軸 受 の 新 技 術

Advanced Technology of Bearings

木 全 圭*
Kei KIMATA

Key Words: Bearing, Rolling Bearing, Air Bearing, Magnetic Bearing, Extreme Condition

1. ま え が き

機械技術が高度化し、多様化するにつれて、軸受にも高度な性能と品質が要求されるようになってきている。近代的な精密ころがり軸受の出現は1900年ごろであるが、今日なお改良が行われて、超高速、極低温、高真空など、従来は使用できなかったような条件においても運転可能になってきている。一方では、空気軸受、磁気軸受など、比較的新しい形の軸受の技術開発が進み、それぞれの特性を生かして実用されるようになった。それらの使用条件の多くはころがり軸受の技術では達成が困難と思われる領域である。ここでは、極限的な条件において使用されているころがり軸受、空気軸受、油・グリース潤滑動・静圧軸受、磁気軸受などについて展望する。

2. 極限条件におけるころがり軸受

極限条件は通常の使用条件にくらべ、要求される性能が高度なもの、使用環境、使用条件が厳格なもの、形状、寸法、精度において製作が容易でないもの、の3種に分類できる。以下に、いくつかの例を見てみよう。

2.1 超高速 高速化の先端をいくのは航空機用ジェットエンジンの主軸受である。軸受はもっぱらアンギュラ玉軸受と円筒ころ軸受が用いられており、実用機の dn 値^(注1)は玉軸受が $2.1 \times$

10^6 、円筒ころ軸受は 2.5×10^6 に達している。実験室では 3×10^6 程度までの試験が行われており⁽¹⁾⁽²⁾、1980年代には実用機がこの水準になると予測されている。ジェットエンジンの主軸受は、高速で回転するのみならず、摩擦による発熱と燃焼室からの伝熱により高温になるし、玉軸受にはタービンや翼に作用するガス圧のために数tのアクシアル荷重が作用する。エンジンの始動時や宙返りのときには潤滑剤の供給がとまる場合もある。このような厳格な条件に耐え得るのは現在ではころがり軸受のほかにはないと思われる。図1はジェットエンジン主軸用ころがり軸受の設計例である。保持器、潤滑油の供給方法、ハウジングへの取付け方法などに注意が払われている。円筒ころ軸受では、ころのスキッドによる損傷を防ぐために外輪をだ円形あるいはおむすび形にひずませて製作して、部分的にラジアル予圧をかけてこ

図1 ジェットエンジン主軸用高速ころがり軸受の設計例

(注1) 軸受内径 d mm と回転数 n rpm の積、ころがり軸受の回転速度のメジャーとして使われる。

* 正員、エヌ・テー・エヌ東洋ベアリング(株) 総合技術研究所 (〒438 磐田市東貝塚 1380)。

ろの駆動力を増すように設計される⁽³⁾。ジェットエンジンには現在のはもっぱら玉軸受と円筒ころ軸受が使われているが、円すいころ軸受も高速化の試みがなされており、 $dn\ 2.2\sim 3.5\times 10^6$ の試験が行われて成功を収めている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

軽合金切削用ミリングマシンのスピンドルにも高速化の要求が強い。この用途では、高回転精度、高剛性、低温度上昇などの要求も合わせて満足させなければならないので、特殊な設計をしたアンギュラ玉軸受が予圧をかけて使われている。 $dn\ 1.2\sim 1.6\times 10^6$ の運転実績があり、 2×10^6 程度までは上げられる見とおしである。それ以上の高速は後述する磁気軸受の領域となろう。

2.2 極低温 人工衛星打上用ロケットでは、推進薬として、液体酸素と液体水素が使用される。これらの推進薬をタンクから燃焼室へ圧送するために、ガスタービン駆動の遠心ポンプが使われる。ポンプの軸受にはアンギュラ玉軸受が使用され、液体酸素用ポンプでは $dn\ 0.5\times 10^6$ 、液体水素用は $dn\ 1.2\times 10^6$ で、いずれも液化ガス中で運転される⁽⁶⁾。液化ガスは粘度が極めて低く、有効な潤滑作用が期待できないので、保持器を自己潤滑性のある材料で作し、転走面と転動体の間は保持器から転移した固体潤滑剤の薄膜で潤滑する技術が開発された。保持器の材料にはPTFEをガラス繊維などで強化した複合材料が使われる⁽⁷⁾。軌道輪や転動体の材料はさびの発生を防ぐためステンレス鋼 SUS 440 C が使われる。

2.3 真空 真空中でころがり軸受を運転する場合の基本的な問題は潤滑剤の蒸発であり、これに対処する技術が開発されている。ころがり軸受の潤滑に必要な油は極めてわずかである。 $6.7\text{ Pa } (5\times 10^{-2}\text{ Torr})$ の真空中で内径 40 mm の保持器なし玉軸受を 8 100 rpm で 13 000 時間運転し、その間の給油量が 3.3 g であったという実験がある⁽⁸⁾。この場合はオイルリザーバにたくわえられた油が、内輪の転走面上のボールとの接触位置の近くに設けた $0.07\mu\text{m}$ の環状すきまを通して $1.2\times 10^{-4}\text{ g/h}$ の割合で供給された。

昭和 56 年 2 月に打上げられた技術試験衛星 IV 号に搭載されたスキャン形地球センサの回転反射鏡を支えるアンギュラ玉軸受では、前述の極低温用軸受のように、PTFE 系複合材料で作った保持器を潤滑剤の供給源とする方法が採用された⁽⁹⁾。回転数 60 rpm で、 $1.3\times 10^{-6}\sim 1.3\times 10^{-11}\text{ Pa } (10^{-8}\sim 10^{-13}\text{ Torr})$ の宇宙空間で 4 000 時間以上異常なく作動した。

100°C 以上の高温で使用する場合は、金、銀、鉛など軟質金属の薄膜による潤滑が採用される⁽¹⁰⁾。保持器に鉛青銅を用い、内・外輪の転走面に鉛を摩擦により付着させておく方法も有効である。

上記のように、特殊な潤滑技術の開発によりころがり軸受は高真空領域での使用が可能となったが、油やグリースによる通常の潤滑で得られるのと同じ性能や耐久性は期待できない。真空中で高速・高荷重で使用する軸受としては後に述べる磁気軸受に軍配があがる。

2.4 超小形化・高精密化 VTR やカセットテーププレーヤなどの映像、音響機器の小形スピンドルの軸受としては、高い精度を要しない箇所には焼結含油軸受などが使われるが、高精度あるいは低トルクの要求される箇所には玉軸受が使われる。

VTR の回転ヘッドでは軸の振れや、回転むらなどが画質に影響する。軸受は玉軸受が使われ、軸の振れはラジアル、アキシアルともに $1\sim 2\mu\text{m}$ 以下に押さえられる。軸と軸受内輪は焼ばめ、冷やしばめ、あるいは $1\mu\text{m}$ 単位の選別はめあいを行い、軸方向に予圧をかけて使われる。

こうした組立上の煩雑さを解消し、かつ軸振れの精度を向上させる ($1\mu\text{m}$ 以下) ために、図 2 のように軸に直接、玉の転走面であるみぞを設けた軸みぞ形ボールベアリングユニットが開発された。予圧はコイルばねで与えられる。このようなユニットでは、軸径の割に外輪外径が小さくなるので、機器の小形化のためにも有効である。

図 2 軸みぞ形ボールベアリングユニット

図 3 超小形偏平モータ

電池で駆動されるポータブル形機器では、消費電力をへらすために、軸受のトルクを低下することが重要である。図3は超小形カセットプレーヤ用の偏平モータである⁽¹¹⁾。軸径1.5 mmで軸受は、焼結合油軸受とプラスチックシール付深みぞ玉軸受が各1個組込まれている。玉軸受には磁石の吸引力によるアキシャル荷重も作用する。シール付超小形玉軸受の採用により、電力消費が約1/2になったとされている⁽¹²⁾。

3. 空気軸受

実用されている空気軸受には、静圧形と動圧形がある。前者は給気の通路に設けられる絞りにより、後者は軸受面の形状によりその特性がきまる。空気軸受の特性や研究、開発の現状などについては文献(13)～(15)にわかりやすい解説がある。ここでは空気軸受を応用面から眺めてみることにする。

3.1 超精密スピンドルへの応用 この用途は静圧空気軸受がその真価を最も良く発揮できる分野と思われる。静圧空気軸受の剛性を高めるためには、軸受面積を大きくし、すきまを小さくする必要がある。すきまの小さい軸受では部品の高精度化が必要であるが、静圧空気軸受は部品の形状が単純であり、高精度の加工に都合が良い。軸の回転精度はほとんど軸の精度のみできまり、受けの精度の影響は少ない。軸の真円度の軸心の振れ(軸外周の振れから外周の形状精度の影響を除いた値)への影響も、空気膜による平均化作用のために、真円度の数分の1～数十分の1になる。このように静圧空気軸受は高精度化に有利であり、サブミクロンの回転精度をもつスピンドルが比較的容易に製作できる。

レーザスキャナなどに使われる軟質金属製ミラーの製作には、0.01 μm のオーダの表面あらさで加工できる超精密切削加工機が使われる。その静圧空気軸受スピンドルには、回転数500～3 000 rpmの範囲で、軸心の振れが0.02 μm 以下と報告されているものがある⁽¹⁶⁾。

このスピンドルは球面軸受と円筒状ラジアル軸受を用いて構成されているが、実用されている超精密スピンドルの多くは、円筒状ラジアル軸受2個と、平面スラスト軸受2面により軸を支持するもので、軸の外周の振れは0.1～0.5 μm 、軸心の振れは0.05 μm 程度である。用途は真円度測定器、磁

気ディスクや光ディスクのガイドトラック書き込み装置、放送用VTRなどである。軸径が大きく、幅の狭い軸受にはコニカル静圧軸受も使われている⁽¹⁷⁾。絞りの方式は自成絞りが多く採用されているが、すきまの小さいものが設計できるという点では、表面絞りのほうが適しているといえる。

3.2 高速スピンドルへの応用 超精密に次いで静圧空気軸受が適している分野は高速スピンドルである。用途は研削用スピンドル、小径ドリリングマシン用スピンドル、繊維機械用スピンドル、高周波モータ、歯科用ハンドピースなど数万～数十万 rpm で使われているものが多い。

高速用静圧軸受は、遠心力と温度上昇による部品の寸法変化を考慮して、あるいはホワール比を2以上にとるために、すきまを大きくした設計が採用される。そのために剛性が低く、用途は軽荷重で衝撃の少ない条件に限られる。絞り方式は自成絞り、多孔質絞りなどが用いられる。

高速用には動圧気体軸受も利用されている。動圧気体軸受は、圧縮空気を供給するための圧縮機がいらないという利点があるが、静圧空気軸受にくらべ、一般には、負荷容量が小さい。

動圧空気軸受の使用が成功している例に、ヘリウム液化用タービン膨張機がある。文献(18)に報告されている例ではラジアル軸受に軸径約20 mmのティルティングパッドベアリングを、スラスト軸受にスパイラルグリーブベアリング(SGB)を採用しており、ヘリウムガスを潤滑剤として、最高294 000 rpmで運転される。SGBは図4のようにレーザスキャナのミラー用スピンドルに應用された例もある。レーザスキャナでは軸の振れが小さいことも重要であり、この例では、60 000 rpmで軸の振れ0.5 μm になっている⁽¹⁹⁾。平行みぞつき動圧軸受を使用した高速スピンドル

図4 動圧空気軸受(SGB)を利用したレーザミラースピンドル

の試作も行われている⁽²⁰⁾。動圧気体軸受としてはフォイルベアリングも開発されており、240 000 rpm まで安定に回転したと報告されている⁽²¹⁾。テイルティングパッド式にくらべ構造が簡単であり、ガスタービンや過給機などに実用されはじめている。

動圧空気軸受の超高速における安定性は、テイルティングパッド式、フォイル式ともにすぐれている。スパイラルグループ式や平行みぞ式はこれより悪いが、みぞなし動圧空気軸受より良い。

4. グリース・油潤滑特殊すべり軸受

スパイラルグループベアリング (SGB) は、グリースや油で潤滑して使用することもできる。形状も平面や円筒面のほか、円すい面や球面にスパイラルグループを設けたものも作れる。球面形の自動調心性は用途によっては有用であろう。グリース潤滑 SGB はレコードプレーヤ、VTR、DAD (Digital Audio Disc) などのスピンドルに応用されはじめている⁽²²⁾。この種の機器には、前記のように、焼結含油軸受や玉軸受が採用されているも

のが多いが、SGB の採用は軸受に起因する振動、軸心の振れ、モータの回転速度変動などの低減に役立つ。ただし、グリース潤滑 SGB は摩擦トルクが大きいという欠点がある。

油を作動流体とする静圧軸受は、静圧空気軸受にくらべ、負荷容量、剛性ともに高いという特徴があり、工作機械用スピンドルに実用されているが、高速回転すると温度が高くなったり、空気を吸い込むなどの不具合がある。図 5 のように、軸受パッド内の流体が還流する流路を設けることにより、この欠点を解消したものが開発された⁽²³⁾。高速、高精度、高剛性の要求されるスピンドルへの応用が期待される。

5. 磁気軸受

5.1 種類と特徴 磁気軸受には ① 永久磁石を利用するもの、② 交流電磁石を利用するもの、③ 直流電磁石を利用するものがある。① は安価で信頼性が高いが剛性が小さく、負荷容量も比較的小さい。また永久磁石のみによって、軸の五つの自由度を拘束することができないので、スピンドルを設計する場合は、他の形式の軸受と組合せて構成しなければならない。② は LCR 共振回路によって自己制御されるもので、やはり剛性、負荷容量ともに小さい。③ はセンサにより軸心位置を検出して閉回路制御されるもので、構成が複雑で高価であるが、他の二者にくらべ、負荷容量や剛性を高くできるし、減衰特性の最適化も可能であるので、用途が最も広いと考えられる。

磁気軸受のユニークな特徴は軸と受けが非接触で、かつ潤滑剤を全く必要としないことである。そのために低トルク、低騒音、長寿命、真空中で使用可、広い使用温度範囲、高速回転に有利、潤滑剤の汚染がない、保守が容易など軸受として望ましい特性が生まれる⁽²⁴⁾。

5.2 直流制御磁気軸受スピンドル 直流制御磁気軸受の力学系は本来不安定な系であり、安定な軸受にするためには、閉回路制御が不可欠である。直流電磁石の電流や変位と吸引力の関係は非線形であるので、通常はバイアス磁界を与えて線形化することを前提として、制御回路の設計が行われる⁽²⁵⁾。制御系の設計は古典的線形制御理論を適用することにより行うことができるが、多変数制御系や最適フィードバック系の扱える現代制

図 5 静圧油軸受パッド内の流速分布と圧力分布

御理論の適用も試みられている⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾。

直流制御磁気軸受の負荷容量は磁気回路の飽和磁束密度により決まる。電磁石にけい素鋼板を使用する場合は軸受部の投影面積 1 cm^2 当たり $20\sim 25\text{ N}$ であり、通常 $5\times 10^5\text{ Pa}$ 程度の空気圧で使用する多孔質静圧空気軸受と同程度である。剛性は図 6 のような傾向をもっており⁽²⁸⁾、外乱の周波数によりかわる。低周波側で高くなっているのは積分要素の効果である。高周波側では軸の質量の影響を強く受け、質量 $\times$ (周波数)² に比例して増大する。回転速度の限界は基本的には回転体の材料の遠心強度と軸の固有振動数により決まる。高速ミリングマシン用スピンドルのように外乱が多い場合は軸の固有振動数の帯域で発振しやすいので、この帯域の減衰特性を強化する必要がある場合もある⁽²⁹⁾。軸心の振れは、低速側では位置センサの精度により決まる。センサはうず電流形変位計が使われることが多い。高速になると、軸はその慣性主軸のまわりで回転するようになる。使用温度範囲は -150°C 程度の極低温から $+450^\circ\text{C}$ 程度までの広い範囲で使用可能なものが設計できる。

図 6 直流制御磁気軸受の動剛性

図 7 高速ミリングマシン用磁気軸受スピンドル

5.3 磁気軸受の応用 高真空、極低温、高温など特殊環境において使用する場合は、他の種類の軸受にくらべ有利である。ターボ分子ポンプへの応用は最も進んでおり、直流制御ラジアル磁気軸受 2 組と、同スラスト磁気軸受 1 組を使用する 5 軸制御形⁽²⁸⁾⁽³⁰⁾、直流制御磁気軸受と永久磁石磁気軸受とを併用するもの⁽³¹⁾などが発表されている。人工衛星の姿勢制御に使用されるモーメントムホイールへの応用も企図されて、各種のものが開発されている⁽³²⁾。

エネルギー蓄積用フライホイールも損失を防ぐために真空中で運転されること、低摩擦の軸受が要求されることなどのために磁気軸受を使用したものが開発されている⁽³³⁾。極低温で使用されるヘリウム液化器用膨張タービンのスラスト軸受に使用された例もある。

特殊ふんい気中以外での主たる用途は、高速、高剛性の要求される工作機械用スピンドルであろう。図 7 はその一例で、アルミ切削用高速ミリングマシン用スピンドルである。直流制御磁気軸受 3 組を使用しており回転数は $30\,000\text{ rpm}$ である⁽²⁹⁾。軸の上下に組み込まれた玉軸受は磁気軸受の制御が不能になった場合にのみ補助的に作動する。この用途のスピンドルは $20\,000\sim 75\,000\text{ rpm}$ のものが発表されており⁽³⁴⁾、利用が拡大するものと思われる。

6. あとがき

高度な機械装置の実現を可能にする新しい軸受技術のいくつかについて、主として応用面から位置づけを試みた。浅学のゆえに意を尽くし得なかったところがあるし、また妥当性を欠くところもあるかもしれないが、軸受の応用に当たり少しでも参考にしていただければ幸甚である。

(原稿受付 昭和 59 年 1 月 25 日)

文 献

- (1) Bamberger, E.N., ほか 2 名, *Trans. ASME, Ser. F*, **98**-4 (1976), 580.
- (2) Schuller, F. T., *NASA Technical Paper*, 1413 (1979).
- (3) Given, P.S., *ASME Winter Annual Meeting*, (1965-11).
- (4) Parker, R.J., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Lubr. Technol.*, **104**-3 (1982), 293.
- (5) Orvos, P.S. and Dressler, G.J., *ASLE Trans.*, **23**-2 (1980), 109.

- (6) 日経メカニカル, 131 (昭 58), 46.
- (7) 宮川・関, 潤滑, 18-1 (昭 48), 53.
- (8) Kingsbury, E., *Lubr. Eng.*, 35-9 (1979), 517.
- (9) 池内・ほか 5 名, 潤滑, 28-9 (昭 58), 649.
- (10) 宮川, 潤滑, 23-5 (昭 53), 365.
- (11) ソニー (株) カタログ, (昭 58-10).
- (12) 日経メカニカル, 151, (昭 58), 36.
- (13) 森, 第 18 回夏期セミナーテキスト, (昭 58), 91, 日本潤滑学会.
- (14) 矢部, 機習教, (関西支部第 104 回), (昭 57-11), 33.
- (15) マシンデザイン, 8-11 (昭 56), 41.
- (16) 田中, 精機学会第 114 回講習会テキスト (昭 58-12), 29.
- (17) 伊庭, 精機学会第 114 回講習会テキスト (昭 58-12), 42.
- (18) Eber, N., ほか 2 名, *Cryogenics*, (1978-11), 585.
- (19) 木全, ベアリングエンジニア, 49 (昭 59-3), 1.
- (20) 神谷・ほか 2 名, 精機学会秋季大会学術講演会講演論文集, (昭 58-10), 653.
- (21) Licht, L. and Branger, M., *Trans. ASME, Ser. F*, 97-2 (1975), 271.
- (22) Muijderland, E.A., *Philips Tech. Rev.*, 39 (1980), 184.
- (23) Mohsin, M.E., *Tribology Int.*, 14-1 (1981), 47.
- (24) 松村, システムと制御, 26-4 (昭 57), 209.
- (25) Habermann, H. and Liard, G., *Ball Bearing J.*, 192 (1977), 1.
- (26) 村松・ほか 2 名, 電気学会論文誌, C, 101-6 (昭 56), 137.
- (27) 樋口・水野, 計測自動制御学会論文集, 18-5 (昭 57), 507.
- (28) Habermann, H. and Liard, G., *Tribology Int.*, 13-2 (1980), 85.
- (29) 中関・ほか 3 名, 精機学会秋季大会学術講演会講演論文集, (昭 58-10), 435.
- (30) 金戸・ほか 4 名, 日本真空協会第 24 回連合講演会講演論文集, (昭 58-11), 85.
- (31) セイコー精機 (株) カタログ, 83.08.1000 (D).
- (32) 村上・ほか 4 名, 航空宇宙技術研究所昭和 57 年度研究発表会前刷集, (昭和 57-11), 24.
- (33) 古石・星野, 応用機械工学, 262 (昭 57-2), 60.
- (34) Liard, G., *Ball Bearing J.*, 213 (1982), 8.

文部省・科学研究費交付先 (その 26)

(5 月号より)

〔一般研究 C〕

(括弧内数字は交付金額, 単位 千円)

▽電子顕微鏡像コントラストによる粒界構造の研究＝北大工, 丸山健三郎 (2 700), ▽稀土類金属基アモルファス合金の合成, 構造解析ならびに応用＝東北大金研, 鈴木謙爾 (2 000), ▽Fe 系非晶質合金の弾性特性＝東北大金研, 深道知和 (2 000), ▽Cu₃Au 規則合金の非線形振動について＝横浜国大工, 三浦憲司 (2 000), ▽バナジウム-チタン合金水素化物の構造と電子的性質＝名工大工, 田中一英 (2 300), ▽バナジウム・ルテニウム合金におけるマルテンサイト変態の電子論的研究＝豊橋技科大, 太田昭男 (1 800), ▽マイクロ・ボイド形成過程における陽電子消滅＝京大工, 古川弘三 (1 800), ▽2¹/₂D 電顕法と WB 法を併用した新しい観察法による微小照射欠陥集合体の性格の判定＝阪大工, 角田直人 (2 400), ▽モリブデンの粒界脆性機構に関する研究＝九大, 栗下裕明 (2 000), ▽一次元長周期逆位相ドメイン配列の統計学および統計熱力学的解析＝九大, くわ野範之 (1 800), ▽スラグ-メタル-ガス三相反応界面の微視的構造の直接観察＝北大工, 石井邦宣 (2 100), ▽積層型回転二重電極電解槽による稀薄溶液からの重金属の回収に関する研究＝北大工, 佐々木健 (1 500), ▽溶融フェロクロムとスラグ間の諸成分の分配平衡＝室蘭工大, 田中章彦 (2 300), ▽原子吸光分光光度法

による溶融金属-硫黄融体の活量測定に関する研究＝東北大工, 阿座上竹四 (1 600), ▽Rare Earths の塩化製錬に関する基礎的研究＝東北大工, 嶋影和宜 (1 600), ▽溶融酸化物, 硫化物および塩類の熱定数の測定＝東北大選鉱研, 板垣己未生 (1 600), ▽マイクロ波水素プラズマ中における金属超微粒子の低温還元生成機構の研究＝東大工, 石塚隆一 (2 000), ▽ウスタイト中の空格子点濃度に及ぼすアルカリ土類金属酸化物の影響＝名工大工, 井口義章 (2 300), ▽クヌーゼンセル質量分析法による Fe-W 及び Fe-Nb 合金の活量測定及び熱分析＝京大工, 一瀬英爾 (2 300), ▽自溶炉銅溶錬のシミュレーション実験による速度論的研究＝京大工, 朝木善次郎 (2 000), ▽三相界面における酸化物の局部溶損現象の動的観察＝九工大工, 向井楠宏 (2 000), ▽炭素鋼のひずみ時効等価則と多軸塑性変形に関する研究＝山形大工, 辛島誠一 (2 500), ▽薄肉金属円管の液圧による型張出し加工に関する基礎的研究＝宇都宮大工, 淵沢定克 (1 700), ▽超塑性合金の特殊押し出し加工に関する研究＝千葉大工, 河合栄一郎 (2 100), ▽金属加工プロセスにおける材料表面性状検出に関する研究＝東大工, 小豆島明 (2 700), ▽エネルギー・有限要素法による型材圧延の三次元変形の解析＝東工大工, 加藤和典 (1 600), ▽熱間圧延加工と整合性のある炭素鋼の変形抵抗式のモデリング＝京大工, 八田夏夫 (1 800).

(566 ページへつづく) (服部 敏夫)