

ローラー型永久磁石式磁場源の設計

Design of mangle-type magnetic field source with permanent magnets

佐久間洋志

宇都宮大学大学院工学研究科, 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 (〒321-8585)

H. Sakuma

Graduate School of Engineering, Utsunomiya Univ., 7-1-2 Yoto, Utsunomiya, Tochigi 321-8585, Japan

The effects of magnet size, separation, and rotation pattern on the strength and uniformity of a magnetic field and the torque acting on magnets are discussed regarding the design of a mangle-type magnetic field source. A finite-element simulation revealed that the maximum magnetic field increased as the diameter of the magnets increased or magnet separation decreased. A uniform magnetic field is possible when the rotation pattern of the magnets adopts a circular arrangement of magnetization for zero-field while a high torque acts on the magnets. The simulation results were verified with a prototype, although the maximum field was smaller than the simulation.

Keywords: magnetic field source, permanent magnet, finite-element method, magnetic field distribution, magnetic torque

1. はじめに

磁場源として最も一般的に使われている電磁石は、静磁場の発生には電力を消費しないが、ジュール熱としてエネルギーを捨てている。また、超伝導電磁石はジュール熱を発生しないが、超伝導状態を保持するために多大なエネルギーを消費する。一方、永久磁石は常に周辺に磁場を発生させており、これをうまく利用すれば無電源、冷却不要の磁場源を開発できると考えられる。実際、このような磁場源は古くから提案され、一部製品化されてきた。

くさび型の永久磁石を組み合わせた Halbach シリンダー¹⁾はその内部に強力に均一な磁場を発生させることが可能である。

Iwashita ら²⁾は、軟磁性体を利用した改良型 Halbach シリンダーにおいて、4.45 T の強力な磁場を発生させることに成功している。2つの Halbach シリンダーを組み合わせてシリンダー間の相対角度を変化させると、磁場強度を変化させることも可能である。しかしながら Halbach シリンダーは特殊なくさび型の永久磁石を必要とし、また強力な磁力に逆らって組み立てる必要があり、これらのことが製作コストを増大させる要因となっている。

本研究では、入手しやすい円柱型の永久磁石を用いたローラー型 (mangle type) の磁場発生装置に着目する。ローラー型磁場発生装置は代表的には4または6本の円柱型磁石を用いる。Fig. 1に示すように、磁石は径方向に着磁されており、磁石を回転させることにより任意の方向・強さの磁場を発生させることが可能である。磁石を Fig. 1(a)の方向に設定すると、Halbach シリンダーの磁化配置に等しくなり、上下二つの磁束ループが装置内部に右向きを発生させる。一方、Fig. 1(b)の場合には内部の空間から磁束が排除され、磁場の強さはゼロに近くなる。

ローラー型磁場発生装置の基礎的な研究は、既にいくつかのグループによりなされている。Bjork ら³⁾は、4本および6本の磁石を使用したローラー型磁場発生装置における磁石の体積と最大磁場の関係を計算している。また、Cugat ら⁴⁾は4本の磁石を使用したローラー型磁場発生装置を試作している。しかしながら、磁石の大きさや配置と発生する磁場の強さ・均一性、磁石を回転させるのに必要なトルクについて系統的に調べた研究は見当たらない。本論文では、このような情報を整理してローラー型磁場発生装置

の開発指針を示すことを目的とする。

2. 磁場源の構造と計算方法

径方向に着磁した6本の円柱型永久磁石を正六角形の頂点に配置したローラー型磁場源を考える。各磁石の角度を Fig. 1(a)のように設定すると、六角形の中心に右方向の最大磁場が生じる。この角度は厳密には正確ではなく、磁石の大きさや磁石間距離に依存するが、ここでは Bjork ら³⁾に従い、この角度における磁束密度を最大磁束密度 B_{max} とする。様々な磁石の大きさや距離、角度において磁石周辺の磁場と磁石に働くトルクを2次元有限要素法

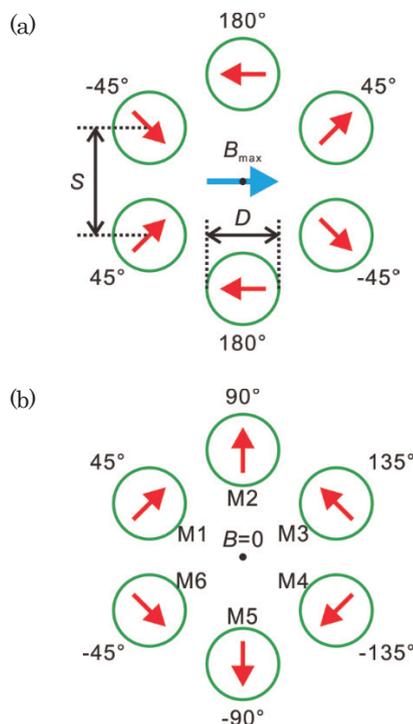


Fig. 1 Mangle-type magnetic field source with six magnets arranged on corners of regular hexagon. Magnetization directions shown in (a) and (b) are those generating high magnetic field and zero field, respectively.

(Field Precision, TriComp) により計算した。なお、磁石の大きさは比較的入手しやすいと考えられる直径 30 mm 以下とした。メッシュサイズは 1 mm とし、相対誤差の目標値は 10^{-6} とした。磁石の磁束密度はネオジウム磁石を想定して 1.1 T とし、減磁特性は理想的な傾き -1 の直線と仮定した。各磁石に働くトルクは、マクスウェルの応力テンソルを用いた面積分^{5),(6)}により求めた。

3. 計算結果

まず、磁石の磁化方向を Fig. 1(a)の最大磁場を発生する角度に固定して、磁石の直径 D と磁石間距離 S を変化させたときの六角形の中心における磁束密度の変化を Fig. 2 に示す。なお、 S は Fig. 1(a) に示したように、磁石中心間の距離である。 S を一定にすると D が大きいほど、また D を一定にすると S が小さいほど磁束密度は大きい。磁石を回転させることを考慮すると、磁石間に最低 2 mm (+磁石の直径) 程の間隔を空けなければならないが、その場合発生可能な磁束密度は最大で 0.65 T 程度である。

次に、任意強度の磁場の発生方法について議論する。プラスの最大からマイナスの最大まで任意強度の磁場を発生させる磁石の回転パターンはゼロ磁場時の磁石角度によって特徴付けられる。このような回転パターンは多数存在するが、ここでは代表的な 3 つのパターンについて検討する。Fig. 3 のパターン 1 は Fig. 1 に示したものと同一であり、磁場をゼロにするために左右から入ってきた磁束を上下に逃がすように磁化方向を設定する。パターン 2, 3 では磁化方向を放射状あるいは渦状にして内部の磁場をゼロにする。プラスの最大磁場からゼロを経てマイナスの最大磁場まで連続的に変化させるには、磁石角度をこれらの間の値に設定すればよいが、パターン 3 に関しては注意が必要である。パターン 3 は上下で非対称な磁化配置であり、縦方向の磁場成分を生じないように角度を設定する必要がある。Fig. 3(c) はこれを考慮して、横方向の磁場が目標の値に、縦方向の磁場がゼロに、後に述べる磁場の均一性が最高になるように磁石角度を最適化した結果である。

各パターンに従って中心の磁場を変化させるとき、磁場の均一性や各磁石に働くトルクも変化する。Fig. 4 は $D = 20$ mm, $S =$

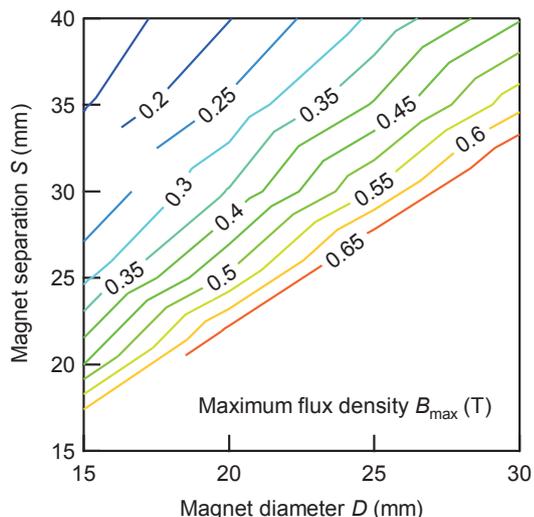


Fig. 2 Magnetic flux density at center as functions of magnet diameter D and magnet separation S .

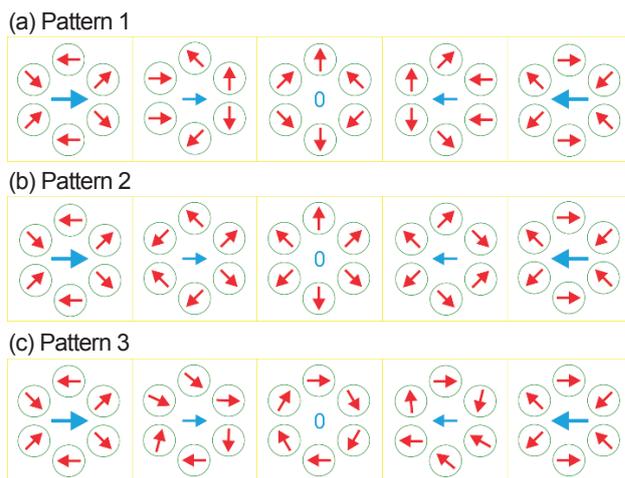


Fig. 3 Three rotation patterns of magnets.

30 mm, パターン 1 において、磁石の角度に対する中心の磁束密度、中心付近の 1 cm 角の領域における磁束密度の (大きさの) 標準偏差、各磁石に働くトルクの変化を示している。ここで横軸は左上の磁石 M1 (Fig. 1(b)参照) の角度である。中心の磁束密度は単調かつ連続に変化していることがわかる。磁束密度の標準偏差については、最大磁場においては Halbach シリンダーの磁化配置に

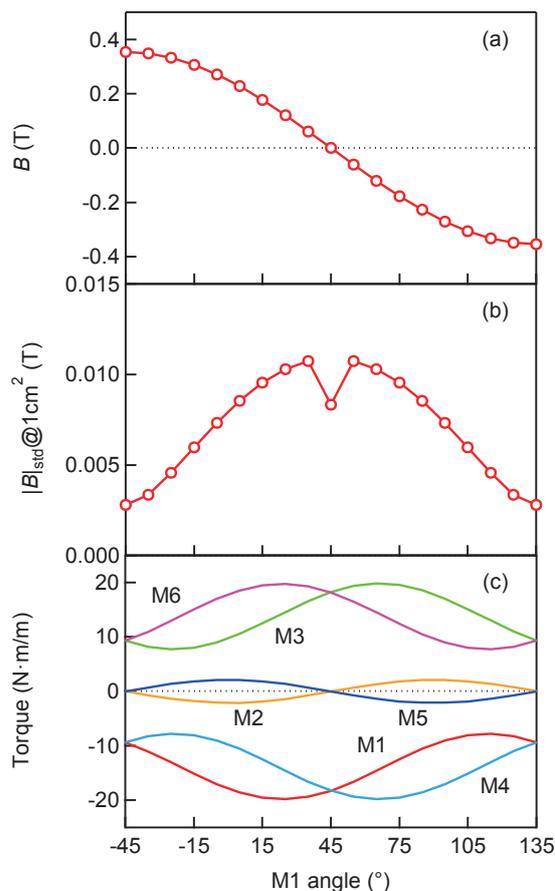


Fig. 4 (a) Magnetic flux density at center. (b) Standard deviation of flux density in 1 cm² region around center. (c) Torque acting on magnets as function of M1 angle for $D = 20$ mm, $S = 30$ mm, and pattern 1.

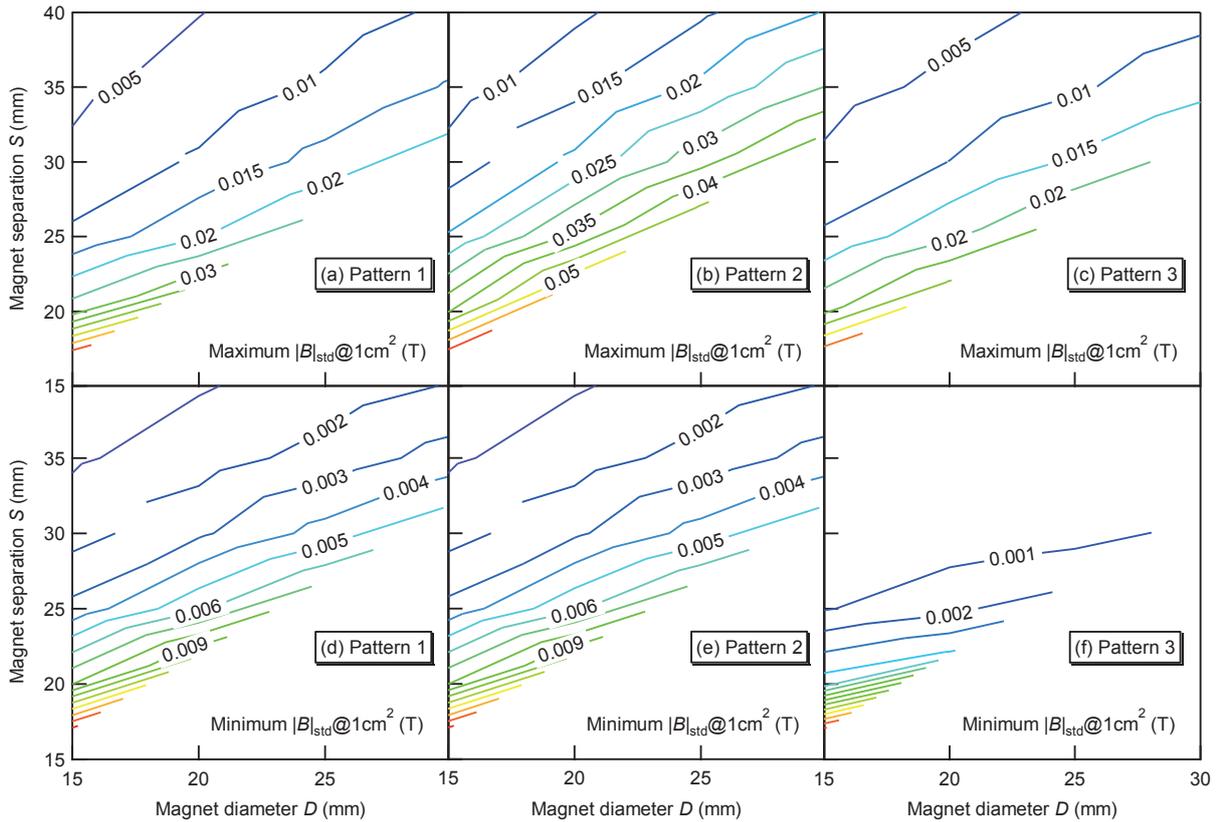


Fig. 5 (a)–(c) Maximum and (d)–(f) minimum standard deviation of magnetic flux density in 1 cm² region around center for patterns 1–3.

近く均一性が高いが、磁場が弱い時には均一性は悪化する。トルクについては、M1とM6、M2とM5、M3とM4はそれぞれ対称に回転するため、トルクは逆符号で同じ大きさとなる。M1、M3、M4、M6に大きなトルクが働くことがわかる。

各パターンにおける磁束密度の標準偏差の最大および最小値、トルクの最大値を D および S の関数としてプロットしてみる。Fig. 5(a)–(c) は磁束密度の標準偏差の最大値、(d)–(f) は最小値である。最大値・最小値とも S を一定にすると D が小さいほど、また D を一定にすると S が大きいほど標準偏差は小さく、磁場の均一性は

高い。最大値に注目すると、パターン1、3はパターン2に比べて均一性が高い。一方、最小値に注目すると、パターン3はゼロ磁場において最も均一性が高い。パターン1および2はHalbachシリンダーに対応する最大磁場において最も標準偏差が小さく、同じ値となっている。以上のことから、磁場の均一性についてはパターン3が最も優れていると言える。

Fig. 6はトルクの最大値である。 S を一定にすると D が小さいほど、また D を一定にすると S が大きいほどトルクは小さく、回転させやすいことがわかる。トルクはパターン1、2、3の順に小

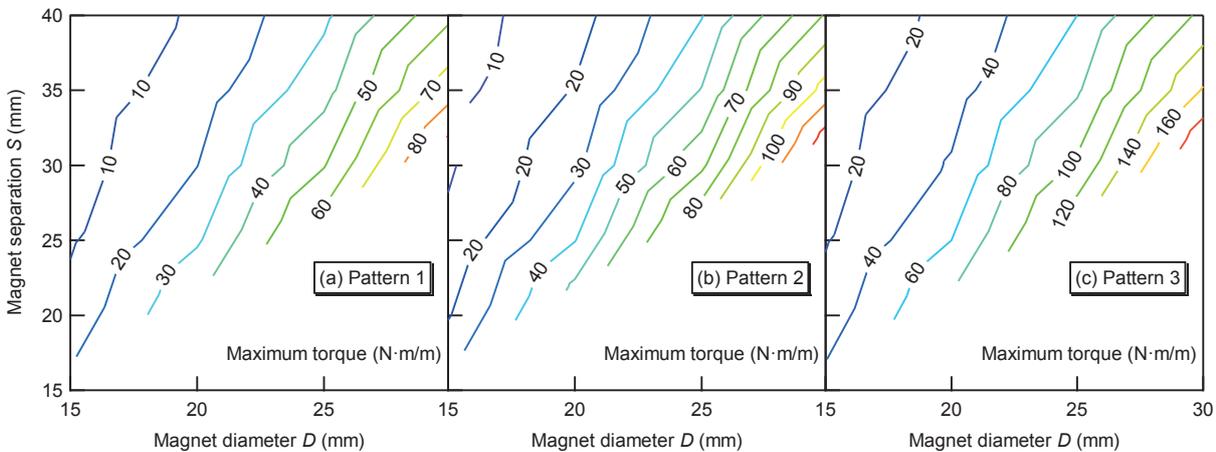


Fig. 6 Maximum torque acting on magnets for patterns 1–3.

さく、装置設計の観点からは好ましいことがわかる。

4. フィージビリティ・スタディと試作

ローラー型磁場発生装置をホール効果や磁気抵抗効果、磁気光学効果等の測定に用いることを想定する。室温測定で試料のみ挿入する場合には直径 10 mm 程度、室温以外の測定でクライオスタット等の装置を挿入する場合は直径 30 mm 程度の空間が必要である。試料空間の直径（ボア）を d とすると、 $d = 2S - D$ の関係があり、これを図示したものが Fig. 7 である。ハッチングの領域は $S < D$ で不可能な領域である。図の D , S の範囲では $d \geq 10$ は自動的に満たされる。一般的なホール効果測定や磁気光学効果測定等において、最大磁束密度は 0.5 T 程度が一つの目安となるだろう。クライオスタットの使用を想定して、Fig. 2 の $B_{\max} = 0.5$ T のラインと Fig. 7 の $d = 30$ mm のラインの交点は、およそ $D = 20$ mm, $S = 25$ mm である。このとき、磁石の回転パターンを「1」とすると、磁束密度の標準偏差の最大値は約 0.02 T であり、最大磁束密度 0.5 T と比較すると約 4% である。一般的な電磁石と比較すると大きい、アプリケーションによっては許容されるであろう。また、最大トルクは約 30 N·m/m である。2次元シミュレーションのため、奥行き方向の単位長さあたりのトルクとなっているが、磁石の長さを 10 cm と仮定すると、3 N·m となる。これは小型のギアードモータで回転可能な値である。

実際の設計では、機構部品が入るスペースを確保するため寸法に若干の余裕を持たせる必要がある。Fig. 8 は $B_{\max} = 0.5$ T, $d = 30$ mm を目標として、 $D = 25$ mm, $S = 31$ mm として試作した装置の外観である。4 台のステッピングモータを用いて磁石を回転させる (M1 と M6, M3 と M4 は対称に回転するため、ギアを用いてそれぞれ 1 つのモータで回転可能である)。1 つのモータには最大約 3.4 N·m のトルクが働くことになるが、減速比 1/264 の遊星ギアを介することにより回転可能である。また、42 mm 角のステッ

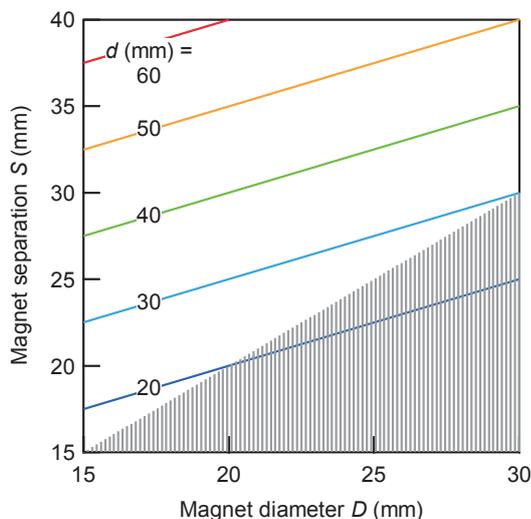


Fig. 7 Bore d as functions of magnet diameter D and magnet separation S . Hatching is invalid region of $S < D$.

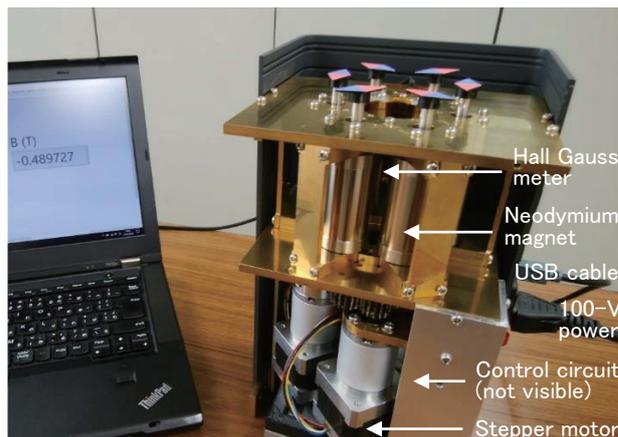


Fig. 8 Prototype of magnetic field source with bore $d = 30$ mm, magnet diameter $D = 25$ mm, and magnet separation $S = 31$ mm.

ピングモータの非通電時の保持力は 0.007 N·m 程度であるので、ギアの効率を 50% とすると、非通電でも磁石の角度を保持できることになる。このようにして磁場を変化させる時以外は通電不要とし、長時間の磁場安定性と省エネルギーを実現している。

Fig. 9 は試作機の中心付近、 20×20 mm² の領域における磁束密度の横方向 (Fig. 1(a) の磁束密度の方向) 成分の分布である。1 軸ホールガウスメータ (LakeShore 425) を 2 軸自動ステージに取り付けて 2 次的に走査することにより測定した。磁石角度は Fig. 1 の最大磁場およびゼロ磁場を発生する角度である。最大磁場、ゼロ磁場どちらにおいても磁束密度の標準偏差はシミュレーションよりも大きく

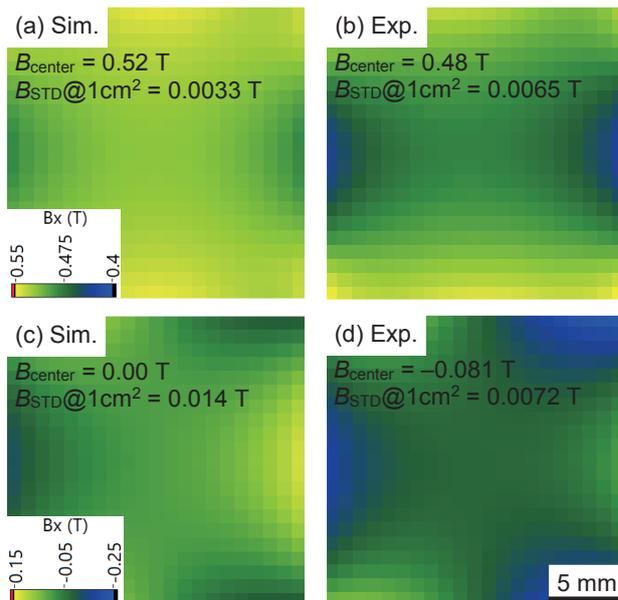


Fig. 9 Distribution of lateral component of magnetic flux density. (a) and (b) are comparison between simulation and experiment for the identical angles of magnets those generate maximum flux density (pattern 1). (c) and (d) are those for zero field.

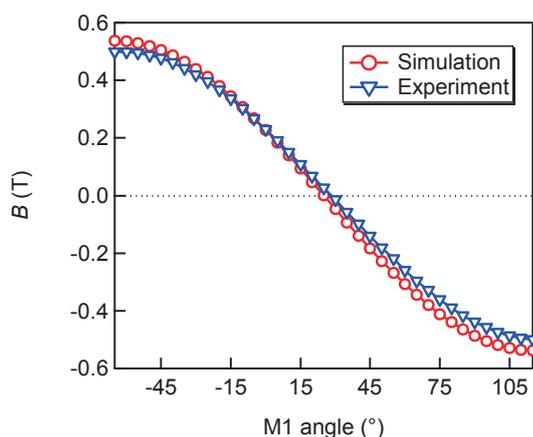


Fig. 10 Simulation and experimental results of magnetic flux density at center as function of M1 angle for modified pattern 1.

なった。この原因については次に示す磁束密度の大きさとともに議論する。

Fig. 10 は中心位置における磁束密度をシミュレーションと比較したものである。このときの磁石回転パターンは修正したパターン1を用いている。第2節で述べたように、最大磁場を発生する磁石角度は厳密には Fig. 1(a)の角度とは異なる。 $D=25\text{ mm}$, $S=31\text{ mm}$ の場合には磁石 M1 の角度は -65° , M2 の角度は 180° , ほかの磁石はそれらに対称な角度である。マイナスの最大磁場を発生する角度は M1 が 65° , M2 は 0° であり、中間の磁場は各磁石の角度を均一に変化させることにより実現する。したがって、ゼロ磁場時の角度は M1 が 25° , M2 が 90° となる。磁場がゼロとなるとき M1 の角度はシミュレーションでは 25° であるが、実験では約 28° であった。この差は、実験において磁石の角度にずれがあることを示している。また、磁束密度の最大値はシミュレーションでは 0.54 T であるのに対して、実験では 0.50 T であった。これも角度ずれが一因ではあるが、そのほかにも磁石自体の磁束密度が小さいこと、磁石の長さが有限であること、各磁石の位置あるいはホールセンサ

の位置が正確でないことなど様々な原因が考えられる。特に磁石の長さが有限であることは、奥行き方向の磁場の発散につながるため、磁束密度の標準偏差が大きいことと一致する。これらの要因については今後詳細に検討する予定である。

5. まとめ

6本の円柱型ネオジウム磁石を用いたローラー型磁場源について、磁石の大きさ・距離と最大磁束密度の関係、3つの磁石回転パターンにおける磁場の均一性と磁石に働くトルクを有限要素法により調べた。その結果、発生可能な最大磁束密度は約 0.65 T であること、磁石回転パターン3は磁場の均一性に優れるが、回転させるためのトルクは大きいことが明らかになった。この知見に基づき、試作機を製作し、 $+0.5\sim-0.5\text{ T}$ の任意の磁束密度を発生可能であることを確認した。

本論文では均一磁場の発生を目的としたが、ローラー型磁場源は不均一磁場の発生にも適している。今後、加速器等に用いられる多重極磁場の発生や、磁場勾配中の磁性体に働く並進力を用いた磁性体の位置制御への利用も期待される。

謝辞 試作機的设计指針について助言いただきました(有)ハヤマ・菊地敏明氏に感謝します。

References

- 1) K. Halbach: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-26**, 3882 (1979).
- 2) Y. Iwashita and M. Kumada: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **26**, 118 (2002) (in Japanese).
- 3) R. Bjørk, C. R. H. Bahl, A. Smith, and N. Pryds: *J. Magn. Magn. Mater.*, **322**, 3664 (2010).
- 4) O. Cugat, P. Hansson, and J. M. D. Coey: *IEEE Trans. Magn.*, **30**, 4602 (1994).
- 5) S. Humphries: Theory and applications of the Maxwell stress tensor, <https://www.fieldp.com/documents/stresstensor.pdf> (2012).
- 6) S. Humphries: Surface integral expressions for electric-magnetic force and torque, <https://www.fieldp.com/documents/forceandtorque.pdf> (2012).

2018年9月28日受理, 2018年12月30日採録