

超音波探触子の送信時、受信時の指向性*

◎田中雄介, △小倉幸夫 (ジャパンプローブ)

1 はじめに

超音波探触子から超音波を送信したときに超音波が広がるが、広がり具合を指向性と定義されている。超音波の指向性は超音波探触子の直径や送信周波数で定義されているが[1]、物理的な現象として説明されていない。また、送信や受信時の指向性は計算により表わされている。このとき送信時と受信時の指向性は同じと考えられているが[2]、実際は送信と受信では異なる現象であり指向性の考え方自体が異なる。また、上記の理論は連続波の場合を前提としており、パルス波の場合は異なる。パルス波の音場については説明されているが[3]、音圧については速度ポテンシャルから計算しているため音圧が無限大となってしまうエッジ波等の音圧について正しく計算されない。超音波探触子から送信される超音波については直接波と直接波端部から発生するエッジ波があり、それらが重なることで音圧の変化が発生することを報告してきた[4]。今回、送信時と受信時のそれぞれの指向性について超音波伝搬から説明し、送信時はエッジ波の広がり、受信時は斜めに超音波が入射する時の伝搬距離差と受信信号の合成として指向性を説明した。

2 超音波探触子の指向性の定義

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 : $ka \sin \phi$ k : $2\pi/\lambda$

a : 探触子半径

ϕ : 中心軸からの角度

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_c を2乗する。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。上記の式は波数無限の連続波、遠距離音場、後述するエッジ波の音圧(振幅)を考慮しないなどの前提条件がある。また、指向性自体が探触子中心から考えているため、後述するエッジ波の広がりとは合わず、実際の指向性が異なる問題がある。

探触子から発生する超音波は図1のように振動面と同形状の直接波と直接波端部から発生するエッジ波がある。エッジ波は直接波の外側に直接波と同位相のエッジ波、直接波の内側に直接波と逆位相のエッジ波が発生する。図1(b)は白が正の振幅、黒が負の振幅を示している。直接波と内側エッジ波の伝搬距離差が半波長のときそれぞれの波が合成されて振幅が大きくなる。探触子中心軸上で以下の式

$$X = \frac{1}{4} \left(\frac{D^2}{\lambda} - \lambda \right) \quad (2) \quad \begin{array}{l} D: \text{探触子直径} \\ \lambda: \text{波長} \end{array}$$

の位置 X で振幅が大きくなり、ほぼ近距離音場限界 X_0 の位置である。 X_0 以下の近距離音場では直接波が支配的であるのであまり広がらないが、 X_0 を超えた遠距離音場ではエッジ波が支配的になるので超音波が広がっていく。エッジ波は広がるほど振幅が低下する。今回は波数1のパルス波の場合で考えるが、これは送信時の指向性であり、受信時の指向性は後述する。

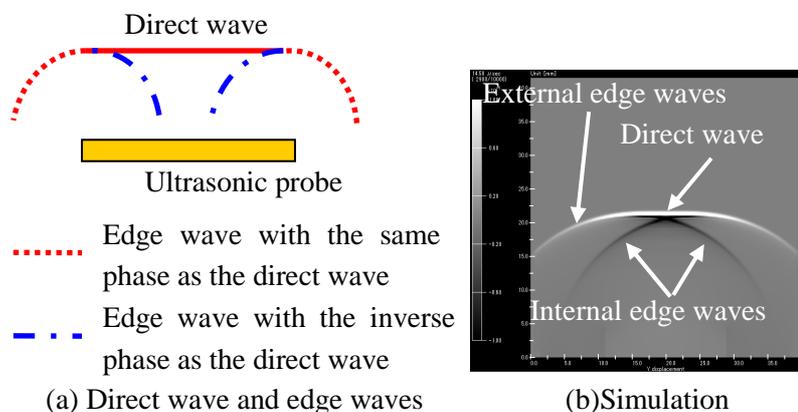


Fig. 1 Ultrasonic emitted from a probe.

* Directivity at the transmitting and receiving of ultrasonic probe, by TANAKA, Yuusuke and OGURA, Yukio (Japan Probe Co., Ltd.).

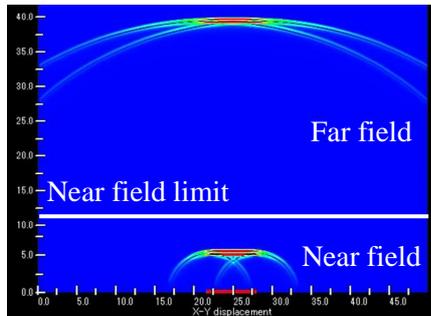


Fig. 2 Ultrasonic waves in near field and far field.

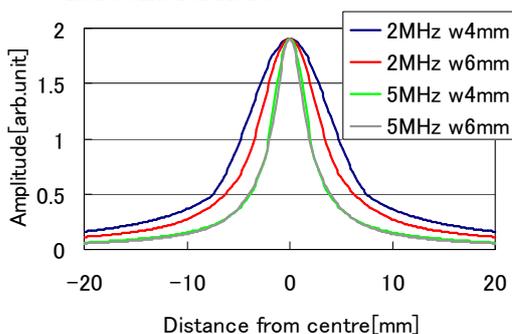


Fig. 3 Simulation results for directivity in far field.

3 送信時の指向性

3.1 近距離と遠距離における指向性

送信、受信の指向性で探触子直径が大きい、周波数が高い場合に指向性が高くなり超音波が広がらないことが知られている。まずは送信時に探触子直径や周波数が指向性にどのように影響するかを述べる。シミュレータ(イーコンピュート株式会社、SWAN21)で音場を調べ、指向性を計算した。2次元のシミュレーションで探触子幅を4[mm]と6[mm]、周波数を2[MHz]と5[MHz]の条件で計算した。それぞれの条件での近距離音場限界を表1に示す。送信は波数1の負のパルス波とした。

図2に探触子幅6[mm]、周波数2[MHz]のときの近距離音場と遠距離音場における超音波伝搬図を示す。白い線の位置が近距離音場限界である。図2の近距離音場に超音波があるときは探触子前面の超音波は直接波部分が平面に近い形であるが、図2の遠距離音場に超音波があるときは直接波とエッジ波が重なって探触子前面の超音波が球面状となった。

ここで遠距離音場における指向性のシミュレーション結果を図3に示す。周波数2[MHz]と5[MHz]、探触子幅wが4[mm]と6[mm]のときに遠距離音場となる距離40[mm]の位置で振幅を求めた。振幅は探触子中心軸上で同じ値に補正した。探触子中心軸上から離れるにつれて振幅が低下するが、周波数が高く探

Table 1 Near field limit at each condition.

Near field limit in water[mm]	Frequency [MHz]		
	2	5	
Width [mm]	4	5.3	13.3
	6	12.0	30.0

Table 2 Directivity from centre of probe at each condition.

Directivity from centre of probe [deg]		Frequency [MHz]	
		2	5
Width [mm]	4	Near 31.0	12.7
		Far 6.8	2.9
	6	Near 19.3	8.0
		Far 5.1	2.9

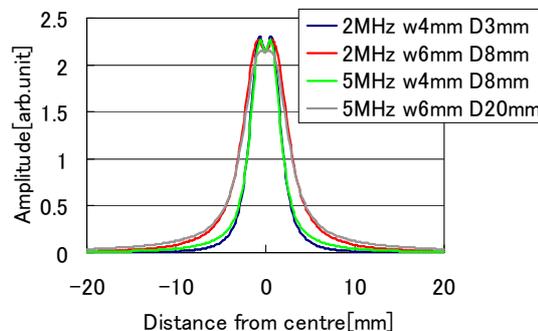


Fig. 4 Simulation results for directivity in near field.

触子幅が大きいと指向性が高くなる。5[MHz]のときは探触子幅によらず指向性ほとんど変化しないが、探触子中心軸上は直接波とエッジ波の重なりにより、振幅が変化するので一定ではない。

次に近距離音場における指向性シミュレーション結果を図4に示す。探触子中心軸上で振幅を合わせた。各条件の近距離Dは図4に記載した。探触子中心軸上で振幅を補正したが、直接波である平面波の左右でエッジ波と重なって振幅が大きくなった。近距離と遠距離の指向角を表2に示す。エッジ波は探触子端部からの広がりを計測するが、実効指向角の考え方は探触子中心からの角度である。実効指向角では探触子が大きく、近距離の観測ほど指向角が大きくなる。実際に評価できる指向角の指標を考える必要があるが、まずエッジ波がどの程度発生するかを調べた。

3.2 媒質によるエッジ波の違い

エッジ波は水では少し発生するが、空気中ではほとんど発生しない。例えば実際に計測すると水中では近距離音場で図5のように30波(連続波)では探触子中心軸上の振幅が変動し、近距離音場限界付近で30波、1波共に直接波とエッジ波が重なって振幅が大きくなる。水中での探触子は直径10[mm]、5[MHz]で近距離音場限界は83[mm]である。対して空中では図6のように連続波でも探触子中心軸上に

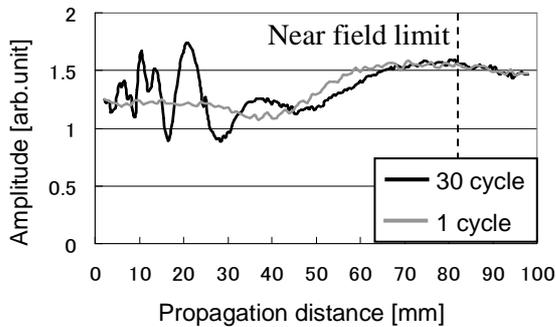


Fig. 5 Amplitude at centre axis of the probe in water.

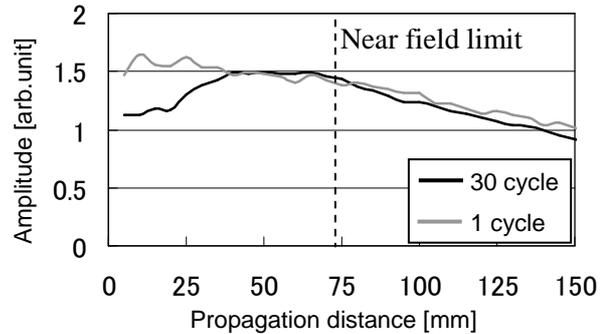


Fig. 6 Amplitude at centre axis of the probe in air.

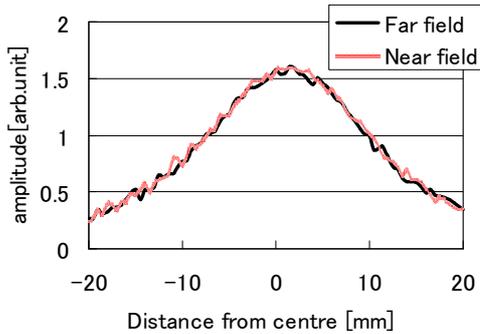


Fig. 7 Air probe directivity in far and near field.

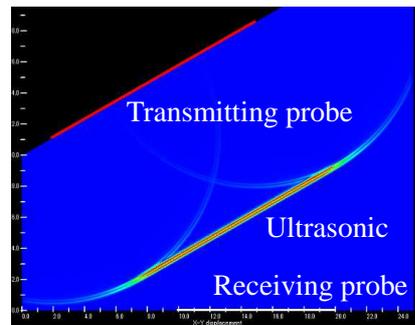
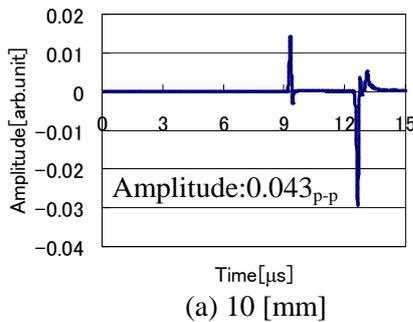
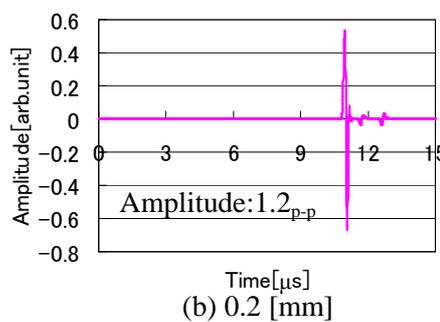


Fig. 8 Ultrasonic with an incident angle of 30 degree.



(a) 10 [mm]



(b) 0.2 [mm]

Fig. 9 Receiving waveform at probe width 10 and 0.2 [mm].

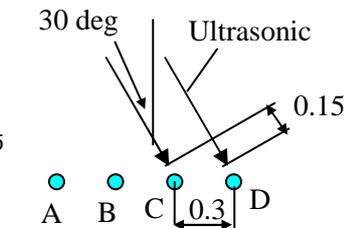


Fig. 10 Each waveform output point and propagation distance difference.

おける近距離音場での振幅変動はなく、近距離音場限界で振幅が大きくなることもない。空中での探触子は直径 20[mm]、250[kHz]で近距離音場限界は 73[mm]である。これらは先端半径 2[mm]の半球形 hidroホンで計測しているため、近距離では連続波の多重反射で振幅が変化することがあるが、エッジ波の重なりのように一定距離ごとの振幅変動はない。また、図 7 は距離 150[mm](遠距離音場)と 30[mm](近距離音場)での指向性であるが、エッジ波がほとんど発生しないので超音波は空中では直進し、近距離と遠距離で指向性がほぼ同じである。これらの結果より、エッジ波の発生が媒質により異なるので、媒質が送信指向性にどのように影響するか調べる必要があるが、今後の課題とする。

4 受信時の指向性と周波数変化

送信時はエッジ波の広がり度で指向性が決まるが、受信時は別の現象である。ここで水中

における周波数 5[MHz]、1 波の平面波が図 8 のように 30° 傾いて探触子に受信する時を考える。シミュレータで計算した受信探触子幅が 10[mm]、0.2[mm]の時の受信波形を図 9 に示す。10[mm]では最初と最後以外信号が無く、振幅も 1.2 から 0.043 と 0.2[mm]の 4%以下となった。ここで探触子の受信波形は受信信号を微小な点の受信波形を合成したものと考える。図 10 のように 0.3[mm]間隔で 4 点の波形出力点を配置し、各点の波形を調べた。入射角度 30 度で各点に入射すると各点の伝搬距離差が 0.15[mm]となり、水中 5[MHz]における波長は 0.3[mm]であるので各点で半波長の伝搬距離差がある。波形出力点は受信順に A、B、C、D とした。図 11 のように合成波形は各波形における位相が逆の信号を打ち消し合う。この波形出力点が無数にあると考えると、最初と最後の信号以外消えるので図 9(a)の幅 10[mm]のような受信波形となる。探

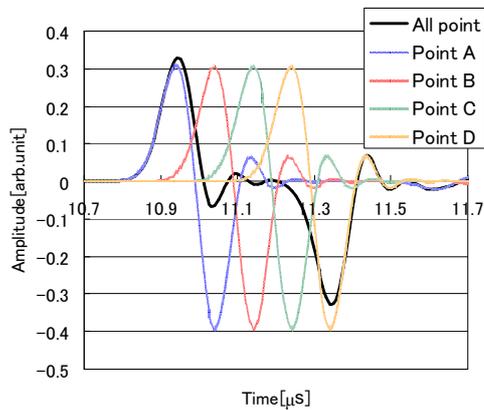


Fig. 11 Synthesised and each point waveform.

触子幅が大きいと途中の受信波形が打ち消され振幅が低下し、さらに大きいとピークが2つに別れるが、これは探触子の一番離れた点での超音波の伝搬距離差が1波長となる点である。このシミュレーションの場合、探触子の両端の点となるが、入射角度が30度であるので探触子幅が2波長の0.6[mm]以上が条件となる。この条件を受信時の指向角と定義すると受信指向角 θ_R は

$$\theta_R = \arcsin \frac{\lambda}{D} \quad (3) \quad \begin{array}{l} \lambda : \text{波長} \\ D : \text{探触子直径} \end{array}$$

となる。また、斜めから超音波が入射した場合、探触子幅が式(3)の条件以下でも信号が合成されて周期が長くなるため計測される信号の波長が長くなり、周波数が低下する。今回の条件で、0.1から0.6[mm]での探触子幅と受信波形を図12、周波数の関係を図13に示す。図12から受信探触子幅が大きくなるとピーク間の周期が長くなり、振幅が低下したことがわかる。また、周波数を求めると図13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[5]。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。この θ_R は目安でありこれ以上の角度でも受信はできる。どの角度まで使えるかは状況により判断する必要がある。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。

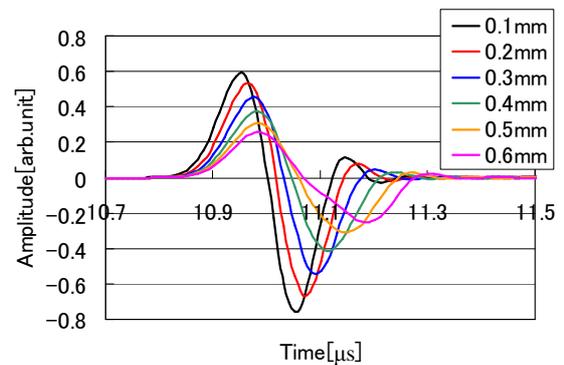


Fig. 12 Waveforms of each probe width.

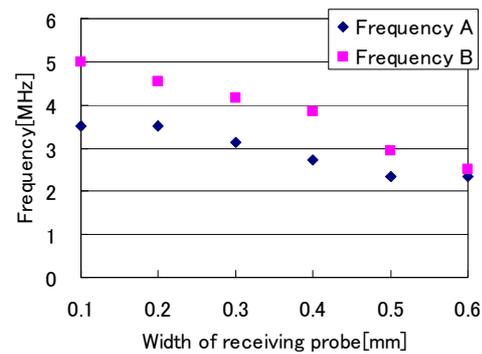


Fig. 13 Receiving probe width and frequency of received waveform.

5 おわりに

超音波探触子の指向性について送信時と受信時で分けて、送信時はエッジ波の広がり、受信時は探触子への受信信号距離差で考えた。エッジ波は媒質により発生量が変化し、空中ではエッジ波がほとんど発生しないので、指向性が高くなる。受信時は斜めから超音波を受信したときの信号の重なりが指向性を決め、波長に対して直径の小さな探触子を用いることで指向性が低下した。

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]超音波便覧編集委員会編；超音波便覧；丸善；pp.31-33(1999)
- [4]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)
- [5]田中雄介、北田純一、小倉幸夫、“集束超音波探触子の焦点位置と評価法、”2017年日本音響学会秋季研究発表会講演論文集 1-2-9、pp.1131-1134(2017)