

強力空中超音波の応用

=微小物体の超音波浮揚=

大塚哲郎、中根偕夫(日本大学生産工学部)

1 はじめに

強力超音波の工業的応用は近年著しく発展していますが、中でも利用しにくいものの一つに空中超音波のエネルギー利用があります。この理由は、効率が良く使い易い強力空中超音波音源が入手しにくいためであり、この観点から筆者らは音源開発に努力しているところです。

さて、本稿は筆者らが開発している強力空中超音波音源を利用した応用の一例として、超音波浮揚実験を紹介する。

2 段つき円形振動板を用いた音源

強力空中超音波用音源は、大別して矩形と円形に分けられる。その一つは、山根、伊藤らにより開発された縞モード矩形振動板⁽¹⁾⁽²⁾である。これは、矩形振動板上にたわみ振動による縞を励振し、効率良く超音波を放射させる音源であり、また振動板を放射状に覆い、一点に音波を中中させるように改善した音源もある。

一方、筆者らは平面円形振動板上にたわみ振動を励振し、その節間隔に凹凸を設けた「段つき円形振動板」⁽³⁾を開発しており、図1にその概観を示す。左側が20kHz系、右側が28kHz系の2節円と4節円モード段つき円形振動板である。

この振動板の特徴は、波長に対して大きな外径を持った振動板でも、容易に中心軸上に鋭い指向特性を持った音場を構築できるところにある。

これらの段つき円形振動板は、エクスポネンシャルホーン先端にねじ止めし、BLTで駆動し音源として使用する。図2は、外径84mmの20kHz用振動板と、外径64mmの28kHz用振動板の例を示しており、ジュラルミン丸棒より旋盤加工で製作した。

なお、この音源の指向特性は、距離1mの円周上で測定した結果、中心軸上に10~12度の単一指向特性を持っている。

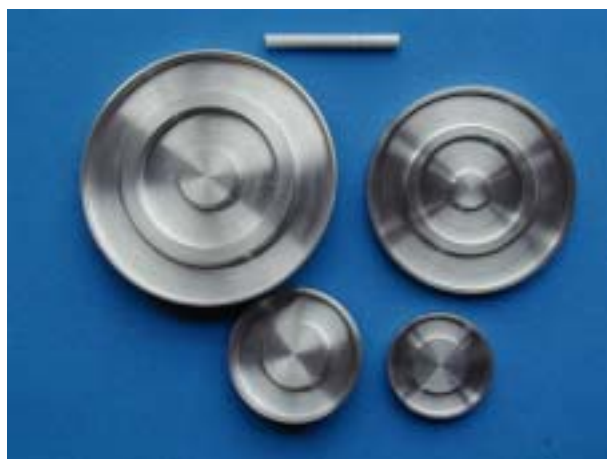


図1 段つき円形振動板



図2 20kHz,28kHz用音源

定在波音場は、段つき円形振動板上に距離数波長離して反射板を平行に設

置し形成した。この音源と反射板との距離は、超音波浮揚する対象物により自由に設定し、音圧はBLTへの入力電力により調整した。

3 超音波浮揚

3.1 固体の浮揚

図3は、定在波音場中に形状の異なった微小物体が空中に浮揚している様子を示している。この時の音源周波数は18.1kHz（振動板外径96mm、空中超音波の半波長約0.96cm）であり、使用した固体の1辺は空中超音波の半波長以内の寸法とした。ここで、重力方向は、写真の上から下に向かって

いる。
図中(1),(2)は、1辺が0.7cm、厚さ0.5cm、密度 $1.26\text{g}/\text{cm}^3$ の亚克力製直角二等辺三角柱であり、三角柱の底面が上でも下でも浮揚する。

(3)は、直径0.4cm、密度 $2.64\text{g}/\text{cm}^3$ のガラス球であり、(4)は直径0.6cm、密度 $1.02\text{g}/\text{cm}^3$ のBB弾が浮揚している。また、(5)は大きさは同じで、重さの異なったBB弾が半波長間隔に浮揚している様子を示している。

この時の浮揚位置は、音圧分布の節となった振動板中心軸上約1.6cmの位置となるが、挿入物体に働く放射圧と自重とのバランスにより若干変動する。

これらの浮揚物体の形状は図3以外でも可能であり、円柱も浮揚する。

ここで、これらの物体が浮揚している時、物体は回転している^[2]ことが分かっており、その回転方向は物体の形状に左右されることも分かっている。

図4は形状と回転軸の関係を示す。(1)、(2)、(3)は円柱であり、直径 d と

長さ l により回転方向が決まるが、(3) の様に直径と長さがほぼ同じになると、2本の回転軸があることが観測された。三角柱の場合は、(4)(5) の様に1軸で回転し、また球の場合は(6) の様に1軸に見えるが、音場によりさまざまに軸の方向が変化することが分かった。

なお、ここまでに紹介した浮揚物体の材質は非金属を用いたが、金属（磁性、非磁性に関係ない）でも浮揚させることができ、例えばS45C鋼材で作した重さ 2.27g の円柱でも可能^[4] であった。

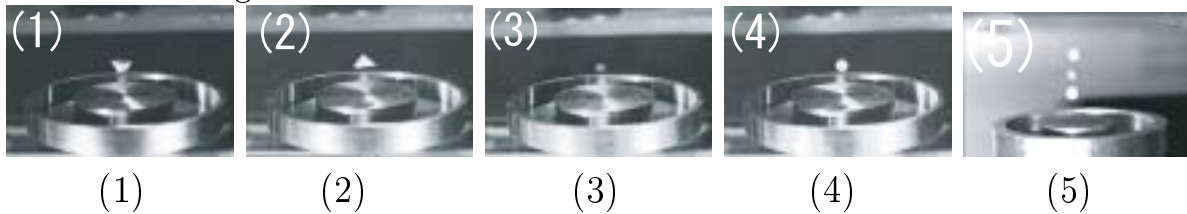


図3 形状の異なった微小固体が音場内に浮揚している様子

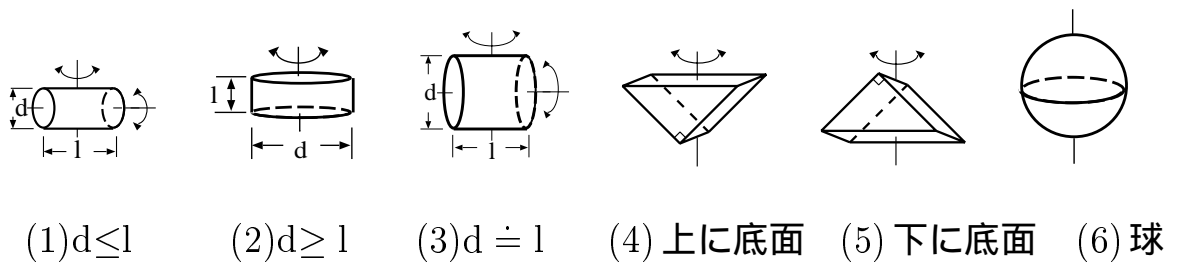


図4 浮揚物体の形状と回転軸

3.2 液滴の浮揚

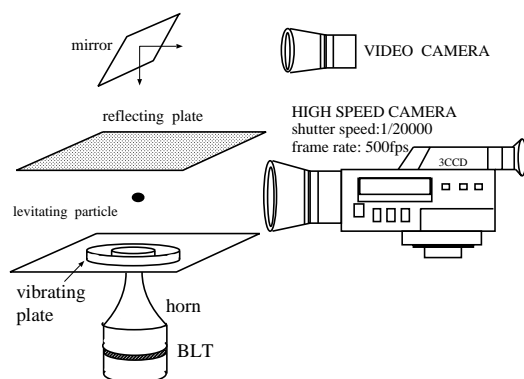


図5 定在波音場の構築

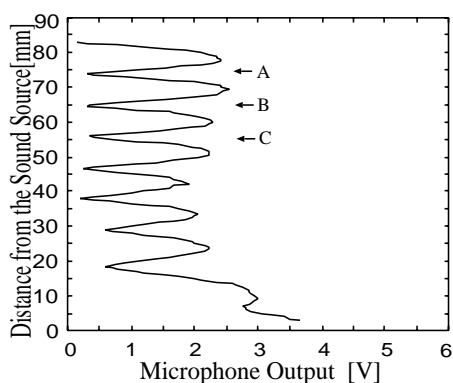


図6 28kHzの音圧分布の一例

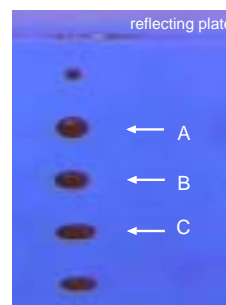


図7 音圧分布の節に並んで浮揚するインク液滴

液滴の浮揚に使用した音源は、図5の様に20kHz又は28kHz用の段つき円形振動板を用い、振動板上5波長離して反射板を設置し、強力定在波音場を構築した。図6には28kHzの音圧分布の一例を示す。

まず、テストとして水滴を浮揚した。水滴は、前述と同様に音圧分布の節に保持されるが、音圧の大きさにより扁平^[5]する。

そこで、扁平する時の形状変化を詳細に測定するため、高速ビデオカメラを図5の様に設置し、時系列な形状変化を測定した。測定は、液滴の形状

を水平・垂直の両方向から記録できるようにした。

また、液滴の粘性による形状変化の違いを測定するための実験では、赤インク（粘性 1.5cp）とグリセリン（粘性 1500cp）を用いた。

段つき円形振動板近傍には直進流が発生するため、液滴の挿入位置は反射板側の音圧分布の節とし、28kHzの音源では、図6に示すA、B、Cの位置とした。これらの位置での音圧をマイクロフォン出力電圧から換算すると、150dBから155dBの範囲であった。

図7は、直径3mmのインク液滴を図6A、B、Cの位置に挿入した例であり、図3(5)と同様に音圧分布の節に並んで浮揚することを示している。

インク液滴内への気泡の混入

図7の状態から徐々に音圧を上げると、扁平して浮揚している液滴内に気泡が混入する現象^[6]が見られたので紹介する。

図8は、インク液滴内に気泡が取り込まれる様子を時系列で示している。図中(1)から(4)は液滴下側からのカメラで測定し、(5)から(7)は反射板上側からミラーを介して測定したものである。

図より、液滴は底面からくりぬかれるように変形し、約900ms経過すると(4)の様に底面側から気泡が取り込まれる様子が観測された。(5)から(7)は、この現象を上から撮影したものであり、液滴内に気泡が包み込まれて存在していることがよく分かる。

なお、同一形状で資料を水滴に変え測定すると、音圧により扁平現象は同じだが、気泡が混入する現象は確認されず、音圧の上昇に伴い円盤状になりその後微小粒子となり飛散した。

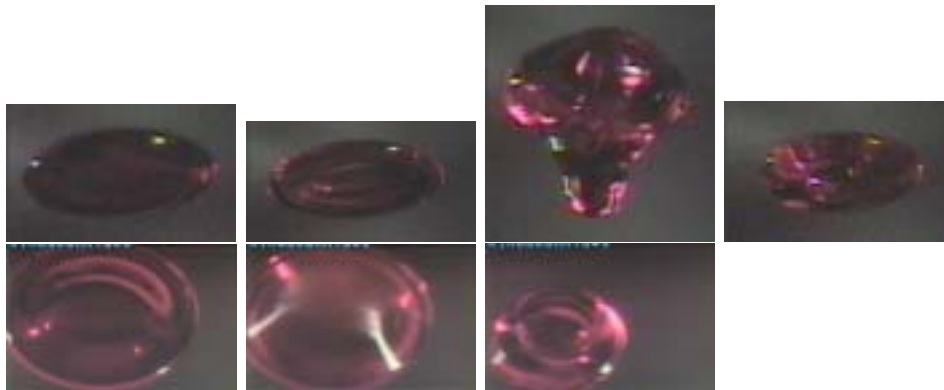


図8 インク液滴の形状変化

グリセリン液滴を浮揚した場合

液滴内への気泡が混入する様子を測定するため、さらに粘性を高くし、グリセリンを使用して同様な実験した結果、図9を得た。

図は(1)を基準とし、約530msで(4)に変化するグリセリン水溶液の液滴を側面から観測したもので、液滴内の気泡は発生・消滅を繰り返し、かつ液滴は回転する様子が観測された。この時の回転する様子は、前述した図4(2)の様であった。



図9 グリセリン液滴に気泡が混入する様子

また、100%のグリセリンを用いて液滴を作成し、同様な実験を行った結果、(5)の様になり、一度気泡が混入すると、液滴中心に気泡を含んだ状態で浮揚した。この状態は数秒間保持することが分かった。

3.3 音圧分布内で浮揚位置が変化した場合

浮揚している液滴は、音圧の大きさにより扁平することはすでに述べたが、音源全体（振動板や反射板）が機械的な振動を受けたり、液滴の形状が変形することにより浮揚位置が変化すると、液滴はバランスを崩して落下し、次の節に移動し再度円盤状に潰れて浮揚する現象が見られた。図10にその時の系列形状変化を示し、図中には音圧分布の概略図を左側に追記した。

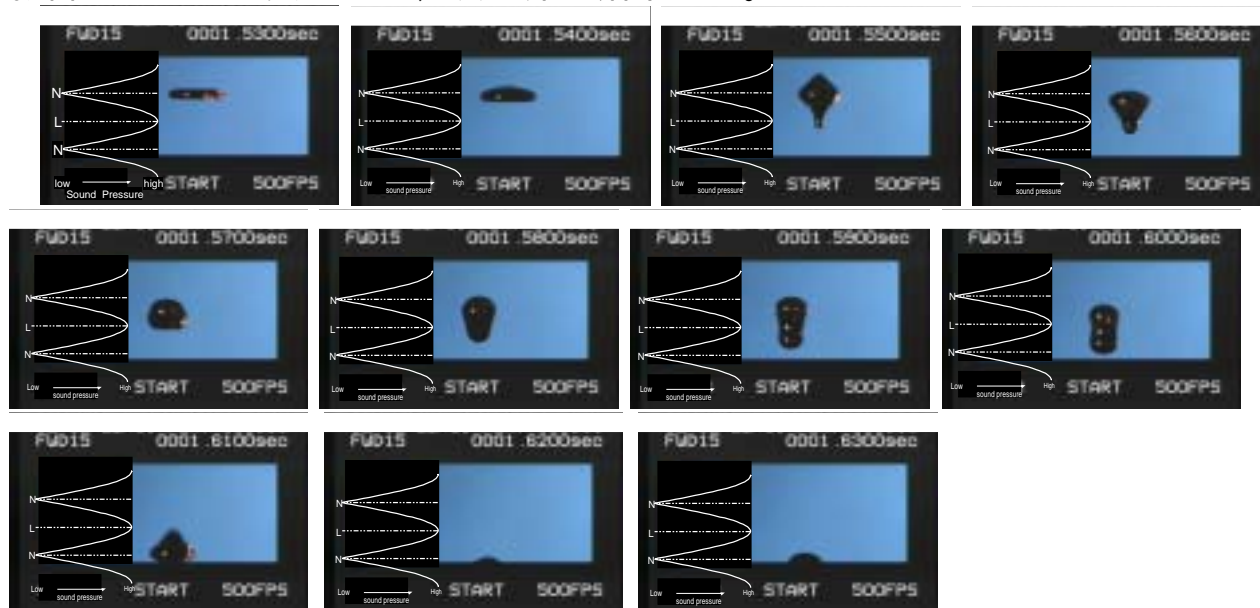
図は、(1)から(11)まで10ms間隔の形状変化を示した。まず、(1)から10ms経過すると(2)の様に重力（図の下向き）とは逆方向に押し上げられ、さらに10msで(3)の様に音圧の両腹方向（上下）に引っ張られるように変形する。その後、上に引き上げられた液滴は自重により下に押し戻され、(4)の様につぎの節方向へ移動し始める。

(5)は音圧分布の節から腹の中間にあり、扁平していた液滴の形状は球に近い状態まで戻る。

(7)ではほぼ腹の位置にあり、液滴の形状変化する軸は鉛直方向に変わり、液滴は引っ張られるように変化しながら(9)へ移動する。

つまり、液滴は音圧分布の腹付近にくると、(1)で受けていた様な音圧の

影響はほとんど受けずに、次の節へ落下する。



4 おわりに

強力空中超音波のエネルギー応用として、超音波浮揚実験を紹介した。

音源は段つき円形振動板を用い、振動板上に反射板を設置して強力定在波音場を構築した。この時の超音波放射方向は重力と逆向きとした。

その結果、超音波浮揚の特徴は、試料の物理的性質あるいは形状に左右されずに浮揚できることにある。

例えば、固体では振動板上 1.6cm の位置に、重さ 2.27g の S45C 鋼材の円柱を浮揚することができ、また重さ 0.3g のガラス球も浮揚できる。この時、浮揚物体は回転するが、その回転軸は直径や長さに左右され、投影面積が大きい面で超音波を受けるように浮揚する。

また、液滴が浮揚すると、音圧の大きさにより扁平した。この扁平する様子を詳細に検討した結果、液滴の粘性が高いと液滴内に気泡が混入するこ

とが分かり、例えばグリセリン液滴では、液滴中心に気泡を含んだまま浮揚する現象が見られた。

さらに液滴は音圧分布の節に浮揚するが、振動板や反射板等のさらに振動により音場全体に変化が起こると、浮揚している液滴は連続的に形状を変えながら次の節まで移動(落下)し、再び円盤状になり浮揚する現象が見られた。

以上、強力空中超音波の応用として、固体や液滴の超音波浮揚実験を紹介した。

超音波浮揚の原点は、微小重量場中での非接触物体固定装置である。しかし、微小重量場中での実験を行うことは実験室レベルでは困難です。そこで、強力超音波音源を用いることにより、微小重量場と同様な接触物体固定装置の模擬実験が地上でも可能となることを示した。(ただし、液滴の形状は重力に左右されると思われる)

超音波浮揚に関する解析は、多くの研究者^[11-14]によりなされていますが、今後さらに詳しい実験を行なう予定です。

参考文献

- [1] 山根宏之、伊藤洋一、”縞モード矩形振動板からの音波の放射”、音学誌、vol.39, no.6, pp.380-387, June 1983.
- [2] 伊藤洋一、”縞モード曲げ振動板と薄型反射器を用いた 20kHz 線収束型強力空中超音波音源”、信学誌、vol.J80-A no.10, pp.1774-1781, 1997
- [3] 大塚哲郎、瀬谷浩一郎、”段つき円形振動板を用いた強力空中超音波音源”、音学誌、vol.47, no.7, pp.478-483, 1991
- [4] 大塚哲郎、樋口和貴、笹井政尚、瀬谷浩一郎、”液滴の超音波浮揚”、音学講論集、1-1-4、1991.March
- [5] 山中龍夫、上村平八郎、”音波浮遊装置内での液滴の挙動と音波干渉履歴の研究”、M-15、ふわつと9 2 宇宙実験成果報告会予稿集、pp.92-94, 1992
- [6] 橋本芳樹、小池義和、上羽貞行、”近距離音波浮揚現象による非接触物体搬送”、音学誌、vol.53, no.10, pp.817-821, 1997
- [7] 大塚哲郎、丸岡 正、瀬谷浩一郎、”4 節円モード段つき円形振動板について”、信学技報、US91-54, pp.7-12, 1991
- [8] T. Otsuka, K. Higuchi and K. Seya, ”Ultrasonic Levitation by Stepped Circular Vibrating Plate”, JJAP, Suppl.29-1, Vol.29, pp.170-172, 1990
- [9] 大塚哲郎、瀬谷浩一郎、”強力空中超音波音場内での一考察”、音学講論集、3-P-27, 1998.
- [10] 広瀬文太郎、中根皆夫、瀬谷浩一郎、”強力定在波音場での羽根車の回転力”、音学講論集、1-P-18, 1990.March
- [11] 波田野甫、梶谷真裕、”超音波浮揚”、超音波テクノ、Vol.6, no.1, p.47 1994
- [12] 三留秀人、”音響流の発生機構について”、信学誌、vol.J80-A no.10, pp.1614-1620, 1997
- [13] 鎌倉友男、安田賢二、熊本芳朗、”音波の 2 次現象の統一的記述”、信学誌、vol.J80-A no.10, pp.1648-1653, 1997
- [14] 橋場邦夫、寺尾憲、久納孝彦、”超音波浮揚に関する基礎研究”、日本機械学会論文集、61-590, C 1995 pp.3931-3936
- [15] 武井道行、大塚哲郎、瀬谷浩一郎、”強力超音波音場内での金属片の浮揚 ”、音学講論集、昭和 59 年 10 月 2-8-16