

空中超音波によるガイド波を用いた非接触厚さ計測*

○田中雄介, △浅川濯, △小倉幸夫 (ジャパンプローブ株式会社)

1 はじめに

超音波による非破壊検査は溶接部の超音波探傷や配管減肉などの厚さ測定など広く実施されている。これらの検査は垂直超音波探触子や斜角超音波探触子をグリセリンペーストなどの接触媒質を介して試験体に接触させて行われるが、検査後の洗浄作業が必要になることや検査技術者の技量に結果が左右されやすいなど作業工程の高コスト化や結果の不安定性など課題がある。また、接触媒質を用いた場合は検査の自動化が難しい。そこで空中超音波を用いることで接触媒質が不要になり、検査の自動化が可能になる。ただし空中超音波の送信はバースト波駆動により行われるため、厚さ測定などパルスエコー法での適用が困難である。これまで空中超音波の測定は報告してきたが[1]、厚さ測定はある程度の厚さでは透過信号で計測できるが、構造物の配管など透過法が適用できずに片面から検査を行いたい場合は多い。今回、片面から空中超音波により試験体の厚さを測定する方法としてガイド波を用いた。ガイド波の伝搬速度が厚さにより変化することを利用し、試験体の厚さを評価する方法を提案する。本報告ではガイド波の位相速度や群速度が厚さにより変化すること、位相速度と群速度の評価法、鋼板やパイプの厚さによるガイド波伝搬速度変化とその評価法について述べる。

2 ガイド波による厚さ計測

2.1 ガイド波の位相速度と群速度

超音波を試験体に斜めから入射させると試験体表面で屈折し、モード変換により試験体内に縦波と横波が発生する。試験体内ではさらに反射時に縦波と横波が発生するが、入射角度を調整すると試験体内で縦波と横波が合成された波の塊であるガイド波が発生する。この時、後述する振幅ピークの移動速度が位相速度、波の塊の包絡線ピークの移動速度が

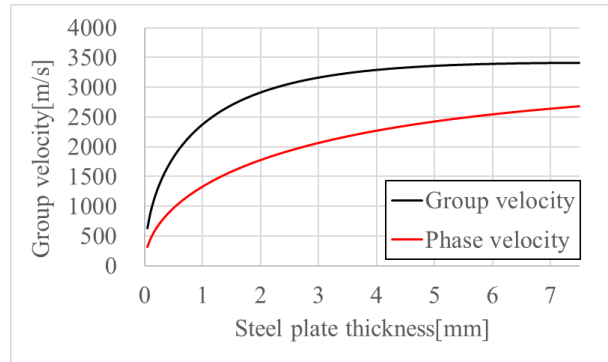


Figure 1 Dispersion curves of phase and group velocity in steel at a frequency of 200 kHz.

Table 1 Phase and group velocity of 200 kHz ultrasonic guided waves in each thicknesses steel.

Thicknes [mm]	Phase velocity [m/s]	Group velocity [m/s]
1.6	1624	2751
2.0	1775	2914
3.0	2063	3165
3.2	2110	3198
4.0	2269	3295
4.5	2351	3334
6.0	2554	3399

群速度である。後述の実験で使用する200[kHz]の超音波では鋼のA0モードガイド波の位相速度と群速度の理論値は図1となる。鋼の厚さにより位相速度と群速度が変化し、後述の実験に用いた6、4.5、4、3.2、3、2、1.6[mm]の各厚さの鋼では表1となる。薄くなるほど位相速度と群速度が低下するため受信までの時間が長くなる。

2.2 厚さが異なる鋼板のガイド波伝搬

超音波伝搬シミュレータ(イーコンピュータ、SWAN21)により厚さ6、4、2[mm]の鋼における超音波伝搬は図2となる。薄くなるほどガイド波の伝搬速度が低下した。しかし、図ではわかりにくい伝搬動画では後ろの波が消えて前の波が新しく発生する現象があっ

* Non-contact thickness measurement using guided waves generated by air-coupled ultrasonic., by TANAKA, Yuusuke, ASAKAWA Taku and OGURA, Yukio (Japan Probe Co., Ltd.).

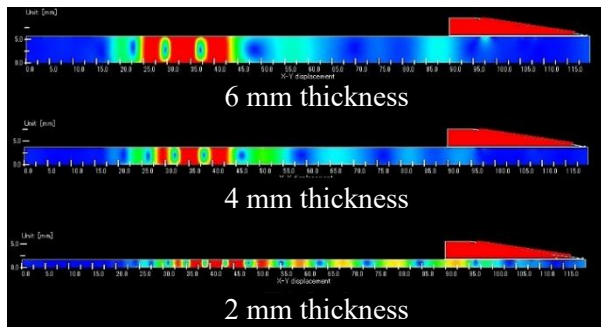


Figure 2 Ultrasonic guided wave propagation of simulation results for thicknesses of 6, 4 and 2 mm.

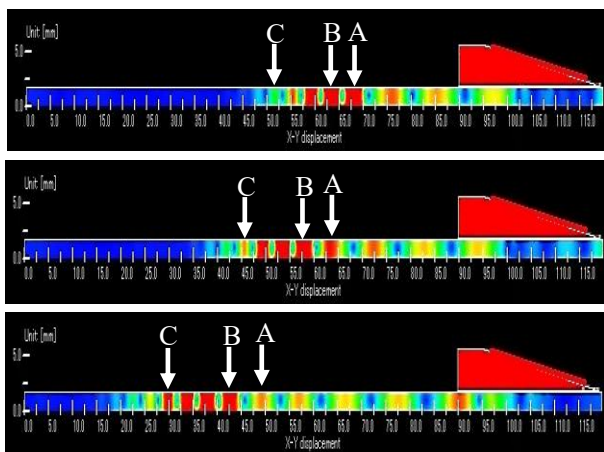


Figure 3 Guided wave propagation at 2 mm thickness steel plate.

た。例えば図3の厚さ2[mm]における波A、B、Cに着目すると伝搬と共に波Aの振幅が低下し、波Cの振幅が増大した。高振幅から赤→黄→緑→青の順である。ここで、各厚さでピーク位置が変化する時間を調べると表2となった。薄いほどピーク位置変化時間が短く、伝搬時にすぐに波の位置が変化した。さらに近距離と遠距離の伝搬時の伝搬速度を比較すると表3となった。遠距離伝搬は各厚さで60[mm]伝搬時、近距離伝搬は特定のピーク位置で評価し、厚さ6[mm]と4[mm]は20[mm]伝搬時、厚さ2[mm]はピーク位置変化が速いため10[mm]伝搬時で評価した。位相速度と群速度の両方とも薄くなるほど伝搬速度が低下した。表1の値と比較すると遠距離伝搬時は群速度、近距離伝搬時は位相速度の値に近い。従って、群速度はピーク位置変化も含んだ波形全体の伝搬速度、位相速度はピーク位置変化前の特定ピークでの伝搬速度である。

3 ガイド波による減肉計測

3.1 厚さの異なる鋼板の計測

ガイド波の伝搬速度変化を確かめるため厚さ

Table 2 Time required for peak position change in steel each thickness.

Thicknes [mm]	Peak change time [μ s]
2.0	9.52
4.0	7.12
6.0	5.12

Table 3 Ultrasonic guide wave propagation velocity during long and short-distance

Thicknes [mm]	Propagarion at	
	near [m/s]	at far [m/s]
2.0	1786	2757
4.0	2118	3074
6.0	2403	3099

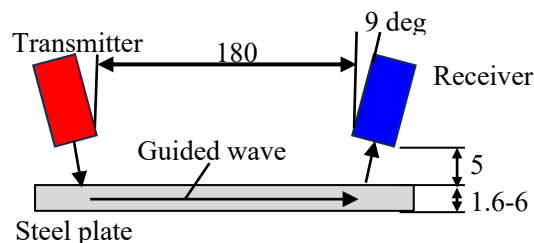


Figure 4 Experimental setup in measuring steel plate.

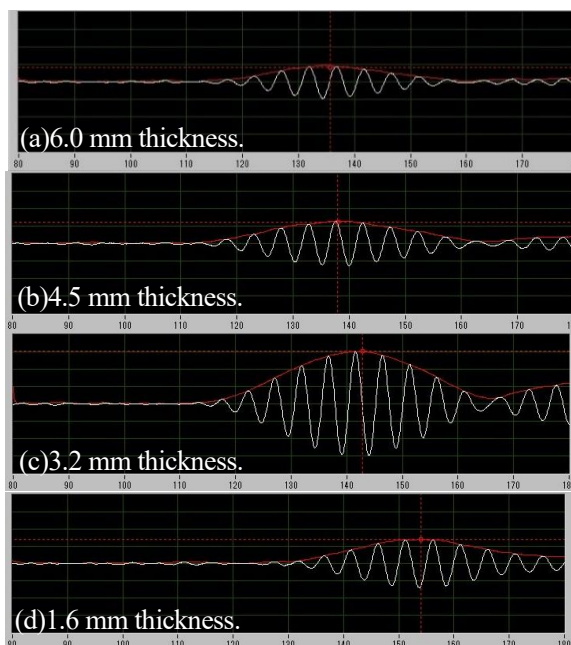


Figure 5 Receiving signals of guided wave at steel plate.

6.0、4.5、3.2、1.6[mm]の各鋼板で伝搬速度変化を確かめた。超音波探触子は200[kHz]、振動子サイズ14×20[mm]の平面空中超音波探触子を用い、図4の配置とした。パルスレーバ(ジャンププローブ、JPR-600C)から

Table 4 Received time at the envelope peak for each thickness during long-distance

Thickness [mm]	Receiving time [μs]
1.6	154
3.2	143
4.5	138
6.0	136

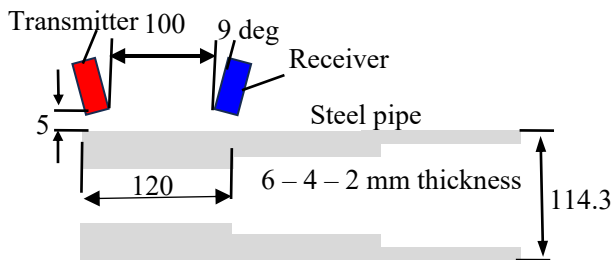


Figure 6 Experimental setup in measuring steel pipe.

200kHz、300V、波数 2 の矩形パルスを印加した。受信波形は図 5 となった。伝搬距離 180[mm]で遠距離の伝搬と考え、包絡線のピーク位置で評価し、受信時間は表 4 となった。薄くなるほど受信までの時間が長くなり、群速度の変化が確認できた。

3.2 厚さが変化するパイプの計測

次に実際の検査対象となる鋼パイプでの厚さ計測のため図 6 に示す外径 114.3[mm]、厚さ 6、4、2[mm]に変化するハーフパイプでガイド波の伝搬速度を評価した。前節と同様に計測し、各厚さの受信波形が図 7 となった。同様に包絡線ピークで評価すると表 5 になったが、各厚さで変化がなく傾向がわからなかった。実験時は探触子の移動で波形ピーク位置が変化したため、特定ピーク位置の移動を追う位相速度で評価した。

ガイド波の伝搬距離が短いと波形のピーク位置変化のため群速度での評価が困難である。そこで特定ピークの移動速度である位相速度で評価した。図 8 のようにパイプの厚さ 6[mm]から 4[mm]部分に探触子を移動させるとき、10[mm]毎に波形データを取得して特定ピーク位置の時間を算出した。例えば図 7(a)の厚さ 6[mm]でのピーク A を参照し、厚さ 4[mm]では図 7(a)のピーク B、厚さ 2[mm]では図 7(a)のピーク C が評価位置となる。これらのピーク A から C で評価した各厚さの受信時間は表 6 となった。薄くなるほど受信時間

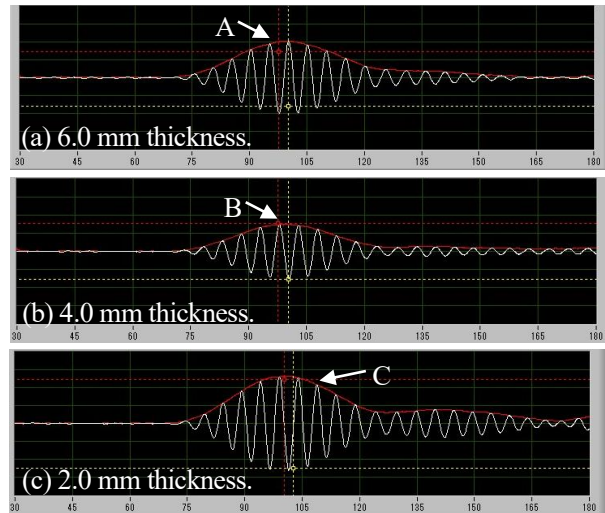


Figure 7 Receiving signals of guided wave at steel pipe.

Table 5 Received time at the envelope peak for each wall thickness during short-range

Thickness [mm]	Receiving time [μs]
2.0	102
4.0	99
6.0	101

Receives the guide wave every 10 mm.



Figure 8 Gradually move the transmitting and receiving probe.

Table 6 Received time at the specific peak for each wall thickness during short-range

Thickness [mm]	Receiving time [μs]
2.0	110
4.0	101
6.0	98

が長くなった。

これらの結果から包絡線ピークによる群速度での評価は全体的に減肉する配管などの遠距離伝搬時、特定ピークを追う位相速度での評価は部分的に減肉が発生する部分での近距離伝搬時に適する。次に位相速度での部分減肉の評価について検証する。

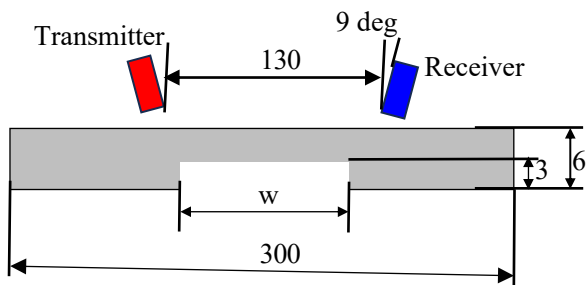


Figure 9 Partial reduce thickness test specimen.

Table 7 Reduction margin and receiving time.

Reduce width [mm]	Receiving time [μs]
0	122
10	126
80	142

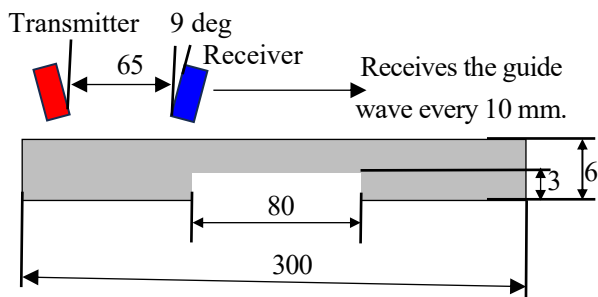


Figure 10 Gradually move the transmitting and receiving probe.

3.3 部分減肉鋼板の評価

次に図 9 に示す厚さ 6[mm]から部分的に 3[mm]に変化する鋼板で位相速度を調べた。部分減肉幅 w が 10[mm]と 80[mm]で位相速度を減肉無しの場合と比較して評価した。探触子の位置は図 9 に示すように部分減肉を探触子間中央に配置して厚さ 6[mm]の減肉なしの鋼板からのピーク位置変化を確かめた。各減肉幅での受信時間は表 7 で減肉幅が大きくなるほど受信時間が長くなった。ここで、図 10 のように減肉幅 80[mm]で探触子間距離を 65[mm]にして減肉無しの部分から探触子を減肉上に移動させ、さらに通過したときの波形を図 11 に示す。減肉部分通過前後の減肉無しの部分と減肉がある部分で波形位置変化により受信時間が大きくなり、表 8 に示すように探触子間距離における減肉部分が占める距離が大きくなるほど受信時間が大きくなった。従って、探触子をスキャンさせ位相速度の変化を追うことで部分減肉の位置や幅を推定で

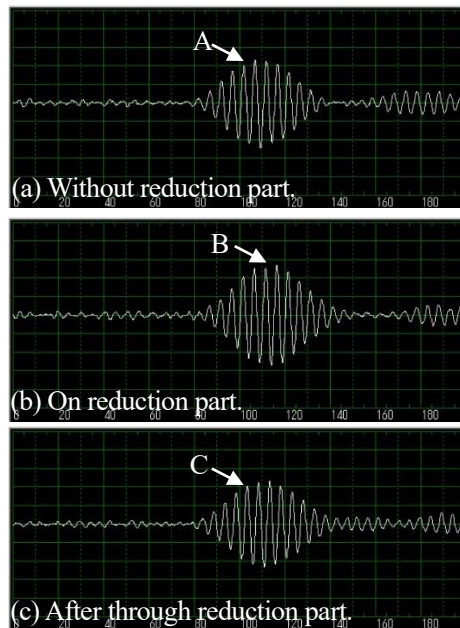


Figure 11 Waveform changes before and after passing through the reduction part.

Table 8 Receiving time of before and after passing through the reduction part.

Probe moving distance[mm]	Overlapped distance in the reduction part[mm]	Receiving time[μs]
0	0	104
40	40	109
80	80	112
120	40	107
160	0	104

きると考えられる。あとは減肉深さの評価であるが、欠陥多重反射による振幅変動の影響もあり今後の検討とする。

4 おわりに

検査対象の厚さを非接触で計測する方法として空中超音波により励起されたガイド波の伝搬速度変化を利用した。群速度と位相速度がどのように変化するかをシミュレーションにより確かめた。距離の長い鋼板の厚さ変化を群速度変化により確かめた。部分的に減肉したパイプ、鋼板は位相速度により確かめた。位相速度による評価は部分減肉位置とその大きさを評価可能なことが示唆された。

文献

[1] 田中雄介、空中超音波による非接触超音波計測、計測と制御、Vol.63, No.4, pp.239-242(2024)