

パルス波と連続波の超音波伝搬の可視化

Ultrasonic Visualisation Pulse and Continuous Waves

田中 雄介 大平 克己 小倉幸夫

Yuusuke TANAKA Katsumi OHIRA Yukio OGURA

ジャパンプローブ株式会社

Japan Probe Co., Ltd.

内 容 梗 概：パルス波と連続波の超音波伝搬をシミュレータ、ハイドロホンによる計測でそれぞれ調べた。パルス波では直接波とエッジ波がそれぞれ発生した。連続波ではエッジ波や直接波が重なり、サイドローブ(副極)やゼロ輻射角、探触子中心軸上の音圧変動が発生した。近距離音場限界距離についてエッジ波により考察し、この距離について直接波とエッジ波が重なる限界の距離であることを確かめた。これらの現象は連続波の2波以降で発生し、波の先頭では発生しなかった。また、波形でも2波以降の波の音圧が変動していることを確認した。フェーズドアレイのグレーティングローブについてシミュレーションで調べ、この現象も連続波において2波以降のエッジ波が重なって発生した。

Keyword：超音波、パルス波、連続波、可視化、エッジ波

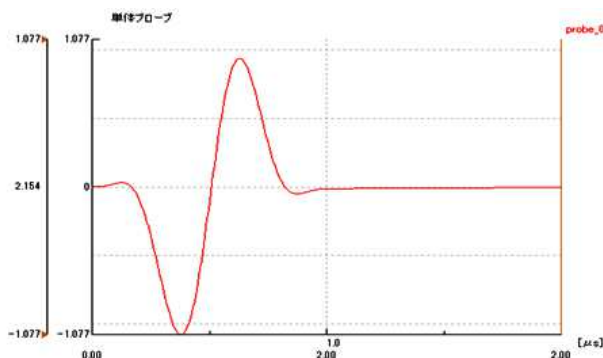
1. はじめに

超音波伝搬に関する現象として、サイドローブやゼロ輻射角、近距離音場では音場が複雑[1]などが知られている。サイドローブは超音波探触子から送信される超音波の送信方向以外の方向にも超音波が送信される現象である。ゼロ輻射角は超音波探触子から送信される超音波である角度だけ超音波の音圧がゼロになる角度である。また、近距離音場では探触子中心軸上で音圧が変動し、超音波による計測は難しいと言われている。これらの現象は連続波の場合に発生し、波数の少ないパルス波では発生しない。これまでに我々はシミュレータや水中での超音波の観測により、パルス波と連続波の超音波伝搬の違いについて報告してきた[2][3]。超音波が伝搬する際に超音波端部からエッジ波が発生するが、これらの現象はエッジ波により説明できる。今回我々はこれらの現象についてシミュレータ、実験のそれぞれの超音波の波形からエッジ波がどのように影響するのか

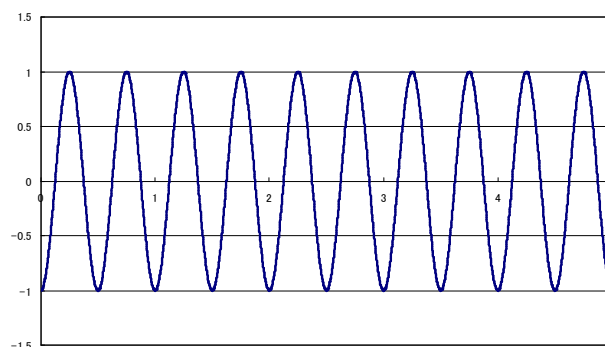
を調べた。連続波においてエッジ波がサイドローブなどの現象を発生させていることを確認した。また、リニアアレイ探触子のフェーズドアレイ走査においてグレーティングローブが発生する現象についてシミュレーションで調べ、この現象も連続波のときに発生することを確かめた。

2. 超音波探触子から送信される超音波

超音波の送信信号としてパルス波は波数の少ない信号、連続波は波数の多い信号として扱われる。今回シミュレーションで用いる波は図1のように波数1と波数30の信号でそれぞれパルス波、連続波とした。超音波探触子から送信される超音波は図2のように直接波が発生し、直接波の端部からエッジ波が発生する。このとき、探触子の外側では直接波と同位相、内側には逆位相のエッジ波がそれぞれ発生する。図2(b)は有限積分法のシミュレーション(イーコンピュート、SWAN21)による超音波伝搬画像で正の

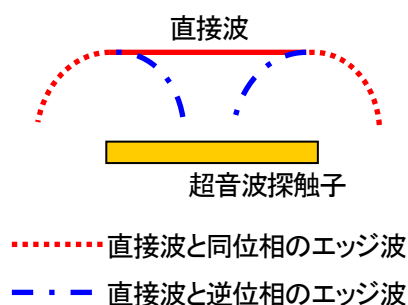


(a)パルス波(波数 1)

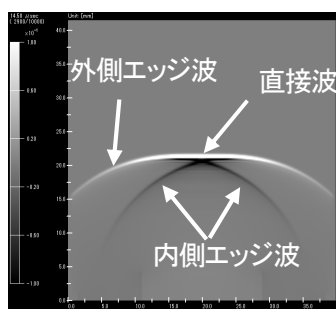


(b)連続波(波数 30)

図1 シミュレーションの送信波形



(a)イメージ図



(b)シミュレーション図

図2 探触子から発生する超音波

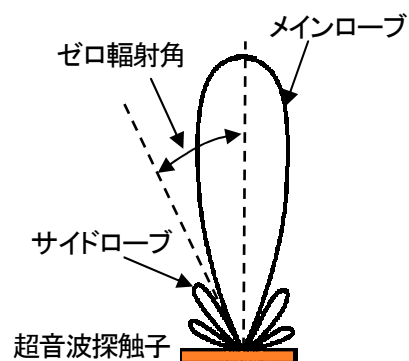


図3 サイドローブとゼロ輻射角

音圧を白、負の音圧を黒で表わしている。正のパルスを送信した時、直接波と外側エッジ波は正で白、内側エッジ波は負で黒となっている。従って、内側エッジ波は直接波と位相が逆になっていることがわかる。この図2のような超音波が探触子から送信されており、図1(a)のようなパルス波では正負の1波が送信され直接波と内外エッジ波が発生する。連続波では直接波と内外エッジ波が連続的に送信され、それらが重なってパルス波では発生しなかった現象が発生する。

3. 連続波で発生する現象

超音波が連続波で送信されたときに発生する現象としてサイドローブ(副極)やゼロ輻射角、近距離音場における探触子中心軸上の音圧変動、フェーズドアレイ走査時のグレーティングローブなどがある。グレーティングローブについては後述するが、サイドローブなどについて説明する。探触子から超音波が送信されたとき図3のように探触子正面にはメインローブ(主極)が発生し、それとは異なる方向にサ

イドローブが発生するとされている。また、ある方向で超音波の音圧が0になるゼロ輻射角が発生するとされている。これらサイドローブやゼロ輻射角は連続波の時に発生し、パルス波のときには発生しない。パルス波では図2(a)のように探触子からは直接波とエッジ波が発生するだけである。外側エッジ波により超音波は広がるが、ゼロ輻射角はない。外側エッジ波をサイドローブと言ってしまえばそれまでであるが、エッジ波は特定の方向に発生する波ではなく広がる角度が大きいほど音圧は小さくなる。

近距離音場については遠距離音場との境界が以下の式(1)で表わされ、

$$x_0 = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (1) \quad \begin{array}{l} x_0: \text{近距離音場限界} \\ D: \text{振動子直径} \quad \lambda: \text{波長} \end{array}$$

この距離より近い場所のことを言う。近距離音場では複雑な音場で探触子中心軸上では音圧が変動するとされている。これも連続波の場合に直接波とエッジ波が探触子中心軸上で重なることで発生する現象である。

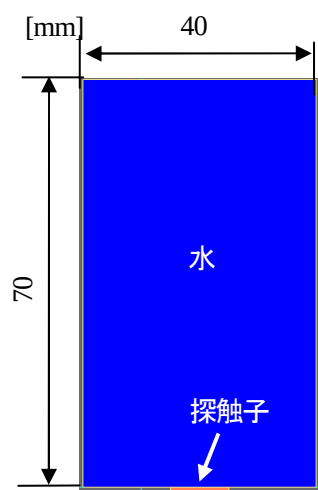
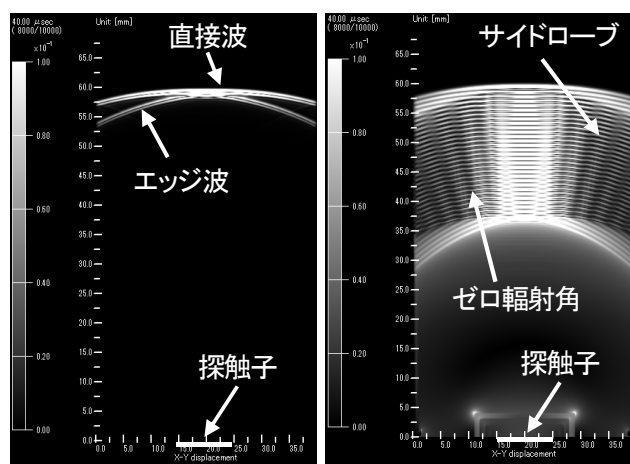


図4 シミュレーションモデル

表1 シミュレーション条件

最大周波数	4[MHz]
中心周波数	2[MHz]
解析時間	50[μs]
時間ステップ	0.005[μs]
総ステップ	10000
メッシュ幅	0.02[mm]
総メッシュ数	7000000



(a)パルス波

(b)連続波

図5 パルス波と連続波の音場

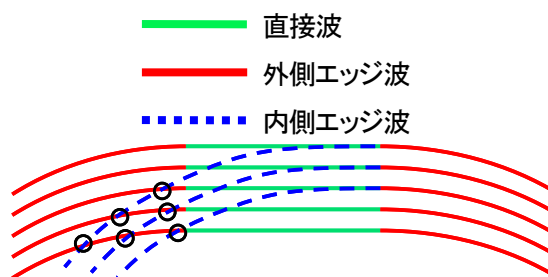


図6 外側エッジ波と内側エッジ波の重なり

4. シミュレーションによる音場の可視化

4.1 サイドローブとゼロ輻射角

ここでシミュレーションでパルス波と連続波の超音波伝搬を可視化し、サイドローブなどの現象を確認する。図4の媒質を水としたシミュレーションモデルで超音波伝搬を可視化した。探触子の幅は10[mm]で、水の音速は1500[m/s]とした。シミュレーション条件は表1の通りで周波数を2[MHz]とした。送信波形は図1のように波数1のパルス波と連続波として波数30のバースト波を設定した。このときのパルス波と連続波のシミュレーション結果を図5に示す。この図は図2(b)と違い、音圧の大きさを表しており、白が音圧が強い部分である。パルス波では直接波やエッジ波が発生しているだけであるが、連続波では音圧の大きい部分と小さい部分が交互に発生した。音圧の大きい部分をサイドローブ、小さい部分をゼロ輻射角と判断できる。ゼロ輻射角という名前であるが、音圧は0にはなっていない。これらは外側エッジ波と内側エッジ波が重なって発生しているが、内側エッジ波のほうが外側エッジ波より

正面方向から傾いているため、音圧が小さくなったと考えられる。また、波の先頭、最後尾付近はサイドローブやゼロ輻射角が発生していないが、これは図6のように考えられる。簡単のため直接波の右側しか内側エッジ波を描いていないが連続波の場合、内側エッジ波が2波以降の外側エッジ波と重なる部分(黒丸)が発生する。ここで外側エッジ波と内側エッジ波の伝搬距離が半波長や1.5波長ずれていると音圧が大きくなり、波長の整数倍ずれていると音圧が小さくなる。従って、サイドローブやゼロ輻射角は内側エッジ波と2波以降の外側エッジ波が重なって発生し、先頭や最後尾では発生していないことがわかる。そのため、波数が1のパルス波では2波以降の外側エッジ波は無いのでサイドローブやゼロ輻射角が発生しないことがわかる。

4.2 探触子中心軸上の音圧

次に探触子中心軸上の音圧がパルス波と連続波でどのように異なるかを述べる。探触子中心軸上の現象については式(1)の近距離音場より近い場所では音圧が複雑に変動するとされている。この現象につ

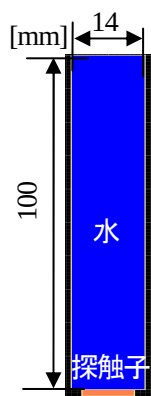


図7 シミュレーションモデル

表2 シミュレーション条件

最大周波数	4[MHz]
中心周波数	2[MHz]
解析時間	70[μs]
時間ステップ	0.005[μs]
総ステップ	14000
メッシュ幅	0.02[mm]
総メッシュ数	3500000

— 直接波
— 外側エッジ波
... 内側エッジ波

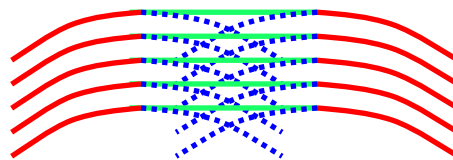


図8 直接波と内側エッジ波の重なり

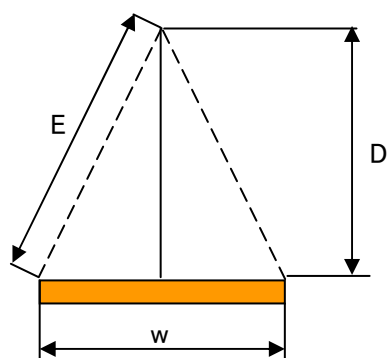


図9 直接波と内側エッジ波の重なり

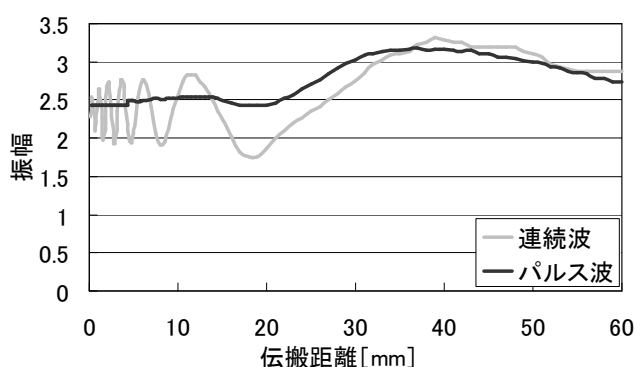


図10 探触子中心軸上の音圧

いて図7のシミュレーションモデルで確かめた。水中に幅 10[mm]の探触子を配置した。水中音速を 1500[m/s]とした。シミュレーション条件は表2の通りで、周波数は 2[MHz]とした。送信波形は図1のように波数1のパルス波と連続波として波数30のバースト波を設定した。図6と同様にエッジ波を探触子中心軸上で考えると図8のようになる。探触子中心軸上では内側エッジ波が直接波と重なる。サイドローブなどの時と同様に直接波とエッジ波の伝搬距離が半波長や1.5波長ずれていると音圧が大きくなり、波長の整数倍ずれていると音圧が小さくなる。

ここで図9のように直接波とエッジ波の伝搬距離を考える。直接波の伝搬距離を D 、エッジ波の伝搬距離を E とするとそれぞれの伝搬距離の差 $E-D$ が半波長や 1.5 波長になるときに音圧が大きくなり、波長の整数倍になると音圧が小さくなる。超音波の伝搬と共に $E-D$ が小さくなり、 $E-D$ が半波長になる点が音圧が大きくなる最後の点である。ここで $E-D$ が半波長になる距離 X を求めると次の式(2)に

なる。

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

シミュレーションが2次元であるので振動子幅 w を振動子直径 D とし、4分の1波長を省略すると式(1)の近距離音場限界の式になる。水中 2[MHz]における4分の1波長は約 0.19[mm]であるので無視してもよい値である。従って、連続波では近距離音場において直接波と内側エッジ波が重なり音圧が変動する。一方、パルス波においては式(2)の距離でのみ直接波とエッジ波が重なり音圧が大きくなる。水中 2[MHz]、探触子幅 10[mm]、水中音速 1500[m/s]の今回のシミュレーションにおいて式(2)の X は 33[mm]となる。

探触子中心軸上の音圧のシミュレーション結果を図10に示す。近距離音場が 33[mm]以下の距離としてパルス波は音圧がほぼ一定で、連続波は音圧が変動した。連続波は2波以降の音圧が変動した部分を調べた。また、近距離音場限界付近でパルス波、連続波ともに音圧が大きくなった。この結果から直接

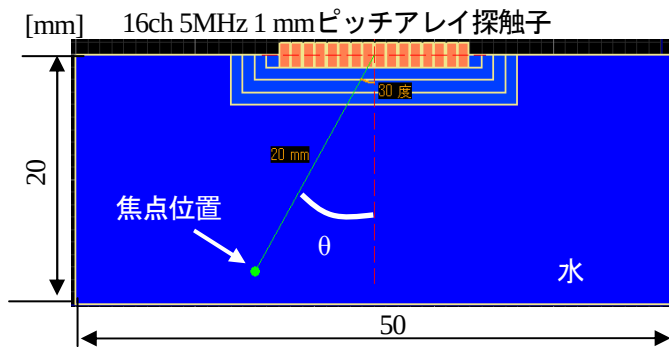


図 11 フェーズドアレイシミュレーションモデル

表 3 シミュレーション条件

最大周波数	10[MHz]
中心周波数	5[MHz]
解析時間	20[μs]
時間ステップ	0.00559[μs]
総ステップ	3560
メッシュ幅	0.012[mm]
総メッシュ数	6942222

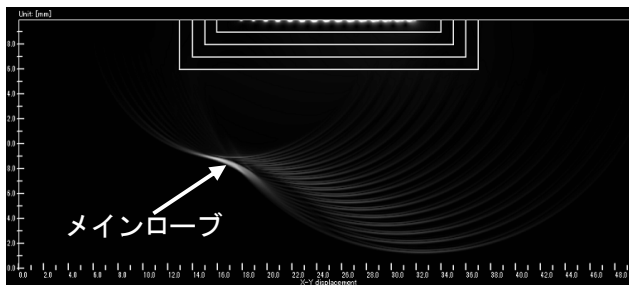


図12 フェーズドアレイ(波数1)

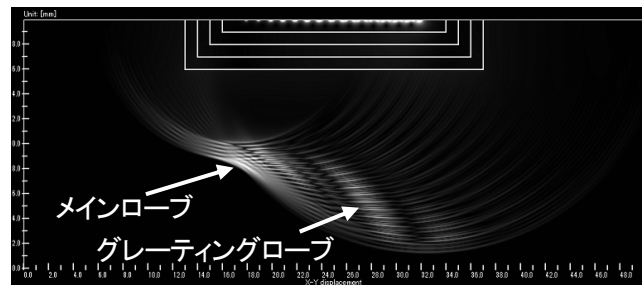


図13 フェーズドアレイ(波数5)

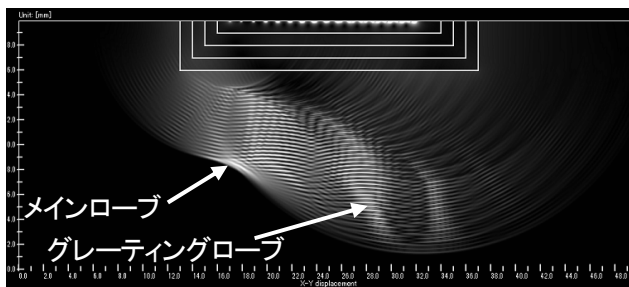


図14 フェーズドアレイ(波数20)

波とエッジ波の伝搬距離の差が半波長になると音圧が大きくなることがわかる。また、連続波では音圧が変動しており、この原因として図 8 のように探触子中心軸上で直接波とエッジ波が重なっていることが考えられる。従って、探触子中心軸上での複雑な音圧変化はパルス波では発生せず連続波でのみ発生し、直接波とエッジ波が重なって起こる。

4.3 グレーティングローブ

次にフェーズドアレイ走査のときに発生するグレーティングローブをシミュレーションで確かめたことを述べる。フェーズドアレイは複数並べた超音波探触子の送信信号のタイミングをずらすことで任意の方向に超音波を送信することができるが、条件によりグレーティングローブという狙った方向の信号(メインローブ)以外に強い超音波が送信される現象がある。フェーズドアレイのシミュレーションモデ

ルとして図 11 を用いた。水中に周波数 5[MHz]、16ch、ピッチ 1[mm]のアレイ探触子を配置し、フェーズドアレイ走査を行った。図中の焦点位置に超音波を集束させる条件でシミュレーションした。グレーティングローブの発生条件は次の式(3)となる。

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

図 11 のモデルでは 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。モデルのピッチは 1[mm] であるのでグレーティングローブが発生する条件となる。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 12 から 14 に示す。アレイ探触子で超音波を送信した場合も個々の素子は図 2 のように直接波、エッジ波が発生している。波数 1 の図 12 ではメインローブの集束点以外にも探触子前方に超音波が送信されている。波数 5 の図 13 ではメインローブ以外に音圧が強いグレーティングローブが探触子前方に発生した。波数 20 の図 14 ではグレーティングローブがさらに多く発生した。図 13 や図 14 を見ると波の先頭では音圧が強くない。グレーティングローブは 2 波以降の波で発生している。従って、グレーティングローブは連続

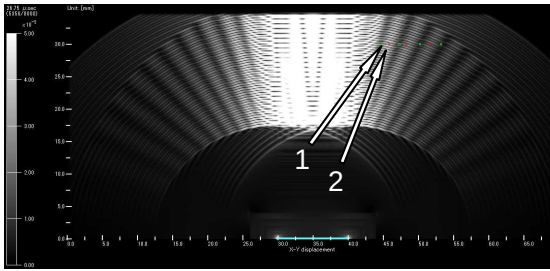


図15 連続波の音場

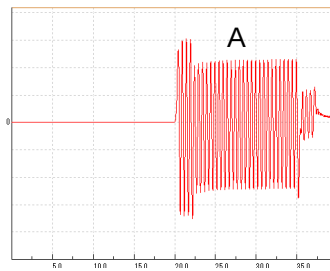


図16 ゼロ輻射角(1)の波形

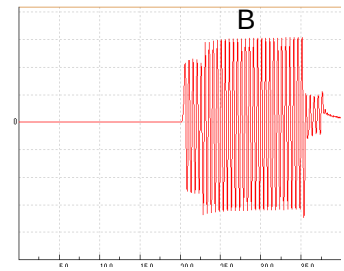


図17 サイドローブ(2)の波形

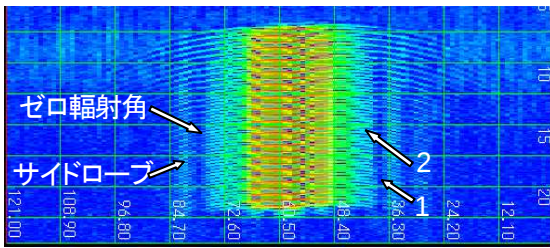


図18 ハイドロホンによる連続波音場

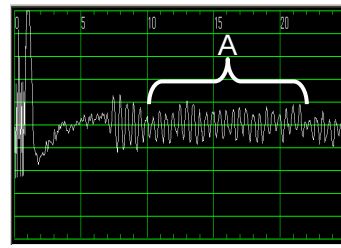


図19 ゼロ輻射角(1)の波形

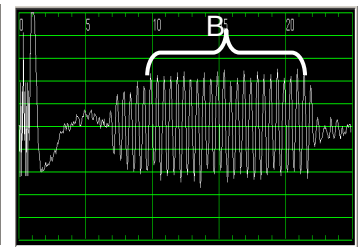


図20 サイドローブ(2)の波形

波の場合に発生し、サイドローブなどと同様に2波以降の波が重なって発生する。一方、パルス波ではメインローブ以外に探触子前方に超音波が送信されるが、それらは重ならないのでグレーティングローブは発生しない。

5. 超音波波形の確認

5.1 サイドローブとゼロ輻射角

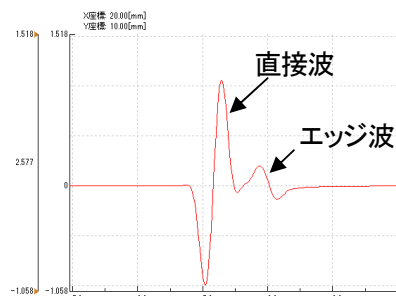
前章でシミュレーションでサイドローブなどの現象を可視化し、それらが連続波の場合に2波以降のエッジ波が重なることで発生することを述べた。ここでシミュレーション、実験で実際に超音波の波形がどのように変化しているかを確認する。図15にシミュレーションでの連続波の音場を示す。図中の1にゼロ輻射角、2にサイドローブが発生している。この場所の波形を図16、17にそれぞれ示す。1のゼロ輻射角は探触子中心軸に近いので、先頭付近の信号が2のサイドローブより大きい。Aの部分の後にある信号は小さくなった。逆に2のサイドローブはBの部分の後にある信号が大きくなった。前述の通り2波以降でエッジ波が重なってサイドローブやゼロ輻射角が発生した。

次にハイドロホンで波数30の連続波で音場観測を行った結果を図18に示す。サイドローブ、ゼロ輻射角を調べるため、水中でハイドロホンを直径

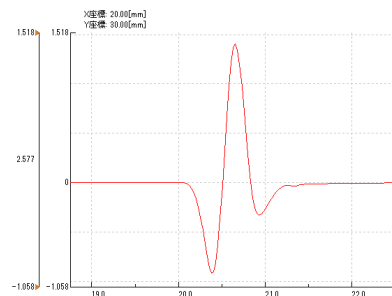
10[mm]の平面超音波探触子から30[mm]の距離に配置し、音場を観測した。周波数は波形の見やすさを重視し、5[MHz]とした。パルスレシーバ(ジャパンプローブ製、JPR-10C)から波数30の連続波を送信した。探触子を水中で移動させ音場の観測を行った。図18の音場ではゼロ輻射角、サイドローブがそれぞれ観測された。ここで1のゼロ輻射角の波形、2のサイドローブのAモード波形を図19、20に示す。図19のAの部分を見ると先頭の波より音圧が小さくなった。一方、図20のBの部分を見ると音圧が大きくなった。先頭の波は図20のほう探触子中心に近いので大きい。後ろの波の音圧が変動してサイドローブやゼロ輻射角が発生させていることがわかる。これらのシミュレーションと実験結果から前述の通り、連続波において2波以降のエッジ波が重なることでサイドローブやゼロ輻射角が発生していることがわかる。

5.2 探触子中心軸上の音圧

次に探触子中心軸上の音圧について連続波の場合に波形がどのように変化するかを確かめたことについて述べる。まずは図21にパルス波における探触子中心軸上の波形を示す。探触子中心軸上は図8のように直接波と内側エッジ波が重なって音圧が変化する。前述したようにパルス波では近距離音場限界付近で直接波とエッジ波が重なり音圧が大きくなる。

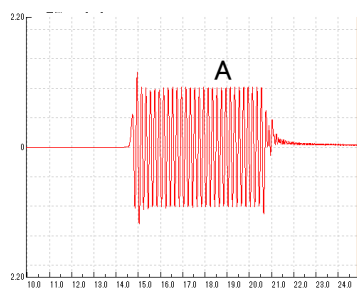


(a)近距離音場

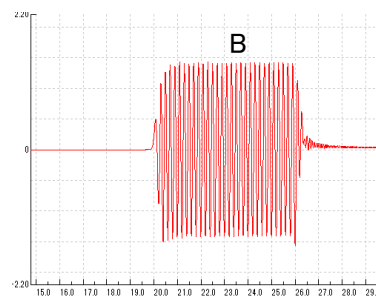


(b)近距離音場限界付近

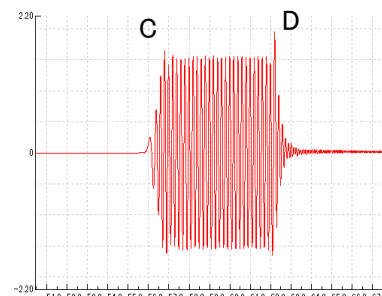
図21 パルス波の探触子中心軸上の波形の一例(シミュレーション)



(a)伝搬距離22[mm]

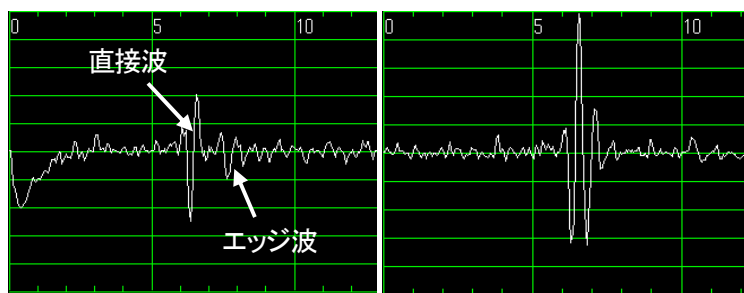


(b)伝搬距離30[mm]



(c)伝搬距離84[mm]

図22 連続波の探触子中心軸上の波形(シミュレーション)



(a)近距離音場

(b)近距離音場限界付近

図23 パルス波の探触子中心軸上の波形(実験)

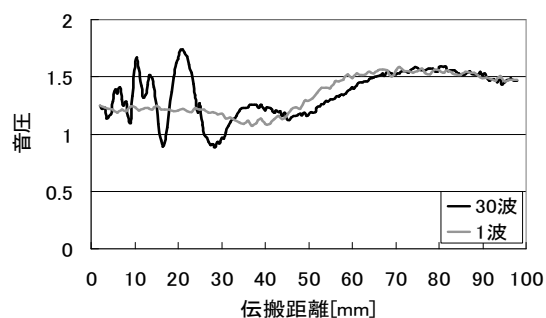


図24 探触子中心軸上の音圧

近距離音場では図 21(a)のように直接波と内側エッジ波がそれぞれ検出される。ここで内側エッジ波は直接波と位相が逆になっていることがわかる。図 21(b)の近距離音場限界付近では直接波とエッジ波が重なり、音圧が大きくなる。

次に連続波の場合の探触子中心軸上の波形を図 22 に示す。後述の実験では波形を見やすくするために 5[MHz]の探触子を用いたのでこのシミュレーションは周波数 5[MHz]の時の波形である。近距離音場限界は 83[mm]となる。図 21(a)の伝搬距離 22[mm]では先頭の波に比べて A の部分信号が小さくなった。図 21(b)の伝搬距離 30[mm]の波形では B の部分の信号が大きくなった。これらの結果より 2 波目以降の音圧が変動していることがわかる。近距離音場限界

付近の図 22(c)では先頭付近の C の信号と最後尾付近の D の信号が大きくなっている。近距離音場限界では先頭または最後尾の直接波と内側エッジ波が重なって音圧が大きくなるため、妥当な結果である。

さらにハイドロホンにより探触子中心軸上の音場観測を行った。実験は先ほどと同様に水中にハイドロホンを配置して音場観測を行った。ハイドロホンは直径 10[mm]の平面超音波探触子の中心軸上に配置し、探触子から距離を 0 から 100[mm]まで変化させて計測した。波形の計測を行いやすくするために、周波数は 5[MHz]のものを用いた。このときの近距離音場限界距離は 83[mm]である。送信はパルサレーバ(ジャパンプローブ製、JPR-10C)から波数 30 の連続波を送信した。また、比較のため波数 1 のパルス

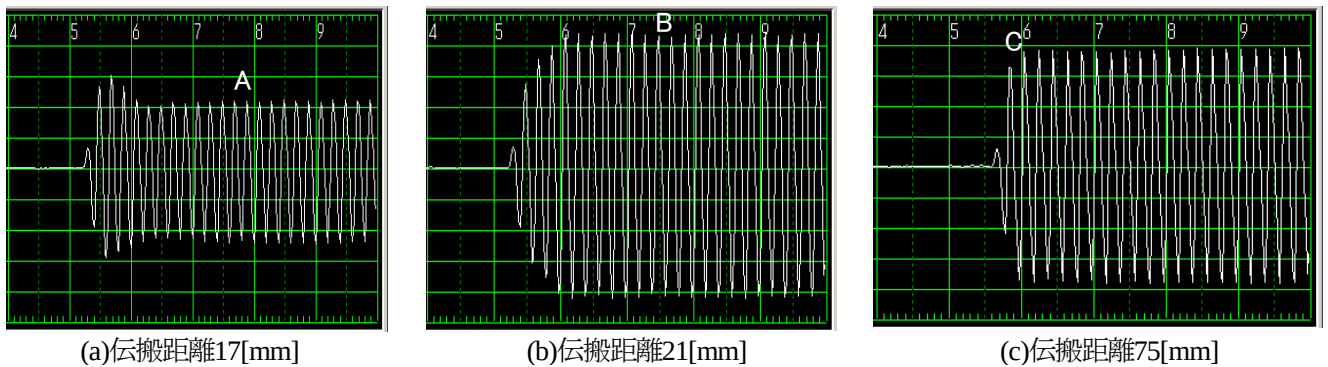


図25 連続波の探触子中心軸上の波形(実験)

波も送信して実験を行った。まずは波形の確認のため、パルス波で探触子中心軸上の波形を確認した。図 23 に波形を示す。近距離音場ではシミュレーションと同様に直接波と内側エッジ波がそれぞれ検出され、位相がそれぞれ逆になった。近距離音場限界付近では直接波と内側エッジ波が合成され音圧が大きくなった。実験における探触子中心軸上の音圧は図 24 のようになる。連続波は音圧が変動する 2 波以降を載せた。波数 1 のパルス波も同時に載せて比較するとパルス波は近距離で音圧変動が少なく、連続波は音圧が変動することがわかる。また、近距離音場限界 83[mm]付近でパルス波、連続波ともに音圧が大きくなった。

次に連続波の場合の探触子中心軸上の波形を図 25 に示す。図 25(a)の伝搬距離 17[mm]では A の部分を見ると先頭付近の音圧より小さくなった。図 25(b)では B の部分を見ると 2 波以降の音圧が大きくなった。最後に伝搬距離 75[mm]を見ると C の先頭付近の音圧も大きくなっており、シミュレーションと同様に先頭の直接波と内側エッジ波が重なったと考えられる。

これらの結果より、サイドローブやゼロ輻射角、近距離音場における探触子中心軸上の音圧変動などは連続波の場合に発生することが確かめられた。また、それらの原因としてエッジ波が関係していることがわかった。直接波と外側エッジ波、内側エッジ波が連続波の場合に 2 波以降の波と重なり、サイドローブなどの現象が発生する。非破壊検査の超音波探傷や超音波診断ではパルス波が主に使われるためこれらの現象は発生しにくい、空中超音波や超音波治療など波数を多くしている場合はこれらの現象

が発生することを考慮する必要がある。また、パルス波においてもエッジ波の発生を考慮して受信波形の評価を行う必要がある。特に音響レンズ型や凹型振動子の集束型超音波探触子は内側エッジ波の影響で、焦点の位置が屈折計算値や凹型の曲率半径中心より近くなる。

6. おわりに

超音波の音場についてシミュレーションと実験で調べた。サイドローブやゼロ輻射角、近距離音場における探触子中心軸上の音圧変動やグレーティングローブは連続波の場合に発生することを調べた。これらはエッジ波が 2 波以降の直接波やエッジ波と重なることで発生することを調べた。

動画

図 5 のパルス波と連続波、図 12 から 14 のグレーティングローブは動画をアコースティックイメージング研究会のページにアップロードした。

参考文献

- [1] 日本非破壊検査協会、“非破壊検査技術シリーズ 超音波探傷試験Ⅱ、” pp.14-16、日本非破壊検査協会発行第 4 刷、2000
- [2] 田中雄介、大平克己、小倉幸夫、“シミュレータによる超音波伝搬の可視化とその応用、” アコースティックイメージング研究会資料 AI2014-3-01、pp.1-8、October 2014.
- [3] 田中雄介、大平克己、小倉幸夫、“連続波とパルス波の超音波伝搬の可視化、” 電子情報通信学会 技術研究報告, 114 巻、422 号、33-38, January 2015