

## 空中超音波探傷における超音波伝搬と虚像の解析

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** 空中超音波での欠陥計測において欠陥近くに虚像が発生することがある。虚像は試験体内の多重反射や超音波の広がりが原因であり、広がった信号を大きな探触子で受信して振幅が変動していることが原因である。シミュレーションで超音波伝搬を分析し、受信探触子にエッジ波、欠陥部近くを透過した直接波、欠陥下部で多重反射して広がった超音波の3つが異なるタイミングで受信していた。受信探触子は大きな集束超音波探触子を用いたが、振幅変動が虚像に影響しないように小さな受信探触子を用いることが適切であると考察した。実際に受信面を小さくした探触子で空中超音波計測を行い、虚像を低減することができた。

**キーワード** 超音波、非接触、空中、虚像、受信波形

## Analysis of Ultrasonic Propagation and Virtual Images in Air-coupled Ultrasonic Testing

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 near the defect in defect measurement by aerial ultrasonic waves. The virtual image is caused by multiple reflections in the specimen and spreading of ultrasonic waves, which is due to the fluctuation in the amplitude due to the reception of the spread signal with a large probe. In the simulation, ultrasonic wave propagation was analyzed, three of the edge wave, the direct wave which passed near the defect part, and the ultrasonic wave which was multiply reflected under the defect and spread were received at different timings. Although we used a large focused ultrasonic probe for the receiving probe, we considered that it is appropriate to use a small receiving probe so that the amplitude fluctuation does not affect the virtual image. Ultrasonic measurement was actually performed with a probe whose receiving surface was made small, and virtual images could be reduced.

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

### 1. はじめに

超音波による計測は非破壊検査や医用超音波など広く利用されている。通常は検査対象に水や油、グリセリンなど空気が探触子と検査対象の間に入らないように接触媒質を塗布する。しかし、接触媒質の状態による検査結果の誤差や検査後の接触媒質の除去など検査の安定性やコストの問題で接触媒質を使わずに超音波計測を行うことが望まれている。我々は空中超音波により試験体の欠陥を画像化する空中超音波検査法を開発し、リチウムイオン電池やCFRP、自動車のブレーキパッドなどへ適用してきた[1]。また、医用超音波では腫の計測に空中超音波を利用することが研究されている[2]。空中超音波検査法は欠陥部をCモード画像

で表示するが、検査対象内の多重反射や超音波の拡散により虚像が発生することを報告した[3]。また、超音波の受信信号は振動面各点の合成であることを報告し[4]、受信する時間差により振幅が変動する。今回、Cモード画像上の虚像をなくすために振動面の小さな受信探触子を用いて欠陥の信号計測と画像化したことを報告する。

### 2. 空中超音波透過画像における虚像

空中超音波透過信号による欠陥計測は図1のように送信探触子と受信探触子の間に試験体を配置し、探触子を走査させて試験体全面の透過信号を計測することで行う。計測点ごとの透過信号強度を平面Cモード

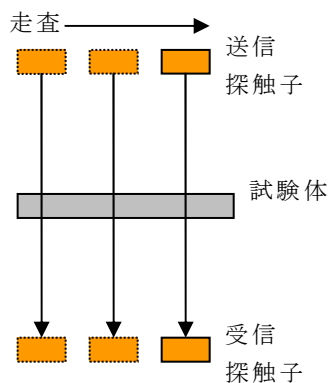


図 1 空中超音波計測

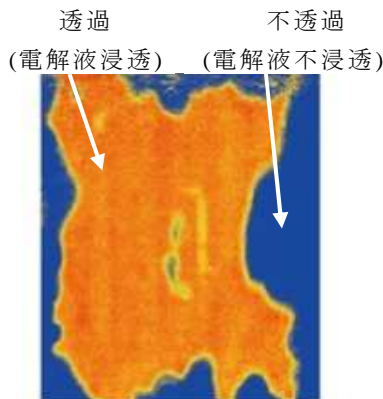


図 2 リチウムイオン電池計測

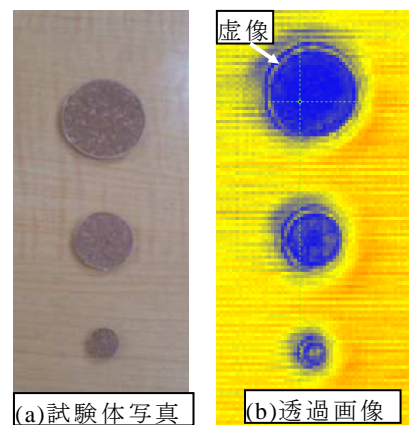


図 3 空中超音波透過画像

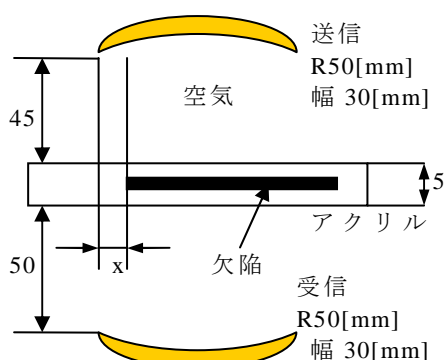


図 4 シミュレーションモデル

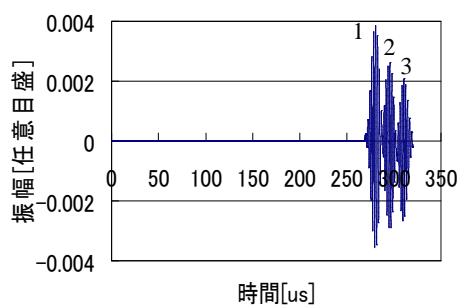


図 5 空中超音波透過波形 (シミュレーション)

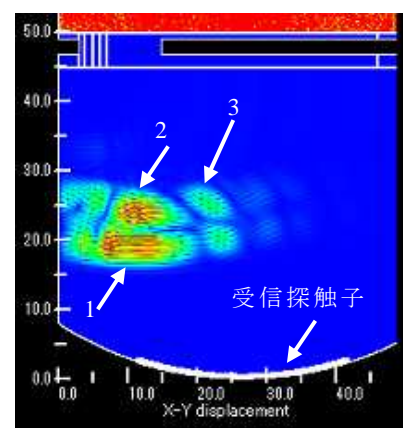


図 6 超音波伝搬図

画像で表示し、欠陥部分を調べる。欠陥が無い部分は信号が透過するが、欠陥部は信号が透過しないので受信信号強度に差が発生する。実際に図 2 のリチウムイオン電池の電解液を空中超音波計測システム(ジャパンプローブ、NAUT21)で計測すると電解液が重点されている部分は超音波が透過し、気泡やガスなどで電解液が充填されていない部分は超音波が透過しない。ここで図 3(a)の厚さ 5[mm]の亚克力内にコルクを埋め込んだ試験体を画像化すると図 3(b)のような虚像が発生する。亚克力部分は超音波が透過し、コルク部分は超音波が透過しないが、境界付近で虚像が発生した。この虚像について受信波形や超音波伝搬経路について調べた。

### 3. 超音波伝搬と受信波形の分析

虚像の発生についてシミュレータ(イーコンピュータ、SWAN21)により、超音波伝搬を調べて考察した。シミュレーションモデルは図 4 に示す。送信探触子と受信探触子は幅 30[mm]、曲率半径 50[mm]の凹面集束超音波探触子を用いた。送信波形は式(1)で周波数 500[kHz]、波数 10 とした。

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

y : 入力波形 f : 周波数

t : 時間 n : 波数

媒質は空気、厚さ 5[mm]の内部に 1[mm]の深さの欠陥がある亚克力試験体を送信探触子と受信探触子の間に配置した。送信探触子からは 45[mm]、受信探触子からは 50[mm]試験体を離れた。空気の密度と音速は 0.0012[kg/m<sup>3</sup>]、340[m/s]、亚克力の密度と音速は 1.2[kg/m<sup>3</sup>]、2730[m/s]とした。探触子端部と欠陥端部の差 x を 0 から 30[mm]まで変化させて受信波形を調べた。

受信の一例として x=3 のときにおける受信波形を図 5 に示す。3つの信号が観測されたが、1の波形は送信信号の超音波伝搬に伴い発生したエッジ波が受信されたもの、2の波形は集束超音波の信号の一部が試験体を透過した信号、3は試験体下部の多重反射信号である。理想的には2の信号だけ受信できればよいが、他の信号も受信される。超音波伝搬図は図 6、伝搬経路図を図 7 に示すが、信号 1、2、3 がそれぞれ異なるタイミングで受信される。x=3 のときはそれぞれの信

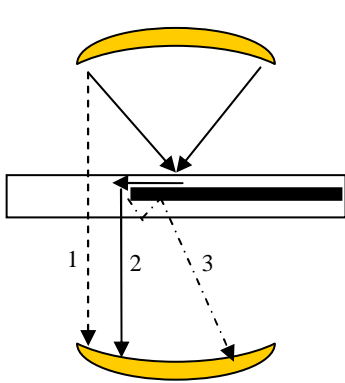
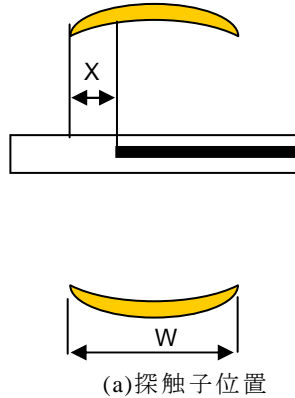
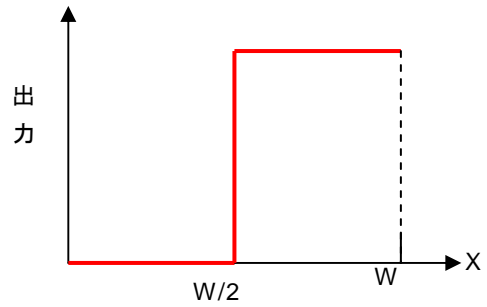


図7 超音波伝搬経路



(a)探触子位置



(b)理想な出力

図8 探触子位置と理想的な出力

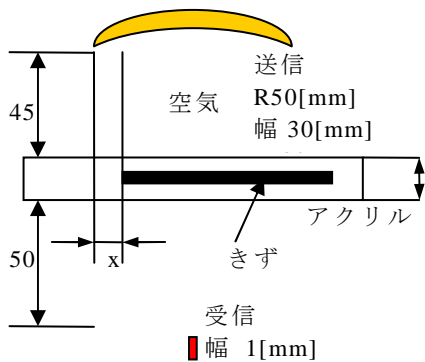


図9 小さな受信探触子

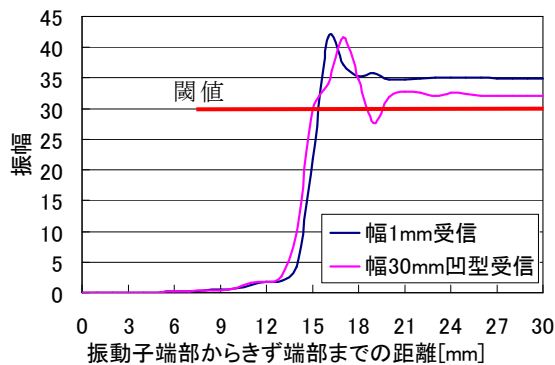
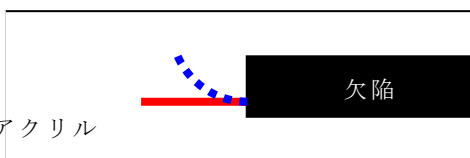


図10 探触子形状と受信振幅



— 直接波  
 - - - 直接波と逆位相のエッジ波

図11 欠陥透過時のエッジ波発生

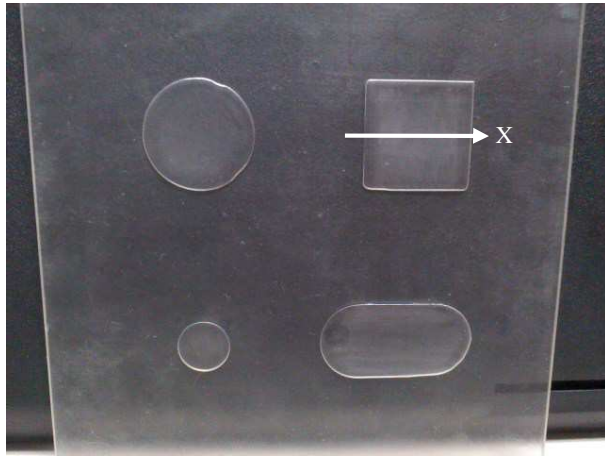
号が個別に検出されるが、 $x$ が大きくなると信号が合成されて受信信号の振幅が変動する。空中超音波ではエッジ波がほとんど発生しないので振幅変動の原因は3の試験体下部の多重反射信号であると考えられる。透過信号の理想的な信号としては図8のように探触子中心に欠陥端部があるときに受信信号の振幅が急激に変化することである。この場合は幅30[mm]の探触子であるので  $x=15$ [mm]で信号が変化することが理想である。しかし、受信探触子が大きな場合は試験体内部で拡散した多重反射信号を計測してしまい、受信信号の振幅が変動する。

ここで図9のように幅1[mm]の受信探触子により受信信号をシミュレーションした。 $X$ を0から30[mm]に変化させたときの受信信号振幅を凹面振動子の受信と共に図10に示す。両方とも受信信号の変動があ

るが、凹面振動子の受信では正負の両方で変動がある。仮に閾値を図10中の位置に設定すると信号が弱くなった部分で虚像が発生する。結果としては幅1[mm]の受信探触子では振幅変動が小さくなった。信号が強くなる部分であるが、図11のように考えられる。欠陥を透過するとき欠陥端部から透過信号と位相が逆のエッジ波が試験体内で発生する。伝搬距離により、エッジ波の振幅が透過信号と合成されて振幅が大きくなる。しかし、振幅の減少は発生しないので虚像の原因にはなりにくい。これらの結果より、受信探触子は小さな受信面の場合には振幅変動が発生しにくいことが確認された。

#### 4. 小さな受信面での受信波形と透過画像

前章のシミュレーションで受信面が小さい場合に虚像が低減できる可能性を示した。実際に振動面が小さい場合に受信波形や画像がどのように変化するかを調べた。受信探触子は周波数250[kHz]、直径20[mm]の空中超音波探触子に穴の開いた蓋をして振動面が小さな探触子を模擬した。蓋の穴は中央に直径3[mm]開けた。送信探触子は直径30[mm]、曲率半径50[mm]の凹面集束超音波探触子で駆動周波数は250[kHz]とした。試験体は図12に示す厚さ2[mm]の樹脂で中央に0.5[mm]の空隙が設定してある。空隙は直径20[mm]の



(a)写真

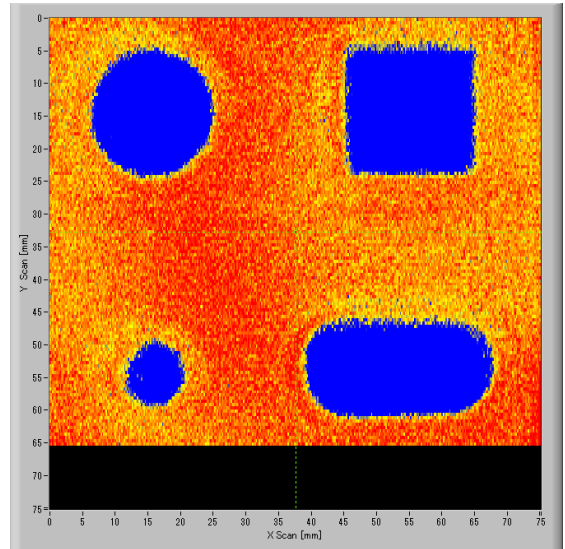


(b)構造

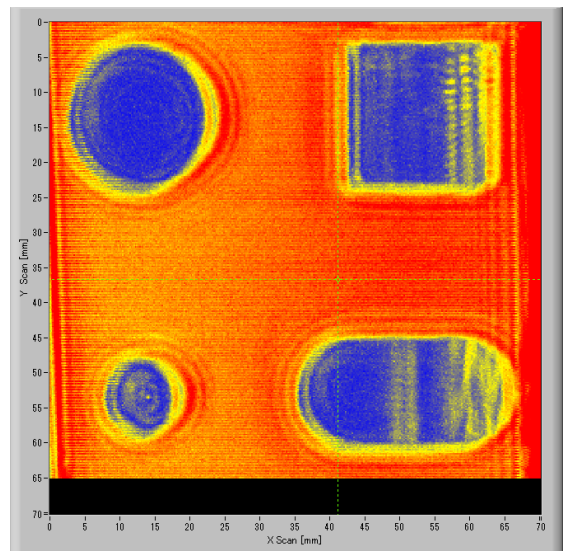
図 12 空中超音波用試験体

円、直径 10[mm]の円、一辺 20[mm]の正方形、長軸 25[mm]で円形部の直径 15[mm]のカプセル形状の 4 種である。受信探触子は上記の蓋をしたもののほかに送信探触子と同じ凹面振動子の集束探触子を用いて画像化し、それぞれを比較した。駆動はパルスレーバ (ジャンプローブ、JPR-600C)から-300[V]、5 波の矩形パルス波を印加した。

直径 3[mm]の小型振動面の受信探触子と直径 30[mm]の凹面受信探触子で画像化した C モード画像を図 13 に示す。凹面探触子で受信したときの画像は虚像が多く発生した。一方、直径 3[mm]の振動面での画像は虚像が発生しなかった。しかし、振動面が小さいため信号の出力が小さく、透過信号にノイズが多くなった。ここで、正方形の空隙において図 12(a)の X 軸の位置での振幅変化を小型振動面探触子と凹面探触子とで比較する。位置と振幅の関係を図 14 に示す。凹面探触子は小型振動面の探触子に対して振幅変動の発生箇所が位置 5[mm]や 20[mm]、25[mm]付近と多く、振幅 0.5 から 1.5 の間で振幅変動が発生している。そのため閾値によるが虚像が発生しやすい。一方、小型振動面の受信探触子では振幅の大きさがほぼ 0.5 から 1.5 の間での振幅変動がなく閾値を 1 付近に設定することで虚像が発生しなくなる。これらの結果から振動面が小さくなると振幅変動が小さくなるため、虚像が発生しなくなることがわかる。一方、振動面が小さく信号強度自体は小さいので S/N は低下する。そのため、虚像が発生しなくなる程度の大きさで、最低限の S/N を確保できる条件を計測ごとに適切に設定する必要がある。



(a)小型振動面受信探触子



(b)直径 30[mm]集束超音波探触子

図 13 小型振動面探触子と集束超音波探触子の C モード画像

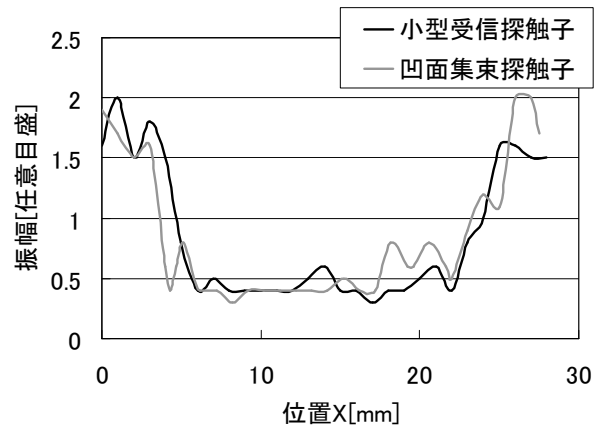


図 14 X 方向における 2 種の受信探触子の振幅

## 5. まとめ

空中超音波で欠陥計測を行った際に発生する虚像についてシミュレーションで解析し、試験体内部の多重反射などで振幅が変動していることを確かめた。また、受信探触子が大きい場合は広がった信号を受信して振幅変動が発生することを確かめた。振動面の小さな受信探触子を用いることで振幅変動を抑制し、虚像を低減することができた。

## 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](http://www.jp-probe.com/news/up_img/1542601521-490443_f1.pdf) 2018 年 12 月 14 日確認
- [4] 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](http://www.jp-probe.com/news/up_img/1539911617-126848_f1.pdf) 2018 年 12 月 14 日確認