

屈折と球面収差を考慮した集束超音波計測方法による高感度化*

○田中雄介, △柘植延啓, △野地正明, △小倉幸夫 (ジャパンプローブ)

1 はじめに

超音波を利用した計測として人体内の病変などを検出するエコー検査や構造物内部の欠陥などを検出する超音波探傷がある。いずれも外部から計測対象を傷つけずに計測を行うが、透過信号の感度向上やより微小な対象を検出する高分解能化が課題となる。感度向上、高分解能化を両方達成する方法として超音波ビームを絞り、焦点を発生させる集束超音波による計測がある。集束超音波を発生させる超音波探触子は凹面振動子や音響レンズを利用した探触子である。この方法で向上する分解能は方位分解能である。計測対象付近で超音波の焦点を発生させて感度や分解能を向上させるが、集束超音波探触子は凹面振動子の曲率半径中心やレンズの屈折計算値が焦点とされるが、エッジ波の影響で焦点位置がずれる[1]。また、非破壊検査などでは水浸超音波探傷、空中超音波探傷など水や空気を介した計測を行うため、計測対象との表面における屈折を考慮する必要がある。光学レンズではレンズの屈折位置により焦点が一点に集まらずにばらける球面収差が発生するが、音響レンズでも球面収差が発生する[2]。また、超音波顕微鏡では音響レンズを用いているが、計測対象表面で発生する表面波を利用した計測[3][4]など集束超音波による計測は様々な現象を考慮する必要がある。今回、計測に影響の大きい屈折を考慮した計測法について検討した。また、特に屈折の大きい空中超音波計測において、屈折と球面収差を考慮した探触子配置により、透過信号の高感度化と高分解能化を行ったことを報告する。

2 集束超音波探触子を用いた微小欠陥計測

2.1 集束超音波探触子の構造と焦点位置

集束超音波探触子は図1に示す凹面振動子

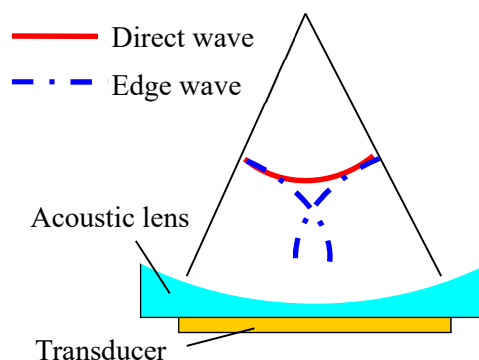


Fig. 1 Focusing probe using acoustic lens.

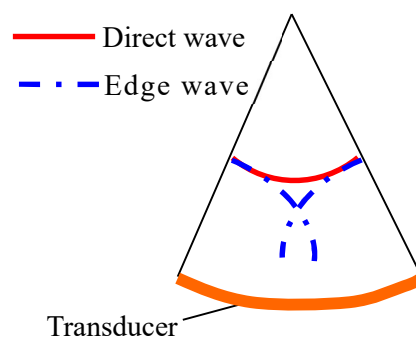


Fig. 2 Concave shaped focusing probe.

を用いたものと図2に示す音響レンズを用いた探触子がある。両方とも凹面超音波を発生させることは同様であるが、凹面超音波の端部から同位相と逆位相のエッジ波が発生し、凹面超音波と重なって振幅が変動することで焦点位置がずれる。焦点位置計測は水中、または空中で行うが、水中や空中での焦点位置をそのまま計測対象に合わせても想定的位置に焦点が発生しない。計測対象表面で発生する屈折を考慮する必要がある。

2.2 計測対象表面での屈折と球面収差による焦点位置のばらつき

集束超音波探触子は凹面超音波が発生しているため、図3のように計測対象表面に垂直に超音波が入射するのは中心部だけで、他の部分は一定の入射角で超音波が入射する。そのため中心部以外で屈折が発生するが、屈折による焦点位置 d は単一ではない。中央部ほ

* Focused ultrasonic measurement method taking into account refraction and spherical aberration for higher sensitivity., by TANAKA, Yuusuke, TSUGE, Nobuhiro, NOJI, Masaaki and OGURA, Yukio (Japan Probe Co., Ltd.).

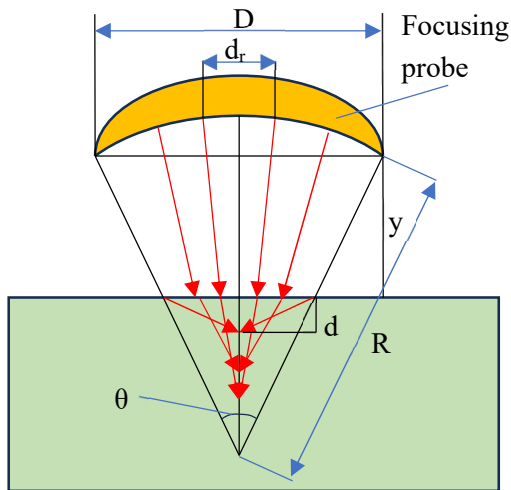


Fig. 3 Refraction of ultrasound at incidence.

ど屈折角が小さく、外周部ほど屈折角が大きい。従って、集束超音波による超音波計測は計測対象内で焦点が一点に集まらないため、比較的屈折率が小さく、焦点位置が集まりやすい中心部付近の集束超音波を用いるか、曲率の大きな超音波振動子、または非球面の振動子を用いる必要がある。

3 送信探触子と受信探触子の配置

3.1 屈折を考慮した送信探触子の配置

集束超音波探触子を用いた透過信号計測により空中でのリチウムイオン電池やCFRP内部の欠陥計測が実施されている。空中集束超音波探触子の配置は図4のように計測対象中心部に配置される。ここで、送信、受信探触子から計測対象までの距離を y_1 、 y_2 とする。異なる媒質間の集束超音波探触子の配置として、音速差を考慮して図5のように配置する方法がある。この方法は音速差だけを考慮し屈折を考慮していない。例えば、アクリルで深さ 2.5[mm]の位置を焦点と想定して空中で焦点位置 31[mm]の集束超音波探触子を

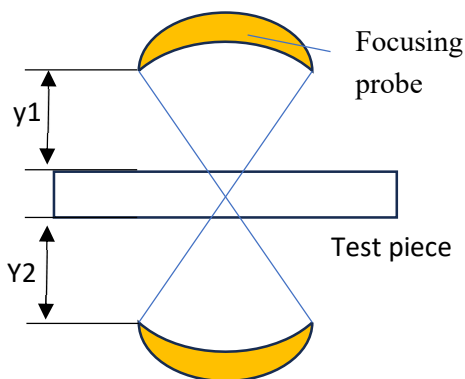


Fig. 4 General focusing probe setting.

Focusing probe with 40[mm] radius curvature

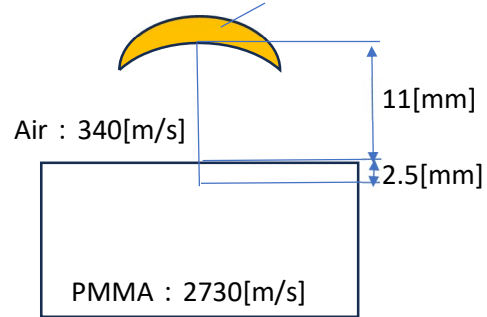


Fig. 5 Setting of focusing probe at ultrasonic testing in air.

配置するとき、アクリル音速(2730[m/s])が空中(340[m/s])の 8 倍としてアクリル内の距離は 2.5×8 の空中での 20[mm]相当としている。そのため、空中距離は 11[mm]となる。しかし、実際は屈折が空気とアクリルの境界で発生するため焦点が 2.5[mm]にならない。また、音速差は縦波で計算するが、屈折時は全反射しやすくなるため横波を考慮するほうが適切である。次章で空中超音波でのアクリルの計測を述べるが、厚さ 5[mm]のアクリルを例に探触子の配置を考えると次のようになる。アクリルは縦波音速 2730[m/s]、横波音速 1400[m/s]であり、縦波音速を考慮して屈折を考えた場合、モード変換で横波も同時に発生するため、横波屈折角を考慮する。直径 20[mm]、曲率半径 40[mm]、400[kHz]の空中超音波探触子を用いて空中(音速 340[m/s])から計測することを想定する。焦点位置はエッジ波などの影響で 31[mm]であり、仮想的な凹面超音波の曲率半径は 31[mm]とする。図3のように凹面音源から振動面に垂直に超音波が送信されると仮定し、実質的な凹面音源の直径を d_r とする。アクリル板の深さ 2.5[mm]の位置に焦点を発生

Table 1 Real diameter and focal depth.

Probe real diameter d_r [mm]	Focal depth d [mm]	Probe real diameter d_r [mm]	Focal depth d [mm]
1	7.51	11	2.19
2	3.13	12	1.94
3	3.10	13	1.63
4	3.05	14	1.19
5	2.99	15	0.28
6	2.91	16	#NUM!
7	2.81	17	#NUM!
8	2.70	18	#NUM!
9	2.56	19	#NUM!
10	2.39	20	#NUM!

させると仮定し、探触子の高さ y を 18[mm] にすると d_r ごとの焦点深さ d は表 1 の通りとなる。 d_r が 11[mm] 以下で焦点深さが 2.0-3.2[mm] の間になっており、深さ 2.5[mm] 付近に焦点が形成されていることがわかる。 d_r が 12[mm] 以降は焦点が浅く、16[mm] 以降は屈折が発生せず全反射となっているため、計測に寄与している部分は d_r が 11[mm] 以下の部分と考えられる。直径の大きな集束超音波探触子を用いる場合は緩やかな曲率にするか、非球面曲面の探触子を用いる必要がある。

3.2 計測対象内の多重反射を考慮した受信探触子の配置

受信探触子の配置は相反定理により送信と受信の特性が同じとして、送信探触子の高さと同じにすることが通常である。しかし、凹面振動子は検査対象内の多重反射信号により振幅変動が発生する[5]。この振幅変動は図 6 のように検査対象内で広がる超音波が広い凹面振動子で受信するために発生するため、受信面積を小さくするか、広がる波を回避するため受信探触子の位置を遠くすることが必要となる。従って、後述する計測では送信探触子の高さが 18[mm] でも受信探触子は 30[mm] と遠い位置に設定した。

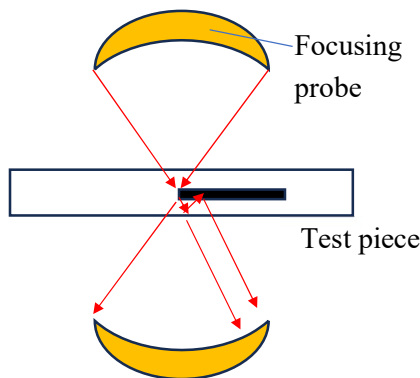


Fig. 6 Received signal amplitude fluctuation.

4 計測対象内での焦点設定による感度と方位分解能向上

4.1 方位分解能評価

アクリル内における方位分解能を空中から集束超音波探触子で探触子の高さを変えながら計測した。凹面探触子は周波数 400[kHz]、振動子直径 20[mm]、曲率半径 40[mm]、焦点位置 31[mm] である。計測対象は図 7 の厚さ 5[mm] の中心部に直径 2[mm] の横穴が 1-4[mm] の間隔で配置されたアクリル試験体で

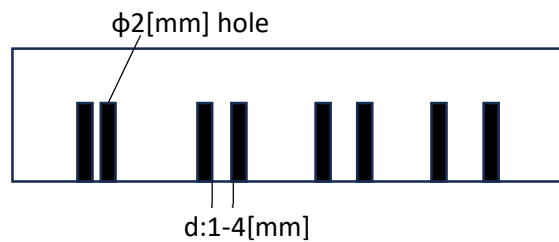


Fig. 7 PMMA block for evaluating axial resolution.

ある。図 4 における送信探触子の距離 y_1 と受信探触子の距離 y_2 を $y_1 : 18[mm]$ 、 $y_2 : 30[mm]$ 、 $y_1 : 35.5[mm]$ 、 $y_2 : 35.5[mm]$ の条件で変えた時の透過信号強度、透過画像からの分解能を評価した。装置は空中超音波計測装置 NAUT21 を用い、パルサレシーバ(ジャパンプローブ製、JPR-600C)から 100[V]、400[kHz]、波数 3 の負の矩形パルスを印加した。

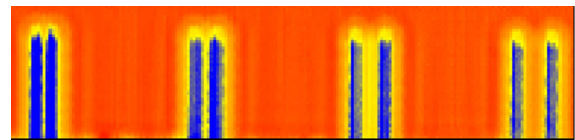


Fig. 8 Transmission signal intensity distribution at $y_1:18[mm]$ and $y_2:30[mm]$.

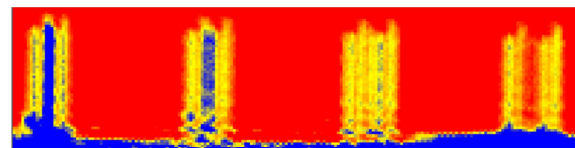


Fig. 9 Transmission signal intensity distribution at y_1 and $y_2:35.5[mm]$.

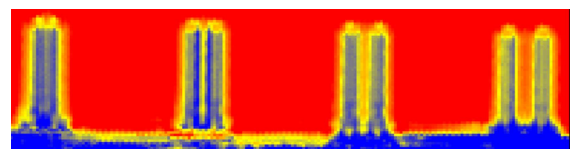


Fig. 10 Transmission signal intensity distribution at y_1 and $y_2:18[mm]$.

まず $y_1 : 18[mm]$ 、 $y_2 : 30[mm]$ の場合の透過画像を図 8 に示す。1[mm] 間隔の横穴が分離できた。装置の設定ゲインは 0.0[dB] である。次に $y_1:35.5[mm]$ 、 $y_2:35.5[mm]$ の凹面曲率中心の中央に試験体を配置したときの透過画像を図 9 に示す。間隔 4[mm] の穴はかろうじて分離されているが、それ以外は穴が 2 個に分離できておらず、特に間隔 1-2[mm] は一つの穴のような画像となった。また、装置の設定ゲインは 14.1[dB] である。従って、屈折を考慮した探触子の配置は方位分解能を向上させ、感度も 5 倍程度向上させる効果がある。次に $y_1 : 18[mm]$ 、 $y_2 : 18[mm]$ での計測を図 10 に

示す。ゲインは 0.0[dB]であるが、振幅変動による虚像が発生しており、画像上の分解能は $y2:30[\text{mm}]$ の方が優れている。これらの結果から、送信探触子は屈折を考慮した配置で焦点が任意の深さに集まりやすい距離、受信探触子は試験体内の多重反射が広がるようにある程度離すことが高感度、高分解能の計測に必要となる。

4.2 空中超音波による CFRP の計測

次に厚さ 5[mm]の CFRP を計測した例について報告する。CFRP 内部は「JAXA」の形状をしたテフロンシートが配置されており、空中超音波透過信号を遮るため、画像上で文字が検出される。CFRP の音速を 1350[m/s]と仮定し、 $y1:20[\text{mm}]$ 、 $y2:30[\text{mm}]$ と $y1:35.5[\text{mm}]$ 、 $y2:35.5[\text{mm}]$ にしたときの透過画像を評価した。パルサレシーバ(ジャパンプローブ製、JPR-600C)から 200[V]、400[kHz]、波数 3 の負の矩形パルス印加した。図 11 に $y1:20[\text{mm}]$ 、 $y2:30[\text{mm}]$ での透過画像、図 12 に $y1:35.5[\text{mm}]$ 、 $y2:35.5[\text{mm}]$ での透過画像を示す。



Fig. 11 Transmission signal intensity distribution at $y1:20[\text{mm}]$ and $y2:30[\text{mm}]$.



Fig. 12 Transmission signal intensity distribution at $y1$ and $y2:35.5[\text{mm}]$.

両方とも「JAXA」の文字は検出されているが、ゲインが 9.4[dB]異なり、屈折を考慮した方が感度が良かった。また、図 12 では右の A 文字に振幅変動による虚像が検出された。分解能の評価がしにくいですが、図 13 に示す J 文字部分の矢印で示した上端部で信号の傾きを調べると図 14 のように $y1:20[\text{mm}]$ 、 $y2:30[\text{mm}]$ のほうが傾きが大きく、方位分解能が高いことがわかる。

5 おわりに

集束超音波探触子の計測対象表面での屈

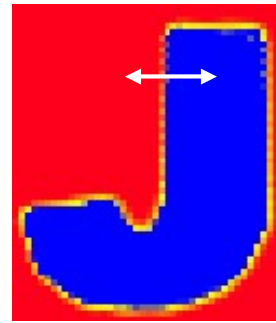


Fig. 13 Measure the slope of the amplitude of the upper horizontal part of the letter J.

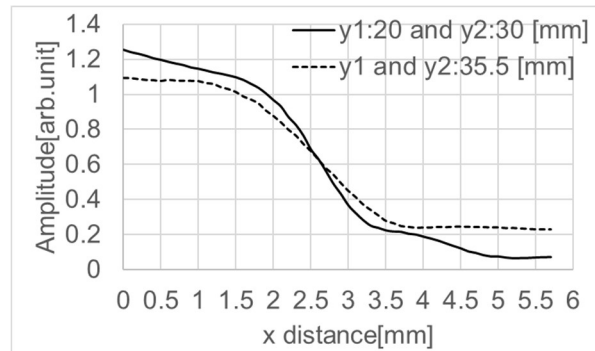


Fig. 14 Inclination of the J-letter part in each of the $y1$ and $y2$ conditions.

折を考慮した探触子の配置を計算する方法を提案した。空中で集束超音波による計測を行い、屈折を考慮した配置は感度と方位分解能の両方を向上させることを示した。受信探触子の配置は試験体の多重反射を考慮し、送信探触子の距離より離れた。

文献

- [1]田中雄介、阿部晃、小倉幸夫、“集束超音波探触子の焦点位置評価とエッジ波による焦点位置変動、” 電子情報通信学会技術研究報告 超音波 US2019-97 pp.149-154(2020).
- [2]洲脇利孝、“超音波顕微鏡、” 電子写真学会誌、23 巻、3 号、pp.229-234(1984).
- [3]石川潔、片倉景義、小倉幸夫、“超音波顕微鏡の漏洩弾性表面波検査法による分解能の向上と材料評価への応用、” 非破壊検査、47 巻、2 号、pp.120-126(1998).
- [4]Kazushi Yamanaka, “Surface acoustic wave measurements using an impulsive converging beam,” J. Appl. Phys., 54, (8), pp.4323-4329(1983).
- [5]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).