シリンダ形状永久磁石で構成した Halbach 配列の磁場分布特性の検討

Consideration on the Magnetic Flux Density Distribution of the Halbach Array
Constructed by Cylinder Shape Permanent Magnets鈴木 晴彦^{*1} (正員) 徳永 昇吾^{*2}, 金丸 允俊^{*2}, 貝沼 秀一郎^{*1}, 伊藤 淳^{*1} (正員)

Haruhiko SUZUKI(Mem.), Shogo TOKUNAGA, Masatoshi KANAMARU, Shuichiro KAINUMA, Atsushi Ito(Mem.)

Halbach array is effective in forming a strong magnetic field. However, the conventional model is difficult to control the magnetic field because all the rectangular shaped permanent magnets are strongly fixed. Proposal Halbach array is constructed with cylinder shaped permanent magnets and rotating all magnets to control the magnetic field. The magnetic flux distribution of the Halbach array using cylinder shaped permanent magnets has been measured actually and simulated to provide the details on the magnetic performance of the proposal model. In the Halbach array using cylinder shaped permanent magnets, by synchronized rotation in the same direction with of all magnets, the slide of the magnetic field distribution has been confirmed. In this paper, it reveals that the features of the proposal model by comparing the detailed measurement and simulation results.

Keywords: Halbach array, permanent magnet, magnetic field distribution, cylinder shaped permanent magnet.

1 はじめに

近年、工業的に実用されている高性能、小型・高出力タイプの永久磁石埋込型のモータやアクチュエータには、希土類系永久磁石が多く用いられている。特にアウトロータ型モータや永久磁石界磁型直流モータの小型軽量化や高トルク化には、構成要素としての永久磁石の高エネルギー密度化や良好な温度特性が求められる。そのため高い磁気特性と温度特性を有するDy系の永久磁石材が多く用いられていたが、流通・経済上の国際的問題などから、脱Dy系、脱希土類系磁石の素材開発やアプリケーションへの適用検討が近年活発に進められた。

一方、特殊な永久磁石配列により強磁場を形成することで知られる、Halbach (ハルバツハ) 配列を基本とした永久磁石列を組み込む電磁駆動機器類の研究開発が進められ、自動車産業や電気機器産業におけるアクチュエータ開発フィールドにおいて、Halbach配列永久磁石は主要な技術要素になっている。

従来Halbach配列は、隣り合う直方体形状の永久磁石を密着させて配列構成することから、外部からの磁束源(電磁石や永久磁石)を用いない限り、形成された

磁場の強度や分布を変化させることは不可能である。

このHalbach配列によって形成される強磁場や磁場分布を容易に制御できるようになれば、磁気支持型アクチュエータの機能拡大や新たな磁気支持機構をもつアクチュエータやアプリケーションの開発に多大な影響を与えると思われる。

2012年、J. E. Hiltonらは、径方向に磁化したシリンダ形状永久磁石によって構成したリニアHalbach配列の磁場制御について報告をしている[1]。これは、シリンダ形状永久磁石を、径の中心軸を対称に交互に逆回転させることで、形成される強磁場が上面から底面へ反転(スイッチ)できることを磁場シミュレーションにより検討したモデルである。

2013年9月、基本構成は同一であるが、我々の研究グループはJ. E. Hiltonらの報告とは全く独立して、また独自の開発視点から、シリンダ形状永久磁石を同方向に同角度、同期回転させることで、磁石列表面に形成される磁場の分布を移動(スライド)させるモデルを考案した。翌2014年1月、シリンダ形状永久磁石11本で構成した磁場検証用の試験器を製作、その磁束密度分布計測によって提案するモデルの妥当性を見出している[2,3]。また磁場シミュレーションによる磁場分布のスライドに関する解析結果が実測とほぼ一致することも、ごく最近明らかになった。

本報では、シリンダ形状永久磁石で構成したHalbach配列永久磁石の磁場特性について、より詳細な磁束密

連絡先：鈴木晴彦，〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾 30，福島工業高等専門学校電気工学科，
e-mail: haruhiko_s@fukushima-nct.ac.jp

^{*1} 福島高専 電気工学科 ^{*2} 福島高専専攻科 産業技術システム工学専攻

度計測をおこない、シリンダ形状永久磁石の回転角に依存した磁束密度の強度、および分布の変化を捉え、磁場解析シミュレーションとの結果を比較し、提案するモデルの準静的な磁場特性について検討をする。

2 シリンダ形状永久磁石による Halbach 配列

2.1 シリンダ形状永久磁石の配列とモデルの構成

Fig. 1にシリンダ形状永久磁石によるHalbach配列の基本構成図を示す。使用したシリンダ形状永久磁石は、直径5 mm、軸長50 mmのネオジム系永久磁石（NeoMag製：N40グレード）を用いた。磁化方向はシリンダ形状永久磁石の径方向であり、表面磁束密度は実測で約0.32 Tである。シリンダ形状の永久磁石を配列・固定するため、Fig. 2のような固定ホルダをアルミ素材で製作し、それをアルミ製スタンドにネジ止めして配列している。

Fig. 3は、11本のシリンダ形状永久磁石によってHalbach配列を構成した磁場検証用の試験器である。この試験器によって配列表面（上面）、および背面（下面）の磁束密度分布を計測する。なお現状の試験器では、次節で示すように全てのシリンダ形状永久磁石に

Fig. 1 Basic structure of Halbach PM array by using cylinder shaped permanent magnets.

Fig. 2 3D-CAD model of magnet holder[2].

同一回転角を与えるため、その都度ホルダをスタンドから取り外し、正確に角度設定をした後に再びホルダをスタンドに組み上げていく。その際に、シリンダ形状永久磁石には個体差があることから、11本の永久磁石それぞれにナンバリングを施し、配列する順序と軸長方向の向きが常に同一となるようにしている。これによって、個体差による観測結果のばらつきを極力回避する処理を施している。

2.2 磁場制御（磁場分布のスライド）の概念

シリンダ形状永久磁石で構成したHalbach配列が形成する磁場の分布を移動（磁場分布のスライド）させるために、シリンダ形状永久磁石を同一回転方向へ同角度、同期回転させることを提案した。その概念図をFig. 4に示す。

例えば、Halbach配列の中央付近に増強されて形成される磁場はFig. 4の赤色実線の位置にあるが、上記の回転を11本のシリンダ形状永久磁石の全てに与えることによって、永久磁石の回転角 θ_{PM} が0degにおける磁束密度分布のパターンを保ちながら、x方向に移動（Fig. 4では時計方向の回転を与えることで右側に移動）すると想定した。ただし、現状の試験器では、中央のシリンダ形状永久磁石から片側6本の永久磁石によって構成され磁場スライド確認しようとしているため、端部の影響により磁束密度の絶対値は端部に近づくにしたがって減少の傾向を示すと思われる。

Fig. 5は、Fig. 4に示した3種の回転角度における、シリンダ形状永久磁石によって形成される磁場（磁束）をシミュレーションしたものである。回転角度が0degと90degの解析結果を見ると中央部分の磁束はシリンダ形状永久磁石一本分（直径分：5 mm）だけ右側へスライドしていることが確認できる。よって、この初期の磁場解析の段階において、我々の提案するモデルの妥当性が示されていると判断した。

Fig. 3 Actual measuring stand of Halbach array arranged eleven holders with cylinder shaped permanent magnets[2].

Fig. 4 Conceptual diagram of the magnetic field control in Halbach array using cylinder shaped permanent magnets. (rotating all magnets clockwise)

Fig. 5 Simulations on 3 different phases of rotation[2]. (0deg, 45deg and 90deg)

3 磁場検証試験器による磁場特性計測

3.1 永久磁石の回転角と磁束密度分布特性

シリンダ形状永久磁石で構成したHalbach配列の磁場検証用試験器 (Fig. 3) の表面から2 mm上方における磁束密度分布を、ホールプローブ (F.W.Bell:BHT921) を用いて測定した。測定範囲はx方向 (径方向) に60 mm, y方向 (軸長方向) に30 mmとした。

基準となるシリンダ形状永久磁石の回転角度 (θ_{PM}) が0degの場合のHalbach配列の上面と底面における磁束密度分布をFig. 6に示す。同図から、上面には中央部に最大約0.25 T, 底面には最大で約0.05 Tが観測されている。底面側の磁場は通常の直形状永久磁石で構成するHalbach配列の底面側に現れる磁束とは異なり、やや大きな磁束密度の値を示している。これは、シリンダ形状永久磁石を用いた配列のため、底面側に閉磁路が構成されていないことが原因している。しかし、上面側の磁場分布は、Halbach配列特有の磁場が形成され

(a) top side

(b) bottom side

Fig. 6 Magnetic flux density distribution of the test Halbach array using cylinder shaped permanent magnets[3].

ており、この観測により、シリンダ形状永久磁石によってHalbach配列が構成できることが明らかとなった。

さらにシリンダ形状永久磁石の回転角度に依存した磁束密度分布計測では、Fig. 7に示すように、回転角度 (θ_{PM}) を0, 15, 30, 45, 60, 75, 90degの7通りに設定し、シリンダ形状永久磁石の軸方向 (y方向) 中央を配列方向 (x方向) にホールプローブを0.1 mm間隔で走査して、磁束密度の大きさを計測した。Fig. 8は比較の基準となる回転角度が0degにおける計測結果である。

Fig. 7 Conceptual diagram of seven measurement pattern depends on the rotational angle of each cylinder shaped permanent magnet[3].

Halbach配列によって形成される特有の磁束密度のパターンを示しており、端部側の対称性も確認できる。

以下の計測で注目するのは、永久磁石の回転角度 (θ_{PM}) に依存した、中央部 (C点) の磁束密度の大きさと位置の変化であるが、L側端部とR側端部の変化も併せて観察する。

Fig. 8 Measurement result of magnetic flux density distribution above the Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle of 0deg.

Fig. 9 Measurement result of magnetic flux density distribution above the Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle from 0 to 90deg.

Fig. 10 Measurement result of maximum magnetic flux density at C above the Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle from 0 to 90deg.

Fig. 9において、シリンダ形状永久磁石の回転角度が増すに従って、それぞれの磁束密度のピーク点には特徴的な変化が見られる。まず中央C点での磁束密度のピーク値の変化をグラフ化するとFig. 10のようになる。45degで磁束密度の減少が見られ、その点を中心に低角度側と高角度側で対称性をもった変化が見られる。

一方、L端部側では角度が増すに従って若干大きくなる傾向が見られ、逆にR端部側では減少する傾向がFig. 9に現れている。

3.2 シリンダ形状永久磁石の回転角と磁場の変位

次に、シリンダ形状永久磁石の回転による磁場の変位 (スライド) を観察する。Fig. 11 は Fig. 9 の C 点付近を拡大したものであり、Fig. 12 は、それぞれの回転角度における C 点のピーク位置の変化を表したものである。若干非線形な部分も見られるが、概ね直線的に比例した変位 (スライド) 特性を示し、シリンダ形状永久磁石が 90deg 回転すると C 点におけるピーク点が約 5 mm スライドすることが明らかとなった。

Fig. 11 Measurement result of magnetic flux density distribution above the Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle from 0 to 90deg.

Fig. 12 Slide performance of the magnetic flux density distribution above the Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle from 0 to 90deg.

4 シミュレーションによる磁場特性

4.1 シリンダ形状永久磁石の回転角と磁束密度分布

電磁界解析ソフト (JMAG) を用いて、直径5 mmのシリンダ形状のネオジム系永久磁石により構成したHalbach配列の磁束密度分布を解析した。なお、磁束密度分布の解析位置は、計測条件と同様に永久磁石の表面から2 mm上方に設定している。

まず基準となるシリンダ形状永久磁石の回転角度0degのときの、磁束密度分布の解析結果をFig. 13に示す。解析の結果は、Halbach配列特有の磁場が形成されており、磁場検証用試験器による磁束密度分布の実測の結果と比べてもほぼ同様の結果が得られた。

また、シリンダ形状永久磁石を同一回転方向に同角度、同期回転させた場合の磁束密度分布の解析結果をFig. 14に示す。それぞれのピーク点の変化には特徴があり、概ね実測で得られた結果と傾向は一致している。

Fig. 13 Simulation result of magnetic flux density distribution above the Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle of 0deg.

Fig. 14 Simulation result of magnetic flux density distribution above the Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle from 0 to 90deg.

Fig. 15 Simulation result of maximum magnetic flux density at C above the Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle from 0 to 90deg.

例えば、L側端部のピークは永久磁石の回転と共に増加する傾向が見られ、逆にR側端部のピーク値は永久磁石の回転に伴い減少する傾向が明瞭に現れている。Fig. 15は、永久磁石の回転に依存したC点のピーク値の変化をFig. 14の結果からグラフ化したもので、実測結果のFig. 10と比較するものである。ここでも実測と一致する傾向が見られ、45degを中心に低角度側と高角度側の対称性が明確に現れている。

4.2 シリンダ形状永久磁石の回転角と磁場の変位

次に、シリンダ形状永久磁石の回転による磁場の変位 (スライド) の解析結果について観察する。Fig. 16はFig. 14のC点付近を拡大したものであり、またFig. 16の解析結果をもとに、シリンダ形状永久磁石の回転角度におけるC点のピーク位置の変化を表したものがFig. 17である。

Fig. 16 Simulation result of magnetic flux density distribution above the Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle from 0 to 90deg.

Fig. 17 Simulation result of slide performance of the magnetic flux density distribution above the Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle from 0 to 90deg.

Fig. 16 において、それぞれの角度における C 点付近の磁束密度を表す 7 つの曲線が、ほぼ等間隔でスライドしていることがわかる。よって Fig. 17 の変位特性において、わずかに非線形を示しているようにも見えるが、Fig. 16 の結果からは、シリンダ形状永久磁石の回転による磁場のスライドは、直線的な変位（スライド）特性であるといえる。なお、シリンダ形状永久磁石が 90deg 回転すると C 点におけるピーク点が約 5 mm スライドすることは実測と同様の結果である。

5 まとめ

シリンダ形状永久磁石により構成した Halbach 配列において、ホールプローブによる計測結果（実測）と磁場解析ソフトによるシミュレーションの結果により、磁束密度分布、および磁場の変位（スライド）について比較した。その結果は以下のようにまとめられる。

- 1) Halbach 配列特有の磁束密度分布が磁場検証用試験器によって計測され、さらに磁場解析シミュレーションによる磁束密度分布のパターンと一致する結果が得られた。よって、シリンダ形状永久磁石によって Halbach 配列を構成することが可能であることが実機（試験器）と磁場解析の双方において検証された。
- 2) すべてのシリンダ形状永久磁石を同一回転方向に同角度、同期回転させることにより、形成される磁場を変位（磁場のスライド）できることが、磁場検証用試験器による磁束密度計測（実測）、および磁場解析シミュレーションの双方によって確

かめられた。このことから、我々が提案した「シリンダ形状永久磁石によって構成する Halbach 配列において、シリンダ形状永久磁石の同方向・同角度、同期回転による磁場の変位（スライド）制御」が可能であることが立証された。

- 3) 一方、スライドする磁場の磁束密度の大きさは回転角度により変化することが計測結果、および磁場解析シミュレーションの結果から明らかになってきた。これは磁場の変位が単純なスライドではなく、磁場強度の変化を伴うことを示したものである。このことは現状の Halbach 配列の構造的な制約や、物理的な解釈をもってすれば理解できる事である。よって、非接触磁気支持機器へのアプリケーションでは、この点を考慮した設計の工夫が必要となってくる。

シリンダ形状永久磁石によって構成される Halbach 配列の磁場制御機構を、今後、バルク超電導体の磁束のピン留め効果を利用した多次元磁気支持機構や、非接触磁気支持搬送システムの分岐機構などへの応用を検討している。これらを開発するためには、シリンダ形状永久磁石を同期回転させるためのメカニズムの設計・試作、およびシリンダ形状永久磁石の磁気相互作用による回転トルクの検証を、実測と磁場解析シミュレーションによって明らかにする必要がある。

(2015 年 10 月 20 日受付)

参考文献

- [1] J.E.Hilton, S.M.McMurry, An adjustable linear Halbach array, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 324, pp. 2051-2056, 2012.
- [2] 土屋裕紀, 徳永昇吾, 伊藤淳, 鈴木晴彦, Mikael J.Bragge, シリンダ形状永久磁石を用いた Halbach 配列分岐機構試作機の磁気的性能, 日本 AEM 学会, MAGDA2014, PS-11, pp. 385-388, 2014.
- [3] S.Tokunaga, H.Tsuchiya, A.Ito, H.Suzuki, Mikael J. Bragge, Magnetic Performance of Halbach Array Branching Mechanism Proto-model utilizing Cylinder Shape Permanent Magnets, *The 10th International Symposium on Linear Drives for Industrial Applications (LDIA 2015) Aachen-Germany*, AEFF-1, No. 244, 2015.