

比抵抗法による電気探査を用いた 塩水浸入調査

INVESTIGATION OF SALINE WATER INTRUSION IN AQUIFER BY USING RESISTIVITY METHOD

石井将幸¹・岡 太郎²・大年邦雄³

¹ 正会員 農博 京都大学助手 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

² フェロー 農博 京都大学教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³ 正会員 工博 高知大学教授 農学部 (〒 783-0093 高知県南国市物部乙 200)

This paper describes the method and result of investigation of saline water intrusion in aquifer using electrical sounding. Vertical soundings were carried out in coastal area of Haruno Town, Kochi Pref. and vertical resistivity distributions were obtained. A deep layer of low resistivity was found near the coast, and it was concluded to be the layer of saline water. Horizontal distributions of its depth were estimated by conventional curve matching method and newly proposed method with numerical analysis and Standard Powell's method. Its result and validity is shown and discussed.

Key Words : Saline water intrusion, Electrical sounding, Standard Powell's method, Finite element method

1. はじめに

地下水は井戸を掘ることで容易に利用できるため、生活用水、農業用水や工業用水などに利用されてきた。しかし近年、過剰揚水に伴う各種障害がみられるようになった。その中で沿岸部における地下水の塩水化は、地盤沈下と並ぶ代表的な障害である。

沿岸部の帯水層では、地下水の下部に比重の大きい塩水がくさび状に浸入しているが、その境界面は地下水位が低下すると上昇することが知られている。大量の地下水利用を行ってきた沿岸部では、淡塩境界面が上昇して揚水中の塩分濃度が高くなり、地下水の継続的な利用が困難になっている。揚水制限などの対策が講じられているが、一度生じた塩水化からの回復には長い時間が必要だと言われている。

塩水化への対策を講じるためには、塩水の浸入状況を正確に把握することが重要である。淡塩境界面の深度分布を平面的に調べ、揚水が可能な地区と問題が生じる恐れのある地区を特定しなければならない。しかし塩水化は地下で生じる現象であり、調査を簡便に行うことは難しい。

本研究では簡単な装置で短時間に測定が可能な、比抵抗法による電気探査を用いた調査法について提案する。はじめに、塩水化が生じた地域を対象として、海岸近くから内陸部までの複数箇所での探査を行う。その結

果を広く用いられている曲線法で整理して、塩水層の検出と平面的分布の推定が可能であることを明らかにする。しかしこの曲線法による推定には客観的な指標がなく、推定結果に個人差が生じるという問題点がある。これに代わる手法として、数値解析法と最適化手法を組み合わせた方法を示し、その妥当性を検討する。

2. 比抵抗法による電気探査

(1) Wenner 法による鉛直探査

電気探査手法の一つである比抵抗法では、地面に電極を打ち込んで電流を流し、電極間の電位差を測定して大地の比抵抗が求められる¹⁾。比抵抗の値は地盤を構成している鉱物以外にも、間隙比や含水率、また間隙水中の電解質濃度に影響されるため、比抵抗の値からそれらの種類や比率を推測することが可能である。また塩水の比抵抗は岩石や地下水より非常に小さいことから、比抵抗法は塩水の浸入した層の調査に適していると考えられる。

本研究では Fig.1 に示すような、等間隔に配置した4つの電極を用いる Wenner 法を採用した。電流電極と呼ばれる両端の C_1, C_2 間に電流 I を流し、電位電極 P_1, P_2 間に生じる電位差 V を測定すれば、(1) 式から大地の比抵抗値 ρ_a が求められる。これは電流が流れた範囲の不均一性を取り込んだ値であり、見掛け比抵抗と呼

ばれている。

$$\rho_a = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (1)$$

電流の流れる範囲は C_1, C_2 の間隔に左右され、間隔が広いほど地中の深い部分まで電流が到達する。そのため、電極間隔が狭い場合には浅い地層の比抵抗が、間隔を広げた測定では深い層の影響を強く受けた見掛け比抵抗が得られる。地下の構造が均一で比抵抗が深さ方向に変化しない場合、見掛け比抵抗は電極間隔によらずほぼ一定となり、Fig.2 の E のようになる。また、表層より比抵抗の小さい層が深いところにある場合には D、中間層の比抵抗が大きく、深部層で小さくなる場合には A のようになる。

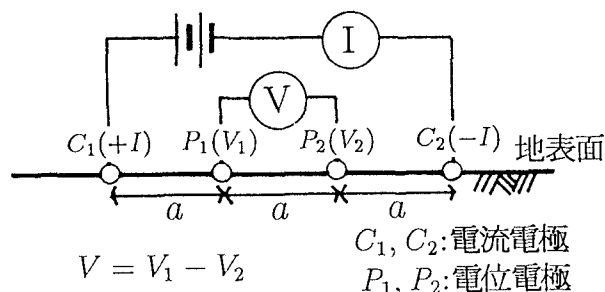


Fig. 1 電気探査概念図

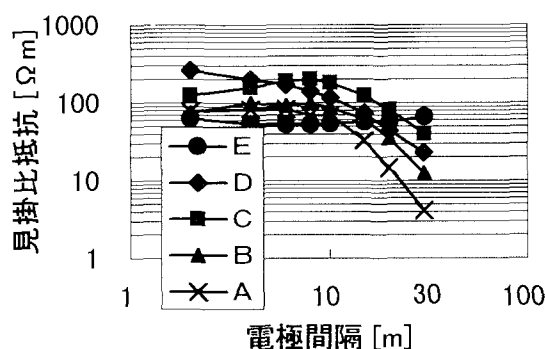


Fig. 2 比抵抗法による測定結果

これらの性質を利用し、電極間隔を変化させた測定を行って層構造を調査する手法を鉛直探査と呼ぶ。比抵抗の3次元的な分布を推測するためには、鉛直探査を数多くの場所で行い、それらの結果を比較検討することが必要となる。

(2) 曲線法による比抵抗値推定

鉛直探査で得た見掛け比抵抗から比抵抗分布を推定する方法に、曲線法と呼ばれるものがある。両対数方眼紙の横軸に電極間距離 a 、縦軸に見掛け比抵抗 ρ_a を取って測定結果をプロットすると、先ほど Fig.2 に示したような曲線が得られる。これを標準曲線と呼ばれる曲線群に重ね、最もよく一致する曲線を見出すことによって、上層と下層の比抵抗、および層境界の深さが求ま

る。また補助曲線を併用することによって、3層以上から成る地層についても推定を行うことができる²⁾。

3. 対象地域と測定結果

(1) 対象地域の概要

今回の調査は、Fig.3 に示す高知県春野町を対象として行った。浦戸湾と仁淀川河口の間に位置する海岸沿いの地域であり、主に稲作とハウス園芸が行われている。稲作の水源は仁淀川からの農業用水であるが、ハウス園芸には大量の地下水が使われているため、地下水位が低下して海水が浸入した。特に西側の地区では、塩水化が深刻な問題となっている。

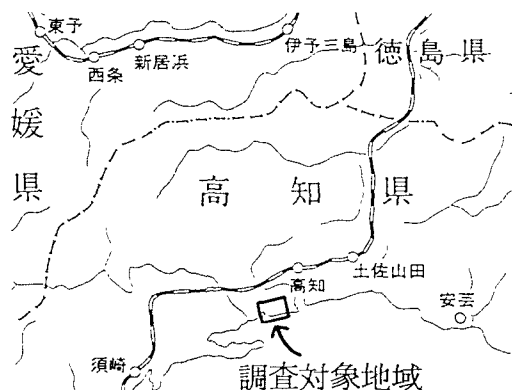


Fig. 3 調査対象地域の位置

(2) 測定箇所と結果

Fig.4 に、1998年3月に電気探査を行った地点が示されている。それぞれの場所において電極間隔 a を2mから30mまで変化させて測定を行い、見掛け比抵抗の値を求めた。

東側の地区で海岸から内陸に向かって定めた、AからE点における測定結果がFig.2に示されている。最も内陸に位置するEを除いて、電極間隔が広がると見掛け比抵抗の値が小さくなり、地中深い部分に比抵抗の小さい層があることがわかる。一方、Eでは見掛け比抵抗の値があまり変わらないことから、そのような層は存在しないと考えられる。さらに、 $a = 30$ m のときの見掛け比抵抗は、海岸に近づくほど小さな値となった。

Fig.2 の A, B, C 点では、電極間隔が広がるにつれて見掛け比抵抗の値が一度大きくなり、その後急激に小さくなっている。これは地層が3つの層から成っており、中間層で比抵抗が最大、下部層で最小となることを示している。そこで地層が3層から成るものと仮定し、それぞれの層の比抵抗と層境界の位置を曲線法で求めた。

A から D 点について求めた結果を Fig.5 に示す。図の横軸は海岸から測定点までの直線距離であり、層境界の深さは標高で表している。第1層と2層の境界面

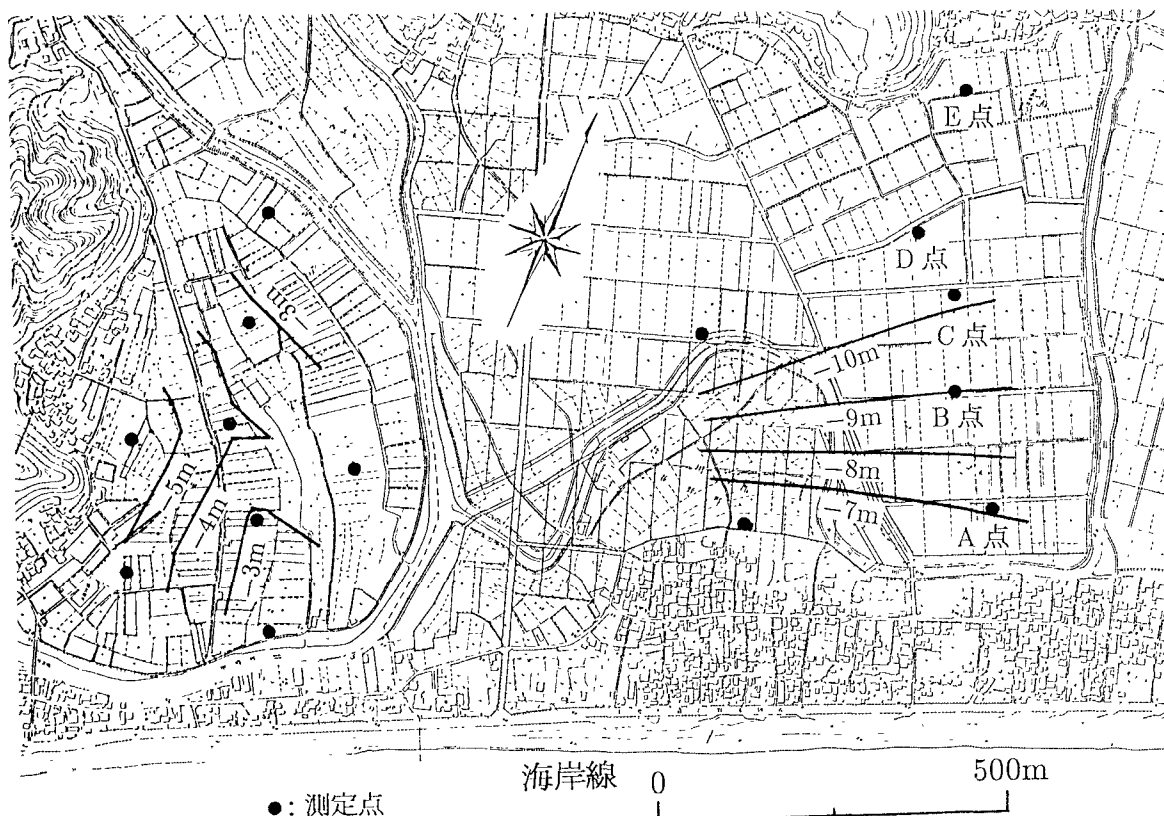


Fig. 4 1998年3月の測定箇所と塩水層の深さ

は場所によって上下しているが、第2層と3層の境界は内陸ほど深くなっている。また第3層の比抵抗 ρ_3 は、他の2層の値と比較して明らかに小さい。これらから、第3層が塩水の浸入した層であると考えられ、E点には塩水が到達していない、もしくは測定可能範囲よりさらに深いものと考えられる。また、 ρ_3 の値は内陸ほど大きくなっており、内陸部で塩分の濃度が低いことを示している。

塩水が達していないと考えられるE点を除く測定点について、第2層と3層の境界の深さを求め、その分布をFig.4に示した。対象地域の東部では、海岸から内陸へ向かって塩水が浸入していることがわかる。一方西部では東部よりも境界面が浅くなっており、塩水化がさらに進行していることが示されている。また、川に近いほど境界面が浅くなっている。これは、満潮時にはこの川を海水が遡上しているので、川底からも塩水が浸入しているためであると考えられる。

同様の調査を1998年8月に行い、Fig.6のような結果を得た。全体的に3月よりも塩水層が深くなっているが、8月はハウス園芸の農閑期にあたり、揚水量が少ない。そのため地下水位が上昇し、塩水を押し下げていると考えられる。E点では、やはり塩水の浸入はみられなかった。

東側地区の中央部に、周囲と比較して塩水層の深い領域がある。ここは水田が広がっている地域のほぼ中

央であり、稲作に用いられた水が地中に浸透し、地下水位を上昇させているためであると考えられる。また、前回と同様に西側地区の塩水層が浅くなっているが、川の影響は下流部に限られている。

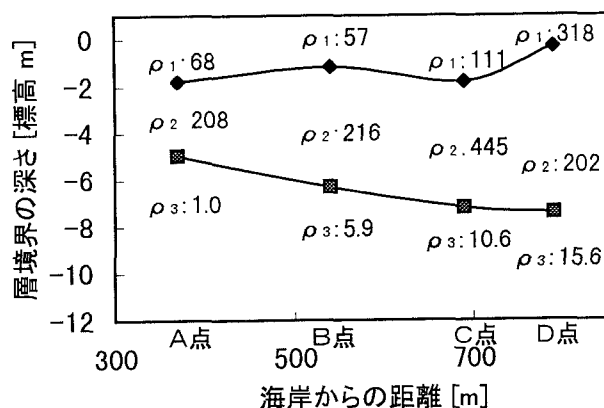


Fig. 5 層境界の深さと比抵抗値

4. Powell 法による塩水分布推定

(1) 数値解析に基づく定数決定

曲線法による比抵抗値と境界深の推定では、見掛け比抵抗のグラフと標準曲線を重ねあわせる際に若干のずれが生じるため、同じ測定結果から異なる推定値が求まる場合が少なくない。探査結果の解析・評価法は客観的であり、異なる調査者によっても同じ結果が得ら

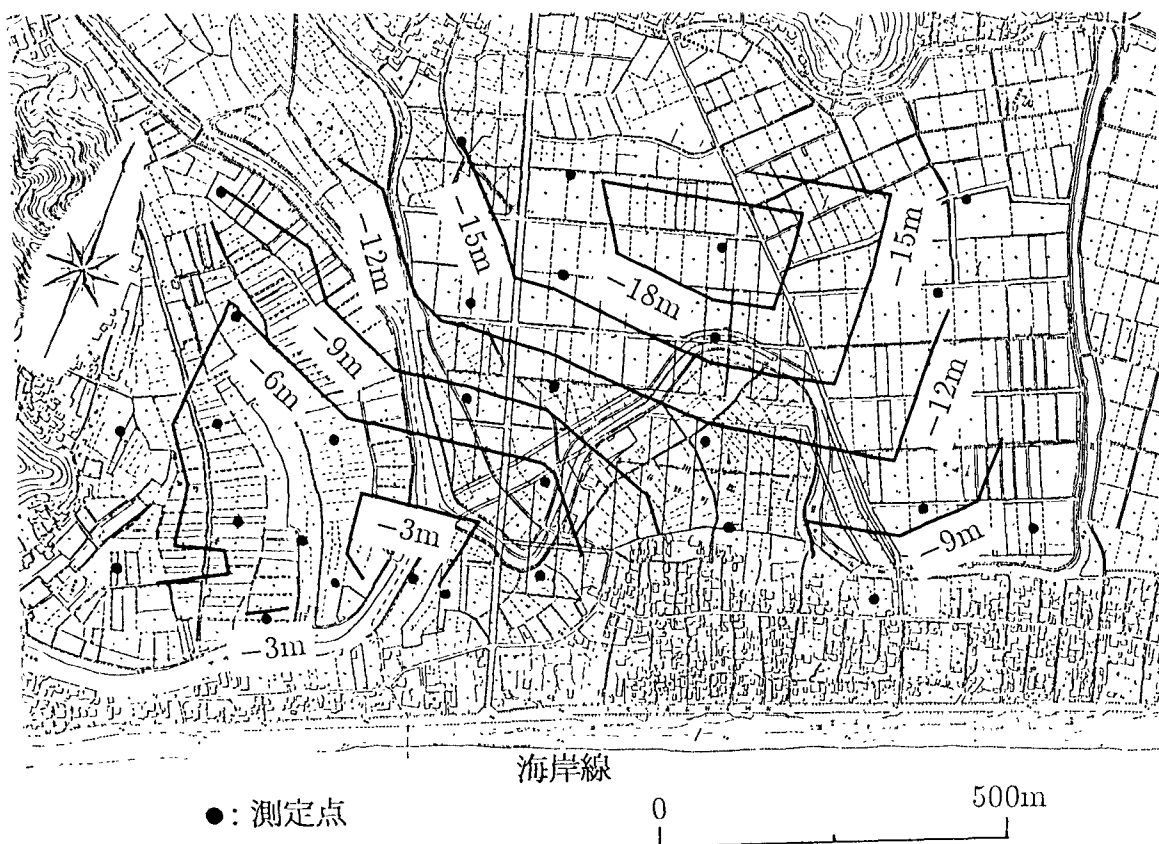


Fig. 6 1998年8月の測定箇所と塩水層の深さ

れるものが望ましい。ここでは曲線法に代わる推定法として、数値解析と最適化を用いた手法について検討し、その結果を示す。

Fig.7は、 C_1C_2 間を流れる電流で発生する電位を示している。各層の比抵抗と層境界の深さは図のとおりであるが、各層の境界で等電位線が折れ曲がっており、電位が比抵抗の分布に影響されることがわかる。その結果、 P_1P_2 間の電位差も比抵抗分布によって異なった値となる。

この電位分布は、(2)式で表される。

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla V \right) = 0 \quad (2)$$

V は電位、 ρ は比抵抗であり、有限要素法で解を得ることができる。Fig.9に示した要素分割を用い、地面には法線方向電流0の境界条件を与えた。さらに、電流電

極に相当する節点に対しては電流に応じた電圧条件として、 C_1 に $V=0$ 、 C_2 には $V=-356$ を与えている。この例では、電位電極間に54Vの電位差が生じている。

もし、解析で与えた条件が電気探査のものと同一ならば、測定時と一致する電位分布が解析で計算され、測定結果と等しい P_1P_2 の電位差が求められる。逆に、測定値と異なる電位差が得られたならば、層の厚さ・数や比抵抗値が誤っていると言える。ここでは、基準化Powell法(以下SP法)³⁾を用い、測定値と解析値が等しくなるように、比抵抗と層境界の深さを決定する。

鉛直探査では、一個所で電極間隔を変えて複数回の測定が行われる。各層の位置とそれぞれの比抵抗は、電位差の測定値と解析値が全ての測定で等しくなるように定めなければならない。ここでは、測定結果より得られる P_1 と P_2 における電位差 V^O と、解析結果による電位差 V^A との誤差 E_r を次式のように定め、 E_r を最小化する。

$$E_r = \sum_{i=1}^N \sqrt{\left\{ \left(\frac{V}{I} \right)_i^O - \left(\frac{V}{I} \right)_i^A \right\}^2} \quad (3)$$

なお、 N は対象点での測定数である。

(2) 2次元解析結果の補正

実際の電気探査での電場は3次元であるため、解析を2次元で行うと電極間の電位差が異なった値となる。ここでは、次のようにして補正を行う。

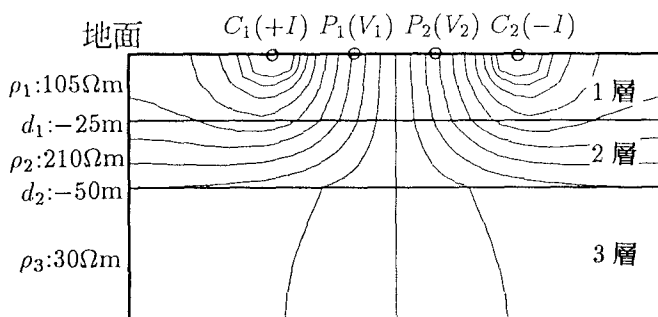


Fig. 7 電位分布の解析例

点電流源 C (電流 I) を原点とする極座標を考え、 r 方向の電界を E_r 、電流密度 (単位長さあたりの電流) を i_r 、電位を V とする。このとき、半径 r の円の円周は $2\pi r$ であるため、比抵抗を ρ とすると、

$$E_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = \rho i_r = \rho \frac{I}{2\pi r} \quad (4)$$

となる。無限遠における電位を 0 と定めると、電流源から距離 r の点における電位 $V(r)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} V(r) &= -\int_{\infty}^r E_r dr \\ &= -\left(\frac{\rho I}{2\pi}\right) \int_{\infty}^r \left(\frac{1}{r}\right) dr = -\frac{\rho I}{2\pi} \log r \end{aligned} \quad (5)$$

鉛直断面中では Fig.8 の (a) に示すように、大地は地面を境界とする半平面で表される。 x 軸を地面に取り、 z 軸を鉛直方向に定めると、電流が地面を通過しないことから

$$\rho_s i_z = E_z = 0 \quad (6)$$

という条件が地面で成立しなければならない。

ここで Fig.8 の (b) のような、比抵抗が ρ_s である全平面内に、電流源 $C(I)$ と $C'(I)$ がある場合を考える。2つの電極は、(a) での地面に相当する x 軸について、対称の位置にあるものとする。このとき点 P の位置では、 C からの電流による z 方向の電界 E_{zC} と、 C' による $E_{zC'}$ が

$$E_{zC} = \frac{\rho I}{2\pi r} \cos \theta \quad E_{zC'} = -\frac{\rho I}{2\pi r'} \cos \theta' \quad (7)$$

となり、両者を加えることによって

$$E_z = \frac{\rho I}{2\pi r} \cos \theta - \frac{\rho I}{2\pi r'} \cos \theta' \quad (8)$$

が得られる。

P が x 軸上にある場合には、 $r = r'$ かつ $\cos \theta = \cos \theta'$ であるため、 E_z の値が 0 となる。つまり、(6) 式の状態が満たされ、 $z = 0$ における条件が (a) と (b) で一致する。また、 $z \leq 0$ で $r = \infty$ のときの $V = 0$ も同じであるため、 $z \leq 0$ の領域を囲む境界全てで同じ条件となる。さらに、 $V = -\infty$ となる電流源 C の座標も一致することから、 $z \leq 0$ なる領域の全体で (a) と (b) の電位が等しくなる。よって、(a) の電位も (8) 式で計算することができる。

Wenner 法のように電流源が地面にある場合には、 C と C' を重ねて $2I$ の電流源と考えればよい。このとき、

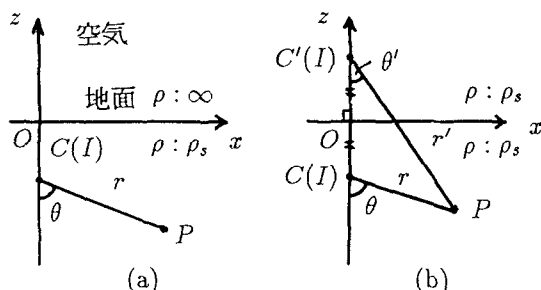


Fig. 8 点電流源周囲の電位分布

電流源からの距離 r における電位 $V(r)$ は、(5) 式から次のようになる。

$$V(r) = -\frac{\rho I}{\pi} \log r \quad (9)$$

さらに $C_1 P_1 = a$, $C_2 P_1 = 2a$, また $C_1 P_2 = 2a$, $C_2 P_2 = a$ より、

$$\begin{aligned} V_1 &= -\frac{\rho I}{\pi} (\log a - \log 2a) = \frac{\rho I}{\pi} \log 2 \\ V_2 &= -\frac{\rho I}{\pi} (\log 2a - \log a) = -\frac{\rho I}{\pi} \log 2 \end{aligned} \quad (10)$$

となる。以上から、

$$V = V_1 - V_2 = \frac{2\rho I}{\pi} \log 2 \quad (11)$$

が得られ、見掛け比抵抗 ρ_a と V/I の関係は次式のように導かれる。

$$\rho_a = \frac{\pi}{2 \log 2} \frac{V}{I} \quad (12)$$

したがって、電気探査で観測された V/I を 2次元解析の結果と比較する際には、観測値を $4 \log 2 \cdot a$ 倍してから (3) 式に代入しなければならない。

(3) 比抵抗分布の推定結果

これらの手法を用い、8月の探査結果から各測定点における比抵抗を求めた。解析の対象領域は横 200m、深さ 100m の鉛直断面とし、Fig.9 のような要素分割とした。測定には $a = 2\text{m}$ という狭い電極間隔によるものが含まれているため、狭い範囲を流れる電流を解析できるように、電極群の中央付近では 50cm 間隔の分割を行っている。また、 $a = 30\text{m}$ のときには電流電極の間隔が 90m に達するため、対象領域に同程度の深さと、その 2 倍の幅を持たせた。総節点数は 853、要素数は 912 となっている。

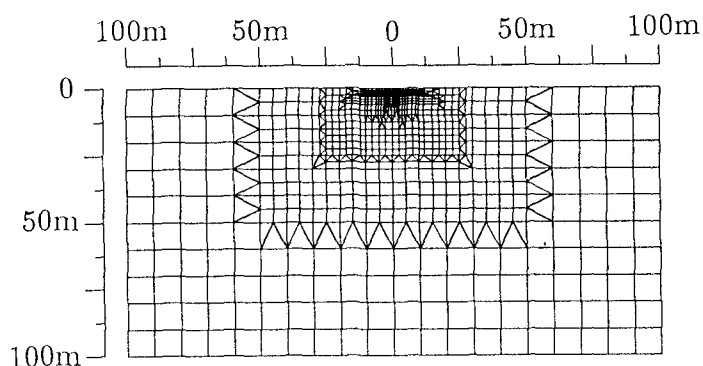


Fig. 9 鉛直 2次元解析の要素分割

比抵抗分布については、先ほどと同様に 3 層の水平成層を仮定した。それぞれの要素がどの層にあるかを調べ、その結果に従って要素の比抵抗を定めた。なお層境界が要素内を通過した場合には、各層が要素内に占める面積比に応じて、比抵抗を比例配分した。未定数は比抵抗 3 つと境界深度 2 つの合計 5 つとなるが、

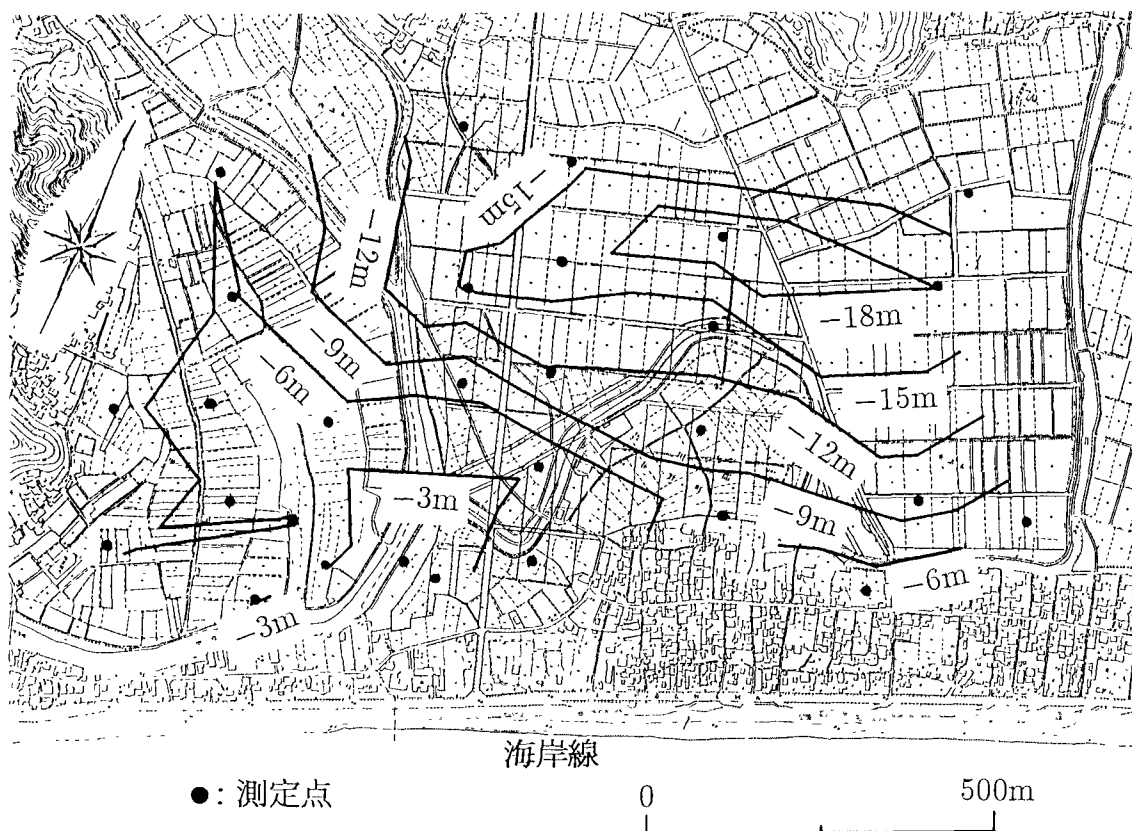


Fig. 10 SP 法で求めた塩水層の深さ

各測定点に対して8とおりの電極間隔で測定を行っているため、未知数よりも条件の方が多い。したがって、値の決定は十分可能と考えられる。SP法では、決定する定数に対して初期値を与える必要があるため、曲線法で求めた値を初期値とした。

各測定点について求めた2-3境界の深度をFig.10に示した。Fig.6と比較すると、全体的に浅い境界深度が求められている。また西地区の北端、川に近い測定点で特に浅い値となり、川底からの塩水侵入を示す結果となった。

5. 結論

比抵抗法による電気探査によって、地下水の塩水化状況が把握できることを明らかにした。また数値解析と最適化による、塩水化の状況を判断する手法を提案した。得られた成果は以下のとおりである。

1. 高知県春野町を対象として、比抵抗法による電気探査を行った。海岸近くの地中深くに、塩水の浸入した層と思われる比抵抗の小さい層が認められた。
2. 地盤が比抵抗の異なる3層から成ると仮定し、曲線法を用いて層境界の深さと比抵抗の値を求めた。揚水量が多く、塩水化が進行していると言われていた西地区では、東地区よりも塩水が浅いところにあることが示された。

3. 農閑期で揚水量の少ない8月に測定を行ったところ、3月よりも塩水層が押し下げられているという結果が得られた。稲作主体で揚水があまり行われていない東側でも同様であり、水田から浸透した水が塩水を押し下げていると考えられる。
4. 有限要素法とSP法を用いて、電気探査の結果から比抵抗分布を推定した。この手法では曲線法と比較して、より客観的な評価が可能となった。

参考文献

- 1) 野口康二：比抵抗探査システムの動向，物理探査，Vol.47，No.6，pp.462-472，1994.
- 2) 佐々宏一・芦田 譲・菅野 強：建設・防災技術者のための物理探査，森北出版株式会社，pp.128-158，1993.
- 3) 角屋 睦・永井明博：流出モデルの最適化手法，京都大学防災研究所年報，22(B-2)，pp.209-224，1979.

(1998. 9.30受付)