

くさび型圧電振動子を用いた Lamb 波伝搬の解析

Analysis of Lamb Wave Propagation Using Wedge Type Piezoelectric Transducer

○貴俵 昌也*, 西平 守正*, 今野 和彦*

○Masaya Kitawara*, Nishihira Morimasa*, Kazuhiko Imano*

*秋田大学 大学院工学資源学研究科

*Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

キーワード：くさび型圧電振動子(Wedge Type Piezoelectric Transducer), Lamb 波(Lamb Wave)

放射角(Radiation Angle), 斜角探触子(Angle Beam Probe)

連絡先：〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学 大学院工学資源学研究科 電気電子工学専攻

西平守正, Tel : 018-889-2494, Fax : 018-837-0406, E-mail : imanoken@ee.akita-u.ac.jp

1. はじめに

探傷試験や医療診断において、非破壊かつ被曝がないことから、圧電振動子を用いた超音波による非破壊検査が利用されている¹⁾。その一つとして斜角探傷法があり、超音波を試験体の表面に対して斜めに入射させるために、圧電振動子との間に樹脂製の固体くさびを配置した斜角探触子が用いられる²⁾。このような斜角探触子では、固体くさび内での多重反射や伝搬損失などの影響が避けられない³⁾ため、これを回避する一手法として、振動子の片面に勾配をつけた Fig. 1 に示すようなくさび型圧電振動子を試験体に直接接触させて超音波を入射させる方法に着目した。くさび型圧電振動子は、一般的に用いられる平板型圧電振動子とは異なり、傾斜面を持つため振動子単体で超音波を音響媒質に対して斜角入射させることができる^{4,5)}。また、厚さが一定ではないため連続した周波数での駆動が可能であり、通常の平板

型圧電振動子と比較すると帯域が広いとの報告もある^{6,7,8)}。

本研究ではくさび型圧電振動子を用いることで、固体くさびを必要とせずに超音波を試験体に対して斜角入射できる可能性があるものと考え、縦振動モードおよびすべり振動モードでのくさび型圧電振動子の電気的特性と、形成する超音波音場について有限要素法を用いて解析する。さらに、試験体が平板状でその板厚が薄い場合において伝搬するガイド波の一種である Lamb 波について、くさび型圧電振動子を用いた Lamb 波伝搬の解析を行った結果について報告する。

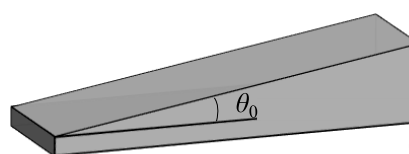


Fig. 1 くさび型圧電振動子

2. くさび型圧電振動子のアドミタンス特性

2.1 解析モデル

くさび型圧電振動子の電気的特性を把握するため、くさび型圧電振動子のアドミタンス特性を解析する。解析モデルの外形を Fig. 2 に示し、縦振動モードまたはすべり振動モードのくさび型圧電振動子の寸法をそれぞれ Table 1, 2 に示す。また、材料定数はジルコン酸チタン酸鉛(株式会社富士セラミックス製 C-2)の物性値を設定し、分極軸の方向は、縦振動モードでは Fig. 2 の z 軸方向、すべり振動モードでは同図 x 軸方向とした。なお本研究では、有限要素解析ソフトウェアの ANSYS® 14.5 を用いた。

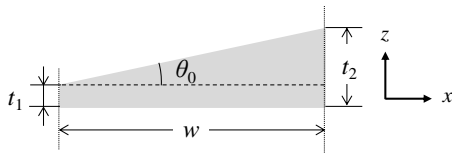


Fig. 2 解析モデル

Table 1 縦振動モードにおける寸法

傾斜角 θ_0 [°]	厚さ t_1 [mm] (共振周波数 f_1)	厚さ t_2 [mm] (共振周波数 f_2)	幅 w [mm]
0	1.01 (2.00 MHz)	1.01 (2.00 MHz)	15.00
10		3.36 (0.55 MHz)	
20		6.42 (0.31 MHz)	
30		9.64 (0.21 MHz)	
40		13.60 (0.15 MHz)	
50		18.89 (0.11 MHz)	

Table 2 すべり振動モードにおける寸法

傾斜角 θ_0 [°]	厚さ t_1 [mm] (共振周波数 f_1)	厚さ t_2 [mm] (共振周波数 f_2)	幅 w [mm]
0	0.44 (2.00 MHz)	0.44 (2.00 MHz)	15.00
10		3.08 (0.29 MHz)	
20		5.90 (0.15 MHz)	
30		9.10 (0.10 MHz)	
40		13.03 (0.07 MHz)	
50		18.83 (0.05 MHz)	

2.2 アドミタンス特性

アドミタンス特性を解析した結果の一例を Fig.3 に示す。同図において、傾斜角 $\theta_0=0^\circ$ すなわち平板型圧電振動子においては、厚さで決まる 2 MHz において単一の共振特性を示す。一方、傾斜角 $\theta_0=20^\circ$ においては、0.1~2 MHz の範囲に共振が連続的に分布する。これは Table 1, 2 で示したように厚さで決まる周波数範囲に対応しており、平板型圧電振動子($\theta_0=0^\circ$)に比較して帯域の広い特性を示すことがわかる。

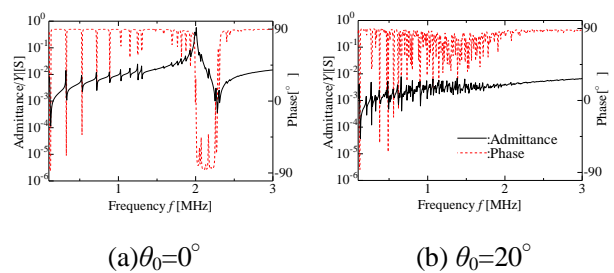


Fig. 3 縦振動モードのアドミタンス特性

3. くさび型圧電振動子の音場特性解析

3.1 解析モデル

くさび型圧電振動子を Lamb 波の励起に応用するためには、振動子の超音波放射特性を把握する必要がある。解析モデルは Fig. 4 に示すように、くさび型圧電振動子から半円のアルミニウムブロックに超音波を入射させる 2 次元モデルとし、Table 1, 2 に示した振動子の寸法を設定する。振動子の駆動信号は、周波数 2 MHz、バースト正弦波 5 波とし、縦振動モードまたはすべり振動モードについてそれぞれ算出する。

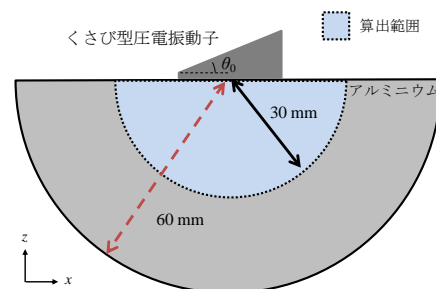


Fig. 4 音場の解析モデル

3.2 音場特性

解析結果の一例として、傾斜角 $\theta_0=20^\circ$ の音場分布を Fig. 5 に示す。縦振動、すべり振動のいずれの振動モードにおいても、超音波の放射方向が傾斜していることがわかる。また、超音波の音源がくさび型圧電振動子の厚みの薄い箇所に片寄る傾向もある。

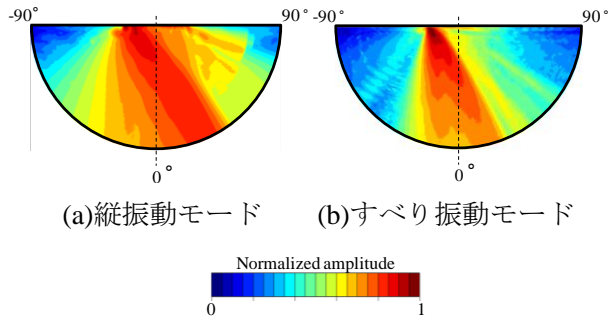


Fig. 5 音場分布（振動子の傾斜角 $\theta_0=20^\circ$ ）

3.3 超音波放射方向の傾斜角依存特性

音場分布の解析結果 (Fig. 5) から、半円の円周上に沿って超音波振幅の放射方向特性を求めた結果を Fig. 6 に示す。同図では、圧電振動子の中心軸を放射方向の角度 $\theta_m=0^\circ$ とし、 $-90\sim 90^\circ$ の範囲で示した。同図から、超音波振幅は傾斜角 $\theta_0=0^\circ$ （平板型圧電振動子）のとき最大で、傾斜角 θ_0 を大きくするほど振幅値が低くなるのがわかる。また、振動子の傾斜角 θ_0 を大きくするほど超音波の放射方向が傾くが、傾斜角 θ_0 が 40° を超えると明確な方向性が見られなくなる。

振動子の傾斜角 θ_0 に対して、それぞれ最大振幅になる超音波放射角 θ_m を Fig. 6 から読み取り、両者の関係を図示したのが Fig. 7 である。同図において、圧電振動子とアルミニウムの音速比から Snell の法則で求めた特性を点線で示した。いずれのモードにおいても $30\sim 40^\circ$ 程度まで振動子の傾斜角 θ_0 と超音波の放射角 θ_m に関係性が見られるが、傾斜角 θ_0 に対する放射角 θ_m の追従には限界があり、超音波の放射角 θ_m の選択可能な範囲には上限があることがわかる。

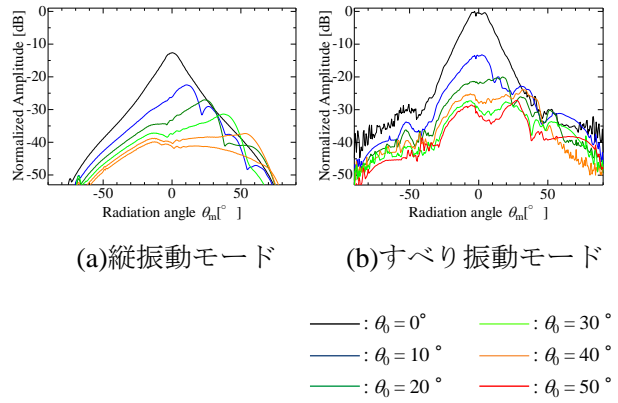


Fig. 6 放射角-振幅特性

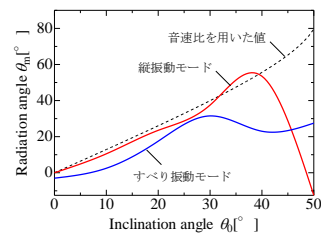


Fig. 7 傾斜角-放射角特性

4. Lamb 波の伝搬解析

4.1 超音波の入射角の算出

斜角探傷法を用いる場合、目的の伝搬モードの Lamb 波を発生させるためには、その伝搬速度から最適な超音波の入射角を求めておく必要がある。このときの角度を臨界角 θ_c と呼び、この角度は Snell の法則を用いて、入射側の音響媒質内の音速と平板中を伝搬する Lamb 波の位相速度から算出できる。また、Lamb 波の伝搬速度は、Rayleigh-Lamb 方程式から算出でき⁹⁾、アルミニウム平板中を伝搬する S0 モードの Lamb 波の位相速度と群速度を Fig. 8 に示す。

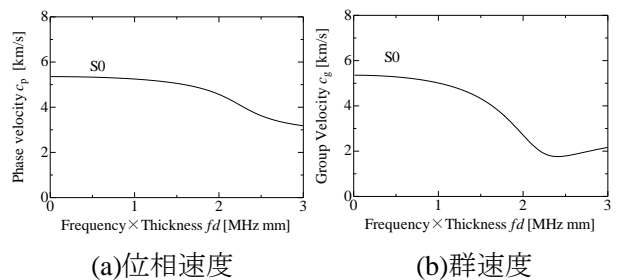
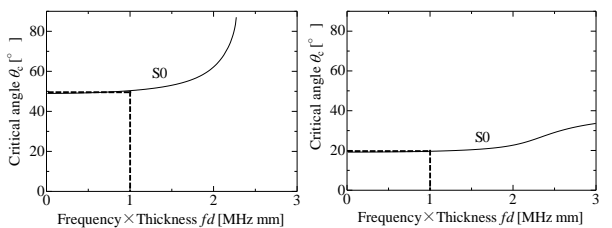


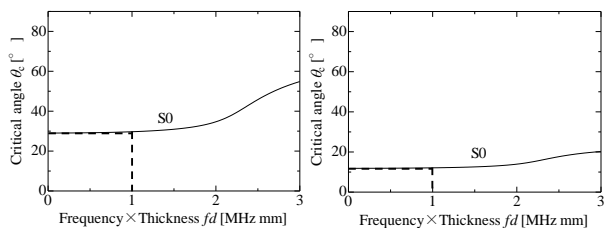
Fig. 8 Lamb 波の伝搬速度分散曲線

Fig. 8 において、横軸は周波数 f と板厚 d の積 fd であり、Lamb 波はこの fd に依存して伝搬速度が変化する速度分散性を持つ。前述したように、同図(a)の位相速度と圧電振動子内の音速を用いることで臨界角 θ_c が算出できる。振動子内の音速は振動モードによって異なり、縦振動モードにおいては縦波、すべり振動モードにおいては横波が生じるため、それぞれ縦波音速 (4040 m/s) および横波音速 (1760 m/s) を用いて臨界角 θ_c を算出する。一方、比較として従来の斜角探触子の固体くさび (エポキシ樹脂、縦波音速 2500 m/s, 横波音速 1100 m/s) の臨界角 θ_c も算出し、これらの値をそれぞれ Fig. 9, 10 に示す。Table 1, 2 に示した形状のくさび型圧電振動子を用いることにすると、周波数の範囲は 0.1~2 MHz であることから、駆動周波数 f を 1 MHz とし、分散の比較的小さい $fd=1$ MHz mm の条件で解析する。Fig. 9, 10 より、 $fd=1$ MHz mm の臨界角 θ_c を確認すると、くさび型圧電振動子の縦振動モードは 49° 、すべり振動モードは 19° 、斜角探触子の縦振動モードは 29° 、すべり振動モードは 11° であることから、これらの値を解析モデルに設定する。



(a)縦振動モード (b)すべり振動モード

Fig. 9 くさび型圧電振動子の臨界角

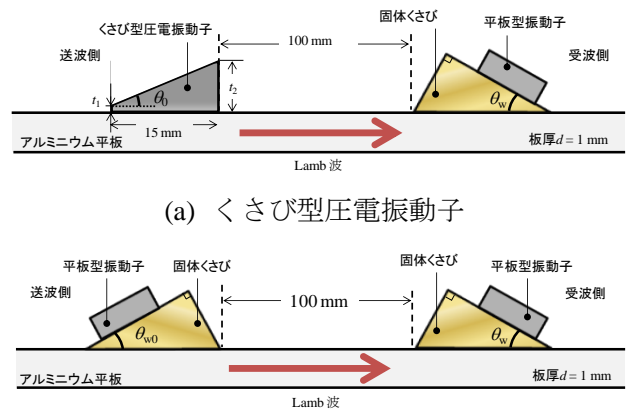


(a)縦振動モード (b)すべり振動モード

Fig. 10 斜角探触子の臨界角

4.2 解析モデル

本研究の解析条件では、超音波の伝搬方向に対して、振動子の中心軸を通る平面内の振動波形が得られれば良いことを考慮して2次元で解析する。解析モデルは、Fig. 11 (a)に示すように、くさび型圧電振動子を板厚 $d=1$ mm のアルミニウム平板に接着し、1 MHz バースト正弦波 10 波の駆動電圧信号を印加することで Lamb 波を送波させる。一方、比較として解析する従来法のモデルは、Fig. 11 (b)に示すように、共振周波数が 1 MHz になる厚さの平板型圧電振動子(幅 15 mm)を固体くさび(幅 25 mm)に接着した斜角探触子をアルミニウム平板に接着させる。両モデルとも、Lamb 波を斜角探触子で受波する。くさび型圧電振動子の寸法を Table 3 に示す。要素分割は、振動子の長さ方向を 15 分割、厚さ方向を 10 分割、アルミニウム板の長さ方向を 700、厚さ方向を 6 分割とした。



(a) くさび型圧電振動子

(b) 固体くさびを用いた斜角探触子(従来法)

Fig. 11 解析モデル

Table 3 くさび型圧電振動子の寸法

	くさび型圧電振動子	
	縦振動モード	すべり振動モード
角度 θ_0 [°]	49	19
厚さ t_1 [mm]	1.01	0.44
厚さ t_2 [mm]	18.27	5.6

4.3 解析結果

$fd=1$ MHz mm における S0 モード Lamb 波の群速度 c_g は、Fig. 8 に示したように 5000 m/s であるため、この値と伝搬距離から伝搬時間を算出すると約 20 μ s であることから、Fig. 12 に示す解析結果は、いずれも S0 モード Lamb 波が伝搬していると考えられる。ただし、同図(a-1)、(a-2)に示すくさび型圧電振動子では数 μ s 程度の遅れがある。これは、1 MHz の共振周波数に対応する振動位置が、くさび型圧電振動子の中央部付近であるためと考えられる。また、両振動モードを比較すると、同図(a-1)の縦振動モードの振幅が同図(a-2)のすべり振動モードの 1/10 程度になっている。これは縦振動モードの傾斜角 θ_0 が 49° と大きな角度のため、Fig. 6 で示したように振動振幅が小さいことが原因と考えられる。一方、従来法の斜角探触子では、すべり振動モード (Fig. 12 (b-2)) において、振幅が最大となった。このようにくさび型圧電振動子を用いた場合は、振幅が半分程度に低下するものの、固体くさびを用いない探触子としての利用可能性があると考えられる。

5. おわりに

くさび型圧電振動子のアドミタンス特性、超音波の音場と放射方向の振動子傾斜角依存特性について、有限要素法を用いて解析した。その結果、超音波の放射角は、振動子の傾斜角が $30\sim 40^\circ$ 程度までは制御できる可能性があることを示した。さらに、くさび型圧電振動子の斜角探触子としての利用可能性を検討するために、Lamb 波の伝搬解析を行ったところ、従来法より Lamb 波の振幅が半分程度に低下するものの、固体くさびを用いない探触子としての利用可能性があると考えられる結果が得られた。今後の課題として、解析結果や送受波特性を実験的に検討することが挙げられる。

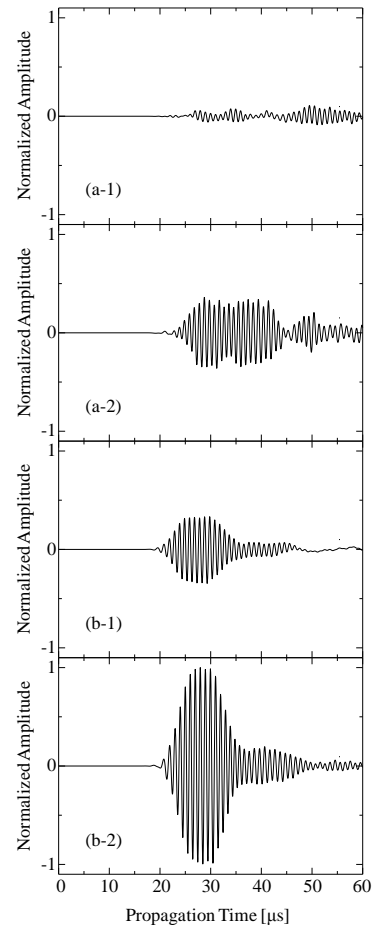


Fig. 12 受波波形

- (a-1) くさび型圧電振動子 (縦振動モード)
- (a-2) くさび型圧電振動子 (すべり振動モード)
- (b-1) 従来法の斜角探触子 (縦振動モード)
- (b-2) 従来法の斜角探触子 (すべり振動モード)

《参考文献》

- 1) 超音波便覧編集委員会：“超音波便覧”，丸善，pp.113(1999)
- 2) 日本学術振興会，製鋼第 19 委員会：“超音波探傷法”，日本工業新聞社，pp.180-199(1974)
- 3) 羽田野甫ほか：“くさびを要しない横波斜角アレイ探触子”，日本音響学会誌，62，7，pp.500-508(2006)
- 4) 小林力：“厚み縦振動の楔形超音波振動子について”，日本音響学会誌，38，12，pp.748-754(1982)
- 5) 小林力：“楔形超音波振動子の放射特性”，日本音響学会誌，44，7，pp.488-495(1988)
- 6) 清水洋，鈴木東逸：“厚さにテーパをつけた厚みすべり振動子の解析”，日本音響学会講演論文集，pp.159-160(1974.10)
- 7) 富川，山田，尾上：“迂りモード圧電セラミックスを用いたレーリ一波並びに縦波用超音波探触子の特性と動作解析”，日本音響学会誌，40，5，pp.340-348(1984)
- 8) L.Germain，J.David N.Cheeke:”Electronic Scanning in Ultrasonic Imaging Using a Wedge Transducer”，IEEE Trans. Ultrason., Ferro-elect., Freq. Contr., vol. 40, pp. 140-141 (1993)
- 9) 超音波便覧編集委員会：“超音波便覧”，丸善，pp.63-65(1999)