

Ultrasonic waves transmitted from the probe and
phenomena caused by edge waves

ジャパンプローブ株式会社 ○田中 雄介、小倉 幸夫

概 要

超音波探触子から送信される超音波について直接波とエッジ波について述べた。連続波では直接波とエッジ波、またはエッジ波同士の重なりサイドローブやゼロ輻射角、探触子中心軸上での振幅変動が発生する。エッジ波は直接波端部から発生し、外側エッジ波は直接波と同位相、内側エッジ波は直接波と逆位相になる。位相が逆の信号は伝搬距離差が半波長で振幅が強くなり、伝搬距離差が波長の整数倍で振幅が弱くなる。サイドローブやゼロ輻射角などは前の超音波のエッジ波が後ろの超音波と重なって振幅が変動することで発生する。エッジ波の発生量は媒質に依存し、空気中ではほとんど発生しない。

1. 緒 言

超音波による計測は医用超音波、非破壊検査などで広く実用化されている。超音波の計測では超音波の伝搬を知る必要があるが、超音波伝搬は基本的に連続波での記述であり[1]パルス波の超音波伝搬について記述されたものは少ない。また、パルス波の超音波伝搬も振幅については速度ポテンシャルの時間微分で説明しており[2]、振幅が無限大となり現実とは異なる。探触子から送信される超音波について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り、直接波やエッジ波が重なりサイドローブやゼロ輻射角等の現象が発生することを報告してきた[3]。また、エッジ波については媒質により発生量が異なり、個体や水中では発生するが空気中ではほとんど発生しない[4]。今回これらをまとめ探触子から送信される超音波と直接波やエッジ波の重なりによりどのような現象が発生するかについて述べる。

2. 直接波とエッジ波

超音波探触子から送信される超音波は振動面と同じ形の直接波である。平面振動子は平面の直接波、凹型の振動子なら凹面の集束する直接波が送信される。エッジ波は音圧の急激な変化がある部分から発生し、直接波端部はその外側で音圧が急に 0 になるためエッジ波が発生する。エッジ波は直接波の外側と内側にそれぞれ発生し、外側は直接波と同位相、内側は逆位相になる。また、障害物に超音波が遮られた場合などでも音圧変化からエッジ波が発生する。平面波は図 1、凹型振動子は図 2、障害物に遮られた場合は図 3 のようになる。図 1 の平面振動子では平面状の直接波が送信され、直接波端部から外側には直接波と同

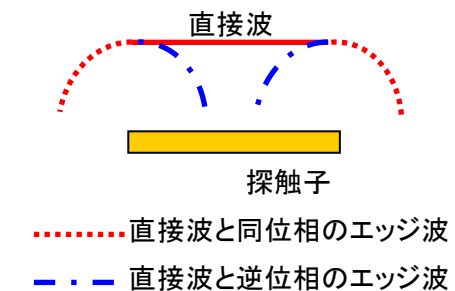


図1 探触子から送信される超音波

位相のエッジ波、内側には直接波と逆位相のエッジ波が発生する。後述するが、探触子中心軸上などでは直接波と内側エッジ波が重なり振幅が変動する。図2の凹型振動子では直接波が凹面となり

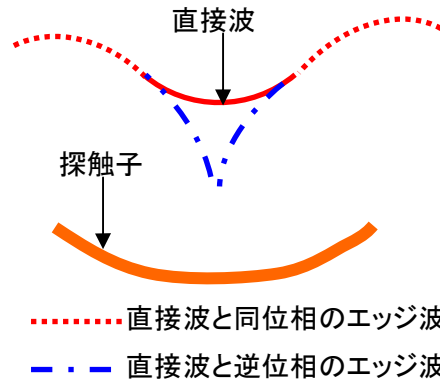


図2 凹型探触子から送信される超音波

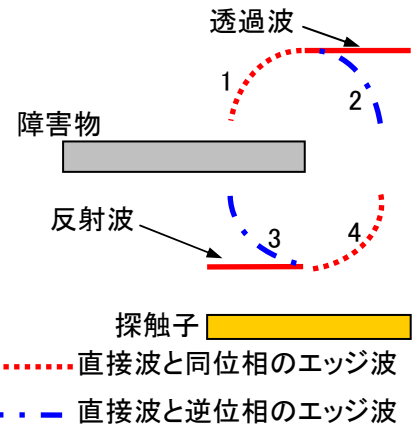
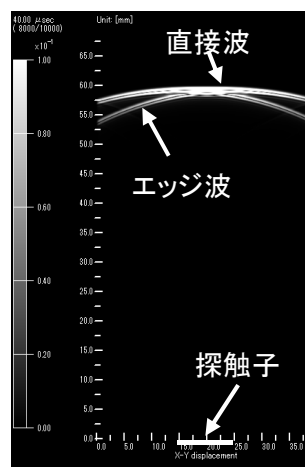
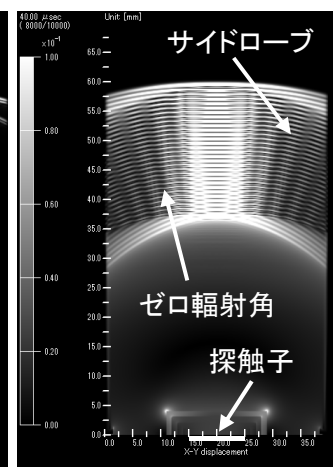


図3 物体透過時に発生するエッジ波

ある位置で超音波の焦点が発生する。この場合も直接波端部から外側と内側にそれぞれエッジ波が発生し、直接波、エッジ波の合成により焦点位置が変化する。図3の物体透過時では透過波の左端部に音圧差が発生するので外側エッジ波1と内側エッジ波2がそれぞれ発生する。障害物で反射した波の右端部にも音圧差が発生するので内側エッジ波3と外側エッジ波4が発生する。次章ではエッジ波による振幅変動で発生する様々な現象について述べる。



(a)パルス波



(b)連続波

図4 パルス波と連続波の音場

3. エッジ波による振幅変動

3.1 サイドローブとゼロ輻射角

エッジ波による振幅変動からサイドローブやゼロ輻射角と呼ばれる現象が発生する。超音波が広がる時に振幅がゼロになる角度や振幅が大きくなる角度がある。これらは連続波で発生する現象でパルス波では発生しない。図4に水中でのパルス波と連続波(波数 30)のシミュレーション図(イーコンピュート、SWAN21)を示すが、連続波では探触子の外側に振幅変動が発生した。振幅の大きい部分がサイドローブ、小さい部分がゼロ輻射角と呼ばれる部分である。ゼロ輻射角はベッセル関数の計算上は振幅がゼロになるが、エッジ波の振幅が一定であるという前提があるので振幅がゼロにならない[4]。これらの現象は図5のように説明できる。直接波端部から外側と内側エッジ波が発生するが、波数が多いと前の波で発生したエッジ波が後ろの波と重なる。例えば、1波目の右側から発生した内側エッジ波は3波目や4波目の外側エッジ波と黒丸の部分で重なる。探触子中心軸上でも灰色丸の部分で重な

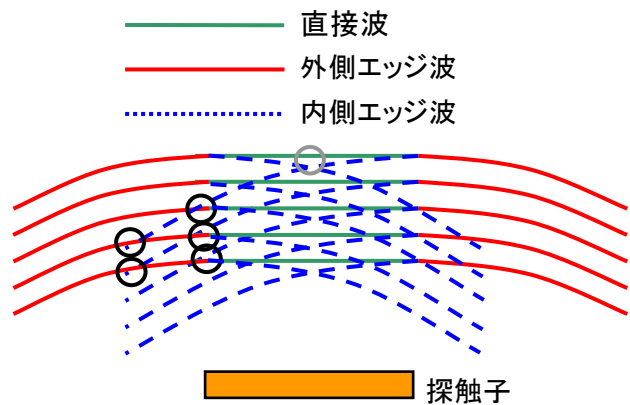


図5 エッジ波の重なりによる振幅変動

る。振幅の大きい部分がサイドローブ、小さい部分がゼロ輻射角と呼ばれる部分である。ゼロ輻射角はベッセル関数の計算上は振幅がゼロになるが、エッジ波の振幅が一定であるという前提があるので振幅がゼロにならない[4]。これらの現象は図5のように説明できる。直接波端部から外側と内側エッジ波が発生するが、波数が多いと前の波で発生したエッジ波が後ろの波と重なる。例えば、1波目の右側から発生した内側エッジ波は3波目や4波目の外側エッジ波と黒丸の部分で重なる。探触子中心軸上でも灰色丸の部分で重な

るがこれは後述する。黒丸の部分には外側エッジ波と内側エッジ波が重なり、それぞれ逆位相なので振幅が低下する。一方、半波長ずれて重なった部分は振幅が大きくなる。そのため、振幅が大きい部分と小さい部分が交互に発生し、大きい部分がサイドローブ、小さい部分がゼロ輻射角となる。エッジ波は正面に近いと振幅が大きく、広がるほど振幅が小さくなるが、図 5 のようにエッジ波が重なった黒丸の部分で外側エッジ波は正面に近く、内側エッジ波は外側エッジ波より広がっている。そのため内側エッジ波の振幅が小さくなり、振幅がゼロにならない。また、エッジ波の重なりは先頭より後ろの波で発生するため、パルス波ではサイドローブやゼロ輻射角が発生しない。また、波数が多くても先頭と最後尾の波ではサイドローブなどは発生しない。図 4(b)でも先頭と最後尾ではサイドローブなどは発生していない。次に探触子中心軸上の振幅変動を述べる。

3. 2 探触子中心軸上の振幅変動

探触子中心軸上でも内側エッジ波と直接波の重なりにより振幅変動が発生する。パルス波では直接波と内側エッジ波の重なりにより振幅が変動する。図 6 のように考えると直接波の伝搬距離 X とエッジ波の伝搬距離 E で $E - X$ が半波長になる位置で振幅が大きくなる。 X について計算すると以下の式

$$X = \frac{1}{4} \left(\frac{w^2}{\lambda} - \lambda \right) \quad (1) \quad w: \text{振動子幅} \quad \lambda: \text{波長}$$

となり、振動子幅 w を振動子直径 D にすると近距離音場限界の式[5]になる。超音波が伝搬するにつれて E と X の差が小さくなるが、連続波では探触子中心軸上で先頭の内側エッジ波と 2 波目、3 波目の内側エッジ波が重なり、この部分の振幅が変動する。図 7 は水中で直径 10[mm]、2[MHz]の探触子中心軸上のシミュレーションでの振幅である。近距離音場限界は 33[mm]で連続波では近距離音場で振幅が変動し、近距離音場限界付近で連続波、パルス波の両方で振幅が大きくなった。ここで極値における波形を図 8 に示す。距離 8 の極小値、距離 11

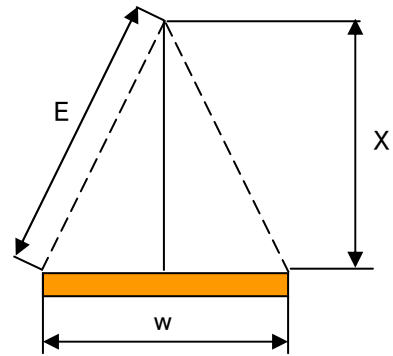


図6 直接波とエッジ波の重なる距離

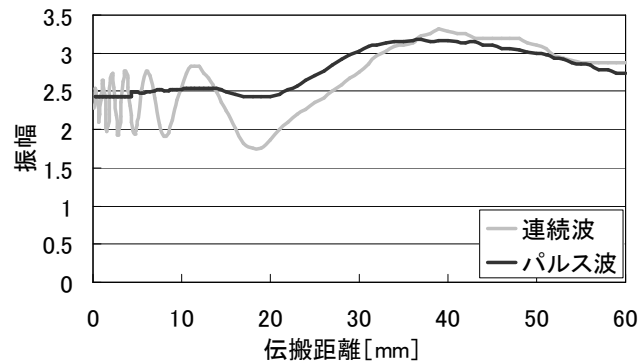


図7 探触子中心軸上の振幅

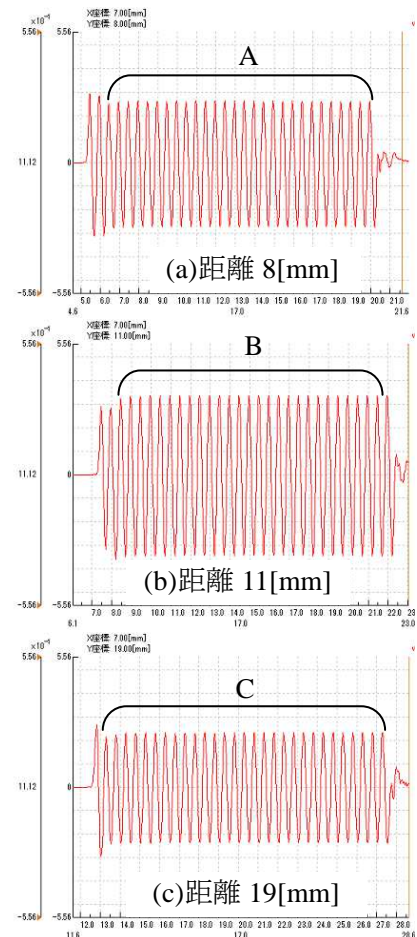


図8 探触子中心軸上の連続波

の極大値、距離 19 の極小値の波形は先頭の波より後ろの A、B、C の振幅が変動しており、先頭の波は振幅が同じである。A、B では 3 波目以降の変動であるが、C は 2 波目の波が変動している。伝搬距離が長くなると先頭付近の波が変動することがわかる。ここで極大値と極小値の位置を考えるとエッジ波と直接波の伝搬距離差が半波長や 1.5 波長で極大、波長の整数倍で極小になる。極大値を X_{\max} 、極小値を X_{\min} として遠い極大値から順に $X_{\max 1}$ 、 $X_{\max 2}$ 、遠い極小値から順に $X_{\min 1}$ 、 $X_{\min 2}$ とすると n 番目の極大値は

$$X_{\max n} = \frac{w^2}{(8n-4)\lambda} - \frac{\{2(n-1)+1\}\lambda}{4} \quad (2)$$

となり、 n 番目の極小値は

$$X_{\min n} = \frac{w^2}{8n\lambda} - \frac{n\lambda}{2} \quad (3)$$

となる。一番遠い極大値は $n=1$ の(1)式で 33[mm]、2 番目に遠い極大値は 11[mm]、3 番目の極大値は 6[mm]である。図 7からもそれらの付近で極大値が現れている。一番遠い極小値は 17[mm]、2 番目に遠い極小値 8[mm]、3 番目に遠い極小値は 4[mm]で図 7にも表れている。ここでパルス波の場合の探触子中心軸上の波形を図 9に示す。近距離音場では直接波と逆位相のエッジ波が観測され、近距離音場限界でそれらが重なって振幅が大きくなったことがわかる。これらの結果から探触子中心軸上で直接波とエッジ波が重なって振幅が変動し、パルス波では式(1)の近距離音場限界付近で振幅が大きくなり、連続波では式(2)と式(3)の極値で振幅が変動することがわかる。従って、近距離音場で複雑な音場となるのは連続波の場合である。

3. 3 グレーティングローブ

フェーズドアレイ走査時にアレイ振動子のピッチが大きいと目的の方向以外にも超音波が強く送信されるグレーティングローブが発生する。グレーティングローブの発生条件は

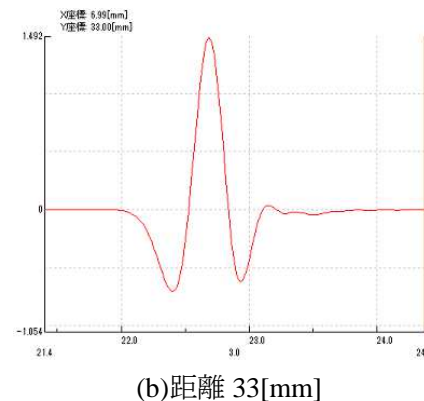
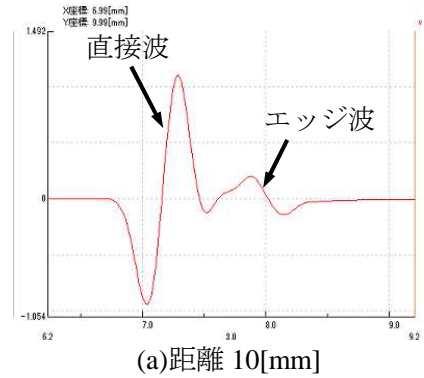


図9 探触子中心軸上のパルス波

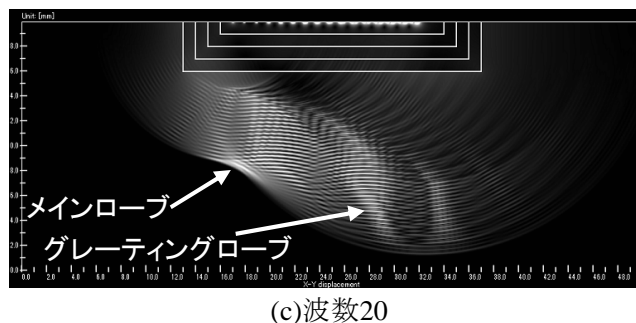
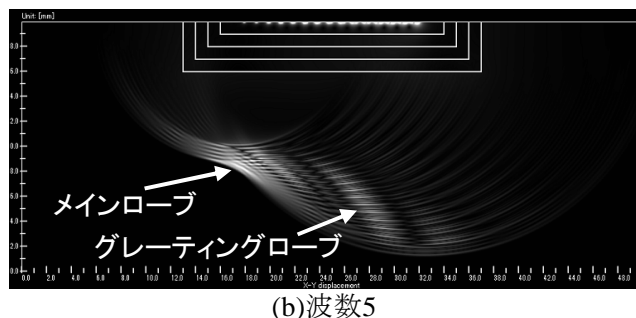
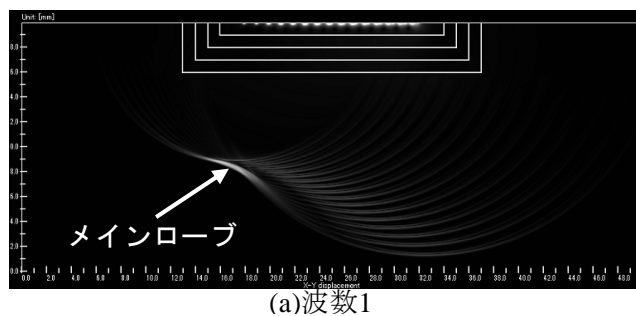


図10 波数によるグレーティングローブの違い

$$d > \frac{\lambda}{1 + \sin \theta} \quad (3) \quad \begin{array}{l} d: \text{素子ピッチ} \quad \lambda: \text{波長} \\ \theta: \text{アレイ走査角度} \end{array}$$

で表わされ、 θ が 30 度で水中 5[MHz] の条件下では d が 0.2[mm] より大きいとグレーティングローブが発生する。ここで水中でピッチ d を 1[mm] にしてグレーティングローブが発生する条件でシミュレーション(イーコンピュート、SWAN21)した。ここで送信信号として sin 波、波数を 1、5、20 としたときのシミュレーション結果を図 10 に示す。波数が 1 のときはグレーティングローブが発生しないが、波数が 5、20 のときはグレーティングローブが発生した。グレーティングローブについてもサイドローブなどと同様にエッジ波が後の波と重なることで発生する現象であることがわかる。

4. 媒質によるエッジ波発生量の違い

次に媒質によりエッジ波の発生する量が異なることを述べる。エッジ波は送信時の指向性やフェーズドアレイ走査を行う際に関わるのでエッジ波が発生しないと超音波は直進し、フェーズドアレイ走査もできなくなる。一般に波長より大きな振動子では超音波が広がら

ないとされているが、エッジ波が発生する場合は超音波が広がる。ここで水中において周波数 5[MHz]、直径 10[mm] の超音波探触子で音場を直径 0.3[mm] の hidroホンで計測した。距離 30[mm] の位置で観測し、エッジ波によるサイドローブやゼロ輻射角を計測した。水中では波長は 0.3[mm] であるので直径 10[mm] では超音波が広がらないとされる。図 11 に波数 30 で送信したときの音場を示す。探触子幅は A であるが、超音波が広がっており、ゼロ輻射角やサイドローブが検出されており、エッジ波が発生していることがわかる。従って、エッジ波により超音波が広がることが示された。

次に空中超音波で音場を観測した。直径 20[mm]、周波数 250[kHz] の空中超音波探触子を用いて、直径 4[mm] の hidroホンで音場を計測した。近距離音場限界は 74[mm] で近距離音場の 30[mm] と遠距離音場の 150[mm] で探触子中心に対する広がりを観測した。図 12 に観測結果を示す。近距離音場、遠距離音場で広がり方が同じで超音波が全く広がっていないことがわかる。ここで近距離音場において探触子中心軸での受信波形を調べた。距離

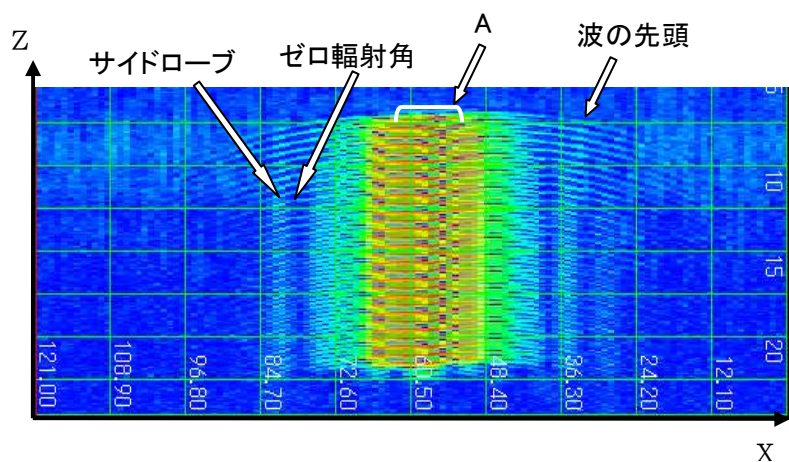


図11 水中のエッジ波観測

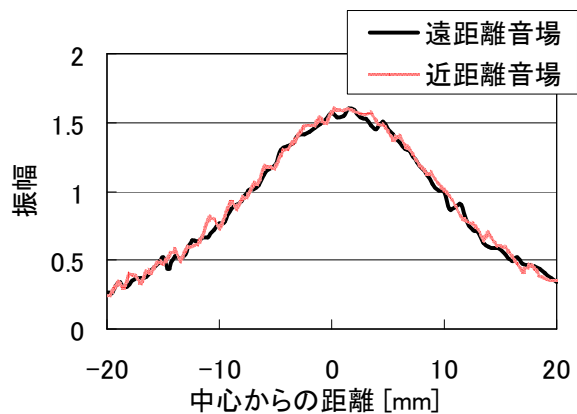


図12 空中での超音波の広がり

30[mm]における受信波形を図 13に示す。直接波は観測されたが、逆位相のエッジ波が観測されなかった。パルスを送信しても空中超音波では波数が多くなるが、エッジ波が発生すると逆位相の信号が混じって波形が乱れるはずである。直接波より後ろに波形の乱れが無い。探触子中心軸上の振幅を計測すると図 14のようになった。ハイドロホンの多重反射で 30 波の場合は振幅が近距離で低下したが、近距離音場限界付近での振幅増大が 1 波、30 波共に検出されなかった。図 15の直径 10[mm]、5[MHz]の探触子による水中での計測では近距離音場限界付近で振幅が増大している。従って、空中超音波ではエッジ波が発生しておらず直進している可能性がある。今後はエッジ波が発生していないか確かめるために、より小さな空中超音波探触子で超音波が広がらないかを確認する必要がある。

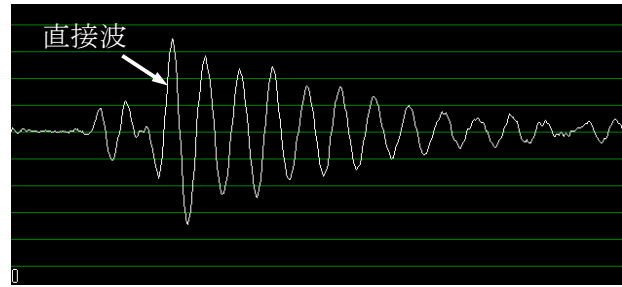


図13 空中での探触子中心軸上波形(距離 30)

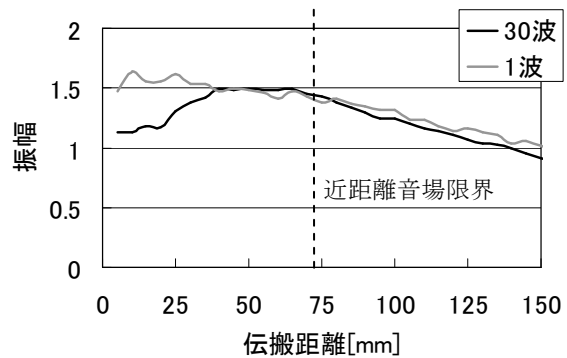


図14 空中での探触子中心軸上の振幅

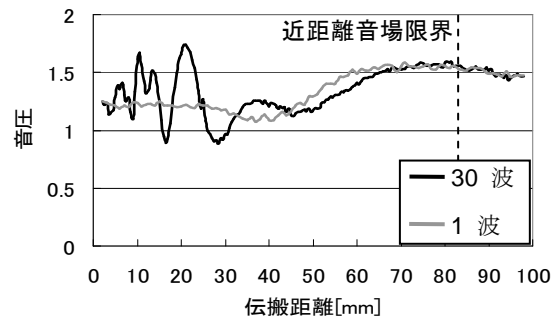


図15 水中での探触子中心軸上の振幅

5. 結言

探触子から送信される超音波を直接波とエッジ波により説明した。エッジ波が重なることでサイドローブやゼロ輻射角、探触子中心軸上の振幅変動が発生した。エッジ波の重なりは前の波のエッジ波が後ろの波の直接波やエッジ波が重なるので波数が多い連続波で発生し、パルス波では発生しなかった。グレーティングローブを含む超音波の現象は連続波の現象である。エッジ波は媒質により発生量が異なり、空中ではほとんど発生しない。

文献

- [1]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)
- [2]超音波便覧編集委員会編；超音波便覧；丸善；pp.31-33(1999)
- [3]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)
- [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)
- [5]J.クラウドクレーマー、H.クラウドクレーマー、「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