

磁気軸受とその制御系

Magnetic Bearing and its Control System

樋口俊郎*

Toshiro HIGUCHI

磁気軸受は媒体を必要としない完全な非接触支持を行える軸受であり、理想的な軸受となる可能性を有している。この磁気軸受に関する現状の紹介を行い、磁気軸受の基本的な構造と制御系について5軸制御形磁気軸受を中心として解説する。あわせて、回転体のジャイロ効果と不釣り合いの影響を考慮した磁気軸受の制御系についての紹介を行う。

1. ま え が き

空気軸受が圧力媒体を必要とする非接触軸受であるのに対して磁気軸受は媒体を必要としない完全非接触支持を行える軸受であり、理想的な軸受であるといえる。磁石の吸引力あるいは反発力を利用して物体を支持しようとする考えは古くからあり、すでに150年前に磁気軸受に関する特許がフランスにおいてみられるそうである¹⁾。

磁気軸受についての研究開発は、真空中での使用が要求される人工衛星の姿勢制御用フライホイールやジャイロ等の宇宙航空機器用の軸受やウラン濃縮用遠心分離機の軸受等を目的として進められてきた。しかし、磁気軸受に関するこれらの研究成果は国家機密に属している理由からか、一般への公表はあまりされていないようである。

これに対して、一般産業における回転機械への磁気軸受の利用は遅れていたといえる。しかし、近年、磁気軸受を利用したターボ分子真空ポンプが商品化され²⁾、また磁気軸受を採用した工作機械が見本市で公開される等、磁気軸受の有効性と将来性への期待が高まってきており、民生分野における本格的な実用化の時代に入ったといえる。磁気軸受の研究は各国で行われており、わが国でも多くなされてきている。原理、特性等についての解説をしたものとして文献3)~5)などがある。

一般産業用の磁気軸受としてはフランスのSMM社(Société de Mécanique Magnétique)の開発した形式の5軸制御形磁気軸受が現在のところ最も多くの実績を有しており、磁気軸受の代表的形式の一つになると考えられる。本解説では、主として5軸制御形磁気軸受の説明を行うことによって、磁気軸受の現状と制御系の構成

について述べ、あわせて著者らが磁気軸受に関して行っている研究の概要を紹介したい。

なお、広義の磁気軸受には非回転体の磁気浮上や機械的な軸受を併用したものも含まれるが、ここでは回転体を磁力のみによって非接触支持するものに磁気軸受の範囲を限定することにする。

2. 磁気軸受の種類

空間における剛体は並進運動に関する3自由度と回転運動の3自由度の合わせて6自由度を有している。磁気軸受は回転体の回転軸周りの運動を除く5自由度の運動を磁気力によって制御し、非接触で支持しようとするものである。永久磁石あるいは常電導磁石を用いて1自由度あるいは複数の自由度を支持する基本的な要素として、図1~図3に示す3形式が考えられる。

形式Iは図1に示すように同極性の磁極間の反発作用を利用するものである。この反発力は磁極間の距離が大きくなると減少することから、起磁力を制御しなくても反発力の作用する方向に関しては復元力が得られ、この方向に関してだけならばたとえ重力に対して安定した釣り合い位置を保つ支持が可能となる。

形式IIは図2のように異極性の磁極間あるいは磁石と強磁性体との間の吸引力を利用するものである。この形式では、吸引力が磁極間の距離が小さくなるとますます大きくなることから分かるように、無制御で非接触吸引支持を行うことは不可能である。したがって支持対象物と電磁石との距離を検出し吸引力を制御することが必要となる。

形式IIIは形式IIと同様に吸引力を利用するものであるが、図3に示すように磁極面と平行な方向に働く力が釣り合い位置(磁気回路の最も磁気抵抗の小さな位置)へ

* 東京大学生産技術研究所 第2部

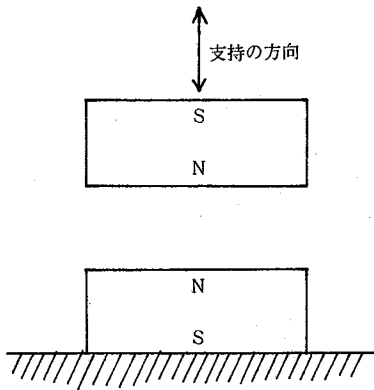


図1 形式I：同極性磁極間の反発力の利用

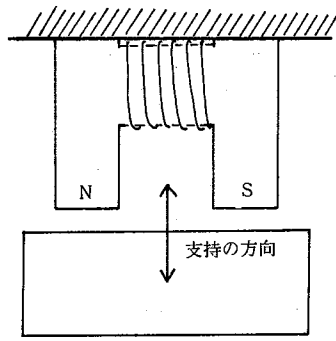


図2 形式II：吸引力(主成分)の利用

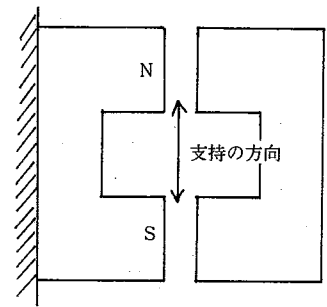


図3 形式III：吸引力(接線方向成分)の利用

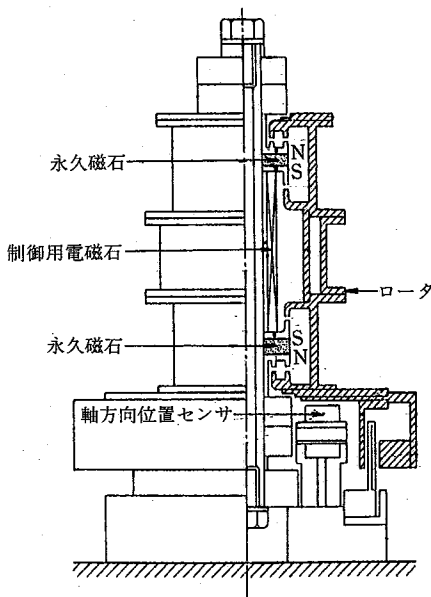


図4 1軸制御形磁気軸受の例⁶⁾

の復元力となることから、この方向に関しては磁力の制御を必要としない。この形式IIIの復元力はステップモータにおける静止位置保持トルクの発生機構と同様のものである。

磁気軸受はこれらの形式を組み合わせることによって構成でき、5自由度の支持にどの形式の支持要素を適用するかによって種々の方式のものが考えられる。しかし、無条件で磁気軸受を構成できるわけではない。たとえば形式Iと形式IIIでは永久磁石を起磁力として用いることが可能であるから、形式Iと形式IIIのみを用いて制御機構を必要としない磁気軸受が実現できそうであるが、すべての自由度を無制御で完全非接触の磁気軸受を構成することが不可能であることが証明されている。つまり、少なくとも1自由度は何らかの形で回転体の変位あるい

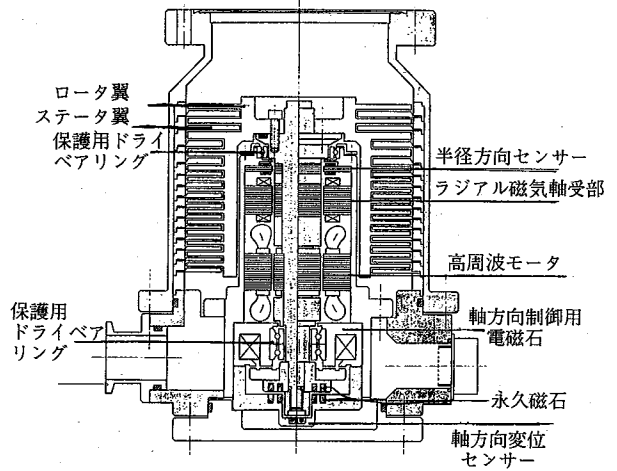


図5 3軸制御形磁気軸受の例⁷⁾

は傾きを一定に保つ制御系を構成しなくてはならない。

スラスト方向(回転軸方向)の1自由度だけを電磁石で能動的に制御する形式のものの一例で人工衛星の姿勢制御用フライホール用に試作されたものを図4に示す⁶⁾。永久磁石を使用することによって、制御用電磁石の数を減じ制御回路を簡素化でき、またエネルギー消費を小さくできる利点があるが、反面、負荷容量と剛性が小さくなる欠点がある。図5はターボ分子真空ポンプ用に開発されたものであり、スラスト方向の1自由度とラジアル方向(半径方向)の2自由度の計3自由度を形式IIで制御し、残るラジアル方向の2自由度を形式IIIで支持する構造となっている⁷⁾。

支持要素の形式IIは他の形式に比べて高い剛性を得ることができることから、剛性と支持精度が要求される場合には、回転を除く5自由度のすべてを形式IIの支持要素によって制御する形式が適しているといえる。この形式は一般に5軸制御形磁気軸受と呼ばれており、工作機械のスピンダルや各種精密機械における利用が進んでいる。5軸制御形磁気軸受は磁気軸受の基本形式の一

つであり、以下の章では主としてこの形式の磁気軸受について述べることにする。

一般に磁気吸引力の制御には直流電磁石を用いるのが普通であるが、交流電磁石を用いる形式のもの（交流形磁気軸受）がある⁹⁾。これは形式IIの支持要素の電磁石に交流電流を流し、電磁石のコイルのインダクタンスが吸引対象物との距離によって変化することを利用しLCR共振回路を構成して自己平衡性を得ているものである。位置検出器（ギャップセンサー）を必要としない反面、動的安定性を得るのが困難であるという欠点がある。

3. 5軸制御形磁気軸受の構造と制御系

3.1 磁気軸受の構造と基本モデル

回転軸周りの回転運動を除く5自由度をすべて能動的に制御する磁気軸受である5軸制御形磁気軸受の基本的なモデルを図6に示す。回転体の半径方向の変位と回転軸の傾きとを制御する8個（4対）の電磁石と回転体の軸方向の変位を制御する2個（1対）の電磁石によって回転体が支持される。ある一つの方向の作用力を電磁力の吸引力によって制御するには、図6の①と③、②と④、……というように同軸上の電磁石の吸引力の差を用いて

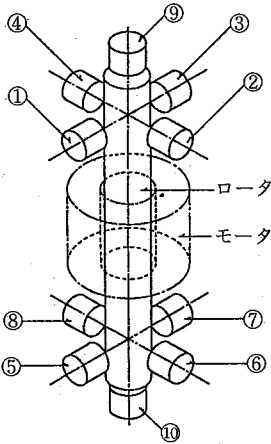


図6 5軸制御形磁気軸受のモデル

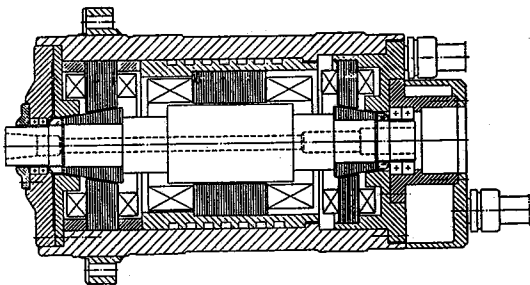


図7 テーパー面を有する磁気軸受のスピンドルに用いられた例⁹⁾

行われる。

5自由度を磁気吸引力によって能動的に制御する磁気軸受としては図7に示すように、回転体の端部を円すい面とし、片側4個、合計8個の電磁石で構成する方法等⁹⁾が考えられるが、以下では最も一般的である図6の構造のものについて説明する。

図8に5軸制御形磁気軸受に関する種々の研究を行うことを目的として著者の研究室において試作した実験装置の断面図を示し、図9に写真を示す。この実験装置の特徴の一つは図に示すように、ラジアル磁気軸受部、スラスト磁気軸受部、高周波モータ部を分離しておのおのユニット化し、これらを組み合わせることによって種々の形態の実験ができるように工夫している点である。

実際に製品化されている磁気軸受も基本的には同様の要素（ラジアル磁気軸受部2個、スラスト磁気軸受部1個、モータ部1個）から構成されており、工作機械のスピンドルの大型のものやターボ分子真空ポンプ用にSMM社が開発した磁気軸受は図8に示したものと同一構成になっている。また、NTN東洋ベアリング社が製作した磁気軸受利用高速切削スピンドルは図10に示す構造になっている¹⁰⁾。スラスト磁気軸受部の位置が図8とは異なり、2個のラジアル磁気軸受部の間に配置されているが、いずれも図6の基本モデルで表現できる。

ラジアル磁気軸受部を図11に示す。図中の破線が示すように磁路が形成されるように①～④の電磁石で構成さ

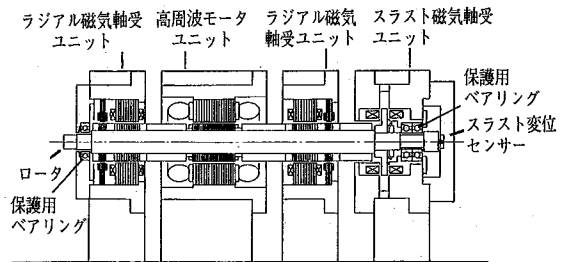


図8 5軸制御形磁気軸受の汎用実験装置

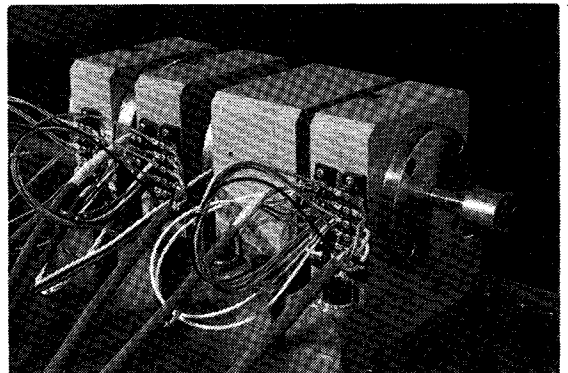


図9 5軸制御形磁気軸受実験装置

れている。この構造から分かるようにロータ側では回転に伴い鎖交磁束の変化を生じる。そこで、ラジアル磁気軸受部に対面するロータ部には、渦電流による損失を低減するために、0.1 mm 程度の厚さの珪素鋼板を積層している。

一方、スラスト磁気軸受部では、吸引力を受けるロータの円板部において、回転に伴う鎖交磁束の変化は無いとみなして良く、一枚の板から製作されるのが普通である。

3.2 回転体の運動方程式

磁気軸受によって支持される回転体が重心に関して対称な軸対称剛体であるとし、回転体の運動方程式を図 6 の基本モデルについて導くと以下のようになる¹¹⁾。

平衡状態における回転体の重心位置を原点として、回転軸が z 軸と一致するように空間に固定された座標系 $0-xyz$ を図 12 のように定める。回転体に働く各電磁石の吸引力を $F_k (k=1, \dots, 10)$ で表し、 F_1, \dots, F_8 はそれぞれ回転体の重心から回転軸に沿って距離 l だけ離れた点に働き、 F_1, F_3, F_5, F_7 は x 軸方向に、 F_2, F_4, F_6, F_8 は y 軸方向に働くものとする。また簡単化のため重力の影響は考えないものとする。

剛体の運動は重心の運動と重心周りの回転運動に分けて取り扱うことができる。回転体の重心の位置を (x_G, y_G, z_G) と表し、回転軸の傾きを θ_x, θ_y で表す。また回転体の z 軸周りの角速度も ω_z とする。平衡状態からの変動

が微小であるとし、2 次以上の項を無視すると、回転体の運動方程式は次のようになる。

$$m\ddot{x}_G = F_1 - F_3 + F_5 - F_7 \tag{1}$$

$$m\ddot{y}_G = F_2 - F_4 + F_6 - F_8 \tag{2}$$

$$m\ddot{z}_G = F_9 - F_{10} \tag{3}$$

$$I_r \ddot{\theta}_y - I_a \omega_z \dot{\theta}_x = l(F_1 - F_3 - F_5 + F_7) \tag{4}$$

$$I_r \ddot{\theta}_x + I_a \omega_z \dot{\theta}_y = l(-F_2 + F_4 + F_6 - F_8) \tag{5}$$

$$I_a \dot{\omega}_z = T_m \tag{6}$$

ここで、 m : 回転体の質量、 I_a : 回転体の回転軸周りの慣性モーメント、 I_r : 回転体の重心を通り回転軸に垂直な軸の周りの慣性モーメント、 T_m : 回転軸の駆動トルク。

3.3 電磁石の吸引力

電磁石と回転体との間の空隙の大きさを d 、励磁電流を i とすると、吸引力 F は一般に $F = Ki^{\rho}/d^{\sigma} (K > 0, \sigma, \rho \geq 1)$ で表せ、 K, ρ, σ は電磁石の特性から定まる値である。平衡状態における電流 i_0 、間隙の大きさ d_0 に比べて、変動量 $\Delta i, \Delta d$ が微小であるとする、電磁石の吸引力は

$$F = F_0 + K_i \Delta i - K_d \Delta d \tag{7}$$

と線形化できる。ここで $F_0 = Ki_0^{\rho}/d_0^{\sigma}$ 、 $K_i = \rho Ki_0^{\rho-1}/d_0^{\sigma}$ 、 $K_d = \sigma Ki_0^{\rho}/d_0^{\sigma+1}$ である。

K_i は電流の変化分と吸引力の変化分との間の比例定数であり、この K_i は $i_0^{\rho-1}$ に比例することが分かる。したがって、励磁電流には線形化のために、ある程度の大

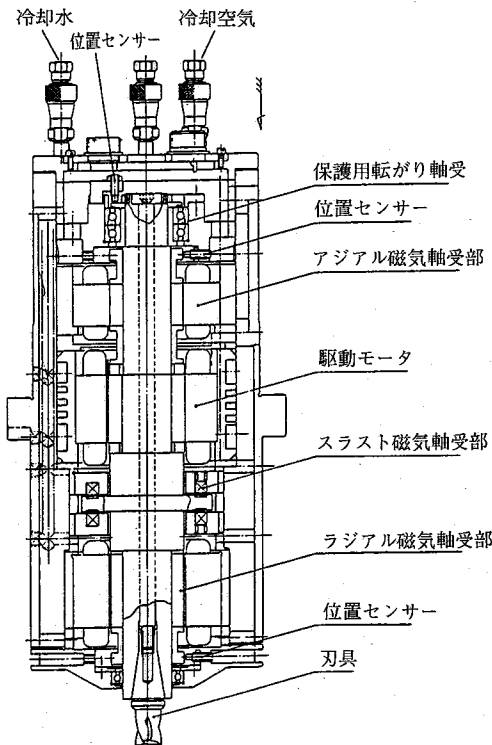


図 10 磁気軸受を利用した高速切削用スピンドル

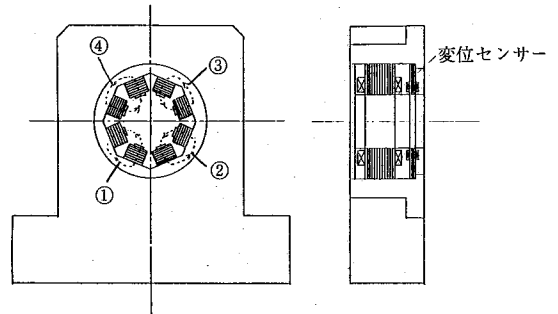


図 11 ラジアル磁気軸受部

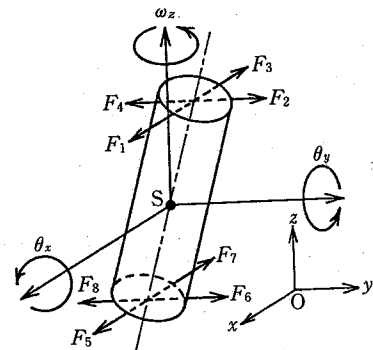


図 12 座標系の定義

きさの一定電流がバイアス分として必要であるといえる。

各電磁石の特性が半径方向の 8 個について等しく、また軸方向の 2 個においても等しいとし、各電磁石の励磁電流の変化分 Δi を $i_k (k=1\sim 10)$ とすると、式(1)～(5)は次のようになる。

$$m\ddot{x}_G = 4K_d x_G + K_i u_x \quad (8)$$

$$m\ddot{y}_G = 4K_d y_G + K_i u_y \quad (9)$$

$$m\ddot{z}_G = 2K_d' z_G + K_i' u_z \quad (10)$$

$$I_r \ddot{\theta}_y - I_a \omega_z \dot{\theta}_x = 4K_d l^2 \theta_y + K_i l u_{01} \quad (11)$$

$$I_r \ddot{\theta}_x + I_a \omega_z \dot{\theta}_y = 4K_d l^2 \theta_x + K_i l u_{02} \quad (12)$$

ここで、 $u_x = i_1 - i_3 + i_5 - i_7$, $u_y = i_2 - i_4 + i_6 - i_8$, $u_z = i_9 - i_{10}$, $u_{01} = i_1 - i_3 - i_5 + i_7$, $u_{02} = -i_2 + i_4 + i_6 - i_8$

3.4 磁気軸受の制御系

電磁石に一定の電流を流した場合、たとえば式(8)は、 $m\ddot{x}_G = 4K_d x_G$ となり、その平衡点は不安定となることがわかる。したがって安定に平衡点に保つようにするためには、 x_G を検出して $u_x = -Ax_G$ という、フィードバック系を構成することが不可欠である。つまり、電磁石の電流の制御を行わない場合、引っ張り合い等の電磁石の吸引力の組み合わせで得る平衡点は不安定となり、回転体を安定に平衡点に保つためには、変位を検出して、これに基づいて電磁石の電流を制御するフィードバックループが不可欠である。このとき $m\ddot{x}_G = -(AK_i - 4K_d)x_G$ となることから、 $AK_i > 4K_d$ の条件を満たさなければならない。 $AK_i - 4K_d$ は軸受の静剛性を表しており、磁気軸受の剛性はフィードバックのゲインおよび励磁電流のバイアス分の大きさによって設定できることがわかる。

回転体の重心の位置と傾きを直接に検出することは、Z 軸方向の変位を除いて一般には困難であるが、少なくとも 4 個の独立した検出器 (ギャップセンサー) を用い適当な位置での回転体との間隙を検出した信号を線形演算処理を行うことによって $x_G, y_G, \theta_x, \theta_y$ を検出することができる。

回転体の変位と傾きを求めるためのギャップセンサーは非接触センサーである必要があり、図 8 の例では差動変圧器と同様の原理によるものを使用しており、図 10 の例では渦電流式非接触磁気センサーを用いている。

先の x_G に関しての説明と同様に、 $y_G, z_G, \theta_y, \theta_x$ についてもおのおの独立した制御ループを構成するのが普通である。位置検出信号をフィードバックすることによって静的な安定が得られるが、平衡点からの運動に対して適当な減衰を得るための補償を必要とする。減衰を得るためには、速度の情報を得てこれを利用することが直接的であるが、実際の磁気軸受では間隙の変化の速度を非接触で直接検出することが困難であることから、位相進み回路による直列補償を行うことが一般的である。

また、変位の偏差を積分して、これを減ずるようにフィードバックする積分補償を行うことによって定常偏差

を原理的に零にすることができる。これによると、低周波の外乱に対して強い制御系が構成でき、支持位置の精度の向上に効果がある。

4. 磁気軸受の特徴と性能

磁気軸受の特性の現状を SMM 社が開発した 5 軸制御形磁気軸受のデータ¹⁾に基づいて簡単に述べる。

(a) 回転数の上限：回転速度の上限はロータに使用されている磁性材料の遠心力に対する破壊強度によって決まる。回転数の上限は軸径によって異なるが、軸径における周速で 200 m/秒に相当する回転数までの使用が可能であるとされている (実際には後に述べるように種々の問題を伴い、この理想的な上限に達することは容易ではない)。

(b) 負荷能力：支持可能な荷重はロータ径や磁性材料によって異なるが、ラジアル軸受部で単位面積あたりの負荷能力は 4 kgf/cm²～8 kgf/cm²、スラスト軸受部で 6 kgf/cm²～12 kgf/cm² を得ることができる。

(c) 消費エネルギー：磁気軸受で消費されるエネルギーは電磁石の電流によるジュール熱と、磁性材料のヒステリシス損失とロータ側の渦電流損失である。これらは磁気軸受の材料や制御回路を工夫することによって低減でき、高速回転では従来の転がり軸受の摩擦損失の 1/10 程度の損失にすることができる。たとえば、ターボ分子真空ポンプでは、外部電源が停電した場合、バッテリーによって 10～30 分間の運転が可能である。

(d) 軸受剛性：能動形磁気軸受の剛性はギャップセンサーと電磁石で構成される制御系によってその特性を調整することができる。周期的な外乱に対する動的剛性として、たとえばロータ重量 10 kg、回転数 60,000 rpm のスピンドルでは 2.5 kgf/ μ m が得られている。また、先に述べたように制御系に積分要素を付加することによって定常偏差を大幅に減ずることができ、低周波の外乱に対して強い制御系を構成できる。先のスピンドルでは 125 kgf/ μ m の静的剛性を得ている。

(e) 電磁石とロータのギャップ：磁気軸受のエアギャップは軸径によって異なるが、0.3～0.6 mm 程度であり、場合によっては 1 mm 以上とすることも可能である。これは、空気軸受のギャップが数 μ m であるのに対してけたちがいいに大きい。したがって磁気軸受の機構部品の製作は空気軸受に比べて容易である。また、ギャップが大きいことにより、図 8 や図 10 で示したように保護用のタッチダウンベアリング (ロータとこのベアリングとのギャップを磁気軸受のギャップの半分程度にする) を併用することができる。非常時におけるロータの電磁石への接触事故を防止することができる。この保護用ベアリングを使用できることは、たとえば磁気軸受を工作機械のスピンドルに利用する場合の大きな利点となる。

(f) 支持精度：ロータの位置の支持精度として 5 μ m を

得ることは容易であり、特別なものとして $0.05 \mu\text{m}$ のものも製作されているといわれている。支持精度を支配するものはギャップセンサーの検出能力である。磁気軸受は空気軸受に比べて製作における機械加工の精度の要求が厳しくないが、センサー部だけは別であり、高精度の加工とターゲット部の材料の均一性等に対する配慮が必要である。

5. 磁気軸受の課題と対策

磁気軸受の利用が拡大するためには解決すべき問題が多数ある。ここでは特に工作機械への利用を考えた場合についていくつかの課題を挙げる。

(a) 価格：磁気軸受の性能の良さが認められてきているが、現在、その利用の拡大の最大の障害となっているのが価格が高い点である。たとえば工作機械用のスピンドルが 1000 万円程度である。しかし、図 8 や図 10 からわかるように磁気軸受本体の構造は通常のマータの構造と大差ないといえる。したがって、ある程度の数量がまれば価格はかなり低下するものと予想できる。磁気軸受を用いたターボ分子真空ポンプが急速に利用されはじめており、制御回路等の一部が工作機械のスピンドル用磁気軸受と共通化できることから、制御回路を含めたシステムの価格が低下することが期待できる。

(b) 支持精度： $1\mu\text{m}$ 程度の支持精度が要求される場合、先に述べたようにギャップセンサーとして低ドリフト高感度のものを用いることが不可欠であるが、このほかにロータや軸受部本体の変形をおさえる必要がある。特に温度上昇による熱変形に対する対策は重要である。発熱源としては磁気軸受部のほかに高周波モータ部があり、磁気軸受部よりも高周波モータ部の発熱のほうが大きい場合が多い。これらのステータ部は冷却水を流すことによって冷却できるが、機械的接触が全く無く支持されているロータの冷却は困難であり、重要な課題になると考えられる。

(c) ロータの振動：ロータ軸の曲げモードに対する振動数に対応する回転数においてロータの振動が大きくなり、磁気軸受の機能が得られなくなる現象がある。これに対しては制御系を工夫することによってロータ軸の固有振動数以上の回転数での利用が可能となっている。しかし、磁気軸受を利用したスピンドルによる高速切削実験では、ロータ軸の固有振動数と異なる回転数においても、切削負荷を大きくするとロータの固有振動数の周波数成分の振動が顕著に現れることが観察されており、これに対して、ロータ軸の固有振動数帯域に谷をもつ notch フィルターを制御系に組み入れるとともに、この成分に対して個別に位相進み回路を介してフィードバック信号に加えることによって振動に対する減衰を得ることに成功している¹²⁾。

6. 回転運動を考慮した磁気軸受の制御

従来の磁気軸受の制御系は回転していない物体を支持する磁気吸引浮上のもとの基本的には同じ構成をしている。しかし、磁気軸受においては支持する物体が高速回転するのが通例であり、単なる磁気浮上では見られない回転体に特有の現象を伴っている。したがって、支持対象が回転体であることを考慮した制御系を構成すべきであるといえる。支持対象が回転体であることによって、次の二つの重要な問題を生じる。一つは高速回転体の回転軸の傾きの 2 自由度の回転運動間に存在するジャイロ効果であり、もう一つは回転体に不釣り合いがある場合に生じる周期力の存在である。

6.1 ジャイロ効果を考慮した制御系¹³⁾

従来の磁気軸受の制御系ではジャイロ効果による相互干渉を考慮せずに各自由度を独立に制御する方式がとられているのがほとんどである。しかし、式(11)に θ_x の項があり、また式(12)に $\dot{\theta}_y$ の項があることから分かるように、 θ_y と θ_x の運動(回転軸の傾きに関する 2 自由度)にはジャイロ効果による相互干渉が存在する。式(11)と式(12)を処理して適当な無次元化変数を用いて表すと、そのブロック線図は図 13 に示す構造となる。つまり、 $1/(s^2 - 1)$ の伝達特性を有する二つの系が互いに異なる符号の伝達要素を介して結合している構造である。

この制御対象に対して最適レギュレータ問題を解くと、図 14 に示すような状態フィードバック補償の制御機構となる。この状態フィードバック補償機

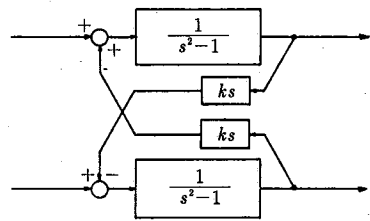


図 13 ジャイロ効果による相互干渉のある系のブロック線図

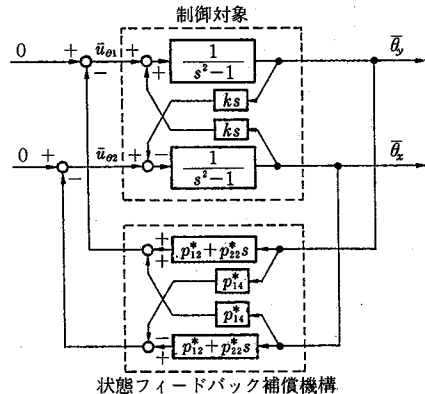


図 14 最適レギュレータ系のブロック線図

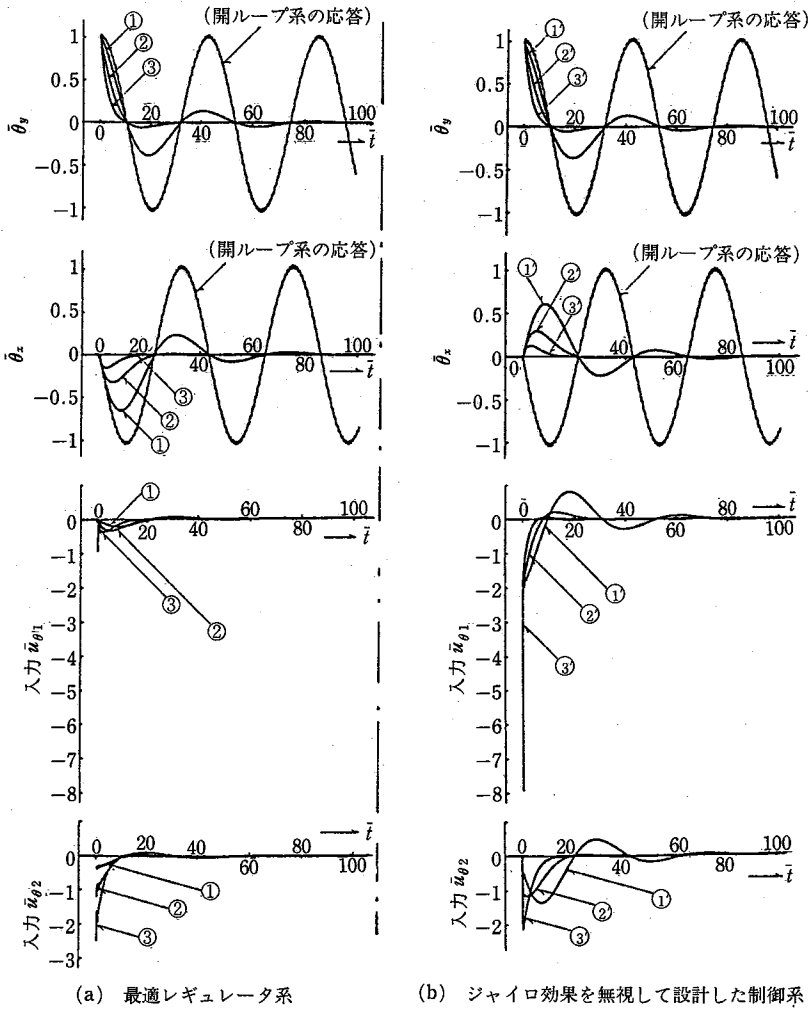


図 15 制御系の応答

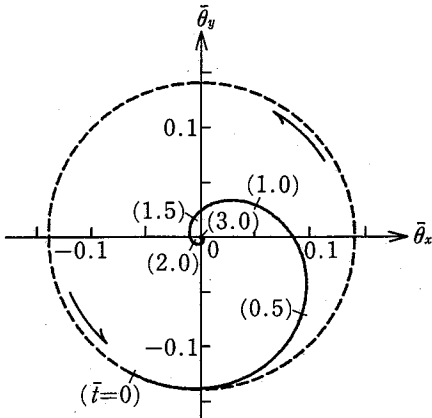


図 16 不釣り合い補償の効果 (シミュレーション)

構に注目すると、制御対象と類似の構造になっており、 $p_1^* \bar{\theta}_x, -p_1^* \bar{\theta}_y$ という交差フィードバックが存在するこ

とがわかる。

ジャイロ効果を無視して、 $\bar{\theta}_y$ の制御と $\bar{\theta}_x$ の制御を独立に扱う通常の方法について各 1 自由度系の最適レギュレータ問題を解いた場合と、ジャイロ効果を考慮して設計した制御系の特性を比較したシミュレーション結果の一例を図 15 に示す。ある初期状態から平衡状態に戻る時間を両者でほぼ等しくなるようにした場合の例であるが、ジャイロ効果を無視して設計した制御系では、ジャイロ効果を考慮して設計した制御系に比べて、より大きな入力が必要としていることがわかる。

6.2 不釣り合い補償機構

すべり軸受や転がり転受を用いた回転機械の回転軸の機械的運動特性は一度そのシステムを構成すれば決定してしまうのに対して、磁気軸受を用いたシステムではその特性を状態に応じて能動的に変化させることができる。磁気軸受では支持力である電磁石の吸引力をかなり

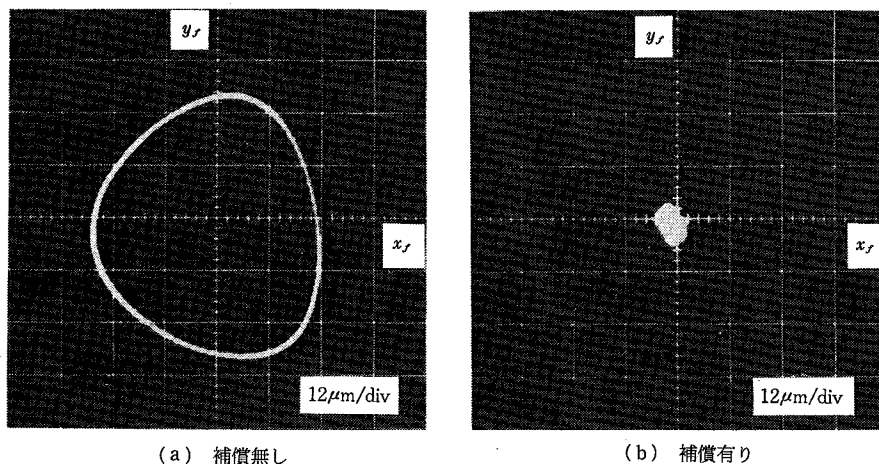


図 17 不釣り合い補償の効果 (実験例)

の高周波数域まで制御が行えており、高速回転体の運動を積極的に制御することができる能力を有している。ここでは著者らが開発した不釣り合い補償機構をその一例として紹介する。

回転体に不釣り合いが存在すると回転数と同じ周波数の周期強制力が発生し、回転体の振れ回り運動の原因となる。したがって回転体の釣り合わせを行うことが重要な作業となるが、いかに精密に釣り合わせを行っても若干の不釣り合いは残る。磁気軸受においては支持力の制御を行えるので、何らかの方法によって不釣り合いを検出できるならば、この不釣り合いによる周期強制力を打ち消すような力を磁気軸受によって発生させることが可能となると考えられる。回転体の不釣り合いの大きさと位置を直接検出することは困難であるが、磁気軸受を用いた回転システムでは現代制御理論から導かれる推定機構であるオブザーバを構成することによってこれらを推定することができる。この制御系の構成の詳細については文献 14) を参考していただきたい。

不釣り合いの影響の補償を行った制御系のシミュレーションの例を図 16 に示す。最適レギュレータを構成しただけで不釣り合い補償を行わないときには図 16 の破線が示すように回転軸が定常時に振れ回る。この状態で、 $t=0$ の時点から不釣り合い補償を開始したときの回転軸の挙動を図の実線が示している。また図 17 は図 8 の装置による実験結果の一例であり、図 17(a) は不釣り合いを付加したロータが振れ回りを生じていることを示している。図 17(b) は不釣り合い補償の制御系によって、この不釣り合いの影響が打ち消され、振れ回りがほとんど無くなっていることを示している。

7. あとがき

磁気軸受は非接触軸受であるばかりでなく、制御を工夫することによって他の軸受では得ることのできない性

能を得られる可能性を有している。磁気軸受の一般産業への利用は始まったばかりであり、種々の回転機械への応用を積極的に検討すべきであると考えられる。

(1985年8月23日受理)

参考文献

- 1) H. Habermann and G. L. Liard: Practical Magnetic Bearing, IEEE Spectrum, Sept. (1979), 26
- 2) H. Habermann and G. L. Liard: An Active Magnetic Bearing System, TRIBOLOGY International, April (1980), 85
- 3) 清水久二, 谷口修: 磁気軸受の原理とその応用, 機械の研究, 22, 12, (1970), 1620
- 4) 清水久二: 磁気軸受の応用と問題点, 機械の研究, 27, 1, (1975), 131
- 5) 松村文夫: 磁気軸受の最近の発展, システムと制御, 26, 4, (1982), 209
- 6) 村上力ほか: 永久磁石を使用した吸引型磁気軸受の試作, 航空宇宙技術研究所資料, TM-388, (1979)
- 7) ターボ分子ポンプ: セイコー精機株式会社カタログ
- 8) 萩原史朗: LCR 共振回路を利用した磁気支持装置の理論解析, 電気学会論文誌, 94 B, 9, (1974), 447
- 9) G. L. Liard: Active magnetic bearings—the key to exceptional spindle speeds, Ball Bearing Journal 213, 8
- 10) NTN 磁気軸受スピンドル: NTN 東洋ベアリング株式会社カタログ No. 8009(1984)
- 11) 樋口俊郎, 水野毅, 相川登: 5 自由度制御形磁気軸受制御系の研究—設計問題の定式化とサブシステムへの分解, 生産研究, 34, 6, (1982), 277
- 12) 大嶋三郎, 中関剛人: 4 万 rpm の磁気軸受スピンドル開発, 日経メカニカル (1984, 10, 22) 102
- 13) 樋口俊郎, 水野毅: 5 自由度制御形磁気軸受制御系の研究—ジャイロ効果による相互干渉のある系の最適レギュレータの構成, 計測自動制御学会論文集, 18, 5, (1982), 507
- 14) 水野毅, 樋口俊郎: 不釣り合い補償機能を備えた磁気軸受制御系の構成, 計測自動制御学会論文集, 20, 12, (1984), 1095