

# 超精密機器における流体/気体軸受の設計と技術動向\*

Technology Trend of Hydrodynamic/Hydrostatic Bearings for High Precision Apparatus

平山朋子\*\*  
Tomoko HIRAYAMA

**Key words** hydrodynamic bearing, hydrostatic bearing, technology trend, precision apparatus, optimum design

## 1. はじめに

超精密機器技術の発展に伴い、流体/気体軸受の需要は年々拡大している。流体/気体軸受はすべり軸受の一形態であり、主として、動圧軸受および静圧軸受に分類される。両者とも、作動流体膜を介して物体を支持するため、接触に伴う摩擦の発生を避けることができ、超精密支持および案内に適している。流体/気体軸受の歴史は、1886年のReynoldsによる流体潤滑理論の導出に始まり<sup>1)</sup>、作動流体膜による物体の非接触支持の可能性が示されるや否や、おびただしい数の特許が出願され、工業的に認知されることとなった。しかしながら、加工精度の厳しさから、民生用機器への応用が本格的に目指されるようになったのは、1960年ごろからである。近年ではその使用も一般的となり、特に、機器の更なる高精度化および高速回転化を狙って用いられるケースが多い。本稿では、流体/気体軸受の特長を活かした超精密技術に焦点を当て、昨今の技術動向および応用事例を紹介する。

## 2. 動圧軸受技術の応用と展開

### 2.1 ハードディスクドライブ (HDD) スピンドル

近年のAV、OA機器の性能の発達はめざましく、その回転主軸部に求められる性能も年々厳しくなっている。小型精密機器を代表するHDDの場合、そのスピンドルが望まれる同期振れ精度(RRO)は0.1 $\mu\text{m}$ 程度であり、非同期振れ精度(NRRO)は0.01 $\mu\text{m}$ 以下である。HDDのスピンドルにおいては、1990年代後半より、転がり軸

受から流体動圧軸受への技術移行が本格的に進み<sup>2)</sup>、今では、一部の機種を除いて、そのほとんどが流体動圧軸受を採用しているといっている<sup>3)</sup>。図1に、その構造の一例を示す。中央に位置するのが、スパイラル溝付軸受と呼ばれる流体動圧軸受であり、図に示すような、ジャーナル軸受とスラスト軸受を一体とした構造の採用が主流である。作動流体には、低粘度でかつ粘度指数の高い(すなわち、温度に対する粘度変化が少ない)潤滑油が用いられている。軸の回転に伴い、すきま内の潤滑油はスパイラル溝によるポンピング作用を受け、溝中央で高い圧力を発生する。レイノルズ方程式を用いて算出したスパイラル溝付軸受のすきま内圧力分布の一例を図2に示す<sup>4)</sup>。この圧力分布を積分したものが支持力であり、これにより、軸は非接触で支持される。軸変位に対する支持力の微分値が軸受剛性であり、基本的には、その値は大きいほど良い。流体動圧軸受の作動特性は、数値シミュレーションによってある程度予測することができ、実験値ともよく一致することがすでに多くの論文で確認されている<sup>5)</sup>。なお、数値計算法の詳細に関しては、例えば、文献6)や7)を参照されたい。

HDDスピンドルに流体動圧軸受技術を適用するこれまでの10年間を第1ステージと呼ぶならば、現在は、機器のさらなる信頼性向上を目指す第2ステージに移行してい

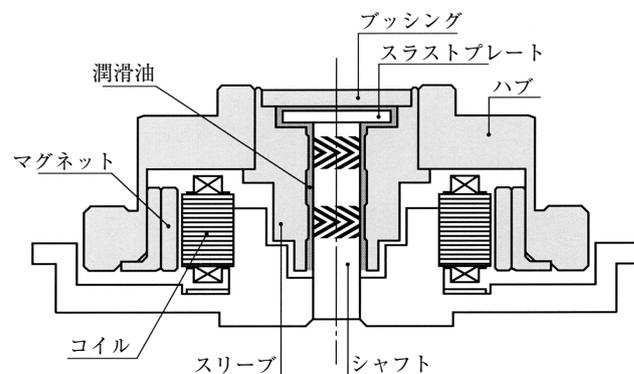


図1 ハードディスクドライブ用スピンドルの構造例  
(中央に位置するのが、スパイラル溝付軸受)



\*原稿受付 平成20年6月30日  
\*\*正会員 同志社大学理工学部(京都府京田辺市多々羅都谷1-3)  
平山朋子  
2001年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻博士課程中退。同年龍谷大学理工学部助手、2005年同志社大学工学部専任講師を経て、2008年より理工学部准教授。博士(工学)。トライボロジー、中でも、潤滑現象に関わる基礎/応用研究に従事。

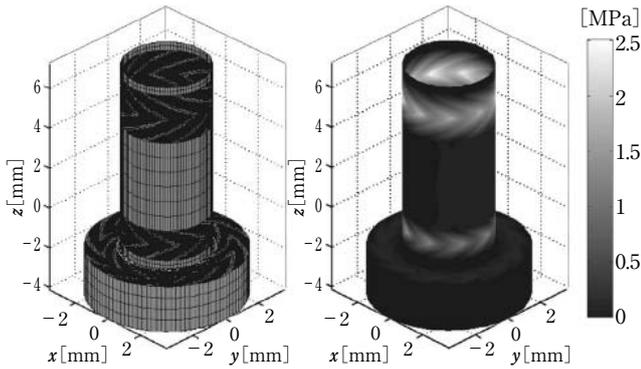


図2 スパイラル溝付軸受のすきま内圧力分布<sup>4)</sup>

るといえる。HDD用流体動圧軸受においていまだ残る検討課題としては、①キャビテーション発生条件の把握、②油漏れ限界の把握、③動圧軸受を含む機器全体の振動特性の把握、等がある。機器のさらなる信頼性向上のためには、これらの理論的解明は必須であろう。

動圧軸受が作動流体に潤滑油を使用する限り、キャビテーションの発生は常に意識しておかねばならない問題である。特に、HDDのような超精密回転を要する機器においては、キャビテーションの不安定な挙動に伴う振れ回り精度の低下は致命的となる。すべり軸受におけるキャビテーションの解析的取り扱いに関しては、過去に多くの議論がなされてきたが<sup>8)</sup>、現在では、キャビテーションを発生させないような設計、すなわち、最も大気開放端に近いスパイラル溝軸受の溝長さを上下で非対称とし、内側へ流体を押し込めることによってすきま内の圧力を一様に押し上げる軸受形状の採用が主流である<sup>9)</sup>。機器の小型化に従って軸受部の長さも徐々に短くなる傾向にあり、キャビテーションを生じないための最小非対称溝長さを解析によって見積もる検討がなされている。

また、特にHDDにおいては、軸受端からの潤滑油の漏洩はディスクの破損を招く可能性もあり、必ず防止されなくてはならない。HDD用流体動圧軸受においては、その大半が、油漏れ防止対策にテーパシール（毛細管シール）を採用しているが、その設計は半経験的である。現在、潤滑油に作用する遠心力と表面張力を組み合わせた数値解析により、テーパシールの設計指針の提示が検討されている<sup>10)</sup>。

スピンドルおよびディスクを含む機器全体の振動特性は、加振試験によって調べられる。HDDスピンドルにおいては、軸受の固有振動数を基本とするロッキングモード振動が問題となる。数値解析によって見積もった軸受の動特性値とディスク等周辺部品の弾性係数および慣性モーメントを適切に用いれば、機器全体の振動特性をシミュレーションで再現できることも確認されており（図3）<sup>11)12)</sup>、今後は、機器全体を見通した総合的な軸受設計が期待される。

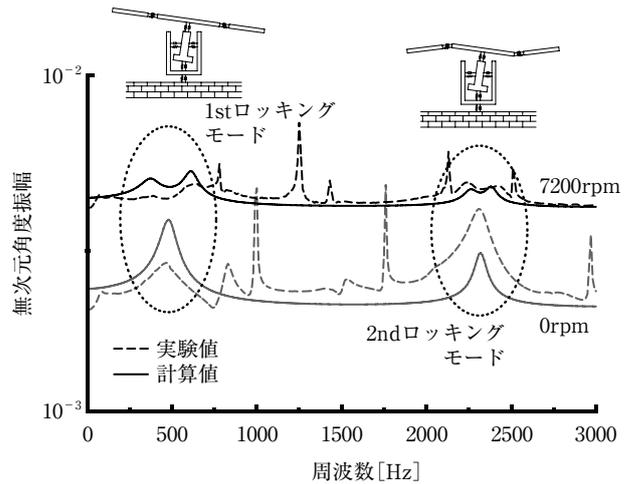


図3 HDDスピンドルの振動特性と数値解析結果<sup>12)</sup>

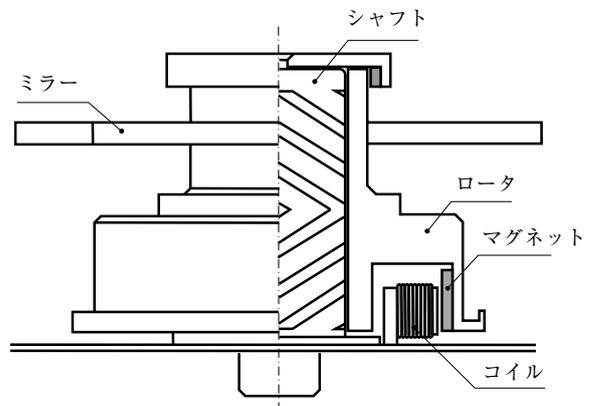


図4 LBP用ポリゴンミラーモータスピンドルの構造例

## 2.2 レーザビームプリンタ (LBP) 用ポリゴンミラーモータスピンドル

HDD同様、高い回転振れ精度を要するLBP用ポリゴンミラーモータスピンドルにおいても、スパイラル溝付軸受が採用されている。図4に、その構造の一例を示す。HDDスピンドルに比べて構造が簡易であるが、HDD並みの高精度回転が望まれる。特に、ポリゴンミラーモータスピンドルでは、ジッタと呼ばれるモータの回転角速度むらさが性能の評価値となり、その値はプリンタの印字精度に直接関わる。著者らは、過去に、さらなる高精度回転を実現するためのスパイラル溝付軸受の最適設計指針および最適な溝形状の提示を行った<sup>13)</sup>。その指針に沿って設計した軸受をポリゴンミラーモータスピンドルに適用したところ、それまで一般的であった主剛性を最大とする軸受形状のスピンドルに比べて、ジッタを約25%低減することができた（図5）。その他、近年、スラスト軸受のスパイラル溝形状に関する最適設計等も検討されており<sup>14)</sup>、今後、さらなる高剛性化、高速回転化、低トルク化等の技術動向に沿って、目的に応じた軸受形状の検討が一層加速するであろうと思われる。

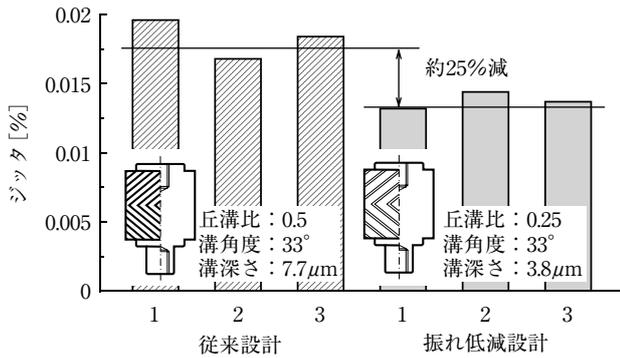
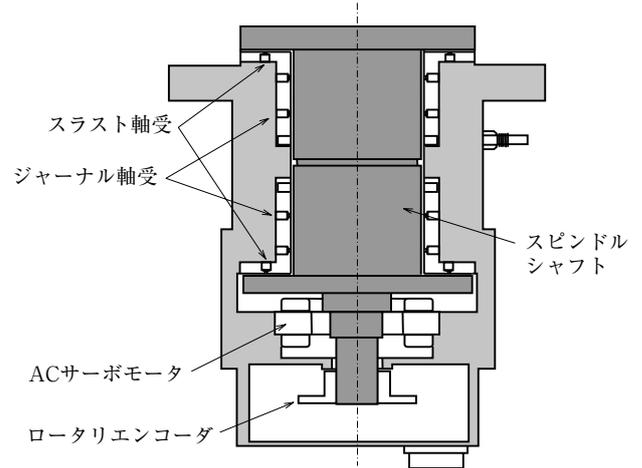


図5 振れ低減指針に沿って設計したシャフトとその特性



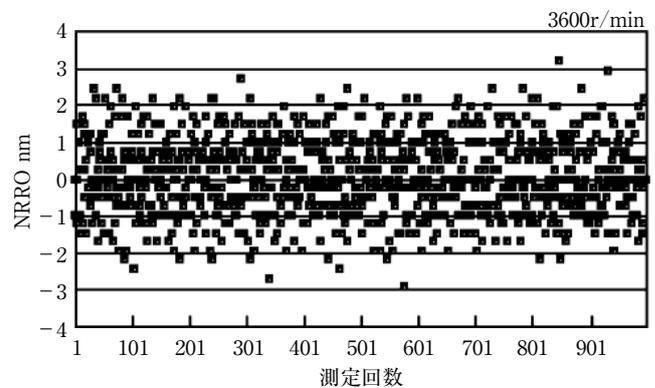
(a) 静圧エアスピンドルの構造

### 3. 静圧軸受技術の応用と展開

#### 3.1 超精密静圧エアスピンドル

静圧軸受とは、給気孔から流入された作動流体が形成する流体（気体）膜力によって負荷を支持する機構を指す。物体は、流体（気体）膜力によって非接触で支持されるため、低摩擦しゅう動を実現することができる。また、動圧軸受と同様、いわゆる作動流体によってもたらされる「平均化効果」により、極めて高い運動精度を実現し得る<sup>15)</sup>。今日、静圧軸受は、半導体、光学部品、情報家電部品の精密な加工・製造装置や検査装置に広く利用されており、機器の超精密化になくはならない存在となっている。

図6(a)に、光ディスクマスタリング装置用静圧エアスピンドル装置の構造一例を示す<sup>16)17)</sup>。本例では、2つのジャーナル軸受と2つのスラスト軸受によって回転軸が支持され、ACサーボモータで回転駆動している。回転数3600rpm時におけるエアスピンドルの非同期振れ試験の結果一例を図6(b)に示す<sup>16)17)</sup>。測定値はほぼ±3nmの範囲に収まっており、静圧軸受の超高回転精度特性を示す好例であるといえよう。



(b) 非同期振れ測定結果（ドリフトなどを除去したもの）

図6 超精密静圧エアスピンドルの構造と振れ精度<sup>16)17)</sup>

#### 3.2 超精密位置決めアクチュエータ

静圧軸受で支持される物体は常に非接触であり、物体間の静/動摩擦の切り替え（スティックスリップ）がないため、超精密アクチュエータの案内要素として極めて適している<sup>18)</sup>。さらに近年では、静圧スラスト軸受の軸受すきまを能動的に変化させることで、静圧軸受自身をアキシャル方向の位置決めアクチュエータとして利用しようとする試みも検討されている。図7に、水本らによって提案された能動自成絞り型超精密位置決め機構の構造を示す<sup>19)</sup>。物体を支持する空気静圧軸受の自成絞りの位置を圧電素子によって動かす機構であり、軸受すきま $h$ が絞り部でのすきま $h_d$ の3乗根に比例する特性を利用してその運動を縮小する、すなわち、圧電素子の動作精度以下の位置決めを実現する機構である。これにより、1nmオーダ、もしくはそれ以下の精度での位置決めの実現が報告されている。

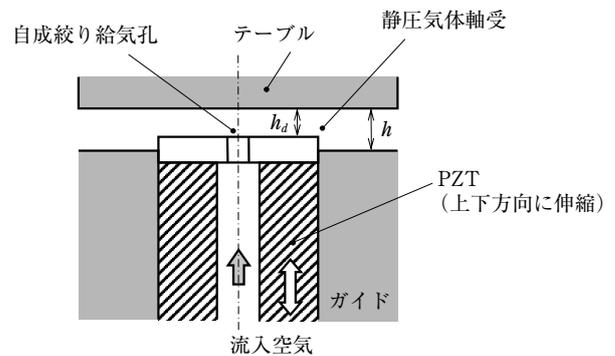
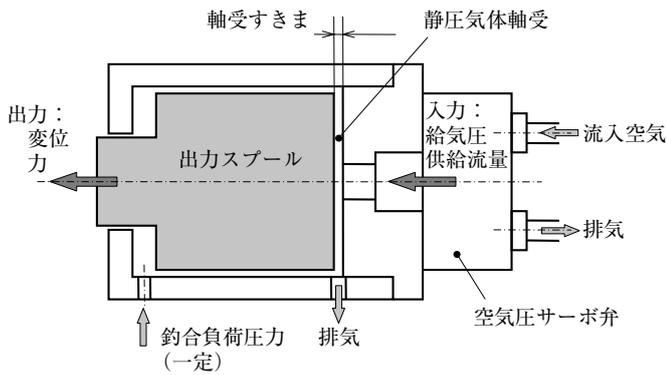


図7 能動自成絞り型超精密位置決め機構<sup>19)</sup>

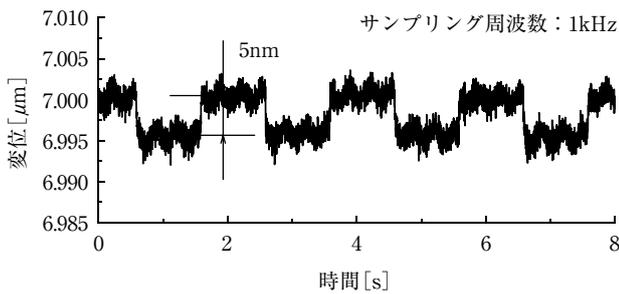
また、近年、著者らは、新しい位置決め要素として、「空気圧サーボ軸受アクチュエータ」を提案している。そ

の構造を図8(a)に示す<sup>20)</sup>。これは、空気圧サーボ弁を用いて軸受すきまへの給気圧を直接的に変化させ、軸受すきまの変化を出力変位として得る機構である。本アクチュエータは、静圧軸受が本来有する自動位置調整機能を利用するため、スプールに働く外力が一定の場合は、位置フィードバック制御を施すことなく、位置決めが可能であるという特長を有している。また、発熱も少なく、ドリフトやヒステリシスを生む不確定な要因も少ない。著者らは、現在までに、フィードバック制御を施すことなく、nmオー

参考文献



(a) 空気圧サーボ軸受アクチュエータの構造<sup>20)</sup>



(b) ステップ応答 (ステップ高さ=5nm)<sup>21)</sup>

図8 空気圧サーボ軸受アクチュエータの構造と位置決め性能

の位置決め精度の実現を確認している (図8 (b))<sup>21)</sup>。また、従来より、空気静圧軸受においては、剛性が小さいために支持物体に微小なふらつきが生じると報告されているが<sup>22)</sup>、本例のように、表面絞り軸受を用い、また、タンクによって上流側の流れを安定化すれば、そのふらつきは1nm程度に抑えられることも確認できている。今後、空気圧機器としての長をより積極的に生かし、電磁場の発生を好まない機器や、重荷重物体の超精密位置決めが必要な機器等への応用が期待される。

4. おわりに

機器の超精密化の流れを受け、現在、流体/気体軸受の需要はますます増えている。今まで通例的に転がり軸受が使用されていた機器であっても、流体/気体軸受への置換を検討したいという相談を受けることも多くなった。すでに繰り返し述べたように、流体/気体軸受は、機器の高精度化、高回転速度化に対してその力を発揮し得る。本稿がその積極的な利用の一助になれば幸甚である。なお、著者は、日本トライボロジー学会「超」を目指す軸受技術研究会」の幹事を務めている。軸受周辺技術に関して課題があれば、会にご参加いただくか、気軽に問い合わせをされたい。

- 1) O. Reynolds: On the Theory of Lubrication and Its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments, Including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil, Phil. Trans. Roy. Soc., **1** (1885) 157.
- 2) 小野京右: 高回転精度の必要性と現状・展望, 精密工学会誌, **67**, 7 (2001) 1051.
- 3) 羽上田公彦: HDD スピンドルモータの市場・技術動向, 月刊トライボロジー, **246** (2008) 39.
- 4) G.H. Jang, S.H. Lee and H.W. Kim: Finite Element Analysis of the Coupled Journal and Thrust Bearing in a Computer Hard Disk Drive, Trans. ASME, J. of Tribology, **128**, 2 (2006) 335.
- 5) 例えば, D.J. Foster, et al.: An Approximate Theoretical Analysis of the Static and Dynamic Characteristics of the Herringbone Grooved, Gas Lubricated Journal Bearing, and Comparison with Experiment, Trans. ASME, J. Lub. Tech., **91** (1969) 25.
- 6) 吉本成香: 流体潤滑軸受のダイナミクス, トライボロジスト, **46**, 2 (2001) 123.
- 7) 古林卓嗣: 小型機器用動圧軸受の理論と応用, トライボロジスト, **53**, 3 (2008) 162.
- 8) 例えば, T. Hirayama, T. Sakurai and H. Yabe: A Theoretical Analysis Considering Cavitation Occurrence in Oil-Lubricated Spiral-Grooved Journal Bearings with Experimental Verification, Trans. ASME, J. of Tribology, **126**, 3 (2004) 190.
- 9) 小幡茂雄: 動圧軸受の最前線, 第49回トライボロジー先端講座「ナノ運動精度を目指す軸受技術の最前線」テキスト, (2004) 21.
- 10) 菱田典明ら: すべり軸受におけるテーパシールからの潤滑油の漏洩の基礎研究, トライボロジー会議予稿集, (2008-5) 151.
- 11) T. Hasegawa, et al.: Dynamic Analysis of Disk-Spindle System in Hard Disk Drive, IEEE Trans. on Magnetics, **39**, 2 (2003) 784.
- 12) S. Tohma, et al.: Frequency Analysis of Hard Disk Drive Spindle System Supported by Hydrodynamic Bearings, J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf., **1**, 5 (2007) 717.
- 13) 平山朋子ら: 精密機器スピンドル用スパイラル溝付ジャーナル軸受の溝諸元の最適化に関する研究 (第1報), 機論 (C編), **72**, 713 (2006) 241.
- 14) 橋本巨ら: 軸受剛性の最大化を目的とした高速スラスト空気軸受のグループ形状の最適化, トライボロジスト, **52**, 1 (2007) 62.
- 15) 矢部寛: 静圧気体ジャーナル軸受の回転精度特性に関する基礎的研究 (第1報), 機論 (C編), **58**, 548 (1992) 1170.
- 16) 藤川芳夫, 浅原章伸: 静圧気体軸受の技術動向, NTN Technical Review, **69** (2001) 13.
- 17) 藤川芳夫: 静圧軸受の最前線, 第49回トライボロジー先端講座「ナノ運動精度を目指す軸受技術の最前線」テキスト, (2004) 1.
- 18) 例えば, 榊和敏: 精密位置決め用空気圧アクチュエータ, フルードパワーシステム, **31**, 5 (2000) 382.
- 19) 水本洋ら: 静圧案内面を運動縮小機構として利用した超精密位置決めシステムの開発, 精密工学会誌, **67**, 9 (2001) 1524.
- 20) 平山朋子ら: 超精密位置決め用空気圧サーボ軸受アクチュエータ (第1報), 2006年度精密工学会秋季大会講演論文集 (2006) 873.
- 21) 佐々木勝美ら: 超精密位置決め用空気圧サーボ軸受アクチュエータ (第2報), 2006年度精密工学会秋季大会講演論文集, (2006) 875.
- 22) 井川直哉, 島田尚一: 超精密切削加工の精度限界, 精密工学会誌, **52**, 12 (1986) 2000.