

1 1. 最適化原理を用いた地下水位等高線図の作成

Making of the Ground Water Surface Contour Map using the Optimal Method

岡山理科大学 能美 洋介

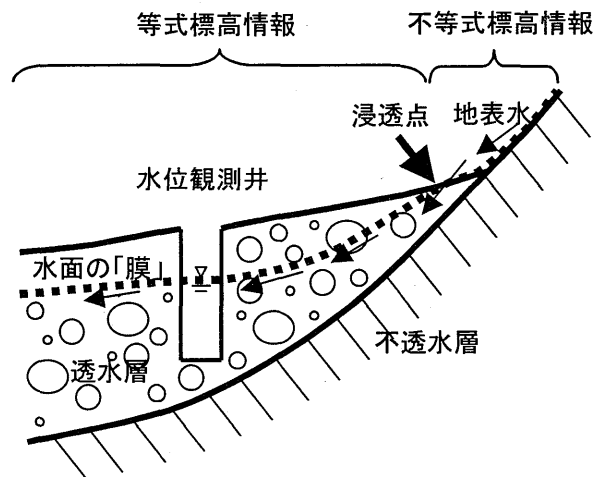
1. はじめに

地下水盆縁辺の地下水位等高線の形状は、不透水層との境界形状を反映したものになると予想される。現在、多くの等高線作図手法が提唱されているが、地下水位のような地点データだけを補間した場合、地下水保有層が無限に連続するとした解を算出するため、現実的でない結果になる場合がある。これは特に地下水盆縁辺において顕著であろう。したがって、地下水位等高線を作成する際、地下水盆全体における形状を問題とするような場合には、この境界形状を加味した作成方法を検討しなければならない。筆者は現在、地形図をもとにしたDEM (Digital Elevation Model) 作成アルゴリズムについて研究をすすめている。このアルゴリズムでは、地形図上に示された等高線間の標高情報を利用して最適化原理で地形モデルを作成する。この手法を地下水位等高線作成に適用できないかと考えた。そして、主に複合扇状地からなる堆積盆において地下水位を実測し、そのデータを用いて最適化原理を利用して地下水位等高線図を作成したところ、観測結果を満足し、等高線形状もおおむね良好と思われる結果を得た。ここに、その方法と結果の概要について報告する。

2. 原理

2.1. 考え方

扇状地は不透水性基盤の山地から流れ出た河川が、平野部においてゆるい円錐状に土砂を堆積させた地形である。その頂上付近では河川は地表を流下するが、途中から地下浸透し水無し川となっているところも多い。複合扇状地ではこのような扇状地が地下水盆縁辺にいくつも並列し、山麓緩斜面を形成する。この状況を、第1図のような地下水面形状モデルで考えてみる。すなわち、不透水性基盤からなる周辺山地の水は、地表もしくは地表のごく近傍に存在し斜面を流下する。この水が透水性の扇状地堆積物の部分にくると地下浸透を起こす。浸透を開始する場所は大まかに見ると扇頂付近と考えられ、それは地質図等で横方向に連続的に追跡することができる。つまり、水面をひとつの「膜」のようなものとする。この「膜」は、透水/不透水境界を境に不透水層側では地形面に密着させ、透水層側では実測した地下水位により標高が規制されるモデルを考える。



第1図 水面の「膜」の概念図

透水/不透水層を通る連続した水流の水面を「膜」と捉える。膜は不透水層部分にあるときは地表面に沿い、透水層中では地下水観測井の水面を通る面となる。

2.2. 最適化原理

任意の地点における標高 0m の点を原点 O とし、 O から水平東向きに x 軸、水平北向きに y 軸を設定する。原点 O を通り、 x 軸 y 軸に平行でそれぞれの大きさが X , Y の辺を持つ解析領域を設定する。

先に述べた「膜」を連続な 1 価の関数 f で表すことができるとする。また、扇状地内部は、多孔質媒体に近似され地下水の定常的流があるとする。ダルシーの法則によりこのような状況下では地下水位は一定傾斜を持つと考えられ、その形状は平面的であると考えられる。そこで、水面が作る「膜」について、ポアソン比 0 の仮想的物質を想定すれば、この「膜」の形状は井上 (1985) により次のような導関数の形で表現することができる。

$$J = \int \left\{ \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} dx dy$$

ここで、解析領域を x 方向に N_x 個、 y 方向に N_y 個の格子で分割し、 f は上記のような連続関数として求めるのではなく、各格子点の標高値 $F \{F: f_{11}, f_{12}, \dots, f_{N_x N_y}\}$ として算出する。一方、能美他 (1999) により推定される不透水層分布域の「膜」の標高は、不等式

$$h_k \leq f(x_a, y_a) \leq h_{k+1}$$

で制限をかけることができる。また、扇状地部分の「膜」の標高は、実測された地下水位を用い、

$$f(x_b, y_b) = h_w$$

により等式で制約をかけることができる。 F の各要素が作る単位格子内の離散近似推定した曲面を $s(x, y)$ とし、これを近傍の格子点を用いて 2 次式で近似する。そして、これを使って F の不等式制約条件からのずれを評価する式を次のように与える。

$$\phi(F) = \sum [\min\{s(I_p, J_p) - h_{k(p)}, 0\}]^2 + \sum [\max\{s(I_p, J_p) - h_{k(p)} + 1, 0\}]^2$$

こうすると、等高線間の不等式標高情報をすべて満たす曲面推定の問題は、以下のような不等式制約条件付き最適化問題の形に書き換えられる。

$$Q(F; \alpha) = J(F) + \alpha \phi(F) \quad \dots\dots\dots (a)$$

すなわち、パラメーター α のもとで (a) 式を最小にする解の組 F が求める「膜」の形状である。

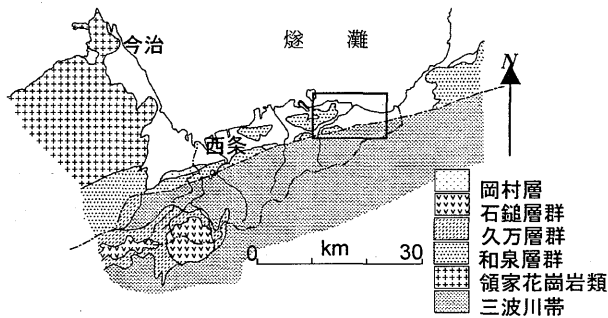
2.3. プログラム Horizon2000

上記に示した最適化問題を格子データの形で解くプログラムが塩野 (2000) により開発された Horizon2000 である。このプログラムでは、(a) 式で示される拡大目的関数を F の各項で微分した結果を 0 としてできる連立 1 次方程式を解くことにより格子データを得る。算出アルゴリズムにはコレスキー法が採用されており、本研究のような不等式制約条件がついた最適化問題では、始めに小さいペナルティ α_0 を設定し、そこから徐々にペナルティを大きくしながら逐次解を求め、算出曲面に滑らかさが残る α_T で計算を終了し、そのときの曲面を最適解として採用する。

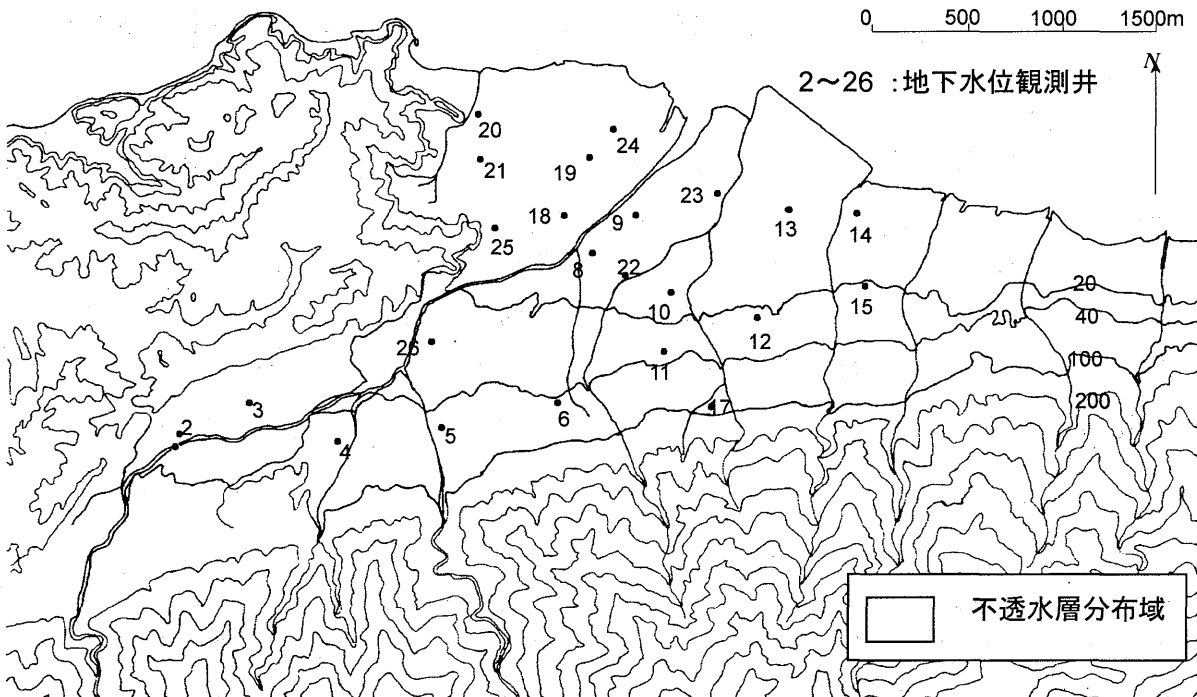
3. 方法

3.1. 研究地域

本研究では、四国北部の愛媛県土居町を事例研究地域とした（第2図）。この地域は中央構造線の北側に位置し、四国山地が海岸付近にまで迫る。山麓には関川、浦山川などの河川がつくる複合扇状地が発達し、その先端は地域東部では直接瀬戸内海に没する。本地域のほぼ中央付近でなされたボーリング調査では、基盤の和泉砂岩（不透水性基盤）まで扇状地性の礫混じり土砂もしくは砂礫層であった。そこで、地下水盆は巨視的には単一帯水層からなると想定した。



第2図 研究地域



3.2. 地下水位観測

地下水位の測定は、地域に散在する家庭用井戸・農業用取水施設・調査ボーリング孔など23箇所で行った（第2図参照）。測定結果は、第1表に示す。

第1表 地下水位測定結果

No.	水位標高(m)	No.	水位標高(m)	No.	水位標高(m)
2	78.6	11	27.0	20	1.5
3	60.8	12	16.7	21	2.1
4	54.2	13	2.0	22	5.3
5	34.7	14	2.4	23	0.5
6	41.0	15	3.6	24	1.1
8	4.8	17	84.2	25	4.5
9	2.5	18	4.8	26	23.2
10	5.9	19	2.8		

3.3. データの作成

解析範囲は土居町平野部全域を含む東西 6.3km, 南北 3.8km の範囲とした。まず、国土地理院発行の 2 万 5 千分の 1 地形図「東予土居」および「新居浜」を利用して等高線図を作成した。トレースしたのは、0m (海岸線), 20m, 40m, 100m, 以後 100m 間隔で 1200m までの等高線である。等高線図はスキャナーを用いて 1500×1200 ピクセルのラスター画像に変換した。そして、村下・野間 (1964), 水野他 (1993) の地質図をもとに透水/不透水層境界を求め、不透水層 (三波川結晶片岩類, 和泉層群堆積岩類) 分布域の等高線間から能美他 (1999) の方法により不等式標高情報を抽出した。透水層分布域については、地下水の実測データ (標高換算したもの) を等式標高情報として利用した。

4. 結果

上記により作成した不等式/等式標高情報をもとに、Horizon2000 で格子数 $N_x \times N_y$ が 151 × 121 の地下水面のグリッド標高データを作成した。なお、この格子数による格子間隔は約 42m に相当する。計算パラメーター α_0 を 1 とし、 α_T を 10000, 逐次計算回数を 500 回とした。その結果得られた等高線図を第 3 図に示す。

5. 評価

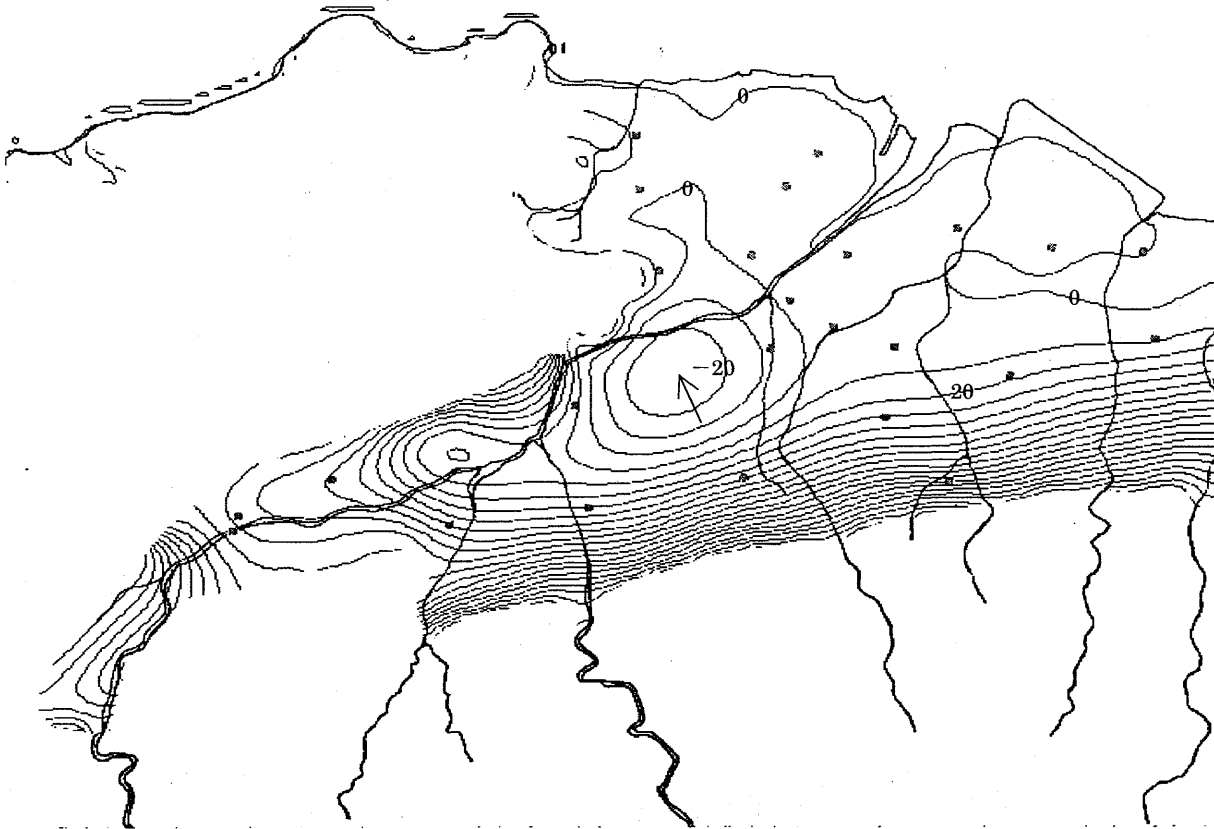
研究地域の複合扇状地は、おもに関川が作るものは地域の西から東に向けて発達し、浦山川やその他の小河川がつくるものは南から北に向けて発達している。本モデルにより作成された等高線図 (第 3 図) では、そのような地形に調和した形状が得られている。また、実測した水位をよく再現している。

等高線の形状は全般的に滑らかすぎる印象であるが、不透水領域の等高線間を 50m としたことや、計算パラメーターの選択において滑らかさを重視したことなどが原因として考えられる。

平野中央付近に水位が不自然に低い部分が目玉状に出現している。これは、この付近の水位データが欠如しているため、周辺のデータから補間した結果生じたものである。したがって、水位データの空白部分を新たなデータ数点で補うことで解決するものと思われる。

本モデルでは、河川浸透地点や浸出地点、湧水等の水文状況の入力も可能である。これら

のデータや透水層部分の地表面データを加えることにより、いっそう現実的なモデルを構築できると思われる。現時点ではまだ予察的ではあるが、本研究により用いた等高線作図手法は、本件旧地域のような帯水盆の縁辺が任意の形に限られるような地域の地下水解析に有効であると考えられる。



第3図 本研究モデルによる地下水位等高線図（等高線は10m間隔）

6. おわりに

土居町役場産業課阿部圭二氏には本研究遂行の全般にわたり多大なるご協力をいただいた。また、現地の地下水位測定などにおいて、愛媛県西条地方局伊予三島出張所池田武正氏にご協力いただいた。岡山理科大学玉素甫艾力莫明、中山学および新屋貴士の諸氏には、水位測定やデータの整理等多くを手伝っていただいた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- P. S. Huyakorn, G. F. Pinder (1983) 地下水解析の基礎と応用—基礎編—. 赤井浩一訳監修, 現代工学社.
- 山本荘毅 (1983) 新版地下水調査法. 古今書院.
- 能美洋介・塩野清治・升本眞二・ベンカテッシュ ラガワン (1999) 地形図をもとにした DEM の作成法—等高線間に分布する標高情報の活用—. 情報地質, vol. 10, no. 4,

pp235-246.

水野清秀・岡田篤正・寒川 旭・清水文健 (1993) 2.5 万分の 1 中央構造線活断層系 (四国地域) ストリップマップ. 地質調査所.

村下敏夫・野間泰二 (1964) 愛媛県金生川・加茂川・中山川および重信川流域水理地質図. 地質調査所.

井上 公 (1985) 一般化院バース理論に基づく離散データの平滑化. 情報地質, no. 10, pp105-134.

塩野清治・升本眞二・坂本正徳 (2000) 曲面推定プログラム HORIZON の改定—滑らかさ・ペナルティ・データ評価—. 情報地質, vol. 11, no. 2, pp124-125.



付図1 調査地の遠景 (土居町西之江より)