

氏 名 村田 直史

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2178 号

学位授与の日付 2020 年 9 月 28 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 宇宙機による将来の磁場探査に向けた基本波型直交フラックスゲート磁力計の開発

論文審査委員 主 査 准教授 岩田 隆浩

教授 堂谷 忠靖

教授 高島 健

准教授 浅村 和史

教授 松岡 彩子

京都大学 理学研究科

名誉教授 笹田 一郎

九州大学

博士論文の要旨

氏 名 村田 直史

論文題目 宇宙機による将来の磁場探査に向けた基本波型直交フラックスゲート磁力計の開発

宇宙科学において磁場は重要な物理量の1つであり、宇宙開発黎明期から現在に至るまで多くの宇宙機に磁場観測器が搭載され、宇宙空間における磁場の“その場観測”が行われてきた。Voyager に代表される 1960 年代～1980 年代のミッションの磁場観測により太陽系内の種々の電磁気現象の理解が大きく進展した。その後もこれらの現象をより詳細に解明するためのミッションが実施され、近年では地球磁気圏の Van Allen 帯の観測を行う、あらせ (ERG) ミッション等が成果を上げている。

これまで宇宙機に搭載されてきた磁場観測器のうち、直流を含む低周波帯域のベクトル観測を行う用途ではリングコアを有する平行型のフラックスゲート磁力計が多く採用されてきた。その最も重要な理由として、センサ出力信号に現れるオフセット成分を小さく安定にできることが挙げられる。直流磁場の計測では出力オフセット成分の不確かさは測定誤差に直結し、宇宙環境特有の大きな温度変動等によりオフセット成分が不安定であると計測精度上問題となる。この点で科学観測の要求を満足できるものはリングコア型フラックスゲート以外に現れてこなかった。

リングコア型フラックスゲートは小型・軽量化、低消費電力化が進められてきたが、センサ構造の複雑性と、性能を発揮するための各種制約によりその開発は概ね限界に達し、技術的に成熟状態にある。一方磁場観測器の搭載が計画される将来ミッションの OKEANOS (木星トロヤ群への深宇宙探査) や Comet Interceptor (複数の小型探査機による彗星探査) 等では、磁場観測器の搭載形態は制約を増しており、これまで以上に小型・軽量で消費電力の少ないセンサが求められている。例えば OKEANOS ミッションでは一辺 40 m 程度の超大型膜面セイルの先端に磁場観測器を搭載する計画であり、センサは展開機構を妨げないサイズ・質量である必要がある。

上記に加え磁場観測器は各ミッションにおける厳しい計測性能要求を満足する必要がある。OKEANOS における磁場観測では太陽風中電子の加熱機構を解明することを目的とする。その中で重要となる低周波電磁波動の Whistler 波を惑星間空間で観測し、その伝搬方向等を十分な精度で算出するためには、センサ雑音は 1 Hz で 18 pT/Hz^{1/2} より十分に小さく、センサ出力オフセットの温度に対する安定性は 0.029 nT/°C 以下を実現する必要がある。

本研究では磁場観測器の一層の低リソース化と厳しい計測精度の要求を同時に実現しうる新方式の磁力計として、2002 年に提案された基本波型直交フラックスゲート (FM-OFG) に着目し、宇宙機搭載品としての開発を行った。FM-OFG は細長いアモルファス磁性体のワイヤコアに検出コイルを巻回する簡素なセンサ構造を有し小型・軽量化に適する。また直流と交流が重畳したユニークな励磁電流をワイヤに直接通電することによりワイヤ

を励磁し、外部磁場を交流励磁電流と同じ基本波周波数で変調して検出することで、極めて良好なセンサ雑音性能が得られる。動作原理上大きく不安定な出力オフセットが発生するが、励磁電流の極性を周期的に反転させこれを大幅に低減・安定化するバイアススイッチング法が先行研究で提案されており、この点により本センサは宇宙科学用途へ有望な適用可能性を持つものと判断した。

一方、FM-OFG を宇宙機搭載品として実用化するためには次のような課題がある。センサの雑音がワイヤコアの磁気特性により大きくばらつき、複数センサ間で安定した性能を得ることが難しい。またセンサ出力オフセット安定性は先行研究により低減されてきているが OKEANOS 要求に対しては 5 倍以上悪く改善が必要である。さらに低消費電力化や 3 軸構成への拡張については十分な検討が行われておらず、また宇宙機搭載品として必須となる打ち上げ振動への耐性や真空中の動作安定性に着目した開発が行われた例は存在していない。

本研究では 1 軸あたりコア長 45 mm、検出コイル幅 3 mm、質量 1 g の FM-OFG センサを基本設計として製作した。センサの雑音性能の再現性を向上させるべく、先行研究からコア材料を変更し Glass-coated タイプと呼ばれるアモルファスワイヤを新たに採用した。本ワイヤは磁気特性の均一性に優れるとされる一方で、内部に強い残留応力が存在しセンサの性能に影響することも指摘されている。実際に、製造後そのままの状態のワイヤを用いたセンサの雑音は目標性能に遠く及ばなかった。ワイヤ内の応力を緩和するため、ワイヤに電流を流し自己発熱で熱処理を行う通電熱処理を実施したところ、センサ雑音特性は大きく改善し、OKEANOS の要求を満足する 1 Hz で $11 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ を達成した。重要なことに、この雑音改善は複数のセンサにおいて同様に得られ、また熱処理前はセンサ毎に差異が認められた固有感度も均質に揃えることに成功した。これらは応力緩和がもたらすワイヤ内の磁区構造の変化と、ワイヤ円周方向への磁気異方性誘導により実現されたものと解釈される。更に、通電熱処理時の温度を高めることで、軌道上で想定される高温環境下でもワイヤの磁気特性変化を抑制できることを示した。

センサの低消費電力化にあたり、励磁電流を小さくするほどセンサ雑音が増加する傾向が得られた。これは励磁極性反転の瞬間にワイヤコア内で生じる過渡的な雑音で、磁化の飽和の程度に応じて変化するためであることを明らかにした。この過渡部分の信号を回路中で遮断し安定な GND 信号でマスクする手法を提案し、励磁電流の大小によらず安定で良好な雑音性能を実現できることを示した。結果 FM-OFG センサ部での消費電力を、あらせ衛星搭載のリングコア型フラックスゲートと比較して 1/3 以下に低減した。

FM-OFG のセンサ出力オフセットは、主としてワイヤコアに存在する一軸性の磁気異方性に起因して発生する。理想的には励磁極性に応じてワイヤ内の磁化の挙動が反転することでこのオフセット成分は対称的に検出され、平均化によりキャンセル可能である。しかしながら正負各励磁極性に対する検出信号は実際には対称とならず、振幅差・位相差のアンバランスが存在することが明らかとなった。磁化の挙動には励磁極性に応じて非対称性が存在しているものと考えられる。磁気異方性の温度変化により励磁極性に対する検出信号のアンバランスが変化すると、オフセットドリフトを発生させる。本研究ではこのアンバランスを同期検波のタイミング調整により効果的に補正する方法を提案し、出力オフセットの温度安定性向上に成功した。達成した $0.015 \text{ nT/}^\circ\text{C}$ ($-60^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$) の安定性は

先行研究より 1 桁小さく、OKEANOS の要求を満足した。

本研究では打ち上げ振動や真空中での動作を想定した新たなセンサ設計を行った。センサのボビンに宇宙環境への耐性を持ちフライト実績のある素材の選定を行うとともに、検出コイルやワイヤコアが強固に固定される構造とした。製作したセンサは観測ロケット条件で振動試験及び真空中動作試験を行い、耐環境性を実証した。

本研究では FM-OFG センサの 3 軸拡張も実施し、3 本のセンサの特性を単軸動作時と同等に保つために並列構成で励磁することを提案した。また軸間のクロストークを最小にするためのセンサ配置を決定し、ミスアライメント 0.6 deg 以内の直交度で良好に磁場のベクトル計測が可能なことを示した。

本研究では将来ミッションに向けた小型・軽量で低消費電力な磁場観測器として FM-OFG の総合的な開発に成功した。センサ性能は将来の OKEANOS ミッションの要求値を達成し、その実用性を示すことができた。

博士論文審査結果

Name in Full 氏 名 村田 直史

論文題目 宇宙機による将来の磁場探査に向けた基本波型直交フラックスゲート磁力計の開発

出願者は、将来の宇宙科学ミッションにおける磁場観測器に求められる厳しい要求を実現するため、小型軽量性に優れる新方式の基本波型直交フラックスゲート (FM-OFG) に着目して、新しい磁性コアの採用や熱処理、効果的な信号処理方法等の技術を確認することにより、OKEANOS ミッションを想定した目標性能を達成する磁力計を開発した。また、同センサに対して環境試験を行って宇宙機搭載品としての実用性を実証した。本研究は宇宙機搭載の磁場観測器として世界で初めて FM-OFG の適用を目指したものであり、既存方式のデメリットを解決し、微弱な低周波の磁場について直流成分を含め長期にわたって測定することを可能にしておき、将来の磁場計測ミッションの実現に大きく寄与するものである。

本研究では、センサの雑音性能の再現性を向上させるために、先行研究からコア材料を変更し Glass-coated タイプと呼ばれるアモルファスワイヤを新たに採用した。本ワイヤは、磁気特性の均一性に優れるとされる一方で、内部に強い残留応力が存在してセンサの性能に影響することが指摘されており、製造後そのままの状態のワイヤを用いたセンサの雑音は目標性能に遠く及ばなかった。このためワイヤ内の応力の緩和が必要と判断し、ワイヤに電流を流し自己発熱で熱処理を行う通電熱処理法を考案して、センサ雑音特性を大きく改善して OKEANOS の要求を満足する 1 Hz で 11 pT/Hz^{1/2} を達成した。この雑音改善手法の再現性を複数のセンサにおいて確認し、また熱処理前はセンサ毎に差異が認められた固有感度も均質に揃えることに成功した。これらは応力緩和がもたらすワイヤ内の磁区構造の変化と、ワイヤ円周方向への磁気異方性誘導により実現されたものと解釈した。更に、通電熱処理時の温度を高めることで、軌道上で想定される高温環境下でもワイヤの磁気特性変化を抑制できることを示した。

センサの低消費電力化にあたり、励磁電流を小さくするほどセンサ雑音が増加する傾向を見出し、その原因として、励磁極性反転の瞬間にワイヤコア内で生じる過渡的な雑音が、磁化の飽和の程度に応じて変化するものであることを明らかにした。この過渡部分の信号を回路中で遮断し安定なグランド電位でマスクする手法を提案し、励磁電流の大小によらず安定で良好な雑音性能を実現できることを示した。結果として、FM-OFG センサ部での消費電力を、「あらせ」衛星搭載のリングコア型フラックスゲートと比較して 1/3 以下に低減した。

FM-OFG のセンサ出力オフセットの低減において、ワイヤコアに存在する一軸性の磁気異方性が、正負各励磁極性に対して振幅差・位相差のアンバランスによる非対称性が存在していることを見出した。本研究ではこのアンバランスを同期検波のタイミング調整によ

り効果的に補正する方法を提案し、出力オフセットの温度安定性向上に成功した。達成した $0.015 \text{ nT/}^\circ\text{C}$ ($-60^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$) の安定性は、先行研究より 1 桁小さく、OKEANOS の要求を満足した。

また、打ち上げ振動や真空中での動作を想定した新たなセンサ設計を行った。センサのボビンに宇宙環境への耐性を持ちフライト実績のある素材の選定を行うとともに、検出コイルやワイヤコアが強固に固定される構造とした。製作したセンサについて観測ロケットの打ち上げ環境条件を想定した振動試験及び真空中動作試験を行い、耐環境性を実証した。さらに FM-OFG センサの 3 軸拡張を実施し、3 本のセンサの特性を単軸動作時と同等に保つために並列構成で励磁することを提案した。また軸間のクロストークを最小にするためのセンサ配置を決定し、ミスアライメント 0.6° 以内の直交度で良好に磁場のベクトル計測が可能なことを示した。

審査会においては、約 1 時間半の公開講演、質疑応答、その後の審査委員全員との非公開質疑を通し、出願者が観測データの解析・解釈のために専門家との議論や情報整理等、本論文の取りまとめを主体的に進めたことが確認された。審査委員会は本論文が博士学位論文に相応しい優れたものであると全員一致で判断した。