磁気軸受の基礎と応用*

清水 久 二**

(昭和58年5月20日 受理)

The Principles of Magnetic Bearings and Their Applications

Hisaji SHIMIZU

(Faculty of Eng., Yokohama National University, Yokohama)

(Received May 20, 1983)

1. 磁気軸受の種類

磁気軸受という名前の由来は、磁気力によって回転体を支えるという基本原理から来ているが、その特色は主に次の3項目に集約される。

- (1) 磁気軸受は真空中においても使用可能。
- (2) 電磁石利用の磁気軸受では回転体の位置制御が可能。
- (3) スラスト形では、大負荷容量の磁気軸受の製作が可能。

第1の特徴は通常の流体潤滑の許されない真空ポンプの軸受や、高真空の宇宙空間で使用する人工衛星用制御装置の軸受として活かされている。さらに潤滑剤を使用しないという特性は、メンテナンスフリーを意味することにもなり、信頼度が要求される回転機器の要素部分としても注目されている。第2の特徴は、回転体の半径方向位置の微調整が可能であることであり、工作機械（特に高速研削盤）に使用されている。第3の特徴は、フライホール発電機などの軸受の損失が問題となる大重量の回転体の支持機構として研究されている。

以上は主にその際立った特性にのみ着眼して行った分類であって、各々の磁気軸受の具体的方式はお互にかなり異なっている。換言すれば、磁気軸受とはいくつかの回転体支持方式の総称であって、玉軸受から連想されるような磁気軸受という標準化された要素部分が存在するわけではない。この点が磁気軸受の大きな欠点であってこの方式の普及を妨げている要因である。すなわち、磁

気軸受とは磁気力を利用した一つのサスペンション・システムであって、装置の仕様に合わせて非常に多岐にわたる構造が考えられる。当然の帰結として、製作費用も高くつくことになる。高いコストを代償にしても得られるメリットが、冒頭に掲げた3項目の特徴である。現在ようやく実用段階の域に達した磁気軸受使用の軸流圧縮型真空ポンプは第1の特徴が活かされたものであり、第2、第3の利点を取り入れた装置も試作研究は終了した段階であるが、価格の面で市場形成が遅れているようである。

本稿では、以上の動向を更に詳細を述べていくことにするが、実用域に達しない他の磁気軸受についても触れていく。そこで理解を容易にするために磁気軸受全般を分類しておく（図1）。

まず完全無接触型であるが、電磁石による磁気吸引力は信号により制御可能であるので、回転体の運動を計測し、適当なフィードバック回路を組むことにより、磁性材である回転体を、その回転を阻害せずに空間に固定することができる（図2）。このような機能は制御された電磁石においてのみ可能であって、永久磁石の組合せのみでは、回転体を安定に固定することはできない。これをEarnshawの原理という（図3）。磁気力は真空中においても磁性体に作用するので、潤滑剤の蒸発を嫌う真空ポンプには専ら本方式が使用される。これを一般に完全無接触型と称する。本方式に更に制御の方向によって、軸方向、半径方向、5軸制御などの方式がある。ところで制御方式の最大の欠点は、制御装置の作動に電力を消費することであって、限られた電力量の使用しか許されない航空宇宙計器としては適さない。この点を克服するた

* 昭和58年2月19日 日本真空協会2月研究例会で講演

** 横浜国立大学工学部（横浜市保土ヶ谷区常盤台）

図1 磁気軸受の分類

図2 直流制御電磁石形スラスト軸受

めに科学技術庁航空宇宙技術研究所(調布市)では、VZP(Virtual Zero Power; 実質電力がゼロ)方式の磁気軸受の研究開発を進めており、支持消費電力を実際上問題にならないほど低い値に抑えることに成功している。制御方式では外部よりエネルギーを供給しなければいけないので、本方式は通称能動型などとも呼ばれている。一方、部分的な接触を許しても著しく性能が改善されることがある。ガス遠心分離機の支持方式として、西独のZippeが採用したシステムでは、永久磁石と特殊なすべ

図3 Earnshawの定理の説明図

図4 実験機の構造

品番	品名
①	真空容器
②	のぞき穴
③	引き口
④	真空容器
⑤	フランジ (大)
⑥	〃 (小)
⑦	天秤台 (下)
⑧	天秤棒
⑨	天秤台 (上)
⑩	モーター据付け台
⑪	下部軸受
⑫	上部軸受
⑬	ローター
⑭	架台

1. UHV connection
2. Permanent magnet bearing
3. Heater
4. Rotor
5. Stator
6. Fore vacuum connection
7. Motor
8. Electric connection
9. Venting connection

図5 Pfeiffer の真空ポンプ

り軸受とが採用されているが、外部よりの電力供給はない。これは受動型と呼ばれる。図4は著者が試作した受動型の実験機である。本方式は減圧下におけるガス遠心分離機という特殊性能要求に偶然合致したものであって他分野へそのまま応用可能というわけではない。しかし、一切外部電力を必要としないため長期間の連続運転に耐えるという優れた特徴を発揮する。さらに永久磁石を強力な電磁石に置き換えれば、フライホイールのような大重量回転体のスラスト軸受として使用可能である。このような場合、電磁石吸引力の荷重分担率を一定に保つために制御装置を使用する。制御の主目的は安定度の向上である。以上述べた方式のほかに、気体軸受と併用する試みも行われており、その成果が期待されているが、磁気軸受側の分類としては完全無接触型に入る。

2. 最近の磁気軸受の動向

2.1 真空ポンプへの応用

軸流分子ポンプの支持機構として実用機に組込んだ例

は、フランスのS₂M社(Société de Mécanique Magnétique)の磁気軸受が最も有名である。未踏加工技術協会の磁気軸受機構研究会における航空宇宙研の村上力氏の視察報告¹⁾によれば、S₂M社は磁気軸受とその制御装置を製作し、真空ポンプメーカーであるLeybold-Heraeus GmbHへ納入しており、その総計は1980年7月の時点で240台に達したという。一方、西独の軸流分子ポンプメーカーとして名高いPfeiffer社では、永久磁石を使用した受動型磁気軸受を自社の分子ポンプに組込んでおり、玉軸受のみによって構成した従来機よりも真空吸引力性能が一段と向上したとしている。図5は同社の製品パンフレットより引用したものである。又、国内においてはT社が真空用の磁気軸受の開発を手がけており、実用上使用しうるレベルに達したと報じられている²⁾。これは完全無接触型であり、内部に高速回転駆動用のモータが組込まれている。ところで、Pfeifferの製品を導入して実際に真空排気作業に使用している研究室の使用体験によれば、本機は機械軸受のみ使用の従来機に比べ

図6 日本精工試作の Grinder

て非常に騒音振動が少ないとしている。特に真空装置が電子顕微鏡などの付属装置として使用された場合、振動が電子顕微鏡の生命である解像力を損なうこともないので、この大きなメリットは多少のコスト高を吸収するものであるとしている。さらに詳細な効果については、学術論文が発表されているので、そちらを参照されたい^{3,4)}。

2.2 工作機械への応用

非常に高速で回転する Grinding machine spindle の軸受としての磁気軸受のメリットは、その半径方向の間隙調節機能と高速性にある。この特質が工作機械の性質に実用上どの程度活かされるかは今後の発展を見なければわからない。現状を言えば、前記のラフンスの S₂M 社が精密旋盤用として月平均1台の割合で生産しているとされている。納入先はスウェーデンの著名な球軸受メーカーの SKF 社である。他に Milling spindle や Printing roll 用旋盤の spindle として継続的な生産活動を行っている。たとえば SKF の研削盤に使用されている制御装置は、スイッチング方式を採用しており、15 kVA の電力を17 kHz の周波数でオン・オフしながら制御する。制御装置内での電力損失は実質的に零に近づけることができる。このように効率のよい制御装置が可能になったのは、高出力パワートランジスタなどの半導体技術の進歩に負うところが多い。SKF 社の研削盤は実際は小会社の Lidköpings Mek Verstdads 社が製作しており、各機種の中で代表的型式は、主軸が約50 mm、回転数が約6万rpm、軸受剛性が約1 kgf/μm、軸の振れが1 μm 以下であるとしている⁵⁾。図6は国内メーカーが試作した小型 Grinder 構造の一例である。

2.3 航空宇宙計器への応用

航空機への利用では、モーメンタム・ホイールへの応用が最も多く、既に商品化の段階に入っている。磁気軸受採用の理由は、その信頼性であり、平均寿命7~10年が設計の目標になっている。これ迄の事情を、第2精

工舎の石沢資男氏の調査報告⁶⁾から引用させて頂くが、各国の磁気軸受開発会社は以下の通りである。

(1) フランス：Aerospatiale 社

フォークランド島紛争で一躍有名になったミサイル「エクソゼ」の製造会社であるが、約30名がモーメンタムホイール、リアクションホイール、エネルギー貯蔵システム用の磁気軸受の開発、製造に従事している。

(2) イギリス：British Aerospace Dynamic Group

1973年頃から磁気軸受の研究に入っており、モーメンタムホイールの開発、製造を行っている。

(3) 西独：Teldix 社(ハイデルベルグ)が磁気軸受をモーメンタム・ホイールに使用している。同社の製品断面図を図7に示す。

(4) 米国：Sperry Flight 社(アリゾナ州、フェニックス)、Aerojet Electro System 社(ロサンゼルス)、Cambion 社(ボストン)、Honywell 社(St. Petersburg)が多様なホイールを開発しており、各社とも独自の路線を歩いている。各々の技術の細部については航空宇宙技術研究所の村上、狼氏がくわしい。

2.4 その他

その他の分野で最も成功した応用例は、日立製作所中央研究所が開発した回転多面鏡光偏光機であろう(図8)。この装置は多面鏡を高速で回転し、光を偏光させる装置であるが、スラストに軸受、ラジアルにティルティングパット動圧気体軸受を採用しており、お互の長所を利用する工夫をしている。この光偏光機は52年12月に同社が販売を開始したレーザー光によるノンインパクトプリンターに回転数約2万rpmで実験に使用されているという。また同研究所が試作したレーザー光線投影型テレビジョンにもこの光偏機が回転数8万rpmで回っている。具体例が示すように磁気軸受の特徴は、高速回転時における振れの少ないことであり、前出の S₂M 社も、Optical scanner としてすでに19台の納入実績をもっている。

図7 Teldix社のモーメントホイール

図8 オプティカルスキャナ

同様な使用方法是、電子技術総合研究所の低温ヘリウム回転機のコンプレッサにも試みられており成果は既に公表されている⁷⁾。形式は異なるが、西独の低温工学中央研究所(ミュンヘン)でもヘリウム液化用膨張タービンへ応用する研究を行っている⁸⁾と聞く。

最近の話題では、電力貯蔵用のフライホイールがある。京浜急行電鉄と三菱電機の共同研究により製作されたフライホイールではロータの重量の何割かを維持するために電磁石を使用していると報告している⁹⁾。

3. 開発上の問題点

以上磁気軸受商品化の動向についてレビューしたが、

図9 磁気軸受設計製作の流れ図

これから磁気軸受を利用しようとする方には、さらに詳細な構造についての知識が必要であろう。あるいは、これが究極的な最良の設計であるというモデルが示されれば、研究の目標も1本に絞りやすいだろう。しかし残念ながら、磁気軸受の形成は前述のように用途によって異なるので、各社の路線も各々の開発ポリシーに基づいて異なり、ほとんど大切なポイントは公表されていない。しかし強いて、これらを分類すれば

- (A) 受動型志向; センサー、電源が不要。
- (B) 完全無接触志向; 最大の特徴を追求。
- (C) 電磁石専用志向; 電力消費量よりも高安定度に魅力。

以上(A), (B), (C)ともそれぞれに色々の設計方式が考えられ、固定化した設計方式はない。各社とも試作のくりかえしによってノウハウを深めているようだが、磁気軸受製作の難点は、機械、電気、磁気工学すべての知識を必要とすることになり、いずれが欠けても開発に手間どることになる(図9)。

図10 試作した磁気軸受

4. 試作例

おわりに著者の研究室における試作研究例を紹介する。受動型磁気軸受のガス遠心分離機への応用は関係者の間で既に知られているが、その構造と振動特性につい

ては、文献(10)が詳しい。最近チタンの粉末化装置への応用が検討されている。さらに図10は、ピボットによって回転体重量の一部を支えているが、10 kgの全重量の、90~95%を上制御電磁石で支えている装置である。特殊な制御装置を使用しているので、電力制御部の損失は数ワット以下である。

〔文 献〕

- 1) 村上力：欧米の磁気軸受見聞記，第10回 磁気軸受・機構研究会資料，未踏加工技術協会，(1981)。
- 2) 日経メカニカル，昭和57年8月16日号。
- 3) 清水久二：潤滑 **23-9** (1978) 633。
- 4) W. Bieger et al.: *Vakuum-Technik* **28** (1979) Heft 2
- 5) SKF 社の技術資料。
- 6) 石沢資男：欧米の磁気軸受見てある記，第12回磁気軸受・機構研究会資料，未踏加工技術協会，1982年5月20日。
- 7) 岡野・十合：ターボ機械 **9-6** (1981年6月)。
- 8) 泉英樹：独仏における磁気軸受開発研究の現況，第13回磁気軸受・機構研究会資料，未踏加工技術協会 (1982)。
- 9) 荻原尊礼：磁気軸受のフライホイール発電機への応用，第6回磁気軸受・機構研究会資料，未踏加工技術協会 (1980)。
- 10) H. Shimizu：第4回希土類磁石国際会議講演論文集，東京 (1979) p. 191。
清水久二：受動型磁気軸受を使用した高速回転実験機の試作とその活動特性，横浜国立大学材料基礎工学研究，No. 13, p. 19~27。