

屈折と球面収差を考慮した集束超音波探触子による超音波計測方法

Ultrasonic testing using focal ultrasonic probe taking into account refraction and spherical aberration

田中 雄介 野地 正明 柘植 延啓 小倉 幸夫
Yuusuke Tanaka Masaaki Noji Nobuhiro Tsuge Yukio Ogura
ジャパンプローブ株式会社
Japan Probe Co., Ltd.

概 要

空中において集束超音波探触子で透過信号による試験体内部の探傷を行う場合、試験体表面で屈折が発生し集束探触子の焦点位置と試験体内部の実際の焦点が異なる。そのため、屈折を考慮して送信探触子と試験体との距離を適切に設定する必要がある。また、試験体内の多重反射による超音波の広がりが発生し、受信探触子へ超音波の透過信号と共に多重反射信号が受信されて振幅変動が発生する。振幅変動によるノイズを回避するために受信探触子は試験体との距離を開けることが必要となる。従って、送信探触子は屈折を考慮して近づけ、受信探触子は振幅変動を回避するために遠ざけて計測する。

キーワード 空中超音波計測、焦点、屈折、球面収差、方位分解能

1. 緒言

超音波探傷やエコー検査において、感度や方位分解能向上のために超音波ビームを絞って焦点を発生させる集束超音波による計測法がある。超音波探傷においては水浸や空中から集束超音波で試験体内部の任意の点に焦点を発生させて計測する。試験体表面で屈折が発生するが、このとき球面収差により焦点がばらついて一点に集まらない。集束超音波による仮想的な球面から各点の入射角と屈折角を計算し、なるべく焦点が集まっているように探触子の位置を決定する必要がある。集束超音波探触子の曲率中心などを試験体中央に設定する場合があるが、エッジ波による焦点位置変動や前述の屈折によりさらに探触子を近くに配置する必要がある。集束超音波探触子をデフォーカスで配置する方法として表面波と直接反射の干渉を利用した計測[1][2]や水中の溶接部で最も大きな屈折角を考慮した計測法[3]があるが、干渉の利用は計測法が異なり、水中溶接部の計測は球面収差によるばらつきを考慮していない。我々は屈折を考慮した空中での集束超音波により高分解能、高感度で計測した[4]。今回、集束超音波探触子の送信探触子と受信探触子の適切な配置条件の考え方について述べる。

2. 計測対象入射時に発生する屈折

集束超音波探触子は音響レンズ方式、凹面振動子方式のどちらも凹面の超音波が発生しているため、図 1 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位置は一定の入射角で超音波が入射する。振動子の仮想的な直径を d_r とすると仮想直径ごとに入射角と屈折角が異なる。そのため中心部以外では屈折が発生するが、焦点位置 d は単一にならない。中央部ほど屈折角が小さく、外周部ほど屈折角が大きくなる。屈折角が 90 度を超えると計測対象表面で全反射するため、超音波が入射しない。

ここで、振動子直径 20[mm]、曲率半径 40[mm]、焦点位置 31[mm]の凹面集束空中超音波探触子を用いて厚さ 5[mm]のアクリル板内の探傷を行う。計測対象は図 2 の直径 2[mm]の横穴が厚さ中心の深さ 2.5[mm]の位置配置されたアクリルブロックで、横穴は間隔 d (1 から 4[mm])を開けて並んで配置されてい

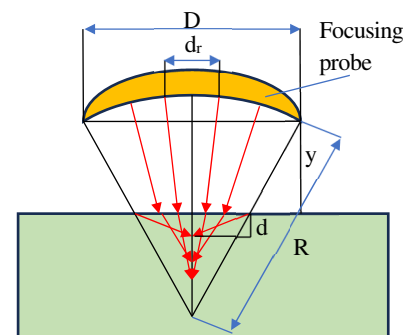


Fig. 1 Refraction of ultrasound at incidence.

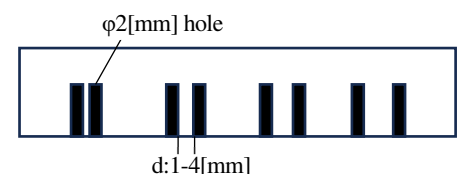


Fig. 2 PMMA block for evaluating axial resolution.

る。探触子と試験体の配置を図 3 として、送信探触子と試験体との距離を y_1 、受信探触子と試験体との距離を y_2 とする。空中音速を $340[\text{m/s}]$ 、アクリル音速を横波の $1400[\text{m/s}]$ 、 y_1 を $18[\text{mm}]$ とし、仮想直径 d_f ごとに屈折時の焦点を計算すると表 1 の通りとなる。 $2.0\text{-}3.2[\text{mm}]$ の間に焦点が発生しており、深さ $2.5[\text{mm}]$ 付近に焦点が発生する。 d_f が $12[\text{mm}]$ 以上は焦点が浅く、 $16[\text{mm}]$ 以上は全反射となる。従って、焦点位置への寄与は d_f が $11[\text{mm}]$ 以下の部分である。縦波音速の場合は全反射領域がさらに大きくなるため、横波音速を考慮した。振動子全てを有効に使うには緩やかな曲率にするか、非球面の集束音場を発生させる必要がある。図 2 のアクリルブロックを y_1 と y_2 を変えて透過信号を計測し、ブロック全体をスキャンした C スコープ画像を図 4 に示す。 $y_1:18[\text{mm}]$ 、 $y_2:30[\text{mm}]$ が隙間 $1[\text{mm}]$ まで画像化できており、良い条件となった。単純に凹面振動子の中心に配置した y_1 、 $y_2:35.5[\text{mm}]$ の時はほとんど画像化できない上に感度が $14[\text{dB}]$ 低く、 y_1 、 $y_2:18[\text{mm}]$ の時は画像がぼやけた。受信探触子は送信探触子と同じ距離にすると振幅が変動するため次章で最適な配置を説明する。

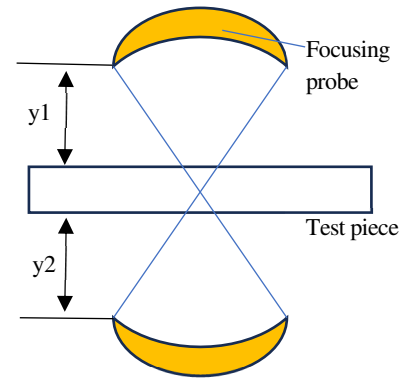


Fig. 3 Focusing probe setting.

3. 計測対象内多重反射を避けるための受信探触子配置

受信探触子の位置は送信探触子より距離を開ける必要があるが、これは計測対象内部で発生する多重反射信号により受信振幅が変動するためである[5]。図 5 のように振幅変動は広がる超音波を広い凹面振動子で受信して発生するため、広がる波を回避するため受信面積を小さくするか受信探触子を遠ざける必要がある。そのため、前章における受信探触子と試験体との距離 y_2 を $30[\text{mm}]$ に設定した。厳密には凹面振動子の曲率や y_2 に最適値があるはずであるが、今後の課題とする。

4. 結言

集束超音波探触子は屈折を考慮して配置することで高感度、高分解能の計測を行うことが可能である。

文献

- [1] 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察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).
- [2] Kazushi Yamanaka, “Surface acoustic wave measurements using an impulsive converging beam,” J. Appl. Phys., 54, (8), pp.4323-4329(1983).
- [3] 里中忍、山本光治、立川逸郎、“集束超音波を用いたクラッド鋼の探傷試験、”溶接学会誌、”52 巻、3 号、pp.320-326(1983).
- [4] 田中雄介、野地正明、柘植延啓、小倉幸夫、“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、”2024 年日本音響学会秋季研究発表会講演論文集 1-8-7, pp.21-24(2024).
- [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).

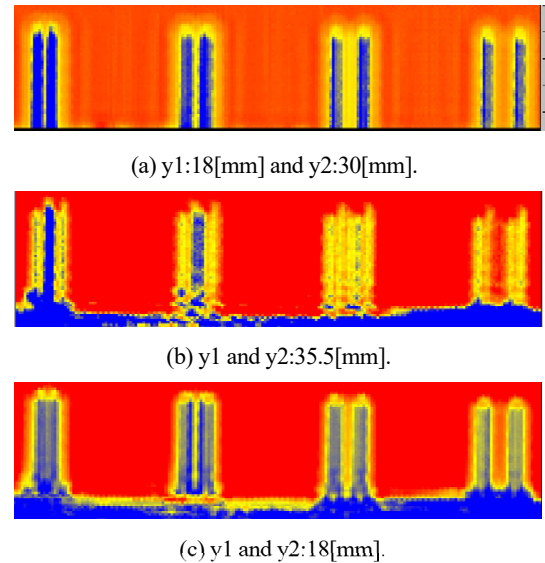


Fig. 4 C scope by transmission signal intensity.

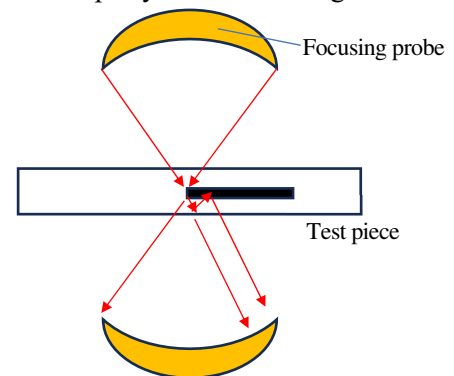


Fig. 5 Received signal amplitude fluctuation.