

# エアベアリングの動特性解析

## Analysis for Dynamic Characteristics of Air Bearing

向 井 俊 夫<sup>\*(1)</sup>  
Toshio MUKAI

### 抄 録

高剛性、低熱膨張のセラミックスを使うことにより低ギャップのエアステージを提供することが可能になってきた。低ギャップにおけるエアベアリングの動特性を流体力学に基づく数値計算により予測した。その結果、通気溝の深さを深くすることにより、低ギャップで高剛性、高減衰のエアベアリングが得られることが明らかになった。

### Abstract

With the use of high-rigidity and low-thermal expansion ceramics, we are able to provide low-gap air stages. The present paper reports dynamic characteristics of air bearing at low gaps calculated by hydrodynamics. The results show that deepening air conduction grooves leads to high-rigidity and high-damping air bearings.

## 1. 緒 言

近年、半導体露光装置等の精密機械分野で、エア浮上による非接触の気体軸受(エアベアリング)が数多く使われるようになった。その典型的な例が図1に示すようなXYステージである。このようなXYステージでは、スライダ部の十数箇所エアパッドが組み込まれており、完全非接触でスライダが動くことができる。エアベアリングXYステージが普及するのに果たしたファインセラミックスの役割は大きい。

軸受は、移動ステージのガイドとスライダの間で構成される。通常スライダに設けたオリフィスからガイドに向かって空気等の気体を噴出し、ガイドとスライダの間に剛性を持った気体膜を作る。この気体膜が形成されることにより、軸受は剛性を持った非接触軸受として機能する。一般に軸受隙間(Bearing Gap)を小さくす

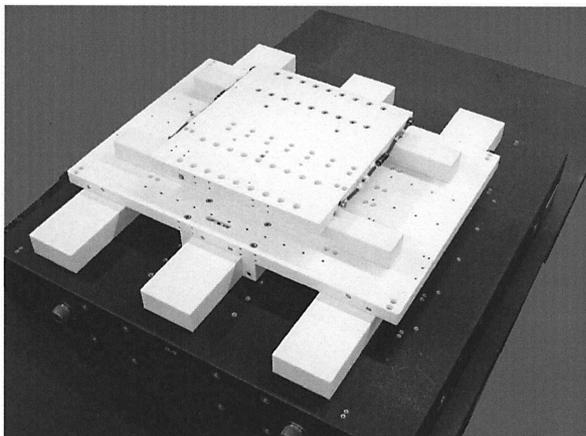


図1 アルミナ製XYステージ(新日本製鐵)  
Alumina-made XY stage (by Nippon Steel)

ば、気体膜の剛性を高めることができ、気体軸受を使ったエアステージの用途が広がることが期待される。

これに対して、一般に使われるアルミニウム系の金属材料では、部材の剛性が低いこと、さらに熱膨張係数が高いことなどの観点から軸受の低ギャップ化に限界があった。代表的なファインセラミックスであるアルミナは、剛性が高く、熱膨張係数が低い。アルミナの熱膨張係数は5.3ppm/Kで、アルミニウム金属の4分の1である。アルミナを用いれば、軸受隙間の小さいエアステージを組むことができ、高剛性のエアステージを提供することが可能である。さらに、窒化ケイ素またはサイアロン(それらの室温における熱膨張係数は1.2ppm/K)を使えば、さらに高性能のエアステージを提供することが可能であろう。

気体軸受は、気体の持つ圧縮性の効果と粘性係数が小さいことにより振動減衰性能が良くない。励起された振動は $\exp(-\zeta\omega_n t)$ に比例して小さくなる(ここで、 $\zeta$ は減衰比、 $\omega_n$ は系の固有角振動数)が、空気軸受の $\zeta$ は一般に0.05程度と小さい。ステージの停止性能もしくは同期性能を上げるためには、減衰比 $\zeta$ をできるだけ大きくすることが必要である。本報告は、流体力学に基づくエアベアリングの減衰特性の計算手法を示すと同時に、低ギャップにおいて高振動減衰特性を示すエアベアリングの構造を提供することを目的とする。

## 2. 計算手法

ここで関与する軸受は、オリフィスを気体噴出手段として用いる静圧気体軸受である。図2、3に、軸受の構成要素となるオリフィス(Orifice)、通気溝(Air Conduction Groove)、ランド(Land)の位置関係を示す。

給気圧 $P_s$ で与えられた気体は、オリフィスから噴出され、通気溝内に広がる時に断熱膨張による絞り効果(図2の場合は自成絞り効

<sup>\*(1)</sup> 新素材事業部 ファインセラミックス部 部長  
東京都千代田区大手町2-6-3 〒100-8071 TEL:(03)3275-8360

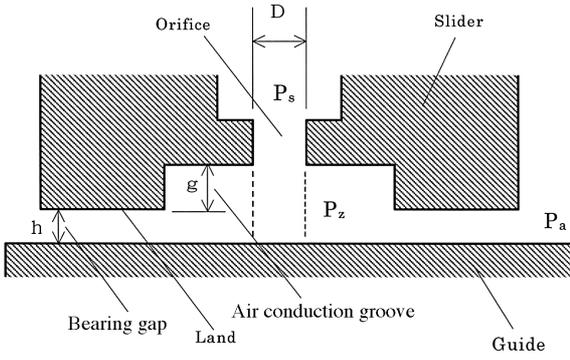


図2 オリフィス型エアベアリング  
Orifice-type air bearing

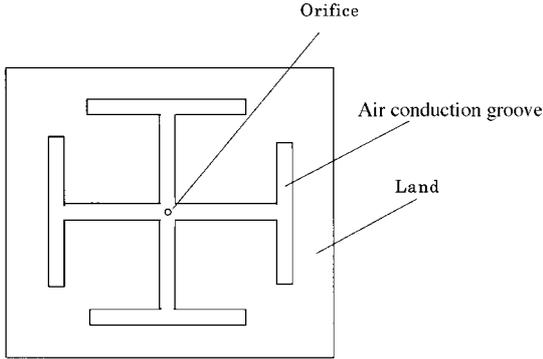


図3 クロスTタイプエアパッド  
Cross T-type air pad

果)を受け圧力 $P_z$ になる。オリフィス直下の仮想円筒から出た気体は、通気溝内に拡がり、通気溝から軸受ランド部を経て軸受外に放出される。気体圧力は、通気溝からランド部を経て軸受端に至る過程で粘性抵抗を受け大気圧力 $P_a$ まで低下する。

流体力学の教えるところに従い、気体の質量流量は次のように表される<sup>1)</sup>。

(i)オリフィスから噴出される質量流量

$$M_1 = [AP_s / (RT)^{1/2}] \cdot \psi_0 \quad (1)$$

ここで、 $P_z / P_s = [2 / (\kappa + 1)]^{\kappa / (\kappa - 1)}$  のときに

$$A = \pi D (g + h)$$

$$\psi_0 = [2\kappa / (\kappa - 1)]^{1/2} \cdot [(P_z / P_s)^{2/\kappa} - (P_z / P_s)^{(\kappa+1)/\kappa}]^{1/2}$$

(ii)軸受隙間において粘性抵抗を受けて出て行く質量流量

差分法による計算を前提に、マトリックス表示を行ったときに、

$$M_2 = [(h + g)^3 / 24\mu RT] \cdot [C_{i,j} P_{i,j}^2 - C_{i,j-1} P_{i,j-1}^2 \dots] \quad (2)$$

と表される。ここで、 $P_{i,j}$ は $(i, j)$ 点における圧力、 $C_{i,j}$ はその係数、他のパラメータは以下の通りである。

D: オリフィスの直径, g: 通気溝の深さ, h: 軸受の隙間,

$\mu$ : 気体の粘性係数, R: ガス定数, T: 温度,  $\kappa$ : 比熱比

平衡状態においては、オリフィスを含む分割要素内での質量の出入りはバランスする。すなわち、 $M_1 = M_2$ となる。オリフィス以外の通気溝部及びランド部においても質量流量が保存されるので、各分割要素につき格子点間の圧力の関係式が導かれる。これらの関係式を解くことにより平衡圧力分布を求めることができる。

時間的に変動する場合の式は以下の通りである(オリフィスを含まない分割要素については $M_1 = 0$ )

$$M_1 - M_2 = (1/RT) \cdot \alpha (P_{i,j} \cdot V_{i,j}) \dot{\alpha} t \quad (3)$$

ここで、 $V_{i,j}$ は $(i, j)$ 点の分割要素における軸受隙間の体積であ

る。動特性を計算するに当たり、平衡点周りで摂動法を用いて計算を行なった。すなわち、 $h = h_0 + \Delta h \cdot \exp(i\omega t)$ ,  $P_{i,j} = P_0 + \Delta P_{i,j} \cdot \exp(i\omega t)$ として定式化し、複素動剛性 $E_{i,j} = \Delta P_{i,j} / \Delta h$ を求める関係式を各格子点について導いた。

それらの関係式を連立させて解き、各格子点の $E_{i,j}$ を求めた。 $E_{i,j}$ の実数成分の全格子点に渡っての和をA、虚数成分の和をBとしたとき、減衰比 $\zeta$ は $\zeta = B / (2A)$ で与えられる。減衰比は周波数 $f$ (ここで $\omega = 2\pi f$ )によって変化する。流体力学の計算では、周波数に比例するスクイーズナンバー $\sigma$ によって計算結果が整理される。縦寸法a, 横寸法bの長方形のエアパッドのスクイーズナンバーは次式で表される。

$$\sigma = (12\mu\omega / P_s) \cdot (a \cdot b / c^2) \quad (4)$$

ここで、cは代表軸受隙間で任意に取ることが可能であるが、本計算にては $c = 5 \mu\text{m}$ で計算した。ここで、エアパッドとは軸受面を限定する大気圧よりも気体圧力の大きい部分のことである。

### 3. 計算結果

典型的なクロスTタイプの通気溝パターンを例に取って計算を行った。図3は、計算に用いたモデル軸受である。エアパッドサイ

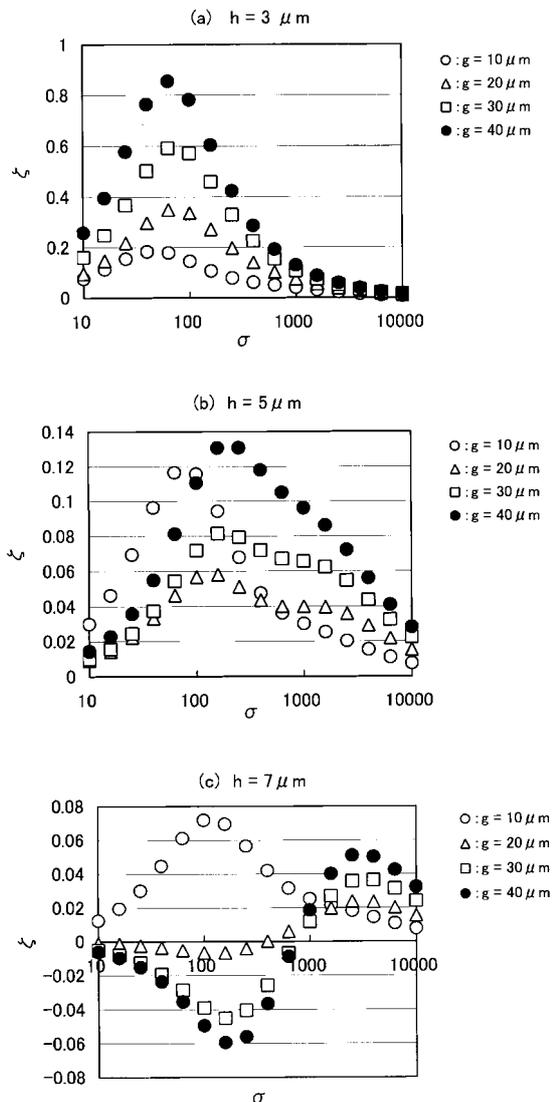


図4 減衰特性の計算結果  
Calculated results of damping coefficients

ズは  $a = b = 40\text{mm}$  , オリフィスの直径は  $D = 0.2\text{mm}$  , 通気溝幅は  $1\text{mm}$  である。最外周の通気溝中心線からエアパッド外周までの距離 (すなわちランド幅) は  $6\text{mm}$  とした。給気圧を大気圧との差圧で  $0.4\text{MPa}$  とし、溝深さ  $g$  を変化させて、代表的な軸受隙間  $h$  に対して減衰比  $\sigma$  を計算した。図 4 に  $h = 3, 5, 7\mu\text{m}$  の場合の計算結果をスクリーズナンバー  $\sigma$  に対して示した。

通常よく使われる  $h = 5 \sim 7\mu\text{m}$  の軸受隙間では、減衰比は通気溝深さによって大きく変化し、溝深さが  $20\mu\text{m}$  を超える場合には減衰比が負になる  $\sigma$  の領域が現れた。減衰比が負になる領域では軸受は自励振動をするので、この領域で軸受が使われることは無い。これらの傾向は、 $h = 3\mu\text{m}$  では大きく異なり、逆に通気溝深さが深いほど減衰比は正の方向に大きくなる (振動減衰が非常に良くなる) というこれまでに予想されたことがない結果が得られた。剛性はギャップが小さいほど高くなるので、 $3\mu\text{m}$  ギャップでは高剛性と高減衰特性を両立できたことになる。

#### 4. 結 言

今や、セラミックスの精密加工は、量産レベルで  $1\text{m}$  長の部材を  $0.5\mu\text{m}$  以下の平面度で加工できるレベルに達している。そのような部材を組み上げることにより、ギャップ  $3\mu\text{m}$  のエアステージを提供できるレベルに達している。従来、エアベアリングは剛性が低い、それをエア圧をあげるなどして無理にやり上げると発振するなどという欠点が指摘され、普及が進まなかった。本報告では、従来実現が困難として注目されなかった低ギャップのエアベアリングの特性に注目し、さらなる高性能化の可能性があることを示した。新日本製鐵では、上記の精密加工技術はもとより、エアベアリングの製造技術、エアステージの組み立て技術を有しており、今後多方面に渡ってエアステージの適用を提案して行きたい。

#### 参考文献

- 1) 十合晋一: 気体軸受設計ガイドブック 初版 東京 共立出版 2002 p.18