

永久磁石反発を用いた磁気浮上天秤の試作

著者	大路 貴久, 東 剛人, 井上 裕章, 山田 外史, 岩原 正吉, 高田 義博
雑誌名	日本AEM学会誌
巻	9
号	4
ページ	503-508
発行年	2001-12-10
URL	http://hdl.handle.net/2297/11799

学術論文

永久磁石反発を用いた磁気浮上天秤の試作

Trial manufacture of the repulsive type balance magnetic levitation system using permanent magnets

大路 貴久	(富山大学)	東 剛人	(金沢大学)
井上 裕章	(金沢大学)	山田 外史	(金沢大学)
岩原 正吉	(金沢大学)	高田 義博	(理学電機株式会社)

Takahisa OHJI	Member
Takehito AZUMA	
Hiroaki INOUE	
Sotoshi YAMADA	Member
Masayoshi IWAHARA	Member
Yoshihiro TAKATA	

The repulsive type magnetic bearing system, which has the passive control utilizing the repulsive forces and active control along axial direction, is superior compared to other magnetic bearings in respect to reduce the number of peripheral devices. The repulsive type magnetic bearing has special features such as the soft and constant stiffness for passive control axes. Hence this system can be applied for a special device without impulse disturbance and mechanical contact for the levitator shaft. In this paper we make a proposition to apply to a thermobalance using the repulsive type magnetic levitation system. If our system can be applied, the accuracy of measurement and sensitivity will be high owing to null mechanical contacts of the levitator. This paper reports the configuration and non-contact levitation characteristics of the trial manufacture and introduces the differential thermobalance configuration made as a next plan.

Key Words: Magnetic levitation, permanent magnet, repulsive force, stiffness, thermobalance.

1 はじめに

現代産業における精密機器や工作機械などの超精密化、高速化に伴い、機械的摩擦や磨耗の問題や振動、騒音の問題が極めて少ないという特徴を持つ磁気軸受が軸の支持方式として使用されている。特に能動形磁気軸受は回転を除く5軸に対し制御を行うため、高剛性、剛性調整などが可能であるという利点を持つ。しかし5軸を制御するために多数の制御回路や周辺装置等が必要となるため、制御の複雑化や高コスト化の問

題が生ずる。著者らが提案する反発浮上形磁気軸受 [1] は、回転を除く5軸のうち4軸を受動的に支持し、1軸のみを能動的に制御することにより、変位センサや制御用素子のコストを抑え、制御回路や電磁石等の周辺装置を大幅に縮小させることが可能である。これらの利点から磁気軸受装置自体を小型化するほうが望ましい。また永久磁石の反発力による支持方式の場合、受動安定方向の剛性は能動制御のそれに比べて柔らかく、かつ一定値であるという特徴を持つため、軸に対する機械的接触や瞬時的な外乱がない状態での応用を考慮する必要がある。

そこで、横軸形の反発浮上形磁気軸受を小型化し

連絡先: 大路貴久 〒 930-8555, 富山市五福 3190, 富山大学工学部電気電子システム工学科, email: ohji@eng.toyama-u.ac.jp

磁気浮上天秤への適用を考える。磁気浮上天秤には風洞試験用装置 [2] などがあり、非接触浮上時の制御電流変化を力に換算する方式が取られる。文献 [2] では全座標軸を能動的に制御するため、擾乱や瞬時外乱など、全座標軸方向に対する振動検出が可能である。

同様に制御電流変化から微小質量変化を測定する磁気浮上天秤として示差熱天秤 [3] への適用を考える。熱分析装置の一種である示差熱天秤は、基準物質と試料との熱挙動の差を連続的に測定する装置であり、示差熱量同時測定装置 (TG/DTA) や示差走査熱量計 (DSC) などがある。熱挙動を精度良く測定するには、天秤梁を有する中心軸端部での摩擦を極力抑える必要があり、機械的接触のない磁気浮上方式を利用すれば高感度化が可能である。また、基準物質と試料の相対的な微小質量変化はプログラム化された温度調節を行うことで、物性変化による瞬時外乱が加わることがない。さらに能動制御対象となる座標軸は浮上体中心軸に対する軸方向並進および回転のみであることを考慮すると横軸形の反発浮上形磁気軸受の適用例として期待できる。

本稿では、実際に小型化したモデル装置を試作するために永久磁石部の反発力調整を行い、モデル装置での非接触浮上状態での特性について述べ、磁気浮上方式での示差熱天秤の可能性について検討する。最後に、より現実的なモデルとして永久磁石を用いた磁気浮上形の示差熱天秤を構成したので紹介する。

2 磁気浮上天秤の試作

2.1 永久磁石の反発力調整

磁気浮上天秤の設計に際し、装置全体を小型化するためには不安定方向 (軸方向並進) の制御の容易化が問題となる。制御電磁石も含めた全系に対する小型化を考慮すると、制御電磁石の空隙断面積を広く取り扁平な形状にすることで吸引力を確保することが考えられる。しかし、2組の永久磁石部を配置する本方式の場合、空隙断面積を広くすることは、浮上体の小型化を妨げることになる。よって、制御電磁石の空隙断面積も小さく設計する必要がある。ここでは永久磁石部での反発力調整を行い、浮上体の軸方向制御を容易化し自重を支持するための永久磁石配置について検討する [4]。

Fig.1 に測定装置を示す。永久磁石材は軸方向に着磁されたネオジ系磁石 (ロータ磁石: $6\phi \times 2\phi \times 3$, ス

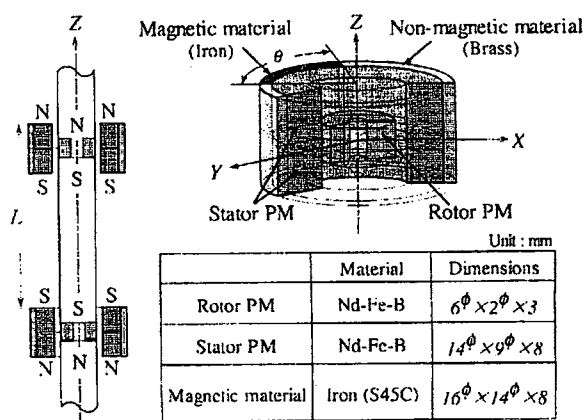


Fig. 1: Configurations of permanent magnets and magnetic material.

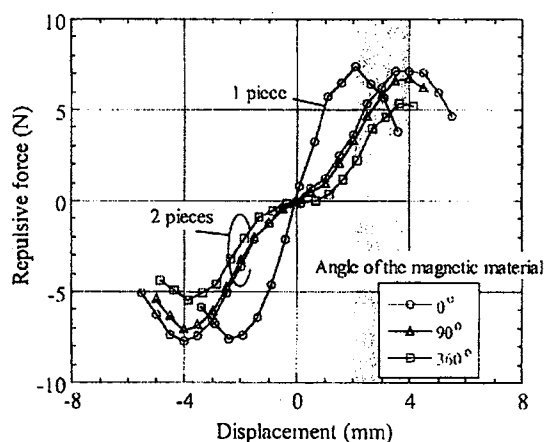


Fig. 2: Characteristics of repulsive forces along axial direction.

ター磁石: $14\phi \times 9\phi \times 4$ を 2 個) を使用し永久磁石部の中心間距離を $L (=30 \text{ mm})$ とする。ロータ磁石を含む軸を Z 方向に変化させた時の Z 方向の反発力をロードセルにて測定しており、磁性材料の角度 θ を変化させた場合についても測定した。磁性材料をステータ磁石外周に配置し、形状を変化させることにより、ロータ、ステータ両磁石間の磁束密度を静的に変化させることが可能である。測定結果を Fig.2 に示す。また、比較としてステータ磁石が 1 個の場合も同図に示した。ステータ磁石の幅の増加により軸方向反発力 $F_z > 0$, 軸方向剛性 $K_z > 0$ の範囲 (ハッチング部) が約 2 倍となり制御可能範囲が増加する。さらに磁性材料を付加し、その角度を増加させることで、軸方向への反発力を抑えることができ、角度に依存した特性となることが分かる。Fig.3 に永久磁石部での磁束線図を示す。横軸形磁気浮上装置の場合、自重を支持する必要があるため、ステータ磁石全体を覆うことはでき

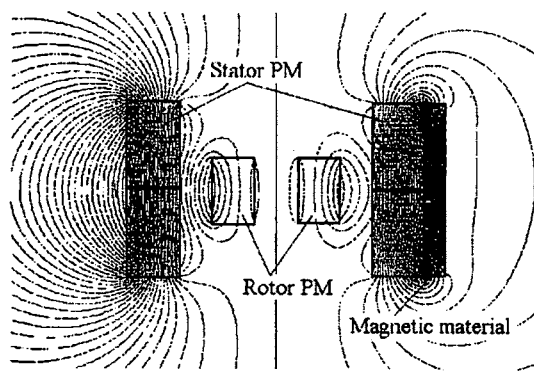


Fig. 3: Flux lines around the permanent magnet section.

ないが、ステータ磁石外周の一部を磁性材料で覆うことにより、ギャップ中の磁束密度を低下させ、相対的に軸方向反発力を減少させることができる。つまり横軸形では、磁性材料をステータ磁石の上部に付加する方法で軸方向反発力を減少させ、同時に浮上方向反発力を増加させる理想的な構成が得られる。

2.2 磁気浮上天秤の構成

Fig.4に磁気浮上天秤の概略を示す。反発浮上形磁気軸受の構成要素である2組の永久磁石部、変位センサ、制御電磁石が設けられている。軸端部には吸引板を配置し、反対側の軸端部にはおもりとシャッタを取り付け、軸が水平に保たれるよう設計している。軸の一部が細くなっているのは浮上方向の変位測定用シャッタを兼ねており、この部分での検出信号は制御に使用しない。浮上体の重心から中心軸に対し直角方向に天秤梁を取り付け、天秤梁も常に水平となるように制御しながら、天秤梁制御用電磁石の電流変化を質量に換算することで天秤としての機能が得られる。実際の浮上実験では、浮上体重心で平衡が取れるように製作した仮の天秤梁も準備した。浮上体の全長は128 mm、

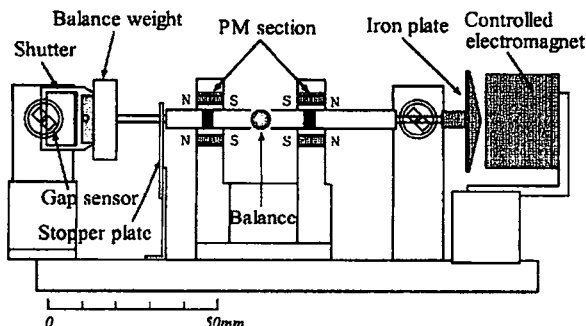


Fig. 4: Proposed configuration of the repulsive type balance magnetic levitation system.

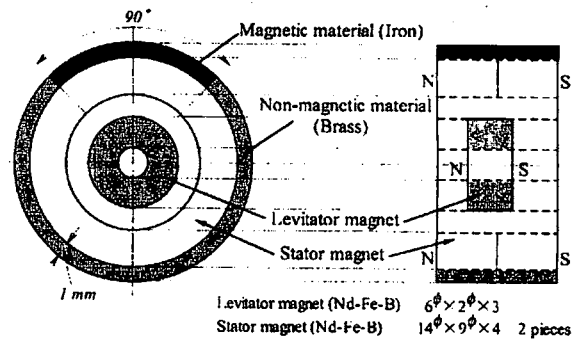


Fig. 5: Configuration of the permanent magnet section.

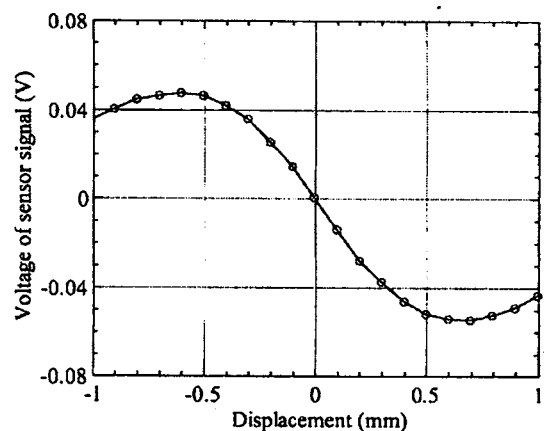


Fig. 6: Characteristic of the sensor signal.

永久磁石間距離は30 mm、全重量は83 gである。Fig.5は反発力調整後の永久磁石配置であり、ステータ磁石上方に中心角90°の鉄(厚さ1 mm)を配置し、残りの270°を真鍮で構成している。

Fig.6に変位センサの電圧特性を示す。磁気浮上装置を小型化する場合、変位センサ部を磁氣的に独立に構成するために、発光素子と受光素子の組み合わせを変位検出に使用した[5]。受光素子には2分割フォトダイオード(MI-33H-2D)を用い、シャッタ通過時の差動電圧を利用することによって、ハッチング部のような線形領域が得られ位置検出が可能となる。

3 対象のモデル化と浮上実験

3.1 モデル化と制御システム

試作機に対するモデル化として、ここでは浮上体を質点系と考え、動作点近傍での線形化モデリングによる状態方程式を導出した。

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx \quad (1)$$

ただし、

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_\delta & \dot{x}_\delta & i_\delta \end{bmatrix}^T, \quad u = e_\delta$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{m} \left(a + 2\frac{F_c}{x_e} \right) & 0 & -2\frac{F_c}{m i_e} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

であり、 m : 質量、 x_δ : 定常位置からの偏差、 i_δ , e_δ : 電流、電圧の変化分、 a : 永久磁石の軸方向剛性、 F_c : 永久磁石の軸方向反発力、 i_e : 定常電流、 R , L : 電磁石抵抗およびインダクタンスである。各パラメータを Table 1 に示す。モデル化では軸方向制御のみを考慮しており、天秤梁制御に対しても (1) 式を用いる。

Table 1: Parameters of the system.

Parameter	Symbol	Value
Mass of the levitator	m	0.083 kg
Axial stiffness	a	2.32×10^3 N/m
Steady repulsive force	F_c	1.7 N
Steady current	i_e	0.45 A
Resistance	R	8.911 Ω
Inductance	L	62.4×10^{-3} H

制御システムを Fig.7 に示す。変位センサからの軸方向変位信号を A/D コンバータを通して DSP (Heron DSP6031) に取り込み、制御電磁石に加える電圧信号をコントローラにより計算し、D/A コンバータを介してパワーアンプに出力する。また状態として

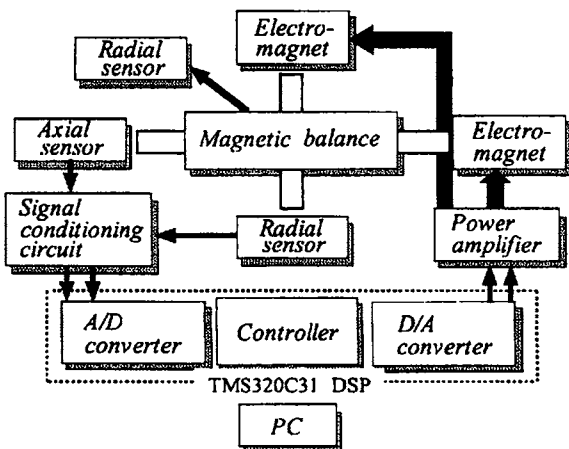


Fig. 7: Controller block diagram.

変位のみを使用し、LQG 制御による制御系設計を行った。また天秤梁の制御に対しても変位センサ、制御回路、制御電磁石を設け、同様の制御系設計を行うこととし、天秤梁無制御時には浮上方向変位測定用のみ使用する変位センサも設置し実験を行った。

3.2 浮上実験

Fig.4 の試作機に対し、仮の天秤梁を設置した場合の非接触浮上を確認した。浮上状態での定常電流値が約 0.4 A、消費電力約 1.4 W、制御方向の振動範囲 10 μm 程度で安定浮上を確認している。軸方向制御時において、浮上体重心 (軸と天秤梁の接合部) に荷重を加えたときの浮上体の質量変化に対する浮上方向変位を Fig.8 に示す。25 gf (0.245 N) の質量増加に対しても浮上体は安定に非接触浮上した。示差熱天秤の仕様として、最大荷重 2 gf (0.02 N)、変化量 0.05 mm/gf (5.1×10^{-3} m/N) 以内があり、Fig.8 より無荷重からの変化量が 3.0×10^{-3} m/N 程度であることから仕様を満たすことが確認できる。

Fig.9 および Fig.10 に、非接触浮上時の軸方向振動特性と天秤梁の振動の様子を示した。Fig.9 では仮の天秤梁を設置した場合と、梁端部に吸引板を取り付けた天秤梁を設置し、天秤梁も同時に浮上制御した場合の軸方向振動幅の比較である。ここでは制御用の天秤梁を設置しても同質量 (83 g) となるように製作した。軸方向振動幅は天秤梁制御時の方が約 4 μm に減少しており、天秤梁の電磁石で生じる軸方向の吸引力により安定化が図られていることが予想される。現在、軸方向と浮上方向は独立に制御しており、この結果から軸方向と天秤梁の回転方向の相互作用を踏まえたモデル化と制御系設計が必要である。Fig.10 は軸方向制御後に天秤梁を制御した時の天秤梁の浮上の様子である。振動幅は 10 μm 以下であるが振動が不安定であ

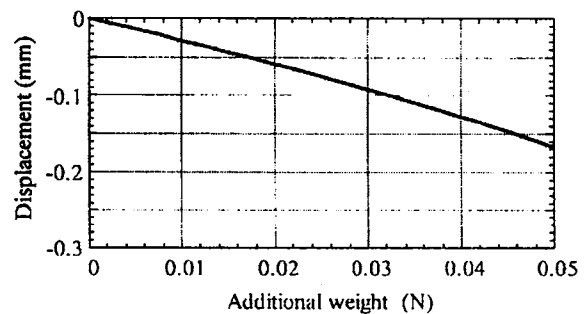


Fig. 8: Characteristic of additional weight vs. displacement along vertical direction.

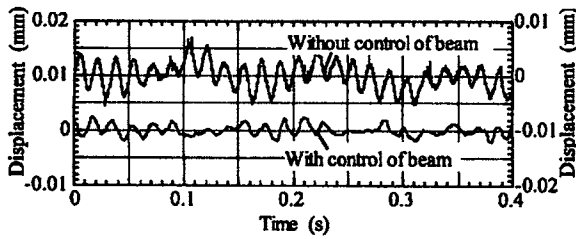


Fig. 9: Steady levitation characteristics for axial control.

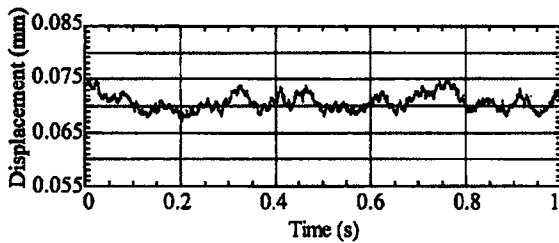


Fig. 10: Steady levitation characteristics for beam control.

り、天秤梁に試料を乗せた状態で天秤梁の制御を開始すると最大 0.1 gf (0.98×10^{-3} N) で天秤梁のみ制御不能となった。

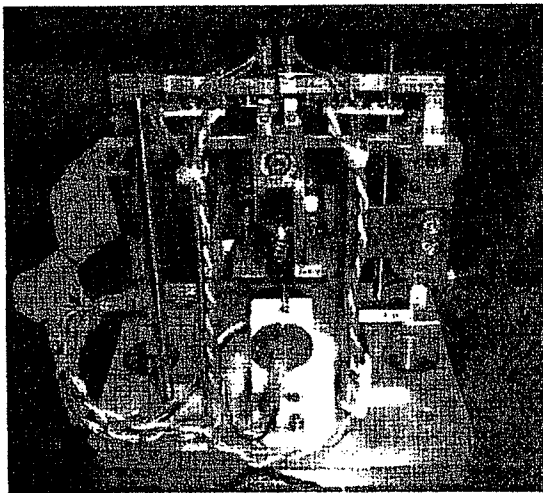


Fig. 11: Differential thermobalance including repulsive type magnetic levitation system.

3.3 磁気浮上方式による示差熱天秤の構成

Fig.11 に永久磁石による磁気浮上方式を適用した接触形の示差熱天秤装置を示した。この装置は中心軸の端部が機械的に僅かに接触する状態で安定を保つよう設計されている。これに基づき、磁気浮上方式を適用した場合の原理図 (Fig.12) について説明する。永

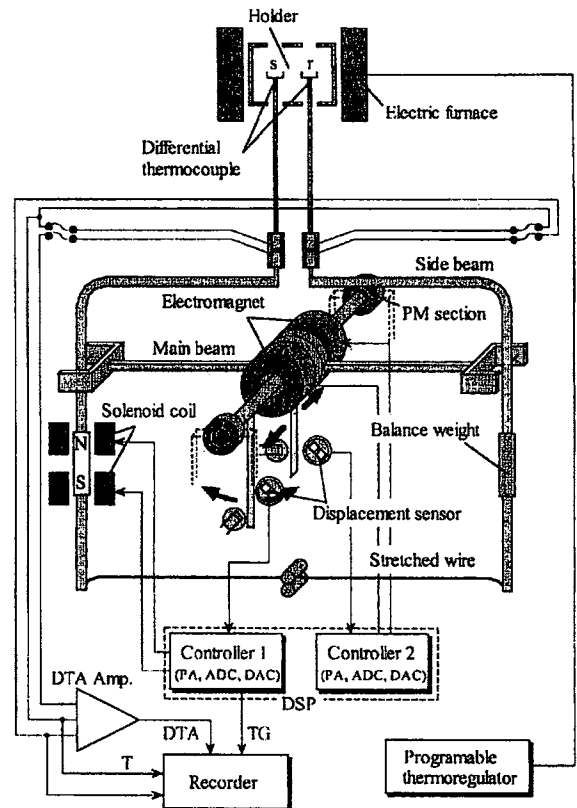


Fig. 12: Principle of the differential thermobalance using repulsive type magnetic levitation system.

久磁石部が軸端部に配置されており、軸内部 (天秤梁中央) に制御電磁石を配置することで非接触浮上が可能となる。天秤梁 (主ビーム) は支点を介して副ビームに接続されており、この副ビームに設置したホルダー支持棒上部の皿に試料 (s) と基準物質 (r) が乗せられる。ホルダー支持棒内部には熱電対が挿入されており、両ホルダーを電気炉内で加熱した際の物質の温度変化を測定できる。天秤梁は常に水平を保つよう制御され、試料と基準物質の質量変化は副ビームに設置されたコイルの電流変化に換算される。現在、Fig.12の構成による実機を製作中である。

4 まとめ

本稿では横軸形の反発浮上磁気軸受を小型化し、無回転での応用例として示差熱天秤への適用について検討した。装置の小型化に有効な反発力調整法を用いた磁気浮上天秤のモデル装置を試作し、浮上時の安定性を調べた。その結果、示差熱天秤に適用する際の仕様

となる最大荷重値と質量変化時の浮上方向変位量の両方を満足する良好な結果が得られた。

本稿ではLQG制御による設計を行ったが、天秤梁の回転に対しては電流-質量換算時の精度が要求されるため、天秤梁制御にサーボ系を適用し、高精度位置決めによる制御実験を行う予定である。

謝辞

本稿に紹介した磁気浮上方式による示差熱天秤の実機製作にあたり理学電機(株)の支援を受けた。ここに付記し、謝意を表す。

(2001年6月12日受付)

参考文献

- [1] 山田, 大路, 宮本, 松村: 永久磁石反発形1軸制御磁気軸受の構成, 日本AEM学会誌, Vol.4, No.1 (1996), pp.40-45.
- [2] 永井: 磁気浮上天秤の研究, 第10回「電磁力関連のダイナミックス」シンポジウム講演論文集, (1998), pp.453-458.
- [3] 斎藤安俊著: 物質科学のための熱分析の基礎, (1996), 共立出版.
- [4] 大路, 山田, 岩原: 反発浮上形磁気軸受の小型化を目指した永久磁石部の反発力調整法, 日本応用磁気学会誌, Vol.25, No.4-2.
- [5] 中, 小森: 磁気浮上形マイクロモータの改良, マグネティクス研究会資料, MAG-99-46, (1999), pp.61-65.