

研究論文

有限振幅超音波を用いた閉口クラックからの2次高調波の検出

今野和彦*, 武藤 梓*

Detection of Second Harmonic Wave from the Closed Crack Using Finite amplitude Ultrasonic Wave

Kazuhiko IMANO[†] and Azusa MUTO[†]

Detection method for the closed crack existed in the glass plate using finite amplitude ultrasonic guided wave is described. The received signal is analyzed by the wavelet transform to identify the mode of the guided wave using group velocity dispersion curves. As the results, finite amplitude Rayleigh wave propagation is identified. Using the finite amplitude Rayleigh wave, increase in 6 dB of the second harmonic components generated from a closed crack in the glass plate is observed. Rapid increase of the second harmonic component at the condition that width of closed crack, less than 2nm, is equal to the vibration amplitude of Rayleigh wave is also found out. Potential of closed crack detection is clarified by the use of finite amplitude guided wave system.

Key Words: Air-coupled Ultrasonic wave, closed crack, second harmonic wave, finite amplitude ultrasonic wave

1. はじめに

従来行なわれている超音波探傷技術は開口した亀裂、体積を持つ欠陥の検出評価に有効であり、その検出能力および安全性などに優れているため現在広く用いられている^[1]。しかし、初期段階の疲労亀裂や応力腐食割れのように、ほとんど閉じた亀裂（以下閉口亀裂）の検出に有効な非破壊評価法は確立されていない。現在主として用いられている非破壊試験法として放射線透過試験法および磁気探傷試験法がある^{[2][3]}。放射線透過試験法は、X線の透過方向の寸法が3%以上の欠陥検出能力には優れているが、X線の向きによって検出能力が異なるため割れの検出には十分とは言えない。磁気探傷試験法は、材料表面上の長さ1mm程度の割れの検出に適しているが、分解能の影響で閉口亀裂の検出は困難である。浸透探傷試験は、表面に開口している欠陥の検出に適しており、長さで1mm、深さで10~20 μm および幅1 μm 程度の欠陥検出が可能であるが、閉口亀裂の検出には適さない。上記のように、従来の種々の非破壊試験法を用いて閉口亀裂の有無、形状などを正確に検出することは容易でない。

近年、非破壊試験法の一方法である超音波探傷技術において、弾性体中に大振幅音波すなわち有限振幅音波を伝搬させた場合に、入射音波の周波数の整数倍の高調波が励起されることが示されており^[4]、さらに近年、亀裂面を含む弾性体についての研究^{[5][6]}が行われるようになってきている。

本論文では、平板材料への超音波の入射法として、くさびを

用いた斜角入射法を用いて有限振幅のガイド波を励起・検出する。この方法を用いて閉口亀裂に超音波を伝搬させる。この音波によって亀裂面の連続的な衝突を繰り返し発生させることができれば、亀裂面における音圧に対する弾性的な非対称性から高調波が発生することが考えられる。一方、ガイド波は平板材料の材質や形状、板面の境界条件などにより複数の種類が存在し、周波数に依存した複雑な伝搬特性を持つため、どのような音波によって高調波が発生するのかを明らかにする必要がある。このため、最初に、ガイド波の伝搬挙動について述べ、どのようなモードの音波が伝搬するかを明らかにする。次にガイド波の伝搬に用いる平板材料としてガラス板を使用し、超音波として、伝搬挙動の異なる2種類のガイド波を励起し、平板に入射させた場合のそれぞれの伝搬モードについて検討を行う。さらに、伝搬挙動の推定を行った有限振幅ガイド波をガラス板の閉口亀裂に伝搬させたところ、閉口亀裂部において高調波が発生することを示した。このときに亀裂幅（2nm以下）とガイド波の振動振幅が等しくなると2次高調波のレベルが急激に増加することから、この方法が閉口亀裂の検出や亀裂の幅の推定に有効であることを述べる。

2. ガイド波の伝搬挙動^{[7][8]}

本論文では図1に示すような圧電振動子とくさびを用いた斜角入射法を用いてガイド波を励起・検出する方法を用いる。こ

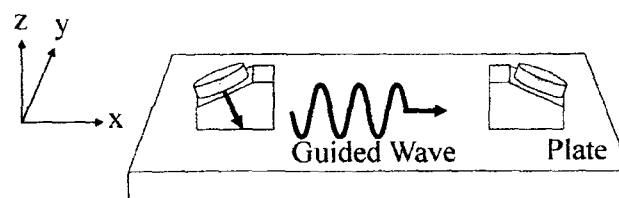


Figure 1 Generation and detection of guided wave

平成19年1月18日受付;平成19年2月24日受理

*秋田大学 工学資源学部電気電子工学科
〒010-8502 秋田市手形学園町1-1

†Department of electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering and Resource Science, 1-1 Tegata Gakuen-cho, Akita City, 010-8502, Japan.

E-mail:k-imano@ipc.akita-u.ac.jp

の場合に平板中を伝搬するガイド波の理論的な検討のため、図2に示すような座標系を用い、板厚が d の半無限等方性平板中の伝搬について検討する。図2の座標系において、ガイド波は x 方向に伝搬し、 y 方向には一様であるとする、変位 ξ_i ($i=x,y,z$)は、 ξ_x および ξ_z が結合した解を与える方程式と ξ_y のみに関する方程式に分離される。 x 軸方向変位と z 軸方向変位が結合して伝搬する波動がRayleigh波およびLamb波であり、 y 軸方向の変位のみ伝搬する波動がSH波である。

ここで、Rayleigh波およびLamb波の場合、縦波成分と横波成分が依存する x - z 平面に着目すればよい。このときの境界条件は、平板の表面および裏面が自由とすれば z 軸方向の垂直応力 T_{zz} とせん断応力 T_{xz} が存在しないとして、次式で表される。

$$T_{zz}=0, T_{xz}=0 \quad (z=\pm d/2) \quad (1)$$

上記の境界条件のもとで波動方程式を解くことにより、Rayleigh波およびLamb波の理論方程式を導出することができる^{[8],[9]}。

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

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

$$k = \omega/c, \quad \alpha = \sqrt{(\omega/c_L)^2 - k^2}, \quad \beta = \sqrt{(\omega/c_T)^2 - k^2}$$

角周波数 ω の正弦波は、上記の(2)、(3)式に示した周波数方程式のいずれかを満たす位相速度 c で伝搬する。ここで、(2)式を満たす場合は振動変位が板の上下で対称な対称モードであり、(3)式を満たす場合は同じく非対称モードである。対称モードおよび非対称モードは高次振動モードが無数に存在し、最低次のモードから順に対称モードの場合はS0モード、S1モード、S2モード、…、非対称モードの場合はA0モード、A1モード、A2モード、…と呼ばれている。ここで、群速度 c_g は ω - k 曲線より、

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{c^2}{c - fd \cdot \frac{dc}{d(fd)}} \quad (4)$$

と表される。

ガイド波の伝搬挙動を理解するには、角周波数 ω に対して周波数方程式を解けばよい。これより、図3に示すような分散曲

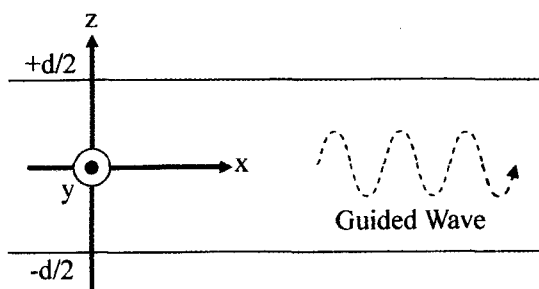


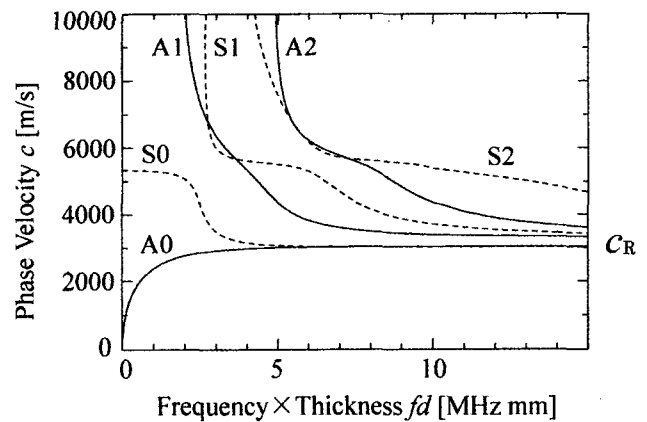
Figure 2 Coordinate system of the propagation of guided wave

線 (dispersion curve) が得られる。分散曲線は、一般的に周波数 f と板の厚さ d の積に対して与えられ、図3(a)は縦軸を位相速度 c で、図3(b)は群速度 c_g で表している。図3では、本論文で使用するガラス(縦波音速 $c_L=5800$ [m/s], 横波音速 $c_T=3300$ [m/s]) 平板材料とした場合の分散曲線を示している。図3において、点線は対称モード、実線は非対称モードであり、位相速度の低い方から順に、S0, S1, S2, …, A0, A1, A2, …である。

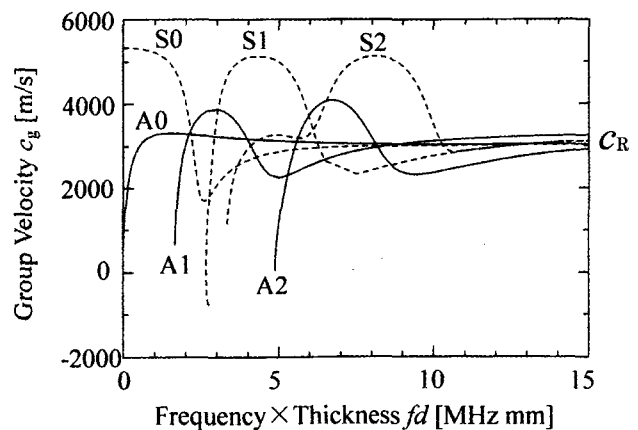
ガイド波は超音波の周波数および媒質の厚さに依存した多数の伝搬モードが存在し、各伝搬モードの伝搬速度が異なる速度分散性を持つ。すなわち、高次の振動モードほど速度分散性が強いことがわかる。超音波の波長に比べて板の厚さが十分に厚い場合、S0およびA0モードの基本振動モードはRayleigh波の速度 c_R に、高次振動モードは横波音速 c_T (SV波)に漸近する。後述のように本論文では前者のRayleigh波を用いる。

3. ガイド波の伝搬モード推定

前述のように、Lamb波やRayleigh波などのガイド波は伝搬材料の材質や形状、板面の境界条件などにより複数の種類が



(a) Dispersion curve of the phase velocity



(b) Dispersion curve of the group velocity

Figure 3 Dispersion curves of the Lamb wave in the case of glass plate ($c_L=5800$ m/s, $c_T=3300$ m/s, c_R : Rayleigh wave velocity)

存在し、周波数に依存した複雑な伝搬特性を持つ。また、速度分散性が強い場合、音波の波面が移動する速度である位相速度とエネルギーの移動する速度である群速度を区別して考える必要がある。このような複雑な伝搬挙動を持つガイド波は受波信号に多数のモードが混在するため、受波信号の時間波形からガイド波の伝搬モードを推定することは困難である。そこで、ガイド波を用いるためには解析的手法により伝搬モードを推定する必要がある。ここでは、波動方程式から理論的に得られる群速度の分散曲線を利用し、高調波検出実験に使用する表面波探触子とガラス板を用いた場合におけるガイド波の伝搬モードの推定を行った。

群速度は、パルス波（バースト波も含む）の包絡線の伝搬速度であり、パルス駆動することで受波信号からの直接的な速度測定が可能である。しかし、上述したようにガイド波は周波数や板厚に依存した速度分散性を持つため、板中での音波の伝搬距離の増加とともに信号波形の変形が生じ、これが時間信号波形からガイド波の伝搬モードの推定を困難にしている。

ガイド波の伝搬モードの分散性を持つガイド波の群速度を知るためには何らかの解析手法が必要である。そこで、理論的に算出した群速度分散曲線を用いてガイド波の伝搬モードを推定する方法を適用する。群速度分散曲線は周波数 f と板厚 d に対する群速度 c_g の特性を示したものであり、分散曲線において縦軸は伝搬時間の軸に、横軸は周波数のみの軸に変換することができ、これから群速度分散曲線を伝搬時間-周波数特性に変換する。受波信号の伝搬時間に対する周波数分布が得られれば、群速度分散曲線との比較が可能になる。本論文では伝搬モードの判別法として、信号処理や画像処理の分野で利用されている手法の一つであるウェーブレット変換^{[10],[11]}を用いる。ウェーブレット変換はフーリエ変換では失われてしまう時間情報を残したまま周波数分布を得ることができ、近年 Lamb 波の伝搬モードの推定に用いられている^[12]。本論文においても、受波信号をウェーブレット変換することによってガイド波の伝搬モードの推定を行う。

ガイド波の受波信号波形の測定システムを図4に示す。ガイド波の伝搬に用いる表面波探触子の先端部分の間隔を3cmとして互いに対向させ、ガラス板上に真空グリスを音響接合剤として用いて接触させる。次に、周波数5.0MHzのパルス正弦波電圧1波で圧電振動子を駆動し音波を斜角入射させた。得られた受波信号波形を図5に示す。図5の受波信号波形は、ガラス板のみの伝搬時間を得るために、全体の伝搬時間からくさび部分の伝搬時間を差し引いて補正してある。

さらに、図5の受波信号波形をウェーブレット変換した結果と縦軸および横軸を変換した群速度分散曲線を重ね合わせたものを図6に示す。これより、分散曲線の各モードが収束している部分（周波数 f と板厚 d の極限值）に強い振幅強度分布が得られた。また、図5の受波信号波形から Lamb 波にみられるような波形の分散（変形）がみられないことから速度分散がない Rayleigh 波が伝搬していると推定される。表面波探触子を用いてガラス板（ $d=5$ mm）に超音波を伝搬した場合、 $fd=25$ となり図3(a),(b)の c_R の値（図の右側に表示）および図6の結果からもこの場合 Rayleigh 波が励起されていることが確認できる。次節では、これらの伝搬モードを用いた閉口亀裂からの高調波検出実験について述べる。

4. 閉口亀裂からの2次高調波検出実験

4-1 超音波の反射率および透過率の算出

閉口亀裂面にガイド波が伝搬した場合における超音波の反射および透過について検討を行う。図7に示すように、閉口亀裂面を単純化して考えると、閉口亀裂面は媒質1と媒質3の間に空気の層である媒質2がある状態であると考えられる。ここで、媒質1と媒質3は平板材料として用いるガラスである。ガラス

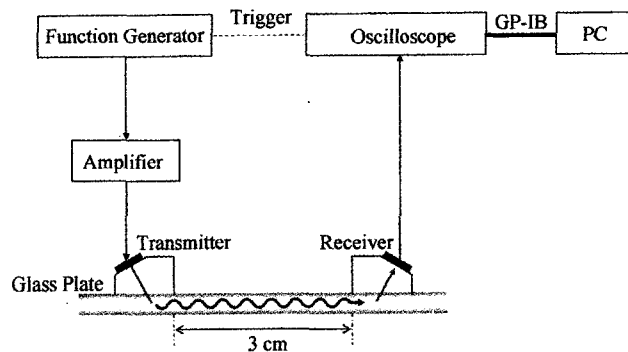


Figure 4 Experimental setup for guided wave system.

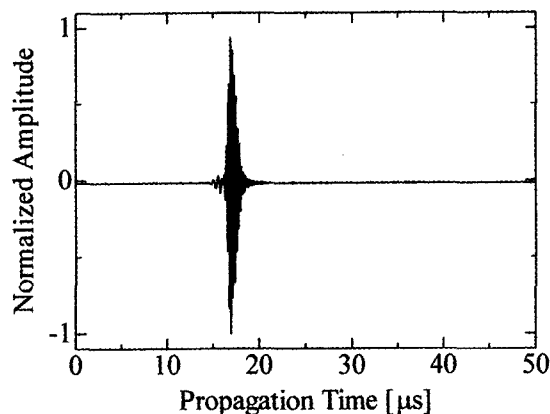


Figure 5 Received waveform obtained by the experimental system shown in Figure 4.

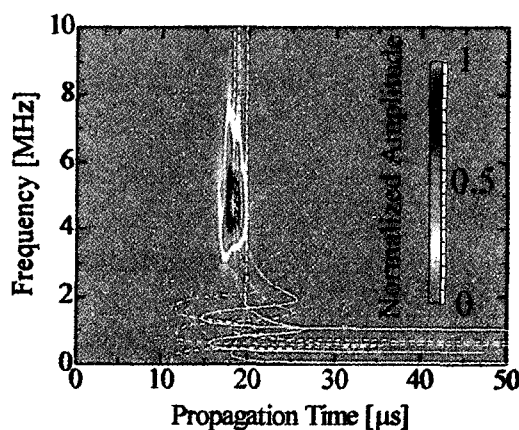


Figure 6 Frequency-time relation of the waveform in Figure 5 using wavelet transform.

と空気の境界面に対して超音波が垂直に入射する場合の反射率および透過率を算出することで、閉口亀裂面を透過するガイド波の伝搬特性について検討を行う。媒質1と媒質3の間に厚さ l の第2の媒質の層が存在する場合に、媒質1から境界面に垂直に入射した平面波の反射率および透過率は以下の(5)式、(6)式で与えられる^{[1],[3]}。ここで、 p_i は入射波の音圧、 p_r は反射波の音圧、 p_t は透過波の音圧、 r は音圧反射率、 t は音圧透過率、 z_1 と z_3 は媒質1および3の音響特性インピーダンス、 z_2 は媒質2(層)の音響特性インピーダンス、 l は層の厚さ、 $k_2=2\pi/\lambda_2$ より λ_2 は媒質2における音波の波長である。閉口亀裂の開口幅(約 $\mu\text{m}\sim\text{nm}$)に対応させて媒質2の層の厚さ l を変化させた場合の反射率と透過率について検討する。

$$r = \frac{p_r}{p_i} = \frac{\left(\frac{z_1}{z_3} - 1\right) + j\left(\frac{z_1}{z_3} - \frac{z_2}{z_3}\right) \tan k_2 l}{\left(\frac{z_1}{z_3} + 1\right) + j\left(\frac{z_1}{z_3} + \frac{z_2}{z_3}\right) \tan k_2 l} \quad (5)$$

$$t = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2}{\left(\frac{z_1}{z_3} + 1\right) \cos k_2 l + j\left(\frac{z_1}{z_3} + \frac{z_2}{z_3}\right) \sin k_2 l} \quad (6)$$

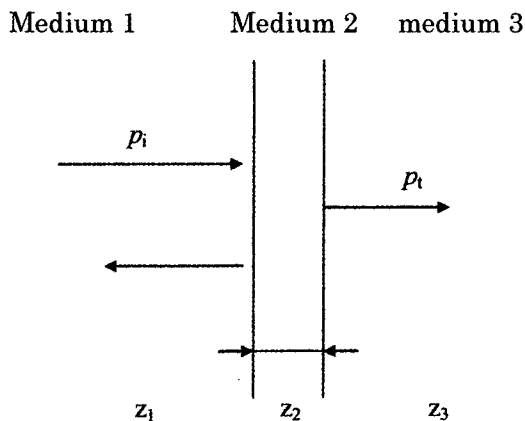


Figure 7 Sound pressure transmission and reflection of the three layers

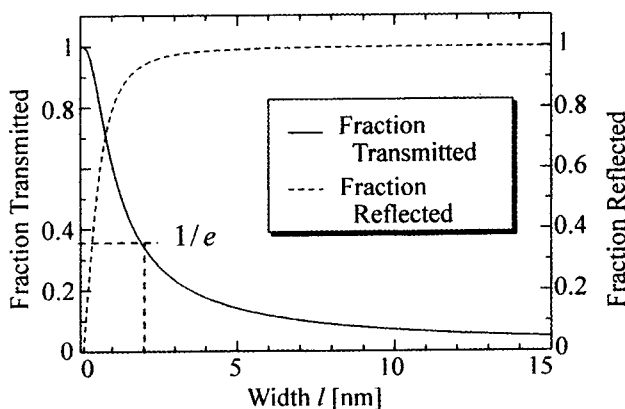


Figure 8 Transmission and reflection of sound pressure calculated from Eq.5 and Eq.6.

上記の(5)式および(6)式から、Rayleigh波の境界面での反射率および透過率を算出し、これを図8に示す。この結果から、空気の層の厚さがnmオーダーでも音圧反射率は増加し、一方、音圧透過率は急激に減少することがわかる。これはガラスと空気の間の高インピーダンスミスマッチが影響している。ここで、図8における点線は伝搬減衰の目安の一つである減衰距離($1/e$)を表しており、このとき媒質2、すなわち空気層の幅 l は1.9nmである。これより、ガラス板の亀裂は約2nmの空気層を有しておりこの幅が2nm付近以上になるとほとんどRayleigh波が透過しないと考えられる。

4-2 閉口亀裂からの高調波検出

図4に示した測定システムを用いて、閉口亀裂で発生する高調波の検出実験を行う。発振器から周波数5.0MHzのバースト正弦波電圧30Vを出力し、増幅器によって増幅した後に送波用探触子に印加する。送波用探触子から送波された超音波はガラス板に斜角入射し、Rayleigh波として板中を伝搬した後に受波用探触子で受波される。

受波信号波形はオシロスコープによって観測される。駆動電圧は、0~135Vの範囲で変化させる。また、Rayleigh波は亀裂のない面(No Crack)と閉口亀裂面(Closed Crack)に対して伝搬させることで測定を行い、それぞれの測定結果を比較・検討する。

本論文で用いた閉口亀裂を有する平板材料は、図9のようなガラス板であり、ガラス板の側面部に約1cm程度の欠陥を作製し、欠陥部にくさび形の金属片を挿入した後に応力を加えることで閉口亀裂の作製を行った。閉口亀裂の長さは約4cmである。この亀裂は目視ではわずかに存在を確認できる程度で、亀裂に塗料などをしみこませようとしても浸入しない程度である。

平板中にRayleigh波を伝搬させた場合において、No CrackおよびClosed Crackでの受波信号波形の測定を行った。駆動電圧135Vでの測定結果を図10に示す。図10の測定結果から、(a)のNo Crackでも(b)のClosed Crackにおいても受波信号の時間波形およびその振幅、伝搬時間は両者とも同一であり、このような時間波形だけからでは、No CrackとClosed Crackの判別を行うことは困難であることがわかる。

一方、オシロスコープのFFT機能を用いてリアルタイムで

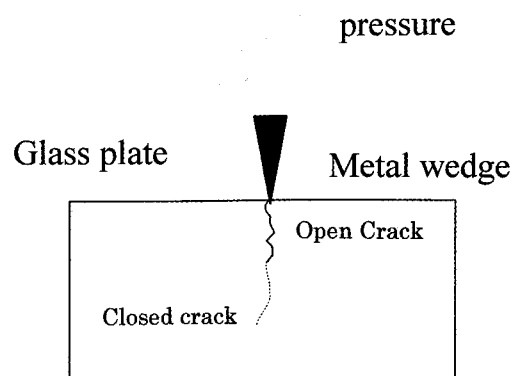


Figure 9 Formation of the closed crack by the squeezed metal wedge

観測される受波信号波形の振幅スペクトルを図11に示す。図11(a), (b)の振幅スペクトルはNo Crackの基本波の振幅スペクトル値によって正規化を行っている。図10に示した振幅スペクトルにおいて、No CrackとClosed Crackを比較すると、No Crackに対してClosed Crackの2次高調波の振幅値が約6 dB程度増加していることが確認できる。

閉口亀裂に伝搬したガイド波に含まれる高調波成分は、閉口亀裂の幅以上の有限振幅 Rayleigh 波を送波した場合において、亀裂面が衝突すると考えられる。したがって、送波用の表面波探触子の駆動電圧すなわち Rayleigh 波の振動振幅を変化させることで、閉口亀裂の幅が測定できると考えられる。図12は駆動電圧とガラス板の亀裂付近の振動変位をレーザドップラー変位計で測定したものである。³⁴⁾ この結果から本システムでは nm オーダの振幅を有する Rayleigh 波が発生できることがわかる。

この Rayleigh 波によって閉口亀裂から発生する2次高調波振幅値を以下の方法によって評価する。亀裂がない場合 (No

Crack)の振幅スペクトルの2次高調波振幅値を A_1 とし、亀裂がある場合 (Closed Crack)の振幅スペクトルの2次高調波振幅値を A_2 とし、これらの2次高調波振幅差 $A_2 - A_1 = \Delta A$ を求める。2次高調波振幅差は、No Crack に対する Closed Crack の2次高調波の増加分であり、亀裂の有無以外は同一条件で測定していることから、閉口亀裂を伝搬する際に発生したものであると考えることができる。すなわち、駆動電圧を変化させた場合において、2次高調波振幅差を求めることで、亀裂による新たな2次高調波の発生が確認できる。図13は図12の結果を用いて Rayleigh 波の振動変位と2次高調波の振幅差 ΔA を表したものである。この結果から、駆動電圧105 V 以下、すなわち振動振幅が1.7 nm 付近から急激に2次高調波振幅が増加していることが分かる。これよりガイド波の入射波振幅が1.7 nm において閉口亀裂面が衝突し始めるためと考えられ、亀裂幅が1.7 nm 程度であることが推測される。この値は図8において音波の透過率 $1/e$ がとなるいわゆる減衰距離 (1.9 nm) にほぼ等しくなり、このことからこの値を境に亀裂面

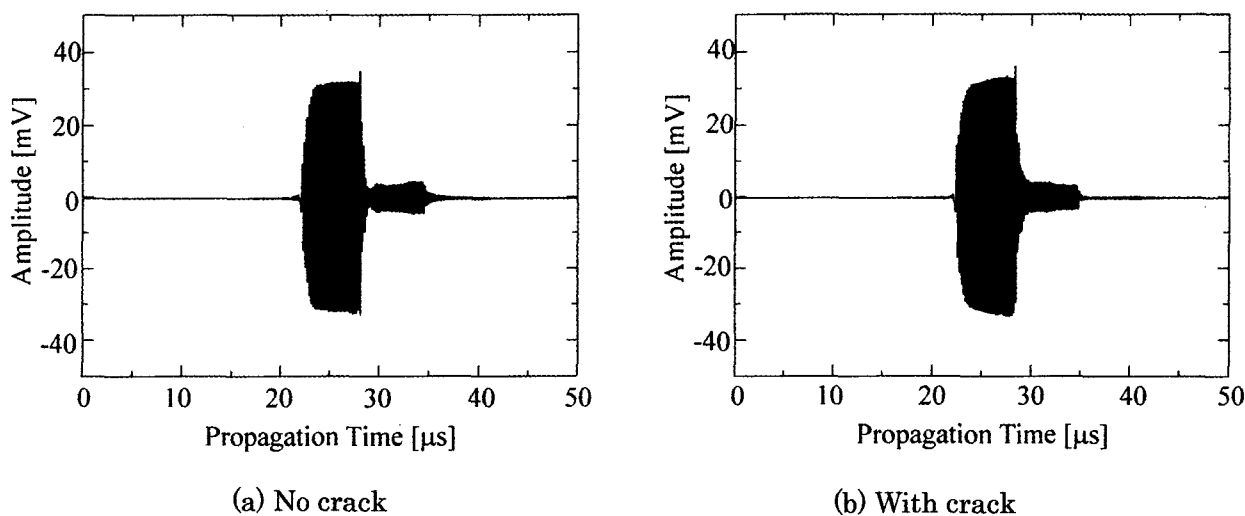


Figure 10 Received waveform in case of no crack (a) and with crack (b).

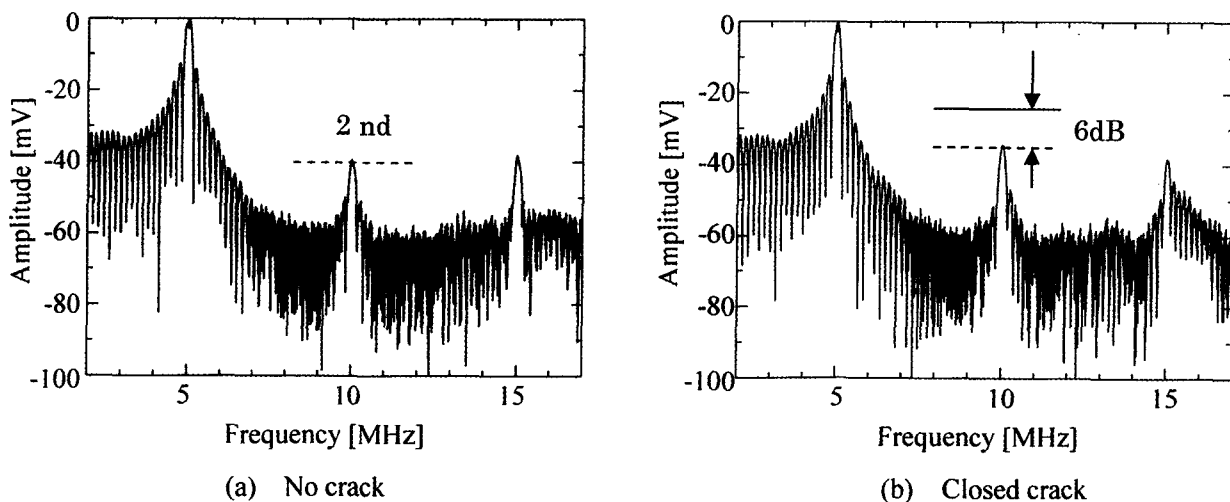


Figure 11 Frequency spectrum of received signal in case of no crack (a) and with crack (b).

が衝突を始めるものと考えることができる。

4-3 2次高調波振幅の角度特性

高調波検出実験では、Rayleigh波の伝搬方向が亀裂面に対して垂直方向であったが、音波の振動方向と亀裂面の振動との関係を明らかにするために亀裂面に対するRayleigh波の伝搬方向を変化させた場合に発生する2次高調波振幅の測定を行って2次高調波振幅の振動方向の角度特性を求める。

図4のシステムを用いて図14に示すように、閉口亀裂面に対してガイド波の伝搬方向を40~140°に変化させて測定を行う。表面探触子の駆動電圧は135Vとした。

測定結果を図15に示す。入射角度90°の場合を基準に正規化を行っており、エラーバーは5回測定における標準偏差を表す。この結果から、Rayleigh波が亀裂面に対して垂直(90°)で入射したときに2次高調波振幅がもっとも大きくなり、入射角度を変化させることで2次高調波振幅値が減少している。入射角度による2次高調波振幅値の減少の割合は大きく、入射角度40°のときでは約10dB以下まで減少している。この場合、Rayleigh波は亀裂面に対して平行な振動成分を多く含むよう

になり、亀裂面での衝突が減少すると考えられ、この結果、亀裂面に対する伝搬方向の角度依存性があると考えられる。

5. おわりに

平板中を伝搬する有限振幅ガイド波を用いて閉口亀裂の検出について検討を行った。閉口亀裂を有するガラス平板中を伝搬する音波の群速度の分散曲線を用いることでガイド波の伝搬モードの推定を行ったところ、有限振幅のRayleigh波が伝搬していることが確認できた。この有限振幅Rayleigh波を用いて、閉口亀裂で発生する高調波の検出実験を行い、No Crackの場合と比較してClosed Crackにおいて2次高調波振幅の増加が確認された。また、亀裂幅と音波の振動振幅(いずれも2nm程度)が等しくなると2次高調波が急激に増加することがわかり、閉口亀裂の存在と幅の推定の可能性を示すことができた。

今後この方法を用いて、他の平板材料での検討や疲労、亀裂などで発生した実際の亀裂の検出可能性について検討する予定である。

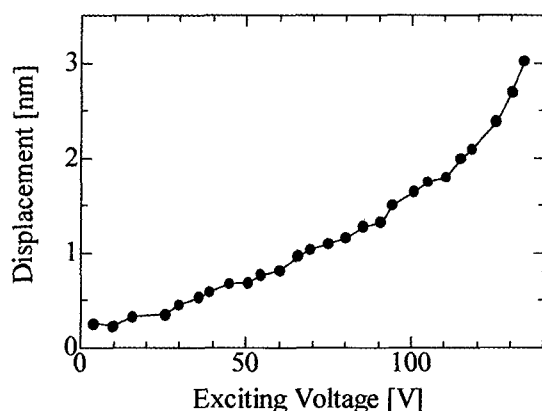


Figure 12 Relation of vibration displacement and exciting voltage measured with a laser Doppler displacement meter

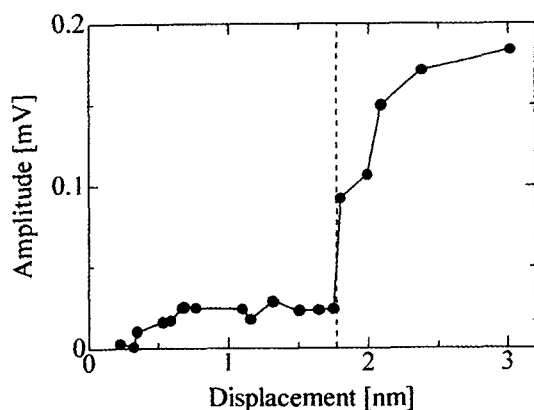


Figure 13 Relation of the vibration displacement and differences of amplitude second harmonic component ΔA .

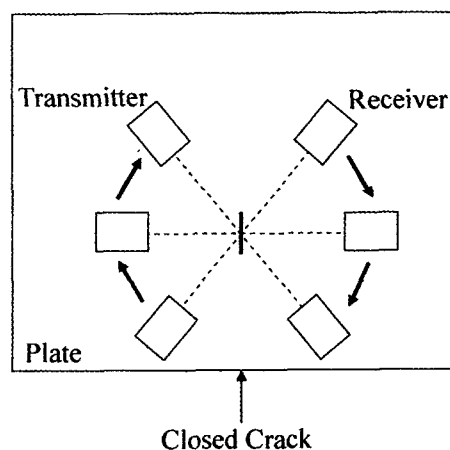


Figure 14 Experimental arrangement for the angular dependence of the second harmonic components.

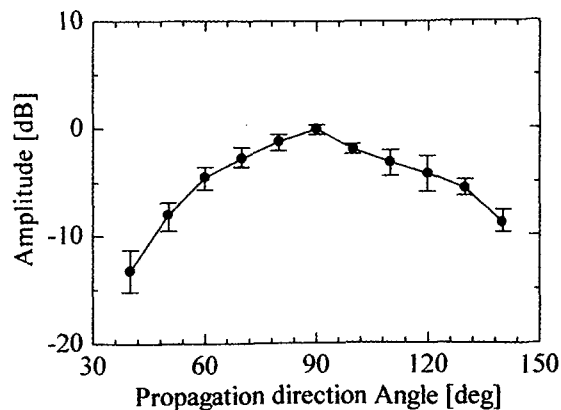


Figure 15 Angular dependence of the second harmonic components.

参考文献

- 1) 杉本幸郎：“超音波による非破壊検査技術”，日本音響学会誌61巻11号，pp.671-676 (2005)
- 2) 日本非破壊検査協会：“新非破壊検査便覧”，日刊工業新聞社 (1992)
- 3) 石井勇五郎：“非破壊検査工学”，産報出版株式会社，pp.111-165 (1973)
- 4) K. Kawashima, R. Omote, T. Ito and H. Fujita：“Nonlinear acoustic response through minute surface cracks: FEM simulation and experimentation”, *Ultrasonics*, **40**, pp.611-615 (2002)
- 5) O. Buck, W. L. Morris and J. M. Richardson：“Acoustic harmonic generation at unbounded interfaces and fatigue cracks”, *Appl. Phys. Lett.* **33**, pp.371-373 (1978)
- 6) S. Hirose and J. D. Achenbach：“Higher harmonic in the far field due to dynamic crack-face contacting”, *J. Acoust. Soc. Am.* vol.**93**, No.1, pp.142-147 (1993)
- 7) 石田制一，本山盛太郎：“金属組織と欠陥”，日刊工業新聞社 (1981)
- 8) H. Lamb：“On Waves in an Elastic Plate”, *Proc. Roy. Soc. London*, **A93**, pp.114-128 (1917)
- 9) B. A. Auld：“Acoustic Fields And Waves In Solids”, Vol. II”, (Wiley-Interscience Pub. New York, 1973).
- 10) K. Horie, M. Nishihira and K. Imano：“Real-time measurement of acoustic properties of coating material using surface wave and plate wave”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.**44**, no.6B, pp.4333-4335, 2005.
- 11) M. Watanabe, M. Nishihira and K. Imano：“Detection of defects on reverse side of metal plate using MHz-range air-coupled Lamb wave”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.**45**, no.5B, pp.4565-4568, 2006
- 12) M. Z. Silva, R. Gouyon and F. Lepoutre：“Hidden corrosion detection in aircraft aluminum structures using laser ultrasonics and wavelet transform signal analysis”, *Ultrasonics*, **41**, 4, pp.301-305 (2003)
- 13) 日本学術振興会 製鋼第19委員会：“超音波探傷法”，日刊工業新聞社 (1974)
- 14) 武藤梓，西平守正，今野和彦：“弾性表面波を用いた閉じたクラックからの高調波検出の実験”，電子情報通信学会2006年総合大会講演論文集 (基礎・境界)，p.215, 2006.