

超音波伝搬に伴い発生するエッジ波の発生と振幅変動についての検討

田中雄介 小倉幸夫

ジャパンプローブ株式会社 〒232-0033 神奈川県横浜市南区中村町1-1-14

E-mail: {yuusuke.tanaka, ogura}@jp-probe.com

あらまし 超音波伝搬時に発生するエッジ波は媒質により発生量が異なり、指向性などに影響する。しかし、超音波送信時に一度だけ発生するか常に発生し続けるかで影響度が異なってくる。また、探触子中心軸上でエッジ波により振幅が増減するが、ピーク位置により増減する位置が変化する。近距離音場限界で振幅が最大になるが、増大し始める位置や減少が大きくなる位置がある。これらの現象をシミュレーションにより調べ、エッジ波が送信時だけでなく常に発生し続けていることを確かめた。また、探触子中心軸上で直接波とエッジ波が重なり、振幅が増大・現象し始める位置についてシミュレーションで確かめた。

キーワード 超音波、直接波、エッジ波、シミュレーション、振幅変動

Examination of the generation and amplitude fluctuation of edge waves generated by ultrasonic propagation

Yuusuke TANAKA Yukio OGURA

Japan Probe Co., Ltd., 1-1-14 Nakamura-chou, Minami-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 232-0033, Japan

E-mail: {yuusuke.tanaka, ogura}@jp-probe.com

Abstract The amount of edge waves generated during ultrasonic propagation differs depending on the medium, which affects directivity and the like. However, the degree of influence differs depending on whether it occurs only once during ultrasonic transmission or always continues to occur. In addition, the amplitude increases or decreases due to the edge wave on the central axis of the probe, but the position of increase or decrease changes depending on the peak position. The amplitude is maximized at the short-range sound field limit, but there are positions where it begins to increase and where it decreases significantly. By investigating these phenomena by simulation, it was confirmed that the edge wave is constantly generated not only at the time of transmission. In addition, the position where the direct wave and the edge wave overlap on the central axis of the probe and the amplitude starts to increase / phenomenon was confirmed by simulation.

Keywords Ultrasonic, Direct wave, Edge wave, Simulation, Amplitude fluctuation

1. はじめに

超音波探触子から送信される信号として振動面と同形状の直接波と直接波端部から球面状に発生するエッジ波がある。直接波やエッジ波が重なることで超音波の振幅が増減し、連続波での指向角や近距離音場での振幅変動が発生する[1]。これらの計算式は振幅が正規化、パルス波は近距離音場では振幅が一定など直接波とエッジ波の重なりによる振幅の増減を考慮していない。また、直接波とエッジ波の振幅が同じであるため振幅が最大値と最小値の間で増減している。実際はエッジ波の発生量は媒質に依存し、直接波とエッジ波は振幅が異なる。エッジ波の発生源は探触子端部の点音源で考えられており[2]、点音源の拡散による振幅低下

が考慮されていない。エッジ波の発生が点音源である場合、すぐに拡散して振幅への影響が少なくなるはずである。エッジ波が点音源ではなく媒質中で超音波端部から発生し続けている場合、指向性や集束探触子の焦点に影響する可能性がある。鋼などの固体ではエッジ波が大きく発生すると推定しているが、水浸集束探触子など水から鋼へ超音波を入射する場合、エッジ波の影響は水ではなく鋼で考える必要がある。このとき集束探触子の設計や評価法を変更するため、エッジ波の発生が点音源か媒質中で常に発生し続けているかを調べる必要がある。音響レンズ型集束超音波探触子についてもエッジ波の発生がレンズか媒質かでエッジ波の影響度が変化する。我々はこれまでに直接波やエッ

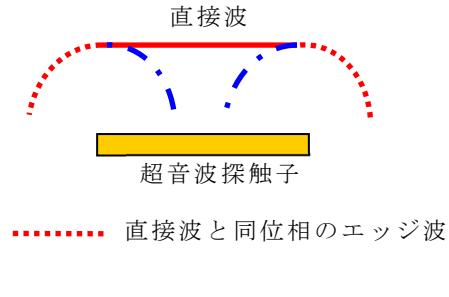


図 1 直接波とエッジ波

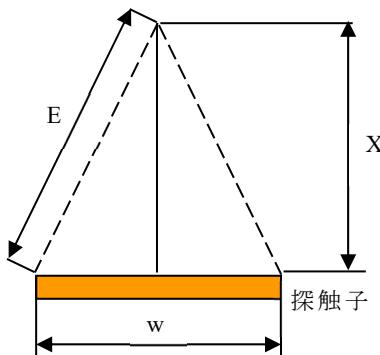


図 3 直接波と内側エッジ波の伝搬

ジ波の重なりによる振幅変動[3]や超音波の指向性や媒質によるエッジ波の発生量の違い[4]、集束超音波の焦点におけるエッジ波の影響度[5]について報告してきた。今回、シミュレーションでエッジ波の発生について調べ、平面音源端部から発生した場合と探触子端部の点音源から発生した場合の音場の違いを調べた。さらに探触子中心軸上の振幅変動について直接波とエッジ波の重なりをシミュレーションで計算したことを報告する。

2. エッジ波の発生と振幅変動

超音波探触子から送信される超音波は図 1 の平面音源の場合、平面の直接波と直接波端部から発生するエッジ波がある。直接波の外側は直接波と同位相、内側は直接波と逆位相のエッジ波がそれぞれ発生する。探触子中心軸上では図 2(a)のように近距離音場では直接波とエッジ波が分離している。直接波とエッジ波の伝搬距離は図 3 のようになり、近距離ではエッジ波の伝搬距離 E が直接波の伝搬距離 X より大きくなる。超音波伝搬と共に直接波とエッジ波が近づいていき図 2(b)のように重なって振幅が大きくなる。さらに超音波が伝搬すると直接波とエッジ波全体が重なり、振幅が低下する。直接波とエッジ波は逆位相であるのでエッジ波の伝搬距離 E と直接波の伝搬距離 X の差が半波長になったときに振幅が大きくなる。この時の位置が

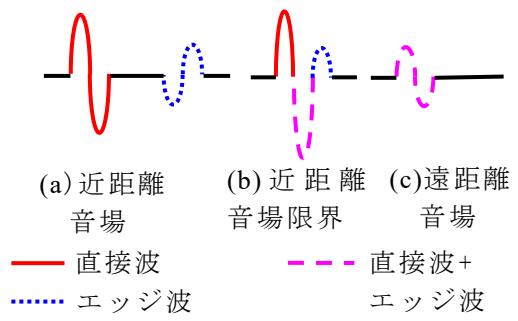


図 2 直接波とエッジ波の合成

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

x_0 ：直接波とエッジ波が重なる位置

w：振動子幅 λ ：波長

で表わされる。この位置が近距離音場限界である。図 4 で直接波とエッジ波の重なりについて考える。直接波とエッジ波の振幅は同じとした。図 4(a)の $E-X=\lambda$ になったときに超苦節はとエッジ波が重なり始める。この時はピーク間振幅 $p-p$ は 1 で変化しない。直接波とエッジ波が重なって振幅が変化し始める位置 x_1 は図 4(b)の $E-X=5\lambda/6$ になったときである。この時合成波形の正振幅が直接波とエッジ波の正振幅と同等になる。図 4(c)の $E-X=\lambda/2$ になった位置 x_0 で合成波形の正振幅が 2 倍となりピーク間振幅 $p-p$ は 1.5 となる。遠距離でさらに超音波が伝搬すると直接波とエッジ波が重なっていき、図 4(d)の $E-X=\lambda/4$ になった位置 x_d では最初のピークである負の振幅が減少し始める。従って、波数 1 のパルス波では探触子中心軸上の振幅 A が $E-X>5\lambda/6$ 、 $5\lambda/6 \geq E-X \geq \lambda/4$ 、 $E-X > \lambda/4$ の 3 つの領域で分けて表現できる。図 4 ではピーク間振幅 $p-p$ の最大値が 1.5 であるが、最大値を 1 とする。ここで

$$E - X = a\lambda \quad (2)$$

となる a を定義するとピーク間の振幅 A_{p-p} は以下の式(3)となる。

$$\left. \begin{aligned} A_{p-p} &= \frac{2}{3} & a > \frac{5}{6} \\ A_{p-p} &= \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \sin\{\pi(1-a)\} & \frac{1}{4} < a \leq \frac{5}{6} \\ A_{p-p} &= \frac{1}{3} \left\{ 1 - \sin\left(\frac{\pi}{2} - 2\pi a\right) \right\} \\ &\quad + \frac{2}{3} \sin\{\pi(1-a)\} & a \leq \frac{1}{4} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

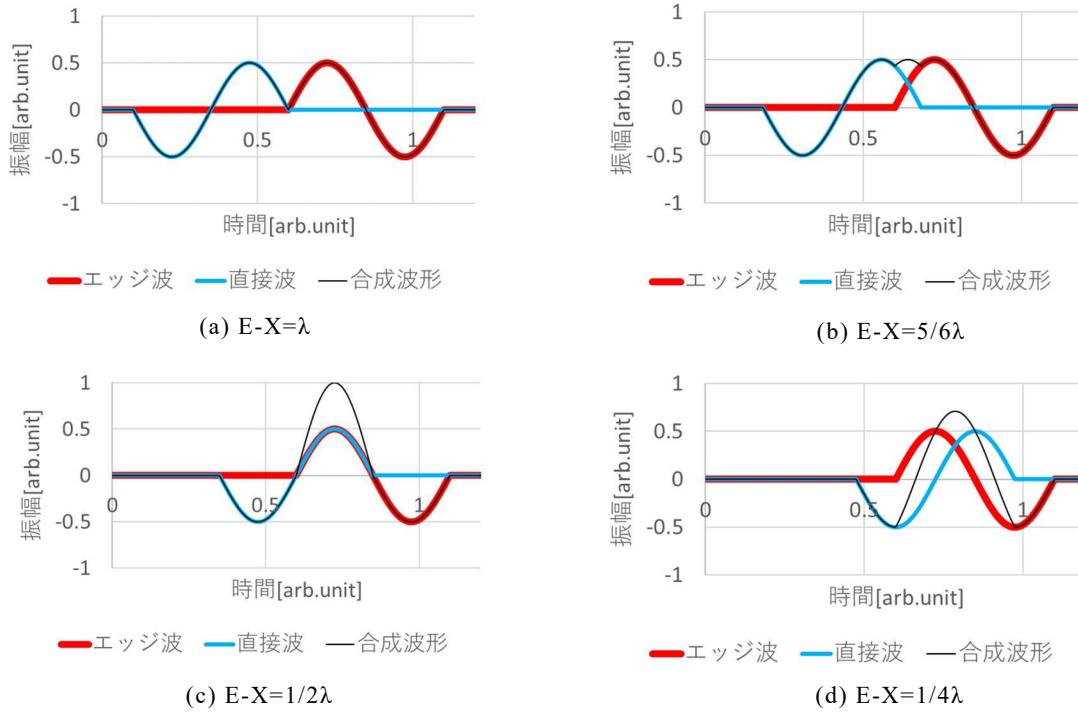


図 4 直接波とエッジ波のそれぞれの伝搬距離差における振幅合成

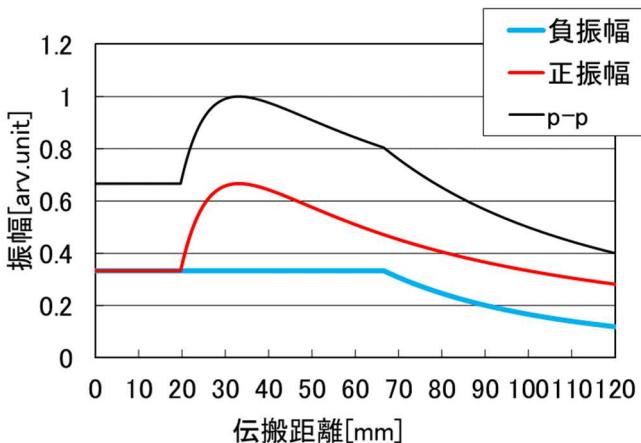


図 5 正負と p-p の振幅変化

ここで式(3)において正の振幅と負の振幅を考えると、 $a > 5/6$ では正負共に $1/3$ 、 $1/4 < a \leq 5/6$ では第 1 項の $1/3$ が負、第 2 項が正の振幅、 $a < 1/4$ では第 1 項が負、第 2 項が正の振幅となる。ここで $E-X=5\lambda/6$ 、 $E-X=\lambda/4$ になる位置を計算すると以下の式(4)、(5)になる。

$$X_{E-X=5\lambda/6} = \frac{3W^2}{20\lambda} - \frac{5\lambda}{12} \quad (4)$$

$$X_{E-X=\lambda/4} = \frac{W^2}{2\lambda} - \frac{\lambda}{8} \quad (5)$$

$E-X=\lambda/2$ の場合は式(1)である。周波数 $2[\text{MHz}]$ 、探触子幅 $w10[\text{mm}]$ 、水中で音速 $1500[\text{m/s}]$ (波長 $0.75[\text{mm}]$)の条件の場合、正の振幅、負の振幅、振幅 $p-p$ は図 5 のようになる。 $E-X=5\lambda/6$ は $19.7[\text{mm}]$ 、 $E-X=\lambda/2$ は $33.1[\text{mm}]$ 、

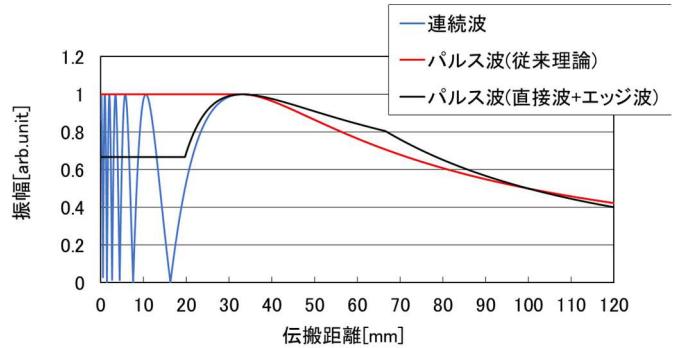


図 6 パルス波における直接波とエッジ波の合成

$E-X=\lambda/4$ は $66.6[\text{mm}]$ である。

また、連続波の場合は以下の式(6)で表わされる。

$$A = \left| \sin \pi \left(\sqrt{\left(\frac{x}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{D}{2\lambda}\right)^2} - \left(\frac{x}{\lambda}\right) \right) \right| \quad (6)$$

x : 伝搬距離 D : 振動子直径

振幅は密度や振動版の振動速度から最大値が 1 になるように正規化した。この時、パルス波は近距離音場では振幅が 1、遠距離音場では連続波と同じになるとされている[1]。図 5 のパルス波での直接波とエッジ波の合成波のピーク間振幅 $p-p$ と従来理論のパルス波、連続波の振幅を同時に描くと図 6 になる。直接波とエッジ波の振幅が同じ場合、正または負の振幅が合成されて近距離音場限界でピーク間振幅が 1.5 倍になる。実

際はエッジ波の発生量が媒質により変化するため振幅増加量が増減する。エッジ波の振幅が変化した場合でも近距離音場限界 x_0 や第 1 ピークが減少し始める位置 x_d は変化しない。しかし、実際の波形はきれいな Sin 波ではなく、さらに直接波とエッジ波の波長が変化する場合があるため、厳密な特定は難しい。また、直接波とエッジ波の合成波形が変化し始める位置 x_i はエッジ波の振幅により変化する。これら振幅や波長の変化、連続波の場合については今後検討する。

次にエッジ波の発生について述べる。探触子から発生する超音波は振動面における点音源の集合体とされている。端部以外は打ち消され、端部の点音源がエッジ波になるが、図 7(a)のように点音源の場合すぐに拡散して振幅が大きく低下する。探触子中心軸上での振幅変動などで振幅に影響を与えるほどの振幅にはならない。エッジ波の影響が大きい場合は図 7(b)のように音圧変化の大きい部分、平面波端部から媒質中で常に発生し続けていると考えられる。次章でエッジ波の発生や波の重なりについてシミュレーションで確かめる。

3. シミュレーションによるエッジ波の確認

3.1 エッジ波の発生

エッジ波の発生や直接波とエッジ波の重なりによる振幅変動についてシミュレータ(イーコンピュート、SWAN21)により調べた。まずエッジ波の発生について探触子端部の点音源か、平面波端部から媒質中で発生し続けているかを検証した。図 8(a)の幅 10[mm]の平面音源を水中に配置したモデルと図 8(b)の直径 0.1[mm]の点音源を 10[mm]の間隔を開けて配置したモデルでシミュレーションした。送信波形は以下の式(7)

$$y = -\cos(2\pi ft)(1 - \cos(1 - \frac{2\pi ft}{n})) \quad (7)$$

y : 入力波形 f : 周波数 t : 時間、 n : 波数
で周波数 2[MHz]、波数 1 の変調した負の sin 波を印加した。モデル左右と上部は吸収境界を設定し、水の密度:1000[kg/m³]、水の音速:1500[m/s]とした。振幅は図 8(a)のように探触子左端部から 1[mm]左の位置、図 8(b)のように左点音源から 1[mm]左の位置に 1[mm]間隔でそれぞれ配置した。 y 方向の変位で振幅を評価した。伝搬距離と振幅の関係を図 9 に示す。平面音源では y 方向の変位での評価のため近距離での振幅が低いが、すぐに振幅が大きくなり、距離 30[mm]以降は伝搬と共に徐々に振幅が大きくなつた。点音源では距離 1[mm]

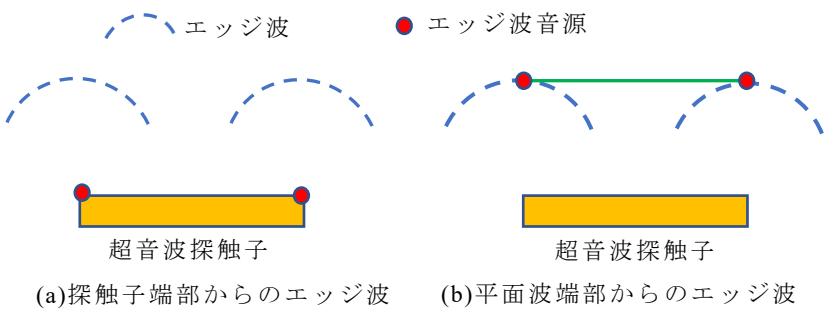


図 7 探触子端部と平面波端部からのエッジ波発生。

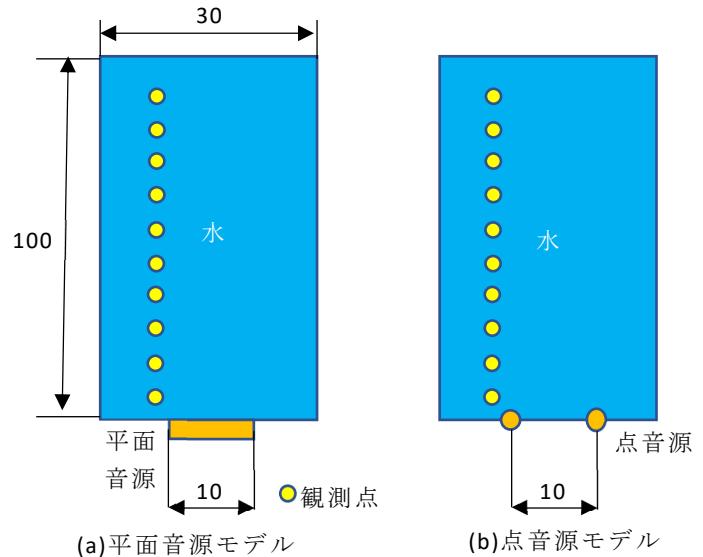


図 8 平面音源と点音源シミュレーションモデル

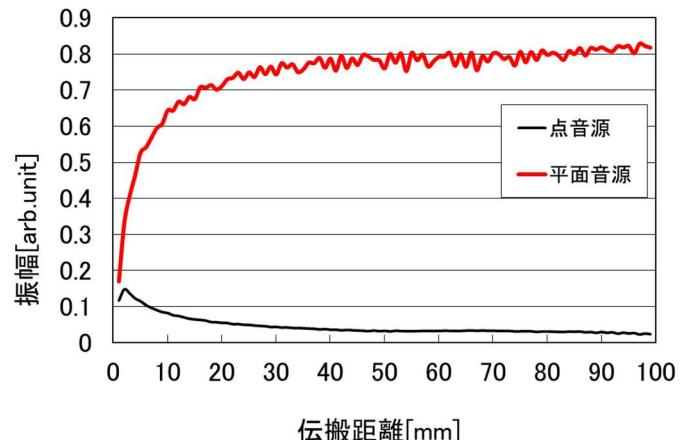


図 9 平面音源と点音源のエッジ波の振幅比較

の時点で振幅が平面音源より小さく、距離 2[mm]以降はすぐに振幅が低下した後で徐々に振幅が低下した。図 9 の結果から平面音源ではエッジ波が常に発生し続け、点音源のようなすぐに振幅が低下する現象は発生しなかった。従って、エッジ波は媒質内で超音波伝搬と共に発生し、その影響度も媒質ごとに考慮する必要がある。

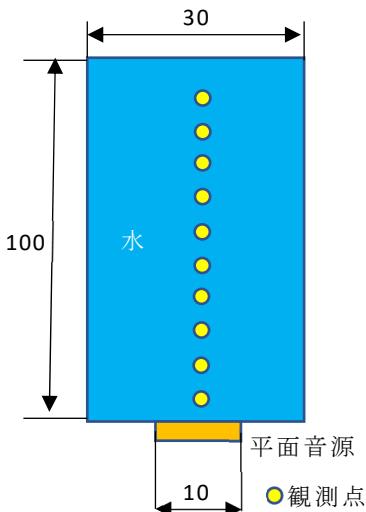


図 10 探触子中心軸上観測用
シミュレーションモデル

3.2 探触子中心軸上の振幅変動

次にパルス波における直接波とエッジ波の重なりについてシミュレーションで確かめた。モデルは図 10 の幅 10[mm]の平面音源を水中に配置したモデルで探触子中心軸上の振幅を 1[mm]ごとに計測した。送信波形は式(7)で周波数 2[MHz]、波数 1 の変調した負の sin 波を印加した。モデル左右と上部は吸収境界を設定し、水の密度:1000[kg/m³]、水の音速:1500[m/s]とした。近距離音場限界の計算値は 33.1[mm]、 x_i は 19.7[mm]、 x_d は 66.6[mm]である。探触子中心軸上の振幅を図 11 に示す。20[mm]付近で正の振幅が増大し始め、振幅が最大になるのが 41[mm]だった。また、負の振幅が減少し始める位置は 50[mm]となった。これらの結果から直接波とエッジ波の重なりにより正や負の振幅が変動することがわかる。振幅最大位置と現象し始める位置の理論値との相違については直接波とエッジ波が重なることで周波数が変動することがあり [6]、直接波やエッジ波の波長が異なったことが原因と考えられる。波長の変化による信号の合成位置変動については今後検討を行う。また、最初の負のピーク信号は少なくとも近距離音場ではエッジ波の影響を受けないため、減衰評価などを行う場合の指標として有効である。

4. おわりに

エッジ波の発生について送信時に探触子端部から一回だけ発生するのではなく、媒質を伝搬中に直接波端部から発生し続けていることをシミュレーションで確かめた。また、探触子中心軸上の直接波とエッジ波の重なりについて正の振幅と負の振幅から考え、それらの合成により振幅変動が発生することを述べた。

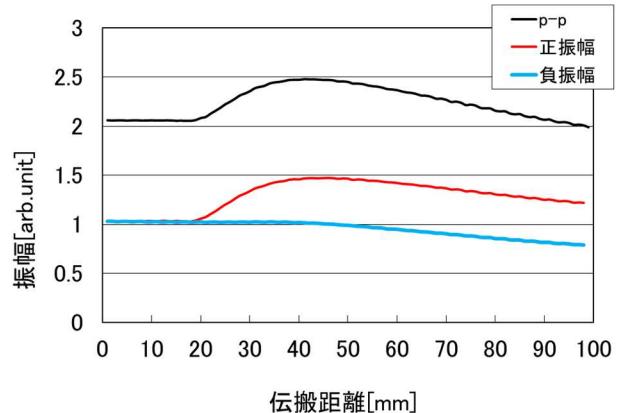


図 11 探触子中心軸上の振幅

文献

- [1] 超音波便覧編集委員会編;超音波便覧;丸善;pp.26-35(1999)
- [2] J. P. Weight, A. J. Hayman; Observations of the propagation of very short ultrasonic pulses and their reflection by small targets; J. Acoust. Soc. Am. 63(2); pp.396-404(1978)
- [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、阿部晃、小倉幸夫;媒質ごとのエッジ波発生量の違いと減衰の評価;電子情報通信学会技術研究報告、US2019-96(2020-1); pp.143-148(2020)
- [5] 田中雄介、阿部晃、小倉幸夫;集束超音波探触子の焦点位置評価とエッジ波による焦点位置変動;電子情報通信学会技術研究報告、US2019-97(2020-01); pp.149-154(2020)
- [6] 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と波長の評価;電子情報通信学会技術研究報告 超音波 Vol.117 No.398 pp.151-156(2018)