

超音波音場の非線形効果による 気体・液体移送デバイス

東京工業大学 中村 健太郎

1. はじめに

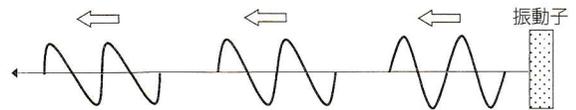
超音波を含めて、一般に、音波は空気や水など媒質の振動が伝搬する現象である。媒質の振動変位には圧力変化を伴うので、圧力変化（振動）が伝わる波動であるとも考えられる。空気中で、ひとが耳で普段聞いている音では、圧力変化の大きさ（音圧）は大気圧（1気圧=100,000 Pa）に対して非常に小さい。ひとが聞くことができる一番小さい音圧（最小可聴値）は耳の感度が高い数kHzの周波数では0.0002 Paであり、耳が痛いほど大きな音でも10~100 Pa程度と大気圧に対してずっと小さい。従って、音響の初歩の教科書では、微小音圧を仮定した線形理論が説明されている。大きな音圧を発生すると、線形現象としての仮定が崩れる。本稿では、超音波の非線形領域の現象の基礎と、これを利用したデバイスとして著者が試みたものを紹介する。

2. 非線形な音場では何が起こるのか

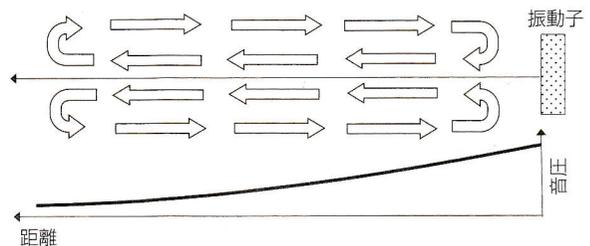
「線形」とは「比例関係にある」という意味であり、音場の基本量である音圧と粒子速度（または粒子変位）の大きさが比例するというのである。これが崩れると「非線形」になるが、音で非線形になると主に次の二つのことが観測される。正弦波で励振しても音圧の波形が正弦波からずれてくる。いわゆる「歪んで」くる。例えば、強い超音波が伝搬してゆくと第1図のように音圧波形が徐々にアルファベットのNに似てくる。音圧の大きな瞬間は音速が速くなって先に進み、音圧の低い瞬間は音速が遅くなって後に遅れるために、先につんのめったようなN字形になると解釈することもできる。波形が歪むと駆動した周波数の整数倍の周波数成分が生じ、伝

搬減衰も大きくなる。空気中では数10 Paくらいの音圧からこのような現象が現れてくる。

一方、空気や水などの媒質のどこかに目印を付けられたとすると、その点の振動の変位振幅と振動速度をそれぞれ粒子変位、粒子速度と呼ぶ。音圧の小さい線形音場では振動変位振幅も微小である。この媒質粒子はそれぞれの点で振動しているのであって、媒質粒子の時間平均した位置は一定の場所にとどまっている。このような微小振幅の仮定の下で線形音響理論は成立する。振動振幅が大きくなるとこの仮定は崩れ、媒質粒子は振動しつつ一方に移動してゆく。第2図のように、振動子から放射される超音波の伝搬方向に中心軸上を媒質自体が流れる。これを音響流（Acoustic streaming）と呼ぶ。振動子の周囲から新たな媒質が供給され、有限な容器では、流れた先から図のように周囲を循環してもどってくる。このような直進流は水中において数MHz



第1図 伝搬するに従って非線形により歪んでゆく波形



第2図 振動子から放射された超音波により発生する音響流

の強い超音波をビーム状に出した場合によく観測される。音響流の流速は数mm/sから数10 mm/sである。空気中でも数10 kHzの強力超音波では容易に観測できる。音源から離れるに従って音圧が低下してゆくことがこの音響流が生じるミソである。以上はいわゆる進行波音場の場合であるが、定在波音場の場合にも音圧の腹から節に向かう方向に流れを起こす力が発生し、音圧の腹と節の間で循環流ができる。超音波洗浄器において水が沸騰したお湯のように動いている正体はこの音響流である。

3. 音場の非線形な特性

超音波を含めて音波の現象は、媒質の弾性的な性質と媒質の運動の法則の二つに支配されている。まずは、媒質の弾性的な性質の非線形について、空気を例として考えよう。空気の圧力と体積の関係を表すのは学校の物理や化学で勉強するボイルの法則である。ボイルの法則は、温度が一定ならば圧力 P と体積 V が反比例するというものである。

$$PV=C \quad (\text{一定}) \quad \dots(1)$$

音圧は音による圧力変動分であるので ΔP で表そう。このときの体積変化を ΔV とすると、

$$(P+\Delta P)(V+\Delta V)=PV \quad \dots(2)$$

である。この式を変形すると、

$$P\Delta V+\Delta PV+\Delta P\Delta V=0 \quad \dots(3)$$

となる。小さい量 ΔP と小さい量 ΔV の積はより小さい量になるので無視すると、

$$P\Delta V+\Delta PV=0 \quad \dots(4)$$

であり、

$$\Delta V=-\frac{V}{P}\Delta P \quad \dots(5)$$

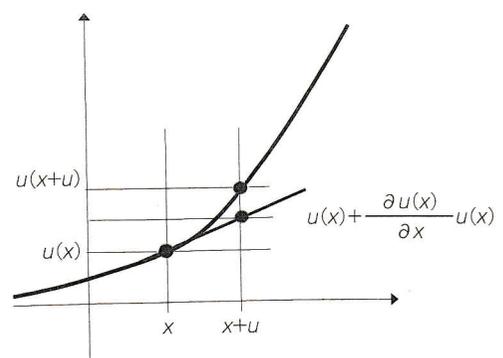
のように体積変化は音圧に比例する。負号が付くのは圧力が増すと体積は減るからである。スタート地点のボイルの法則は圧力と体積が反比例関係にあるといっているのに、変化分についての結論は比例になっているので、おかしな感じを受けるが、微小変化に対する近似をするとこのようになる。これに基づいて線形の音波の波動方程式が導かれている。し

かし、音の大きさが大きくなるとこの線形の仮定は崩れて、媒質のもつ非線形な特性が顕在化してくる。

以上は媒質の弾性的な性質の非線形性に基づく非線形効果であるが、一方で、媒質粒子の運動の性質に関わる非線形効果がある。線形な音響理論では粒子振幅を無限小と仮定して、簡単な運動方程式を適用している。位置 x における粒子変位を $u(x)$ とすると、変位した先の粒子変位は $u(x+u)$ であるが、これは関数の引数に自らが入っているので定式化するには厄介である。そこで、位置 x での傾きを用いて

$$u(x)+\frac{\partial u(x)}{\partial x}u(x) \quad \dots(6)$$

のように表す。ここで $u(x)$ と $u(x)$ の偏微分の積の項が現れており、これが非線形な効果である。流体の運動方程式である流体方程式にはこのような非線形項が含まれる。一方、線形な音響理論では振動変位は無限小、すなわちゼロと考えるので、このように粒子を追いかけてゆく考え方はしないので非線形項は現れない。このような媒質の運動の性質自体がそもそも非線形なのであり、大きな振動振幅になるとそれが現実に現れてくる。第2図の直進流の現象もその一つである。すなわち、縦波として伝搬方向に粒子が変位した先では、第2図のように音場は減衰して弱くなっているので変位量は小さく、音源方向に変位がもどるときに元の位置まではもどれない。これを繰り返してゆくうちに、少しずつ音波伝搬方向に媒質粒子は移動してゆく。これが、音響流が起きる定性的な説明である。

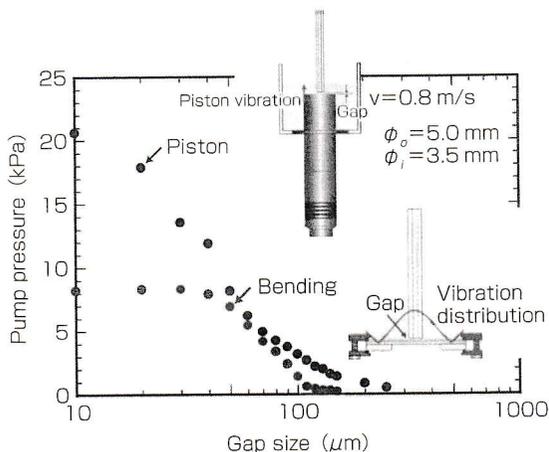


第3図 粒子の運動の数学モデル

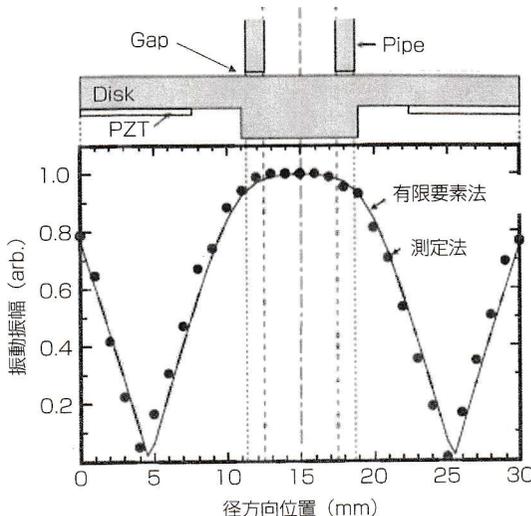
4. 超音波による流体制御デバイス

以上のように、媒質の弾性特性の非線形性と音場自体の非線形性が絡み合って、媒質の流れや静圧の発生といった現象が起きる。ここで、筆者が試したいくつかの流体デバイスを紹介する。

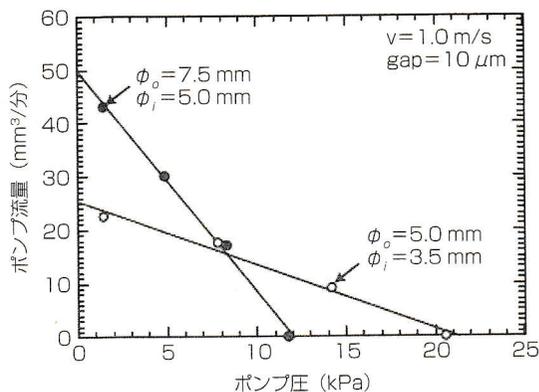
まず、振動面に垂直に細管を配置した構成のポンプ作用について紹介する。水中で振動する平面に近づけて垂直に配置する細管中を水が上昇してゆく⁽¹⁾⁽²⁾。細管の外径5.0 mm、内径3.5 mm、振動面の振動速度0.8 m/s、周波数20 kHzのときの実験結果を第4図に示す。管の端面と振動面とのすき間が0.1 mm程度以下になると水が管の中を重力に逆らって吸い上げられてゆく。すき間が0.01 mmのオーダーになると20 kPaくらいの吸い上げ力が得られた。この際、十分な吸い上げ力を得るには管の端面が平面度よく切られている必要があった。この実験ではピストン振動面としてボルト締め振動子に接続したホーンの端面を利用しており、実用には不向きであったので、金属円板に圧電セラミックス (PZT) 円環を接着した円形たわみ振動板でも試みた。その結果も同じ図中に示した⁽³⁾。同じ振動速度でも円板振動子のほうのポンプ圧力が小さくなっているのは、ピストン振動ではなくたわみ振動であるため、管の端面に対向する振動面の振動分布が一様でないからである。そこで、振動板に肉厚分布をもたせて、第5図のように、中心付近ではピストン振動に近い振動分布をもたせたたわみ振動板を製作した。振動速度を1 m/s、すき間を0.01 mmとして測定したポンプ特



第4図 振動面に小さなギャップを介して対向させた管のポンプ作用



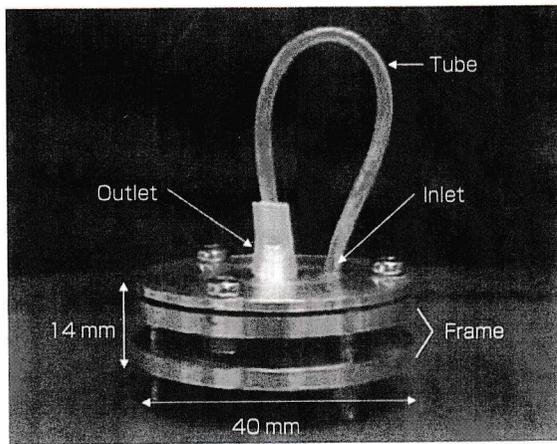
第5図 中心付近の振動分布を均一にしたたわみ振動板によるポンプ構成



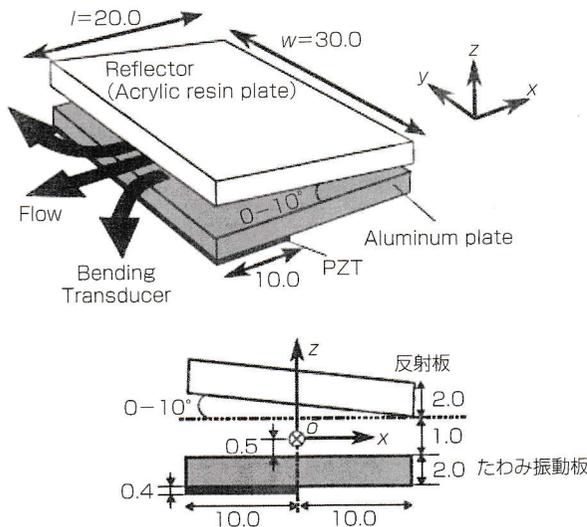
第6図 図5の超音波ポンプの特性

性を第6図に示す。管径を変えることで、圧力を得るか流量を得るかを選択できることがわかる。この構成では、圧電セラミックス素子の寸法にもよるが数W~10 W程度の電気入力でのこの程度の特徴が得られる。全体をシーリングして流体の出入り口を設けたものの写真を第7図に示す。構造を洗練すればさらなる低背化も可能であると考えられる。駆動回路も比較的簡単なので、回転軸や弁の無い小型ポンプとしての応用を期待したい。

次に紹介するのは、振動板と反射板の間に設けた1 mm以下のギャップ中で振動板と平行方向に気体の流れを生じさせるデバイスであり、小型燃料電池へのガス供給や半導体素子の強制空冷用途を想定して開発したものである⁽⁴⁾。第8図にその概要を示す。

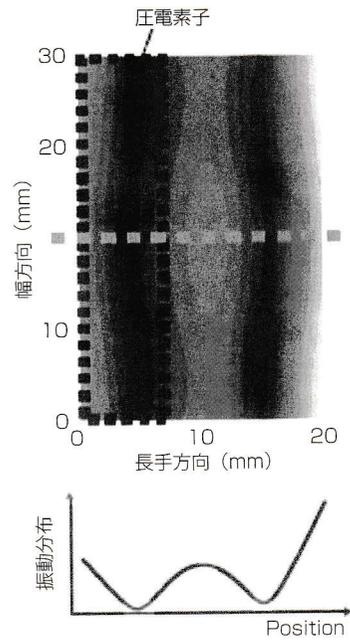


第7図 液体循環用ポンプとして図5の構成をパッケージ化したもの

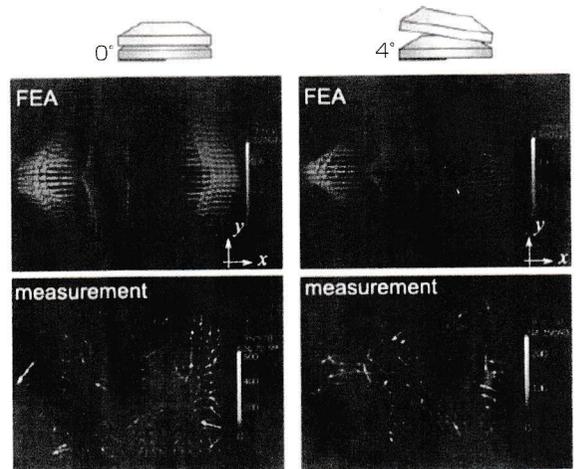


第8図 たわみ振動板と反射板の間のギャップを利用した気体移送デバイス

アルミニウム板の裏に圧電セラミックス素子を接着した矩形のたわみ振動板のすぐ上に反射板を配置している。ここで、振動板と反射板は完全に平行ではなく、少し角度をもたせている。こうすることで振動板と反射板の間のギャップ中の音場分布が左右対称ではなくなり、この音場の非対称性により一方向の空気の流れが生じる。本稿の前半で述べたように音場の強さの空間的な変化により音響流が生じるからである。なお、このたわみ振動板では、第9図のように、圧電セラミックス素子は振動板の中央ではなく、左側に接着しており、このことによって振動板の振動も左右対称ではなくなるようにしている。

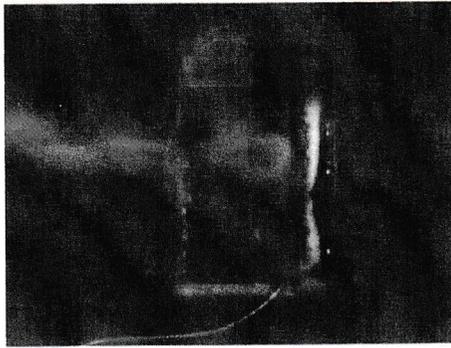


第9図 たわみ振動板の振動分布

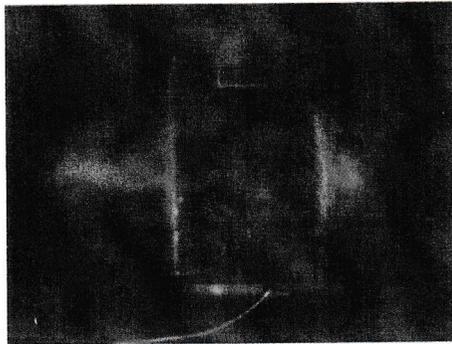


第10図 反射板の角度と流れ分布

これらのことにより、第10図のような空気の流れが生じる。完全に一方向の流れにはなっていないが、角度をつけることで左方向へ流れ出る量が多くなっている。この場合、角度の最適値は4～5度であった。この実験では側面が自由になっているため、側面から気体を吸い込んで左右両方から吐き出しており、角度をつけることで、左からの吐出し量が大きくなっていた。側面を密閉すればより一方向性の高い流れを実現できると考えている。なお、このよう



ずれ 5 mm



ずれ 無し

第11図 平行配置した反射板を横方向にずらした場合の
流れの様子

に反射板に角度を付けるほかに、反射板が平行であっても、反射板を振動板に対して横方向にその位置を少しずらすことでも流れの一方方向性が増えた。その様子を第11図に示す。

5. おわりに：まとめ

本稿では、気体中や液体中で強い超音波を発生した場合に起こる非線形現象の基礎について説明し、それを利用したポンプや気体移送デバイスについての実験例を示した。従来の電磁モータとファンなどを用いたポンプや、逆止弁を用いたポンプと違い、機械的な可動部がないので、小型で静粛、故障の少ない流体デバイスが実現できる可能性がある。液送ポンプの場合、キャビテーションがどの程度起きるか、その影響はどうか、などの検討が残されている。気体移送デバイスでは流路全体の設計を同時に行わないと効率のよいデバイスにはならないと考えられる。また、このようなデバイスの数値シミュレーションも行われているが⁽⁵⁾⁽⁶⁾、超音波周波数の振

動や音場というマイクロ秒の現象と数10ミリ秒から数秒という時定数を有する流れの現象を同時に計算することは、計算手法上も興味深い課題である。なお、非線形音場の基礎については文献⁽⁷⁾が参考になる。

<参考文献>

- (1) T.Hasegawa, D.Koyama, K.Nakamura and S.Ueha : "Modeling and Performance Evaluation of an Ultrasonic Suction Pump", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.47, No.5, pp.4248-4252 (2008)
- (2) T.Hasegawa, J.Friend, K.Nakamura and S.Ueha : "Characteristics of Ultrasonic Suction Pump Without Moving Parts", Japanese Journal of Applied Physics Vol.44, No.6B, pp.4658-4661 (2005)
- (3) T.Hasegawa, D.Koyama, K.Nakamura and S.Ueha : "Improvement in the Flow Rate of a Miniature Ultrasonic Suction Pump", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.46, No.7B, pp.4931-4935 (2007)
- (4) H.Takei, D.Koyama, K.Nakamura and S.Ueha : "Air Flow in a Small Gap between a Bending Vibrator and a Reflector", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.47, No.5, pp.4276-4281 (2008)
- (5) Yuji Wada, Daisuke Koyama and Kentaro Nakamura : "Finite-Element Analysis of Acoustic Streaming Generated Between a Bending Transducer and a Reflector Through Second-Order Approximated Forces", Acoustical Science and Technology, Vol.34, No.5, pp.322-331 (2013)
- (6) Yuji Wada, Daisuke Koyama and Kentaro Nakamura : "Acoustic Streaming in an Ultrasonic Air Pump with Three-Dimensional Finite-Difference Time-Domain Analysis and Comparison to the Measurement." Ultrasonics, 54, pp.2119-2125, (8) (2014)
- (7) 鎌倉友男編 "非線形音響-基礎と応用-", 音響テクノロジーシリーズ, コロナ社 (東京) (2014)

【筆者紹介】

中村 健太郎

東京工業大学 科学技術創成研究院
未来産業技術研究所 教授

<主なる業務歴>

強力超音波工学、パワー超音波デバイス、超音波アクチュエータ、音場計測、光ファイバセンサなどの研究に従事。