

博士論文

水封式岩盤タンクの保全点検システムに関する研究

A Study on Maintenance Management System
of Water-Sealing Type Rock Cavern

国立大学法人 横浜国立大学大学院

環境情報学府

城代 邦宏

Kunihiro JODAI

2008年3月

目 次

第1章 序 論	1
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 本研究の概要	2
第2章 水封式岩盤タンクの概要および現行の点検・検査システムと課題	6
2.1 水封式岩盤タンクの概要	6
2.1.1 岩盤タンクの概要	6
2.1.2 地下石油備蓄基地の施設概要	10
2.1.3 岩盤タンクの設計	14
2.2 現行の点検・検査システム	19
2.2.1 点検・検査フロー	19
2.2.2 定期保安検査の項目と評価方法	19
2.2.3 日常点検および定期点検の項目と内容	22
2.2.4 現行の点検・検査システムの課題	28
2.3 まとめ	29
第3章 保全点検システムにおける点検技術	31
3.1 保全点検システムの構成	31
3.2 各種点検手法とその適用性	32
3.2.1 サイズミックモニタリング	32
3.2.2 光ファイバー歪計測	45
3.2.3 高精度傾斜計測	53
3.2.4 弾性波・比抵抗トモグラフィ計測	61
3.2.5 間隙水圧計測	67
3.3 まとめ	73
第4章 保全点検システムにおける解析・評価手法	77
4.1 評価・診断項目と解析・評価手法	77
4.2 解析・評価手法とその適用性	78
4.2.1 現行の評価手法(水封機能データの変動傾向と水収支バランス分析)	78
4.2.2 実効雨量による水封データ評価手法	89
4.2.3 観測孔水位相互の相関構造による地下水位データ評価手法	98
4.2.4 三次元浸透流解析による評価手法	102
4.3 まとめ	116
第5章 保全点検システムの構築	118
5.1 基本方針	118
5.2 保全点検システム	118
5.2.1 点検の流れと適用手法	118
5.2.2 保全点検計画	123
5.3 まとめ	131
第6章 結 論	133
謝 辞	137

第1章 序 論

1.1 本研究の背景と目的

我が国で初めての水封式岩盤タンクによる地下石油備蓄基地は、岩手県久慈市、愛媛県今治市菊間町、鹿児島県いちき串木野市の3箇所に建設され、1993年1月から1995年2月の間に串木野基地、久慈基地、菊間基地と準じオイルインが行われ、その後順調に操業が行われている。

水封式岩盤タンクは、地下水水面下の岩盤に空洞を設け、スチールやコンクリートなどによるライニングを施すことなく、自然あるいは人工の地下水圧により原油等の貯蔵物を岩盤空洞に封じ込めるもので、所定の地下水水位（水圧）を維持することが、漏油・漏気を防止し施設の機能を維持する上で重要な要件となる。このため、水封式岩盤タンクの安全性は、液密・気密性能を保障する水封機能の安定性と貯槽の力学的安全性の二面から点検・評価する必要がある。

現行の保全点検システムでは、岩盤タンクを開放して内部から直接点検・評価する方法が水封機能への影響、安全性およびコスト等から困難なため、岩盤タンクを構成する周辺岩盤の水理・力学物性値の変化が反映される岩盤タンク湧水量、人工水封水供給量、地下水水位観測孔水位等を日々観測し、これら水封機能データの変動傾向の変化から間接的に岩盤タンクの安全性を評価する手法¹⁾が採られている。

水封機能データは、人工水封制御や排水ポンプ制御等の運転操作による影響を受けるほか、目詰まりの進行による長期的な漸減傾向の中で、降水、気圧、潮汐といった自然要因の影響を受けて常に変動し、さらには地震や地表改変によっても大きな変化を示す²⁾。しかしながら、日々の観測値に対する岩盤タンクの安全性に関わる定量的な判定手法が確立されておらず、学識経験者により構成された岩盤タンク保全技術検討委員会により定期的に岩盤タンクの安全性を評価しているのが現状で、操業管理の担当者は観測値が適正な範囲なのか異常なのかの判断が困難なため、迅速な対応、臨機の処置が出来ないといった課題を抱えている。加えて、水封機能データを主体とした現行の保全点検システムは、1990年当時の技術レベルを踏まえて定められたもので、安全性が保たれていることを確認するには有効であるが、安全性に影響を及ぼす局所的な岩盤の損傷等が生じた場合は、その箇所の特定や損傷等の程度を評価するには十分な情報を与えるものとはなっていない。

このように、水封式岩盤タンクは自然の地下水圧を利用した半人造構造物であり、複雑な条件下に存在すること、鋼製タンクに比べ水封式岩盤タンクの歴史が浅く操業事例も少ないことから、保全点検システムとして確立されたものとはなっていない。一方、海外での岩盤タンク保全点検システムはノウハウとして扱われているため詳細が不明であり^{3), 4)}、かつ我が国は地震国であるなどの自然環境条件や社会条件が異なっている。岩盤タンクは非常に大規模な構造物であり、いざダメージが生じると、即効かつ有効な対策・手順が確立されておらず、修復等の時間およびコストが膨大となる。したがって、我が国の自然環境条件に適した信頼性の高い評価が行える合理的な保全

点検システムの構築が必要であり、これは、安全・安心への意識の高まりといった昨今の社会的要請にも応えるものとなる。

このような背景から、本研究は、タンク周辺岩盤に安全性に影響を及ぼすような劣化等の損傷が生じた場合の損傷個所の特定やその程度が評価可能な計測技術について、原油備蓄タンクの点検手法としての適用性、有効性を現地試験等により検討・確認すること、また、日々観測される観測孔水位等の水封機能データに関して、タンク周辺岩盤の水理・力学物性値の変化に伴う変動傾向の変化を検出する手法について検討・開発すること、ならびに、これらの手法を統合したより信頼性の高い合理的な保全点検システムを構築することを目的に行ったものである。

1.2 本研究の概要

本研究では、まず筆者が携わってきた水封式岩盤タンクの安全性を評価する現行の保全点検システムについて、十数年の操業を通して経験した事象や知見等を踏まえて課題を整理した。そして、これを解決するための方法として、原油を貯蔵した状態の岩盤タンクの点検手法として適すると考えられる五つの計測技術を実際の岩盤タンクに適用し、その有効性と適用方法を示した。また、タンク周辺岩盤の水理条件等の変化に伴う観測孔水位等の観測データの変化を検知するための解析・評価手法について検討し、新たに考案した「実効雨量」、「観測孔水位相互の相関構造」のそれぞれを用いた「逐次更新型」の線形回帰モデルである2つの管理モデルについてその有効性を示した。最後に、これらの手法を採り入れたより信頼性の高い合理的な保全点検システムについて検討し、タンク周辺岩盤に劣化が生じた場合の箇所特定とその程度の評価、必要な場合の対策へと繋げていくことが可能な点検・評価フローを提案するとともに、我が国の地下石油備蓄基地への具体的な適用の仕方を示した。

本論文の概要は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景と目的を述べるとともに、本研究の概要を示した。

第2章では、まず水封式岩盤タンクによる地下石油備蓄基地の概要を述べるとともに、水封式岩盤タンク設計時の主要な検討項目・設計定数等を示して、岩盤タンクの安全性確保において具備されるべき条件を明らかにした。次に現行の岩盤タンクの点検・検査システムの概要とこれらに係わる十数年の操業を通して経験した事象や知見、課題を整理し、現行の点検・検査システムに補足・補完すべき対象、項目を抽出した。

第3章では、まず**3.1節**において保全点検システムの考え方として、システムの全体像と本研究が対象とする範囲を示すとともに、運用に際しての留意点を述べた。**3.2節**では、システムを構成する技術の一つである点検技術について、岩盤タンクの点検手法として適すると考えられる五つの計測技術を実際の岩盤タンクに適用した結果を示し、その有効性と適用方法、ならびに今後の課題を明らかにした。それぞれの点検手法の適用試験結果の概要を以下に示す。

- **サイスミックモニタリング**：菊間基地 TK-103 での適用試験により、微小破壊を検知するための基礎的データを取得するとともに、極微小な振動を数十メートル離れた地点で捉え、その震源位置評定時の推定誤差は数メートルに収まることを確認した。将来的に岩盤タンクの安全性に影響を及ぼす可能性のある亀裂へと発達した段階のサイスミックイベントに観測ターゲットを絞ることで、受振器数を現実的な範囲に抑えた合理的な観測が可能であり、点検の目的を十分に達成できることが分かった。今後の課題として、タンク周辺岩盤の微小破壊に伴うサイスミックイベントの検出精度向上のため、引き続きデータの蓄積・分析を行い、各種作業等に伴う振動特性を把握して、これらを識別できるようにしていくことが重要である。
- **光ファイバー歪計測**：竣工後約 22 年が経過した菊間基地 TK-103 に適用し、当該センサの設置上の課題、ならびに原油受払いにより有意な変形が生じないことを確認した。弱層部等の変状の発生・進行が懸念される箇所において、光ファイバー歪計測手法を適用し、変位の進行の有無などの長期的な変動傾向を監視・把握することで、岩盤タンクの安全性評価の精度・信頼性の向上を図ることができる。
- **高精度傾斜計測**：串木野基地での試験計測の結果、潮汐、気圧変動、地震動および油面低下に起因する地盤傾斜の変化量、残留の有無およびその大きさを把握した。また、適切なデータ解析を行い、数値解析と組み合わせることで、高精度傾斜計により岩盤タンクと周辺岩盤の監視・評価が十分可能であることが分かった⁵⁾。今後の課題として、計測データから長期的な岩盤挙動、イベント位置の推定手法、ならびに地質モデルに対する順解析と逆解析による定量的な岩盤挙動把握のための検討を行っていくことが挙げられる。
- **弾性波・比抵抗トモグラフィ**：菊間基地 TK-103 において、タンク周辺岩盤の初期値を得るため、弾性波・比抵抗トモグラフィ調査を実施し、岩盤状況に概ね整合する結果を得た⁶⁾。今後、同一の測定条件のもとで定期的、または地震発生後等に測定を行って、弾性波速度と比抵抗値の変化を把握し、岩盤の劣化や不飽和域の変化状況を評価することになる。今後の課題としては、弾性波速度と比抵抗値からの飽和度等の推定方法の構築や間隙水圧分布との比較検討を行うことが挙げられる。
- **間隙水圧測定**：菊間基地 TK-103 の主要亀裂帯が集中する付近の間隙水圧分布を確認し、水封機能には問題ないものの、タンク肩付近の間隙水圧が約 22 年前の状態からあまり変わっていないことが分かった。また、間隙水圧の変化は岩盤の透水性の変化に起因しているという前提で、測定結果からタンク周辺岩盤の透水係数を逆解析により求め、透水係数の変化が生じた領域の推定を行った⁷⁾。透水係数の高い領域や変化する領域は亀裂帯の分布状況と良い対応を示し、岩盤タンクの安全性評価に有効な手法であることを確認した。なお、この間隙水圧の変化は平衡に至る過程という見方もできるため、今後さらに経時的な傾向を把握し、見極めていく必要がある。

第4章では、まず4.1節で保全点検システムを構成する点検データの評価診断技術について、岩盤タンクの安全性評価に至る評価診断の流れと、その各段階において把握すべき事項、そのために必要な解析・評価手法を整理し、本研究で対象とした解析・評価手法を示した。4.2節では、まず現行の評価手法の考え方と対象データの変動特性を示すとともに、本手法に関する既往の研究を述べ、現行手法の長短を明らかにした。次に操業管理担当者の日常管理に供することを目的に考案した実効雨量、観測孔水位相互の相関構造のそれぞれに基づく逐次更新型線形回帰モデルである2つの解析・評価手法について、実際の観測データを用いて検討した結果を示し、その有効性と課題を明らかにした。最後に、現行の評価手法を補足するために開発された三次元浸透流解析手法について概説するとともに、その有効性と適用上の留意点を示した。また、解析結果を実効雨量に基づく解析・評価手法により分析し、浸透流解析における地下水位挙動の実効雨量との相関性、および実効雨量パラメータの水理地質的な影響要因について考察した。それぞれの解析・評価手法の検討結果の概要を以下に示す。

- **現行の評価手法**：植出の提案する評価指標²⁾を用いて最近の水封機能データを分析し、当該指標の有効性と適用上の留意点を示した。本評価手法は、岩盤タンク全体およびタンクユニット毎の領域の安全性を評価する手法と位置付けられる。
- **実効雨量による水封機能データ評価手法**：実効雨量のパラメータは水封機能データの変動に影響を及ぼす水理地質条件をある程度反映したものであることが分かった。本手法は、水理条件等の変化に伴う水封機能データの過去の変動傾向からの逸脱の検出といった日常管理における安全性評価の第1ステップとして有効であることを確認した⁸⁾。今後の課題として、他の地下石油備蓄基地におけるデータへの適用性、潮汐や浅層浸透水の影響による短周期応答成分の除去フィルターの検討を行う必要があることを挙げた。
- **観測孔水位相互の相関構造による地下水位データ評価手法**：実効雨量による評価手法と同様、水理条件等の変化に伴う観測孔水位データの過去の変動傾向からの逸脱の検出といった日常管理における安全性評価手法として有効であることを確認した⁸⁾。実効雨量による水封データ評価手法と併せた評価を行えば、考え方の異なる手法によるクロスチェックができ、その信頼性が増すものとなる。
- **三次元浸透流解析による評価手法⁹⁾**：本手法は、解析モデルの格子サイズに比べて微細な亀裂性岩盤における水みちの水理状態の再現は困難であり、岩盤タンク全体ならびに比較的広い領域の安全性評価に資する手法と位置付けられる。また、解析観測孔水位を実効雨量による評価手法により分析した結果、実測値と同様に実効雨量との関係において非線形な関係や複数の相関関係を示すことが分かった。実効雨量パラメータの影響要因については、亀裂帯の有無と貯留層の働きをする風化層厚が半減期の影響要因であることを確認した。累積日数は、観測孔の地下水供給（涵養）範囲、および風化層厚が影響要因と推定され、遅延日数は、各観測孔の涵養範囲における地下水面の最頂部の地表からの深さを表しているものと推定された。

第5章では、まず5.1節で保全点検システムの構築における基本的考え方を示した。5.2節では、地下石油備蓄基地の規模を踏まえ、段階的に点検精度を上げていく仕組みを採ることとして、点検箇所別にその重要性、岩盤劣化等の発生の確率を考慮した点検の流れと各種点検手法の適用区分を示すとともに、タンク周辺岩盤に劣化等が生じた場合の箇所の特定とその程度の評価、必要な場合の対策へと繋げていくことが可能な点検・評価フローを提案した。最後に、串木野基地を例として実際の地下石油備蓄基地へ適用するに際しての具体的な適用方法を示した。

第6章では、各章を総括し、本論文の結論として取りまとめた。

参考文献

- 1) 自治省消防庁:岩盤タンクに係る屋外タンク貯蔵所の保安検査等に関する調査検討報告書, 危険物保安技術協会, 1991
- 2) 植出和雄:原油岩盤タンクの水封機能評価技術に関する研究, 京都大学学位論文, 2003
- 3) 石油公団:平成9年度岩盤タンク内部点検技術の調査・研究, 日本地下石油備蓄(株), 1998.
- 4) 石油公団:平成13年度海外LPG岩盤貯蔵基地の操業に係る技術調査業務報告書, 電源開発(株), 2002.
- 5) 城代邦宏, 植出和雄, 廣岡知, 神原洋, 竹村進, 松岡俊文, 塚田和彦:地下石油岩盤タンクにおける微小傾斜の計測, 材料, Vol.55 No.5, pp.523-528, 2006.
- 6) 城代邦宏, 植出和雄, 若林成樹, 宮下国一郎:水封式岩盤タンクの健全性評価に対する弾性波・比抵抗トモグラフィ調査の適用, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol. 35, pp.183-186, 2006.
- 7) 城代邦宏, 植出和雄, 若林成樹, 宮下国一郎:水封式岩盤タンクの健全性評価に対する透水係数の逆解析手法の適用, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol.37, pp.229-232, 2008.
- 8) 城代邦宏, 植出和雄, 本多眞, 長谷川誠, 小島圭二, 小川輝繁:地下石油岩盤タンクにおける水封機能の健全性評価手法に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 63 No.2, pp.624-634, 2007.
- 9) 山石毅, 小林仁, 谷藤吉郎, 岡本明夫, 登坂博行, 小島圭二:地下石油備蓄基地建設に伴う水文・水理挙動の数値シミュレーション, 地下水学会誌, 第40巻第2号, pp.167-183, 1998.

第2章 水封式岩盤タンクの概要および現行の点検・検査システムと課題

2.1 水封式岩盤タンクの概要

2.1.1 岩盤タンクの概要

一般に原油をはじめとした石油類の貯蔵方式には、地上方式、地中方式、洋上方式、地下方式の4方式がある。このうち地下方式による貯蔵技術については、自然空洞を用いる方法と人工空洞を用いる方法がある。自然空洞を用いる例としては、枯渇油田、枯渇ガス田や帯水層を利用するものがある。人工空洞を用いるものには、休廃止鉱山等の既設の地下空間を利用するもの、新規に地下空間を構築し利用するものがあり、新設空洞として岩塩ドームや横穴水封式の岩盤タンクがある¹⁾。

本論文の対象である横穴水封式の岩盤タンクは、空洞掘削に適した良好な地質条件、および液密・気密性を保つための地下水が存在すれば建設可能であり、海外では多くの建設事例がある。2002年時点での海外の操業中の岩盤貯蔵基地の一部を表2.1-1(1)～(3)に示す²⁾。近年は、東南アジア諸国、インドなどでも岩盤貯蔵基地の計画、建設が進められている。

岩盤タンクの特徴を、地上タンクや地中タンクと比較し概説する。

岩盤タンクが地上タンクや地下タンクに比べて大きく異なる点は、タンク本体を人工材料ではなく、岩盤という天然の材料を利用する点、および地下水を利用して液密性、気密性の保持を行う水封システムを適用するという点にある。以下に特徴を列挙する。

① 安全性・耐久性:岩盤タンクは半無限に広がる堅硬な岩盤を躯体材料として利用することから、人工材料ではしばしば問題となる劣化等が少なく、地盤の不等沈下や液状化等の変状の発生も無い。また、岩盤タンクは基盤となる岩盤内部に設置されるため、地上構造物に比べて地震の影響が極めて少なく地震に対する安全性が高い。このため、岩盤タンクは非常に高い安全性と耐久性を有した構造物であり、メンテナンスフリーな構造物を目指した設計が行われる。

② 液密・気密性:地上タンクや地中タンクでは、鋼材等のライニングにより液密・気密性が保持されるが、岩盤タンクの場合には人工的なライニングを用いず水封システムにより液密・気密性を確保する構造としている。水封システムは図2.1-1に示すように、岩盤タンク周辺に十分な水圧を作用させ、岩盤タンクに貯蔵される石油類を水圧により封じ込めるという技術である。一般に岩盤には割れ目や微小空隙が存在するが、水封システムを利用することにより、このような岩盤においても液密・気密性を確保することができる。

③ 火災に対する安全性:岩盤タンクは多くの場合において、タンク内部が不燃性ガスで密封されること、また地下に設置されることから、貯蔵されている石油類が地上に漏洩することがなく、火災に対

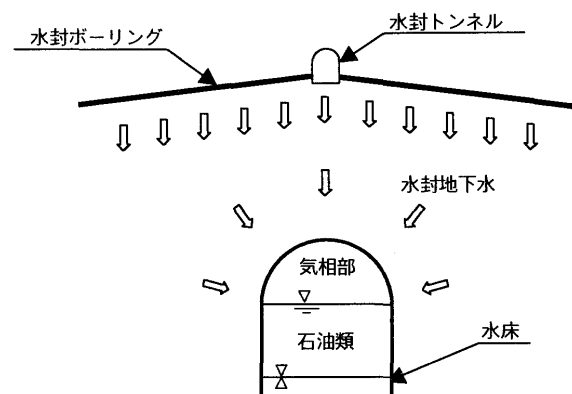


図 2.1-1 水封システムの概念¹⁾

表 2.1-1-1(1) 海外の石油等地下貯蔵墓地の概要一覧表(その1)²⁾

No.	基地名	ユニット名	国名	竣工年	貯蔵物 (貯蔵物名)	貯蔵容量 (千m ³)	貯蔵方式	貯槽		貯槽設置深度 (m)	岩種		
								断面形状	寸法(m) (W×H×L)				
1	Goteborg	T-7901	スウェーデン	1968	フロン	20	自然水封	食パン形	15.0×(4~22)×100	1	1	GWL-79.5	花崗岩
2	Goteborg	T-7902	スウェーデン	1988	フロン	80	自然水封	食パン形	20.0×23.0×200	1	1	GWL-88.35	花崗岩
3	仁川(Inchon)		韓国	2000	フロン	340	人工水封	卵形	16.0×26.0×	3	3	EL-130	花崗岩、片麻岩
4	仁川(Inchon)		韓国	2000	フロン	125	自然水封	卵形	16.0×26.0×	2	2	EL-110	花崗岩、片麻岩
5	蔚山(Ulsan)		韓国	1987	フロン	275	人工水封	卵形	17.0×21.0×857(全長)	4	4	MSL-119	変成堆積岩
6	蔚山(Ulsan)		韓国	1987	フロン	225	人工水封	卵形	19.0×21.0×634(全長)	3	3	MSL-63	安山岩
7	Karlskamm		スウェーデン	1989	フロン	48	人工水封		20.0×22.5×90	1	1	SWL-96	片麻岩
8	Gargenville		フランス	1977	フロン	130	自然水封	食パン形	6.5×8.5×2750(総延長)			GWL-112.88	フロン
9	巨済島(Kojesdo)U-2		韓国	1985	原油	4,293	自然水封	食パン形	18.0×30.0×(850*6, 700*6) 2ユニット	12	12	EL-30	花崗閃緑岩
10	巨済島(Kojesdo)U-2		韓国	1997	原油	1,908	自然水封	食パン形	18.0×30.0×(1800, 2000) 2ユニット	2	2	EL-30	花崗閃緑岩
11	Sines		ホルトガル		フロン	83	人工水封		14.0×13.0×(165, 165, 160)	3	3	SWL-105.0	斑レイ岩
12	Sines		ホルトガル		フロン	75	自然水封	食パン形	16.0×25.0×290	1	1	GWL-130.0	斑レイ岩、閃緑岩
13	Stenungsund	UC-731	スウェーデン	1972	フロン・フロン	63	低温常圧		16.0×35.0×172.5	1	1	SWL-25	片麻岩
14	Stenungsund	UC-732	スウェーデン	1972	フロン	80	低温常圧		16.5×33.0×195.0	1	1	SWL-25	片麻岩
15	Stenungsund	UC-904	スウェーデン	1990	フロン	523	低温常圧	食パン形	20.0×30.0×420.0	2	2	SWL-15	片麻岩
16	Sundsvall	1	スウェーデン	1989	フロン	55	人工水封	食パン形	20.0×25.0×100	1	1	GWL-80	花崗岩
17	Demopolis	No.1	アメリカ	1956	フロン	23	岩盤密封	ルーフ・ド・ピラー	4.5×9.0 貯槽範囲102×144	-	-	GL-87.6	フロン
18	Demopolis	No.2	アメリカ	1957	使用停止	34	岩盤密封	ルーフ・ド・ピラー	不明 貯槽範囲108×171	-	-	不明	フロン
19	Tornio	TU-1	フィンランド	1993	フロン	85	人工水封	食パン形	22/16×30.0×142	1	1	SWL-103.0	花崗岩
20	Tornio	TU-2	フィンランド		フロン	85	人工水封						
21	Donges		フランス	1977	フロン	80	人工水封	食パン形	16.5×22.0×230 (114, 116)	2	2	GL-112	花崗岩質片麻岩
22	寧波(Ningbo)		中国	2002	フロン	250	人工水封	食パン形	20.0×22.0×			EL-125	溶結凝灰岩、砂岩
23	寧波(Ningbo)		中国	2002	フロン	250	人工水封	食パン形	20.0×22.0×			EL-65	溶結凝灰岩、砂岩
24	Notch Cliff		アメリカ	1962	フロン	23	自然水封	ルーフ・ド・ピラー	8.7×12.2 貯槽範囲 90×30	-	-	GWL-117	花崗岩
25	Humber		イギリス	1986	フロン	120	帯水層	馬蹄形	9.5×10.5×1400(全長)	-	-	GWL-200	フロン
26	Humber		イギリス	1986	フロン	120	帯水層	馬蹄形	9.5×10.5×1400(全長)	-	-	GWL-184	フロン
27	Pitea		スウェーデン	1992	フロン	100	人工水封	食パン形	18.0×24.0×135.0	2	2	GL-90	
28	平澤(Pyongyangtaek)L-1		韓国	1989	フロン	119	人工水封	卵形	18.0×22.5×121.0	3	3	SWL-60	花崗岩、片麻岩
29	平澤(Pyongyangtaek)L-1		韓国	1989	フロン	177	人工水封	卵形	18.0×22.5×134.0	4	4	SWL-120	花崗岩、片麻岩
30	平澤(Pyongyangtaek)L-1		韓国	1996	フロン	394	人工水封	卵形	18.0×22.5×	不明	不明	SWL-120	花崗岩、片麻岩
31	平澤(Pyongyangtaek)		韓国	1999	フロン	300	人工水封	卵形	18.0×22.0×740(全長)	4	4	EL-128	片麻岩
32	Porvoo	U-1~3	フィンランド	1967	軽油、原油	209	自然水封	食パン形	18.0×22.0×	3	3	SWL-18.0	花崗岩、片麻岩
33	Porvoo	U-4~6	フィンランド	1968	軽油、原油	375	自然水封	食パン形	18.0×30.0×	3	3	SWL-5.0	花崗岩、片麻岩
34	Porvoo	U-7~10	フィンランド	1968	原油	675	自然水封	食パン形	18.0×30.0×	4	4	SWL±0.0	花崗岩、片麻岩
35	Porvoo	U-11	フィンランド	1972	ガソリン	306	人工水封	食パン形	16.0×30.0×	2	2	SWL-5.0	花崗岩、片麻岩
36	Porvoo	U-12	フィンランド	1971	重油	200	人工水封	食パン形	16.0×30.0×	2	2	SWL-5.0	花崗岩、片麻岩

表 2.1.1-1(2) 海外の石油等地下貯蔵墓地の概要一覽表(その2)²⁾

No.	基地名	ユニット名	国名	竣工年	貯蔵物 (貯蔵物名)	貯蔵容量 (千m ³)	貯蔵方式	貯槽		貯槽設置深度 (m)	岩種
								断面形状	寸法(m) (W×H×L)		
37	Porvoo	U-13	フィンランド	1972	原油	495	人工水封	食パン形	18.0×30.0×	2 SWL-25.0	花崗岩、片麻岩
38	Porvoo	U-14	フィンランド	1975	原油	550	人工水封	食パン形	19.0×34.0×	2 SWL-25.0	花崗岩、片麻岩
39	Porvoo	U-15, 16	フィンランド	1975	原油	1,042	自然水封	食パン形	18.0×32.0×605+605, 545+435	4 SWL-10.0	花崗岩、片麻岩
40	Porvoo	U-17, 18	フィンランド	1976	軽油、重油	422	人工水封	食パン形	18.0×35.0×	4 SWL±0.0	花崗岩、片麻岩
41	Porvoo	U-19	フィンランド	1976	フタ	116	人工水封	食パン形	16.0×30.0×340	2 SWL-60.0	花崗岩、片麻岩
42	Porvoo	U-20	フィンランド	1981	軽油	530	自然水封	卵形	20.5×(32.0,31.5)×	5 SWL-25.0	花崗岩、片麻岩
43	Porvoo	U-22	フィンランド	1982	軽油	315	自然水封	卵形	20.5×31.5×	2 SWL-25.0	花崗岩、片麻岩
44	Porvoo	U-23	フィンランド	1987	フタ・フタ	105	人工水封	食パン形	21.1×32.5×170.0	1 SWL-106.0	花崗岩、片麻岩
45	Porvoo	U-24	フィンランド	1987	フタ	51	人工水封	食パン形	19.6×24.5×121.2	1 SWL-141.0	花崗岩、片麻岩
46	Porvoo	U-25	フィンランド	1993	フタ	150	人工水封	食パン形	22.0×35.0×196.0	1 SWL-131.0	花崗岩
47	Whiting		アメリカ	1982	フタ	109				EL-159	石灰岩
48	Marcus Hook	No.1	アメリカ	1958	フタ	40	自然水封	ル-ムアツトピラー		-	変成岩、花崗岩質斑岩類
49	Marcus Hook	No.2, 3	アメリカ	1961	フタ	104	自然水封	ル-ムアツトピラー		-	変成岩、花崗岩質斑岩類
50	Marcus Hook	No.4	アメリカ	1962	フタ	12	自然水封	ル-ムアツトピラー		-	変成岩、花崗岩質斑岩類
51	Marcus Hook	No.5	アメリカ	1976	フタ	177	自然水封	ル-ムアツトピラー	7.6×12.2×2100	SWL-120	変成岩、花崗岩質斑岩類
52	苗栗(Miaoli)		台湾	1983	フタ	50	自然水封		5.0×6.5×1596(全長)	GWL-149(SWL-127)	頁岩
53	Morris	3ユニット	アメリカ	1971	フタ			掘削作業用ケーシングを中心とした放射状		GL-180	泥岩
54	Molmieux		オーストラリア	2000	フタ	130	人工水封	矩形	14.0×11.0×230	4 GWL-124	砂岩
55	Mongstad	No.6101, 02	ルカエ	1988	フタ	20	人工水封	食パン形	13.0×16.0×64	2 GWL-74	片麻岩
56	Mongstad	No.6103	ルカエ	1988	フタ	10	人工水封	食パン形	13.0×16.0×64	1 GWL-58	片麻岩
57	Yonk	No.1	アメリカ	1976	フタ	60	自然水封	ル-ムアツトピラー		-	花崗岩
58	Yonk	No.2	アメリカ	1979	フタ	240	自然水封	ル-ムアツトピラー	7.6×12.2 貯槽範囲229×275	-	花崗岩
59	麗水(Yosui)		韓国	1983	フタ	173	人工水封	食パン形	15.0×19.5×660(全長)	1 SWL-114	溶結凝灰岩
60	麗水(Yosui)		韓国	1983	フタ	123	人工水封	食パン形	16.0×21.0×410(全長)	1 SWL-60	安山岩
61	Rafnes		ルカエ	1977	フタ	100	人工水封	食パン形	19.0×22.0×255	1 SWL-90	花崗岩
62	Lavera	フタ	フランス	1971	フタ	120	人工水封	食パン形	13.0×19.7×566(全長)	3 SWL-100	石灰岩
63	Lavera	2ユニット	フランス	1984	フタ	183	人工水封	食パン形	12.0×18.0×730, 270(全長)	5 SWL-62	石灰岩
64	Lavera		フランス	1997	フタ	90	人工水封	食パン形	10.0×13.75×200	4 SWL-139.25	石灰岩
65	Ravensworth		アメリカ	1963	フタ	52	人工水封	ル-ムアツトピラー	高さ7.6 貯槽範囲115×148	-	花崗岩
66	Livorno	No.1~3	イタリア	1967	フタ	11	自然水封	円形	約φ5×570, 800, 970(全長)	13 GL-100~105	第4紀層 プル-粘土
67	Lysekil		スウェーデン	1973	フタ	10	人工水封	食パン形	14.0×13.0(最大液深)×51.6	1 SWL-75	片麻岩
68	Watkins Glen		アメリカ	1984	フタ	191	自然水封	ル-ムアツトピラー	5.5×7.3 貯槽範囲258.6×258.6	-	頁岩
69	Antwerpen	75/ I, 75/ II	ベルギー	1963	フタ	10	自然水封	円形	φ4.4×650	8 GL-75(WL-65)	Boom層(日本の土丹と類似)
70	Antwerpen	45/ II	ベルギー	1963	フタ	22	自然水封	円形	φ3.3 L=2,350(当初は3,300m)	1 GL-45(WL-35)	Boom層(日本の土丹と類似)
71	Goteborg		スウェーデン	1983	原油	800	自然水封	食パン形	20.0×30.0×300~350	4 SWL-30	花崗岩・片麻岩
72	Goteborg	3905A	スウェーデン	1978	原油	1,200	自然水封	食パン形	20.0×30.0×500	4 SWL-17.5	花崗岩

表 2.1-1(3) 海外の石油等地下貯蔵墓地の概要一覧表(その3)²⁾

No.	基地名	ユニット名	国名	竣工年	貯蔵物 (貯蔵物名)	貯蔵容量 (千m ³)	貯蔵方式	貯槽		貯槽設置深度 (m)	岩種
								断面形状	寸法(m) (W×H×L)		
73	Goteborg	3905B	スウェーデン	1981	原油	1,600	自然水封	食パン形	20.0×30.0×350~650	5 SWL-20	花崗岩
74	Ekeberg	旧岩盤タケ群	ノルウェー	1970	石油類		人工水封			17 SWL-8.5	片麻岩
75	Ekeberg	新岩盤タケ群	ノルウェー	1979	石油類		人工水封			6 SWL-30	片麻岩
76	Samia	RP-1~7	カナダ		NGl	270	岩塩層	ワルトム	例 RP-1 W40×H40	7 GL-580	岩塩
77	Samia	P-1~12	カナダ		LPG類	760	岩塩層	ワルトム	例 P-3 W40×H55	12 GL-630	岩塩
78	Syihara	3905A	スウェーデン	1978	原油	1,200		食パン形	20.0×30.0×500	4 SWL-20	花崗岩
79	Syihara	3905B	スウェーデン	1981	原油	1,600		食パン形	20.0×30.0×350~650	5 SWL-20	花崗岩
80	Heide		ドイツ		ブタン	55	岩塩層	ワルトム	φ60m	1 GL-660~670	岩塩
81	Fort Saskatchewan	C101	カナダ		C ₃ ⁺		岩塩層	ワルトム		1	岩塩
82	Fort Saskatchewan	C104,C105	カナダ		プロパン	80	岩塩層	ワルトム	内径53.4 高さ45.8	2 GWL-1860~-1906	岩塩
83	Fort Saskatchewan	C102,C106,C109	カナダ		プロパン・ブタン		岩塩層	ワルトム		3	岩塩
84	Fort Saskatchewan	C103,C107,C108	カナダ		エタン		岩塩層	ワルトム		3	岩塩
85	May-sur-Orme	北側空洞	フランス	1972	軽油	1,500	廃坑利用		2~5×400×3500		砂岩、頁岩
86	May-sur-Orme	南側空洞	フランス	1973	軽油	3,500	廃坑利用		2~5×400×6000		砂岩、頁岩
87	Mongstad		ノルウェー	1988	原油	1,300	人工水封	食パン形	18.0×33.0×550(4基), 330(2基)	6 GWL-35	片麻岩
88	Montreal	3ユニット	カナダ		プロパン・ブタン	200	人工水封	卵形	W9~13×H13~18	9 GWL-130	
89	Mont Belvieu		アメリカ		LPG類	8,000	岩塩層	ワルトム	標準 W40~65×H400	25 GL-500~-1000	岩塩
90	Risholmen		スウェーデン		原油	650		食パン形		2 GL-20	
91	Louisiana Offshore Oil Port	Clovelly Dome	アメリカ		原油	7,155	岩塩層	ワルトム	φ58×H412	9 GL-458	岩塩
92	Weeks Island		アメリカ		原油	11,600	岩塩層	ルムアットヒュー	H17~23(上下2段)	— SWL-140,-202	岩塩
93	Vartan		スウェーデン	1975	重油	200	人工水封	食パン型	18×29.3×(220,290)	2	片麻岩
94	Finn Berget		スウェーデン	1940	使用停止	30				6	
95	Finn Berget		スウェーデン	1969	石油類	150		食パン型		2	
96	Finn Berget		スウェーデン	?	石油類	240				8	
97	Scanraff	原油貯蔵用	スウェーデン		原油	800	自然水封	食パン型	18×30×400	4 -25 (GL-65)	花崗岩、片麻岩
98	Scanraff	製品貯蔵用	スウェーデン		重油、軽油	270	自然水封	食パン型	18×30×	4	花崗岩、片麻岩
99	Vaasa	2ユニット	フィンランド		重油、軽油	210				2	
100	Nynashamn	BCA-2	スウェーデン		石油	100				2	片麻岩
101	Nynashamn	BCA-3	スウェーデン		ガソリン	40	人工水封	食パン型		4	片麻岩
102	Nynashamn	3907AB,3907C	スウェーデン		原油	800		食パン型	16×30.5×最大350m	9	片麻岩
103	Broffjorden		スウェーデン		原油	2,600	自然水封	食パン型	20×30×500~900	6	花崗片麻岩
104	Sola	2ユニット	ノルウェー	1967	原油	220	自然水封	食パン型	16×24×135, 163	4 SWL-5	片麻岩、花崗岩
105	Oxelosund		スウェーデン	1975	重油	1,111	人工水封	食パン型	20×25×200~360	7 SWL-6	シタタイト(斑レイ岩、片麻岩を伴う)
106	Manosque		フランス	1973	石油類	7,600	岩塩層	ワルトム	W50~60,H400	36 GL-600~-1000	岩塩
107	Sennecey		フランス		プロパン	12			5.0×6.5×322	GL-145	石灰石

して安全である。

- ④ タンクの規模・配置：岩盤タンクは地下に横穴形式で設置することから、計画貯蔵容量を確保するためのタンク延長、タンク条数、断面形状等を地形・地質条件や土地利用条件等が許す範囲で自由に設定することができ、配置計画上の自由度が高い。さらに、非常に大規模な容量のタンクを構築することも可能である。
- ⑤ 周辺環境との調和：岩盤タンクでは一部の受払い設備が地上に設置されるものの、タンク本体は地下に設置されることから、周辺景観との調和の観点から地上タンクや地中タンクに比して有利である。また、地上タンクや地中タンクはタンク内径に応じた保安距離を確保する必要性から、地上占有範囲が広がるが、岩盤タンクではそれらに比べ地上占有面積は小さくなり、地上空間の有効利用が容易となる。

これらの構造的な特徴を踏まえ、岩盤タンクの建設段階から保全段階において、技術的に留意点すべき点は次の通りである。

◇ 岩盤総合評価

岩盤タンクにおいては、岩盤がタンクの躯体材料となり、また水封システムを適用することから、岩盤の力学特性および透水特性を適切に評価する必要がある。そのためには、計画・設計段階のみならず、施工中においても岩盤特性の総合的な分析評価を行って、岩盤特性に適合した支保構造や水封システムを構築することが重要である。

また、操業開始後の保全段階では、建設段階までに得られた岩盤の力学特性および透水特性を十分に把握し、岩盤タンクの力学的な安定性や液密・気密性の保持に影響を及ぼす岩盤の力学特性および透水特性に変化のないことを継続的に確認していくことが重要となる。

◇ 水封システム

水封システムの利用のためには、岩盤タンク周辺地盤における地下水の状態を適切に評価する必要がある。地下水の分布状況、地下水の供給源となる気象条件や地表の形態についても調査する必要がある。特に工事中は地下に大空洞を掘削するため、岩盤タンク周辺の地下水位分布に大きな変動を来たすことがあり、これが水封システムに対して少なからず影響を及ぼす場合がある。そのため、工事中の地下水位の管理、および地下水変動の原因となる過大湧水への対策工等を講じることが重要である。

また、保全段階では、工事中に現れた地下水位の低下や過大湧水等の各種現象および対策工等の履歴を十分に踏まえたうえで、原油受入れ後の地下水位等の変動傾向や水封システムの稼働状況を分析・解析し、長期寿命維持の観点に立った適切な施設管理が重要となる。

2.1.2 地下石油備蓄基地の施設概要

石油需要の大幅な増大と 1973 年のオイルショックを契機として、1978 年に国家備蓄制度が制定され、備蓄基地の建設が開始された。現在、国家石油備蓄基地は図 2.1-2

に示すように 10 箇所あり、備蓄容量は合計で 4,000 万 kl である。

岩盤タンクによる地下備蓄方式を採用している基地は、久慈基地（岩手県久慈市）、菊間基地（愛媛県今治市）、串木野基地（鹿児島県串木野市）であり、備蓄容量は 3 基地で 500 万 kl である。

3 基地の建設は、石油公団により 1980 年から開始された菊間実証プラント（現在の菊間基地 TK-103）での各種実証実験による安全性等の確認を経て、日本地下石油備蓄株式会社により 1986 年から始まった。着工後約 7 年、1993 年から 1994 年にかけて 3 基地が順次完成し、引き続いて原油の受入れが行われ、現在 3 基地ともに操業中である。3 基地の施設概要を表 2.1-2 に示す。また、自然水封方式と人工水封方式を併用している串木野基地を例として、主な施設の具体的な配置を図 2.1-3(1)～(3)に、操油系統概略図を図 2.1-4 に示す。



図 2.1-2 国家石油備蓄基地の位置

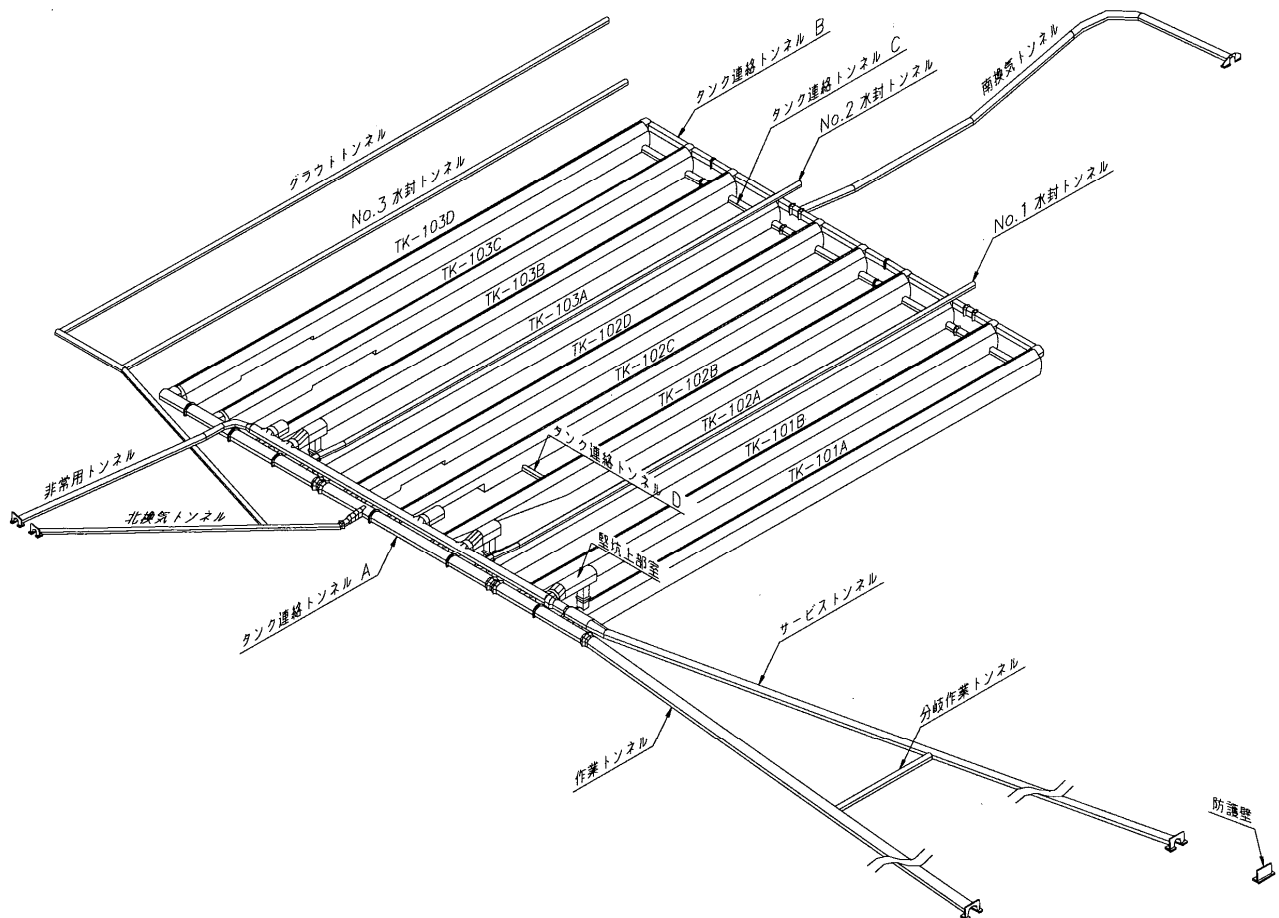


図 2.1-3(1) 串木野基地鳥瞰図¹⁾

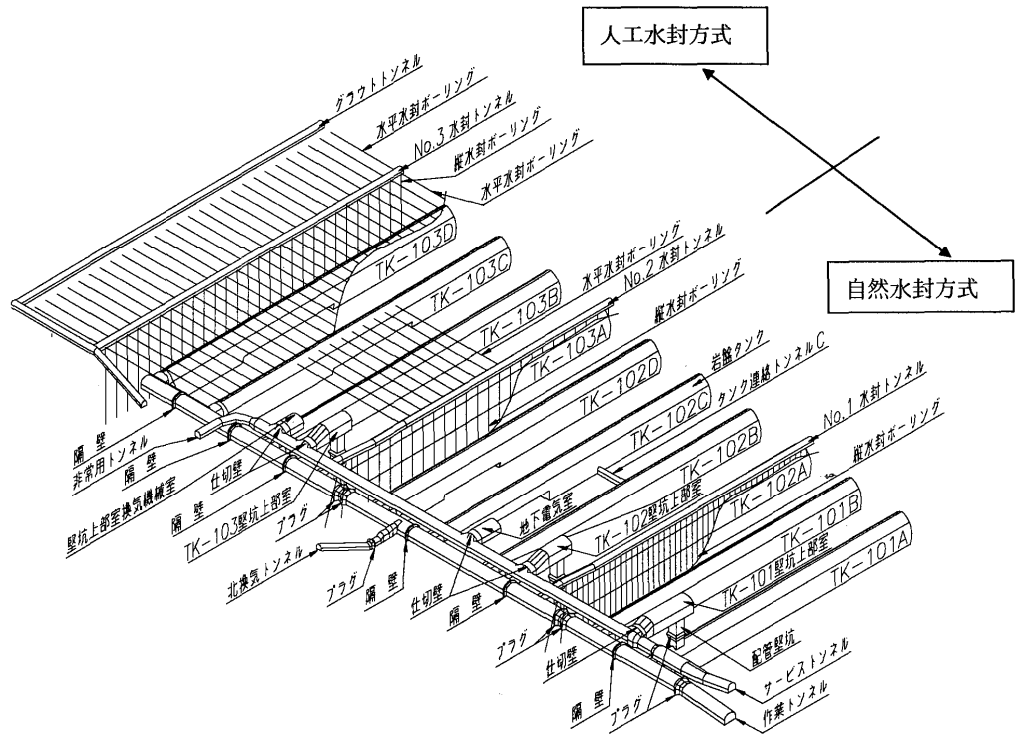


図 2.1-3(2) 壁坑上部室付近拡大鳥瞰図¹⁾

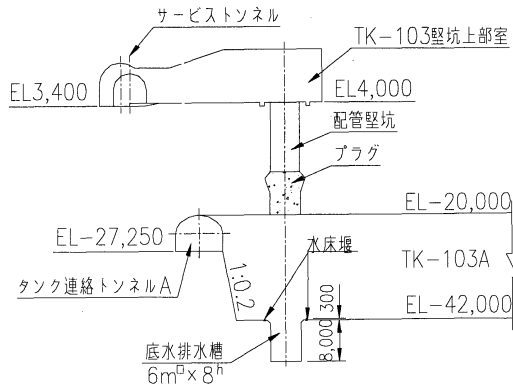


図 2.1-3(3) 底水排水槽部詳細図(TK-103A)⁴⁾

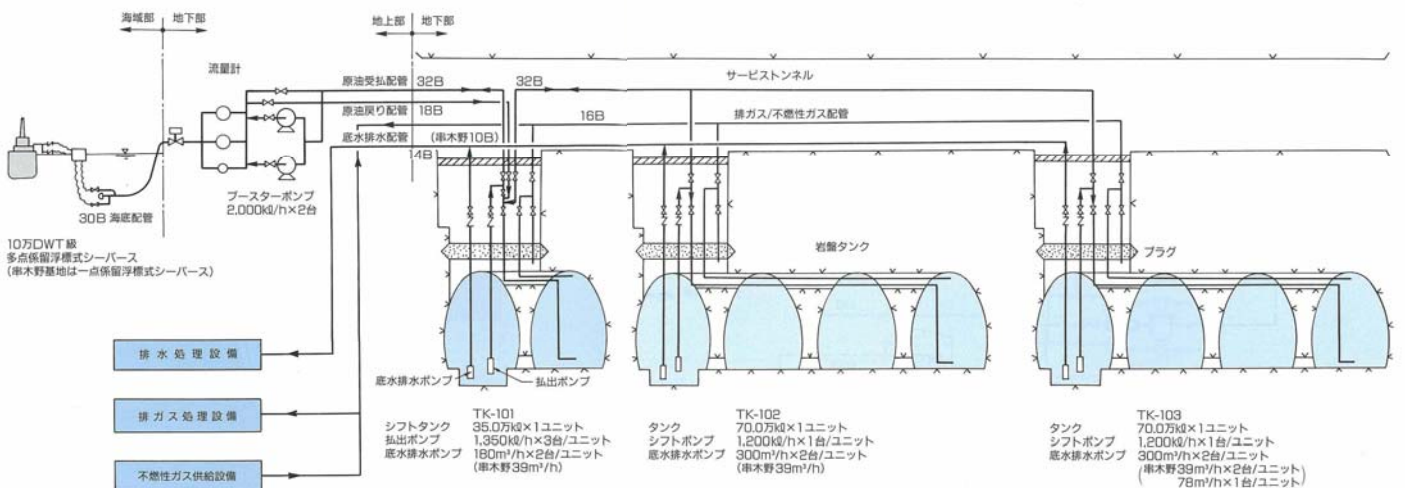


図 2.1-4 操油系統概略図³⁾

表 2.1-2 3基地の施設概要³⁾

項 目		久慈基地	菊間基地	串木野基地
敷地面積	地上部	約 6ha	約 10ha	約 5ha
	地下部 ^{注1)}	約 26ha	約 15ha	約 26ha
貯油施設	全備蓄容量	175 万 kℓ	150 万 kℓ	175 万 kℓ
	岩盤タンク 水床方式 常用圧力(kPa・G) 水封方式 岩 質 設置深さ(天端) 海面より 地表より ユニット数 寸法:幅×高さ×長さ (m/ユニット) 備蓄容量(万kℓ/ユニット)	横穴水封式 固定水床式 -10~40 人工水封 久喜花崗岩 -20m -100m 以深 3 18×22×1,080~2,160 35, 70, 70	横穴水封式 固定水床式 -10~40 人工水封 新期領家花崗岩類 -35m -65m 以深 3 20.5×30×1,030~1,313 15×20×112 ^{注2)} 59.4, 74.5, 2.5 ^{注2)}	横穴水封式 固定水床式 -10~40 自然水封(一部人工水封) 北薩古期安山岩 -20m -100m 以深 3 18×22×1,110~2,220 35, 70, 70
	地上シフトタンク 寸法:直径×高さ 容量×基数	—	フローティングルーフタンク 46.5m×21.9m 3.4 万 kℓ×4 基	—
	受払施設	10 万 DWT 級多点係留浮標式シーバース	太陽石油(株)四国事業所設備を利用 ・28 万 DWT 級多点係留浮標式シーバース ^{注3)} ・8.8 万 DWT 級ドルフィンバース	10 万 DWT 級一点係留浮標式シーバース
	操油施設	配管(原油受払い) 払出ポンプ 容量×台数 シフトポンプ 容量×台数 受払ポンプ 容量×台数 ブースターポンプ 容量×台数 底水排水ポンプ 容量×台数	32B, 30B サブマージブル型 1,350kℓ/h×3 台 サブマージブル型 1,200kℓ/h×2 台 — 遠心横型 2,000kℓ/h×2 台 サブマージブル型 180m ³ /h×2 台 300m ³ /h×4 台	28B, 16B — サブマージブル型 1,000kℓ/h×2 台 遠心横型 300kℓ/h×1 台 ^{注2)} 遠心横型 1,600kℓ/h×2 台 — サブマージブル型 45m ³ /h×4 台 遠心横型 20m ³ /h×2 台 ^{注2)}
用役施設	蒸気設備, 工業用水設備, 飲料水設備, 燃料設備, 圧縮空気設備, 不燃性ガス供給設備, 電気設備			
計装施設	集中管理方式			
安全防災施設	消化設備	消化用水貯水槽, 消化ポンプ, 屋外給水ポンプ, ハロゲン化物消火設備, 固定泡消火設備, 消火器, 消防車・防災船等		
	保安防災設備	油濁防除対策設備, 漏油等検知設備, 通報監視設備, 換気設備, 非常用照明設備, 予備電源設備		
公害防止設備	スロップタンク, 排水処理設備, 排ガス処理設備			
管理施設・その他	総合管理事務所, 資材倉庫, 緑地等			

注 1) 岩盤タンク等地下貯油施設の投影面積、注 2) TK-103(旧実証プラント)、注 3) H13 年改造(当初 13 万 DWT 級)

2.1.3 岩盤タンクの設計

(1) 岩盤タンク貯蔵所に関する消防法の規制

岩盤タンクは消防法上、屋外タンク貯蔵所として位置付けられ、その運用にあたっては1987年5月に定められた「岩盤タンクに係わる屋外タンク貯蔵所の規制に関する運用基準等について」（以降、運用基準と称す）の中で、その位置、構造および設備の技術上の基準、完成検査前検査、保安検査等が規定されている。

運用基準の中で設計上、特に関係の深い事項として以下の項目が挙げられる。

- ① 岩盤タンク間の離間距離の確保
- ② 岩盤タンク周辺の安定した地下水位の確保
- ③ 岩盤タンクの限界地下水位（漏油・漏気を防止するために保たなければならない最低の地下水位）からの深さの確保
- ④ 荷重に対する岩盤タンクの安全性の確保

設計では、これらの項目について種々の検討を実施した。

(2) 岩盤タンクの力学的安定性の検討

岩盤タンクは、操業開始後の開放点検を実施しないことを基本としている。このため、メンテナンスフリーの

観点から可能な限り支保に依存せずに空洞の安定が確保できることを基本として、表 2.1-3 に示す検討を行った。

また、空洞の安定性の検討に用いる解析用岩盤物性値は、各基地の岩種・岩質および岩盤の形成過程に由来する固有の岩盤特性を考慮し、孔内試験などの現位置試験結果と既往文献記載の物性値を比較検討して設定した。3基地の岩盤等級別の物性値を表 2.1-4 に示す。

1) 離間距離の検討

岩盤タンクの離間距離は、力学的条件と水理学的条件の2要素から決定される。前者は空洞間の力学的相互作用をある程度まで低減することを目的とし、後者は空洞間での貯蔵危険物の移流の発生を防ぐことを目的としている。

力学的条件については、消防法の運用基準において岩盤タンクの空間相互の距離を次に定める値L以上確保することと定めている（図 2.1-5 参照）。

表 2.1-3 詳細設計における解析項目⁴⁾

	解析項目	解析内容
岩盤安定	(1)初期地圧の検討	山岳地形における平均地圧モデル設定のための三次元線形弾性解析
	(2)空洞離間距離検討	空洞離間距離設定のための線形弾性解析
	(3)各掘削ステージの安定性検討	非線形弾性逐次解析による各掘削段階の空洞挙動の詳細シミュレート
	(4)断面縮小の検討	岩盤不良部における断面形状変更の検討
	(5)端部形状の検討	三次元境界要素法による空洞端部形状の検討
	(6)支保工の検討	種々の手法による支保工の解析
	(7)爆発圧力耐圧性検討	空洞内爆発を想定した岩盤の安定性検討（線形および非線形弾性仮定の静解析）
地下水理	(1)湧水年涵養量の検討	100年確率の湧水年解析をベースとしたタンクモデルによる地下水涵養量評価
	(2)水封計算 （二次元鉛直断面）	飽和不飽和浸透流解析による空洞掘削前後の地下水位挙動ならびに空洞湧水量の強化
	(3)水封計算 （準三次元解析）	自然状態の地下水位再現解析後の空洞掘削による平面的な地下水位変動の評価
	(4)油混入計算	満液状態の空洞から空液状態の隣接空洞へ貯蔵液移流が生じないことを確認するための解析
	(5)塩水地下水計算	気液二相流解析による海岸近傍の地下空洞湧水中の塩分濃度評価

$$L = \frac{B_1 + H_1 + B_2 + H_2}{4} + R_1 + R_2$$

ここに、

L : 確保すべき距離(当該岩盤タンクの空間の内壁面から隣接する空間の内面壁までの距離)

B₁ : 当該空間の内壁面の最大幅

H₁ : 隣接空間の内壁面の最大高さ

B₂ : 隣接空間の内壁面の最大幅

H₂ : 隣接空間の内壁面の最大高さ

R₁ : 当該空間を構成する岩盤のゆるみ域の幅

R₂ : 隣接空間を構成する岩盤のゆるみ域の幅

表 2.1-4 岩盤等級別岩盤物性値一覧表⁴⁾

	岩盤等級	密度 (g/cm ³)	初期ポアソン比	初期変形係数 (GPa)	せん断強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	初期地圧 (側圧比)
久慈	Hv	2.75	0.25	11.8	3.43	0.69	0.9
	H	2.75	0.25	5.9	2.45	0.49	0.9
	M	2.75	0.30	2.9	1.77	0.35	0.9
菊間	L	2.75	0.35	1.7	1.37	0.27	0.9
	Hv	2.70	0.25	9.8	4.12	0.82	1.2
	H	2.70	0.25	6.4	3.14	0.63	1.2
串木野	M	2.70	0.30	3.4	2.16	0.43	1.2
	L	2.70	0.35	2.0	1.57	0.31	1.2
	Hv	2.50	0.25	5.9	2.06	0.41	1.0
串木野	H	2.50	0.25	3.9	1.77	0.35	1.0
	M	2.50	0.30	2.5	1.47	0.29	1.0
	L	2.50	0.35	1.6	1.18	0.24	1.0

ゆるみ域は、空洞の掘削により、空洞周辺において岩盤の節理が開くなどして、掘削前の岩盤特性から変化した領域をいう。力学的特性面からは周辺岩盤に比べ強度、変形係数、弾性波速度が低下し、ポアソン比が増大する傾向が認められ、水理特性面からは岩盤の透水係数が増大する傾向が認められる。岩盤タンクの設計におけるゆるみ域は、損傷域（破壊領域）に塑性域を含めた範囲として、モールの応力円が破壊包絡線に接近する割合で表現した局所安全係数 $F_s \leq 1.5$ の範囲と定義し、その範囲を地圧、岩盤内の間隙水圧、地震慣性力を考慮して、併設空洞モデルにより二次元線形弾性解析を行って求めた。なお、併設空洞モデルでは地震力を考慮した計算ができないため、単設空洞モデルにて常時と地震時のゆるみ域をそれぞれ計算し、単設空洞モデルにおける常時に対する地震時のゆるみ域の増加率を併設モデルで算出したゆるみ域に乗じて地震時のゆるみ域とした。

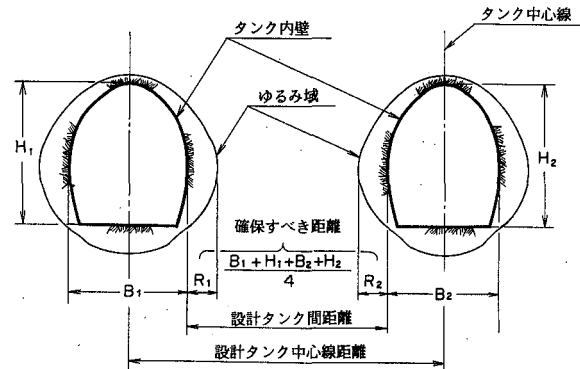


図 2.1-5 確保すべき空洞相互の距離⁴⁾

2) 岩盤タンクの安全性照査

岩盤タンクの安全性照査は、空洞に対する荷重の作用状況を勘案し、地圧等の外圧に対する検討と、爆発圧力等の内圧に対する検討に分けて実施した。前者においてはこれを内面から施工する支保工が妥当であることを示し、後者においては周辺岩盤が十分な剛性、強度を有していることを示した。岩盤タンクの掘削は、ロックボルトと吹付けコンクリートを支保部材とする NATM を採用している。そこで支保の設計は、従来の相当数にのぼる地下発電所の設計・施工実績や菊間実証プラントの実績を重視することを前提に、その他の経験則をベースとして配置した支保パターンを設計時点で妥当と考えられる手法で検証するという方法を用いた。すなわち、支保部材を含めた岩盤タンクの外圧に対する安全性は、その内容によりタンク天端や側壁における「局

所安定性検討」、グラウンドアーチに関する「全体安定性検討」、および支保部材の機能を保証する「支保部材の健全性検討」という三つのパートから検討し、確認した。なお、吹付けコンクリートについては、強度条件、打設条件および形状など、解析上モデル化が困難な部分が多いため、空洞内壁の肌落防止や局所的な応力集中の緩和等その効果は十分期待できるものの、安全側をみて支保工の検討から除外している。串木野基地の代表岩盤に対応する支保パターンを図 2.1-6 に示す。

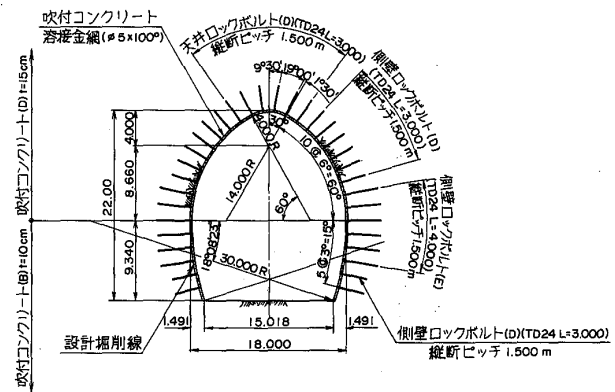


図 2.1-6 串木野基地 Hv 級岩盤の支保パターン⁴⁾

また内圧に対する検討は、タンク内爆発圧力 (1MPa・G) を含む設計内圧に対する岩盤タンクの安全性確認として、タンク周辺岩盤の安定性と地表への影響の二点を評価項目とし二次元弾性解析により行った。周辺岩盤の安定性は、内圧に対してタンク周辺岩盤が十分な拘束力、すなわち地圧を有しているかという点を確認し、地表への影響については、爆発圧力作用時の地表変位が微小であることを確認した。

(3) 水封機能の検討

岩盤タンクは水封方式による貯蔵を基本としており、水封機能を中心とした地下水理の検討は重要な課題である。そのため表 2.1-3 に示す解析を実施し、タンク内の貯蔵圧力より大きな間隙水圧が常に確保できることを確認した。以下にその中でも特に重視した地下水涵養量の設定と安定した地下水位の確保について概説する。

1) 地下水涵養量の設定

消防法の運用基準では、100 年確率程度の渇水年および地表形態変化時における水封機能の健全性を確認することになっており、その際の地下水涵養量の評価が重要な要件となる。そこで年降水量の確率処理を行って対象渇水年がどの程度の再現期間を持つ渇水年であるかを検討し、対象渇水年の降水量データにタンクモデル法を用いて対応する地下水涵養量を算定した。タンクモデル法は雨量から河川流量を推定する流出計算手法であり、ここでは対象流域の流出機構を表現するために 4 段タンクモデルを採用した。

また、地表形態変化については山火事等によって樹木が焼失した場合を想定し、焼失後の流出率の変化を考慮することによって地下水涵養量を評価した。表 2.1-5 に各基地の地下水涵養量の推定結果を示す。

表 2.1-5 各基地の地下水涵養量推定値⁴⁾

	統計年数	渇水時涵養量	地表形態変化時
久慈基地	77 年間	0.6mm/日	0.5mm/日
菊間基地	96 年間	0.25 mm/日	0.2 mm/日
串木野基地	98 年間	0.8 mm/日	0.7 mm/日

2) 安定した地下水位の確保

消防法の運用基準では、岩盤タンクの内壁から岩盤タンクの最大幅の 5 倍の水平距離を有する範囲の地下水位は、安定したものであり、常に限界地下水位以上の水位が

保たれなければならないとなっている。限界地下水位は、地下水面から岩盤タンク最上部までの最低深さ H_w として、次の式で定義される。

$$H_w = 0.1 \cdot P + H_o$$

ここに、

P : 岩盤タンク的设计最大圧力で、
3基地ともに $50\text{kPa} \cdot G$

H_o : 余裕深さで、3基地ともに 15m
設計では、図 2.1-7 に示すフローにて岩盤タンク設置後の地下水位を検討した。

a. 解析手法

岩盤内の地下水の流れはダルシーの法則および連続式に従うものとして、自由水面の取扱いが比較的簡単な自由水面上部の不飽和領域を含めた飽和・不飽和土中の浸透流解析理論を用い、鉛直二次元モデルによる定常浸透流解析を行った。

b. 岩盤の水理特性

岩盤の飽和透水係数は、基地周辺におけるルジオンテストで求められた透水係数に対数分布平均法を適用し算出した。また、岩盤の不飽和特性の設定に当たっては駒田の方法⁵⁾を適用した。解析に用いた3基地の平均透水係数 k_o と不飽和特性設定のための間隙率 n 、自然含水率 θ_n および毛管上昇高 h_p を表 2.1-6 に示す。

c. 解析条件

空洞モデルは、空洞の安定解析で得られた L 級岩盤の局所安全係数 $F_s \leq 1.5$ のゆるみ域を空洞の一部と見なした等価な円形モデルとした。また人工水封設備については、水平水封ボーリング孔の間隔および長さをそれぞれ Muskat の理論⁶⁾、上田の理論⁷⁾より、隣接タンク間の貯蔵原油移流防止のための縦水封ボーリング孔間隔を B. Aberg の式⁸⁾により概略設計し、それらの設置位置に所定の圧力を与えた浸透流解析を行って設備諸元の妥当性を確認した。久慈基地の空洞掘削後の等圧力線図を図 2.1-8 に示す。

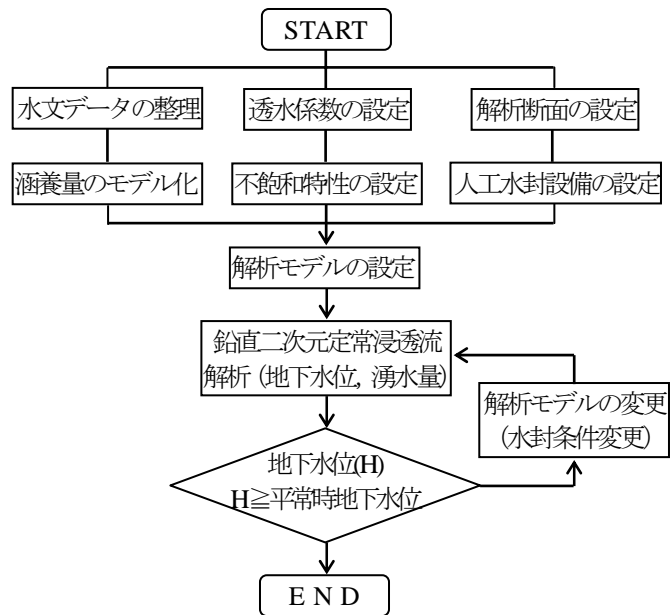


図 2.1-7 地下水位の検討フロー

表 2.1-6 平均透水係数と不飽和特性の設定に用いた定数⁴⁾

	久慈基地		菊間基地		串木野基地	
	風化帯	新鮮岩盤	風化帯	新鮮岩盤	風化帯	新鮮岩盤
k_o (cm/s)	3.2×10^4	7.6×10^6	1.0×10^4	6.4×10^7 2.5×10^6	6.8×10^4	1.5×10^7 1.0×10^6
n	0.25	0.05	0.25	0.05	0.25	0.05
θ_n	0.075	0.025	0.075	0.025	0.075	0.025
h_p (m)	1.5	3.0	1.5	3.0	1.5	3.0

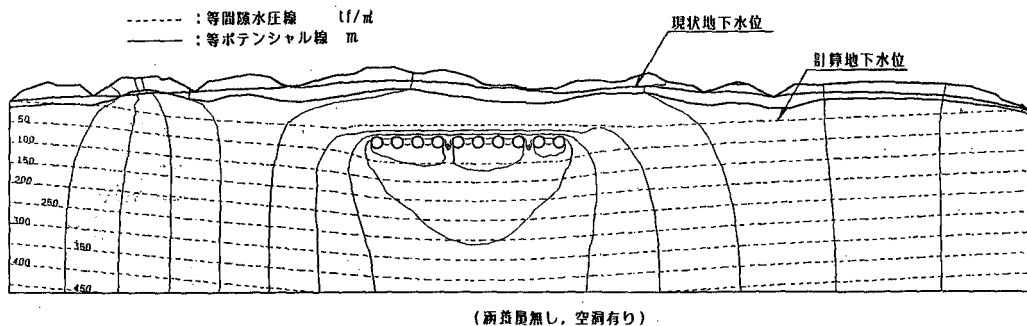


図 2.1-8 空洞掘削後の等圧力線(久慈基地)⁴⁾

(4) 岩盤タンク貯蔵所の安全性確保

岩盤タンク貯蔵所の安全性を確保することを目的に、Hazard & Operability Studies (HAZOP)、Fault Tree Analysis (FTA) および Event Tree Analysis (ETA) の3手法を用いて、安全上の問題点・留意点を抽出し、点検・検査の項目を含めた予防対策、異常事態の検知、異常時の緊急対策、拡大防止対策といった各段階の安全対策について検討した。

安全上の問題点・留意点の抽出は、図 2.1-9 に示すように、まず岩盤タンク貯蔵所の重大災害要因を HAZOP により抽出し、これに基づき FTA の頂上事象の設定を行い、設定の頂上事象に対して FTA により事故の発生要因を分析し、発生要因に対する防止対策上の問題点・留意点を抽出した。さらに、FTA 事象の内、他と比較して発生の可能性が高いと考えられる事象を起点とした ETA を行い、災害の拡大経路を分析して災害拡大防止対策上の問題点・留意点を抽出した。

表 2.1-7 重大災害要因と頂上事象⁹⁾

HAZOPによる 重大災害要因	FTAの頂上事象
① 貯油槽内での爆発性混合気形成	→ 貯槽内の火災・爆発
② 坑道内での漏油, 可燃性蒸気の漏洩	→ 堅坑上部室内の火災・爆発
	→ サービスンネル内の火災・爆発
	→ 地下電気室内の火災・爆発
③ 貯油槽からの漏油, 可燃性蒸気の漏洩	→ 貯油槽からの漏油
	→ 貯油槽からの漏気
④ サブマージブルポンプ保守, 交換時の爆発性混合気形成	→ サブマージブルポンプ保守, 交換時の火災・爆発
⑤ 被害地震(短期), ゆるみ域増大(長期)	→ 空洞の安定性低下, 地下水位の異常低下

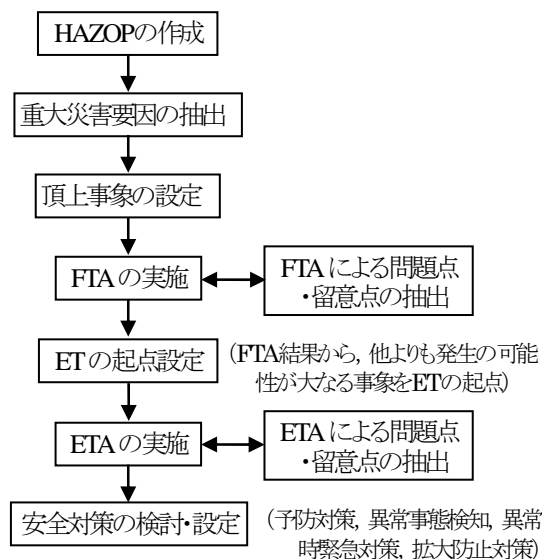


図 2.1-9 安全上の問題点・留意点の抽出フロー⁹⁾

図 2.1-8 に発生可能性が高いと考えられる事象を示す。

表 2.1-8 発生の可能性が高いと考えられる事象⁹⁾

ETの起点
(イ) 堅坑上部室内での漏油・・・原油配管フラジシール部の劣化を想定
(ロ) 堅坑上部室内での漏気・・・貯油槽ベーパーゾーンと直結するガス配管の開放(誤操作)を想定
(ハ) サービスンネルでの漏油・・・ドレン弁の開放(誤操作)
(ニ) サブマージブルポンプ保守, 交換時の漏油・漏気

2.2 岩盤タンクの点検・検査システム

2.2.1 点検・検査フロー

岩盤タンクの維持管理における点検・検査システムは、日常点検、定期点検、定期保安検査および臨時保安検査で構成される。図 2.2-1 に岩盤タンクの点検・検査フローを示す。

日常点検は事業者あるいは管理者が自ら実施するものであり、定期点検および定期保安検査は基地の所在する市町村長が消防法の定める技術上の基準に従って維持されていることを確認するものである。定期点検は、主に日常点検において行われなかった事項を対象とするもので、一般的な危険物施設と異なる事項は少ない。定期保安検査は、主として日常点検または定期点検で行われなかった事項を対象に行うが、日常点検、定期点検で得た蓄積データに基づき実施する事項も多い。また、臨時保安検査は、想定を超える地震力、その他の著しい異常が発生したと認められた場合に、まず事前調査確認として3段階の特別点検を行い、その総合的評価から岩盤タンクの内部開放による検査の必要性があると判断された場合に臨時保安検査を実施することになる。

岩盤タンクの維持管理においては、検査や点検の項目が相互に関連していることから総合的な検討が必要となる。特に、日常点検における岩盤タンク湧水量、人工水封水供給量、観測孔の地下水位、漏油・漏気検知器作動の有無等の蓄積された管理データが、定期保安検査時の基礎データとして活用されるため、岩盤タンクの維持管理においては日常点検の重要度が極めて高いと言える。

2.2.2 定期保安検査の項目と評価方法

定期保安検査は、市町村長等が消防法第14条の3第1項の規定に基づき、岩盤タンク貯蔵所の構造または設備のうち特定の事項が消防法第10条第4項の技術上の基準に適合して維持されているかどうかについて、「岩盤タンクに係る屋外タンクの貯蔵所の保安検査に関する運用基準について（平成4年消防危第6号）」に従って10年（±1年）ごとに行う検査であり、通常の運転状態において水封機能を正常に維持することを基本とし、岩盤タンクの開放検査は行わないことを前提として実施される。定期保安検査の検査項目とその主旨・目的を図 2.2-2 に、具体的な検査内容、検査方法を表 2.2-1 に示す。

ここで、岩盤タンクの力学的安全性の確認方法については、岩盤タンク周辺の岩盤または堅坑プラグに異常が発生した場合、透水性の変化となって現れることから、

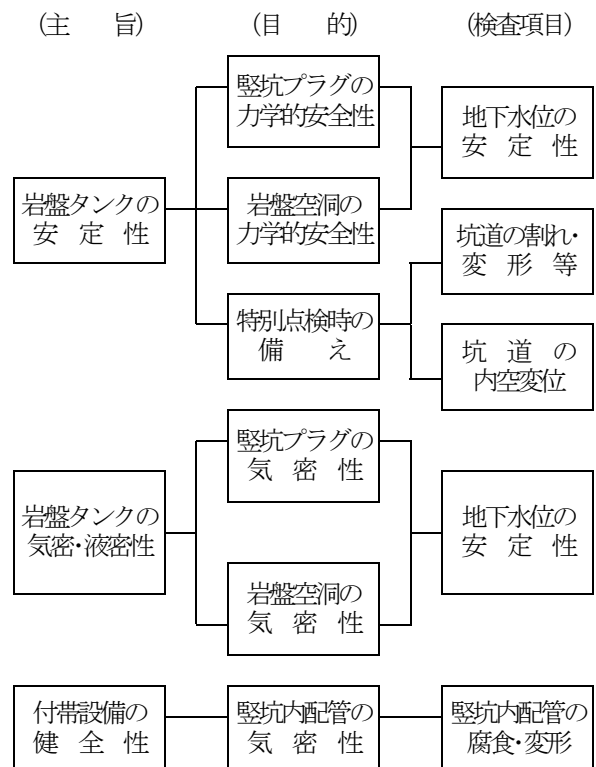
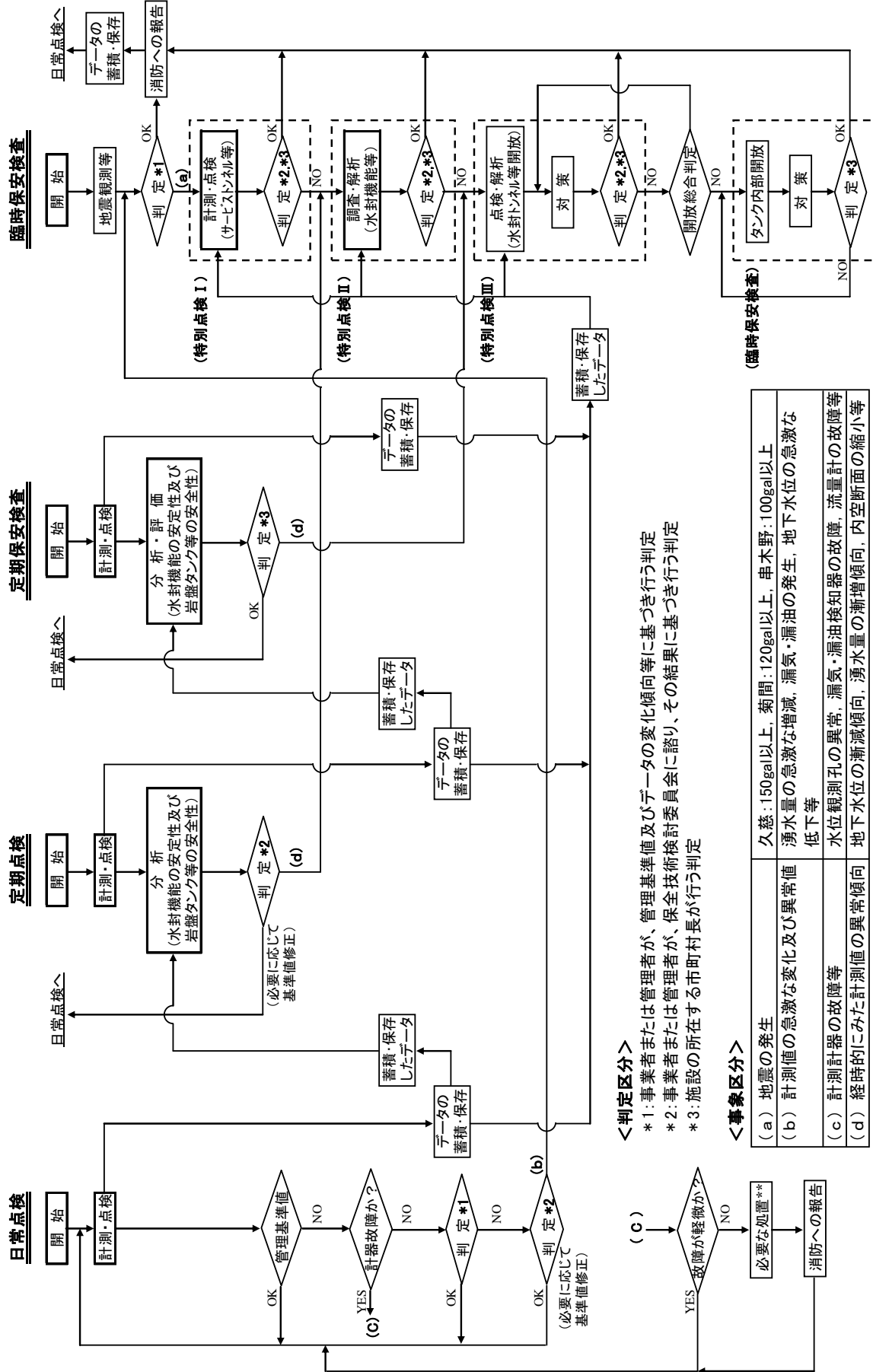


図 2.2-2 定期保安検査の検査項目とその目的¹⁾



<判定区分>
 *1: 事業者または管理者が、管理基準値及びデータの変化傾向等に基づき行う判定
 *2: 事業者または管理者が、保全技術検討委員会に諮り、その結果に基づき行う判定
 *3: 施設の所在する市町村長が行う判定

<事象区分>

(a) 地震の発生	久慈:150gal以上、菊間:120gal以上、串木野:100gal以上
(b) 計測値の急激な変化及び異常値	湧水量の急激な増減、漏気・漏油の発生、地下水位の急激な低下等
(c) 計測計器の故障等	水位観測孔の異常、漏気・漏油検知器の故障、流量計の故障等
(d) 経時的にみた計測値の異常傾向	地下水位の漸減傾向、湧水量の漸増傾向、内空断面の縮小等

* 必要な処置** : 計器類の取替・位置変更、水位観測孔の大規模補修等

図 2.2-1 岩盤タンクの点検・検査フロー⁽¹⁰⁾

表 2.2-1 定期保安検査の検査内容と検査内容¹⁰⁾

検査項目	検査内容	検査方法		備考	
		資料検査	現地検査		
漏油・漏気検知	漏油・漏気の有無	検知記録一覧表	目視検査	日常点検記録	
岩盤タンクの安全性	縦坑プラグ	縦坑水封水位の異常の有無	計測データ経時変化図	—	日常計測記録
		縦坑水封水供給量の異常の有無	計測データ経時変化図	流量計による計測検査	日常計測記録
	坑道の内空変位	内空相対変位の異常な変化の有無	計測データ経時変化図	変位計測検査	定期計測記録
	縦坑上部室間距離	縦坑上部室間距離測定	計測データ経時変化図	距離計測検査	定期計測記録
	坑道の変状等	吹付コンクリートクラック幅の異常な変化の有無	計測データ経時変化図	—	定期計測記録
		吹付コンクリート等の異常の有無	点検記録一覧表	目視検査	日常点検記録
	総合評価	水封機能の安定性の評価結果から判定			
水封機能の安定性	地下水位	観測孔内水位の異常の有無	計測データ経時変化図	手検尺による検査	日常計測記録
	岩盤タンク湧水量	湧水量の異常の有無	計測データ経時変化図	流量計による計測検査	日常計測記録
	水封水供給量	供給量の異常の有無	計測データ経時変化図	流量計による計測検査	日常計測記録
	水封水位	水封水位の異常の有無	計測データ経時変化図	目視検査	日常計測記録
	水収支(自然涵養量)	自然涵養量(=降雨量-蒸発散量-河川流出量)の年間日平均値	年変動図	雨量計、蒸発量計、河川流量計の作動確認	定期点検集計値
	総合評価	上記蓄積データから総合的に評価・判定			
設備の健全性	縦坑水封部配管の外側の腐食、変形	縦坑水封部に設置された油中ポンプ等の保護管、危険物配管の外側の腐食、変形の有無	水中心検報告書(ビデオを含む)の確認	水中カメラ(潜水夫)による目視検査	腐食または変形が認められた場合、 腐食:肉厚測定 変形:変形量の測定を別途実施
	その他設備	日常・定期点検における点検結果の確認	点検・整備記録の確認	目視および作動等確認	定期点検記録

水封機能の安定性の確認と同じく地下水位、岩盤タンク湧水量、人工水封水供給量、堅坑水封水供給量の変動傾向を確認することになる。また、サービストンネル、堅坑上部室等の坑道の割れ・変形等のないことの確認ならびに内空等相対変位の計測は、想定を超える地震等の著しく大きな荷重が岩盤タンクに加わった場合の特別点検時における岩盤タンクの力学的安全性を総合的に評価するための補足資料として、整理・蓄積するものである。

2.2.3 日常点検および定期点検の項目と内容

定期点検は、市町村長等が消防法第 14 条の 3 第 2 項の規定に基づき、岩盤タンク貯蔵所の構造または設備のうち特定の事項が消防法第 10 条第 4 項の技術上の基準に適合して維持されているかどうかについて、「岩盤タンクに係る屋外タンクの貯蔵所の定期点検等に関する指導指針について（平成 4 年消防危第 7 号）」に従って原則として 1 年に 1 回以上行う検査である。日本地下石油備蓄財は、具体的な定期点検および日常点検要領として当該指導指針に基づき「保全業務管理基準」ならびに「岩盤タンク等点検基準」を定めて運用している。

ここでは、地上設備などの直接目視および計測等可能な施設の点検等は一般的な危険物施設と同様であることから省略し、岩盤タンク等土木施設および通常は直接的な点検・整備が不可能な岩盤タンク付帯設備の日常点検・定期点検について、点検項目、点検内容・方法、ならびにこれらに係る約十数年の操業を通して表れた現象や知見等を特記事項として表 2.2-2(1)～(2)、表 2.2-3(1)～(2)にそれぞれ示す。

点検の主要項目についての要点は、以下の通りである。

(1) 水封機能の安定性に関する点検

各基地とも地下水観測孔水位、岩盤タンク湧水量、水封水供給量、堅坑および水封トンネル等の水封水位、ならびに降水量、蒸発量、河川流出量の測定結果より算定される水収支（地下水補給量）を日々観測・記録している。地下水位観測孔は、消防法の通達に従って岩盤タンクの 5B（B はタンクの幅）の範囲内で 4 万 m²に 1 箇所の割合で設置されている。日常点検では、設備の能力および建設時のデータも含めた過去の変動範囲から運用管理値を定めて点検を行っている。

点検結果は、年 1 回開催する学識経験者等より構成された保全技術検討委員会、およびその中間に開催する保全技術検討分科会において、それらの蓄積データに基づき、地下水観測孔や堅坑等水封部の漏油・漏気監視結果と合わせて総合的に評価・判定している。運用管理値を外れた場合、または外れる恐れのある場合、その他計測値がこれまでと異なる傾向等を示した場合は、その都度保全技術検討分科会を開催し、既設・新設ボーリング孔による各種検層、地表等からの物理探査等の調査手法を組み合わせた調査を実施するなどして、建設時の地質や各種の観測データと併せて評価・判定している。なお、これまでに幾つかの運用管理値はその値を外れたために、保全技術検討委員会の審議を経て、これを変更している。

もっとも、岩盤タンク等点検基準の特別点検を必要とする事象（図 2.2-1 の事象区分参照）とする (b) の計測値の急激な変化や (d) の経時的な計測値の異常傾向については、定量的な閾値、あるいは客観的な判断手法が定まっているわけではない。こ

のため、特別点検の必要の有無以前に、操業管理の担当者は日々変動する観測値が正常な範囲なのか異常なのかの判断が困難で、迅速な対応、臨機の処置に苦慮しているという課題を抱えている。

また、地下水観測孔水位、岩盤タンク湧水量、水封水供給量等の変動傾向により岩盤タンクの安全性を評価する手法は、全体監視であり、安全性が保たれていることを確認するには有効であるが、タンクの安全性に影響を及ぼすような周辺岩盤の局所で物性値の変化が生じた場合、その場所や範囲、その変化の程度を評価するには十分な情報を与えるものにはなっていない。

一方、岩盤タンクには周辺の地形から定まる集水域以外からも地下水が供給されている。これ自体は水封機能の安定にとって好ましいことであるが、その流域は十分に把握できていない。岩盤タンク保全のための規制区域（5B）外での工事や取水等による自然地下水の供給の阻害、遮断が水封機能へ及ぼす影響は大きいと予想されることから、岩盤タンクの地下水理上の影響圏を把握することも今後の課題である。

(2) 岩盤タンクの力学的安全性に関する点検

岩盤タンクの力学的安全性に関しては、岩盤タンク周辺岩盤または堅坑プラグに異常が発生した場合、透水性の変化となって現れることから、水封機能の安定性の評価項目と同様に地下水観測孔水位、岩盤タンク湧水量、水封水供給量、堅坑等の水封水位の変動傾向より総合的に評価・判定している。

サービストンネル、堅坑上部室等坑道の変状等観察ならびに内空等相対変位計測については、想定を超える地震等の著しく大きな荷重が岩盤タンクに加わった場合の特別点検時の岩盤タンクの力学的安全性を総合的に評価するための補足資料として、整理・蓄積しているものである。なお、3基地における約10年間の測定データから堅坑上部室等坑道の挙動特性ならびに各種データの相互関係を分析した結果、これらは測定箇所のごく近傍の吹付コンクリートや岩盤状況を反映したもので、必ずしもタンク周辺岩盤の挙動を反映したものではないことが明らかになっている¹²⁾。

2001年3月24日の芸予地震では、サービストンネル内に設置している地震計で149gal(NS)と設計の想定以上の地震動であったため、特別点検Iを実施して岩盤タンクの機能に異常が無いことを確認した。

(3) 堅坑水封部配管の気密性に関する点検

旧実証プラントの菊間基地 TK-103 受入堅坑内の保護管は炭素鋼鋼管で電気防食が施されており、それ以外はステンレス鋼管が採用されている。

堅坑水封部の配管検査は、10年に1度の定期保安検査において、水中カメラによる目視確認ならびに必要な応じ超音波探査による肉厚測定が実施されている。その結果、3基地の何れの配管も先般の定期保安検査では、腐食・変形は認められていない。

なお、現行の水中カメラによる目視検査という手法は、良好な映像の確保、観察面の清掃、1回の潜水時間の制限、潜水夫との連絡等の観点から、効率的な検査方法とは言えない。このため、水質分析と有害な腐食の有無の確認用モニタリングピースの設置を組み合わせた腐食環境モニタリング手法の導入に向けて、データの蓄積を開始したところである。

表 2.2-2(1) 日常点検の項目、内容と点検方法等(その1)¹⁰⁾

点検項目		点検内容	点検方法	頻度	管理基準	特記事項
漏油・漏気(地下水位観測孔及び各水封部)		原油、可燃性蒸気の漏洩の有無	漏油、漏気検知器で検知し、中央計器室で警報	常時	漏油・漏気のないこと	・地下水位観測孔内の漏油検知器は水質の劣化により時々誤作動あり
水封機能	地下水観測孔水位	水位の異常の有無 (岩盤タンク周辺 5B の範囲の 4 万 m ² に一箇所設置)	中央計器室で表示・記録	1 回/日	異常な変化がないこと (運用基準値以上)	・地下水位、湧水量、水封水供給量は、降水、気圧、潮汐などの自然要因及びタンク内圧などの操業条件によって常に変動する。また、これらは、水封水位と合わせてお互いが直接的・間接的に影響を及ぼす。 ・湧水量、水封水供給量は、目詰まりの進行により長期的に漸減傾向を示す。 ・水封水位は、下限水位を制御しているため、豊水期には給水量が0となり、さらには自然上昇する箇所もある。
	岩盤タンク湧水量	湧水量の異常の有無	現場流量計読取・記録	1 回/日	異常な変化がないこと	
	水封水供給量	供給量の異常の有無	現場流量計読取・記録	1 回/日	異常な変化がないこと	
	水封水位	水封水位の異常の有無	中央計器室で表示・記録	1 回/日	異常な変化がないこと	
	水収支(地下水補給量)	雨量計、蒸発量計、河川流量計	自記記録計	1 回集計/月	<ul style="list-style-type: none"> ・雨量、蒸発量は、樹木等周辺環境の影響を強く受ける。 ・流量が多いと、堰を越流し正確な計測ができない。 ・菊間 TK-102 湧水の pH は徐々に上昇し、平成 11 年以降 pH10 を越えている。また、TK-103 湧水は海水が 14% 程度混入している。 ・3 基地の水封トンネル湛水の細菌数は、数万から数十万個/ml オーダーで大きな変化はない 	
	水封水・湧水等水質	目詰まり等の監視 (pH, EC, Eh, DO, COD, SS, TOC, SiO ₂ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Fe, Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , PO ₄ ³⁻ , 全菌数, 好気性細菌数, 嫌気性細菌, 硫酸還元菌数)	一般水質、細菌数等	4 回/年		
坑道	各坑道内	吹付コンクリート等の異常の有無	目視	1 回/日	吹付コンクリートの剥離等がないこと	・1回/月は専門家による目視点検
	坑口及び坑口周辺	変形及び埋没の危険性の有無	目視	1 回/日	法面の変形、落石、倒木等がないこと	
水位観測孔周辺		埋没等の危険性の有無	目視	1 回/月	<ul style="list-style-type: none"> ・専門家による目視点検 	
周辺地山等		山崩れ等の危険性有無	目視	1 回/月		

表 2.2-2(2) 日常点検の項目、内容と点検方法等(その2)¹⁰⁾

点検項目		点検内容	点検方法	頻度	管理基準	特記事項
地震	地震加速度	強震計(サービストンネル内に1箇所)	中央計器室で記録・警報	常時	5ガル以上で記録、図-10に示す加速度以上で警報	<ul style="list-style-type: none"> 湧水量、水封水供給量が大きく変化。 観測孔水位も変化するが、その影響は大きくない。 地震の影響は1年程度で解消される。 湧水量や地震時過剰間隙水圧の変動は、加速度よりも変位速度との対応が良い。
	間隙水圧(動的、静的)	サービストンネルから下向きのボーリング孔(2孔)内に3箇所/孔の計6箇所計測	地下電気室内で記録(平常時は静的データを記録、5ガル以上の地震発生時に動的データを記録)	常時		
貯蔵状態	タンク内圧	圧力異常の有無	中央計器室で監視・警報	常時	管理基準値内	<ul style="list-style-type: none"> タンク内圧は気圧変化に連動(高気圧通過時:低下、低気圧通過時:上昇) 油面低下と湧水量の一時的急増を数回経験、水床部堆積スラッジの崩壊が原因と推測。
	油面・油水界面高	油面・界面異常の有無	中央計器室で監視・警報	常時	管理基準値内	
	油温・水温	温度異常の有無	中央計器室で監視・警報	常時		
	酸素濃度	酸素濃度異常の有無	中央計器室で監視・警報	常時	管理基準値内	
	気温・気圧		中央計器室で表示	1回/時		
付帯設備	底水排水ポンプ	運転異常の有無	中央計器室で監視・警報	稼動時	運転状態に異常のないこと 目視による異常、異音、異常振動及び異常発熱等のないこと	
	排水処理設備	運転異常の有無	中央計器室で監視・警報	1回/日		
	水封水供給設備	給水異常の有無	現場目視、中央計器室警報	1回/日		
	排ガス処理設備	運転異常の有無	現場目視、中央計器室警報	稼動時		
	不燃性ガス供給設備	運転異常の有無	現場目視、中央計器室警報	稼動時		
	換気設備	運転異常の有無	現場目視、中央計器室警報	1回/日		
	照明設備	損傷等異常の有無	現場目視、中央計器室警報	1回/日		
その他						

表 2.2-3(1) 定期点検の項目、内容と点検方法等(その1)¹⁰⁾

点検項目		点検内容	点検方法	頻度	特記事項
水封機能	地下水観測孔水位	水位の異常の有無	計測データ経時変化図	1回集計/年	<ul style="list-style-type: none"> • 現行の測定データは、全体の状態把握には有効であるが、局所的な異常の検知には必ずしも十分でない。 • 空洞掘削の影響で地下水位が低下した領域の一部に、いまだ回復が十分でない箇所が残存している。 • 菊間、串木野基地では、採土や林道建設に伴い近傍観測孔水位の変動傾向に変化が認められた。 • 目詰まり等の給水量減少抑制・回復のため、サービストンネル等坑道内の注水孔は、定期的な洗浄等工事が必要。 • 岩盤タンク周辺には、タンク周辺以外のより広い範囲から自然地下水の供給があり、左記の計測データから得られる地下水補給量と地下水位変動との相関性は低い。 • 左記のほか、久慈基地の水封機能維持工事における効果の予測など計画立案の参考とするため、解析対象範囲や格子の大きさを縮小する等、逐次解析モデルを改良している。 • 岩盤タンク周辺の地下水位の異常の有無を総合的に確認(保全技術検討委員会にて審議)
	岩盤タンク湧水量	湧水量の異常の有無	計測データ経時変化図	1回集計/年	
	水封水供給量	供給量の異常の有無	計測データ経時変化図	1回集計/年	
	水封水位	水封水位異常の有無	計測データ経時変化図	1回集計/年	
	水収支(地下水補給量)	雨量計、蒸発量計、河川流量計	年変動図	1回集計/年	
	水封機能解析	2成分2相3次元浸透流解析(GETFLOWS) ・現状の岩盤タンク周辺の水理状況再現解析 ・湧水時等の将来予測解析 ・運用基準値の妥当性等評価		1回/年	
	水封機能の安定性	上記の測定記録に基づき、水封機能の安定性に関する分析・評価		1回/年	
坑道	各坑道内 (サービストンネル、非常用トンネル、豎坑上部室等)	内空相対変位測定*1)	指定箇所のコンバージェンスメジャーによる測定	オイルイン前後 :各1回 オイルイン後1年 以降:2回/年	<ul style="list-style-type: none"> • 内空相対変位で累計が 1mm を超えた側線は、近傍への側線の追加や弾性波探査を行って緩みの範囲、深度等を確認している。 • 吹付コンクリートクラック幅は季節的な変動を示す。また変状の進行が一部に見られるが、その範囲は局所的で岩盤深部への緩み域の進行を示すものではなかった。 • 串木野基地では最近、サービストンネル等坑道の一部で変状が認められるようになってきた。
		吹付コンクリート等の異常の有無	指定箇所のクラック幅測定		
		サービストンネル地質不良部の吹付コンクリート等の異常の有無	指定範囲の目視及びスケッチ(亀裂の伸長等がある場合)	1回/年	
		豎坑上部室間距離測定	光波測距器による計測	1回/年	

*1) 豎坑上部室鉛直側線は 1回/年

表 2.2-3(2) 定期点検の項目、内容と点検方法等(その2)¹⁰⁾

点検項目		点検内容	点検方法	頻度	特記事項
坑 道	坑口	保安物件新設等の有無	目視(該当物件がある場合は実測)	1回/年	
	水位観測孔周辺	坑口前面空地に許可外物件の存置の有無	目視	1回/年	
	岩盤タンク等の安全性	上記の内空相対変位、吹付コンクリートクラック幅および堅坑上部室間距離等測定データの分析・評価		1回/年	・岩盤タンクの力学的安全性は水封機能の安定性の分析・評価結果に基づき評価。内空相対変位等のデータは参考値である。
防護壁		損傷の有無	目視	1回/年	
植生調査		赤外カラー航空写真の撮影と現地調査から樹木活力の現況及び植生の生育状況を調査		1回/2年	・久慈基地では、岩盤タンク直上の沢が空洞掘削の影響で枯れ、現在までのところ建設以前の状態には回復していない。 ・台風、塩害等自然現象による影響を確認
貯 槽 内 ポ ン プ	底水排水ポンプ	分解整備(工場)		1回/5~7年	・不具合事例として、メカニカルシール漏れやモータの絶縁低下の報告がある。 ・各基地とも、ポンプ引上げ時に炭酸カルシウムの固着が観察されている。特に菊間基地 TK-102 が顕著である。
	油中ポンプ	分解整備(工場)		1回/7年	
堅坑内水中配管の気密性		水中カメラ(潜水夫)により、油中ポンプ等の保護管、危険物配管の外面の腐食、変形の有無を目視点検		定期保安検査前	・水封底部は強アルカリ。 ・配管表面に炭酸カルシウムが固着しており事前に点検部分の清掃が必要。 ・目視点検に加え肉厚測定を任意実施(減肉はない)。 ・菊間 TK-103 の保護管は炭素鋼鋼管で電気防食をしている。適宜電位測定を行っており、現在までのところ腐食等は認められていない。
その他					

2.2.4 現行の点検・検査システムの課題

オイルイン後の十数年の操業において、上述の岩盤タンクの点検・検査システムを運用した実績から浮かび上がった当該点検・検査システムの課題は、以下のように整理される。

- ◇ 日常的な観測データ変動に対する定量的な判定手法が確立されていないため、操業管理の担当者は日々変動する観測値が適正な範囲なのか異常なのかの判断が困難で、迅速な対応、臨機の処置に苦慮している。そこで、日常管理での利用が可能なタンク周辺岩盤の損傷の発生等に伴う計測データの変動傾向の変化を検出することができる分析手法の検討・開発が必要である。
- ◇ 現行の点検データは、安全性が保たれていることを確認するには有効であるが、安全性に影響を及ぼす岩盤の損傷が局所的に発生した場合、その箇所の特定制傷の程度の評価には十分な情報を与えるものとはなっていない。そこで、損傷箇所等の特定、損傷の程度等の評価が可能な新たな点検手法を追加する必要がある。
- ◇ 岩盤タンクには、周辺の地形から定まる集水域以外からも地下水が供給されており、水封機能の安定に寄与しているが、その流域は十分に把握できていない。岩盤タンク保全のための規制区域外での工事や取水等による自然地下水の供給の阻害、遮断が水封機能へ及ぼす影響は大きいと予想されるため、岩盤タンクの地下水理上の影響圏を把握する必要がある。
- ◇ 坑道の内空変位やクラック幅等の測定値は、測定箇所近傍の吹付けコンクリートや岩盤の状況を反映したもので、必ずしも岩盤タンクの挙動をモニターできるものではない。そこで、岩盤タンクの挙動をモニターできる新たな点検手法の導入が必要である。

すなわち、現行の点検・検査システムにおける点検データの分析・評価に定量化手法を導入して客観性を向上させること、および現行の点検・検査システムを補足・補完する新たな点検手法を追加・導入し、岩盤タンクの安全性評価の精度と信頼性を向上させることが必要といえる。

2.3 まとめ

本章では、まず我が国で初めての水封式岩盤タンクによる地下石油備蓄基地の概要を述べるとともに、水封式岩盤タンク設計時の主要な検討項目、設計定数等を示して、岩盤タンクの安全性確保において具備されるべき最低条件を整理した。次に現行の岩盤タンクの点検・検査システムについて、法的な規制に基づく点検・検査ならびに自主的な点検の主旨と目的、点検項目、点検内容と方法、点検・検査の流れを述べるとともに、十数年の操業を通して経験した事象や知見を示して、課題を整理した。

岩盤タンクは、開放点検が行われないことを前提として、メンテナンスフリーの観点から長期的に安全性が確保されるよう十分な配慮をもって設計され、岩盤タンクの点検・検査システムでは、開放による直接的な点検が困難なことから、水封式という特徴を逆に利用し、岩盤タンク周辺の地下水理の状態変化を監視することで水封機能の安定性と岩盤タンクの力学的安全性の双方を評価する手法を採っている。

しかしながら、地震時における岩盤タンク湧水量等の急変や岩盤タンク掘削に伴う地下水位低下域の一部での回復の遅れ、サービストンネル等坑道の一部での変状の発生など、当初設計時では想定されていない事象や、オイルイン後十数年経過した現在、坑道の一部に劣化も見られるようになっている。

岩盤タンクは、非常に大規模な半人工構造物で、複雑な条件下に存在しており、いざダメージが生じると、即効かつ有効な対策案が現時点では確立されておらず、修復等の費用及び時間が莫大となる。また、安全・安心への意識の高まりといった昨今の社会環境の変化に対応するため、岩盤タンクの安全性の点検・評価についてもその精度、信頼性、客観性を向上させる必要がある。

したがって、的確で早期の異常検知および信頼性の高い客観的評価が可能なより合理的な保全点検システムの構築が必要であり、このための手段として、タンク周辺岩盤の物性変化の検知あるいは評価が可能な新たな点検手法、現行の観測データのタンク周辺岩盤の物性変化に伴う変動傾向の変化を検出する統計的時系列解析手法、およびこれら手法を統合したより信頼性の高い合理的な保全点検システムについて研究した成果を次章以降に述べる。

参考文献

- 1) 石油公団:岩盤タンク技術指針, 石油学会, 2001.
- 2) 石油公団:平成 14 年度 海外 LPG 岩盤貯蔵基地の操業に係わる技術調査業務 データベース操作マニュアル, 電源開発(株), 2003.
- 3) 日本地下石油備蓄(株):日本地下石油備蓄 10 年史, 1996.
- 4) 日本地下石油備蓄(株):久慈・菊間・串木野地下石油備蓄基地工事記録(岩盤土木), 1994.
- 5) 駒田広也:飽和・不飽和土中の非定常浸透流解析, 電力中央研究所報告, No.377015, 1978.
- 6) M. Muskat :The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media, McGraw-Hill, pp.524-530, 1977.
- 7) 上田年比古・杉尾哲:被圧水で満たされた円形暗きょの取水量について, 土木学会論文報告集第 194 号, pp.91-101, 1971.
- 8) B. Aberg :Prevention of Gas Leakage from Unlined Reservoirs in Rock, Preprint of The First International Symposium on Storage in Excavated Rock Caverns (ROCK STORE 77), Vol.2, pp.175-189, 1977.
- 9) 自治省消防庁:岩盤タンク貯蔵所の安全確保に関する調査検討報告書, 危険物保安技術協会, 1986.
- 10) 日本地下石油備蓄(株):岩盤タンク等点検基準, 1994.
- 11) 自治省消防庁:岩盤タンクに係る屋外タンク貯蔵所の保安検査等に関する調査検討報告書, 危険物保安技術協会, 1991.
- 12) 石油公団:平成 14 年度岩盤タンクの合理的な維持管理に関する調査検討報告書, 危険物保安技術協会, 2003.

第3章 保全点検システムにおける点検手法

本章では、先ず水封式岩盤タンクの保全点検システムの考え方を示し、この保全点検システムを構成する点検技術における適用性が高い要素技術について、その概要、適用性確認試験結果、適用方法等を示す。同じく保全点検システムを構成する評価診断技術については次章に示す。

3.1 保全点検システムの考え方

水封式岩盤タンクの保全点検システムは、直接目で見る事が出来ない岩盤タンクの機能低下を防止し、長期的に安全で安心できる状態に保つための地下石油備蓄基地維持管理システムの中核をなすものである。しかしながら、水封式岩盤タンクは自然の地下水圧を利用した非常に大規模な半人工構造物であり、複雑な条件下に存在すること、鋼製タンクに比べ水封式岩盤タンクの歴史が浅く操業事例も少ないことから、保全点検システムとして確立されたものとはなっていない。一方、海外での岩盤タンク保全点検システムはノウハウとして扱われているため詳細が不明であり^{1), 2)}、かつ我が国は地震国であるなどの自然環境条件や社会条件が異なっている。したがって、我が国の条件に適した合理的な保全点検システムを構築する必要がある。

水封式岩盤タンクの保全点検システムは、**図 3.1-1** に示すように信頼性の高い「点検技術」と「評価診断技術」、評価診断結果に応じた適切な「補修補強技術」、ならびに調査・建設から操業段階で得られた水理・地質情報、施工・補修情報および各施設の構造寸法等を相互に関連させた「データベース」より構成される。

水封式岩盤タンクは自然を利用した半人工システムであるため、ばらつきと不確実性が大きく、自然要因によって時間的・空間的にその状態が変化する。このため、環境の変化によって変動する当該システムの動特性を逐次同定しながら管理手法を適合させていく必要があり、保全点検システムは画一的に固定化せず、運用とデータの蓄積に伴い逐次改良・更新していくことが重要となる。

<保全点検システム>

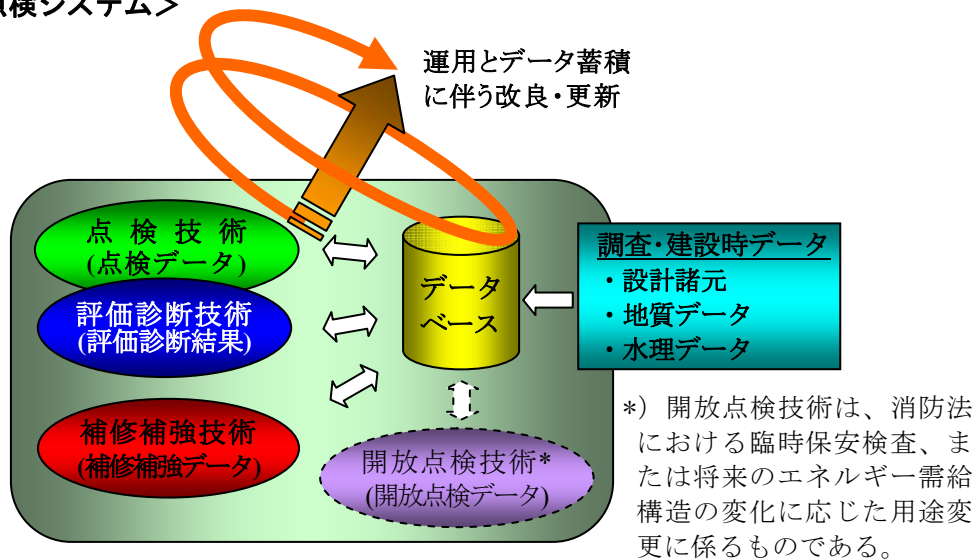


図 3.1-1 保全点検システムを構成する技術など

3.2 各点検手法とその適用

岩盤タンクを開放せずに岩盤タンクの状態を点検する技術について、段階的に調査研究を進め、適用性が高いと考えられる五つの点検手法を選出し、その実用性の検証を行った。図 3.2-1 にこれら点検手法と対応する点検の目的・対象の関係を示す。

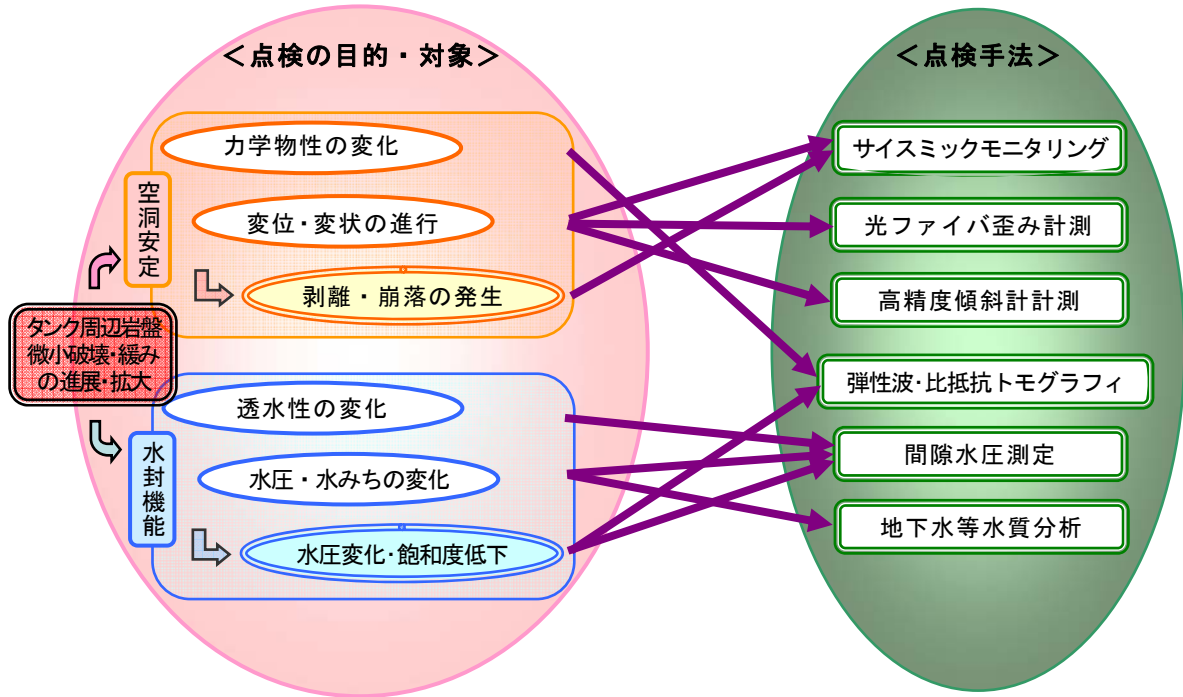


図 3.2-1 点検目的・対象と点検手法

3.2.1 サイスミックモニタリング

(1) 概要

サイスミックモニタリングは、豎坑ならびに岩盤タンク周辺の岩盤に破壊の進行域や断層破碎帯等の劣化面ですべり域等が存在しているかどうかについて高周波の振動を受動的に観測し、岩盤タンクの安全性を評価する点検手法である。

微小な破壊に伴って発生する高周波の弾性波動である AE (Acoustic Emission) を複数個所で同時に観測することにより、破壊の発生位置や発生頻度を特定する点検手法は、1930 年代後半に岩はねや山はねの発生を予知する目的でアメリカやカナダで始められたとされる³⁾。本技術に関する研究は炭鉱や金属鉱山が多いカナダや南アフリカの研究機関で活発であり、“Conference on Acoustic Emission/ Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials”などで多くの論文が発表されている⁴⁾。我が国では、1963 年末の別子鉱山で山はね予知のための極微小地震計測が最初の例とされ、その後の北海道の幾つかの炭鉱での山はね予知や大谷石採掘場跡地の陥没予知⁵⁾を目的とした極微小地震計測の実績により、サイスミックモニタリングが防災の観点から有効な技術であることが認識された。特に、地下発電所建設における空洞の安定性監視等に関する当該技術の適用・検討例が数多く報告されている^{6), 7)}。また近年、サイスミックモニタリング技術は、材料や構造物の診断や監視への応用、医療分野においても適用例が報告されるなど適用範囲が拡大している。

(2) 適用性確認試験

岩盤タンクの安定性評価における点検手法としてのサイスミックモニタリング技術の適用性を確認するため、平成 15 年度と 16 年度に菊間国家石油備蓄基地 TK-103（旧実証プラント）を挟む形で 5 本のボーリング孔を削孔（平成 15 年度）し、これを利用して試験を行った^{8),9)}。

1) 試験項目および内容

当該試験では、タンク周辺岩盤の弾性波伝播特性、ノイズ環境、岩盤破壊時の周波数特性、震源位置評定精度、および破壊規模と受振可能距離の関係の把握を目的として表 3.2.1-1 に示す試験を行った。

表 3.2.1-2 に主要測定機器を、図 3.2.1-1～-2 に受振器の配置を示す。平成 15 年度試験は孔内に hidroフォンセンサを、払出し配管堅坑側壁に高感度加速度計およびジオフォンを設置して計測を行い、平成 16 年度は No.1,4,5 孔内に hidroフォンセンサを、No.2,3 孔に高感度加速度計を埋設して計測を行った。

hidroフォンセンサは何れも孔内水中に吊下げて設置したもので、平成 16 年度 No.4 孔は平成 15 年度に確認したボーリング孔内の亀裂より発生するチューブ波の影響を評価するためアレイ型配置としている。平成 15 年度の高感度加速度計およびジオフォンは鉄筋コンクリート厚さ 70cm の払出し配管堅坑側壁に密着させてボルトで固定、平成 16 年度の高感度加速度計はボーリング孔内に間隙水圧計、光ファイバ歪み計と共に埋設し、セメントミルクで固定した。

表 3.2.1-1 サイスミックモニタリング適用性確認試験項目および内容

	項 目	内 容
①	孔口付近底盤および払出し配管堅坑側壁のハンマー打撃	弾性波伝播特性、受振可能距離、震源評定精度の把握
②	ボーリング孔削孔およびコア採取時	削孔時およびコア採取時の岩盤の微小破壊に起因する振動を観測し、周波数特性や伝播特性ならびに受振可能距離を把握
③	ノイズ環境	ノイズ環境の把握

表 3.2.1-2 主要測定機器一覧表

		平成 15 年度	平成 16 年度
震源	震源タイプ	・ハンマー打撃（サービストンネル底盤、払出し配管堅坑底部） ・削孔時、コア採取時	ハンマー打撃（払出し配管堅坑側壁）
受振器	加速度計	上下動高感度加速度計	高感度(表 3.2.1-3 参照)
	hidroフォン	シングル型(削孔時)、アレイ型(No.4、No.5 孔、@1.0m、底盤打撃時)	シングル型、アレイ型(表 3.2.1-4 参照)
データ収録	収録装置タイプ	高感度・広帯域データ収録装置	GDAPS-Light サイスミックモニタリングシステム
	サンプル間隔	0.1 ミリ秒	0.5 ミリ秒 0.1 ミリ秒または 1 ミリ秒
	記録形態	連続観測	5 秒間観測 連続計測・イベントトリガー方式併用
	チャンネル数	8 チャンネル	25 チャンネル 最大 36 チャンネル
	記録方式	4 byte binary format	SEG-Y 4 byte binary format

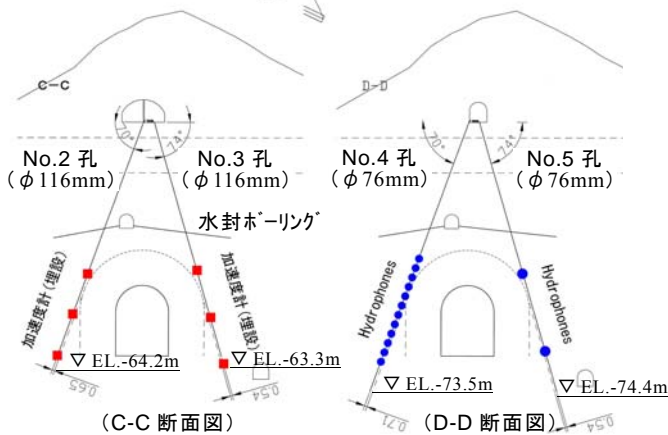
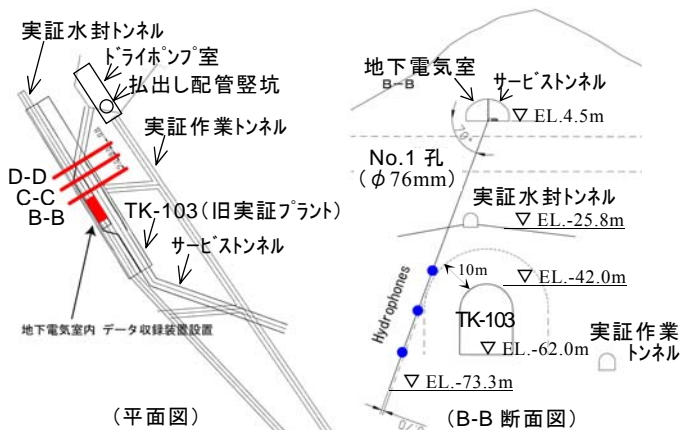


図 3.2.1-1 平成 16 年度受振器設置状況

表 3.2.1-3 高感度加速度計 (SVAC-3C) 仕様

項目	仕様
加速度出力範囲	±3 g (ヒーク値)
感度	1.2 V/g (typical)
周波数特性	DC ~ 5,000 Hz
ゲインミックス	120 dB
ノイズ (10~100Hz)	300~500 ng _{rms} /Hz ^{1/2}
出力信号形式	Differential
使用温度範囲	-40~125 °C
電源電圧	6~15Volts DC
寸法	φ45×130 mm

表 3.2.1-4 ハイドロフォンセンサ仕様

項目	仕様
[アレイ型(DEEPENDER500)]	
感度	-180±3dB re 1V/μPa
周波数特性	3~15,000 Hz
ノイズ (1.3Hz~1.3kHz)	0.03 Pa
最大使用圧力	6.895 MPa
出力信号形式	Single Ended
使用温度範囲	±0~100 °C
電源電圧	15~30 Volts DC
寸法	φ46×188 mm
[シングル型(P-44A)]	
感度	0.00014 V/Pa
周波数特性	10~1,000 Hz
最大使用圧力	0.747 Mpa
使用温度範囲	±0~35 °C
寸法	φ50×90 mm

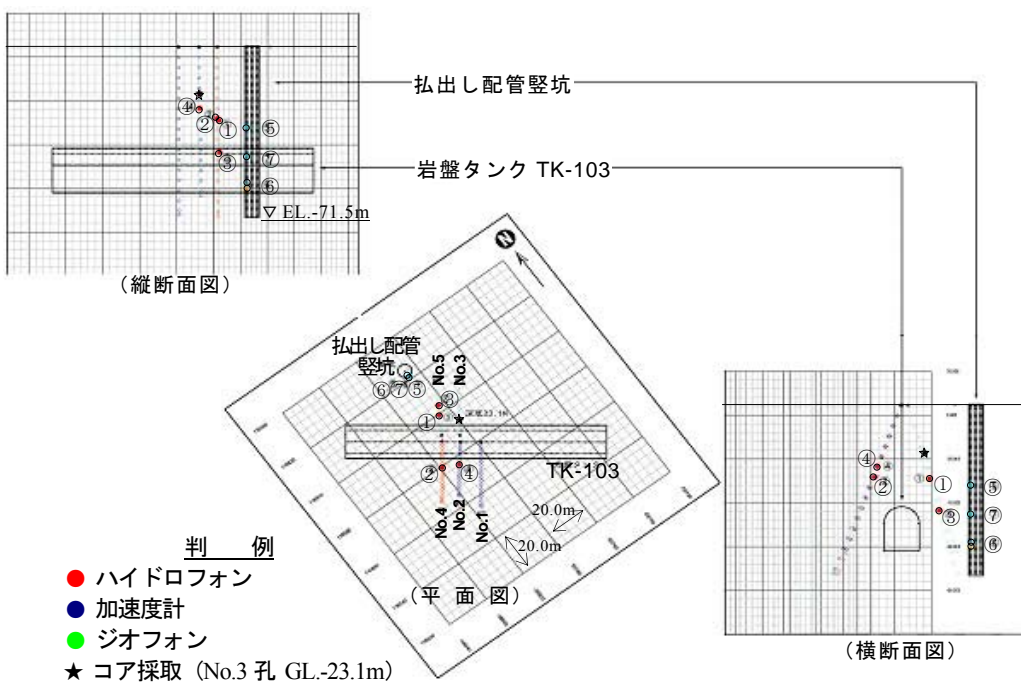


図 3.2.1-2 平成 15 年度受振器設置状況 (No.3 ボーリング孔削孔時)

2) 試験結果と考察

① 弾性波伝播特性

a. 弾性波速度

No.4 と No.5 孔の 24m 以深に 1m 間隔の 24 連アレイ型ハイドロフォンセンサを設置して、No.4 孔口付近の底盤および側壁をハンマーで打撃（底盤 4 回、側壁 2 回）し、受振器間の走時差を求めることで周辺岩盤の弾性波速度を算定した。図 3.2.1-3 と図 3.2.1-4 に測定結果の例を示す。

図 3.2.1-3 は、サービストンネル底盤打撃時の No.4 孔口より -24~-48m の間に設置したセンサによる弾性波動の観測結果（打撃試験 a）である。上から 2 番目、3 番目および 13 番目の波動は受振器の動作不良のためノイズ波形となっている。また、孔口から深さ-30m 付近に開口亀裂があり、そこから相対的に大きな振幅のチューブ波（黄色線）が生じている様子が確認できる。図中の赤線に沿うイベントが P 波初動である。深さ-29~-34m 間はチューブ波の干渉によって波形が歪んでおり、初動の正確な値を読み取ることは難しいが、全体としては赤線で示すように近似でき、伝達速度は約 5.0km/sec と算定される。

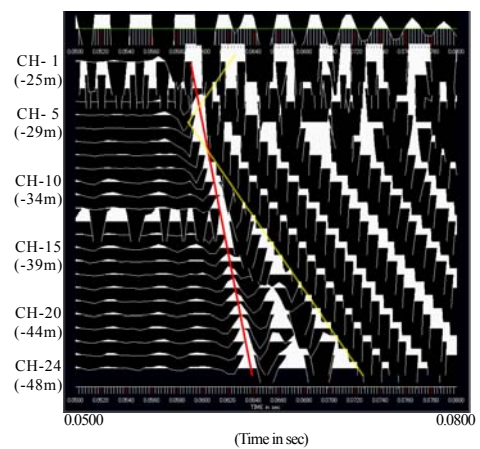


図 3.2.1-3 P 波初動測定結果
（打撃試験 a）

図 3.2.1-4 の左図は、払出し配管竪坑側壁打撃時の No.4 孔口より -49~-72m の間に設置したセンサによる弾性波動の観測結果（打撃試験 b）である。上から 2 番目と 3 番目の波動は受振器の動作不良のためノイズ波形となっている。また、坑口から深さ-62~-63m 付近に開口亀裂があり、そこから相対的に大きな振幅のチューブ波（黄色線）が生じている様子が確認できる。

図中赤線に沿うイベントが S 波初動と見られ、速度は約

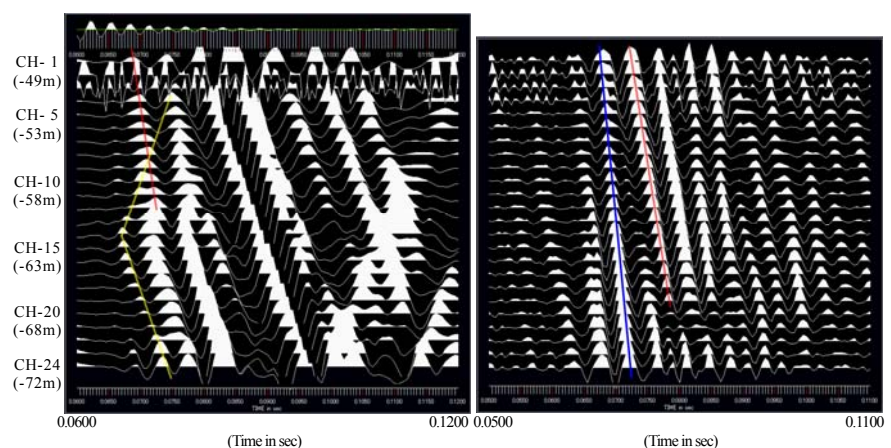


図 3.2.1-4 S 波初動測定結果（打撃試験 b）

3.0km/sec である。孔口から深さ-58m 以深は、チューブ波の干渉により波形が歪んでおり、初動の読み取りが困難である。このため、観測波形に空間フィルタを掛けてチューブ波を除去したものが右図である。図中の青線に沿うイベントが P 波初動、赤線に沿うイベントが S 波初動で、速度はそれぞれ約 5.0km/sec、約 3.0km/sec と算定される。左図との比較から、チューブ波は P 波が開口亀裂に到達した時刻で発生している

ことが読み取れる。

他の幾つかの打撃試験においても P 波速度は約 5.0km/sec、S 波速度は約 3.0km/sec であり、当サイトの既往の調査結果と同様の値を得た。

b. 減衰特性 (Q 値)

P 波の減衰特性 (Q 値) は、サービストンネル底盤打撃時の No.4 孔口より -49～-72m の間に設置したセンサによる弾性波動の観測結果 (打撃試験 c)、および No.5 孔口より -48～-71m の間に設置したセンサによる弾性波動の観測結果 (打撃試験 d) を用いて算出した。具体的には、孔軸に沿って伝播する P 波の速度振幅低下率 (a) と伝播距離の関係を、下記に示す指数関数¹⁰⁾ にフィットさせることで、新鮮岩盤における In-Situ 環境での Q 値を推定した。なお、チューブ波発生付近の波形が歪んでいる区間は除いた。

$$a = e^{\frac{-fx}{QV_p}}$$

ここに、a : 震源の速度振幅 (A₀) に対する観測位置での低下率 (a=A_v/A₀)

f : P 波初動の中心周波数で、本件では周波数特性がフラットな範囲でより高い周波数として 500Hz とした。

x : 振動伝播距離 (m)

V_p : P 波速度で、本件では払出し配管竪坑底盤打撃時の取得データを加味して 4,980m/sec とした。

Q 値は図 3.2.1-5 に示す通り、それぞれ約 16、約 13 と推定され、平成 13 年度および平成 14 年度に実証プラント作業トンネル坑口から TD21～42m 付近で行った現場基礎実験^{11), 12)} で得た値 (14～16) と整合したものであった。

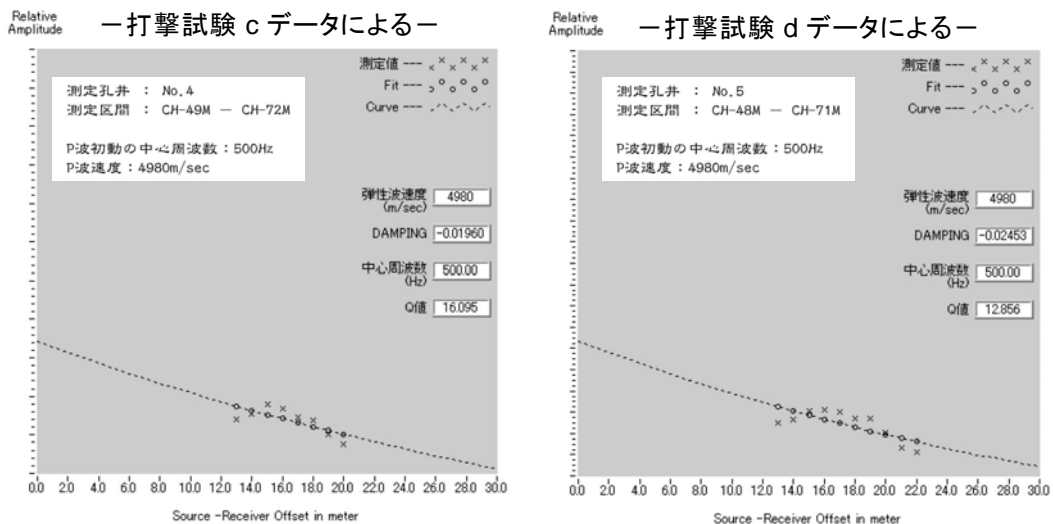


図 3.2.1-5 新鮮岩盤における P 波の減衰特性 (Q 値)

② ノイズ環境

a. 加速度計のバックグラウンドノイズ

各種作業が行われていない時間帯の No.2 孔中段に埋設した加速度計の観測波形およびパワーペクトルを例として図 3.2.1-6 に示す。25Hz 付近の低周波ノイズと 1.0kHz

付近から徐々に増加し 2.3kHz 付近をピークとする加速度計自体のノイズが顕著であるが、**図 3.2.1-11** に示した前年度の払出し配管竪坑壁にボルトで固定した加速度計のノイズレベル（約 $1E-04 \sim 4E-04G$ ）に比べ受感周波数帯域のほとんどで $1E-06G$ 未満とノイズレベルは極めて低い。他の加速度計も同様であり、ボーリング孔内にセメントミルクで埋設固定することで、バックグラウンドノイズの少ない環境でのモニタリングが可能になることが判った。なお、平成 15 年度の加速度計を設置した払出し配管竪坑・ドライポンプ室は、岩盤と巻立てコンクリートの間に厚さ 3mm の保水シート（リブ付）を挿んでおり、これら構造物の周りに水封水圧が確実に作用する構造となっている。

No.2 Well MID FILE PATH : J:\KIKDY_6\KIKHR_0\KIKMN_0\Dev1-518405_3184871282.390.bin 7:27:56.914 2004/12/03

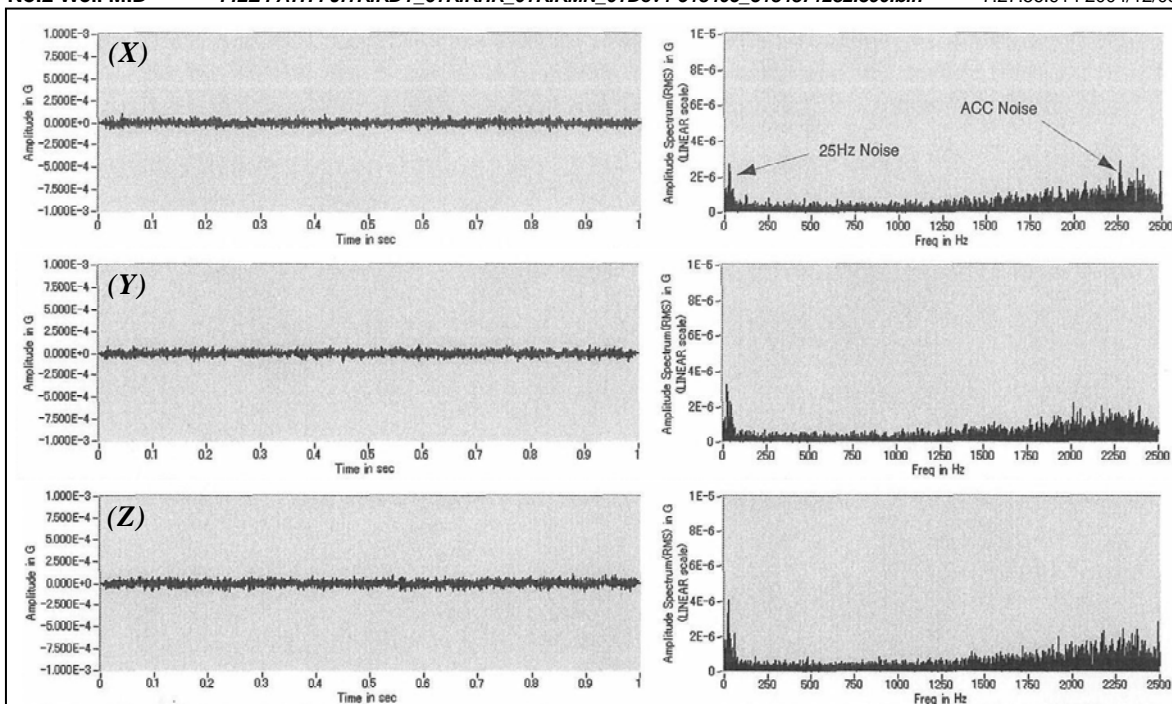


図 3.2.1-6 No.2 孔中段加速度計のバックグラウンドノイズ(左図:観測波形,右図:パワースペクトル)

b. ハイドロフォンのバックグラウンドノイズ

No.1 孔中段と No.4 孔最上部ハイドロフォン（アレー型）の観測波形およびパワースペクトルを例として**図 3.2.1-7** に示す。10Hz 付近をピークとして 500~600Hz 以下の周波数帯域でノイズが大きい、これはケーブルで水中にセンサを吊下げていることに起因するものと考えられる。他のアレー型センサも同様であるが、500~600Hz を超える周波数帯域では非常に静かな環境となっている。払出し配管竪坑側壁を金槌で極軽く叩いた打撃試験では、加速度計よりハイドロフォンのほうが微小インパルス振動に対する感度が高いという結果が得られた。岩盤の破壊に伴う弾性波動は広帯域の周波数成分を含むと考えられることから、微小インパルス振動の実用的な範囲での観測が可能であることが確認できた。

図 3.2.1-8 は No.5 孔上段ハイドロフォン（シングル型）の観測波形およびパワースペクトルを示したものである。波形からは No.1 孔や No.4 孔に比べてノイズ環境に優れ

ているように見えるが、パワースペクトルを見るとノイズレベルはほぼ 2kHz まで高く、微小振動を観測するには難があるといえる。これは、孔口から深度約-50m付近の顕著な逸水亀裂から常時チューブ波が発生し、大きなバックグラウンドノイズとなっているためである。このような孔は、比較的大きなサイスミックイベントを観測対象とするか、グラウトによる透水性改良を行って定常的なチューブ波の発生を抑制する必要がある。

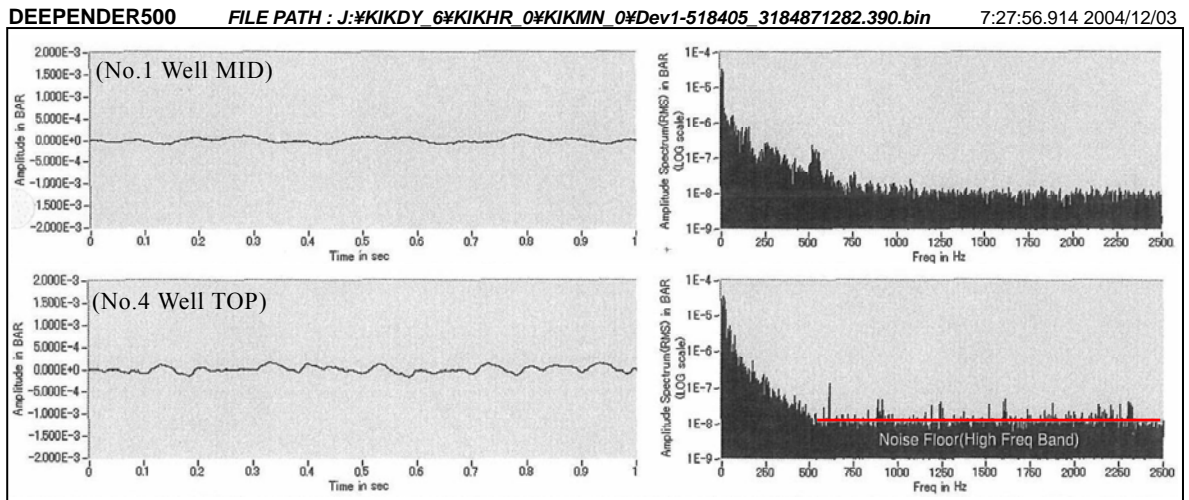


図 3.2.1-7 アレイ型ハイドロフォンのバックグラウンドノイズ(左図:観測波形, 右図:パワースペクトル)

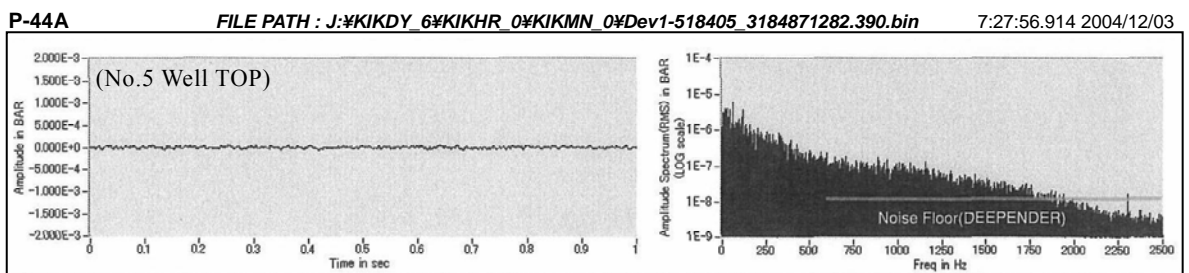


図 3.2.1-8 シングル型ハイドロフォンのバックグラウンドノイズ(左図:観測波形, 右図:パワースペクトル)

③ 岩盤破壊時の周波数特性

岩盤の微小破壊時の実際的なサイスミックイベントとして、No.3 孔の深度 23.1m でのコア採取（径約 95mm）に伴う弾性波動を取得した。

観測された振動レベルは、バックグラウンドノイズ（図 3.2.1-11 参照）に比べて小さいため、観測波形に 100Hz、200Hz、300Hz、400Hz、500Hz、1,000Hz、2,000Hz の各 low cut フィルタを通して、サイスミックイベント信号成分の抽出を試みた。No.2 孔と No.4 孔に設置したハイドロフォンでは、100Hz の low cut フィルタを通すことで微小振動が検出でき、400Hz 以上のフィルタで初動の読み取りが可能となった。払出し配管竪坑側壁に設置した加速度計では、300～400Hz の low cut フィルタを通すことで微小振動が検出できたが、初動到達時刻を正確に読み取ることはできなかった。一方、No.5 孔に設置したハイドロフォンならびに払出し配管竪坑側壁に設置したジオフォンでは、観測波形をフィルタ処理するだけでは、コア採取に伴う微小振動を検知できなかった。観測波形と 100Hz、400Hz、1,000Hz の各 low cut フィルタを通して処理

した波形を図 3.2.1-9 に示す。

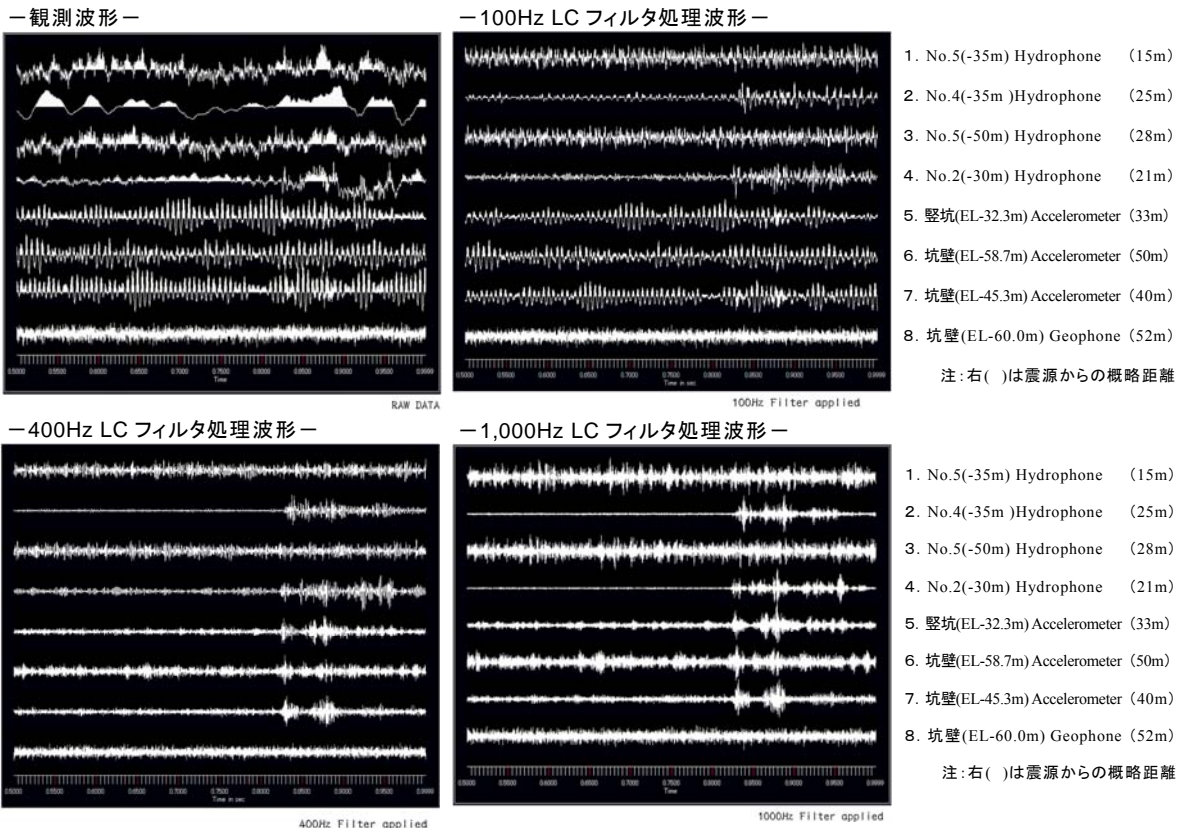
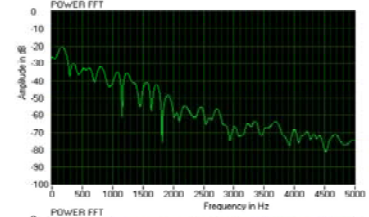
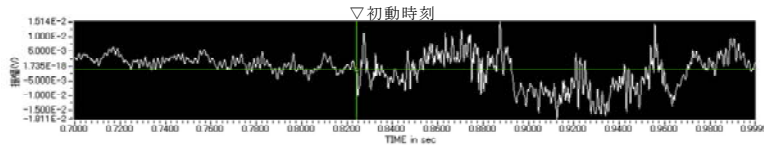


図 3.2.1-9 コア採取時のサイスミックイベントの観測波形および LC フィルタ処理後の波形

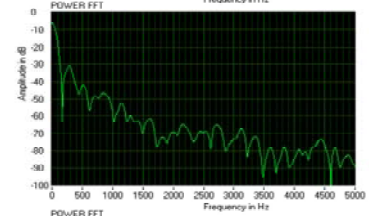
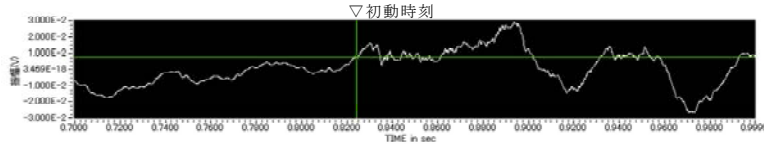
図 3.2.1-10 は、No.2 孔 (CH-30m) および No.4 孔 (CH-35m) のハイドロフォンの受振データから初動時刻を読み取り、それを指標に払出し配管竪坑側壁 (EL-32.3m) 及び同側壁 (EL-45.3m) の加速度計の受振データの初動時刻を推定し、イベント前後 0.3 秒間の観測波形とそのパワースペクトルを示したものである。これらパワースペクトルで 4 箇所とも一致するピーク周波数はないが、3 箇所で一致するのは 1,080Hz、1,720Hz、2,460 Hz、2,720Hz である。一方、同センサのボーリング作業や打撃試験が行われていない時の観測波のパワースペクトルは図 3.2.1-11 右に示す通りであり、ハイドロフォンは 1,000Hz 以上でノイズレベルが低く概ねフラットであり、加速度計は 1,000Hz、1,400Hz、1,800Hz、2,500Hz 付近にピークを持つ。このことから、複数の観測点で観測されたそれら共通するピーク周波数は、コア採取に伴うサイスミックイベント固有の特性である可能性が考えられるが、それ以外のノイズがコア採取時に生じていた可能性があること、またハイドロフォンでの観測波はサイスミックイベントに起因したチューブ波の可能性があること等から断定することはできない。

ノイズ源はある程度固定していると考えられることから、タンク周辺岩盤の微小破壊に伴うサイスミックイベントの判別のためには、各種ノイズの観測点毎の周波数特性を把握することが今後重要となる。

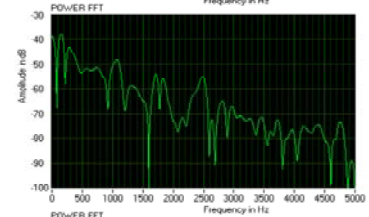
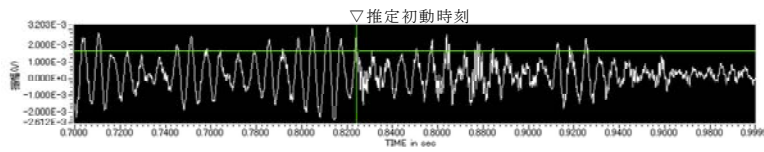
— 4. No.2 CH-30m/ Hydrophone —



— 2. No.4 CH-35m/ Hydrophone —



— 5. 豎坑 EL-32.3m/ Accelerometer —



— 7. 豎坑 EL-45.3m/ Accelerometer —

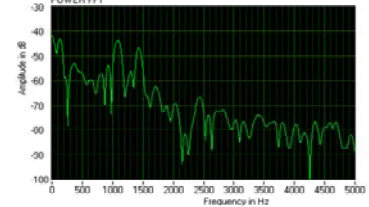
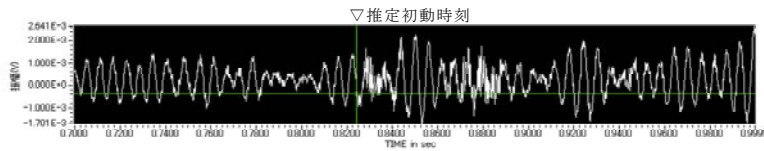
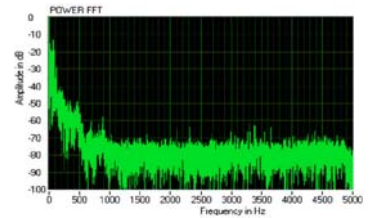
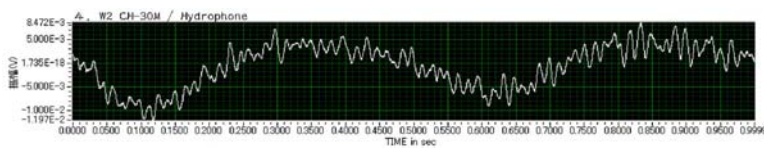
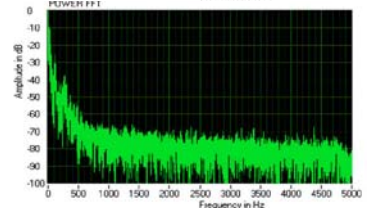
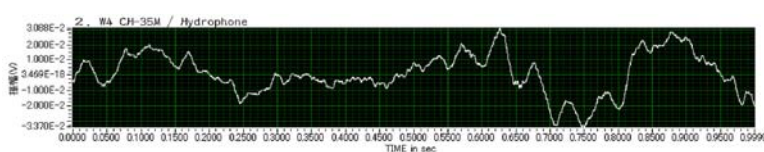


図 3.2.1-10 コア採取時のサイズミックイベントの観測波形(前後 0.3 秒間)とパワースペクトル

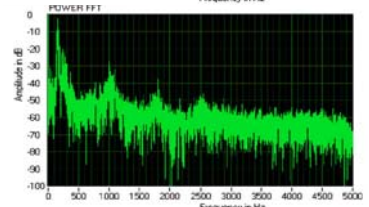
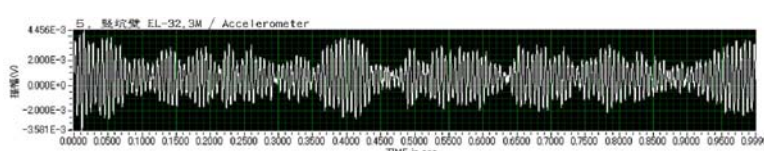
— 4. No.2 CH-30m/ Hydrophone —



— 2. No.4 CH-35m/ Hydrophone —



— 5. 豎坑 EL-32.3m/ Accelerometer —



— 7. 豎坑 EL-45.3m/ Accelerometer —

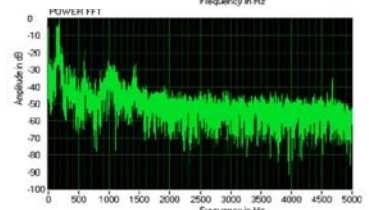
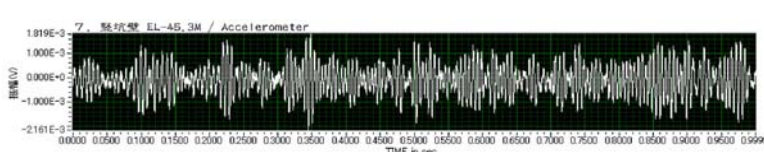


図 3.2.1-11 削孔時のバックグラウンドノイズ(左図:観測波形, 右図:パワースペクトル)

④ 震源評定精度

震源位置は、図 3.2.1-1 に示した受振器配置にて、払出し配管竪坑側壁 2 箇所 (EL-23m 付近および EL-43m 付近) を水平方向に金槌で極軽く叩いた打撃試験時の観測波を用い、岩盤タンクを中心とした 1m 間隔の格子モデルによる単純な方法で算出した。総格子点数は約 1,770,000 点である。

具体的には、これら格子点を震源位置と仮定して、格子点から各観測点までの距離と新鮮岩盤の平均的な弾性波伝播速度から弾性波の伝播時間 (t_i) を算出する。観測点のうち初動が最も早く観測された観測点の到達時刻 (t_{\min}) を基準として、その他の観測点への到達時刻の遅れ ($\Delta t_i = t_i - t_{\min}$) を求め、実際に観測された時間差 (ΔT_i) と仮定された震源に対する時間差 (Δt_i) の差 ($\varepsilon_i = \Delta t_i - \Delta T_i$) の 2 乗和 ($\sum (\varepsilon_i)^2$) を求め、これが最も小さい点を震源位置としたものである。測定ジオメトリはタンク内の気相・液相を通過するレイパスが発生しないよう設定するとともに、タンクの形状・貯蔵物による弾性波特性の変化などを考慮しない等方均質モデルとした。なお、ハイドロフォンデータは初動付近波形の S/N 比の良いものからセンサ配置を考慮して 6 波形を選定し算定に用いた。また、弾性波速度 (P 波) は既往の試験結果を踏まえ 4,950m/sec とした。

図 3.2.1-12 に各観測波形を、このうちの No.3 孔中段の Y 方向観測波形の拡大図とそのパワースペクトルを図 3.2.1-13 に、竪坑側壁 EL-23m 付近の打撃試験時の加速度計データ、ハイドロフォンデータによる震源位置評定結果を図 3.2.1-14 に示す。

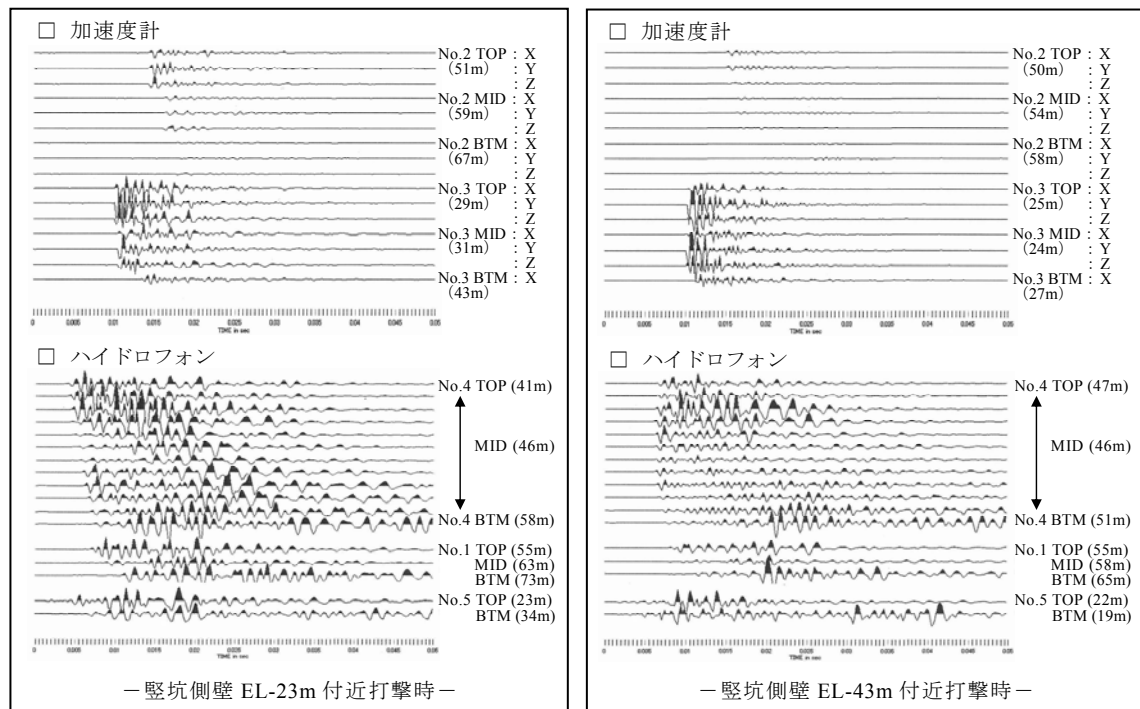


図 3.2.1-12 払出し配管竪坑側壁打撃試験観測波形

加速度計およびハイドロフォンデータともに、側壁の小型金槌での極軽いタップにも拘らず S/N 比の良好なインパルス波形として検知できた。また、震源位置は受振器タイプによらずほぼ実際の打撃点近傍に求められた。

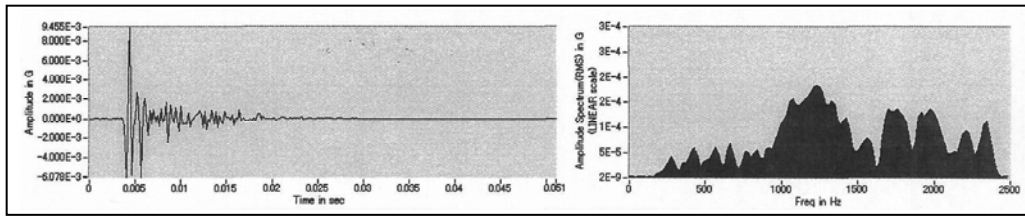
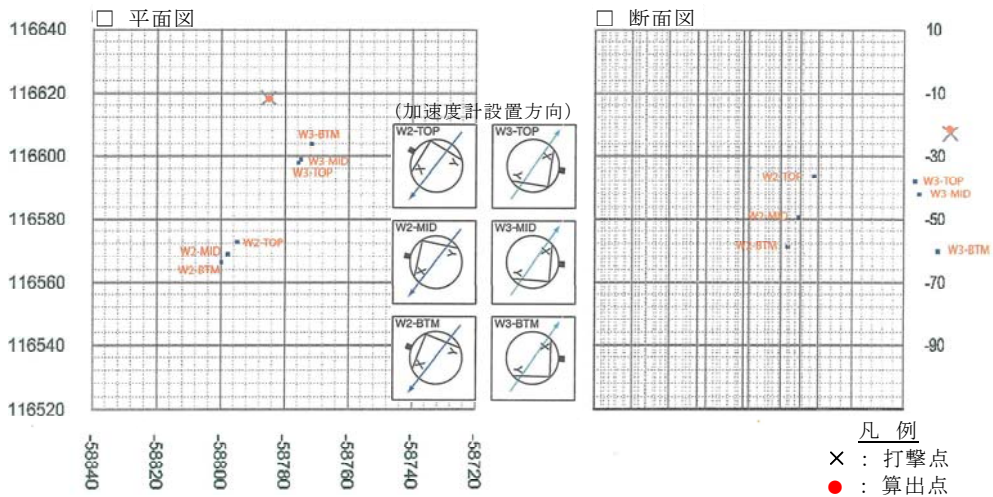


図 3.2.1-13 払出し配管竪坑側壁 EL-43m 付近打撃試験時の No.3 孔中段 Y 方向の観測波形とパワースペクトル

— 加速度計データを用いた震源位置評定結果 —



— ハイドロフォンデータを用いた震源位置評定結果 —

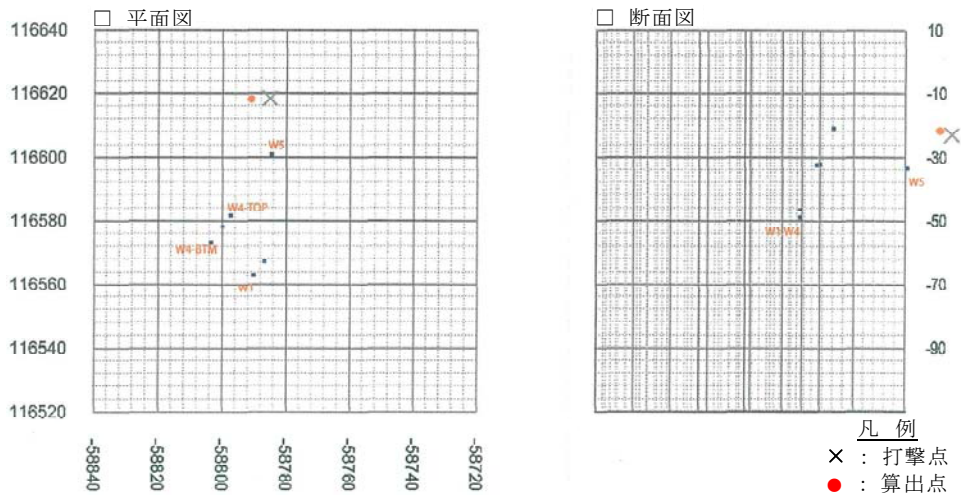


図 3.2.1-14 払出し配管竪坑側壁打撃試験データによる震源位置評定結果

当該試験により、図 3.2.1-13 に示されるような周波数成分が 2kHz を超える広帯域の打撃振動が 50m を越える距離を伝播し、孔内水中に吊下げたハイドロフォンで検知できることを確認した。すなわち、受振器配置を数十 m とする微小振動を対象としたモニタリング用受振器としてハイドロフォンセンサが有効であることが検証されたといえる。さらに、アレイ型配置の場合は波動の空間的広がりをモニターできることから、最適な観測波の選定が可能となり、アレイ型配置が震源位置評定において有効な方法であることが判った。一方、加速度計は設置方位が既知であることから、震源位

置の評定に加えて、今後、破壊メカニズムの解析などにおいて有用な情報が得られることが期待できる。

⑤ 岩盤破壊規模と受振可能距離

上述の払出し配管竪坑側壁打撃試験では、震源より 50m を超える位置の受振器で 1,000Hz～2,500Hz の周波数成分を持つ微小振動を明瞭に捉えることができた。より大きな破壊規模の場合は、より遠方での受振が可能となる。

地震エネルギーの大きさを表すマグニチュード (M) と地震モーメント (M_0)、震源の相当破壊半径 (R)、震源で励起される卓越周波数 (f)、震源のごく近傍で励起される速度振幅 (A_v) の間にはそれぞれ表 3.2.1-5 に示す関係があるとされている。これらは経験式や実験式もあり、適用範囲等の相違やパラメータの当サイトでの妥当性等からお互いを関連付けた利用には十分な検討が必要と考えられるが、実測結果を基準として推計すればおおよその目安にはなるものと考えられる。そこで、卓越周波数

表 3.2.1-5 破壊規模と各種パラメータの関係

項 目	関 係 式	備 考
マグニチュード (M) と速度振幅 (A_v)	$\log(A_v) = 0.85M - 1.73\log(D) + \alpha$	渡辺の式 ¹³⁾
地震モーメント (M_0) とマグニチュード (M)	$\log(M_0) = 1.5M + 16.0$	安芸の式 ¹³⁾
卓越周波数 (f) とマグニチュード (M)	$\log(f) = 1.4 - 0.30M$	寺島の式 ¹³⁾
地震モーメント (M_0) と相当破壊半径 (R)	$M_0 = 8(1 - \nu)T \cdot R^3/3$	Sato の式 ¹⁴⁾
伝播距離 (D) と速度振幅低下率 (a)	$a = A_v/A_0 = \exp(-f\pi D/Q/V_p)$	田中他の式 ¹⁰⁾
ここで、 A_v 伝播距離 D における速度振幅 (μ kine) : 震源のごく近傍の速度振幅は、渡辺の式を変形し、 $\log(A_0) = 0.85M + 4.42$ の関係となる A_0 震源での振幅 (μ kine) D 伝播距離 (m) V_p 縦波速度 (m/s) : 試験結果より 4,950m/s とする ν 媒質のポアソン比 : 菊間基地工事記録 ¹⁵⁾ より 0.23 とする T 引張強度 (dyne/cm ²) : 菊間基地工事記録 ¹⁵⁾ より 5×10^7 とする Q 減衰係数 : 試験結果より 15 とする α 定数 : -2.5		

を 1,250Hz とする微小振動が 50m を越える距離で明瞭に捉えられたことから、本試験と同様なノイズ環境であれば同程度の加速度レベルの波動が受振可能として、表 3.2.1-5 に示す式より破壊規模と受振可能距離を推計しおおよその目安とした

表 3.2.2-6 おおよその目安としての破壊規模と受振可能距離

卓越周波数 f (Hz)	相当破壊半径 R (cm)	受振可能 距離 D (m)	速度振幅 A_v (μ kine)	$2\pi f \cdot A_v$ (μ cm/s ²)
1,250	0.7	50	0.029	228
1,000	1.0	70	0.040	250
750	1.6	110	0.053	250
500	3.2	200	0.080	251
250	10.0	500	0.198	310

(表 3.2.2-6)。これより、ハイドロフォンは 600Hz を超える周波数帯域で非常に静かな環境となっていることから、卓越周波数を約 600～2,500Hz とする破壊半径が数 cm 相当の破壊規模のサイズミックイベントをそれぞれ数十 m から 100m 程度離れた地点で検知することが可能と推測できる。また、高感度加速度計は 100Hz 以上の周波数帯域で非常に静かな環境となっているため、卓越周波数 100～2,500Hz の破壊半径が数十 cm～数 cm 相当の破壊規模のサイズミックイベントをそれぞれ数百 m から数十 m 離れた地点で検知することが可能と推測される。

ここで、岩盤タンクの安全性上は、タンク周辺の岩盤に極めて微小な亀裂が発生してもそれが直ちに安全性に影響を及ぼすことは無い。このような微細な亀裂がある空間に集中する等してより大きな亀裂へと進展するもののうち、岩盤タンクの安全性に影響を及ぼす程の亀裂に発達して行くものが問題となる。すなわち、従来の AE 計測における周波数帯域（数十～数百 kHz）の下限よりも低い周波数帯域で観測することで、極めて微小な亀裂の発生に伴うサイスミックイベントは捉えられないが、それらが将来的に岩盤タンクの安全性に影響を及ぼす可能性のある亀裂にまで発達した段階のサイスミックイベントを確実に検知することが確認できたと言える。

さらに、リスク管理の観点からは、岩盤タンク一般部では、多少のゆるみ域の拡大や小規模な崩落が生じて、直ちに貯槽としての機能を損ねることは無く、かつ堅硬な岩盤中に設けられていることから、急速に劣化が進行する恐れも小さいと考えられる。これに対し、地上施設と連絡しかつ貯槽機能を維持する上で重要機器類が設置された堅坑部では、ゆるみ域の拡大や小規模な崩落が堅坑周辺の水封機能低下や機器損傷等を引き起こす恐れがあり、その場合の貯槽機能に与える影響は大きいものとなる。また、断層破碎帯等の弱層部では、堅硬な岩盤中に設けられた岩盤タンク一般部に比べてゆるみ域の拡大等が生じる確率が高く、かつそれが岩盤タンクの安全性低下に発展する可能性も大きいと考えられる。したがって、岩盤タンクの保安全管理上の重要な箇所および要注意箇所については、高感度加速度計またはハイドロフォンセンサを約 50～100m と密に、一般部は高感度加速度計を約 200～300m と粗く配置して、破壊規模に対応する検知対象周波数帯域を変えることで、より合理的な観測を行うことが可能である。

(3) まとめ

複数年に亘る菊間国家石油備蓄基地での適用性確認試験により、タンク周辺岩盤の弾性波伝播特性、ノイズ環境、岩盤破壊時の周波数特性を把握した。さらに、埋設の高感度加速度計およびハイドロフォンセンサで極微小な振動を数十メートル離れた地点で捉え、その震源位置評定時の推定誤差は数メートルに収まることを確認した。

将来的に岩盤タンクの安定性に影響を及ぼす可能性のある亀裂へと発達した段階のサイスミックイベントに観測ターゲットを絞ることで、受振器数を現実的な範囲に抑えた合理的な観測が可能であり、当該計測手法で点検の目的を十分に達成できることが分かった。

今後は、タンク周辺岩盤の微小破壊に伴うサイスミックイベントの検出精度の向上のため、データの蓄積・分析を行い、各種作業やポンプ等機器の稼動等に伴うサイスミックイベントの特性を把握し、これらを除いた有意なサイスミックイベントを適正に評価するシステムにさらにブラッシュアップしていく必要がある。

3.2.2 光ファイバ歪み計測

(1) 概要

光ファイバ歪み計測は、岩盤タンクの周辺岩盤における断層破碎帯等の弱層部での劣化の進行や応力集中箇所での破壊の進展に伴い生じる岩盤の変位状況を計測し、力学モデルによる数値解析と併せて岩盤タンクの安全性を評価する点検手法である。

光ファイバは、大量・高速通信を可能にする材料として急速に普及したものである。近年は、光ファイバ内での後方散乱光や干渉作用、透過光の強度変化から歪みや温度等の測定が可能で、電氣的雑音の影響を受けない、センサへの電力供給が不要で漏電・絶縁不良の恐れがない、配線が単純化できる、耐久性・耐腐食性が高い、長距離の測定・伝送が可能である等の特徴から、各種の工学センサとして開発・利用が進んでいる。当該計測では、B-OTDR方式（Brillouin Optical Time Domain Reflectometer）を採用した。図 3.2.2-1、図 3.2.2-2 に示すように、入射したパルス光の後方錯乱光の一つであるブリルアン錯乱光の周波数が光ファイバの伸縮に比例してシフトする性質を利用して、測定区間全長にわたっての連続的な歪み分布を測定するものである。

(2) 現場適用試験

岩盤タンク点検手法の一つとして適用するに際しての当該センサの設置上の課題の確認、ならびに原油受払い時の想定を越える変形の有無を確認するため、平成 15 年度の菊間国家石油備蓄基地 TK-103（旧実証プラント、1982 年 3 月竣工）に設けた No.2、No.3 孔内に間隙水圧計、高精度加速度計とともに埋設設置（図 3.2.1-1 参照）して計測を行った⁹⁾。

1) 光ファイバセンサの仕様と設置方法

今回使用した光ファイバとデータ収録装置の主な仕様を表 3.2.2-1、表 3.2.2-2 に、ボーリング孔内に挿入し歪みを計測する部分の概念図を図 3.2.2-3 に示す。今回設置した歪み計は、図 3.2.2-4 に示す間隙水圧計と加速度計埋設ロード(VP75)外面の上下、左右の 4 方向に一筆書きの如く、1 本のファイバセンサで全長にわたり貼り付け、向かい合うファイバセンサ軸方向の歪みの差から曲率として軸直角方向の曲げ歪みを計測できるようにしたものである。すなわち、図 3.2.2-5 に示すように径 75mm の硬質塩化ビニール管（外形 89mm）外面の 4 方向に接着した歪み計をボーリング孔内に挿入後、セメントミルクを充填することで、周辺岩盤に比べて硬化セメントと塩ビ管の弾性係数は小さいため、周辺岩盤が変形すると硬化セメント、塩ビ管とファイバ

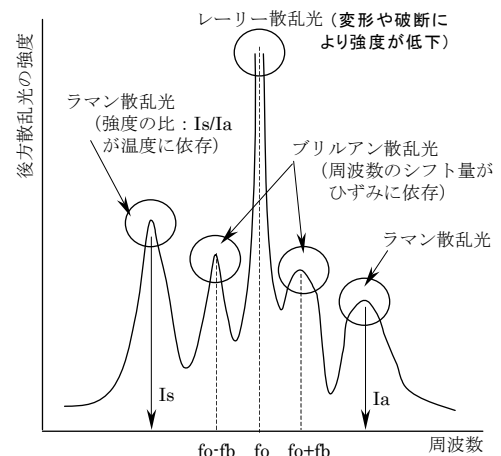


図 3.2.2-1 後方錯乱の種類と波長分布
出展)清水建設機カタログ

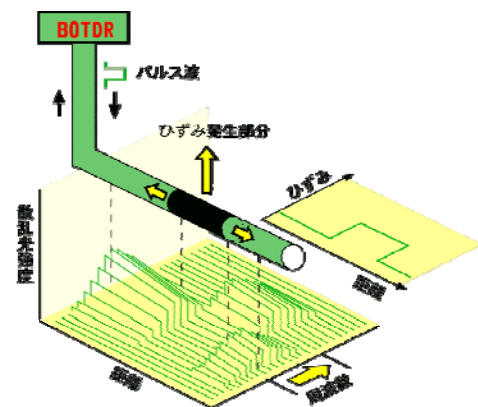


図 3.2.2-2 B-OTDR のひずみ計測原理
出展)清水建設機カタログ

センサが周辺岩盤と一体となって変形すると見なすことができることによる¹⁶⁾。

表 3.2.2-1 光ファイバの主な仕様

用途	センサファイバ	配線用ファイバ
名称	GFRP	FR-OGCE
外被覆	素材(色)	ポリエチレン
	外形(mm)	2.2
	単位重量(g/m)	4.2
	引張り強さ(N)	960
	許容曲げ半径	30mm
	伝送損失(dB/km)	0.45
	入射波長 1.55 μm	0.3

*) D はケーブル外径

ここで、周辺岩盤の変形に伴うボーリング孔の変位量 (y) は次式で表される。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{Rp}$$

$$y = \iint \frac{Rb}{Rp} \frac{1}{\rho} dz dz \quad \text{より、} \quad y_i = \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^j \frac{Rb}{Rp} \frac{\varepsilon_{2,t,k} - \varepsilon_{1,c,k}}{Rp} \Delta z^2$$

ここに、 ρ : ボーリング孔軸線の曲率半径

Rp : 歪み計の直径 (= 塩ビ管の直径 89mm)

Rb : ボーリング孔の直径 (= 116mm)

ε₁ ~ ε₄ : 過去の測定値に対する歪み増分

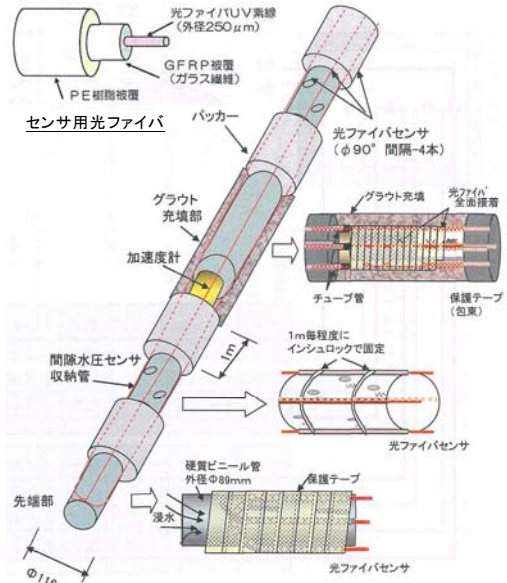


図 3.2.2-3 曲げ歪計測用光ファイバ歪計の概念図

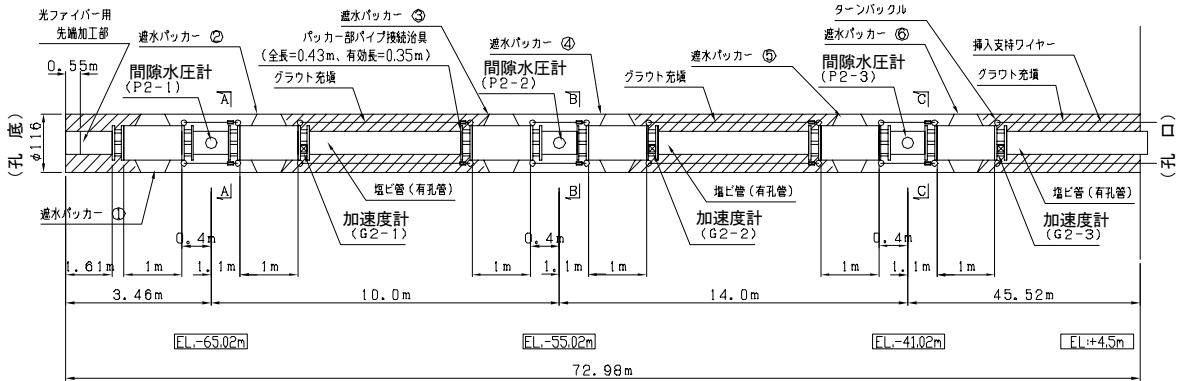
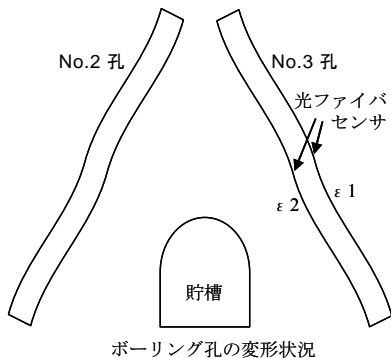


図 3.2.2-4 センサ収納埋設ロッドの構造 (No.2 孔)



ボーリング孔の変形状況

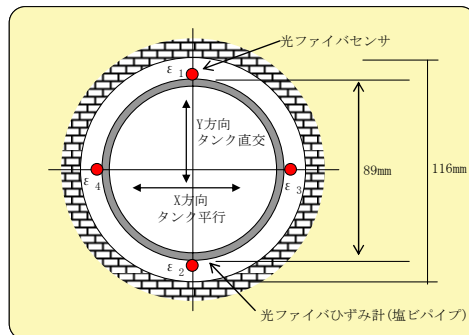


図 3.2.2-5 光ファイバセンサによる曲げ歪計の構造

表 3.2.2-2 光ファイバ歪みアナライザーの主な仕様

発光波長	1,550 nm帯					
測定周波数可変範囲	9.9 ~ 11.9 GHz					
測定周波数掃引間隔	1, 2, 5, 10, 20, 50 MHz					
加算回数の設定	2 ¹⁰ ~ 2 ²⁴ 回					
歪み測定範囲 *1)	約-1.5 ~ +1.5%					
パルス幅	10 ns	20 ns	50 ns	100 ns	200 ns	
ダイナミックレンジ (dB) *2)	2	6	10	13	15	歪み測定精度±0.004%(2σ)時
	-	-	8	11	13	歪み測定精度±0.003%(2σ)時
距離分解能 (m)	1	2	5	11	22	
歪み測定精度 *3)	±0.004%(2σ)		±0.003%(2σ)			
	(±0.01%)		(±0.005%)			
再現性 *4)	<0.04%		<0.02%			
電源	AC100 ~ 240V, 50/60Hz, 200VA					
環境条件	使用温度;10 ~ 40 °C, 保存温度;0 ~ 50 °C, 湿度;85% RH(ただし結露なきこと)					
寸法質量	約445 ^W ×495 ^D ×249 ^H mm(突起物を除く), 約20kg					

*1) ITU-T G.652 準拠の光ファイバ (以下 SM ファイバとする)による。

*2) 測定条件:加算回数2~14回, 周波数掃引間隔 10MHz(パルス幅 100ns および 200ns は 5MHz), 束取りUV被覆 SM ファイバの歪み分布波形において連続する 100 データの標準偏差(2σ)が歪み測定精度(±0.003%または±0.004%)以下となる光ファイバ損失。

*3) 測定条件:加算回数2~14回, 周波数掃引間隔 10MHz(パルス幅 100ns および 200ns は 5MHz), 束取りUV被覆 SM ファイバの歪み分布波形において連続する 100 データの標準偏差(2σ)。()内は歪み分布波形におけるノイズピーク幅(参考値)

*4) 測定条件:加算回数2~14回, 周波数掃引間隔 10MHz(パルス幅 100ns および 200ns は 5MHz), 束取りUV被覆 SM ファイバの歪み分布波形における任意距離のデータの連続測定回数 10 回の変化幅。

光ファイバ歪み計は、No.2 孔及び No.3 孔のボーリング孔全長にわたって設置した。設置においては、間隙水圧計及びサイスミックモニタリング用加速度計と同時に、ボーリング孔口においてセンサおよびパッカー等を組み立てながら、順次ボーリング孔内に挿入した。間隙水圧用のパッカー区間については、間隙水圧計等のケーブルと同様にパッカーの内側を通し、それ以外の区間については、各パッカーをつなぐ塩ビ管の表面に抱かせた。センサは孔底で折り返して孔口まで戻し、1 つのループを形成するように塩ビ管の両側に配置し、孔断面において互いに直交する方向に 2 組のループを形成させた。ボーリング孔内の所定の位置に上記計測装置全体をセットした後、パッカー（水圧式）を拡張させて各測定区間を遮断し、パッカーの外側にセメントミルクを注入して光ファイバセンサ等を固定した。セメントミルクは孔口まで充填した。光ファイバセンサからのケーブルは電気室まで延伸し、測定装置に接続して計測を行った。

2) 測定結果と考察

初期値を平成 16 年 11 月 22 日に計測し、第 2 回目の計測を原油払出し後の 12 月 18 日に、第 3 回目の計測を原油受入れ後の平成 17 年 2 月 7 日に行った。原油受け払いは、各種点検手法の適用性を確認するため、TK-103 (貯蔵容量 25,000kl) において約 17,100 kl 移送させ、約 10.1m の油面変動を生じさせたものである。

① 光ファイバ歪み計の設置状態

1 回の計測において全長の歪み分布を 10cm 間隔で 30 回測定し、ばらつき状況を確認した後に、これらの計測データから中央値に近い 20 回の測定データを用いて平均ひ

歪みを算出した。例として初期値 30 回の測定結果を図 3.2.2-6 に示す。測定結果からは、設置は断線等支障無く行えたものと見られる。ただし、図 3.2.2-7 に示す同時に埋設した加速度計の設置オリエンテーションの結果を見ると、タンク横断方向に対して No.2 孔で反時計回りに 95~115°、No.3 孔で時計回りに 55~65° の埋設ロッドの回転ならびに若干の振れが生じている。振れは、ロッド接続時あるいは加速度計自体に生じた可能性が考えられるが、特定はできなかった。

歪みセンサの姿勢は計測結果の評価に関わるため、できるだけ回転・振れが生じないようスペーサやロッド接続治具および挿入方法を改良・工夫する必要がある。特に、ボーリング孔が水平に近くなるほど孔壁状態の影響を強く受けることになるため、設置方法のより一層の改善が必要である。また、加速度計など埋設後の姿勢情報が得られるセンサを同時に設置しない場合は、コンパスを組み込む等して、歪みセンサ姿勢の確認を行う必要がある。

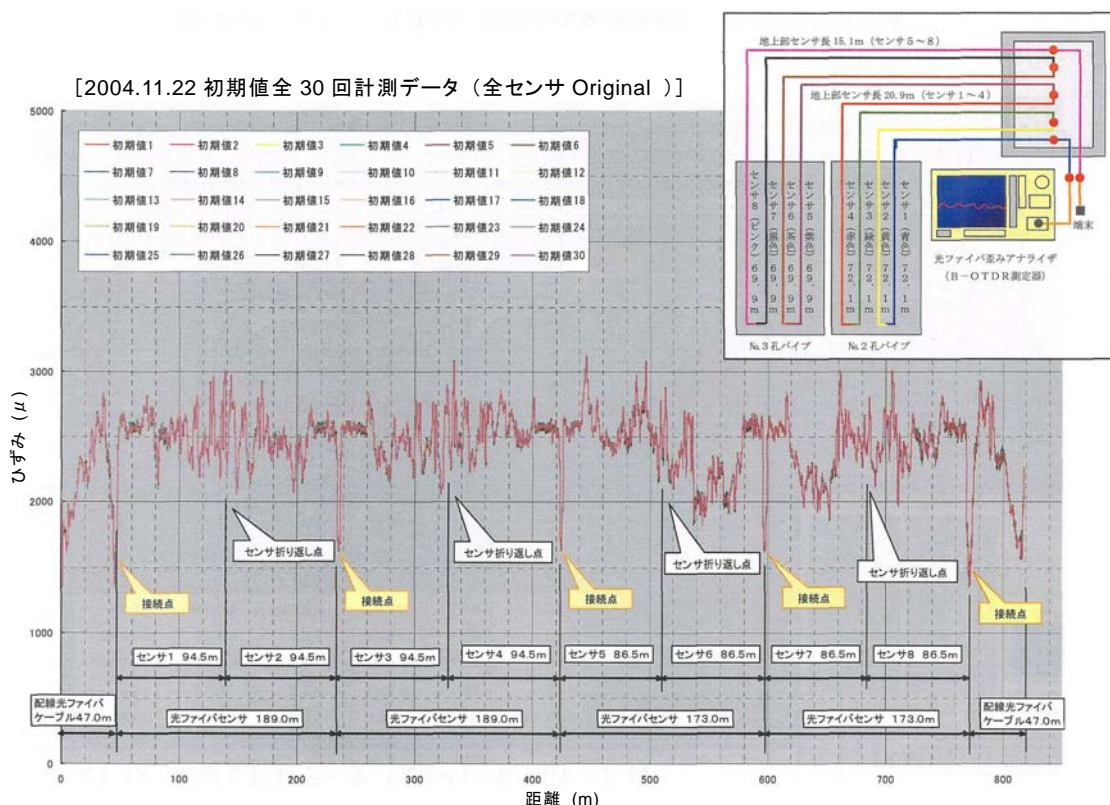


図 3.2.2-6 光ファイバ歪み計 初期値測定結果

② 受払いに伴う相対変位量の測定結果

得られた平均歪みから、初期値と原油払出し後、原油払出し後と受入れ後の各センサの歪みの変化量を算定し、No.2 孔、No.3 孔のタンク横断方向、タンク軸方向の相対するセンサ ([No.2 孔横断方向：センサ 1-2]、[No.2 孔軸方向：センサ 3-4]、[No.3 孔横断方向：センサ 5-6]、[No.3 孔軸方向：センサ 7-8]) の歪み変化量の差より曲げ歪みを求めた。例として No.2、No.3 孔の初期値に対する原油払出し後の曲げ

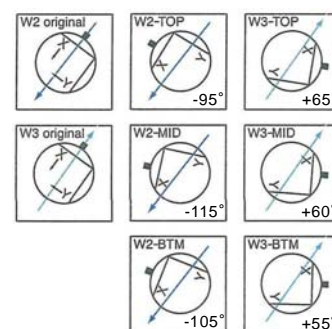


図 3.2.2-7 加速度計埋設後オリエンテーション(水平面)

歪み変化量の算定結果を図 3.2.2-8 に示す。

何れも全長に渡ってほとんど変動は見られない。曲げ歪みの測定精度は $\pm 60 \mu$ （ファイバセンサの歪み測定精度は $\pm 30 \mu$ ）であることを考慮すると、ほとんど変動していないといえる。なお、ファイバセンサの温度ドリフトは $10 \sim 20 \mu / ^\circ\text{C}$ と比較的大きいが、相対するセンサの歪み変化量の差から曲げ歪みを求めることから温度ドリフトの影響はキャンセルされることになる。

原油受払いに伴う相対変位量は、1m 区間の平均曲げひずみから曲率を求め、前項に示した式より算出した。例として No.2 孔の 1m 区間毎の変位の算定結果を図 3.2.2-9 に示す。

1m 区間の相対変位量の算定精度は、曲げ歪みの測定精度 $\pm 60 \mu$ より \pm 約 0.5mm となる。結果は何れも $\pm 0.5\text{mm}$ を大きく下回っており、原油払出し前後および原油受入れ前後でボーリング孔に有意な変形が生じていないことが確認できた。

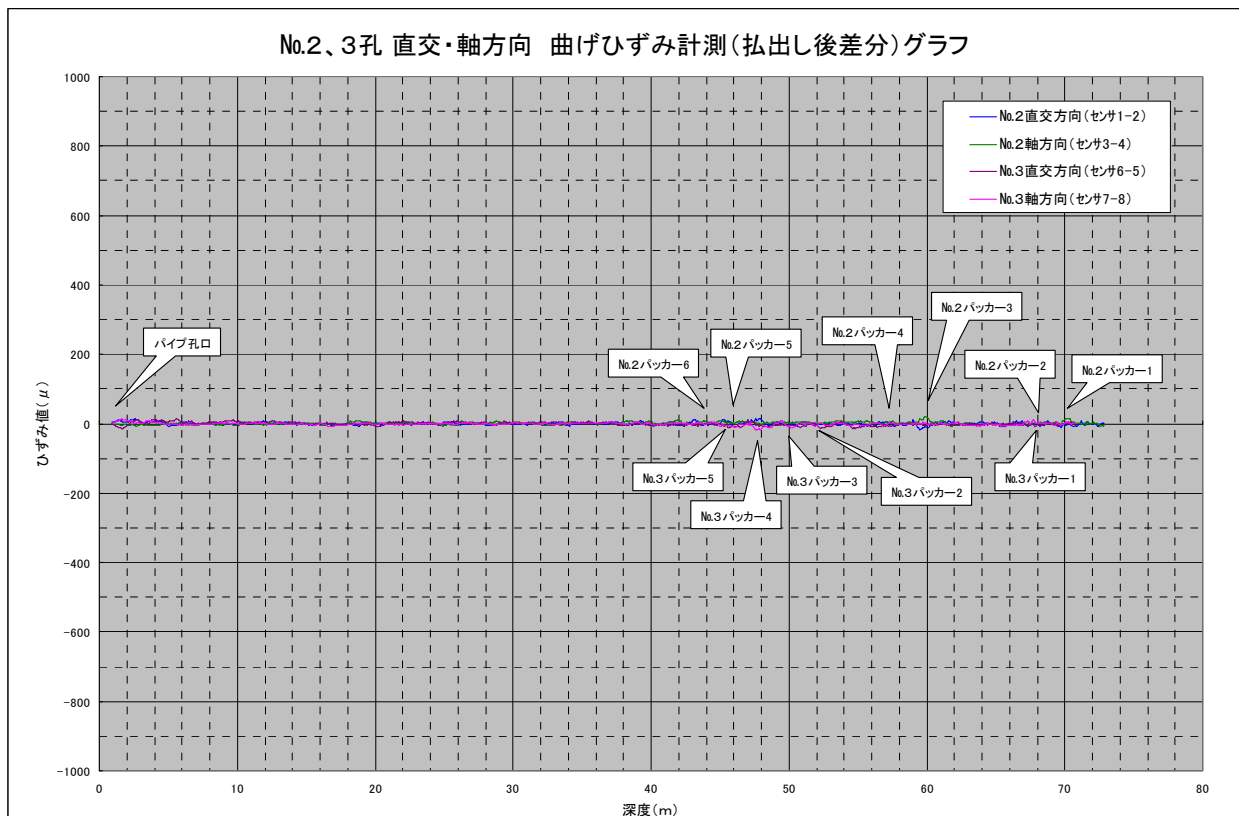


図 3.2.2-8 原油払出しに伴う曲げ歪みの変化量 (No.2、No.3 孔)

③ 受払いに伴う相対変位量の数値解析結果

原油受払いに伴う岩盤タンクおよびボーリング孔沿いの相対変位量を推定することで、当該手法の岩盤タンク点検手法の一つとしての適用性を判断するため、原油払出し前後の気相圧、油面変化を考慮した FEM による 2 次元の数値解析を行った。解析に用いた力学モデル、物性値を図 3.2.2-10、表 3.2.2-3 に、払出し前後の相対変位ベクトルと相対変位を図 3.2.2-11 に示す。また、原油払出し前後の相対変位ベクトルから、No.2 および No.3 孔の岩盤タンク横断方向の相対変位を算出した結果を図 3.2.2-12 に示す。

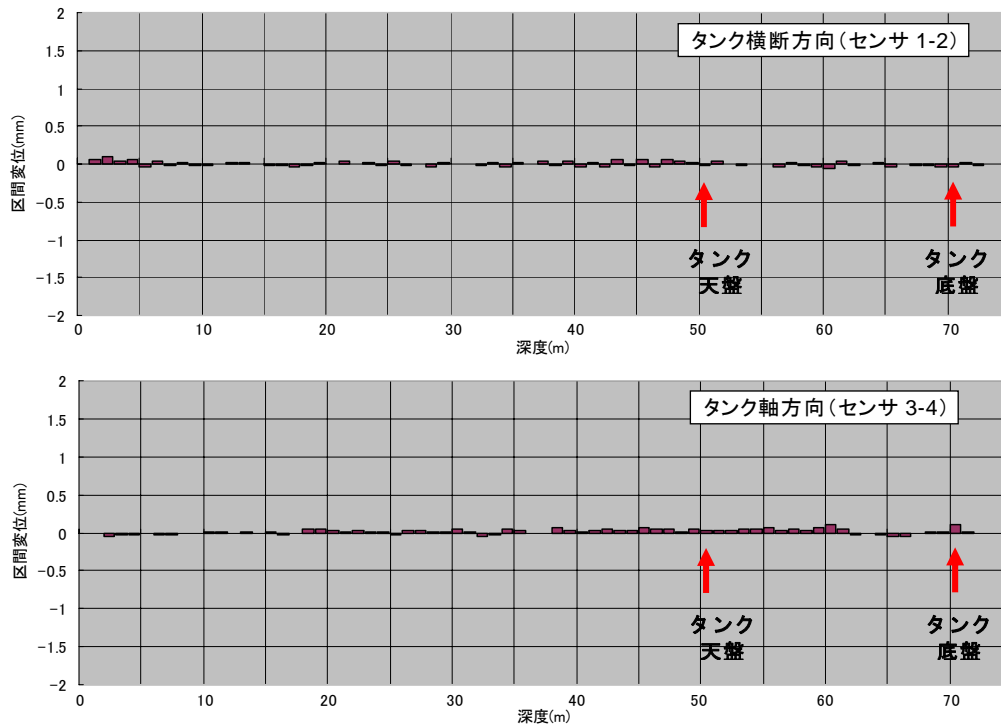


図 3.2.2-9 原油払出しに伴うボーリング孔の相対変位 (No.2 孔)

払出し前後の岩盤タンク壁面の相対変位量は約 0.2mm と僅かであり、ボーリング孔位置では 0.06mm 程度以下の極めて小さな変位と推定される。

初期値測定時点では岩盤タンクの力学的安全性が確保されていると仮定すると、安全性の検討や詳細調査が必要となるのは、相対変位量がこの数十倍を超えるようになる場合である。したがって、岩盤タンクから 10m 程度離れた位置で約 0.5mm 以上の変位量およびその変化速度を計測することで、岩盤タンクの機能に影響を及ぼす可能性のある変状が十分に早い段階で捉えられることになり、安定性の検討や詳細調査ならびに必要な対策などの事前の対応が余裕を持って行うことができるものとする。

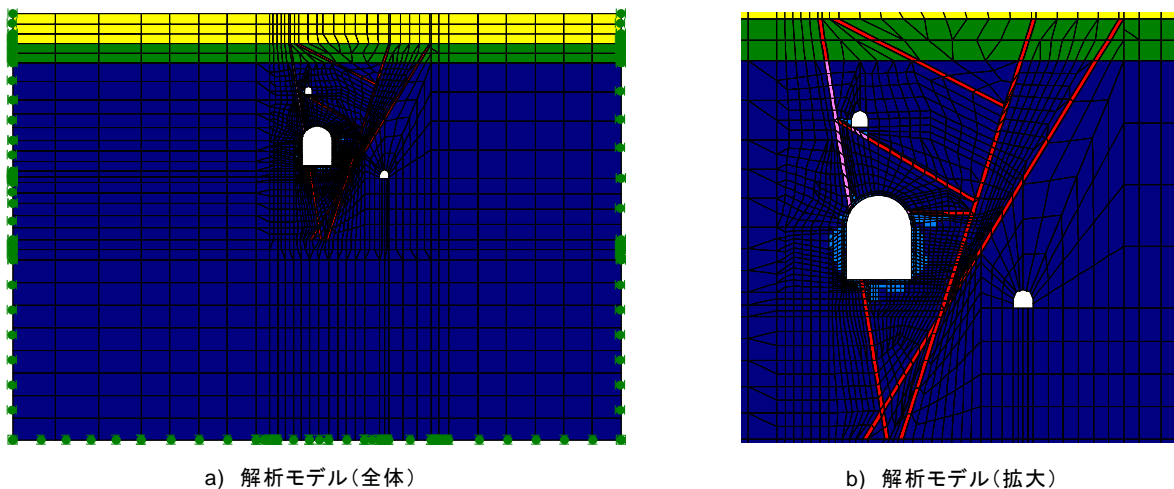


図 3.2.2-10 FEM 二次元解析モデル

3) まとめ

菊間地下石油備蓄基地の竣工後 22 年経過した TK-103 タンクを挟む形で光ファイバ歪み計を設置して、原油受け払いに伴うタンク周辺岩盤の相対変位を測定した。

計器の設置は支障無く行えたが、計器に回転・振れが生じていることを確認した。歪みセンサの姿勢は結果の評価に関わるため、設置方法等をさらに改良・工夫する必要があることが分かった。

表 3.2.2-3 解析用物性値

材料色	材料名	変形係数 (kN/m ²)	ポアソン比	単重 (kN/m ³)
オレンジ	断層	1.00E+06	0.35	25
黄色	風化部	1.00E+06	0.35	25
青	堅岩部	7.00E+06	0.25	26
緑	遷移部	2.00E+06	0.30	26
水色	緩み域(堅岩部)	2.80E+06	0.35	26
ピンク	緩み域(断層)	4.00E+05	0.45	25

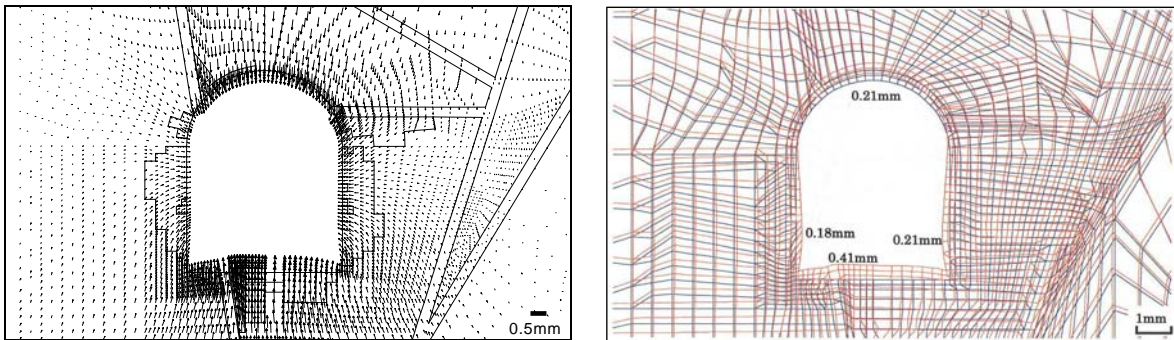


図 3.2.2-11 原油払出し前後の岩盤タンクの相対変位ベクトルと相対変位

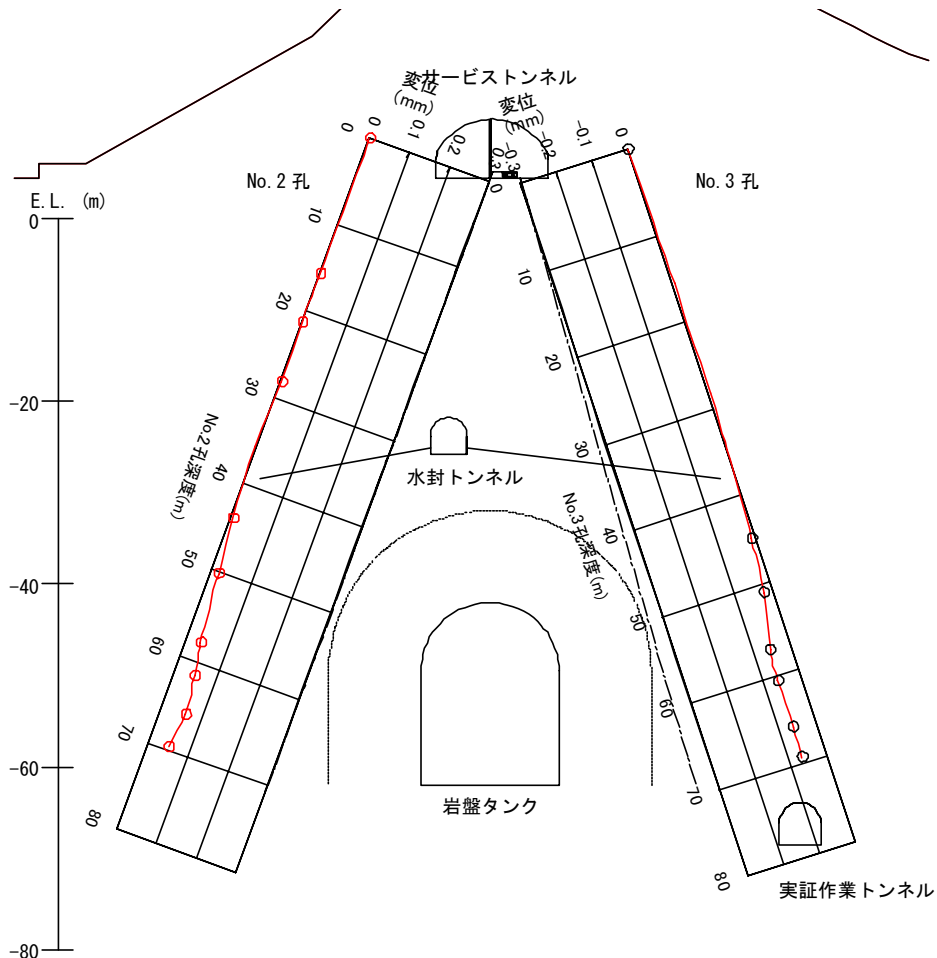


図 3.2.2-12 原油払出し前後におけるボーリング孔沿いの岩盤変位状況

原油受払いに伴う計器設置位置での岩盤に有意な変形が生じないことを確認した。TK-103 タンクは竣工後約 22 年経過しているが、力学的安全性は確保されているものと推察される。

光ファイバ歪み計の測定誤差は±約 0.5mm とやや大きいですが、岩盤タンクの安全性評価においては問題となるものではない。断層破碎帯等の弱層部の変状の発生・進行が懸念される箇所において当該光ファイバ歪み計測手法を適用することで、変位の進行の有無などの長期的な変動傾向を監視・把握することが可能となり、岩盤タンクの安全性に関する評価精度・信頼性の向上を図ることができると考える。

3.2.3 高精度傾斜計測

(1) 概要

高精度傾斜計測は、地下深部の岩盤タンクの変形および変形の進行程度を地表近くに設置したセンサで地盤の傾斜変化として捉え、力学モデルによる数値解析と併せて岩盤タンクの安全性を評価する点検手法である。

本計測は、地下深部の岩盤挙動の監視として既に国内外の石油や地熱の分野で実績があり^{17)~20)}、現在は地表近くの微細な傾斜の計測により、地下深部の応力集中異常域の予測や地下水理の解析への適用などについて研究が行われている。

(2) 適用性確認試験

岩盤タンクの安全性評価における点検手法としての高精度傾斜計測の適用性を確認するため、平成15年度から16年度にかけて串木野国家石油備蓄基地の堅坑上部室およびサービストンネル内に高精度傾斜計を計3台設置して観測を行った²¹⁾。傾斜計配置箇所は、**図 3.2.3-1** に示すように岩盤タンク域の北西（タンク域中心から西側でタンク TK-101、TK-102 付近）の領域で、ST-4 以外はタンク空洞縁の直上付近に位置する。

1) 傾斜計の原理・性能と設置方法

① 傾斜計の原理・性能

計測器はピナクル社製孔内設置型 Tiltmeter5500 を使用した。高精度傾斜計の概要図を**図 3.2.3-2** に示す。この傾斜計は、一般の水準器と同様の気泡方式のセンサーを使用している。傾斜センサーは、表面に電極が設けられたガラス管でできており、内部には電解質溶液と気泡が封入されている。重力方向の変化により気泡が動くことによって電極間の電位が変化する。傾斜センサーは、互いに直交するように2個内蔵されており、X、Yの2方向の傾斜が同時に計測できるものである（**図 3.2.3-2** 参照）。

傾斜計の仕様を表 3.2.3-1 に示す。センサで測定された電位はアナログアンプで増幅された後、センサ内部の A/D 変換器で 24Bit にデジタル化される。アナログアンプのゲイン調整は3段階可能で、分解能は1~100ナラジアンまで変更できる。傾斜計は本体内にメモリを内蔵し、A/D

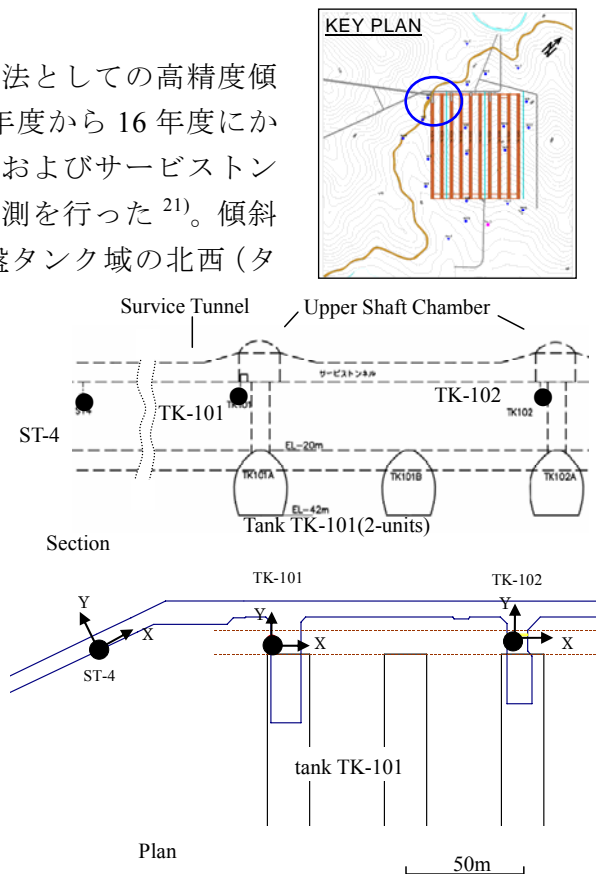


図 3.2.3-1 高精度傾斜計の設置位置

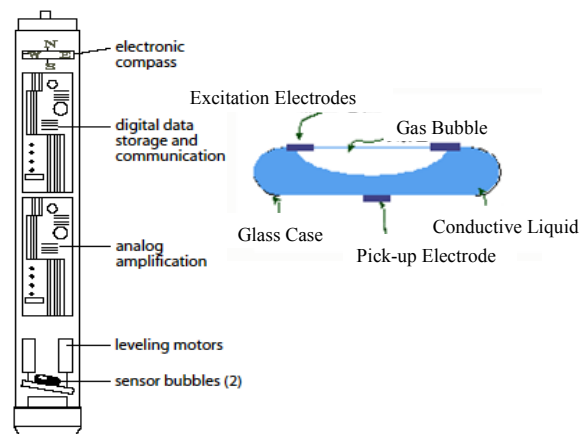


図 3.2.3-2 高精度傾斜計とセンサの概要図

変換後のデジタルデータを内部保存できる。

さらに、自動レベリング機能を有している
ので、鉛直から $\pm 8^\circ$ の範囲での傾斜測定が可
能である。このほか、傾斜計内部にはコンパ
スおよび温度計を内蔵しているため、傾斜と
同時に方位・温度が測定できる。

② 傾斜計の設置と計測条件

高精度傾斜計（直径 6.4cm, 長さ 107cm, 重
量約 4kg）を設置するための観測孔を堅坑上
部室 TK101 と TK102、およびサービストンネ
ル内空変位測定地点でそれぞれ各 1 孔（孔径
6 インチ）掘削した。

設置箇所のサービストンネルおよび堅坑上
部室は、厚さ 1m 前後のコンクリートが打設されてい
る。観測孔の掘削深度は、この
コンクリート下面から 4m とし、堅硬な安山岩を確認したうえで孔底に設置した。

観測孔への設置方法は以下の通りである（図 3.2.3-3）。孔底に届く長さの VP75 ビ
ニルパイプ（ $\phi 75\text{mm}$ ）をインナーパイプとして孔内に挿入し、VP75 ビニルパイプと観測
孔の間にセメントミルクを注入し、VP75 ビニルパイプを固定した。なお、セメント
ミルクの注入は、挿入した VP75 パイプがコンクリート床の振動に影響されないよう
に、コンクリート床の下面の下 20~30cm 程度までとした。

このインナーパイプの底に珪砂を予め 30mm 程度敷き、傾斜計を吊りワイヤーで底
まで降ろして PC と接続し、傾斜計の計測軸
を固定した。計測軸が決定後、さらに珪砂を
700mm 程度まで詰めて傾斜計を固定し、計測
を開始した。

傾斜計計測の設定条件は以下の通りである。

- ・データ取得間隔：60 秒
- ・分解能：1 ナノラジアン（ 10^{-9} radian）
- ・設定方位：

TK-101, TK-102 : X : N49°E, Y : N41°W

ST-4 : X : N23°E, Y : N67°W

2) 計測結果と考察

① 全般的傾向

全 3 箇所の 2004 年 1 月 1 日から 1 年間の傾斜変化を図 3.2.3-4 に示す。ST-4 の傾斜
は、気圧変動及び地震による傾斜変化のほかに温度に依存していると考えられる長期
トレンドが認められる。サービストンネル軸方向（X）（図 3.2.3-1）には長期的な岩
盤変位が見られるが、トンネル軸に直角方向（Y）の傾斜は 1 年を経て、年初の傾斜
に復帰している。

傾斜計設置位置付近（トンネル底盤の約 4m 下方）の岩盤のトンネル長軸方向（X）

表 3.2.3-1 高精度傾斜計の仕様
(Pinnacle Technologies 5500 series)

Tilt Resolution	1 nrad
Range	$\pm 8^\circ$ from vertical
Gain(Max)	1000 mV/ μ rad
Gain Levels	3
Sampling Time	1 sec. ~ 4 min.
Data storage	30 days (30sec. samples)
Data Storage Type	Internal A/D & Storage
A/D Resolution	24 bits
Measured Orientaion	X & Y (two direction) Internal
Compass	magnetic compass
Temperature	Internal thermometer
Size & Weight	6.4cm(dia.) \times 107cm, 4kg
Environmental	-40° to 85°C operation
Power req.	DC 12 V
Ave. Power Consumption	280 mW

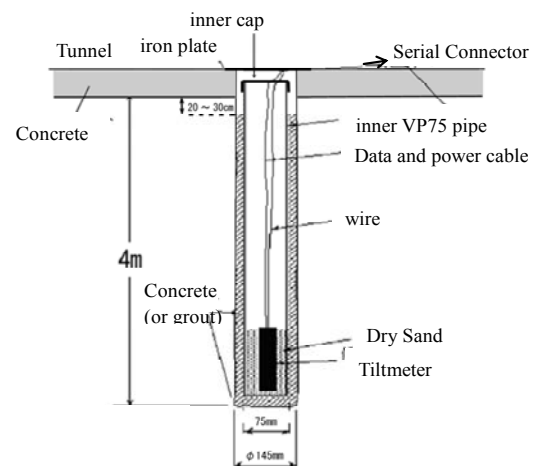


図 3.2.3-3 高精度傾斜計設置概要

傾斜は、温度影響成分も含めて1年間で約 $70 \mu \text{ rad}$ ($0.7\text{mm}/10\text{m}$ 相当) と岩盤の安全性に大きな影響を与える変化ではないが、わずかながら増加している。温度影響成分は、 $15 \mu \text{ rad}/^\circ\text{C}$ 程度と推定される。

トンネル軸に直角方向 (Y) の傾斜は温度変化と相似した変化を示し、1年間の傾斜振幅は約 $30 \mu \text{ rad}$ ($0.3\text{mm}/10\text{m}$ 相当) である。

岩盤タンクの西端でタンク天端から約 20m 上部に位置する堅坑上部室 (TK-101 および TK-102) での傾斜変化は ST-4 に比べて短期イベントに対する傾斜変動が小さい。TK-101 におけるタンク長軸直角方向 (X) (図 3.2.3-1) の傾斜は年間で $10 \mu \text{ rad}$ ($0.1\text{mm}/10\text{m}$ 相当) 程度の増加が見られる。傾斜の変動傾向はわずかながら進行するトレンドを示しているが、サービストンネル ST-4 の進行速度よりも小さく、空洞等の安定性には問題とならない。なお、堅坑上部室 TK-101 においては、4月まで電源系統不具合により欠測となった。また、TK-102 においては、中間に欠測が生じたため1年間における変動は不明であるが、欠測期間前後の傾斜変動勾配は3箇所中最も小さい。

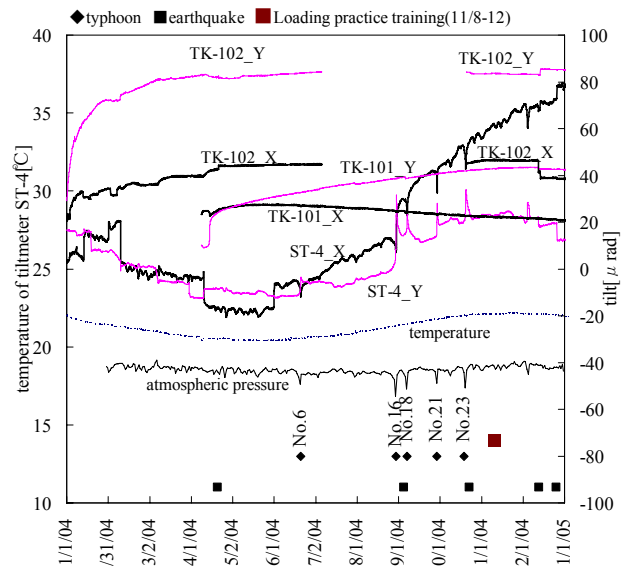


図 3.2.3-4 傾斜変動図(2004年1月~12月)

② 影響成分の抽出

傾斜計データには地球潮汐及び気圧に対応した変動が認められる。ここでは、地球潮汐データ及び地殻変動観測データ等の解析などに広く用いられている BAYTAP-G²²⁾ を用いて各傾斜の影響成分を分離した。

BAYTAP-G は潮汐定数の決定、ドリフトの決定とそのパワースペクトルの計算、並行観測データの応答計算、欠測値の補間、跳び量の推定、および異常値の検出などの多くの機能を有している。

BAYTAP-G では、観測値の時系列 y_n を潮汐成分、並行観測データの応答及びドリフトを考慮して以下の式でモデル化している。

$$y_n = \sum_{m=1}^M (\alpha_m C_{mn} + \beta_m S_{mn}) + \sum_{k=0}^K b_k x_{n-k} + d_n + \varepsilon_n \quad \dots \dots (1)$$

式(1)の第1項は潮汐項であり、 m は分潮群の番号 (M は分潮群の総数)、 α_m 、 β_m は潮汐定数、 C_{mn} 、 S_{mn} は分潮番号 m の理論値である。 b_k は並行観測データ x に対する応答係数で、 d_n はドリフト成分である。 ε_n は不規則な観測誤差成分である。

応答係数 b_k などのパラメータの推定値は、次の式の $J(d)$ を最小化する値として最小2乗計算によって求められる²³⁾。下式第2項の係数 v^2 はドリフトの滑らかさを規定する係数である。

$$J(d) = \sum_{n=1}^N \left\{ y_n - \sum_{m=1}^M (\alpha_m C_{mn} + \beta_m S_{mn}) - \sum_{k=0}^K b_k x_{n-k} - d_n \right\}^2 + v^2 \sum_{n=1}^N \{ d_n - 2d_{n-1} + d_{n-2} \}^2 \quad \dots \dots (2)$$

ここでは、地球潮汐成分の除去及び並行観測データとして鹿児島県枕崎測候所において計測された気圧時系列を用いて各種影響成分の検討を行い、各成分の分離を試みた。なお、BAYTAP-G を実行する前に1分間隔のデータを間引き、1時間毎とした。

BAYTAP-G により抽出した各種影響成分の例として、サービストンネル (ST-4) の X 成分を図 3.2.3-5 に示す。他の 2 箇所 (堅坑上部室 TK-101、TK-102) においても解析精度は高く、次節で示すように、油面低下に伴う微小な短期イベント (低下期間において $0.1 \sim 0.2 \mu \text{ rad}$ 程度の変化) を抽出した。

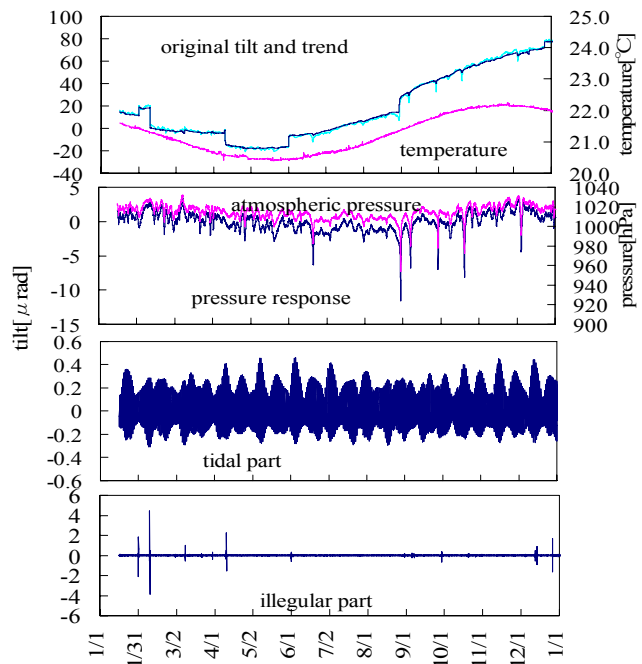


図 3.2.3-5 傾斜変動影響成分(ST-4_X.)

a. 潮汐影響成分

潮汐影響成分の大きさは、サービストンネル ST-4 で最も大きく約 $0.4 \sim 0.8 \mu \text{ rad}$ であるのに対し、堅坑上部室 (TK-101 および TK-102) における潮汐影響成分の振幅は $0.1 \sim 0.5 \mu \text{ rad}$ であった。潮位 (枕崎) と ST-4 の X 成分は、図 3.2.3-6 右に示すように、ほぼ逆相関となっている。

b. 気圧影響成分

気圧影響成分は、ST-4 で特に大きく約 $15 \mu \text{ rad}$ に達しているが、TK-101 及び TK-102 では約 $0.2 \sim 0.8 \mu \text{ rad}$ で地球潮汐影響成分と同程度の大きさである。気圧変動と ST-4 の X 成分は、図 3.2.3-6 左に示すように正の相関を示す。

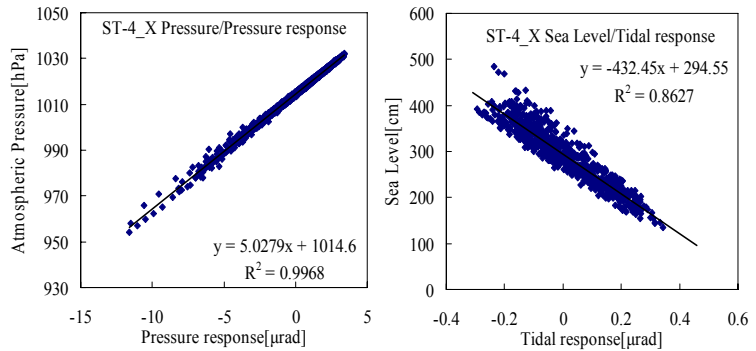


図 3.2.3-6 気圧・潮汐と傾斜変動の相関

c. 残差成分とトレンド成分

残差成分には、主として地震及びその他ノイズ成分が含まれる。傾斜の長期トレンドは、測定点近傍の内空相対変位の進行速度と同程度のオーダーであることから、岩盤の長期変動傾向と関連した傾向を示していると考えられる。

③ 短期イベントによる微小傾斜変化

短期イベントによる傾斜変化は、潮汐の他に地震及び気圧変動が主な影響成分である。以下顕著なイベントについて説明する。

a. 地震

地震と対応する瞬間的なイベントは多数認められる。今回の観測データでは、海外の M7 以上、日本国内の M6 以上及び串木野基地近傍での M3 程度以上の地震に対応

するイベントが確認できた。ここでは、2004年12月26日インドネシア・スマトラ沖地震(M9.0)に対応する傾斜変動について図 3.2.3-7 に示す。

スマトラ沖地震時には、地震イベントとしては最大の約 $24 \mu \text{rad}$ (TK-102)を記録した。

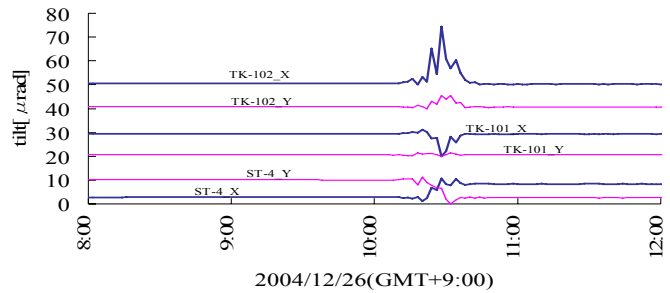


図 3.2.3-7 スマトラ沖地震に伴う傾斜変動

b. 気圧

傾斜計は、台風通過時などの気圧低下に対応した地盤変動を明瞭に捉えている。気圧変動に伴う傾斜変化は、堅坑上部室 (TK-101 および TK-102) に比べてサービストンネル (ST-4) でより顕著に現れており、台風 16 号通過時 (964hPa) には最大約 $30 \mu \text{rad}$ の変動を示した。台風 16 号及び台風 18 号が続けて通過した 8 月末から 9 月初旬にかけてのサービストンネル (ST-4) の傾斜変動経過を図 3.2.3-8 に示す。なお、この期間には 9 月 5 日に紀伊半島沖地震が起きている。

c. 油面の変化による傾斜変化

2004 年 11 月に原油の受払いを行う荷役実技訓練が岩盤タンク TK-101 (TK-101A および 101B の 2 ユニット) において実施され、その時の油面変化 (10 万 kl 払出した時点で約 6.6m 低下、タンク TK-102・TK-103 の計 8 ユニットの油面は不変) に伴う微小傾斜変化を計測した。

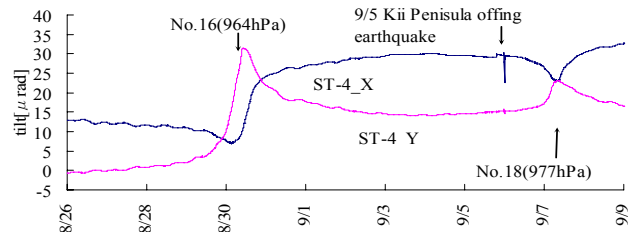


図 3.2.3-8 台風通過時の傾斜変動 (2004 年)

油面低下前後における TK-101 および TK-102 の傾斜の経時変化の様子を図 3.2.3-9 に示す。破線は原データであり、実線は BAYTAP-G により潮汐、大気圧変動等の成分を除去したトレンド成分である。油面の変化に対応して、傾斜が変動したことが読み取れた。また、図 3.2.3-10 には油面変動に伴う傾斜変動の方位及び絶対値を見るために、傾斜の x 成分 (タンク長軸直角方向) を横軸、傾斜の y 成分 (タンク長軸方向) を縦軸として表したホドグラムを示す。

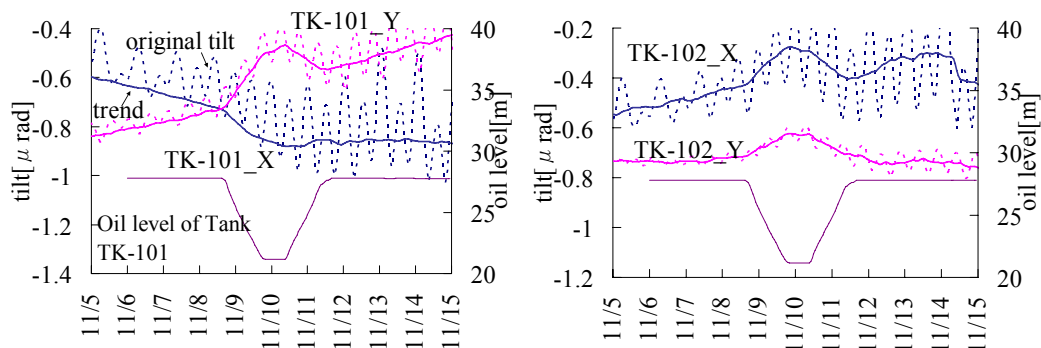


図 3.2.3-9 油面変化時の傾斜変動 (2004 年)

1) 傾斜変動方位と変動量

図 3.2.3-10 のホドグラムから、油面低下時の TK-101 および TK-102 の傾斜変動の方

位はタンク北西側端部を中心に放射方向となっており、傾斜計位置の仮想鉛直線が傾斜方位に向かって倒れる動きを示していることが分る。

油面低下時のタンク内圧は、タンク頂部気相部は不変でタンク側面および底面では減少することから、タンク側壁がタンク内側へ縮小するとともに、タンク天端およびタンク底盤は上向きに変形すると推定される。この「タンク断面の変形」が岩盤タンク周辺全体に伝播し、傾斜計により捉えられたものと考えられる。

ロ) 二次元解析

油面低下に伴う傾斜変動の傾向及び変動値の大きさを概略推定することを目的として、二次元線形有限要素法により岩盤タンク油面を 6m 低下させたときのタンク軸横断方向の数値解析（解析コード「FINAS」）を行った。解析条件を表 3.2.3-2 に示す。

表 3.2.3-2 解析条件一覧表

解析条件 範囲 岩盤物性 原油密度	上～下端:EL+100m～EL-100m, 幅:100m 変形係数 2.55E+06 kN/m ² , 密度 24.5 kN/m ³ , ポアソン比 0.3, 側圧比 1.0 8.425 kN/m ³ (Iranian Light)
境界条件	上面:自由, 側面:横方向拘束, 鉛直方向自由, 底面:拘束.
荷重条件	ケース1(油面 EL-21m):液面 0MPa, 底盤 0.176MPa ケース2(油面 EL-27m):液面 0MPa, 底盤 0.126MPa *) 両ケースとも気相部圧は 0.01MPa

推定傾斜値と実測値を表 3.2.3-3 に、ほぼ満液状態から 6m 油面が低下した場合のタンク周辺岩盤の傾斜分布を図 3.2.3-11 に示す。なお、岩盤タンクの相対変位は、側壁でタンク内側へ約 0.3mm の縮小、天端および底盤は上向きにそれぞれ約 0.06mm、0.32mm と推定される。

傾斜計のタンク軸横断方向(X)の傾斜変動方向の傾向と解析結果は一致する。傾斜変動予測値は実測値の約 2 倍程度となったが、(1)傾斜計がタンク端部直上に位置しており、(2)絶対傾斜値には y 成分（タンク軸方向）の傾斜を含むこと、一方解析では(3)推定傾斜値はタンク中央部横断面における x 方向傾斜値であることを考慮すると、傾斜オーダーとしてはほぼ一致していると評価できる。傾斜変動実測値を適切な解析により再現できれば、岩盤タンク周辺の状況を推定することができることを意味している。

④ 傾斜の長期トレンド

傾斜データの長期的な傾向として、傾斜計に

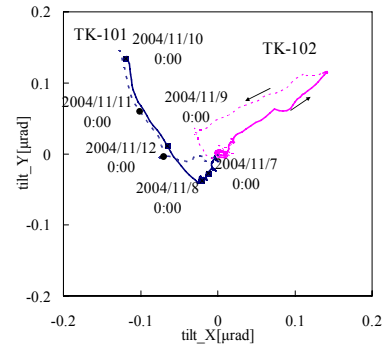


図 3.2.3-10 油面変化時の傾斜変動軌跡

表 3.2.3-3 油面低下時の傾斜変動解析結果と計測値

計測地点	解析値 (μ rad)	計測値 x (μ rad)
	6.0m 油面低下時	6.6m 油面低下時
TK-101	-0.3	-0.13
TK-102	0.3	0.14
ST-4	<0.1	(0.0)

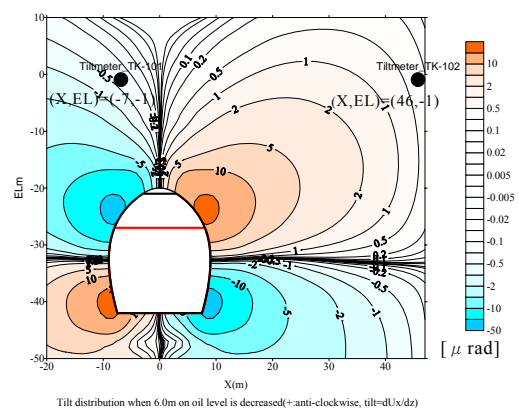


図 3.2.3-11 油面変化時のタンク周辺岩盤の傾斜分布(+:反時計回り)

装着された温度計計測値の変化に対応した変動が認められる。特にサービストンネルの微小傾斜の長期トレンドは傾斜計設置箇所（底盤約 4m 下部）の微小温度変化に対応して変化していると推定される（図 3.2.3-4 参照）。他の箇所（堅坑上部室 TK-101 および TK-102）では ST-4 ほど明確でないが、温度変化に相似した傾向が認められる。

図 3.2.3-12 は、2004 年 1 月 1 日から同年 12 月 31 日にかけての ST-4 の傾斜方位および絶対量（2004 年 1 月 1 日を基準として）を示したもので、横軸に X 方向傾斜、縦軸に Y 方向傾斜を割り当て表示したものである。傾斜計測定開始当初は-X 方向（ほぼ南）に傾斜が増加する傾向であったが、2004 年 6 月以降+X 方向（ほぼ北）へ傾斜が増加し始め、2004 年 9 月以降は 1 月時点を基準にして北側へ傾斜が増加し続けている。その大きさは約 $70 \mu \text{rad}$ である。台風通過時には短期的に西方向に変動し、台風通過前のトレンドの延長位置に回帰している。Y 成分は 1 年でほぼ同じ値に回復しているため、傾斜進行の方位はほぼ X 軸の正方向（北方向）であると考えられる。今後は、この長期的な傾斜変動とタンク周辺岩盤の挙動との関連を検討・把握していくことが必要である。

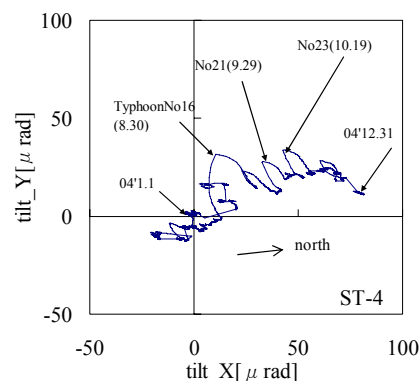


図 3.2.3-12 2004 年 1 年間の傾斜変動の軌跡 (ST-4)

⑤ 他の計測値との比較

当該地下石油備蓄基地では操業管理のために孔内水位、岩盤タンク湧水量、人工水封水供給量、タンク内圧、水収支等の各種モニタリングを行っている。傾斜データはこれらの計測データと比較しながら監視を行っている。

孔内水位、傾斜、降雨を比較した例を図 3.2.3-13 に示す。水位観測孔 W-9 は降雨量に対応した変化を示していない。W-9 孔水位は、台風 16 号通過による気圧低下後に (964hPa, 降雨: 8/29-30: 60mm) 約 70m 低下した。このとき傾斜は ST-4 で約 $30 \mu \text{rad}$ 変化し、傾斜は回復せず残留している。一方、観測孔 W-12 の水位は台風通過時に変化はなく降雨に対応した小さな変化のみ示している (台風 16, 18, 21, 23 号等)。

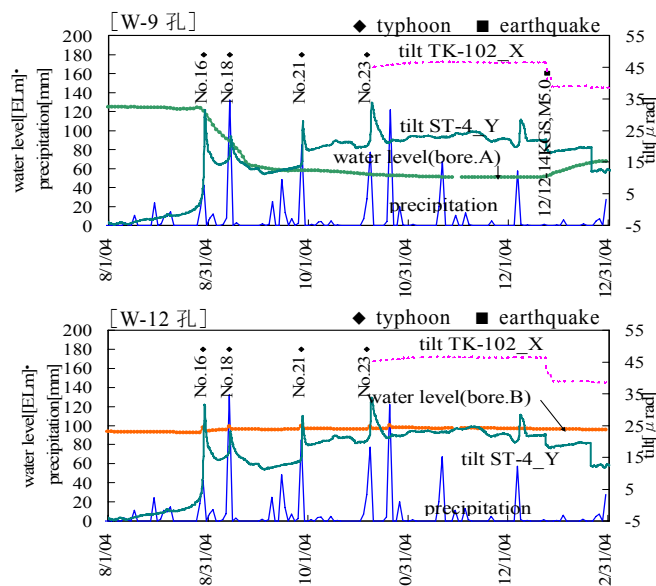


図 3.2.3-13 観測孔水位と傾斜変動および降水量

傾斜計においては、遠隔地の大規模地震および基地近傍の小規模な地震を多数記録している。地震との関連は明らかではないが、九州西方沖群発地震 (12/12~14, M5.0, 傾斜変化 TK-102: $8 \mu \text{rad}$) において W-9 孔は 3 日で約 2m、2 週間で約 16m 上昇した。

3) まとめ

1 年余りの試験計測により、潮汐、気圧変動、地震動および油面低下に起因する傾斜の変化量、残留の有無及びその大きさを把握できた。さらに、適切なデータ解析（各種影響成分の抽出）を行い、数値解析と組み合わせることで、高精度傾斜計により地下空洞および周辺岩盤の監視・評価が十分可能である事が確認できた。

今後は、計測データから岩盤の長期的な挙動、イベント位置の推定手法、並びに当該地区の地下地質モデルに対する順解析と計測値の逆解析による定量的な岩盤挙動の把握について検討を進めていく必要がある。

3.2.4 弾性波・比抵抗トモグラフィ

(1) 概要

弾性波・比抵抗トモグラフィは、地下石油備蓄基地の堅坑ならびにタンク周辺岩盤の劣化の進行や不飽和域の生成等の有無を弾性波速度値および比抵抗値の変化として捉え、その変化状況から岩盤タンクの安全性を評価する点検手法である。

弾性波、比抵抗による探査やトモグラフィは、地質構造、地下水や鉱物等資源の分布等の把握を目的として土木地質調査や資源調査において広くに利用されている技術である。

(2) 適用性確認試験

岩盤タンクの安全性評価における点検手法としての弾性波・比抵抗トモグラフィ調査の適用性を確認するため、平成 15 年度に菊間国家石油備蓄基地 TK-103（旧実証プラント）に設けた No.1、No.4、No.5 孔を利用して弾性波・比抵抗トモグラフィ調査を実施した^{8),9),24)}。

これら 3 孔は、掘削長 82.0～84.0m、孔径 76mm、傾斜角 70～74° で岩盤タンクを取り巻くように配置している。また、3 孔ともに裸孔状態で、水封孔として給水設備により常時注水を行うとともに、前述のサイスミックモニタリング用のハイドロフォンを設置している。

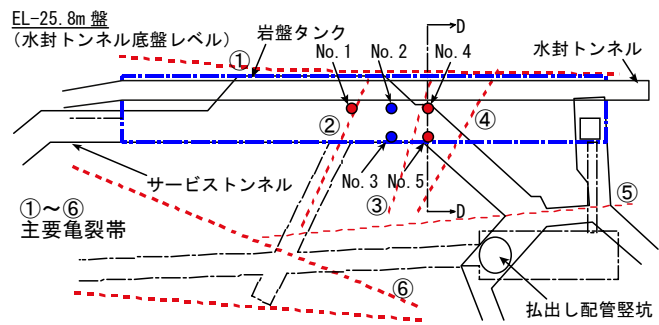


図 3.2.4 調査位置平面図 (EL-25.8m 盤)

調査地点の平面図を図 3.2.4-1 に、No.4 - No.5 孔位置の断面図 (D-D 断面) を図 3.2.4-2 に示す。両図には、岩盤タンク建設時に観察記録された主要亀裂帯と当該調査ボーリングのコア観察結果から判断した脆弱帯などの位置を併せて示した。

1) 調査方法

弾性波トモグラフィは、岩盤タンクの横断方向となる No.4-5 孔、軸方向となる No.1-4 孔および斜め方向となる No.1-5 孔の 3 断面で実施した。使用した装置を表 3.2.4-1 に示す。震源は大きな振動エネルギーが得られる OWS 震源を、受振器は 12ch のハイドロフォンを使用した。震源および受振器の間隔は 2m とし、これらを順次移動させながら、孔-孔間のクロスホールと孔軸に沿ったインラインで測定を行った。

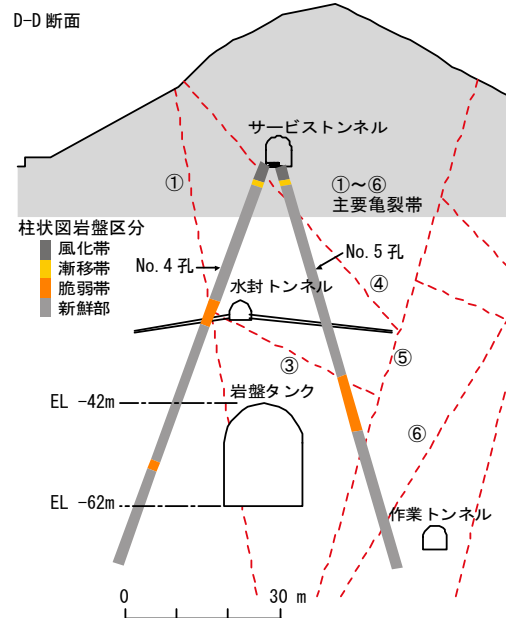


図 3.2.4-2 調査位置断面図 (D-D)

比抵抗トモグラフィも同様に 3 孔に電流電極と電位電極を配置して 3 断面で比抵抗

分布を測定した。使用した装置を表 3.2.4-2 に示す。比抵抗トモグラフィは、孔間だけの測定を行うと孔間中央深部に偽像が発生しやすい。このため、対象断面の直上の地表に水平距離 8.5m 間隔で 11 電極を互いに直交する 2 方向に配置した。電極配置は二極法とし、調査位置から約 500m 離れた 2 箇所に遠電極を設置した。また、ボーリング孔内の電極の間隔は 2.5m とした。孔全長にわたって電極を配置し、電流電極を移動させて電流を流し、残りの全電極で電位分布を測定した。弾性波と同様にクロスホール測定とインライン測定を行った。

2) 調査結果と考察

① 弾性波トモグラフィ

弾性波トモグラフィで得られた波形の一例を図 3.2.4-3 に示す。波形には大きなノイズが認められるが、800Hz～4,000Hz を通過させるバンドパスフィルタを設定することでノイズをある程度除去することができる。以後の解析には同様にノイズを除去したデータを用いた。

解析では、水封トンネル内水封水、岩盤タンク内原油および気相の弾性波速度をそれぞれ 1.5km/sec、1.31km/sec、0.35km/sec に固定し、それ以外は初期値を 4.9km/sec とした。解析結果を図 3.2.4-4 に示す。なお、解析領域の側面境界はボーリング孔である。

No.4-5 断面では、弾性波速度は全体的に 5.0km/sec 程度となっており、水封トンネルの左下と右下および岩盤タンクの右側と右下部に 3.5～4.5km/sec 程度の相対的に低速度の領域が認められる。これらの低速度域は図 3.2.4-1、図 3.2.4-2 に示した亀裂帯 (①, ③, ⑤, ⑥) の分布と良い整合性がみられ、亀裂帯の分布状況をうまく表しているものと考えられる。

表 3.2.4-1 弾性波トモグラフィ使用機器一覧

項目	仕様
震源	OWS 震源 寸法:φ60mm×長さ2.3m トリガー信号:震源内ジオフォンからの波形出力 コントローラ:280mm ^(w) ×210mm ^(H) ×220mm ^(D)
受振器	名称:ハイドロフォン(チャンネル数:12ch) 周波数応答:7Hz～36Hz 受振感度:-190dBを1V/μPaとして出力 許容使用深度:水深1000m 許容使用温度:70° センサー間隔:2m
記録器	McSEIS-SX24(チャンネル数:24ch) サンプリング間隔:25,50,100,200,500,1000,2000μs 周波数帯域:4.6Hz～4.6kHz 利得:16,64,256,1024倍

表 3.2.4-2 比抵抗トモグラフィ使用機器一覧

項目	仕様
電気探査装置	送信機 GS606 電圧:DC 5～600V 電流:最大1A 受信器 VM5-105 チャンネル数:105ch
孔中ケーブル	40電極(銅製)100m対応
地表電極	S字アース棒:長さ60cm
地表電線	VSF1.25(有効断面積1.25mm ²)

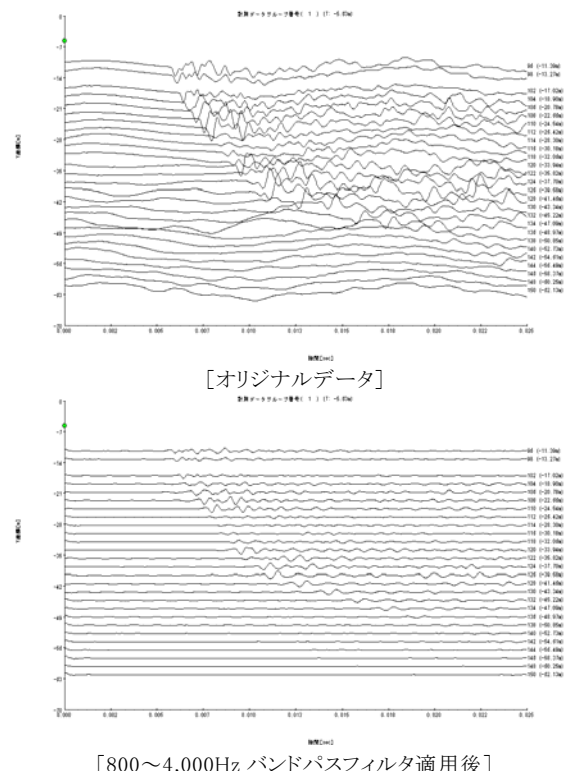


図 3.2.4-3 測定波形データの一例

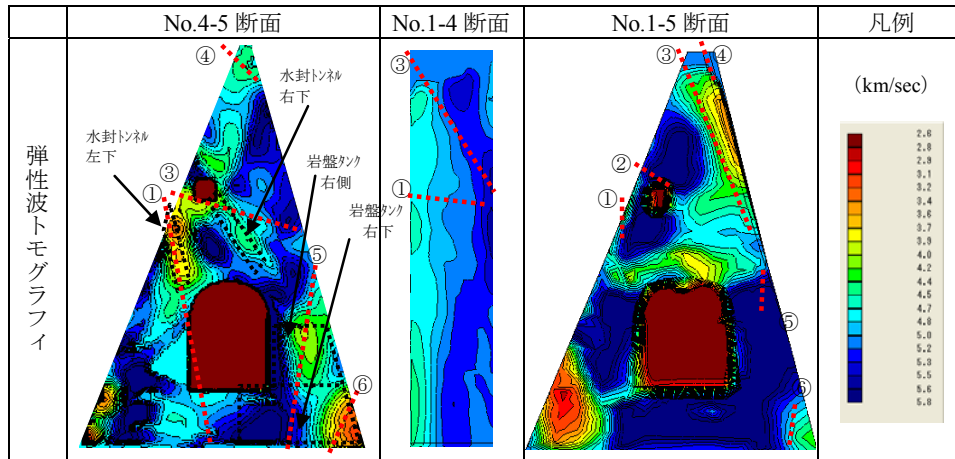


図 3.2.4-4 弾性波トモグラフィ解析結果

No.1-4 断面では、速度範囲は 4.0km/sec～5.7km/sec と全体的に均一な速度分布となっている。この断面では亀裂帯が計測断面とほぼ平行して存在しているため、弾性波速度の変化に乏しい結果となっているものと推察される。No.1-5 断面はボーリング孔の位置関係より、2 次元平面上に正確に投影できないことから結果の解釈にはやや難があるが、全体的には 5.0km/sec 程度の速度分布が認められ、低速度域は亀裂帯 (③, ④, ⑥) の分布と概ね整合している。このように、今回の計測および解析では岩盤タンクを横断する方向となる No.4-5、No.1-5 断面において岩盤状況と良い対応を示す結果が得られた。

② 比抵抗トモグラフィ

比抵抗トモグラフィ解析では、水封トンネル内水封水、岩盤タンク内原油および気相の比抵抗値をそれぞれ $50 \Omega \cdot m$ 、 $\infty \Omega \cdot m$ に固定し、それ以外は $600 \Omega \cdot m$ を初期値とした。解析は 2 次元で地表測線を考慮しない場合と考慮した場合で行った。解析結果を図 3.2.4-5 に示す。岩盤タンク周辺の比抵抗値は、概ね $2,000 \sim 4,000 \Omega \cdot m$ 程度で、部分的に $200 \Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗域がみられる。

No.4-5 断面の地表測線を考慮しなかった場合は、No.4 孔から岩盤タンク上部にかけ

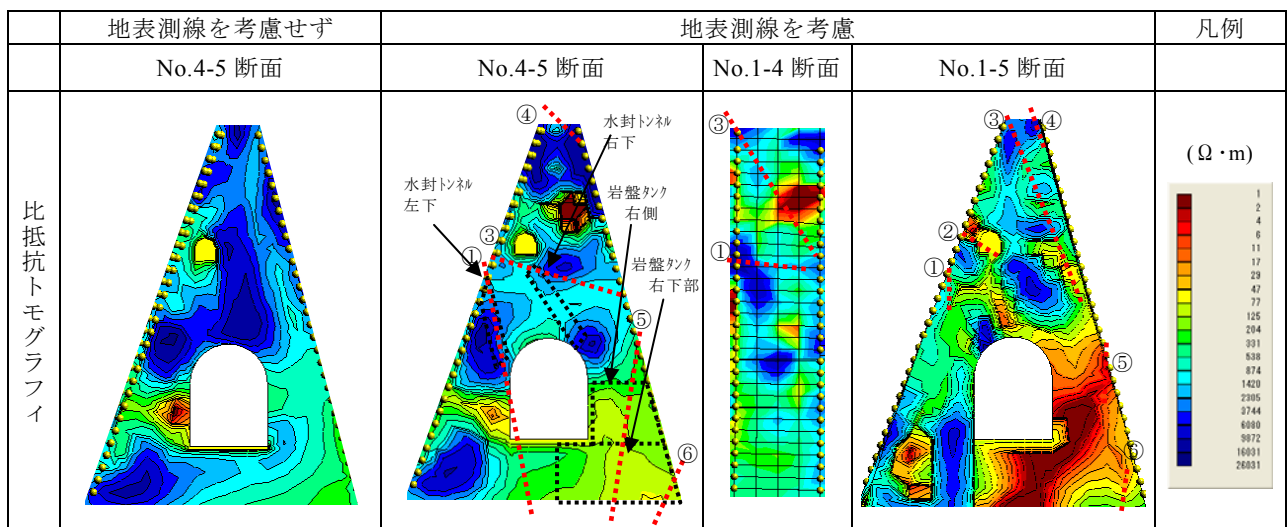


図 3.2.4-5 比抵抗トモグラフィ解析結果

て高比抵抗域が認められるが、地表測線を考慮した場合は、その高比抵抗域が減少し、タンク上部に推定されるゆるみ域や水封トンネル左下、右下の亀裂帯①、③に相当する箇所では低比抵抗域がみられる。また、亀裂帯⑤、⑥が分布する岩盤タンク右側から右下部にも低比抵抗域がみられ、岩盤状況と対応した比抵抗分布になっている。このように地表測線を考慮した方が精度の良い結果になっていると判断できる。以下、No.1-4、No.1-5 断面については、地表測線を考慮した場合の結果を示す。No.1-4 断面では、上部に低比抵抗域が出現している。この断面は亀裂帯が計測断面とほぼ平行して存在するため、低比抵抗域と亀裂帯との整合性は十分でない。No.1-5 断面では、岩盤タンク右側から右下部に水封水の比抵抗値である $50 \Omega \cdot m$ を下回る低比抵抗域が認められ、海水の影響が示唆される。

なお、No.1-4-5 の 3 次元解析も行ったが、お互いの断面間でフィッティングが図られるためか 2 次元解析に比べて比抵抗値のコントラストが弱まり、地質構造との対比が不明瞭となる傾向が認められた。

③ 岩盤タンクの安全性評価における適用性

No.4-5 断面を 651 個のブロック（縦約 3.8m、横約 3.7m）に分割して、ブロック毎の弾性波速度、比抵抗値を片対数グラフにプロットした相関図を図 3.2.4-6 に示す。図には当サイトでの既往調査結果および文献調査²³⁾で推定した代表的な物性値も示した。弾性波速度は 3~6km/sec で分布し、概ね新鮮部に相当する良好な岩盤であることを示している。亀裂帯の存在を示していると考えられる水封トンネルの左下と右下の領域では、弾性波速度は 3.5~4.5km/sec と相対的に低いのが、比抵抗値は新鮮部から新鮮部のゆるみ域相当の良好な値を示している。また、岩盤タンクの右側および右下部では、弾性波速度は 3~6km/sec で分布するが、比抵抗値は $200 \Omega \cdot m$ 以下と断層部相当の小さな値を示しており、No.1-5 断面の結果から海水の影響と考えられる。

岩盤の間隙率、飽和度と弾性波速度 (V_p)、比抵抗値 (ρr) とは、Wyllie²⁵⁾や Archie²⁶⁾、Katsube & Hume²⁷⁾によれば次のような関係があるとされている。

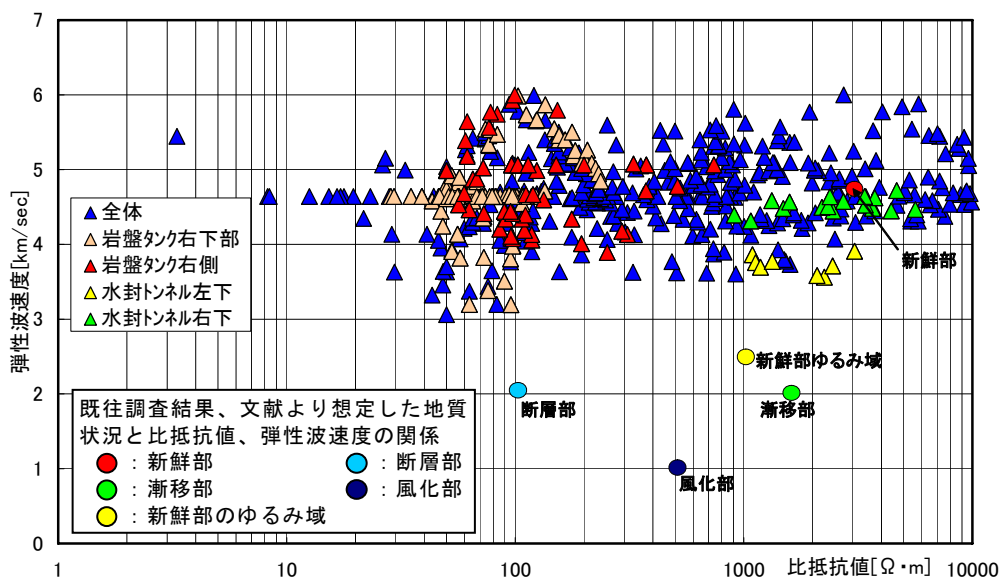


図 3.2.4-6 弾性波速度と比抵抗値の相関(初期ダイヤグラム)

$$\frac{1}{V_p} = \frac{\phi S_r}{V_w} + \frac{\phi(1-S_r)}{V_a} + \frac{1-\phi}{V_r} \quad \dots\dots\dots \text{(Wyllie の式)}$$

$$\frac{1}{\rho r} = \frac{\phi^m}{a} \times \frac{S_r^n}{\rho w} + \frac{1}{\rho c} \quad \dots\dots\dots \text{(Katsube \& Hume の式)}$$

ここに、 V_p , V_w , V_a , V_r は、それぞれ岩盤、間隙水、空気および岩石構成物質の弾性波速度であり、 ρr , ρw は岩盤および間隙水の比抵抗値、 ρc は岩石構成物質（媒質）の表面伝導の比抵抗値である。また、 ϕ , S_r はそれぞれ岩盤の間隙率、飽和度で、Katsube & Hume 式の a , m , n は実験定数（ m ：膠着係数、 n ：飽和指数）である。

上式より、弾性波速度は間隙率、飽和度の変化に対する感度が低く、比抵抗値は間隙水の水質や伝導体の存在等に大きく影響を受けるものの、間隙率、飽和度の変化に対する感度が高いことが分る。また、平成 13 年度、14 年度に実証プラント作業トンネル坑口から TD21～42m 付近で行った現場基礎実験（20m～34m のボーリング孔 3 孔を設け、強制的に地下水位を低下させて、飽和・不飽和状態の弾性波・比抵抗トモグラフィによる再現性等を検討）^{11),12)} および今回の調査では、弾性波トモグラフィのほうが比抵抗トモグラフィに比べ、当サイトの地質条件においては、地質構造等の再現性、分解能に優れる結果となった。

今回の調査で得られた図 3.2.4-6 は、当該断面位置での初期ダイヤグラムとなる。今後、定期的あるいは原油の受払いや地震発生後、他の点検データに異常が見られた場合などの不定期に弾性波・比抵抗トモグラフィを行って、各部位のプロット位置の初期値からのズレの有無、程度を点検・検討していくこととする。図 3.2.4-7 は、間隙率および飽和度の変化による任意のブロックの初期ダイヤグラム上のプロット位置からの変化の方向を概念的に示したものである。現状ではそれらの変化量を定量的に評価することは困難であるが、間隙率のみが増加した場合は左肩下がりに、飽和度のみが低下した場合は右肩下がりにプロット位置が移動し、双方ともに変化した場合はそれぞれの変化程度に応じて下向きの勾配が大きくなるものと予想される。このように、お互いの得失を補完するように弾性波と比抵抗トモグラフィの双方を併用した点検を行い、弾性波速度・比抵抗値相関ダイヤグラム上のプロット位置の変化等の検討を行うことで、ゆるみ域拡大等に伴う間隙率の増加や水位低下等に伴う飽和度の低下といった岩盤タンク周辺の水理地質状態変化の検知精度、確度が向上するものと考えられる。

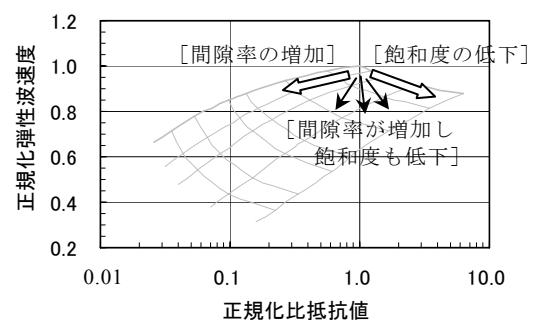


図 3.2.4-7 間隙率・飽和度の変化に伴う弾性波速度・比抵抗値相関ダイヤグラム上の変化方向の概念図

(3) まとめ

水封式岩盤タンクを対象に弾性波・比抵抗トモグラフィ調査を実施し、岩盤状況に概ね整合する結果が得られた。岩盤タンク周辺の弾性波速度は 3～6km/sec と良好な値を示し、亀裂帯に該当する領域は 3.5～4.5km/sec と相対的に低くなった。比抵抗値はゆ

るみ域や亀裂帯に該当する領域はその周辺より相対的に低い値を示した。また、海水の影響と考えられる低比抵抗域も確認された。

今回の調査は岩盤タンク周辺の岩盤の初期状態を把握する目的で行ったもので、今後、同一の測定条件のもとで定期的、または原油受払いや地震発生後等に測定を行って、弾性波速度と比抵抗値の変化を把握し、岩盤の劣化や不飽和域の変化状況を評価する予定である。また、弾性波速度と比抵抗値からの飽和度等の推定方法の構築や間隙水圧分布との比較検討等も進める予定である。

3.2.5 間隙水圧計測

(1) 概要

間隙水圧計測は、岩盤タンク周辺の地下水位低下域や高透水帯等の要所に間隙水圧計を複数設置して、計測位置の水圧を把握するとともに、複数の間隙水圧計測値から順解析・逆解析によりタンク周辺の水圧分布や透水係数分布を推定し、水封機能の健全性を評価する点検手法である。

(2) 現場適用計測

竣工後約 22 年が経過した菊間国家石油備蓄基地 TK-103 タンクの主要亀裂帯付近の水封機能の健全性を確認するため、平成 15 年度に設置した No.2、No.3 孔にそれぞれ各 3 個の間隙水圧計を、加速度計、光ファイバ歪み計とともに設置（図 3.2.2-3、図 3.2.2-4 参照）して計測を行った⁹⁾。また、透水係数分布の推定手法の有効性を確認するため、当該計測値を用いた逆解析を実施した²⁸⁾。

1) 計測位置

間隙水圧計の設置位置を図 3.2.5-1 に、岩盤タンク建設時に記録された主要亀裂帯と間隙水圧計を設置したボーリングのコア観察結果から判断した脆弱帯などの位置とあわせて示す。間隙水圧計を設置した No.2、3 孔は、孔径 116mm で、それぞれ掘削長 73.7m、71.2m、傾斜角 70°、72°である。間隙水圧計は、コア観察やボアホール TV 観察で比較的顕著な割れ目を含む区間に設置した。設置深度は No.2 孔が EL-65m、-55m、-41m で、No.3 孔は EL-65.9m、-46.9m、-42.9m である。

2) 計測結果

間隙水圧は、挿入設置時のグラウト直後（2004 年 9 月 3 日）、グラウト 1 ヶ月後（同年 9 月 30 日）に 1 回測定した後、1 時間毎の自動計測を行っている。間隙水圧の経時変化を図 3.2.5-2 に示す。

2004 年 11 月 29 日 11:00～12 月 1 日 21:31 の間に原油の払出しが行われ、2005 年 1 月 20 日 23:03～1 月 21 日 21:07 の間に原油の受入れが行われた。各間隙水圧はこれらのイベントによる岩盤タンクの内圧の変化に対応して、払出しでは水圧値が低下し、再受入後はまた回復している。

また、P2-3 が設置当初より漸減傾向を示し、約 1 年半後である 2006 年 3 月 1 日ごろから落ち着きはじめ現在に至っている。P3-3 については、2005 年 9 月ごろから漸減傾

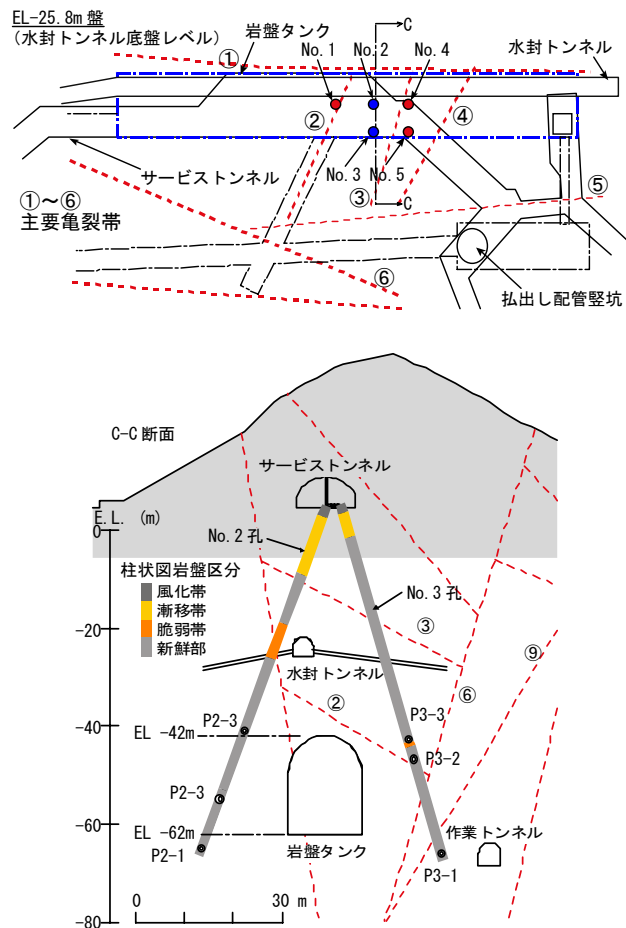


図 3.2.5-1 地質状況と計測位置

向を示し始め現在に至っている。同様の傾向が P2-1, P2-2 にも見られる。P3-1, P3-2 は、受入れ後の 2005 年 2 月下旬頃から現在に至るまでの間、ほとんど変化が見られない。

水圧分布としては、いずれもタンク内圧より十分に高く、水封機能上は問題ないが、計測開始当初から岩盤タンクの右肩に位置する P3-2, P3-3 の水圧が低く、岩盤タンク

左肩に位置する P2-3 も設置約 1 年後には P3-2, P3-3 と同程度の水圧となっている。図 3.2.5-3²⁹⁾は 1982 年の実証運転時の間隙水圧分布であるが、当時から岩盤タンク右肩付近の間隙水圧は破碎帯がかなり集中していた影響で低く、現在に至っても大きく変化していないことが分かった。

3) 原油払出し前後の予測解析

原油払出し前後の貯蔵状態に対して有限要素法による浸透流解析を実施し、計測値の変動について検討を行った。解析モデルを図 3.2.5-4 に、計測値を加えた解析結果を図 3.2.5-5 に示す。なお、モデルの透水係数、間隙率は文献調査²⁹⁾を参考に設定したものである。

計測値と解析値は必ずしも同じ値とはなっていないが、いずれの点においても、水圧値は払出しにより低下し、受入後はほぼ同じ値に回復している。その変化の幅は、実測値のほうが概して小さくなっている。このような水圧値の変動には、設置位置の地質状況が関係しているものと考えられる。

解析値との差が比較的大きくなっている P3-2 および P3-3 は、亀裂帯が比較的集中した周辺に設置したもので、ボーリング削孔時に送水圧が低下したところである。図 3.2.5-3 に示したように、実証実験の当時から間隙水圧の低下が顕著であり、このような箇所では小さな水圧値を示す傾向がみられる。

今後はこのような水圧値の変動状況から、その設置位置の傾向を把握するとともに、他の計測状況や諸現象等との対応について検討し、長期的な安定状況を確認していく必要があると考える。

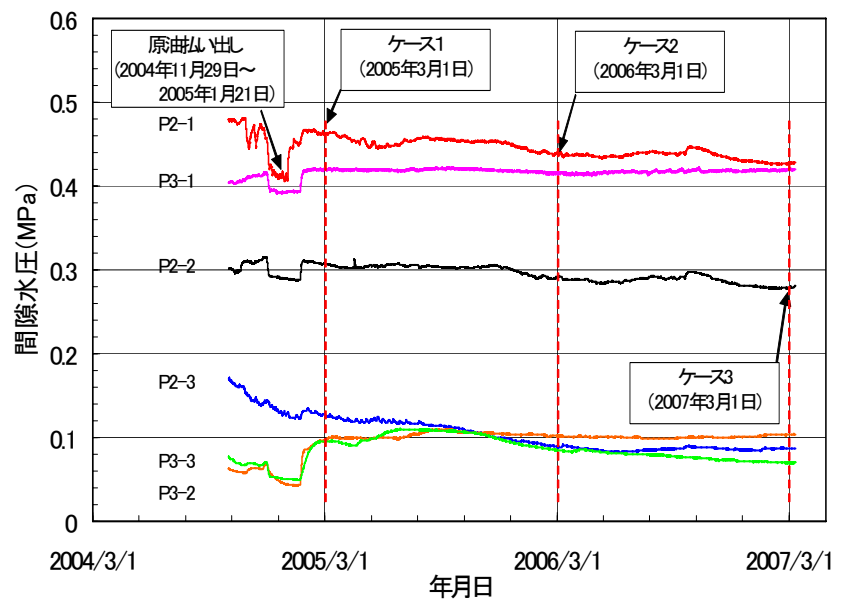


図 3.2.5-2 間隙水圧の経時変化

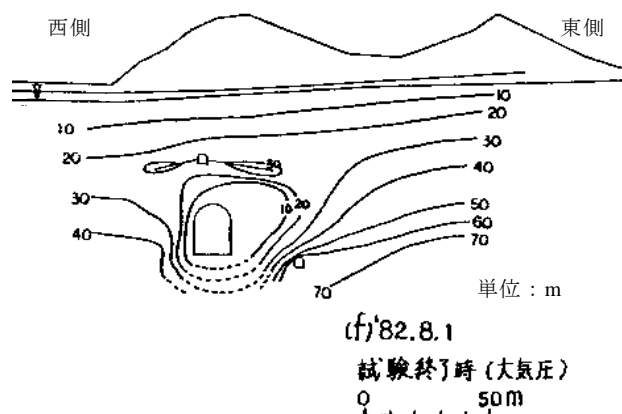
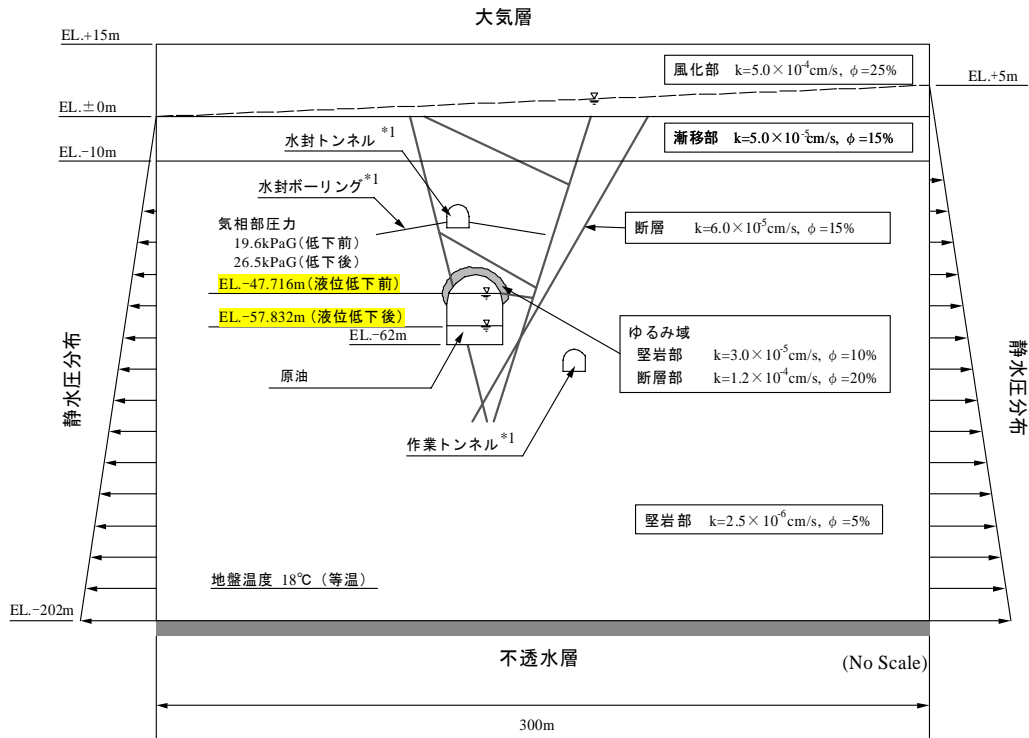


図 3.2.5-3 実証実験時の間隙水分布計測結果 (原油払出し後, C-C 断面付近位置)



*1 ウォーターカーテン（水封トンネル及び水封ボーリング）と作業トンネルの水封水供給レベルはEL.+3.5mとする

図 3.2.5-4 予測解析モデル

4) 透水係数分布の逆解析手法の適用

間隙水圧の予測値と実測値の差異や間隙水圧の変化が岩盤の透水係数に起因すると仮定し、以下の逆解析手法により、岩盤タンク周辺の透水係数および透水係数の変化を推定した。

① 解析方法

解析は原油受払いによる間隙水圧の変化が落ち着いたと見られる 2005 年 3 月 1 日、その 1 年後の 2006 年 3 月 1 日、2 年後の 2007 年 3 月 1 日の 3 ケースを対象に行った。最初に広域の浸透流解析により岩盤タンク周辺の定常状態の間隙水圧分布を推定する。図 3.2.5-6 に示す解析モデルは、

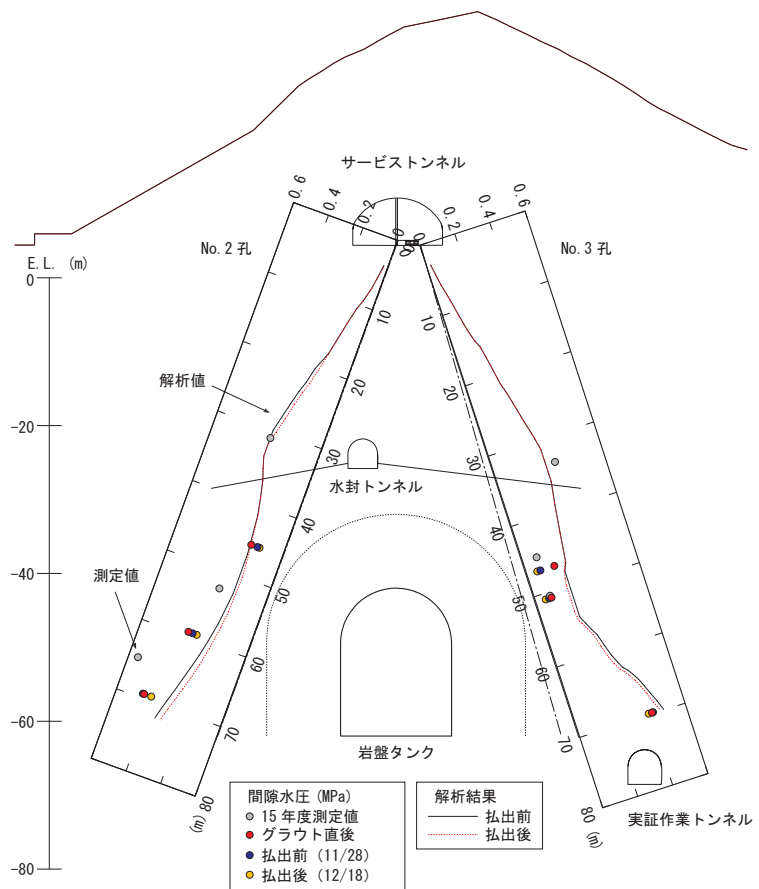


図 3.2.5-5 解析結果と間隙水圧実測値

図 3.2.5-4 の予測解析モデルと基本的には同じであるが、風化層、タンク掘削によるゆるみ域を考慮しないなどの点が異なる。境界条件としては、表 3.2.5-1 に示す解析ケース日の運転条件および観測孔内水位を与え、岩盤の透水係数は表 2.2.5-2 に示す初期値を与えて解析した。

透水係数の逆解析には、カルマンフィルタを用いた有限要素法を適用した³⁰⁾。図 3.2.5-7 に逆解析用のモデルを示す。浸透流解析から求められた外周部の間隙水圧とモデル内の水封トンネルや岩盤タンク内のベーパー圧、液面高さなどを境界条件とし、表 3.2.5-3 に示す No.2, 3 孔の 6 点の間隙水圧を観測値として岩盤タンク周辺の岩盤の透水係数を逆解析で求めるものである。

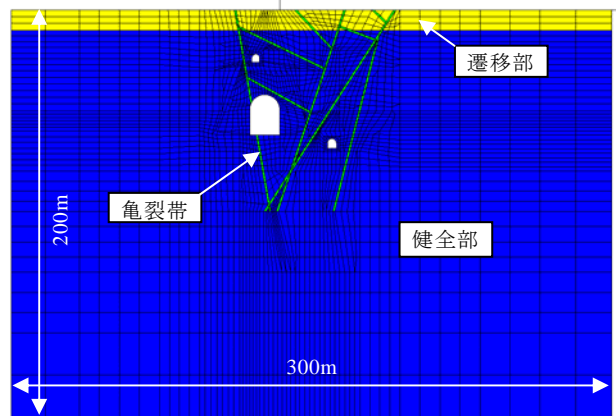


図 3.2.5-6 順解析モデル

表 3.2.5-1 境界条件

項目	場所	ケース 1	ケース 2	ケース 3
		2005 年 3 月 1 日	2006 年 3 月 1 日	2007 年 3 月 1 日
水封水圧 (EL)	TK-103 水封 T & Bor	3.97m	3.94m	3.99m
	旧実証作業 T	1.42m	0.45m	1.51m
岩盤タンク内ベーパー圧力		29.91kPa	28.12kPa	27.75kPa
岩盤タンク内油面高 (EL)		-47.5m	-47.5m	-47.5m
岩盤タンク内水面高 (EL)		-61.5m	-61.5m	-61.5m
原油密度		0.857t/m ³	0.857t/m ³	0.857t/m ³
地表観測孔内水位 (EL)	解析モデル左側	0.0m	0.0m	0.0m
	解析モデル右側	7.35m	5.93m	6.03m

表 3.2.5-2 初期材料物性値

	透水係数 (m/sec)	間隙率 (%)
遷移部	5.0×10^{-7}	15
健全部	2.5×10^{-8}	5
断層部	6.0×10^{-7}	15

表 3.2.5-3 観測値

間隙水圧	ケース 1	ケース 2	ケース 3
P2-1 (MPa)	0.46354	0.43952	0.42772
P2-1 (MPa)	0.30752	0.29161	0.27914
P2-3 (MPa)	0.12684	0.08904	0.08694
P3-1 (MPa)	0.42088	0.41505	0.42046
P3-2 (MPa)	0.09735	0.10175	0.10336
P3-3 (MPa)	0.09533	0.08487	0.07024

② 解析結果

ケース 1～3 の岩盤タンク周辺の透水係数分布を図 3.2.5-8 に示す。いずれのケースとも亀裂帯①, ②, ⑥, ⑨の周辺で局所的に透水性の高いところがみられる結果となり、実際の岩盤状況を反映したものと考えられる。亀裂帯②の周辺で透水性が比較的高くなっているのは、P2-3, P3-2, P3-3 の計測値が解析値よりも小さくなっていることが影響していると考えられる。

図 3.2.5-9 は透水係数の変化を示し

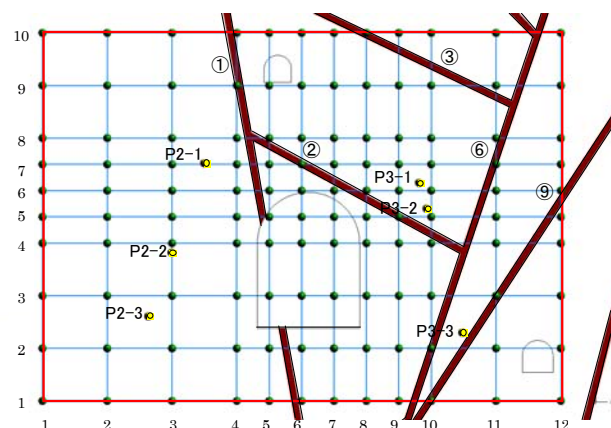
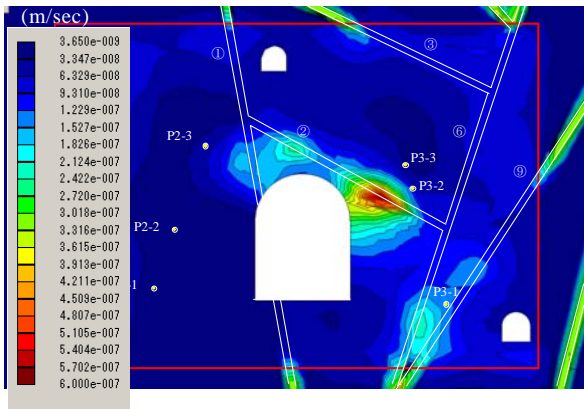
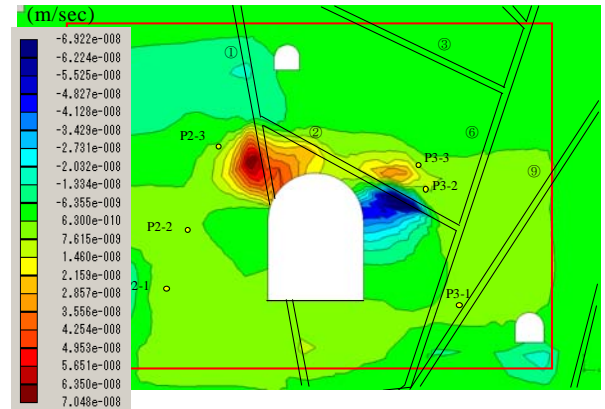


図 3.2.5-7 逆解析モデルと境界条件

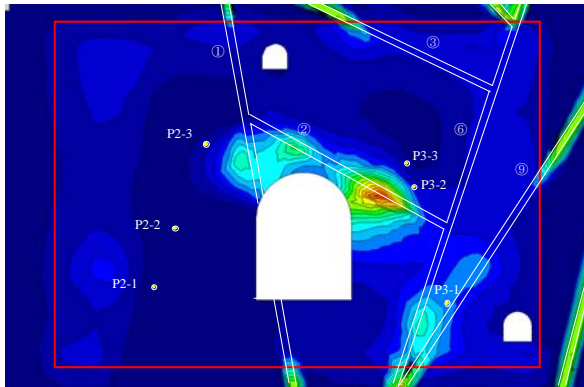
たもので、(a)は 2005 年 3 月 1 日～2006 年 3 月 1 日の 1 年間の、(b)は 2006 年 3 月 1 日～2007 年 3 月 1 日の 1 年間の、(c)は 2005 年 3 月 1 日～2007 年 3 月 1 日の 2 年間の透水性係数の変化である。(a)と(c)では、岩盤タンク左上部において透水性係数が大きくなる傾向となった。これは、P2-3 の計測開始当初からの漸減傾向が影響しているためと考えられる。(b)では、岩盤タンク右上部の透水性係数が大きくなっている。これは、この期間で P2-3 にあまり変化がみられず、P3-3 に低下傾向がみられたことが影響しているためと考えられる。また、(a)～(c)とも亀裂帯②の右下方部の透水性係数が小さくなっている。これは、この期間の P3-2 にあまり変化がみられないのに対して、P3-3 は低下傾向が見られ、P3-2 付近の間隙水圧が P3-3 に比べて相対的に大きくなったため



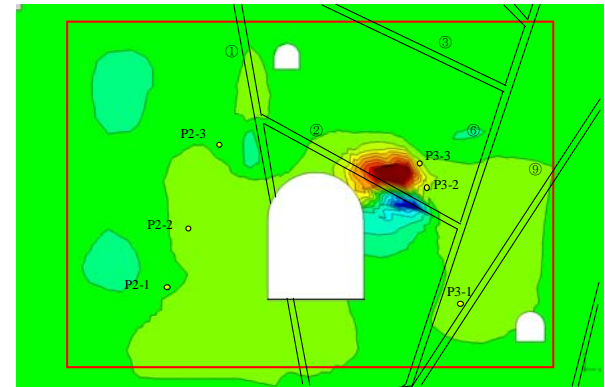
ケース 1 (2005 年 3 月 1 日)



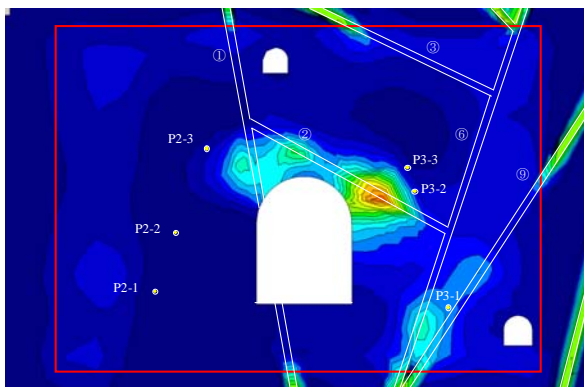
(a) ケース 2 とケース 1 の透水性係数の変化



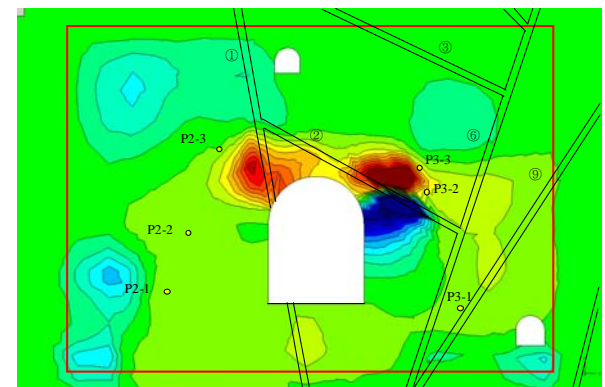
ケース 2 (2006 年 3 月 1 日)



(b) ケース 3 とケース 2 の透水性係数の変化



ケース 3 (2007 年 3 月 1 日)



(c) ケース 3 とケース 1 の透水性係数の変化

図 3.2.5-8 岩盤タンク周辺の透水性係数の分布

図 3.2.5-9 岩盤タンク周辺の透水性係数の変化

と考えられる。

透水係数の推定値が経時的に大きくなる傾向がみられるのは、岩盤タンク左上部および右上部の亀裂帯②の周辺となっているが、この周辺は間隙水圧の計測値が解析値に比べて低く、また低下傾向が比較的大きな P2-3 や P3-3 周辺に対応しており、この傾向が推定値に反映されたものと考えられる。

(3) まとめ

竣工後約 22 年が経過した岩盤タンクの主要亀裂帯が集中する付近にタンクを取囲むように間隙水圧計を 6 個設置して、タンク周辺の水圧分布を確認した。タンク両肩付近の間隙水圧が浸透流解析結果と比べて低く、特に右肩付近は約 22 年前の状態からあまり変わっていないことが分った。なお、計測水圧がタンク内圧に比べて十分に大きいこと、原油受払いに伴う間隙水圧の挙動がほぼ予想通りの動きを示したことから、水封機能に問題は認められなかった。

また、水封式岩盤タンク周辺の間隙水圧の測定結果から岩盤タンク周辺の岩盤の透水係数を逆解析により求め、間隙水圧の変化から透水係数の変化が生じた領域の推定を行った。透水係数の高い領域や変化する領域は亀裂帯の分布状況と良い対応を示し、岩盤タンクの安全性評価に有効な手法であることが確認できた。なお、本件では間隙水圧の変化は岩盤の透水性の変化に起因しているということを前提として行ったものであるが、この変化は平衡に至る途中経過としての変化という見方も一部ではでき、これについては今後さらに経時的な傾向を把握し、見極めていく必要があると考えられる。

3.3 まとめ

本章では、まず 3.1 節において保全点検システムの考え方として、システムの全体像と本研究が対象とする範囲を示すとともに、運用に際しての留意点を述べた。3.2 節では、対象とする技術の一つである点検技術について、岩盤タンクの点検手法として適すると考えられる五つの計測技術を実際の岩盤タンクに適用した結果を示し、その実用性と有効性ならびに今後の課題を明らかにした。それぞれの点検手法の適用試験結果、今後の課題等は次のようにまとめられる。また、図 3.3-1 に何を対象として何処に各点検手法を適用するかという観点からこれら成果をまとめたものを示す。

- **サイスミックモニタリング**：菊間基地 TK-103 での適用試験の結果、微小破壊を検知するための基礎的データを取得するとともに、極微小な振動を数十メートル離れた地点で捉え、その震源位置評定時の推定誤差は数メートルに収まることを確認した。将来的に岩盤タンクの安定性に影響を及ぼす可能性のある亀裂へと発達した段階のサイスミックイベントに観測ターゲットを絞ることで、受振器数を現実的な範囲に抑えた合理的な観測が可能であり、点検の目的を十分に達成できることが分かった。今後の課題としては、タンク周辺岩盤の微小破壊に伴うサイスミックイベントの検出精度向上のために、データの蓄積・分析を行い、各種作業等に伴う振動特性を把握し、これらを識別できるようにしていくことが挙げられる。
- **光ファイバ歪み計測**：竣工後約 22 年が経過した菊間基地 TK-103 に適用し、当該センサの設置上の課題、ならびに原油受払いにより有意な変形が生じないことを確認した。弱層部等の変状の発生・進行が懸念される箇所において、光ファイバ歪み計測手法を適用し、変位の進行の有無などの長期的な変動傾向を監視・把握することで、岩盤タンクの安全性評価の精度・信頼性の向上を図ることができるものとする。今後の課題としては、センサの回転・振れを極力防ぐ設置方法の改善・工夫が挙げられる。
- **高精度傾斜計測**：串木野基地での試験計測の結果、潮汐、気圧変動、地震動および油面低下に起因する地盤傾斜の変化量、残留の有無およびその大きさを把握した。また、適切なデータ解析を行い、数値解析と組み合わせることで、高精度傾斜計により岩盤タンクと周辺岩盤の監視・評価が十分可能であることが分かった。今後の課題としては、計測データから長期的な岩盤挙動、イベント位置の推定手法、ならびに地質モデルに対する順解析と逆解析による定量的な岩盤挙動把握のための検討が挙げられる。
- **弾性波・比抵抗トモグラフィ**：菊間基地 TK-103 において、タンク周辺岩盤の初期値を得るため、弾性波・比抵抗トモグラフィ調査を実施し、岩盤状況に概ね整合する結果を得た。今後、同一の測定条件のもとで定期的、または地震発生後等に測定を行って、弾性波速度と比抵抗値の変化を把握し、岩盤の劣化や不飽和域の変化状況を評価することになる。今後の課題としては、弾性波速度と比抵抗値からの飽和度等の推定方法の構築や間隙水圧分布との比較検討が挙げられる。

- 間隙水圧測定：菊間基地 TK-103 の主要亀裂帯が集中する付近の間隙水圧分布を確認し、水封機能には問題ないものの、タンク肩付近の間隙水圧が約 22 年前の状態からあまり変わっていないことが分った。また、間隙水圧の変化は岩盤の透水性の変化に起因しているという前提で、測定結果からタンク周辺岩盤の透水係数を逆解析により求め、透水係数の変化が生じた領域の推定を行った。透水係数の高い領域や変化する領域は亀裂帯の分布状況と良い対応を示し、岩盤タンクの安全性評価に有効な手法であることを確認した。なお、この変化は平衡に至る過程の変化という見方もできるため、今後さらに経時的な傾向を把握し、見極めていく必要がある。

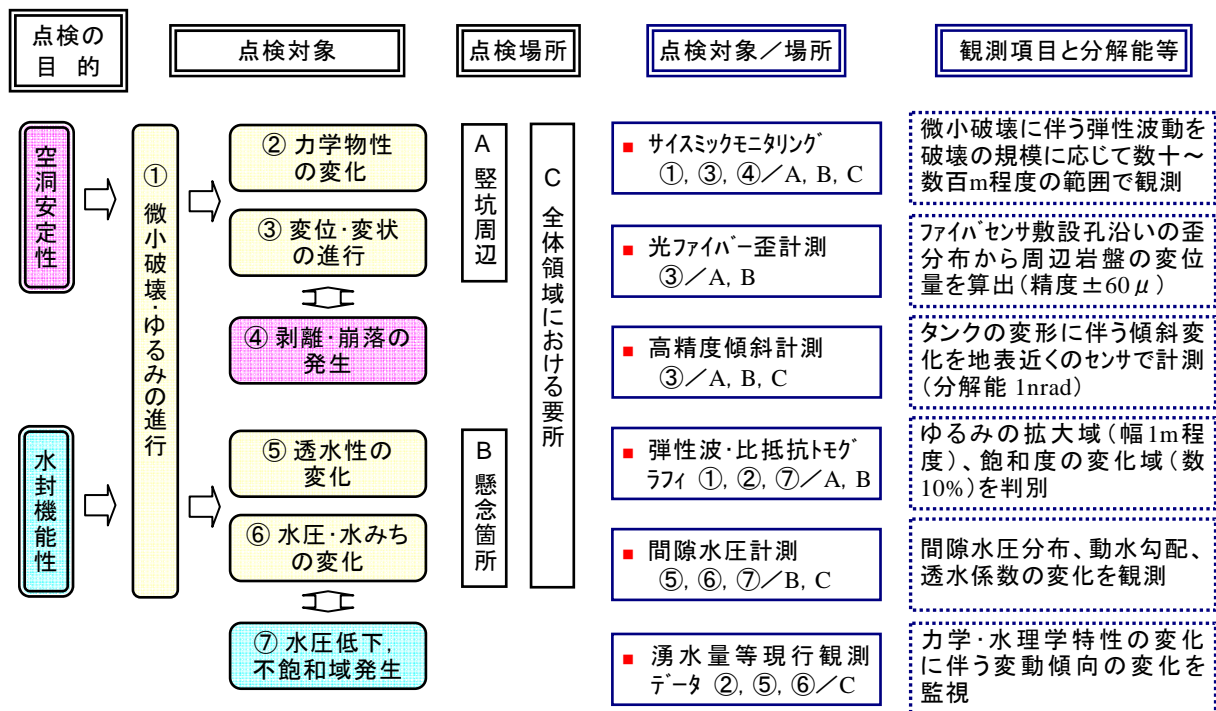


図3.3-1 各点検手法の点検対象と場所など

参考文献

- 1) 石油公団:平成 9 年度岩盤タンク内部点検技術の調査・研究, 日本地下石油備蓄㈱, 1998.
- 2) 石油公団:平成 13 年度海外 LPG 岩盤貯蔵基地の操業に係る技術調査業務報告書, 電源開発㈱, 2002.
- 3) Koerner, R.M., McCabe, W.M. and Lord, AE. Jr.:Overview of acoustic emission monitoring of rock structures, *Rock Mechanics*, 14, pp.27-35, 1981.
- 4) Hardy, H.R., Jr.:Proceedings 4th conference on Acoustic Emission/ Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, Trans Tech Publications, 711pp., 1989.
- 5) 中田文雄:野外 AE を利用した陥没予知, 調査・設計・施工技術報告会講演集, (社)土質工学会中部支部・中部地質調査業協会, pp. 5-20, 1992.
- 6) 石田毅, 金川忠, 佐々木俊二, 浦沢義彦:AE による岩盤空洞安定性監視に関する基礎実験, 土木学会論文集, 376 号/Ⅲ-6, pp. 141-149, 1986.
- 7) 石田毅, 金川忠, 打田靖夫, 浦山克:AE のメカニズム解による地下発電所空洞掘削時岩盤挙動の検討, 土木学会論文集, 529 号/Ⅲ-33, pp. 19-28, 1995.
- 8) 石油公団:平成 15 年度操業に係る岩盤タンク内部点検技術に関する調査・研究, 日本地下石油備蓄㈱, 2004.
- 9) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構:平成 16 年度操業に係る岩盤タンク内部点検技術に関する調査・研究, 日本地下石油備蓄㈱, 2005.
- 10) 田中義晴, 稲葉力, 平田篤夫, 石田一成, 佐野修:原位置における高精度弾性波測定システムを用いた岩盤モニタリング, 土木学会論文集, 561 号/Ⅲ-38, pp.185-192, 1997.
- 11) 石油公団:平成 14 年度岩盤タンク内部点検技術の適用性に関する調査・研究, 日本地下石油備蓄㈱, 2003.
- 12) 石油公団:平成 13 年度岩盤タンク内部点検技術の適用性に関する調査・研究, 日本地下石油備蓄㈱, 2002.
- 13) 宇津徳治:地震学, 共立全書, 286pp., 1977.
- 14) Sato, T. :A note on body wave radiation from expanding tensile crack, *Sci. Rep. Tohoku Univ. Geophys.*, 25, pp.1-10, 1978.
- 15) 日本地下石油備蓄㈱:菊間地下石油備蓄基地工事記録(岩盤土木), 日本地下石油備蓄㈱, 1994.
- 16) 渡辺浩平, 熊谷仁志, 石井利信, 高田英二, 小林理志, 関聡史, 長岡敬一郎, 成瀬央, 大野博重:光ファイバセンサを用いたトンネルモニタリングシステム, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, F15-6pp., 2002.
- 17) Davis E., Wright C., Demetrius S., Choi J., Craley G.:Precise tiltmeter subsidence monitoring enhances reservoir management, *Society of Petroleum Engineers, SPE Paper 62577*, 2000.
- 18) 松岡俊文, 芦田 譲, 深森広英, 桑野恭, 黒墨秀行, 中禮正明, 原田智史, 鈴木巖, 向井正二郎, 荒井文明, 高杉真司, 館野正之, 高橋昌宏, Cris Wright:岩手山の火山活動に伴う地殻変動観測への高精度傾斜計の応用, *物理探査*, Vol.52 No.6, pp.583-593, 1999.
- 19) 中込理, 安田善雄, 志賀信彦, 石崎潤一, 横井浩一, 茂原諭, 田中啓二, 中西繁隆, 前田俊一, 堀越隆昌, 橋本幸治:貯留槽変動探査法 技術マニュアル, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, pp.66-95, 2003.

- 20) Wright C. A., Davis E., Weijers L., Golich G., Demetrius S. L., Minner W. A.: Downhole tiltmeter fracture mapping : a new tool for directly measuring hydraulic fracture dimensions, Society of Petroleum Engineers, SPE Paper 49193, 1998.
- 21) 城代邦宏, 植出和雄, 廣岡知, 神原洋, 竹村進, 松岡俊文, 塚田和彦: 地下石油岩盤タンクにおける微小傾斜の計測, 材料, Vol.55 No.5, pp.523-528, 2006.
- 22) Tamura Y., Sato T., Ooe M., Ishiguro M.: A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, Geophys J., Vol104, pp.507-516, 1991.
- 23) 赤池弘治, 北川源四郎: 時系列解析の実際Ⅱ, 朝倉書店, pp.151-165, 1995.
- 24) 城代邦宏, 植出和雄, 若林成樹, 宮下国一郎: 水封式岩盤タンクの健全性評価に対する弾性波・比抵抗トモグラフィ調査の適用, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol. 35, pp.183-186, 2006.
- 25) Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., and Gardner, G. H. F.: An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocity in porous media, Geophys., vol.23, No.3, pp.459-493, 1958.
- 26) Archie, G.E. : The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. A.I.M.E., vol.146, pp.55-67, 1942.
- 27) Katsube, T. J. and Hume, J. P.: Permeability determination in crystalline rocks by standard geophysical logs, Geophys., No.52, pp.342-352, 1987.
- 28) 城代邦宏, 植出和雄, 若林成樹, 宮下国一郎: 水封式岩盤タンクの健全性評価に対する透水係数の逆解析手法の適用, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol.37, pp. 229-232, 2008.
- 29) 石油公団: 石油備蓄技術(地下備蓄)調査報告書, 石油公団, 1983.
- 30) 奥野哲夫, 宮下国一郎, 長谷川誠, 岡本明夫: 水封式岩盤タンク周辺の間隙水圧測定に基づく透水性評価と岩盤の健全性評価方法の検討, 第 36 回地盤工学会発表会講演集, pp.1283-1284, 2001.

第4章 保全点検システムにおける解析・評価手法

4.1 評価診断項目と解析・評価手法

内部から直接点検できない岩盤タンクの安全性の評価診断では、各種計測データの変動を要因毎に把握してタンク周辺岩盤の劣化（空洞周辺の緩み域の拡大や微小亀裂の発生・伸展）に起因した変化を出来るだけ早期に抽出する技術、岩盤の劣化の程度と範囲を他のデータとあわせて総合的に把握する技術、ならびに岩盤の劣化による岩盤タンクの現在および将来の機能低下の程度を推測する技術が必要となる。

そのためには、前節で述べた新規点検手法による計測データを含めた各種データを統合した岩盤タンク安全性の総合評価診断手法の構築が重要であり、あわせて計測データにおける各種変動要因の影響度合いや他データとの関連性の把握、および各種点検データから力学特性や水理特性の現状再現や将来予測のための合理的で精度の高い統計解析手法や数値解析手法等の解析・評価支援ツールの整備・高度化が必要不可欠である。図4.1-1に評価診断の流れと把握すべき事項および評価診断のための支援ツールとなる解析・評価手法を示す。

本章では、現行の評価手法について概説し、これを補い支援する解析・評価手法について記す。一つは、岩盤タンク湧水量、人工水封水供給量および地下水観測孔水位といった水封機能データのタンク周辺岩盤の劣化に伴う挙動の変化を早期に検出するための統計的時系列解析手法であり、一つは水封機能データの挙動から水理特性値・水理状態を推定し、水封機能の健全性評価および湧水時の影響や水封機能維持工事等の対策工の効果予測に資する浸透流解析手法である。

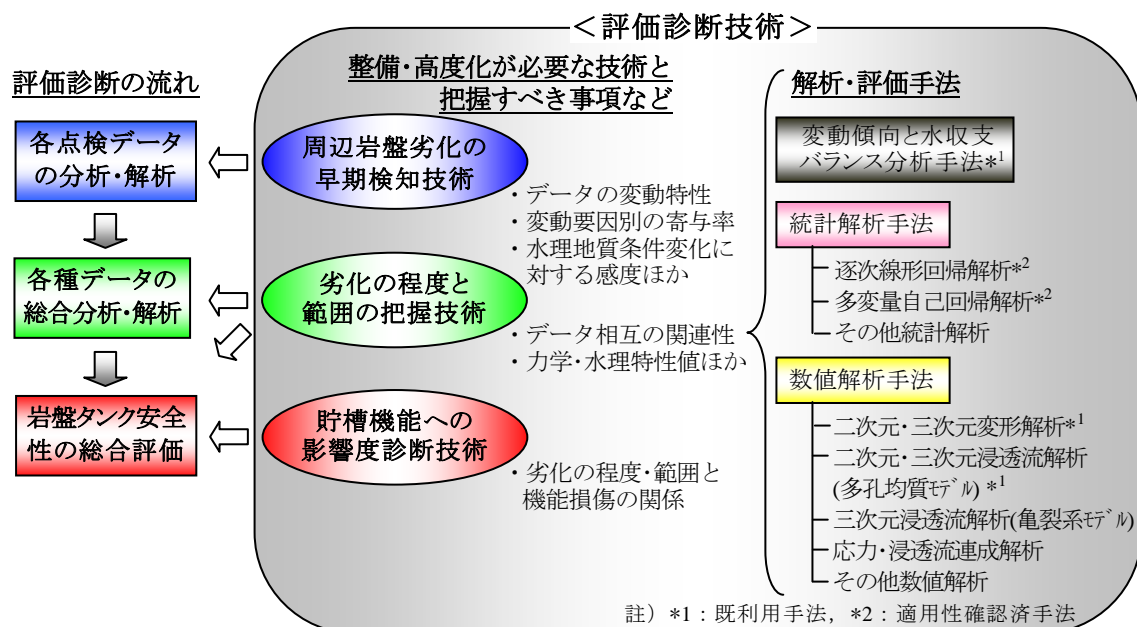


図 4.1-1 評価診断の流れと把握すべき項目および評価診断のための解析・評価手法

4.2 解析・評価手法とその適用性

4.2.1 現行の評価手法(水封機能データの変動傾向と水収支バランス分析)

(1) 概要

観測孔水位、岩盤タンク湧水量、人工水封水供給量の変動を主要項目とし、地下水補給量(=降水量-蒸発散量-河川流出量)を補助項目として評価する手法である。地震や操業等のイベントと観測値を経時変化図に整理して、観測データの挙動に各種イベントに対応しない急激な変化あるいは同一方向を向いた長期的な変化傾向が無いかを峻別するとともに、タンク湧水量と自然の涵養を含めた水封水供給量、周辺地下水位の変動傾向が岩盤タンクを中心とした地下水理系の水収支からみて異常が無いかを、学識経験者等の専門家が点検して、岩盤タンクの安全性を評価するものである。

(2) 現行評価手法(水封機能データの変動傾向と水収支バランス分析手法)による分析

1) 現行評価手法の適用論拠

原油貯槽としての岩盤タンクの安全性は、空洞の力学的安全性ならびに液密・気密性能(水封機能)の安定性の二面から点検・評価する必要がある。しかしながら、岩盤タンクを開放しての内部からの直接的な点検・検査は、タンク周辺地下水位の低下による水封機能への影響、大量の原油受払いの費用や入槽時の安全性などの面から容易ではない。このため、タンクを開放しての点検・検査は極力行わず、岩盤タンクを構成する岩盤の物性等の変化が反映される水封機能データの変化から岩盤タンクの安全性を間接的に評価する手法が採られている。

ここで、空洞の力学的安全性と水封機能の安定性は、図 4.2.1-1 に示すようにお互いに密接に関連している。空洞の力学的安全性の低下は、内空変位の増大や壁面の崩落が生じる状態であり、これは空洞周辺岩盤の力学特性値の低下、すなわち空洞周辺岩盤のゆるみ域の拡大や微小破壊の発生・進展に起因する。一方、水封機能の低下は、地下水位の低下、タンク湧水量や人工水封水供給量の増大であり、これは地下水流動状態や水収支バランスの変化をもたらす周辺岩盤の透水特性の変化、すなわち力学的安全性低下の原因と同様に空洞周辺岩盤のゆるみ域の拡大や微小破壊の集中発生・進展に起因するものである。

従って、岩盤タンクの安全性評価における空洞の力学的安全性および液密・気密性能(水封機能)の安定性は、ともに観測孔水位、湧水量、人工水封水供給量を主要パラ

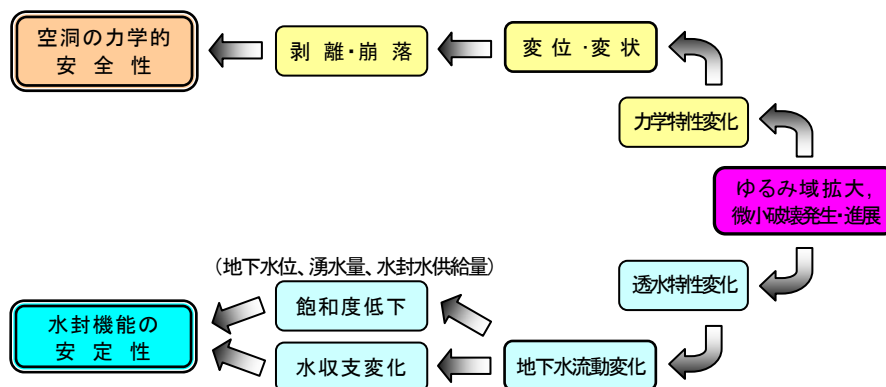


図 4.2.1-1 空洞の力学的安全性と水封機能の安定性に対応する事象相互の関係

メータとし、岩盤タンク上部の地形上の集水域における地下水補給量（＝降水量－蒸発散量－河川流出量）を補助パラメータとして、これら水封機能データの変動傾向より評価することとなっている。図 4.2.1-2 はこれらパラメータによる水封機能の安定性の評価基準を模式的に示したものである。タンク周辺の岩盤でゆるみが進行した場合、透水性が増し、岩盤タンク湧水量および人工水封水供給量の増加、ならびに地下水位の低下として水封機能データの変動傾向が変化することから、水封機能の低下として把握・評価され、その程度に応じた対応を行うことになる。

しかしながら、実際には、これら水封機能データは、タンク内圧・液位、人工水封制御などの運転操作による変動のほか、降水などの気象変動による影響を受けて常に変動し、さらには地震や地表改変など水理状況等の変化による影響を受け大きな変化を示す。このため、タンク周辺岩盤の物性等の変化に起因した観測データの変化を見出すことは簡単ではなく、岩盤タンクの安定性評価は、学識経験者等の専門家より構成される地下石油備蓄保全技術検討委員会において半年毎に行われている。

2) 水封機能データの変動特性

水封式岩盤タンク周辺の地下水理状態に影響を与える因子は、周辺岩盤の水理特性のほかに、①観測孔水位、②岩盤タンク湧水量、③人工水封水供給水量、④人工水封水位、⑤タンク内圧、⑥油面高さおよび油水界面高さ、⑦降水量（⑦'蒸発量、⑦''河川流出量）、⑧気圧、⑨潮汐が挙げられる。これらはお互いに複雑に関連している。図 4.2.1-3 は水封式岩盤タンクにおける水封機能データ相互の因果関係を概念的に示したものである。図中の朱書きの矢印が各データに影響を及ぼすことを示している。

これらの内、人為的な制御を行っているものは、タンク内圧・液位と人工水封水位であり、その他は非制御因子である。また、自然因子である降水量、潮汐、気圧は他の因子の影響を受けない独立した因子である。

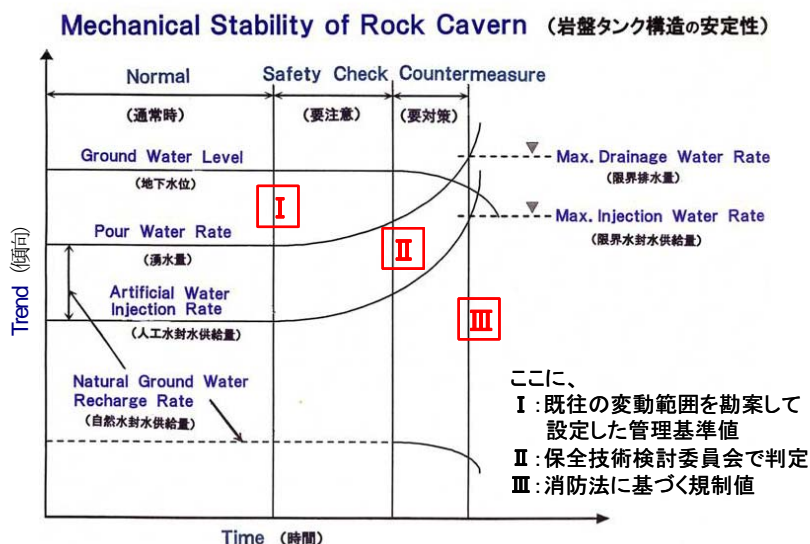


図 4.2.1-2 岩盤タンクの安全性の評価模式図¹⁾
(ゆるみが拡大した場合の観測値の経時変化の一例)

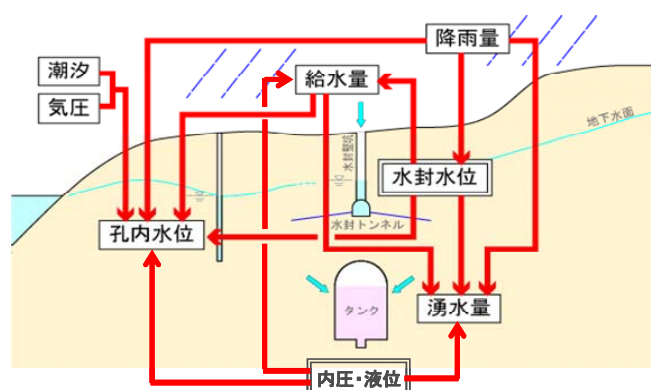


図4.2.1-3 水封機能データの因果関係概念図

なお、人工水封水位は通常、水位を一定に保つように制御しており、水封水供給量が周辺の地下水位に応じて増減するが、周辺の地下水位が水封水位の制御水位よりも高くなると、水封水供給量がマイナスすなわち湧水側に転じるか、または水封水位の上昇となる。以下に菊間基地を例として各水封機能データの主な変動特性を示す。

① 観測孔水位変動

図 4.2.1-4 に菊間基地の観測孔水位の経時変化を、図 4.2.1-8 に岩盤タンク、地下水観測孔等のレイアウトを示す。観測孔水位は、それぞれが対応するエリアの水理地質条件に従って、降水、気圧、潮汐、水封水位およびタンク内圧・油面高さの変動の影響を受け変動する。また、道路や宅地化といった地表改変および地震動の影響によっても変動する。

菊間基地では、2001年3月24日の芸予地震（サービストンネル内に設置された強震計で最大149gal(NS)を観測）により、W-10孔水位が約3m上昇（地震10日後に最大値を示し、約3ヶ月で地震前の水位に戻る）したほか、数孔が数十cmの上下降を示した。また、W-3孔は近傍北東側の尾根の切取り（切土高さ平均15m）により約30m低下した。

なお、通常は降水の影響が顕著であり、気圧・潮汐の影響は相対的に小さい。

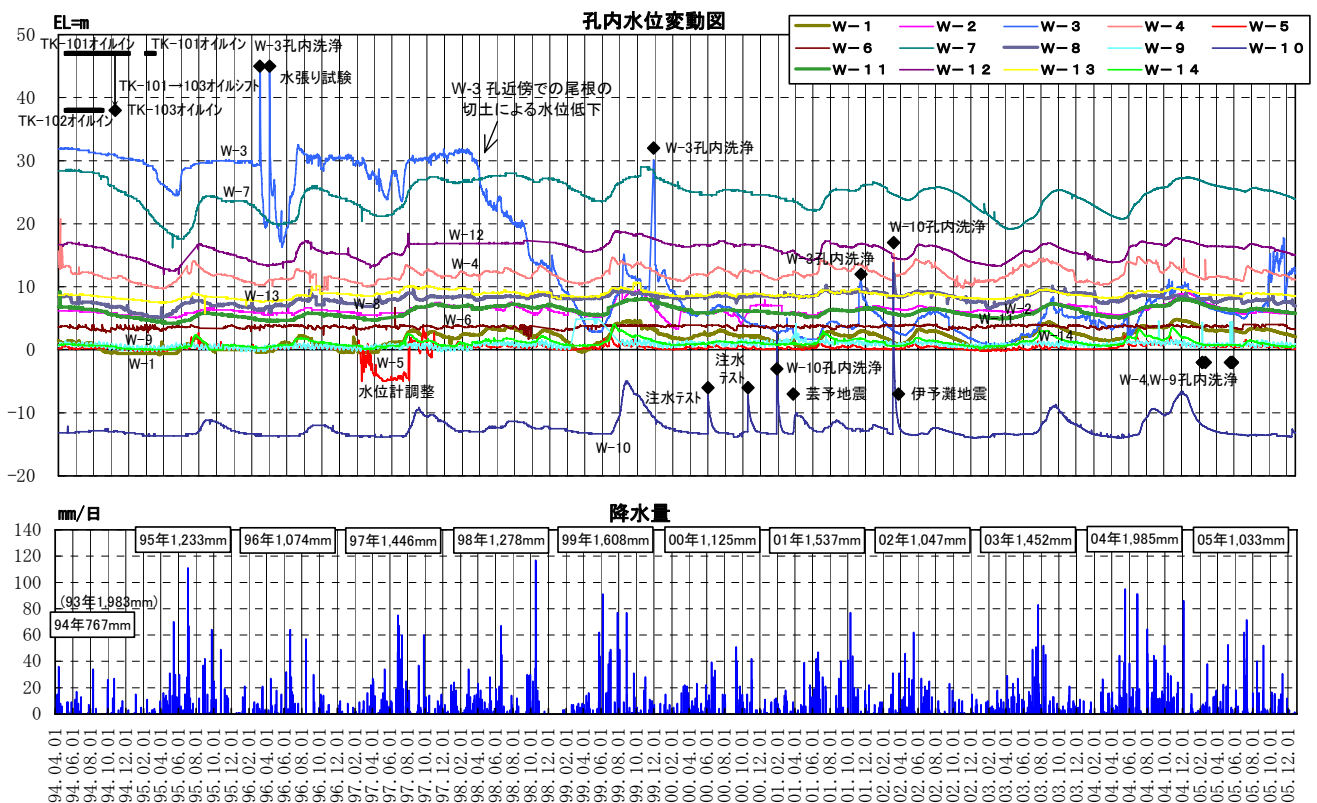


図 4.2.1-4 観測孔水位の経時変化の例(菊間基地:1994.4.1~2005.12.31)

② 岩盤タンク湧水量

図 4.2.1-5 に菊間基地の岩盤タンク湧水量の経時変化の例を示す。岩盤タンクの湧水は、タンク周辺岩盤の水理地質条件に従って、周辺の地下水位ならびに人工水封水

位とタンク内のポテンシャルの差によって生じるもので、そのポテンシャル差の変化が湧水量の変化となって現れる。すなわち、タンク湧水量は、地下水位、水封水位、およびタンク内圧・油面高さの変動の影響を受けて変動する。

また、地震動の影響によっても大きく変動する。菊間基地では、芸予地震により総湧水量が地震前の約 220m³/日から地震 2 日後に約 430m³/日とほぼ倍増した後、急激に減少し、地震 7 日後にピーク値の約 65%となった。その後は降水等の影響による増減を繰り返しながら緩やかな減少を続け、約 21 ヶ月後に地震前の湧水量に戻った。

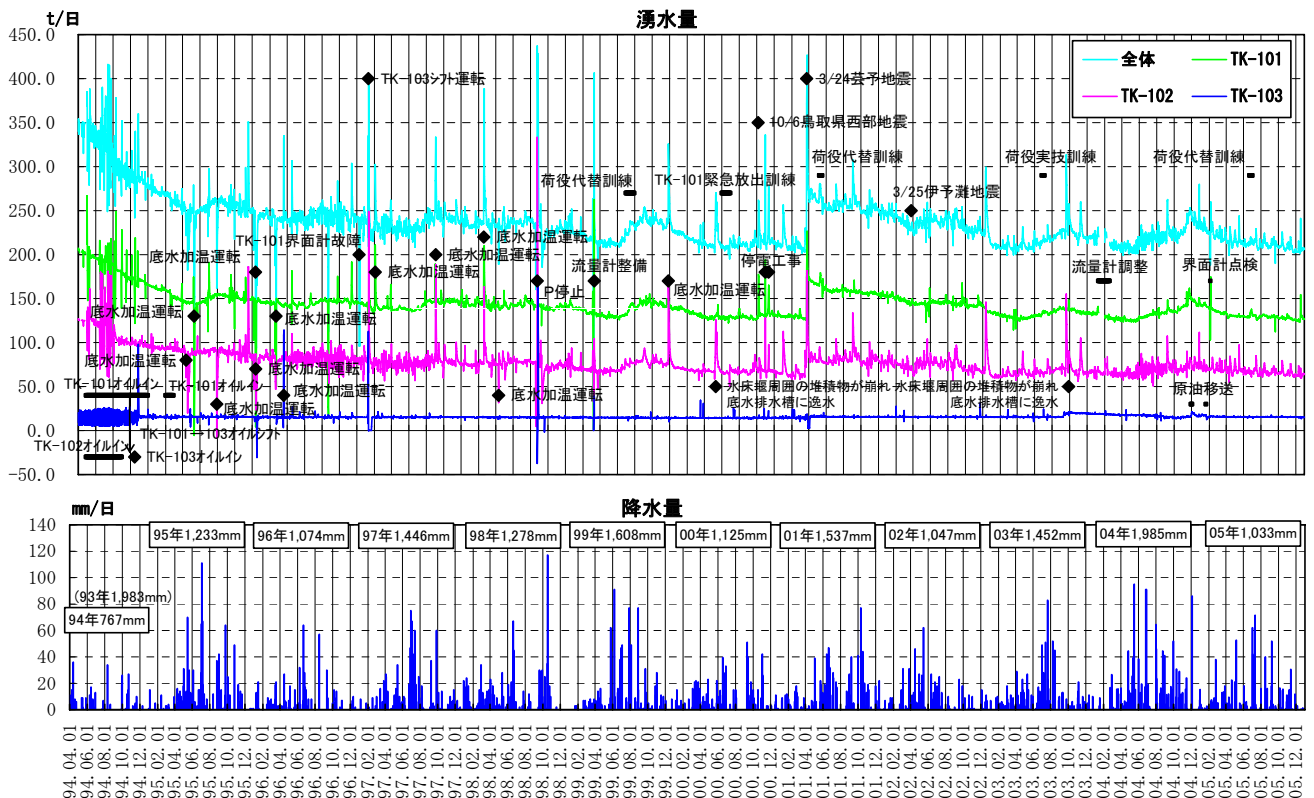


図 4.2.1-5 岩盤タンク湧水量の経時変化の例(菊間基地:1994.4.1~2005.12.31)

③ 人工水封水供給量

図 4.2.1-6 に菊間基地の人工水封水供給量の経時変化の例を示す。通常、人工水封水位を一定に保つよう制御しており、人工水封水供給量は、水封水位と自然の地下水位との関係の下で、タンク周辺岩盤の水理条件に従って、タンク内とのポテンシャル差に応じて変動する。すなわち、水封水供給量は、地下水位、水封水位、およびタンク内圧・油面高さの変動の影響を受ける。雨期はタンク周辺の地下水位が上昇するため、タンク湧水量が増加し、水封水供給量は減少する。逆に乾期はタンク周辺の地下水位が低下するため、タンク湧水量は減少し、水封水供給量が増加するという、地下水位およびタンク湧水量とは逆相関の挙動を示す。また、地震時も水封水位と周辺の地下水位との関係の下で、その影響が現れる。水封水位が周辺地下水位より相対的に高い時は、タンク湧水量と同様、水封水供給量も増加する。一方、水封水位が周辺地下水位より相対的に低い時は、水封トンネルや水封孔からの岩盤タンクへの供給量よりもこれら自体への湧水量が多くなり、供給量が減少またはマイナス、あるいは水封

水位の上昇という形で地震動の影響が現れる。

菊間基地での芸予地震時には、TK-101 ユニット上部の W-10 孔周辺の地下水位が局所的に低い状態にあり、TK-101 系の供給量（水封堅坑）は地震前の約 43m³/日から約 100m³/日と急増したが、TK-102 系（堅坑(102)）や他の供給系統の変動は数 m³/日にとどまっている。なお、TK-101 系の供給量が地震前の状態に戻るのは、降水等の影響もあり、地震から約 14 ヶ月後である。

また、串木野基地では、図 2.2-2(2)に示すように TK-103 ユニットの一部分が人工水封方式となっているが、1997 年 3 月 26 日の鹿児島県北西部地震（サービストンネル内に設置された強震計で最大 40gal（N47°W）を観測）、ならびに同年 5 月 13 日の第 2 鹿児島県北西部地震（同地点で最大 60gal（N47°W）を観測）により、TK-103 ユニットの湧水量および水封水供給量が大きく変動した。湧水量は、これらの地震前には約 610 m³/日であったが、3 月 26 日の地震後に約 740 m³/日、5 月 13 日の地震後に約 830 m³/日と急増し、供給量は地震前の約 60 m³/日の供給側から 3 月 26 日の地震後に約 370 m³/日と湧水側へ反転し、5 月 13 日の地震後は約 530 m³/日とさらに湧水量が急増した。なお、湧水量、水封水供給量が地震前の状態に戻るのは、降水等の影響もあり、最初の地震からそれぞれ約 22 ヶ月後、約 8 ヶ月後である。

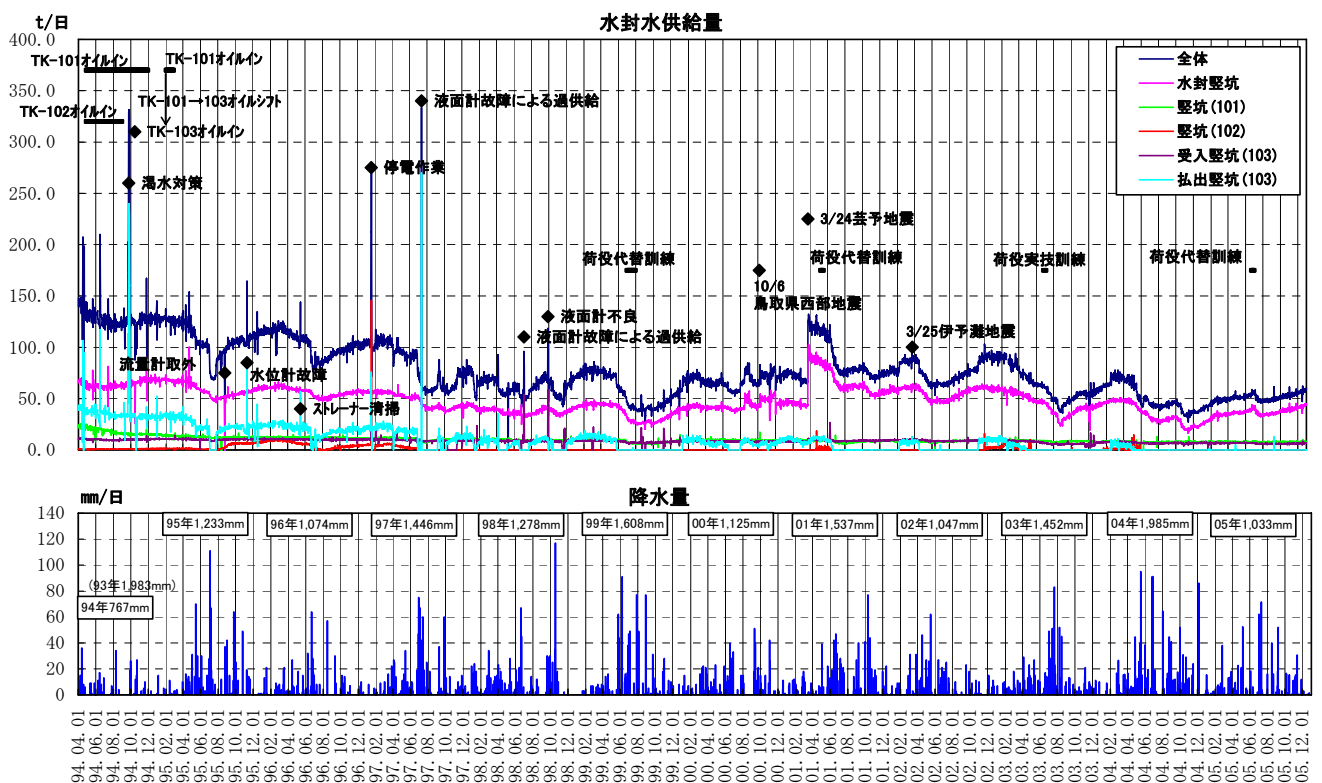


図 4.2.1-6 水封水供給量の経時変化の例(菊間基地:1994.4.1~2005.12.31)

④ 水収支バランス

岩盤タンク湧水量から人工水封水供給量を減じたものを“自然水封水供給量”、岩盤タンク上部の地形上から定まる集水域に降った雨量から蒸発散量と河川流出量を減じたものを“地下水補給量”と定義し、これらの年間平均値と岩盤タンク湧水量の年

間平均値、および観測孔全孔の日平均水位の年最低値の変動傾向を比較することで、岩盤タンク周辺の地下水理系の水収支バランスをチェックしている。図 4.2.1-7 に 3 基地のこれら水収支関連データの経年変動を示す。

水封式岩盤タンクでは、自然水封水供給量の岩盤タンク湧水量に占める割合が約 60～90%とその大半を占め、人工水封の寄与する割合は少ない。水封システムは、自然水封が主体であり、人工水封はあくまでも自然水封の足りないところを補い、補佐する補助システムと位置付けることができる。したがって、水封管理上は岩盤タンク周辺に多くの雨が降り、その地下浸透分である地下水補給量が、自然水封水供給量を上回っていることが望ましい。しかしながら、久慈基地や菊間基地は年間降水量の平年値は 1,000～1,300mm と少なく、地下水補給

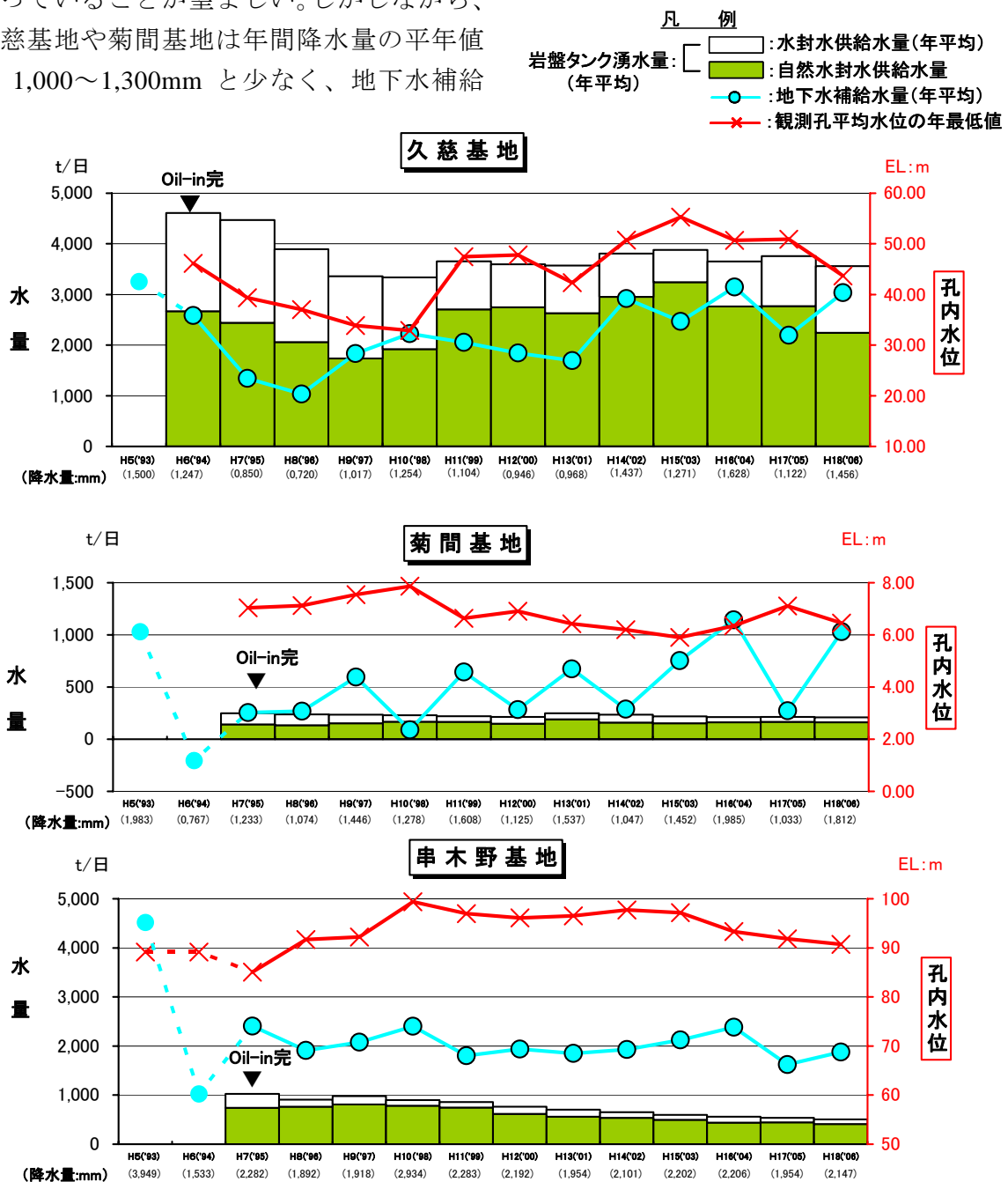


図 4.2.1-7 水収支関連データの経年変動

水量が自然水封水供給量を下回る場合もしばしば起こっている。もっとも、これまでのところは、何れの基地においても、岩盤タンク周辺の集水域の域外から自然地下水が流入してきているため、大幅な地下水位低下や湧水量の減少、水封水供給量の増加は見られていない。串木野基地においても、岩盤タンク周辺の集水域外からの自然地下水の岩盤タンクへの流入が確認されており²⁾、1997年3月5月の地震時の人工水封水供給量の大きな変動はその事実を示す一例といえる。

この地下水理における流域の把握は、工事や取水等による水みちの流動阻害、遮断による水封機能への影響を事前に防ぐ意味からも、水封管理上非常に重要であるが、現在までのところ十分に把握できていない。岩盤タンクの地下水理における影響圏を把握することが今後の課題の一つとして挙げられる。

3) 現行評価手法による水封機能データの分析

植出³⁾は「原油岩盤タンクの水封機能評価技術に関する研究」において、これらの水封管理パラメータによる評価手法の妥当性を示すとともに、約10年間の蓄積データを用いた水封管理パラメータの分析・解析を行って、100年超過確率を超える湧水や設計地震力を超える地震動を経験した岩盤タンクの水封機能の健全性が保たれていることを検証し、各水封管理パラメータの評価指標について次の通り提案している。

(地下水位の安定性)

- ・指標1：地下水位は限界地下水位以上のレベルにあること。
 《 観測孔水位最低値 > 限界地下水位 》
- ・指標2：平均水位の変動は十分に小さいこと。
 《 | 平均水位変動線形近似式勾配 | < 10^{-2} 》
- ・指標3：地震時の地下水位の変動は小さい。
 《 低水位部地下水位は上昇し、高水位部地下水位は下降する 》

(湧水量の安定性)

- ・指標4：地下水位が安定した状態のもと、湧水量は漸減する。
 《 安定した地下水位の下で、湧水量は漸減する。
 ただし、湧水量はゼロとはならない 》
 《 補正湧水量を補正平均水位で除した値の線形近似式勾配は
 10^{-3} 程度であること 》

ここに、補正平均水位は平均水位標高一岩盤タンク中心標高、補正湧水量は補正平均水位で除した値が1程度となるように適当な整数で除した値

- ・指標5：地震後湧水量が増加し、短時間で減少に移行する場合は問題ない。
 《 地震の影響で増加した湧水量が、短時間後をピークとして減少する変動は一過性である 》

(地下水涵養量の安定性)

- ・指標6：降水現象に追従した人工・自然水封供給水量の変化は逆相関が成り立つこと。
 《 人工・自然水封供給水量の変化は逆相関が成り立つこと 》

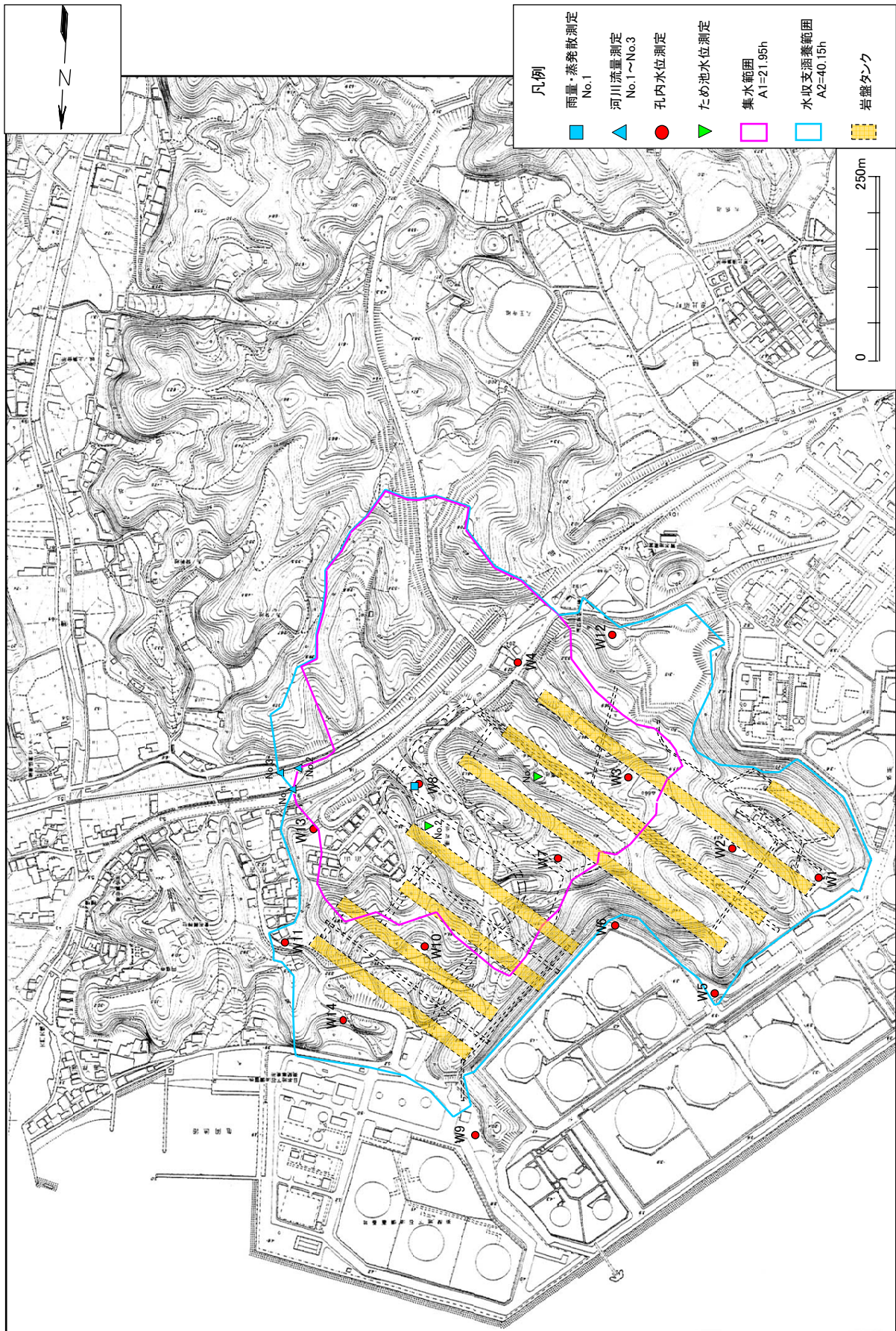


図 4.2.1-8 岩盤タンクおよび地下水観測孔等の配置平面図

(地震時の水封機能の安定性)

・指標 7：地震時の増加応力の確認

《 地震時の増加応力は小さく局所安全係数 F_s は $F_s > 1.1$ であること 》

指標 2、指標 4 について各基地の 2002 年 4 月から 2007 年 3 月までの 5 年間の水封管理データを分析した結果を図 4.2.1-9~4.2.1-10 に示す。

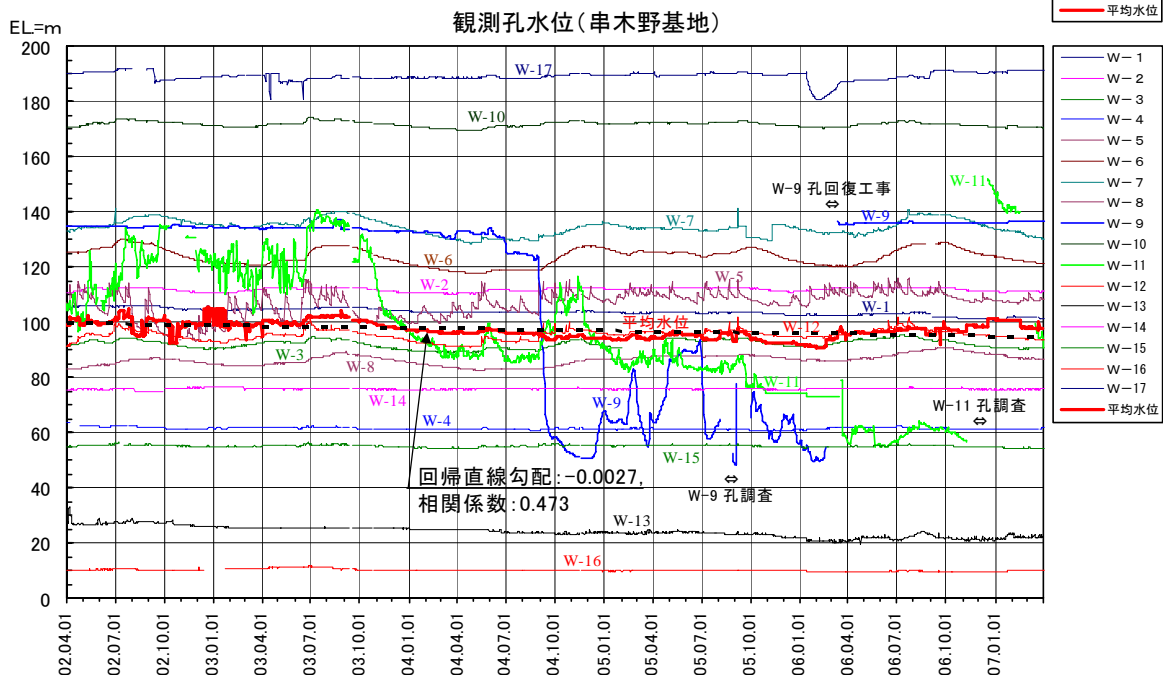
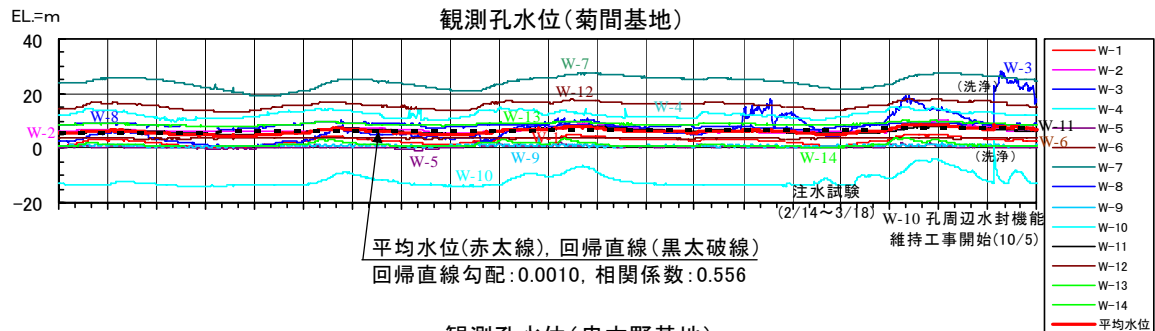
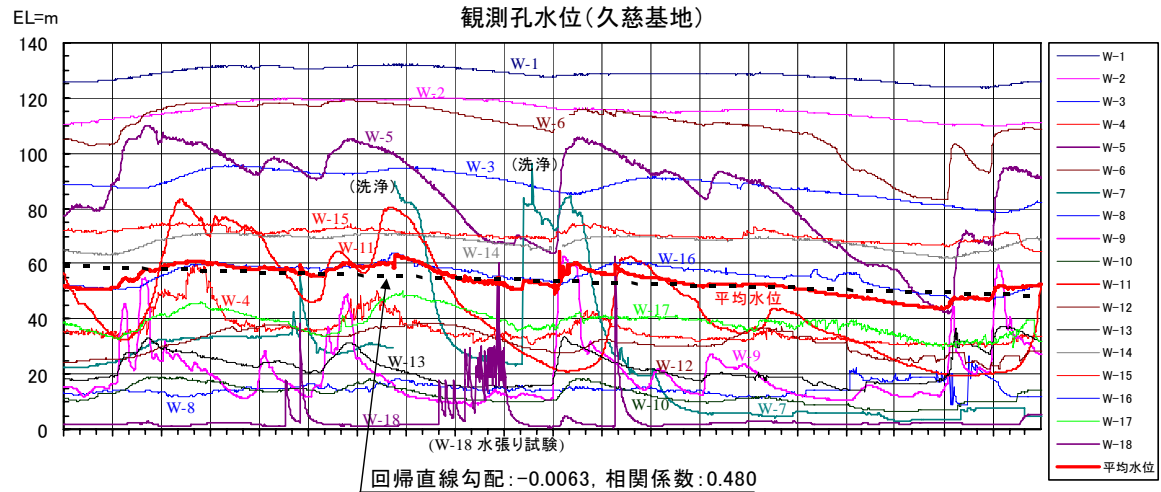


図 4.2.1-9 各基地の観測孔水位、平均水位の経時変化

各基地とも、いずれの指標も閾値内に収まっている。

久慈基地では、平均水位が若干の低下傾向を示すのに対して、補正湧水量を補正平均水位で除した値は僅ではあるが増加傾向を示している。地震や人為的な操作がない場合は、タンク周辺岩盤のゆるみ域の拡大等による透水性増加の可能性が疑われるため、調査等次段階の対応が必要と考えられるが、この場合は、2004年9月下旬より水封水位をEL.10.0mからEL.10.5mに、さらに2005年9月中旬からEL.11.5mと上昇させたことによる。この水封水位の上昇による湧水量の増加量の妥当性は、後述の4.2.4三次元浸透流解析にて確認している。なお、2007年2月中旬の水封水圧上昇試験以降の観測データは回帰計算から除いている。

また、串木野基地ではこの期間、W-9、W-11孔の水位が大きな低下を示したが、平均水位には有意な変化として表れていない。本手法は、局部に有意な変化が生じても平均化によりその変化量が薄められてしまうため、全体的な傾向管理の指標として用いるものと位置付けられる。局所または個別には、次節で述べる統計的時系列手法による観測データの解析や、第3章で示した間隙水圧計測等の点検手法を用いて管理する必要がある。なお、串木野基地のW-9、W-11の水位低下は、調査の結果、観測孔を交差するごく一部の亀裂の透水性が増したことが原因と考えられ、その箇所をセメントミルクによるコーキング等の処置を行い低下前の水位に回復させている。

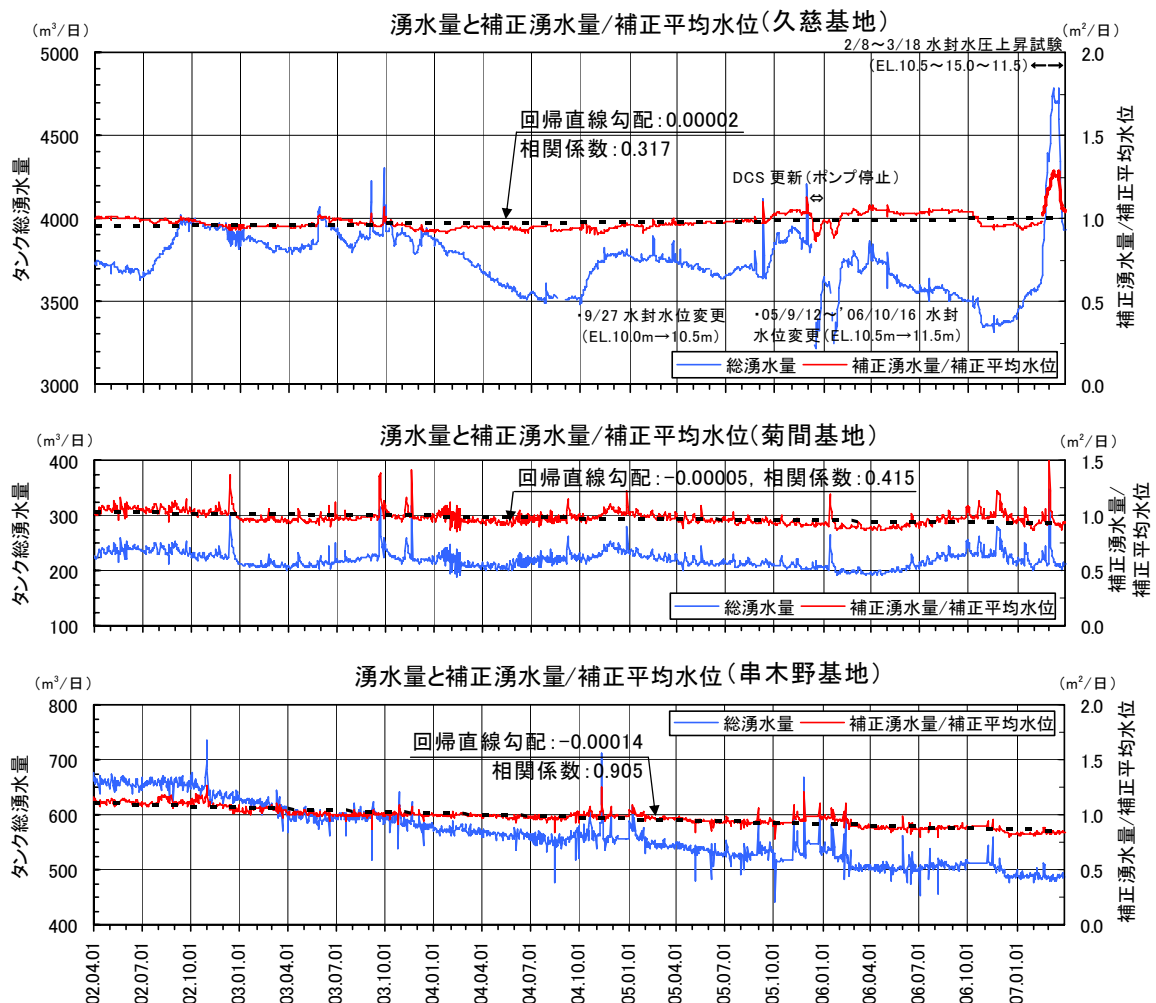


図 4.2.1-10 各基地の総湧水量と補正湧水量/補正平均水位の経時変化

(3) まとめ

本節では、水封機能データの変動傾向と水収支バランスを分析することで水封機能の安定性、岩盤タンクの力学的安全性を評価する現行の手法について、その適用論拠を整理するとともに、各水封機能データの主たる変動特性を示した。加えて、植出の提案する評価手法のうち、常時における指標 2、指標 4 を用いて最近の水封機能データを分析し、当該指標の有効性と適用上の留意点を示した。

本評価手法は、岩盤タンクの全体として安全性が保たれていることを確認するには有効である。しかしながら、本評価手法のみでは、仮に局所的な安全性に影響を及ぼす岩盤の損傷が生じた場合、その箇所の特異性や損傷の程度を評価するには十分でない。また、学識経験者等の評価を経る必要があり、操業管理の担当者は日々の観測値が適正な範囲なのかどうかの判断が困難で、迅速な対応や臨機の処置に苦慮するという課題を抱えている。加えて、統計モデルや物理モデルによる解析手法に比べて定性的で客観性に劣るという課題も有している。

4.2.2 実効雨量による水封データ評価手法

(1) 概要

ここで示す水封データ評価手法は、水封機能データの過去の変動傾向からの逸脱を判定するための分析手法の一つで、土砂災害や河川災害の予測・評価に用いられている実効雨量を説明変数とした統計的時系列解析モデルである。ゆるみ域の拡大等により岩盤タンク周辺の水理状態が変化すると、その影響が水封機能データに過去の変動傾向からの逸脱という形で現れることになる。そこで、水封機能の健全性評価の第一ステップとして、この逸脱の有無を分析・監視するものである。当該水封データ管理モデルは、基地操業管理担当者の日常管理に供するものとして、理解が容易で取扱い易い管理モデルを構築することを目標に開発したもので、観測データが実効雨量と非線形な関係や複数の相関関係を示すものに対応できるように統計期間を時間の経過と共に更新する「逐次更新型」の線形回帰モデルを考案した⁴⁾。以下に水封機能データに対する管理モデルとしての有効性を示す。

(2) 実効雨量法による水封データ変動の分析

菊間国家石油備蓄基地における2002年4月～2005年3月までの3年間の計測データを用いて検討を行った。当基地の岩盤タンクと地下水位観測孔の配置および水収支領域の平面図を図4.2.2-1に、岩盤タンクの配置横断面図を図4.2.2-2に示す。

図4.2.2-3は菊間基地の水封機能データの時系列変化を例示したものである。孔内水位変動の例としてa) W-2、b) W-13を示す。c) は人工水封水位制御による全体供給水量の変動で、d) はタンク内の全体湧水量の変動である。またe) は、同じ期間のサイト内で観測された日降雨量の変化である。これらの図から判るように、地下水位、水封水供給量および湧水量の地下水関連データは、影響の強弱やピーク時期に違いはあるが、何れも降雨に伴う季節的な変動を示している。すなわち、地下

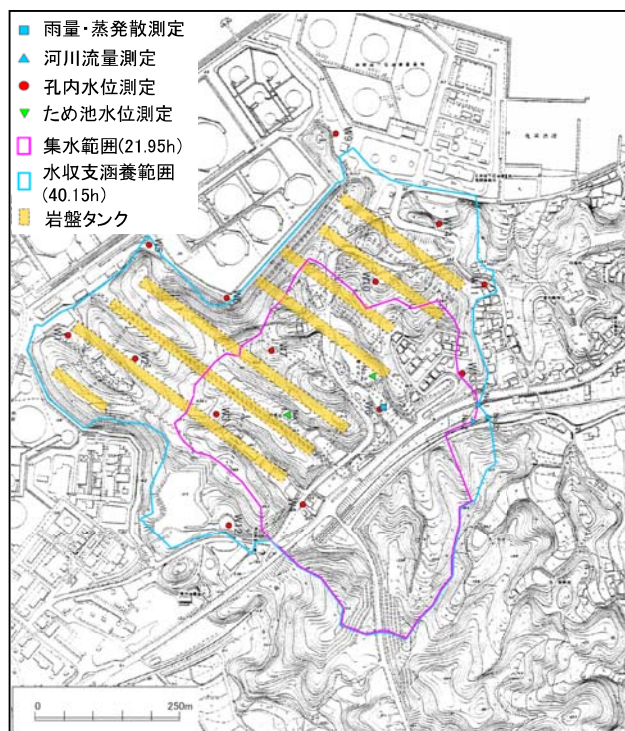


図4.2.2-1 岩盤タンク位置および水収支領域

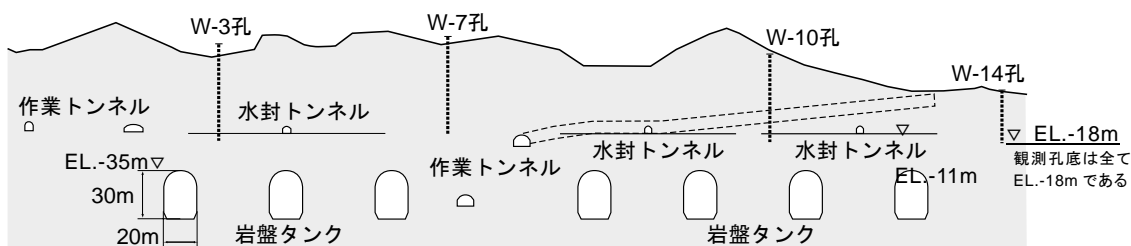


図4.2.2-2 岩盤タンク配置横断面図

水位と湧水量は降雨の多い夏季に高く（多く）、降雨の少ない冬季に低く（少なく）なる傾向を示し、供給水量は逆に夏季に少なく、冬季に多くなる傾向を示す。

全体の水収支の観点から考えれば合理的な傾向であるが、**図4.2.2-4**の相関関数グラフに示すように降雨量データとの直接的な相関性は低く、日雨量データをそのまま用いたのでは十分なモデル化ができない。これは地下水位や湧水量等が、現在の降雨だけでなく先行する降雨の影響も受けて変動しているためと考えられることから、先行する雨量を考慮できる実効雨量法を導入して検討を行った。

1) 実効雨量法

実効雨量は、過去に降った雨量の影響程度を考慮するための指標で、降雨に伴う地表流水や浅層浸透水に起因する土砂災害、河川災害の予測・評価に用いられている⁵⁾。先行する雨量の影響を一定期間で半減させながら反映することから半減期モデルとも呼ばれている。実効雨量 $R(t)$ は次式で定義される。

$$R(t) = r(t) + \sum_{k=1}^n (1/2)^{k/T} \cdot r(t-k) \dots \dots (1)$$

ここに、 $R(t)$ ：時刻 t における実効雨量、 $r(t)$ ：時刻 t における降雨量、 T ：半減期、 n ：累積時刻ステップ数である。

すなわち、実効雨量とは当該時刻 t までの経過時間に応じた重み（経過時間 T 毎に半分となる減少率）付き先行雨量の合計としたもので、防災分野での実効雨量算出では通常、累積時刻ステップ数 n を一連の降雨期間（前後に 24 時間以上の無降雨期間があるひとまとまりの降雨期間）として定義し、災害発生率との関係から最適な半減期を定めている。これは土砂災害の原因となる浅層の土中水分量が 24 時間以上の無降雨期間で初期状態に戻る（累積しない）と仮定していることによる。

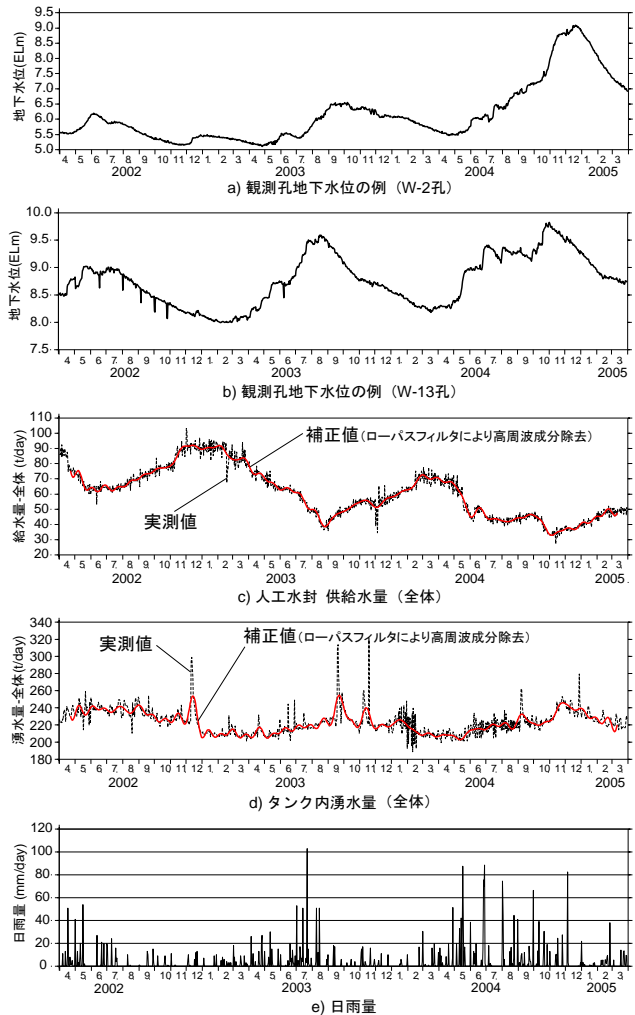


図4.2.2-3 地下水関連計測データの例

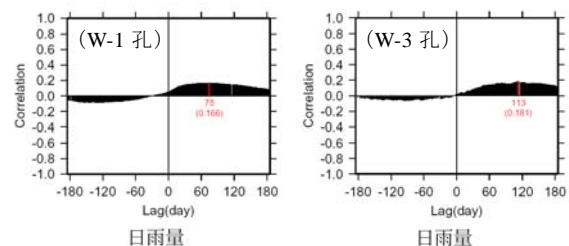


図4.2.2-4 観測データと日雨量の相関係数とラグの算定例

2) 深部岩盤水理に対する最適な実効雨量の算出

降雨の影響を受けて変動している観測孔水位、人工水封水供給量および岩盤タンク湧水量に対して、相関性が最も高くなる実効雨量を算出することで降雨影響の分析を行うとともに、実効雨量のパラメータから変動に起因する水理地質条件を推定した。具体的には下式により、位相差ラグ（時間のズレ） L のときの相関係数 $r(L)$ を求め、最も大きくなる最適な L を選出する。

$$r(L) = \frac{\sum_{t=L+1}^n \{R(t-L) - \bar{R}\} \{X(t) - \bar{X}\}}{\sqrt{\sum_{t=1}^n \{R(t) - \bar{R}\} \{X(t) - \bar{X}\}^2}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $X(t)$ ：対象とする水封機能データ、 \bar{X}, \bar{R} ：それぞれの平均値である。

このように実効雨量のパラメータは、半減期 T 、累積時刻ステップ数 n 、実効雨量と地下水関連データとの位相のラグ L となり、これらは雨水の浸透・貯留特性や涵養範囲といった水理地質条件の違いを表すものと考えられる⁶⁾。

具体的にはより深部の岩盤水理が対象の場合は、半減期が長いと想定されること、亀裂性岩盤での水理特性は水みちと称される亀裂のネットワークが支配的で不均質性が強いことから、累積時刻ステップ数 n は対象データの水理地質構造を反映するよう計測データ毎に値を定めることとした。

対象データは 14 孔の観測孔水位、人工水封水供給量および岩盤タンク湧水量の 1 日毎データである。そして対応する期間の日雨量データに対して表 4.2.2-1 に示したパラメータの探索範囲と探索刻みの組合せの中で相関係数が最大となる実効雨量を求めた。実効雨量算定結果の例を図 4.2.2-5 に示す。図 4.2.2-3 で示した W-2 孔、W-13 孔水位、供給水量および湧水量について、それぞれの最適な実効雨量のグラフを日雨量と同時に示したものである。なお供給水量および湧水量は、タンク内

表4.2.2-1 最適実効雨量のパラメータ探索範囲の設定

パラメータ	設定範囲	探索刻み
半減期 T	10日～360日	10日毎 36分割
累積日数 n	T 日～360日	10日毎 最大36分割
遅延日数 L	0日～360日	1日毎 360分割

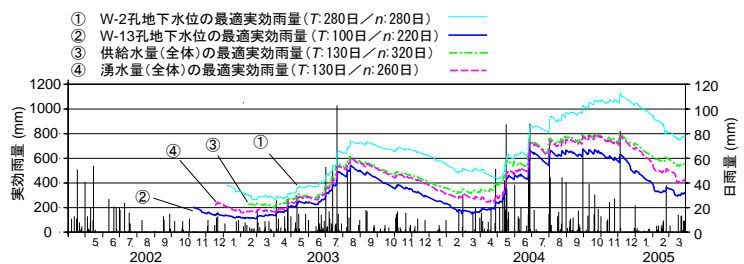


図4.2.2-5 最適実効雨量の算定結果例

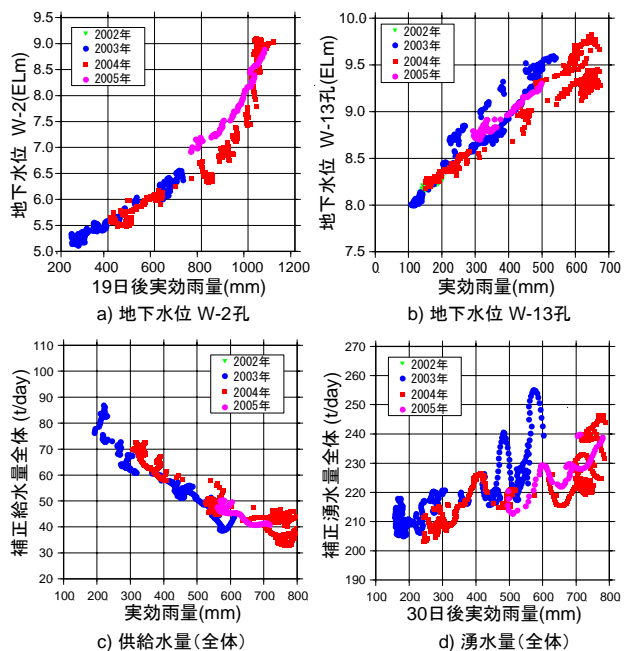


図4.2.2-6 各実測データと実効雨量との散布図

圧変動の影響や人工水封制御、排水ポンプ制御などの運転操作による影響を直接に受けるため、実測値には図 4.2.2-3 に示されるような短周期のノイズ成分が含まれる。このような要因が明らかな変動は適切に補正することで実効雨量との相関はより強くなる。そこで実測値の代わりに、FFT のローパスフィルタを用いて 0.04 cycle/day より大きな高周波成分を除去したデータ（図 4.2.2-3 の赤色実線）を用いた。

それぞれの最適パラメータは、①W-2孔水位が半減期 T :280日／累積日数 n :280日、②W-13孔水位が半減期 T :100日／累積日数 n :220日、③供給水量（全体）が半減期 T :130日／累積日数 n :320日、④湧水量（全体）が半減期 T :130日／累積日数 n :260日である。それぞれの実効雨量グラフから判るように、半減期および累積日数が大きくなるに従って、絶対量は多くなり、なめらかな変動になっている。それぞれのパラメータは互いに関連すると考えられ一概には言えないが、主として半減期は貯留効果、累積日数は涵養範囲を表すと考えられる。

相関係数が最大となる遅延日数を考慮して、それぞれ両者の関係を散布図で示したものが図4.2.2-6である。a)のW-2孔水位は、求めた実効雨量の19日後の値と最も相関

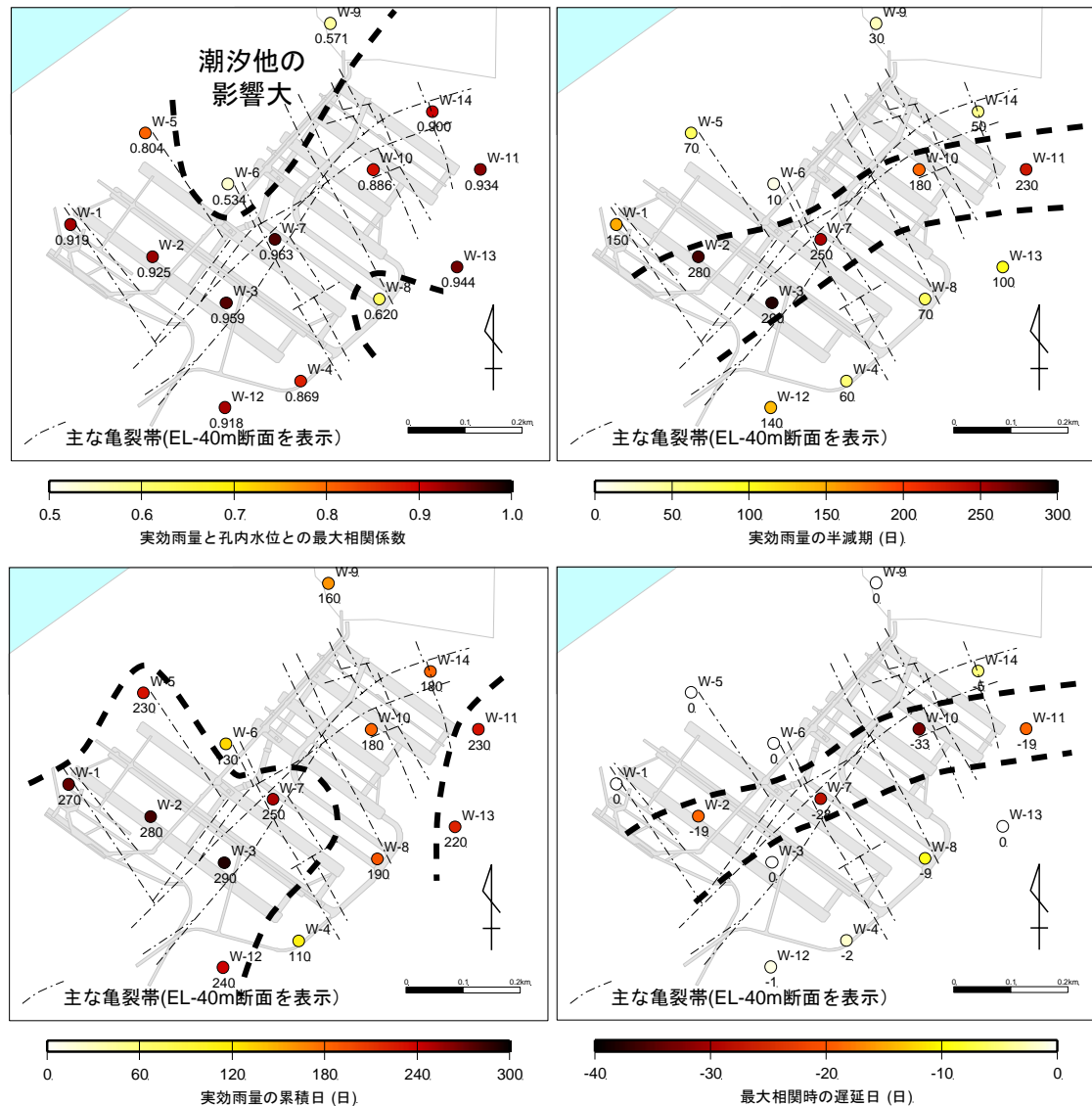


図4.2.2-7 地下水位変動を表現する実効雨量のパラメータ分布

が強く、相関係数は0.925（標準偏差0.371m）である。散布図を見ると高水位において非線形な関係を呈していることが判る。b)のW-13孔水位は、遅延日数が0日で相関係数は0.944（標準偏差0.166m）で、散布図から中高水位で複数の相関構造が見て取れる。c)の供給水量は、遅延日数0日で相関係数は-0.933（標準偏差4.70 t/day）で、散布図から明瞭な負の線形関係が認められる。d)の湧水量は遅延日数30日で相関係数は0.763（標準偏差6.91 t/day）である。散布図から正の相関が認められるが、短周期ノイズの除去がFFTローパスフィルタでは十分でなくバラツキが大きなものとなっている。その他の地下水位データとの相関は図4.2.2-7の左上の図に示した通りである。

このように水封機能データの多くと強い相関が認められ、実効雨量は変動のモデル化に有用な指標であることが分った。

3) 地下水観測孔内水位変動の分析評価

求められた実効雨量と観測孔内水位との関係や実効雨量の各パラメータの分布を基に、地下水位変動の分析評価を行った。前項で示した実効雨量を全14孔の地下水位データに対して算出し、それぞれの最大相関係数、遅延日数 L および実効雨量のパラメータ（半減期 T 、累積日数 n ）について分布を示したものが図4.2.2-7である。

まず最大相関係数の分布（図の左上）を見ると、殆どの観測孔で相関係数は0.9程度あり極めて高い相関性を示しているが、W-9、W-6およびW-8は相関性が低くなっている。図4.2.2-8にW-9、W-6およびW-8の孔内水位変動図と実効雨量との散布図を示した。W-9孔は旧海岸線近傍に位置し、潮位変動の影響を強く受けている。W-6孔は降雨に対する長期的な変動と貯留効果の小さい短周期の応答が組み合わさった変動を示している。この孔は岩盤の露出する切土のり面尻に位置するため、これは浅層の浸透水の影響と考えられる。W-8孔は2003年までと2004年以降で相関関係が異なることが分る。これはこの時期に近接するため池が干上がり、以降降雨に対するため池水位の応答関係に変化が生じたことが原因であり、ため池の貯水性等の水理構造が変化した可能性が考えられる。この程度の水位低下は水封機能上問題にならないレベルであるが、実効雨量との関係を見ることで水理構造変化の検出に有効であることを示す一例といえる。

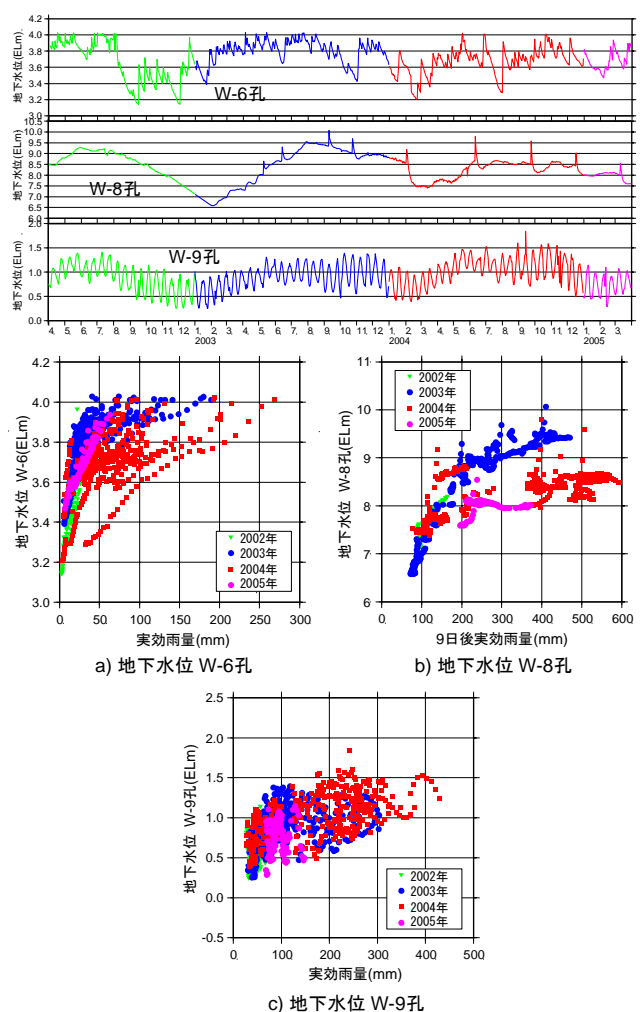


図4.2.2-8 W-6, 8, 9の孔内水位変動と実効雨量との散布図

図4.2.2-7の右上図は実効雨量の半減期の分布を示したもので、南西～北東方向(W-2, W-3～W-7～W-10～W-11孔)に半減期の長い領域が分布する。半減期が長いということは、過去に降った雨の影響が長く続くことを示しており、主として地盤の貯留効果に関係すると考えられる。この領域は風化層が厚く、粘土を伴う角礫状破碎帯であるN40E系とN60～70E系の亀裂帯分布と概ね重なることから、それらが貯留効果の大きい水理構造として影響している可能性がある。左下図は実効雨量の累積日数の分布であり、南西付近(W-1, W-2, W-3, W-5, W-7, W-12孔)および東縁部(W-11, W-13孔)に累積日数の大きい領域が分布する。累積日数は実効雨量の絶対量を左右するので、主として涵養範囲(影響領域)に関係すると考えられる。図4.2.2-1に示した地形および涵養域と比較すると、累積日数の大きい領域は涵養域の縁域であることがわかる。また、右下図は実効雨量と最大の相関を示す遅延日数の分布であり、半減期の分布と同様、W-2～W-7～W-10～W-11孔方向の風化層が厚く、下位に亀裂帯が分布する領域と概ね重なる範囲に遅延日数の大きな領域が分布する。遅延日数は主に降った雨の浸透速度に影響すると考えられ、半減期と併せると、貯留効果が大きく降雨の浸透速度の遅い水理構造に類似した性質を示す領域であることが推察される。

以上のように水封機能データと相関性の高い実効雨量パラメータは、当サイトの水理地質構造条件と概ね整合しており、水理地質条件をある程度反映したものであることが分った。

(3) 実効雨量に基づく水封データ管理モデルの構築

本研究は、直感的で判りやすい簡易なモデルにより水封機能の健全性を評価できる手法を構築し、日常管理に供することを目的としている。本節では前節で検討した実効雨量を指標とした管理モデルについて検討を実施した。

1) 統計モデル

健全性評価のベースモデルは簡易な統計モデルに基づくものとして、実効雨量を説明変数とする線形回帰モデルを基本とする。管理(判定)の基準としては、回帰モデルによる水位予測値と予測誤差標準偏差から、例えば約99%の信頼区間として、

$$\hat{H} - 3\hat{\sigma} \leq H \leq \hat{H} + 3\hat{\sigma}$$

を設定した場合、実測値がこの範囲を

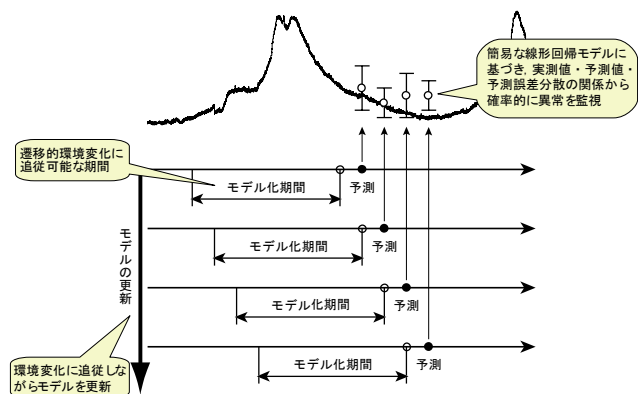


図4.2.2-9 逐次更新型モデルの概念図

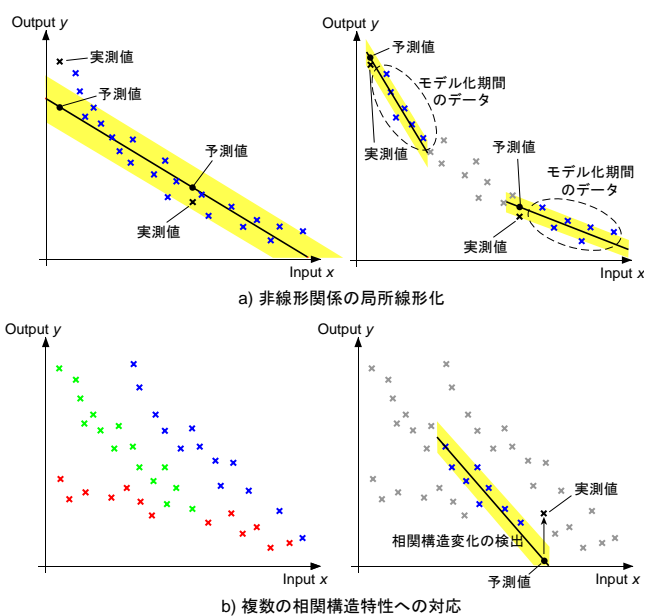


図4.2.2-10 逐次更新型モデルによる各種相関構造への対応

外れると99%の確率で過去の蓄積データから逸脱と見なすことができる。

水封機能の健全性という観点からすれば下限値のみ定義すれば良いが、状態の変化を迅速に検出するという日々の管理の目的から上限値も監視するモデルとした。また、下限値については、水封機能の保全という観点から、別途、絶対値としての基準が設定されており、 3σ については今後の運用実績に基づいて日常管理に適切な基準に設定する必要がある。

非線形な関係や複数の相関構造に対応するモデルとしては、データの蓄積（時間の経過）に伴い常にモデルを更新するモデル（ここでは「逐次更新型モデル」と称す）を考案した。

逐次更新型モデルは、図4.2.2-9の概念図に示されるように、上記の線形回帰モデルを現時点から過去の一定期間（モデル化期間と称す）のデータのみを用いて構築し、新たなデータが蓄積されるに従ってモデルを逐次更新していくモデルである。

本モデルは、管理対象変数と説明変数との間の相関性に非線形な関係や複数の相関構造を有する場合に有効であり、追従性および予測精度を向上することができる。このことを概念図で示したものが図4.2.2-10である。図a)は非線形な相関関係を有するデータへ適用した場合で、図a)左の非線形な関係に一律な線型モデルをあてはめた場合に対し、図a)右は適切なモデル化期間の設定による局所的線形化を図ることで予測精度が向上する様子を示している。また、図b)は複数の相関構造を有するデータへの対応を示している。図b)左のようにデータ間に未知の条件に依存した隠れた複数の相関構造がある場合において、図b)右のように直近のモデル化期間の相関構造によりモデルを構築して予測を行うことで、同じ相関構造で推移している間は変動の追従が可能で、降雨に対する応答関係が変化する際に実測値がモデルから乖離することでこれを検出できることとなる。

2) 単純線形回帰モデルの適用結果

まずは対象期間全体に対して実効雨量を説明変数とする線形回帰モデルを適用した例を示す。図4.2.2-11はW-2孔内水位および水封水供給量（全体）の結果を示したものである。図a)はそれぞれの実測値と回帰モデルによる計算値の時系列グラフであり、同時に回帰誤差標準偏差の $\pm 3\sigma$ の範囲とそれを超過した実測値に●印をプロットした。また、図b)はそれぞれの回帰直線を散布図とともに示し、同様に $\pm 3\sigma$ の回帰誤差範囲を図示したものである。

W-2孔内水位の例では、回帰モデルによる計算値は実測値の変動傾向を捉えているが、散布図と回帰線の間を

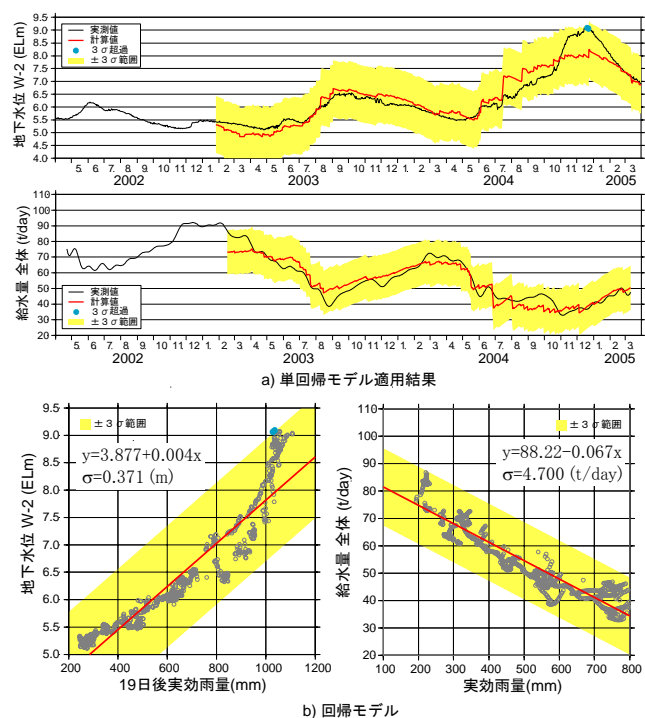


図4.2.2-11 単回帰モデルの適用結果例
(W-2孔地下水位および給水量全体)

見ると、非線形な関係に線型モデルを適用しているため、高水位期および低水位期において回帰線から乖離している。このため回帰誤差も大きくなっており、管理モデルとして十分ではない。一方、水封水供給量（全体）の例では概ね変動傾向を捉えており、実効雨量との関係は散布図からもほぼ線形であることが判る。但し、対象期間が長くなるに従ってモデルの誤差は大きくなることが考えられ、管理モデルとするには適用期間を適切に判断する必要がある。

3) 逐次更新型モデルの適用結果

ここでは、逐次更新型モデルによる適用例を示し、その有効性について考察する。

図 4.2.2-12 および図 4.2.2-13 にそれぞれ W-2, W-13 孔水位への適用結果を示した。最適な実効雨量に対するモデル化期間を季節変化が捉えられるように 90 日間として、1 日毎のデータに対して日々モデルを更新して予測値および予測誤差を求めた。それぞれの図の a) は実測値と回帰モデルによる計算値の時系列グラフ、b) および c) は例として抽出した日付に対する回帰モデルを散布図に示したものである。青色のプロットが当該日付に対するモデル化期間（91 日前から前日までの 90 日間）のデータであり、これを基に構築した線形回帰モデルを回帰誤差（ $\pm 3\sigma$ の範囲）と共に示し、当該日付の実測値を★印で示した。

W-2 孔水位の例では、前述の単回帰モデルによる結果（図 4.2.2-11）と比べて明らかに変動への追従精度が良く、回帰誤差（ $\pm 3\sigma$ の範囲）も小さくなっている。時系列図 a) に示した二つの日付における図 b), c) の散布図と回帰モデルを見ると、非線形な関係に対して局所線形化を図ることにより予測精度が向上している。また、非線形関係の変曲点付近（地下水位 EL7~8m）で誤差が大きくなり、 $\pm 3\sigma$ 規準を超過する日が連続している。

W-13 孔水位の例では、b) の回帰例から判るように、直近のモデル化期間のデータが、データ全体の上側に位置し強い線形関係にあるため、誤差はかなり小さく抑えられている。一方 c) では、直近のモデル化期間の

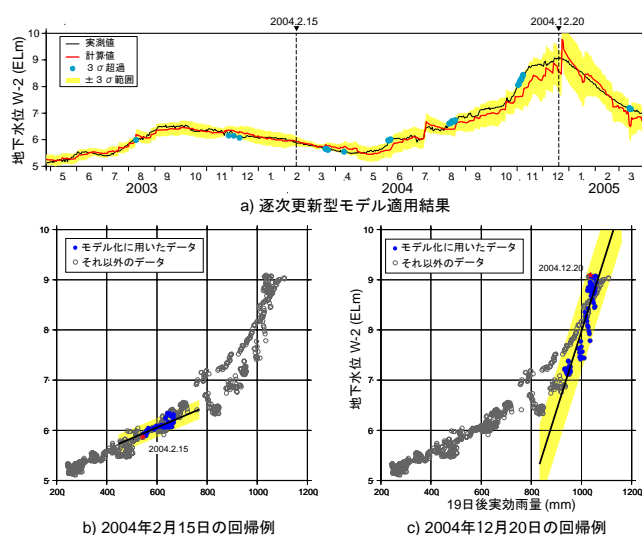


図4.2.2-12 逐次更新型モデルの適用結果例 (W-2孔地下水位)

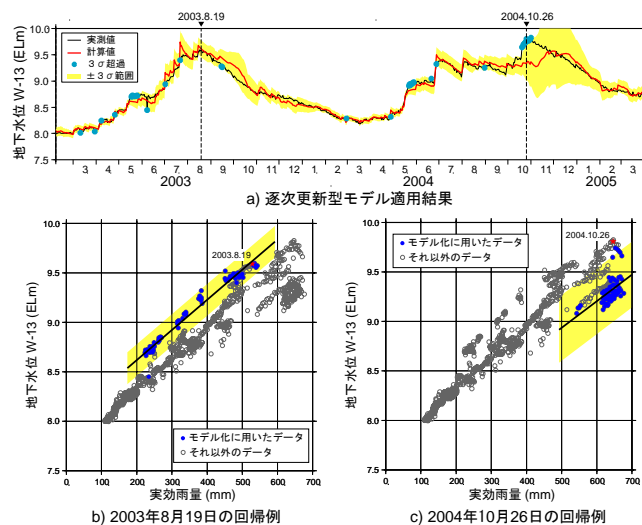


図4.2.2-13 逐次更新型モデルの適用結果例 (W-13孔地下水位)

データがデータ全体の下側に位置するのに対して、実測値は 50cm 程度高くなっており、相関構造が変化している期間であることが判る。この W-13 孔の例のように実効雨量との関係は全体としてばらつきが大きく、複数の線形関係が重なり合った構造を示すものでも、局所線形化を図ることで各々の相関構造を表現できる。

以上のように逐次更新型モデルを用いることで非線形な関係や複数の相関構造特性を有する関係にも対応が可能で、その変化の検出ができることに加えて、散布図を見ることで過去のデータとの関係を分析することができることが判った。

(4) まとめ

本節では、基地の操業担当者が日常管理において日々観測される水封機能データに対して、水封機能の健全性を簡易な指標に基づき評価できる方法について検討を行った。特に地下水位変動を監視するための簡易な統計モデルについて検討を行い、実効雨量を指標とする方法について検討した。

結果、実効雨量のパラメータは水封機能データの変動に影響を及ぼす水理地質条件をある程度反映したものであることが分かった。そして健全性評価の手法として、極めて簡易な線形回帰モデルを採用し、非線形性等に対応するために逐次更新型モデルを考案した。さらに実際のデータを適用して、実効雨量に基づくモデルの特徴を整理し、水理条件等の変化に伴う過去の変動傾向からの逸脱の検出、付随的な計器故障の検出といった日常管理における第1ステップの健全性評価手法としての有効性を示した。

今後は、他の地下石油備蓄基地におけるデータへの適用性を検討するとともに、潮汐や浅層浸透水の影響による短周期応答成分の除去フィルターの検討など当該評価手法の適用範囲の拡大・改良を図っていく必要がある。

4.2.3 観測孔水位相互の相関構造による地下水位データ評価手法

(1) 概要

観測孔水位の過去の変動傾向からの逸脱を判定するための分析手法で、観測孔水位相互の相関構造を指標とした統計的時系列解析モデルである。観測孔水位は、基本的に気象変動（主に降雨変動）の影響を、それぞれが対応するエリアの水理構造を反映して変動している。前節の実効雨量を指標としたモデル化の考え方は、この水理構造の変化を降雨データに基づき単純化して捉えようとしたものであるが、本手法では別な考え方として、水理構造の変化を観測孔間水位の相関構造の変化として迅速に検出する方法を考案した⁴⁾。実効雨量による水封データ管理モデルと同様に、「逐次更新型」の線形回帰モデルを採用し、水封機能の健全性評価の第一ステップとして、基地操業管理担当者の日常管理に供するものである。以下に観測孔水位データに対する管理モデルとしての有効性を示す。

(2) 観測孔地下水位の相互相関構造と水理構造の関係

観測孔水位相互の相関構造と水理構造の関係を概念的に示すと図4.3.3-1のように表される。図に示すように、安定した水理構造の条件の下で気象変動等の影響を受けて変動する観測孔内水位は、位置的に離れていても主たる変動要因が同じであれば、互いに高い相関性がある。ところが地表改変など水理構造に局所的な変化が生じた場合（例えば①）、その影響を直接受ける観測孔（W-1孔）と他の観測孔との間の相関構造は崩れることになる（②）。したがって、安定状態における観測孔相互の相関構造を把握し監視していれば、局所的に何らかの水理構造の変化が生じた場合に、観測孔間の相関構造に変化が生じるため、それが捉えられことになる。すなわち、観測孔水位間の相関構造を監視することで水理構造の安定性を評価することが可能となる。

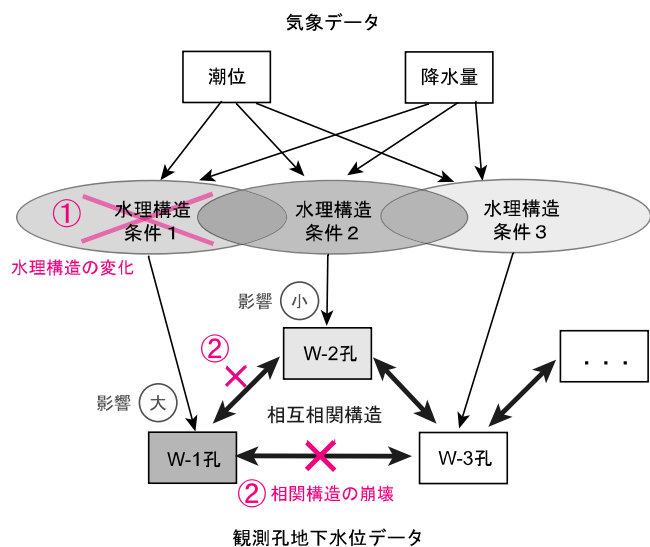


図4.2.3-1 観測孔水位間の相関構造と水理構造との関係概念図

具体的には先ず、前節4.2.2 (2)で示した式(2)より、観測孔毎に他の観測孔データとの相関係数 $r(L)$ が最大となる相互相関を求めて相関構造を把握する。そして観測孔毎に高相関を示す他の観測孔を全て抽出し、それぞれに回帰モデルを構築する。適用モデルは、非線形な関係や複数の相関構造に対応できるように前節で示した「逐次更新型モデル」とする。これより水理構造に変化が生じた場合、影響範囲の観測孔は他の全ての観測孔との相関に変化が生じ、基準超過が全モデル同時に認められる。つまり、事前に相関構造を確立したモデルにおいて、同時に基準超過が認められることを一つの判定基準として管理することで、水封機能の健全性評価の指標となると考えた。

(3) 観測孔水位間の相互相関構造の分析

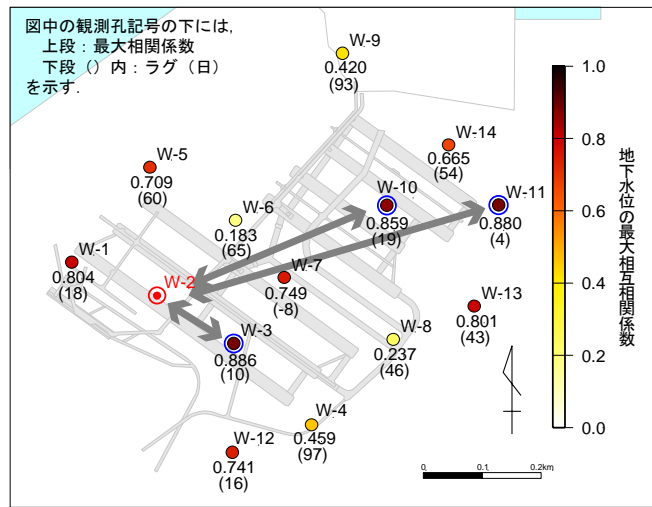
実効雨量による水封データ管理モデルと同様、菊間国家石油備蓄基地における2002年4月～2005年3月までの3年間の観測孔水位データを用いて検討を行った。地下水位観測孔は、水封機能の健全性を空間的に把握する目的で岩盤タンク周辺に14孔が設置されている。

当該基地の全14孔の観測孔内水位について、相互相関関数を求めて、最大相関係数が0.85以上となる観測孔とその時のラグ（時間遅れ）を抽出した。図4.2.3-2に例として観測孔W-2, W-13孔の他孔との相関構造を示した。図には算定された相互相関関数から最大相関係数を基に色分けし、相関係数0.85以上の観測孔間を矢印で示している。

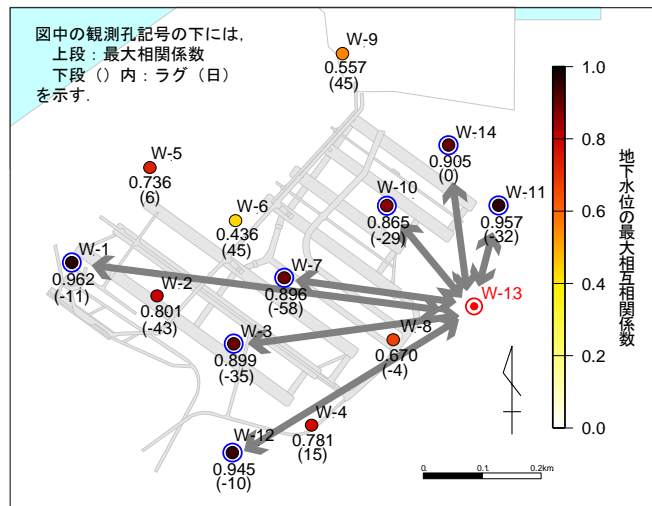
例えばW-2孔では、W-3, W-10およびW-11の3孔が抽出され、何れもラグは正であり他孔の地下水位が先行して変動していることを示す。W-13孔では、抽出された相関係数0.85以上の観測孔は図に示す7孔あり、W-14孔を除く6孔は負のラグであり当該孔（W-13孔）が先行して変動していることを示す。

健全性評価の指標としての利用を考えると、ラグが将来（負）の場合は、そのラグの分だけ判定が遅れることになり、ラグが大きい場合には迅速性の観点から注意が必要となる。

全14孔の結果から、高相関の観測孔が複数ある観測孔は9孔あることが分かった。一方で高相関性を示す他の観測孔がないのはW-4, 5, 6, 8, 9のエリア周辺部に位置する5孔である。本節で提案する判定手法は、複数の観測孔との相関構造を監視することを基本とするものであるため、上記5孔は当該地下水位管理モデルの適用外となる。ちなみに、最も多くの観測孔と高い相関を有するのはW-11およびW-13孔であった。



W-2孔地下水変動の相関構造



W-13孔地下水変動の相関構造

図4.2.3-2 観測孔間の相互相関構造の分析結果例

(3) 相互相関構造を基にした逐次更新型モデルの適用

水理構造の健全性評価の指標としては、観測孔毎に高相関を示す複数の観測孔との回帰モデルを構築して、前章と同様の確率的な管理基準（ $\pm 3\sigma$ ）によりそれぞれ管理を行う。水理構造変化に伴う異常は全てのモデルに現れると考え、同時に基準超過が

認められることを水理構造の変化として捉えることとした。

適用する統計モデルは、非線形な関係や複数の相関構造に対応できる「逐次更新型モデル」として、実際にW-2孔およびW-13孔に適用した例を図4.2.3-3および図4.2.3-4に示す。それぞれの図のa)の時系列グラフは、それら観測孔との回帰モデルを1日毎に更新した計算結果から、最も実測値に近い結果を得たモデルを計算値として示したものである。モデル化期間は90日間である。いずれも実測値の変動を極めて良く捉えており、実効雨量を基にした逐次更新型モデル結果(図4.2.2-12および図4.2.2-13)と比較すると、2004年10～11月付近の高水位期の追従精度が高くなっているのがわかる。特にW-2孔のモデルは、高相関の孔が3孔と少ないものの、高い追従精度が得られることが分かった。

回帰誤差(±3σの範囲を黄色で表示)は、1日毎に更新した複数の回帰モデルの中から選出しているため変動が著しいが、全体として地下水位が高い時に大きい傾向が認められる。これは高水位期において他の観測孔との関係に非線形性が強くなる傾向が認められるため、低水位期と比較して変動を規制する水理構造が異なることが考えられる。

図4.2.3-4のW-13孔の適用例では、水理構造変化の検知感度を検証するため、2005年2月1日～3月31日の2ヶ月間の地下水位を段階的に最大80cmまで実際の地下水位より低く設定して、水封機能の異常状態を仮想的に作り出した。図に示すように仮想異常期間で±3σの管理基準を逸脱し始めるのは、24日経た2/24(実際の地下水位より33cm低い時点)であり、その際の回帰モデルの一部(W-1孔およびW-11孔内地下水位とのモデル)を図のb)およびc)の散布図に示した。散布図からデータが従来の相関構造から逸脱し始める様子がわかり、比較的早い段階でそれを検出できている。

2月下旬以降連続して基準超過が認められるが、3月半ば以降は実測値と計算値が乖離し続けているものの、回帰誤差σも大きくなっているため、±3σの基準超過はなくなっている。これはモデル化期間(90日)に異常期間のデータが含まれることで誤差

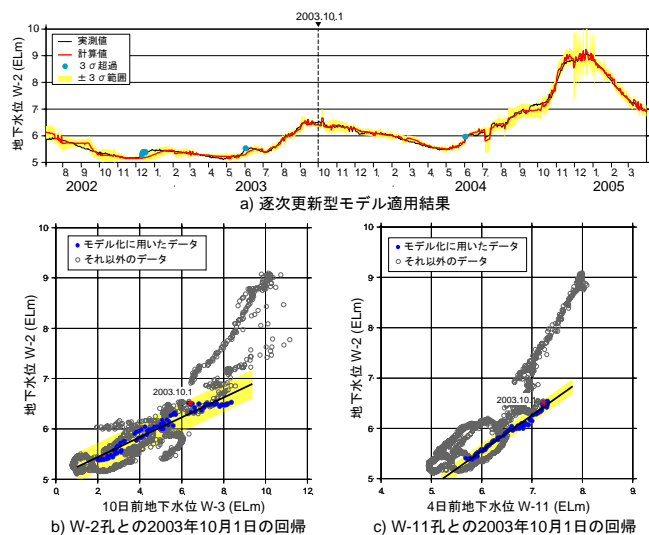


図4.2.3-3 観測孔間の相関構造に基づく逐次更新型モデルの適用例(W-2孔地下水位)

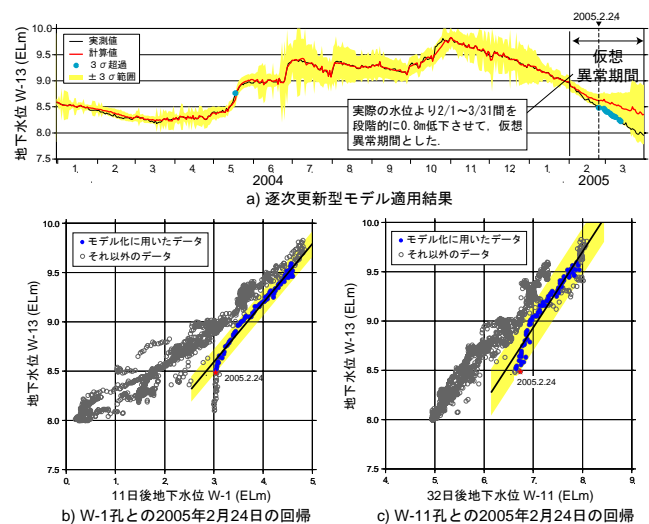


図4.2.3-4 観測孔間の相関構造に基づく逐次更新型モデルの適用例(W-13孔地下水位)

が大きくなっているため、健全性の判定には $\pm 3\sigma$ の基準だけでなく、 σ の大きさも考慮する必要があるといえる。

(4) 地下水データ等管理モデルの運用

水封機能の健全性評価においては、すべての観測孔が所定の地下水位以上で継続的に安定していることを確認することにある。よって、**図4.2.3-5**に示したように、実測値から判定モデル計算値を差し引いた経時変化の傾向に、異常な低下や長期的な低下傾向がないかどうかを監視することが分かりやすくかつ客観的である。

過去の変動傾向からの逸脱が認められた場合は、水封機能の健全性について他の点検データと合わせて総合的に検討する必要がある。その結果、水封機能に低下あるいは今後低下していく可能性があるとして評価された場合は、次章で述べるように、既設・新設ボーリング孔による各種検層や地表等からの物理探査等の各種の調査手法を組み合わせたより詳細な調査、および2成分2相3次元地表流・地下水流統合型陸水シミュレータ³²⁾等の浸透流解析による透水係数等の各種パラメータの変化の程度や将来の地下水位の予測解析といった次段階の調査・解析に進むことになる。本研究で検討した評価手法を組み込んだ日常点検フローを**図4.2.3-6**に示す。

(5) まとめ

本節では、基地操業担当者の日常管理に供するための簡易な統計モデルとして、観測孔水位相互の相関構造を指標とする方法について検討した。

前節の実効雨量による水封データ管理モデルと同様に、簡易な線形回帰モデルを採用した管理モデルを構築し、観測孔水位相互の相関構造に基づくモデルの特徴を整理し、水理構造変化に伴う過去の変動傾向からの逸脱の検出、付随的な計器故障の検出といった日常管理における第1ステップの健全性評価手法としての有効性を示した。また、本地下水データ管理モデルでは、再現精度が高いことから、短期間であれば計器の点検整備時等の欠測値の補間も可能である。特に、実効雨量による水封データ管理モデルと併用した評価を行えば、考え方の異なる手法によるクロスチェックができるため、その信頼性が増すものといえる。

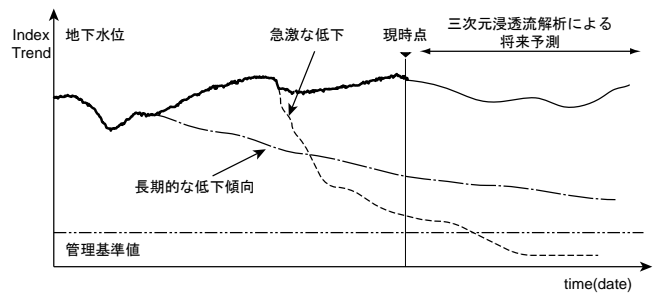


図4.2.3-5 地下水位変動監視の概念図

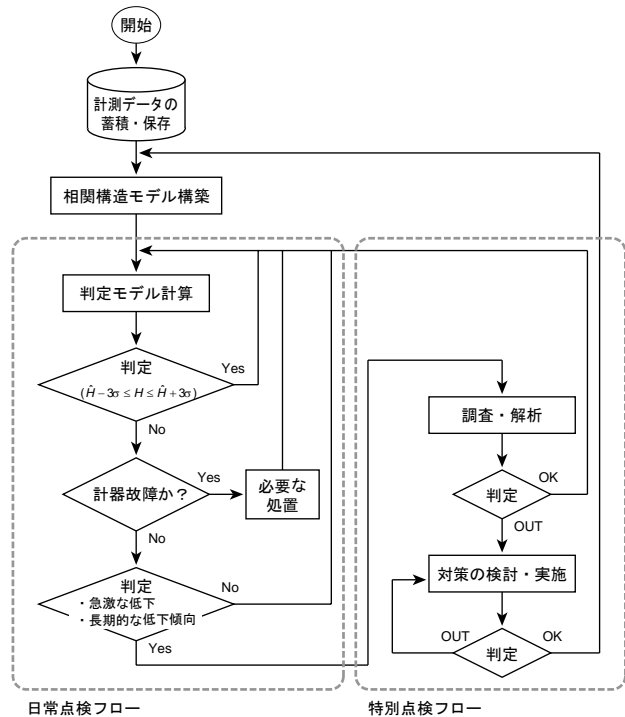


図4.2.3-6 提案する日常点検フロー図

4.2.4 三次元浸透流解析による評価手法

(1) 概要

地下石油備蓄基地では、水封機能の安定性評価、渇水時等の異常時の影響や水封機能維持等の保全工事の効果予測のための資料として、各基地それぞれに水理解析モデルを構築し、2成分2相3次元地表流・地下水流統合型陸水シミュレータ（解析コード：GETFLOWS）を用いて、年1回ならびに必要な都度、三次元浸透流解析を実施している⁷⁾。

水理解析モデルは、地下の全貯油施設とその周辺を含む広域モデルであり、基地建设前の調査時点から操業時にわたる長期間に対し、基地周辺の地表水および地下水の流動をシミュレーションにおいて再現できる。この解析モデルの作成に際しては、地下水の流動に大きく影響を与える地形および地質構造をできるかぎり忠実に表現するとともに、全てのタンク・坑道を極力現実のサイズに合致するように格子分割を行い、調査段階から現在に至るまでの調査・試験等により取得された水文および岩盤水理構造に関する情報を総合して反映させている。

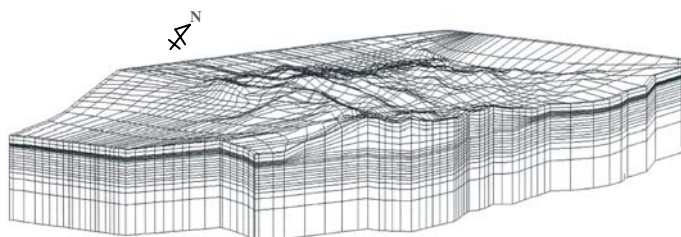
また、シミュレーションは、岩盤タンク・各種坑道の掘削工事、岩盤タンク掘削時の水封ボーリング孔からの給水、グラウト工事、水封トンネル等坑道の水没ならびにオイルイン等の状況を現実の工程に準じて組み込み実施している。なお、モデルの各種パラメータ・条件の最適化は、岩盤タンク湧水量、人工水封水供給量、河川流量および観測孔水位の観測データに対して、解析結果を経時的にマッチングさせることで達成させている。

以下に菊間基地を例として、当該解析モデル・条件と解析結果を示すとともに、観測孔水位の解析値に対して前節 4.2.2 で述べた実効雨量に基づく評価手法を適用し、数値解析結果の実効雨量との相関関係、および水理解析モデルにおける実効雨量パラメータの影響要因について検討した結果を示す。

(2) 三次元浸透流解析による水封機能データの変動評価

1) 水理解析モデルと解析条件

図 4.2.4-1～図 4.2.4-3 に水理解析モデルの鳥瞰図、深度方向の格子分割図およびモデル領域の格子分割平面図を示す。菊間基地の水理解析モデルは北東-南西最大 1.8km、北西-南東最大 1.0km の面積 1.16km² で、格子数は 33,600 である。また、解析条件は表



(面積1.16km²、北東-南西最大1.8km、北西-南東最大1.0km、48×35×20=33,600格子)

図4.2.4-1 水理解析モデルの鳥瞰図(菊間基地)

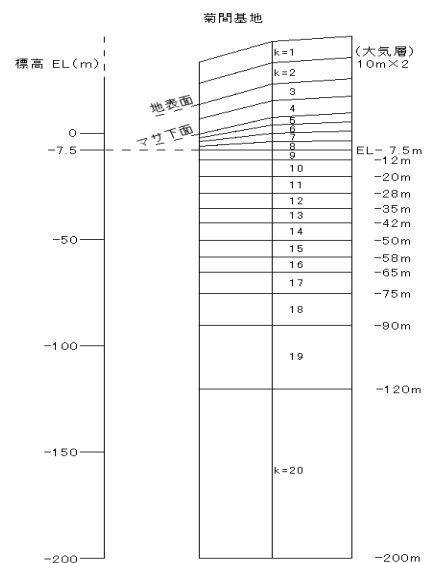


図4.2.4-2 菊間モデルの深度方向分割図

4.2.4-1 に示すとおりである。

GETFLOWS は、ダルシー則および質量保存則を基礎方程式とし、水・空気の 2 成分 2 相を取扱うことができるシミュレータで、透水係数、間隙率、不飽和特性値、蒸発散量を除いた降水量、内圧・液位、水封水位、および各種空洞の建設工程実績を入力値として、流体圧力と水飽和率を求めるものである。地表流・河川の流れと地下水流を同時に解析するため、降雨、地表流出、



図4.2.4-3 菊間モデルの格子分割平面図

地下浸透の陸水循環過程が整合的にモデル化される特徴を有する。また、坑井は複数の格子（地層）を貫く 1 次元の導管としてモデルに組み込まれ、軸対象の流れを仮定した解析解とリンクさせて解かれる。よって、水封孔は孔内の圧力を水封水圧に規定し、地下水位観測孔は孔内の流量を規定（流量を 0 とする）して取扱う。

水理解析モデルは、地質を風化花崗岩、新鮮花崗岩、透水帯、亀裂帯に区分し、これに対応する透水係数、間隙率を与えている。走向方向の亀裂帯の透水係数はすべて 2m 幅に換算、亀裂帯直交方向は新鮮花崗岩の透水係数と同じとし、亀裂帯分布および透水帯分布、ならびにそれらの透水係数は、観測値との非定常解析によるヒストリーマッチングの際にトライ&エラーにより調整している。また、オイルイン後のタンク湧水量や人工水封水供給量の漸減傾向に対しては、目詰まりの進行と考え、水封ボーリング孔近傍および岩盤タンク周辺の透水係数を時間の経過と共に段階的に小さく

表 4.2.4-1 解析条件一覧表(菊間基地)

条 件	概 要
地 形	地形図デジタル化により作成
地 質	風化帯, 新鮮岩体, 透水帯, 亀裂帯に区分
透水係数	地質区分により設定(第 3 層上面は風化帯の数値を設定) 数値はトライ&エラーにより調整
間 隙 率	風化帯 25%, 新鮮岩体 5%
不飽和特性	水飽和率-相対浸透率(水, 空気)を設定 水飽和率-毛管圧力 を設定 水残留率:風化帯 0.2, 新鮮岩体 0.4
降水量・蒸発散量	大気層(地表面)に観測値を与える(1995 年以降 週毎, 以前 月毎)
境界条件	頂面:定圧(大気圧)境界 底面:閉境界 側面:海岸線および河川は静水圧定圧境界, 稜線は閉境界
初 期 値	平均降水量を与えた空洞掘削前地下水位にマッチング設定
工 事	タンク・坑道掘削, 水封水供給工事, グラウト工事
操 業	オイルイン:油面レベル, 内圧をタンク毎に設定 水封水位 :水封トンネル毎に設定
タイムステップ	2,898 ステップ/9,862 日 (1980 年~2006 年の 27 年間)
マッチング量	タンク・坑道湧水量, 水封水供給量, 河川流量, 観測孔水位

することで、観測値とのマッチングを図っている。

マッチング量は、湧水量、水封水供給量、河川流量、および観測孔水位であるが、湧水量、水封水供給量および河川流出量とのマッチングを優先している。観測孔水位は、孔内の水収支を表し、水みちと呼ばれる微細な水理構造に支配されており、格子サイズに比べて非常に微小な観測孔の局所的な水理構造を、格子内は均質異方性とする多孔質媒体モデルで精度よくモデル化することが困難なためである。

2) 解析結果

① マッチング状況

1988年1月～2005年12月の間の菊間基地の岩盤タンク湧水量、TK-101の人工水封水供給量、観測孔水位の解析結果の経時変化をそれぞれ図4.2.4-4～図4.2.4-6に示す。赤実線が解析値で、黒実線は観測値である。縦軸は水量・水位で、1目盛りは湧水量が100m³/日、水封水供給量が50m³/日、観測孔水位は10mである。横軸は時間で1目盛りは1年である。

解析湧水量は、全期間にわたって高い再現性が得られている。特に変化の激しい建設期間の変動傾向もよく再現している。

解析水封水供給量は、水封トンネルが水没された1993年春以降の再現性は高いが、

それ以前は観測値との差異が大きい。岩盤タンク掘削中は、水封トンネルから削孔した水封ボーリング孔の口元にパッカーを取り付け、配管により直接水封水を供給しており、観測値にはパッカーや配管からの漏れ、湧水として水封トンネルに短絡した無効な水量が多く含まれていることから差異が生じているものと考えられる。

解析観測孔水位は、前述したように観測値とのマッチング上の優先順位を下げているが、幾つかの孔で水位レベルに多少の差異があるものの、全般的には空洞掘削や水封トンネル等坑道の水没、季節変動等をよく再現している。

また、ここには示して

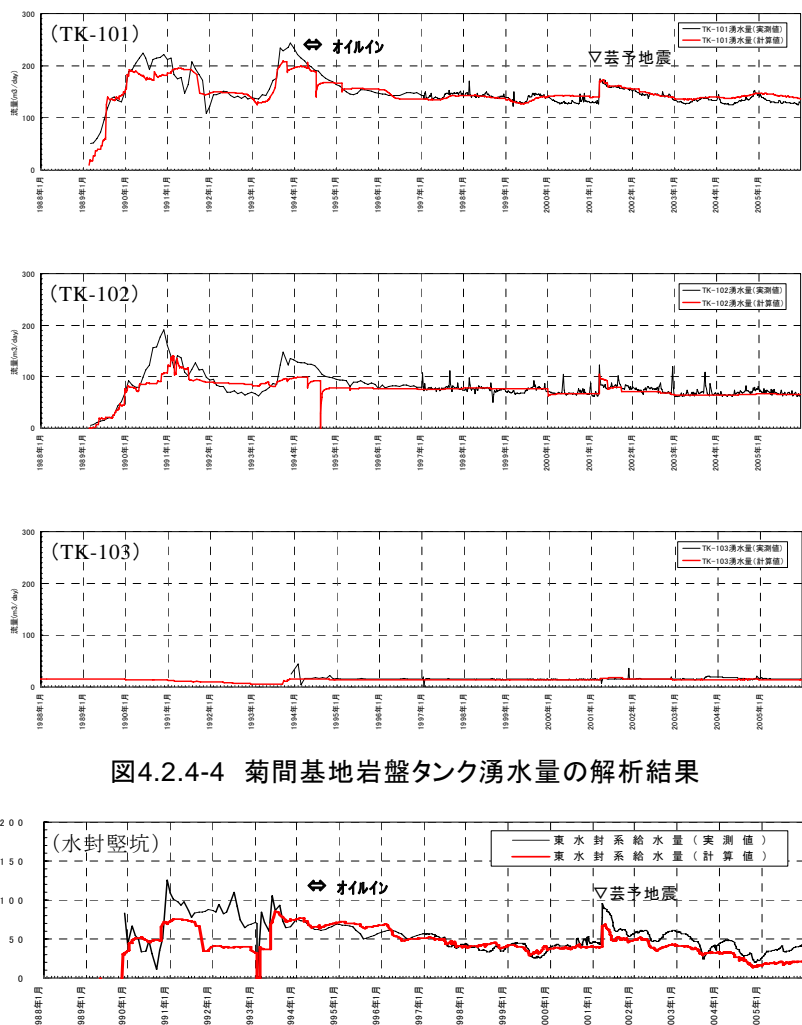


図4.2.4-4 菊間基地岩盤タンク湧水量の解析結果

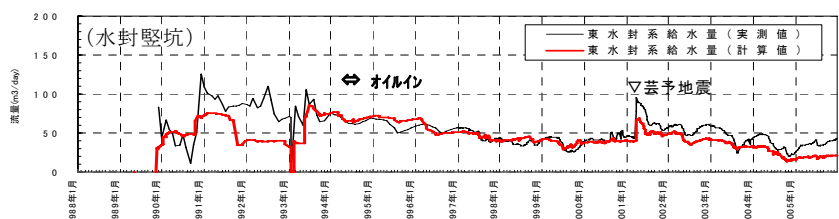


図4.2.4-5 菊間基地水封水供給量の解析結果(TK-101)

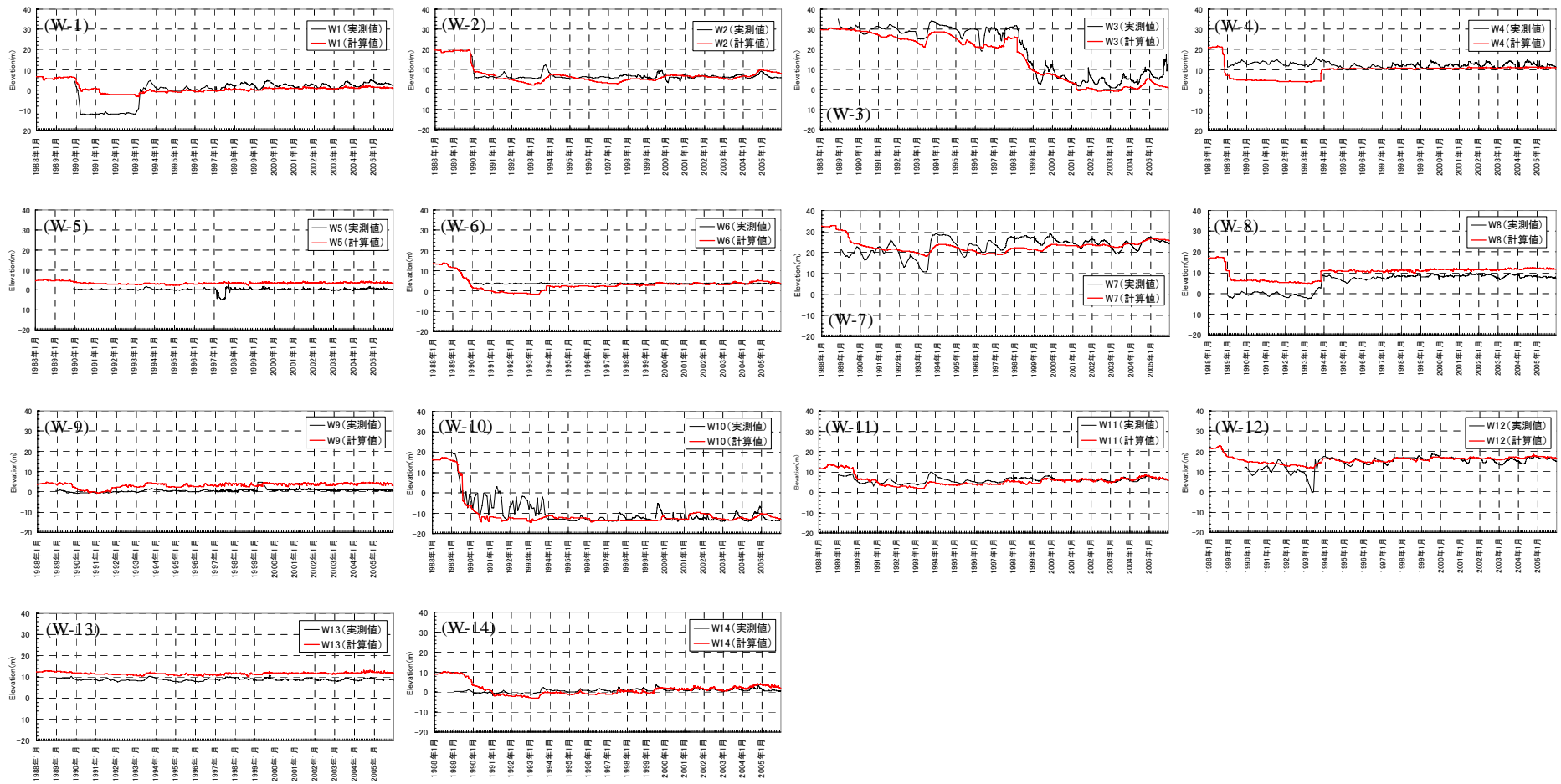


図 4.2.4-6 地下水観測孔水位の解析結果(菊間基地)

いないが、建設期間中の各種坑道の湧水量や調査ボーリング孔水位とのマッチングも同様に図られており、空間的に位置の異なる多くの観測値との時系列的な整合を図ることで、モデルのパラメータ、解析条件が最適化され、三次元の広域水理モデルとして精度の高いモデルとなっている。

② 地下水理状況

菊間基地タンク周辺岩盤の水圧分布、水飽和率分布、流速ベクトル分布をそれぞれ図 4.2.4-7～図-4.2.4-9 に示す。

水圧分布図から、W-10 孔周辺 (TK-101B～C 間の中央付近) と TK-102A～B 間の中央付近に相対的な水位低下がみられるものの、岩盤タンクの周辺の水圧は十分に確保されていると推定できる。

水飽和率分布図では、W-10 孔周辺 (TK-101B～C 間の中央付近) と TK-102B～C 間の北西部で水飽和率 1 未満の部分が岩盤タンク頂部から上方に広がっている結果となっている。ともに岩盤タンク掘削時の湧水が顕著な亀裂帯が反映された結果であり、特に W-10 孔周辺は実際の観測孔水位も相対的に低い状態にあることから、保全管理上の要監視箇所と位置付けている。

流速ベクトル分布図からは、岩盤タンク周辺ではすべての地下水がタンクに向かっ

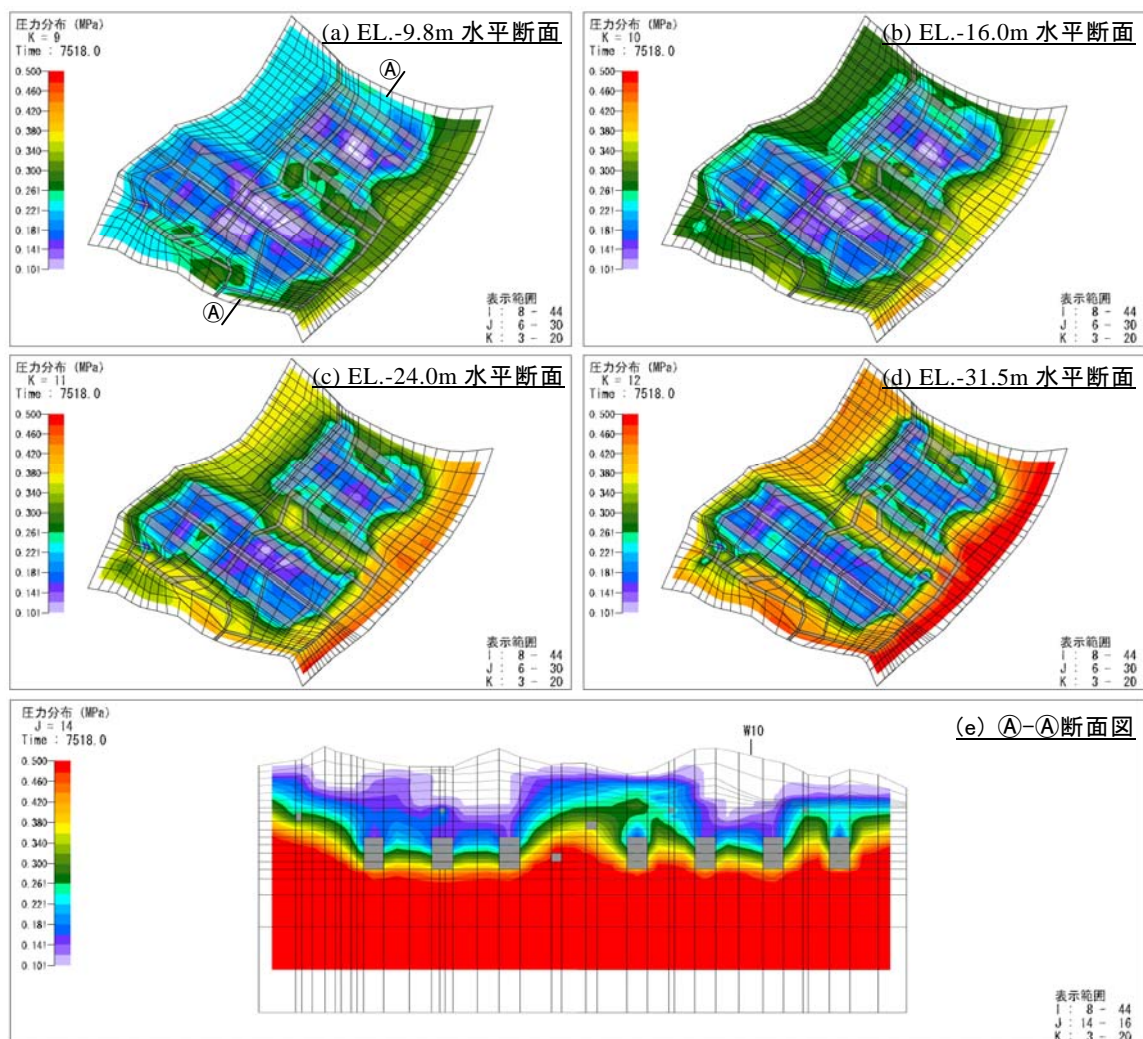


図 4.2.4-7 水圧分布の解析結果 (2005 年末 菊間基地)

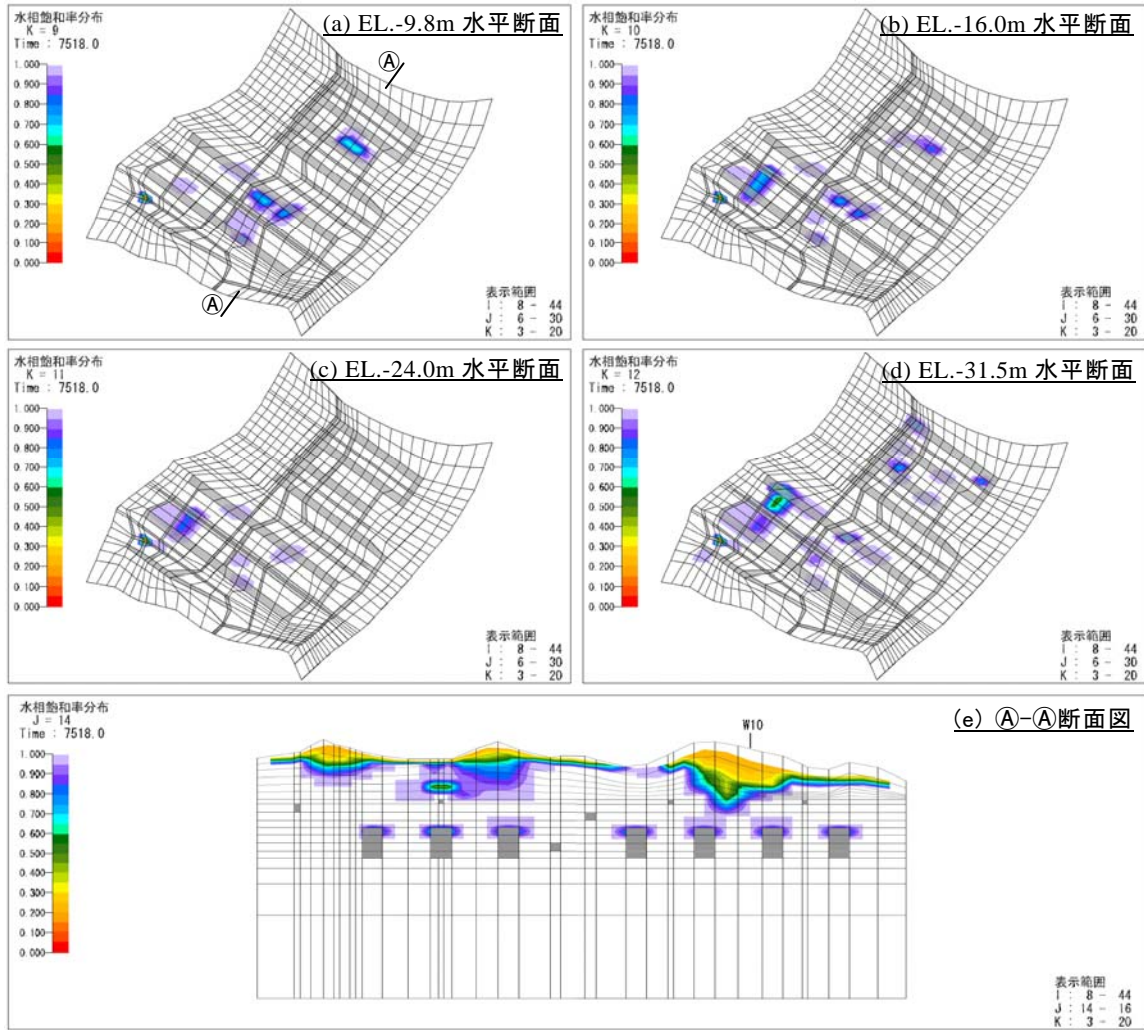


図 4.2.4-8 水飽和率分布の解析結果(2005 年末 菊間基地)

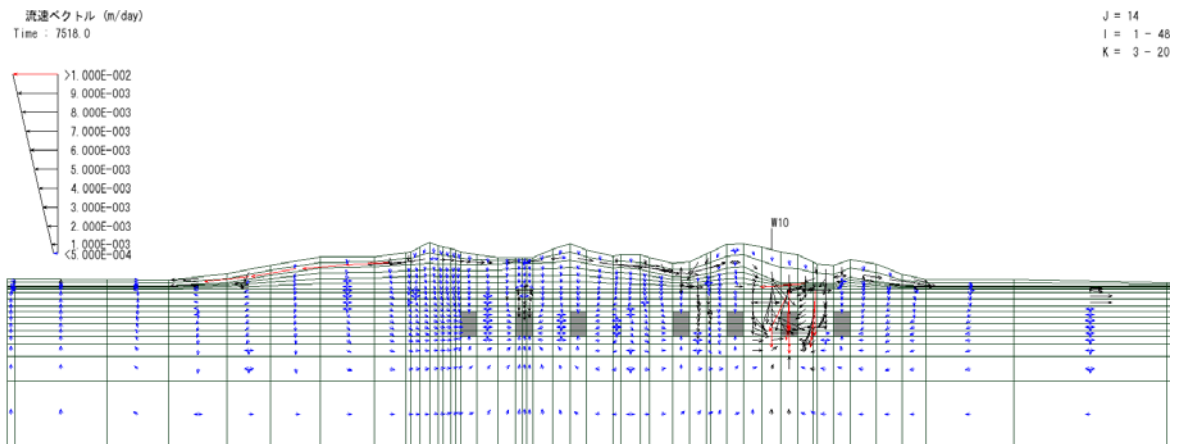


図 4.2.4-9 流速ベクトル分布の解析結果(2005 年末 菊間基地)

ているものと推定できる。また、TK-101C へ向かう流速が相対的に大きく、TK-101C の湧水が卓越していると推定される。

このように、三次元浸透流解析により、直接目で確認することができない岩盤タンク周辺の地下水理の状態を視覚的に表すことができ、現状の水封機能の安定性評価や、

観測値に異常な傾向が見られた場合の原因推定の資料として、ならびに湧水等の異常時の予測や保全工事等の効果予測に有効である。なお、本解析では、透水係数、間隙率は格子面に平均として与え、水圧、水飽和率、流速ベクトルの解析結果は格子内の平均として得られ、格子サイズに比べ微細な亀裂性岩盤における水みちの水理状態は表現されないことに留意する必要がある。言い換えれば、仮に格子内の局部で水理状態が悪化したとしても、本解析のみではこれを捉えることはできないし、また、高透水帯が貫く格子はその影響により格子全体が、平均化によりその程度は薄まるが、相対的に水理状態の劣る部分として表現される。

よって、三次元浸透流解析結果は、全体あるいは比較的広い領域の評価に資する資料として用いるものとし、局所または個別には、前章の間隙水圧計測データや弾性波・比抵抗トモグラフィ測定データ、および前節で述べた実効雨量や観測孔水位相互の相関構造による解析結果とあわせて、岩盤タンクの安全性を総合的に評価する必要がある。

(3) 三次元浸透流解析結果の実効雨量による水封データ評価手法の適用

三次元浸透流解析モデルによる解析値は、均質異方性な多孔質媒体として単純化された地下水理構造条件の下で、通常は降雨の地下浸透量と周辺地下水位、岩盤タンク内圧・液位（一定）および人工水封水位（一定）の関係から導かれ、計器の不具合や周辺での工事、潮汐・気圧変動等の影響は受けない。

そこで、この変動要因が限られた観測孔水位の解析結果を 4.2.2 で述べた実効雨量による水封データ評価手法に適用し、解析値の実効雨量との相関関係、ならびに実効雨量パラメータの解析モデル上の水理地質構造に係わる影響要因について検討した。検討に用いたのは、菊間基地における 2002 年 4 月～2006 年 3 月の 4 年間の実測の観測孔水位と日降水量、および菊間モデルによる解析観測孔水位である。

例として、図 4.2.4-10 に W-2, W-3, W-5, W-7 の解析観測孔水位の経時変化を実測値とあわせて示す。解析水位の変動は実測水位に比べて変動幅は小さいものの、季節変動の傾向は概ね再現しており、水位の絶対値もほぼ一致していることがわかる。W-5 孔は実測水位に比べ短周期の振動成分が多く見られる。2005 年末の W-3 孔実測水位の上昇は、乾期に生じており、原因は特定されていない。

なお、実効雨量は日降水量により算出するが、浸透流解析では 1 週間毎に平均した日降水量を与えている。

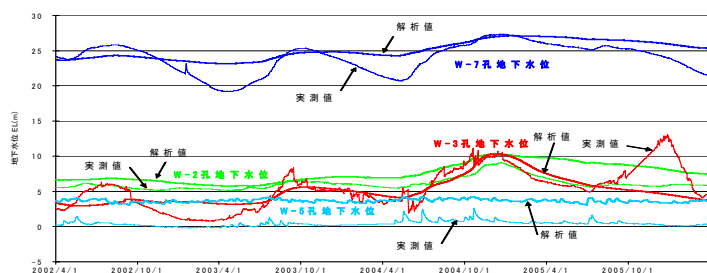


図4.2.4-10 解析観測孔水位と実測値の比較例 (W-2, W-3, W-5, W-7孔)

1) 解析地下水位と最適実効雨量との関係

最適実効雨量の算出方法は 4.2.2 に示した通りである。

解析観測孔水位と最適実効雨量との関係の例を図 4.2.4-11 に示す。解析観測孔水位と最適実効雨量は、図 4.2.2-6 や図 4.2.2-8 に示した実測値と同様に非線形な関係や複

数の相関関係を示す。全孔についてこの関係を分類すると、**図 4.2.4-12** に示すように7つのタイプに大別できる。これらタイプは、観測孔の地形上の配置や孔口標高、風化層厚さ、亀裂帯との交差の有無等による有意な違いは認められない。強いて挙げれば、水面が地表に近い孔は、ある程度のまとまった降雨毎に短期的な水位上昇を示し、この場合、水位変動幅の小さな孔では、その上昇量の全変動幅に占める割合が大きくなり、複雑な相関関係を呈するようになっているといえる。つまり、**図 4.2.4-13** に示すように、水面が地表

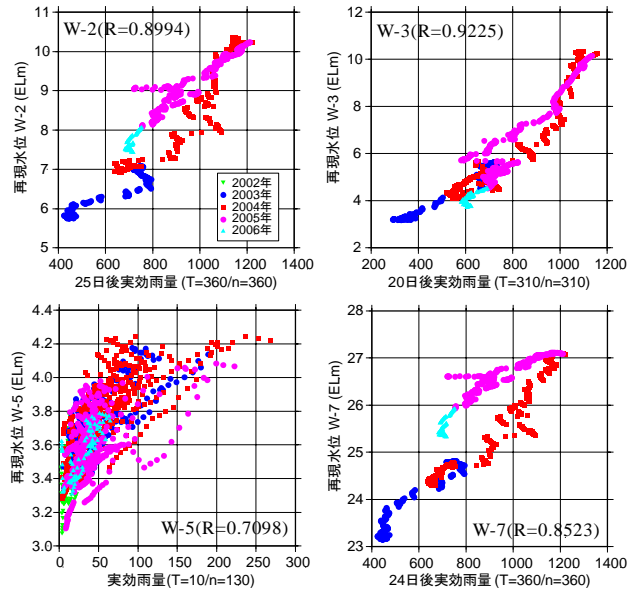


図 4.2.4-11 解析観測孔水位と最適実効雨量との関係の例 (W-2, W-3, W-5, W-7 孔)

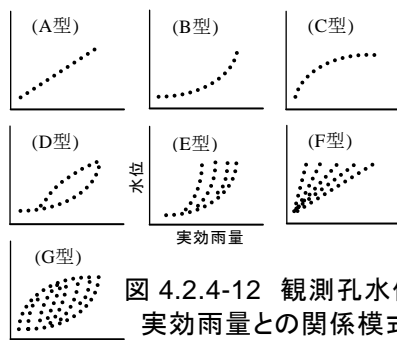


図 4.2.4-12 観測孔水位と実効雨量との関係模式図

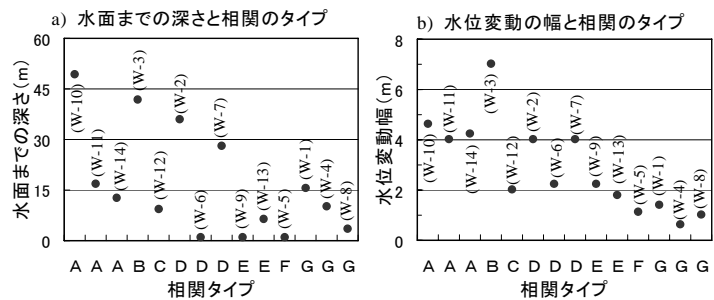


図 4.2.4-13 水面深さ、水位変動幅と相関タイプの関係

に近い孔、水位の変動幅の小さい孔は複雑な関係 (E~F) を示し、孔口から水面までの深い孔、水位変動幅の大きい孔は単純な関係 (A~D 型) を示す傾向がある。

実測観測孔水位と最適実効雨量の関係もほぼ同様な関係を示す。E~F 型の複雑な関係を示す孔は W-5, W-6, W-8, W-9, W-14 の 5 孔である。なお、水位観測孔は**図 4.2.4-14** に示すように、地表水や風化層等の浅層水が直接孔内に流入しないように設けられている。実測水位の場合は、水位計 (間隙水圧計) の精度がフルスケール (1.6Mpa) の $\pm 0.5\%$ であり、水位変動幅の小さな孔は水位計の精度の影響も無視できないものとする。

2) 解析観測孔水位に基づく実効雨量パラメータの分析

実効雨量パラメータの水理地質構造に係わる影響要因について検討するため、**①**現状モデル、**②**亀裂帯なしモデル、**③**亀裂帯なし+風化層厚半減モデルにより浸透流解析を実施した。

① 地質構造条件の変更に伴う解析結果

現状モデル**①**における解析観測孔水位と**②**モデル、**③**モデルの解析観測孔水位の相違点等の概要を一覧表にまとめ**表 4.2.4-2** に示す。

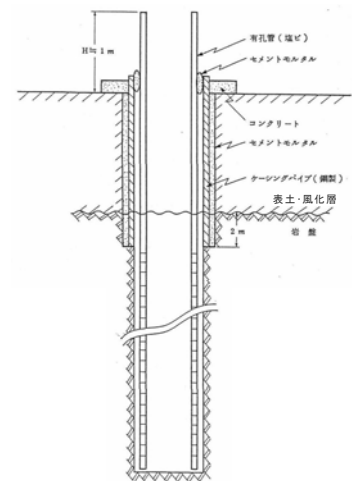


図 4.2.4-14 地下水位等観測孔の構造概念図

⑥モデルでは、岩盤タンクにつながる亀裂帯の影響により水位の低かった W-3, W-10 孔水位が、亀裂帯を無くすことで大きく上昇している。また、亀裂帯に向かって低下していた地下水の水面勾配が、これが無くなることで変化し、観測孔への流入量が変わるため、多くの観測孔で若干の水位変動を生じている。特に水位が低下した孔では、降雨に即応した短周期の変動が減少する傾向が認められる。

③モデルでは、W-3 孔等の一部を除き、多くの孔で水位が低下している。特に尾根部または尾根の斜面に位置する W-2, W-7, W-10 孔（図 4.2.1-8 参照）の水位は、①および⑥モデルでは季節的な上下動をしていたが、③モデルでは緩やかで一様な低下が続く結果となっている。貯留層として働く風化層を半減することで地下水の供給が減少したこと、風化層の半減により風化層の厚い尾根部から風化層の薄い谷部に向けた新鮮岩盤上面の傾斜が急となり、新鮮岩盤上面を流れる地下水の流向・流速が大きく変化したことが反映された結果と考える。

図 4.2.4-15 は、実測水位、①および⑥モデルの解析観測孔水位の最適実効雨量に対する最大相関係数の分布を示したものである。また、図 4.2.4-16 に実測水位と①モデル

表 4.2.4-2 地質構造条件変更に伴う解析水位の変化

孔名	⑥ 亀裂帯なし		③ 亀裂帯なし+風化層厚半減	
	水位	変動傾向	水位	変動傾向
W-1	ほぼ変わらず	ほぼ変わらず	約 2.4m 低下	振幅量減
W-2	約 6m 低下	ほぼ変わらず	>12m 低下	一様な低下
W-3	約 22m 上昇	振幅量減	約 33m 上昇	振幅量減
W-4	約 1.4m 上昇	ほぼ変わらず	約 0.4m 低下	ほぼ変わらず
W-5	約 1.4m 低下	短周期波減	約 1.2m 低下	短周期波減
W-6	約 1.2m 低下	短周期波減	若干の低下	ほぼ変わらず
W-7	約 1.9m 上昇	ほぼ変わらず	>18m 低下	一様な低下
W-8	約 4.5m 低下	短周期波微減	約 6m 低下	短周期波微減
W-9	約 1.8m 低下	短周期波微減	約 3.8m 低下	短周期波減
W-10	約 29m 上昇	短周期波出現	<7.5m 上昇	一様な低下
W-11	ほぼ変わらず	ほぼ変わらず	ほぼ変わらず	振幅量減
W-12	約 0.4m 上昇	ほぼ変わらず	約 0.4m 上昇	短周期波増
W-13	約 0.5m 低下	ほぼ変わらず	約 1m 低下	振幅量増
W-14	約 1.7m 上昇	振幅量微減	ほぼ変わらず	振幅量減

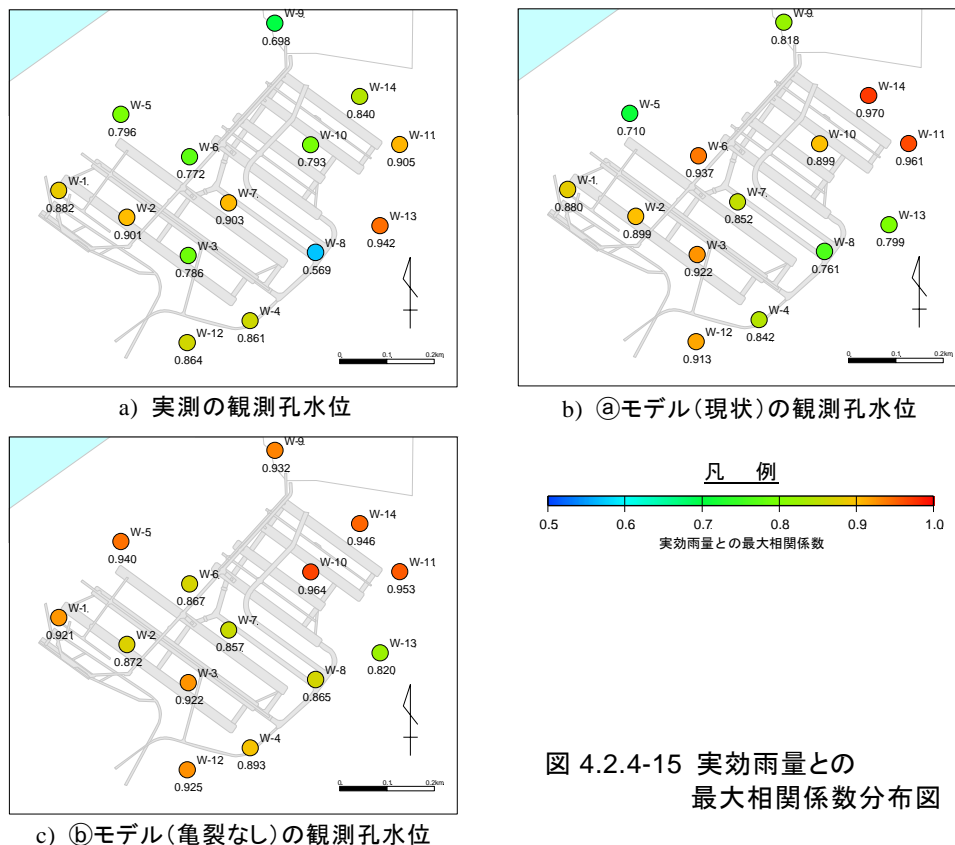


図 4.2.4-15 実効雨量との最大相関係数分布図

ル、㉑モデルと㉒モデルの最大相関係数を孔毎に比較したものを示す。

㉑モデルの解析観測孔水位は、実測値に比べて変動要因が限られているため、全体的に相関係数は同等か高くなっている。また、㉒モデルの解析観測孔水位は、亀裂帯をなくすことで岩盤タンクの影響が小さくなり、㉑モデルよりさらに実効雨量との相関性が向上するという結果になっている。

相関性が低下する孔は、何れの場合も、水位変動の振幅が小さくなるか、降雨に即応した短周期の波形の影響が相対的に大きくなる場合である。

② 実効雨量パラメータの影響要因の検討

実効雨量パラメータは、4.2.2の式(1)、式(2)に示したように、半減期 T 、累積日数 n 、実効雨量と観測孔水位との位相ラグ L である。これらのパラメータは、雨水の地中浸透における透水性、貯留性、涵養（影響）範囲といった水理地質条件の違いを表すものと考えられる。4.2.2の実測水位を用いた検討では、各パラメータの分布と岩盤タンクのレイアウト、風化層や亀裂帯分布等の地質構造から、主として半減期は貯留性、累積日数は涵養範囲、遅延日数は透水性の違いを表すと推定した。

a. 半減期

図 4.2.4-17 は、実測値と各モデルにおける最適実効雨量の孔毎の半減期を比較したものである。実測値と㉑の現状モデルの比較では、W-6, W-10, W-14 孔で差異が大きいものの、全体的にはほぼ整合した値となっている。㉒の亀裂帯をなくしたモデルでは、亀裂帯の影響を受けていた W-3, W-10 孔と W-14 孔で半減期が短くなり、W-5, W-6 孔では半減期が長くなっている。㉓の風化層厚を半減したモデルでは、W-3 孔で半減期が長くなり、W-5, W-6 孔で半減期が大幅に短くなる結果となった。

図 4.2.4-18 は実測値、㉑および㉓モデルの風化層厚と半減期の関係をそれぞれ散布図に示したものである。図 a) の実測値における半減期と風化層厚、および b) の現状モデルにおける半減期と風化層厚の間には正の相関が認められる。また、図 c) の風化層厚半減モデルにおける半減期と風化層厚の間にも、W-3, W-6 を除くと正の相関性が認められる。W-3 孔は、地質構造条件の変更に伴い現状モデルの水位から平均約 33m と最も水位が上昇し、孔口 (EL.44.8m) 近くの EL.39m~40m で水位変動するようになった孔である。W-6 孔は岩盤

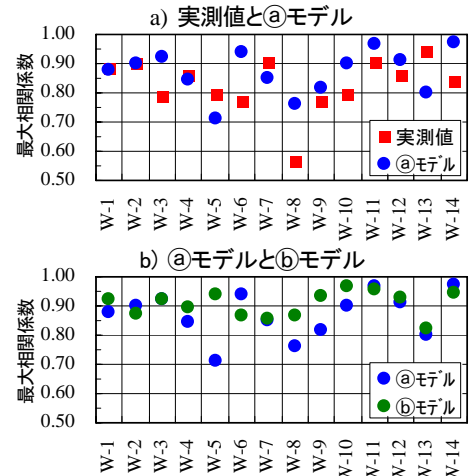


図 4.2.4-16 各水位の最適実効雨量における最大相関係数の比較

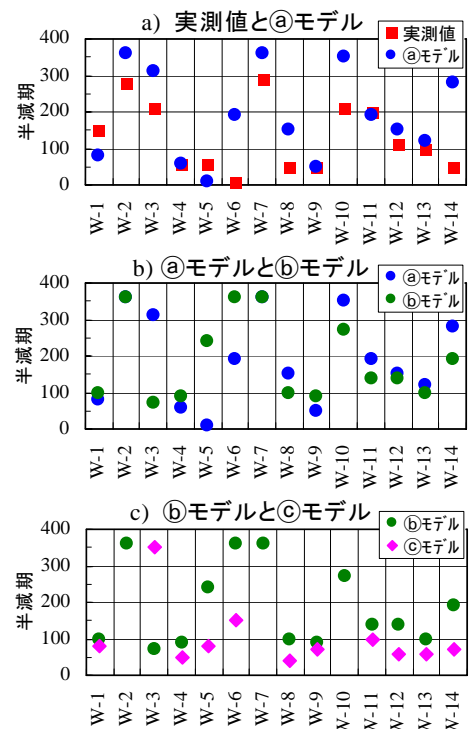


図 4.2.4-17 各水位の最適実効雨量における半減期の比較

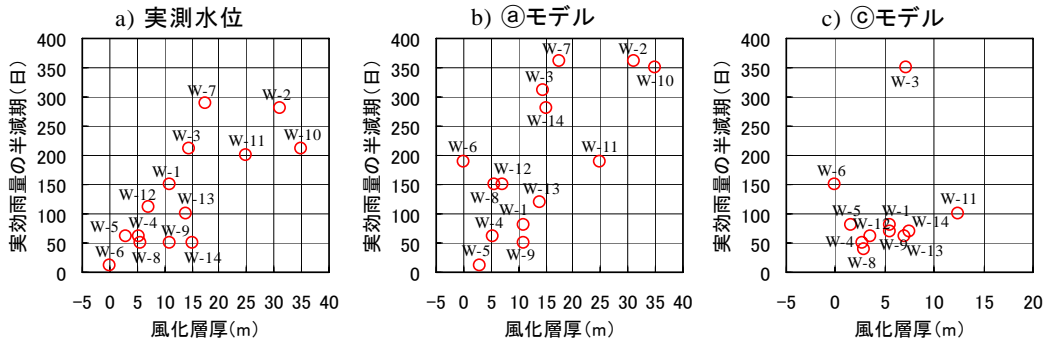


図 4.2.4-18 各水位の最適実効雨量における半減期と風化層厚との関係

の露出する切土のり面尻に位置し、風化層厚がゼロの孔である。なお、㊹モデルにおいて一様な減少傾向を続け、実効雨量との相関が認められなくなった W-2, W-7, W-10 孔(表 4.2.4-2)は図 c)から除いている。

このように、半減期は亀裂帯の有無および風化層厚の変更に伴い変化することから、亀裂帯の有無および風化層厚は半減期の影響要因の一つであることが分かった。風化層厚と半減期の間には相関が認められる。風化層は、当該水理モデルにおいて間隙率が大きく、貯留層の働きをしていることから、半減期は貯留性の違いを表しているといえる。また、風化層厚を半減させても水位が上昇した W-3 孔や、風化層厚が薄い W-5, W-6 孔も半減期が変化していることから、断定は出来ないが、半減期は涵養範囲の影響も受けるものと推測できる。

b. 累積日数

図 4.2.4-19 に実測水位、および㊸の現状モデルの解析観測孔水位に対する最適実効雨量の累積日数の分布を、図 4.2.4-20 に実測値と各モデルにおける最適実効雨量の孔毎の累積日数を比較したものを示す。

㊸の現状モデルにおける解析水位に対する累積日数は、実測値のものより全体的に大きくなっている。㊸モデルにおいて累積日数が相対的に小さいのは海側(南西)の W-1, W-5, W-9 孔と山側(南東)の W-4 孔である。図 4.2.4-20 b)の㊸モデルと亀裂を無くした㊹モデルとの比較では、W-3 孔で累積日数が短くなり、W-5 孔は倍以上長くなっている。同図 c)の㊹モデルと風化層厚を半減した㊹モデルとの比較では、W-3 孔で累積日数が長くなった他は、W-4~W-6, W-8, W-12~W-14 孔と多くの孔で累積日数が短くなる結果となった。

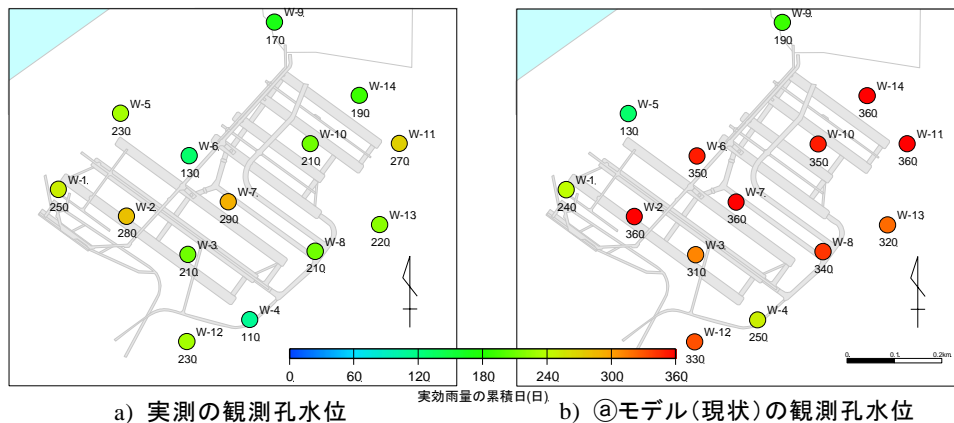


図 4.2.4-19 実効雨量の累積日数分布図

図 4.2.4-21 は実測値、①モデルおよび②モデルの風化層厚と累積日数の関係をそれぞれ散布図に示したものである。図 a) の実測値における累積日数と風化層厚の間には極弱い正の相関が認められるが、図 b) の現状モデルにおける累積日数と風化層厚、および図 c) の風化層厚半減モデルにおける累積日数と風化層厚の間には、風化層厚が薄くても累積日数の大きなものも多く、相関が認められるとは言い難い。

累積日数は実効雨量の絶対量を左右するので、観測孔への地下水の供給（涵養）範囲、および観測孔への地下水の供給能力を表す貯留性に関係すると考えられる。

地質構造条件の変更で累積日数が比較的顕著に変化したものの内、W-3, W-4, W-8 孔は水位の上昇下降と累積日数の増減とが対応している。これは地質構造条件の変更によって地下水面の分布形状が変化し、観測孔の涵養範囲が変わったことのためと考えられる。しかしながら、累積日数の変化と水位の変化(表 4.2.4-2 参照)の関係はすべての孔では整合しておらず、今回の検討のみでは断定することは出来ない。

また、風化層厚を半減したことで多くの孔の累積日数が短くなっていることから、風化層厚（貯留性）は累積日数の影響要因の一つということが出来る。ただし、風化層厚との相関は明瞭でなく、影響の程度は今回の検討では不明である。

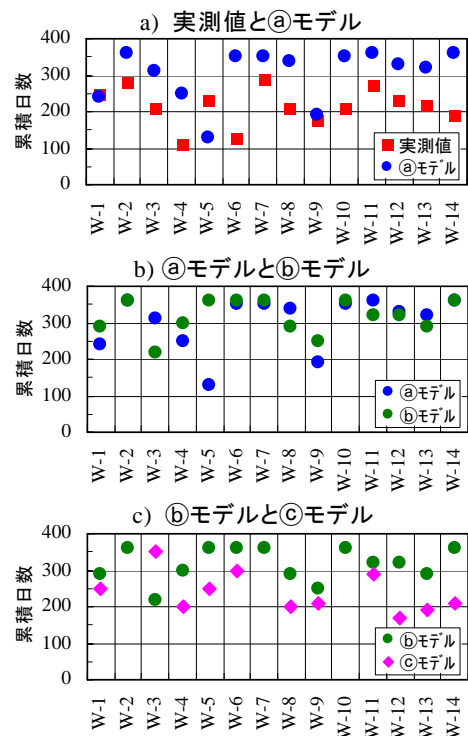


図 4.2.4-20 各水位の最適実効雨量における累積日数の比較

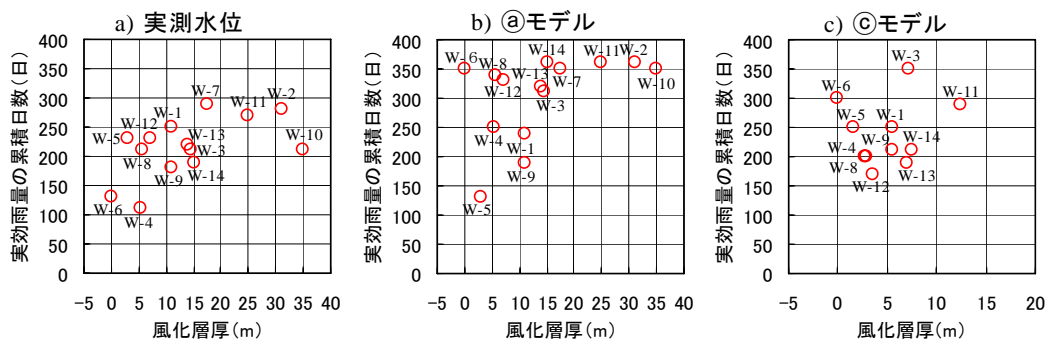
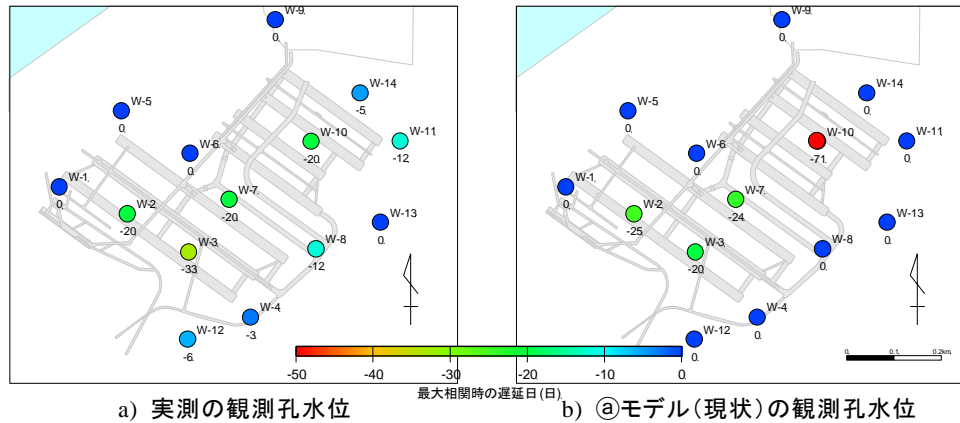


図 4.2.4-21 各水位の最適実効雨量における累積日数と風化層厚との関係

c. 遅延日数

図 4.2.4-22 に実測水位、および①の現状モデルの解析観測孔水位に対する最適実効雨量の遅延日数の分布を、図 4.2.4-23 に実測値と各モデルにおける最適実効雨量の孔毎の遅延日数を比較したものを示す。

①の現状モデルにおける解析水位に対する遅延日数は、岩盤タンクの縁辺に配置された観測孔で短く、タンク上部では長く、実測値の遅延日数と同じ傾向を示す。また、実測値に比べ①モデルの遅延日数は、W-10 孔（差異が大きい）を除き、全体的に短く、



a) 実測の観測孔水位 b) ①モデル(現状)の観測孔水位

図 4.2.4-22 実効雨量の遅延日数分布図

多くの孔が遅延日数ゼロとなっている。図 4.2.4-23 b)の①モデルと亀裂を無くした②モデルとの比較では、W-2, W-6 孔で遅延日数が長くなり、亀裂帯の影響を受けていた W-3, W-10 孔は遅延日数が短くゼロとなっている。同図 c)の②モデルと風化層厚を半減した③モデルとの比較では、W-3 孔で遅延日数が長くなり、W-6 孔では短くゼロとなった。これら解析水位における遅延日数がゼロの孔は、いずれも降雨に即応した短周期の変動をする孔である。

図 4.2.4-24 は実測値および①モデルの孔内水面(検討期間における変動幅の中央値)の孔口からの深さと遅延日数の関係をそれぞれ散布図に示したものである。図 a)の実測値における遅延日数と水面深さ、および b)の現状モデルにおける遅延日数とともに、水面深さとの間に比較的強い負の相関が認められる。

遅延日数は、観測孔水位変動の降雨に対する応答時間の遅れを意味する。水理解析モデルにおいては風化層の透水係数は一様であることから、遅延日数は、降った雨が地中に浸透し地下水面に到達するまでの時間を表すものと言い換えることができる。

よって、浸透流解析では、岩盤タンク上部の地下水水位は周辺に比べて低くなっていること、遅延日数がゼロとなる観測孔の水位変動には、いずれも降雨に

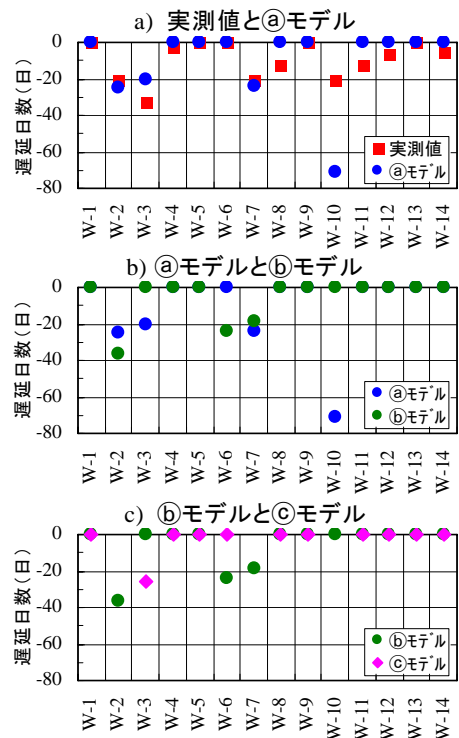


図 4.2.4-23 各水位の最適実効雨量における遅延日数の比

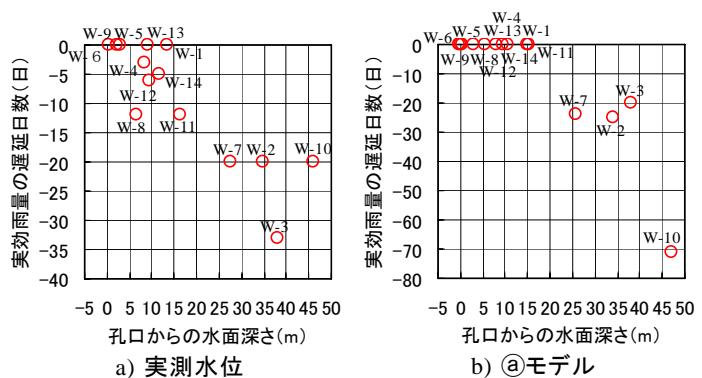


図 4.2.4-21 各水位の最適実効雨量における遅延日数と観測孔水面の深さとの関係

即応した短周期の波形が見られること、ならびに遅延日数は、地表からの深さと比較的強い相関があることから、解析観測孔水位変動に対する最適実効雨量の遅延日数は、各観測孔の涵養範囲の地下水面の地表からの深さを表しているものと推定される。つまり、遅延日数の小さい孔は、観測孔の涵養範囲の地下水面の最頂部が浅いことを表し、逆に遅延日数の長い孔は、涵養範囲の地下水面の最頂部が相対的に深いことを表しているということである。これは、地質構造条件の変更で明瞭な遅延日数の変化が生じた W-2, W-3, W-6, W-10 の水位挙動とも整合している。

(4) まとめ

本節では、まず水封機能データに基づく現行の岩盤タンク安全性評価手法を補足するために構築された三次元浸透流解析手法（解析コード：GETFLOWS）の概要と有効性を示すとともに、適用に際しての留意点、適用範囲について述べた。

次に、前節 4.2.2 で述べた実効雨量による水封データ評価手法を当該浸透流解析における観測孔水位に適用して、数値解析結果の実効雨量との相関関係、ならびに実効雨量パラメータの解析モデル上の影響要因について検討した。

三次元浸透流解析は、直接目で確認することができない岩盤タンク周辺の水理状態を定量的かつ視覚的に表すことができ、現状の水封機能の安定性評価、観測値の異常に対する原因推定の資料、ならびに漏水等の異常予測及び保全工事等の対策予測に有効である。ただし、解析モデルの格子サイズに比べて微細な亀裂性岩盤における水みちの水理状態は表現が困難であることに留意する必要がある。三次元浸透流解析結果は全体もしくは比較的広域の評価に用い、局所および個別には、間隙水圧等の計測データ、実効雨量や観測孔水位相互による分析結果とあわせて、総合的に評価する必要がある。

また、観測孔水位の解析結果を実効雨量による評価手法により分析した結果、実効雨量との関係において、高い相関性があること、および実測値と同様に非線形な関係や複数の相関関係を示すことが分かった。水理解析モデルの地質構造条件を変更して実効雨量パラメータの影響要因について考察した結果からは、亀裂帯の有無と貯留層の働きをする風化層厚が半減期の影響要因であることを確認した。累積日数は、観測孔の地下水供給（涵養）範囲、および風化層厚が影響要因と推定され、遅延日数は、各観測孔の涵養範囲における地下水面の最頂部の地表からの深さを表しているものと推定された。

4.3 まとめ

本章では、まず 4.1 節で保全点検システムを構成する点検データの評価診断技術について、岩盤タンクの安全性評価に至る評価診断の流れと、その各段階において把握すべき事項、そのために必要な解析・評価手法を整理し、本研究で対象とした解析・評価手法を示した。4.2 節では、まず現行の評価手法の考え方と対象データの変動特性を示すとともに、本手法に関する既往の研究を述べ、現行手法の長短を明らかにした。次に操業管理担当者の日常管理に供することを目的に考案した実効雨量、観測孔水位相互の相関構造のそれぞれに基づく逐次更新型線形回帰モデルである 2 つの解析・評価手法について、実際の観測データを用いて検討した結果を示し、その有効性と課題を明らかにした。最後に、現行の評価手法を補足するために構築された 3 次元浸透流解析手法について概説するとともに、その有効性と適用上の留意点を示した。また、解析結果を実効雨量に基づく解析・評価手法により分析し、浸透流解析における地下水位挙動の実効雨量との相関関係、および実効雨量パラメータの水理地質的な影響要因について考察した。それぞれの解析・評価手法の検討結果、今後の課題等は以下の通りである。

- **現行の評価手法**：植出の提案する評価指標を用いて最近の水封機能データを分析し、当該指標の有効性と適用上の留意点を示した。本評価手法は、岩盤タンク全体の安全性、およびタンクユニット毎の領域の安全性を評価する手法と位置付けられる。
- **実効雨量による水封データ評価手法**：実効雨量のパラメータは水封機能データの変動に影響を及ぼす水理地質条件をある程度反映したものであることが分かった。本手法は、水理条件等の変化に伴う過去の変動傾向からの逸脱の検出といった日常管理における安全性評価の第1ステップとして有効であることを確認した。今後の課題として、他の地下石油備蓄基地におけるデータへの適用性、潮汐や浅層浸透水の影響による短周期応答成分の除去フィルターの検討など当該評価手法の適用範囲の拡大・改良を図っていくことが挙げられる。
- **観測孔水位相互の相関構造による地下水位データ評価手法**：実効雨量による評価手法と同様、水理条件等の変化に伴う観測孔水位データの過去の変動傾向からの逸脱の検出といった日常管理における健全性評価手法として有効であることを確認した。加えて、本手法は再現精度が高いため、短期間であれば計器の点検整備時等の欠測値の補間も可能である。特に、実効雨量による水封データ評価手法と併せた評価を行えば、考え方の異なる手法によるクロスチェックとなり、その信頼性が増すものといえる。
- **三次元浸透流解析による評価手法**：本手法は、直接目で確認することができない岩盤タンク周辺の水理状態を定量的かつ視覚的に表すことができる利点を有す。ただし、解析モデルの格子サイズに比べて微細な亀裂性岩盤における水みちの水理状態の再現は困難であり、岩盤タンク全体ならびに比較的広い領域の安全性評価に資する手法と位置付けられる。また、観測孔水位の解析結果を実効雨

量による評価手法により分析した結果、実効雨量との関係において、高い相関性があること、および実測値と同様に非線形な関係や複数の相関関係を示すことが分かった。水理解析モデルにおける実効雨量パラメータの影響要因については、亀裂帯の有無と貯留層の働きをする風化層厚が半減期の影響要因であることを確認した。累積日数は、観測孔の地下水供給（涵養）範囲、および風化層厚が影響要因と推定され、遅延日数は、各観測孔の涵養範囲における地下水面の最頂部の地表からの深さを表しているものと推定された。

参考文献

- 1) 自治省消防庁:岩盤タンクに係る屋外タンク貯蔵所の保安検査等に関する調査検討報告書, 危険物保安技術協会, 1991
- 2) 日本地下石油備蓄(株): 串木野事業所岩盤内の水みち把握手法の調査研究業務 (平成 13 年度), 三井金属資源開発(株), 2002.
- 3) 植出和雄:原油岩盤タンクの水封機能評価技術に関する研究, 京都大学学位論文, 2003.
- 4) 城代邦宏, 植出和雄, 本多眞, 長谷川誠, 小島圭二, 小川輝繁:地下石油岩盤タンクにおける水封機能の健全性評価手法に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 63 No.2, pp.624-634, 2007.
- 5) 鈴木雅一, 小橋澄治:がけ崩れ発生と降雨の関係について, 新砂防, Vol.121, pp.16-26, 1981.
- 6) 加藤祐子, 恩田裕一, 水山高久, 小杉賢一朗, 吉川愛, 辻村真貴, 秦耕二, 岡本正男: 揖斐川上流の地質の異なる流域における流出の遅れ時間の違い, 砂防学会誌, Vol.53, No.4, pp.38-43, 2000.
- 7) 山石毅, 小林仁, 谷藤吉郎, 岡本明夫, 登坂博行, 小島圭二:地下石油備蓄基地建設に伴う水文・水理挙動の数値シミュレーション, 地下水学会誌, Vol.40, No.2, pp.167-183, 1998.

第5章 保全点検システムの構築

本章では、現行の保全点検システムと前章までに述べたタンク周辺岩盤の物性変化の検知が可能な点検手法、および現行点検データのタンク周辺岩盤の物性変化に伴う変動傾向の変化を検出する解析手法を統合したより精度と信頼性の高い合理的な保全点検システムについて検討する。先ず地下石油備蓄基地の立地条件、水封式岩盤タンクの特性を考慮した保全点検システムの基本方針を示し、次にこれを踏まえて構築したシステムと串木野基地を例に実際の基地への適用の仕方を示す¹⁾。

5.1 基本方針

地下石油備蓄基地における合理的な保全点検システムの構築に当たっての基本方針は、次のように考える。

- ◇ 岩盤タンクは地下深部に設けられ、その保全対象面積は久慈、串木野基地で約47～48ha、菊間基地で約41haと非常に広大である。したがって、初めから全域を詳細に点検できる仕組みとすることは合理的でない。点検結果に応じて段階的に点検・調査の密度、精度を上げていく仕組みとする。
- ◇ 岩盤タンクを構成する各部位のうち、地上施設と連絡し、かつ貯槽機能を維持する上で重要機器類が設置された堅坑部でのゆるみ域の拡大や小規模な崩落による機器損傷等は、貯槽機能に大きな影響を及ぼすものとなる。また、断層破碎帯等の弱層部では、堅硬な岩盤中に設けられた岩盤タンク一般部に比べてゆるみ域の拡大等が生じる確率が高く、かつそれが岩盤タンクの安全性低下に発展する可能性も大きいと考えられる。したがって、このような保安全管理上の重要な箇所および要注意箇所に対しては、岩盤タンク一般部より詳細な点検を行うものとする。
- ◇ 湧水量、給水量、観測孔水位の変動データは多くの情報を内包している。よって、これら地下水関連データを点検の核とし、他の点検手法はこれらを補足・補完するものとして、これら変動の要因を読み解くため、および定量的評価を行うための手段と位置付ける。
- ◇ 天然システムと人工システムの組み合わせであり、対象を確定的に記述することは本質的に困難である。このため、一つの点検手法、分析・解析手法の結果を偏重せず、複数の点検結果、分析・解析結果に基づき総合的に評価することとする。
- ◇ 保全点検システムの運用とデータ蓄積にあわせて点検手法および解析・評価手法の改善・改良、さらには精度、適用性、信頼性に優れた新技術の導入など、保全点検システムを随時改良・更新することで、点検精度、評価・診断結果の信頼性のさらなる向上を図って行くものとする。

5.2 保全点検システム

5.2.1 点検の流れと適用手法

上記の基本的考え方に基づき、岩盤タンクの保全点検システムは、第1段階から第3段階へと詳細な調査・検討が必要な部分を絞り込んでいくとともに、点検・調査の密度と精度を高めていくシステムとする。すなわち表5.2-1に示すように、まず第1段

階として岩盤タンク全体を常時グローバルに監視して、タンク周辺岩盤の劣化等の異常の発生やその進展程度、おおよその位置を把握し、岩盤タンクの状態を診断する（全体把握）。次に第2段階として第1段階で把握された劣化等異常箇所に対して把握事象に適した点検手法によりその箇所の物理的な状態量や範囲を調査し、岩盤タンクの機能低下の定量的な程度を検討し安全性を評価する（個別把握）。その結果必要な場合は、第3段階として岩盤タンクの内外から劣化等異常箇所に対してより精度の高い調査または直接的な観察・計測を行って、岩盤タンクの機能低下の定量的な程度をより詳細に検討し安全性を評価するとともに、補修・補強計画立案に必要な情報を取得する（直接把握）という流れである。また、保全管理上の重要箇所である堅坑周辺部や安全上の弱点である弱層部等については、局所的な要検討部分の把握として第1段階の全体把握と平行して点検するものとする。

表 5.2-1 点検対象と点検の流れ

点検対象 点検の流れ	岩盤タンク設置域 全体の把握	局所(要検討部分)の把握
第1段階 (全体把握)	全体把握による要 検討部分の掌握	堅坑周辺部、弱層部等の留意 箇所の点検(*第2段階)
第2段階 (個別把握)		第1段階で掌握された要検討 部分に対する個別点検
第3段階 (直接把握)		既存調査手法等を用いた種々 の角度からの直接点検

次に第3章、第4章で述べたサイズミックモニタリング等の個々の点検手法、ならびに解析・評価手法をどの段階で、どのように適用していくかについて、図 3.3-1 に示した各点検手法の点検対象および点検場所を踏まえて検討した結果を図 5.2-1 に示す。

すなわち、サイズミックモニタリングはセンサの配置間隔を変えることによって第1段階から第3段階に、高精度傾斜計測は第1段階、第2段階に適用する手法として位置付ける。また、弾性波・比抵抗トモグラフィ計測は岩盤構造および水封機能の双方を対象として第2段階に、光ファイバ歪み計測および間隙水圧計測は第2段階、第3段階の要検討部分に適用する点検手法として位置付ける。これら以外の既存調査手法に関しても、同図に示すように各段階で状況に応じて順次適用していくものとする。モニターTVやソナー計測は、堅坑内や岩盤タンク内の堅坑プラグ下面周辺あるいは気相部の全域、または水床水位を上昇させた水中からタンク内を直接調査・観察するものであるが、モニターTV等の岩盤タンク内への導入に当っては、我が国では実績が無く、点検項目・範囲や安全性等について十分な検討を必要とする。なお、弾性波・比抵抗トモグラフィ計測および間隙水圧計測は水封機能維持対策工等の効果確認のためのモニタリング用としても利用するものとなる。

一方、第4章で述べた実効雨量による水封データ評価手法、観測孔水位相互の相関構造による地下水データ評価手法および三次元浸透流解析手法は、第1段階における解析・評価手法と位置付けられる。湧水量等の現行の水封機能データに基づきタンク周辺岩盤の水理条件等の変化を定量的に評価することが可能となり、客観性が向上する。

図 5.2-2(1)、(2)は、岩盤構造および水封機能それぞれについて、点検対象、点検の流れの中にこれらの点検手法ならびに解析・評価手法をあてはめ、どの段階でどの点検技術を適用し、評価・診断していくかを具体的に示したものである。岩盤タンクに対する実際の点検においては、これらの図に示した流れに従って、順次点検手法を適用し、評価して行くことになるが、点検の各段階においては、適用する点検手法個々の分析・

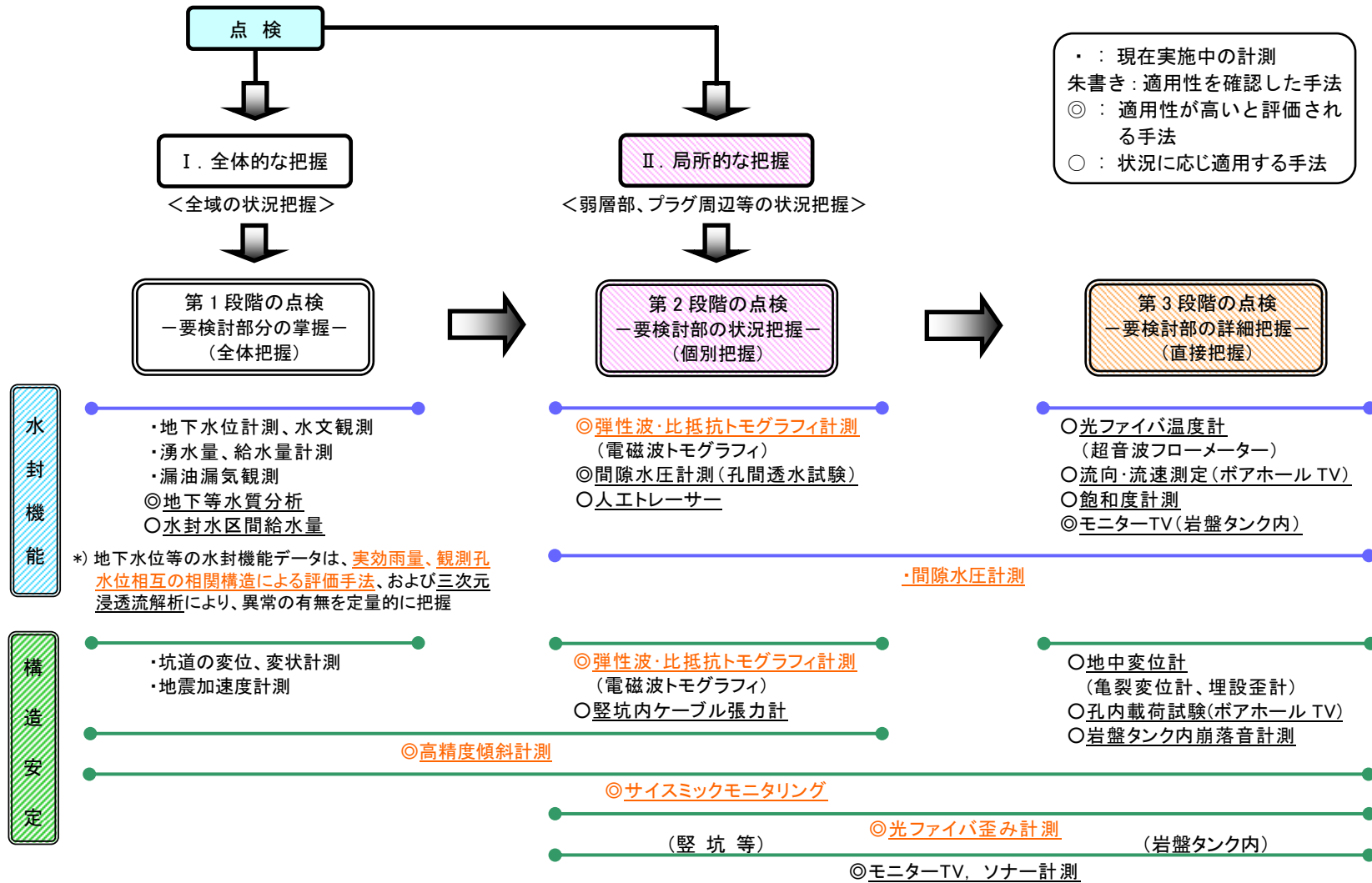


図 5.2-1 新たな点検技術の導入による点検の流れと適用する点検手法
 (本論文で確立した計測技術(朱書き)の位置付け)

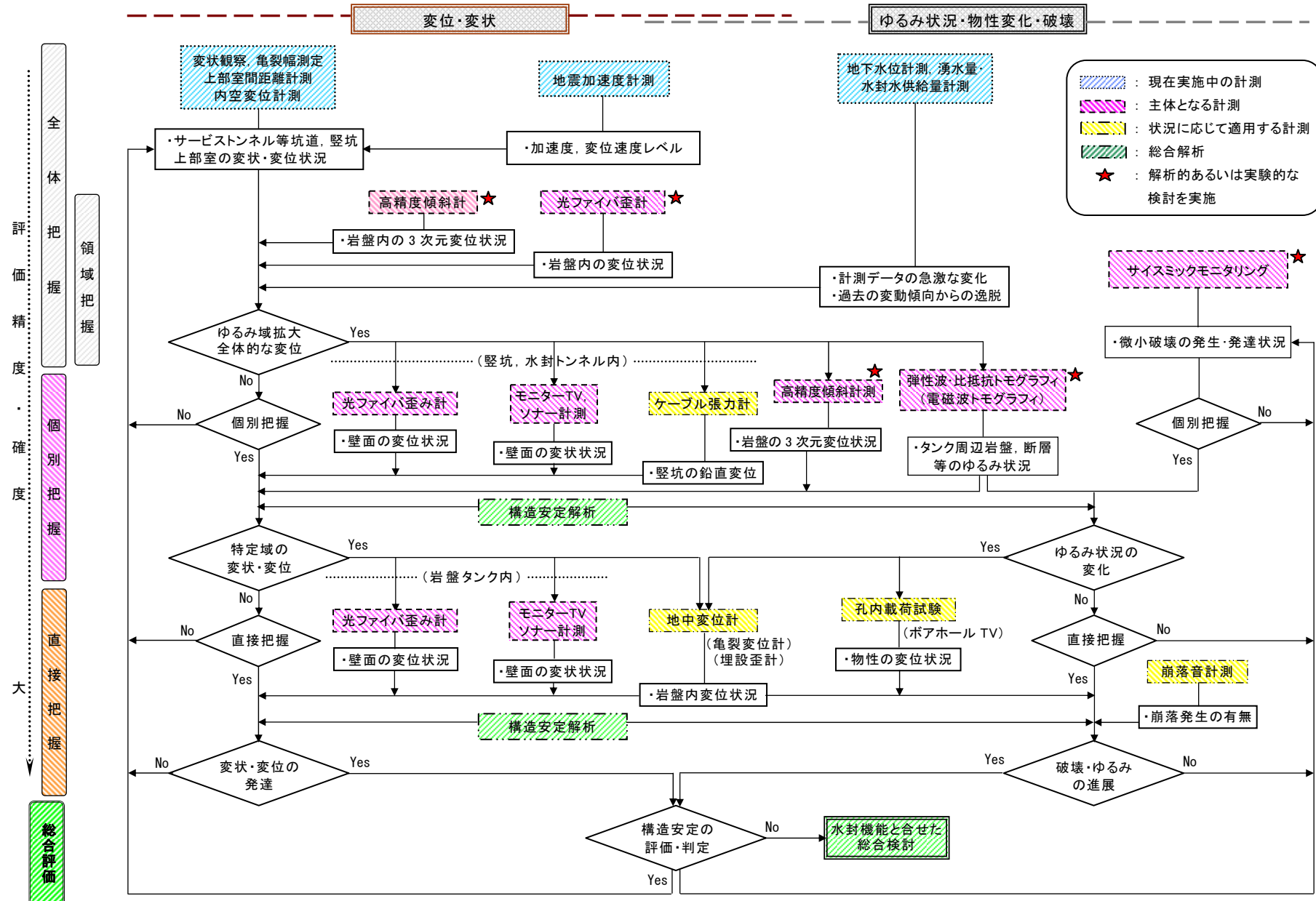


図 5.2-2(1) 空洞の安全性に係わる点検フロー

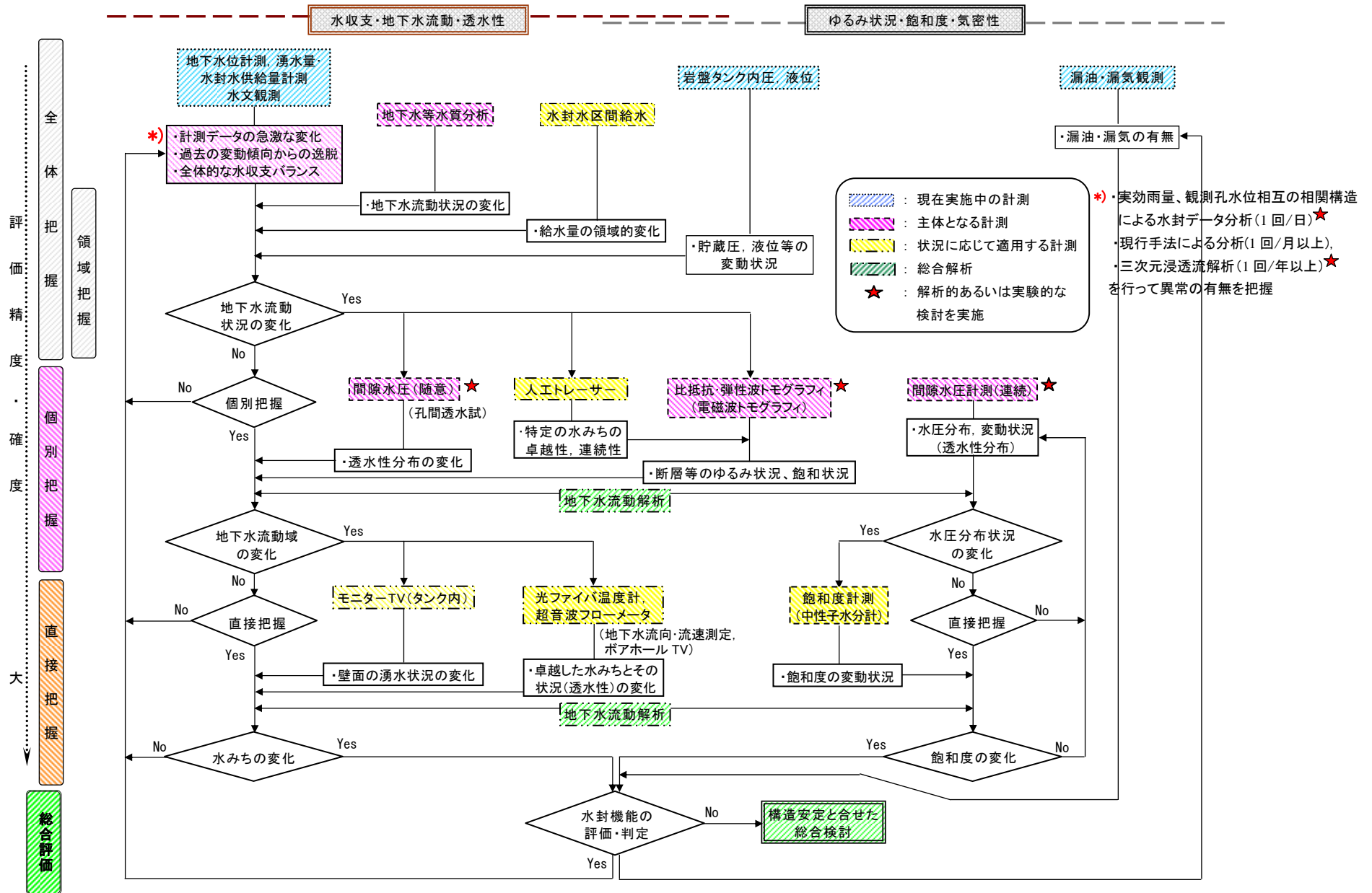


図 5.2-2(2) 水封機能の安定性に係わる点検フロー

解析による検討とともに、これらの検討結果を合わせた総合的な評価を行う必要がある。また、岩盤構造および水封機能は互いに密接に関連しているため、同図に示した岩盤構造および水封機能の各評価とともに、双方を総合した検討、評価を行うことが重要である。

このように、タンク周辺岩盤に安全性に影響を及ぼすような劣化等が生じた場合、段階的に点検・調査の密度と精度を高めていくことで、箇所の特特定とその程度の評価、必要な場合の対策へと合理的に繋げていくことが可能となる。

岩盤タンクの保全点検システムでは、開放による直接の点検が困難な岩盤タンクに対して、貯槽としての機能、安全性を確認し維持することを目的としているため、何処の何をどのように点検するかについて検討するとともに、その考え方に従った点検、評価を行っていく必要がある。本研究では、各点検手法についての具体的な適用方法について実用性の観点から検討を行い、1つの方向性を示すことができたといえる。

今後の展望としては、検証実験による継続的なデータの取得とともに、これら点検手法等を3基地へ展開し同様なデータの蓄積を平行して行い、データを分析・解析することで評価基準・安全基準の設定、さらには技術指針の策定と、保全点検技術の体系化を図ることが保全点検システムの確立の観点から重要と考える。特に、第1段階のタンク湧水量等の水封機能データ計測、サイスミックモニタリング、高精度傾斜計測を主体とする全体把握は、操業中の岩盤タンクの状態を定量的に診断するものであり、近年取組みが始まった施設・構造物に対するグローバル診断^{2), 3)}に対比される点検手法といえる。そこで、まず全体把握におけるデータ蓄積を進め、その分析・解析および数値解析によるケーススタディ等により、サイスミックイベントの空間的・時間的な位置ならびに発生頻度情報と地盤傾斜データの力学情報、水封機能データ異常の水理情報との相互の関連性を把握して、診断精度と信頼性を高めていく必要がある。また、当該システムを3基地へ展開するに際しては、各基地の特性に応じて、これらの図に示した考えに基づいて点検技術を適用し、既存の点検と合わせて岩盤タンクの安全性について総合的な評価を行っていくことになる。このような新しい点検技術の適用によって、3基地における岩盤タンクの長期的な安全性の評価が、合理的にかつより精度良く行えていくものと考えられる。

5.2.2 保全点検計画

ここでは、岩盤タンクの長期的な維持管理という観点から、各基地における現行の保全点検を補充・補完し、安全性に対する評価精度の向上や合理化を図っていくことを目的に、本研究でその実用性、有効性を確認した点検手法を岩盤タンクにより近いところに適用して行くものとして、その具体的な内容、配置等について検討を行った。

現在、久慈、菊間、串木野の各基地では、観測孔水位や岩盤タンク湧水量、水封水供給量、サービストンネル等における空洞の変位、変状の計測等の諸計測によって岩盤タンクの異常の有無を確認している。異常現象としては、被害地震、地表改変、経年劣化、異常湧水や排水ポンプ等の設備故障などを引金事象とするタンク周辺岩盤のゆるみ域の拡大等に伴う空洞の変形、割れ目の発生・拡大、壁面の部分的な崩落や不飽和域の発生・拡大等が考えられる。現在行っているこれらの計測によって、このような

異常現象の発生の有無はある程度確認できると考えられるが、発生部位や進行程度、規模等についての詳細な把握はできず、タンク周辺岩盤に対する情報としては必ずしも十分な情報を与えるものとはなっていない。

異常現象の発生は、その進展程度によっては岩盤タンクからの漏油・漏気につながる可能性があり、このような異常現象を的確に把握し、評価していくことが岩盤タンクの安全性確保にとって重要である。

各基地においては、現在順調に操業が行われているが、それぞれ若干の留意すべき課題も挙げられており、現行の保全点検内容を補充・補完し、岩盤タンクの安全性をさらに的確に把握、評価する点検手法の適用が待たれるところとなっている。

本研究では、適用計画の全体内容についての基本計画を作成した。ここで示す計画は、これによって点検の目的が全て達成されると考えるものではなく、この計画に従って点検を開始し、データの収集・蓄積を行い、そのデータの状況をみながら点検内容を充実させていくものとする。すなわち、本計画による点検の実施状況を検討し、その状況に応じて点検内容の追加、発展を柔軟に行っていくものである。

また、このようにして収集・蓄積されるデータ、およびこれまでに行った各種試験等結果を基に、岩盤タンクの保全点検技術としての評価・安全基準の設定、さらには技術指針を作成し、岩盤タンク保全点検システムとしての体系化を図って行くものとする。

(1) 保全点検計画の基本的な考え方

点検を行う計測断面は、これまでの検討結果に基づき、第1段階の点検として“全体把握”と“局所把握（堅坑周辺、現状で懸念される領域）”に分けてその配置等を考える。この配置等の検討にあたっては、各基地の地質状況、岩盤水理状況とともに、現行の諸計測の実施状況等を考慮し、効果的な点検が行えるよう留意する。計測断面に設けるボーリング孔は、用地確保の面から、サービストンネル内から設置することを基本とするが、全体把握の観点から必要と考えられる計測については、地表から計測用ボーリング孔を設置し、計測機器等を設置する。

なお、この第1段階の点検として配置した計測機器類にて何らかの異常を検知した場合は、次段階の点検・調査に移行し、検知状況や検知場所等を勘案のうえ、適切な調査手法を追加・配置することで点検・調査の密度と精度を上げ、岩盤タンクの安全性評価のためのより詳細な情報を取得することとする。

<<全体把握>>

現在、地下水位観測孔が岩盤タンク全体をカバーするように配置されており、この観測孔水位や岩盤タンク湧水量、水封水供給量等によって“全体把握”が行われているが、力学的安定性の監視としては十分とは言えない。従って、地表近くからのサイスミックモニタリングおよび高精度傾斜計測を適用し、タンク周辺岩盤のゆるみ域や破碎帯等の劣化の進行に伴う微小破壊振動の発生や岩盤の傾斜変動を観測するものとする。また、貯槽機能の確保という観点から特に留意が必要な部位は、ポンプや配管設備等が集中する堅坑周辺であり、この周辺に対する監視が重要となる。よって、“全体把握”では、地表部からのモニタリングに加えて、原則的には堅坑が配置されているサービストンネル側の領域に重点をおいた点検を行うこととし、この周辺を対象に

計測用ボーリング孔を設けて局所把握を兼ねた計測等を行う。

基地を全体的に把握するためには、最低でも岩盤タンクの設置域に対し両端付近、中央部の3領域に分け、それぞれに検討断面を設ける必要があるが、検討断面の配置は各基地の構造、地形・地質状況等により柔軟に対応していくものとする。

“全体把握”では、現行の観測孔水位や岩盤タンク湧水量、水封水供給量計測にサイスミックモニタリングと高精度傾斜計測を加えた点検を主体とする。

- サイスミックモニタリングは、岩盤内におけるゆるみ域や破砕帯等の劣化の進行に伴う破壊振動や、岩塊の崩落等に伴う弾性波動を検知するものであり、岩盤の破壊現象を直接捉えようとするものである。
- 高精度傾斜計測は、岩盤内におけるゆるみ域や破砕帯等の劣化の進行に伴う変形・変位を地表近くに設置した高精度傾斜計により地盤の傾斜変化として捉えようとするものである。

<<局所把握>>

“局所把握”は、全体把握と同様の観点から、原則としてサービストンネル側の領域を対象とし、顕著な破砕帯等の地質状況などから現状で特に留意が必要と考えられるところ、あるいは堅坑周辺等の応力集中箇所（設備機能の観点からも重要なところ）などに対して計測断面を設ける。

“局所把握”では、サイスミックモニタリング、高精度傾斜計測、間隙水圧計測、トモグラフィ計測、光ファイバ歪み計測を主体とした点検を行う。計測用ボーリング孔は、何れの計測を行うかによって、裸孔として用いる場合と埋設孔として用いる場合が生じる。

- 間隙水圧計測は、計器設置位置の間隙水圧の値により動水勾配の監視を行うとともに、間隙水圧の変化から、岩盤の劣化の進行に伴う透水性の変化状況を評価しようとするものである。
- トモグラフィ計測は、弾性波および比抵抗トモグラフィにより岩盤の劣化の進行状況、不飽和域の有無等を把握、評価しようとするものであり、定期・不定期に計測を行ってその変化状況を点検する。
- 光ファイバ歪み計測は、岩盤タンク周辺岩盤内に変位が生じているかどうか、またその状況を定期・不定期に計測を行って点検するものである。

これらの“全体把握”および“局所把握”に対する点検計測は、それぞれ互いに補完あるいは一部兼用して配置することとなるが、基本的には変化が生じる可能性が高いと考えられるところに優先的に配置する。計測断面の基本的な配置、位置付けおよび計測内容を表 5.2-2 に示す。

なお、ここで示した点検計測は、現在行っている日常的な計測を補完、補強するものであり、地下水位や湧水量といった既計測データとの対比・検討、およびこれらを合わせた総合的な評価を行っていくべきものと位置付ける。一方、地下水水質に関しては、岩盤タンク湧水量、水封水、地下水観測孔内水等に対する同位体、一般水質等の分析を必要に応じてこれらの点検計測に加え、評価の一項目として活用していくものと位置付ける。

また、状況に応じて適用する各種の手法については、計測手法として確立されている手法も含まれており、各基地の諸条件等によっては、適用することが適当な手法もあると考えられることから、今後の計測状況を見ながらその適用について引き続き検討していくものとする。

表 5.2-2 計測断面の基本的な配置

計測断面	場 所	位置付け	計測内容	備 考
A	タンク全域および端部付近①	全体把握および局所把握	<ul style="list-style-type: none"> ・観測孔水位測定 ・岩盤タンク湧水量測定 ・水封水供給量測定 ・水文観測 ・<u>サイズミックモニタリング</u> ・<u>高精度傾斜計測</u> ・<u>間隙水圧計測</u> ・地下水等水質分析 	C断面と対をなす
B	タンク全域および中央付近②			A断面と対をなす
C	タンク全域および端部付近③			A断面と対をなす
D	特定箇所㉓	局所把握	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>サイズミックモニタリング</u> ・<u>高精度傾斜計測</u> ・<u>間隙水圧計測</u> ・<u>トモグラフィ計測</u> ・<u>光ファイバ歪み計測</u> 	E断面とペア
E	特定箇所㉔			D断面とペア

(2) 保全点検計画の概要

以下に各設定断面における基本的な点検計測の概要について示す。なお、計測用ボーリング孔および設置計器の配置、個数等については、検討地点の構造、地形・地質状況、ボーリングコアによる破砕帯等の分布状況等に応じ柔軟に対応していく必要がある。また、セメントミルク等による埋設孔以外の裸孔となるボーリング孔は、水封孔として給水用の配管を配置し、孔内水位を一定の水位以上に保つよう制御しなければならない。

- ・タンク全域に対するモニタリングは、基本的にはサイズミックモニタリングと高精度傾斜計測を主体としたものとする。
- ・A, B, C断面ではサイズミックモニタリング、間隙水圧計測を行い、その変化状況を監視する。
- ・サイズミックモニタリングセンサ(数個)、間隙水圧計(数個)は、基本的には埋設型とする。
- ・D, E断面では弾性波・比抵抗トモグラフィ計測、サイズミックモニタリングを行い、その変化状況を監視する。光ファイバ歪み計や間隙水圧計については、必要箇所に別途設置する。
- ・トモグラフィ計測を行うボーリング孔は裸孔の状態とし、通常は基本的にアレイ型の hidroフォンセンサを吊下げて、サイズミックモニタリングを継続的に行う。トモグラフィ計測時に、hidroフォンセンサを一旦引き上げ、孔内に発振器及び受振器を挿入して計測を実施する。トモグラフィ計測は、D断面とE断面で囲まれた範囲を対象に行う。
- ・光ファイバ歪み計または間隙水圧計を設置する場合は、必要に応じて高感度加速度計を併設しサイズミックモニタリングを併用して行うこととする。ボーリング孔は埋設式とする。

なお、地下水等水質分析については、各基地の状況に応じて実施することし、地下水位観測孔内水、水封水供給水、岩盤タンク内湧水等を適宜定期的にサンプリングして分析し、その変動状況を地下水流動状況の検討・評価に供する資料とする。

(3) 串木野基地の保全点検計画例

各基地においては、現在順調に操業が行われているものの、それぞれ下記のような若干の留意すべき課題が挙げられている。

まず久慈基地では、岩盤タンクを構成する久喜花崗岩は全体的に割れ目が発達しており、他の2基地に比べ透水係数が1オーダー大きく、建設時には幾つかの地下水位観測孔で掘削の進行に伴って顕著な水位低下を示した⁴⁾。オイルイン後十数年経過した現在も、これらの一部の観測孔は水位が十分に回復しておらず、その周辺領域での水みちや割れ目に沿った地下水位の低下や不飽和域の形成に留意することが保全管理上の重要な監視点となっている。

菊間基地では、岩盤タンクを構成する新期領家花崗岩は堅硬緻密で割れ目も比較的少なく全体的に良好な岩盤であり、タンク掘削の影響による水位低下も比較的小さかった⁴⁾。しかしながら、図4.2.1-8に示すW-10孔は水位の回復が十分でなく、その周辺領域の地下水位状況等の監視が重要となっている。

串木野基地では、次に述べるように、断層破碎帯の岩盤劣化の著しい部分での岩盤劣化の進行、ならびに割れ目に沿った地下水位の局所的な低下や不飽和域の形成に対して留意することが保全管理上の重要な監視点となっている。

ここでは、岩盤タンクの構造安定と水封機能の両面から新たな点検手法を導入した保全点検システムの構築が必要とされる串木野基地を例として保全点検計画の検討結果の概要を示す。

1) 地質状況及びこれまでの計測等の経過

串木野基地における地質平面図を図5.2-3に示す。

本地点は西南日本外帯に属し、九州のグリーンタフ地域の中で北薩地区と呼ばれ、新第3系の北薩古期及び中期安山岩類から成っている。

岩盤タンクを構成する岩盤は、北薩古期安山岩類の自破碎状安山岩(LB)と礫岩(LB(礫))および安山岩(LB(An))である。このうちLBは岩盤タンク設置域の約7割を占め、LB(礫)は岩盤タンク設置域の南西側に分布し、LB(An)は主として岩脈状に分布している。岩盤タンクの主要な構成岩盤であるLB及びLB(礫)は、全体的には堅硬緻密な新鮮岩盤であり、割れ目の少ない良好な岩盤である。岩石の一軸圧縮強度は平均49.0MPa程度と、久慈基地、菊間基地の岩盤が硬岩であるのに対して中硬岩として位置付けられる。岩盤タンク設置域及びその周辺には、図5.2-3に示す14条の主要な断層が確認されたが、このうちのF9～F14断層は岩盤タンク設置域北部に集中して分布していた。これらの断層は岩盤タンク軸方向とほぼ横断する方向となる北東方向の走向で、南傾斜の比較的緩やかな30～60°の傾斜角を示すものが多く、周辺は熱水変質作用を受けて一部で白色粘土化しているところ、あるいは開口亀裂の発達したところがみられるなど部分的に脆弱な岩盤となっていた。

このF9断層群周辺については、掘削時に警戒レベルを超える壁面の変位を観測す

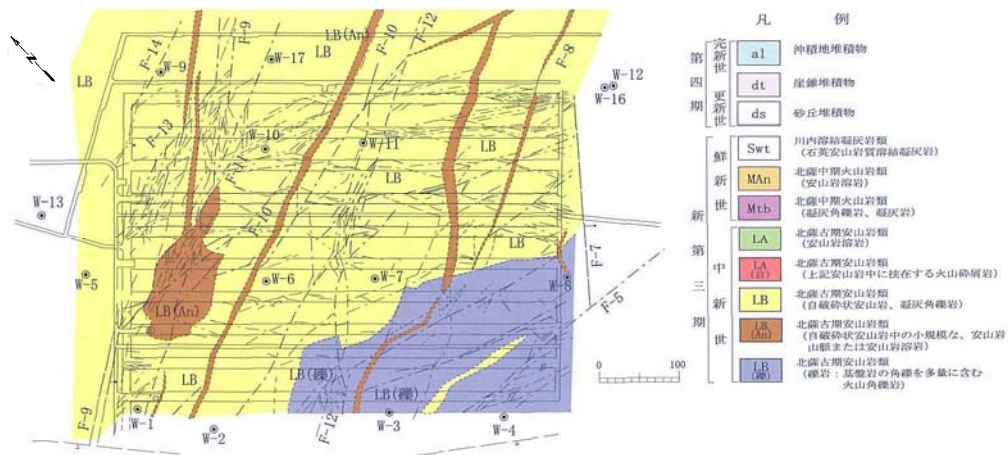


図 5.2-3 串木野基地地質平面図(EL.-27.5m)

るなど、空洞の安定性に大きな影響を及ぼした。このため、この周辺では図 5.2-4 に示すように岩盤タンクの断面形状の変更または盤下げ中止区間を設定し対応している。また、これらの断層周辺の一部で岩盤内の地下水圧が十分でないところも見られたため、水封機能の安定性確保の観点から自然水封方式から一部人工水封方式への変更、ならびにグラウト工事が実施された⁴⁾。

このように、上記した領域については、岩盤の劣化の進行および割れ目に沿った地下水位の局所的な低下や不飽和域の形成に対して十分留意することが保全管理上の重要な監視点となっている。

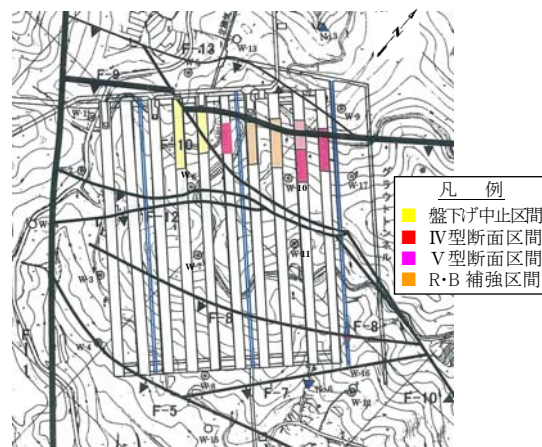


図 5.2-4 串木野基地における断面変更区間と盤下げ中止区間

2) 保全点検計画例

串木野基地における保全点検システムは、上述の地質状況、地下水位状況等を考慮すると、F9 断層群を主体としたサービストンネル側における岩盤状況、水理状況に着目した点検が重要と考える。図 5.2-5、図 5.2-6(1)～(4)に点検計測器の配置計画平面図および断面図を示す。串木野基地における保全点検計画の概要は以下の通りである。

- ・全体把握は、サイスミックモニタリングによる構造安定の常時監視とし、低周波数のイベントを確実に捉えるようにセンサ間隔を 250m 程度とする。センサは広帯域・高感度のセンサとし、局所把握に移行する場合も考慮して地表およびサービストンネル内から計測用孔を設けて設置する。
- ・構造安定に関する局所把握では、サイスミックモニタリング、光ファイバ歪み計測、高精度傾斜計測および弾性波・比抵抗トモグラフィ計測を行うこととし、TK-102B～TK-102D の F9 断層群周辺の地質不良部の劣化の進行況等を監視する。各センサはサービストンネル内あるいは地表から計測用孔を設け設置する。
- ・水封機能に関する局所把握については、間隙水圧測定と弾性波・比抵抗トモグラフィ

計測（構造安定に関する局所把握と兼用）を行うこととし、TK-102B～TK-102D の F9 断層群周辺の地質不良部の水圧分布、不飽和域形成の有無等を監視する。各センサは構造安定に関する局所把握用の計測用孔に併設する。

- ・局所把握におけるサイスミックモニタリングでは、3kHz 未満のイベントを確実に捉えるようにセンサ間隔を 50m 程度とし、広帯域・高感度加速度計（埋設）またはアレイ型ハイドロフォンセンサ（吊下げ）を用いる。広帯域・高感度加速度計埋設孔には光ファイバ歪計および間隙水圧計を併設し（孔径 116mm）、ハイドロフォンセンサ吊下げ孔は弾性波・比抵抗トモグラフィ計測孔として兼用する（孔径 86mm）。
- ・地表から設ける計測用孔は鉛直孔とし、既設の地下水位観測孔に隣接して設置する。サイスミックモニタリング用孔は、孔径 66mm で岩盤タンクを構成する新鮮岩盤に着岩してから 10m 程度の深度までの長さとして、孔底付近にセンサをセメントミルクで埋設する。高精度傾斜計設置孔は、孔径 145mm で新鮮岩盤に着岩してから 5m 程度の深度までの長さとして、第 3 章 3.2.3 で示した要領でセンサを設置する。
- ・サービストンネル内から設ける各センサと計測用孔は、既存の点検計測位置を考慮した効率的な配置とするとともに、可能な場合は既存の注水孔等を利用する。
- ・サービストンネル内から設ける計測用孔は、斜め下向きで孔底は岩盤タンクから約 10m 離すものとする。なお、光ファイバ歪み計、高感度加速度計および間隙水圧計の埋設は、第 3 章 3.2.2 で示した要領に準じる。

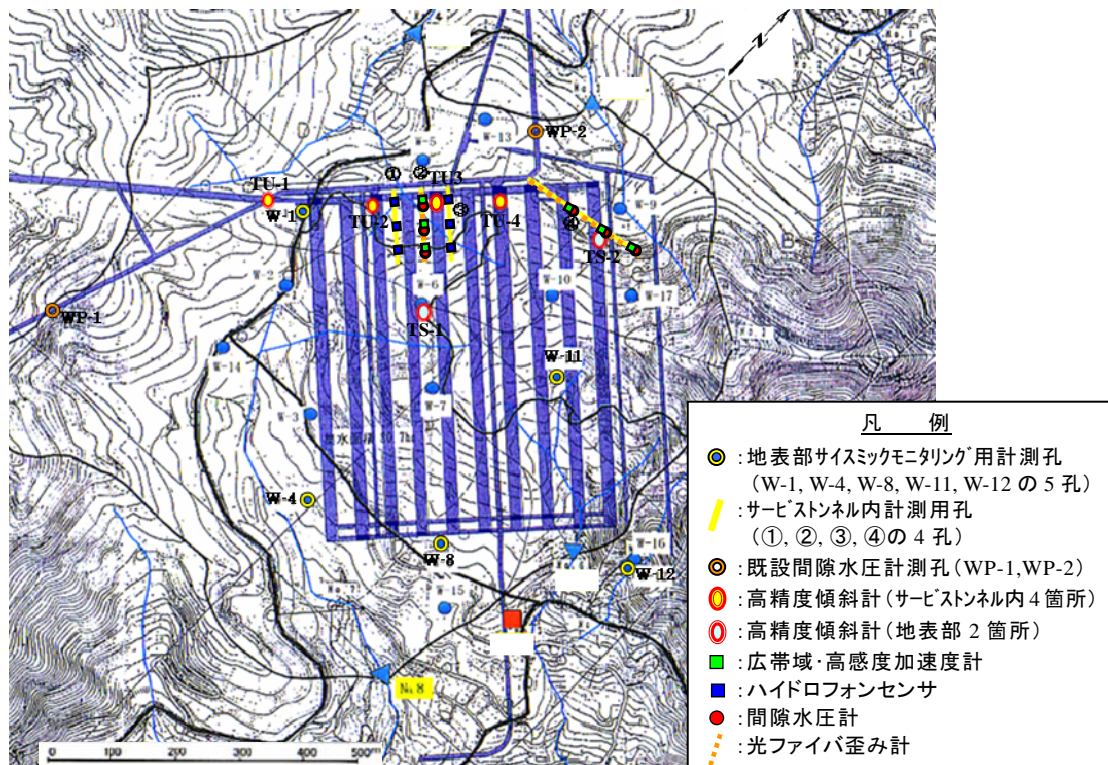


図 5.2-5 計測用ボーリング孔と点検計測器の配置平面図

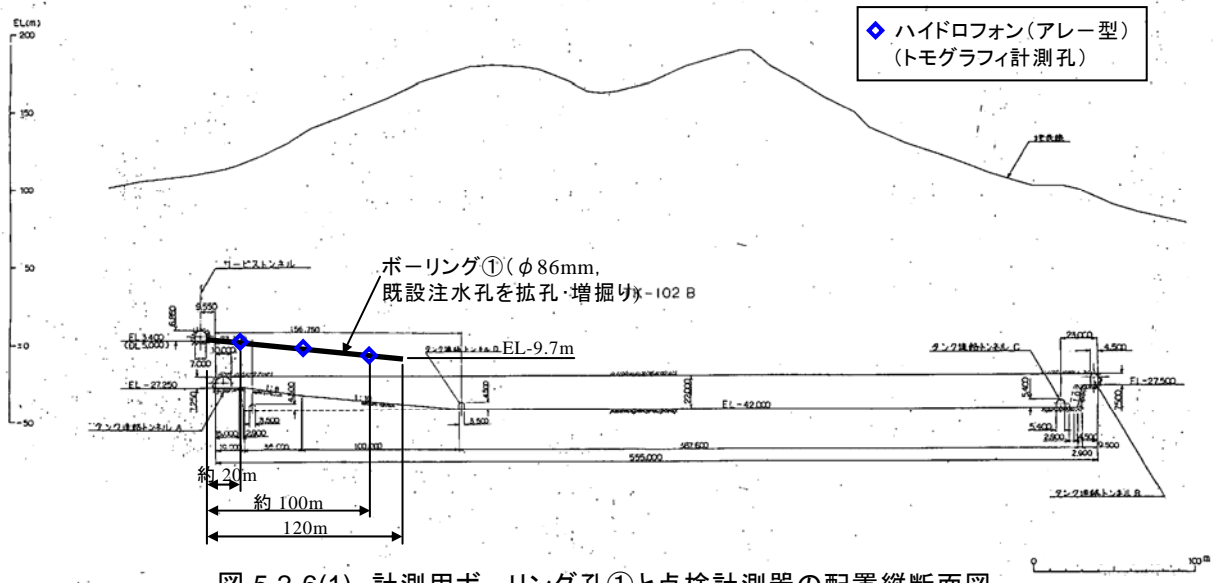


図 5.2-6(1) 計測用ボーリング孔①と点検計測器の配置縦断面図

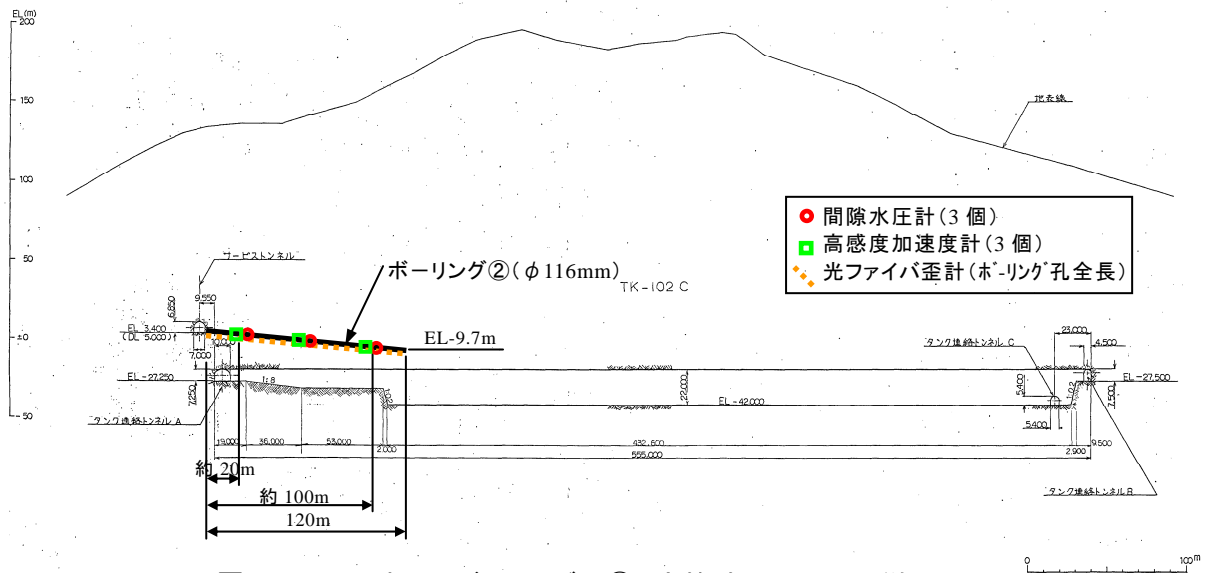


図 5.2-6(2) 計測用ボーリング孔②と点検計測器の配置縦断面図

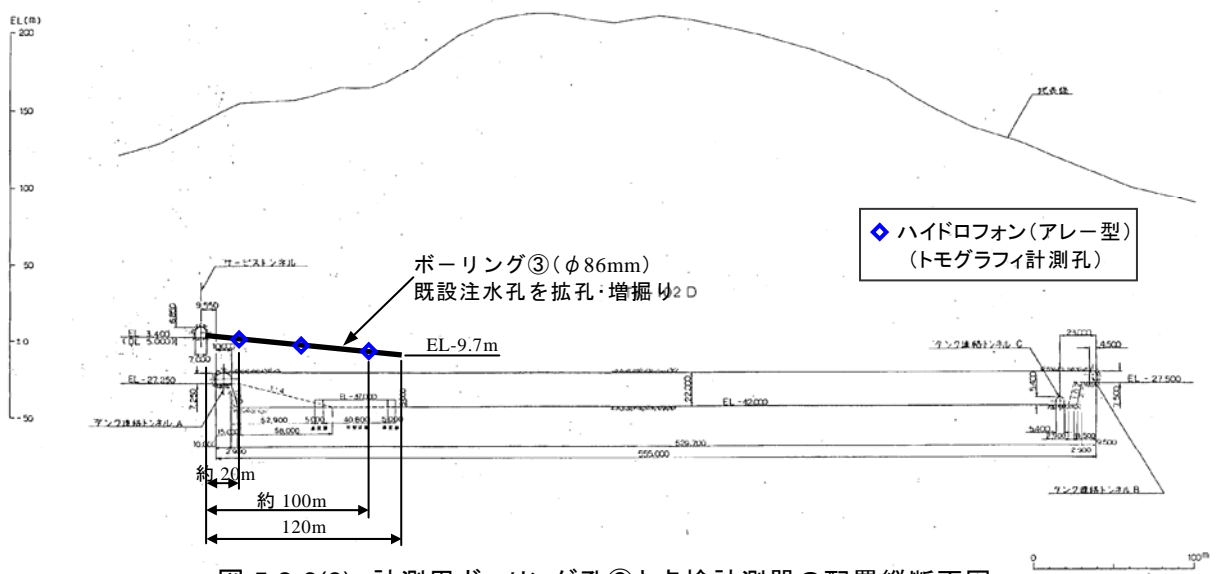


図 5.2-6(3) 計測用ボーリング孔③と点検計測器の配置縦断面図

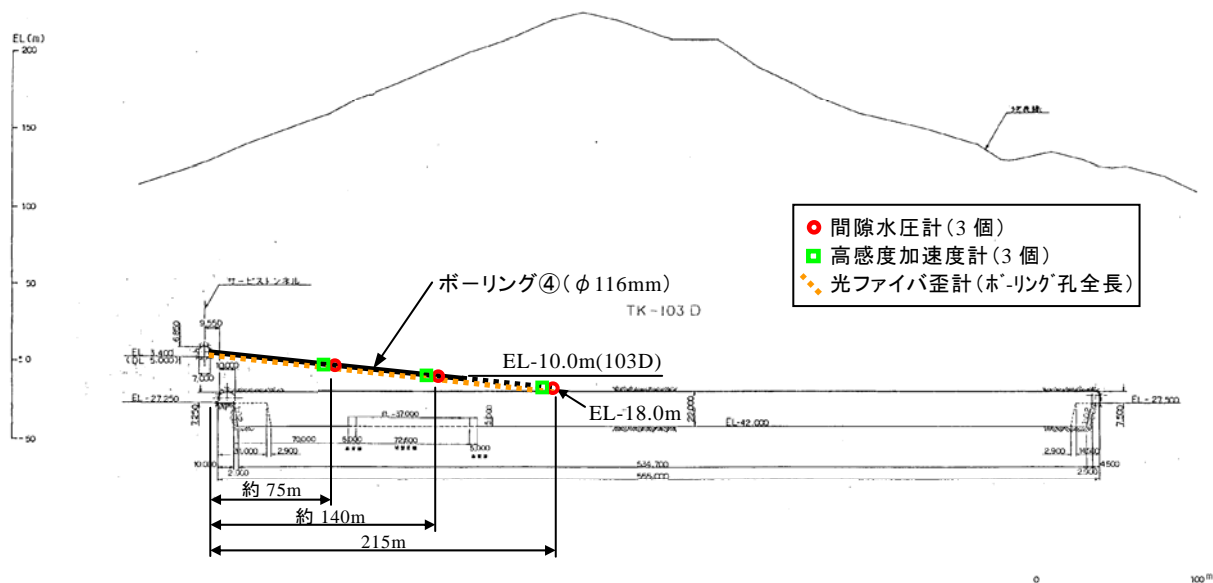


図 5.2-6(4) 計測用ボーリング孔④と点検計測器の配置縦断面図

5.3 まとめ

本章では、現行の保全点検システムと前章までに述べたタンク周辺岩盤の物性変化の検知が可能な点検手法、および現行点検データのタンク周辺岩盤の物性変化に伴う変動傾向の変化を検出する解析手法を統合したより精度と信頼性の高い合理的な保全点検システムについて述べた。まず 5.1 節で保全点検システムの構築における基本的考え方を示した。5.2 節では、地下石油備蓄基地の規模を踏まえ、段階的に点検精度を上げていく仕組みを採ることとして、第 3 章、第 4 章で述べた本論文の成果を採り入れ、点検箇所別にその重要性、岩盤劣化等の発生の確率を考慮した点検の流れと各種点検手法の適用区分を示した。さらに、タンク周辺岩盤に劣化が生じた場合の箇所の特定とその程度の評価、必要な場合の対策へと合理的に繋げていくことが可能な点検・評価フローを提案した。最後に、串木野基地を例として、実際の地下石油備蓄基地へ適用するに際しての具体的な適用の仕方を示した。

今後は、検証実験による継続的なデータの取得とともに、これら点検手法等を 3 基地へ展開して同様なデータの蓄積を平行して行い、データを分析・解析することで評価基準・安全基準の設定、さらには技術指針の策定と、保全点検技術の体系化を図ることが保全点検システムの確立の観点から重要と考える。

以上、本章では、岩盤タンクを開放することなく、周辺の地下水理や岩盤構造、岩盤弱層部等の状況を把握して、岩盤タンクの安全性をより精度よく評価できる保全点検システムを構築することができたと考える。

参考文献

- 1) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構：平成 16 年度操業に係る岩盤タンク内部点検技術に関する調査・研究，日本地下石油備蓄㈱，2005.
- 2) API: Recommended Practice for Fitness-For-Service, API 579, 2000.
- 3) 湯山茂徳：構造物の性能規定型設計・管理における検査技術の動向，非破壊検査，Vol.51, No.1, pp.3-7, 2002.
- 4) 日本地下石油備蓄㈱：久慈・菊間・串木野地下石油備蓄基地工事記録(岩盤土木)，1994.

第6章 結論

本研究は、岩盤タンクの安全性に影響を及ぼすような劣化等の損傷がタンク周辺岩盤に生じた場合の損傷個所の特定やその程度が評価可能な計測技術について、原油備蓄タンクの点検手法としての適用性、有効性を現地試験等により検討・確認すること、また、日々観測される観測孔水位等の水封機能データに関して、タンク周辺岩盤の水理・力学物性値の変化に伴う変動傾向の変化を検出する手法について検討・開発すること、ならびに、これらの手法を統合したより信頼性の高い合理的な保全点検システムを構築することを目的に行ったものである。

本研究では、まず筆者が携わってきた水封式岩盤タンクの安全性を評価する保全点検システムについて、十数年の操業を通して経験した事象や知見等を踏まえて現行システムの課題を整理した。そして、これを解決するための方法として、原油を貯蔵した状態の岩盤タンクの点検手法として適すると考えられる五つの計測技術を実際の岩盤タンクに適用した結果を示し、その有効性と適用方法について述べた。また、タンク周辺岩盤の水理条件等の変化に伴う観測孔水位等の観測データの変化を検知するための解析・評価手法について検討し、「実効雨量」、「観測孔水位相互の相関構造」のそれぞれを用いた「逐次更新型」の線形回帰モデルである2つの管理モデルを考案し、その有効性を示した。最後に、これらの手法を採り入れたより信頼性の高い合理的な保全点検システムについて検討し、タンク周辺岩盤に劣化が生じた場合の箇所の特定とその程度の評価、必要な場合の対策へと繋げていくことが可能な点検・評価フローを提案するとともに、我が国の地下石油備蓄基地への具体的な適用の仕方を示した。

以下に本研究で得られた成果を要約して示す。

第1章では、本研究の背景と目的を述べるとともに、本研究の概要を示した。

第2章では、まず水封式岩盤タンクによる地下石油備蓄基地の概要を述べるとともに、水封式岩盤タンク設計時の主要な検討項目・設計定数等を示して、岩盤タンクの安全性確保において具備されるべき条件を明らかにした。次に現行の岩盤タンクの点検・検査システムの概要とこれらに係わる十数年の操業を通して経験した事象や知見、課題を整理し、現行の点検・検査システムに補足・補完すべき対象、項目を抽出した。

第3章では、まず**3.1節**において保全点検システムの考え方として、システムの全体像と本研究が対象とする範囲を示すとともに、運用に際しての留意点を述べた。**3.2節**では、保全点検システムを構成する技術の一つである点検技術について、岩盤タンクの点検手法として適すると考えられる五つの計測技術を実際の岩盤タンクに適用した結果を示し、その有効性と適用方法、ならびに今後の課題を明らかにした。それぞれの点検手法の適用試験結果、今後の課題等は以下の通りである。

- **サイズミックモニタリング**：菊間基地 TK-103 での適用試験により、微小破壊を検知するための基礎的データを取得するとともに、極微小な振動を数十メートル離れた地点で捉え、その震源位置評定時の推定誤差は数メートルに収まることを確認した。将来的に岩盤タンクの安全性に影響を及ぼす可能性のある亀裂へと発達した段階のサイズミックイベントに観測ターゲットを絞ることで、受振器数を現実的な範囲

に抑えた合理的な観測が可能であり、点検の目的を十分に達成できることが分かった。今後は、タンク周辺岩盤の微小破壊に伴うサイスミックイベントの検出精度向上のため、引き続きデータの蓄積・分析を行い、各種作業等に伴う振動特性を把握し、これらを識別できるようにしていくことが重要となる。

- **光ファイバー歪計測**：竣工後約 22 年が経過した菊間基地 TK-103 に適用し、当該センサの設置上の課題、ならびに原油受払いにより有意な変形が生じないことを確認した。弱層部等の変状の発生・進行が懸念される箇所において、光ファイバー歪計測手法を適用し、変位の進行の有無などの長期的な変動傾向を監視・把握することで、岩盤タンクの安全性評価の精度・信頼性の向上を図ることができるものと考えられる。なお、センサの回転・振れを極力防ぐ設置方法の改善・工夫を図る必要がある。
- **高精度傾斜計測**：串木野基地での試験計測の結果、潮汐、気圧変動、地震動および油面低下に起因する地盤傾斜の変化量、残留の有無およびその大きさを把握した。また、適切なデータ解析を行い、数値解析と組み合わせることで、高精度傾斜計により岩盤タンクと周辺岩盤の監視・評価が十分可能であることが分かった。今後の課題として、計測データから長期的な岩盤挙動、イベント位置の推定手法、ならびに地質モデルに対する順解析と逆解析による定量的な岩盤挙動把握のための検討を行っていくことが挙げられる。
- **弾性波・比抵抗トモグラフィ**：菊間基地 TK-103 において、タンク周辺岩盤の初期値を得るため、弾性波・比抵抗トモグラフィ調査を実施し、岩盤状況に概ね整合する結果を得た。今後、同一の測定条件のもとで定期的、または地震発生後等に測定を行って、弾性波速度と比抵抗値の変化を把握し、岩盤の劣化や不飽和域の変化状況を評価することになる。併せて、弾性波速度と比抵抗値からの飽和度等の推定方法の構築や間隙水圧分布との比較検討を行っていく必要がある。
- **間隙水圧測定**：菊間基地 TK-103 の主要亀裂帯が集中する付近の間隙水圧分布を確認し、水封機能には問題ないものの、タンク肩付近の間隙水圧が約 22 年前の状態からあまり変わっていないことが分かった。また、間隙水圧の変化は岩盤の透水性の変化に起因しているという前提で、測定結果からタンク周辺岩盤の透水係数を逆解析により求め、透水係数の変化が生じた領域の推定を行った。透水係数の高い領域や変化する領域は亀裂帯の分布状況と良い対応を示し、岩盤タンクの安全性評価に有効な手法であることを確認した。なお、この間隙水圧の変化は平衡に至る過程という見方もできるため、今後さらに経時的な傾向を把握し、見極めていく必要がある。

第 4 章では、まず 4.1 節で保全点検システムを構成する点検データの評価診断技術について、岩盤タンクの安全性評価に至る評価診断の流れと、その各段階において把握すべき事項、そのために必要な解析・評価手法を整理し、本研究で対象とした解析・評価手法を示した。4.2 節では、まず現行の評価手法の考え方と対象データの変動特性を示すとともに、本手法に関する既往の研究を述べ、現行手法の長短を明らかにし

た。次に操業管理担当者の日常管理に供することを目的に考案した実効雨量、観測孔水位相互の相関構造のそれぞれに基づく逐次更新型線形回帰モデルである 2 つの解析・評価手法について、実際の観測データを用いて検討した結果を示し、その有効性と課題を明らかにした。最後に、現行の評価手法を補足するために構築された三次元浸透流解析手法について概説するとともに、その有効性と適用上の留意点を示した。また、解析結果を実効雨量に基づく解析・評価手法により分析し、浸透流解析における地下水位挙動の実効雨量との相関性、および実効雨量パラメータの水理地質的な影響要因について考察した。それぞれの解析・評価手法の検討結果、今後の課題等は以下の通りである。

- **現行の評価手法**：植出の提案する評価指標を用いて最近の水封機能データを分析し、当該指標の有効性と適用上の留意点を示した。本評価手法は、岩盤タンク全体の安全性、ならびにタンクユニット毎の領域の安全性を評価する手法と位置付けられる。
- **実効雨量による評価手法**：実効雨量のパラメータは水封機能データの変動に影響を及ぼす水理地質条件をある程度反映したものであることが分かった。本手法は、水理条件等の変化に伴う過去の変動傾向からの逸脱の検出といった日常管理における安全性評価の第1ステップとして有効であることを確認した。今後の課題として、他の地下石油備蓄基地におけるデータへの適用性、潮汐や浅層浸透水の影響による短周期応答成分の除去フィルターの検討など当該評価手法の適用範囲の拡大・改良を図っていく必要がある。
- **観測孔水位相互の相関構造による地下水位データ評価手法**：実効雨量による評価手法と同様、水理条件等の変化に伴う観測孔水位データの過去の変動傾向からの逸脱の検出といった日常管理における安全性評価手法として有効であることを確認した。実効雨量による水封データ評価手法と併せた評価を行えば、考え方の異なる手法によるクロスチェックとなり、その信頼性が増すものといえる。
- **三次元浸透流解析による評価手法**：本手法は、直接目で確認することができない岩盤タンク周辺の水理状態を定量的かつ視覚的に表すことができる利点を有す。ただし、解析モデルの格子サイズに比べて微細な亀裂性岩盤における水みちの水理状態の再現は困難であり、岩盤タンク全体ならびに比較的広い領域の安全性評価に資する手法と位置付けられる。また、解析観測孔水位を実効雨量による評価手法により分析した結果、実測値と同様に実効雨量との関係において非線形な関係や複数の相関関係を示すことが分かった。水理解析モデルにおける実効雨量パラメータの影響要因については、亀裂帯の有無と貯留層の働きをする風化層厚が半減期の影響要因であることを確認した。累積日数は、観測孔の地下水供給（涵養）範囲、および風化層厚が影響要因と推定され、遅延日数は、各観測孔の涵養範囲における地下水面の最頂部の地表からの深さを表しているものと推定された。

第 5 章では、5.1 節で保全点検システムの構築における基本的考え方を示した。5.2 節では、地下石油備蓄基地の規模を踏まえ、段階的に点検精度を上げていく仕組みを採ることとして、第 3 章、第 4 章で述べた本論文の成果を採り入れ、点検箇所別にそ

の重要性、岩盤劣化等の発生の確率を考慮した点検の流れと各種点検手法の適用区分を示した。さらに、タンク周辺岩盤に劣化等が生じた場合の箇所の特異とその程度の評価、必要な場合の対策へと合理的に繋げていくことが可能な点検・評価フローを提案した。最後に、串木野基地を例として、実際の地下石油備蓄基地へ適用するに際しての具体的な適用方法を示した。

以上、本論文では、岩盤タンクを開放することなく、周辺の地下水理や岩盤構造、岩盤弱層部等の状況を把握して、岩盤タンクの安全性をより精度よく評価できる保全点検システムの構築と実際の地下備蓄基への適用の仕方を示した。このような岩盤タンクの安全性評価に関する解析・評価手法、および現行の点検システムを補完する点検手法等を実用的な範囲で検討した成果、およびその成果を採り入れたより合理的な点検システムは、現在操業中の地下石油備蓄基地の安全・安定操業に資するのみならず、国内外でのLPGなどの石油製品、圧縮空気、熱エネルギーなどの地下貯蔵や放射性廃棄物の地層処分などの地下利用施設の計画や維持管理にも参考になるものと期待される。

また、今後の展望として、検証実験による継続的なデータの取得とともに、これら点検手法等を3基地へ展開して同様なデータの蓄積を平行して行い、データを分析・解析することで評価基準・安全基準の設定、さらには技術指針の策定と、保全点検技術の体系化を図ることが保全点検システムの確立の観点から重要と考える。

謝 辞

本論文の執筆にあたり、一方ならぬご指導とご助言を賜りました横浜国立大学大学院小川輝繁教授に深甚な敬意を表するとともに、ここに研究論文としてまとめることができ、改めて心から感謝とお礼を申し上げる次第です。

また、同大学院関根和喜教授、大谷英雄教授、谷和夫教授、三宅淳巳教授、ならびに(財)電力中央研究所の駒田広也博士からも適切なご指摘、ご指導を賜り心より感謝申し上げる次第です。

東京大学名誉教授小島圭二博士には、最後まで暖かい激励のことばを頂き、厚くお礼申し上げます。

植出和雄博士には、本論文に係わる全般の議論を通じて、ご協力を頂き厚くお礼を申し上げます。

長谷川誠博士、宮下国一郎博士、吉田順博士、本多眞博士、清水信之博士、若林成樹氏、竹村進氏、山石毅氏、廣岡知氏には点検手法や解析・評価手法において多くのご協力、ご助言を頂き、ここに改めて厚くお礼を申し上げます。

日本地下石油備蓄株式会社木村功社長、ならびに増田聰博専務には、折にふれて厳しくも暖かい励ましのことばを頂き、本研究に邁進することができました。ここに改めて厚くお礼申し上げます。

また、本論文の執筆に際し資料の整備にご助力下さった細川賢一氏、金澤孝氏、ならびに本研究を進めるにあたり、暖かいご理解とご配慮を頂いた日本地下石油備蓄株式会社の皆様には、深く感謝とお礼を申し上げます。

最後に、この論文が、今後の同種の岩盤タンクに何等かの参考になれば幸いです。