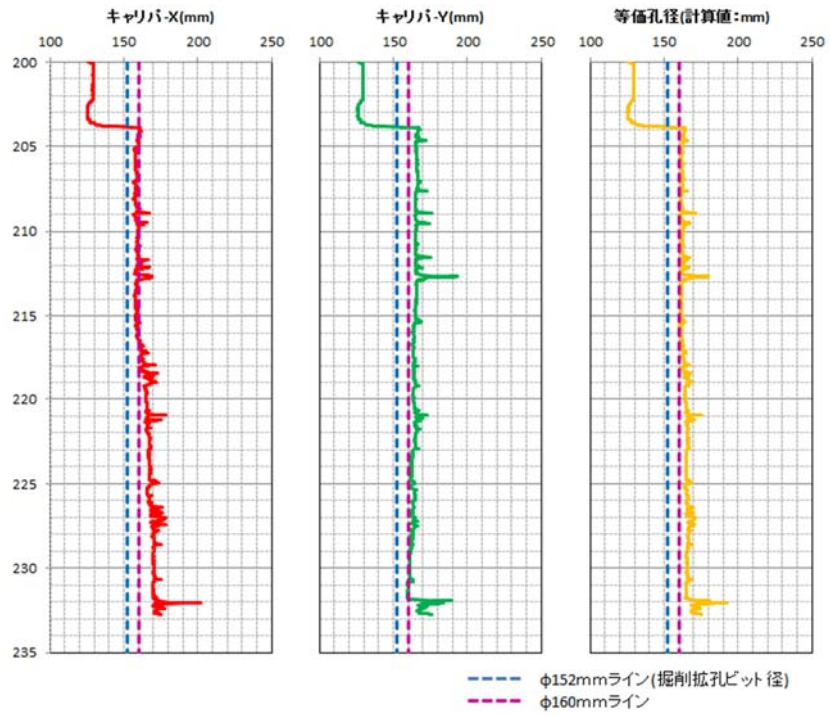


図 4.1-1 キャリパー検層結果(区間①)

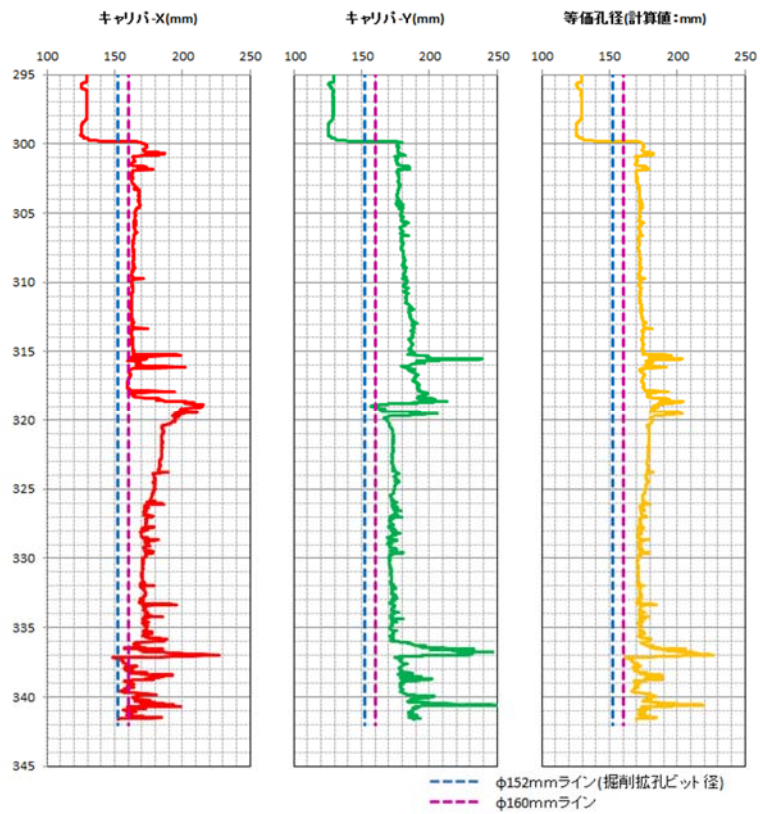


図 4.1-2 キャリパー検層結果(区間②)

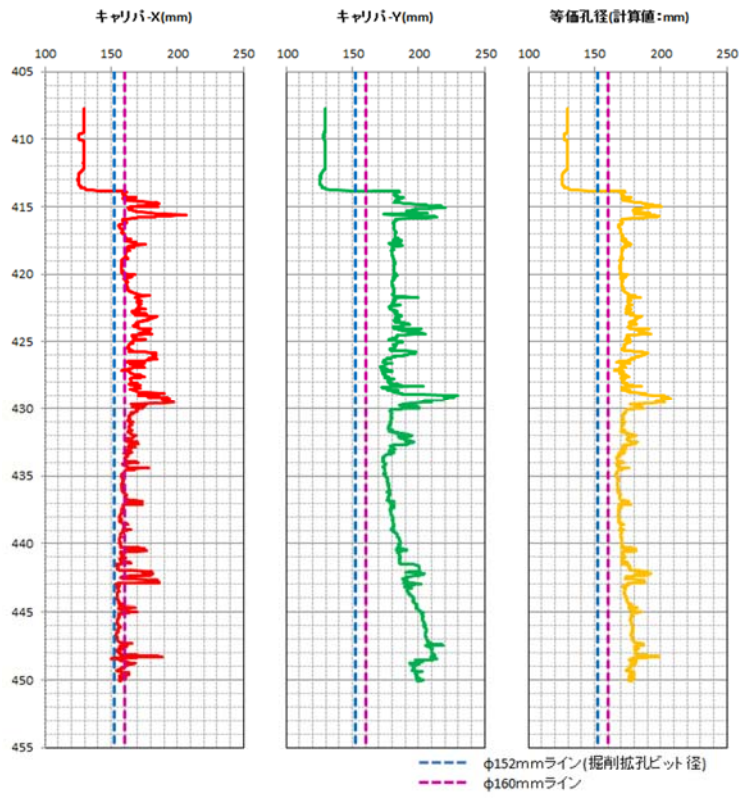


図 4.1-3 キャリパー検層結果(区間③)

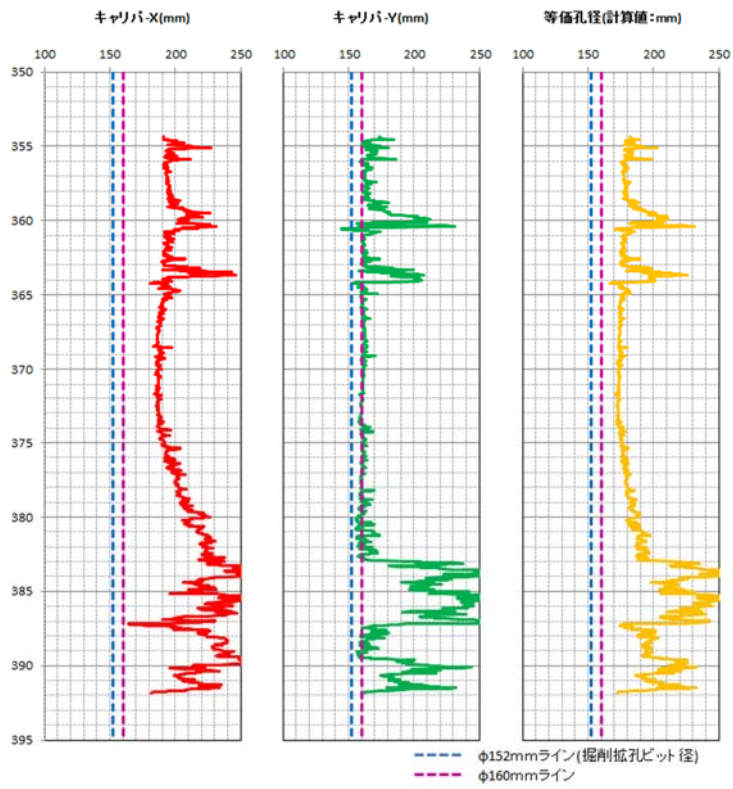


図 4.1-4 キャリパー検層結果(追加区間 A)

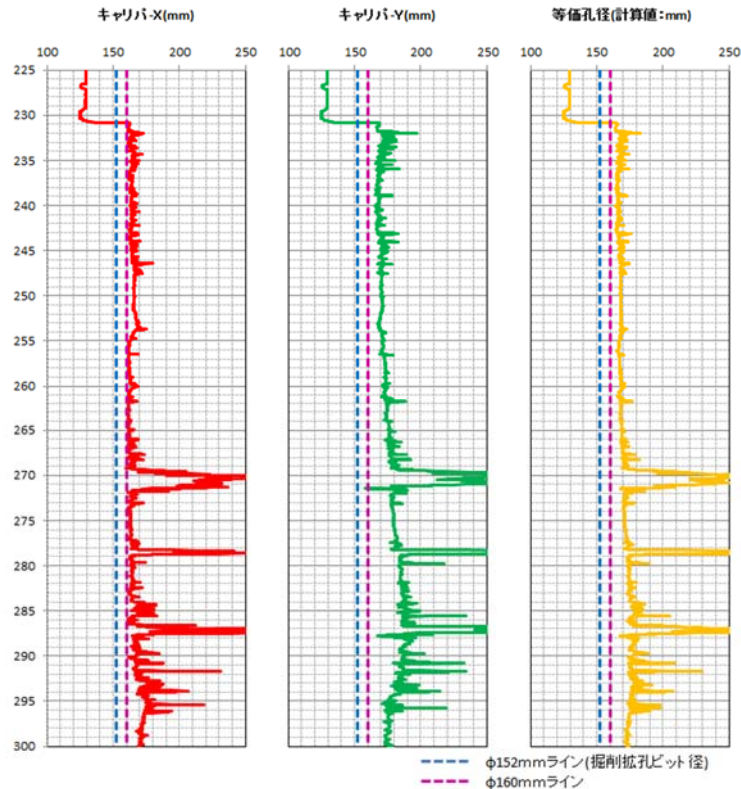


図 4.1-5 キャリパー検層結果(追加区間 B)

#### 4.2 サイドトラック掘削

サイドトラック掘削技術の現地適用性評価試験として、既存の掘削装置や地上設備を使用して、平成 24 年度までに掘削済みの既存孔井の一部区間を埋め戻した後に、実際に分岐した新規孔井を掘削した。サイドトラックまで下記の準備作業を行った。

- 1) 既存孔閉塞用パッカプラグの設置
- 2) セメントミルク充填材注入
- 3) 硬化したセメント頂部位置の確認
- 4) 端面成形作業

サイドトラック掘削は平成 25 年 12 月 1 日～12 月 6 日の期間に、掘削長 648.00m～掘削長 663.65m の間で実施した。掘削区間別のコアリング、ノンコアリング掘削別の内訳は、以下のとおりとなった。

- ・ 区間 1(コアリング掘削) : 掘削長 648.00m～掘削長 653.80m
- ・ 区間 2(ノンコアリング掘削) : 掘削長 653.80m～掘削長 656.00m
- ・ 区間 3(コアリング掘削) : 掘削長 656.00m～掘削長 663.65m

各区間の掘削作業状況により得られた成果は以下のとおりである。

##### 区間 1

- ① 最初のコアリング実施区間である掘削長 648.00m～掘削長 651.00m で採取したボーリン

グコアではセメントは確認できず、全て稚内層の泥岩コアが回収された。

- ② コアビットのみで掘削を行っている掘削長 648.00m～掘削長 651.60m 間までと比べ、掘削長 651.60m 以降ではビット荷重とトルクの値が大きくなり、方位と傾斜のばらつき具合も、同掘削長以深では安定したため、既存孔井からの分岐掘削が行えていると判断した。

#### 区間 2

- ① 掘削状況では、想定した掘削能率を得ることができず、掘削速度がコアリング掘削で得られた 0.5～0.6m/h より悪化したため、ノンコアリング掘削作業は掘削長 656.00m 地点で中止とした。
- ② 当該区間の掘削では、ビット荷重が 500kgf 程度増加し、孔井の傾斜は WL-MWD が新規掘削した分岐孔井に近づいた掘削長 655.4m 付近より 78.8° 前後を維持したことから、サイドトラック掘削が沿角で掘削されていると判断した。

#### 区間 3

- ① 掘削長 656.0m 地点からコアリング掘削を再開し、採取したボーリングコアの割れ目の確認を通じて、孔内応力試験装置による水圧破碎試験実施に資する情報提供を行った。
- ② 掘削状況は、ダウンホールモータのベント角度は 0.39° とし、掘削時のツールフェイス角度を 180° ～195° の範囲となるように設定した。
- ③ 掘削長 659.00m～掘削長 662.0m 間において、ビット荷重が高い値を示し、掘進速度も前後区間と比較して 0.1～0.2m/h 程度低下したことから、コアビットに問題が生じている可能性が想定された。このため、掘削ツールを回収してコアビットの点検を行った結果、ビットを構成するダイヤモンドのうち、外周部のチップが欠けている箇所を複数箇所確認したため、コアビットを交換した結果、掘削状況は改善した。
- ④ 孔井傾斜と方位の値については、ほぼ同じ値を維持して掘削できたことから、サイドトラック掘削による沿角掘削が得られていると判断した。

#### サイドトラック軌跡実績

- ① WL-MWD の計測結果では、サイドトラック掘削を実施した掘削長 648.0m～掘削長 663.6m の区間で、ほぼ沿角の傾斜角度で分岐孔井を掘削した。
- ② 既存孔井との乖離距離は、掘削長 651.0m 地点で掘削孔径程度 ( $\phi$  152mm) の乖離距離となり、掘削長 663.6m 地点で 0.90m と孔径の約 6 倍の乖離距離となった。
- ③ ジャイロ計測は掘削長 654.6m までを測定し、WL-MWD で得た傾斜角度同様に、ほぼ沿角での掘削ができていたことが確認できた。乖離距離は掘削長 654.6m 地点で 0.28m であった。

### 4.3 孔内透水試験・採水

上幌延現地適用サイトの HCD-3 において透水試験・採水・イメージング装置を用いた原位置試験を実施し、適用性の検討を行った。試験区間として、掘進長 208.5~209.7m を対象とした。改良製作したダブルパッカーを適用して水理試験を行なった結果、圧力測定データからパッカーによる止水性を確認し、ダブルパッカーの適用性を確認した。

水理試験の結果、間隙水圧は平成 18 年度測定時よりも 5m 程度高く、ほぼ静水圧であった。また、透水試験の結果、平成 18 年度測定時よりも透水係数が 100 分の 1 程度となっていた。これらのことから、7 年間で割れ目の透水性が低下していることが明らかとなった。

総揚水量 73L の揚水を実施し、デッドボリュームの約 4 倍揚水した後採水を行なった。採水中の水質モニタリングの結果から、平成 18 年度測定時と同等の水質であると判断された。これにより、ケミカルユニットの適用性を確認した。

### 4.4 孔内応力測定

#### 4.4.1 幌延・横須賀地区における現地適用性試験

幌延地区では孔内応力試験装置と同試験装置専用のアーマードケーブルを接続して、地上部計測装置と孔内計測装置間での通信確認を行った。表 4.4-1 に地上通信機能検証項目を示す。

表 4.4-1 地上通信機能検証項目

確認項目	内容	結果
通信	地上部 PC から孔内計測機器の制御、RS485-光ファイバー-RS485 通信、 圧力、方位、傾斜、ポンプモータの作動	通信、動作 OK
カメラ	孔内カメラの画像、LED 点灯	確認 OK
AE	AE センサー波形	確認 OK

横須賀地区での現地適用性試験ではラッチシステムの機能、計測と通信及び耐圧機能の検証をおこなった。また、水圧破碎試験は 2 つの異なる孔内水圧条件(低水圧(0.5MPa)と幌延 450m 深度相当(4.5MPa))で実施した。

#### 4.4.2 現地適用性試験結果

幌延地区では現地の地上部で試験装置を組み立て、応力専用アーマードケーブルに接続して、通信の確認を行い、地上部計測機器と通信と計測制御が可能であることを確認した。

横須賀地区における孔内応力試験装置の現地適用性試験は、試験孔内に水圧を掛けて実施した。現地適用性試験の各検証項目については低水圧 0.5MPa では典型的な水圧破碎データの取得を行い、幌延

深度相当の 4.5MPa では高圧下での装置動作を検証した。水圧破碎試験の試験深度は、注水区間深度が 5.75m~6.5m で、試験前後の型どり区間深度は 6.0m~6.5m である。また、各検証項目について水圧を加圧した状態で試験を行った。その結果、水圧の掛かった状態で、孔内応力試験装置はポンプを作動させて、注水加圧し圧力、流量を計測することが出来、水圧破碎試験装置として有効に機能することを確認した。表 4.4-2 に現地適用性試験の検証結果一覧を示す。各試験の結果は下記のとおりである。

表 4.4-2 現地適用性試験の検証結果一覧

現地適用性試験の検証項目	2012年度 我孫子 (地上)	幌延 約500m	横須賀 (浅部)	2013年度 我孫子等 (地上)	幌延 約400m	横須賀 水圧下
<b>■コントロールボーリングシステムへの適用</b>						
槽での組立～立上げ～降下開始		○			○	
鋼管曲率への適用性		○		○		
水平孔での送込み機能	○	○		○		
ラッチ機能	△		○	○		○
<b>■計測と通信</b>						
孔内応力試験装置～地上間の通信・制御		○	○		○ 地上	○
傾斜と軸回転の計測機能		○	○		○ 地上	○
水圧破碎の圧力計測機能		○	○		○ 地上	○
水圧破碎の流量計測機能			○		○ 地上	○
バッカーの圧力計測機能			○		○ 地上	○
亀裂計測機能-AE			○		○ 地上	○
亀裂計測機能-孔内カメラ			○		○ 地上	○
<b>■耐圧機能</b>						
耐圧機能-各ユニット間		○	○	○		○
耐圧機能-バッカー部		○	○	○		○
耐圧機能-ラッチユニット部			○	○	× (破損箇所)	○
<b>■水圧破碎試験</b>						
バッカー加圧・除圧			○			○
加圧送水			○			○
亀裂型どり			○	○		○
水圧破碎データの評価(Pb,Pr,Ps)			○			○

a. ラッチ機能

先端シューを付けた NL140 ロッドを試験孔に挿入し、試験装置を NL140 ロッドのラッチ溝に固定させて、試験深度まで送り込んだ。そして、孔内に送水して水圧をかけた。孔内加圧したが、試験装置は動かずに静止した状態を保持した。この結果より高圧下でもラッチ固定が機能していることを確認した。ラッチ解除については、各試験後に、試験装置にバンドを掛けてこのバンドを引っ張り装置が引き出されたことでラッチ解除が機能していることを確認した。

b. 孔内応力試験装置～地上間の通信・制御

試験孔内への加圧前から試験装置と地上部 PC との間で通信を開始して、装置を試験深度まで押し込み、孔内水圧を 4.5MPa まで加圧した後、通信遮断やデータの欠如など無く計測できた。試験前型どり試験、水圧破碎試験、試験後型どり試験で各パラメータ(圧力、流量、方位、傾斜等)の計測とポンプの制御が可能であり試験を実施できたことから高圧下でも通信・制御が機能していることを確認した。

c. 傾斜と軸回転の計測機能

試験深度到達から継続して孔内加圧後まで傾斜、軸回転が正常に計測出来ていて、試験前型

どりの水圧破碎試験、試験後型どりでも傾斜計の計測値は $0^{\circ}$ を示していることで高圧下でも正常に機能していることを確認した。

d. 水圧破碎の圧力計測機能

孔内加圧後に注水区間計測の圧力センサーが加圧した孔内圧と同様の値を示した。また、水圧破碎試験では、注水圧は常に孔内水圧以上の値を示し、注水開始で注水圧が上昇し、亀裂を作成することができた。注水圧はブレークダウン時に約7MPaと妥当な値を示し、圧力低下時も孔内圧を下回る値は示さなかったため圧力計測機能は高圧下でも機能していることを確認した。

e. 水圧破碎の流量計測機能

事前にポンプモータ用電源電圧の設定電圧でポンプモータを駆動させて吐出した流量の計測値と、試験時の同電圧での流量値との計測値が同様の値を示しているため高圧下で機能することを確認した。

f. パッカーの圧力計測機能

試験装置を試験深度に送り込み、孔内加圧することで、パッカー圧も同様に上昇することを確認した。そして、水圧破碎試験では、注水区間の圧力上昇に伴いパッカー圧も上昇すること、そしてブレークダウンを起こして亀裂が作成できたため高圧下でパッカーの圧力を計測する機能があることを確認した。

g. 亀裂計測機能-AE

水圧破碎試験時に岩盤からの有意なAEは観測されなかったが、注水時の水の流れに伴うと思われる波形を計測した。試験後の試験装置回収後にAEセンサー部を打撃してAE波形が計測できることから、AE計測は正常に機能していたため、高圧下で機能していることを確認した。

h. 亀裂計測機能-孔内カメラ

セメント被覆孔での水圧破碎試験では、岩盤と比較して亀裂開口幅が小さかったためか、モニター画面で亀裂が観察されなかった。

試験後の試験装置回収後に、孔外でカメラの映像を確認できたため高圧下でもカメラ機能自体は有効に機能していることを確認した。

i. 耐圧機能(各ユニット間、パッカ部、ラッチユニット)

孔内加圧4.5MPaの状況で試験を実施し、その際通信の遮断無く計測が可能であった。試験装置回収後に装置内に水漏れが無いことを確認し、高圧下で耐圧性を有することを確認した。

j. パッカー加圧・除圧

試験孔内に試験装置を挿入し試験深度に送り込んだ後に、孔内加圧の状況でパッカーを加圧し、パッカー圧の初期値が孔内圧相当であることを確認した。それから、パッカポンプを作動させてパッカー圧が上昇することを確認した。また、型どり試験で型どり熱収縮ゴムチューブの孔



壁面状況の痕及び除圧後に装置が回収できることで除圧が機能していることを確認した。以上のことから高圧下でパッカーの加圧・除圧が可能であることを確認した。

#### k. 加圧送水

試験孔内加圧状況下で注水圧の値が孔内加圧未満の値にならずに、注水ポンプを作動させると圧力が上昇することから、高圧下で加圧送水が可能であることを確認した。

#### l. 亀裂型どり

試験孔内加圧状況下で水圧破碎試験後の亀裂型どりを実施して、型どり熱収縮ゴムチューブに亀裂痕が読みとれたので、高圧下で亀裂型どりが可能であることを確認した。

#### m. 水圧破碎データの評価 (Pb、Pr、Ps)

試験孔内加圧状況下で、水圧破碎を行い、圧力-時間曲線から、ブレイクダウンプレッシャー (Pb)、リオープンングプレッシャー (Pr)、シャットインプレッシャー (Ps) が読みとることが出来た。なお、この読みとりデータを用いて模擬的に2次元応力を評価した。

### 4.5 物理探査技術

平成 22 年度、23 年度及び 25 年度に取得したトモグラフィデータを用いて、HCD-3 孔井周辺の P 波速度構造を求めた。またその速度構造を用いて、平成 17 年度に取得した反射法データ Line1 の再解析を行った。MDRS 処理の適用により、既存処理とくらべて、高精度でより地質解釈が容易な反射断面を得ることができた。平成 25 年度まで実施した解析作業をとおして、コントロールボーリング孔井内の弾性波トモグラフィ調査の一連の実施手順ならびに解析手順を 4.5.1 及び 4.5.2 のとおりとまとめた。

#### 4.5.1 孔井内トモグラフィの実施手順

孔井内トモグラフィは(1)から(3)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) ハイドロフォンアレイツールとロガーの接続

図 4.5-4 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ィンチドラムに巻かれ、ウィ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、ウィ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) ハイドロフォンアレイツールの孔内挿入

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。

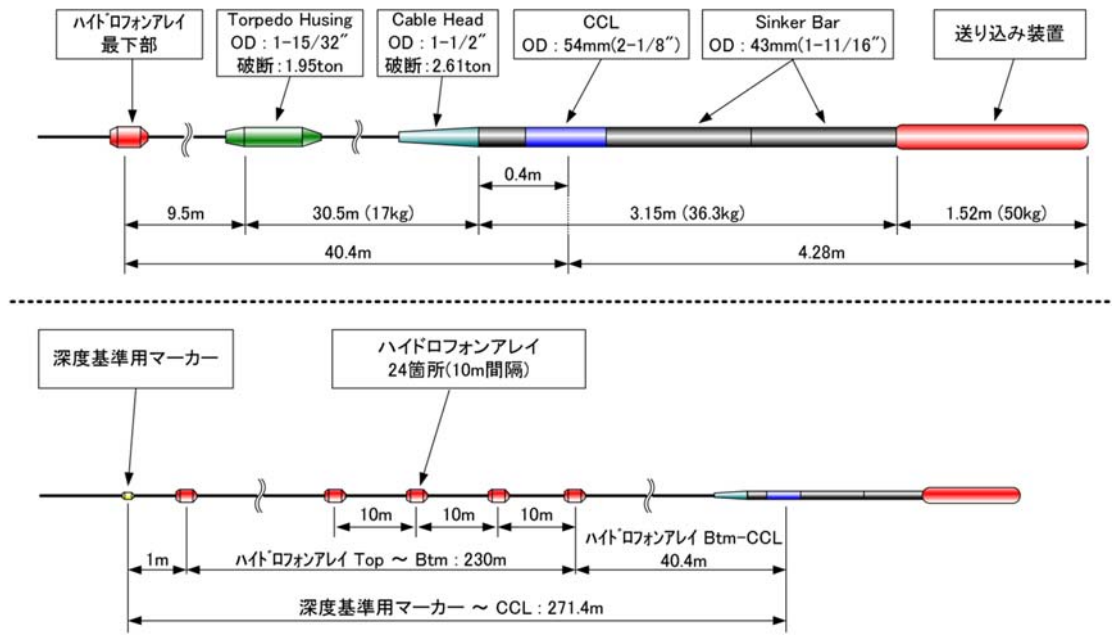
図 4.5-5 に HCD-3 孔を用いて実施した試験時におけるリグアップ装置の配置概要図を示す。ハイドロフォンアレイケーブルの先端は、上下滑車を通して孔口付近まで導かれる。孔内ツールは長尺物のため一気に吊り上げて孔内に挿入することができないことから、構成に応じて適宜孔口部で接続して孔内に送り込む。ハイドロフォンアレイツールを安定して降下させるため、ツール先端部の挙動を CCL (図 4.5-2 (a) に示す編成の場合) あるいは WL-MWD (図 4.5-2 (b) に示す編成の場合) で確認しながら孔内へ挿入する。



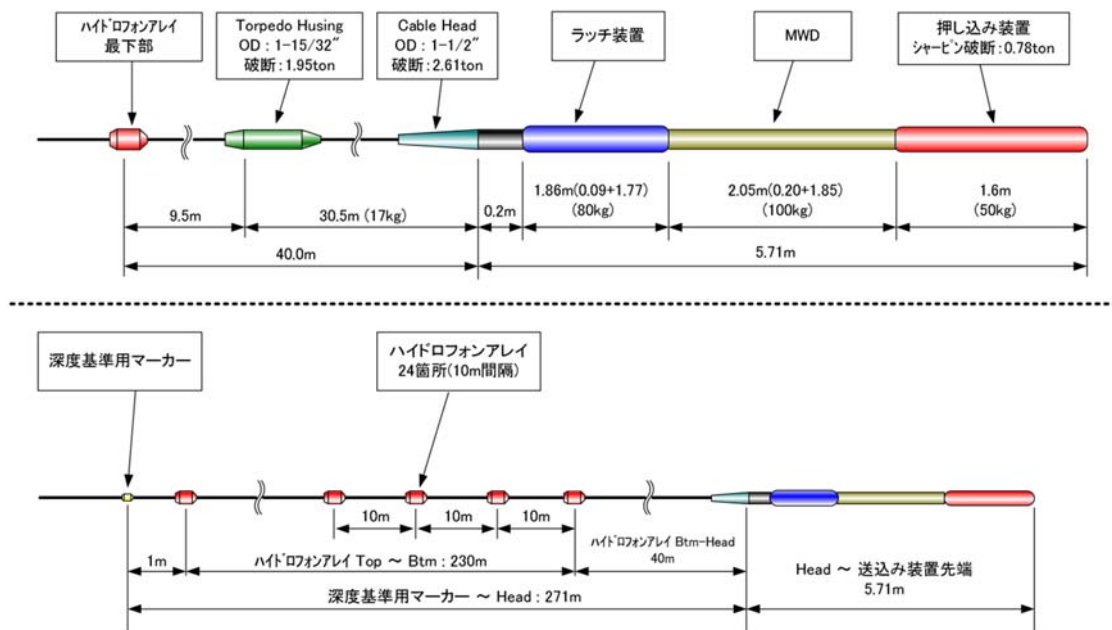
図 4.5-1 中型バイブレータ震源

表 4.5-1 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 / ダウンスウィープ、ノニアスウィープ 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 4.5-2 ハイドロフォンアレイツールの構成図

表 4.5-2 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 4.5-3 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

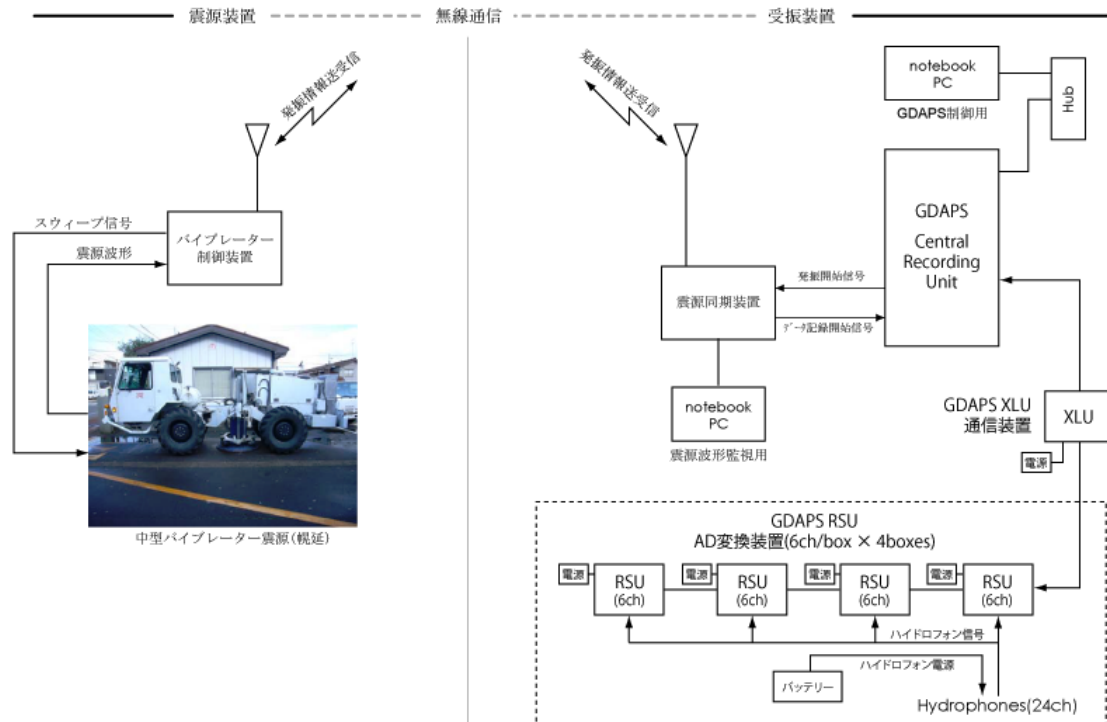


図 4.5-3 データ取得機器の接続概要図

(3) ハイドロフォンアレイとパイプレータ震源の組み合わせによるデータ取得

(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、地上部からパイプ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 4.5-6 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 4.5-2（b））、区間 3 は CCL を接続した状態（図 4.5-2（a））でそれぞれ計測した。表 4.5-4 に発振パラメーター、表 4.5-5 に記録パラメーターを示す。

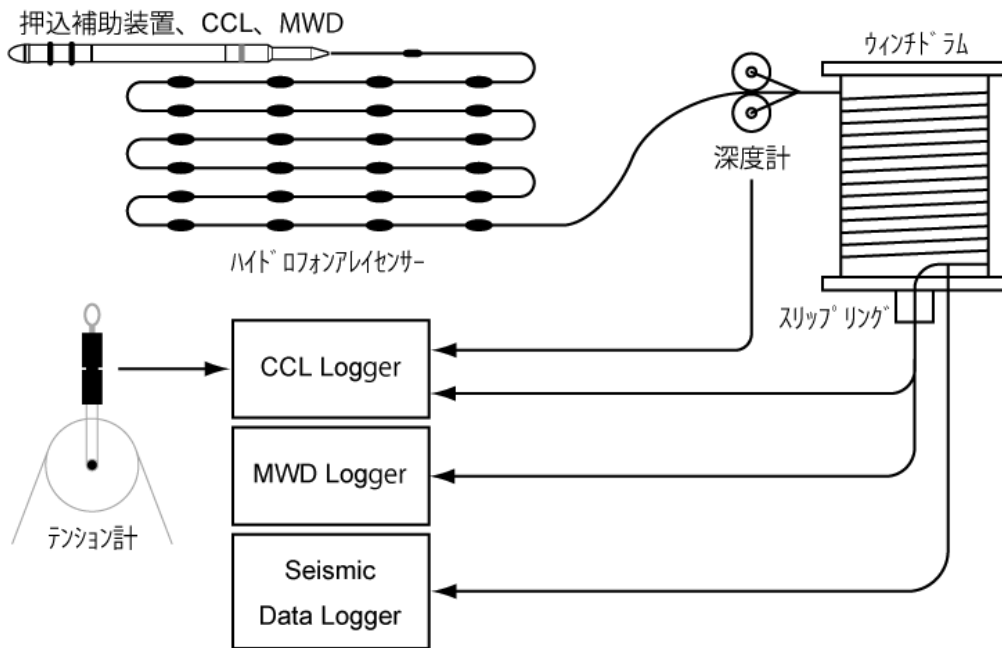


図 4.5-4 ハイドロフォンアレイツールとデータロガーとの接続図

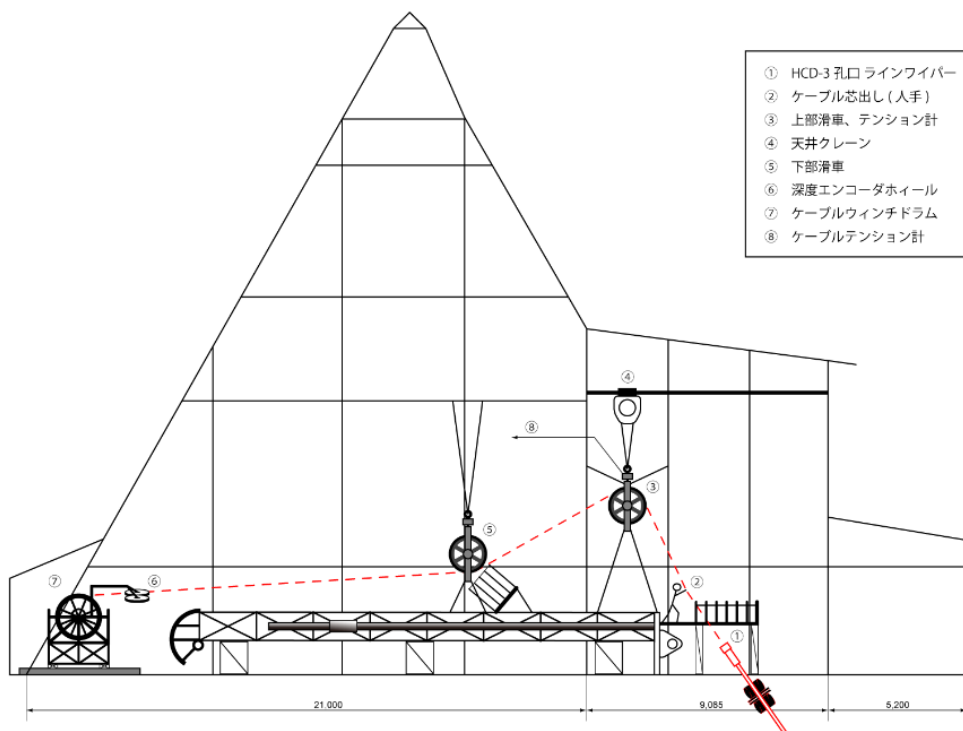


図 4.5-5 リグアップ装置の配置概要図

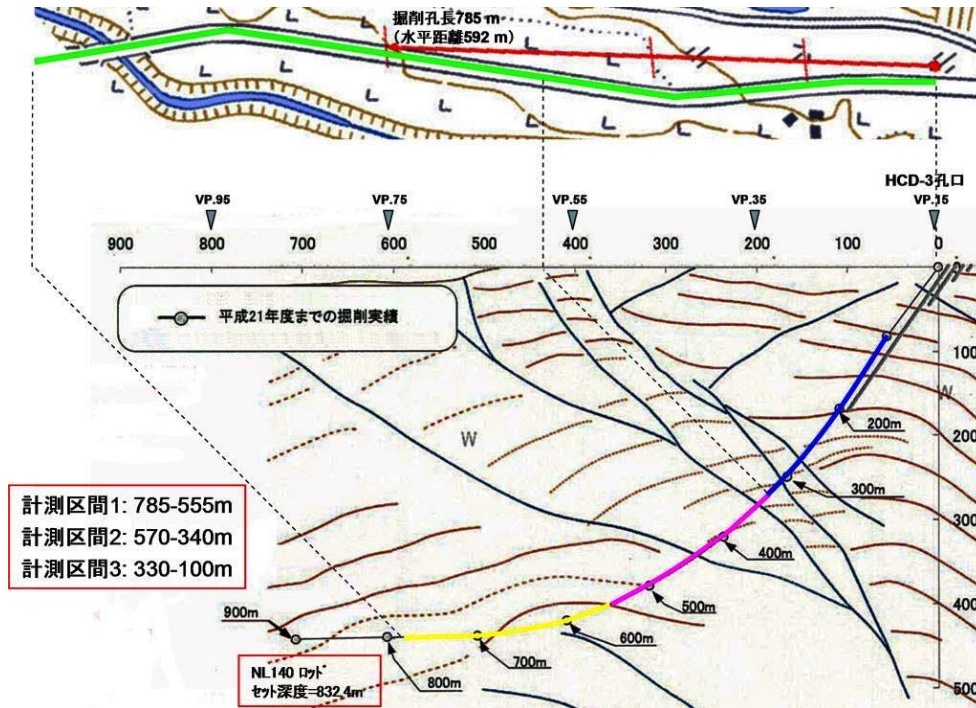


図 4.5-6 平成 23 年度データ取得試験における地表発振点及び受振点の配置図

表 4.5-4 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	リニアアアップスイープ

表 4.5-5 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

#### 4.5.2 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

図 4.5-7 にデータ解析の流れを示す。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。ここで、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。

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 4.5-8 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 (

(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 4.5-9)。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、解析に用いた。発受振点の位置を図 4.5-10 に、得られた取得波形の例を図 4.5-11 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 4.5-12 に示す。

(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 4.5-6 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 4.5-13 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 4.5-14) 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 4.5-15 に示す。

次に、地表—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 4.5-16 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 4.5-17 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 4.5-16) に対する更新量（変化した割合）を図 4.5-18 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)<sup>8)</sup>、<sup>9)</sup>、<sup>10)</sup> を改良した手法である MDRS 法 (Multi-Dip Reflection Surface method; 青木ほか, 2010)<sup>11)</sup> 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 4.5-19)。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図 4.5-20 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 4.5-17) 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 +400msec/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 4.5-21 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 4.5-22 に示す。既存処理による断面 (図 4.5-21) に対して、今回実施した処理による断面 (図 4.5-22) 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。

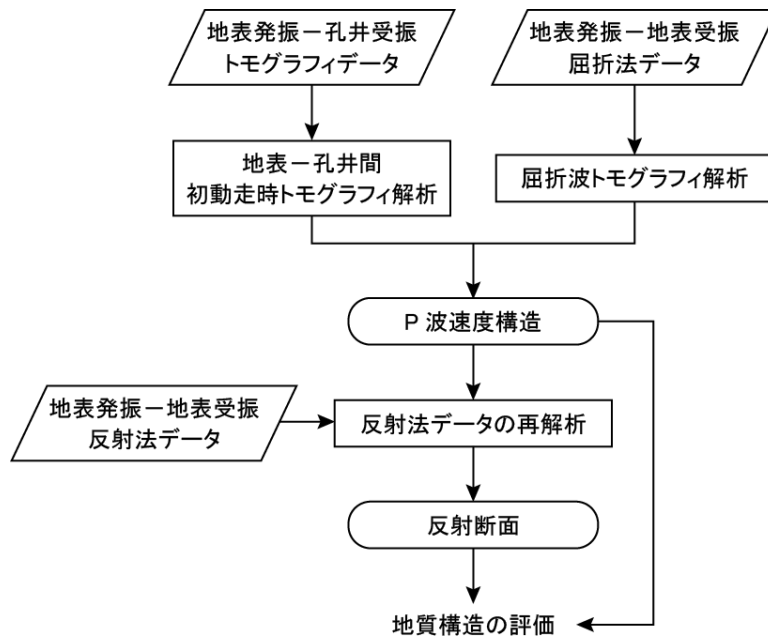
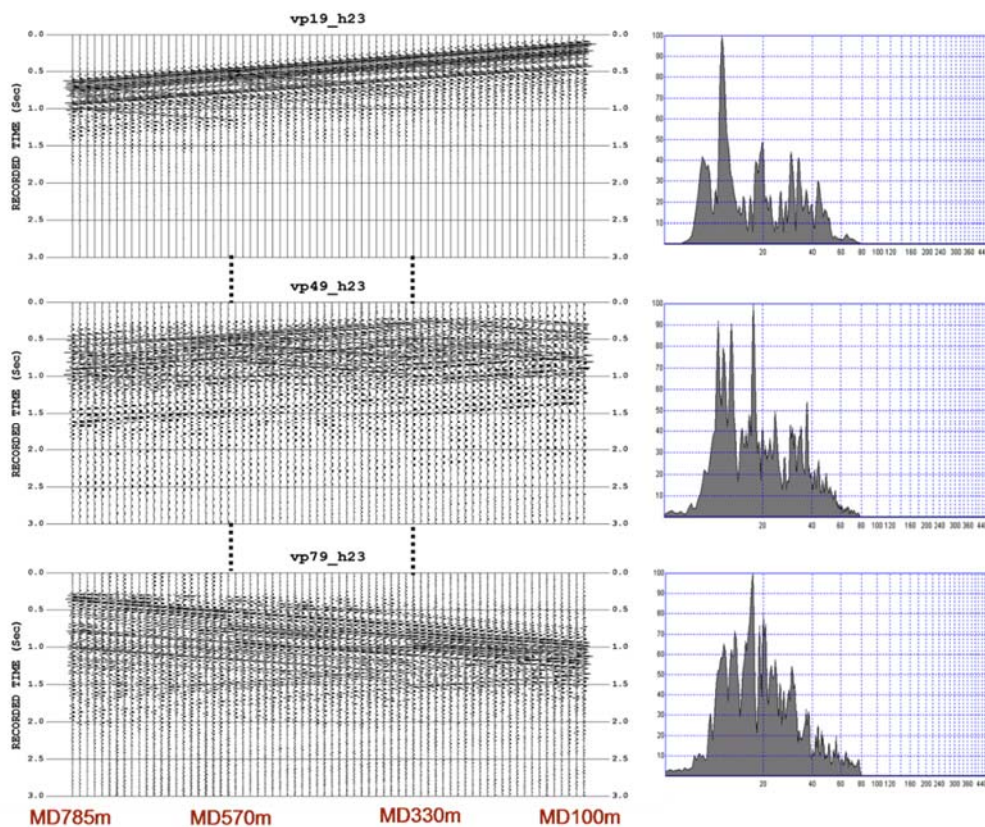
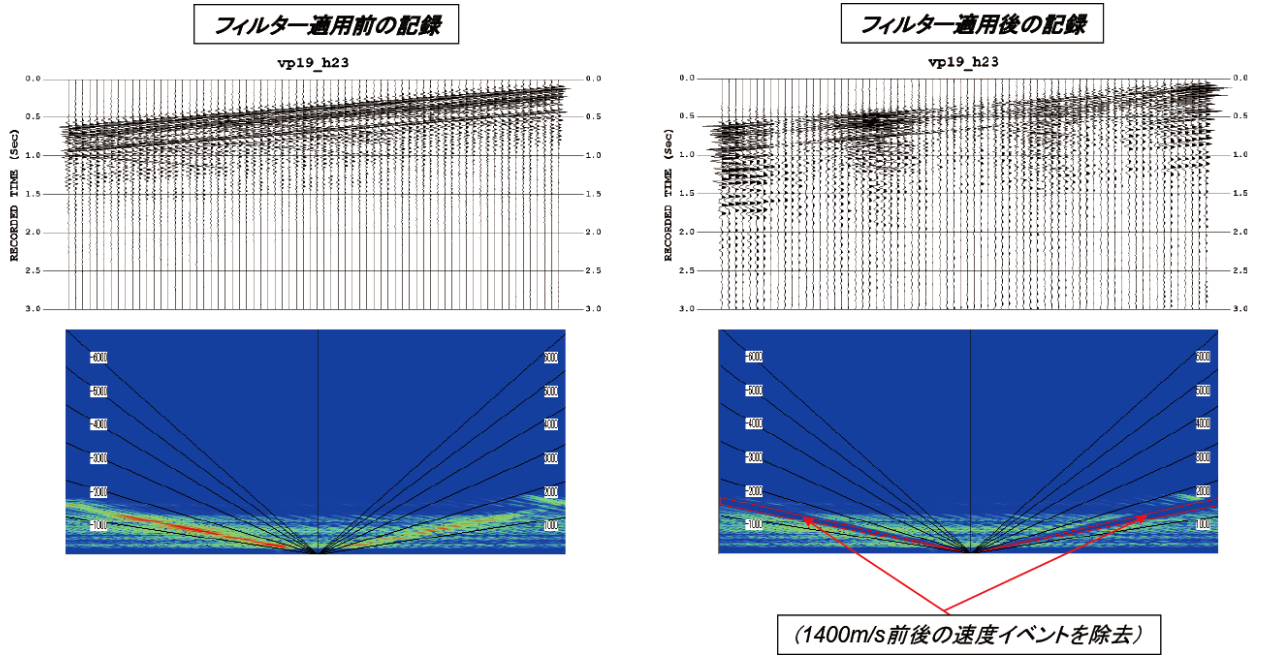


図 4.5-7 データ解析の流れ



(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 4.5-6 に示している)

図 4.5-8 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



(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 4.5-9 F-K フィルター適用前後の発振記録例

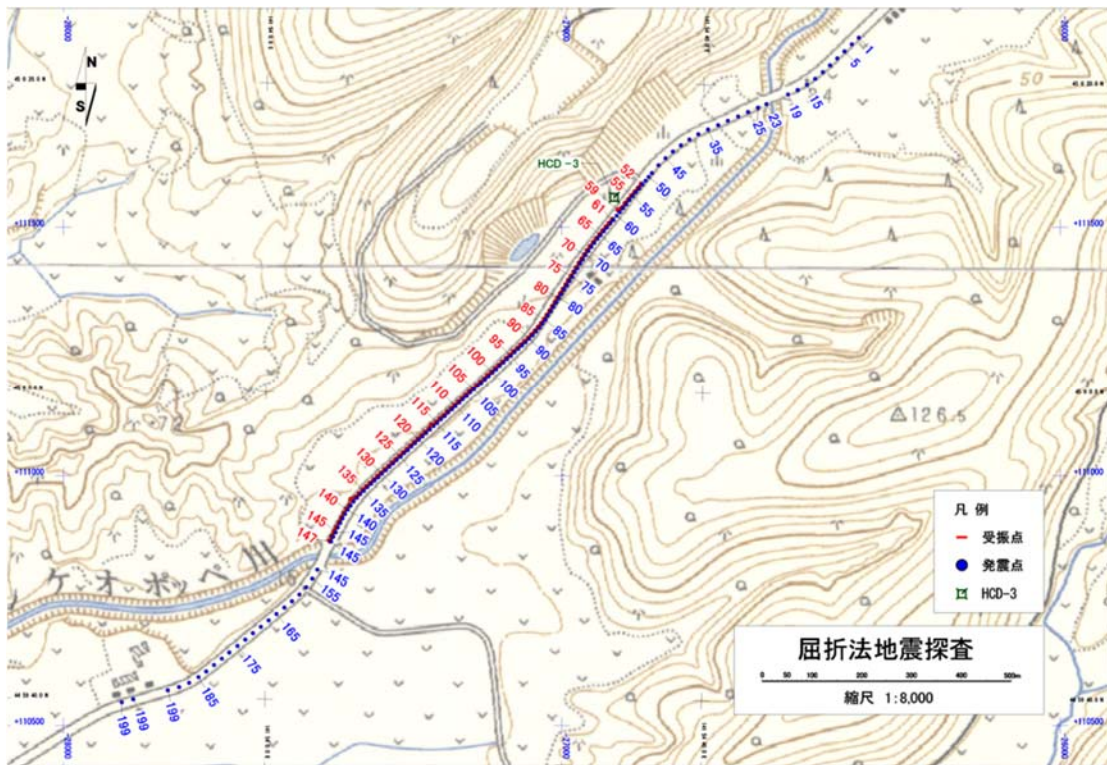
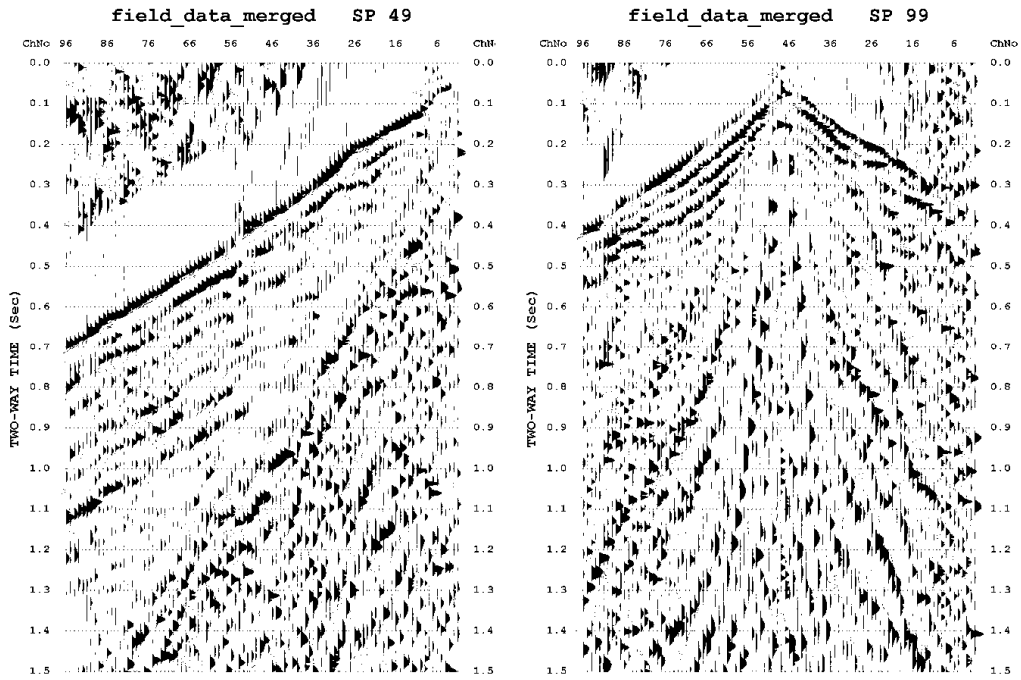
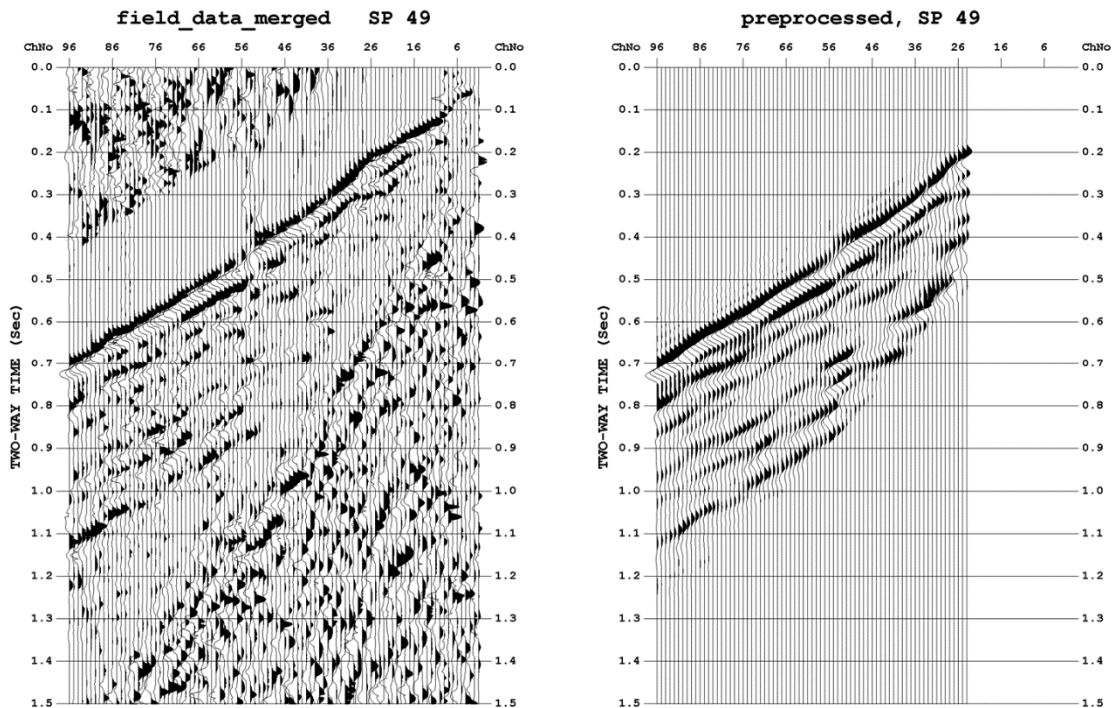


図 4.5-10 屈折波データ取得試験における発受振点の位置図



(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 4.5-10 に示している)

図 4.5-11 屈折波データ取得試験における取得波形の例



(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)

図 4.5-12 屈折波データ取得波形に対する前処理後の記録例

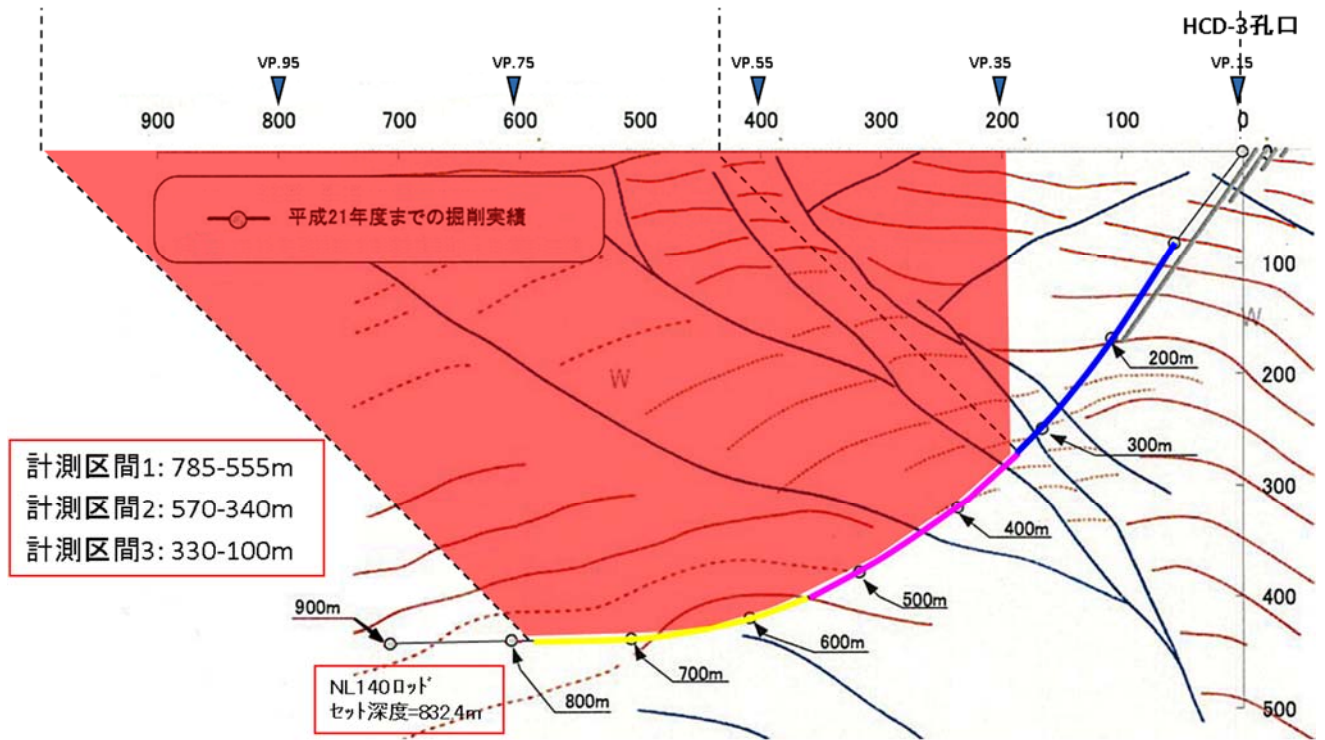


図 4.5-13 P波初動走時トモグラフィ解析に用いたデータ取得範囲

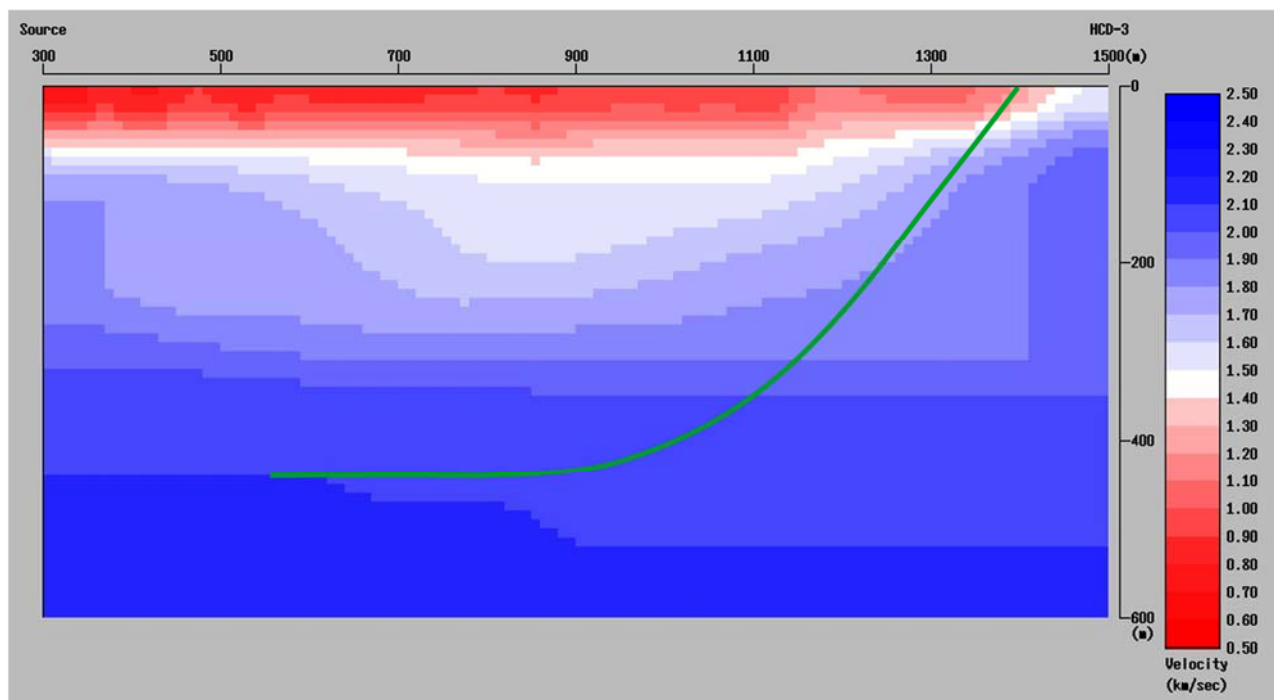
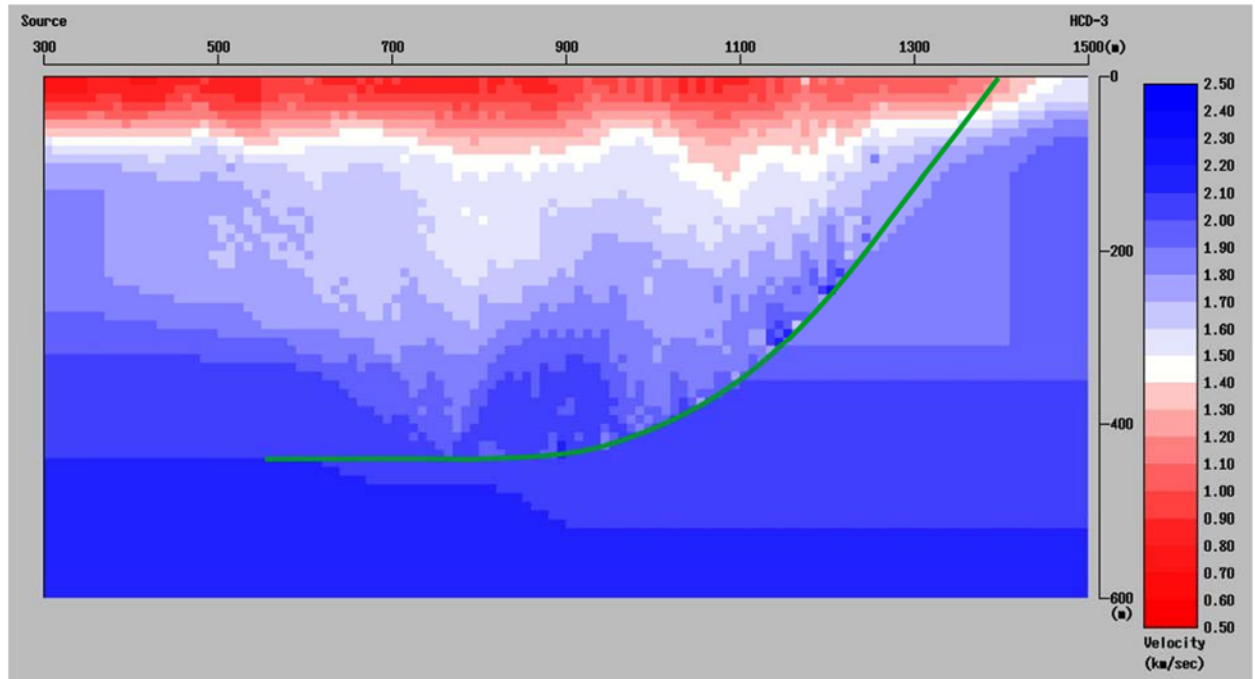
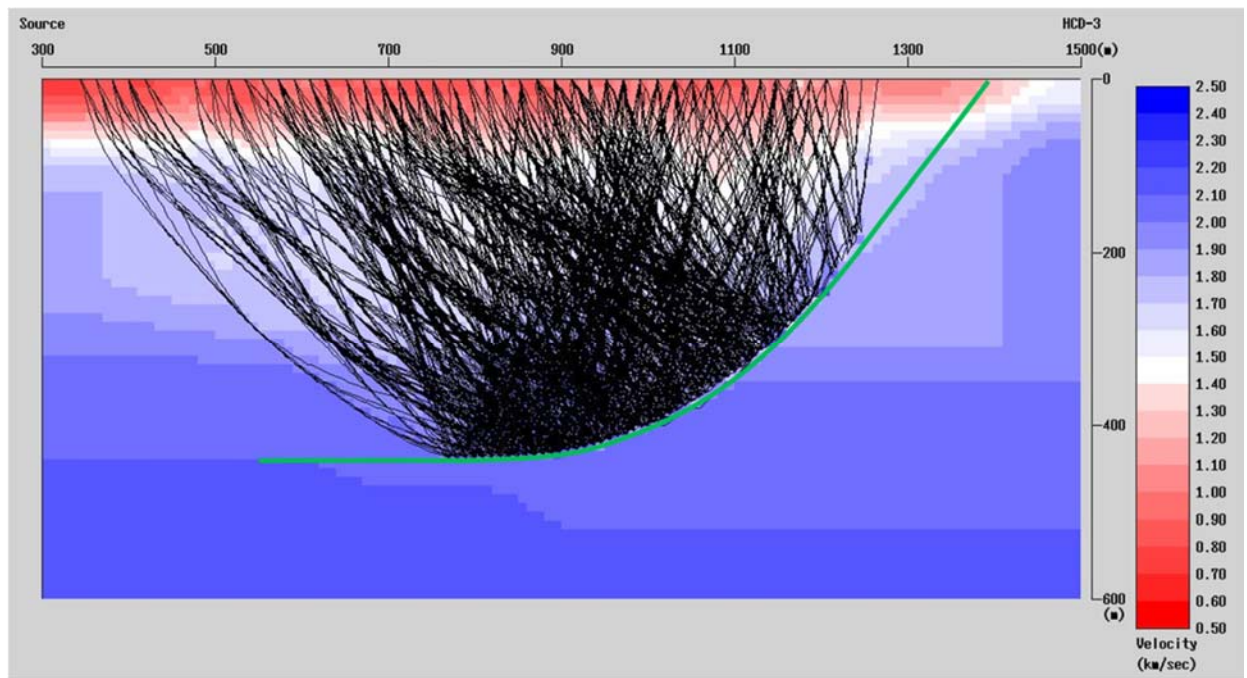


図 4.5-14 P波初動走時トモグラフィ解析における初期速度構造



(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 4.5-15 P波初動走時トモグラフィ解析の結果

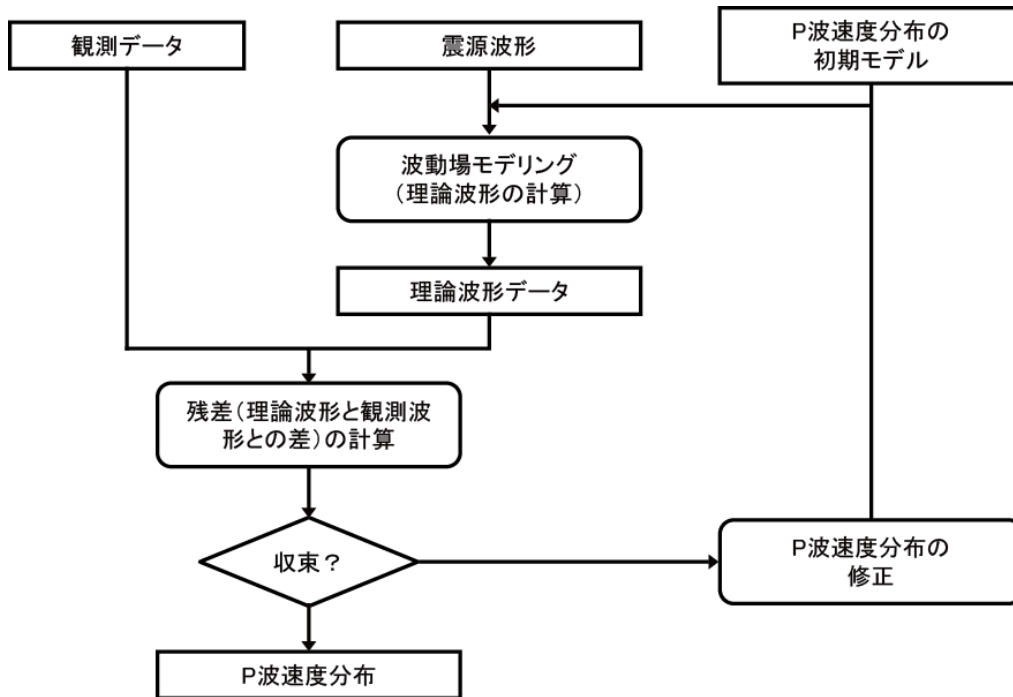


図 4.5-16 フルウェーブインバージョンの流れ

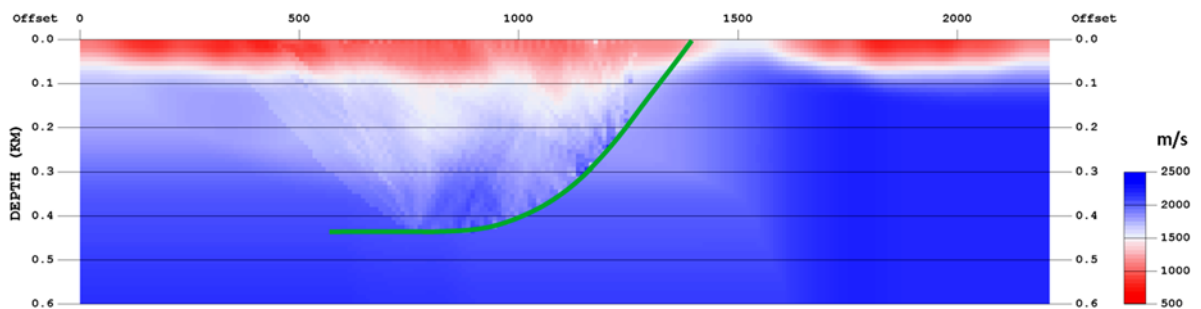


図 4.5-17 屈折波トモグラフィ解析により更新されたP波速度構造

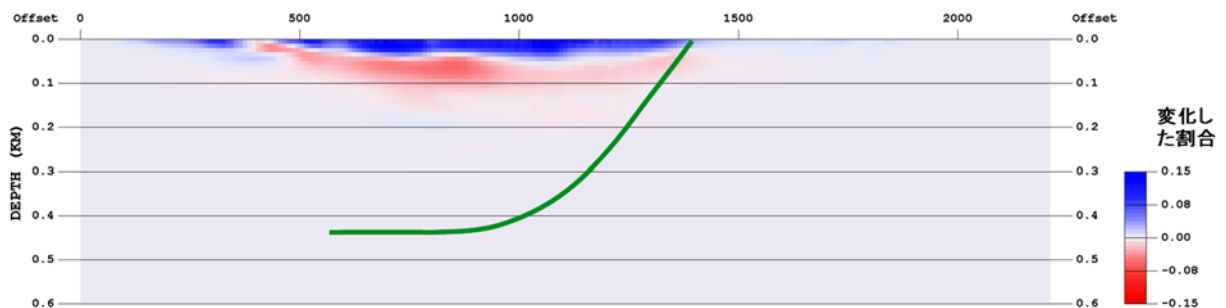


図 4.5-18 屈折波トモグラフィ解析の初期値に対する更新量 (変化した割合)



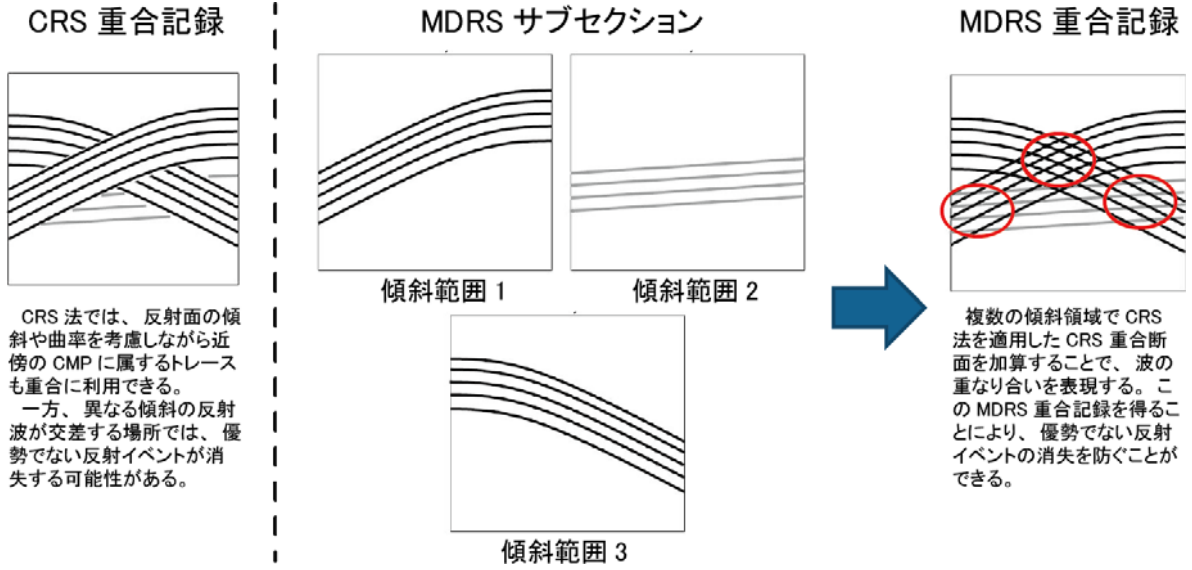
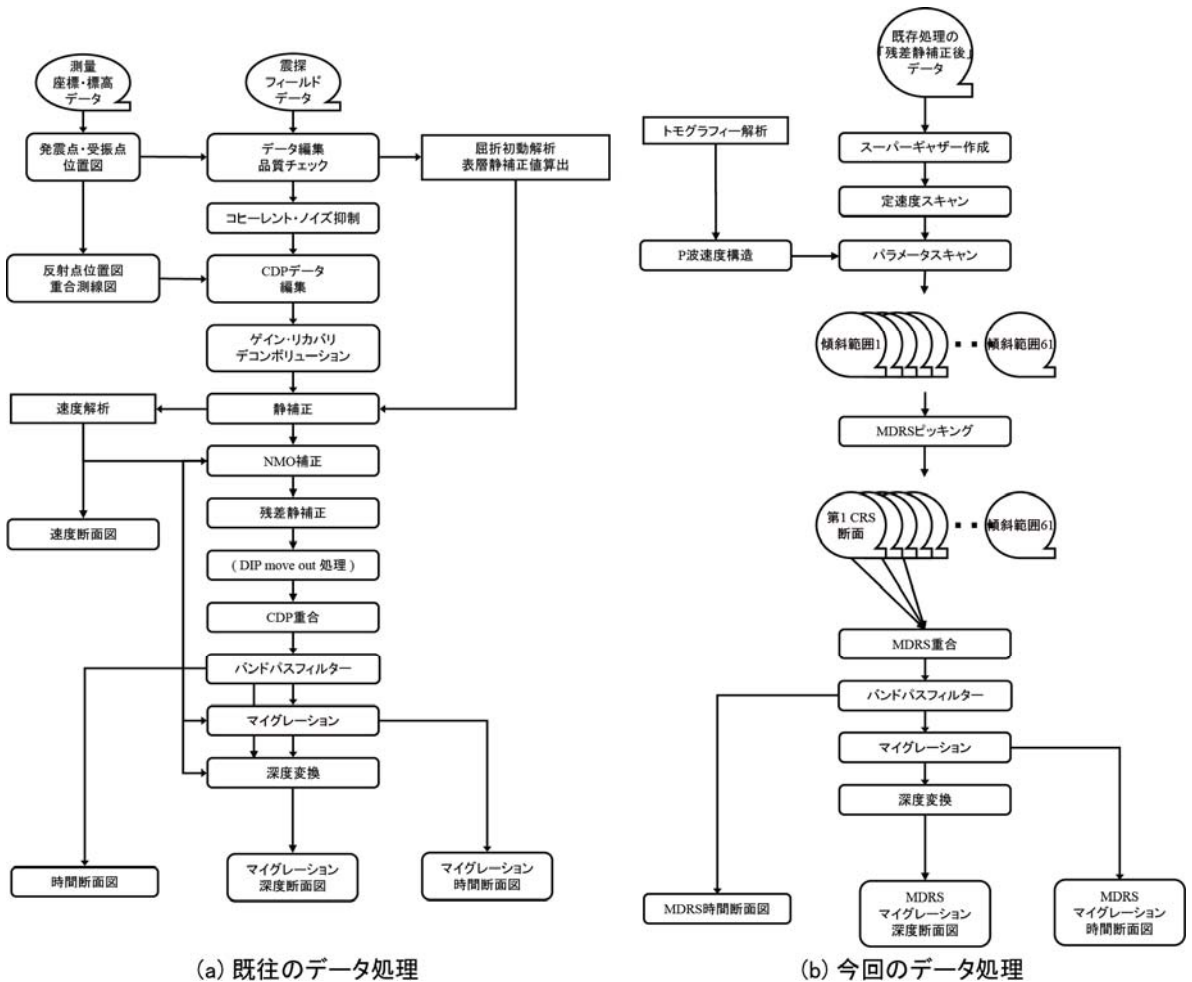


図 4.5-19 CRS 法、MDRS 法の概要



(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 4.5-20 反射法データ処理の流れ

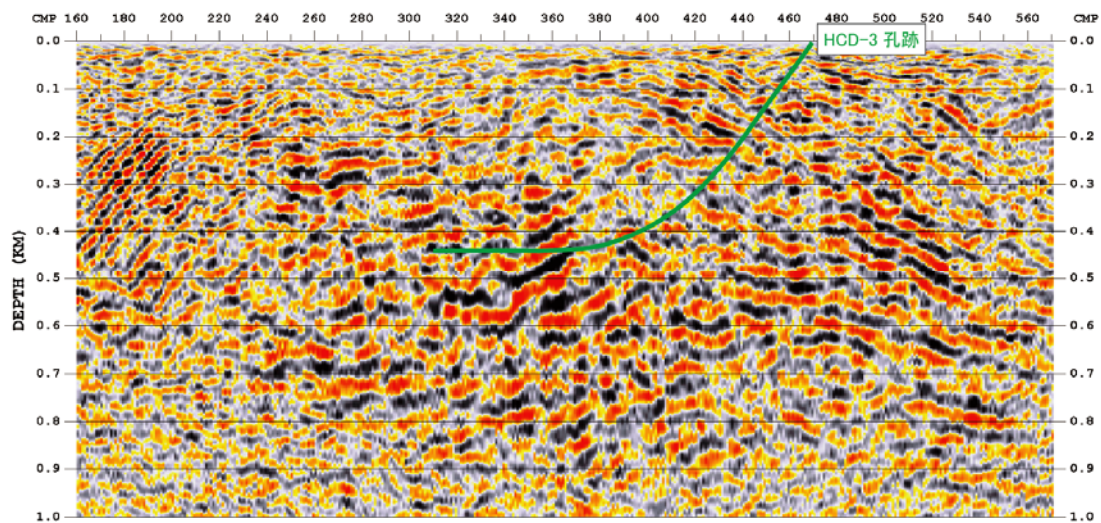


図 4.5-21 既存処理により得られたマイグレーション深度断面

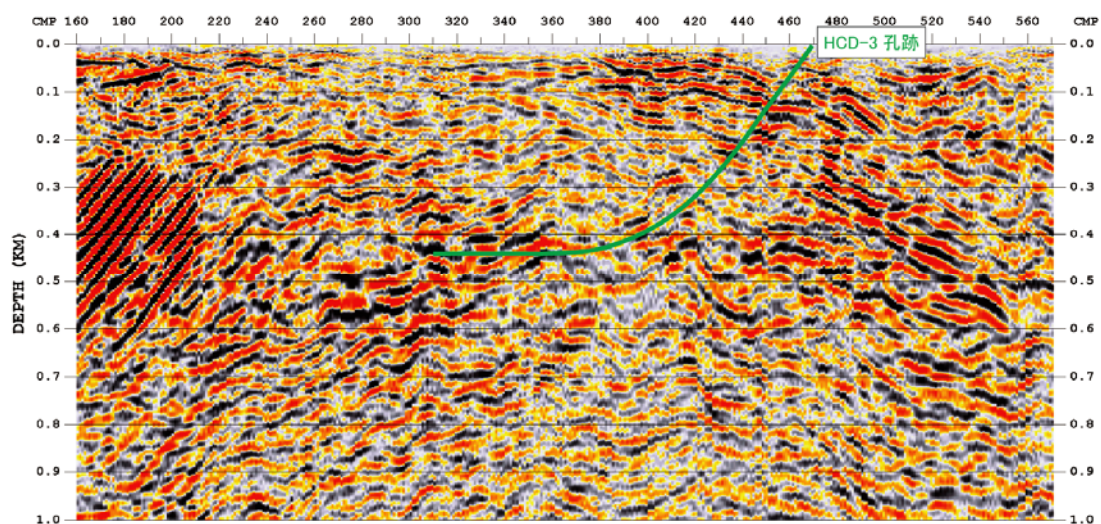


図 4.5-22 今回の処理により得られたマイグレーション深度断面

## 4.6 孔内モニタリング

### 4.6.1 区間圧力

モニタリングシステムは平成 26 年 2 月に HCD-3 孔内に設置し、3 区間の間隙水圧のデータ取得を開始した。その後、平成 27 年 10 月から無人計測システムに移行し、引き続きデータ取得を実施した。平成 29 年 5 月のシステム回収までに取得した観測データを図 4.6-1 に示す。区間①および②の間隙水圧は水頭で+5m 程度を示すのに対し、区間③の間隙水圧は+10~+20m と安定しないものの、他の区間に比べ大きな値を示す。

区間③では平成 27 年 6 月から採水作業とそれに先立つ予備排水を開始した。当初は採水や予備排水の都度ミニパッカーを外し、終了後に設置する作業を繰り返したため、孔内間隙水圧が安定しなかった。平成 28 年 6 月からは、常時ミニパッカーを外した状態とし、スタンドパイプから常時湧水する状態で放置した。そのため、グラフ上の計測水位はスタンドパイプ上部までの水位を示している。

#### (1) 区間圧力に及ぼす影響要因と解析方法

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、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 4.6-2 参照）。また、本システムでは各観測区間をパッカーにより遮水しているが、パッカー圧力の変動に伴い計測圧力が変化する可能性も示唆されている。さらに、各観測区間はミニパッカーにより遮水され、大気圧の影響を受けないようにしているが、ミニパッカー自体の圧力変化により計測圧力が変化する可能性も考えられる。

##### ・大気圧による影響

本システムでは各スタンドパイプにミニパッカーを設置しており、直接的な大気圧の影響は遮断している。そのため大気圧による影響はないと考えられる。

##### ・潮汐による影響

図 4.6-3 に各観測区間水位と稚内における潮位を示す。区間①及び②において、潮汐の影響が表れている箇所が見られ、解析によりその影響を取り除くことが望ましいと考えられる。区間③については、常時湧水状態であったため、解析対象から除外する。解析には潮汐解析プログラムとして実績のある BAYTAP-G (Bayesian Tidal Analysis Program - Grouping Model, Ishiguro et al., 1981; Tamura et al., 1991) を使用する。

##### ・降水による影響

降水による各観測区間水位への影響について検討するため、近隣 3 箇所（天塩、幌延、豊富）で観測されているアメダスデータと各観測区間水位を比較した（図 4.6-4 参照）。その結果、降水による区間水位への明確な影響はないと考えらる。

##### ・その他の要因による影響

区間①及び②の観測区間水位とパッカー圧力、ミニパッカー圧力、気温及び大気圧のクロスプロットをとり、その影響について検討した（図 4.6-5 から図 4.6-6 参照）。

区間①においてミニパッカー圧力との逆相関の傾向がみられる。これはミニパッカー拡張ラインの地上部分が気温の影響を受けていることに起因していると考えられる。

図中の▽は現地におけるメンテナンス、採水作業を行った時期を示している

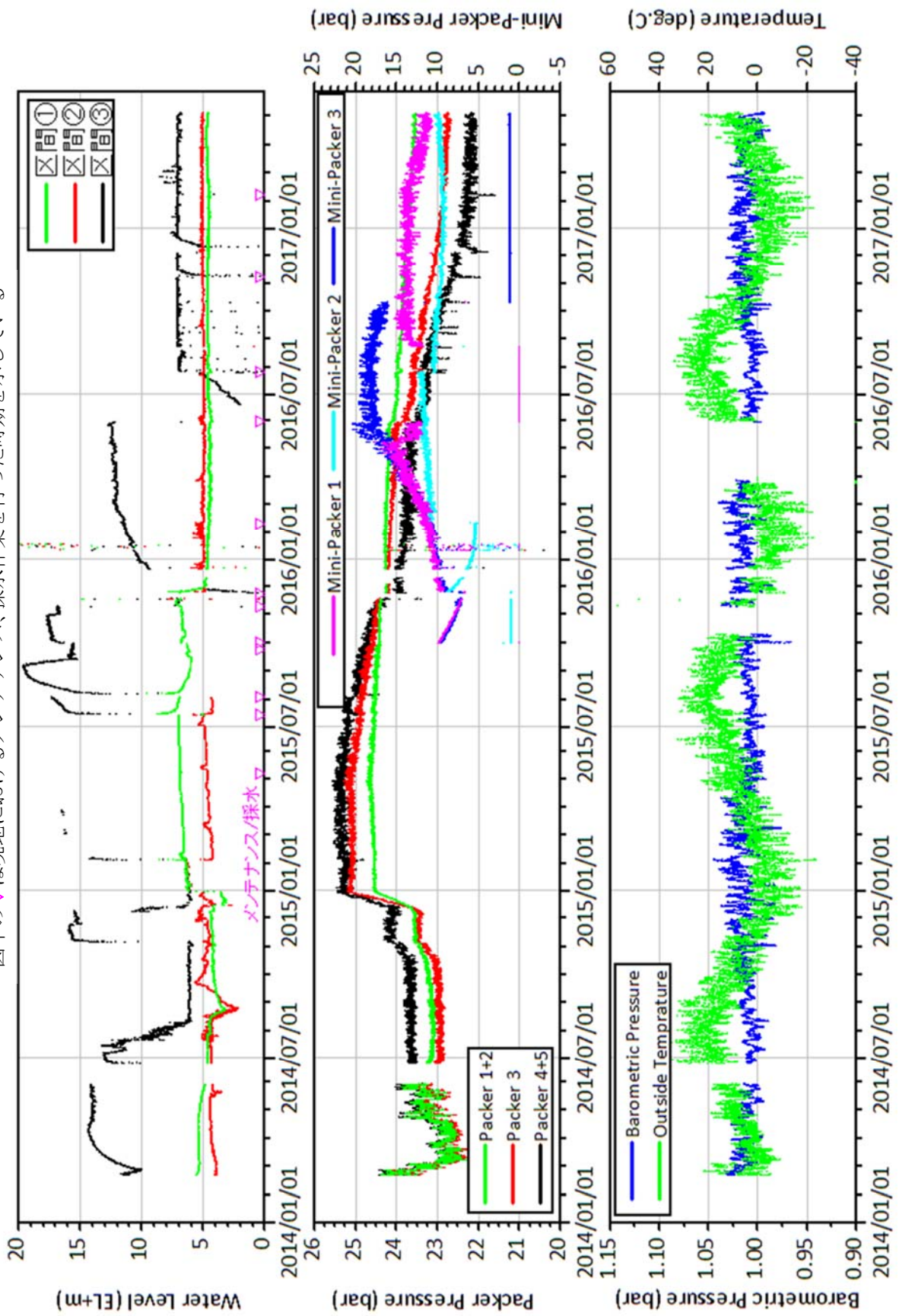


図 4.6-1 観測データ (全期間)

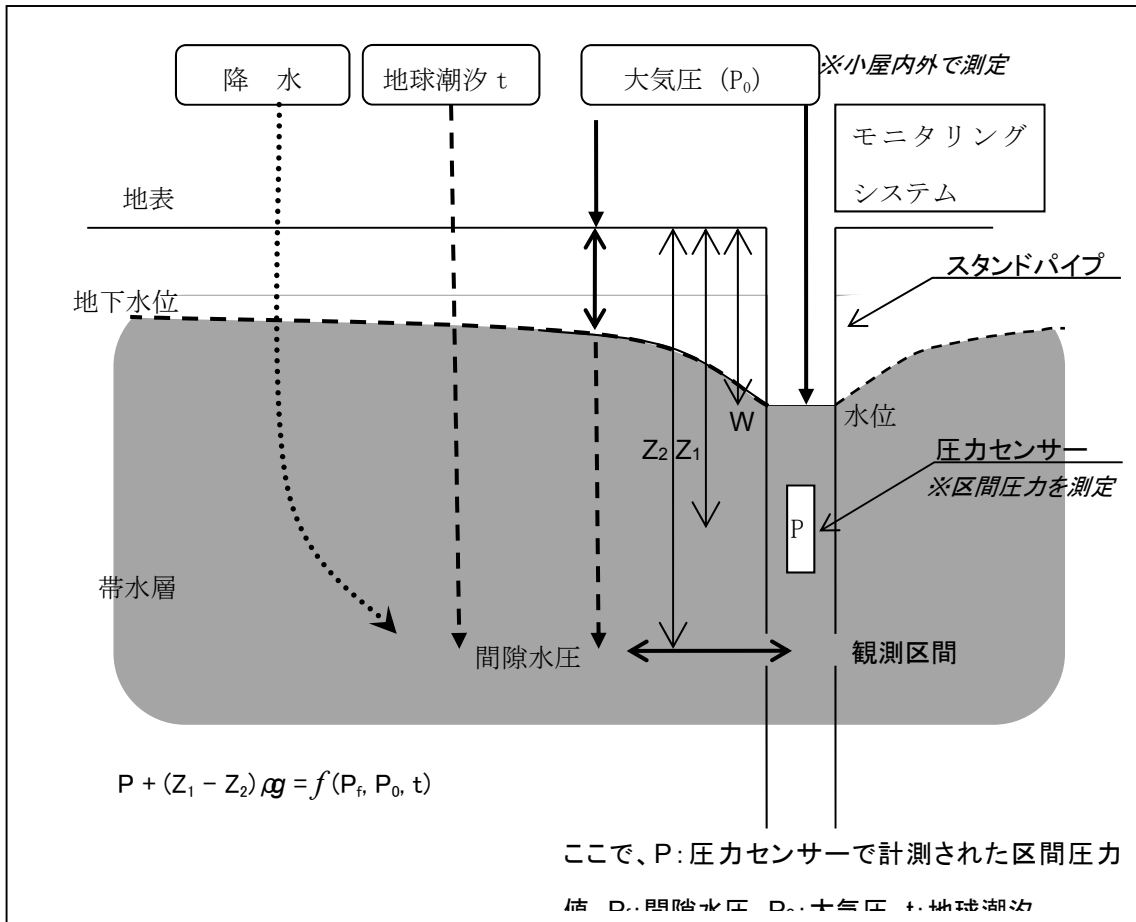


図 4.6-2 区間圧力データに対する影響要因

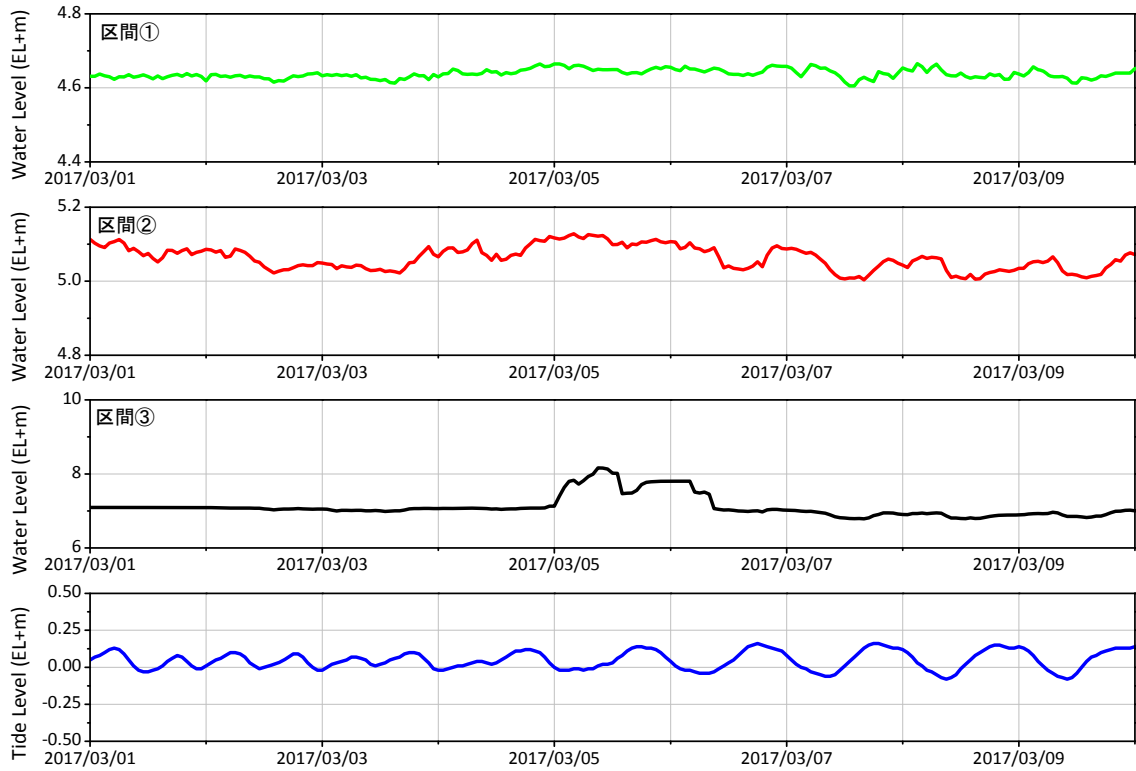


図 4.6-3 各観測区間水位と稚内における潮位

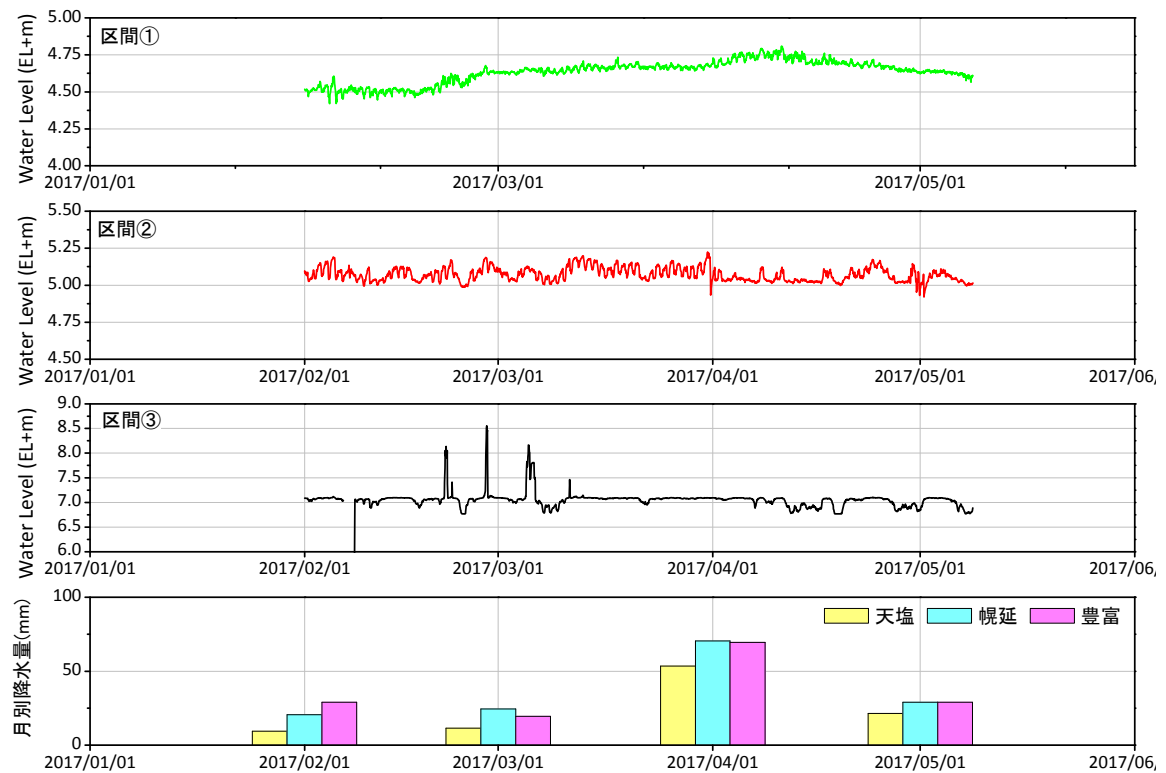


図 4.6-4 各観測区間水位と近隣3箇所の降水量

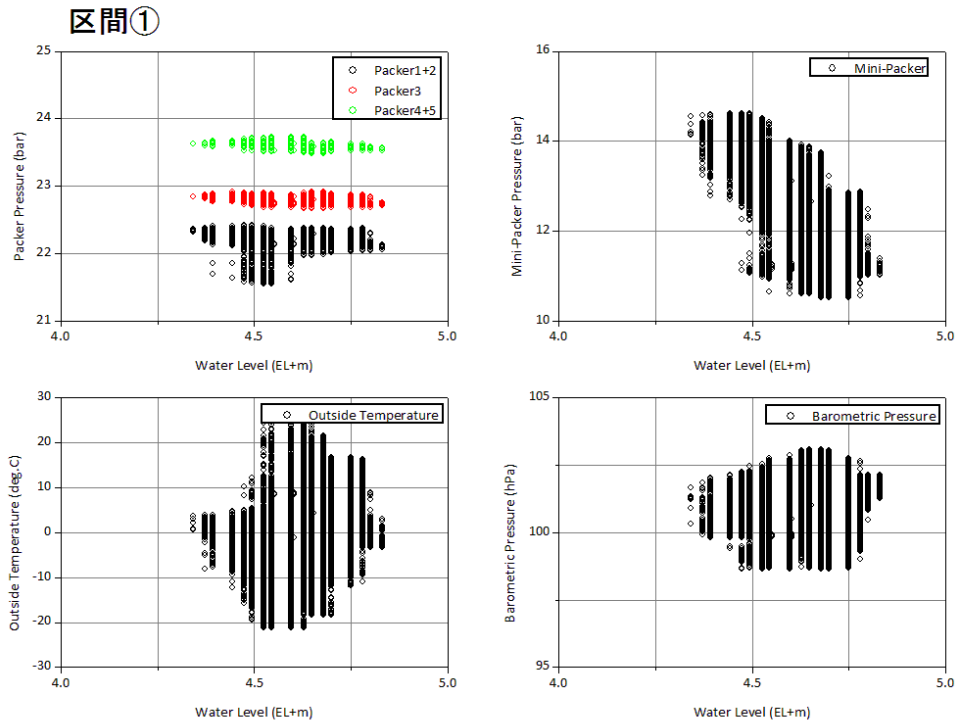


図 4.6-5 区間①水位と各種データとのクロスプロット

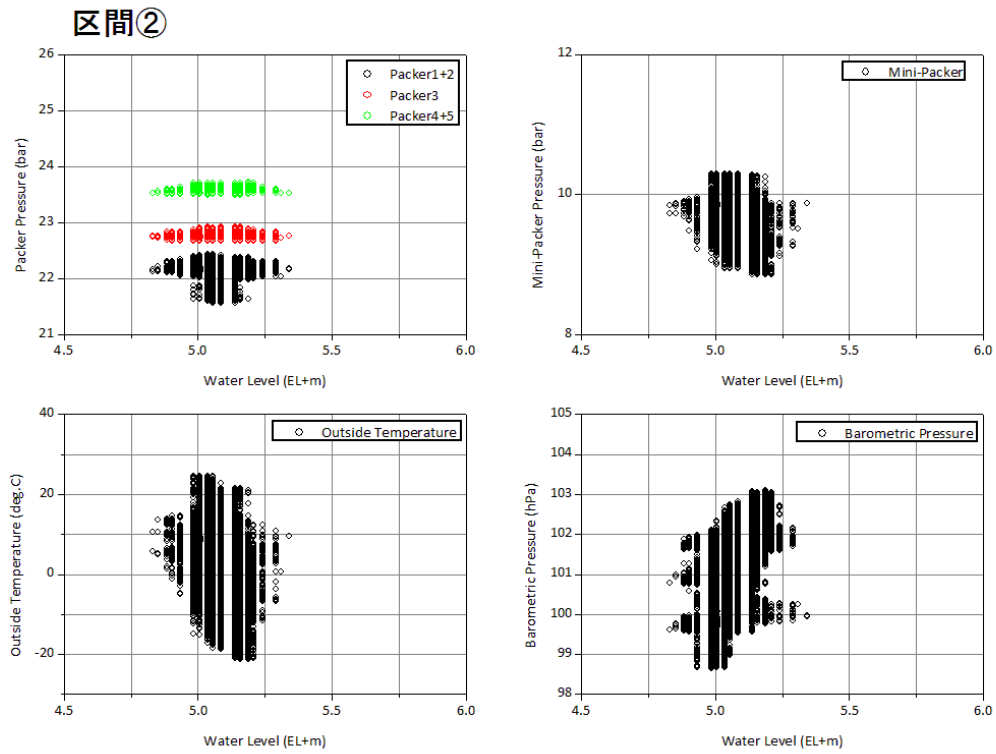


図 4.6-6 区間②水位と各種データとのクロスプロット

(2) 解析結果

解析は区間①及び②を対象とし、対象期間は2017/2/1～2017/5/8とした。解析では、BAYTAP-Gを用いて各区間水位から潮汐成分の除去を行った。解析結果を図4.6-7から図4.6-10に示す。

図4.6-8及び図4.6-10から各観測区間水位から潮汐成分が除去されたことがわかる。

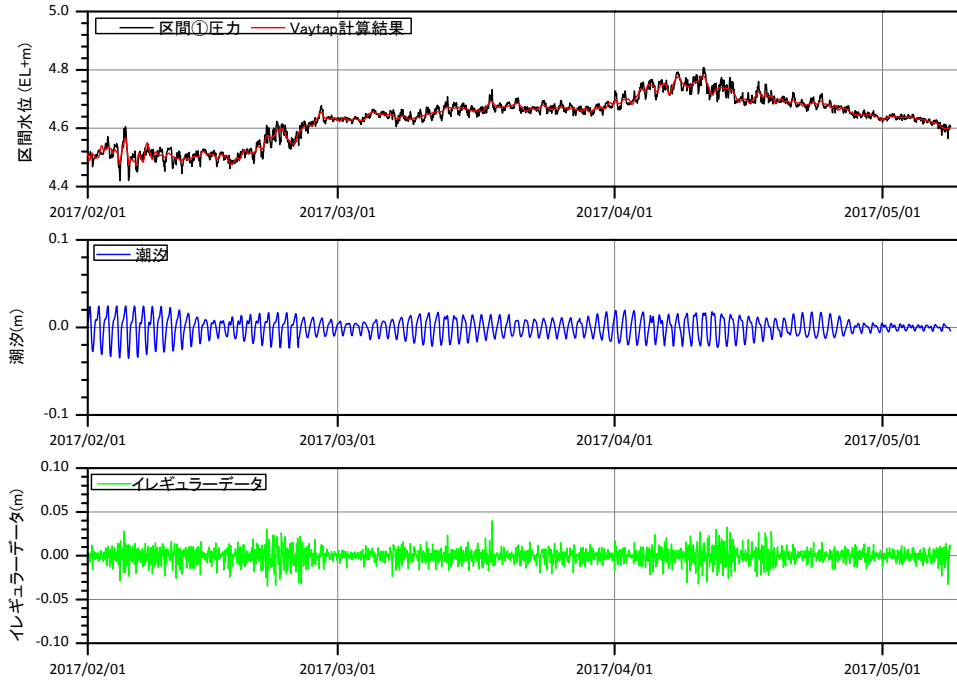


図4.6-7 BAYTAP-Gによる解析結果（観測区間①全体）

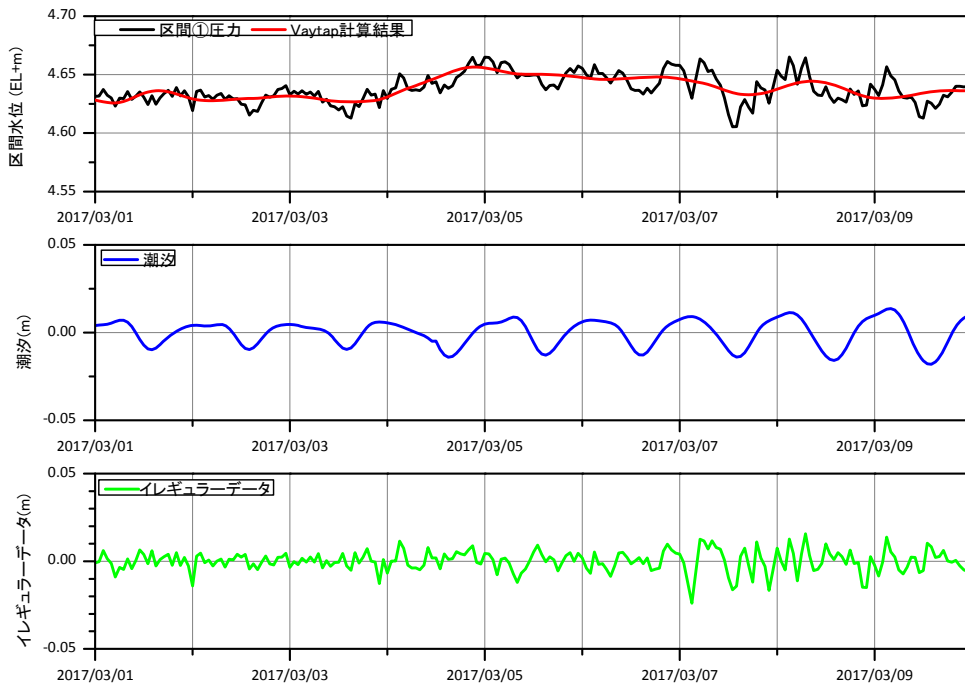


図4.6-8 BAYTAP-Gによる解析結果（観測区間①詳細）



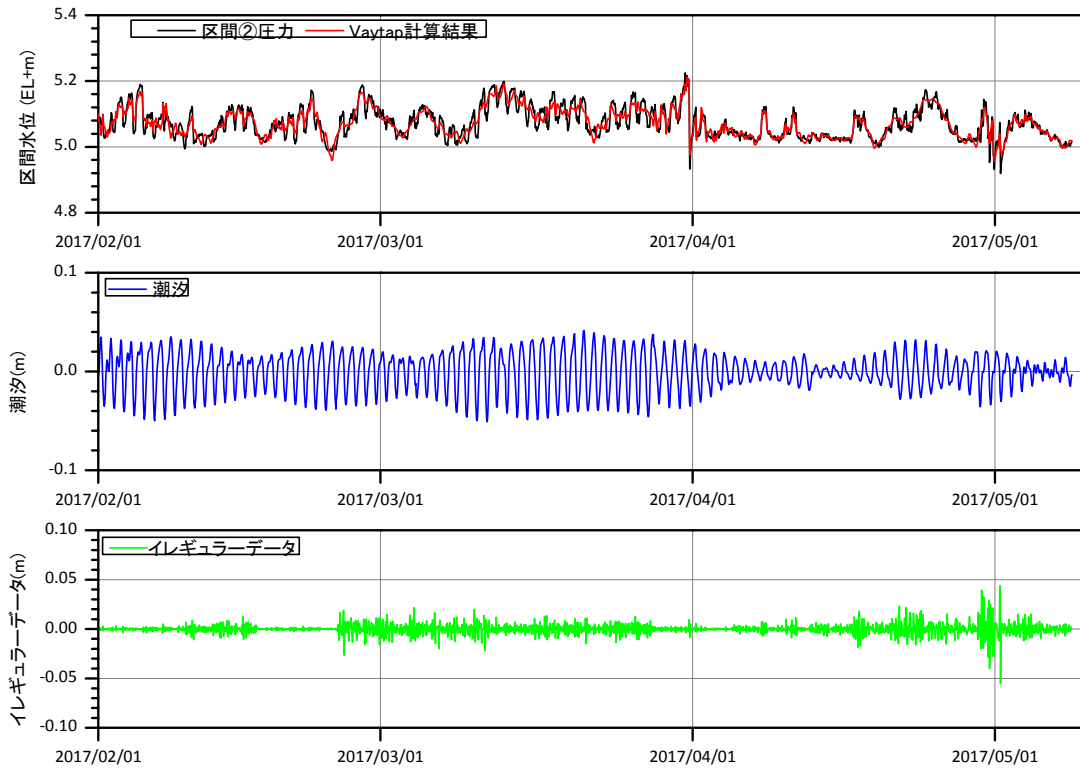


図 4.6-9 BAYTAP-G による解析結果（観測区間②全体）

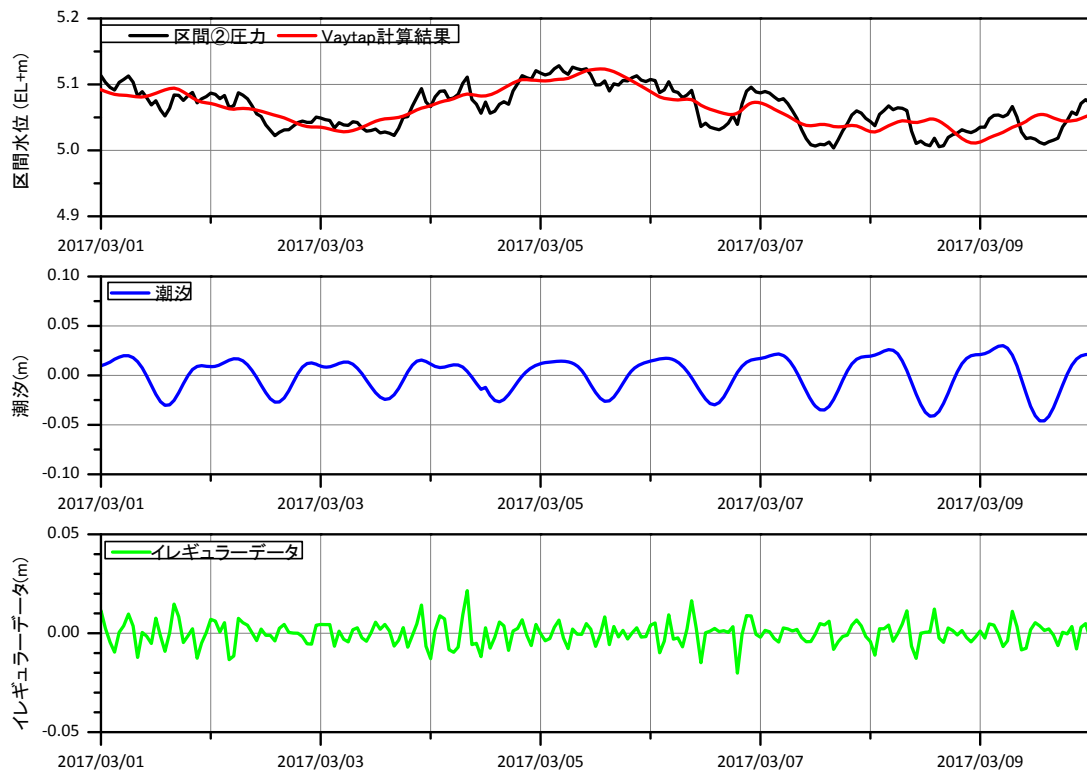


図 4.6-10 BAYTAP-G による解析結果（観測区間②詳細）

#### 4.6.2 地下水の水質

水質・同位体分析用試料はダブルバルブポンプをスタンドパイプ内の-89m 深度までポンプを降下させて揚水を行い、地上で採取した。希ガス分析用の採水はサンプラーを専用のポリアミド管につないで所定深度まで降下させた後、原位置でバルブを閉じて採取した。遊離ガスは、ダブルバルブポンプにより強制的に揚水し、地上において水上置換によって採取した。HCD-3 孔の区間③から採取した地下水及びガスの分析結果は（1）から（9）に示す通りであった。

##### （1）蛍光染料濃度の変化

本孔で地下水に混入している外部要因の水は、掘削泥水と孔内洗浄水及び SPMP システム設置時に導入された清水である。これらには蛍光染料（ナフチオン酸）が 20mg/L となるように添加されている。いずれの水も同じ蛍光染料を使っていることから地下水に混合している外部要因の水が泥水か清水かの区別がつかない。予備排水を進めたことにより低下しているものの、11 月採水の段階で 53%の混入率を示している。

2016 年 6 月以降、ほぼ毎月予備排水を行い、蛍光染料の測定を行った。その結果を図 4.6-11 に示す。なお、保管していた試料を一度に測り直したため、各採水ごとに分析を行った結果とは若干異なる値を示しているが、実質的に同じ値を示している。図 4.6-11 では 2016 年 7 月 27 日の採水までは 80%超で概ね安定した値を示しているが、翌日（2016 年 7 月 28 日）までの排水で大きく値が低下しており、2016 年 9 月 13 日の採水以降は 2017 年 2 月の採水まで概ね 60%程度で推移している。

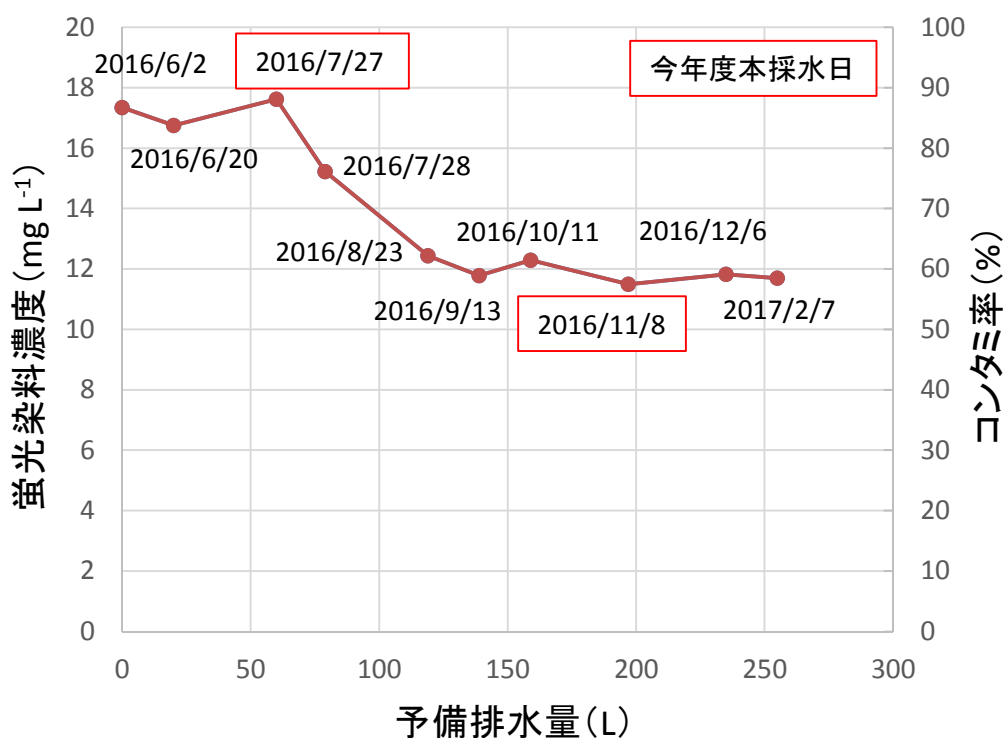


図 4.6-11 予備排水に伴う蛍光染料濃度の変化

## (2) トリチウム

幌延地域の稚内層の地下水はこれまでの He 年代測定の結果から百万年オーダーの地下水年代があると考えられている（中田・長谷川，2009）<sup>12)</sup>。このことからトリチウム（半減期 12.3 年）が検出されるということは、若い水が混入しているものと考えられる。混入している若い水としては、掘削水に用いられた浜里水井戸の水（3.18TU）ならびに孔の洗浄や SPMP システムの設置に用いられた清水（浜里水井戸の水）と考えられる。これが仮に約 10 年前の掘削時（2006 年～2007 年）に混入したと仮定してトリチウム濃度の補正をして混合率を算出すると、32～47%となる。

2015 年度及び、2016 年度 7 月の採水までは 0.59～0.85TU の濃度でトリチウムが検出されていたが、11 月採水では <0.17（TU，測定値 <0.02BqL<sup>-1</sup> を換算）であった。仮に 0.17TU 検出されていたとして、10 年前に換算すると混合率は 9.3%となる。蛍光染料から算出した混合率とは合わないが、急激に変化する状況は蛍光染料測定の場合と同じである。

表 4.6-1 トリチウム濃度とコンタミ率

	<sup>3</sup> H (TU)	<sup>3</sup> Hによるコンタミ率 (%) *	蛍光染料によるコンタミ率 (%)
浜里水井戸 (掘削水の原水)	3.18	-	-
13R1314	0.76	42	3
HCD-3_2015_1	0.59	32	102
HCD-3_2015_2	0.85	47	83
HCD-3_2016_1	0.59	32	84
HCD-3_2016_2	<0.17	9.3	53

\*トリチウムは掘削時だけではなく、孔内洗浄、SPMPシステム設置時にも混入するが、トリチウムはすべて掘削時(10年前)に入ったものと仮定し、改変した分を減算してコンタミ率を算出。

## (3) 一般水質

ヘキサダイアグラム（図 4.6-12）とパイパーダイアグラム（図 4.6-13）を示す。参考のため、2013 年度に原位置で採取した 13R1314 も示している。圧縮抽水に基づく分析値は、アルカリ度（もしくは重炭酸濃度）及び硫酸濃度の信頼性が低い。それは、圧縮抽水で得られる試料量が少ないことからアルカリ度測定を行っていない場合があることや、岩石にカルサイトとパイライトが含まれる場合、大気に触れて酸化されたパイライトから溶出する硫酸が地下水由来の硫酸と混合することや、硫酸により酸性となった間隙水がカルサイトを溶解して重炭酸を生成することによる。今回示した 200m（abg1）及び 250m（abg1）の圧縮抽水ではアルカリ度測定が行われていないため、主要溶存イオンの

電荷バランスから  $\text{HCO}_3^-$  濃度を求めているが、上述した理由のほかに、電荷バランスの差し引きで求められた値であるため、正しい値かどうかは不明であり、あくまで仮の値である。

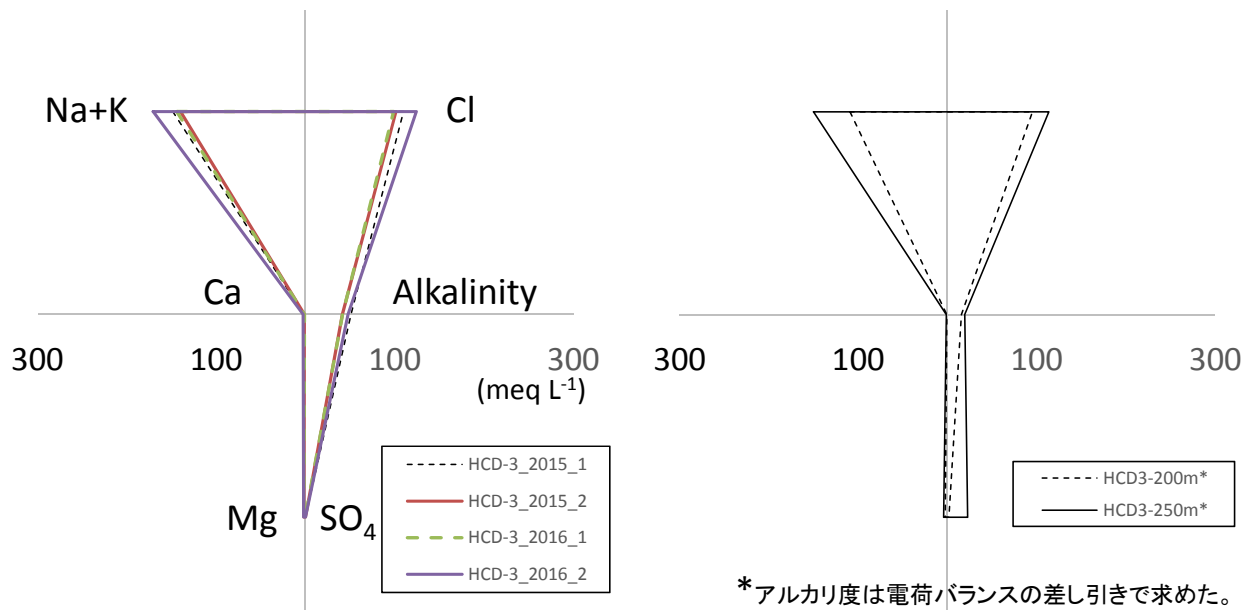


図 4.6-12 ヘキサダイアグラム

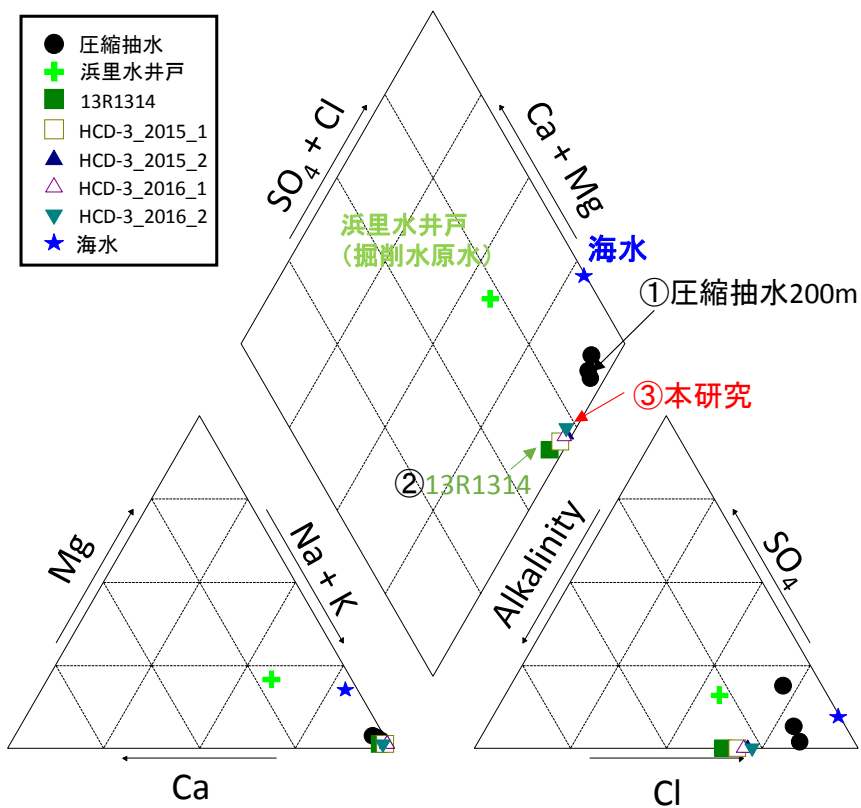


図 4.6-13 パイパーダイアグラム

#### (4) 水素酸素同位体比

水素酸素同位体比及び水素同位体比と Cl<sup>-</sup> イオン濃度との比較を図 4.6-14 に示す。今年度得られた地下水については、同深度で得られた圧縮抽水の値とほとんど同じ値を示している。

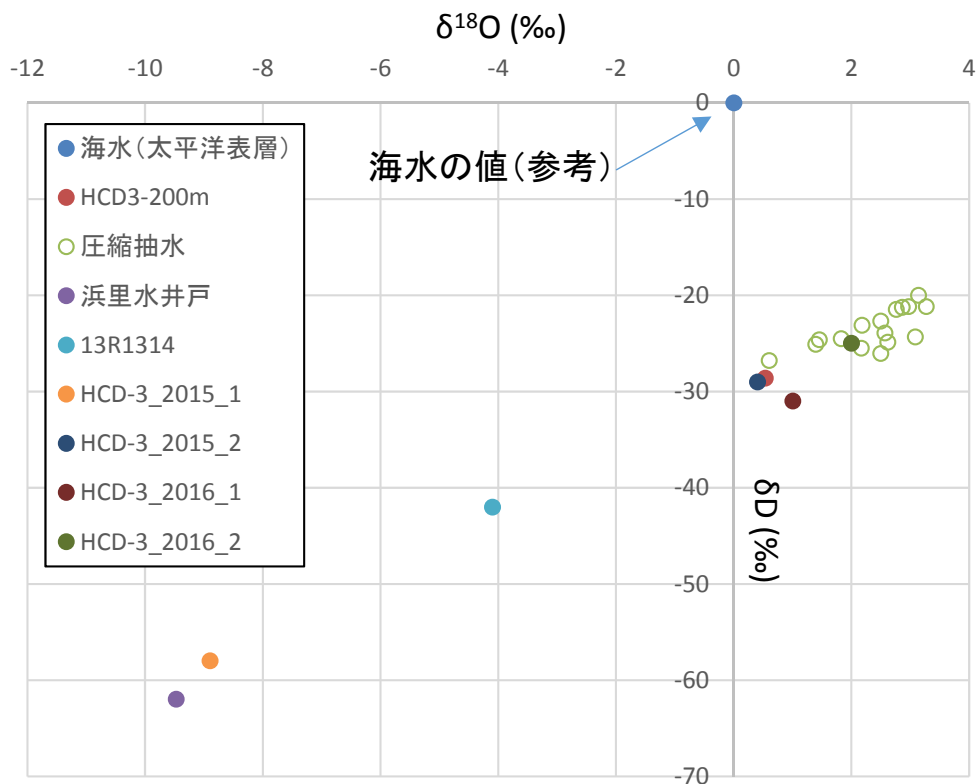


図 4.6-14 水素酸素同位体比

#### (5) 微量元素

幌延の地下水は高いホウ素濃度が特徴的である。本採水で得られた地下水も海水の十倍以上の高いホウ素濃度を示している。掘削水に用いられた浜里水井戸のホウ素濃度は 0.04 mg/L であることから、高いホウ素濃度は原位置の地下水に由来しているものと考えられる。ただし、掘削泥剤に含まれていたホウ素濃度が不明なため、原位置の地下水のものとは断定することはできない。

#### (6) 一般ガス

採水毎のガスの構成の変化は概ね小さいが、二酸化炭素の同位体比が大きく変化している。また、最後の採水であった HCD-3\_2016\_2 の採水データは CO<sub>2</sub> 濃度が高くなっている。予備排水中の一般ガスの濃度、同位体比の変化を測定した事例は見当たらないが、予備排水に従い、大きく変化する可能性のあることが分かった。特に CO<sub>2</sub> の同位体比がマイナスからプラスに転じるという大きな変化をしていることから、予備排水が不十分な状態であれば誤った解釈をする可能性がある。

#### (7) 物理化学パラメーター

pH と ORP はフローセルにて測定を行った。流速は概略での測定であるが概ね 100ml/min 以下となるようにした。DO は溶存ガスが電極面に当たると値が大きく動くため、密閉性の高いフローセルでは正確な測定ができなかった。そこで、100ml のプラスチックボトルに地下水を導入し、底まで電極を挿入し、ボトルを斜めにしてガスが速やかに抜けるようにして測定した。EC はフローセルを通過した水をプラスチックビーカーに導入し、大気開放下かつ、緩やかな流れの中で測定した。物理化学パラメーターを表 4.6-2 に示す。なお、ORP は読み取り値 (Ag/AgCl) から SHE 基準に換算している。

表 4.6-2 物理化学パラメーター

計測日	2015/8/6	2015/11/25	2016/7/26	2016/11/9
pH	8.15	8.46	8.3	7.84
ORP(mV SHE)	-57	98	-37	47
DO (mg L <sup>-1</sup> )	0.07	0.00	0.00	0.00
EC (S m <sup>-1</sup> )	1.378	1.394	1.301	1.670

それぞれの測定値の増減について一定の傾向は見られない。表 6.4-1 の観察で示したとおり、pH はフローセルで測定し、安定した値を示した。ORP は各測定とも安定値まで到達していない。DO はおそらく計測を通じてゼロである。また、EC は安定値である。

#### (8) 炭素同位体比と塩素同位体比

放射性炭素 (<sup>14</sup>C) は 5.1pMC であった。これまでの He 蓄積法による年代評価では、百万年オーダーの年代となることから、半減期が 5730 年である <sup>14</sup>C は減衰し、検出限界以下となっているはずである。すなわち、5.1pMC は掘削水、洗浄水等からのコンタミネーションと考えられる。

放射性塩素 (<sup>36</sup>Cl) は、2.9±0.9 という値であった。今回採水を行った HCD-3 の 200m 付近の地層は稚内層である。中田と長谷川 (2009)<sup>12)</sup> によると、稚内層の地下水の <sup>36</sup>Cl 放射平衡値は 8.1±3.3 である。また、HCD-3 孔の掘削時に圧縮抽水により 200m 付近から採取された <sup>36</sup>Cl の分析値は 8 弱の値であることから、今回得られた 2.9±0.9 という値は本来の原位置の値と比べて低いものと考えられる。

#### (9) 希ガス

希ガスデータの深度分布を図 4.6-15 に示す。図中には今年度得られたデータのほかに、岩石コアを用いた希ガス採取による He, Ne のデータ (中田ほか, 2006 ; 中田・長谷川, 2009)<sup>12), 13)</sup> を示す。

2016/7/27 に採取した結果はこれまでのデータと概ね変わらない。一方で、2016/11/09-10 で採取

したものは大きく異なる値を示し、分析後に差し引きで求める試料の重量から地下水がほとんど取れていないことが分かった。

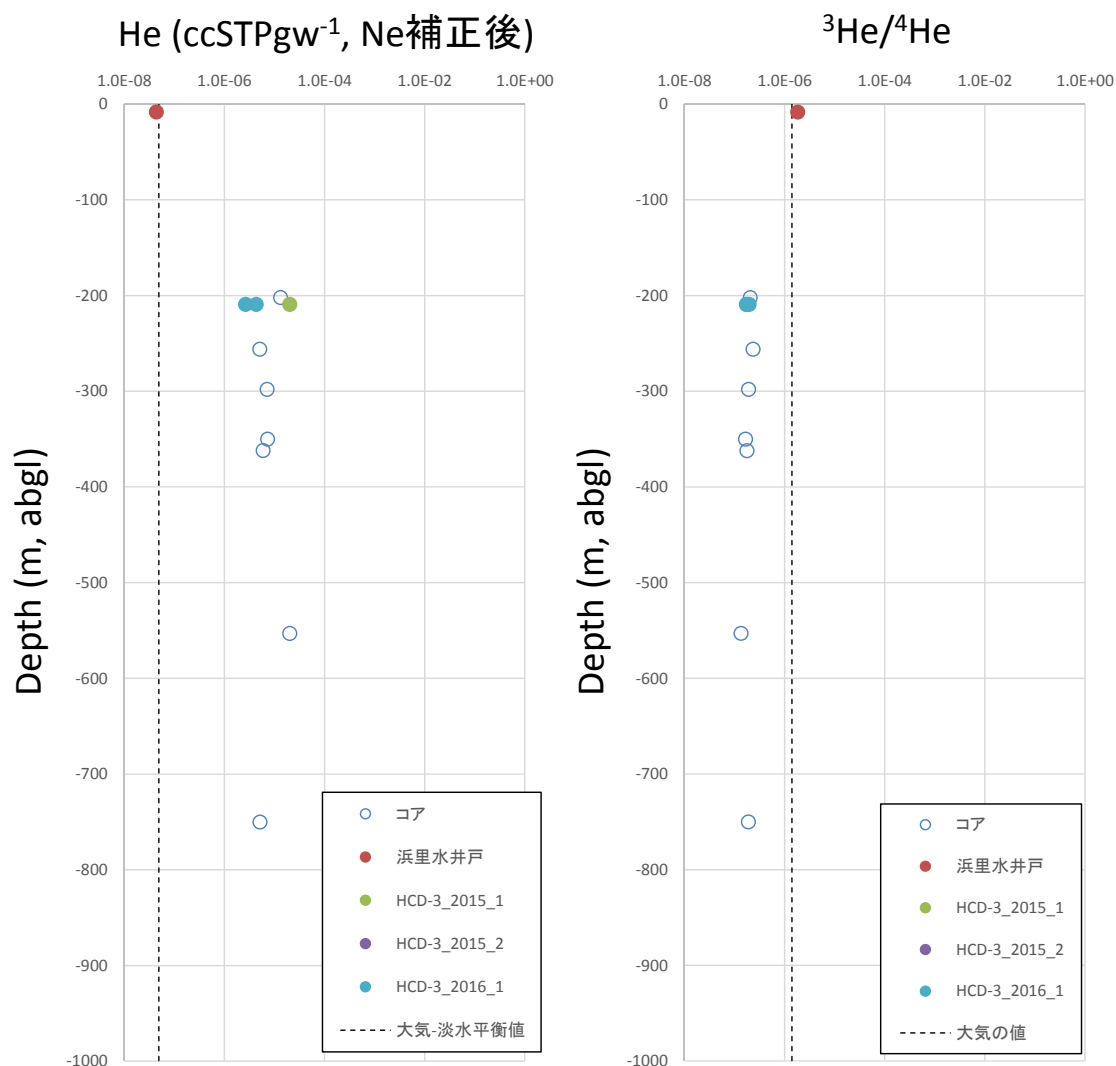


図 4.6-15 希ガスの分析結果の比較

地下水水質については、ボーリング掘削時に採水、分析を実施することが一般的であるが、掘削水の影響が懸念されることにより、長期的に水質をモニタリングすることにより掘削水の影響を極力除いた初期的な水質を評価することを目標として孔内モニタリング技術の開発を行ってきた。モニタリングシステムを HCD-3 孔内に設置以降採取した地下水及びガスの分析結果をまとめると以下のとおりである。

地下水及び溶存ガスの採取は掘削時に逸泥が確認された区間③において 2 回（2016 年 7 月及び 11 月）実施した。平成 27 年度の結果から採取された地下水のトレーサー濃度からは掘削泥水の影響が大きいことが明らかとなっていたため、平成 28 年度は月に一度予備排水を行い、掘削泥水の影響を極力排除したうえで、試料採取を行った。平成 28 年度は予備排水と採水を含めて約 250 リットル以上を揚

水し、トレーサー濃度は徐々に低減したが、トレーサー濃度から計算される掘削泥水の混入率は最終的にも50%以上と、地盤内に大量の掘削泥水が混入したことが推測された。

一般水質に関しては、パイパーダイアグラム及びシュティフダイアグラムにより検討した結果、採取された2回の地下水HCD-3\_2016\_1及びHCD-3\_2016\_2は海水、化石海水、温泉等に分類された。また、同深度から採取されたコアの圧縮抽水の分析結果とほぼ同様の値を示していた。水素酸素同位体比及び水素同位体比とClイオン濃度との比較をした結果、平成28年度に採取した地下水については、同深度で得られた圧縮抽水の値とほとんど同じ値を示していた。しかしながら、酸素・水素同位体の分析結果や水質から推定される塩濃度と試料中に含まれるトレーサー濃度との関係が不整合の結果を示した。

希ガスサンプラーにより採取した希ガスの分析の結果、掘削時に採取したコアから得られたHe濃度やヘリウム同位体比と本研究で得られたそれらは概ね同じ値を示した。掘削水混合率から言えば同じ程度の値が得られることはない。地下水に近い組成を持つ掘削泥水で掘削を行ったとしても、泥水の循環利用では泥水は一旦大気に曝されるため、希ガスの濃度が原位置の地下水と同程度になることは考えがたい。

平成27年度及び平成28年度に採取した地下水は幌延地域の深部地下水の特徴を持っていた。得られたデータのうちのいくつかの水質データは掘削時に得られたコアから得られた水質や希ガス濃度に近い値を示した。その一方で、蛍光染料濃度は高いことからコンタミネーションしていることが明らかであった。掘削水の循環利用により、地下水の水質に近く蛍光染料濃度の高い泥水ができる可能性が示唆されるが、掘削中の泥水の分析値がないことから、その妥当性を確認することができない。

今回の孔内モニタリングの一環として行った地下水分析を通して、確からしい水質を得るためには、十分な予備排水が必要なのは言うまでもないが、さらに孔に加わった人工的な操作の履歴を記録しておくことが重要であることが明らかとなった。

#### 4.6.3 モニタリングシステムの維持、管理

##### (1) マルチパッカーの作動状況の確認方法

マルチパッカーはパッカー加圧ラインが地上まで通っており、ライン内圧力を圧力センサーにより計測し、地上のデータロガーに記録している。この圧力データを監視することでパッカーの作動状況の確認を行うことができる。

なお、本システムの設置当初は圧力調整器（アキュムレータ）を設置し、パッカー圧力が一定となるように常時調整できるようにしていたが、圧力調整器自身が地上の温度変化による影響を受けることが判明したため、地上装置の再設置時にこれを取り外した。その結果パッカー圧力への気温の影響は低減している。



## (2) 圧力センサーの作動状況の確認方法

スタンドパイプ内の圧力センサーはデータロガーに接続されており、データロガーに記録されたデータを見ることにより作動状況の確認を行うことができる。

本システムはスタンドパイプ方式を採用しているため、圧力センサーに不具合があった場合は、スタンドパイプから回収し、整備もしくは交換を行うことが可能である。

## (3) データロガーの作動状況の確認方法

データロガーは6V電源により稼働し、100,000データの記録が可能なものであり、定期的(3~4ヶ月/回)にデータ回収及びバッテリー交換を行うことで継続的にデータ取得が可能である。しかしながら、データロガーは現地の観測小屋内に設置されており、その都度現地でPC接続を行いデータ回収しないとデータロガーの作動状況を確認できない。

また、マルチパッカーならびに圧力センサーも回収データを見るまではその作動状況が明らかにならない。したがって、離れた場所からこれら機器の作動状況を常時確認するためにはデータ通信ならびにそのための電源供給システムを検討する必要がある。

## (4) 孔内設備(孔内設置部)の維持、管理方法

孔内設備(孔内設置部)の維持・管理方法は、定期的にシステムを回収し、各部の検査を実施することが確実な方法と考えられる。しかし、この方法はシステム回収時の抑留や回収後の孔壁の崩壊等のリスクを伴う。そのため、通常時は各種計測データ及び地表からの目視による管理を行うことが現実的である。

データロガーに収録しているパッカー圧力データに異常が見られた場合はパッカーの遮水性能が低下していることが想定される。また、パッカー圧力に異常が見られない状況で観測区間圧力のトレンドに変化が見られる場合は通常、観測区間圧力が変化すると判断することが妥当である。しかしながら、既存き裂の開口、クラックの形成など孔壁の異常に起因するパッカーの遮水効果の低下による場合も考えられる。このように、観測区間圧力変化の要因には特定することが難しい要素がまぎれていることがあるため、これら要素も可能性の一つとして圧力変化の傾向を吟味する必要がある。

HCD-3孔へのシステム設置前にHMD-1孔において孔内設備の設置・回収試験を実施しており、回収後にパッカー及び装置ケーシング等の検査を実施した。その結果、特に異常は認められなかった。また、国内における同一のシステムでは、設置後10年以上経過し、現在もなお継続して使用しているが不具合は報告されていない。

## (5) 孔内設備(スタンドパイプ内)の維持、管理方法

スタンドパイプ内には圧力センサーとミニパッカーが設置されている。圧力センサー、ミニパッカーとも回収が可能であることから圧力センサーは年1回程度の間隔で較正試験を行うことが望ましい。その際は、ポンプ等による加圧を行い、較正済みの圧力計との計測値を比較する。ミニパッカーは地上

で加圧し、拡張時の動作及び漏えい等を確認するとともに必要に応じてシール材を交換する。

連続計測中は、圧力センサーはデータロガーに接続されており、データ解析により圧力センサー自身の不具合かどうか判別することが可能である。また、ミニパッカーもライン内圧力をデータロガーに記録しており、所要の封圧機能を発揮しているか判断することが可能である。これら孔内設備に不具合があった場合はシステム全体に影響を与えることなく回収・交換が可能であるが、機材の発注・手配の期間を短縮して連続計測に与える影響を最小限にするためには、バックアップ機材を準備しておくことが必要である。

#### (6) 地上設備（圧力ライン）の維持、管理方法

圧力ラインは、地上部でバルブ、圧力計及び圧力センサーと接続されており、これらの不具合は圧力センサーの取得値及び圧力計の指示値により判断できる。その際は各部の締め付け及びバルブのシール性能の確認を行う必要がある。また、これらの箇所について定期的に漏えいの確認を行うことでシステムを維持する。

#### (7) 地上設備（計測システム）の維持、管理方法の検討

地上計測システムは、データロガー、パッカー圧力センサー、大気圧センサー、温度センサーにより構成されており、各種圧力センサーは前述のスタンドパイプ内圧力センサーと同様に定期的に性能試験を行うことが望ましい。

### 4.6.4 無人計測システムの運用と信頼性評価

孔内モニタリング計測を無人かつスタンドアローンな電源、通信で行うモニタリング無人計測システム（以下、「本システム」という）を平成 27 年 10 月に現地に構築し、運用を開始した。本システムのシステム構成図ならびにシステム配線系統図をそれぞれ図 4.6-16 と図 4.6-17 に示す。

本システムを構成する主要な機器ならびにデータ通信の役割は以下のとおりである。

NC : ネットワークコンピュータの略

現地システムの各機器間のローカル通信の親局

ケース C 内に設置

MGB : マジックビー (MGB) の略

本システムにおけるデータロガーで、ローカル通信の子局の役割も果たす

ケース A, B, D, F 内に 9 機の MGB が配置されており、各 MGB は 1 分に 1 回、計測データを取得し、MGB 上の micro SD (micro SD) に保存するとともに無線通信によりケース C 内の NC に計測データを転送する

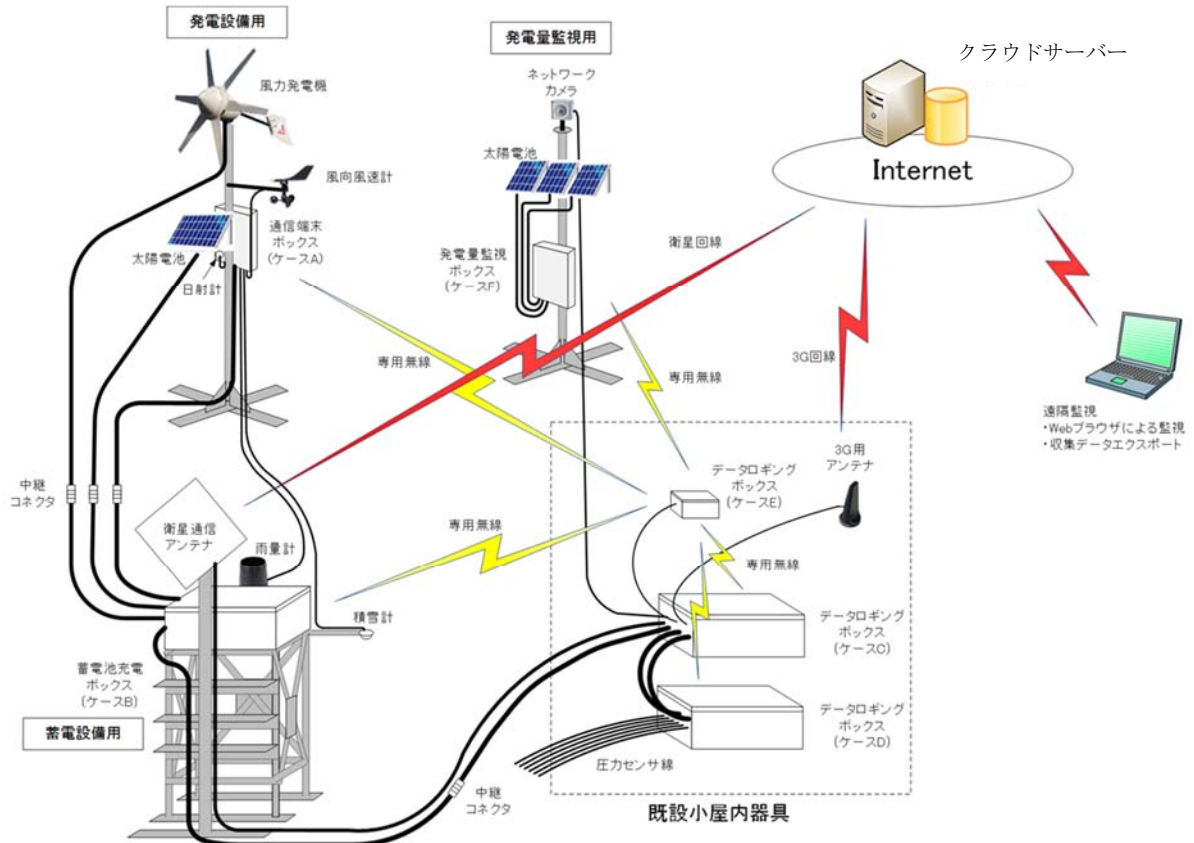


図 4.6-16 無人計測システム システム構成図

- MGB\_1A : 気象系データ用のデータロガー
  - MGB\_1B : 電源系データ用のデータロガー
  - MGB\_1D : 区間圧力 2、3 用のデータロガー
  - MGB\_1F : 太陽光パネル設置角度別発電量評価用のデータロガー
  - MGB\_2A : 積雪量のデータロガー
  - MGB\_2D : 区間圧力 1、パッカー1、2 用のデータロガー
  - MGB\_3D : パッカー3、4、5 用のデータロガー
  - MGB\_4D : ミニパッカー3、2 用のデータロガー
  - MGB\_5D : ミニパッカー1 用のデータロガー
  - MGB\_1F : 太陽光パネル設置角度別発電量評価用のデータロガー (ケース F 内に設置)
  - クラウド : 無人計測システムの計測データを保管・管理するクラウドサーバー
  - 上位通信 : NC-クラウド間の通信
- NC に集められた計測データを、Internet を介してクラウドに転送する  
観測局から現地システムへの遠隔制御命令をクラウド経由で送信することも可能

本システム運用では1時間周期<sup>\*</sup>で通信を行うことを基本とした（※遠隔制御によって通信周期の変更可能）

ローカル通信：MGB—NC 間の通信

MGB はケース A、B、D、F 内に格納されており、無線通信によりケース C 内の NC に計測データを転送している

本評価においては1時間周期で通信し、1時間分の計測データを送信

本システムでは計測対象が分散して設置されており、MGB で計測されたデータは低消費電力通信規格 ZigBee を使用した無線センサネットワーク（ローカル通信）を介して、NC（ネットワークコンピュータ）に集積される。各 MGB は計測用のセンサーとともにケース（A、B、D、F）に収められている。NC 側のローカル通信モジュールはケース E 内に設置され、ケース C 内の NC と有線接続されている。

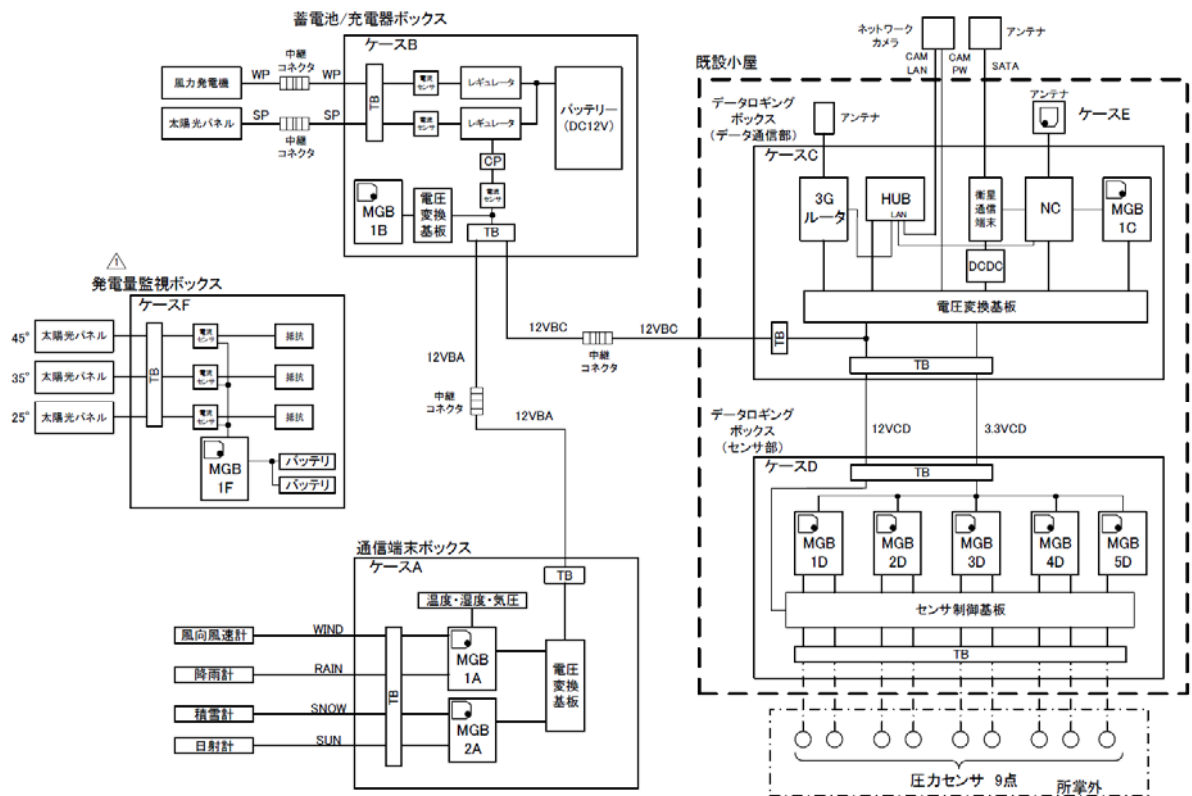


図 4.6-17 システム配線系統図



図 4.6-18 ケース A 及びケース A 内部



図 4.6-19 ケース B 及びケース B 内部

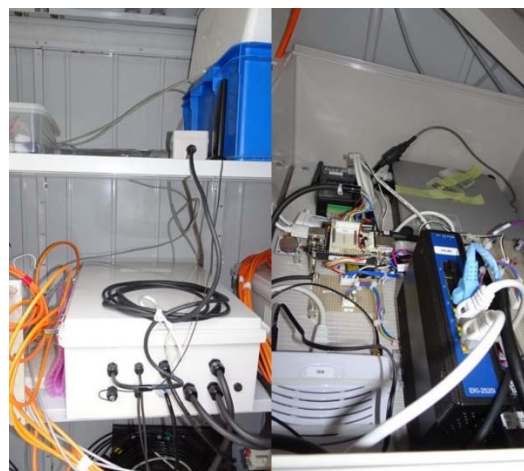


図 4.6-20 ケース C 及びケース C 内部



図 4.6-21 ケース D 及びケース D 内部



図 4.6-22 ケース E 及びケース E 内部



図 4.6-23 ケース F 及びケース F 内部

本システムの運用では、NCは1時間に1度の間欠運転を行い、間欠運転動作中にNCとMGBから構築されるローカル通信ネットワークを介して各MGBからデータを受信し、上位通信を用いてクラウドサーバーにデータ送信した。NCの間欠運転動作中に複数の計測用MGBからNCへのデータ転送を順次行うため、各MGBにはそれぞれの送信タイミングを設定してNCとのローカル通信を行うように制御した。上位通信は衛星通信と3G通信の二つが利用可能な構成としたが、本システムの設置環境においては衛星通信の品質が著しく悪いため、ほとんどを3G通信でシステム運用した。上位通信を介して集積された計測データは、遠隔地からクラウドサーバーにアクセスすることで閲覧・ダウンロードを行う。

平成27年度に本システムを設置し、半年間運用した結果、

- ・システム構成機器の同期外れ（システムの時間管理用部品の不具合）
- ・ローカル通信ラインへの外部ノイズ侵入によるμSDカードデータの破損
- ・ローカル通信伝送不良によるデータ欠損
- ・外部通信（衛星通信、3G/4G通信）不良によるバッテリー電源の低下、システムダウン

等の電力、通信、システム制御、現地環境計測における本システム上の課題が明らかになった。平成28年度にこれらの課題への対応をはかるため、表4.6-3に示す工程でシステム構成機器のハードウェア及びソフトウェアの改造を行い、データ取得率を指標とした改造効果の確認、評価を行った。具体的には、電源、通信、計測・システム制御、環境計測の4つの系に分けて調査検討を行い、必要なハードウェアとソフトウェアを実装してその効果を検証した。

通信や無人計測システム自身に不具合が発生した場合、クラウドサーバーにデータが転送されない場合があるため、検証に際しては、各MGB及びNCからの回収データを含めた取得データ数とクラウドサーバーに送られたデータ数を比較し、データの『取得率』で本システムの信頼性を評価することとした。データの『取得率』は以下のとおり定義される。

測定点…各月の理論上の測定回数（1分単位で測定した場合の測定回数）

クラウドデータ数…NCからクラウドサーバーに転送されたデータ数

NC内データ数…MGBからNCに転送されたデータ数

上位通信欠損回数…NC内データのうち、クラウドサーバーに転送されなかったデータ数

上位通信取得率…NCからクラウドサーバーへのデータ転送の成功率（下式により算出）

$$\text{上位通信取得率}[\%] = \frac{\text{クラウドデータ数}}{\text{NC内データ数}} \times 100$$

ローカル通信欠損回数…測定点のうち、NCに転送されなかったデータ数

ローカル通信取得率…MGBからNCへのデータ転送の成功率（下式により算出）

$$\text{ローカル通信取得率}[\%] = \frac{\text{NC内データ数}}{\text{測定点}} \times 100$$

システム欠損回数…測定点のうち、クラウドサーバーに転送されなかったデータ数

システム取得率…ローカル通信及び上位通信を介したクラウドサーバーへのデータ転送の成功率

(下式により算出)

$$\text{データ取得率}[\%] = \frac{\text{クラウドデータ数}}{\text{測定点}} \times 100$$

マイクロ SD 保存欠損回数…測定点のうち、マイクロ SD に保存されなかったデータ数

マイクロ SD 保存取得率…マイクロ SD へのデータ保存の成功率 (下式により算出)

$$\text{マイクロ SD 保存取得率}[\%] = 100 - \frac{\text{マイクロSD保存欠損回数}}{\text{測定点}} \times 100$$

表 4.6-3 に示したシステムの改造・調整を含めてシステム設置から撤去までの各データの『取得率』の変化を図 4.6-24 から図 4.6-27 に示す。

表 4.6-3 システム改造・調整の内容

対応年月日	MGB	NC	その他
2016/6/1～ 6/3	①電源電圧 2.7V 未満 micro SD 書き込み禁止機能追加	①上位通信再送信機能追加	
2016/8/22～ 8/24	①ローカル通信再送信機能追加 ②ローカル通信送信タイミング調整 ③積雪量計測アルゴリズム変更	①ローカル通信再送信機能対応追加 ②ローカル通信送信タイミング調整対応追加 ③衛星/3G 通信切替機能追加 ④システム状況に応じた衛星通信 OFF 機能追加 ⑤カメラ高解像度設定対応	①圧力センサー電源分離 + 太陽光外装装置追加
2016/12/5～ 12/7	①micro SD、micro SD カードスロット交換 ②MGB 時刻ずれ発生時ローカル通信接続機能追加		
2017/2/6～2/8			①積雪計動作確認

表 4.6-3 に示すシステムの改造・改修により、現地からクラウドサーバーに送られる正味のデータ数の割合 (データ取得率) がどのように向上したかについて整理した結果が表 4.6-4 である。

平成 28 年度の第 1 回目の改造・改修ではケース A の電源基板交換による MGB 単体機能の信頼性改善を行うとともに、上位通信再送信機能を組み込んだ。これに伴い、MGB\_1A 及び MGB\_2A からのデータ取得率が回復したが、その他 MGB からのデータ取得率は 85% から 100% となっており、大きな改善は見られなかった。第 2 回目の改造・改修ではローカル通信の再送信機能の組み込み、圧力計測系電源の分離等の改造を行った。これに伴い、MGB\_2A を除くその他の MGB からのデータ取得率は 100% 近くまで改善した。第 3 回目の改造・改修では MGB\_1A 及び MGB\_2A の micro SD とスロット基板を交換したのみで、各 MGB からのデータ取得率は 100% 付近で安定している。



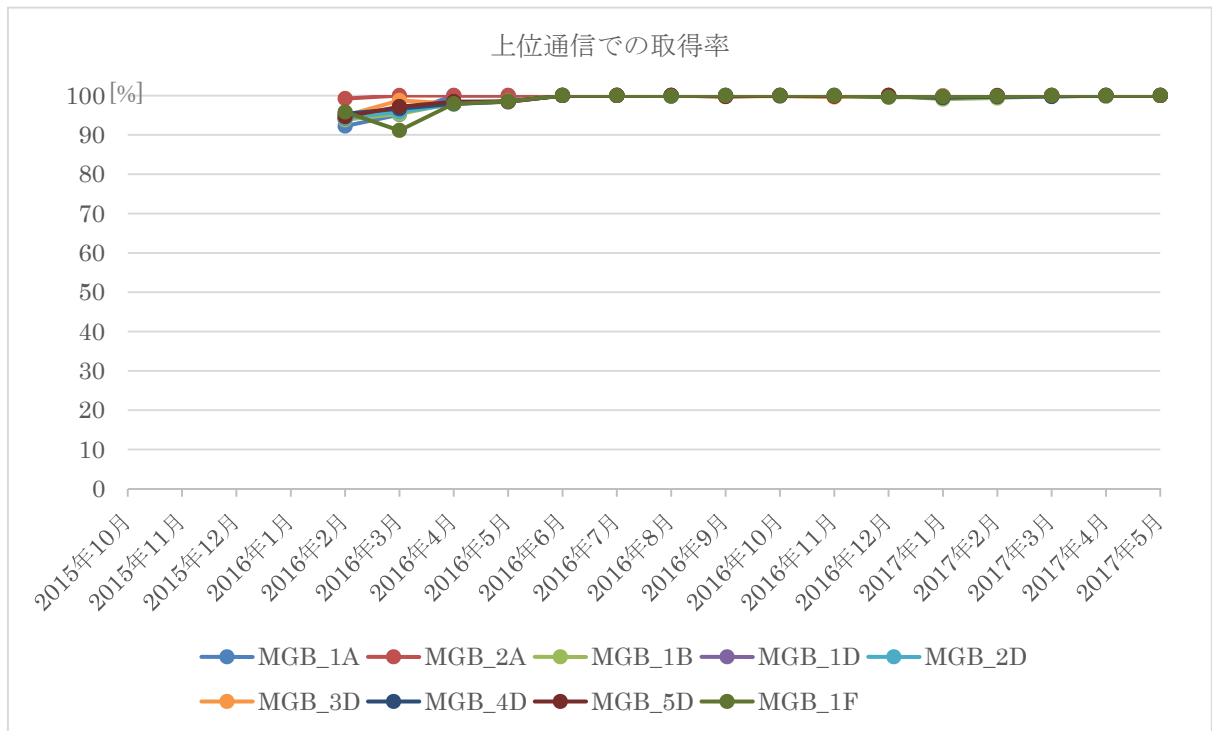


図 4.6-24 上位通信取得率

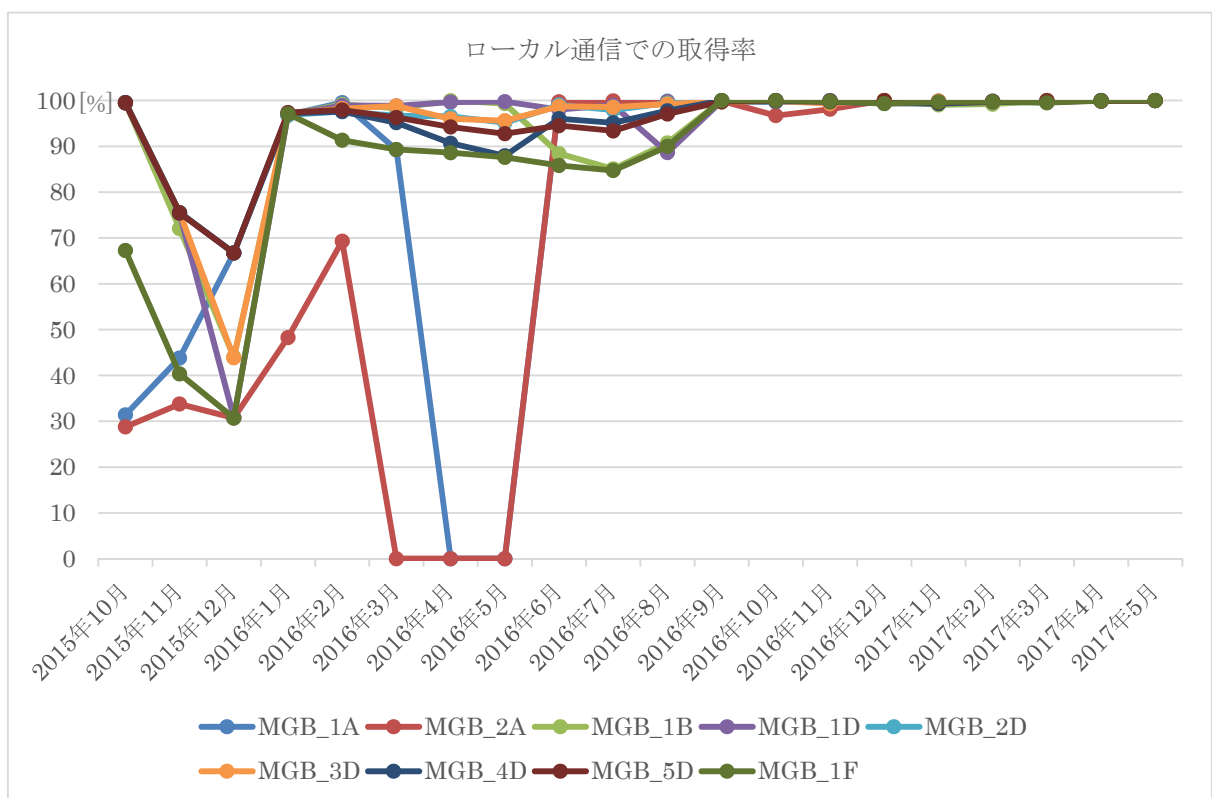


図 4.6-25 ローカル通信取得率

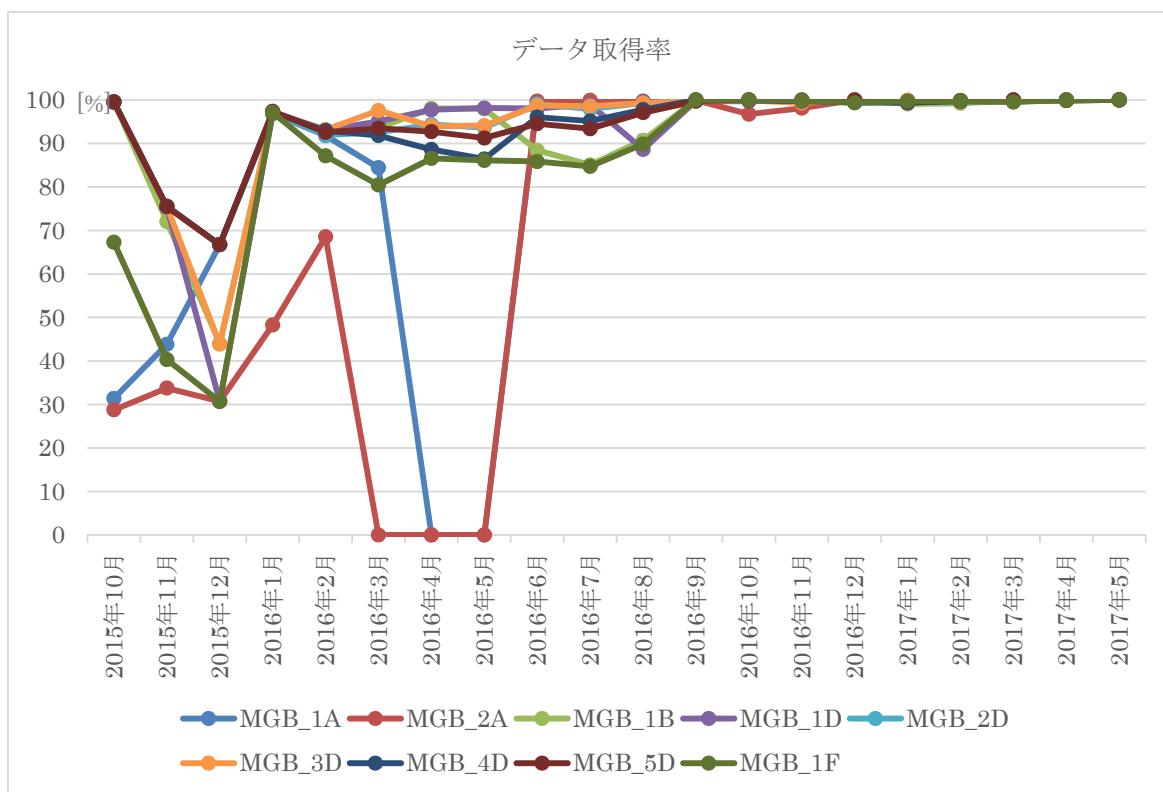


図 4.6-26 データ取得率

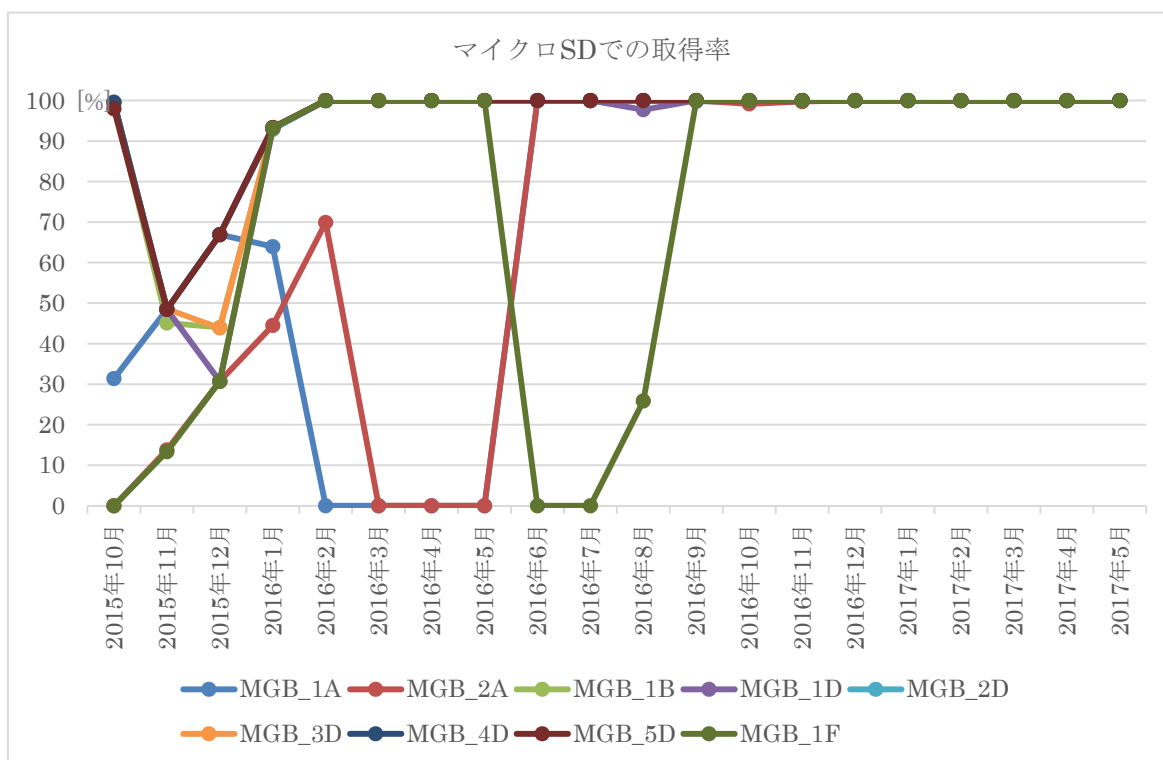


図 4.6-27 マイクロSD 保取得率

表 4.6-4 無人計測システムのデータ取得率

システムの欠損率(現地でのデータ回収を含まない。)

データ取得率[%]	2016年2月	2016年3月	2016年4月	2016年5月	2016年6月	2016年7月	2016年8月	2016年9月	2016年10月	2016年11月	2016年12月	2017年1月
MGB_1A	91.793	84.406	0.000	0.000	99.660	99.619	99.713	99.706	99.673	99.986	99.983	99.724
MGB_2A	68.534	0.000	0.000	0.000	99.689	99.813	99.600	99.921	96.709	98.100	99.998	99.731
MGB_1B	92.991	93.607	98.023	97.930	88.408	85.065	90.723	100.000	99.996	99.954	99.995	98.109
MGB_1D	93.061	95.067	97.704	98.109	98.032	98.952	88.625	99.722	99.998	99.991	99.385	98.918
MGB_2D	91.903	92.558	94.294	93.631	99.012	97.926	99.282	99.722	100.000	99.574	99.841	99.460
MGB_3D	93.158	97.556	93.914	94.061	98.711	98.542	99.210	99.444	99.731	98.880	99.998	99.724
MGB_4D	92.953	91.806	88.600	86.420	96.044	95.130	97.771	100.000	99.731	99.565	99.085	98.784
MGB_5D	92.528	93.491	92.685	91.237	94.524	93.362	97.071	99.438	100.000	99.713	99.990	99.299
MGB_1F	87.145	80.437	86.539	86.091	85.826	84.716	89.859	100.000	100.000	99.808	98.876	99.406
全MGB	89.341	80.991	72.418	71.942	95.546	94.803	95.761	99.773	99.538	99.508	99.683	99.240
MGA_1A2A以外	91.963	92.073	93.108	92.497	94.385	93.385	94.649	99.761	99.922	99.641	99.596	99.100

※データ回収を含めた場合の取得率は、micro SDのデータ取得率に等しい。

3回に分けて行ったシステムの改造・改修が、データ取得率にどのように変化を与えたかを見るため、各改造・改修作業後のデータ取得率をMGB毎に整理した(表4.6-5)。この表から第2回目のシステム改造・回収がMGB全体のデータ取得率を押し上げ、システムの信頼性を向上させたことがわかった。

表 4.6-5 システムの改造・改修後のデータ取得率

改造・改修	第1回実施後	第2回実施後	第3回実施後	参考 1	参考 2
データ取得率[%]	ケースA電源基板改修 上位通信 再送信機能追加 (6月~8月)	ローカル通信 再送信機能追加 ※H28年度改造完了 (9月~11月)	micro SD交換 ※2016年12月メンテナ ンス後 (12月~2017年1月)	H28年度調査通算 (2016年2月~ 2017年11月)	H27年度 最終状態 (2月~5月)
MGB_1A	99.663	99.787	99.847	80.723	42.815
MGB_2A	99.815	98.226	99.858	71.231	15.725
MGB_1B	87.989	99.983	99.004	95.460	95.707
MGB_1D	95.224	99.905	99.140	97.352	96.069
MGB_2D	98.763	99.768	99.641	97.270	96.455
MGB_3D	98.817	99.356	99.854	97.760	94.730
MGB_4D	96.294	99.765	98.927	95.465	89.855
MGB_5D	94.959	99.720	99.627	96.121	95.222
MGB_1F	86.774	99.937	99.155	91.588	84.970
全MGB	95.366	99.605	99.450	91.441	79.061

また、無人計測システム撤去時に2017年1月以降も各種データ取得率がほぼ100パーセント近くで安定していることが確認でき、実運用に差し支えないレベルの信頼性を備えた無人計測システムとなることが実証された。

## 5. 設備の撤去・原形復旧

平成18年以降幌延町上幌延地区において実施したコントロール掘削及び孔内調査の技術開発は、農業振興地域の整備に関する法律第15条の2の規定により許可を受けて行った。このため全体計画に沿った技術開発の進捗に応じて不要設備を撤去し、最終的に元の農用地に原形復旧することとした。

コントロール掘削技術開発が完了した平成25年度の翌年度にコントロール掘削用の地上設備を撤去した。また、孔内モニタリング技術開発が終了した平成29年度には幌延町上幌延地区の二つの試験孔

井（HCD-3 孔と HMD-1 孔）の廃孔処理を行い、元の農用地に原形復旧した。

### 5.1 地上設備撤去

北海道幌延町上幌延地区の試験サイトのコントロールボーリング孔井(HCD-3)において、平成 25 年度まで孔曲げ掘削技術の現地適用性評価試験と孔井内における各種特性調査技術の現地適用性評価試験が行われてきた。また、平成 25 年度に長期間にわたる孔内水圧変化の計測を目的とした「孔内モニタリングシステム」が設置され、計測が始まった。HCD-3 孔のボーリング掘削及び孔内調査の開発はこれをもって終了した。幌延町上幌延地点におけるこれらの技術開発は幌延町から開発行為許可を受けて行ってきた。許可条件として試験調査が完了した段階ですみやかに地上設備の撤去を行うことになっていたことから HCD-3 孔の掘削、調査に用いた地上設備の撤去を平成 26 年 6 月末日に完了した。地上設備の配置は図 5.1-1 に示すとおりである。

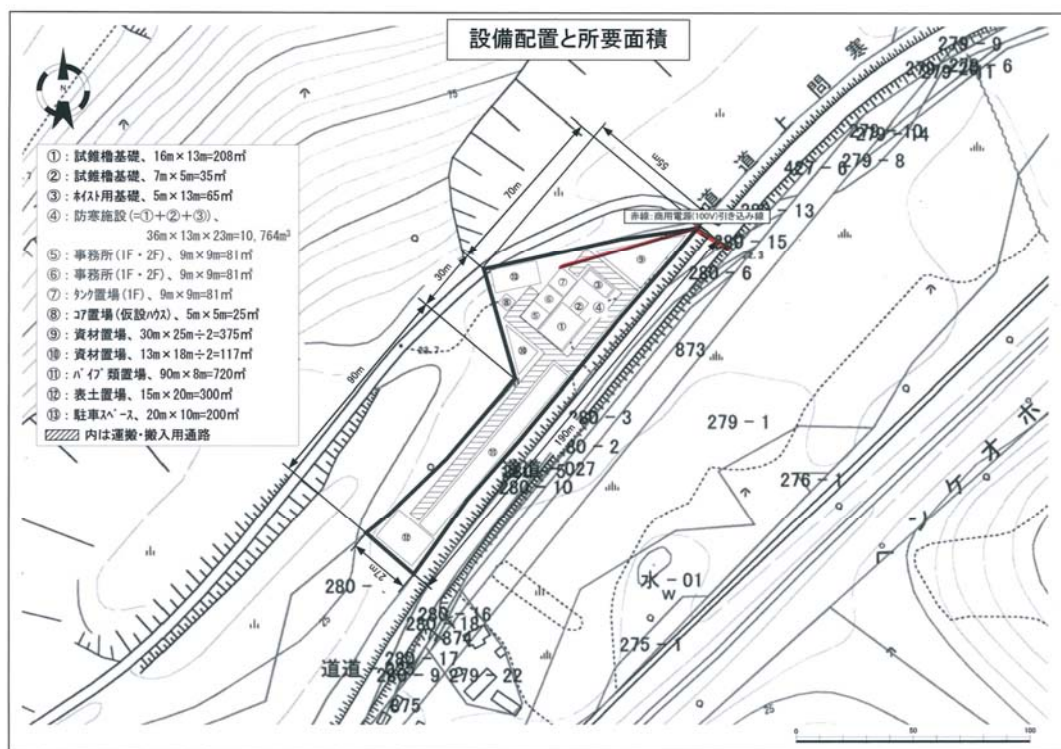


図 5.1-1 HCD-3 孔試験機調査設備配置

現場事務所として使用していた組立式プレハブハウスから撤去作業を開始し、順次防寒施設、防寒施設内機材を解体撤去していった。撤去作業のフローならびに撤去対象品目は図 5.1-2 に示すとおりである。HCD-3 孔の口元部、口元部のコンクリート製の大型枡(セーラ)ならびに防寒施設本体基礎コンクリートと試験機の基礎コンクリートは孔内モニタリング計測を継続するため残置した。

これら設備の撤去前の状況は図 5.1-3、図 5.1-4 に示すとおりである。現地で実施した各撤去作業内容を以下に記す。

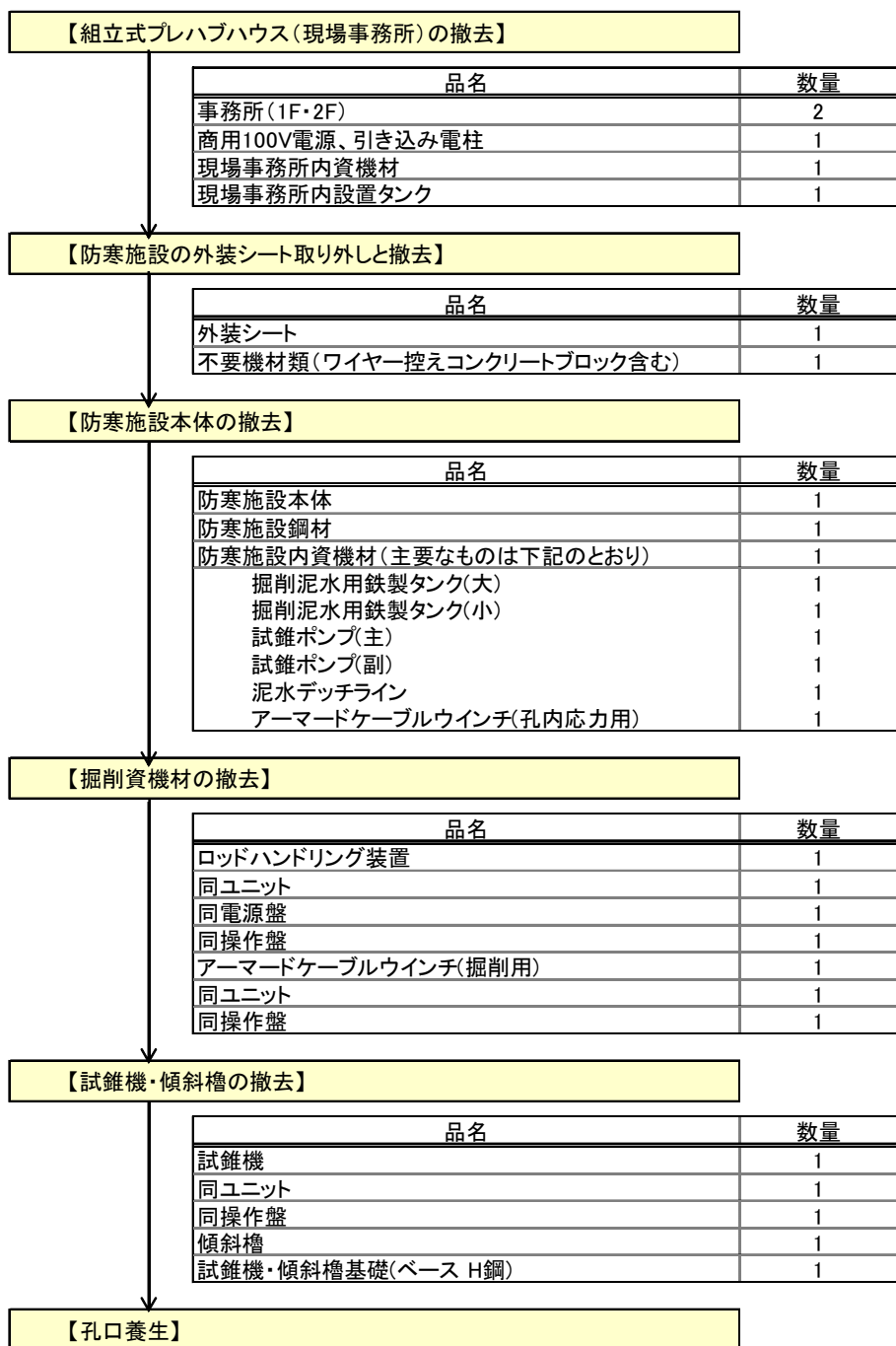


図 5.1-2 撤去作業の流れと主要な撤去対象品目

### 5.1.1 組立式プレハブハウス(現場事務所)の撤去

防寒施設の撤去に先立ち、隣接するプレハブ構造の現場事務所の解体を以下の手順に沿って行った。

#### ①商用 100V 電源、引き込み電柱の撤去

商用電源(100V)の引き込み線と引き込み電柱の取り外し、撤去作業。

#### ②現場事務所内資機材の搬出

現場事務所内に保管されている掘削用機材や計測用機器、保安用具等の資機材の撤去・搬出。

### ③現場事務所の撤去

掘削用清水貯留用の鋼製タンクの撤去・搬出及び現場事務所の解体・撤去作業。



図 5.1-3 現場事務所（組立式プレハブハウス）及び防寒施設

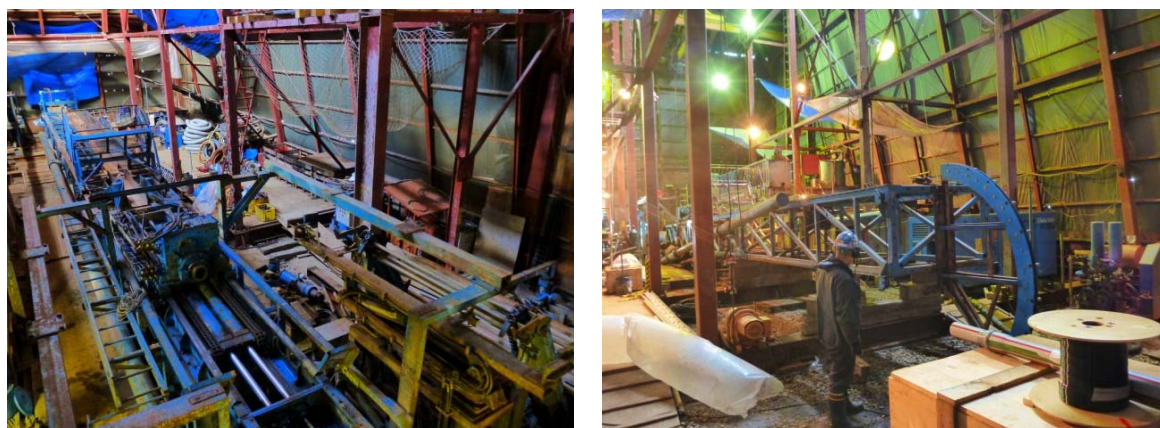


図 5.1-4 防寒施設内の掘削資機材

#### 5.1.2 防寒施設の外装シート取り外しと撤去

荒天時や夜間作業における良好な作業環境の確保や掘削資機材を保護するために設置した防寒施設（仮設構造物）を覆う外装シートの撤去を以下の手順で行った。

##### ①外装シート固定物の取り外し

外装シート本体を固定している” 栈木 ” や ” 垂木 ” ならびに電気・通信配線や掘削用機材などの付帯物の取り外し

##### ②外装シートの取り外し

防寒施設全体を覆っている外装シートの取り外し。

##### ③不要機材類の取り外しと撤去

外装シートの取り外し後、防寒施設の構成部材（鋼材）に取り付けられている滑車やワイヤケーブル、照明設備などの不要機材の取り外しならびに作業敷地内の不要物の撤去・搬出。



図 5.1-5 外装シート取り外し前と取り外し後

### 5.1.3 防寒施設本体の撤去

防寒施設本体を構成している鋼材の解体・撤去を以下の手順で行った。

#### ①防寒施設内資機材の撤去・搬出

防寒施設内に保管されている掘削用機材、計測用機器、保安用具等の資機材の撤去・搬出。

#### ②防寒施設本体の解体

防寒施設本体を構成している H 鋼・アングル鋼・ターンバックル・すじかいなどの鋼製部材の解体。

#### ③鋼製部材の搬出・廃棄

解体した鋼製部材の搬出・廃棄処理（産業廃棄物）。



図 5.1-6 防寒施設本体解体作業状況

#### 5.1.4 掘削資機材の撤去

過年度までの現地適用性評価試験において使用した下記の掘削用機材とこれらに付帯する資材の撤去・搬出。



図 5.1-7 試錐機操作盤・掘削用アーマードケーブルウィンチ搬出状況

#### 5.1.5 試錐機・傾斜槽の撤去

過年度までのコントロールボーリング掘削作業や孔井を使用した各種の現地適用性評価試験において使用した試錐機本体と傾斜槽、及びこれらに付随する以下の掘削機材の解体・撤去・搬出・廃棄処理（産業廃棄物）。



図 5.1-8 試錐機本体・マスト基礎鋼解体撤去状況

#### 5.1.6 孔口養生

開口部となる孔口に鋼製蓋を設置して養生するとともに、撤去作業期間中計測を中断していたモニタリング計測システムを再開した（図 5.1-9）。これをもって地上設備の撤去作業を完了した（図 5.1-10）。





養生前



養生後

図 5.1-9 孔口部養生状況（養生前と養生後）



図 5.1-10 地上設備撤去後の試験サイト全景（北海道幌延町上幌延地区）

## 5.2 廃孔及び原形復旧

一連の孔内モニタリング技術開発で使用した北海道幌延町上幌延地区の2本のコントロールボーリング孔(HMD-1及びHCD-3)は農業振興地域の整備に関する法律で指定される農用地に設置されており、開発許可期限の平成29年6月30日までに農地利用に支障のないように原形復旧すること、とされていた。このため、平成29年5月から6月に無人計測システム（地上設備）の撤去、HCD-3孔内のモニタリングシステムの回収、廃孔（HMD-1孔及びHCD-3孔の孔井埋戻し）、基礎・舗装の撤去、設備撤去後の埋戻し・整地を行い、技術開発・調査を開始する前の農用地の状態に復元した。

### 5.2.1 無人計測システム撤去

撤去作業開始前にmicro SDならびにNC内に収納されているモニタリングデータの回収を行い、発電機停止措置及びバッテリー接続解除を行い、実証用のモニタリング無人計測システム機器ならびに設置用構造物を分解し、適正に廃棄処分した。撤去に際して、無人計測システムを構成する各機器、機材の劣化状態を確認した。一部の機器に若干の腐食等の経年劣化が確認されたが、システム障害を起すような劣化は確認されなかった。

無人計測システム撤去前後の全景を図5.2-1、図5.2-2に示す。

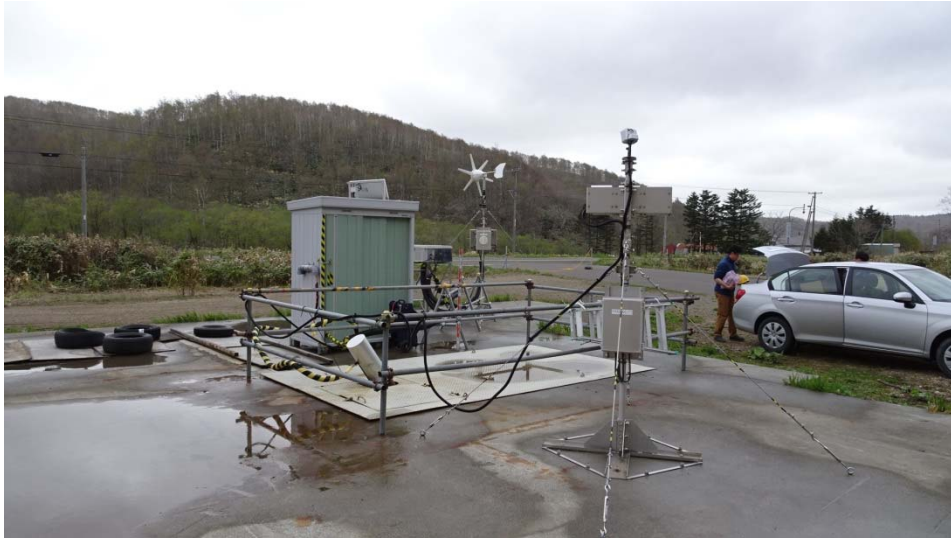


図 5.2-1 無人計測システム撤去作業前全景



図 5.2-2 無人計測システム撤去作業完了後の全景

## 5.2.2 モニタリングシステム回収

### (1) パッカー収縮作業

スタンドパイプ内に設置していたミニパッカーを収縮し、ミニパッカー及び圧力センサーを、特に引っ掛かりもなく、回収した。また各区間において、窒素ガスの圧入によるパッカー拡張水の回収と窒素ガスにより拡張したパッカーの収縮を交互に実施し、パッカー拡張水の回収を行った。

### (2) モニタリングシステム回収作業

事前に決定した手順に従ってモニタリングシステムの回収作業を実施した。越し切り時及びパッカーが裸坑部から NL140 ロッド内に入る箇所荷重の増加が見られたが、強引（ボーリングマシン+チェーンブロック：最大荷重 5.0 t 超の併用）により回収した。この結果、すべてのシステムケーシング



図 5.2-3 モニタリングシステム回収前状況



図 5.2-4 回収したミニパッカーと圧力センサーならびに回収したパッカー拡張水

及びパッカー、インターバルアクセスモジュールを回収することができた。

図 5.2-5、図 5.2-6 にモニタリングシステム回収状況を、図 5.2-7 及び図 5.2-8 に立ち上げ管回収状況及び回収後の坑口状況を、図 5.2-9 にパッカー回収状況（強引）を、図 5.2-10 にパッカー回収状況を、図 5.2-11 から図 5.2-15 に回収したパッカーを、図 5.2-16 に変形したパッカーを、図 5.2-17 に回収したモニタリング装置を示す。

回収したパッカーは真円に戻っていなかった（図 5.2-11 から図 5.2-16）。平成 20 年度に HMD-1 孔からモニタリングシステムを回収した際にも回収したパッカーは真円に戻っていなかった。原因としては、パッカーが拡張限界に近い真円でない孔内に長期間にわたり同じ形状で保持されていたこと、 $35^\circ$  の斜孔であるため自重の影響でパッカーが均一に収縮できなかったことなどにより扁平が生じた

と考えられる。パッカー拡張前の口径に戻すためにパッカー拡張水を 80%以上回収することを目標としていたが、斜孔におけるパッカーは均一に収縮しないことを前提にパッカー拡張水はできるだけ回収することが望ましいことが明らかとなった。



図 5.2-5 モニタリングシステム回収状況（全景）



図 5.2-6 モニタリングシステム回収状況①



図 5.2-7 立ち上げ管回収状況



図 5.2-8 立ち上げ管回収後の坑口状況



図 5.2-9 モニタリングシステム回収状況（強引）



図 5.2-10 バッカー回収状況



図 5.2-11 回収したパッカー (パッカー⑤)



図 5.2-12 回収したパッカー (パッカー④)



図 5.2-13 回収したパッカー (パッカー③)



図 5.2-14 回収したパッカー (パッカー②)



図 5.2-15 回収したパッカー (パッカー①)



図 5.2-16 パッカー変形部 (パッカー②)



図 5.2-17 回収したモニタリングシステム

### 5.2.3 廃孔

廃孔処理するHCD-3孔とHMD-1孔のケーシングプログラムを表 5.2-1 及び表 5.2-2 に示す。

表 5.2-1 HCD-3 孔のケーシングプログラム

段	ケーシング	ケーシングサイズ (mm)	設置区間 (m)
1	口元保護管	OD:362.0 / ID:	0 ~ 8.50
2	14" SGP	OD:355.5 / ID:339.8	0 ~ 8.50
3	12" STPG	OD:318.5 / ID:297.9	0 ~ 20.00
4	10" STPG	OD:267.4 / ID:248.8	0 ~ 52.16
5	8" STPG	OD:216.3 / ID:199.9	0 ~ 195.00
6	7" 仮ケーシング	OD:177.8 / ID:157.8	0 ~ 194.70
7	NL140 ロッド		0 ~ 206.00
7a	NL140 ロッド		218.00 ~ 247.50

表 5.2-2 HMD-1 孔のケーシングプログラム

段	ケーシング	ケーシングサイズ (mm)	設置区間 (m)
1	8" SGP	OD:216.3 / ID:199.9	0 ~ 10.60
2	6" SGP	OD:165.2 / ID:155.2	0 ~ 10.60
3	NL140 ロッド		0 ~ 60.70
3a	NL140 ロッド		66.2 ~ 81.00



また、HCD-3 孔及び HMD-1 孔の概要図は図 5.2-18 と図 5.2-19 に示すとおりである。

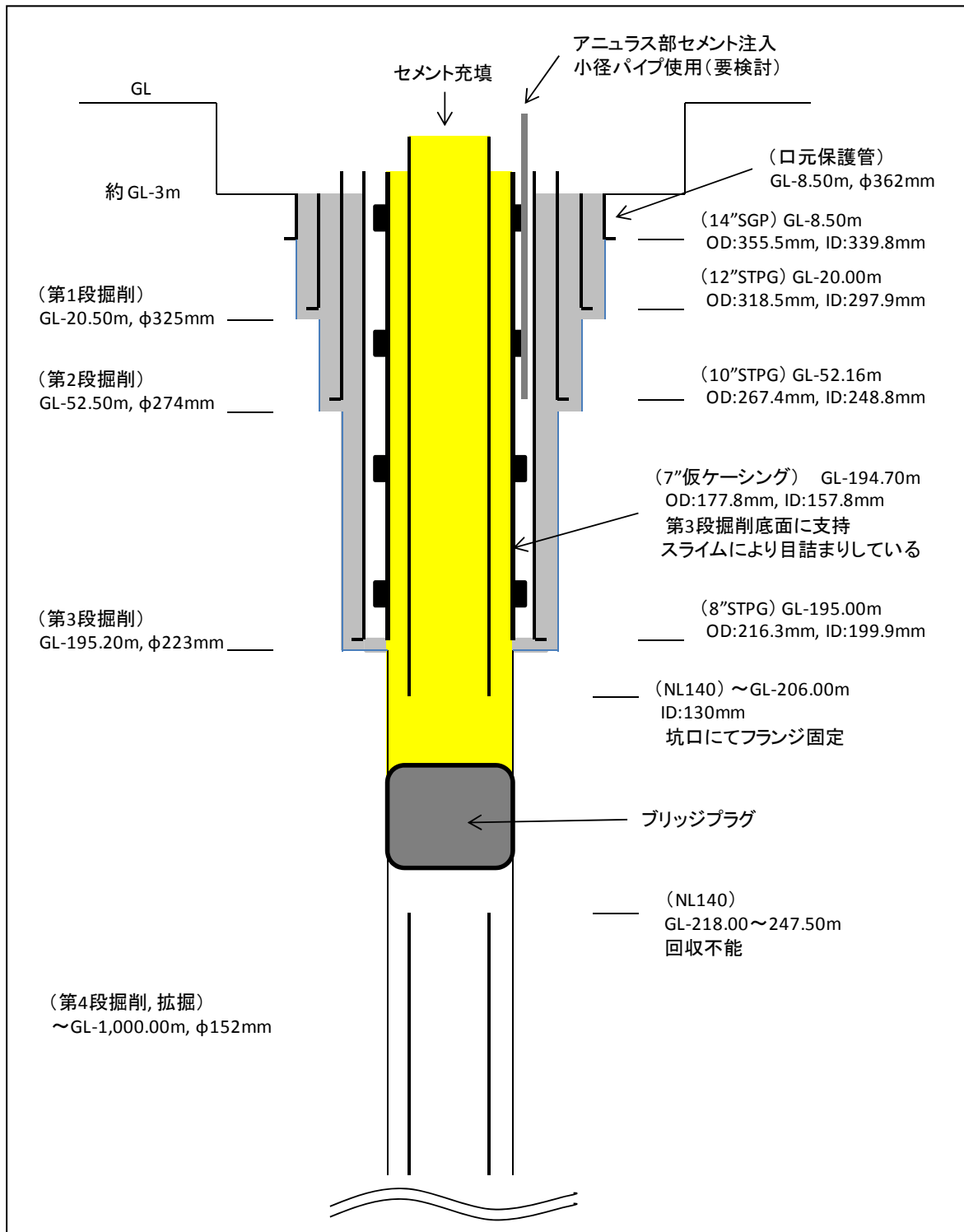


図 5.2-18 HCD-3 孔概要図

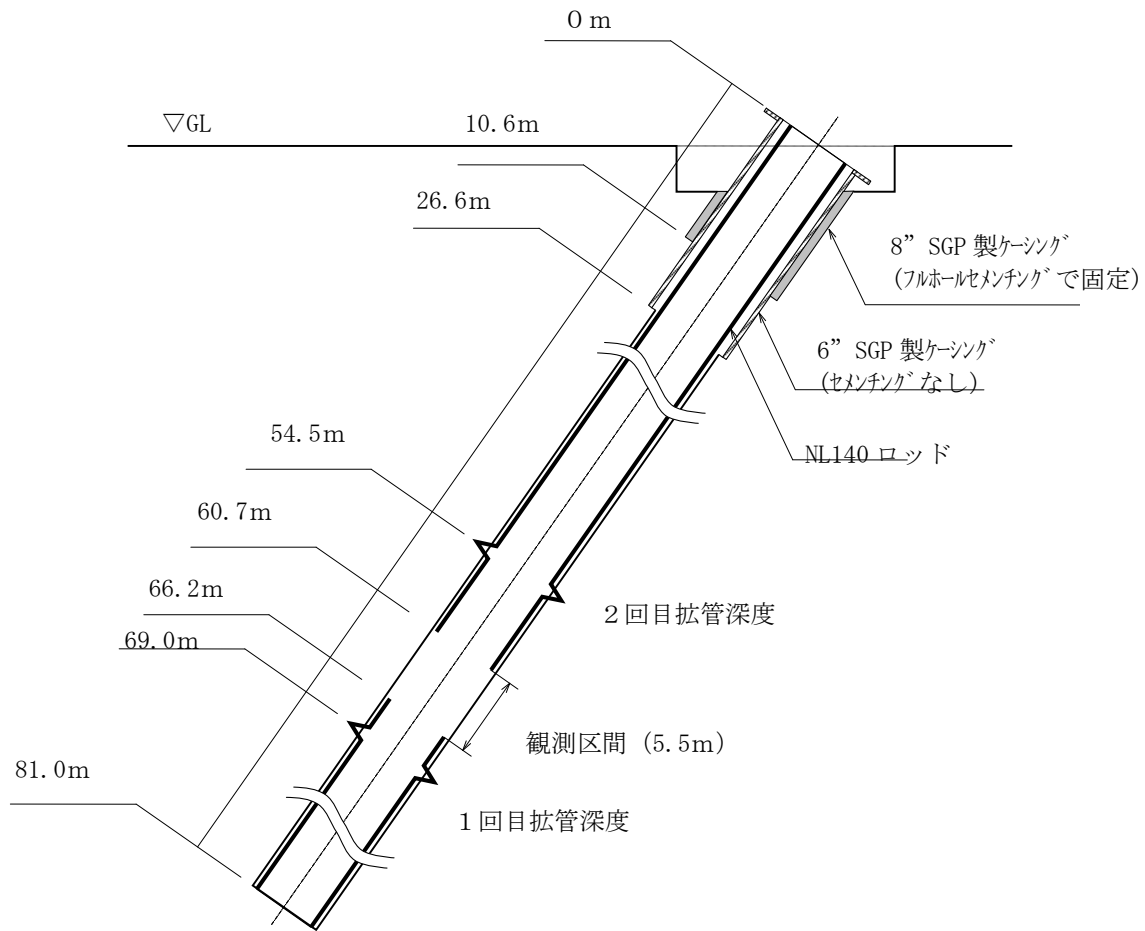


図 5.2-19 HMD-1 孔概要図

(1) HCD-3 孔廃孔

本孔はすでにスライムなどにより目詰まりしており、回収は不能な状況にあった。廃孔方法は、NL140 ロッドの下端 (GL-206.00m) から下位の NL140 ロッド上端 (GL-218.00m) 間の裸孔部 ( $\phi 152\text{mm}$ ) にブリッジプラグ (プラグパッカー) を設置し、その上位の孔内のフルホールセメンチングを行うこととした (図 5.2-18)。また、孔口部は GL-1.6m において外側のケーシングを 200A サイズの鉄蓋フランジで完全に閉塞し、アニュラス部に高圧セメンチングを行うこととした。セメンチング終了後、セーラー内をコンクリートで充填し、セーラー内に納められていた孔口をそのままコンクリートで被覆して、さらに軟岩で埋設して原状回復を行うこととした。

孔内状況の把握及びプラグパッカーの設置位置を決定するためキャリパー検層を行った。キャリパー検層の結果、孔内裸孔部分の内径は概ね  $\phi 166\text{mm} \sim \phi 167\text{mm}$  の値を確認し、埋孔用プラグパッカーが安全に通過することを確認した。プラグパッカーは裸孔部上部の深度 207.5m に設置することとした。キャリパー検層結果を図 5.2-20 に示す。

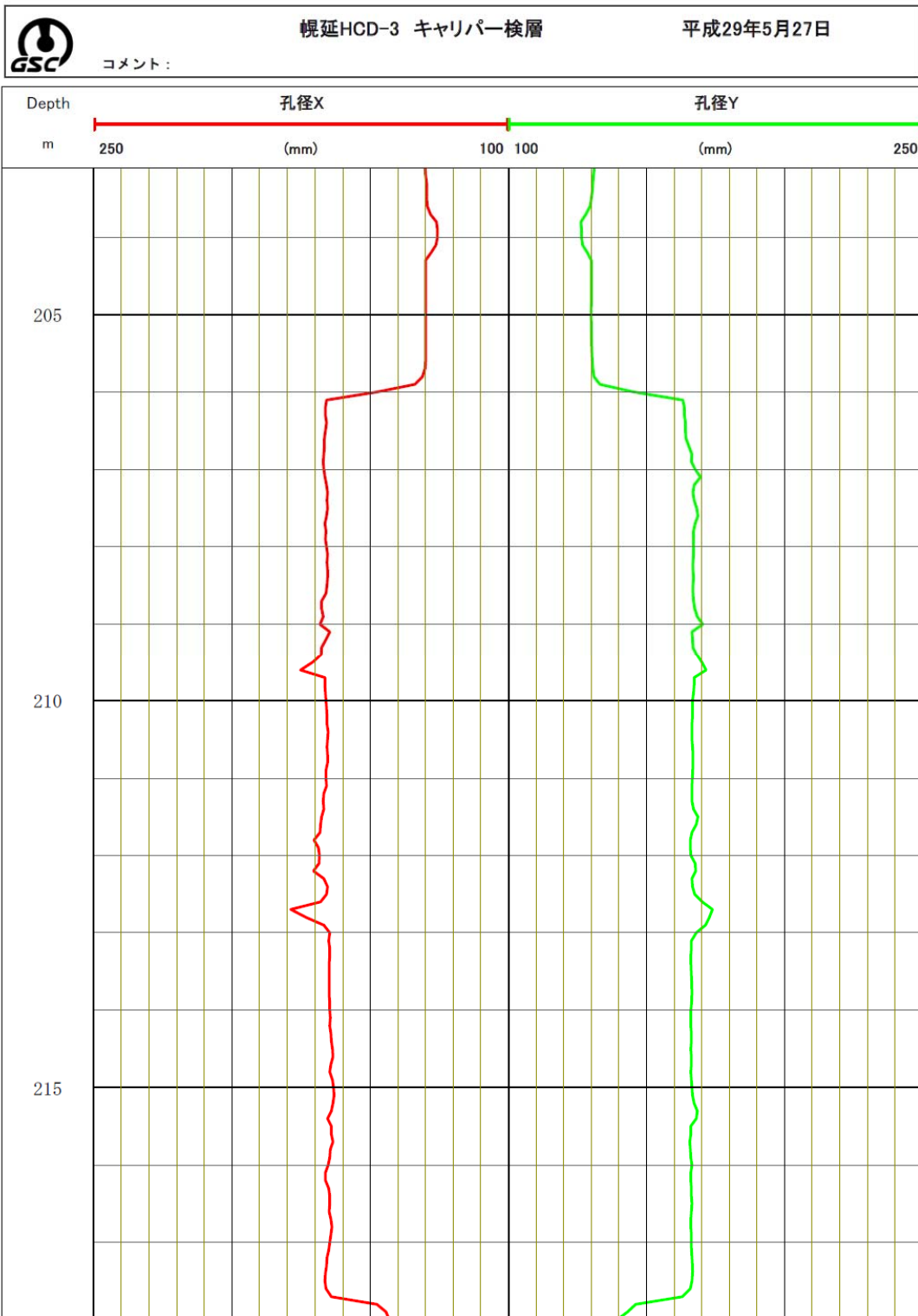


図 5.2-20 キャリパー検層結果図

プラグパッカーにはニューマチックパッカーを使用し、所定の深度（深度 207.5m：裸孔部上部）に設置後、窒素ガスで拡張した。プラグパッカーの降下作業には小径の JIS φ 40.5mm のパイプを使用し、パッカーの拡張圧力をパッカーの降下深度（水圧）に合わせて常に 0.11MPa（パッカー径 120mm）を保

つようにきめ細かな送ガスを行いながらパッカー降下を行った。



図 5.2-21 プラグパッカー（ニューマチックパッカー）



図 5.2-22 プラグパッカー設置・拡張状況

プラグパッカー設置後、プラグパッカーの閉塞機能を確認しながら 3 回に分けてセメンチングを行った。3 回目のセメンチングでは 7” ケーシングパイプと外側の 8” STPG ケーシング間のアニュラスへの高圧セメンチングも行うため、孔口上部を 200A サイズの鉄蓋フランジで完全に閉塞し、孔口装置のドリリングスプールからアニュラス部へ 2.0MPa の高圧セメンチングを行った（図 5.2-23）。



図 5.2-23 高圧セメンチング実施状況（HCD-3 孔）

セメンチング完了後、フランジの天端から 0.20m 下まで 40mm 切込碎石をセーラー内に充填するとともにフランジの天端から 0.30m 上までコンクリートを打設して孔口のコンクリート被覆を完了した(図 5.2-24、図 5.2-25)。



図 5.2-24 コンクリートによる埋孔状況



図 5.2-25 コンクリート打設完了状況

## (2) HMD-1 孔廃孔

本孔は NL140 ロッドが孔内で固定され回収不能であることから、NL140 ロッド内のフルホールセメンチングを行うこととした。また、孔口部は、NL140 ロッド及び 6 インチ SGP 製ケーシングを切断し、6 インチ SGP 製ケーシングに鉄板を溶接し、その上部をセメントスラリーで覆い、土砂で埋設し、原状回復することとした。

セメンチングはセメンチング用の小径パイプを人力で孔内に挿入し、2 回に分けて行った(図 5.2-26)。2 回目のセメンチング終了後、既存の NL140 ロッドと 6 インチ SGP 製ケーシングのアニユラス部に孔口からセメントスラリーを追加注入した。



図 5.2-26 セメンチング実施状況 (HMD-1 孔)

セメンチング完了後、孔口周辺を深さ 2.5m まで掘削し、NL140 ロッド及び 6 インチ SGP 製ケーシングの切断、外側の 6 インチ SGP 製ケーシングへの鉄板溶接後、孔口をセメントスラリーで被覆し、転圧埋戻しを行い HMD-1 孔の孔口コンクリート被覆を完了した (図 5.2-27、図 5.2-28)。



図 5.2-27 鉄板溶接した孔口とセメントスラリー被覆準備 (型枠設置)



図 5.2-28 HMD-1 孔口コンクリート被覆、埋戻し状況

#### 5.2.4 原形復旧

##### (1) コンクリート基礎・アスファルト舗装撤去

コントロールボーリング掘削時に設置したコンクリート基礎ならびに HCD-3 孔のセーラー側壁を撤去した。また、農用地にかかる進入路のアスファルト舗装を撤去した。これら作業で発生したコンクリート塊ならびにアスファルト塊は産業廃棄物として適正に処分した。



図 5.2-29 コンクリート基礎破碎ならびにコンクリート塊積込・搬出状況

##### (2) 埋戻し・整地

農用地としての利用に支障のないように設備等撤去後の凹地の埋戻し及び整地を行った。埋戻し材料には「農用地としての支障のないように原形復旧する」ことから、現地採取した軟岩を使用した。



図 5.2-30 埋戻し・転圧作業状況ならびに整地作業完了状況

#### 6. ボーリング調査技術の体系化

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いるため、これらの技術を実際に運用する際に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、調査技術のおおよその実用化の目途をつけた平成 25 年度にこれら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、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た。

平成 25 年度末に設置した孔内モニタリング装置による計測を平成 29 年度の初めまで実施した。途中、孔内間隙水圧の計測を無人計測システムに切り替えた。平成 27 年度から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、コントロール掘削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技術の体系化をはかり、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。

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、掘削・調査手順書と孔内モニタリング手順書を統合した。統合した手順書は、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たものである。実際にサイト選定調査を実施する技術者や管理者を手引書の利用者として想定しており、概要調査などの掘削、調査計画の立案に資するものとしている。手順書は 5 つの章から構成されている。手順書の目次構成は下記のとおりであり、手順書を本報告書の APPENDIX として巻末に添付する。

手順書タイトル：「コントロールボーリング掘削・調査技術の体系化ー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ー」

手順書目次：

## 第 1 章 はじめに

### 1-1 背景

### 1-2 目的

### 1-3 開発目標

### 1-4 掘削・調査技術の特長

## 第 2 章 精密調査地区選定段階の概要調査

### 2-1 概要調査の概要

### 2-2 概要調査における考慮すべき事項（要件）

## 第 3 章 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

### 3-2 コントロール掘削・調査による地質環境特性の評価



## 第4章 掘削・調査の手順

### 4-1 掘削・調査計画の立案

### 4-2 コントロール掘削

### 4-3 掘削時検層

### 4-4 透水試験・採水・イメージング

### 4-5 孔内応力・力学

### 4-6 孔井内トモグラフィ

### 4-7 モニタリング

### 4-8 モニタリング無人計測システム

## 第5章 掘削・調査結果の評価

### 5-1 コントロール掘削の評価

### 5-2 調査結果の評価

## 7. まとめ

### 7.1 機器の開発及び高度化

#### 7.1.1 コントロール掘削技術の改良

サイドトラック掘削手法について、セメント充填方法、セメント材料、サイドトラック掘削時の計画孔跡、及びサイドトラック掘削手順を検討し、セメントミルク充填方法の作業手順を考案した。また、必要な試作治具として孔内閉塞用パッカプラグを試作した。

#### 7.1.2 孔内計測技術の改良

透水試験・採水・イメージング装置として、試験対象の絞り込みを可能とし、効率的な採水を実現するためのダブルパッカーを改良製作し、室内においてその拡張性能を確認した。また、分光光度計及びケミカルセンサーの動作を室内において確認した。

孔内応力試験装置の改良については、通信試験を実施して孔内応力試験装置と地上部計測機器との通信が問題なく行えることを確認した。また、送り込み装置の機能検証、型どりパッカーの機能検証、ラッチシステムの機能検証を実施した。

#### 7.1.3 物理探査技術の開発・改良

平成22年度、23年度及び25年度に取得したトモグラフィデータを用いて、HCD-3孔井周辺のP波速度構造を求め、その速度構造を用いて平成17年度に取得した反射法データ Line1 の再解析を行った。MDRS処理の適用により、既存処理とくらべて、高精度でより地質解釈が容易な反射断面を得ることができた。この作業を通してコントロールボーリング孔井で実施する弾性波トモグラフィ調査の一連の実施フローを示した。

#### 7.1.4 孔内モニタリング技術の開発

平成24年度までに確立した孔内モニタリング技術及び既存技術の適用性評価や各作業手法を構築するため、平成25年度に北海道幌延町のコントロールボーリング孔井(HCD-3孔)にて「火薬による拡管～ケーシング(NL140 ロッド)切断～観測区間確保～孔内モニタリングシステムの設置、試験運用」までの一連の孔内モニタリングシステム適用に際し、その設置作業を実施し、孔内モニタリングデータを取得した。設置作業に合わせて、火薬による拡管試験、ケーシング(NL140 ロッド)切断試験及びBHTVによる拡管部の管径計測の適用性試験を実施した。

### 7.2 現地適用性検討

#### 7.2.1 コントロールボーリング孔内状況の確認

孔内応力試験装置による現地適用試験前に孔内状況の確認を行った結果、4箇所ではビット荷重が減少傾向を示し、送泥作業を要した。それら区間に対して孔内洗浄を実施することで、抵抗の原因は排除された。送泥による洗浄作業中にマッドロギングシステムでの測定を行うことにより、孔井内状況の改善が確認できた。

孔内モニタリング計測区間を構成するダブルパッカーの設置位置を確認・評価するため孔径検層(キャリパー検層)を行った。孔径検層の結果、当初設置を予定していた3つの区間の掘削径が設計値( $\phi$ 152mm)より拡大していたため、観測区間を変更した。

#### 7.2.2 サイドトラック掘削

コントロール掘削技術の現地適用性評価試験として、既存の掘削装置や地上設備を使用して掘削済みの既存コントロール孔井の一部区間を埋め戻した後に、実際に分岐した新規孔井を掘削した。

掘削孔長663.65mまでのサイドトラック掘削を行い、既存孔との孔心乖離距離約90cm(孔径の約6倍)が得られ、また、サイドトラック区間のコア採取により、応力試験装置の試験区間の選定を実施できた。ノンコアリング掘削時の掘削能率が低く、サイドトラック時の効率化が課題となった。

#### 7.2.3 孔内透水試験・採水

HCD-3において透水試験・採水・イメージング装置を用いた原位置試験を実施し、適用性の検討を行った。改良製作したダブルパッカーを適用して水理試験を行なった結果、圧力測定データからパッカーによる止水性を確認し、ダブルパッカーの適用性を確認した。デッドボリュームの約4倍揚水した後採水を行い、ケミカルユニットの適用性を確認した。

#### 7.2.4 孔内応力測定

幌延地区の地上部で試験装置を組み立て、応力専用アーマードケーブルに接続して、通信の確認を行い、地上部計測機器と通信と計測制御が可能であることを確認した。

横須賀地区において試験孔内に水圧を掛けて孔内応力試験装置の現地適用性試験を実施した。試験

の各検証項目について水圧破砕データの取得を行い、幌延深度相当の 4.5MPa の水圧がかかった状態における装置動作を確認した。

#### 7.2.5 物理探査技術

平成 22 年度、23 年度及び 25 年度に取得したトモグラフィデータを用いて、HCD-3 孔井周辺の P 波速度構造を求めた。またその速度構造を用いて、平成 17 年度に取得した反射法データ Line1 の再解析を行った。MDSR 処理の適用により、既存処理とくらべて、高精度でより地質解釈が容易な反射断面を得ることができた。平成 25 年度まで実施した解析作業をとおして、コントロールボーリング孔井内の弾性波トモグラフィ調査の一連の実施手順ならびに解析手順をとりまとめた。

#### 7.2.6 孔内モニタリング

開発技術を適用してケーシングパイプの拡管、切断を行い、3 つのモニタリング区間を実孔井(HCD-3 孔)に設置した。約 3 年間の水圧データの取得を行うとともに、地下水水質のベースラインを把握するため採水を行った。区間圧力に及ぼす影響要因を抽出し、影響の大きな潮位変動のノイズを除去し、孔内水圧のベースラインを評価した。

採水試料分析のうちのいくつかの水質データは掘削時に得られたコアから得られた水質や希ガス濃度に近い値を示し、採取した地下水が幌延地域の深部地下水の特徴を有していることが明らかとなった。その一方、蛍光染料濃度が高いことからコンタミネーションしていることが明らかであった。掘削水の循環利用により、地下水の水質に近く蛍光染料濃度の高い泥水ができる可能性が示唆されたが、掘削中の泥水の分析値がないことから、その妥当性を確認することができなかった。地下水分析を通して、確からしい水質を得るためには、十分な予備排水が必要であること、さらにボーリング掘削時のトレーサー濃度など孔内水質に影響を及ぼす可能性のある人工的な操作の履歴を記録しておくことが重要であることが明らかとなった。得られた知見を体系化でとりまとめた手順書に留意点として明記した。

電源や通信インフラの整備がなされていない環境下においても概要調査段階における孔内長期モニタリングのデータ回収が可能である無人計測システムの開発を行った。モニタリングデータを遠隔で収集する無人計測システムを平成 27 年 10 月に現地に設置し、1 年余りのシステム運用を通してそのシステムの信頼性を評価した。システム運用期間中のシステム改造・改修の結果、実運用に差し支えないレベルの信頼性を備えた無人計測システムとなることが実証された。

これら孔内モニタリングシステムの運用を通して得られた知見を手順書に取りまとめた。

### 7.3 ボーリング調査技術の体系化

平成 12 年度から開発を進めてきたコントロール掘削、調査技術ならびに平成 26 年度から計測を開始した孔内モニタリングの成果はそれぞれ掘削・調査手順書と孔内モニタリング手順書にとりまとめられてきた。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、概要調査などの掘削、

調査計画の立案に資するものとして二つの手順書を手引書として統合した手順書にまとめた。

## 8. 引用文献

- 1) 木方建造、田中和広、河野愛、松村修治、川越健、大島和夫、岩崎慶次 (1998) 第三紀堆積軟岩における大深度孔井掘削及び調査技術の開発 (その 2) —大深度ボーリング孔への適用—、日本応用地質学会 平成 10 年度研究発表会講演論文集、pp. 225-228.
- 2) 木方建造、田中和広、宮川公雄、岡田哲実、馬原保典、田代寿春、河野愛、川越健 (1999) 第三紀堆積軟岩における地質・地下水調査技術の開発 (その 2) —調査技術の開発と適用—、日本応用地質学会 平成 11 年度研究発表会講演論文集、pp. 167-170.
- 3) 福沢仁之、保柳康一、秋山雅彦 (1982) 北海道天北—羽幌地域の新第三紀珪藻質堆積岩の堆積機構と続成作用、月刊地球、Vol. 4、No. 8、pp. 492-501
- 4) 石井英一、安江健一、田中竹延、津久井郎太、松尾公一、杉山和稔、松尾重明 (2006) : 北海道北部、幌延地域における大曲断層の三次元分布と水理特性、地質学雑誌、Vol. 112、No. 5、pp. 301-314.
- 5) 木方建造、新孝一、鈴木浩一、宮川公雄、岡田哲実、増原康布、井ヶ田徳行、山本真哉、小早川博亮 (2006) : コントロールボーリングによる掘削・調査技術の開発 (フェーズ 1)、電力中央研究所総合報告、N01
- 6) 鈴木浩一、木方建造、宮川公雄、岡田哲実 (2000) : 物理探査データによる地盤物性値の評価法の開発 (その 2) —堆積性軟岩・硬岩を考慮した透水係数の解析法の適用—、日本応用地質学会研究発表会講演論文集、pp. 113-116.
- 7) 木方建造、新孝一、大津正士、宮川公雄、鈴木浩一、岡田哲実、須永崇之、小早川博亮、末永弘、井ヶ田徳行、山本真哉 (2009) : コントロールボーリングによる掘削・調査技術の開発 (フェーズ 2) —掘削・調査システムの高度化と断層への適用—、電力中央研究所報告、総合報告 N03、97p.
- 8) Jager, R., Mann, J., Hocht, G. and Hubral, P. (2001) : Common-reflection-surface stack: Image and attributes, Geophysics, 66, 97-109.
- 9) Mann, J., Schleicher, J. and Hertweck, T. (2007) : CRS Stacking —A Simplified Explanation, Extended abstracts of 69th EAGE Conference & Exhibition, B044.
- 10) Schleicher, J., Tygel, M. and dan Hubral, P. (1993) : Parabolic and hyperbolic paraxial twopoint traveltimes in 3d media, Geophysical Prospecting, 41, 495-5.
- 11) 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.
- 12) 中田弘太郎・長谷川琢磨 (2009) : 地下水年代測定評価技術の開発 (その 10) —北海道幌延地域における  $^4\text{He}$ ・ $^{36}\text{Cl}$  法適用の試み—、電力中央研究所研究報告、N09027.
- 13) 中田弘太郎、長谷川琢磨、東原知広 (2006) : 地下水年代測定評価技術の開発 (その 1) —地下水年代測定のためのコア間隙水中希ガス抽出技術の確立と適用—、電力中央研究所研究報告、N05065.

## 9. 関連資料

- (1) 財団法人 電力中央研究所 (2000) : 高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査等 (高レベル放射性廃棄物処分関連技術高度化調査) -ボーリング技術高度化調査-, 526p
- (2) 財団法人 電力中央研究所 (2001) : 高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査等 (高レベル放射性廃棄物処分関連技術高度化調査) -ボーリング技術高度化調査-, 562p
- (3) 財団法人 電力中央研究所 (2002) : 地層処分技術調査等 (高レベル放射性廃棄物処分関連技術高度化調査) -ボーリング技術高度化調査-, 491p
- (4) 財団法人 電力中央研究所 (2003) : 地層処分技術調査等 -ボーリング技術高度化調査-, 554p
- (5) 財団法人 電力中央研究所 (2004) : 地層処分技術調査等 -ボーリング技術高度化調査-, 735p
- (6) 財団法人 電力中央研究所 (2005) : 地層処分技術調査等 -ボーリング技術高度化調査-, 687p
- (7) 財団法人 電力中央研究所 (2006) : 地層処分技術調査等 -ボーリング技術高度化調査-, 652p
- (8) 財団法人 電力中央研究所 (2007) : 地層処分技術調査等 -ボーリング技術高度化開発-, 747p
- (9) 財団法人 電力中央研究所 (2007) : 地層処分技術調査等 -地下水年代測定技術調査-, 302p
- (10) 財団法人 電力中央研究所 (2008) : 地層処分技術調査等 -ボーリング技術高度化開発-, 653p
- (11) 財団法人 電力中央研究所 (2008) : 地層処分技術調査等 -地下水年代測定技術調査-, 379 p
- (12) 財団法人 電力中央研究所 (2009) : 地層処分技術調査等 -ボーリング技術高度化開発-, 696p
- (13) 財団法人 電力中央研究所 (2009) : 地層処分技術調査等 -地下水年代測定技術調査-, 448p
- (14) 財団法人 電力中央研究所 (2010) : 地層処分技術調査等 -ボーリング技術高度化開発-, 722p
- (15) 財団法人 電力中央研究所 (2010) : 地層処分技術調査等 -地下水年代測定技術調査-, 494p
- (16) 財団法人 電力中央研究所 (2011) : 地層処分技術調査等 -ボーリング技術高度化開発-, 535p
- (17) 財団法人 電力中央研究所 (2011) : 地層処分技術調査等 -地下水年代測定技術調査-, 388p
- (18) 一般財団法人 電力中央研究所 (2012) : 地層処分技術調査等 -ボーリング技術高度化開発-, 338p
- (19) 一般財団法人 電力中央研究所 (2012) : 地層処分技術調査等 -ボーリング技術高度化開発-,  
平成 12 年度～平成 24 年度 とりまとめ報告書、171p
- (20) 一般財団法人 電力中央研究所 (2013) : 地層処分技術調査等 -ボーリング調査技術の確証-, 490p
- (21) 一般財団法人 電力中央研究所 (2014) : 地層処分技術調査等 -ボーリング調査技術の確証-, 127p
- (22) 一般財団法人 電力中央研究所 (2015) : 地層処分技術調査等 -ボーリング調査技術の確証-, 159p
- (23) 一般財団法人 電力中央研究所 (2016) : 地層処分技術調査等 -ボーリング調査技術の確証-, 166p
- (24) 一般財団法人 電力中央研究所 (2017) : 地層処分技術調査等 -ボーリング調査技術の確証-, xxxp
- (25) 木方建造、宮川公雄、鈴木浩一、石山忠幸、窪田亮、川西繁 (2001) : 水理地質構造調査のための  
ボーリング掘削技術の開発 -コントロールボーリングの概念設計と主要装置の試作-, 日本応用

- 地質学会 平成 13 年度研究発表会講演論文集、pp. 311-314.
- (26) Kenzo Kiho, Kimio Miyakawa, Koichi Suzuki, Tadayuki Ishiyama, Ryo Kubota, Shigeru Kawanishi (2002) : Development of Controlled Drilling Technology in Soft Sedimentary Rock, Proceedings of 9th congress of International Association for Engineering Geology and the Environment, pp. 2061-2067.
- (27) 木方建造、宮川公雄、鈴木浩一、水落幸広、石山忠幸 (2002) : 水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発 (その 2) - コントロールボーリングの機器開発 -, 日本応用地質学会 平成 14 年度研究発表会講演論文集、pp. 299-302.
- (28) 木方建造、早川正史、宮川公雄、鈴木浩一、水落幸広、長谷和則 (2003) : 水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発 (その 3) - コントロールボーリング掘削システムの構築と性能試験 -, 日本応用地質学会 平成 15 年度研究発表会講演論文集、pp. 73-76.
- (29) 木方建造、早川正史、宮川公雄、鈴木浩一、水落幸広、長谷和則 (2004) : 水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発 (その 4) - コントロールボーリングの現地適用性検討 -, 日本応用地質学会 平成 16 年度研究発表会講演論文集、pp. 267-270.
- (30) 木方建造、宮川公雄、鈴木浩一、水落幸広、早川正史、長谷和則 (2005) : 水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発 (その 5) - コントロールボーリングの実証試験 -, 日本応用地質学会 平成 17 年度研究発表会講演論文集、pp. 187-190.
- (31) Kenzo Kiho, Kimio Miyakawa, Koichi Suzuki, Masashi Hayakawa, Yasunobu Masuhara (2005) : Development of Technology for Controlled Drilling and Measurement in the Borehole, Proceedings of the 11th Formation Evaluation Symposium of Japan, section L
- (32) 木方建造、新孝一、鈴木浩一、宮川公雄、岡田哲実、増原康布、井ヶ田徳行、山本真哉、小早川博亮 (2006) : コントロールボーリングによる掘削・調査技術の開発 (フェーズ 1)、電力中央研究所 総合報告、N01
- (33) 木方建造、大山隆弘、鈴木浩一、中田英二、田中姿郎、宮川公雄、石井英一、高橋一晴、濱克宏、國丸貴紀、津久井朗太、福島龍朗、瀬谷正巳、青木和弘 (2006) : 幌延における堆積岩の特性研究 - 電力中央研究所 / 日本原子力研究開発機構共同研究成果報告 -, 電力中央研究所 研究報告、N05044
- (34) 木方建造、井ヶ田徳行 (2006) ボーリング技術の最前線 - 4. 計測・コントロールボーリング、土と基礎、Vol. 54、No. 6、Ser. No. 581、pp. 51-58.
- (35) Kenzo Kiho, Kimio Miyakawa, Koichi Suzuki, Yukihiro Mizuochi, Yasushi Komoda, Kazunori Hase, Masato Nakadai (2006) : Development of the Wireline MWD system for Controlled Drilling Technology, The 12th Formation Evaluation Symposium of Japan

- (36) 木方建造、宮川公雄、鈴木浩一、長谷和則、薦田靖志 (2006) : 水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発 (その 6) — 幌延サイトにおけるコントロールボーリングの掘削・調査 —、日本応用地質学会 平成 18 年度研究発表会、pp. 2225-228.
- (37) 木方建造、宮川公雄、鈴木浩一 (2007) : 水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発 (その 7) — コントロールボーリングによる大曲断層の掘削・調査 —、日本応用地質学会 平成 19 年度研究発表会、pp. 139-140.
- (38) 木方建造、宮川公雄、鈴木浩一、岡田哲実、山本真哉 (2007) : コントロールボーリング掘削、調査技術の開発、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、G121-P006
- (39) Kenzo Kiho, Kimio Miyakawa, Koichi Suzuki, Takayuki Sunaga (2008) : Development of Controlled Drilling System, 16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC), Aomori, Japan, PaperID P16P1395
- (40) 木方建造 (2008) : 電中研式コントロールボーリングによる掘削・調査、プロジェクト紹介、岩の力学ニュース、No. 90、pp. 1-4.
- (41) 木方建造、宮川公雄、鈴木浩一、須永崇之、大津正士、長谷和則 (2008) 水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発 (その 8) — 大曲断層の掘削・調査と特性評価 —、日本応用地質学会 平成 20 年度研究発表会講演論文集、pp. 103-104.
- (42) 木方建造、新孝一、大津正士、宮川公雄、鈴木浩一、岡田哲実、須永崇之、小早川博亮、末永弘、井ヶ田徳行、山本真哉 (2009) : コントロールボーリングによる掘削・調査技術の開発 (フェーズ 2) — 掘削・調査システムの高度化と断層への適用 —、電力中央研究所報告、総合報告 N03、97p.
- (43) 木方建造、宮川公雄、鈴木浩一、新孝一、岡田哲実 (2009) 水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発 (その 9) — 機器開発と現地掘削の成果の概要 —、日本応用地質学会 平成 21 年度研究発表会講演論文集、pp. 191-192.
- (44) 木方建造、宮川公男、鈴木浩一、新孝一、岡田哲実、須永崇之、南浩輔 (2010) コントロールボーリング掘削・調査技術 — 掘削・調査システムと現地適用の概要 —、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、2010 年 5 月
- (45) 木方建造、宮川公雄、須永崇之、薦田靖志、長谷和則、中台真人 (2010) コントロールボーリング掘削・調査技術 — 掘削技術の開発とその適用 —、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、2010 年 5 月
- (46) 木方建造 (2010) コントロールボーリング掘削・調査技術の開発、電力土木、350 号、
- (47) 木方建造、宮川公雄、須永崇之 (2010) 水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発 (その 10) — コントロールボーリングにおける掘削・調査の体系化 —、日本応用地質学会 平成 22 年度研究発表会講演論文集、pp. 229-230.
- (48) K. Kiho, K. Miyakawa, K. Suzuki, T. Sunaga and M. Ohtsu (2010) Development of Controlled



- Drilling Technology for Soft Sedimentary Rock (Part 2): Upgrade of a Drilling and Measurement System and its Application to a Fault, Proceedings of IAEG Congress 2010.
- (49) Kenzo Kiho, Kimio Miyakawa, Koichi Suzuki, Koichi Shin, Tetsuji Okada and Takayuki Sunaga (2010) Development of the Controlled Drilling Technology and Measurement Method in the Borehole, Proceeding of 3rd EAFORM.
- (50) 木方建造 (2011) コントロールボーリングによる掘削・調査技術の開発、土木学会誌、2012年2月号
- (51) 木方建造 (2011) 幌延における原子力機構/電中研共同研究の成果—コントロールボーリングと地下水年代測定技術—、幌延深地層研究計画 札幌報告会 2011、2011年7月29日
- (52) 木方建造 (2011) 水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発(その11) —モニタリング装置の概要と設置方法—、日本応用地質学会 平成23年度研究発表会講演論文集、pp. 115-116.
- (53) 木方建造, 須永崇之, 小淵康義 (2012) 水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発(その12) —水平偏距掘削技術の現地適用—、日本応用地質学会 平成24年度研究発表会講演論文集、pp. 121-122.
- (54) 木方 建造、新 孝一、岡田 哲実、小淵 康義、須永 崇之、長谷 和則 (2012) 高レベル放射性廃棄物処分のためのコントロール掘削・調査技術—方向制御掘削と孔内力学・応力測定—、岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.
- (55) 増原康布、木方建造、宮川公雄、松村修治、川越健 (2005) コントロールボーリング孔における長期モニタリング用パッカーシステムの開発、日本応用地質学会 平成17年度研究発表会講演論文集、pp. 197-198.
- (56) 南浩輔、大津正士、木方建造、松村修治、岡部高志 (2009) 水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発(その9) —コントロールボーリング孔井を利用したモニタリングシステムの開発—、日本応用地質学会 平成21年度研究発表会講演論文集、pp. 199-200.
- (57) 宮川公雄、木方建造、金内昌直 (2003) : コントロールボーリング用透水試験・採水複合試験ツールの開発—幌延地点における適用について—日本応用地質学会研究発表会講演論文集、pp. 77-84.
- (58) 宮川公雄、木方建造、金内昌直 (2004) : コントロールボーリング用透水試験・採水複合試験ツールの開発(その2) —開発装置の適用性検討—日本応用地質学会研究発表会講演論文集、pp. 271-272.
- (59) 宮川公雄、木方建造、金内昌直 (2005) : コントロールボーリング用透水試験・採水複合試験ツールの開発(その3) —開発装置の適用性検討—日本応用地質学会研究発表会講演論文集、pp. 191-193.
- (60) 宮川公雄、木方建造、金内昌直 (2006) : コントロールボーリング用透水試験・採水複合試験ツール

ルの開発（その4）－適用試験結果と課題－日本応用地質学会研究発表会講演論文集

- (61) 宮川公雄、木方建造、金内昌直（2007）コントロールボーリング用透水試験・採水複合試験ツールの開発（その5）－泥水中の孔壁可視化による試験区間の選定－応用地質学会研究発表会講演論文集
- (62) 宮川公雄、末永弘、木方建造、金内昌直（2009）水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発（その9）－透水・採水・イメージング装置の開発と現地適用成果－、日本応用地質学会 平成21年度研究発表会講演論文集、pp. 195-196.
- (63) 末永弘、宮川公雄、木方建造、金内昌直（2010）水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発（その10）－シリッジポンプを用いた透水試験装置の開発と現地適用結果－、日本応用地質学会 平成22年度研究発表会講演論文集、pp. 231-232.
- (64) 須永崇之、長谷和則、薦田靖志、中台真人、山本俊也（2009）水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発（その9）－北海道天塩郡幌延町におけるコントロールボーリング技術の紹介－、日本応用地質学会 平成21年度研究発表会講演論文集、pp. 197-198.
- (65) 鈴木浩一、木方建造、櫻井昌人（2005）：コントロールボーリング用物理検層装置（LWD）の開発－幌延地点での適用試験結果－、日本応用地質学会研究発表会講演論文集、pp. 193-196.
- (66) 鈴木浩一、木方建造、岡部高志（2009）水理地質構造調査のためのボーリング掘削技術の開発（その9）－幌延地点でのLWD適用試験結果－、日本応用地質学会 平成21年度研究発表会講演論文集、pp. 193-194.
- (67) 山本真哉・木方建造・早川正史・宮川公雄・鈴木浩一（2004）コントロールボーリングにおける掘削・調査データの統合化システムの構築、日本応用地質学会 平成16年度研究発表会講演論文集、pp. 273-274.
- (68) 山本真哉、木方建造、井ヶ田徳行、宮川公雄、鈴木浩一（2005）：コントロールボーリングにおける掘削・調査データの統合化システムの構築（その2）－掘削データに関する検討－、日本応用地質学会 平成17年度研究発表会講演論文集、pp. 199-200.
- (69) 山本真哉、木方建造、井ヶ田徳行、宮川公雄、鈴木浩一（2006）：コントロールボーリングにおける掘削・調査データの統合化システムの構築（その3）－掘削・調査データによる地質モデルの更新－、日本応用地質学会 平成16年度研究発表会講演論文集、pp. 235-236
- (70) 風早ほか（2014）：西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴、日本水文科学会誌，44，3-16.
- (71) 国立天文台（2006）：理科年表机上版，第79冊，丸善，1022p.
- (72) 中田弘太郎，大山隆弘，東原知広，長谷川琢磨，橘川貴史（2007）：地下水年代測定評価技術の開発（その6）－低透水性岩盤における地下水抽出法の提案－，電力中央研究所研究報告，N07012.

- (73) Ozima, M. and Podosek, F.A. (2002): Noble gas geochemistry 2<sup>nd</sup> edition, Cambridge University Press, 286p.
- (74) 木方建造、司代 明、末永弘、宮川公雄、松村修治 (2015) コントロールボーリング孔内での長期モニタリング –モニタリング技術の体系化を目指して-、日本応用地質学会 平成 27 年度研究発表会講演論文集、pp.15-16
- (75) 木方建造、司代 明、富岡祐一、末永弘、宮川公雄、松村修治 (2016) コントロールボーリング孔内での長期モニタリング (その 2) –モニタリング技術の体系化を目指して-、日本応用地質学会 平成 28 年度研究発表会講演論文集、pp.23-24
- (76) 木方建造、富岡祐一、司代 明、松村修治、加藤雅士 (2017) コントロールボーリング孔内での長期モニタリング (その 3) –モニタリング技術の体系化を目指して-、日本応用地質学会 平成 29 年度研究発表会講演論文集、pp.71-72
- (77) 司代 明、木方建造、松村修治、村田学 (2015) 長期モニタリング無人計測システムの開発 –モニタリング技術の体系化を目指して-、日本応用地質学会 平成 27 年度研究発表会講演論文集、pp.137-138
- (78) 司代 明、木方建造、松村修治、齋藤康二 (2016) 長期モニタリング無人計測システムの開発 (その 2) –モニタリング技術の体系化を目指して-、日本応用地質学会 平成 28 年度研究発表会講演論文集、pp.185-186
- (79) 司代 明、木方建造、齋藤康二、川上知宏 (2017) 長期モニタリング無人計測システムの開発 (その3) –モニタリング技術の体系化を目指して-、日本応用地質学会 平成29年度研究発表会講演論文集、pp.223-224
- (80) Kiho, K., Miyakawa, K. and Suenaga, H., 2014, “Development of Directional Drilling and Survey System, -Results of the Drilling and In-situ Permeability Test”, Proceedings of 8th Asian Rock Mechanics Symposium, RW2-6
- (81) Akira Shidai, Kenzo Kiho and Manabu Murata (2016) Directional Drilling Technology for HLW Disposal -Long-term monitoring in the borehole WM2016 Conference, March 6-10, 2016, Phoenix, Arizona, USA
- (82) Kiho, K., Miyakawa, K., Hase, K. and Sunaga, T. (2016) Development of Technology for Directional Drilling - Results of Drilling and Survey in the Borehole - 35<sup>th</sup> International Geological Congress, 27 August - 4 September, Cape Town, South Africa
- (83) Shidai A., Kiho, K., Tomioka Y., Matsumura S., Kato M. and Saito Y (2016) Development of Technology for Directional Drilling - Long-term monitoring and automatic data acquisition system - 35<sup>th</sup> International Geological Congress, 27 August - 4 September,

Cape Town, South Africa

- (84) Akira Shidai, Kenzo Kiho, Yasuji Saito and Tomohiro Kawakami (2017) Development of technology for long-term monitoring and automatic data acquisition system IAEG ARC-11, November 28-30, 2017, Kathmandu, Nepal