電気探査による地下水流動モニター法の研究

竹内睦雄*・長江亮二**

Geophysical Monitoring System of Diffusing Electrolyte Injected into Groundwater

Mutsuo TAKEUCHI* and Ryouji NAGAE**

Abstract

Electrical prospecting method is traditionally used to obtain an information of geological profile, as one of geophysical prospecting methods for hydrogeological survey. However, recently, we need to develop a new technique which provides a moving profile of resistivity due to the groundwater flow.

A new technique, in which movement of an electrolyte tracer is obtained by means of resistivity measurements and the feature of the tracer movement beneath a survey line is visually displayed, is demonstrated in this paper. Sodium chloride is used as a tracer. The effectiveness of this method is ensured with the result of borehole loggings.

1. 緒言

土木地質調査法の1つとして、電気探査比抵抗法は地下水の探査、構造物の基盤調査および地すべり地帯の地下構造調査など、主に静的な地下構造の解明に広く利用されている。近年、とくに地下水を対象とした調査においては、水質汚濁機構の解明など、いわゆる地下水の流動問題まで取り扱える動的な電気探査比抵抗法の開発が強く望まれている。

長期的な比抵抗の経時変化を利用した方法については、下記のような検討が行われている。吉住他¹⁾は、山崩れの予知方法として、地盤変動を比抵抗の変化としてとらえる電気的測定法を提案している。また、佐々木他²⁾は地熱資源の生産によって引き起こされた地熱貯溜部およびその周辺の変化を把握するため、見掛け比抵抗の変化から地下の比抵抗分布の変化を定量的に計算する解析法について検討している。

一方、短期的な方法として井上³⁾は、電解質のトレー

サーにより帯水層の分布形態および地下水の流速を求める問題に対する電気探査比抵抗法の適用性について、モデル計算により検討を行っている。

時間とともに変化する探査対象物の短期間の経時変化をとらえる手法に電気探査比抵抗法を利用する場合、土木地質調査法として用いられている比抵抗法の高精度化・高能率化を図る必要がある。本手法の高精度化については、すでに筆者他⁴⁾⁵⁾が検討を行ってきた。

本論文では、主に電気探査比抵抗法の高能率化を図ることにより比抵抗モニター法の開発を試みた⁶⁾。さらに、本手法をトレーサー法の1つと位置付けて、その野外実験を行った。

地下水流動の現地測定には、従来からトレーサー法が広く利用されており、漏水および水みちの解析、さらに、地質構造あるいは帯水層の性状を反映した流れを実証的に示す手段として着目され、大きな成果を挙げたことが小前他⁷⁾によって報告されている。とくに近年では、環境の放射性同位体および放射化追跡子の利用などの技術が実用化されているが、測定技術が専門化して使用者が限定されたり、ボーリング孔の配置によっては追跡子が検出されない危険性もある。

浅層地下水の水みち探査法として、竹内⁸⁾は1 m 深の地温測定による方法を開発し、地下水流脈の存在と、そ

* 農林水産省農業工学研究所 (National Research Institute of Agricultural Engineering, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries.)

** 農林水産省東北農政局 (Tohoku Regional Agricultural Administration Office, M. A. F. F.)

の流動経路および広がりか推定できることを地すべり地などで実証し成果を挙げているが、地下水流速の測定は困難であった。

一方、地すべり地などにおいて、傾斜の頭部に位置するボーリング孔に食塩水を投入し、その流下に伴って発生する流動電位の変化を測定することにより流速を算定する方法が、伊藤他⁹⁾により提案されている。この方法では塩水塊の広がりか推定することは困難であり、また遅い流れの地下水に対しては、自然電位の変動などにより適用範囲が限られると思われる。

ここでは、実験地として川崎他¹⁰⁾によって地下水人工涵養試験が行われている福井県三里浜砂丘地を選定し、トレーサー（食塩）の流動経路、流速およびその広がりを解明するために比抵抗モニター法の測定を行った。すでにトレーサー法として確立されている、ボーリング孔を利用した直接的測定法である食塩トレーサー法と比較検討した結果について報告する。

2. 比抵抗モニター法の測定システム

ある時間での見掛け比抵抗擬似断面図を作成するには、迅速な計測が必要となるため、図-1のようなシステムを構築した。電極配置はダイポール・ダイポール法を

用い、送信器(MODEL MT-310)および受信器(MODEL DF-53B)は横浜電子製を使用した。電極を迅速に切り換えるため、各電極からの電線をすべて配電盤に集中させ、そこから応用地質(株)製のジオエレクトリックスキャナー(MODEL 2205A)に配線する。スキャナーは50本までの電極をGP-IBインタフェース制御により自由に切り換えることができる。さらに、計算機のコマンドによって、電極をどのような配置にでも切り換えることができる。GP-IBインタフェース制御部およびデータ収集部は、現地計測を考慮して内部バッテリーで動作可能なエプソン(株)製のハンドヘルドコンピュータHC-88(測定計算結果を打ち出すプリンタ、データを格納する3.5インチフロッピーディスクを含む)を用い、RS-232Cインタフェース信号をコンピュータ・イノベーション(株)製の変換器(GP-2000)によりGP-IBインタフェース規格の信号に変換し、スキャナーにより電極をハンドヘルドコンピュータで切り換える。

塩水塊の移動状況を比抵抗法で追うために、ここでは塩水投入前の状態の見掛け比抵抗値をバックグラウンドとして、塩水投入後の見掛け比抵抗値を変動率で表現する方法を用いた。変動率は次式より求めた。

図-1 測定システム

図-2 実験地区の地質断面図

$$m = (\rho_m - \rho_b) / \rho_b \times 100$$

ここに、 m は変動率(%), ρ_b はバックグラウンドの見掛け比抵抗値(Ωm), ρ_m は塩水投入後の見掛け比抵抗値(Ωm)である。

得られた変動率(m)は便宜上、図-1のように直角二等辺三角形の頂点に表示し、変動率擬似断面図として表現した。

本手法の特徴は、高密度のデータに基づいて時間別の変動率擬似断面図を作成し、塩水塊の移動を可視化する点にある。ここでは、とくに流速についても検討するため、データ間隔をなるべく細かくとる必要がある。しかしながら、1測点の測定には約17秒の時間が必要であるため、1断面を測定するのに要する時間と予想される流速とから考えて、測定間隔を1mに設定した。したがって、大量のデータを効率よく処理する必要があるため、日本電気(株)製PC-9801シリーズのパーソナルコンピュータを使用した。

3. 野外実験

実験地域は福井県九頭竜川河口に広がる三里浜砂丘の南端に位置しており、砂丘の背後には第三紀層からなる山地と洪積層からなる台地が広がっている。実験地は最

も海よりの砂丘列にあって、標高7~15mであり、難透水層として洪積層の細砂、沖積層の泥質砂礫があり、その標高は、おおむね海水準下7~11mである。その上位に帯水層として砂丘砂層が堆積しており(図-2)、層厚は約16mである。

地下水位は地表面下4.5m程度で、動水勾配は自然状態で1/200~1/250であり、河川水の涵養時には1/30程度

図-3 測線配置図

度になる。

長さ20m, 幅2m, 深さ1mの涵養水路(I)を涵養面積 $3 \times 2 \text{ m}^2$ に仕切って, そこから約30%の塩水を涵養強度 167 l/min で2回に分けて合計 7 m^3 注入した。その後, 涵養水路(I)に $0.3 \text{ m}^3/\text{min}$ の涵養強度で2時間河川水(電気伝導度 $E_c: 140 \mu\text{S/cm}$, 水温 $t: 25^\circ\text{C}$)を涵養して塩水塊を中押しした。塩水を注入してから70時間後に涵養強度約 $0.6 \text{ m}^3/\text{min}$ で定常的に河川水を涵養した。

河川水の涵養前後における塩水塊の移動の様子を本手法で測定した。測定は図-3のように, 涵養水路(I)とほぼ直交する50mの測線を設定し, 表-1の条件により行った。なお, 測定に使用した周波数は3 Hzの矩形波で, 電流値は20mAである。

また, ボーリング孔を利用した食塩トレーサー法と本手法との比較実験も行った。すなわち, 図-2および図-3に示した涵養水路(I)下流側の観測孔2121W(スクリーンの位置: 12.5m)を利用して, 地下水の流速を測定するために, 電気伝導度の経時観測を行った。

表-1 測定条件

測線長	電極間隔 a	隔離係数 n	測定間隔
50 (m)	2 (m)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	1 (m)
	4	6, 7, 8, 9	1

4. 実験結果および考察

図-4は, 測線における塩水注入前の見掛け比抵抗断面面図である。測点26付近に位置する観測孔2121Wおよび測点37付近に位置する観測孔2220NWでのボーリング結果と, 電気探査ダイポール・ダイポール法による測定結果から, $150 \Omega\text{m}$ 以上は砂丘砂層, $150 \Omega\text{m}$ 以下は泥質砂礫層および海水を含んだ細砂と考えられる。標高-8m付近に $150 \Omega\text{m}$ の見掛け比抵抗値境界が現れており, ほぼ地質境界と一致している。測点16を中心にして, いわゆる

図-5 粗粒砂の間隙水の電気伝導度と含水させた粗粒砂の比抵抗値の関係

図-4 等比抵抗曲線断面図

る「ハの字」型の異常が現れているが、これは測点15から17にかけて存在する涵養水路（I）による影響である。

比抵抗モニター法の野外実験に先立って、室内実験により基礎的な検討を行った（図-5）。粗粒砂に含水させる水の電気伝導度を変化させ、含水させた粗粒砂の比抵抗値を測定した結果、図-5のように両対数で直線関係を示しており、これはアーチーの実験式を実験的に裏付けるデータになっている。このことから、測定期間中に透水層となる粗粒砂の比抵抗値に変化がないとして変動率をとれば、地下の比抵抗値の変化は地下水の電気伝導度値の変化と考えることができる。この考え方に基づいて、図-4の見掛け比抵抗値をバックグラウンドとして図-6の時間別変動率擬似断面図を作成した。なお、塩水塊のフロントが観測孔（2121W）に到達した時点を、ボーリング孔を利用した直接的測定法である食塩トレーサー法で確認した結果、比抵抗モニター法の測定誤差は約10%であった。その誤差を引いて作成した図が図-6であり、塩水塊が時間の経過とともに移動する様子が表現されている。断面図（a）および（b）の河川水の未涵養時では、塩水塊の移動がほとんど見られないが、（c）および（d）の河川水の定常涵養時では、河川水の涵養に伴い、それが移動して行く様子が視覚的に判断できる。

図-7は、塩水塊の移動距離と、その経過時間の関係を示している。ここで塩水塊の位置は、図-6の変動率擬似断面図から塩水塊の中心の値を読み取った。この結果からも、河川水の未涵養時での塩水塊の移動はほとんど見られないが、河川水の涵養に伴い、それが移動していることは明らかである。塩水塊の垂直方向の移動は図-6

および図-7からも明らかなようにほとんどなく、塩水塊は難透水性基盤である泥質砂礫層の上面に沿って移動している。

塩水塊の中心と涵養水路（I）からの距離および塩水涵養後の経過時間から流速を推定することができる。ここでは、河川水の未涵養時では塩水塊の移動がほとんど見られないため、河川水涵養後の経過時間を用いて流速を算出した。なお、後述のボーリング孔を利用した食塩トレーサー法による流速の推定にも、河川水涵養後の経過時間を用いた。表-2には、比抵抗モニター法によって間接的に得られた流速と、直接的測定である食塩トレーサー法によって得られた流速との比較を示す。表-2のうち比抵抗モニター法による流速は、図-7の流下方向移動距離の勾配から求め、食塩トレーサー法による流速は図-8より求めた。図-8の測定深度は12.5mである。両者の間には、良い一致が見られ、比抵抗モニター法の有用性が確認できた。なお、塩水塊が観測孔に到達した時点での電気伝導度は $1,200\mu\text{S}/\text{cm}$ であり、投入前の塩水の電気伝導度は $40,000\mu\text{S}/\text{cm}$ であったため、塩水塊は観測孔に到達した時点で約1/30に希釈された。

1断面（測点数：422点）を測定するのに要した時間は約2時間であり、得られた流速から推定すると、塩水塊は2時間で約22cm移動することになるが、実用的には無視できる範囲と考えられる。

表-2 各方法における流速の比較

測定方法	流速 (cm/s)
比抵抗モニター法	3.17×10^{-3}
食塩トレーサー法	3.45×10^{-3}

図-7 塩水塊の移動距離と経過時間の関係（図中のa, b, cおよびdは断面図表示の4段階を表す）

図-8 観測孔（2121w）における塩水涵養後の電気伝導度変化（図中のa, b, cおよびdは断面図表示の4段階を表す）

5. 結 言

比抵抗モニター法の測定システムを構築し、基礎的実験結果に基づいて、野外実験により現地への適用性を検討した。その結果、本手法はトレーサーの流動経路、流速およびその広がり の推定に有効であり、本手法を間接的トレーサー法の1つと位置付けることができた。一方、ボーリング孔を利用した直接的測定法である食塩トレーサー法は、塩水塊がボーリング孔に到達する前後の電気伝導度をとくに細かく測定する必要があるが、到達時刻を予想するのが困難な場合が多いため、流速の精度および作業効率が悪い。間接的測定法である比抵抗モニター法を併用すると、ある程度塩水塊の位置を推定することができるため、食塩トレーサー法による作業効率が著しく向上する。したがって、汚染域での地下水の流動機構を解明する場合などは、より信頼性を高める必要があるため、両者を組み合わせて用いる必要がある。

ここでは、比抵抗モニター法をトレーサー法の1つと位置付けて述べたが、例えば汚染物質が電解質のものであれば、汚染物質そのものの流動方向や流速および分布状況などを、非破壊で解明することも可能である。

今後、本手法を発展させるためには、大きく分けて下記の2つの方向が考えられる。1つは地下水流動の概略的な解明方法として、本手法を単独で使用する方向、他の1つはさらに詳細に地下水流動を解明するために、他の手法と併用する方向である。すなわち、調査目的に応じて比抵抗モニター法をさらに改善することによって、他の調査に対しても適用できる可能性がある。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、前北陸農政局 川崎 敏 地質官（現在国際協力事業団出向）、橋田知幸 技官（現在近畿農政局）および北国鑿泉（株）には多大の御協力をい

ただいた。また、農業工学研究所造構部構造研究室 中山 康 室長ならびに地域資源工学部地下水資源研究室 小前 隆美 室長には有益な御助言を賜った。本論文をまとめるに当たり、韓国釜山水産大学応用地質学科 金 喜俊 副教授には、有益な助言をしていただいた。関係者各位に謹んで感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 吉住永三郎・菅野 強・鈴木韶次郎・佐藤忠五郎（1970）：大野ダムにおける長期地盤変動の電気的測定，第3回岩の力学国内シンポジウム講演集，pp. 179-184.
- 2) 佐々木 裕・N. E. GOLDSTEIN・M. WILT（1985）：比抵抗の経年変化モニター，物理探査学会秋季講演会講演予稿集，pp. 73-74.
- 3) 井上 誠（1979）：電気探査比抵抗断面表示による地下水探査法，応用地質，Vol. 20. No. 4, pp. 12-19.
- 4) 竹内睦雄・金 喜俊・野口康二・遠藤源助（1983）：電気探査比抵抗法による地下浅部調査——電極配置の比較——，物理探査，Vol. 36. No. 3, pp. 111-117.
- 5) 竹内睦雄（1985）：電気探査ダイポール・ダイポール法による地下浅部探査，土と基礎，Vol. 33. No. 7, pp. 29-32.
- 6) 竹内睦雄・長江亮二（1987）：動的電気探査法の検討，物理探査学会第76回学術講演会講演論文集，pp. 235-236.
- 7) 小前隆美・竹内睦雄（1987）：地下水入門・新知識（その4）——地下水の探査と計測——，農業土木学会誌，Vol. 55, No. 6, pp. 559-565.
- 8) 竹内篤雄（1983）：地すべり・地温測定による地下水調査法，吉井書店，産業図書
- 9) 伊藤芳朗・斎藤輝夫・市川 浩・南雲政博・川口英雄・竹内篤雄（1984）：地下水流速の新しい測定方法の試み，日本地下水学会誌，Vol. 26. No. 3, pp. 77-96.
- 10) 川崎 敏・橋田知幸（1987）：地下水人工かん養による帯水層への熱エネルギー貯留実験とその応用，昭和61年度農業土木試験場農業土木課題別研究会資料

（1989年6月28日受付，1989年11月28日受理）