

# 超音波伝搬シミュレータによる集束超音波探触子の設計と 球面収差による影響評価

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** 集束超音波探触子は音響レンズや凹面振動子を用いており、その焦点位置は直接波とエッジ波が重なって発生する。実際の焦点位置は直接波とエッジ波のそれぞれの影響度により変化し、幾何学的に計算される直接波最大影響度の焦点とエッジ波最大影響度の焦点の間になる。エッジ波の影響度を求めることで焦点位置を計算可能で、シミュレータによりエッジ波の影響度を凹面状超音波の開口角と関係づけて算出した。エッジ波の影響度から振動子形状や周波数、音響レンズや媒質の音速から焦点位置を推定可能になった。さらに音響レンズの球面収差の影響をシミュレータで評価し、焦点に影響が無いことを確かめた。

**キーワード** 超音波、焦点、音響レンズ、直接波、エッジ波、球面収差

## Focused ultrasonic transducer design and spherical aberration effects evaluation using simulator

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** Focused ultrasonic probe uses acoustic lenses or concave transducers, with their focal point arising from overlapped direct and edge waves. The actual focal point varies according to the respective influence of the direct and edge waves, lying between the geometrically calculated focal points of maximum direct wave influence and maximum edge wave influence. By determining the influence of the edge wave, the focal position can be calculated. Using a simulator, the influence of the edge wave was calculated in relation to the aperture angle of the concave-shaped ultrasonic wave. It became possible to estimate the focal point from the influence of the edge wave, based on the transducer shape, frequency, acoustic lens, and the sound velocity of the medium. Furthermore, the influence of spherical aberration in the acoustic lens was evaluated using the simulator, confirming it has no effect on the focal point.

**Keywords** Ultrasound, Focal point, Acoustic Lens, Direct wave, Edge wave, Spherical aberration

### 1. はじめに

集束超音波は焦点位置での高分解能化や高音圧により非破壊検査や医用超音波で広く利用されている。集束超音波は音響レンズや凹面振動子により発生可能で、焦点位置を正しく設計することが重要である。焦点位置は凹面振動子が曲率半径中心[1]、音響レンズが屈折焦点[2]とされる。実際の焦点はレンズや超音波振動子の形状により大きく異なり、凹面振動子は曲率半径中心より焦点が手前になる[3]。音響レンズでも屈折焦点より実際の焦点が手前になり、これらは直接波とエッジ波が重なって振幅が変動することで発生する[4]。従来理論ではパルス波は近距離音場では振幅が一定[5]

でエッジ波の重なりによる振幅増加などの変動は記述がない。直接波とエッジ波の重なりによる振幅変動は実験では報告されており[6]、集束超音波でもエッジ波の発生が報告されている[7]ことからエッジ波による振幅変動が発生する。これまでエッジ波の影響度を定義し、凹面超音波面の開口角とエッジ波の影響度の関係をシミュレータで計算して焦点位置計算法を報告した[4]。音響レンズでは屈折焦点相当の仮想的な凹面振動子を設定して計算したが、音響レンズは球面収差により波面が凹面にならない。従って、音響レンズ型集束超音波探触子は球面収差の影響を評価する必要がある。今回、集束超音波探触子の焦点計算法に加え、音響レンズ型集束超音波探触子の球面収差の影響について

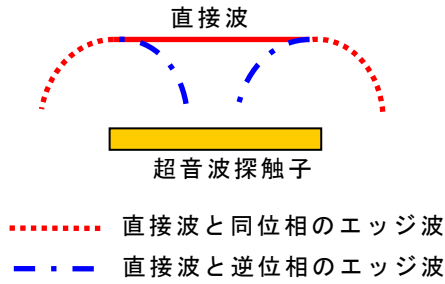


図1 探触子から発生する超音波

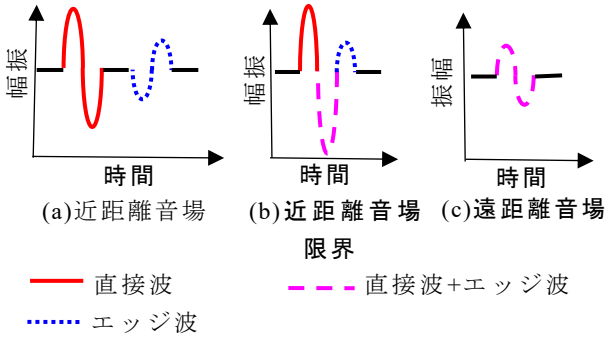


図3 探触子中心軸上における直接波とエッジ波の合成

てシミュレータにより評価したことを述べる。

## 2. 集束超音波探触子の焦点形成

### 2.1 直接波とエッジ波の合成による振幅変動

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。エッジ波が超音波振動子端部から発生するか直接波端部から発生するかは音響レンズが厚い場合に影響する。平面音源は点音源の集合で端部以外は打ち消し合い正面の成分だけが残る、端部は打ち消されずに点音源として残るためエッジ波が発生するとされる。図2に超音波伝搬シミュレータ(イーコンピュート株式会社、SWAN21)で平面音源と端部だけの点音源で水中に超音波を送信したときの様子を示す。点音源はすぐに拡散して振幅が低下するが、平面音源はエッジ波が確認でき、エッジ波は直接波端部から常に発生していることがわかる。

ここで探触子中心軸上では図3のように振幅変動が発生する。直接波の伝搬距離  $D$  とエッジ波の伝搬距離  $E$  は図4のように考え、直接波とエッジ波が逆位相のため  $E-D$  が半波長になる位置  $x_0$  で振幅が増大し、その位置は

$$x_0 = \frac{1}{4} \left( \frac{w^2}{\lambda} - \lambda \right) \quad (1) \quad \begin{array}{l} w : \text{振動子幅} \\ \lambda : \text{波長} \end{array}$$

となり、近距離音場限界である。平面振動子ではエッジ波の振幅変動のみで焦点が形成され、後述する焦点位置に対するエッジ波の影響度は 100%である。探触

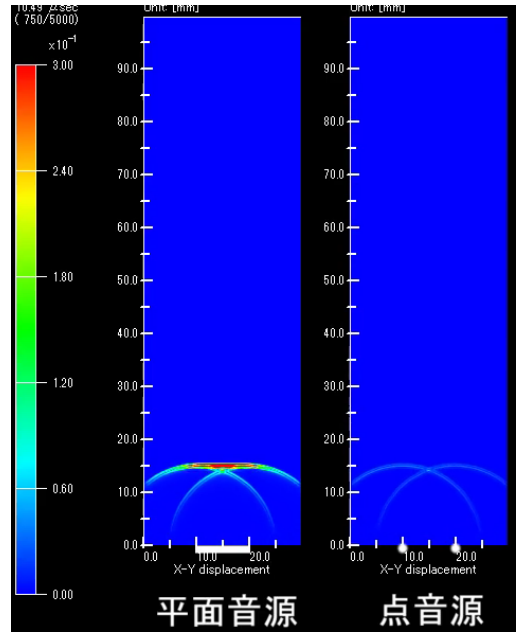


図2 平面音源のエッジ波と点音源の比較

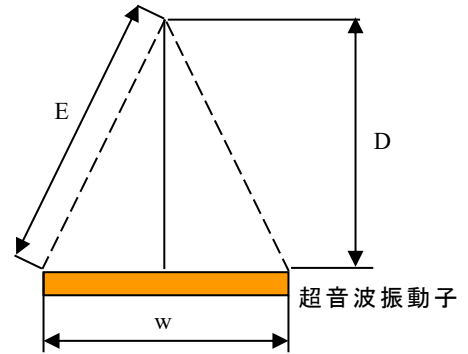


図4 直接波とエッジ波の超音波伝搬

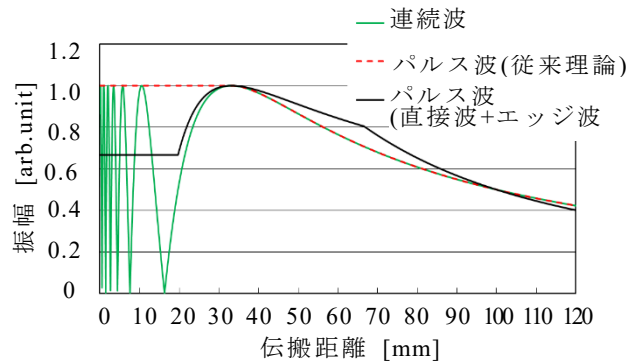


図5 探触子中心軸上の振幅変動

子中心軸上の振幅について振動子直径 10[mm]、周波数 2[MHz]と仮定すると図5となる。振幅  $A$  は最大値 1、最小値 0 と正規化しており、連続波は

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

で表わされる。パルス波は近距離音場限界までは振幅

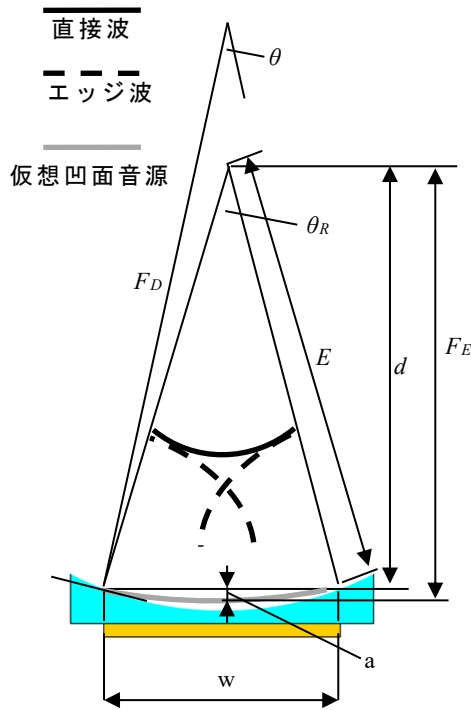


図6 音響レンズ型集束超音波探触子の仮想凹面音源  
1、それ以遠は式(2)とされる[5]。このパルス波は直接波とエッジ波の振幅変動は考慮していない。直接波とエッジ波の重なりを考慮すると次の考え方となる。

直接波とエッジ波の伝搬距離差  $E-D$  と超音波の波長  $\lambda$  から下記の式(3)

$$E-D = a\lambda \quad (3)$$

で  $a$  を定義しパルス波の振幅  $A_{p-p}$  は  $a$  の値によって以下の式(4)

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

となる。仮定として直接波とエッジ波の振幅が同等で1波の正弦波送信時であり、最大値を1、最小値を0とした正負のピーク間振幅値  $p-p$  である。パルス波では  $a$  が  $5/6$  より大きいと振幅が一定でそこから直接波の第2ピークとエッジ波の第1ピークが重なって振幅が上昇し始める。 $a$  が  $1/2$  になる近距離音場限界で振幅が最大(図3(b)の状態)になり、そこから徐々に振幅が低下し、 $a$  が  $1/4$  以下になると直接波とエッジ波全体が重なり始め振幅減少幅が大きくなる。従って、パルス波は探触子中心軸上で伝搬距離により直接波とエッジ波の重なり方が変化して図5のような振幅変動が発生する。

## 2.2 集束超音波探触子の幾何学的焦点

集束超音波探触子の焦点について従来凹面振動子型は曲率半径中心  $r_c$ 、音響レンズ型は屈折計算値  $F_R$  とされる。 $F_R$  は凹レンズでは

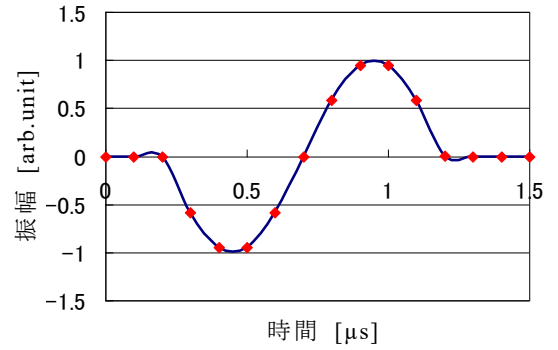


図7 1[MHz] 1波の正弦波

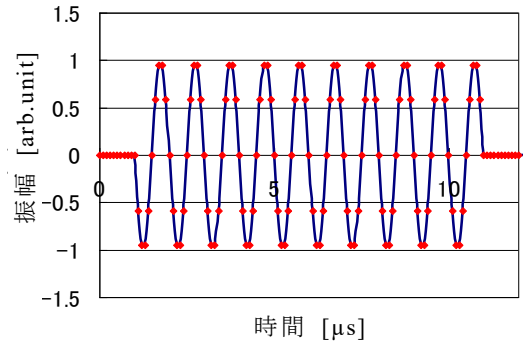


図8 1[MHz] 10波の正弦波

$$F_R = \frac{r}{1 - \frac{c_2}{c_1}} \quad (5), \quad \begin{aligned} c_1: & \text{音響レンズの音速} \\ c_2: & \text{媒質音速} \end{aligned}$$

凸レンズでは

$$F_R = \frac{r}{\frac{c_2}{c_1} - 1} \quad (6)$$

$r$ : レンズ曲率半径

である。音響レンズ型は図6のように曲率半径  $F_R$  の仮想凹面音源が配置されたと近似できる。上記の音響レンズや凹面振動子の焦点  $F_R$ 、 $r_c$  は直接波のみで考えた場合でエッジ波による振幅変動は考慮しない。ここで凹面振動子や仮想凹面音源の中心角  $\theta$  を開口角と定義し、次章で焦点位置  $F$  へのエッジ波の影響を考える。凹面音響レンズの開口角は  $\theta_R$  と定義できるが、屈折により  $\theta_R$  は  $\theta$  より小さくなる。

## 2.3 波長と周波数の評価法

式(1)の近距離音場限界、後述の式(8)の直接波とエッジ波の重なりを考えると波長で計算する。波長を計算するには周波数を評価する必要があるが、周波数はFFTの振幅スペクトル(周波数 A)、周期の逆数(周波数 B)、探触子の共振周波数(周波数 C)と認識が様々である。JIS Z 2350 では平板反射信号をFFTし、中心周波数で評価するが、周波数の定義は周期の逆数である。波長  $\lambda$  は音速  $c$  を周波数で割った  $c/f$  であるが、波長の定義は波が1回振動するときに進む距離である。波が1回振動するときの時間は周期  $T$  であり、音速  $c$  と周期  $T$  の積が波長  $\lambda$  となり、以下の式(7)となる。

$$\lambda = cT \quad (7)$$

周波数 A と周波数 B を比較すると、図7、図8の周波

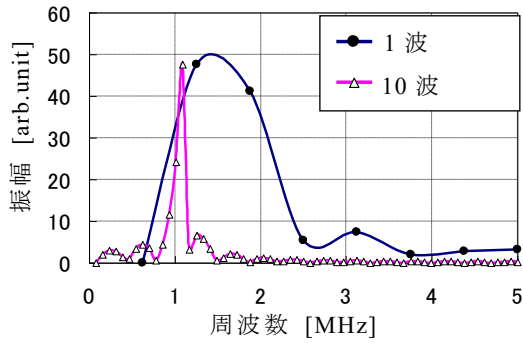


図9 1[MHz]正弦波のFFT振幅スペクトル

数 1[MHz]、サンプリング周波数 10[MHz]の正弦波 1 波と 10 波に FFT を行うと振幅スペクトルは図 9 となる。1 波は中心周波数が 1.4[MHz]程度、10 波は 1.1[MHz]程度であり、1 波は 40%の誤差がある。FFT は連続波が前提であり、波数が多くなるほど誤差が少なくなる。従って、波数が少ないパルス波に FFT を行うと周波数の誤差が大きくなる。サンプリング周波数を増やしても振幅スペクトルの横軸周波数の最大値が大きくなるだけで精度は変わらない。波数が少ない場合、ピーク間の時間差の逆数、例えば正負ピーク間は半周期であるので、 $0.5/(\text{半周期時間})$ で周波数を計算すると 1[MHz]となる。従って、波長を計算する周波数は周期の逆数(周波数 B)で評価することが適切である。

### 3. 直接波とエッジ波の焦点位置への影響度

#### 3.1 直接波とエッジ波の最大影響位置と焦点範囲

焦点位置  $F$  は直接波とエッジ波の重なりにより形成される。焦点位置計算にはそれらの影響度を評価する必要がある、凹面振動子の曲率半径中心  $r_c$  や音響レンズの屈折計算値  $F_R$  は直接波の影響度が 100%の位置  $F_D$  である。一方、近距離音場限界  $x_0$  はエッジ波の影響度が 100%の位置である。ここで、凹面音源におけるエッジ波の影響度が最大になる位置を考える。音響レンズ式、凹面振動子の両方に対応するため図 6 で仮想凹面音源で考えて、エッジ波と直接波の伝搬距離差が半波長になる位置がエッジ波の影響度が最大になる位置  $F_E$  である。図 6 で  $F_E$  は  $E-d$  であり、以下の式(8)

$$F_E = \frac{4b^2 + w^2 - \lambda^2}{4(\lambda + 2b)} \quad (8)$$

$b$  : 仮想凹面音源矢高

$w$  : 振動子幅  $\lambda$  : 波長

となる。焦点位置  $F$  は  $F_D$  と  $F_E$  の間にあり、エッジ波の重なり方により焦点が計算可能である。ここで焦点位置  $F$  に対する直接波の影響度を  $I_D$ 、エッジ波の影響度を  $I_E(0 \leq I_D, I_E \leq 1)$  とすると焦点位置  $F$  は以下の式(9)

$$F = F_D I_D + F_E I_E \quad (9)$$

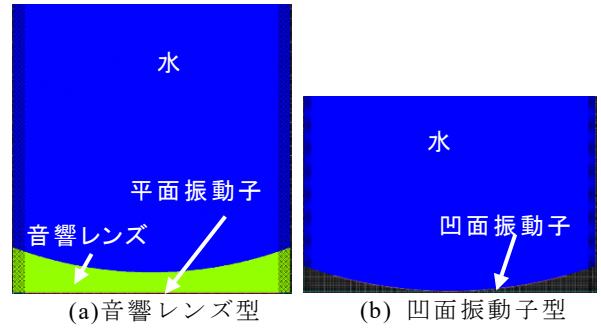


図 10 音響レンズ型と凹面振動子型集束超音波探触子のシミュレーションモデル

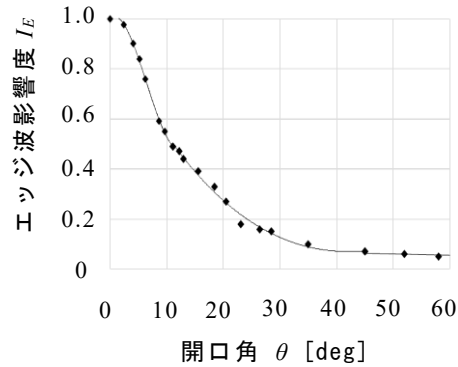


図 11 開口角  $\theta$  とエッジ波影響度  $I_E$  の関係

で表わされ、直接波とエッジ波のみで焦点が形成されると考えると式(9)は以下の式(10)

$$F = F_D(1 - I_E) + F_E I_E \quad (10)$$

となる。 $F_D$  や  $F_E$  は振動子サイズや曲率半径、レンズの音速などから幾何学的に計算できるため、焦点位置へのエッジ波の影響度  $I_E$  を算出すれば焦点位置を計算することができる。

#### 3.2 エッジ波影響度の推定

開口角  $\theta$  は平面音源では 0 であり、この場合焦点位置へのエッジ波影響度  $I_E$  は 100%である。従って、開口角  $\theta$  と焦点位置へのエッジ波影響度  $I_E$  は関係性があると仮定できる。ここで、超音波伝搬シミュレータ(イーコンピュート、SWAN21)を用いて、図 10 の音響レンズ、凹面振動子モデルで開口角  $\theta$  を変化させたときの焦点を計算し、開口角  $\theta$  とエッジ波影響度  $I_E$  の関係を調べた。これらの関係性は図 11 となり、近似曲線は  $\theta$  が  $11^\circ$  までが

$$I_E = 7 \times 10^{-4} \theta^3 - 0.0141 \theta^2 + 0.0213 \theta + 0.9988 \quad (11),$$

45° までが

$$I_E = -3 \times 10^{-6} \theta^3 - 0.0008 \theta^2 + 0.0467 \theta + 0.9289 \quad (12),$$

45° 以上が

$$I_E = -0.0005 \theta + 0.0848 \quad (13)$$

とな 3 次と 1 次の曲線となる。上記の近似曲線からエッジ波の影響度  $I_E$  を計算し、焦点位置  $F$  を推定する。

表1 エッジ波影響度から求めた焦点位置計算結果と実際に試作した探触子焦点の比較

種類	振動子幅 $w$ [mm]	曲率半径 $r$ or $r_c$ [mm]	開口角 $\theta$ [deg]	レンズ音速 $c_1$ [m/s]	媒質音速 $c_2$ [m/s]	周波数B $f_B$ [MHz]	エッジ波影響度 $I_E$	焦点計算値 $F_c$ [mm]	実際の焦点 $F$ [mm]
音響レンズ	6.4	38	4.1	2600	1500	9.6	0.90	43	43
音響レンズ	6.4	38	4.1	2600	1500	5.4	0.90	32	30
音響レンズ	6.4	10	15.6	2600	1500	8.6	0.38	21	20
音響レンズ	6.4	10	15.6	2600	1500	5.6	0.38	20	21
音響レンズ	6.3	14	9.2	2330	1500	12.2	0.57	32	33
音響レンズ	6.4	38	3.4	2330	1500	9.8	0.93	45	44
凹面振動子	6.4	38	9.7		1500	8.9	0.52	30	29
凹面振動子	6.4	38	9.7		1500	4.5	0.52	27	23
凹面振動子	6.4	10	37.3		1500	8.9	0.14	10	10
凹面振動子	6.4	12	30.9		1500	8.2	0.12	12	12
凹面振動子	6.4	18	20.5		1500	8.3	0.26	17	16

表2 水中での音響レンズ焦点シミュレーション

音響レンズ 曲率半径 $r$ [mm]	レンズ焦点 $F_R$ [mm]	焦点計算値 $F_C$ [mm]	仮想凹面音源 開口角 $\theta$ [°]	シミュレーション 焦点 $F_S$ [mm]
5	14.0	13.4	26.4	13
7	19.7	17.6	18.7	18
9	25.3	21.0	14.5	20
18	50.5	30.5	7.3	28
37	103.8	31.2	3.5	32

表3 水中での凹面振動子焦点シミュレーション

凹面振動子 曲率半径 $r_c$ [mm]	焦点計算値 $F_C$ [mm]	凹面振動子 開口角 $\theta$ [°]	シミュレーション 焦点 $F_S$ [mm]
14	13.3	26.4	13
20	17.7	18.4	17
25	20.7	14.7	21
51	30.4	7.2	29
104	31.1	3.5	33

#### 4. エッジ波影響度の推定と焦点位置算出

焦点位置  $F$  を実際に計算するときは直接波のみの焦点  $F_D$  とエッジ波最大影響度の焦点  $F_E$ 、焦点位置へのエッジ波の影響度  $I_E$  が必要である。まず直接波のみの焦点  $F_D$  は式(5)や式(6)での屈折焦点  $F_R$ 、または凹面振動子の曲率半径中心  $r_c$  から計算する。これらは音響レンズの音速  $c_1$  や媒質音速  $c_2$ 、音響レンズの曲率半径  $r$  から求められる。次にエッジ波最大影響度の焦点  $F_E$  は仮想凹面音源や凹面振動子の振動子幅  $w$  や矢高  $b$ 、波長  $\lambda$  から式(8)で計算する。矢高  $b$  は振動子幅や曲率半径から計算する。波長は式(7)の通り媒質音速  $c_2$  と周期  $T$  の積で、周波数  $f_B$  は実際に計測した超音波波形の1周期の逆数や  $0.5/(\text{半周期時間})$  で計算することが正確であるが、ひとまずは探触子の公称周波数を用いる。 $I_E$  は凹面音源や仮想凹面音源の開口角  $\theta$  により式(11)から式(13)で計算する。最後に式(10)に  $F_D$ 、 $F_E$ 、 $I_E$  を代入して焦点位置  $F$  を計算する。

ここで音響レンズ型と凹面振動子型の集束超音波探触子で式(10)の焦点位置計算結果  $F_C$  と実際に試作した焦点位置  $F$  を比較し、表1に示した。音響レンズはエポキシ(音速 2600[m/s])、ポリスチレン(音速 2330[m/s])、媒質は水(音速 1500[m/s])である。 $F_C$  と  $F$  がよく一致しており、開口角  $\theta$  から焦点位置  $F$  に対するエッジ波の影響度  $I_E$  をシミュレータで作成することで

焦点位置  $F$  を計算することが可能である。しかし、音響レンズ型集束超音波探触子の仮想凹面音源は球面音源と仮定しているが、球面収差の影響で非球面の音源となる。開口角  $\theta$  が大きいほど球面収差の影響が大きくなると予想されるため次章で仮想凹面音源と凹面音源の曲率を同じにしたときの焦点を評価する。

#### 5. 球面収差による焦点位置変化の検証

球面収差による音響レンズ型集束超音波探触子の焦点位置を評価するため、音響レンズの仮想凹面音源と凹面音源の曲率を同程度にしたときの焦点位置をシミュレータ(イーコンピュート、SWAN21)で比較した。媒質は水中(音速 1500[m/s])、周波数 5[MHz]、ポリスチレン音響レンズ(音速 2330[m/s])、振動子直径 6.4[mm] で焦点位置  $F_S$  を評価した。表2に音響レンズ型の焦点位置シミュレーション結果、表3に音響レンズの仮想凹面音源と同程度の曲率の凹面振動子の焦点位置シミュレーション結果を示す。それぞれの焦点位置  $F_S$  は誤差 1[mm]以内になり、音響レンズによる球面収差は水中超音波では焦点計算値に影響しない。

次に媒質が空中(音速 340[m/s])の場合の球面収差を同様に評価した。ポリスチレン音響レンズ(音速 2330[m/s])で周波数は 400[kHz]である。振動子直径 20[mm]で焦点位置  $F_S$  をシミュレーションで計算した。

表 4 空中での音響レンズ焦点シミュレーション

音響レンズ 曲率半径 $r$ [mm]	レンズ焦点 $F_R$ [mm]	焦点計算値 $F_C$ [mm]	仮想凹面音源 開口角 $\theta$ [°]	シミュレーション 焦点位置 $F_S$ [mm]
12	14.1	14.0	90.8	14
14	16.4	16.3	75.2	16
17	19.9	19.8	60.3	19

表 4 に音響レンズ型の焦点位置シミュレーション結果、表 5 に凹面振動子の焦点位置シミュレーション結果を示す。空中でも焦点位置  $F_S$  は誤差 1[mm]以内になり、音響レンズの球面収差は焦点計算値に影響しないことが確かめられた。

## 6. おわりに

集束超音波探触子の焦点が直接波とエッジ波の重なりにより形成されることを説明し、直接波とエッジ波の影響度により焦点位置が変動することを示した。焦点位置  $F$  に対するエッジ波の影響度  $I_E$  をシミュレータで開口角  $\theta$  との関係から計算した。これらの計算法により、振動子幅や音響レンズと媒質の音速、周波数や曲率半径から焦点位置を計算する手法を開発した。音響レンズ型集束超音波探触子における球面収差による焦点変動をシミュレーションで調べ、水中や空中で球面収差の影響がほとんど無いことが確かめられた。

今後の課題としては低周波時の遠距離音場で集束する超音波探触子の焦点位置が本計算式ではずれることである。例えば振動子直径 40[mm]、曲率半径 40[mm]、周波数 100[kHz]の凹面振動子は近距離音場限界が水中で 22.9[mm]である。焦点計算値  $F_C$  は 38.9[mm]であるが、シミュレーションでの焦点  $F_S$  が 28[mm]と大きくずれる。遠距離音場での焦点におけるエッジ波の影響度を補正する式を作成する必要がある。

## 文献

- [1] H. Djelouah, J.C. Baboux and M. Perdrix, "The transient field of a planar ultrasonic transducer coupled to a lens: Experiments and simulations," The Journal of the Acoustical Society of America, 87(1), pp. 76-80(1990)
- [2] 日本非破壊検査協会：超音波探傷試験Ⅲ2017、日本非破壊検査協会、pp.65-69(2017)
- [3] 超音波便覧編集委員会編：超音波便覧、丸善、pp.38-40(1999)
- [4] 田中雄介、小倉幸夫；超音波伝搬シミュレータを活用した集束超音波探触子の設計；非破壊検査、Vol.74, No.9, pp.361-369(2025)
- [5] 超音波便覧編集委員会編：超音波便覧、丸善、pp.31-34(1999)

表 5 空中での凹面振動子焦点シミュレーション

凹面音源 曲率半径 $r_c$ [mm]	焦点計算値 $F_C$ [mm]	凹面振動子 開口角 $\theta$ [°]	シミュレーション 焦点 $F_S$ [mm]
14	14.0	91.2	14
16	15.9	77.4	16
20	19.9	60.0	20

[6] J. P. Weight, A. J. Hayman, "Observations of the propagation of very short ultrasonic pulses and their reflection by small targets," The Journal of the Acoustical Society of America, 63(2), pp.396-404(1978)

[7] 大谷隆彦, "集束音場のパルス応答," 海洋音響学会誌, 28(3), pp.139-146(2001)