



Title	接触界面における高調波発生現象の可視化
Author(s)	村瀬, 守正; 林, 高弘; 北山, 綱次
Citation	非破壊検査. 2014, 63(6), p. 310-315
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/84944
rights	© 2014 一般社団法人日本非破壊検査協会
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

接触界面における高調波発生現象の可視化

村瀬 守正*, 林 高弘*, 北山 綱次*

Visualization of Higher Harmonic Generation at Contacting Surfaces

Morimasa MURASE*, Takahiro HAYASHI*, Tsunaji KITAYAMA*

Abstract

Since material evaluation using nonlinear acoustics is a different technique from conventional linear ultrasonic techniques in principle, its phenomena are difficult to understand using fundamental data such as waveforms and frequency spectra. In this study, therefore, higher harmonic waves generated at a contacting surface of aluminum blocks were experimentally visualized. An ultrasonic wave was emitted from the lateral side of the block and a longitudinal wave propagating on the top side of the block was detected by a laser Doppler vibrometer at many points, then animations of the ultrasonic waves were constructed. From these results, a second harmonic generation at the contacting surface was observed.



Key Words

Nonlinear ultrasonic, Visualization, Higher harmonics, Laser Doppler vibrometer

1. 緒言

材料中を伝搬する超音波は、縦波や横波といった異なる振動形態のモードが存在する上、壁面や境界面における反射や透過、屈折や回折といった複雑な伝搬挙動を示すため、その現象の把握が非常に難しい場合がある。その中で、材料中や表面を伝搬する線形超音波を可視化する取り組みが盛んに行われている。たとえば、数値計算に関する研究において、古くは Harumi¹⁾ が欠陥周りの超音波伝搬や表面波などを可視化しており、現在ではほぼすべての数値計算結果が可視化されている²⁾。また、実験的には透明体内部を伝搬する超音波に対し、光弾性法による超音波伝搬の可視化が Zhang ら³⁾ や Li, Negishi⁴⁾、三原⁵⁾ によって行われている。さらに、金属材料表面を伝搬する超音波については、レーザ振動計による多点受信波形を用いた手法で、高坪ら⁶⁾、林ら^{7), 8)} や Na ら⁹⁾ の報告がある。いずれも直感的に現象を把握しやすく、文章や数式では説明が難しい現象や新しい現象を表現するのに適している。

一方で近年、材料中や界面における非線形性を利用し、これまで不可能であった微細損傷や閉じたき裂を検出できるとして期待されている非線形超音波を非破壊評価へ適用する研究が盛んに進められている。しかし、非線形超音波法は、これまでの線形超音波探傷の概念とは異なる手法であるため、波形や周波数スペクトルといった基礎データでは、現象を理解しにくい側面がある。また、き裂や界面での非線形現象を扱うため、数値計算にも工夫が必要となっている。この非線形現象を理解するためには、実際の界面で発生した高調波を可視化することが有効である。線形超音波に関しては、先に述べたように多くの可視化が行われているが高調波の伝搬を可視化した事例はない。また、高調波は計測系のあらゆる要素から発生している可能性があり、非線形超音波法を非破壊評価に適用する上で、対象部位から発生していることを確認

することが重要である。

そこで本論文では、レーザドップラー振動計を用いた多点受信による波動伝搬の可視化技術を用いて、接触界面を例に、高調波の発生が界面における非線形現象によるものであることを確認する。

2. 計測結果に現れる高調波

超音波発振器から超音波信号が発され、受信波形をデジタル信号として収録するまでに、計測系中には高調波が混入する様々な要因が存在する (Fig.1)。

初めに超音波探触子を駆動するために、超音波発振器 (a) において高電圧のパルス信号やバースト信号を生成する。このとき、全く高調波が重畳しない高電圧正弦バースト波を生成することは容易ではなく、多かれ少なかれ高調波が混在した波形を利用している。

次に高電圧信号を受けた超音波探触子 (b) において、電圧信号を超音波信号に変換し、外部へ超音波を放射する。この際、振動子に周波数特性があるため、振動子自体がフィルタとし

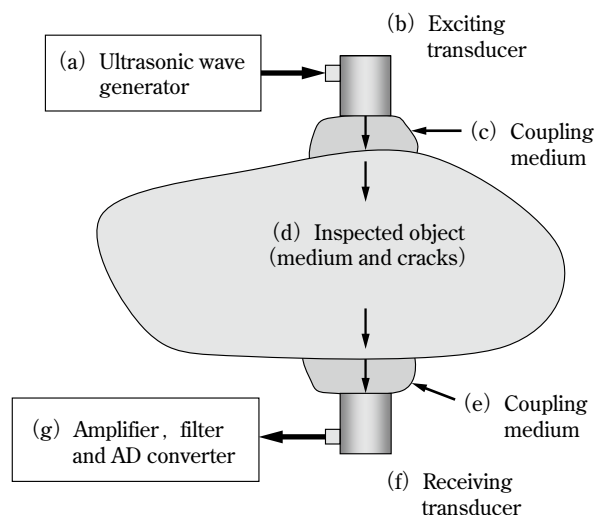


Fig.1 Sources of higher harmonics

原稿受付：平成 25 年 1 月 21 日 掲載決定：平成 26 年 2 月 10 日

* (株) 豊田中央研究所 (愛知県長久手市横道 41-1)
Toyota Central R&D Labs., Inc.

て高調波を抑制すると同時に、振動子やその接着部における非線形性が高調波を発生させる。その後、材料中に超音波を入射しやすくする水やジェルなどの結合媒質 (c) においても高調波が発生する可能性がある。

検査対象の材料 (d) 内においては、材料の持つ非線形性と欠陥などにおいて界面が開閉口することによる非線形性により高調波が発生する。一般に金属材料においては、材料の持つ非線形性による高調波の発現に比べ、欠陥界面の開閉口において現れる高調波の方が 100 倍から 1000 倍程度大きいとされており^{10) - 12)}、現在多くの非線形超音波に関する研究は、この性質を利用した材料内き裂の非破壊評価に関するものとなっている。

材料中を透過した超音波は、再び結合媒質 (e) を通って、受信探触子 (f) で受信される。受信側でも同様に結合媒質や受信探触子、アンプなどの回路系の非線形性が存在するが、高電圧を扱う入射側の非線形性に比べて非常に小さい。

ただし、受信回路 (Fig.1 (g)) に入ってくる信号レベルが制限範囲から外れる場合、非常に大きな高調波が現れる。例えば、受信回路 (g) に入る信号レベルがアンプや AD 変換器の最大信号レベルを超えると、信号が飽和し、Fig.2 (a) のように上下がつぶれた波形になる。この波形をフーリエ変換すると Fig.2 (b) のように奇数次高調波が大きく現れる。また、高調波の信号レベルが基本波に比べ非常に小さい場合、AD 変換器のビット数によっては高調波信号を正確にデジタルデータで表現することができず、その誤差が高調波として現れる。

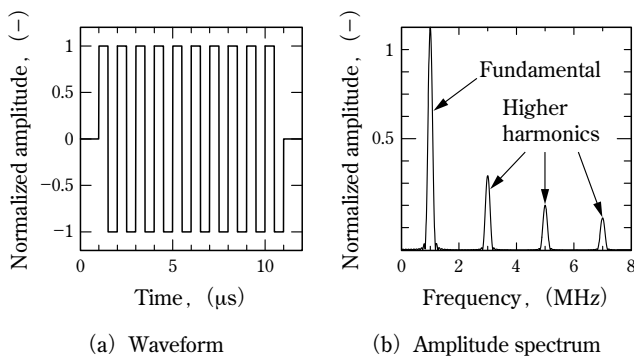


Fig.2 Square burst waveform and its amplitude spectrum

3. レーザドップラー振動計を用いた高調波可視化実験

前章で示したように高調波は計測系のあらゆる要素から発生している可能性があり、収録された単一の波形の高調波成分を解析しても、欠陥の有無や損傷度合を表しているとはいえない。そこで、本章ではレーザドップラー振動計を用いた多点波形計測により、金属ブロック表面の高調波伝搬の可視化を行い、接触界面における高調波の発生を確認する。

3.1 試験体と簡易圧縮試験機

接触界面に負荷される応力を制御して実験するために、Fig.3 のようにアルミブロック試験体と万力を用いた簡易圧縮試験機を構築した。2 個のアルミブロック (A5052P, 接触面 40mm × 50mm, 長さ 40mm) を万力により圧縮 (界面の圧縮応力 1.5MPa) し、その際にブロック側面から入射した超

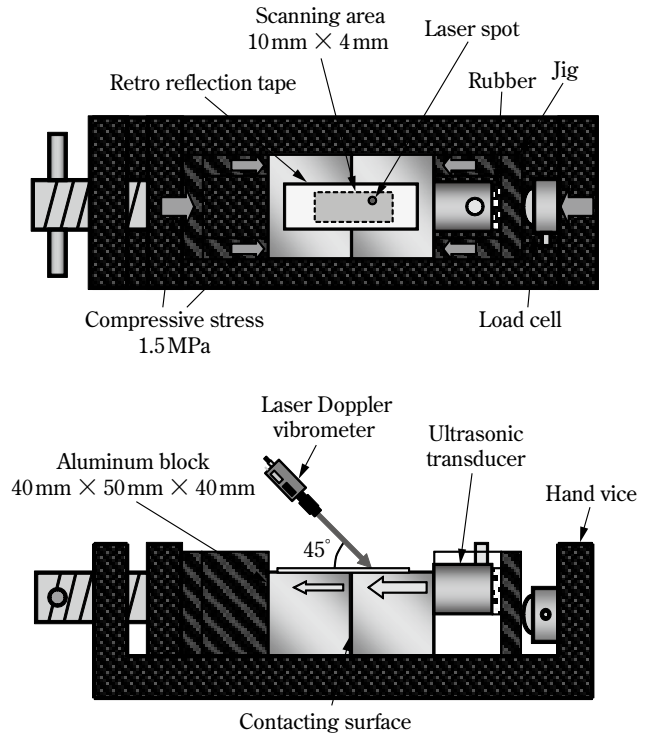


Fig.3 Test pieces and compression test jig

音波縦波を、上面からレーザドップラー振動計により計測するという仕組みである。アルミブロックの接触面は粗さ $R_z = 1.2\mu\text{m}$ とした。

アルミブロックの上面にて振動を検出できるように、図のような位置に超音波探触子 (オリンパス, V106, 公称中心周波数 2.25MHz) を取り付けた。このとき、この超音波探触子を避けてアルミブロックに圧縮応力を負荷するため、コの字型のジグを図のように取り付け、その両端から万力により圧縮応力を負荷した。コの字型のジグは圧縮力により数 μm 程度縮む可能性があるため、探触子とジグとの間にゴム板を設置し、この縮みによる圧縮力が探触子に伝達しないようにした。これにより探触子-アルミブロック間の接触圧力は、計測中ほぼ一定に保たれると考えられる。圧縮力は、コの字型のジグと万力の間にロードセルを取り付けて計測した。また、このジグにより中央のアルミブロックの左右表面には局所的な圧縮力が負荷されるが、中央の接触界面に向かうに従って均質な圧縮応力に近づく。有限要素法を用いた応力解析を行ったところ、長さ 40mm の場合に接触界面上では、ほぼ様な応力分布になることを確認した。

3.2 超音波伝搬の可視化実験装置

Fig.4 に実験装置の概略図を示す。超音波発振器からの高電圧信号を受けた超音波探触子から、超音波縦波が試験体中を伝搬する。超音波伝搬による試験体上面の振動を、レーザドップラー振動計 (小野測器, LV-1720A, LV-0160, 計測速度範囲 2mm/s ~ 5m/s) により検出し、AD 変換器 (ナショナルインスツルメンツ, USB-5133) により収録した。レーザドップラー振動計のヘッドを XY ステージ (シグマ光機, SHOT-204MS) によって XY 方向に移動し、移動点ごとに波形の計測を繰り返し、試験体上面の多点での波形を収録した。

アルミブロック上面には再帰反射テープ (小野測器, LV-0012) を貼り付け、そのテープ面にレーザ光を斜め 45° から照射して、振動を計測した。これによりレーザ光の照射方向の

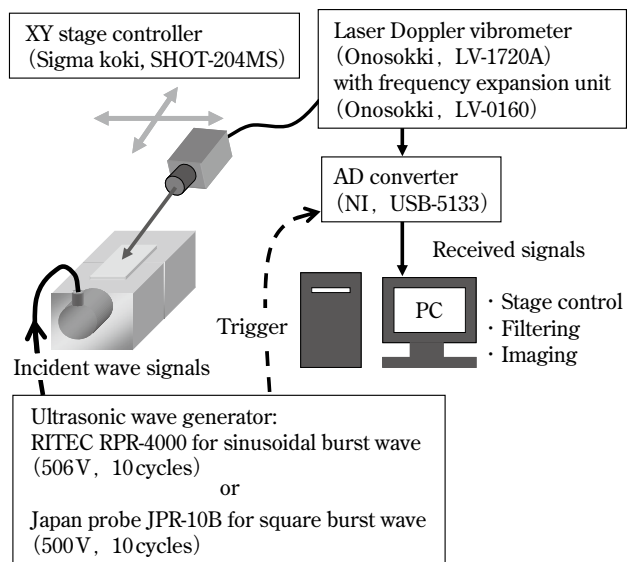


Fig.4 Experimental system

振動が検出できる^{7), 8)}。レーザの照射点すなわち波形の計測点は、再帰反射テープ上の10mm×4mmの領域を0.1mmステップの101点×41点=4141点とした。入射波がアルミブロック内の界面の法線方向に振動する縦波が支配的であることを考えると、計測される波形は試験体内部を伝搬する縦波による表面の振動である。

高調波の発生を評価するに際して、電圧信号の形状により振動子内で発生する高調波成分が異なるため、入射超音波に含まれる二次高調波成分が影響を受けることが考えられる。この影響を比較するために、信号発生器に正弦波状のバースト波を出力するRITEC社製RPR-4000と矩形波状のバースト波を出力するジャパンプローブ社製JPR-10Bを用い、2.2MHz、10サイクルのバースト波をそれぞれFig.4中に示した電圧で出力した。パーソナルコンピュータ内では、ステージの制御および加算平均処理(50回)、信号のフィルタリング、結果の表示を行っている。

3.3 実験結果

3.3.1 高調波伝搬の可視化

多点で収録した波形の同一時刻における振幅値を並べると、その時刻における空間波形が得られ、各時刻の空間波形を連続表示すると、アルミブロック表面における超音波伝搬のアニメーションが得られる。ここでは、各受信信号からフィルタにより基本波、二次高調波の信号を抽出し、それぞれに対する伝搬アニメーションを生成した。Fig.5にその一部を示す。

Fig.5 (a), (c) は基本波に対応する周波数成分、(b), (d) は二次高調波に対応する周波数成分の2つの時刻に対する空間波形を示したものである。図のスケールはFig.5 (a), (c) においては-50mV～50mVを示し、Fig.5 (b), (d) においては-2mV～2mVを示している。(a)～(d) 中の上図は入射波が接触界面に到達する直前、下図はその後の時刻における空間波形である。(a), (b) は超音波発振器として、正弦波信号を

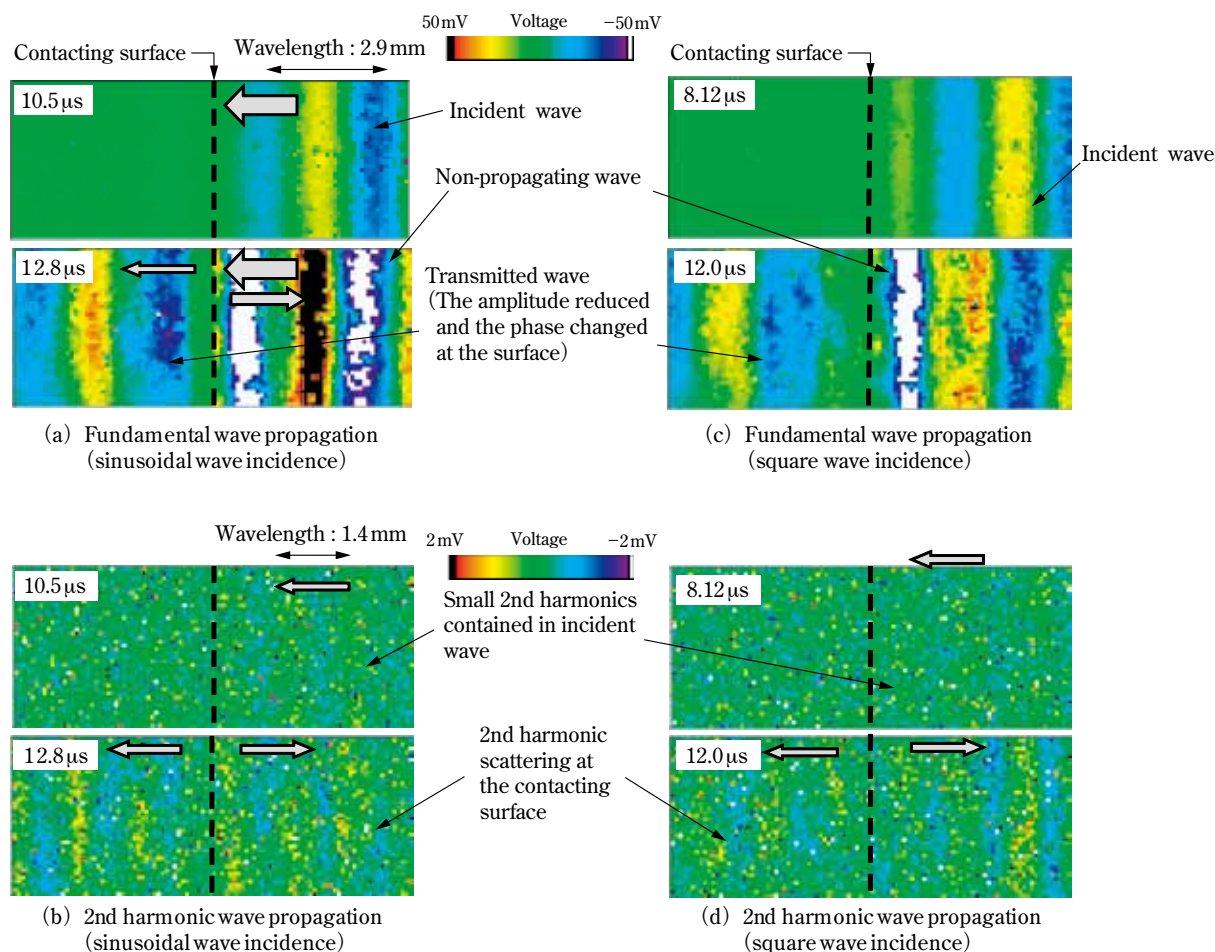


Fig.5 Fundamental and 2nd harmonic wave propagation near the contacting surface

出力する RPR-4000 を用いた場合、(c)、(d) は矩形波信号を出力する JPR-10B を用いた場合である。それぞれ 2.2MHz の基本波、4.4MHz の二次高調波に対し、カットオフ周波数が 1.1MHz と 3.3MHz、3.3MHz と 5.5MHz の 8 次のバターワース型バンドパスフィルタを用いて波形を抽出した。

Fig.5 (a), (c) の上図では、波が右からアルミブロック中を接触界面へ向かって伝搬している。図中の縞の間隔から伝搬している波の波長を読み取ると 2.9mm となり、入射波の周波数およびアルミの縦波音速より計算される波長に対応している。これにより、可視化された波は基本波であることが分かる。Fig.5 (a), (c) の下図では、接触界面において入射波より振幅が小さい波が左のブロックへ透過している様子が見える。また、接触界面を透過する瞬間には、位相のずれが見られ、接触界面から最も近い左右の縞の間隔が入射波の波長の間隔と異なっている。このような伝搬挙動は、スプリング界面モデルを用いた理論的な研究¹⁰⁾においても確認されている現象である。また、右のブロックでは、界面における反射波と入射波が重畳し、伝搬せずに一定の位置で振動する波が観察された。

次に、Fig.5 (b), (d) の空間波形では、界面に入射波が到達する前の時刻において、波が右から左へ伝搬の様子が確認された。図中の縞の間隔から伝搬している波の波長を読み取ると 1.4mm となり、二次高調波の周波数 4.4MHz とアルミの縦波音速から計算される波長に対応している。すなわち、この縞模様は入射波に含まれていた二次高調波成分であり、超音波発振器や超音波探触子、結合媒質などにより発生したものと考えられる。また、入射波に含まれる二次高調波成分の大きさは、正弦波と矩形波を用いた場合であり差が見られなかった。よって、正弦波と矩形波のどちらを用いても入射波への高調波の影響はほぼ同じであることが分かった。一方で、入射波が界面に到達した後 (b), (d) の下図) には、二次高調波が中央から左右に伝搬の様子が確認された。この波は入射波の二次高調波成分より振幅が大きいことから、接触界面において発生した二次高調波成分が含まれていると言える。

接触界面で発生する二次高調波の振幅は、界面の圧縮応力に依存し、圧縮応力が大きくなると、界面での接触剛性が増加し振幅が小さくなるという特徴を持つことがこれまでの研究^{12), 13)}より明らかになっている。逆に、圧縮応力が小さくなると、接触剛性が低下し高調波の振幅が大きくなることが明らかになっている。今回は圧縮応力 1.5MPa の一定条件で実験しているが、圧縮応力を変えて計測することで、その特徴を視覚的に確認できると考えられる。

3.3.2 基本波と二次高調波の振幅依存性

非線形応答を議論する際、その振幅依存性を評価することが重要となる。そこで、本項では透過波および反射波に含まれる二次高調波の振幅依存性を考察する。

入射波、透過波、反射波の二次高調波を評価するには、それぞれの波を個別に計測する必要がある。しかし、受信点が接触界面に近い場合、入射波と反射波が重なって評価できない。そこで、入射波と反射波を分離して計測するのに必要な接触界面と受信点との距離を次のように検討した。Fig.6 に示すように接触界面と受信点との距離を a 、入射波の長さを l とする。入射波が受信点を通過するのに必要な伝搬時間は、アルミの縦波音速を c とすると l/c となる。また、受信点を通過した入射波が、接触界面で反射し反射波として再度受信点で

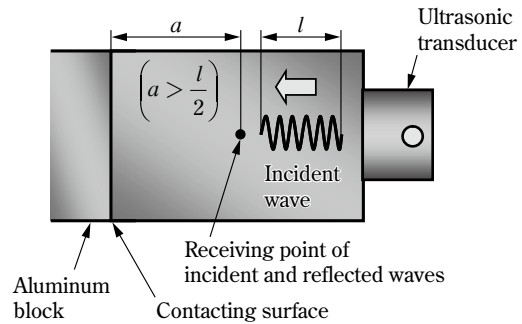


Fig.6 Concept of setup of the receiving point of the ultrasonic wave for amplitude dependence evaluation

受信されるまでの伝搬時間は $2a/c$ となる。この場合、受信点にて入射波と反射波が重ならないためには、 $2a/c > l/c$ つまり $a > l/2$ の条件を満足する必要がある。接触界面と受信点との距離 a は、バースト波の長さ l の 1/2 より長くする必要がある。周波数 2.2MHz の縦波の波長は、アルミの縦波音速 6260m/s から 2.8mm となる。従って、入射波として用いた 10 サイクルのバースト波の長さは 28mm となるため $a > 14mm$ となる。さらに、入射波のリングングの影響を考慮して Fig.7 に示すように界面から 20mm 離れた位置で入射波、透過波、反射波を計測した。なお、この計測は二次高調波振幅のばらつきの影響を考慮して、収録位置を界面に平行に 0.2mm ずつずらしながら 5 ヶ所で行った。

計測された入射波、透過波、反射波に対してそれぞれ離散フーリエ変換を行い、それぞれの基本波成分および二次高調波成分の振幅値を求めた。なお、入射波、透過波、反射波はそれぞれ 2.2MHz、10 サイクル分 (約 4.5 μ s) の時間長さしかないため、各波形の占める時間領域のデータ列を取り出した後、振幅ゼロのデータ列を追加して 164 μ s 分のデータ列にして離散フーリエ変換を行った。これにより離散フーリエ変換後の周波数分解能は $1/(164 \times 10^{-6}) = 6.1\text{kHz}$ となっている。5 ヶ所で計測した各波形に対して離散フーリエ変換を行って得られた基本波および二次高調波の振幅値の平均を求めてばらつきの影響を低減した。

Fig.8 にアルミブロックの中心軸上の点で計測した各点の波形と周波数スペクトルを示す。図より分かるように入射波の振幅スペクトルには二次高調波 (4.4MHz) はほとんど含まれていない。一方、透過波や反射波の振幅スペクトルには入射波に比べて多くの二次高調波が含まれていることが分かる。

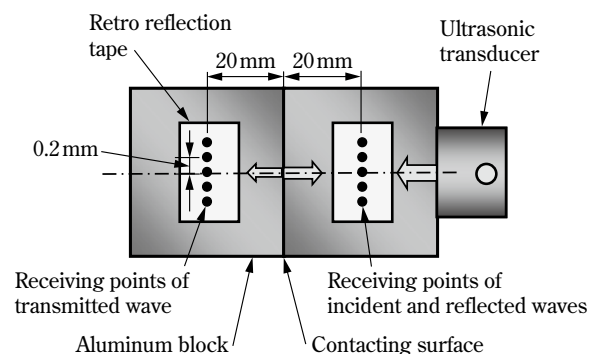


Fig.7 Illustration of setup of the receiving point of the ultrasonic wave for amplitude dependence evaluation

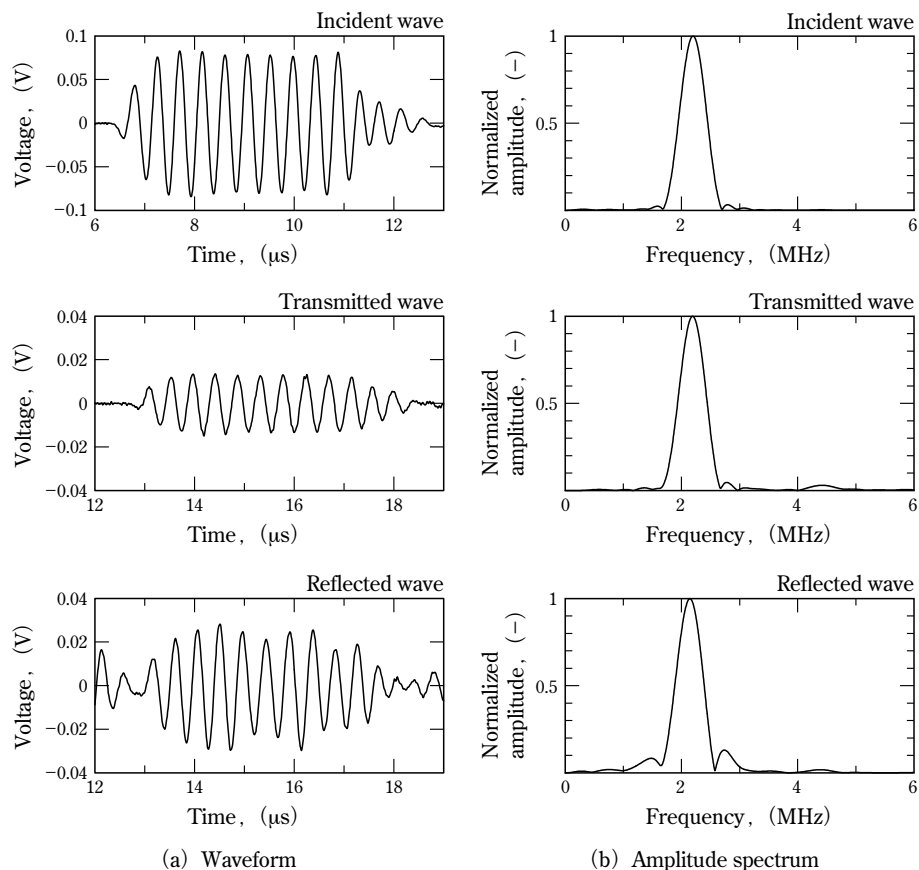
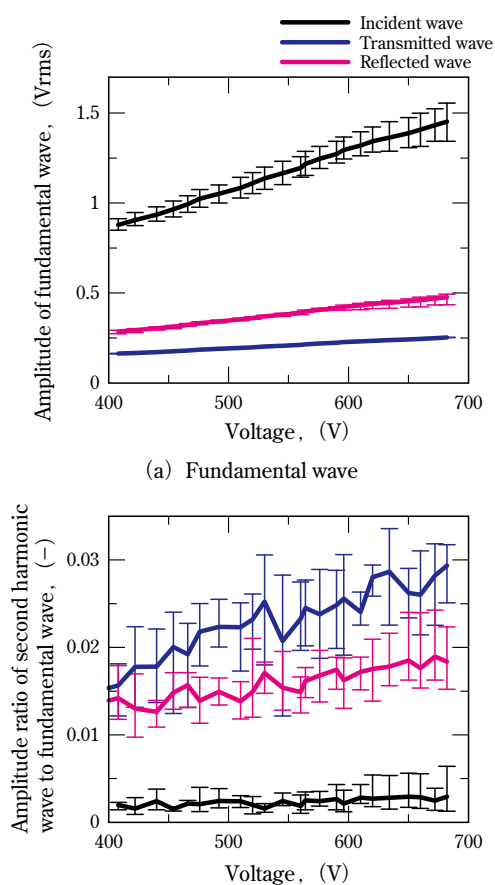


Fig.8 Ultrasonic waveform and amplitude spectrum at the receiving point



(b) Amplitude ratio of second harmonic wave to fundamental wave

Fig.9 Amplitude of fundamental and second harmonic wave at different input voltages

Fig.9に入射波、透過波、反射波における基本波成分の振幅およびそれに対する二次高調波成分の振幅比と入力電圧の関係を示す。図中のエラーバーは5ヵ所の計測点で得られたそれぞれの計測値の最大値と最小値を示す。Fig.9 (a) より基本波成分は入力電圧に対してほぼ単調増加していることが分かる。また、Fig.9 (b) より入射波の二次高調波振幅比は、入力電圧に対して微増の傾向である。この二次高調波成分の増加要因としては超音波探触子内および超音波探触子とアルミブロックとの接触部や出力回路内などが考えられる。一方、透過波および反射波の二次高調波振幅比は入力電圧に対して概ね単調に増加しており、その変化量は入射波のそれよりも大きい。つまり、透過波および反射波に含まれる二次高調波成分の振幅は、入力電圧の二乗にほぼ比例して入射波のそれよりも大きく増加している。これまでの理論的検討¹²⁾においても接触界面で発生する二次高調波振幅は基本波振幅の二乗に比例することが明らかになっている。これらのことから、本実験で計測された透過波および反射波に含まれる二次高調波は接触界面で発生したものであることが言え、前節の結果を補足する。

ただし、本実験では、二次高調波振幅が非常に小さい領域での計測であるため、入力電圧に対する二次高調波振幅の明瞭な閾値現象などは確認できなかった。

4. 結言

レーザドップラー振動計を用いてアルミブロック表面を伝搬する超音波を多点で計測し、超音波伝搬の可視化を行った。この際に、収録された波形からフィルタ処理により、二次高

調波成分を抽出して、その伝搬挙動を計測した。

探触子への電圧信号として正弦波と矩形波を用いたいずれの場合にも、入射波に二次高調波成分が含まれたが、接触界面ではそれよりも大きな二次高調波成分の発生とその伝搬を確認できた。このように、界面で発生する二次高調波の可視化が行えることから、本手法は非線形現象を理解するためのツールとして利用することができると考えられる。

本論文で述べたように入射波にも高調波成分が含まれている。この高調波は、受信波にも含まれるため高調波の有無の評価だけでは界面の状態を評価することができない。このため、実際の評価の際には、高調波成分の振幅依存性の計測等を行い、増加傾向などの確認も含めて慎重な検討が必要である。

参 考 文 献

- 1) K. Harumi : Computer Simulation of Ultrasonics in a Solid: NDT International, 19(5), pp.315-332, (1986)
- 2) 特集 超音波シミュレーションの展開, 非破壊検査, 60(4), pp.191-221, (2011)
- 3) S. Y. Zhang, J. Z. Shen and C. F. Ying : The Reflection of the Lamb Wave by a Free Plate Edge: Visualization and Theory, Materials Evaluation, 46(5), pp.638-641, (1988)
- 4) H. U. Li and K. Negishi : Visualization of Lamb Mode Patterns in a Glass Plate, Ultrasonics, 32(4), pp.243-248, (1994)
- 5) 三原 毅 : 光弾性画像処理法による超音波伝搬の可視化, 可視化情報, 70(18), pp.181-186, (1998)
- 6) 高坪純治, 今出政明 : レーザー法による超音波伝搬の可視化, 非破壊検査, 51(4), pp.200-204, (2002)
- 7) 林 高弘, 小鹿雄介, 村瀬守正 : レーザードップラー振動計の曲面スキャンによる配管中を伝搬するガイド波の可視化, 非破壊検査, 57(1), pp.30-35, (2008)
- 8) M. N. Salim, T. Hayashi, M. Murase and S. Kamiya : Analysis of Guided Wave Propagation by Visualizing In-plane and Out-of-plane Modes, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 28, pp.774-781, (2009)
- 9) J. K. Na and J. L. Blackshine : Interaction of Rayleigh Surface Waves with a Tightly Closed Fatigue Crack, NDT & E International, 43(5), pp.432-439, (2010)
- 10) I. Y. Solodov, N. Krohn and G. Busse : CAN: an Example of Nonclassical Acoustic Nonlinearity in Solid, Ultrasonics, 40(1-8), pp.621-625, (2002)
- 11) 特集 非線形超音波法による非破壊検査・評価, 非破壊検査, 56(6), pp.273-302, (2007)
- 12) S. Biwa, S. Nakajima and N. Ohno : On the Acoustic Nonlinearity of Solid-solid Contact with Pressure-dependent Interface Stiffness, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Applied Mechanics, 71(4), pp.508-515, (2004)
- 13) J. Y. Kim and J. S. Lee : A Micromechanical Model for Nonlinear Acoustic Properties of Interfaces Between Solids, Journal of applied physics, 101(4), pp.043501-043501-9, (2007)