

超音波探触子の指向性とエッジ波発生量の評価*

◎田中雄介, △吉田光良, △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が送信されるときに超音波が広がりながら伝搬する。この超音波の広がりが指向性で、超音波振動子の大きさや超音波の周波数で定義されている[1]。指向性はベッセル関数により定義されており、波長や振動子で計算される[2]。ベッセル関数は前提条件が連続波、送信と受信は同じ特性、音圧は考慮しない、といったことで実際に使用することが多いパルス波では指向性が異なる。パルス波での探触子の指向性は計算されているが[3]、減衰や後述するエッジ波の音圧について考慮されていない。探触子から送信される超音波は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る[4]。直接波とエッジ波はインパルス応答での速度ポテンシャルから音圧を計算されるが[5]、直接波とエッジ波の両方とも無限大として正規化され、エッジ波の音圧は表現されていない。我々はこれまでに送信時と受信時の指向性の違いについて報告した[6]。今回送信時の指向性に着目し、媒質によりエッジ波の発生量が異なることを調べ、水中と空気中で超音波の広がりが全く異なることを述べる。

2 エッジ波の発生と指向性

超音波探触子から送信される超音波は図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。エッジ波は音圧の急激な変化がある部分から発生し、変化量が大きいほどエッジ波の発生量が多くなる。エッジ波の発生は媒質が押されることに伴い発生する文献[7]や粒子速度の勾配により発生する文献[8]がある。エッジ波の広がりで送信時の指向性が決まるが、指向性はベッセル関数の計算で表現されることが多い。ベッセル関数による指向性は図2のようになり、指向係数 D_c が次の式で計算される。

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

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

φ : 中心軸からの角度

ベッセル関数は前提が以下の4条件である。

条件1: 波数無限の連続波

条件2: 遠距離音場

条件3: 直接波とエッジ波の音圧は一定

条件4: 送信と受信は同じ特性

条件2の遠距離音場が必要とは、指向角の考え方が探触子中心軸上の角度から考えているためである。エッジ波は直接波端部から発生すると述べたが、図3のように近距離では端部からのエッジ波の角度と探触子中央からの角度では広がり方が異なる。十分遠距離ではその差が少なくなるためである。

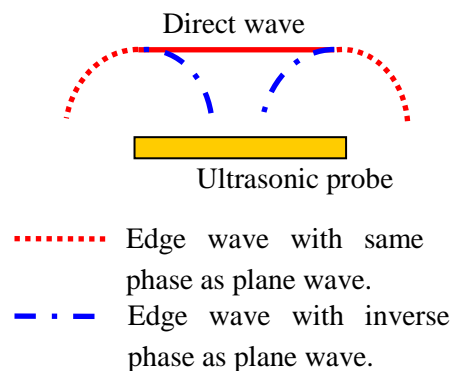


Fig. 1 Direct wave and edge wave transmitted from ultrasonic probe.

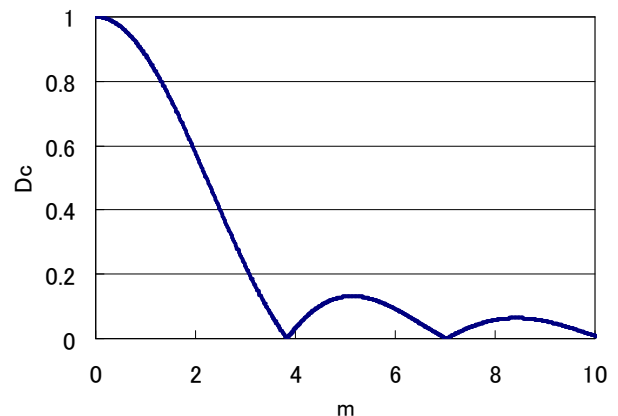


Fig. 2 Directivity by Bessel function.

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

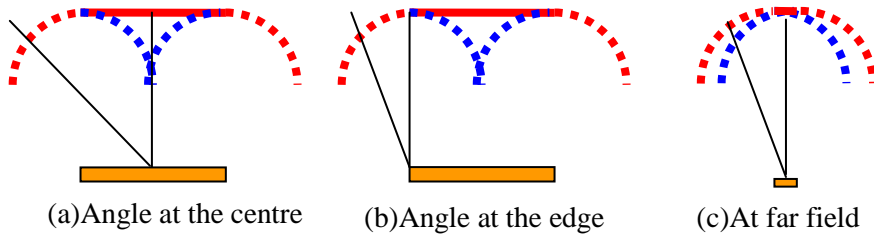


Fig. 3 Angle concept at the centre, the edge and the far field.

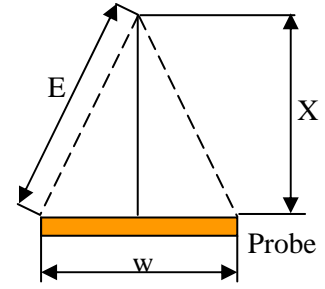


Fig. 4 Propagation of direct wave and internal edge wave.

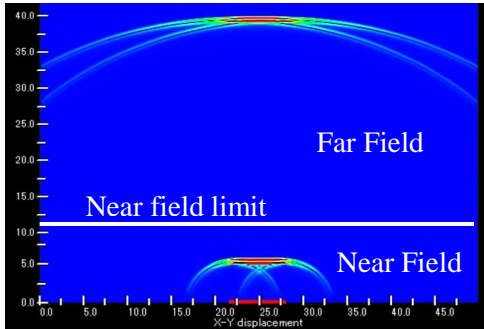


Fig. 5 Ultrasonic propagation in near and far field.

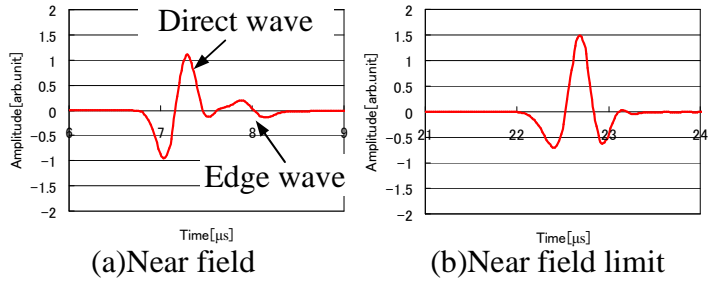


Fig. 6 Direct and edge wave at central axis in near field and near field limit.

探触子からは直接波とエッジ波が発生するが、伝搬と共に直接波とエッジ波の距離差が小さくなりそれぞれの波が重なる。図4のように直接波の伝搬距離を X 、エッジ波の伝搬距離を E とすると探触子中心軸上では $E-X$ が半波長になる位置でそれぞれの波が重なって音圧が大きくなる。この位置は近距離音場限界 X_0 となり、以下の式(2)となる[9]。

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

近距離音場では直接波が支配的でエッジ波による拡散は少ないが、近距離音場限界を過ぎると徐々にエッジ波が支配的になり超音波が拡散する。シミュレータ(イーコンピュート、SWAN21)による近距離音場と遠距離音場の超音波伝搬図を図5に示す。平面探触子から超音波を送信した図であるが、近距離音場では平面状の直接波と端部からのエッジ波となっているが、遠距離音場では直接波とエッジ波が混じり、球面状に広がる波となった。近距離音場限界が遠いほど広がりにくい超音波となるが、式(2)から波長が短く、探触子が大きいほど近距離音場限界が遠い。従って、探触子が大きく、周波数が高いほど送信指向性が高いということである。

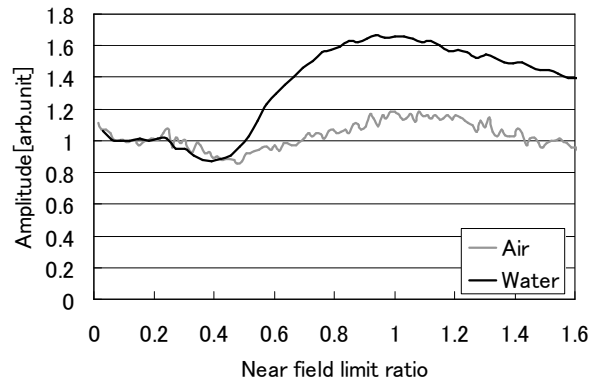


Fig. 7 Acoustic pressure at central axis of probe in air and water.

3 水中と空中のエッジ波発生量

水中と空中でのエッジ波の発生量と超音波の広がりについて述べる。探触子中心軸上では図6のように近距離音場で直接波とエッジ波が別々に別れて、近距離音場限界でそれらが重なって音圧が大きくなる。従って、探触子中心軸上の近距離音場限界における音圧変化量によりエッジ波の発生量が評価できる。水中では周波数 2[MHz]、直径 10[mm]の探触子、空中では周波数 250[kHz]、直径 20[mm]の探触子を用いて探触子中心軸上の音圧を調べた。波長は水中では 0.75[mm]、空中では 1.36[mm]であるので両方とも波長より 10 倍以上大きな探触子である。受信は直径

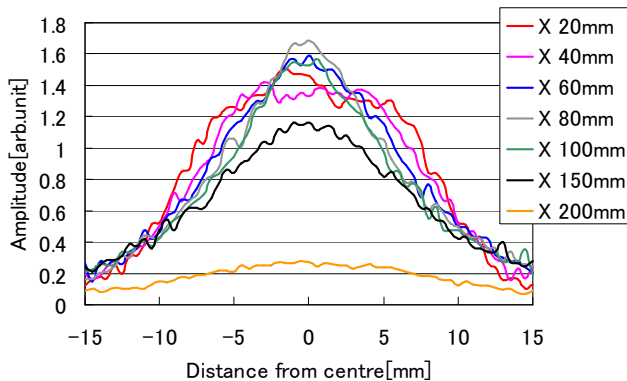


Fig. 8 Acoustic pressure at central axis of $\phi 20$ mm probe in air.

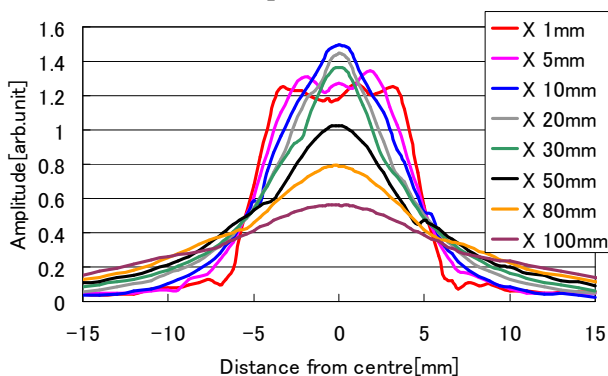


Fig. 10 Acoustic pressure at central axis of $\phi 10$ mm probe in water.

0.5[mm]の PMN-Pt 単結晶ハイドロホンを用いた。パルスレシーバ(ジャパンプローブ、JPR-10C)から-100[V]の負のパルス印加して計測した。近距離音場限界距離と近距離音場での音圧をそれぞれ 1、と正規化して音圧変化を表示すると図7のようになる。近距離音場限界での音圧増加は空中では 18%、水中では 60%となった。従って、空中では水中の 3 割しかエッジ波が発生しないことがわかる。

次に空中での超音波の広がりについての計測結果を述べる。送信探触子、ハイドロホンは前述のものと同様である。ハイドロホンを探触子から距離 X[mm]だけ離して音圧を計測した。まず空中での超音波の計測結果を図8に示す。250[kHz]、直径 20[mm]では近距離音場限界は 73[mm]である。探触子中心軸上から±10[mm]が探触子の端部であるが、それより外側には超音波がほとんど伝搬しなかった。また、音圧は距離 100[mm]まではほとんど変化がないが、距離 150[mm]では音圧が 20%低下し、距離 200[mm]では 80%音圧が低下した。距離 200[mm]では広がっているように見えるが、音圧が小さすぎて S/N が低く実用上使用できない。次に直径 1[mm]の穴を開けた蓋を

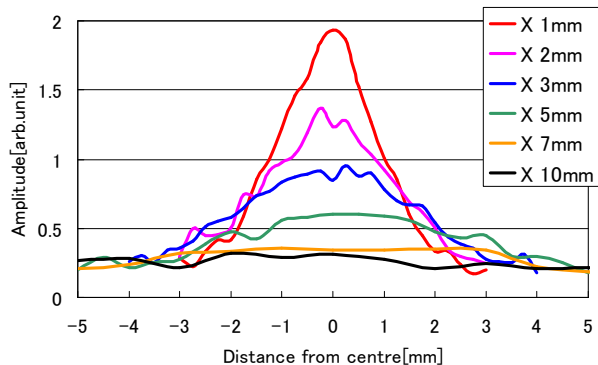


Fig. 9 Acoustic pressure at central axis of $\phi 1$ mm slit probe in air.

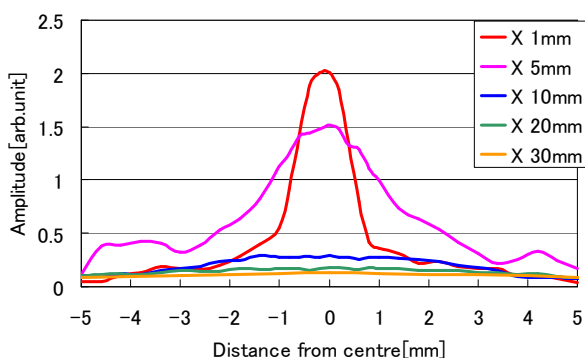


Fig. 11 Acoustic pressure at central axis of $\phi 1$ mm slit probe in water.

探触子に被せて、直径 1[mm]の探触子を模擬した状態での音場観測結果を図 9 に示す。250[kHz]、直径 1[mm]では空中で近距離音場限界が-0.16[mm]となり、すぐに超音波が拡散する。距離 3[mm]までは±1[mm]ほど拡散するが、距離 5[mm]を超えると広がっても減衰しすぎて S/N が低くなり、実用上使えない。

一方、水中での超音波の広がりについては図 10 のようになる。2[MHz]、直径 10[mm]では空中で近距離音場限界が 33[mm]となる。距離 1[mm]や 5[mm]では平面状の波であるが、距離 10 から 30[mm]までは探触子中心軸上の音圧が大きくなった。距離 50[mm]から広がり出し、距離 100[mm]では中心からの距離 15[mm]での音圧が一番大きくなり、超音波が拡散していることがわかる。図 8 の空中での結果では中心からの距離 15[mm]の位置での音圧がほとんど変化がなく、距離 200[mm]で一番音圧が小さくなった。従って、水中では超音波がある程度拡散するが、空中ではほとんど拡散しない結果となった。次に空中と同様に直径 1[mm]の穴を開けた蓋を探触子に被せて、直径 1[mm]の探触子を模擬した状態での音場観測結果を図 11 に示す。近距離音場限界は

0.15[mm]であるためすぐに拡散する。距離10[mm]からは減衰のため音圧が大きく低下してわかりにくい、距離、5[mm]では中心から±1.5[mm]程度まで超音波が広がった。距離10[mm]からの信号でも空中に対して音圧はまだ大きく、S/Nは空中ほど低下しない。実用上は水中では拡散した超音波でも使用可能である。図9の空中での広がりと比較すると空中では広がり方が距離によりほとんど変化しないことに対して、水中では距離5[mm]において中心から±2[mm]の振幅が大きくなり超音波が広がっていることがわかる。水中の減衰係数は0.002[dB/cm・MHz]、空中では10[dB/cm・MHz]と空中の方が減衰が大きいが、図7の結果より近距離音場では両方とも探触子中心軸上での減衰が無い。減衰は材料内の散乱減衰と超音波の拡散による拡散減衰がある。拡散減衰は遠距離音場における拡散であるので、近距離音場では散乱減衰が適用される。しかし、図7の結果では水中、空中ともに散乱減衰は無いため、散乱減衰は個体中の現象であると推定できる。減衰係数についても水中と空中は拡散減衰のことである。固体中では近距離音場でも減衰するため、減衰係数は近距離音場(散乱減衰)と遠距離音場(散乱と拡散減衰)で2種類あると考えられる。これらの結果から、水中ではある程度拡散するが、空中ではほぼ超音波が直進すると実用上考えてもよい。また、送信時の指向性はエッジ波の発生量と減衰により決定すると言える。

4 おわりに

超音波送信時の指向性についてエッジ波の発生量で考え、エッジ波の発生量が多いほど超音波が広がりやすいことを述べた。更に減衰が指向性に影響し、空中では減衰のため実用上直進するとしてよいと述べた。水中ではエッジ波の拡散があり、超音波が広がる。超音波の広がりを利用するフェーズドアレイなどは空中ではエッジ波が弱いので利用が困難である。一方、水中ではエッジ波による拡散があるのでフェーズドアレイは利用でき、実際にソナーや医療分野などで実施されている。今後は個体中のエッジ波の発生量について検討する。

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]T. Otani; Physical Principles and Theoretical Concepts of Transient Acoustic Field, Japanese Journal of Applied Physics; Vol.39; pp. 2888-2897(2000)
- [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)
http://www.jp-probe.com/technology/up_img/1540432454-182171_f1.pdf 2018年12月20日確認
- [5]超音波便覧編集委員会編；超音波便覧；丸善；pp.31-33(1999)
- [6]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 2018年12月20日確認
- [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)
- [9]J.クラウトクレマー、H.クラウトクレマー、「超音波試験技術」 翻訳委員会訳：超音波試験技術 理論と実際、日本能率協会(1980)、p.55
- [10] 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)
ジャパンプローブ HP
http://www.jp-probe.com/news/up_img/1517816308-666163_f4.pdf
2018年12月20日確認