非接触高温超電導浮上パルスモータの開発*

長 屋 幸 助^{*1}, 小 杉 泰 裕^{*2}
鈴 木 孝 明^{*3}, 村 上 岩 範^{*1}

High Tc Superconducting Levitation Pulse Motor without Contact

Kosuke NAGAYA, Yasuhiro KOSUGI,
Takaaki SUZUKI and Iwanori MURAKAMI

A simple but stable non-contact high Tc superconducting levitation system with a vertical shaft has been presented. The system consists of a superconductor and permanent magnets. In the system, only a lower end of the shaft is supported by a high Tc superconductor, and the other end is supported by two ordinary permanent magnets. Since the restoring force is small with respect to the radial direction the system becomes unstable when the force act in the radial direction, so it is difficult to drive the shaft by electromagnetic forces in using such as motors. Then, a driving system using electromagnets has been presented, in which the balanced forces act on two opposite sides of the disc type rotor in the axial direction. Since the system has no unbalance force from an analytical point of view, the rotor will be able to rotate without control. In the system, however, since there is the eccentricity between the center of rotation and magnetic center, so vibrations are generated. This study also presents an optimal control method of the vibrations. To validate the proposed system, and the control method, experimental tests have been carried out.

Key Words: Superconductor, High Tc, Levitation, Motor, Vibration Control, Stabilization

1. 緒 言

高温超電導浮上系は浮上方向とその直角の両方向に安定であるため、無制御で非接触浮上を実現することができる^{(1)~(8)}。この性質を利用して、リニアガイド⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、磁気軸受⁽¹²⁾⁽¹³⁾等の開発が行われている。これらの系で回転系に対しては、そのほとんどが単一の軸受のみを対象としており、軸を有する高温超電導非接触浮上モータについての研究は極端に少ない。その理由は非接触で軸を回転させる場合、磁気力等により駆動力を与えようとすると、横方向のピン止め力が小さいため、横方向に大きなふれまわりおよびピッチングが発生し、軸を有する浮上系では、無制御では安定した回転が得られないためである。この場合、軸両端に高温超電導体を置くと、全軸方向に軸が安定に浮上するが、両軸受を冷却しなければならない。このとき液体窒素で冷却を行う関係上、液体窒素のシールが困難となり、軸受を含む軸全体の液体窒素に浸した実験が軸受の研究でなされている。この欠点を解消するた

め、大型の高温超電導円盤を用いてピッチングを抑制し、誘導モータを用いた系が電力貯蔵フライホイールシステムで採用されている⁽⁹⁾。しかしこの方式では、高価な超電導材で大きな円盤を造るため、装置に要する費用、それを冷却する装置、維持経費等は極端に高価で、実際に大形研究プロジェクトで採用されているだけである。すなわち通常のモータのように小形でかつ安価な超電導浮上モータについては、著者らの調べた限り見受けられない。

本研究では、これらの欠点を補う浮上方式として比較的的小形の超電導円板一つを下端の軸受に配し、他方は2個の永久磁石を用いた超電導浮上力と永久磁石の吸引力を併用した全軸方向に安定な浮上方式を提案し、この方式に対するモータを検討する。本研究で提案する浮上方式を用いた場合、垂直下方向の浮上力はかなり大きく、水平方向のふれまわり・ピッチングに対する復元力も安定化され、無制御回転が可能である。しかしふれまわり・ピッチングの復元力はそう大きくはない。そこで本研究では、非接触無制御回転が可能とするため、軸に回転板(ロータ)を取り付け、その円周上の直下に4個の円すい形状の鉄片を取付け、その下方にある2個の対となる磁石に同時に電流を印加し、電磁石と鉄片との間の吸引力によりロータを回

* 原稿受付 1998年5月29日。

^{*1} 正員, 群馬大学工学部 (☎376-8515 桐生市天神町1-5-1)。^{*2} 群馬大学大学院。^{*3} 学生員, 群馬大学大学院。

E-mail: nagaya@me.gunma-u.ac.jp

転させると同時に軸のふれまわりをも補正する力に利用した非接触高温超電導無制御モータを提案し、それによる浮上および駆動方法の妥当性を検証した。

上記で提案した方法では無制御により非接触浮上で軸を回転できるが、浮上体の軸心と磁気中心を完全に一致させることが難しいことから、ある程度のふれまわり、ピッチングは残留する。この振動をさらに安定させるには、振動制御用のアクチュエータを使用するのが望ましいが、特別なアクチュエータを使わずに済むなら、系も簡単化でき、経済的にも望ましい。そこで本研究では、軸を回転するための駆動電磁石にフィードバック信号を追加し、振動制御のアクチュエータとして使用することを提案し、それによる制御法も検討した。

2. 軸を有する高温超電導浮上系の安定化の方法

2・1 浮上系の構成 本モータの概略を図1に示す。この図で、環状の永久磁石②(No. 1)がクライオスタット底部に取付けられ、その上に軸を有する高温超電導円板①が軸方向ピン止め力により浮上する。この場合、浮上磁石として環状磁石を用いたのは、磁気

Fig. 1 Geometry of the levitation and driving system

中心と回転中心をできるだけ一致させるためである。軸の上端には小さな円板形永久磁石②(No. 2)が取り付けられ、それと向かい合って固定された円板形永久磁石②(No. 3)がN極とS極が対向するように非接触で配置されている。すなわちこの二つの磁石間には、吸引力が作用し、軸心のずれを補正する。この吸引磁石系は軸方向に不安定であるが、その不安定力は高温超電導円板の軸方向ピン止め力で解消している。超電導円板1個を用いた場合は、超電導体のところで軸直角方向のピン止め力が存在するものの、軸を有する場合は、その他端に支持力が存在しないため、安定な浮上を行うことは困難である。それに対し、本系は軸方向のみならず軸両端で軸直角方向にも復元力を有し、全軸方向に安定した浮上ができる特徴を有する。

2・2 浮上系の特性 本浮上系の一例として、後述の実験に用いた装置の諸元を表1に示す。この諸元に対する諸特性を実験により求めたものが図2～4である。図2は垂直方向(軸方向)浮上力と下端の永久磁石と超電導体の空げきの関係を示したものである。図で、▲は軸上端に永久磁石のない場合の結果であり、大きな履歴特性をもつことがわかる。それに対し上端に吸引形の永久磁石を配して浮上させた系では、図の●で示されるように履歴特性が少なく、かつ測定された領域では、浮上力と空げきの関係がほぼ線形になっていることがわかる。図3は軸を水平方向にずらせた

Table 1 Dimensions of system

Diameter of the superconductor	50 mm
Thickness of the superconductor	14 mm
Critical electric field	0.1×10^{-3} V/m
Critical current	1.5×10^6 A/m ²
Outer diameter of magnet 1	46 mm
Inner diameter of magnet 1	13 mm
Thickness of magnet 1	15 mm
Magnetization strength of magnet 1	0.88 T
Outer diameter of magnet 2	20 mm
Inner diameter of magnet 2	10 mm
Thickness of magnet 2	4 mm
Magnetization strength of magnet 2	0.88 T
Diameter of magnet 3	25 mm
Thickness of magnet 3	10 mm
Magnetization strength of magnet 2	0.88 T
Refrigerant	Liquid nitrogen
Temperature under cooling	77 K
Initial air gap under field cooling	20 mm
Moment of inertia of the levitated body	2.1×10^{-4} kg · m ²
Mass of the levitated body	0.54 kg

Fig. 2 Load versus air gap in the vertical direction

Fig. 3 Force versus displacement in the horizontal direction

ときの水平方向復元力と軸の水平方向変位の関係を示したものである。上端に永久磁石による浮上を行わない場合も実験したところ、水平方向復元力はほとんど得られなかった。しかし本系では、図3に示すように履歴特性はあるものの程度の復元力が得られることがわかる。また軸下端を回転端とする復元モーメントと軸の倒れ角度(ピッチング角)の関係も調べてみた。その結果を図4に示す。この図を見てわかるように、実験点がばらつき、復元モーメントは非常に小さく、正しい結果が得られていないことがわかる。以上の結果を定量的にまとめると、本系は、垂直方向荷重には約10 Nまで耐えられるのに対し、水平方向には荷重では約1 N、モーメントでは約0.15 Nmまでしか耐えられないことがわかる。すなわち上端に吸引磁石系を配することで、全軸方向に安定してはいるが、垂直方向に比べて水平方向は外乱に弱いことが認められる。言い換えると、モータの駆動方式として、水平方向の力を極力避けることが望ましい。

一方本浮上系に打撃を加え、加速度ピックアップで固有振動数をFFTアナライザで計測したところ、5 Hzであった。また本系の軸を手で回し、手を離れた後を肉眼で観察してみたところ、ほとんど抵抗はなく、

Fig. 4 Restoring moment versus pitching of the shaft

滑らかにかなり長い時間にわたり回転が持続することを確認した。

3. パルスモータの構成と駆動方法

以上の実験より本研究で提案した永久磁石吸引形の高温超電導浮上系は、全軸方向に安定に浮上はできるものの、外乱に対しては、(1)水平方向の復元力が小さい、(2)軸を傾ける力(ピッチング)に対しては極端に弱い性質があり、かつ(3)無制御時の回転数は5 Hz以内でなければならない。この条件を満足させるためには、回転数は5 Hz以内でかつ、上記(1)、(2)の力を加えないような駆動方法を用いる必要がある。そこで本研究では次のような駆動システムを提案する。すなわち、駆動系としては、ロータ円板を軸に取付け、その円盤の同一円周上に4個の円すい鉄片④を取付け、円板下方に適当な空けきを取り、6個の電磁石③を円すい鉄片の取付けられている同一円周上に配置した。ここで、電磁石を下方に取付けることが系を安定化させるために重要である。すなわち本系の場合、軸方向ピン止め力は下方に極端に強いが、上方方向には弱い。そのため、もし駆動電磁石を上配置すると、回転力として与える電磁石の吸引力で鉄片と電磁石が吸着するか、もしくは回転中に上下方向に激しく振動する。また鉄片を円すい状にしたのは、鉄片磁気勾配を作り、鉄片中心を電磁石の中心まで回転させるためであり、さらに浮上永久磁石を下方に配置したのは、駆動電磁石と浮上電磁石の干渉を避けるためである。なお本系では、高温超電導浮上モータの基本概念的提案を行うものであるため、鉄片は2対(4個)、駆動電磁石も3対(6個)しか用いていない。もちろん鉄片の数と駆動電磁石を増加させることで、さらに強力な分解能の高いパルスモータを構成することができる。

浮上体を回転させるための駆動方法は、2個の対と

Fig. 5 Principle of the motor

なる駆動電磁石に同時に電流を印加し、電磁石と円すい鉄片との間の吸引力によりロータを回転させる。このときの円すい鉄片と6個の電磁石の状態を図5に示す。図5で6個の実線円が電磁石、4個の破線円が円すい鉄片であり、矢印は回転の方向と力の加わり方を示す。電磁石と円すい鉄片が図5の状態では電磁石2と5に電流を印加すると、電磁石2と5に近い円すい鉄片②と④が電磁石2と5に引き寄せられ、ロータは反時計回りに30°回転する。そして、円すい鉄片②と④が電磁石2と5の上に移動する。ここで電流を印加する電磁石を3と6にスイッチングすると、ロータはさらに反時計回りに30°回転する。ここで電流を印加する電磁石を1と4にスイッチングするまでを1ターンとすると、電磁石の駆動電流のスイッチングが時計回りに4ターンしたとき、ロータは反時計回りに360°回転する。このようなステッピング方式により浮上体を駆動する。以上が本モータの駆動の原理である。

また、図5の状態に電磁石と円すい鉄片がある場合、円すい鉄片と電磁石に作用する吸引力の半径方向成分は常に原点方向を向いているため軸心が原点からずれているときは、この吸引力によりロータが原点方向に復帰する。すなわち軸のふれまわりを無制御でも抑制できる。さらに対向するふたつの電磁石に同時に電流を印加することにより、垂直方向(z 方向)に同時に力が作用するため、ピッチングが電磁石の吸引力により発生しないようになっている。

以上で述べた駆動の原理はあくまで理想的な場合であり、実際には電磁石に印加する電流の強弱・時間の大小や外乱によって、吸引力が変わるため一回の電流の印加に対するロータの回転量は変わるものと思われる。本系の駆動の原理では駆動電磁石に電流を印加し

終わったときに円すい鉄片がちょうど駆動電磁石の真上に位置することが必須条件であり、そうでない場合は回転が止まったり逆方向に回転することもある。特に本実験では駆動電磁石への電流の印加の方法によりロータが回転しすぎるという問題が生じた。原因はおもに駆動電磁力が弱すぎるために電磁石の吸引力がロータの慣性力に負けることが原因と考えられる。そこで、本研究ではその対策として、駆動電流を印加していない他の電磁石4個にも弱い一定の電流を印加することにより、円すい鉄片との吸引力を制動力として利用する。この対策によりロータの過度の回転を減らすことが可能であり、また6個全部の電磁石に電流を印加するので、駆動電磁石2個のみに電流を印加した系より安定させることが可能である。さらに後述するように、軸の振動制御も本研究で検討するが、本系の駆動系は完全に吸引型であり、駆動電磁石を振動制御用のアクチュエータとして用いた場合、制御力は吸引方向(下方)にしか作用できない。しかし前述のように一定電流を全駆動電磁石に加え、軸をはじめから下方に吸引しておき、電流を減少することで、ある程度上方向の振動制御も可能となる。もちろん大きな電流を流すと、制動力が大きくなり逆に駆動が困難となるので、この電流の大きさには限界があり、したがって振動制御も上方向については、限界がある。

4. モータの駆動電流と振動制御

本モータはパルスモータであり、駆動電流はパルス状のものである。しかし同じパルスでも通常の長方形パルスと正弦波状のパルスでは、振動発生に違いがある。すなわち長方形パルスは高周波成分を含むため、高次振動を誘起しやすいのに対し、半波正弦波は高周波成分を含むものの長方形パルスより高次振動の誘起が小さいと考えられる。そこで本研究では、駆動電磁石へ印加する電流波形を、長方形パルスと半波正弦波の場合の2とおりについて検討する。

本実験では、図7のように円盤ロータの x 軸上と y 軸上の変位をレーザ変位計で計測し、その信号をディジタル信号演算器(DSP)に取込み、駆動電流と振動制御電流をDSP内で計算し、パワーアンプを通して、駆動電磁石のコイルに電流を印加する。このとき駆動電磁石の電気抵抗は一定であるから、電流の代わりに電圧を用いてかまわないので、以下電圧値を用いたモータの駆動方法と振動制御法を示す。

4・1 無制御時の駆動電圧 本システムは前述のように無制御でも安定に浮上させて回転できる。そこでまず振動制御を行わない場合の電磁石の駆動方法に

ついて考える。この場合の駆動電磁石への電流の印加の方法は、DSPにより6個の電磁石に印加される駆動電圧がパルスの場合、最初に印加する電圧は次式のように表される。

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{out} & V_4 &= V_{out} \\ V_2 &= V_c & V_5 &= V_c & \dots\dots\dots (1) \\ V_3 &= V_c & V_6 &= V_c \end{aligned}$$

ここに V_{out} が駆動パルスの大きさであり、 V_c は前述の回転を安定化させるための一定電圧である。

一方、電磁石に印加する電圧が半波正弦波の場合、6個の電磁石への最初の印加電圧は次式となる。

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{out} \sin \omega t & V_4 &= V_{out} \sin \omega t \\ V_2 &= V_c & V_5 &= V_c & \dots\dots\dots (2) \\ V_3 &= V_c & V_6 &= V_c \end{aligned}$$

上式で駆動電圧を電磁石1と4、2と5、3と6のようにスイッチングして印加すると、ロータは反時計方向に回転し、1と4、3と6、2と5のようにスイッチングすると、ロータは時計方向に回転する。

4・2 振動制御を含む駆動電圧 本系は無制御でも回転可能であるが、磁気中心と回転中心を完全に一致させて軸を浮上させることは困難で、どのようにしてもピッチング振動が発生する。この系で振動制御用のアクチュエータを別に用いて磁気中心と回転中心を補正すればかなり良好な制御が可能であるが、系が複雑となり、かつ高価なものとなる。そこで本研究では、駆動電磁石を振動制御用のアクチュエータとしても用いる方法を検討する。本系は吸引形のみで制御力しか与えられず、かつロータの回転中に吸引力がロータの回転角とともに大幅に変化する強非線形性を有するため、通常の線形制御は本系には不适当である。そこで本研究では、非線形系に対する適応制御法を提案する。

本系では、図1に示す円盤ロータの x 軸および y 軸上の変位が計測されるので、その信号をDSPに導き、一回微分すると、速度も得られる。それらをフィードバックすることを考える。すなわち変位(P)と速度(D)をフィードバックすると、駆動電圧はパルス駆動に対して次のように表される。

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{out} + f_1 x + g_1 y + h_1 \dot{x} + h_2 \dot{y} \\ V_2 &= V_c + f_2 x + g_2 y + h_1 \dot{x} + h_2 \dot{y} \\ V_3 &= V_c + f_3 x + g_3 y + h_1 \dot{x} + h_2 \dot{y} & \dots\dots\dots (3) \\ V_4 &= V_{out} + f_4 x + g_4 y + h_1 \dot{x} + h_2 \dot{y} \\ V_5 &= V_c + f_5 x + g_5 y + h_1 \dot{x} + h_2 \dot{y} \\ V_6 &= V_c + f_6 x + g_6 y + h_1 \dot{x} + h_2 \dot{y} \end{aligned}$$

一方駆動電圧が半波正弦波の場合は次式となる。

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{out} \sin \omega t + f_1 x + g_1 y + h_1 \dot{x} + h_2 \dot{y} \\ V_2 &= V_c + f_2 x + g_2 y + h_1 \dot{x} + h_2 \dot{y} \\ V_3 &= V_c + f_3 x + g_3 y + h_1 \dot{x} + h_2 \dot{y} \\ V_4 &= V_{out} \sin \omega t + f_4 x + g_4 y + h_1 \dot{x} + h_2 \dot{y} \\ V_5 &= V_c + f_5 x + g_5 y + h_1 \dot{x} + h_2 \dot{y} \\ V_6 &= V_c + f_6 x + g_6 y + h_1 \dot{x} + h_2 \dot{y} & \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで V_{out} と V_c はこの場合も前述と同じであり、 x 、 y は x 、 y 軸上の垂直方向(軸方向)変位、 $\dot{x}$ 、 $\dot{y}$ はそれらの速度である。また $f_1 \sim h_2$ はPD制御の各フィードバック係数である。この場合も電磁石の駆動方法は前述の場合と同様であるが、振動制御の制御電圧が重畳されているところが異なる。この制御信号はフィードバック係数の数(14個)分だけあり、これらの係数を最適に選択しなければ制御効果は薄い。すなわちロータの回転に伴うふれまわり、ピッチングを抑制するためには式(3)から(4)の各フィードバック係数を最適化する必要がある。

本系で、もし x 、 y 軸上の変位を最小とすると、軸方向(z 軸方向)のみならずピッチング(軸の傾く運動)も同時に抑制できる。そこで次のような評価関数を考える。すなわち

$$J = \int_0^T \{w_1(|x|+|y|) + w_2(|\dot{x}|+|\dot{y}|)\} dt \dots\dots (5)$$

ここに T はロータが一回転する時間である。式(5)の評価関数 J を最小とすることにより、ロータの傾き

Fig. 6 Geometry of the experimental set-up

Fig. 7 Experimental set-up

や垂直方向変位を最小とするようなコントローラが得られる。式(5)は非線形であり、またこれを最小とするためのパラメータは非常に多く、理論的に求めることは困難である。そこで本報では最急降下法を用いて評価関数 J を最小とするような最適なフィードバック係数を探索した。なお本系で速度に関するフィードバック係数を零とすることで P 制御のみの最適フィードバック係数も求められる。

5. ロータの駆動試験

5.1 実験方法 第2章で述べた諸元の実験装置を用いてロータの駆動実験を行った。その実験装置の外観を図6に、実験システムの概念図を図7に示す。実験の初期設定は、マグネットスタンドにより支持された浮上体上方の永久磁石に浮上体上端にある永久磁石を吸引力により固定する。このとき、浮上体の軸心と浮上体の下方にある磁石の磁気中心を合せ、かつ高温超電導体がクライオスタット中におさまるようにする。その状態でクライオスタットに液体窒素を注ぎ、高温超電導体を冷却する。十分冷却がなされた後、浮上体上方についている2個の永久磁石を引き剥がして浮上体を落下させる。このとき十分冷却がなされていれば超電導状態が形成され、ピン止め効果により浮上状態をつくり出すことができる。その状態で4章で述べたようにロータの下方にある6個の電磁石のうち2個の対となる電磁石に電流を印加することによりロータ円盤を回転させる。

計測には、ロータの上下方向変位を調べるためレー

Fig. 8 Driving voltages for the coil 1 under sinusoidal driving voltages (Rotating period=5.47 s, driving voltage=8.8 V)

Fig. 9 Driving voltages for the coil 1 under rectangular pulse driving voltages (Rotating period=5.47 s, driving voltage=8.8 V)

ザ変位計を用いた。レーザ変位計の測定レンジは ± 10 mm, 分解能は $15 \mu\text{m}$ で、応答周波数は200 Hzである。また用いたDSPは8チャンネル、32ビットのフローティングタイプである。

ロータの水平面上に x 軸とそれと直角に y 軸を固定し、浮上体を回転させたときのロータ中心から35 mmにおける x 軸と y 軸上の点の上下方向変位を測定した。レーザ変位計の取り付け方法はマグネットスタンドを用い、ロータの上方から測定した。

おもな計測項目は、(1)電磁石への電流の印加方法をDSPにより変えたときの、浮上体の回転数の変化と、(2)無制御時、制御時のロータの振動変位の変化である。

5.2 実験結果 図8, 9は電磁石に印加するパルス電圧の一例を示したものであり、図8は半波正弦駆

Fig. 10 Time response of the displacement of disc Under rectangular pulse driving voltages (Rotating period=5.47 s, driving voltages=8.8 V)

Fig. 12 Time response of the displacement of disc under rectangular pulse driving voltages with P control (Rotating period=5.47 s, driving voltages=8.8 V)

Fig. 11 Time response of the displacement of disc Under sinusoidal driving voltages (Rotating period=5.47 s, driving voltages=8.8 V)

Fig. 13 Time response of the displacement of disc under rectangular pulse driving voltages with PD control (Rotating period=5.47 s, driving voltages=8.8 V)

動の、図9は長方形パルスの駆動電圧の時間変化を示す。このような駆動電圧によるロータ円盤の上下方向変位を図10および図11に示す。本例は振動制御の無い無制御の結果であるが、駆動パルスの周期とロータ円盤の回転周期が等しくなっており、ロータは無制御で正しく回転していることがわかる。これは前述のように本系が全軸方向に無制御で安定な系を構成しているためである。しかし振動がかなり発生しており、特に長方形パルス駆動の場合は(図10)、振動波形の全体に高次の振動が重畳されているのに対し、半波正弦駆動の場合は(図11)高次成分の影響が長方形パルスに比べ少ないため、全体的に振動は抑制されているものの、最大値はかえって大きくなっていることがわかる。最大値が長方形パルスに比べ正弦パルスで大きく

なることは、一般的には考えづらいが、これは正弦パルスの場合、おなじ駆動電圧で同じパルス幅としたときは、回転エネルギーが正弦パルスのほうが小さいため、ロータの動きが長方形パルスのときに比べ間欠的となるためと考えられる。すなわち正弦パルスとしたほうがよい結果が得られるとは必ずしも限らないことがわかる。

一方適応振動制御を行った結果を図12, 13に示す。ここに図12は変位のための適応制御(適応P制御)を行った結果であり、図13は変位と速度の両方の適応制御(適応PD制御)を行った結果である。図よりP制御、PD制御とも無制御の場合に比べ、振動振幅が減少していることがわかる。しかし本系の場合の振動制御力は吸引力のみであり、また振動制御用のアクチュ

エータと駆動電磁石を供用しているため、振動制御の効果はそれほど大きくはない。特に振動制御力を大とすると、振動制御の効果は増大するが、振動制御の吸引により、ロータ円盤の回転にブレーキがかけられるため、回転の滑らかさが失われる。このような理由から本系の振動制御には限界があるものの、特別なアクチュエータを用いずにある程度の振動制御に成功しており、簡便な振動制御法として用いることができると考えられる。

以上の本報で開発したモータは、非接触モータとしてさまざまな応用が考えられる。すぐに使えるものとしては、特殊環境(高真空・無塵)で使用するモータからダイレクトドライブする回転テーブルなどがあげられる。また、本報では上側の吸引磁石に中実磁石を用いているが、上側の磁石を両方環状磁石として、その中を軸を貫通させればトルクを取出すことができる。

6. 結 言

本研究では非接触高温超電導浮上モータを提案し、それによる浮上および駆動方法の妥当性を検証したものである。その内容を要約すると、

(1) 浮上体の上方に永久磁石2個を配置し、下方に超電導体をおくことにより全軸方向に安定な浮上を得られることを確認した。

(2) 軸に取付けられたロータに円すい鉄片を取付け、その下方の2対の電磁石に電流を印加したときに生じる吸引力により、軸を回転させると同時に軸のふれまわりをも補正する力に利用した高温超電導非接触浮上パルスモータを提案し、それによる浮上および駆動方法の妥当性を確認した。

(3) 系を簡単化するため特別な振動制御用のアクチュエータを使用せず駆動電磁石のみにより制御を行う方法を検討した。すなわち軸を回転するための駆動電磁石にフィードバック信号を追加し、振動制御のアクチュエータとして使用することを提案した。また浮上体の傾きや上下方向の変位を最小とするような適応フィードバック制御法を提案し、かつ実験を行い本システムおよび制御法の妥当性を検討した。その結果、本方法により振動も制御できることがわかった。

文 献

- (1) Senba, A., Kitahara, H., Ohsaki, H. and Masada, E.,

- Characteristics of an electromagnetic levitation system using a bulk superconductor, *IEEE Trans. Magn.*, **32**-5, Pt. 2(1996), 5049-5051.
- (2) Kim, H. J., Watada, M., Torii, S. and Ebihara, D., The characteristics on mixed- μ magnetic levitation system using the superconductors, *IEEE Trans. Magn.*, **33**-5, Pt. 2(1997), 3457-3459.
- (3) Nagaya, K., Analysis of a high T_c superconducting levitation system with vibration isolation control, *IEEE Trans. Magn.*, **32**-2(1996), 445-452.
- (4) Nagaya, K. and Shuto, S., Approximate boundary conditions in a circular conductor and their application to nonlinear vibration analyses of high- T_c superconducting levitation system, *IEEE Trans. Magn.*, **32**-3, Pt. 2(1996), 1888-1896.
- (5) Murakami, Y. and Ise, T., Power electronics and applied superconductivity, *Systems, Control and Information*, **41**-7(1997), 258-266.
- (6) Nagaya, K., Tsukagoshi, M., Kosugi, Y. and Murakami, M., Vibration control for a high- T_c superconducting nonlinear levitation system, *J. Sound Vib.*, **208**-2(1998), 299-311.
- (7) Tixador, P., Hiebel, P., Brunet, Y., Chaud, X. and Gautier-Picard, P., Hybrid superconducting magnetic suspensions, *IEEE Trans. Magn.*, **32**-4, Pt. 1(1996), 2578-2581.
- (8) Nanri, T., Katogiri, K. and Takahata, R., Analysis on levitation force between oxide superconductor and permanent magnet, *J. Jap. Society for Simulation Technology*, **13**-3(1995), 264-271.
- (9) Komori, M., Ide, T., Fukata, S. and Matsushita, T., Vibration suppression of a disk-shaped superconductor with PD control, *Cryogenics*, **37**-4(1997), 195-199.
- (10) Sato, S., Sato, K., Fuzihira, K., Hashimoto, M. and Miyamoto, K., Development of noncontact transport system along vertical guideway using QMG bulk materials, *Advances in Superconductivity VII. Proceedings of the 7th International Symposium on Superconductivity (ISS'94)*, p. 2 Vol. (xxii+xvii+1328), (1996), 1251-1254 Vol. 2.
- (11) Ohsaki, P., Takabatake, M. and Masada, E., Magnetic gradient levitation using high- T_c bulk superconductors, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **7**-2, Pt. 1(1997), 908-911.
- (12) Iizuka, T., Maeda, Y., Aihara, K. and Fujita, H., A micro X-Y- θ conveyor by superconducting magnetic levitation, *ETFA '94. 1994 IEEE Symp. Emerging Technologies Factory Autom. (SEIKEN Symp.)*, (1995), 477, 462-467, Novel Disciplines for the Next Century Proceedings (Cat. No. 94 TH 8000).
- (13) Lamb, M., Ki Bui Ma, Cooley, R., Mackey, D., Ruling Meng, Ching Wu Chu, Wei Kan Chu, Chen, P. C. and Wilson, T., High temperature superconducting bearings for lunar telescope mounts, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **5**-2, Pt. 1(1995), 638-642.