

# 地震波干渉法による水封式岩盤タンク周辺の弾性波速度の推定

若林 成樹

(技術研究所)

## An Estimation of Elastic Wave Velocity of Rock Mass around the Water Sealed Rock Oil Tank by Using Seismic Interferometry

Naruki Wakabayashi

水封式地下岩盤タンク方式の地下石油備蓄基地の長期にわたる維持管理及び安全確保という観点から、岩盤タンクの周辺岩盤の力学的安定性や地下水状況の変化等を点検・評価することは重要な管理項目となっている。地下石油備蓄基地では岩盤タンク周辺の微小破壊現象を検知する目的でサイスミックモニタリングシステムが設置されている。このシステムでは微小破壊現象以外に自然地震や人工振動波形も記録され、システムの新たな利用法として地震波干渉法を適用して周辺岩盤の弾性波速度を求めた結果を報告する。

From the point of view of long-term maintenance and safety of the water sealed rock oil tank, evaluation on the change of mechanical stability and groundwater situation around the rock oil tank has become an important management item. Seismic monitoring system has been installed for the purpose of detecting micro failure phenomena around the rock oil tank. Natural earthquakes and artificial vibration waveforms are also recorded in this system. This paper reports the results of estimation of elastic wave velocity determined from these waveforms by using seismic interferometry method.

### 1. はじめに

現在、わが国では九州、四国、東北地方の3箇所で水封式地下岩盤タンク方式の地下石油備蓄基地が運用されている。これらの備蓄基地では水封式地下岩盤タンクの長期にわたる維持管理及び安全確保という観点から、周辺岩盤の力学的安定性や地下水状況の変化などを点検・把握することは重要な管理項目となっている。力学的安定性に関しては坑道や堅坑上部室での目視点検や内空相対変位、吹付コンクリートのクラック幅の計測やサイスミックモニタリングシステムによる岩盤タンク周辺での微小破壊現象の検知などを通じて点検・評価している。地下水状況に関しては孔内水位、岩盤タンク湧水量、人工水封水供給量や間隙水圧の計測などを通じて点検・評価している。

これらの力学的安定性や地下水状況の変化は上記以外に、周辺岩盤の弾性波速度の変化として表れると考えられる。サイスミックモニタリングシステムでは微小破壊現象以外に自然地震や人工振動の波

形も記録している。このシステムの新たな利用法として、地震探鉱の分野で注目されている地震波干渉法を適用してこれらの振動波形から周辺岩盤の弾性波速度を推定することを試みた。地震波干渉法とは、地中を伝播する振動を複数の受振機により観測し、それらの振動波形に対し相互相関処理を行うことで、任意の受振機を疑似震源とした波形を合成するデータ処理技術であり<sup>1,2,3)</sup>、人工的な震源を用いることなく日常的に記録される自然地震波形等から岩盤の弾性波速度を算出することが可能である。

本報では九州地方の地下石油備蓄基地でサイスミックモニタリングシステムを設置してからの3年間で記録された自然地震波形と基地東方の採石場からの発破による人工振動波形を用いて岩盤タンクの周辺岩盤の弾性波速度を推定した結果を示す<sup>4)</sup>。次に、手法の有効性を確認するため、四国、東北地方の地下石油備蓄基地を対象に、システムの設置後3～4年間で記録された自然地震波形から周辺岩盤の弾性波速度を推定した結果も示す<sup>5)</sup>。

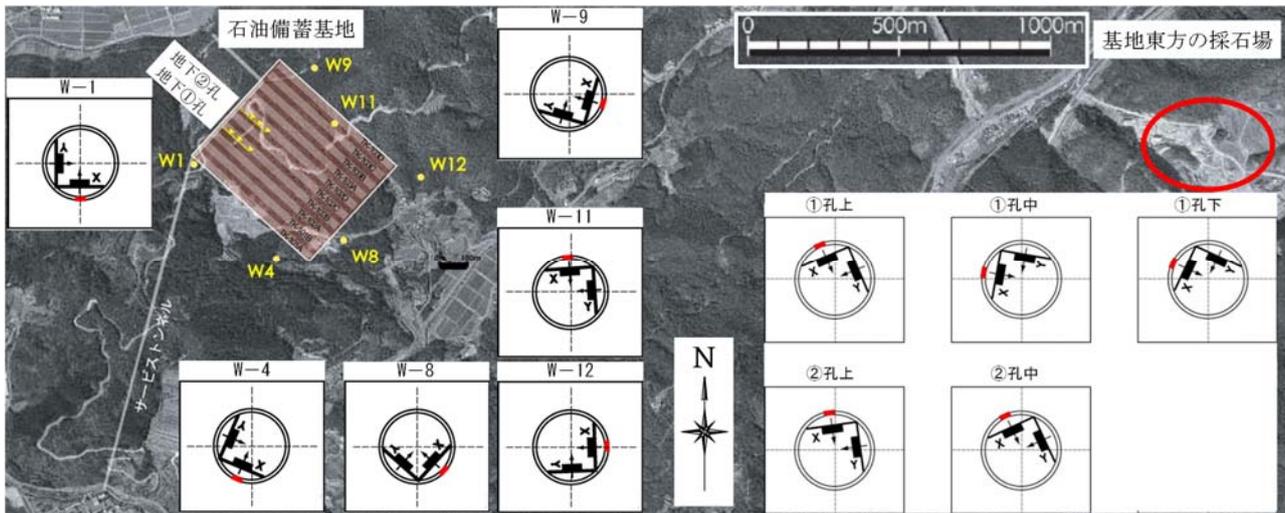


図-1 受振機の配置と X、Y、Z 成分の方向（九州地方の地下石油備蓄基地）

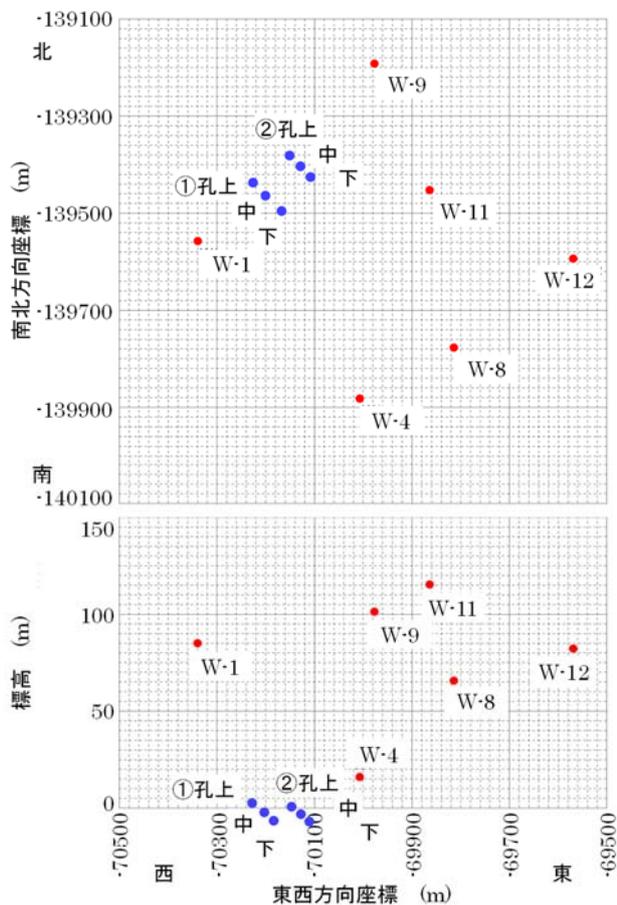


図-2 受振機の東西～南北の配置座標と標高

## 2. 受振機の配置

九州地方の地下石油備蓄基地では 2008 年に岩盤タンクを囲むように地表部の W-1、W-4、W-8、W-9、W-11、W-12 の 6 地点からの鉛直下向き孔に各 1 個、EL+3.4m レベルに設置されているサービストンネルからの斜め下向きの①孔の上、中、下に 3 個、②

孔の上、中に 2 個の計 11 個の受振機（3 成分高感度加速度計：X、Y、Z 成分）によるサイスミックモニタリングシステムが設置された。システムは数秒周期から 2kHz までの広い周波数帯域にわたる振動を検知し、サンプリング周波数 4kHz で記録している。図-1 に設置した 11 個の受振機の配置と X、Y、Z 成分の方向を示す。図中には基地の約 3km 東方の採石場の位置も示した。また、各受振機の東西～南北座標、標高を図-2 に示す。受振機は基地を網羅するように東西に約 700m、南北に 700m、標高で約 10～115m（地表面下 39～74m）の範囲に配置し、コア観察で孔周辺が地下石油備蓄基地における岩盤分類<sup>6)</sup>で M 級以上の岩盤内に埋設設置した。

## 3. 対象とした自然地震

システムを設置した 2008 年からの 3 年間に基地周辺で発生した比較的 S/N 比が高い自然地震から、時期や震源域が偏らないように合計 72 個を選定した。選定した自然地震の震源分布を図-3 に示す。



図-3 震源分布（数字は地震の番号）

## 4. 地震波干渉法による弾性波速度の推定

### 4.1 波形のローテーション処理

図-3に示した24番目の自然地震(2009年7月17日18時16分11秒、九州地方南西沖、深度8.3km、マグニチュード1.7)の波形例として①孔上の受振機で捉えたX、Y、Z成分の波形を図-4に示す。P波の到達後、約3秒後にS波が到達していることが分かる。他の10個の受振機でも同様の波形が記録されている。11個の受振機のX、Y、Z成分の方向は異なっているが、図-1に示したように既知である。そこで各受振機のX、Y、Z成分の波形に対し

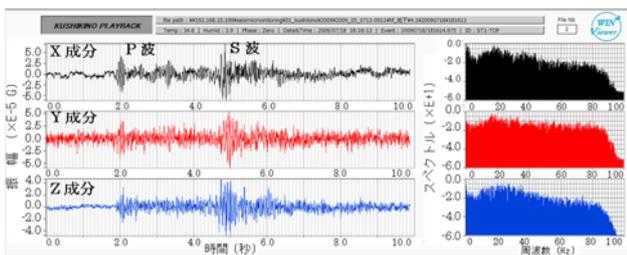


図-4 自然地震波形の一例(①孔上で受振)

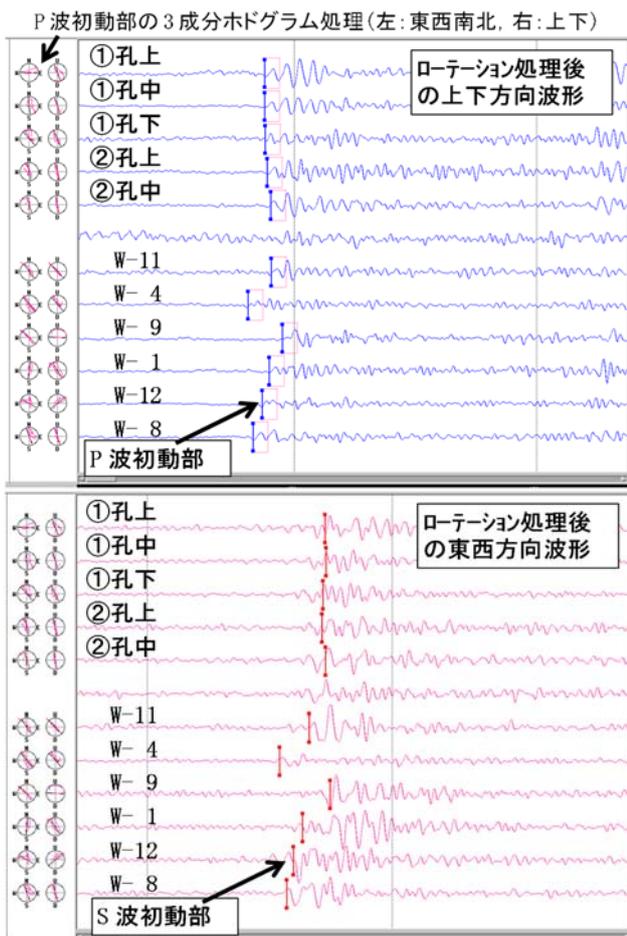


図-5 ローテーション処理後の上下・東西方向の振動波形

てローテーション処理を行い、図-5に示す様に上下、東西方向の振動波形に変換した。図左側に3成分ホドグラム処理による地震波の到来方向を示す。全ての受振機とも地震波が南東、鉛直斜め下方向から到来していることを示している。対象とした72個の自然地震に対して同じ処理を行ったところ、図-6に示す様に地震波の到来方向はそれぞれの震源方向であり、傾斜角は震源の深さには依存せずに145度(鉛直下向き35度)方向から到来していることが得られた。これは地震波が弾性波速度の速い深部基盤部を伝達し、基地直下付近から斜めに地上に向かって上昇するためと考えられる。

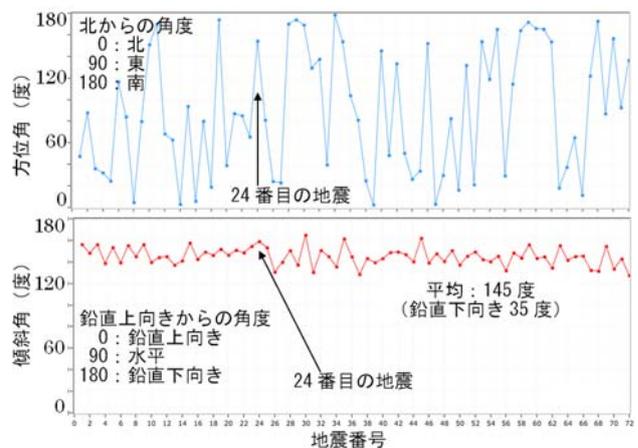


図-6 自然地震波の到来方向

### 4.2 周辺岩盤の弾性波速度の算出方法

周辺岩盤の弾性波速度の算出手順を以下に記す。

- ローテーション処理後の鉛直成分のP波初動について、任意の観測点データをリファレンスにしてその他の観測点データとの相互相関をとり、相関係数のピークを与える時間差を求める。
- 地震波面を平面と仮定し、法線方向の観測点間の距離を全ての観測点の組み合わせで求める。
- リファレンス観測点と各観測点の相互相関の時間差とその距離を全ての組み合わせについて求め、最小二乗近似にてP波速度( $V_p$ )を求める。
- 水平方向のS波初動に関しても同様にa)~c)の処理を行い、S波速度( $V_s$ )を求める。

図-3に示した24番目の自然地震に対して②孔上の観測点データをリファレンス、②孔中の観測点をデータとした場合のP波初動に相互相関処理を適用した結果を図-7に示す。また、観測点間の距離の算出方法を図-8に示す。その他の観測点データについても同様の処理を行い、全ての観測点の組み合わせについて、相互相関波形のピークの時間差と観

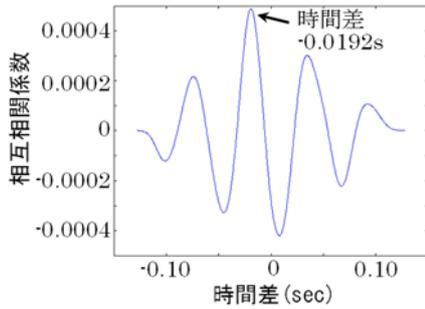


図-7 P波初動の相互相関波形

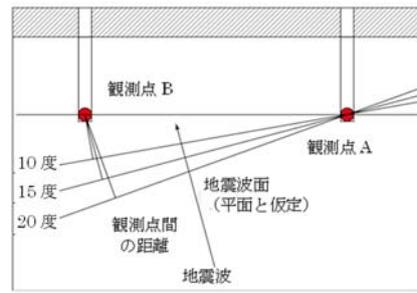


図-8 観測点間の距離の算出方法

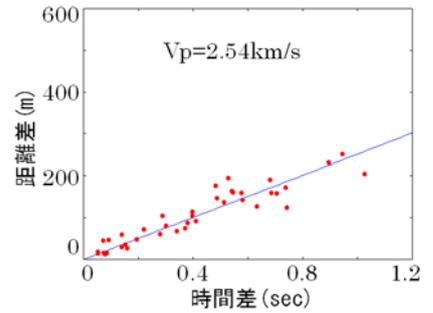


図-9 最小二乗近似による  $V_p$

観測点間の距離をまとめたものを図-9に示す。これらを最小二乗法で直線近似し、その傾きを岩盤タンクの周辺岩盤のP波速度 ( $V_p$ ) とした。同様の処理をS波初動に対しても実施し、S波速度 ( $V_s$ ) も求めた。

処理に用いた72個の自然地震波形の中にはS/N比が不十分等の理由により弾性波速度が極端な値となる場合が散見されたため、 $1.5\text{km/s} < V_p < 7\text{km/s}$ 、 $1\text{km/s} < V_s < 4\text{km/s}$ の制限を設け、逸脱する場合は除外した。また、最小二乗法に用いるデータが3個未満の場合も除外することにした。

### 4.3 弾性波速度の経時変化

岩盤タンクの周辺岩盤の  $V_p$ 、 $V_s$  の3年間の経時変化を図-10に示す。周辺岩盤の  $V_p$  の平均値は  $3.16\text{km/s}$ 、 $V_s$  の平均値は  $1.79\text{km/s}$  であった。 $V_p$  は  $2.0\sim 4.5\text{km/s}$ 、 $V_s$  は  $1.5\sim 3.0\text{km/s}$  の間で大きくばらついており、明確な経時変化は認められないようである。推定された弾性波速度のばらつきが大きいのは受振機の設置標高にあまり差が無いこと、地震波の到来方向が鉛直下向き35度方向で法線方向の観測点間の距離が小さく、角度による距離の算出誤差が大きかった影響と考えられる。

孔内水位との関係については、図-10の上図に赤線で示したW-11の孔内水位は受振機の設置標高の

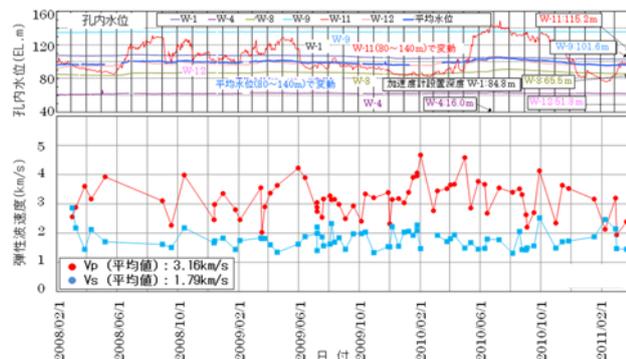


図-10 弾性波速度の経時変化と孔内水位変化 (自然地震から算出：九州地方の基地)

115mを挟んで季節的に80~140mで大きく変動している。しかし、その他の受振機は全て孔内水位以下に設置されていること、孔内水位の変動も少ないことから、タンク周辺の  $V_p$ 、 $V_s$  と孔内水位との対応は見られないようである。

弾性波速度はばらつきが大きいものの経時変化や孔内水位の変動の影響も見られず、タンク周辺岩盤の力学・地下水状況には変化が無いと考えられる。

### 4.4 採石場からの人工振動による弾性波速度

基地の約3km東方に位置する採石場から昼間の時間帯に発破と思われる人工的な振動が年間で50回以上観測されている。この人工振動は震源が同じで毎回類似した波形となっていることから地震波干渉法が適用しやすいと考えられた。

W-1の受振機で観測された人工振動の波形例を図

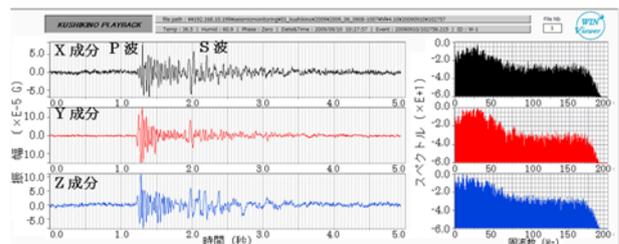


図-11 人工振動波形の一例 (W-1で受振)

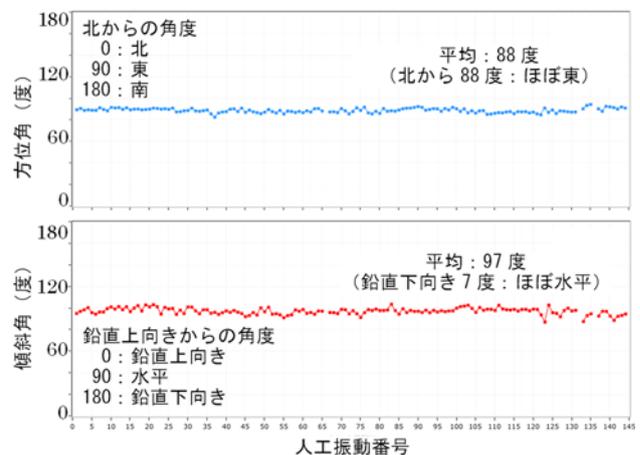


図-12 人工振動波の到来方向

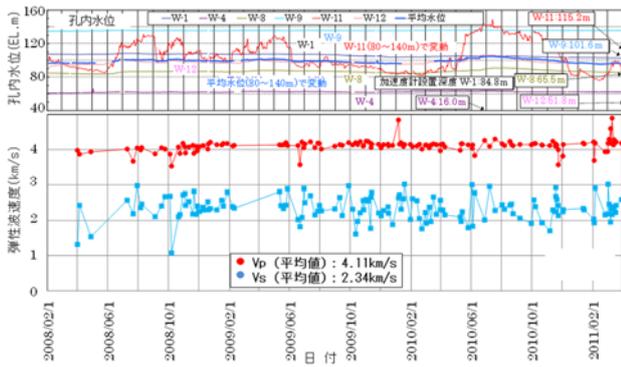


図-13 弾性波速度の経時変化と孔内水位変化  
(人工振動から算出：九州地方の基地)

-11 に示す。波形の S/N 比は自然地震に比べて高く、P 波初動部の波形は明確である。人工振動で S 波成分が少ないためか S 波初動部は不明瞭ではあるが、P 波から約 0.7sec 後に到達していることが分かる。

自然地震の場合と同様に、2008 年からの 3 年間で選定した計 144 回の人工振動波形に対し、ローテーション処理により上下、東西方向の波形に変換し、P 波初動部の 3 成分ホドグラム処理によって人工振動の到来方向を求めた。その結果を図-12 に示す。振動の到来方向はほぼ全ての波形が採石場の方向である東方、水平方向を示しており、一貫性のある人工振動であると考えられる。また、同様の手順で求めた岩盤の弾性波速度の 3 年間の経年変化を孔内水位の変化と合わせて図-13 に示す。周辺岩盤の  $V_p$  の平均値は 4.11km/s、 $V_s$  の平均値は 2.34 km/s となった。P 波初動部の波形が明確で推定された振動の到来方向も採石場位置と一致していること、受振機が東西方向の広い範囲に配置され距離差があることから  $V_p$  は非常に精度良く推定できたと考えられる。S 波は初動部の波形がやや不明瞭であったため、 $V_s$  は自然地震と同程度のばらつきを示した。

人工振動は自然地震に比べて震源や波形に一貫性があるため、地震波干渉法で精度良く岩盤の弾性波速度を推定できることを確認した。

#### 4.5 既存調査結果との対応

岩盤タンクの施工時の坑壁弾性波探査によると  $V_p$  は H 級で 3.7~5.0km/s、M 級で 1.2~5.0km/s と報告されている<sup>7)</sup>。また、サービストンネル内の①、②孔付近の弾性波速度はシステムの設置時に孔内震源で調査し、 $V_p$  は約 3.5km/s を得ている。

受振機は孔周辺の岩盤が M 級以上の位置に埋設設置された。自然地震や人工振動波形から推定された平均  $V_p$  は 3.16~4.11km/s であり、既存調査の M~H

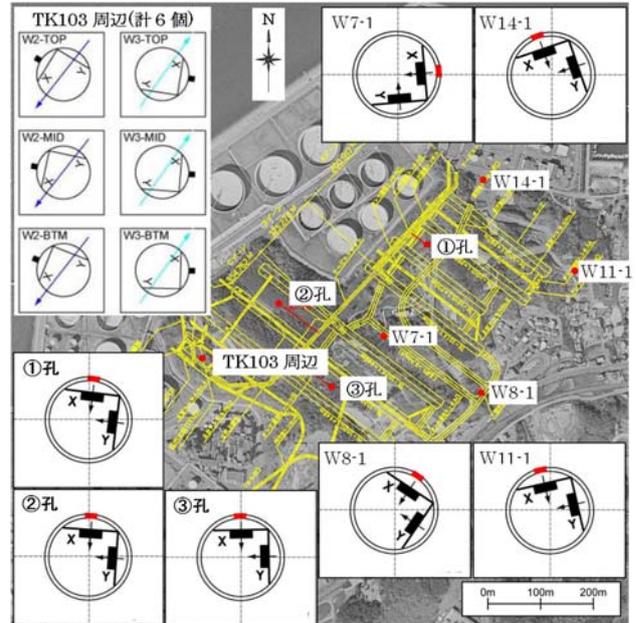


図-14 受振機の配置と X、Y、Z 成分の方向  
(四国地方の地下石油備蓄基地)

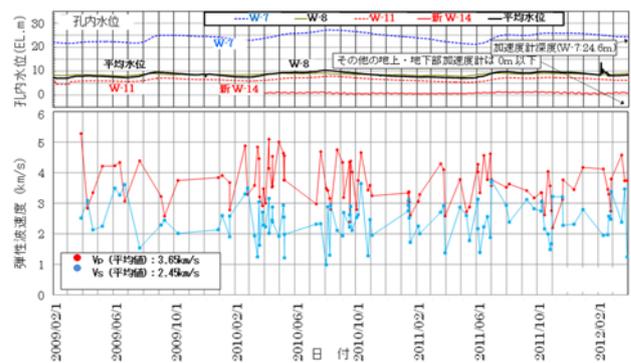


図-15 弾性波速度の経時変化と孔内水位変化  
(自然地震から算出：四国地方の基地)

級に相当し、受振機を設置したところの岩盤等級と対応している。

#### 5. 他基地における岩盤の弾性波速度

四国地方の地下石油備蓄基地では図-14 に示すように地表部、地下のサービストンネルからのボーリング孔に計 13 個の受振機によるサイスミックモニタリングシステムが 2009 年に設置された。システムは基地全体を網羅するように東西に約 700m、南北に約 400m、標高で約 60~25m の範囲に配置されている。九州地方の基地と同様に地下石油備蓄基地における岩盤分類で M 級以上の岩盤内に埋設設置した。

システムを設置した 2009 年からの 3 年間で発生した比較的 S/N 比が高い自然地震から、時期や震源

域が偏らない 98 個を選定した。地震波形のローテーション処理、3 成分ホドグラム処理による地震波の到来方向の算出、相互相関係数のピークの時間差の算出、観測点間の距離差の算出を行い、 $V_p$ 、 $V_s$  を求めた。その結果を図-15 に示す。 $V_p$  は 2.5~5km/s の範囲でばらつき、平均は 3.65km/s であった。 $V_s$  は 1~3.5km/s の範囲でばらつき、平均は 2.45km/s であった。 $V_p$ 、 $V_s$  ともばらつきはするが、経時的な変化や孔内水位変化との連動は見られず、岩盤タンクの周辺岩盤の力学・地下水状況は安定して推移していると考えられる。

また、岩盤タンク設計時に用いられた岩盤総合評価基準<sup>8)</sup>によれば、当基地の  $V_p$  は M 級以上で 3km/s 以上である。推定された平均  $V_p$  の 3.65km/s は M 級以上に相当し、受振機を設置したところの岩盤等級と対応している。

次に東北地方の地下石油備蓄基地の結果を示す。図-16 に示すように地表部からのボーリング孔に計 7 個の受振機によるシステムが 2010 年に設置された。システムは基地全体を網羅するように東西に約 500m、南北に 500m の範囲、標高で約 50~110m の範囲の M 級以上の岩盤内に埋設設置されている。同様にシステムを設置した 2010 年からの 4 年間で発生した自然地震から 98 個を選定し、 $V_p$ 、 $V_s$  を求めた。その結果を図-17 に示す。この中には 2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震（以後、大震災）を含む。 $V_p$  は 3~5km/s の範囲でばらつき、平均は 3.88km/s であった。 $V_s$  は 1~3km/s の範囲でばらつき、平均は 2.35km/s であった。 $V_p$ 、 $V_s$  とともに大震災の前後で変化や経時変化は見られないようである。また、孔内水位は漸減傾向にあるが、ほとんどの受振機の設置深度は孔内水位以下であることから、その影響も見られない。弾性波速度の 4 年間の経年変化や大震災前後での変化について検討したが、変化は認められず、岩盤タンクの周辺岩盤の力学・地下水状況は安定して推移していると考えられる。

また、岩盤タンク設計時に用いられた岩盤総合評価基準<sup>8)</sup>によれば、この基地も M 級以上の  $V_p$  は 3km/s 以上である。推定された平均  $V_p$  の 3.88km/s は M 級以上に相当し、受振機を設置した位置の岩盤等級と対応している。

## 6. まとめ

九州、四国、東北地方の水封式地下岩盤タンク方式の地下石油備蓄基地に設置されたサイスミックモニタリングシステムで取得された自然地震や人工振

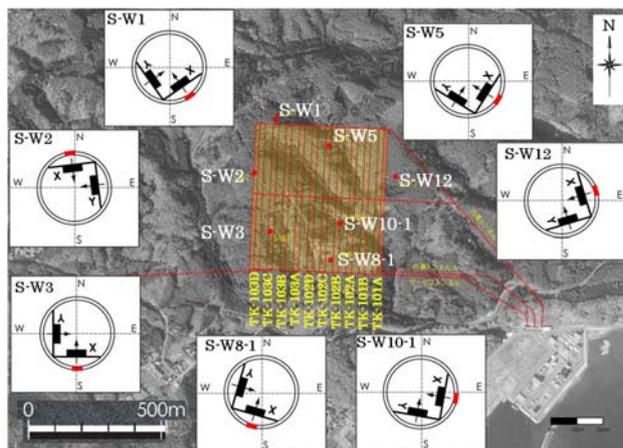


図-16 受振機の配置と X、Y、Z 成分の方向  
(東北地方の地下石油備蓄基地)

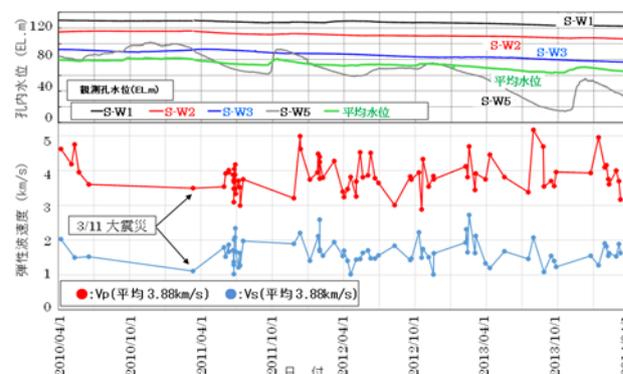


図-17 弾性波速度の経時変化と孔内水位変化  
(自然地震から算出：東北地方の基地)

動波形に対して地震波干渉法を適用し、岩盤タンクの周辺岩盤の弾性波速度を求めた。システム設置後の3~4年間の弾性波速度に関して経年変化や大震災の前後での変化について検討したが、孔内水位の変動による変化や大震災による岩盤劣化などに起因する変化は認められず、岩盤タンクの周辺岩盤の力学・地下水状況は安定していることが得られた。

自然地震は地震ごとに波形が到来する方向が異なるため、距離の算出誤差が大きく、算出された弾性波速度はばらつきやすい。一方、九州地方の基地で見られたように採石場からの人工振動は一定方向から波形が到来するため、精度良く弾性波速度を推定できることが示された。

地震波干渉法は特別な地震探査を行うことなく、自然地震や人工振動の波形を用いてタンク周辺岩盤の弾性波速度を求めることができる。大きなイベントが発生し、岩盤タンクの健全性を評価する必要性が生じた際にはイベント前後の振動波形からの弾性波速度を比較することで評価が可能であり、新たなモニタリング手法として有効であると考えられる。

## 謝辞

本研究は日本地下石油備蓄株式会社から平成26、27年度に受託した「保全管理に係る最新技術の適用性調査研究業務 -地震波干渉法による岩盤水理構造把握に関する調査研究-」の成果の一部を取り纏めたものである。本研究の実施に当たり、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構の富田敦紀様、日本地下石油備蓄株式会社の城代邦宏様、渡部利文様には多大なるご支援を頂いた。ここに記して謝意を示す。

## <参考文献>

- 1) Wapenaar, K., : "Synthesis of an inhomogeneous medium from its acoustic transmission response", *Geophysics*, 68, pp.1756-1759, 2003.
- 2) 松岡俊文, 白石和也: "地震波干渉法によるグリーン関数合成と地下構造イメージング", *物理探査* 61, pp.133-144, 2008.
- 3) Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder, R., Campman, X. and Verdel, A. : "Tutorial on seismic interferometry Part 1 Basic principles and applications", *Geophysics*, 75(5), pp.75A195-75A209, 2010.
- 4) 若林成樹, 城代邦宏, 渡部利文, 片岡俊一, 福島啓介: "地震波干渉法による水封式岩盤タンク周辺岩盤の弾性波速度の推定", 第14回岩の力学国内シンポジウム, 講演番号017, 2017.
- 5) 若林成樹, 城代邦宏, 渡部利文, 片岡俊一, 福島啓介: "地震波干渉法による水封式岩盤タンク周辺岩盤の弾性波速度変化に関する検討", 第44回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.126-130, 2016.
- 6) 蒔田敏明, 福竹養造, 星野延夫, 井口敬次, 新見健: "深部地下空洞を対象にした岩盤分類法 -石油地下備蓄基地における岩盤分類と総合評価-", *応用地質*, Vol.32, No.5, pp.240-251, 1991.
- 7) 日本地下石油備蓄株式会社: "串木野地下石油備蓄基地工事記録(岩盤土木)", 1994.
- 8) 日本地下石油備蓄株式会社: "菊間地下石油備蓄基地工事記録(岩盤土木)", 1994.