

超音波スクイーズ効果を利用した真空環境下における非接触浮上技術に関する実験的研究

Experimental Study on Non-contact Levitation Technology in Vacuum Environment Using Ultrasonic Squeeze Effect

東理大・院（正）*平田 遼 東理大・工（非）八木 皓平 東理大（正）宮武 正明

Ryo Hirata*, Kohei Yagi**, Masaaki Miyatake**

*Graduate School of Tokyo University of Science, ** Tokyo University of Science

1. はじめに

近年、AI や IoT 技術の発展により、半導体の需要が右肩上がりになっている中、半導体製造における歩留まり率は依然として課題となっている。特に、エッチングやイオン注入といった真空環境下での工程において、半導体部品の破損や異物の付着を防止するため、非接触での浮上・搬送技術が求められている。従来では、このような真空環境下での非接触浮上・搬送技術として、磁気浮上によるリニア機構などが提案されている。しかし、浮上対象が磁性体でなくてはならないといった制約があり、シリコンを主材料とする半導体部品の浮上・搬送は難しい。そこで、スクイーズ効果を用いた非接触浮上技術が注目されている。スクイーズ効果とは、Figure 1 に示すように、相対する 2 面間の距離を交番的に変化させた際に、2 面間の流体膜の時間平均圧力 p が周囲圧 p_a より高くなることを利用したものである。スクイーズ膜浮上の発生には、通常は空気が媒質として用いられることが多いが、半導体製造の真空環境下での工程では、空気を媒質としては利用できない。そこで先行研究において小川ら¹⁾は、真空環境下でも利用できる低蒸気圧流体を用いた真空中でのスクイーズ膜浮上を試みた。小川らの研究では、スクイーズ膜浮上に用いる振動周波数が 14kHz と可聴域であったが、本研究では振動周波数を超音波域に変更し、超音波スクイーズ膜浮上効果を用いた真空環境における非接触浮上を試みるとともに、その浮上特性を大気圧下および真空環境下にて実験的に検証した。

2. 実験装置

Figure 2 に、実験装置の概略図および写真を示す。この実験装置は、振動増幅ホーン（以下ホーン）、ランジュバン型圧電素子（以下圧電素子）、装置筐体により構成されている。ホーン（ $\phi 35\text{mm} \times 50\text{mm}$ ）は超音波領域である 61.8kHz にて、ホーン先端がピストンモードで共振するように設計されている。このホーンの下部に圧電素子（ $\phi 15\text{mm} \times 42\text{mm}$ ）をボルト締めで固定し、ファンクションジェネレータで生成した交流波（電圧振幅 $\pm 10\text{V}$ ）をアクチュエータドライバで増幅して、 $\pm 60\text{V} \sim \pm 70\text{V}$ の電圧を圧電素子に入力する。この振動をさらにホーンで増幅し、ホーン先端振幅を $a = 4.129\mu\text{m} \sim 4.534\mu\text{m}$ として実験を行った。浮上物体には、直径 8.0mm で厚さ 3mm ($m=0.416\text{g}$) と厚さ 4mm ($m=0.556\text{g}$) のアルミ合金製の円板を 2 種類使用し、ホーン上面に低蒸気圧流体である拡散ポンプ油（ライオン S、動粘度 $37\text{mm}^2/\text{s}@40^\circ\text{C}$ ）を $20\mu\text{L}$ 滴下し、その上に円板を静かに設置した。

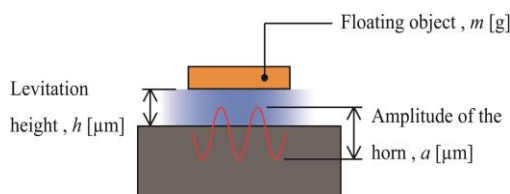


Fig. 1 Schematic diagram of the squeeze effect

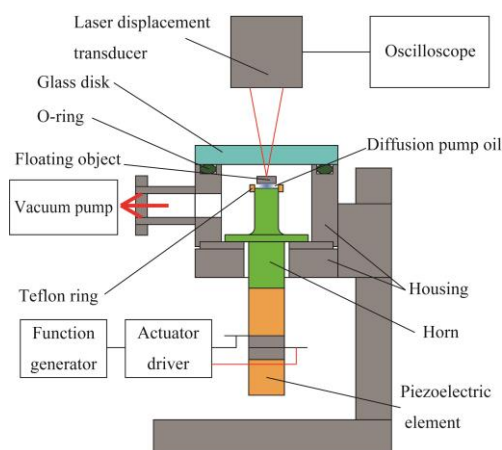


Fig. 3 Aluminum floating object ($\phi 8 \times 3\text{mm}$, $\phi 8 \times 4\text{mm}$), Glass floating object ($\phi 8 \times 3\text{mm}$)

Fig. 2 Schematic view and photo of the experimental apparatus

3. 実験方法

まず大気圧下においてスクイーズ膜浮上実験を行った。浮上物体の上方にレーザー変位計（KEYENCE LK-H052K）を正反射モードで取付け、ホーンを振動させ浮上量を測定した。次に真空環境下での測定として、装置を真空ポンプ（SATO VAC TSW-150N）に接続し、装置内の絶対圧を $5.0 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 程度の中真空環境とした。その後、ホーンを振動させ、浮上量を測定した。さらに、浮上物体をガラス製のもの（ $\phi 8 \text{mm} \times 3 \text{mm}, m=0.332 \text{g}$ ）に変更し、浮上物体とホーン上面との間でキャビテーションの有無を確認した。なお、このガラス製円板を用いて浮上量を測定するために、片面に円環状のシムリングを貼り付け、レーザーを反射させることで測定を行った。

4. 実験結果

Figure 4 に、 $m=0.416 \text{g}$ と $m=0.556 \text{g}$ の各浮上物体について、大気圧下および真空環境下における浮上量の時間推移を示す。実験は $t=20$ 秒でホーンの振動を開始し、最大浮上量に到達して 50～100 秒後に振動を停止した。このときのホーンの振幅は $a=4.534 \mu\text{m}$ である。最大浮上量は、 $m=0.416 \text{g}$ の浮上物体において大気圧下が $34.2 \mu\text{m}$ 、真空環境下が $36.8 \mu\text{m}$ 、 $m=0.556 \text{g}$ の浮上物体において大気圧下が $31.6 \mu\text{m}$ 、真空環境下が $33.9 \mu\text{m}$ となった。この最大浮上量を複数回測定して平均を取った数値を C_0 とし、各質量における最大浮上量のグラフを Figure 5 に、各ホーン振幅における最大浮上量のグラフを Figure 6 に示す。これらの図より、浮上物体の浮上量は、ホーン振幅が一定の場合、浮上物体の質量が増加するのにともない減少する。また、ホーン振幅が増加するにつれ、浮上量は増加する。これらの傾向は大気圧下・真空環境下のいずれにおいても見られた。また、各測定結果より、大気圧下よりも真空環境下の方が浮上量は大きくなった。この理由として、大気圧下では浮上物体に周囲圧力による荷重と浮上物体の質量による重力が合わさって鉛直下向きの力として作用している一方、真空環境下では周囲圧力による荷重が大気圧下のそれと比較して微小であるため、鉛直下向きの力も小さくなるためであると考えられる。

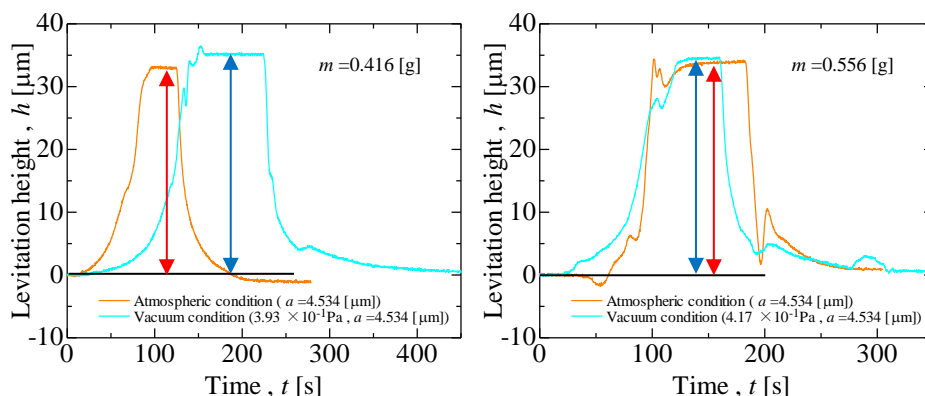


Fig. 4 Results of squeeze film levitation experiments under atmospheric pressure and vacuum conditions

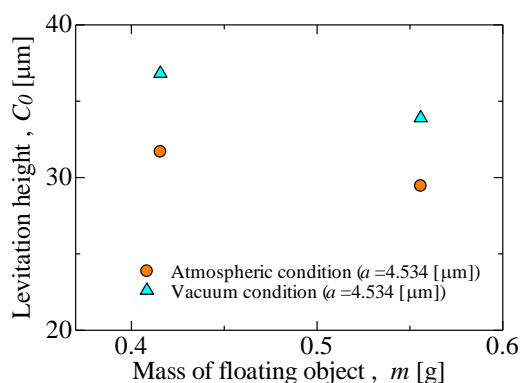


Fig. 5 Relationship between the mass of the floating object and Maximum levitation height

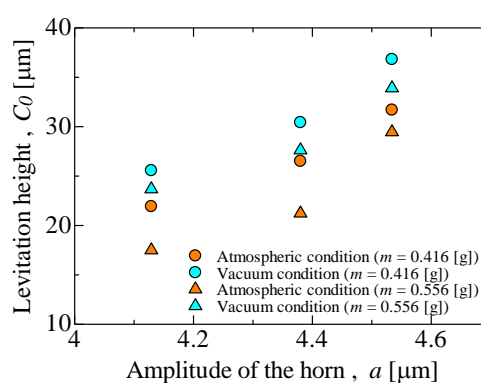


Fig. 6 Relationship between the amplitude of the horn tip and Maximum levitation height

Figure 7 に、ホーンの入力電圧とホーンの振動振幅の関係を、Figure 8 には $m=0.416 \text{g}$ と $m=0.556 \text{g}$ のそれぞれの浮上物体において、ホーンの入力電圧と浮上物体の浮上中の振動振幅の関係を示す。ここで、ホーンの入力電圧を基準としたホーン先端振幅の位相差を ϕ 、ホーンの入力電圧を基準とした浮上物体の振動の位相差を ϕ_1 、 ϕ_2 とし、 $\phi_1 - \phi$ 、 $\phi_2 - \phi$ を求めることで、ホーン先端振動と浮上物体の振動の位相差を求めることができる。まず、ホーン先端振動振幅と、浮上物体の振動振幅を比較すると、ホーンの振幅 $a=4.534 \mu\text{m}$ に対して、各浮上物体の浮上中における振動振幅は、それぞれ $0.281 \mu\text{m}$ 、 $0.227 \mu\text{m}$ とおよそ $1/20$ 程度となった。また、小川らの先行研究では、ホーン先端振動と浮上物体の振動の位相差は殆ど見られなかったが、本実験では $\pi/8 \text{ rad}$ 程度の位相差が確認された。このような結果は、空気を用いた超音波スクイーズ膜浮上にて見られる現象であり、空気の圧縮性浮上すきまから出入りする空気の慣性力による

影響によるものであるが、本研究では非圧縮性流体を用いていることから、浮上物体のすきま内へ出入りする流体の慣性力による影響が主な要因と考えられる。

最後に、Figure 9 にガラス製浮上物体を用いた際の浮上量の推移を、Figure 10 に試験時間中の浮上物体とホーン間の拡散ポンプ油の写真を示す。Figure 10 に示すように、浮上前、浮上中、浮上後のいずれの状態においても、拡散ポンプ油の中に気泡は見られなかった。このことから、浮上物体の浮上時においても、浮上すきま内の圧力は拡散ポンプ油の飽和蒸気圧以上の圧力となっており、キャビテーションが発生することなく安定して流体膜が形成されていることが確認された。

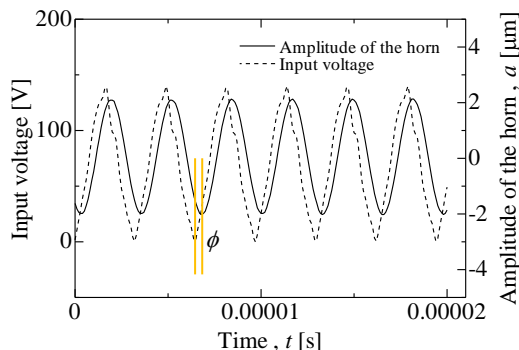


Fig. 7 Phase difference between the input voltage to the piezoelectric element and the amplitude of the horn tip

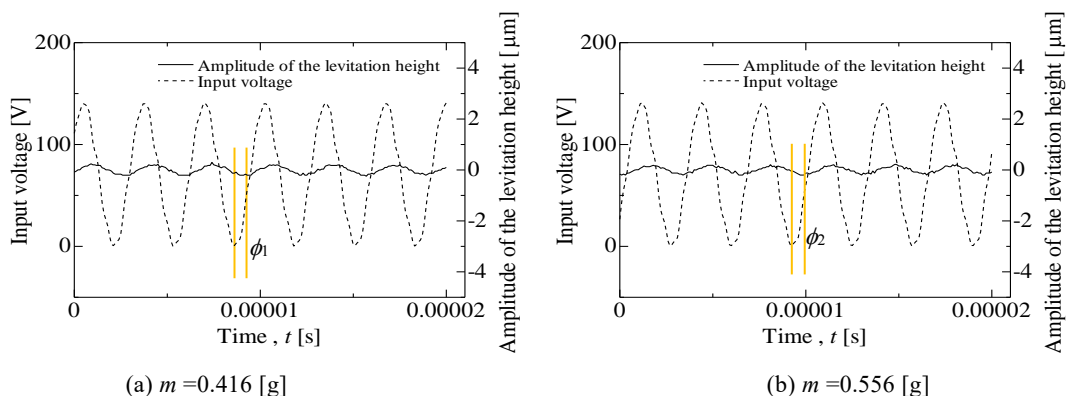


Fig. 8 Phase difference between the input voltage to the piezoelectric element and the vibration of the floating object

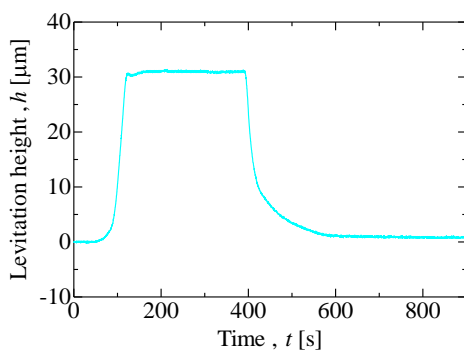


Fig. 9 Results of squeeze film levitation using glass floating object



Fig. 10 Diffusion pump oil behavior at each time

5. おわりに

本研究では、超音波スクイーズ膜浮上効果を用いた真空環境における非接触浮上を試み、以下の知見を得た。

- 1) 低蒸気圧流体を用いることにより、大気圧下だけでなく真空環境下においても、超音波スクイーズ膜浮上効果による非接触浮上は実現された。
- 2) 浮上物体の浮上量は、質量の増加にともない減少し、ホーン振動振幅の増加にともない増加する。
- 3) 低蒸気圧流体を用いた超音波スクイーズ膜浮上においては、入力側のホーンと浮上物体の振動振幅の間には位相差が生じ、浮上物体の振幅は 1/20 程度に小さくなる。この理由として、浮上物体のすきま内へ出入りする流体の慣性力による影響が考えられる。
- 4) 真空環境下での超音波スクイーズ膜浮上における浮上すきま内の圧力は拡散ポンプ油の飽和蒸気圧以上の圧力となっており、減圧によるキャビテーションは発生していないと考えられる。

文献

- 1) Ogawa R, Ito T, Kawada S, et al. Development of non-contact floating mechanism utilizing squeeze film levitation under vacuum environment. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2023;237(12):2224-2229. doi:10.1177/13506501231211624