

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：51601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560307

研究課題名(和文)反磁性グラファイト板の形状設計による高効率非接触駆動に関する基礎研究

研究課題名(英文)The basic research on high-efficiency non-contact drive by the shape design of diamagnetic graphite plates

研究代表者

鈴木 晴彦 (Suzuki, Haruhiko)

福島工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：30201578

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：2006年、我々は直線状永久磁石軌道上における、PG板を用いた新たな非接触リニア駆動技術について報告しました。それは室温で磁気浮上するPG板は、直線状PM軌道と近づけるPM小片による磁場勾配中の移動が可能ということです。

近年、準静的な測定法によりPG板試料の端部形状に依存する反磁性反発力の定量的観察を行いました。そして興味深い結果が、本研究データから得られました。それは、厚さ方向に傾斜処理した非対称形状PG板試料の両端部に、二つのPM小片をそれぞれ配置した場合、反磁性反発力が一方向に現れました。この特性はPG板試料を用いた高効率非接触磁気浮上駆動モデルの構成に有効な技術要素の一つと思われます。

研究成果の概要(英文)：In 2006, we reported that novel contact-free linear motion technique by using PG plate above linear permanent magnet (PM) track. It is that PG plate, which levitates at room temperature, can move in a unique magnetic field gradient induced by interaction between linear PM track and an approaching PM piece.

Recent years, we had been doing a quantitative observation of diamagnetic repulsion force that depends on the edge shape of the PG plate sample by quasi-static measurement technique. An interesting result was obtained from the present experimental data. It is the diamagnetic repulsion force appeared in one direction when the two PM pieces are located respectively on both ends of the asymmetric shape PG plate sample with a slant treated edge in the thickness direction. It is seems that this characteristics is one of effective technical elements to constitute a high efficiency contact-free magnetic suspension motion model using PG Plate sample.

研究分野：電気電子材料工学

キーワード：マイクロ・ナノメカトロニクス 反磁性 磁気浮上 非接触駆動 永久磁石 省エネルギー

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、様々な工業製品の省エネルギー化、小型化が進められているが、システムを構成する電気機器要素のなかで、アクチュエータはその構成点数が比較的多く、また電力消費割合が高い機器要素群である。これらアクチュエータの抱える技術的課題のなかで、高効率な駆動や省エネルギー、パワーセービングに役立てる要素技術のひとつとして磁気浮上技術が注目されている。

また、超微細加工システムにおけるプローブ駆動部などには、ナノオーダーの駆動精度を有する XY アクチュエータや、高効率で省エネルギー駆動が可能なりニア・アクチュエータが必要とされている。これらのシステムの多くはクリーンな環境で用いられ、「高精度な位置決め」以外にも、「ダストレス」、「オイルフリー」などの機能が要求され、宇宙ステーションで用いるような場合には、「低消費電力な駆動」も重要な開発課題となっており、これらの機能を兼ね備える非接触型のアクチュエータ開発が求められている。

(2) 物質の反磁性を利用した非接触磁気支持機構の研究は国内外で進められているが、2004年、本研究代表者(鈴木晴彦)は、Halbach(ハルバッハ)配列永久磁石の上方から永久磁石小片を近づけ、Halbach配列永久磁石表面に特殊な磁場勾配を形成することで、Halbach配列永久磁石上でパッシブに磁気浮上する PG 板試料に反磁性磁気力を誘導し、電力供給の無い、PG 板の非接触リニア駆動が可能であることを見出した(図1、図2参照)。

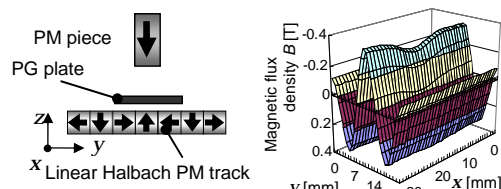


図1 PG 板の非接触駆動のための Halbach 配列永久磁石列上の永久磁石小片の配置とその磁場分布

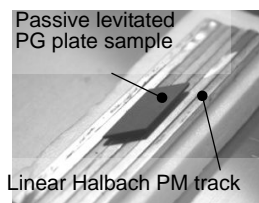


図2 直線状永久磁石軌道上における PG 板のパッシブ磁気浮上

(3) 2006年以降、PG 板の非接触駆動の観測をはじめ、PG 円板の非接触磁気支持回転モデル、PG 板の非接触二次元マイクロ駆動を手掛け、また、反磁性物質に現れる磁気現象が静磁界中でも起こる現象であることが

ら、PG 板の反磁性磁気反発力を準静的な観測方法によって定量計測し、端部形状の異なる PG 板試料の反磁性磁気反発力の計測評価を開始した。

## 2. 研究の目的

本研究は、「オイルフリー」、「真空」などの特殊環境下で用いるマイクロ・アクチュエータの非接触駆動機構へ利用することを目的に、反磁性グラファイト(PG: Pyrolytic Graphite)板の形状とそこに与える磁場の相関的設計によって、PG 板試料端部に作用する反磁性磁気力の効率的発生条件を明らかにし、高効率な非接触駆動の要素技術を確立しようとする実験研究である。

## 3. 研究の方法

(1) PG 板試料端部形状に依存した反磁性磁気反発力精密計測

永久磁石などで形成する静磁場空間で、PG 板は室温でのパッシブな磁気浮上が可能であり、また端部形状と磁場勾配に依存した反磁性磁気反発力が誘導され、PG 板試料は非接触な駆動や変位、磁気支持を実現する。これら PG 板試料端部形状と磁場の形成(磁場勾配)に依存する磁気特性を、独自の準静的な観測方法により、サブミリ・ニュートンの計測精度で詳細検討をおこなう。

(2) 直線状永久磁石軌道上に形成される磁場勾配に依存した PG 板試料の反磁性磁気反発力の観測

直線状永久磁石軌道上に配置する永久磁石小片のキャップの可変によって、そこに形成される磁場勾配を制御することができる。これに依存する PG 板試料端部に作用する反磁性磁気反発力の詳細計測を(1)での方法でおこなう。

(3) PG 板試料の厚み方向の形状加工による反磁性磁気反発力の特観測

PG 板試料の端部を厚み方向に特殊形状加工し、その両端部の磁場条件を制御することにより、PG 板試料に同時(総合的)に作用する反磁性磁気反発力が消失していくことや、分離、増倍すること、また発生タイミングが可変することなどの関連性を、(1)での計測システムの改良により検討する。

(4) 連続的に配置した永久磁石小片によって形成される磁場空間における、試料端部形状の異なる PG 板試料に作用する反磁性磁気反発力の観測

本研究による要素技術のアクチュエータ等への適用のため、高効率な連続的駆動としての基礎データ取得のため、新たに製作した長尺(400mm)の直線状永久磁石軌道を用いて、また(3)による検討結果をもとに磁場設計(条件)を与えて、厚み方向に端部形状を加工した PG 板試料による非接触駆動を観測する。

(5) 同心円状永久磁石上に連続配置した永久磁石小片によって形成される磁場における弧状 PG 板試料の非接触駆動観測

(3) および (4) の実験結果をもとに、同心円状に Halbach 配列を構成した永久磁石上での、厚み方向に形状加工した弧状 PG 板試料の非接触駆動の初期観測をおこなう。

#### 4. 研究成果

(1) PG 板試料端部形状に依存した反磁性磁気反発力精密計測

図 3 示すような計測装置を構成し、PG 板試料に作用する反磁性磁気反発力を、準静的な計測手法で捉えることを試みた。

本計測装置は、ハイブリッド式永久磁石軌道とその磁場に勾配を形成するための永久磁石小片を同時に変位させ、PG 板試料に作用する反磁性磁気反発力(図 3 の  $x$  方向成分)を、電子天秤の荷重変化として直接計測するものである。これは、永久磁石軌道上で磁気浮上する PG 板試料が、磁場勾配が形成された空間を通過する過程、すなわち PG 板試料の非接触磁気浮上駆動の様子を擬似的に再現していることになる。

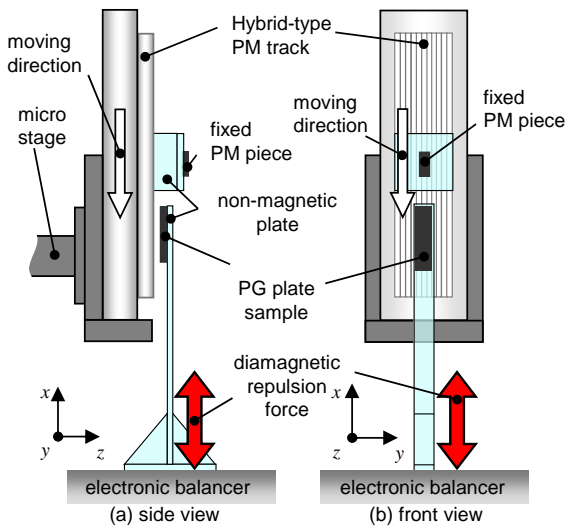


図 3 PG 板試料に作用する反磁性磁気反発力の準静的な計測装置の構成

図 4 に端部形状の異なる 2 種の PG 板試料を示す。図 4(a) に示す 90deg/90deg 試料を標準試料として、同図(b) に示すような厚み方向に傾斜をもつ Slant/90deg 試料の、それぞれの端部に磁場勾配を与えたときに作用する反磁性磁気反発力の計測を行った。

図 5 に計測範囲・条件の一例を示す。端部形状が 90deg/90deg の PG 板試料 ( $L_{PG}=40\text{mm}$ ) の端部同士を連結させ、連結構成 PG 板試料 ( $L_{PG}=80\text{mm}$ ) として使用している。また、厚み方向に傾斜をもつ PG 板試料 ( $L_{PG}=37.5\text{mm}$ ) の上端部を X、下端部を Y とする。永久磁石小片中央を計測の基準とし、計測開始時の位置を A ( $D_{PM}=0\text{mm}$ )

PG 板試料の上端部中央を B ( $D_{PM}=20\text{mm}$ )、PG 板連結部分を C ( $D_{PM}=60\text{mm}$ )、下端部中央を D ( $D_{PM}=100\text{mm}$ )、計測終了時の位置を E ( $D_{PM}=120\text{mm}$ ) とし、A - E 間: 120mm の範囲で永久磁石小片を変位させる。

永久磁石小片の変位間隔は 1.0mm とし、各測定点では永久磁石軌道並びに永久磁石小片を静止させた状態で計測している。その変位過程において、鉛直方向に対して下向きの変位過程を「downward」、上向きの変位過程を「upward」と呼んでいる。また、PG 板試料とハイブリッド式永久磁石軌道表面間のエアギャップ  $G_{PG}=1.0\text{mm}$ 、永久磁石小片(表面磁束密度: 約 0.27T、外寸:  $L10 \times W5 \times H4\text{mm}$ ) と永久磁石軌道表面間のエアギャップ  $G_{PM}=8.0\text{mm}$  としている。

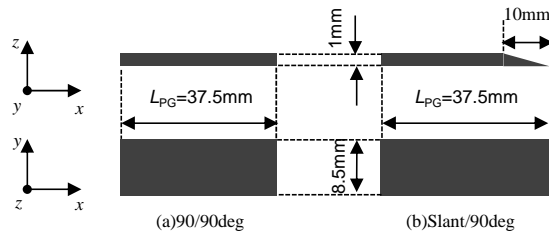


図 4 端部形状の異なる PG 板試料

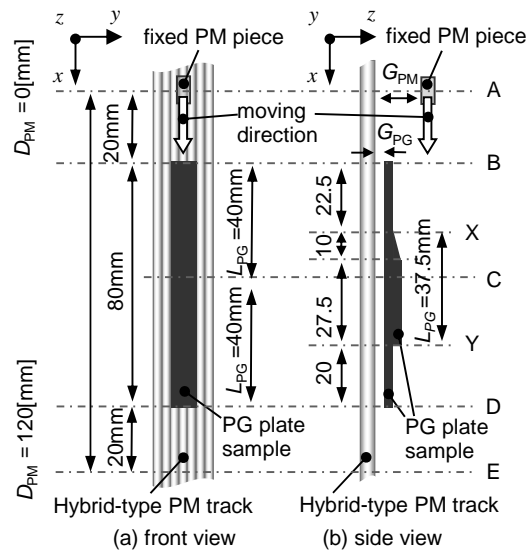


図 5 端部形状の異なる PG 板試料に作用する反磁性磁気反発力の準静的な計測の条件

図 6 に永久磁石小片の相対的な変位過程における PG 板試料に作用する反磁性磁気反発力を示す。図 6 中に示す A、B、C、D、E、X、Y は、図 5 に示す各点に対応している。

ここで、厚み方向に傾斜をもつ上端部側(X 点近辺)に着目すると、傾斜を持たない下端部側(Y 点近辺)に比べ作用する反磁性磁気反発力が極端に小さいことが分かる。それと同様に、端部が存在する B、D 点近辺でも、反磁性磁気反発力は強く作用していることが分かる。このことから、PG 板試料端部の厚み方向に傾斜をもたせた場合、傾斜をもたない形状に比べ、作用する反磁性磁気反発力は極めて小さくなることが分かる。

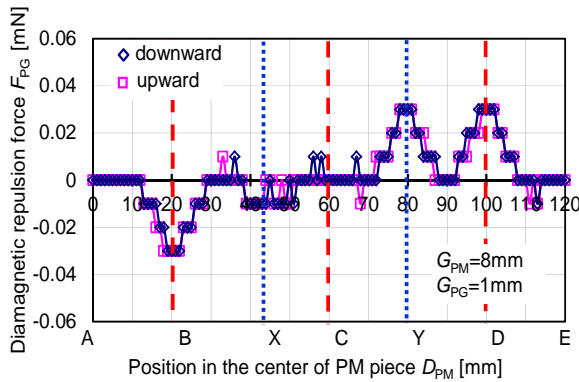


図 6 永久磁石小片の変位に依存した PG 板試料端部に作用する反磁性磁気反発力

- (2) 直線状永久磁石軌道上に形成される磁場勾配に依存した PG 板試料の反磁性磁気反発力の観測
- (3) PG 板試料の厚み方向の形状加工による反磁性磁気反発力の特徴観測

研究の方法 (2) および (3) に関する成果を以下に示す。

本研究による「永久磁石による磁場勾配を PG 板試料端部に与えることによる非接触駆動方法」をアプリケーションに適用しようとする場合、PG 板試料の一方への連続的駆動を可能にすることが求められる。

その指標を得る条件として、それぞれ異なる端部形状をもった PG 板試料において、PG 板試料両端部に対し、同時に、同じ磁場勾配を与えたとき、それぞれの試料端部に作用する対向方向の反磁性磁気反発力の差（総合的な磁気反発力）が、一方向（駆動させようとする方向）に生じるか否かを観測することが挙げられる。

図 3 と同じ計測システム（但し、直線状ハイブリッド式永久磁石軌道長が 400mm を使用）を用いて、標準の PG 板試料 (90/90deg) と厚み方向に形状差（傾斜）を与えた PG 板試料 (Slant/90deg) の、それぞれの端部に作用する反磁性磁気反発力、およびその差の磁気反発力について、図 7 に示す測定条件、特に磁場形成の条件として  $G_{PM}$  を 8mm、および 7mm、 $L_{PM}$  を 34.0~37.5mm に設定して計測した。

図 8 に二つの永久磁石小片の相対的な変位過程における PG 板試料 (90/90deg) に作用する反磁性磁気反発力の計測結果を示す。図 8 中に示す A、B、C、D、E は、図 7 の各点に対応している。

PG 板試料の両端部に永久磁石小片が位置する C 点付近では、計測精度の範囲内でほぼ「0」の値を示している。この理由として、PG 板試料のそれぞれの端部に作用する反磁性磁気反発力は逆向きで、かつ発生する力の大きさや現れる範囲が等しくなるため、総合的な駆動力に関する反磁性磁気反発力は相殺され、見かけ上「0」として計測されていると考えられる。

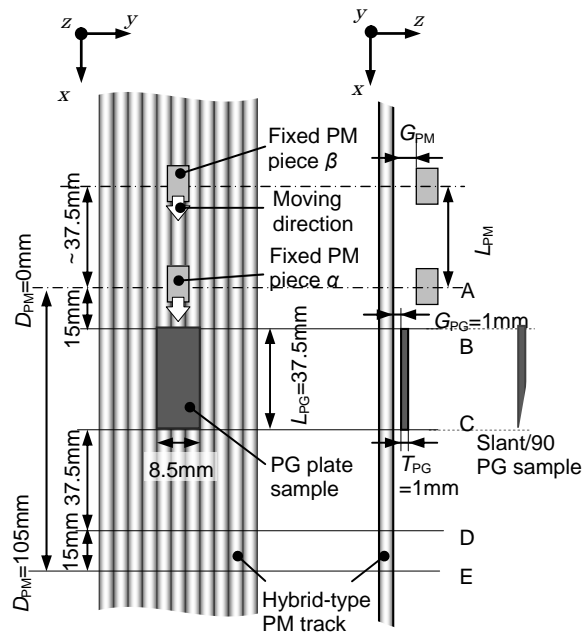


図 7 二つの永久磁石小片による PG 板試料に作用する反磁性磁気反発力の計測条件

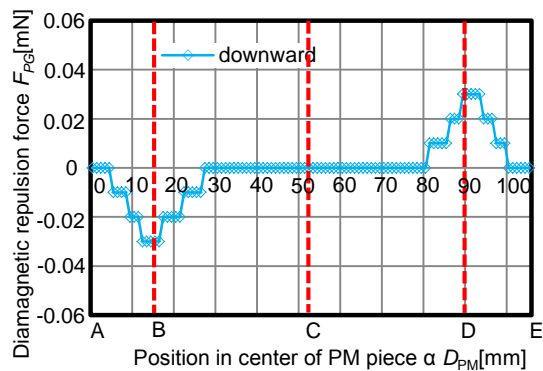


図 8 二つの永久磁石小片による対称端部形状 PG 板試料に作用する反磁性磁気反発力

一方、端部形状の異なる PG 板試料 (Slant/90deg) の両端部に同時に作用する反磁性磁気反発力の計測結果を図 9、図 10 に示す。図 9 は永久磁石小片のギャップ  $G_{PM} = 8mm$  での結果、図 10 は  $G_{PM} = 7mm$  での結果を示している。

$G_{PM}$  の変更による反磁性磁気反発力の大きさの変化は明らかで、永久磁石小片がハイブリッド式永久磁石軌道に近づくとき、PG 板試料端部に現れる反磁性磁気反発力のピーク値は大きく現れ、B 点 (90deg 端部に永久磁石小片が位置する点) では 0.03mN が 0.05mN、D 点 (Slant 端部に永久磁石小片が位置する点) では 0.02mN が 0.04mN となった。

また C 点 (二つの永久磁石小片  $\alpha$ 、 $\beta$  が、PG 板試料の上端部、下端部に同時に位置するとき) 付近に注目すると、PG 板試料の両端部に作用する逆向きの反磁性磁気反発力の差が観測されるはずである。 $G_{PM}=8mm$  (図 9) のとき、B 点で作用している反磁性磁気

反発力と同じ成分（PG 板試料を前進させる方向の成分）のみが現れていたのに対し、 $G_{PM}=7\text{mm}$ （図 10）での C 点付近では、D 点で作用している反磁性磁気反発力と同じ成分（PG 板試料を後退させる方向の成分）が大きく現れた後に、B 点と同じ成分が相対的に小さく現れている。

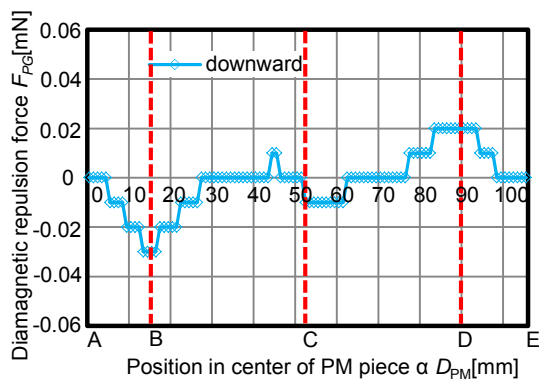


図 9 二つの永久磁石小片による異端部形状 PG 板試料に作用する反磁性磁気反発力 ( $G_{PM}=8\text{mm}$ )

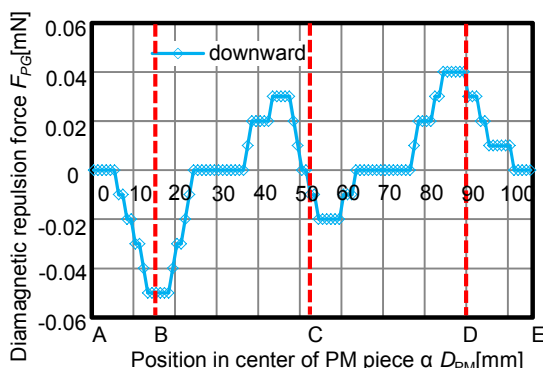


図 10 二つの永久磁石小片による異端部形状 PG 板試料に作用する反磁性磁気反発力 ( $G_{PM}=7\text{mm}$ )

これまでの結果から、異端部 PG 板試料 (Slant/90deg) において、二種の  $G_{PM}$  の条件を与えることによって永久磁石軌道上の磁場形成（磁場勾配）が変わり、PG 板試料端部に作用する反磁性磁気反発力に大きな変化が見られた。駆動に作用する力（反磁性磁気反発力の絶対値）を大きくするための  $G_{PM}$  の 7mm への変更であったが、PG 板試料 Slant 側端部の作用を助長する結果となり、駆動を抑制すると思われる効果が観測された。

高効率な非接触リニアアクチュエーションを実現するには、C 点において駆動に不要となる成分を消していく必要がある。その方法として、二つの永久磁石小片の磁極ピッチ  $L_{PM}$  を可変し、PG 板試料端部で発生する反磁性磁気反発力のピーク位置を制御することが必要と思われた。そこで、 $G_{PM}$  を 7mm 固定、 $L_{PM}$  を 34mm ~ 37.5mm と可変させ最適条件の検討を行った。

図 11 に二つの永久磁石小片が  $G_{PM}=7\text{mm}$ 、 $L_{PM}=34.5\text{mm}$  の条件における、端部形状の異なる PG 板試料 (Slant/90deg) 端部に作用する反磁性磁気反発力の計測結果を示す。

計測結果に於いて、C 点 (PG 板試料の両端部に永久磁石小片が位置する点) における反磁性磁気反発力の差に相当する値が、一方向 (図 11 に於ける負の値) に現れている。これは、本研究における「高効率な非接触連続駆動」に必要な磁気特性を得る条件の一つを明確にしたことになり、よって、この PG 板試料形状、および磁場条件を整えることで、高効率な非接触磁気浮上型のアクチュエータを構成できる可能性を見出したことになるとと思われる。

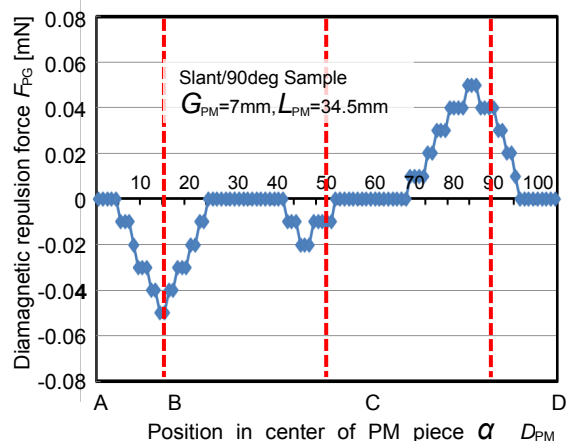


図 11 二つの永久磁石小片による異端部形状 PG 板試料に作用する反磁性磁気反発力 ( $G_{PM}=7\text{mm}$ 、 $L_{PM}=34.5\text{mm}$ )

(4) 連続的に配置した永久磁石小片によって形成される磁場空間における、試料端部形状の異なる PG 板試料に作用する反磁性磁気反発力の観測

上述の(3)の成果を受け、長尺(400mm)の直線状永久磁石軌道上に 8 か所の磁場勾配を形成し、その磁場中における異端部形状 PG 板試料 (Slant/90deg) の一方向連続駆動の観測を行った。現時点(2015年6月)において、明らかに一方向への加速的な磁気浮上動作を確認している。現在その定量計測システムの構築を進めている段階である。

(5) 同心円状永久磁石上に連続配置した永久磁石小片によって形成される磁場における弧状 PG 板試料の非接触駆動観測

上述の(3)の成果、および(4)の予備結果を受け、図 12 に示す弧状の異端部形状 PG 板試料を設計加工し、同心円状の Halbach 配列永久磁石上に連続配置した永久磁石小片によって形成される磁場勾配における、弧状 PG 板試料の非接触動作を観測している。現時点(2015年6月)において、明らかな動作の確認には至っていないが、弧状 PG 板試料における反磁性磁気反発力の定量計測システムの構築を進めている。

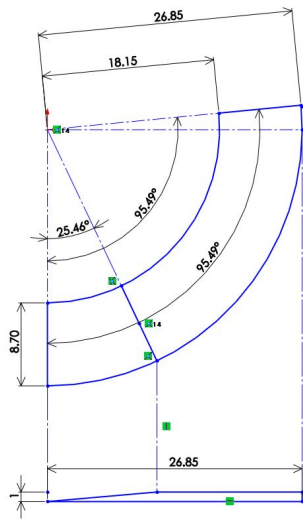


図 12 異端部形状弧状 PG 板試料の初期設計

### 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 0 件)

[学会発表](計 18 件)

Haruhiko SUZUKI, Yuta TOMOTSUNE, Masatoshi ARAKAWA, Masato IGARI, Shogo TOKUNAGA, Atsushi ITO, "Diamagnetic Repulsion Force of an Asymmetrical Graphite Plate Sample by the Quasi-static Measurement Method", The 10th International Symposium on Linear Drives for Industrial Applications (LDIA 2015), 2015 年 7 月 27 日 (Aachen - Germany)

鈴木晴彦, 荒川雅俊, 柳沼啓也, 猪狩雅人, 和田鍋健太, 友常裕太, 伊藤 淳, 「リング Halbach 配列磁石上における異端部形状をもつ PG 板の非接触駆動観測」, 電気学会, 第 27 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2015 年 5 月 15 日 (長崎)

鈴木晴彦, 猪狩雅人, 和田鍋健太, 荒川雅俊, 柳沼啓也, 友常裕太, 伊藤 淳, 「反磁性グラファイト板に作用する反磁性磁気反発力の動的計測と非接触駆動観察」, 電気学会, 第 27 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2015 年 5 月 15 日 (長崎)

鈴木晴彦, 猪狩聖人, 荒川雅俊, 友常裕太, 伊藤 淳: 「グラファイト板に作用する反磁性磁気反発力の動的定量計測」: 電気学会, 平成 27 年全国大会, 2015 年 3 月 25 日 (東京)

鈴木晴彦, 友常裕太, 荒川雅俊, 猪狩聖人, 柳沼啓也, 和田鍋健太, 伊藤 淳: 「高効率非接触磁気浮上駆動に利用するグラファイト板試料端部に作用する反磁性磁気

反発力の計測評価」: 日本 AEM 学会, 第 23 回 MAGDA コンファレンス in 高松, 2014 年 12 月 4 日 (高松)

伊藤 淳, 小田公則, 友常裕太, 鈴木晴彦: 「磁場条件に依存したグラファイト板試料端部に作用する反磁性磁気反発力の観測」: 日本 AEM 学会, 第 26 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2014 年 5 月 22 日 (岩手)

小田公則, 友常裕太, 伊藤 淳, 鈴木晴彦: 「PG 板試料の両端部に作用する反磁性磁気反発力の差の計測」: 平成 25 年電気学会産業応用部門大会, 2013 年 8 月 28 日 (山口)

Toshiyuki MASAKI, Kazuto ITATSU, Ryosuke SAITO, Mizuki TAIRAKO, Atsushi ITO, Haruhiko SUZUKI: "Observation of Diamagnetic Repulsion Force Concerning Contact-free Linear Motion by using Diamagnetic Graphite Plate", The 7th International Symposium on Linear Drives for Industrial Applications (LDIA 2011), 2011 年 7 月 5 日 (Eindhoven-the Netherlands)

Haruhiko SUZUKI, Ryosuke SAITO, Yuta MIZUNO, Kazuto ITATSU, Toshiyuki MASAKI, Atsushi ITO: "Contact-free Micro Displacement Characteristics of Diamagnetic Graphite Plate above Two Dimensional Halbach PM Array", The 7th International Symposium on Linear Drives for Industrial Applications (LDIA 2011), 2011 年 7 月 6 日 (Eindhoven-the Netherlands)

他 9 件

[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