

機関番号：51601  
 研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20560250  
 研究課題名 (和文) ゼロパワーで位置制御可能な反磁性グラファイト板を用いた  
 非接触マイクロ駆動の研究  
 研究課題名 (英文) Study on contact-free micro drive with zero-power positioning  
 by using diamagnetic graphite plate  
 研究代表者  
 鈴木 晴彦 (SUZUKI HARUHIKO)  
 福島工業高等専門学校・電気工学科・教授  
 研究者番号：30201578

研究成果の概要 (和文)： 2007年から、我々は二次元 (2D) にHalbach配列された永久磁石列上でパッシブ磁気浮上する反磁性グラファイト (PG) 板を用いた、二次元非接触マイクロ駆動モデルの開発に取り組み、上方より接近させる永久磁石小片により、PG板試料の非接触なマイクロ駆動制御を実現した。2008年からの本課題研究では、より高精密な変位特性を作り出すために、二種の改良モデルにおける二次元Halbach配列永久磁石列上の八角形PG板試料の磁気支持剛性の改良に注目した。そして、これらの基本的な特性データをもとに、リニア・アクチュエータを用いたシステムにより上方より接近させる永久磁石小片を駆動させ、現行モデルに対する変位応答特性を観測し、現行モデルに依存した過渡応答特性の違いを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)： Since 2007, we have worked on development of planar contact-free micro motion model using diamagnetic graphite (Pyrolytic Graphite: PG) plate above two dimensional (2D) Halbach permanent magnet array. And, we realized precise micro motion control of octagonal PG plate sample above 2D Halbach PM array by using an approaching PM piece. On the project since 2008, in order to make more precise displacement characteristics, we focused on the improvement for magnetic stiffness of the octagonal PG plate sample by two kinds of improved model above 2D Halbach PM array. Then, on the basis of this result, we conducted to explain the displacement response of the octagonal PG plate sample by using a piezo linear actuator for the approach system of a small PM piece in the present model. We could take the preliminary measurement result of the displacement response depending on the present models.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究代表者の研究分野：電気電子材料工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：マイクロ・ナノメカトロニクス、磁気浮上技術、非接触技術、反磁性材料

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、MEMS や SPM 技術を応用したアクチュエータやセンサの開発、また、超微細加工システムなどが大きな注目を集めており、これらシステムのプローブ駆動部や試料ステージに使用されるナノオーダーの駆動精度を有するマイクロ XY ステージの要求も高まっている。このマイクロ XY ステージに用いられるアクチュエータには「高い駆動精度」の他、特殊環境での利用に耐えうる「ダストレス・オイルフリー」、「低消費電力」の性能が要求され、これらを兼ね備えるアクチュエータの開発が重要となっている。

(2) 磁気浮上技術は「ダストレス・ノイズレス」に関して大きな優位性をもち、特に、物質の弱反磁性を利用した室温パッシブ磁気浮上は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に必要なエネルギー供給が不要となることから「省エネルギー」の実現が可能である。つまり、室温パッシブ磁気浮上技術は上記の MEMS や SPM システムに用いるアクチュエータに求められる 3 つの条件のうち 2 つを満たすことができる重要な技術要素といえる。

(3) 2001 年以降、EPFL (スイス連邦工科大学ローザンヌ校) の H.Bleuler らは、二次元配列した永久磁石上における反磁性グラファイト (Pyloritic Graphite : PG) 板のパッシブ磁気浮上を利用した、非接触ローターに関する研究やマイクロ・コンベヤなどへの検討をおこなっていた。

(4) 2004 年以降、我々と H.Bleuler らの研究グループは、PG 板を用いた非接触アクチュエータに関する研究を一部共同で手掛け、2006 年には不可逆的な電気エネルギーを一切使うことなく、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で非接触駆動するモデルや (図 1 参照)、同心円状に Halbach 配列された永久磁石が作る特殊な磁場分布により、一切の機械的支持を与えず、パッシブに磁気支持されながら非接触回転できる PG ディスク・サスペンションモデルなどを開発してきた (図 2 参照)。

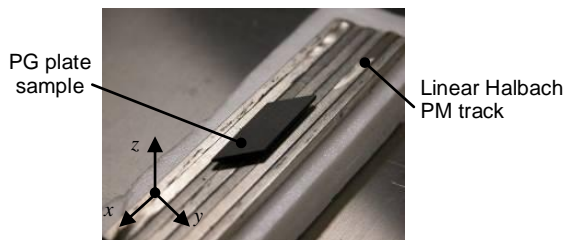


図 1 直線状永久磁石軌道上における PG 板のパッシブ磁気浮上

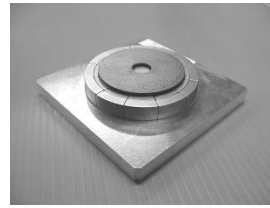


図 2 同心円状 Halbach 配列永久磁石による PG 円板のパッシブ磁気浮上

(5) 2007 年、二次元に Halbach 配列した永久磁石上でパッシブ磁気浮上する PG 板試料に、永久磁石小片を近づけ磁場分布に変化を与えることで、二次元に微小変位できる非接触マイクロ駆動モデルの開発も手掛けた (図 3 参照)。このモデルは、PG 板試料端部に近づける永久磁石小片のギャップを変えるだけで、変位する PG 板試料の位置保持には一切の不可逆的エネルギーを必要としない。つまりこの特性により「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」の開発が可能と思われる。

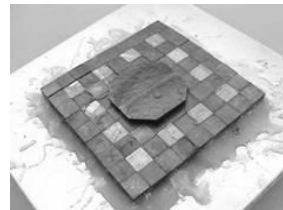


図 3 二次元 Halbach 配列永久磁石による八角形 PG 板の磁気浮上

## 2. 研究の目的

パッシブ磁気浮上する PG 板は磁気支持剛性が弱く、振動などの外乱を受けやすい。よって、磁気支持剛性に関わる磁場設計を十分に検討し外乱に対する非接触磁気支持の安定性を高める必要がある。また、ナノスケールの駆動精度と数  $10\mu\text{m}$ ~ $100\mu\text{m}$  程度ダイナミックな変位を両立させようとする場合、このシステムにおける磁気支持剛性力と駆動特性のバランスを厳密に捉えていく必要がある。そのために、以下の研究の方法により、本課題研究をすすめた。

## 3. 研究の方法

(1) 磁気支持剛性力の強い安定な PG 板のパッシブ磁気浮上を実現するため、二次元 Halbach 配列永久磁石列の磁場改良とグラファイト板形状の検討をする。

(2) PG 板の端部形状と永久磁石列上の磁場に依存した PG 板の磁気支持剛性の定量計測をおこなう。

(3) リニア・アクチュエータを用いた改善

モデルにおける PG 板の変位応答の観測をおこなう。

#### 4. 研究成果

(1) PG 板試料の磁気支持剛性を向上させるため、二次元 Halbach 配列永久磁石列上の磁場改良とグラフィート板形状の検討。

①図1に示した初期の二次元 Halbach 配列永久磁石列は、端部側に形成される磁場と中心部付近に形成される磁場に、磁束密度に差が生じていた。図 4 に示す新たな磁石列を設計・製作し、磁場の改善を施した(図 5 参照)。

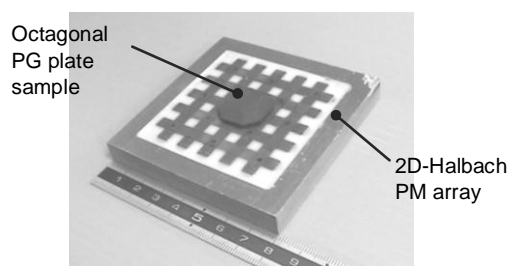


図 4 磁場改良を施した二次元 Halbach 配列永久磁石

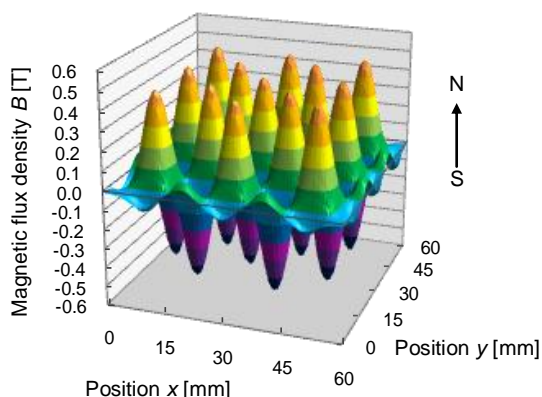


図 5 磁場改良を施した二次元 Halbach 配列永久磁石の磁束密度分布 (1mm 上空)

②PG 板磁気支持剛性の改善を行うため、図 6 に示す二種の方法を提案した。まず図 6(a)のコンセプト A は、試料端部にある 4 つの N 磁極 (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、新たに図 7 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二次元 Halbach 配列永久磁石上部に固定した。その際の PG 板試料周囲に形成される磁束密度分布を図 8 に示す。

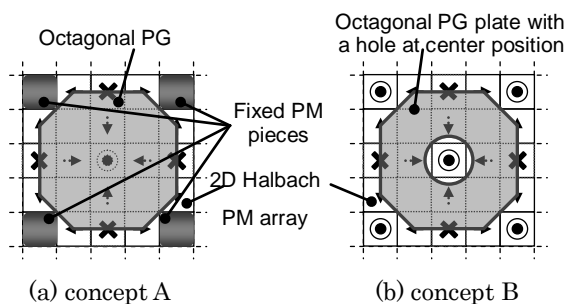


図 6 提案する八角形 PG 板試料の磁気支持剛性の改善方法

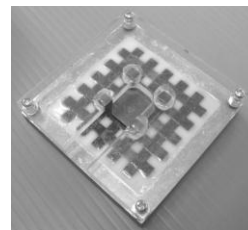


図 7 提案したコンセプト A による八角形 PG 板試料の磁気支持の様子

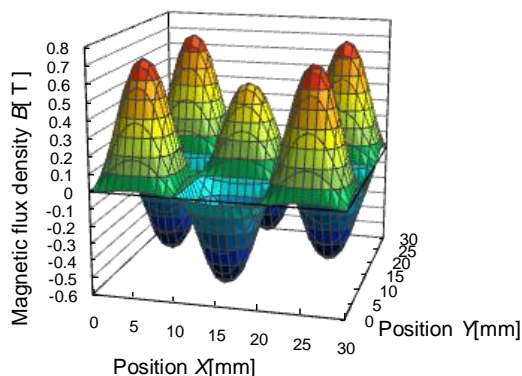


図 8 提案したコンセプト A による八角形 PG 板試料周囲の磁束密度分布 (1mm 上空)

③コンセプト B は、八角形 PG 板試料の中央に穴を設け (図 9 参照)、二次元 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、穴の周端部に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 円板のモデルでも採用した方法である。

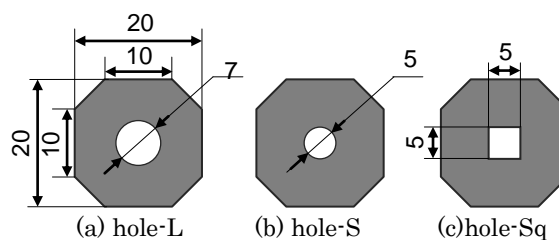


図 9 コンセプト B の八角形 PG 板試料



(2) PG 板の端部形状と永久磁石列の磁場に依存した PG 板の磁気支持剛性の定量計測。

①PG 板試料に働く反磁性磁気反発力の準静的計測。図 10 に示すような測定装置により、二次元 Halbach 配列永久磁石上を非接触に変位する八角形 PG 板試料にはたらく反磁性磁気反発力、即ち、PG 板試料に作用する磁気支持剛性の観測を行なった。まず、電子天秤上に垂直に設置した二次元 Halbach 配列永久磁石の  $x$ - $y$  平面に対して平行に、1mm のエアギャップを設けて八角形 PG 板試料を非磁性アーム上に固定した。そして PG 板試料をマイクロステージによって上下方向に変位させ、変位量  $d$  に対して試料に作用する反磁性磁気反発力  $F_r$  を永久磁石列にはたらく反作用として荷重変化により計測した。

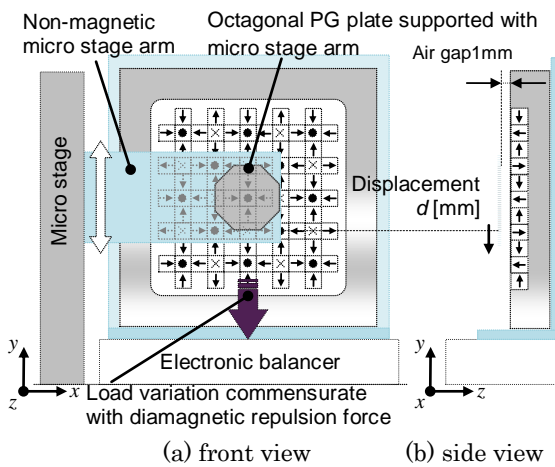


図 10 二次元 Halbach 配列永久磁石上の PG 板試料に働く反磁性磁気反発力の準静的計測システム

②各コンセプトによる PG 板試料の反磁性磁気反発力の計測結果。2 つの改善モデルについて、図 10 に示した計測方法により八角形 PG 板試料に作用する反磁性磁気反発力を測定した。ただし、コンセプト A においては Point B 上空にすでに PM 小片を配置しているため、PG 板試料を Point B 方向に変位させることができない。そのため、ここではそれと 45 度ずれる方向 (Point A 方向) への特性のみ検討した。コンセプト A による反磁性磁気反発力の改善結果を図 11 に、コンセプト B における結果を図 12 に示す。なお、比較のために Normal のデータも併記する。

測定結果より、コンセプト A およびコンセプト B の各 PG 板試料ともに反磁性磁気反発力の向上が確認できる。また、両モデルともに  $d=0\sim 1\text{mm}$  の範囲でほぼ線形な特性が得られた。 $d=0\sim 1\text{mm}$  の範囲での特性の傾き (磁気支持剛性) を Normal と比較した場合の向上率は、コンセプト A で約

194%となり、またコンセプト B では 3 種の試料ともコンセプト A 以上の値を示していることがわかる。特に hole-L については向上率が約 270%となり、これまでの測定の中で最も大きな改善がみられた。

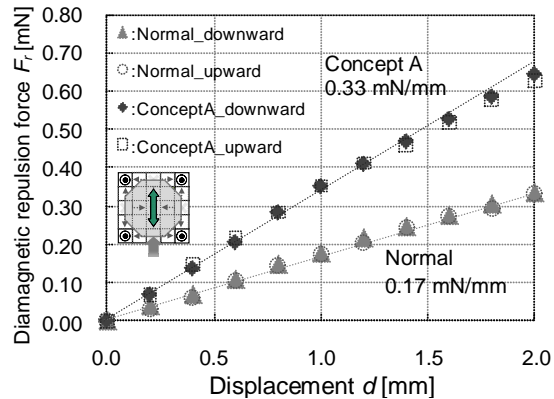


図 11 コンセプト A の反磁性磁気反発力 (ポイント A 方向)

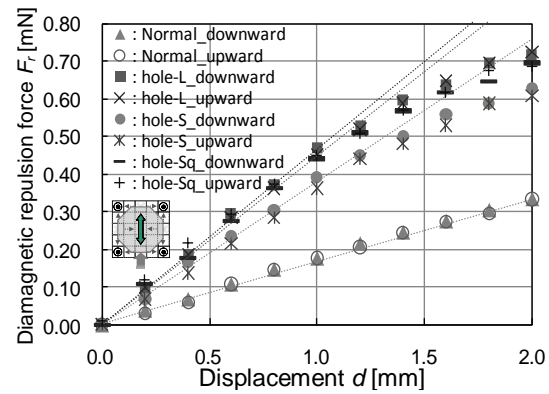


図 12 コンセプト B の反磁性磁気反発力 (ポイント A 方向)

③各コンセプトによる変位特性の改善。2 つのモデルにおいて八角形 PG 板試料の磁気支持剛性の改善を確認した段階で、変位の抑制について検証をおこなった。ただし、ここでも先と同様に Point A 方向への変位特性のみ検討することとした。また、コンセプト B については Point A 方向について最も大きな改善がみられた hole-L を代表値として用いた。

測定結果を図 13 に示す。両改善モデルともに Normal の場合よりも変位量が減少しており、磁気支持剛性の改善による変位の抑制を確認できる。また、Normal の場合と同様に  $G=3\sim 5\text{mm}$  の範囲では線形に近い特性が得られた。ここでコンセプト A とコンセプト B を比較すると、PM 小片のどちらの極を近づけた場合でも変位量は明らかに Concept B の方が小さく、より強く変位が抑制されていることがわかる。この結果から、特に Point A 方向について、八角形 PG 板試料の変位特性の高精度化にはコンセプト B による改善方法が有効であると考えられる。

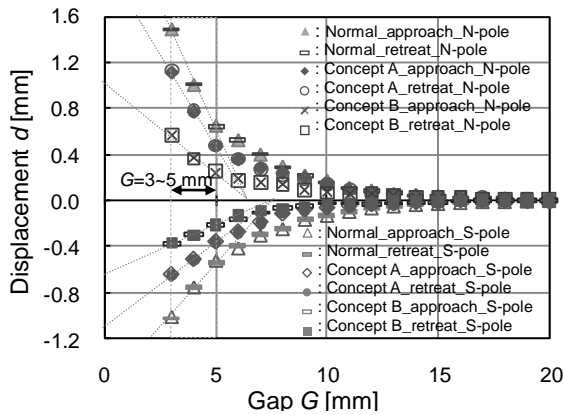


図 13 各コンセプトの PG 板の変位特性 (ポイント A 方向)

(3) 各コンセプトにおけるリニア・アクチュエータを用いた PG 板の変位応答の観測。

①本モデルを実用的なデバイスへ応用するためには、八角形 PG 板試料の準静的な変位特性や磁気支持特性だけでなく、動的な特性 (過渡応答) を評価することが必要である。そこで、図 14 に示すようにリニア・アクチュエータによって PM 小片を変位させる計測システムを構築し、八角形 PG 板試料の動的特性の測定を進めた。

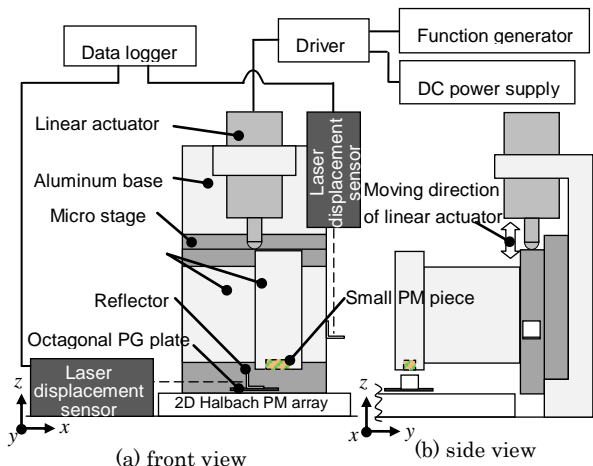


図 14 PG 板の変位応答計測システム

②図 15 に、Normal およびコンセプト A、コンセプト B (hole-L) において、Point A に対して PM 小片の N 極を  $G=5.0\text{mm}$  から  $0.1\text{mm}$  だけ接近させたときの八角形 PG 板試料の変位応答特性を示す。なお、測定では  $G=5.0\text{mm}$  のときの PG 板試料の位置を初期位置 ( $d=0.0\text{mm}$ ) とした。また、各モデルとも計 3 回の測定においてほぼ同様な特性が得られたため、同図は計測結果の平均値をプロットしている。

減衰特性に注目しそれぞれのモデルを比較する。表 1 に計測結果から求めた振動周期、整定時間、対数減衰率、定常変位およびパーセントオーバーシュートの値をまとめる。ま

ず、振動周期については、Normal と比較して両改善モデルともに短くなっていることがわかる。コンセプト A では磁気支持剛性の改善によって、また、コンセプト B では剛性の改善と試料中央に穴を設けたことによる試料の質量の違いが原因と考えられる。次に整定時間と対数減衰率に注目すると、最も整定時間の短いモデルはコンセプト A、最も振動の減衰が大きなモデルは Normal となり、それに対してコンセプト B は最も整定時間が長く、また、振動の減衰が最も小さいという結果となった。

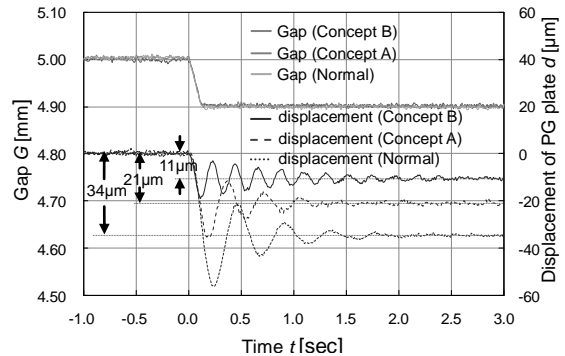


図 15 各コンセプトの PG 板試料の変位応答

表 1 各コンセプトの変位応答の評価

	Normal	Concept A	Concept B (hole-L)
Period [sec]	0.45	0.35	0.22
Settling time [sec]	2.5	2.0	3.0
Logarithmic decrement	0.90	0.63	0.24
Steady-state value [ $\mu\text{m}$ ]	34	21	11
Percentage overshoot [%]	64	65	84

③PG 板試料の変位応答特性から見た、各コンセプトの有効性。

八角形 PG 板試料の端部付近の磁場特性を変化させるコンセプト A は、図 15 に示す変位応答特性の結果から、コンセプト B よりも減衰特性の点で優れると思われる。しかし、装置の構成面で大型化や複雑化が伴うため、アクチュエータへの応用を考えた場合、この課題を解決することが必要であると考えられる。

一方、PG 板試料の中央に新たに穴を設けたコンセプト B は、コンセプト A と比較して減衰特性の点で劣るものの、試料への直接的な加工のみという非常にシンプルな構造で準静的な変位特性をより強く抑制することが確認できた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① Ryosuke Saito, Kazuto Itatsu, Minoru Kanke, Atsushi Ito, Haruhiko Suzuki, "Contact-free Two Dimensional Micro-displacement Actuation by Using Diamagnetic Graphite", 電気学会論文誌, 査読有, Vol.130-D, No.11 (2010)pp.1221-1225.
- ② 鈴木晴彦, 齋藤亮介, 佐藤康太, 佐藤善栄, 板津和任, 伊藤 淳, 「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」, 日本 AEM 学会誌, 査読有, Vol.18, No.3 (2010) pp. 233-238.
- ③ 鈴木晴彦, 佐藤大地, 初瀬 敬, 菅家 稔, 伊藤 淳, 「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, 査読有, Vol.17, No.1 (2009) pp.150-155.

[学会発表] (計14件)

- ① 鈴木晴彦, 齋藤亮介, 水野雄太, 板津和任, 島尾敏裕, 門馬直人, 鈴木将敬, 伊藤 淳, 「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変位応答」, 電気学会, リニアドライブ研究会, 2011年2月16日(浜松)
- ② 齋藤亮介, 佐藤康太, 佐藤善栄, 水野雄太, 伊藤 淳, 鈴木晴彦, 「反磁性グラファイトを用いた非接触マイクロ・モーション・モデルにおける磁気支持剛性の改善」, 日本機械学会, 第22回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2010年5月19日(門司)
- ③ 佐藤康太, 佐藤善栄, 水野雄太, 板津和任, 齋藤亮介, 伊藤 淳, 鈴木晴彦, 「非接触二次元マイクロポジショニングモデルにおける反磁性グラファイト板の形状に依存した変位特性の観測」, 電気学会, リニアドライブ研究会, 2010年3月5日(東京都市大)
- ④ 鈴木晴彦, 齋藤亮介, 佐藤康太, 佐藤善栄, 板津和任, 伊藤 淳, 「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」, 日本 AEM 学会, 第18回「MAGDA コンファレンス in 東京」, 2009年11月21日(東京都市大)
- ⑤ Ryosuke SAITO, Kazuto ITATSU, Minoru KANKE, Atsushi ITO, Haruhiko SUZUKI, "Contact-free Two Dimensional Precise Micro Positioning by using Diamagnetic Graphite",

The 7th International Symposium on Linear Drives for Industrial Applications (LDIA 2009), 2009年9月22日(Incheon-Korea)

- ⑥ Farah Hanim binti Mukhtar, 齋藤亮介, 板津和任, 菅家 稔, 伊藤 淳, 鈴木晴彦, 「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, 2009年1月30日(神戸大学)
- ⑦ 鈴木晴彦, 齋藤亮介, Farah Hanim binti Mukhtar, 板津和任, 菅家 稔, 伊藤 淳, 「二次元 Halbach 配列永久磁石上でパッシブ磁気支持される PG 板試料の磁気支持剛性の観測」, 日本 AEM 学会, 第17回「MAGDA コンファレンス in 日立」, 2008年11月21日(日立シビックセンター)
- ⑧ 齋藤亮介, Farah Hanim binti Mukhtar, 板津和任, 菅家 稔, 伊藤 淳, 鈴木晴彦, 「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」, 電気関係学会, 平成20年電気関係学会東北支部連合大会, 2008年8月22日(日大郡山)
- ⑨ 鈴木晴彦, 佐藤大地, 初瀬 敬, 菅家 稔, 伊藤 淳, 「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, 第20回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2008年5月23日(別府)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 晴彦 (SUZUKI HARUHIKO)

福島工業高等専門学校・電気工学科・教授  
研究者番号: 30201578

### (2) 研究分担者

伊藤 淳 (ITO ATSUSHI)

福島工業高等専門学校・電気工学科・  
准教授

研究者番号: 70193472