

## 電気探査連続測定システムによる地盤環境モニタリング

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 独立行政法人農業工学研究所 公開日: 2024-02-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 中里, 裕臣, 黒田, 清一郎, 奥山, 武彦, 朴, 美京 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24514/0002000049">https://doi.org/10.24514/0002000049</a>

# 電気探査連続測定システムによる地盤環境モニタリング

中里裕臣・黒田清一郎・奥山武彦・朴美京<sup>\*</sup>・金喜俊<sup>\*\*</sup>・轟木良則<sup>\*\*\*</sup>

## 目次

I 緒言	173
II 試験研究方法	173
1 試験地の概要	173
2 試験方法	174
III 探査結果	176
1 バックグラウンドデータの解析結果	176
2 比抵抗変化率解析結果	176

IV 考察	179
1 涵養水塊の3次元性の影響評価	179
2 電気探査連続測定による地盤環境モニタリング手法の評価	180
V 結言	180
参考文献	181
Summary	182

## I 緒言

地盤環境に係わる主な問題としては、地盤災害および地盤汚染があげられる。特に後者については、市街地の工場跡地、廃棄物処理施設周辺などにおける重金属もしくは有機塩素化合物による汚染や、生活排水および農用地への過剰施肥などを原因とする硝酸性窒素汚染を近年の問題として取り上げることができる。汚染物質の移動には地下水による移流が大きな役割を果たしており、地盤環境汚染の拡大機構や将来予測を行うためには、地下水の移流を支配する不均一な地下地質構造と汚染物質や地下水の移動を広域的かつ経済的に探査する手法の確立が求められている。地盤の比抵抗は、水飽和度、間隙率および間隙水比抵抗により変化することが知られている (Archie, 1942)。地下水流動は不飽和帯では飽和度変化により、飽和帯では地下水流動に伴う地盤間隙水の比抵抗変化により地盤比抵抗を変化させることが期待される。

本研究では地盤環境における地下水流動モニタリング手法として電気探査の連続測定による比抵抗モニタリング法を取り上げ、北陸農政局が新潟県長岡市で実施した地下水強化手法の検討を目的とした地下水人工涵養試験をケーススタディとして、涵養水をトレーサとした同手法の適用性を検討し、その移動状況を明らかにした。

なお、本報告は農業工学研究所交付金研究「地盤の三次元性を考慮した電気探査解析手法の開発, H14~16」、農業工学研究所と韓国釜慶大学地質環境研究所との平成14年度共同研究および北陸農政局からの平成13年度受託研究の成果をとりまとめたものである。北陸農政局

\*造構部土地質研究室

\*\*造構部土地質研究室 (JSPS フェロー)

\*\*\*「韓国釜慶大学」

\*\*\*\*「北陸農政局 (現沖縄総合事務局)」

平成14年11月25日受理

キーワード：地盤環境・モニタリング・電気探査・比抵抗・比抵抗変化率

(現東北農政局)の森一司地質官および中央開発株式会社との関係各位には現地調査において多大なご協力を得た。株式会社ダイヤコンサルタントの杉本芳博博士には比抵抗変化率逆解析についてご助言いただいた。これらの方々には謝意を表します。

## II 試験研究方法

### 1 試験地の概要

#### a 地形地質概要

試験地は魚沼丘陵北東端である新潟県長岡市西部の高寺町地内に位置する (Fig. 1)。試験地周辺には信濃川もしくは支流の渋海川が形成した深沢、上高岡、関原および高寺面の4段の河成段丘が認められ (新潟平野団体研究グループ, 1967)、試験地はこれらの段丘のうちつ

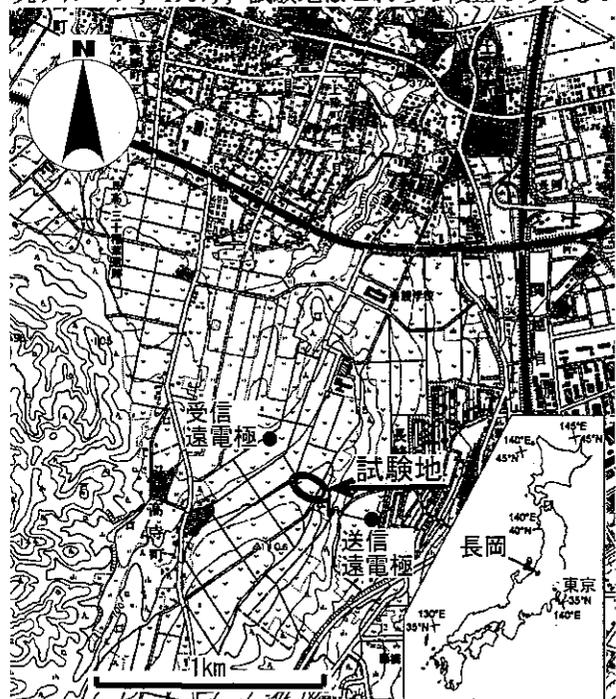


Fig.1 試験地位置図 (1:25,000 地形図長岡使用)

Location of the survey area in Nagaoka city, northwest of Tokyo

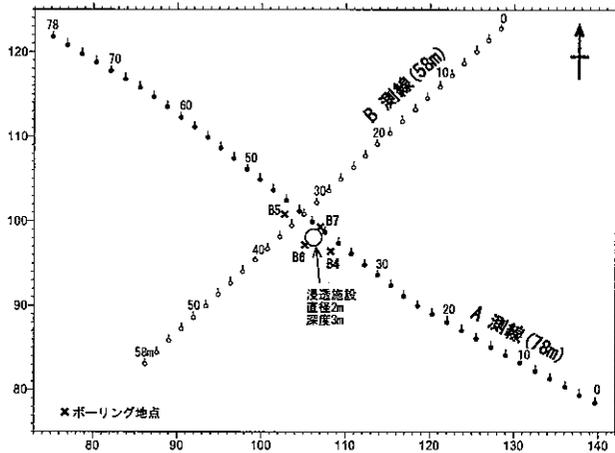


Fig.2 測線配置図

A map showing survey lines and boring sites

とも高位の高寺面に位置する。高寺面には基盤である中部更新統魚沼層とともに活褶曲による変形が認められ、北東-南西方向の向斜軸が尾根となっており（小林ら，1991），試験地は向斜軸から北西翼にかけての北西向き斜面に設定された。

試験地の地下地質は、ボーリング調査により下位からシルト層、シルト混じり砂礫層、礫混じりローム層 (Fig.4 ではシルト混じり砂礫層に一括)、ローム層および耕土層からなる (Figs. 2,3,4)。最下部のシルト層は魚沼層と考えられ、試験地では不透水基盤に相当する。これより上位の地層は段丘構成層であり、シルト混じり砂礫層は層厚約 8.7m で、基底面は概ね西向きに 7~17° で傾斜している。B5, B6 孔では下部に層厚 0.3~0.8m のシルト層をレンズ状に挟在する。礫混じりローム層は層厚 0.65~0.9m で、礫の基質がロームとなっている。最上位のローム層は、耕土層と合わせて約 2m の層厚である。

**b 水文地質概要**

B5 孔の 1999 年 9 月から 2001 年 11 月までの水位記録によると、調査地の地下水位は 12 月~4 月の積雪・融雪期に高く標高 97m まで達するが、4 月以降は概ね標高 92.5m 以深にある（北陸農政局，2002）。2001 年 10 月 11 日に実施された今回の涵養試験前には 10 月 1 日以降降雨はなく、地下水位は標高 90.8m 付近で安定していた。シルト混じり砂礫層基底は標高 90.3m であることから、シルト混じり砂礫層の大部分は涵養試験開始時に不飽和の状態にあったと推定される。Figs. 3, 4 には涵養試験開始直後の 2001 年 10 月 11 日 10:00 の孔内水位を示したが、B4 および B7 の孔内水位は基盤中にあり、シルト混じり砂礫層内の地下水位を示していない。この原因としては涵養試験前からの採水と観測井仕上げの影響が考えられる。なお、シルト混じり砂礫層の透水係数は、各種の透水試験および粒度試験から  $k=2.7 \times 10^{-5} \sim 9.4 \times 10^{-6} \text{m/s}$  の範囲とされた（北陸農政局，2002）。

**c 涵養施設概要**

涵養施設は直径 2.0m で深度 3m まで円柱状に掘削された浸透マスであり、掘削壁面はライナープレートで保

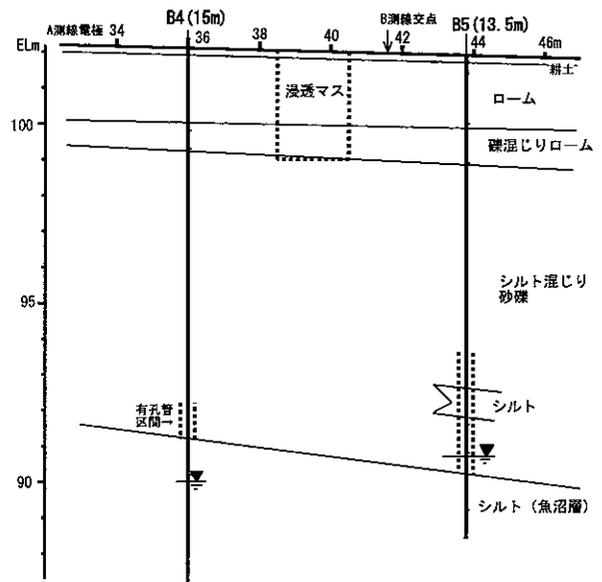


Fig.3 地質断面図 (A 測線沿い)

Geological section along A-Line

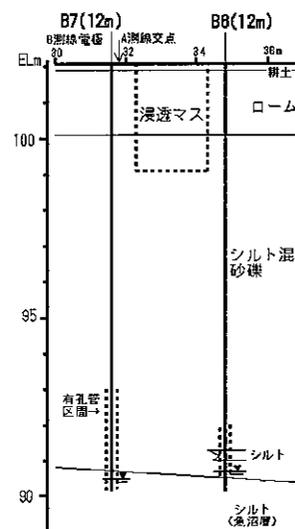


Fig.4 地質断面図 (B 測線沿い)

Geological section along B-Line

護されている。底面深度は礫混じりローム層基底に相当し、底面にはフィルターとして豆砂利が層厚 20cm で敷かれた。

**2 試験方法**

**a 比抵抗モニタリング探査システム**

Kuroda et al. (2002)は孔間レーダを用いて、本試験地において 2000 年に行われた涵養実験の際の涵養水塊の浸潤前線の下方移動速度を  $8 \times 10^{-4} \text{m/s}$  としている。この速度によると浸透マス底面から地下水面までの涵養水塊の到達時間は約 3 時間と求められる。比抵抗法 2 次元探査の繰り返しにより時間変化の大きな現象の比抵抗モニタリングを行うためには、受信器の多チャンネル化とそれによる探査能率の向上性に優れる 2 極法電極配置を用いる必要がある（中里ら，2002）。中里ら(2002)では

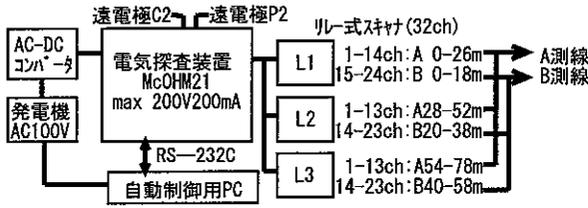


Fig.5 探査システム図

Arrangement of survey equipments

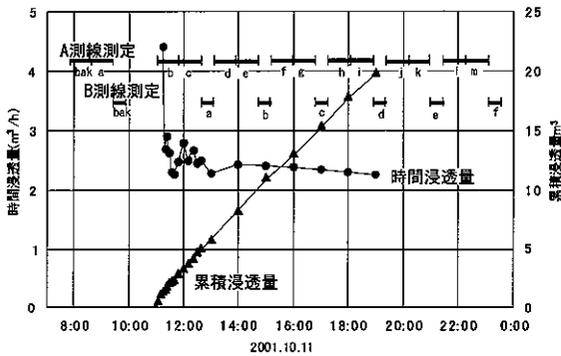


Fig.6 涵養試験概要と探査スケジュール

Plan of ground water recharge test

電極系を用いたことにより、1断面当たり10,000を超えるデータを1時間以内に取得する必要があったため、大規模地すべりブロック内地下深部の地下水流動部を把握することを目的として、探査範囲に対して地表-地中512chの比抵抗法自動測定装置(鈴木ら, 1998)を採用した。本研究では探査範囲が地表下10数mまでと限られることから、探査測線は地表の直交2測線(A測線:電極数40点,測線長78mおよびB測線:電極数30点,測線長58m)とし、各測線を3系統に分割し3chの探査装置によって2極法データを効率よく取得することとした。このシステムにより、A測線では1断面406データを約50分、B測線では1断面225データを約25分で取得することができた。また、探査装置(応用地質製McOHM21)は長時間の連続探査に対応するため、外部PCにより装置のon/offおよびデータのダウンロードを自動的に行えるように改造し、涵養試験中およびその後の連続自動観測を可能にした。探査システムのブロック図をFig.5に示す。2極法探査のための遠電極はA測線両端からそれぞれ300m離れた地点に設置した(Fig.1)。

2001年10月11日に行われた涵養試験では、11:00から19:00までの8時間に累計20m<sup>3</sup>の水が涵養された。各ボーリング孔内水の水温が12.5~14℃、電気伝導度は20~30mS/m(比抵抗50~33Ωm)であるのに対し、涵養水温は平均19.5℃、電気伝導度は12.6mS/m(比抵抗79.4Ωm)であった。比抵抗モニタリングはA測線2回+B測線1回を1セットとして、涵養前にバックグラウンドとして1セット、涵養試験開始後に6セットの探査を行った。この結果、A測線では14断面、B測線では7断面のデータが得られ、このうち涵養開始か

ら3時間以内ではそれぞれ3断面および1断面のデータを得ることができた(Fig.6)。なお、比抵抗モニタリング期間中には降雨はなかった。

b 比抵抗変化率解析

比抵抗分布の時間変化を検討するために比抵抗変化率断面図を作製する場合には、個々の探査断面をそれぞれ逆解析し、分割された小領域毎に初期値に対する変化率を求めるのが一般的である。しかし、個々の逆解析結果では同一測線であっても真の比抵抗変化に加えてノイズ成分の違いや解析の収束性が微妙に異なるため、これらの差をとると増幅されたノイズ成分を抽出してしまう可能性が高い。杉本(1995)は、比抵抗変化の非線形性を考慮した比抵抗変化率逆解析手法を提案し、制約付非線形差トモグラフィ解析と呼んだ。その概要は、適当なりファレンス断面(一般に初期値探査データの逆解析結果を用いる)から計算した理論データに測定された差データを加えて逆解析を行い、その結果得られる比抵抗分布とリファレンス断面の比抵抗分布の差から比抵抗変化率を求めるものである。杉本(1995)は、本手法において比抵抗変化の方向を制約することにより、さらに精度の高い解析が可能になることを示した。佐々木(2002)はこの手法を正規化データによる比抵抗変化の解析と呼び、比抵抗モニタリングにおける同法の有効性を示した。

不飽和帯への涵養は、水飽和度の増大による低比抵抗化を生じさせるため、杉本(1995)の手法に従いバックグラウンドに対して比抵抗は減少するものとして比抵抗変化率逆解析を行った。バックグラウンドデータの比抵抗断面を求める逆解析と比抵抗変化率の時系列断面を求める逆解析にはE-Tomo Ver.4.0(株式会社ダイヤコンサルタント製)により、初期値拘束制約付き非線形最小二乗法を用いた。反復計算毎の最適な拘束係数の選定には、データからモデルを推定する際のモデルの妥当性の客観的な指標となる情報量規準AIC(赤池, 1976)が最小になるモデルを採用した。

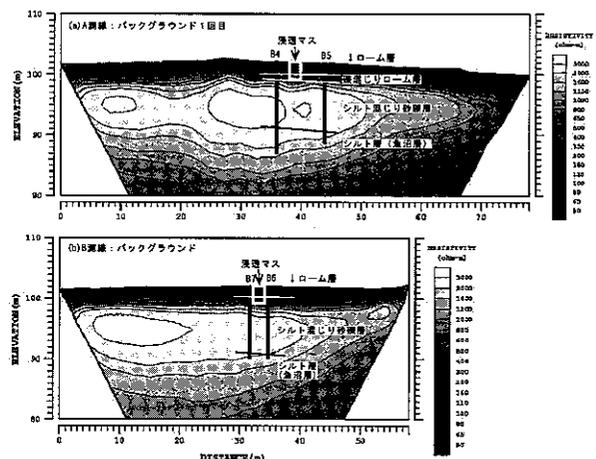


Fig.7 比抵抗断面図 (A,B測線)

Interpreted resistivity sections along Lines A (upper) and B (lower)

Table 1 逆解析における RMS 残差変化 (A,B 測線)

bak はバックグラウンド探査, a~m はバックグラウンドに対する各探査の変化率逆解析。

反復回数の 0 は初期モデルに対する RMS 残差。

RMS misfits during inversion iterations														
A	bak	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
0	49.76	0.42	0.42	0.57	0.62	0.82	0.92	0.88	1.09	1.12	1.19	1.10	1.05	1.02
1	14.21	0.40	0.33	0.46	0.41	0.58	0.55	0.39	0.58	0.51	0.50	0.48	0.43	0.49
2	4.80	0.40	0.33	0.46	0.41	0.58	0.55	0.39	0.58	0.51	0.50	0.48	0.43	0.49
3	1.40	0.40	0.33	0.46	0.41	0.58	0.55	0.39	0.58	0.51	0.50	0.48	0.43	0.49
4	0.92	0.40	0.33	0.46	0.41	0.58	0.55	0.39	0.58	0.51	0.50	0.48	0.43	0.49
5	0.63	0.40	0.33	0.46	0.41	0.58	0.55	0.39	0.58	0.51	0.50	0.48	0.43	0.49
6	0.48	0.40	0.33	0.46	0.41	0.58	0.55	0.39	0.58	0.51	0.50	0.48	0.43	0.49

B	bak	a	b	c	d	e	f
0	32.13	0.31	0.62	0.87	1.12	1.1	0.95
1	14.3	0.24	0.28	0.41	0.35	0.36	0.36
2	7.67	0.24	0.28	0.41	0.35	0.35	0.36
3	4.77	0.24	0.28	0.41	0.35	0.35	0.36
4	3.12	0.24	0.28	0.41	0.35	0.35	0.36
5	1.65	0.24	0.28	0.41	0.35	0.35	0.36
6	1.03	0.24	0.28	0.41	0.35	0.35	0.36

### III 探査結果

#### 1 バックグラウンドデータの解析結果

バックグラウンド測定による A, B 測線の比抵抗断面図を Fig.7 に示す。測定見かけ比抵抗値  $\rho_{qt}$  と逆解析された比抵抗分布モデルから計算される見かけ比抵抗値  $\rho_{act}$  との RMS 残差は解析結果の妥当性を示す指標の一つであり、次式で求められる。

$$RMS\ error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\ln \rho_{qt} - \ln \rho_{act})^2}{N}} \times 100(\%) \quad (1)$$

各解析の RMS 残差は、6 回の反復計算により A 測線では 0.48%, B 測線では 1.03% となっており (Table 1), 解析結果の妥当性は高いものと判断される。各断面とも地質構造に対応した 3 層構造を示し、表層の 500  $\Omega$  m 以下の部分はローム層, 下位の 500 ~ 3000  $\Omega$  m の高比抵抗層はシルト混じり砂礫層, 最下位の 1200 ~ 2000  $\Omega$  m 以下の低比抵抗層は魚沼層シルト層に対応する。シルト混じり砂礫層と魚沼層シルト層との境界は不明瞭である。また、両測線とも第 2 層の高比抵抗部がレンズ状に解析されているが、これは測線外側の固定比抵抗値 (各測線の平均見かけ比抵抗値) の影響を受けたものと考えられる。

#### 2 比抵抗変化率解析結果

ある時間の比抵抗変化率  $d_t$  は分割した地下の小領域ごとに、涵養試験前のバックグラウンドの解析比抵抗値  $R_0$  を基準として、時間ごとの解析比抵抗値  $R_t$  によって以下のように定義される。

$$d_t(\%) = (R_t - R_0) / R_0 \times 100 \quad (2)$$

Figs.8,11 に比抵抗変化率断面図を示す。断面図は各測線とも浸透マスの投影位置を中心に水平方向は  $\pm 20$  m, 深度方向には標高 80 m までの範囲を図示し、変化率スケールは 0 ~ -10% まで 0.5% 区切りに統一した。すべての比抵抗変化率解析について RMS 残差をみると、反復 2

回目で収束し、その値は 1% 未満となった (Table 1)。このため、1% オーダーの比抵抗変化率分布の違いは有意なものと判断される。以下、各測線について述べる。

##### a A 測線 (Fig. 8)

(a) は 2 回のバックグラウンド測定についての比抵抗変化率分布であり、すべての点で 0 ~ -1% の範囲にあり、探査解析システムの精度が 1% 以内にあることが確認できる。

比抵抗減少部の変化を概観すると、まず浸透マス地点では、比抵抗変化率 -10% 以上に及ぶ時間経過に伴う比抵抗減少部の強調が認められ、それ以外の部分における最大変化率は -3.5 ~ -4.0% である。比抵抗減少部の深度方向への拡大は (b) から (f) までに認められ、これ以降は -2.5% の等値線に代表される比抵抗減少部の測線終点方向への拡大が認められる。

深度方向への比抵抗変化について、涵養試験前の浸透マス直下の地下水面を B5 および B7 の地下水位から標高 91 m と仮定し、探査ごとのこの部分における比抵抗変化率を Fig. 8 から読みとると Fig. 9 のようになる。この図から浸透マス下方の地下水面付近では、涵養開始から 5 時間後まで比抵抗が減少し、それ以降はほぼ一定になることが読みとれる。涵養開始から 5 時間後を涵養水主部の地下水面への到達時間とすると、浸透マス下底 (標高 99 m) から地下水面までの距離 8.0 m について  $4.4 \times 10^{-4}$  m/s の涵養水の見かけの浸透速度 (後述) を得ることができる。

測線終点方向への比抵抗変化については、探査時間に対して -2.5% の等値線のもっとも終点側の浸透マス中心からの距離をプロットすると Fig. 10 のようになる。(g), (h) の値を除くと、涵養開始から 4 時間後付近に変曲点があり、4 時間後以降では等値線の移動速度が大きくなる。そして涵養停止の 8 時間後以降では移動速度がそれ以前より小さくなる変化が読みとれる。

##### b B 測線 (Fig. 11)

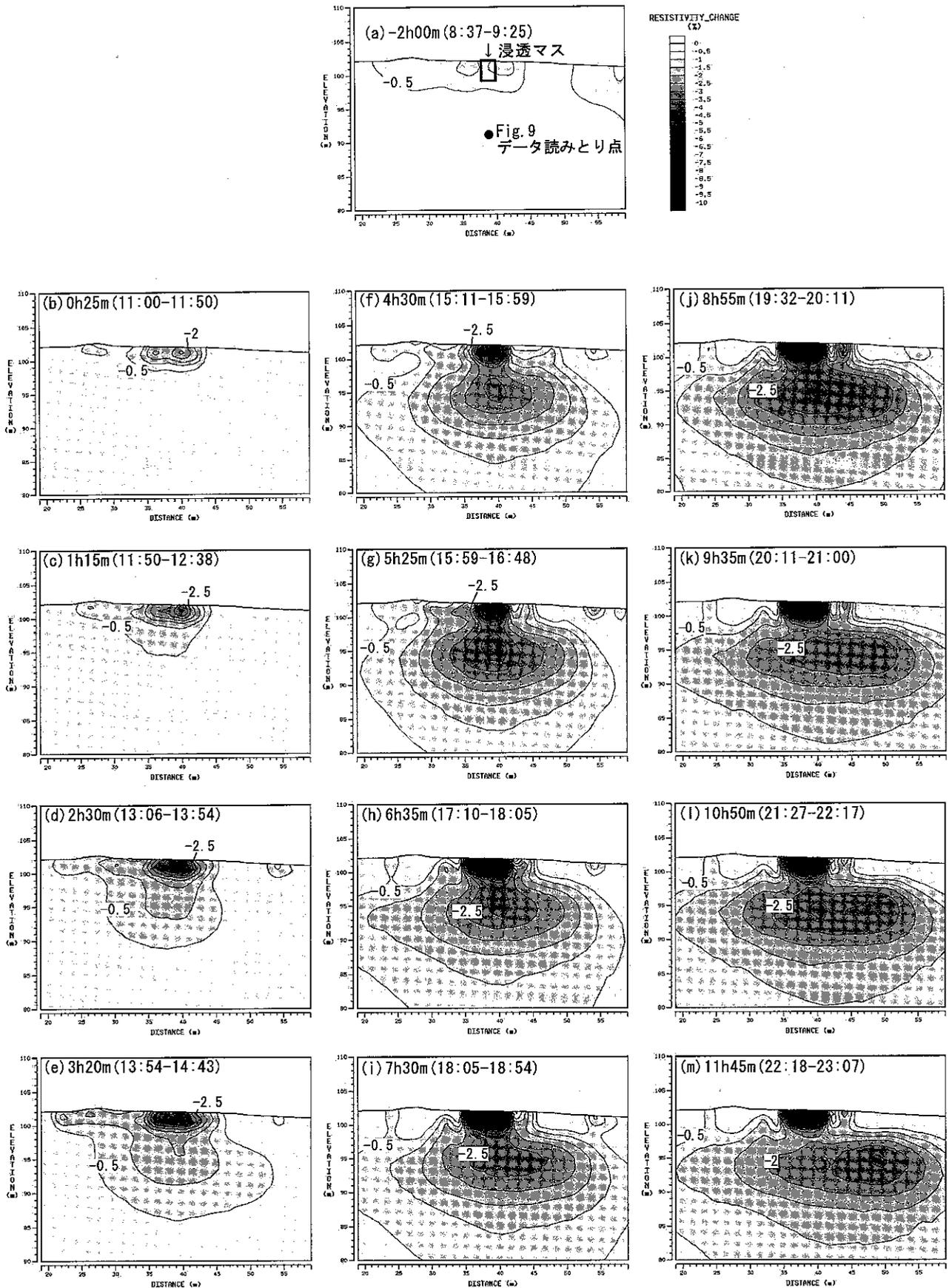


Fig.8 A測線比抵抗変化率分布の経時変化  
Sections of resistivity changing ratios along A-Line

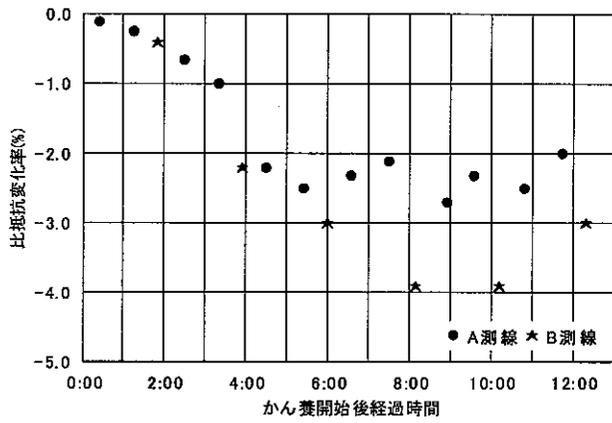


Fig.9 浸透マス下方における比抵抗変化率経時変化  
Resistivity changing ratios (%) beneath the infiltration pit due to time-lapse water recharge

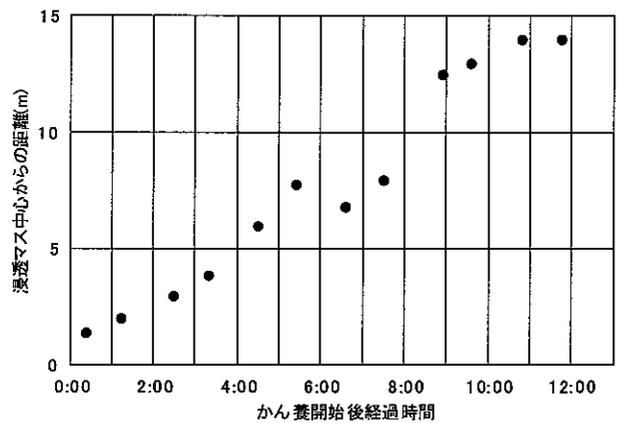


Fig.10 -2.5%等値線による比抵抗減少部の斜面下方への側方移動  
Downward migration of the resistivity contour of -2.5 % along the slope as a function of time after water recharge

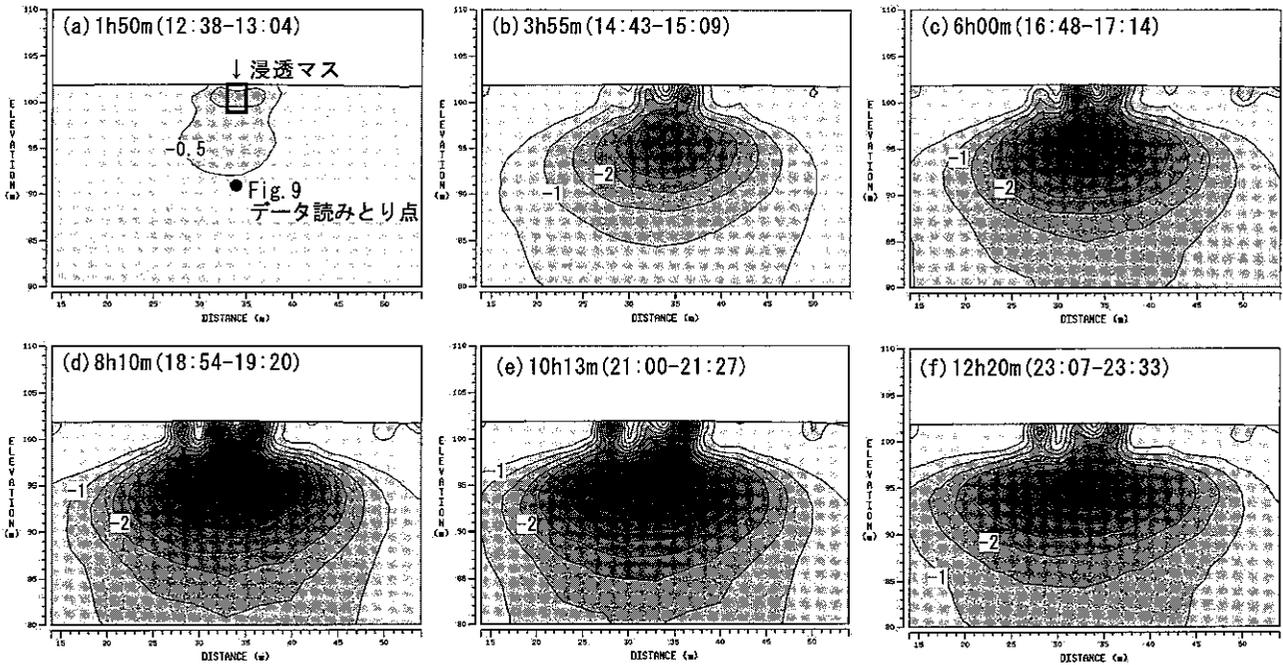


Fig.11 B測線比抵抗変化率分布の経時変化 (凡例はFig. 8に同じ)  
Time lapse change of resistivity changing ratio distribution of B-Line

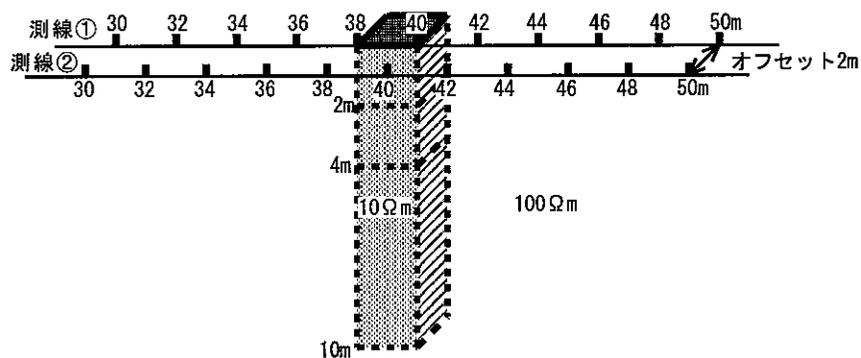


Fig.12 3次元低比抵抗角柱モデル (測線①: オフセット無し, 測線②: オフセット2m)  
A model showing a square pillar of 10 ohm-m in a homogeneous half-space of 100 ohm-m

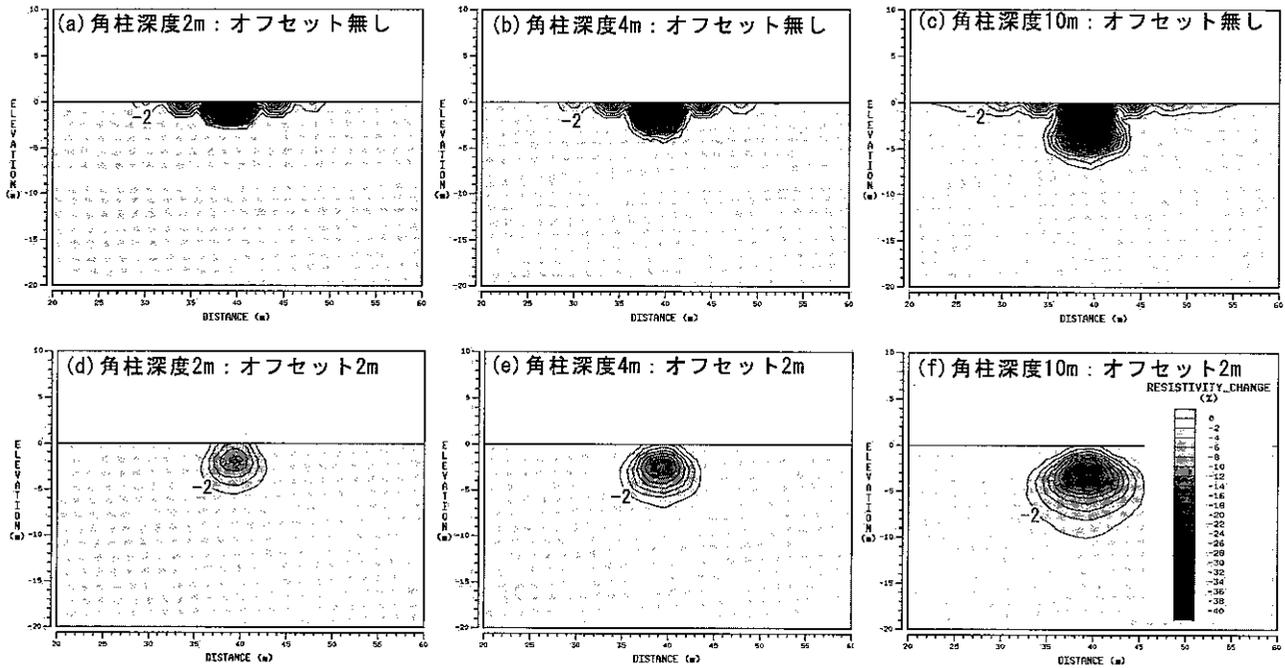


Fig.13 3次元低比抵抗角柱モデルの2極法2次元探査計算データの2次元比抵抗変化率逆解析結果  
Inverted sections of resistivity changing ratios along lines ① and ② with three depths of the square pillar shown in Fig. 12

B 測線の比抵抗変化率断面図はほぼ 2 時間おきの測定結果によるものである。また、A 測線は浸透マスに接して設定されているのに対し、B 測線は浸透マスから斜面下流側に 2m 離れた点を通っている。比抵抗減少部の変化については A 測線のような地表付近における顕著な低比抵抗化は認められなかった。A 測線同様、浸透マスの投影点下方の標高 91m 点における比抵抗変化率の時間変化をみると、涵養期間中の 8 時間は低比抵抗化が進み、8 ~ 10 時間後には一定となり、その後高比抵抗化に転じている (Fig. 9)。4 時間後までの 2 点は A 測線同様の位置にプロットされ、涵養開始直後の涵養水の動きについては両測線とも同じ探査結果が得られていると考えられる。B 測線では変化率の最大値が A 測線より大きくなっている。これは涵養水の浸透が A 測線上で斜面下流方向への成分を持つため、浸透マスより下流側に位置する B 測線上では、より大きな変化率が得られたと考えられる。側方への低比抵抗化はほぼ左右対称に進んだと考えられる。

#### IV 考察

##### 1 涵養水塊の3次元性の影響評価

浸透マスの底面から浸透する涵養水は、涵養初期には円柱状の高飽和度体を形成すると考えられる。これに対し、比抵抗法 2 次元探査は地下断面に垂直な方向には比抵抗構造の変化がない 2 次元構造を仮定しているため、探査断面に垂直な方向には連続性がないと考えられる涵養水塊の移動による比抵抗変化を十分に探査できていない可能性がある。また、測線 A、B では浸透マス位置における比抵抗変化率の経時変化状況が大きく異なり、こ

れは浸透マスと探査測線との距離の違いによるものと考えられた。このため、今回の探査状況を模擬するため、まず Sasaki(1994)に基づき四面体要素を用いた有限要素法による比抵抗法 3 次元モデリングプログラムを製作した。このプログラムにより 100 Ω m の均一半空間に底面積 2m × 2m、10 Ω m の低比抵抗角柱が地表から 2m、4m、10m まで分布しているモデルについて、電極間隔 2m、測線長 78m の測線がこの低比抵抗角柱に接する場合 (測線①：A 測線の場合) と、同じ測線が 2m 離れて設置された場合 (測線②：B 測線の場合) を想定し、2 極法 2 次元探査データを計算した (Fig. 12)。次に各データについて 100 Ω m 均質半空間を初期値とする比抵抗変化率逆解析を現地測定データと同じ仕様でおこない、比抵抗変化率分布を検討した (Fig. 13)。

その結果、低比抵抗角柱と探査測線の位置関係によって比抵抗変化率分布が大きく異なり、A,B 測線の解析結果の違いが浸透マスと探査測線とのオフセットの大きさに起因することが確認できた。低比抵抗角柱に探査測線が接する場合は、低比抵抗角柱の分布深度の増大により表層の比抵抗減少部が強調される傾向がある。このとき低比抵抗角柱の深部への移動は数%の比抵抗減少部の拡大で表現されるが、比抵抗減少部は低比抵抗角柱下面深度までは及ばない。低比抵抗角柱と探査測線との間にオフセットがある場合は、同心円状の比抵抗減少部が低比抵抗角柱の底面深度の増大に伴い下方に拡大する様子が認められる。しかし、底面深度が 10m の場合でも比抵抗減少部中心の深度は 3m であり、深度 10m における比抵抗変化率は -2% に過ぎない。これらの結果は 3 次元的な構造に対する 2 次元探査の適用限界を示すものである。

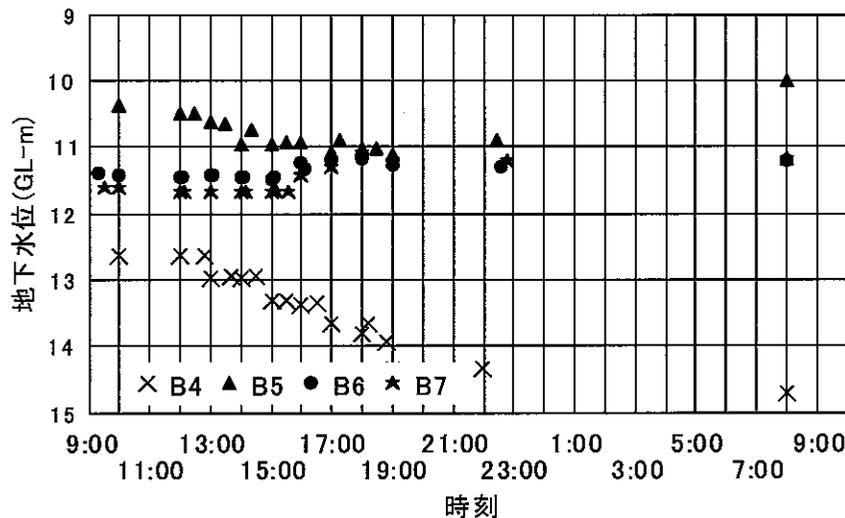


Fig.14 観測孔の水位変化(2001.10.11-12)

Water levels in observation well of B4, B5, B6 and B7

Figs.8, 11によれば両測線の比抵抗減少部は、標高90m付近で制限され、これより下方には拡大しない傾向が認められる。標高90m付近は不透水基盤である魚沼層の上面高度に相当するため、比抵抗減少部の変化は実際の涵養水の動きをある程度反映していると考えられる。しかし、本節の検討によれば、探査断面に垂直方向に連続性のない領域の時系列変化について2次元探査による比抵抗モニタリングを適用する場合は、2次元断面における比抵抗減少部の形状変化については見かけの現象としてとらえる必要があり、III章で得られた涵養水の浸透速度は「見かけ浸透速度」として取り扱う。さらに、低比抵抗角柱の位置で解析された比抵抗変化率は真の比抵抗変化率を示すものではないことから、解析された「見かけ」の変化率から飽和度変化等を導くためには、多くの参照データが必要となる点に留意すべきである。

2 電気探査連続測定による地盤環境モニタリング手法の適用性

浸透マス周辺の調査ボーリング孔 B4, B5, B6, B7 については、涵養試験中は毎時に水質分析用の採水が行われたため B4, B5 孔の水位は低下傾向にあるが、浸透マスに近い B6, B7 孔では涵養開始後 4 ~ 5 時間後に水位の上昇が認められる (Fig.14)。これが涵養水の浸透マス下面から地下水面への到達時間とすると、浸透速度は比抵抗変化率分布図から得られた見かけ浸透速度とほぼ一致する。今回検討した電気探査連続測定による地盤環境モニタリング手法には、3次元現象の2次元解析という問題点はあるが、妥当性の高い結果が得られたと評価できる。

涵養水の側方への移動方向については、試験地における4本のボーリングの魚沼層上面深度から魚沼層上面は西傾斜が推定されており (Fig.15)、A, B 測線とも終点方向への低比抵抗化が期待される。しかし、比抵抗減少部の拡大方向が A 側線では測線終点方向であるが、B

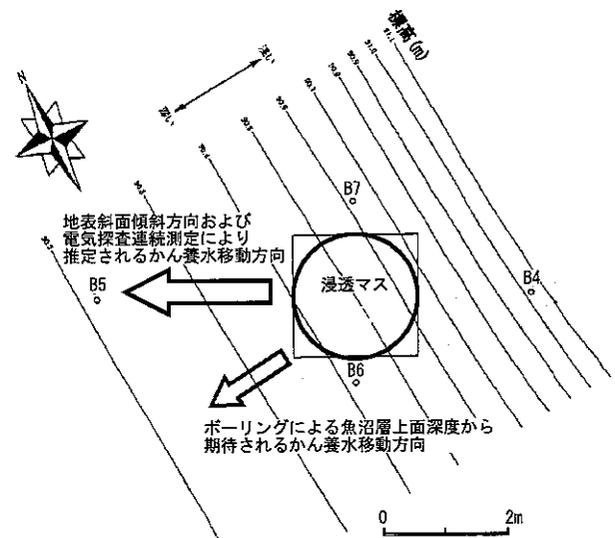


Fig.15 浸透マス周辺の魚沼層上面等高線図と涵養水流下方向の推定

Contour map of top of the Uonuma formation around the infiltration pit and estimated moving direction of charged water mass

測線ではほぼ左右対称であることから、本研究からは涵養水の移動方向はおおむね A 測線方向で北西方向と推定される。試験地周辺の地形は全体的には北西傾斜であり (Fig.1), 調査地周辺の地質ボーリング結果および垂直電気探査結果等から魚沼層上面についても広域的に北西傾斜の傾向が推定されており (北陸農政局, 2002), 今回の探査結果は大局的な不透水基盤層上面傾斜方向への涵養水移動を反映している可能性がある。

V 結言

地盤環境モニタリング手法として電気探査連続測定による比抵抗モニタリング法を取り上げ、地下水人工涵養実験をケーススタディとして同法の適用性を検討し、以

下の結果を得た。

(1)3ch 電気探査装置を改造し、2 極法電極配置による自動電気探査連続観測システムを構築した。本システムでは1時間あたり約490データの探査が可能であり、外部PCへのデータ保存により長時間連続測定が可能になった。

(2)制約付非線形比抵抗変化率逆解析により、涵養に伴う比抵抗減少部の時間変化を精度よく求めることができた。涵養初期のデータからは、涵養水の見かけ浸透速度  $4.4 \times 10^{-4}$  m/s が得られた。

(3)3次元モデリングプログラムにより探査断面の直交方向に連続しない比抵抗構造について2次元探査データを計算し、涵養水浸透を模擬して比抵抗変化率解析をおこなった。その結果、比抵抗変化率分布は浸透施設と探査測線の距離により大きく異なり、また、地下深部ほど比抵抗変化はわずかにしか検出されないことを明らかにした。

(4)モデル計算結果から、2次元解析断面における比抵抗変化率分布の変化から地盤環境変動を把握する際には、探査対象が2次元的な構造であるか否かについて留意が必要である。

(5)今回得られた見かけ浸透速度は、涵養に伴う地下水位変化から求められる浸透速度と一致し、3次元的な涵養水浸透についても2次元探査を用いる本手法の一定の妥当性が確認できた。また、直交測線の検討結果から、涵養水の移動方向が推定できた。

地盤環境モニタリング法として電気探査連続測定法を汎用化するためには、3次元探査および解析が必要である。3次元探査では求めるパラメータ数の増大に応じて、多数の測線設置と大量のデータ取得が必要とされている(杉本・井上, 1998)。しかし、大量データ取得には探査時間が増大し、今回扱ったような時間変化の大きい現象への対応が不可能となる。今後は3次元探査のための測線配置および取得データ数の最適化について検討し、実用的な3次元比抵抗モニタリング手法の開発を行う予定である。

## 参考文献

- 1)赤池弘次(1976):情報量規準 AIC とは何か—その意味と将来への展望, 数理科学, 153, 5-11
- 2)Archie, G.E.(1942):The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. AIME*, 146, 54-62
- 3)北陸農政局(2002):地下水調査地下水強化手法検討型魚沼段丘地区報告書, 295p, 北陸農政局
- 4)小林巖雄・立石雅昭・吉岡敏和・島津光夫(1991):長岡地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 132p, 地質調査所
- 5)Kuroda, S., Nakazato, H., Nihira, S., Hatakeyama, M., Takeuchi, M., Asano, M., Todoroki, Y. and Konno, M. (2002): Cross-hole geo-radar monitoring for moisture distribution and migration in soil beneath an infiltration pit: a case study of an artificial groundwater recharge test in Niigata, Japan, *Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, Koppenjan, S. K. and Lee, H. (eds), Proc. SPIE*, 4758, 703-707
- 6)中里裕臣・畑山元晴・黒田清一郎・長束 勇・鈴木浩一・藤田裕一・榎並信行(2002):地表-地中電極系による比抵抗モニタリングの試み, 農工研技報, 200, 129-137
- 7)新潟平野団体研究グループ(1967):新潟県小千谷市周辺および長岡市西方の第四系, 新潟大学教育学部高田分校紀要, 12, 139-160
- 8)Sasaki, Y.(1994):3-D resistivity inversion using the finite-element method, *Geophysics*, 59, 1839-1848
- 9)佐々木裕・高倉伸一・高橋武春・横井浩一(2002):不規則電極配置による比抵抗モニタリングデータの3次元インバージョン, 物理探査学会第106回学術講演会論文集, 158-161
- 10)杉本芳博(1995):比抵抗トモグラフィによる電解質トレーサーのモニタリング—数値的検討—, 物理探査学会第92回学術講演会論文集, 57-62
- 11)杉本芳博・井上 誠(1998):土木分野における3次元比抵抗トモグラフィ, 物理探査, 51, 676-687
- 12)鈴木浩一・東 義則・城森信豪(1998):512成分比抵抗法自動測定装置の開発, 物理探査, 51, 210-218

# Application of Continuous Measuring System of Electrical Resistivity to Geoenvironmental Monitoring

NAKAZATO Hiroomi, KURODA Seichiro, OKUYAMA Takehiko, PARK Mikyung,  
KIM Hee Joon, and TODOROKI Yoshinori

## Summary

A case study of artificial ground water recharge test has been conducted in order to evaluate the applicability of electrical resistivity prospecting for geoenvironmental monitoring.

(1) The automatic monitoring system of electrical resistivity prospecting was built based on the modification of the conventional equipment with three-channel receiver. This system was practicable to get about 490 data in an hour. This system can store the data into an external personal computer. It enables the continuous repetitive measuring for a longer time.

(2) Non-linear inversion of resistivity changing ratio with constrained optimization enabled the robust numerical estimation for the change in resistivity after infiltration. In the first stage of the recharge test, while the infiltration process is dominant, the apparent infiltration rate estimated by resistivity monitoring was supposed to be  $4.4 \times 10^{-4}$  m/s.

(3) Two-dimensional resistivity prospecting data produced by 3-D code of the resistivity modeling, which can take the asymmetry to the vertical section along the survey line, are analyzed to estimate the resistivity changing ratio caused by recharge. It clarified that the estimated resistivity changing ratio depends on the distance between the survey line and the ground water recharge facility, and that the sensitivity of the change in resistivity becomes less in the deeper zone.

(4) In the application of the conventional 2-D resistivity prospecting and its analysis for geoenvironmental monitoring, it is to be considered whether the resistivity distribution can be assumed to be the 2-D structure.

(5) The apparent infiltration rate estimated by resistivity monitoring was consistent with the apparent propagation rate estimated by the effect of recharge on the ground water table. Also, the soil moisture migration, not only in vertical direction but also in the direction of horizontal section, can be supposed by 2-D prospecting with two orthogonal survey lines.

Keywords: geoenvironment, monitoring, electrical prospecting, resistivity, resistivity changing ratio