

# 超音波探触子の送信と受信それぞれの指向性

田中雄介 小倉幸夫

ジャパンプローブ株式会社 〒232-0033 神奈川県横浜市南区中村町 1-1-14

E-mail: {yuusuke.tanaka, ogura}@jp-probe.com

**あらまし** 超音波探触子の指向性について送信時はエッジ波の発生による拡散、受信時は受信面における伝搬時間差で説明した。エッジ波の拡散は遠距離音場で大きくなるため高周波で大きな探触子は指向性が高い。エッジ波の発生量は媒質により異なり、空気ではほとんど発生しない。さらに空中では減衰によりエッジ波がほとんど拡散しない。そのため、実用上空中では超音波は直進する。受信時の指向性はシミュレーションで確かめ、各受信点の合成により受信信号が検出される。斜めから受信した場合、信号が打ち消しあうので受信強度が低下する。斜めからの超音波は受信面が大きいと受信信号強度が低下し、さらに受信信号の波長が長くなり、周波数が低下した。

**キーワード** 超音波、探触子、指向性、エッジ波、時間差

## Directionality of ultrasonic probe at transmitting and receiving

Yuusuke Tanaka Yukio Ogura

Japan Probe Co., Ltd., 1-1-14 Nakamura-chou, Minami-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 232-0033, Japan

E-mail: {yuusuke.tanaka, ogura}@jp-probe.com

**Abstract** The directivity of the ultrasonic probe was explained by diffusion caused by the generation of edge waves during transmission and propagation time difference on the receiving surface during reception. Diffusion of edge waves becomes large in long range sound field, so high directivity of large probe is high directivity. The amount of edge waves generated depends on the medium, and hardly occurs in air. Furthermore, in the air, the edge wave hardly diffuses due to attenuation. Therefore, ultrasonic waves go straight in practical use. Directivity at reception is confirmed by simulation, and the reception signal is detected by combination of reception points. In the case of receiving from an oblique direction, since the signals cancel each other, the reception intensity is lowered. Ultrasonic waves from an oblique angle decrease the received signal intensity when the receiving surface is large, the wavelength of the received signal becomes longer, and the frequency drops.

**Keywords** Ultrasonic, Probe, Directivity, Edge wave, Time difference

### 1. はじめに

超音波の指向性は直進性を表現するためのもので、志向性が高いほど超音波は広がらずに直進する。一般に周波数が高く、振動子が大きな探触子は指向性が高いとされており、指向性はベッセル関数で計算されている[1]。また、相反定理から送信と受信の指向性は同じとされているが[2][3]、送信と受信はそれぞれ別の現象であることを報告した[4][5]。ベッセル関数などの指向性は連続波であることなどが前提になっており、計測でよく用いるパルス波では指向性を求めることができない。パルス波での現象は速度ポテンシャルから計算されているが、音圧が無限大になってしまう問題がある[6]。指向性についてもパルス波での指向性が計算されているが[7]、媒質の違いや減衰への考慮はされていない。これまでに超音波の伝搬現象について報告し[8]、直接波とエッジ波、パルス波と連続波の伝搬に伴

う現象について説明した。今回、探触子の送信、受信指向性の違い、送信指向性におけるエッジ波の振幅が媒質により異なること、エッジ波の発生量は振動子の大きさに依らないことを述べる。

### 2. 超音波の指向性

超音波探触子の指向性は以下のベッセル関数で計算される指向係数  $D_c$  により求められる。

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

$J_1$ : 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  $\varphi$ : 中心軸からの角度

指向係数が0になる一番小さな角度を第一零輻射角、または指向角と呼ぶ。また、指向係数が

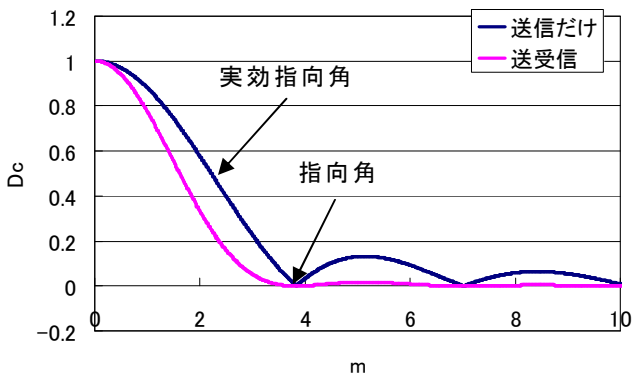


図1 ベッセル関数による指向性

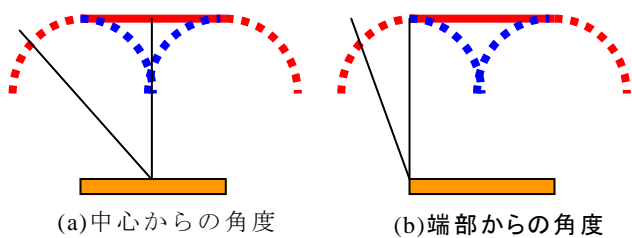


図3 角度の考え方

0.5 になる角度は実効指向角と呼ぶ。送信と受信が同じと仮定すると送受信の指向性は指向係数を二乗して計算される。ベッセル関数による指向性は図1のように表わされる。この計算には前提条件があり、以下の4条件が必要になる。

- 条件1：波数無限の連続波
- 条件2：遠距離音場
- 条件3：直接波とエッジ波の音圧は一定
- 条件4：送信と受信は同じ特性

計測では連続波ではなくパルス波を用いることも多いので条件により指向性はベッセル関数の計算とは別に考える必要がある。また、探触子から送信される超音波は図2のように振動面と同じ形状の直接波と直接波端部から発生するエッジ波があり、外側と内側はそれぞれ位相が異なる。また、遠距離音場については指向性の角度が探触子中心軸上からの角度で考えられているが、図3のように実際はエッジ波が直接波端部から発生するので近距離では角度が異なるためである。十分遠距離では振動子端部からの角度と中心からの角度に差は無くなる。直接波とエッジ波の音圧については速度ポテンシャルの時間微分により計算され、音圧  $p$  は以下の式で表される。

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

図4は円形振動子の中心軸上にある観測点の速度ポテ

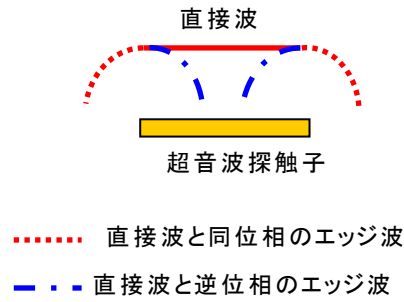


図2 直接波とエッジ波

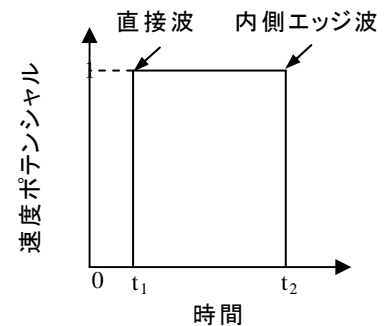


図4 中心軸上速度ポテンシャル

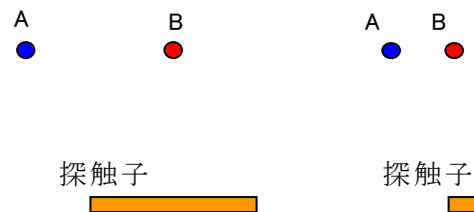


図5 探触子前方の振幅計測

ンシャルであるが、伝搬時間  $t_1$  で速度ポテンシャルが1になり、伝搬時間  $t_2$  で0になる。 $t_1$ が直接波の伝搬時間、 $t_2$ がエッジ波の伝搬時間である。時間微分すると直接波が正の無限大、エッジ波が負の無限大となる。通常最大値を1に正規化するが、直接波とエッジ波の音圧が同じとされる。後述するが、エッジ波の発生量は媒質により異なるため一定ではない。

従って、現状の指向性計算はパルス波の現象、近距離の超音波、エッジ波の音圧、受信時の現象は考慮されていない。実際に探触子の設計や計測結果の分析を行うときはこれらのことを考慮して考える必要がある。

### 3. 送信指向性

#### 3.1 エッジ波による超音波の拡散

送信時の指向性はエッジ波の拡散により決まる。エッジ波の発生については媒質が押される、引っ張られる際に発生する現象[9]や粒子速度の勾配から発生する説明がある[10]。まずエッジ波の拡散量が探触子幅に影響されるかをシミュレーションで確かめた。水中

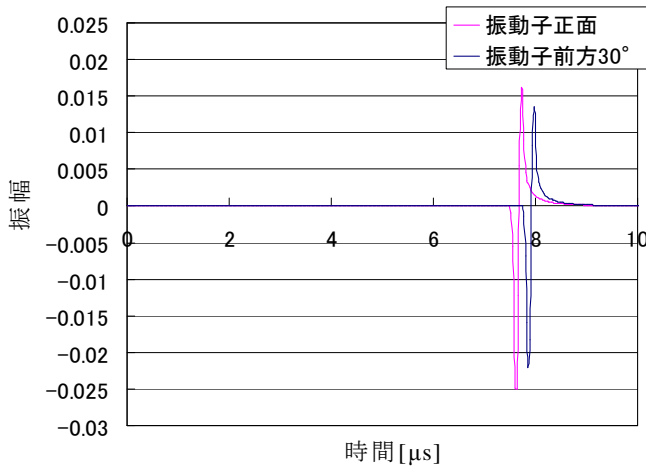


図 6 振動子 10[mm]、前方 10[mm]における正面と 30 度前方の受信波形

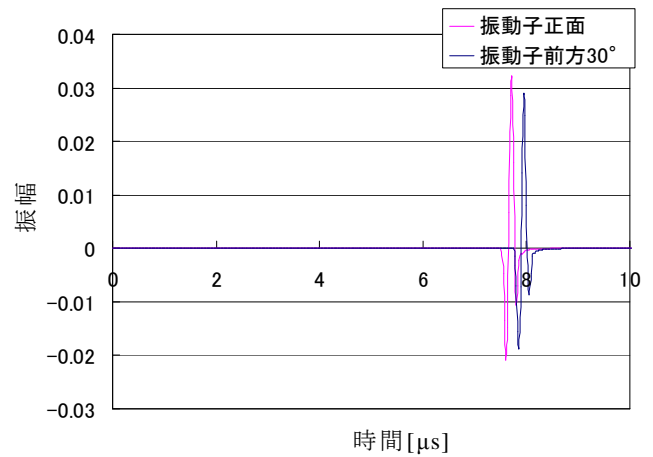


図 7 振動子幅 0.2[mm]、前方 10[mm]における正面と 30 度前方の受信波形

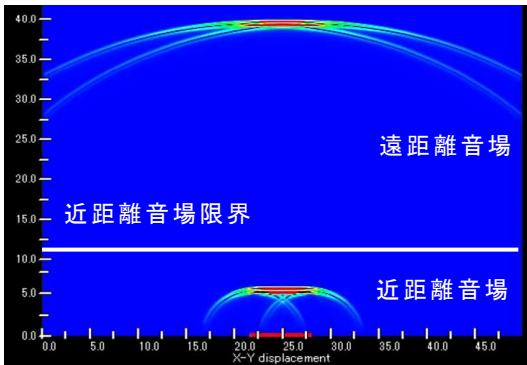


図 8 遠距離音場と近距離音場の波形

5[MHz]で探触子幅 10[mm]と 0.2[mm]の探触子の前方 10[mm]の位置における振幅を調べた。図 5 のように端部から 30 度前方の位置(点 A)の振幅と探触子中心軸上(点 B)の振幅をそれぞれ調べた。シミュレーション結果は図 6、図 7 に示す。探触子幅 10[mm]では探触子中心で振幅 0.041、30 度前方で 0.036 だった。探触子幅 0.2[mm]では探触子中心で振幅 0.053、30 度前方で 0.049 だった。探触子中心と前方 30 度の振幅比は探触子幅 10[mm]で 88%、探触子幅 0.2[mm]で 92%だった。従ってシミュレーションにおいてはエッジ波の広がり方に探触子幅の影響は無い。また、媒質の影響も無いため広がり方は一定である。

次に近距離音場と遠距離音場での超音波の挙動をシミュレーションで調べた。近距離と遠距離の超音波伝搬を図 8 に示す。水中で探触子幅 6[mm]、2[MHz]、近距離音場限界は 12[mm]である。近距離では直接波とエッジ波が重ならず平面状の波が残っているが、遠距離では直接波とエッジ波が重なって球面上の波で広がりながら伝搬する。直接波とエッジ波の伝搬について図 9 のように考えると、探触子中心軸上では直接波の伝搬距離を X、エッジ波の伝搬距離を E とする。互いに位相が逆なので E-X が反波長のときに探触子中心

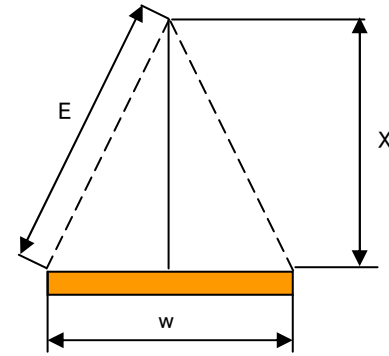


図 9 直接波とエッジ波の重なる距離

軸上で重なり、振幅が強くなる。この位置は式(3)

$$x_0 = \frac{1}{4} \left( \frac{D^2}{\lambda} - \lambda \right) \quad (3)$$

$x_0$ : 直接波とエッジ波が重なる位置

$D$ : 振動子直径  $\lambda$ : 波長

で表され、近距離音場限界で直接波とエッジ波が重なって振幅が大きくなる。近距離と遠距離では図 10 のように直接波とエッジ波のどちらが支配的かが変わる。近距離では直接波が支配的でエッジ波の広がりはあるが、あまり超音波は拡散しない。対して遠距離ではエッジ波が支配的になり伝搬と共に超音波が拡散し、音圧が低下する。送信時に探触子が大きく高周波ほど指向性が高くなるのは送信時で考えると近距離音場限界が遠くなるからである。

### 3.2 媒質によるエッジ波発生量の違い

次に空中と水中でエッジ波の大きさを比較する。前述の通り、探触子中心軸上では近距離音場限界付近で直接波とエッジ波が重なって振幅が大きくなるが、空中と水中では振幅が大きくなる割合が異なる。空中では直径 20[mm]、周波数 250[kHz]の探触子、水中では

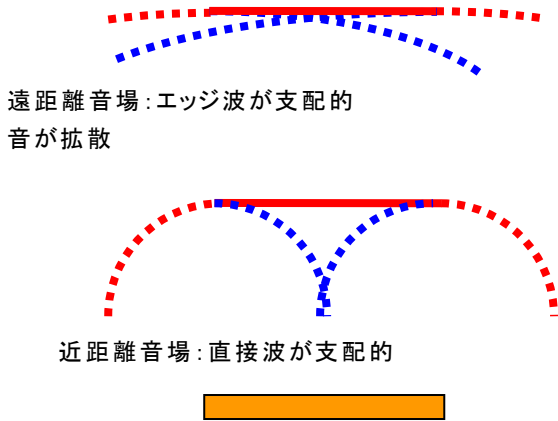


図 10 近距離と遠距離の超音波

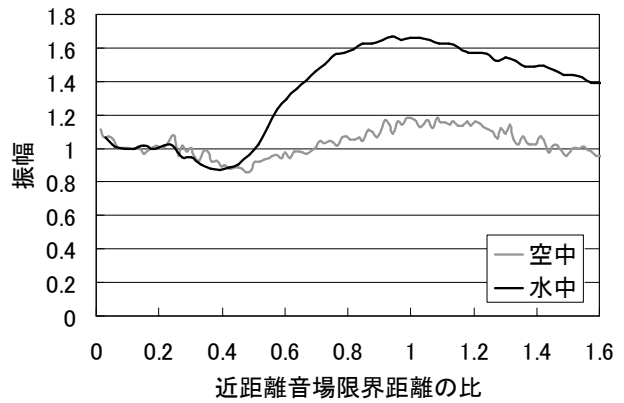


図 11 探触子中心軸上での水中と空中の振幅

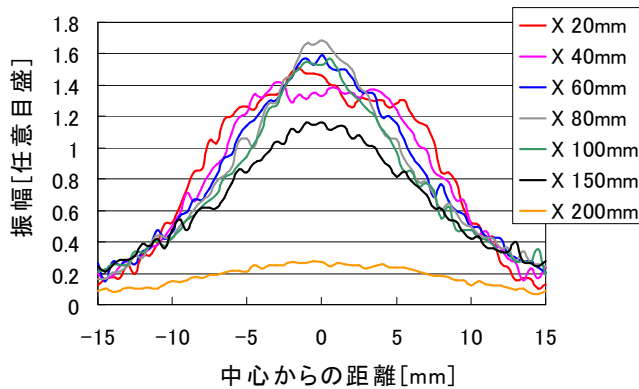


図 12 直径 20[mm]空中超音波探触子の広がり

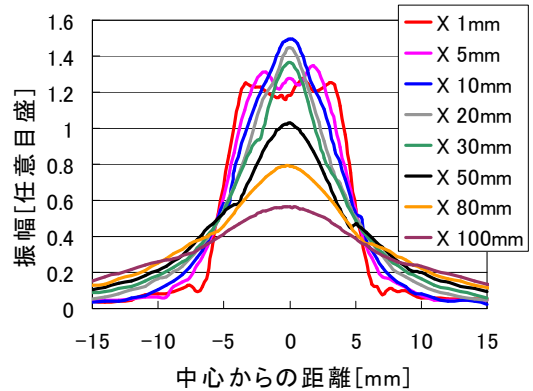


図 13 直径 10[mm]水浸超音波探触子の広がり

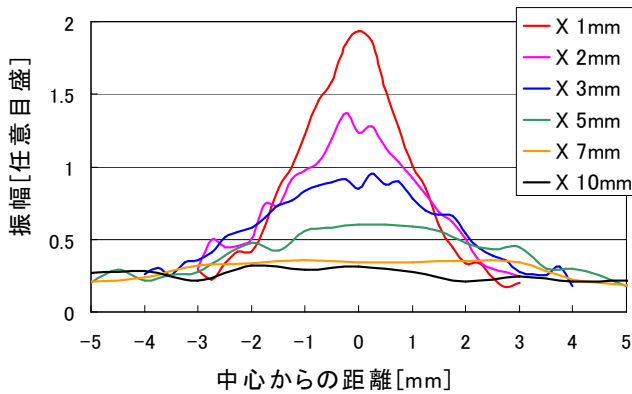


図 14 直径 1[mm]相当空中超音波探触子の広がり

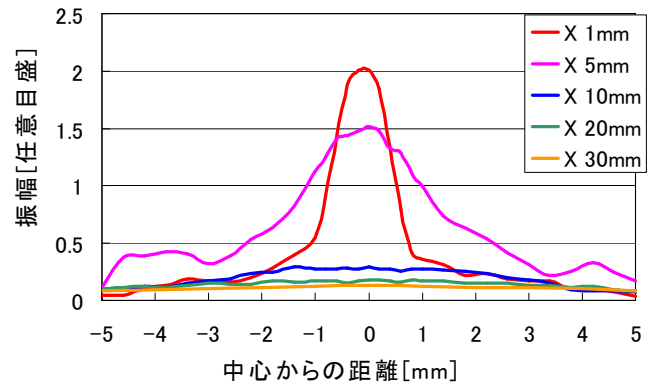


図 15 直径 1[mm]相当水浸超音波探触子の広がり

直径 10[mm]、周波数 2[MHz]の探触子を用いた。受信は直径 0.5[mm]の PMN-Pt 単結晶の hidroホンを用いた。図 11 に探触子中心軸上での計測結果を示す。横軸は近距離音場限界を 1 として距離を正規化し、縦軸は近距離音場の音圧を 1 として正規化した。近距離音場限界での音圧増加は空中では 18%、水中では 60%の音圧増加が発生した。従って、エッジ波の発生量は空中では水中より少ないことがわかる。

### 3.3 水中と空中での超音波の広がり

空中と水中での超音波の広がりを調べるために距離 X での超音波の音圧を計測した。送信、受信に用いた探触子は前節と同様である。空中では X を 20 から

200[mm]まで変化させて計測し、水中では X を 1 から 100[mm]まで変化させて計測した。それぞれの計測結果を図 12 と図 13 に示す。図 12 の空中超音波では距離 100[mm]までほとんど波形に変化がなく、距離 150[mm]からは振幅が 20%低下した。距離 200[mm]では広がっているように見えるが、振幅が 80%低下し S/N がノイズと同程度になった。空中では超音波が広がったところでは信号が弱くなり計測には使えない。そのため実用上直進すると考えてよい。一方、図 13 の水中では中心軸から 15[mm]離れた位置での振幅が一番大きいのは距離 100[mm]での計測であり、超音波が拡散していることが分かる。

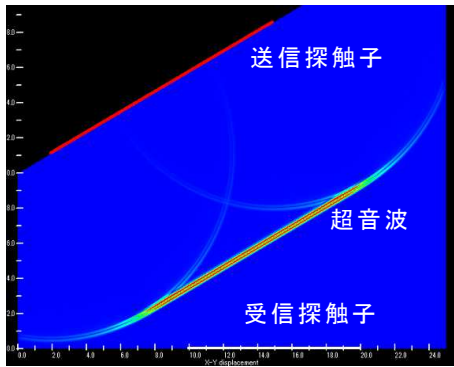


図 16 斜めから受信する場合

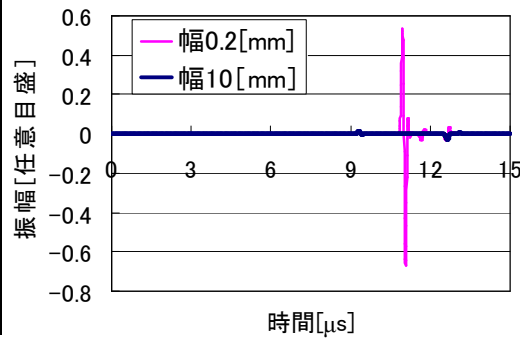


図 17 探触子幅受信信号振幅

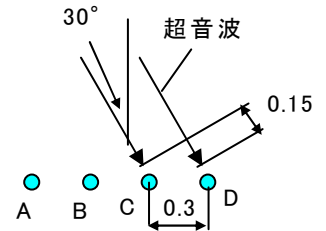


図 18 斜めから入射するときの波形出力

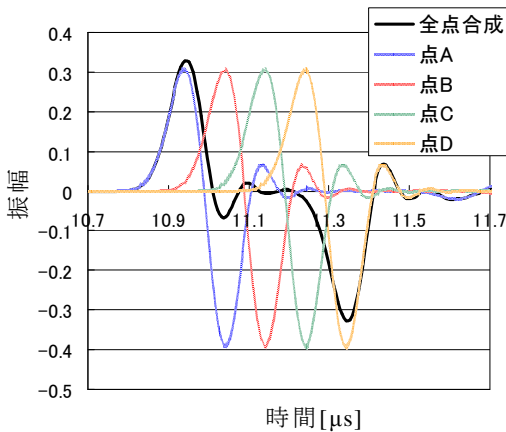


図 19 各波形出力点の波形と合成波形

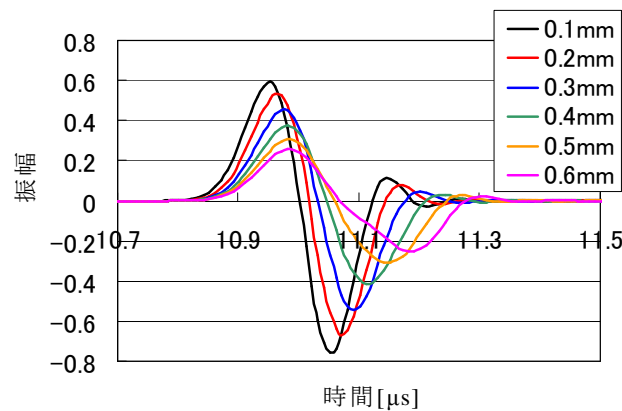


図 20 各振動子幅と受信波形

次に中央に直径 1[mm]の穴を開けた蓋をそれぞれの探触子に取り付け、直径 1[mm]の探触子を模擬した。この状態で X を変えながら計測した結果を図 14、図 15 に示す。空中では距離 5[mm]で減衰しほとんど広がらなかった。図 15 の水中では距離 10[mm]以上では減衰して使えないが、距離 5[mm]では空中より広がった。

これらの結果からエッジ波が弱い空中ではほとんど超音波が広がらず、計測には実用上直進する領域でしか使用できないことが分かる。今後さらに感度が良く S/N が高い受信センサが開発できれば空中でも広がった領域で超音波が利用できる。

## 4. 受信指向性

### 4.1 伝搬時間差による信号の重なり

送信時の指向性はエッジ波の広がりであるが、受信時は別の現象である。例えば図 16 のように水中で平面波が 30 度傾いて受信探触子に入射する状況を考える。周波数 5[MHz]、水中音速 1500[m/s]で受信探触子幅 10[mm]と 0.2[mm]での受信信号の振幅をシミュレータ(イーコンピュート、SWAN21)で調べた。図 17 にそれぞれの受信波形を示す。探触子幅 10[mm]は振幅が 0.043、探触子幅 0.2[mm]は 1.2 で 28 倍も差があった。図 6、図 7 で同様の条件で送信時の広がりを調べたが、差はほとんどなかった。従って、探触子の指向性は受信のほうが大きく影響すると考えられる。この受信波

形について図 18 のように 4 つの波形出力点に平面波が 30 度傾いて入射したときを考える。各出力点は距離が 0.3[mm]間隔で配置してあり、各点の受信伝搬距離差は 0.15[mm]で水中 5[MHz]の波長 0.3[mm]の半分である。各点の波形と合成波形を図 19 に示す。各点は伝搬距離差が半波長であるので最初と最後の信号以外が打ち消し合って振幅が低下した。受信探触子はこの出力点が無数にあると考えられるので大きな探触子に傾いて入射した場合、信号を打ち消しあう。

### 4.2 探触子幅と受信信号強度

次に探触子幅を 0.1 から 0.6[mm]まで変えた場合の受信波形をシミュレーションで調べた。図 20 に受信波形を示す。振幅が大きいのは幅 0.1[mm]で幅が大きいくほど振幅が低下した。さらに幅を大きくした場合の結果を図 21 に示す。幅 0.6[mm]を超えると波形に振幅が 0 になる部分が発生した。幅 0.6[mm]は超音波の最大伝搬距離差(振動子の右端部から左段部)が 0.3[mm]となり波長に相当する。ここを超えると振幅が 0 になる部分が発生するので、この位置を受信指向角  $\theta_R$  の目安とすると以下の式(4)

$$\theta_R = \arcsin \frac{\lambda}{w} \quad (4) \quad \begin{array}{l} \lambda : \text{波長} \\ w : \text{探触子幅} \end{array}$$

となる。斜めからの信号を受信するためには最大伝搬距離差をなるべく小さくすることが重要となり、これ



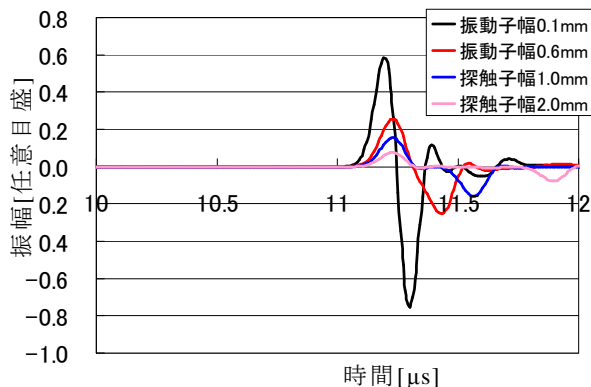


図 21 0.6[mm]以上の振動子幅と受信波形

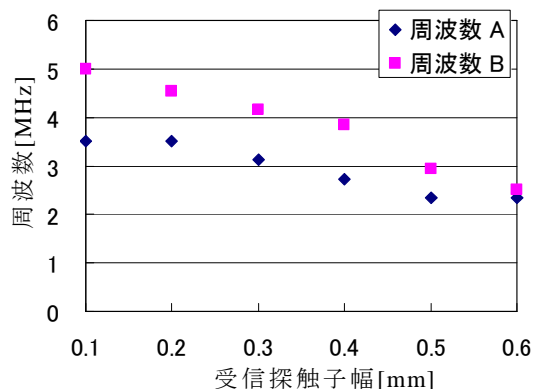


図 22 振動子幅と周波数の変化

が受信指向性となる。しかし、探触子を小さくしすぎると受信信号がノイズに埋もれてしまうため使用する機器との兼ね合いも重要となる。この現象は受信探触子が大きいと様々な信号が合成されて振幅が変動するということである。

### 4.3 探触子幅と信号周波数

次に図 20 の受信波形を見ると探触子幅が大きくなると波長が長くなったことがわかる。周波数が変化していることであるが、周波数は FFT による周波数 A と周期の逆数である周波数 B での評価がある。今回は入射する超音波の伝搬距離差、波長の評価になるので周波数 B で評価することが適切である[11]。探触子幅と受信信号の周波数 A、B の関係は図 22 のようになる。斜めから超音波が受信すると周波数 A、B 共に低下していることが分かる。また探触子幅を変えたが、要は受信探触子における最大伝搬距離差で波長が決まるので、超音波の入射角度で周波数が決まる。例えば、探触子の斜め前方に欠陥がある場合は受信信号の周波数が変化するので、周波数から欠陥の方向を判定することが可能となる。

## 5. まとめ

超音波探触子の指向性について送信と受信で分けて考え、送信時はエッジ波の広がり、受信時は伝搬時間差から指向性が決定する。エッジ波は媒質により発生量が異なり、空中ではエッジ波がほとんど発生しない。また、減衰も大きく空中では直進する領域でしか超音波が実用上使用できない。受信時は斜めから超音波が入射したとき、探触子幅が小さいほど振幅が大きくなった。また、斜めから入射した超音波は探触子幅により受信信号の周波数が変化した。

## 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]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)

ジャパンプローブ HP

[http://www.jp-probe.com/news/up\\_img/1537315821-839196\\_f1.pdf](http://www.jp-probe.com/news/up_img/1537315821-839196_f1.pdf) 2018 年 12 月 14 日確認

[5]田中雄介、小倉幸夫；超音波探触子の送信時と受信時の指向性；アコースティックイメージング研究会資料 AI-2018-24(2018)

ジャパンプローブ HP

[http://www.jp-probe.com/news/up\\_img/1539911617-126848\\_f1.pdf](http://www.jp-probe.com/news/up_img/1539911617-126848_f1.pdf) 2018 年 12 月 14 日確認

[6]超音波便覧編集委員会編；超音波便覧；丸善；pp.31-33(1999)

[7]T. Otani; Physical Principles and Theoretical Concepts of Transient Acoustic Field, Japanese Journal of Applied Physics; Vol.39; pp. 2888-2897(2000)

[8]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)

ジャパンプローブ HP

[http://www.jp-probe.com/technology/up\\_img/1540432454-182171\\_f1.pdf](http://www.jp-probe.com/technology/up_img/1540432454-182171_f1.pdf) 2018 年 12 月 14 日確認

[9]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)

[10]Yasuhiro Kawai, Masahiro Toyoda; Development of edge-effect suppression barriers; Acoustical Science and Technology; vol. 35 No. 1; pp.28-34(2014)

[11]田中雄介、阿部晃、北田純一、小倉幸夫；集束超音波探触子の焦点評価法；第 25 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集；pp.57-62(2018)