

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04950

研究課題名（和文）土砂災害予兆検知のための小型MT法探査装置の開発

研究課題名（英文）Development of compact exploration equipments for MT method for predictive detection of landslide disasters

研究代表者

田中 俊昭（Tanaka, Toshiaki）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：90294892

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：急傾斜地域では、多量の降雨により地下水位が急激に上昇すると土砂災害が発生する危険性が高まる。地下水位が上昇することを地表で検知するために、地盤の比抵抗変化に着目して小型MT法探査装置を開発した。探査装置は可搬性や軽量性を重視した。そのプロトタイプを試作して実験室内と野外で基本的な機能の動作試験を実施した。電場と磁場を測定するMT法探査では、都市部や山間部を問わず電力線に起因するノイズが測定の障害になることがある。そこで、ノイズの特性を評価した結果を踏まえて、適切なノイズ低減回路を探査装置に追加した。その結果、電場と磁場を精度良く測定できることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

急傾斜地などで発生する土砂災害は、地盤中の地下水の増加が原因の一つとして知られている。地下水の分布は、観測孔に設置した地下水位計などにより測定されることが多い。しかし、広範囲な地下水位変化をモニタリングするためには、多数の観測孔が必要になり、コストと労力が必要になる。そこで、地下水の分布によって変化する地下の比抵抗分布を地表からMT法により測定する。しかし、MT法の探査装置は一般に高価であるため小型の探査装置を開発した。その結果、多数の探査装置を同時に利用することで、精度良く地下水の分布の推定が可能となり、減災の一助となりうる。

研究成果の概要（英文）：In steep slope areas, the risk of landslides increases when groundwater levels rise rapidly due to heavy rainfall. To detect rising groundwater levels at the ground surface, a compact MT method exploration equipment was developed, focusing on the change in the resistivity of the ground. The exploration equipment was emphasized for its portability and light weight. A prototype of the equipment was developed and its basic functions were tested in the laboratory and in the field. In the MT method, which measures electric and magnetic fields, noise from power lines can be an obstacle to measurement in both urban and mountainous areas. Therefore, based on the results of noise evaluation, an appropriate noise reduction circuit was added to the exploration equipment. As a result, it was confirmed that the electric and magnetic fields can be accurately measured.

研究分野：物理探査学

キーワード：土砂災害 地下水分布 比抵抗 電磁探査 探査装置

## 1. 研究開始当初の背景

地磁気地電流法 (MT 法) は自然の電磁場変動を観測して地下の比抵抗構造を探查する電磁探查法である。この方法は地下資源探查や構造探查等に用いられる場合が多く、特に地熱探查では、主要な探查法として国内外で広く利用されている。また石油探查では、反射法地震探查があまり有効ではない難地域での補完的な探查法として注目されている。近年コンピュータの計算能力の目覚ましい向上により 2 次元および 3 次元の逆解析の精度が向上し、複雑な比抵抗構造の把握に効果を上げている。

急傾斜地などで発生する土砂災害は、地盤中の地下水の増加が原因の一つとして知られている。地下水の分布は、従来観測孔に設置した地下水位計などにより測定されることが多い。しかし、広範囲な地下水位変化をモニタリングするためには、多数の観測孔が必要になり、コストと労力が必要になる。そこで、地下水の分布によって変化する地下の比抵抗分布に着目し、電磁探查により比抵抗分布を測定することで地下水分布を推定する。

3 次元 MT 法探查による地下水モニタリングを想定した場合、探查コストが問題になる。高精度な MT 法探查装置は高価なため、現状では十分な測点密度での同時測定やモニタリングが困難である。また MT 法では 3 軸の磁場計測のために重いインダクションコイル (1 本 5kg から 10kg 程度) を 3 本使用するため、崩落しそうな急傾斜地にコイルを設置することは困難が伴う。地下水分布の動的な挙動を捉えるためには、調査領域で面的に高密度かつ連続的な繰り返し 3 次元 MT 法 (真の 4 次元 MT 法) の測定が必要不可欠である。そのためには、小型で低消費電力かつ安価でありながら高精度の測定が可能な測定機が多数必要になる。

近年の半導体技術の発展により、高性能な半導体が手軽に利用できるようになり、小型軽量であり安価な測定機を開発することが可能になってきた。磁気インピーダンス効果を利用して磁場強度を測定する MI センサは、小型 (センサ全体で数 cm 程度) であり、価格が数十倍高価なフラックスゲート磁力計と同程度以上の感度を有し、特に低周波数領域から高周波数領域まで幅広い帯域で感度が一定である特性を有する。そのため電磁探查や磁気探查における磁場強度の測定への適用が期待されている。このような背景により、小型の測定機を開発し、自然電磁場の多点同時観測を行なうことにより真の 4 次元 MT 法による地下水モニタリングに基づく土砂災害予兆検知が可能となる。

## 2. 研究の目的

MT 法では磁場センサとして、インダクションコイルが一般的に使われている。しかし、インダクションコイルは、磁場の変動を測定するため、高周波磁場の感度は高いものの低周波磁場の感度は極端に低い。実際の MT 法探查では、周波数ごとの感度の違いを補正しているが、低周波の測定値の S/N 比の悪さは、低周波磁場変動の小ささや人工ノイズの影響もあるが、根本的には磁場センサとしてのインダクションコイルの感度の問題である。本研究で開発予定の MT 法探查装置では、インダクションコイルの代わりに磁気インピーダンス効果を用いた MI センサを利用する。MI センサは、アモルファス金属のインピーダンスが外部磁場で変化することを利用した新しい磁気センサで、インダクションコイルとは異なり、磁場感度は高周波領域から低周波領域まで減少することなく一定である。本研究により、磁場センサとして MI センサが利用できることが確認できれば、コスト面や軽量化、小型化などにより作業性の向上のみならず、低周波の測定値の質の改善が期待できる。

また、現在使われている既存の MT 法探查装置は非常に高価なため、広く普及しているとは言いがたい。この研究によって、既存の測定装置の百分の一程度の安価で小型な MT 法探查装置が開発できれば、限られたコスト内でも十分な測点密度での探查が可能となり、探查コストの低減に大きく貢献できる。さらに、このような MT 法探查装置が開発できれば、数多くの MT 法探查装置を設置したモニタリング探查が可能となるので、MT 法を用いた地下水分布のリアルタイムモニタリング (4 次元 MT 法) という新しい研究分野が開拓できる。

## 3. 研究の方法

山間部や急傾斜地において、多量の降雨により地下水位が急激に上昇すると土砂災害の発生が懸念される。地下水位の上昇を地上で検知するために、地盤の比抵抗変化に着目して MT 法による測定を想定した。開発する小型 MT 法探查装置の仕様を検討する必要がある。そのため、地下水位の変化を仮定し地下の比抵抗変化を模擬するために 3 次元比抵抗シミュレーションを行った。シミュレーション結果を踏まえて MT 法探查のために必要な小型 MT 法探查装置の仕様を検討した。一般的には磁場変化の測定はインダクションコイルが使用されるが、可搬性や小型化を重視し、高感度な磁場センサを採用した。決定した仕様に基づきプロトタイプを試作して実験室内と野外で基本的な機能の動作試験を実施した。

電場と磁場を測定する MT 法探查では、都市部や山間部を問わず電力線に起因するノイズが測

定の障害になることがある。電場と磁場の測定精度を向上させるため、まずノイズの特性を評価した。家屋や工場が点在する地域や工事現場付近、および郊外の送電線の近くなどで電磁ノイズの測定を行った。その結果、商用周波数帯の電磁ノイズが大きいものの、加えてインバータ制御の電動機から発生していると思われる高周波数の間欠的な電磁ノイズなどが検知され、場所や時間帯により特徴的な周波数や強度の電磁ノイズが確認された。場所や時間帯により電磁ノイズの特性が異なることから、測定を行う場所で事前に長時間の電磁ノイズ特性を測定し、測定された電磁ノイズに対応したノイズ低減回路を準備する必要性が確認できた。その結果を踏まえて測定回路に適切なノイズ低減回路を追加した。

#### 4. 研究成果

安価で小型のMT法探査装置の開発に先立ち、必要な要素技術の開発に重点を置き研究を行った。地盤に含まれる地下水が土砂災害を発生させるほどに増加する条件を想定し、地盤の比抵抗値とMT法で測定される電場と磁場の強度を、3次元比抵抗シミュレーションを用いて推定した。その結果に基づき、開発する小型MT法探査装置の仕様を決定し、プロトタイプのMT法探査装置を試作した。試作した探査装置を使用して、室内と野外で動作試験を行った。電場と磁場を精度



Fig.1 測定を行った学内林地の風景

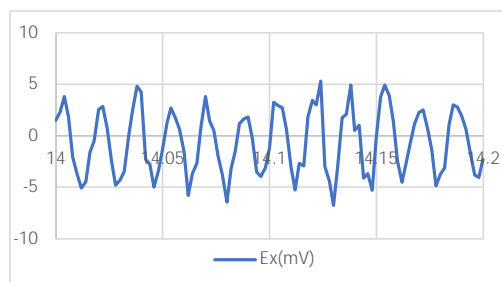


Fig.2 測定された典型的な商用周波数(60Hz:西日本地域)のノイズの例

良く測定するために、内蔵する測定制御プログラムに複数回改良を加えて測定精度を比較した。高精度な磁場測定を目的に高感度な磁場センサを採用すると、微弱な電磁ノイズを測定してしまう。わずかな比抵抗変化を測定するために電場と磁場を精度良く測定するためには、耐ノイズ性を向上させることが重要である。特に都市部では、商用周波数帯をはじめとした電磁ノイズが大きいことが予想される。Fig.1に示す学内の林地で測定された典型的な商用周波数(60Hz:西日本地域)のノイズの例をFig.2に示す。建物などからは十分に離れた場所であるが、60Hzのノイズが明確に測定された。そこで、測定の高精度化を目指して、都市部での電磁ノイズの特性を評価し、電磁ノイズの周波数特性に対応した適切なノイズ低減回路やデータ処理法の開発を行った。

まず、家屋や工場が点在する地域や工事現場付近、および郊外の送電線の近くなどで電磁ノイズの測定を行った。その結果、商用周波数帯の電磁ノイズが大きいものの、加えてインバータ制御の電動機から発生していると思われる高周波数の間欠的な電磁ノイズなど、場所や時間帯により特徴的な周波数や強度の電磁ノイズが確認された。場所や時間帯により電磁ノイズの特性が異なることから、測定を行う場所で事前に長時間の電磁ノイズ特性を測定し、測定された電磁ノイズに対応したノイズ低減回路を準備する必要性が確認できた。電磁ノイズを低減する回路として、あらかじめ固定した周波数特性の電磁ノイズ低減回路ではなく、測定地点の電磁ノイズ特性に応じた周波数特性のノイズ低減回路をオンサイトで動的に生成できる適応型のノイズ低減方式を採用した。その結果、場所によって異なる電磁ノイズに対応でき、電場や磁場を精度良く測定できることが確認された。

それらの研究成果を踏まえて、小型のMT法測定装置とパソコンに接続する測定本部装置を設計し試作した。地滑りや土石流の発生が懸念される危険箇所に測定装置を設置することを想定し、可搬性を考慮して小型軽量であることを優先した。土砂災害の発生の危険性がある地域は多くの場合アクセスが難しいことが多いため、測定装置を設置した後、遠隔で操作や測定値の確認ができるように無線機能を搭載した。測定装置を小型軽量化するために、磁場の測定に、従来一般に用いられる大型のインダクションコイルの代わりに磁場センサ(MIセンサ)を採用した。測定した結果は測定装置に内蔵したSDカードに記録する方式を採用した。パソコンにUSBケーブルで接続した測定本部装置と測定装置を無線で接続し、遠隔制御を可能とし必要に応じて測定値を確認できるようにした。

通信周波数は、山間部などでも比較的通信距離が長く無線通信のための免許を必要としないことを条件に920MHz帯を採用した。そのため、通信速度に制約があり、すべての測定値を測定装置から測定本部装置に送信するためには長い時間が必要であることが確認された。

測定装置に内蔵した高感度な磁場センサは、測定装置内部の自己ノイズの影響を受けることが確認された。そのため、磁場センサを測定装置の外部に配置して比較した結果、自己ノイズによる影響を低減でき、測定精度の改善が確認できた。

試作した小型 MT 法探査装置を評価するために測定実験を実施した。Fig.3 に示す測定実験を行った地点の地質構造は、腐葉土の表層の下部に 20m から 50m 程度の厚さで風化花崗岩である真砂土が分布しており、その下部に基盤としての花崗岩が存在していることが知られている。Fig.4 に、測定された見掛比抵抗分布を示す。深部に高比抵抗があることから高周波から低周波

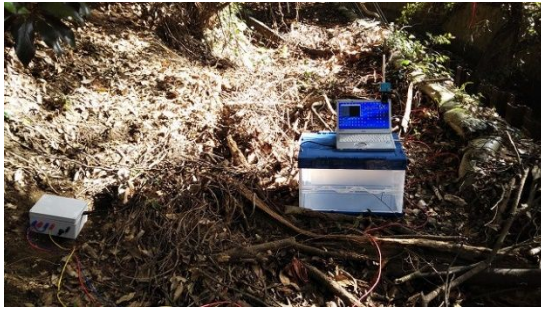


Fig.3 測定の様子

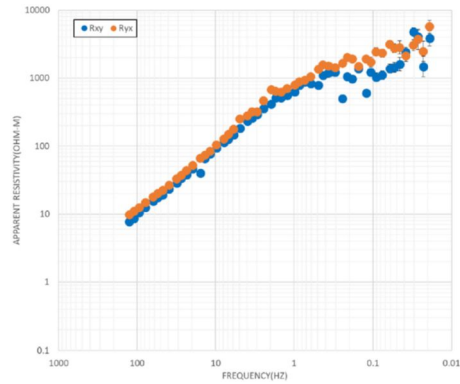


Fig.4 見掛比抵抗の一例

に向かって見掛比抵抗が上昇していることが確認できた。

測定を行った地点の近くには湧水があり、花崗岩の上面を浸透した地下水の一部が湧き出ていることが考えられている。十分な降水量があれば、地下水位の上昇に伴って、比抵抗の変化が期待できる。測定の期間中、一時的に降雨があったものの、雨量が十分ではなかった。その結果、測定された比抵抗に有意な変化は認められなかったが、見掛比抵抗の値のばらつきが大きくなったことが確認された。また、降雨の間、測定された電場に対してノイズが大きくなることが確認された。そのため、安定した精度の高い測定を行うために、降雨によるノイズの影響を低減するような測定の工夫が必要であることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Chen Hao, Mizunaga Hideki, Tanaka Toshiaki	4. 巻 74
2. 論文標題 Influence of geomagnetic storms on the quality of magnetotelluric impedance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 253-256
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-022-01659-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 橋本幸治、水永秀樹、田中俊昭、平瀬敬司
2. 発表標題 小型MT探査装置によるフィールド実験(1)：九州大学伊都キャンパス
3. 学会等名 日本地熱学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 水永秀樹、田中俊昭、橋本幸治、平瀬敬司
2. 発表標題 小型MT探査装置によるフィールド実験(2)：大分県久住高原
3. 学会等名 日本地熱学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中俊昭、水永秀樹、橋本幸治、平瀬敬司
2. 発表標題 小型MT探査装置によるフィールド実験(3)：宮崎県えびの高原
3. 学会等名 日本地熱学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 水永秀樹、田中俊昭、橋本幸治
2. 発表標題 MT法の常識と非常識
3. 学会等名 物理探査学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中俊昭・水永秀樹・橋本幸治・小野寺真也
2. 発表標題 超低周波磁場測定のためのMIセンサの改良
3. 学会等名 物理探査学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中俊昭、水永秀樹、橋本幸治、古川浩幸、小野寺真也
2. 発表標題 超低周波磁場測定のためのMIセンサの改良
3. 学会等名 物理探査学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 水永秀樹、田中俊昭、橋本幸治
2. 発表標題 MT法の常識と非常識
3. 学会等名 物理探査学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 橋本幸治、水永秀樹、田中俊昭、平瀬敬司
2. 発表標題 小型MT探査装置によるフィールド実験(1)：九州大学伊都キャンパス
3. 学会等名 日本地熱学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 水永秀樹、田中俊昭、橋本幸治、平瀬敬司
2. 発表標題 小型MT探査装置によるフィールド実験(2)：大分県久住高原
3. 学会等名 日本地熱学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中俊昭、水永秀樹、橋本幸治、平瀬敬司
2. 発表標題 小型MT探査装置によるフィールド実験(3)：宮崎県えびの高原
3. 学会等名 日本地熱学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 水永秀樹・田中俊昭・橋本幸治・小野寺真也
2. 発表標題 小型軽量装置を活用したMT探査装置の高度化(1)：プロジェクトの概要
3. 学会等名 日本地熱学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中俊昭・水永秀樹・橋本幸治・小野寺真也
2. 発表標題 小型軽量装置を活用したMT探査装置の高度化(2)：測定装置の設計と試作
3. 学会等名 日本地熱学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本幸治・水永秀樹・田中俊昭・小野寺真也
2. 発表標題 小型軽量装置を活用したMT探査装置の高度化(3)：文献調査およびアンケート調査
3. 学会等名 日本地熱学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水永秀樹・田中俊昭・橋本幸治・小野寺真也
2. 発表標題 小型軽量装置を活用したMT探査手法の高度化(1)：プロジェクトの概要
3. 学会等名 物理探査学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中俊昭・水永秀樹・橋本幸治・小野寺真也
2. 発表標題 小型軽量装置を活用したMT探査手法の高度化(2)：ハードウェアの設計と試作
3. 学会等名 物理探査学会
4. 発表年 2022年



1 . 発表者名 Kazuto INOUE, Hao CHEN, Toshiaki TANAKA, Hideki MIZUNAGA
2 . 発表標題 Example of application of a new MT time series processing method
3 . 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2021 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Hao Chen, Hideki Mizunaga, Toshiaki Tanaka , Gang Wang and Maik Neukirch
2 . 発表標題 Application of a new robust impedance estimator based on Hilbert-Huang transform for magnetotelluric method
3 . 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2021 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Hao Chen・Hideki Mizunaga・Toshiaki Tanaka・Gang Wang
2 . 発表標題 Comparing the bound influence and maximum likelihood magnetotelluric response function estimator
3 . 学会等名 物理探査学会第144回学術講演会
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Casulla Mel Anthony Asis, Hideki Mizunaga, Toshiaki Tanaka, Torres Aniano
2 . 発表標題 Subsurface characterization using geophysical and hydrochemical data: An application to groundwater resource management in Pampanga, Philippines
3 . 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2020 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 Hao Chen, Hideki Mizunaga, Toshiaki Tanaka, Gang Wang
2. 発表標題 New strategy to calculate robust impedance using RMHHT estimator for continuous and discontinuous broadband magnetotelluric time-series data
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hao Chen, Hideki Mizunaga, Toshiaki Tanaka
2. 発表標題 The research on the application of Hilbert-Huang Transformation to time series magnetotelluric data
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yosuke Kiyomoto, Hideki Mizunaga, Toshiaki Tanaka
2. 発表標題 Development of Magnetotelluric 1-D Sparse Inversion
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清元 陽介・水永 秀樹・田中 俊昭
2. 発表標題 MT法の1-Dスパースインバージョン
3. 学会等名 物理探査学会第141回学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------