

電 気 学 会 研 究 会 資 料

The Papers of Technical Meeting on
"Linear Drives ", IEE Japan

リニアドライブ研究会

LD-09-047～055

2 0 0 9 年 1 0 月 2 6 ・ 2 7 日

社団法人 電 気 学 会
The Institute of Electrical Engineers of Japan
東京都千代田区五番町 6 - 2

運動制御による鉄球の回転機構のトルク特性

孫 鳳* 岡 宏一 (高知工科大学)

Torque Performance of Noncontact Spinning Mechanism Using Motion Control

Feng Sun*, Koichi Oka, (Kochi University of Technology)

This paper describes magnetic analyses for spinning mechanisms that spin a levitated object using motion control of permanent magnets. Investigations are carried out for two different spinning mechanisms. One is using cylindrical magnets driven in linear directions. The other is using disk magnet driven in rotational directions. The analyses are performed by using an IEM(integral element method). A model of the levitated object is proposed and about the model, the torque is calculated by IEM analyses are carried out. As results, the rotational driven mechanism can rotate the object and control its angular position, the linear driven mechanism, however, can not rotate the object and can not control the angular position by the proposed model in this paper.

キーワード：非接触回転機構，運動制御，永久磁石，トルク特性，積分要素法

(Keywords, noncontact spinning mechanism, motion control, permanent magnet, torque analysis, IEM analysis)

1. はじめに

現在，機械の精密化と小型化が目まぐるしく進展しており，それに伴い，塵埃の発生を抑えるクリーンルーム工場や，小型の機械パーツの組立・搬送中の精度保持が求められている．非接触で機械パーツを操作することができれば，接触が起因となって発生するパーツの変形，またそれに伴う精度低下や塵埃発生が低減が可能であると考えられる．

非接触浮上機構には空気圧，静電気，磁力などが利用可能である．空気圧ではエアによる塵埃の発生が考えられクリーン環境には不向きである．静電気力は，他に比べ格段に吸引力が小さく，対象物は薄く面積の広いものに限られる．磁力を用いた場合，浮上対象は磁性体に限られるが，他に比べ吸引力は大きく，塵埃の問題もない．ここでは，磁力を用いた浮上機構について考察する．

これまでに，磁気浮上機構として常電導を用いた多くの浮上機構が提案され実現されている．通常の常伝導磁気浮上機構は，電磁石を用い，電流を制御する形式のものである⁽¹⁾．これに対し電磁石を用いずに永久磁石とアクチュエータを利用した浮上機構も提案されている⁽²⁾⁻⁽⁵⁾．この非接支持機構により浮上した対象物に対して，永久磁石リニア駆動によるマニピュレーション機構も考察されている^{(6), (7)}．また浮上体の回転を制御する機構としてリニア駆動ではなく回転駆動を用いたものも提案されている⁽⁸⁾．

本論文では，永久磁石の運動を制御することによって浮

上体を回転させる機構⁽⁷⁾⁽⁸⁾について，磁路解析を行いそれらの機構がどのように浮上中の物体を非接触で回転させるかについて検討を行う．まず，浮上体のモデルを構築しこのモデルに関して積分要素法によって浮上体に加わるトルクを求めた．この発生トルクを検討することによって浮上体の回転原理に関する考察を行う．

2. 永久磁石の運動制御による非接触回転機構

〈2・1〉 浮上機構 今回用いた浮上装置は，図1に示すように，リニアアクチュエータと永久磁石を用いるものである．永久磁石，Voice Coil Motor (VCM)，センサターゲット，2つのセンサなどが含まれる．1つの永久磁石がVCMの駆動軸に取り付けられており，VCMによって鉛直軸方向に直線的に駆動される．VCMの駆動軸は，永久磁石と渦電流のギャップセンサのターゲットとをVCMの内部を貫いてつながっている．よって永久磁石の運動の検出は上部の渦電流センサによって行われる．

永久磁石は，直径が8 mm，長さが10 mmの円筒形のネオジム磁石であり，その軸方向に着磁されている．VCMは，15 mmの可動範囲を持っており，定格電流2 Aに対して20 Nの力を発生させることができる．上部の永久磁石の運動を検出するセンサの検出範囲は10 mmであり，分解能は0.02 mmである．下部の浮上体の運動を検出するセンサは，検出範囲が4 mmであり，分解能が1 μmである．

浮上体および永久磁石の運動を測定した信号は、A/D 変換器によってデジタル化し、コントローラに入力される。その信号に基づいて DSP は演算を行い適切な VCM への発生力を計算する。その結果は、D/A 変換器を通して VCM へ電流信号として出力される。

〈2・2〉 永久磁石のリニア駆動による回転機構 永久磁石を直線的に駆動して浮上体を回転させる機構の試作装置を図 2 に示す。浮上対象の回転機構は、浮上体を水平面内で回転させる機構である。その模式図 3 に示す。これは鉄球の鉛直上部から見た図で、鉄球と永久磁石だけの図である。今回は、浮上中の浮上体の水平面上に 4 個の永久磁石を直交位置に配置し、それぞれの永久磁石を浮上体に交互に接近させ、浮上体に回転運動を発生させる。この原理を具体的に以下に説明する。

浮上体は鉄球であり、その表面には残留磁気の影響があると考えられる。それは、鉄球の表面に S, N それぞれの極性を持った複数、大小の点が不規則に全体に分布してあると考えられる。最も大きい残留磁気の影響は鉛直方向の浮上の際に鉄球の上下方向を決めるものである。このとき鉄球の水平方向には他の残留磁気の影響も残っている。図 3 の矢印で示す点が、水平方向の最も大きな影響点とする。よって水平方向の異なる方向から永久磁石を近づけることで、この影響点が永久磁石の方へ引き付けられる。この力を利用し四方から交互に永久磁石を近づけることを繰り返すことで、鉄球を回転させる。つまり一般の PM 型ステッピングモータの原理により回転させる機構と考えられる。具体的な永久磁石の制御方法を述べる。

まず、永久磁石 a を①の動きで鉄球に近付けることにより鉄球の表面にある残留磁気のうち永久磁石と逆の極性の影響の部分が回転し永久磁石に近付いた位置で安定する(図の現在の状態)。そして②の動きで永久磁石を鉄球から離し、永久磁石 b を③の動きで近づけると、残留磁気部が引き寄せられ④の方向に回転運動をする。同様なことを次々と隣の磁石に対して繰り返すことで鉄球に回転運動を発生させる。

制御システムを図 4. に示す。4 個のボイスコイルモータにそれぞれ位相を $\pi/2(\text{rad})$ ずらした信号を入力し、隣り合う永久磁石が、順番に鉄球に近付くように制御している。回転機構では鉄球と永久磁石との空隙を計測しないため、あらかじめそれぞれのボイスコイルモータの位置をステイにより鉄球の中心から等しい距離に固定しておく。

〈2・3〉 円盤形永久磁石の回転駆動による回転機構 永久磁石を回転させて浮上体を回転させる形式の試作装置の写真を図 5 に示す。回転機構は、4 つの同じ機構から構成されている。1 つの回転機構の基本構成を図 6 に示す。回転機構は、円板磁石、ギアヘッド、ロータリーアクチュエータ、エンコーダなどから構成されている。円板磁石は、直径が 30 mm、厚さが 10 mm のネオジウム磁石であり、その径方向に磁化されている。ロータリーアクチュエータは、ギアヘッドを通して、円板磁石を回転する。さらに、エン

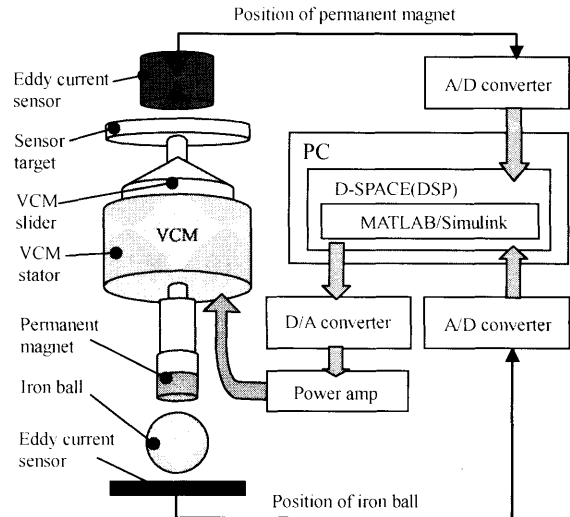


図 1 磁気浮上部分の基本構成
Fig. 1 Configuration of Magnetic Suspension System

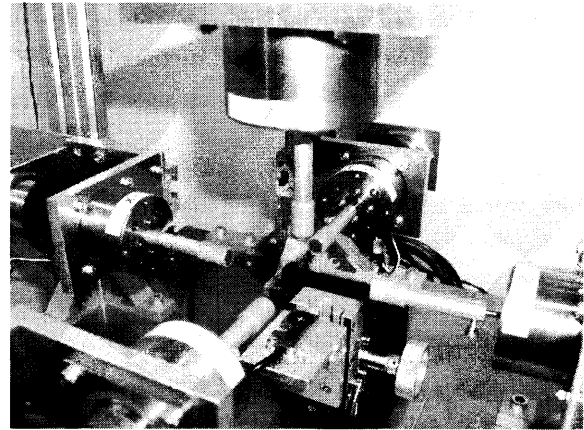


図 2 磁気浮上回転装置の写真
Fig. 2 Photograph of Magnetic Suspension-Spin Device

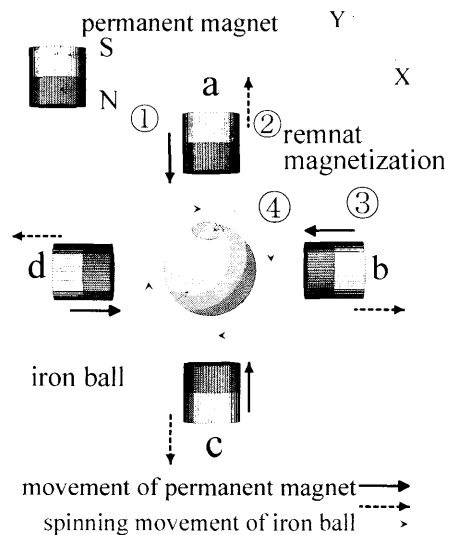


図 3 リニアドライブ形非接触回転機構
Fig. 3 Spin Mechanism Using Liner Drive PM

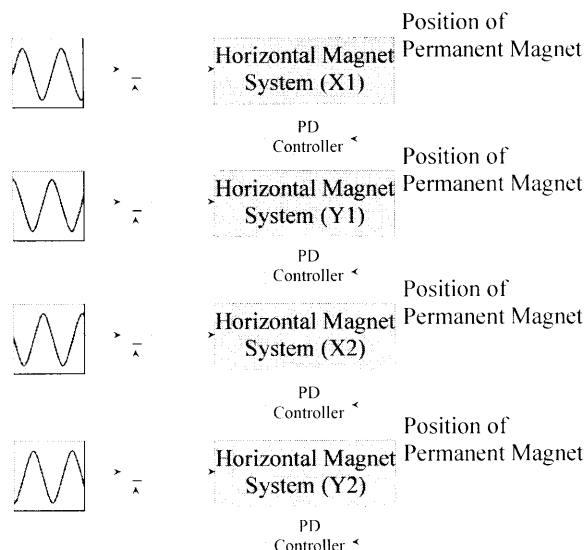


図4 回転機構の制御ブロック線図
Fig. 4 Block Diagram for Spinning Mechanism

コードにより、円板磁石の回転速度を計測する。回転機構は、レールに取り付けられており、任意の位置・高さに固定可能である。4つの同じ回転機構は、浮上中の浮上体を中心として、水平面上に90度ずつ配置している。さらに、図6に示す回転機構の制御システムは、エンコーダの信号を用い、速度と角度で制御している。

浮上体の回転機構は、浮上体を水平面内で回転させる機構である。今回の試作機構の回転原理を図7に示す。これは鉄球の鉛直上部から見た図で、鉄球と円板磁石だけの図である。今回は、浮上中の浮上体の水平面上に4つの円板磁石を直交位置に配置し、全部の円板磁石を同じ回転速度で回転させると、浮上体の表面の残留磁気が引き寄せられ、浮上体に回転運動を発生させる。

図7に示すように、円板磁石は二つの磁極が径方向に磁化されている。4つの円板磁石を、浮上している鉄球の水平面に、鉄球に対して同じ距離で、直交位置に配置しており、全ての磁極方向が平行している。また浮上体を中心として、向かい合う円板磁石は共に磁極方向は同じであり、隣り合う円板磁石の磁極方向は反対となるように配置する。さらに、4つの円板磁石を同様の回転方向と回転速度に回転させる。これによって、鉄球を支持している水平方向の吸引力は常に平衡となり、鉄球の合力はほぼ0となる。しかし、4つの円板磁石の回転によって、鉄球の表面の残留磁力点を支持している合力は常に変化している。残留磁気点をNと仮定した場合、残留磁気点に対して、円板磁石Iの吸引力が一番大きいため、残留磁気点が円板磁石Iへ引き付けられ、残留磁気点が円板磁石Iに面する位置に移動する。その結果、鉄球を時計回りに回転させることができる。それと同時に、4つの円板磁石は左周りに回転する。そのため、鉄球が90度回転し残留磁気点が円板磁石Iに面する時には、4つの円板磁石も90度に回転している。そのため、その時点

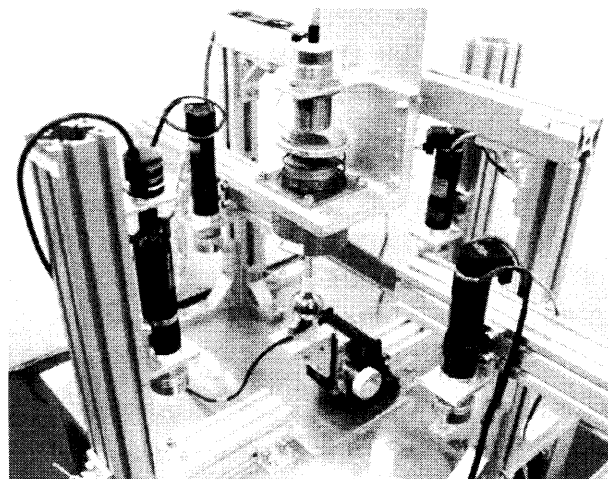


図5 回転駆動による非接触回転装置
Fig. 5 Photograph of Spin Device by Rotational Motion

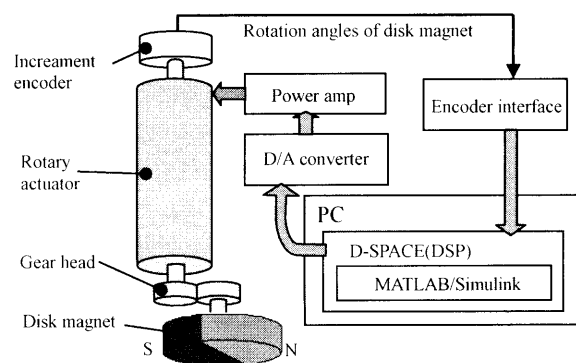


図6 回転部分の基本構成 (1/4)
Fig. 6 Configuration of Spinning System (1/4)

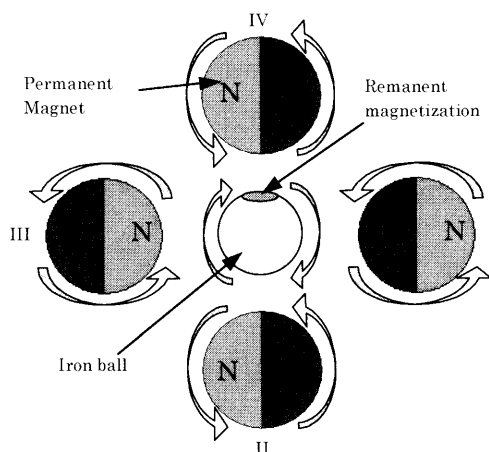


図7 回転駆動による非接触回転原理
Fig. 7 Spinning Principle by Rotational Motion

での残留磁気点に対して最大の吸引力を持っている円板磁石はIIになっている。この一連の動作を繰り返し行うことで、鉄球を継続的に回転させる。

回転機構の制御システムを図8に示す。回転機構では鉄

球の位置および、回転のフィードバックは行っていない。
また、浮上機構と、回転機構は独立した制御を行っている。
回転機構は4つの同じ回転装置から構成されており、4つの円板磁石を同じ速度で回転させる。そのため回転機構の制御システムは、4つの速度制御のPDコントローラを用い、また3つの回転角度制御のPDコントローラを用いている。4つの円板磁石は初期位置での互いの角度を保てるため、1つの円板磁石の回転角度を参考値として、他の3つの回転角度を制御する。そのため、この制御システムによって4つの円板磁石は同期して動き、同じ速度で回転し、また停止する

3. 磁気解析による発生トルク

以上述べてきた2つの非接触回転駆動機構に関して、積分要素形磁場解析ソフトウェア ELF/MAGIC（株式会社エルフ）を用いて磁場解析を行い、浮上体の発生トルクについて検討を行った。行った解析は、水平2次元平面の解析であり、リニア駆動形回転装置については永久磁石が2つのものと4つのもの、回転駆動形装置については永久磁石が1つ、2つ、および4つのものについて検討を行った。

〈3・1〉浮上体のモデル 試作装置の浮上体は鉄球であり、その表面に残留磁気があると仮定した。そのモデル化として今回は鉄球表面に薄い永久磁石が貼り付けてあると仮定した。鉄球の回転を考察するためにはこのモデルの構築は重要なものであるが、今回は第1段階として最も簡単だと考えられるものを用いた。解析は永久磁石の位置、または回転角をパラメータとして、鉄球の回転角に対するトルクを計算した。鉄球の回転角は、 θ とした。

直線駆動形の磁石と浮上体との距離は、 ϕ をパラメータとして

$$x_i = d_0 + \cos(\phi + \alpha_i) \dots\dots\dots (1)$$

とした。ただし、 $\alpha_i = \pi(i-90)/2$ である。添え字の*i*は、磁石の順番で基準となる磁石を1として、そこから右回りに、2, 3, 4とした。2つの永久磁石を用いた実験は、1, と3の磁石を用いて行い、他の磁石は取り外して行った。図8に2つの磁石を用いたときの $\theta=0$, $\phi=0$ の場合のモデルの様子を示す。

回転駆動形の各磁石の回転角度も、直線駆動形と同様に ϕ をパラメータとして

$$\phi_i = \phi + \beta_i \dots\dots\dots (2)$$

とした。ただし、 $\beta_i = \pi(i-90)$ である。4つの回転形磁石を用いて、 $\theta=30^\circ$ $\phi=30^\circ$ の場合のモデルを図9に示す。1つの永久磁石を用いた解析ではIの永久磁石のみを用い、2つの永久磁石を用いた解析ではIとIIIの永久磁石を用いて行った。

〈3・2〉直線駆動形の発生トルク 直線駆動形の回転機

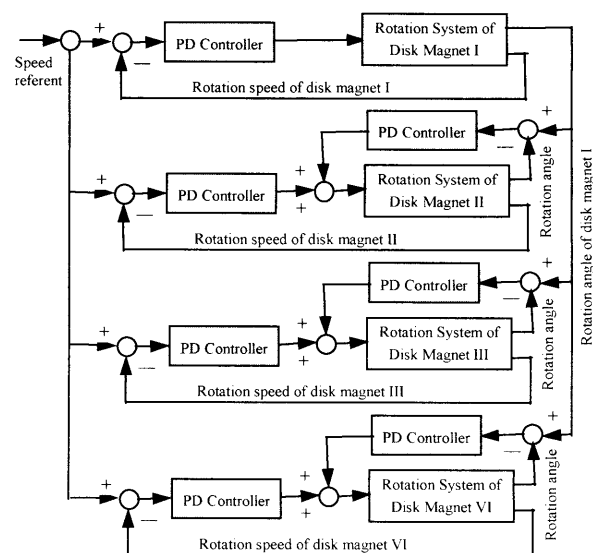


図7 回転システムの制御構成図
Fig. 7 Control Diagram of Spinning System

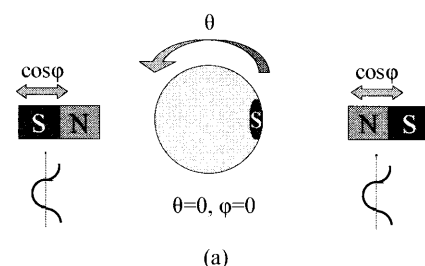


図8 2つの直線駆動形永久磁石による磁路解析モデル
Fig. 8 Analysis Model for Linear Motion using 2 Magnets

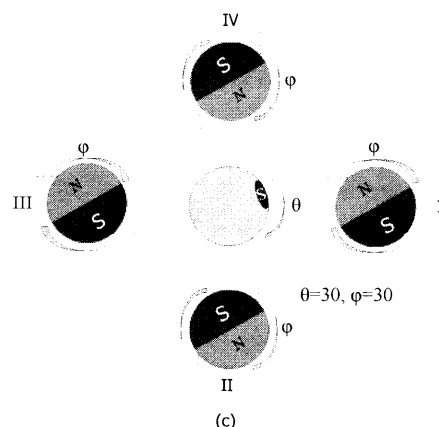


図9 4つの回転形磁石を用いた場合の磁路解析モデル
Fig. 9 Analysis Model for Rotational Motion Using 4 Magnets

構を用いて発生トルクを計算させた結果を図10と図11に示す。図10は2つの磁石を使った結果であり、図11は4つの磁石を使った結果である。グラフの横軸は鉄球の回転角 θ であり、縦軸はトルクを表している。各図の上部に示

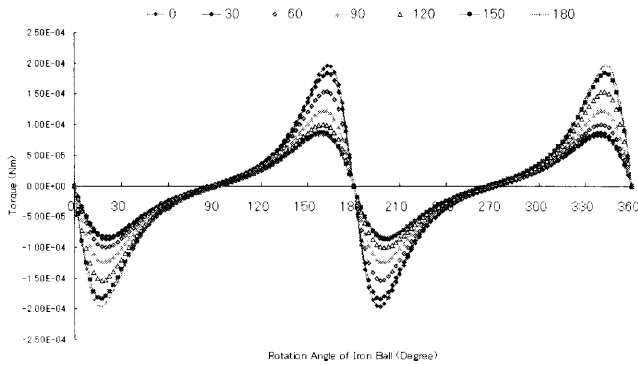


図 12 直線駆動形磁石を 2 つ使った場合のトルク計算結果
Fig. 12 Results of Torque for Linear Motion using 2 Magnets

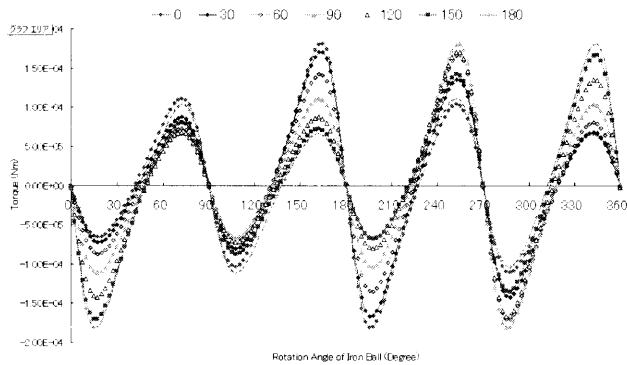


図 13 直線駆動形磁石を 4 つ使った場合のトルク計算結果
Fig. 13 Results of Torque for Linear Motion using 4 Magnets

してある数値は、パラメータ ϕ であり、0 度から 180 度までの変化させた結果を示してある。180 度から 360 度の場合は同様の結果となるため省略した。

2 つの図は、回転角度に対するトルクを表している。従って、得られた計算結果のグラフが右下がりやトルク 0 と交わっている点が安定点である。図からわかるように、図 12 では 2 個、図 13 では 4 個の安定点があり、その他には存在しない。このことは、直線駆動形永久磁石の位置を $\sin$ 波状に変化させただけでは、安定点は変化せず、従って回転制御はできないことがわかる。しかし、現在までの試作装置での実験では回転が可能であることが確認されている。このため、鉄球の表面の 1 部に永久磁石があるというモデルは、十分なものではないことがわかる。

〈3・3〉回転駆動形の発生トルク 次に回転駆動形の発生トルクの結果を図 14 から図 16 に示す。直線駆動形のグラフと同様に、横軸は鉄球の回転角度 θ 、縦軸は発生トルクを示している。図 14 から図 16 でそれぞれ永久磁石が 1 つの場合、2 つの場合、4 つの場合を表している。図の上部に永久磁石の回転角のパラメータ ϕ を示している。

図 14 の永久磁石が 1 つの場合では、安定点は $\theta=0$ と $\theta=180$ の付近に集中していることがわかる。 $\theta=0$ の付近では交差する傾きが大きく剛性が高く、逆に $\theta=180$ の付近では剛性は低い。また、 $\theta=90$ や $\theta=270$ 度付近では安定点が疎である。この結果永久磁石 1 つの場合には、永久磁石の回

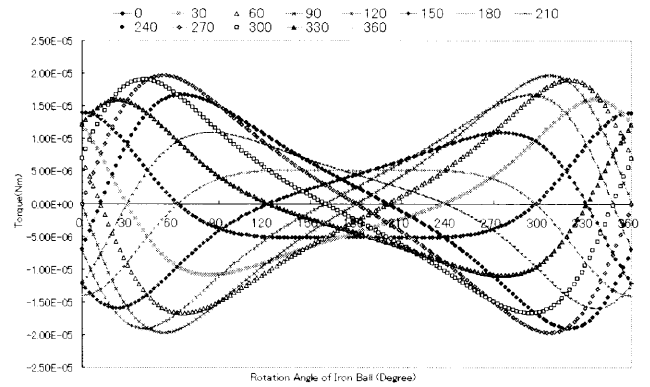


図 14 回転駆動形磁石を 1 つ使った場合のトルク計算結果
Fig. 14 Results of Torque for Rotational Motion using a Magnet

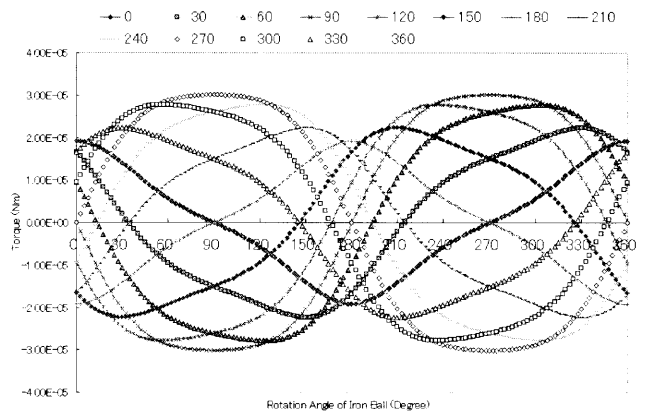


図 15 回転駆動形磁石を 2 つ使った場合のトルク計算結果
Fig. 15 Results of Torque for Rotational Motion using two Magnets

転と鉄球の回転との間の関係は非線形であることが確認された。また剛性が場所によって変化しており、スムーズな回転ができないことが予想される。しかし、永久磁石の回転により安定点を制御することが可能であり、回転制御が可能であることが確認できた。

図 15 に示す永久磁石を 2 つ使った場合の解析結果では、剛性の高い部分が $\theta=0$ と $\theta=180$ の 2 つの場所になっていることが確認できる。しかし、安定点が疎になる部分は存在しており、また最大トルクも ϕ によって変化することが確認できる。よってこの場合にも磁石の回転と鉄球の回転の関係は非線形であることも同様に確認できる。

図 16 に示す永久磁石を 4 つ使った場合の解析結果では、図 14, 15 と違い一様な曲線によりトルクが変化していることがわかる。このことは磁石を 4 つ使った場合には、それらで形成される外部磁場の変化が一様に変化し、鉄球に対しても回転角度に応じたトルクが発生していることを示している。各トルク曲線の最大値もほぼ等しく、安定点の剛性もすべての場所で傾きがほぼ等しいことが確認できる。安定点もパラメータ ϕ の変化量と等しく 30 度ごとである。この結果、永久磁石を 4 つつけた場合には、鉄球の回転が

非常にスムーズであることが予想される。

4. おわりに

永久磁石を直線駆動または回転駆動することにより、浮上体である鉄球を回転させる機構において、磁路解析に基づいた発生トルクを計算し、回転原理について検討を行った。その結果、本論文で提案した鉄球の磁化では直線駆動による回転はできないことが明らかになった。このことにより本論文で提案した磁化のモデルが妥当ではないと考えられる。しかし、回転駆動による浮上対象の回転は可能であることが確認され、また磁石を増やすことによってよりスムーズな回転が可能であることが確認された。

今後は実験による鉄球の磁化の状態を検討しより実際に近いモデルを構築していくことを検討中である。なお、本研究で利用した ELF/MAGIC は、株式会社エルフの協力により使わせていただいております、ここに謝意を表す。

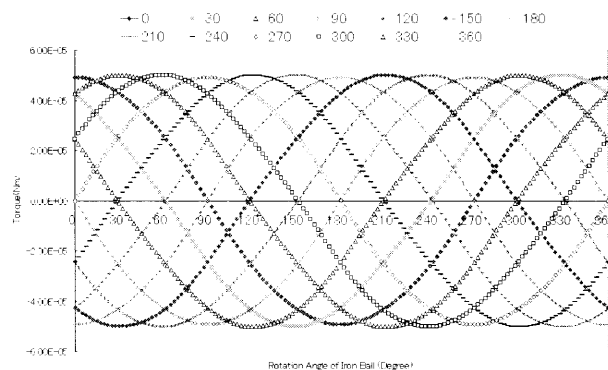


図 16 回転駆動形磁石を 4 つ使った場合のトルク計算結果

Fig. 16 Results of Torque for Rotational Motion using four Magnets

文 献

- (1) 電気学会磁気浮上応用技術調査専門委員会編：「磁気浮上と磁気軸受」，コロナ社，(1993)
- (2) Oka K. and Higuchi T., "Magnetic Levitation System by Reluctance Control: Levitation by Motion Control of Permanent Magnet", International Journal of Applied Electromagnetics in Materials, Vol. 4, pp.369-375, (1994).
- (3) Mizuno T., Sekiguchi H. and Araki K., Repulsive Magnetic Bearing Using Motion Control of Permanent Magnets (Stabilization in the Axial Direction), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 64, No.628, pp. 187-192, (1998).
- (4) Oka, K., Higuchi, T. and Shiraishi, T., "Hanging Type Mag-lev System with Permanent Magnet Motion Control", Electrical Engineering in Japan, Vol. 133, No. 3 pp.63-70, (2000).
- (5) Sun F. and Oka K., "Zero Power Control for Hanging Type Maglev System with Permanent Magnet and VCM", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 75, No.753, pp 1383-1388, (2009).
- (6) 催天時・岡宏一・政本慶次：「永久磁石とリニアアクチュエータを用いた磁気浮上機構－両側吸引の場合の浮上特性について」，第 17 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム，pp. 243-248，高知，日本 (2005)。
- (7) Fujiwara Y., Cui T.S., Chen L and Oka K., Manipulation by Linear Driving Permanent magnet Rotation Control of Iron Ball, The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 14, No. 1, pp.126-131, (2006)
- (8) 孫鳳，岡宏一：「アクチュエータ駆動による非接触回転駆動機構－円盤磁石の回転による駆動－」第 21 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム，長野(2009)。