観測地下水位による自由地下水場の基盤高と 地下水パラメータの推定について

藤野和徳*・小路順一**

Identification of Lower Boundary of Aquifer and Groundwater Parameters in Unconfined Aquifer by Genetic Algorithm

Kazunori FUJINO * and Jun-ichi SHOJI **

Abstract

In this paper, using several observed groundwater levels, the method to identify the distribution of the lower boundaries of aquifer and the groundwater parameters in unconfined aquifer simultaneously is proposed. The genetic algorithm is used to minimize the difference between the observed and the calculated groundwater levels. Here the distribution of the lower boundaries of aquifer is expressed by linear interpolation of several lower boundaries on the grids and the groundwater parameters are constant in the region. This method is applied to the simulation regions of aquifer and coastal aquifer to discuss the availability.

Key Words: Observation Groundwater Level, Unconfined Aquifer, Hydraulic Conductivity, Effective Porosity, Lower Boundary of Aquifer, Genetic Algorithm

要 旨

この研究は数箇所の観測地下水位を用いて、自由地下水場の帯水層の基盤高と地下水パ

* 八代工業高等専門学校土木建築工学科 ()
Department of Civil and Architectural Engineering, Yatsushiro College of Technology

** アジアプランニング(株)
Asia Planning, Inc.,

ラメータを同時に同定する手法を提案している。遺伝的アルゴリズムを観測地下水位と推定地下水位の差を小さくするために使用している。ここで、基盤高の分布は数箇所の基盤高より線形補完しており、また、地下水パラメータである透水係数、有効空隙率は解析領域内では一定としている。この手法を淡水のみの帯水層および海岸近くの帯水層に適用しその有効性を検討している。

キーワード：観測地下水位、自由地下水、透水係数、有効空隙率、基盤高、遺伝的アルゴリズム

1. はじめに

自由地下水場において地下水の流れを解析したり、地下水汚染対策のために地下水中の物質の挙動を解析する場合、境界の地下水位、地下水パラメータ（透水係数、有効空隙率）、基盤高が必要となる。これまで地下水パラメータについては揚水試験によって直接求めたり、また、間接的に地下水の流れを規定する方程式と地下水位の観測結果をもとに逆解析手法によって求められている。この逆解析手法には多くの研究があり、大西・井尻（1986）は非線形計画を用いて、平野（1991）、藤野・神野（1994）はカルマンフィルターを用いて、竹下ら（1997）は遺伝的アルゴリズムを用いて地下水パラメータを推定している。また、藤間（1989）、神野（1990）の研究があり、本城（2000）、竹下（2000）はこれまでの逆解析手法をまとめている。

基盤高もまた地下水の流れを規定するものであり、被圧地下水であれば透水係数と帯水層厚の積である透水量係数によって地下水の流れを解析することができる。しかしながら自由地下水では帯水層厚は地下水位の関数であることから透水量係数を定義することができない。地下水位の変動が小さい場合は平均地下水位を近似的に帯水層厚として取り扱う場合はあるが、精度よく解析するには透水係数と基盤高をそれぞれ与える必要がある。基盤高や帯水層厚はこれまでボーリング調査によってのみ求められており、基盤高を、また基盤高と地下水パラメータを同時に逆解析手法で求めている研究は見受けられない。実際問題として自由地下水場で地下水の流れを精度よく解析する

場合は、精度よい基盤高分布が必要であるが、多くの場合数点のボーリング調査結果から解析領域の基盤高分布を概略与え、地下水位や地下水の流向を求めているのが現状である。基盤高や帯水層厚を求めるには多くのボーリング調査が必要であるが、これには多くの費用を必要とする。

したがって、本研究は観測された地下水位には地下水定数や基盤高の情報が内包されていることを利用し、遺伝的アルゴリズム（北野（1994））を用いて、自由地下水場における基盤高および地下水パラメータを同時に推定する手法を提案するもので、シミュレーションモデルを用いて本手法を検討している。本手法の利用価値としては、既存の基盤高分布の評価や新たに基盤高分布を求めるためのボーリング調査の補完に役立つものと考える。

2. 遺伝的アルゴリズムによる基盤高と地下水パラメータの推定手法

地下水パラメータ、基盤高分布、境界条件が正しく設定されれば、地下水位の挙動は地下水流方程式や地下密度流方程式を用いて計算することができる。観測地下水位には地下水パラメータおよび基盤高分布の情報が内包されており、本研究は基盤高分布および地下水パラメータの組み合わせを数多く与え、遺伝的アルゴリズムにより、算定された地下水位が観測水位に一致するようなパラメータの組み合わせ、すなわち基盤高分布と地下水パラメータを同定する手法を提案するものである。遺伝的アルゴリズムは適応度の高い近似解を得るもので、数学的取り扱いが簡単であり、適応

関数を設定することができればどのような問題でも解を得ることができることから、探索手法に遺伝的アルゴリズムを用いている。

ここでは1次元のシミュレーションモデルは海岸地域で地下水位が観測された場合を取り扱い、地下水位を規定する方程式に地下密度流方程式を用いている。平面2次元のシミュレーションモデルは内陸部において地下水位が観測された場合を取り扱い、自由地下水の地下水流方程式を用いている。両モデルともに高さ方向には流速は変化しない（垂直流速を無視）とした準一様流が適用でき、観測水位とボーリング調査結果から既知の基盤高をもとに、基盤高分布およびシミュレーション領域内で一定の地下水パラメータである透水係数と有効空隙率を同時に同定する手法を提案している。なお、一般に観測地下水位には観測誤差や準一様流の仮定による誤差雑音が含まれている可能性があるが、本研究では予め誤差の取り除かれた観測地下水位をもとに、実務的に基盤高および地下水パラメータの同定に焦点をあてている。

図1に示す2次元のシミュレーションモデルを用いて基盤高、地下水パラメータの同定手法を図

2にしたがって説明する。このモデルでは、地下水位観測点は7箇所、既知の基盤高位置は5箇所となっている。基盤高分布は図1の■と▲印の15点を線形補完して表すこととしており、そのうちの5箇所が既知としているため、残り10箇所の基盤高を求めることになる。また、地下水パラメータ数は透水係数と有効空隙率の2つで、したがって合計12個のパラメータを求める問題となっている。

遺伝的アルゴリズム（北野、1994、藤野、1997）は生物の進化論をもとに構成されたもので、一般的に3つの過程、選択、交叉、突然変異によって、適合する子孫到達の原理をモデリングした確率的探索手法である。ここでは初期に遺伝子として様々な基盤高と地下水パラメータを持った生物群が世代を追うに従い、適合する生物群すなわち観測された地下水位とよく一致する基盤高と地下水パラメータを持った生物群に変わっていき、その生物群を明らかにすることによって基盤高と地下水パラメータを求めるものである。

処理手順として、まず、初期個体集団を生成する。パラメータは計算の便宜上全て8桁の2進数

図1 2次元シミュレーション領域

Fig. 1 2 dimensional simulation region

で表すことにした。したがって、1個体は12個のパラメータからなることから合計96 (12×8) 桁の2進数 (00101100.....01010010) で表した。初期個体集団は100個体とした。1個体は10箇所の基盤高と透水係数、有効空隙率からなり、探索範囲は解析領域の現地調査をもとに設定する必要があるが、ここでは基盤高は基準高さから0m~5.5mの範囲に、透水係数は1~51m/日の範囲に、有効空隙率は0.2~0.4の範囲にあるとして、0~255 (2進数8桁を10進数に直した値) の乱数を与えて各個体のパラメータを設定し、遺伝的アルゴリズムのパラメータとしてはこれを2進数表示して用いている。

基盤高 0 から255の1様乱数×5.5m/255
 透水係数 0 から255の1様乱数×50m/日/
 255+1.0m/日
 有効空隙率 0 から255の1様乱数×0.2/255+
 0.2

次に、各個体 (地下水パラメータと10箇所の基盤高) の12個のパラメータと初期、境界条件を与え、式 (1) を差分化した式 (1)' によって推定地下水位を求める。

$$n \frac{\partial h}{\partial t} = k \frac{\partial}{\partial x} \{ (h-g) \frac{\partial h}{\partial x} \} + k \frac{\partial}{\partial y} \{ (h-g) \frac{\partial h}{\partial y} \} + r \quad (1)$$

ここに、

h : 地下水位 (m)
 g : 基盤高 (m)
 k : 透水係数 (m/日)
 n : 有効空隙率
 r : 涵養量 (m/日)

式 (1) の差分式は、次式で与えた。

$$h(x, y, t + \Delta t) = h(x, y, t) + \frac{k \cdot \Delta t}{n \cdot \Delta x^2} (e1 \cdot g1 - e2 \cdot g2) + \frac{k \cdot \Delta t}{n \cdot \Delta x^2} (e3 \cdot g3 - e4 \cdot g4) + \frac{\Delta t}{n} r \quad (1)'$$

ここに、

$$e1 = \frac{1}{2} \{ (h(x + \Delta x, y, t) - g(x + \Delta x, y)) + (h(x, y, t) - g(x, y)) \}$$

$$g1 = h(x + \Delta x, y, t) - h(x, y, t)$$

$$e2 = \frac{1}{2} \{ (h(x, y, t) - g(x, y)) + (h(x - \Delta x, y, t) - g(x - \Delta x, y)) \}$$

$$g2 = h(x, y, t) - h(x - \Delta x, y, t)$$

$$e3 = \frac{1}{2} \{ (h(x, y + \Delta y, t) - g(x, y + \Delta y)) + (h(x, y, t) - g(x, y)) \}$$

$$g3 = h(x, y + \Delta y, t) - h(x, y, t)$$

$$e4 = \frac{1}{2} \{ (h(x, y, t) - g(x, y)) + (h(x, y - \Delta y, t) - g(x, y - \Delta y)) \}$$

$$g4 = h(x, y, t) - h(x, y - \Delta y, t)$$

Δx 、 Δy 、 Δt はそれぞれ x、y 方向の格子間隔お

図2 パラメータ同定のための流れ図

Fig. 2 Flow chart to identify the parameters

よび時間間隔である。

次に、観測地下水位と得られた推定地下水位から式 (2) によって100個体それぞれの適応関数値を求める。この適応関数値は基盤高と地下水パラメータが正しく設定されれば観測地下水位と推定地下水位は一致してくるもので、この関数値が小さいほど適応度が高いと評価される。

$$f = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (h_{i,j} - h'_{i,j})^2} \quad (2)$$

ここに、

- M : 観測井戸数、(図1のモデルでは)
- N : 各観測井戸の観測個数 (時間的なもので後述の適用例では)
- h' : 観測地下水位
- i : 観測井戸の番号
- j : 時間的観測番号 (ここでは1~48)

次に適応度の高い個体が多く残るように選択を行う。ここではトーナメント選択を用い、100の個体を2回選択できるとして、任意の2個体の組を100組作り、各組で適応関数値の小さい個体を残す操作を行った。この選択方法では個体数は変化しない。

次に交叉を行う。個体の0と1を遺伝子とみなして操作を行っている。交叉は100組の個体から任意の2個体の50組について、交叉確率を0.6として、0~1の一樣乱数を発生させ、0.6以下であれば交叉操作を行った。その方法は、まず交叉させる区間を乱数を用いて定め、その区間の遺伝子を交叉させている。交叉区間3~6の場合の交叉の一例を次に示す。

親 A	0 1 1		0 1 1 1		1 0
親 B	1 0 1		1 0 0 1		0 1
					↓
子 A	0 1 1		1 0 0 1		1 0
子 B	1 0 1		0 1 1 1		0 1

次に、突然変異の操作を行う。まず、交叉と同様、乱数を用いて突然変異区間を定め、突然変異確率0.1として、0~1の一樣乱数を発生させ0.1以下であれば変異区間の遺伝子について0は1に、1は0に組み替える操作 (逆位) を行った。この突然変異の考慮は局所解に陥ることを防ぐもので、設定した範囲を広く探索しようとするもの

である。変異区間が2~4の場合の突然変異操作の一例を次に示す。

0		1 1 0		1 1 1 0
				↓
0		0 0 1		1 1 1 0

これらの一連の操作が終了すると、新たな個体集団が生成され、この新しい集団に対して同様に適応度の評価、選択、交叉、突然変異を2000世代まで繰り返してゆき、適応度の高い個体、すなわち基盤高と地下水パラメータを得ている。

3.2 次元自由地下水場への適用

適用例として、図3に示す2つの設定基盤 (case1, 2) の地下水場において、透水係数25.92m/日、有効空隙率0.3、東西の境界水位は一定で南北の境界は不透水壁とし、図4に示す涵

case1

case2

図3 設定基盤高

Fig. 3 The distribution of lower boundary of aquifer given

養量があったとして、式 (1) を数値解析し、1つの観測井戸について時間間隔 1 時間の48時間分の地下水位を得、これを観測地下水位とした。なお、初期個体集団の作成には初期乱数を変化させ、10種類の初期個体集団を作成、同定し、適応関数の最小のものを同定値とした。図5に設定基盤の違いによる観測地下水位を示す。この図において例えば凡例の2-1は基盤高はcase1で井戸番号2の地下水位を示すものであるが、基盤高の違いによる地下水位の差は比較的小さく、このわずかな違いによって、基盤高、透水係数、有効空隙率を同定することになる。図6、7に地下水位の観測井戸数7、既知基盤高5の場合と比較のために地下水位観測井戸数4、既知基盤高が3（求めるパラメータ総数は14）のときの同定基盤高を示す。また、同定により得られた地下水パラメータ値と適応関数値を表1に示す。case1、2ともに観測井戸数が多い場合の方が適応関数値は小さく

なっており、図3と図6、7を見比べると、地下水位の観測井戸数および既知基盤高の多い場合の方が設定基盤に近い分布となっている。これは観測井戸数に応じて地下水位は観測地下水位に近くなる箇所が多くなり、適応関数値が小さくなっているものと考えられる。透水係数についての誤差はcase1で観測井戸数7の場合0.69%、観測井戸数4では0.08%、case2で観測井戸数7の場合0.81%、観測井戸数4では5.25%であった。有効空隙率についてはどの場合も設定値0.3が同定されている。有効空隙率は式 (1) より涵養量が既知でなければ同定できないが、涵養量に見合うだけ地下水位は上昇し、この上昇分を有効空隙率は表すもので比較的精度よく同定されるものと考えられる。これらの適用例では地下水パラメータの誤差はいずれも小さく、適応関数値に応じて誤差も小さくなるものと考えられる。なお、case1の場合では観測井戸数4、既知基盤高数3の場合の方が地下水パラメータについての誤差が小さくなっているが、これは遺伝的アルゴリズムは多くの個体群（パラメータ群）から適合するパラメータを探索するため、観測井戸数が少なくても良い精度を示す場合があることを示している。しかしながら、一般にはcase2のように観測井戸数が多い場合の方が正しく基盤高および地下水パラメータは推定されることが考えられる。

基盤高と地下水パラメータの同定において、境界水位と少なくとも観測井戸は1つ以上必要であり、観測井戸はできるだけ多く用いる必要がある。

図4 涵養量 (mm/h)
Fig. 4 Recharge rate (mm/h)

図5 観測井戸番号2, 5, 6の観測地下水位
Fig. 5 Observation groundwater level of No.2, 5, 6

る。観測井戸点の観測地下水位と推定地下水位が一致していれば適応関数値は小さくなるが、観測井戸数が少ない場合、解析領域全体についての地下水位が一致しているとは限らないため、したがって、解の精度を上げるためには多くの観測井戸が必要となる。なお、基盤高と地下水パラメータのいずれも真値が分からないため、世代数としては適応関数値が変化しなくなる世代数を所定の世代として、繰り返し計算し、最終値を同定値とする方法をとっている。

4.1 次元海岸帯水層の適用例

図8に1次元の海岸帯水層モデルを示す。透水係数は100m/日、有効空隙率0.3、淡水密度1000kg/m³、塩水密度1025kg/m³、境界水位として、格子点番号1の海岸線では平均海水位0.0mで、振幅0.6m、周期12時間の潮汐を与え、格子点番号17の内陸部の境界水位は4mの一定値であり、図9に示す涵養量があったとして、格子間隔50m、時間間隔30分として式(3)、(4)を用いて非定常解(小路ほか, 1999)を算出し、各点48個の観測水位を用いて基盤高と地下水パラメータを同定した。なお、基盤高の既知点は1箇所で格子

観測井戸数 7

観測井戸数 7

観測井戸数 4

観測井戸数 4

図6 同定基盤高 (case1)

Fig. 6 The distribution of lower boundary of aquifer identified (case1)

図7 同定基盤高 (case2)

Fig. 7 The distribution of lower boundary of aquifer identified (case2)

表1 地下水パラメータの同定結果

Table 1 Results of identification of groundwater parameters

設定値	観測井戸数	基地基盤高数	透水係数 (m/日)	有効空隙率	適応関数値 (m)
casel	7	5	25.92	0.30	
casel	4	3	26.10	0.30	0.0002
case2	7	5	25.90	0.30	0.0008
case2	4	3	25.71	0.30	0.0003
case2	4	3	27.28	0.30	0.0011

図8 海岸帯水層モデル
Fig. 8 Model of coastal aquifer

図9 涵養量(海岸帯水層)
Fig. 9 Recharge rate (coastal aquifer)

点番号9の-40mである。本適応例でも初期個体集団は10種類を用意し、適応関数値の最小のものを同定値としている。基盤高の探索範囲は-20~-60m、透水係数の探索範囲は30~120m/日、有効空隙率の探索範囲は0.2~0.4と設定し同定を行った。なお、海岸帯水層モデルでは基準高さを平均潮位としているため、基盤高の位置は負の値となっている。

$$n \frac{\partial h_f}{\partial t} - n \frac{\partial h_s}{\partial t} = k \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (h_f - h_s) \frac{\partial h_f}{\partial x} \right\} + r \quad (3)$$

$$n \frac{\partial h_s}{\partial t} = k \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (h_s - g) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} h_f + \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} h_s \right) \right\} \quad (4)$$

ここに、

h_f : 淡水位 (m)

h_s : 塩水位 (m)
 g : 基盤高 (m)
 ρ_f : 淡水密度 (kg/m³)
 ρ_s : 塩水密度 (kg/m³)
 k : 透水係数 (m/日)
 n : 有効空隙率
 r : 涵養量 (m/日)

海岸線(格子点番号1)から内陸部へ直線的に上昇している基盤高と逆に海岸線から直線的に下降している基盤高について、図10、11に観測井戸数を7(格子点番号3、5、7、9、11、13、15)、4(3、7、11、15)、2(3、12)箇所の場合の同定基盤高を示す。また、表2に図10の基盤高について観測井戸数の違いによる同定された地下水パラメータ、適応関数値、基盤高の誤差についての比較を示す。これらの図表より、観測井戸数が多いほど、適応関数値は小さくなっており、透水係数、有効空隙率ともに設定値に近く、また、基盤高の誤差は小さくなり、基盤高は設定基盤高にほぼ一致している。図10を見ると観測井戸数が2の場合、基盤高が設定値より高く同定されている。この場合、地下水の流れる層が小さくなり、透水係数は設定値より大きく同定されたものと思われる。また、逆に観測井戸数4の場合は基盤高が設定基盤より低く推定されている。この場合は地下水の流れる層が大きくなることから透

図10 設定基盤高と同定基盤高 (case1)

Fig.10 The distribution of lower boundary of aquifer given and identified (case1)

図11 設定基盤高と同定基盤高 (case2)

Fig.11 The distribution of lower boundary of aquifer given and identified (case2)

表2 同定結果 (海岸帯水層)

Table 2 Results of identification of groundwater parameters (coastal aquifer)

	設定値	観測井戸数2	観測井戸数4	観測井戸数7
透水係数 (m/日)	100.00	107.46	99.84	98.75
空隙率	0.30	0.30	0.30	0.30
適応関数値 (m)	-	0.032	0.038	0.018
基盤高の誤差 (m)	-	5.603	1.606	0.100

水係数は小さく同定されたものと思われる。観測井戸数が少なく、観測井戸間の距離がある場合は観測井戸間で基盤高が正しく同定されない可能性が高くなり、地下水パラメータには誤差が入る可能性がでてくるものと思われる。しかしながら、

観測井戸数が多くなれば各観測井戸で推定地下水位が観測地下水位に一致ししてくるために適応関数値は小さく、基盤高および地下水パラメータともに正しく同定されるものと思われる。

5. まとめ

本研究は地下水流について準一様流が適用できるとして、観測誤差や準一様流の適用による誤差については小さいまたは取り除かれているものとして、遺伝的アルゴリズムを用い観測地下水位により基盤高、地下水パラメータを同時に同定する手法を提示し、同定可能であること示した。観測井戸数が多いほど基盤高、地下水パラメータは精度よく同定されることを示した。有効空隙率は涵養量による地下水位の上昇分を受け持つために比較的精度よく同定されると考えられる。地下水位は地下水が流れる層の高さと透水係数で規定されるために、基盤高の同定値が透水係数に、透水係数の同定値が基盤高に影響する。したがって、既存の井戸を用いるなど、多くの地下水位を測定することが必要であり、基盤高、透水係数の推定精度は高くなるものと思われる。

参考文献

大西有三・井尻祐二 (1986)：不均一地盤における浸透流の逆問題解析手法に関する基礎的研究、土木学会論文集、第376号／Ⅲ-6、PP.121-130。
奥野哲夫・鈴木 誠 (1993)：不圧地下水を対象とした拡張カルマンフィルターによると薄い係数の空間分布推定法、土木学会論文集、第469号／Ⅲ-23、PP.93-102。
北野宏明 (1994)：遺伝的アルゴリズム、産業図書、PP.3-60。
河野伊一郎・西垣 誠・竹下祐二 (1989)：逆解析手法を用いた被圧帯水層における揚水試験結果の解析方

法、土質工学会論文報告集、Vol.29、No.2、PP.159-168。
小路順一、初井和朗、藤野和徳、國武昌人 (1999)：非混合アプローチによる琉球石灰岩沿岸帯水層への海水侵入解析、農業土木学会論文集、第201号、PP.355-362。
神野健二 (1990)：地下水汚染の解析とモニタリングの方法、水工学シリーズ90-A-6、土木学会水理委員会。
竹下雄二・安井克豊・河野伊一郎 (1997)：遺伝的アルゴリズムを用いた多層帯水層地盤における揚水試験データの逆解析手法、地下水学会誌、第39巻第4号、PP.313-325。
竹下祐二 (2000)：地下水モデリングのための解析手法の基礎3.5原位置透水試験による浸透特性値の推定、地下水学会誌、第42巻第2号、PP.187-195。
藤間 聡 (1989)：地下水パラメータの推定に関する基礎的研究 (九州大学学位論文)。
平野文昭 (1991)：地下水数値計算法 (14) 3-1、カルマンフィルターによる実時間同定問題、地下水学会誌、第33巻第4号、PP.277-284。
藤野和徳・神野健二 (1994)：フーリエ級数と拡張カルマンフィルターによる地下水位と地下水パラメータの推定、地下水学会誌、第36巻第2号、PP.155-167。
藤野和徳 (1997)：遺伝的アルゴリズムによるごみ収集輸送計画、土木学会論文集 No.558／Ⅱ-38、PP.139-146。
本城勇介 (2000)：地下水モデリングのための解析手法の基礎3.4広域地下水解析モデルの逆解析、地下水学会誌、第42巻第2号、PP.175-186。
(受付：2003年2月17日、受理：2003年9月20日)