

令和元年6月25日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04235

研究課題名(和文) 超音波による密着界面型欠陥の高感度評価のための非線形周波数ミキシングの解明

研究課題名(英文) Nonlinear frequency mixing of ultrasonic waves for sensitive evaluation of closed defects

研究代表者

琵琶 志朗 (BIWA, Shiro)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：90273466

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)： 固体同士の密着界面における超音波の非線形周波数ミキシング現象を解明するための理論的ならびに実験的研究を行った。具体的には、非線形スプリング界面モデルに基づいて密着界面における周波数ミキシングや高調波発生を解析し、入射波の周波数や入射角、界面の線形・非線形パラメータの影響を明らかにするとともに、理論解析で見出された定性的特徴をアルミニウム合金ブロックの接触界面に対して実験的に検証した。また、材料非線形性による周波数ミキシングや密着欠陥における線形・非線形超音波挙動に関する検討も行った。これらの検討により、周波数ミキシング特性に着目した密着界面型欠陥の評価を行う上での基礎的な知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では密着界面における超音波の周波数ミキシングや高調波発生に関して非線形界面モデルに基づく理論解析および実験的検証が行われ、密着界面の線形・非線形パラメータがこれらの非線形超音波特性に与える影響が明らかになるなど、学術的に興味深い成果が得られた。本研究は周波数ミキシングを密着界面型欠陥の非破壊評価に適用するための基礎的検討と位置づけられ、本研究をさらに発展させることで各種の輸送機やプラントの構造健全性を確保するための非破壊欠陥評価法の充実につながることが期待できる。

研究成果の概要(英文)： The nonlinear frequency mixing phenomenon of ultrasonic waves at contacting interfaces of solid bodies has been studied theoretically and experimentally. Namely, the frequency mixing and the harmonic generation phenomena have been analyzed theoretically based on a nonlinear spring-type interface model to elucidate the influence of the frequencies and angles of the incident waves and the linear and nonlinear parameters of the interface. Some qualitative features obtained by the analysis have been confirmed by the experiments for the contacting interface between two aluminum alloy blocks. Furthermore, the frequency mixing due to the material nonlinearity as well as the linear/nonlinear behavior of ultrasonic waves at closed defects have been studied. This study has provided some basic findings related to the nondestructive evaluation of closed defects using the frequency mixing characteristics.

研究分野：固体力学

キーワード：機械材料・材料力学 超音波 非破壊評価 密着界面 周波数ミキシング 高調波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

各種の輸送機やプラントの構造健全性を確保するうえで、構造部材中の欠陥の検出、評価が重要な課題であり、超音波計測はそのための有効な手段である。超音波を用いた欠陥の非破壊評価では、閉口し密着した欠陥から明瞭なエコーが得られないという問題点がある。構造部材に生じた疲労き裂やはく離欠陥が圧縮応力下で閉口した状態はその代表例である。このような密着界面型欠陥に対して、比較的大振幅の超音波を入射した際に界面開閉口に伴う非線形効果に起因して観測される特徴的スペクトル成分に着目する非線形超音波法が高感度な欠陥評価法として国内外で注目されている。例えば、狭帯域の超音波(周波数 f) を入射した場合に発生する高調波(入射波周波数の整数倍 $2f, 3f, \dots$ の周波数成分)は、界面の密着度を反映して敏感に変化することが明らかにされ、密着界面型欠陥の評価への応用が研究されてきた。しかしながら、欠陥により散乱される超音波信号には、界面非線形性による高調波成分のほかに測定系に起因する高調波成分も含まれ、実際の計測においてその識別が困難であることが多い。

超音波の非線形効果としては、高調波発生のほかに周波数ミキシング現象が知られている。周波数ミキシングとは、異なる周波数 f_1, f_2 の超音波が交差するとき、入射波周波数の和 $f_1 + f_2$ 、差 $|f_1 - f_2|$ の周波数成分が発生する現象を指す。高調波発生は、周波数ミキシングで二つの入射波周波数 f_1 と f_2 が等しい特別な場合と考えることができる。周波数ミキシングを非破壊評価に応用する場合、入射波(周波数 f_1, f_2) の高調波(周波数 $2f_1, 2f_2, \dots$) とは別の周波数成分に着目することから、高調波計測に伴う上記の難点を排除した評価が可能となることが期待される。周波数ミキシング現象は音波物性の分野で古くから知られており、近年では疲労損傷による応力 - ひずみ非線形性(材料非線形性)の変化に着目した非破壊評価への応用が報告されている。しかしながら、本研究開始当初において、密着界面における周波数ミキシング現象は理論的にも実験的にも十分に解明されていなかった。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、密着界面における超音波の非線形周波数ミキシング現象を理論的、実験的に明らかにし、密着界面型欠陥の高感度な非破壊評価に向けて基礎的知見を得ることを本研究の目的とした。具体的には、非線形スプリング界面モデルに基づいて二つの異なる周波数の超音波が密着界面で交差する場合の周波数ミキシング現象を解析すること、および固体ブロックの接触界面に対して実験的検証を行うことを本研究の主要な検討課題とした。

前述した通り、高調波発生は周波数ミキシングの特別な場合と考えることができるため、密着欠陥における高調波発生に関する理解を深めることは本研究においても重要である。密着界面に垂直に入射した超音波に対する高調波発生は理論的にも実験的にも多く研究されているのに対して、斜め入射に対する高調波発生の研究報告は多くない。このため、本研究では周波数ミキシングを明らかにするための基礎的検討として、斜め入射条件での高調波発生の理論解析と実験的検証も課題の一つとした。

また、密着界面による周波数ミキシングを評価する場合、界面非線形性に加え材料非線形性の影響を把握しておくことが必要になるため、材料非線形性に起因する周波数ミキシングの測定方法に関する検討も行った。さらに、密着欠陥の非破壊評価に関する基礎的研究として、平板中の密着欠陥における超音波(ラム波)の透過挙動に関する検討も課題に加えた。

3. 研究の方法

本研究では、以下の方法により前節に示した課題について理論的、実験的に検討した。

(1) 密着界面における斜め入射超音波の高調波発生に関する理論解析と実験的検討

密着界面を非線形スプリング界面としてモデル化し、平面縦波調和波が同じ材質の弾性体間の平坦界面に任意の角度で入射した場合の二次高調波発生を解析した。本解析で仮定した非線形スプリング界面での応力(垂直応力 σ 、せん断応力 τ) と界面の相対変位(垂直方向 $h - h_0$ 、接線方向 s) の関係は次式のように表される。

$$\sigma = -p_0 + K_N(h - h_0) - K_{NN}(h - h_0)^2 - K_{TT}s^2, \quad \tau = K_Ts - K_{NT}(h - h_0)s.$$

ここに、 h_0 は静的圧力 p_0 に対応する接触面の間隙幅、 K_N, K_T は垂直および接線方向の界面剛性、 K_{NN}, K_{TT}, K_{NT} は界面の非線形性を表すパラメータである。界面の非線形性は十分に弱くと仮定し、摂動法の考え方に基づいて、非線形界面における超音波反射・透過の問題を、基本波成分の反射・透過に関する問題と、界面非線形性により発生した二次高調波の放射に関する問題に分解し、それぞれを周波数領域で解いた。これにより、二次高調波発生特性に及ぼす入射波の入射方向および界面の線形・非線形パラメータの影響を調べた。

また、実験的検討として、二個のアルミニウム合金ブロックの接触界面に対して超音波を垂直または斜め(45度)方向に入射した場合の反射波、透過波を計測した(図1)。二個のブロックに垂直および斜め方向に設けた孔に圧電探触子(送信側:公称中心周波数 1 MHz、受信側:公称中心周波数 2.25 MHz)をはめ込み、高出力超音波パルサー(RITEC RAM-5000)を用いて周波数 1 MHz の縦波パースト波を送信し、反射、透過波形に含まれる二次高調波(2 MHz)の振幅を評価した。これにより、二次高調波発生特性に及ぼす接触圧力の影響を調べるとともに、垂直入射と斜め入射の結果を比較した。

(2) 密着界面における超音波の周波数ミキシングに関する理論解析と実験的検討

前項で述べた解析法を拡張し、非線形スプリング界面としてモデル化した密着界面に二方向から異なる周波数の平面縦波調和波が入射した場合の反射波および透過波を、前項と同様の摂動法に基づいて解析した。これにより、周波数ミキシングに及ぼす二つの入射波の入射方向および周波数の組み合わせ、界面の線形・非線形パラメータの影響を調べた。

また、実験的検討として、二個のアルミニウム合金ブロックの接触界面に対して、理論解析の結果をもとに、法線方向から両側に45度ずれた方向から異なる周波数（例えば0.9 MHzと1.1 MHz）の縦波バースト波を同時に入射し、法線方向に伝搬する超音波を計測するための測定系を構築した。試験片および測定系は前項で述べたもの（図1）と同様である。また、二方向から同時に超音波を入射できるように高出力超音波パルサーの機能を本研究で拡充している。これにより、周波数ミキシングに及ぼす接触圧力や両入射波の振幅の影響を調べた。

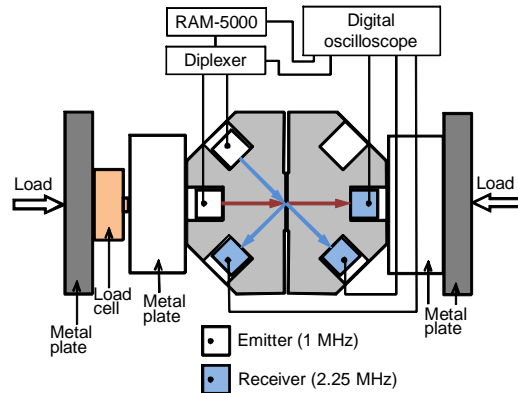


図1 界面非線形性による高調波発生測定

(3) 材料非線形性に起因する周波数ミキシングの実験的検討

図2に示す測定系により、4種類のアルミニウム合金ブロックに対して、二つの横波のミキシング実験を実施した。二つの縦波用圧電探触子（ともに公称中心周波数5 MHz）に、3.5 MHzおよび4.5 MHzの正弦波をガウス関数で振幅変調したバースト電圧（最大振幅180 Vpp）を印加し、励起された縦波をPMMAウェッジにより斜角入射させることで試験片中に横波を発生させた。これらの横波が交差したときに生じる和周波数成分（8 MHz）の縦波を、試験片上面に設置した縦波用圧電探触子（公称中心周波数10 MHz）により受信した。なお、伝搬距離の異なる二つの横波が理論的な共鳴条件を満たすような角度で交差するように、さらに和周波数の縦波が試験片の厚さ方向に伝搬するように、ウェッジと受信探触子の位置、ウェッジ角および二つの送信探触子を駆動するタイミングを設定した。本実験では、二つの送信探触子をともに駆動したときの受信波形から各々を個別に駆動したときの受信波形を差し引き、その結果得られた波形に7.8~8.2 MHzのデジタルバンドパスフィルタを施すことでミキシング波の抽出を行った。

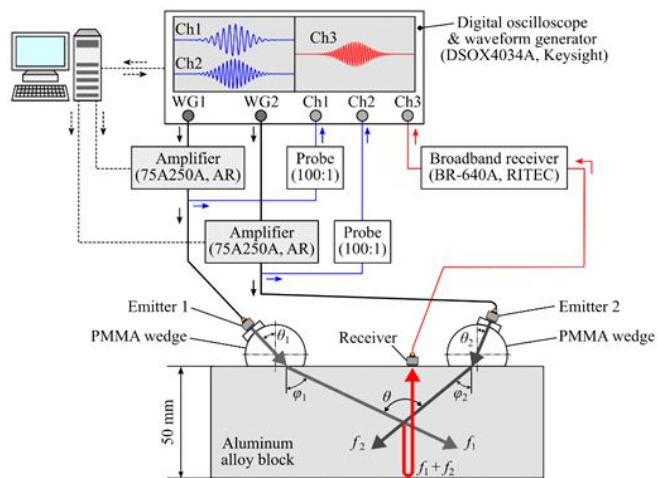


図2 材料非線形性による周波数ミキシングの測定

(4) 密着欠陥におけるラム波透過挙動の数値解析と実験的検討

厚さ方向に貫通した密着き裂を有する有限幅の弾性平板におけるラム波の三次元伝搬挙動をスペクトル要素法により解析した。密着き裂はスプリング界面としてモデル化し、その長さおよび密着度（界面剛性）が透過挙動に及ぼす影響を調べた。また、実験的検討として、スリットや疲労き裂を有するアルミニウム合金平板におけるラム波透過特性の測定を行った。送受信に用いるウェッジの角度を調整することにより、最低次のラム波対称モード（S0モード）および反対称モード（A0モード）の透過率を実験的に評価した。これにより、スリット（開口欠陥）および疲労き裂（密着界面型欠陥）におけるラム波透過挙動の違いや、S0モードとA0モードの透過挙動の特徴、平板に加えた引張負荷の影響について調べた。

4. 研究成果

本研究の成果のうち主なものについて、前節に示した検討課題ごとに以下に述べる。

(1) 密着界面における斜め入射超音波の高調波発生に関する理論解析と実験的検討

入射角および界面の線形・非線形パラメータを変化させて二次高調波発生特性を解析した結果、 K_{TT} と K_{NT} がともに0の場合、パラメータ K_{NN} で表される非線形性による二次高調波発生は垂直入射で最も顕著であり、入射角とともに単調に減少することがわかった。パラメータ K_{TT}

と K_{NT} は垂直入射では高調波発生に寄与しないが、斜め入射においては比較的大きな影響を及ぼし得ることがわかった。また、 $K_{TT} = K_{NT} = 0$ の場合を基準にすると、正（負）のパラメータ K_{TT} は反射波と透過波に含まれる二次高調波振幅をともに増加（減少）させ、一方、正（負）のパラメータ K_{NT} は反射波の二次高調波振幅を減少（増加）、透過波の二次高調波振幅を増加（減少）させることがわかった。

図3に、実験で得られた垂直入射および斜め（45度）入射に対する透過波に含まれる二次高調波振幅と接触圧力の関係を示す。本実験ではレーザドップラー振動計を用いた受信側圧電探触子の感度補正により、二次高調波振幅を変位量として定量的に評価している。この結果では、垂直入射の方が斜め入射よりも二次高調波振幅は大きくなっているが、両者はほぼ同様の接触圧力依存性を示している。本実験で得られた垂直入射、斜め入射に対する二次高調波振幅の大小関係は、非線形パラメータとして K_{NN} のみを考慮した場合の理論解析で定性的に再現される。一方、別の測定で、斜め入射に対する反射波に含まれる二次高調波振幅も合わせて検討したところ、パラメータ K_{NN} のほか K_{TT} と K_{NT} の影響を示唆する結果も得られた。

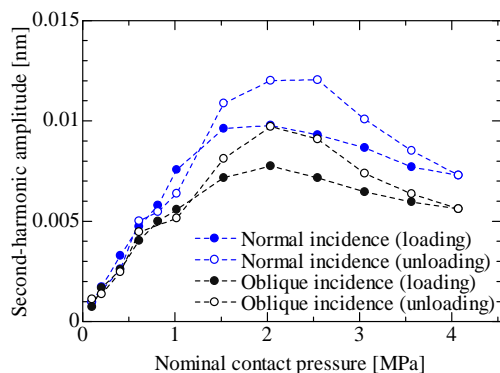


図3 二次高調波振幅の接触圧力依存性

(2) 密着界面における超音波の周波数ミキシングに関する理論解析と実験的検討

本理論解析により、二つの入射波と密着界面の非線形相互作用で発生する和周波数成分と差周波数成分の縦波・横波の伝搬方向を理論的に導くことができた。また、二つの入射波の周波数と入射角、および界面の線形・非線形パラメータを変化させて周波数ミキシング特性を解析した結果、界面の法線方向に対して反対方向に同じ入射角 θ_{L0} で異なる周波数の縦波平面波が入射した場合、界面の法線に近い方向に和周波数の超音波が放射されるという知見が得られた。この場合の和周波数を持つ縦波の無次元化振幅と入射角の関係の計算例を図4に示す。図中の ω_{ave} は二つの角周波数の平均値、 ρ と c_L は固体の密度と縦波速度である。図4は $K_{TT} = K_{NT} = 0$ の場合の計算結果を示しているが、解析の結果、この入射条件ではパラメータ K_{NT} の影響は極めて小さいこともわかった。

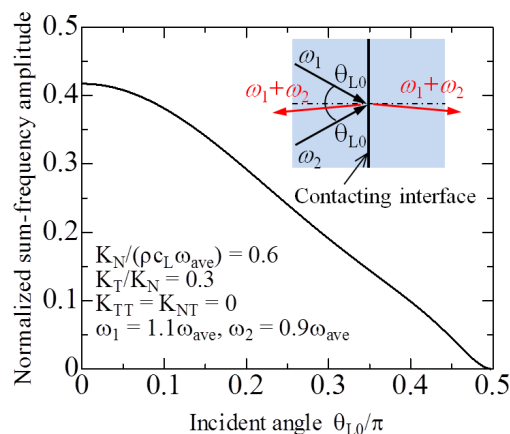


図4 和周波数縦波振幅の入射角依存性

この解析結果を踏まえて、上記の入射角 θ_{L0} を45度とし、二つの入射波の周波数を1.1 MHz、0.9 MHzとしてアルミニウム合金ブロックの接触界面に入射し、界面の法線方向（透過側）で計測した超音波波形のフーリエ変換結果（振幅スペクトル）を図5に示す。ここでは0.9 MHzの入射波を送信する探触子の励振電圧振幅 V_2 を固定し、1.1 MHzの入射波を送信する探触子の励振電圧振幅 V_1 を段階的に変化させている。界面を持たない単一のアルミニウム合金ブロックに対して同じ実験を行ったところ、測定波形の振幅スペクトルには周波数2 MHzのピークは特に見られなかった。この結果から、接触界面で和周波数（2 MHz）の成分が発生していることが確認された。また、その振幅は1.1 MHzの入射波の励振電圧振幅とほぼ比例関係にあることもわかった。さらに、ブロックに加える圧縮荷重を変化させたところ、和周波数成分のスペクトル振幅も変化することが確認され、周波数ミキシング特性も高調波と同様に界面の密着度を反映した特徴量であることが明らかとなった。

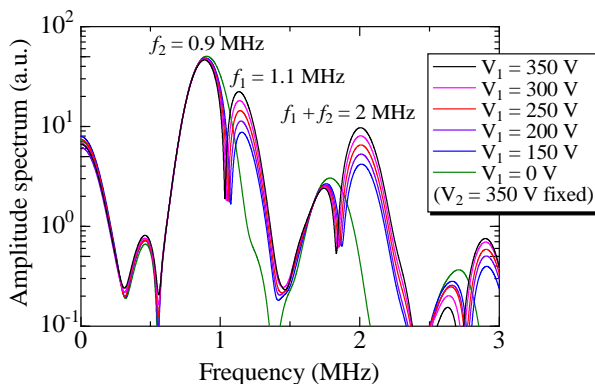


図5 界面非線形性による周波数ミキシングの測定結果

(3) 材料非線形性に起因する周波数ミキシングの実験的検討

図6に、4種類のアルミニウム合金ブロックにおける横波（3.5 MHzと4.5 MHz）のミキシングにより発生した和周波数成分（8 MHz）の測定信号を示す。図6の58 μ s付近において、ミキシングにより発生した後、試験片底面で反射し受信探触子に到達した信号が確認でき、74 μ s付近には厚さ方向にさらに一往復した信号も確認できる。これらの信号の到達時間差と試験片厚さ（50 mm）から算出した音速が別途測定した試験片の縦波音速値と整合していることから、横波のミキシングによる和周波数縦波の発生が確認できた。測定された縦波の振幅は試験片によって異なり、特にA2017-T351は本実験で用いた4種類の試験片の中で最も大きな振幅となった。以上の結果から、本実験で材料非線形性による周波数ミキシングを評価できていると考えられる。材料非線形性による周波数ミキシングと界面非線形性による周波数ミキシングは、それぞれ異なる条件に従って発生すると考えられるため、本研究で対象とした界面非線形性による周波数ミキシングを評価する場合には、材料非線形性による周波数ミキシングを抑制するように測定条件を設定することが望ましいと考えられる。

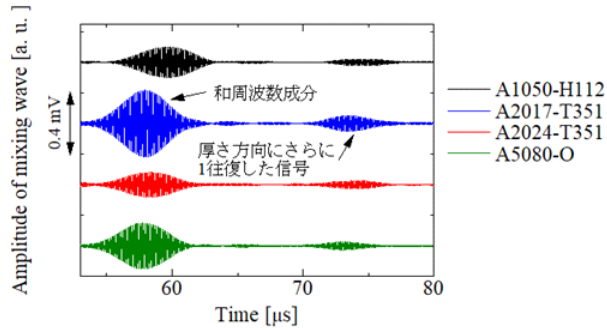


図6 材料非線形性による周波数ミキシングの測定結果

(4) 密着欠陥におけるラム波透過挙動の数値解析と実験的検討

スプリング界面としてモデル化した閉口き裂におけるラム波透過挙動をスペクトル要素法により解析した結果、対称モードラム波（S0モード）の透過率は界面剛性や入射波周波数に対して単調に変化するが、反対称モードラム波（A0モード）の透過率は界面剛性や入射波周波数への依存性が単調でなく、ある点で極小値を取ることが明らかとなった。疲労き裂を有するアルミニウム合金平板に対して行った実験の結果では、S0モードの透過率は引張負荷とともに単調に減少したが、A0モードの透過率は周波数によっては非単調な引張負荷依存性が見られた。引張負荷によりき裂面の密着度（界面剛性）が低下すると考えれば、この実験結果は数値解析の結果と定性的に対応している。本検討で示された伝搬モードによるラム波透過率の違いは、ラム波を用いて平板構造の健全性評価を行ううえで重要な知見と考えられる。この成果については雑誌論文で詳しく説明している。

(5) その他の成果、国内外での位置づけ、今後の展望

以上に述べた成果のほか、密着界面におけるラム波の高調波発生に関する理論解析や、弾性平板におけるラム波の周波数ミキシングに関する理論解析を行い、高調波発生や周波数ミキシングを非破壊評価に応用するための基礎的知見を得た。これらの内容については雑誌論文で詳細に説明している。また、本研究で斜め入射超音波に対する高調波発生や周波数ミキシングを解析するための基礎として、非線形スプリング界面における高調波発生特性に関する解析方法や実験結果を体系的にまとめた内容が、非線形超音波法に関する専門書の一章として刊行された（図書）。

本研究により、密着界面における周波数ミキシング特性および高調波発生特性について、非線形スプリング界面モデルに基づく解析によって入射角、周波数および界面の線形・非線形パラメータの影響を明らかにすることができ、また理論解析で得られた定性的特徴の幾つかに関して実験的に検証することができた。これらの成果は国内外で行われている研究の中でも独自性のあるものであり、アメリカ音響学会（カナダ・ピクトリア、2018年11月）で招待講演（学会発表）を行うなど国際的にも関心を集めている。さらに、材料非線形性による周波数ミキシングや、密着欠陥におけるラム波の線形・非線形挙動に関しても基礎的理解を深めることができた。これらの成果を基礎的知見として、密着界面型欠陥の高感度な非破壊評価の新しい原理の構築を行うことが今後の課題である。

< 引用文献 >

- A. J. Croxford, P. D. Wilcox, B. W. Drinkwater, P. B. Nagy, The use of non-collinear mixing for nonlinear ultrasonic detection of plasticity and fatigue, J. Acoust. Soc. Am., Vol.126 (2009), EL117-EL122.
- S. Biwa, S. Nakajima, N. Ohno, On the acoustic nonlinearity of solid-solid contact with pressure-dependent interface stiffness, Trans. ASME J. Appl. Mech., Vol.71 (2004), 508-515.
- S. Biwa, S. Hiraiwa, E. Matsumoto, Pressure-dependent stiffnesses and nonlinear ultrasonic response of contacting surfaces, J. Solid Mech. Mater. Eng., Vol. 3 (2009), 10-21.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

M. Matsushita, N. Mori, S. Biwa, Transmission of Lamb waves across a partially closed crack: Numerical analysis and experiment, *Ultrasonics*, Vol. 92 (2019), pp. 57-67. (査読有)

DOI: 10.1016/j.ultras.2018.09.007

N. Mori, S. Biwa, T. Kusaka, Numerical study of the second harmonic generation of Lamb waves at an imperfect joint of plates, *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Vol. 34 (2018), 030002. (査読有)

DOI: 10.1121/2.0000868

Y. Ishii, S. Biwa, T. Adachi, Non-collinear interaction of guided elastic waves in an isotropic plate, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 419 (2018), pp. 390-404. (査読有)

DOI: 10.1016/j.jsv.2018.01.031

〔学会発表〕(計8件)

高橋拓也, 琵琶志朗, 固体接触面における斜角入射超音波の高調波発生特性に関する実験的検討, 日本機械学会 M&M2018 材料力学カンファレンス, 福井大学文京キャンパス(福井市), 2018年12月22日.

S. Biwa, Harmonic generation and frequency mixing at nonlinear imperfect interfaces, 176th Meeting of the Acoustical Society of America, Victoria Conference Centre (Victoria, B. C., Canada), November 6, 2018.

松下睦生, 森 直樹, 琵琶志朗, 疲労き裂を有する平板におけるラム波伝搬挙動の実験的検討と理論的考察, 日本非破壊検査協会 安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム, 愛媛大学城北キャンパス(松山市), 2018年3月15日.

石井陽介, 琵琶志朗, 平岡紘一, 足立忠晴, 等方性弾性平板における非線形三波相互作用の理論解析と数値シミュレーション, 日本非破壊検査協会 第25回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京都立産業技術研究センター青海本部(東京都江東区), 2018年1月26日.

石井陽介, 琵琶志朗, 足立忠晴, 板波の非線形三波相互作用に関する理論的検討, 第54回日本航空宇宙学会 関西・中部支部合同秋期大会, 京都大学桂キャンパス(京都市), 2017年11月11日.

琵琶志朗, 非線形スプリング界面における斜角入射縦波の二次高調波発生特性, 第64回理論応用力学講演会, 機械振興会館(東京都港区), 2017年8月23日.

松下睦生, 森 直樹, 琵琶志朗, 三次元スペクトル要素法を用いたき裂を有する平板のラム波伝搬解析, 日本非破壊検査協会 第24回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京都立産業技術研究センター青梅本部(東京都江東区), 2017年1月27日.

M. Matsushita, N. Mori, S. Biwa, Three-dimensional analysis of Lamb wave propagation in a plate with a crack by the spectral element method, *Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2016*, Toyama International Conference Center (Toyama), September 21, 2016.

〔図書〕(計1件)

S. Biwa, *Nonlinear Ultrasonic and Vibro-Acoustical Techniques for Nondestructive Evaluation*, Chapter 7: Second-harmonic generation at contacting interfaces, pp. 263-299, Springer, Cham, 2019.

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 石井 陽介

ローマ字氏名: ISHII, Yosuke

所属研究機関名: 豊橋技術科学大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 助教

研究者番号(8桁): 70781706

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。