

平成 21 年 4 月 30 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760044

研究課題名（和文） MI センサーを応用した高感度ベクトル磁力計の開発

研究課題名（英文） Developing a high-sensitivity vector magnetometer using the magneto-impedance (MI) sensor

研究代表者

氏名（アルファベット） 小河勉(OGAWA Tsutomu)

所属機関・所属部局名・職名 東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：00345175

研究成果の概要：

工業用磁気センサーとして用いられている磁気インピーダンス(MI)センサーを、地磁気測定用高感度ベクトル磁力計へ応用すべくその開発を試みた。思索した磁力計から得られた結果は、地磁気の主磁場に対しては感度を持った出力が得られたものの、日変化や地磁気擾乱などの微小な地磁気変化の検出には至らなかった。ただし MI センサーの地磁気測定用磁力計への活用方法にはなおも追求すべき課題が複数存在することが具体的に判明した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	900,000	0	900,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,400,000	150,000	1,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物理学一般

キーワード：電磁気

1. 研究開始当初の背景

(1)火山噴火や地震などの地殻活動の際には、ピエゾ磁気効果や熱磁気効果、流動電位などの物理過程を介して地磁気の変化が期待される。地殻活動域における磁力計の精力的な展開によって、震源断層近傍や群発地震域、活動的火山の周辺における観測的研究により、地磁気全磁力の異常な変化が検出されており、地磁気変化からは、応力変化や熱、流体移動など、地震観測や地殻変動観測からは得られない、もしくは相補的に解釈しうる物理情報の推移を推定し、一連の地殻活動の総合的解釈に資することが期待できる。

(2)しかし、地磁気観測が地震観測や地殻変動観測と大きく異なる点は、その観測点分布の著しい疎らさにある。全国的な連続観測網の観測点数を比較すれば、地震観測では防災科学技術研究所の高感度地震観測網は約 800 点、地殻変動観測では国土地理院の GPS 連続観測網は約 1200 点に対し、地磁気連続観測は国土地理院による 11 点と国土地理院及び気象庁地磁気観測所による観測所計 6 箇所が展開されているに過ぎない。

(3)磁力計の展開が疎である背景には、常磁

性体の磁化の飽和現象を応用したフラックスゲート (FG) センサーを用いたベクトル磁力計が高価なためであり、地震観測や測地観測と同水準の空間分解能をもつ地磁気変化の観測的研究において、同時多点観測のための廉価で高感度なベクトル磁力計の開発は不可欠な課題である。

2. 研究の目的

本研究は、磁性体にかかる磁場に応じてそのインピーダンスが変化する磁気インピーダンス (MI) 効果を応用した MI センサーを用いた、高感度ベクトル磁力計の開発を目的とする。開発するベクトル磁力計の性能の目標は、分解能は 10pT、サンプリング周期は 1 秒とする。廉価に多数製造できることを目指した。

3. 研究の方法

(1) 開発予定の磁力計をセンサー部と記録部とに分け、市販されるセンサー部の試験を初年度に、また記録部の開発とセンサー部と記録部の結合とを第 2 年度に実施した。

(2) センサー部の最も重要な特性である、磁場への感度と温度特性とを、地磁気観測が実施されている観測所における測定試験により明らかにし、記録部の開発の際にその特性を考慮した記録部開発を進める。

(3) 記録部の開発ではセンサーの特性を考慮した上で、目標の仕様が達成できるよう工夫する。

4. 研究成果

(1) 市販の MI センサー (内橋エステック (株) 製) を用いた地磁気測定用磁力計は未開発であり、本研究がその最初の試作である。そのため、本研究ではまず、1nT の感度が得られないとのメーカーによる事前の確認を踏まえ、センサーの線形化・安定化のための負帰還回路を弱めることにより、センサーの利得を市販一般の物よりも 10 倍向上させたセンサーサンプルを用いて、磁場への感度試験を行った。その結果、併置したアナログ温度センサーよりも温度への感度が高いセンサーとなること、地磁気変化に対応するアナログ出力が得られないことが分かった。温度センサーを用いた、MI センサーのアナログ出力の温度補正が精度的に不可能となり、負帰還回路の弱化による感度向上は断念した。なお、同試験により MI センサーからは 1 秒以下の周期の高周波ノイズがアナログ出力に含まれることが判明した。

(2) 市販の MI センサーの感度の向上のために、入力段に時定数が秒オーダーになる RC ロー

パスフィルターを挿入するとともに、24 ビット型 AD 変換器のオーバーサンプリングによるノイズレベルの低減を試みた。AD 変換器には 型でも、バックグラウンドキャリアレーションにより通常の 型 AD 変換器であれば逐次蓄積されていくカウント誤差がその都度キャンセルされる機能を持った AD7714 を採用した。AD7714 が内蔵する Sinc³ フィルターとローパスフィルターとにより、高周波ノイズが更に低減されることを期待した上で、2Hz サンプリングの 2 秒平均値を每秒値とする演算を記録部内で行い、電波時計 ((有) トライステート製) と同期したデジタル出力を PC 等に RS232 出力する記録部を完成させた。

(3) 完成した磁力計の写真は次のとおりである。

右はセンサー部を東大地震研究所八ヶ岳地球電磁気観測所の絶対観測室内、磁気儀台上に設置したものである。

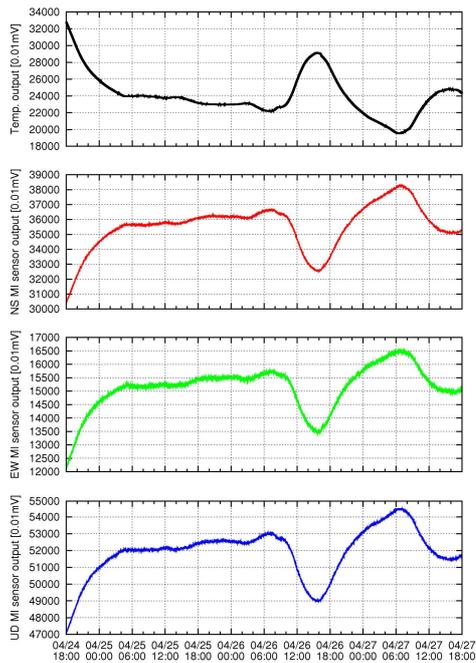
センサー部を拡大した写真が右及び右下である。AD 変換器を含む基板をセンサー部の筐体中に同梱し、3 方向に向けた MI センサーとの間はアルミ板によって高周波ノイズをシールドする構成とした。さらにセンサー部の筐体内には温度センサーも同梱し、都合 4 成分のアナログ信号を AD 変換して記録部へ RS232 レベルのデジタル信号で記録部へ送信するセンサー部を構成した。

記録部の写真が右である。電波時計のアンテナ (右上)、記録部の演算部 (中央) と記録用 PDA (その左) によって構成される。

(4) 本研究で製作した磁力計で得られたデータを以下に示す。MI センサーを用いて製作された地磁気測定用の磁力計の、公表されたデータは現時点で存在しない。3 軸の直交性やセンサーのオフセット値、感度などは未調整である。

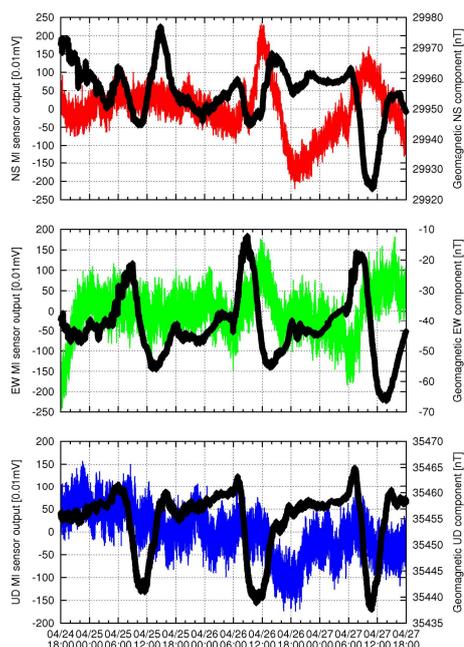
下図は 4 月 24 日から 27 日までの、上から順に、温度センサー (黒)、MI センサー南北成分 (赤)、同東西成分 (緑)、同鉛直成分 (青) の出力をプロットしたものである。一見して、MI センサーの出力が温度センサーの出力と明瞭な相関を持つことが見出され、現時点で





は地磁気データとの比較には及ばない。ただし、温度センサーと MI センサーの温度変化に対する感度の相違に留意する必要がある。温度変化に対し、温度センサーの出力に比して MI センサーの出力は感度が低い。よって温度センサーの出力を用いて MI センサーの温度係数を相応の精度で決定することが原理的に可能になる。そこで、MI センサーの出力から温度と相関のある成分を除去し、各成分の同時刻の地磁気三成分と比較した図を次に示す。

下図は上から順に、温度と相関のある成分を除去した、MI センサー南北成分（赤）、同東西成分（緑）、同鉛直成分（青）の出力に、



同観測所のフラックスゲート磁力計の南北、東西、鉛直成分（いずれも黒）を重ねてプロットしたものである。測定した3日間において、水平成分の振幅はピーク間で約60nT、鉛直成分で約30nTであるが、これらと明瞭な相関のある MI センサーの出力は見られなかった。

磁気儀台上でセンサー筐体を鉛直軸の周りに水平回転させると、南北成分のセンサー出力は平均値 $\pm 100\text{mV}$ 程度の範囲で変化した。これがセンサーの感度すなわちおよそ $100\text{mV}/30000\text{nT}$ であるならば、地磁気南北成分の60nTの変化に対して0.2mVの変化を MI センサーの出力として検知せねばならない。よって、本研究で試作した、MI センサーを応用した磁力計では、およそ日単位では $\pm 200\text{mV}$ 程度（地磁気的全強度に対応する MI センサーの出力電圧に相当する）常時 $\pm 50\text{mV}$ 程度重畳するノイズを除去しなければ、地磁気変化を MI センサーで捉えるのは困難であることを示唆している。したがって所期の目標であった10pTの分解能をもつベクトル磁力計の開発には、 $0.03\mu\text{V}$ の分解能で MI センサーの出力電圧を計測する必要がある。MI センサーの出力ノイズの低減がその最初の課題となることが判明した。同時に、AD変換器が10nVオーダーの電圧値を正しく測定するには多くの困難が想像される。

温度センサーの出力のAD7714による取得は極めて安定であり、高周波ノイズは含まれないことを確認した。これは、温度センサーへの電源供給・アナログ信号受信用のケーブルの接続先（センサーからの出力信号がRCフィルターとAD変換器に入力される）を、MI センサー用の接続先に接続して、温度センサーの記録を取得しても高周波ノイズが混入しないことが確認できたことによる。このことは同時に、MI センサーの出力信号のAD変換回路が正常に稼働していることも示唆している。よって本結果が示す、地磁気と相関のない MI センサーの高周波ノイズは MI センサー起源であることが確認された。

高周波ノイズの原因として、MI センサーへのDC電源供給に含まれるAC成分に着目し、その低減を、バイパスコンデンサーの強化により試みた。しかし、センサー自体が入力電源に対してバイパスコンデンサーを持っており、ノイズレベルの本質的な低減を結果としてもたらずことにはならなかった。

(5)本研究により、MI センサーを応用したベクトル磁力計開発の今後の課題は、いくつかの方向に整理されることが示唆された。

センサー出力に含まれる高周波ノイズには、センサーの筐体に基板を同梱した影響を考慮する必要がある以前に、MI センサーの原理に起源を持つ高周波ノイズが含まれてい

る可能性がある。センサーヘッドとセンサー駆動回路（センサーヘッドと半田付けされている）との間にシールドを配置し、その効果を検討する余地がある。

10pTの分解能をもつ毎秒値のベクトル磁力計開発を既存のMIセンサーの感度で試みるには限界がある。他方、MIセンサーの原理的制約により、感度を向上させるには負帰還回路の弱化を不可避とし、センサーとしての安定性、線形性を損なう原因となる。廉価なベクトル磁力計の開発をMIセンサーを用いて引き続き継続するためには、次のような判断を要することが示唆された。

i)分解能を、広く用いられる全磁力測定用プロトン磁力計や通常の地磁気測定用ベクトル磁力計であるFG磁力計と同様、0.1nT(100pT)に許容する。

ii)実効的毎秒値の取得を断念し、国際的・国内的に標準的なサンプリング間隔である毎分値の精確な取得へと方針を切り替える。上記i)、ii)のいずれかもしくは両方の採用を経て、毎秒値の2分平均値を毎分値に換算する、あるいは10秒オーダーの時定数を持つアクティブフィルターを入力段に取り入れることなどにより、ランダムノイズの影響は約1桁低減される可能性がある。

MIセンサーの感度の向上もしくはノイズレベルの低減自体に限界があるならば、センサーを高透磁率物質を用いて囲み、同物質による地磁気のセンサー周辺における強化を実施し、強化された地磁気をMIセンサーで測定させることにより、出力電圧の向上を図りこれを計測することは可能である。ただし高透磁率物質は透磁率が温度に依存して大きく変化するため、温度補正もしくは恒温化に更なる注意を要する。

(6)以上の工夫により、MIセンサーを応用した廉価なベクトル磁力計開発は引き続き進展が期待される。

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 0件)

〔学会発表〕(計 0件)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

小河 勉(OGAWA Tsutomu)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号：00345175

(2)研究分担者

(3)連携研究者