

## 6-2

## エッジ波発生量と減衰の評価

## Evaluation of edge wave generation amount and attenuation

田中 雄介 阿部 晃 小倉 幸夫  
 Yuusuke Tanaka Akira Abe Yukio Ogura

ジャパンプローブ株式会社 Japan Probe Co., Ltd.

## 講演概要

超音波伝搬に伴い発生するエッジ波は送信指向性を決定するが、エッジ波の発生量は媒質ごとに異なる。ポリスチレン、水、空気のエッジ波発生量を調べ、空気はポリスチレンや水に比べてエッジ波の発生量が少なく超音波が直進した。減衰についても評価し、ポリスチレンは減衰が大きく水や空気は減衰が少ない結果となった。空気の減衰が大きいと一般的に言われる原因として空中超音波がたわみ振動により発生していることを考察した。

KEYWORDS：超音波、エッジ波、指向性、減衰、空中

## 1. 緒言

超音波探触子から送信される超音波がどれだけ拡散するかは指向性で表現されており、ベッセル関数により指向性が計算されている[1]。しかし、ベッセル関数による指向性は連続波、十分な遠距離、振幅の正規化など実際の超音波とは異なる。実際の超音波はパルス波による計測、近距離での計測、複数の超音波が混じって振幅が変動するなどベッセル関数による指向性とは異なる指向性を示す。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り[2]、エッジ波が超音波の拡散度合いを決定するため、エッジ波発生量が送信指向性を決定する[3]。指向性は送信時と受信時で異なり、受信指向性は受信面の伝搬時間差により決定する[4]。送信時の指向性についてエッジ波発生量が媒質により異なり、水に比べて空気はエッジ波発生量が少なく、空中では超音波が広がらず直進する。空中は超音波の減衰が大きいとされており[5]、空気がエッジ波の発生量が少ないのは減衰の影響が考えられる。しかし、空中超音波の音場計測では減衰が少ない結果となった[6]。今回、材料中の超音波の減衰評価方法と材料ごとの減衰、空中超音波で減衰が大きいと評価される場合について調べ、縦振動の超音波探触子とたわみ振動の超音波探触子では減衰が全く異なることを述べる。

## 2. 探触子の送信指向性とエッジ波

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。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、広がるほど振幅が低下す

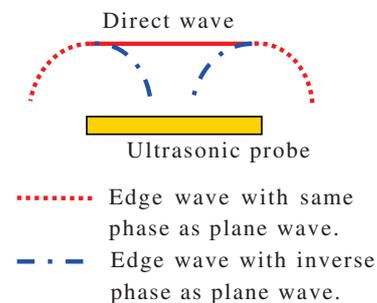


Figure 1. Direct wave and edge wave transmitted from ultrasonic probe.

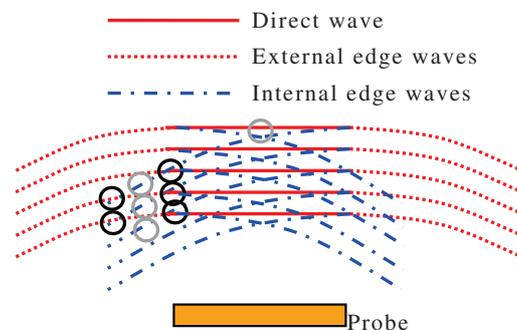


Figure. 2 Overlapped direct and edge waves.

る。直接波やエッジ波はそれらが重なることで振幅変動を発生させる。特に波数が多くなると図 2 に示すように前の波と後ろの波が重なる部分で振幅変動が発生する。黒丸の部分は先頭の内側エッジ波と後ろの波の外側エッジ波が重なり、互いに逆位相であるので振幅が低下する。外側エッジ波と内側エッジ波の伝搬距離差が半波長になると(灰色丸)振幅が増大するため、連続波では低振幅の部分と高振幅の部分が交互に発生する。図 3 は平面音源における 1 波と 30 波の超音波伝搬シミュレーション(アイコンピュート、SWAN21)であるが、それぞれ音場が異なることがわかる。一般的な指向性は次のベッセル関数により表わされ、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  
 $m$ :  $ka \sin \phi$      $k$ :  $2\pi/\lambda$   
 $a$ : 探触子半径     $\phi$ : 中心軸からの角度

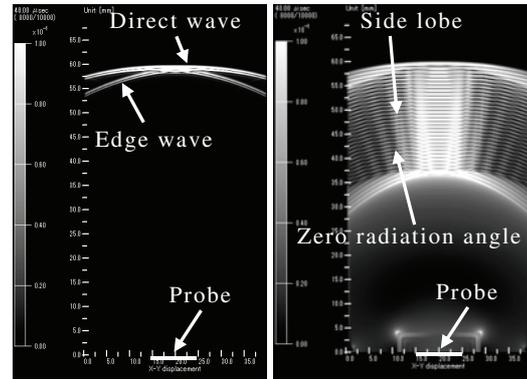
水中で音速 1500[m/s]、振動子直径 10[mm]、周波数は 2[MHz]の場合におけるベッセル関数による指向性は図 4 に示すが、ある角度で振幅が 0 になる。シミュレーションにより 1 波のパルス波で水中の探触子からの距離  $Z$  を変えた観測点での波形を計算した結果を図 5 に示す。近距離音場限界は 33[mm]である。図 4 のベッセル関数とは全く異なる指向性を示した。特にベッセル関数は 5.2 度で振幅が 0 になるがシミュレーションでは 0 になる部分が存在せず、振幅が変動した。

ベッセル関数による指向性では連続波である、探触子から遠い位置である、直接波とエッジ波の振幅が同じである、送信と受信が同じ特性である、といった条件がある場合にのみ成立する。実際の超音波計測ではパルス波、近距離での計測、直接波とエッジ波は振幅が異なる、送信と受信は異なる特性であるのでベッセル関数はほぼ適用できない。送信指向性は超音波の広がりであるので、直接波端部からのエッジ波がどのくらい発生するかにより決定される。従って、エッジ波の発生量を調べることで送信指向性を求められる。

### 3. エッジ波発生量の評価

#### 3. 1 エッジ波による探触子中心軸上の振幅変動

エッジ波の発生量は探触子中心軸上の振幅変動により求めた。探触子中心軸上では図 5 のように近距離音場限界で直接波とエッジ波が重なって振幅が増大する。図 6 にエッジ波の伝搬距離  $E$  と直接波の伝搬距離  $X$  を示すが、 $E-X$  が半波長になる位置  $x_0$  で振幅が



(a) Pulse wave      (b) 30 cycles wave  
Figure 3. Acoustic fields of pulse and continuous wave

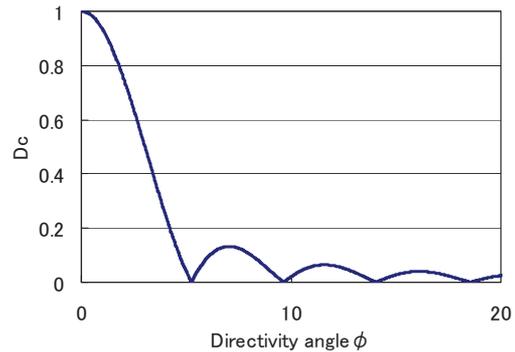


Figure 4. Directivity of ultrasonic probe by Bessel function

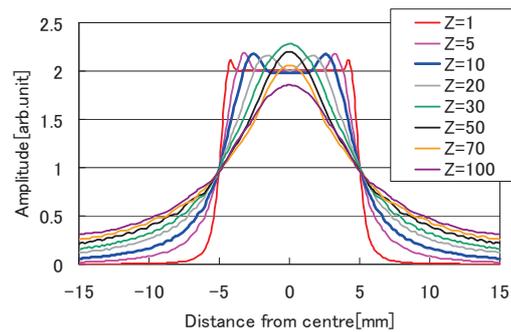


Figure 5. Acoustic field of ultrasonic probe by simulation.

増大する。その時の  $x_0$  は

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

$x_0$ : 直接波とエッジ波が重なる位置

$w$ : 振動子幅  $\lambda$ : 波長

で求められ、近距離音場限界となる。図7に水中で音速1500[m/s]、振動子直径10[mm]、周波数2[MHz]、パルス波の場合における探触子中心軸上振幅のシミュレーション結果を示す。近距離での振幅と近距離音場限界の振幅上昇の割合  $a$  でエッジ波の発生量を評価できる。

### 3.2 媒質ごとのエッジ波発生量

次にポリスチレン、水、空気で探触子中心軸上の振幅変動からエッジ波の発生量を評価した。用いた探触子はポリスチレンが2[MHz]、直径10[mm]、水が5[MHz]、直径10[mm]、空気が250[kHz]、直径20[mm]である。エッジ波の評価は球状の反射か小径ハイドロホンによる計測が必要になるため、それぞれの計測法は図8に示すように行った。ポリスチレンは直径4[mm]の球形穴からの反射信号、水中は直径4[mm]からの反射信号、空中は直径0.5[mm]のPMN-Pt単結晶ハイドロホンを用いて評価した。パルサレシーバ(ジャパンプローブ製、JPR-50P)から100[V]の負のパルス波を印加した。各材料と探触子の情報は表1にまとめた。

図9に近距離音場限界での振幅変動を示す。横軸は近距離音場限界を1、縦軸は近距離音場での振幅を1と正規化した。ポリスチレンが206%の振幅上昇、水が190%の振幅上昇、空気が18%の振幅上昇となった。この結果からはポリスチレンや水は振幅上昇が大きく、空気は振幅上昇が低いのでエッジ波はポリスチレンや水では多く発生するが、空気ではほとんど発生しないと言える。しかし、材料の減衰が影響している可能性があるためそれぞれの減衰を評価する必要がある。

### 4. 材料の減衰評価

#### 4.1 平面超音波音源の音場と減衰評価

材料の減衰を評価するためにはエッジ波による振幅変動が発生しない位置で行う必

Table 1. Each materials and transducers

	Polystyrene	Water	Air
Frequency[MHz]	2	5	0.25
Diameter[mm]	10	10	20
Acoustic velocity[m/s]	2330	1500	340
Near field limit[mm]	21	83	73

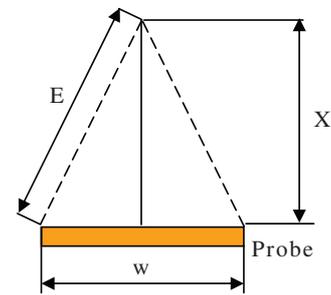


Figure 6. Propagation of direct wave and internal edge wave.

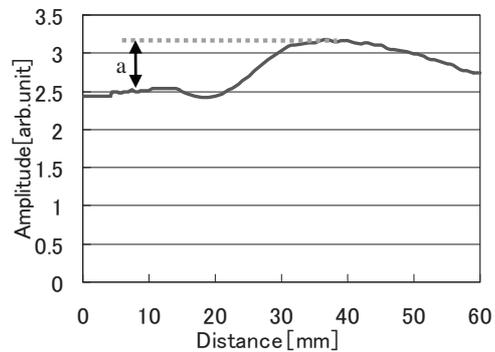


Figure 7. Increasing amplitude of pulse wave at near field limit.

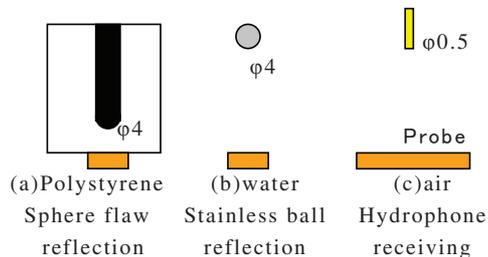


Figure 8. Edge wave measuring method.

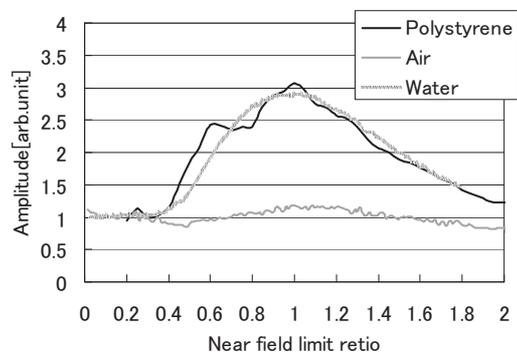


Figure 9. Increasing amplitude by edge wave at near field limit.

要がある。単純に振幅だけで評価するとエッジ波で振幅が増減するため減衰を評価できない。探触子中心軸上では図 10 のように直接波とエッジ波の伝搬距離差が 1 波長以上の近距離では直接波とエッジ波が分離しているが、近距離音場限界に近付くにつれて直接波後ろ半分とエッジ波の前半分が重なることで振幅が上昇し、遠距離音場では直接波とエッジ波が重なり振幅が低下する。近距離音場限界においてピーク A は直接波、ピーク B は直接波とエッジ波の合成、ピーク C はエッジ波である。遠距離音場ではピーク D と E 共に直接波とエッジ波の合成で振幅が変動している。従って、材料の減衰を評価すべき信号はエッジ波による振幅変動が無い近距離音場における最初のピーク A である。各材料におけるピーク A の振幅計測結果を図 11 に示す。ポリスチレンは減衰が大きく、水や空気は減衰が少ない結果となった。ポリスチレンや水は近距離音場限界(ポリスチレン:24[mm]、水:83[mm])を過ぎると減衰が大きくなったが、空気は近距離音場限界 73[mm]を過ぎても減衰があまり変化しなかった。これはエッジ波が遠距離で重なっても空中で発生量が少なく振幅減少の影響が低いためである。ポリスチレンと水は往復、空気は片道であるため、距離を考慮したときの近距離と遠距離の減衰を表 2 に示す。水と空気は減衰が少なくポリスチレンは減衰が大きかった。遠距離ではエッジ波による振幅低下の影響で空気より水の方が大きい減衰となった。空中超音波探触子が 250[kHz]の低周波で減衰が少ない可能性があるため、周波数を高くして減衰を計測した。周波数が 500[kHz]、600[kHz]、700[kHz]、900[kHz]で振動子が 14×20[mm]の長方形であるが、近距離の最初のピーク A で判断すればエッジ波の影響は無い。伝搬距離と振幅の関係を図 12 に示す。周波数に依ら

ず減衰はあまり変化しなかった。減衰係数をまとめると表 3 に示す。空中では周波数による減衰の変化は少なく、500[kHz]から 900[kHz]では 1[dB/cm]程

Table 3. Attenuation coefficient at each frequency in air.

Frequency [kHz]	Attenuation coefficient [dB/cm]
500	0.84
600	0.99
700	1.26
900	1.13

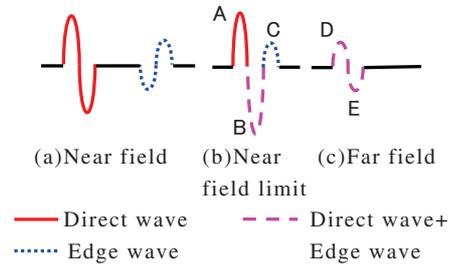


Figure 10. Synthesis of direct and edge wave at after near field limit.

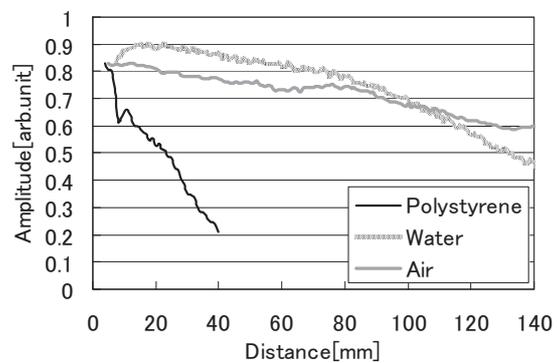


Figure 11. Attenuation of each materials evaluated by peak A.

Table 2. Attenuation coefficient of each materials.

Medium		Attenuation coefficient [dB/cm]
Polystyrene	Near	1.23
	Far	2.00
Water	Near	0.11
	Far	0.41
Air	Near	0.16
	Far	0.25

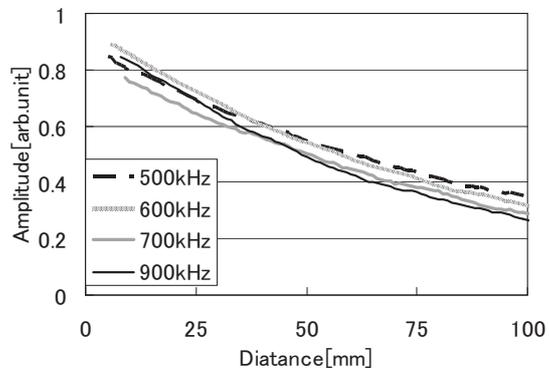


Figure 12. Amplitude of each frequency in air.

度になった。

これら減衰の結果を考慮して近距離音場限界でのエッジ波による振幅上昇をまとめると図13の通りである。ポリスチレンが274%、水が221%、空気が33%の振幅上昇となり、ポリスチレンや水に比べて空気はエッジ波の発生量が低いことがわかる。ジャパンプローブ製の空中超音波探触子は縦振動による平面波が送信されているが、通常バックソナーなどに用いる空中超音波探触子はたわみ振動である。次にたわみ振動空中超音波探触子の減衰について評価する。

4.2 たわみ振動音源の減衰

たわみ振動空中超音波探触子の減衰と拡散を平面振動音源と比較した。用いた探触子はたわみ振動音源は図14に示す村田製作所製開放型MA40SR/S、防滴型MA40MF14-5B、平面振動音源はジャパンプローブ製

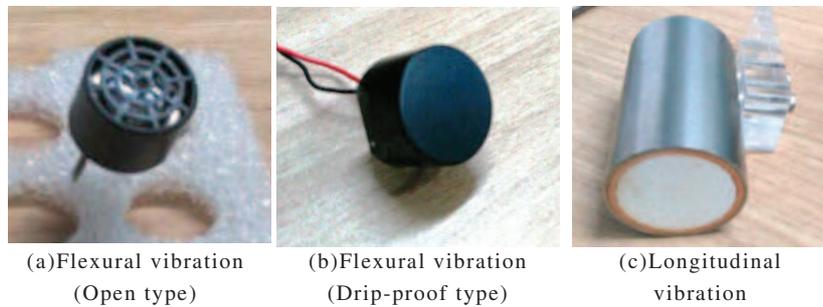


Figure 14. Air probes with flexural and longitudinal vibration transducer.

0.25K20Nである。村田製作所製は両方とも周波数は40[kHz]、解放型は探触子径が10[mm]、防滴型は14[mm]である。平面音源は周波数250[kHz]、振動子径20[mm]である。探触子中心軸上の振幅ピークを直径0.5[mm]のPMN-Pt単結晶ハイドロホンで評価した。パルサレシーバ(ジャパンプローブ製、JPR-10C)から解放型と防滴型は10波30[V]のバースト波、平面振動型は50[V]のパルス波を印加した。それぞれの伝搬距離と振幅を図15に示す。振幅は最初の値を1と正規化した。平面振動型は振幅がほとんど変化しないが、たわみ振動の開放型と防滴型は振幅がすぐに低下した。これは図16のように考えられる。たわみ振動の超音波探触子は曲面に振動しているため最初から広がった球面波が送信され、拡散が非常に大きい。そのため空気そのものの減衰ではなく拡散による減衰が発生している。対して、平面振動型は縦振動のため平面波が送信され拡散がほとんどない。これらの結果

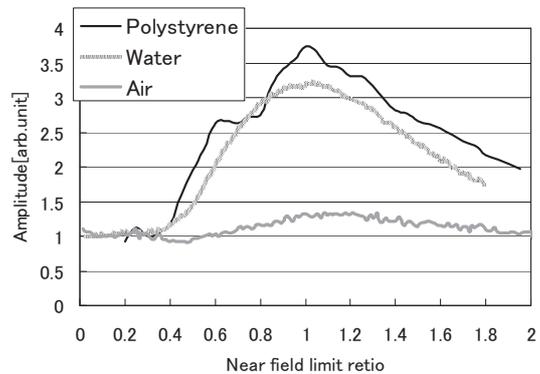


Figure 13. Increasing amplitude by edge wave at near field limit considering attenuation.

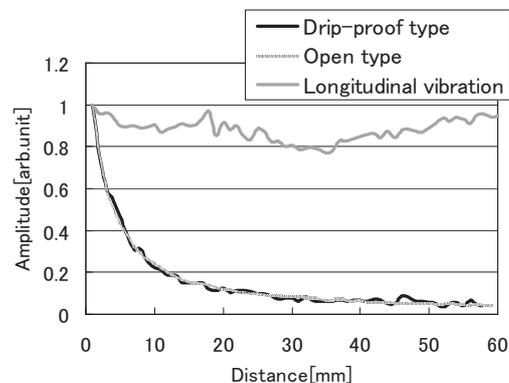


Figure 15. Amplitude of each air probes: two types flexural and longitudinal vibration.

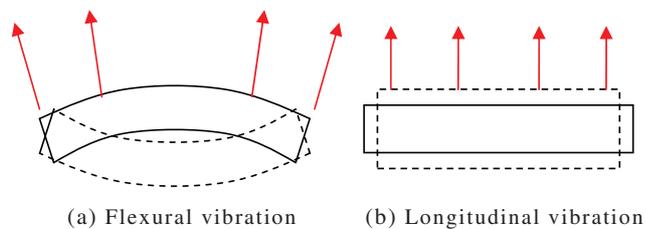


Figure 16. Difference of ultrasonic emitting direction by vibration mode.

から空中の減衰が大きいという説は空気そのものの減衰ではなく拡散による減衰を空中の減衰としていたからである。探触子からの距離  $Z$  を変化させながら拡散を調べると図 17 のように平面振動型探触子に比べて、たわみ振動の 2 種は大きく拡散していた。これらの結果からたわみ振動型空中超音波探触子は超音波が拡散しているため、拡散による減衰が大きいことがわかる。

これらの結果から空中超音波においてエッジ波の発生量や空気そのものの減衰が少なく、平面振動の探触子を用いるとほとんど拡散せずに超音波が伝搬していることがわかる。

## 5. 結 言

超音波の広がり方を決定するエッジ波発生量について媒質ごとで調べ、ポリスチレンや水は発生量が大きく、空気は発生量が少ないことを確かめた。減衰の影響を調べ、ポリスチレンに比べて水や空気は減衰が少ないことを確かめた。たわみ振動型空中超音波探触子の減衰を調べ、拡散によりたわみ振動ではすぐに減衰することを確認した。空中の減衰が大きいという説はたわみ振動による拡散のことを指していると述べた。

## 参考文献

[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] 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 12 月 6 日確認

[3] 田中雄介、小倉幸夫、“超音波探触子の送信と受信それぞれの指向性、”電子情報通信学会技術研究報告 超音波 US2018-104 pp.123-128(2019)

[http://www.jp-probe.com/news/up\\_img/1548674301-954327\\_f1.pdf](http://www.jp-probe.com/news/up_img/1548674301-954327_f1.pdf) 2019 年 12 月 6 日確認

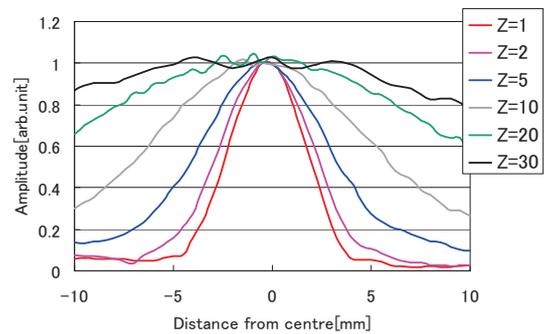
[4] 田中雄介、野地正明、柘植延啓、小倉幸夫、“探触子の受信指向性と空中超音波における虚像の解析、”電子情報通信学会技術研究報告 超音波 US2018-112 Vol.118 No.452 pp.21-26(2019)

[http://www.jp-probe.com/news/up\\_img/1552979364-712221\\_f1.pdf](http://www.jp-probe.com/news/up_img/1552979364-712221_f1.pdf) 2019 年 12 月 6 日確認

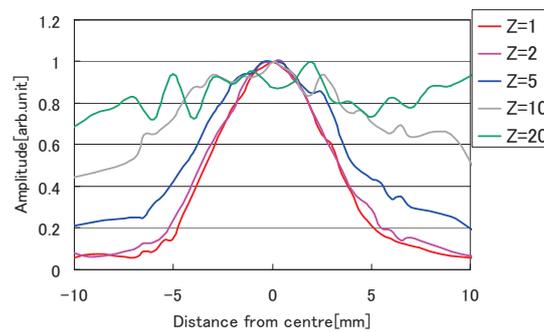
[5] 伊藤洋一、“強力空中超音波の発生方法とその応用技術、”TEICE Fundamentals Review Vol.9 No.3 pp.205-213(2015)

[6] 田中雄介、吉田光良、小倉幸夫、“媒質によるエッジ波発生量変化の評価、”日本非破壊検査協会 2019 年度秋季講演大会講演概要集 pp.7-8(2019)

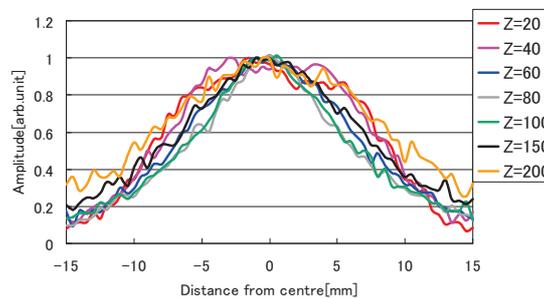
[http://www.jp-probe.com/news/up\\_img/1574398304-546660\\_f1.pdf](http://www.jp-probe.com/news/up_img/1574398304-546660_f1.pdf) 2019 年 12 月 6 日確認



(a) Flexural vibration (Open type)



(b) Flexural vibration (Drip-proof type)



(c) Longitudinal vibration

Figure 17. Ultrasonic spreading of each air probes: two types flexural and longitudinal vibration.