空中超音波共振法による非接触厚さ計測*

◎田中雄介，△大橋保宏，△小倉幸夫（ジャパンプローブ）

1　はじめに

構造物内部の状態について対象を破壊せずに調べる非破壊検査の一つに超音波を用いるものがある。超音波検査は超音波探触子を試験体に接触させて計測し、試験体内部の欠陥や試験体の厚さを計測する。探触子を試験体に接触させる場合、試験体と探触子の間に接触媒質が必要で接触媒質の厚さにより受信信号が変化する、試験体が高温の場合は接触できない、などの問題がある。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計測が実用化され、リチウムイオン電池や自動車のブレーキパッドの計測に利用されている[1]。超音波検査は内部のきずを計測する目的の他、試験体の厚さを計測することにも利用されている。配管壁の厚さを計測して減肉を検査することなどに超音波が利用されており、超音波厚さ計などで厚さを計測する。この場合も超音波探触子を試験体に接触させるが、高温の試験体や計測の自動化のため非接触で厚さ計測を行うことが望まれている。厚さ測定はパルスエコー法により行うが、空中超音波は感度向上のため低周波で波数を多くしており、パルスエコー法での計測は分解能が低く実用的でない。空中でパルスエコー法を行うための探触子は研究されているが[2]、まだ実用化されていない。そこで我々は空中超音波での厚さ計測をパルスエコー法ではなく共振法を用いて行い、試験体の厚さ計測を非接触で行う方法を提案した。これまでに基本的な共振法の計測[3]や曲面、凹凸など様々な形状における厚さ計測[4]について報告した。今回、共振法の波形を時間ごとに調べどの部分で共振信号を検出しているかについて述べる。

2　共振法

2.1 非接触厚さ計測

共振法は図 1 のように超音波が物体内部で何度も反射して厚さに応じた特定の波長(周波数)を持った信号が増幅され、受信信号の周波数から試験体の厚さを計測する方法である。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。試験体の音速を設定すれば計測された波形の周波数を求めることで試験体の厚さを推定することができる。

2.2 試験体と探触子との距離と共振信号

まず共振法の基礎実験として試験体の厚さを非接触で計測したことを述べる。図 2 のように厚さ 10[mm]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 を変えながら計測した。空中超音波探触子は周波数 250[kHz]、直径 20[mm]、振動面が平らな高感度探触子である。パルサレシーバ(ジャパンプローブ製、JPR-600C)から電圧 100[V]、波数 30、周波数 250[kHz]の矩形パルス波を送信した。受信信号はプリアンプを用いて増幅した。

共振時の信号の一例として図 3 から図 6 に厚さ 10[mm]の鋼板計測時に共振が発生した時としていない時の受信波形と周波数分布を示す。図 3 と図 5 の受信波形を比較すると、

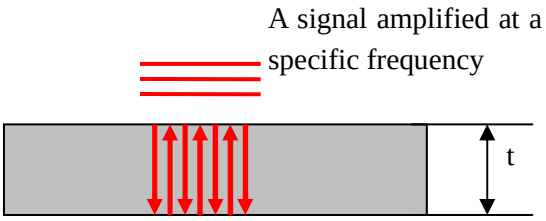


Fig.1 Resonance method

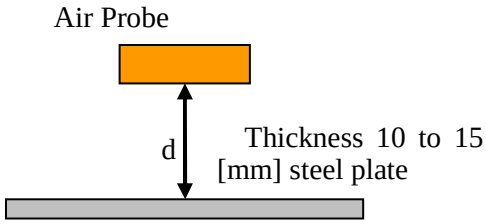


Fig.2 Steel plate measurement by resonance method

* Focal point and its evaluation method of focused ultrasonic probe, by TANAKA, Yuusuke, OHASHI, Yasuhiro and OGURA, Yukio (Japan Probe Co., Ltd.).

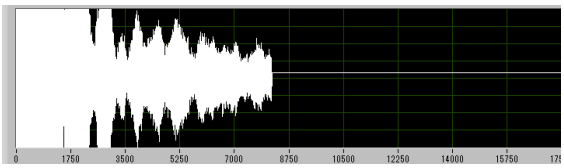


Fig.3　Waveform at resonance

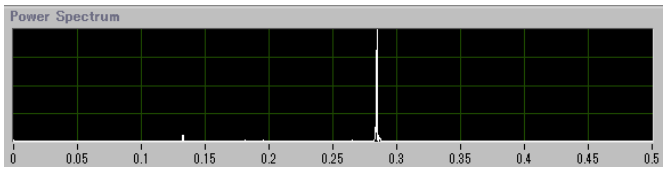


Fig.4　Frequency at resonance

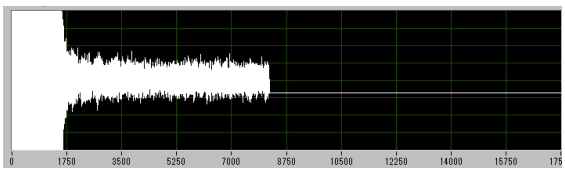


Fig.5 Waveform at not resonance

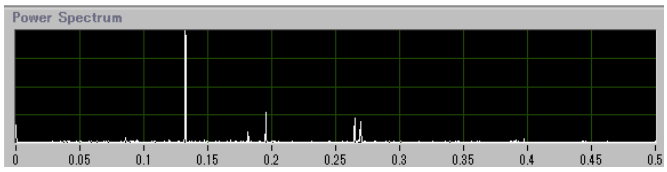


Fig.6 Frequency at not resonance

Table 1 Example of thickness of steel plate and frequency at resonance

Thichness [mm]	Frequency [kHz]	Culculated thickness [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

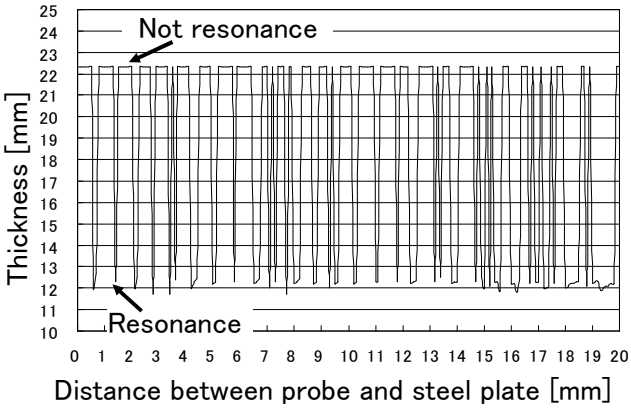


Fig.7　Relationship between distance and plate thickness (steel plate 12 [mm] thickness)

Table 2 Measurement results of thin steel plate

Thickness [mm]	Frequency [kHz]	Culculated thickness [mm]
3	961	3.1
4	754	3.9
6	489	6.0

共振が発生している図 3 の受信波形は振幅が大きくなっているが、図 5 の共振が発生していない時の受信波形は送信信号の後に振幅が小さい。この信号を FFT した時、共振が発生した時と共振が発生しない時で特定の周波数が検出される。共振発生時は試験体の厚さに応じた周波数が検出されるが、共振が発生しない時はいつも特定の周波数が検出される。この周波数は探触子やパルサレシーバ固有の特性で、このシステムでは 132[kHz]が検出された。

次に厚さ 10[mm]から 15[mm]の鋼板を共振法で計測した。250[kHz]の空中超音波探触子を用いて計測した。鋼の音速は 5900[m/s]と設定した。100[V]、波数 30 の矩形波をパルサレシーバから送信して受信波形の周波数を求めた。それぞれの厚さの鋼板において検出された周波数について表 1 に示す。厚さに換算すると誤差 0.1[mm]以内の厚さで計測された。計測は探触子と試験体との距離を変えながら行ったが、探触子と試験体との距離を変えた場合、一定間隔ごとに共振が発生する。一例として厚さ 12[mm]の鋼板を計測した時、探触子と試験体との距離を変えた時の共振を図 7 に示す。共振が発生していない時は厚さ 22[mm]付近となるが、共振が発生した時は厚さ 12[mm]付近と計測される。この図から探触子と試験体との距離が一定距離ごとに共振が発声した。この間隔は 0.6～0.7[mm]であり、空気の半波長程度である。この結果から、試験体内部の共振と共に空中の共振も関係している可能性がある。また、さらに薄い鋼板を計測する場合はより高周波の探触子を用いることで計測可能である。厚さ 6[mm]の鋼板について 500[kHz]の探触子を用いて共振法により厚さ計測をした。また、厚さ 3[mm]と 4[mm]の鋼板については 750[kHz]の探触子で計測した。表 2 に計測結果を示すが、それぞれの厚さについて共振法で計測できた。

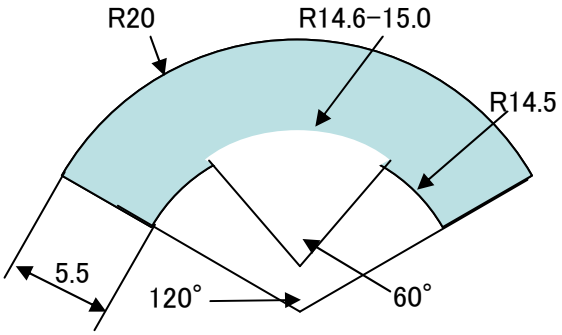
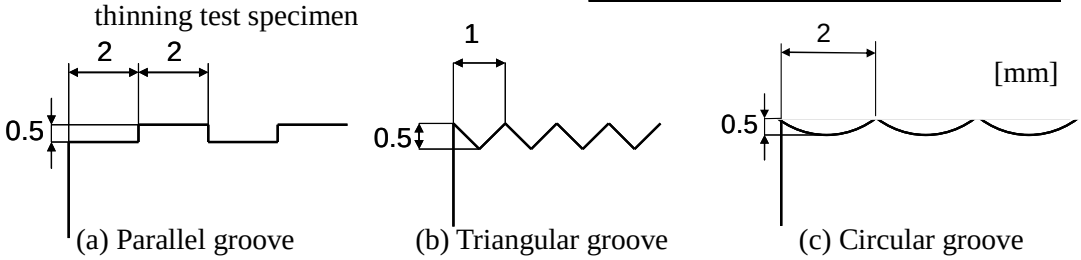


Fig.8　Structural drawing of curved surface thinning test specimen

Table 3　Frequency and thickness of curved surface thinning test specimen

Thickness [mm]	Frequency [kHz]	Culculated thickness[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 (Helthy part)	246.6	5.5



(a) Parallel groove　(b) Triangular groove　(c) Circular groove

Fig.9　Structure of thinning test specimen

3　試験体の非接触厚さ計測

3.1 曲面試験体の減肉

厚さを計測する場合は配管など曲面での減肉を計測することが多い。共振法で計測する場合も曲面での厚さ計測が可能でないと実用ができない。図 8 の厚さ 5.5[mm]、外径 20[mm]、厚さ 5.5[mm]の曲面材に曲面減肉を 0.5[mm]から 0.1[mm]まで設定した試験体の減肉部を共振法で計測した。曲面試験体の材質はアクリルで音速は 2730[m/s]に設定した。探触子は直径 20[mm]、250[kHz]の空中超音波探触子で外径側から計測した。表 3 にそれぞれの厚さにおける周波数と計算された厚さを示す。曲面減肉試験体のそれぞれの厚さで異なる周波数が検出でき、計算された厚さも実際の厚さと一致した。この結果より曲面においても共振法で厚さを計測可能とわかる。

3.2 減肉形状と共振信号

次に複数の厚さが混在する場合にどのような信号が受信されるかを調べた。図 9 の厚さ 5.5[mm]のアクリルに深さ 0.5[mm]の溝がある試験体を共振法で計測した。平行溝、三角形溝、円形溝の 3 種でそれぞれの厚さを計測した。結果は探触子と試験体との距離により 5.5[mm]、5.0[mm]と両方の周波数が検出された。一例として三角形溝における周波数を図 10 と図 11 に示す。図 12 は厚さ 5.5[mm]と計算されたときの周波数であるが、250[kHz]のほかに 270[kHz]付近に A の周波数信号がある。図 15 は厚さ 5.0[mm]と計算されたときの周波数で 271[kHz]のほかに 250[kHz]付近に B の周波数信号がある。この信号について図 16 のような共振が発生していると考えられる。共振信号は何度も反射を繰り返すが、底面と平行な部分でないと反射は繰り返さない。三角形溝の頂点部分は底面と平行のため、①の反射と②の反射は何度も反射が可能である。従って、①と②の両方の反射信号を検出しており、複数の周波数が検出された。平行溝や円形溝も 2 つの周波数が検出されており、平行な部分で共振が発生していると考えられる。

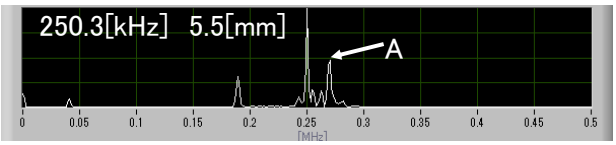


Fig.10　Frequency of resonance method in triangular groove 1

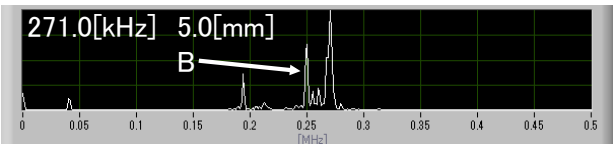


Fig.11 Frequency of resonance method in triangular groove 2

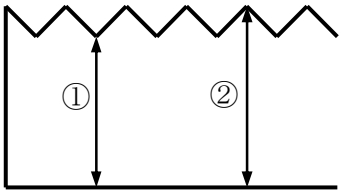


Fig.12 Triangle groove resonance

4　共振信号の発生箇所

これまでは受信波形全体を FFT してきたが、

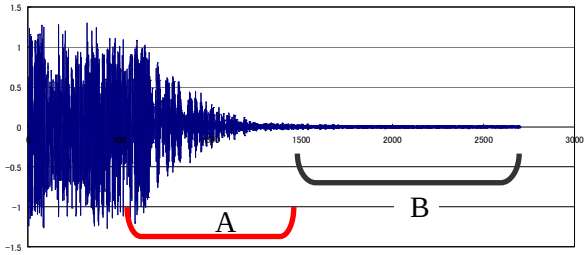


Fig.13　Thickness 5.0 [mm] resonance waveform of acrylic plate

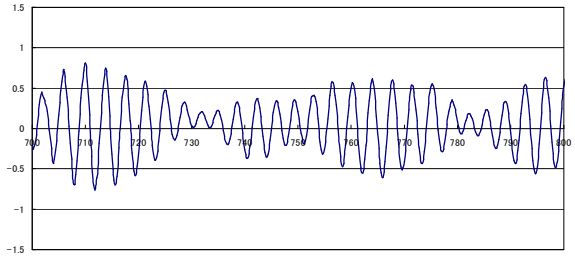


Fig.14　Time 700 - 800 [μs] enlarged view

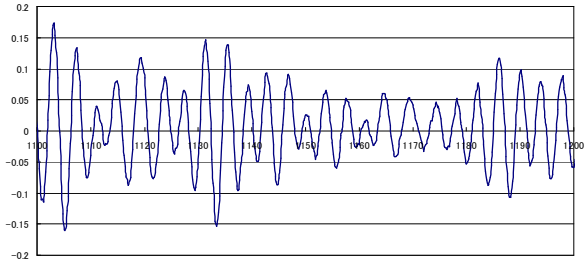


Fig.15　Time 1100 - 1200 [μs] enlarged view

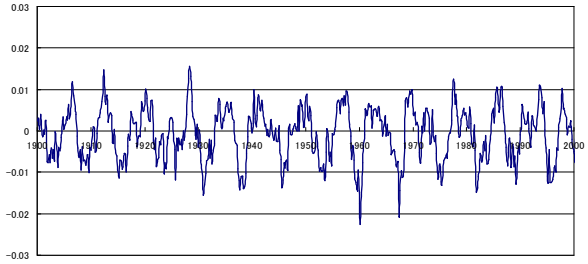


Fig.16　Time 1900 - 2000 [μs] enlarged view

共振信号はどの位置で発生しているか調べた。試験体内で何度も反射を繰り返すためある程度時間が経過した後に共振信号が発生していると考えられるが、実際は不明である。厚さ5.0[mm]のアクリル板の共振波形について波形を調べた。図 13 は厚さ 5.0[mm]のアクリル板の共振波形である。A の部分、700～1400[μs]の範囲で FFT を行うとピーク周波数が273.3[kHz]となり厚さ 5.0[mm]と計算された。B の部分、1500～2700[μs]の範囲で FFT を行うとピーク周波数が 137.0[kHz]となり厚さ10.0[mm]と計算され、共振信号として認識されなかった。ここで各時間の信号を拡大してみると 700～800[μs]が図 14、1100～1200[μs]が図 15、1900～2000[μs]が図 16 である。共振信号が周期的な信号であるとすると、図 14 や図 15 では周期的な信号が検出されているが、図 16 ではノイズが支配的になっている。図 13 の B の部分の FFT では共振信号として検出されないので時間が経過しすぎると共振信号が弱くなってしまう。従って、共振信号は送信信号が終わった後すぐに発生しており、この部分で FFT を行うことが望ましい。しかし送信信号の空中での多重反射も同時に検出されるため、送信信号が終わった直後ではなくしばらく経過した後の信号に FFT を行うと共振信号が検出されやすいと考えられる。今回の場合は 700～1200[μs]付近で共振信号が検出されたと判断できる。今後、プリアンプの設定や周波数評価の仕方などを見直して安定した周波数の検出ができるようにする。

5　おわりに

空中超音波共振法により非接触で対象物の厚さ計測を行った。探触子と試験体との距離を変化させると共振状態が変化し、一定距離ごとに共振が発生した。曲面や複数の厚さを持つ試験体を計測し、それぞれの厚さを計測できた。共振が発生している時間を調べ、送信信号のすぐ後で共振信号が発生していると考察した。

参考文献

[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、北原大太朗、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)