

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05624

研究課題名(和文)電磁波反射・屈折法による地下電気伝導度時間変化検出シミュレーション

研究課題名(英文)A simulation study of electromagnetic wave reflection and refraction to monitor subsurface electrical resistivity time variation

研究代表者

市来 雅啓 (Ichiki, Masahiro)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：80359182

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：

地下の電気比抵抗時間変化の監視を実現することを目標に、地表面上の閉曲線に電流を流し、離れた場所の起電力を測定するLoop-Loop法のシミュレーションコードの開発と蔵王山での既存の電気比抵抗モデルでシミュレーションを行うことを計画した。

時間領域有限要素法の定式化で電磁場計算のコード開発を試みたが、閉曲面の印加電流を有限線分に分け、各線分端の電流の湧き出しと吸い込みのコード化が最後まで成功しなかった。一様な比抵抗に対する解析解を用いて計算したところ、100m四方に10Aの電流送信に対し100～10 mの地下構造であれば1km離れた場所で1～100mV起電力を期待できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2014年の御嶽山の噴火や2016年の阿蘇山の噴火によって、地震計や傾斜計、GNSSによる力学的変動の観測では水蒸気噴火の短期的噴火時間予測が難しいケースが再認識された。水蒸気噴火の予測には火山体下の熱水流体の動きを捕捉すると考えられる電気比抵抗の変化の監視で精度を向上させることが期待されており、本研究では時間領域電磁法と呼ばれるうちLoop-Loop法と呼ばれる手法を向上させることで、地下の電気比抵抗が変化した場所を特定できるだけでなく、時間、空間的に分解能を改善させ、火山噴火予測、さらには流体駆動型の内陸地震などの予測を多項目で実装できることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：

Electrical resistivity time variation of the earth's crust reflects transport of crustal fluids, which more or less involves phreatic eruption or seismicity. To develop a technique to monitor the resistivity variation, this project aims to study loop-loop transient electromagnetic method. The objective is (1) to develop a finite element time domain simulation code to calculate horizontal transient electromotive force in the 3D resistivity distribution, and (2) to calculate expected transient electromotive force in the 3D resistivity distribution model of Zao volcano, NE Japan by use of the code.

We took a finite element time domain approach to develop the code, and found still insufficient numerical precision of loop source formulation to be composed line dipole segments. In uniform half-space resistivity, we can expect 0.987 mV at 1 ms, 0.987  $\mu$ V at 10 ms on 100 $\times$ 100 m in 100 Ohm-m, and 98.7 mV at 1 ms, 98.7  $\mu$ V at 10 ms in 10 Ohm-m, induced by 100 $\times$ 100 m loop of 10 A.

研究分野：地球惑星内部電磁気学

キーワード：地震発生予測・火山噴火予測 観測手法開発

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

火山噴火の短期的時間予測は火口付近での火山性地震・火山性微動の検出と山腹に鉛直に埋め込まれた傾斜計の変動といった物体の破壊や膨張の検出に頼っている。研究開始時の2017年は、2014年の御嶽山の噴火や2016年の阿蘇山の噴火によって、地震計や傾斜計、GNSSによる力学的変動の観測では水蒸気噴火の短期的噴火時間予測が難しいケースが再認識された。以前より水蒸気噴火の予測に火山ガスの化学組成の変化や火山体下の熱や電気比抵抗の変化を監視する方法が提唱されており、本研究では人工的に鉛直磁気ダイポールを一定時間定期的に発生させ、それに対する地下の電磁誘導応答の時間変化で地下の電気比抵抗の時間変化を捕える時間領域電磁法(TEM法)に着目した。それまで2007年に伊豆大島で地表付近に2本の電極を埋め込んで電流を流し(ソース)、多点の鉛直磁場(レシーバ)の応答を測る方法(ACTIVE)と2010年に草津白根山で地表に円環に敷設したケーブルに電流を流し、流したケーブルそのもので電磁応答を測る方法(Volcano-Loop)が実用化されていたが、ACTIVEは降雨で地中を流れるソース電流経路が変化し、電磁誘導応答の計算に必要な電流閉回路の面積が未知となること、Volcano-Loopはソースとレシーバに同一の円環ケーブルを用いる為、地下の電気比抵抗が変化した領域に任意性があることが問題点として明らかになっていた。しかしVolcano-Loopは、ソースとレシーバを分離し、レシーバとなる円環ケーブルを多くの場所に設置するLoop-Loop TEM法にすることで地下の電気比抵抗が変化した場所を特定できるだけでなく、分解能を改善させることが期待できるという着想の下、将来的にはこの方法による火山噴火予測、さらには流体駆動型の内陸地震などの予測にも応用することを目標に研究を計画した。

### 2. 研究の目的

上記目標を達成する為の基礎研究として、

- (1) 地下の3次元比抵抗分布において、ある地表1点における鉛直磁気ダイポールを入力とした場合の任意の地表面での電磁誘導場を計算するシミュレーションコードを開発する。
  - (2) 地下の比抵抗変動によって、観測可能な電磁応答関数の変化が期待できるかシミュレーションを行う。
  - (3) シミュレーションに基づいて実際に電磁波の野外伝送試験を行う。
- 以上の3つを目的とした。

### 3. 研究の方法

- (1) シミュレーションコードの開発では、当初、既存の地下3次元電気比抵抗構造に対する周波数領域電磁場計算コードを基に改良を加える方針を取った。3次元電気比抵抗構造の環境の下、周波数領域で計算される電磁場をフーリエ逆変換のサブルーチンを組み込んで時間領域の電磁場データに変換するコード開発である。既存の周波数領域コードは電磁場の入力(境界条件)として平面波を与えるMT法の解析コードで、TEM法の場合は地表面一点の磁気ダイポールを模した単位インパルスが境界条件になる為、その変更も行う必要がある。しかし研究開始直後、類似の水平電流ダイポールを入力とする時間領域有限要素法(FETD法)による電磁場計算の定式化が論文に発表された為、時間領域そのものでの計算コード開発に変更した。プログラムはMATLABを開発補助に使用しながら、FORTRAN90言語での開発を目指した。
- (2) 開発したコードでシミュレーションする電気比抵抗構造は、蔵王山で2014年に実施したMT法観測で推定された3次元の比抵抗構造を基にしてシミュレーションを計画した。過去の熱水だまりと解釈される低比抵抗領域をさらに低抵抗、もしくは高抵抗に変化させた場合それぞれの観測電磁場変動を計算する。
- (3) (2)を基にして実際の場所で電磁場の伝送試験を行う。ソースの大きさは野外の状況から1辺100mの平面正形状に敷設したケーブルに最大10Aの電流を流すことを想定した。伝送試験に必要な機材は電流発生器(トランスミッター)と高速サンプリングデータロガーで、トランスミッターはレンタルによる借用、データロガーは代表研究者所属所有の500kHzサンプリングが可能なものを利用する。

### 4. 研究成果

#### (1) シミュレーションコードの開発

① 地下の3次元電気比抵抗構造に対する時間領域の電磁場計算は、差分法か有限要素法で、周波数領域で計算したものを時間領域に変換するか、時間領域そのもので計算するかの4つが現実的手法として挙げられる。有限要素法による時間領域そのもので電磁場を計算するFETD法は

差分法より地下の 3 次元電気比抵抗構造の任意形状を表現し易く、フーリエ逆変換が不必要かつ非平面波ソースの扱いが容易でこの問題に最適の方法であるが、計算機リソースの問題と歴史的経緯で最も開発が遅れている。2010 年に Um 他は FETD 法による定式化を最も基本となる水平電流ダイポールソース (1. で述べた ACTIVE と同じソース) で発表し、単純な電気比抵抗構造でのシミュレーションを示した。そこで Loop-Loop 法のソースを表現する為、地表面 1 点の鉛直磁気ダイポールと等価な地表の水平電流ダイポールソースを組み合わせる正方形の閉曲線電流ダイポールソースでモデルコードを作成する方針を取った。問題となったのは、線電流のつなぎ目に正負の電流湧き出し・吸い込みを作り、正と負の湧き出し・吸い込みを隣接する微小な有限要素に配置するところであるが、この部分でのコード化が成功しなかった。Farquharson らは、全く同じ考え方で本研究中の 2017 年に周波数領域での有限要素法による Loop ソースによる論文を発表した。しかし論文上で正負の湧き出し・吸い込みのコード上の扱いや、湧き出し・吸い込みの打ち消しが有効になる距離について論文では不明であったので、研究代表者はこの問題点を議論、情報収集する為、Farquharson が参加した学会発表に参加し議論を試みたが、理解できないまま終わった。他にも上記の Um とも電子メールで情報交換し、MATLAB で作成されたプログラムについては民間プロジェクトによる著作権の問題で見せることができないということだった。結果的に本研究で実現されるコードの新しい点は時間領域そのもののコード化であるが、最終的にコードが完成しなかった。計画時に想定できなかったエフォートを割けない事情も重なって結果を出せなかったことを猛省し、上記の情報収集経費以外の未使用分である全期間直接経費の 66%を返還した。

② プリプロセスの有限要素メッシュ作成では、当該プログラムのスタンダードの一つであるフリーの TetGen プログラムを採用し、4 面体要素を用いた有限要素パラメータを入力として採用した。TetGen プログラムについては特に問題なくコードに接続できた。

(2) 図 1 は代表研究者らによって 2014 年の MT 法観測によって得られている蔵王山の地下、海拔 1190 m の電気比抵抗モデル平面図である。暖色になる程低抵抗で赤色の低比抵抗領域が過去の熱水だまりを示唆する熱水変質層であると解釈できる。この北東側の低抵抗体を 0.1  $\Omega\text{m}$  と 100  $\Omega\text{m}$  に変化させる 2 ケースで図中の 100 m のソース正方形に電流 10 A を流し、切断した直後からのレシーバの正方形部分 100 m 四方で期待される時間領域での起電力を計算する計画であった。

(3) (2) を基にして実際に野外で電磁場の伝送実験を実施する予定であった。シミュレーションコードが完成しなかったため、地下を一様分布と仮定して解析解から計算されるレシーバで期待される起電力を計算した。今回解析解を文献調査した過程で TEM 法の理論式として電場のベクトルポテンシャルを用いるものと (Kaufman に代表される旧ソ連派)、ヘルツベクトルポテンシャルを用いる定式化 (Wait に代表される米国派) の 2 つが存在し、最終的な両者の解析解がファクターで異なっていることを確認した。式変形を比較すると Wait の方がよい近似であるが、広く用いられているのは Kaufman の定式化である。今回 Kaufman の式で計算したところ、100  $\Omega\text{m}$  一様の場合、観測される起電力は 1 ms 後で 0.987 mV、10 ms 後で 0.987  $\mu\text{V}$ 、0.1 s 後で 0.987 nV で、10  $\Omega\text{m}$  一様の場合、1 ms 後で 98.7 mV、10 ms 後で 98.7  $\mu\text{V}$ 、0.1 s 後で 98.7 nV の起電力が期待され、十分に既存の計測器で計測が期待される起電力であった。

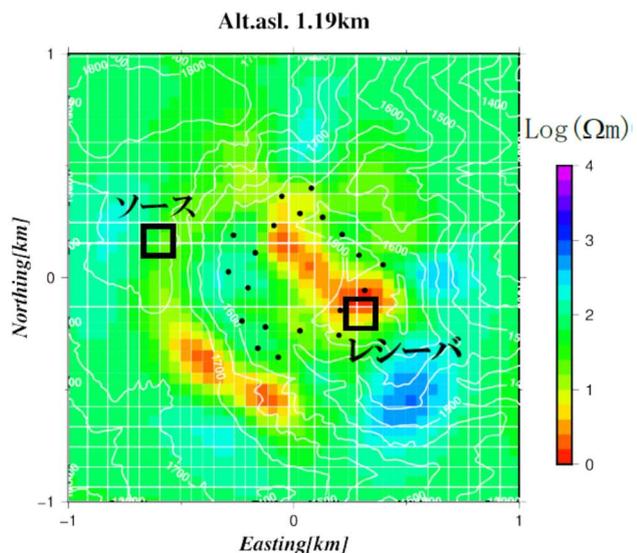


図 1. 蔵王山の海拔 1190 m の地下 3 次元電気比抵抗モデルの平面図。黒の正方形はシミュレーションで想定していた Loop ソースとレシーバの位置。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 市來雅啓, 海田俊輝, 中山貴史, 山本希, 福島洋, 三浦哲
2. 発表標題 吾妻山・安達太良山周辺の地殻電気伝導度構造
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ichiki, M., T. Kaida, Y. Ogawa
2. 発表標題 A 3-D crust and uppermost mantle electrical conductivity model of subduction zone beneath NE Japan
3. 学会等名 The Second International Symposium Crustal Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ichiki, M., T. Kaida, T. Demachi, S. Hirahara, T. Nakayama, M. Yamamoto, S. Miura, T. Moriyama, M. Akutagawa, T. Kobayashi, S. Matsuura, S. Omori, K. Ono, S. Seki, W. Kanda, K. Seki, Y. Ogawa, M. Ushioda, M. Uyeshima
2. 発表標題 Audio-frequency magnetotelluric, and total magnetic intensity observations in 2014-2016, at Zao volcano, NE Japan
3. 学会等名 AGU 2017 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 曾國軒・小川康雄・國友孝洋・深井雅斗・Ted Bertrand・木下雄介・南拓人
2. 発表標題 EM ACROSS experiment at Kusatsu-Shirane volcano
3. 学会等名 平成29年度 Conductivity Anomaly 研究会
4. 発表年 2018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
連携研究者	小川 康雄  (Ogawa Yasuo)  (10334525)	東京工業大学・理学院・教授    (12608)	