

水星探査機搭載用フラックスゲート磁力計の広範囲温度試験

西尾泰穂^{*1}, 碓井瑞生^{*2}, 遠山文雄^{*3}, 松岡彩子^{*4}

A Wide-Temperature-Range Test of Fluxgate Magnetometer Sensor for Mercury Exploration

by

Yasuo NISHIO, Mizuo USUI, Fumio TOHYAMA and Ayako MATSUOKA

(received & accepted)

Abstract

The Mercury spacecraft mission, Bepi-Colombo Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO), is one of the cooperative projects between Japan and Europe. A ring-core-type fluxgate magnetometer made in Japan will be installed on the MMO for observing the magnetic field of Mercury and Mercury's magnetosphere. Interplanetary magnetic field observation is very important for clarifying the interaction between solar wind and planetary magnetosphere structures. Although the fluxgate magnetometer has been used for many magnetic field observations, there is a problem of a temperature dependence. The temperature change of the sensor is assumed to range from -100 to +175°C during the research mission. However, no existing nonmagnetic temperature test apparatus can cover this wide temperature range. Thus, we have developed a wide-temperature-range testing system and tested two kinds of sensor, one with a bobbin made of INCONEL and the other with a bobbin made of ceramic. We obtained data on sensor sensitivity, offset drift, and noise level in the range from -160 to +200°C using this testing system. As a result, the ceramic sensor showed poorer performance than the INCONEL sensor on the low-temperature side below -100°C, and no marked difference in the temperature characteristics was observed on the high-temperature side over -100°C.

Keywords: Fluxgate magnetometer, Temperature test, Bepi-Colombo MMO, Planetary exploration, Mercury magnetosphere

1. 緒言

太陽風プラズマ粒子と地球磁気圏との相互作用の解明や、惑星内部構造の解明にとって磁場観測データは大変重要な情報が含まれている。そのため地球磁場観測や惑星間空間・惑星探査には磁場観測器が必ず搭載されてきた。現在、宇宙航空研究開発機構 (JAXA: Japan Astronautics Exploration Agency) と欧州宇宙機構 (ESA: European Space Agency) との共同で、2013年打ち上げを目標にBepiColombo水星探査計画が提案されている。この水星磁気圏探査機 (MMO: Mercury Magnetospheric Orbiter) には、高精度磁場観測の目的でリングコア型フラックスゲート磁力計が搭載される。水星は、Mariner10による3回のフライバイ観測 (1974~1975) によって磁気双極子的な固有磁場を持っていることが発見されたが^{1), 2), 3)}、惑星が固有磁場を持つためには、溶けた中心核が必要とされている⁴⁾。他の地球型惑星の金星、火星には局所的に小さな磁場しか存在しないことが分かっており、さらに小質量の水星において双極子磁場を持つ要因は、仮説の提唱はされているが未だに不明である^{5), 6)}。また、水星は十分な大気を有さず、磁場がそれ程強くないため、電離圏・プラズマ圏を伴わず、磁気圏が直接惑星と接続している。地球では、電離圏・プラズマ圏が地球磁気圏の形成に大きく関与しているが、

この欠如がもたらす影響は未解明である。これらの解明には、水星磁気圏の詳細な情報が必要であり、水星磁気圏の解明が行なわれることによって、太陽系の初期形成過程の解明、地球磁気圏、天体磁気圏構造解明につながることを期待される⁷⁾。

高精度磁場観測を目的として衛星に搭載される磁力計センサは、衛星本体からの磁気的影響を避ける為に、伸展マストによって衛星本体から離れた位置に搭載されるので、温度環境の厳しい宇宙空間に直接曝される。水星軌道上では、センサの温度変化は-100~+175°Cになると予想され、高精度磁場観測を行う上で大きな影響を与える。フラックスゲート磁力計は数多くの科学観測用のロケットや人工衛星に搭載され、多くの研究者によって改良がなされてきたが⁸⁾、温度特性があまり良くないので、温度特性の改善やフライトデータの補正法に関して長年研究がなされてきた⁹⁾。フライトデータの温度補正を行う為には、地上試験において、温度特性値を計測することが必要となる。衛星搭載用磁力計の温度試験の例を挙げると、ロシアの火星探査機 MARS-96 では、Magnes らによって温度試験範囲-80~+100°Cで感度・オフセット・ノイズレベルの計測が行なわれ¹⁰⁾、アメリカでは Gordon によって-40~+70°Cでオフセットの計測が行なわれた¹¹⁾。一方日本では、火星探査機「のぞみ」に搭載された磁力計が、-30~+40°Cの範囲で感度・オフセットの計測が行われ¹²⁾、基礎実験として綱川らによって-80~+80°Cの範囲で感度・オフセット・ノイズレベルの計測が行なわれた¹³⁾。しかし、水星軌道上で想定される広い温度範囲での試験が行われた例は無く、またそれが可能な試験装置も存在しなかつ

*1 工学研究科航空宇宙学専攻研修員
*2 工学研究科航空宇宙学専攻博士課程前期
*3 工学部航空宇宙学科教授
*4 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部助教

た。近年、水星探査ミッションのための温度試験装置の開発が早急に望まれてきた。我々は、衛星搭載条件を上回る-160~+200°Cの広範囲温度試験装置を開発し、温度特性値として、感度、オフセット、ノイズレベルを取得することができた。ここでは、我々が開発した広範囲試験装置の概要について説明し、フラックスゲート磁力計の温度特性の結果について報告する。

温度特性が変化する要因の一つとして、熱応力による影響が考えられる。磁性材料とボビン材料の線膨張係数に大きな差があった場合、温度変化すると磁性材料に熱応力が加わり、磁化特性が変化することが影響していると言われている^{14), 15)}。その対策の為、海外における衛星搭載用磁力計のボビン材料には、磁性材料と線膨張係数が近い INCONEL が使用されている^{16), 17)}。本研究では、ボビン材料には、従来使われてきたセラミックボビンと、INCONEL625 ボビンとの温度特性の比較実験を行い、どちらのセンサが優れているか検証を行なう。

2. 温度試験用フラックスゲート磁力計

2.1 電子回路部

Fig.1 は電子回路部のブロック図である。フラックスゲート磁力計はセンサコアの磁性材料が容易に飽和し、外部磁場によって発生する励磁信号の2次高調波の振幅が外部磁場に比例することを利用しており、同調、検波、積分を経て外部磁場に比例する電圧を取得する。さらに、出力電圧を電圧電流変換器により電流に変換し、ピックアップコイルに印加することで外部磁場を打ち消し、その量を出力とするゼロメソッドとして動作させている^{18), 19), 20)}。電子回路部は、本システムの為に新たに開発したものである。この表面パネルには、端子が取り付けられており、その端子に抵抗やコンデンサをハンダ付けすることで、回路定数を自由に変更することができ、回路系によるノイズの比較実験が可能である。電子回路部をPCにRS-232Cケーブルで接続し、PCによるデータ収集、データ解析を行なうことができ、また、PCからの信号でドライブ周波数、ピックアップコイルの極性を変えることができる。回路部には、±2.5V、24bit ADコンバータを搭載し、128Hzでサンプリングを行なっている。計測レンジは電圧電流変換器のフィードバック抵抗で決定し、本実験では、±2048nT、分解能0.24pT、表示分解能1pTに設定した(Table1)。

2.2 センサ部

MMO 搭載磁力計では Fig.2 のような、リングコア型1軸フラックスゲートセンサを使用する。この磁力計は、ピックアップコイルとドライブコイルから構成され、ピックアップコイルは箱型の形状をしており、その中にドライブコイルが巻かれたセンサコアが入っている。センサコアは直径18mmの、ボビンの形状をしており、そこに薄膜のリボン状をした磁性材料が巻かれている。そのボビンにドライブコイルがトロイダル状に巻かれており、ピックアップコイルには、コイルがソレノイド状に巻かれている。ピックアップコイルは、2次高調波の検出コイルと、打ち消し磁場を発生させるフィードバックコイルの両方の役目を果たしている。磁性材料としてアモルファス VITROVAC6025 が使用される例もあるが²¹⁾、キュリー点が240°C²²⁾と低いので、MMO 搭載用には適していないと考えられ

る。本実験では、キュリー点480°Cの81%Niパーマロイを使用した。ボビン材料には、セラミックと、INCONEL625を使用した。ピックアップボビンの素材は Photoveel を使用した(Table2)。これらの材料の線膨張係数を比較したものを Fig.3 に示す。本実験では、セラミックボビンはパーマロイより線膨張係数が小さいので、低温領域においてパーマロイに熱応力が加わり、温度特性が変化すると考えられる。

2.3 励磁条件

古くからフラックスゲート磁力計のノイズは、バルクハウゼンノイズが最大の要因といわれており²³⁾、磁性体の磁化過程において磁壁が移動する時に、その移動が不連続に行なわれることに起因している。また磁性体内部の磁壁の中に、磁的にソフトで移動しやすい磁壁と、ハードで移動しにくい磁壁があり、励磁磁場振幅がある程度の大きさ以上ない場合、ハードな磁壁が残りノイズの原因となると言われている²⁴⁾。パーマロイは励磁磁界約10Oe(80A/m)で飽和するが、10Oeまで僅かながら緩やかに磁束密度が増加する。そこで本実験では、励磁電流振幅500mA、励磁磁界20.9Oe(1.66kA/m)、ドライブ周波数11kHzの正弦波で励磁を行った。

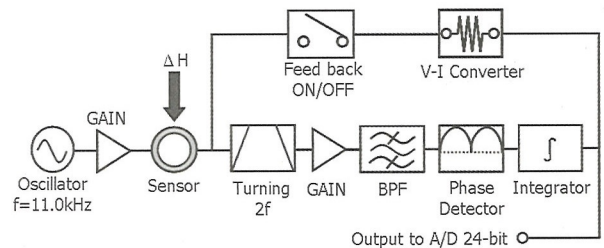


Fig.1 Fluxgate magnetometer electronics and block diagram.

Table 1 Specification of fluxgate sensor and electronics.

Sensor type	Ring core (1-axis)
Dimension	
Sensor	32×30×13mm
Electronics	430×252×150mm
Weight	
Sensor	25.8g (ceramics), 28.1g (INCONEL)
Electronics	4.5kg
Resolution	0.24pT (24-bit)
Measurement Range	±2048nT
Sample Rate	128Hz
Drive Frequency	11KHz (100Hz~16kHz)
Excitation Current	500mA

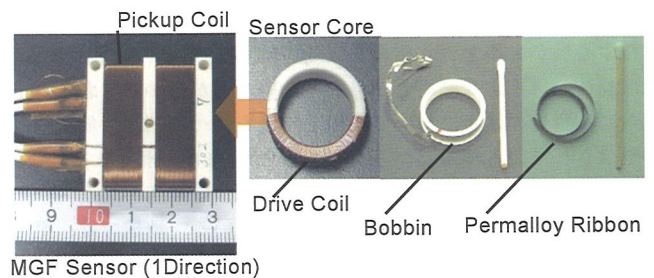


Fig.2 Structure of fluxgate magnetometer sensor.

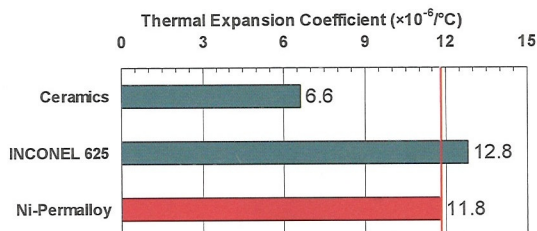


Fig.3 Comparison of Linier expansion coefficient for ring core material and magnetic material.

Table 2 Specification of test samples.

	Magnetic Material	Ring core	Pick-up Bobbin
Sample1	81% Ni Permalloy	INCONEL625	Photoveel
Sample2	81% Ni Permalloy	INCONEL625	Photoveel
Sample3	81% Ni Permalloy	Ceramics	Photoveel
Sample4	81% Ni Permalloy	Ceramics	Photoveel

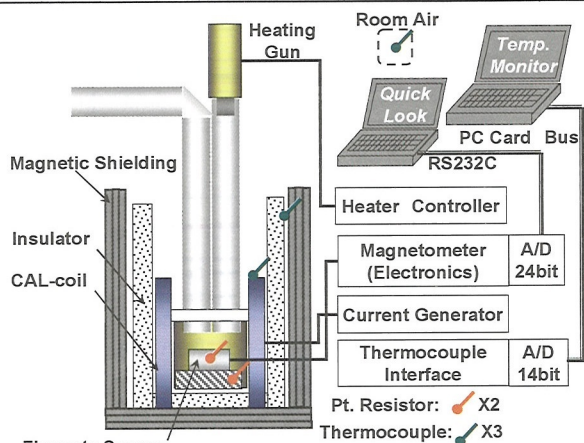


Fig.4 Measurement system of temperature characteristics for fluxgate sensor.

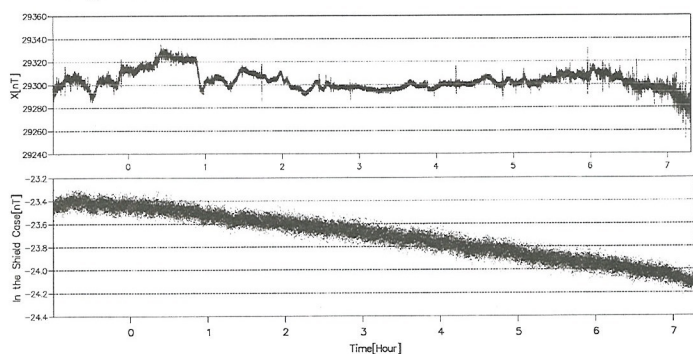


Fig.5 Comparison of magnetic field in a magnetic shielding and an external magnetic field in the laboratory.

2.4 センサコアの調整

センサをゼロ磁場の状態に置いて、ピックアップコイルとドライブコイルの間に生じている静電容量の影響で、ピックアップコイル側で、ドライブ周波数の2次高調波以外の波形が現われる。これらの波形はフィードスルーと呼ばれ、センサのオフセットやノイズに影響を与えるので、センサコアをピックアップコイル内で回転させ、偏心位置を調整することでフィードスルーの影響を少なくすることができる^{16), 25)}。今回実験に使用したセンサは、ピックアップコイルの中心にドライブコイルを固定する円盤と固定ネジが取り付けられており、容易に調整できる

ようにしてある。センサをシールドケース内に置き、ピックアップコイルからの出力をロックインアンプで計測し、1次波形が最小になるように調整を行なった。

3. 温度試験装置

3.1 試験システムの構成

広範囲温度試験装置の構成を Fig.4 に示す。ノイズレベルを計測するためには、外部磁場変動の影響を抑える必要があるため、円筒型三層パーマロイ磁気シールドケース (D350mm×H500mm) を使用し、その中にセンサを配置した。センサは耐熱容器の中に固定し、容器の中に温風と冷風を送り込んで、センサの温度が一樣になるように容器の中全体を温度変化させた。耐熱容器の温度が外部に影響を与えないように、耐熱容器と磁気シールドを断熱材 (セラミックファイバブランケット) によって保温した。加熱はヒーティングガン (室温~400°C) を使用した。ヒーティングガンには、モーターや電熱線が使用されているので、これらの磁気的影響が磁力計センサに与えないように、ヒーティングガンとセンサはある程度距離をとる必要がある。そこで断熱材で保温された非磁性の真鍮パイプによって温風を送るようにした。これによりセンサの位置ではヒーティングガンによる磁気的影響は見られなかった。冷却は、パイプからヒーティングガンを取り外し、自加圧式液体窒素タンクから気化した窒素ガスを使用した。これによって、簡単に高温-低温試験の切り替えが可能である。温度計測は非磁性の白金抵抗測温体 (Pt-100) と K 型熱電対を使用し、磁力計センサの温度計測には Pt-100 を使用した。温度データは 14bit AD コンバータで取得し、PC でモニターを行なった。温度計測は、ピックアップコイルケース (Photoveel) の表面とセンサ台座 (Photoveel) の二点で計測し、温度差が無くなったときに温度が一定になっていると定義した。容器の外側に直径 26cm のヘルムホルツコイル (コイル定数 26.637nT/mA) を取り付け、電流発生器で電流を流して感度の取得を行なった。センサケーブルは、耐熱フッ素樹脂皮膜電線 (耐熱温度-253~+260°C) を使用し、その接続には、融点 290°C の高温ハンダを使用した。

3.2 実験室の磁気的環境

磁気シールドケースの磁気遮蔽率を磁力計で精密計測した結果、磁気シールドケースの底から 10cm の所で最大の遮蔽効果を示し、遮蔽率は、-60dB (残留磁場<40nT) であった。実験室内の磁場環境ノイズと遮蔽効果を計測するために、磁気シールドケースの内と外で同時に磁場計測を行なった。内に置いた磁力計は 1 軸センサを設置し、外に置いた磁力計は 3 軸センサで、X 軸:北向き、Y 軸:東向き、Z 軸:鉛直下向きに設置した。22:30~7:30 の間で、9 時間の環境磁場変動の様子を Fig.5 に示す。都市部では、日中と深夜 (電車の終電から始発までの時間帯) で環境磁場が大きく異なっている場合が多く、その要因の 1 つとして、電車の運行が挙げられる²⁶⁾。日中の実験室では、数十 nT 程度の変動と、電気機器のスイッチ動作等による影響と思われるパルスノイズが約 50nT 程度存在しているが、午前 1 時~5 時においては、変動は数 nT になっている。これは電車の運行が停止している時間と一致しているため、この時間帯以外に見られる磁場変動の影響は、電車の運行による影響と思われる

る。磁気シールドケース内の磁力計は、ノイズレベル 0.2nTp-p の変動は見られるが、環境磁場変動の影響は見られなかったので、ノイズ計測に問題が無いことが確認できた。また、磁気シールドケース内の磁力計には、室温の変化による影響と思われるドリフトが見られる。これは、温度変化によって磁力計センサ部および回路部のオフセットの変動と、磁気シールドケースの残留磁場の変化であるが、このときの室内の温度変化 10°C に対して約 0.6nT 程度と小さいので、実験中の室温変化はオフセット計測への影響はないといえる。

3.3 温度変化

温度試験中の各計測点における温度変化の様子を Fig.6 に示す。温度の計測ポイントは、磁力計センサ、磁気シールド、室温、校正コイルである。ひとつの温度計測を行うときに、約 30 分間同じ温度を維持し、センサ温度に斑がないようにしている。温度変化は、室温、磁気シールドは 5°C 以下、校正コイルは 10°C 以下であった。これらの温度変化は、磁気シールドの帯磁量の変化、電子回路部のオフセットの変化に影響を与えるが、これらの温度変化は少ないので、温度特性の計測に与える影響は少ないと言える。

3.4 温度特性計測方法

温度特性の評価は、感度、オフセット、ノイズの項目を計測した。磁力計の出力には、検出磁場以外にオフセットが含まれているので、これらを切り分ける必要がある。一般に磁力計のオフセットと検出磁場との切り分けは、センサを 180 度回転させ、出力の平均値をオフセットと定義する。しかし、この温度試験システムでは、温度試験中に、高精度に 180 度回転させることは困難なので、磁力計センサを容器に設置する際に、予め 180 度回転させ、オフセットを求めておき、磁気シールド内の残留磁場に対し直交するように設置する。そうすると、センサはゼロ磁場に置かれた状態になり、残留磁場の影響を 1nT 以下にすることができた。このオフセットにはセンサオフセットと電子回路部のオフセットが合わさったトータルオフセットなので、その評価はセンサオフセットと電子回路のオフセットを切り分けて行った。本実験では、ピックアップコイルの極性を回路側で反転させる方法を採用した。この方法は、センサのオフセット成分が反転するので、極性を切り替えたとき、出力の変動した成分をセンサのオフセットとし、変動しない成分は、回路部のオフセットと定義した。感度計測には、磁気シールドケース内に配置したヘルムホルツコイルによって校正磁場を ±250nT 印加し、その時の出力電圧を計測した。温度特性の計測を行ったデータ区間の一例を Fig.7 に示す。感度計測のために校正磁場の入力を二回行い、その次に、ピックアップコイルの反転の作業を二回行なった。一連の作業は 10 秒間隔で行なわれ、一回の計測に 100 秒かかった。ノイズレベルは一秒間毎のデータを取得した。感度 S は式 (1) で表されるように、感度校正用ヘルムホルツコイルで与えた磁場 B [nT] と、その時の出力電圧 V [mV] で割って求めた。オフセットは、ピックアップコイルの極性を反転させてその出力を反転させる前を B_{p+} [nT]、反転させた後を B_{p-} [nT] とすると、電子回路部のオフセット O_e は式 (2) で表され、センサ部のオフセット O_s は式 (3) で表される。ノイズレベル N は式 (4)、1 秒間のデータを取得し、実効値 RMS として定義した。

$$S = \frac{V}{B} \text{ [mV/nT]} \tag{1}$$

$$O_e = \frac{B_{p+} + B_{p-}}{2} \text{ [nT]} \tag{2}$$

$$O_s = \frac{B_{p+} - B_{p-}}{2} \text{ [nT]} \tag{3}$$

$$N = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2} \text{ [nTrms]} \tag{4}$$

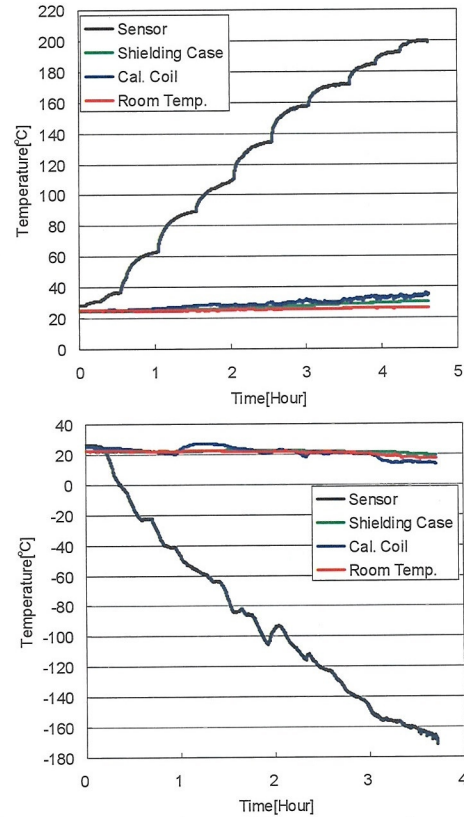


Fig.6 The temperature change of each measuring point under temperature test.

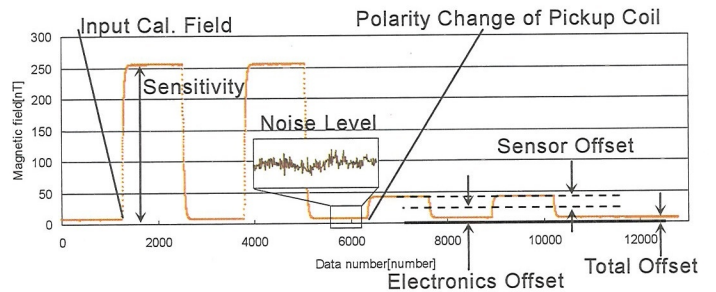


Fig.7 An example of the data range for measuring the temperature characteristics.

4. 温度試験結果

温度試験によって得られた結果を Fig.8~Fig.11 に示す。INCONEL コアとセラミックコアの大きな違いを挙げると、-100°C 以下からセラミックコアは、急激なオフセットの増加や周波数応答の減少などの現象がみられ、動作が不安定になった

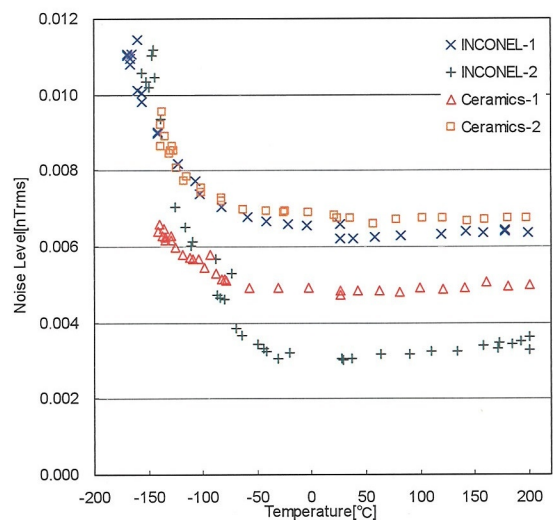
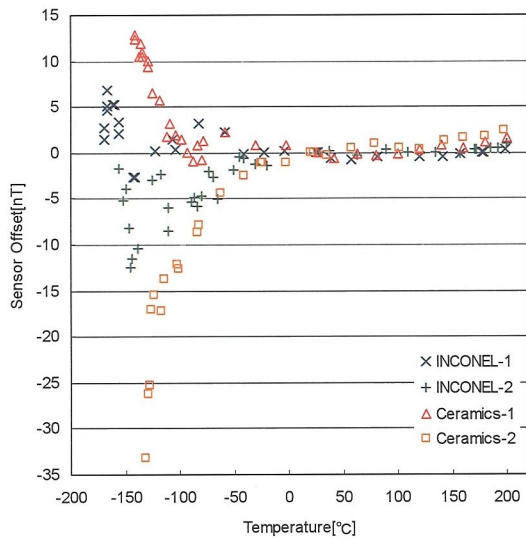
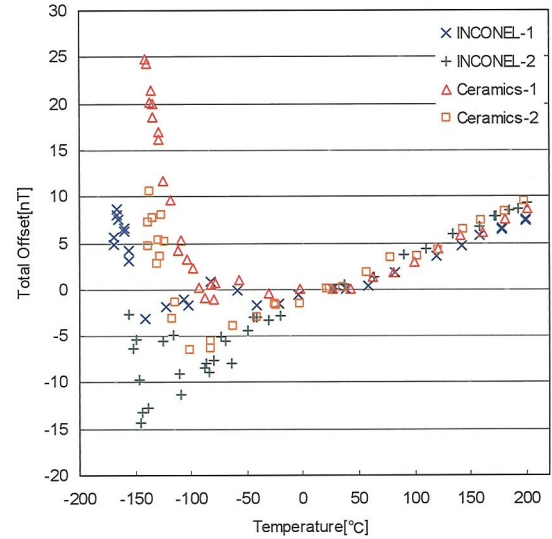
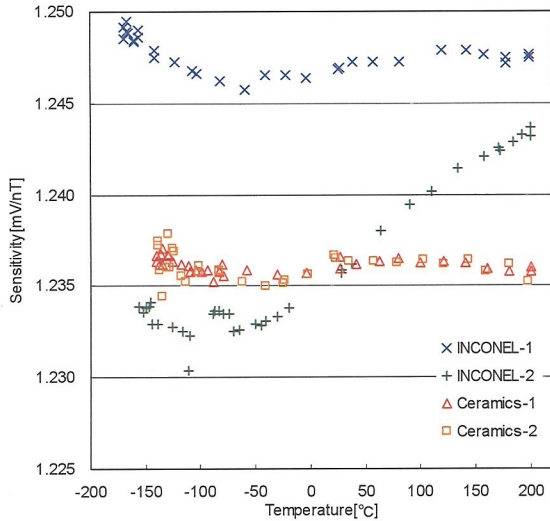


Fig.10 Sensor offset versus temperature.

Fig.11 Noise versus temperature.

-140°C 以下では感度の計測ができなくなったので、温度特性の計測は行わなかった。セラミックコアは-140～+200°C、INCONEL コアは-160～+200°C の温度範囲で温度特性の計測を行った。

4.1 感度

Fig.8 は温度に対する感度の変化量を示したものである。セラミックコアは INCONEL コアよりも感度は安定していた。INCONEL-2 のセンサだけ感度の大きな変動が見られ、平均変化率は 30ppm/°C であった。感度が温度とともに上昇する要因として、フィードバックコイルの熱膨張と、コイル銅線の内部抵抗の上昇が考えられる。フィードバックコイルが熱膨張すると、コイルの電流密度が小さくなるので、外部磁場をキャンセルする為に大きな電流が必要になる。また、内部抵抗が上昇すると、電圧電流変換器の抵抗値が変化し、より大きな電圧が必要になる。フィードバックコイルに使われている銅線の線膨張係数は 17ppm/°C で、内部抵抗の変化率は 4ppm/°C になる。これらを考えると、INCONEL-2 の感度の変化は妥当であるが、他のセンサにあまり変化が見られていない。他のセンサには感度の上昇を打ち消す磁化特性の変化の影響が働いている可能性がある。

4.2 オフセット

Fig.9 は温度に対するトータルオフセットの室温を基準とした変化量を示したものである。全てのセンサにおいてトータルオフセットは、-100°C～+200°C の範囲ではボビン材料による差は見られなかった。これを電子回路部とセンサ部とで分離し、センサオフセットの変化量を示したものが Fig.10 である。-100°C 以上では、センサオフセットの変動は小さく温度依存性は見られなかった。-100°C 以下になると、セラミックコアは大きな変動が見られた。INCONEL コアでもセンサオフセットの 5～10nT 程度の変動はあるが、セラミックコアのオフセット変化よりも小さかった。

4.3 ノイズレベル

Fig.11 は温度に対するノイズレベルの変化量を示したものである。ノイズレベルは-100°C 以上では、個体差によるレベルの違いはあるが、温度依存性は見られず、大きな変動は見られなかった。-100°C 以下では、全てのセンサにおいてノイズの上昇傾向が見られた。

5. 結言

我々は、フラックスゲート磁力計用広範囲温度試験装置を開発し、-160～+200°Cまでの温度試験を行い、感度、オフセット、ノイズの温度特性を得ることができた。ポピン材料として温度特性が改善されるといわれてきた INCONEL と、従来ポピン材料として使用されてきたセラミックとの温度試験を行い、これらの温度特性の比較を行った。その結果以下のような結論を得た。

- (1) -100°C以下の温度特性は、INCONEL コアよりセラミックコアの方が悪かったが、-100°C以上では、特に温度特性の差は見られなかった。
- (2) 低温側でセラミックコアに著しい温度特性の変化が生じたことにより、温度特性には、熱応力による磁化特性の変化が大きく関与していることを本実験によって確かめることができた。
- (3) ポピン材料に INCONEL を使用することで温度特性は改善すると言われているが、高温側では特に改善されなかった。
- (4) Bepi-MMO 搭載用フラックスゲート磁力計センサの温度範囲は-100～+175°Cなので、セラミックコアを使用しても問題ない事が分かった。

セラミックコアの方が INCONEL コアよりも 2g 軽いというメリットがあり、軽量化は重要な要素なので、セラミックコアの方が適していると言える。

今後、温度特性の理論的な検討を行なうために、パーマロイの磁気履歴曲線を取得し、磁化特性の温度変化と磁力計温度特性との因果関係をみていく予定である。

謝辞

この研究の一部は、文部科学省の科学研究費補助金および宇宙航空研究開発機構 (JAXA)・宇宙科学研究本部の搭載機器基礎開発研究補助金の一部をあてて行なわれました。またフラックスゲート磁力計のセンサコアおよび電子回路の製作に当たっては、(株)テラ・テクニカのご協力を得ました。関係各機関、各位に対し、ここに深謝いたします。

参考文献

- 1) N. F. Ness, et al: Magnetic field observation near Mercury: Preliminary results from Mariner 10, *Science*, Vol.185, p151-160, 1974.
- 2) J. E. P. Connerney and N. F. Ness: Mercury's magnetic field and interior, in "Mercury", University of Arizona Press p494-513, 1988.
- 3) C. T. Russell, D. N. Baker and J. A. Slavin: The magnetosphere of Mercury, in "Mercury", University of Arizona Press p514-561, 1988.
- 4) C. T. Russell: Planetary magnetism, in "Geomagnetism", J. A. Jacobs (Editor) Academic Press Vol.2 p457, 1987.
- 5) G. Schubert, et al: Mercury's thermal history and the generation of its magnetic field, in "Mercury", University of Arizona Press p429, 1988.
- 6) D. J. Stevenson: Mercury's magnetic field: a thermoelectric dynamo?, *Earth Planet. Sci. Lett.* Vol.82 p114, 1987.
- 7) 向井利典, 水星探査 WG : BepiColombo 国際水星探査計画提

案書, ISAS Mercury Project Office, 2001.

- 8) O. V. Nielsen, et al: Development, construction and analysis of the 'Ørsted' fluxgate magnetometer, *Meas. Sci. Technol.* Vol.6 p1099-1115, 1995.
- 9) T. Risbo, et al: Ørsted pre-flight magnetometer calibration mission *Meas. Sci. Technol.* Vol. 14 pp674-688 2003.
- 10) W. Magnes, et al: A spaceborne magnetometer tested under extended temperature conditions (experiment MAREMF-OS/MARS-96), *Meas. Sci. Technol.* Vol.9 p1219-1228, 1998.
- 11) D. I. Gordon, et al: A fluxgate sensor of high stability for low field magnetometry, *IEEE Trans. Mag.*, Vol.MAG-4 No.3, p397-401, 1968.
- 12) 山本達人, 國分 征: 衛星搭載弱磁場計測磁力計の地上校正, 宇宙科学研究報告 第 88 号, 1996.
- 13) 網川秀夫, 他, : 衛星搭載用磁力計センサ温度による感度・オフセット変化, 搭載機器基礎開発成果報告書 Vol.14 p13-18, 2001.
- 14) Pavel Ripka: Review of fluxgate sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 33 p129-141, 1992.
- 15) R. Szweczyk and A. Bienkowski: Stress dependence of sensitivity of fluxgate sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 110 p232-235, 2004.
- 16) P. Brauer, et al: Fluxgate sensor for the vector magnetometer onboard the 'Astrid-2' satellite, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 81 p184-188, 2000.
- 17) O. V. Nielsen, et al: A high-precision triaxial fluxgate sensor for space applications: layout and choice of materials *Sensor and Actuators A* 59 168-176 1997.
- 18) F. Primdahl: The fluxgate mechanism, *IEEE Trans. Magn.* Vol.MAG-6 p376-383, 1970.
- 19) M. H. Acuna: Fluxgate magnetometers for outer planets exploration, *IEEE Trans. Magn.* Vol.MAG-10 p519-523, 1974.
- 20) F. Primdahl: The fluxgate magnetometer, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol.12, p241-253, 1979.
- 21) O. V. Nielsen, et al: A high-precision triaxial fluxgate sensor for space applications: layout and choice of materials *Sensor and Actuators A* Vol.59 168-176 1977.
- 22) G. Bordin, et al: Temperature dependence of magnetic properties and phase transitions in a soft magnetic Co-based nanostructured alloy, *J. Phys. D: Appl. Phys.* Vol.32 1795-1800 1999.
- 23) J. L. M. J. Van Bree, et al: Barkhausen noise in fluxgate magnetometers, *Appl. Sci. Res.* Vol.29 p59-68, 1974.
- 24) Pavel Ripka and William .G. Hurley: Excitation tuning in fluxgate sensors, *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002. IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE* Vol. 1 p677 - 680, 2002.
- 25) J. R. Petersen, et al.: The ring core fluxgate sensor null feed-through signal, *Meas. Sci. Technol.* Vol.3 1149-1154, 1992.
- 26) 山崎慶太, 他, : 磁気シールド設計のための超低周波環境磁界変動の特性, *電学論 A* 122 巻 10 号 p925-932, 2002.