

シリンダ形状永久磁石により構成された Halbach配列永久磁石列の磁気特性

Magnetic performance of Halbach permanent magnet array
constructed with cylinder shaped permanent magnets

伊藤 淳・徳永 昇吾・土屋 裕紀・Mikael J. Bragge*・鈴木 晴彦
福島工業高等専門学校電気工学科

*Helsinki Metropolia University of Applied Sciences

Atsushi Ito, Shogo Tokunaga, Hiroki Tsuchiya, Mikael J. Bragge* and Haruhiko Suzuki
National Institute of Technology, Fukushima College, Department of Electrical Engineering

*Helsinki Metropolia University of Applied Sciences

(2015年9月25日受理)

Halbach array is effective in forming a strong magnetic field. However, it is impossible to control the magnetic field in a Halbach array using rectangular permanent magnets. Proposal Halbach array was 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 was 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 was confirmed.

Key words: Halbach array, permanent magnet, magnetic field distribution, cylinder shaped permanent magnet

1. はじめに

工業的に利用される永久磁石埋込型のモータやアクチュエータは、その小型化や高出力化のため、希土類系永久磁石が多く用いられている。特にアウター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密度化には、構成要素としての永久磁石のエネルギー密度の高度化が有力である。そのため特殊な配列により強磁場を発生することで知られる、Halbach (ハルバッハ) 配列を基本構成とした永久磁石列を組み込む電磁駆動機器類が、近年多くの研究・教育機関や企業において開発研究、および生産が進んでおり、自動車産業界、電気機器産業界において、Halbach配列永久磁石は主要な技術要素になっている。また、輸送機器産業界の分野では、クリーンルーム内の非接触搬送技術の利用が拡大し、永久磁石の磁力(斥力・引力)をバイアスとした磁気支持システムでは、磁気支持性能向上のためにHalbach配列永久磁石の適用が増加している。

一方、Halbach配列はその特性を生み出す永久磁石の配列構成の原理において、形成された磁場の強度や分布を任意に制御す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制御できるようになれば、これまでの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プリケーションの開発に多大な影響を与えることは明らかである。

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りニアHalbach配列の磁場制御について報告している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。

一方、基本構成は同一であるが、我々はこの報告とは全く独立して、また独自の開発視点から、シリンダ形状の永久磁石を同方向に回転させ、磁石列表面に形成される磁場の分布を移動(スライド)させるモデルを提案し、試作機による磁場分布計測によってその妥当性を見出している^{2,3)}。

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、これまでの磁場分布計測の結果に対し、磁場解析シミュレーションの結果を比較し、提案するモデルの妥当性について検討をした。

2. Halbach配列永久磁石列

2.1 直形状永久磁石によるHalbach配列の基本構成

立方形状の永久磁石によるHalbach配列が基本原理の構成であるが、近年、磁気支持機構で見られる直形状（四角柱形状）の永久磁石による構成例をFig.1(a)、(b)に示す。隣り合う磁極が直交する配列により、同極が隣り合った配列構成となる片面には強磁場が形成され、もう一方の面には異極が隣り合うため閉磁路が形成され磁束の漏れが少ないという特徴をもっている。表面磁束密度が0.4Tのネオジム系直形状永久磁石で構成したHalbach配列永久磁石の上面と底面の磁束密度分布の例を同図(c)および(d)に示す。

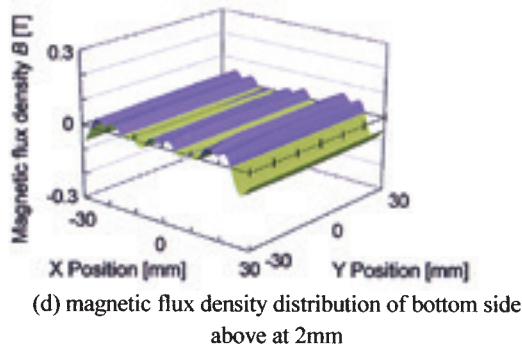
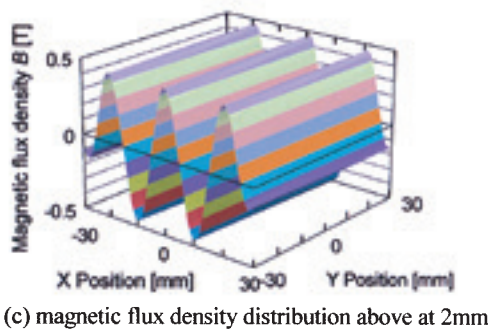
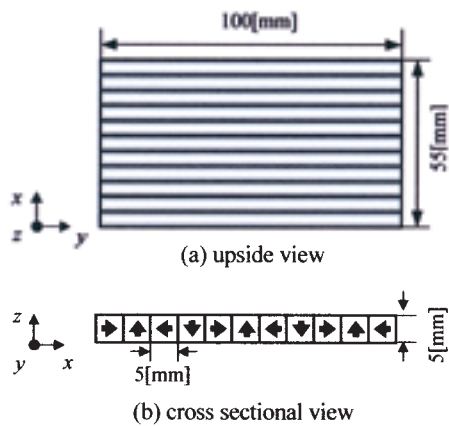


Fig.1 Halbach permanent magnet array constructed with rectangular shaped permanent magnets.

Halbach配列永久磁石上でバルク超電導体の磁気浮上実験の際、配列磁石とバルク超電導間を2mmに設定していた。これに合わせ、配列磁石から2mm上方における磁束密度分布を示している。測定の原因は配列磁石の中心としている。磁束密度分布計測により上面の最大磁束密度が0.47Tであり、Halbach配列特有の磁場分布が形成されていることが分かる。また、底面には約0.04Tの磁束密度が生じ、上面の1/10程度の値であり、片面にだけ強磁場が形成されている。この強磁場がモータの高出力化や磁気支持力の向上に寄与する。

通常、立方体や直方体の永久磁石を使用したHalbach配列では、永久磁石相互の磁気反発や吸引により配列が崩れないようにするため、底面側に磁気吸着板（バックアイアン）をあてたり、接着剤等で固定したりする必要がある。このように固定化された永久磁石配列は、形成される磁場分布も固定される。

2.2 シリンダ形状永久磁石によるHalbach配列の構成

前節のような直形状の永久磁石同士を密着させるHalbach配列構成では、形成される磁場（磁場強度や磁場分布）を可変させることは不可能である。そこで、シリンダ形状の永久磁石を使用しHalbach配列構成した場合、通常の方形状永久磁石で構成したHalbach配列特有の磁場分布と同様な特性が得られるのかを、磁場検証用の試験器を製作して検討を行った。

シリンダ形状永久磁石によるHalbach配列の基本構成図をFig.2に示す。シリンダ形状の永久磁石には、直径5mm、軸長50mmのネオジム系永久磁石を用いた。磁化方向はシリンダ形状永久磁石の径方向であり、表面における磁束密度は0.32Tである。シリンダ形状永久磁石を配列するため、Fig.3のような固定ホルダを製作し、その固定ホルダをアルミベースのスタンドにネジ止めして配列している。Fig.4は、11本のシリンダ形状永久磁石を用いて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上面、および底面の磁束密度分布を計測する。

また、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を可変（磁束密度分布のスライド）させるために、シリンダ形状永久磁石を同一回転方向へ、同角度回転させることを提案した。その概念図をFig.5に示す。例えば、永久磁石の回転に伴って、Halbach配列の中央付近に増強されて形成される磁場は、同図中の赤色実線の位置にあるが、上記の回転を全てのシリンダ形状永久磁石に与えることにより、 $\theta_{PM}=0[\text{deg}]$ における磁

束密度分布のパターンを保ったまま、x方向に移動すると予想される。ただし、現状の試験器では、それぞれのシリンダ形状永久磁石の回転角の設定は独立しているため、それぞれの角度決めは慎重な設定が求められ、かつ永久磁石の個体差による磁場形成への影響も考慮する必要があるため、それぞれの永久磁石の配列は同一順序にする注意も必要である。第3章以降の磁束密度分布計測では、シリンダ形状永久磁石の回転角度 (θ_{PM}) を、0、30、45、60、90degとし、シリンダ形状永久磁石の断面のトップ位置から2mm上面での計測結果を報告する。

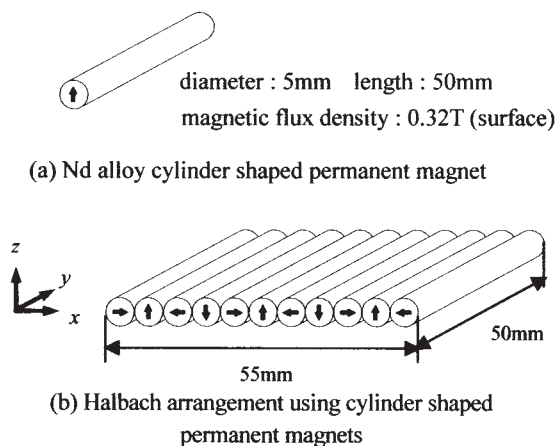


Fig.2 Basic structure of Halbach permanent magnet array using cylinder shaped permanent magnets.

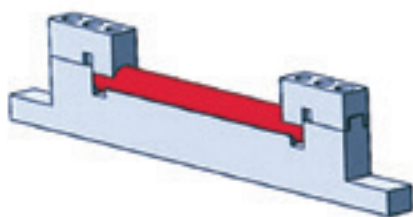


Fig.3 Model of magnet holder.

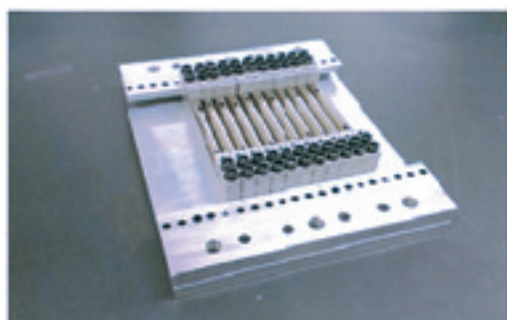


Fig.4 Actual measuring stand of Halbach array arranged eleven holders with cylinder shaped permanent magnets.

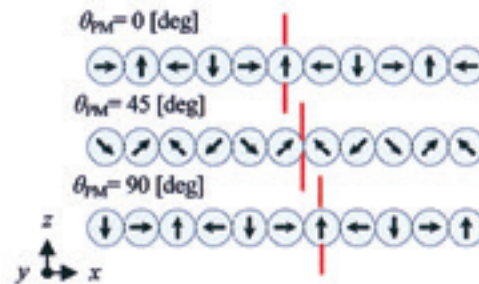


Fig.5 Conceptual diagram of the magnetic field control in Halbach array using cylinder shaped permanent magnets. (rotating all magnets clockwise)

3. 磁束密度分布の計測と磁場シミュレーション

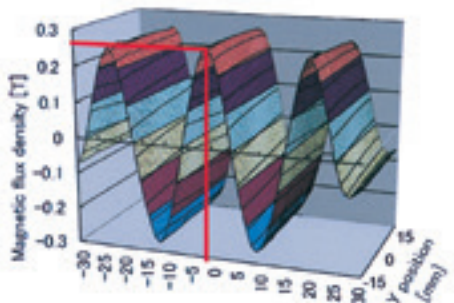
3.1 試験器における磁束密度分布計測

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の表面から2mm上方の磁束密度分布を、ホールプローブ (F.W.Bell : BHT921) を用いて測定した。配列磁石の中心を原点とし、測定範囲はx方向 (径方向) に±30mm、y方向 (軸長方向) に±15mmとした。

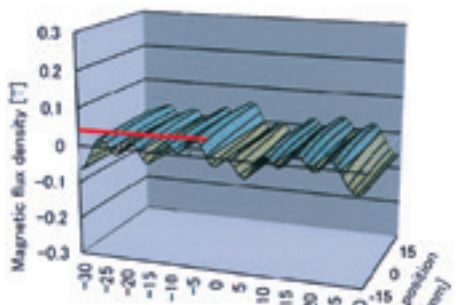
まずFig.6において、基本データとなるシリンダ形状永久磁石の回転角度 (θ_{PM}) が0degの場合のHalbach配列の上面と底面における磁束密度分布を示す。同図から、上面には中央部に最大約0.25T、底面には最大で約0.05Tの磁束密度が観測されている。上面側の磁場の分布は、Halbach配列特有の増強された磁場が形成されていることが分かる。その一方で、底面側の磁場は上面の1/5程度の値で、やや大きな磁束密度の値を示しており、通常の直形状永久磁石で構成するHalbach配列とは若干異なる。これは、シリンダ形状永久磁石を用いた配列のため、底面側に閉磁路が構成されていないことが原因している。しかし、上面側の磁場分布と強度の現れはHalbach配列特有のものであり、これにより、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。

シリンダ形状永久磁石の回転角度 (θ_{PM}) を30、45、60、90degとした場合のHalbach配列永久磁石試験器上面から2mmの磁束密度分布をFig.7~Fig.10に示す。

$x=0$ [mm]の中央付近の最大磁束密度に注目し、その値と位置を赤色直線で示した。また、 $y=0$ [mm]において、回転角度 θ_{PM} に伴う磁束密度分布のx方向への変化の様子をFig.11に示す。中央付近の最大磁束密度の値と回転角度との関係はこの計測結果のみでは明らかではないが、最大値を示す位置は明らかにプラスx方向に移動 (スライド) することが分かる。



(a) top side



(b) bottom side

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

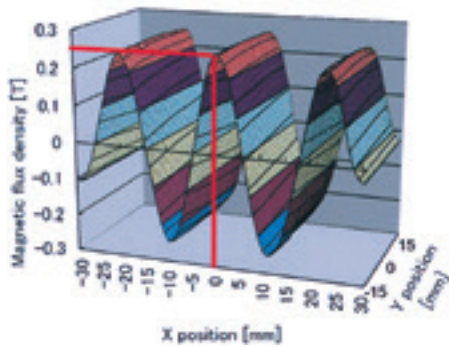


Fig.7 Magnetic flux density distribution of the test Halbach array top side at rotating angle of 30deg.

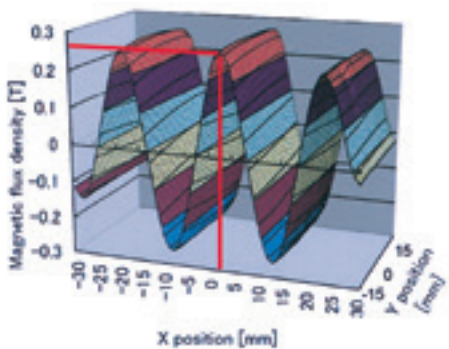


Fig.8 Magnetic flux density distribution of the test Halbach array top side at rotating angle of 45deg.

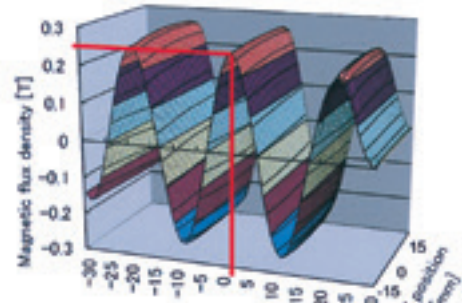


Fig.9 Magnetic flux density distribution of the test Halbach array top side at rotating angle of 60deg.

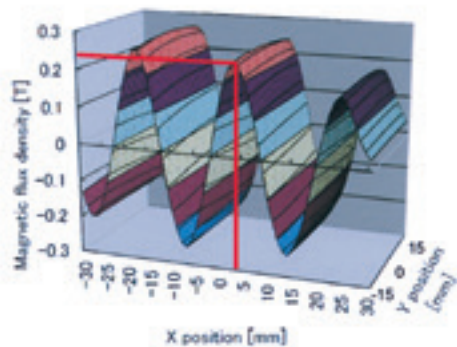


Fig.10 Magnetic flux density distribution of the test Halbach array top side at rotating angle of 90deg.

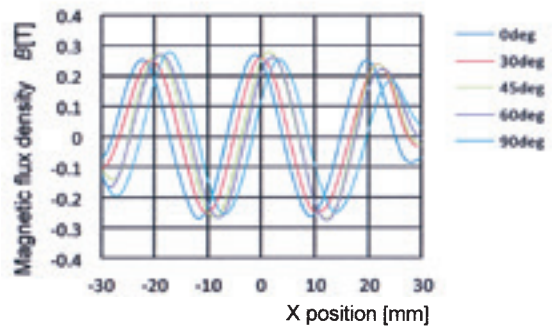


Fig.11 Magnetic flux density distribution of the test Halbach array top side at rotating angle from 0 to 90deg.

また $x=20$ [mm]付近に現れていた磁束密度のピークは回転角度の増加に従い減少していることが分かる。これは、磁束密度の正のピークを形成するN磁極が配列の最端部に位置したことにより、集中する同磁極の一方が開放された影響である。回転角度による中央付近に生ずる磁束密度の最大値の変化とピーク位置の移動(スライド)の特性をFig.12およびFig.13にそれぞれ示す。回転角度によって最大磁束密度は若干変化している。また、最大値を示すピーク位置は回転角度に従いほぼ直線的に変化し、90degではプラス x 方向に5mm移動(スライド)し

ている。これは、使用した永久磁石の直径と一致しており、提案したシリンダ形状永久磁石を用いたHalbach配列の磁場の可変（磁束密度分布のスライド）特性を示している。

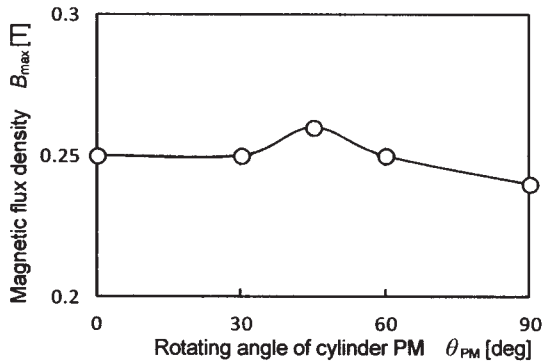


Fig.12 Maximum magnetic flux density around center of the test Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle from 0 to 90deg.

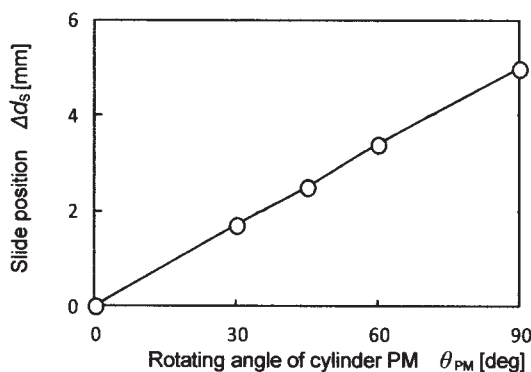


Fig.13 Slide performance of the magnetic flux density distribution above the test Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle from 0 to 90deg.

3.2 磁束密度分布のシミュレーション

電磁界解析ソフト (JMAG) を用いて、直径5mmのシリンダ形状のネオジウ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。また試験器による磁束密度の計測と同様に、シリンダ形状永久磁石を同方向に回転させた場合の磁束密度分布の解析も行った。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2mm上方である。

まず基準となる回転角度0degのときの、磁束密度分布の解析結果をFig.14に示す。解析結果は、計測した磁束密度分布と同様の結果が得られた。また、シリンダ形状の永久磁石を同一回転方向に同角度回転させた場合の磁束密度分布の解析結果をFig.15に示す。永久磁石の回転に伴い、 $x=20$ [mm]付近に現れる磁束密度の最大値は

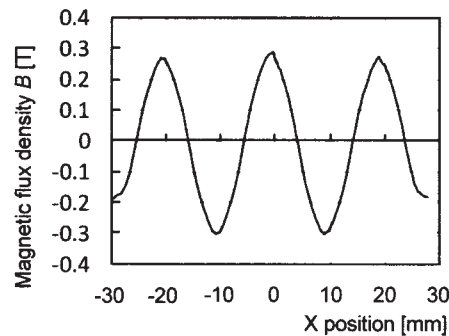


Fig.14 Simulation result of magnetic flux density distribution on the Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle of 0deg.

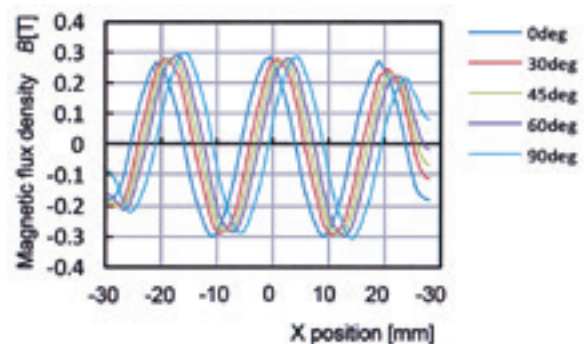


Fig.15 Simulation result of magnetic flux density distribution on Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle from 0 to 90 deg.

小さくなる解析結果となり、試験器による磁束密度の計測値の $x=20$ [mm]付近に現れていたピーク値の変化傾向と一致している。また、 $x=-20$ [mm]付近に現れる磁束密度のピーク値は大きくなる解析結果となり、この点をあらためて計測結果で確認すると、同様の傾向が $x=20$ [mm]付近のピーク値にも見られる。

一方、中央付近に現れる磁束密度において、計測の場合は回転角度の影響は明瞭ではなかったが、磁場解析の結果からは、Fig.16に示すように明らかな回転角度に依存した傾向を示し、45degで最小値を示した。この点に関して、現状の計測と磁場解析との一致は見られない。現時点において、Fig.15の磁場分布特性曲線の間隔が不揃いである点から、永久磁石を試験器に設置する際の回転角度のずれなどが要因と思われるが、今後、詳細な測定によってこの点を明らかにしていきたい。

回転角度に対する中央付近に現れる磁束密度の最大値を示すピーク位置の移動（スライド）特性をFig.17に示す。中央付近に現れる磁束密度のピーク位置の変位は、永久磁石の回転角度により、ほぼ直線的に変化している。また、回転角度が0degから90degの総変位量は5mmとな

り、試験器による計測の結果と一致した。しかし、磁場解析では45degでわずかに屈曲が見られる。回転角度が大きいことが原因としてあげられ、回転角度を小さくし解析点を増加させることで、検討を進めていくことにしている。

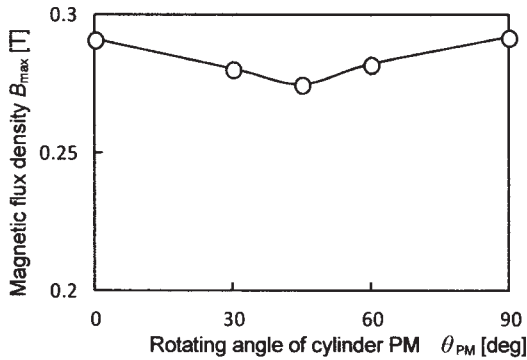


Fig.16 Simulation result of maximum magnetic flux density on Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle from 0 to 90deg.

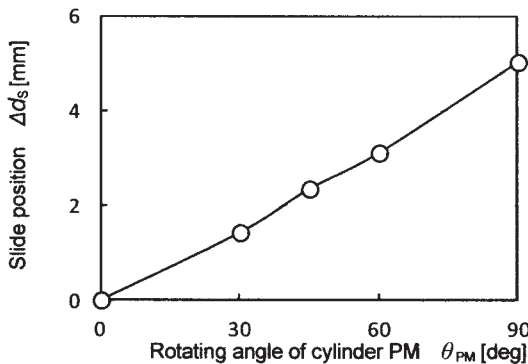


Fig.17 Simulation result of slide performance of the magnetic flux density distribution on Halbach array using cylinder shaped permanent magnets at rotating angle from 0 to 90deg.

4. 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、磁束密度分布、および磁場の可変（磁束密度分布の移動）について、ホールプローブによる計測結果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比較した。その結果は以下の3点としてまとめられる。

1) Halbach配列特有の磁束密度分布が計測され、また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）によって検証された。

- 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回転させることにより、形成される磁場を可変（磁束密度分布のスライド）できることが、試験器による磁束密度計測、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配列による「シリンダ形状永久磁石の同方向・同角度回転による磁場の可変制御」が可能であることが立証された。
- 3) 一方において、可変する磁場の磁束密度の大きさは回転角度により若干ながら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。これは磁場の可変（磁束密度分布のスライド）が単純な磁場パターンのスライドではなく、磁場強度の変化を伴うことを示したものである。このことは構造的、物理的な視点をもってすれば容易に理解できる事であるが、非接触磁気支持機器へのアプリケーションにとっては不利な要因でもある。

この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は、今後、超電導体の磁束のピン止め効果を利用した多次元の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。それらを実現するためには、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、および永久磁石の磁気相互作用によるトルクの検証を実際の計測と磁場解析シミュレーションによって進める必要がある。

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氣的性能」, 日本AEM学会, MAGDA2014, PS-11 (2014) pp.385-388.
- 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),AEFF-1, No.244 (2015). (Proceeding in USB chip)