

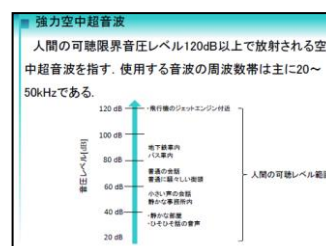
講演2：日本大学理工学部 電気工学科 助教・博士 大隅 歩氏
「強力超音波を用いた応用技術」

先ほど、小山先生からは、強力超音波の利用や発生、各種の応用技術などをご紹介いただきました。私は、同じ強力超音波でも「空中」に焦点をあてて、その発生方法と、現在私共の研究グループで取り組んでいる各種研究についてお話しいたします。

また、今日は、理論的な部分はあまりお話しせず、応用技術のイメージをお伝えすることを中心に資料を作成しました。配布資料に含んでいない内容を説明することもあります、その際はその旨をお伝えします。

私は日本大学理工学部電気工学科に所属しておりまして、学生の頃から指導頂いております伊藤洋一特任教授とともに研究を行っております。専門は音響や超音波ですが、空中に強力な超音波を放射可能な音源の開発と、それを利用した応用技術にも取り組んでいます。私自身が取り組んでいる主な研究に非破壊検査がありますが、応用技術の一つとして後ほどお話しいたします。

まず、強力空中超音波について説明します。人間には可聴限界の音圧レベル（最大可聴値）がありまして、凡そ120dBと言われています。ここで言う120dBは、ジェットエンジン付近の音に相当します。この120dBを超えるような空中超音波を強力空中超音波と呼ぶことが多いです。使用する周波数帯ですが、空気媒質中の超音波減衰が著しいので、20～50kHzの周波数帯が用いられます。ただ、最近では数百kHz～MHzの空中超音波も利用されています。



私たちの研究室では、120dBよりも上の音圧レベルで研究を行っています。このスライドの図にありませんが、現在の研究では、170dBくらいの音波を使っています。最大では、178dB以上の音波を利用します。理論的には、さらに強い音波は出るのですが、現在の市販のマイクロホンでは計測できないという状況です。

ところで、実際に空中超音波を発生させるデバイスについてですが、よく使われるのは空中超音波用のトランスデューサーという、センサに使われているものです。

先ほどのご講演にもありました「共振」などを利用したデバイスで、電圧を加えることで振動し、その振動によって音波を発生させるものです。図中のセンサ内にある圧電セラミックスは、電気音響変換効率が高いことから、良く使用されています。【スライド3】



このセンサを利用した空中超音波技術としては、通信・計測への応用が主なものであり、パワー応用が少し少ないという印象です。これは、空中超音波の伝搬減衰が大きいことに起因して、相当強力でなければ非接触での利用が難しいためです。【スライド4】

ところで、強力空中超音波を利用すれば何が可能になるのかと申しますと、大まかに調べただけでも、通信計測応用では、触覚インターフェイスや最近有名なパラメトリックスピーカー、弾性計測などの応用技術があります。ほかにも赤字で示している非破壊検査があります。これは、後ほど私共の研究事例を主に紹介いたします。

また、パワー応用の面では、非接触搬送、乾燥や凝集があります。私共の研究室では、赤字で示している液体・微粒子の非接触除去、非接触攪拌、非接触加熱などの応用技術の研究しております。これも後ほど紹介させて頂きます【スライド5】

強力空中超音波を利用した技術	
○通信・計測応用	
＞各種センサ応用	＞速度計測・距離計測
＞生体計測	＞エコーロケーション
＞触覚インターフェイス	＞パラメトリックスピーカー
＞弾性計測	＞非破壊検査
○パワー応用	
＞物体の非接触搬送	＞物体の乾燥
＞液体(雫など)の凝集	＞液体・微粒子の非接触除去
＞非接触攪拌	＞非接触加熱

このような応用技術を実現させるためには、強い音波を放射しなければなりません。しかし、この技術の実現は難しかったため、応用技術はなかなか増えてきませんでした。

最大の原因は、気体媒質では巨大な音響パワーを発生させることが困難であるということにあります。どのように困難であるかというと、物体に作用させるほど音波の強度が十分に得られないということです。

これを実現するためには「デバイスから音波を効率よく放射すること。」「放射した音波を集束させ巨大な音響パワーを得ること」の2つが重要なカギになります。【スライド6】

強力空中超音波の発生と問題点

＞【振動体】から放射される音響パワー、
$$W = \rho c S v^2$$

ρ : 媒質の密度、 c : 媒質の音速
 S : 振動体の放射面積、 v : 振動面の振動速度

気体中では、 ρc (音響インピーダンス)が圧倒的に小さい
気体: 440 [N・s/m³]
液体(水): 1.5×10^6 [N・s/m³] = 気体の3000倍

少し理論的な側面から気体媒質で何故、巨大な音響パワーが得られないのかについて説明いたします。

一般的に振動体から放射される音響パワー（W）は、 $W = \rho c S v^2$ の数式であらわれます。

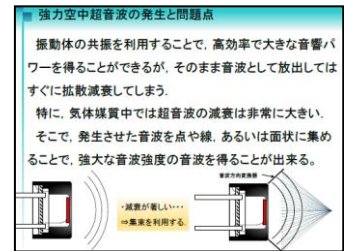
ρ ：媒質の密度、 c ：媒質の音速、 S ：振動体の放射面積、 v ：振動面の振動速度です。

気体は、 ρ と c の積が圧倒的に小さくなります。気体では440、液体で 1.5×10^6 です。両者を比べると、約3000倍の違いがあります。媒質による差は、改善することができませんので水中と同様な音響パワーを空中で得るには、 S （放射面積）と v （振動速度）を、何とかして増やすことになります。【スライド7】

さて、振動体の放射面積と振動速度を増加させていくことについて、実際にはハード面で調整しながら、どちらか一方を、できることなら両方とも増加させていくことになります。先ほどの空中超音波センサを例にさせていただきますと、圧電セラミックスの図中の赤色部分を非常に大きくして、かつ、大きく振動させることになります。【スライド8】

しかし、実際に放射面積を大きくすることにはハード的に限界があります。したがって、ある程度まで大きくした後は、振動速度を大きくすることになります。さて、超音波は圧電素子を用いて放射します。これは電気エネルギーを音響エネルギーに変換することになりますので、効率が良い方が絶対に良いことになります。そこで、「共振」を利用することになります。【スライド9】

このようにして、増加させた振動速度をそのまま放射しますと、空中超音波は減衰が早いので、すぐに減衰してしまいます。このため、音波の方向変換機を用いて、点や線、面などの形に集束させます。このように、音波を集めることで強大な音響パワーを手にすることができます。【スライド10】

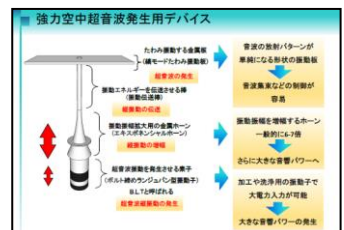


このような理論のもとに、デバイスを開発していくことになります。まずは、振動子の選定になりますが、空中超音波センサでは出力面から難しいので、先の講演で小山先生が紹介された「ボルト締めランジュバン型振動子」を使います。圧電素子をジュラルミンやチタンで挟み込んでネジ結合された振動子です。この振動子の特徴は、大きな電力を入力することができるため、大きな音響パワーを得ることができます。【スライド11】



こちらの図に示したものが、私共が研究で使用している「縞モード振動板を用いた強力超音波発生用のデバイス」の概要図です。

まず、ボルト締めランジュバン型振動子に大電力を入力し、大きな振動速度を得ます。その振動を、エキスポネンシャルホーンという振幅拡大用のホーンにより増大させます。増大させた振動を、上部にある大きな振動面を持つ振動板に伝搬させ、この振動板から音波を放射します。その間にある振動伝送棒は、無くても大丈夫なのですが、後ほど説明する集束音源の反射器を装置に挿入するために、設けています。振動伝送棒の先に、さきほどの振動板を連結するのですが、この振動板には縞状の振動モードで駆動する振動板（縞モード振動板）を利用します。



縞モード振動板を利用する理由は、後ほど説明しますが音波の放射パターンができるだけ単純な方が、音波の放射方向を制御しやすいことと、でたらめな振動モードでは音波の放射効率が下がるため、これを防ぐためです。【スライド12】

縞モード振動板にはいくつかのタイプがありますが、私共は円形と四角形（矩形）の2つを使っています。なお、このデバイスでは、縦方向の長さがちょうど振動子と同じ周波数になるように縞モード振動板も含めた共振系で設計されておりますので、全体での電気音響変換効率は80%以上とされています。一般的なスピーカーが数%であることを考えると、かなりの高効率で放射していることになります。【スライド13】

さて、振動板が矩形なので、縞モード矩形振動板と呼んでいますが、なぜこのようなモードを利用しているかと申しますと、このような振動板から放射される音波の放射パターンが単純であるためです。図に示しているのは、縞モード振動板の写真です。板に砂をまき、板の振動モードを可視化しています。図を見ますと、横方向に縞状のモードパターンが発生しているのがわかります。【スライド14】

このモードがでたらめに発生しますと、放射パターンが複雑になります。このため放射効率も低下します。【スライド15】

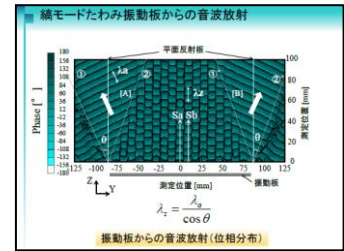
ここで、縞モード振動板からの音波放射方向はどのようになるかと言いますと、縞間隔に依存した放射角度で、上下4方向に発生します。これは、縞同士が逆相で振動していることに起因します。このように4方向にのみ放射しますので、音波の方向制御が非常に簡単になります。縞間隔は、板厚・周波数・寸法・材料定

数等の様々な条件で変化しますが、設計式が確立されており、簡単に設計することができます。

このスライドの図は、振動板から放射されている音波の位相特性を示しています。図にあるように、振動板の正面にはある角度の2方向にのみ音波が放射されており、中心部分は干渉領域となっており、正面方向だけに音波が伝搬しています。

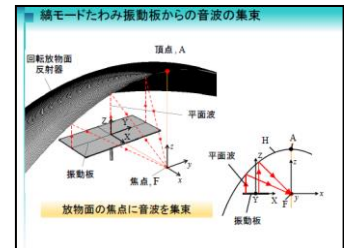
また、このカラーマップは位相分布を表しており、一つ一つの間隔がマイナス180度からプラス180度までの一周期となっています。これを振動板周辺に着目して見てみると、隣り合う縞から発生した音波は逆位相で発生しています。後ほど説明しますが、この逆位相の音波放射があるため、集束させるには工夫が必要となります。

【スライド16】



さて、ある角度方向に放射された音波ですが、このままでは集束が難しいので、上下の方向のみに音波が放射するように、反射板を図の位置に置きます。この反射板ですが、2～3ミリのアクリル板でも十分反射します。反射板を置きますと、2方向に向かっていた音波が、上下方向だけになります。【スライド17】

このように上下方向のみに放射された音波を、「回転放物面反射器」により、音波を集束させます。この回転放物面反射器を用いることで振動板から放射された音波が放物面の焦点に集まります。【スライド18】



ただ、一つ問題があります。さきほど申し上げたように隣り合う縞からでる音波は逆位相になっています。このまま焦点に集まると、逆位相のため、すべてを打消しあってしまいます。そこで、その位相差に該当する距離分だけ反射器の凹凸を少し伸ばす、あるいは縮めます。そうすることにより、集束位置に、同じ位相で音波が集束するようにします。【スライド19】

このようにして、強力音波を発生させるのですが、すべてカット・アンド・トライで実施しますと、かなり大変です。そこで、先ほど小山先生がご紹介されていたFEM解析などを用いて解析して、ある程度の見立てを立ててから実際に試作していきます。【スライド20】

左の図は、ここまでお話してきた矩形振動板による集束音源です。右は、円形振動板を用いた集束音源です。点対称の回転放物面反射器を用いることで集束させることができます。両者を比較しますと、主極に対するサイドローブの分布が異なります。円形振動板のサイドローブは同心円状となります。なお、円形振動板を用いた集束音源は、その構造上すべての音波が効率よく集まります。【スライド21】

こちらの写真は、実際の点集束タイプの音源です。回転放物面反射器にはケミカルウッドを用いています。作成するときは、3DCADソフトでFEM解析を行った数値とほぼ同じ通りに設計し、3Dプリンターで製作しています。私共の研究室には、これらの設備がありますのですべて研究室で解析から試作まで実施しています。余談ですが、研究室に入室してきた4年生には、まずこの3DCADやFEM解析ソフトの使いかたを学んでもらっています。



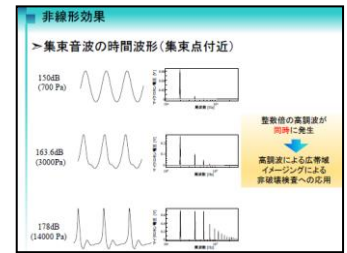
ところで、さきほど説明した振動伝送棒を用いる理由がここにあります。

このように振動板の下側に反射器を入れるために、音源全体を縦方向に伸ばすことに利用しております。なお、音源全体の高さは50センチほどです。【スライド22】

続きまして、集束音源の特性についてお話しします。左の図が、19.6kHzの振動子を用いて作成した集束音源の集束点付近の音波集束特性です。集束径は、半値幅でおおよそ直径2センチくらいです。右側の図は、集束分布の中心部の音圧と供給電力の特性を示しています。供給電力50Wで、オーバーオール値で16000パスカル(音圧レベル約178dB)に達します。大気圧が10万1300パスカル(1013hPa)ですから、その約1/6に達しています。このレベルの音波では、集束点に手を置くと、少し手が痛くなるほどの圧力を感じます。なお、50W以降を計測しないのは、市販のマイクロホンで測ることができないからです。この音源には、100W程度の供給電力を入力できますので、まだまだ強い音波を発生させることが出来ます。振動板をチタン製にすれば、200W位までは入力できますので、20000パスカルを超えることもできると予想しますが、マイクが破損してしまう可能性があるので実施したことはありません。ここで、再度右の図をみて頂きますと、もう一つの特徴としまして、非線形効果による整数倍の高調波成分が発生しているのがわかります。通常、音源の駆動周波数と同じ19.6kHzが放射されるのですが、非線形効果により、整数倍の高調波が発生します。

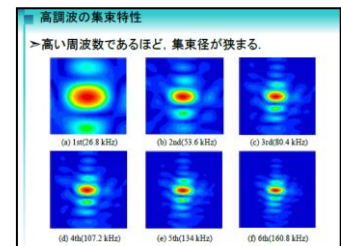
この図では、マイクロホンの周波数応答の限界値である140kHzまでしか正確に計測できないので、7次高調波(19.6kHz×7=137.2kHz)までを示していますが、もっと高い次数まで発生していることが予想されます。【スライド23】

ここで、少し非線形効果について説明させていただきます。非線形効果とは、例えば物体に外力を加えた際の応答が非線形になることを一般的には指しますが、強力空中超音波でも同様の現象が起きます。非線形音響の教科書に記載されていますが、音圧レベルが120 dB(20パスカル)を超えると、気体媒質、つまりの空気の弾性の非線形性が顕著になります。具体的には、圧力が高い部分では音速が早くなり、圧力が低いところでは音速が遅くなります。つまり、正弦波を伝搬させた場合は正弦波の形状を維持できず、歪んでしまいます。歪んだ波は、音が伝搬するに従い、さらに歪み、最終的にはN字の波形に近づきます。この波形の周波数成分を解析するためにフーリエ変換しますと、基本波に加えて整数倍の高調波が含まれていることが確認できます。【スライド24】



こちらの図にあるのは、先ほどの点集束音源の集束点における音波の時間波形です。上から順に、各音圧レベルにおける時間波形を示しています。順に紹介していきますと、まず150 dB程度では、それほど歪んでおりません。横にある周波数解析結果でもほとんど高調波が発生していないのがわかります。一方、163 dBや178 dBの結果を見てみますと、波形がかなり歪んでいるのがわかります。横に示してある周波数解析結果を見るとかなり高い次数まで高調波が発生します。使用したマイクロホンの周波数応答は140 kHzまでなので、正確に計測できていないのですが、7次以上の高調波成分も検出されています。後程、紹介させていただきますが、この高調波成分を非破壊検査のイメージングに利用します。【スライド25】

また、もう一つの特徴として、周波数が高いほど集束径が狭くなります。こちらの図に示しているのは、1次から6次までの集束点における集束特性を示しています。この結果では、駆動周波数が26.8 kHzの音源を用いております。図を見ていただくとわかりますが、高い周波数であるほど集束径の狭い音波を発生できます。これらの音波は、同時に照射できる点が、非破壊検査に非常に有用と考えています。【スライド26】



余談ですが、一番初めに紹介させて頂いた空中超音波センサを上手く使っても、ある程度強い音波を生み出すことはできます。具体的な作り方としては、ホームセンター等で販売している半球ドーム形状の透明な塩化ビニルに、画鋸等で穴をあけて、250個ほど敷き詰めるだけで、集束音源を簡易的につくることができます。簡易的に作成できますが、170 dB程度の高音圧が発生可能です。この音源の良い点は、Q値（共振の鋭さ）が低いので、時間の短いパースト波を放射できます。先ほどのBLTタイプは、Q値が高いので短いサイクル数を入力しても、かなり時間の長いパースト波が発生してしまいます。

FPGA*で電子的に位相の制御を行えば、色々な場所に集束させることも可能です。

※FPGA (field-programmable gate array)：製造後に購入者や設計者が構成を設定できる集積回路

デメリットとしては、センサそのものの共振周波数はすべて同じではなく、例えば±1 kHzの間に存在するなどのばらつきがあります。したがって、数百個を同時に駆動しますと、ある振動子は最適な駆動をしますが、ある振動子は共振周波数から外れて駆動しますので、発熱したりもします。そのため、事前になるべく特性がそろった振動子を使うようにします。私の場合は、さらに空冷ファンを取り付けて対応しています。また、間違えて大電力を入力すると、壊れることもあるので駆動には注意が必要です。

【スライド27】



ここまで、点集束タイプの音源について紹介してまいりましたが、反射器を工夫することで、線集束タイプにすることや、薄膜を使って位相制御し、同相で面状に放射するような面放射タイプの音源も開発しております。当然エネルギー密度が低下していきますので、あまり高い音圧は出ません。こちら（線集束）で数千パスカル、こちら（面放射）は600パスカル程度です。【スライド28】

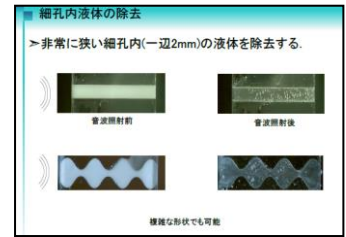
ここまで、強力空中超音波発生とそれを可能とする音源について説明して参りましたが、ここから、その応用技術について紹介させていただきます。主に私共の研究グループの事例紹介となります。

まず、紹介させていただくのは液体の非接触霧化です。こちらの図のように強力空中超音波を照射しますと、表面張力波が発生します。さらに、音波を強くしていきますと波頭からちぎれ飛びます。これが非接触霧化の大まかなメカニズムです。右の図は、ピーカーに水道水を入れて、液面を先ほどまで紹介させて頂いた集束音源の集束点に配置した際の液体挙動の動画です。動画をご覧くださいとわかりますが、激しく液体は振動して、ピーカーの入り口付近で霧化していく様子が確認できます。これを利用すれば、物体の表面に付着した液滴を除去することができます。主に、非接触であることが要求されるような場面や環境での利用が想定されます。以前の研究では、ガラスに付着した指紋などにあえて液滴を垂らして、強力空中超音波で油脂ごと除去するという技術の開発も行っていました。【スライド29】

また、この技術は、細かい溝や細孔であっても一度音波が侵入されれば、液体を綺麗に除去することができます。こちらの図では、液体の挙動がよくわかるように白色絵具で液体を着色しています。図では、中身が残っているように見えますが、これは細孔の入り口から外側に吹き飛んでしまった液滴です。このような

細孔内の液体を除去する場合は、通常は空気流で実施すれば良いのですが、複雑な形状の場合（左下図）、空気流は直進してしまい、くぼみ状のところは液体が残りやすくなります。音波の場合は、一度音波が細孔内に入れば除去することができます。また、細孔が L 字型に屈曲していても取ることができます。除去可能な細孔の細さですが、1 辺が 0.6 ミリ程度までであれば液体を除去できることを確認しています。細孔の細さにもよりますが、長さ方向には 10 センチほどあっても除去可能です。主に、微細な傷の中に侵入した汚れなどの除去を想定した技術です。

【スライド 30】



その他の技術としては、固体に付着した微粒子の除去です。左の図にあるように強力空中超音波を照射すると瞬間的に吹き飛ばすことができます。右にある動画は、14 ミクロン程度の酸化アルミニウム粒子を強力空中超音波で吹き飛ばした際の動画です。ご覧頂いたように一瞬(0.1 秒程度)で吹き飛ばすことができます。しかし、その一方で吹き飛ばすのは良いのですが、周辺にまき散らすことになります。これを制御するために色々工夫しました。その一例がこちらのスライドにあるようなパイプの利用です。右の動画はパイプを用いた場合の飛散の様子です。ご覧頂いたようにパイプを使いますと、微粒子を横方向だけに飛散させることができます。そして、外側をもう一回り大きなパイプで囲って、そこに吸引装置が設ければ、内側のパイプから音波照射し飛散した粒を捕集することができます。【スライド 31、32】

ここまでの応用技術は、液体や微粒子に直接作用させて実現してきました。次の段階として、直接ではなく間接的、例えば、薄い壁越しに液体や微粒子に作用させることは出来ないのかということモチベーションとして、近年取組んでいます。現在、行っているのは血清など微小な液体を納める微小容器内の液体の攪拌です。

非接触攪拌のニーズは比較的多く、たとえば通常のヘラなどを用いた攪拌ですとヘラ側に液体が奪われて、分量が正確な量から変化したり、内容物の汚染も考えられます。この方法であれば、必要な分量を注入して封をしてしまった後でも外から攪拌可能です。

右の動画は、微小容器の上部にエタノール、下部に食紅を注入しています。この状態の容器の液面付近に容器の外側から強力空中超音波を照射したときの攪拌の様子です。ご覧頂いたように、音波照射された点を起点として液滴が半分霧化しながら吹き飛ばされ、結果として全体が上手く攪拌されます。攪拌に要する時間は 0.1 秒ほどです。この音波を照射する位置はどこでもよいわけではなく、液面の部分が最も攪拌に適していることが実験的に確認されています。一般的な液体攪拌で使用するスターラーで機械的に振動させても同様のことが可能ですが、工場のラインにこの装置を入れて、ラインを高速で流れてくる微小容器に照射して攪拌するような使い方を想定します。

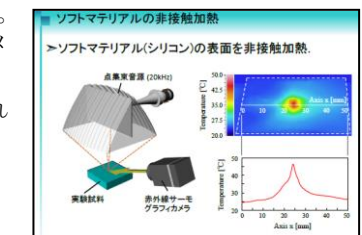
【スライド 33】



次に説明する事例は少し変わっておりまして、非接触加熱という技術です。この事例は、昔から現象としては確認されていたのですが、ここ数年 16000 Pa を超えるような高強度の空中超音波照射が可能になってきましたので、どの程度まで熱くなるのかを実験的に確認してみたいという興味から始めました。

対象の試料として、まず用いたのはソフトマテリアルであるシリコンです。左の図にあるように音波集束点にシリコンをセットアップし、赤外線カメラで撮影しました。右の図が結果になります。結果をご覧くださいと、音波の集束エリアでは数秒ほどで 50℃ 以上に達します。私たちは、これを非破壊検査に応用しております。後ほど、紹介させていただきます。

【スライド 34】



ここまで、主に強力空中超音波のパワー応用の研究事例でございました。ここからは非破壊検査への応用事例を紹介させていただきます。

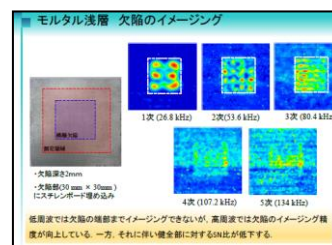
非破壊検査は、赤外線を使ったり、電磁波を使ったり、色々な非接触の技術があります。最近では超音波でも非接触で検査できるようになってきており、この後のご講演でもご紹介されることかと思います。私共の研究グループでも非接触での非破壊検査を取組んでおります。さて、空中超音波を利用した非破壊検査は「送信」と「受信」の組合せにより、色々変わってきます。

例えば、昔から使われてきたのはレーザー超音波法では、熱励起により固体内に超音波を発生させて、レーザーで受信します。一方、送信に空中超音波を利用した方法では、空中超音波を固体に照射した場合、空気と固体の境界面において、99% 以下しか入っていきません。従いまして、いかに強い音波を照射するのが肝心です。しかしながら、最近では非破壊検査用の空中超音波プローブが実用レベルまで開発され、加振(送信)にも受信にも使用されています。よく用いられる空中超音波プローブで数百 kHz です。私共の研究グループでは、これまで紹介させて頂いた比較的低い周波数(20 kHz~50 kHz)帯の強力空中超音波で加振し、受信はレーザーを使用しています。受信に関しては、レーザーでも空中超音波プローブでも状況に合わせて、それぞれの特性をよく理解していれば、どちらを使用しても問題ないと思います。【スライド 35】

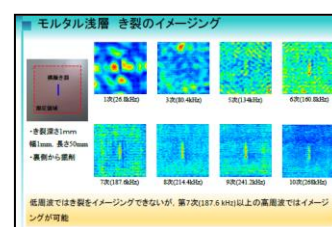
ところで、これまで紹介させて頂いた比較的低い周波数(20 kHz~50 kHz)帯の強力空中超音波を非破壊検査に適用した場合、非破壊検査用の空中超音波プローブに対して周波数が1桁小さいため、分解能の面で劣ります。そこで、最初の方で説明させて頂いた非線形効果を利用して、高周波数帯を確保していくことになります。また、この方法は、同時に整数時の高調波を照射できるので、それぞれの周波数帯で同時に欠陥などをイメージングできるのが利点です。

こちらの図は、具体的な方法を示しています。実験では、集束音波で加振して対象を励起し、その点での振動をレーザーで計測していきます。例えば、提案手法を用いますと図にあるように欠陥部では、一般的に大きく振動します。これに対象面全域に渡って行い、その振幅分布から欠陥を映像化します。また、この時に非線形効果による高調波を含んだ音波で照射しますので、対象面も同様の周波数で振動します。したがって、各次数の高調波でも同時にイメージングできます。【スライド36】

こちらの事例は、モルタルの表面から深さ2mmの位置に空隙を模したスチレンボードを入れた試料に対しての実験結果です。結果を見ますと、基本波、第2次高調波、第3次高調波と周波数が高くなるにつれて、映像化される欠陥が、実際の欠陥形状に近づいていくのがわかります。ところが、第4次高調波、第5次高調波になると、照射音波の強度も下がってくるため、健全部に対するS/N比が、急激に低下してきますが、このケースでは、第3次高調波でも十分な精度で欠陥がイメージングされています。このように、選択的に多周波でイメージングできる点が本手法の利点です。【スライド37】



次に紹介するのは、幅が1ミリしかないようなき裂についてです。このような対象には、高調波が威力を発揮します。結果を見てみますと、低い周波数帯で何もイメージングされません。一方、第7次高調波(187.6 kHz)くらいからイメージングされてきます。第10次高調波(268 kHz)になると、他の健全部とのS/N比もよく、かなり精細にイメージングされます。このように低周波駆動でありながら、非線形効果を利用することで1桁上の周波数帯(今回のケースでは10倍の周波数)を利用することができます。【スライド38-39】



こちらのスライドは資料にございませんが、紹介させていただきます。最近、柔らかい物質であるソフトマテリアルに硬い異物が入っていた場合の非破壊検出に挑戦しています。先ほどの小山先生のお話しにありましたが、強力空中超音波をソフトマテリアルに放射するとその音響放射力によって柔らかい物質は凹みます。この時、異物がある領域では放射力による表面変位は健全な領域に比べて変化しますので、変位分布をみれば異物をイメージングできることになります。右の図は、測定結果です。先ほどまで紹介させて頂きました振動速度分布でもイメージングは可能です。両結果は、振幅的には逆の傾向が出ておりますが、異物の形状をよくイメージングできています。これは、ゴム製品などに異物が混入した際の検出に使用できると考えています。

また、こちらのスライドも資料にはありませんが、コンクリートの火害のイメージングにも提案手法を用いております。火害とは、建物の内外装材料および構成品材の火災による劣化または喪失のことを指します。私たちは、この中でも主に火害による影響としてモルタルやコンクリートなどの建築資材が火災時の高温で化学変化に伴う組成変化によってヤング率*などが大きく低下することを間接的に推定することを目的としています。簡単にいってしまうと、火災によって建築資材が脆く危険な状況になったその程度を提案手法で推定したいということになります。

※ヤング率：弾性範囲での応力と歪の関係を表す比例係数。数値が大きければ材料剛性は高い。
実験方法は、これまで紹介させて頂いた方法と全く同じです。こちらのスライドでは、モルタル試料の中心部をガスバーナーで焼成して、火災による火害影響を再現しています。つまり、中心だけヤング率が低下した状態になっています。なお、この火害領域の表面は、急激に乾燥するためき裂が発生します。実は、このまま測定すると、火害部はヤング率が低下したことにより一般的には大きく振動するのですが、表面き裂部も大きく振動してしまうことがあります。つまり、そのままでは、き裂や凹凸などの表面状態を検出しているのか、ヤング率の低下、つまりは火害の影響を見ているのか、診断ができません。実は、ここでも提案手法の多周波イメージングが利用できました。き裂は、高い周波数では反射などの影響で複雑な振動することが予想されます。一方、低い周波数では透過してしまい、そこまで大きな影響がないのではないかと予想しました。その予想に基づいて実験を行ったのが右の結果になります。低い周波数では、火害部付近のみが大きく振動しています。一方、高調波の結果ではき裂部に沿って振動しているのが確認できます。これによって、ヤング率の低下と表面状態の両方を、イメージングできることが分かってきました。【スライド40】

ここまでの手法では、集束音波による加振点と計測点を一致させながら行う方法ですので、どうしても時間がかかります。そこで、少々考え方を変えて、スライドに示すような方法でも行っております。まず、図にあるように加振点は一つにして、弾性表面波を発生させます。この表面波が欠陥部を通過すると、振幅や位相が何かしらの変化を起こし、表面波伝搬に影響を与えます。その表面波伝搬を観測すれば、欠陥部をイメージングできることが予想されます。この表面波観測を、高速でスキャン計測できるスキヤニングレーザーで

実施すれば、計測時間を大幅に短縮できます。

こちらのスライドの結果は、先ほどと全く同じモルタルの模擬欠陥試料に対して、表面波の伝搬観測で行った結果です。左から順に低い周波数から高い周波数の結果を示しています。結果を見ますと、低い周波数では表面波が通過してしまい、欠陥をイメージングできません。一方で高い周波数では、健全部と欠陥部の境界部で上手く反射して振動モードが欠陥領域に発生し、欠陥がイメージングできているのがわかります。第5次高調波になると、さらに細かなモードが立ち、欠陥が精細にイメージングされます。

次の事例は、金属の減肉部のイメージングです。こちらの結果はある時刻における振動速度の瞬時値分布を示しています。左から順に低い周波数から高い周波数の結果を示しています。先ほどの結果と同様に高い周波数であるほど細かな振動モードが発生し、減肉部が精細にイメージングされます。

また、こちらのスライドにありますように減肉部が非常に狭い場合においては、高調波が威力を発揮します。幅3mm程度のき裂のような減肉部では第五次高調波（200kHz）を用いないとイメージングが難しいことがわかります。

こちらのスライドも資料にございませんが、紹介させていただきます。先ほどは、集束音源による一点加振でしたが、照射領域を広げた非破壊検査も行っております。先ほど少し紹介させて頂いた面状に音波を照射する音源を利用した非破壊検査の応用事例です。

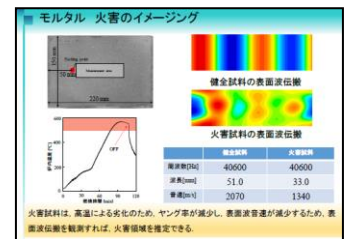
図にありますように、この音源は直径100mmほどの広範囲を同時に照射できます。したがって、複数の欠陥を、一度にイメージングできると予想して実験を行いました。右の結果をご覧くださいとわかりますが、4つの複数欠陥を一度にイメージングできているのが確認できます。また、欠陥外に音波を照射すると、イメージングされた欠陥のSN比も下がることが確認できます。

また、こちらのスライドにありますように、高調波を利用しますと、欠陥の端部も明確にイメージングされました。

さて、表面波伝搬を用いた方法は火害診断にも適用することもできます。火害を受けますと、ヤング率が極端に下がりますが、それに伴い弾性表面波の音速も低下することが予想されます。

こちらがその結果になります、表面波伝搬を観測すると明らかに波長間隔が短くなっています。実際に、この振幅ピーク間を一波長として音速を算出すると、音速が約2000m/sから約1300m/sまで減少しているのがわかります。この結果からも、火害診断をすることができます。

【スライド41】



次に紹介させていただくのは、提案手法を用いた、セメントの硬化過程のモニタリングです。こちらは、セメントを打設してから時間に対する結果を示しております。上の図が表面変位の結果、下の図が振動のグラフになります。両者の横軸は時間です。結果を見ますと、最初、表面変位は急激に下がり、表面の水分がなくなってくると、ほぼ変位を検出できなくなります。一方、振動速度は当初は振幅値が変化しながらもほぼ一定の値で推移しますが、固まり始めますと、急に振幅が減少します。図中の応力計の結果は、セメントの時間に対する固まる程度を示しており、提案手法の結果がおおよそそのセメントの固まる速度と対応しているのがわかります。このように、セメントの硬化過程のモニタリングも可能になってきます。

【スライド42】

ここまで一気に説明させて頂きましたが、最後にご紹介するのは、赤外線カメラを使ったき裂のサーマルイメージングになります。これは、最初のほうで説明させて頂いた非接触加熱の応用の一つです。こちらの図にあるようなき裂を対象として実験を行いました。き裂付近に音波を照射しますとき裂部分だけが急激に加熱されていきます。これをサーマルカメラで熱画像として取得すれば、結果にありますように、き裂がイメージングできることになります。

まとめとして、今日は強力空中超音波の発生方法と実現するためのデバイスや応用技術について紹介しました。単独での使用と言うよりは、実用化されている実用化技術に組み込まれると、より大きな効果が得られるのではないかと考えています。是非、お問合せ下さい。最後に参考文献を記載しておりますが、東工大の中村先生や日大の三浦先生のお名前についても加えていただければ幸いです。