

超音波探触子の送信時と受信時の指向性

Directivity at the transmitting and receiving of ultrasonic probe

田中 雄介 小倉 幸夫

Yuusuke TANAKA Yukio OGURA

ジャパンプローブ株式会社

Japan Probe Co., Ltd.

内容梗概：超音波探触子の指向性を送信時と受信時で異なる現象として説明する。超音波探触子からは直接波と直接波端部からエッジ波が発生するが、送信時の指向性はエッジ波の発生量に依存する。エッジ波は媒質により発生量が異なり、水中では検出されるが空気中ではほぼ検出されない。水中では超音波が少し広がるが、空中ではほぼ直進する。受信時の指向性は傾いて超音波を受信したときの受信時間差による信号の合成で決定し、最大伝搬距離差が大きくなると信号が打ち消し合って受信信号が小さくなる。また、斜めからの超音波は信号の波長が変化し、最大伝搬距離差が大きいと波長が長くなり見かけの周波数が低下する。

Keyword：超音波、指向性、エッジ波、受信時間差、波長

1. はじめに

超音波の直進度合いを表現するものとして指向性があり、指向性が高いと超音波は直進する。一般に周波数が高く、送信面が大きな超音波探触子は指向性が高いとされている。指向性はベッセル関数により計算されており[1]、周波数と振動子半径が大きいほど指向性が高い。また、送信と受信の指向性は相反定理から同じとされているが[2]、送信と受信は物理現象として異なっており、指向性が異なる。音響学は振動系の現象で波数が無限、または波数が多数と考えられており、音響インピーダンスなども電気回路との相似で計算されている[3]。実際は超音波を用いるときはパルス波で駆動することが多く、波数が多い連続波での駆動は集束超音波による治療や共振法による厚さ計測など一部である。パルス波の場合はインパルス応答による計算もされているが、音圧が速度ポテンシャルの時間微分で表現されているため、音圧が無限となってしまう正確に表現されて

いない[4]。探触子から送信される超音波については直接波とエッジ波があり、パルス波と連続波の違いやエッジ波の重なりにより発生する現象、エッジ波の振幅が無限大でないことをこれまでに説明してきた[5]。また、送信と受信の指向性の違いについて送信はエッジ波の広がり、受信は受信面の時間差による信号の合成について説明した[6]。今回送信と受信についてさらに詳細に説明し、送信時と受信時の指向性が異なることを述べる。

2. ベッセル関数による指向性

超音波の指向性は円形探触子の場合、教科書では指向係数 D_c が次式で表わされる[1][2]。

$$D_c = \frac{2J_1(m)}{m} \quad (1)$$

J_1 ：第1種1次ベッセル関数

m ： $ka \sin \varphi$ k ： $2\pi/\lambda$

a ：探触子半径 φ ：中心軸からの角度

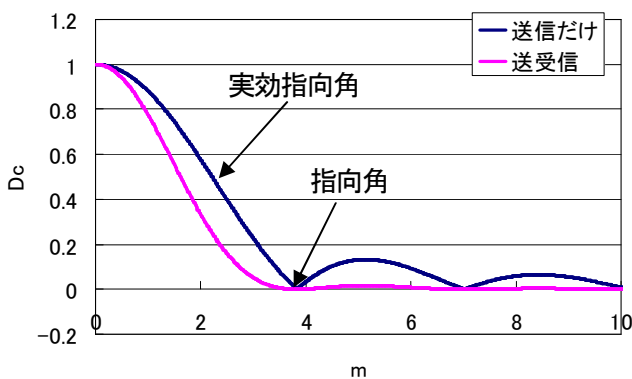


図 1 ベッセル関数による指向性

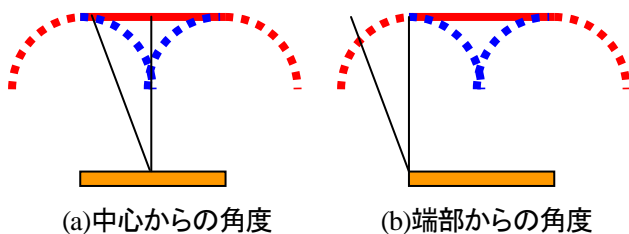


図 3 角度の考え方

指向係数が 0 となる一番小さい角度を第 1 零輻射角または指向角、指向係数が 0.5 となる角度を実効指向角と定義される。この指向係数を計算したとき $m=3.83$ で指向係数が 0、 $m=2.22$ で指向係数が 0.5 となる。これは送信だけ考えた場合で送受信の場合は D_0 を 2 乗する。探触子から送信された超音波はある角度で振幅が 0 になる。図 1 にベッセル関数による指向性と指向角について示す。このような音圧変化は後述のエッジ波の重なりにより発生するが、このベッセル関数による指向性が成り立つには以下の条件が必要である。

条件 1：波数無限の連続波

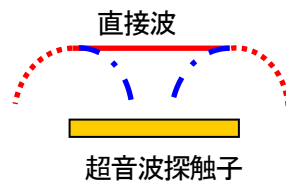
条件 2：遠距離音場

条件 3：直接波とエッジ波は音圧が一定

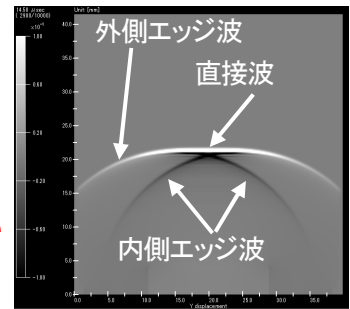
条件 4：送信と受信が同じ特性

条件 1 は波数が無限であるということであるが、波動工学などと同様に振動系で考えられているためこの条件が必要である。後述するが、波数が多くなると前の波と後ろの波が重なって広がったときに振幅変動が発生し、波数 1 のパルス波では発生しない。

条件 2 は探触子のどの部分からの角度を考えるか



(a)直接波とエッジ波



(b)シミュレーション

..... 直接波と同位相のエッジ波

- - - 直接波と逆位相のエッジ波

図 2 直接波とエッジ波

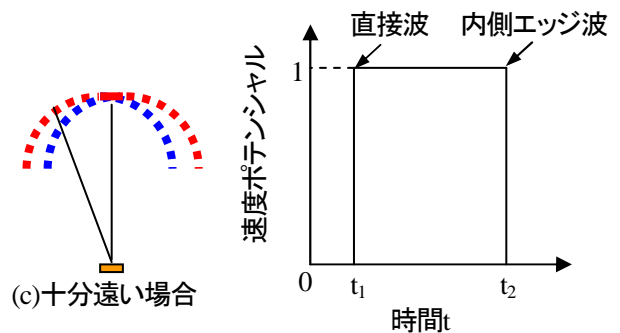


図 4 中心軸上速度ポテンシャル

で変わる。まず図 2 に探触子から発生する直接波と直接波端部から発生するエッジ波について示す。直接波は探触子の振動面と同じ形状の波で平面振動子の場合は平面波が送信される。直接波端部から外側と内側にエッジ波が発生する。後述するが、エッジ波は音圧の急激な変化がある部分から発生し、外側は押されるので直接波と同位相、内側は引っ張られ直接波と逆位相になる。シミュレーションでも正の振幅を白、負を黒で表しているが、内側エッジ波は逆位相である。超音波はエッジ波により直接波端部、つまり位置的には振動子端部から広がっていくが、一般的には探触子中心から超音波が広がると考えている。図 3 に角度の考え方を示すが、中心からの角度と端部からの角度がほとんど変わらないようになるには振動子幅より十分遠い条件が必要である。従って、遠距離音場という条件になる。

条件 3 の直接波やエッジ波の音圧が同じであると音圧 p が速度ポテンシャルの時間微分となる式

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2) \quad \begin{array}{l} \rho : \text{密度} \\ \phi : \text{速度ポテンシャル} \end{array}$$

で求めていることに由来する。図 4 に円形振動子の

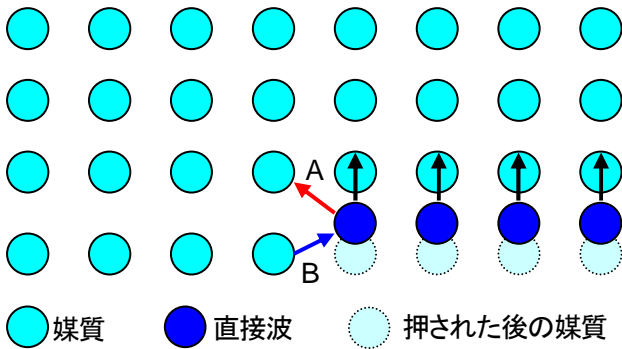


図 5 媒質伝搬中のエッジ波発生

中心軸上のある観測点の速度ポテンシャルを示す。観測点に時間 t_1 で直接波が到達し、速度ポテンシャルが発生する。この場合は値を 1 と正規化している。次に時間 t_2 で内側エッジ波が到達し、速度ポテンシャルが 0 になる。音圧は速度ポテンシャルの時間微分であるので直接波は正の無限大、内側エッジ波は負の無限大となる。このことから直接波とエッジ波は同じ音圧であると考えられているが、エッジ波は広がるほど音圧が低下するためエッジ波の音圧は一定ではない。正面に近いほどエッジ波の音圧は大きくなる。探触子中心軸上は内側エッジ波が集中するので外側エッジ波よりは音圧が大きくなるが、直接波と同じ音圧にはならない。

条件 4 は相反定理により送信と受信は同じ特性であると考えられている。しかし、送信時の指向性はエッジ波の広がり、後述する受信時の指向性は受信信号が重なって発生するものであるので送信と受信は異なる現象である。

これらのことからベッセル関数による指向角は発生せず、現実には適用できないことが多い。非破壊検査では音圧が探触子中心軸上から 50% 低下した角度である実効指向角を使用している。次章では送信時の超音波の物理現象について述べる。

3. 超音波が広がる時の物理的な現象

超音波が広がる時に直接波端部から発生するエッジ波が関係することは述べた。エッジ波の発生原理はまだ完璧には解明されていないが媒質が押される際に発生する現象[7]や粒子速度勾配から発生する現象[8]であると考えられる。ここでは媒質が押される際の現象で説明する。図 5 のように媒質が伝搬す

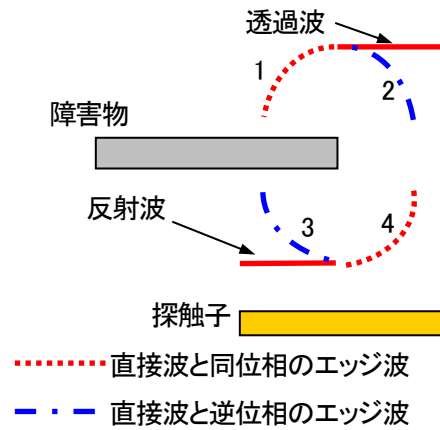
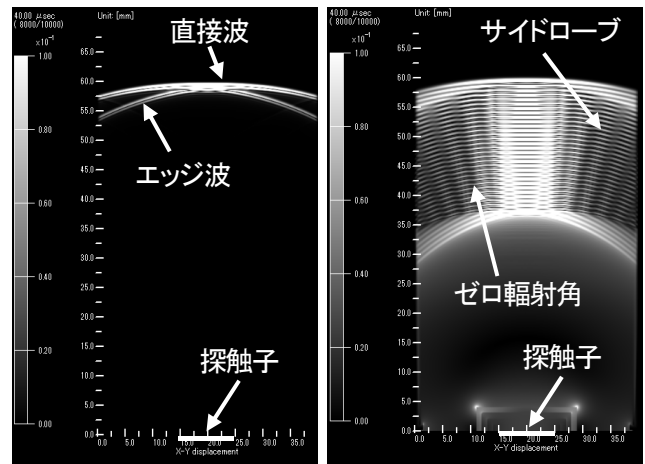


図 6 物体透過時に発生するエッジ波



(a)パルス波 (b)連続波

図 7 パルス波と連続波の音場

る超音波を考えると、直接波が媒質を伝搬している時は媒質を押しながら伝搬する。直接波中央では媒質が押されるだけであるが、直接波端部はその外側前部の媒質を押し(赤矢印 A)、外側後部の媒質を引っ張る形(青矢印 B)となる。そのため直接波の外側は押されて直接波と同位相、直接波の内側は引っ張られて逆位相のエッジ波が発生するとされている。エッジ波は正面方向以外の圧力になるので直接波より音圧は低下する。エッジ波は音圧変化が大きいほど発生するので直接波が外側に徐々に音圧が低下するとあまり発生しない。直接波端部だけでなく図 6 のように障害物に遮られた時でもエッジ波は発生する。図 6 で障害物で遮られた透過波の左端部は音圧変化があるので外側エッジ波 1 と内側エッジ波 2 が発生する。障害物で反射した反射波も右側に音圧変化があるので外側エッジ波 4 と内側エッジ波 3 が発生する。

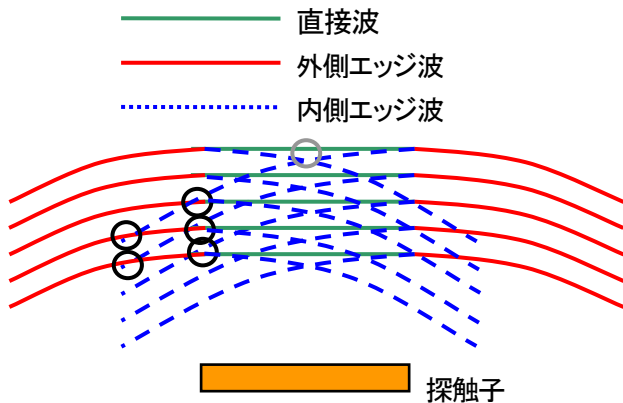


図8 エッジ波の重なりによる振幅変動

エッジ波が重なることで様々な現象が発生する。図7はパルス波(波数 1)と連続波(波数 30)のシミュレーションでの音場であるが、連続波では音圧の強弱が発生した。音圧の強い部分がサイドローブ、音圧の弱い部分がゼロ輻射角、または指向角と呼ばれる。これを説明すると図8のようになる。直接波端部から発生したエッジ波、図8では右端部から発生した内側エッジ波が左側から発生した外側エッジ波と重なる。黒丸の部分で重なるが、図中で1波目の内側エッジ波は3波目や4波目の外側エッジ波と重なる。それぞれのエッジ波は逆位相なので黒丸の部分は振幅が低下する。エッジ波の広がり方で考えると外側エッジ波は中心に近く音圧が大きい。一方内側エッジ波は中心から遠く音圧が小さくなる。そのため、黒丸の部分は音圧が0にならずに正の音圧となる。単純に外側エッジ波と内側エッジ波が重なると音圧が低下するが、伝搬距離差が半波長ずれて重なると音圧が大きくなる。そのため強い音圧と弱い音圧が交互になる。また、先頭と最後尾の波は重ならないので音圧変動が発生しない。このように図1のベッセル関数のように指向角らしき箇所は発生するが、エッジ波が広がりにより音圧が変化するため、音圧が0になる指向角が発生しない。

探触子中心軸上でも灰色の丸を図8に記してあるが、直接波と内側エッジ波の伝搬距離差が半波長に

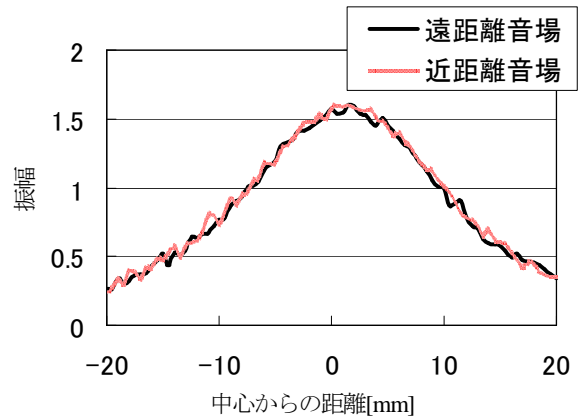


図9 空中での超音波の広がり

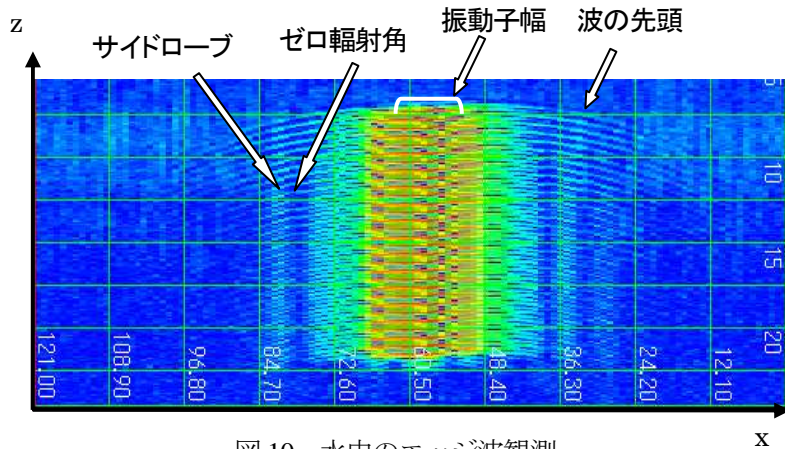


図10 水中のエッジ波観測

なると振幅が大きくなる。後述する近距離音場限界はこの振幅が大きくなる距離である。

超音波の送信時の指向性は直接波端部のエッジ波がどの程度広がるかで決まる。例えば水中ではある程度エッジ波が発生するが、空気中ではエッジ波がほとんど発生しない。図9は直径20[mm]、周波数250[kHz]の探触子の音場を hidroホンで計測した図である。探触子中心から外側に音圧が低下しているが、広がり方が近距離(30[mm])、遠距離(150[mm])で同じである。近距離音場限界は74[mm]である。この図からエッジ波が発生していないので広がり方が近距離、遠距離で同じであることがわかる。空気中の波長が1.36[mm]であるので一般的には振動子が大きく広がらないとされるが、図10の距離15[mm]における水中での超音波の観測ではエッジ波により超音波が広がっている。5[MHz]、直径10[mm]の探触子で、水中の波長が0.3[mm]である。波長より振動子幅が大きく、図10の中央部分白線が

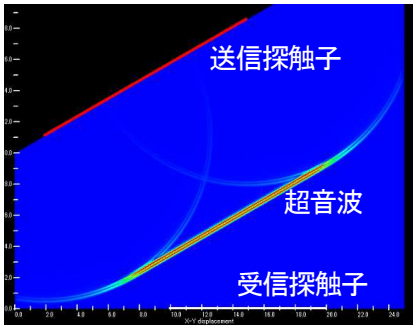
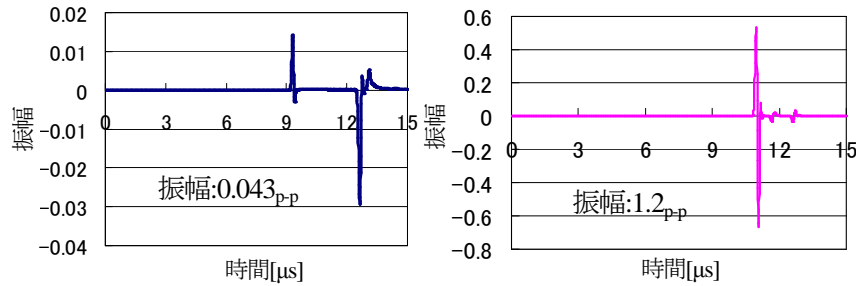


図 11 斜めから受信する場合



(a) 10 [mm]

(b) 0.2 [mm]

図 12 振動子幅が 10[mm]と 0.2[mm]の時の受信波形

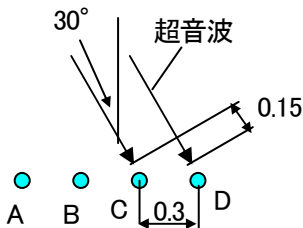


図 13 斜めから入射したときの波形出力点

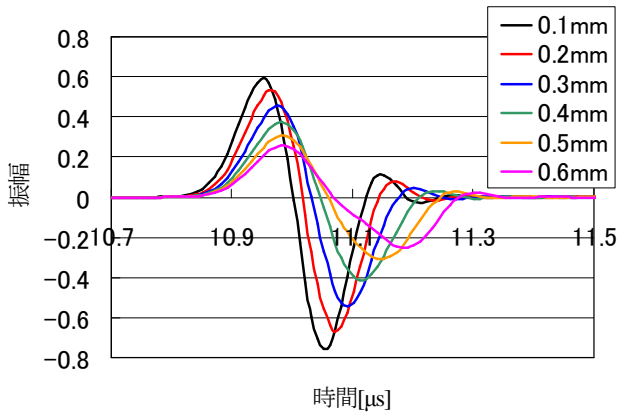


図 15 各振動子幅と受信波形

振動子幅であるが、エッジ波が発生し超音波が広がっている。サイロローブやゼロ輻射角が発生し、音圧の強弱部分が発生した。従って、送信時の指向性はエッジ波の広がりによって決まると考えられる。媒質によりエッジ波の発生量が異なるため送信時の指向性は媒質に依存する。今後空中での小さな振動子でどのような音場になるかをさらに詳細に調べる。

4. 超音波受信時の信号

送信時の指向性はエッジ波の広がりにより決まるが、受信時の指向性は別の現象であるため個別に考える必要がある。例えば水中で 5[MHz]、1 波のパルス波が受信探触子に図 11 のように 30 度傾いて受信したときを考える。受信探触子幅を 10[mm]と

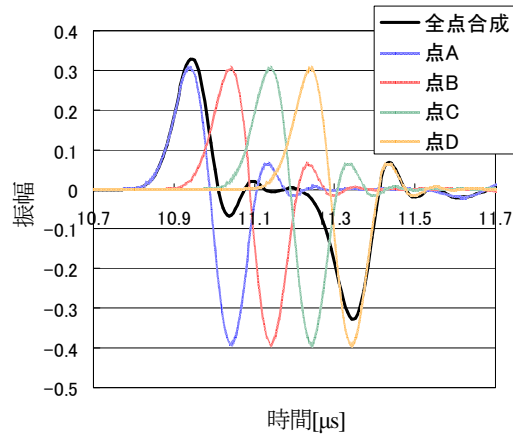


図 14 各波形出力点の波形と合成波形

0.2[mm]にした時の受信信号をシミュレータで調べた結果が図 12 である。振動子幅が 10[mm]のとき振幅 0.043p-p、振動子幅が 0.2[mm]のとき振幅が 1.2p-p と 28 倍の差があり、振動子幅が小さいほうが振幅が大きい。

ここで図 13 のように 4 つの波形出力点 A、B、C、D に 30 度傾いて超音波が入射したときを考える。各点は 0.3[mm]離してあり、隣の点との伝搬距離差は 0.15[mm]と半波長になる。各点の波形と全点合成波形を図 14 に示す。最初と最後の信号以外は打ち消し合って振幅が低下した。次に受信振動子幅を 0.1 から 0.6[mm]まで変えた時の受信波形を図 15 に示す。振動子幅が大きくなると受信信号の振幅が低下した。振幅低下は図 13 のような波形出力点が無数にあるためそれらが合成され信号を打ち消し合ったためである。振動子幅 0.6[mm]で信号の中間部分が折れたようになった。振動子幅をさらに大きくした時の受信波形を図 16 に示す。振動子幅 1.0[mm]や 2.0[mm]では中間部分の振幅が 0 になった。これらは振動子幅が大きいと場所により受信時間差があるため位相が逆の信号で打ち消し合ったためである。信号が打

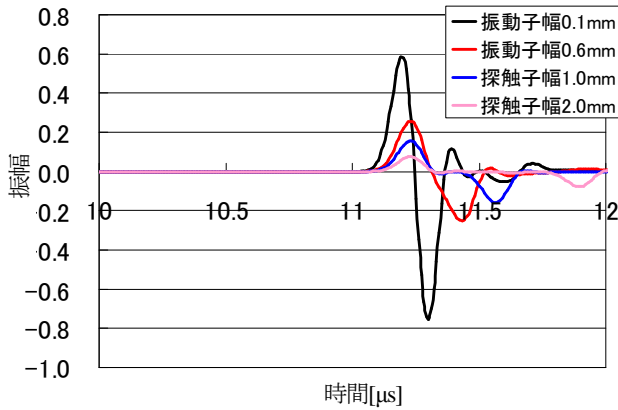


図 16 0.6[mm]以上の振動子幅と受信波形

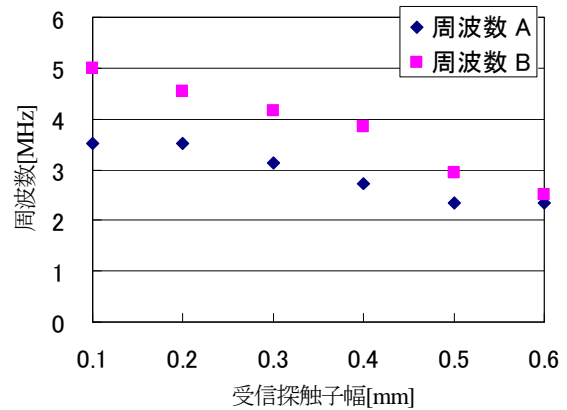


図 17 振動子幅と周波数の変化

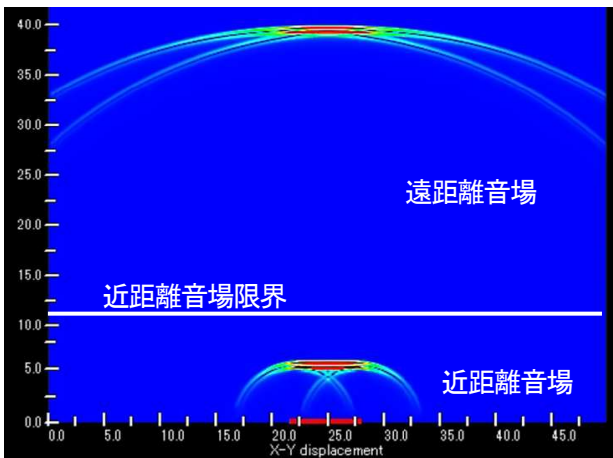


図 18 遠距離音場と近距離音場の波形

ち消し合わない振動子幅は 0.6[mm]であるのでこの場合は振動子両端の伝搬距離差が 0.3[mm]と 1 波長分になる。このときの受信角度を受信指向角と定義すると受信指向角 θ_R は次の式(3)

$$\theta_R = \arcsin \frac{\lambda}{w} \quad (3) \quad \begin{array}{l} \lambda : \text{波長} \\ w : \text{振動子幅} \end{array}$$

で表わされる。この受信指向角は目安であり、これ以上の振動子幅でも受信信号は検出されるが、振幅が小さくなるため目的により幅を決める必要がある。

図 15 で受信振動子幅が大きくなると信号の波長が長くなっている。周波数を求めると図 17 のようになり、探触子幅が大きくなると周波数が低下した。周波数 A を FFT のピーク周波数、周波数 B を周期の逆数とし、両方で周波数が低下したが、今回は波長で評価するので周波数 B で評価する方法が適切である[6]。周波数 B では幅 0.1[mm]の 5[MHz]から幅 0.6[mm]の 2.5[MHz]まで低下した。従って、受信指向性は入射信号の受信距離差により定義することが

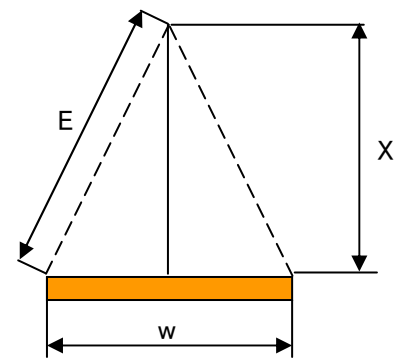


図 19 直接波とエッジ波の重なる距離

でき、直径が小さく周波数が低いほど指向性が低下し、振幅も大きくなる。シミュレーションでは各要素の波形を合成していたが、実際にも圧電体の各要素の受信信号の合成であるので同様の波形合成が発生していると考えられる。

5. 波長や振動子幅と指向性の関係

波長が短い、振動子が大きいと指向性が高くなるが送信と受信でそれぞれ考える。図 18 に近距離音場と遠距離音場のシミュレーション伝搬図を示す。近距離音場では直接波が支配的で直接波が平面状であるが、遠距離音場ではエッジ波が支配的になり波面が球面状になり超音波が拡散する。近距離音場限界は図 19 のように考えると内側エッジ波の伝搬距離 E と直接波の伝搬距離 X の差が半波長になり、直接波と内側エッジ波が探触子中心軸上で合成される点である。その点は次の式

$$X = \frac{1}{4} \left(\frac{w^2}{\lambda} - \lambda \right) \quad (4)$$

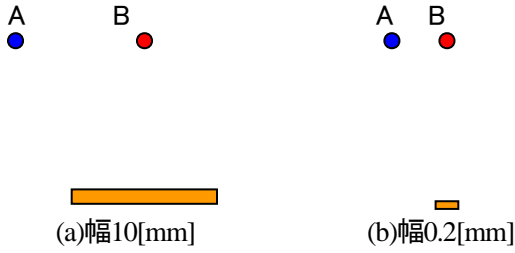


図 20 波形出力点の位置

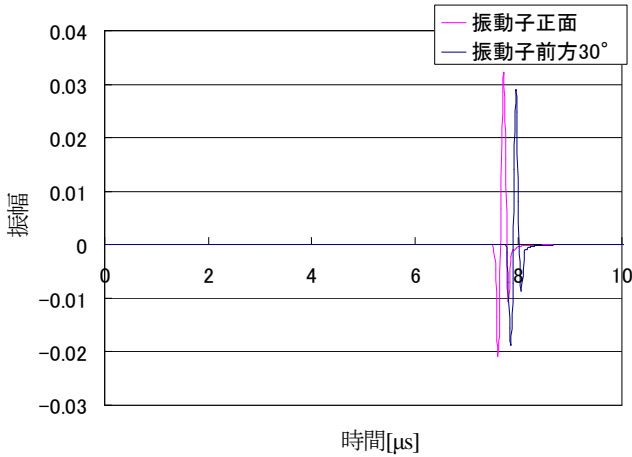


図 22 振動子幅 0.2[mm]、前方 10[mm]における正面と 30 度前方の受信波形

で表わされ、振動子幅 w を直径 D にすると近距離音場限界の式になる。従って、波長が短い、振動子幅が大きい条件では近距離音場限界が長くなり、直接波が支配的な領域が長くなるため指向性が良くなる。近距離音場でもエッジ波により超音波が広がるので空中でない限り完全に直進するというわけではない。受信では 4 章の受信波形で考えた通り、振動子幅が小さいと傾いた信号に対して受信時間差が小さくなり受信振幅が大きくなる。振動子幅に対して波長が短いほど受信指向角が小さくなるので振動子幅が大きく、波長が短いほど指向性が良くなる。

送信、受信共に波長に対して振動子が大きいと指向性が良くなるが、それらが同じであるか考える。図 12 で水中 5[MHz]、受信振動子幅 0.2[mm]と 10[mm]では受信振幅が 28 倍違ったが、送信でも同じように発生するかを調べた。水中 5[MHz]、振動子幅 0.2[mm]と 10[mm]でシミュレーションし、振動子前方 10[mm]において図 20 のように振動子中心の振動子端部から 30 度傾いた位置 A と探触子中心正面の位置 B で振幅がどのようになるかを調べた。エッ

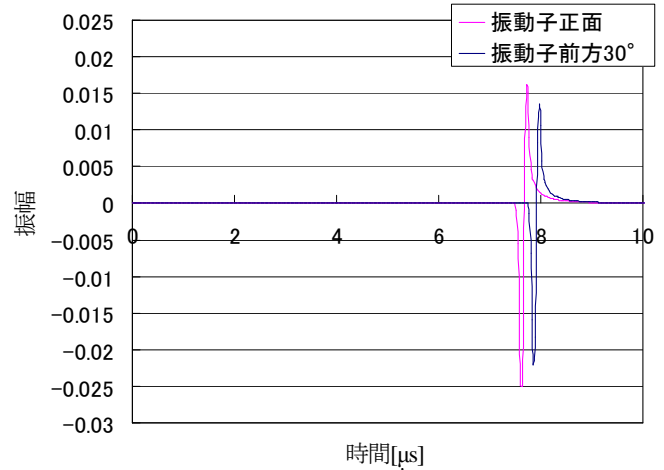


図 21 振動子幅 10[mm]、前方 10[mm]における正面と 30 度前方の受信波形

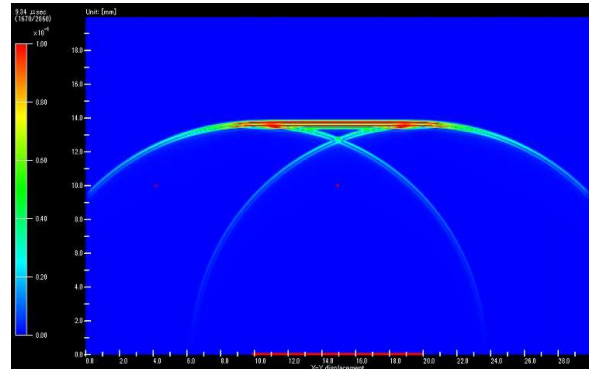


図 23 振動子幅 10[mm]における伝搬図

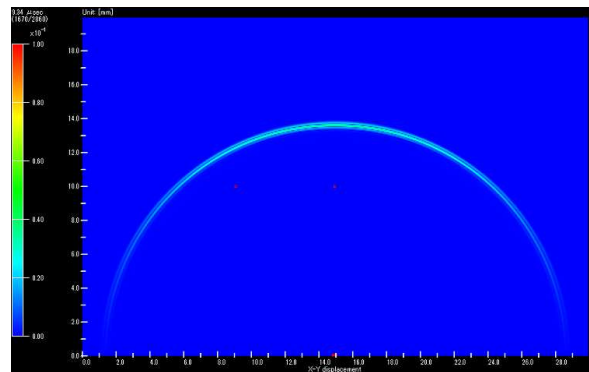


図 24 振動子幅 0.2[mm]における伝搬図

ジ波は直接波端部から広がるので、振動子端部から 30 度の位置に観測点を配置した。

図 21 に振動子幅 10[mm]における正面と 30 度前方の受信波形、図 22 に振動子幅 0.2[mm]における正面と 30 度前方の受信波形を示す。振動子幅 10[mm]では近距離音場限界が 83[mm]で近距離音場、振動子幅 0.2[mm]では近距離音場限界が 0.03[mm]で遠距離音場となる。超音波伝搬図を図 23、図 24 に示す。振

動子幅 10[mm]では直接波が支配的で平面波であるが、振動子幅 0.2[mm]ではエッジ波が支配的で球面状の波になっている。しかし、両方ともエッジ波により超音波が広がっている。図 21 と図 22 の振幅を見ると図 21 の振動子幅 10[mm]では正面の振幅が 0.041_{pp} 、30 度前方の振幅が 0.036_{pp} である。振動子幅 0.2[mm]では正面の振幅が 0.053_{pp} 、30 度前方の振幅が 0.049_{pp} である。波形を見ると 1 波程度であるので振動子幅が 10[mm]では 30 度前方は外側エッジ波のみの振幅であるが、振動子幅が 0.2[mm]では 30 度前方は 1.5 波であるので外側エッジ波と内側エッジ波が混じって振幅が変動している。正面に対して 30 度前方の振幅は振動子幅 10[mm]では 88%、0.2[mm]では 92% である。10[mm]、0.2[mm]の振動子幅を比較してもエッジ波の広がり方について、30 度受信時のような 28 倍もの差は発生せずほとんど同じである。従って、送信と受信で波長や振動子幅に指向性が影響するのは確かであるが、送信と受信で同じ特性ではないことがわかる。

6. おわりに

超音波振動子の指向性について送信と受信で分けて考え、送信時はエッジ波による広がり、受信時は振動子面の受信時間差により指向性が決まることを述べた。エッジ波は媒質により発生量が異なるので送信時の指向性が媒質により大きく変化する。傾いて超音波を受信する場合に受信波形が合成された結果、波長が長くなり受信振幅が低下する。

動画

図 7 のパルス波と連続波の動画、図 11 の傾いて超音波が受信したときの幅 0.2[mm]と 10[mm]の波形比較動画をアコースティックイメージング研究会のページにアップロードした。

参考文献

- [1] 日本非破壊検査協会編；超音波探傷試験Ⅲ 2017；日本非破壊検査協会；pp.68-69(2017)
- [2] 実吉純一、菊池喜充、能本乙彦；超音波技術便覧 改訂新版；日刊工業新聞社；pp.23-59(1968)

- [3] 鈴木英男；音響学における相反定理とその応用；日本音響学会誌、58 巻、4 号、pp.239-243(2002)
- [4] 超音波便覧編集委員会編；超音波便覧；丸善；pp.31-33(1999)
- [5] 田中雄介、大平克己、小倉幸夫、“パルス波と連続波の超音波伝搬の可視化、”アコースティックイメージング研究会資料、AI-2016-26(2016)
- [6] 田中雄介、小倉幸夫、“超音波探触子の送信時、受信時の指向性、”2018 年日本音響学会秋季研究発表会講演論文集 2-7-13 pp.55-58(2018)
- [7] 宇田川義夫、三原毅、“探触子の音波送信原理、”超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集、vol.16th：pp.57-62(2009)
- [8] Yasuhito Kawai, Masahiro Toyoda, “Development of edge-effect suppression barriers、” Acoustical Science and Technology、vol. 35、No. 1、pp.28-34(2014)