

論文 Article

高剛性空気軸受の開発

原稿受付 2011年3月31日

ものつくり大学紀要 第2号 (2011) 15~20

藤澤 政泰^{*1}, 斎藤 芳紀^{*2}, 鷲北 好晃^{*3}^{*1}ものつくり大学 技能工芸学部 製造学科^{*2}株式会社ミツウロコ^{*3}豊田自動織機株式会社

Development of Air Bearing with High Rigidity

Masayasu FUJISAWA^{*1}, Yoshinori SAITO^{*2}, Yoshiaki WASHIKITA^{*3}^{*1} Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists^{*2} Mitsuuroko Co. Ltd.^{*3} Toyota Industries Corporation

Abstract

A new high rigid air bearing has been developed for a solution of bottleneck in the development of a small and ultra high-precision machine. One of the developed air bearing has hybrid restrictors which restricts air flow at entrance and exit of air gap, and has achieved 2 times rigidity of conventional air bearing. The other developed air bearing has elastic restrictors which restricts air flow at exit of air gap, and has achieved 3 times rigidity of conventional air bearing.

Key Words : Air Bearing, Rigidity, Micro Ultra-Precision Machine

1. 諸言

空気軸受は、超精密加工機や測定機、ステッパ一等、ナノメータオーダーの精度の装置に必須の機械要素である^{1)~6)}。しかし、空気軸受の剛性は軸受面積に比例するため、小型化すると剛性が低下し、小型装置に使うことができない。空気軸受の剛性は軸受ギャップに反比例するので、これを小さくできれば小型化が可能であるが、現状では軸受ギャップを小さくすることが困難である。小型で高剛性の空気軸受の製作が困難なことが、精密小型機械の開発の隘路になっている。

空気軸受のギャップを小さくできない原因は軸受への空気供給口、または出口における絞りにある。供給口において絞る方式はオリフィス絞り、または自成絞りであり、出口で絞るのが面絞りである。軸受ギャップを小さくするには、オリフィ

ス径を小さくするか、面絞りであれば空気出口側のステップを小さくしなければならない。ギャップを $1\ \mu\text{m}$ 以下にするには、ミクロンオーダーの径のオリフィスか、あるいはサブミクロンのステップを形成する必要があるが、現状の加工技術では困難である。そこで、新しい方式の絞りを考案し、空気軸受の高剛性化を実現した。

2. 空気軸受の高剛性化

2.1 従来の空気軸受の絞り

最も多く使われている空気軸受の絞りはオリフィス絞りであり、空気供給口側で絞る方式である。オリフィスの流路抵抗と軸受ギャップの流路抵抗が直列に繋がった構造である。軸受ギャップが小さくなっても、オリフィスの流路抵抗はほとんど

変化しないのに対し、軸受ギャップの流路抵抗はギャップの3乗に反比例して大きくなるため、図2.1に示すようにギャップ部の空気の圧力が大きくなる。空気の圧力の増加量を軸受ギャップの変化量で除算した値が軸受剛性となる。軸受剛性が最も大きくなるのは、軸受ギャップの流路抵抗とオリフィスの流路抵抗が等しくなる場合であり、軸受直径 100mm、オリフィス径 0.1mm に対し、軸受ギャップが $10\mu\text{m}$ のとき流路抵抗が等しくなる。オリフィス径を小さくする程、軸受ギャップを小さくできるが、オリフィス径を $50\mu\text{m}$ 未満にすることができないため、数 μm 以下の軸受ギャップは実現されていない。

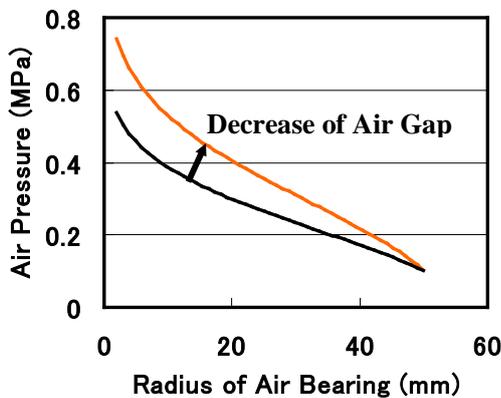


Fig.2.1 Pressure Distribution of Air Bearing with Orifice Restrictor

空気軸受の流路の出口側で絞るのが面絞りであり、その一つが図2.2のステップ絞りである。流路抵抗はギャップの3乗に反比例するので、ギャップが小さくなると、ギャップ部の流路抵抗に比し、出口のステップ部の流路抵抗が急激に大きくなる。このため、軸受部の空気圧が大きくなり、軸受剛性が生じる。オリフィス絞りと同様に、ステップ絞りもギャップ部の流路抵抗とステップ部の流路抵抗が同じとき、剛性が最も大きくなる。ステップ絞りはオリフィス絞りより、軸受ギャップを小さくすることが可能で、 $5\mu\text{m}$ 程度まで小さくできる。それでも軸受ギャップをサブミクロンにするにはステップもサブミクロンにする必要があり、高度な精密加工技術をもってしても、その加工は容易ではない。

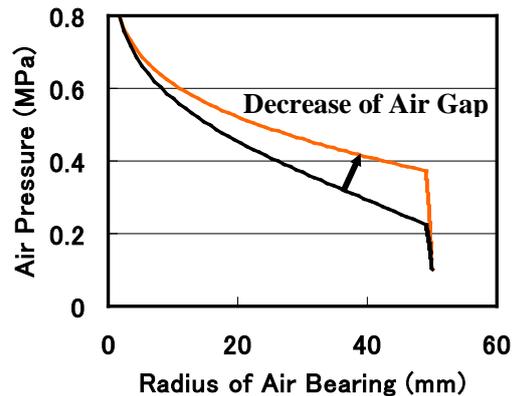


Fig.2.2 Pressure Distribution of Air Bearing with Surface Restrictor

2.2 新方式空気軸受

2.2.1 ハイブリッド絞り方式

軸受ギャップの変化に伴う空気圧分布の変化は、オリフィス絞りでは空気供給部の変化が大きいのに対し（図2.1参照）、ステップ絞りでは空気出口部の圧力変化が大きい（図2.2参照）。そこで、オリフィス絞りとステップ絞りを組み合わせた図2.3の絞り、以降これを「ハイブリッド絞り」という。このハイブリッド絞りによって、図2.4に示すように軸受部全体で圧力を変化させ、軸受剛性を向上できると考えられる。

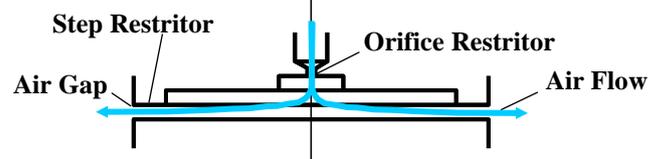


Fig.2.3 Schematic Diagram of Air Bearing with Hybrid Restrictor

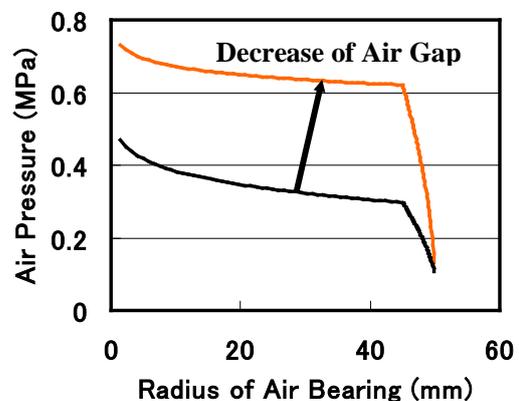


Fig.2.4 Pressure Distribution of Air Bearing with Hybrid Restrictor

2.2.2 弾性絞り方式

空気軸受の高剛性化法としてアクティブ制御法がある⁷⁾⁸⁾。これは軸受ギャップの減少にたいして空気の供給圧を増大させ、剛性を向上させる方法であるが、制御無しに軸受剛性が得られる空気軸受の特長を生かしておらず、ほとんど使われていない。そこで、軸受ギャップの減少に伴って、自動的に空気出口部が絞られる図 2.5 の構造を考案した。軸受ギャップの減少に伴って軸受内の空気圧が上昇し、これによって弾性板が変形して空気の出口部のギャップが小さくなる構造である。以後これを「弾性絞り」という。

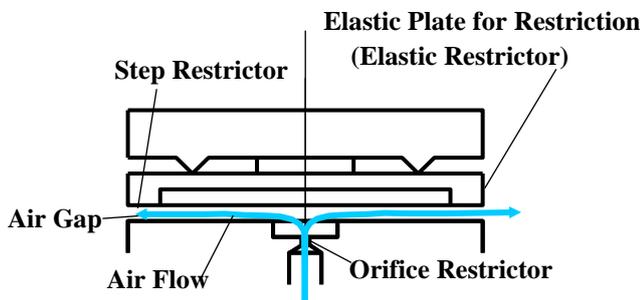


Fig2.5 Schematic Diagram of Air Bearing with Elastic Restrictor

3. 実験方法

3.1 軸受の構成

理論計算しやすい軸対称のスラスト軸受を採用した。図 3.1 のφ100mmの軸受面を超精密加工機（東芝機械製 ULG-100A）で加工し、実験に供した。オリフィス絞りのリセス部深さは軸受の動的安定性に影響するので、図 3.2 に示す調整できる構造にした。

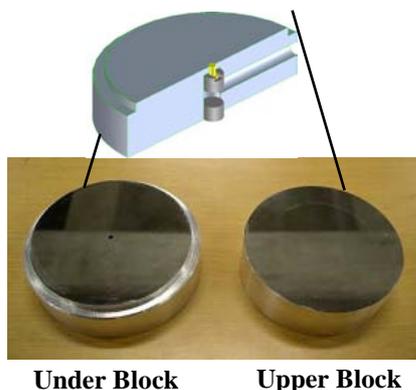


Fig. 3.1 Under and Upper Block of Air Bearing

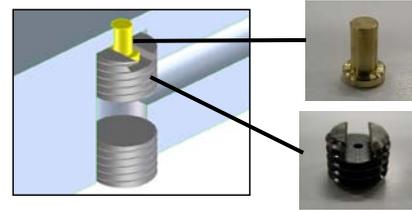
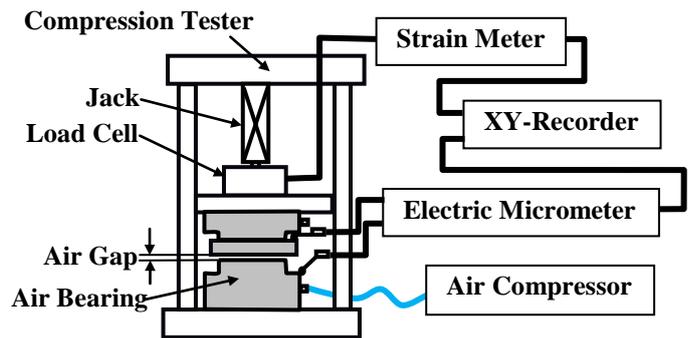


Fig. 3.2 Adjusting Mechanism of Recess Depth of Orifice

3.2 軸受剛性の測定

軸受面には数トンの荷重が加わるため、高い剛性を有する図3.3の軸受剛性測定装置を製作した。2個の電気マイクロ（TESA 製 TT80）で空気軸受の上部ブロックと下部ブロックの位置を測定し、その位置の差から、軸受ギャップを求めた。荷重はロードセル（共和電業製：LC-20TV）で測定した。荷重と軸受ギャップの測定値をXYレコーダに入力し、剛性を求めた。



Compression Tester

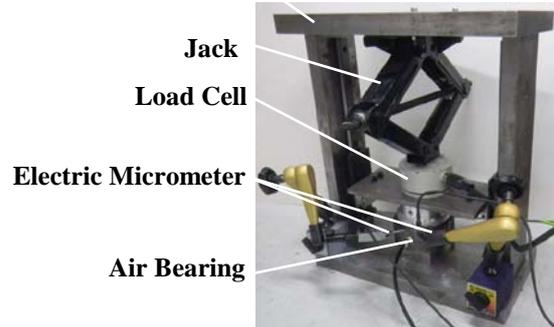


Fig3.3 Measuring Instrument of Rigidity of Air Bearing

4. 実験結果

4.1 ハイブリッド絞り方式

空気軸受の剛性は、軸受ギャップの変化に伴う

空気圧分布の変化を求めることによって、計算できる。図 4.1 のオリフィス、ギャップ 1、ギャップ 2 (ステップ部) における空気質量流量 m_0, m_1, m_2 は

$$m_0 = \psi a \frac{p_i}{\sqrt{RT}}$$

$$m_1 = \frac{2\pi h_1^3 (p_i^2 - p_s^2)}{K \ln(r_s / r_i)}$$

$$m_2 = \frac{2\pi h_2^3 (p_s^2 - p_o^2)}{K \ln(r_o / r_s)}$$

ただし

$$\psi = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left\{ \left(\frac{p_s}{p_i} \right)^{2/\kappa} - \left(\frac{p_s}{p_i} \right)^{(\kappa+1)/\kappa} \right\}}$$

$$\text{ただし } \frac{p_s}{p_i} \geq \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\kappa/(\kappa-1)}$$

$$\psi = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{2/(\kappa-1)}}$$

$$\text{ただし } \frac{p_s}{p_i} < \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\kappa/(\kappa-1)}$$

$$K = \frac{24\mu RT}{m_m}, \quad a = 2\pi r_{ol} (s + h_1)$$

- p_i : 供給空気圧, p_o : 大気圧
- p_s : ステップ境界における空気圧
- R : ガス定数
- T : 絶対温度
- κ : 空気比熱比
- μ : 空気粘性係数
- m_m : 1 モルの空気質量
- $r_i, r_s, r_o, h_1, h_2, s, s_2$: 図 4.1 参照
- r_{ol} : オリフィス半径

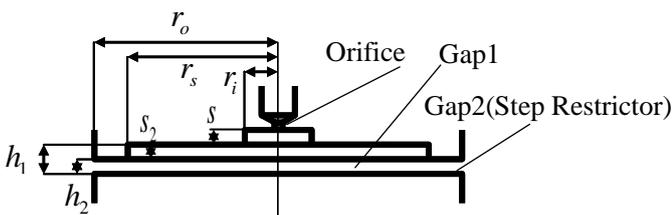


Fig4.1 Schematic Diagram of Hybrid Restrictor

と表される。質量流量は保存されるので、ニュートン法によって質量流量とステップ部境界の圧力 p_s を求め、下記式より、圧力分布を計算する。圧力分布を数値積分して空気軸受に加わる力を求める。軸受ギャップの減少に対するこの力の増大量を求めることによって軸受の剛性を計算することができる。

$$p(r) = \sqrt{p_s^2 + \frac{K}{2\pi} \int \frac{m_1}{r h_1^3} dr}$$

$(r_s > r > r_i)$

$$p(r) = \sqrt{p_o^2 + \frac{K}{2\pi} \int \frac{m_2}{r h_2^3} dr}$$

$(r_o > r > r_s)$

図 4.2 にハイブリッド絞りの軸受ギャップと剛性の関係を示す。実験値と計算値はほぼ一致しており、ハイブリッド絞りはステップ絞りの 2 倍以上に剛性を向上できることがわかる。

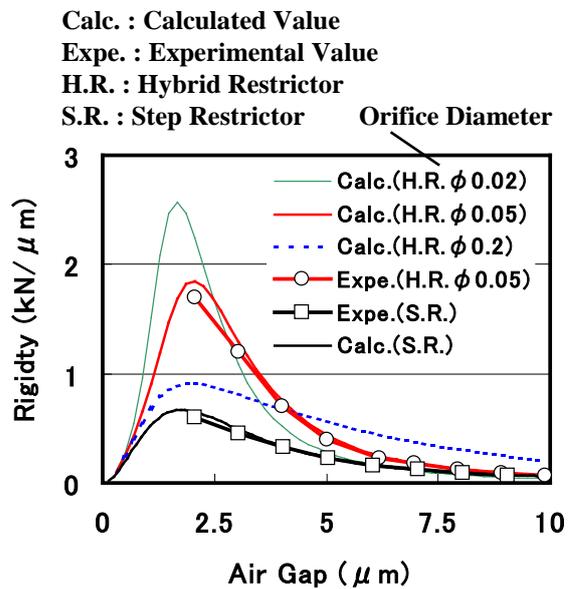


Fig4.2 Rigidity of Air Bearing with Hybrid Restrictor and Step Restrictor

4.2 弾性絞り方式

弾性絞りでは、軸受内の空気圧分布 $p(r)$ によって弾性板が図 4.3 に示すように変形(変形量: $w(r)$)する。これによって軸受ギャップが変化し、空気圧分布が変化するので、下記連立方程式を数値的に解き、軸受剛性を求めた。

$$w(r) = \int_{r_i}^r \frac{1}{r} \int_{r_i}^r r \int_{r_i}^r \frac{1}{rD} \int_{r_i}^r rp(r)dr^4 + c_1 \int_{r_i}^r \frac{1}{r} \int_{r_i}^r r \int_{r_i}^r \frac{1}{rD} dr^3$$

$$+ c_2 \int_{r_i}^r \frac{1}{r} \int_{r_i}^r r dr^2 + c_3 \int_{r_i}^r \frac{1}{r} dr + c_4$$

$$p(r) = \sqrt{p_o^2 + \frac{K}{2\pi} \int \frac{m_1}{\{h_1 + w(r)\}^3} dr}$$

ただし

- D : 弾性板曲げ剛性
- c_1, c_2, c_3, c_4 : 積分定数
- p_o : 大気圧
- m_1 : 空気質量流量
- K : 4.2 節参照
- $r_i, r_1, r_2, r_s, r_o, h_1, h_2, s, s_2$: 図 4.3 参照

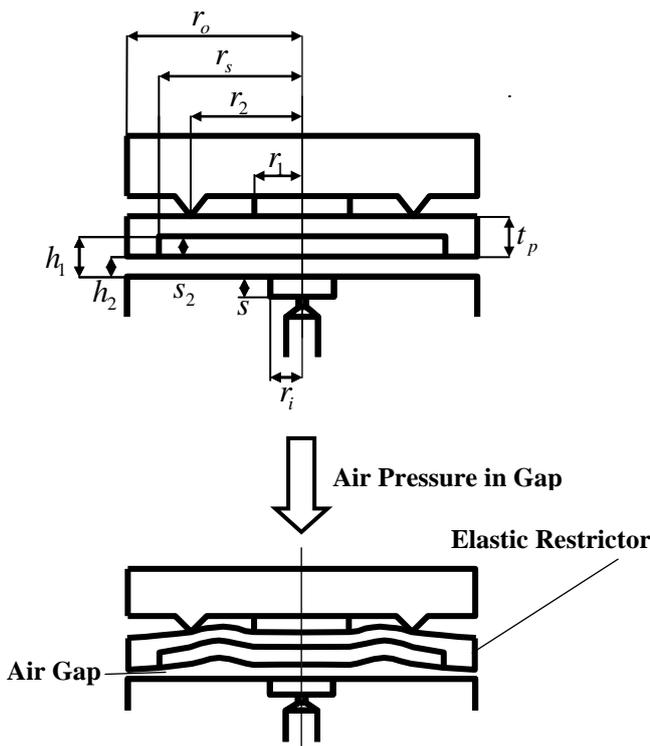


Fig4.3 Schematic Diagram of Elastic Restrictor Deformation by Air Pressure in Gap

図 4.4 に弾性絞り板の厚さ t_p の軸受剛性への影響を示す。板厚が薄いほど弾性絞りの効果によって、軸受剛性が向上していることが分かる。板厚が 8mm 以下になると、動的不安定性が生じるので、9.5mm を最小値とした。

図 4.5 に弾性絞りの支持位置の半径 r_2 の剛性へ

の影響を示す。 r_2 が 34mm のとき剛性が最も大きくなり、ハイブリッド絞りの約 1.5 倍に高剛性化できることがわかった。

Supportive Radius r_2 of Elastic Restrictor is 34mm

t_p : Thickness of Elastic Restrictor

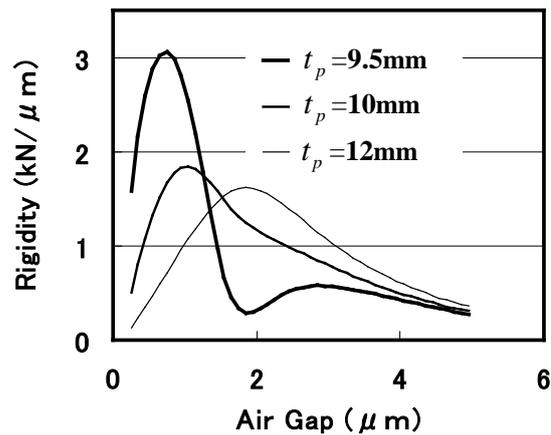


Fig4.4 Effect of Elastic Restrictor Thickness on Rigidity of Air Bearing

Thickness of Elastic Restrictor $t_p = 9.5\text{mm}$

C.V.: Calculated Value

E.V.: Experimental Value

r_2 : Supportive Radius of Elastic Restrictor (Refer Fig4.3)

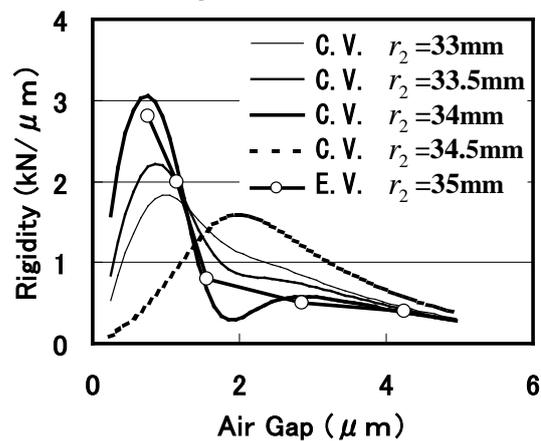


Fig4.5 Effect of Supportive Position of Elastic Restrictor on Rigidity of Air Bearing

5. 結 言

空気軸受の高剛性化を目的に、新方式の軸受を製作し、計算と実験からその剛性を求め、以下の結果を得た。

- (1) ステップ絞りとオリフィス絞りを組み合わせたハイブリッド絞りでは、ステップ絞りの約2倍の高剛性化を達成した。
- (2) 軸受内の空気圧の上昇に伴って、絞りが変形し、空気出口で空気流量を絞る弾性絞りを考案し、ハイブリッド絞りの約1.5倍、ステップ絞りの3倍の高剛性化を達成した。
- (3) ステップ絞りはオリフィス絞りの2倍以上の剛性を有するので、本開発の弾性絞りは一般的なオリフィス絞りの6倍以上の剛性を有する。したがって、軸受寸法を1/6~1/2.5程度に小型化が可能である。

本研究は2005年の藤澤研究室における斎藤、驚北両氏の卒業研究を端緒に、その後、剛性測定装置と剛性計算プログラムの改良を進め、論文として纏めた。考案した新方式空気軸受については小型超精密装置への活用を進めている。

文 献

- 1) 十合晋一：気体軸受，共立出版株式会社，(1983)，2
- 2) 林巖崗,青山藤詞郎,稲崎一郎：表面絞り形静圧空気軸受の負荷特性と最適設計,精密工学会誌,53,4,(1987)619
- 3) 谷順二：能動空気軸受によるロータ系の自励振動の制御,日本機械学会論文集.C編,66,643,(2000)724
- 4) 趙鵬,畑山和也,里見：空気式静圧案内に関する基礎的研究,日本機械学会,2004年度年次大会講演論文集,(2005)249
- 5) 向井俊夫:エアベアリングの動特性解析,新日鉄技報,383(2005)13
- 6) CHEN Y.s.et al:Influences of operational conditions and geometric parameters on the stiffness of aerostatic journal bearings, *Precis Eng*,34,4,(2010)722
- 7) 磯部浩巳,久曾神煌,小島茂：圧電素子の高周波振動を利用したアクティブスクイーズ空気軸受の開発(第1報),精密工学会誌,65,3,(1999)438
- 8) AGUIRRE Gorika et al.:A multiphysics model for optimizing the design of active aerostatic thrust bearings, *Precis Eng* ,34,3,(2010)507