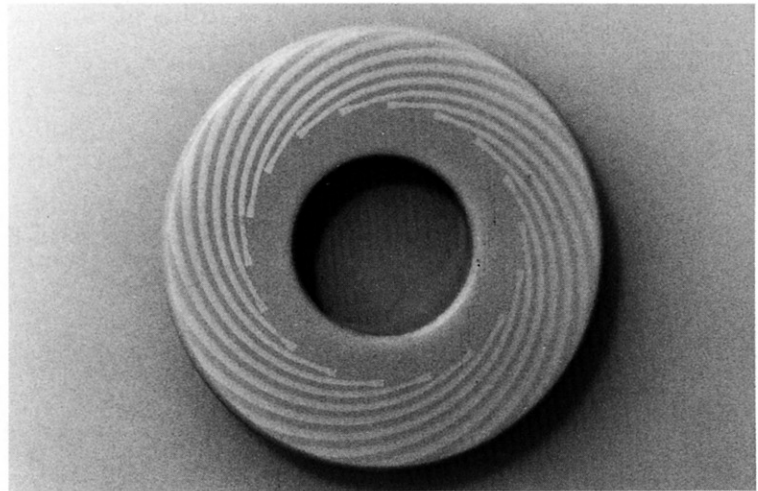


高速ポリゴンミラー用 エアベアリングの開発

The Development of Gas Bearings for
High Speed Optical Scanner Units

岩村義雄
高橋祐幸
伊藤豊次
情報機器事業本部
生産技術研究センター



Iwamura, Yoshio
Takahashi, Yuko
Itoh, Toyotsugu
Production Engineering
Research Center
Business Machines Headquarters

Abstract;

Recently, development of higher speed optical scanner units has been required as a result of the demand for higher speed and higher quality in the digital information machines.

Usually, ball bearings have been used for optical scanner units, but rotation speed was limited from 15,000 to 20,000 rpm, which limited life span and precision. We have developed self acting gas bearings of higher quality and higher speed and obtained good results.

1

まえがき

近年、デジタル複写機、レーザービームプリンター等に代表されるデジタル情報機器は高速で高画質の性能を一層求められている状況にある。そのために光走査系の主要部品であるポリゴンミラーユニットにも、高速高精度の光走査性能が要求されている。ポリゴンミラーを回転させるモーターには、通常ボールベアリングが使用されているが、接触圧による抵抗や局所的な摩耗などが高速回転時の不安定要因となり、光学性能を保証できる回転数は現状では最高でも15,000~20,000rpm程度とされており、高速機開発の障害のひとつとなっている。そこで、我々はポリゴンミラーユニットの高速回転での性能向上を目的に、動圧式エアベアリングの開発を行った。その成果について解説する。

2

エアベアリング

2.1 開発の背景

エアベアリングは、圧縮空気を可動部と固定部の間に送り込み、非接触状態でベアリング機能を持たせるものであるが、方式的には静圧式と動圧式に分かれる。

静圧式は外部から圧縮空気を供給し浮力を発生させる方式であり、低速回転においても高精度の回転性能、高剛性を得られるので、超精密加工機や測定機等に用いられるが、圧縮機が必要になり一般的に大型になる。

一方、動圧式は自らの回転により空気を巻き込み浮力を発生させる方式であり、起動から浮上までの摺動回転時に傷、こすれが発生する危険性はあるが、小型軽量で高速回転時の高精度の回転性能を得ることが可能である。

エアベアリングの特徴をボールベアリングと比較し、Table 1に示した。

以上の特徴から、高速スキャナー用ベアリングとして、動圧式エアベアリングに着目して開発を行った。動圧発

Table 1 Feature of ball and gas bearing

	ボールベアリング	エアベアリング	
		静圧式エアベアリング	動圧式エアベアリング
長所	<ul style="list-style-type: none"> ○低コスト ○設計が容易 	<ul style="list-style-type: none"> ○低トルク、低摩擦 ○油無しの清浄回転 ○低騒音、低振動 ○予圧調整不要 	<ul style="list-style-type: none"> ○低高速全域で高精度、高剛性 ○起動、停止時の摩擦無し
短所	<ul style="list-style-type: none"> ○高速回転で回転精度劣化(精度保証回転数20,000rpm以下) ○グリスにより周囲を汚す 	○高精度な加工技術が必要	
		<ul style="list-style-type: none"> ○専用の圧縮機が必要(構造が大型化) 	<ul style="list-style-type: none"> ○高速回転において高精度 ○小型構造可能
			<ul style="list-style-type: none"> ○起動、停止時に摩擦有り ○負荷容量小 ○動圧溝加工難

生溝の微細加工、ベアリング形状の最適設計、スキャナー性能の確認などの検討結果について以下に述べる。(本文中では以下動圧式エアベアリングをエアベアリングと呼ぶ。)

2.2 開発仕様

エアベアリングはこれまでいくつかの開発例がすでに発表されているが¹⁾²⁾、その適用は低速や高負荷の使用、例えばレコードプレーヤーやポンプ用などが多いためベアリングは比較的大型になり、また負荷容量を増すためにグリスなど潤滑剤を用いた構造になっている。潤滑剤を使用すると摩擦抵抗の増加により回転数に対して制約条件になることと、油飛散がクリーンな環境での使用の障害になるなどの理由から、潤滑剤を使用しない乾式構造とした。ポリゴンミラー用としての小型軽量で高速高性能のエアベアリングを開発するため、ベアリングの開発条件を光学系の現在及び将来の仕様を想定して設定した。諸条件の代表例を、Table 2に示す。

Table 2 Typical specification of gas bearing

Rotor weight	150~250 (g)
Radial bearing size	~20 (mm)
GD ²	3,000~4,000 (g·cm ²)
Rotating speed	~30,000 (rpm)
Deflection in rotating	~3 (μm)

3

エアベアリングの最適設計

Fig.1に今回開発したエアベアリングの基本構造を示す。これまでにスラスト、ラジアル単独あるいはその複合形のエアベアリングがいくつか報告されているが³⁾、形状の簡易化や組立性を考慮し、また小型であることによる剛性の劣化を防ぐため、上下方向の2個のスラストベアリ

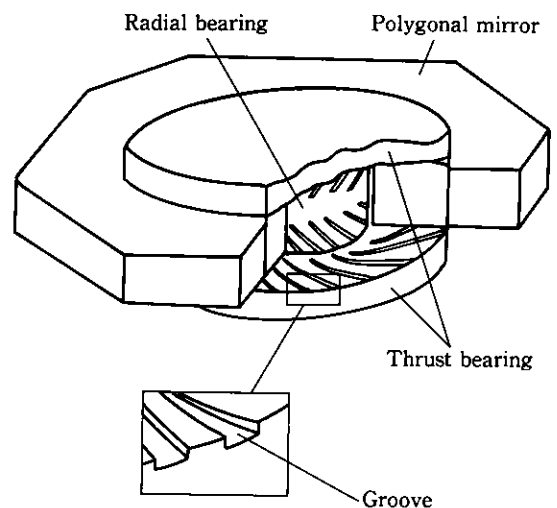


Fig.1 Cross section of gas bearing unit

ングに回転部中央の1個のラジアルベアリングを組み合わせた構造とした。以下この形状でポリゴンミラー用エアベアリングユニットとしての最適設計を行った内容について紹介する。

3.1 負荷容量と剛性

エアベアリングの浮上特性の解析はWhippleが初めて行って以来いくつか理論式が報告されているが、それらの理論式から実用上の適用性を検討しMuijderman⁴⁾、Vohr⁵⁾らの式を用いて性能試験を繰り返した。しかし、これらの式はラジアル、スラスト共に単体としての性能を求めたもので、我々が構成した組合せベアリングには初期条件から当てはまらない点が多かった。

そこで、これらの式をもとに組合せベアリングについての独自の設計理論の作成を行い、実測値と比較した。

Fig.2およびFig.3に浮上量の設計理論値及び実測値の一例を示す。起動直後500rpm付近で回転部は完全に浮上し、目標とする30,000rpmまでの範囲で浮上量が設計値と良く相関が取れている。設計値との誤差分についてはベアリングの形状誤差や回転中の遠心力、風損などによるものと推定される。

Fig.4に30,000rpmを設定回転数として開発したベアリングにおける、スラスト方向のふれ変動を示す。ポリゴンミラー Scanner では、スラストふれ変動は倒れ角精度

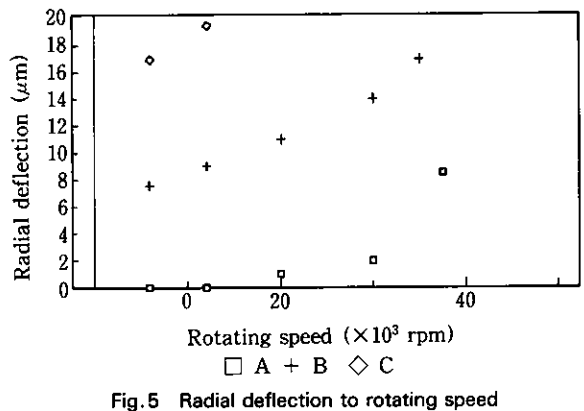
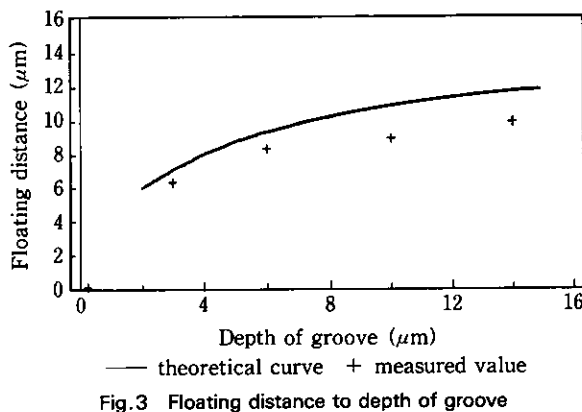
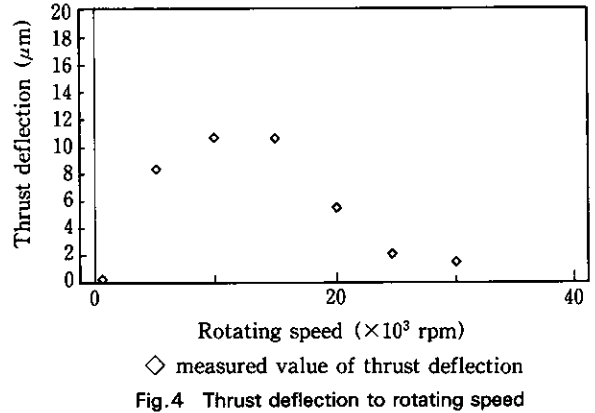
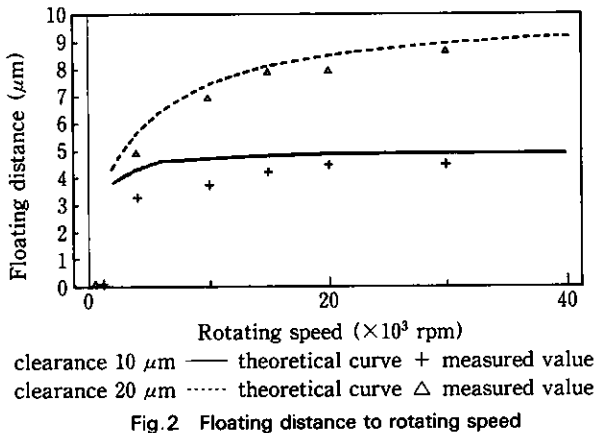
に影響する。回転数が増加するに従いふれ変動も増加するが、設定回転数に近づくにつれて減少し、30,000rpmで最小値1.5 μm である。この値は倒れ角に計算すると10"に相当する値であり、光学特性を十分満足させる。

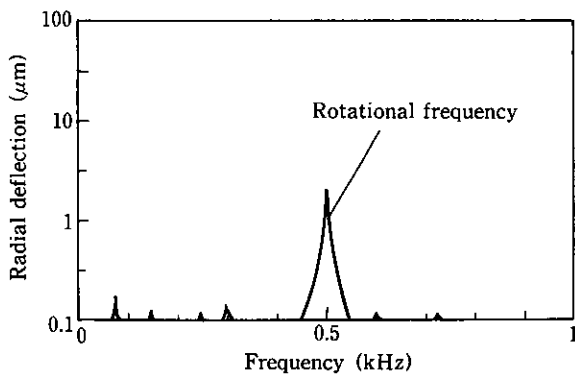
3.2 回転安定性

エアベアリングを設計する際に避けられない問題として、高速回転時のふれ回りによる不安定現象があり、回転の安定性についても設計を行わなければ最適なベアリング性能は得られない。

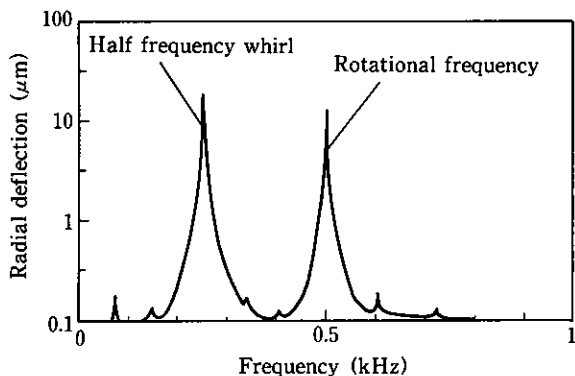
Fig.5にラジアル方向のふれ精度測定結果を示す。前項の設計理論をもとに開発した3種のベアリングのうち、ベアリングAにおいては30,000rpmで2 μm 以下のふれであり、安定した回転性能を示している。これに対しベアリングB、Cは回転初期からふれが大きく、満足した性能は得られていない。Fig.6にベアリングA、Bのふれ変動について周波数解析した結果を示す。この結果からわかるように、ベアリングAの場合回転数成分のみであるが、ベアリングBは回転数成分の半分の周波数のふれ回りが発生しており、いわゆるHFW現象(Half Frequency Whirl)であることを示している。

このような不安定現象の発生を防ぎ、安定した回転性能が得られるベアリングを設計するため、Malanoski⁶⁾のラジアルベアリング単体での安定判別理論、及び開発し





(a) A



(b) B

Fig.6 Frequency analysis of radial deflection

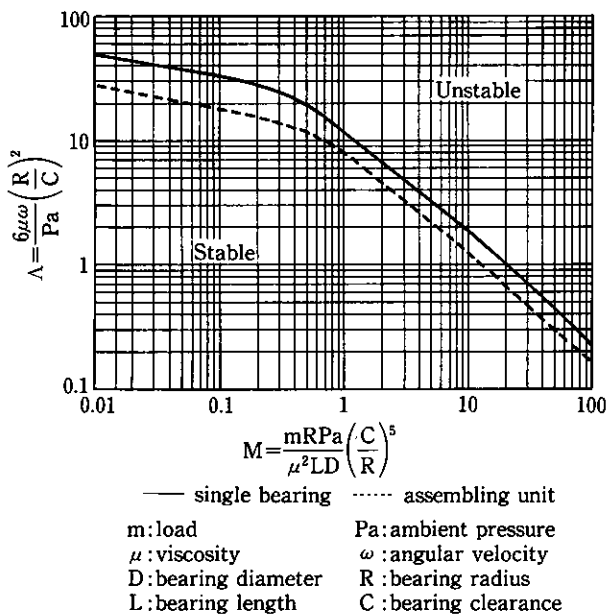


Fig.7 Instability area

たベアリングの実験結果から、組合せベアリングにおける安定領域を求めた。Fig.7に求めた安定領域を示す。ここでMは負荷容量、 Λ は動圧効果を表す無次元量である。

以上の負荷容量、剛性及び安定限界の設計理論を用いることにより、最適な諸元が決定され、目的にあった高速エアベアリングの開発を行うことができる。

4 エアベアリングの加工法の開発

エアベアリングの性能を最大限に引き出すためには、最適材料の選定や、動圧溝形状のミクロンオーダーの加工技術が必要である。そこで、加工精度やベアリングの使用条件の観点から、以下の点について検討を行った。

4.1 材料特性

エアベアリングは、起動直後から浮上するのに十分な動圧が発生する回転数に達するまでの間や、停止直前には、回転部が滑り軸受と同様な摺動状態にあるため、接触によるかじり等の事故が発生しやすい。そのためエアベアリングには摺動による表面状態の変化が起こりにくく、接触による傷・かじりのない材料が求められる。そこで、エアベアリングの材料にセラミックスの使用を検討した。数種の材料について特性試験を行い、その中で最も良好な結果を得る材料を選定した。

今回選定したセラミックスの特性試験の一例として、Fig.8に同一材料を互いに摺動させた摩耗試験の結果を示す。10km以上の摩耗試験を行い、表面粗さの劣化やかけ、かじりなどの発生がない事を確認した。Table 3にその他の材料特性値を示す。外部の温度変化や摩擦など、回転時の材料に与える変動に対しても十分な値である。脆性材料であるセラミックスの特性として、金属材料に比べて鋭利なエッジは得られにくいですが、微小なエッジのだけは回転性能にほとんど影響せず、逆にエッジに「かえり」が発生しにくく摺動時のかじり事故には有利である。

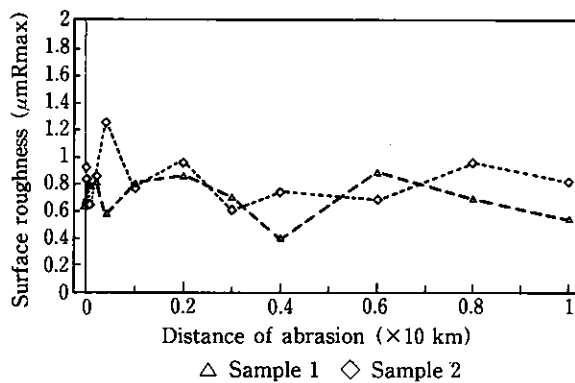


Fig.8 Result of abrasion test

Table 3 Material characteristic value

Bending strength	130~150 (kgf/mm ²)
Fracture toughness	7.0~9.0 (MN/m ^{3/2})
Vickers hardness	1,500~1,650 (kg/mm ²)
Coefficient of thermal expansion	3.0~4.0 (10 ⁻⁶ /°C)
Coefficient of friction	0.1

4.2 ベアリング溝加工精度

ベアリング最適設計から求められる性能を十分に得るため、材料を成形、研磨加工することにより寸法精度、表面粗さを向上させたのちに、独自に開発した加工法により表面に微細溝を加工した。

Fig.9は今回開発した加工法によって得られた溝形状である。溝形状誤差は約 $1\mu\text{m}$ であり、溝設計の許容誤差に対して十分な精度である。

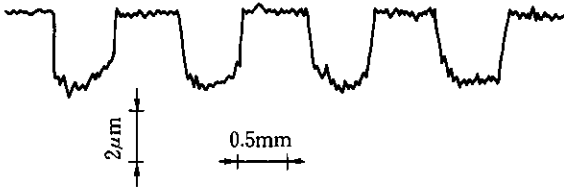


Fig.9 Profile of groove

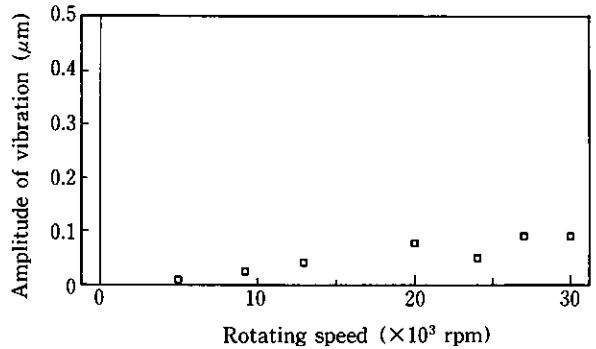


Fig.10 Amplitude of thrust vibration to rotating speed

Table 4 Test results

Rotating speed	30,000 (rpm)
Radial deflection	2.0 (μm)
Thrust deflection	1.5 (μm)
Amplitude of vibration	0.1 (μm)
Processing precision of groove	1.0 (μm)

5 開発したエアベアリングの性能

今回開発したエアベアリングが光学系へ与える影響のひとつとして、回転中に発生する振動をベアリング固定部で測定した結果についてFig.10に示す。回転による振動は $0.1\mu\text{m}$ 以下のごく微小な値であり、光学系に与える影響は非常に小さい。

以上、開発したエアベアリングの性能結果について、Table 4にまとめる。

6 おわりに

以上のように、これまで単体のみの設計理論から、あるいは経験的に決定してきた組合せエアベアリング諸元についての設計理論を確立することができた。この設計理論を用いて、小型でかつ高速のポリゴンミラー用エア

ベアリングの開発を行なった結果、30,000rpmにおいて良好な性能を得るエアベアリングユニットの開発ができた。

さらに、組合せ設計理論の確証を進め、形状による性能評価データの蓄積を行なうと共に、現在の加工法を改良し安価で最適なエアベアリングの開発を行っていく。

●参考文献

- 1) 日本機械学会, “気体軸受に関する調査研究分科会成果報告書”, (1973)
- 2) 日経メカニカル, 80, (1982.5.24)
- 3) 十合晋一: “気体軸受—設計から製作まで—”, 共立出版, (1984)
- 4) E.A.Muijderland: “Spiral Groove Bearings”, Philips Technical Library, (1966)
- 5) J.H.Vohr, C.Y.Chow: “Characteristics of Herringbone-Grooved, Gas-Lubricated Journal Bearings”, Trans.asme d.87.3,568 (1965)
- 6) S.B.Malanoski: Trans.asme f.89.4,433 (1967)