

学術論文

コイルを組み合わせた開口部を有する磁気シールドの検討

A Study on Magnetic Shielding Enclosure with Openings with Coil Systems

松岡 信仁^{*1} (学生員), 松村 啓志郎^{*1}, 久保田 晃弘^{*2},
田代 晋久^{*1} (正員), 脇若 弘之^{*1} (正員)

Akihito MATSUOKA(Stu. Mem.), Keishiro MATSUMURA, Kubota AKIHIRO,
Kunihisa TASHIRO(Mem.), Hiroyuki WAKIWAKA(Mem.)

We propose a new magnetic shielding system. This magnetic shield has the shape of a hexagonal tube with an opening. Compared with a conventional cylindrical magnetic shield, this system can provide a better magnetical environment. The measured results show that the system demonstrates a special environment as 10 nT (in z axis) in 32 % of the residual magnetic field in the shield. Moreover, this magnetic shield combined three sets of coil system. The measured results show that the system demonstrates 100 nT (in 3-axes) in 30 % of the residual magnetic field in the shield.

Keywords: residual magnetization measurement, hexagonal tube, magnetic shielding system, coil system.

1 はじめに

人工衛星等の宇宙機器はロケットへの搭載前に対策を講じるため、宇宙磁場である 10 nT 以下のシールド環境を提供する必要がある[1]。日本の宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所本部(JAXA/ISAS)では、ISAS が所有する飛翔体用大型磁気シールドルームと呼ばれる球形状のパーマロイ 3 重シールド内部で搭載機器の残留磁気計測が行われている[2]。このような高性能のものは制作費が数億円する上、大重量であるため[3]、著者らは、研究室レベルで手軽に使用できる磁気シールドとして、安価かつ軽量である、円筒磁気シールド(以下、円筒)の評価を行ってきた。しかし、目標となる 10 nT 以下の磁界空間を実現できなかつたため、円筒の欠点となる軸方向のシールド性能に着目した。軸方向のシールド性能の向上を目指し、一様磁界発生コイル[4] (Simple box-9)を用いて、軸方向の地磁気キャンセルを行つた後、円筒を組み合わせ、残留磁界測定を行つた。結果として、円筒内部 60 % の領域で±100 nT 以下の磁束密度変動に抑えることはできたが、10 nT 以下の領域を実現することはできなかつた[5]。次なる対策として、開口部の存在により決まるシールド性能に着目し、新たに片側開口部を有する正六角柱磁気シールド(以下、正六角柱)を製作した。片側を開口部にすることより、開口部側で内部の磁束密度を低減することに成功し、磁気シールド内部の磁束密度に一様

性と見なせる範囲を確保できることを確認した。

本論文は、円筒と正六角柱の軸方向に対するシールド性能評価を行い、正六角柱が開口部を有することによって磁気シールド内部の磁束密度に一様性が得られたことを述べる。また、磁気シールドと一様磁界発生コイルを組み合わせた簡易磁気シールドシステムについて、地磁気に対する内部の磁束密度(軸方向成分のみ)の測定結果を円筒と正六角柱の両者で比較を行つた結果、正六角柱に優位性が確認できたので報告する。さらに、一様磁界発生コイル(Simple cubic-3)[6]を 3 つ用いて 3 軸磁界発生装置を作成し、3 軸方向で正六角柱内部の中心で 0 nT を実現した後、軸方向の内部の磁束密度(全磁力)の測定を行つたので報告する。

2 正六角柱磁気シールド

軟磁性材料を用いた U 字型の構成要素をもつ磁気シールドが提案されている[7]。しかし、この磁気シールドは閉構造となつてることから外部からのアクセスが容易でないという欠点がある。著者らは U 字型の構成要素を組み合わせた片側のみが開口部を有する開構造の正六角柱の製作を行つた。正六角柱は U 字型にしたシールド材料を Fig. 1 の過程を踏まえて 1 層巻きと定義し、積層することで厚みを持たせた。また、空隙材にアクリルを用いて 3 つの正六角柱を重ねた 3 重構造とする。寸法は円筒と比較を行うためにもほぼ同等のサイズとした。外観を Fig. 2 に示し、仕様を Fig. 3 に示す。シールド材料にはファインメット(日立金属、MS-FR 470-100M-T0)を使用した。

連絡先： 松岡 信仁, 〒380-8553 長野県長野市若4-17-1,
信州大学大学院工学系研究科電気電子工学専攻

e-mail: waki-lab@live.jp

*¹信州大学 *²多摩川精機株式会社

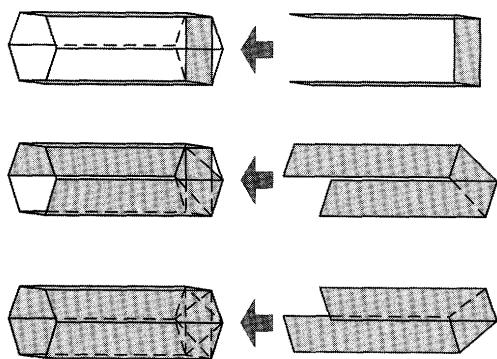


Fig. 1 Definition of the one layer for the hexagonal tube.

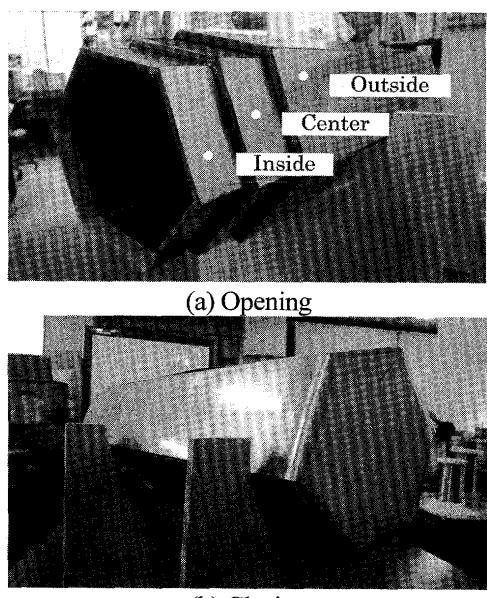


Fig. 2 Hexagonal tube.

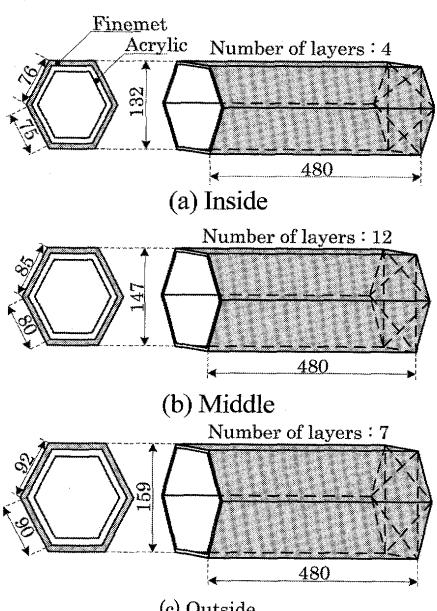


Fig. 3 Systematic design of the hexagonal tube.

3 一様磁界発生コイル

磁気シールドの軸方向のシールド性能を向上させる対策として一様磁界発生コイルを用いた。今回は2種類のコイルを用いてそれぞれで実験を行った。まず1つ目の一様磁界発生コイルとしてSimple box-9の仕様をFig.4に、外観をFig.5示す。一辺500 mmの正方形コイルを等間隔に9つ並べた構造で、外側2つのコイルは20回巻きとし、それ以外のコイルは10回巻きとした。この一様磁界発生コイルは、コイル内部の70%の領域内で偏差1%以下の一定磁界を発生できるコイルであり、一定磁界を発生コイルとして特に有用性がある[4]。2つ目の一様磁界発生コイルとしてSimple cubic-3の仕様をFig.6に示す。一辺2 mの正方形コイルを等間隔に3つ並べた構造で、外側2つのコイルは24回巻きとし、中央のコイルは12回巻きとした。この一様磁界発生コイルは、コイル内部の50%の領域内で偏差3%以下の一定磁界を発生できるコイルである[6]。このコイルは前者に比べて一様性に劣るが、利用できる空間が広く外部からのアクセスが容易であることが利点として挙げられる。また1辺を d [m]とする立方体であるため3軸磁界発生装置として製作することが容易である。Simple cubic-3を用いて製作した3軸磁界発生コイルをFig.7に示す。

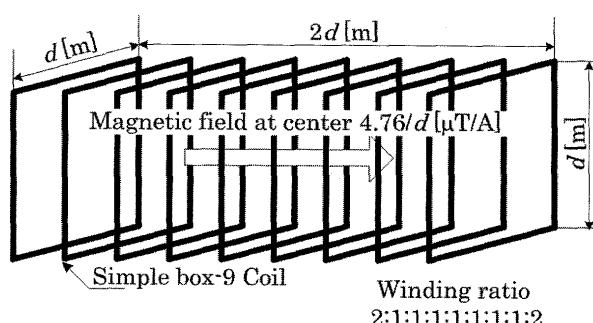


Fig. 4 Systematic design of Simple box-9.

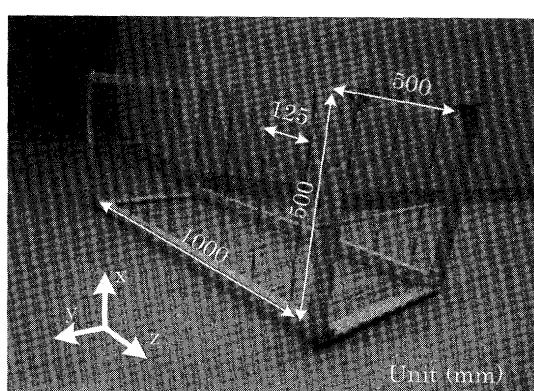


Fig. 5 Simple box-9.

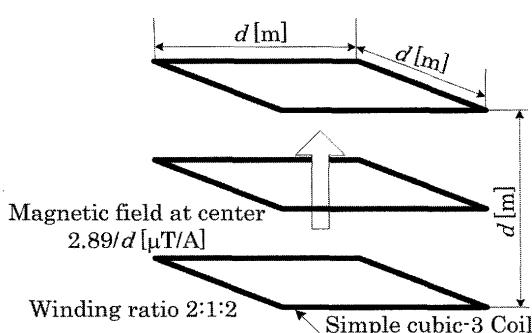


Fig. 6 Systematic design of Simple cubic-3 Coil.

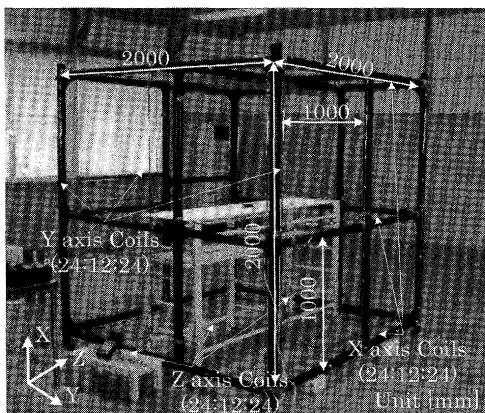


Fig. 7 Three set of coil systems.

4 軸方向のシールド性能評価

今回のような非線形性かつ極めて高い透磁率を有する薄い磁性層厚みを的確にモデル化し、有限要素法解析を行うと解の収束が得られない。そこで、微弱磁界に対する透磁率はほぼ一定とし、スカラーポテンシャルを用いた3次元静磁界解析を行った。解析ソフトは COMSOL Multiphysics Ver3.4 を用いて透磁率を70,000とし、シールド中心軸上(z軸上)の磁束密度分布の傾向を円筒と正六角柱で比較した。結果を Fig. 8 に示す。正六角柱の閉口部側で磁束密度を大きく低減でき、中心付近で均一な残留磁束の領域を円筒に比べて2倍近く得られることを確認した。

解析結果を基に、新たに製作した正六角柱の微弱磁界に対する軸方向シールド性能を測定し、円筒との比較を行った。Fig. 9 に測定概略図を示す。Simple box-9 (Fig. 5) を用いて周波数 10 Hz で通電し、コイル中心で交流磁束密度 100 nT を発生させる。この後、正六角柱をコイル中央に設置し、シールド内部 z 軸上 z 方向(軸方向)の磁束密度測定を行った。測定にはブラックスゲートセンサ(MEDA 社製, μMAG-01N, 以下 FG)を用いた。

シールド性能測定結果を Fig. 10 に示す。円筒の場合でシールド中心の磁束密度を 1/120 程度に低減することができたのに対し、正六角柱では 1/25 程度にしか低減することができなかつたが、正六角柱の閉口部側で磁束密度を円筒に比べて大きく低減することに成功した。以上より有限要素法解析と実測を通じて正六角柱の優位性を示した。

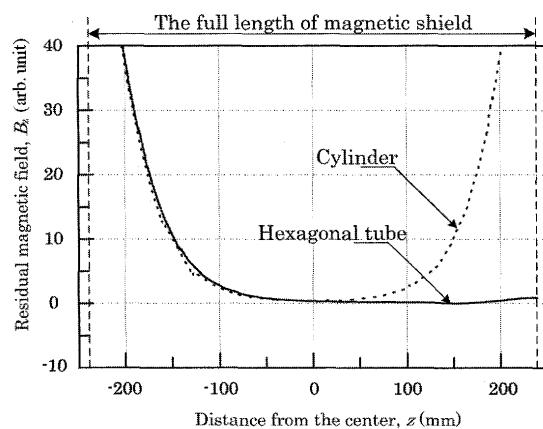


Fig. 8 Magnetic flux distribution that uses FEM analysis.

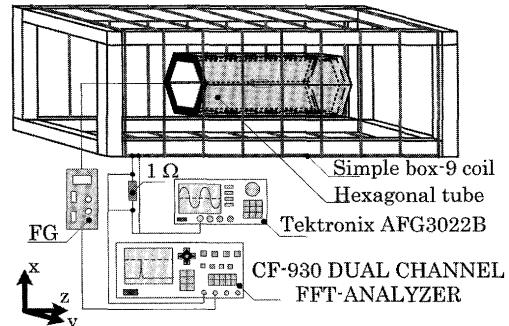


Fig. 9 Measurement system for shield evaluation.

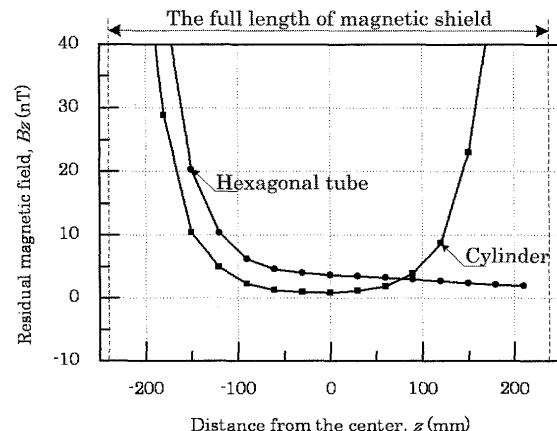


Fig. 10 Axial component inside the magnetic field on the center axis. External field was 100 nT, 10 Hz.

5 地磁気に対するシールド性能評価（軸方向）

磁気シールドと Simple box-9 (Fig. 5)を用いて、軸方向の地磁気残留磁界測定を行った。Fig. 11 に両者を組み合わせた簡易磁気シールドシステムを示し、Fig. 12 に測定概略図を示した。磁気シールドは Simple box-9 の中央に設置し、円筒と正六角柱の 2 種類を用いてそれぞれで同様の測定を行った。初めの測定は、コイルを用いずに、磁気シールドのみでシールド内部z軸上z方向(軸方向)の地磁気残留磁界測定を行った。次に、コイルに直流電流を通電し直流磁界を発生させて、シールド内部の地磁気残留磁界をキャンセルさせる。この時、シールド内部の中心 $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ で z 軸方向成分を 0 nT となるようにした。測定には FG を用いた。

軸方向の地磁気残留磁界測定結果を Fig. 13 に示す。円筒のみと正六角柱のみの場合を比較すると、シールド中心では円筒の方が内部の残留磁束密度は小さいことが読み取れる。しかし、前章で述べた通り、正六角柱は閉口部側の内部磁界を大きく低減することに成功し、地磁気に対しても中心から閉口部まで偏差 100 nT 以内に抑えることができた。コイルと磁気シールドを組み合わせた簡易磁気

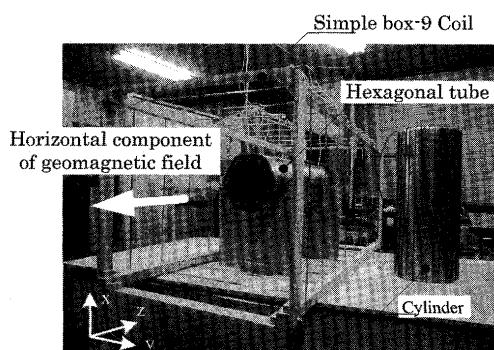


Fig. 11 A magnetic shielding system.

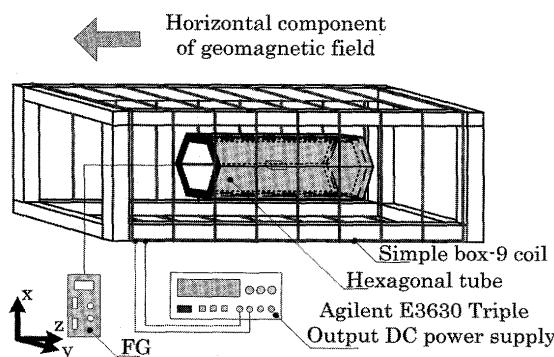


Fig. 12 Measurement chart of residual magnetic field of geomagnetic field.

シールドシステムについて、円筒と正六角柱を比較すると、円筒ではほとんど変化がなく 10 nT 以内の領域を確保できたのは中心の 1 点のみであった。しかし、正六角柱では閉口部側の内部磁界を大きく低減することを実現したため中心を 0 nT にした場合、閉口部側で一様磁場と見なせる領域を有することができ、軸方向に対してシールド内部 32% 以内の領域で 10 nT 以下、 66% 以内の領域で 100 nT 以下の磁界空間を実現し、円筒に比べて優位性が確認された。Fig. 14 に正六角柱とコイルを組み合わせた場合の測定結果について、評価範囲を狭めて拡大した結果を示す。

ここで、閉口部付近で内部の磁束密度が大きくなる点について着目する。原因として、磁性層が磁化することにより値が大きくなると考えた。この問題について検討を行ったので第 7 章に示す。

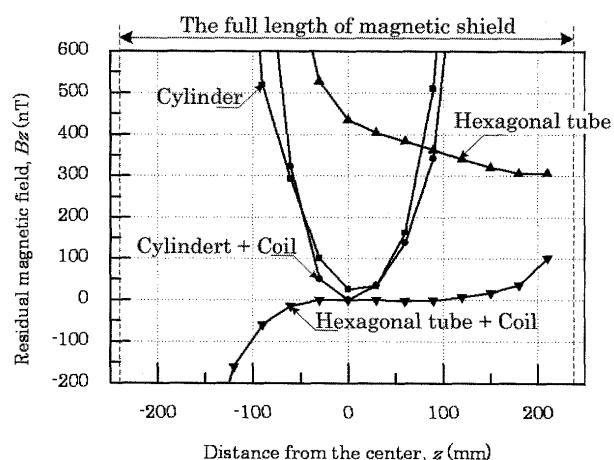


Fig. 13 Axial component of residual magnetic field along to the center axis.

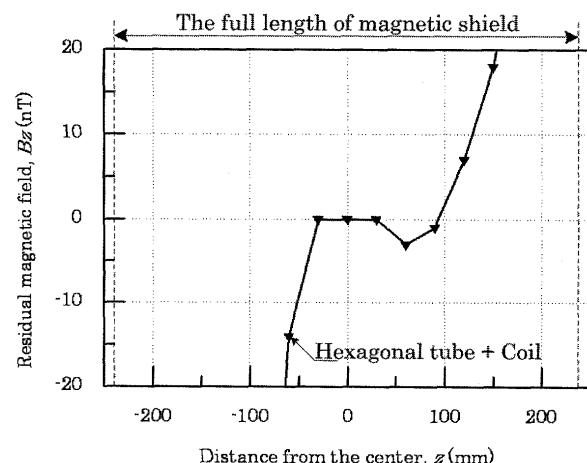


Fig. 14 Axial component of residual magnetic field along to the center axis. ($\pm 20 \text{ nT}$ range)

6 地磁気に対するシールド性能評価（全磁力）

正六角柱と3軸磁界発生コイル（Fig. 7）を用いて地磁気キャンセルを行い、正六角柱内部のz軸上でx, y, z軸方向それぞれの磁束密度測定を行った。Fig. 15に測定概略図を示す。正六角柱は3軸コイルの中央に設置して、コイルに直流電流を印加し直流磁界を発生させシールド内部の磁束密度を低減した。この時、シールド内部の中心が各軸方向それぞれで0 nTとなるようにする。測定にはFGを用いた。測定結果をFig. 16に示す。全磁力 $|B|$ [T]は式(1)を用いて求めた。

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (\text{T}) \quad (1)$$

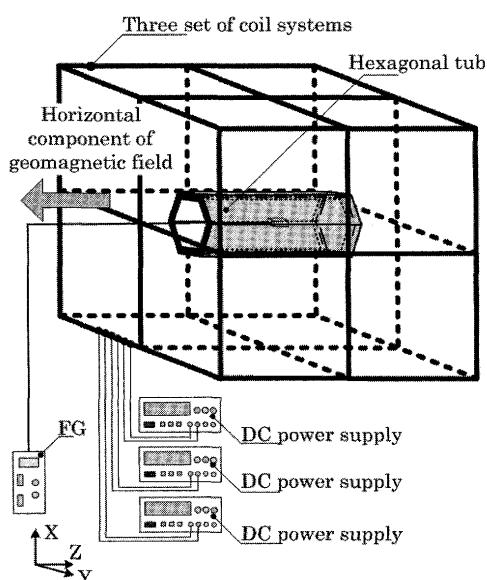


Fig. 15 Measurement chart of residual magnetic field of geomagnetic field for Coil system.

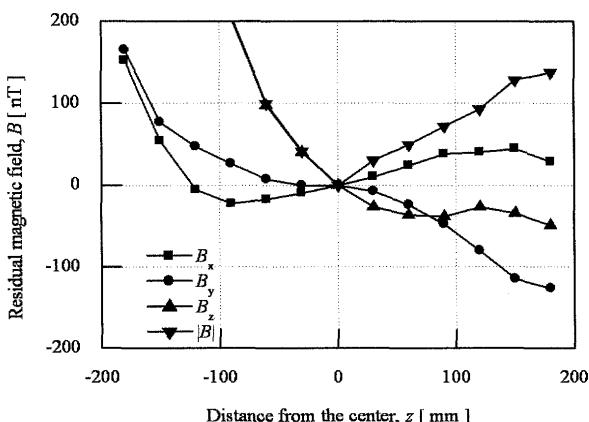


Fig. 16 3 axial components of residual magnetic field along the z axis.

Simple cubic-3を用いた3軸磁界発生コイルは各軸方向の磁束密度を閉口部側で低減できることを確認し、結果として、正六角柱の内部z軸上の約37%以内の領域で全磁力100 nT以下の磁界空間を実現した。しかし、全磁力10 nT以下の磁界空間を実現できたのは中心1点のみであった。この要因として、コイルがつくる磁界の一様性が重要になることが考えられる。軸方向の磁束密度測定で用いたSimple box-9は正六角柱内部の磁束密度分布に一様性が見られるのに対し、Simple cubic-3を用いた3軸磁界発生コイルは外部からのアクセスが容易である半面、Simple box-9に比べ一様性に劣ることが大きな要因として挙げられる。

7 磁性層の残留磁気分布

本章ではシールド内部の磁束密度低減を行う際に、大きな問題点となる磁性層の残留磁気について検討を行う。前章で述べた通り、磁性層の残留磁気がシールド内部の磁束密度分布に影響を与えていくことが考えられる。測定に用いる磁気シールドは正六角柱の構成要素となるU字型磁気シールド（Fig. 17）を製作し、内部の磁束密度測定を行った。測定概略図をFig. 18に示す。測定方法として3軸磁界発生コイル（Fig. 7）を用いて地磁気をキャンセルさせ、U字型磁気シールドを設置する前にコイル中心で全磁力0 nTとなるようにする。その後にU字型磁気シールドをコイル中央に設置し、y軸上の磁束密度をFGを用いて測定を行った。この時、U字型磁気シールドは100 nT以下の磁界空間に設置されている。測定結果をFig. 19に示す。測定結果から100 nT以下の磁界空間に200 nTから400 nT付近の残留磁気が存在することが読み取れる。また、中心の磁束密度に対し閉口部側の磁束密度に100 nT程度の違いがあることが分かる。これは、第5章で記述した通り閉口部側で磁束密度が大きくなる原因として考えられる。

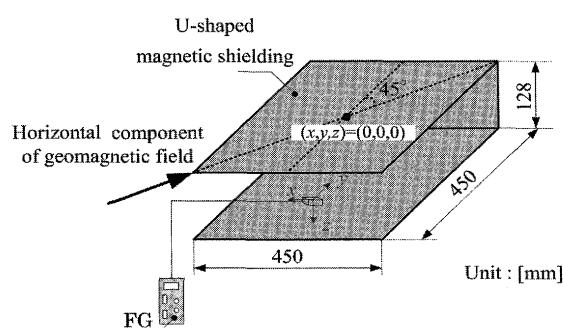


Fig. 17 U-shaped magnetic shielding.

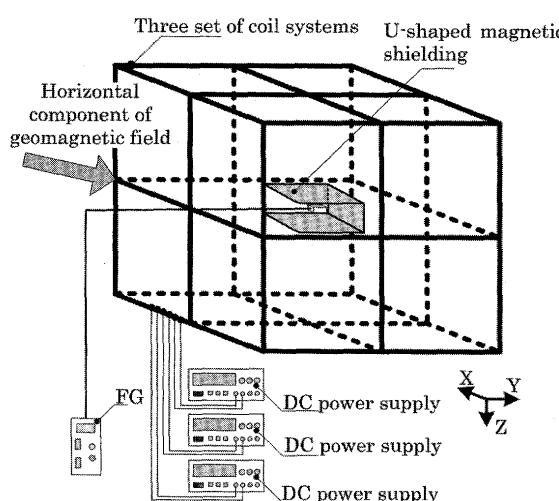


Fig.18 Measurement chart of residual magnetic field of geomagnetic field for coil system.

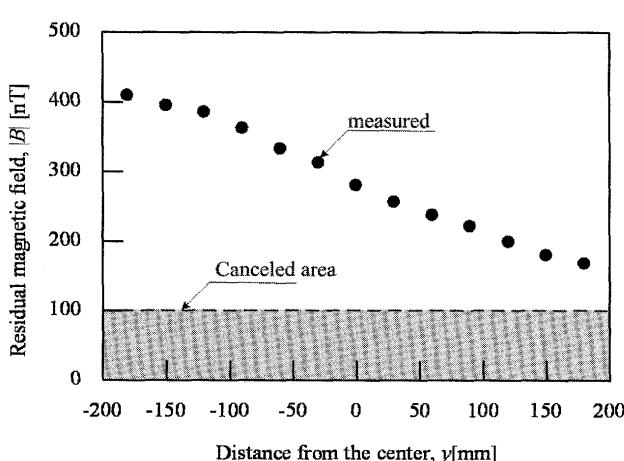


Fig.19 Residual magnetic field along to the y axis inside the U-shaped shielding.

8まとめ

宇宙磁場である 10 nT 以下のシールド環境を提供するため、研究室レベルで手軽に使用できる磁気シールドの製作と評価を行ってきた。今回新たに、閉口部を有する磁気シールドとして、正六角柱磁気シールドを製作し円筒磁気シールドと比較を行った。シールド性能評価を行うことで、円筒の場合シールド中心では磁束密度を低減することはできたが、閉口部の影響により磁束密度分布に一様性があり確認されなかつた。しかし、正六角柱は片側閉口部を有することにより、閉口部側において磁束密度を抑えることに成功し、円筒に比べて 2 倍近い領域で一様性と見なせる範囲を確保することができることを確認した。これを基

に、コイルと組み合わせて地磁気キャンセルを試みた。円筒の場合、10 nT 以下を達成できたのは中心 1 点のみであった。しかし、正六角柱の場合、軸方向に対してシールド内部 32 % 以内の領域で 10 nT 以下、66 % 以内の領域で 100 nT 以下の磁界空間を実現し、円筒に比べて優位性が確認された。また、全磁力で 10 nT 以下の空間を実現するために 3 軸磁界発生コイルを用いて検討を行った結果、正六角柱の内部 z 軸上の約 37 % 以内の領域で全磁力 100 nT 以下の磁界空間を実現したが、全磁力 10 nT 以下の磁界空間を実現できたのは中心 1 点のみであった。この問題点として、コイルの一様性と磁性層の磁化が原因と考え、今回は磁性層近傍の磁束密度測定を行った結果、200 nT から 400 nT 程度の磁束密度として測定された。

今後の課題として、3 軸方向で地磁気キャンセルを行い、全磁力で 10 nT 以下の領域を確保することを検討する。

(2009 年 12 月 28 日受付)

参考文献

- [1] 山崎慶太, 小林宏一郎, 百束泰俊, 環境磁気ノイズと磁気シールド技術VI : 宇宙研究施設における零磁場空間, まぐね, Vol.1, No.2, pp.77-89, 2006.
- [2] 白澤秀剛, 遠山文雄, 広川栄治, 宇宙飛翔体用大型磁気シールドルームにおける衛星搭載機器の残留磁気計測, 電学論 A, Vol.125, No.10, pp.777-783, 2005.
- [3] 小谷 誠, 内川義則, 中屋 豊, 森 博愛, 栗城真也, 生体磁気計測, コロナ社, pp.40-42, 1995.
- [4] 田代晋久, 松岡信仁, 堀内厚弥, 久保田晃弘, 脇若弘之, 正方形コイルを等間隔に配置した一様磁界発生コイルシステム, 電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-08-55, pp.41-46, 2008.
- [5] 松岡信仁, 堀内厚弥, 久保田晃弘, 田代晋久, 脇若弘之, 宇宙磁場環境を模擬する簡易磁気シールドシステムの検討, 平成 20 年度電気学会全国大会講演論文集, 材料/マグネティクス, No.2, p.178, 2008.
- [6] K. Tashiro and H. Wakiwaka, *Simple Cubic coil*, The Bioelectromagnetics Society 29th Annual Meeting Abstract Collection, pp.421-423, 2007.
- [7] A. Haga, S. Kikuchi, *An elliptical cylinder-type shielding device using amorphous ribbons*, IEEE Trans. Magn., Vol.25, No.5, pp.3845-3847, 1989.