

# 地盤の水分変化モニタリング技術 —比抵抗モニタリングシステムの概要—

小林 剛\*

## Monitoring Technology for a Moisture Change of Subsurface —Outline of the Resistivity Monitoring System—

Tsuyoshi KOBAYASHI\*

### Abstract

Resistivity monitoring system is a visualization technology for a dynamic moisture change of subsurface by repeat measurements of apparent resistivity. The rate-of-change profiles of apparent resistivity are generated from the repeat and baseline measurements obtained by multi-channel high-speed electrical survey equipment, and they enable us to estimate water content of an unsaturated zone.

The authors developed the resistivity monitoring system, the measurement system, the processing software for automatic calculation of apparent resistivity change, and the installation method of the electrodes and equipment.

The developed resistivity monitoring system was installed and evaluated at OYO Tsukuba property, river dyke, and near the location where a slope failure was occurred before. The resistivity monitoring system, in these demonstrations, successfully visualized the dynamic behavior of the underground associated with the rainfall, such as the distribution of unsaturated and saturated zone, infiltration process, the flow direction, and air bubbles tapped under the ground.

**Keywords:** resistivity, monitoring, visualization, an unsaturated zone, moisture, infiltration

### (要 旨)

比抵抗モニタリングは、多チャンネル高速電気探査装置を用いて地盤の見かけ比抵抗を繰り返し計測し、基準データをもとに見かけ比抵抗の変化率断面を作成して、その時間変化を動画として表現することで、地盤内の不飽和層における水分の動的な変化を可視化する技術である。

比抵抗モニタリングシステムの開発では、多チャンネル高速電気探査装置を用いた計測システムの開発、見かけ比抵抗変化の自動処理ソフトの開発、電極および装置の設置方法の検討を行った。開発した比抵抗モニタリングシステムを、つくば社有地、河川堤防および表層崩壊が発生した斜面の近傍に設置して適用性の評価を行った。

その結果、地盤内の不飽和層および雨水の滞留層の分布、雨水の浸透過程や流動方向、浸透に伴う地中の間隙空気の挙動など、通常の電気探査では把握できなかった地盤内の水分の動的な変化を、詳細に把握することができた。

**キーワード：**比抵抗，モニタリング，可視化，不飽和層，水分，浸透

\* 応用地質(株)計測システム事業部

\* OYO Corporation

## 1. まえがき

河川堤防や地すべり（表層崩壊）地域では、降雨に起因する浸透崩壊が発生する場合がある。これらの現象を解明する際の原位置モニタリングとして、土壌水分計測や地下水位計測によるモニタリングが実施されることが多いが、不飽和領域における水分の変化や、浸透水の挙動をモニタリングする技術は確立されていない。

そこで、地盤内の不飽和領域における水分状態や浸透水の動的な挙動を、2次元のかつ時系列的に把握することを目的として、比抵抗モニタリングシステムの開発を行った。本論では、比抵抗モニタリングシステムの概要および適用事例について紹介する。

## 2. 比抵抗モニタリングシステムの開発

### 2.1 比抵抗モニタリングの概要

比抵抗モニタリングは、電気探査を経時的に繰り返し行い、地盤の物性変化（比抵抗変化）を観測する手法である。国内における比抵抗モニタリングの適用事例としては、自然斜面や耕地および河川堤防において、浸透水や地下水の動態・状態の把握（例えば、1）～5）が試みられており、不飽和領域の水分動態観測に電気探査手法が有用であることが検証されている。従来の比抵抗モニタリングでは、電気探査の計測間隔は1時間～1日、連続計測期間は数日～数か月であり、計測間隔を短くした高速モニタリングと、数年間計測が可能な長期間モニタリングが課題とされていた。

そこで、長期間（数年）の比抵抗モニタリングを、高速（計測間隔：数分～数十分）に実施できる比抵抗モニタリングシステムの開発を行った。

なお、今回開発した比抵抗モニタリングには、比抵抗映像法<sup>6)</sup>（2極法電気探査）を用いることとした。比抵抗映像法は、1つの電流電極（C）に対して多点の電位（P）を計測することができるため、多チャンネルの電気探査装置を用いることで高速に計測を行うことができる。比抵抗映像法の計測の模式図を図-1に示す。

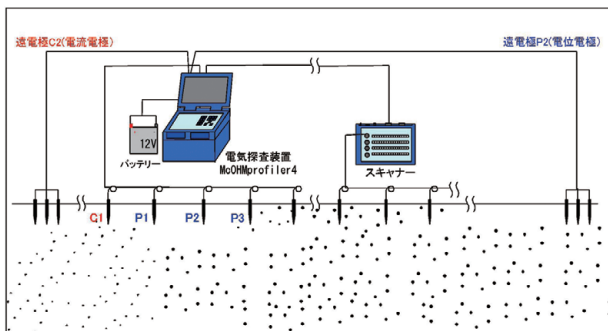


図-1 比抵抗映像法の計測の模式図

Fig.1 Schematic illustration of measurement by resistivity image profiling.

### 2.2 計測システム

比抵抗モニタリング用の計測システムの開発では、廃棄物最終処分場における遮水シートの漏水検知システム<sup>7)</sup>として、長期間の稼働実績を持つ多チャンネル高速電気探査装置（LCP-20：応用地質株製）をベースに、長期間の連続計測を安定的に行う必要があることから、屋内専用のAC電源で稼働する計測システムを開発した。計測システムの仕様を表-1に示す。

表-1 比抵抗モニタリング用計測システムの仕様  
Table 1 Specification of the measurement system

トランスミッターユニット	
最大電圧	±200 V (400 Vp-p)
電流	最大 100 mA (自動設定)
通電周期	400～8000 msec
電源入力	AC85～264V
電源出力	DC12・13A
レシーバーユニット	
入力インピーダンス	9.4 MΩ
入力成分数	20CH, 10CH
入力電圧範囲	±10 V
電源入力	DC12V
スキャナーユニット	
電極数	200 極, 100 極 (20 極単位)
切換素子	電流極：メカニカルリレー 電位極：フォトモスリレー
電源入力	DC12V

計測システムの外観を図-2に示す。



図-2 比抵抗モニタリング用計測システムの外観  
(左：10CH システム, 右：20CH システム)

Fig.2 Resistivity monitoring system.  
(Left : 10CH system, Right : 20CH system)

## 2.3 ソフトウェア

電気探査では、測定で得られた見かけ比抵抗データを解析して真の比抵抗を求め、地盤の比抵抗構造を推定することが一般的である。ここで、見かけ比抵抗とは、次式(1)で表され、地下のすべての物質の影響を含む比抵抗分布を反映した値(電極周辺の広い範囲の比抵抗の一種の平均値)として、真の比抵抗と区別される。

$$\rho = K \frac{V}{I} \quad (1)$$

ここで、 $\rho$  は見かけ比抵抗、 $K$  は電極配置係数、 $V$  は電位差、 $I$  は電流である。

今回の比抵抗モニタリングの開発では、多チャンネル高速電気探査装置で取得した大量の測定データを、迅速にリアルタイムで処理するために、解析は行わず見かけ比抵抗を用いることとした。見かけ比抵抗を用いる理由を以下に示す。

- ①見かけ比抵抗データすべてについて解析を行い真の比抵抗を求めると、膨大な解析処理が必要となる<sup>8)</sup>ためリアルタイムモニタリングを行うことができない。
- ②解析を行う場合、解析に用いる比抵抗構造モデルなどの影響を受けるため、測定データに含まれる微小な比抵抗変化を除去してしまう可能性がある。

具体的なデータ処理の手順としては、まず、比抵抗映像法の繰り返し測定により得られた見かけ比抵抗断面図を用いて、基準時の見かけ比抵抗(基準データ)と任意の時間の見かけ比抵抗(測定データ)の差分をとって、見かけ比抵抗の差分断面図および変化率断面図を作成する。

見かけ比抵抗変化率は以下の式(2)で算出する。

$$\text{変化率(\%)} = \frac{\text{測定データ} - \text{基準データ}}{\text{基準データ}} \times 100 \quad (2)$$

次に、作成した見かけ比抵抗の差分断面図・変化率断面図を、経時的に並べて動画を作成することにより、見かけ比抵抗の変化の様子や範囲を、動的な経時変化として可視化する。

見かけ比抵抗変化の自動処理ソフトの開発では、電気探査用解析ソフト(DataQC:応用地質(株)製)をベースに、以下の機能を持つソフトウェアを作成した。

- ①取得したデータの図化(見かけ比抵抗断面図、見かけ比抵抗差分断面図、見かけ比抵抗変化率断面図)・表示・画像出力機能。
- ②複数測線のデータ処理・図化機能(4測線まで)
- ③地形補正、感度補正機能
- ④ファイル変換機能(GeoPlot形式)

## 3. 適用事例

### 3.1 つくば社有地

応用地質株式会社つくばオフィスの敷地内において、開発した比抵抗モニタリングシステムの動作試験と、取得データの評価を目的として、高速自動連続測定を実施した。測定の仕様を以下に示す。

比抵抗モニタリング:20CH システム

○測定内容:比抵抗映像法(2測線:55 m, 40 m)

・測線L(55 m):探査深度20 m, 電極数56本, 電極間隔1.0 m

・測線S(40 m):探査深度10 m, 電極数81本, 電極間隔0.5 m

・2極法データ, dipole-dipole法データ, Wenner法データ(各々深度1 m, 2 m)

・鉛直埋設電極(0.5 m, 1 m, 2 m)

○測定間隔:20分

○測定期間:2年6か月(H21.5.27~H23.11.17)

○使用資材:電極(銅電極), ケーブル(VSF1.25sq) ケーブル保護管(コルゲートチューブ, PF管)

また、比較データとして土壌水分計、地下水位計、雨量計による計測も併せて実施した。

比抵抗モニタリングの実施状況を図-3に示す。



図-3 比抵抗モニタリングの実施状況(赤矢印:測線)

Fig. 3 Test filed for resistivity monitoring at OYO Tsukuba. The red line in the figure indicates the survey line.

モニタリング測線付近の地質柱状図を、図-4(右図)に示す。表層から0.4 mは礫混じりロームの盛土で、以下、ローム層(深度1.6 m)、細砂層(深度2.55 m)、凝灰質粘土層(深度4.8 m)となっており、地下水位は深度7.8 m~8.6 mで変動している。

また、モニタリング測線脇で実施した地下レーダー探査結果を、図-4(左図)に示す。探査結果には、各地層の境界付近に強い反射波が表れており、これらのやや起伏をもった構造が認められるほか、距離程6 m~14 mの深度1.5 m付近には、埋設物を埋めた掘削跡が捉えられている。

高速自動連続測定で得られた見かけ比抵抗データの処理例を、図-5に示す。データ処理を行った期間は、5月28日20時から6月1日23時の4日分である。この期間内に、降水量46.5mm(最大17.5mm/h)の降雨があった。データ処理は、降雨前のデータ(5月28日20時)を基準データとして、見かけ比抵抗変化率断面を出力するパターンと、降雨後のデータ(5月29日8時)を基準データとして、見かけ比抵抗変化率断面を出力するパターンの2種類のデータセットを作成し、それぞれの動画を作成して見かけ比抵抗変化率断面の経時変化を確認した。図-5では、動画を表示できないため、見かけ比抵抗変化率断面の変化の様子を抜粋して示している。

降雨前を基準データとした結果から、表層に分布するローム層の見かけ比抵抗変化率が、時間とともに減少(青色に変化)しており、雨水の浸透降下により

ローム層の見かけ比抵抗が減少することがわかる。この青色の範囲から、ローム層の層厚や分布を把握することができる。一方、ローム層の下の細砂層では、見かけ比抵抗変化率が増加(赤色に変化)しており、これは、浸透水の圧力により間隙空気が細砂層に押し込まれ、細砂層内の間隙空気の割合が増加したためと推察される。

降雨後を基準データとした結果では、掘削跡と細砂層の見かけ比抵抗変化率が、時間とともに減少(青色に変化)しており、これらは雨水の浸透降下による影響と考えられる。また、水色～青色の範囲の変化を見ることにより、浸透した雨水が細砂層の中を流動(拡散)していく様子が見える。

以上の結果より、地盤内の水分の変化を、動的にモニタリングできる可能性があることを確認した。

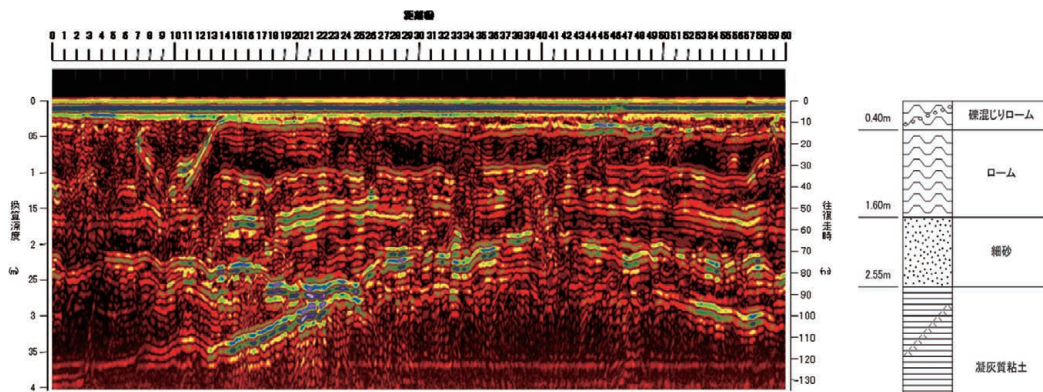


図-4 地下レーダー探査結果(左図)および地質柱状図(右図)

Fig. 4 GPR result (Left) and geological column (Right).

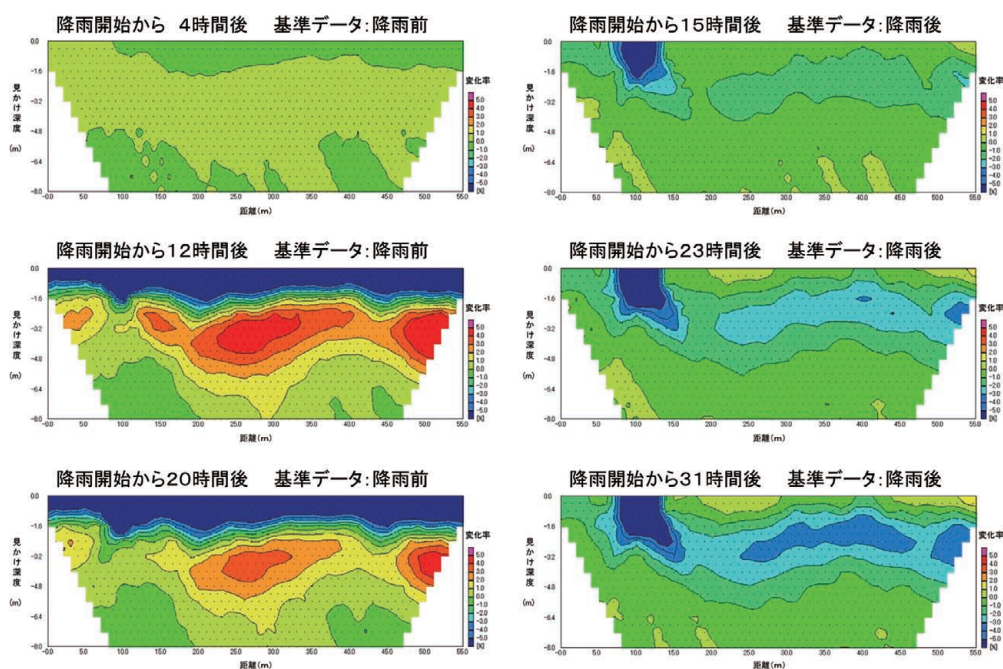


図-5 見かけ比抵抗変化率断面の経時変化(左列:降雨前基準, 右列:降雨後基準)

Fig. 5 Time lapse "Rate-of-change profiles" in apparent resistivity after rainfall.

さらに、本動作試験では、電極および装置の設置方法の検討として、計測システム、埋設した電極、コルゲートチューブおよびPF管を使用して敷設したケーブルの長期安定性（耐久性）の評価を行った。

計測システムについては、高速自動連続測定を実施した2年6か月の間、開発した比抵抗モニタリングシステムは正常に稼働し、長期間のモニタリングが可能であることを確認した。

一方、埋設した電極は1年を経過した頃から接地状況が悪くなり、測定データにノイズが増加したため、1年毎に電極を再設置することとした。なお、測定期間中、電極本体の劣化やケーブルの断線は生じなかった。

### 3.2 河川堤防

実用性を確認した比抵抗モニタリングシステムを、実際の河川堤防に適用し、降雨による堤体内部への雨水の浸透降下や間隙空気移動の状況を見かけ比抵抗の変化として捉えられるかどうかを確認することを目的として、比抵抗モニタリングを実施した。

ここでは、庄内川右岸堤防23km地点の川裏法面において実施した、散水実験の結果<sup>9)・10)</sup>を紹介する。

散水実験では、堤防横断方向に測線長18.5mの測線（電極間隔：0.5m）を設定し、20CHシステムを用いて比抵抗モニタリングを実施した。

比抵抗モニタリングの電極配置図を、図-6に示す。

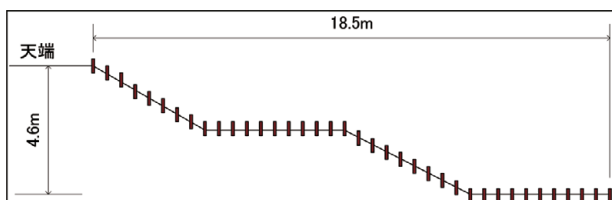


図-6 比抵抗モニタリングの電極配置図  
（測線長：18.5m、電極間隔：0.5m、電極数：38本）

Fig. 6 Arrangement of electrodes for resistivity monitoring.

散水実験状況を、図-7に示す。



図-7 散水実験状況

Fig. 7 Watering the ground for the experiment.

散水実験では、庄内川の河川水を水中ポンプで汲み上げ、ホースを使用して、測線に沿いに降雨強度約200mm/hの散水を1時間継続した。比抵抗モニタリングは、散水の20分前から散水停止後3時間までの間、測定間隔を4分として実施した。

散水前の測定データを基準として算出した、散水停止時の見かけ比抵抗変化率断面図を、図-8に示す。

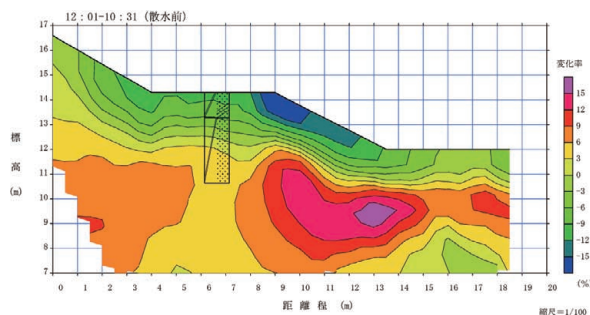


図-8 散水停止時の見かけ比抵抗変化率断面図

Fig. 8 Rate-of-change profiles at no watering period.

表層部（層厚1m程度）の見かけ比抵抗は、散水により減少（寒色系の領域）している。表層部より下方では、見かけ比抵抗が増加（暖色系の領域）しており、これは散水した水の圧力により間隙空気が押し込まれ、間隙空気の割合が増加した影響と考えられる。

散水停止直後の測定データを基準として算出した、散水停止直後から3時間経過した見かけ比抵抗変化率断面図を、図-9に示す。

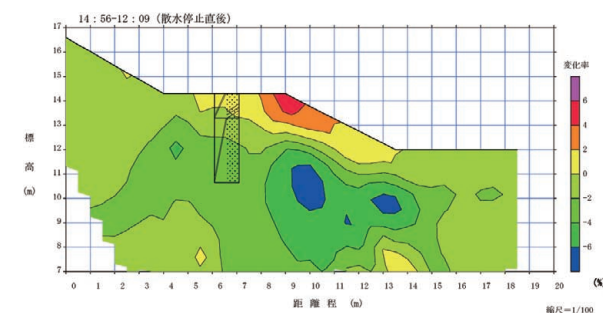


図-9 散水停止直後から3時間経過した見かけ比抵抗変化率断面図

Fig. 9 Rate-of-change profiles three hours after the end of the watering.

表層部（層厚1m程度）の見かけ比抵抗は、散水停止後、増加（暖色の系領域）している。これは、散水停止後、表層部が乾燥することにより、表層部が再び不飽和状態になったことを示唆している。また、表層部より下方では、地中に降下した浸透水の影響により、見かけ比抵抗が減少（寒色系の領域）することがわかった。

実堤防での散水実験の結果、散水した水の浸透状況を見かけ比抵抗が低下する領域の変化として、また、間隙空気の挙動を見かけ比抵抗が増加する領域の変化として可視化することができた。

### 3.3 表層崩壊斜面

平成 18 年に斜面崩壊が発生した長野県辰野町赤羽地区において、遷急線付近に分布する表層土層内の水分変化（降雨時の雨水の浸透状況，浸透水の土中での挙動）を把握することを目的として，比抵抗モニタリングを実施した<sup>11), 12)</sup>。

実施地点の位置図を，図-10 に示す。

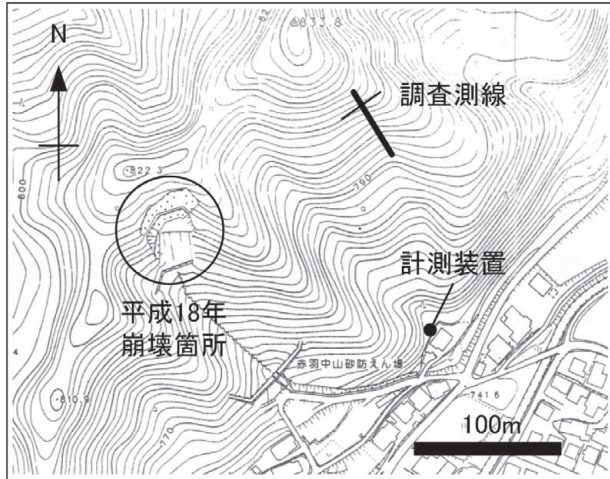


図-10 実施地点の位置図

Fig. 10 Location of Tatsuno test site.

実施地点において，測線長 40 m の縦断測線（電極間隔：0.5 m）と，縦断測線と直交方向に測線長 20 m の横断測線（遷急線の上部の平坦地，電極間隔：0.5 m）を設定し，10CH システムを用いて比抵抗モニタリングを実施した。計測システム（計測装置）は，山裾の民家の脇に設置し，測定間隔を 10 分として，平成 23 年 7 月 25 日より連続自動測定を開始した。

ここでは，降水量が 100 mm を超えた期間の比抵抗モニタリング結果を紹介する。

縦断測線の比抵抗モニタリング結果を図-11，横断測線の比抵抗モニタリング結果を図-12 に示す。両測線ともに，降雨開始から約 5 時間後では，表土層（不飽和層）が雨水で飽和し，見かけ比抵抗が減少する層（寒色系の領域）として捉えられている。一方，降雨開始から 8 日後では，表土層が再び不飽和状態となり，見かけ比抵抗が増加する範囲（暖色系の領域）と，地盤内に浸透水が滞水し，見かけ比抵抗が減少した状態が続く範囲（寒色系の領域）が，存在することがわかった。特に，縦断測線の距離程 15 m 付近では，滞水していた浸透水が，地下深部へ浸透していく様子を把握することができた。また，横断測線の距離程 12 m 付近の深度 2 m の位置に，浸透水の水みちが形成される様子も把握することができた。

表層崩壊斜面に比抵抗モニタリングを適用した結果，雨水の浸透範囲および浸透水の地盤内の挙動を，見かけ比抵抗変化として動的に可視化することができた。

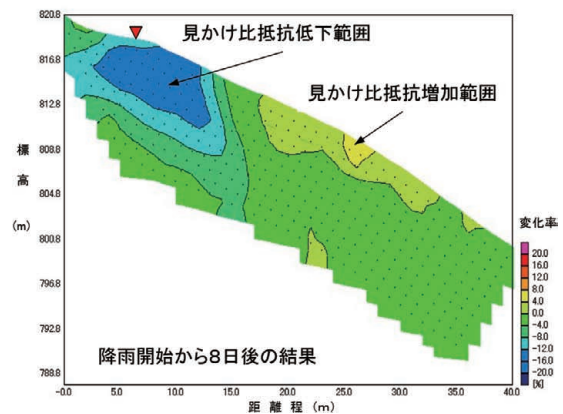
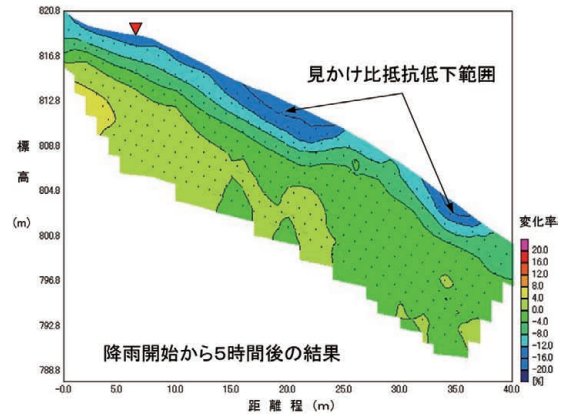


図-11 縦断測線の比抵抗モニタリング結果  
(▼：横断測線との交点)

Fig. 11 Resistivity monitoring results for the in-line, which is the survey line along the slope.  
(▼：Intersection of in-line and cross-line)

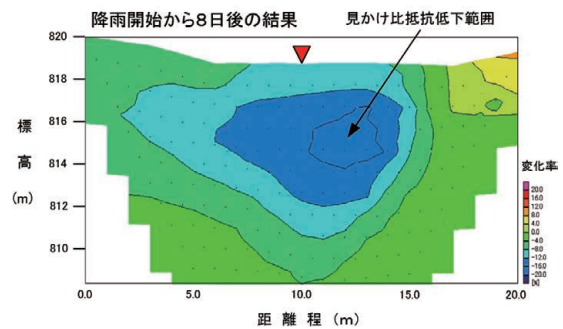
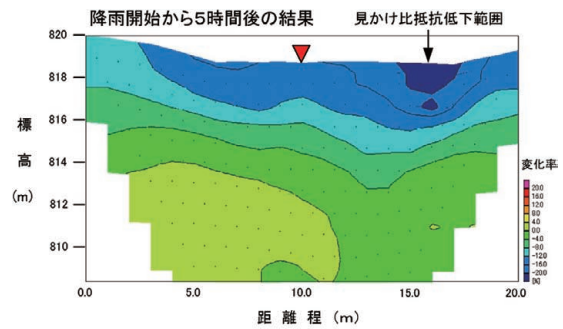


図-12 横断測線の比抵抗モニタリング結果  
(▼：縦断測線との交点)

Fig. 12 Resistivity monitoring results for the cross-line.  
(▼：Intersection of cross-line and in-line)

#### 4. 今後の展望

今回開発した計測システムは、屋内専用で AC 電源を使用するため、設置場所が限定されるほか、可搬性がないため、適用できる現場および地域が限定される。今後は、よりポータブルでコンパクトな計測システムを開発し、現場への適用範囲の拡大を図る予定である。なお、電源については、長期間のモニタリングを行う場合、通常のバッテリーでは駆動時間が限られることから、AC 電源の確保を含めた検討が必要である。

比抵抗モニタリング結果の評価では、見かけ比抵抗の変化を地盤内の水分変化として解釈したが、実際の水分の変化を定量的に把握するためには、従来から用いられている雨量計、土壌水分計、間隙水圧計、および地下水位計等による計測値との対比を行い、それぞれの相関関係を明らかにする必要がある。そのため、今後はこれまでに取得した比抵抗モニタリング結果と、同時に計測した他の計測値の分析を進め、両者を統合した、効果的な地盤の水分変化モニタリング技術の構築に取り組む予定である。

#### 5. あとがき

比抵抗モニタリングシステムの実用化に向けて、多チャンネル高速電気探査装置を用いた計測システムの開発、見かけ比抵抗変化の自動処理ソフトの開発、電極および装置の設置方法の検討を行った。

開発した比抵抗モニタリングシステムを、つくば私有地、河川堤防、および表層崩壊が発生した斜面の近傍に設置して、長期安定性および適用性の評価を行った。

その結果、長期間の高速連続自動測定が可能なシステムであることを確認した。また、比抵抗モニタリング結果から、地盤内の不飽和層および雨水の滞留層の分布、雨水の浸透過程や流動方向、浸透に伴う地中の間隙空気挙動など、通常の電気探査では把握できなかった地盤内の水分の動的な変化を、詳細に把握（可視化）することができた。

今後は、ポータブルでコンパクトな計測システムの開発を行い、現場への適用事例を増やすとともに、雨量計、土壌水分計、間隙水圧計、地下水位計等の計測器との統合化を図り、地盤の水分変化モニタリング技術として確立させたい。

#### 謝辞

本稿の河川堤防における適用事例は、平成 21 年度国土交通省河川技術開発制度地域課題研究公募で採択された、平成 21～23 年の 3 年間の研究成果の一部である。また、表層崩壊斜面における適用事例は、緑斜面研究会における総合的な斜面防災の研究の一部とし

て実施したものであり、ここに記して感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 井上 誠・樗木政昭・岩松 暉・横田修一郎(1991): 比抵抗計測の自動計測およびデータ処理, 情報地質, **2**, **1**, 65-84.
- 2) 西 宏之・細川昌裕・青山千彰・西田一彦(1992): 山腹斜面の不飽和浸透計測について, 第 27 回土工質工学会研究発表会講演集, 1912-1922.
- 3) 菅 智浩(2004): 連続電気探査法による河川堤防内への降雨水浸透状況の推定, 物理探査, **57**, 545-552.
- 4) 稲崎富士・井上 誠・齋藤由紀子・荒金 聡・吉田直人(2009): 時系列データに基づく堤防浸透破壊過程の解析, 河川技術論文集, **13**, 339-344.
- 5) 小西千里・林 宏一・畠山正則・川原孝洋・亀谷裕志(2009): 不飽和土の比抵抗と S 波速度のクロスプロットの解釈について, 物理探査学会第 121 回学術講演論文集, 175-178.
- 6) 島 裕雅, 梶間和彦, 神谷英樹(1995): 建設・防災・環境のための新しい電気探査法, 比抵抗映像法, 古今書院.
- 7) 小林 剛(2008): 廃棄物最終処分場における漏水モニタリング技術, 社団法人 物理探査学会創立 60 周年記念事業委員会, 最新の物理探査適用事例集, 295-300.
- 8) 井上敬資・中里裕臣・久保田富次郎・竹内陸雄・古江公治(2008): 複数測線データの 2 次元差トモグラフィ解析による土中水動態の準 3 次元的モニタリング, 物理探査, **61**, **4**, 313-321.
- 9) 柴田 賢, 今瀬達也, 石川晴将, 馬場干児, 榊尾孝之, 前田健一(2011): 豪雨による砂質堤防内の間隙空気挙動と透気遮水シートの補強効果, 第 46 回地盤工学研究発表会論文集, **536**, 1077-1078.
- 10) 小林 剛・前田健一・柴田 賢(2012): 不飽和堤防の急速浸潤に伴う間隙空気挙動と比抵抗モニタリングによる可視化, 河川技術論文集, **18**, 293-298.
- 11) 安藤 伸・山寺喜成・馬場干児・上野将司・佐藤謙司・小林 剛・小西千里(2011): 斜面崩壊危険箇所を迅速に調査するための非破壊探査および貫入試験の適用性評価 特 に土層強度検査棒について, 第 46 回地盤工学研究発表会講演集, 1983-1984.
- 12) 北原哲郎・安藤 伸・小林 剛・山寺喜成(2012): 斜面崩壊危険箇所における調査方法—非破壊探査および土層強度検査棒の適用性評価—, 平成 24 年度砂防学会研究発表会講演集, 344-355.