

空中超音波共振法による非接触厚さ計測

—共振信号発生位置の推定—

田中雄介、大橋保宏、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, ohashi, ogura}@jp-probe.com

あらまし 空中超音波により試験体の厚さを非接触で計測した。共振法を用いて計測を行い、鋼板やアクリル板などの平面試験体のほか、曲面や凹凸面における厚さ計測を行った。平面試験体、曲面試験体で共振法による厚さ計測を行い、それぞれの厚さを計測した。また、厚さ 5.5[mm]のアクリル板に円形などの形状で深さ 0.5[mm]の溝を設定した試験体を計測したとき健全部と減肉部の両方の厚さを計測した。共振法の波形を時間ごとに調べ、試験体の厚さ計測を行うための評価を行う波形の箇所を考察した。送信信号の直後から共振信号が発生しているが、時間が経過した部分の信号ではノイズが大きくなり共振と思われる信号が検出できなかった。

キーワード 空中超音波、共振法、非接触、厚さ計測、減肉

Non-contact Thickness Measurement by Air-Coupled Ultrasonic

— Non-contact Thickness Measurement by Air-Coupled Ultrasonic —

Yuusuke Tanaka Yasuhiro Ohashi Yukio Ogura

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

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

Abstract The thickness of the specimen was measured noncontact by aerial ultrasonic waves. In addition to planar specimens such as steel plates and acrylic boards, thickness measurements were made on curved surfaces and concavoconvex surfaces using the resonance method. Thickness was measured by the resonance method on a planar specimen and a curved specimen, and the thickness of each was measured. In addition, thicknesses of both the healthy part and the thinned part were measured when measuring a test specimen having a groove with a depth of 0.5 [mm] in a shape such as a circle on an acrylic plate having a thickness of 5.5 [mm]. We investigated the waveform of the resonance method every time and examined the part of the waveform to be evaluated for measuring the thickness of the specimen. Although a resonance signal is generated immediately after the transmission signal, noise is increased in the signal of the portion where time has passed, and a signal considered as resonance can not be detected.

Keywords Air-coupled Ultrasonic、Resonance Method、Non-contact、Thickness Measurement、Thickness Reduction

1. はじめに

構造物の内部を破壊せずに検査を行う方法として非破壊検査があり、超音波による検査は非破壊検査で広く利用されている。超音波検査は探触子を試験体に接触させて計測を行い、試験体内部の探傷や厚さ計測を行う。探触子を試験体に接触させるときは接触媒質を探触子と試験体との間に塗布して超音波を試験体に伝搬させやすくする。接触媒質を塗布する方法は接触媒質の厚さにより受信感度が変化することや高温の試験体には適用できないなどの課題がある。試験体に非接触で超音波検査を行う方法として空中超音波による計測があり、リチウムイオン電池の電解液浸透計測や自動車のブレーキパッドの接着検査、CFRP の探傷などに利用されている[1]。超音波による計測は構造物内

部のきずを計測するだけでなく、配管の内壁検査など構造物の厚さ測定にも利用されている。この場合も試験体に探触子を接触させるが、試験体が高温の場合など適用できない場面もある。空中超音波による計測は送信信号の波数を多くする必要があり、厚さ計測を行う方法のパルスエコー法では分解能が低下して試験体の厚さを正確に計測できない問題がある。また、リチウムイオン電池などの検査は試験体の両面から探触子で挟んだ状態で計測する透過法であり、片面からの厚さ計測にはそのまま適用できない。また、空中で片面から計測する方法としてタンデム法があるが、試験体表面や内部のきずを計測する方法であり、厚さ計測への適用は困難である。空中超音波でパルスエコー法を行うための超音波振動子は研究されているが[2]、実用

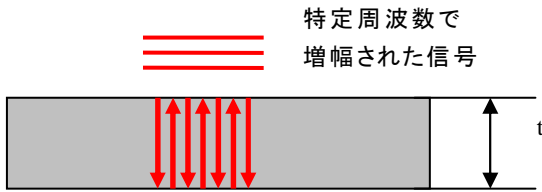
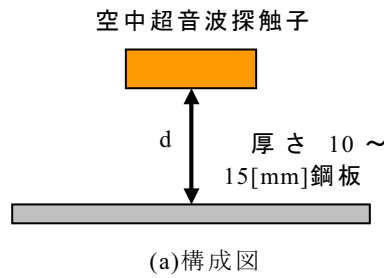
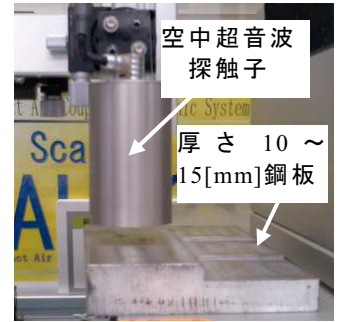


図1 共振法



(a)構成図



(b)写真

図2 共振法による鋼板計測

表1 鋼板の厚さと共振が発生する周波数の一例

厚さ[mm]	検出された周波数[kHz]	計算された厚さ[mm]
10	290.9	10.1
11	268.3	11.0
12	246.2	12.0
13	227.5	13.0
14	212.2	13.9
15	194.9	15.1

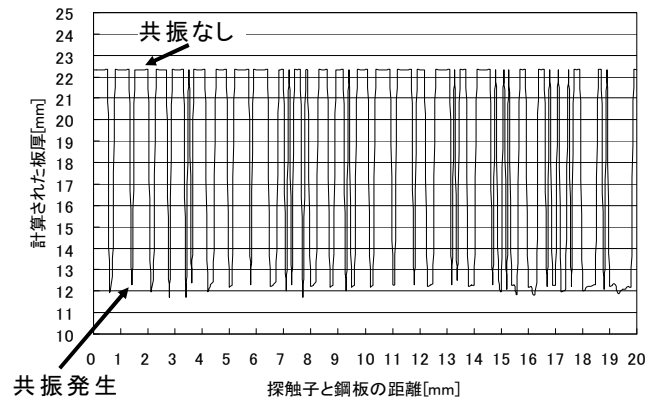


図3 距離と板厚の関係(鋼板 12[mm]厚さ)

化はまだされていない。そこで我々は空中超音波を用いた共振法による厚さ計測を行い、片面非接触で試験体の厚さを計測した。これまでに基本的な非接触共振法の計測[3]や曲面、凹凸面などの厚さ計測[4]について報告してきた。今回、共振信号の発生位置について調べ、受信信号のどの部分で評価を行うことが適切かについて考察する。

2. 共振法

試験体内部に超音波が伝搬した時、何度も反射することで図1のように試験体の厚さに応じた周波数の信号が増幅される。その増幅された信号の波長を求めることで試験体の厚さを推定することができる。空中超音波では空中に漏洩した信号を計測し、その信号をFFTすることで厚さを推定する。試験体の厚さは以下の式で表わされる[5]。

$$t = 0.48 \frac{C_p}{f} \quad (1)$$

C_p : 試験体の音速 f : 周波数 t : 厚さ

波長を C_p/f とすると試験体の厚さはほぼ波長の半分と計算される。共振が発生している信号の周波数を計測し、指定された音速から試験体の厚さを計測する。

計測の例として図2に鋼板の計測を示す。厚さ10から15[mm]の鋼板の上に空中超音波探触子を配置し、探触子と試験体との距離 d を変化させながら計測した。鋼の音速は 5900[m/s] に設定し、パルスレーバ(ジャパンプローブ製、JPR-600C)から電圧 100[V]、波数 30 の矩形波を送信した。探触子の周波数は 250[kHz] のものを用いた。計測された共振信号に対してFFTを行いピーク周波数で評価した。表1に各厚さにおける検出された周波数とそこから計算した厚さの値を示す。厚さごとに異なる周波数が検出されており、厚さの誤差も 0.1[mm] 以内となった。ここで図3に厚さ 12[mm] の鋼板を計測した時の探触子と鋼板との距離と計算された板厚の関係を示す。共振が発生した時に鋼板の厚さは 12[mm] 付近を示しているが、共振が発生していない時は 22.3[mm] 付近の厚さと計算された。22.3[mm] の厚さと計算された時は周波数が 132[kHz] と計算され、この値は探触子やパルスレーバなど計測システム固有の周波数と考えられる。共振が発生している間隔は距離が 0.6 から 0.7[mm] でこの距離は空気の半波長程度であり、空中での共振も鋼の共振と関係している可能性がある。

3. 様々な減肉形状における共振

次に三角形溝など平行な減肉以外の場合における

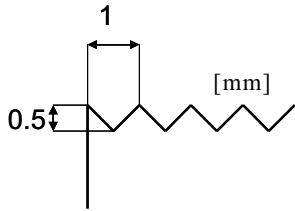


図 4 三角形溝減肉試験体構造図

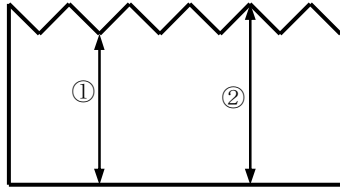


図 7 三角形溝の共振

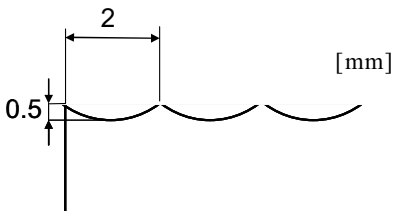


図 8 三角形溝減肉試験体構造図

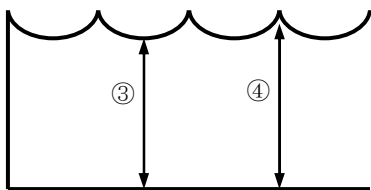


図 11 円形溝の共振

共振法について調べた。厚さ 5.5[mm]の亚克力試験体に図 4 のように幅 1[mm]、深さ 0.5[mm]の三角形減肉を設定し、共振法により厚さを計測した。空中超音波探触子は 250[kHz]のものを用いた。三角形形状の溝により、厚さ 5.5[mm]部分と 5.0[mm]部分の 2 か所が存在している。音速や送信設定は 2730[m/s]、電圧 100[V]、波数 10、周波数 250[kHz]の矩形チャープ波でチャープ比は 1.2 とした。図 5 に三角形溝における共振信号の周波数の一例を示す。ピーク周波数は 250[kHz]となり、厚さは 5.5[mm]と計算された。ピーク信号の他に A の 270[kHz]付近の周波数信号が検出された。次に探触子と試験体との距離を変えて計測すると、図 6 の共振信号の周波数が検出された。ピークは 271[kHz]で厚さは 5.0[mm]と計算されたが、250[kHz]付近に B の周波数信号が検出された。これらの波形から三角形溝の試験体の共振を考えると図 7 のようになる。底面と平行な部分で反射を繰り返して共振信号となるが、三角形溝試験体で底面と平行な部分は溝の底面と頂点の 2 か所である。従って、溝の底面と試験体底面との間で何度も反射した信号①と溝の頂点と試験体底面との間で何度

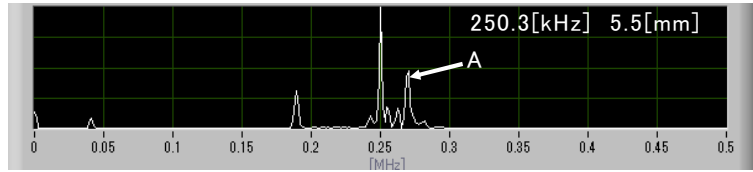


図 5 三角形溝における共振法の周波数 1

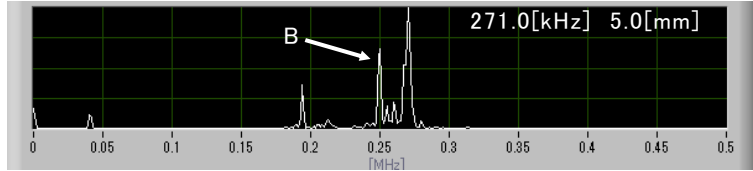


図 6 三角形溝における共振法の周波数 2

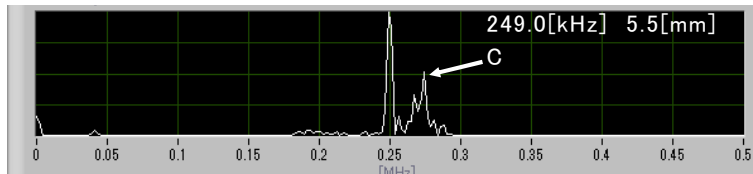


図 9 円形溝における共振法の周波数 1

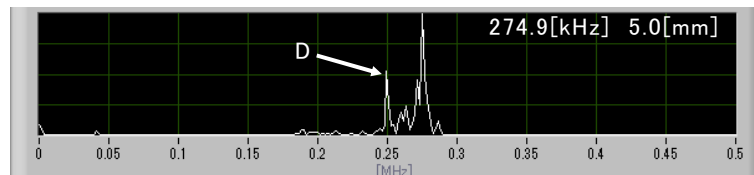


図 10 円形溝における共振法の周波数 2

も反射した信号②が共振信号になると考えられる。従って、溝がある場合は試験体底面と平行な部分がある複数の箇所でも共振が発生し、それぞれの周波数が複数検出される。

次に図 8 に示す円形溝において共振信号を計測した。厚さ 5.5[mm]の亚克力板に深さ 0.5[mm]、幅 2[mm]の円形溝を設定した試験体について共振法で厚さを計測すると図 9 のような周波数信号が計測された。249[kHz]にピーク周波数が発生し、厚さが 5.5[mm]となった。共振信号のほか、周波数 270[kHz]付近に信号 C が検出された。探触子と試験体との距離を変えて計測すると図 10 のようにピーク周波数が 275[kHz]となり、厚さが 5.0[mm]となった。ピーク周波数のほかに周波数 250[kHz]付近に信号 D が検出された。これらの結果から、円形溝の共振についても図 11 のように底面と平行な部分で共振が発生し、試験体底面と溝の底面との共振③と試験体底面と溝上面との共振④がそれぞれ検出されたと考えられる。

三角形溝と円形溝の結果から共振信号は試験体内部で平行な部分があると発生することが考えられる。

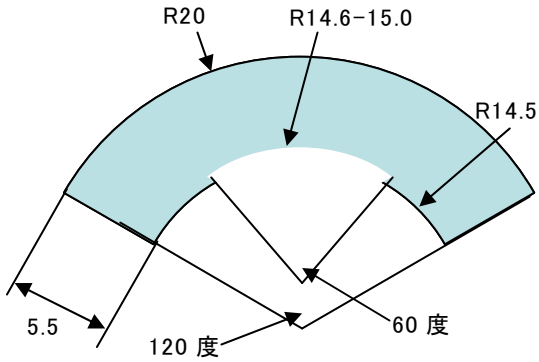


図 12 曲面減肉試験体の構造図

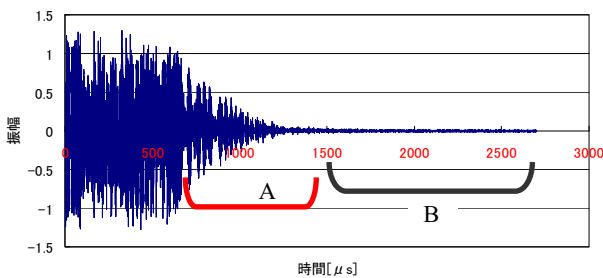


図 13 厚さ 5.0[mm]アクリル板の共振信号

配管において複数の減肉が発生した場合、平行な部分全ての周波数が検出されるのでそれぞれの減肉が一度に計測されると考えられる。

次に曲面減肉試験体で共振法による厚さ計測を行った。図 12 の外径 20[mm]、厚さ 5.5[mm]のアクリル曲面試験体に減肉を曲面状に 0.1~0.5[mm]設定した。それぞれの厚さを共振法で計測すると表 2 のようになった。厚さごとに異なる周波数が検出され、減肉部の厚さを計測できた。曲面部においても超音波の入射面と底面とで平行な部分があるためその部分で共振が発生すると考えられる。この試験体では減肉部が超音波の入射面と平行なため、探触子と試験体の超音波入射面とで平行な部分から試験体に入射した超音波が共振信号を発生させている。

4. 共振信号の発生箇所

次に受信波形において共振信号が発生している箇所について調べた。共振信号は超音波が試験体に入ってから発生するが、空中超音波では探触子と試験体との間との多重反射が無くならないと試験体内の共振信号を検出することができない。しかし、時間が経過しすぎると試験体内で共振信号が減衰してしまい、共振信号を検出することができない。ここで厚さ 5.0[mm]のアクリル板においてどのタイミングで発生しているかを調べた。厚さ 5.0[mm]のアクリル板の共振信号を図 13 に示す。時間 700[μs]までは送信信号や空中での多重反射が計測されていると思われるが、

表 2 曲面減肉試験体の周波数と厚さ

厚さ[mm]	周波数[kHz]	計算厚さ[mm]
5.0	273.0	5.0
5.1	268.6	5.1
5.2	262.1	5.2
5.3	256.1	5.3
5.4	252.1	5.4
5.5(健全部)	246.6	5.5

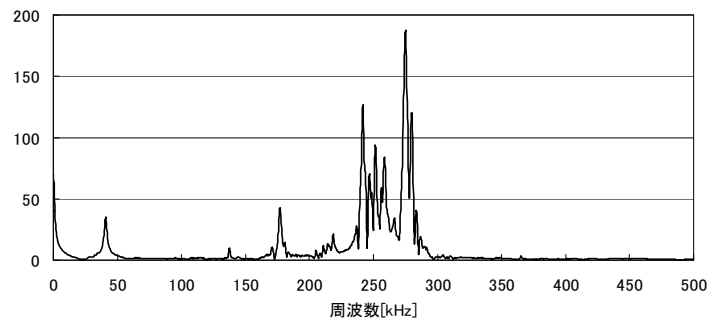


図 14 区間 A の周波数スペクトル

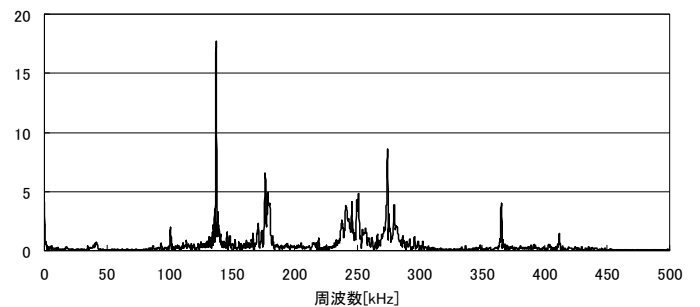


図 15 区間 B の周波数スペクトル

700[μs]付近から共振信号のような周期的な信号が検出された。周期的な信号は 1400[μs]辺りまでは検出されるが、それ以降は小さな信号しか検出されなかった。

時間 700~1400[μs]付近の区間を A、時間 1500~2700[μs]の区間を B としてそれぞれの周波数スペクトルを FFT で求めた。図 14 に区間 A の周波数スペクトルを示す。ピーク周波数が 275[kHz]と計算され、厚さは 5.0[mm]となった。次に区間 B の周波数スペクトルを図 15 に示す。ピーク周波数が 131[kHz]となっており、共振信号が検出されていなかった。従って、共振信号は送信信号のすぐ後から発生するが、時間が経過すると空中への漏洩や試験体内部の減衰などで信号強度が低下することがわかる。

ここで区間 A、B の信号について拡大して共振信号がどのようになっているかを調べた。共振が発生していると試験体の厚さに応じた周波数の周期的な信号が発生するはずである。図 13 の区間 A では周期的な信号、区間 B では周期的でない信号が発生していると

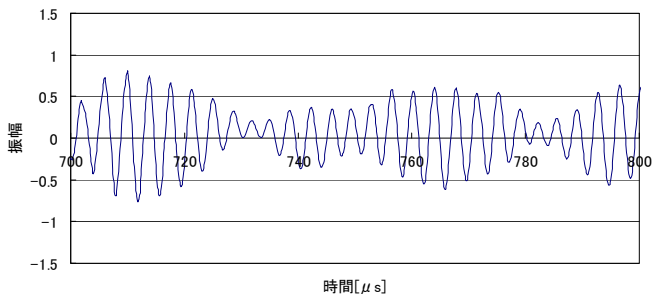


図 16 時間 700～800 [μs]の拡大図

予想される。図 13 の共振信号における区間 A の 700～800[μs]の部分拡大したものを図 16 に示す。周期的な信号が検出されており、共振が発生したと考えられる。また、図 13 の共振信号における時間 1100～1200[μs]の部分拡大したものを図 17 に示す。この区間においても周期的な信号が検出された。一方、図 18 に区間 B の時間 1900～2000[μs]の拡大図を示す。共振信号ではなくノイズのような信号が支配的になっており、この部分を FFT しても共振信号の周波数が検出できなかったと考えられる。従って、共振信号自体は送信信号のすぐ後から発生するが、空中への漏洩や試験体中の減衰などがあるためなるべく時間が経過していない部分の信号を FFT する必要がある。

ここで共振信号の周期について考える。共振信号から試験体の厚さを求めるには周波数から波長を計算する必要がある。波長を求める式は以下の式

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2) \quad \begin{array}{l} \lambda: \text{波長} \quad c: \text{音速} \\ f: \text{周波数} \end{array}$$

で求められるが、波長の定義は波が 1 回振動するとき進む距離である。波が 1 回振動する時の時間は周期であるので波長は以下の式

$$\lambda = cT \quad (3) \quad T: \text{周期}$$

で表わされる。FFT による周波数と周期の逆数による周波数を別の値として考え、FFT による周波数は周波数 A、周期の逆数による周波数は周波数 B とすると [6][7]、超音波の波長は実際には以下の式

$$\lambda = \frac{c}{f_B} \quad (4) \quad \begin{array}{l} \lambda: \text{波長} \quad c: \text{音速} \\ f_B: \text{周波数} B \end{array}$$

で表わされる。周波数 A と周波数 B の値が一致する時は波数が無限の時であり、波数が多くなるほど周波数 A と B の誤差が少なくなる。共振信号は周期的な信号となっているため、波数が多くなるはずであるが、周波数 B による評価も考えておく必要がある。現在サンプリング周波数は 5[MHz]と探触子の周波数 250[kHz]の 20 倍としているが、5[MHz]ではサンプリング時間の間隔が 0.2[μs]となるため、周期で計算すると 1 点計測箇所がずれると 10[kHz]以上計算結果が異なる。そ

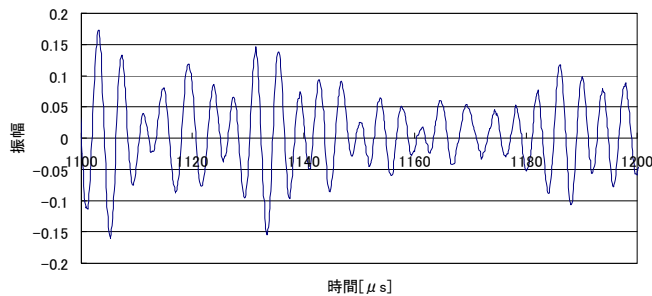


図 17 時間 1100～1200 [μs]の拡大図

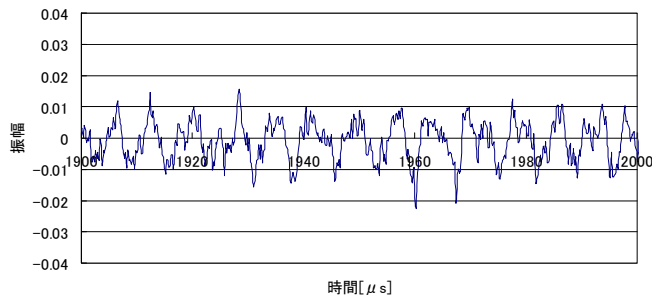


図 18 時間 1900～2000 [μs]の拡大図

のため、周期で計算する場合はさらにサンプリング周波数を高くして計測する必要がある。共振信号の周期で周波数を計算することについては今後の課題とする。

5. まとめ

空中超音波による共振法により試験体の厚さを非接触で計測した。平板や凹凸のある試験体、曲面の減肉試験体においてそれぞれの厚さを計測した。共振は試験体の入射面と平行な部分があると、その部分で共振が発生することを述べた。受信信号において共振信号の発生箇所を調べ、送信信号のすぐ後で共振が発生していることを述べた。時間が大きく経過すると空中への漏洩や試験体内部の減衰により共振信号がほとんど検出されなくなった。

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] 辻俊宏、北原大太郎、田中康弘、小原良和、三原毅；空中超音波計測のためのダイシングした圧電素子を用いる気相複合探触子の開発；平成 29 年度日本非破壊検査協会秋季講演大会講演概要集；pp.3-4(2017)
- [3] 田中雄介、大橋保宏、小倉幸夫、“空中超音波を用いた片面非接触厚さ計測、” 第 24 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集 pp.51-56 (2017)
- [4] 田中雄介、大橋保宏、小倉幸夫、“空中超音波共振法における減肉形状と計測厚さ、” 電子情報通信学会

- 技術研究報告 超音波、Vol.117 No.14 pp.11-16(2017)
- [5]Frank Schubert、Bernd Köhler、“Ten Lectures on Impact-Echo,” Journal of Nondestructive Evaluation、Volume 27, Issue 1, pp 5-21(2008)
- [6]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、Vol.117 No.398 pp.151-156(2018)
- [7] 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評価法、” 第 25 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集 pp.57-62(2018)