

キーワード 超音波, エッジ波, 連続波, シミュレーション, 可視化, 指向性

1. はじめに

シミュレーションはある理論に対して入力, 条件を与えた時に結果を計算で出力するものであり, 設計や評価などに広く利用されている。シミュレーションの理論は世の中のすべての現象を再現しているわけではなく, 結果も近似値である。超音波の伝搬理論についてもエッジ波の振幅などは完全には解明されていない。完璧に実測と合わないと思えないというわけではなく, シミュレーション結果のどの部分が設計, 評価に使えるかを判断してシミュレーションを活用する必要がある。これまでに超音波伝搬の可視化としてパルス波と連続波の超音波伝搬の違い¹⁾, 集束超音波探触子の焦点位置評価²⁾, 探触子の送信と受信の指向性について報告してきた³⁾。また, アンカーボルト内の超音波伝搬についてシミュレーションを用いた分析を報告した⁴⁾。本稿では探触子から送信される超音波, シミュレーション結果と実験結果の異なる部分, パルス波と連続波の現象, 探触子の送信と受信の指向性, シミュレーションによる集束超音波の設計と評価について述べる。

2. 探触子から送信される超音波と理論, シミュレーション, 実際の違い

探触子から送信される超音波は図1のような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である。この波が無数にあると連続波になる。しかし, ほとんどの教科書⁵⁾にある理論は波動工学が基になっている。そのため連続波の現象で説明しており1波のパルス波について記述されたものは少ない^{6), 7)}。また, エッジ波は音圧の急激な変化がある部分から発生するという説がある⁸⁾。例えば, 図2のように物体に音が遮られた場合も音圧の急激な変化があるので透過部分と反射部分の端部からエッジ波が発生する。エッジ波は直接波より音圧が小さくなり広がるほど音圧が低下する。しかし, 教科書では直接波とエッジ波の音圧が同じ前提で計算されており, さらに最大値を2や1の固定値で正規化され

ている⁶⁾。本稿では中畑らによる動弾性有限積分法でシミュレーションを行うシミュレータ「SWAN21」(イーコンピュート社製)を用いてパルス波と連続波でのシミュレーション結果を述べる。図3は平面振動子に正パルス波を印加したときのシミュレーション結果である。白が正の振幅, 黒が負の振幅である。平面の直接波と外側には直接波と同位相のエッジ波, 内側には逆位相の負のエッジ波が発生していることが確認できる。シミュレータでの注意点は波数無限の連続波でしか行えないものがあることである。使用するシミュレータが連続波の定常状態しか計算できないか, パルス波の過渡応答も計算できるかを知る必要がある。また, 音圧などの振幅は相対的な値であり, 絶対値を求めるには圧電解析が必要である。しかし, 圧電解析もほとんど連続波の定常状態で計算しているという問題がある。さらにエッジ波の振幅は媒質により異なるが完璧に再現はまだできない。騒音などの回り込みでは粒子速度の勾配から評価を行うものがあるが⁹⁾, エッジ波へ

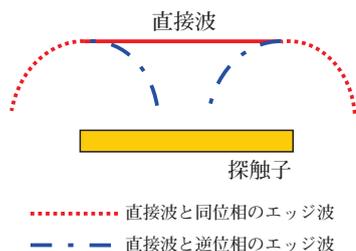


図1 探触子から送信される超音波

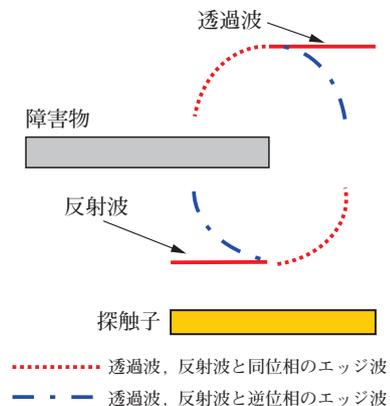


図2 物体透過時に発生するエッジ波

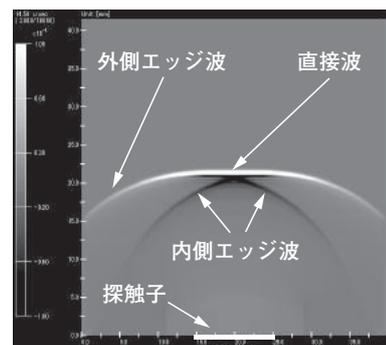


図3 エッジ波シミュレーション図

適用できるかは検討が必要である。

上記をまとめると教科書やシミュレーション、実際の計測で気を付けることは

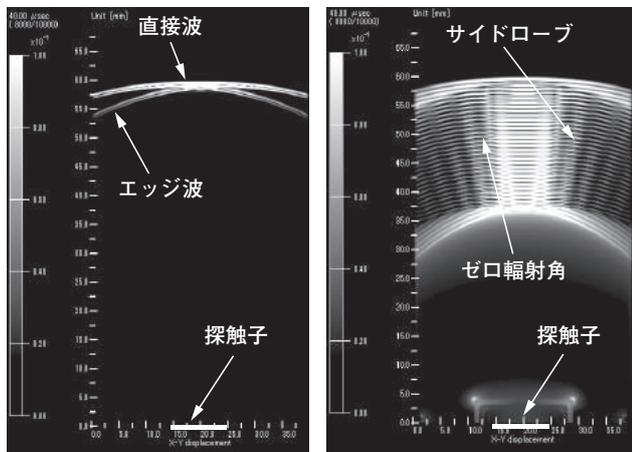
1. 使う理論やシミュレーションは連続波を前提にしたものか、パルス波では適用できるか
2. 音圧などの振幅は直接波とエッジ波で同じか、ある値を最大値として正規化されているか
3. シミュレーションの直接波、エッジ波などの振幅と実際の振幅はどの程度異なるか

となる。重要なことは実際とシミュレーションとの違いを把握して結果をどのように利用するかである。

3. パルス波と連続波での現象

3.1 サイドローブとゼロ輻射角

探触子から送信される超音波はパルス波と連続波で異なり、連続波では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する。図4は波数1と波数30のSin波を印加したときのシミュレーション結果である。波数30では振幅変動が発生し、サイドローブやゼロ輻射角のような現象が起こった。これを説明すると図5のようになる。片側だけ説明するが、前の直接波右側から発生した内側エッジ波と後の直接波左側から発生した外側エッジ波が黒丸の部分で重なるとする。それぞれ位相が逆なので単純に重なると振幅が低下する。また、半波長ずれて重なると振幅が増大する。エッジ波の振幅については正面に近いほど大きいので黒丸の部分は直接波



(a) パルス波 (1波) (b) 連続波 (30波)

図4 パルス波と連続波の音場

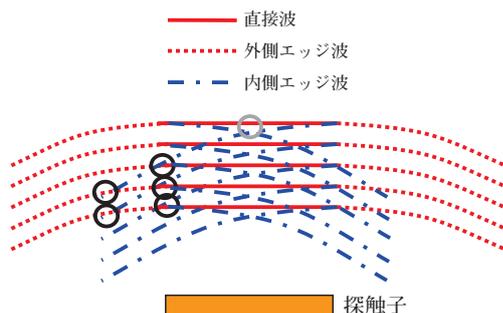


図5 エッジ波の重なりによる振幅変動

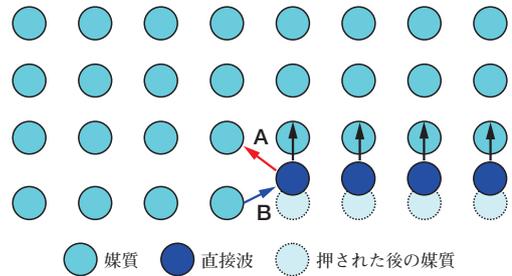


図6 媒質伝搬中のエッジ波発生

左側の外側エッジ波の方が直接波右側の内側エッジ波より振幅が大きい。文献8)によると図6のような説明がされている。直接波が媒質を伝搬する時媒質が押されるが、端部では直接波前方の媒質は押され (A)、後方の媒質は引っ張られる (B)。そのため内外エッジ波は位相が異なり、エッジ波が広がるほど押される力、または引っ張られる力が低下する。従って、図5の黒丸部分では外側エッジ波の振幅が大きくなる。また、先頭付近と最後尾付近の波はエッジ波が重ならないので振幅変動が発生せず、図4でもそうになっている。エッジ波の重なりは探触子中心軸上でも発生するが、次節で述べる。

3.2 探触子中心軸上の振幅変動

図5の探触子中心軸上の灰色丸部分では直接波とエッジ波が重なる。それぞれ逆位相であるので伝搬距離差が半波長になった時に振幅が増大し、単純に重なった場合は振幅が低下する。図7のように考えるとエッジ波の伝搬距離 E と直接波の伝搬距離 X の差 $E - X$ が半波長になった時に振幅が増大する。 $E - X$ が $\lambda/2$ になるときは式 (1)

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

w : 振動子幅 λ : 波長

となり、振動子幅を直径 D にして $\lambda/4$ が小さいので省略すると近距離音場限界の式となる。ここで振動子幅 10mm、周波数 2MHz の探触子での中心軸上のシミュレーションにおける振幅は図8のようになる。水中音速 1500m/s、波長を 0.75mm とすると近距離音場限界は 33mm で、パルス波 (1波) と連続波 (30波) の Sin 波を送信した。近距離音場限界付近で連続波、パルス波共に振幅が大きくなり、連続波では振幅変動が発生した。パルス波での探触子中心軸上の振幅を図9に示す。距離 10mm では直接波とエッジ波がそれぞれ逆位相で検出され、近距離音場限界でそれらが合成されて振幅が大きくなる。図10の

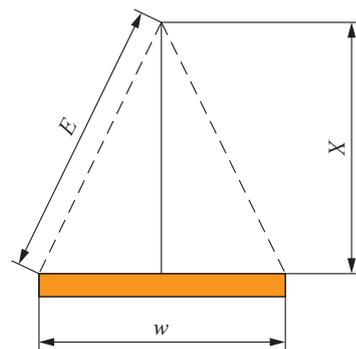


図7 直接波とエッジ波の重なる距離

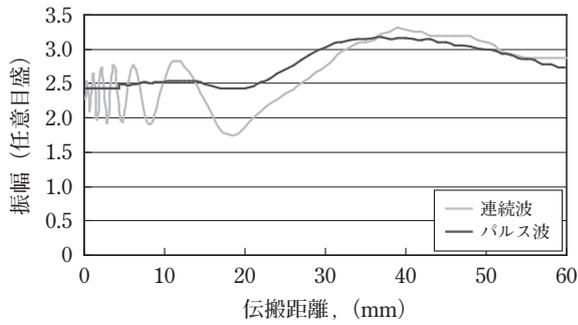


図8 探触子中心軸上の振幅 (シミュレーション)

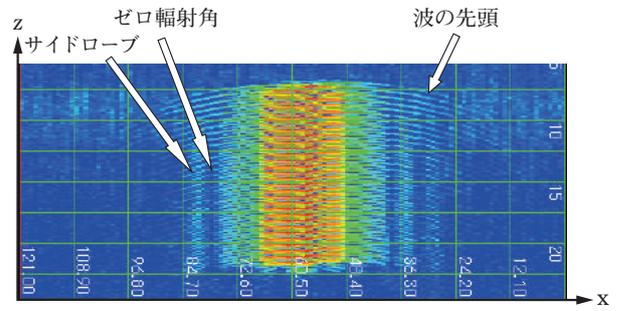


図11 水中の音場観測

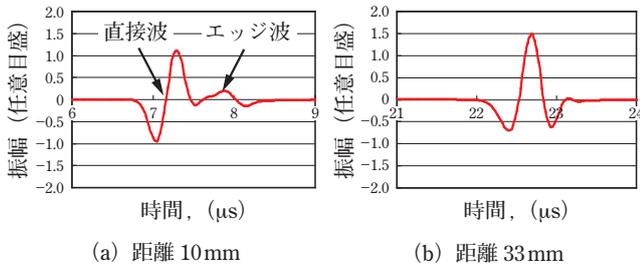


図9 探触子中心軸上における直接波とエッジ波の重なり

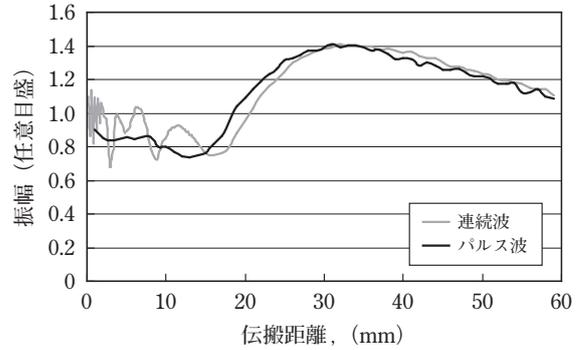


図12 探触子中心軸上の振幅 (実験)

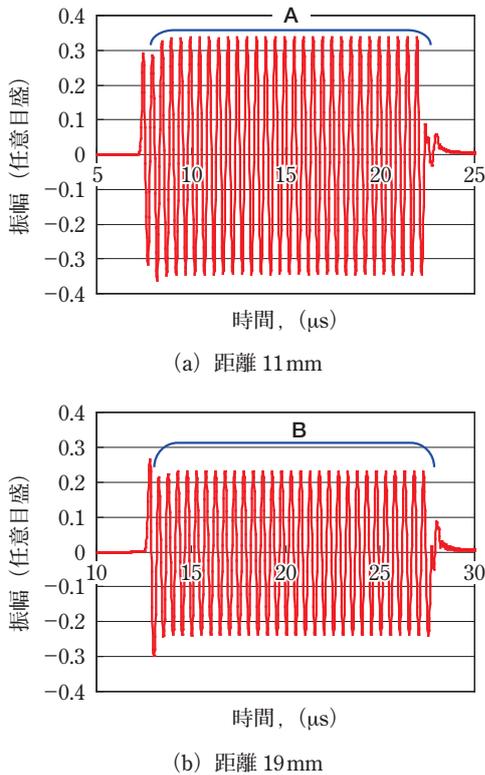


図10 30波における振幅変動

30波では後ろの波の振幅が変動していることがわかる。連続波の振幅として図10のA、Bの位置のように後ろの波の振幅を記録した。振幅が増大する点としては $E - X$ が $\lambda/2$ や $3\lambda/2$, $5\lambda/2$ になる点、振幅が減少する点としては $E - X$ が λ の整数倍になる点である。超音波の伝搬と共に $E - X$ の差が小さくなるので、近距離音場限界とは直接波とエッジ波が重なって振幅が大きくなる一番遠い位置になる。

3.3 実験との比較

連続波ではサイドローブとゼロ輻射角、探触子中心軸上の

振幅変動について実験で現象を確かめた。直径10mm、周波数5MHzの探触子で水中において30波の超音波を送信し、ハイドロホンで音場を計測した。図11に計測結果を示す。サイドローブやゼロ輻射角が観測でき、波の先頭では振幅変動が発生していないことがわかる。また、ゼロ輻射角の音圧が0でないこともわかる。次に直径10mm、周波数2MHzの探触子で中心軸上の振幅をハイドロホンで計測した。図12の結果で連続波では近距離で振幅が変動し、近距離音場限界付近でパルス波、連続波共に振幅が大きくなった。

これらのシミュレーション、実験結果から直接波よりエッジ波の振幅が小さい、連続波では直接波とエッジ波が重なって振幅が変動する、近距離音場限界付近で振幅が大きくなるということがわかる。

3.4 グレーティングローブ

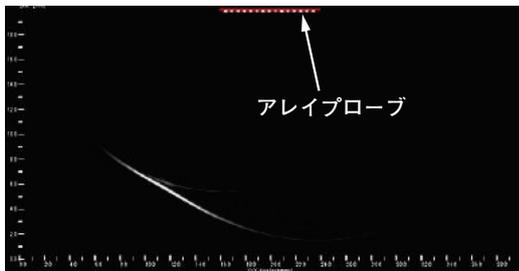
フェーズドアレイ走査においてピッチが大きくなると送信方向以外にも強い超音波が発生するグレーティングローブという現象がある。これも連続波の現象である。フェーズドアレイ自体がエッジ波の広がりを利用しており、前のエッジ波が後ろのエッジ波と重なって発生する。図13に水中5MHz、ピッチ0.5mm、走査角度30度で波数1波、5波、20波における超音波伝搬図を示す。グレーティングローブの発生条件は式(2)

$$d > \frac{\lambda}{1 + \sin\theta} \dots\dots\dots (2)$$

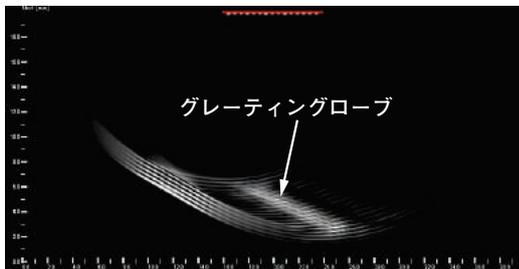
d : 素子ピッチ λ : 波長
 θ : アレイ走査角度

で表され、ピッチが0.2mmより大きいとグレーティングローブが発生する。図13より、波数1ではグレーティングローブが発生せず、波数が増えた時に先頭より後の波でグレーティングローブが発生していることがわかる。

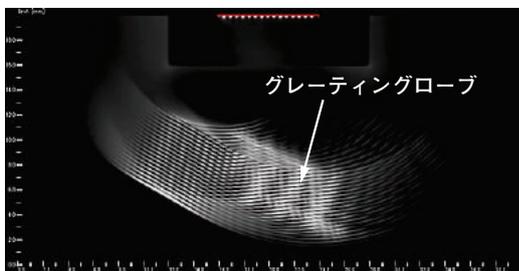
解説



(a) 波数 1



(b) 波数 5



(c) 波数 20

図 13 波数の違いによるグレーティングローブの変化

3.5 媒質によるエッジ波発生量の違い

シミュレーションでエッジ波がサイドローブや探触子中心軸上の振幅変動を発生させると述べたが、シミュレーションで完璧に計算できないことがエッジ波の発生量である。探触子中心軸上において近距離音場限界付近で直接波とエッジ波が重なって振幅が大きくなる。しかし、振幅の増加度合いが水中と空気中では異なる。図 14 は空気中と水中でのパルス波を送信したときの探触子中心軸上の振幅である。空中では 250kHz、直径 20mm の探触子、水中では 2MHz、直径 10mm の探触子を使用した。横軸は近距離音場限界を 1 とし、縦軸は近距離音場の振幅で合わせてある。空中

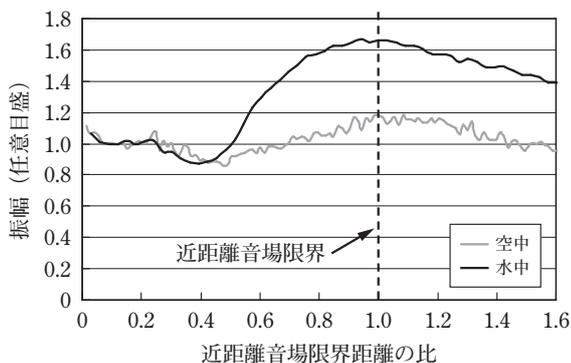


図 14 水中と空中の探触子中心軸上の振幅変化

だと近距離音場限界で 18% の振幅上昇、水中だと 66% の振幅上昇が発生した。従って、エッジ波の発生量は水中が空中より多く、媒質により異なる。シミュレーションだと 30% 程度の振幅上昇なので実際に使用している機器と比較してシミュレーション結果をどのように補正して考えるかが必要になる。従って、用途に応じてシミュレーション結果をどのように扱うかが重要になる。

4. 探触子の指向性

超音波探触子の指向性はベッセル関数で表現されており、相反定理から送信と受信は同じ特性であるとされる¹⁰⁾。しかし、文献 3) でも示したように送信と受信では指向性が異なる。送信指向性はエッジ波の広がりであり、媒質によりエッジ波の発生が異なるので空中は水中より音が広がりにくい。受信指向性は現象が異なり、信号の伝搬距離差で決まる。例えば 5MHz の平面波が水中において図 15 のように入射角 30 度で探触子に入射する時の受信強度のシミュレーション結果を図 16 に示す。振動子幅 0.2mm と 10mm では振幅が 28 倍異なり、振動子幅 0.2mm のほうが大きい。これは図 17 のように 4 点の出力で考えると各点に到達する超音波に時間差があるため、半波長ずれた信号が打ち消し合ったためである。図 18 に各点の波形と合成結果を示す。各点への到達距離が半波長ずれるため信号が打ち消し合って最初と最後のピークだけ残る。振動子幅を大きくしていくと図 19 のように振幅が低下し、信号の波長が長くなるのがわかる。シミュレーションにより斜めからの信号は信号が打ち消し合うので振動子幅が小さいほど指向性が低下するということがわかる。受信時の指向

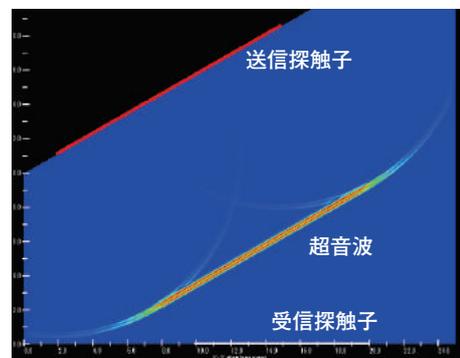


図 15 水中で斜めから超音波を受信

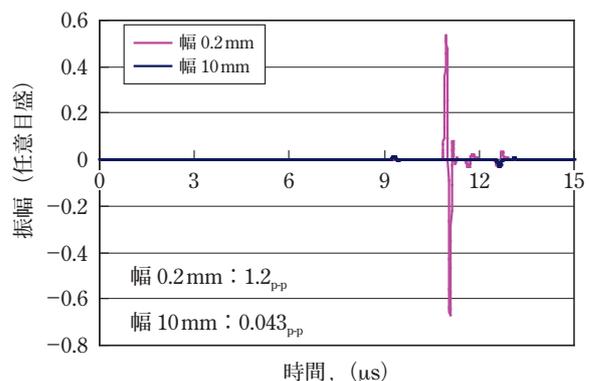


図 16 振動子幅と受信波形

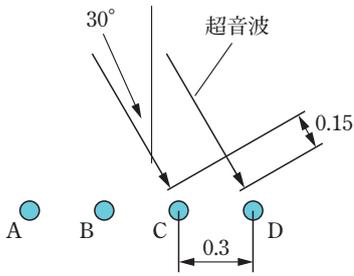


図 17 斜め入射時の波形出力点

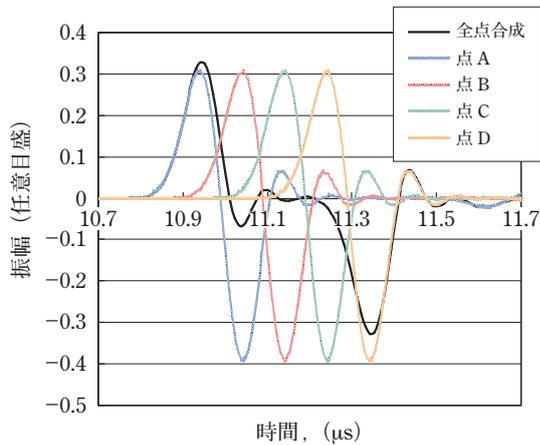


図 18 各波形出力点の波形と合成波形

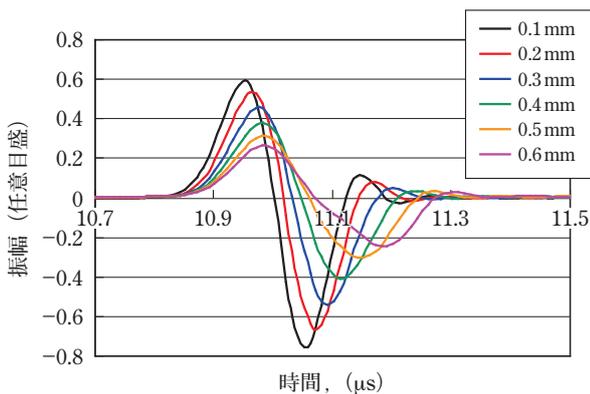


図 19 各振動子幅と受信波形

性と説明したが、要は大きな受信探触子は余計な信号を多く拾って信号が合成されてしまうので望ましくないということである。

5. 集束超音波の設計と評価

シミュレーションの活用事例として集束超音波探触子の設計について述べる。集束超音波探触子は音響レンズ型、凹面振動子型の2種があるが、基本的な考え方は同じである。音響レンズ型を例にするが、集束超音波探触子は焦点位置に波動による以下の式(3)

$$f = \frac{r}{1 - \frac{c_2}{c_1}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

f : 焦点位置 r : レンズの曲率半径
 c_1 : 音響レンズの音速 c_2 : 媒質の音速

で計算されるが¹¹⁾、この式には内側エッジ波の影響が入っていないので焦点はこの式より手前になる。凹型振動子についても曲率半径中心より焦点が手前になるが、エッジ波の影響である。図20に示す開口角が小さくなるほどエッジ波の影響が大きくなる。平面探触子では近距離音場限界付近で振幅が大きくなるが、エッジ波の影響が100%である。平面では開口角が0度である。開口角が大きくなるほど焦点位置の直接波の影響が大きくなる。エッジ波の影響が大きくなると式(1)に示すように波長が焦点位置に影響する。シミュレーションで直径6.4mm、音響レンズの曲率R38mm(開口角9.7度)と10mm(開口角37.3度)で焦点位置を調べた結果を表1に示す。開口角9.7度で式(3)では焦点位置が90mmであるが、シミュレーションでは10MHzで43mm、5MHzで30mmとなった。開口角37.3度では焦点位置は周波数によらず21mmであるが、式(3)より手前である。エッジ波の影響が大きくなるほど周波数が焦点に影響し、式(3)の値と異なってくる。開口角が9.7度の場合は10MHzから5MHzへの変化で焦点が13mm近くなった。一方、開口角が37.3度の場合は周波数による焦点の変動はなかった。

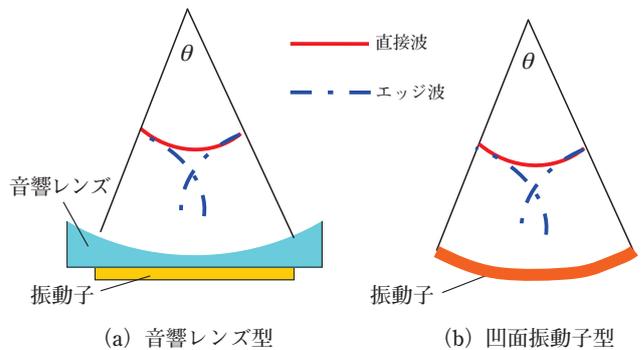


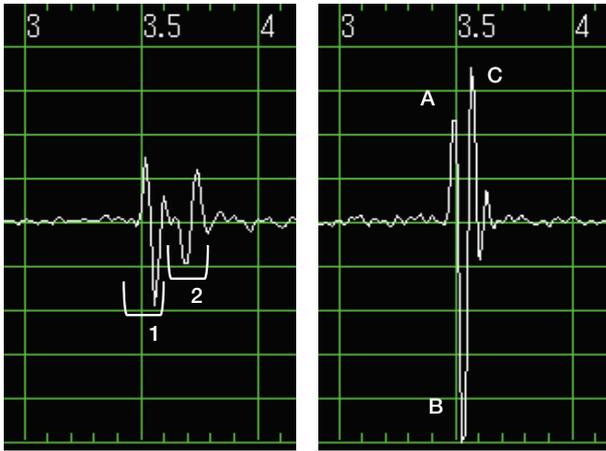
図 20 集束超音波探触子の焦点変化と開口角

表 1 音響レンズ型集束超音波探触子の焦点位置

開口角 (度)	周波数 (MHz)	式(3)の焦点 (mm)	焦点位置 (mm) (シミュレーション)	焦点位置 (mm) (実験)
9.7 (R38 (mm))	10	90	43	51
	5	90	30	27
37.3 (R10 (mm))	10	24	21	20
	5	24	21	21

実際に10MHz、直径6.4mm、R38mmで音響レンズ型探触子を作ると焦点位置が51mmとなり8mmも遠くなった。これは周波数の評価法の違いでJISでは平板の反射信号をFFTして評価するが、波長というのは波が一回振動する時に進む距離であり時間差や距離差である。図21に焦点位置におけるハイドロホンの受信波形を示す。近距離で直接波1とエッジ波2が観測され焦点位置で合成される。ピークA、B、Cは別の信号であり、ピークAが直接波、Bが直接波とエッジ波の合成、Cがエッジ波の信号である。表2にガラス板の反射、ステンレス球の反射、ハイドロホンの受信信号でFFTと時間差からの周波数を示す。信号の大きなピークはB-C間でその時間差は0.038μsでB-C間は半周期なので2倍して逆数にすると13.2MHzである。JISの平板の反射信号をFFTした時の中心周波数では9.2MHzだったので4MHzも高い。

解説



(a) 距離 15 (b) 距離 51

図 21 R38mm, 10MHz ハイドロホン受信波形

表 2 R38mm 音響レンズ集束超音波探触子の周波数計測

(MHz)	ガラス板	ステンレス球	ハイドロホン
FFT			
ピーク	8.4	11.4	11.2
中心	9.2 JIS	11.2	11.4
時間差			
A-B 間	11.1	12.2	12.8
B-C 間	9.3	12.8	13.2 適用

表 3 B-C 間時間差からの周波数と焦点位置

	実験	シミュレーション
焦点位置 (mm)	43	43
周波数 B-C 間 (MHz)	9.6	9.4
焦点位置 (mm)	51	52
周波数 B-C 間 (MHz)	13.2	12.7

この B-C 間の周波数をシミュレーション (9.4MHz) と実験 (9.6MHz) で合わせると焦点位置が 43mm となった。表 2、表 3 のように B-C 間の周波数を合わせると実験とシミュレーションの焦点が合う。従って、シミュレーションのどの部分を合わせて設計するかを適切に考えることで、シミュレーションを実際の設計に役立てることができる。

6. おわりに

シミュレーションにより超音波の現象を可視化し、パルス波と連続波における現象、教科書とシミュレーション、実際の違いを説明した。シミュレーションと実際が異なる事例としてエッジ波の振幅を述べた。シミュレーションによる超音波の解析結果の一例として探触子の指向性を説明し、送信時と受信時が異なることを述べた。シミュレーションの活用事例として集束超音波探触子の設計について説明し、どのパラメータを合わせることで焦点位置が合うかを述べた。

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)
ジャパンプローブ HP
http://www.jp-probe.com/technology/up_img/1540432454-182171_f1.pdf 2018 年 10 月 25 日確認
- 2) 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位置と周波数評価, アコースティックイメージング研究会資料, AI-2017-25, (2017)
ジャパンプローブ HP
http://www.jp-probe.com/news/up_img/1509434843-369075_f1.pdf 2018 年 10 月 25 日確認
- 3) 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
ジャパンプローブ HP
http://www.jp-probe.com/news/up_img/1539911617-126848_f1.pdf 2018 年 10 月 25 日確認
- 4) 田中雄介, 星野秀和, 小倉幸夫: 超音波による接着系アンカーボルトの非破壊検査, 第 25 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, pp.13-18, (2018)
ジャパンプローブ HP
http://www.jp-probe.com/news/up_img/1517816308-666163_f1.pdf 2018 年 10 月 25 日確認
- 5) 日本非破壊検査協会, 超音波探傷試験Ⅲ 2001 年度版第 3 刷, pp.67-69, (2004)
- 6) 超音波便覧編集委員会編, 超音波便覧, 丸善, pp.31-33, (1999)
- 7) 日本音響学会編, 音響学入門ベディア, コロナ社, pp.184-187, (2017)
- 8) 宇田川義夫, 三原 毅: 探触子の音波送信原理, 超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, 16, pp.57-62, (2009)
- 9) Y. Kawai and M. Toyoda: Development of edge-effect suppression barriers, AST, 35, pp.28-34, (2014)
- 10) 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)
- 11) 日本非破壊検査協会, 超音波探傷試験Ⅲ 2001 年度版第 3 刷, p.47, (2004)



田中 雄介 ジャパンプローブ (株)
(232-0033 神奈川県横浜市南区中村町 1-1-14)
研究開発センター 副主任研究員
2012 年ジャパンプローブ (株) 入社, 医用超音波, 空中超音波, 超音波伝搬解析の研究に従事。博士 (工学)
URL: <http://www.jp-probe.com/>