420 減肉計測のためのパイプの肉厚外径比による 円筒波の速度分散関係に関する考察

Dispersion relation of hollow cylindrical guided waves as a function of the ratio of diameter to thickness for the measurement of pipe wall thickness.

西野秀郎(東北大)、長秀雄(青学大)、小野桓司(UCLA)、竹本幹男(青学大)

Hideo NISHINO, Tohoku Univ., Hideo CHO, Aoyama Gakuin Univ., Kanji ONO, UCLA,
Mikio TAKEMOTO, Aoyama Gakuin Univ.

Dispersion relations of the hollow cylindrical guided waves (HCGW) for different ratio of diameter to thickness of pipe are experimentally verified in comparison with the theory. Wavelet transform was employed to obtain the Time-Frequency representation. It was shown that the $L(0, 2)$ mode have a dominant role to determine the group velocity of the Primary wave of the HCGW.

はじめに 配管の広域一括検査を目的として、パイプを伝搬するガイド波である円筒波を用いた研究が最近注目を浴びている[1]。速度分散の比較的小さい単一伝搬モードを選択的に励起する方法[2]や、パイプの埋設や内容物による減衰に比較的高い「ねじりモード」の高効率励起[3]などが報告され、欠陥の検出などが報告されている。これまで筆者らは、インパルス励起した広帯域円筒波の第一到達波（初動波）音速が、肉厚外径比 (thickness/diameter: t/d) が小さいほど大きな値を取ることを理論的に示し、実験で確認してきた[4-5]。この方法は、パイプの広い範囲に存在する減肉の計測が可能なが示唆される。本報告では、レーザー超音波法により励起・検出した円筒波の時間周波数解析を行い、原理の詳細な検討を行ったので報告する。肉厚外径比の変化に伴う $L(0, 1)$, $L(0, 2)$ モードの変化が初動波に与える影響を示した。

肉厚外径比による初動波の音速変化 Fig.1 に、 t/d の異なる A1 パイプの $L(0, 1)$ と $F(1, 1)$ の群速度分散曲線を示す。 $L(0, 1)$ の最高群速度は、 t/d に依存せず $ft = 0$ における 5000 m/s で有るのに対し、 $F(1, 1)$ では、 t/d が小さくなるほど増大し、 $1/5$ 付近で 5000 m/s となり、 t/d が小さいほど群速度が大きくなるがわかる。すなわち、この範囲において初動波の音速を計測することで、 t/d の推定が可能である。

実験方法 広帯域レーザー超音波法を用いて、上記原理の検証実験を行った。 $(t, d) = (1, 4), (1, 5), (0.5, 3), (1, 6), (1, 8), (1, 10), (1, 12)$ [mm] で長さ 500 mm の A1 パイプを用いた。円筒波の伝搬距離は、いずれも 500 mm である。

実験結果 Fig.2 に、得られた時間波形を示す。 t/d が小さくなるほど伝搬時間が短く、音速が速い。 $1/4$ では、比較的低周波成分のみが初動部に見られるのに対し、 t/d の減少にしたがって、高周波成分が初動部に重ね合わされ、より伝搬

Fig.1 Dispersion relation of the $L(0,1)$ and $L(0,2)$ mode waves for different t/d 's.

時間が短い部分に移動していくことが分かる。後の時間周波数解析でより鮮明に示すが、この低周波成分が $L(0, 1)$ で、高周波成分は $L(0, 2)$ と推定される。Fig.3 に、得られた初動波速度と、 t/d の関係を示す。実線の理論値と●の実験値がほぼ一致した結果を得た。Fig.4 に、 $t/d = 1/4, 1/6, 1/12$ における時間波形に対して Wavelet 変換を施して得た時間周波数解析結果を示す。また、図中の実線は理論群速度分散曲線を示している。それぞれ理論と実験値が非常によく一致していることが、分かる。理論が示すように、 $L(0, 2)$ が t/d によって変化し、初動波の最大速度が変化することが実験的に確認出来た。これらは、図3の時間波形の特徴とも一致する。ここでは比較的低周波での円筒波を用いているが、高周波域における高次の円筒波では、 $L(0, 2)$ より最大群速度が大きなモードが存在する。このことは、原理的に高周波成分の除去を必要とするが、実際には測定系全体が LOW-PASS フィルターとして作用するため、必要ないことを実験的に確認している。

まとめ 薄肉のパイプほど初動波の群速度が大きいことを広帯域 (20kHz-40MHz) のレーザー超音波法によって確認した。

Fig.2 Time domain waves for different t/d 's.

Fig.3 Primary wave velocity as a function of d/t of pipe.

$L(0,1)$ の最大群速度が肉厚外径比 (t/d) に依存しないのに対し、 $L(0,2)$ では変化し、そのことが原因であることを実験的に確認出来た。今後は、本方法をパイプの広範囲減肉計測に活用していきたい。

Reference [1] J. L. Rose: *Ultrasonic waves in solid media* (Cambridge University Press 1999)

[2] D. N. Alleyne and P. Cawley: Long range propagation of Lamb waves in chemical plant pipework, *Mater. Eval.* (1997) 504.

Fig.4 Results of Wavelet transform for different t/d ;
(a) 1/4, (b) 1/8, (c) 1/12.

[3] 金原了二, 池田隆, 竹本幹男, 林淑恵, 磁歪型振動によるガイド波の性質に関する実験と考察, 日本非破壊検査協会第 10 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, 77-82, (2003)

[4] H. Nishino, S. Takashina, F. Uchida, M. Takemoto and K. Ono, Modal Analysis of hollow cylindrical guided waves and applications, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40, 364-370 (2001)