

探触子の受信指向性と空中超音波における虚像の解析

田中雄介 野地正明 柘植延啓 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, noji, tsuge, ogura}@jp-probe.com

あらまし 空中超音波探傷で試験体を画像化したとき虚像が発生することがある。虚像は試験体内の多重反射により広がった信号を凹面の受信探触子で受信し、受信信号振幅が変動したことが原因である。受信探触子の信号は受信各面の信号が合成されることにより指向性や焦点位置が発生しているように見える。凹面受信探触子の受信信号をシミュレーションで調べ、焦点位置の信号が強調される状況は複数の散乱信号が発生する時であることを述べた。平面信号が受信される時は凹面の開口角が大きいと受信点ごとの時間差が発生して受信強度が低下し、受信波形の波長も長くなったことを確認した。受信時は受信時間差が少ない小さな受信面にすることで虚像を低減できた。

キーワード 超音波、非接触、空中、虚像、受信波形

Receiving directivity of probe and analysis of virtual image in air coupled ultrasonic

Yuusuke TANAKA Masaaki NOJI Nobuhiro TSUGE Yukio OGURA

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

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

Abstract A virtual image may be generated when the specimen is imaged with aerial ultrasonic flaw detection. The virtual image is due to the received signal amplitudes fluctuating by receiving the signal spread by multiple reflection in the specimen with the concave receiving probe. As the signal of the receiving probe is combined with the signals of the receiving surfaces, it seems that directivity and focal position are generated. It is stated that the received signal of the concave receiving probe is examined by simulation and the situation where the signal of the focal position is emphasized is the time when plural scattering signals are generated. When a plane signal is received, it is confirmed that when the concave aperture angle is large, a time difference occurs between reception points, the reception intensity decreases, and the wavelength of the reception waveform also increases. When receiving, virtual images can be reduced by making small reception surface with less reception time difference.

Keywords Ultrasonic, Non-contact, Air, Virtual image, Receiving waveform

1. はじめに

超音波による検査は通常接触媒質を介して超音波探触子を検査対象に接触させて行う。接触媒質を使用した場合は検査後に洗浄処理が必要であり、さらに接触媒質の厚さなどにより計測結果がばらつく。水浸法など接触媒質を用いない方法もあるが、検査後の乾燥工程が必要なことや電池では使用できないという問題があり、空中で超音波計測を行うことが有効である状況は多い。我々は空中超音波の透過信号によりリチウムイオン電池や自動車のブレーキパッド、CFRPの探傷を行い、報告してきた[1]。空中超音波による計測は工業だけでなく医療分野でも研究されており、腫の透

過信号計測による骨量の測定が行われている[2]。空中超音波による透過信号は試験体下部の多重反射によって透過画像上に虚像が発生することがあり、それらの超音波伝搬について報告した[3]。この虚像は受信探触子の振幅変動が原因であり、探触子の受信現象について調べる必要がある。探触子からの超音波送信と受信は別の現象であるが、相反定理[4]により超音波の送信と受信は同じ特性であるとされている[5]。探触子の指向性について送信時はエッジ波の広がり、受信時は探触子に入射する超音波の伝搬時間差による信号の合成であると説明した[6]。また、送信時に発生するエッジ波は媒質により発生量がことなり、空中ではほとんど

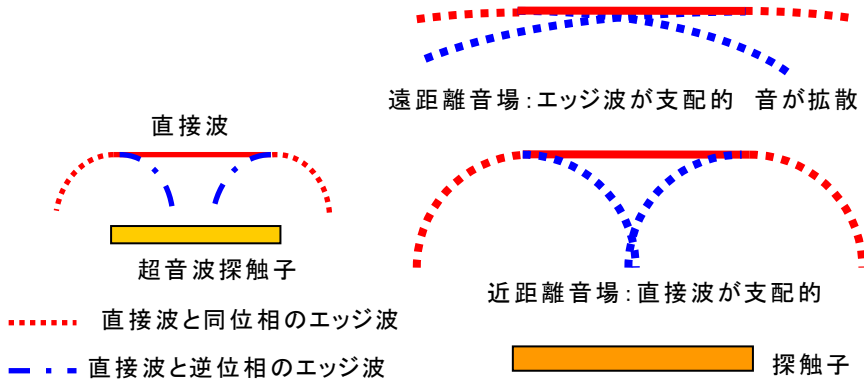


図1 直接波とエッジ波

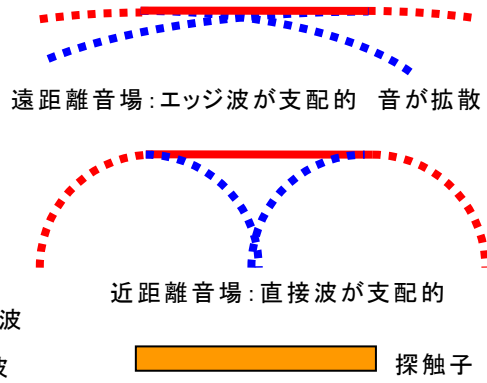


図2 近距離と遠距離の超音波

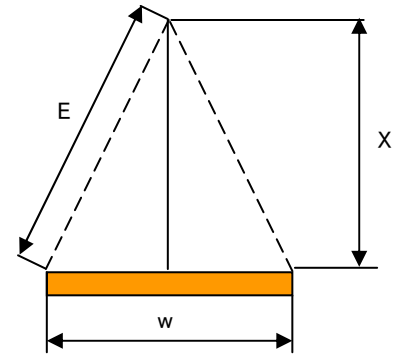


図3 直接波とエッジ波の重なる距離

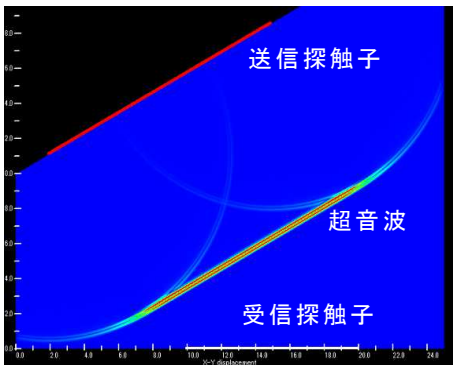


図4 斜めから受信する場合

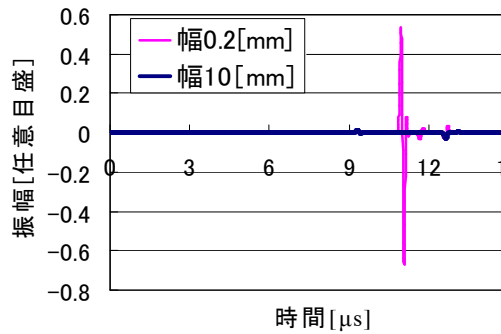


図5 探触子幅受信信号振幅

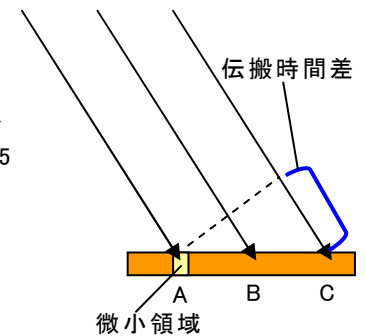


図6 斜めからの超音波受信と各受信位置の時間差

発生しないことを報告した[7]。虚像は凹面振動子が試験体内部で広がった超音波の信号を受信してしまい振幅変動が発生したことが原因であることを報告した[8]。受信において集束超音波探触子は焦点位置の信号を強調するのではなく受信信号の合成結果により焦点位置があるように見えるだけである。今回、凹面受信探触子の受信波形を調べ、どのような状況で集束受信探触子が有効であることを述べる。

2. 送信指向性と受信指向性

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。エッジ波の発生量が多いほど超音波が広がりやすくなり指向性が低下する。また、図2のように超音波の伝搬と共に直接波とエッジ波が徐々に重なって、最初は直接波が支配的で広がり小さいが最終的にはエッジ波が支配的となり超音波が広がる。探触子中心軸上では直接波とエッジ波は互いに位相が逆であるので伝搬距離差が半波長になると振幅が大きくなる。図3のように考えるとエッジ波の伝搬経路をE、直接波の伝搬経路をXとするとE-Xが半波長になる位置で振幅が大きくなる。この位置が直接波とエッジ波が重なる位置でこれより遠い位置ではエッジ波が支配的になり超音波が拡散する。この位置は

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

で表わされ、近距離音場限界とほぼ同じ位置である。受信指向性は受信信号が合成された結果である。例えば図4のように水中で平面振動子に平面波が入射したときを考える。振動子幅が0.2[mm]と10[mm]の場合の受信信号をシミュレータ(イーコンピュート、SWAN21)で調べると図5のようになる。振動子幅が0.2[mm]のほうが振動子幅10[mm]の場合より28倍振幅が大きくなった。受信信号は図6のように考えられる。斜めから受信振動子に入射した超音波は微小領域で考えると受信したA部分で受信信号が発生する。他の受信面Bでは伝搬時間差があり、A部分と信号がずれて発生する。ここで図6の受信点A、B、Cのそれぞれ隣り合う点の伝搬距離差が半波長とすると図7のように信号が打ち消し合い、最初の正の信号と最後の負の信号だけが残る。探触子の受信点が無数にあると考えると超音波の波長より十分大きくなると受信信号に伝搬時間差が発生し、受信信号がそれぞれずれて合成される。送信の場合は振動子の電極に同じタイミングで送信信号が印加され、一様に振動して超音波を送信するが、受信の場合は受信信号が同じタイミングで受信するとは限らず異なるタイミングで受信した信号が合成される。受信面の幅が波長より大きいとこ

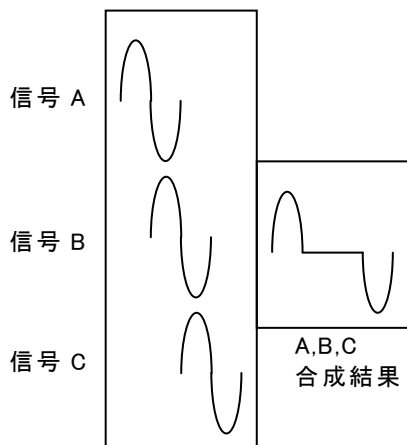


図7 受信位置のずれと合成結果

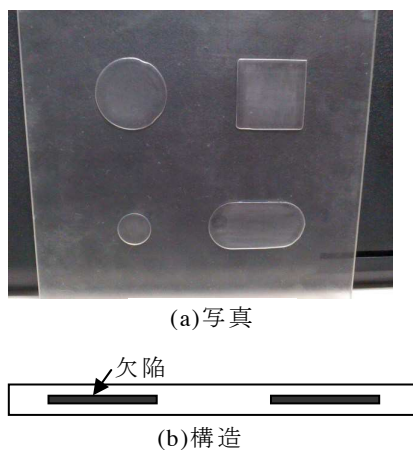


図8 空中超音波用試験体

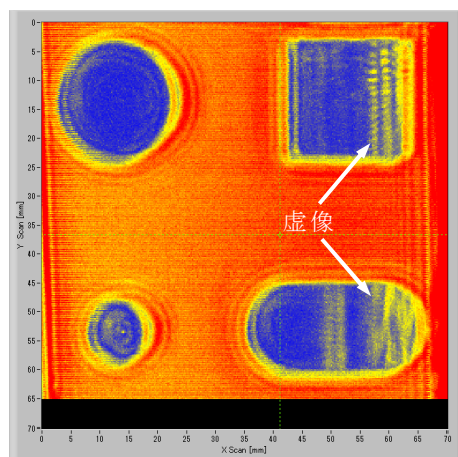


図9 集束探触子受信時の虚像

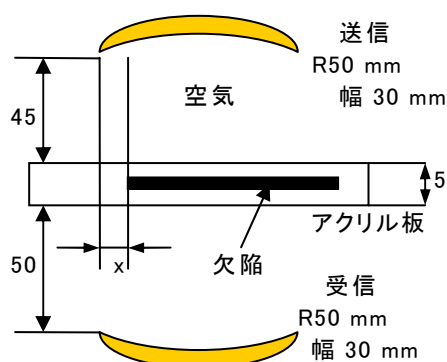


図10 シミュレーションモデル

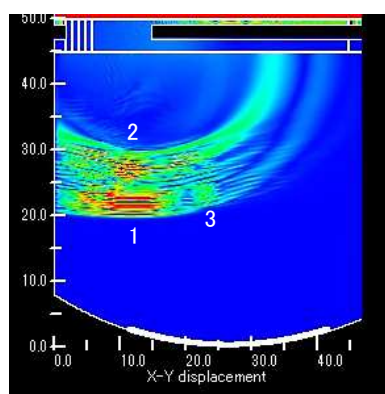


図11 超音波伝搬図

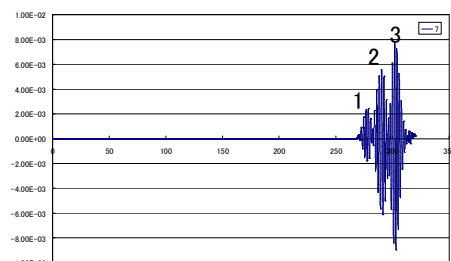


図12 X=7 mm の受信波形

の効果が顕著になる。

ここで相反定理にあるように送信と受信を同じになるような条件を考えると波長に比べて十分小さな振動子の場合には受信の時間差が気にならなくなる。理想的な受信信号の時間差のない点音源とみなせるような状況では相反定理を用いても差し支えが無い。例えば可聴域では波長が受信振動子より大きく、受信振動子は点音源とみなしている。音速 340[m/s]の空气中で 1[kHz]の音は波長が 340[mm]である。受信マイクはそれより十分小さいので受信を点音源とみなせるため、受信信号の伝搬時間差が問題にならない。

従って、送信信号は振動面全体に同時に電圧が印加されるので、振動面が同時に駆動するが、受信信号は全ての受信面に同時に信号が受信されるとは限らないので送信と受信の指向性には差が発生する。後述の凹面振動子の受信信号を考える上で受信信号の時間差が重要になる。

3. 空中超音波の虚像分析

空中超音波で透過信号を計測する場合、凹面の集束超音波探触子を用いる。しかし、図8のエポキシ樹脂内部に空隙を設定した試験体を集束超音波探触子で計測して画像化すると図9のように虚像が発生した。送信と受信探触子は周波数 500[kHz]、直径 30[mm]、

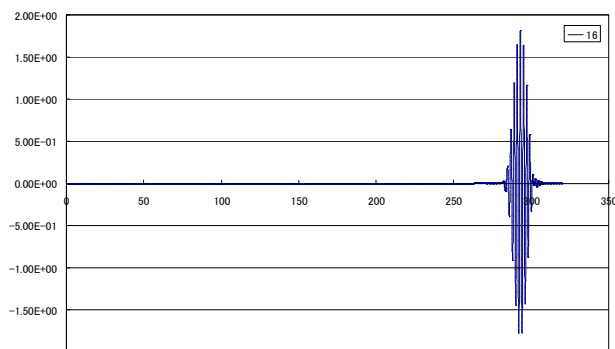


図13 X=16 mm の受信波形

曲率半径 R50[mm]の凹面集束探触子である。ここで、シミュレータ(イーコンピュート、SWAN21)により図10のシミュレーションモデルで探触子の端部から試験体の欠陥端部の距離 X を変えながら超音波伝搬信号を調べた。X=7[mm]のときの超音波伝搬を図11、受信波形を図12に示す。信号1、2、3の3つが検出され、それぞれ空中のエッジ波1、直接波2、試験体下部の多重反射信号3である。これら3つの信号が異なる時間で受信されて受信信号を構成している。Xの値が大きくなるとこれらの信号の受信時間差が少なくなり3つの信号が合成される。例えば、X=16[mm]の時は図13のように3つの信号が合成され1つの信号になった。

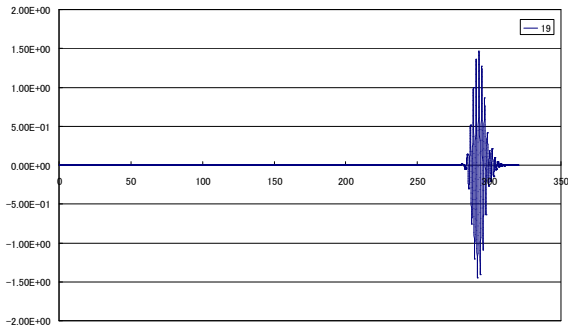


図 14 X=19 mm での受信波形

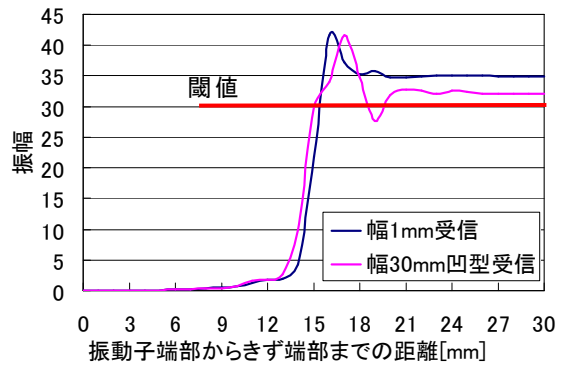


図 15 探触子形状と受信振幅

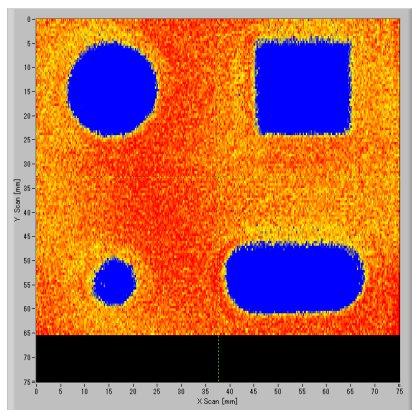


図 16 受信面が小さい場合の透過画像

X=19[mm]の時は図 14 のように 3 つの信号が合成されたが X=16[mm]の振幅 3.6_{p-p} に対して、 2.9_{p-p} と振幅が低下した。この振幅が低下した原因として、本来直接波の信号 2 だけを受信したいが、受信探触子が大きいので試験体下部の多重反射信号 3 も受信してしまうためである。受信探触子を小さくすることで信号 2 だけを受信できる。実際に幅 1[mm]の受信探触子で受信し、X と振幅の関係を表わすと図 15 のようになる。幅 30[mm]の凹面振動子では振幅低下が発生するが、幅 1[mm]では振幅低下が発生しない。画像化の際は閾値を図中の線に設定すると虚像が発生する。従って、受信面を小さくすることで余計な信号を受信しない。

実際に受信面を小さくした場合の透過画像は図 16 のようになり、虚像が低減された。この場合は受信探触子に図 17 のような穴の開いたカバーを付けて疑似的に振動面を小さくした。振動面を小さくすることで試験体下部の多重反射信号を受信しないが、受信信号強度そのものが低下してしまう。S/N が低下するが、ノイズは使用している機器により異なるため、最適な振動面の大きさは計測環境ごとに見つける必要がある。

4. 凹面振動子での受信信号

次に凹面振動子の受信信号について調べた。凹面振動子は曲率半径中心に焦点が発生すると仮定してい

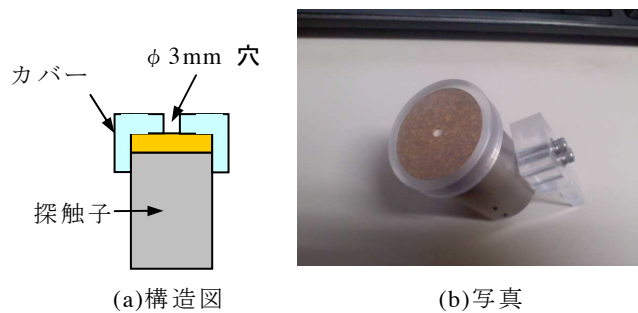


図 17 直径 3 mm の穴が開いた蓋を付けた探触子

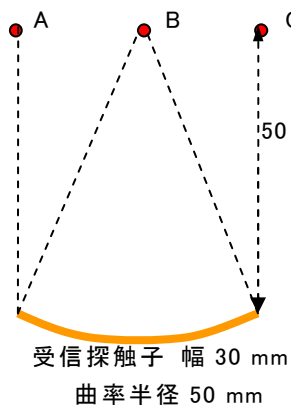


図 18 3つの点音源
受信モデル(受信 R50)

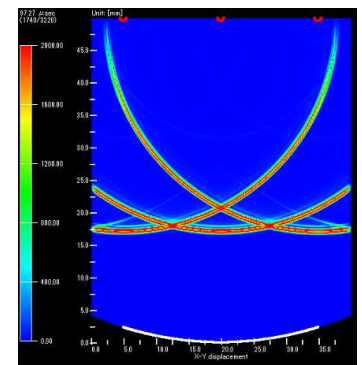


図 19 超音波伝搬図

るが、送信時はエッジ波の影響で曲率半径中心より焦点位置が手前になる[9]。受信の場合はエッジ波が関係なく、探触子と超音波の曲率半径が同様の場合に各点の受信時間差がゼロになり、受信信号が最大になる。ここで図 18 のように振動子幅 30[mm]、曲率半径 50[mm]の受信探触子を考え、シミュレータ(イーコンピュート、SWAN21)で受信信号を調べた。距離 50[mm]離れた位置に点音源 A、B、C をそれぞれ配置した。音源 B は曲率半径中心である。周波数は 500[kHz]で 1 波のパルス波を送信した。超音波伝搬図を図 19 に示す。音源 A、B、C のそれぞれの信号が凹面振動子で受信された。ここで、音源を図 20 のように幅 30[mm]の平面音源にして受信波形を調べた。図 21 で超音波伝搬を説明すると受信振動子端部付近の信号が最初

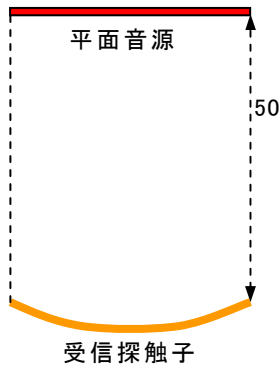


図 20 平面音源受信モデル (受信 R50)

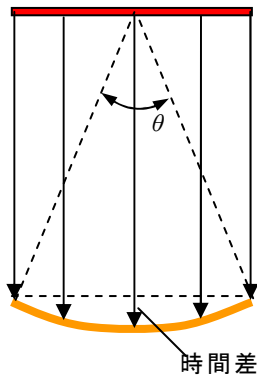


図 21 受信時間差

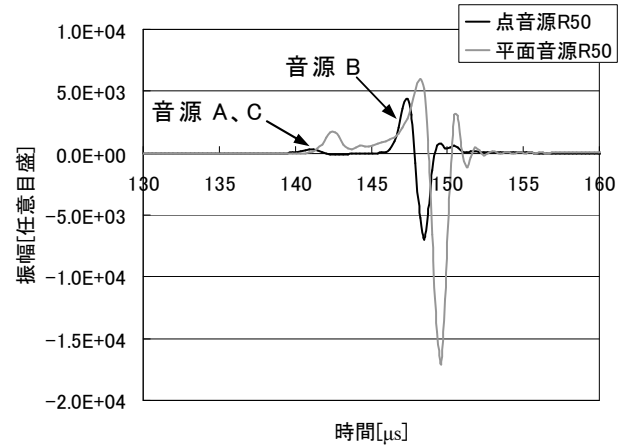


図 22 曲率 R50mm 凹面振動子の受信波形

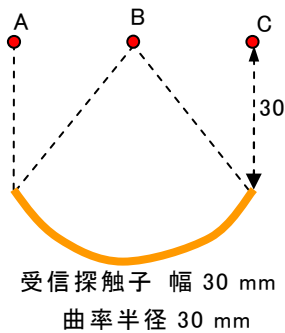


図 23 3つの点音源受信モデル(受信 R30)

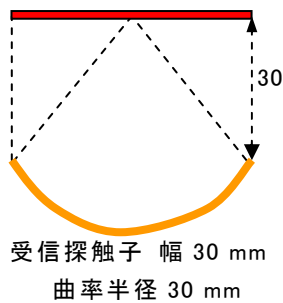


図 24 平面音源受信モデル (受信 R30)

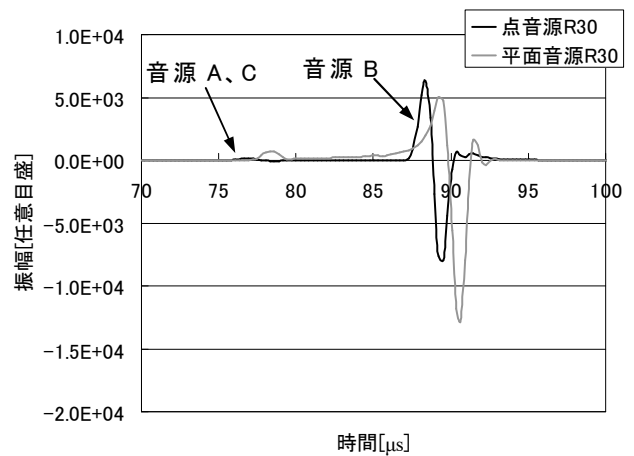


図 25 曲率 R30mm 凹面振動子の受信波形

に受信され、最後に中央の信号が受信される。このとき、中央の受信面は平面に近く受信信号が大きくなる。開口角 θ が小さい場合は凹面受信振動子でも平面振動子に近くなり、平面波の受信信号振幅が大きくなる。点音源と平面音源の場合の受信波形を図 22 に示す。点音源の場合は曲率半径中心にある音源 B の信号を強調しており A と C の信号は小さくなった。平面音源では時間差で複数の信号を受信して全体の受信信号を形成した。ここで受信信号のピーク間周期を調べてみると点音源は $1.12[\mu\text{s}]$ で $447[\text{kHz}]$ 相当、平面音源は $1.40[\mu\text{s}]$ で $358[\text{kHz}]$ 相当となり、受信時間差による周波数低下が発生した。受信振幅は点音源は 11.42_{p-p} 、平面音源は 23.05_{p-p} と 2 倍程度大きくなった。

ここで、振動子幅 $30[\text{mm}]$ 、曲率半径 $30[\text{mm}]$ 、開口角 60 度の凹面受信振動子での受信波形を調べた。点音源を図 23 のように距離 $30[\text{mm}]$ 離れた位置に配置し、受信信号をシミュレータで調べた。曲率半径 $50[\text{mm}]$ の時と同様に音源 B は曲率半径中心である。次に図 24 のように幅 $30[\text{mm}]$ の平面音源にした場合の受信信号を調べた。点音源と平面音源の場合の受信信号を図 25 に示す。点音源の場合は曲率半径 $50[\text{mm}]$ の時と同様に

曲率半径中心にある音源 B の信号を強調しており A と C の信号は小さくなった。平面音源の場合も探触子曲率半径中心の信号が強調されるのではなく点音源が周波数 $447[\text{kHz}]$ であるのに対して、 $358[\text{kHz}]$ 相当に低下した。また、受信強度についても凹面振動子の音源 B の信号は 14.27_{p-p} であるが、平面音源は 17.86_{p-p} と 1.25 倍の大きさとなった。平面に近い曲率半径 $50[\text{mm}]$ 、開口角 34 度では平面音源での振幅上昇が 2 倍であるのに対して、曲率半径 $30[\text{mm}]$ 、開口角 60 度の凹面受信では 1.25 倍の振幅上昇になった。振幅を大きくするためには受信面に同じタイミングで超音波を受信させることが重要である。また、受信の際に超音波の受信タイミングがずれると受信信号の波長が変化する。

これらの結果から凹面振動子による受信信号は曲率半径中心の信号が常に強調されるのではなく、点音源が複数ある場合に曲率半径中心にある音源の信号が強調されるということがわかる。実際の例で考えると、超音波伝搬中の散乱源が激しい物体、例えば人体の超音波伝搬においては凹面振動子による受信信号は曲率半径中心の信号を強調させることができると考えられる。また、受信振動子についてはアレイ化する

ることで開口合成により任意の位置からの信号を強調できるので凹面による集束よりアレイ振動子にするほうが適していると考えられる。

5. まとめ

空中超音波による虚像の解析において受信信号の時間差で考え、大きな受信面の信号合成が虚像の原因と推定した。小さな受信面にすることで虚像を低減でき、空中超音波透過画像を改善できた。凹面振動子の受信信号を調べ、受信で焦点が発生するのは点音源が複数ある時であり、平面波が入射したときは曲率半径中心の信号が強調されない。開口角が大きいほど平面波入射時の受信波形の振幅と周波数の低下が大きくなった。受信信号は受信点の時間差と信号合成により決まることを述べた。

文献

[1]田中雄介；非接触で探傷・計測が可能な超音波スキャナー技術；超音波 Techno、Vol.28、No.5、pp.81-83(2016)

[2]埜大祐，平田慎之介，蜂屋弘之；踵側面の形状を考慮した非接触音響特性計測の精度検討：日本音響学会2017年秋季研究発表会講演論文集、pp.1135-1136,(2017)

[3] 田中雄介、野地正明、柘植延啓、小倉幸夫；空中超音波における超音波伝搬の解析；日本非破壊検査協会平成30年度秋季講演大会講演概要集 pp.11-12(2018)

ジャパンプローブ HP

http://www.jp-probe.com/news/up_img/1542601521-490443_f1.pdf 2018年12月14日確認

[4]鈴木英男；音響学における相反定理とその応用；日本音響学会誌、58巻、4号、pp.239-243(2002)

[5]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)

[6]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(2018)

ジャパンプローブ HP

http://www.jp-probe.com/news/up_img/1539911617-126848_f1.pdf 2018年12月14日確認

[7]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)

ジャパンプローブ HP

http://www.jp-probe.com/news/up_img/1548674301-954327_f1.pdf 2019年1月28日確認

[8]田中雄介、野地正明、柘植延啓、小倉幸夫；空中超

音波探傷における超音波伝搬と虚像の解析；電子情報通信学会技術研究報告 超音波 US2018-105 pp.129-133(2019)

ジャパンプローブ HP

http://www.jp-probe.com/news/up_img/1548674301-954327_f2.pdf 2019年1月28日確認

[9]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 US-2017-110、Vol.117 No.398 pp.151-156(2018)

ジャパンプローブ HP

http://www.jp-probe.com/news/up_img/1517815404-618433_f2.pdf 2019年1月28日確認