

南ロシア製トーシヨン型磁力計の較正試験および動作試験

後藤 忠徳*¹ 佐柳 敬造*² 三ヶ田 均*¹ 長尾 年恭*³

本研究では東海大学地震予知研究センターと共同で新たに開発した、海底用磁力計の試験結果を報告する。今回試作したものはロシア製トーシヨン型磁力計であり、従来のものを元にして、海底用に改良が加えられている。そのサイズは250×50×50mmであり、小型の耐圧容器に十分収まるポータブルなものである。

試作したトーシヨン型磁力計を用いて、気象庁柿岡地磁気観測所において直流・交流磁場較正試験を行った。その結果、周期数十秒以下の長周期については、安定して磁場を記録できることがわかった。一方、交流成分については、周期40秒よりも短周期側では、磁力計の出力信号に位相おくれが生じることが分かった。

次に磁力計の長期安定性を調べるために、東京大学地震研究所八ヶ岳地球電磁気観測所において約1週間の長期安定性試験を行った。その結果、トーシヨン型磁力計には温度変化に伴う出力電圧変動が顕著であることが分かった。温度変化の影響を補正した結果、トーシヨン型磁力計によって得られる磁場変動は、八ヶ岳観測所で記録された物にほぼ等しく、両者のずれは最大で数nT程度であることが分かった。これらの試験結果を踏まえ、海底磁力計の改良に今後取り組む予定である。

キーワード：トーシヨン型磁力計、較正試験、八ヶ岳、柿岡、地磁気

Calibration and Running Test of Torsion Magnetometer made in Russia

Tada-nori GOTO*⁴ Keizo SAYANAGI*⁵ Hitoshi MIKADA*⁴ and Toshiyasu NAGAO*⁶

A new torsion magnetometer for ocean bottom observations is developed. This magnetometer, made in Russia, has low power consumption and small size, and will be applicable to ocean-bottom cable observatories.

We calibrate this new magnetometer at the Kakioka geomagnetic observatory, Japan Meteorological Agency. The calibration results show that DC magnetic field is recorded by the magnetometer with high accuracy. We also conclude that magnetic field variation at period lower than 40 seconds is recorded by the magnetometer with little phase delay.

We tried a running test for about a week at the Yatsugatake geomagnetic observatory, Earthquake Research Institute, University of Tokyo. We found that output voltages of the magnetometer are strongly affected by temperature variation around the magnetometer. After correcting the temperature effect, difference between the magnetic field recorded by the torsion magnetometer and observed at the Yatsugatake observatory is less than 2 - 3 nT. On the basis of the results of the calibration and the running test, we will improve the torsion magnetometer.

Keywords : Torsion Magnetometer, Calibration, Yatsugatake, Kakioka, Geomagnetism

*1 海洋科学技術センター深海研究部

*2 理化学研究所地震国際フロンティア研究グループ

*3 東海大学地震予知研究センター

*4 Deep Sea Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

*5 International Frontier Research Group on Earthquakes, RIKEN

*6 Earthquake Prediction Research Center, Tokai University

1. 研究背景ならびに目的

近年、日本近海には海底ケーブルを用いた海底地震総合観測システムが整備されつつあり、海溝近傍に発生する地震活動の様子や、本来取得の困難な深海底の環境変動等のデータをリアルタイムで得ることが可能となってきた(Momma et al., 1998a; Momma et al., 1998b; Kawaguchi et al., 2001)。このリアルタイム性及び海域という観測場所を活用し、多種類のセンサーを駆使しつつ、海溝域での地震活動や地殻活動を至近距離で常時監視(モニタリング)することは、自然科学上興味深いことであり、また防災面でも重要である。地震発生には地殻の歪みや地殻内流体の存在が関与していると考えられているが、地磁気観測はこれら2つの変動に関して敏感である。従って、海底ケーブルを用いた観測システムに磁場センサーを新たに付加することは、これら地殻歪みや流体の情報を得るのに効果的である。

海底での地磁気変動の連続観測によって、主に4つの現象をとらえることが可能であると考えられる。

(1) 海底下の電気伝導度の時間的変化

電離層起源の地磁気変動は、海水という良導体によりシールドされているが、長周期成分は海底でも記録可能である。地磁気変動には、電離層起源の1次的な物と、海底下に流れる誘導電流が作り出す2次的な物の双方が混じっている。中低緯度の外部磁場変化には鉛直成分変化は小さいことが多いが、海底下に電気伝導度の水平方向の不均質が存在すると、誘導磁場として鉛直成分が現れる。従って、水平磁場変動と鉛直磁場変動の比(地磁気変換関数)を得ることで、誘導磁場の寄与のみを情報として得ることが可能であり、これから地下の電気伝導度の情報を得ることができる。電気伝導度は地殻浅部では流体の分布と密接な関係があるので、流体分布が変化すれば、電気伝導度が変化する可能性がある。海底で地磁気の連続観測を行い、地磁気変換関数の時間変化を調べることで、海底下の電気伝導度構造の時間変化を議論することができる。

(2) 地殻内流体の移動に関連する地磁気変化

空隙を持つ媒質中をイオンを含む流体が移動すると、界面動電現象が引き起こされ、流動電位が発生する(Ishido and Mizutani, 1981)。この時発生される電位は、海底面や海底下の地磁気変化を引き起こす可能性があり、数値計算からその振幅は最大で10-30nT程度である(Jouniaux et al., 1999)。もしも流体移動の速度が10%変化すれば、数nTの地磁気変動として観測されることになり、海底での長期磁場測定から海底下の流体移動を推測できる可能性がある。

(3) 地殻変動に伴う地磁気変化

地殻内の応力分布が変化すると、磁性鉱物の帯磁率または磁化が変化し、結果として磁場変化が観測されることが理論・観測の双方から知られており(例えばSasai, 1991; Sakanaka et al., 1997; Davis and Stacey, 1972)、応力磁気効果とも呼ばれている。海溝付近での地震発生の際に地殻歪に伴った地磁気変化が生じるとすれば、この変化を観測するには陸上よりも海底の方が有利である。

(4) 海底での磁場記録には海洋のダイナモ作用

地球磁場の中で良導体である海水が移動すると、海水中に誘導電流が発生する。例えばSegawa and Toh (1992)によれば、黒潮の流軸直下では海底で数 μ V/mの水平電場が理論上期待され、同オーダーの長期電場変動が実際に観測されている。この誘導電流は海底に地磁気変化も作り出すと考えられる。

これらの現象は、地磁気測定のみで明らかになるとはいえない。地磁気観測と並行して、流行流速計・超音波音響海流プロファイラーによる海流の観測や、地中温度計・湧水量測定計による地下水流動の観測、地震計・歪み計による地震・地殻変動の観測を行い、これらのデータを互いに比較する必要がある。従って、海底地震総合観測システムのように多種類のセンサーが配置された地点に磁力計を設置して長期観測を行うことで、上記のどの現象の影響がどの程度現れたかについての議論を行うことが効果的である。

一方で地震発生に関する重要な問題として、地震発生に伴って電磁氣的諸現象が挙げられる。これは古くから報告されている現象であり、1996年から開始された理化学研究所「地震国際フロンティア研究」による、多地点での連続電磁気観測によっても、地震に関連すると思われる電磁場変動は観測されている(長尾, 2001)。その発生メカニズムについては上記の(2)の現象が関連しているとの報告もあるが、今のところ明らかになっていない。海底は人為的なノイズ発生源がなく地磁気観測にとっては理想的な環境であり、海溝付近の地震発生域にも近づくことが可能なため、地震電磁気現象の発生メカニズムに迫ることが期待できる。

東海大学との共同研究「海洋底における電磁場変動ネットワーク観測基礎研究」では、低消費電力で小型であり、将来的には海底ケーブル観測システムへの接続が可能な磁力計の開発を目指している。本共同研究では、これらのスペックを満たす磁力計として、トーション型磁力計を新たに試作した。トーション型磁力計は、1960年代に開発された最初の海底磁力計であり(Filloux, 1980)、その低消費電力性のため現在も米国で使用されている。本研究では、試作したトーション型磁力計の性能を調べるために実施された磁力計較正試験と長期安定性試験の結果を報告する。

2. トーション型磁力計(MVC-MA)概要

ロシア製トーション型磁力計(MVC-MA)は、DC~10Hzの磁場変動3成分を測定することができる。MVC-MAは、3つの独立した磁気センサーからなるMagnetic Sensor Unit(MSU)と、増幅器からなるコンパクトな構造である(写真1~3)。MVC-MAの仕様を表1にまとめた。

MVC-MAはロシアのIZMIRAN(Institute of Geomagnetic, Ionosphere and Radio Propagation)のYuri Kopytenko氏、Eugene Kopytenko氏らによって製作された。MSUは非磁性金属製の容器でできており、内部には3つの互いに直交したトーション型磁場センサーが取り付けられている(写真2)。ここで、MSUの長軸方向・短軸方向・鉛直下向き方向を

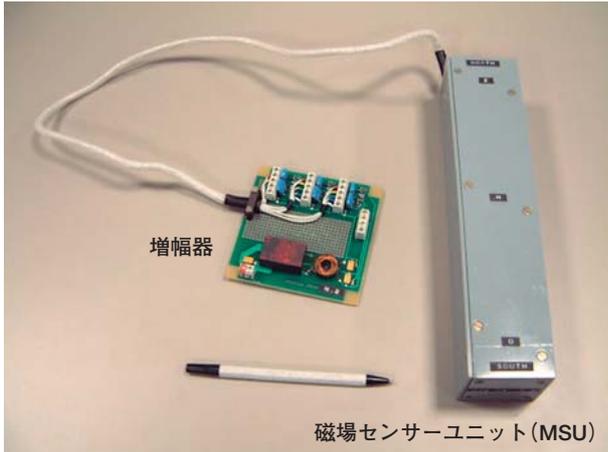


写真1 トーション型磁力計(MVC-MA)外観
photo 1 MVC-MA torsion magnetometer.

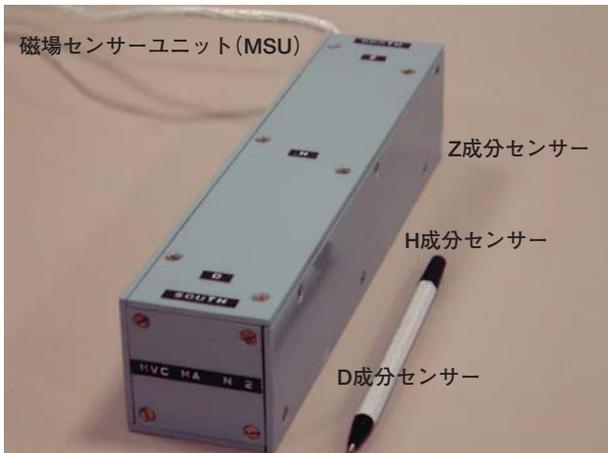


写真2 磁気センサーユニット(MSU)
photo 2 Magnetic sensor unit (MSU)

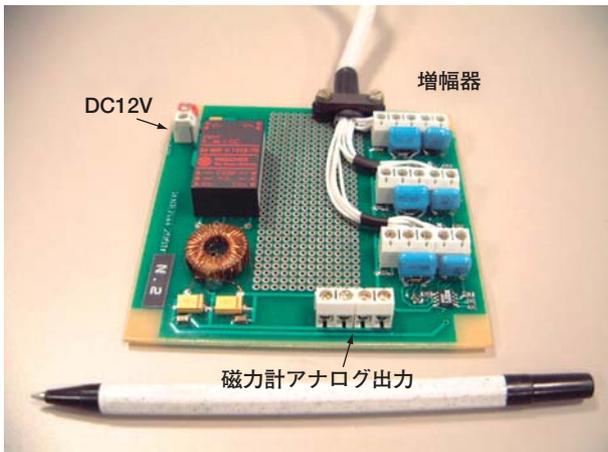


写真3 増幅器
photo 3 Amplifier

表1 ロシア製トーション型磁力計(MVC-MA)の仕様(マニュアルより)
Table 1 Technical characteristics of torsion magnetometer MVC-MA.

MVC-MA仕様	
磁力計タイプ	トーション型
測定値	直交磁場3成分
周波数帯域	0~10 Hz
ダイナミックレンジ	±70000 nT
出力電圧	±10 V
入力ノイズレベル(0.1~10Hz)	0.05 nT以下
内部キャリブレーションコイル係数	170±10 nT/mA
磁場センサーサイズ	250×50×50 mm
増幅器サイズ	100×100×10 mm
磁場センサー重量	0.85 kg
供給電圧	+12V (10.5~18 V)
消費電力	2.5 W 以下
動作温度	-10 °C~50 °C
温度ドリフト	1 nT/°C以下

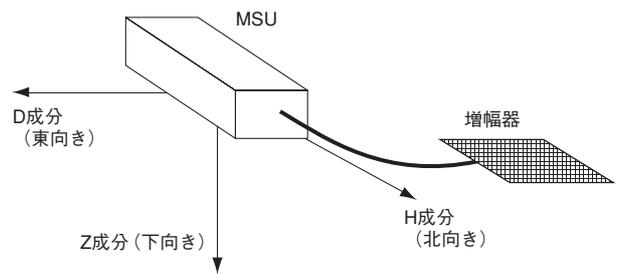


図1 トーション型磁力計の測定座標系
Fig. 1 Coordination system of MVC-MA

それぞれ、H方向、D方向、Z方向とする(図1)。MVC-MAに使用されているトーション型磁場センサーの測定原理を図2に示す。トーション型磁場センサーの<心臓部>は、長さ約3cm・直径約1cmのカプセル状のMSE (Magneto-Sensitive Element)である。MSEは水晶または金属製の細糸と、それに釣り下げられた鏡付き磁石からなり、カプセル内部はダンピングのために液体で満たされている。MSEの外側には低消費電力で放射角15度・波長9000 Angstromの短波長IR発光ダイオード(EMT)が取り付けられている。この発光ダイオードからの放射光は、MSE内の鏡で反射されて、2つのフォトダイオードからなる受光部(PHR)で受光される。PHRのスペクトルは発光ダイオードからの放射光に調整されている。また2つのフォトダイオードの距離は200~300 μmである。外部磁場に変動が生じて、2つのフォトダイオードの受光量に差が生じた場合、2つのフォトダイオードの電流の差が、磁場信号の強度となる。実際には、ダイナミックレンジの拡張や、測定信号の線形性・安定性、高周波変動への追従性、MSEのダンピングのために、2つのフォトダイオードの電流量の差を利用してMSEへ負のフィードバック磁場を与えている。こ

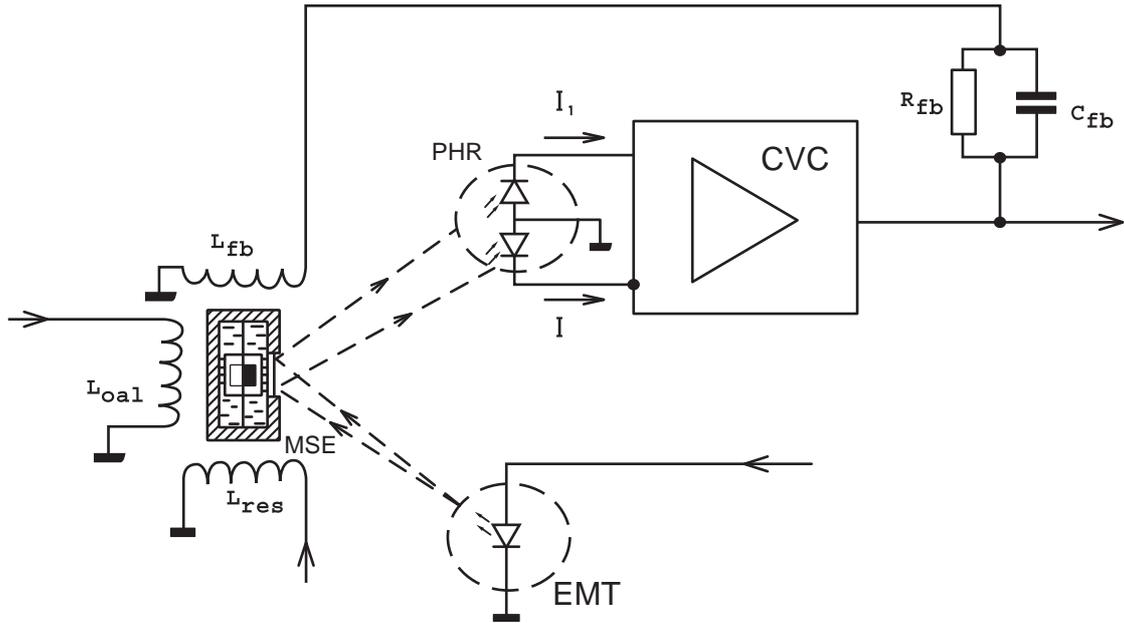


図2 トーション型磁力計模式図(MVC-MAマニュアルより)

Fig. 2 Principle of torsion magnetometer based on the MVC-MA user's manual.

れによってMSE内の鏡の回転角度は20分以下に押さえられており、出力信号の非線形性は0.1%以下である。フィードバック回路は、電流電圧変換器(CVC)、フィードバック抵抗(R_{fb})、コンデンサー(C_{fb})およびフィードバックコイル(L_{fb})からなる。フィードバックコイルはDC成分の磁場を打ち消すためにも利用されている。その他には、MSE取り付け時の位置調整用に用いられるリセットコイル(L_{res})、センサーの簡易検定に利用されるキャリブレーションコイル(L_{cal})も装備されている。

MVC-MAは、従来のロシア製トーション型磁力計を元に海底観測用に本研究で新たに試作されたものであり、いくつかの改良が施されている。改良点の1つはMVC-MAのサイズであり、従来型よりも約半分のサイズにセンサー類が納められている。また改良点の2番目はDC磁場補償方法である。従来はMSUをネジなどで手で回転してDC磁場成分をメカニカルに打ち消していたが、MVC-MAではフィードバックコイルのみでDC磁場を打ち消している。このため、7000nT/10Vという非常に広いダイナミックレンジを達成している。

3. 直流磁場較正

MVC-MAの感度特性を調べるために、気象庁柿岡地磁気観測所にて磁力計較正試験を行った。磁力計較正には、柿岡地磁気観測所所有の3軸ヘルムホルツコイルを用いた磁力計較正システムを利用した(図3)。3軸ヘルムホルツコイルはH, D, Z方向に直流及び交流磁場を発生することができる。これを用いて平成13年6月28日に直流磁場較正を行った。MVC-MA動作の電源としては、自動車用12Vバッテリーを使用し、MVC-MAの出力値の記録にはLawson Labs Inc.製 24bit A/Dコンバータ(Model 201)とノートパソコンを使

用した。サンプリングレートは1秒である。MVC-MAの出力電圧は ± 10 Vであり、A/Dコンバータの入力電圧は ± 2 Vであったために、抵抗を用いた減衰器(約0.2倍)を使用している。ノイズ軽減のために、磁力計増幅器から記録器までのケーブルにアルミホイルを巻いた。また較正試験開始前には、磁力計増幅器へ接続する予定のケーブルを配線した後に、ケーブルの末端を短絡した状態で ± 200 nTの直流磁場を発生させて、A/Dコンバータおよびパソコンでこの時の電圧変化を記録した。その結果、与えた磁場に相関のある信号が記録されていないこと、A/Dコンバータのオフセットは0.01mV以下であることを確認した。

磁場較正を行う前に、MVC-MAの測定軸をヘルムホルツコイルの測定軸にあわせた。ヘルムホルツコイルを用いて、H方向に ± 200 nTの矩形的人工磁場を発生させ、MVC-MAのD成分出力が最小になるように、ターンテーブル上の磁力計を回転させた。その後Z方向のみに ± 200 nTの矩形的人工磁場を発生させ、MVC-MAのH成分・D成分出力が最小になるようにターンテーブルの水平を調整した。これによって、MVC-MAのD軸をヘルムホルツコイルのD軸に、またMVC-MAのH軸とD軸からなる水平面を、ヘルムホルツコイルの水平面にあわせた。結果として、 ± 200 nTのZ方向矩形磁場に対して、H成分とD成分の出力は約0.5 nTであった。

直流磁場較正試験として、ヘルムホルツコイルから ± 100 nT・ ± 300 nT・ ± 500 nTと段階的に矩形的な人工磁場を発生して、その際のMVC-MAの出力電圧を記録した。矩形波については、数秒間の正の直流磁場を5回、数秒間の負の直流磁場を5回与えた。直流磁場較正の際は、H・D・Z成分の順に1成分ずつ較正を行った。出力電圧の振幅の誤差(95%信頼区間)は、0.02mV以下であった。

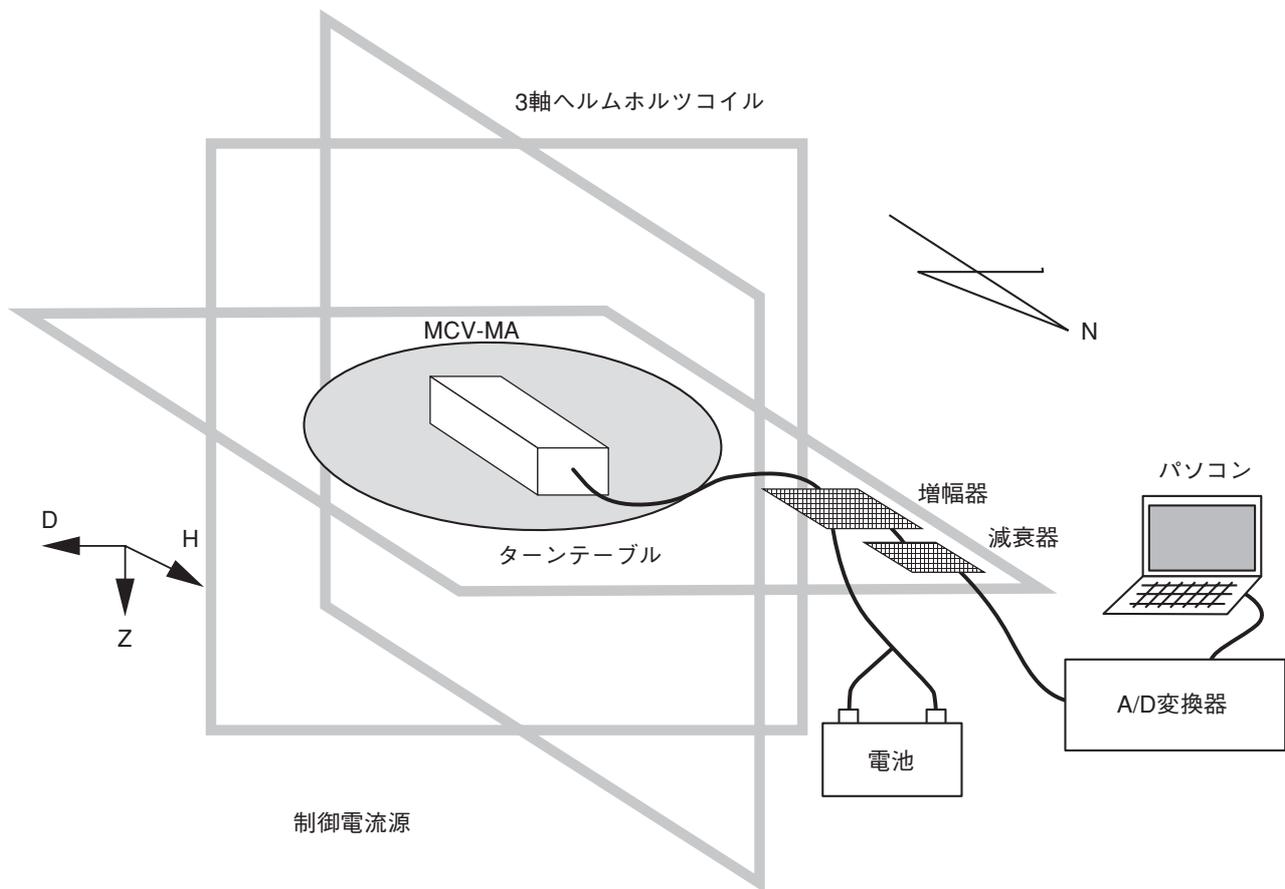


図3 気象庁柿岡地磁気観測所所有の3軸ヘルムホルツコイルを用いた磁力計較正システム模式図
 Fig. 3 Schematic diagram of the calibration system with three orthogonal Helmholtz coils developed by the Kakioka Geomagnetic Observatory.

直流磁場較正の結果例を図4に示す。磁力計出力は正および負の人工磁場に対して、ほぼ線形的な応答を示している事が分かる。人工磁場値と磁力計出力値を用いて最小自乗法を適用し、直流ゲイン特性を表2にまとめた。仕様表(表1)によれば、直流ゲインは0.14286 mV/nTであるので、MVC-MAは直流磁場に対してはほぼ仕様通りのゲイン特性であることが確認できた。またオフセットもほぼゼロに近いことも確認された。

直流磁場較正時の記録を用いて、磁力計センサー軸の直交性試験を行った。MVC-MAの1つの軸方向に±500 nTの人工磁場を与えているときに、この軸に直交する2成分の出力電圧を測定した。その結果を表3にまとめた。ここには表2の係数を用いて電圧値をnT単位に直した値も記した。これから、MVC-MAのH-D-Z 3軸は互いに完全には直交しておらず、特にH-D軸間およびD-Z軸間の角度は90度からのずれが認められる。そこで表3のnT値から、MVC-MAとヘルムホルツコイルの各軸のずれ角度を計算した(表4)。結果としては、MVC-MAの3軸の直交性は精度2度以内であった。

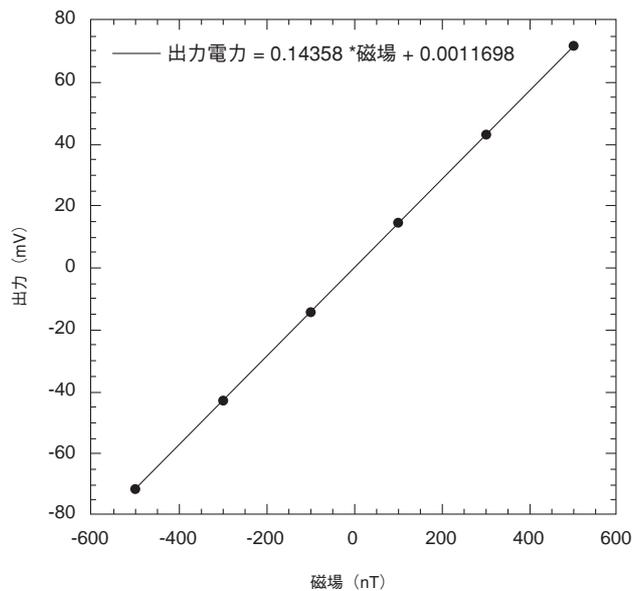


図4 トーション型磁力計H成分における直流磁場に対する出力電圧。実線は最小自乗法による近似直線。

Fig. 4 Output voltages of the H-component of MVC-MA at various DC magnetic fields. A solid line is created by the least square method.

表2 直流磁場較正によって得られたトーシヨ型磁力計の直流磁場に対するゲインおよびオフセット。

Table 2 Gains and offsets of MVC-MA obtained by the DC calibration.

	係数(mV/nT)	オフセット値(nT)
H	0.14358	0.01
D	0.14648	0.02
Z	0.14394	0.04

表3 磁力計センサー軸の直交性試験結果。

Table 3 Result of orthogonal tests of three axes of magnetic sensors in MVC-MA

	出力電圧(mV)	測定磁場強度(nT)
(H成分DC検定時)		
H	71.812	500.15
D	0.055	0.38
Z	0.523	3.63
(D成分DC検定時)		
H	-2.045	-14.24
D	73.282	500.30
Z	2.415	16.78
(Z成分DC検定時)		
H	0.120	0.83
D	0.117	0.80
Z	71.987	500.10

表4 直交座標系の各軸及び各平面と、トーシヨ型磁力計各成分の間の角度(絶対値)。

Table 4 Angles between the orthogonal coordinate and observation coordinate of MVC-MA. All values are shown as absolute one.

	直交座標系		
	H-D平面(度)	Z-H平面(度)	H軸(度)
磁力計H軸	0.096	1.632	1.635
磁力計D軸	H-D平面	D-Z平面	D軸
	0.092	0.043	0.101
磁力計Z軸	D-Z平面	Z-H平面	Z軸
	0.416	1.923	1.968

4. 交流磁場較正試験

MVC-MAの周波数応答を知るために、気象庁柿岡地磁気観測所において交流磁場による磁力計較正試験を実施した。磁力計較正システムは直流磁場較正試験で用いたもの(図3)と同じであり、直流磁場較正試験と同日に行った。ここでは、ヘルムホルツコイルからsin波状の人工交流磁場をH, D, Z成分同時に発生し、MVC-MAからの出力電圧を記録した。発生した人工磁場とMVC-MAの出力電圧の位相差についても測定を行うために、ヘルムホルツコイルに流している電流値もA/Dコンバータとパソコンで記録した。人工磁場の振幅は200 nTで一定である。人工交流磁場の周期は4秒~200秒とし、段階的に9つの周期の人工交流磁場を発生させた。記録器のサンプリングレートは1秒とした。

記録された時系列データに対して、フーリエ変換を行い、MVC-MAの出力電圧の振幅および位相を求めた。出力電圧振幅については、周期200秒の値を基準値としてその他の周期の振幅値を規格化した。また位相については、ヘルムホルツコイルへの電圧値と出力電圧値の位相差を求めた。ここで、正の位相差はMVC-MAの出力電圧が入力磁場よりも位相遅れを伴っていることを示している。

計算された振幅値および位相差について図5に示した。40秒よりも長周期では振幅は1に近づき、位相差は0度に近づく傾向が認められる。他方、周期40秒よりも短周期側では、MVC-MAの出力電圧の振幅値は長周期よりも大きくなっており、位相差についてもMVC-MAの出力変動の位相遅れが大きくなることが分かる。

5. 長期安定性試験

トーシヨ型磁力計 MVC-MAを用いた自然磁場変動の測定が可能であるか、また長期間の安定性はどの程度かを調べるために、MVC-MAを用いた長期磁場観測を行い、地磁気観測所の磁場変動記録と比較を行った。

長期安定性試験は東京大学地震研究所八ヶ岳地球電磁気観測所(以下、八ヶ岳観測所と略)で行われた。八ヶ岳観測所の地磁気絶対測定室(非金属製小屋)にMVC-MAを設置し平成13年6月11日から18日まで連続観測がおこなわれた。MVC-MAを小屋内の床(地面)におき、水平面上で回転したときにD成分出力電圧が最小になるように、H軸方向を決定した。これにより、H軸がほぼ磁北方向、D軸が東方向、Z成分が鉛直下方向に向いている。

以降、北向き・東向き・鉛直下向きの磁場変動成分をそれぞれ、H成分、D成分、Z成分と呼ぶ。MVC-MAの出力値の記録には白山工業製LS-3300を用いた。サンプリングレートは1秒である。MVC-MA動作電源としては、直流電源装置を用いた。直流電源装置はMVC-MAから約3m離れた。また直流電源装置からのノイズレベルを調べるために、連続観測開始前に、直流電源装置と自動車用バッテリーのそれぞれを用いてMVC-MAを動作させて、出力電圧値の安定度をモニター画面上で調べた。その結果、どちらの電源を用いても出力値の安定度には変化が認められないことを確認した。さらにMVC-MAの測定と並行して、Fluke製80TKとデジタルテス

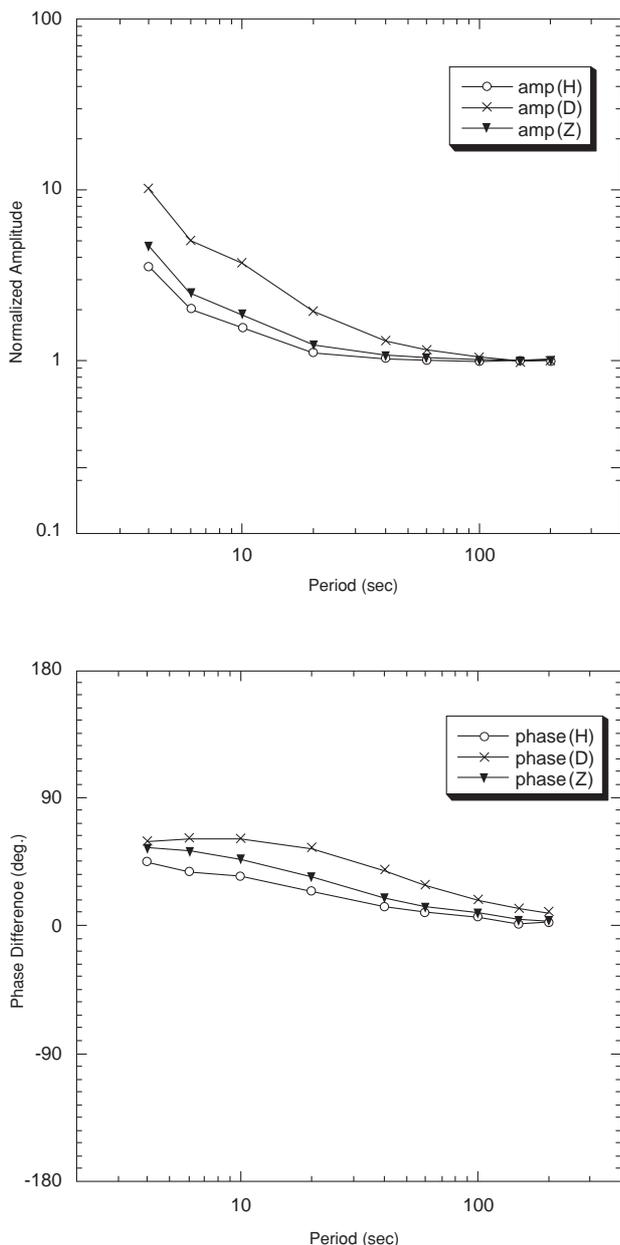


図5 交流磁場に対するトーション型磁力計各成分の出力電圧振幅(上)および交流磁場に対する出力電圧の位相おくれ(下)。振幅については、周期200秒のもので規格化を行っている。

Fig. 5 Amplitude (upper) and phase delay (lower) of output voltages of MVC-MA at various periods. The amplitude is normalized by one at the period of 200 sec.

ターを用いて、MVC-MA近傍の温度も記録した。地磁気絶対測定室から数十m離れた地点では、八ヶ岳観測所によってフラックスゲート磁力計による地磁気観測が継続して行われており、毎秒の磁場変動値の記録が行われているため、この毎秒記録とMVC-MAの記録値を比較することが可能である。

約1週間の長期観測によって、MVC-MAの温度変化に対する安定性について、新たな結果を得ることができた。6月11日16:00 LT~6月18日13:30 LTに、MVC-MAによって記録

された磁場3成分の出力電圧値と温度変化を図6に示した。6月14日(図6, Time = 150,000 sec付近)には出力電圧にスパイク状の変動が見られるが、これは地磁気絶対測定室入室があったためである。図6で明らかのように、H成分およびZ成分は温度と非常に相関の高い変動をしている。最小自乗法によるH・D・Z成分と温度変化の相関係数はそれぞれ、0.94, 0.55, 0.92であった。したがってMVC-MAによって記録された磁場変動を議論する前に、温度変化に起因する出力電圧変動を除去する必要がある。

そこで、温度変化と磁場変動の双方がMVC-MAの出力電圧に影響していると仮定し、温度変化係数と磁場変動係数をそれぞれ求めることとした。これは2入力1出力系において、周波数領域で伝達関数を求めることと同じである。そこで、本研究ではChave and Thomson (1989)およびChave et al. (1987)に基づく、伝達関数計算プログラム"RRRMT"を利用した。このプログラムは本来、Magnetotelluric法解析のために開発された物である。ここでは、MVC-MAのH成分出力電圧値に対して、八ヶ岳観測所で得られたH成分の地磁気変動毎秒値とMVC-MA付近の温度変化を入力値として用いて解析を行った。またD成分・Z成分についても同様な解析を行った。解析に際しては、入力値・出力値とも6月14日15:00 LT~6月18日11:00 LTの記録を使用し、原記録に対して片側30秒の移動平均を施した後に、約21.09秒毎に再サンプリングを行ったものを使用した。

周期10,000秒~100,000秒の区間について、温度変化および地磁気変化に対するMVC-MA出力電圧の伝達関数を精度良く求めることができた。図7には、温度変化のスペクトルと共に温度変化に対する伝達関数の例を示した。周期10,000秒~100,000秒では、伝達関数の当てはまり程度の指標となるMultiple Coherencyは0.95を上回っている。図7の伝達関数については実部のみ示しており、虚部については省略しているが、周期10,000秒~100,000秒では虚部は実部の数分の1~10分の1の値を示した。

温度変化の振幅は、10,000秒以上の長周期で卓越していることがわかる。そこで、周期10,000秒以上について温度変化振幅を重みとして温度変化に関する伝達関数の事物を平均化し、これをMVC-MAの温度変化係数とした。表5にMVC-MA各成分の温度係数をまとめた。これを見ると成分毎に温度係数が異なっており、出力電圧値の大きい成分=Z, H, Dの順に温度係数が変化していることが分かる。

表5の温度係数を用いて温度に伴う電圧変化を補正した後に、表2のゲイン係数を用いて、MVC-MAによって得られた自然の磁場変動を求めた。ここでは表3にある角度の補正は行っていない。得られた磁場3成分変動を図8に示す。図8には八ヶ岳観測所で得られた磁場3成分変動も表示した。長周期のH成分、D成分の変動については、温度変化に伴う電圧変動が除去されており、MVC-MAの磁場変動と八ヶ岳観測所の磁場変動値が良く一致している。Z成分についてもおおむね一致しているが、温度変化の大きな部分については(6月17日 15:00 LT頃: 図8 Time = 259,200 sec付近)両者に違いが認められた。

Time Series (H. D. Z and temp)

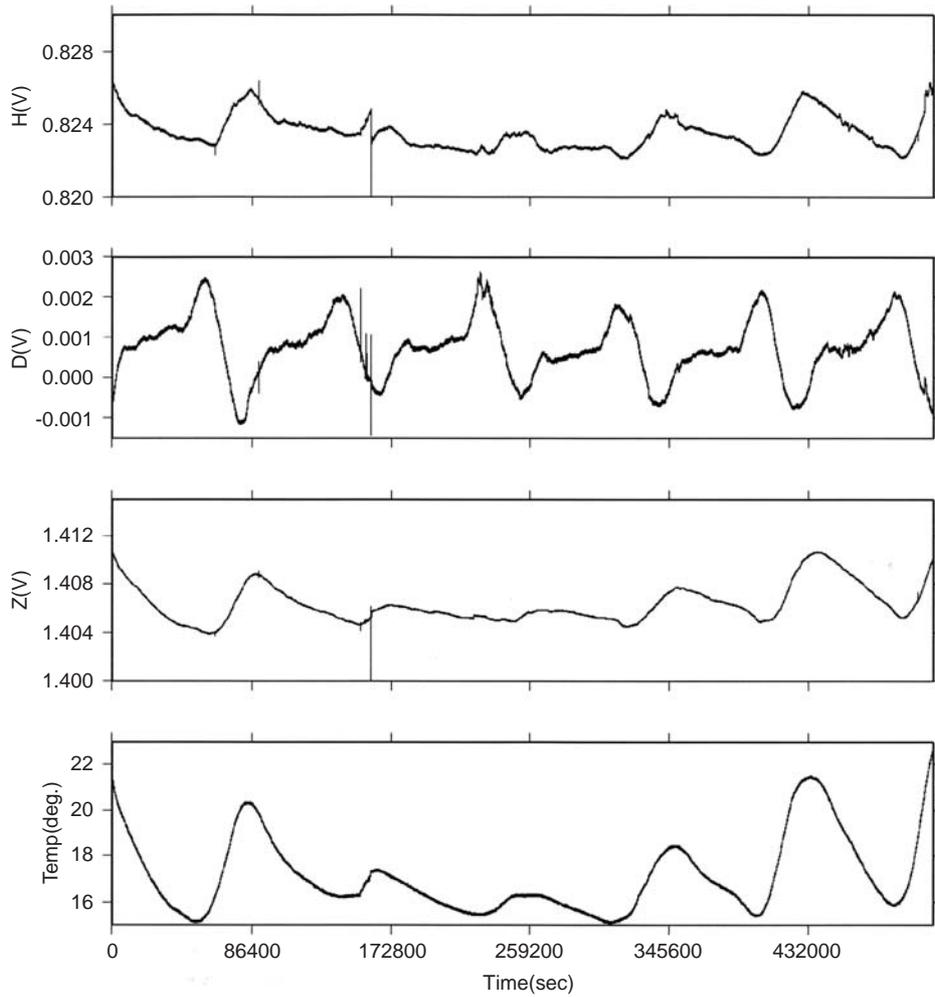


図6 東京大学地震研八ヶ岳地球電磁気観測所での、トーシヨ型磁力計による約1週間(6月11日16:00LT~6月18日13:30LT)の出力電圧値および温度。横軸1目盛りは1日に相当する。

Fig. 6 Output voltages of MVC-MA at the Yatsugatake geomagnetic observatory, Earthquake Research Inst., Univ. Tokyo. They are indicated from 16:00 LT on June 11 to 13:30 LT on June 18 in 2001. Temperature variation around MVC-MA is also shown.

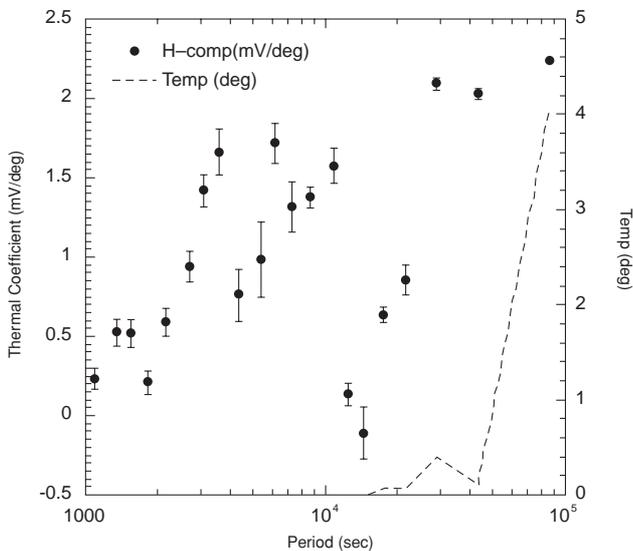


表5 トーシヨ型磁力計各成分の温度係数。

Table 5 Temperature coefficients of the MVC-MA output Voltages.

温度係数 (mV/°C)	
H成分	2.1708
D成分	-0.4443
Z成分	4.0649

図7 温度変化に対するトーシヨ型磁力計のH成分出力電圧の伝達関数。温度変化のスペクトルも共に示した。

Fig. 7 Transfer function between output voltage of the H-component of MVC-MA and temperature. A spectrum of temperature variation is also shown.

Time Series (H. D. and Z)

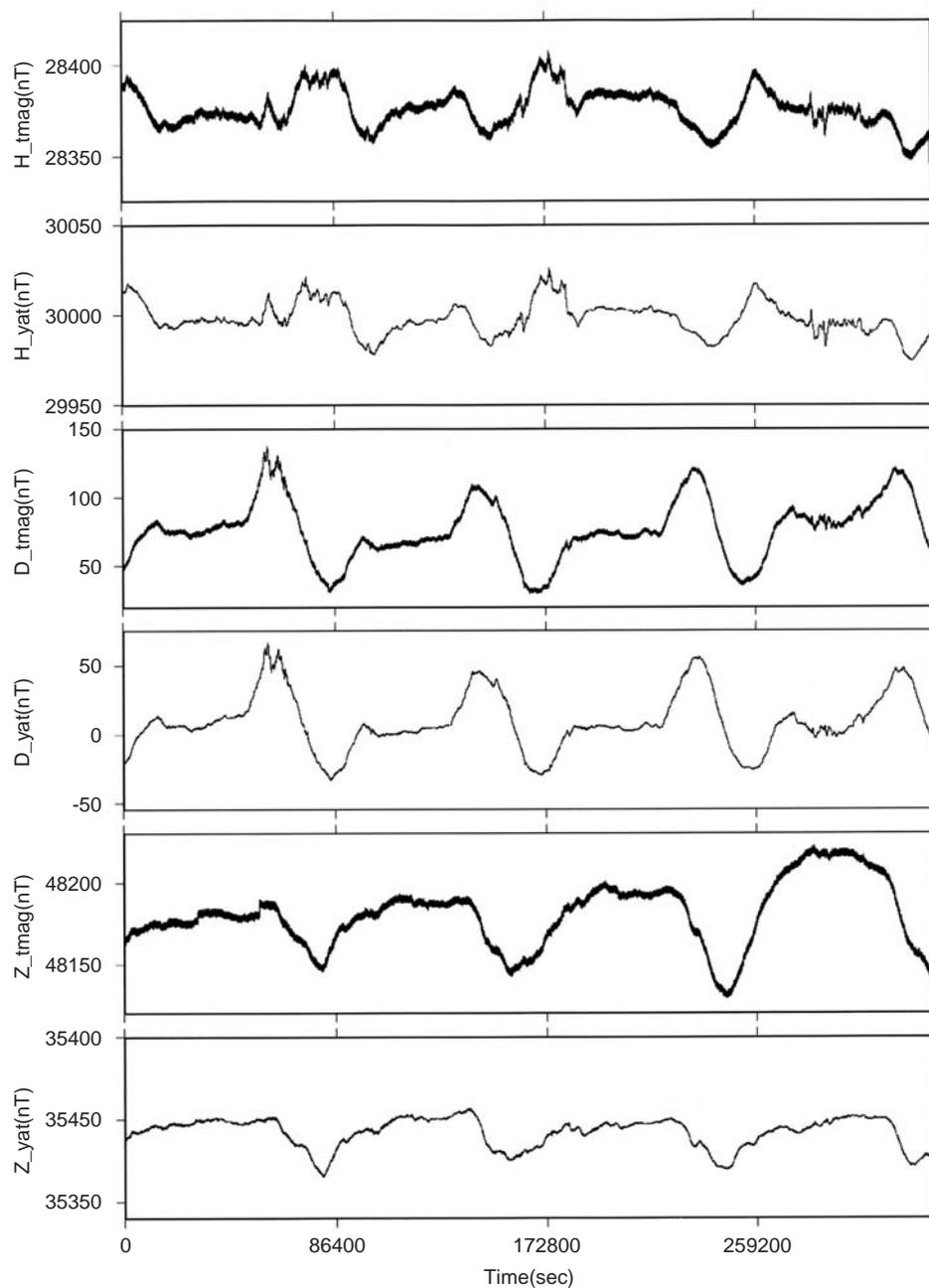


図8 トーション型磁力計によって得られた磁場3成分値(H_tmag, D_tmag & Z_tmag)。温度変化による影響を補正している。期間は6月14日15:00 LT～6月18日11:00 LT。八ヶ岳観測所による地磁気3成分値も示した(H_yat, D_yat & Z_yat)。横軸1目盛りは1日に相当する。

Fig. 8 Three-components magnetic fields obtained by MVC-MA (H_tmag, D_tmag & Z_tmag) in which the temperature effect is corrected. They are shown from 15:00 LT, June 14 to 11:00 LT, June 18. Magnetic fields recorded at the Yatsugatake observatory are also shown as H_yat, D_yat and Z_yat.

短周期の自然磁場変動についても、MVC-MAで得られた値と八ヶ岳観測所で得られた値を比較した。図9には6月17日 21:00 LT～6月18日 04:00 LTの磁場3成分値を示した。短周期変動についても、MVC-MAのH成分およびD成分出力は八ヶ岳観測所で得られた値によく一致している。またZ成分について、短周期の変動(例えば図9, Time = 288,000

sec付近)はおおむね一致している。MVC-MAによる磁場変動と八ヶ岳観測所の記録の違いをより明瞭に見るため、両者の差を図10に示した。3成分ともに両者の差は約2～3nTであることがわかる。ただしZ成分については、温度変化に伴う長周期の変動がみとめられる。

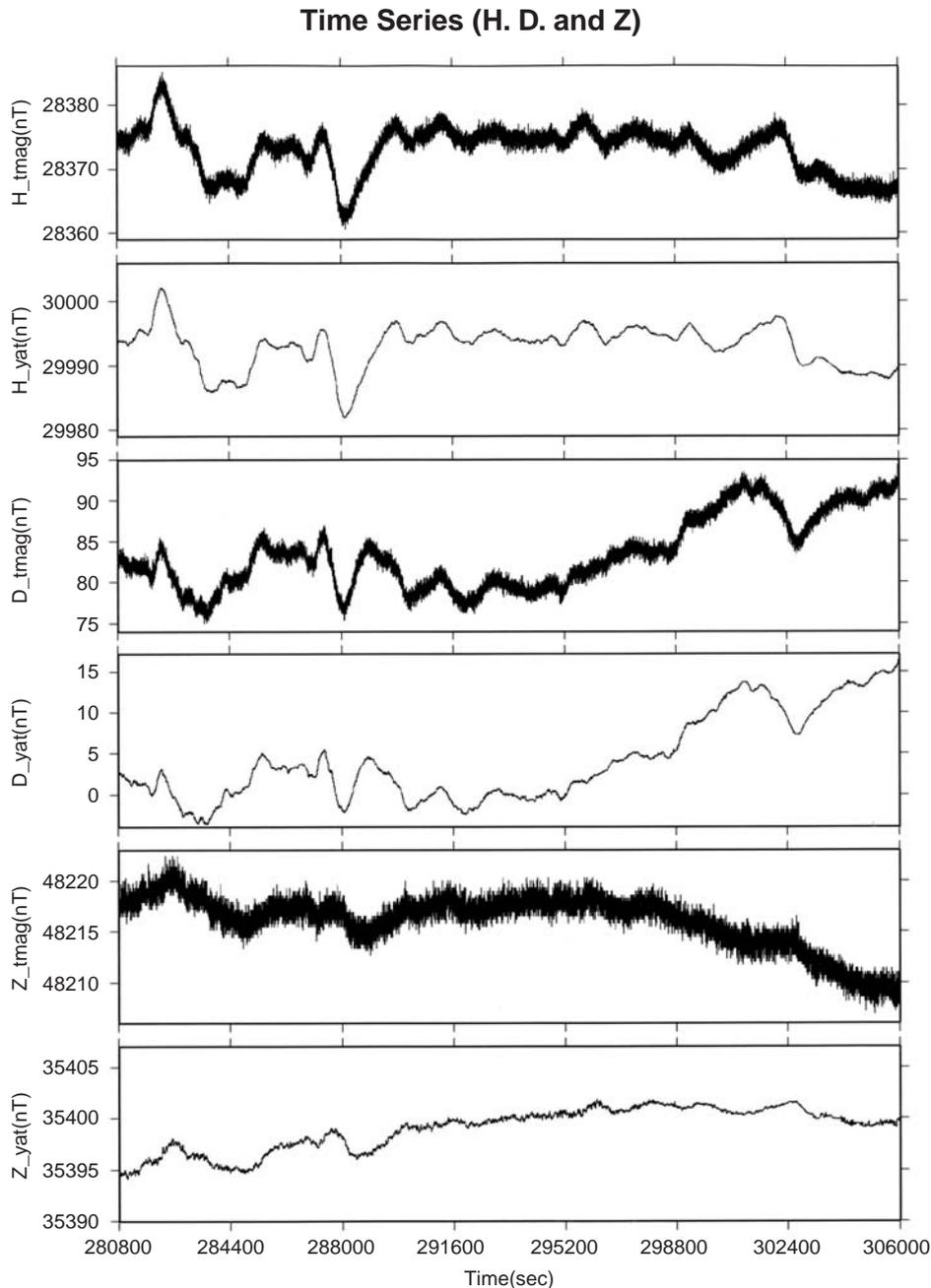


図9 トーション型磁力計によって得られた磁場3成分値(H_tmag, D_tmag & Z_tmag)および八ヶ岳観測所によって得られた地磁気3成分値も示した(H_yat, D_yat & Z_yat)。温度変化による影響を補正している。期間は6月17日 21:00 LT～6月18日 04:00 LT。横軸1目盛りは1時間に相当する。

Fig. 9 Three-components magnetic fields obtained by MVC-MA (H_tmag, D_tmag & Z_tmag) from 21:00 LT, June 17 to 04:00 LT, June 18. Magnetic fields recorded at the Yatsugatake observatory are also shown as H_yat, D_yat and Z_yat.

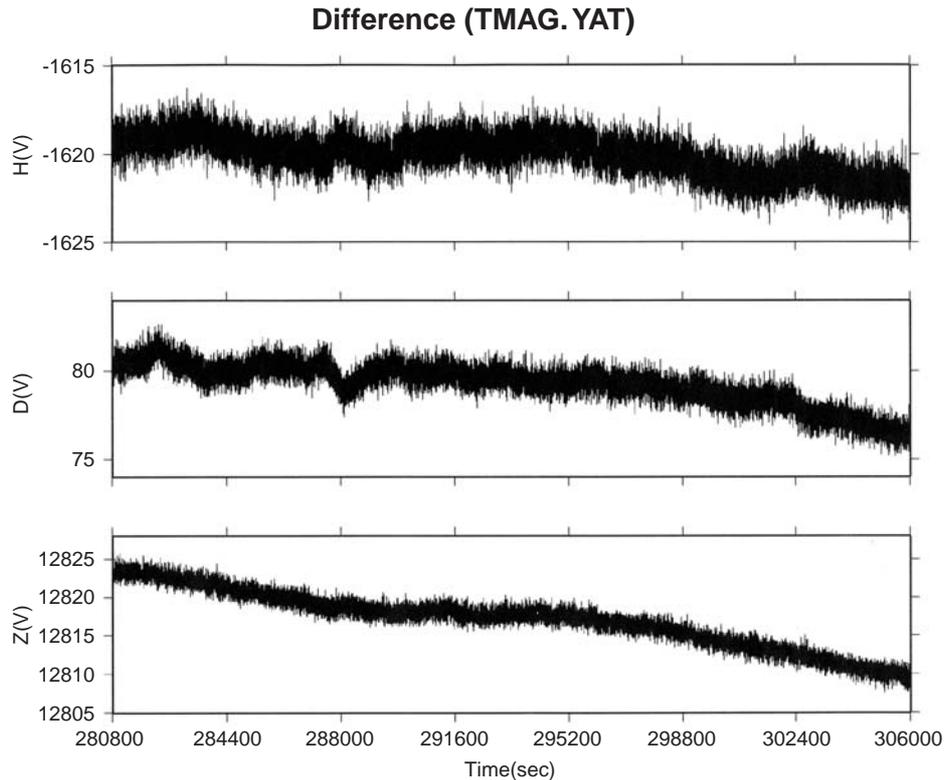


図10 トーション型磁力計による地磁気3成分値と八ヶ岳観測所による地磁気3成分値の差。図9の記録に基づく。

Fig.10 Difference between two magnetic fields recorded by MVC-MA and the Yatsugatake observatory, on the basis of time series data in Fig. 9.

6. 議論

本研究によってMVC-MAの特性について明らかにすることができた。まず直流磁場校正試験によって、DC成分に近い磁場変動に対しては、MVC-MAの出力電圧はほぼ線形に反応することが分かった(図4)。これは外部磁場がゼロの時に磁力計センサーのMSEがほぼ中立位置になるようによく調整されていることと、磁場変動に対してそれを打ち消すフィードバックがうまく働いていることを示している。

しかしながら、交流磁場校正試験によって、MVC-MAの応答はDC帯域と高周波帯域では異なることが分かった。図5に示したように、H、Z成分については40秒よりも長周期では概ね直流磁場校正結果と同様の周波数特性を示すが、それよりも短周期側では位相の遅れが大きくなる。これは外部磁場変動をフィードバックして打ち消す回路の時定数が影響していると思われる。従って、MVC-MAを用いた磁場観測を行う場合は、今回行ったような交流磁場校正試験を行い、MVC-MAの周波数特性をあらかじめ知っておくことが必須であるといえる。また今後、フィードバック回路の時定数をより高周波側へ変更することも考えられる。なおD成分は、他の2成分に比べて位相遅れが大きい傾向がある。直流磁場校正試験の結果得られた磁場-電圧変換係数(表2)についても、D成分の値はH、Z成分とは多少異なっている。これらはMSEやフィードバック回路の個体差であると考えられ、

MVC-MAを使用する際には磁場校正試験が欠かせないことを意味している。

長期安定性試験によって、MVC-MAの温度特性を知ることができた(表5)。本研究では、出力電圧は地磁気変化と温度変化の双方に依存すると仮定して、温度係数を求めた。ここで仮に、出力電圧変動は温度に強く依存すると単純化して考えてみる。横軸に温度、縦軸に出力電圧をとり、最小自乗法によってその傾き(すなわち温度係数)を求めた結果、H・D・Z成分についてそれぞれ2.394、-1.192、4.350という値が求められた。H、Z成分の値は表5の物に近いが、D成分については大きく異なっている。仮にD成分の温度係数に-1.192として温度補正を行った場合、MVC-MAのD成分磁場変動と八ヶ岳観測所のD成分との差は、図10の場合よりも大きくなった。つまり、本研究で行われたような、温度変化と地磁気変動の双方を考慮しつつ温度係数を求めることが、温度による影響を補正するときに重要であるといえる。

MVC-MAの温度係数は各成分毎に違っている(表5)。表2の係数を用いた場合、H成分では約15 nT/°C、Z成分では約30 nT/°Cである。出力電圧値の大きい成分(Z、H、D成分の順)ほど、温度係数が大きい傾向があり、温度に伴う出力電圧変化は、外部磁場変動を打ち消すためのフィードバック回路の特性が、温度変化とともに変化しているためと推測される。強い磁場が存在し、温度の変化する環境では、Z成

分に認められたように温度係数を用いて出力電圧値を補正しても、温度変化の影響が残ることが予想される(図8~10)。従って今後は、まず温度・磁場の双方を制御できる環境下で磁力計の試験を行い、様々なDC磁場強度化での温度係数を求める予定である。

海底や孔内などの温度変化の小さな環境では現状のMVC-MAを用いた磁場変動観測は可能である。例えば、0.1℃程度の温度変化では、温度ドリフトも数nT以下と小さな値となる。しかしながら、群発地震の際に発生した泥流によって、海底下数十cmの地中温度が約1.5℃ステップ上に上昇したことが報告されている(岩瀬他, 1998)。この場合、温度変化に伴う見かけ上の磁場変動は数十nTに及び可能性がある。したがって今後は、温度変化によるMVC-MAの出力電圧変動を低減する必要がある。たとえば、海底等に設置後にモータなどで磁場センサー(MSE)を機械的に一定時間だけ回転させて、MSEのねじれがほぼない状態にして、外部磁場のDC成分をキャンセルさせる方法などが考えられる。また、フィードバック回路特性の温度変化そのものを低減することも必要である。

温度変化の影響の小さいMVC-MAのH成分及びD成分は、八ヶ岳観測所で記録されたH成分およびD成分にきわめて近い値を示した(図8~10)。MVC-MAを地面においたため、地面の磁化のためにMVC-MAの方向が磁北からずれている可能性はあるものの、MVC-MAを用いた磁場測定の精度は、約3nT以下であるといえる。図9, 10からは、MVC-MA側に高周波数の磁場変動が記録されていることが分かる。これがMVC-MA自身のノイズであるのか、実際に存在する高周波磁場変動であるかは、八ヶ岳観測所の磁力計にLow-Pass Filterが内蔵されているため、本研究では明らかにできない。今後は、より高周波の磁場変動を測定可能な磁力計との並行観測を行い、高周波帯でのMVC-MAの測定精度について議論を進めたい。

さらに付け加えるべき改良点としては、消費電力があげられる。MVC-MAの消費電力について、テスターを用いて電流量の測定を行った結果、常時100 - 200 mAを消費していることが分かった。入力電圧は12Vであるので消費電力は約1200 - 2400 mWである。現在、日本で海底磁力計として運用を行っているテラテクニカ社製のフラックスゲート型磁力計の消費電力は、常時約2500 mW(記録計の消費電力も含む)であるため、両者の違いはほとんどない。今後はMVC-MAを海底で利用するためには、消費電力の改善が必要であると思われる。具体的には、MVC-MAに使用されている発光ダイオードを低消費電力型に変える、MSEの配置の改良や光ファイバーの利用によって、発光ダイオードの総数を減らす、上述の様にモータなどを利用してDC磁場の大部分を打ち消すことにより、フィードバック回路で消費する電流量を減少させる、といった方法が考えられる。

7. まとめ

本研究では東海大学地震予知研究センターと共同で、海底で長期間安定して磁場変動を記録可能であり、かつ低消

費電力のトーション型磁場計の試作を行った。試作したトーション型磁力計を用いて、気象庁柿岡地磁気観測所では較正試験を、また東京大学地震研究所八ヶ岳地球電磁気観測所において長期安定性試験をそれぞれ行った。柿岡地磁気観測所での較正試験の結果、本磁力計は40秒よりも長周期では、位相の遅れなども小さく、また非線形性もほとんどなく、磁場変動を記録することができた。他方、周期40秒以下の人工信号に対して、磁力計の出力信号は位相おくれが生じることが分かった。長期安定性試験では、1週間の観測試験を行い、八ヶ岳観測所で記録されている地磁気3成分値との比較を行った。その結果、周期数十分以下の短周期については、両者のずれは最大で数nT程度の範囲内であり、安定して磁場を記録することができることが分かった。しかしながら温度変化と非常に相関の高い長周期のドリフトも認められる。今後は温度環境を変化させて動作試験を行い、ドリフトの要因とドリフト除去の方法を探る予定である。また、消費電力については約1.2-2.4Wである。これは従来の磁力計(たとえばフラックスゲート型)と大差はない。消費電力については、内蔵発光ダイオードの数を減らす等、さらなる改良が必要である。

謝辞

気象庁柿岡地磁気観測所には、磁力計の直流および交流感度較正試験を行っていただいた。東京大学地震研究所の歌田久司教授、上嶋誠助教授、小山茂枝官には、八ヶ岳地球電磁気観測所における長期試験のご協力ならびに八ヶ岳観測所で取得した地磁気データをご提供いただいた。千葉大学海洋バイオシステム研究センターの服部 克巳助教授には、ロシア製トーション型磁力計について多くのことを教授いただいた。

Reference

- Chave, A. D., D. J. Thomson and M. E. Ander, On the robust estimation of power spectra, coherences, and transfer functions, *J. Geophys. Res.*, 92, 633-648, 1987.
- Chave, A. D. and D. J. Thomson, Some comments on magnetotelluric response function estimation, *J. Geophys. Res.*, 94, 14,215-14,225, 1989.
- Davis, P. M. and F. D. Stacey, Geomagnetic anomalies caused by a man-made lake, *Nature*, 240, 348-349, 1972.
- Filloux, J. H., Observation of very low frequency electromagnetic signals in the ocean, *J. Geomag. Geoelectr., Suppl. I*, SI1-SI12, 1980.
- Jouniaux, L., J. Pozzi, J. Berthier, P. Masse, Detection of fluid flow variations at the Nankai Trough by electric and magnetic measurements in boreholes or at the seafloor, *J. Geophys. Res.*, 104, 29293-29309, 1999.
- Ishido, T. and Mizutani, H., Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, *J. Geophys. Res.*, 86, 1763-1775, 1981.

- 岩瀬良一・門馬大和・川口勝義・鈴木伸一郎, 深海底の堆積物増加と地中温度－相模湾初島沖での長期観測－, 1998年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, p.357, 1998.
- Kawaguchi, K., K. Hirata and H. Mikada, An expandable deep seafloor monitoring system, *Sea Technology*, 42, 10, 42-54, 2001.
- Momma, H., R. Iwase, K. Mitsuzawa, Y. Kaiho and Y. Fujiwara, Preliminary Results of a Three-Year Continuous Observation by a Deep Seafloor Observatory in Sagami Bay, Central Japan, Special Issue: Seafloor Observatories and Geophysical Networks, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 108, 263-274, 1998a.
- Momma, H., K. Kawaguchi and S. Suzuki, Deep-sea monitoring system for submarine earthquakes, environment, *Sea Technology*, 39, 6, 72-76, 1998b.
- 長尾年恭, 地震予知研究の新展開, 近未来社, 209 pp., 2001.
- Sasai, Y., Piezomagnetic field associated with the Mogi model revisited: analytic solution for finite spherical source, *J. Geomag. Geoelectr.*, 43, 21-64, 1991.
- Sakanaka, S., N. Oshiman and N. Sumitomo, A hybrid calculation method of tectonomagnetic effect using BEM and the surface integral representation of the piezomagnetic potential, --Two dimensional case study--, *J. Geomag. Geoelectr.*, 49, 101-118, 1997.
- Segawa, J. and Toh, H., 1992, Detecting fluid circulation by electric field variations at the Nankai Trough, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 109, 469-476, 1992.

(原稿受理: 2002年2月6日)