

平成 27 年度

地層処分技術調査等事業

(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-

報告書

平成 28 年 3 月

一般財団法人 電力中央研究所

目 次

I 編：概要、経緯、開発目標

1. 目的	
2. 研究開発の経緯	
3. 平成 26 年度の成果の概要	
4. 本年度の開発目標	
1. 目的	1
2. 研究開発の経緯	3
2.1 これまで（2000-2013 年度）の研究成果の概要	3
2.1.1 研究開発概要	3
2.1.2 研究成果	4
(1) 孔曲げ掘削関連技術	5
(2) 先端探知技術	6
(3) 共通技術	6
(4) 透水・採水技術	6
(5) 検層技術	7
(6) 孔内応力・力学統合測定技術	7
(7) 孔内モニタリング技術	8
(8) 弾性波トモグラフィ	8
2.2 ボーリング調査技術の確立（2014-2017 年度）の目標と全体計画	12
3. 平成 26 年度の成果の概要	14
3.1 地上設備の撤去	14
3.2 孔内長期モニタリング	14
3.2.1 データ取得および解析方法の検討	15
3.2.2 維持、管理手法の検討	15
3.2.3 無人計測システムの概念設計	16
4. 本年度の開発目標	17
4.1 概論	18

4.1.1	孔内モニタリングシステムの保守、管理	18
4.1.2	計測データの取得および解析	18
4.1.3	地下水およびガスの採取、分析	18
4.1.4	モニタリング無人計測システム	19
4.1.5	開発の審議・検討	19
4.2	孔内モニタリングシステムの保守、管理	20
4.2.1	モニタリングシステムの点検	20
4.2.2	モニタリングシステムの改良	20
4.3	計測データの取得および解析	20
4.3.1	データ取得	20
4.3.2	解析方法の検討	20
4.3.3	解析結果および考察	21
4.4	地下水およびガスの採取、分析	21
4.4.1	地下水採取方法	21
4.4.2	ガス採取方法	21
4.4.3	分析項目および分析方法	21
4.4.4	分析結果および考察	21
4.5	モニタリング無人計測システム	21
4.5.1	システムの詳細設計・製作	22
4.5.2	現地据え付け及び運用	22
4.5.3	システム信頼性	22

Ⅱ編：本年度の研究内容

5. 孔内モニタリングシステムの保守、管理

6. 計測データの取得および解析

7. 地下水およびガスの採取、分析

8. モニタリング無人計測システム

5. 孔内モニタリングシステムの保守、管理	2 3
5.1 計測機器の点検・保守	2 3
5.1.1 マルチパッカーの点検	2 4
5.1.2 ミニパッカーの点検	2 4
5.1.3 圧力センサーの点検	2 4
5.1.4 データロガーの点検	2 4
5.2 モニタリングシステムの改良	2 4
5.2.1 ミニパッカーの改良	2 4
6. 計測データの取得および解析	2 6
6.1 データ取得	2 6
6.1.1 取得対象データ	2 6
6.1.2 データ取得方法	2 7
6.1.3 データの回収	2 9
6.1.4 取得データについて	2 9
6.2 解析方法の検討	3 1
6.2.1 区間圧力データに対する影響要因	3 1
6.2.2 各影響要因と解析方法	3 2
6.2.3 BAYTAP-G について	3 6
6.3 解析結果および考察	3 6
7. 地下水およびガスの採取、分析	4 1
7.1 背景と目的	4 1
7.2 地下水・ガス採取	4 1
7.2.1 採取区間	4 1

7.2.2	採取期間	4 1
7.2.3	地下水採取方法	4 2
7.3	計測と分析方法	4 7
7.4	分析・測定結果	4 7
7.5	考察	5 1
7.5.1	溶存イオン・同位体の評価	5 1
7.5.2	物理化学パラメータの評価	5 3
7.5.3	希ガスの評価	5 4
7.6	課題	5 6
8.	モニタリング無人計測システム	6 0
8.1	システムの詳細設計・製作	6 0
8.1.1	通信設備	6 1
8.1.2	発電設備	6 4
8.1.3	蓄電池	7 7
8.1.4	その他設備	7 8
8.1.5	システム配線系統とシステム制御ロジック	8 4
8.1.6	工場試験	8 5
8.2	現地据付および運用	8 7
8.2.1	システム機器配置計画	8 7
8.2.2	システム据付	8 8
8.2.3	間欠運転および連続運転モードにおけるシステム動作	9 1
8.2.4	遠隔操作におけるシステム制御	9 5
8.2.5	無人計測システム計測結果	9 9
8.3	システム信頼性	1 1 4
8.3.1	現地運用の中で発生したトラブルと課題	1 1 4
8.3.2	無人計測システムの発生電力の検証	1 2 5
8.3.3	バッテリーの検証	1 2 9
8.3.4	モニタリングの間欠動作ロジックの安定性検証	1 3 3
8.3.5	データ通信の安定性	1 3 7
8.3.6	現地調査に基づく検証	1 4 4
8.3.7	その他検証	1 4 5
8.4	システム信頼性向上に向けた課題	1 5 0

Ⅲ編：成果のまとめと課題、今後の計画

9. 本年度研究成果のまとめ

10. 今後の課題

11. 次年度の研究計画

9. 本年度研究成果のまとめ	151
9.1 孔内モニタリングシステムの保守、管理.....	151
9.2 計測データの取得および解析.....	151
9.3 地下水およびガスの採取、分析.....	152
9.4 モニタリング無人計測システム.....	153
10. 今後の課題	155
10.1 孔内モニタリングシステムの保守、管理.....	155
10.2 計測データの取得および解析.....	155
10.3 地下水およびガスの採取、分析.....	155
10.4 モニタリング無人計測システム.....	156
11. 次年度の研究計画	158
11.1 次年度計画の概要.....	158
11.2 孔内モニタリングシステムの保守、管理.....	158
11.3 計測データの取得および解析.....	158
11.4 地下水およびガスの採取、分析.....	158
11.5 モニタリング無人計測システム.....	158
11.6 モニタリングの体系化.....	158
11.7 開発の審議・検討.....	159

目 次

図 5.2-1	アキュムレータ	2 5
図 6.1-1	孔内長期モニタリング装置概念図	2 6
図 6.1-2	スタンドパイプ内圧力センサー	2 7
図 6.1-3	パッカー圧計測センサー	2 8
図 6.1-4	大気圧センサー	2 8
図 6.1-5	データロガー	2 9
図 6.1-6	HCD-3 孔モニタリングデータ (2015/4/1~2016/2/14)	3 0
図 6.2-1	区間圧力データに対する影響要因	3 1
図 6.2-2	各観測区間水位と稚内の潮位	3 2
図 6.2-3	各観測区間水位と降雨量との比較	3 3
図 6.2-4	区間①水位と各種データとのクロスプロット	3 5
図 6.2-5	区間②水位と各種データとのクロスプロット	3 5
図 6.2-6	区間③水位と各種データとのクロスプロット	3 6
図 6.3-1	BAYTAP-G による解析結果 (観測区間①全体)	3 8
図 6.3-2	BAYTAP-G による解析結果 (観測区間①詳細)	3 8
図 6.3-3	BAYTAP-G による解析結果 (観測区間②全体)	3 9
図 6.3-4	BAYTAP-G による解析結果 (観測区間②詳細)	3 9
図 6.3-5	BAYTAP-G による解析結果 (観測区間③全体)	4 0
図 6.3-6	BAYTAP-G による解析結果 (観測区間③詳細)	4 0
図 7.2-1	ポンプコントロールユニット	4 3
図 7.2-2	チューブドラム	4 3
図 7.2-3	ダブルバルブポンプ作動原理	4 4
図 7.2-4	サンプラー	4 6
図 7.2-5	ウィンチ	4 6
図 7.2-6	クランプ止め装置	4 6
図 7.2-7	フロースルー型サンプラー断面図	4 6
図 7.4-1	パイパーダイアグラム	5 0
図 7.4-2	シュティフダイアグラム	5 0
図 7.5-1	水素酸素同位体比の比較	5 1

図 7.5-2	水素同位体比と C1 濃度の関係	5 2
図 7.5-3	pH-Eh ダイアグラム	5 3
図 7.5-4	希ガスデータの深度分布	5 5
図 8.1-1	モニタリング無人計測システム概念図	6 0
図 8.1-2	衛星通信サービスエリア	6 2
図 8.1-3	3G/4G 通信キャリア別サービス提供エリア	6 3
図 8.1-4	1 日あたりの賦存エネルギー	6 9
図 8.1-5	モデル発電機-1	7 0
図 8.1-6	モデル発電機-2	7 1
図 8.1-7	シンフォニアテクノロジー社発電機の発電量過不足予測 (北海道: 幌延)	7 5
図 8.1-8	発電量と消費電力量の予測	7 7
図 8.1-9	蓄電池容量算定フロー	7 8
図 8.1-10	発電量監視用太陽光パネル	8 3
図 8.1-11	システム配線系統	8 4
図 8.1-12	システム制御ロジック (機能ブロック図)	8 5
図 8.1-13	工場試験状況	8 6
図 8.2-1	幌延 HCD-3 孔 システム機器配置計画	8 7
図 8.2-2	幌延 HCD-3 孔 無人計測システム設置イメージ	8 8
図 8.2-3	幌延 HCD-3 孔 計測小屋内機器配置イメージ	8 8
図 8.2-4	無人計測システム機器現場搬入状況	8 9
図 8.2-5	設置作業前現場状況	8 9
図 8.2-6	外装品取付作業状況	9 0
図 8.2-7	データロギングボックス設置後の既設計測小屋内状況	9 0
図 8.2-8	無人計測システム設置後の現場状況	9 1
図 8.2-9	間欠運転モードタイミングチャート	9 3
図 8.2-10	連続運転モードタイミングチャート	9 4
図 8.2-11	NC のみ連続運転モードタイミングチャート	9 5
図 8.2-12	遠隔操作データフローイメージ図	9 6
図 8.2-13	基本設定画面	9 6
図 8.2-14	遠隔システム制御による制御コマンドの処理タイミングチャート	9 7
図 8.2-15	最新計測値の表示	9 8
図 8.2-16	指定期間のグラフ表示	9 8

図 8.2-17	計測データ取得	9 9
図 8.2-18	計測結果 (パッカー)	1 0 0
図 8.2-19	計測結果 (ミニパッカー)	1 0 0
図 8.2-20	計測結果 (区間圧力)	1 0 1
図 8.2-21	計測結果 (太陽光発電)	1 0 1
図 8.2-22	計測結果 (風力発電)	1 0 2
図 8.2-23	計測結果 (消費電圧・消費電流)	1 0 2
図 8.2-24	計測結果 (蓄電池温度)	1 0 3
図 8.2-25	計測結果 (雨量計)	1 0 3
図 8.2-26	計測結果 (風速・風向)	1 0 4
図 8.2-27	計測結果 (日射量計)	1 0 4
図 8.2-28	計測結果 (気温)	1 0 5
図 8.2-29	計測結果 (湿度)	1 0 5
図 8.2-30	計測結果 (気圧)	1 0 6
図 8.2-31	計測結果 (積雪計)	1 0 6
図 8.2-32	計測結果 (設置角検証用太陽光発電電圧)	1 0 7
図 8.2-33	計測結果 (設置角検証用太陽光発電電流)	1 0 7
図 8.2-34	2015 年 10 月欠損状況	1 0 9
図 8.2-35	2015 年 11 月欠損状況	1 1 0
図 8.2-36	2015 年 12 月欠損状況	1 1 1
図 8.2-37	2016 年 1 月欠損状況	1 1 2
図 8.2-38	2016 年 2 月欠損状況	1 1 3
図 8.2-39	データ欠損率	1 1 4
図 8.3-1	衛星通信接続状態による NC 動作時間のばらつき	1 1 5
図 8.3-2	NC 起動時の消費電流の推移 (2016/1/4)	1 1 5
図 8.3-3	NC 起動時の消費電流の推移 (2016/1/6)	1 1 6
図 8.3-4	バッテリー電圧と区間圧力計測結果	1 1 7
図 8.3-5	ローカル通信機器のリセット処理変更イメージ	1 1 8
図 8.3-6	MGB の送信処理	1 1 9
図 8.3-7	2015 年 11 月の日射量と太陽光パネルの発電電流の関係	1 2 0
図 8.3-8	2015 年 12 月の日射量と太陽光パネルの発電電流の関係	1 2 1
図 8.3-9	2015 年 11 月 12 日の日射量と太陽光パネルの発電電流	1 2 1

図 8.3-10	2015 年 12 月 25 日（積雪時）の日射量と太陽光パネルの発電電流	1 2 2
図 8.3-11	2015 年 12 月 25 日（積雪時）の太陽光パネルの着雪状態	1 2 2
図 8.3-12	積雪計	1 2 3
図 8.3-13	積雪環境における雨量計	1 2 4
図 8.3-14	2013 年気象データ（豊富町）からの発電予測	1 2 5
図 8.3-15	2015 年気象データ（豊富町）からの発電予測	1 2 6
図 8.3-16	無人計測システム発電実績	1 2 6
図 8.3-17	2015 年気象データからの予測と実績の比較	1 2 7
図 8.3-18	風力発電予測と実績の誤差	1 2 8
図 8.3-19	太陽光発電予測と実績の誤差	1 2 8
図 8.3-20	気象データと現地システムの実測値比較（風速）	1 2 9
図 8.3-21	発電量および消費電力比較	1 3 2
図 8.3-22	ローカル通信停止時のシステム制御フロー	1 3 3
図 8.3-23	MGB 同期処理修正後のシステム制御フロー	1 3 4
図 8.3-24	MGB-NC へのデータ送信失敗率	1 3 6
図 8.3-25	MGB-NC へのデータ送信失敗率	1 3 7
図 8.3-26	上位データ通信 再送信処理フロー例	1 3 8
図 8.3-27	積雪時現場写真	1 4 4
図 8.3-28	雨天時ケース B 内状況	1 4 5
図 8.3-29	発生電力検証用太陽光発電電圧（10/2）	1 4 6
図 8.3-30	発生電力検証用太陽光発電電圧（12/23）	1 4 6
図 8.3-31	発生電力検証用太陽光発電電圧 パネル比（10/2）	1 4 7
図 8.3-32	発生電力検証用太陽光発電電圧 パネル比（12/23）	1 4 7
図 8.3-33	発生電力検証用太陽光発電電圧（2/8）	1 4 8
図 8.3-34	発生電力検証用太陽光発電電圧 パネル比（2/8）	1 4 8
図 8.3-35	2/8 発生電力検証用太陽光パネル着雪状況	1 4 9
図 8.3-36	ネットワークカメラ撮影画像	1 5 0

表 目 次

表 2.2-1	全体研究計画	1 3
表 4.1-1	平成 27 年度実施工程	1 8
表 4.1-2	「岩盤中物質移行特性評価技術の確証検討委員会」委員一覧	1 9
表 5.1-1	孔内モニタリングシステムの保守、管理実績表	2 3
表 6.1-1	設置区間－深度一覧表	2 7
表 6.2-1	その他の要因による影響	3 4
表 7.2-1	地下水およびガスの採取工程（1 回目）	4 2
表 7.2-2	地下水およびガスの採取工程（2 回目）	4 2
表 7.2-3	ダブルバルブポンプ仕様	4 3
表 7.2-4	サンプラーの仕様	4 5
表 7.3-1	本報告で用いた分析・測定方法	4 7
表 7.4-1	分析・測定結果および参考データの一覧	4 9
表 8.1-1	衛星通信機器比較表	6 2
表 8.1-2	3G 通信装置	6 3
表 8.1-3	消費電力予想	6 5
表 8.1-4	全国 8 箇所の賦存エネルギー推定結果	6 7
表 8.1-5	1 日あたりの賦存エネルギー	6 8
表 8.1-6	シンフォニアテクノロジー社発電機による発電予測	7 2
表 8.1-7	ゼファー社発電機による発電予測	7 3
表 8.1-8	シンフォニアテクノロジー社発電機の発電量過不足予測	7 4
表 8.1-9	風力発電機	7 6
表 8.1-10	太陽光発電機	7 6
表 8.1-11	蓄電池タイプ比較表	7 8
表 8.1-12	データロガーに求められる要求仕様	7 9
表 8.1-13	データロガー比較	8 0
表 8.1-14	工場試験概要	8 6
表 8.2-1	データ欠損率	1 1 3
表 8.3-1	実測値に基づく消費電力計算結果	1 3 1
表 8.3-2	上位通信×運転モード 消費電力比較	1 3 2
表 8.3-3	MGB-NC へのデータ送信失敗状況	1 3 5

表 8.3-4	10月衛星通信実績.....	139
表 8.3-5	11月衛星通信実績.....	140
表 8.3-6	12月衛星通信実績.....	141
表 8.3-7	1月衛星通信実績.....	142
表 8.3-8	3G通信実績.....	143
表 11.7-1	「岩盤中物質移行特性評価技術の確証検討委員会」委員一覧（予定）.....	159

I 編：概要、経緯、開発目標

1. 目的
2. 研究開発の経緯
3. 平成 26 年度の成果の概要
4. 本年度の開発目標

1. 目的

高レベル放射性廃棄物処分などの地下空間利用に際しては、対象とする岩盤の地質、物理、力学、水理、地化学特性を評価することが必要不可欠であり、地下深部のこれらの特性を評価するためには、調査初期にボーリングによる調査を行うこととなっている。ボーリング掘削に際しては、地形や地質条件によってはボーリングの孔跡、すなわち方位や傾斜を自由に制御する必要が生じる。

数少ないボーリング調査による、効率的な調査を実施するために必要な、方位・傾斜を自由に制御する手法は、既存の掘削、主に石油掘削では一般にコアを採取することは行われていない。特に小口径孔におけるコントロールコアリング技術には既存技術がないため、堆積性軟岩を掘削調査するための重要な要素である「フルコア採取」技術と、孔心制御(コントロール)を両立したボーリング技術の確立は不可欠である。また、硬岩と比較して軟岩を地表から低角度で掘削する場合には、孔壁崩壊などの地質要因から発生するトラブルを防ぐために、掘削と同時に孔壁保護のための保護管(ケーシングパイプ)を挿入する必要がある。しかし、ケーシングパイプ挿入後には、孔内検層や孔内における地化学特性などの物性値を測定することが困難となる。このため、コア採取ができるコントロールドリリング掘削技術、および掘削中の裸孔部を用いた検層や孔内測定技術の開発が急務となっている。また、ボーリングによる調査においては、断層破碎帯のような崩壊層や破碎帯、さらには逸泥層に遭遇する可能性を想定して、対応可能な技術を開発することで、ターゲットとする対象地域の選択の幅を拡げることができると考えられる。そのためにも、掘削が困難な地質条件にも対応可能な工法の検討を進めるとともに、掘削装置、治具、調査機器の高度化を進めることは重要な要素と位置づけられる。

本研究は、高レベル放射性廃棄物処分場の概要調査地区選定、および精密調査地区選定段階でのボーリング掘削技術、および孔内における各種調査技術の開発に主眼をおいて実施するものである。すなわち、各段階において地質・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、コントロール掘削および水理地質調査技術を体系化するものである。

2. 研究開発の経緯

2.1 これまで（2000-2013 年度）の研究成果の概要

コントロール掘削および調査技術の開発は、2000 年より開始している。この研究開発は大きく 3 つのフェーズに区分して実施されており、フェーズ 1 として 2000 年度～2004 年度（平成 12 年度～平成 16 年度）、フェーズ 2 として 2005 年度～2007 年度（平成 17 年度～平成 19 年度）、フェーズ 3 として 2008 年度～2013 年度（平成 20 年度～平成 25 年度）を設定し、掘削・調査技術の体系化を図ってきた。

2.1.1 研究開発概要

本研究開発は、高レベル放射性廃棄物処分場の地点選定時、特に地表からの調査時点でのボーリング掘削技術と孔内での各種調査技術の開発を主眼としている。個々の掘削、調査に関わる機器開発を行い、総合システム化することにより、コントロール掘削と水理地質特性の調査、評価手法の体系化を目指す。本研究開発の最終目標は、(1)コントロール掘削および孔内の各種調査に関する機器開発を行い、これらをシステム化すること、(2)開発したシステムにより堆積性軟岩地域において垂直深度 500m、掘削長 1,000m の孔井を掘削し、その孔井内において各種調査試験を実施すること、(3)機器開発や現地での適用性の検討を通じて得られた知見をまとめることにより本技術の体系化を図ること、である。

開発目標(1)に関しては、掘削、調査システムを 4 つの要素技術(①孔井曲げ掘削技術、②先端探知技術、③コア採取技術、④孔内計測技術)に区分し、それぞれの要素技術ごとに概念設計した上で 4 つの技術の整合性を確認し、それぞれの要素技術に関する機器開発を行った。孔内計測技術に関しては、掘削時検層、孔内透水試験、孔内採水、孔内応力測定、孔内力学測定、孔内間隙水圧モニタリングについて概念設計を実施した後に機器開発を実施した。これらのうち、特に掘削に関する①～③に関する機器を総合化し、模擬岩盤においてその適用性を確認した。

開発目標(2)に関しては、主として掘削システムおよび透水、採水試験の現地適用性検討を目的として、北海道幌延町北進地区に分布する新第三紀の堆積岩（珪藻質泥岩：声間層および硬質頁岩：稚内層）を対象岩盤として、方向性をコントロールした掘削を孔長約 700m まで実施し、当初想定した孔跡を追跡することができた。その後、より掘削困難な事象として断層破碎帯を設定し、同様の地層中に大曲断層が分布する幌延町上幌延地区においてコントロール掘削および孔内の各種調査を実施した。事前の調査により断層の分布正常を評価し、これに基づき孔跡を決定し掘削を開始した。想定した孔跡とほぼ同様に、孔長 1000m、深さ 450m で、孔長 750m 以深で水平となる孔井を掘削し、コア回収率はほぼ 100%であった。孔内で各種の特性調査を実施し大曲断層の特性を評価することができた。また、各種特性を調査した後に、予め構築した手順で、マルチパッカーシステムを孔内に設置

し、間隙水圧の長期モニタリングを開始した。

開発目標 (3) に関しては、コントロール掘削、調査技術の体系化を目指して、掘削、調査データの管理システムの構築および、掘削・調査の手順書作成などを行った。

2.1.2 研究成果

2.1.2.1 掘削・調査システムの概念構築における研究成果

研究開発の大きな流れは、①文献調査、②コントロール掘削・調査の概念構築、③システム化のための要素技術を構成する主要装置の開発・試験、④適用性の確認である。

文献調査として、構成する4つの要素技術の現状をレビューするために国内における石油および金属鉱床分野での文献調査、海外技術の動向を認識するための動向調査を実施し、本研究で適用させるために必要なキー技術の探索を実施した。

また、探索したキー技術を開発・高度化することで実現可能と考えられる「コントロール掘削・調査技術」の概念を構築することで、システム化に向けた2つのシステム編成の概念設計ができた。

構築した2つのシステム編成は”コントロール掘削を実施するために必要な機能を集めたもの”と”調査を実施するために必要な機能を集めたもの”に分けた。

前者に該当するものは、先端駆動方式のモーターと掘削時計測装置(WL-MWD)を併用するリアルタイムコントロール機能に連続コアリングを加えたものである。一方、後者に該当するものは、ワイヤライン方式で原位置測定が可能となる機能を有したものである。

この2つを統合化することで完成するコントロールボーリングシステムの体系化を目指すことを決定した。

以下に2つのシステム編成を示す。

① ワイヤライン式ケーシング追従型コントロールコアリング検層(掘削システム)

構成システム：コントロールコアリング工法

ワイヤライン式ケーシング追従工法

ワイヤライン式掘削検層システム

主な機能：堆積性軟岩掘削に必要な孔壁保護機能

ボーリングの孔跡を自由に制御する機能

コア掘削機能

掘削中の裸孔検層機能

② ワイヤライン式孔内原位置測定(孔内計測システム)

構成システム：ケーシング追従

ワイヤライン式原位置測定システム

主な機能 : 裸孔部測定機能
ワイヤライン機能
ケーシング内の装置昇降機能

2.1.2.2 主要装置開発に関する研究成果

コントロール掘削技術に必要な要素技術には、「孔井曲げ掘削技術」・「先端探知技術」・「コア採取技術」があり、それぞれを構成するために必要な主要装置の開発を実施した。さらに、掘削技術を統合するために必要な「掘削に必要な共通技術」についての開発も行った。

また、孔内計測技術に必要なキー技術としては、「検層技術」・「透水・採水技術」・「孔内モニタリング技術」・「力学測定技術」・「応力測定技術」、またその後の検討で孔内と地表間での「物理探査技術」があげられた。

(1) 孔曲げ掘削関連技術

掘削関連技術として、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。

孔曲げ掘削技術に関する開発項目(機器)としては、ダウンホールモーター、拡径装置、ケーシング、ケーシング追従装置、試錐機、コア採取技術に関連する開発項目としては、コアバレル、泥水である。

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った。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。

孔曲げ掘削技術として、(i)断層帯掘削に必要な技術と(ii)水平孔を掘削するために必要な技術、(iii)長尺掘削に必要な技術および(iv)コア採取に必要な技術を中心として開発・高度化を実施した。

断層帯掘削に必要な技術として、部分セメンチングを実施するための①セメントプラグの開発、さらに孔壁の崩壊、押し出しおよびスライムの沈降に対して安定した圧力環境を維持するための②孔壁整形装置の開発を行った。

水平孔掘削のために必要な装置として、当初使用を検討していたGFRPロッドに替わり③押し込み補助装置(ポンプインシステム)、④水平偏距掘削に必要な治具の開発を行った。

長尺掘削に必要な技術としては、上幌延地区で大曲断層を対象に掘削する孔跡に対応する⑤現有試錐機的能力評価および改良実施した。

コア採取関連技術開発として、⑥コアリング時のビット先端の泥水圧力低減のための改良および⑦掘削情報による適正な掘削管理に関する検討を行った。

これらによって開発・高度化された機器・技術は工場試験や現地での掘削においてその適用性が確

認、検証された

(2) 先端探知技術

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、その性能を確認し、要求仕様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。現地での掘削中に常時計測を実施し、磁気影響補正方法を含めてその適用性を確認した。磁気影響による方位誤差を生じるために、ジャイロシステムのスポット計測を併用した計測手法を構築した。

(3) 共通技術

掘削・調査システム統合化に必要な共通技術として、①孔内スライムの排除のための装置開発、②通信システムの改善を実施した。

孔内スライムの排除のための装置として、スライムを採取するベアラを試作し、掘削中のスライム回収および水理試験開始前のスライム排除を目的として試作を行った。

掘削中および孔内計測中に発生した通信エラーへの対応では、問題点を究明しエラー発生環境を改善する改良を行った。

(4) 透水・採水技術

コントロールボーリングシステムでは第三紀の堆積軟岩を対象とするため泥水による掘削が想定される。このため、泥水存在下で適用可能な透水試験装置や採水装置の開発が最大の課題であった。また、試験は掘削を中断して行うため、ケーシングの抑留を防止し、掘削工程への影響を低減するために短時間での実施が求められた。

フェーズ1では試験区間の掘削泥水でパッカーを拡張するシステムを考案し、送水ラインの除去や、その組み立てによる時間を短縮した。またパッカー拡張のために泥水対応のポンプを開発し、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た。採水装置の開発では掘削水を排除し、採水のタイミングを計るため、採水区間から揚水しながら水質をモニタリングし、区間から泥水が排出され地下水に置換される状況をケミカルセンサーで検知可能とした。

フェーズ2ではフェーズ1で開発した試験区間の掘削泥水でパッカーを拡張するシステムを生かし、コア孔のみならず、拡張孔においても適用可能とした。また、音響によるイメージング装置を開発した。これにより、試験箇所ならびにパッカー拡張箇所の岩盤状況を事前に確認することが可能となった。採水装置の開発では掘削水を排除し、採水のタイミングをより正確に計るため、孔内水に混入されているトレーサーを原位置で計測できるシステムを装置内に設置した。これによって、採水時の掘削水の混合量が定量的に把握でき、原位置での採水時の泥水の混入が定量的に判断することが可能となった。

フェーズ3ではより透水性の低い岩盤での透水試験を可能とするためシリンジポンプを実装したと

透水試験ツールを開発した。また、任意の割れ目などを対象に透水試験や採水を行うため、ダブルパッカーの開発を行った

(5) 検層技術

LWD プローブは、開発当初の強度目標値を上方修正し、プローブの圧縮荷重 8000kgf、引張荷重 8000kgf、ねじり 180kgf-m に変更し、強度試験を行い問題ないことを確認した。可動部(電磁波検層およびマイクロ電気検層センサーの搭載部)は、昇降作業時のセンサー部破損の危険性を少なくするため、構造の改良を重ね、昇降時に破壊されないことを確認した。

音波検層、電磁波検層、マイクロ電気検層、自然ガンマ検層については掘削時の適用試験を行い、掘削状態での各種測定を行うことができた。

音波検層は掘削ノイズ音で入力信号が飽和してしまう不具合が生じたが、その後の感度やフィルター一定数の調整により改善できた。電磁波検層は可動部の構造変更をするため、アンテナ部をさらに小型化し正常に測定できた。マイクロ電気検層は配線部分の断線が起こったが、配線の固定方法を改良し正常に測定できた。自然ガンマ検層は現地適用試験で正常に測定することができ、従来の検層プローブとの比較試験も行い動作に問題が無いことが確認できた。

以上、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。

フェーズ2では、フェーズ1で試作した WL-LWD サブシステムの高度化を図るため、1)断層破砕帯での動作確認および掘削時計測の適用性を目標とした現地適用試験、2)長期的測定環境での信頼性向上と可動部の耐久性、信頼性の向上を目標としたシステムの試作・改良、3)データ処理ソフトウェアの試作とデータ解析ソフトウェア(自動読み取りソフトウェア)の検討を目標としたデータ処理ソフトの検討、を行った。

現地適用試験では、2箇所深度区間において掘削時計測を行い、断層破砕帯の20m区間において連続計測が可能であることを確認した。また、システムの改良では、電気回路予備基板の試作、一部基盤の小型化、地上装置処理能力の向上を行い、耐久性の向上を図るパッド部の基本的な改造案を検討した。さらに、各検層項目のデータ処理ソフトウェアと、電磁波検層のデータ解析ソフトウェア(初動の自動読み取りソフトウェア)を試作し、その実用性を確認した。

(6) 孔内応力・力学統合測定技術

本測定技術は、第1フェーズでは孔内応力測定装置、孔内力学測定装置として個別にコントロールボーリングに適用する前提で、コントロールボーリングに適用するための要素技術の開発を行った。要素技術の主なものは、孔内力学測定装置では孔壁変形の測定法、拡孔装置の開発など、孔内応力測定装置では亀裂計測センサー、孔内で駆動できる高圧ポンプなどである。

第2フェーズでは両装置を統合化してコントロールボーリングに適用することを目指した。それは、

孔内力学装置で用いる孔壁載荷用のパッカーと孔内応力装置で用いるダブルパッカーの1つとの兼用、またそれらの駆動ポンプなどの兼用により、より合理的な測定装置とすることができるためである。さらに、ボーリング孔内での装置の上げ降ろしの時間短縮の効果も見込まれるためである。そして第3フェーズの前半までには、統合化装置を用いて相模原ジオドームで浅孔での機能検証試験を複数回行い、統合化装置として基本的に検証した。なおこの時点の統合化装置はまだコントロールボーリングに適用できず単独で用いるものである。第3フェーズの後半では諸制約から孔内応力測定装置のみをコントロールボーリングに適用することとして開発を行い、2012年度にはコントロールボーリングに必要な送り込み装置やラッチシステムなどの機器も含めて浅孔などで機能を検証した。横須賀地区の旧防空壕を用いた浅孔にて原位置試験を実施し、岩盤応力評価に必要なデータを本装置により取得することができた。

(7) 孔内モニタリング技術

①CP切断技術、②CP荷重の負担方法、③パッカーとCPの接続技術および④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・試験および、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、図7.1-1に示すパッカーシステムの設置概念を構築した。

モニタリングシステム設置概念を、開発中であったパッカーシステムに代えてSPMPタイプのシステムを用いるように再構築した。この概念に基づくシステムを設計・試作し、これを模擬孔井と試験用孔井HMD-1孔（掘削長81m、傾斜35°）に設置および試験運用し、その適用性を確認した。HMD-1孔では、地下水サンプリング（計4回実施）および水圧データの取得（約2年11か月分）を通じて、その仕様、性能等を確認した。

これらによって、長期間の水圧、水質を観測可能なモニタリングシステムおよびその設置方法を開発し、堆積軟岩の実岩盤における傾斜孔での適用性を確認することができた。

本システムについてはHCD-3孔の各種試験が終了した後、孔内深部に複数箇所の計測区間を設置し長期計測（3年程度）を実施し、システムのメンテナンス方策、計測精度の評価に資するためのデータを採取する計画としている。

(8) 弾性波トモグラフィ

コントロールボーリング孔井を利用した、地表-孔井間のジオメトリによる弾性波トモグラフィに関する技術開発を目的に、震源やデータ収録システムに関する検討・製作を行った。そして、現地での適用性を検討するとともに、HCD-3孔周辺における詳細な地質構造の評価を行うためのデータ取得実験を行った。その結果、バイブレータ震源とハイドロフォンアレイツールとの組み合わせにより、水平区間を含む地表-孔井間のジオメトリで、初動走時トモグラフィのデータ処理・解析に資する品質のデータを取得できる見通しを得た。

2.1.2.3 現地適用性検討に関する研究成果

構築したコントロールボーリング掘削、調査システムの適用性を検討する目的で、北海道幌延町北進地区において、孔長 700m 級の孔井を掘削し、孔内およびコアによる試験を実施した。計画した孔跡とほぼ一致した掘削をすることができた。

2004 年度には 300m 以深で大量の逸泥区間に遭遇したため、逸泥対策を施しながら掘削した。150m 以深ではコア掘削を実施したが、逸泥区間の一部でノンコア掘削となった。2005 年度には、掘削に先立ち前年度までの逸泥区間を限定し、セメンチングによる逸泥対策を実施した後、547m～706m 区間のコントロールコアリング掘削を実施した。最終方位は NE31.36°、傾斜は 64.93°であり、コア採取率は 100%とほぼ当初計画とおりの掘削を実施することができた。掘削時の 406.6～410.6m、530.6～535.6m 区間において WL-LWD を、634.418～636.800m、702.200～706.000m の区間において透水試験・採水を行い、採取したコアの地質観察や各種試験を実施した。

透水試験・採水ツールは北進地区において 2003 年度から 2005 年度の 3 年間で 6 回の原位置試験を行なった。2003 年度から 2004 年度の原位置試験ではシステムのハンドリングおよび基本動作とともにポンプの耐久性を確認した。2004 年度からは透水試験ツールと採水ツールによる適用試験を開始し、開発したツールで透水性が得られること、泥水を排除しつつ採水か王であることを検証した。また、これらの実際の試験を通して透水試験・採水の手順を確定した。

上幌延地区の試験では HCD-3 孔において 11 回の透水試験と 2 回の採水を実施した。音響イメージングツールの適用では、孔内の割れ目の判別が可能であり、試験位置の選定に資するが可能であった。原位置トレーサー濃度測定システムの適用では、濁度計測によって清水となるまで実施した場合、検知可能なトレーサーの濃度よりも低下していること、一方、十分に濁度を低下させないで採水した場合は、土粒子により分光光度計によるトレーサー濃度が十分な精度で得られないことが明らかとなった。またシリンジポンプを用いた透水試験では 10^{-11} m/s オーダーの透水性を評価した。以上の開発装置の適用性を確認しつつ、毎回原位置試験では透水試験、採水をフローに沿った手順で実施し、ツールのハンドリング技術および透水試験、採水技術の向上を果たした。最終段階として、コントロールボーリング孔での一連の透水試験、採水試験によってシステム全体の有効性を検証した。

LWD については、音波検層では、コア試料による計測値と大局的な整合性はあるが、破碎帯および節理の検出がほとんどできていない結果となった。電磁波検層は破碎帯および節理を比誘電率の高い異常部として検出できた。マイクロ電気検層でも、破碎帯および節理を低比抵抗異常部としてとらえることができた。自然γ線検層は、計測区間での岩種がほぼ均質であったため、岩種の相違による妥当性を評価できなかったが、工場敷地内の試験孔において他社ツール(物理計測製)との対比でその整合性を確認した。

コア観察・試験については、採取されたコアによるコア観察、測定、分析などを実施し、地域の地質、水理、地下水地化学、岩石物性などの特性を評価することができた。

2005年度には、北進地区のコントロール掘削に並行して新たな掘削対象である断層・破碎帯の分布を考慮し、上幌延地区において反射法地震探査を実施し、得られた反射断面より地質構造および断層の分布位置を推定し、これに基づき掘削孔跡および掘削候補個所を選定した。2006年度より HCD-3 の掘削を開始した。孔口から掘削長 200m までは傾斜 35° 沿角のノンコア掘削、200m より 740m までは偏角率 1°~1.27°/10m のコントロールコアリング掘削を実施した。740m の孔底での水平(傾斜 90°)となったため、その後は水平を維持して掘削し、孔長 800m からは、水平を維持して、西に偏角率 0.5°/10m で水平偏距掘削を実施した。最終方位は SE39.43° (計画方位 SE40.82°)、最終傾斜は 84.60° (計画傾斜 86.19°) であり、掘削区間のコア採取率は断層を掘削したにも拘らずほぼ 100%となった。

掘削時の 318.15~335.60m、571~644m 区間において掘削中に検層 (WL-LWD) を実施した。208.943~210.500m、317.74~328.00m、371.604~400.00m、430.684~489.60m、568.684~631.00m、681.300~690.700m、773.65~800.00m、809.01~840.00m、834.48~880.00m、901.83~950.40m および 942.60~1000.00m の 11 区間において透水試験をまた一部区間において採水を行い、採取したコアの地質観察や各種試験を実施した。

現地における掘削、調査により得られたデータにより、各々の地区の地質環境特性を評価した。

北進地区においては、掘進長 180~200m 区間で声間層から稚内層に漸移している。上部から下部にかけて圧密の影響を受けて深部に従い間隙率は若干小さく、密度は若干大きく、弾性波速度は速くなる傾向にある。コア間隙水の水質は Na-Cl 型を示しているが、掘進長 350m~550m の存在する逸泥区間を境に上部では 2000~3000ppm、下部では 5000~9000ppm と急激に上昇する。逸泥の原因と想定される割れ目帯はリニアメント分布と地表調査から褶曲を胴切りする WSW-ENE 系統の横断断層と推定され、この断層系が本個所の地下水流動を支配している可能性がある。

一方上幌延地区では、深度(掘削長) 210m から 1000m の区間に 28 条の断層帯が確認できた。反射法から推定される大曲断層に相当する個所に f3 から f14 の断層帯が集中することなどから、反射法とコアから推定する断層が整合的であること、コア観察から地下では大曲断層により稚内層同士が接していることが確認できた。

岩石コア試料などの透水試験の結果に比べ、孔内試験の結果はいずれも大きな透水性を示しており、これが割れ目に起因すると考えられる。断層内部と断層周辺(逸泥個所を除く)いずれも低い透水性を示すが、断層内部がその周辺岩盤に比べて若干低い透水性を示すことから、断層内部には角礫や割れ目が多く発達するものの、周辺の断層影響帯の岩盤に比べさらに透水性が低く、粘土化することにより割れ目が閉塞して透水性が低くなっていると推察される。

孔内透水試験時に計測した区間間隙水圧の分布からは、断層の下盤で最大の間隙水圧(水頭で 68m)

を示しており、210m の逸泥区間および孔底に向かって圧力が低減する傾向が認められる。

水質は Na-Cl リッチであり、その濃度は海水のおおよそ 1/4 程度である。全体として濃度の深度依存性は認められない。また、断層の内部や断層を境にした水質の変化は認められない。地下水の地化学特性からは、地下 200m 以深の地下水は、地表からの天水の浸入の影響を大きくは受けていないこと、断層に支配された水の動きを示していないと推察される。

以上から、断層は地下水流動を大きく支配はしていないが、圧力を保持する機能を有していることが推察される

コントロールボーリングでは脆弱な地質においてもコアを採取することができ、これらのコアから堆積岩特有の特性（地質性状、コア間隙水（水質）、コア透水性、物理、力学特性）などを連続的、断続的に効率的に取得することができる。これらのデータおよび孔内で取得されるデータを併せて地域の地質環境特性を評価することができた。

2.1.2.4 掘削・調査の体系化に関する研究成果

(1) 統合化データベース構築

コントロールボーリングで取得される多種多様な掘削・調査データを効率的に一元管理し、統合化を図るためのデータベースシステムについて検討し、データベースの構築とこれに付随するシステムの要素技術の開発を実施した。

現地適用試験において当システムの長期的な運用試験を行った結果、実際の掘削・調査データのデータベース化、ならびにインターネットを利用したデータベースの共有化が可能であり、データベースシステムとしての所定の性能を有することを確認した。ただし、ネットワーク帯域が不足するために、しばしば情報閲覧に支障をきたすことがあった。このため、サーバーを外部サイトに設置し、試験サイトとのデータを随時サーバーに転送し、外部閲覧者は外部のメインサーバーにアクセスすることによりスムーズに閲覧が可能となるとともに、冬季に試験サイトが閉鎖される際にも、データ閲覧が可能となった。

(2) 掘削・調査フローの構築

フェーズ 1 で構築したコントロールボーリングによる体系的な掘削・調査フローをフェーズ 2 および 3 における掘削・調査の実績を考慮し改良した。また、最終年度にこれまでの実績や知見に基づき、掘削・調査に係るより詳細な作業手順書や基本的な考え方を作成した。

(3) 掘削・調査データの活用

統合化データベースに蓄積される掘削・調査データを掘削管理や調査地点周辺の地質環境特性評価に活用する方法について検討した。

コントロール掘削では、地下の原位置で掘削に係わる各種情報を MWD によって取得しており、通常

のコンベンショナルな掘削での掘削情報に比べて高品質なデータが取得できる。この観点から、MWD によって取得されたデータの活用を目指して以下の検討を実施した。

①WL-MWD の掘削パラメータから掘削指標値を求め、コアの物性データとの比較により適用性を検証した。その結果、掘削指標値は岩石強度との間に相関がみられ、指標値となる見通しが得られた。また、地球統計学的手法により掘削・調査データを空間的に統合化し、地質モデルを作成した。事前調査データから作成した初期地質モデルに、原位置で得られる掘削データを反映し、ボーリング孔周辺部の詳細な地質物性分布を与える概要地質モデルを作成した。

②MWD の孔内圧力データなどから逸泥個所を感知し、これにより水理試験区間の設定をサポートするシステムを構築するために、MWD データの解析に着手した。HCD-3 孔井におけるデータ解析を実施したが、これまでに逸泥と MWD データに関連は認められない。MWD データには各種のノイズが想定されることから、これらをフィルタリングして、精度のよいデータに加工し、このデータをもとに再度検討することとした。

(4) 危機管理

断層帯掘削時に遭遇する主な危機として、「孔壁崩壊」、「コア採取率低下」、「逸泥発生」を想定し、危機発生の早期発見と初期回避を実施するため、対応手順の構築を行った。また、初期回避ができず想定危機に遭遇した場合の対応策についても検討し、これらを統合化することにより、危機対応フローを構築した。

2.2 ボーリング調査技術の確立（2014-2017 年度）の目標と全体計画

前述したように、コントロール掘削および調査技術の研究開発はおおよそ 2013 年度までに終了した。本設定期間では、2013 年度に孔内に設置したマルチパッカーシステムによる長期モニタリングを実施し、コントロール掘削孔における長期モニタリング技術の体系化を目指す。また、これに先駆けて掘削・調査用に設営されていた地上設備を地元、地権者との約束に基づく期日までに安全に撤去する。

本技術開発においては、以下の 2 項目を実施する。

(1) 地上設備の撤去（廃孔を含む）

(2) 孔内長期モニタリング

- ・データ取得および解析方法の検討
- ・維持・管理手法の検討
- ・無人計測システムの概念設計および運用
- ・体系化

なお、2016 年度に十分な計測期間や採水間隔を確保する観点から、当該年度に予定していた廃孔

3. 平成 26 年度の成果の概要

3.1 地上設備の撤去

平成 25 年度にコントロールボーリングの現地適用性試験を終了し、試験終了後に設置した長期モニタリングシステムでの間隙水圧の観測を開始した。平成 26 年度は試験サイトの地上設備(掘削資機材、防寒施設(リグ用ハウジング)、計測及び管理用プレハブなど)の撤去を行った。継続して実施する孔内長期モニタリングのため、ボーリング孔とその周辺のコンクリート基礎は残置し、併せて孔口の養生を行った。

地上設備の撤去は以下の手順により安全に実施した。

- ①組立式プレハブハウス(現場事務所)の撤去：商用 100V 電源引き込み電柱の撤去、現場事務所内資機材の搬出、現場事務所の撤去
- ②防寒施設の外装シート取り外しと撤去：外装シート固定物の取り外し、外装シートの取り外し、不要機材類の取り外しと撤去
- ③防寒施設本体の撤去：防寒施設内資機材の撤去・搬出、防寒施設本体の解体、鋼製部材の搬出・廃棄
- ④掘削資機材の撤去：(NL140 ロッド)ハンドリング装置、試錐機操作盤、掘削用アーマードケーブルウィンチ、ウィンチ油圧ユニット・操作盤
- ⑤試錐機・傾斜櫓の撤去：試錐機、試錐機油圧ユニット・操作盤、試錐機マスト(傾斜櫓)、試錐機・試錐機マスト基礎鋼
- ⑥孔口養生等：防寒施設の解体後に開口部として残るセーラに転落防止用の柵(単管パイプ)と屋根(合板)をかけて養生し、撤去作業完了に合わせて、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復旧すると同時に養生の屋根を撤去し鋼製蓋を設置した。

3.2 孔内長期モニタリング

昨年度、コントロールボーリングによる上幌延地区での現地適用性検討を終了した。本検討の最後に、コントロール掘削孔井にマルチパッカーによる孔内長期モニタリング装置を設置し、間隙水圧の計測を開始した。

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、孔長約 200~260m の間に 3 つの計測区間(区間①：249.45~257.45m、区間②：210.95~215.95m、区間③：

208.45～209.95m)を設定した。各区分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。

コントロール掘削井を利用した孔内長期モニタリングの体系化を目指し、今年度は以下の項目を実施した。

- (1) データの取得およびデータの解析方法の検討
- (2) モニタリングシステムの維持・管理手法の検討
- (3) 無人計測システムの概念設計

3.2.1 データ取得および解析方法の検討

今年度は、昨年度末に3区分において開始した間隙水圧計測に関するデータ、すなわち区分間隙水圧、パッカー圧、ミニパッカー圧および地上における気象データを回収する下。また、間隙水圧挙動のベースラインを想定する目的で、間隙水圧データの解析方法の検討を行った。

データはリグ撤去による中断期間を除いて欠測することがなく、センサー類および地上観測装置については問題なく動作していることを確認した。しかし、ミニパッカー圧力の低下により遮水性能が欠如したため、一部区分圧力データに異常が認められる。

取得された間隙水圧データには、周辺環境ノイズが含まれている。環境ノイズの要因としては、地球潮汐、大気圧および降水が想定できる。これらの影響因子の排除方法について検討した結果、区分圧力データに対する大気圧および潮汐の影響についてはBAYTAP-Gを用い方法が有効であることを提示した。これらを取り除いた間隙水圧データに基づき、降水との関係を検討することとした。降水パターンは地域により大きく異なるといわれており、上幌延サイト近傍にアメダスデータがないことから、次年度以降サイトにおいて降水、降雪量を計測する必要があることが判明した。

3.2.2 維持、管理手法の検討

本モニタリングシステムの維持、管理方法について、動作チェック方法、孔内設備の維持、管理方法および地上設備の維持、管理方法にわけて検討した。

動作チェック方法のうちマルチパッカーシステムの動作チェック方法については、パッカー圧力のモニタリングにより実施することとし、センサー類、地上装置については地上での動作確認が可能である。

維持、管理方法については、孔内システムの検査には一旦システムを回収し、抜き取り検査等を実施する方法が考えられるが、過年度に実施した検査結果では著しく品質が劣化する等認められておらず、通常使用の範囲では問題ないと考えられる。スタンドパイプ内設備および地上設備の維持、管理につ

いては、データ監視および定期的なメンテナンスを行うことで対応可能である。

3.2.3 無人計測システムの概念設計

高レベル放射性廃棄物処分場の選定調査、特に概要調査では広域での調査を実施する必要があり、電気や通信など長期モニタリングに関わるインフラストラクチャーが整備されていないことが想定される。このため、このような環境においても必要なデータを確実に取得・回収でき、かつ現地での不具合状況を監視できる、無人計測システムの構築が必要となる。

無人計測システムの概念設計に際しては、電力の供給量の確保、消費電力の低減および通信の確保の観点から検討した。システムは極力小電力とすること、通信は既存の電話回線が不通である可能性を考慮して衛星回線と電話回線をについて検討した。また、地域に数孔のモニタリング孔井が存在するとの仮定のもとに、基地局を設けた孔井との間を無線で繋ぐシステムとした。電力の供給に用いる太陽光および風力発電は、その地の気象条件に左右されることから、日本全国の気象条件を網羅できるように候補地を挙げ、その上でそれぞれの候補地にあった電力供給システムについてケーススタディを実施した。これらの結果を踏まえて、幌延 HCD-3 孔の環境条件に適合する計測システムの試設計を行った。

4. 本年度の開発目標

平成 24 年度までに、掘削長 1,000m までのコントロールボーリングを掘削し、垂直深度で約 440m の位置において水平傾斜延長約 260m 区間の孔跡軌跡を達成できた。孔芯制御では先端探知技術を用いて、1° /10m の傾斜制御、水平傾斜の維持および水平傾斜区間における方位制御の技術を適用した。また、孔内トラブル遭遇時の危機回避手法として、サイドトラックを行い新たな孔跡を掘削することができた。

孔内計測技術の透水・採水技術については、断層帯区間を含む幌延コントロールドリリング 3 号孔 (HCD-3 孔) の透水性、間隙圧力計測などにおけるの水理地質構造評価への有効性を確認できた。

また、検層技術と物理探査技術および孔内応力側技術ではコントロールボーリングへの適用性を確認した。一方、モニタリング技術については HMD-1 孔や地上試験における評価でコントロールボーリングへの適用性を確認し、最終年度にはコントロールボーリング孔にあらかじめ構築した手法でマルチパッカーシステムを設置し、孔内における長期モニタリングを開始した。

平成 25 年度までで、上幌延地区におけるコントロール掘削および孔内での調査が終了したこと、平成 25 年度の最後に孔内にマルチパッカーシステムを設置し孔内長期モニタリングを開始したことを受けて、平成 26 年度には地上設備を撤去し、孔内間隙水圧の長期モニタリングをした。また、概要調査時の長期モニタリングの現地環境を考慮し、電気や通信などのインフラストラクチャーがない箇所でも長期的に安定したデータ取得を目的とした無人計測システムを構築することとなり、当該年度は、本システムの概念設計を実施した。

平成 27 年度は、平成 26 年度に引き続き孔内間隙水圧の長期モニタリングを実施するとともに、新たに以下の項目を実施する（表 4.1-1 参照）。

- ①無人計測システムの設置・運用
- ②無人計測システムの信頼性評価
- ③定期的な原位置地下水の採水

以下に、開発目標と各作業や試験の実施目標をまとめる。

表 4.1-1 平成 27 年度実施工程

事業項目	平成27年度											
	第1四半期			第2四半期			第3四半期			第4四半期		
孔内モニタリングの保守・管理												
・保守・管理												
計測データの取得および解析												
・データ取得												
・データ解析												
地下水およびガスの採取、分析												
・地水およびガスの採取												
・分析												
モニタリング無人計測システム												
・システムの設置												
・システムの運用												
・システムの信頼性評価												
開発の審議・検討												
・検討委員会												

4.1 概論

4.1.1 孔内モニタリングシステムの保守、管理

平成 26 年度に引き続き、孔内に設置されたスタンドパイプ式マルチパッカー（SPMP）モニタリングシステムを用いて年間を通して安定した間隙水圧測定ができるようにシステムの保守、管理を定期的に行う。

4.1.2 計測データの取得および解析

年間を通して孔内の 3 区間の間隙水圧を計測し、これらの結果を地上の計測システムにより収集する。取得された間隙水圧データに影響のある、気圧、降雨量、潮汐などのデータに基づきノイズを除去することにより、年間の間隙水圧ベースラインを評価する。

4.1.3 地下水およびガスの採取、分析

地下水の水質のベースラインを評価する目的で、孔内における 3 計測区間のうち、透水性が最も高

い観測区間③（208.7～209.7m）のスタンドパイプ内でサンプリング装置を降下させ、原位置での採水（溶存ガスを含む）を実施する。採取した水およびガス試料の化学分析を実施する。

4.1.4 モニタリング無人計測システム

平成 26 年度に検討した無人計測システムの概念設計に基づき、地上における無人でスタンドアロンの電源、通信、計測システムを構築し、運用を開始し、電源、通信、計測の状況に基づきシステムの信頼性を評価する。

4.1.5 開発の審議・検討

本研究実施にあたっては、学識経験者からなる「岩盤中地下水移行評価確証技術」検討委員会を設けて、研究計画や研究内容について審議・検討を行った上で、意見等をその都度、反映させて研究を遂行させる計画である。

本年度は検討委員会を以下の 3 回開催する計画である。

- ・ 第 1 回検討委員会 平成 27 年 7 月下旬 本年度研究計画審議
- ・ 第 2 回検討委員会 平成 27 年 12 月上旬 中間成果の審議
- ・ 第 3 回検討委員会 平成 28 年 2 月下旬 最終成果の審議

表 4.1-2 に検討委員会の委員一覧を示す。

表 4.1-2 「岩盤中物質移行特性評価技術の確証検討委員会」委員一覧

委員区分	委員名	所 属
委員長	西垣 誠	岡山大学大学院 環境生命科学研究科 教授
委員	五十嵐 敏文	北海道大学大学院 工学研究科 環境循環システム部門地圏物質移動学研究室 教授
委員	佐々木 泰	日本原燃株式会社 開発設計部 部長
委員	嶋田 純	熊本大学大学院 自然科学研究科複合新領域科学専攻(理学専攻兼任) 水文学研究室 教授
委員	吉田 英一	名古屋大学博物館 教授

4.2 孔内モニタリングシステムの保守、管理

4.2.1 モニタリングシステムの点検

無人計測システム導入前は、データ回収時に併せて、導入後は3ヶ月に1回の頻度で、現地においてモニタリングシステムの点検を実施する。点検項目は以下のとおりである。

- ・バッテリー交換
- ・パッカーおよびミニパッカー圧力の確認および必要な場合には調整
- ・データを確認し、問題があった場合にはセンサーの動作チェック

4.2.2 モニタリングシステムの改良

前年度課題となっていた、ミニパッカーの給圧システムの改良および一部ミニパッカーの漏気部分の特定と補修を行い、遮水性能を維持できるように改良する。

4.3 計測データの取得および解析

4.3.1 データ取得

(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、従前の観測データの取得・回収を行う。データの回収は3ヶ月に1回を予定（バッテリー及びデータロガーの容量より安全側に設定）し、下記の項目を実施する。

- ・間隙水圧：3区間
- ・パッカー圧：3組
- ・大気圧
- ・外気温

(2)無人システム導入後

無人計測システム設置後は、通信によりデータを取得する。なお、無人システム導入時に新たに設置された雨量計などのデータを併せて回収する。

4.3.2 解析方法の検討

間隙水圧および地下水水質のベースライン把握を目的として、得られたデータ（間隙水圧および地下水水質）のうち間隙水圧についてはその影響因子（地球潮汐、大気圧および降水量）との関連を考慮して、これらの影響を除いた間隙水圧プロファイルを求める。

4.3.3 解析結果および考察

間隙水圧に影響を及ぼす影響を除いた間隙水圧プロファイルを間隙水圧のベースラインと評価した上で、その妥当性を周辺の他のモニタリングデータと比較検証する。

4.4 地下水およびガスの採取、分析

4.4.1 地下水採取方法

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③ (208.45~209.95m) 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する。なお、採水に先立ち観測区間の孔内水を地下水と置換する。地下水への置換については、区間が被圧しているため湧水状況を確認し、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する。なお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や同位体分析用に採取する。採取した地下水の一般水質分析、酸素・水素同位体分析、溶存ガス (^3He) による年代測定などを行う。

水質などの時間変化を確認するため、年 2 回実施する。

4.4.2 ガス採取方法

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する。

4.4.3 分析項目および分析方法

湧水もしくは揚水時に採取した地下水の一般水質、酸素・水素同位体、トリチウムなどの分析を実施する。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、電気伝導度および酸化還元電位を計測する。原位置サンプラーにより採取された溶存ガスを用いて年代測定などを行う。

4.4.4 分析結果および考察

水質については、過去に実施した水質分析結果を含めた経時的な挙動について検討し、地下水水質のベースラインについて検討するとともに、地下水年代値の妥当性について検討する。

4.5 モニタリング無人計測システム

4.5.1 システムの詳細設計・製作

平成 26 年度に検討した無人計測システムの概念設計に基づき、上幌延サイトに適したシステムの詳細設計を行う。詳細設計に際しては、以下の点を考慮し発電量を見込み、それに沿った発電設備および蓄電池を設置する。

- (1) 計測項目：区間圧力、パッカー圧力、ミニパッカー圧力、気象データ、監視カメラなど
- (2) 計測間隔：基本的には 1 分間隔とする。
- (3) 通信方法、通信間隔：衛星/3G/4G 通信、10 分間隔

4.5.2 現地据え付け及び運用

製作したシステムを平成 27 年度の上半期をめどに現地に据え付けるとともに、直ちに運用を開始する。

4.5.3 システム信頼性

運用状況を確認した上で、以下の項目について信頼性の評価を行う。

- ・電源：当初想定した電力が供給されているか、電力が不足する場合の機器間の電力需給バランスなどの観点から信頼性をチェックする。
 - ・通信：通信が常時確保されているか、データは送信されているか、遠隔地からの指令が実行されているかなどの観点から信頼性をチェックする。
 - ・計測：孔内および地上の計測データが収集できているか等の観点から信頼性をチェックする。
- なお、システム運用中に不具合が見つかった場合は、その原因を探り、対策を講じる。

Ⅱ編：本年度の研究内容

5. 孔内モニタリングシステムの保守、管理

6. 計測データの取得および解析

7. 地下水およびガスの採取、分析

8. モニタリング無人計測システム

5. 孔内モニタリングシステムの保守、管理

5.1 計測機器の点検・保守

本年度は、5回にわたり孔内モニタリングシステムの保守、管理作業を実施した。表 5.1-1 に作業期間および作業内容を示す。これらのうち2回は後述の採水作業時に実施した。

表 5.1-1 孔内モニタリングシステムの保守、管理実績表

No.	期間		作業内容
	自	至	
No.1	2015/7/14	2015/7/16	<ul style="list-style-type: none"> ・データ回収 ・バッテリー交換 ・ミニパッカー給圧システム改良（給圧ライン分岐）
No.2	2015/8/3	2015/8/7	<ul style="list-style-type: none"> ・データ回収 ・区間②ミニパッカー回収（改良のため） ※採水
No.3	2015/9/24	2015/10/1	<ul style="list-style-type: none"> ・データ回収 ・無人計測システム移行
No.4	2015/11/24	2015/11/28	<ul style="list-style-type: none"> ・区間②ミニパッカー再設置 ・各区間ミニパッカー加圧媒体変更（窒素ガス⇒不凍液） ※採水
No.5	2016/2/10	2016/2/11	<ul style="list-style-type: none"> ・各区間ミニパッカー圧力確認 ・区間②ミニパッカー用アキュムレータ設置

5.1.1 マルチパッカーの点検

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計および圧力センサーにより計測している。現地入場時に圧力計による指示値を確認し、データロガーからデータ回収後に圧力センサーによる指示値を確認した。長期的なトレンドおよび気温変化に起因すると考えられる日変化が確認されたが、一定圧力を保っており遮水性能に問題ないことを確認した。

5.1.2 ミニパッカーの点検

ミニパッカーはマルチパッカーと同様に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計により計測している。そのため、現地での圧力計の指示値を確認することで点検を行う。昨年度からミニパッカー圧力の低下がみられ、メンテナンス時に加圧調整を行ってきたが本年度は原因の特定と改良を行った。詳細については、5.2章に記述する。

5.1.3 圧力センサーの点検

圧力センサーの動作状況については、センサー読み値とロープ式水位計の計測値を比較するのが簡単だが、観測区間の水位は地表面より高いため計測値の比較は困難である。そのため、計測値が明らかに異常と思われる値を示していないこと、かつこれまでの計測値から大きく異なる値を示していないことを確認することにより圧力センサーは正常に動作していると判断した。

5.1.4 データロガーの点検

表 5.1-1 の No. 1～3 までは当初設置したデータロガーからデータ回収を行い、正常に動作していることを確認した。それ以降は無人計測システムに移行し、無人計測システムの運用管理の中でデータ収集を行っている。

5.2 モニタリングシステムの改良

5.2.1 ミニパッカーの改良

これまで各区間ミニパッカーの加圧ラインは1つのラインで全区間の加圧調整を行っていたが、圧力の低下がみられるようになったため、表 5.1-1 の No. 1 で区間ごとに独立した加圧ラインに切り替えた。その結果、区間②の圧力低下が大きいことが判明した。そのため、同区間のミニパッカーを回収し、メーカーにて点検を実施したが、特に目立った損傷等は見られず、現地での現象を再現することはできなかった。このことから、給圧ラインを含むミニパッカーシステムの一部で微細な漏えいが起こっていることが考えられた。そこで、それを緩和するためにこれまで窒素ガスにより加圧していたも

のを不凍液による加圧に切り替えた（表 5.1-1 の No.4）。

上記の作業後も圧力の低下が継続していることがわかったため、加圧ラインにアキュムレータ（図 5.2-1 参照）を取り付け、継続的に圧力をコントロールすることにした。



図 5.2-1 アキュムレータ

6. 計測データの取得および解析

6.1 データ取得

6.1.1 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は、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および2の圧力、⑤パッカー3の圧力、⑥パッカー4および5の圧力、⑦大気圧、⑧観測小屋内温度、⑨外気温である。図 6.1-1 に設置概念図を、表 6.1-1 に観測区間を示す。

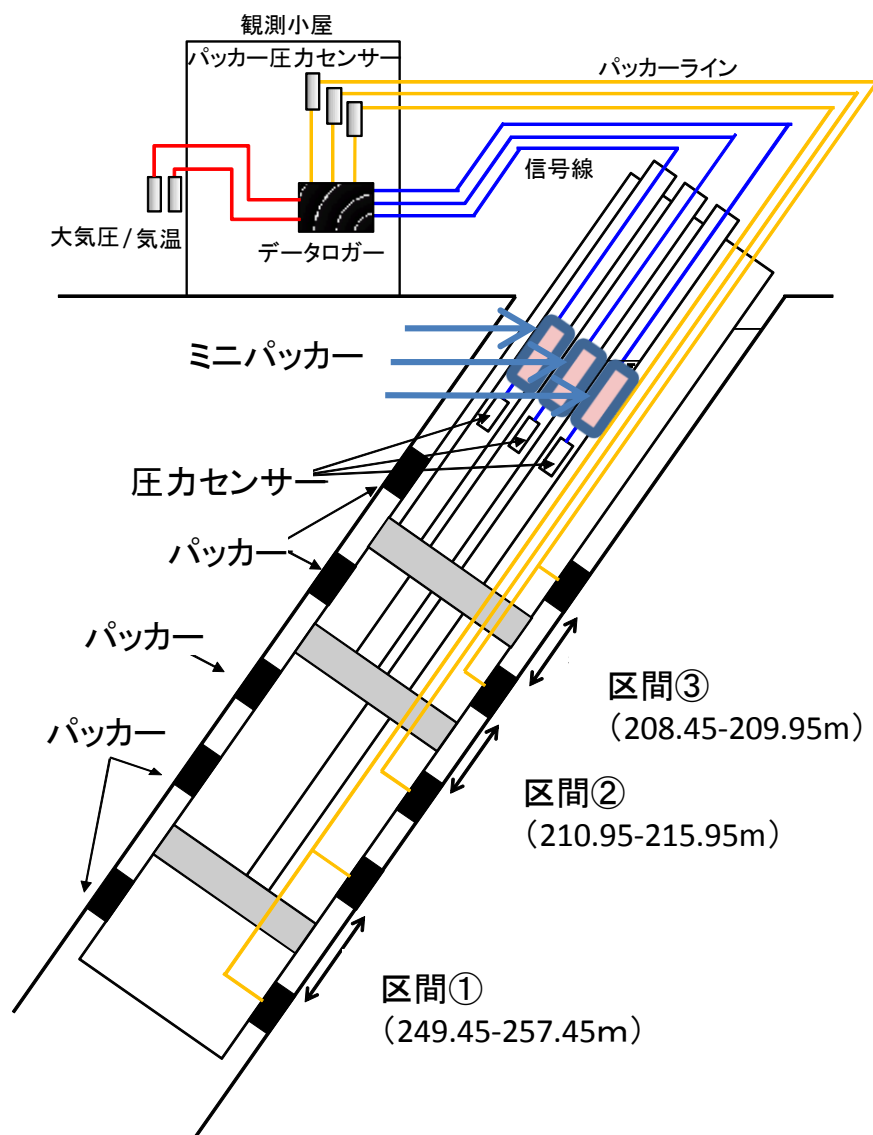


図 6.1-1 孔内長期モニタリング装置概念図

表 6.1-1 設置区間－深度一覧表

深度 (m)	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)
208.45 ～ 209.95	最浅	1.5	SP3	P3 (GL-9.705m)	Packer 5	207.2	208.7
					Interval 3		
210.95 ～ 215.95	中間	5	SP2	P2 (GL-9.705m)	Packer 4	209.7	211.2
					Interval 2		
249.45 ～ 257.45	最深	8	SP1	P1 (GL-9.705m)	Packer 3	215.7	217.2
					Packer 2	248.2	249.7
					Interval 1		
					Packer 1	257.2	258.7

6.1.2 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 6.1-2 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, ピエゾレジスタティブ	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 6.1-3 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, ピエゾレジスタティブ	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 6.1-4 大気圧センサー

(4) データロガー

項目	仕様	備考
名称	SDL (Solexperts Data Logger)	
寸法	0.22 m × 0.12 m × 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 6.1-5 データロガー

6.1.3 データの回収

現地に赴いてのデータ回収は第 5 章の表 5.1-1 に示した No.1~3 の作業で実施しており、無人観測システム導入後は常時観測の中で遠隔で行った。

6.1.4 取得データについて

取得したデータを図 6.1-6 に示す。

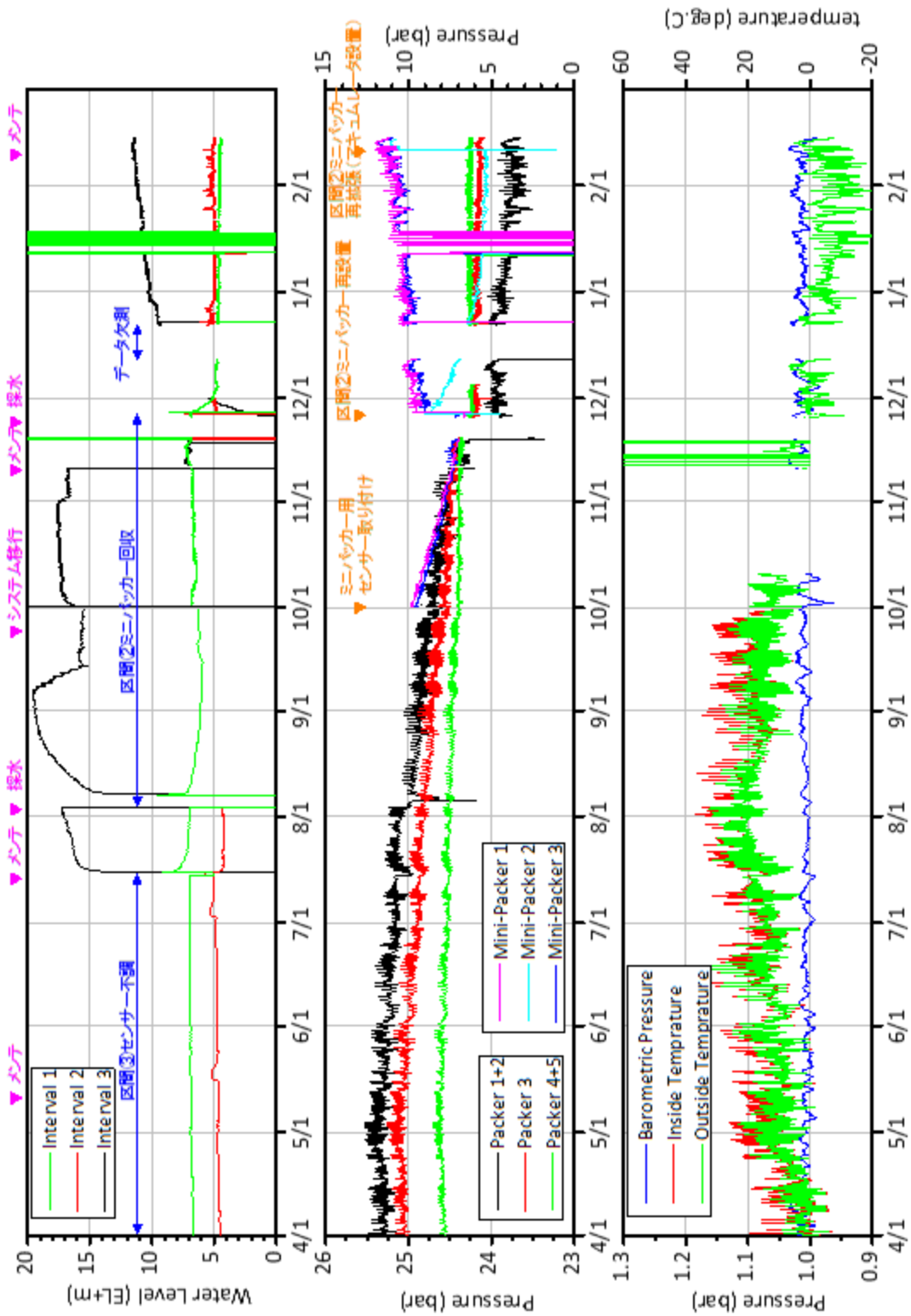


図 6.1-6 HCD-3 孔モニタリングデータ (2015/4/1~2016/2/14)

6.2 解析方法の検討

6.2.1 区間圧力データに対する影響要因

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 6.2-1 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。

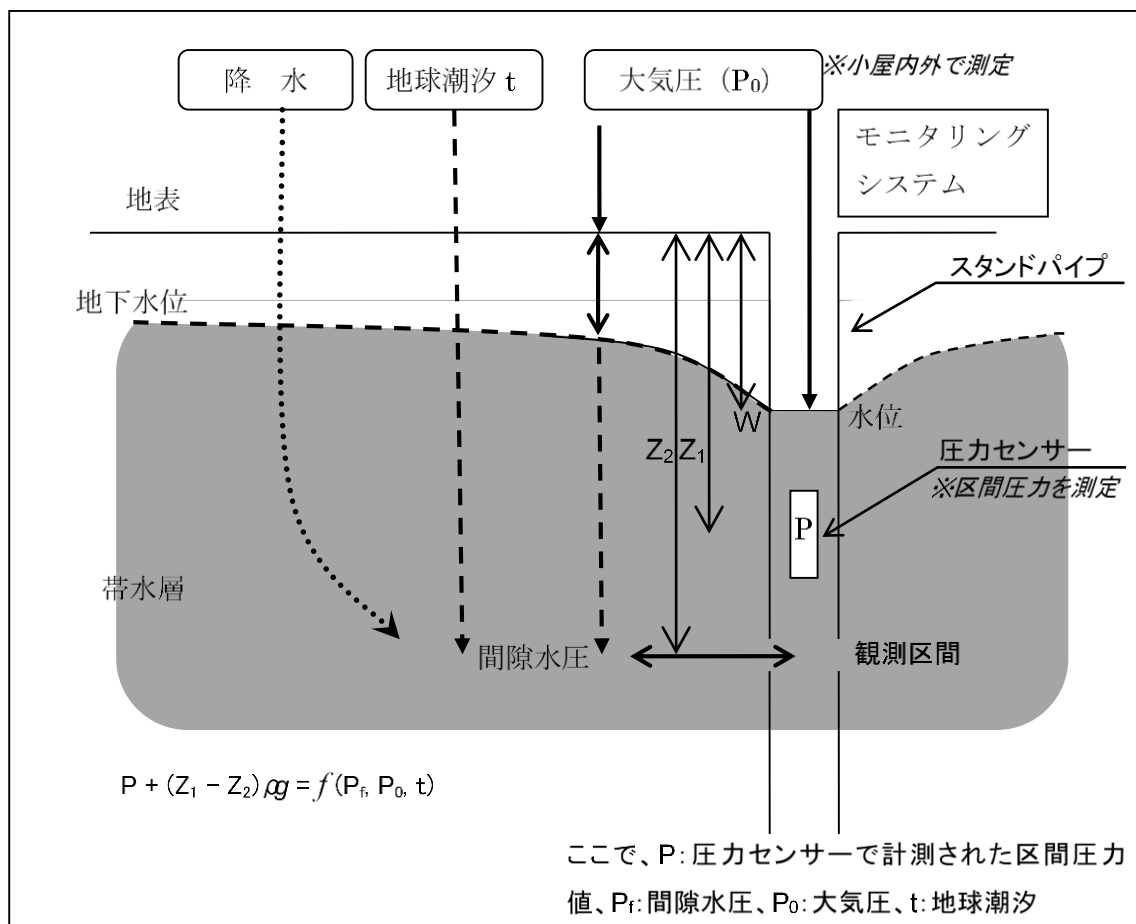


図 6.2-1 区間圧力データに対する影響要因

6.2.2 各影響要因と解析方法

(1) 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。後述する各区間水位と大気圧のクロスプロットからも明らかである。

(2) 潮汐による影響

図 6.2-2 に各観測区間水位と稚内における潮位を示す。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。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。

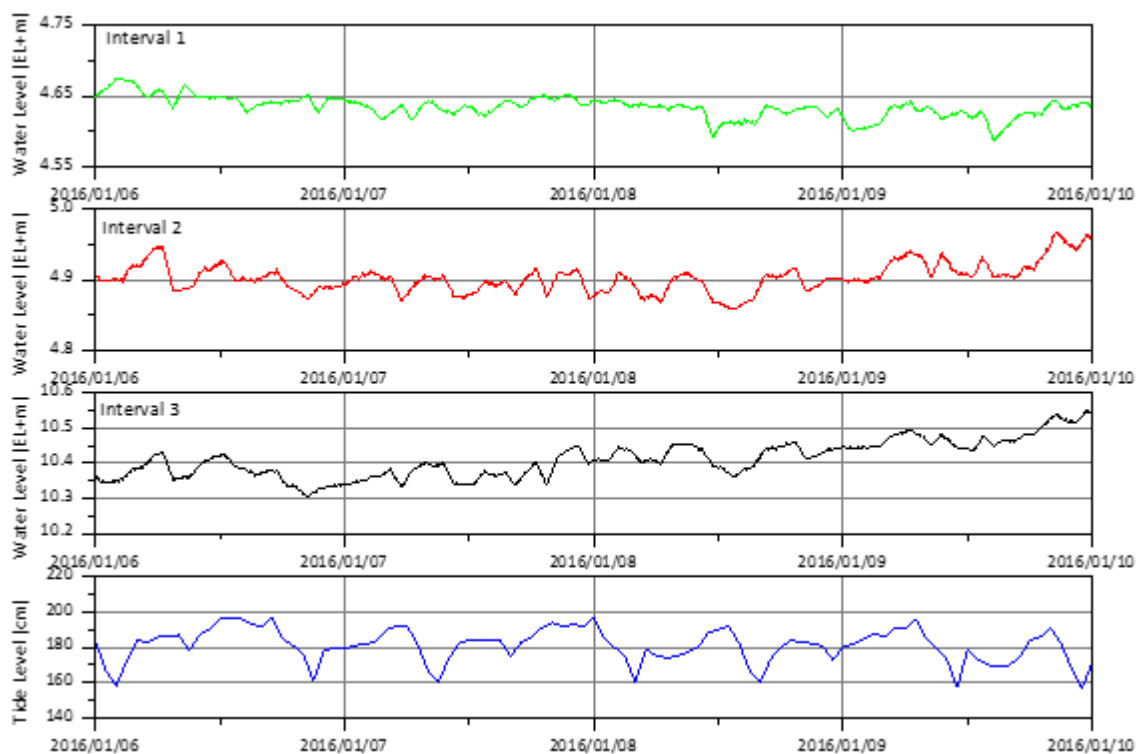


図 6.2-2 各観測区間水位と稚内の潮位

(3) 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 6.2-3 参照)。対象期間はモニタリングシステム設置時から直近までとした。

比較的水位変化の大きい区間③において一部期間で降雨量との整合がみられるが、機器不調による

欠損期間等があるため連続データでの評価が困難である。今後連続的に観測することで降雨量との関連性について評価していく必要がある。

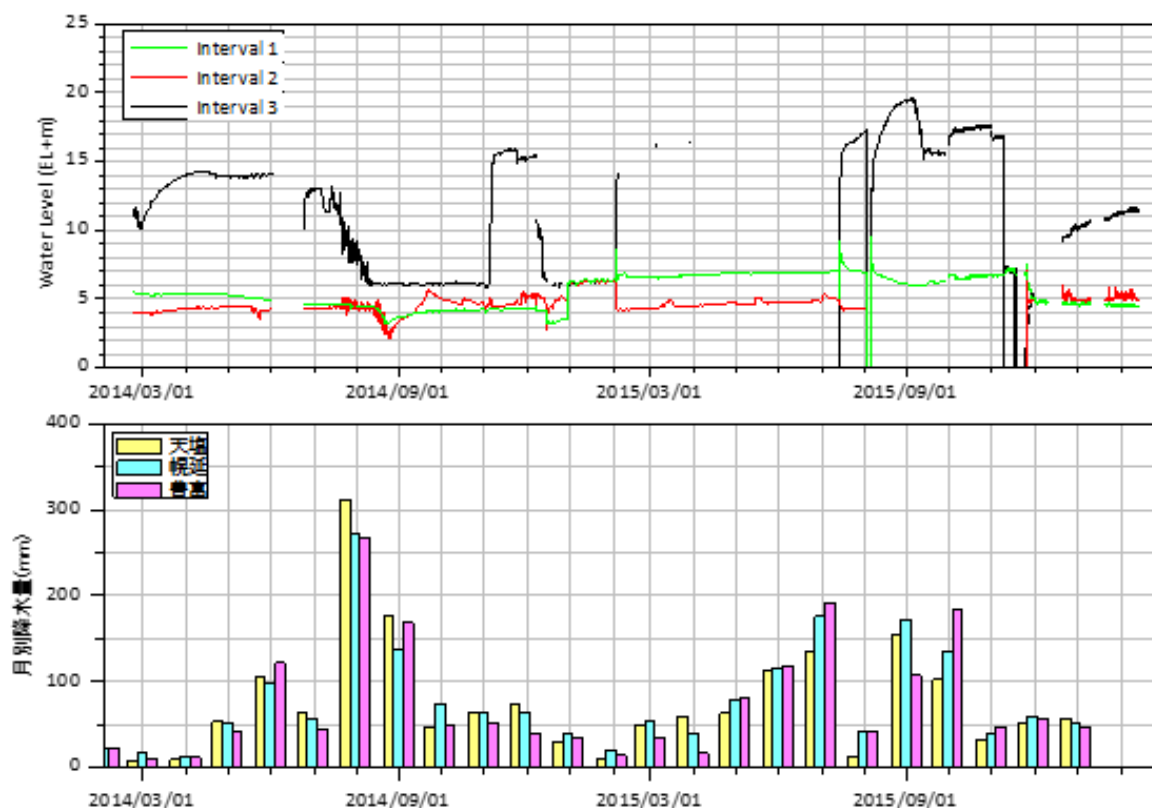


図 6.2-3 各観測区間水位と降雨量との比較

(4) その他の要因による影響

各区間圧力（ここでは水位変換値）とパッカー圧力、ミニパッカー圧力、気温およ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（表 6.2-1、図 6.2-4～図 6.2-6 参照）。なお、対象期間は比較的データの揃っている 2015/12/22 以降とした。

ミニパッカー圧力との比較では区間③で相関、区間①で逆相関の傾向となっており、その因果関係は明らかではない。ミニパッカー圧力を人為的に変えた場合の区間圧力を計測する等行い、その因果関係について明らかにする必要があると考えられる。

表 6.2-1 その他の要因による影響

	区間①水位	区間②水位	区間③水位
パッカー	区間①に接するパッカーはパッカー1および2であり、区間水位への影響は見られない。	区間②に接するパッカーはパッカー3および4であり、区間水位への影響は見られない。	区間③に接するパッカーはパッカー4および5であり、区間水位への影響は見られない。
ミニパッカー	ミニパッカー圧力に対し線形的に変化している（逆相関）ため、若干の影響を受けている可能性がある。	顕著な影響は見られない。	ミニパッカー圧力に対し線形的に変化しているため、若干の影響を受けている可能性がある。
気温	顕著な影響は見られない。	顕著な影響は見られない。	顕著な影響は見られない。
大気圧	顕著ではないが線形性がみられる。	顕著な影響は見られない。	顕著な影響は見られない。

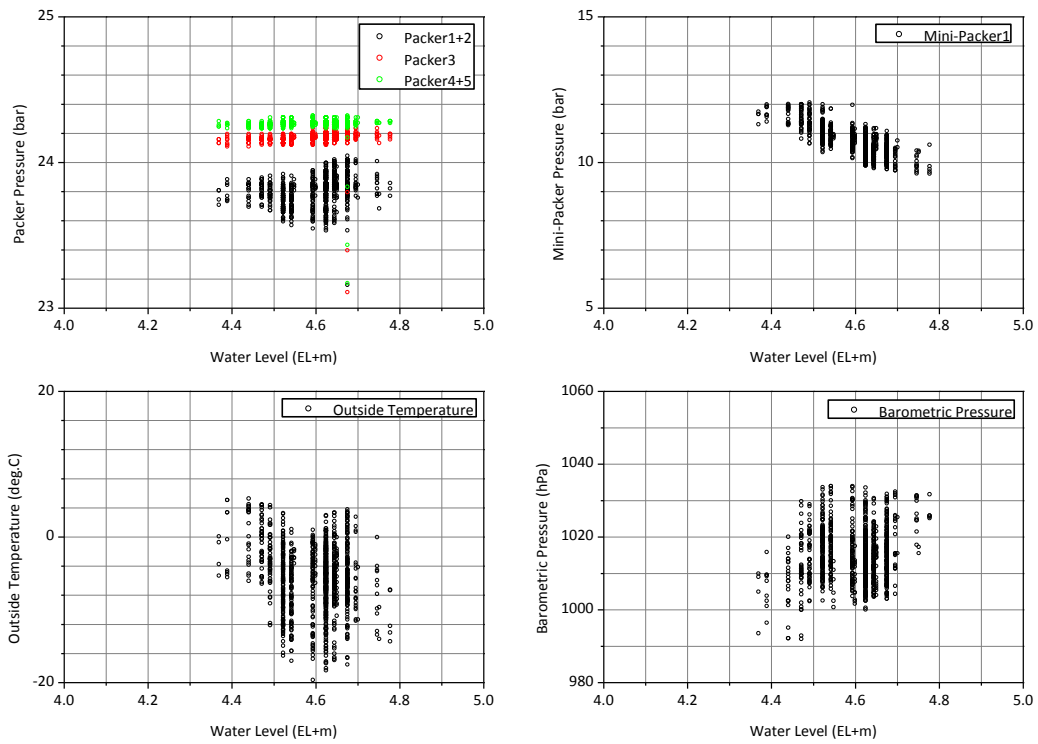


図 6.2-4 区間①水位と各種データとのクロスプロット

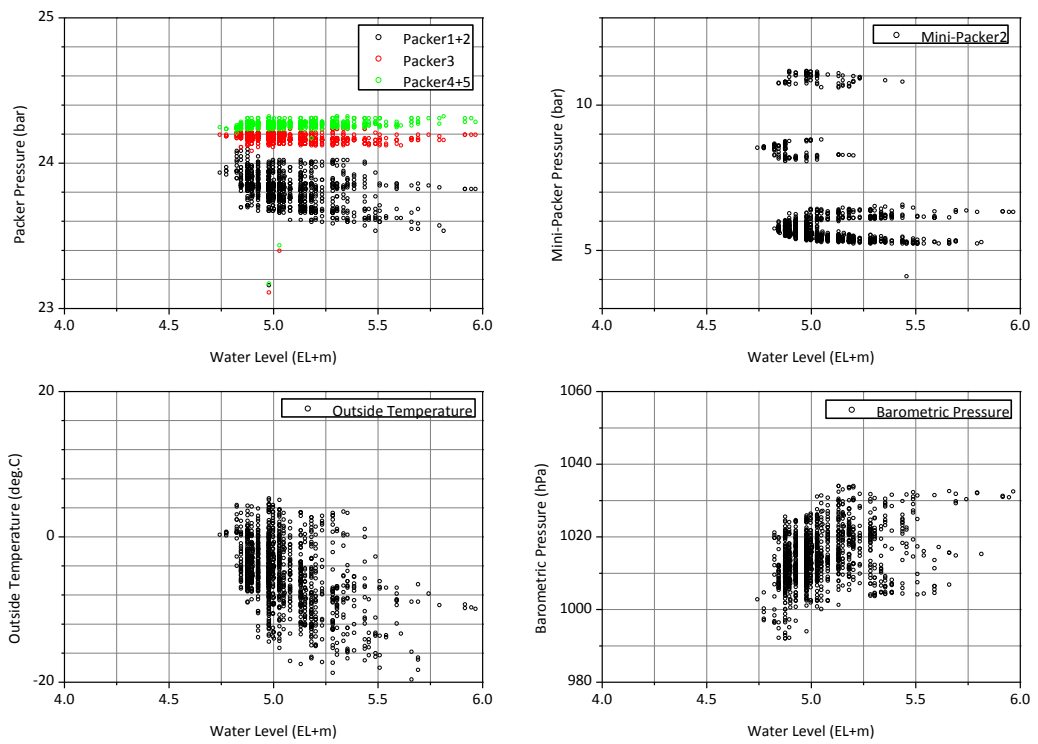


図 6.2-5 区間②水位と各種データとのクロスプロット

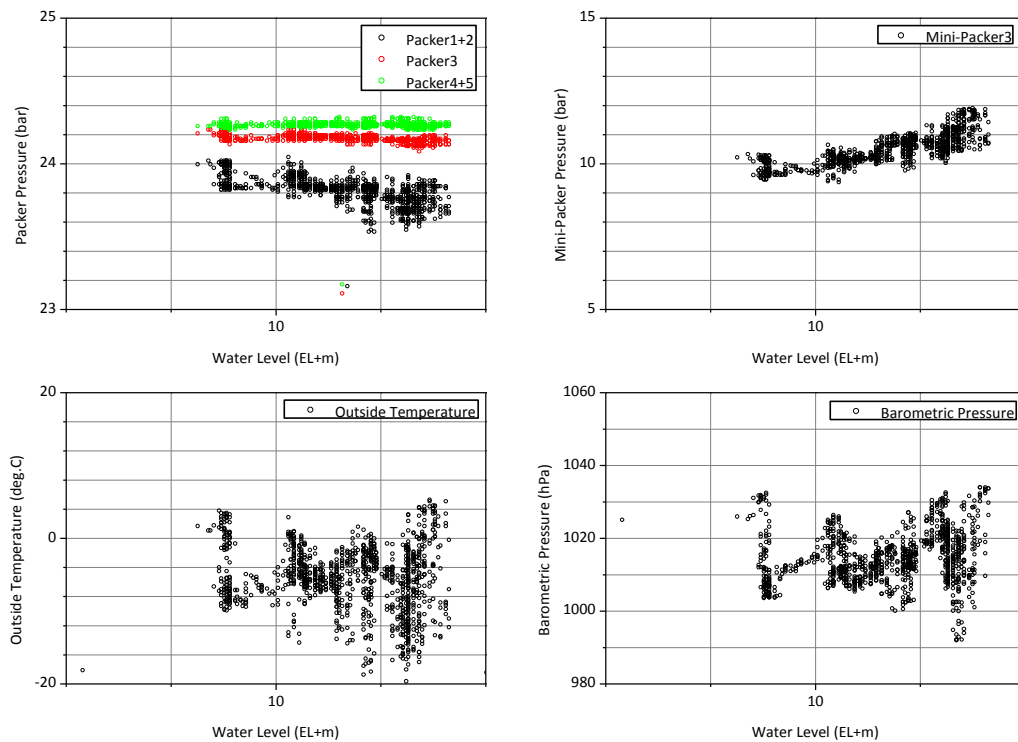


図 6.2-6 区間③水位と各種データとのクロスプロット

6.2.3 BAYTAP-G について

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

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

6.3 解析結果および考察

解析対象期間は 2015/4/1～2016/2/14 とし、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 6.3-1～図 6.3-6 に示す。図 6.3-2、図 6.3-4 および図 6.3-6 から各区間水位から潮汐成分が除去されたことがわかる。

本解析では潮汐成分のみを影響要因として区間水位からの除去を行ったが、ミニパッカー圧力の影響については今後のモニタリングを継続し、因果関係について検討する必要がある。

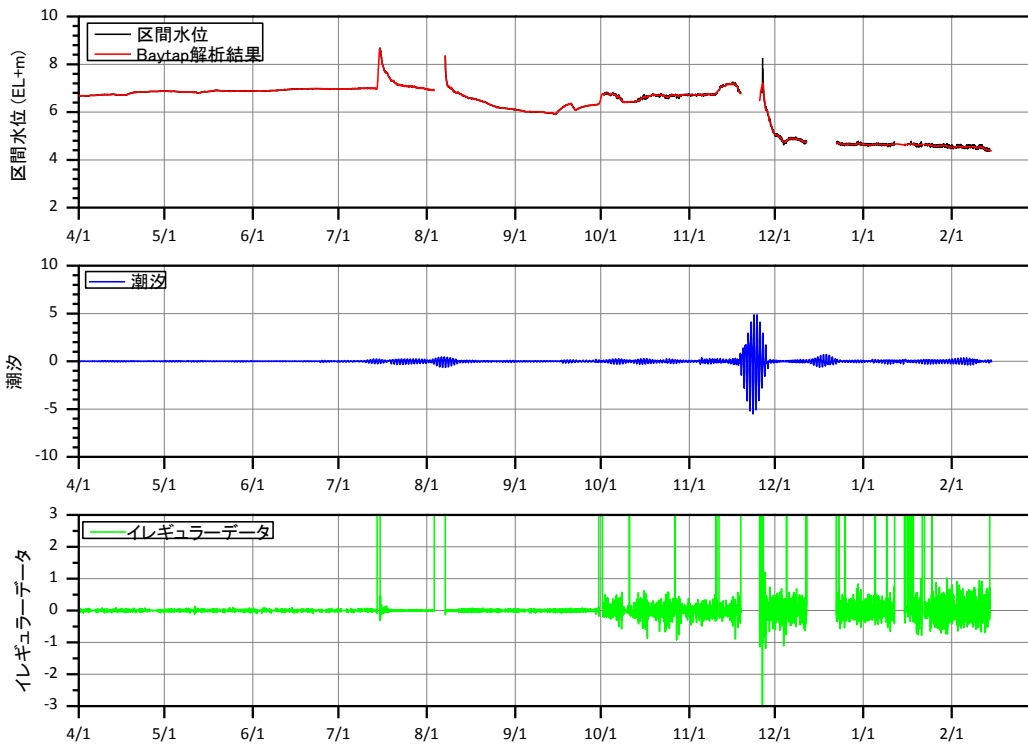


図 6.3-1 BAYTAP-G による解析結果 (観測区間①全体)

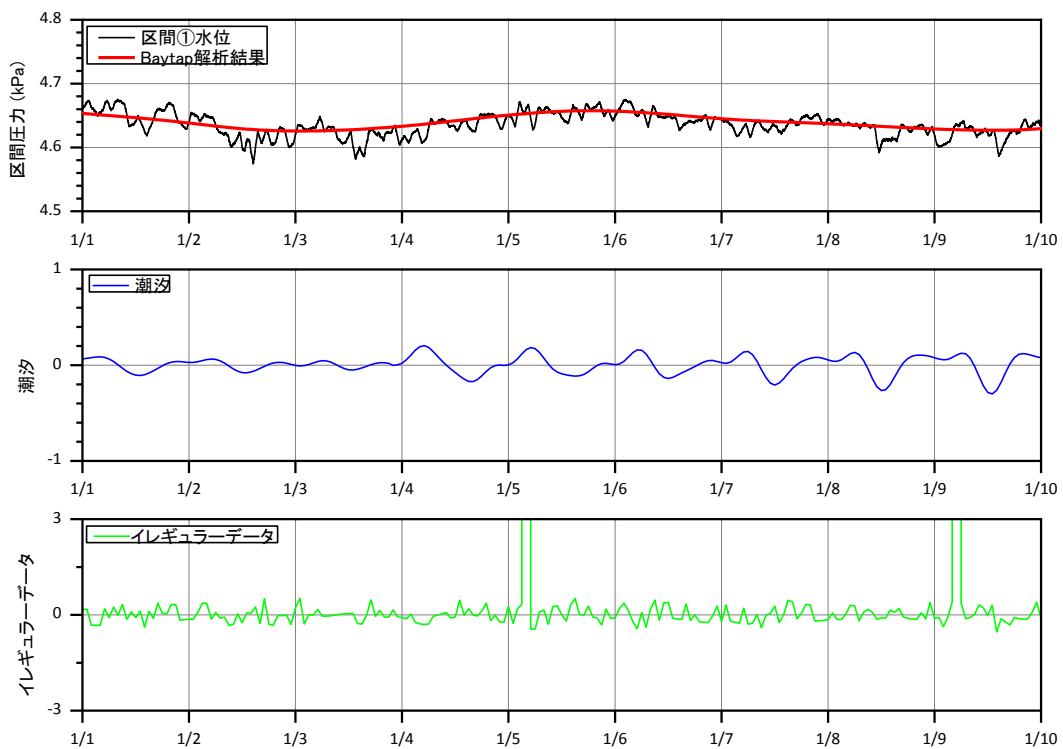


図 6.3-2 BAYTAP-G による解析結果 (観測区間①詳細)

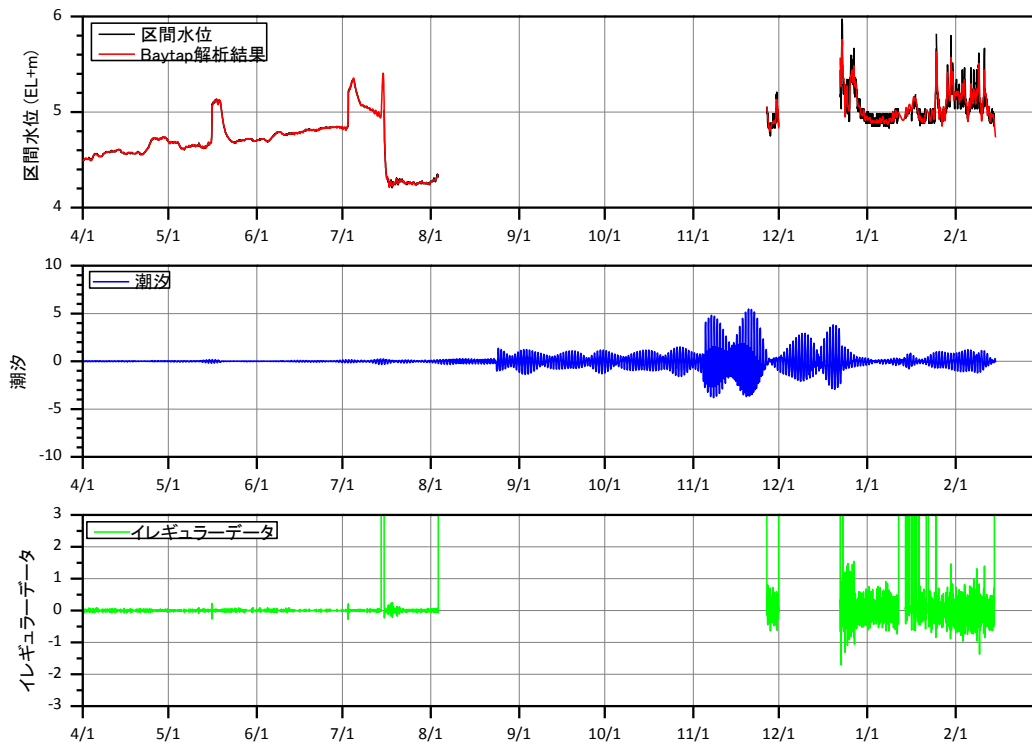


図 6.3-3 BAYTAP-G による解析結果 (観測区間②全体)

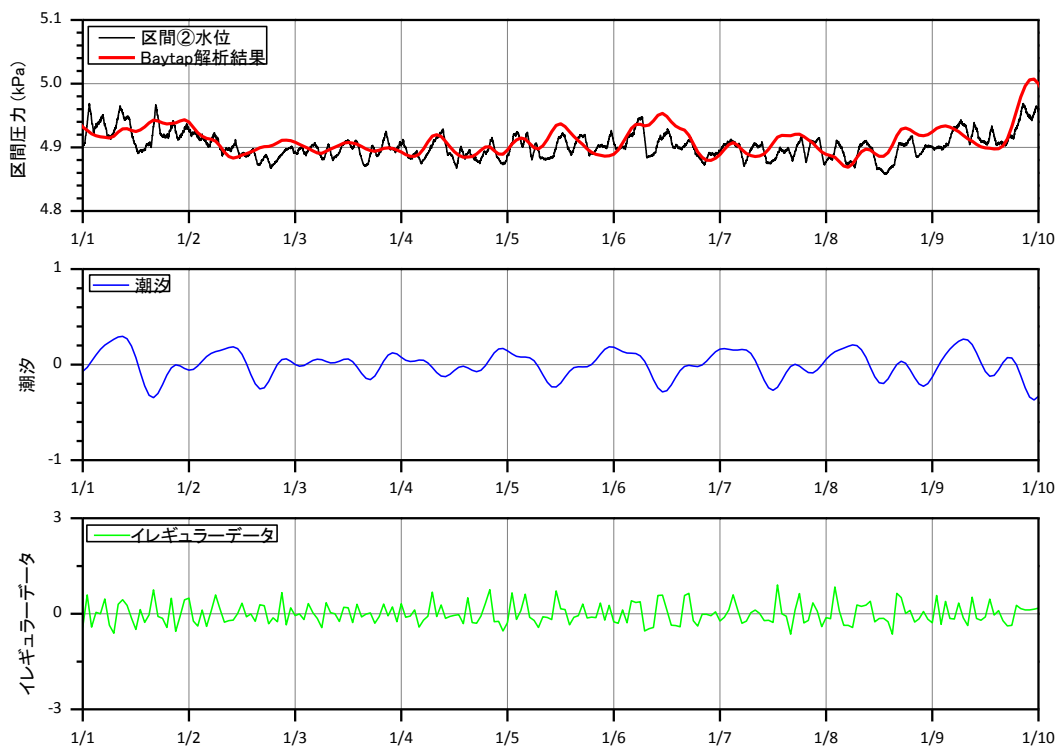


図 6.3-4 BAYTAP-G による解析結果 (観測区間②詳細)

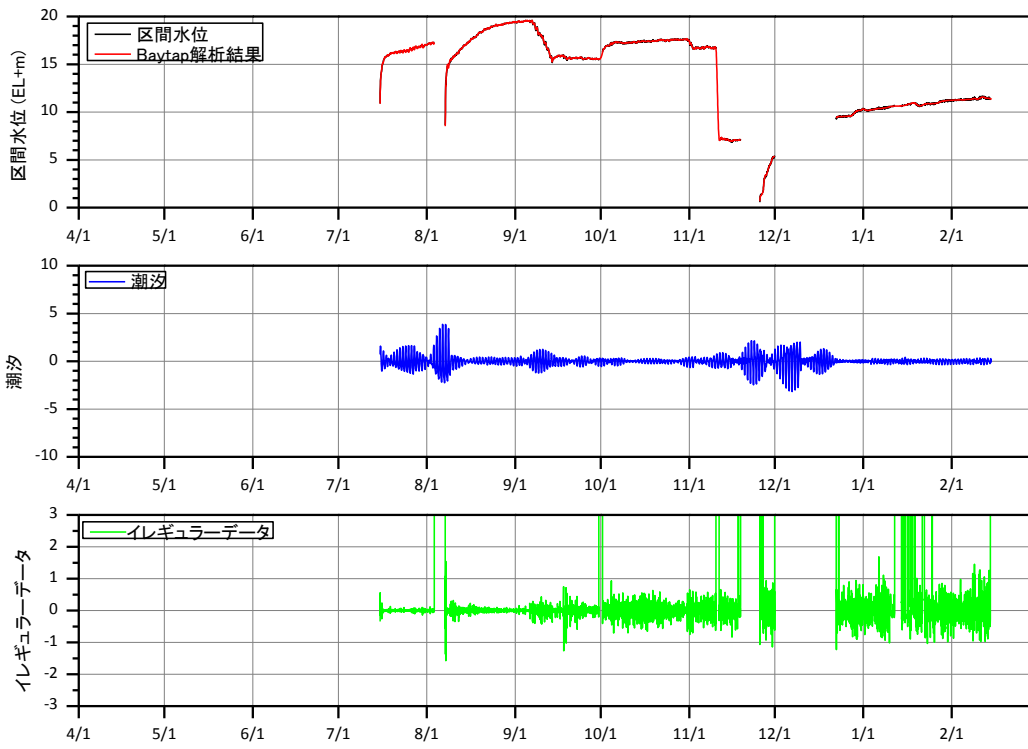


図 6.3-5 BAYTAP-G による解析結果 (観測区間③全体)

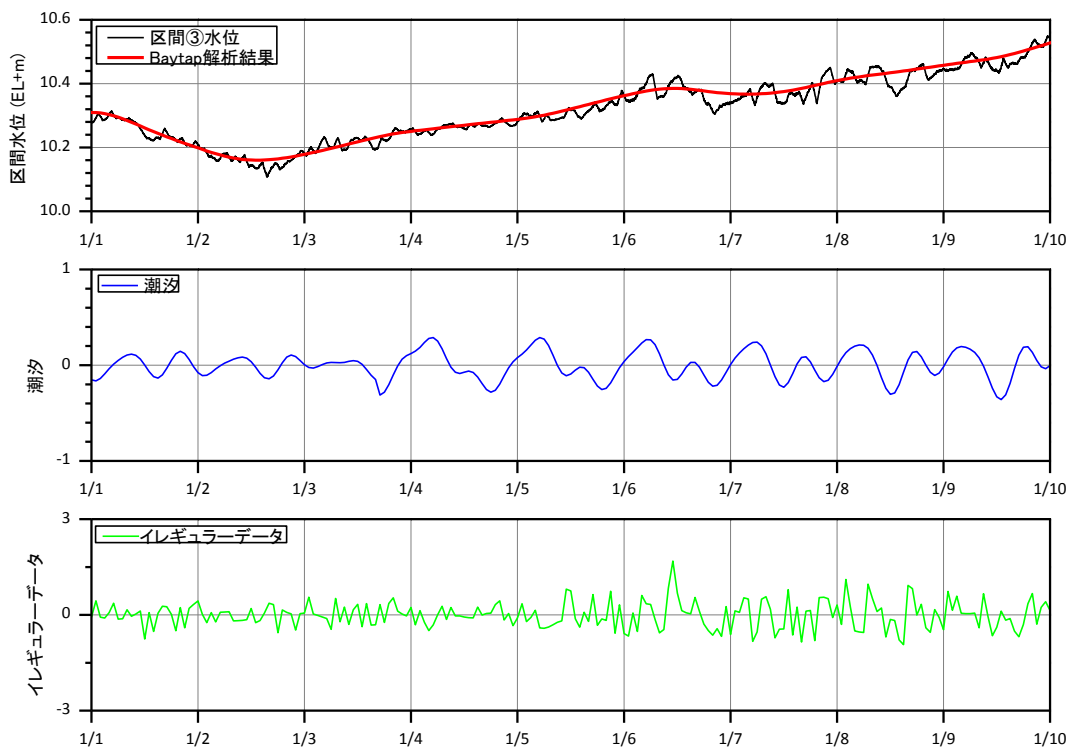


図 6.3-6 BAYTAP-G による解析結果 (観測区間③詳細)

7. 地下水およびガスの採取、分析

7.1 背景と目的

モニタリング技術の開発の目的は、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ており、間隙水圧についてはベースラインを把握することにより、その後の処分場建設時の間隙水圧挙動をベースラインと比較することによって評価することが可能となる。これに対して、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、掘削水の影響により初期的な地下水水質を評価するのが困難なため、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。

7.2 地下水・ガス採取

7.2.1 採取区間

孔内長期モニタリングの区間として以下の3区間を設定している。

- ・区間①：深度（孔長）249.95～257.45m
- ・区間②：深度（孔長）210.95～215.95m
- ・区間③：深度（孔長）208.45～209.95m

このうち、掘削時に逸泥が確認された区間③が他の区間に対して透水性が高く、短時間で採水が可能と判断されたため、当該区間において地下水・ガスの採取を実施した。なお本区間での透水性は、掘削終了時には $1.88\text{--}2.66 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 、モニタリング装置設置前には $2.2 \times 10^{-8} \text{m/s}$ と現状では掘削時に比較して透水性が2オーダーほど低くなっている。

7.2.2 採取期間

本年度は2回にわたり地下水およびガスの採取を実施した。表 7.2-1 および表 7.2-2 に実施工程を示す。対象は比較的湧水量が多いと考えられる区間③とし、サンプラーによる採水深度は深度 200m とした。

表 7.2-1 地下水およびガスの採取工程（1回目）

日付	作業内容
2015/8/3	<ul style="list-style-type: none"> ・現地入場 ・センサー＋ミニパッカー回収
2015/8/4	<ul style="list-style-type: none"> ・湧水時ガス採取
2015/8/5	<ul style="list-style-type: none"> ・サンプラーによる地下水採取
2015/8/6	<ul style="list-style-type: none"> ・ダブルバルブポンプによる地下水採取
2015/8/7	<ul style="list-style-type: none"> ・センサー＋ミニパッカー再設置 ・撤収

表 7.2-2 地下水およびガスの採取工程（2回目）

日付	作業内容
2015/11/24	<ul style="list-style-type: none"> ・現地入場 ・センサー＋ミニパッカー回収 ・ダブルバルブポンプによる地下水採取
2015/11/25	<ul style="list-style-type: none"> ・ダブルバルブポンプによる地下水採取 ・サンプラーによる地下水採取
2015/11/26	<ul style="list-style-type: none"> ・サンプラーによる地下水採取 ・センサー＋ミニパッカー再設置
2015/11/27	<ul style="list-style-type: none"> ・撤収

7.2.3 地下水採取方法

採水をしたHCD-3孔には、Solexparts社製SPMPシステム（図6.1-1）が設置されており、採取対象とした区間③（深度（孔長）：208.45m～209.95m）にはスタンドパイプと呼ばれる内径21mmのステンレス管が接続されており、地上まで延びている。

地下水水質試料を得るためには、採水対象とするパッカー区間から採水をする箇所（地上もしくは孔内）までのスタンドパイプ内が原位置の本来の地下水に入れ替わっている必要がある。そのため、掘削に用いた泥水や孔内洗浄および、その他装置の設置等で孔内に加えた水が採水区間に残らないよう

に予備排水を行った。

希ガス分析のための採水は希ガスサンプラー（図 7.2-4）を専用のステンレスチューブもしくは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。

地下水の採取は下記に示す 2 種類の方法により実施した。

(1) ダブルバルブポンプによる採取

表 7.2-3 にダブルバルブポンプの仕様を、図 7.2-1 および図 7.2-2 にダブルバルブポンプのコントロールユニットとチューブドラムの外観を示す。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 7.2-3 に作動原理を示す。

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。

表 7.2-3 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 7.2-1 ポンプコントロールユニット



図 7.2-2 チューブドラム

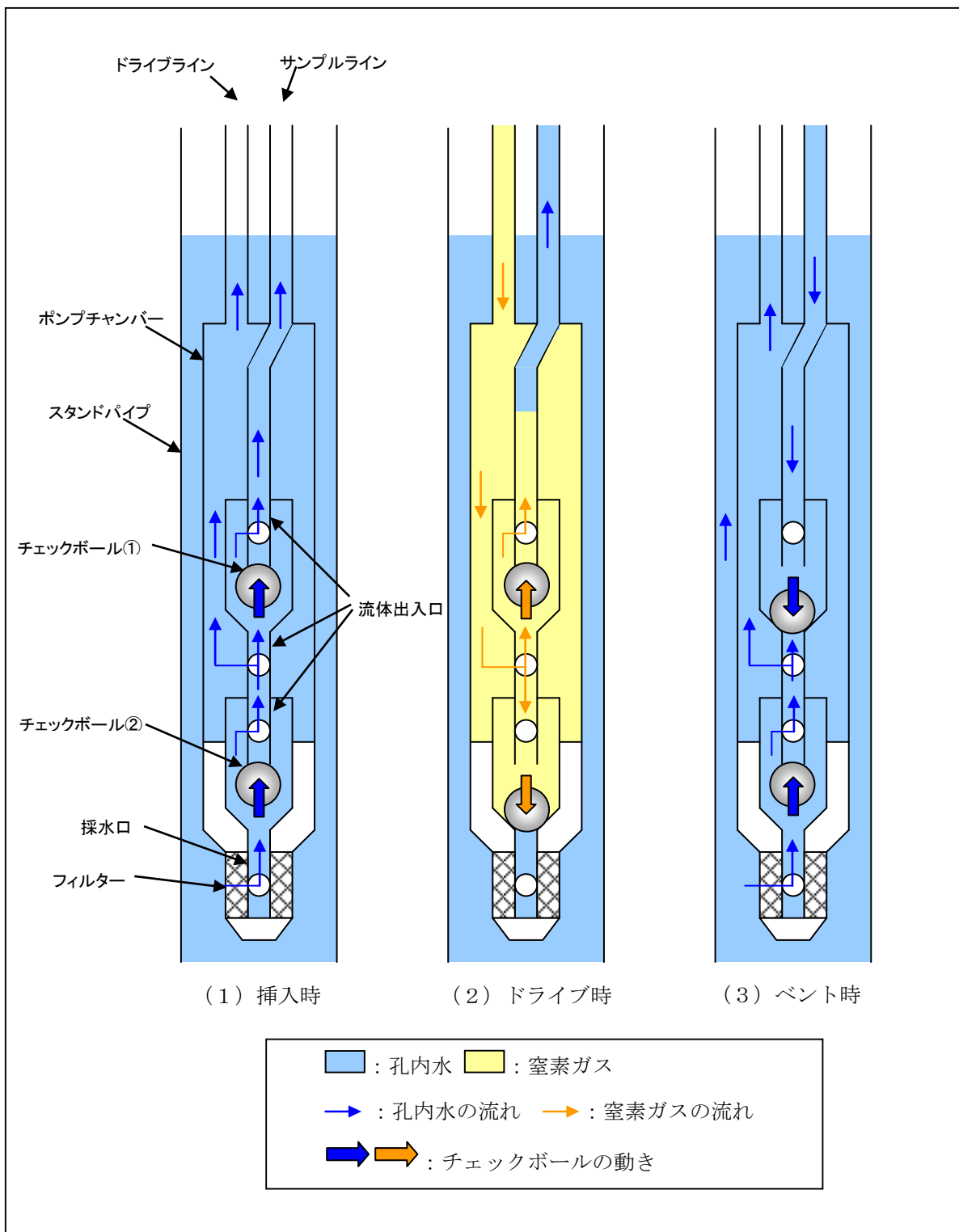


図 7.2-3 ダブルバルブポンプ作動原理

(2) サンプラーによる採取

表 7.2-4 にサンプラーの仕様を、図 7.2-4～図 7.2-5 に機器写真を示す。本サンプラーはフロースルー式（図 7.2-7 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および加圧ラインを改良した。

希ガス分析用の採水はサンプラーを専用のステンレスチューブもしくは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。

表 7.2-4 サンプラーの仕様

項目	仕様	備考
フロースルータイプ サンプラー タイプ 外径 銅管（外径／内径） 全長 容積 材質 重量 全長 チェックバルブ閉鎖圧力	Flow through 18 mm 10 / 8 mm 0.5 m ca. 22 ml ステンレススチール DIN 1.4301 0.5 kg 0.7 m 48 bar + 地層圧	AISI SS304
ウィンチ タイプ 加圧ライン	手動 ステンレススチール、外径 6mm	
クランプ止め装置 材質 全長 固定点間長 バルブ ガスチャンバー容積 ピストン長 圧力ゲージ	ステンレススチール DIN 1.4301 1.15 m 0.79 m 2-way、ニードルバルブ 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 7.2-4 サンプラー



図 7.2-5 ウィンチ

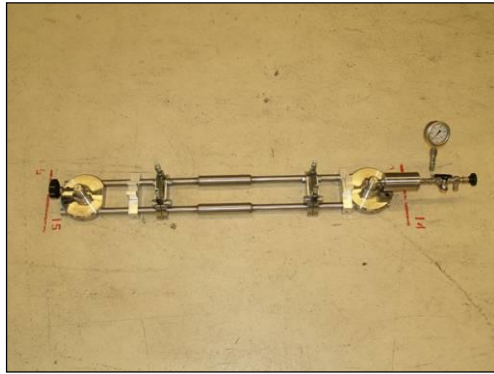
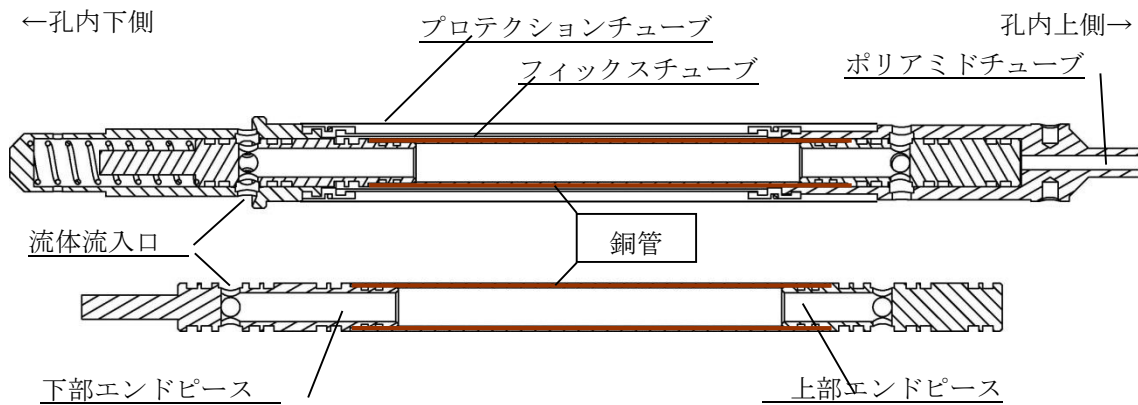


図 7.2-6 クランプ止め装置



上：サンプラー全体（左側：孔内下側，右側：坑内上側）

下：サンプラーから保護チューブ、フィックスチューブを外したところ

図 7.2-7 フロースルー型サンプラー断面図

7.3 計測と分析方法

採水は 2 回実施した。自然湧水もしくはダブルバルブポンプによる孔口での水試料採取時に物理化学パラメータ (pH、ORP、DO、EC) の測定を 1 回目：2015 年 8 月、2 回目：2015 年 11 月に実施した。

水質・同位体分析用試料および希ガス分析試料の分析方法は表 7.3-1 の通り。

表 7.3-1 本報告で用いた分析・測定方法

分析・測定項目	手法
温度, pH, ORP, DO	ポータブルの計測器でフローセルを用いて地上にて計測
EC	ポータブルの計測器で地上にて計測
Na, K, Ca, Mg, Cl, SO ₄ , Br	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
Al	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 ₃	河川水質試験法(案)II, 燃焼酸化-赤外線分析法
TOC	JISK0102燃焼酸化-赤外線式TOC分析法
δ D, δ O	新実験化学講座(1975)第10巻, 4.6安定同位体比の測定方法
3H	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)

7.4 分析・測定結果

分析・測定結果の一覧を表 7.4-1 に示す。本孔の掘削時には、コアを用いた圧縮抽水（木方ほか、1999；中田ほか、2007）およびコアを用いた希ガス測定（中田ほか、2006）が実施されており、採水区間の近傍でもデータが得られている（中田・長谷川 2009；電力中央研究所、2007；2008；2009；2010）。

表 7.4-1 には本報告で実施した計測・分析結果のほかに、圧縮抽水データ、HCD-3 孔で掘削水の作成や孔内洗浄等で使った浜里水井戸の水（電力中央研究所、2011）、および 13R1314 と称する H25 年度に現在のパッカー区間とほぼ同じ位置で採水と物理化学パラメータの原位置測定を行った値（電力中央研究所、2014）などの、考察において比較対象となる計測・分析データも示している。電荷バランス (Electrical balance、E. B. (%)) は主要溶存元素 (Na、K、Ca、Mg、Cl、SO₄、HCO₃) 濃度 (meq L⁻¹) を用いて以下の式で計算したものである。

$$E. B. (\%) = \frac{([Cations] - [Anions])}{([Cations] + [Anions])} \times 100$$

圧縮抽水試料は得られる液量が少ないときにはアルカリ度測定や TOC 計による TIC 測定を行っていない場合があるため、HCO₃ 濃度がないものについては E. B. の計算をしていない。また、本章では E. B. が ±5% の範囲を超えるものは分析結果が正しくない可能性が低くないものとして取り扱う。

図 7.4-1 にパイパーダイアグラム、図 7.4-2 にシュティフダイアグラムを示す。また参考のため海水の値（国立天文台、2006）も示す。

パイパーダイアグラムによると、プロットしたいずれの点も山本（1983）の分類では IV 型で海水、化石海水、温泉等に分類される。また、浜里水井戸も IV 型に属するが、海水と比べて非常に薄い水であり、パイパーダイアグラムの中心付近にプロットされることから、浅い地下水や河川水に相当する水質である。ヘキサダイアグラムによると、HCD-3 の 700m、750m、800m（いずれも標高は-415m 前後）の水質は Na-Cl 型である。Cl 濃度を基準とすれば、海水の 1/3 程度の濃度である。今年度採水を行った HCD-3_2015_1 および、HCD-3_2015_2、H25 年度に採水を行った 13R1314 はいずれも Na-Cl 型といえることができるが、Na-HCO₃ 型にも近い形状であり、Cl 濃度を基準とすれば海水の 1/5 程度の濃度であり、HCD-3 の圧縮抽水データと比較すると、薄い溶存元素濃度である。

表 7.4-1 分析・測定結果および参考データのー覧

参考文献	Borehole	ID	m abgl	代表深度abgl	Elevation	Formation	Samplig date	Temp °C	pH flowcell	pH in situ	pH Lab	ORP mV Ag/AgCl	ORP mV SHE	DO mg/L	EC mS/m	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Cl mg/L	SO ₄ mg/L	Alkalinity meq/L	TIC	HCO ₃	CO ₃	TOC	Br mg/L	Br/Cl	
Ozima&Podsek (2002)	-	Ozima&Podsek (2002)	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
電力中央研究所(2007)	HCD-3	HCD3-200m	-202	-202	-147.5	Wakkanai	-	-	-	-	-	-	-	-	2491	28.4	16.0	31.0	3370.0	82.4	-	-	-	-	-	-	7.68	0.0023	
電力中央研究所(2007)	HCD-3	HCD3-250m	-256	-256	-192.6	Wakkanai	-	-	-	-	-	-	-	-	3424	33.8	28.3	52.1	4020.0	1087.9	-	-	-	-	-	-	7.73	0.0019	
電力中央研究所(2007)	HCD-3	HCD3-300m	-298	-298	-225.8	Wakkanai	-	-	-	-	-	-	-	-	4042	43.1	43.5	82.7	4010.0	2699.9	-	-	-	-	-	-	7.80	0.0019	
電力中央研究所(2007)	HCD-3	HCD3-350m	-350	-350	-264.2	Wakkanai	-	-	-	-	-	-	-	-	3540	52.5	33.6	103.7	4300.0	849.8	-	-	-	-	-	-	11.59	0.0027	
電力中央研究所(2007)	HCD-3	HCD3-360m	-362	-362	-272.5	Wakkanai	-	-	-	-	-	-	-	-	3021	37.6	16.8	32.9	3980.0	307.4	-	-	-	-	-	-	4.69	0.0012	
電力中央研究所(2007)	HCD-3	HCD3-400m	-403	-403	-299.9	Wakkanai	-	-	-	-	-	-	-	-	2850	38.2	25.7	52.2	3810.0	830.0	-	-	-	-	-	-	16.39	0.0043	
電力中央研究所(2008)	HCD-3	HCD3-450m	-450	-450	-328.6	Wakkanai	-	-	-	-	-	-	-	-	3220	51.1	28.7	45.7	4710.0	1350.0	-	-	-	-	-	-	20.16	0.0043	
電力中央研究所(2008)	HCD-3	HCD3-500m	-501	-501	-356.1	Wakkanai	-	-	-	-	-	-	-	-	2800	44.9	26.3	28.6	4410.0	310.0	-	-	-	-	-	-	17.868	0.0041	
電力中央研究所(2008)	HCD-3	HCD3-550m	-553	-553	-379.7	Wakkanai	-	-	-	-	-	-	-	-	3200	64.1	33.6	25.2	4940.0	220.0	-	-	-	-	-	-	-	23.66	0.0048
電力中央研究所(2008)	HCD-3	HCD3-600m	-601	-601	-396.8	Wakkanai	-	-	-	-	-	-	-	-	2690	32.5	35.3	38.2	4340.0	250.0	-	-	-	-	-	-	21.8	0.0050	
電力中央研究所(2008)	HCD-3	HCD3-650m	-651	-651	-408.6	Wakkanai	-	-	-	-	-	-	-	-	3190	46.7	55.5	66.3	4470.0	1130.0	-	-	-	-	-	-	26.281	0.0059	
電力中央研究所(2009)	HCD-3	HCD3-700m	-702	-702	-414.6	Wakkanai	-	-	-	-	-	-	-	-	3685	54.7	58.1	43.6	5380.0	176.2	-	305.8	-	-	-	157.9	26.955	0.0050	
電力中央研究所(2009)	HCD-3	HCD3-750m	-750	-750	-415.6	Wakkanai	-	-	-	-	-	-	-	-	4690	101.5	130.8	104.2	5610.0	2000.0	-	272.2	-	-	-	198.5	32.74	0.0058	
電力中央研究所(2010)	HCD-3	HCD3-800m	-800	-800	-416.3	Wakkanai	-	-	-	-	-	-	-	-	4245	92.7	88.6	74.4	5800.0	649.0	-	327.6	-	-	-	82.4	35.125	0.0061	
電力中央研究所(2010)	HCD-3	HCD3-825m	-824	-824	-416.6	Wakkanai	-	-	-	-	-	-	-	-	4059	64.5	72.9	60.1	5786.1	207.8	-	538.8	-	-	-	150.3	42.26	0.0073	
電力中央研究所(2010)	HCD-3	HCD3-850m	-856	-856	-416.6	漸移帯	-	-	-	-	-	-	-	-	4273	74.9	53.9	59.1	5605.0	285.3	-	799.3	-	-	-	136	40.75	0.0070	
電力中央研究所(2010)	HCD-3	HCD3-875m	-877	-877	-416.5	Koitoi	-	-	-	-	-	-	-	-	4550	95.4	65.3	59.6	6086.5	98.7	-	950.5	-	-	-	184.5	42.46	0.0070	
電力中央研究所(2011)	浜里水井戸	浜里水井戸	-0.332	-16.18	-8.26	-	-	-	-	6.62	-	-	-	-	30.6	3.20	9.02	6.19	49.39	19.39	0.70	-	-	-	-	22.43	0.27	0.0048	
電力中央研究所(2014)	HCD-3	13R1314	-208.50	-209.70	-209.1	Wakkanai	2013/1/23-24	18.04	-	6.98	6.98	-139	72	-	994	1800	23	37	13	1900	<1	-	1800	-	-	9.4	0.0049		
本報告書	HCD-3	HCD-3_2015_1	-208.45	-209.95	-209.2	Wakkanai	水質・物P2015/8/6	26.7	8.15	-	8.1	-262	-57	0.07	1378	3400	26	33	23	3900	<1	-	3120	-	-	160	18	0.0046	
本報告書	HCD-3	HCD-3_2015_2	-208.45	-209.95	-209.2	Wakkanai	希ガス2015/8/5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
本報告書	HCD-3	HCD-3_2015_2	-208.45	-209.95	-209.2	Wakkanai	水質・物P2015/11/25	2.3	8.46	-	8.3	-124	98	0.00	1394	3200	25	21	21	3600	<1	-	-	2530	-	-	110	15	0.0042
本報告書	HCD-3	HCD-3_2015_2	-208.45	-209.95	-209.2	Wakkanai	希ガス1本目11/25, 2,3本目2015/11/26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

参考文献	Borehole	ID	m abgl	代表深度abgl	Elevation	Formation	Samplig date	I mg/L	F mg/L	Si mg/L	Al mg/L	B mg/L	δ D ‰	δ ¹⁸ O ‰	³⁶ Cl/ ³⁵ Cl × 10 ⁻¹⁵	err ±	⁴ He ccSTP/gw	³ He/ ⁴ He	T-Ne ccSTP/gw	⁴ He/Ne	Ne補正 ⁴ He	Ne補正 ³ He/ ⁴ He	³ H TU	¹⁴ C pMC	δ ¹³ C ‰	NAF mg/L	cont(%) %	eb %	
Ozima&Podsek (2002)	-	Ozima&Podsek (2002)	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
電力中央研究所(2007)	HCD-3	HCD3-200m	-202	-202	-147.5	Wakkanai	-	6.978	9.648	-	-	-	-29	0.5	9	1.4	5.36E-06	2.09E-07	8.04E-08	66.71	1.33E-05	2.09E-07	-	-	-	-	-	-	
電力中央研究所(2007)	HCD-3	HCD3-250m	-256	-256	-192.6	Wakkanai	-	8.585	8.742	-	-	-	-23	2.2	7.9	1.3	3.29E-06	2.38E-07	1.28E-07	25.62	5.12E-06	2.38E-07	-	-	-	-	-	-	
電力中央研究所(2007)	HCD-3	HCD3-300m	-298	-298	-225.8	Wakkanai	-	6.566	8.778	-	-	-	-21	2.9	7.6	1.2	2.66E-06	1.92E-07	7.43E-08	35.81	7.16E-06	1.92E-07	-	-	-	-	-	-	
電力中央研究所(2007)	HCD-3	HCD3-350m	-350	-350	-264.2	Wakkanai	-	8.79	11.35	-	-	-	-24	2.6	-	-	3.07E-06	1.68E-07	8.41E-08	36.45	7.29E-06	1.68E-07	-	-	-	-	-	-	
電力中央研究所(2007)	HCD-3	HCD3-360m	-362	-362	-272.5	Wakkanai	-	7.638	5.462	-	-	-	-26	2.2	6.8	1.2	4.49E-06	1.79E-07	1.51E-07	29.82	5.96E-06	1.79E-07	-	-	-	-	-	-	
電力中央研究所(2007)	HCD-3	HCD3-400m	-403	-403	-299.9	Wakkanai	-	13.502	5.112	-	-	-	-27	0.6	6.8	1.5	1.83E-05	1.15E-06	3.62E-05	0.50	7.88E-06	8.09E-07	-	-	-	-	-	-	
電力中央研究所(2008)	HCD-3	HCD3-450m	-450	-450	-328.6	Wakkanai	-	13.256	8.021	-	-	-	-25	1.5	6.7	1.4	2.32E-06	1.49E-07	2.89E-08	80.34	1.61E-05	1.49E-07	-	-	-	-	-	-	
電力中央研究所(2008)	HCD-3	HCD3-500m	-501	-501	-356.1	Wakkanai	-	10.436	4.9515	-	-	-	-25	1.4	5.9	1.3	7.28E-06	1.35E-07	2.31E-08	315.85	6.32E-05	1.35E-07	-	-	-	-	-	-	
電力中央研究所(2008)	HCD-3	HCD3-550m	-553	-553	-379.7	Wakkanai	-	12.826	4.8035	-	-	-	-23	2.5	8.9	1.7	6.38E-06	1.36E-07	6.29E-08	101.39	2.03E-05	1.36E-07	-	-	-	-	-	-	
電力中央研究所(2008)	HCD-3	HCD3-600m	-601	-601	-396.8	Wakkanai	-	9.218	4.6405	-	-	-	-25	1.8	7.1	1.5	1.02E-06	1.79E-07	4.54E-08	22.55	4.51E-06	1.79E-07	-	-	-	-	-	-	
電力中央研究所(2008)	HCD-3	HCD3-650m	-651	-651	-408.6	Wakkanai	-	9.075	3.6785	-	-	-	-21	2.8	7.7	1.5	1.16E-06	1.45E-07	4.83E-08	24.10	4.82E-06	1.45E-07	-	-	-	-	-	-	
電力中央研究所(2009)	HCD-3	HCD3-700m	-702	-702	-414.6	Wakkanai	-	13.57	-	-	-	-	-20	3.1	6.0	1.5	7.46E-06	1.52E-07	3.30E-08	225.63	4.51E-05	1.52E-07	-	-	-	-	-	-3.6	
電力中央研究所(2009)	HCD-3	HCD3-750m	-750	-750	-415.6	Wakkanai	-	12.36	-	-	-	-	-21	3.0	3.2	1.6	2.63E-06	1.91E-07	1.02E-07	25.73	5.15E-06	1.91E-07	-	-	-	-	-	-0.2	
電力中央研究所(2010)	HCD-3	HCD3-800m	-800	-800	-416.3	Wakkanai	-	13.16	-	-	-	-	-21	3.3	7.2	1.9	7.51E-06	1.60E-07	3.10E-08	242.56	4.85E-05	1.60E-07	-	-	-	-	-	-1.7	
電力中央研究所(2010)	HCD-3	HCD3-825m	-824	-824	-416.6	Wakkanai	-	7.393	-	32.0	-	58.0	-25	2.6	3.2	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-6.4	
電力中央研究所(2010)	HCD-3	HCD3-850m	-856	-856	-416.6	漸移帯	-	7.431	-	54.8	-	68.8	-26	2.5	5.6	1.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-8.3	
電力中央研究所(2010)	HCD-3	HCD3-875m	-877	-877	-416.5	Koitoi	-	8.423	-	45.4	-	76.9	-24	3.1	3.3	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-9.6	
電力中央研究所(2011)	浜里水井戸	浜里水井戸	-0.332	-16.18	-8.26	-	-	0.019585	0.0713	1.69	-	0.04	-62	-9.5	8.6	1.3	6.59E-08	1.70E-06	2.76E-07	0.24	4.41E-08	1.84E-06	3.18	90.63	-21	-	3	-2.5	
電力中央研究所(2014)	HCD-3	13R1314	-208.50	-209.70	-209.1	Wakkanai	2013/1/23-24	5.9	-	-	-	-	-42	-4.1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.7	-	-	-	-	-0.8	
本報告																													

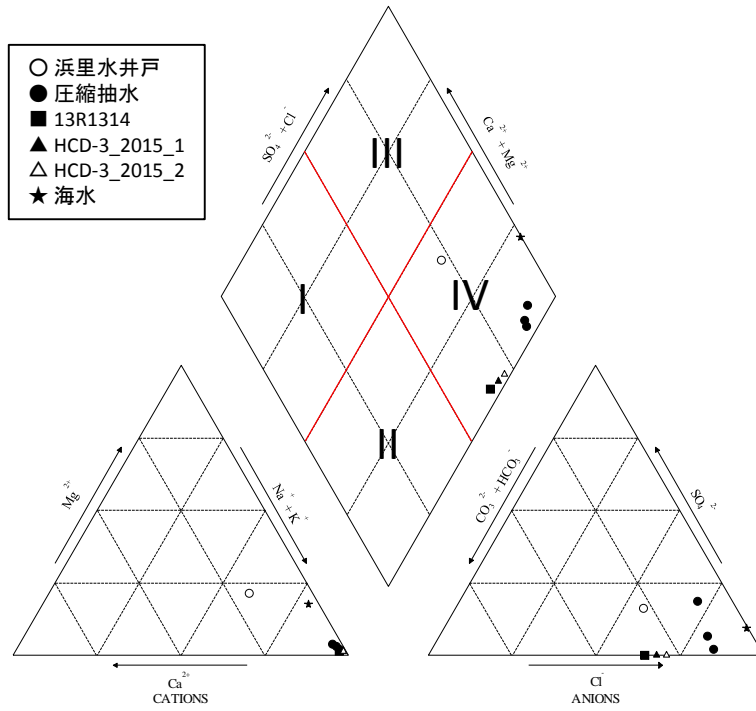


図 7.4-1 パイパーダイアグラム

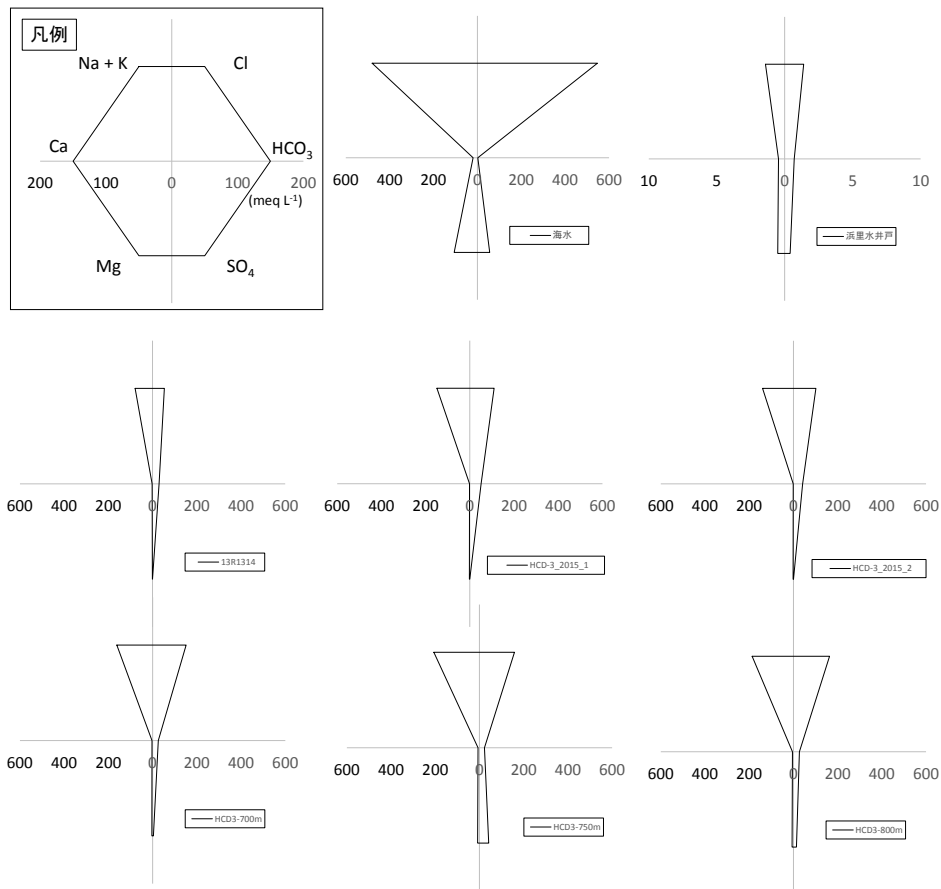


図 7.4-2 シュティフダイアグラム

7.5 考察

7.5.1 溶存イオン・同位体の評価

本年度の採水結果の品質を検討するために、圧縮抽水データが正しいと仮定して、本年度得られた結果や H25 年度に採水を行った結果（13R1314）との比較検討を行う。

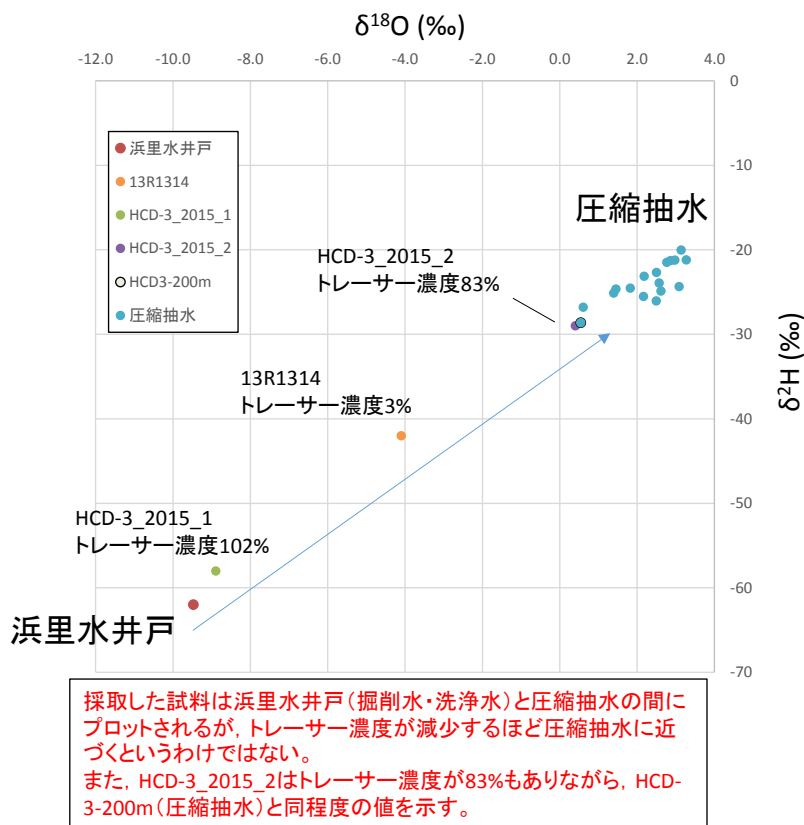


図 7.5-1 水素酸素同位体比の比較

図 7.5-1 に水素酸素同位体比の比較を示す。2015 年 8 月に採水した HCD-3_2015_1 はトレーサー濃度が 102%であり、浜里水井戸の水素酸素同位体比に近い値を示している。一方で、2015 年 11 月に採水した HCD-3_2015_2 はトレーサー濃度が 83%にもかかわらず、同程度の深度から得られた圧縮抽水データ（HCD-3-200m）と同じ位置にプロットされている。また、13R1314 は SPMP システムの設置前に取られた値であり、トレーサー濃度が 3%であるが、水素酸素同位体比は浜里水井戸と圧縮抽水の中間点付近に位置する。蛍光染料が加えられた水は浜里水井戸であり、それが蛍光染料の加えられていない原位置の地下水と混合していると考えられることから、トレーサー濃度が 83%（HCD-3_2015_2）あるにもかかわらず、圧縮抽水と同程度の値を示したり、トレーサー濃度が 3%（13R1314）であるにもかかわらず、浜里水井戸と圧縮抽水の中間付近の同位体比を示したりするのは不可解である。図 7.5-2 に水素同位体比と Cl 濃度の関係を示す。HCD-3_2015_1 は 4000 mg L⁻¹ 近い Cl 濃度を有しているが、水素

同位体比は浜里水井戸に近い、淡水のような値を示している。HCD-3_2015_2 は同程度の深度から得られた圧縮抽水データ（HCD-3-200m）と同じ位置にプロットされ、Cl 濃度は圧縮抽水データと同程度の値を示しているが、蛍光染料濃度は 83%である。13R1314 についても同様にトレーサー濃度が 3%であるにもかかわらず、Cl 濃度は圧縮抽水データの Cl 濃度の 6 割程度である。蛍光染料濃度、水素酸素同位体比および Cl 濃度はそれぞれ整合しない値を示している。

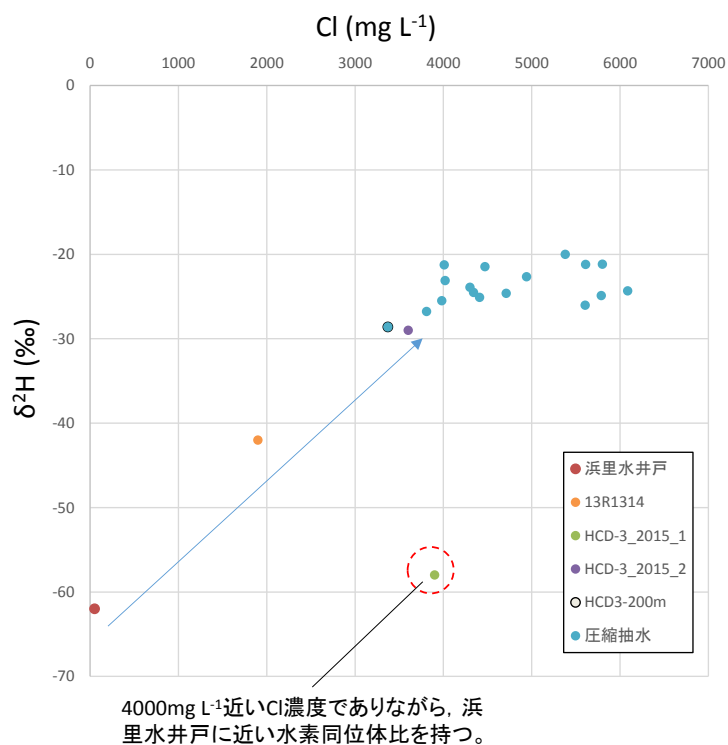


図 7.5-2 水素同位体比と Cl 濃度の関係

HCD-3 では掘削水、洗浄水等の孔内に入れる水にナフチオン酸が 20mg L⁻¹ となるよう添加されている。モニタリングシステムの設置等、掘削と採水以外の作業が孔内で行われた場合は、その作業をする際に適宜孔内水を入れ替える場合がある。この場合は、孔内作業をするときに注入された水に添加したトレーサーが加わるため、そのたびにトレーサー濃度が上がることになる。孔内作業ごとにトレーサーの種類を変えていけば、混合している水の起源を知ることができるが、HCD-3 孔ではトレーサーの種類を変えていないことから、掘削水と洗浄水や、その他の孔内作業を行ったときに使った水の区別をトレーサー濃度からだけでは判別することができない。

本年度得られた水質変化を理解するためには、孔内に導入した水の種類やトレーサー濃度に関する管理記録を調べ、トレーサー濃度と水質の対応を評価する必要がある。

7.5.2 物理化学パラメータの評価

2回目の採水の水質データと1回目、2回目のpH、ORPの測定値を基に、Geochemist's workbench ver. 10を用いてpH-Ehダイアグラムを作成した(図7.5-3)。

天然水に含まれる成分のうち、主な4元素F、S、CおよびNの酸化還元対に対してpH-Ehダイアグラムを作成し、本年度得られたHCD-3_2015_1とHCD-3_2015_2のpH、Ehをプロットした。いずれの酸化還元対に対しても平衡になっていないが、ジャロサイトとSO₄²⁻の境界付近にプロットされているようにも見受けられる。孔は異なるが同じ幌延地区においては深度500~550m程度でFe²⁺、SO₄²⁻とFeS₂との酸化還元反応の平衡電位付近にプロットされたとの報告がある(岩月ほか2009)。同じ結果になるとは限らないが、岩月ほか(2009)の測定と同様な結果が得られると考えるならば、図7.5-3左上の図のSO₄²⁻とPyriteの境界線付近にデータがプロットされるはずである。今回そのようなならなかったのは脱ガス等の計測の問題か予備排水が十分ではないことが考えられる。

本年度の採水・計測では、蛍光染料濃度が、1回目:100%、2回目:80%であり、掘削水等の混合が多いものと考えられることから、本年度の物理化学パラメータの測定において真の値を論じることはできない。そこで本年度は測定を通して今後の測定に向けた改善点を抽出した。

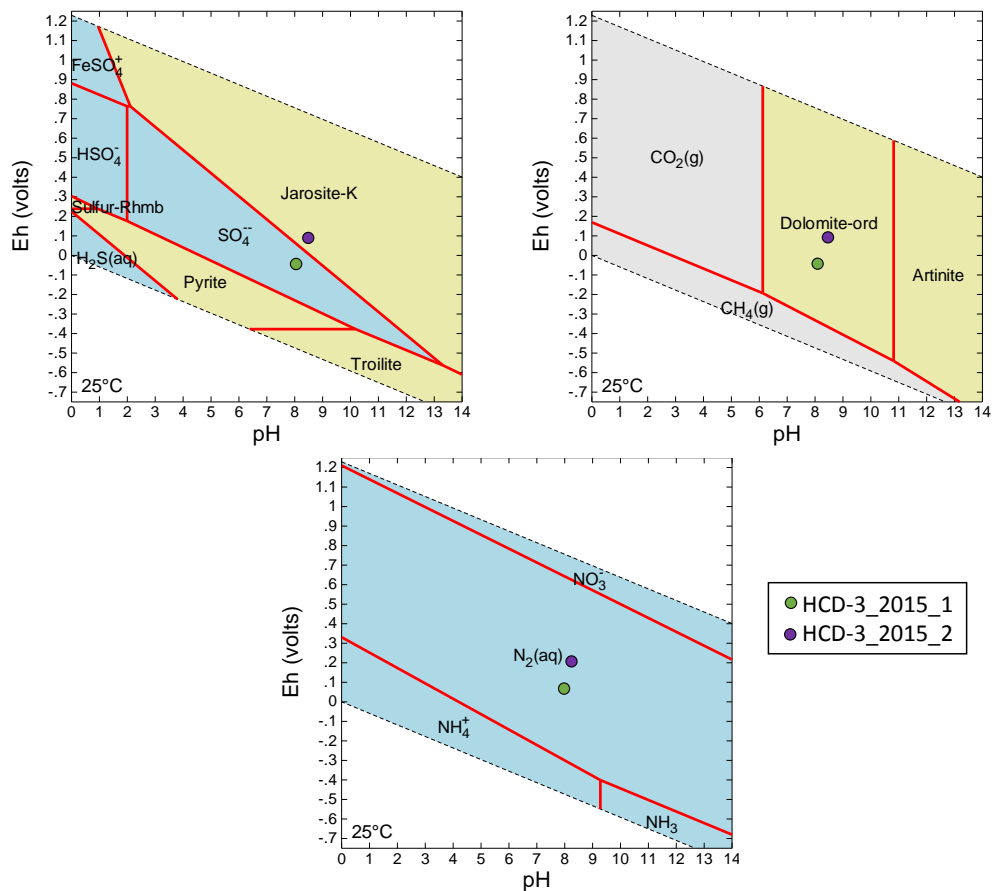


図 7.5-3 pH-Eh ダイアグラム

本年度の測定において pH、ORP、DO はダブルバルブポンプで揚水して地上でフローセルを通じて測定した。EC はフローセルから分岐させた地下水を 1L ポリビーカーに導入し、流水環境下で測定した。深部の地下水の物理化学パラメータを地上で測定する場合は、原位置の値とは異なる値となることが知られている。その中で、DO はフローセルを用いて大気が混入しないような対策をすれば正しいと考えられる値が得られ、また、EC は電気伝導度に関与するイオンの濃度が変わらなければ、原位置でも地上でも大きく変わらないものと考えられる。一方で、pH は原位置では溶存していた CO_2aq が地上で脱ガスすることにより上昇する場合や、逆に、大気中の CO_2 が地上に汲み上げた地下水に溶解して pH を下げる場合がある。ORP も地上での測定の場合は、酸素が混入しやすく、DO 電極で測定できない程度の低い濃度の DO でも ORP 値に影響を及ぼす。またガス成分が系の酸化還元に関与している場合、ORP 値は脱ガスの影響を受ける。このため、pH、ORP は対象深度に測定プローブを降下させて測ることが望ましいが、スタンドパイプ形式の場合は内径が細かい場合が多く、本系では内径 21mm である。なお、この 21mm の内径と 200m 深度の高い水圧に対応した一般に流通する電極はなく、特注品を作成する必要がある。

本孔でも揚水時に気泡が見られることから、脱ガスしていることは明らかである。よって、確からしい pH を地上で得るためには、ガス水比やガス組成を測定・分析し、原位置の水圧を考慮した補正計算を行う必要があるものと考えられる。また、ORP については、地上で計測した値から原位置の値を推定することは容易ではないが、地上で得られた ORP 値の妥当性の検討をしていく必要がある。

7.5.3 希ガスの評価

希ガスデータの深度分布を図 7.5-4 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）を示す。

地下水溶存 He 濃度は帯水層中の岩石に含まれる U や Th のアルファ崩壊で発生する He を蓄積することで、地下水の滞留時間が長くなるほど溶存 He 濃度は高くなる。一方で、Ne は基本的に地中では発生しないため、どの年代の地下水を採取しても Ne 濃度はほぼ一定値を取る。このため Ne 濃度が希ガス採取の品質の指標となる。Ne 濃度は $2.25 \times 10^{-7} \text{ cm}^3\text{STP/g-water}$ （淡水、 0°C ）が理想的な値である。塩分濃度が高いと塩析効果により溶存ガス量は若干低くなる。海水では $1.77 \times 10^{-7} \text{ cm}^3\text{STP/g-water}$ （海水、 0°C ）である（Ozima & Podosek, 2002）。Ne や He が涵養された時点で、どの程度の塩分濃度の環境であったかは定かではないが、いずれにせよ、Ne 濃度についてはこの程度の値のずれがある。図 7.5-4 に示したとおり、コアを用いた希ガス採取における Ne 濃度は大気平衡値よりも低い値を示す。この原因としては、中田ほか(2006)で示されている通り、コアを掘削してから専用容器に封入するまでにある程度時間がかかること、また、専用容器への封入時に一度真空引きを行うため、脱ガスの影響

を受けやすいことが挙げられる。この場合、Ne と He が同じだけ脱ガスしたものと仮定して、Ne が大気平衡値になるように割り戻すことで、確からしい He 濃度を得ることが可能である。一方で、Ne 濃度が大気平衡値よりも高い場合もある。これはエクセスエアーの問題と試料封入時に大気が混入する問題の 2 つが考えられる。エクセスエアーとは涵養時に土壌ガス等の大気中由来の空気が理想的な飽和条件よりも多く地下水に混入したものである。これらの場合、過剰な Ne と同じだけ大気中の He も混入したと想定して補正計算を行うことで確からしい He 濃度を得ることができる。

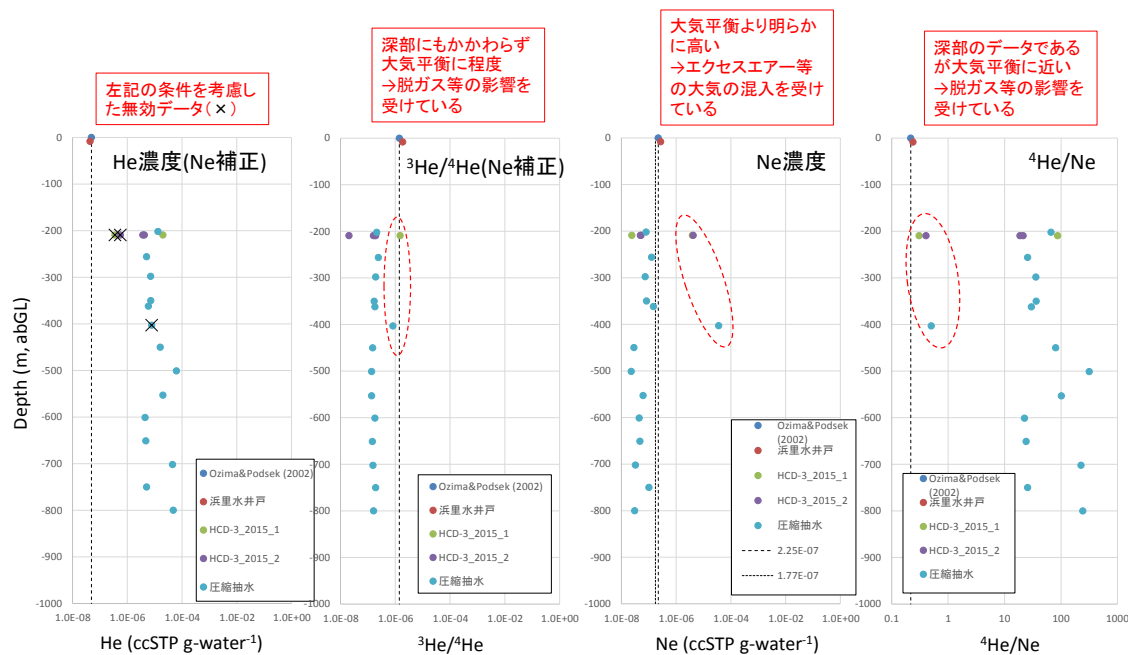


図 7.5-4 希ガスデータの深度分布

本年度の希ガス採取はコアを用いた方法ではなく、所定の深度に希ガス採取用銅管の両端にリモートで閉じることのできるバルブを配置したサンプラーを降下させてバルブを閉じ、サンプリング深度の圧力を保ったまま、地下水を採取する方法である。本手法での Ne 濃度が理想値から外れる原因として、試料採取時の擾乱が影響している可能性が考えられる。スタンドパイプの浅いところでは深部の高い間隙水圧で溶存していたガスが脱ガスする。また、スタンドパイプ内をサンプラーが上下することでスタンドパイプ内の水の混合が起きる。このため、脱ガスが起きてい中でサンプラーを下ろすことになることから、脱ガスに起因する溶存ガス濃度の不均一さの影響を受ける。また、複数回のサンプリングを行う場合の 2 回目以降や、希ガス採取を行う前に別の孔内作業を行っていた場合は、孔内水がかき乱されていると考えられ、その擾乱の影響も受けることになる。これらの状況への対策としては、可能な限りパッカー位置に近いところで採取することで脱ガスの影響を抑え、また、直前まで行う孔内作業は希ガスのサンプリング深度よりは上で行うことが考えられる。

孔内の採取位置でバルブを閉じたサンプラーを地上に揚げた後、速やかに鉄製クランプで銅管をつ

ぶして試料を密封する。本年度の鉄製クランプで封入する際には、脱ガスと考えられる圧力の抜ける音が観測されたことが数例ある。この事実からすると、銅管内の試料は脱ガスをしていたり、場合によっては大気の混入を受けたりしていることが考えられる。

7.6 課題

水質モニタリングをするにあたって採水を行ったところ、蛍光染料濃度が高く、他の水質にかかわる項目も原位置の水質が安定して得られる状況ではないことが分かった。そこで、2回の採水で得られた結果を基に、現状での課題をまとめた。

・水質測定試料測定と採取

予備排水中に2回の採水を行い、計測・分析を行った。その2回と圧縮抽水等の過去に取られたデータとを比較すると、その過程は連続したものとは考えがたい結果であった。今後予備排水と採水を引き続き行うと共に、孔に注入した掘削水や洗浄水等の履歴を調査する必要がある。

・物理化学パラメータ測定

pH-Eh ダイアグラムは、確からしい値が得られているとは言えない結果であった。予備排水を継続して行い、原位置の水質に近い水質を得ることによって改善されていくものと考えられるが、地上での測定では脱ガスの影響を避けることはできないものと考えられるため、ガス成分や原位置の水圧等を考慮した補正を行う必要がある。また、地上で得られた値を用いてORPを推定する方法を検討する必要がある。

・希ガスサンプラーの降下

本プロジェクトで開発した希ガスサンプラーの適用性を検証するために、HCD-3 孔井の脇に掘削されたモニタリング専用孔井HMD-1(孔長80m)でテスト運用した。この際に専用のウィンチとポリアミドのラインを製作したが、今回は当初深度を400m前後に想定したため、ライン長を600mとし、引っ張り強度などを考慮してステンレス管によりラインを構築した。

実運用では、ステンレス管とスタンドパイプの摩擦により、所定深度(200m)まで降下しなかった。このため、ステンレス管に代わる材質でラインを構成し、来年度の採水に備える必要がある。

・希ガス採取(サンプラー)

脱ガスあるいは大気の混入が疑われる結果であったことから、サンプラーの降下や地上でのクランプ止めに際し、以下の方策を実施する必要がある。

サンプラーの降下に関しては、採取時の擾乱を防ぐため可能な限りパッカー位置に近いところで採取することで脱ガスの影響を抑えるほか、直前まで行う孔内作業は希ガスのサンプリング深度よりは上で行うことが望ましい。また、地上でのクランプ止めについては、クランプ締めの際に脱ガスが起きないように、銅管へのバルブの取り付け方の改善等を行う。

参考文献

- 電力中央研究所（2007）：平成 18 年度地層処分技術調査等（地下水年代測定技術調査）報告書、経済産業省、平成 19 年 3 月。
- 電力中央研究所（2008）：平成 19 年度地層処分技術調査等委託費（地層処分共通技術調査：岩盤中地下水移行評価技術高度化開発）－地下水年代測定技術調査－報告書、経済産業省、平成 20 年 3 月。
- 電力中央研究所（2009）：平成 20 年度地層処分技術調査等委託費（地層処分共通技術調査：岩盤中地下水移行評価技術高度化開発）－地下水年代測定技術調査－報告書、経済産業省、平成 21 年 3 月。
- 電力中央研究所（2010）：平成 21 年度地層処分技術調査等委託費（地層処分共通技術調査：岩盤中地下水移行評価技術高度化開発）－地下水年代測定技術調査－報告書、経済産業省、平成 22 年 3 月。
- 電力中央研究所（2011）：平成 22 年度地層処分技術調査等委託費（地層処分共通技術調査：岩盤中地下水移行評価技術高度化開発）－地下水年代測定技術調査－報告書、経済産業省、平成 23 年 3 月。
- 電力中央研究所（2014）：平成 25 年度地層処分技術調査等事業（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－成果報告書、経済産業省、平成 26 年 3 月。
- 岩月輝希、森川圭太、細谷真一、吉川英樹（2009）：深部地下水の物理化学パラメータ（pH、酸化還元電位）の測定とその留意点、地下水学会誌、51(3)、205-214.
- 木方建造、大山隆弘、馬原保典(1999)：圧密型岩石抽水装置の製作と深部堆積岩への適用、応用地質、40(5)、260-269.
- 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・井ヶ田德行・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－、電力中央研究所総合報告、N03.
- 国立天文台（2006）：理科年表机上版、第 79 冊、丸善、1022p.
- 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.
- 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.
- 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 ^4He ・ ^{36}Cl 法適用の試み－、電力中央研究所研究報告、N09027.

Ozima, M. and Podosek, F.A. (2002): Noble gas geochemistry 2nd edition, Cambridge University Press, 286p.

山本莊毅 (1983) : 新版地下水調査法、古今書院、490p.

8. モニタリング無人計測システム

8.1 システムの詳細設計・製作

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。このため、電源や通信など基本的な公共インフラが無い環境下であってもデータ計測および回収が可能な無人計測システムが求められる。

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・通信システムのプロトタイプを 図 8.1-1 に示す。ここで、無人計測システムを構成する主な機器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（データ入出力装置）

このたび、幌延 HCD-3 孔向けのモニタリング無人計測システムの詳細設計と製作を行った。幌延 HCD-3 孔向けのシステムには、各構成機器の検証を行うための検証用装置も含めた構成とした。

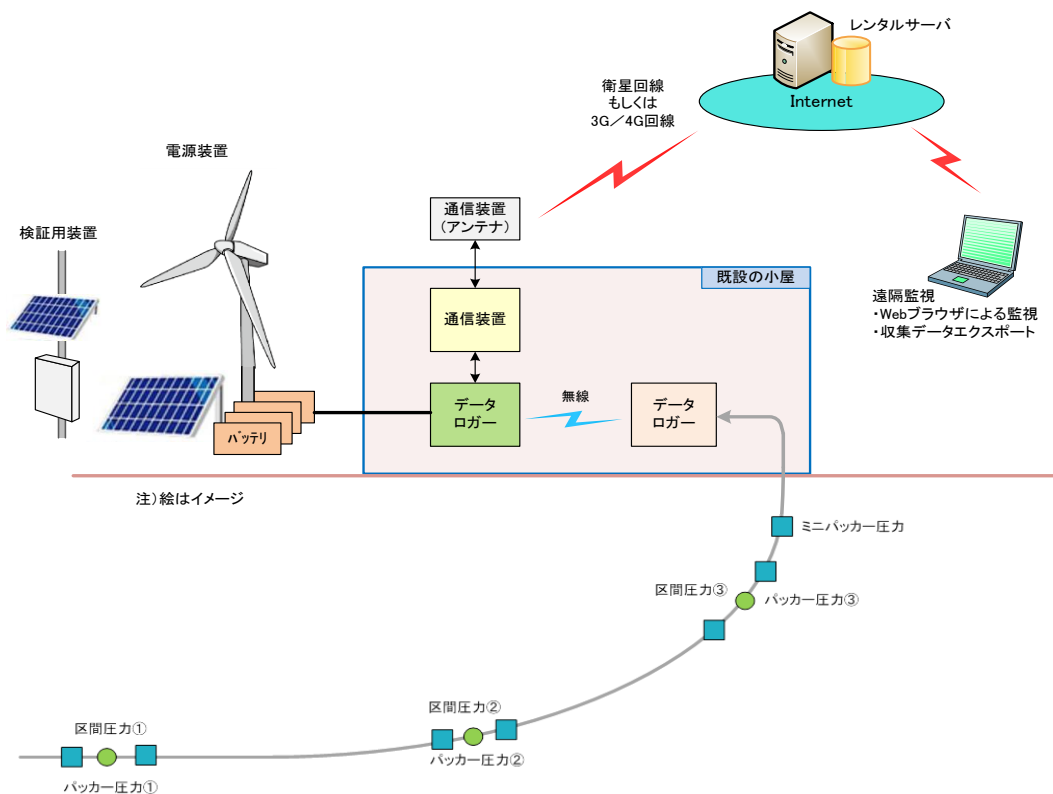


図 8.1-1 モニタリング無人計測システムのプロトタイプ

幌延 HCD-3 孔向けに製作した無人計測システムを構成する機器等の呼称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。

MGB: マジックビーの略。本システムにおいて用いているデータロガー。ローカル通信の子局。

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 1、2 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 3、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1、2 用のデータロガー。

MGB_5D: ミニパッカー3 用のデータロガー。

MGB_TK: タイムキーパー(ウォッチドッグタイマー)。NC の動作タイミング管理用のマジックビー。

ZigBee: 本システムのローカル通信において用いている通信規格。

XBee: 本システムのローカル通信において用いている通信モジュール。

以下にシステムを構成する通信設備、発電設備、蓄電設備ならびにその他設備について述べる。

8.1.1 通信設備

現地システムからクラウドサーバへの上位データ通信手段は、機器価格・通信料が低廉である 3G/4G を基本として、サービスが無い地域については衛星通信を選択することを基本方針とした。

幌延 HCD-3 孔のシステムは 3G/4G 公衆回線と衛星通信どちらも利用可能とし、通信環境/性能評価を行える構成とした。

(1) 衛星通信装置

日本における衛星通信サービスとしては、NTT docomo ワイドスターⅡと KDDI インマルサットがある。NTT docomo ワイドスターⅡは国内専用サービスであり、KDDI インマルサットは全世界がサービスエリアとなっている。

無人計測システムの設置地点は日本国内に限定されるので、どちらのサービスでもサービスエリアとしては問題ない。図 8.1-2 に衛星通信サービスエリアを示す。

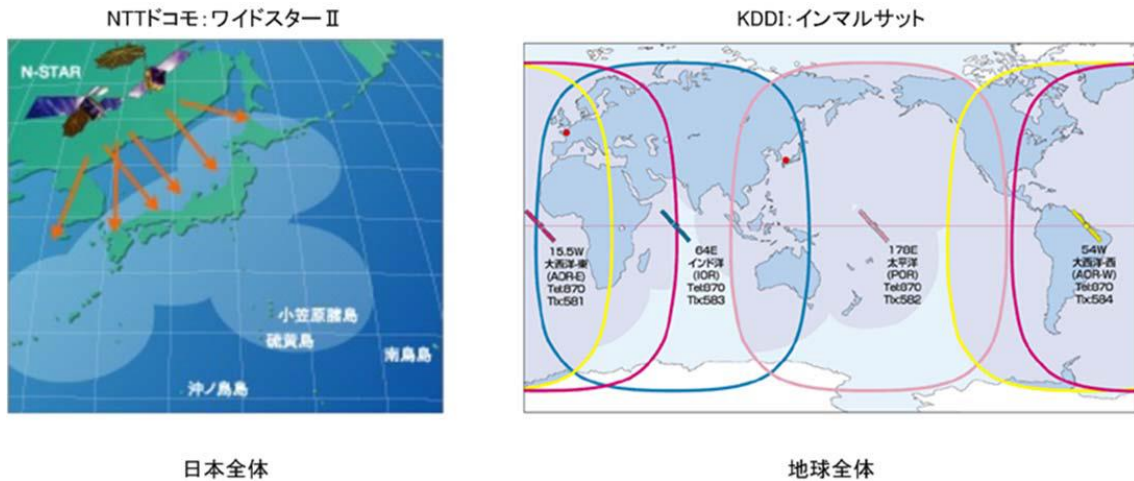


図 8.1-2 衛星通信サービスエリア

表 8.1-1 衛星通信機器比較表

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

無人計測システムでは音声通話は不要であるため、データ通信用端末に対象を限定して比較を行った。表 8.1-1 に衛星通信機器比較表を示す。

通信速度は KDDI が優勢であるが、NTT docomo でも必要十分な速度であると判断した。NTT docomo の端末は、KDDI の端末に比べて低消費電力であり、また、車載用としてバッテリー駆動、電源制御の機能を持っている。これらの特徴は無人計測システムに適合すると考えられることから、本システムには NTT docomo ワイドスターII を採用することとした。

(2) 3G 通信装置

3G/4G 通信の各キャリアのサービス提供エリアを図 8.1-3 に示す。

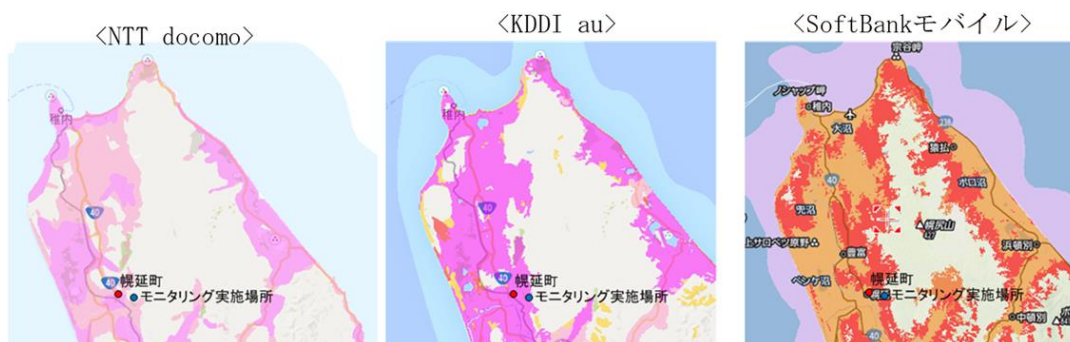



図 8.1-3 3G/4G 通信キャリア別サービス提供エリア

北海道幌延町 HCD-3 孔地点は、各キャリアともにサービス提供エリアとの境界にあり、いずれのキャリアを選んでも通信感度に大きな優位性は得られないと考えられた。このため、無人計測システムのキャリアには全国のサービスエリアのカバー率が高い NTT docomo を選択した。3G 通信装置には、一般汎用品である表 8.1-2 の端末を用いた。

表 8.1-2 3G 通信装置

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

8.1.2 発電設備

現地の自然環境に適した発電設備の構成を検討するために、消費電力と賦存エネルギー^{*}の推定を行った。

※賦存エネルギー

利用可否に関係なく理論上算出される天然資源が持つエネルギー量。

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の意。

(1) 消費電力の予測

予想消費電力量（表 8.1-3）は以下の手順で算出した。

- ①無人計測システムに関わる各コンポーネントを選定し、各コンポーネントの消費電力を調査する。
- ②各コンポーネントの消費電力を合算し、システム全体の消費電力を算出する。
- ③システム動作条件として、以下を設定した。

- ・上位通信手段として、衛星通信と 3G/4G の 2 パターンについて消費電力を算出する。
- ・連続運転と間欠運転（通信間隔：10 分）の両方の消費電力を算出する。

※連続運転：各センサー駆動電源・上位通信装置電源常時 ON、かつ、現地システムークラウドサーバー間通信実施。

※間欠運転：各センサー1分周期で駆動電源 ON、かつ、データ収集実行。上位通信は10分周期で電源 ON、かつ、現地システムークラウドサーバー間通信実施。

本システムは外部電源のない地域で自立式の発電装置での運用を想定しており、連続運転は間欠運転の10倍の消費電力となることから実運用に当たっては間欠運転を基本動作としたシステムを設計した。なお、連続運転は、測定地点にて地震等のイベント事象が発生し、現場状況を逐次モニターする場合の運転モードとして用いることとし、遠隔監視局側からリモートコントロールにより現場システムの運転モードを連続運転に切り替えられるよう設計を行った。

表 8.1-3 消費電力予想

機器	メーカー	型式	衛星		3G/4G		備考		
			数量	消費電力 (w) 計	数量	消費電力 (w) 計			
衛星通信端末	NTTdocomo	ワイドスター-II	1	13.1	13.10	0	13.1	0.00	遠隔監視装置との通信
3G/4Gルータ	ゼネテック	HSPA-450C	0	5.0	0.00	1	5.0	5.00	遠隔監視装置との通信
ネットワークコンピュータ	四国総研	新型NC	1	2.0	2.00	1	2.0	2.00	Web機能搭載コントローラ
ネットワークカメラ	パナソニック	BB-SW175A	1	5.2	5.20	1	5.2	5.20	Webカメラカメラ
信号変換&通信ユニット	東洋電機	MGB10-ER	5	0.4	2.05	5	0.4	2.05	バッカー、区間圧力
信号変換&通信ユニット	東洋電機	MGB10-ER	1	0.4	0.41	1	0.4	0.41	ミニバッカー圧力、気圧・室内温度
信号変換&通信ユニット	東洋電機	MGB10-ER	2	0.4	0.82	2	0.4	0.82	降雨・積雪量、風向・風速・外気温
信号変換&通信ユニット	東洋電機	MGB10-ER	1	0.4	0.41	1	0.4	0.41	日射量、バッテリー、タイムキーパー
圧力センサ	KELLER	PAA-22S	1	0.30	0.30	1	0.30	0.30	ミニバッカー圧力
圧力センサ	KELLER	PAA-23S	5	0.30	1.50	5	0.30	1.50	バッカー圧力 5区間
圧力センサ	KELLER	PAA-23S	5	0.30	1.50	5	0.30	1.50	区間圧力 5区間
降雨センサ	Davis	#07852	1	0.00	0.00	1	0.00	0.00	
積雪量センサ	オーミック電子	OM7-1S	1	0.60	0.60	1	0.60	0.60	
風向・風速計	大田計器	No.30-T	1	0.22	0.22	1	0.22	0.22	
気圧センサ	STマイクロ	LPS331AP	1	0.00	0.00	1	0.00	0.00	
日射センサ	Apogee	SESP212	1	0.00	0.00	1	0.00	0.00	
消費電力			連続運転		28.11 w	20.01 w			
			間欠運転		0.67 kWh・day	0.48 kWh・day			
					2.81 w	2.00 w			
					0.07 kWh・day	0.05 kWh・day			

* 間欠運転の条件
通信周期
センサ動作周期

10分周期
1分周期

(2) 賦存エネルギー推定

現地気象データ（気象庁およびNEDO ホームページより入手）から、設置環境における賦存エネルギー

一の推定を行った。

※風力の賦存エネルギー算出方法

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

$\delta 0$: 気体の基準密度=1.185kg/m³(25°C)

T1 : 気体の温度[°C] ←月毎の気温を参照

273.2 : 絶対温度

101.3 : 標準大気圧

P1 : 気体の圧力[kPa] ←0 として計算

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

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

※太陽光の賦存エネルギー算出方法

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

全国 8 箇所の賦存エネルギーの推定結果を表 8.1-4 に示す。このデータから 1 日あたりの賦存エネルギーを算出した結果を、表 8.1-5 および図 8.1-4 に示す。

図 8.1-4 は縦軸を風力賦存エネルギー、横軸を太陽光賦存エネルギーとしており、この図から各地点における発電設備（太陽光／風力／太陽光＋風力（ハイブリッド））およびバッテリー容量に関する最適な組み合わせを推定することができる。

例えば、青森県（むつ）、新潟県（柏崎）、福島県（広野）および鹿児島県（川内）では風力の賦存エネルギーが低く風力発電では実用的な発電量が得られない可能性が高く、発電設備としては“太陽光＋大容量バッテリー”の組合せが考えられる。一方、静岡県（御前崎）と沖縄県（石垣島）では太陽光・風力共に賦存エネルギーが高く発電設備としては“太陽光＋小容量バッテリー”または“風力＋小容量バッテリー”で十分な電力を得られるものと推定できる。

北海道（幌延）は太陽光、風力とも低めながら発電は可能な賦存エネルギーを有しており、適用する発電設備としては“太陽光＋風力のハイブリッド＋大容量バッテリー”の組合せが適していることから、幌延 HCD-3 孔向けシステムの発電設備の構成は“太陽光＋風力のハイブリッド＋大容量バッテリー”として各設備の選定を行った。

表 8.1-4 全国8箇所の賦存エネルギー推定結果

■気象データ
(2004年～2013年)平均

* 気象データは気象庁HP(日射データはNEDOのHP)より入手

	北海道 幌延町(釧路)	青森県 むつ市	福島県 広野町	新潟県 柏崎市	静岡県 御前崎市	愛知県 伊方町(瀬戸)	鹿児島県 薩摩川内市	沖縄県 石垣島
気温								
最高	29.5℃	33.7℃	34.8℃	35.6℃	33.4℃	32.7℃	35.7℃	34.4℃
平均	6.4℃	9.7℃	13.1℃	13.4℃	16.7℃	16.1℃	17.1℃	24.4℃
最低	-22.5℃	-16.4℃	-6.1℃	-6.7℃	-1.7℃	-1.9℃	-3.8℃	11.3℃
風速								
瞬間	25.4 m/s	26.5 m/s	26.5 m/s	26.2 m/s	38.1 m/s	31.9 m/s	20.1 m/s	53.1 m/s
最大	14.4 m/s	15.0 m/s	13.8 m/s	12.6 m/s	22.9 m/s	28.0 m/s	13.7 m/s	34.5 m/s
平均	3.2 m/s	2.6 m/s	1.5 m/s	2.3 m/s	4.9 m/s	4.4 m/s	1.9 m/s	5.4 m/s
年間	970.4 mm	1242.5 mm	1640.0 mm	2433.9 mm	2096.8 mm	1557.2 mm	2289.1 mm	2130.0 mm
降雪量	736.8 mm	476.5 mm	mm	310.3 mm	0.0 mm	0.0 mm	0.0 mm	0.0 mm
最深	98.0 mm	82.5 mm	mm	55.6 mm	0.0 mm	0.0 mm	0.0 mm	0.0 mm
日射量	1,113 kWh/m ²	1,186 kWh/m ²	1,267 kWh/m ²	1,197.8 kWh/m ²	1,461 kWh/m ²	1,357 kWh/m ²	1,314 kWh/m ²	1,522 kWh/m ²
雪					18.0			21.6

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

■賦存エネルギー

(2013年)

月	風速 m/s	気温 ℃	風力 kW/m ² *day	風速 m/s	気温 ℃	風力 kW/m ² *day	風速 m/s	気温 ℃	風力 kW/m ² *day	風速 m/s	気温 ℃	風力 kW/m ² *day	風速 m/s	気温 ℃	風力 kW/m ² *day	風速 m/s	気温 ℃	風力 kW/m ² *day	風速 m/s	気温 ℃	風力 kW/m ² *day	風速 m/s	気温 ℃	風力 kW/m ² *day								
1	3.5	-7.8	0.63	1.21	2.5	-2.9	0.22	1.46	1.6	1.9	0.06	2.35	3.4	1.8	0.56	1.34	6.0	6.0	3.01	2.79	3.8	3.8	0.77	2.02	1.6	5.6	0.06	2.10	5.6	18.7	2.34	2.44
2	4.0	-7.2	0.93	2.24	3.0	-2.2	0.39	2.30	2.1	2.5	0.13	3.06	3.4	1.6	0.56	2.06	6.1	6.6	3.15	3.45	4.3	4.1	1.11	2.79	1.8	7.9	0.08	2.75	5.6	21.2	2.32	2.81
3	5.6	-2.5	2.52	3.43	3.5	1.8	0.61	3.41	2.5	7.9	0.22	3.64	2.9	5.7	0.31	3.06	5.5	12.2	2.28	3.99	4.3	9.5	1.09	3.59	1.9	11.8	0.09	3.42	4.9	22.0	1.55	3.51
4	4.5	3.7	1.28	4.11	3.4	7.1	0.54	4.48	2.1	10.6	0.13	4.44	3.1	9.8	0.41	4.43	6.1	15.1	3.05	4.83	4.8	12.4	1.50	4.82	2.4	14.5	0.19	4.25	4.6	22.3	1.28	4.25
5	3.8	7.5	0.76	4.62	2.5	10.9	0.21	4.95	1.7	14.1	0.07	4.71	2.2	15.4	0.14	4.96	4.1	18.7	0.82	5.11	4.6	17.6	1.30	5.01	2.0	19.6	0.11	4.62	4.3	26.0	1.03	4.99
6	3.2	14.1	0.44	4.88	2.3	16.3	0.16	4.85	0.9	17.9	0.01	4.24	1.9	21.2	0.09	4.69	3.7	21.7	0.57	4.65	3.5	22.9	0.56	4.56	1.9	23.4	0.09	3.99	5.1	29.2	1.70	5.65
7	3.0	19.9	0.36	4.45	2.2	20.2	0.14	4.26	1.0	21.9	0.01	4.26	2.1	24.9	0.12	4.69	4.4	25.4	1.11	5.12	5.0	27.3	1.62	5.17	2.1	28.0	0.12	4.80	5.8	29.5	2.50	6.20
8	3.3	19.9	0.48	3.85	2.1	23.1	0.12	4.02	1.1	24.9	0.02	4.46	1.9	26.2	0.09	4.94	3.5	27.9	0.55	5.47	4.2	28.3	0.95	5.46	2.1	28.5	0.12	4.93	5.6	29.7	2.25	5.63
9	3.5	16.0	0.58	3.51	2.1	19.2	0.12	3.44	1.0	21.3	0.01	3.29	1.9	21.5	0.09	3.50	4.0	25.2	0.93	4.09	3.3	23.6	0.47	3.99	1.7	24.8	0.06	4.13	5.2	28.5	1.81	4.90
10	3.6	10.1	0.75	2.24	2.4	13.6	0.19	2.83	1.2	17.0	0.02	2.80	2.2	17.6	0.14	2.72	4.6	21.1	1.28	3.26	3.2	18.6	0.43	3.27	1.7	20.3	0.07	3.51	6.7	25.7	3.91	4.00
11	4.1	3.6	0.97	1.15	2.8	6.8	0.30	1.71	1.7	10.6	0.07	2.29	3.1	9.7	0.41	1.72	5.3	13.4	2.02	2.86	4.3	11.8	1.08	2.86	1.5	12.6	0.05	2.55	5.5	22.6	2.19	3.03
12	4.0	-1.7	0.92	0.88	2.7	2.4	0.28	1.23	2.0	6.0	0.11	2.10	3.6	5.2	0.65	1.20	6.2	8.2	3.29	2.55	4.2	6.7	1.03	1.91	1.6	7.1	0.06	2.09	5.7	18.7	2.46	2.52
平均	3.9	6.3	0.88	3.05	2.6	9.7	0.27	3.25	1.6	13.1	0.07	3.47	2.6	13.4	0.30	3.28	5.0	16.8	1.85	4.00	4.1	15.6	0.99	3.71	1.9	17.0	0.09	3.60	5.4	24.5	2.11	4.16

(計算式)
 * 風力のエネルギー密度 = 1/2 × 空気密度(δ) × 風速³
 * 空気密度(δ) = δ0 × 273.2 / (273.2 + T) × (101.3 kPa) / 101.3
 δ0 : 気体の標準密度 : 1.18 kg/m³(25℃)
 T : 気体の温度℃ → 月毎の気温を参照
 273 : 絶対温度
 P1 : 標準大気圧
 101.3 : 気体の圧力 kPa → 0 とし計算
 * 風力の賦存エネルギー = 風力のエネルギー密度 × 24時間
 * 太陽光の賦存エネルギー = 日射量(NEDOの日射量データベースを参照)

【気象データの出典元】

気象データ：

国土交通省 気象庁 HP <http://www.data.jma.go.jp/>

日射量データ：

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) HP
<http://app7.infoc.nedo.go.jp/>

表 8.1-5 1日あたりの賦存エネルギー

■地域ごとの賦存エネルギー

地域	風力賦存エネルギー kWh/m ² ・day	太陽光賦存エネルギー kWh/m ² ・day
北海道:幌延町(豊富)	0.88	3.05
青森県:むつ市	0.27	3.25
福島県:広野町	0.07	3.47
新潟県:柏崎市	0.30	3.28
静岡県:御前崎市	1.85	4.00
愛媛県:伊方町(瀬戸)	0.99	3.71
鹿児島県:薩摩川内市	0.09	3.60
沖縄県:石垣島	2.11	4.16

《計算式》

* 風力賦存エネルギー(日平均) = 風力エネルギー密度 × 24

* 太陽光賦存エネルギー(日平均) = 日射量

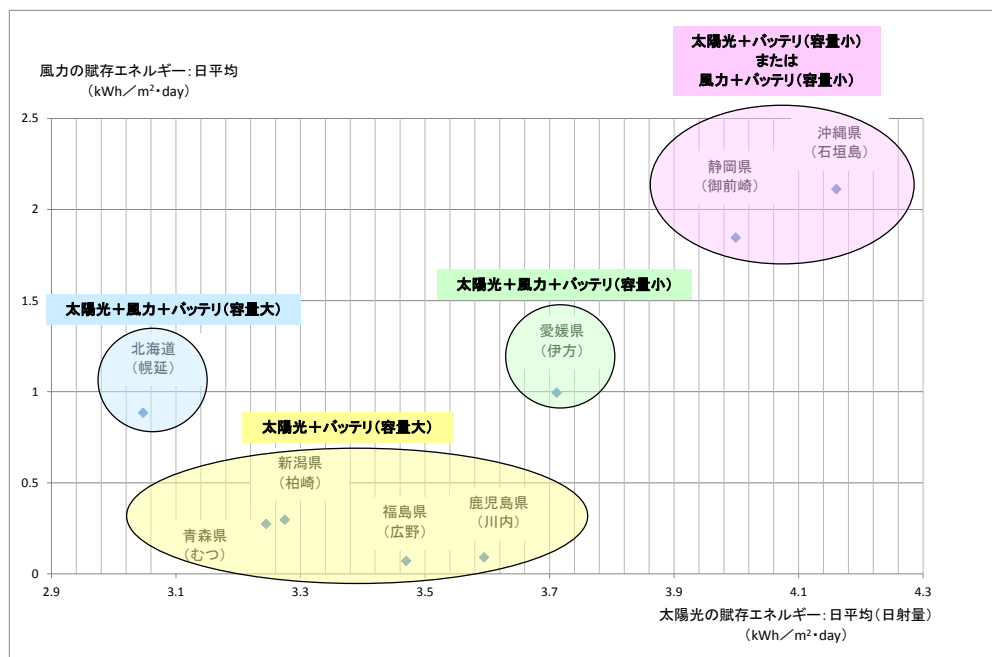


図 8.1-4 1日あたりの賦存エネルギー

発電の設備選定を行うにあたって、モデル発電機を選定して発電量予測を行い、上述の検討結果の検証を行った。なお、モデル発電機は発電量を予測計算するためのモデルとして選定するものであり、実際のシステムに適用されるものではない。

発電機設備規模の検討結果を基に既存の発電機メーカーの調査を行い、一般市場から調達可能な太陽光と風力のハイブリッドタイプで発電規模が同程度の2社のハイブリッド発電機を検討用モデルとして選定した。

《選定したモデル発電機》

1. シンフォニアテクノロジー社 WK18-20 (垂直型)
2. ゼファー社 Z-1000-250 (水平型)

■モデル発電機:垂直型風力発電機(シンフォニアテクノロジー社)

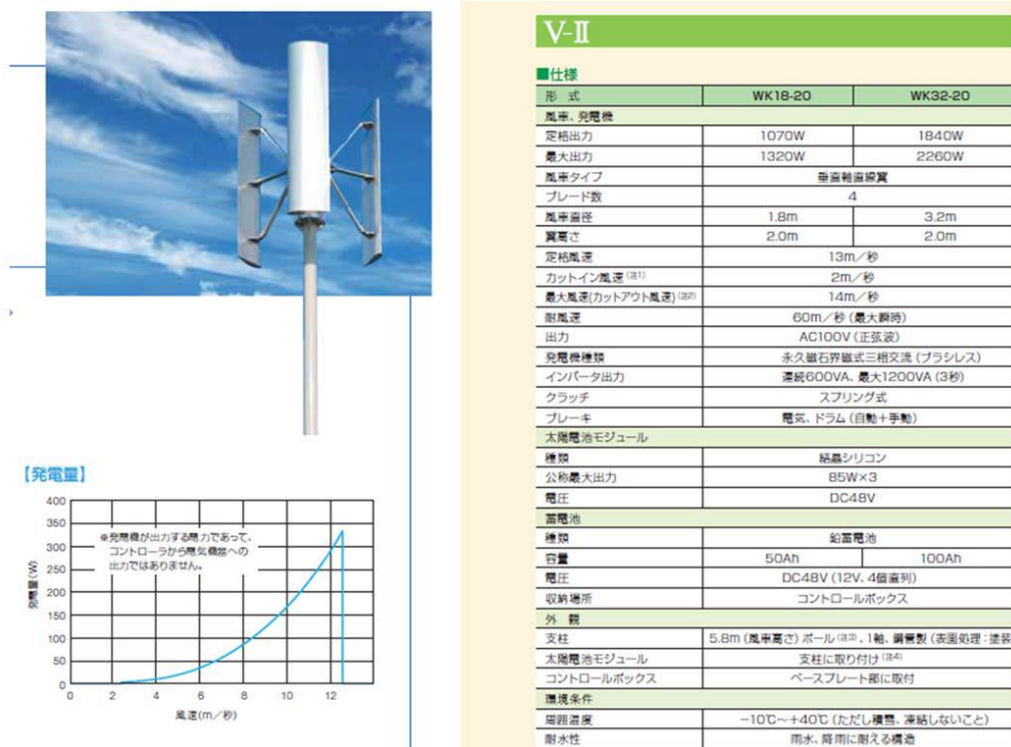


図 8.1-5 モデル発電機 - 1

■モデル発電機:水平型風力発電機(ゼファー社)

ゼファー株式会社:エアドルフィンGTO	
品番	Z-1000-250
風車タイプ	水平軸プロペラ式、アップウィンド型
ロータ直径	1800mm
質量	20kg
ブレード数	3枚
カットイン風速	2.5m/s
定格出力	585W ※風速11m/s時

■風力発電機仕様		*ゼファー株式会社のHPより抜粋
	ゼファー株式会社:エアドルフィンGTO	
品番	Z-1000-250	
風車タイプ	水平軸プロペラ式、アップウィンド型	
ロータ直径	1800mm	
質量	20kg	
ブレード数	3枚	
ブレード材質	炭素繊維織布	
ボディ素材	アルミダイキャスト	
制御方式	1. パワーアシストシステム 2. 最大出力マネジメント 3. 回転数制御 4. 安全制御 5. 通信機能	
保護回路	過電力、過回転、過電圧、高温	
カットイン風速	2.5m/s	
定格出力	585W ※1	
風車DC出力	1.1kW (12.5m/s時), 742W (11m/s時)	
最大出力回転数	1,280rpm	
定格出力電圧	DC260V	
通信出力方式	RS-485	

■太陽電池仕様		SM-100
概要	薄膜系太陽電池	
最大出力動作電圧	32.4V	
概要定格出力	60W	
外形寸法	641(W)×1235(L)×35(D)mm	
重量	8.5 kg	

図 8.1-6 モデル発電機-2

図 8.1-5 と図 8.1-6 に示すモデル発電機のスペックを用いて、全国 8 箇所の各地点の賦存エネルギーから発電量[W]を予測した(表 8.1-6、表 8.1-7 参照)。さらに、モデル発電機として選定したうちのシンフォニアテクノロジー社について、予測した発電量(W)より各設置地点における無人計測システムが必要とする電力に対する発電量の過不足を月別に算出した(表 8.1-6、図 8.1-7)。

シンフォニアテクノロジー社の風車は垂直型でありゼファー社(表 8.1-7)に比較してカットイン風力(発電開始風力)が低く風力発電効率が良い。

表 8.1-6 シンフォニアテクノロジー社発電機による発電予測

【月毎の気象データと発電量予測(時)】 発電機:シンフォニアテクノロジー社ハイブリッド(電力:垂直軸型&太陽光)

2013年	北海道 網走(観音)						青森県 むつ市						福島県 須賀野(成野)						新潟県 柏崎市					
	気温 ℃	風速 m/s	日照 KWh/㎡	電力 wh	太陽光 wh	計	気温 ℃	風速 m/s	日照 KWh/㎡	電力 wh	太陽光 wh	計	気温 ℃	風速 m/s	日照 KWh/㎡	電力 wh	太陽光 wh	計	気温 ℃	風速 m/s	日照 KWh/㎡	電力 wh	太陽光 wh	計
1	-7.8	3.5	1.21	21.5	11.9	33.4	-2.9	2.5	1.46	7.7	14.1	21.8	1.9	1.6	2.35	2.0	22.2	24.2	1.8	3.4	1.34	15.0	12.7	31.7
2	-7.2	4.0	2.24	32.0	22.0	54.0	-2.2	3.0	2.30	13.2	22.1	35.4	2.5	2.1	3.06	4.5	28.6	33.3	1.6	3.4	2.06	15.0	13.5	38.5
3	-2.5	5.6	3.43	89.2	33.0	119.2	1.8	3.5	3.41	20.7	32.2	52.9	7.9	2.5	3.64	7.4	33.5	40.9	5.7	2.8	3.06	10.5	28.4	38.9
4	3.7	4.5	4.11	43.7	38.5	82.3	7.1	3.4	4.48	18.6	41.4	60.0	10.6	2.1	4.44	4.3	40.4	44.7	5.8	3.1	4.43	14.0	40.4	54.4
5	7.9	3.8	4.02	26.0	42.6	68.6	10.9	2.5	4.95	7.3	45.0	52.3	14.1	1.7	4.71	2.3	42.2	44.4	15.4	2.2	4.96	4.9	44.1	49.0
6	14.1	3.2	4.88	15.2	43.7	58.8	16.3	2.3	4.85	5.6	43.0	48.7	17.9	1.0	4.24	0.3	37.3	37.6	21.2	1.9	4.68	3.1	40.5	43.6
7	19.9	3.0	4.45	12.2	38.8	51.0	20.2	2.2	4.26	4.8	37.1	41.9	21.9	1.0	4.26	0.5	36.8	37.2	24.9	2.1	4.69	4.1	39.9	44.0
8	19.9	3.3	3.85	16.3	33.5	49.8	23.1	2.1	4.02	4.2	34.5	38.6	24.9	1.1	4.46	0.6	37.9	38.5	26.2	1.9	4.54	3.0	41.7	44.8
9	16.0	3.5	3.51	19.7	31.1	50.8	19.2	2.1	3.44	4.2	30.1	34.3	21.3	1.0	3.29	0.5	28.5	28.9	21.5	1.9	3.50	3.1	30.3	33.3
10	10.1	3.8	2.24	25.7	20.4	46.2	13.6	2.4	2.83	6.4	25.4	31.8	17.0	1.2	2.80	0.8	24.7	25.5	17.6	2.2	2.72	4.9	23.9	28.8
11	3.6	4.1	1.15	33.1	10.8	43.9	6.8	2.8	1.71	10.4	15.6	26.2	10.6	1.7	2.29	2.3	20.8	23.1	9.7	3.1	1.72	14.0	15.7	25.7
12	-1.7	4.0	0.88	31.3	8.4	39.8	2.4	2.7	1.23	9.3	11.6	21.1	6.0	2.0	2.10	3.8	19.5	23.9	5.2	3.6	1.20	22.3	11.2	33.4
平均	6.3	3.9	3.0	30.2	27.9	58.1	9.7	2.6	3.2	9.4	29.3	38.7	13.1	1.6	3.5	2.4	31.0	33.5	13.4	2.6	3.3	10.2	23.0	35.2

■ 必要電力以下
■ 必要電力以上、二倍以下
■ 必要電力の二倍以上

2013年	静岡県 湖西市						愛知県 伊方町(瀬戸)						徳島県 徳島市内						香川県 石井町					
	気温 ℃	風速 m/s	日照 KWh/㎡	電力 wh	太陽光 wh	計	気温 ℃	風速 m/s	日照 KWh/㎡	電力 wh	太陽光 wh	計	気温 ℃	風速 m/s	日照 KWh/㎡	電力 wh	太陽光 wh	計	気温 ℃	風速 m/s	日照 KWh/㎡	電力 wh	太陽光 wh	計
1	6.0	6.0	2.79	108.1	27.5	135.6	3.8	3.8	2.02	27.0	19.5	46.5	5.6	1.6	2.10	2.0	19.6	21.6	18.7	3.6	2.44	84.8	23.1	107.9
2	6.6	6.1	3.45	113.4	33.9	147.3	4.1	4.3	2.79	39.0	26.8	65.8	7.9	1.8	2.75	2.6	25.9	28.5	21.2	3.6	2.81	64.9	26.6	111.5
3	1.2	5.3	3.99	81.7	38.4	120.1	9.3	4.3	3.59	38.4	33.9	72.4	11.8	1.9	3.42	3.2	31.5	34.7	22.0	4.9	3.51	56.0	32.6	88.7
4	1.1	6.1	4.83	109.9	45.3	154.2	12.4	4.8	4.62	42.4	42.7	85.1	14.5	2.4	4.25	6.5	38.6	43.1	23.3	4.6	4.25	45.7	38.8	84.5
5	18.7	4.1	5.11	32.8	47.1	79.7	17.6	4.6	5.01	45.3	45.5	90.8	19.6	2.0	4.62	3.7	41.3	45.0	26.0	4.3	4.99	36.6	44.4	81.0
6	21.7	3.7	4.65	23.4	41.6	65.0	22.9	3.5	4.56	19.7	40.4	60.1	23.4	1.9	3.99	3.1	35.1	38.2	29.2	3.1	5.63	53.9	48.9	102.8
7	23.4	4.4	5.12	38.6	44.6	83.2	27.3	5.0	5.17	56.6	45.0	101.6	28.0	2.1	4.60	4.2	41.4	45.6	29.5	3.8	6.20	67.0	52.7	119.7
8	27.9	3.5	5.47	19.4	47.6	67.1	28.3	4.2	5.26	33.2	45.1	78.3	28.5	2.1	4.53	4.1	41.9	46.1	29.7	3.6	5.63	77.9	47.6	125.5
9	23.2	4.0	4.09	29.4	36.3	65.7	23.6	3.3	3.98	16.3	34.6	51.1	24.8	1.7	4.13	2.2	35.7	38.0	28.5	3.2	4.90	63.4	42.4	105.7
10	21.1	4.6	3.26	49.6	29.7	79.4	19.6	3.2	3.27	15.2	29.3	44.5	20.3	1.7	3.51	2.2	31.0	33.2	25.7	6.7	4.00	137.4	35.2	172.6
11	13.4	5.3	2.68	71.5	25.1	96.6	11.8	4.3	2.36	37.7	21.8	59.5	12.6	1.5	2.45	1.6	23.2	24.8	22.6	5.5	3.03	78.1	27.7	105.8
12	8.2	6.2	2.55	116.6	24.5	141.1	6.7	4.2	1.91	35.7	18.0	53.7	7.1	1.6	2.09	1.9	19.4	21.4	18.7	3.7	2.52	68.4	23.5	111.9
平均	16.8	5.0	4.0	63.8	36.8	102.6	15.6	4.1	3.7	34.7	33.6	68.3	17.0	1.9	3.6	3.1	32.1	34.2	24.5	5.4	4.2	75.0	37.0	112.0

■ 必要電力以下
■ 必要電力以上、二倍以下
■ 必要電力の二倍以上

【発電機条件】

電力発電機	プレート直径: 1.8 m	プレート長さ: 2.0 m	パワー係数: 2.28%
太陽電池	公称最大出力: 255 w	パネル数係数: 60%	温度係数: 0.485%

必要電力 必要電力量 バッテリー総容量/バッテリー容量 2.4 kWh

連続運転	2811 w	674.58 wh	4 日
最大運転	281 w	67.46 wh	36 日

表 8.1-7 ゼファー社発電機による発電予測

【月毎の気象データと発電量予測(時)】 発電機:ゼファー社ハイブリッド(風力:水平軸型&太陽光)

2013年	北海道 札幌市						道庁(広野)						新潟県 柏崎市											
	気温 ℃	風速 m/s	日照 KWh/m ²	風力 Wh	太陽光 Wh	計	気温 ℃	風速 m/s	日照 KWh/m ²	風力 Wh	太陽光 Wh	計	気温 ℃	風速 m/s	日照 KWh/m ²	風力 Wh	太陽光 Wh	計						
1	-7.8	3.5	1.21	21.9	3.6	27.6	-2.9	2.5	1.45	7.9	6.6	14.5	1.9	1.6	2.35	2.0	10.5	12.5	18	3.4	1.34	19.4	6.0	25.2
2	-7.2	4.0	2.24	32.7	10.4	43.0	-2.2	3.0	2.30	13.5	10.4	23.9	7.5	2.1	3.06	4.6	13.6	18.1	1.6	3.4	2.06	19.4	5.2	24.6
3	-2.5	5.6	3.43	88.1	15.5	103.7	1.8	3.5	3.41	36.4	15.2	36.4	7.9	2.5	3.64	7.6	15.8	23.5	5.7	2.8	3.06	10.7	13.4	24.1
4	3.7	4.5	4.11	44.7	18.1	62.8	7.1	3.4	4.48	19.1	19.5	38.5	10.6	2.1	4.44	4.4	19.0	23.4	9.8	3.1	4.43	14.3	19.0	33.3
5	7.5	3.8	4.62	26.6	20.0	46.6	10.9	2.5	4.95	7.5	21.2	28.7	14.1	1.7	4.71	2.3	19.8	22.2	15.4	2.2	4.96	5.0	20.8	25.8
6	14.1	3.2	4.88	15.5	20.6	36.0	18.3	2.3	4.85	5.7	20.2	25.9	17.9	0.9	4.24	0.3	17.5	17.9	21.2	1.9	4.68	3.2	19.1	22.2
7	19.9	3.0	4.45	12.5	18.2	30.8	20.2	2.2	4.26	4.9	17.4	22.4	21.9	1.0	4.26	0.5	17.3	17.8	24.9	2.1	4.69	4.2	18.8	23.0
8	19.9	3.3	3.85	16.7	15.8	32.4	23.1	2.1	4.02	4.2	16.2	20.5	24.9	1.1	4.46	0.6	17.8	18.5	26.2	1.9	4.54	3.1	19.6	22.8
9	16.0	3.5	3.51	20.1	14.7	34.8	19.2	2.1	3.44	4.3	14.1	19.3	21.3	1.0	3.29	0.5	13.4	13.9	21.5	1.9	3.90	3.2	14.2	17.2
10	10.1	3.8	2.24	26.3	9.6	35.9	13.6	2.4	2.83	6.3	11.9	19.9	17.0	1.2	2.80	0.8	11.6	12.4	17.6	2.2	2.72	5.0	11.3	16.2
11	3.6	4.1	1.15	33.8	5.1	38.9	6.8	2.8	1.71	10.7	7.4	18.1	10.6	1.7	2.29	2.4	9.8	12.2	9.7	3.1	1.72	14.3	7.4	21.7
12	-1.7	4.0	0.88	32.0	4.0	36.0	2.4	2.7	1.23	9.7	5.5	15.2	6.0	2.0	2.10	3.9	9.2	13.1	5.2	3.6	1.20	22.8	5.3	28.1
平均	6.3	3.9	3.0	30.9	13.1	44.1	9.7	2.6	3.2	9.6	13.8	23.4	13.1	1.6	3.5	2.5	14.6	17.1	13.4	2.6	3.3	10.4	13.7	24.0

■ 必要電力以下
 ■ 必要電力以上、二倍以下
 ■ 必要電力の二倍以上

2013年	静岡県 静岡市						愛知県 伊豆市(戸)						静岡県 静岡市						静岡県 石巻市					
	気温 ℃	風速 m/s	日照 KWh/m ²	風力 Wh	太陽光 Wh	計	気温 ℃	風速 m/s	日照 KWh/m ²	風力 Wh	太陽光 Wh	計	気温 ℃	風速 m/s	日照 KWh/m ²	風力 Wh	太陽光 Wh	計	気温 ℃	風速 m/s	日照 KWh/m ²	風力 Wh	太陽光 Wh	計
1	6.0	6.0	2.79	110.6	12.9	123.5	3.8	3.8	2.02	27.6	9.2	36.8	5.6	1.6	2.10	2.0	9.3	11.4	18.7	3.6	2.44	86.8	10.9	97.8
2	6.6	6.1	3.45	115.9	16.0	131.9	4.1	4.3	2.79	35.9	12.6	48.5	7.9	1.8	2.75	2.9	12.2	15.1	21.2	3.6	2.81	86.8	12.5	99.3
3	12.2	5.5	3.99	83.5	18.1	101.6	9.5	4.3	3.59	35.3	16.0	51.3	11.8	1.9	3.42	3.3	14.8	18.1	22.0	4.9	3.51	97.3	15.4	112.7
4	15.1	6.1	4.63	111.4	21.3	132.7	12.4	4.8	4.62	53.6	20.1	73.7	14.5	2.4	4.25	6.6	18.2	24.6	22.3	4.6	4.25	46.7	16.3	63.0
5	16.7	4.1	5.11	33.4	22.2	55.5	17.6	4.6	5.01	46.5	21.4	68.0	19.6	2.0	4.82	3.8	19.5	23.2	26.0	4.3	4.99	37.4	20.9	58.3
6	21.7	3.7	4.65	24.0	18.5	42.5	22.9	3.5	4.56	20.1	19.0	39.1	23.4	1.9	3.99	3.2	16.5	19.7	29.2	5.1	5.65	61.2	23.0	84.2
7	25.4	4.4	5.12	39.5	21.0	60.5	27.3	5.0	5.17	57.9	21.2	79.0	28.0	2.1	4.80	4.3	19.3	23.8	29.9	5.8	6.20	88.9	24.8	113.7
8	27.9	3.5	5.47	19.9	22.4	42.3	28.3	4.2	5.26	34.0	21.2	55.2	28.5	2.1	4.93	4.2	19.7	24.0	29.7	5.6	5.63	79.7	22.4	102.1
9	25.2	4.0	4.09	30.1	17.1	47.1	23.6	3.3	3.98	16.7	16.4	33.1	24.6	1.7	4.13	2.3	16.8	19.1	28.5	5.2	4.90	64.6	19.9	84.6
10	21.1	4.6	3.26	46.7	14.0	60.7	19.6	3.2	3.27	15.9	13.8	29.3	20.3	1.7	3.51	2.3	14.6	16.9	25.7	6.7	4.00	140.5	16.6	157.1
11	13.4	5.3	2.68	73.1	11.6	84.9	11.8	4.3	2.96	36.6	10.3	46.9	12.6	1.5	2.55	1.6	10.9	12.2	22.6	5.5	3.03	79.9	13.0	92.9
12	8.2	6.2	2.55	119.3	11.3	130.6	6.7	4.2	1.91	36.5	8.5	45.0	7.1	1.6	2.09	2.0	9.1	11.9	18.7	5.7	2.52	90.4	11.0	101.4
平均	16.8	5.0	4.0	67.3	17.3	84.6	15.6	4.1	3.7	35.5	15.8	51.3	17.0	1.9	3.6	3.2	15.1	18.3	24.5	5.4	4.2	76.7	17.4	94.1

■ 必要電力以下
 ■ 必要電力以上、二倍以下
 ■ 必要電力の二倍以上

【発電機仕様】
 風力発電機 プレード直径: 1.8 m プレード長さ: パワー係数: 35.00%
 太陽電池 公称最大出力: 120 W 576枚搭載数: 80% 温度係数: 0.485%

必要電力 必要電力量 バッテリー余裕 バッテリー容量
 連続運転 2811 W 67,458 Wh 7 日
 間欠運転 281 W 67,468 Wh 75 日

表 8.1-8 シンフォニアテクノロジー社発電機の発電量過不足予測

(2013年)	風速エネルギー				発電エネルギー(任意の発電機)				風力発電のみ				太陽光発電のみ				MPパド			
	風速 m/s	気温 ℃	風力 エネルギー 密度		日射 Wh /m ²	風力 太陽光		風量 通風 連続運転 必要な電力		風量 通風 間欠運転 必要な電力		不足 電力 連続運転	不足 電力 連続運転	余剰 電力	不足 電力 連続運転	不足 電力 連続運転	余剰 電力	不足 電力 連続運転	余剰 電力	
			W /m ²	kWh /m ² ·day		W	Wh	W	Wh	W	Wh									W
月																				
1	3.5	-7.8	262	1.21	50.4	21.5	11.9	33.4	28.11	28.11	2.81	-4.84	-4.84	0.00	-12.04	-12.04	0.00	3.83	0.00	3.93
2	4.0	-7.2	388	2.24	83.3	32.0	22.0	54.0	28.11	28.11	2.81	2.59	0.00	2.59	-4.10	-4.10	0.00	17.39	0.00	17.39
3	5.6	-2.5	1050	3.43	142.9	86.2	33.0	119.2	28.11	28.11	2.81	43.22	0.00	43.22	3.67	0.00	3.67	67.80	0.00	67.80
4	4.5	3.7	533	4.11	171.3	43.7	38.5	82.3	28.11	28.11	2.81	11.24	0.00	11.24	7.51	0.00	7.51	39.00	0.00	39.00
5	3.8	7.5	316	4.62	192.5	26.0	42.6	68.6	28.11	28.11	2.81	-1.59	-1.59	0.00	10.78	0.00	10.78	30.11	0.00	30.11
6	3.2	14.1	185	4.88	203.3	15.2	43.7	56.8	28.11	28.11	2.81	-8.33	-8.33	0.00	11.21	0.00	11.21	22.12	0.00	22.12
7	3.0	19.9	149	4.45	185.4	12.2	38.8	51.0	28.11	28.11	2.81	-11.81	-11.81	0.00	7.93	0.00	7.93	17.03	0.00	17.03
8	3.3	19.9	188	3.85	160.4	16.3	33.5	49.8	28.11	28.11	2.81	-8.79	-8.79	0.00	4.04	0.00	4.04	16.16	0.00	16.16
9	3.5	16.0	240	3.51	146.3	18.7	31.1	50.8	28.11	28.11	2.81	-6.06	-6.06	0.00	2.18	0.00	2.18	16.36	0.00	16.36
10	3.8	10.1	314	2.24	93.3	25.7	20.4	46.2	28.11	28.11	2.81	-1.77	-1.77	0.00	-5.72	-5.72	0.00	13.42	0.00	13.42
11	4.1	3.6	403	1.15	47.8	33.1	10.8	43.9	28.11	28.11	2.81	3.58	0.00	3.58	-12.47	-12.47	0.00	11.35	0.00	11.35
12	4.0	-1.7	382	0.88	36.7	31.3	8.4	39.8	28.11	28.11	2.81	2.39	0.00	2.39	-14.53	-14.53	0.00	8.68	0.00	8.68
平均	3.9	6.3	368	3.0	127.0	30.2	27.9	59.1	28.11	28.11	2.81	18.75	-44.28	63.03	-1.83	-48.96	47.32	263.34	0.00	263.34

システム係数
80%
運転係数
0.485%

< 必要消費電力 < OK
> 必要消費電力 > NG

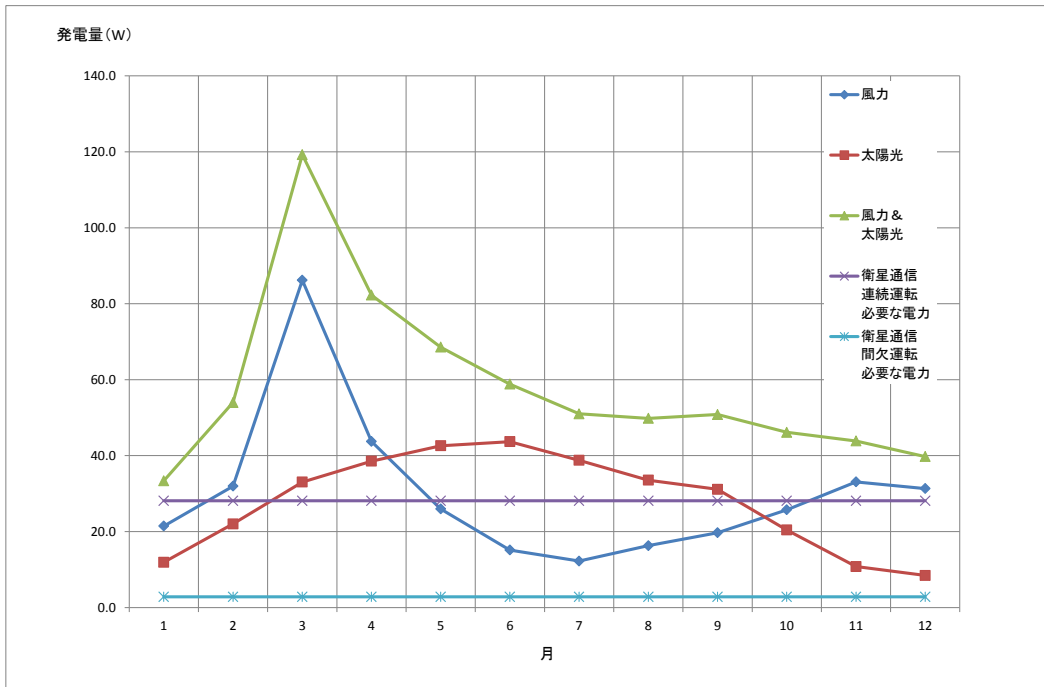


図 8.1-7 シンフォニアテクノロジー社発電機の発電量過不足予測（北海道：幌延）

モデル発電機による検討結果から風力+太陽光のハイブリッド方式を用いることとし、間欠運転を基本動作として、必要十分な発電量を得るための発電設備の設計を行った。間欠運転における消費電力予測は表 8.1-3 に示した通りであり、これを賄い得る発電設備として風力発電機（表 8.1-9）と太陽光発電機（表 8.1-10）の構成を検討した。

表 8.1-9 風力発電機


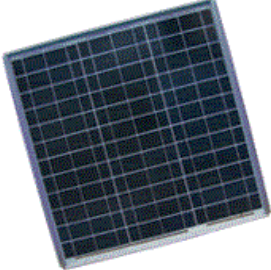
メーカー	MARLEC
型式	FM910-4
ファースリング機構	側方偏向方式
発電電力	72W(風速10m/s時)
出力電圧	DC12V または DC24V (機種選択指定)
運転開始風速	風速2.0m/s
耐風速強度	風速60m/s
ローター直径	910mm
本体重量	約13.1kg
写真	

表 8.1-10 太陽光発電機

メーカー	京セラ
型式	KC32T-02
発電素子	多結晶シリコン
発電電力	32W
最大動作電圧	17.4V
最大動作電流	1.84A
サイズ	517mm × 512mm × 17mm
本体重量	2.8kg
写真	

幌延 HCD-3 孔におけるこれら二つの発電機の構成による予想発電量と予想消費電力量の関係を図 8.1-8 に示す。風力+太陽光の発電量の合計は年間を通して間欠運転に必要な電力量を上回っており、HCD-3 孔に対応する発電設備はこれら二つの発電機を組み合わせたハイブリッド発電とした。

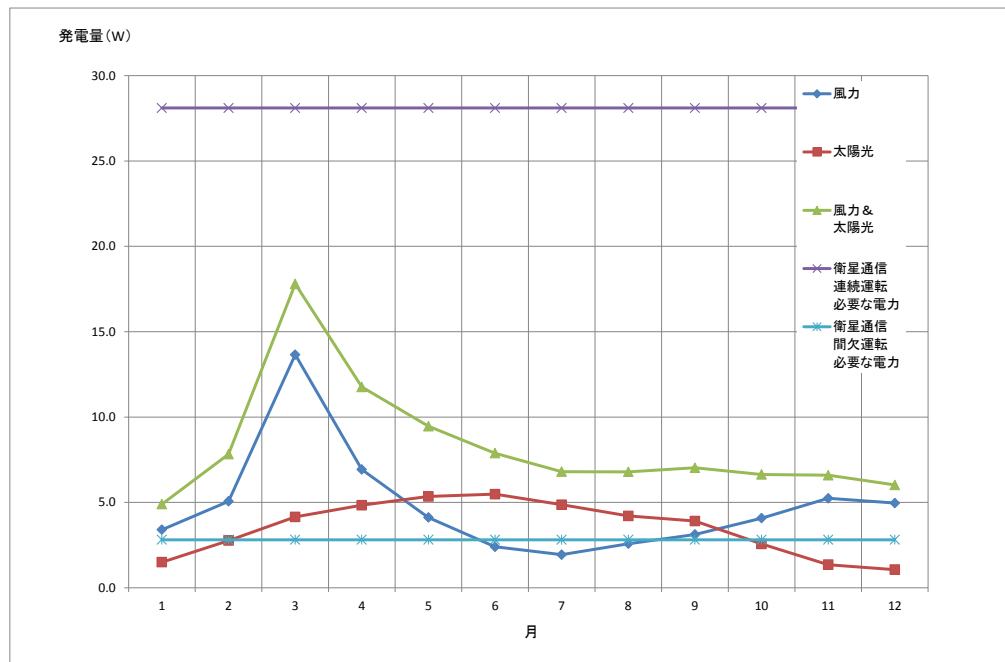


図 8.1-8 発電量と消費電力量の予測

8.1.3 蓄電池

代表的な蓄電池である鉛蓄電池、ニッケル水素電池ならびにリチウム電池の特徴を表 8.1-11 に示す。リチウム電池はエネルギー密度が高く、システムの小型化に寄与するが、発火事故などのリスクが考えられる。本システムの電源を構成する蓄電池としては、コスト、寿命、動作温度範囲および安全性の観点から実績が最も多い鉛電池を採用することとした。

発電設備の検討結果からハイブリッド発電で十分な発電量を得られると算定されたことから、蓄電池には発電量の変動分をカバーする分の蓄電容量を期待することとした。また、発電途絶状態が一週間続く状態を“最悪の発電途絶状態”として、この場合にも対応できる蓄電池容量となる 12V 50Ah を確保することとした。蓄電池容量算定のフローを図 8.1-9 に示す。

表 8.1-11 蓄電池タイプ比較表

	種類		
	鉛電池	ニッケル水素電池	リチウム電池
コンパクト化 エネルギー密度 Wh/Kg	△ 35	○ 60	◎ 200
コスト 円/kWh	5万円	10万円	20万円
安全性	◎	○	△
寿命	17年	5~7年	6~10年
動作温度範囲	-25℃~55℃	-20℃~40℃	-20℃~60℃

*出展元:蓄電池戦略「平成24年7月 経済産業省 蓄電池戦略プロジェクトチーム、
(一部加筆)

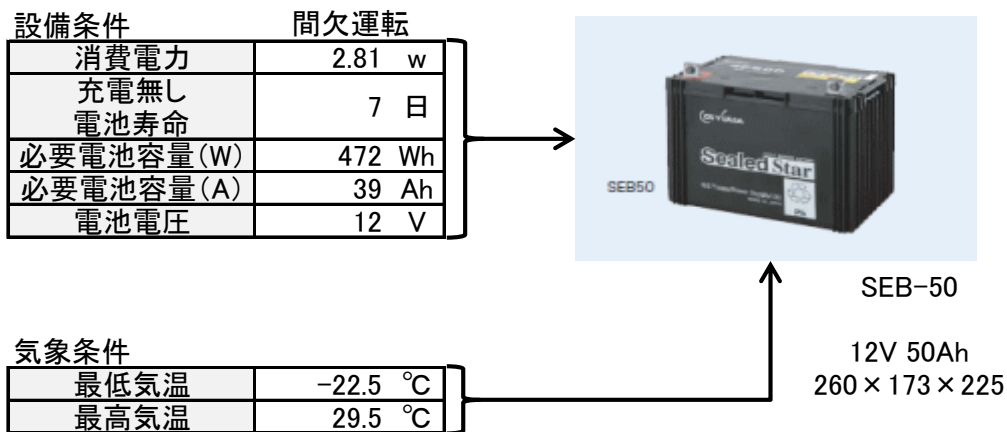


図 8.1-9 蓄電池容量算定フロー

8.1.4 その他設備

その他設備として、データロガー、ネットワークカメラ、システム設置用各種設備ならびに検証用付帯設備の検討を行った。

(1) データロガー

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満たす可能性のある市販の機器の仕様を整理した。データロガーに求められる要求仕様を計測内容別に表 8.1-12 に示す。

表 8.1-12 データロガーに求められる要求仕様

	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°C~60°C	気象データ:最低気温 :最高気温	幌延 川内市 -22.5°C +35.7°C
4	気圧	850HPa~1050HPa	気象データ:最低気圧 :最高気圧	御前崎 石垣島 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) 1018HPa 瞬間最高気圧のデータなし
5	風向	0~360度(東西南北)		
6	風速	0~70m/s	気象データ:最大瞬間風速	石垣島 53.1m/s
7	日射量	0~500w/m ²	気象データ:最大日射量	石垣島 6.2kWh・m ² ・day ⇒ 258w/m ²
8	降雨量	0~200mm(時間降雨量)	気象データ:最大降雨量	柏崎市 最大降雨量:2438mm
9	積雪量	0~1500mm	気象データ:最大積雪量	幌延 最大積雪量:980mm

低消費電力で稼働するという本システムの最大の特性を踏まえ、その他の要求仕様として以下の①～⑤を掲げて一般市場から調達できるデータロガーの仕様を比較した(表 8.1-13)。

- ①システム全体で低い消費電力で連続稼働すること。
- ②システム全体の消費電力を動的に制御できること。
 - 1)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。
 - 2)上位通信機能も必要なときにだけ電源をON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(坑道)がある場合に複数のデータロガーを無線接続してデータ収集可能なセンサーネットワークを有すること。且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センサー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。

表 8.1-12 と上記①～⑤の要求仕様を満足するデータロガーとして openATOMS “MAGIC・BEE” (東洋電機製) を選定した。

(2) ネットワークカメラ

モニタリングサイト周辺状況を視覚的に把握するため、通信周期毎に周囲画像を撮影する下記に示すネットワークカメラを設置した。

型式 : BB-SW175A (パナソニック製)

消費電力 : 5.16W (DC12V、430mA)

(3) システム設置用各種設備

システム設置用のケース及び外装品は以下に示すものとした。

① 通信端末ボックス

気象条件 (温度、湿度、気圧、風向風速、雨量、積雪、日射) 測定用データロガーの格納ボックス

型式 : BCAP304015G (メーカー: タカチ電機工業)

寸法 : 300 (W) × 400 (D) × 150 (H)

取付方法 : 専用外装に取付

収容機器 : MAGIC BEE 2 式

: 専用ユニバーサル基板

数量 : 1

② 蓄電池充電ボックス

型式 : BCAP608028G (メーカー: タカチ電機工業)

寸法 : 630 (W) × 830 (D) × 288 (H)

取付方法 : 専用外装に取付

収容機器 : MAGIC BEE 1 式

: 蓄電池

: 充放電コントローラ

: 専用ユニバーサル基板

数量 : 1

③ データロギングボックス (センサー部)

型式 : BCAP405020G (メーカー: タカチ電機工業)

寸法 : 400 (W) × 500 (D) × 201 (H)

取付方法 : 既設小屋内に設置

収容機器 : MAGIC BEE 5 式

: 専用ユニバーサル基板

数量 : 1

④ データロギングボックス（データ通信部）

上位通信端末、ローカル通信親局（ネットワークコンピュータ）の格納ボックス

型式 : BCAP405020G（メーカー：タカチ電機工業）

寸法 : 400 (W) × 500 (D) × 201 (H)

取付方法 : 既設小屋内に設置

収容機器 : MAGIC BEE 1式

: ネットワークコンピュータ (NC)

: 衛星通信端末 (本体)

: 3G ルータ (本体)

: HUB

: 専用ユニバーサル基板

数量 : 1

⑤ 発電設備用外装

太陽光パネル、風力発電機、通信端末ボックスの設置用外装品。

ハードウェア : ポール

: 台

: ケース取付金具

: 太陽光パネル取付金具

: ワイヤ固定用金具

材質 : SUS304

概算寸法 : 1200 (W) × 1200 (D) × 2900 (H)

数量 : 1

⑥ 蓄電設備用外装

蓄電池充電ボックス、衛星通信用アンテナの設置用外装品

ハードウェア : L字アングル

: 棚板

: ポール

: ワイヤ固定用金具

材質 : SUS304

概算寸法 : 900 (W) × 1000 (D) × 1800 (H)

数量 : 1

⑦既設計測小屋

データロギングボックス（センサー部）、データロギングボックス（データ通信部）を既設の計測小屋内に設置

（４）検証用付帯設備

幌延 HCD-3 孔の無人計測システムに導入する太陽光発電の発電量を評価するため小型の発電量監視用太陽光パネルを設置した（図 8.1-10）。

ハードウェア：通信端末ボックス

：電圧・電流・電力計モジュール

：太陽光パネル 3 枚（45° /35° /25° ）

：外装

概算寸法：1200（W）×1200（D）×2225（H）

数量：1



図 8.1-10 発電量監視用太陽光パネル

8.1.5 システム配線システムとシステム制御ロジック

システム配線システムを図 8.1-11 に示す。

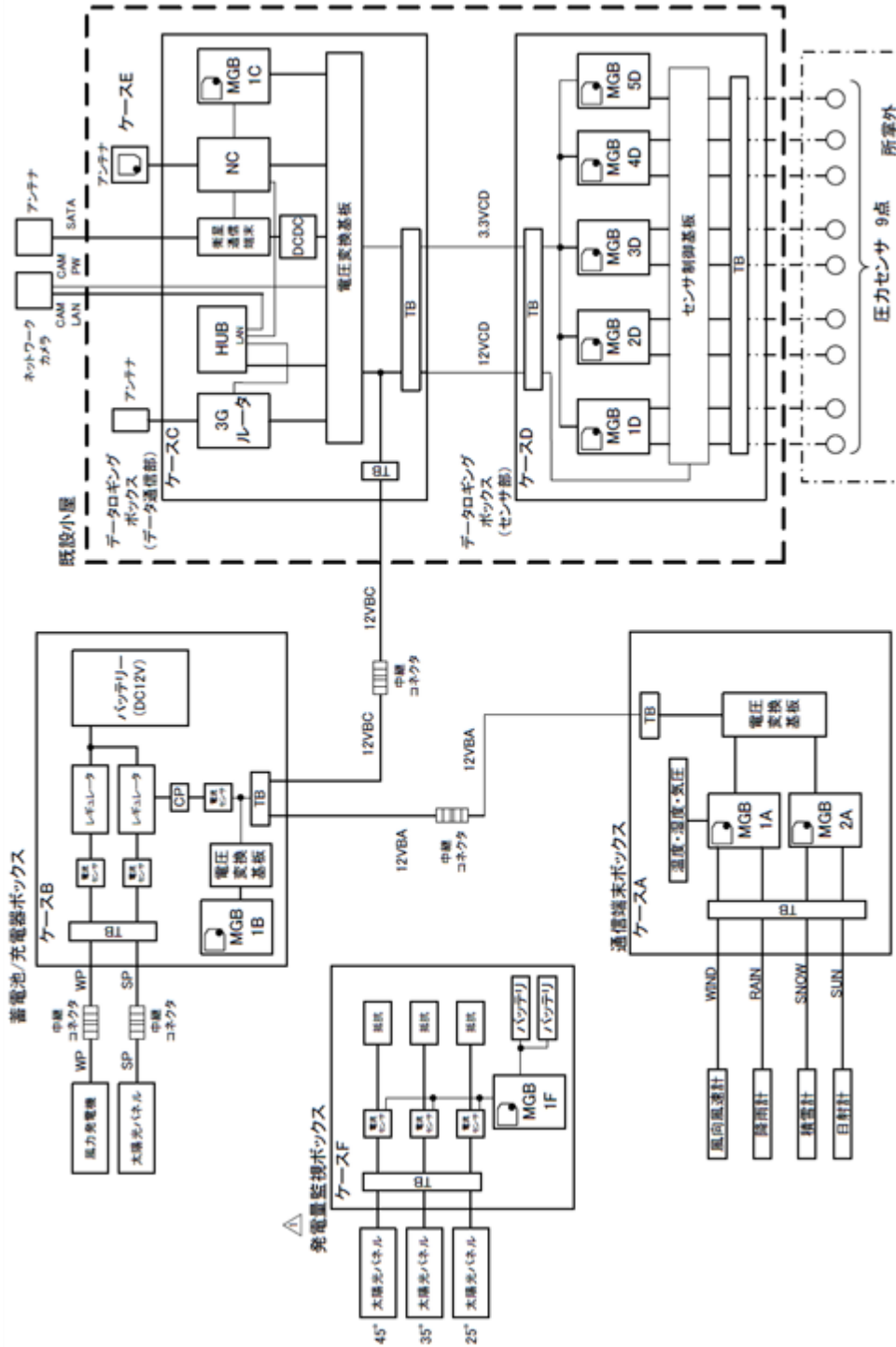


図 8.1-11 システム配線システム

システム制御ロジックは図 8.1-12 に示す機能ブロック図に示すとおりである。

幌延のシステムではMGBを10台用いるが、各MGBの機能は同じなので図8.1-12には記載していない。

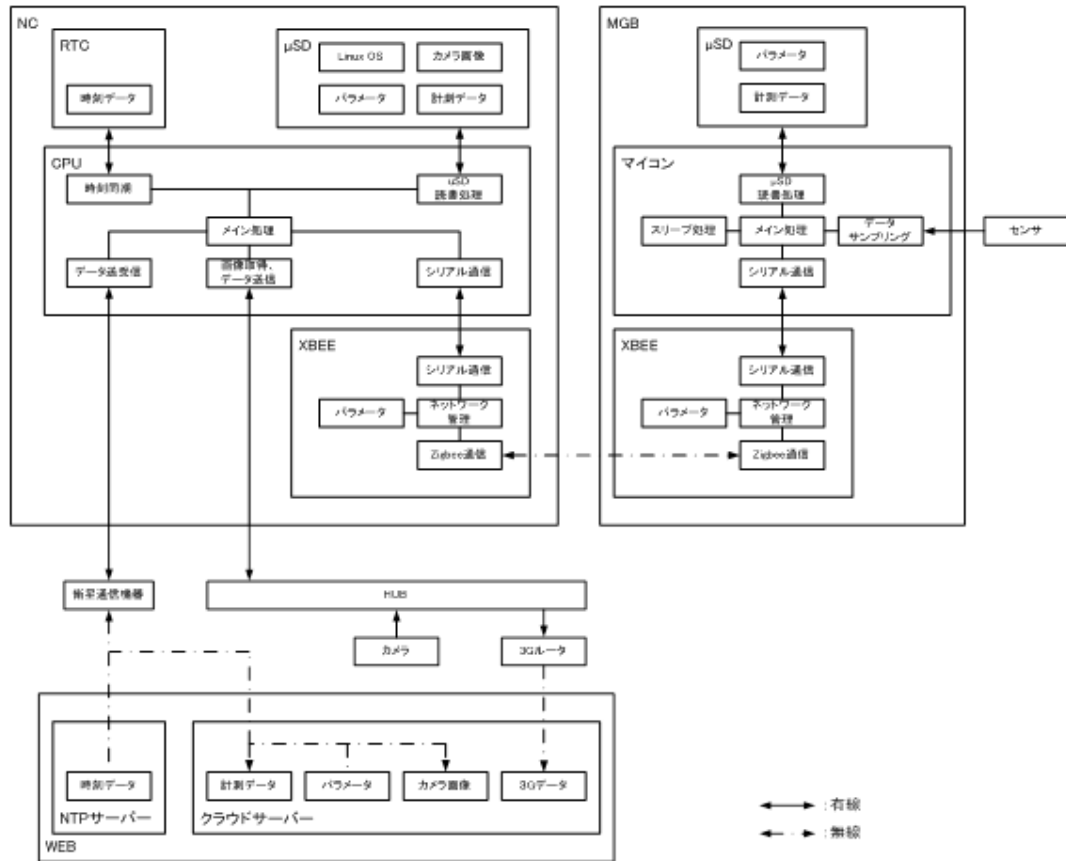


図 8.1-12 システム制御ロジック（機能ブロック図）

8.1.6 工場試験

機器製作工場において、下記の項目等について試験及び検査を2015年9月18日に行い、システムを構成する機器の動作確認等を行った。

1. 員数検査
2. 構造寸法検査
3. 外観検査
4. 単体試験
5. 機能試験
6. 通信試験

工場試験概要と試験状況を表8.1-14と図8.1-13に示す。

表 8.1-14 工場試験概要

No.	検査項目	検査内容	判定基準																				
1	員数検査	設置機器及び付属品、予備品の員数を目視確認する。	員数が所定数量あること。																				
2	構造寸法検査	外形図に記載された寸法を鋼製巻尺等で測定する。 計測器は、校正済みで有効期限内のもの	各部の寸法が許容差内にあること。 寸法許容差(JEM 1459:2005) 単位 (mm) <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">外形寸法</th> <th colspan="2">許容差</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>120を超え 400以下</td> <td>±2</td> <td>±3</td> </tr> <tr> <td>400を超え 1000以下</td> <td>±2</td> <td>±4</td> </tr> <tr> <td>1000を超え 2000以下</td> <td>±3</td> <td>±6</td> </tr> <tr> <td>2000を超え 4000以下</td> <td>±4</td> <td>±8</td> </tr> <tr> <td>4000を超え 8000以下</td> <td>—</td> <td>±10</td> </tr> </tbody> </table> 上記表のAは枠の許容差を示す。 Bは、組合せ寸法許容差を示す。	外形寸法	許容差		A	B	120を超え 400以下	±2	±3	400を超え 1000以下	±2	±4	1000を超え 2000以下	±3	±6	2000を超え 4000以下	±4	±8	4000を超え 8000以下	—	±10
外形寸法	許容差																						
	A	B																					
120を超え 400以下	±2	±3																					
400を超え 1000以下	±2	±4																					
1000を超え 2000以下	±3	±6																					
2000を超え 4000以下	±4	±8																					
4000を超え 8000以下	—	±10																					
3	外観検査	目視により外観及びその構成を検査する。 外形図との照合を実施する。	外観検査記録の判定基準を満たすこと。																				
4	単体試験	1)各機器の起動停止動作を確認し、正常であることを確認する。 2)機器を接続し、動作試験を実施する。	単体試験記録の判定基準を満たすこと。																				
5	機能試験	全機器を接続し、動作試験を実施する。	機能試験記録の判定基準を満たすこと。																				
6	通信試験	1)連続運転モードでの、データ更新動作を確認する。 2)間欠運転モードでの、データ更新動作	通信試験記録の判定基準を満たすこと。																				



図 8.1-13 工場試験状況

8.2 現地据付および運用

8.2.1 システム機器配置計画

システム機器の配置計画を図 8.2-1 に示す。

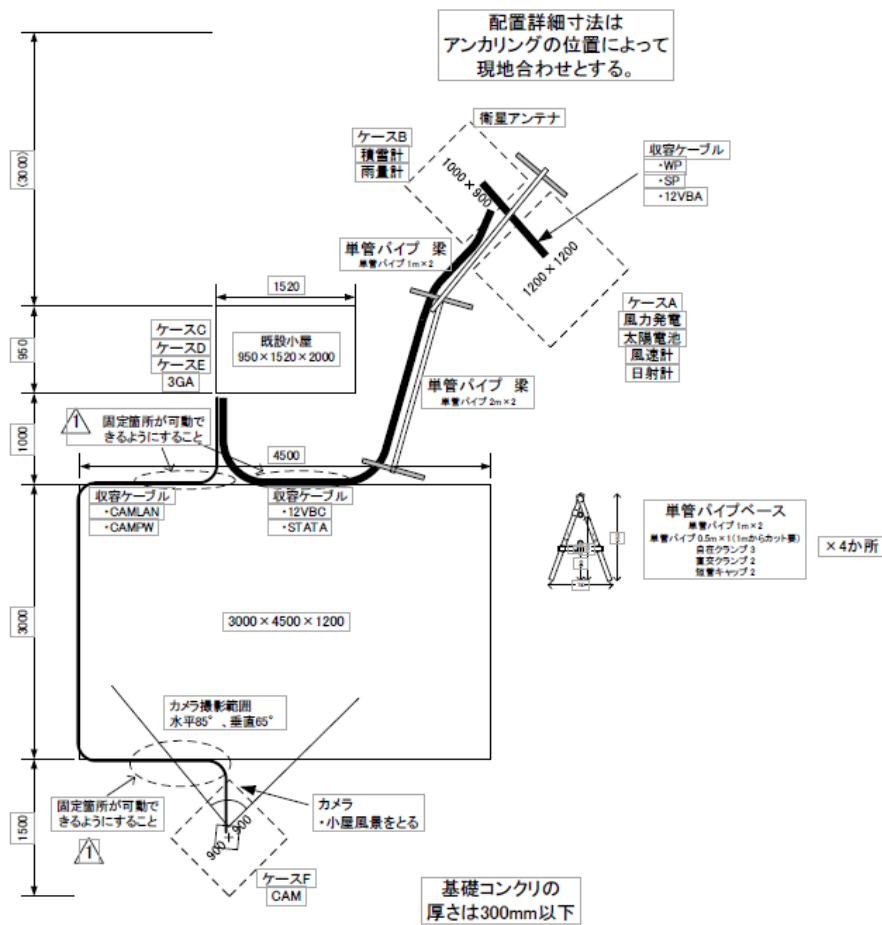


図 8.2-1 幌延 HCD-3 孔 システム機器配置計画

データロギング盤および上位データ通信機器（図中、ケース C、ケース D、ケース E、3GA）は既設計測小屋内に設置する。また、既設の計装配線は本システムに流用する。

発電設備（図 8.2-1 中のケース B、風力発電、太陽電池）および気象データ測定設備（積雪計、雨量計、ケース A、風速計、日射計）は計測小屋の後方に設置し、アンカーにて固定する。

発電設備を含むモニタリングサイト周辺状況を撮影するネットワークカメラならびに検証用付帯設

備（ケース F）は計測小屋の前方に設置する。

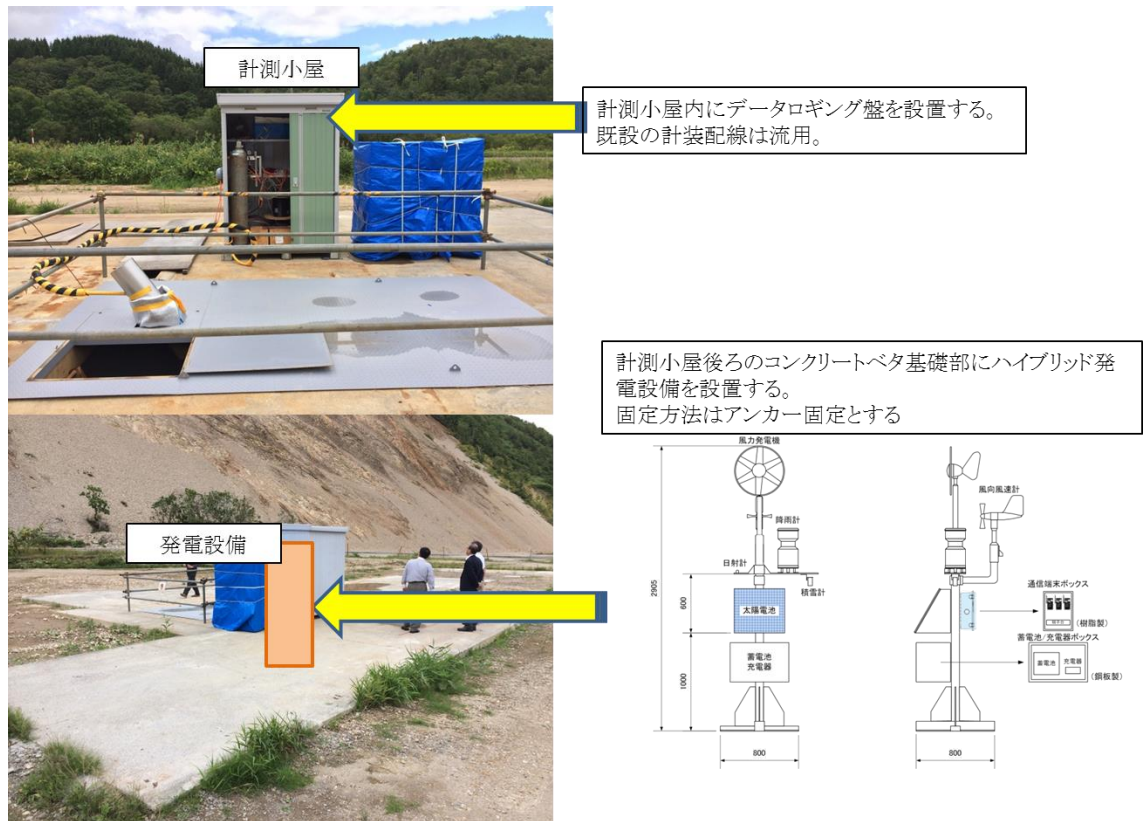


図 8.2-2 幌延 HCD-3 孔 無人計測システム設置イメージ

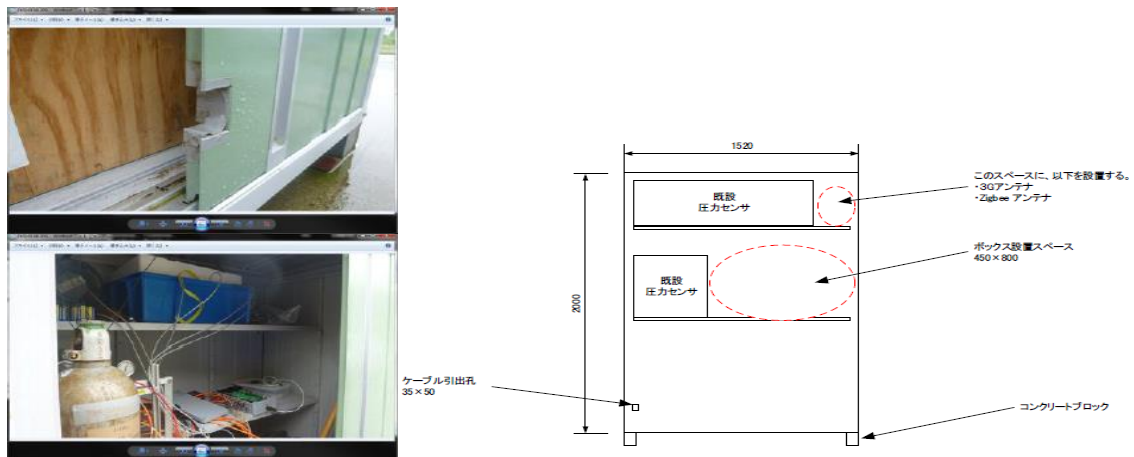


図 8.2-3 幌延 HCD-3 孔 計測小屋内機器配置イメージ

8.2.2 システム据付

システム機器配置計画に基づき、2015年9月29日～2015年10月1日にシステムの据付作業を行った（図 8.2-4～図 8.2-8）。



図 8.2-4 無人計測システム機器現場搬入状況



図 8.2-5 設置作業前現場状況



図 8.2-6 外装品取付作業状況



図 8.2-7 データロギングボックス設置後の既設計測小屋内状況



図 8.2-8 無人計測システム設置後の現場状況

8.2.3 間欠運転および連続運転モードにおけるシステム動作

本システムは動作モードとして間欠運転モードと連続運転モードの 2 つのモードを有している。ここでは、両モードにおけるシステム動作の説明を行う。また、システムを運用する中で、ローカル通信の安定性を向上させるためにネットワークコンピュータ（NC）のみ連続運転するモードを追加したことから、NC 連続運転モードについてもあわせて説明を行う。

（1）間欠運転モード

本モードは通信機器、NC、MGB のすべての機器が、間欠運転をする超低消費電力モードである。本モードのタイミングチャートを図 8.2-9 に示す。

MGB は毎分データ計測と μ SD カードへの保存を行い、NC が起動したタイミングで μ SD カード内に保存された計測データを送信する。各 MGB はローカル通信である ZigBee ネットワークの混雑を避けるため、時間をずらして起動し、送信する仕組みとなっている。

NC の起動タイミングは遠隔操作により 10 分単位で設定することができる。

（2）連続運転モード

本モードは通信機器と NC を常時起動状態とするモードである。NC が MGB から受信した計測データをクラウドサーバ上のデータベースに瞬時伝送をするモードである。MGB はセンサーデータを 60 秒周期で収集する。本モードのタイミングチャートを図 8.2-10 に示す。

MGB は毎分データ計測と μ SD カードへの保存および NC へのデータの送信を行う。

遠隔監視局の PC から NC にリモートアクセスして NC 内の計測データやログの収集などのメンテ

ナンスは本モードにおいて行う。

(3) NCのみ連続運転モード

本モードはNCのみを常時起動状態とし、上位通信のタイミングのみ通信機器を起動させる低消費電力モードである。本モードのタイミングチャートを図 8.2-11 に示す。

通信機器が起動完了したタイミングで、MGB が NC に対してクラウドサーバ送信要求を送信することで、NC 内に保持された計測データをクラウドサーバへ送信する。

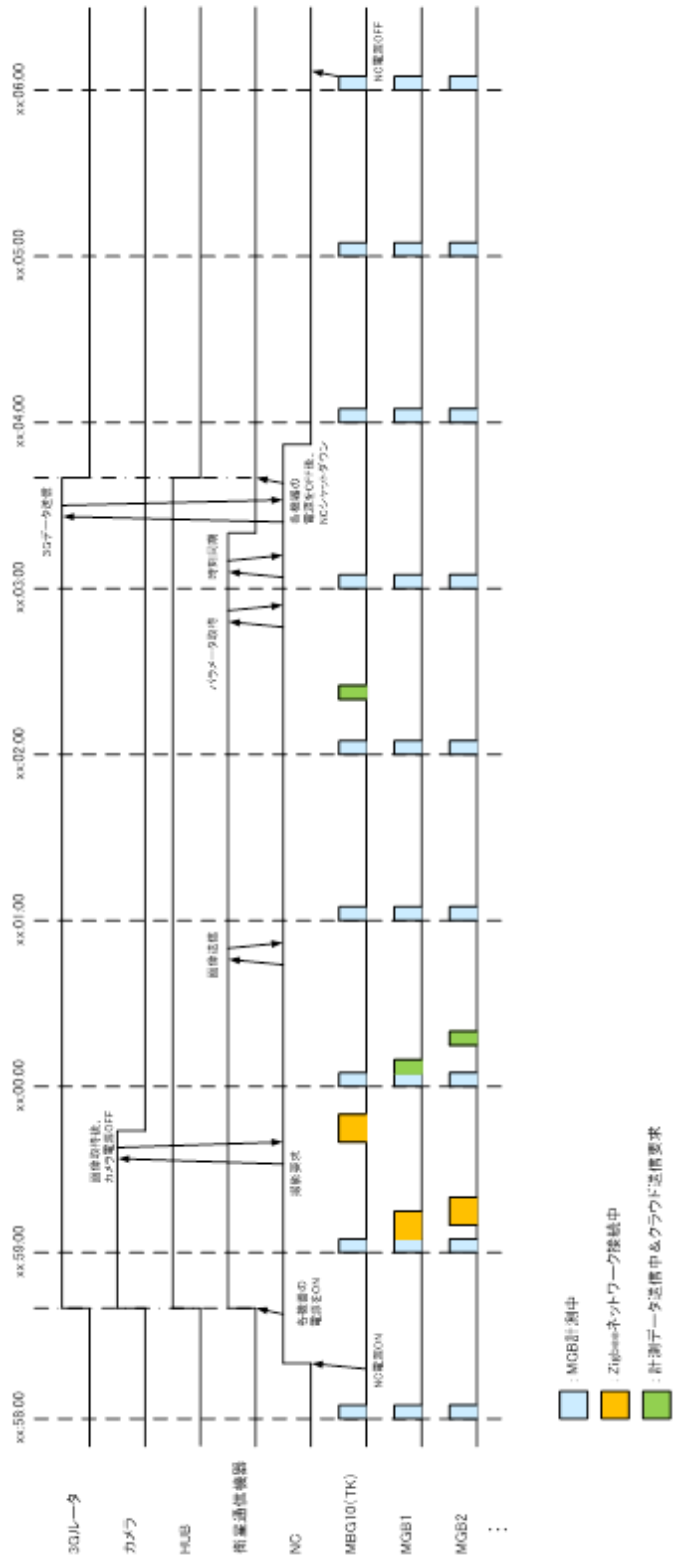


図 8.2-9 間欠運転モードタイミングチャート

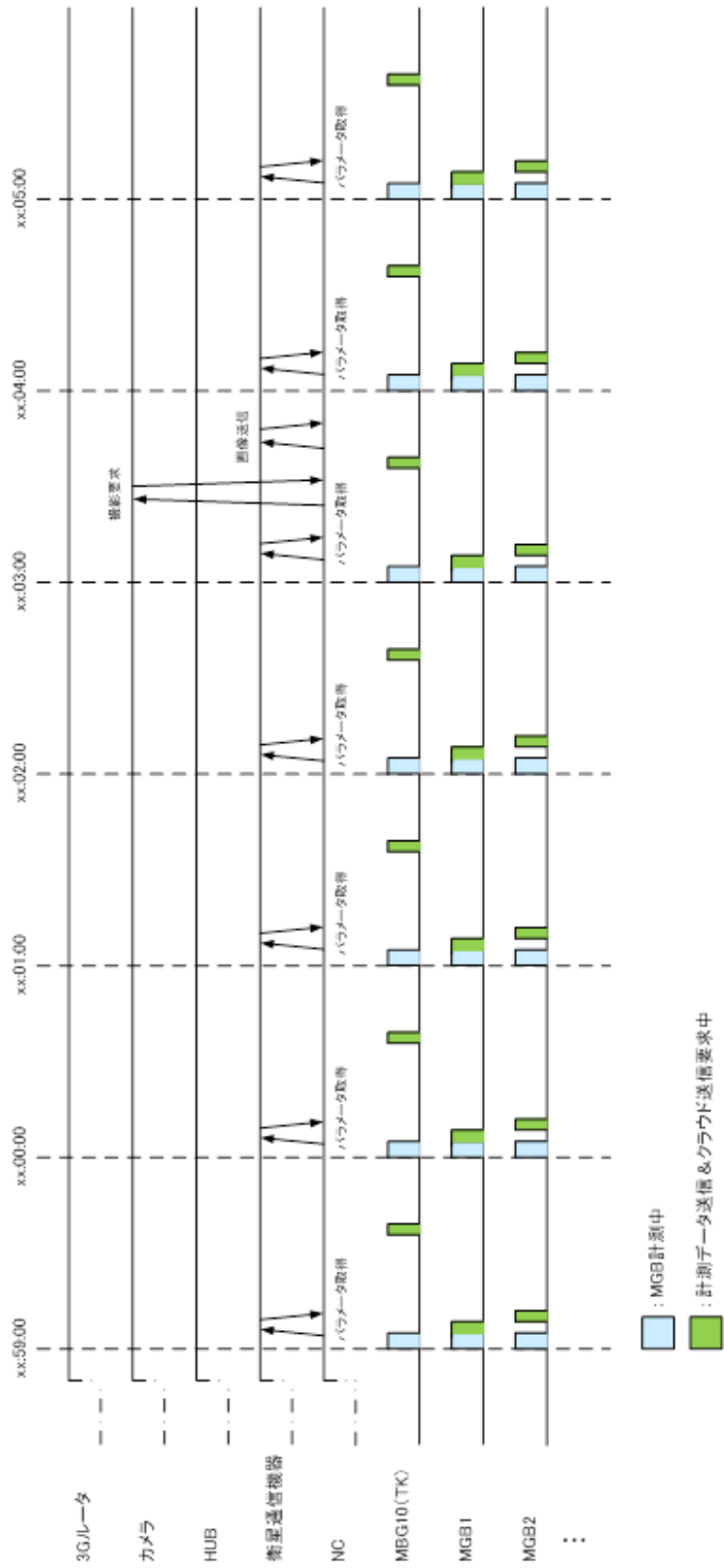


図 8.2-10 連続運転モードタイミングチャート

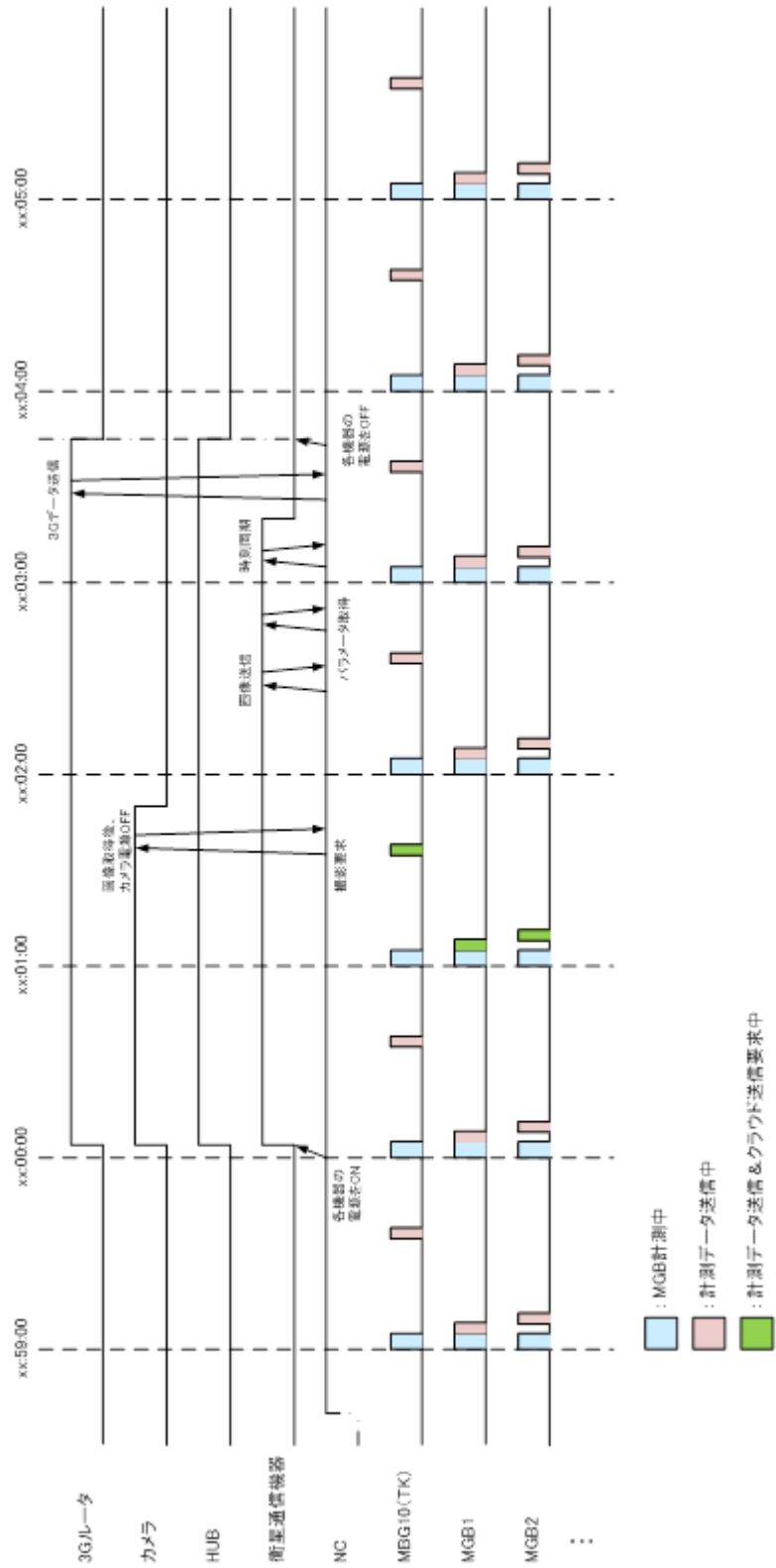


図 8.2-11 NCのみ連続運転モードタイミングチャート

8.2.4 遠隔操作におけるシステム制御

本システムでは通信装置を利用して計測したデータを Web Server に送信し、遠隔監視局からこの

Web Serverにアクセスすることで計測データの閲覧・ダウンロードおよび現地システムの制御を行うことができる（図 8.2-12）。

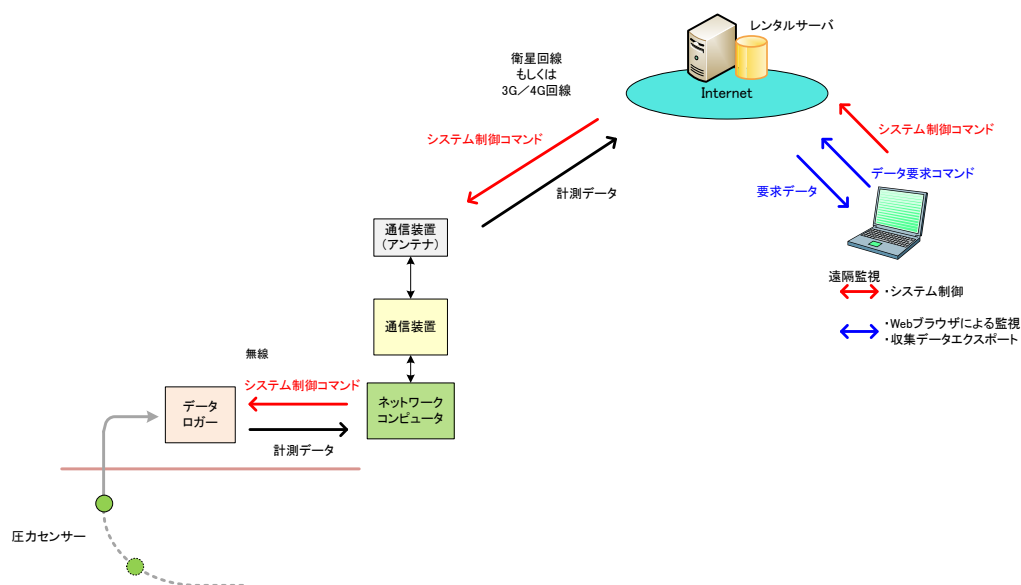


図 8.2-12 遠隔操作データフローイメージ図

(1) 遠隔操作によるシステム制御

図 8.2-13 の基本設定画面は本システムの設定を行う画面である。システムの基本設定やネットワークコンピュータの通信時間の設定の変更を行うことができる。

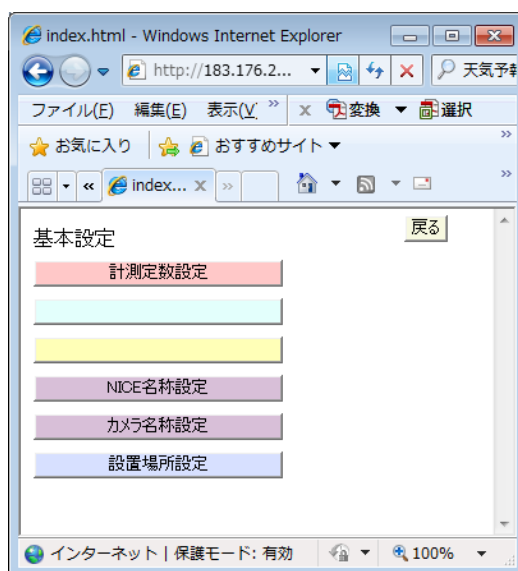


図 8.2-13 基本設定画面

ネットワークコンピュータの通信時間とはクラウドサーバと本システム間の通信周期時間のこ

とであり、この時間は 10 分単位で設定可能である。

間欠運転時のクラウドサーバ～NC～MGB 間の動作パラメータの取得タイミングを図 8.2-14 に示す。NC はクラウドサーバ上で設定された動作パラメータをシャットダウンの直前に取得する。そのため、MGB が動作パラメータを取得するのはその次の上位通信のタイミングからとなる。

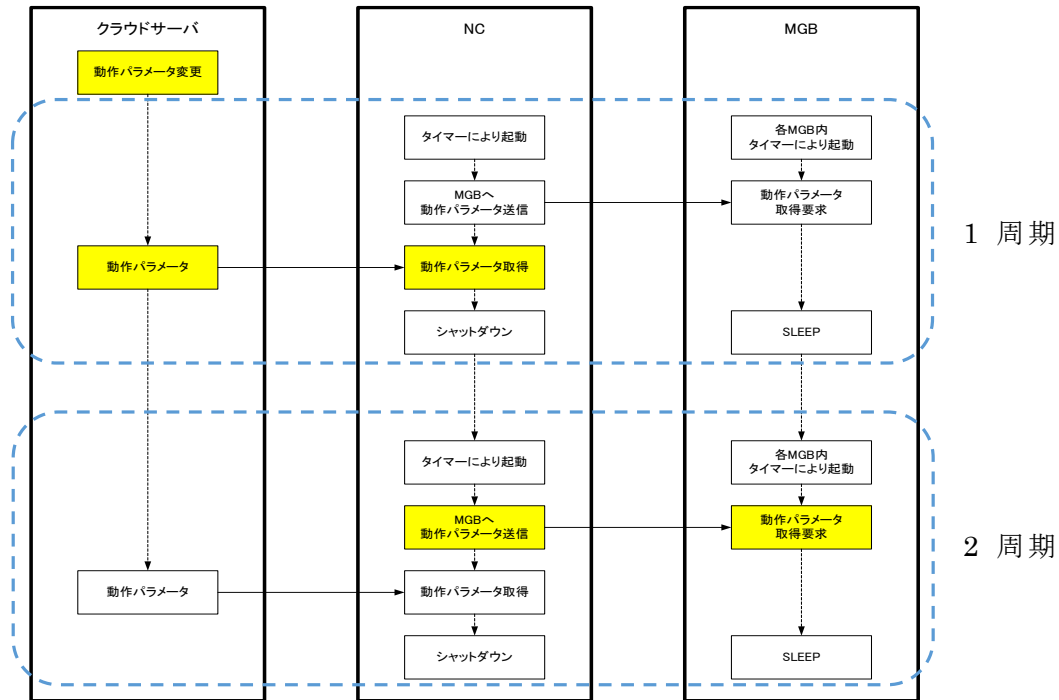


図 8.2-14 遠隔システム制御による制御コマンドの処理タイミングチャート

また、「連続運転モード」と「間欠運転モード」も同様の経路で遠隔監視局から切り替え可能となっている。

(2) 遠隔操作によるデータ閲覧

各センサーの最新の計測値 (図 8.2-15) のほかに図 8.2-16 に示したように、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。

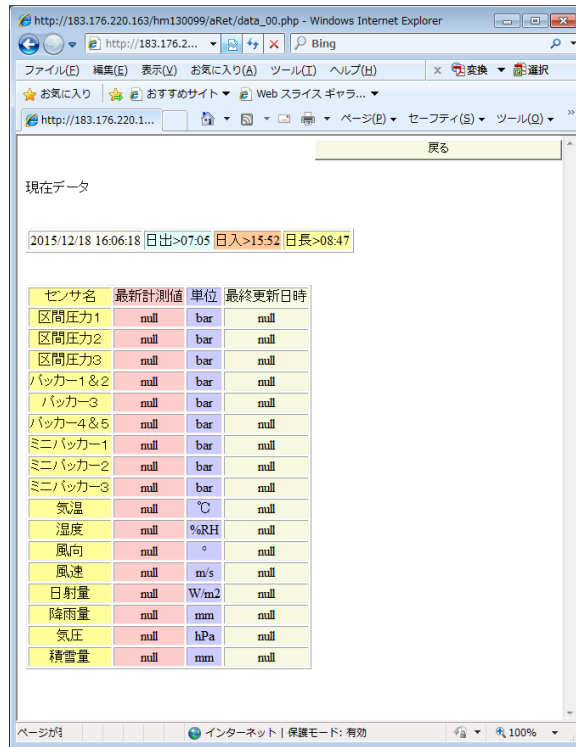


図 8.2-15 最新計測値の表示

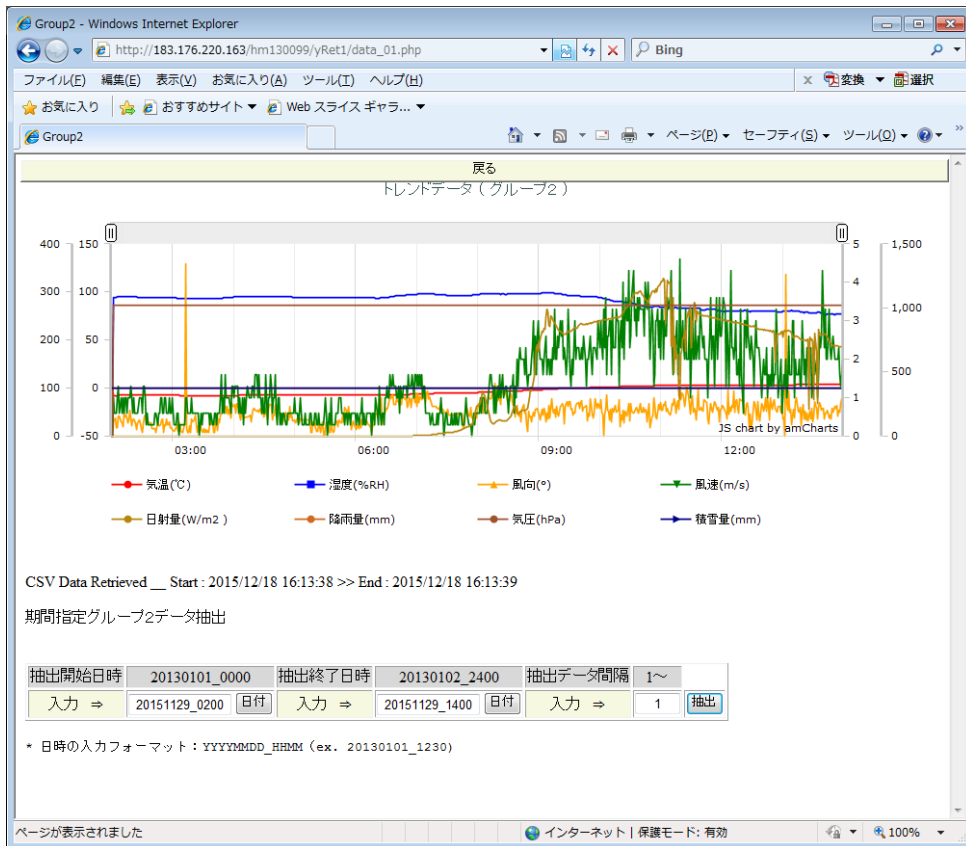


図 8.2-16 指定期間のグラフ表示

(3) 遠隔操作によるデータ取得

指定した期間の各センサーのデータはクラウドサーバ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できる (図 8.2-17)。

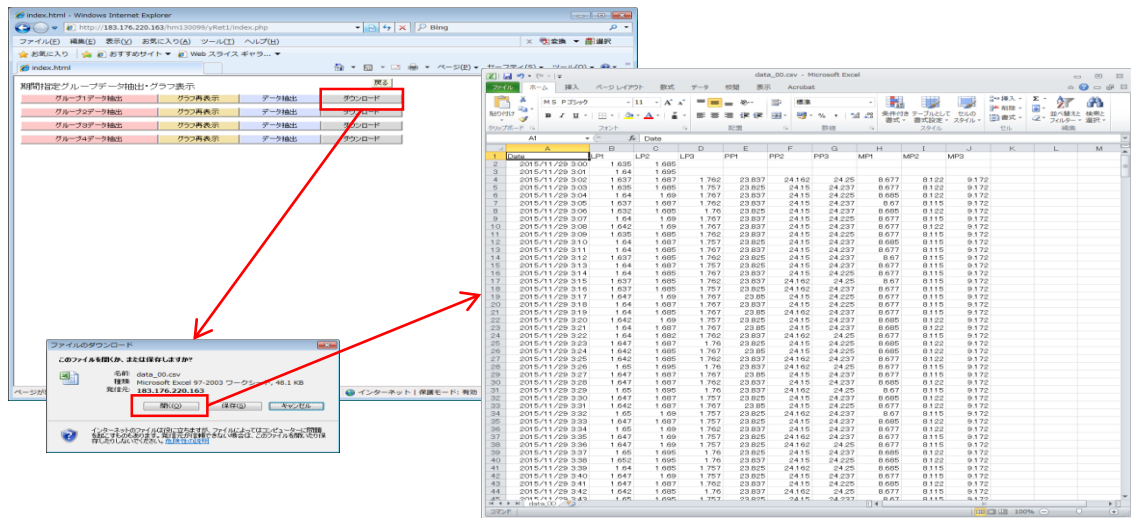


図 8.2-17 計測データ取得

8.2.5 無人計測システム計測結果

無人計測システムは2015年10月1日より運用を開始した。

2015年10月1日 0:00 から2016年2月8日 23:59 までの無人計測システムの計測結果を図 8.2-18 から図 8.2-33 に示す。図中、計測結果が途切れている区間はシステムのトラブル (後述) によりデータが欠損した期間である。

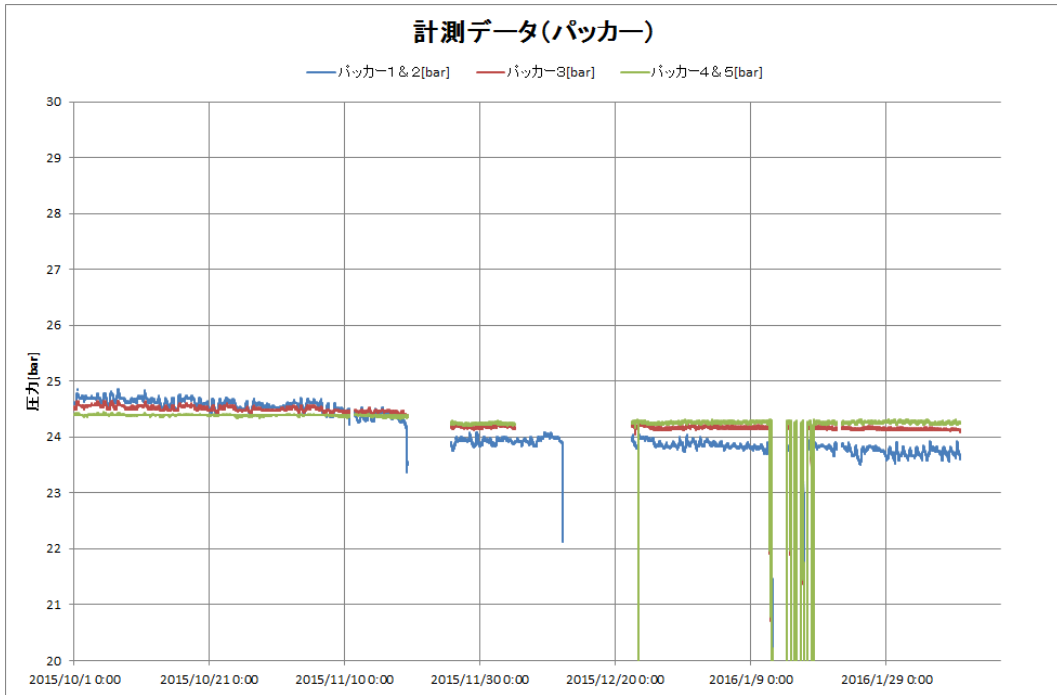


図 8.2-18 計測結果 (パッカー)

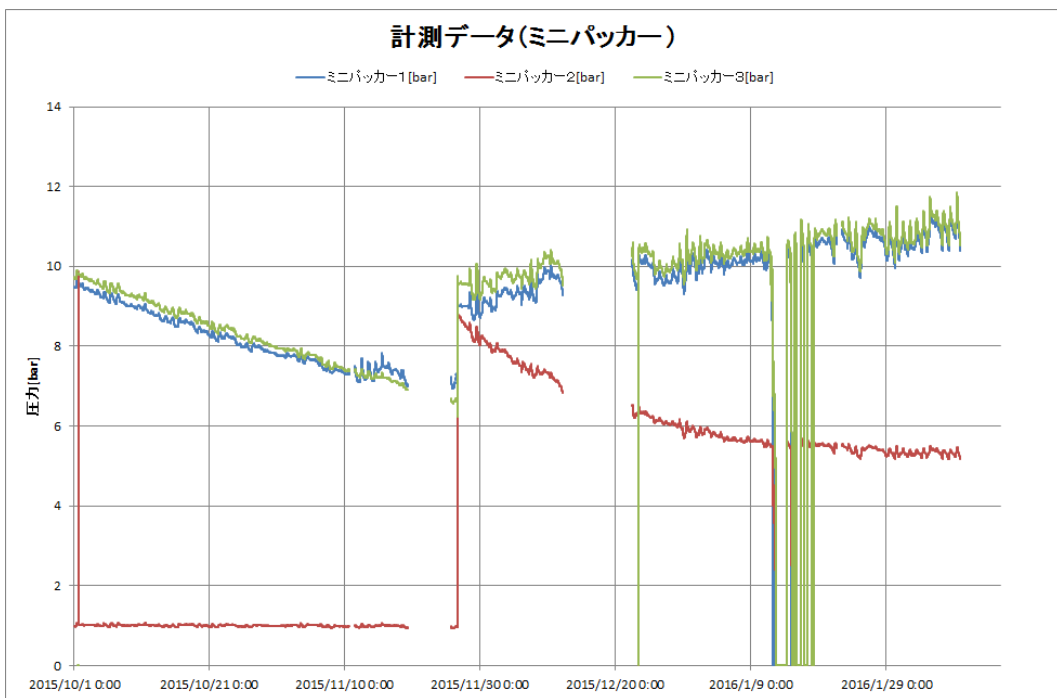


図 8.2-19 計測結果 (ミニパッカー)

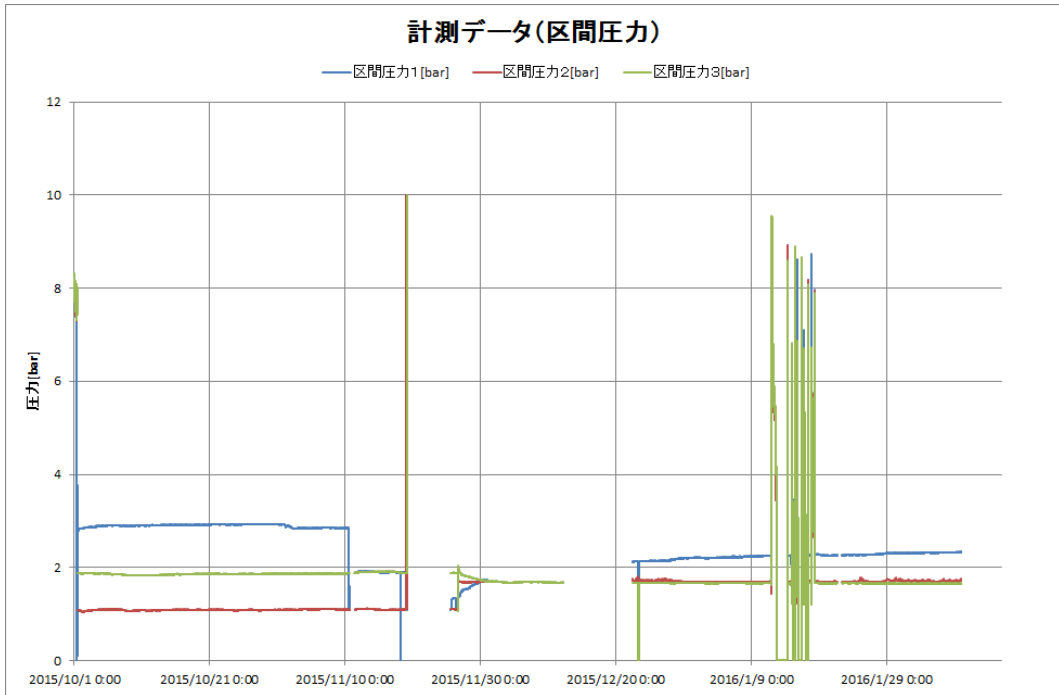


図 8.2-20 計測結果 (区間圧力)

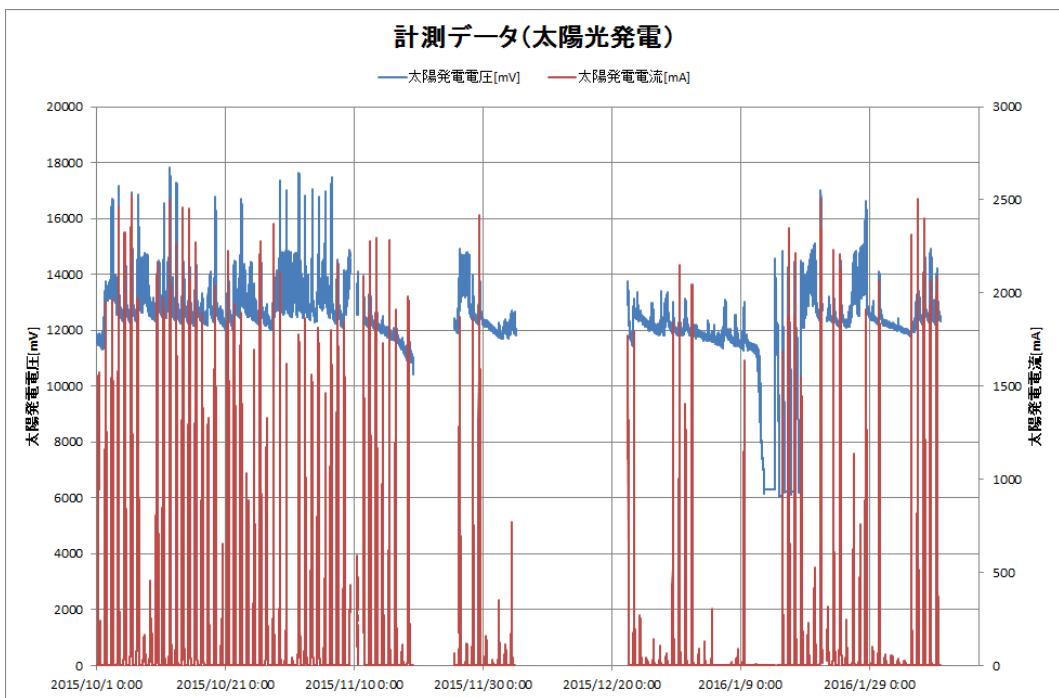


図 8.2-21 計測結果 (太陽光発電)

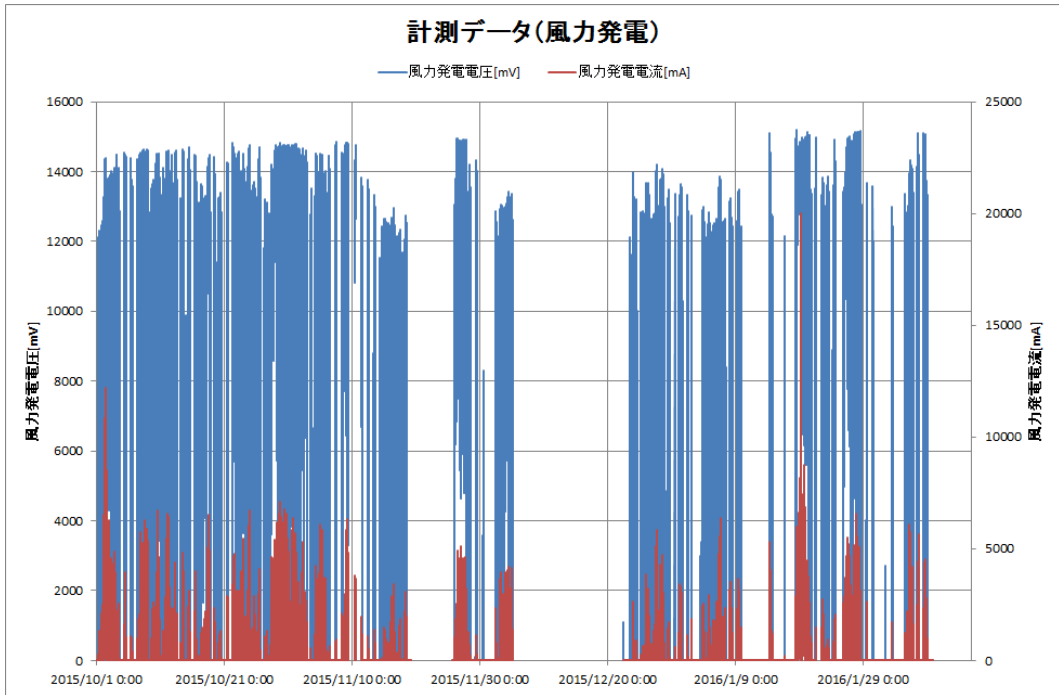


図 8.2-22 計測結果 (風力発電)

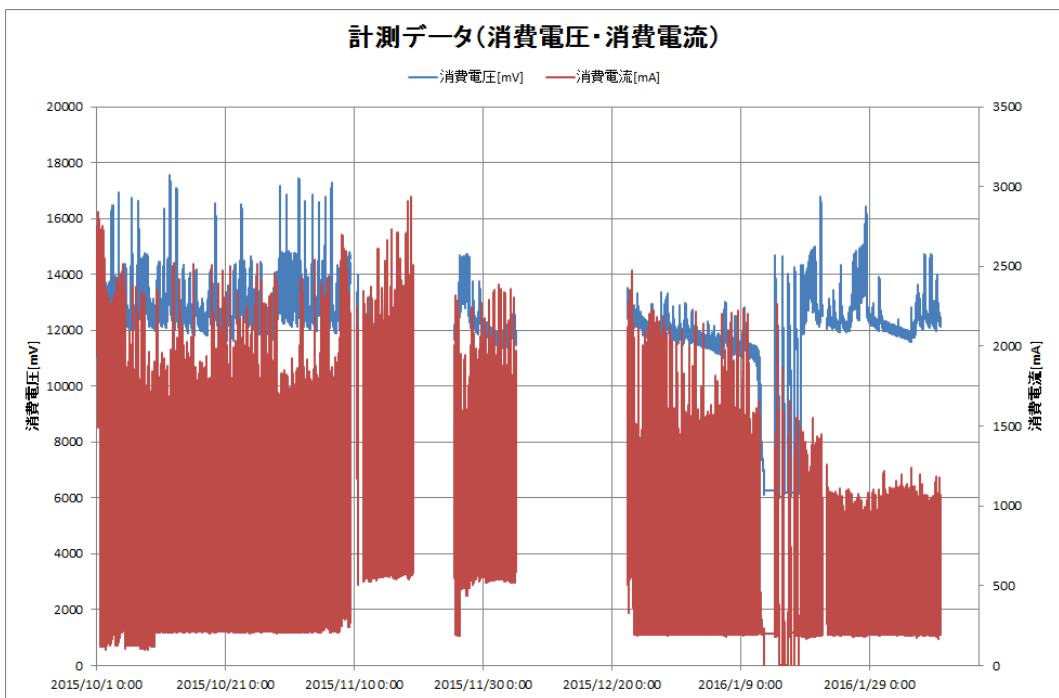


図 8.2-23 計測結果 (消費電圧・消費電流)

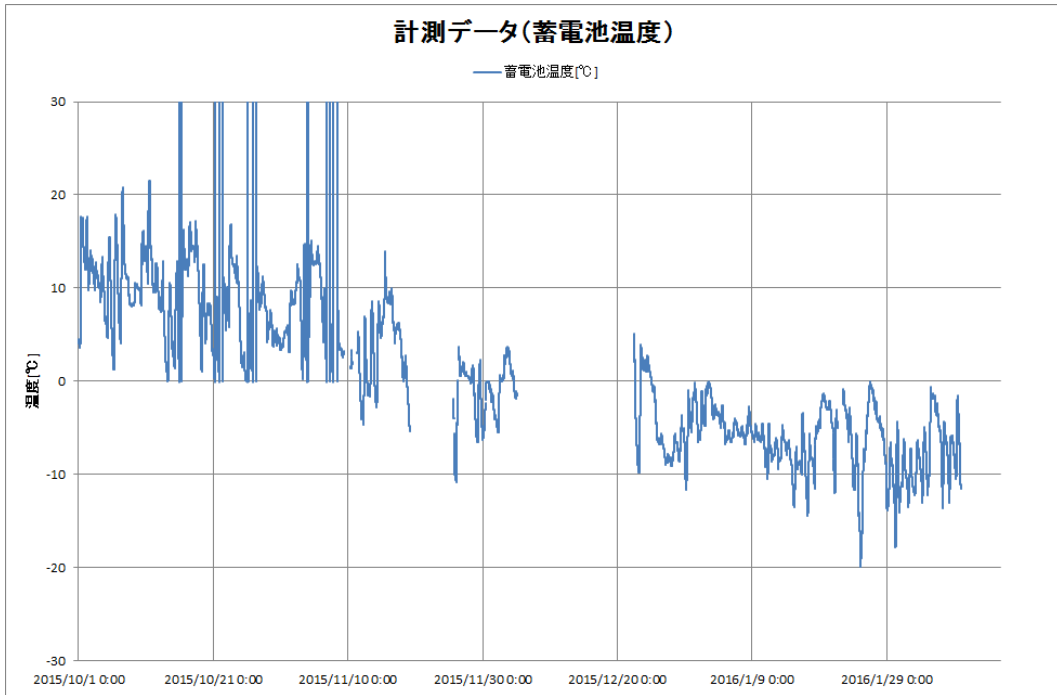


図 8.2-24 計測結果 (蓄電池温度)

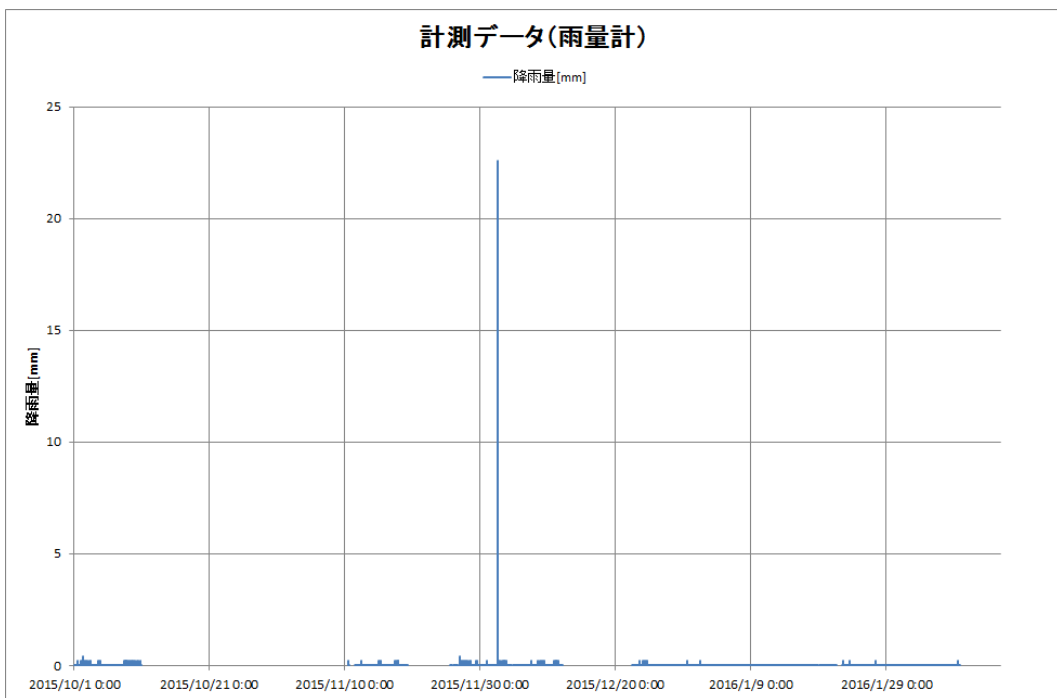


図 8.2-25 計測結果 (雨量計)

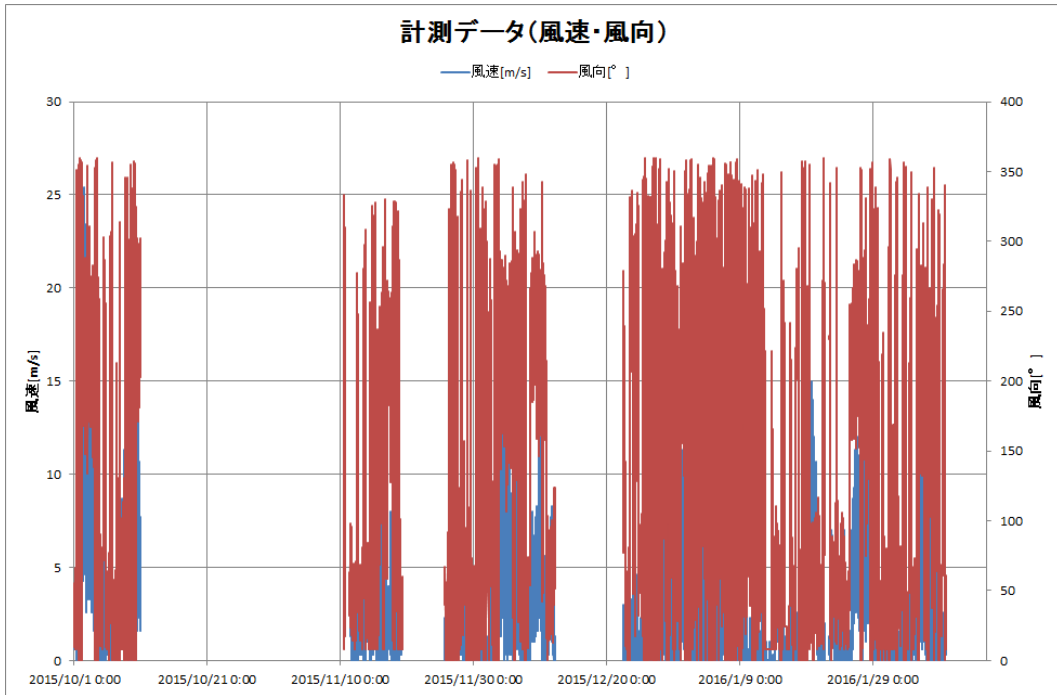


図 8.2-26 計測結果 (風速・風向)

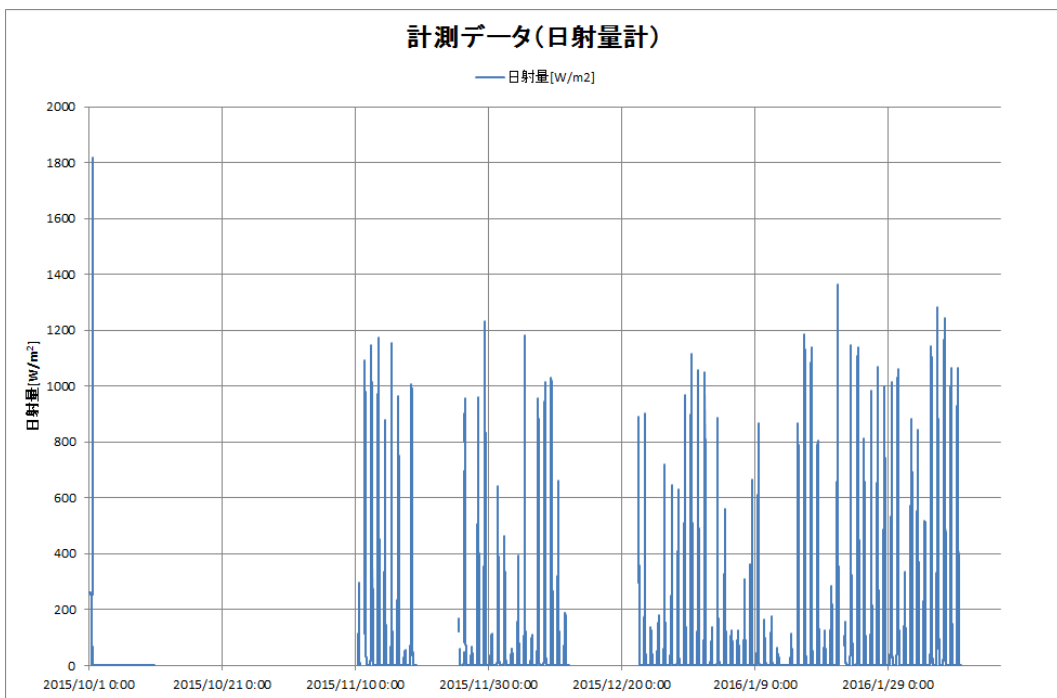


図 8.2-27 計測結果 (日射量計)

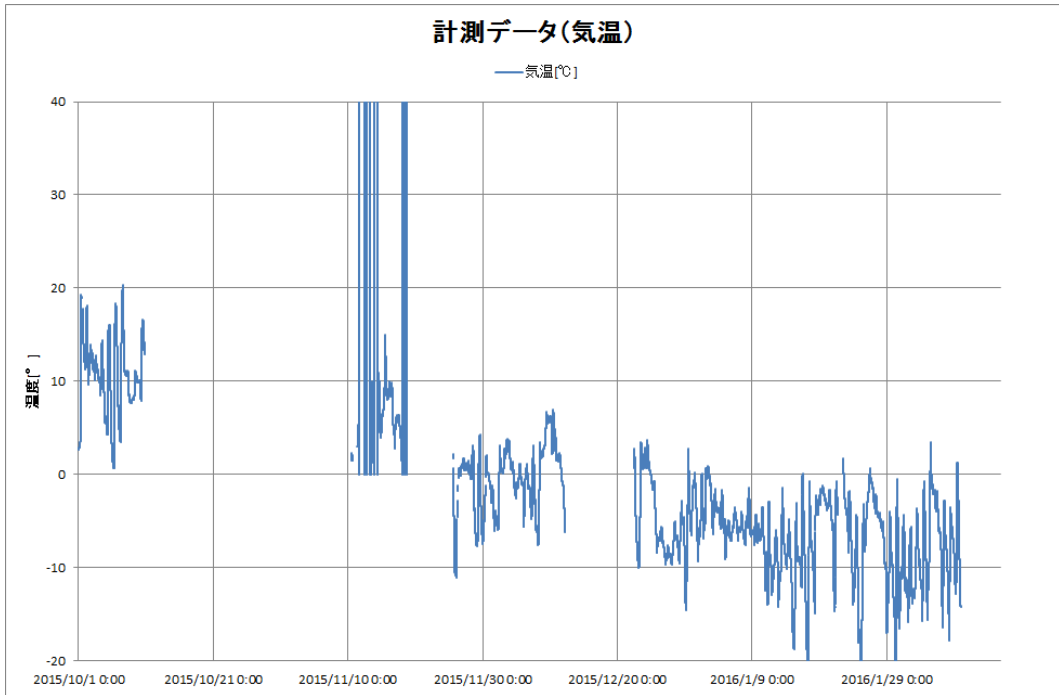


図 8.2-28 計測結果 (気温)

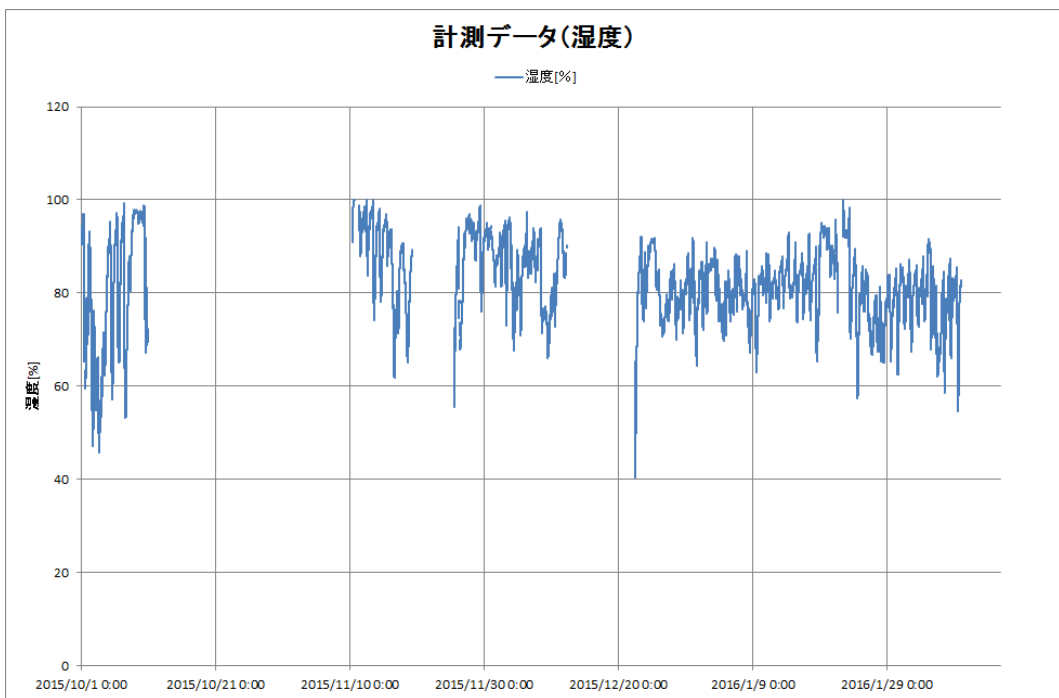


図 8.2-29 計測結果 (湿度)



図 8.2-30 計測結果 (気圧)

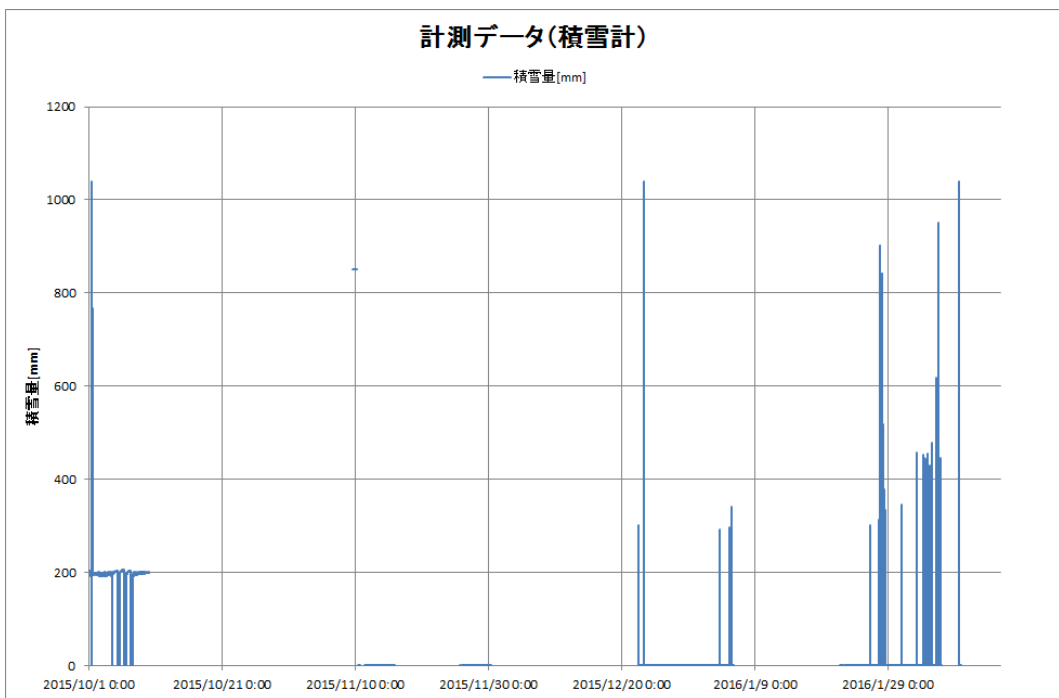


図 8.2-31 計測結果 (積雪計)

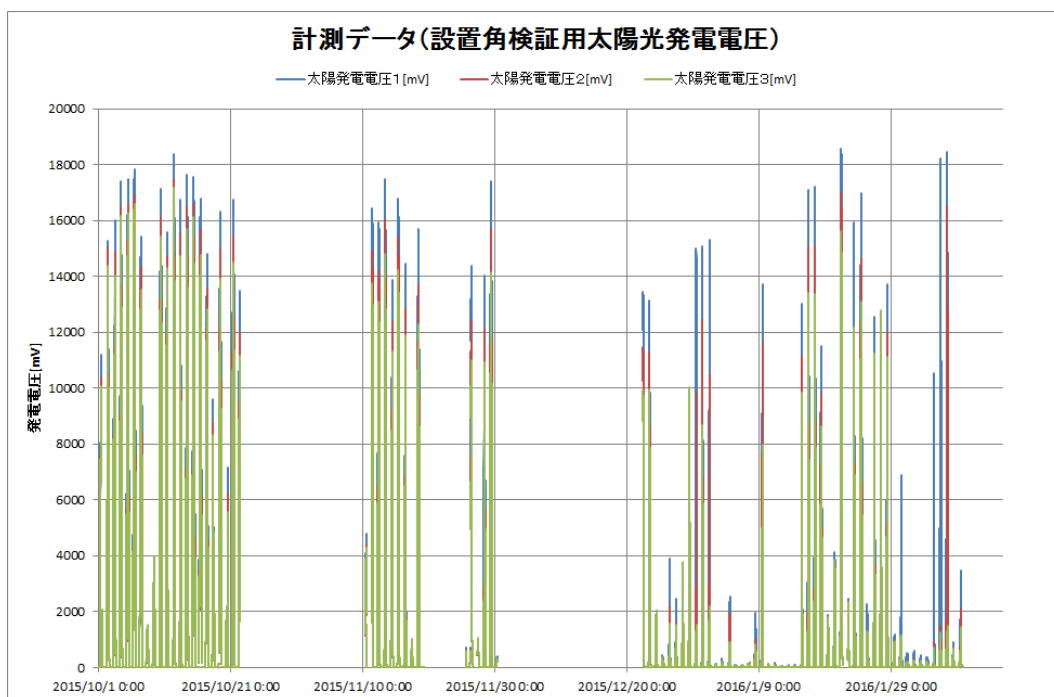


図 8.2-32 計測結果（設置角検証用太陽光発電電圧）

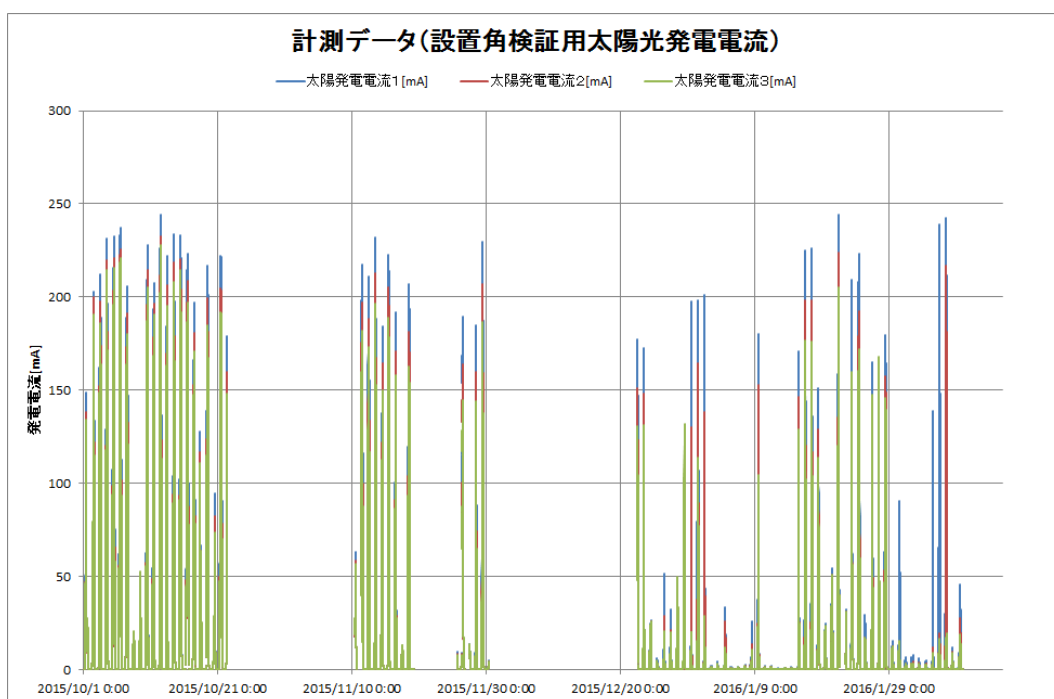


図 8.2-33 計測結果（設置角検証用太陽光発電電流）

上記計測期間における各月のデータ取得・欠損状況を図 8.2-34 から図 8.2-38 に示す。図中、各 MGB のデータ取得期間がグラフ上に線で示されている。グラフ上に線が示されていない区間が対象の

MGBにおいてデータ欠損が発生したことを示している。

データはその取得形態から以下の四つに分類できる。

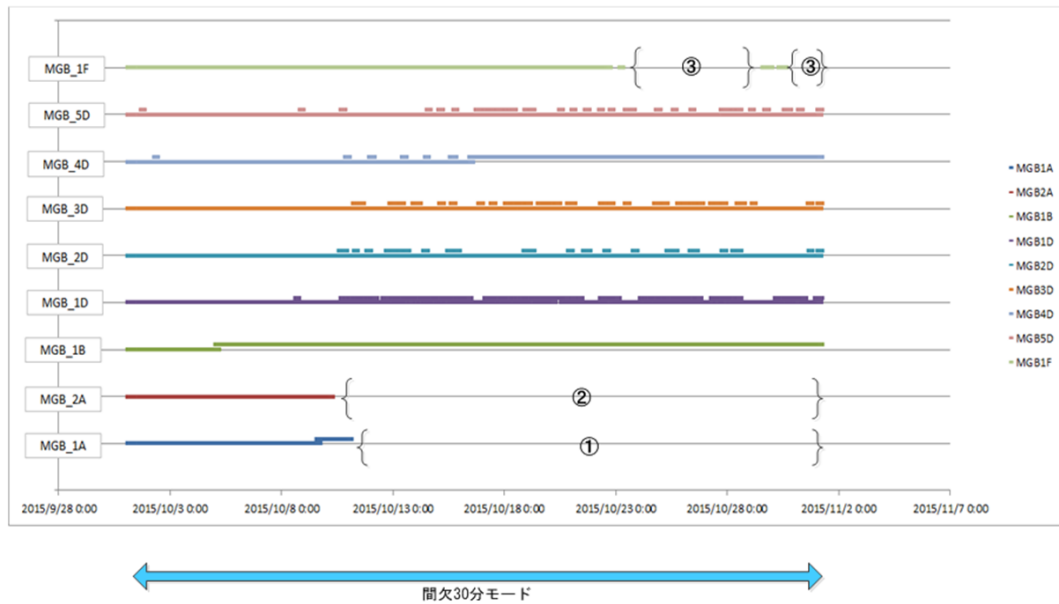
- a. 正常に取得されたデータ
- b. 上位通信が不安定なためクラウドサーバに送信されず、別途、親局（NC）内から回収したデータ（欠損データとはならない）
- c. ローカル通信が不安定なため親局に送信されず、別途、各子局（MGBの μ SDカード）から回収したデータ（欠損データとはならない）
- d. 欠損データ

データの欠損区間とは、データ回収を試みたもののデータ回収できなかった d. の区間を示す。各軸線より下側に取得済みの線が示されている箇所は、a. または b. のデータであることを示しており、上側に取得済みの線が示されている箇所は、c. のデータであることを示している。長期間に及んで欠損が発生した区間については図中にデータ欠損の推定要因を記している。無人計測期間中にシステムの信頼性を評価するため運転モードの切り替えを行っており、各時期の運転モードも図中に記載している。

2015年10月1日からシステムの基本運用モードの間欠モードで運転を開始した。

2015年10月のデータ欠損状況を図 8.2-34 に示す。 μ SDデータ（ファイルシステム）の破損に伴うMGBの異常動作により、MGB_1A、MGB_2Aの計測が停止した区間が発生している。また、システムの間欠運転周期に対してMGB_1Fの再同期が確立するまでの期間、計測データの記録に異常が発生した。2015年11月9日から11日まで1回目の点検調整作業を行い、間欠モードでの動作が安定していないと判断した。NCを連続運転することにより安定性の改善がはかれることを確認するため、運転モードの切り替えを行った。 μ SDカードへの通信ラインにノイズ対策も合せて行った。この作業後には μ SDデータ（ファイルシステム）の破損が確認されていない。

2015年10月 欠測状況



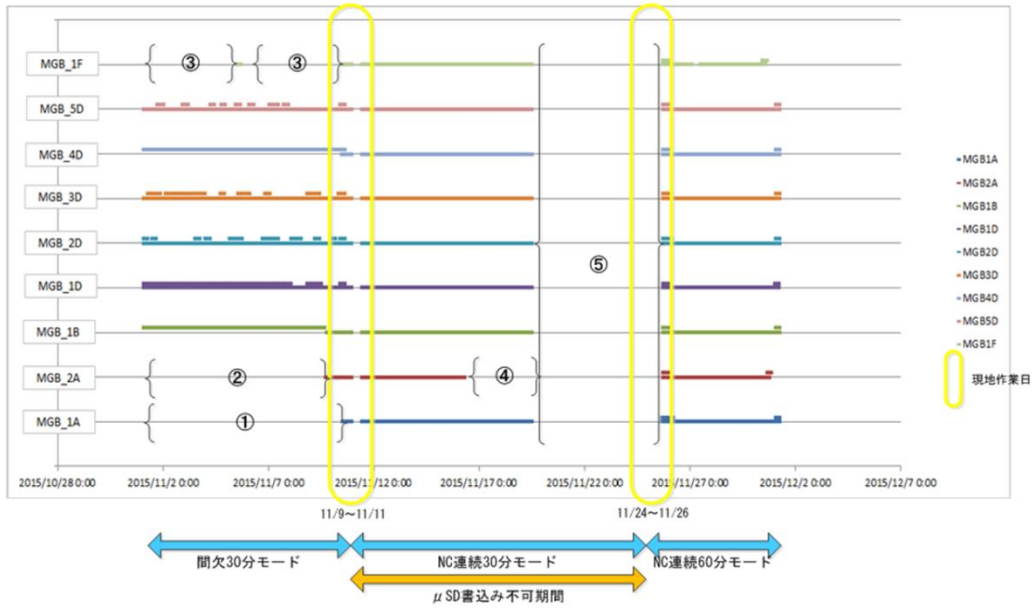
欠測要因

- ① MGB_1A : μ SD破損による異常動作により計測不能
- ② MGB_2A : μ SD破損による異常動作により計測不能
- ③ MGB_1F : NCとの同期通信不良による計測データの記録不良

図 8.2-34 2015年10月欠損状況

この点検調整後、ローカル通信伝送不良による欠損が MGB_2A において確認された。また、NC 連続運転による消費電力の増加に伴いバッテリー電源が低下し、システム動作が停止し、全計測データが欠損する区間が発生した (図 8.2-35)。

2015年11月 欠測状況



欠測要因

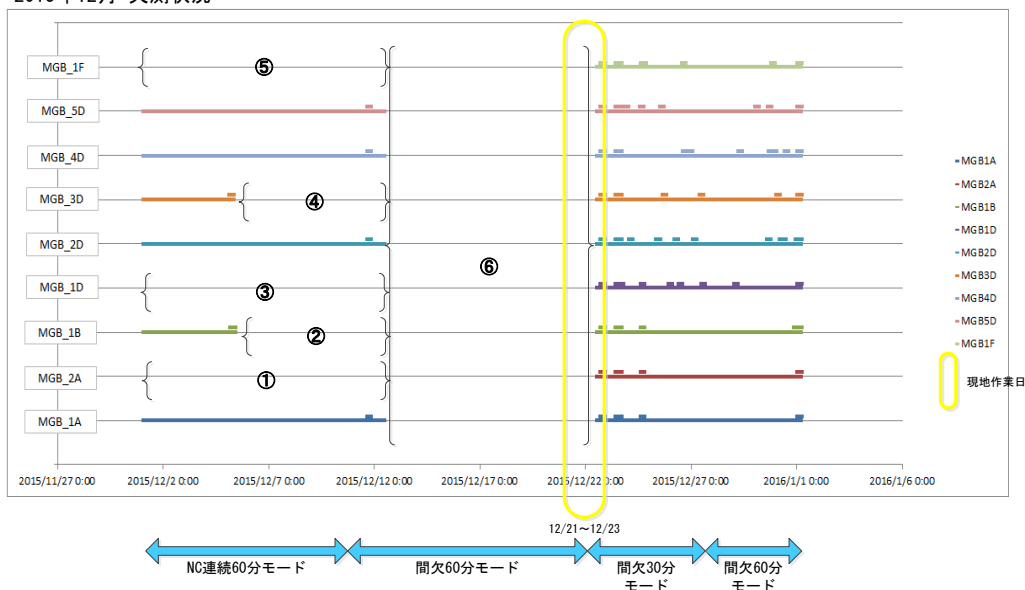
- ① MGB_1A : μ SD破損による異常動作により計測不能
- ② MGB_2A : μ SD破損による異常動作により計測不能
- ③ MGB_1F : NCとの同期通信不良による計測データの記録不良
- ④ MGB_2A : MGBのZigBeeモジュールの伝送不良（ネットワーク参加不能）により計測不能
- ⑤ 全MGB : バッテリー電源低下によるシステム動作停止により計測不能

図 8.2-35 2015年11月欠損状況

2015年11月24日から26日にかけて2回目の点検調整作業を行い、バッテリー電源低下によるシステム停止状態の復旧を行った。システムの時間管理用の部品に不具合があることが確認されたため、間欠運転モードの使用に障害があると判断し、引き続き、連続運転モードで運用を行うこととした（図8.2-35、図8.2-36）。

12月にMGB_2A、MGB_1B、MGB_1D、MGB_3D、MGB_1Fでローカル通信伝送不良による欠損が発生した（図8.2-36）。バッテリー電源低下の傾向が見られたため、システムが全停止する前に12月11日に消費電力を抑える目的で間欠運転モードに切り替えを行った。しかしながら、その後もバッテリー電源低下の影響でシステムが停止した（図8.2-36）。2015年12月21日から23日にかけて3回目の点検調整作業を行い、システムの時間管理用部品を交換した。また、ローカル通信の安定性に対する改善をはかるためZigBeeモジュールのハードリセット処理の実装・ファームウェアの変更を行い、間欠運転モードを再開した。

2015年12月 欠測状況



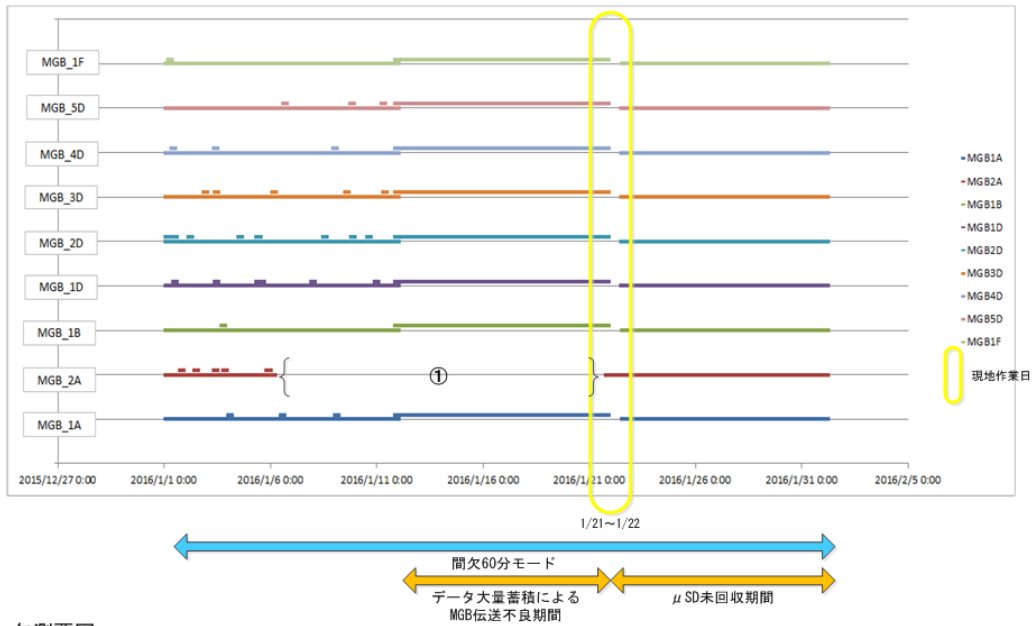
欠測要因

- ① MGB_2A : MGBのZigBeeモジュールの伝送不良 (ネットワーク参加不能) により計測不能
- ② MGB_1B : MGBのZigBeeモジュールの伝送不良 (ネットワーク参加不能) により計測不能
- ③ MGB_1D : MGBのZigBeeモジュールの伝送不良 (ネットワーク参加不能) により計測不能
- ④ MGB_3D : MGBのZigBeeモジュールの伝送不良 (ネットワーク参加不能) により計測不能
- ⑤ MGB_1F : MGBのZigBeeモジュールの伝送不良 (ネットワーク参加不能) により計測不能
- ⑥ 全MGB : バッテリー電源低下によるシステム動作停止により計測不能

図 8.2-36 2015年12月欠損状況

2016年1月11日、バッテリー電源低下によってNCが停止する状況が発生し、クラウドサーバのデータが更新されなくなった(図8.2-37)。1月21日から23日にかけて4回目の点検調整作業を行い、MGBのμSDカード内のデータを確認した。μSDカード内にはNC停止期間中の計測結果が残されており、各MGBは計測動作を続けていたことが確認された。積雪計の停止は対応するMGBの内蔵電池の消費が大きかったために発生しており、現地作業時に電池交換を行い復旧した。また、この現地作業のタイミングで、上位通信を消費電力が少ない3G通信に切り替えた。

2016年1月 欠測状況



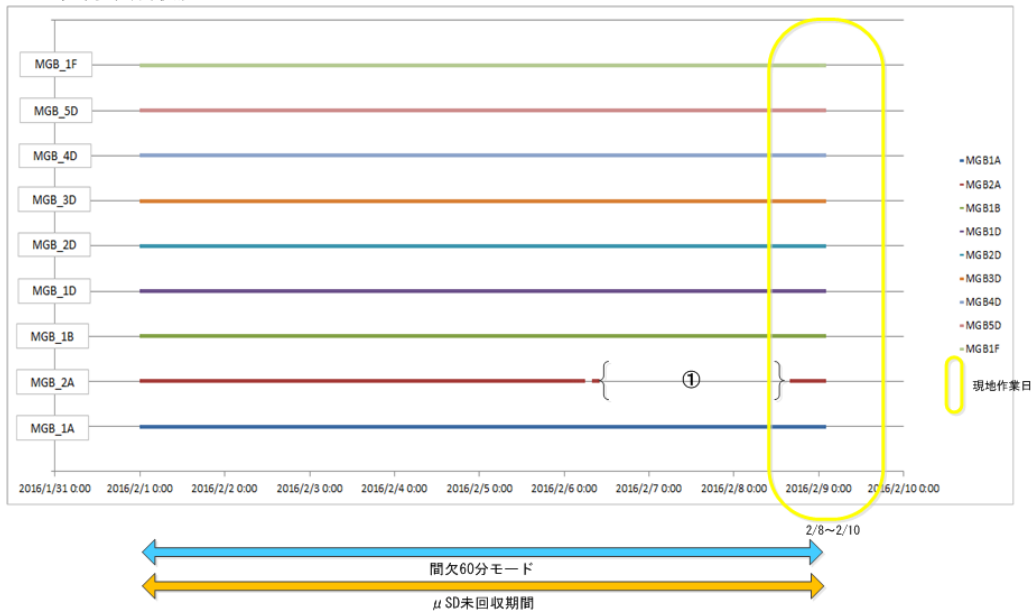
欠測要因

- ① MGB_2A : 内蔵電池の電圧低下により計測不能

図 8.2-37 2016年1月欠損状況

2016年2月6日に積雪計が内蔵電池の電圧低下により再停止した。2016年2月8日から10日にかけて5回目の点検調整作業を行った。対応するMGBの確認を行った結果、MGBの一部配線に接触不良があったため再配線を実施した。3G機器に交換以降はバッテリー電源の低下によるシステムの停止は確認されなかったため、以降、3G機器+間欠運転モードにて運用を行った。

2016年2月 欠測状況



欠測要因

- ① MGB_2A : 内蔵電池の電圧低下により計測不能

図 8.2-38 2016年2月欠損状況

MGB 別に各月のデータ欠損率を表 8.2-1 および図 8.2-39 にまとめた。2015年10月のデータを見ると、欠損率が高いのは MGB_1A、MGB_2A、MGB_1F となっているが、これらは NC から離れた箇所に設置されており、ローカル通信の感度不良等の影響が現れているものと考えられる。2015年11月、12月はバッテリー電源低下によるシステム動作停止の影響で全 MGB の欠損率が高くなっている。2015年1月以降については、ローカル通信の安定性改善効果が見られ、MGB_2A (積雪系) を除き欠損率が大幅に改善された。前述の通り、MGB_2A については、起動用の内蔵電池の消費が大きかったため、起動できなくなっていたことが確認されている。

表 8.2-1 データ欠損率

データ欠損率[%]	2015年10月	2015年11月	2015年12月	2016年1月	2016年2月	合計
MGB_1A	68.60887097	56.1875	33.27284946	3.174283154	0.017361111	37.72900763
MGB_2A	71.23655914	66.2337963	69.26747312	51.71594982	32.23958333	62.6240458
MGB_1B	0.454749104	27.96296296	55.98566308	3.210125448	0.034722222	20.5216285
MGB_1D	0.562275986	24.59722222	69.24507168	3.13172043	0.043402778	22.89599237
MGB_2D	0.44578853	24.45138889	33.27508961	3.149641577	0.164930556	14.33471162
MGB_3D	0.456989247	24.43055556	56.14023297	2.824820789	0	19.65648855
MGB_4D	0.454749104	24.48842593	33.26836918	2.827060932	0	14.25731552
MGB_5D	0.499551971	24.54398148	33.27508961	2.638888889	0.026041667	14.23929177
MGB_1F	32.72401434	59.65972222	69.29883513	2.894265233	0.104166667	38.49660729
合計	19.4937276	36.95061728	50.33651932	8.396306252	3.625578704	27.1950099

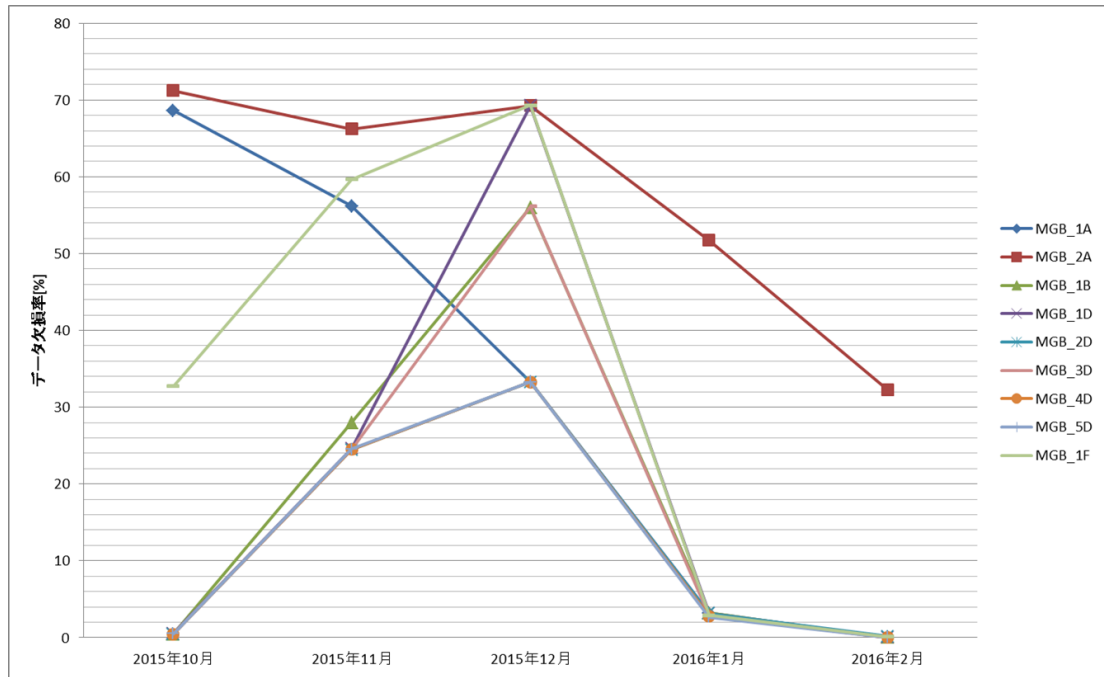


図 8.2-39 データ欠損率

8.3 システム信頼性

システム運用中に発生した計測の停止、データ欠損のトラブル対応を通して、システム信頼性向上のための課題と対応策を以下4つのカテゴリーに分類して整理した。

1. 電力
2. システム制御
3. 通信
4. 現地環境による影響

8.3.1 現地運用の中で発生したトラブルと課題

(1) 電力

① 衛星通信感度不良時の消費電力増

現地環境では衛星通信機器の通信感度が悪く、接続失敗・接続不安定に伴うデータの再送受信などが発生していることが確認された。間欠運転の60分周期としたときのNCの動作時間のばらつきを図8.3-1に示す。NCの動作時間にばらつきがあり、衛星通信感度不良時に通常よりも上位通信に時間がかかっていることを示している。

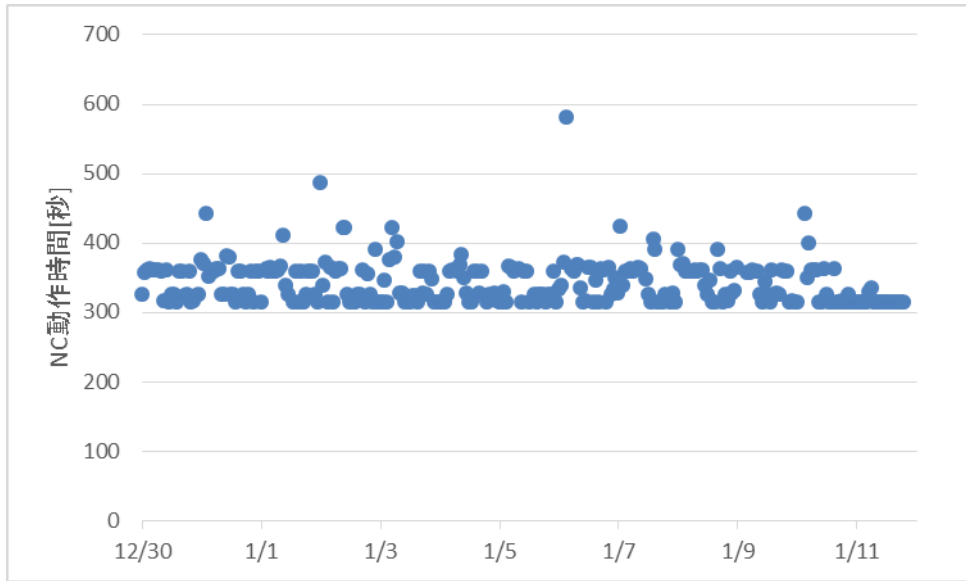


図 8.3-1 衛星通信接続状態による NC 動作時間のばらつき

図 8.3-2 は消費電流の推移をモニターしたグラフである。NC 動作中は消費電流が 1400[mA]程度まで大きくなる。1月4日(図 8.3-2)の例ではNCの起動時間が6分間だが、1月6日(図 8.3-3)のデータでは起動時間が10分程度まで長期化していることを示している。

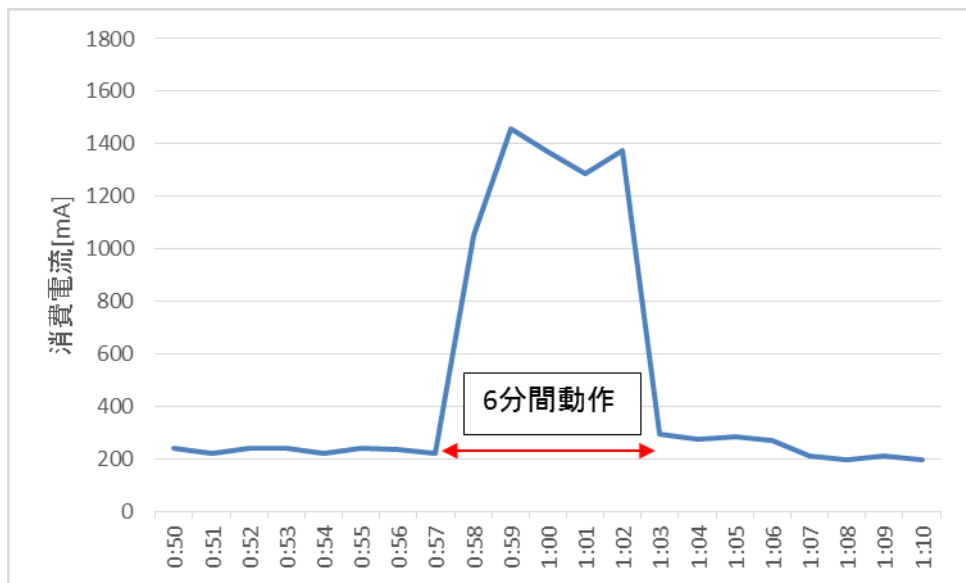


図 8.3-2 NC 起動時の消費電流の推移 (2016/1/4)

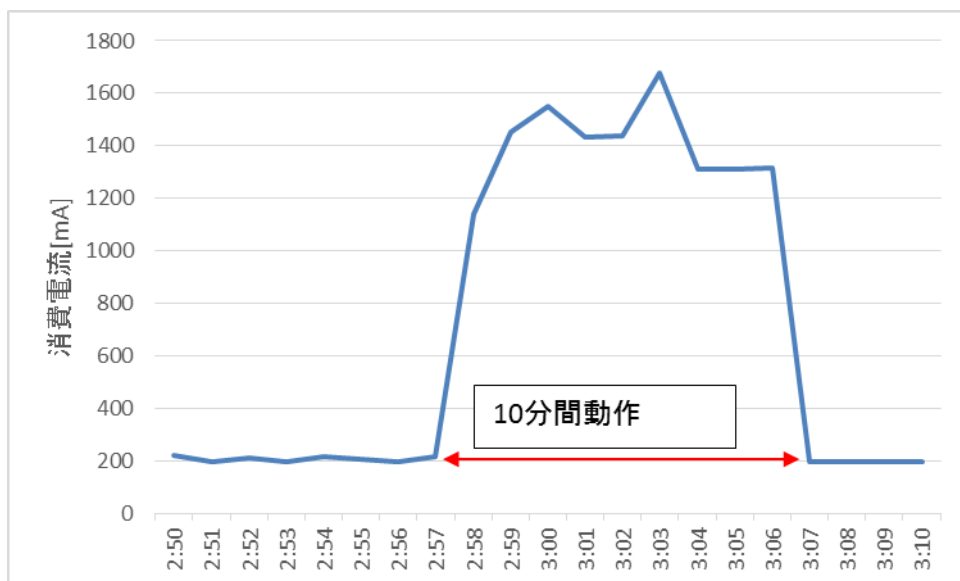


図 8.3-3 NC 起動時の消費電流の推移 (2016/1/6)

特にカメラ画像の送信、動作パラメータの取得による上位通信の時間が延びることによって、NC の動作時間が延び、消費電力が増加していることが確認された。また、使用機器には通信不良時、送信する電波を増幅することで感度改善を図る機能が備わっているが、その際通常の通信時よりも消費電力が大きくなる。これらの現象・機能によって設計時に想定した以上の電力消費が発生し、バッテリー電圧が低下してシステムが停止した。

② バッテリー電圧低下による測定停止

衛星通信不良や電源系設計時に想定していなかった NC のみ連続運転でのシステム運用を行った結果、バッテリー電圧が低下した。2015 年 11 月 19 日のバッテリー電圧と区間圧力の推移を図 8.3-4 に示す。バッテリー電圧低下に伴い 12V 電源を使用する区間圧力のデータが正しく計測できなくなった。正常値：約 1~2[bar]であるところ、バッテリー電圧の低下時に異常値：約 10[bar] を示しており、その後システムの全停止に至った。

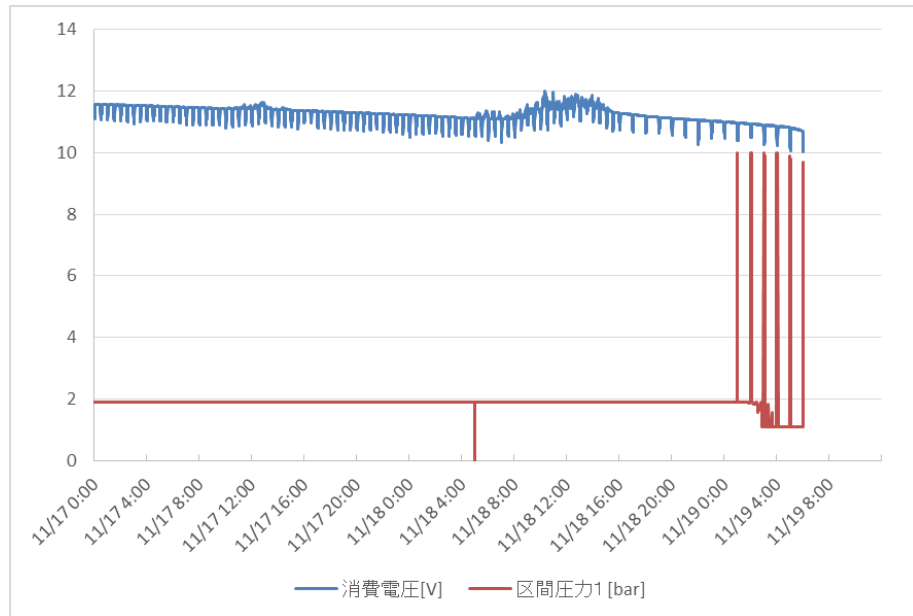


図 8.3-4 バッテリー電圧と区間圧力計測結果

設計では電圧低下によるシステム停止の発生を考慮していなかったため、バッテリー電圧が十分なレベルに回復してもシステムは自動で復旧せず、手動でシステムの再起動を行う必要があった。このため、システム停止から復旧作業までデータ取得が行われない結果となった。

(2) システム制御

③ ローカル通信伝送不良によるシステム安定性低下

システムは各機器が同調して動作しているが、機器間の時刻データずれが発生した場合、親局が通信可能なタイミング以外に子局から親局へのアクセスが発生することがある。このアクセスにより上位通信が失敗するだけでなくシステム動作が不安定になる事象が発生した。親局と子局の間のハンドシェイク（通信接続手続き）に失敗した際にシステム上の異常状態が発生していると考えられる。

この事象に対してはネットワークコンピュータのみ連続運転にすることで安定性が改善することが確認できた。

間欠運転モードにおける改善策として、

- ・通信モジュールのファームウェアの変更
- ・ローカル通信におけるルータ機能を MGB_TK の通信モジュールに追加する

などの対応を行ったが原因の特定に至らず、解析が引き続き必要である。

④ ローカル通信環境異常の自立復旧機能の追加

ローカル通信の通信異常が発生した際に通信環境を自立的に復旧させる仕組みがなく、異常の発生に伴ってデータが欠損する事象が発生した。通信が行えなくなった際にローカル通信機器のソフトウェアリセットを行う機構を設けたが、通信不具合は復旧できなかった。原因としてソフトウェアリセットのみでは通信機器のハードウェア部分（図 8.3-5 の②）がリセットできなかったためと考えられた。その後、通信モジュールのリセットピンを制御してハードウェアリセットが実行されるようにプログラム変更を行うことにより復旧が正常に行えるようになり、システムの安定性を向上させることができた。

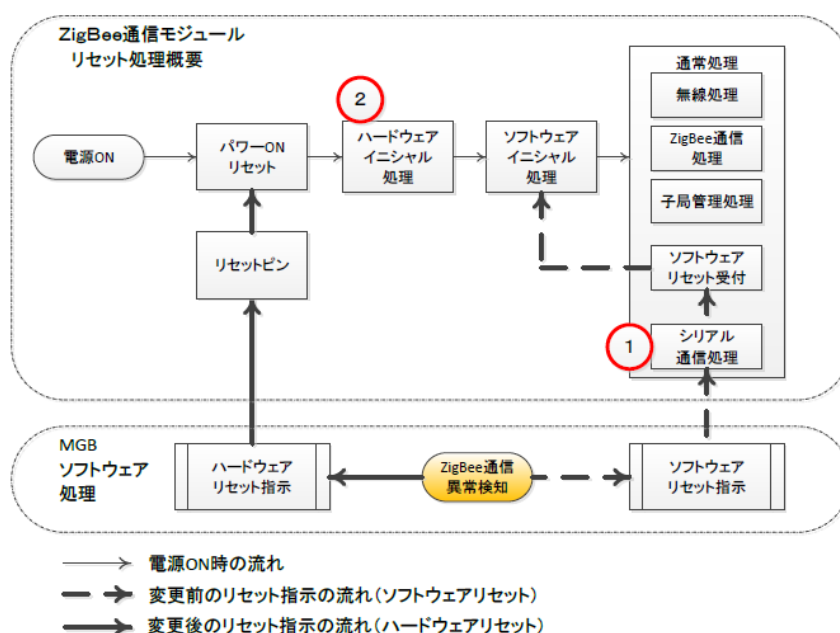


図 8.3-5 ローカル通信機器のリセット処理変更イメージ

⑤ MGB 内大量データ保持状態におけるデータ送信制御の改善

バッテリー電源の低下に伴う NC 停止によって、MGB 内に大量のデータが保持される事象が発生した。間欠運転モードでは NC の動作時間が設定されているため、MGB の μ SD 内に大量の計測データが蓄積した場合、NC 動作中に計測データの送信を完了できない。MGB は μ SD 内に蓄積した計測データの送信が完了しないため、クラウドサーバへの送信要求を発行できず、その結果、クラウドサーバのデータが更新されなくなった。

図 8.3-6 に MGB の送信処理のフローチャートを示す。更新停止時のソフトウェア処理では μ SD 内に蓄積した計測データをすべて NC へ送信完了した時にクラウドサーバへの計測データの送信要求を発行する。そのため、MGB が μ SD 内に蓄積した計測データの送信を途中で

失敗した場合にはクラウドサーバへの計測データの送信要求が発行されない。

この対策として、1回当たりのデータの送信回数の上限を上位通信周期の直近2周期分とするようにプログラムの変更を行った。その結果、NC動作中にMGBが計測データの送信を完了できるようになり、クラウドサーバのデータが更新されない事象が改善された。しかし、本対策では2周期分以上のデータが蓄積された場合にクラウドサーバへ送信されないデータが発生するため、再送信処理について引き続き検討が必要である。

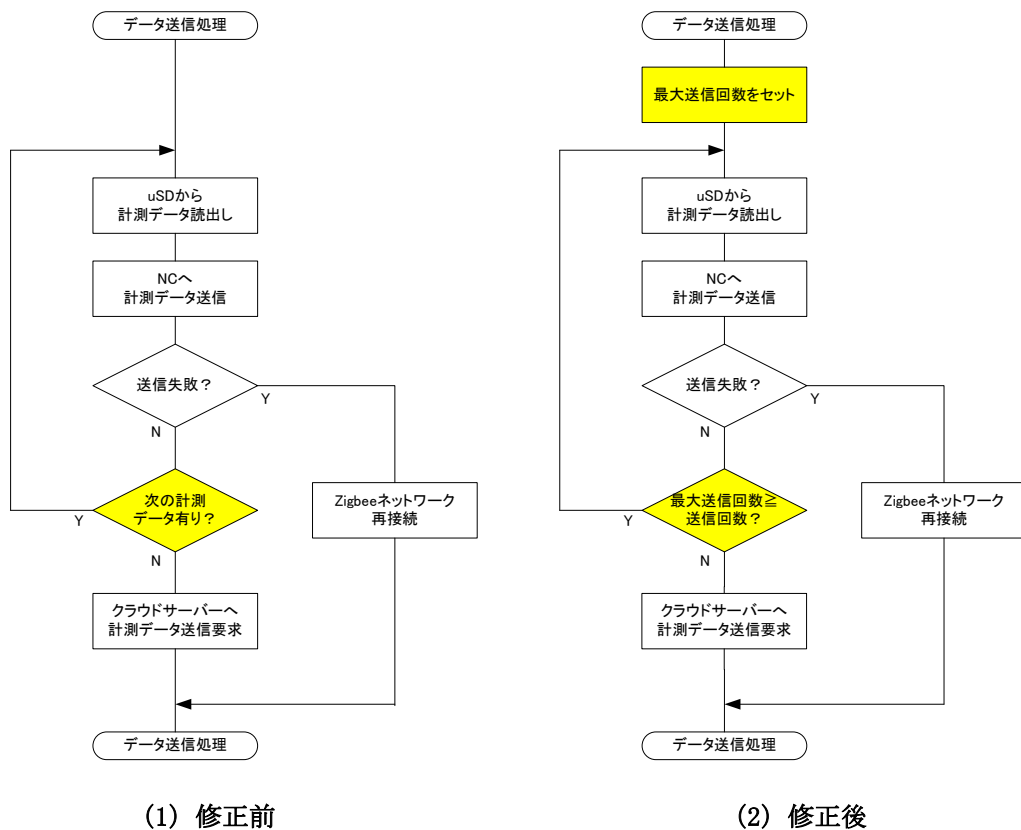


図 8.3-6 MGB の送信処理

(3) 通信

⑥ 上位通信不良時のデータ送信制御の追加

現地衛星通信の通信感度が悪く、上位通信（各種計測データの送信）の接続失敗が頻繁に発生した。上位通信に失敗した場合、その通信のタイミングで送信しようとしていたデータがクラウドサーバ上に蓄積されない状態となってしまう。

自動的に未送信のデータを再送信してクラウドサーバ上のデータベースの欠損を補完する機能を有していないため上位通信に失敗した時のデータは親局内に保持された状態になってしまう。その場合、遠隔操作による親局内のデータの回収、クラウドサーバ上データ

ベースへのデータの追加を行うことが可能である。今回はシステム運用において手動で未送信データの回収を行った。

(4) 現地環境による影響

⑦ 太陽光パネルへの着雪による発電量低下

冬期積雪が予測される地域では太陽光パネルへの着雪に配慮する必要がある。本システムの設置においては稚内メガソーラーにおける事例等を参考に設置角や設置方法について検討を行ったが、実際には着雪が発生し、日照があっても期待した発電量を得ることができない事象が発生した。

11月と12月の日射量と太陽光パネルの発電電流の関係を図 8.3-7 および図 8.3-8 に示す。11月のグラフでは日射量と太陽光パネルの発電電流に比例関係があることが分かる。しかし、12月のグラフでは日射量に対する太陽光パネルの発電電流の比例関係とともに、発電電流が比例部分より下回るケースが増加している。図 8.3-9、図 8.3-10 には2015年11月12日（晴天時）と2015年12月25日（積雪時）の日射量と太陽光パネル発電電流の関係を示した。2015年12月25日には太陽光発電電流がほとんど発生していない。図 8.3-11 に2015年12月25日の太陽光パネルの着雪状態の写真を示す。日射計には着雪していないが太陽光パネルには着雪していることがわかる。これらのデータは、降雪時期には太陽光発電パネルへの着雪により日射量データから期待できる発電量が得られないことがあることを示している。

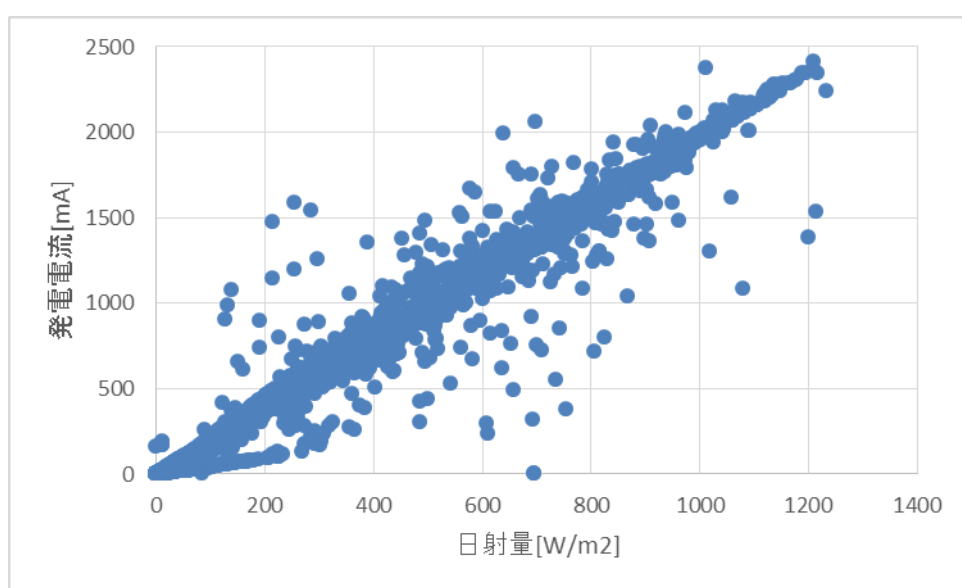


図 8.3-7 2015年11月の日射量と太陽光パネルの発電電流の関係

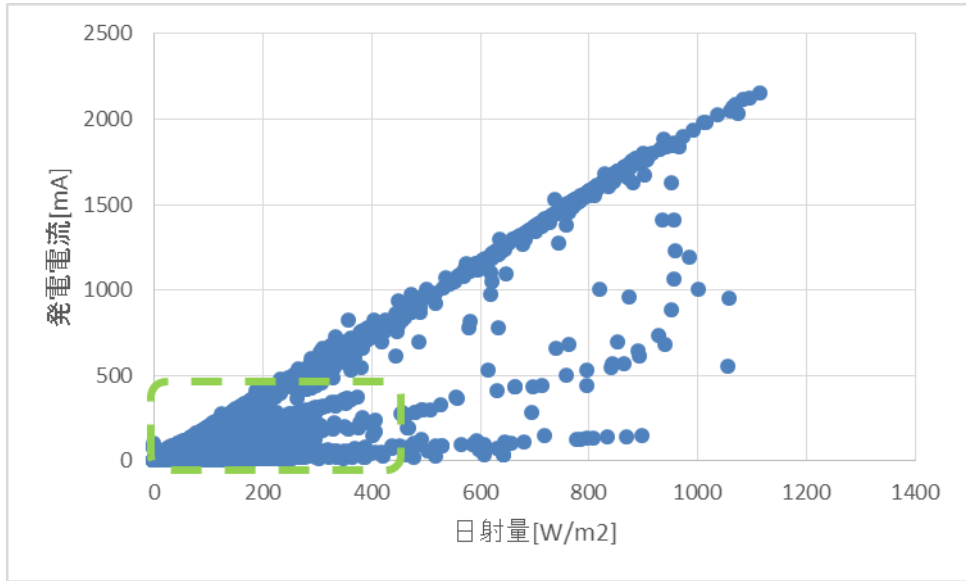


図 8.3-8 2015 年 12 月の日射量と太陽光パネルの発電電流の関係

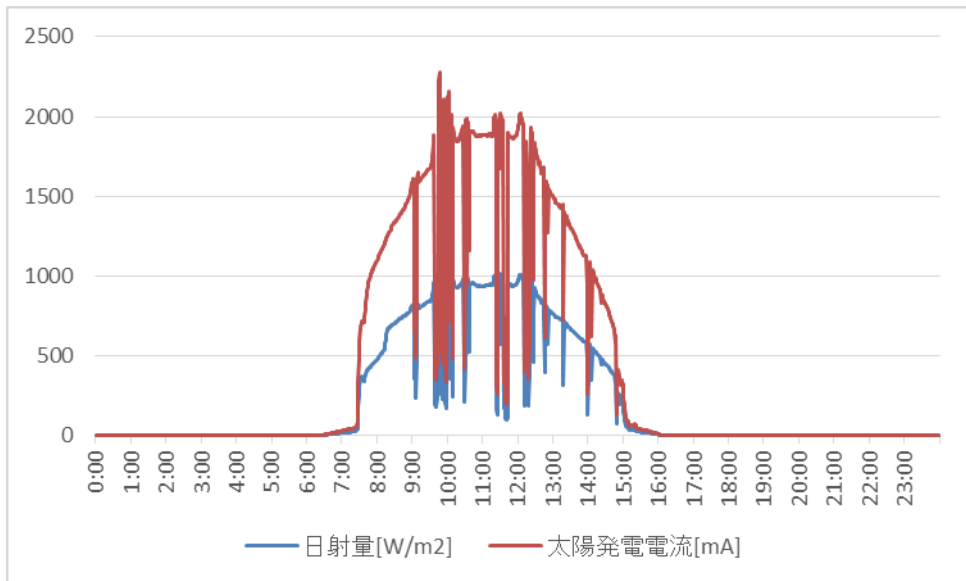


図 8.3-9 2015 年 11 月 12 日の日射量と太陽光パネルの発電電流

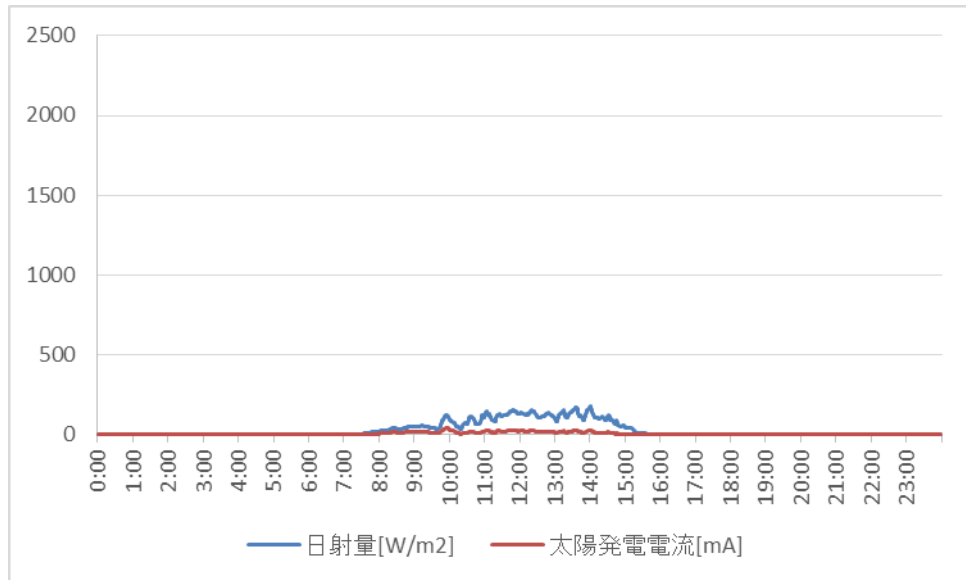


図 8.3-10 2015 年 12 月 25 日（積雪時）の日射量と太陽光パネルの発電電流



図 8.3-11 2015 年 12 月 25 日（積雪時）の太陽光パネルの着雪状態

⑧ 積雪計の測定アルゴリズムの改善

積雪量計測では計測結果のばらつきが大きく、安定した計測値を得られなかった。システムに用いている超音波式の積雪計には一般的に以下のような問題があるとされている。

- ・積雪面が水平でない場合、音波の反射が送受波器に届かないことがある。
- ・新雪面の下に密度の高い従来雪面がある場合、音波が新雪面を突き抜けて従来雪面をとらえてしまう。
- ・強風時に音波が流され計測できないことがある。

安定した積雪データをとるためには複数回計測しトリム平均を取るなどして、計測結果を安定化させる処理が必要と考えられる。

なお、レーザー式積雪計には、

- ・深い霧が発生するなど、光の散乱が極端に大きい場合、計測できないことがある。
- ・晴天時（積雪面に太陽光が反射するようなどき）など背景輝度が高い場合、計測できないことがある。
- ・光源に時間寿命がある。

などの課題、特徴がある。このため、本システムには超音波式積雪計を用いている。



図 8.3-12 積雪計

⑨ 雨量計の積雪時測定結果の取り扱い検討

使用している雨量計は雨水の重みによるカップ（雨水受けの器）の上下動の回数で雨量を測っている。積雪によってカップの上部がキャッピングされてしまう状況になった際、雨量の測定が行えなくなった（図 8.3-13）。積雪・凍結が想定される地域では一般に雨量計を温めることでキャッピング防止やカップの可動性確保しているが、本システムにおい

ては電源インフラ設備が整っていない地域での運用を想定した省電力設計を行っており、加温対策は適用しがたい。気温がマイナス以下に下がる厳寒期、積雪期を有するモニタリング地域における雨量測定は課題の一つである。



図 8.3-13 積雪環境における雨量計

(5) その他の不適合

設計上の不適合によるその他のトラブル事例を以下に掲げる。

⑩ 時間管理用の部品のトラブル

システムに使用していた時間管理用の部品が現地気温低下に伴い異常動作を起こすことでシステム内の各機器が保持している時刻データにずれが発生した。その結果、間欠動作時に機器間の同期が取れなくなり、通信・測定が正常に行えなくなるというトラブルが発生した。該当部品を動作適応範囲のより広い製品に変更したことにより以降のトラブル発生を回避できた。

間欠動作による省エネルギー運用が本システム設計の特徴であり、システム機器の間欠動作を同期させるシンプルな方法あるいは信頼性のある時間管理機器の採用が重要であることがあらためて確認できた。

⑪ μ SD カードデータ（ファイルシステム）の破損

μ SD カードのファイルシステムが破損するトラブルが発生したが原因を特定できなかった。通信ラインへのノイズ対策（シールド処理）、 μ SD カードのメーカー変更の対策を行った結果、ファイルシステムの破損は確認されていないことから、今後のシステム設計

に際しては通信ラインへのノイズ対策と μ SD カードスペックを今回のシステムと同等のものにしておく必要がある。

8.3.2 無人計測システムの発生電力の検証

太陽光パネルへの着雪などの影響を受けて、実運用における発生電力量は、設計時の予想発生電力に対して差分が生じていると考えられる。発電システムの実測データ、現地気象データを基に、発生電力についての検証を行った。

2013年気象データ、2015年気象データ（気象庁、および、NEDO ホームページより入手）に基づく発電予測（設計時予測式）、実測発電量を図に示す。システム設計では、幌延町の気象データが無いため、発電量予測は豊富町のデータを基に行っている。

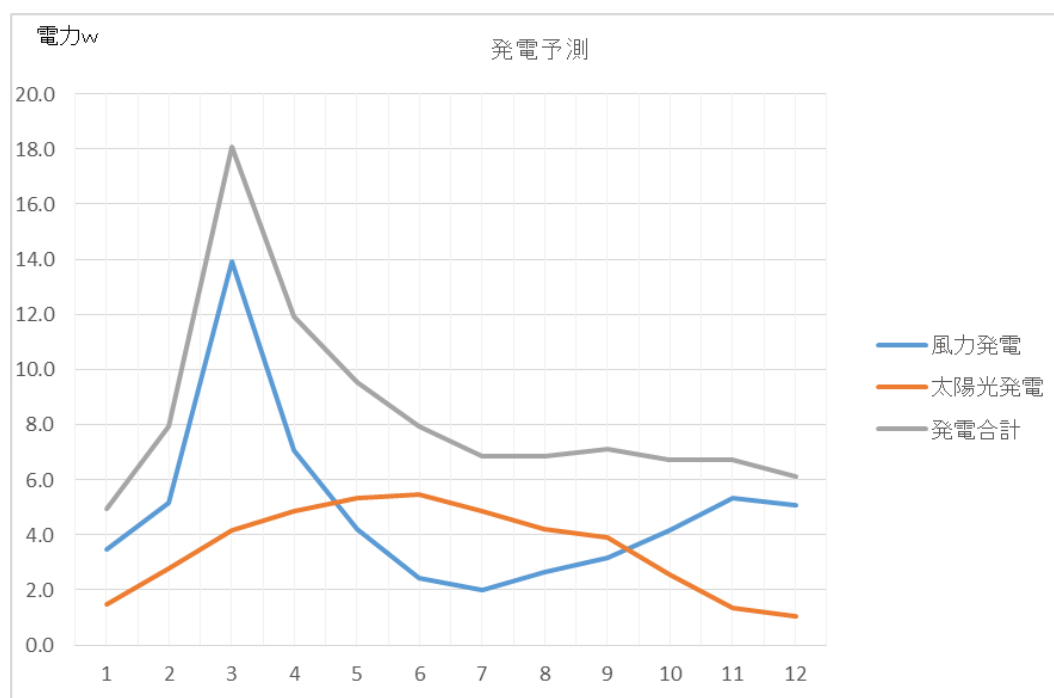


図 8.3-14 2013年気象データ（豊富町）からの発電予測

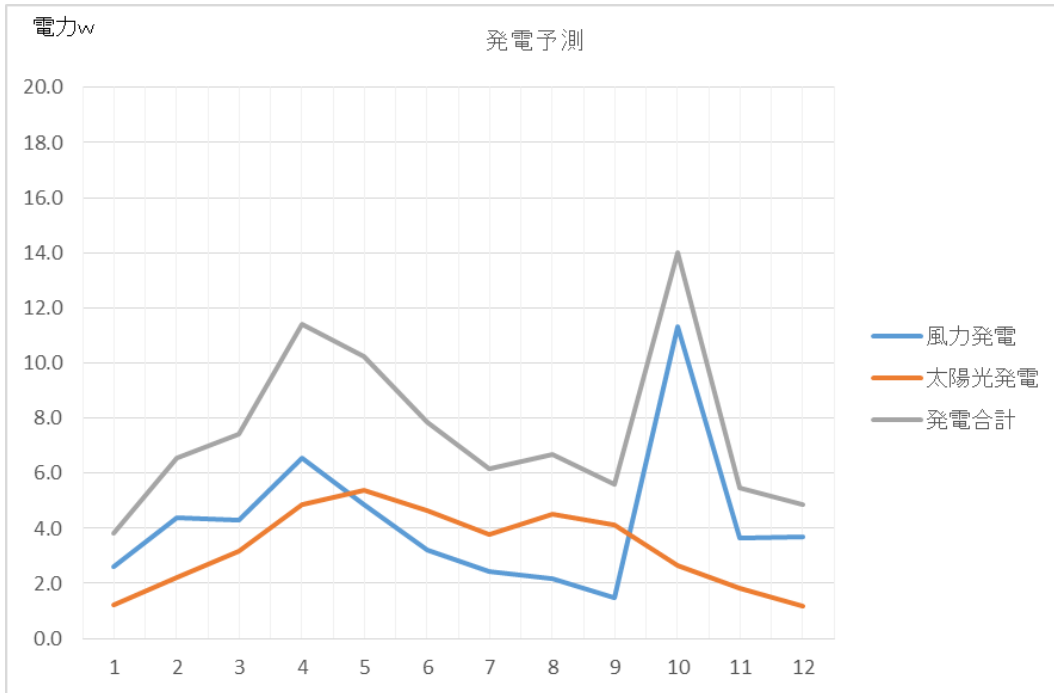


図 8.3-15 2015 年気象データ（豊富町）からの発電予測

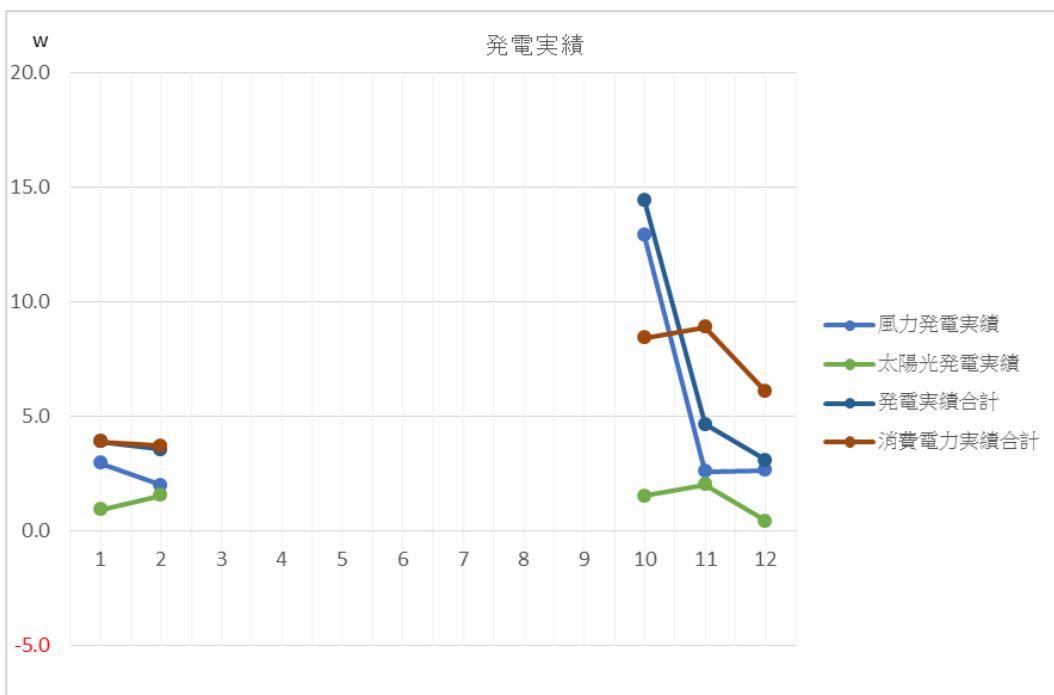


図 8.3-16 無人計測システム発電実績

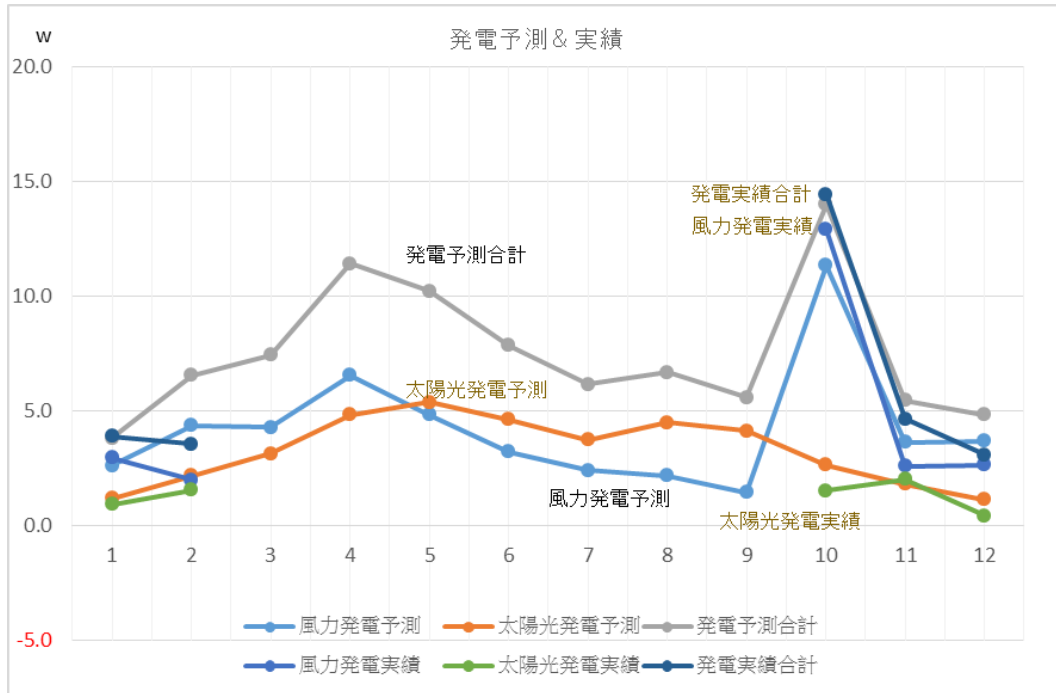


図 8.3-17 2015 年気象データからの予測と実績の比較

2015 年データに基づく予測と実測発電量の推移には近い傾向が見られ、気象データからの予測方法としては、妥当であると考えられる。一方で、2013 年データに基づく予測と 2015 年データに基づく予測には大きな差があり、システム設計時にはできるだけ長期間の気象条件を用いて電源の評価を行う必要がある。

風力発電、太陽光発電の 2015 年データに基づく予測と実績の差分（誤差）を図 8.3-18、図 8.3-19 に示す。図中の黄色の線は各発電機の定格出力を示しており、予測誤差が定格出力に対して小さく抑えられていることが分かる。このことから、システム設計における発電量予測方法は妥当な方法と考えられる。

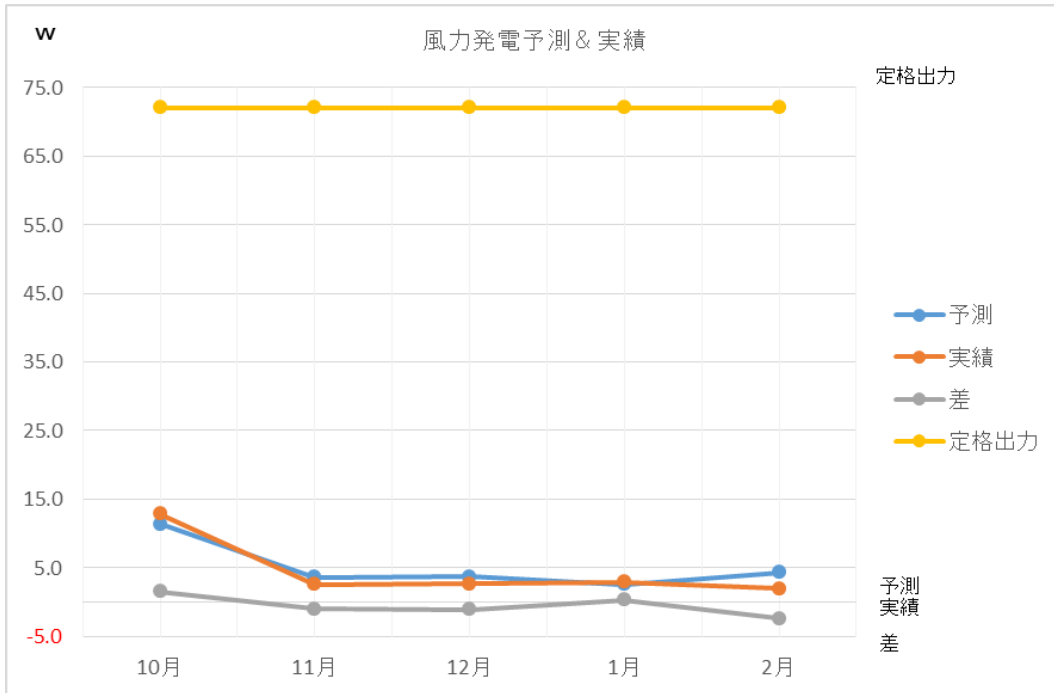


図 8.3-18 風力発電予測と実績の誤差

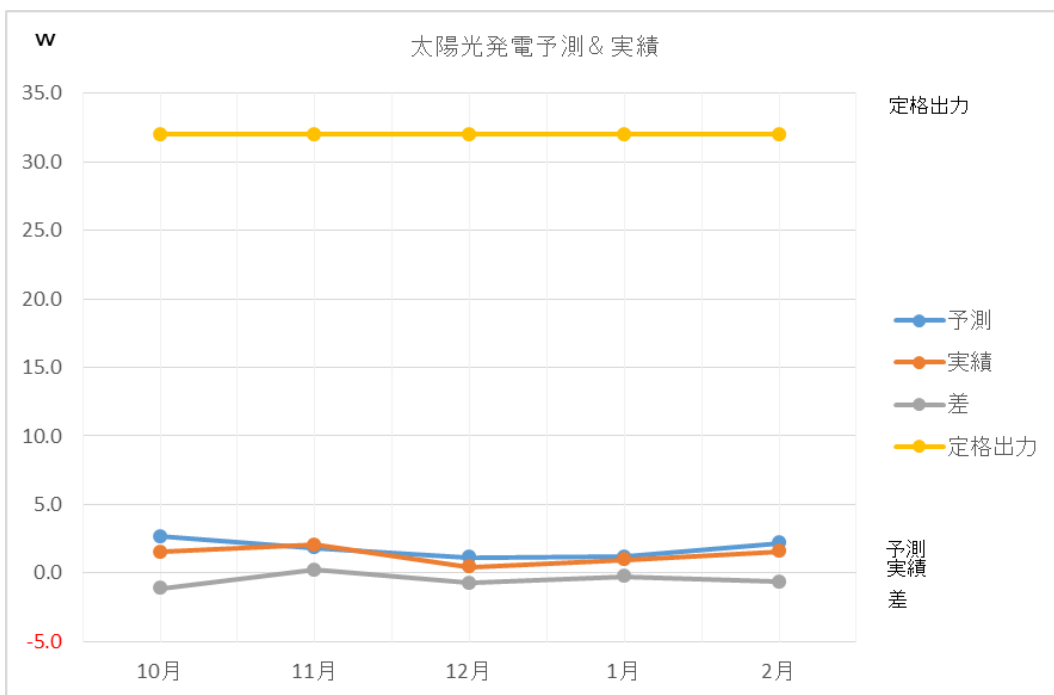


図 8.3-19 太陽光発電予測と実績の誤差

誤差の発生要因を分析するため無人計測システムで実測した風速データと気象庁のデータを比較した(図 8.3-20)。豊富町のデータに対して、幌延町の実測値は風速が低くなっている。これが豊富町

のデータを基にした設計値よりシステム実運用時の発電量が低くなった要因の一つと考えられる。

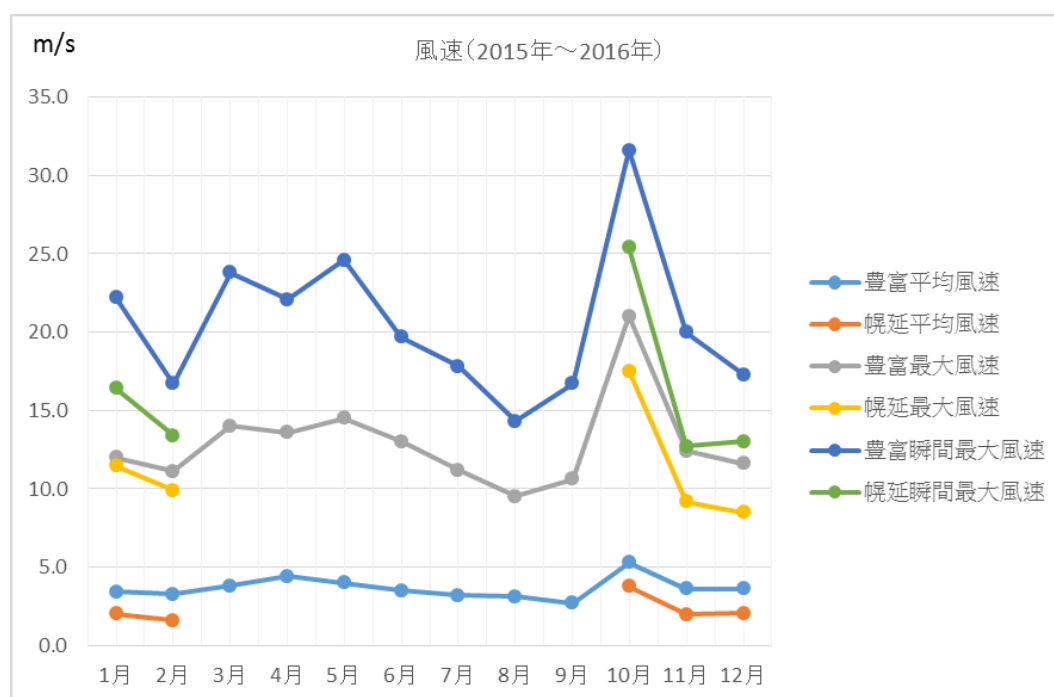


図 8.3-20 気象データと現地システムの実測値比較 (風速)

太陽光発電は着雪の影響を受けて発電量が低くなったと考えられるが、着雪状況をモニターする仕組みが備えられていないため、厳密に評価することができなかった。気象データに基づきシステム電源(太陽光)の設計を行ったが、気象データと実際の気象との差を回避することは困難なことから、システム設計に際しては蓄電系も含めて、設計時の想定と実運用の差を吸収できる冗長的な電源システムにしておくことが推奨される。

8.3.3 バッテリーの検証

電源システムの設計では発生電力予測と消費電力予測からシステムを構成する各機器の選定を行った。バッテリーおよび電源システムの検証を行うにあたって、まず、消費電力の予測の妥当性を検証した。

表 8.3-1 に現地システムの各機器の消費電力の実測値をもとに計算した消費電力を示す。間欠運転モードの消費電力については、機器の消費電力を実測値に変更したことに加えて、各機器の起動時間についても実測値を元に計算を行っている。機器の起動時間は、実際の運用状態を見ながら、機器間の通信等が問題なく行えるよう実機ベースで調整を行っている。設計時の予測結果との比較を表 8.3-2 に示す。連続運転時の消費電力は実測値の方が少なくなっている。各機器の消費電力が連続運転の運

用では予測より少なかったためである。一方、間欠運転モードでは設計時の予測に対して消費電力が大幅に増加している。間欠運転に伴い運転中の各機器の消費電力が少なくなっている反面、機器の起動時間の長期化が消費電力の大幅な増加の原因と考えられる。衛星通信機器においては通信感度不良時に再接続処理・発信電波の強化処理などが行われ、表 8.3-1 の値よりもさらに大きな電力が消費されるものと推測される。

実績値を元に算出した間欠運転モードの消費電力に対する発電実績の推移を図 8.3-21 に示す。衛星通信を用いた場合の消費電力に対して 12 月以降は発電量が不足状態になっていたことが分かる。12 月 24 日から 1 月 21 日まで衛星通信を用いた間欠運転での調査を行ったが、1 月 11 日にバッテリー電圧低下によって NC が停止した。発電量の不足する期間ではあったが、短期間で機器の停止に至ったことから衛星通信機器の通信感度不良改善機能による消費電力増加の影響が大きかったと考えられる。

3G 通信によるシステム運用では 12 月と 2 月に発電量が不足しているが、1 月 23 日から 2 月 14 日の運用中にバッテリー電圧低下による障害は発生しておらず、検証期間としては短期間ではあるが、バッテリー容量に関する問題はなかったと考えられる。

表 8.3-1 実測値に基づく消費電力計算結果

■ 実測値から計算したシステムの消費電力

機器	メーカー	型式	衛星		3G/4G		備考
			数量	消費電力 (w)	数量	消費電力 (w)	
衛星通信機器	NTT docomo	ワイドスターII	1	15.30	0	15.30	遠隔監視装置との通信
3G/4Gルータ	ゼネテック	HSPA-450C	0	2.40	1	2.40	遠隔監視装置との通信
ネットワークコンピュータ	四国総研	新型NC	1	2.25	1	2.25	Web機能搭載コントローラ
HUB	アドバンテック	EKI-2525I-AE	0	2.40	1	2.40	
ネットワークカメラ	パナソニック	BB-SW175A	1	2.58	1	2.58	Webカメラカメラ
信号変換&通信ユニット	東洋電機	MGB10-RRN	2	0.008	2	0.008	降雨・積雪量・風向・風速・気圧・日射量
信号変換&通信ユニット	東洋電機	MGB10-RRN	1	0.008	1	0.008	発電電力・消費電力
信号変換&通信ユニット	東洋電機	MGB10-RRN	5	0.008	5	0.008	区間圧力・パッカー圧力・ミニパッカー圧力
信号変換&通信ユニット	東洋電機	MGB10-RRN	1	0.008	1	0.008	タイムキーパー
圧力センサ	KELLER	PAA-22S	3	0.30	3	0.30	ミニパッカー圧力
圧力センサ	KELLER	PAA-23S	3	0.30	3	0.30	パッカー圧力
圧力センサ	KELLER	PAA-23S	3	0.30	3	0.30	区間圧力
降雨センサ	Davis	#07852	1	0.00	1	0.00	
積雪センサ	オーミック電子	OM7-1S	1	0.30	1	0.30	
風向・風速計	Davis	#07911	1	0.00	1	0.00	
気圧センサ	STマイクロ	LPS331AP	1	0.00	1	0.00	
日射センサ	Apogee	SE-SP215	1	0.00	1	0.00	
DCDCコンバータ	Cosel	SUS3123R3	2	0.03	2	0.03	0.06 12V→3.3V(MGB用電源)
DCDCコンバータ	Cosel	SUS6123R3C	1	0.60	1	0.60	0.60 12V→3.3V(MGBTk用電源)
DCDCコンバータ	Cosel	SUS31205	1	0.03	1	0.03	0.03 12V→5V(センサ用電源)
DCDCコンバータ	Cosel	MGS151205	1	1.80	1	1.80	1.80 12V→5V(NC用電源)
DCDCコンバータ	Cosel	SUS31212	1	0.60	1	0.60	0.60 12V→12V(センサ用電源)
			連続運転	26.29	連続運転	15.79	W
				630.90		378.90	Wh・day
			間欠運転	4.43	間欠運転	3.64	W
				106.34		87.44	Wh・day

※間欠運転の条件
通信周期 60
センサ動作周期 1

表 8.3-2 上位通信×運転モード 消費電力比較

■消費電力比較

	衛星		3G/4G	
	設計時予測	実測値計算	設計時予測	実測値計算
連続運転	28.11	26.29	20.01	15.79
間欠運転10分	2.81	2.81	2.00	2.00
間欠運転60分	0.47	4.43	0.33	3.64

赤字: 設計時の予測データより再計算したデータ

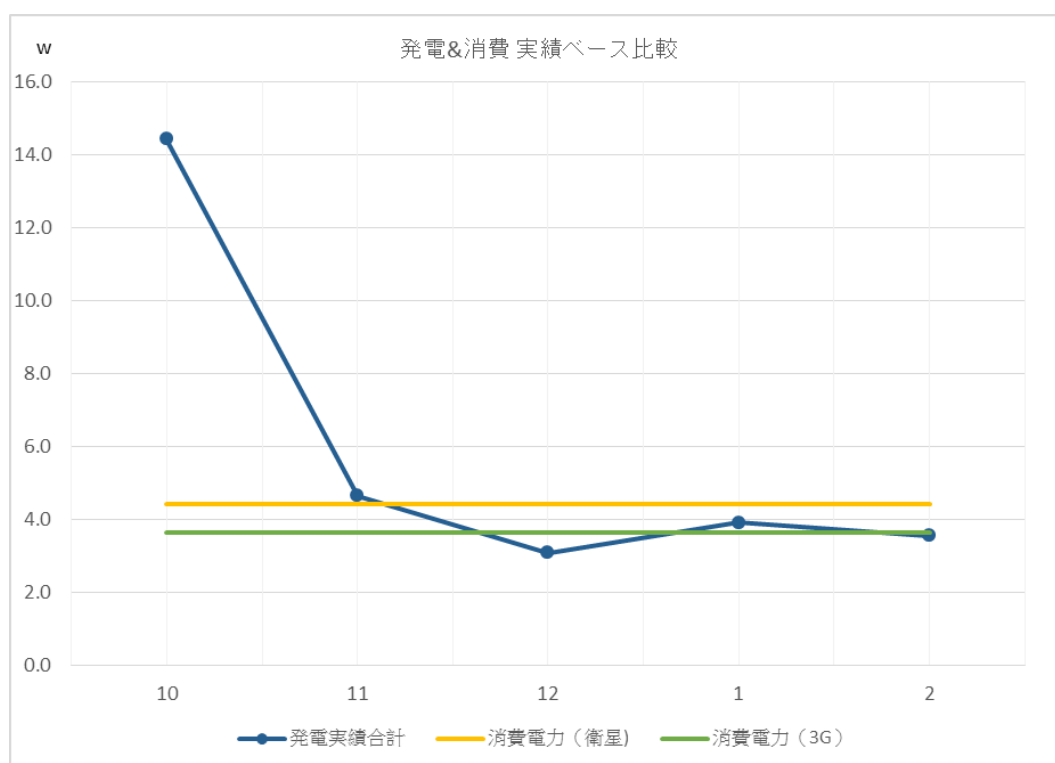


図 8.3-21 発電量および消費電力比較

3G 通信+間欠動作での運用は当初想定していた消費電力に近く、消費電力の変動も少なかったためバッテリー電圧不足によるシステム停止は発生しなかった。一方、衛星通信を用いた間欠動作での運用では当初想定以上の電力量を消費したため、バッテリー電圧低下による機器 (NC) 停止が発生した。この問題に対してはバッテリー容量を増加させることで電圧低下によるトラブルの発生を緩和させることができると考えられる。しかしながら、通信不良による消費電力の増加はその時々通信環境に依存して大きく変化することが推測されることから過大なバッテリー設計となるおそれがある。また、発電設備とのバランスが崩れるおそれがある。バッテリーの選定ならびに電源システムの設計においては、通信不良時を想定したシステムの運用方法・制御方法を検討し、消費電力が過剰に増加しないように丁寧に設計することが望ましい。

8.3.4 モニタリングの間欠動作ロジックの安定性検証

本システムは外部電源のない地域で自立式の発電装置での運用を想定しているため間欠運転を基本動作とした設計を行っている。間欠運転中に機器間のタイマーずれでローカル通信ができなくなる事象が発生した。図 8.3-22 にローカル通信停止事象が発生した際の、システムの制御フローを示す。

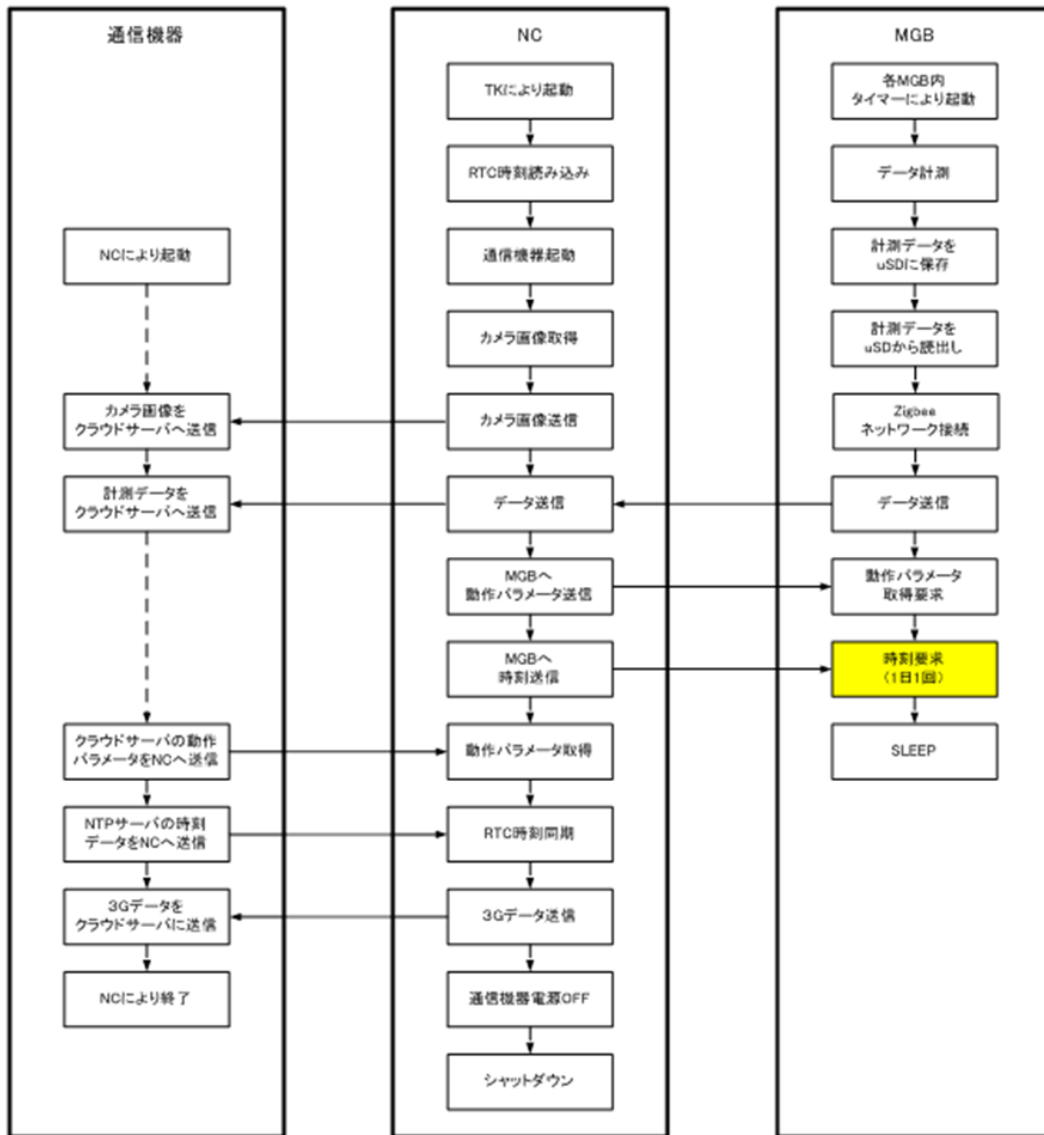


図 8.3-22 ローカル通信停止時のシステム制御フロー

システム運用当初、NC は上位通信周期毎に NTP サーバーとの時刻同期を行っており、MGB-NC 間は 1 日 1 回 (00:00:00 のタイミング) のみ時刻同期を行うロジックとしていた。その時刻同期のタイミングに MGB が NC との通信に失敗すると次の日の 00:00:00 のタイミングまで時刻同期を行わない。MGB の内部時計は 1 日当たり数秒ずれるため、時刻同期に数回連続して失敗すると MGB と NC との制御タイ

ミングがずれる。その結果、ローカル通信が停止したと考えられた。

この問題に対して、図 8.3-23 のように NC の時刻同期と同様、MGB-NC 間についても、上位通信周期毎に時刻同期を行うように MGB のソフトウェアのロジック修正を行った。その結果、MGB-NC 間の時刻のずれによるローカル通信が停止するトラブルは改善した。

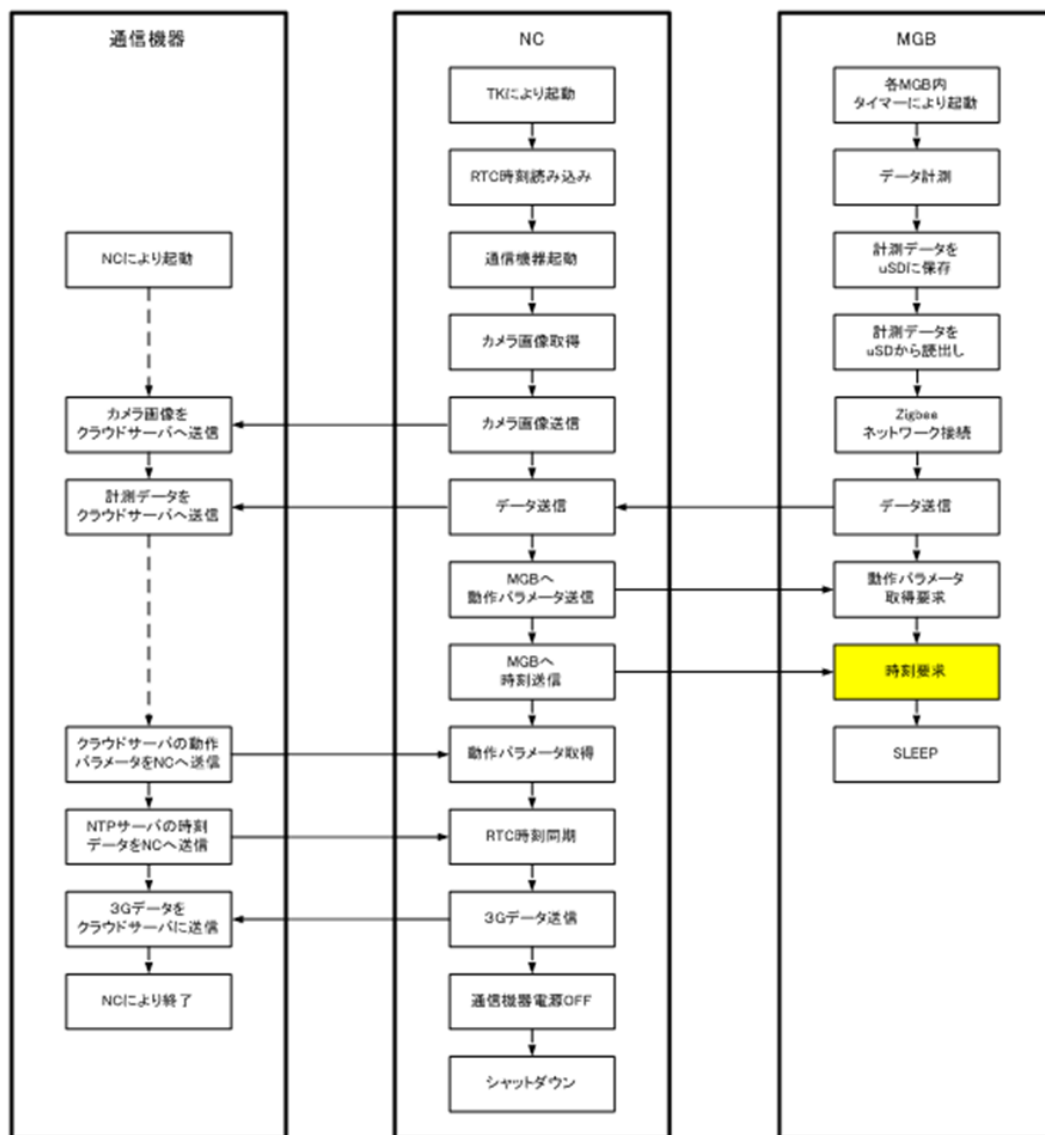


図 8.3-23 MGB 同期処理修正後のシステム制御フロー

本システム設計では時間管理用にマジックビー (MGB_TK) を導入し、システムのウォッチドッグタイマーとして運用するようにした。NC 自身には直接時間管理を行わせる一方、各 MGB に対しては間接的な時間管理 (時刻同期) を行うようにしていた。各 MGB の時刻に対する挙動は個々に内蔵された時計機能に従っており、1 日に 1 度、NC および MGB_TK と同期を取ることで同調動作が実現されることを期待していた。しかしながら、ローカル通信が実施できなくなると同期を取ることができなくなるシス

テムとなっていることが実運用を通じて判明した。

MGB_TK がシステムの時間管理の機能として最低限の機能（ローカル通信の親局の制御）しか持っておらず、各 MGB を直接制御するような機構を持っていなかったため、MGB_TK には NC 停止中も他の MGB からの通信要求を受け付ける、もしくは、他の MGB を任意のタイミングで起動させる機能を追加し、システム全体のタイミング管理をより直接的に行う機構が必要であった。

間欠動作ロジックの安定性を確認するためローカル通信の成否について解析した。無人計測システムによる計測データは、以下のように分類される。

- a. 正常に取得されたデータ
- b. 上位通信が不安定なためクラウドサーバに送信されず、別途、親局（NC）内から回収したデータ（欠損データとはならない）
- c. ローカル通信が不安定なため親局に送信されず、別途、各子局（MGB の μ SD カード）から回収したデータ（欠損データとはならない）
- d. 欠損データ

このうち、c. のデータの発生率（=MGB から NC へのデータ送信の失敗率）を表 8.3-3 および図 8.3-24 にまとめた。無人計測システム設置後のシステム運用は運転モードを切り替えながら行ったため、表では運転モード毎に集計を行った。集計した運転モードは以下の 3 モードとなる。

- 設計時の間欠運転モード（2015/10/1 0:00～2015/11/8 0:00）
- NC 連続運転モード（2015/11/27 0:00～2015/12/11 0:00）
- 上記モードでの運用期間の動作実績に基づいて改修を行った間欠運転モード（2015/12/24 0:00～2016/1/11 0:00）

表 8.3-3 中の測定回数は集計期間における計測データの取得回数を示している。このうち、同じモードにおいて他の MGB に比べて測定回数が少ない（=データ欠損の発生回数が多い）データについて、統計上の母数が少なく注意が必要となるため、黄色で色づけしている。

表 8.3-3 MGB-NC へのデータ送信失敗状況

	開始期間	終了期間	MGB 1A			MGB 2A			MGB 1B		
			測定回数	失敗	失敗率[%]	測定回数	失敗	失敗率[%]	測定回数	失敗	失敗率[%]
設計時間欠モード	2015/10/1 0:00	2015/11/8 0:00	14013	1997	14.25	12840	0	0.00	54517	49049	89.97
NC連続モード	2015/11/27 0:00	2015/12/11 0:00	19958	1	0.01	4906	1	0.02	11585	83	0.72
改修後間欠モード	2015/12/24 0:00	2016/1/11 0:00	25921	64	0.25	18424	131	0.71	25919	67	0.26

	開始期間	終了期間	MGB 1D			MGB 2D			MGB 3D		
			測定回数	失敗	失敗率[%]	測定回数	失敗	失敗率[%]	測定回数	失敗	失敗率[%]
設計時間欠モード	2015/10/1 0:00	2015/11/8 0:00	54470	15303	28.09	54521	1229	2.25	54517	3061	5.61
NC連続モード	2015/11/27 0:00	2015/12/11 0:00	5666	7	0.12	20050	1	0.00	11561	59	0.51
改修後間欠モード	2015/12/24 0:00	2016/1/11 0:00	25920	103	0.40	25900	116	0.45	25921	78	0.30

	開始期間	終了期間	MGB 4D			MGB 5D			MGB 1F		
			測定回数	失敗	失敗率[%]	測定回数	失敗	失敗率[%]	測定回数	失敗	失敗率[%]
設計時間欠モード	2015/10/1 0:00	2015/11/8 0:00	54518	32910	60.37	54498	1625	2.98	30033	0	0.00
NC連続モード	2015/11/27 0:00	2015/12/11 0:00	20049	1	0.00	20044	1	0.00	4238	61	1.44
改修後間欠モード	2015/12/24 0:00	2016/1/11 0:00	25920	79	0.30	25919	78	0.30	25860	68	0.26

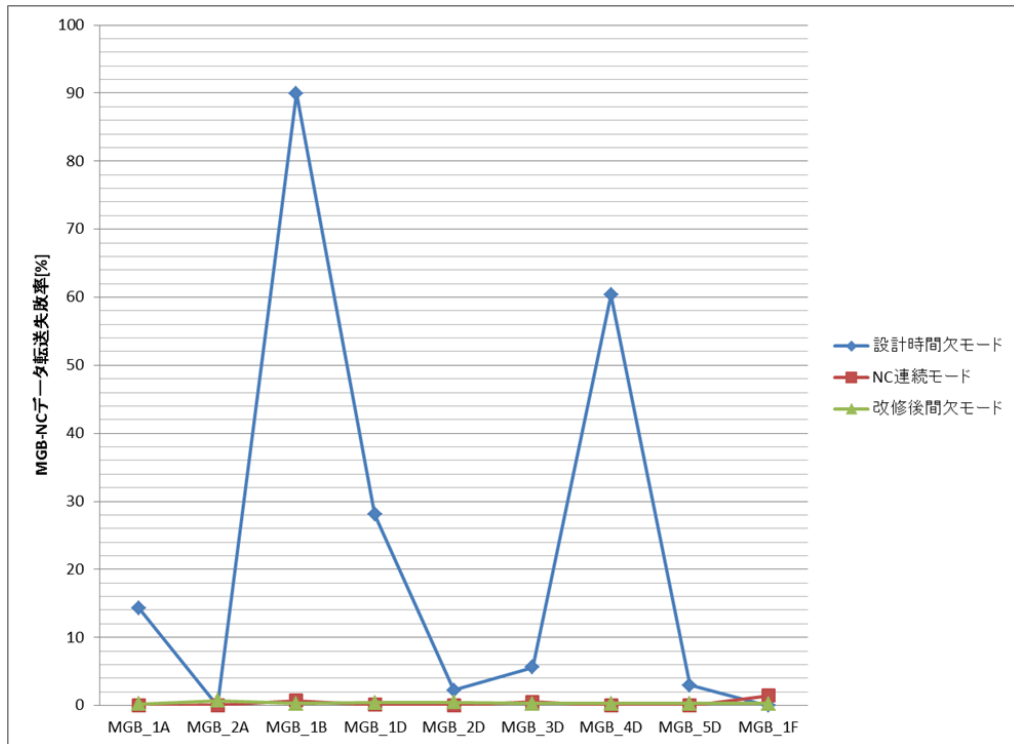


図 8.3-24 MGB-NC へのデータ送信失敗率

当初、設計時に想定した間欠モードでの失敗率が他モードの失敗率に比べて高く、間欠モードにおけるローカル通信の安定性が課題となった。動作実績に基づいて改修を行った結果、失敗率が改善できた。ローカル通信の安定性改善に寄与したと考えられる改修項目は、

- ・内部時刻ずれに対する対策（ソフトウェア変更及び部品交換）
- ・ローカル通信機器のリセット処理変更
- ・ローカル通信モジュールのファームウェア変更
- ・ローカル通信におけるルータ機能の追加

である。ただし、これらの改修項目がそれぞれどの程度安定性の改善に寄与したかは、改修項目別に改善度をモニターできなかったことから定量的な評価ができなかった。

MGB と NC 間のデータ送信失敗率を図 8.3-25 に示す。この図では失敗率が 0% だったデータ（設計時間欠モード MGB_2A、MGB_1F）を表示していない。測定回数が少ないデータは丸印で示している。丸印のデータおよび失敗率 0% のデータを除くと、NC 連続モードの失敗率が間欠モードに比べて低くなっている。改修後の間欠モードの送信失敗率は 0.2% から 0.7% であり、NC 連続モードの失敗率より高くなっており、間欠運転モードにおけるローカル通信の安定性を阻害する要因がまだ残されていると考えられる。引き続き、システムの運用を継続しながらローカル通信の安定性の阻害要因を調査する必要がある。

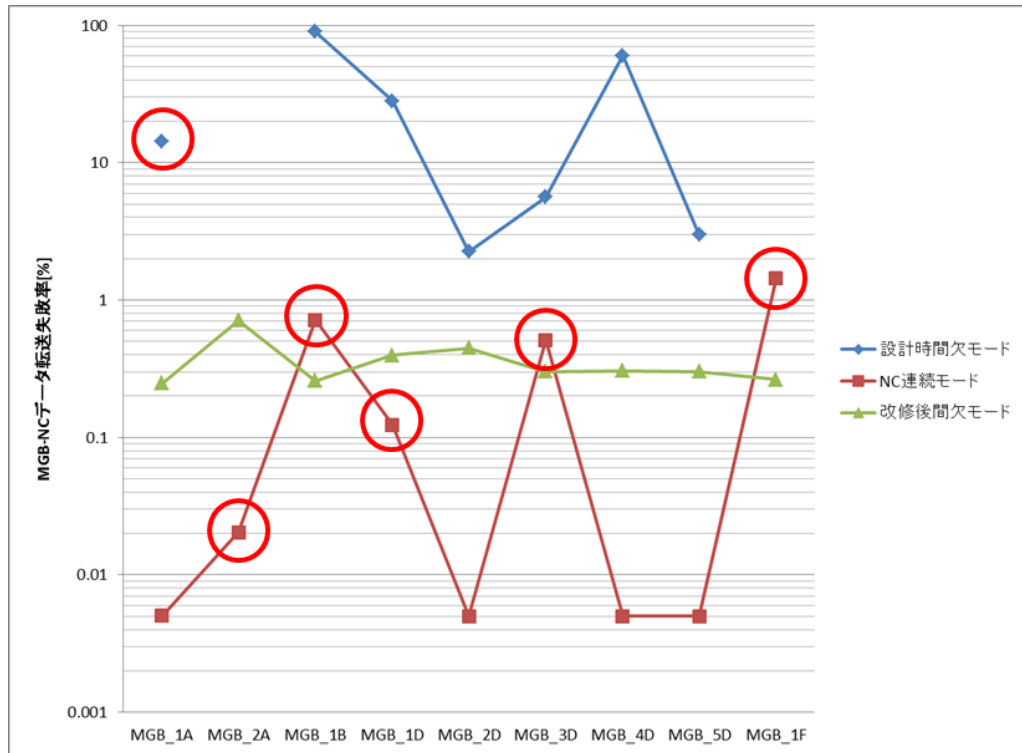


図 8.3-25 MGB-NC へのデータ送信失敗率

8.3.5 データ通信の安定性

衛星通信（2015/10/1～2016/1/21）、3G 通信（2016/1/23～2016/2/8）の通信の成否について整理した。各々の通信成功率は以下ようになっており、衛星通信に通信成功率の低さが表われている。

衛星通信の成功率：56.2%

3G 通信の成功率：75.2%

上位データ通信は 3G 機器を用いることで成功率が改善するものの、約 25%の割合で失敗している。今回導入した無人計測システムには上位データ通信（＝クラウドサーバへのデータ送信）の失敗をリカバリする制御を実装していなかった。さらに、連続運転モードでデータ回収できるように設計したが、上位データ通信が不安定な場合、途中で通信が切断する状況が発生し、現地で手動によるデータ回収を行わざるを得ないこともあった。また、今回のシステム運用において、ローカル通信の失敗が連続した場合にデータ再送信処理が間欠動作の稼働時間中に完了できない事象が発生した。上位通信の再送信においても同様の事象が発生しうるので、再送信処理として図 8.3-26 のようなフローでリカバリ制御を実装する必要があると考えられる。再送信処理については、今後の検討課題である。

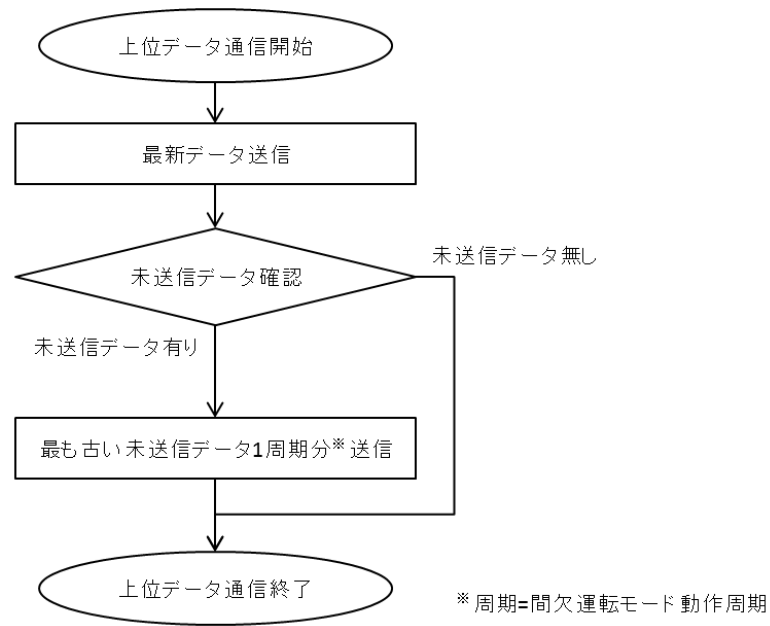


図 8.3-26 上位データ通信 再送信処理フロー例

正時毎の上位通信の成功：1（緑）／失敗：0（赤）を表 8.3-4～表 8.3-8 に示す。右端に日毎の成功率、右下に各月の成功率を記載している。黄色のセルは現地作業日、灰色のセルは NC 停止状態（上位通信自体が実行されなかった状態）を示している。

表 8.3-4 10月衛星通信実績

	0時	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時	23時	成功回数	失敗回数	成功率	
2015/10/1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	18	25.00 %
2015/10/2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	9	15	37.50 %
2015/10/3	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	21	3	87.50 %
2015/10/4	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	21	3	87.50 %
2015/10/5	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	18	6	75.00 %	
2015/10/6	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	16	8	66.67 %	
2015/10/7	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	18	6	75.00 %	
2015/10/8	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	18	6	75.00 %	
2015/10/9	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	12	12	50.00 %	
2015/10/10	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	18	6	75.00 %	
2015/10/11	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	14	10	58.33 %	
2015/10/12	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	16	8	66.67 %	
2015/10/13	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	16	8	66.67 %	
2015/10/14	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	15	9	62.50 %	
2015/10/15	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	17	7	70.83 %	
2015/10/16	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	18	6	75.00 %	
2015/10/17	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	17	7	70.83 %	
2015/10/18	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	11	13	45.83 %	
2015/10/19	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	13	11	54.17 %	
2015/10/20	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	11	13	45.83 %	
2015/10/21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	16	8	66.67 %	
2015/10/22	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	14	10	58.33 %	
2015/10/23	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	20	4	83.33 %	
2015/10/24	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	16	8	66.67 %	
2015/10/25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	18	6	75.00 %	
2015/10/26	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	14	10	58.33 %	
2015/10/27	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	17	7	70.83 %	
2015/10/28	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	10	58.33 %	
2015/10/29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	16	8	66.67 %	
2015/10/30	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	15	9	62.50 %	
2015/10/31	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	16	8	66.67 %	
																									2015年10月合計	161	84	64.65 %

*作業日

表 8.3-5 11月衛星通信実績

	0時	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時	23時	成功回数	失敗回数	成功率	
2015/11/1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	18	6	75.00 %	
2015/11/2	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	16	8	66.67 %	
2015/11/3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	18	6	75.00 %	
2015/11/4	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	16	8	66.67 %	
2015/11/5	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	19	5	79.17 %	
2015/11/6	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	18	6	75.00 %	
2015/11/7	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	17	7	70.83 %	
2015/11/8	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	18	6	75.00 %	
2015/11/9	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	13	11	54.17 %	
2015/11/10	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	7	17	29.17 %	
2015/11/11	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	10	14	41.67 %	
2015/11/12	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	19	5	79.17 %	
2015/11/13	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	20	4	83.33 %	
2015/11/14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	21	3	87.50 %	
2015/11/15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	22	2	91.67 %	
2015/11/16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	21	3	87.50 %	
2015/11/17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	23	1	95.83 %	
2015/11/18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	23	1	95.83 %	
2015/11/19	0	1	0	1	1	1	0																		4	3	57.14 %	
2015/11/20																												
2015/11/21																												
2015/11/22																												
2015/11/23																												
2015/11/24																												
2015/11/25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	8	16	33.33 %	
2015/11/26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	18	6	75.00 %	
2015/11/27	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	17	29.17 %	
2015/11/28	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	16	8	66.67 %	
2015/11/29	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	17	7	70.83 %	
2015/11/30	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	18	6	75.00 %	
																										2015年11月合計	188	69.81 %

*作業日

*バッテリー電源低下

〃

〃

〃

〃

〃

*作業日

表 8.3-6 12月衛星通信実績

	0時	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時	23時	成功回数	失敗回数	成功率	
2015/12/1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	18	6	75.00 %
2015/12/2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	17	7	70.83 %
2015/12/3	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	10	14	41.67 %
2015/12/4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	16	8	66.67 %	
2015/12/5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	11	13	45.83 %	
2015/12/6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	18	6	75.00 %	
2015/12/7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	19	5	79.17 %	
2015/12/8	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	19	5	79.17 %	
2015/12/9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	12	50.00 %	
2015/12/10	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	8	16	33.33 %	
2015/12/11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	16	8	66.67 %	
2015/12/12	1	0	0	0	0																				1	4	20.00 %	
2015/12/13																												
2015/12/14																												
2015/12/15																												
2015/12/16																												
2015/12/17																												
2015/12/18																												
2015/12/19																												
2015/12/20																												
2015/12/21																												
2015/12/22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	6	18	25.00 %	
2015/12/23	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	8	16	33.33 %	
2015/12/24	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	23	4.17 %	
2015/12/25	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	11	13	45.83 %	
2015/12/26	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	19	5	79.17 %	
2015/12/27	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	15	9	62.50 %	
2015/12/28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	13	11	54.17 %	
2015/12/29	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	13	11	54.17 %	
2015/12/30	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	11	13	45.83 %	
2015/12/31	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	14	10	58.33 %	
																									2015年12月合計			54.22 %

* バッテリ電源低下

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

〃

表 8.3-7 1 月衛星通信実績

	0時	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時	23時	成功回数	失敗回数	成功率		
2016/1/1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	14	10	58.33 %		
2016/1/2	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	10	14	41.67 %		
2016/1/3	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	8	16	33.33 %		
2016/1/4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	9	15	37.50 %		
2016/1/5	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	7	17	29.17 %		
2016/1/6	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	11	13	45.83 %		
2016/1/7	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	14	41.67 %		
2016/1/8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	14	10	58.33 %		
2016/1/9	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	10	14	41.67 %		
2016/1/10	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	7	17	29.17 %		
2016/1/11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0.00 %		
2016/1/12																													
2016/1/13																													
2016/1/14										0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	13	13.33 %	
2016/1/15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	23	4.17 %		
2016/1/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	4	20	16.67 %		
2016/1/17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	4	20	16.67 %		
2016/1/18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	3	21	12.50 %		
2016/1/19	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	21	12.50 %		
2016/1/20	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7	17	29.17 %		
2016/1/21	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	6	18	25.00 %		
																									2016年1月合計	2941	%		

*バッテリー電源低下
//

表 8.3-8 3G 通信実績

	0時	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時	23時	成功回数	失敗回数	成功率	
2016/1/23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	23	1	95.83 %
2016/1/24	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	17	7	70.83 %	
2016/1/25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	12	12	50.00 %	
2016/1/26	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	22	2	91.67 %	
2016/1/27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	23	1	95.83 %	
2016/1/28	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	23	1	95.83 %	
2016/1/29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	12	12	50.00 %	
2016/1/30	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	11	13	45.83 %	
2016/1/31	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	19	5	79.17 %	
2016/2/1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	15	9	62.50 %	
2016/2/2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	22	2	91.67 %	
2016/2/3	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	15	9	62.50 %	
2016/2/4	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	16	8	66.67 %	
2016/2/5	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	20	4	83.33 %	
2016/2/6	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20	4	83.33 %	
2016/2/7	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	16	8	66.67 %	
2016/2/8	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	21	3	87.50 %	
																									2016年3G調査合計	7525	%	

8.3.6 現地調査に基づく検証

システム運用期間にシステムに影響を及ぼす環境要因として、①積雪、②気温（低温）、③暴風雨が挙げられる。各環境要因に対して現地（上幌延地区）で確認されたシステムの状況は下記のとおりであった。

① 積雪

運用期間において積雪計が示した最高値は 950mm^{*}であったが、システムの構造物が物理的に破損することは無かった。

※積雪計の最高値は 1040mm であるが、現地作業期間のデータであり、作業の影響を受けていると考えられる。

太陽光パネルへの着雪による影響については前述したとおりであるが、日照が得られれば自然にパネル上から落雪することが現地作業を行う中で確認できている。

風力発電機、風力・風向計については、着雪の影響は見られなかった。

積雪計・雨量計については前述の通りである。これらの計測結果をモニタリングデータの解析に反映することから、信頼度の高い積雪量、雨量データを確保する計測機器の導入・運用が今後の課題である。その他、構成機器について、積雪・着雪による異常は確認されなかった。



図 8.3-27 積雪時現場写真

② 気温

低気温時に時間管理用の部品が異常動作を行いシステム障害が発生したが、対象の部品は現地条件に非対応な部品であった。現地条件に対応する部品に変更して以降、低気温の影響によるシステム障害は確認されていない。その他の機器・構造物について動作の異常や破損は見られなかった。

③ 暴風雨

運用期間において風力計が示した最高値は 25.4m/s であったが、暴風による構造物の破損は無かった。また、各構造物について、雨水による腐食の発生も確認されていない。各ケース内への浸水や結露の発生もなくドライな状態が保たれており、風雨による異常は確認されなかった。



図 8.3-28 雨天時ケース B 内状況

8.3.7 その他検証

① 太陽光パネル設置角度による発生電力の検証

太陽光パネルの設置角度による発生電力の違いを検証するため、3枚の太陽光パネルを検証用に設置した。検証用の太陽光パネルの設置角度は以下のとおりである。

- ・ パネル 1 : 45°
- ・ パネル 2 : 35°
- ・ パネル 3 : 25°

10/2 と 12/23 に計測した 3 枚の検証用太陽光パネルの発電電圧を図 8.3-29 と図 8.3-30 に示す。

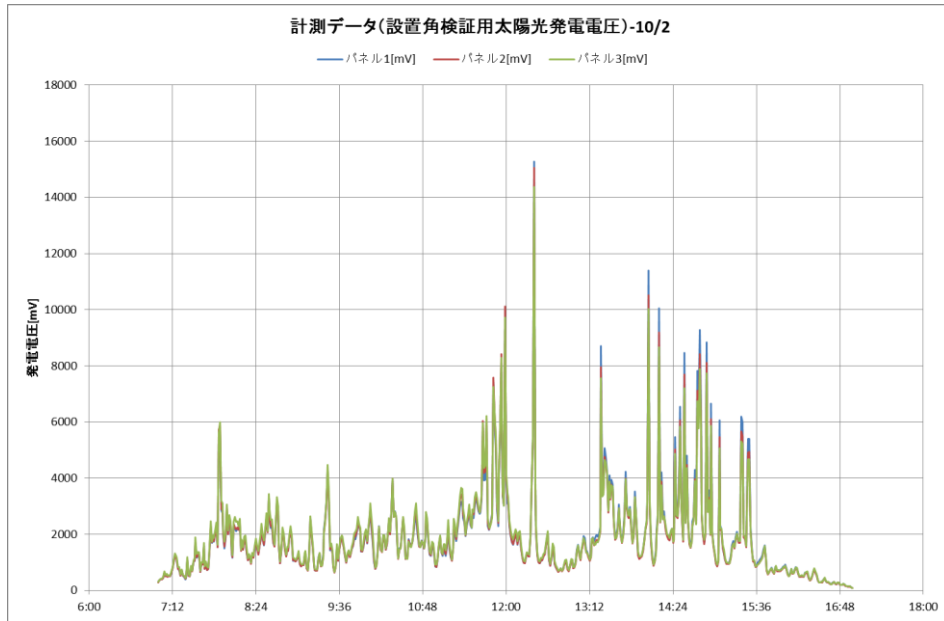


図 8.3-29 発生電力検証用太陽光発電電圧 (10/2)

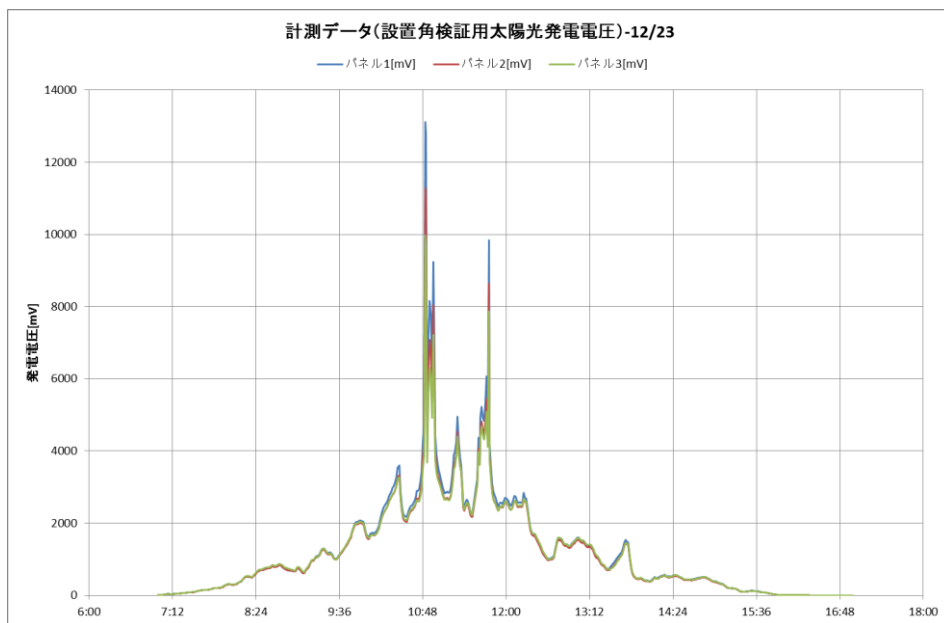


図 8.3-30 発生電力検証用太陽光発電電圧 (12/23)

図 8.3-31、図 8.3-32 はパネル 3 の発電電圧に対するパネル 1、2 の発電電圧比を示す。両日ともに、10%~20%程度の変動が確認できる。また、10/2 のデータでは、特定のパネルに発電能力の優位性は見られないが、12/23 のデータにおいてはパネル 1 の発電電圧が 1 日を通して他よりも大きい傾向がある。冬期は太陽の位置が低くなるので、パネル 1 (45°) が最も高い発電効率を得られていると考えられる。

※12/23 は現地作業日であり、着雪は見られなかったが、パネルの凍結状態が確認されている。

上記データについても、凍結の影響を受けている可能性がある。

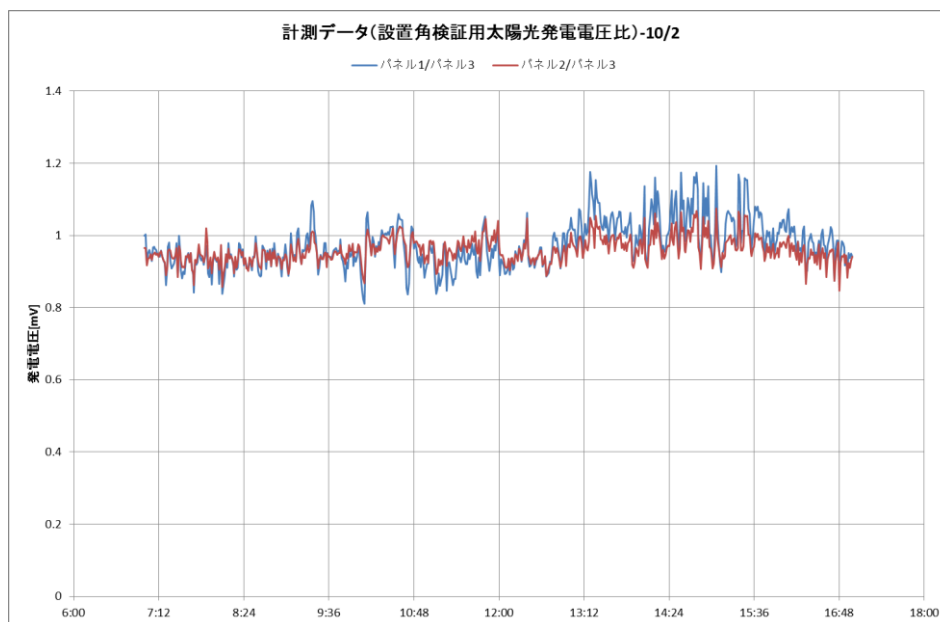


図 8.3-31 発生電力検証用太陽光発電電圧 パネル比 (10/2)

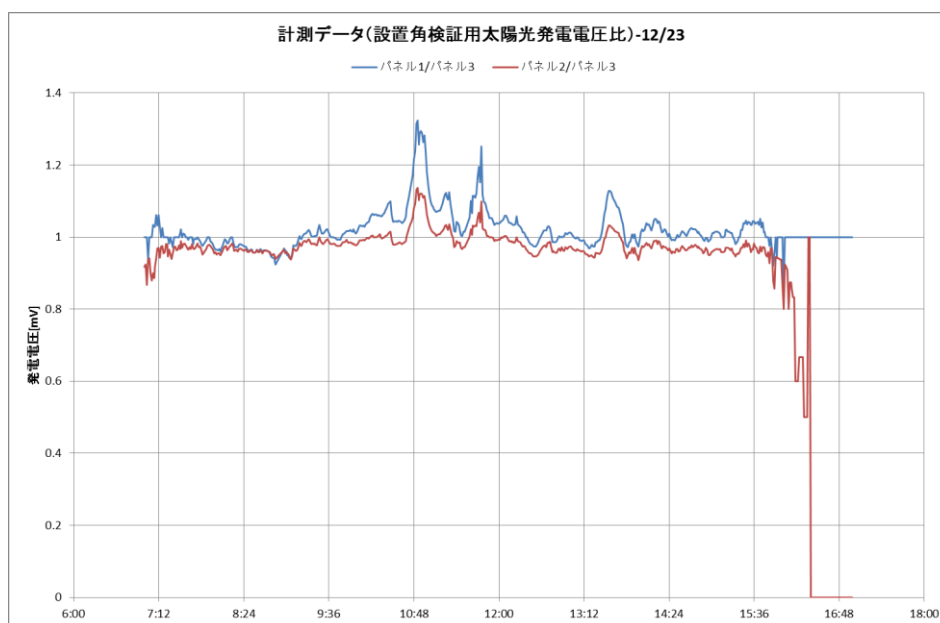


図 8.3-32 発生電力検証用太陽光発電電圧 パネル比 (12/23)

2/8の発電電圧を図 8.3-33に示す。2/8は現地作業の実施日であり、現地到着後、太陽光パネル上の着雪を除去している。図中、発電電圧が急に増加している箇所が除雪を行ったタイミングである。

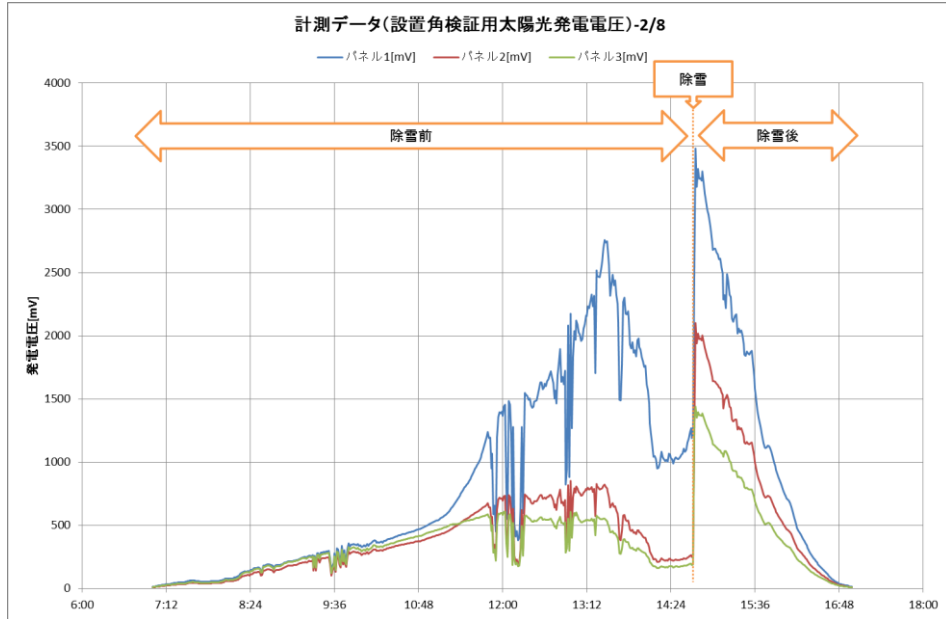


図 8.3-33 発生電力検証用太陽光発電電圧 (2/8)

同日のパネル 3 に対するパネル 1、および、パネル 2 の比率を図 8.3-34 に示す。上記の除雪のタイミングでパネル 1/パネル 3 の比が明らかに小さくなっている。一方で、パネル 2/パネル 3 の比はほとんど変化しない。

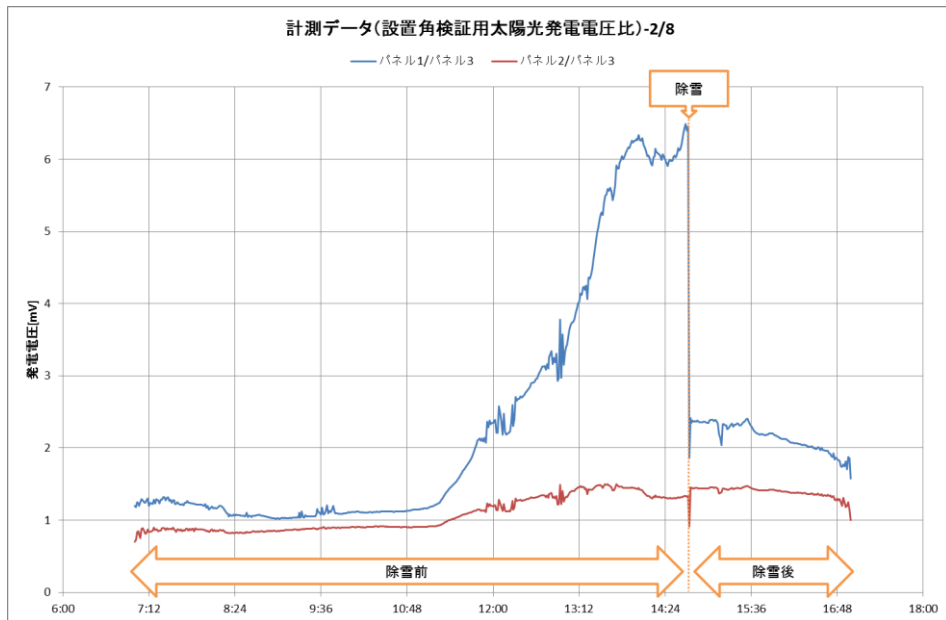


図 8.3-34 発生電力検証用太陽光発電電圧 パネル比 (2/8)

除雪前後のパネルの写真を図 8.3-35 に示す。除雪前のパネルは 1 枚だけ着雪がほとんど見られず (パネル 1)、他の 2 枚 (パネル 2, 3) は着雪によってパネル全体が覆われているような状態にな

っている。除雪後、パネル 2、3 の発電電圧が増加して、パネル 1/パネル 3 の比が小さくなったことが分かる。パネル 2,3 については凍結が確認され、完全に除去を行えなかったため、パネル 2,3 の発電電圧が少なめに推移しているものと考えられる。



図 8.3-35 2/8 発生電力検証用太陽光パネル着雪状況

幌延地区における太陽光パネルの設置は、着雪への対応能力の高い設置角 45° が適していると考えられる。着雪により発電電圧は大きく低下するので、積雪地域においては着雪をできるだけ排除できるように設置角度を大きくとり、年間を通したトータルの発電量を最大にするような検討が必要である。

② ネットワークカメラ

ネットワークカメラをモニタリング計測地点周辺の状況監視用に設置した。運用にあたってはデータ通信に対する負荷を考慮して、低解像度のモードとした。ネットワークカメラで撮影した降雪前と降雪時の画像を図 8.3-36 に示す。

計測地点周辺状況の概要を可視データとして確認できることは非常に有効であった。しかしながら、画素が荒いため積雪標の読み取りなどの詳細な状況を確認することができなかった。低解像度の運用であっても他の計測データにくらべてデータ通信量が大きく、上位通信時間に占める画像データの送信時間の割合が大きくなっている。したがって、高解像度モードによるネットワークカメラの運用については、現地の通信環境ならびに電源に応じて検討する必要がある。

例えば、長期モニタリングにおけるネットワークカメラの運用としては、

- ・現地の何らかの状況変化をトリガーとして、必要性のある場合のみ高解像度の画像を撮影する（通常監視項目から画像データは切り離す）、あるいは、
- ・通常は低解像度画像で現地周辺状況の監視を行い、詳細を確認する必要がある場合のみ、遠隔操作によって高解像度画像を撮影する、などが考えられる。



図 8.3-36 ネットワークカメラ撮影画像

8.4 システム信頼性向上に向けた課題

無人計測システム設置後のシステム運用と点検調整を通して、システムの信頼性向上に向けた課題が明らかになった。システムの信頼性向上に向けて以下の項目について検討を行う必要がある。

1. 電力
 - ・ 通信系・計測系の電源分離（計測系の電源確保による計測データの保全）
 - ・ 現地通信状況ならびに運転モードに応じた電源システム（風力ー太陽光ー蓄電）の最適化
2. システム制御
 - ・ MGB 計測欠損区間の対策
 - ・ 制御モードの追加による間欠モード周期設定・遠隔制御機能の拡充
3. 通信
 - ・ 接続不良時における再送信機能の追加
 - ・ 遠隔操作による上位通信（3G/衛星）の切り替え機能の追加
4. 現地環境計測
 - ・ 雨量計・積雪計の計測結果処理アルゴリズム

Ⅲ編：成果のまとめと課題、今後の計画

9. 本年度研究成果のまとめ

10. 今後の課題

11. 次年度の研究計画

9. 本年度研究成果のまとめ

9.1 孔内モニタリングシステムの保守、管理

本年度は、5回にわたり孔内モニタリングシステムの保守、管理作業を実施し、これらのうち2回は後述の採水作業時に実施した。

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計および圧力センサーにより計測している。現地入場時に圧力計による指示値を確認し、データロガーからデータ回収後に圧力センサーによる指示値を確認した。長期的なトレンドおよび気温変化に起因すると考えられる日変化が確認されたが、一定圧力を保っており遮水性能に問題ないことを確認した。

昨年度からミニパッカー圧力の低下がみられ、メンテナンス時に加圧調整を行ってきたが本年度は原因の特定と改良を行った。

各区間ミニパッカーの加圧ラインは1つのラインで全区間の加圧調整を行っていたが、圧力の低下がみられるようになったため、区間ごとに独立した加圧ラインに切り替えた。その結果、区間②の圧力低下が大きいことが判明した。同区間のミニパッカーを回収し点検したが、特に目立った損傷等は確認できず、給圧ラインを含むミニパッカーシステムの一部で微細な漏えいが起こっていることが考えられたため、加圧媒体を窒素ガスから不凍液に切り替えた。本作業後も圧力の低下が継続していることがわかったため、加圧ラインにアキュムレータを取り付け、継続的に圧力をコントロールすることにした。

9.2 計測データの取得および解析

計測対象は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および2の圧力、⑤パッカー3の圧力、⑥パッカー4および5の圧力、⑦大気圧、⑧観測小屋内温度、⑨外気温である。

計測したデータはデータロガーに蓄積し、現地において定期的にロガーからダウンロードした。無

人計測システムの運用後は、衛星通信（電話回線）によって転送されたデータを外部サーバー上でダウンロードすることにより取得した。

取得された区間圧力に対する外部からの影響要因について検討した。

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、各区間水位と大気圧のクロスプロットからも影響を受けていないことが明らかである。

観測データに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、BAYTAP-Gによる解析を実施し、区間圧力から潮汐成分を除去することができた。

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。比較的水位変化の大きい区間①において一部期間で降雨量との整合がみられるが、機器不調による欠損期間等があるため連続データでの評価が困難である。

ミニパッカー圧力と区間間隙水圧データとの比較では区間①で正相関、区間③で逆相関の傾向となっており、その因果関係は明らかではない。

9.3 地下水およびガスの採取、分析

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。

地下水およ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（2015年8月および11月）実施した。試料採取には、採水対象とするパッカー区間から採水をする箇所（地上もしくは孔内）までのスタンドパイプ内が原位置の本来の地下水に入れ替わっている必要がある。そのため、掘削に用いた泥水や孔内洗浄および、その他装置の設置等で孔内に加えた水が採水区間に残らないように予備排水を行った上で、試料採取を行った。

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ステンレスチューブもしくは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。

一般水質に関しては、パイパーダイアグラムおよ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回の地下水は海水、化石海水、温泉等に分類された。今年度採水を行ったHCD-3_2015_1および、HCD-3_2015_2、H25年度に採水を行った13R1314はいずれもNa-Cl型とすることができるが、Na-HCO₃型にも近い形状であり、Cl濃度を基準とすれば海水の1/5程度の濃度であり、HCD-3の圧縮抽

水データと比較すると、薄い溶存元素濃度である。酸素・水素同位体の結果からは 1 回目の採取データが浜里の水井戸に近い値を示すのに対し、2 回目のデータが近傍のコア間隙水の値とほぼ同様の値を示している。なお、酸素・水素同位体の分析結果や水質から推定されるサリニティーと試料中に含まれるトレーサー濃度との関係が不整合であり、この点について次年度の結果を踏まえて更なる検討が必要である。

希ガスサンプラーにより採取した希ガスの分析の結果、これまでに実施したコアを用いた希ガス分析結果と整合する値を示す試料が認められる一方、大気の混入により整合しない分析結果も認められた。この結果からは、希ガスサンプラーでの採取箇所の溶存希ガスの脱ガス状態もしくは地上での作業時での脱ガスに起因する可能性が高いが、現在のところは明確な原因は特定には至っていない。

9.4 モニタリング無人計測システム

概要調査時の長期モニタリングの現地環境を考慮し、電気や通信などのインフラストラクチャーがない箇所でも長期的に安定したデータ取得を目的とした無人計測システムのプロトタイプを幌延 HCD-3 孔向けに設計・製作し、2015 年 10 月に現地に設置した。システムは太陽光ならびに風力を電源とするスタンドアロンシステムであり、システム運用を通してシステムの動作確認、システム制御に関するデータ収集を行い、システム信頼性を評価した。

システムは 1 時間おきにモニタリングデータを伝送する間欠動作を基本としており、大規模地震発生のような大きなイベントがあった場合、あるいはデータを連続取得する場合を想定した連続運転モードも組み込んだものとした。また、システムを構成する機器間のローカル通信を制御するネットワークコンピュータ (NC) のみを連続運転し、データを間欠伝送する運転モードもシステム運用中に組み込んだ。制御ならびにデータの取得・閲覧を遠隔で行えるプログラムを整備して、2015 年 10 月 1 日からシステム運用を開始した。

冬季にはマイナス 20°C 以下となる厳しい環境下におけるシステム運用を想定して設計・構築したモニタリング無人計測システムではあるが、実際の運用を通して以下のようなトラブルが生じ、データ取得に欠損が生じた。

- ・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 μ SD 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

システムの信頼性を評価するため、トラブル対応も含めたシステムの運用を通してシステムの発生電力の検証、バッテリーの検証、間欠動作ロジックの安定性検証、データ通信の安定性評価等を行った。

連続運転の長期化や冬季の着雪により想定していた電力の需要供給バランスが崩れることがあることから冗長的な電源システムにしておく必要性が明らかとなった。また、データ取得の信頼性を高めるため、通信系と計測系の電源を分離させ、最低限計測系の電源を確保する必要性も明らかとなった。

バッテリーについてはシステム運用中に増設を行い、容量に関する問題はないものと考えられたが、電源システムの設計ならびにバッテリーの選定にあたっては通信不良時を想定したシステムの運用方法・制御方法に配慮した消費電力が過剰に増加しない設計を行うことが必要であることが明らかになった。

本システムを特徴づける間欠動作において種々のトラブルが発生した。間欠動作におけるローカル通信の安定性阻害要因の特定が残された課題となったが、複数のシステム構成機器を同調させてシステム全体のタイミング管理をより直接的に行う機構がシステム信頼性を高める上で必要であることが明らかになった。

データ通信の成功率は衛星通信で 56.2%、3G 通信で 75.2%であった。本システムではデータ通信の失敗をリカバリする制御を実装していなかった。システム信頼性を高めるためにはリカバリ制御を実装する必要があること、再送信処理については今後の検討が必要であることが明らかとなった。

10. 今後の課題

10.1 孔内モニタリングシステムの保守、管理

これまでに、不具合の認められた個所を改善し、孔口での作業がない安定した状態での計測が可能となっている。また、無人計測システムによるデータの監視により孔内モニタリングシステムの状態を観測値として確認することができるようになったため、保守、管理の効率化が可能となっており、現状では特段の課題は見当たらない。

10.2 計測データの取得および解析

本年度の計測データの取得およびこれらデータの解析を通して、以下の課題が明らかになった。

・計測データの欠損

今年度は、ミニパッカーの改良や採水によるミニパッカーの開放などによりそれぞれの区間で計測データに欠損が生じた。特に、取得されたデータが降水の影響を受けている兆候（データ間の整合）が認められたものの、データ欠損によるデータ不足のため、影響解析に至らなかった。

・ミニパッカー圧力と区間圧力の関連

ミニパッカーと区間圧力には関連が認められるものの、区間③では正相関、区間①では逆相関となっているが、これらの因果関係については明らかとなっていない。

10.3 地下水およびガスの採取、分析

本年度の地下水および溶存ガスの採取、現地計測および分析を通して以下の課題が明らかになった。

・水質測定試料測定と採取

予備排水中に2回の採水を行い、計測・分析を行った。その2回と圧縮抽水等の過去に取られたデータとを比較すると、その過程は連続したものとは考えがたい結果であった。今後予備排水と採水を引き続き行うと共に、孔に注入した掘削水や洗浄水等の履歴を調査する必要がある。

・物理化学パラメータ測定

pH-Eh ダイアグラムは、確からしい値が得られているとは言えない結果であった。予備排水を継続して行い、原位置の水質に近い水質を得ることによって改善されていくものと考えられるが、地上での測定では脱ガスの影響を避けることはできないものと考えられるため、ガス成分や原位置の水圧等を考慮した補正を行う必要がある。また、地上で得られた値を用いてORPを推定する方法を検討する必要がある。

- ・希ガスサンプラーの降下

本プロジェクトで開発した希ガスサンプラーの適用性を検証するために、HCD-3 孔井の脇に掘削されたモニタリング専用孔井 HMD-1 (孔長 80m) でテスト運用した。この際に専用のウィンチとポリアミドのラインを製作したが、今回は当初最大深度 (孔長) を 400-500m に想定したため、ライン長を 600m とし、引っ張り強度などを考慮してステンレス管によりラインを構築した。

実運用では、ステンレス管が曲率を有するためスタンドパイプとの摩擦により、所定深度 (200m) まで降下しなかった。このため、ステンレス管に代わる材質でラインを構成し、来年度の採水に備える必要がある。

- ・希ガス採取 (サンプラー)

脱ガスあるいは大気の混入が疑われる結果であったことから、サンプラーの降下や地上でのクランプ止めに際し、以下の方策を実施する必要がある。

サンプラーの降下に関しては、採取時の擾乱を防ぐため可能な限りパッカー位置に近いところで採取することで脱ガスの影響を抑えるほか、直前まで行う孔内作業は希ガスのサンプリング深度よりは上で行うことが望ましい。また、地上でのクランプ止めについては、クランプ締めの際に脱ガスが起きないように、銅管へのバルブの取り付け方の改善等をする必要がある。

10.4 モニタリング無人計測システム

無人計測システム設置後のシステム運用と点検調整を通して、システムの信頼性向上に向けた以下の課題が明らかになった。

- ・電力

通信系・計測系の電源分離 (計測系の電源確保による計測データの保全)

現地通信状況ならびに運転モードに応じた電源システム (風力-太陽光-蓄電) の最適化

- ・システム制御

MGB 計測欠損区間の対策

制御モードの追加による間欠モード周期設定・遠隔制御機能の拡充

- ・通信

接続不良時における再送信機能の追加

遠隔操作による上位通信 (3G/衛星) の切り替え機能の追加

- ・現地環境計測

雨量計・積雪計の計測結果処理アルゴリズム

11. 次年度の研究計画

11.1 次年度計画の概要

長期孔内モニタリングの体系化に資する知見を得るために、平成 27 年度に引き続き、①モニタリングシステムの保守・管理、②計測データの取得および解析、③地下水およびガスの採取、分析、④モニタリング無人計測システムの運用と信頼性評価を実施するとともに、体系化に関する中間的な取りまとめを行う。

11.2 孔内モニタリングシステムの保守、管理

本年度において特に課題が確認されていないため、本年度と同様に、無人計測システムからのデータによる管理と、年数回の現地での保守点検を実施する。

11.3 計測データの取得および解析

年間を通して孔内の 3 区間の間隙水圧を計測し、これらの結果を地上の計測システムにより収集する。なお区間③については、採水を優先させるため、予備排水のためのパッカーを頻繁に開放することがあり、データの品質が保証できない可能性がある。また、間隙水圧データに影響のある、気圧、気温、降雨量、潮汐などのデータに基づきノイズを除去することにより、ベースの間隙水圧挙動を評価する。

11.4 地下水およびガスの採取、分析

孔内における 3 計測区間のうち、透水性が最も高い観測区間③（208.45～209.95m）のスタンドパイプ内でダブルバルブポンプによる揚水を行い孔口での水試料および遊離ガスの採取を行うとともに、水位の回復を待って観測区間③にサンプリング装置を降下させ、原位置での採水（溶存ガスを含む）を実施する。採取した水試料の化学分析を実施する。なお、採水時期に先駆け、数度の予備排水を実施するためミニパッカーを外し自然湧水もしくは強制揚水を実施する。

11.5 モニタリング無人計測システム

地上における無人でスタンドアローンな電源、通信、計測システムを引き続き運用しながら平成 27 年度に明らかになった課題対応を点検調整の中で行う。また、電源、通信、計測の状況に基づきシステムの信頼性について年間を通して評価する。

11.6 モニタリングの体系化

11.7 開発の審議・検討

本研究実施にあたっては、学識経験者からなる「岩盤中地下水移行評価確証技術」検討委員会を設けて、研究計画や研究内容について審議・検討を行った上で、意見等をその都度、反映させて研究を遂行させる計画である。

来年度も本年度に引き続き検討委員会を以下の3回開催する計画である。

- ・ 第1回検討委員会 平成28年7月下旬 本年度研究計画審議
- ・ 第2回検討委員会 平成28年12月上旬 中間成果の審議
- ・ 第3回検討委員会 平成29年2月下旬 最終成果の審議

表 11.7-1 に検討委員会の委員一覧（予定）を示す。

表 11.7-1 「岩盤中物質移行特性評価技術の確証検討委員会」委員一覧（予定）

委員区分	委員名	所 属
委員長	西垣 誠	岡山大学大学院 環境生命科学研究科 教授
委員	五十嵐 敏文	北海道大学大学院 工学研究科 環境循環システム部門地圏物質移動学研究室 教授
委員	佐々木 泰	日本原燃株式会社 開発設計部 部長
委員	嶋田 純	熊本大学大学院 自然科学研究科複合新領域科学専攻(理学専攻兼任) 水文学研究室 教授
委員	吉田 英一	名古屋大学博物館 教授