



## 岩盤タンクの気相圧変化による傾斜応答を用いた タンクの力学的安定性評価\*

廣岡 知<sup>1</sup> 山口 達也<sup>2</sup> 渡部 利文<sup>3</sup>  
山本 順也<sup>3</sup> 城代 邦宏<sup>3</sup> 保田 尚俊<sup>4</sup>  
塚田 和彦<sup>4</sup> 小池 克明<sup>5</sup> 朝倉 俊弘<sup>4</sup>

### Mechanical Stability Evaluation of Water-sealed Type Underground Rock Cavern Using Tilt Response to Gas Pressure Change in Cavern

by Satoshi HIROOKA<sup>a\*</sup>, Tatsuya YAMAGUCHI<sup>a</sup>, Toshifumi WATABE<sup>b</sup>, Nobuya YAMAMOTO<sup>b</sup>,  
Kunihiro JODAI<sup>b</sup>, Naotoshi YASUDA<sup>c</sup>, Kazuhiko TSUKADA<sup>c</sup>,  
Katsuaki KOIKE<sup>c</sup> and Toshihiro ASAKURA<sup>c</sup>

- a. JX Nippon Exploration and Development Co., Ltd., 1-9, Kanda-Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0054, Japan (\*Corresponding author, E-mail: hirooka@tankai.co.jp)  
b. Japan Underground Oil Storage Co., Ltd., 1-1-30, Shibadaimon, Minato-ku, Tokyo, 105-0012, Japan  
c. Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C, Kyoto, 615-8540, Japan

In addition to hydrological characterization of water-sealed type underground rock caverns, their mechanical stability is constantly monitored by measuring several properties, such as earthquake-induced vibration, strain, and tilt. Among them, tilt measurement is the most accurate monitoring method for rock deformation because of the tiltmeter's high resolution of  $10^{-9}$  rad, which enables the detection of minute deformations caused by earth tide, rock responses to earthquake, change in atmospheric pressure, and artificial disturbance by operation. This study aimed to correctly extract these responses from long-term tilt data measured by a high precision tiltmeter at the Kushikino station and clarify the mechanism of tilt change as a result of deformation of rock mass. Tilt changes due to a small change in the gas phase pressure at the top of the rock cavern, approximately 10 kPa pressure fluctuation, were analyzed and discussed. The gradient response due to the gas pressure change was extracted from the measurement data by BAYTAP-G, and its magnitude was identified as 2 to 8 nrad, which was almost the same tilt response magnitude observed at an issuance of stored crude oil. This tilt response to the increase in tank gas pressure was numerically confirmed to originate from minute elastic deformation of rock masses, by using finite element method. Because fluctuation of the gas phase pressure can be continuously monitored, the effectiveness of tilt measurement was proved as a minute strain sensor for deformation of the water-sealed type underground rock cavern.

**KEY WORDS:** Tank Cavern, High-Precision Tiltmeter, Tilt Response, Gas Pressure, Monitoring

#### 1. 概 要

1973年のオイルショックを契機とし、石油備蓄法が1976年に施行されて以降、我が国では石油の安定供給確保のため、その備蓄が行われている。民間を含む国内の石油備蓄設備は、直接タンクの状況を確認できる地上式、半地下式および洋上式タンクによる貯蔵方式が大半を占めているが、その他の方式として、水圧により貯蔵物を封じ込める水封式地下岩盤タンク方式がある<sup>1)</sup>。この方式は設備の機能などタンクの健全性を直接確認することができないため、岩盤タンクの水封機能に関する監視が重要となり、湧水量、水封水供給量、水封水位、地下水位等の水理計測データ

のリアルタイム計測が実施されている。これに加えて岩盤タンク本体の力学的な安定性評価の要求も高まり、1990年代後半から欧米の地下石油備蓄、鉱山、大規模地下空洞建設、地盤のモニタリング等の分野において実績のある調査法と計測法（サイスミックモニタリング、光ファイバー歪計測及び間隙水圧計測等）の適用性に関する検討が行われてきた<sup>2)</sup>。一方で、高精度傾斜計は高い精度を有するものの地下空洞の監視に適用された事例は無かったが、石油の二次回収<sup>3)</sup>、地熱貯留層のモニタリング、火山監視<sup>4-6)</sup>及び地殻変動観測<sup>7)</sup>などに利用されていることが調査されていた。その実用性・適用性を確認する目的で2003年に串木野国家石油備蓄基地において試験計測が開始された。試験計測において高精度傾斜計は、地球潮汐、気圧変動、地震、および原油の受払に伴う岩盤の変形挙動を計測できることが実証され<sup>8)</sup>、その実用性が確認された。

岩盤タンクは、地震などにより周辺岩盤に歪みが生じると、その応答として微小な変位すなわち傾斜にも変化が現れることが知られている<sup>9)</sup>。既往の研究では、地震などのイベント、石油の二次回収、岩盤温度および気圧などの気象条件の変化と、周辺岩

\*2017年1月4日受付 2017年4月11日受理

1. 正会員 JX 金属探開株式会社 開発事業部  
2. JX 金属探開株式会社 開発事業部  
3. 日本地下石油備蓄株式会社 業務部 岩盤技術室  
4. 京都大学大学院 工学研究科  
5. 正会員 京都大学 工学研究科 教授  
【著者連絡先】FAX: 03-5577-4948

E-mail: hirooka@tankai.co.jp

キーワード: 岩盤タンク, 高精度傾斜計, 傾斜応答, 気相圧, モニタリング

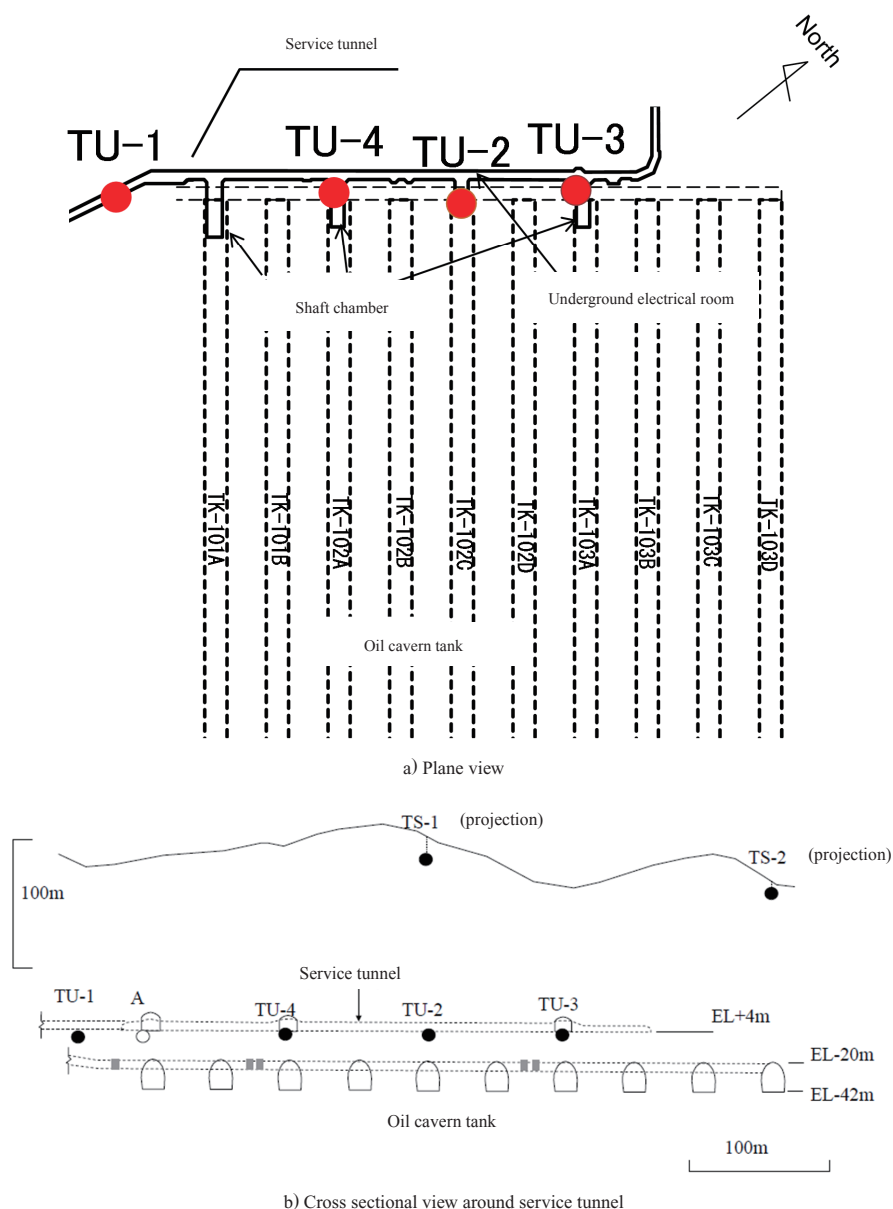


Fig.1 Placement of high precision tiltmeter in Kushikino base underground oil storage base.

盤の高精度傾斜計測値との相関を定性的あるいは定量的に評価をした例<sup>3,8)</sup>がある。しかしながら、これらの並行観測結果と傾斜計の計測結果および数値解析結果に基づいて、大規模地下空洞の力学的安定性を定量的に評価・考察した事例は見当たらない。そこで本研究では、串木野基地で2013年の内圧管理値変更試験前後に取得された傾斜計の計測データと数値解析を用い、傾斜計の計測精度およびその応答を用いた岩盤タンク監視の有用性について考察する。

## 2. 計測の概要

### 2・1 高精度傾斜計

本研究では米国 Pinnacle 社製 5000 series の高精度傾斜計を用いた。傾斜センサーは水準器と同様の気泡式であり、直径約 6 cm の筐体内に直交 2 方向の傾斜が計測できるように設置され、電解液で満たされたガラスケース内に気泡が封入され、電極が装着されている。筐体が傾くと気泡が移動するので、電極による計測電圧がわずかに変化し、これを傾斜に変換する。傾斜は 1 nrad ( $6 \times 10^{-8}$ ) の分解能で  $-8 \sim +8^\circ$  の範囲で測定できる。岩盤の相対変位や

ひずみの計測計器として中空相対変位計測 (精度 0.1 mm 程度)、岩盤変位計 (精度 0.1 mm 程度)、光ファイバー歪計 ( $10^{-5}$  strain) 等があるが、これらより傾斜計の方が 3 オーダー以上高精度である。

筐体内には方位計と温度計も付属し、傾斜と同時に計測される。目的に応じて計測間隔を 1 秒～4 分に設定でき、メンテナンス時を除き 1 分間隔で本計測を実施している。

傾斜計の設置では、およそ直径 150 mm で深さ 5 m のボーリング孔に塩化ビニル管を建込み、外部をセメンチングして管内を大気圧とする必要がある。設置の手順は、1) 内管底までの深さ確認と孔内の水の除去、2) 方位や傾斜極性等に関する計器の健全性確認、3) 珪砂 (敷砂) 投入、4) 傾斜計降下、5) 方位設定、6) 珪砂を筐体の 7～8 割埋まる程度まで投入することで傾斜計の固定、7) 設置から数時間～1 日後での動作確認、である。センサーの自動レベル機能により、設置時に生じるわずかな筐体姿勢の傾きは自動補正される。

### 2・2 串木野基地高精度傾斜観測点

串木野基地の岩盤タンクは卵型断面で幅 18 m、高さ 22 m、長さ 555 m の大きさであり、10 本が Fig. 1 のように配置されている。

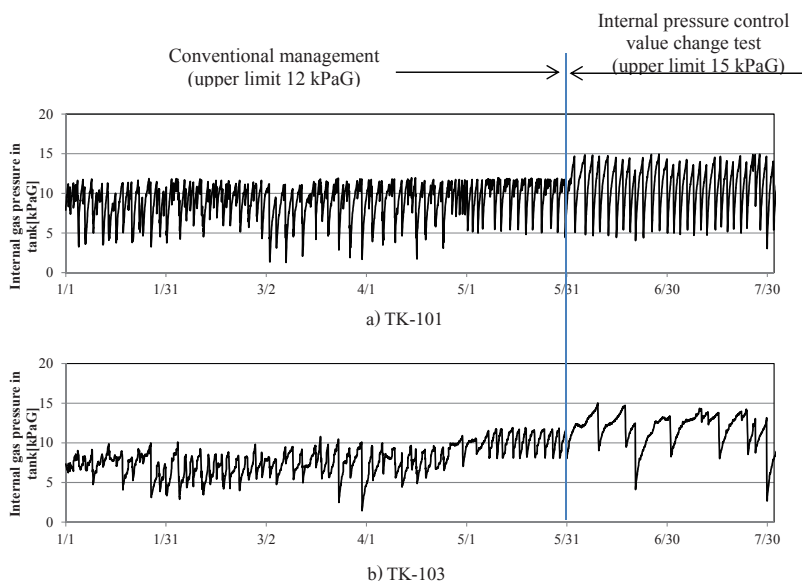


Fig.2 Internal gas pressure measurements in TK-101 and TK-103 during the period from January 1 to July 31, 2013.

左端 2 本は TK-101A・B, 中央 4 本は TK-102A・B・C・D, 右端 4 本は TK-103A・B・C・D と記号付けられ, 同じ TK 記号のタンクは連通している。高精度傾斜計の測点は, 岩盤タンク近傍の標高 0m に設けられた TU-1, TU-4, TU-2, TU-3 (Fig. 1 a) や b) の左 (南西) 側からの記号), および地表からの観測孔に設置された TS-1 と TS-2 の 6 つからなるが以降の検討では, 岩盤タンクに近接した TU-1 ~ 4 に着目する。TU-1 はサービストンネル軸方向 (北北東) が X 軸, その直交 (西北西) が Y 軸とする。また, TU-2 から TU-4 は, 岩盤タンク長軸に直交する方向 (北東方向) を X 軸, 平行な方向を Y 軸とする。

2・3 内圧管理値変更試験

水封式の岩盤タンクは水封機能を維持するため, 原油のタンク内循環運転という降圧運転により, 岩盤タンク内の気相部の圧力が運用範囲の上限を超えることのないように一定に保たれている。降圧運転頻度の減少による電力消費量の縮減を目的とし, 気相圧力の運用上限値を上げることが検討された。この操業合理化の一環として, 2013 年より気相圧力を段階的に上昇させる「内圧管理値変更試験」が実施されている。この中で, 本研究では試験開始当初の 2013 年 6 月 ~ 8 月初旬を含む 2013 年 1 月 ~ 8 月初旬の内圧変動を解析対象とする。この理由としては, 試験前後の傾斜応答の変化が比較できるためである。

気相圧力データは右肩上がりりの鋸刃状に変化するが, 一定の範囲内で変動していることがわかる (Fig. 2)。この鋸刃状の圧力上昇は原油の蒸気圧増加, 瞬間的な圧力低下は降圧運転の実施に伴う現象である。内圧管理値試験実施後の降圧運転に伴う気相圧の瞬時的な低下は最大で約 10 kPa 程度であり, これは水頭に換算すると約 1 m のわずかな水圧変化に相当する。これに起因した微小な岩盤変形が抽出できるかについて明らかにする。

3. 傾斜データの解析法

高精度傾斜計の元データには, 長周期的なトレンド, 潮汐や気圧変動に起因した短期的変動, および地震等に伴う瞬時的な変動が含まれている。このうち短期的変動の寄与が大きいと考えられるため, 地球潮汐や地殻変動等の観測データの解析などに広く用いられている BAYTAP-G<sup>10)</sup> によりそれらを分離する。なお, BAYTAP-G の解析に使用する気圧及び岩盤タンク内圧データは, 1 時間ごとであるため, 計測データを間引き, 1 時間間隔のデータに変換している。

BAYTAP-G では, 潮汐成分, 並行観測データの応答, およびドリフトの線形結合として観測値の時系列  $y_n$  を以下の式でモデル化する。

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

ここで第 1 項は潮汐項であり,  $m$  は総数  $M$  の分潮群での番号,  $\alpha_m$  と  $\beta_m$  は潮汐定数,  $C_{mn}$  と  $S_{mn}$  は分潮番号  $m$  の理論値,  $b_k$  は並行観測データ  $x$  に対する応答係数,  $K$  は応答係数の長さ (遅れ時間で最大 3, 本解析では 3 時間),  $d_n$  はドリフト成分, および  $\epsilon_n$  は不規則な観測誤差成分を表す。応答係数  $b_k$  などは, 最小 2 乗法により次式の制約条件付き誤差関数  $J(d)$  を最小化することで求められる<sup>10)</sup>。係数  $v^2$  はドリフトの滑らかさを規定するものである。

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

傾斜計で観測される, 潮汐応答は 500 ~ 1,000 nrad, 気圧応答は 500 ~ 1,000 nrad, ただし, 台風接近時には 2,000 nrad 程度, 原油受払時は約 60 kPa の内圧 (貯蔵物重量圧) の変化が生じ, この傾斜応答は 200 rad である<sup>8)</sup>。岩盤タンクの気相圧力の変化は約 10 kPa 程度であることから, その傾斜応答は数十 nrad オーダー程度と小さいことが推定される。

気相圧応答は, 他の応答より 1 ~ 2 オーダー小さいと考えられるので, これを抽出するためには高い精度で潮汐及び気圧応答を抽出・除去することが不可欠となる。よって, 本研究では, 第一段階: 潮汐応答と気圧応答の抽出, および精度確認, 第二段階: 岩盤タンクの気相圧の応答の抽出, のステップで BAYTAP-G 処理を行う。

4. 傾斜応答の計測・解析結果と考察

4・1 気相圧応答の抽出結果と特徴

ここでは, 岩盤タンク TK-103 に近接し当該タンクの内圧変化に対する応答が最も大きい TU-3 測点の X 軸データを取り扱う。BAYTAP-G による各種成分の抽出結果として, 傾斜元データと

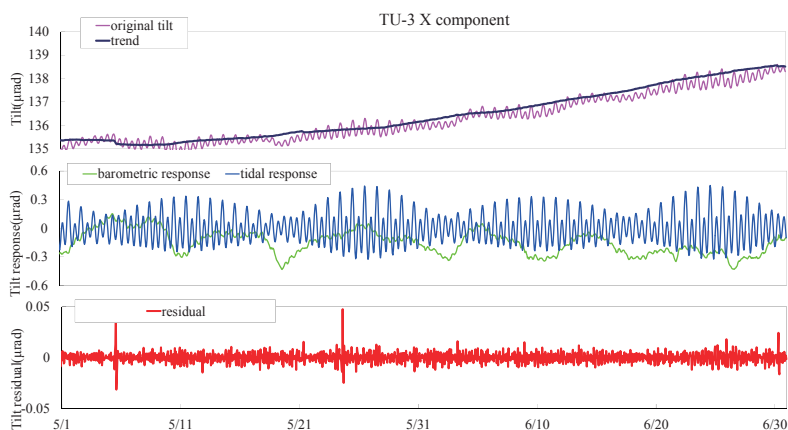


Fig.3 Tilt response of TU-3X component during the period from May 1 to July 1, 2013 (upper Fig. : original tilt and calculated trend, middle Fig. : tidal response and barometric response, bottom Fig. : residual).

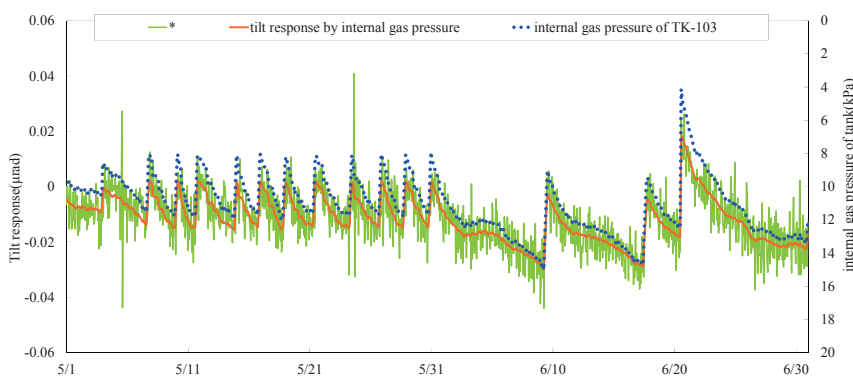


Fig.4 Internal gas pressure at TK-103 (blue dot), the response of TU-3X component (orange), and time series calculated by subtracting trend, tidal response, barometric response from original tilt data (\*green curve), during the period from May 1 to July 1, 2013.

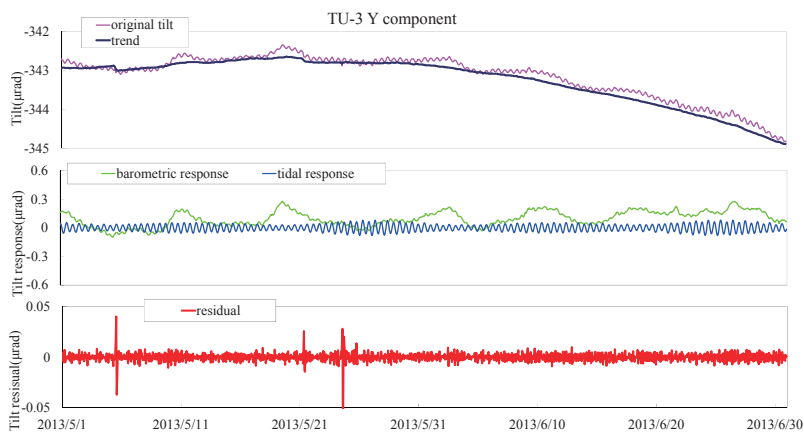


Fig.5 Tilt response of TU-3Y component during the period from May 1 to July 1, 2013 (upper Fig. : original tilt and calculated trend, middle Fig. : tidal response and barometric response, bottom Fig. : residual).

トレンド成分、潮汐応答と気圧応答成分、および元データからこれらの成分を差し引いた残差成分の時間的変化を Fig. 3 に表す。図から潮汐応答と気圧応答成分が除去されて、滑らかなトレンドとなっていることが確かめられる。一方、残差成分は概ね 10 nrad 程度でランダムな変動を示しており、岩盤タンク気相圧応答成分などの他の外乱要因による変動が含まれていると考えられる。

次に元データから気圧応答成分のみを差し引き、時系列データを作成した。このデータに対して岩盤タンク内圧データを並行観測データとし、BAYTAP-G による解析を再実行した。傾斜

元データからトレンド、気圧応答、潮汐応答をそれぞれ差し引いた時系列(緑線)、TK-103 タンクの気相圧に対する気相圧応答(橙線)、および岩盤タンク気相圧の計測結果(青点線)を Fig. 4 に示す。気相圧応答は岩盤タンク内圧とほとんど対応しており、BAYTAP-G により内圧応答がうまく抽出されている。したがって、潮汐応答、気圧応答、およびトレンドを適切に推定し除去することにより、岩盤タンク気相圧変化に起因した傾斜変化を抽出できたといえる。

X 軸成分と同様に Y 軸成分データを処理したものを Fig. 5 お

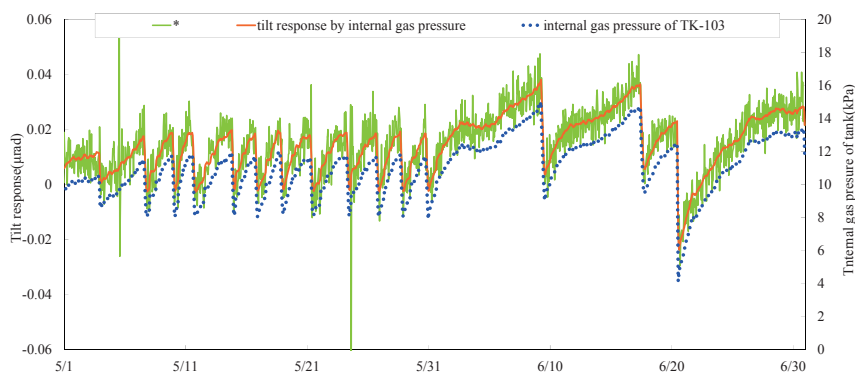


Fig.6 Internal gas pressure at TK-103 (blue dot), the response of TU-3Y component (orange), and time series calculated by subtracting trend, tidal response, barometric response from original tilt data (\*green curve), during the period from May 1 to July 1, 2013.

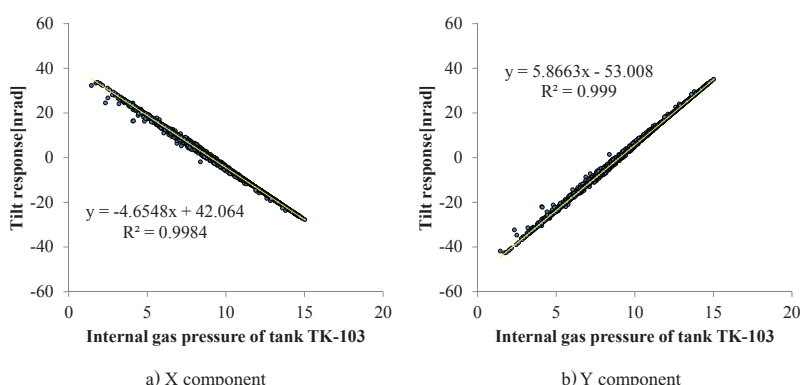


Fig.7 Scatter diagram of gas phase pressure and its tilt response at TU-3.

よび Fig. 6 に示す。Fig. 6 中のグラフの緑線は元の傾斜データから BAYTAP-G により抽出したトレンド、潮汐応答および気圧応答を差し引いた時系列であり、気相圧応答に残差が加算された時系列となっている。Y 軸成分についても気相圧応答と岩盤タンク TK-103 気相圧の推移はほぼ対応していることが分かる。5 月末以前の降圧運転に伴う気相圧応答の急変化は約 0.02 μrad と、残差の振幅とほぼ同程度ある。これに対し、内圧管理値変更試験が開始された 6 月以降では、降圧運転による気相圧応答の急変化は約 0.04 μrad と残差の振幅より数倍大きく、変化が明瞭である。

以上から、気相圧の変化幅 5 kPa 未満の場合気相圧応答の検出は困難であるが、10 kPa 程度以上の変化幅を有する場合には、岩盤の傾斜応答として把握することが可能であること、言い換えれば水頭換算 1 m 程度以上の圧力変化に対する傾斜変化を把握可能であることが分かる。

このような微小な傾斜応答を BAYTAP-G により抽出できた理由として、BAYTAP-G には約 1,000 種類の分潮成分を精密に取り込んだ調和関数が組み込まれており<sup>10)</sup>、潮汐応答の抽出精度が高いこと、並行観測の線形関数項を用いて気圧応答が適切に除去できること、およびある程度の滑らかさを有するトレンドを算定できることがあげられる。

Fig. 7 は最も傾斜応答が大きな TU-3 測点の X 及び Y 成分傾斜応答と TK-103 岩盤タンクの気相圧実測値の関係を表したものである。気相圧実測値と傾斜応答の間には決定係数 0.99 以上の相関が認められ、気相圧変化に対して、X 成分は逆相関、Y 成分は正相関を示す。例えば、TU-3 の X 成分の気相圧応答は  $y = -4.7x + 40$  という一次式で近似できる。ここで、y は気相圧に対する線形傾斜応答、x は気相圧上昇量を表す。この回帰式から TK103 タンク内圧が 1kPa 上昇すると、TU-3X での傾斜は

Table 1 Tilt response of each measurement point per 1 kPa to tank pressure increase.

a) Tilt response per 1 kPa gas pressure increase in TK-103.

site	tilt response[μrad]		
	X	Y	magnitude
TU-1	-2.0	0.9	2.2
TU-2	0.7	1.0	1.2
TU-3	-4.7	5.9	7.5
TU-4	-0.1	3.8	3.8

b) Tilt response per 1 kPa gas pressure increase in TK-101.

site	tilt response[μrad]		
	X	Y	magnitude
TU-1	-0.7	-0.1	0.7
TU-2	0.4	1.0	1.0
TU-3	-0.2	0.3	0.4
TU-4	1.2	1.7	2.1

-4.7 nrad 変化することがわかる。これらの結果をもとに、TK-103 タンクの気相圧 1 kPa 上昇に対する TU-3 での傾斜応答合成値を求めたところ約 8 nrad と得られ、他の坑内測点では 1 ~ 4 nrad の応答が見積もられた (Table 1)。同表には、岩盤タンク TK-101 の気相圧変化に対する TU-1 ~ TU-4 における傾斜応答についても示した。

この内圧上昇に起因した傾斜の方向と大きさをベクトルで表すと Fig. 8 及び Fig. 9 のようである。岩盤タンク TK-101 の気相圧 1 kPa 上昇に対する傾斜応答はその最も近傍にある測点 TU-4 が最も大きく約 2 nrad であり、他の傾斜観測点では 1 nrad 以下であっ

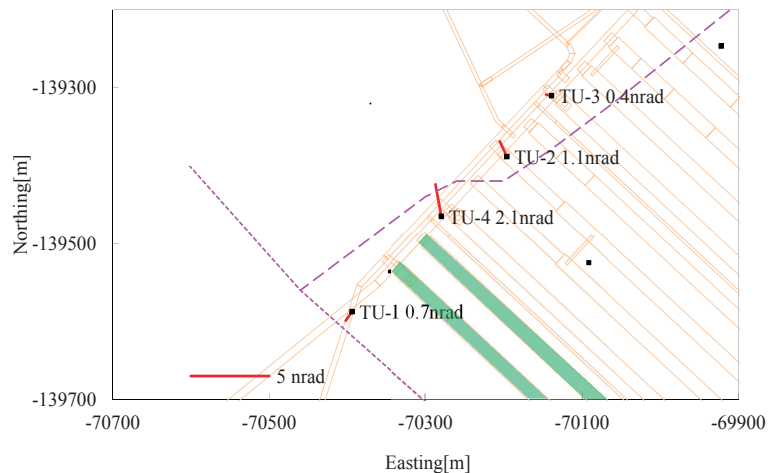


Fig.8 Magnitude and direction of the measured tilt response amount per 1 kPa internal gas pressure in TK-101. Green is rock tank TK-101, pink wavy line is a fault confirmed at the time of construction.

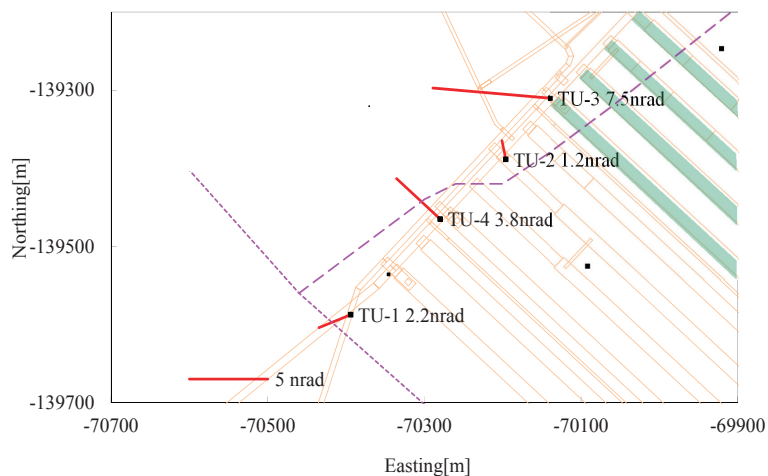


Fig.9 Magnitude and direction of the measured tilt response amount per 1 kPa internal gas pressure in TK-103. Green is rock tank TK-103, pink wavy line is a fault confirmed at the time of construction.

た (Fig. 8)。TU-4 の気相圧変化に伴う傾斜応答は 2004 年緊急放出訓練時の油面低下に対する傾斜応答約 3 nrad/kPa<sup>8)</sup> とほぼ同程度の値を示し、方向もほぼ同じであった。

一方、タンク TK-103 の気相圧 1 kPa 上昇に対する傾斜応答はその最も近傍にある測点 TU-3 が最も大きく約 8 nrad であり、他の傾斜観測点では 4 nrad 以下であった。TU-3 と TU-1 では西側傾斜で、これらに挟まれた 2 測点では少し北側に傾斜するという特徴が現れている (Fig. 9)。

TK-101 の気相圧 1 kPa 上昇に対する TU-4 の応答は、TK-103 の気相圧 1 kPa 上昇に対する TU-3 の応答の約 1/4 となっているが、この理由としては、1) タンク TK-103 の容量が TK-101 の容量より大きい (約 2 倍)、2) 地質の違い、が考えられる。タンク TK-103 の領域の岩盤等級が主に L ~ M 級であるのに対し、タンク TK-101 周辺の岩盤等級は M ~ H 級と良好であることから応答量に相違が生じたと推定される。なお、串木野基地設計において岩盤等級は L, M, H, Hv の 4 等級が設けられ、設計変形係数は L 級 1.6 GPa, M 級 2.6 GPa, H 級 4 GPa とされた<sup>11)</sup>。

なお、各測点の傾斜値にはタンク TK-101, TK-102 および TK-103 の気相圧の変動の影響が含まれるが、本論では各タンク別個の内圧に対する応答を求めた。このため BAYTAP-G の解析による残差成分には対象としたタンク以外のタンクの気相圧応答が含

まれていると考えられる。今後、傾斜値から 3 タンクの気相圧変動の応答成分を精密に分離・抽出することが課題である。

#### 4・2 数値解析による岩盤タンク変形挙動推定の検証

Fig. 9 に示した岩盤タンク TK-103 気相圧上昇に対する TU-3 測点の傾斜変動ベクトルはあたかも岩盤タンク天端部が隆起するような挙動と推定される。この事象を検証できる手段は、現時点では数値解析のみである。そこで、岩盤タンク TK-103 の気相圧力を 1 kPa 増加させた場合の周辺岩盤の変形を二次元有限要素法 (FEM) により計算した。併せて、岩盤タンク周辺に生じた傾斜、ひずみ、および応力変化量についても考察する。解析は、岩盤タンク長軸の直交方向の断面をモデルとし、平面ひずみ状態を仮定する。対象範囲は水平方向 650 m、鉛直方向 200 m であり、10 個の岩盤タンクの大きさ、位置、形状は設計断面に合わせた (Fig. 10)。なお、岩盤タンク TK-101 は A および B の 2 空洞、タンク TK-102 は A ~ D の 4 空洞および TK-103 は A ~ D の 4 空洞からなり、例えば TK-102A ~ TK-102D はトンネルにより接続しており一つのタンクを構成している。岩盤と原油の力学定数は Table 2 のように与える。モデル領域の鉛直方向両端は水平方向の変位、および領域下端は鉛直方向の変位をそれぞれ拘束したディリクレ境界とする。上端は変位を拘束しないノイマン境界である。領域は中間節点の無い三角形要素で分割する。試験前後で土被り圧は変化

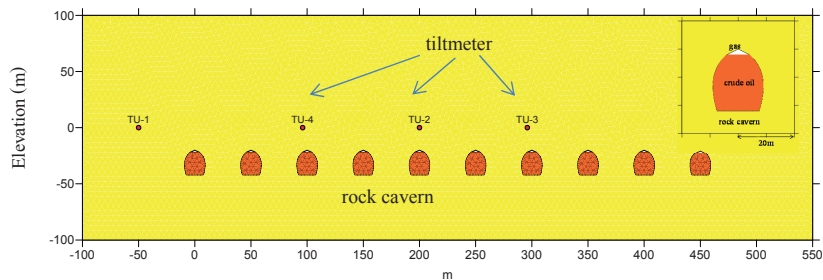


Fig.10 Numerical analysis model.

Table 2 Input parameter for numerical analysis.

Item	Young's modulus	Poisson's ratio	Remarks
rock	4GPa	0.25	H class rock <sup>11)</sup>
crude oil	1GPa	0.49	refer to science chronology <sup>12)</sup>

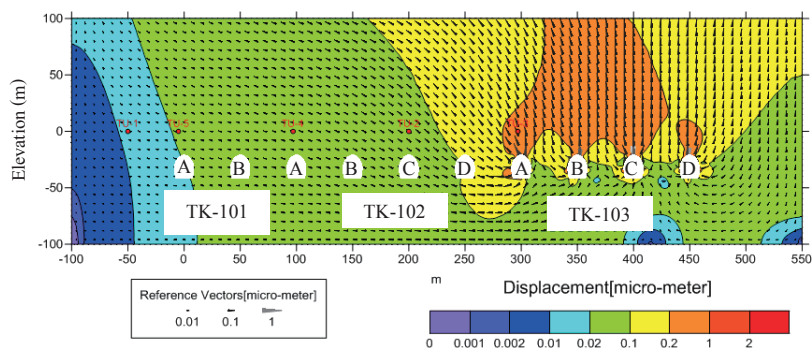


Fig.11 Magnitude and direction of displacement per 1 kPa internal gas pressure increase in TK-103 (the unit of the displacement is μm).

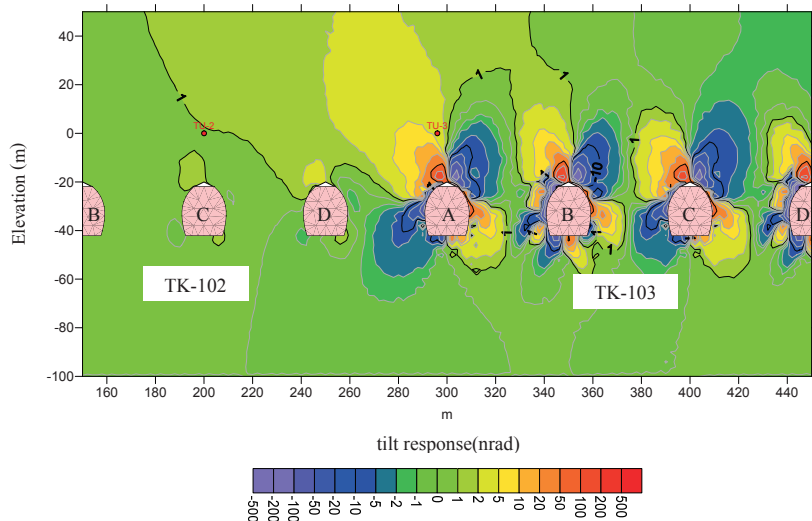


Fig.12 Calculated tilt response contour map per 1 kPa internal gas pressure increase in TK-103 (warm color: counterclockwise, cold color: clockwise).

しないので岩盤の自重は考慮せず、岩盤タンク気相部相当の要素 (Fig. 10 の白色部分) に面荷重を作用させることで気相圧を表現する。

Fig. 11 に TK-103 の気相圧力を 1 kPa 増加させた場合の岩盤変位の大きさと方向を示す。これからいずれの岩盤タンクでも天端付近で岩盤が上方に変位する傾向にあり、その変位は TK103B 天

端で最も大きく、ほぼ上向きに 1 μm 程度である。この変位量を精度よく計測することは困難である。次に、傾斜変化の分布を Fig. 12 に示す。傾斜測点位置の下方に空洞が存在し、空洞内の圧力が上昇するとわずかにタンク上方の岩盤が押し広げられるような運動が生じ、タンク右側では時計回り、左側では反時計回りの傾斜変動が生じると推測できる (Fig. 13)。岩盤タンク TK-103

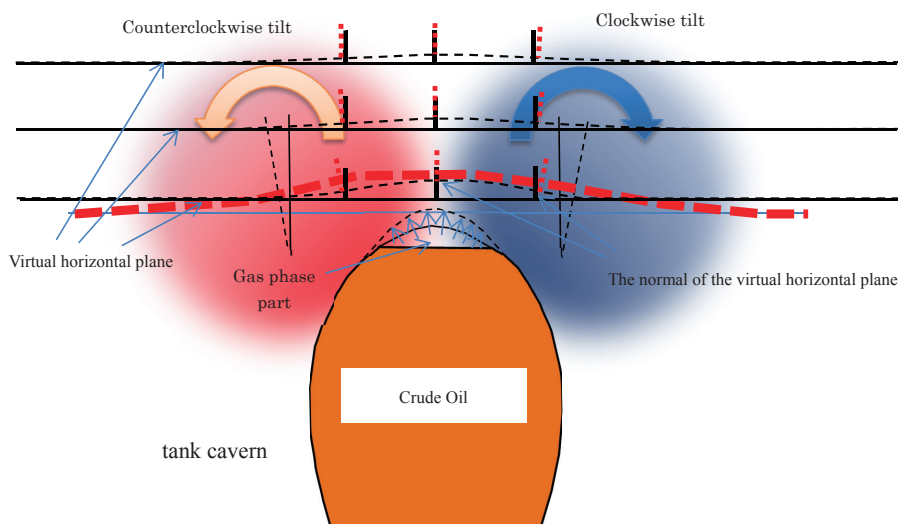


Fig.13 Interpretation of tilt response around upper part of tank section.

ユニットのタンク内圧の 1 kPa 増加により、該当タンクの上方でほぼ対称に正負の傾斜ゾーンが現れているのがわかる。TU-3 測点での X 方向の傾斜変化は 4.5 nrad と得られ (Table 3 参照)、これは同測点での実測応答 4.7 nrad とほぼ同じである。よって、岩盤タンクの気相圧の上昇は、約 20 m 上方に設置された高精度傾斜計測点に傾斜変化として現れることが数値解析によって確かめられた。微小な気相圧の上昇でも岩盤タンク天端部は膨らんだことが、傾斜計によって捉えられたといえる。一方、TK-103 から離隔した TU-1 及び TU-4 測点の解析値は、実測値よりも小さい結果となったが、その理由として今回の解析では地質 (岩盤等級) の不均質性を考慮しなかったためと考えられる。

FEM 結果に基づくと岩盤タンク周辺において数百 nrad/kPa、すなわち 1 kPa の気相圧上昇に対し 1  $\mu$ rad 程度の傾斜変化が生じたことになる。これは、岩盤タンク周辺で変位が発生した場合、傾斜測点ではその数百分の 1 の変動として現れることを意味している。本研究で対象としたタンク内天端付近気相圧の変動による傾斜変化は微小にもかかわらず BAYTAP-G の適用によって抽出できたことから、岩盤タンク周辺異常を高精度傾斜計により十分に把握できることを明らかにできた。

以上の知見から、高精度傾斜計においてなんらかの傾斜応答が観測されたら、1) 基地外部の作用 (例えば、気圧変動、地震等) によるものか?、2) 1) が否定される場合、タンク周辺にその原因があるか? (周辺の間隙水圧等の並行観測に異常が認められる)、について確認することとなると考えられる。岩盤タンク付近の傾斜応答が例えば岩盤の破壊歪 (通常  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  オーダー) 相当の傾斜変化 (1,000  $\mu$ rad  $\sim$  10,000  $\mu$ rad) に達すれば、タンク空洞周辺で何らかの破壊現象が起きる可能性が高いといえる。解析による検討の知見を考慮すると、傾斜観測位置ではその約百分の一の傾斜応答すなわち、10  $\mu$ rad  $\sim$  100  $\mu$ rad の変化が生じた場合、注意が必要といえる。すなわち、地震等の外乱を除き、タンク近傍に起因する傾斜変化では約 10  $\mu$ rad  $\sim$  100  $\mu$ rad 以上の変化が起きない限り安全といえる。

##### 5. まとめと今後の課題

本研究では高精度傾斜計データを用いた岩盤タンクの力学的安定性評価手法の構築を目的とし、傾斜計データからの気相圧応答成分の抽出と傾斜ベクトルの算出、および数値解析により傾斜の大きさと方向の検証を行った。得られた主な成果を以下に要約する。

Table 3 Calculated tilt response of X component per 1 kPa internal gas pressure increase in TK-103.

Site	X component tilt[nrad]
TU-1	0.0
TU-2	1.0
TU-3	4.5
TU-4	0.3

- (1) BAYTAP-G を用いれば傾斜データから潮汐と気圧応答成分、および長期的トレンド成分を除去することができ、岩盤タンク気相部の内圧 1 kPa 上昇に起因した岩盤の 2  $\sim$  8 nrad という微小な傾斜変化が抽出できることがわかった。
- (2) 傾斜の大きさと方向を解釈するために、平面ひずみ状態を仮定した有限要素法を用いて、上記の内圧上昇に伴う周辺岩盤の変位を計算した。その結果、1 kPa のタンク気相圧上昇に対してユニット中央付近の天端付近で約 1  $\mu$ m の上方鉛直変位が推定され、ユニットの 4 タンクのいずれでも左右対称の傾斜変化となることがわかった。
- (3) 1kPa のタンク気相圧上昇に対する測点 TU-3X 成分での傾斜変化の計算値は 4.5 nrad であり、これは実測値の 4.7 nrad にほぼ等しく、傾斜の方向も対応した。また、タンク内部の天端付近の壁面圧力の変化によって生じるタンク壁面付近の傾斜変化は傾斜計の応答よりも大きく、数  $\mu$ rad 程度となる可能性が計算結果から導かれた。よって、岩盤タンク内のイベントによりタンク周辺の岩盤に傾斜変化が生じた場合、タンク内部の傾斜変化は、サービストネル付近の観測傾斜変化の数十  $\sim$  数百倍程度となる可能性がある。
- (4) 高精度傾斜データから潮汐・気圧成分とトレンド成分を BAYTAP-G によってリアルタイムに差し引いた時系列データにより、気相圧変化による岩盤タンク周辺の変化を十分な精度で監視できることが明らかになった。

潮汐応答の予測精度は  $\pm 1 \sim 4$  nrad であり誤差要因となり得ること、台風などの異常な低気圧時には線形フィルタでは気圧応答が予測できないこと、地震などのステップを伴う瞬間イベントには対応できないことが現状の問題点であり、これらの解決、および傾斜値からタンクごとの気相圧変動の応答成分を精密に分離・抽出することが今後の課題となる。これらの改良、および別個の



平行観測に基づく傾斜の長期トレンド予測の高精度化が今後必要である。

**謝辞** 本研究のため、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構からはデータの使用について承諾をいただきました。また、日本地下石油備蓄（株）宮下国一郎博士、ならびに2名の匿名の査読者からは貴重な意見をいただき、論文の改善に大いに役立ちました。ここに記して深甚の謝意を表します。

#### References

- 1) Japan Oil, Gas and Metals National Corporation: JOGMEC NEWS, **33** (2013).
- 2) Japan Underground Oil Storage Co., Ltd: Heisei-15-nendo Kokkabichiku-sekiyu no kannri-tou ni kakaru chosa, kenkyu houkokusyo (2004).

- 3) E. Davis, C.Wright, S.Demetrius, J.Choi, G.Craley: Society of Petroleum Engineers, SPE Paper, 62577 (2000).
- 4) S. Okubo: Kazan, **50** (2005), S49-S58.
- 5) S. Churei, H. Katayam: Kazan, **51** (2006), 91-101.
- 6) S. Shimada, H. Watanabe, K. Fukui, E. Fukuyama: Kazan, **33** (1986), S161-S169.
- 7) K. Watanabe, K. Oike: Kyodai-bosaikenkyujo Nenpo, **26**, B-1 (1985).
- 8) K. Jodai, K. Uede, S. Hirooka, H. Kanbara, S. Takemura, T. Matsuoka, K. Tsukada: Journal of the Society of Materials Science, Japan, **55** (2006), 523-528.
- 9) K. Jodai: A Study on Maintenance Management System of Water-Sealing Type Rock Cavern, (Yokohama National University Graduate School of Environment and Information Sciences, thesis for a degree (2008).
- 10) Y. Tamura, T. Sato, M. Ooe and M. Ishiguro: Geophys. J. Int., **104** (1991), 507-516.
- 11) Japan Underground Oil Storage Co., Ltd: Kushikino-kichi Koji-Kiroku (Ganban-doboku), (1994).
- 12) National Astronomical Observatory of Japan: *CHRONOLOGICAL SCIENTIFIC TABLES* (Maruzen shuppan,2015), p. 393.