

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 24日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360381

研究課題名（和文） 流体流動電磁法による地下流体の可視化

 研究課題名（英文） Visualization of 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

研究成果の概要（和文）：石油・天然ガスや地熱流体の動的挙動を可視化するため、流体流動に伴って発生する電磁気現象に着目した流体流動電磁法を考案した。流体流動電磁法は界面動電現象によって生じた電磁場の時間変化を、地表面で多点同時観測して地下の資源流体の動的挙動を把握するモニタリング探査法である。本研究では、電場2成分と磁場3成分を測定するための計測機器と、得られた観測データから地下の資源流体の流動方向を推定するための解析プログラムを開発した。

研究成果の概要（英文）：In order to visualize dynamic behaviors of subsurface fluid, Fluid Flow Electromagnetic method that observe transient electromagnetic due to electrokinetic phenomenon was invented. This method is based on the simultaneous observation of the transient changes of both electric and magnetic fields. In this research, measurement equipment for measuring two components of electric field and three components of magnetic field and the data analysis program for estimating the flow direction of subsurface fluid from the observed data were developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2011年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	9,900,000	2,970,000	12,870,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学 地球・資源システム工学

キーワード：資源探査, 物理探査, 電磁探査

1. 研究開始当初の背景

EORによる石油の増回収を効率的に行なうためには、貯留層内での石油・天然ガス等の動的挙動を物理探査技術によりリアルタイムに把握する必要がある。また、地熱発電を

安定かつ継続的に実施するためには、地熱貯留層内の地熱流体の動的挙動を把握する必要がある。従来の資源流体のモニタリングには、坑井内の温度・圧力データが用いられているが、流体の流動に伴う温度・圧力の時間

応答は緩やかであるため、リアルタイム(または短時間)でのモニタリングには不向きである。この問題を克服して地下深部の貯留層内の流体の時間・空間変化をリアルタイムに監視する方法として、地下流体の流動に伴って瞬時に現れる電気現象(流動電位)に着目した流体流動電位法という4次元電気探査法を考案し、世界に先駆けて研究開発し実用化した。この方法は、高温岩体発電のための地下亀裂面の評価、カナダオイルサンドの水蒸気攻法のモニタリング、地熱発電所の地熱貯留層モニタリング、天然ガスフィールドでの地下水還元井のモニタリングなどに応用され、優れた成果を挙げている。

しかし、流体流動電位法では、調査地域に設置された多点の観測電位電極と遠方にある基準電位電極との電位差(人工電位および流動電位)を同時に計測する必要があるため、大量の多芯ケーブルが必要で、野外計測の作業性の点で問題となっている。また、地下流体に伴って流動電流が発生すれば、流動電位のみならず流動電流にカップルした磁場も発生するが、現在の流体流動電位法では磁場情報は考慮されず、計測されていない。しかしながら、従来の電場データに加えて磁場データが取得できれば、これまで以上に高精度の地下流体可視化期待できる。そこで、これまでの流体流動電位法を発展させ、各測点で磁場3成分および電場2成分の多点同時観測を行う新しい地下流体のモニタリング探査法である“流体流動電磁法”を考案した。

本研究の実施に先立ち、鹿児島県指宿市の山川地熱発電所周辺の地熱地域において、流体流動電磁法の基礎実験を実施した。その結果、地熱水の還元に伴う流体流動によって生じる流動電位を観測すると共に、流動電位の発生に同期した磁場変化を観測することができた。

2. 研究の目的

石油や地熱流体などが地下で流動すると、流体-岩石間の界面動電現象によって電荷の不均衡が生じ、流動電流が発生することが知られている。この流動電流によって電場および磁場変化が生じるので、地表面で電磁場の観測を行い、地下の流動電流の方向が推定できれば、その原因である地下流体の流動方向が推定できる。図1に地下流体の流動に伴って発生する電磁場の概念を示す。

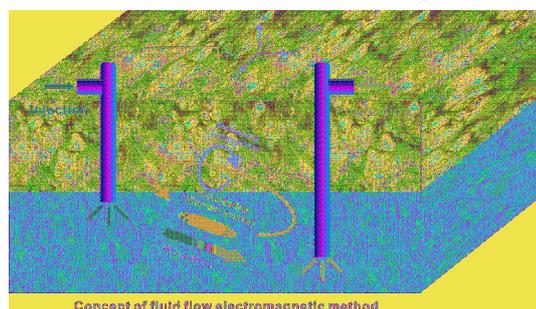


図1 地下流体の流動によって生じる電磁場

地下の流体流動に伴って発生する電磁場変化に着目した流体流動電磁法は、全く新しい概念の探査法であるため、探査方法の基礎理論の研究や探査機器に関する研究がこれまで殆ど行われていない。本研究では、地下の資源流体の流動に伴う電磁場変化を地表面で観測するために測定機器の開発と、測定で得られた電磁場データから地下の流動電流の方向を推定して地下流体の流動方向を推定するためのデータ解析法の開発を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、電場と磁場を多点同時観測するための計測システムの設計および試作を行う。電場と同時に多点の磁場計測を行うためには、小型で高性能な磁場センサが不可欠となる。現在市販されているインダクション

コイルやフラックスゲート磁力計などの磁場センサは、測定精度は高いものの大きさや重量の点では野外計測向きとは言えない。本研究では、野外計測向きの磁場センサとして、磁気インピーダンス効果を利用した小型軽量の磁気センサを使って、電場と磁場の同時観測ができる流体流動電磁法の計測システムを開発する。

地下の資源流体の流動に伴って発生する流動電流は多くの場合、図1に示したように地下流体の流動元の正電荷から流動先の負電荷へと流れる。データ解析の研究では、この正負の電荷を想定した点電流源が存在する流動電流モデルを基にして、シミュレーションやインバージョンの研究を実施する。

4. 研究成果

(1) 流体流動電磁法の測定では、調査対象領域に広範囲に多数の測定機を配置する必要がある。各測定点に設置された測定機で、直交する電場2成分と磁場3成分を同時に測定する(図2)。各測定点の測定値を時刻同期するために、精度の良い半導体リアルタイムクロック(RTC)を内蔵し、電場と磁場を測定した時刻を記録する。測定された電場2成分と磁場3成分は複数回の測定分をまとめてZigBeeによって構成されたワイヤレスセンサーネットワークにより、測定本部に設置した測定制御装置へ定期的に送信される。図3に今回の研究で開発した測定ユニットの外観を示す。

測定ユニットは防水性のプラスチック製ケースで密閉構造とし、内蔵する電子回路を結露から保護するよう工夫した。直交する電場を測定するための電線を接続するターミナルは、本体前面に4本配置した。電場2成分の測定は、測定点近傍に直交する2方向に測線を設け、地表に接地した非分極電極また

は耐食性に優れたステンレス電極により電位差を測定する。

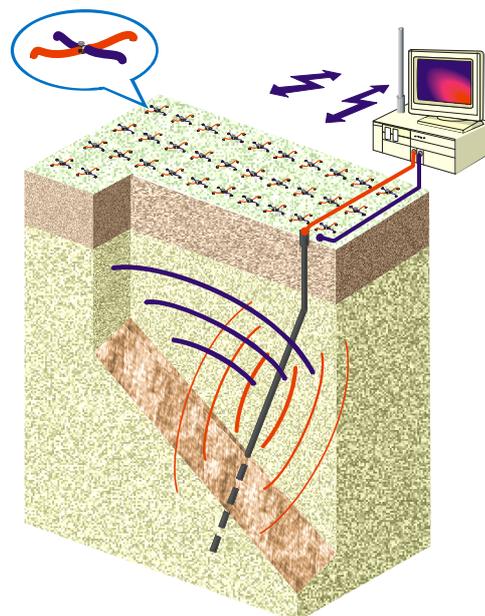


図2 流体流動電磁法の測定イメージ



図3 測定ユニットの外観

磁場センサとして、フラックスゲート磁力計と同程度の感度を有し、小型で安価な磁場センサとして近年注目されているMI磁場センサを採用した。MT法に用いられるインダクションコイルは大型で重く、磁気探査に用いられるフラックスゲート磁力計では高価であるために、多点で同時計測することを念頭に作業性やコストを考慮すると、多数の測定点のすべてに配置するには適さない。そこで、アイチマイクロインテリジェント製ナノテ

スラセンサを3個使用し、小型の3軸磁気センサを製作した。ナノスラセンサは、感磁方向が基板長手方向と直交方向の2種類があり、基板長手方向1個と直交方向2個を組み合わせることで、3軸磁気センサが小型になるよう工夫した。

アイチマイクロインテリジェント製ナノスラセンサは、地球磁場をキャンセルするためにカットオフ周波数が極めて低い0.1Hzのハイパスフィルタを内蔵している。このセンサの周波数特性は約1Hzから約300Hz程度までフラットである。消費電流は1軸あたり10mAと低消費電流であることから、バッテリー内蔵の測定ユニットで長期間の測定に適していると考えられる。

精度の高い測定を行うためには、ノイズ環境に適応したノイズ除去が必要不可欠である。そこで測定器には回路特性を動的に変更可能なアナログデジタル混在の集積回路であるCypress Semiconductor社製PSoC1を採用し、主要な回路を構成した。PSoC1ではパソコンなどにより外部から情報を送信することで、ノイズ除去フィルタの周波数特性やアンプのゲインなどを任意に変更可能である。また、ソフトウェアを内蔵しているので、ノイズ環境に合わせたフィルタ特性の動的な変更なども可能である。

測定時刻は、各測定点における電場と磁場の変化を同期させるために重要な情報である。測定対象とする電場と磁場の周波数が高くなるほど精度の高い測定時刻が要求される。消費電流が大きなGPSの電波を受信するモジュールはすべての測定点に配置するには適さない。そのため、できるだけ省電力である一方で精度の高い半導体時計であるRTCを各測定ユニットに内蔵した。消費電力が大きなGPSモジュールは、電源容量の制限がない測定本部の測定制御装置に設置した。本研

究で採用したRTCの精度は、誤差 ± 2 ppmであり、年間1分、月間5秒程度の誤差に相当する。

ZigBeeによって構成されたワイヤレスセンサーネットワークでは、測定点から測定本部へ直接電波が届かない離れた場所でも、図4のように調査対象地域に広範囲に測定点を配置することにより、隣接測定点間で通信を中継し、測定本部まで測定値を送信することが可能である。また、資源流体の動的なアノマリの移動に対しても展開する測点を測定中も動的に追加や移動が可能である。

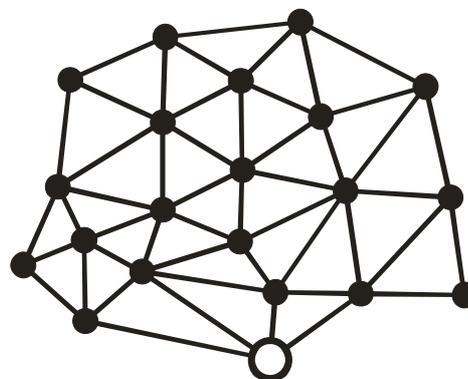


図4 ワイヤレスセンサーネットワークの一例
(○測定本部, ●測定点)

高性能な最新の半導体を利用することで、低コストかつ低消費電力の測定ユニットを開発することができた。また開発した測定ユニットを、ワイヤレスセンサーネットワークを利用して相互通信することで、流体流動電磁法を実施するための測定システムを構築することができた。

(2) 流体流動電磁法で取得される電磁場データから、地下流体の流動方向を推定するための基本的なモデルとして、一定の比抵抗値を持つ等方均質な半無限媒質中に複数の電流源が存在するモデルを考えた。均質大地に埋設した点電流源によ

る電位は理論的に求められるので、この理論電位式を x 方向と y 方向に偏微分することで水平 2 方向の電場の理論式を導出した。磁場については、地下の点電流源と等価な地上の線電流源を考慮することで理論式を導くことができる。

これらの理論式を用いて、流体流動電磁法の 3 次元シミュレーションプログラムを開発した。また、3 次元シミュレーションプログラムを基にして、観測データから電流源の 3 次元位置を推定するインバージョンプログラムを開発した。インバージョンプログラムには、非線形最小二乗法でよく用いられるマルカート法のアルゴリズムを採用した。図 5 にマルカート法を用いた 3 次元インバージョンプログラムのフローチャートを示す。

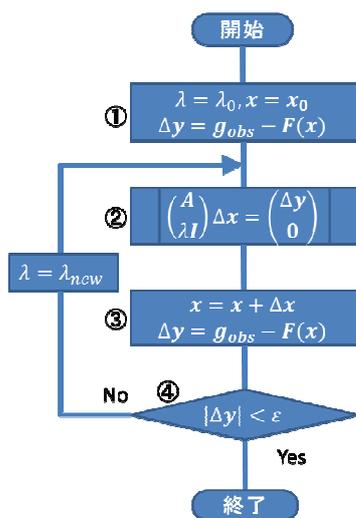


図 5 3 次元インバージョンのフローチャート

3 次元インバージョンに用いた 3 次元モデルを図 6 に示す。インバージョンの解析領域は、 X 方向が -1000m から 1000m までの 2000m 、 Y 方向が -1000m から 1000m までの 2000m 、 Z 方向が 0m から 1000m までの 1000m 、という直方体の領域となる。正または負の符号を持つ電流源は解析領域中に任意の個数設定できる。流体流動電磁法で求める未知パラメータ

は、各電流源の大きさと 3 次元位置である。今回開発したプログラムでは、比抵抗も未知パラメータとしてインバージョンで求めることができる。

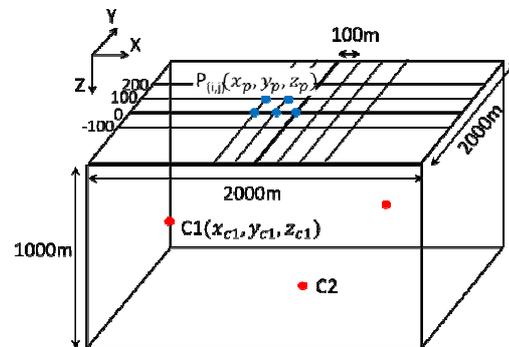


図 6 流体流動電磁法の 3 次元モデル

数値実験の手順は以下の通りである。まずインバージョンに用いる人工的な観測データを作成するため、電流源の強さや位置などの必要なパラメータを設定してシミュレーションを実施し、電場と磁場を計算した。シミュレーションで得られた計算結果には、ガウスノイズを付加して観測データを作成した。次に、地表面の全ての電磁場データを用いてインバージョンを実行し、パラメータの収束性、真値との相対誤差、残差二乗和などを比較検討した。

データに含まれるノイズの影響を検討するため、ノイズを加えないデータと 10%, 30%, 50%のガウスノイズを付加したデータを用いて数値実験を実施した。ノイズを含まないデータを使用した場合、電流値およびその位置座標などは真値とほぼ一致した。それに対して 10%, 30%, 50%のガウスノイズを付加した場合は、ノイズが大きくなるに連れて真値との相対誤差は増えるものの、すべてのパラメータを良好な範囲で求めることができた。図 7 には 30%のガウスノイズを加えた場合の x 方向の電場分布を示す。緑の実線がノイズ付加後の電場分布で、破線で描いたノイズ無し

のデータからかなり歪んでいることがわかる。図8はインバージョンで求めたパラメータを用いて再計算したx方向の電場分布である。この図を見ると、電流源の大きさや位置が正しく求められたため、実線の電場分布が破線の実際の電場分布とほぼ一致していることがわかる。

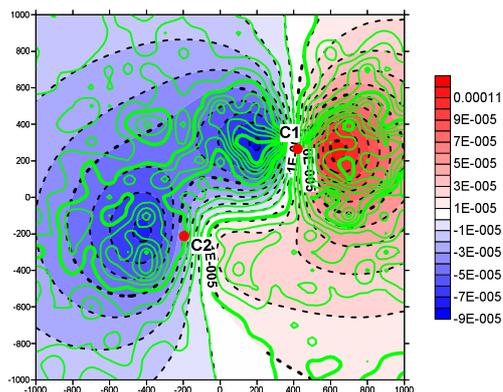


図7 x方向の電場分布
(30%ガウスノイズを含む電場分布)

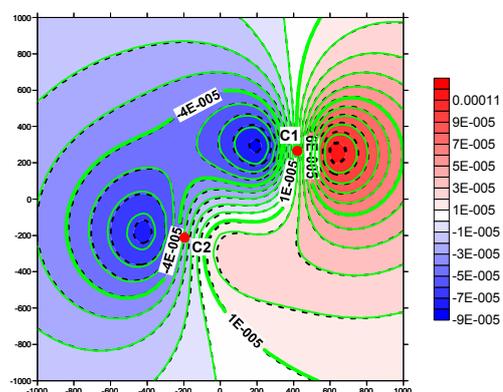


図8 x方向の電場分布
(インバージョンで求めた電場分布)

本研究では、流体流動電磁法のデータ解析として、地表面で観測された電場・磁場から、地下の流体流動に起因する電流源の分布を求めるインバージョンプログラムを開発した。このインバージョンプログラムを使用して、ノイズの大きさによる解析精度の違いを比較検討した。その結果、標準偏差50%以下と大きなガウスノイズを付加した場合

でも、真値の近傍となる解析結果が得られた。このことから、流体流動電磁法は観測ノイズに強い探査法であることが確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1件)

- ① 田中俊昭, 水永秀樹, 流体流動電磁法のためのワイヤレスセンサーネットワークを用いた多点同時計測システムの開発, 物理探査学会第127回学術講演会論文集, 査読無, 2012, 239-241

[学会発表] (計 5件)

- ① 田中俊昭, 水永秀樹, 流体流動電磁法のためのワイヤレスセンサーネットワークを用いた多点同時計測システムの開発, 物理探査学会第127回学術講演会, 2012.11.29, 鳥取市
- ② 水永秀樹, 田中俊昭, 流体流動電磁法3次元インバージョン, 日本地熱学会平成24年学術講演会, 2012.10.25, 秋田県湯沢市
- ③ 田中俊昭, 水永秀樹, 流体流動電磁法による地熱流体挙動のモニタリングのための多点測定システムの開発, 日本地熱学会平成23年学術講演会, 2011.11.10, 鹿児島県指宿市
- ④ 田中俊昭, 水永秀樹, 流体流動電磁法による地熱流体モニタリングのための測定システムの開発, 日本地熱学会平成22年学術講演会, 2010.11.26, つくば市
- ⑤ 水永秀樹, 田中俊昭, 流体流動電磁法のシミュレーション, 日本地熱学会平成22年学術講演会, 2010.11.26, つくば市

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

田中 俊昭 (TANAKA TOSHIAKI)
九州大学・工学研究院・助教
研究者番号: 90294892