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

城代 邦宏¹・植出 和雄²・本多 眞³・長谷川 誠⁴・小島 圭二⁵・小川 輝繁⁶

¹日本地下石油備蓄（株）（〒105-0012 東京都港区芝大門1-1-30 芝NBFタワー）
E-mail:kjyodai@chikabi.co.jp

²日本地下石油備蓄（株）（〒105-0012 東京都港区芝大門1-1-30 芝NBFタワー）
E-mail:kuede@chikabi.co.jp

³正会員 清水建設（株）技術研究所（〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17）
E-mail:mac.honda@shimz.co.jp

⁴フェロー会員 清水建設（株）土木事業本部（〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 シーバンスS館）
E-mail:mhasegawa@shimz.co.jp

⁵正会員 地圏空間研究所（〒105-0022 東京都港区海岸1-6-1-1114 イトーピア浜離宮）
E-mail:kojima-hm@amy.hi-ho.ne.jp

⁶国立大学法人 横浜国立大学大学院（〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5）
E-mail:t-ogawa@ynu.ac.jp

地下石油岩盤タンクにおける水封機能の健全性の評価は、操業管理において極めて重要な課題である。地下水関連の計測データに基づく健全性評価は、現状では豊富な経験と学識を備えた経験者に委ねており、操業管理の担当者レベルで評価をして、迅速・臨機な対応をとることが難しい。そこで本研究では、計測データに基づいた簡易なモデルによる健全性評価の手法を構築し日常管理に供することを目的として、特に地下水位変動を管理する統計モデルを検討した。具体的には、実効雨量ならびに複数の観測孔間の相関構造を基にした二つの指標に、統計期間を時間の経過と共に更新する逐次更新型線形回帰モデルを組合わせた手法について実際のデータを用いて検討を実施し、健全性評価の手法としての有効性を示した。

Key Words : *underground oil cavern, water seal, effective rainfall, statistical analysis, cross correlation*

1. はじめに

地下石油岩盤タンクは、地下水面下の岩盤に空洞を設け、スチールやコンクリート等によるライニングを施すことなく、自然あるいは人工的な地下水压により原油を空洞内に封じ込めるもので、所定の地下水压を維持することが漏油・漏気を防止し、岩盤タンクとしての機能を維持する上で重要な要件となっている。

この水封機能の健全性を監視するため、岩盤タンク周辺の地下水位観測孔水位、タンク内湧水量、人工水封水供給量および降雨量、蒸発量など水収支に関わる計測が実施されている。このような計測データは人工水封制御などの運転操作による変動のほか、降雨や気圧、潮汐変動の影響を受けて変動し、さらには地震や

地表改変など水理構造等の変化による影響を受け大きな変化を示す¹⁾。しかしながら、計測データを基にした水封機能の健全性に関する明瞭な評価指標が定められておらず、豊富な経験と学識を備えた経験者で構成される保全技術検討委員会により、半年毎に水封機能の健全性を評価・確認しているのが現状である。したがって操業管理の担当者は、日々の計測値が適正な範囲なのかどうかの判断が困難なため、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。

地下石油岩盤タンクにおける地下水関連計測データの統計的管理モデルに関しては、状態空間モデルおよび多変量自己回帰モデルを用いた植出らの研究²⁾が、また水封機能評価に関しては、操業開始後約10年間の計測データに基づく植出の研究¹⁾などがあるが、日々の計測デ

図-1 岩盤タンク配置横断面図

図-2 岩盤タンク位置および水収支領域

ータに対する水封機能の健全性について、操業担当者レベルでの評価が可能となる簡易的な指標に関する研究はない。

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構により委託される「久慈・菊間・串木野国家石油備蓄基地の操業に係る業務」では、三基地の日々の各種計測データを整理している。本研究では、この業務成果のうち菊間国家石油備蓄基地の地下水関連データを利用して、降雨の影響を分析すると共に、計測データに基づく簡便な水封機能の健全性評価手法について検討を行った。

具体的にはまず、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法³⁾を導入して、降雨による影響を分析し、深部岩盤水理の状態を表す地下水関連データ変動への適用性を検討した。次に簡易なモデルによる健全性評価手法の検討として、取り扱いの容易な線形回帰モデルを基本とした二つの評価指標について適用可能性を検討した。

一つは先に述べた実効雨量に基づくものである。水収支の観点から日常運用時の地下水関連データは、主

として降雨の影響を受けて変動しており、水理地質条件を考慮できる実効雨量を用いた簡易なモデル化を検討した。

もう一つは、観測孔内水位データを対象として、複数の観測孔間の相関関係に着目し、この関係を利用した簡易なモデル化を検討した。岩盤タンク周辺には4万 m^2 に一箇所の地下水位観測孔が設けてあり、それぞれが対応する範囲の水理構造を反映して変動している。水封機能の健全性を水理構造の安定性として捉えれば、水理構造の変化は観測孔間の相関構造の変化として迅速に検出できると考えた。

なお、計測データと説明変数との間に非線形な関係や複数の相関パターンを示すものについては、これ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。

本論文では、これらのモデルの組合せによる健全性の評価手法を検討し、評価指標としての有効性について検証した。

2. 実効雨量法による地下水関連データ変動の分析

本研究では菊間国家石油備蓄基地^{4) 5)}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実施した。当基地の岩盤タンクの配置横断面図を図-1に、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-2に示した。

図-3 は地下水関連計測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を示し、c) は人工水封水位制御による全体供給水量の変動、d) はタンク内の全体湧水量の変動を示している。またe) には、同じ期間のサイト内で観測された日降雨量の変化を示している。これらの図からわかるように、地下水位、供給水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

図-3 地下水関連計測データの例

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、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ことによるもので、ここでは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あり、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³⁾。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 $R(t)$ は式(1)で定義される。

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

ここで $R(t)$ ：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。

表-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 最適実効雨量の算定結果例

図-5 実効雨量との散布図

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。

(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内水位、人工水封供給水量およびタンク内湧水量に対して、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

図6 地下水位変動を表現する実効雨量のパラメータ分布

響の分析を行うと共に、実効雨量のパラメータと計測データの変動に起因する水理地質条件との関連性を検討した。具体的には式(2)により位相差ラグ（時間のズレ） L のときの相関係数 $r(L)$ を求めて、最も大きくなる最適な L を求める。

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

ここで $X(t)$ は対象とする地下水関連データを示し、 $\bar{X}, \bar{R}$ はそれぞれの平均値を表す。

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、これらが雨水の浸透・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た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。対象データとの相関係数の絶対値が最大となる最適な実効雨量を求めるに当たってのパラメータは半減期 T 、累積時刻ステップ n 、および遅延時間 L とした。

対象データは14孔の観測孔内水位、人工水封供給水量およびタンク内湧水量の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-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に示す。図-3で示したW-2孔、W-13孔内水位、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、タンク内圧変動の影響や人工水封制御、排水ポン

図-7 W-6, 8, 9の孔内水位変動と実効雨量との散布図

ブ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-3に示されるような短周期のノイズ成分が含まれる。このように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-3の赤色実線）を用いた。

それぞれの最適パラメータは(1) W-2孔内水位が半減期 T :280日/累積日数 n :280日、(2) W-13孔内水位が半減期 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わかるように、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-5である。

a) W-2孔内水位は求めた実効雨量の19日後の値と最も相関が強く、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わかる。b) W-13孔内水位では遅延日数は0で相関係数は0.944（標準偏差0.166m）、散布図から中高水位で複数の相関構造が見て取れる。c) 供給水量は遅延日数0で相関係数は-0.933（標準偏差4.70 t/day）、散布図から明瞭な負の線形関係が認められる。d) 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-6左上の図に示した通りである。

このように地下水位関連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わかった。

(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-6である。

まず最大相関係数の分布（図の左上）を見ると、ほとん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-7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。岩盤の露出する切土のり面尻に位置することから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わかる。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が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-6（右上）は実効雨量の半減期の分布を示しており、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。図-6（左下）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-2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。また図-6（右下）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孔方向の亀裂帯分布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。

以上のように地下水関連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わかった。

3. 実効雨量を基にした健全性判定手法

本研究は、直感的でわかりやすい簡略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。本章ではまず前章で検討した実効雨量を指標とした評価手法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、

$$\hat{H} - 3\hat{\sigma} \leq H \leq \hat{H} + 3\hat{\sigma} \quad (3)$$

を設定した場合、実測値がこの範囲を外れると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。

図-8 逐次更新型モデルの概念図

図-9 逐次更新型モデルによる各種相関構造への対応

図-10 単回帰モデルの適用結果例（W-2孔地下水水位および給水量全体）

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-8 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-9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に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。

(2) 単純線形回帰モデルの適用結果

まず、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-10 はW-2 孔内水位および給水量（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共に示し、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、給水量（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わかる。ただし、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。

図-11 逐次更新型モデルの適用結果例（W-2孔地下水位）

図-12 逐次更新型モデルの適用結果例（W-13孔地下水位）

(3) 逐次更新型モデルの適用結果

次に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-11 および図-12 にそれぞれW-2, W-13孔内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を捉えることができるように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、図b)および図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孔内水位の例では、前述の単回帰モデルによる結果（図-10）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、非線形な関係を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 7~8 ELM) 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 孔内水位の例では、図 b) の回帰例からわかるように、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。一方図 c) では、直近のモデル化期間の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わかる。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わかった。

4. 観測孔間の相関構造の監視に基づく判定手法

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複数設置している。本章では、観測孔内水位相互の相関構造に着目した健全性評価の方法について検討した。

(1) 観測孔地下水位の相互相関構造と水理構造の関係

観測孔内水位は、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。前述までの実効雨量による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、ここ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。

図-13 はこの考え方を概念図で示したものである。図に示すように、安定した水理構造の条件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 A) に、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 (B)。したがって、安定

図-13 観測孔間の相関構造と水理構造との関係概念図

W-2 孔地下水位変動の相関構造

W-13 孔地下水位変動の相関構造

図-14 観測孔間の相互相関構造の分析結果例

状態における観測孔相互の相関構造を把握しておくことで、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ことになる。つまり、観測孔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。

具体的にはまず、各観測孔毎に他の観測孔データとの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章で示した「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。

(2) 観測孔間の相互相関構造の分析

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-14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孔が抽出されており、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孔の例では、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である。

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孔あることがわかった。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。本章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孔は対象とすることができない。

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。

(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、まず各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

図-15 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-16 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）

りそれぞれ管理を行う。そして、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て、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-15 および図-16に示した。各図、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日間とした。

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-11 および図-12）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わかった。

回帰誤差 ($\pm 3\sigma$ 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-16 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に、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 $\pm 3\sigma$ 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) 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、 $\pm 3\sigma$ 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。

図-17 地下水位変動監視の概念図

図-18 提案する日常点検フロー図

5. 判定手法の運用

何れの評価手法とも水理構造の変化を検出することができ、また計器故障の検出にも適用できることが検証された。さらに観測孔間の相関構造の監視による評価手法では、計器の点検整備時等の欠測値の補間も可能である。特に両手法を併用した評価を行えば、考え方の異なる手法の結果であるため、その信頼性が増すものといえる。

さて、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-17 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になる。異常と判定された場合は、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合わせた調査、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⁷⁾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-18 に示した。

6. まとめ

本論文では、操業担当者が日常管理において、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管理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と複数の観測孔間の相関構造を指標とする方法の二つの手法について検討した。

その結果、まず実効雨量により地下水関連データの変動に起因する深部岩盤の水理地質条件をある程度推定できることがわかった。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

ルおよび複数の観測孔間の相関構造に基づくモデルそれぞれの特徴を整理し、水理構造変化の検出、計器故障の検出および欠測値の補間といった日常管理における健全性評価の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・改良に取り組み、現行の点検システムの合理化・信頼性向上ならびに汎用性を高めていく所存である。

謝辞:本研究における実測データの利用に際しては、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構の地下備蓄システム維持管理センターに多大なるご協力・ご便宜をいただいた。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

1) 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。

- 2) 植出和雄，岡本明夫，本多眞，長谷川誠，鈴木誠：気象・潮汐を考慮した水封式岩盤タンク周辺地下水位の変動評価，土木学会論文集，No.729/III-62，pp.157-168，2003。
- 3) 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。
- 4) 岡本明夫：地下石油備蓄岩盤タンクの水封評価—久慈・菊間・串木野基地について—，東京大学学位論文，1996。
- 5) 岡本淳，有元平，山本和彦，大津宏康：菊間地下石油備蓄基地建設工事での空洞掘削に伴う地下水挙動に関する検討，土木学会論文集，No.480/VI-21，pp.33-42，1993。
- 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。

(2006. 10. 5 受付)

SIMPLIFIED CRITERIA FOR DAILY INSPECTION OF WATER-SEALING FUNCTION STABILITY OF UNDERGROUND OIL CAVERN

Kunihiro JODAI, Kazuo UEDE, Makoto HONDA, Makoto HASEGAWA,
Keiji KOJIMA and Terushige OGAWA

The daily inspection of the stability of water-sealing function is one of the most important items in the operating procedure for underground oil storage. The simplified criteria for the daily on-site judgement are strongly needed for the speedy evaluation and the expedient countermeasures. In this paper, the methods based on the simple statistical model are proposed for the daily judgement and their effectivenesses are verified by using the observed data concerning groundwater. The effective rainfall method is adopted to evaluate the data fluctuation due to seasonal precipitation. And, the method based on the cross-correlation structure of multiple groundwater table measurements is also discussed.