

## 超音波伝搬に伴い発生するエッジ波の媒質による発生量変化\*

◎田中雄介, △吉田光良, △阿部晃, △小倉幸夫 (ジャパンプローブ)

## 1 はじめに

超音波が媒質中を伝搬するとき直接波の端部や物体反射時、透過時などでエッジ波が発生する。エッジ波は音圧の不連続部で発生し、球面状に波が広がる。不連続部の外側と内側で位相が逆になり、内側は逆位相となる。前述の直接波端部などが不連続部であり、超音波伝搬と共に位相が異なる2種のエッジ波が発生する[1]。直接波の外側へエッジ波が広がる時、エッジ波の量が超音波の送信時の指向性となる[2]。指向性についてはベッセル関数により定義されているが[3]、連続波であることや振幅について考慮していない、遠い位置での評価など実際の状況とは異なることが多い。また、指向性や振幅についてパルス波での説明[4]やインパルス応答[5]で説明するものがあるが、振幅が極大値を1または2で極小値を0と正規化されており、実際とは異なる。我々はこれまでに水中と空中のエッジ波の発生量の違い[6]、受信信号の発生原理や受信指向性について報告してきた[7]。今回、水中と空中に加えて固体としてポリスチレンのエッジ波発生量を評価した。また、それぞれの減衰を調べ、近距離と遠距離における減衰の評価や空中で減衰が少ないことを報告する。

## 2 エッジ波の発生と評価

超音波探触子から送信される超音波は図1の平面振動子では振動面と同じ平面形状の直接波と直接波端部からエッジ波が発生する。エッジ波は直接波の外側は直接波と同位相、内側は逆位相であり、直接波と内側エッジ波が重なって振幅が変動する。探触子中心軸上で近距離では直接波と内側エッジ波の伝搬距離差が大きく重ならないが、伝搬と共に直接波と内側エッジ波の伝搬距離差が小さくなりそれぞれが重なって振幅が大きくなる。直接波とエッジ波は逆位相であるので伝搬距離差が半波長になる位置で振幅が最大となり、この位置を近距離音場限界と言う。距離の概念

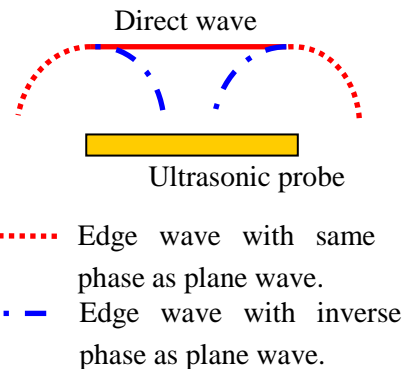


Fig. 1 Direct wave and edge wave transmitted from ultrasonic probe.

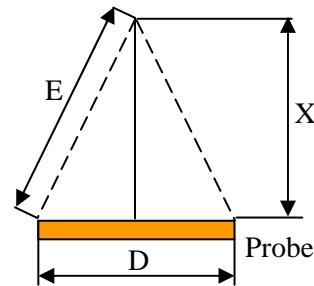


Fig. 2 Propagation of direct wave and internal edge wave.

として図2のようにエッジ波の伝搬距離をE、直接波の伝搬距離をXとするとE-Xが半波長になる位置 $X_0$ は

$$X_0 = \frac{1}{4} \left( \frac{D^2}{\lambda} - \lambda \right) \quad (1) \quad \begin{array}{l} D : \text{探触子直径} \\ \lambda : \text{波長} \end{array}$$

となり、近距離音場限界の式となる[8]。

近距離音場と遠距離音場の直接波とエッジ波の挙動をシミュレータ(イーコンピュート、SWAN21)で計算すると図3の通りである。近距離音場では直接波とエッジ波が別れており、遠距離音場ではそれらが合成されて球面状の波となる。探触子中心軸上では図4のように近距離音場では直接波とエッジ波が分離し、それぞれが逆位相である。近距離音場限界ではそれらが重なって振幅が大きくなる。この

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

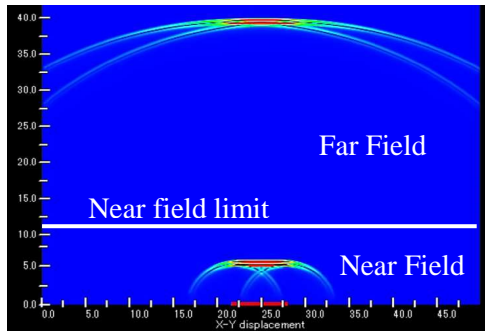


Fig. 3 Ultrasonic propagation in near and far field.

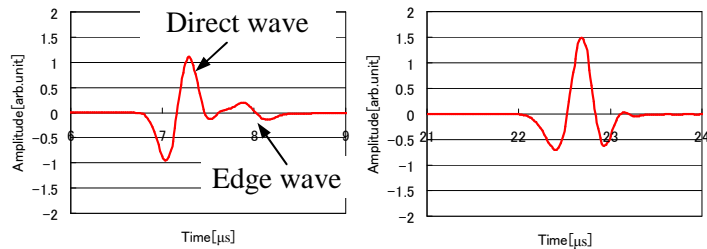


Fig. 4 Direct and edge wave at central axis in near field and near field limit.

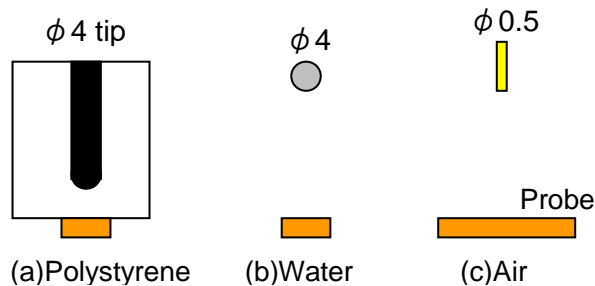


Fig. 5 Received signal observation method of each medium

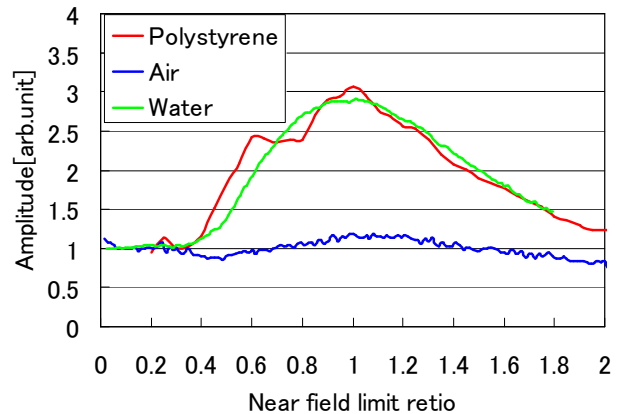


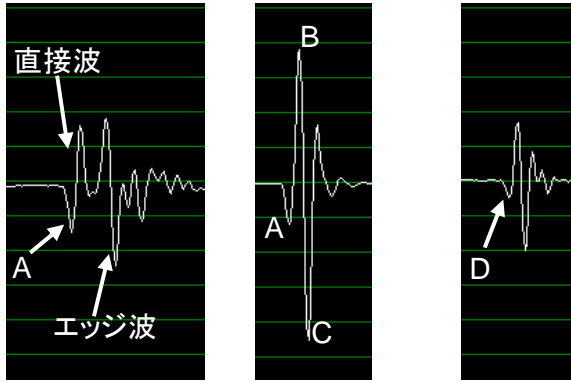
Fig. 6 Amplitude rising at near field limit by edge waves in central axis of each medium

振幅の変化量を評価することで媒質ごとのエッジ波発生量を評価することが可能である。

空中、水中、ポリスチレンでエッジ波の発生量を評価した。空中では 250[kHz]、直径 20[mm]の平面超音波探触子、水では 5[MHz]、直径 10[mm]の平面超音波探触子、ポリスチレンでは 2[MHz]、直径 10[mm]の平面超音波探触子を用いた。波形観測方法は図 5 のように行った。ポリスチレンは深さの異なる直径 4[mm]の球状穴からの反射波形で評価した。水中は直径 4[mm]のステンレス球の反射波形で評価した。空中は探触子中心軸上に直径 0.5[mm]の PMN-Pt 単結晶の hidroホンを配置して受信波形を評価した。それぞれの探触子にパルサレシーバ(ジャパンプローブ、JPR-50P)から負のパルス波を送信した。図 6 にそれぞれの媒質における近距離音場限界の振幅増加を示す。横軸は近距離音場限界を 1、縦軸は近距離音場の振幅を 1 と正規化した。空中では 18%、水中では 190%、ポリスチレンでは 206%の近距離音場限界での振幅上昇が確認された。

### 3 減衰の評価

次にそれぞれの媒質における減衰を評価し、図 6 の振幅上昇を補正してさらに詳細なエッジ波発生量を評価した。減衰は超音波が媒質中を伝搬する時に生じる散乱減衰や吸収減衰などの媒質そのものの減衰(以後媒質の減衰と表記する)と遠距離音場でエッジ波が支配的になって拡散する時の拡散減衰がある。近距離音場限界の振幅上昇を評価するためには媒質の減衰を評価し、補正する必要がある。媒質の減衰を評価するためにエッジ波が混じっていない信号で減衰を調べた。図 7 は水中におけるステンレス球からの反射波形の一例である。近距離では直接波とエッジ波が分離、近距離音場限界ではそれらが重なり、遠距離では減衰している。近距離音場限界以降での信号ピークの意味は A が直接波、B が直接波とエッジ波の混じった信号、C がエッジ波である。遠距離での最初のピーク D は直接波とエッジ波が混じっている。従って、近距離音場における最初のピーク A で評価すると直接波の信号だけで評価が可能で、振幅減少量を



(a) Near field (b) Near field limit (c) Far field  
 Fig. 7 Reflected wave by stainless ball with 4 mm diameter in water

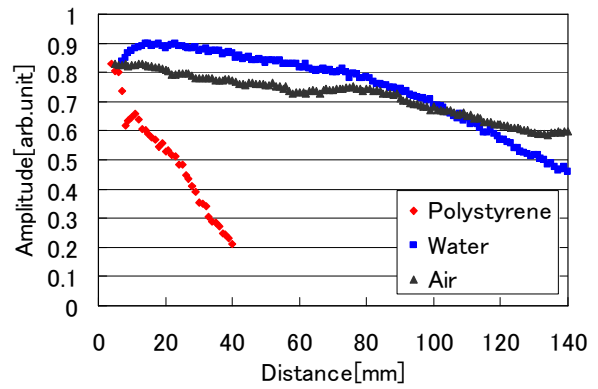


Fig. 8 Relationship of distance and peak A amplitude each medium

Table 1 Relationship of distance and amplitude each medium

Medium	Attenuation coefficient [dB/cm]
Polystyrene	1.23
Water	0.11
Air	0.15

調べることで媒質の減衰を評価できる。

ポリスチレン、水、空気の媒質の減衰を波形の最初のピーク A の振幅から評価した。波形観測は前章と同様に図 5 のポリスチレンは直径 4[mm]の球状穴からの反射波形、水中はステンレス球の反射波形、空中は hidroホン の受信波形で評価した。図 8 にポリスチレン、水中、空中での最初のピーク信号の振幅を示す。近距離音場限界はポリスチレンが 20[mm]、水中は 83[mm]、空中は 73[mm]である。ポリスチレンが水中、空中に比べて急激に減衰した。ポリスチレンと水中の伝搬距離が往復、空中の伝搬距離が片道であることを考慮すると減衰係数は表 1 の通りである。ポリスチレンの評価位置は 4[mm]から 20[mm]で往復伝搬距離は 32[mm]、水の評価位置は 15[mm]から 83[mm]で往復伝搬距離は 136[mm]、空気の評価位置は 13[mm]から 73[mm]で伝搬距離は 60[mm]とした。ポリスチレンは減衰が大きく、水と空気は減衰が小さい結果となった。水の減衰係数を基準とすると空気は水より 0.5%媒質の減衰が大きく、ポリスチレンは水より 13.8%媒質の減衰が大きい。従って、媒質自体の減衰は固体が大きく、水や空気が少ないと考えられる。この減衰係数を補正してポリスチレン、水、空気の

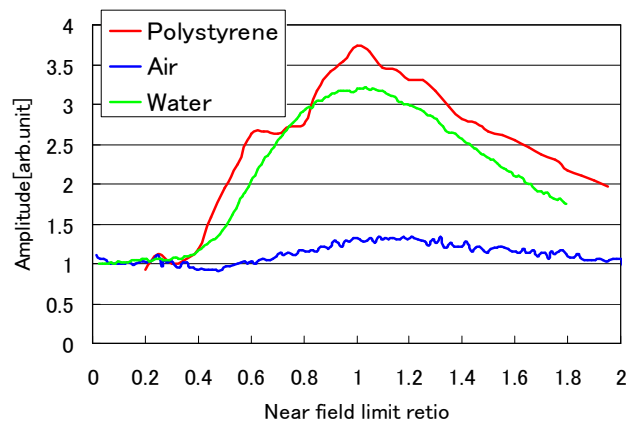


Fig. 9 Amplitude rising at near field limit by edge wave in central axis of each medium (Attenuation corrected)

近距離音場限界での振幅増幅量を求めると図 9 のようになる。ポリスチレンが 274%、水が 221%、空気が 33%の振幅上昇となった。これらの結果からポリスチレンは水や空気と比べてエッジ波の発生量が非常に大きく超音波が広がりやすいと言える。傾向としては力が作用する時の応力が大きいほどエッジ波が大きくなるようである。空気抵抗より水の抵抗、固体の応力など力に対する抵抗が大きくなるほどエッジ波が大きくなると考えられる。樹脂より固い鋼やステンレスなどの金属材料ではエッジ波が大きくなる可能性がある。また、空気は一般的に言われているほど減衰が大きくなく、遠くまで超音波が伝搬した。遠距離での拡散減衰についてもエッジ波による変動を考慮して観測範囲を適切に設定する必要がある。空中では周波数が 250[kHz]と低いが、周波数の影響についてはこれからの課題とする。金属のエッジ波発生量や遠距離での拡散減衰、

周波数の減衰への影響については今後の課題とする。

超音波試験技術 理論と実際, 日本能率協会 (1980)、p.55

#### 4 おわりに

媒質ごとのエッジ波発生量を評価し、ポリスチレン、水、空気の順でエッジ波発生量が低下した。散乱減衰や吸収減衰である媒質自体の減衰を調べるとポリスチレンが減衰が大きく、水、空気はほとんど減衰しなかった。減衰も調べると固体は減衰やエッジ波の発生が大きく超音波が拡散しやすい。逆に気体では超音波が拡散しにくく減衰も少ないと推定した。

#### 参考文献

- [1] 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](http://www.jp-probe.com/technology/up_img/1540432454-182171_f1.pdf) 2019年7月10日確認
- [2] 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) 2019年7月10日確認
- [3] 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)
- [4] T. Otani; Physical Principles and Theoretical Concepts of Transient Acoustic Field, Japanese Journal of Applied Physics; Vol.39; pp. 2888-2897(2000)
- [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、吉田光良、小倉幸夫；超音波探触子の指向性とエッジ波発生量の評価；2019年日本音響学会春季研究発表会講演論文集 3-4-5 pp.91-94(2019)
- [7] 田中雄介、野地正明、柘植延啓、小倉幸夫；探触子の受信指向性と空中超音波における虚像の解析；電子情報通信学会技術研究報告 超音波 US2018-112 Vol.118 No.452 pp.21-26(2019)
- [8] 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：