空気式静圧案内に関する基礎的研究*

—管内表面粗さを考慮した微細オリフィス内空気流れの解析—

趙 鵬** 里 見 忠 篤***

Fundamental Study on Aerostatic Guidance

- Analysis of an Air Flow in the Minute Orifice in Consideration of the Surface Roughness -

Peng ZHAO and Tadaatsu SATOMI

The purpose of this study is to enhance the calculation accuracy in the region of which the diameter of the orifice and the guidance clearance are comparatively small in the aerostatic guidance design. Specifically, the amount of air flux passing through said orifice is calculated in two separated parts, one part is the calculation done on the boundary layer flow whereas the other part on the potential flow. In this case, the calculation of the boundary layer flow is attempted using a theory in which the surface roughness is taken into account. That is, the calculation is done based on a virtual cylinder which has the same area as that of the rough inner surface of the orifice calculated based on the measured value of the surface roughness of an orifice cut surface. As a result, in the region abovementioned the calculation results of the flux, the recess pressure, the load capacitance and the static rigidity, are in a good agreement with the experimental results.

Key words: positioning, air bearing, orifice, surface roughness, virtual cylinder

1. 結 言

近年空気式静圧案内が IC 製造装置・測定機械や生体工学分野で精密位置決め装置として用いられている。空気式静圧案内について、案内精度の向上という観点からは、案内面すきまは小さいほうが望ましく、また剛性の向上という観点からは、オリフィスにより空気を強く絞るほうが望ましい。これまでの空気式静圧案内の設計理論¹⁾²⁾はオリフィス径が比較的大きい、また案内面すきまも比較的大きい場合、理論値は実験値とよく合うが、オリフィス径が小さく（例えば 0.5mm 以下）、案内面すきまも小さくなる場合（例えば 20 μ m 以下）、誤差が大きくなる。本研究では、案内精度と剛性を双方共に向上させるため、第 1 絞り（図 1）として直径が小さいオリフィス（直径 0.3mm, 直径 0.4mm, 直径 0.5mm 三種類）、第 2 絞りとして案内面すきま 20 μ m 以下の面絞りにより絞り部を構成している。この場合、加工面の粗さが空気流れに影響を及ぼすものと思われる。特にドリル加工されたオリフィス内表面は研削が不可能であるため、その内表面粗さ層の割合はかなり大きい。本研究では、オリフィス内の表面粗さを切断面で実測し、その値を用いて実表面積相当の仮想円筒モデルを構築した。仮想円筒の表面近傍では、境界層流れ、中心部はポテンシャル流れを想定し流れ計算を行った。それに基づいてオリフィス下流側の圧力 P_0 を求め、案内部の負荷と静剛性の計算を行った結果理論値が実験値と比較的よく一致した。

2. 理 論

2.1 記号

本論文で使用了記号は以下ようになる。

D : 仮想円筒の直径

L : 仮想円筒の長さ

R : 仮想円筒の半径

R_i : 仮想円筒からポテンシャル流れ円筒までを n 等分した任意の位置

r_i : 実境界層 ($r_0 \sim r$ 間) を n 等分した任意の位置

S_i : R_i の仮想円筒に対応するせん断面積

P_s : 圧力源圧力

P_0 : オリフィス下流側圧力 (エアポケット圧力)

d : ポテンシャル流れの直径

l : オリフィスの長さ

r : ポテンシャル流れの半径

r_0 : オリフィスの半径

δ : 境界層の厚さ

f_1 : オリフィス内表面の円周方向粗さ曲線

f_2 : オリフィス内表面の軸方向粗さ曲線

x : 0 から $2\pi r_0$ までの変数

y : 0 から l までの変数

z : 粗さの高さ

F : オリフィス前後の圧力差より求めた全圧力

Δr : $(R-r)/n$

Δl : $(L-l)/2n$

ΔP : オリフィス軸方向微小変位に対する圧力差

dr : $(r_0-r)/n$

v_n : 実境界層部 r_{n-1} から r_n までの流速

v_{nmax} : v_n の最大値 (ポテンシャル流れの初期条件)

v_i : 実境界層部 r_{i-1} から r_i までの流速

s_i : 各 v_i に対応する断面積

v_{n+1} : ポテンシャルの流速

C_{K1} : オリフィス部の流量形状補正係数

C_{K2} : 案内部の流量形状補正係数

r_r : 0 (中心線) から r までの変数

r_r' : r_0 から r までの変数

η : 空気の粘度

* 原稿受付 平成 18 年 8 月 1 日

** 学生会員 東京電機大学大学院 (埼玉県比企郡鳩山町石坂)

*** 正 会 員 東京電機大学 (埼玉県比企郡鳩山町石坂)

ν : 空気の動粘性係数
 Q_{in} : オリフィスを通る空気流れの質量流量
 Q_{out} : 案内内部に流れる空気流れの質量流量
 $\rho_{orifice}$: オリフィスを通る空気の平均密度
 ρ_{land} : 案内内部を通る空気の平均密度
 R'_1 : 案内内部半径 (エアポケット半径)
 R'_2 : 案内外部半径
 h : 案内面すきま
 r' : R'_1 と R'_2 間の変数
 W : オリフィスの案内負荷容量
 p : 案内内部任意点の圧力
 P_a : 大気圧

2.2 計算モデル

本研究における絞り部は、図 1 に示すように第 1 絞りとして直径 0.4mm のオリフィス、第 2 絞りとして案内面すきまは約 20 μ m の円形面絞りより構成されている。この場合、加工面の粗さが性能に影響を及ぼすものと思われる。特にオリフィス内表面は研削が不可能であるため、穴加工後の加工表面は粗い。図 2 はオリフィス内面の粗さの様子を表す。ここで x は円周方向、 y は軸方向、 z は粗さの高さを表す。本研究では、この表面の粗さはオリフィス内部の流路抵抗を増加させる傾向にあると考えている。

一般にオリフィス部を通る空気流量を計算する場合、その穴寸法 (例えば $\phi 0.4\text{mm} \times 4\text{mm}$) を基準として管内流れの計算を行う。しかし、穴直径が比較的大きい場合境界層流れは無視できるが、本研究の様な穴径が比較的小さい場合は境界層流れの影響はかなり大きいものと考えられる。ここの境界層に注目すると、オリフィスの内表面粗さが境界層領域に存在しているので、この領域の流速を直接に計算することは極めて困難である。従来の計算理論¹⁾によると、境界層や表面粗さの影響をすべて流量係数に負わせて計算を行っている。この流量係数は案内面すきまが十分大きい ($\phi 0.4\text{mm}$ オリフィスの場合案内面すきまが約 120 μ m 以上) オリフィス絞り領域¹⁾になると一定値として取り扱うことができるが、本研究の様な案内面すきまが約 20 μ m の自成絞り領域¹⁾では一定値として取り扱えない。そこで、本研究はこれらの問題を解決するため仮想円筒モデルを提案し、それに基づいてオリフィスを通る空気流れの計算をより確かなものに改善した。

図 3 に本研究で用いたオリフィス流量計算モデルを示す。図に示す通り本研究の流れ計算は境界層流れとポテンシャル流れ 2 部分に分けて計算する。この場合の流れはニュートンの粘性流の理論に基づいている。図 3 の曲線は実際加工したオリフィスの内表面を表す断面曲線モデルである。二点鎖線は境界層理論より得られた境界層流れとポテンシャル流れの境界線を表す。境界層内部の流速を計算するため本研究では図 4 に示す仮想円筒の計算モデルを提案した。

仮想円筒は図 4 に示す直径 D と長さ L より構成されている。仮想円筒の直径 D は実際のオリフィス円周方向粗さ曲線の長さ (軸直角断面曲線の延べ長さ) に基づいて求めた。長さ L は実際のオリフィス軸方向粗さ曲線の長さ (軸断面曲線の延べ長さ) となる。つまり、この仮想円筒の表面積はオリフィスの実表面積とほぼ同じになると考えた。ここで、オリフィスの円周方向と軸方向粗さ曲線の長さを求め

Fig.1 Base structure of the aerostatic guidance

Fig.2 Inner surface roughness of the orifice

Fig.3 Calculation model of the orifice

るため、三次元表面粗さ測定機 (小坂研究所 SE3500K) を用いてオリフィスの内表面粗さを計測した。この計測したデータに基づきフーリエ級数展開することにより、式(1)と式(2)で示すオリフィス内表面の円周方向と軸方向それぞれの粗さの曲線式が得られた。仮想円筒 (πDL) と実円筒 (πdL) の間は架空域となり、実際には存在しない領域であるが、境界層領域における軸方向流れ速度の計算を行うために、 R から r までの間を n 分割し、それぞれの仮想円筒について空気流れの速度計算を行った。

$$\begin{aligned}
 f_1 = & -0.2032 + 2.3517 \times \cos\left(\frac{2\pi}{45}x\right) + 4.4311 \times \sin\left(\frac{2\pi}{45}x\right) \\
 & + 1.0091 \times \cos\left(2 \times \frac{2\pi}{45}x\right) + 1.7171 \times \sin\left(2 \times \frac{2\pi}{45}x\right) \\
 & + 1.4508 \times \cos\left(3 \times \frac{2\pi}{45}x\right) + 0.1308 \times \sin\left(3 \times \frac{2\pi}{45}x\right) \\
 & + 1.4608 \times \cos\left(4 \times \frac{2\pi}{45}x\right) - 0.7410 \times \sin\left(4 \times \frac{2\pi}{45}x\right) \\
 & + 0.6909 \times \cos\left(5 \times \frac{2\pi}{45}x\right) + 15.4897 \times \sin\left(5 \times \frac{2\pi}{45}x\right)
 \end{aligned} \quad (1)$$

Fig.4 Virtual cylinder

Fig.5 Inner surface roughness of the orifice

$$\begin{aligned}
 f_2 = & -0.4946 - 0.3232 \times \cos\left(\frac{2\pi}{45}y\right) - 1.0985 \times \sin\left(\frac{2\pi}{45}y\right) \\
 & - 0.6404 \times \cos\left(2 \times \frac{2\pi}{45}y\right) + 0.2726 \times \sin\left(2 \times \frac{2\pi}{45}y\right) \\
 & - 0.0218 \times \cos\left(3 \times \frac{2\pi}{45}y\right) - 0.1156 \times \sin\left(3 \times \frac{2\pi}{45}y\right) \\
 & - 0.1307 \times \cos\left(4 \times \frac{2\pi}{45}y\right) + 0.0134 \times \sin\left(4 \times \frac{2\pi}{45}y\right) \\
 & + 0.0106 \times \cos\left(5 \times \frac{2\pi}{45}y\right) - 0.0350 \times \sin\left(5 \times \frac{2\pi}{45}y\right)
 \end{aligned} \quad (2)$$

図5は式(1)と(2)より計算したオリフィス内表面粗さを示す。図2と同じ形状の凹凸面を示している。ここで、 $\phi 0.4\text{mm} \times 4\text{mm}$ のオリフィスに対して仮想円筒の寸法は $\phi 0.81\text{mm} \times 4.07\text{mm}$ 程度である。

2.3 計算方法

仮想円筒を用いて計算する場合、実際に存在する受圧部面積(πr^2)のみに源圧力が作用することにより全圧力 F が発生するものとする、その全圧力は式(3)で表すことができる。

$$F = \pi r_0^2 (P_s - P_0) \quad (3)$$

2.3.1 境界層厚さ δ の決め方

文献5)6)HowarthとBlasiusの境界層の理論より、境界層厚さ δ は式(4)で計算できる。ここで、 U_∞ は一様流の流速であるが、本研究ではポテンシャル流れの平均流速 U_∞ 値として計算を行う。

$$\delta = 5.0 \sqrt{\frac{\nu \cdot y}{U_\infty}} \quad (4)$$

2.3.2 流量の計算

図4に示すように、仮想領域である $R \sim r$ の領域については各 R_i の仮想円筒に対応するせん断面積 S_i を求め、その計算結果を実際の境界層 $r_0 \sim r$ の領域に適用すれば、ニュートン粘性流の式に基づき境界層領域の流速が計算できる。

仮定：空気流れは軸(y)方向のみである

具体的な計算手順を以下に示す

- ①. P_0 が決まれば、全圧力 F は常に一定値になる。
- ②. $R \sim r$ の間、段階的に $R_1, R_2, \dots, R_n$ に分ける。
- ③. それぞれの R の位置に対して面積 S を求める。

$$S_1 = \pi D L$$

$$S_2 = \pi (D - 2\Delta r) (L - 2\Delta l)$$

...

$$S_i = \pi \{D - 2(i-1) \cdot \Delta r\} \{L - 2(i-1) \cdot \Delta l\}$$

...

$$S_n = \pi \{D - 2(n-1) \cdot \Delta r\} \{L - 2(n-1) \cdot \Delta l\}$$

④. それぞれの仮想円筒面積 S_i をニュートンの粘性流の理論式に適用し、実際の境界層領域 $r_0 \sim r$ 間の流速 v_i を求める。基本的な式は $\frac{F}{S} = \eta \frac{dv}{dr}$ である。面積 S は手順③より

求めた仮想面積であるが、実際の位置 r_i は r_0 から r までの値を用いた。 r_0 から r までを n 段階に等分し、各段階における半径方向の変化分を dr とした。この場合、各段階内(dr)の流速は一定値と見なすと、これらの流速は以下の式で求められる。

$$v_1 = \frac{F \cdot dr}{\eta} \cdot \frac{1}{S_1}$$

$$v_2 = \frac{F \cdot dr}{\eta} \cdot \left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} \right)$$

...

$$v_i = \frac{F \cdot dr}{\eta} \cdot \left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_i} \right)$$

...

$$v_n = \frac{F \cdot dr}{\eta} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i}$$

⑤. ポテンシャル領域の計算は式(5)となる.

$$v_{n+1} = v_n + \frac{\left\{ \frac{(r_0 - \delta)^2}{4} - r_r^2 \right\} \Delta p}{2\eta l} \quad (5)$$

式(5)の第1項は境界層流れの最大流速, いわゆるポテンシャル流れの境界条件である. 第2項はニュートンの粘性流の式を管内流れに適用する場合の式である.

⑥. オリフィスを通る空気流れの質量流量は式(6)になる. 括弧内の第1項は境界層流れの体積流量で, 第2項はポテンシャル流れの体積流量である.

$$Q_{in} = \rho_{orifice} C_{K1} \left\{ \pi(r_0 - \delta)^2 v_n + \frac{\pi(r_0 - \delta)^4 (P_s - P_0)}{6\eta l^2} \right\} \quad (6)$$

ここで C_{K1} はオリフィス部の流量形状補正係数である. C_{K1} の値はオリフィスの断面積とオリフィスに入る前の流路の断面積の比より決める.

2.3.3 圧力の計算

$$Q_{out} = \frac{\rho_{land} C_{K2} \pi h^3 (P_0 - P_a)}{6\eta \log(R'_2 / R'_1)} \quad (7)$$

案内部の仕上げは研削できるので, 本研究で案内部の流れ計算は境界層と表面粗さの影響を無視した. この場合, 案内部(第2絞り部)を流れる空気の流れは式(7)で計算される. ここで C_{K2} は案内部の流量形状補正係数である. C_{K2} の値はオリフィスの断面積とオリフィス下流流路の断面積の比より決める. 連続の条件より式(6)と式(7)は等しいと考えられるので, これよりオリフィス下流側の圧力 P_0 の値が求められる. 案内部の圧力分布は, 任意半径 r' に対する圧力 p とすると式(7)で $P_0 = p, r_0 = r'$ とおき, p について解いた式(8)で計算できる.

$$p = \frac{6Q_{out}\eta}{\pi h^3} \log \frac{R'_2}{r'} + P_a \quad (8)$$

$$P_0 = \frac{6Q_{out}\eta}{\pi h^3} \log \frac{R'_2}{r_0} + P_a \quad (9)$$

2.3.4 負荷の計算

以上の理論より, 各領域の圧力分布より案内部の負荷 W の計算は式(10)となる.

$$W = \pi R_1'^2 (P_0 - P_a) + 2\pi \int_{R_1'}^{R_2'} r' \cdot (p - P_a) \cdot dr' \quad (10)$$

エアポケットがない場合, $R'_1 = r_0$ として計算する.

3. 実験

本研究で提案した計算理論を検証するため, オリフィスについて流量特性実験と荷重特性実験を行った. 本研究にて用いたオリフィスは $\phi 0.3\text{mm} \times 4\text{mm}$, $\phi 0.4\text{mm} \times 4\text{mm}$, $\phi 0.5\text{mm} \times 4\text{mm}$ の3種類である. 流量特性実験では, オリフィスを通る空気流れの質量流量と, オリフィス前後の圧力と案内部すきまの関係を明らかにした. 荷重特性実験では, 浮上荷重と案内部すきまの関係を明らかにし, 最大静剛性と最大静剛性すきまを実験より求めた.

3.1 実験装置および方法

図6は本研究で用いるオリフィス流量特性実験装置である. ベーステーブル2(交換可能に取り付けられている)とすきま調節軸3とが相対するすきま部Aは, 平面度, 平行度, 直角度とものできる限り精密に仕上がられている. 圧縮空気はコンプレ

Fig.6 Device for flux characteristics

Fig.7 Device for load characteristics

ッサからレギュレータや流量計(品川製作所 W-NH-1B)を通り, 圧力室1に流入する. 圧力室内の圧力は圧力源圧 P_s としてゲージより計測する. その後圧縮空気がベーステーブル2上に設けられたオリフィス5を通り, 下流側の案内部に流入する. すきま調節軸3は軸方向にナット4により微細調節ができ, 軸の上端面の変位を電気マイクロメーターで測ることによりすきま量が調節できる.

案内部に $\phi 0.4\text{mm}$ の圧力検出穴を設けており, オリフィス噴出中心から 0.5mm ところの検出穴より測定した圧力値をオリフィス下流側圧力 P_0 として取り扱った.

図7は荷重特性実験装置を示す. 1, 2の部分は図6の流量特性実験装置と同じになっている. 3はスラスト案内部, 4はジャーナル部, 5は浮上テーブルである. この場合, ジャーナル部, スラスト部共に空気式静圧案内となっている. ジャーナル部は2段

合計 16 ヶ所 $\phi 0.4\text{mm}$ のオリフィスを設けた。ジャーナル部の平均すきまは約 $18\mu\text{m}$ とした。この場合、ジャーナル部の軸直角方向静剛性値は $60\text{N}/\mu\text{m}$ となった。スラスト案内部の静剛性を測定する時、質量 1kg の分銅を 1 個ずつ浮上テーブルの上面に設置してある荷重台上に載せ、それぞれの場合のすきま量は浮上テーブル上部に設置した電気マイクロメーターにより測定した。この場合、荷重の重心を浮上テーブルの軸に一致させるため、荷重台に分銅の中心合せ軸を設けた。荷重特性実験を行う際には、浮上テーブルの傾きがないことを確認した。

3.2 実験および計算結果

図 8, 9 はオリフィス流量特性実験装置を用いた場合の実験結果と計算結果を示す。すべての実験は圧力源圧 $P_s=0.39\text{MPa}$ とした。◇, ●と▲は実験値を、破線, 実線およびマスク線は理論値を示す。図 8 は流量特性を示す。 $\phi 0.3\text{mm}$, $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 0.5\text{mm}$ 三種類のオリフィスとも案内面すきま $30\mu\text{m}$ 以下の領域において理論値と実験値は比較的良好に一致している。図 9 はオリフィス下流側の圧力 P_0 の実験値と理論値を示す。 $\phi 0.3\text{mm}$, $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 0.5\text{mm}$ 三種類のオリフィスとも案内面すきま $30\mu\text{m}$ 以下の領域にて理論値と実験値は比較的良好に一致している。図 10, 11 に荷重特性実験装置を用いた場合の実験と計算結果を示す。◇と●は実験値を、破線と実線は理論値を示す。図 10 は $\phi 0.3\text{mm}$, $\phi 0.4\text{mm}$ のオリフィスを用いた場合の荷重特性を示しており、理論値と実験値は比較的良好に一致している。図 11 は $\phi 0.3\text{mm}$, $\phi 0.4\text{mm}$ のオリフィスを用いた場合の静剛性と案内面すきまの関係を示しており、理論値と実験値は比較的良好に一致している。 $\phi 0.3\text{mm}$ オリフィスの場合、最大静剛性 $7\text{N}/\mu\text{m}$ 、最適すきま $6.0\mu\text{m}$ となり、 $\phi 0.4\text{mm}$ オリフィスを用いた場合、最大静剛性 $6.6\text{N}/\mu\text{m}$ 、最適すきま $11.8\mu\text{m}$ となった。

4. 考 察

これまでの研究^{1)~4)}では、案内面すきまが小さい場合の流量計算、荷重計算には曖昧さがあった。本研究で提案した計算理論はオリフィス直径が小さく、また案内面すきまも比較的小さい領域に対するものである。図 8 と図 9 に示すような実験結果と計算結果から、 $\phi 0.3\text{mm}$ と $\phi 0.4\text{mm}$ オリフィスに対して案内面すきま $30\mu\text{m}$ 以下の領域で流量と圧力 P_0 の理論値と計算値はよく一致している。 $\phi 0.5\text{mm}$ オリフィスの場合比較的一致しているが、 $\phi 0.3\text{mm}$ と $\phi 0.4\text{mm}$ のオリフィスより誤差が大きくなっている。この傾向は図 10 と図 11 に示したように、 $\phi 0.3\text{mm}$ と $\phi 0.4\text{mm}$ オリフィスの場合の荷重と静剛性の理論値と実験値にもよく表れている。これらの現象より、本研究で提案したように、オリフィス内表面粗さを考慮した方法で行うオリフィス内部の流速計算は、境界層とポテンシャル流れの二部分に分けて計算することにより、オリフィス直径および案内面すきまが比較的小さい($\phi 0.4\text{mm}$, $20\mu\text{m}$ 以下)場合、計算結果が実験結果によく一致する。したがって、案内部の最大静剛性およびそのすきま値を求める計算にも、本研究で明らかにした方法が有効であることが確認できた。

5. 結 言

- ①オリフィス内の表面粗さを考慮した細管内流れの実用的な計算理論を構築した。
- ②その計算により、直径 0.4mm 以下オリフィスについて流量特性の計算値は実験値とよく一致した。
- ③その結果を用いて、すきまが $20\mu\text{m}$ 以下における空気式静圧

Fig.8 Flux characteristics

Fig.9 Relationship between air-pocket pressure and clearance

Fig.10 Load characteristics

Fig.11 Static rigidity

案内の静剛性、及び最適すきまの計算が可能な設計理論を確立した。

- ④本研究にて用いた装置では、 $\phi 0.3\text{mm}$ オリフィスを用いた場合、最大静剛性 $7\text{N}/\mu\text{m}$ 、最適すきま $6.0\mu\text{m}$ となり、 $\phi 0.4\text{mm}$ オリフィスを用いた場合、最大静剛性 $6.6\text{N}/\mu\text{m}$ 、最適すきま

11.8 μ m となり, 理論値と実験値が比較的よく一致した.

参考文献

- 1) 里見 忠篤: 空気式静圧案内に関する研究: 静剛性および安定性に関する理論と実験, 精密機械, **47**, 10 (1981.10) 1216.
- 2) 里見 忠篤: 空気式静圧案内に関する研究: 各種要因が自励振動の発生に及ぼす影響, 精密機械, **49**, 4 (1983.04) 483.
- 3) 諸貫, 古川: 面絞り方式空気静圧案内面の設計と試作, 精密工学会誌, **54**, 4 (1988.04) 721.
- 4) 森 美郎, 矢部 寛: 多数供給孔を有するスラストつば静圧気体軸受の研究, 日本機械学会論文集 (第3部), **31**, 230 (1965) 1569.
- 5) L. Howarth, On the solution of the laminar boundary layer equations, Proc. Roy. Soc. London A **164** (1938) 547.
- 6) H. Blasius, Grenzschichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung, Z. Math. Phys. **56** (1908) 1.
- 7) Mori, H., and Mori, A., On the Stabilizing Methods of Externally Pressurized Thrust Gas Bearings, Journal of Lubrication Technology, Trans. ASME, Series F, **89**, 3 (1967.07) 183.
- 8) H. Mori and H. Ezuka: A Pseudo Shock Theory of Pressure Depression in Externally Pressurized Circular Thrust Gas Bearing, JSLE-ASME Int. Lubric. Conf., (1975) 115.
- 9) 鳥住, 平山他/圧縮性流れにおける管オリフィスの高速流動特性と流量計算法, 日本機械学会論文集 B 編, **48**, 429 (1982.05) 911.
- 10) 水本, 数谷他/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 (2001.09) 1524.