

■9群 (電子材料・デバイス) - 8編 (センサ・弾性波・機構デバイス)

2章 超音波トランスデューサ

【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 2-1 超音波の発生と検出
- 2-2 超音波振動子
- 2-3 各種トランスデューサ

■9群-8編-2章

2-1 超音波の発生と検出

(執筆者：竹内真一) [2018年12月 受領]

2-1-1 圧電効果

超音波を発生，検出させる現代の最も一般的な方法は，圧電効果を利用する方法である．圧電効果には，正圧電効果と逆圧電効果がある．圧電効果によって超音波の発生，検出を行う素子を圧電振動子という．**図 1・1** に示すように，圧電振動子に圧力をかけて歪みを発生させると圧力（応力）や歪みに比例した分極（表面電荷）が発生し，振動子の表面と裏面の電極間に電圧が発生する現象を正圧電効果という．また，**図 1・2** に示すように圧電振動子の表面と裏面の電極間に電圧を印加すると圧電振動子の寸法が変化し歪みを生ずる．この現象を逆圧電効果という．そこで，逆圧電効果を利用して，圧電振動子の表裏の電極間にある周波数の交流の電圧を印加すると，圧電振動子の寸法が印加した電圧と同じ周波数で変化するので，この圧電振動子と接触している媒質中にも同じ周波数の超音波を発生させることになる．この状態を超音波の発生あるいは超音波の送信という．一方，超音波の発生している媒質中に圧電振動子を挿入すると，圧電振動子は超音波の周波数と同じ周波数で振動して圧電振動子の電極間に同じ周波数の交流電圧を発生する．この状態を超音波の検出あるいは受信という．このように圧電振動子を利用することで，超音波を発生し，検出することができる．

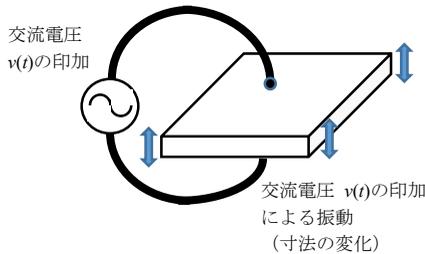


図 1・1 逆圧電効果 (送信：超音波の発生)

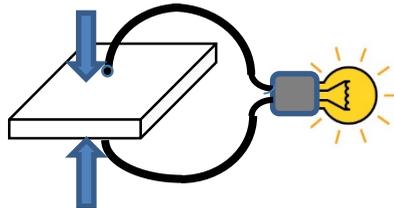


図 1・2 正圧電効果 (受信：超音波の検出)

圧電振動子の挙動を示すために，**表 1・1** の式(1.a)～(4.b)のような圧電方程式を用いる．

表 1・1 圧電振動子の挙動を表す圧電方程式

$T_i = c_{ij}^D S_j - h_{ni} D_n$	(1.a)		$E_m = -h_{mj} S_j + \beta_{mn}^S D_n$	(1.b)
$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{ni} E_n$	(2.a)		$D_m = d_{mj} T_j + \varepsilon_{mn}^T E_n$	(2.b)
$T_i = c_{ij}^E S_j - e_{ni} E_n$	(3.a)		$D_m = e_{mj} S_j + \varepsilon_{mn}^S E_n$	(3.b)
$S_i = s_{ij}^D T_j + g_{ni} D_n$	(4.a)		$E_m = -g_{mj} T_j + \beta_{mn}^T D_n$	(4.b)
$i, j = 1 \text{ to } 6, \quad m, n = 1 \text{ to } 3$				

ここで、 D は電極面の電束密度、 E は電極間の電界、 T と S は電極面（前面および背面の音響端）に発生する応力及び歪である。また、 ε^S は歪を一定とした場合の誘電率、 c^E, c^D は電界または電束密度を一定とした場合の弾性定数（スティフネス）、 s^E, s^D は電界または電束密度を一定とした場合の弾性定数（コンプライアンス）、 e, d, h, g は圧電定数である。

圧電振動子以外の超音波の発生・検出方法として、磁歪効果を利用する方法、電磁超音波 (EMAT)、光超音波、CMAT、PMAT などがある。

2-1-2 磁歪効果

磁歪効果とは、ニッケルや鉄、フェライトなどの磁性体にコイルを巻いて電流を流すと磁界が発生し、その磁界によって磁性体の寸法がわずかに変化する現象のことである。この磁歪現象を利用して電気振動を機械振動に変換する素子を磁歪振動子という。磁性材料にコイルを巻き、コイルに流す直流あるいは永久磁石によってバイアス磁界を形成する。このコイルに交流電流を流して交流磁界を重畳すると、磁歪振動子はその周波数で振動する。

逆に、バイアス磁界の存在する状態で振動子を機械的に振動させるとコイルの両端に交流電圧が発生するので受波器としても超音波の検出にも使用可能である。圧電振動子の場合と異なり電流駆動型なので、高電圧を必要としないという利点もある。主に、超音波洗浄機などの音源として用いられることが多い。

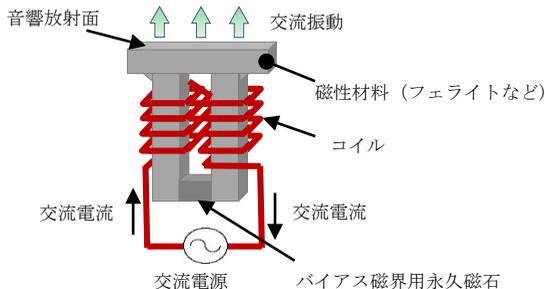


図 1・3 磁歪効果

2-1-3 光超音波

光超音波イメージングは、パルス状のレーザー光を照射し、人体や物体などの光吸収体が光を吸収し、熱膨張して発生する超音波（光音響効果）を検出し、イメージングする手法である。この場合、レーザー光の照射による光吸収体（測定対象物）の熱膨張によって超音波を発生する。このとき発生した超音波の検出には、多くの場合、圧電振動子を使用する。

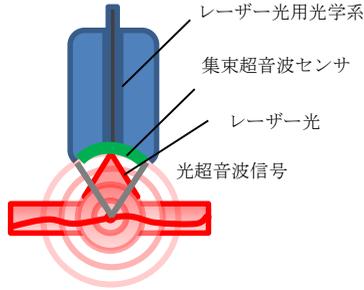


図 1・4 光超音波

2-1-4 電磁超音波 (EMAT)

電磁超音波 (EMAT) とは、電磁場を通じて金属の検査対象に非接触で超音波の送受信を行う方法である。超音波は測定物中で発生され、電磁結合で超音波信号の発生と検出を行う。

EMAT は被測定物と非接触のため、カップリング剤の水や油を必要とせず、連続測定・検査、高温検査などに有効である。このため、パイプラインなどの長手パイプや、高温検査に応用できる。

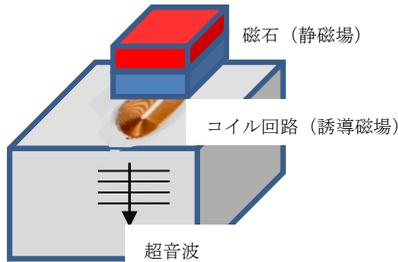


図 1・5 電磁超音波 (EMAT)

■9群-8編-2章

2-2 超音波振動子

(執筆者：竹内真一) [2018年12月 受領]

2-2-1 圧電振動子の種類と特徴

前節 (2-1 超音波の発生と検出) では、圧電効果、磁歪効果、光超音波、電磁超音波を用いる方法について解説したが、本節では、現在最も広く用いられている圧電振動子に限定して超音波振動子の解説する。

圧電振動子は、電気入力信号 (電圧) を機械的な音響信号 (音圧) に変換したり、逆に音響信号 (音圧) を電気信号 (電圧) に変換する電気音響変換器 (電気音響トランスデューサ) であり、超音波プローブにおいて最も重要な部分である。圧電振動子には、圧電セラミック振動子や圧電単結晶振動子、高分子圧電フィルム振動子、水熱合成圧電多結晶膜、ゾルゲル圧電膜、圧電スパッタ膜などがある。ここでは、最も一般的に用いられている圧電セラミック振動子、圧電単結晶振動子、高分子圧電フィルム振動子について簡単に解説する。

(1) 圧電セラミック振動子

圧電セラミック振動子は、最も多用されている圧電振動子であり、その中でも一般的に PZT と呼ばれているジルコン酸チタン酸鉛を基本とした圧電セラミック振動子は高感度であることから最も多用されている。メーカ各社は、その特性を改善するために添加物を加えて様々な工夫をした PZT 系の圧電セラミック材料を市販している。また、強い異方性を有するチタン酸鉛や、元祖圧電セラミックともいべきチタン酸バリウムもある。最も多用されている PZT 系圧電セラミック振動子には、機械的品質係数 Q_m が小さく、誘電損失 $\tan \theta$ が大きい PZT ソフト系圧電セラミックス (ソフト材、Low Q 材ともいわれている) や機械的品質係数 Q_m が大きく、誘電損失 $\tan \delta$ が小さい PZT ハード系圧電セラミックス (ハード材、High Q 材などともいわれている) がある。

ハード材は Q 値が大きく、感度の周波数帯域幅は狭くても、高感度が期待できるので、長距離まで超音波を伝えて探知できる必要のある探信儀や魚群探知機などのソナー用の超音波トランスデューサに適している。ソフト材は Q 値が小さく、広帯域な感度の周波数特性を期待できるので、持続時間の短い超音波パルスを送受信可能である。そのため、高い距離分解能を要求される医療用超音波診断装置の超音波プローブに適している。しかし、単純にハード材かソフト材かだけが判断基準ではなく、送受信回路との電氣的なインピーダンス整合の容易さなどを考慮して、比誘電率の大きさを優先して選択することもある。

また、感度は低いが、振動子内の不要な雑エコーなどを抑制するために、敢えて異方性を有するチタン酸鉛 (PT) 系の圧電セラミック振動子を使用することもある。

(2) 圧電単結晶振動子

マグネシウム・ニオブ酸鉛とチタン酸鉛の固溶体 ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 : PMNT) にインジウム In をドーブすることによって、優れた圧電特性と高いキュリー温度 T_c を両立した圧電単結晶 ($\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 : PIMNT) が実現した。このほかにも、高い T_c を示す圧電単結晶材料として、スカンジウム酸ビスマスとチタン酸鉛の固溶体 (BiScO_3 - PbTiO_3 : BPST) やニオブ酸カリウム (KNbO_3 : KN) 単結晶などが有望視されている。これら

の圧電単結晶振動子を用いることで、広帯域の送受波感度の周波数特性と極めて高い電気機械結合係数を有し、高い送受波感度の両立を期待できる。

生体組織中の非線形伝搬特性によって生じる高調波成分は、指向性が鋭く方位分解能が優れているので、この高調波成分を利用した Tissue Harmonic Imaging (THI) と呼ばれる超音波診断法は、偽像の少ない美しい超音波診断画像を得ることができる。また、Contrast Harmonic Imaging (CHI) と呼ばれる超音波診断法では、血管内に導入されたマイクロバブル超音波造影剤から発生した高調波成分をフィルタ回路によって抽出することで、従来の超音波診断法よりも鮮明に血管の画像を描出することができる。高感度で広帯域な送受波感度の周波数特性の両立を実現可能な圧電単結晶振動子は、THI や CHI に用いる超音波プローブに適した圧電振動子である。

(3) 高分子圧電フィルム振動子

高分子圧電フィルムは、約 $20 \mu\text{m}$ ~ $100 \mu\text{m}$ 程度の厚さの可撓性を有する圧電性を有する高分子フィルムである。ポリフッ化ビニリデン (PolyVinylidene DiFluoride : PVDF) や PVDF とトリフッ化エチレンの共重合体である P (VDF + TrFE) は、代表的な高分子圧電フィルムである。圧電振動子は、その厚さが波長の半分または4分の1となるような周波数で共振 (2分の1波長共振または4分の1波長共振) するので、所望の超音波周波数が高いほど薄い圧電振動子が必要となる。数 10 MHz 以上の周波数の超音波を発生させようとする圧電振動子の厚さは、数百 μm 以下となってしまうが、そのような薄い圧電セラミック振動子は壊れやすく取り扱いが非常に困難である。可撓性を有する高分子圧電フィルム振動子は、このような高周波の超音波の発生に適している。

2-2-2 圧電振動子の等価回路

上述のような様々な圧電振動子を用いて、超音波探触子や超音波センサ、ハイドロホンなどを設計したり、その特性を予測するためには、等価回路を使用と便利である。本節では、最も一般的に用いられていると考えられる Mason の等価回路について紹介する。

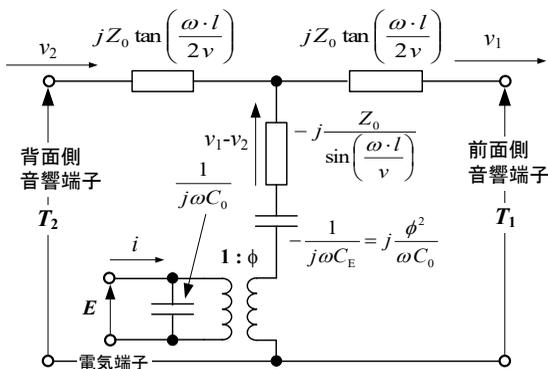


図 2・1 厚み振動縦効果圧電振動子の挙動を表す Mason の等価回路

圧電振動子は、表面と裏面の両面に音響端子があり、これらを前面側音響端子、背面側音響

端子と称することにする。これらの面が振動することで、超音波を送受信する。また、これらの面は電極面ともなっており、超音波の送信時には表裏の電極面間に電圧を印加し、受信時はこれらの電極間に現れる電圧を計測することで超音波を電気信号として受信する。前節(2-1 超音波の発生と検出)の式(1.a)~(4.b)を用いて、境界条件を適用することで、図2・1に示す厚み縦効果圧電振動子のMasonの等価回路を求めることができる。また、圧電振動子の裏面に背板を設置した場合の等価回路を図2・2に示す。ここで、 ω は角周波数、 v_1 は圧電振動子表面の振動速度、 v_2 は同じく裏面の粒子速度、 l は圧電振動子の厚み、 C_0 は圧電振動子の拘束容量、 Z_0 は圧電振動子の固有音響インピーダンスである。

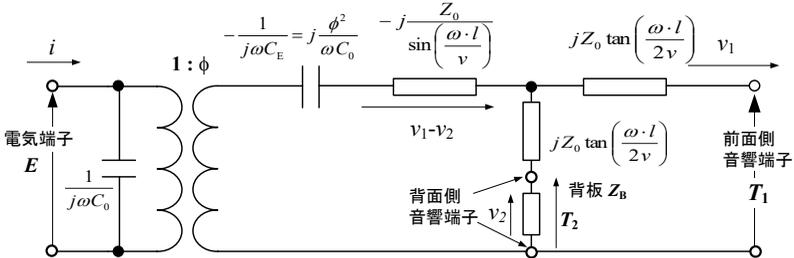


図2・2 背面の音響端子に背板を設置した圧電振動子の等価回路 ($Z_b = \rho_b \times c_b$ は背板の固有音響インピーダンス)

■参考文献

- 1) 竹内真一：“連載 圧電振動子を用いた超音波プローブの設計入門 第1回 圧電振動子と超音波プローブ,” 超音波テクノ, vol.28, no.6, pp.102-106, 日本工業出版, 2016.
- 2) 竹内真一：“連載 圧電振動子を用いた超音波プローブの設計入門 第2回 圧電方程式と等価回路,” 超音波テクノ, vol.29, no.1, pp.101-107, 日本工業出版, 2017.
- 3) 竹内真一：“チュートリアル—はじめての超音波圧電素子: 圧電材料の選択法, 特性測定法や等価回路, そして応用例について—はじめての水中超音波トランスデューサ,” 日本音響学会誌, 72巻5号, pp.264-272, 2016.

■9 群-8 編-2 章

2-3 各種トランスデューサ

2-3-1 医用超音波トランスデューサ

(執筆者：泉 美喜雄) [2012年9月 受領]

超音波検査の対象は生体である。一般的な超音波診断装置は、超音波パルスをビーム状に集束して、その位置や方向を順次変えながら送受信し、生体内部の断層画像をリアルタイムに表示することを基本機能としている。トランスデューサ（以下、探触子という）は、超音波診断装置の送受信回路と生体の間にあつて、パルス信号の電気音響変換を行う。それゆえ、探触子の挿入損失、周波数特性ならびに過渡応答特性は、超音波診断装置システムの感度や画質などに重大な影響を与える。

本節では 1970 年代以降に発展し、今日広く使われている電子走査型超音波診断装置¹⁾の探触子について記述する。



図 3・1 リニアアレイ探触子の外観例

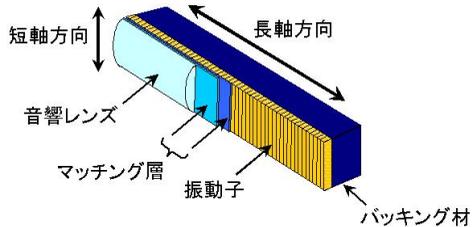


図 3・2 探触子の内部構造例

図 3・1 はリニアアレイ探触子の外観の一例である。探触子はケーブル（図右上）を介して超音波診断装置に接続される。検査者は探触子を手で保持しながら、音響端（図左下）を被検体に接触させ、2 次元断層画像を観察する。図 3・2 は音響部分の内部構造の一例である。電気音響変換を行う短冊状の振動子は、パッキング材の上に、所定のピッチと素子数で長軸（Lateral）方向に配列される。アレイ構造は、同方向の電子フォーカスと電子走査を行うためのものである。材質は、主にチタン酸ジルコン酸鉛（PZT）などの圧電セラミクスが用いられる。有機圧電材や、近年は圧電単結晶なども用いられる。振動子と生体との音響インピーダンスの違いが大きいため、振動子前面には 1/4 波長厚みのマッチング層が複数層設けられる。更に、短軸（Elevation）方向の超音波ビームをあらかじめ設定した焦点で集束する音響レンズを備える。レンズの代わりに振動子を短軸方向に凹面に形成する方法もある。また、短軸方向に振動子がある程度分割して、焦点を電子的に可変とした、いわゆる 1.5 次元アレイ（1.5D Array）探触子²⁾も実用化されている。

(1) 電子走査型探触子の種類

臨床的応用分野や手技などに対応して、探触子には極めて多くの品種があるが、図 3・3 に示すように、次の 3 タイプに分けることができる。

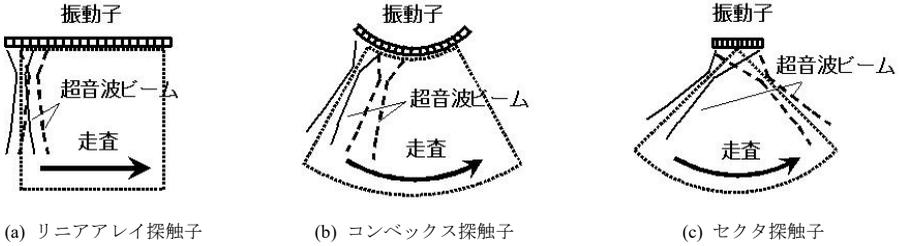


図 3・3 電子走査型探触子の種類

(a) リニアアレイ探触子 (Linear Array Probe)

振動子のピッチはおおむね超音波の波長 λ 以下として 64 素子～256 素子程度の直線状のアレイを構成して、超音波ビームをリニア走査 (Linear Scan) する。体表接触面 (Foot Print) 直下の視野が広く、高周波化にも有利であることから、浅い領域の高分解能な観察に適する。代表的な応用例に、血管、乳腺・甲状腺の検査などがある。

(b) コンベックス探触子 (Convex Array Probe)

リニアアレイを所定の曲率半径で凸形に配列したもの (Curved Linear Array と呼ばれることもある) であり、比較的狭い体表接触面で深部の視野が広いという特徴がある。振動子の曲率半径が 20～60 mm 程度、周波数が 1～5 MHz 程度のものは腹部超音波検査に広く用いられている。

(c) セクタ探触子

素子数は 32～128 素子程度であり、ビーム偏向角度: $\pm 45^\circ$ 程度のセクタ走査 (Sector Scan) のためのフェーズドアレイ (Phased Array) を構成する。ビーム偏向時のグレーティングローブ (Grating Lobe) を抑圧するため、振動子のピッチは超音波の波長 λ に対して $\lambda/2$ 以下に設計される必要がある。体表接触面が小さく、代表的な応用に心臓超音波検査がある。

以上は代表的な応用例であり、振動子を小型化することで、体内内用や術中用など、広く応用されている。

(2) 3次元走査用探触子

3次元走査の一つの方法は、前述のアレイを、断層画像面に直交する方向に機械走査するのである³⁾。今日、胎児などのリアルタイム3次元走査用に広く応用されている。

もう一つは、図 3・4 に示すように、振動子を 2次元アレイ (Two-dimensional Array) として、超音波ビームを電子的に走査する方法である。この方法には、前者の機械走査に比べて、ビーム制御を高速化できるというメリットがあるが、振動子の素子数が数千チャネルと多く、膨大な回路数が必要になるという問題もある。これに対して、素子を間引き、スパースアレイ (Sparse Array) とする方法があるが、間引きが多いとサイドローブが増加して SN 比が低下してしまう⁴⁾。これを解決するため、探触子の内部に遅延加算回路などを搭載することで、回路数を縮減し超音波診断装置に接続する技術が開発されてきた⁵⁾。今日、心臓のリアルタイム3次元走査などに実用化されている。また、探触子内にマルチプレクサを搭載することで、回路数を縮減したコンベックス2次元アレイ探触子も提案されている (図 3・5)⁶⁾。

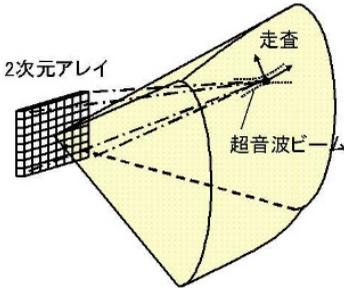


図 3・4 2次元アレイによる3次元走査

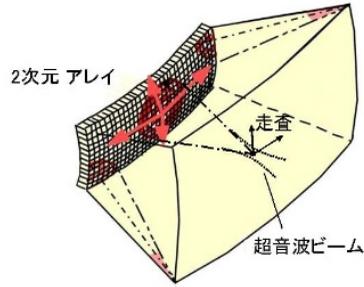


図 3・5 コンベックス2次元アレイ

(3) CMUT

CMUT (Capacitive Micro-machined Ultrasonic Transducer) は、シリコン基板上に設けた真空隙を介して振動膜を多数形成した静電型 MEMS デバイスである⁷⁾。近年、医用応用に向けた性能評価や長期信頼性に関する研究開発が行われてきた⁸⁾。以下、その構造と動作を説明する。図 3・6 に鳥瞰写真を、図 3・7 にはその構造概略図を示す。セルの上下には電極を設けた構造となっており、電極間にはあらかじめ DC バイアス電圧を印加しておく。送信時は、送波パルスによる静電力変化で膜を変位させ、超音波を送波する。また、受信時には、超音波による膜の変位が静電容量の変化となり、電気信号として取り出される。この CMUT には、水中や生体などに適用する場合、マッチング層 (図 3・2 参照) がなくとも、広帯域で良好な過渡応答特性が得られるという特徴がある。今日、乳腺用リニア探触子として実用化されている。今後、半導体プロセスによる微細化、大規模化、集積回路の混載可能性、ならびに量産性などの特徴を生かした、研究開発と応用が期待される。

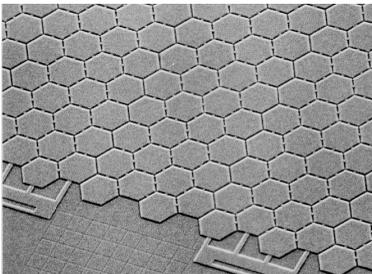
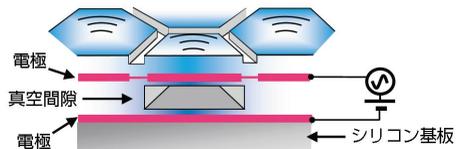
図 3・6 CMUT アレイ鳥瞰写真⁸⁾

図 3・7 CMUT セルの構造概略図

■参考文献

- 1) (社)日本画像医療システム工業会, 医用画像電子博物館 歴史で見る医用画像の歩み 超音波診断装置, <http://www.jira-net.or.jp>
- 2) 小島 正: “9.3.1 医用超音波探触子,” 超音波便覧編集委員会(編): 超音波便覧, pp.430-435, 丸善, 1999.
- 3) 秋山いわき: “9.5.3 3次元表示,” 超音波便覧編集委員会(編): 超音波便覧, pp.458-460, 丸善, 1999.
- 4) D.H. Turnbull and F.S. Foster: “Beam Steering with Pulsed Two-Dimensional Transducer Arrays,” Trans. IEEE

Ultrasonics, vol.38, no.4, pp.320-333, Jul. 1991.

- 5) B. Savord and R. Solomon : "Fully sampled matrix transducer for real time 3D ultrasonic imaging," Proc. IEEE Ultrasonics Symposium, vol.1, pp.945-953, 2003.
- 6) S. Tamano, et al. : "3D Ultrasound Imaging System using Fresnel Ring Array & High Voltage Multiplexer IC," Proc. IEEE Ultrasonics Symposium, pp.782-785, 2004.
- 7) M.I. Haller and B.T. Khuri-Yakub : "A surface micromachined electrostatic ultrasonic air transducer," Proc. IEEE Ultrasonics Symposium, pp.1241-1244, 1994.
- 8) S. Machida, et al. : "Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer with Driving Voltage Over 100 V And Vibration Durability Over 1011 Cycles," Proc. IEEE Transducers '09, pp.2218-2221, 2009.

2-3-2 水中超音波トランスデューサ

(執筆者：南利光彦) [2012年12月受領]

水中超音波トランスデューサは、海底地層探査、潜水艦・機雷探知、魚群探知、海底マッピング、音響通信、音響イメージングなどに用いられ、それぞれ目標となる物体の距離や大きさが異なるため、その使用周波数も数 Hz から数 MHz と幅広い。圧電セラミックスの共振モードを利用すると効率は良いが、使用帯域が狭く、また低周波化するためには寸法が大きくなる。これら問題（低周波小型化・広帯域化）を解決するために、近年開発された水中超音波トランスデューサ方式をいくつか紹介する。

(1) フリーフラッドリング方式^{1)~3)}

フリーフラッドリング方式は、キャビティモードとリングモードを複合させ送波する音源方式（図 3・8 参照）で、基礎原理の発表は 1964 年と古いですが、近年、潜水艦探知用可変深度型ソナー用音源として高出力、低周波数化（数 kHz 帯）のためリメイクされた音源方式である。リング内の貫通部分には水（媒体）の出入りが自由になっておりキャビティモードで共振する。また、リングの共振周波数 f_r をこのキャビティモードの共振周波数 f_h と近い周波数に設定することにより、図 3・9 に示すような広帯域な周波数特性が得られる。フリーフラッドリングの原理断面図を図 3・10 に示す。キャビティモードの共振角周波数 ω_h は、内部媒体のコンプライアンス C_2 を $C_2 = L/\rho_0 c_0 \pi a^2$ 、放射質量を M_2 とすると、 $\omega_h^2 = 1/C_2 M_2$ となる。ここで、 ρ_0 は媒体の密度、 c_0 は媒体の音速を示す。等価回路は、円筒音源の等価回路にキャビティモード部の等価回路が $1 : a/2L$ のトランスで結合する回路で表すことができるが、詳細は、引用文献などを参考して欲しい。また、実際の設計は、リングの内面と外面からそれぞれ放射された音が干渉し複雑な挙動を示すため、有限要素法などで行うのが一般的である。



図 3・8 フリーフラッドリング型水中トランスデューサ

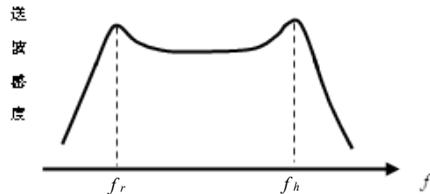


図 3・9 送波感度周波数特性

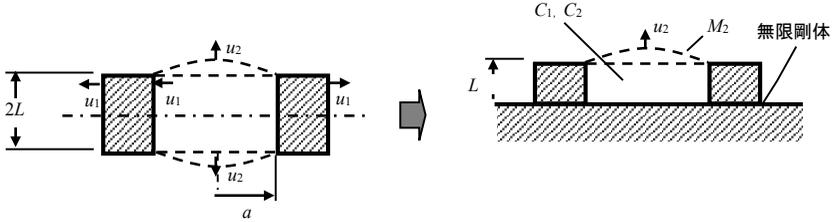


図 3・10 フリーフラッドリング原理断面図

(2) Xスプリング方式^{4),5)}

図 3・11 に X スプリング音源を示す。駆動源として圧電セラミックスを使用し、この駆動源と放射面の間をスプリング部材で連結した音源である。圧電セラミックスの振動モードは、バルク型圧電セラミックスの縦振動、円筒型圧電セラミックスの呼吸振動、金属やプラスチックなどの受動部材を、極性の異なる 2 つの能動部材（圧電セラミックス）でサンドイッチして生成するベンディング振動などを利用する。スプリング部分のアームの長さを H 、高さを a 、駆動源である圧電セラミックスの半分の長さを b とすると、 $H^2 = a^2 + b^2$ の関係になる。微分すると $2HdH = 2ada + 2bdb$ となり、ここで da は a の長さの変化量、 db は b の長さの変化量を示す。スプリング部分のアームが変形しないものとする $dH = 0$ となり、振幅増幅率 M_f は、以下で与えられる。

$$M_f = da/db = -b/a \tag{3・1}$$

この関係式は、放射面の振幅が圧電セラミックスの振幅の M_f 倍大きくなり、逆に圧電セラミックスにかかる負荷は、放射面にかかる負荷の M_f^2 倍になることを示している。つまり、 M_f を大きくすればするほど Q_m は小さく広帯域になるが、 M_f の増加に合わせて、結合係数も小さくなってしまうため、現実的な M_f は 3 程度とされている。

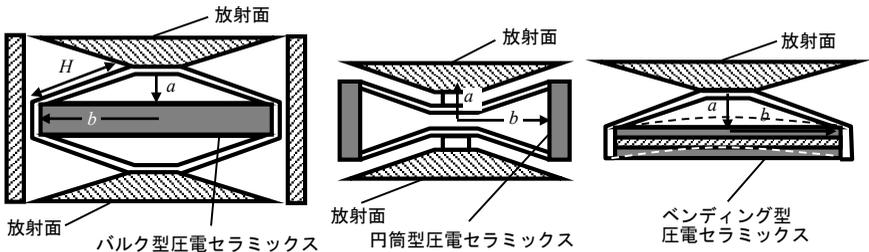


図 3・11 X スプリング型水中トランスデューサ

(3) 単結晶トンプルツ方式⁶⁾

PMN-PT や PZN-PT 単結晶を用いた水中用トランスデューサの開発が各国で進められている。圧電単結晶は、一般的にヤング率が従来 PZT よりも小さいため、同じ共振周波数を得るための

部材の長さを PZT よりも短くすることができ、また結合係数が大きいと、広帯域化を図れる材料として注目されている。結合係数 k と比帯域幅 $\Delta f/f$ の関係式は次式で表すことができる。計算結果を図 3・12 に示す。

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{k}{\sqrt{1-k^2}} \quad (3 \cdot 2)$$

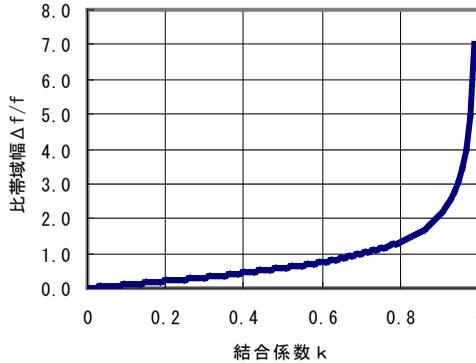


図 3・12 結合係数と比帯域幅の関係

トンピルツ方式は、従来からある方式で、図 3・13 に示すように、圧電セラミックスを金属マスでサンドイッチした構造で、小型、低周波数化、広帯域化に優れ、主に数 kHz～数十 kHz 帯の水中トランスデューサで広く採用されている方式である。米海軍の研究機関 NUWC (Naval Undersea Warfare Center) は、圧電セラミックス部分に <001> 結晶軸方向に分極した PMN-PT を適用し比帯域幅 1.0 以上を実現している。

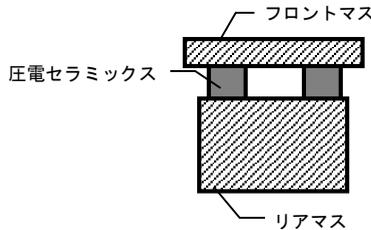


図 3・13 トンピルツ型水中トランスデューサ

フロントマスの質量を M_1 、リアマスの質量を M_2 、圧電セラミックスのバネ定数を K とすると、このトンピルツトランスデューサの共振角周波数 ω_s は次式で表すことができる。

$$\omega_s^2 = \frac{K(M_1 + M_2)}{M_1 M_2} \quad (3 \cdot 3)$$

(4) CMUT (Capacitive Micro-machined Ultrasonic Transducer) ⁷⁾

小型・軽量、広帯域化を実現する方法として近年着目されている静電容量型トランスデュー

サ CMUT について述べる。CMUT は、医療用超音波診断装置の分野では既に製品化されているが、水中トランスデューサの分野では、周波数帯域 10 kHz から 150 kHz を実現している例もあるもののまだ研究段階である。CMUT は、内部に空隙を持つ太鼓のような形をしているため、水中用に用いる場合、水圧の影響を防ぐための圧力バランス構造が必要となる。また、使用周波数に合わせて振動膜の厚みや空隙の大きさを最適化するが、水中用は医療用と比較し周波数が低く、空隙の大きさやギャップ間が広くなるため、印加電圧が高くなる。

図 3・14 に CMUT の基本構造を示す。絶縁された基材上に空隙を設け、その上部にシリコンなどの絶縁材により薄い膜を形成する。上部、下部に電極を設け、この電極に電圧を印加し電極間に静電界を発生させる。印加電圧を時間的に変化させることにより電極間に発生した静電気力を変動させ、それに応じて膜を振動させることで音を送波する。また、電極に蓄積した電荷が膜の振動とともに変位する際に流れる電流を検出することで音波を受波する。

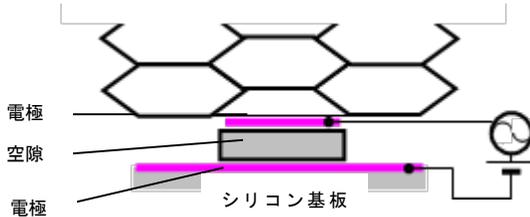


図 3・14 静電容量型トランスデューサ (CMUT)

■参考文献

- 1) G.W. McMahon : “Performance of open ferroelectric ceramic cylinders in underwater transducers,” J. Acoust. Soc. Am. 36, pp.528-533, 1964.
- 2) C.H. Sherman and N.G. Parke : “Acoustic radiation from a thin torus, with application to the free-flooding ring transducer,” J. Acoust. Soc. Am. 38, pp.715-722, 1965.
- 3) 例えば、C.H. Sherman and J.L. Butler : “Transducers and Arrays for Underwater Sound,” Springer, pp.91-95, 2007.
- 4) J.L. Butler : “Electro-mechanical transduction apparatus,” U.S. Patent 4,845,688, July 4, 1989.
- 5) J.L. Butler and A.L. Butler : “Single-sided electromechanical transduction apparatus,” U.S. Patent 6,654,316B1, issued November 25, 2003.
- 6) H.C. Robinson, et al. : “Development of broadband, High Power Single Crystal Transducers,” UDT Europe 2008 Conf. Proc., 10B2, 2008.
- 7) Y. Hung, et al., : “Fabrication of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers (CMUTs) Using Wafer Bonding Technology for Low Frequency (10 kHz-150 kHz) Sonar Application,” 2002 IEEE, pp.2322-2327

2-3-3 工業用トランスデューサ

(執筆者：和高修三) [2012年12月受領]

超音波トランスデューサは各種工業製品の非破壊検査にも用いられている。実際の検査では、1~20 MHz 帯の周波数が広く使われている。製品材料の代表として鋼を取り上げれば、その縦波音速は約 6000 m/s であるから、対応する波長は 0.3~6 mm である。横波音速は縦波音速の約半分であるから、横波を利用すれば波長は上記の約半分である。いずれにしても超音波を用いることによってサブミリメートルからミリメートルのオーダーで材料内部を診ている。

超音波を用いた非破壊検査は超音波探傷と呼ばれる。パルス反射法が広く用いられている。利用されるモードには縦波や横波以外に、表面波、Lamb波、SH (Shear Horizontal) 板波、クレーピング波などがある。探傷法の詳細は文献 1)～3) を参照して欲しい。超音波探傷に使用される超音波トランスデューサは、超音波探触子あるいは単に探触子と呼ばれる。本項では探触子という用語を用いる。各探傷法に対してそれぞれ適切な探触子が使用される。探触子に係わる日本工業規格として JIS Z 2350 「超音波探触子の性能測定方法」がある。探触子は垂直用と斜角用に大別される。

(1) 垂直探触子

図 3・15 に垂直探触子の基本構成を示す。振動子の背面にバックリング材を設け、前面に保護板を設けている。バックリング材は振動子の自由振動を抑制し、探触子から送信される超音波パルスの幅を短くして時間分解能を向上する役割や、探触子の広帯域化を図る役割を担っている。保護板は振動子を機械的損傷から保護する役割や、振動子と試験体との音響インピーダンスを整合する役割を担っている。

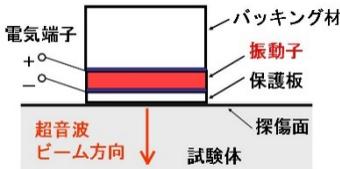


図 3・15 垂直探触子（基本構成）

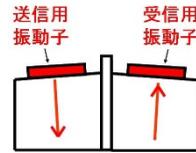


図 3・16 二振動子型



図 3・17 垂直探触子（外観写真）

垂直探触子は、試験体の探傷面（試験体内に超音波を入射する試験体表面）に対して垂直方向に超音波を送受信する垂直探傷法に用いられる。探傷面や探傷方向は、試験体の製造工程で発生しやすい位置や向きを考慮して選ばれる。

垂直探触子には、試験体の探傷面に直接接させて用いる直接接着用と、探触子と試験体との間に水を介して超音波を送受信する水浸用のものがある。図 3・15 に示したように 1 つの振動子で超音波の送受信を兼ねる一振動子型と、図 3・16 に示すように 2 つの振動子を並列配置して送信と受信を別々の振動子で行う二振動子型がある。図 3・17 は一振動子型の外観写真である。

(2) 斜角探触子

図 3・18 に斜角探触子の基本構成を示す。くさびに振動子を接着している。くさびにはアク

ル材やポリスチレン材などが用いられている。振動子からくさび内に縦波を送信する。縦波がくさびと試験体との境界面に到達するとスネルの法則に従ったモード変換を伴う屈折が生じる。入射角を、屈折伝搬する縦波に関する臨界角以上に設定すれば、試験体中には横波だけを屈折伝搬できる。通常、斜角探触子と呼ばれるものはこのタイプの探触子である。逆に、入射角を上記臨界角以下に設定すれば試験体中に縦波を屈折伝搬できるが、横波も同時に屈折伝搬するので使用に関しては注意を要する。斜角探触子も垂直探触子と同様に、一振動子型と二振動子型がある。図 3・19 は一振動子型の外観写真である。

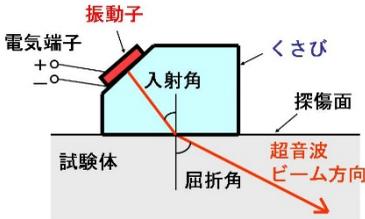


図 3・18 斜角探触子（基本構成）

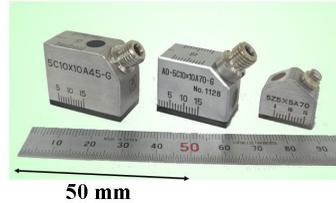


図 3・19 斜角探触子（外観写真）

斜角探触子は試験体の探傷面に対して斜めに超音波を送受信する斜角探傷法に用いられる。この探傷法は溶接部の検査などに広く用いられている。図 3・20 に示すように、探触子から送信された超音波を、直接きずに照射する直射法と、試験体の裏面と表面で複数回反射させてきずに照射する多数回反射法が用いられている。斜角探傷法においても、探傷面や探傷方向はきずの位置や向きを考慮して選ばれるが、この探傷法における探傷方向は探傷面だけでなく、探触子の屈折角、試験体の表裏面での反射回数、及び探触子の向きによっても変わる。探傷方向は、超音波ビームがきずになるべく垂直に照射されるように選ばれるが、ほとんどの場合、規格や標準によって規定されている。

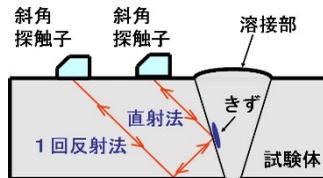


図 3・20 斜角探傷法

図 3・18 に示した入射角を、くさびの縦波音速と試験体の表面波音速を用いてスネルの法則を満足する角度に設定すれば、試験体に表面波を送受信できる。斜角探触子には入射角を機械的に可変できるようにしたものもある。

(3) 自動探傷システムで用いられる探触子

以上は可搬形探傷装置で用いられる探触子を主体として説明したが、製鉄所の製造ラインなどでは鋼板（厚板、薄板）、棒鋼、鋼管、ピレットなどの検査に自動超音波探傷システムが活用

されており、種々のタイプの探触子が使用されている。

厚板用では、板表面からの反射エコー振幅を小さくできる二振動子形垂直探触子を数 100 個配列して板全面を短時間で検査している。

薄板用では、図 3・21 に示すタイヤ探触子による板探傷が用いられている。内部に水や油などを充填したゴム製タイヤの中に振動子を組み込み、タイヤ外周を薄板に接触させて高速回転させながら超音波を送受信している。



図 3・21 タイヤ探触子

丸棒用では、図 3・22 に示すように垂直探触子と斜角探触子を併用し、前者で丸棒中心付近に発生するきずを検査し、後者で丸棒表面付近に発生するきずを検査している。これら 2 種類の探触子を共に複数個、回転式ホルダーに装着し、ホルダーを高速回転させて複数の螺旋状超音波ビーム軌跡を形成し、これによって丸棒全面を検査している。斜角探触子の構成と外観写真を図 3・23 に示すが、反射板を設けて音響結合状態を常時モニターすることによって検査が正常に実施されていることを確認している。

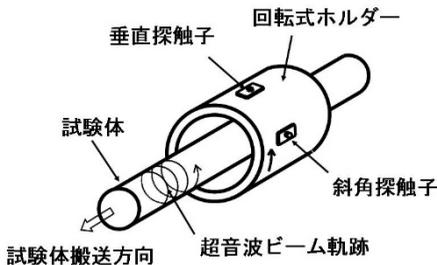


図 3・22 丸棒自動探傷システム構成



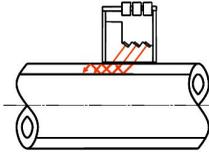
図 3・23 反射板付き斜角探触子

鋼管用では、管軸方向に延びたきずと、管周方向に延びたきずが表面や内面に発生することから、超音波を管周方向に伝搬させる斜角探触子と、管軸方向に伝搬させる斜角探触子とを併

用している。後者の斜角探触子では探傷ビームカバー率を確保するために、**図 3・24** に示すように複数の振動子を内蔵したマルチ構造のものが必要になる場合が多い。またラミネーションの検出や肉厚測定に垂直探触子が用いられている。

最近では、超音波ビームの方向や形状を電子的に変えられるフェーズドアレイ探触子も用いられるようになってきている。**図 3・25** に丸棒用フェーズドアレイ探触子の外観写真を示す。素子数は 128 素子、素子配列ピッチは 0.6 mm で、素子材料にはコンポジット振動子が用いられ、素子は曲率 40 mm の円弧面に配列されている。

マルチ型斜角探触子



試験体

図 3・24 マルチ型斜角探触子



図 3・25 フェーズドアレイ探触子

■参考文献

- 1) 日本学術振興会製鋼第 19 委員会(編)：“超音波探傷法,” 日刊工業新聞社, 1974.
- 2) (社)日本非破壊検査協会(編)：“新 非破壊検査便覧,” 日刊工業新聞社, 1992.
- 3) (社)日本非破壊検査協会(編)：“超音波探傷試験 I,” “超音波探傷試験 II,” “超音波探傷試験 III,” (社)日本非破壊検査協会, 1999, 2000, 2001.