

## F-0434 超音波振動を用いたアクティブエアベアリング

## —円すい面形状を持つ空気軸受の試作—

## Active Air Bearing using Ultrasonic Oscillation

## -Experimental Air Bearing with Cone-shaped Oscillator-

○正 大岩 孝彰 (静岡)

田中 宏幸 (静岡)

市村 誠 (静岡)

佐藤 正典 (本多電子)

Takaaki OIWA, Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka

Hiroyuki TANAKA, Shizuoka University

Makoto ICHIMURA, Shizuoka University

Masanori SATO, Honda Electronics, Toyohashi, Aichi

This study proposes an active air bearing based on the squeeze air film generated by the ultrasonic oscillation. The squeeze film generated by ultrasonic oscillator lifts and supports the rotor without residual vibrations and without use of any air supply. In this paper, a split rotor with two conical inside surfaces and a cone-shaped oscillator are employed. Radial and axial runouts were estimated by measuring displacements of a reference ball mounted on the rotor with displacement sensors. Axial runout of the rotor during rotation was less than  $0.5 \mu\text{m}$ . Moreover, non-repeatable runout in axial direction was less than  $0.33 \mu\text{m}$ . However, radial runout of the ball was considerably large because of attitude variations of the rotor.

**Key Words** : Active Air Bearing, Squeeze Air Film, Ultrasonic Actuator, Positioning

## 1. 緒言

近年、超精密加工機や測定機に用いられる案内要素の高精度化の要求はますます高くなっている。特に回転軸受では、高精度化と高剛性化が求められている。静圧空気軸受は、気体潤滑膜によるアベレーシング効果により高い回転精度が得られるが、反面空気膜の圧縮性と低粘性による軸受剛性や振動減衰性の不足という問題が生じている。そこで、機械式軸受や静圧軸受の軸の振れ回りを能動的に制御し、回転精度と剛性を向上させるアクティブベアリングの研究が行われてきた<sup>(1)~(3)</sup>。

一方従来より、軸受面を高周波振動させた際に生じるスクイズ効果を応用した空気軸受が研究されてきた<sup>(4)</sup>。このスクイズ型空気軸受についても、積層型圧電アクチュエータを用いて能動的な制御を行う空気軸受が提案されている<sup>(5)~(7)</sup>。しかし、この場合の振動周波数は数百 Hz~数 kHz と低く、軸に残留振動が発生する問題があった。そこで、本研究では軸受面を超音波領域の周波数(約 20 kHz 以上)で振動させることにより残留振動を低減させ、同時に回転中の軸の心振れ・姿勢の制御を能動的に行う新しい軸受の基礎的研究を行う。既報<sup>(8),(9)</sup>では、超音波領域での駆動により残留振動がほぼ消滅すること、浮上物体の精密位置決めを行った結果、30 nm 程度の位置決め分解能が得られることなどを確認した。本報では、円すい面を持つ空気軸受を試作した結果について報告する。

## 2. 原理

原理図を図 1 に示す。超音波振動子に浮上用高周波信号(正弦波)を印加し、スクイズ空気膜を発生させ、物体を浮上させる。このとき浮上物体には加振周波数と同じ振動数を持つ微小な残留振動が生

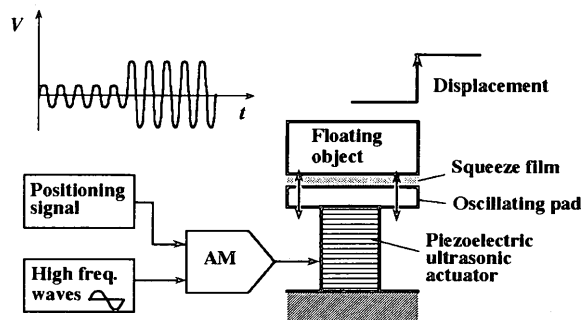


Fig. 1 Principle of active air bearing based on squeeze air film generated by ultrasonic actuator

ずるが、加振周波数を超音波領域とすることで、加振振幅の数百分の1のレベルに減少させることが可能である<sup>(4),(8)</sup>。そして、浮上物体の平均浮上量は振動面の振幅の大きさに

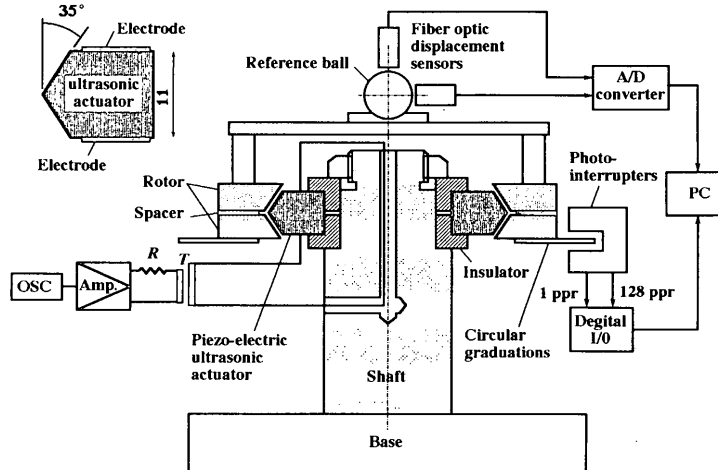


Fig. 2 Experimental setup of air bearing using ultrasonic actuator

ほぼ比例するので、位置決め制御用信号を用いて加振信号の振幅を変調すれば、浮上物体の位置決めを行うことができる。本報では位置決め制御は行わず、超音波振動による回転体の浮上と回転誤差の測定を行った。

### 3. 実験装置

実験装置の概要を図2に示す。円盤状（ $\phi 60 \times 11$ 、内径 $\phi 32$ ）のセラミックス製圧電素子の外周を算盤珠のような形状に研削加工した。円すい面の真円度は $8.7 \mu\text{m}$ 程度であった。超音波振動させた際の共振周波数は $23.80 \text{ kHz}$ であり、振動面の振動振幅は最大 $3.7 \mu\text{m}$ 程度（アンプ出力 $48 \text{ Vp-p}$ 時）である。回転体はSUS材を用いて、二つ割り構造とし、円すい内面は研削加工した。円すい内面の真円度は上部 $9.4 \mu\text{m}$ および下部 $12.0 \mu\text{m}$ であった。上下の回転体の間にスペーサ（ $t 20 \mu\text{m}$ ,  $30 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$ および $150 \mu\text{m}$ ）を挟むことにより、振動子とのすきまを調整する。回転体の上部には、基準球（軸受用鋼球SUJ2,  $1/2$ "、グレード20、公称真球度 $0.5 \mu\text{m}$ ）を取り付け、光ファイバ変位計（Philtec社、周波数特性DC~ $50 \text{ kHz}$ ）により半径方向と軸方向の振れを測定した。回転部全体の質量は、 $320 \text{ g}$ 程度となった。

### 4. 回転誤差測定結果

回転体を浮上させ、静かに回転させて半径方向の振れを5回転にわたって測定した結果を図3に示す。回転誤差は $72 \mu\text{mp-p}$ であり、振動子や回転体の円すい面の真円度と比較してかなり大きい結果となった。これは振れを測定する基準球が回転体よりも $30 \text{ mm}$ 上方にあるため、回転体の姿勢変動により半径方向の変位が拡大されたものと推察される。この回転誤差の平均値を測定値から減じたものを非繰返し回転誤差（NRRO）とすると、図4に示すように、 $8.9 \mu\text{mp-p}$ （ $1.2 \mu\text{m}\sigma$ ）となった。半径方向振れの測定では、変位計のファレンジ（測定範囲：約 $\pm 300 \mu\text{m}$ ）を用いているため、そのノイズレベルは $3 \mu\text{mp-p}$ と大きい。繰返し回転誤差に対してNRROは比較的小さいといえる。

次に軸方向の回転誤差を測定した結果を図5に示す。 $0.50 \mu\text{mp-p}$ であり、半径方向の場合の $0.7\%$ 程度と非常に小さい。また同様にNRROを図6に示す。 $0.33 \mu\text{mp-p}$ （ $0.05 \mu\text{m}\sigma$ ）であり、ニアレンジ（ $\pm 15 \mu\text{m}$ ）で用いた変位計のノイズレベル $0.16 \mu\text{mp-p}$ （ $0.027 \mu\text{m}\sigma$ ）の倍程度であった。円すい面および基準球の真円度を考慮しても良好な結果といえ、精度平均化効果が現れているといえる。

### 5. 結言

超音波振動子によるスクイズ空気膜を用いた空気軸受を試作し、以下の結果を得た。

- (1) 円すい面2面を持つ回転型の軸受を試作し、非接触で支持した。
- (2) 軸方向の繰返し回転誤差は $0.50 \mu\text{mp-p}$ 、非繰返し回転誤差は $0.33 \mu\text{mp-p}$ であり、良好な結果を得た。
- (3) 半径方向の回転誤差は回転体の姿勢変化の影響により大きく、繰返し回転誤差は $72 \mu\text{mp-p}$ 、非繰返し回転誤差で $8.9 \mu\text{mp-p}$ であった。

今後は回転体の姿勢変化の少ない構造について検討し、回

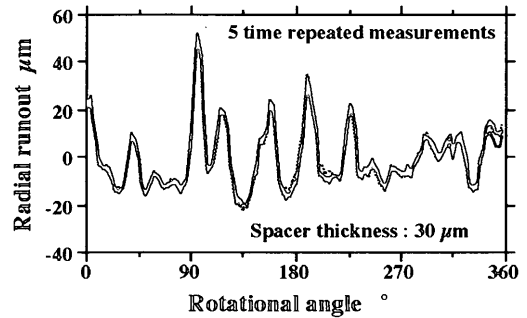


Fig. 3 Radial runout during rotation

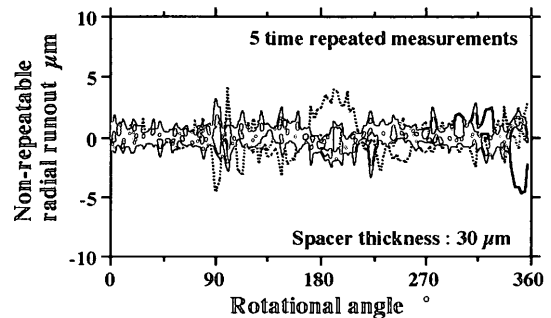


Fig. 4 Non-repeatable runout in radial direction

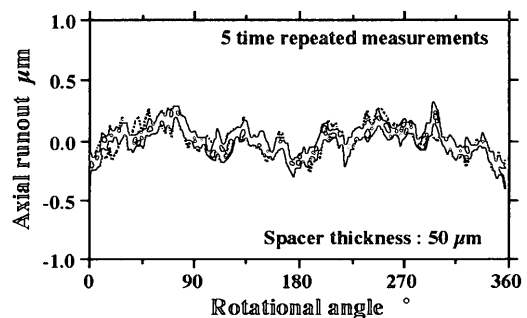


Fig. 5 Axial runout during rotation

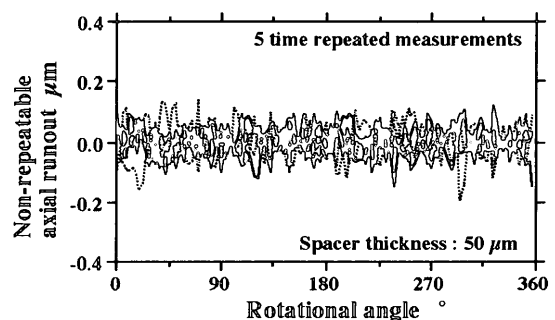


Fig. 6 Non-repeatable runout in axial direction

転誤差補正を行う予定である。

### 参考文献

- (1) T. G. Bifano and T. A. Dow, Optical Engineering, 24, 5 (1985) 888.
- (2) 野村武彦他2名, 精密工学会誌, 53, 7 (1987) 1104.
- (3) 渡辺一郎他2名, 精密工学会誌, 54, 2 (1988) 329.
- (4) 例えば, 小野京右, 潤滑, 21, 9 (1976) 589.
- (5) 吉本他1名, トライボロジスト, 36, 7 (1991) 543.
- (6) 吉本他1名, 精密工学会誌, 58, 3 (1992) 527.
- (7) 磯部他2名, 精密工学会誌, 65, 3 (1999) 438.
- (8) 大岩他2名, 第75期通常総会講演会講演論文集 (IV), (1998) 250.
- (9) 大岩他1名: 電磁力関連のゲイジシシボジウム講演論文集 (2001).