

光学的手法を用いた

Lamb 波の 2 次高調波分布の検出

Distribution measurement of second harmonic Lamb wave optical method

○長谷部 大樹*, 福田 誠*, 今野 和彦*

○Taiki Hasebe*, Makoto Fukuda*, 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：閉じた亀裂(Closed Cracks), Lamb 波(Lamb wave)

高調波(Harmonic), Lamé モード(Lamé mode)

接触型音響非線形性 (Contact Acoustic Nonlinearity)

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
今野 和彦, Tel : (018)889-2490, Fax : (018)837-0406, E-mail : imano@ipc.akita-u.ac.jp

1. はじめに

構造物内部にき裂が存在している場合、き裂が原因となり事故につながる危険性がある。したがって早期に構造物内部のき裂の存在を知り構造物への影響を調査する必要がある。近年、構造物を破壊せずに内部のき裂を検査する非破壊検査が注目されており、その分野において超音波は広く利用されている。その手法の一つとして、垂直探傷法が多く利用されている。垂直探傷法は超音波を構造物に対して垂直入射し、き裂からの反射波を受波するという方法である。しかし、この方法では検査範囲が超音波ビーム幅に限られるため、広範囲を検査するためには多くの時間が必要となる。そこでLamb波を用いた方法が提案されている。Lamb波は板波の一種であり、減衰が小さく構造物中を長距離伝搬するため、一度に広範囲の検査が可能である¹⁾。

一方、同一物質においてき裂の開口幅が極小な閉じたき裂の場合、き裂部では音響特性インピー

ダンスの差が生じないため反射波が発生せず超音波が閉じたき裂を透過してしまい閉じたき裂を検出ができないという問題がある。この閉口き裂の存在を見つける方法として、接触型音響非線形性(Contact Acoustic Nonlinearity :CAN)を用いた方法がある²⁾。CAN とは、内部に閉口き裂がある構造物に有限振幅超音波を送波することによって閉口き裂のき裂面がぶつかり合うことにより閉口き裂のき裂面から入射した周波数の高調波成分が発生する現象である。超音波を閉じたき裂に入射させ透過波の成分を解析して高調波成分を抽出することにより、閉口き裂の検査が可能となる。一般的にその高調波成分の中で最も大きく発生する2次高調波成分が着目されている。よってCANにより生じた2次高調波成分を検出し閉じたき裂の有無を判断する。また、Lamb波を用いて2次高調波を検出する際、送波したLamb波のモードの2倍の周波数に、送波したモードと同一の位相速度を有する他のモードが存在するLaméモードを用

いることが望ましいとされている。

著者らは、二層型圧電振動子を用いた2次高調波の検出システムを構築し、ハーモニックイメージングや、ボルトの締結評価の利用を検討している^{3), 4)}。また、ガラス平板からの2次高調波成分の検出に関しては弾性表面波を用いた報告がある⁵⁾。しかし、弾性表面波では構造物の表面しか伝搬せず内部の検査は困難である。

本研究は、構造物内部の閉じたき裂を早期に発見することを目的とし、き裂を作成したガラス平板にLamb波を伝搬させた際に閉じたき裂で生じる2次高調波成分を、光学的手法により検出する。

2. Lamb波

2-1 Rayleigh-Lamb方程式

Lamb波は平板材料中を伝搬する超音波の周波数と平板材料の厚さによりその伝搬特性が大きく変化する速度分散性を有している。Lamb波の伝搬特性を理論的に解釈するために波動方程式からRayleigh-Lamb方程式を導出する。Fig. 1にLamb波の発生を表す。平板に縦波超音波が斜角入射する場合、 y 軸方向の振動成分であるSH波は発生しないため、 y 軸方向の振動成分は考慮する必要がなく、波動方程式上では x - z 平面の振動成分のみについて考えれば良い。Lamb波の伝搬特性を表す式を(1)、(2)式に示す

$$\Delta\phi = \frac{\rho}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\Delta\psi = \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (2)$$

上式中で ρ は密度 [kg/m^3]、 λ および μ はLaméの定数、 c_L は平板中の縦波音速[m/s]、 c_T は平板中の横波音速 [m/s]を表す。上式を解くことにより(3)、(4)、(5)式が導かれる。

$$(\text{Sモード}) \frac{\tan \alpha d/2}{\tan \beta d/2} = -\frac{(k^2 - \beta^2)^2}{4k^2 \alpha \beta} \quad (3)$$

$$(\text{Aモード}) \frac{\tan \alpha d/2}{\tan \beta d/2} = -\frac{4k^2 \alpha \beta}{(k^2 - \beta^2)^2} \quad (4)$$

$$c_p = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} \quad (5)$$

上式で k は波数 [m^{-1}]、 $\omega (=2\pi f)$ は角周波数 [rad/s]、 c_p は位相速度 [m/s]を示し、式(3)、(4)をRayleigh-Lamb方程式と呼ぶ。Rayleigh-Lamb方程式を用いることでLamb波の理論的な位相速度 c_p を算出できる。さらに、この位相速度 c_p よりLamb波の理論的な群速度 c_g を算出できる。

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{c_p^2}{c_p - fd \cdot \frac{dc_p}{d(fd)}} \quad (6)$$

Rayleigh-Lamb方程式から算出した位相速度 c_p および群速度 c_g のガラス平板($c_L=5560$ m/s, $c_T=3280$ m/s, $d=4.91$ mm)における速度分散曲線をFig.2 (a)、(b)に示す。ここで d が一定であるため周波数 f により位相速度 c_p 、群速度 c_g が変化する速度分散性が確認できる。

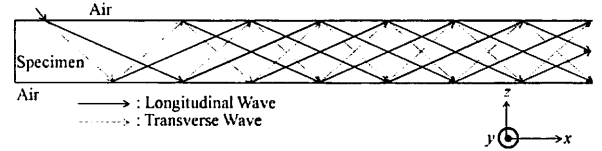
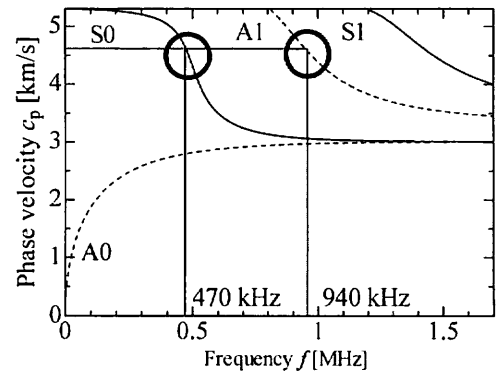
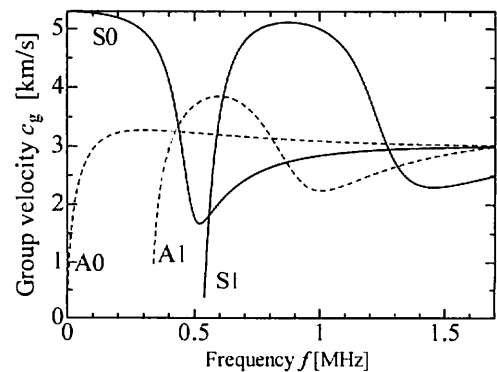


Fig. 1 Lamb波の発生



(a) 位相速度



(b) 群速度

Fig. 2 速度分散曲線

2-2 Lamé モード⁶⁾

Lamé モードは、Fig. 2 (a) のように送波した Lamb 波のモードの 2 倍の周波数に、送波した Lamb 波のモードと同一の位相速度を有する他のモードが存在している。送波する Lamb 波のモードは、式(7)を解くことにより得られる。

$$fd = \frac{Nc_T}{\sqrt{2}}, N \begin{cases} = 2k+1 \text{ (Sモード)} \\ = 2k \text{ (Aモード)} \end{cases} \quad (7)$$

ここで N は整数である。ガラス平板の場合は、 $f=470$ kHz のときに Lamé モードが発生する。

2-3 斜角入射法における Lamb 波の発生原理と臨界角 θ_c の分散曲線

Lamb 波は位相整合条件を満たした角度で斜角入射した場合に最も効率良く発生させることができる。この斜角入射角度を Snell の法則より算出することができる。

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{c_w}{c_p} \quad (8)$$

ここで c_w はくさびの縦波音速(高密度ポリエチレン、縦波音速: 2530 m/s)を示す。Fig. 3 にガラス平板における臨界角 θ_c の分散曲線を示す。ガラス平板の板厚 d を 4.91 mm、周波数を 470 kHz、入射角度 33 deg.(S0 モード)に設定し、実験を行う。

3. ガラス平板における Lamb 波の測定実験

3-1 測定システム

本実験で用いる測定システムを Fig. 4 に示す。電圧 150 V_{pp}、周波数 470 kHz とバーストサイン波 10 波を斜角探触子に印加する。Lamb 波発生地点におけるガラス平板の板厚 d を 4.91 mm、斜角探触子の角度を 33 deg.とし、周波数 $f=470$ kHz の領域の S0 モードの Lamb 波を励起する。

平板中を伝搬する Lamb 波の伝搬挙動を、レーザドップラ振動計を用いて波形を取得し、得られた波形を FFT した結果を検出する。実験に使用したガラス平板を Fig. 5 に示す。ガラス平板には約 35 mm の目に見えるき裂が作成されており、レーザ光を反射させるためにき裂の部分を反射シールでおおっている。走査距離は、 x 軸方向を探触子から 40 mm 地点の地点を開始点とし、き裂を挟んで 10 mm まで、 y 軸方向をき裂の始まりの地点を

開始地点とし 50 mm までの範囲とし、走査間隔を 1 mm とした。

3-2 測定結果

Fig. 4 に示す、測定システムを用いて得られた振動変位波形と FFT 結果の例を Fig. 6 に示す。それらの結果から得られたイメージング結果を Fig. 7 に示す。それぞれの結果に移動平均を行なっている。また、はそれぞれの最大値で行なっている。

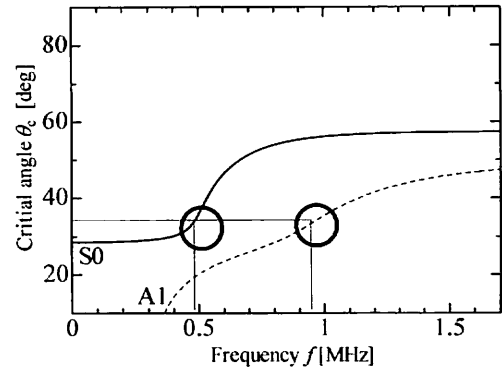


Fig. 3 臨界角 θ_c の分散曲線

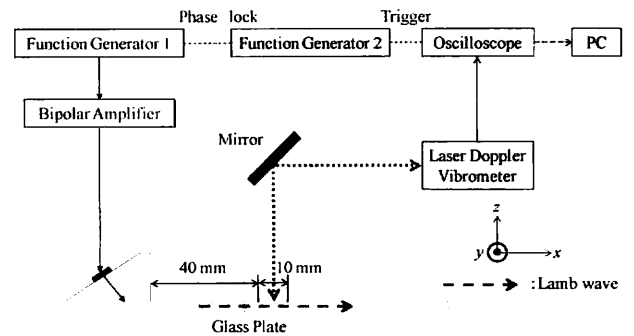
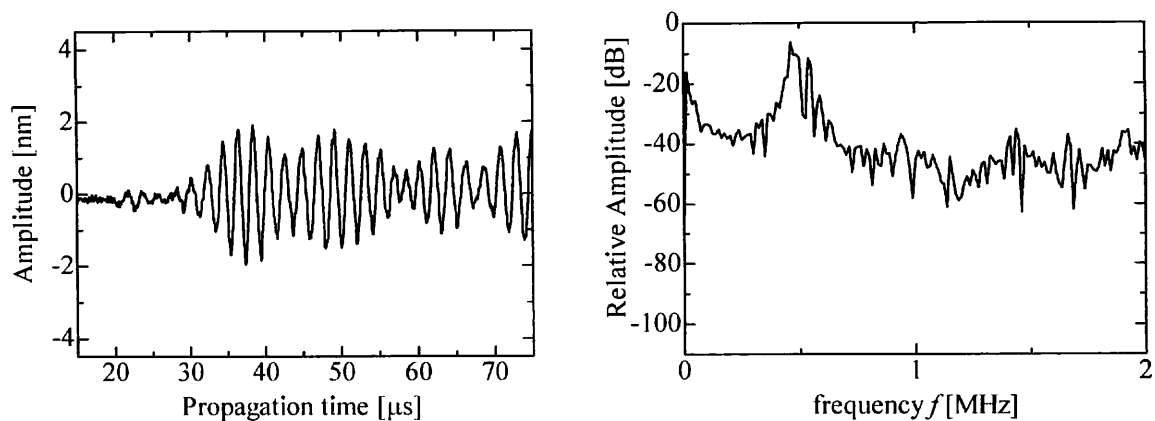


Fig. 4 測定システム



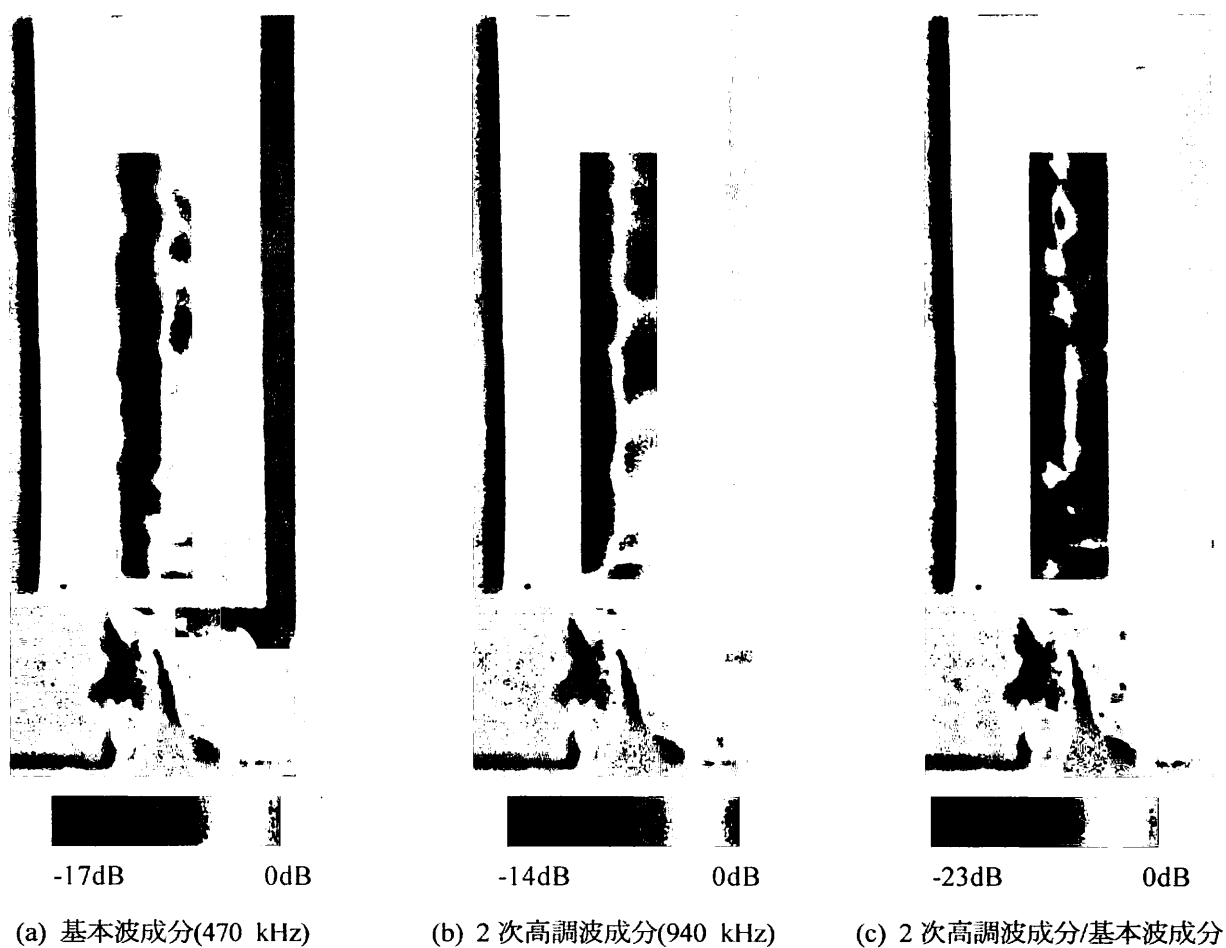
Fig. 5 ガラス平板のき裂部



(a) 振動変位波形

(b) 周波数スペクトル

Fig. 6 振動変位波形と周波数スペクトルの例



(a) 基本波成分(470 kHz)

(b) 2次高調波成分(940 kHz)

(c) 2次高調波成分/基本波成分

Fig. 7 2次高調波成分の分布

4. 考察

Fig. 7(a) の結果より、き裂を挟んで基本波成分が増加していることが確認できる。これは、ガラス平板の音響特性インピーダンスとき裂部の隙間との音響特性インピーダンスの違いが大きいことにより基本波成分が増加したと考えられる。

Fig. 7(b) の結果より、き裂を挟んで2次高調波成分が増加していることが確認できる。これは、ガラス平板の音響特性インピーダンスとき裂部の隙間との音響特性インピーダンスの違いが大きいことにより基本波成分が増加され、それに伴って2次高調波成分が増加したと考えられる。

Fig. 7(c) の結果より、き裂が見えなくなったその先に2次高調波成分/基本波成分の大きい部分が存在した。これは有限振幅 Lamb 波を伝搬させた際に、閉じたき裂において CAN が発生し、閉じたき裂のき裂面から2次高調波成分が発生したと考えられる。

このことから、き裂部の先に閉じたき裂が存在しているのではないかと推測できる。

5. おわりに

本研究では、き裂が作成してあるガラス平板に Lamb 波を伝搬させた場合におけるき裂部での2次高調波成分の分布を測定した。その結果、き裂部の先に2次高調波成分が大きく検出される部分が存在していることを確認した。

今後は、PIA (Pulse Inversion Averaging)を用いたイメージング、閉じたき裂の形状の把握、ガラス平板を重ね合わせた際に生じる、音響特性インピーダンスの違いにより生じる2次高調波成分の分布、疲労試験を行った金属平板における光学的手法を用いた2次高調波成分の検出などが挙げられる。

<参考文献>

- 1) 西野 秀郎：“非破壊計測のためのガイド波の基礎と展望”，非破壊検査，52，12，pp654-661 (2003)
- 2) I.Y.Solodov:”Nonlinear NDE using contact acoustic nonlinearity (CAN)”，IEEE Ultrasonic symposium, pp 1279-1283 (1994)
- 3) M.Fukuda, M.Nishihira and K.Imano:”Real-time ultrasonic imaging of several order harmonic using a double-layered piezoelectric transducer”，Electron.Lett, 43 (22), pp.1237-1239 (2007)
- 4) M.Fukuda and K.Imano:”Detection of a second harmonic ultrasonic component generated from a fastened bolt using a double-layered piezoelectric transducer”，IEICE Electron. Exp. 6(20), pp1438-1443 (2009)
- 5) 武藤 梓，今野 和彦：“有限振幅音波を用いた閉口クラックからの2次高調波の検出”，素材物性学雑誌，Vol.20，No.1，pp12-18 (2007)
- 6) N.Matsuda and S.Biwa:”Phase and group velocity matching for cumulative harmonic generation in Lamb waves”，J. Appl. Phys. Vol.109, No.094903, pp1-11 (2011)