超音波技術

中村 健太郎*

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 67, No. 12 (2017), 634-640
© 2017 The Japan Institute of Light Metals

Ultrasonic technologies

Kentaro NAKAMURA*

Keywords: *ultrasonics; measurement; machining*

1. 超音波とは何か

超音波は周波数の高い音波のことであり、ひとの聞くことができる上限と考えられている20kHzを超える周波数の音のことを指すのがふつうである。しかし、実際には20kHzよりも低い周波数の音も超音波と称して利用されることがあるので、「聞くことを目的としない音」と定義されることもある。ひとの耳に直接働きかけること以外の音波利用が超音波であるというわけである。また、空気中や液体中の「音」のみではなく金属などの固体中の「振動」も超音波である。音は流体中の圧力変化が伝わる波動であり、伝搬する方向と媒質の振動方向が一致する「縦波」である。固体中を伝わる振動の場合は、この縦波に加えて、振動方向が伝搬方向と直交する横波も存在する。細棒や薄板の場合はむしろ横振動のほうが起きやすい。横波の場合、振動方向が物体の表面に垂直な場合と水平な場合で性質が異なる、縦波成分も伴うことがあるなど、固体の振動は複雑である。

本稿では、超音波の性質とその応用に関して、計測応用とパワー応用について概要を述べる。計測応用では、超音波が電波や光が伝わりにくい水中や固体中でよく伝わる大きな特徴となっている。また、電波や光に比べると伝搬速度が5桁以上小さいので、低い周波数でも分解能の高い測定が

できる。低周波数で済むということは、送受信や信号処理の電子回路が低価格になることを意味している。また、パワーの利用では非常に大きな音圧や強力な振動を用いて、洗浄、乳化、化学応用からプラスチック接合、ワイヤーボンディング、切削加工、塑性加工など広い範囲の工業応用がなされている。

2. 超音波の周波数と応用

図1のように、100Hz程度からGHz領域までの幅広い周波数が用途に応じて使い分けられている。海洋の温度分布や流速分布などを地球規模で測定する海洋音響トモグラフィーと呼ばれる技術では、海洋を1000km程度伝搬させるために、減衰の少ない数10Hz~200Hzの音波が使用される¹⁾。クジラなどの生物の使う周波数を邪魔しないように周波数が選ばれている。音速が水温などによって変化することを利用する。また、魚群探知²⁾、ソナー³⁾などには分解能と減衰量との兼ね合いから数kHz~数100kHzくらいが用いられている。超音波などの波動現象を用いた測定では回折などが空間分解能を決めるので、波長が分解能の指標になる。水中の音速は約1500m/sであるため、50kHzの超音波の波長は30mmである。一方、遺跡など土中の埋設物探査のために、数100Hzの横波音響波の利用が試みられており、地中レーダが使いに

図1 超音波の周波数と応用

* 東京工業大学科学技術創成研究院 (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-R2-26) Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology (R2-26, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8503) E-mail: knakamur@sonic.pi.titech.ac.jp

受付日：平成29年7月18日 受理日：平成29年8月8日

くい水分を含む土質で優位性があると考えられている⁴⁾。また、医用診断装置では数MHz～数10MHzが診断部位によって使い分けられる⁵⁾。人体は音響的には水と似た性質を有しているため、波長はサブmmとなる。鉄道車両の車軸、レール等や、発電所の配管など金属の非破壊検査では数MHzが、超音波顕微鏡⁶⁾では数100MHzから1GHz程度が利用される。金属中の縦波音速は5000m/s程度なので、数MHzで波長はmmとなる。亀裂などは媒質が不連続となるので、亀裂幅は微小でも進展長が分解能以上であれば検出できる。また、閉じた亀裂でもある程度の強度の超音波を利用すると送信周波数の半分の周波数の信号などが検出できるという検討も進んでいる。一方、超音波を用いた物性研究においては低い周波数から数GHz以上の領域まで利用されている⁷⁾。空中超音波は主に自動車やロボットなどで近接センサとして40kHz程度の周波数のものが広く使われている。

パワー応用では数10kHzの振動を用いるものが多い。半導体素子の引出線のボンディングでは100kHz以上が使われることもある。また、半導体製造における洗浄では1MHz程度が使われる。液晶ディスプレイの製造ラインなどでは大型の洗浄槽が必要になる。

また、超音波振動を利用した電子部品として、表面弾性波 (SAW, Surface Acoustic Wave) を使った通信用フィルタ⁸⁾やアンテナ切替素子がある。テレビや携帯電話などで広く使われてきた。高周波化に伴い、薄膜の振動を用いたデバイス (FBAR, Film Bulk Acoustic Resonator) も開発され使われている。これらは数10MHzから数GHzで動作するものまで存在する。また、SAW素子の弾性波伝搬面を用いた各種センサが考案されている。一方、透明固体中を伝わる超音波を利用した音響光学素子は高度な光計測で重要な役割を果たしている。超音波はひずみ変化の波動であるので、伝搬媒質の光の屈折率が超音波の波長で周期的に変調される。これにより光のBragg回折が起きるので、光路の切り替えに利用される。さらに伝搬する超音波により回折された際に光の周波数が超音波の周波数だけシフトされる。ヘテロダイン干渉計に必須の周波数シフト素子として利用されている。音響光学素子では40～200MHzが主に使われている。一方、超音波振動により摩擦力を介してロータやスライダを駆動する超音波モータは高速応答性、制御性や軽量さを生かしてカメラのオートフォーカス等で使われている。超音波モータは数10kHzで動作するものが多い。

3. 超音波による計測

3.1 気体・液体中での計測

流体中での超音波計測応用の主要なものとして距離計測と流速計測が挙げられる。距離測定では、パルス波またはバースト波を送波して反射波を受信し、送波から受信までの時間 T を計測する。図2のように、音速 c が既知であるので、超音波が往復することを考慮すれば距離 L は

$$L = \frac{cT}{2} \quad (1)$$

として求めることができる。ここで、一般に流体の音速には温度依存性があるので、精密な測定を必要とする場合や常温から離れた温度の流体中で測定する場合には音速の温度補償が必要である。流体が流れている場合でも、流速が音速に比

図2 距離測定

図3 流速測定

べて十分小さければ往復測定であるので誤差は縮小されるが、流速が大きいときには誤差に注意する必要がある。送波と受波を1つのトランスデューサで兼用する場合も多い。

流体の流速を測定する場合は距離 L を一定として、到達時間を測定する。図3のように流れ方向に対して角度 θ に伝搬方向を設定した場合を考える。トランスデューサTr1からTr2に送波した場合の到達時間 T_1 、Tr2からTr1に送波した場合の到達時間 T_2 は次のように表せる。

$$T_1 = \frac{L}{c + V \cos \theta} \quad (2)$$

$$T_2 = \frac{L}{c - V \cos \theta} \quad (3)$$

ここから音速 c を消去することで、流速 V は次のように求められる。

$$V = \frac{T_1 - T_2}{2T_1 T_2} \cdot \frac{L}{\cos \theta} \quad (4)$$

この式から音速によらずに流速が求められることがわかる。これは温度等による音速変化に影響を受けないことを示している。しかし、2つの到達時間差の測定精度が流速の推定値に影響するので、結果的には測定精度は音速に左右される。なお、一般にパイプ内では径方向に流速が分布しているが、その空間平均値が得られる。パイプ用の実用的な流速計では、パイプの外壁にトランスデューサを接触配置させる、いわゆる「クランプオン」方式のものが実用化されている。この場合、くさび形のトランスデューサ (図6で後述) を用いて管壁の振動を介して管内に超音波を送受信する。

3.2 固体中での計測

金属などの固体中の距離測定も原理は図2と同じである。パイプや板の肉厚計はこの原理で動作する。あらかじめ材料の音速を与えて、裏面からの反射波の到達時間測定から厚さを計算する。縦波超音波を利用することが多い。このような測定には圧電トランスデューサが広く使われている。圧電性のセラミックス材料であるチタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) が主に利用され、短いパルスを発生させるために、図4のように圧電素子を整合層とバック材で挟んだ構造となっている。整合層は被測定物 (媒質) と圧電素子との音響インピーダンスの整合をとって、反射波の受信効率を向上させる。

図4 測定用圧電トランスデューサの構造

図5 EMATの原理

図6 くさび形振動子による表面波の励振

バックリング材は後方に放射される超音波を吸収してリングングを抑圧する役割をもつ。

最近では、多数の素子を直線状に並べ、素子間に位相差をつけて送信し、受信時も素子間で時間遅延を変えて加算受信することで、所望の方向に送信し、狙った方向からの反射波を選択的に受信するフェーズドアレイ方式の探傷装置が使われるようになった。これにより瞬時に2次元的な画像が得られる。医用診断用で長く使われている方式である。

対象が導電性の場合には、電磁的な力を用いたEMAT (Electro-Magnetic Acoustic Transducer) を利用することがある。図5のように対象表面付近に配置したコイルに電流を流したときに生じる渦電流による反発力を利用する。永久磁石によりバイアス磁界をかけることが多い。受信もこの構成で可能である。コイルは非接触で動作するので、圧電トランスデューサのように対象に密着させるカップリングジェルなどが不要であり、表面が荒れている場合にも適用できる。コイルを工夫することで縦波以外に横波も励振できる。金属部材の磁歪効果を活用することもある。

一方、図6のように対象の表面に斜めに縦波を入射することで表面波を励振することができる。この際、縦波と表面波の波長が対象とくさびの間で整合するようにくさびの音速により角度を選ぶ。くさび中の縦波音速が対象の表面波速度より小さい必要があるため、くさびの材質は樹脂などに限定される。パイプなどの表面を、測りたい場所から離れた場所か

図7 ボルト締めランジュバン振動子

図8 BLTの重量と許容入力電力

らアクセスできる。圧電素子ではなく、EMATでも表面波を利用する方式が考案されている。

4. パワー超音波の発生法

パワー応用は「強力超音波」とも呼ばれる。発生にはほとんどの場合、PZT素子が用いられる。かつては金属やフェライトの磁歪効果を利用した振動子も利用されていたが、今日ではPZTセラミックスでは耐えられない高温環境などでの応用に限られている。PZT素子による振動子は条件を選べば90%を超える効率を得られるためである。前述の計測応用では、短いパルスを送受信するための工夫がなされているが、パワー応用では共振を利用して効率を重視した動作が求められる。

100kHz程度までの低周波応用では、図7に示すボルト締めランジュバン振動子 (BLT) がもっぱら利用されている。偶数枚の円環状PZT素子を分極方向が互いに逆になるよう重ねたものを2つの金属円柱 (主にアルミニウム合金) ではさみ、貫通ボルトで締め付けている。PZT素子はセラミックスであるため、引張応力には弱い圧縮応力には比較的強い。全長で半波長共振する周波数で動作させる。後述のホーンや負荷にねじ締結できることが最大の利点である。直径10mmから60mm程度のものが製造されている。メーカー製BLTの重量と最大許容入力電力をプロットしたものを図8に示す。1kW/kg近い高いパワー重量比を有していることがわ

図9 パワー超音波振動系の構成

図10 各種ホーン

かる。負荷機械インピーダンスを適切に選ぶと効率90%以上が実現できるので大きな出力パワーが得られる。PZT素子は40~70MPaの振動応力が破壊限界であり、これは振動子端で1m/s以上の振動速度に対応するが、温度上昇による限界のほうに先に顕在化する場合も多い。

中型以上の超音波洗浄機では、BLTが1つまたは複数、金属洗浄槽の底面裏に配置されている。また、金属加工やプラスチック溶接などでは図9のようにホーンと呼ばれる振動伝送体を介してワークに必要な超音波振動を与える。ホーンは断面積が長さ方向に変化する金属棒であり、長さは共振長に調整されている⁹⁾。先端の面積を小さくすることで、BLT端面よりも振動速度振幅を拡大する機能がある。これは電気回路のトランスのような役割を担っていることを意味し、機械インピーダンスの変換を行っているということもできる。適切な変成比を設定することで、ワークの機械インピーダンスとBLTの最適負荷インピーダンスを整合させ、BLTの最大効率点で動作させる。ホーンには、断面の変化のさせ方により、図10のように、ステップホーン、コニカルホーン、エキスポネンシャルホーンなどがあり、それぞれ、振動振幅の拡大

図11 MHz帯用トランスデューサ

図12 他励式駆動回路

図13 自励式駆動回路

率、応力集中の度合いなどに差があり、用途によって使い分けられている。ホーン形状により共振長や振動の節の位置が異なる。ホーンを多段で用いることもある。

より大きな振動エネルギーが必要な場合には複数のBLTの出力を集約させるパワー合成器が考案されている。また、振動方向を90度変換する振動方向変換体が使われることもある。パワー超音波応用では、ほとんどの場合、縦振動が用いられるが、ねじり振動やたわみ振動が使われる場合もある。ねじり振動やたわみ振動を励振するために分極方向を変えたPZT素子を使ったり、縦振動子に斜めにスリットを入れてねじり振動に変換したりすることが行われる。一方、数100kHz以上のパワー応用では、図11のように厚さが半波長のPZT素子を半波長の金属板に接着した振動子が使われている。

BLTの駆動では、負荷条件によって変化する振動振幅を一定にするために、図12のような定電流回路が用いられる。PZT素子の静電容量分に流れ込む無効電流をキャンセルするブリッジ回路などで振動速度に比例する電流を一定に保つような制御をかけることが多い。また、動作状況によってドリフトする共振周波数を追尾するための制御回路が組み込まれ

図14 2次元振動による異種金属の超音波接合

ている。また、実用機の電力出力回路は、リニアアンプではなく、FETやIGBTによるスイッチング回路が採用されることが多い。一方、このような他励式駆動回路より簡易な自励式駆動回路（図13）が用いられることもある。駆動電流を増幅器の入力に帰還することで、振動子の共振周波数で常に発振する回路となっている。MHzで動作する超音波霧化器などの駆動回路によく利用される方式である。

5. 超音波による加工

切削、穴あけ、研削などの機械加工の工具に超音波振動を加えることで加工効率や仕上げが向上される。超音波振動を刃物や砥石に加えると、その振動振幅は $10\mu\text{m}$ のオーダーと小さいが、周波数が高いため、数万Gに達する衝撃加速度が1秒間に数万回繰り返して印加されることになる。特に高速化が困難な精密溝切り、微小穴あけ、切削が難しいセラミックスのような脆性材料の加工などに有効である^{10), 11)}。超音波振動による小さい変位振幅の繰り返し衝撃力や応力変化によると、通常の加工で生じる一方向の応力の蓄積を避けられるため、仕上げ精度が改善されると考えられる。切削に必要な力は小さくなり、加工面のダメージは減少する。熱、酸化作用、電気分解など他のエネルギーを援用する加工法に比べて環境面や装置コスト、加工コストなどで利点があると思われる。

一方、金属の塑性加工においても超音波振動を印加することで変形抵抗が大幅に低減されることが知られており、ブラハ効果と呼ばれている。引張加工、引抜き加工、鍛造、曲げ加工などに応用できる。通常の曲げ加工では、所望の角度まで曲げても少し曲げ角度が戻ってしまう「スプリングバック」が起きるが、超音波曲げ加工ではこの効果を小さく抑えることができる。

また、自動車部品の配線や半導体素子の引出線の接合では、超音波振動による接合技術が広く行われている。接合部に予圧を与えながら接合面に平行な超音波振動を印加すると、塑性変形と摩擦により表面酸化膜などが破壊され、内部の金属原子同士が直接接触して拡散接合されると考えられている。接合面に平行な2つの振動成分を用いて銅とアルミニウムを接合した例を図14に示す^{12), 13)}。ここでは振動方向が直交するねじり振動（18kHz）と縦振動（29kHz）を用いて

図15 振動振幅をそろえた際の2次元振動軌跡

図16 振動比率を変えた場合の接合強度

接合面内に2次元振動軌跡を生じさせており、600Nの予圧を与えて3秒間だけ振動を印加した。図15に2つの振動の振動変位振幅をそろえた際の振動軌跡を示す。図16には、縦振動を $0\sim 10\mu\text{m}$ 、ねじり振動を $10\sim 0\mu\text{m}$ の範囲で変化させた場合の接合強度を示している。2つの振動を同時に印加することで十分な強度が得られていることがわかる。

6. 超音波を測定する技術

超音波や超音波振動を利用する場合、超音波を測定する技術が重要である。空気中の超音波音場を定量的に測定するには計測用コンデンサマイクロホンが利用される。構造上は可聴周波数用のコンデンサマイクロホンと同じであるが、高い周波数、短い波長に対応するために直径の小さいものが利用される。1/8インチ型では100kHz以上まで平坦な音圧感度の周波数特性を有している。振動膜の直径が小さくなるため、

図17 シュリーレン法の基本光学系

図18 音圧定在波の節に小球を浮かせた場合のシュリーレン画像

感度は1/2インチ型や1/4インチ型よりも低くなる。1/8型の外径は約3mmであるが、これよりも大きな波長の数10kHzの音場であっても、定在波音場である場合は音場分布が乱れるので、注意を要する場合がある。水中の音場測定では一般に圧電型ハイドロホンが使われる。これには100kHz程度までの直径10mm前後のものと、MHz帯用の直径1mm以下のものと、市販品がある。高周波用の細いものは「ニードル型」といわれることがある。フィルムに微小な圧電材料が取り付けられた、いわゆる「メムレン型」もMHz以上で用いられる。MHz以上の高周波用途では、光ファイバの先端に微小なファブリペロー共振器を作った方式¹⁴⁾があり、市販品も存在する。また、強力な音場や衝撃波音場などでは、光ファイバの切断面からの反射光強度を測定する方式が利用されることもある。これは音圧に比例した水や空気屈折率変化を光の反射率変化としてとらえるものである。

マイクロホンもハイドロホンも音圧を定量的に測定するためのものである。一方、音場の分布を瞬時に2次元画像として得ることができるものとして、シュリーレン法がある。図17のような構成で、音圧変化に伴う水や空気など媒質の屈折率変化を映像化する。ナイフエッジや点状のビームストップにより、超音波がないときの光路を通る光を止めておく。超音波が存在するときの屈折率分布により経路が変わった光がカメラに入る。ナイフエッジの設定のしかたにより画像が変化するが、図18のように音圧定在波の節が明か暗として見える。

また、振動体の振動振幅を定量的に測定する方法として、レーザドップラ振動計 (LDV) が広く用いられている。レーザ光のドップラ効果により振動速度を測定するもので、実用的には図19に示すようなヘテロダイン干渉計によるものが市販されている。対象面が面に垂直に変位する振動を測定す

図19 レーザドップラ振動計の基本構成

る面外振動計が一般的であるが、面に平行な振動変位を測定する面内振動計も存在する。He-Ne赤色レーザを用いた面外振動計の場合、1m/sの振動速度に対して約3.2MHzのドップラシフトが発生することになる。ヘテロダインのための音響光学変調器 (AOM) は40MHzや80MHzのものが一般的に用いられており、10MHz程度の振動まで対応できる。最近では、小型超音波デバイス用に100MHzを超える周波数まで対応する製品もあり、顕微鏡と組み合わせた構成などが実現されている。それよりも高い周波数では、反射光の方向が振動により偏向することを利用した方法が用いられることもある。ホログラフィの手法で振動分布を可視化することも試みられている。市販LDVでは、ドップラシフトの瞬時値をアナログ電圧に変換して出力する復調回路が組み込まれており、振動速度波形の観測ができる。ガルバノミラーにより測定点を2次元走査して振動分布を表示する製品もあり、振動モードの可視化などに威力を発揮する。LDVは最も確実な振動測定法であるが、構成が複雑であるため、光ファイバ先端を振動面に近づけて、反射光量のアナログ量によって振動を測定する商品名FOTONIC SENSORも古くから利用される。連続振動であれば電気的フィルタを用いてnmオーダの振動も検出できるが、原理的に変位量に応じた光量変化を検出しているので、高周波数になるほど変位が小さくなるため測定が難しくなる。また、振動振幅が10μmを超えるような数10kHzまでの超音波振動工具先端の動作は光学顕微鏡で直接観察することも行われる。たわみ振動板などの広い面の振動分布の観測では、微小な粉を撒いて節に集まる様子を観察する古典的なクラドニの砂図も現場では適用されることがある。

7. ま と め

超音波の応用について、計測用途とパワー用途に分けて概要を説明した。超音波の応用は非常に多岐にわたるので、ここでそれらを網羅的に触れることはできなかった。例えば、超音波風速計は可動部がなく、また、ベクトル的に風速が測定できる特徴のある測定器である。さまざまなタンクの残量測定にも超音波が利用されることがある。また、圧力装置や配管などからの気体漏れ、送電線のスパークなどから出る超音波を検出する検査装置も利用されている。振幅変調したある程度の強度の超音波をビーム状に空中に送波することで、変調信号成分 (可聴域成分) を空気非線形性によって高い指向性で再生するパラメトリックスピーカは、音のスポットライトとして応用されている。水中応用では、超音波を使ったダイバー用の通信装置や沿岸用の音響画像装置 (音響カメ

ラ)がある。パワー応用はさらに多様である。主に製造技術のノウハウに属する部分なので表面に出にくい側面があるが、その時代ごとの花形産業の黒子としての役割を果たして来た。戦後の精密機械産業、化学産業、また、その後は自動車産業、半導体産業の発展を支えた技術のひとつと言えよう。今後もさまざまな分野の役に立ってゆくために、振動系の設計手法の系統化や自動化、圧電材料の飛躍的な性能向上などに期待したい。

謝 辞

パワー超音波応用に関するデータや情報をご提供いただいた日本大学 三浦 光教授、日本工業大学 神 雅彦教授に感謝申し上げます。また、シュリーレン画像取得にご協力いただいたカトウ光研(株)にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 吉川 茂ほか：〈小特集〉海洋音響：その現状と将来，日本音

- 響学会誌, **53** (1997), 524–562.
- 2) 中村常夫：超音波 TECHNO, **12-7** (2000), 6–10.
- 3) 小濱俊一ほか：超音波 TECHNO, **13-4** (2001), 2–35.
- 4) T. Sugimoto and M. Okujima: Jpn. J. Appl. Phys., **35** (1996), 3105–3108.
- 5) 片倉景義：日本音響学会誌, **47** (1991), 218–221.
- 6) 中村傳良編：超音波，コロナ社，(2001)，106–114.
- 7) 崔 博坤，高木堅志郎：日本音響学会誌, **47** (1991)，180–183.
- 8) 柴山乾夫監修：弾性表面波工学，電子情報通信学会，(1983)，178–184.
- 9) 日本電子機械工業会編：超音波工学，コロナ社，(1993)，72–79.
- 10) 鬼鞍宏猷，神 雅彦：やさしい超音波振動応用加工技術，養賢堂，(2015)，94–150.
- 11) 神 雅彦：精密工学会誌, **82** (1983)，403–406.
- 12) T. Asami and H. Miura: Jpn. J. Appl. Phys., **55** (2016), 07KE08.
- 13) 浅見拓哉，玉田洋介，樋口祐亮，三浦 光：電子情報通信学会技術報告，US2017-18, (2017)，23–26.
- 14) Y. Uno and K. Nakamura: IEEE Transactions on Sensors and Micromachines, **118** (1998), 487–493.