

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K01268

研究課題名(和文) SQUID磁束計によるインピーダンス計測システムの災害時土壌特性評価に関する研究

研究課題名(英文) study for the evaluation of soil property using the impedance measuring systems and the SQUID magnetometer to the landslide disaster

研究代表者

松本 和健 (Matsumoto, kazutake)

釧路工業高等専門学校・創造工学科・教授

研究者番号：30342439

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、下層土の土壌インピーダンスの大きさと位相を三次元的なデータとして取得するために、四探針電気探査法とRMS法(無線磁気探査法)による計測システムを構築する。土壌の含水率を電気回路モデルから解析する方法について提案し検証している。本方法で、土壌粒子の粒径や密度、水分含有量の深さ方向のデータが非破壊で得られると期待でき、従来よりも簡便に災害時の土壌特性を明らかにできる。非破壊的な下層土の土壌インピーダンス計測が災害時の土壌評価として有用であることを検証する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

道東地域は、地震や土砂災害などの自然災害が懸念されている地域である。このような地域での、災害対策をより効率的に実施していくために、簡便で広範囲な土壌特性評価手法が必要になる。本研究は、土砂災害の発生予防評価手法の提案と実証試験による適用可能性の検討を行っている。土壌インピーダンスの評価手法は、土壌表面から10m程度までの浅い層を四探針電気探査法により、それより深い層でSQUID磁束計を用いたRMS法によって評価する。本研究の目的は、土壌の複素インピーダンスから、土壌の粒径と含水率を評価できる手法を提案することと、その結果が土砂災害の評価に有益な情報を提供できることを検証することである。

研究成果の概要(英文)：In this study, four-probe electrical measurement and RMS method (RadioMagnetic Sounding system) was constructed for the subsoil measuring systems. These measuring systems can acquire 3- dimensional data of magnitude and phase angle in the impedance of subsoil down to some 10 [m] depth. In this study, analytical method of soil moisture content was proposed and demonstrated with soil electrical circuit network model. The size of soil particles and the soil moisture content can be cleared by the nondestructive testing using this electrical model. This electrical model was expected to investigate into soil property at the landslide disaster. These soil impedance measurement of nondestructive subsoil testing verified to useful method of soil evaluation as the landslide disaster.

研究分野：磁界計測，低温エレクトロニクス

キーワード：SQUID磁束計 四探針電気探査 土壌インピーダンス 土砂災害

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

道東地域は、地震などの自然災害が懸念されている地域である。特に、沿岸部や湿地上の造成地における液状化現象や、土砂崩れなど土壌の特性に依存した災害も度々発生している^[1]。このような地域での、災害対策をより効率的に実施していくために、簡便で広範囲な土壌特性評価手法が必要になる。

2. 研究の目的

本研究では、下層土の土壌インピーダンスの大きさと位相を三次元的なデータとして取得するために、四探針電気探査法と RMS 法（無線磁気探査法）による計測システムを構築する。本方法で、土壌粒子の粒径や密度、水分含有量の深さ方向のデータが非破壊で得られると期待でき、従来よりも簡便に災害時の土壌特性を明らかにできる。従来手法である PL 値との比較検討より、下層土の土壌インピーダンス計測が災害時の土壌評価として有用であることを検証する^[2]。

3. 研究の方法

本研究は、土砂災害の発生予防評価手法の提案と実証試験による適用可能性の検討を行っている。土壌インピーダンスの評価手法は、土壌表面から数 m の範囲を四探針電気探査法により、10m から数百 m の範囲では SQUID 磁束計を用いた RMS 法によって評価する。本研究の目的は、土壌の複素インピーダンスから、土壌の粒径と含水率を評価できる手法を提案することと、その結果が土砂災害の評価に有益な情報を提供できることを検証することである。

4. 研究成果

(1) 四探針電気探査法に依る複素インピーダンス測定と土壌モデルの評価

① 本研究の電気探査補に用いた電極配置と測定システム

四探針電気探査法は、ウィナー法とシュランベルジャー法の電極配置で実施した。測定対象は、防災科学研究所から公開されているジオ・ステーション^[3]のボーリング柱状図のある地点の屋外データの測定と、研究室内の 380 [mm] 角程度の大きさの土壌サンプルで測定を行った。土壌状態を決めるパラメータのうち、含水率を対象に評価することを目的としたので、屋外測定は、晴天時と雨天時の比較を行った。研究室レベルの土壌サンプルは、乾燥した黒土を飽和状態まで水を混合し、自然乾燥による含水率変化（水分重量の変化）による電気特性の変化を測定した。

測定装置の概念図を図 1 に示す。図中の I_+ 、 I_- 、 V_+ 、 V_- の四本の電気探査プローブは、ステンレス製金串（ $\phi 1.5 \times 360$ [mm]）を用いた。電流源は、100 [kHz] までの正弦波を発生できる定電流発振器を用いた。電流値は図 1 中の抵抗 R_C （1 [k Ω]）を用いてモニタした。グラウンドの電位を分離するためにアイソレーションアンプを介してデジタルオシロスコープで観測した。電流源とプローブ用のケーブルまでの間は、トリアキシャルケーブル（ECX-1.5D-2VSV）を使用した。プローブ側への電流用延長ケーブル二本（それぞれ 20 [m]）は同軸ケーブル（1.5D2V）を使用し、同軸ケーブルの芯線のみ電流プローブ I_+ と I_- に接続し、外側の網線はシールド用として、トリアキシャルケーブルの外側のシールドと接続している。電圧プローブ V_+ と V_- からの信号も図 1 に示すように、アイソレーションアンプを介してデジタルオシロスコープで波形観測した。プローブ側への電圧用延長ケーブル二本（それぞれ 10 [m]）は同軸ケーブル（1.5D2V）を使用した。この測定システムの周波数特性を調べるために各プローブ間に 100 [Ω] の固定抵抗を接続して実験を行った。プローブまでの延長ケーブルを含めて、100 [kHz] までの周波数範囲では、インピーダンスの大きさ (V/I)、電流と電圧の位相差は共に変化が無く平坦な特性であり、土壌の複素インピーダンス測定に影響がないことを確認した。

② 屋外の土壌インピーダンス実験結果

ジオ・ステーション^[3]を利用して、屋外の測定点を選定した。選定条件は国道沿いで、地下の構造が比較的単純な場所で五カ所選んだ。各地点で、ウィナー法とシュランベルジャー法の電極配置の両方について、電流電極間隔を最大 30 [m] から 3 [m] ずつ短くして最小 3 [m] までの 11

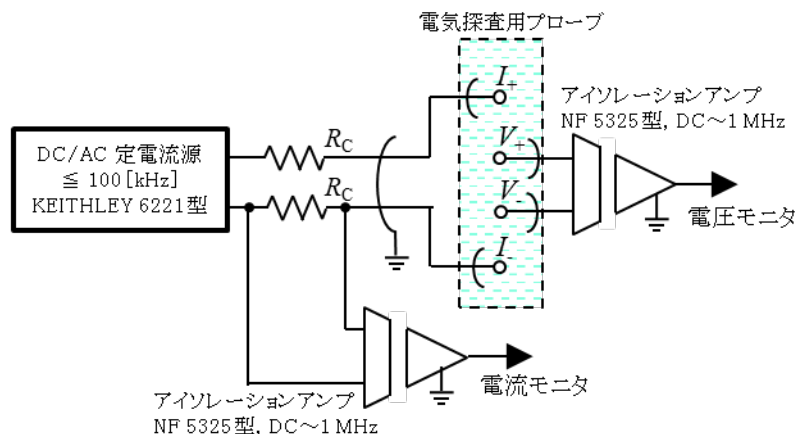


図1.土壌複素インピーダンス測定に用いた測定システムの概念図

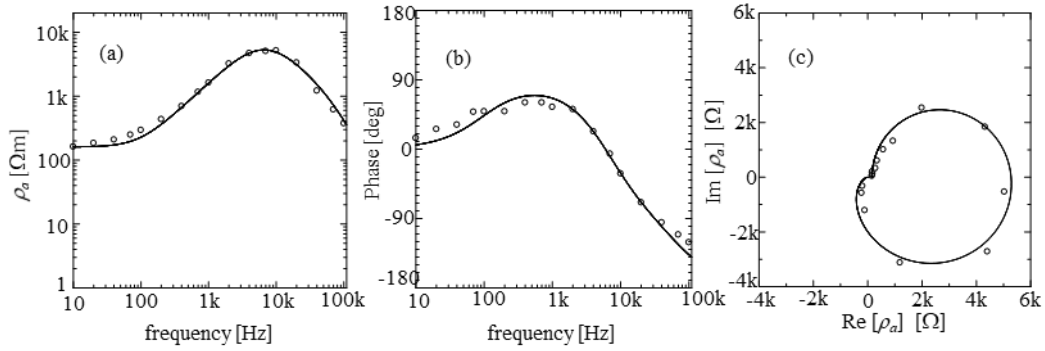


図2. 北海道中川郡豊頃町統内(B2地点)晴天時のデータ例
(電流電極間隔 15 [m], 電圧電極間隔 3 [m]); (a)インピーダンスの特性, (b)位相の特性, (c)ベクトル軌跡

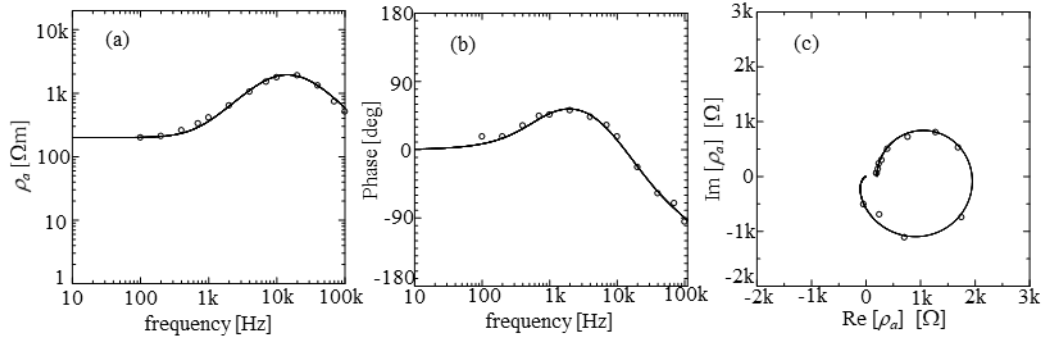


図3. 北海道中川郡豊頃町統内(B2地点)雨天時のデータ例
(電流電極間隔 15 [m], 電圧電極間隔 3 [m]); (a)インピーダンスの特性, (b)位相の特性, (c)ベクトル軌跡

種類の間隔について測定した。電極配置によって異なるが最大 10~15 [m]の深さから、最小 1~1.5 [m]の深さまでの 11 点の見かけ比抵抗率の測定ができる。定電流源は正弦波、5 [mA]の実効値を印可した。各測定では 10 [Hz]~100 [kHz]までの電流データ、電圧データ、電流と電圧の位相差を測定した。測定されたデータの典型的な例を図 2 と図 3 に示す。両者とも豊頃町の統内地区の同一地点であるが、図 2 は 2018 年 10 月 22 日に測定し、測定地点では数日間晴天が連続した時のデータである。図 3 は 2018 年 10 月 28 日に測定し、測定地点では前日に一日中強雨がかった日の測定結果である。図の (a)~(c)に、見かけ比抵抗と位相差の周波数特性、見かけ比抵抗のベクトル軌跡をそれぞれ示している。いずれのデータも丸のシンボルが測定データで、実線は後述する LCR モデルを用いた計算値である。屋外の測定ではここで示した例と同様に共振点のようなインピーダンスのピーク値が観測され、共振点では位相差がほぼゼロになる。共振点より低周波側で電圧波形が電流より正の位相差、高周波側で反対に負の位相差を観測している。

晴天時と雨天時の比較から、10 [Hz]の低周波での見かけ比抵抗率は、晴天 180 [Ω m]、雨天 200 [Ω m]とほぼ同じだが、共振点付近では晴天 5300 [Ω m]、雨天 1950 [Ω m]雨天時の抵抗率が半分以下になる。共振周波数の値は、抵抗率のピークと位相がゼロになる周波数から、晴天 6 [kHz]、雨天 14 [kHz] となり、雨天時に共振周波数が大きく高周波側にシフトすることが判る。

③ LCR等価回路モデルの提案

通常、土壌は地平面に対して層状構造であり、電気伝導特性は多孔質材料の性質になることが知られている^[4]。土壌中は岩石や粘土が混ざった比較的抵抗率の高い材料で構成されるが、この中に水分やその他の抵抗率の低い物質も混ざり、図 4(a)に示すように空隙中を埋める水の部分で分極されたイオンが、電界によって移動し電気伝導していると考えられている。この電気伝導から推定できる伝導モデルは、分極に係る容量的な挙動とイオンの流れの運動に係る誘導的

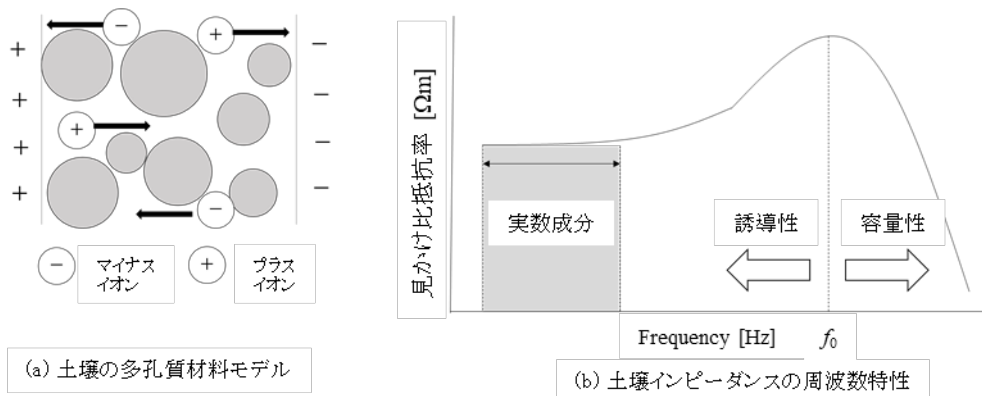


図4. 土壌の電気伝導の概念と周波数特性との関係

な挙動、及びそのイオン流を妨げる抵抗的な挙動に分けて考えることができる。これらの振る舞いが、含水率や土壌の粒形とどのように関係するかを明らかにするために、電気回路的なLCRモデルを提案する。多孔質材料の伝導のメカニズムから予想されることは、イオンの流れは水分比率（含水率）と関係し、分極は絶縁材料である岩石の大きさ（土壌の粒径）と関係すると考えられる。誘導的な挙動を電気回路のインダクタンス、容量的な挙動をキャパシタンスとして、インピーダンスの周波数特性から、各回路定数を推定して土壌の含水率と粒径にどう対応するかを評価するためにLCR等価回路による評価を提案する。LCR回路の共振特性は図4(b)に示されるように共振周波数 f_0 を中心に誘導性と容量性のインピーダンスの性質に分けることができる。この特性は、図4(a)の土壌の多孔質モデルから推定されるイオンの運動や分極のモデルとも矛盾しないことに加えて、図2と図3の実験結果の周波数特性をうまく説明できる。

そこで、誘導性と容量性のインピーダンス成分と、含水率、土壌粒径との関係を調査するために、LCRモデルを仮定して、各インピーダンス成分と土壌の状態をデバイスの成分値で数値的に評価するモデルを提案する。図4(b)のような共振特性を示す典型的な電気回路は、図5に示すようなLC並列共振回路である。図5中の四カ所の端子は四探針電気探査法の電流プローブ二本と、電圧プローブ二本に対応する。 I は定電流源の電流値、 R_0 は電流源の出力インピーダンス、誘導成分が L_a で代表されていて、その損失が R_a である。容量成分が C_3 で代表され、その損失が R_3 である。通常、低周波又は直流の電気探査評価される比抵抗率は R_a と R_3 の並列のインピーダンスから与えられる。実際の土壌では、図5に示すような単純なLCR回路で表現できないはずで、図4(a)のような多孔質の伝導メカニズムを説明するには、より複雑な回路網で構成されていると推定される。そこで、より現実に近いモデルを表現するために、土壌は地表面に平行な層は均一と仮定して、図5の各成分に加えて、図6のように四本の各電極間に誘導成分(L_2, R_2, L_2', R_2')を追加)を考えて、電極間隔に従ってより深い層の誘導成分を反映させ、深い層の容量成分(C_1, R_1)を追加した。この回路を用いて計算値を求めるが、追加した L_2, R_2, L_2', R_2' は、電源から見ると直列なので一つの要素に置き換えて、図7の回路でLCRモデルを構成できる。図7の回路の入出力の電圧電流関係は以下のように、Fマトリクスを用いて

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix}, \quad I_2 = 0 \text{ より}, \quad \frac{V_2}{I_1} = \frac{1}{C} \quad (1)$$

式(1)のようになり、 $1/C$ が電気探査で測定される電圧を定電流源の値で割ったインピーダンスになる。図7の回路網のFマトリクスは

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1+j\omega C_1 R_1}{R_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_2 + j\omega L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1+j\omega C_3 R_3}{R_3} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_a + j\omega L_a} & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式(2)で与えられるFパラメータCから、電気探査の比抵抗率の周波数特性を計算できる。図2と図3に示される計算値は式(2)のLCRモデルから計算した。現段階では、一定の拘束条件のもの

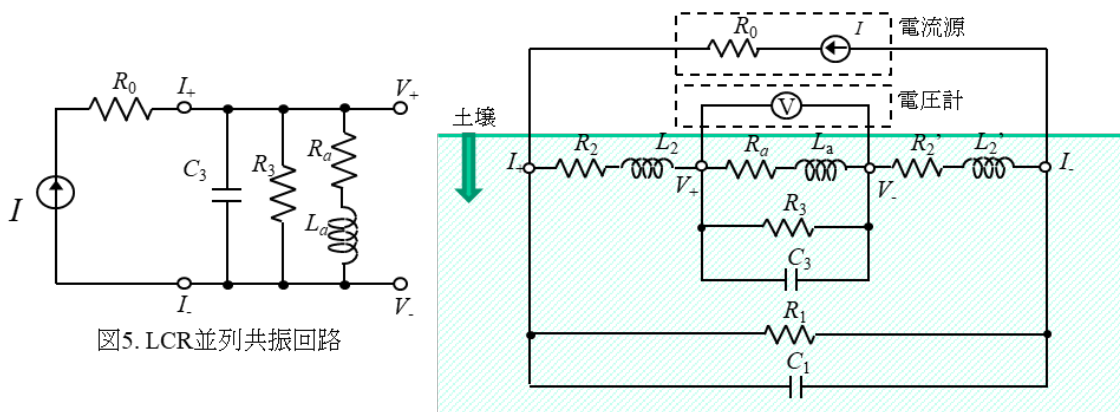


図5. LCR並列共振回路

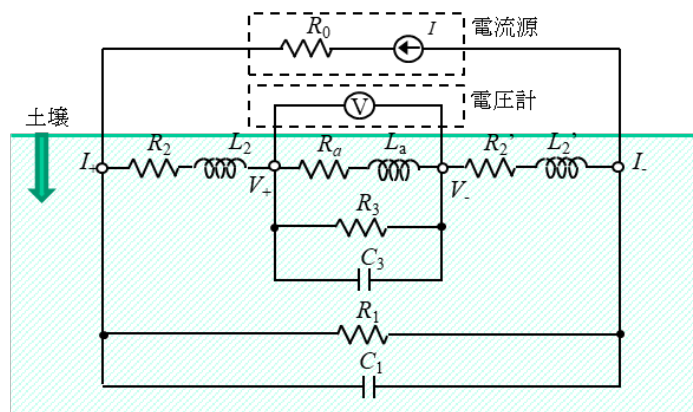


図6. 土壌の伝導モデルと周波数特性から推定したLCRモデル

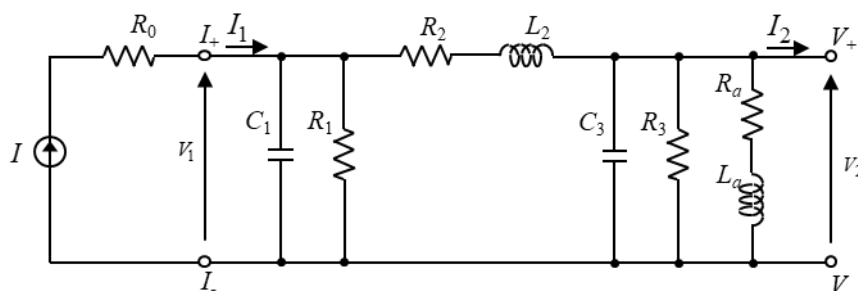


図7. 土壌の複素インピーダンス計算に用いたLCRモデル

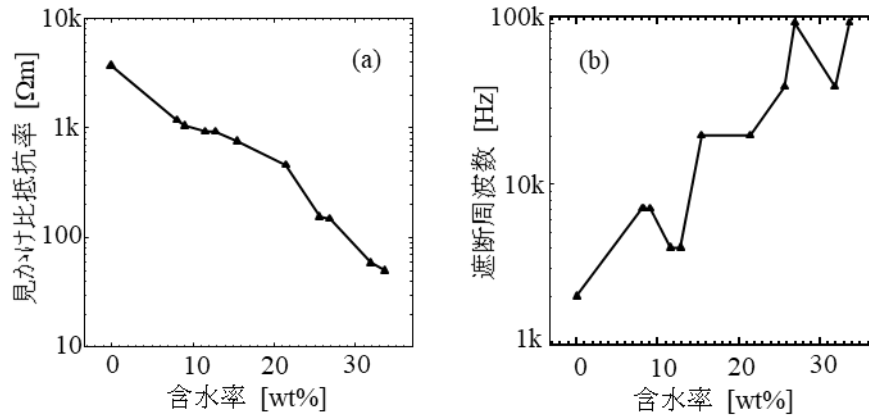


図8. 研究室レベルの土壌サンプルを用いた含水率に対する土壌特性
 (a) 10 [Hz]の見かけ比抵抗値の含水率依存性, (b) 遮断周波数の含水率依存性

とに、各パラメータを変化させ、実験値にフィッティングしているが、今後、最適解を求める方法について検討を進める。現段階では、より含水率が高い場合、共振点の周波数が高くなり、計算値で用いる誘導成分が小さくなり、容量成分の変化は小さいが増減する傾向が見られた。

④ 研究室レベルの土壌サンプルを用いた含水率の評価

定量的な含水率によって、土壌インピーダンスの変化を測定した。測定システムは図1に示す測定システムでケーブルもプローブも同じものを使用した。研究室レベルのサンプルは陶器製の容器に黒土を入れ、水を飽和状態まで入れて、その後の自然乾燥による重量変化から含水率を変化させた。研究室レベルの土壌サンプルは、およそ W380×D380×H200 [mm] のサイズで、プローブは土壌表面上の対角線方向の中心付近に、100 [mm] 間隔のウィナー法電極配置で測定した。焼成黒土を陶器に入れて土壌サンプルにし、含水率 0 [%] のときの重量と、電気探査データを測定する。このサンプルに飽和するまで水を加えて、重量比で含水率を求めた。この研究室レベルの電気探査測定では、屋外で測定した結果のようなピークは観測されず、単純なローパスフィルターの特性を示した。図8(a)は、低周波側 (10 Hz) の見かけ抵抗率の含水率依存性を示している。図8(b)は、土壌インピーダンス周波数特性の遮断周波数の含水率依存性を示している。ともに、屋外で測定した電気探査データの晴天時と雨天時の傾向と同じであるが、研究室レベルのサンプルでは誘導成分が無いような特性を示し、この原因は検討中である。

(2) RMS法に依る複素インピーダンス測定システムの構築

本研究課題では、超電導センサが研究計画では2個必要だったが、1個の準備となり、研究計画の変更を余儀なくされた。そのため1個のセンサを切り替えて使用するために低温環境で動作可能なスイッチングデバイスの選定を行った。MEMSやCMOSなど5種類のスイッチングデバイスを検討した。結果として、MEMSがスイッチの動特性や、ON時の損失、OFF時の漏れなどに優れていることが判った。高周波信号の伝送特性の測定結果を図9に示す。各シンボルはADGM1004がMEMSの型番、RTが室温での測定、LN2が液体窒素中での測定、on/offがスイッチの状態を表す。液体窒素中では、off時の伝達遮断特性が改善されることが判る。CMOSスイッチでは、off時の遮断特性が、20 [dB]以上劣化した。MEMSの問題点は、接点駆動用高電圧電源が、液体窒素中では動作せず、外部から80 [V]の電源を接続する必要があったことである。今後、この問題の解決と検出コイルのスイッチング回路の試作を検討する。

SQUID磁束計の信号処理回路の検討では、同期位相検波回路の動作確認と、広帯域読み出し回路の評価を行った。RMS法に適した複素インピーダンス測定回路を検討している。

アクティブシールドの磁気補正コイル構成の検討は、コイル構成をシミュレーションして、実際に試作した場合の作成に伴う誤差に対するロバスト性の高い構成パラメータを得た。しかし、要求する磁場均一度が達成できていない。

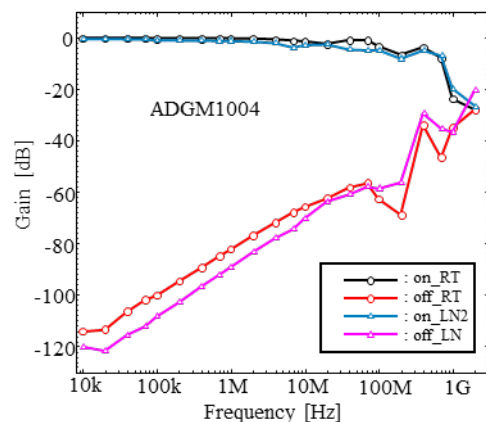


図9. MEMSのスイッチ伝達特性

<引用文献>

[1] 国土交通省, “平成30年 全国の土砂災害発生状況,” 2019
 [2] 吉田隆, “斜面崩壊対策技術 メカニズム・センシング・監視システム・新施工法,” pp. 3-29, 株式会社 エヌ・ティー・エス, 東京, 2014
 [3] 「ジオ・ステーション」 <https://www.geo-stn.bosai.go.jp/>
 [4] Xiaobin Cao, et. al., ” Analysis on the Phase Frequency Characteristic of Soil Impedance,” School of Electrical Engineering, Southwest Jiao Tong University, Chengdu, China, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
研究分担者	坂口 直志 (Sakaguchi tadashi) (80225789)	釧路工業高等専門学校・創造工学科・教授 (50103)	