

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01926

研究課題名（和文）流体流動電磁法による地下流体のモニタリングシステムの高度化

研究課題名（英文）Sophistication of monitoring system for subsurface fluid flow using fluid flow electromagnetic method

研究代表者

水永 秀樹（Mizunaga, Hideki）

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：40226246

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：資源流体が地下で流動すれば、その流動に応じた流動電流が地下で発生する。また、この流動電流によって誘起される二次的な磁場も発生する。流体流動電磁法は、このような地下流体の流動に起因した電磁場変化から、流体の流動方向を推定しようとする方法である。

この流体流動電磁法を実施するためには、地表面で水平二成分の電場と三成分の磁場を同時に測定する必要がある。そこで本研究では、磁気インピーダンス効果を利用したMIセンサを利用した、流体流動電磁探査用の測定システムを開発した。今回開発した装置では、多点の同時観測用のために測定装置を小型化し、省電力で長期間の測定を実施できるような設計にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流体流動電磁法は、地下の流体流動現象に着目したモニタリング物理探査法である。流体流動電磁法は、地熱流体や地下水のモニタリング、石油の強制回収(EOR)モニタリング、さらには地中に貯留した二酸化炭素のモニタリングにも応用が可能である。本研究で開発した流体流動電磁法探査の測定システムを用いることで、純国産の再生可能エネルギーである地熱エネルギーの安定利用に資することができる。また流体流動電磁法は、二酸化炭素の削減手法の一つであるCCS時の、二酸化炭素漏洩モニタリングにも応用することが可能である。さらには、地すべりなどと関連した地下水などのモニタリングにも適用可能で、防災分野での応用も期待できる。

研究成果の概要（英文）：When resource fluids flow underground, flow currents are generated underground in response to that flow. Secondary magnetic fields induced by the flow currents are also generated. The fluid flow electromagnetic method is a method to estimate the direction of subsurface fluid flow from the electromagnetic field changes caused by such underground fluid flow.

In order to implement this method, it is necessary to measure the two-component horizontal electric field and three-component magnetic field simultaneously at the ground surface. In this study, we developed a measurement system for fluid flow electromagnetic exploration using MI sensors based on the magneto-impedance effect. In the newly developed system, the measuring device is designed to be small enough for simultaneous observation of multiple observation points and to allow long-term measurement with low power consumption.

研究分野：物理探査学

キーワード：物理探査 資源探査 地熱探査 石油探査 資源流体の可視化 流体のリアルタイムモニタリング

1. 研究開始当初の背景

物理探査学の分野では、金・銀・銅・鉄などの鉱物資源や石油・天然ガスなどのエネルギー資源のような、特定の場所に濃集していて“動かない”ものを対象にしてきた。しかしながら、純国産の再生可能エネルギーである地熱資源は、地熱流体(地熱蒸気と熱水)を地下から取り出し、熱を回収した後もう一度地下に戻す循環型のエネルギーである。このような移動を伴う地下資源を効率的に扱うためには、地下流体の動的挙動(時間変化)を正しく把握する必要がある。また、地熱資源に限らず、石油・天然ガスの分野では地下の石油を強制的に二・三次回収する EOR 技術が使われており、この EOR にも地下の石油の流れをモニタリング技術は効率化をもたらす技術となるであろう。さらには、脱二酸化炭素のための二酸化炭素の地下貯留では、地下に注入した二酸化炭素の漏洩モニタリングは、今後の脱 CO₂ 社会においては必要不可欠な技術である。

このような地下資源流体の可視化には、物理探査技術を応用した各種の地下モニタリングが考案されている。しかしながら、重力探査や弾性波探査を用いたモニタリングは、長期の変動に着目したモニタリング法であり、時間スケールは月または年単位である。そこで、分・秒単位のモニタリングを目的として、時間的な応答が速い電気現象に着目した流体流動電位法を開発した。流体流動電位法は、地下流体の流動に伴って発生する流動電流に着目したモニタリング物理探査法である。流体流動電位法の測定システムを開発し、複数の地熱フィールドで調査した結果、定期点検時の大きな地熱流動の変化を捉えることに成功し、地熱貯留層内の地熱流体の時間変化を捉えることに成功した。

流体流動電位法は、地下流体のモニタリングに有効ではあるが、その探査方法には作業上の問題がある。流体流動電位法では、十分遠方の基準電位電極からの電位差を測定する必要があるため、基準電極からの電位線および各測点からの電位線の総延長が、調査領域を広げるほど長くなる。このような流体流動電位法の欠点を克服するため、新しく流体流動電磁法を考案した。しかしながら研究開始当初には、流体流動電磁法探査を実施するための測定装置が存在しなかった。

2. 研究の目的

流体流動電磁法は、地下の資源流体の流動によって生じた電磁場応答を測定して、地下流体の動的挙動を可視化するためのモニタリング探査法である。地下の資源流体、例えば地熱流体などが坑井からの生産や還元のために流動すれば、界面動電現象によって、その流動に応じた流動電流が地下の貯留層内で発生する。また、この流動電流によって誘起される二次的な静磁場も発生する。流体流動電位法が電場変化だけに着目しているのに対し、流体流動電磁法は地下流体の流動に起因した電磁場変化から、流体の流動方向を推定しようとする方法である。図 1 に、流体流動電磁法の測定イメージ図を示す。

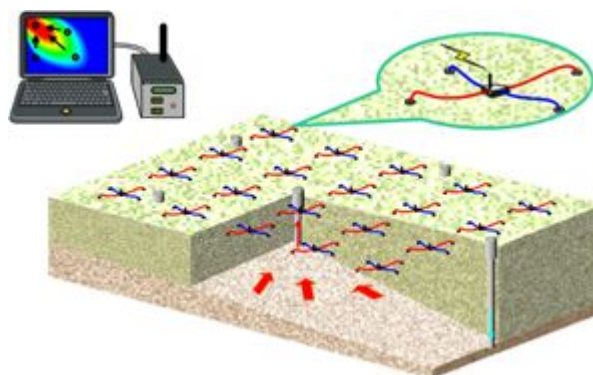


図 1 流体流動電磁法のフィールドでの測定イメージ

この流体流動電磁法を実施するためには、地下流体が存在すると推定される地下の上部にあたる地表で電場 2 成分(東西及び南北方向)と磁場 3 成分(東西、南北及び鉛直方向)を同時に測

定する必要がある。そこで本研究では、磁気インピーダンス効果を利用した次世代の磁気センサである MI センサを利用した、流体流動電磁探査用の測定システムを開発する。流体流動電磁法探査では、地表面での多点の同時観測が必要であるため、測定装置を小型化する必要がある。さらには、長期間の測定が実施可能なように省電力な測定装置を開発する。

3. 研究の方法

本研究では、流体流動電磁法を実施するための小型軽量で省電力な測定装置を目指した測定制御回路の設計を行なった。測定制御回路の主要部分には、SoC (System on Chip)と呼ばれる、CPU・マイクロコントローラ・メモリなどを一つのチップに組み込んだ半導体を利用した。このような SoC タイプの制御 IC を用いることで、流体流動電磁法の計測装置の小型・軽量化が期待できる。また、SoC を使ったことで測定機全体の消費電力を低減することができ、省電力化も達成できる。設計の初期段階では、ブレッドボード上に SoC 型の制御 IC、三軸の MI センサ、データ記録用の SD カードを配置して、試行錯誤しながら測定制御回路の設計を行なった。次に、最終的な測定回路に基づいて専用基盤を作製し、最初の測定機となるプロトタイプ機を完成させた。また、このプロトタイプ機を用いた野外でのテスト実験の結果に基づいて、改良機の設計を行なった。

流体流動電磁法のハードウェアである測定装置の開発と並行して、ソフトウェアの開発も行なった。ソフトウェアの開発では、流体流動電磁法測定で得られる電磁場 5 成分の測定データの時系列処理プログラムを開発した。また、地下の流体流動に伴った流動電流をシミュレーションするために、流体の圧力分布とカップリングした流動電流を計算する、流体流動電磁法のシミュレーションプログラムの開発を実施した。さらに、流体流動電磁法データから、地下の流動電流の 3 次元分布を推定するインバージョンプログラムを開発した。この流動電流の分布を推定することで、地下の流体の動的挙動を 3 次元的に把握することが可能となる。

4. 研究成果

4.1 流体流動電磁法のプロトタイプ機の開発

流体流動電磁法のプロトタイプ機として、次の仕様を満足する設計を行なって試作を実施した。満たすべきハードウェアの仕様は、以下の通りである。

- 1)測定制御には、SoC タイプの半導体を使用する。
- 2)磁気センサには MI センサを利用し、水平 2 成分・鉛直 1 成分が測定できる 3 軸磁場センサとする。
- 3)測定データは、SD カードに保存する。
- 4)サブギガ帯(920 MHz)の無線機能を有する。
- 5)測定回路は一体型として、一つの筐体内に納める。

上記の仕様を満足するように設計して製作したプロトタイプ機の写真を、図 2(左)に示す。この写真で右下角部が、測定制御を担当する SoC 型の IC である。この IC では AD 変換機能を有しているため、次の磁場センサや電場センサからのアナログ信号をデジタル信号に変換できる。次に左上角部が、3 つの MI センサで構成された 3 軸磁場センサである。この磁場センサの感度は mV/nT となっている。また、左上角部が測定データを記録する SD カードである。この SD カードには、固定したサンプリング周期で取得した電場 2 成分、磁場 3 成分の同時測定データが、デジタル変換された後に記録される。最後に左下角部がサブギガ無線用の制御回路で、測定機(子機)と測定制御 PC(親機)間での通信が可能となる。



図 2 三軸磁場センサを内蔵した流体流動電磁法の測定装置の測定回路(左)とプロトタイプ機を用いたフィールド実験の様子(右)

図 2(右)は、このプロトタイプ機をフィールドでテストした時の測定風景である。筐体の外部に出ている赤・青のターミナルコネクタは、南北・東西方向の電場センサを接続するためのものである。このテスト実験は、福岡市西区にある九州大学伊都キャンパス内の湧水源である幸(さや)の神に隣接する場所で行なった。この時のテスト実験で得られた時系列データの一例を図 3 に示す。図 3 には、サンプリング周波数 1 Hz で取得した磁場と電場の時系列データが表示されている。この時、電場および磁場は小さな変動を繰り返しながらも、安定した値で推移していることがわかった。この結果、プロトタイプ機で磁場 3 成分と電場 2 成分を、安定的に測定して記録することができることを確認できた。

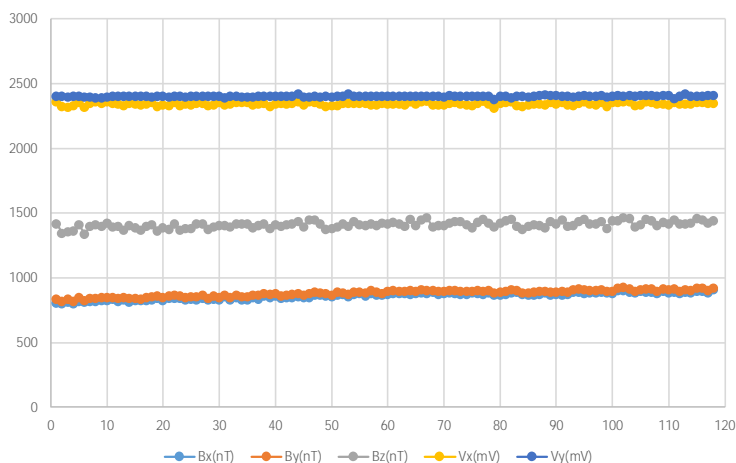


図 3 プロトタイプ機を用いた測定結果(磁場 3 成分と電場 2 成分)

4.2 プロトタイプ機の改良機の開発

プロトタイプ機の評価結果を踏まえて改良機を設計し試作を実施した。プロトタイプ機とその改良機の基本的な仕様は等しいが、高性能化を目指し改良した点は以下の通りである。

- 1)測定回路や制御回路、電源回路のすべての機能を 1 枚の基板に集約し、小型化を実施した。
- 2)高感度の磁気センサである MI センサは、回路部からできるだけ離れた位置に配置した。
- 3)電場 2 成分および磁場 3 成分のサンプリング周波数を最大 1 kHz に向上した。
- 4)長時間の測定を考慮し、省電力化を行った。

上記の改良を行い設計して製作したプロトタイプ機の改良機の写真を、図 4(左)に示す。この写真から、基板下半分に主要な回路が集積されていることがわかる。回路からの自己ノイズを低

減するために、回路と距離を離して基板最上部に高感度な磁場センサを配置した。



図 4 流体流動電磁法のプロトタイプ機の改良機の測定回路(左)とプロトタイプ機を用いたフィールド実験の様子(右)

図 4(右)は、このプロトタイプ機の改良機をフィールドでテストした時の測定風景である。このテスト実験は、プロトタイプ機のテスト実験を行った場所と同一の九州大学伊都キャンパス内の湧水源である幸(さや)の神に隣接する場所で行なった。防水シートの上に 12V バッテリーと改良機を設置し、測定時は防水シートを二つ折りして雨水や落葉などを防いだ。改良機は水平器で水平を確認して配置し、川の流れの方向に磁場センサの x 軸を合わせた。測定開始時と終了時のみパソコンから制御を行った。筐体の外部に出ている赤・黒のターミナルコネクタは、改良機の奥に配置した 12 V バッテリーから電力を供給するためのものであり、赤・青の 2 対のターミナルコネクタは、南北・東西方向の電場センサを接続するためのものである。この時のテスト実験で得られた時系列データの一部を図 5 に示す。

図 5 には、サンプリング周波数 1 kHz で取得した電場と磁場の時系列データの一部(10 秒間)が表示されている。この時、 x 方向と y 方向の電場は同期した変化を示していることがわかる。磁場は小さな変動を繰り返しながらも、安定した値で推移していることがわかった。この結果、プロトタイプ機の改良機では、磁場 3 成分と電場 2 成分の細かな変動を高精度かつ安定的に測定して記録することができることを確認できた。

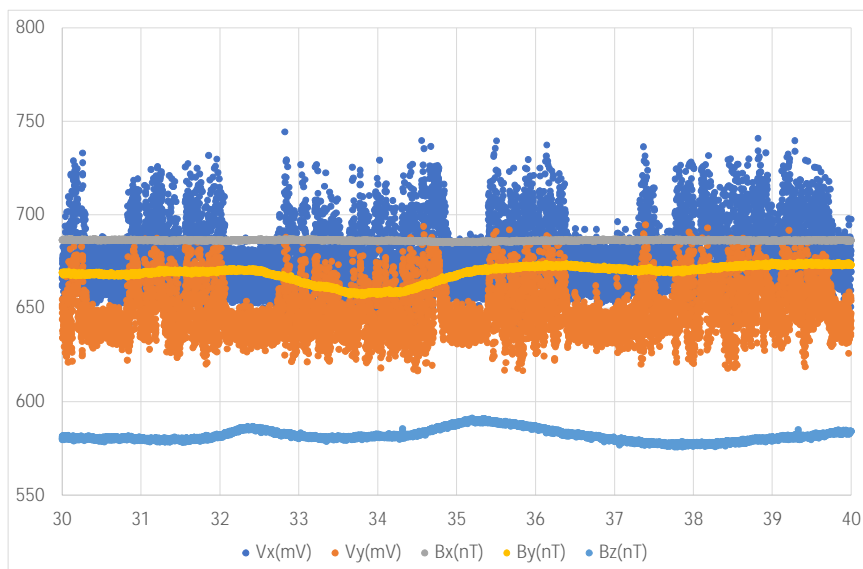


図 5 プロトタイプ機の改良機を用いた測定結果(電場 2 成分と磁場 3 成分)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Hao Chen, Hideki Mizunaga and Toshiaki Tanaka
2. 発表標題 Robust impedance estimator based on Hilbert-Huang transform to time series magnetotelluric data
3. 学会等名 物理探査学会第143回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tumbu LUCAS, Hideki MIZUNAGA
2. 発表標題 Dimensionality and Directionality Analysis of MT Data to Geothermal Systems in Kiejo-Mbaka Geothermal Field, South-West Tanzania
3. 学会等名 物理探査学会第140回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mohammad SHEHATA, Hideki MIZUNAGA
2. 発表標題 Three Dimensional Subsurface Resistivity Imaging of the Western USA Retrieved from Magnetotelluric Inversion
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

1. 発表者名 水永秀樹, 田中俊昭, マリヤディ
2. 発表標題 電磁地質温度計を用いた地下深部温度の推定
3. 学会等名 日本地熱学会・令和元年熊本大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水永 秀樹, 田中 俊昭
2. 発表標題 流体流動電磁法の3次元スパースインバージョン
3. 学会等名 物理探査学会第139回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中 俊昭, 水永 秀樹
2. 発表標題 流体流動電磁法測定システムの改良
3. 学会等名 物理探査学会第139回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水永 秀樹
2. 発表標題 物理探査データのスパースインバージョン
3. 学会等名 物理探査学会ワンデーセミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水永 秀樹, 田中 俊昭, 星野 剛右, 岡本 駿一
2. 発表標題 流体流動電磁法による地熱貯留層モニタリング
3. 学会等名 日本地熱学会平成30年学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星野 剛右, 岡本 駿一, 田中 俊昭, 水永 秀樹, 窪田 健二, 鈴木 浩一, 海江田 秀志
2. 発表標題 流体流動電磁法の測定機開発と注水モニタリング実験
3. 学会等名 物理探査学会 第138回学術講演会
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
研究協力者	田中 俊昭 (Tanaka Toshiaki) (90294892)		

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
---------	---------