

超音波による空中での物体非接触搬送

東京工業大学 中 村 健 太 郎*

1. はじめに

超音波による代表的なアクチュエーション技術として、固体の超音波振動によって、それに接するロータやスライダを、摩擦力を介して駆動する超音波モータがある。超音波モータは、軽量・高トルクなどの特徴を生かし、カメラの自動焦点合わせ機構などを中心に1980年代後半から実用化されており、機構駆動用デバイスの選択肢の一つとして認識されている。

一方、空气中を伝搬する超音波には、その波動としての放射力¹⁾や、高振幅による非線形性に起因する空気の流れ(音響流)が生じる現象が古くから知られている。近年、この現象を利用して、空中で固体や液体に対して非接触な操作をすることが試みられるようになった。本稿では、空气中において、超音波の放射力や音響流によって微量液滴を非接触に操作する技術、大面積の平板を非接触搬送する技術について紹介する。

2. 空中定在波による液滴の非接触操作

2.1 定在波音場中の微小物体の浮揚

一般に空气中では、20 kHz から100 kHz 程度の超音波が使われる。空气中の音速はおおよそ340 m/s と遅く、この程度の周波数でも波長は数 mm 程度であり、20 mm よりも短い。また、これよりも周波数が高いと空気による吸収減衰がかなり大きくなる。超音波の定在波を発生させた場合、音響放射力により、その音圧の節の位置に波長よりも十分小さい物体がトラップされることが古くから知られている。これが空中での超音波浮揚の典型例である。周波数27 kHzの均一振動面(直径30 mm)とそれと平行な反射面(金属板)の間に発生させた定在波の節に小

球が浮いているようすのシュリーレン写真を図1に示す。このシュリーレン写真では、音圧の節が明(白)または暗(黒)になっている。重力と浮揚力との釣り合いのために、浮揚する位置は音圧の節から少し鉛直方向下向きにずれた位置になるが、図1の例では軽量の発泡スチロール球を浮揚させているので、節の位置からのずれは少ない。水平方向にも、中心軸に浮揚物体が保持される。これは水平方向にも音場分布があるためである。図1の例では、水平方向の保持力は鉛直方向のそれよりも小さい。

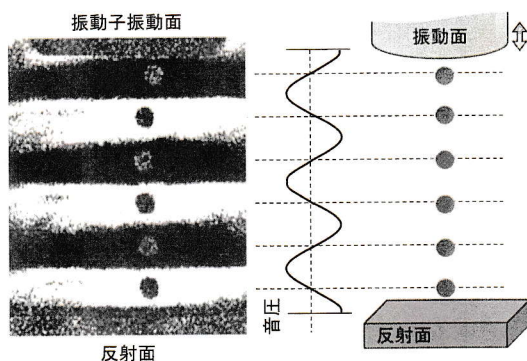


図1 振動面と反射面の間に生成した定在波中に浮く微小球

2.2 浮揚位置の操作

空气中に浮揚した物体を浮揚させたままその位置を移動する方法として、定在波音場の分布を水平方向にスライドさせる方法がある²⁾。図2のように、横長の振動板の両端に駆動用振動源を配置する。振動源の垂直方向縦振動によって振動板にたわみ振動が励振される。振動板と反射板の間には定在波音場が形成される。これら2つの振動源は同じもので、同じ電源で駆動されるが、位相差を与えられている。この位相差を変えると、定在波の分布が水平方向に移動する。こうすることで、浮揚した物体も定在波分布と同期して移動する。このような振動系に生じ

* なかむら けんたろう 科学技術創成研究院未来産業技術研究所教授

る定在波振動分布は振動板両端の境界条件によって決定されるが、この図の例のように駆動源の位相をずらす強制的な方法でも分布をある程度は移動させることができる。図2下では、位相差を変えた場合の音圧分布と浮揚物体の位置を示した。なお、ここに示した音場分布は音圧による空気の屈折率変調を光学干渉計で測定、可視化したもので、図1の音場可視化画像とは節と腹が逆になっている。位相を少しずつステップ的に変化させてゆくと、それに応じて浮揚物体の位置も少しずつ移動してゆく。この際、1ステップの位相変化を大きくとりすぎると、物体は所望の方向とは逆方向に移動してしまう。反対側の安定点のほうが始めの安定点に近くなってしまうためである。

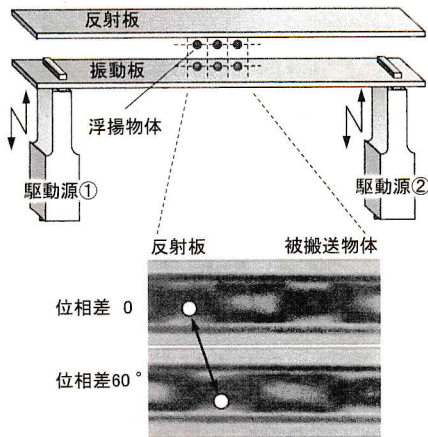


図2 定在波の励振位相による浮揚位置の操作

2.3 微量の液滴の浮揚と搬送

微小物体の代わりに微量の液滴を定在波音場中に入れると、これも音圧の節にトラップされる。図3は反射体として円弧状のものを用い、振動面との間に液滴を浮揚したようすである。ここで、反射体

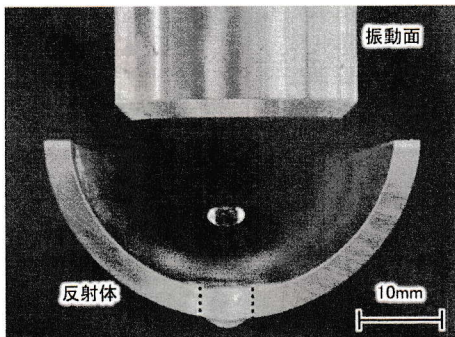


図3 平面振動面と円弧状反射体の間に浮揚する液滴

に円弧を用いたのは、横方向の音場の閉じ込めを増してトラップ力を向上させるためである。音圧の節に浮いた液滴が、音圧の大きい上下方向からの放射力を受けて潰れているようすがわかる。筆者は水やエタノールで浮揚実験を行っているが、音圧の大きさと液体の表面張力などによって扁平率が異なる。音圧を大きくし過ぎると、液体は超音波音場により霧化されて飛散してしまうので、液体を浮揚する場合は音場強度の調節が必要である。

2.4 液滴の直線連続搬送

前述のような定在波分布の励振位置を逐次ずらす方法により液滴をステップ・バイ・ステップで搬送することも可能であるが、ここでは進行波音場によって液滴を直線的かつ連続的に搬送することについて説明する。たわみ振動の進行波を励振するには、前掲の図2に似た構成において振動板の片側で振動を吸収し反射波を無くす必要がある。このためには図2の振動源2の位置に振動吸収材料を置くか、振動源2の電気端子を電気的に整合終端して、振動を吸収させる。図4にその構成例と、微小物体の搬送のようすを示す^{3),4)}。図の下に音圧分布のようす(濃淡)と搬送された微小物体の軌跡(黒丸)を示している。垂直方向には音圧の腹と節ができており、水平方向には進行波となっている。たわみ振動の伝搬速度と反射板・振動板間に伝わる音場モードの伝搬速度を一致させると効率がよくなると考えられる。また、この実験例では、右端で音場の反射を完全にゼロにできていないために、水平方向にも定在波成分が見られる。搬送される物体は垂直方向にトラップされると同時に、水平方向の進行波による音響流によって移動される。軌跡の間隔から徐々に加速されているようすが見てとれるが、右端での速度は2 m/sに達していた。

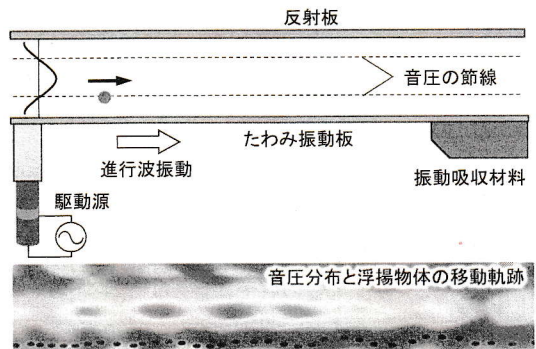


図4 たわみ振動進行波を用いた非接触連続搬送

3. 大型ガラス基板の非接触搬送

3.1 平板の浮揚

次に、振動面の直上に音波の波長よりも大きな平板物体が振動面と平行に浮上する現象^{5),6)}とその応用について述べる。

図5は、たわみ振動する金属板の上でシリコン円板が非接触で保持されているようすである。振動の変位振幅が数10 μmであるのに対し、円板が浮上した距離は1 mm以下である。振動板と円板の間には空気が存在し、完全非接触の状態で浮上している。浮揚距離は波長よりもずっと小さく、振動板を超音波放射面と考えれば、その近傍に浮揚するということから、前章の定在波音場の音圧の節での微小物体の浮揚と区別するために、近距離場音場浮揚と呼ぶこともある。浮揚距離は浮揚物体の重量に反比例して小さくなり、重量を増してゆくと、ついには振動板と浮揚物体が接触する。この接触するときの重量が最大の浮揚可能荷重であるとする、理論的には、郵便はがき大の振動面でも100 kgf程度の耐荷重がある。現実には、振動板のたわみなどにより、耐荷重はこれよりも小さくなるが、シリコン基板やガラス基板の浮上には十分である。浮揚物体の寸法は波長程度以上でないと安定な浮揚ができない。大きな振動面が実現できるのなら大面積の物体の浮揚が可能である。液晶ディスプレイ用ガラス基板の非接触搬送用として検討されている技術である。

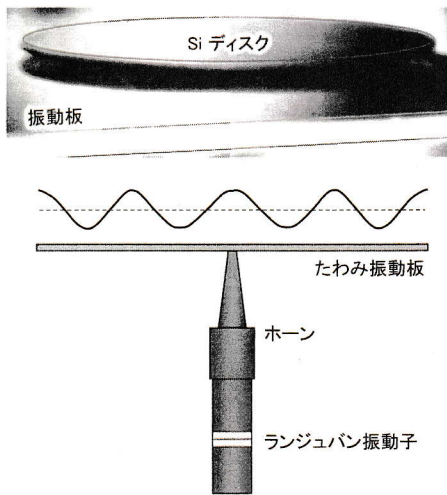


図5 たわみ振動板の直上に浮くシリコン基板

3.2 浮揚力の見積もり

単純な例として、図6のように、ピストン振動す

る面の直上に、それと同形状同寸法の平板が浮く場合について述べる。平板は音波を透過しないものとし、振動面の振動変位振幅（片振幅、0-ピーク値）を u 、浮揚距離（振動面と平板裏面との距離）を h 、平板の質量を w とし、浮揚力と w が釣り合う浮揚距離が h になると考える。最も単純な理論によると、音圧が p の場合（0-ピーク値）、空気の密度を ρ 、音速を c とすると、エネルギー密度 E は

$$E = \frac{1}{2} \rho c^2 \frac{u^2}{h^2} \quad (1)$$

と表され、これが浮揚力、すなわち平板に働く重力 w に等しくなると考える。この理論にもとづく浮揚力と実際にいくつかの浮揚物体で実験した結果を図7に示す。このように理論値よりも実現できた浮揚力は小さいものの、傾向はよく一致しており、かなり大きな浮揚力が得られていることがわかる。浮揚力に関しては、野村・鎌倉の研究^{7),8)}、橋場らの研究⁹⁾がある。音響エネルギーの洩れや、平板と振動板の間の空気ギャップの音場分布の影響がある。

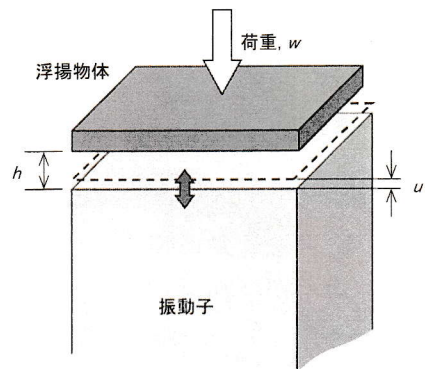


図6 ピストン振動面の直上に浮くモデル

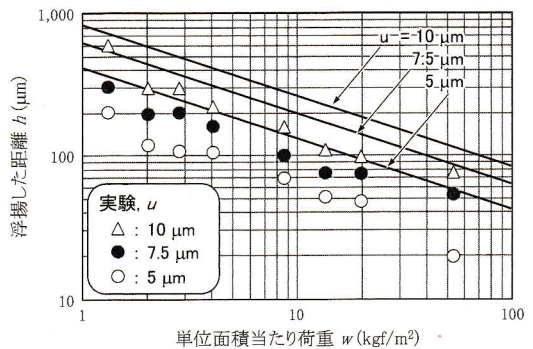


図7 浮揚平板の重さと浮揚する距離の関係

3.3 平板の非接触搬送

たわみ振動の進行波を利用することで、平板を浮

上したまま非接触搬送することができる^{10),11)}。図4の構成から反射板を取り除いたものが利用できる。この原理図を図8に示す。板に縞モードのたわみ振動を励振するため、ランジュバン振動子と振動板の間に幅広の板状ホーンを挿入している。縞モードとは、波面が板の長手方向と直交し、板の幅方向には振動分布が様な振動モードである。ここでは、吸収端に振動子と電気負荷を用いた例を示している。これはかつて進行波型リニア超音波モータのために試された方法¹²⁾である。振動子と電気抵抗負荷 R との電氣的整合のため、圧電素子の静電容量を打ち消すためのインダクタ L を挿入している。 R の値を調整して定在波が生じないようにする。電気抵抗でエネルギーを消散する代わりに、これを駆動側に還流すれば消費電力を節約できる。

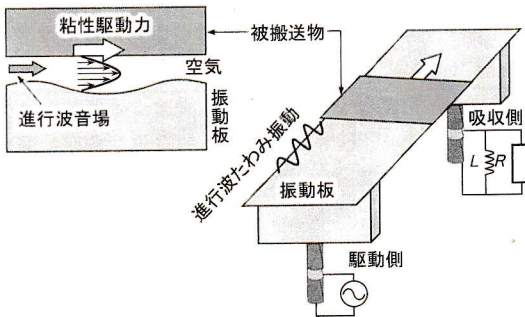


図8 進行波たわみ振動進行波による平板の搬送

振動板と浮揚した搬送物との狭いギャップ中には進行波音場による音響流が生じ、粘性によって浮揚された物体に搬送方向の力が与えられる。これにより、浮上したまま非接触で搬送される。搬送距離を伸ばすために振動板を長くすると、重力により振動板がたわむため、振動板の長さには制限がある。いくつかの個別の振動系を小さな隙間を介して並べ、いわば「乗り継ぎ」をすることが可能である¹³⁾。なお、搬送方向と直交する方向に、音響流による保持力を発生させることができる¹⁴⁾。すなわち、浮揚物体の位置が横方向にずれた場合、それを中央に戻すような方向に音響流が発生するような構成が可能である。さらに大面積の物体の場合には、図9のように振動板を複数枚並列に並べる方法をとることがある。図9では2枚の振動板を、間を空けて平行に並べている。また、振動板の端部の厚みを減じることで、その部分の振動変位が厚い部分に比べて大きくなるようにしている。こうすることで、振動板と浮揚物体の間に、振動板の薄い部分から厚い部分へ向かう

音響流が生じ、浮揚物体を中央に保つ効果が大きくなる。このような振動分布の設計には、有限要素法などによる数値計算の助けが必要である。

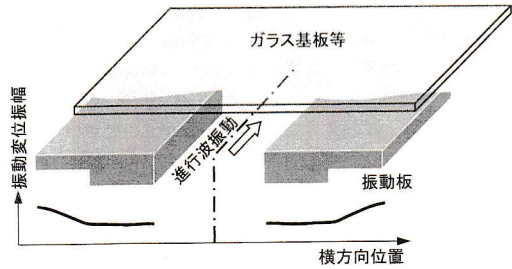


図9 大面積物体の搬送

4. まとめ

本稿では、空中における微小物体や液滴、さらに大型平面物体の非接触操作や搬送について、その原理と基本構成を述べた。液滴の非接触操作については、ここで述べたこと以外に、非接触状態での2液の混合や液滴の質量などの解析法についても検討中である。また、このような浮揚技術を加速器中に導入した実験例¹⁵⁾も最近報告されている。平面物体の搬送については文献¹⁶⁾の解説も参考にされたい。また、同様な原理で浮上式の移動ステージを構成すること^{17),18)}、逆の構成として、平滑な床面に振動板を浮かせること¹⁹⁾も可能である。

謝 辞

ここで紹介した空中における液滴浮揚の研究の一部はJSPS 科研費 JP26289054の助成を受けたものである。また、シュリーレン画像の撮影はカトウ光研(株)の協力の下に行われた。

参考文献

- 1) 日本音響学会編, '音響キーワードブック,' コロナ社, p. 92, 169, 193, 272, 302 (2016).
- 2) D. Koyama and K. Nakamura, 'Noncontact ultrasonic transportation of small objects over long distances in air using a bending vibrator and a reflector, IEEE Trans., Ferroelect., Freq. Contr., 57, 5, 1152-1159 (2010).
- 3) Y. Ito, D. Koyama and K. Nakamura, 'High-speed noncontact ultrasonic transport of small objects using acoustic traveling wave field, Acoust. Sci. & Tech., 31, 6, 420-422 (2010).
- 4) M. Ding, D. Koyama and K. Nakamura, 'Noncontact Ultrasonic Transportation of Liquid Using a Flexural Vibration Plate,' App. Phys. Express, 5, 9, 097301 (2012).
- 5) Y. Hashimoto, Y. Koike and S. Ueha, 'Acoustic levitation of

- planar objects using a longitudinal vibration mode," J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 16, 189-192 (1995).
- 6) Y. Hashimoto, Y. Koike and S. Ueha, "Near-field acoustic levitation of planar specimens using flexural vibration," J. Acoust. Soc. Am., 100, 2057-2061 (1996).
 - 7) 野村英之, 鎌倉友男, "ピストン音源の近距離場に置かれた平面物体に働く音響放射力," 音響学会誌, 56, 805-814 (2000).
 - 8) 野村英之, 鎌倉友男, "音波の洩れが近距離での浮揚特性に与える影響," 音響学会誌, 57, 200-209 (2001).
 - 9) 橋場邦夫, 寺尾 憲, 久納孝彦, "超音波浮揚に関する研究 (浮揚理論の構築と浮揚特性の解明)," 日本機械学会論文集 (C編), 63, 3487-3495 (1997).
 - 10) Y. Hashimoto, Y. Koike and S. Ueha, "Transporting objects without contact using flexural traveling waves," J. Acoust. Soc. Am., 103, 3230-3233 (1998).
 - 11) 小池義和, 上羽貞行, "近距離場音波浮揚を用いた搬送技術," 日本機械学会誌, 111, 420-423 (2008).
 - 12) M. Kuribayashi, S. Ueha and E. Mori, "Excitation conditions of flexural traveling waves for reversible ultrasonic linear motor," J. Acoust. Soc. Am., 77, 1431-1435 (1985).
 - 13) Y. Hashimoto, Y. Koike and S. Ueha, "Magnification of transportation range using non-contact acoustic levitation by connecting vibrating plates," Jpn. J. Appl. Phys., 36, 5B, 3140-3145 (1997).
 - 14) E. Matsuo, Y. Koike, K. Nakamura, S. Ueha and Y. Hashimoto, "Holding characteristics of planar objects suspended by near-field acoustic levitation," Ultrasonics, 38, 60-63 (2000).
 - 15) S. Tsujino and T. Tomizaki, 'Ultrasonic acoustic levitation for fast frame rate X-ray protein crystallography at room temperature,' Scientific Reports, 6, 25558 (2016).
 - 16) 中村健太郎, "近距離場音波浮揚による平板物体の搬送," 日本音響学会誌, Vol. 69, No. 11, pp. 603-608, 2013.
 - 17) 小山大介, 中村健太郎, "超音波浮上式非接触ステージの開発," 機械の研究, Vol. 61, No. 11, pp. 1038-1044, 2009.
 - 18) 小山大介, 中村健太郎, "非接触超音波アクチュエータ," 日本音響学会誌, 67, 75-80 (2011).
 - 19) T. Ishii, Y. Mizuno, D. Koyama, K. Nakamura, K. Harada, and Y. Uchida, "Plate-shaped non-contact ultrasonic transporter using flexural vibration," Ultrasonics, vol. 54, no. 2, pp. 455-460 (2014).

九電みらいエナジーほかが潮流発電技術実用化推進事業者に選定

—九電みらいエナジーほか—

環境省は再生可能エネルギーの導入を促進し、地球温暖化対策を強化していく取り組みの一つとして、海洋再生可能エネルギーの開発と実用化を進めている。「平成28年度潮流発電技術実用化推進事業」について事業者の公募が行われ、九電みらいエナジー(株)、新日鉄住金エンジニアリング(株)、NPO長崎海洋産業クラスター形成推進協議会、およびオープンハイドロ・テクノロジー・ジャパン(株)からなるコンソーシアム(以下、コンソーシアム)が事業者として選定された。

この事業は、日本の海域に適した普及可能性が高く、環境影響の小さい潮流発電の実証を行い、

再生可能エネルギーの導入量拡大とエネルギー起源CO₂の削減をさらに進めることを目的としており、コンソーシアムとして以下のとおり事業に取り組む。

1. 事業概要

日本は排他的経済水域世界第6位という海洋国であり、海洋再生可能エネルギーについて大きなポテンシャルを有している。中でも潮流発電は太陽光や風力発電とは異なり一定の規則性を持った潮汐力により、年間を通じて安定した発電ができる発電方式として注目されているものの、国内では技術の未確立などから実用化が課題となっている。この事業では、潮流発電の分野で先行している欧州の発電機を採用し、国内初となる商用スケールで大規模なMW級(単機あたりでは世界最大級)の潮流発電の実証を行うという。

2. 実施場所：長崎県五島市沖奈留瀬戸海域

3. 発電規模：2MW潮流発電機 1基

4. 実施期間：H28年度～H31年度(予定)

詳細は九電みらいエナジー(株)ホームページ参照：
<http://www.q-mirai.co.jp/news/archives/60>

