

学術論文

反磁性グラファイト板を用いた非接触二次元位置制御形
アクチュエータ試作器における磁気支持剛性の改良Improvement of Magnetic Stiffness on the Proto-model of Contact-free Two-dimensional Micro Positioning
Actuator by using Diamagnetic Graphite Plate鈴木 晴彦^{*1} (正員), 齋藤 亮介^{*2}, 佐藤 康太^{*1}, 佐藤 善栄^{*1}, 板津 和任^{*2}, 伊藤 淳^{*1}

Haruhiko SUZUKI (Mem.), Ryosuke SAITO, Kota SATO, Yoshitaka SATO, Kazuto ITATSU, Atsushi ITO

Recently, we could obtain several useful experimental results about the planar contact-free micro motion using a PG plate above two-dimensional Halbach permanent magnet (2D-Halbach PM) array with zero-power supply. To realize practical use of a precise micro positioning of PG plate by using our novel technique, it is necessary to investigate all components of the magnetic stiffness exactly. In this paper, we mainly describe the method of improved magnetic stiffness of PG plate carrying out contact-free magnetic levitation above 2D Halbach PM array, and report some experimental results of the diamagnetic force which corresponds to the magnetic stiffness acting on the PG plate in two displacement directions.

Keywords: contact-free, diamagnetic graphite, magnetic stiffness, Halbach PM array, micro motion, zero-power.

1 はじめに

近年, MEMS におけるプローブ駆動システムや, 走査プローブ顕微鏡技術を応用した微細加工システム, 高密度メモリシステムの駆動部には, ナノオーダーの駆動精度を有する XY ステージが必要とされている。これらのアクチュエータに要求される性能として, 「高精度駆動」, 「ダストレス・ノイズレス」, 「省メンテナンス・省エネルギー」が挙げられ, これらを兼ね備えるマイクロ・モーション・アクチュエータの開発が重要である。非接触技術は「ダストレス・ノイズレス」の点で圧倒的な優位性をもつが, 特に物質の弱反磁性と希土類系永久磁石の特性を利用した, 室温におけるパッシブ磁気浮上であれば, 浮上に関する制御機構の簡素化が可能であり, かつ超電導材料のような冷却は不要であることから, 「省メンテナンス・省エネルギー」をも確実に実現できる。つまり, この反磁性材料による室温パッシブ磁気浮上は, 前述のマイクロ・モーション・アクチュエータに求められる二つの性能を満たす可能性があり, 極めて重要な技術要素である。

2001 年以降, EPFL-LSRO1 の H. Bleuler らは, 室温において優れた特性を示す反磁性グラファイト (Pyloric Graphite: PG) 板のパッシブ磁気浮上を利用

した非接触フライホイールに関する研究や[1], PG 板と永久磁石直線軌道を利用したリニア・コンベアに関する研究を進めている[2]。また 2004 年以降は, 我々と EPFL-LSRO1 グループの一部共同研究により, PG 板を用いた非接触アクチュエータに関する研究を手掛け, 2006 年, Halbach 配列永久磁石上でパッシブ磁気浮上する PG 板に永久磁石小片を近づけ, 特殊な磁場勾配を与えることにより, PG 板が非接触駆動するモデルや[3,4], 同心円状に Halbach 配列された永久磁石上でディスク状の PG 板が非接触磁気支持回転するモデルを開発した[5]。さらに 2007 年以降, Fig. 1 で示すような二次元 (2D) に Halbach 配列された永久磁石上でパッシブ磁気浮上する PG 板試料を用いた, 二次元非接触マイクロ駆動モデルの開発を, 我々が独自に手掛けてきた[6-10]。

我々の研究グループが手掛けた PG 板を用いた全て

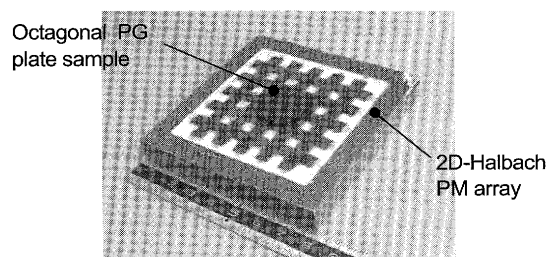


Fig. 1 Passive magnetic levitation of octagonal PG plate sample above 2D-Halbach PM array at room temperature.

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 ^{*2} 福島高専専攻科

の非接触モデルは、Halbach 配列永久磁石上でパッシブ磁気浮上する PG 板の「非接触磁気支持」および「非接触駆動・変位」において、直接的な電力供給を与えておらず、極めて高効率・省エネルギーな非接触アクチュエーションを可能とすることから、特殊環境下での高精度な部品のハンドリングや、MEMS 技術を用いた超微細加工装置の非接触駆動システム開発に対し重要な要素技術を与えると思われる。特に Fig. 1 で示す PG 板を用いた非接触二次元マイクロ駆動モデルは、PG 板試料の「位置保持」において、直接的な電力供給を用いないことから「ゼロパワーで位置決めできる二次元非接触マイクロ・モーション・アクチュエータ」の開発が可能であると思われる。

この「ゼロパワーで位置決めできる二次元非接触マイクロ・モーション・アクチュエータ」のプロトモデルにおいては、これまでに $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 程度の位置決め精度が実現できることを示してきたが、さらに、数十 nm の「高精度な位置決め」を実現するため、PG 板試料の磁気支持剛性の改善について検討をしている[11,12]。

本報では、パッシブに磁気支持される八角形 PG 板試料の磁気支持剛性向上に関する方法と新たな観測結果を示し、本モデルの「二次元非接触マイクロ・モーション・アクチュエータ」としての特性を検討する。

2 PG 板試料の非接触変位と磁気支持剛性

2.1 2D-Halbach 配列永久磁石の構成と PG 板試料

Fig. 1 および Fig. 2 で示すように、表面磁束密度約 0.4 T の Nb-Fe-B 系永久磁石 ($5 \times 5 \times 5 \text{ mm}$ 立方体) を二次元に Halbach 配列した永久磁石列 (2D-Halbach 配列永久磁石) を製作し、PG 板のパッシブな磁気浮上・磁気支持の観測、および非接触二次元駆動の観測を行っている。Fig. 3 には製作した 2D-Halbach 配列永久磁石列表面上 1 mm における磁場分布の様子を示す。

物質の反磁性による磁気力は、その試料の磁化率 χ_m (PG 板に垂直な方向の磁化率 $\chi_m: -450 \times 10^{-6}$) が一様であるとき、試料に作用する磁場の磁束密度と磁場勾配に依存する。また永久磁石上でパッシブ磁気浮上する PG 板の反磁性磁気力による磁気支持力に関しては、永久磁石列によって形成される磁場の条件以外に、PG 板試料形状に大きく依存することが、これまでの我々の実験研究によって明らかになっている[4]。これらをもとに、2D-Halbach 配列永久磁石上で安定にパッシブ磁気浮上する PG 板の基本形状を Fig. 4 のように設

計し[7], 2.2 節で示すような方法により、PG 板試料の非接触変位と磁気支持剛性の特性計測を行っている。なお、Fig. 4 (および Fig. 1) に示す八角形 PG 板試料の厚さは約 1 mm 、質量は約 0.83 g である。

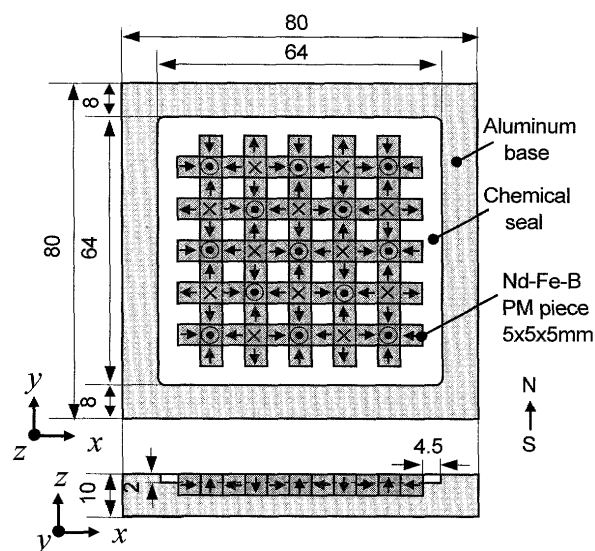


Fig. 2 Design of 2D-Halbach PM array.

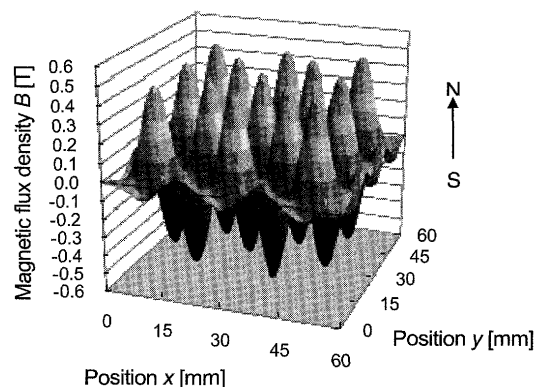


Fig. 3 Magnetic flux density distribution of 2D-Halbach PM array. (above 1 mm)

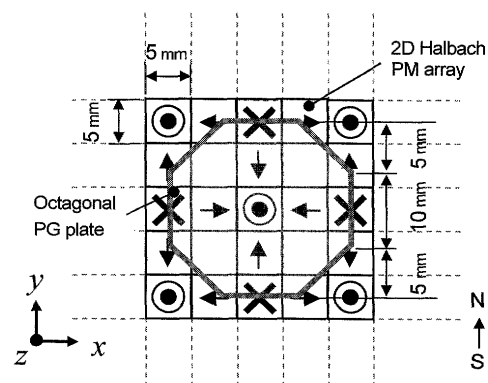


Fig. 4 Design of octagonal PG plate sample and layout of PG sample above 2D-Halbach PM array.

2.2 PG 板試料の非接触変位と磁気支持剛性

八角形 PG 板試料は、Fig. 4 に示す位置で約 1 mm のエアギャップを保って安定浮上する。このとき、PG 板試料は周囲の磁場により試料面および試料端部に反磁性磁気力が誘起され、それと試料重量とのバランスによって磁気支持されている。この状態において、Fig. 5 に示すように上空から Nd-Fe-B 系永久磁石小片（表面磁束密度：約 0.3 T）を近づけて PG 板試料端部近傍の磁場に変化を与えると、八角形 PG 板試料に作用する磁気支持力（反磁性磁気力）のバランスが崩れて不安定状態となり、PG 板試料は新たな安定点に向かって変位する。Fig. 6 は、近付ける永久磁石小片の極性と近付ける位置の組み合わせによる、八角形 PG 板試料の変位方向を示している。

また Fig. 7 には、N 磁極面を向けた永久磁石小片を、Fig. 6 中の Point A ならびに Point B の上空から近づけた場合の、八角形 PG 板試料の変位特性を示している。それぞれは非線形な特性を示すが、 $G=3\sim5$ mm の範囲において、Point A に永久磁石小片を近づけた場合で約 $450\ \mu\text{m}/\text{mm}$ 、Point B では約 $125\ \mu\text{m}/\text{mm}$ のほぼ線形な変位特性が得られている。

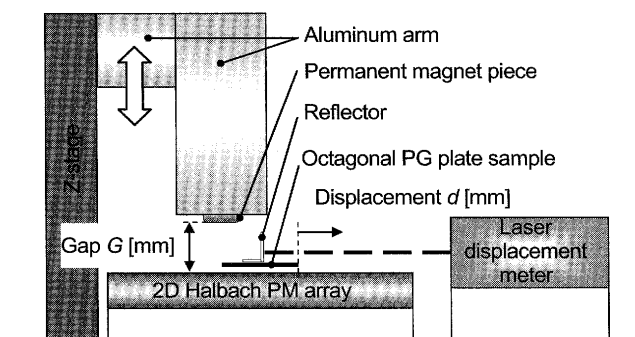


Fig. 5 Schematic illustration of experimental set for the displacement of octagonal PG plate sample.

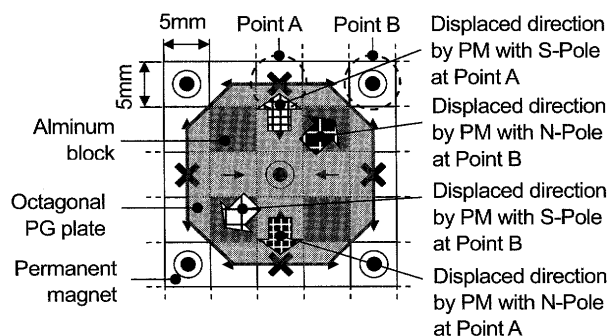


Fig. 6 Displaced direction of an octagonal PG plate depending on how to approach with a small PM piece.

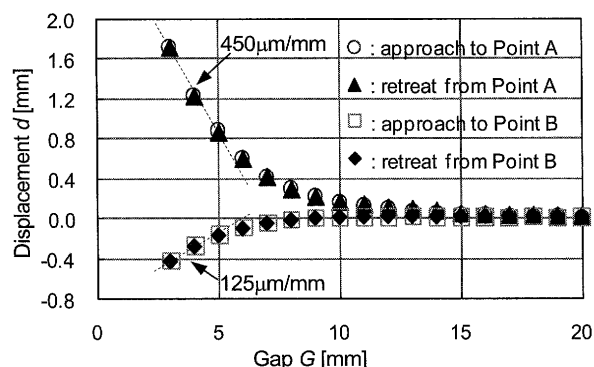


Fig. 7 Relationship between the displacement of PG plate and the gap of approaching PM piece (N-pole).

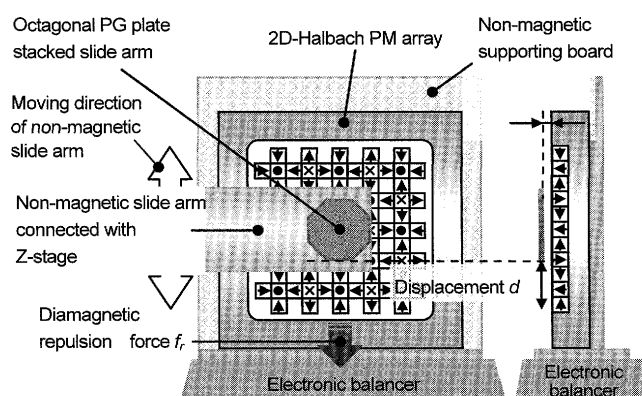


Fig. 8 Schematic illustration of experimental set for the diamagnetic repulsion force acting on octagonal PG plate above 2D Halbach PM array.

上記 Fig. 7 における 2 方向の変位特性に表れる差は、それぞれの変位方向において PG 板に作用している磁気支持力の強さ（磁気支持剛性）に差があるためである。これを Fig. 8 に示すような計測方法により、八角形 PG 板試料が 2D-Halbach 配列永久磁石表面 (x-y 面) で変位する際の磁気支持力（反磁性磁気反発力）を明らかにした。2D-Halbach 配列永久磁石の上面 (x-y 面) を電子天秤上で垂直に立て、その x-y 面に対し平行に 1 mm のギャップを与えて八角形 PG 板試料を非磁性可動アームに取り付けている。PG 板試料を Z 軸マイクロステージにより上下方向に変位させることで、PG 板試料に作用する磁気支持力（反磁性磁気反発力）を、2D-Halbach 配列永久磁石に加わる反作用として、電子天秤の荷重変化によって計測している。その結果を Fig. 9 に示す。

Point A 方向（direction A）への変位、Point B 方向（direction B）への変位において、 $d=0\sim2$ mm の範囲で、それぞれ再現性のある線形な特性が計測され、

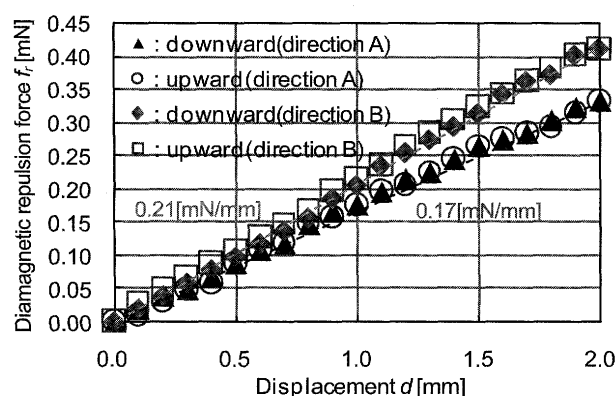


Fig. 9 Diamagnetic repulsion force acting on an octagonal PG plate sample variation of its displacement in direction A and direction B.

Point A 方向の変位では約 0.17 mN/mm, Point B 方向の変位では約 0.21 mN/mm という磁気支持剛性値を得た。

3 PG 板試料の磁気支持剛性特性の改善

3.1 磁気支持剛性向上の方法

Fig. 7 と Fig. 9 で示すこれまでの結果から, PG 板試料の変位特性が磁気支持剛性特性に依存していることが明らかとなった。即ち磁気支持剛性の向上が PG 板試料の変位量抑制 (変位精度の向上) につながるということを示している。

そこで, Fig. 10 に示す二つの方法によって, 八角形 PG 板試料の磁気支持剛性向上の検討を行った。まずコンセプト A は, 試料端部にある 4 つの Point B の磁束密度を高めるため, Point B の 5 mm 上空に永久磁石小片 (5×5×5 mm) が異極で向かい合うように配置したものである。これにより, 八角形 PG 板試料 Point B 方向からの反磁性磁気反発力を増加させ, PG 板試料面内方向の磁気支持力を向上させようとするものである。このコンセプト A の磁石配置を実現するために, 新たに Fig. 11 に示すような 4 つの永久磁石小片を埋め込んだ付加プレートを 2D-Halbach 配列永久磁石上部に固定した。

一方コンセプト B は, 八角形 PG 板試料の中央に直径約 7 mm の穴を設け, 2D-Halbach 配列永久磁石中央の N 磁極によって形成されている磁場により, 穴の端部にも反磁性磁気反発力を作用させ, PG 板試料面内方向の磁気支持力を向上させようとするものである。この方法は, 既に我々の研究グループによって開発された, 同心円状に構成した Halbach 配列永久磁石上で, 非接触に磁気支持回転する PG 円板

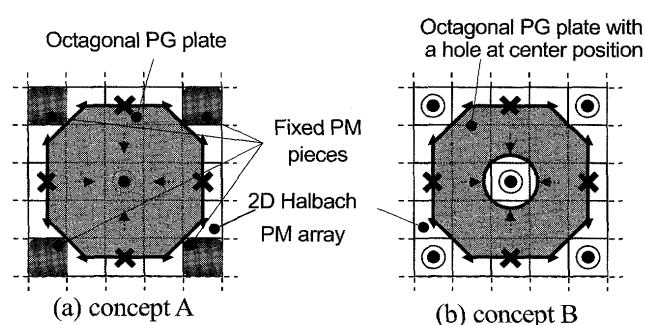


Fig. 10 Schematic illustration for the improving method of magnetic stiffness of octagonal PG plate sample.

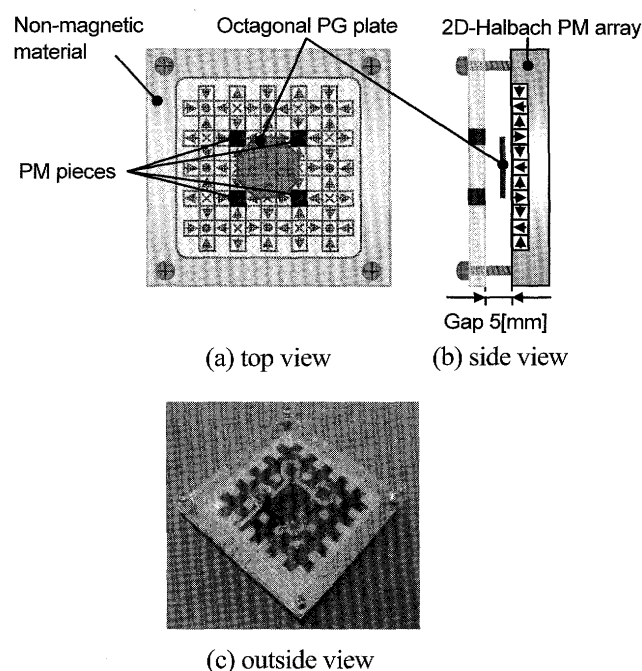


Fig. 11 Adapter unit for improving magnetic stiffness by using four PM pieces above at point B.

のモデルでも採用している方法である[5]。

これら二つの方法を Fig. 8 で示した計測方法により, Point A 方向または Point B 方向に PG 板試料を変位させたときの反磁性磁気反発力を測定した。

3.2 PG 板試料の磁気支持剛性特性の改善

コンセプト A の Point A 方向における反磁性磁気反発力の測定結果を Fig. 12 に, Point B 方向における結果を Fig. 13 に示す。なお, 比較として改善策を施す前の Fig. 9 で示した反磁性磁気反発力を「normal」データとしてそれぞれの図中に付記する。Fig. 12 および Fig. 13 から, Point A 方向および Point B 方向ともに反磁性磁気反発力の向上, つまり磁気支持剛性の向上を確認することができる。また, 各方向とも測定範囲内では

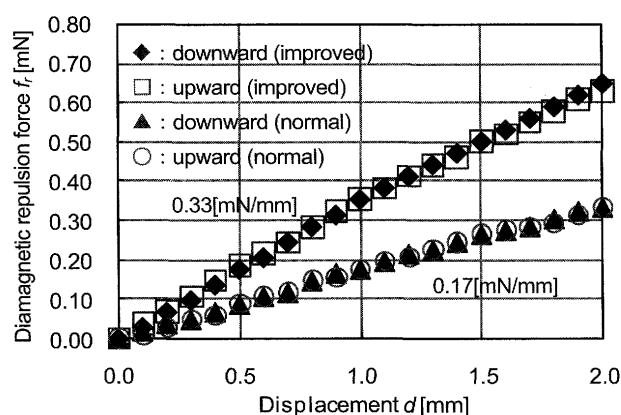


Fig. 12 Result for the improvement of diamagnetic repulsion force in direction A.(concept A)

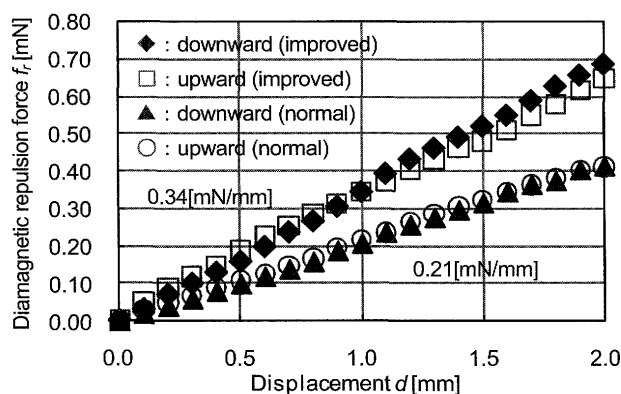


Fig. 13 Result for the improvement of diamagnetic repulsion force in direction B.(concept A)

ほぼ線形な特性が得られ、その傾きは Point A 方向の場合では約 0.33 mN/mm となり、Point B 方向の場合では約 0.34 mN/mm である。改善前の「normal」な状態と比較すると、Point A 方向において 194 % の向上、Point B 方向において 162 % の向上となった。

同様に、コンセプト B の Point A 方向における反磁性磁気反発力の測定結果を Fig. 14 に、Point B 方向における結果を Fig. 15 に示す。なお、比較として同条件で新たに計測したオリジナルな PG 板試料のデータを図中に記載する。Fig. 14 および Fig. 15 から、Point A 方向および Point B 方向ともに反磁性磁気反発力の向上（磁気支持剛性の向上）を確認することができる。特に、Point A 方向の反磁性磁気反発力が全体的に大きく現れ、変位 $d=0 \sim 1$ mm の範囲における傾き（磁気支持剛性）は約 0.46 mN/mm であり、これまでの全ての計測結果の中で一番強く現れている。また Point B 方向の場合、同範囲では約 0.35 mN/mm であり、コンセプト A における Point B 方向とほぼ同値である。コンセプト B における改善率は「normal」な状態を基準と

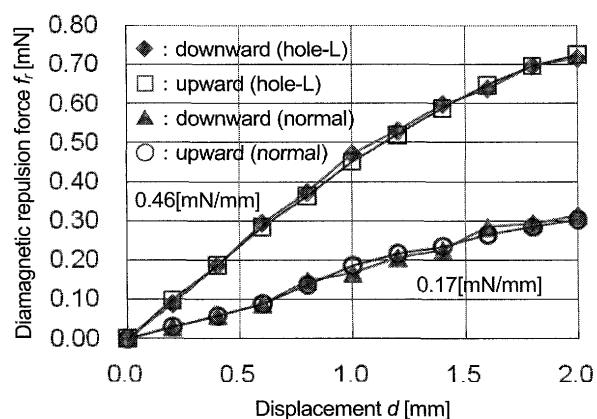


Fig. 14 Result for the improvement of diamagnetic repulsion force in direction A.(concept B)

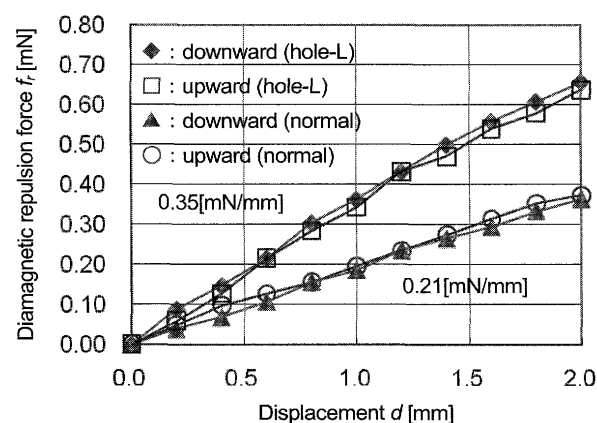


Fig. 15 Result for the improvement of diamagnetic repulsion force in direction B.(concept B)

して、Point A 方向で約 270 % の向上、Point B 方向において約 167 % の向上となった。

4 おわりに

2D-Halbach 配列永久磁石上における八角形 PG 板試料の非接触磁気支持・変位特性は、PG 板に作用する反磁性磁気反発力から成る磁気支持力、および磁気支持剛性によって大勢が決められる。その PG 板試料に作用する反磁性磁気反発力を大きくするには、反磁性材料自身の特性を一定とする限り、「試料周囲の磁場特性」を変えるか、「試料形状」を変えるかの二点になる。本報では、これら二点について実験事実により初期検討を試みたことになる。

PG 板試料周囲の磁場特性を変化させたコンセプト A は、磁気支持剛性向上の効果は大いにあるといえるが、その構成面において大型化・複雑化を伴っている。今後、永久磁石以外の磁束源や磁性材料により同様な

効果を得ようとする場合でも、必ず機械的な構成要素が増えることとなり、省スペースが要求されるマイクロアクチュエータへの実用には適合しなくなる。これを解決する一方法として、2D-Halbach 配列永久磁石の磁場設計を変更し、局所的に強い磁場を形成させ、今回のコンセプト A による効果と同様な磁場状態を作り出すことも考えられる。これにより、PG 板試料上部がフリーとなり、アプリケーションの構築が可能となると思われる。

一方、PG 板試料の中央部に穴を設け、「PG 板の端部形状効果」を積極的に利用したコンセプト B は、若干の浮上ギャップの低下と非線形性を伴うものの、コンセプト A 以上の効果が観測され、本モデルにおける「高精度マイクロ・ポジショニング」を構築する上で、極めて有効な手法であることが明らかになった。

本報で示した磁気支持剛性向上のための方法は、その効果が確認されたことから、現在、詳細な変位計測を実施している。またコンセプト B においては、穴の形状によってさらに磁気支持の特性を制御できるので、現在 3 種類の穴形状を設けた試料によって、比較検討を進めている。

謝 辞

本研究の一部は、科研費（基盤研究 (C) : 20560250）の助成により行われていることを付記し、謝意を表す。

(2010 年 2 月 24 日受付)

参考文献

- [1] R. Moser, Y.-J. Regamey, J. Sandtner, H. Blauler, Passive diamagnetic levitation for flywheels, *Proceedings of the Eighth International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB-8)*, pp.599-603, 2002.
- [2] F. Barrot, D. Chapuis, T. Bosgiraud, B. Löhr, L. Sache, R. Moser and H. Bleuler, Preliminary investigations on a diamagnetically levitated linear conveyor, *Proceedings of the 5th International Symposium on Linear Drive for Industry Applications (LDIA2005)*, pp.343-346, 2005.
- [3] H. Suzuki, A. Suzuki, S. Sasaki, A. Ito, F. Barrot, D. Chapuis, T. Bosgiraud, R. Moser, J. Sandtner, H. Bleuler, Preliminary experimental study on new contact-free linear drive system using diamagnetic material, *Proceedings of the 18th Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (Maglev2006)*, Vol.1, pp.199-203, 2006.
- [4] H. Suzuki, M. Kanke, A. Suzuki, A. Ito, Contact-free linear drive technique by using the edge shape effect of diamagnetic graphite plate, *The 6th International Symposium on Linear Drives for Industrial Applications (LDIA 2007)*, OS3.1, pp.55-56, 2007.
- [5] H. Suzuki, A. Suzuki, S. Sasaki, A. Ito, F. Barrot, D. Chapuis, T. Bosgiraud, R. Moser, J. Sandtner, H. Bleuler, Proto-model of novel contact-free disk suspension system utilizing diamagnetic material, *The 10th International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB-10)*, pp.98-99, 2006.
- [6] 星, 河野, 菅家, 鈴木, 伊藤, 鈴木, 二次元 Halbach 配列永久磁石上における反磁性グラファイト板の磁気浮上駆動の観察, 日本機械学会第 19 回「電磁力関連のダイナミックス」シンポジウム (SEAD19), C331, pp.478-479, 2007.
- [7] 佐藤, 初瀬, 菅家, 伊藤, 鈴木, 二次元 Halbach 永久磁石上でパッシブ磁気浮上する反磁性グラファイト板の非接触駆動の観測, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-08-12, pp.59-62, 2008.
- [8] 齋藤, Farah Hanim, 板津, 菅家, 伊藤, 鈴木, 二次元 Halbach 配列永久磁石上における反磁性グラファイト板の非接触位置制御の観測, 平成 20 年電気関係学会東北支部連合大会 (郡山), 1113 p.310, 2008.
- [9] 齋藤, フェラハニム, 板津, 菅家, 伊藤, 鈴木, 二次元 Halbach 配列永久磁石上でパッシブ磁気浮上する反磁性グラファイト板のゼロパワー非接触マイクロ位置制御の観測, 平成 20 年電気学会産業応用部門大会 (高知) YPC, Y-129, 2008.
- [10] 鈴木, 佐藤, 初瀬, 菅家, 伊藤, ゼロパワーで位置制御できる反磁性グラファイト板を用いた非接触二次元マイクロ駆動, 日本 AEM 学会誌, Vol.17, No.1, pp.150-155, 2009.
- [11] Farah Hanim, 齋藤, 板津, 菅家, 伊藤, 鈴木, ゼロパワーで二次元非接触位置制御できる反磁性グラファイト板の磁気支持剛性向上に関する初期実験, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-09-16, pp.87-92, 2009.
- [12] R. Saito, K. Itatsu, M. Kanke, A. Ito, H. Suzuki, Contact-free Two Dimensional Precise Micro Positioning by using Diamagnetic Graphite, *The 7th International Symposium on Linear Drives for Industrial Applications (LDIA 2009)*, PS4.14, pp.369-372, 2009.