

超音波を用いた非接触の物体浮上技術

東京理科大学 工学部 機械工学科 教授 みやたけ まさあき
宮武 正明

■ 1. はじめに

音波は、媒質（固体、液体、気体）を介して伝播する波ですが、人間の可聴域（数十～20 kHz 未満）以上の周波数を持つ音波が超音波です。超音波の持つ様々な特性（波長の短さ、界面での反射特性、指向性の高さなど）を利用して、例えば、工業分野では、材料や構造物内部に存在する欠陥や損傷を非侵食で検査する超音波探傷法^{1,2)}として、医療分野では、超音波エコー検査^{3,4)}に使用されております。これ以外にも、水中ソナーや魚群探知機⁵⁾にも使用されており、自動車運転支援技術への利用も検討されております⁶⁾。今回は、超音波の利用の中でも、超音波を用いた非接触（固体接触をとみなさない）の物体浮上技術について紹介いたします。

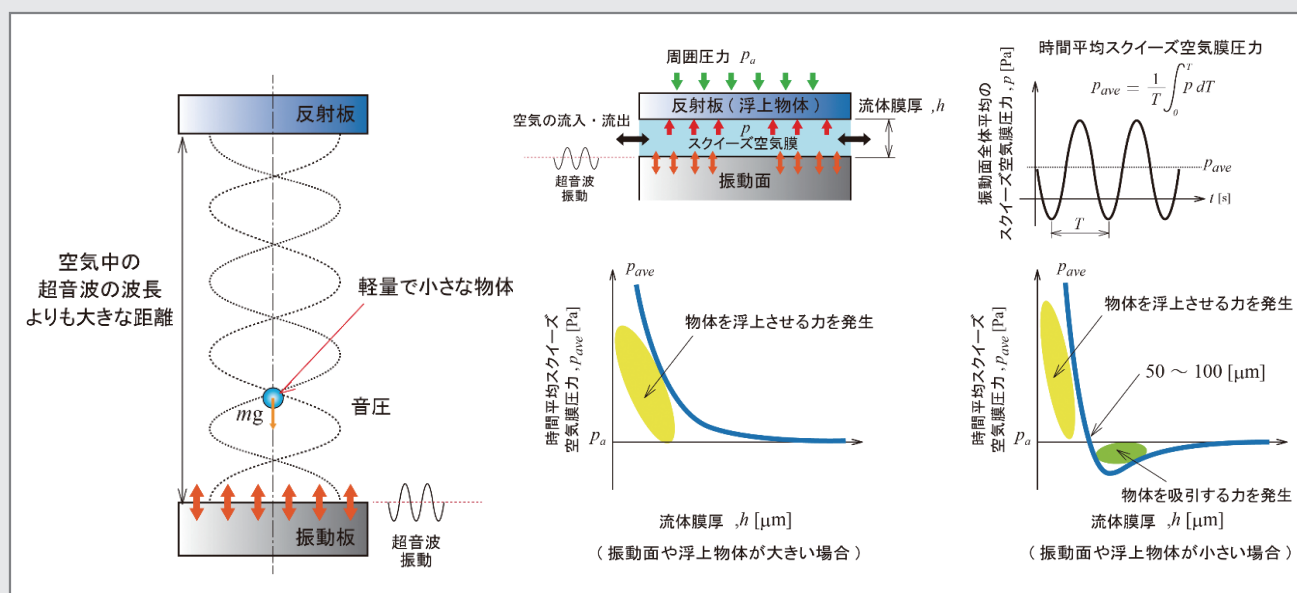
■ 2. 超音波を利用した物体の非接触浮上

超音波を用いた物体の非接触浮上としては、振動板と反射板の間に発生させた定在波を利用したものが古くから知られております⁷⁾【図 1】。これは、理科実験の課題としても取り上げられることも多い現象ですが、

プラスチックや水滴などの小型で軽量の物体が、定在波による音圧の節の所にトラップされて非接触で浮上します。さて、この定在波を利用した非接触浮上では、振動板と反射板の距離は、空気中の超音波の波長（周波数 20 kHz の場合で約 17 mm）よりも長いのですが、この距離を超音波の波長よりも短くしていくと、定在波による物体浮上とは異なる現象が生じます。この現象は、スクイーズ膜浮上^{8,9)}や近距離場（近接場）音波浮揚^{10,11)}と呼ばれる現象で、近年、半導体チップなどの小型物体の非接触浮上技術として注目されております。この現象は、機械工学やトライボロジー（摩擦・摩耗・潤滑）に関わる研究者はスクイーズ膜浮上と呼称し、音響学に関わる研究者は近距離場（近接場）音波浮揚と呼称することが多いのですが、今回取り扱うような、振動板と浮上物体の間が数 μm ～数百 μm の場合は、基本的には同じ現象です。以降では、スクイーズ膜浮上として説明します。

■ 3. スクイーズ膜浮上

スクイーズ膜浮上においては、振動板を振動させますが、その周波数は人間の可聴域でも超音波領域



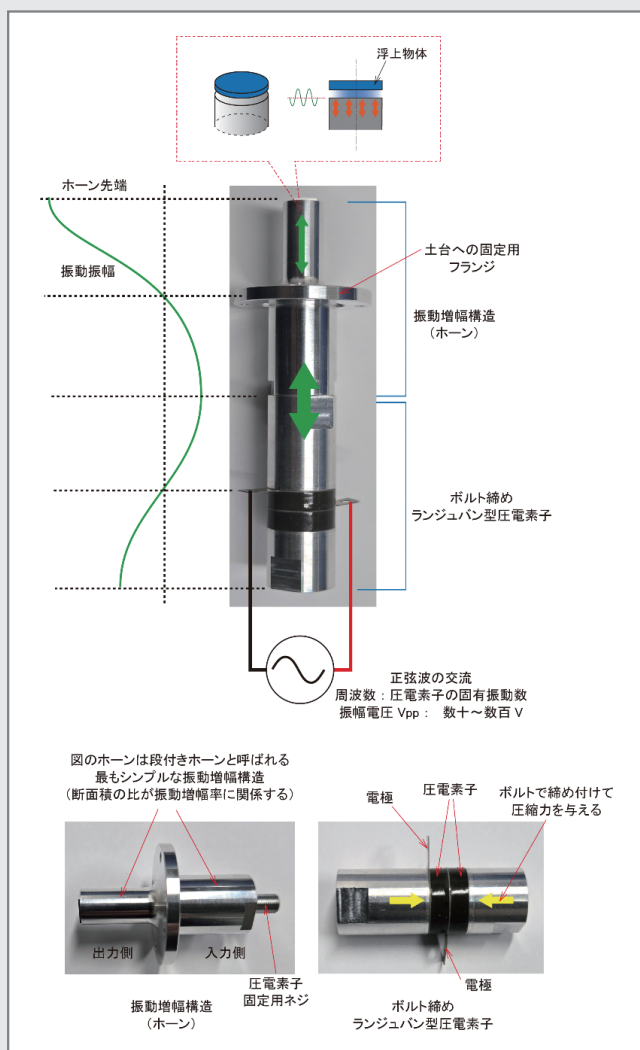
【図 1】 定在波による物体浮上

【図 2】 スクイーズ膜浮上

(20 kHz 以上) でも使用できますが、可聴域の音波を使用した場合は装置から発生する騒音が大きいため、通常は超音波を使用したスクイーズ膜浮上が用いられます【図 2】。スクイーズ膜浮上においては、浮上物体を浮上させる力は、振動板と浮上物体の間の、数 μm ～数百 μm の厚さの流体膜（スクイーズ膜）の圧力により得られます。媒質としては液体が使用されることもあります。まずは空気を媒質とした空気スクイーズ膜浮上を取り扱います。スクイーズ膜の圧力は、振動板の振動によりスクイーズ膜が圧縮された場合に高くなり、膨張した際に低くなりますが、スクイーズ膜の外端部において周囲との空気の流入・流出もありますし、振動板や浮上物体の大きさ、流体膜厚、振動板の振動周波数や振動振幅、空気の圧縮性などの影響も受けます。基本的には、浮上量が小さくなるのにもない、スクイーズ空気膜の圧力は高くなりますが、小型の浮上物体の場合は、浮上量を小さくすると、一旦スクイーズ空気膜圧力が大気圧よりも低くなり、更に小さくすると大気圧よりも高くなるという現象が生じます。この現象を利用すると、小型で軽量の部品を対象とした場合には、振動面を下向きにして、水平面上に置かれた把持対象をピックアップして非接触把持することが可能です。

スクイーズ膜浮上を行うには、振動板を数 μm ～数十 μm の振幅で振動させる必要があります。そこで使用されるのが、電圧や磁界により伸縮する振動子です。両者とも、高周波電力を振動子に入力して機械的振動に変換して振動させますが、一般的には、電圧によって伸縮する圧電素子を使用されます。圧電素子の材料としては、ジルコン酸チタン酸鉛 (PZT) が主に使用されておりますが、振動子自体の振動振幅はそれほど大きくないため、振動を増幅する構造と共振現象を利用して、浮上物体と相対する面の振動振幅を増幅させます。振動の周波数は、振動子の特性、振動子に入力する発振装置の特性により、 $\sim 100\text{ kHz}$ の周波数で使用されることが多いです。

【図 3】は、圧電素子および振動増幅ホーンを用いたスクイーズ膜浮上装置の構成例です。この装置では、ボルト締めランジュバン型圧電素子と呼ばれるリング形状の圧電素子を両側からボルトで締め付けた振動子を使用しております。振動子の振動増幅を、ホーンの形状によって増幅させて、ホーンの先端においてスクイーズ空気膜により対象物を浮上させます。スクイーズ膜浮上装置の性能には、高電圧かつ高周波数で圧電素子に交流電圧を入力可能な発振装置も重要ですが、振



【図 3】スクイーズ膜浮上装置の構成例
(ランジュバン型圧電素子と振動増幅ホーンを使用する場合)

動を増幅する構造（ホーンなど）の“かたち”も重要です。振動増幅構造の“かたち”は、機械工学の 4 力学（材料力学、熱力学、流体力学、機械力学）の中の、材料力学や機械力学を用いて決めますが、振動子の固有振動数で共振しつつ、いかに大きな振動増幅率を得られるかが設計のポイントとなります。電気信号のように目に見えないものではなく、目に見える機械の“かたち”が装置の性能に大きな影響を与えるという点で、機械工学の観点から見ると非常に面白い技術となります。

なお、スクイーズ膜浮上では、振動板の振動がスクイーズ膜（液体や気体）に伝わり、物体を浮上させます。振動板の設計には、材料力学や機械力学が関係し、スクイーズ膜の特性は、流体力学や熱力学が関係します。その点で言うと、スクイーズ膜浮上は、機械工学の 4 力学（材料力学、熱力学、流体力学、機械力学）全てが密接に関わる機械要素となります。

■ 4. スクイーズ膜浮上における水平方向のセルフセンタリング機能

スクイーズ膜浮上が近年、半導体チップなどの小型物体の非接触浮上に注目されている理由は、物体を非接触で浮上させることだけでなく、水平方向に非接触で把持するセルフセンタリング機能を持っているためです。浮上物体に水平方向に変位を与えても、自動的に最初の位置に戻ります。

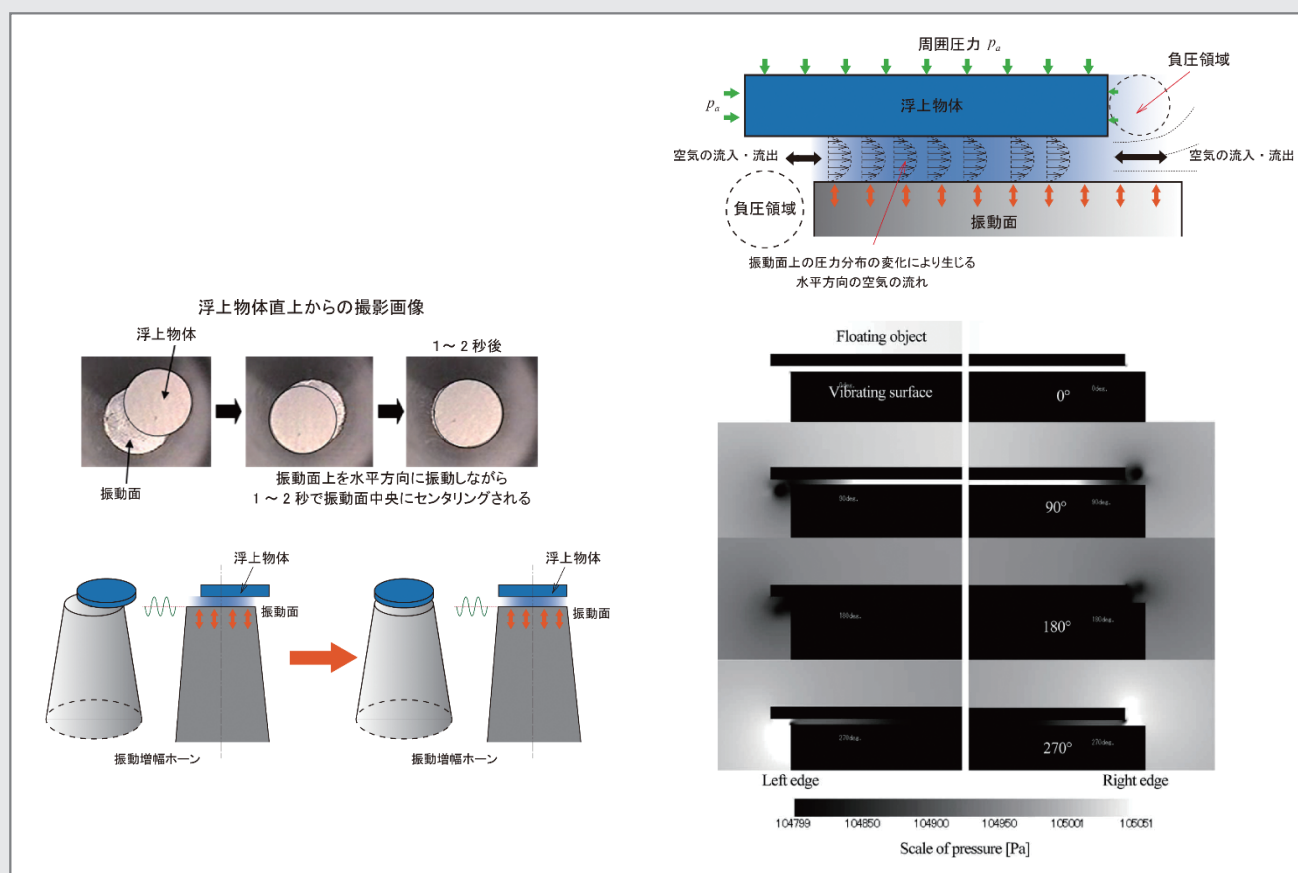
【図 4】は、直径 4 mm の円形振動面と同様の形状を持つ厚さ 40 μm の円板を非接触で浮上させて、水平方向に移動させた後の円板の運動を動画撮影したものです。厚さ 40 μm の円板の位置を水平方向にずらしても、振動面から外れることなく、1~2 秒以内に振動面の直上中央位置に非接触で保持されることが確認されております¹²⁾。この図では浮上物体は円形ですが、半導体のチップのような矩形の物体でも水平方向に非接触で把持できることが確認されております。

このスクイーズ膜浮上における水平方向のセルフセンタリング機能の発生の要因としては 2 個の要因が考えられております【図 5】。一つは、浮上物体が水

平方向にずれることにより、振動面と浮上物体間の圧力分布が水平方向に不均一となることでスクイーズ膜内に水平方向の空気の流れが生じ、粘性による水平方向の戻り力が発生すること¹³⁾、二つ目には浮上物体が水平方向にずれた際に浮上物体端面に負圧が発生し、浮上物体が水平方向に戻る力が発生することが要因として考えられております¹⁴⁾。スクイーズ膜浮上装置では、このセルフセンタリング機能を利用することで、半導体チップなどの小型物体を非接触での把持や搬送、非接触での反転動作も可能となります。

■ 5. スクイーズ膜浮上を用いた非接触把持および搬送に関するアプリケーション例

近年、生成 AI などの AI 技術が注目されておりますが、これらは莫大なデータ処理が必要となることから、メモリの記憶容量や演算処理能力の大幅な性能アップが必要とされております。従来は、半導体回路の微細化により、高密度化や高速化を行ってきましたが、微細化技術だけでは限界があり、メモリを垂直方向に積載して高密度化し、処理速度の高速化を図る三次元積



【図 4】スクイーズ膜浮上における非接触の水平方向把持（セルフセンタリング）機能

振動 1 周期におけるスクイーズ膜および振動面と浮上物体周囲の圧力分布¹⁴⁾
【図 5】スクイーズ膜浮上における非接触の水平方向把持（セルフセンタリング）機能

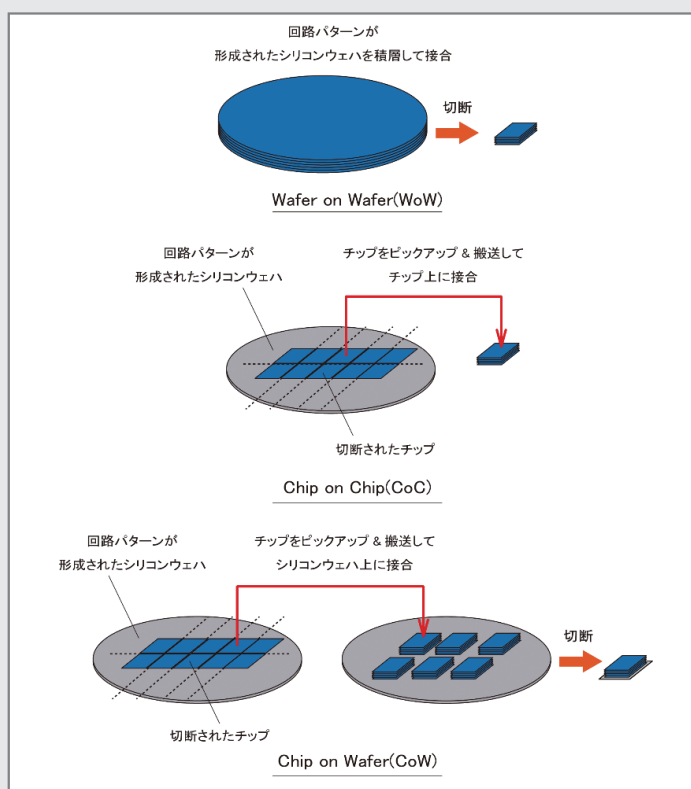
層技術に注目が集まっております。三次元積層においては、【図6】に示すように、円板形状のウェハ同士を接合する Wafer on Wafer (WoW)，ウェハから矩形に切り出したチップ同士を接合する Chip on Chip (CoC)，ウェハ上に矩形のチップを接合する Chip on Wafer (CoW) がありますが、CoC や CoW は、矩形のチップを搬送用ツールでピックアップおよび搬送をして、チップやウェハ上に接合します。従来の三次元積層技術においては、はんだバンブによりチップ同士を接合しており、チップのピックアップと搬送には主に接触式のツールを使用して搬送を行っていましたが、近年、チップの金属電極間を直接接合するダイレクト接合技術の実用化に向けた検討が進められております【図7】。ダイレクト接合においては、チップ搬送時の破損や微小異物の付着を抑制するために、非接触のハンドリングが求められております。

ダイレクト接合におけるチップの非接触搬送ハンドリングにおいては、ウェハ上に回路パターンを形成した後に、ダイシング加工したウェハから非接触のハンドリングツールによりチップをピックアップした後に、水平方向の搬送や、ボンディングツールに受け渡すために、チップが上向きになるように180度反転させます【図8】。この動作において、先ほど説明したような、スクイーズ膜浮上による水平方向のセルフセンタリング機能が重要となります^{15,16)}。

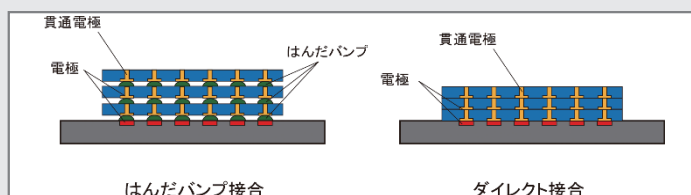
筆者の研究室では、スクイーズ膜浮上を利用した非接触ツールによる半導体チップの非接触把持および搬送に関して、実用化に向けた各種評価を行っております¹⁷⁻¹⁹⁾。【図9】は、半導体チップ用実装装置に搭載可能なサイズの、小型非接触ハンドリングツールの概要ですが、実際の装置を模擬したフリップチップ動作と非接触のハンドリングが可能となっております。

■ 6. 真空環境下でのスクイーズ膜浮上

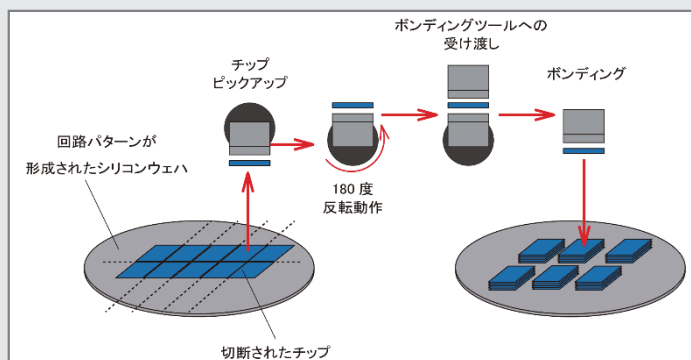
これまでの説明は、空気を媒質としたスクイーズ膜浮上で大気環境での使用でしたが、宇宙環境や半導体製造工程における真空中での製造工程において、物体を非接触で浮上させたいという要望は多くあります。しかし超音波は媒質



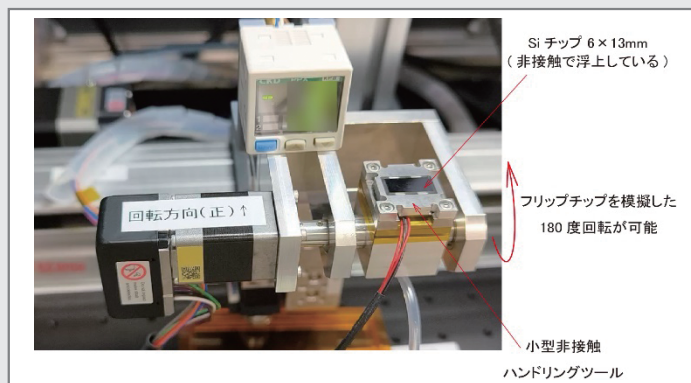
【図6】 三次元積層技術



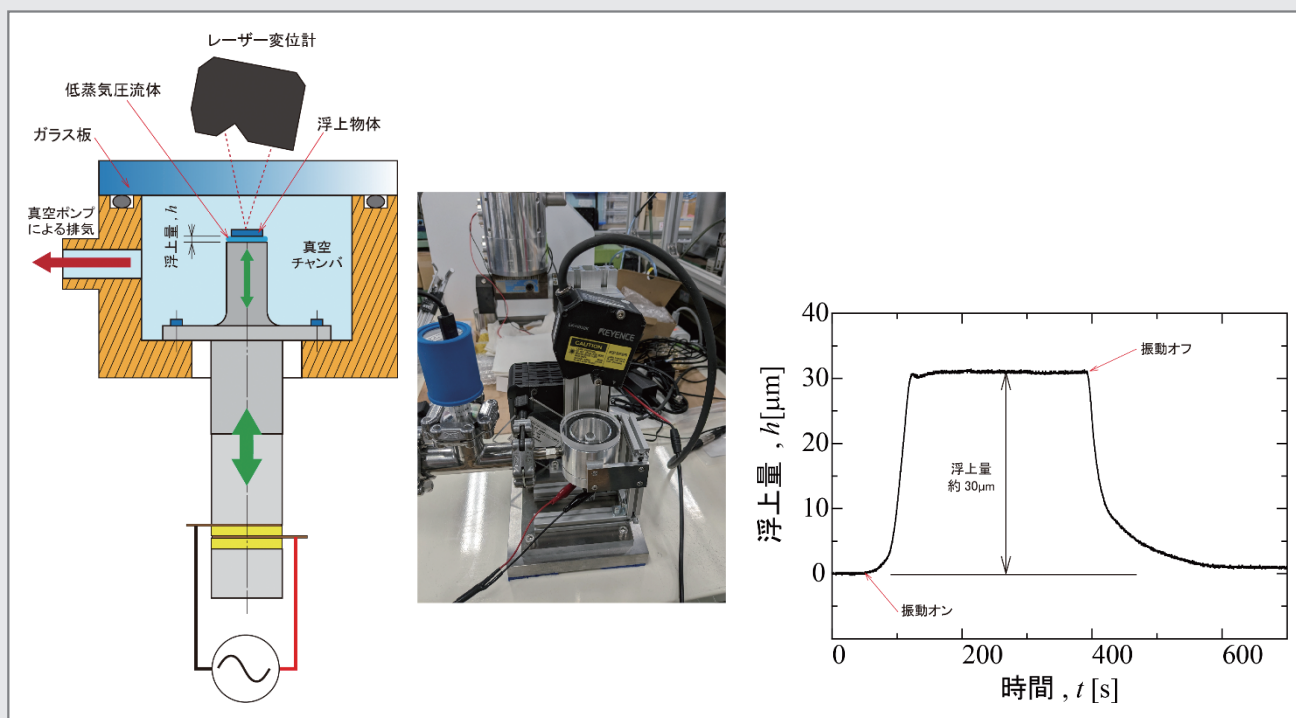
【図7】 はんだバンブ接合とダイレクト接合



【図8】 非接触ハンドリングツールを使用した CoW ダイレクト接合

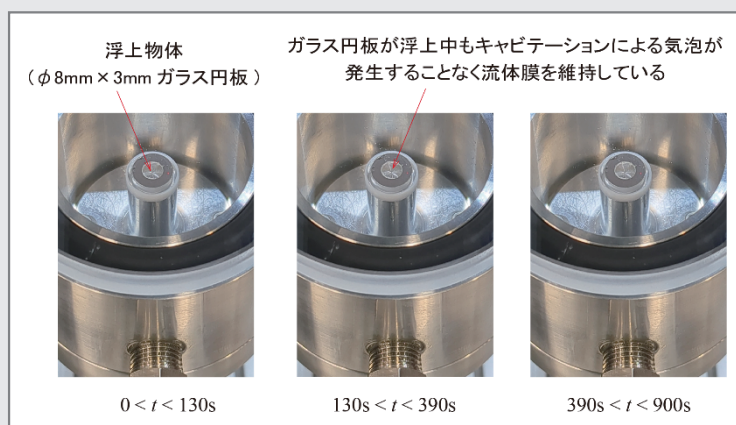


【図9】 非接触ハンドリングツール (実験装置の概要)



【図 10】 真空環境下でのスクイーズ膜浮上実験（実験装置の概要）

【図 11】 真空環境下でのスクイーズ膜浮上実験
（浮上量測定実験結果の例）



【図 12】 真空環境下でのスクイーズ膜浮上実験
（浮上量測定実験中の流体膜の様子）

（固体、液体、気体）を介して伝播するため、真空中では伝播しません。そのため、真空環境下でスクイーズ膜浮上を行うには、液体を使用する必要がありますが、筆者の研究室では、真空ポンプ用油やイオン液体²⁰⁾（アニオン、カチオンのイオンから構成され常温で液体）のように、蒸気圧が極めて低い液体を使用した真空環境下でのスクイーズ膜浮上に関して研究を行っております^{21,22)}。

【図 10】は、真空環境下でのスクイーズ膜浮上装置の概要です。振動増幅ホーンの先端部が真空チャンバ内に位置するように設置されております。浮上物体としては、直径 8 mm、厚さ 3 mm 程度のアルミ合金製円板や合成石英ガラス製円板（質量 0.3～0.5 g 程

度）を使用し、スクイーズ膜浮上に使用される液体には、拡散ポンプ油（最大到達圧力 6.7×10^{-7} Pa、動粘度 $37 \text{ mm}^2/\text{s}@40^\circ\text{C}$ ）を 20 μL 使用しました。

【図 11】は、真空環境下（チャンバ内圧力 5×10^{-1} Pa）において、 $t=50\text{s}$ の時に振動子の振動をオン、 $t=400\text{s}$ の時に振動をオフにした際の浮上物体（ガラス円板、直径 8 mm、厚さ 3 mm）の浮上量を、装置上部からレーザー変位計により測定した結果です。この時の振動子への入力周波数は約 61 kHz で、ホーン先端の振動振幅は約 4 μm でした。

【図 11】に示すように、振動をオンにした後、浮上物体の浮上量は徐々に増加し、約 70 秒経過後に約 30 μm の浮上量で安定しました。なお、この実験で

は、ガラス円板を浮上物体として使用しているため、浮上実験中の流体膜の状態を観察可能です。【図 12】は浮上実験中の流体膜の状態を写真撮影したのですが、ガラス円板が約 30 μm 浮上中 ($130\text{ s} < t < 390\text{ s}$) の状態でも、キャビテーションによる気泡が発生することなく、流体膜を維持していることが分かります。この真空環境下でのスクイズ膜浮上に関する研究は始めたばかりですが、大気環境での空気を用いたスクイズ膜浮上とは異なる現象も見られております。今後この真空環境下でのスクイズ膜浮上に関して、基礎、応用を含めた研究を実施して行く予定です。

■ 7. おわりに

超音波は、媒質（固体、液体、気体）を介して伝播する波であり、基本的な理論や現象から、実用的な応用事例まで見ると、サイエンスからエンジニアリングまで幅広く関わります。今回は、超音波を用いた非接触の物体浮上技術について紹介しましたが、これはあくまでも、超音波の一つの利用事例であり、このような紹介記事を通して、少しでも超音波に関して興味を持っていただければ幸いです。

なお、今回紹介した成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業」（JPNP 20017）の助成事業の結果得られたものです。

参考文献

- 1) Firestone F. The Supersonic Reflectoscope, an Instrument for Inspecting the Interior of Solid Parts by Means of Sound Waves. The Journal of The Acoustic Society of America, 1946 ; 17 (3) : 287-299.
- 2) 増田 智紀, 町田 進, 吉成 仁志, 榎並 啓太郎. 超音波探傷による欠陥検出と破壊強度評価. 日本造船学会論文集, 1997 ; 1997 (182) : 675-682.
- 3) 橋本 健二郎, 鈴木 洋. 超音波診断法の原理と基礎知識. 動物の循環器. 1984 ; 17 (17) : 2-12.
- 4) 岡本 光師, 宮武 邦夫, 木下 直和, 榊原 博, 仁村 泰治. 超音波パルス・ドプラ法による肺動脈血流の分析. 日本内科学会雑誌. 1981 ; 70 (3) : 376-384.
- 5) 松尾 行雄, 赤松 友成, 西森 靖. 超音波による魚群探知システム. 計測と制御. 2010 ; 49 (1) : 51-55.
- 6) 井幡 光詞, 原 六蔵, 木村 友則, 西岡 泰弘, 米田 尚史, 鈴木 涼太郎, 岡田 光昭. 空中超音波センサの自動車運転支援技術への応用. 日本音響学会誌, 2020 ; 76 (5) : 291-297.
- 7) 羽田野 甫. 無容器プロセスのための超音波浮揚. 日本音響学会誌. 1996, 52 (3) : 197-202.
- 8) Salbu E. Compressible Squeeze Films and Squeeze Bearings. ASME. J.

Basic Eng. 1964 ; 86 (2) : 355-364.

- 9) 小野 京右. 圧縮性スクイズ膜に関する基礎的研究. 潤滑. 1976, 21 (9) : 589-597.
- 10) 橋本 芳樹, 小池 義和, 上羽 貞行. 近距離場音波浮揚現象による非接触物体搬送. 日本音響学会誌. 1997 ; 53 : 817-821.
- 11) 小池 義和. 近距離場音波浮揚による非接触搬送技. 日本音響学会誌. 2005 ; 61 (3) : 137-142.
- 12) 吉本 成香, 山崎 友美, 戸田 和之, 宮武 正明. 超音波振動を利用した非接触チャックに関する研究. 日本機械学会論文集 C 編. 2007 ; 73 (728) : 1208-1214.
- 13) 千野 翔太, 加藤 裕弘, 石野 裕二, 高崎 正也, 水野 毅. 微小物体を対象とした非接触超音波支持の作用力特性. 精密工学会誌. 2012 ; 78 (4) : 332-337.
- 14) Yoshimoto S, Sekine H, Miyatake M. A non-contact chuck using ultrasonic vibration : Analysis of the primary cause of the holding force acting on a floating object. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science. 2010 ; 224 (2) : 305-313.
- 15) Kohei A, Aoyagi A. Measurement of Holding Force and Transportation Force Acting on Tabular Object in Near-Field Acoustic Levitation. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2022 ; 69 (4) : 1508-1514.
- 16) Mita K, Miyatake M, Atherton M, Mares C, Yoshimoto S, Stolarski T. Non-contact Handling Equipment Using Ultrasonic Vibration. World Tribology Congress 2017, Beijing, China, September 17-22
- 17) 菱沼 隼, 宮武 正明, 菊地 広, 李 瑾, 戸張 優太. 半導体チップ搬送における超音波スクイズ効果を利用した非接触ハンドリング技術開発. 第 38 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会講演論文集 (2024)
- 18) Hishinuma H, Kikuchi H, Tobar Y, Miyatake M. Advanced Development of Squeeze Effect Non-Contact Handling Tool for Semiconductor Chips. Proceedings of IEEE 3DIC 2024 (IEEE International 3D Systems Integration Conference 2024)
- 19) Sato S, Miyatake M, Kikuchi H, Hishinuma H. Study on Positioning Accuracy of Si Chips in Non-contact Holding by Non-contact Chuck Utilizing Ultrasonic Squeeze Effect. Proceedings of ICPE2024 : The 20th International Conference on Precision Engineering. GS10-05.
- 20) 川田 将平, 佐々木 信也. 潤滑剤としてのイオン液体の展望. トライボロジスト. 2018 ; 63 (5) : 317-323.
- 21) Ogawa R, Ito T, Kawada S, Miyatake M, Mares C, Stolarski T, Yoshimoto S. 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.
- 22) 平田 遼, 八木 皓平, 宮武 正明. 超音波スクイ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. トライボロジー会議 2024 秋 名護 予稿集

