

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

植出和雄¹・岡本明夫²・本多 眞³・長谷川誠⁴・鈴木 誠⁵

¹ 日本地下石油備蓄(株) (〒105-0012 港区芝大門 2-10-12 秀和第3芝パークビル)

² 工博 日本地下石油備蓄(株) (〒105-0012 港区芝大門 2-10-12 秀和第3芝パークビル)

³ 正会員 工博 清水建設(株)和泉研究室 (〒100-0011 千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル)

⁴ 正会員 工博 清水建設(株)土木事業本部 (〒105-8007 港区芝浦 1-2-3 シーバンス S 館)

⁵ 正会員 工博 清水建設(株)和泉研究室 (〒100-0011 千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル)

水封式岩盤タンク周辺の地下水位は降水による影響はもとより、気圧変動、地球潮汐などによる自然影響要因や、水封制御のための給水流量変動などにより大きく変動する。このような変動の中から、地震やその他の要因に伴う水理構造変化による影響を見いだすことが、水封機能管理において極めて重要となる。したがって、本研究では時系列解析手法を用いて、気圧や潮汐、降水による影響を分離するとともに維持管理モデルとしての可能性を検証した。その結果、気圧・潮汐・降水等の自然因子による影響を取り除き、水理構造の変化等に伴う水位変動の検出が可能であることがわかり、水封機能管理モデルとしての適用性を示した。

Key Words : ground water level, water seal, rock cavern, time series analysis, AR model

1. はじめに

水封式岩盤タンクにおいて水封機能の確保には、常に地下水位変動を観測し、地下水位を維持するように制御を行う必要がある。このため岩盤タンク周辺に設置した多くの観測孔において、孔内地下水位の経時的な変動を常時自動観測している。

孔内地下水位の変動は降水変動による影響はもとより、気圧変動、地球潮汐などの自然影響因子により大きく変動する。また人工水封方式では水封機能確保のため水封水位を一定に保つべく給水による制御を実施しており、給水流量変動や水封水位変動も孔内水位の変動に影響を及ぼしている。このため水封機能の管理としては、孔内地下水位の観測のみならず、水封水位や給水流量、タンク内湧水流量、さらには気圧、降水や潮汐変動など、数多くのデータ変動を経時的に観測している。このような複雑に影響し合うデータ変動をモデル化し、地下水位変動に含まれる地震やその他の影響によって生じた水理構造の変化を見いだすことが、水封機能の管理において極めて重要な課題である。

一般に設計段階における地下水挙動の把握には物理モデルに基づく浸透流解析が用いられるが、多数の観測データを取り込んでリアルタイムに解析を実施する必要のある維持管理の段階では、統計的な時系列解析手法を用いるのが現実的である。地下水位変動と外因との関係を統計モデルにより扱った研究には、単純な一次回帰分析と調和解析により分析したもの¹⁾などがあ

るが、本研究で対象とする水封式岩盤タンク周辺地下水位は、自然状態の地下水位とは異なり、人工水封制御により複雑なメカニズムを有して変動している。このメカニズムを気象や潮汐、水封制御関連データなどを考慮してモデル化することで、降水や潮汐などの影響を定量的に評価し、地下水挙動の異常を検出可能な管理モデルを構築することが本研究の目的である。

そこで菊間国家石油備蓄基地における各種データを用いて、時系列解析手法による孔内地下水位変動のモデル化を行い、気圧や潮汐、降水による影響の定量的な評価に関する検討を実施した。

具体的にはまず、孔内地下水位の時系列モデルを状態空間モデルを用いて表現して、気圧、潮汐、降水の影響を分離する手法を試みる。この手法は、地震予知研究の一環として地震に先行する地下水位変化を検出することを目的として、観測データから気圧、潮汐、降水の影響を分離するためのモデルとして提案されたものである^{2),3),4)}。

次に水封制御に伴う複雑な影響を考慮するために、多変量自己回帰モデルによるモデル化を試みる。多変量自己回帰モデルは、定量的な要因分析が可能であると共に、システム全体の解析を基にシステム制御が可能である。多変量自己回帰モデルを用いたシステム制御の方法を先駆的に示したのが、セメントプラントのキルプロセスの制御に用いた赤池ほか⁵⁾であり、その後多くの制御工学の分野でシステム制御に用いられている⁶⁾。著者らは既に、降水変動の影響を含む地下水挙動

データに対して、多変量自己回帰モデルを用いた管理モデルの提案を行っており⁷⁾、ここではこのモデルを用いて降水影響成分を定量的に評価し、水封機能維持管理モデルとしての可能性について検討する。

2. 地下水関連データ変動の因果関係

図-1は、人工水封式岩盤タンクにおける地下水関連データ相互の因果関係を概念的に示した図である。図中の矢印は各データ変動が影響を与えることを示すものである。

水封機能確保においては、タンクに向かう動水勾配を確保することが重要であり、そのために周辺地下水位を設計限界水位以上に維持することが求められる。孔内地下水位変動に影響を及ぼす自然因子には、降水、気圧および地球潮汐があげられる。このうち気圧や潮汐は、直接独立に各観測孔地下水位の変動に影響を与える。これに対して降水変動の影響は、降水浸透が直接孔内地下水位に影響を与えるだけでなく、極めて複雑に孔内地下水位に影響を及ぼす。人工水封制御時には、図に示すように水封トンネルの水位（水封水位）を一定に保つように、堅坑への給水流量を増減させて制御している。この水封水位は降水浸透の影響を受けて変動しようとするため、結果として給水流量の変動は降水量変動の影響を受ける。

また通常は一定に保たれている水封水位も、給水を行っていない自然水封の状態では変動することになる。孔内地下水位変動は、このような水封水位の変動の影響も受ける。タンク内への湧水流量についても同様に、降水浸透が直接影響を及ぼすだけでなく、給水流量変動や水封水位変動を介して影響を及ぼしている。

図-2は、水封水位変動と給水流量変動および日降水量との関係を例示したものである。この例では、水封水位は下限値を0.45m程度で制御しているが、給水流量を0としたときには水封水位が上昇することがある（1997年8月や1999年6月～12月など）。すなわち給水流量0の期間は自然水封状態で水封水位も自由に変動する、ただし計測設備の特性上水封水位は1.12mで頭打ちになっている。日降水量との関係を見ると、給水流量が減少あるいは0となる期間は降水量が多い期間と一致していることがわかる。

また運用開始の1994年から徐々に給水流量は減少しており、1994年当初の4分の1程度となっていることもわかる。これは運用開始から目詰まり等と推定される要因により徐々に水みちが変化していると考えられる。

孔内地下水位は、一般に降水の影響を受けて降水が多いときに水位が上がり、少ないときに水位が下がる傾向を示す。この変動傾向は給水流量の変動傾向に対して

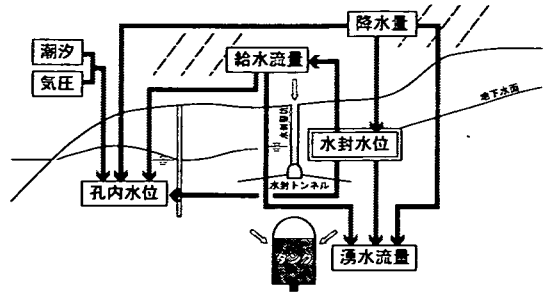


図-1 地下水関連データの因果関係概念図

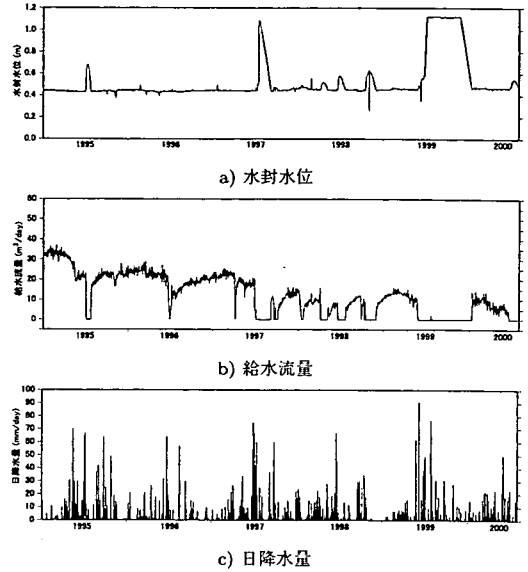


図-2 水封水位と給水流量および日降水量の関係例（払出堅坑）

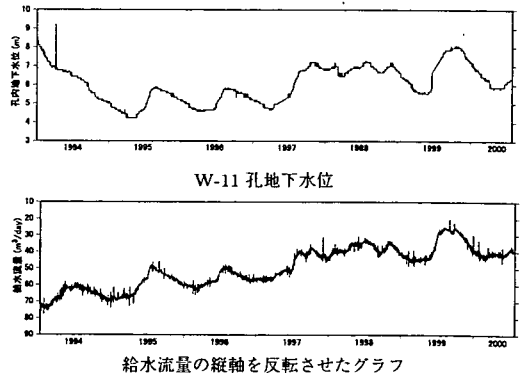


図-3 給水流量との強い負の相関性

負の相関性を示すことになる。図-3は例としてW-11孔地下水水位と水封堅坑給水流量のグラフの縦軸を逆転したものを比較して示したものである。2つのグラフは極めて変動が似通っており、孔内水位が上昇すると

給水流量が減り、孔内水位が下がると給水流量が増える傾向となっている。これは降水変動の影響により変動しようとする水封水位の制御を通して給水流量変動に現れたものであり、この関係は、後に示す降水変動と孔内水位変動の関係を表すモデル構築において極めて重要な意味を持つ。

上述のように孔内水位変動の統計的なモデル化においては、気圧および潮汐は独立に影響を受けるものとして考えることができるが、降水変動は浸透した降水が大きな時間遅れを伴って受ける直接の影響だけでなく、人工水封の制御に伴って、給水量変動や水封水位変動を介した間接的な関係を考慮する必要がある。

本論文では、次の2種類のモデルによる孔内地下水位変動の評価に関する検討を実施した。

- 状態空間モデルによる影響分離手法

予め各影響成分の線形モデルを定義して、これらの和として地下水位が表されるものとして、状態空間モデルによるモデル化・各成分の推定を行う方法である。

- 多変量自己回帰モデルによる降水影響評価手法

給水流量や水封水位など水封制御データによる相互の影響を考慮するために、これらのデータを変数とした多変量自己回帰モデルにより地下水位変動をモデル化し、各変量の寄与率や降水量や水封水位を制御したときのシミュレーションなどを通して、降水影響を評価するものである。

2つの手法は基本的に、変量相互の相関性を考慮するか否かにおいて考え方が異なる。

3. 状態空間モデルによる潮汐・気圧・降水影響成分分離検討

(1) 状態空間モデルによる影響分離手法

本手法は文献^{2),4)}に基づくもので、地下水位変動を気圧、潮汐、降水の3つの影響成分とそれ以外の変動の4つに分離できるものと仮定して、それぞれの影響成分をモデル化する。

a) 孔内地下水位の時系列モデル

孔内地下水位の観測データを $y_n (n = 1, \dots, N)$ とするとき、気圧の影響 P_n 、地球潮汐の影響 E_n 、降水の影響 R_n を用いた次式のモデルで表されると仮定する。

$$y_n = t_n + P_n + E_n + R_n + \varepsilon_n \quad (1)$$

ここで、 ε_n は観測ノイズ等を表すもので、上記モデルで表現しきれなかった成分が含まれる。これを平均0、分散 σ^2 の正規白色ノイズと仮定する。気圧、潮汐および

降水の影響は以下に示すモデルで表現する。

$$\text{気圧の影響: } P_n = \sum_{i=0}^l a_i p_{n-i} \quad (2)$$

$$\text{潮汐の影響: } E_n = \sum_{i=0}^m b_i e_{n-i} \quad (3)$$

$$\text{降水の影響: } R_n = \sum_{i=1}^k c_i R_{n-i} + \sum_{i=1}^k d_i r_{n-i} \quad (4)$$

ここで、 p_n および e_n はそれぞれ気圧、潮高データで、ここではこれらの影響を時間遅れの影響を考慮したインパルス応答型のモデルで表している。また降水の影響は、降水量データ r_n を入力とする自己回帰型の線形モデルで表し、少数の変数で長時間の積算効果の影響が考慮できる。

t_n は気圧、潮汐、降水の影響を除去した後に残る地下水位の変動成分 (トレンド成分) であり、いわゆる「補正後の地下水位」である。トレンドは急激な変化をしないという条件で、以下のようなランダムウォークモデルに従って徐々に変化するものと仮定する。

トレンド (補正後の地下水位): t_n

$$t_n = t_{n-1} + v_n, \quad v_n \sim N(0, \tau^2) \quad (5)$$

b) 状態空間モデルによる表現

地下水位 y_n 、気圧 p_n 、降水量 r_n 、潮高 e_n の観測値が時系列 ($n = 1, \dots, N$) データとして与えられるとき、先のモデル式 (1)~(5) を次の状態空間モデルで表して、トレンド t_n を求める。

$$x_n = F x_{n-1} + M r_{n-1} + G v_n \quad (\text{システムモデル}) \quad (6)$$

$$y_n = H_n x_n + w_n \quad (\text{観測モデル}) \quad (7)$$

x_n は状態ベクトルで、次式で表される。

$$x_n = (t_n, a_0, \dots, a_l, b_0, \dots, b_m, R_n, \hat{R}_{n+1|n-1}, \dots, \hat{R}_{n+k-1|n-1})^t \quad (8)$$

なお、 $\hat{R}_{n+i|n-1}$ は R_{n+i} の $n-1$ 時点までの観測値から決まる部分を示し、次式で表される。

$$\hat{R}_{n+i|n-1} = \sum_{j=i+1}^k c_j R_{n+i-j} + \sum_{j=i+1}^k d_j r_{n+i-j} \quad (9)$$

また $v_n \sim N(0, \tau^2)$ 、 $w_n \sim N(0, \sigma^2)$ であり、さらに、

$$F = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & & \\ & I_{l+1} & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & I_{m+1} & & & & & \\ & & & & & c_1 & 1 & & & \\ & & & & & c_2 & 0 & \ddots & & \\ & & & & & \vdots & \ddots & \ddots & 1 & \\ & & & & & c_k & & & 0 & \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ d_1 \\ \vdots \\ d_{k-1} \\ d_k \end{bmatrix} \quad (10)$$

表-1 状態空間モデルに置いて推定すべきパラメータ

状態変数	t_1, \dots, t_N	N 個
	a_0, \dots, a_l	$l+1$ 個
	b_0, \dots, b_m	$m+1$ 個
	R_1, \dots, R_N	N 個
ハイパーパラメータ	c_1, \dots, c_k	k 個
	d_1, \dots, d_k	k 個
	τ^2, σ^2	2 個
計		$2 \times (N+k) + l + m + 4$ 個

$$H_n = (1, p_n, \dots, p_{n-l}, e_n, \dots, e_{n-m}, 1, 0, \dots, 0) \quad (11)$$

ただし、 I_{l+1} は $(l+1) \times (l+1)$ の単位行列である。以上がこの時系列モデルの状態空間表現である。このとき推定しなくてはならない未知量は表-1 の通りである。上記の状態空間モデルにおいて、パラメータ $\sigma^2, \tau^2, c_1, \dots, c_k, d_1, \dots, d_k$ を既知と仮定すれば、カルマンフィルタと平滑化アルゴリズムを用いることで、観測値の時系列 y_n に基づいて状態 x_n の推定を行うことができる。状態ベクトル x_n が推定されれば、トレンド t_n のほかに、降水の影響 R_n 、気圧の影響係数 a_i および潮汐の影響係数 b_i の推定値が得られることになる。

またパラメータ $\sigma^2, \tau^2, c_1, \dots, c_k, d_1, \dots, d_k$ は、事前分布のパラメータということでハイパーパラメータと呼ばれ、この推定にはカルマンフィルタのアルゴリズムの中で求められる尤度を最大とする最尤法を用いる。さらに各モデルの次数 l, m, k は、いくつかのケースを設定して計算を行い、情報量規準 AIC^8 が最小となる次数を選択する。

(2) 検討内容

a) 検討対象

図-4 に示した菊間基地における 14 孔の孔内地下水水位データを対象として検討を実施し、ここでは図-5 中の 3 孔 (W-4, W-9, W-11 孔) の孔内地下水水位の検討結果を例として示す。対象期間は 1995 年 1 月 1 日～2000 年 7 月 31 日の 5 年半で 1 日毎 (毎日午前 10 時に計測) のデータである。図-6 は対象期間の気圧、潮高、日降水量を示したものである (敷地内に計測器を設けて常時観測)。なお潮高データについては 1 日の中でも周期変動するため、1 時間毎のデータからモデル化精度が最も良かった午前 9 時のデータを用いた。

b) 解析手順

気圧、潮汐、降水の影響モデルの様々な次数の組合せについて最適次数を求めるのは、計算時間が膨大となるため、実際の解析では以下の手順で実施する。

気圧および潮汐の影響モデルの次数決定 まず最初に、気圧と潮汐の影響のみを考慮し、降水影響を除いた次

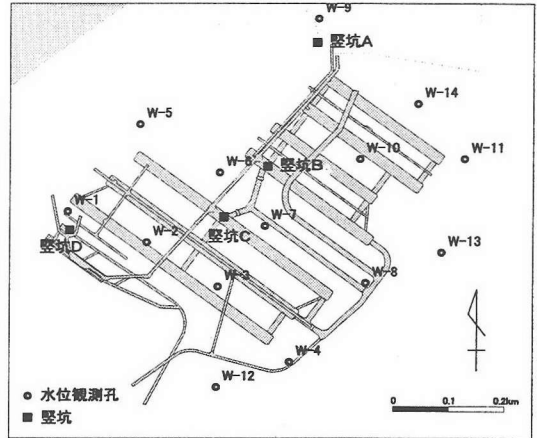


図-4 孔内水位観測孔位置図 (菊間基地)

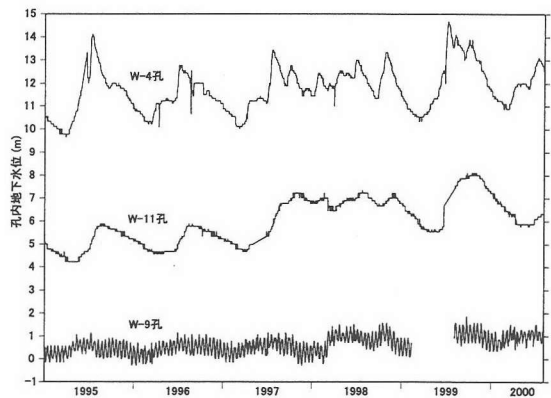


図-5 孔内地下水水位

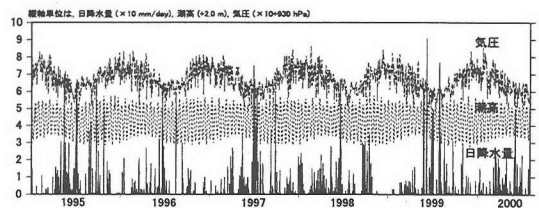


図-6 気圧・潮高・降水データ

式のモデルについて最適な次数を決定する。

$$y_n = t_n + \sum_{i=0}^l a_i p_{n-i} + \sum_{i=0}^m b_i e_{n-i} + \varepsilon_n \quad (12)$$

このモデルの状態空間表現は、式 (10) から降水の影響を除いて、以下のように表す。

$$F = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & I_{l+1} & \\ & & I_{m+1} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$H_n = (1, p_n, \dots, p_{n-l}, e_n, \dots, e_{n-m}) \quad (14)$$

表-2 各観測孔の気圧・潮汐・降水の影響次数と影響評価

	モデル次数			気圧 影響	潮汐 影響	降水 影響	結果評価
	気圧 l	潮汐 m	降水 k				
W-4 孔	1	0	1	無	無	◎	× (降水モデルに難あり)
W-9 孔	1	5	1	○	◎	ほぼ無	○ (潮汐影響分離可)
W-11 孔	1	0	15	無	無	◎	△ (降水モデルに難あり)

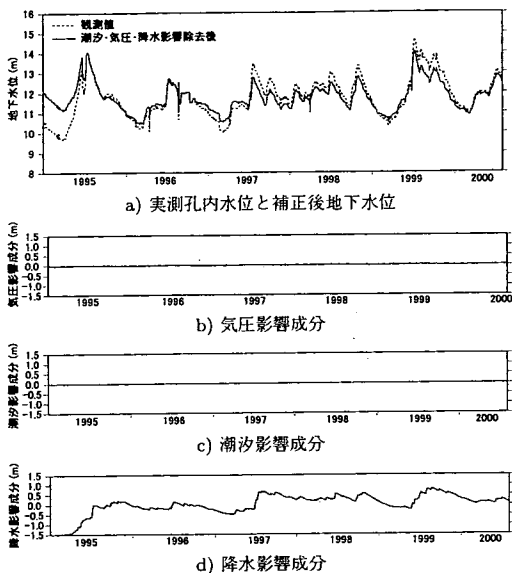


図-7 補正後地下水位変動と各影響成分 (孔内水位W-4)

降水の影響モデルの次数決定 同じ期間のデータを用いて、先に決定した気圧および潮汐影響モデルの次数を固定して、降水影響モデルの最適な次数を決定する。全対象期間のトレンド (補正後地下水位) の推定 上記で決定した気圧、潮汐、降水の影響モデルの次数 l , m , k を固定して、カルマンフィルタと平滑化アルゴリズムにより全対象期間のトレンド (補正後の地下水位) を推定する。

(3) 検討結果

最終的に対象期間全体に対して適用した結果について述べる。表-2は3つの観測孔データについて、決定された各影響モデルの次数 l, m, k と影響分離結果の評価を示したものである。W-9孔は海に近いことから潮汐の影響を受けて、潮汐影響モデルの次数が他孔より高いことがわかる。またW-11孔は降水影響モデルの次数が高く、長期的な降水影響が認められる。また推定結果として補正後地下水位、気圧影響成分、潮汐影響成分、降水影響成分のグラフを図-7~図-9に示した。なお各図の a) は実測孔内水位 (細線) と影響除去後の

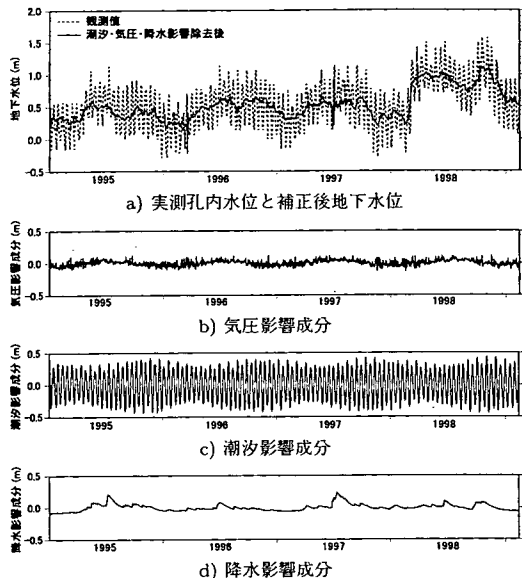


図-8 補正後地下水位変動と各影響成分 (孔内水位W-9)

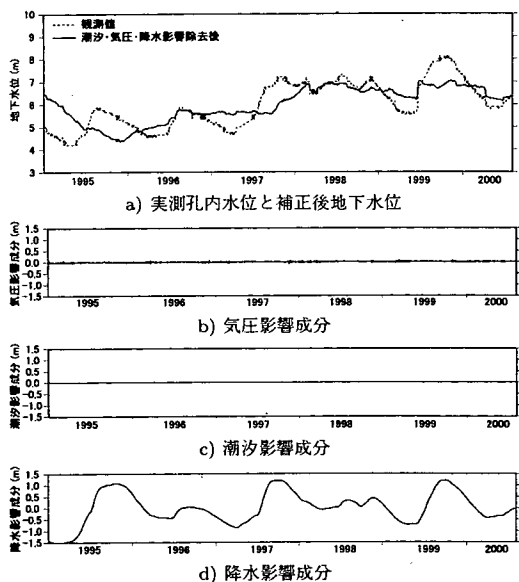


図-9 補正後地下水位変動と各影響成分 (孔内水位W-11)

補正水位 (太線) を示し、b), c), d) はそれぞれ気圧、潮汐、降水の影響成分を示したものである。

まず図-7のW-4孔を見ると、気圧および潮汐の影響は共に検出されておらず、降水についても最大1.5m程度の僅かな影響を検出しているが、補正後地下水位は観測値とほとんど変わらない結果となった。同様に図-9のW-11孔を見ると、やはり気圧および潮汐の影響は検出されていない。降水による影響成分は、変動傾向をある程度捉えることができてはいるものの、補正後地下

水位には、除去しきれなかった降水変動成分が残っている。

このように降水による影響と考えられる変動成分は、十分な精度で分離することができなかった。これは、起因となる変動は降水変動によるものであっても、水封制御による供給流量の変動や水封水位の変動による影響が複雑に絡んでおり、ここで定義した単純な自己回帰型降水影響モデル (式 (4)) では表しきれないものと考えられる。

本手法により有効に影響分離ができたのは、潮汐の影響を強く受けて変動しているW-9孔 (図-8) であった。潮汐による周期的な変動を精度良く分離でき、潮汐変動に隠れていた数10cm程度のわずかな変動が明確になった。特に1998年3月頃には約50cmの水位上昇が明確に認められる。なお気圧の影響は若干検出されているが、絶対量としては他の観測孔と比較して特に有意ではない。

以上のことを踏まえて、表-2には定性的な結果の評価を示した。

4. 多変量自己回帰モデルによる降水影響評価検討

状態空間モデルによる影響成分の分離では、潮汐変動は精度良く分離できたが、降水の影響は十分な精度で分離できなかった。そこで、ここでは既に著者らが提案している制御系多変量自己回帰モデル⁵⁾に基づく地下水水位変動の管理モデル⁷⁾を用いて、給水流量や水封水位など水封制御データによる相互の影響を考慮して、降水影響を評価する手法の検討を実施した。

(1) 多変量自己回帰モデルによる降水影響評価手法

a) 孔内水位変動のモデル化

各観測孔毎の孔内水位変動 y_n は次式⁵⁾の多変量自己回帰モデル (Multivariate Autoregressive model) (以下MARモデルと呼ぶ) で表されるとする。

$$\begin{Bmatrix} y_n \\ Q_n \\ F_n \\ R_n \\ P_n \\ H_n \end{Bmatrix} = A(1) \begin{Bmatrix} y_{n-1} \\ Q_{n-1} \\ F_{n-1} \\ R_{n-1} \\ P_{n-1} \\ H_{n-1} \end{Bmatrix} + A(2) \begin{Bmatrix} y_{n-2} \\ Q_{n-2} \\ F_{n-2} \\ R_{n-2} \\ P_{n-2} \\ H_{n-2} \end{Bmatrix} + \dots \\ + A(M) \begin{Bmatrix} y_{n-M} \\ Q_{n-M} \\ F_{n-M} \\ R_{n-M} \\ P_{n-M} \\ H_{n-M} \end{Bmatrix} + e(t) \quad (15)$$

ただし、 y_n : 孔内地下水位、 Q_n : 各給水流量のベクトル、 F_n : 各湧水流量のベクトル、 R_n : 日降水量、 P_n : 気圧、 H_n : 各水封水位のベクトルで、何れも時刻 n ス

テップ時である。また M はモデルの次数、 $A(m)$ は回帰式の重み係数ベクトルで、次式のユールウォーカー方程式を解くことで求められる。

$$\begin{bmatrix} \hat{C}^T(0) & \hat{C}^T(-1) & \dots & \hat{C}^T(1-M) \\ \hat{C}^T(1) & \hat{C}^T(0) & \dots & \hat{C}^T(2-M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{C}^T(M-1) & \hat{C}^T(M-2) & \dots & \hat{C}^T(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^T(1) \\ A^T(2) \\ \vdots \\ A^T(M) \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \hat{C}^T(1) \\ \hat{C}^T(2) \\ \vdots \\ \hat{C}^T(M) \end{bmatrix} \quad (16)$$

ここで $\hat{C}(m)$ は、各変数間の自己-相互相関関数である。

上記モデルにおいて他から影響を受けずに独立して変動する項目は、日降水量 R_n 、気圧 P_n および各水封水位 H_n である。一方、給水流量 Q_n や湧水流量 F_n は降水や水封水位変動の影響を受ける。制御系のMARモデルとして考える場合、通常、前者の変量を操作変数 (人為的に制御され独立に与えられる変数)、後者を被制御変数 (予測管理すべき変数) とするが、ここでは孔内地下水位 y_n のモデル化が目的であり、給水流量 Q_n や湧水流量 F_n をも推定するモデルとした場合、孔内地下水位の推定に最適なモデル構築とならない可能性がある。また給水流量は孔内地下水位に影響を及ぼすが、逆に孔内地下水位が給水流量や湧水流量に直接的に影響を与えることはない。このことからも給水流量や湧水流量は別途に予測モデルを構築して降水量の影響を評価することとして、ここでは孔内地下水位以外の変量は全て常に独立に与えられる操作変数としてモデル化する。したがって先の式 (15) の左辺には、孔内地下水位 y_n 以外の項は () を付けて表し、予測する必要のない操作変数であることを示している。

b) 給水流量変動および湧水流量変動のモデル化

式 (15) において独立な操作変数としてモデル化した給水流量 Q_n と湧水流量 F_n の変動は、降水と水封水位の影響を受けるため予め別のモデルで降水影響を評価する必要がある。

まず給水流量 Q_n の変動は、降水量 R_n と各水封水位 H_n の影響を考慮して次式のモデルで表されるとする。

$$\begin{Bmatrix} Q_n \\ R_n \\ H_n \end{Bmatrix} = A(1) \begin{Bmatrix} Q_{n-1} \\ R_{n-1} \\ H_{n-1} \end{Bmatrix} + A(2) \begin{Bmatrix} Q_{n-2} \\ R_{n-2} \\ H_{n-2} \end{Bmatrix} + \dots \\ + A(M) \begin{Bmatrix} Q_{n-M} \\ R_{n-M} \\ H_{n-M} \end{Bmatrix} + e(t) \quad (17)$$

これは日降水量 R_n および各水封水位 H_n を操作変数とした制御系MARモデルである。

一方、湧水流量 F_n の変動は、降水量 R_n と各水封水位 H_n に加えて上記モデルで予測される給水流量 Q_n の影響を受けるものとして、次式の制御系 MAR モデルで表されるとする。

$$\begin{Bmatrix} F_n \\ Q_n \\ R_n \\ H_n \end{Bmatrix} = A(1) \begin{Bmatrix} F_{n-1} \\ Q_{n-1} \\ R_{n-1} \\ H_{n-1} \end{Bmatrix} + A(2) \begin{Bmatrix} F_{n-2} \\ Q_{n-2} \\ R_{n-2} \\ H_{n-2} \end{Bmatrix} + \dots + A(M) \begin{Bmatrix} F_{n-M} \\ Q_{n-M} \\ R_{n-M} \\ H_{n-M} \end{Bmatrix} + e(t) \quad (18)$$

c) 降水影響評価シミュレーション

上述のモデルで孔内地下水位変動への降水影響評価を行う方法は以下の通りである。

- (a) まず給水流量変動モデル (式 (17)) で、降水量 R_n を 0、各水封水位 H_n に管理水位値 H_{cn} を与えて各給水流量変動のシミュレーション値 \tilde{Q}_n を得る。
- (b) 次に湧水流量変動モデル (式 (18)) で、降水量 R_n を 0、各水封水位に管理水位値 (一定値) H_{cn} 、さらに各給水流量に先に得られたシミュレーション値 \tilde{Q}_n を与えて、各湧水流量変動のシミュレーション値 \tilde{F}_n を得る。
- (c) 最後に各孔内地下水位変動モデル (式 (15)) で、降水量 R_n を 0、各水封水位に管理水位値 (一定値) H_{cn} 、各給水量にシミュレーション値 \tilde{Q}_n 、各湧水流量に同じくシミュレーション値 \tilde{F}_n を与えて、孔内地下水位のシミュレーション値 \tilde{y}_n を求める。これをモデルの再現値と比較することで、降水影響成分の評価を行う。

以降は、先に示した図-5 の孔内地下水位、図-6 の日降水量に加えて、図-10 に示す水封制御関連データ (水封水位、給水流量、湧水流量) を用いて、上記モデルによる検討を実施した結果について述べる。

(2) 給水流量変動と湧水流量変動のモデル化と降水影響評価

図-10 は、対象とする菊間基地における水封制御関連データを示している。菊間基地では水封機能確保のため先の図-4 に示した A~D の 4 カ所の竖坑水位 (水封水位) を一定に保つように給水を実施しており、図-10 a) はその竖坑水位 (水封水位) を示し、図-10 b) はそれぞれの給水流量を示す。またタンク内の全湧水流量を示したものが図-10 c) である。

給水流量および湧水流量データの変動を見ると、運用開始の 1994 年以降徐々に減少する傾向がある。目詰まり等の現象によるものと推定されており、減少の割

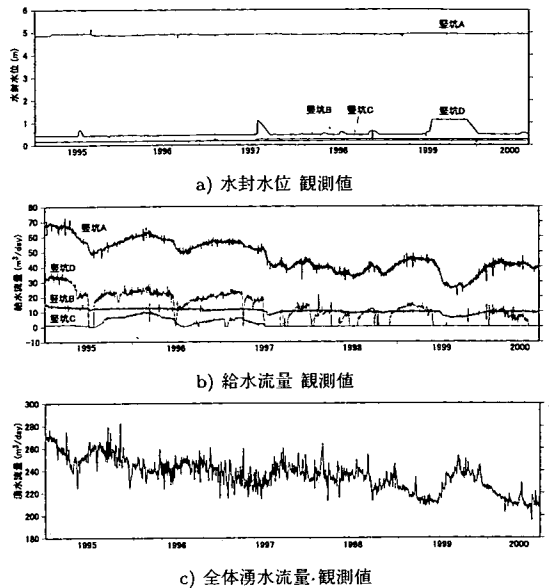


図-10 水封制御関連データ

合は徐々に小さくなっている。先述の MAR モデルは定常状態を仮定したものであり、このような非定常な挙動は予め取り除かなければモデルの再現精度が悪い。そこで漸減現象を指数関数モデルの回帰によって取り除いてデータを補正する。漸減の近似モデルとして次式の負の指数関数を提案する。

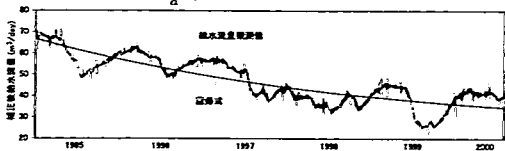
$$Q(t) = a \cdot \exp\left(-\frac{t-b}{a}\right) + c \quad (19)$$

ただし t は時刻、 a, b, c は回帰係数である。対象期間を決めてデータにあてはめて最小二乗法により回帰係数を求める。

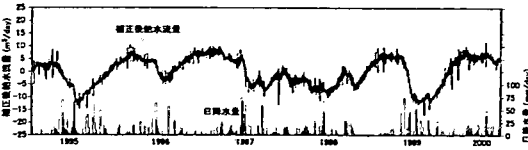
図-11 および図-12 はそれぞれ、給水流量 (例として竖坑 A) と全体湧水流量を上記の式で回帰した結果を各図-a) に示し、漸減トレンドを取り除いた補正後のデータを各図-b) に示した。これらを見ると極めて精度良く漸減減少を近似でき、補正後データは定常性が満たされているものと考えられる。

補正された給水流量および湧水流量データに対して、ここでは式 (17) および式 (18) のモデルを構築して、それぞれの降水による影響を評価する。まず給水流量変動モデルでは、各水封水位 H_n の組合せによりいくつかのモデルを構築して最も再現精度の高いモデルを選出した。竖坑 A の例を図-13 a) に示す。モデルによる再現結果は、極めて精度良く変動を捉えることができていくことがわかる。次に構築されたモデルにおいて、降水量 R_n に 0、変化している水封水位 H_n に管理値 H_{cn} を与えてシミュレーションした結果 \tilde{Q}_n を同じ図中の太破線で示した。降水影響除去後の給水流量変動

図11式: $Q(t) = a \cdot \exp\left(-\frac{t-b}{a}\right) + c$ $a = 1376.4, b = -4448.3, c = 25.1$



a) 回帰結果



b) 補正後 豎坑 A 給水流量

図-11 豎坑 A 給水流量の漸減現象の指数関数回帰補正

はベースが5t/day程度増えて、変動幅は極めて小さく滑らかな変動である。図-13 b) は再現値から降水影響除去値を引いた給水流量変動に占める降水影響成分を示しており、降水量の多い期間では約15~17t/day程度の減少に寄与していることがわかる。

同様に湧水流量変動モデル(式(18))についても、補正後全体湧水流量を用いて水封水位 H_n および給水流量 Q_n の組合せによりいくつかのモデルを構築して最も再現精度の高いモデルを選出した。その結果を図-14 a) に示した。モデルによる再現結果は、やはり変動傾向を精度良く捉えられていることがわかる。次に構築されたモデルにおいて降水量 R_n に0、水封水位 H_n に管理値 $H_{c,n}$ 、また給水流量 Q_n には先に構築したモデル式(17)による降水影響除去値 \bar{Q}_n を与えてシミュレーションした結果を、同図中の太破線で示した。また再現値との差(降水影響成分)を図-14 b) に示した。降水影響除去後の湧水流量はほとんど変動せず、湧水流量変動に占める降水影響成分は最大で約20t/dayと全体量(220~250t/day)に対して5~10%程度であることがわかった。

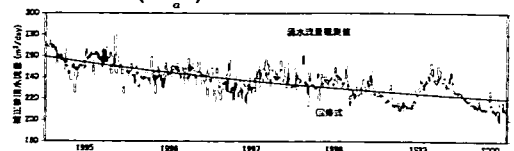
(3) 孔内地下水水位変動のモデル化と降水影響評価

ここでは各孔内地下水水位毎に式(15)のモデルを構築して、それぞれの降水による影響を評価する。水封水位 H_n 、給水流量 Q_n および湧水流量 F_n の組合せによりいくつかのモデルを構築して、最も再現精度の高いモデルを選出した。

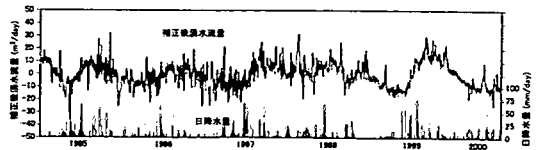
最適モデルにより得られた再現結果として、W-4孔およびW-11孔の例をそれぞれ図-15および図-16に示した。各図a)の細破線が観測値、太実線が再現値を示している。どちらもかなり精度良く地下水水位変動の傾向を捉えることができています。

構築されたモデルにおいて、降水量 R_n に0、水封水

図12式: $F(t) = a \cdot \exp\left(-\frac{t-b}{a}\right) + c$ $a = 2022.2, b = -6665.4, c = 196.6$

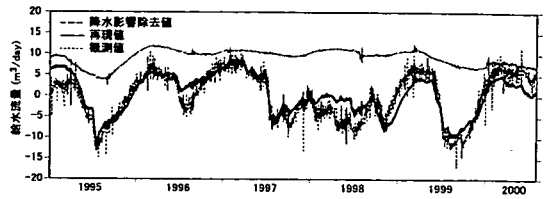


a) 回帰結果

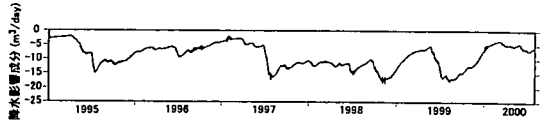


b) 補正後 全体湧水流量

図-12 全体湧水流量の漸減現象の指数関数回帰補正

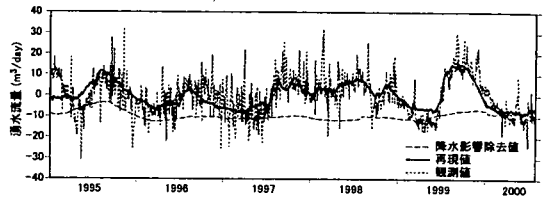


a) MARモデルあてはめおよび降水影響除去結果



b) 降水影響成分

図-13 豎坑 A 給水流量に占める降水影響成分の抽出



a) MARモデルあてはめおよび降水影響除去結果



b) 降水影響成分

図-14 全体湧水流量に占める降水影響成分の抽出

位 H_n に管理値 $H_{c,n}$ 、給水流量 Q_n および湧水流量 F_n には先に求めておいた降水影響除去値 \bar{Q}_n および \bar{F}_n を与えて降水影響除去後の孔内水位変動をシミュレーションした結果を同図中の太破線で示した。また再現値との差(降水影響成分)を各図b)に示した。

W-4孔の降水影響除去後の地下水水位は、ほとんど変

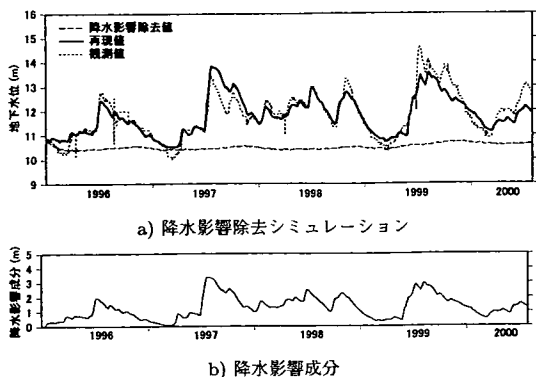


図-15 MARモデルによる降水影響除去結果（観測孔 W-4）

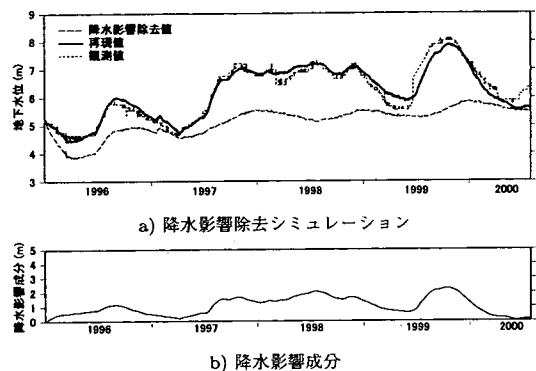


図-16 MARモデルによる降水影響除去結果（観測孔 W-11）

動せず実測最低水位（約 10.5m）付近ではほぼ一定という結果となった。実測水位に占める降水影響成分は最大 3m 以上に及んでいる。W-11 孔の降水影響除去後の地下水位は、最初の数ヶ月間は 1m 程度下降した後上昇するという挙動を示しているが、それ以降の変動は僅かであり、降水影響成分が 1~2m 程度含まれていると評価された。W-4 孔と比べると降水影響成分はかなり滑らかで、より大きな時間遅れを伴っていることが推察される。

なお初期の数ヶ月間シミュレーション値が安定していないのは、MAR モデルの式 (15) にあてはめる際に次数 M 個分の初期値の影響が考えられる。つまり降水影響を含んだ孔内水位実測値を初期値として入力しているために、この影響が自己回帰成分によって数ヶ月間継続していることによるものと考えられる。このようにシミュレーション初期は不安定となることがあるため、降水影響評価として信頼できるのは、シミュレーション初期の半年間を除いた以降と考えるのが妥当である。ただし W-4 孔でも同様の問題は考えられるが、孔内地下水位の初期値に占める降水影響分の割合が小さかったために不安定な期間は短いものと考えられる。

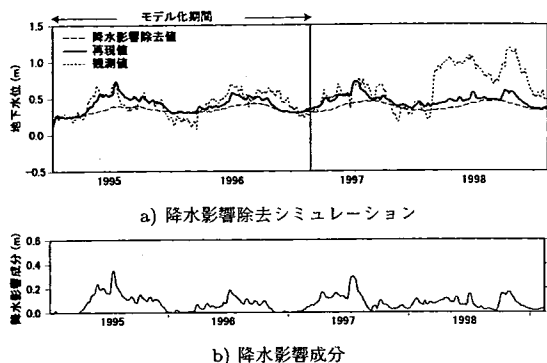


図-17 MARモデルによる降水影響除去結果（観測孔 W-9）

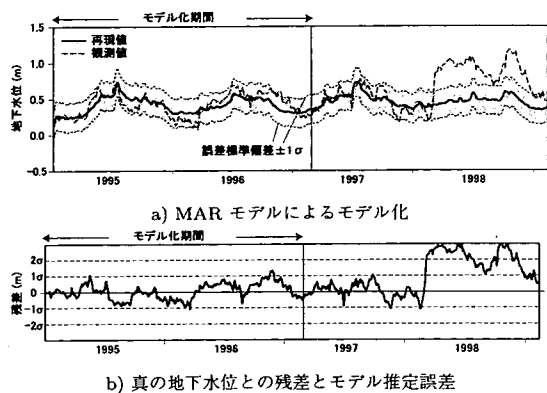


図-18 MARモデルによる地下水位管理の概念（観測孔 W-9 の例）

W-9 孔については、前章で実施した状態空間モデルにより気圧、潮汐、降水影響成分を分離した後の補正後地下水位（図-8）に対して、式 (15) のモデルによる検討を実施した。しかしながら対象期間全体についても十分な再現精度が得られなかった。前述したように補正後地下水位変動では 1998 年 3 月頃に約 50cm の上昇が認められ、特にこの付近の影響により全体の再現精度が悪くなっていることがわかった。そこで最初の約 2 年間（1995 年 1 月 1 日～1997 年 3 月 1 日）で最適モデルの構築を行ったところ、精度良く変動を捉える事ができた。図-17 a) は構築されたモデルにより対象期間全体を再現したものであり、細破線が観測値、太実線が再現値を示している。これを見ると 1998 年 3 月頃の水位上昇以外の変動は精度良く捉えられている。

また同様に構築されたモデルにおいて、降水影響除去後の孔内水位変動シミュレーション結果を同図中の太破線で、また再現値との差（降水影響成分）を図-17 b) に示した。これから水位変動に占める降水影響成分は最大 0.3m 程度であることがわかった。

(4) 孔内地下水位の計測管理

ここではW-9孔を例に、提案するモデルによる計測管理モデルとしての可能性について述べる。図-18 a) は、前節で最初の約2年間をモデル化期間として構築した最適モデルによる再現値にモデルの誤差標準偏差(式(15)の最後の誤差項 $e(t)$ の標準偏差)の $\pm 1\sigma$ の範囲を同時に示したものである。図中の破線が観測値(ただし状態空間モデルによる気圧、潮汐、降水影響成分を除いた後の補正後水位)を示し、実線がモデルによる再現値であり、グレーハッチの範囲が $\pm 1\sigma$ の範囲である。また図-18 b) は観測値と再現値の残差を $\pm 1\sigma$ 、 $\pm 2\sigma$ の範囲と共に示している。

これらを見るとわかるように、約2年間のモデル化期間とその後約1年間(1998年2月頃迄)は変動傾向は捉えられており、残差もモデル標準偏差のほぼ範囲内に収まっているが、1998年3月頃における約50cmの水位上昇を全く捉えることができず、以降は、誤差が $+2\sigma$ 以上となっている。このことから、この時期を境に水理構造に何らかの変化が生じて水位が上昇したものと考えられる。

このように本モデルを用いることで、モデルに含まれない影響による僅かな地下水位変化を十分な精度で検出できることがわかった。すなわち本モデルにより計測管理を行うことで、運用中の日々の地下水位変動の中から、水理構造の変化等に伴う水位変動(異常)の検出が可能であることを示唆するものである。

(5) 孔内地下水位の変動要因評価

MARモデルにおいて、特定の変数の変動に対する他の変数の寄与の程度を相対的に表した量が相対ノイズ寄与率(文献⁹⁾参照)であり、対象変数変動の周期成分毎に算出される。上記のW-4孔およびW-11孔地下水位の最適MARモデルにおいて、孔内地下水位の変動に対する他の変数の相対ノイズ寄与率を表したグラフが図-19である。グラフの横軸は孔内地下水位変動の周期成分(単位は日)を示し、縦軸は各変数毎のノイズ寄与率を累積して示している。自身(孔内地下水位)を含む全ての変数の寄与率を累積すると1となる。

W-4孔およびW-11孔のノイズ寄与率ともに、長周期成分(月周期~年周期)ほど他の変数の寄与率が大きく、短周期成分(1~数日周期)は自己成分が大きい。いずれの地下水位変動も長周期成分が卓越していると考えられるため、その変動は他の変数による影響を強く受けていることがわかる。個別に見るとW-4孔では、多くの周期成分で日降水量が40%程度寄与していることがわかる。これに対してW-11孔では、200日以上(長周期成分)において堅坑Cの給水流量が60%程度の寄与率を示している。

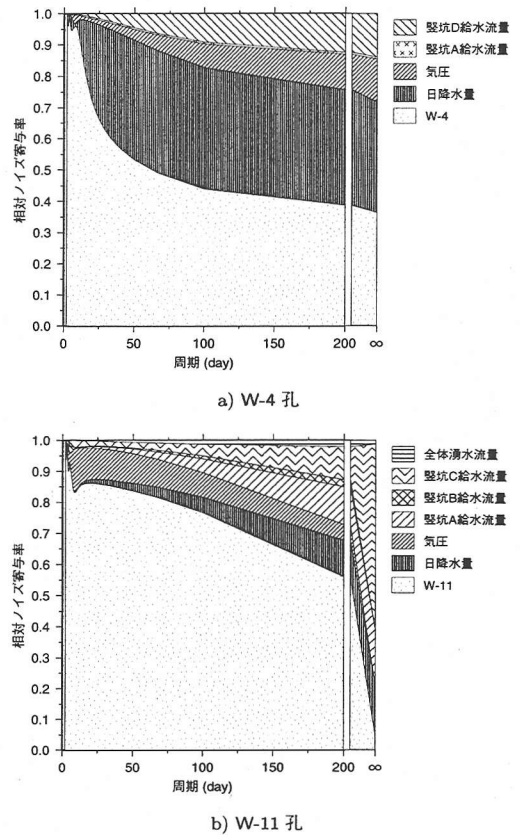


図-19 相対ノイズ寄与率

14孔全ての観測孔について構築したMARモデルにおいて、ノイズ寄与率による評価を実施して、定性的に要因分析を行った結果を図-20に示す。まず図-20 a) は日降水量の寄与が高い孔の範囲を示しており、これを見ると基地周縁部に位置していることがわかる。これはタンク敷地内は給水された水封水の影響で地下水位が制御されているために、直接的な降水の影響を受けにくいことによるものと考えられる。堅坑C給水流量の寄与率が高い孔は図-20 c)に示す範囲で、南西側の観測孔地下水位に寄与している。ただし給水流量の絶対量が最大で $15\text{m}^3/\text{day}$ 程度と少ないことからすれば、給水流量が直接に影響を与えているのではなく、一定に制御されている水封水位の本来の変動が、この範囲の孔内水位変動と関連が深いことを意味するものである。図-20 b)およびd)はそれぞれ堅坑Bおよび堅坑D給水流量の寄与する観測孔を示している。何れも水封水の注入範囲にある程度一致した位置の観測孔地下水位に関連があることがわかる。ただし水封トンネルの位置関係からだけでは関連性の説明が付かない観測孔も存在しており、これらは東西方向を主体とする亀裂帯の賦存状態による地質構造の影響が考えられる。

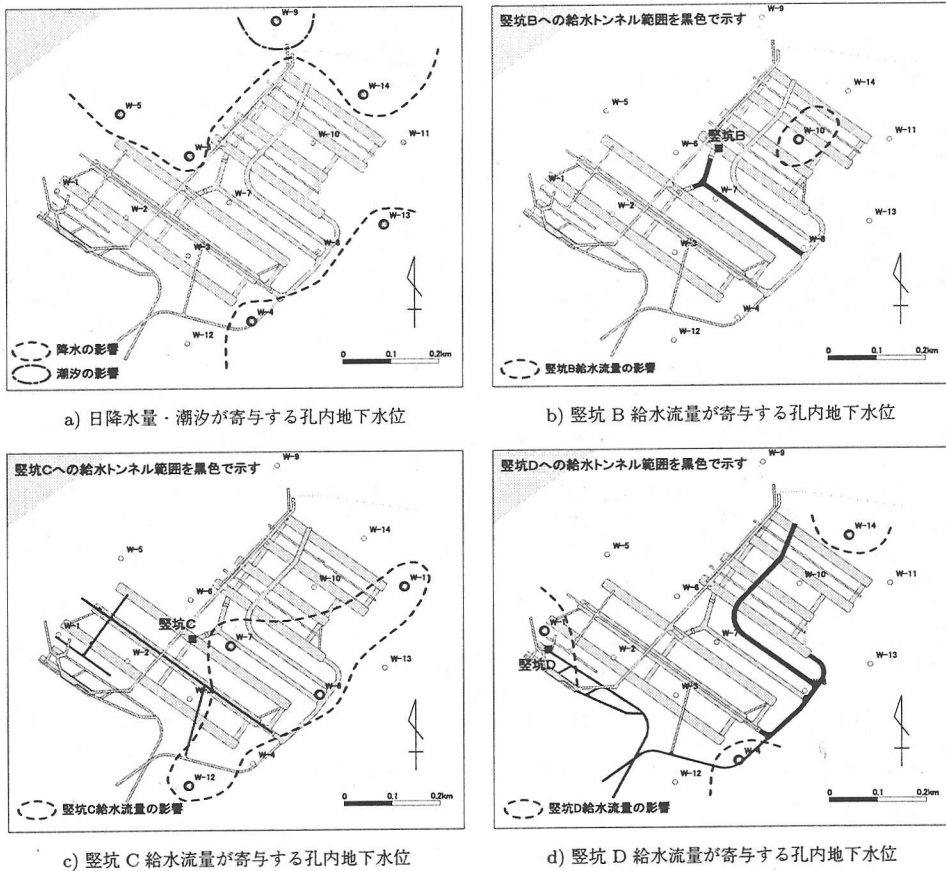


図-20 変動要因の評価

5. まとめ

本論文では、菊間基地における1日毎の地下水関連データを用いて、統計的な時系列解析手法による孔内地下水水位変動のモデル化と気圧や潮汐、降水による影響の分離・評価を実施した。結果をまとめると以下の通りである。

- 状態空間モデルによる気圧・潮汐・降水影響成分の分離手法では、潮汐の影響を強く受けて変動するW-9孔地下水水位については精度良く分離可能であり、潮汐による変動成分が約80cm程度存在する。
- 地下水水位変動における降水の影響は、給水流量や水封水位などの制御に伴う影響を複雑に受けているため、単純な線形モデルでは表しきれない。
- 給水流量や水封水位など水封制御データによる相互の影響を考慮した制御系多変量自己回帰(MAR)モデルによる検討では、漸減現象を補正した給水流量、湧水流量データをモデルに組み込むことで、ほとんどの孔内地下水水位変動が十分な精度で再現できる。

- 構築されたモデルにおいて、降水を0とした時のシミュレーションにより、各観測孔地下水水位変動に占める降水影響成分の評価が可能である。
- 構築されたモデルの再現値と観測値の残差を管理することで、気象や潮汐等の自然因子による影響を除いた、水理構造の変化等による水位変化(異常)を十分な精度で検出可能である。
- ノイズ寄与率を基に変動要因の分析をすることで、各観測孔地下水水位の変動傾向の分類が可能であり、水封機能の管理上役に立つものと考えらる。

以上、水封式岩盤タンク周辺の地下水挙動は、水封制御による影響により複雑な因果関係が成り立っており、これらの関係を提案する時系列解析モデルにより十分な精度でモデル化でき、水封機能管理モデルとしての適用性が示された。今後は申木野基地や久慈基地におけるデータにおいても検討を行い、適用性を示していく所存である。

参考文献

- 1) 浅岡弘錫, 宇野尚雄: 大規模工事前後の地下水位変動の分析, 土木学会第 49 回年次学術講演会梗概集, III-98, pp.190-191, 1994.
- 2) Kitagawa,G. and Matsumoto,N. : Detection of coseismic changes of underground water level., Jour.of American Statistical Association, pp.521-528, 1996.
- 3) 松本則夫, 高橋誠: 地震にともなう地下水位変化検出のための時系列解析～静岡県浜岡観測井への適用～, 地震, 2-45 巻, pp.407-415, 1993.
- 4) 赤池弘次, 北川源四郎編: 統計学選書 時系列解析の実例 II, 朝倉書店, p.218, 1995.
- 5) 赤池弘次, 中川東一郎: ダイナミックシステムの統計的解析と制御, サイエンス社, p.189, 1972.
- 6) 例えば, 中村秀夫, 内田主幹: 統計モデルによる火力発電プラントの解析と制御, システム・制御・情報, Vol.34, No.1, pp.9-15, 1990.
- 7) 本多真, 鈴木誠, 百田博宣: 地下水挙動への多変量自己回帰モデルの適用, 土木学会論文集, No.529/III-33, pp.93-102, 1995.
- 8) Akaike,H. : A new look at the statistical model identification. IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-19, No.6, pp.716-723, 1974.
- 9) 尾崎統, 北川源四郎編: 統計学選書 時系列解析の方法, 朝倉書店, p.185, 1998.

(2002.7.15 受付)

STATISTICAL ANALYSIS OF GROUNDWATER BEHAVIOR AROUND WATER SEALED ROCK CAVERN TAKING METEOROLOGICAL AND TIDAL DATA INTO ACCOUNT

Kazuo UEDE, Akio OKAMOTO, Makoto HONDA, Makoto HASEGAWA and Makoto SUZUKI

Groundwater levels around the water sealed rock cavern are greatly fluctuating by the influence of not only precipitation, air pressure and earth tide, but also changes of water supply for water curtain control. It is very important for maintenance and control of water curtain functions to detect a minor fluctuation caused by changing hydrological structure with earthquake or others in the greatly fluctuated observed values. In this paper, it is shown that the effect of meteorological phenomena can be clearly separated by statistical time series analysis and that the changes of hydrological structure can be detected. It's also shown that the proposed methods are available for the maintenance system.