

# 反磁性グラファイト板に作用する反磁性磁気力の準静的計測

## Quasi-static Measurement of Diamagnetic Force Acting on Diamagnetic Graphite Plate

伊藤 淳、友常裕太\*、鈴木晴彦

福島工業高等専門学校電気工学科

\*福島工業高等専門学校専攻科機械・電気システム工学専攻

Atsushi Ito, Yuta Tomotsune\* and Haruhiko Suzuki

Fukushima National College of Technology, Department of Electrical Engineering

\*Fukushima National College of Technology,

Advanced Course of Mechanical and Electrical System Engineering

(2014年9月29日受理)

Pyloritic graphite (PG) has high diamagnetic susceptibility. The PG plate sample levitates on permanent magnets at room temperature. Diamagnetic force acts on PG plate sample. Two types of PG plate sample which has different edge shape were used for measurement of diamagnetic force by quasi-static condition. The results show the diamagnetic force acting on PG plate sample was affected by the shape of edge of PG plate samples.

**Key words:** diamagnetic material, pyloritic graphite, contact-free, quasi-static measurement

### 1. はじめに

水や非金属系材料が示す弱反磁性の性質と強磁場を利用した常温におけるパッシブ磁気浮上に関する研究がヨーロッパやアメリカの研究グループで行われている<sup>(1)(2)</sup>。特にスイスのEPFLの研究グループは0.4T程度の希土類系永久磁石を配列・組み合わせ、反磁性グラファイト (Pyloritic Graphite : 以下PGと略記) を室温においてパッシブ磁気浮上させることを実現した。また、磁石配列に依存したPG板の磁気浮上特性<sup>(3)</sup>やPG板と永久磁石軌道を用いたリニアコンベアに関する研究を報告している<sup>(4)</sup>。永久磁石と弱反磁性体を組み合わせた磁気浮上技術は、冷却の必要がなく、また、摩擦や振動がないため、省エネルギーやメンテナンスの軽減などの点で優れている。

本研究グループでは、パッシブ磁気浮上するPG板試料の端部に、その上方から永久磁石小片を接近させ磁場勾配を与えると、PG板試料が非接触にリニア駆動することを見出している<sup>(5)</sup>。これはPG板には磁気的な駆動力が働いていることを示している。本報告ではPG板に作用する反磁性磁気力を測定した結果について述べている。

### 2. PG板に作用する反磁性磁気力と非接触駆動

#### 2.1 反磁性によるPG板の磁気浮上

Table1に代表的な反磁性材料の磁化率を示す。PG板 (積層面に対し垂直方向) の磁化率はビスマスやグラファイトのバルク材料に比べ、約2~3倍の値を示している。弱反磁性材料を用いた非接触磁気支持型のマイクロアクチュエータを設計する場合、PG板は有効な材料であることが分かる。

Table1 Magnetic susceptibility of diamagnetic material

Materials	$\chi_m(\times 10^{-6})$
Water	-8.8
Bismuth	-170
Graphite rod	-160
Pyrolytic Graphite (PG)	-450

Fig.1はHalbach配列された永久磁石軌道上で、室温においてパッシブ磁気浮上するPG板試料の様子である。Halbach配列永久磁石軌道上では、x軸方向への磁束の均一性とy軸方向への対称性をもつ特異な磁場が形成される。この磁場中においてPG板試料は安定浮上し、磁石軌道のy軸方向には磁気的な案内力が生じ、x軸方向には抵抗なく移動することができる。

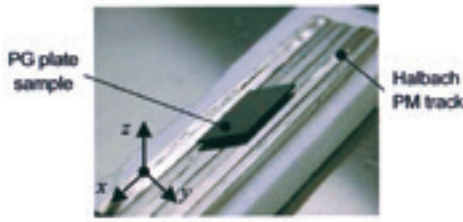


Fig.1 Stable magnetic levitation on Halbach arranged permanent magnet track.

## 2.2 反磁性によるPG板の非接触駆動

Fig.2に示すように、Halbach配列永久磁石軌道の中央に、表面磁束密度約0.27T、外寸 L10×W5×H4mm のNd-Fe-B系永久磁石 (PMと略記) 小片のN極を配置する。永久磁石小片が無い場合の代表的なHalbach配列永久磁石軌道の磁束密度分布を示すと、Fig.3(a)のようにx軸方向に均一な磁束密度分布が形成される。しかし、Halbach配列永久磁石軌道とNd-Fe-B系永久磁石小片の間隔 $G_{PM}$ が4mmとなるように永久磁石小片をz軸方向から近づけると、互いの磁場の相互作用により、Halbach配列永久磁石軌道上の磁束密度分布はFig.3(b)のようになり、局所的に弱い磁場空間が形成される。このような磁場空間をPG板試料の端部に与えると、PG板試料は磁場勾配により、近づけた永久磁石小片に向かう方向へ移動する。これは、PG板試料には駆動方向 (x軸方向) に反磁性磁気力が作用していることを表している。また、Fig.4に示すように、PG板試料の端部を90degと45degに加工した、端部の形状が非対称となるPG板試料の両端部に、z軸方向から同時に永久磁石小片を近づける。この場合、45degに加工した端部側にPG板試料が変位することが確かめられた<sup>(6)</sup>。このことから、PG板試料に働くx軸方向の反磁性磁気力は、90degの端部より45degの端部のほうが大きく、端部の形状により反磁性磁気力に差異があることが予想された。

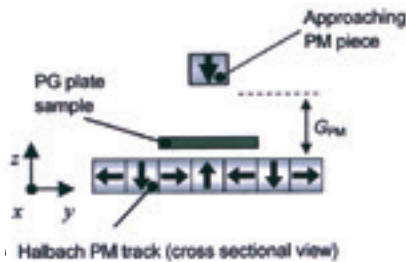
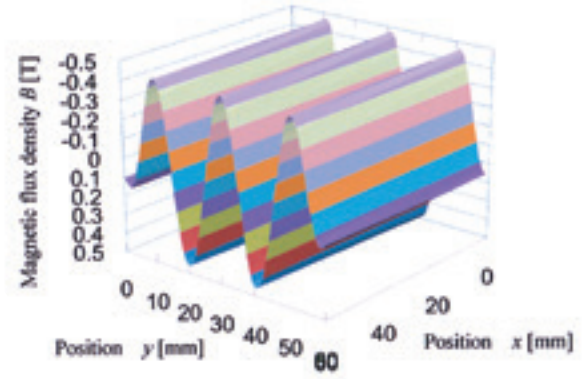
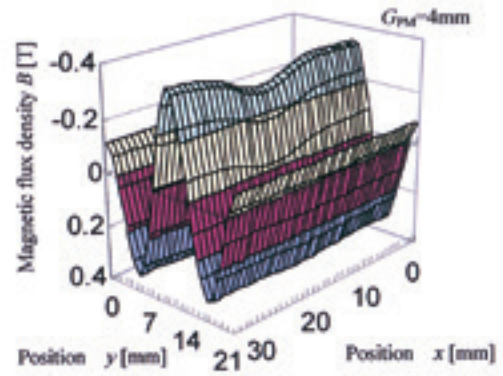


Fig.2 Position of approaching permanent magnet for noncontact driving of PG plate sample (N pole -N pole same magnetic pole arranged)

Fig.5のように複数個の永久磁石小片を永久磁石軌道に配置した場合には、PG板試料は永久磁石小片によって形成される複数個の磁場勾配によってAからBの方向に加速、減速を繰り返しながら駆動される。Bの位置にPG板が達すると、A方向へ駆動方向が変わり、A-B間を往復運動する。PG板の両端部には同時に磁場勾配が与えられ、進行方向とその逆方向に反磁性磁気力が発生していると考えられる。



(a) without approaching PM piece



(b) with approaching PM piece

Fig.3 Magnetic density distribution of Halbach arranged PM track.

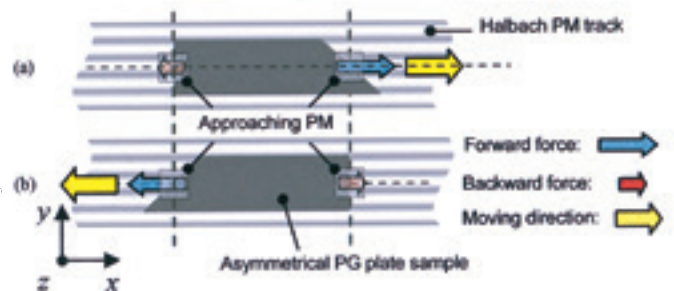


Fig.4 Diamagnetic force acting on each edge of PG plate with different edge shape.

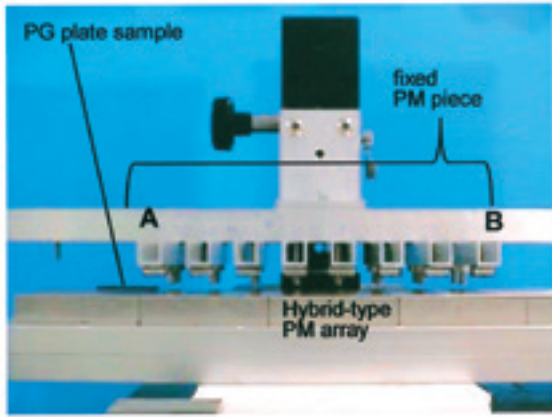


Fig.5 Continues magnetic drive of PG plate.

### 3. PG板の端部形状に依存した反磁性磁気力の観測

#### 3.1 準静的な反磁性磁気力の計測方法

PG板に作用する駆動力や端部の形状により生ずる反磁性磁気力を明らかとするため、Fig.6に示すような計測装置を用いて、磁場勾配によってPG板に作用するx軸方向の反磁性磁気力の観測を行った。永久磁石軌道にはHalbach配列永久磁石と同程度の磁束密度を生ずるハイブリッド式永久磁石軌道（表面磁束密度：約0.55T、軌道面外寸：L320×W33mm）を用いた。ハイブリッド式永久磁石軌道の概略図をFig.7に示す。この永久磁石軌道はNd-Fe-B系永久磁石（信越化学工業：N50Mグレード）と鉄鋼材（SS400）を交互に配列した構造を持つ。永久磁石軌道の1mm上方の磁束密度分布をホールプローブにより測定した。測定結果をFig.8に示す。Halbach配列永久磁石と類似した磁束密度分布を示している。ハイブリッド式永久磁石軌道の中央に1個の永久磁石小片のN極（表面磁束密度：約0.27T、L10×W5×H4mm）を配置し、ハイブリッド式永久磁石軌道と永久磁石小片間の距離をエアギャップ $G_{PM}$ とする。マイクロステージにハイブリッド式永久磁石軌道を固定し、鉛直方向に変位させる。PG板試料は非磁性体の板に固定し、電子天秤（島津製：EB430H、最小計測値1mg）に設置する。PG板試料とハイブリッド式永久磁石軌道の距離を $G_{PG}$ とし1mmとした。マイクロステージを鉛直方向に変位させ、このときPG板試料に作用する反磁性磁気力（Fig.6のx軸方向成分）を、直接電子天秤の荷重変化として測定する準静的な計測手法で求めた。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、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。

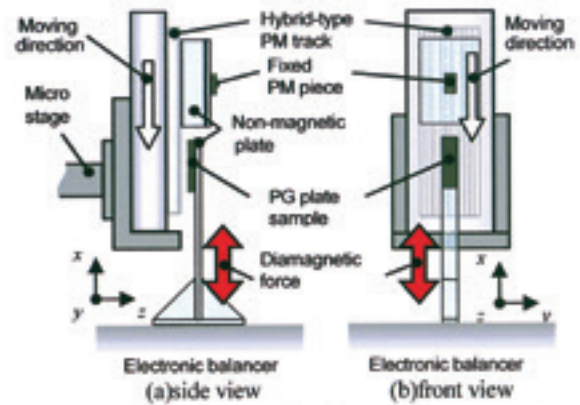


Fig.6 Layout of the quasi-static measurement system for diamagnetic force acting on PG plate sample.

(Single fixed PM piece)

ハイブリッド式永久磁石軌道の中央に、永久磁石小片のN極（表面磁束密度：約0.27T）を近づけた場合（エアギャップ： $G_{PM}=8\text{mm}$ ）、ハイブリッド式永久磁石軌道上の磁束密度分布はFig.9のように変化する。永久磁石小片が位置している部分の磁束密度が、周囲の磁束密度より局所的におよそ0.1T低下していることが確認できる。

Fig.10に使用したPG板試料の形状を示す。両端部の断面を直角に加工した試料（90/90deg）を基準として、(b)のように厚み方向に傾斜をもつ試料（90deg/Slant）の2種類を準備した。

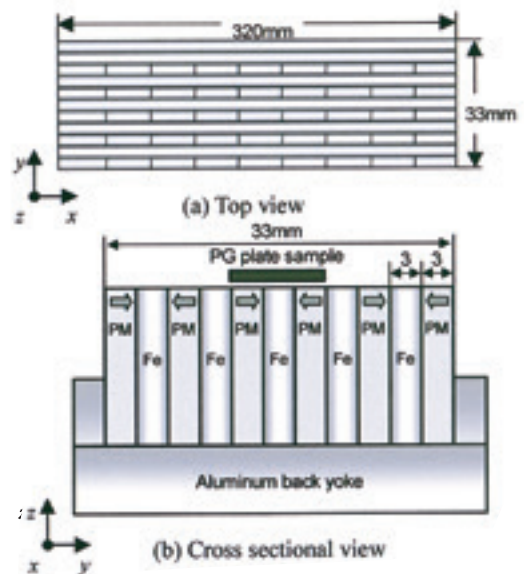


Fig.7 Linear Hybrid-type test PM track.

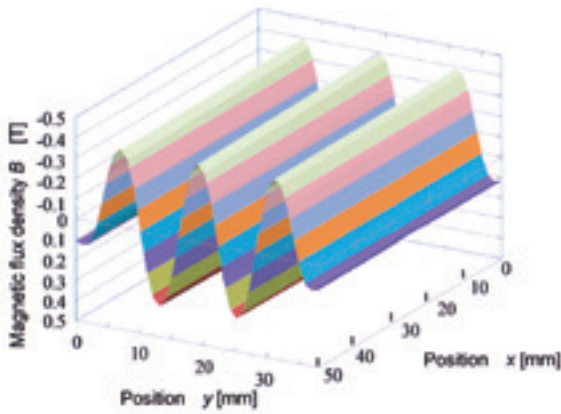


Fig.8 Distribution of magnetic flux density above 1mm from surface of hybrid-type test PM track

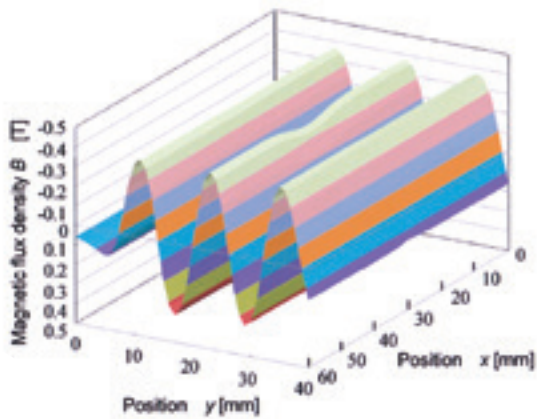


Fig.9 Distribution of magnetic flux density above 1mm from surface of hybrid-type test PM track. (Single fixed PM piece,  $G_{PM}=8\text{mm}$ )

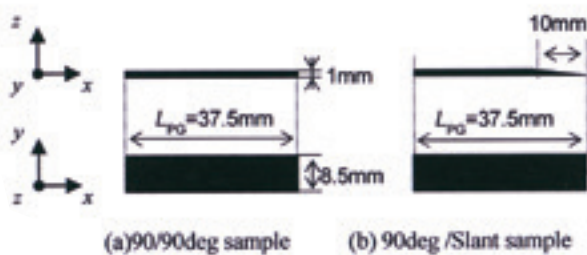
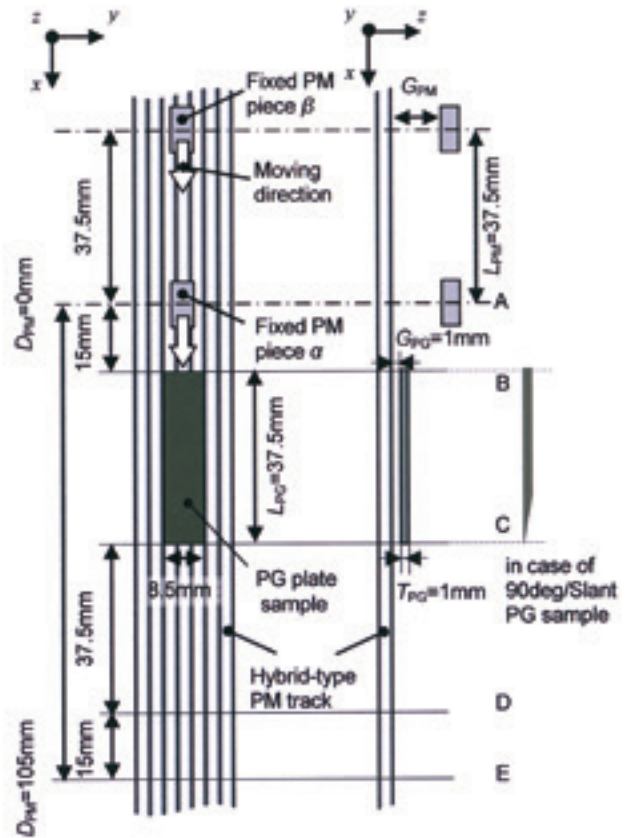
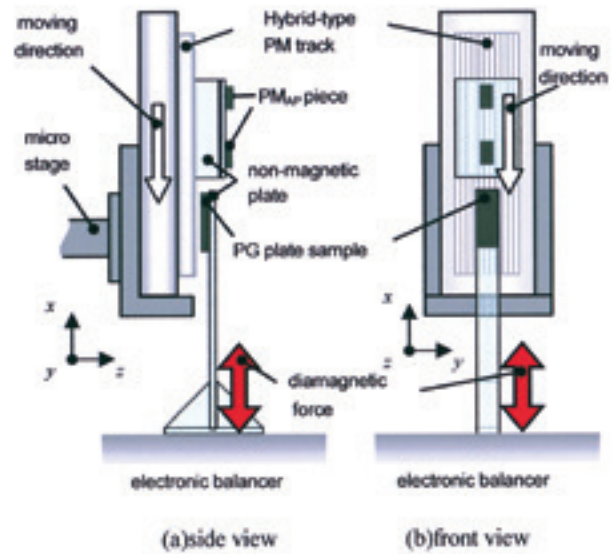


Fig.10 PG plate samples for the dependent of edge shape.

また、複数の永久磁石小片が永久磁石軌道に設置されている場合を模擬するため、Fig.11のような計測装置を用いた。2個の永久磁石小片の中心間の距離 $L_{PM}$ をPG板試料の寸法に合わせて、37.5mmとした。PG板試料に近いほうの永久磁石小片を永久磁石小片 $\alpha$ 、遠いほうを永久磁石小片 $\beta$ とする。



(c) layout of PG plate sample and two fixed PM pieces

Fig.11 Layout of the quasi-static measurement system for diamagnetic force acting on PG plate sample. (two fixed PM pieces)

永久磁石小片 $\alpha$ の中央を計測の基準とし、永久磁石小片 $\alpha$ が変位する距離を $D_{PM}$ とする。計測開始時の位置を位置A ( $D_{PM}=0\text{mm}$ )、永久磁石小片 $\alpha$ の中心がPG板試

料の上端部に位置するときを位置B ( $D_{PM}=15\text{mm}$ )、下端部に位置するときを位置C ( $D_{PM}=52.5\text{mm}$ )、永久磁石小片 $\beta$ の中心がPG板試料の下端部に位置するときの永久磁石小片 $\alpha$ の中心を位置D ( $D_{PM}=90\text{mm}$ )、計測終了時の位置を位置E ( $D_{PM}=105\text{mm}$ )とし、A-E間:105mmの範囲で永久磁石小片を変位させる。ハイブリッド式永久磁石軌道の中央に、2個の永久磁石小片のN極(表面磁束密度:約0.27T)をエアギャップ $G_{PM}$ が8mmとなるように近づけた場合の、ハイブリッド式永久磁石軌道上の磁束密度分布をFig.12に示す。同図はハイブリッド式永久磁石軌道の表面から1mm上方の磁束密度分布を示している。Fig.9と同様に、永久磁石小片が位置する個所の磁束密度が、周囲の磁束密度より局所的におよそ0.1T程度低下することが確認できる。

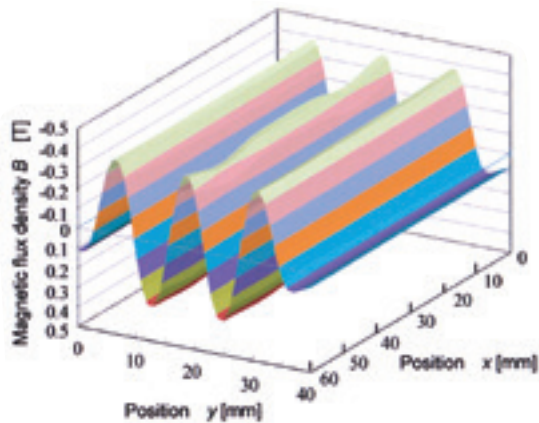


Fig.12 Distribution of magnetic flux density above 1mm from surface of hybrid-type test PM track. (two fixed PM piece,  $G_{PM}=8\text{mm}$ )

### 3.2 反磁性磁気力の計測結果

Fig.13に1個の永久磁石小片を配置した場合のPG板に作用するx軸方向の反磁性磁気力の測定結果を示す。ハイブリッド式永久磁石軌道と永久磁石小片のエアギャップ $G_{PM}$ は7mmとしている。試料端部の角度が90degのPG板試料に作用するx軸方向の反磁性磁気力は両端部で等しく、およそ0.05mNとなることが分かる。これに対してSlantに加工されたPG板試料端部に作用する反磁性磁気力はおよそ0.04mNとなり、90degの端部に作用する力より、およそ0.01mN程度小さくなることを確認された。また、反磁性磁気力が作用する範囲が90degの端部では22mm、Slantに加工された端部では26mmとなった。このため、反磁性磁気力の作用する範囲に差異が認められ、Slantに加工された方が広い範囲で反磁性磁

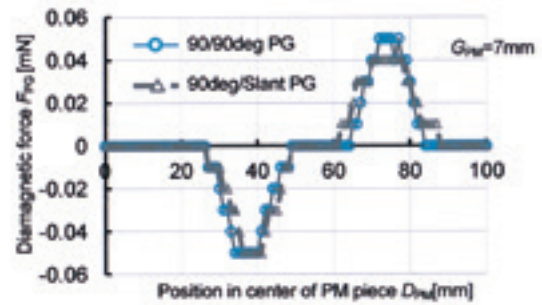


Fig.13 Diamagnetic force acting on PG plate sample. (single fixed PM piece,  $G_{PM}=7\text{mm}$ )

気力が働くことが確かめられた<sup>7)</sup>。

Fig.14に2個の永久磁石小片を変位させた場合における、90/90deg PG板試料に作用する反磁性磁気力の測定結果を示す。永久磁石小片とハイブリッド式永久磁石軌道のエアギャップ $G_{PM}$ は8mmである。同図中のA、B、C、D、Eは、Fig.11のA、B、C、D、Eの各位置に対応している。永久磁石小片 $\alpha$ がPG板試料に近づくと、負の力(上方に作用する成分:PG板試料を前進させる成分)が作用し、永久磁石小片 $\alpha$ の中央がPG板試料の上端部に位置するとき(位置B)、 $-0.03\text{mN}$ と負の最大値を示す。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0mNの値を示している。これは、PG板試料のそれぞれの端部に作用する反磁性磁気力が逆向きで、かつ発生する力の大きさと発生する範囲が等しくなるため、反磁性磁気力は相殺され、総合的に0mNとして計測されたと考えられる。また、永久磁石小片 $\beta$ がPG板試料の下端部に位置したとき(位置D)、反磁性磁気力は0.03mNと正の力(下方に作用する成分:PG板試料を後退させる成分)として最大値を示した。Fig.13と比較して反磁性磁気力の値が小さいが、これはハイブリッド式永久磁石軌道と永久磁石小片のエアギャップ $G_{PM}$ の影響が表れていると考えられる。次に、端部形状が異なる90deg/Slant PG板試料の反磁性磁気力の測定結果をFig.15に示す。永久磁石小片とハイブリッド式永久磁石軌道のエアギャップ $G_{PM}$ は8mmとしている。位置Aおよび位置Bでは90/90deg PG板試料に作用する反磁性磁気力と同様の値を示している。しかし、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、0.01mNと極めて小さいが、位置Bで生じている力と同じ方向の力が観測される。これは、90deg/Slant PG板試料に働く反磁性磁気力が、90deg端部に永久磁石小

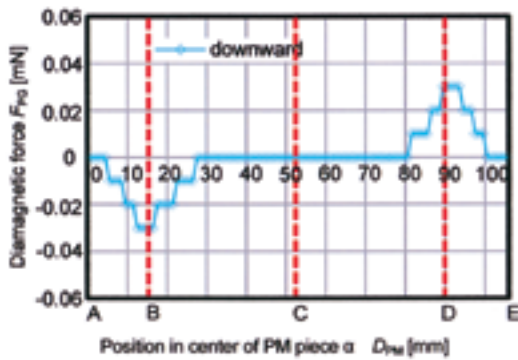


Fig.14 Diamagnetic force acting on 90/90deg PG plate sample. (two fixed PM pieces,  $G_{PM}=8\text{mm}$ )

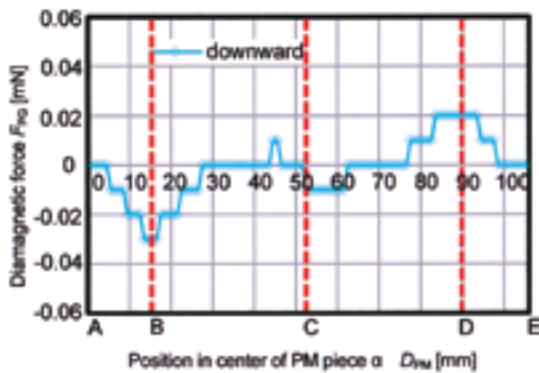


Fig.15 Diamagnetic force acting on 90deg/Slant PG plate sample. (two fixed PM pieces,  $G_{PM}=8\text{mm}$ )

片が位置する位置Bでは、0.03mNであるのに対し、Slant 端部に永久磁石小片が位置する位置Dでは0.02mNであるため、完全に相殺されず、わずかに残っているものと考えられる。

#### 4. まとめ

計測結果により、PG板試料の端部に作用する反磁性磁気力は、試料端部の形状に依存することが認められた。2個の永久磁石小片がPG板試料の両端部に同時に位置するとき（位置C）、端部形状が90/90degのPG板試料では、非接触駆動に寄与する反磁性磁気力の成分は発生

しないということが明らかになった。一方、端部形状が非対称になっている90deg/SlantのPG板試料では、両端部に発生する反磁性磁気力が相殺されず、「PG板試料を前進させる力の成分」が、極めてわずかに残ることが明らかになった。

#### 謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費23560307の助成を受けて行われたことを付記し、謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) M.V.Berry and A.K.Geim: "Of flying frog and levitations", Eur.J.Phys.18, pp.307-313 (1997).
- 2) A.K.Geim, M.D.simon, M.I.Boamfa, L.O.Heflinger: "Magnet levitation at your fingertips", NATURE Vol.400,22, July (1999).
- 3) R. Moser and H. Bleuler: "Precise Positioning using Electrostatic Glass Motor with Diamagnetically Suspended Rotor", I.E.E.E, Transactions on Applied Superconductivity, Vol.12(1), pp.937-939 (2003).
- 4) F.Barrot, D.Chapuis, T.Bosgiraud, B.Löhr, L.Sache, R.Moser and H.Bleuler: "Preliminary Investigations on a Diamagnetically Levitated Linear Conveyor", LDIA 2005, Kobe-Awaji, Japan, pp.343-346 (2005).
- 5) 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", Maglev2006, No.91, pp.199-203, Dresden-Germany (2006).
- 6) H. Suzuki, M. Kanke, A. Suzuki, A. Ito: "Contact-free Linear Drive Technique by using the Edge Shape Effect of Diamagnetic Graphite Plate", LDIA2007, Lille-France, pp.55-56 (2007).
- 7) T.Masaki, K.Itatsu, R.Saito, M.Tairako, A.Ito, H.Suzuki: "Observation of Diamagnetic Repulsion Force Concerning Contact-free Linear Motion by using Diamagnetic Graphite Plate", LDIA2011, Eindhoven - The Netherlands, PS-II.19, pp.194-195 (2011).