

## 1 はじめに

地下水浸透流の逆解析には拡張ベイズ法<sup>1)</sup>、拡張カルマンフィルタ法<sup>2)</sup>による手法がある。これらは、いずれも透水量係数の事前情報を最大限に活用した手法である。事前情報が得られない場合には最小二乗法による同定<sup>3)</sup>がある。しかし、透水量係数の同定結果は透水量係数のゾーニングに依存するため、透水量係数の事前情報が得られていない場合、そのゾーニングを試行的求めなければならない。すなわち、ゾーニング方法が課題となってくる。そこで、本研究では効果的なゾーニングの方法として、ゾーニングには観測地下水位と計算地下水位の誤差分布を用い、また、最良なゾーニングモデルの判断にはAICを用いた。そして、この手法を関東平野北部地域へ適用し、透水量係数の同定を行なった。

## 2 地下水浸透流の逆解析手法

地下水浸透流解析に有限要素法を適用した場合、順解析においては最終的に境界条件を考慮した次の連立方程式を解く問題に帰着する。

$$\mathbf{K}\mathbf{h} = \mathbf{q} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{K}$ は未知の透水量係数 $\theta$ で表される全体剛性マトリクス、 $\mathbf{h}$ は水頭ポテンシャルベクトル、 $\mathbf{q}$ は全体フラックスベクトルと呼ばれるものである。なお、上式は等水頭境界における境界条も考慮し縮退させたものであり、全体フラックスベクトルは $\theta$ の関数であることに注意する。ある透水量係数 $\theta$ を用いたモデルによる地下水位の計算値は、式(1)の逆関係より、

$$\mathbf{h} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{q} \quad (2)$$

と表すことができる。

観測された地下水位を $\mathbf{h}^*$ とすれば、透水量係数が未知としこれを観測結果から最小二乗法により推定することは、次の評価関数 $J$ を最小化する問題である。

$$\min. J(\theta) = \min. (\mathbf{h}(\theta) - \mathbf{h}^*)^T \mathbf{W} (\mathbf{h}(\theta) - \mathbf{h}^*) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{W}$ は重み係数マトリクスである。

このような評価関数 $J(\theta)$ を最小とするような透水量係数 $\theta$ を求めると、これが逆解析である。

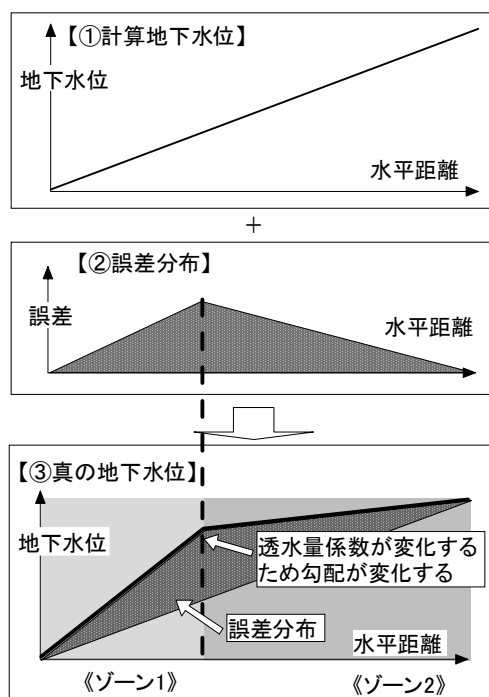


図-1 ゾーニングの着眼点

## 3 誤差を利用したゾーニング手法とAICによる判定

本研究の目的はゾーニングモデルの効果的な作成にある。理想的な透水量係数のゾーニングモデルは、計算された地下水位が観測地下水位と誤差が小さくなるようなモデルである。そこで、ゾーニングは観測(真の)地下水位と計算地下水位の誤差に着目する。また、地下水位の勾配は透水量係数に左右されること、すなわち、透水量係数が増減し地下水位の勾配が変化する個所がゾーンの変化する個所であるという点にも着目する。この二つの点から、図-1のように誤差と計算地下水位を比較すると、真の地下水の勾配が変化する個所が予測できる。その真の地下水位の勾配が変化する個所がゾーニングを行なう個所である。またもし、間違ったゾーニングを行なったとしても、その部分で誤差が大きくなる場合や、ゾーニング個所と異なる個所に誤差が現われる場合があるので、逆にゾーニング個所を見つける目安となる。

ゾーニングは誤差の変化と計算地下水位を比較して視覚的に判断するために、計算地下水位を図化したものや、誤差のコンター図・傾斜方向の分布図を用いて誤差の変化が分かりやすいようにする。

作成したゾーニングモデルの判定にはAICを用いる。本研究では測定誤差の標準偏差が未知であるので次の式(4)を用いた。

$$AIC = n \cdot \ln S + 2r \quad (4)$$

ここで、 $n$ はデータの総数、 $S$ は測定値と計算値の残差二乗和、 $r$ はゾーンの数である<sup>4)</sup>。

#### 4 関東平野北部地域への適用

実際に本手法を関東平野北部地域(図-2 参照)に適用する。この地域の帯水層を上層と下層の2つ(以下、第1、第2と区別する)に大別した場合、対象地域内における工業・生活用の全揚水量のうち約7割が第2帯水層からの揚水であるとされている<sup>5)</sup>。そこで、本研究では、揚水の依存度が高い第2帯水層に対し透水量係数を求めることとした。逆解析に用いた情報は、1988年から1997年の10年間に於ける対象地域内観測井の工業用および生活揚水量である。生活用・工業用の揚水は年間の変動はほとんど無いことが分かっている。他に農業揚水が考えられるが、この地域における農業揚水は6月から10月の灌漑期に使用されるとすれば、灌漑期以外の揚水は工業・生活用のみであると考えられる。そこで、計算に用いる観測地下水位は2月のデータを用いることとし、この時期の揚水は工業・生活用のみであると考えて計算を行なうことにした。有限要素メッシュは対象地域を UTM 座標系で1辺2.5kmの正方形要素896個に分割して行なった。対象地域内の観測井位置と地下水の情報を地理情報システム(GIS)上で空間補間を行ない、境界条件を設定した。また、補間した地下水位を有限要素メッシュの各節点の観測地下水位に割り当て、実際の観測井地に近接するものは真の観測値、それ以外のは仮の観測値と区別した。地域内の揚水量は市町村ごとに集計されたものをGIS上で市町村ポリゴンの属性情報として与え、これを有限要素メッシュ同様のメッシュデータに交換して用いた<sup>3)</sup>。

関東平野北部地域へ本手法を適用した手順は以下のようになる。

観測地下水位・境界条件・揚水量のデータを用いて、対象領域を1つのゾーンとして逆解析を行ない透水量係数を同定する。

逆解析で得られたゾーニングモデルと透水量係数を用いて順解析を行ない、地下水頭の計算値を求める。

地盤の観測地下水位と逆解析によって得られたモデルの計算地下水位との誤差を求める。

地下水位の観測値と計算値から AIC を求める。

地下水位の観測値と計算値の誤差とその分布からゾーンの数を増やし、次のゾーニングを決定して、再び逆解析を行なう。

この解析を AIC が最小になるまで繰り返す。

この手順で行ったゾーン数7、20、29におけるゾーン分割とその場合のAICを図-2に示している。本研究で得られたゾーニングとAICは図-2の下の図であり、最終的な透水量係数の同定結果は表-1である。この手順で行うことにより、効率的にゾーン分割が行うことができた。また、同定された結果も佐藤らが行なった埼玉県を対象とした最適揚水配分の算定に用いられた透水量係数<sup>6)</sup>に比較的近い値を得ることができた。

#### 5 おわりに

本研究では透水量係数の同定においてゾーニングの手法を提案した。また、関東平野北部地域を対象に透水量係数のゾーニングを行なった。この手法をさらに客観的にすることが今後の課題である。

【謝辞】本研究の一部は、日産科学振興財団の研究助成を戴いて行なったものである。ここに、付記して謝意を表します。

【参考文献】1)本城勇介ら(1996).拡張ベイズ法による広域地下水解析モデルの逆解析:定常データに基づく場合、土木学会論文報告集, No.535 / -34, pp93-102. 2)奥野哲夫ら(1994).複数の揚水試験結果を用いた透水係数の空間分布推定と地下水流動予測,土木学会論文報告集, No.493 / 27, pp.165-174. 3)村上哲ら(2001).関東平野北部の地盤沈下地帯における透水量係数の同定,第36回地盤工学研究発表会, pp.1255-1226. 4)中川徹・小柳義夫(1982).最小二乗法による実験データ解析,東京大学出版会, pp.150-155. 5)環境庁(2000).関東平野北部地盤沈下防止対策調査, p.236. 6)佐藤邦明ら(1986).埼玉県平野部における適正地下水揚水量の検討,土と基礎, Vol.34, No.11.

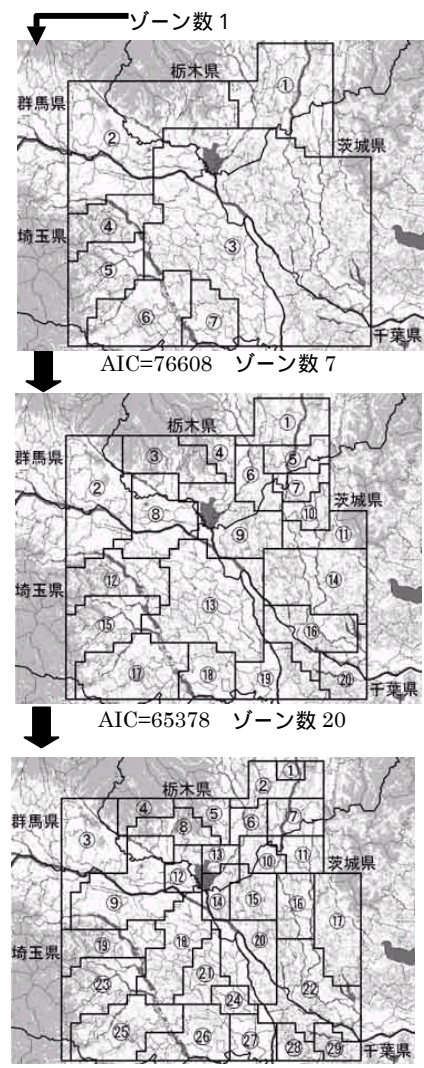


図-2 ゾーニングの過程

表-1 透水量係数の同定結果

ゾーン	透水量係数(m <sup>2</sup> /y)	ゾーン	透水量係数(m <sup>2</sup> /y)
1	2.50 × 10 <sup>4</sup>	16	5.03 × 10 <sup>2</sup>
2	1.10 × 10 <sup>4</sup>	17	3.21 × 10 <sup>4</sup>
3	1.89 × 10 <sup>3</sup>	18	6.00 × 10 <sup>2</sup>
4	3.41 × 10 <sup>3</sup>	19	1.42 × 10 <sup>4</sup>
5	1.89 × 10 <sup>3</sup>	20	2.02 × 10 <sup>3</sup>
6	3.36 × 10 <sup>3</sup>	21	1.88 × 10 <sup>3</sup>
7	1.90 × 10 <sup>3</sup>	22	5.07 × 10 <sup>3</sup>
8	2.12 × 10 <sup>4</sup>	23	1.57 × 10 <sup>4</sup>
9	1.00 × 10 <sup>4</sup>	24	2.12 × 10 <sup>2</sup>
10	4.43 × 10 <sup>2</sup>	25	5.34 × 10 <sup>4</sup>
11	9.06 × 10 <sup>2</sup>	26	7.85 × 10 <sup>3</sup>
12	1.59 × 10 <sup>2</sup>	27	1.47 × 10 <sup>3</sup>
13	1.30 × 10 <sup>4</sup>	28	2.94 × 10 <sup>2</sup>
14	3.54 × 10 <sup>3</sup>	29	6.74 × 10
15	4.04 × 10 <sup>2</sup>		