

### 1.はじめに

地下水は、重要な水源の一つとして幅広く利用されている。無秩序に地下水を汲むことは、諸問題を招くことから、利水需要量のみの揚水が望ましい。本文では、そういった所与の需要量を揚水する際、地下水全体への影響が最小になるように各井戸の揚水量を決定することを目的とした。ここでは地下水位変動量に着目し、その評価汎関数を考え、それを最小にする揚水量を求めた。なお、対象領域の透水係数は、地下水位観測から拡張 Kalman フィルタ有限要素法<sup>1)-3)</sup>により同定された結果を用いている。また、揚水量算定時の解析では、地下水位の境界移動をともなう方法を地盤モデルに適用している。

### 2. 地下水流動基礎方程式およびその離散化<sup>4)</sup>

水平2次元地下水流動方程式に関する線形近似式について、所与の境界条件下から弱形式を得る。空間について離散化した後、時間差分・展開を施して得られる式を本文で扱う有限要素方程式とする。

### 3. モデル解析

本解析にあたり、図-1のような地下水盆モデルを設定し、このモデルに対して2つの目的をもって解析を行った。まず、そのモデルの透水係数分布は既知であるが、その値が未知な状況を想定し、地下水位観測値から透水係数を同定した。次に、その結果を用いて、対象領域全体の地下水位変動量を評価した関数を考える。所与の需要揚水量をみたしながら、そういう関数が最小になるように各井戸の揚水量を決めた。

まず、図-2に従って逆解析を行う。透水係数は常用対数をとり、状態量に含める<sup>4)</sup>。ここで解析には、図-1において常に地下水の存在する領域、すなわち、下流側の正方形20要素のみの領域を対象とした。解析に用いた観測値は、順解析による地下水挙動の一部とおいた。図-1に示す条件下で、各井戸の揚水を一定量 172.8( $m^3/day$ )とおき、時間間隔を1日にとり、61日分の計算を行った。図-3は計算結果を示す。透水係数同定は、全て1%の誤差で順解析における当初設定値に収束しているとわかる。

各井戸の揚水量決定は以下のように考える。地下水位変動量に対する評価関数  $L$ において、各時間毎の需要揚水量を拘束条件として付加した評価汎関数  $\tilde{L}$  を適用した。汎関数  $\tilde{L}$  を最小にするための条件は  $\partial \tilde{L} / \partial q_i|_t = 0$  である。この連立方程式を解き、目的

$$\begin{aligned}\lambda \frac{\partial h}{\partial t} &= k D_0 \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + \varepsilon \quad (\varepsilon: \text{流入量}) \\ \downarrow \\ A h_{t+1} &= B h_t + \xi_{t+\theta} - C q_t \\ \text{境界条件: } \bar{h} &= h \quad \text{on } S_h, \quad \bar{q} = k \frac{\partial h}{\partial n} \quad \text{on } S_q\end{aligned}$$

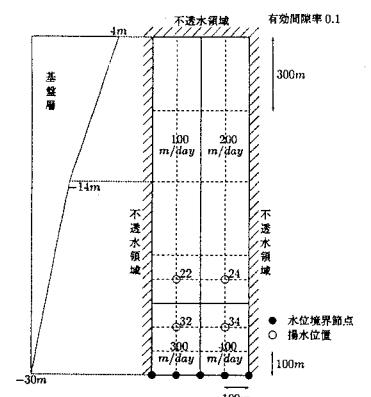


図-1 地下水盆モデル

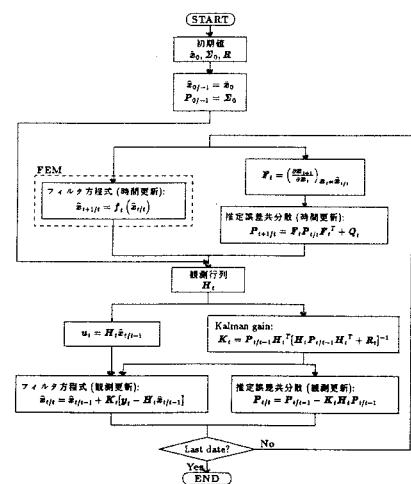


図-2 拡張 Kalman フィルタ有限要素法

の揚水量  $q_{ijt}$  を得る。揚水に関するモデル解析は、図-1に示した地下水盆全体を解析対象としている。したがって、その領域内で、地下水水面の境界移動をともない得る解析を行った<sup>6)</sup>。移動境界解析は、固定境界解析とは異なり、地下水位変動の大きな上流部の挙動を評価できることから、本解析において是有用性があると判断した。揚水は、図-1上の節点 22, 32 と 24, 34 がそれぞれ同量になるようにした。ここでは、一例として需要揚水量  $R_t$  は一定値  $691.2(m^3/day)$  であると設定した。各節点の重み  $w_i$  には節点換算面積<sup>5)</sup>に等しい値をおき、ペナルティ数入には 10000 を与えた。図-4 は、上記揚水決定法による計算結果と、各井戸が一定量  $172.8(m^3/day)$  で揚水した場合の計算結果との比較を表している。図中の地下水位挙動は揚水位置のものを示す。また計算結果から、地下水は第 13 ~ 14 日目と第 47 ~ 48 日目において、最上流要素の一部に境界の移動が認められた。

#### 4. 結論

地盤モデルにおいて、透水係数が当初設定値でいう 100 および  $300(m/day)$  の領域を  $\alpha$  領域、200 および  $400(m/day)$  の領域を  $\beta$  領域と呼ぶことにする。計算結果から、地下水位変動量は全体的に微小量ではあるが小さくなっていた。また、全解析領域内において、揚水位置を中心とした領域が最も変動量が抑えられていたことがわかった。

変動量を小さくし得た一方、最終ステップ付近では、 $\alpha$  領域中の揚水量が大きくなり、 $\beta$  領域中の揚水量が小さくなつた。これは  $\beta$  領域よりも、 $\alpha$  領域の方が流れにくく、地下水位変動が徐々に推移していくためであると思われる。加えて、本文のモデルは解析領域が小さく、変化に乏しいものであったため、微小な地下水位変動量となる期間においては、 $\alpha, \beta$  領域の微小な変動差が強調され、図-4 のように極端な結果を得ていると思われる。また評価量が微小であることから、結果には大きく表れていないが、計算誤差の影響も多少含まれていると思われる。今後、そういった微小な地下水位変動時の揚水量決定方法を改善し、計算誤差の影響を取り除くとともに、観測水位から推定した水位分布を用い、本文の方法によって揚水量を決定させていく予定である。

参考文献 1) 村上 章・長谷川高士: Kalman フィルター有限要素法による逆解析と観測節点配置、土木学会論文集、(388): 227~235, 1987. 2) Murakami,A.: Studies on the application of Kalman filtering to some geomechanical problems related to safety assessment, Doctoral dissertation, Kyoto University, 1991. 3) Murakami,A. and T. Hasegawa: Application of Kalman filtering to inverse problems, Theoretical & Applied Mechanics, 42: 3~14, 1993. 4) 奥野哲夫・鈴木 誠: 不透地下水を対象とした拡張カルマンフィルタによる透水係数の空間分布推定法、土木学会論文集、(469): 93~102, 1993. 5) 村上 章・長谷川高士・浜口俊雄・H. エルシャザリ: 拡張 Kalman フィルタ有限要素法による地下水モデルのパラメータ同定、第 43 回応用力学連合講演会、397~400, 1994. 6) 長谷川高士・石井将幸・浜口俊雄: 宮古島砂川地下ダムの地下水流动解析、第 49 回農業土木学会京都支部研究発表会講演会要旨集、52~53, 1992.

$$\tilde{L} = L + \lambda(Q_t - R_t)^2$$

$$L = (h_{t+1} - h_t)^T \cdot W \cdot (h_{t+1} - h_t)$$

$$Q_t = \sum_i C_{ij} q_j$$

ただし  $\lambda$ : ペナルティ数、 $W$ : 対角重み行列、

$Q_t$ : 総揚水量、 $R_t$ : 需要揚水量

$$\frac{\partial \tilde{L}}{\partial q_{ijt}} = 0 \Rightarrow P_{ij} q_{ijt} = f_i$$

$$P_{ij} = \sum_k \{w_k \cdot (A_{km}^{-1} C_{mi}) \cdot (A_{kn}^{-1} C_{nj})\}$$

$$+ \lambda \sum_k C_{ki} \cdot \sum_l C_{lj}$$

$$f_i = \lambda \cdot R_t \sum_k C_{ki} + \sum_k \{w_k \cdot \Delta h_{kl} \cdot (A_{km}^{-1} C_{ml})\}$$

$$\Delta h_{kl} = A_{km}^{-1} (B_{mn} h_{nl}^t + \xi_m^t) - h_{kl}^t$$

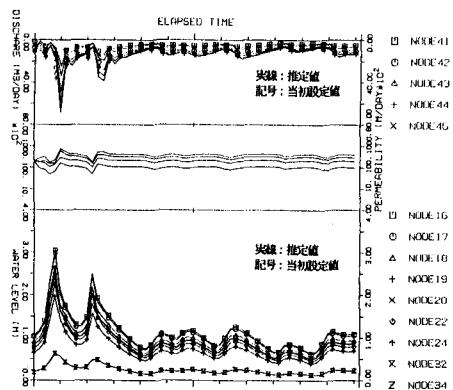


図-3 逆解析結果

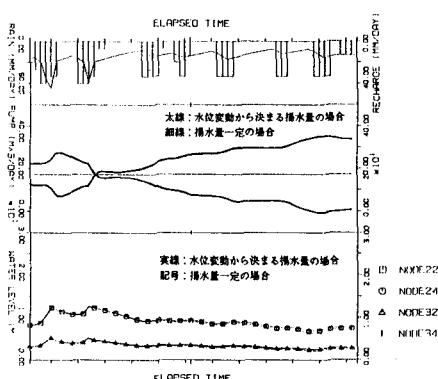


図-4 揚水量算定結果