超音波振動を利用した非接触チャックに関する研究*

(浮上物体に加わる保持力の発生要因について)

吉本 成香^{*1}, 山崎 友美^{*2}戸田 和之^{*3}, 宮武 正明^{*1}Study on Non-contact Chuck Using Ultrasonic Vibration
(On Primary Cause of Holding Force Acting to a Floating Object)Shigeka YOSHIMOTO^{*4}, Tomomi YAMAZAKI,
Kazuyuki TODA and Masaaki MIYATAKE^{*4} Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science,
1-14-6 Kudankita, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0073 Japan

It is experimentally known that a flat surface vibrating at ultrasonic frequencies generates forces in both vertical and parallel directions to a vibrating surface, and these forces can support a floating object without any contact. However, the cause of the force parallel to the vibrating surface (called a holding force in this paper) has not been clarified yet. Therefore, this paper investigates the cause of the parallel force generated by a vibrating surface, experimentally and numerically. In numerical calculations, computational fluid dynamics (CFD) was used in order to obtain the pressure distribution of air surrounding a floating object and a vibrating plate. It was consequently found that the holding force acting to a floating object is due to an average minus pressure generated at the edge of a floating object on the vibrating flat surface.

Key Words: Non-contact Chuck, Ultrasonic Vibration, Computational Fluid Dynamics, Holding Force, Pressure Distribution

1. 緒言

近年, ICチップや小型レンズ, 半導体ウェハなどを取り扱う際, 塵埃の付着を防ぐために, それらに直接触れることなく, 搬送, 据え付けを行う必要が出てきた。これまでに, 半導体ウェハを非接触に保持するものとして, 圧縮空気の吹き出しに伴うベルヌーイ効果を利用した非接触チャックが実用化されている。しかし, このチャックの場合, 水平方向の保持力がないために, ウェハがチャックからはみ出さないように, チャック外周部にピンなどの止め具を配するのが一般的である。したがってウェハが止め具に接触した場合などには, 埃を生じたり, 場合によっては割れなどの損傷を生ずる場合もある。

ところで, 超音波で振動する平面上に物体を置いた場合, 物体はスクイーズ効果により振動面上に浮上するとともに, 振動面内に物体を止める保持力が働くことが報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。研究者らの実験においても, 図1に示すような直径4mmの円形振動面あるいは1辺が4mmの正方形振動面上に, 同様の形状を持つ厚さ

40 μ mのステンレスの薄板を置いた場合, その位置をずらしたとしても, 薄板は振動面から外れることなく, 元の位置に保持されることが確認されている⁽³⁾。

本研究では, このような保持力を持つ超音波振動面を利用して, 図2に示すような非接触チャックを構成することを提案する。この図に示した非接触チャックは, ICチップのような小さいものを保持するための構造であるが, 振動面で発生するスクイーズ空気膜の正圧と真空ポンプによる負圧とを釣り合わせることで, 物体を非接触保持する。さらに本非接触チャックは, 水平方向にも物体を保持できることから, 水平方向の止め具を必要としないという利点を持っている。しか

Fig. 1 Behaviors of a floating object on a flat surface vibrating at ultrasonic frequencies

* 原稿受付 2006年9月20日。

^{*1} 正員, 東京理科大学工学部 (〒102-0073 東京都千代田区九段北1-14-6)。

^{*2} 東京理科大学工学研究科。

^{*3} 正員, 千葉科学大学危機管理学部 (〒288-0025 銚子市潮見町3)。

E-mail: yosimoto@rs.kagu.tus.ac.jp

Fig.2 Non-contact chuck using a flat surface vibrating at ultrasonic frequencies

し、超音波振動面が水平方向（振動面に平行方向）に保持力を持つ現象については、その存在は知られているが、発生原因についての説明はほとんどなされていないのが現状である。超音波振動面の保持力の発生原因の説明は、今後、この種の力を利用する機器を開発し、発展させていく上できわめて重要と考える。

そこで本研究では、超音波振動面の保持力発生要因を説明するために、Navier-Stokes 方程式を、直接、数値的に解く数値流体力学(CFD)を用いて振動面および浮上物体周辺の圧力分布を求めることを試みた。そしてその発生要因を明らかにすることを目的とする。

2. 記号

- a : オフセット量
- a_0 : 振動面の振幅
- e : 全エネルギー
- F : 振動面と平行な方向の負荷荷重
あるいは保持力
- h : 軸受すきま
- h_{av} : 平均浮上量あるいは平均軸受すきま
- p : 静圧
- p_a : 周囲圧力 (=0.105MPa と仮定する)
- r : 半径方向座標
- r_0 : 振動面の半径
- R : 無次元半径方向座標 $= r/r_0$
- $\mathcal{R}$: ガス定数
- t : 時間
- T : 絶対温度
- T_∞ : 一様流の温度 (ここでは293K とした)

- u, v : x, y 方向速度成分
- x : x 方向 (浮上すきま厚さ方向) 座標
- y : y 方向 (浮上物体長手方向) 座標
- γ : 比熱比
- μ : 粘性係数
- ρ : 密度
- $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{yx}$: 粘性応力

3. 浮上特性についての基礎的実験

CFD によって、浮上物体を周辺の圧力分布を計算するためには、妥当と考えられる計算モデルを作る必要がある。よってここでは、まず、実験により、基本的な浮上特性を明らかにすることを試みた。この実験では、超音波振動によって生じる保持力についてのみ検討するため、図2に示す実験装置を反転し、振動面を上向きとし、その上に浮上物体を置く形式とした。したがって、浮上物体を牽引するための真空ポンプは使用しない。図2に示すように、加振源としてボルト締めランジュバン型超音波振動子を使用し、ホーンを用いてその振幅を増幅する形式とした。浮上実験には、表1に示すような寸法および質量を持つステンレス箔を用いた。また浮上物体の浮上量、振幅等の測定には、渦電流式の非接触変位計を使用した。

3.1 浮上特性 図3には、加振周波数および入力電圧を変化させた場合のホーン先端の振幅を示す。図から明らかなように、ホーン先端の振幅は、加振周波数によって変化し、27.3kHz 近傍で最も大きな振幅を示し、

Table 1 Principal dimensions of stainless foil used in the experiment

Diameter	4 mm			
Thickness	20 μm	40 μm	60 μm	80 μm
Mass	1.96 mg	3.92 mg	5.88 mg	7.84 mg

Fig. 3 Relationship between input frequency and the amplitude of vibration at the tip of horn

Fig. 4 Relationship between input frequency and average floating height

Fig. 5 Relationship between the mass of a floating object and the amplitude of floating object

約 $9\mu\text{m}$ となっている。また振幅は、入力電圧が高くなるにつれ、多少大きくなる傾向が見られる。

図4には、加振周波数および浮上物体の質量を変化させた場合の浮上物体の平均浮上量を示す。浮上物体の質量は、異なった厚さの浮上物体を用いることにより変化させた。加振周波数が 27.3kHz に近づいたがい、浮上量も大きくなっているが、これは、図3に示したように、ホーン先端の振幅が大きくなっていることに起因している。浮上物体の質量を変化させた場合については、 $m=5.88\text{mg}$ の浮上物体の浮上量が最も大きくなっている。これまでに報告されているスクイーズ軸受に関する実験^{(4)~(6)}では、浮上物体の質量が軽いほど、より大きな浮上量が得られていたが、本実験では、最大浮上量を示す質量の値が存在している。図中には、レイノルズ方程式および運動方程式から浮上量を求める従来の計算法^{(4)~(6)}による計算結果を示したが、この計算結果では、浮上量は浮上物体の質量が小さいほど大きくなっており、実験結果と異なる傾向

Fig. 6 Relationship between time and the amplitudes of vibration of a floating object and the tip of horn

を示している。

図5には、物体浮上時の振幅の測定結果を示す。図に示されるように、浮上物体の質量が $m=1.96\text{mg}$ 、 3.92mg では、その振動振幅は比較的大きくなる。一方、 $m=5.88\text{mg}$ 、 $m=7.84\text{mg}$ の場合は、その振幅は小さい値となっており、この図の場合、変位計のノイズレベルと同様となっている。また図中には参考のために、図4と同様の計算法による浮上物体の振動振幅の計算結果を示した。計算結果の振幅は、実験結果に比べかなり小さくなっており、浮上量の場合と同様、両者は異なる傾向を示している。これらの相違の発生原因については明らかではないが、本実験では、従来のスクイーズ軸受の実験条件に比べ、浮上物体の質量および形状が極端に小さく、また厚さも薄いことなどから、従来の計算では考慮していない空気慣性力、浮上物体の平面度などが影響しているものと思われる。

図6には、 $m=1.98\text{mg}$ 、 5.88mg の場合、ホーンの振動と浮上物体の振動の時間に対する変動を示した。この図から明らかのように、 $m=1.98\text{mg}$ の場合には、浮上物体は、ホーンに加振振幅に近い比較的大きな振幅で振動し、またその位相もあまりずれていないことが分かる。したがってこの場合、振動面と浮上物体は同じような位相で振動することになり、それらの間に生ずるスクイーズ空気膜圧力の値は小さくなる。よって浮上量が減少したものと思われる。 $m=5.88\text{mg}$ の場合には、浮上物体の慣性力が大きくなり、浮上物体はホーンの振動に追従しなくなる。よってスクイーズ空気膜圧力が効率的に生成され、浮上量が増したものと思われる。

3.2 保持力の特性 つぎに、超音波振動面が持つ保持力についての基礎的な実験を行った。保持力の測定を行うために、図7中に示すように、ホーン先端を振動させた状態で振動面を傾けることにより、振動面に平行な負荷荷重 F を加えた。このとき、浮上物体の端とホーン頂点の端との距離をオフセット量 a とした。図7は、 $m=5.88\text{mg}$ とした場合の物体の保持状況を示したものである。この場合、振動面を鉛直 ($\theta=90^\circ$) としたときでも、図のような状態で物体は保持されている。図8に、 $m=1.98\text{mg}\sim m=5.88\text{mg}$ の質量の物体を、 $V_{\text{amp}}=30\text{V}$ で浮上させた場合のオフセット量 a の値を示す。これらの質量の場合においても、ホーンの振動面を鉛直とした場合でも、浮上物体は、落ちることなく振動面上に保持されていたため、それらの質量の値を保持力として用いた。図に見られるように、浮上物体の質量が増すにつれ、オフセット量 a の値は大きくなるが、 a の値は、ほぼ 0.1mm 以下の小さな値となっている。

以上のように、超音波振動面は、物体を振動面と垂直方向に浮上させるとともに、平行な方向にも保持力を持つことが実験的に明らかになった。

Fig.7 Experimental result of offset distance in the case of $m=5.88\text{ mg}$

Fig. 8 Relationship between load and average offset distance

Fig. 9 Calculation model

4. 基礎方程式および計算法

4.1 計算モデル 前述のように、超音波振動面は、振動面と平行な方向に保持力を持つことが示された。この保持力の発生要因を明らかにするために、ここでは、CFDを用いて、浮上物体周辺の圧力分布を求めることを試み、そのための計算モデルを図9に示す。図5に示したように、 $m=5.88\text{mg}$ の浮上時の振動振幅は、大変小さい。したがって図9の計算モデルでは、浮上物体を固定して計算を行うことにした。計算モデルの寸法は、実験で用いたホーン等の寸法と等しくしたが、計算時間を短くするために、2次元としている。したがってこの計算では、紙面に垂直方向に無限の幅を持つ浮上物体の周辺の圧力分布を求めることになる。計算では、浮上物体の厚さを $60\mu\text{m}$ 、平均軸受すきまを $40\mu\text{m}$ 、振動面の振幅を $1.5\mu\text{m}$ とした。

4.2 基礎方程式 圧縮性の連続の式、Navier-Stokes方程式、エネルギー方程式を用い、2次元直角座標系の保存則表現でまとめた基礎式を用いる。代表長さ、速度で無次元化を行うと、基礎方程式はベクトル形式で以下のように表される。

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{E}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial y} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \bar{R}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{S}}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ただし、

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e \end{bmatrix} \quad \bar{E} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u u + p \\ \rho u v \\ (\rho e + p)u \end{bmatrix} \quad \bar{F} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho v u \\ \rho v v + p \\ (\rho e + p)v \end{bmatrix}$$

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ R_4 \end{bmatrix} \quad \bar{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ S_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 p &= (\gamma - 1) \rho \left[e - \frac{1}{2} (u^2 + v^2) \right] \\
 \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] \\
 \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] \\
 \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\
 R_4 &= \tau_{xx} u + \tau_{xy} v + \frac{\mu}{Pr(\gamma - 1)} a_x^2 \\
 S_4 &= \tau_{yx} u + \tau_{yy} v + \frac{\mu}{Pr(\gamma - 1)} a_y^2
 \end{aligned} \quad (3)$$

である。\$t, \rho, u, v, e, p, \mu\$ は時間、密度、\$x\$ 方向(すきま方向)速度成分、\$y\$ 方向(長手方向)速度成分、全エネルギー、静圧、粘性係数を表す。また \$\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}, \tau_{yx}\$ は粘性応力、\$\gamma\$ は比熱比、\$a_x, a_y\$ は音速である。\$E, F, G\$ は各方向の非粘性流束(対流流束)、\$R, S\$ は各方向の粘性流束である。\$Re, Pr\$ はレイノルズ数、プラントル数である。空気の粘性係数は、通常、温度の関数として表され、ここでは以下に示す Sutherland の式を用いて算出した。

$$\frac{\mu}{\mu_\infty} = \left(\frac{T}{T_\infty} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{1 + S_1 / T_\infty}{T / T_\infty + S_1 / T_\infty} \quad (4)$$

ここで、\$T_\infty, \mu_\infty\$ は一様流の温度(293K)および粘性係数、\$S_1 = 117\$ K である。数値計算では、3 段階 Runge-Kutta 法を用いて時間積分を行い、差分については、対流項に Chakravarthy-Osher の 3 次精度風上型 TVD スキームを、他の項に 2 次精度中心差分を用いた。なお、計算の収束は、浮上物体端部圧力の一周あたりの変化量より判断した。

4.3 計算格子 図 9 に示すように、本計算では、下側にあるテーブルを時間とともに上下方向に振動させる必要がある。また保持力生成の要因を解明するためには、軸受すきま内のみの圧力変動ではなく、浮上物体の周りの圧力変動についても検討する必要があると思われる。よって計算格子としては、図 10 に示すように、格子 1 および格子 2 を作成し、時間とともに格子 2 の位置を変化させる重合格子を用いた。\$x\$ 方向に 270 分割、\$y\$ 方向に、格子 1 では 150 分割、格子 2 では 75 分割とした。なお、計算格子は不等間隔格子を用いて \$x\$ 方向および \$y\$ 方向の壁近傍の格子数を増やしており、計算精度向上を図っている。

4.4 境界条件 基礎方程式を解くにあたり、以下のような境界条件を用いた。

Fig. 10 Grid shape for calculation model

- (1). 固体壁は、ノンスリップ断熱壁とする。
- (2). 計算領域外周境界では、無限遠方において \$u_x = 0\$ m/s、\$T_x = 293\$ K を仮定し、リーマン境界条件を適用した。これにより、計算領域内の熱力学諸量の発散、および境界部における圧力波の反射を回避している。
- (3). 振動板とともに動く計算格子 2 の上の物理量は加速度座標系に、浮上板周りに配した計算格子 1 の上の物理量は静止座標系に属する。加速度座標系の支配方程式には、慣性力の効果を物体力として加えている。また、それぞれの格子間での情報伝達は、時間ステップごとに境界上の物理量を他の格子上の物理量から内挿することにより再現した。なお、内挿法には物理量の空間位置に基づく線形法を用いた。

5. 計算結果

図 11 に、1 周期間における浮上物体両端部近傍の圧力変化を拡大して示す。浮上物体の中心は、振動面中心から左に 0.1mm ずれている。圧力の値は、図下部の圧力スケールに示すように、明度が高いほど発生圧力が高いことを示している。周囲圧は 0.105 MPa とした。図中の角度は、下部振動面の位置に関係しており、振動面は、図 9 に示すように、90°、270° で軸受すきまが最小、最大を示すような正弦波振動をしている。図から明らかなように、下部面が振動することにより、すきま内圧力とともに、浮上物体端部の圧力が変化していることが分かる。とくに、振動面上にある浮上物体右側端部の圧力変化が、振動面の外に出ている左側

Fig. 11 Pressure contours in the calculation area during one interval ($f=30\text{kHz}$, $a_0=1.5\mu\text{m}$, $h_{\text{ave}}=40\mu\text{m}$)

端部に比べて大きくなっている。

図 12 には、1 周期間における浮上物体右側端部での速度ベクトルを示す。振動面の位置が 0° のとき、軸受すきま内の空気は、右側端部より外部に流れ出し、浮上物体の右下角部を上方に小さく曲がる流れが存在することがわかる。このような曲がり流れでは、角部の圧力が負となることが知られており⁹⁾、図 11 の 0° の圧力を見ると、浮上物体右下角部に小さな低圧域が現れていることが分かる。つぎに角度が 0° から大きくなるにつれ、浮上物体右側には空気の流れ出しとその曲がり流れによる渦が形成され、図 11 に見られるように、渦を中心として負圧領域が広がっていく。約 130° で、すきまからの空気の流れ出しがなくなるが、その角度から約 220° までは、空気は逆に右側端

Fig. 12 Velocity vectors near the right end of a floating object during one interval

Fig. 13 Velocity vectors near the left end of a floating object

部に沿ってすきま内に流入するようになる。よって右端部の圧力は、空気の吸い込みによって低下する。 270° 、 310° では、右側端部に、大きな速度ベクトルが存在せず、右側端部の圧力は、すきま内の圧力に影響され圧力は上昇する。

図 13 に、浮上物体左側端部の速度ベクトルを示した。左側端部では、すきまから出入りする流れは、振動面の左端下方への流れをおもに形成する。この流れは、図 11 に示すように、渦の中心部では圧力低下を生ずるものの浮上物体左側端部の流れには、ほとんど影響を及ぼさない。よって、浮上物体左側端部の圧力は、ほぼ周囲圧に近い一定の値となる。

図 14 に、浮上物体の端部に加わる単位長さあたりの力 F_1 , F_2 , F_2-F_1 の計算結果をそれぞれ示す。端部に加わ

Fig. 14 Force variations exerted on the both ends of a flat plate

Fig. 15 Relationship between offset distance and average holding force

る力は、圧力を浮上物体厚さ方向に積分することにより求めている。また力の計算では、周囲圧 $=0.105\text{MPa}$ を零（ゲージ圧）とし、図9中に示す F_2 の方向を正とした。図に示されるように、右側端部に加わる力 F_1 は、流れ出しの際に生ずる渦と吸い込み流れの効果により、角度が約 0° から 270° までの間、負の値を示している。したがって F_2-F_1 の平均値は正となり、浮上物体には、振動面上に引き戻す力（保持力）が働くことになる。

図15には、図14で示した F_2-F_1 の計算結果を1周期分にわたって積分して得た保持力 F とオフセット量 a との関係を示した。保持力 F は、オフセット量が約 0.1mm 程度で最大となり、その後低下することが分かる。図8に、実験的に得たオフセット量 a の値を示したが、実験においても a の値は、比較的小さな値を示しており、計算結果の傾向とよく一致している。ちなみに、図15の F の値 $=1 \times 10^2 \text{ N/m}$ を図8に示す直径 4mm の円板（厚さ $60\mu\text{m}$ ）に加わる保持力に換算すると、約 $6 \times 10^{-5} \text{ N}$ ($=1 \times 10^2 [\text{N/m}] \times 2 \times 10^{-3} \times 3.14 [\text{m}]$)となり、

ほぼ、実験値と同様のオーダーの値となる。

6. 結 言

本研究では、超音波領域で振動する平板によって生ずるスクイーズ空気膜圧力と保持力（振動面に平行な力）とを利用した小型の非接触チャックを提案した。そして提案する非接触チャックを設計する上で重要となる超音波振動面の保持力の発生要因を、CFDを用いて解明するとともに、実験的な検討を行った。その結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 超音波振動面上に置かれた物体には、振動面に垂直な方向および平行な方向に力が働き、物体は振動面上に非接触に保持される。
- (2) 振動面上に置かれた物体にオフセット量が生じた場合、振動面上にある浮上物体端部の平均圧力が負となり、物体を振動面内に引き戻す力が働く。この浮上物体端部の負圧が保持力の発生要因であることがわかった。
- (3) 浮上物体右側端部の負圧は、おもに空気がすきまから流れ出す際に浮上物体端部の曲り流れによって生成される渦と、すきま内に空気が吸い込まれる際に生じる端部に沿う流れによって生じる。

なお論文作成に際し、貴重なご意見を頂いた東京理科大学工学部山本誠教授に謝意を表する。

参考文献

- (1) Matsuo, E., Koike, Y., Nakamura, K. Ueha, S. and Hashimoto, Y., Holding characteristics of Planar objects suspended by near-field acoustic levitation, *Ultrasonics* 38 (2000) pp. 60-63
- (2) Ueha, S., Koike, Y., Nakamura, K. and Hashimoto, Y., Near-field acoustic levitation phenomenon and its applications, *Proc. of ASJ*, (2000-3) Paper No. 2-JA-13
- (3) Yoshimoto, S. Yamazaki, T and Yagi, K., Study on non-contact chuck using ultrasonic vibration, *Proc. JSPE*, (2004-September) Paper No. L25, pp915-916
- (4) Kuroda, S. and Hirata, N., The Characteristics of Motion of a Round Plate Supported on Squeeze Air Film, *Trans. JSME*, 50-459, B (1984), 2727
- (5) Yoshimoto, S and Anno, Y., Rectangular Squeeze-Film Gas Bearing Using a Piezoelectric Actuator *J. of JSPE*, 58-3 (1992), 527
- (6) Yoshimoto, S., Anno, Y., Sato, Y. and Hamanaka, K., Float Characteristics of Squeeze-Film Gas Bearing with Elastic Hinges for Linear Motion Guide, *Trans JSME*, 60-574, C (1994), 1791
- (7) Hino, M, *Introduction to Fluid Mechanics*, (1992) Asakura-shoten