

講演 1 : 同志社大学理工学部

電気工学科 超音波エレクトロニクス・応用計測研究室 教授・博士 小山 大介 氏

「強力超音波を用いた各種アクチュエータの開発」

超音波の研究は、「複合領域」の研究となります。電子工学、物理学、計測、生物学等々、関連する分野が多い。現在一般的に利用されている超音波の利用は、「通信・診断・計測」、「エネルギー利用」、「電子デバイス」の3つに大別できます。



「通信・診断・計測」は、後の講演にもあるように、超音波を用いて何かを測る、評価する、計測するというものです。具体例としては一般には画像診断、エコー診断というものです。先の話にあった潜水艦のソナーも、この一つです。

2つ目に、私の研究分野に近いものとして、超音波をエネルギーとして使おうというものです。演題にもあるように、音を使って物を動かしたり、混ぜたりというアプリケーションです。メガネ屋さんで、“チャー”という音を出す洗浄機がありますが、あれもこの应用の一つです。

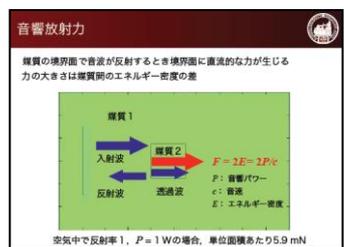
3つ目が、超音波デバイスということで、携帯電話に入っているような“SAW フィルター”があります。これは電気信号を、一旦弾性波動である超音波に変換し、それを再び電気信号に変えるというプロセスを経るのですが、そうしたものにも利用されています。【スライド2】



超音波というと、聞こえないほどの高い音と言うことですが、すなわち、物理的には20 kHz以上の周波数の音を超音波と言います。言い換えれば、「人が聴くことを目的としない音」とも言います。固体を伝搬する振動も音であり、20 kHz以上であれば超音波です。私が研究している強力超音波というのは、つまりは、周波数は20 kHz以上で、音の大きさがすごく大きいということです。

そういう超音波ですと、どのようなことが起きるのかというと、大まかに言えば「音響反射力」「音響流」「大きな加速度」「キャビテーション」「非線形ひずみ」「吸音による発熱」のような、特殊な現象が起きます。【スライド3】

例えば、「音響反射力」という超音波による音の力が作用します。スピーカーから空気中を介して、何でも良いのですが、置いてある金属のブロックに向けて音を出すと、音が跳ね返ったり、反射したり、屈折したりという現象が起きます。この時は、研究者は知っていますが、一般的には知られていないこととして、入射波と反射波が発生すると、透過波が発生します。そして音の伝搬方向に圧力が働きます。圧力と言うのは、超音波の周波数による圧力とは別に、直流成分として「ギュギュギュッと押す」「グググッと押す」と、押す力が発生します。これを「音響放射力」と言います。



数式とパラメータで表現すると $F=2E=2P/c$ (P: 音響パワー、c: 音速、E: エネルギー密度) となります。ここで、 $P=1W$ の音を空気中に出し、完全に反射する環境であれば、6 mN という、1円玉も持たないような仕事しかしないこととなります。音の力は、それほど強い力ではないことがお分かり頂けると思います。ただし、使いようによっては何か使い道もあるかもしれないということです。【スライド4】

例えば、どのような事が見えるのか、スピーカーから、発泡スチロール製の粒に向けて超音波を照射すると、音の力により押されます。

音と言うのは、音の変化を観察すると正弦波状で、正圧と負圧が交互に発生し、ギュッと縮めたり伸ばしたりする、これは強力超音波に限りませんが、強力なエネルギーなので、より顕著に直流成分の音が見えます。このような力が働くのですが、リング状に音が発生していて、同心円状の緑と赤の縞状に定在波が出ているのですが、発泡スチロールの粒のような軽いものであれば、リングの中心部分に生じる、“定在波の節の位置”という、エネルギー的に安定する位置の空中に留まることができます。そのため、この場合、発泡スチロールの粒を、非接触で持つことができることとなります。

これを利用して、どのようなアプリケーションができるのかというと、我々のチームの以前の仕事ですが、泥水に超音波を照射すると泥水がピタッと“定在波の節”の位置に止まります。そうすると、泥水のフィルターができることとなります。泥水のフィルターは、普通はコーヒーのフィルターのようなメッシュ状のものを使いますが、すぐに目詰まりします。そこで、メッシュ状ではないような泥水フィルターが音で作れないかとの要望を、ある企業から受けて取組みました。このような共同製作のアプリケーションがあります。

【スライド5】

また、別のアプリケーションとしては、「音響流」があります。画面の上から下に向かって超音波が出ていますが、水中の粒子が流れをコントロールできますので、ポンプのようなものが作れます。これは、液体に限らず気体でも同じです。このような作用が働くのは、強力な超音波でなくとも発生するのですが、実感できるか、目に見えるかという差になります。これほど大きなものは、超音波の圧力が大きい強力超音波でなければ難しいということです。【スライド6】

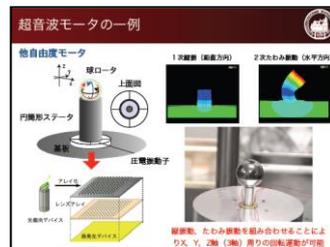
私が研究しているのは、アクチュエータを用いた強力超音波でして、一番有名なアクチュエータ（振動子）である「ボルト締めランジュバン型振動子」をご紹介します。超音波のアクチュエータは基本的に共振現象を利用しています。

共振は、お寺の鐘をゴーンと鳴らすと、誰が鐘をついても同じ高さの音がします。これは、音が共鳴しているからです。これと同じ原理です。ピエゾ素子と金属ブロックをボルトでギュッと締めると一体化するのが、最も単純なものです。

ここに電気信号を加えると、電界により生じる圧電効果や逆圧電効果により、素子が伸びたり縮んだりします。そのことで、全面に音が生じることにより超音波を発生させます。全部をピエゾ素子で作ることもできますが、費用が嵩むことや、大きな素子の材料を綺麗につくるのが、なかなか難しいので、一部をピエゾとして、後は金属にするのが、よくあるセオリーとなっています。

一般的なメガネの洗浄機などの機械の底を開けてみると、こうした振動子が6本くらい付いているという、良く使われている例です。【スライド7】

こういうを使うと、どのようなことができるかと言うと、先ほどの振動子とは多少異なりますが、共振現象を利用すると「他自由度モーター」というものがあります。この「他自由度」とは、モーター先端部にある球体が、好きな方向に回りますというアクチュエータです。リング状のピエゾ素子を輪投げのように棒に通す形で作りました。ここに電気信号を入れると輪投げの軸の部分共振し、鉛直方向や水平方向に振動します。これを上手に設計して、同時に発生するようにすると、軸の先端は楕円の振動をします。まるでオートセイが、その口先でボールを突いて回すような状態と基本的には同じことが発生し、先端部のボールはX、Y、Zの3軸方向に回すことができるようになります。一部のピエゾ素子と金属を用いて、共振現象を発生させると、こうしたアクチュエータができます。今すぐ産業用途に使えるものではありませんが、特殊な一例としては、基盤上に他自由度モーターを数多く設置し、面発光デバイスと組み合わせると、下から直進してくる光の屈折角を変えるような“光デバイス”をつくれたりします。【スライド8】



これまでご紹介した接触型のアクチュエータは60～70年前ほど前からすでにあつたものです。一眼レフのオートフォーカス機能に使う超音波モーターが、もちろん形状は異なりますが、今の共振現象の原理を活用しています。

よく言われるデメリットとして、突いてボールを回して動かすため、摩擦駆動となり、接触部分がどうしても摩擦します。そうすると、すぐに起きるわけではありませんが、長期間使うと動作がおかしくなることや、クリーンルーム内での使用に、こうした機器が耐えうるのかという課題が出てきます。

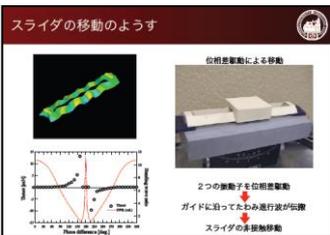
最近の研究では、こうした動きを「非接触」で実現したい、接触するところがない、超音波アクチュエータを開発しています。

接触しないのに、どのようにして動かすのかというと、先ほどの音響放射力とつながりまして、平らな板を鉛直方向に振動している超音波の振動子の上に置くと、超音波の放射力によって、ほんの少しである100ミクロン程度、空中に浮きます。これを押ししても、復元力により振動子の上から落ちませんという状況が生まれます。この「落ちない」ということには、ここではあまり意味がないのですが、このように浮き上がる力を使うと、超音波で物を動かしたりできるのではないかと考え、研究を進めています。【スライド10】



ある企業さんと共同開発した一軸のリニアステージの上にステーターが乗っていて、位置決めができるというものです。これは、4つの圧電材料が取り付けられていて、全体はセラミックできています。そこに図のような振動（1ミクロン程度）を与えると、超音波の放射力によりスライダが鉛直報告に100ミクロンほど浮きます。浮き上がりのイメージとしては「エア・ホッケー」の遊技機のような感じになり、完全に非接触となります。こうすると、接触型では発生する粉塵とかは心配がなくなります。このスライダには、5kg程度の物は乗せることができます。【スライド11】

ただ浮くだけではなく、ステージ側に図のような位相差を利用して進行する波を発生させますと、スライダが、浮き上がりながら波と同じ方向に引きずられるように動きます。つまり、ステーターが浮きながら動くという超音波のアクチュエータが実現できます。どのように動かすのかは、ステージ側のピエゾ素子に送る電気信号を制御してやると、うまく振動モードを作りだし、進行方向を制御できます。【スライド12、13】



別の動きとして、ペラペラした、たわむような振動を発生させると、地面との反射力による反作用により浮き上がります。そこに先ほどのような進行波を加えると進むこととなります。こうしたものを、どのようにして製作するのかというと、教科書通り作ると、なかなか上手くいきません。形状が特殊な場合、理論値通りにはならず、非常に単純な形状であれば実現できますが、一般に販売されているシミュレーターに数値を

入力し、学生さんでも答えを出してくれるのです。原理を理解していなくても、形状の答えは出てきます。学生のためには良くはないのですが。
【スライド14】

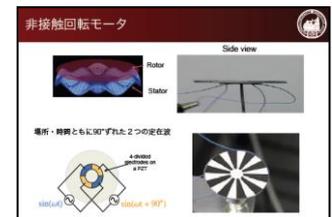
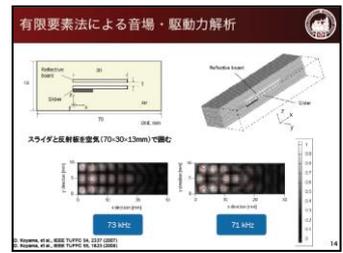
どのような感じで、どのくらいの力で、どの周波数なら、どちら方向に走っていく、おおよそ計算はできます。ピエゾのついている金属板の運動モードと、その間に空気層のところに、どのような圧力場が形成され、どのような流れができてと言うのは、市販されているシミュレーターをそのまま使用しても、おおよその計算ができます。そのため、コードさえ手に入れば、1週間もあれば、正しい答え（計算結果）が、未経験者でも得られます。

実際に設計したものと試作機を製作しても、それほど違いは出ません。使用する材料の乗数が若干異なることで、周波数等にズレが生じるという程度です。

どのようなものを作りたいのかというコンセプトがあれば、このような形状にすれば良いのではないかと、そこの部分を作り上げることが難しいため、個々の部分は携わる人の経験が必要な部分になります。作り上げるものの形状のコンセプトが出来上がれば、使用しているパラメータの数値を変更しつつ、最終案にしていくことが大体できます。

この場合は、浮いて右に進んで、左に進んでというアクチュエータですが、こうしたものを作れます。
【スライド15】

こういうものを利用すると、同じ原理ですが、横から見ると完全に浮いていることがお分かり頂けると思いますが、浮かせてクルクル回すという、無接触のスピンドルモーター状のものも作れます。非接触で物を動かすことに、私の研究室では取組んで作っています。【スライド16】



2つ目のお話ですが、最も力を入れて研究しているものですが、レンズを作っています。レンズと言うのは最終の目標として、携帯電話の中にあるようなレンズをイメージしています。一般的なレンズは、一例として左から右方向に平行な光が差し込んできた時に、凸レンズの焦点に光が収束します。この焦点を移動させたい時には、レンズを動かすことになります。

このデメリットは、焦点を変えるためにレンズを動かさないといけないので、その時間が必要になります。もう一つは、動かす空間やギヤ機構に作用するアクチュエータが必要になりますので、どうしても厚みが出てしまいます。そうしたデメリットをなくす方法として、我々の研究チームでは、これを“薄く”、“速く”ピントを合わせるようなレンズを作っています。【スライド17】

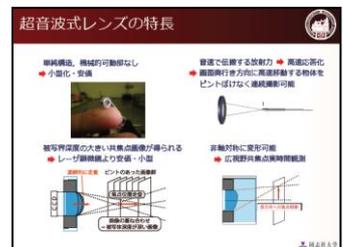
全く関係ない話と思われるかもしれませんが、図の上部分はサラダ油で、下半分は水で、その境界部分に音を照射します、そうしますと、油と水の境界がポコッと形状変化します。これは先ほどから説明してました音響放射力により変形しています。

実は、音を当てる方向は関係しておらず、上からでも横からでも音を当てると、この方向にポコッと変形します。これは、両方の物質のエネルギー密度が異なり、水が小さく油が大きいことから、エネルギー密度の高い方から低い方へ押し力が生じます。この現象を使いレンズを作ろうとしています。

水と油は、小学校か中学校の理科でも学習するように屈折率が異なりますので、中を通過する光が屈折します。この原理をレンズづくりに応用しています。

具体的な形状としては、ドーナツ状の圧電素子に半球状の水の周りを油で埋めています。これを、下から上に向かい光を照射させて、レンズに相当する水と油の境界面の形状を、電圧の変化に応じて変形させると、可変焦点レンズになると考えて試作しています。【スライド19】

超音波振動子に電気信号を送ると、装置の中で超音波が発生して、中の液面境界に放射力が生じて変形するので、振動子に電圧をどんどん上げると、焦点の位置が変化します。そうするとレンズを動かす必要はなくなります。レンズの「変形」と「動かす」ことによる違いは、必要とするスペース面での違いになり、かなり小さく作ることができます。それに加えて、レンズ焦点の変更に必要な応答速度が、一桁ほど早くなります。人間の眼の中にある「水晶体」の動きと同じようになります。人間の眼球は、水晶体を筋肉で引くことで、水晶体を薄くしたり厚くしたりして焦点距離を変化させています。これと似た構造になり、小型化と高速化を実現しています。



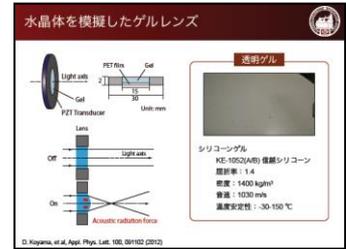
このメリットには、小さくできますので、部品点数も少ないので安価に作れることや、拳銃の弾丸が画面の奥行き方向から手前方向に進んで迫ってくるような場合に、その弾丸に常に焦点を合わせた状態の画像を撮影することも可能になります。ピント合わせの速度が速いので、ピントを奥行き方向に連続的に動かし、被写界深度の大きい画像が得られます。これは、顕微鏡で微生物を見た時に、3次元的に移動すると、常にピントを合わせるのが難しいと感じた方もいると思いますが、そうしたことを解決する技術にも使えます。

また、レンズの形状を、中心軸に対して対称ではなく、非軸対称の横方向にピントを合わせることもできます。今の手振れ補正の技術は、レンズをスプリングで吊り下げて調節することが多いのですが、メカニカルな機構をなくしてアクティブにピントを合わせることもできます。【スライド20】

光軸方向にピントを合わせる、要は超音波を ON・OFF すると、液面の境界が振動することになります。入力する電圧を変化させることで、焦点の走査範囲を制御することができます。たとえば、20 ボルトであれば、直近の 10 ミリから 50 ミリあたりを、常に走査しているという実験の結果をお示ししています。【スライド 2 1】

非軸対称に変形させた場合、図の下部分からレーザーが照射されると、横方向にレーザーの方向を振ることができますし、焦点を合わせることもできます。【スライド 2 2】

水と油を、携帯電話の中で使おうとした場合、温度が上昇したりすると、水と油が混ざりマヨネーズのようになっていたり、知らないうちに気泡が入るような、産業的な「ロバストネス（強靭性、堅牢性）」の面に課題があります。これを克服する方策のひとつとして、“ゲル”を混ぜて、人間の水晶体の構造にかなり近いものになるような方法もあります。この場合も原理的には全く同じように、超音波を発生させるとレンズが膨らみ、凸レンズのように焦点を結ぶようなものを作っています。【スライド 2 3】



もちろん、このレンズだけで綺麗な結像を得るのは難しく、カメラを取り付けて、奥と手前でピントを変化させていますが、リアルタイムで現状では 0.1 秒程度と、まだまだ遅い。これはゲルなので、その応答速度はゲルの動粘度によりますが、こうしたものを作っています。【スライド 2 4】

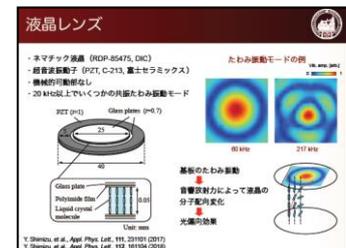
その他に、レンズ技術を使うとレンズアレイが作れます。ご存じかもしれませんが CCD の光量調整にも使われています。これを超音波で何が実現できるかといえば、応答速度が速く、焦点距離やレンズピッチも変化させられます。

面発光のデバイスと超音波のレンズアレイを組み合わせると透過光の波面を高速に変化できるような光デバイスをつくることができます。そのものはレンズアレイにはなっていませんが、作ってみたのが圧電材料を 4 つガラス板に貼った上に、先ほどのゲルを塗布して格子状の振動モードを与えますと、塗布しているゲルが振動の大小の振幅に依存した変位を持ちます。そうすると、実験ではこのピッチに対応したレンズアレイができます。【スライド 2 5】

91 kHz から 183 kHz に周波数を変化させると、周波数が高くなると波長が短くなることに連動して、レンズのピッチが短く変化します。一方、電圧を変えると、レンズの高さが変わります。このことで様々なことができます。【スライド 2 6】

ゲルでも応答速度が難しいので、現在は液晶を用いた光偏向デバイスにも取り組んでいます。液晶はカシオさんの電卓が有名で、今はすごく簡易に作れます。単純な反応の分かりやすいモデルで言えば、液晶の分子がランダムに配向されていて、電界をかけると電界に沿って並ぶというものです。電界をかけて、光が通ったり通らなかつたりするのが、電卓の黒くなったり透明になったりする理由です。透明であるのは、光を通す必要があるため、そのためには電界をかける必要があります、そのための透明の電極をつける必要が生じます。ここには、一般的には酸化インジウムスズ (ITO) というレアメタルが使われています。【スライド 2 7】

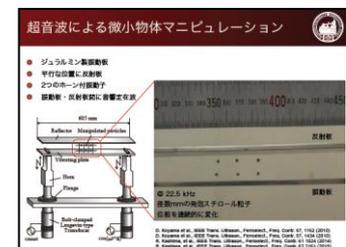
これを我々の研究室では超音波で液晶分子を配向しようとしています。これが、そのデバイスですが、液晶分子をサンドイッチして超音波振動を加えると、液晶の分子がきちんと配向する様子をあらわしています。これは 2016 年に、世界で初めて発見し実証しました。これでレンズを作ろうということ、今やっています。【スライド 2 8】



レンズは、圧電材料とガラスに、液晶がサンドイッチされているもので、すごく薄く、1 ミリ以下にもできます。そして液晶分子をうまく配向させて光が通ってくると、焦点を持った可変焦点レンズを作れます。

この図では、液晶分子が立っている状態から、超音波により、うまく凸レンズ状に液晶の分子を配向させると、超音波を OFF のときは像を結んでいない、ON にすると焦点が合うので、薄いレンズが作れます。電圧を変えて、超音波の強度も変化させられるので、焦点距離を変えることができ、グラフは、電圧が高くなると焦点距離が短くなることをあらわしています。今これを携帯電話に搭載しようとしています。【スライド 2 9】

もう一つは、超音波で物を浮かせて運ぶ技術に取り組んでいます。これは様々な企業からお声をかけていただいておりますが、一例には、錠剤とかを製造するときに、ベルトコンベアとかで運ぶと、どうしてもカケやヒビが生じたりすることが多いので、浮かせて、プカプカと目的地まで、それも等間隔で運ぶことができればうれしいですねとか言われます。また、液体でもできますか？という場合もありますが、音の観点から違う物質であれば、放射力は作用します。液体と気体の空気は音的には別物であり、放射



力も働くので、周りが空気、その中に液体を浮かせることもできます。【スライド30】

これを様々な汎用的な場面で使いたいのですが、実験では発泡スチロールの球を使い、等間隔で停止したり動いたりして、ゆっくりでも速くでも搬送することができます。この装置では、下部の板に振動を下から突いて超音波を発生させて、上の板との間に定在波を発生させ、そこに球が浮いています。【スライド31】

これは、シミュレーターを用いた有限要素解析により設計ができます。メッシュは、板の間の空気層をあらわしており、この空気層にどのような圧力分布が生じるのかを計算しています。図ではモデルと計算結果をあらわしていて、矢印が集まっているところにパーティクルは留まりますということを示しています。【スライド32】

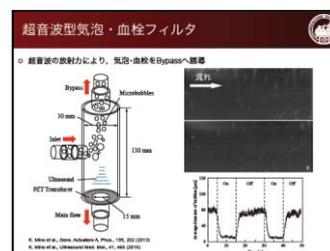
実際に作ると正にその通りで、試作機では、緑と赤は、音の正圧と負圧の圧力分布をあらわしています。このように格子状の超音波定在波が超音波振動板と反射板の間に生じ、そこの安定する点に半波長毎に「節」が挟まっています。そして下から突いて超音波を発生させていますが、同時か少しズラしたタイミングにより、だんだん音の「節」が移動していきます。どれだけズラして突っつくのかにより、圧力場の変化も分かり、どれだけ粒子が動くのかを制御することも実現できます。【スライド33】

ゆっくりとステップ状に搬送することもできますし、流れるような超音波により、速く動かすこともできます。名刺のような板でも浮きますし、液体は表面張力により液滴になりますが、液体も動かします。【スライド34】

流体制御技術を用いたポンプもできます。超音波の流れを使ったすごく薄い、機械可動部がないポンプも作れます。これは、下に超音波振動する板に少し間を空けて反射板をつけて、上から見ると一方向に流れますという図になります。平らな場合と、傾斜をつけた場合で比較すると、傾斜をつけた場合は、片方に空気層に厚みができることで、一方向の流れるポンプができます。【スライド35、36、37、38】



レンズの研究と含めて中心に据えて研究しているものに医用デバイスがあり、医療機器会社と共同研究した血液フィルターをご紹介します。原理的には最初の方にお見せした、砂や泥を止めるフィルターと同じです。血液中の血栓や微小気泡を取り除きたいという、体内循環用のフィルターです。体内を循環する汚れた血液を、フィルターを通して綺麗にした後に戻すというものです。【スライド39】



模式図では、血液に超音波を照射して、血栓や気泡を含む血液はバイパス側に、そうではない血液はメインの流れに誘導します。【スライド40】

もう一つに、細胞マニピュレーションに取り組んでいます。図ではHeLa細胞というガン細胞ですが、細胞レベルのマイクロオーダーの物体を、超音波を使い任意の場所に動かすことができます。この技術により、細胞を3次元的に培養させたり成長方向や分化を制御したりする研究を進めています。現在の実験では良い結果を得ております。【スライド41】

今日は雑駁な話しになってしまい、また名刺の持参を忘れてしまいました。今日のお話にご興味をお持ちいただき、お問合せ等がございましたら、申し訳ありませんが、同志社大学の理工学部 超音波エレクトロニクス・応用計測研究室をネット検索いただきますようお願いします。

メールアドレスも掲載していますので、そちらからご連絡いただければ幸いです。

他にも様々な取り組みがあります。今のお仕事で、「これは超音波に直接関係は無いかもしれないが、将来的に超音波と関係するかもしれない」という課題やアプリケーションがあれば、ご連絡下さい。【スライド42】