

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02026

研究課題名(和文) 密着欠陥によるガイド波非線形散乱挙動の解明と新しい非破壊評価原理への展開

研究課題名(英文) Study of nonlinear guided wave scattering by closed defects and its application to nondestructive evaluation

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) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：密着欠陥におけるガイド波の非線形散乱挙動を明らかにし、新しい非破壊評価原理の確立に向けた基礎的知見を得るための理論的、実験的研究を行った。具体的には、閉口き裂によるラム波高調波発生の数値解析を行い、き裂部の共振が高調波発生に大きく影響することを明らかにした。また、平板の突合せ接触部および疲労き裂におけるラム波の高調波発生および周波数ミキシング(和・差周波数成分の発生)の測定を行い、ラム波の分散性を考慮して欠陥で生じた非線形信号を識別できる可能性があること、ラム波交差位置を走査しながらミキシング成分を測定することで欠陥の存在や位置を同定できる可能性があることなどを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

閉口き裂におけるラム波高調波発生に及ぼすき裂部共振の影響を詳細に明らかにしたこと、平板の突合せ接触部と疲労き裂に対してラム波高調波発生や周波数ミキシングを実験的に調べたことなど、まだ未解明の部分が多い密着欠陥によるガイド波非線形散乱挙動に関して理論的、実験的に興味深い結果を得たことに学術的意義がある。本研究の成果は、健全性の確保が社会的に重要な航空機や各種プラントで用いられる平板やシェルなどの薄肉部材に生じる欠陥を非破壊的かつ高感度に検出、評価する方法を充実させるための基礎的知見と位置付けられる。

研究成果の概要(英文)：The nonlinear scattering of ultrasonic guided waves by closed defects has been studied theoretically and experimentally with the aim to obtain basic insights into a novel principle of the nondestructive evaluation. Specifically, the harmonic generation of Lamb waves at a closed crack has been analyzed numerically, and it has been shown that the local resonance of the crack has significant influence on the harmonic generation behavior. Furthermore, the harmonic generation and the frequency mixing (generation of the sum and difference frequency components) of Lamb waves at a contacting interface and a fatigue crack of plates have been measured experimentally. It has been shown that the dispersive nature of Lamb waves is advantageous to discriminate the defect-induced nonlinear signals, and that it is possible to identify the presence and location of defects based on the mixed frequency signals measured by scanning the crossing zone of Lamb waves.

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 密着欠陥 ガイド波 高調波 周波数ミキシング

1. 研究開始当初の背景

超音波による欠陥の非破壊評価では、閉口し密着した欠陥(以下、密着欠陥)から明瞭なエコーが得られず、検出・評価が困難であることが長年の課題である。この課題に対する一つのアプローチとして、大振幅超音波を入射した際に密着欠陥の開閉口に伴う非線形効果によって発生する特徴的な周波数成分(入射波周波数の整数倍の周波数成分(高調波)や、異なる二つの入射波周波数の和・差周波数成分など)を観測する非線形超音波法が高感度な欠陥評価法として1990年代頃から注目を集めてきた。

航空機や各種プラントをはじめとして多くの構造物で平板やシェルなどの薄肉部材が多用されており、疲労き裂や接着不良などの密着欠陥の検出・評価に非線形超音波法の適用が期待されている。薄肉構造において、超音波はガイド波(誘導波)として長距離を伝搬し得ることから、広範囲を効率的に検査できる利点があり、ガイド波の長距離伝搬性・効率性と非線形計測の高感度性を合わせ持つ欠陥評価法の実現が期待される。しかしながら、ガイド波が有する多モード性(振動分布や伝搬速度の異なる複数の伝搬モードが存在)と分散性(伝搬速度が周波数に依存)、さらに欠陥近傍での局在モードの発生や共振の影響により、密着欠陥におけるガイド波の非線形散乱挙動は極めて複雑になることが予想される。

本課題の代表者は固体同士の接触界面に超音波が入射した際の高調波発生^[1]や、二方向から超音波が入射した際の周波数ミキシング(和・差周波数成分の発生)に関して非線形スプリング界面モデルによる理論解析や実験的検討を行ってきた。また、平板を伝搬するガイド波(ラム波)に対して累積的高調波発生の条件を明らかにするなど^[2]、ガイド波の非線形挙動に関して基礎的検討を行ってきた。しかしながら、本研究開始当初の段階において密着欠陥によるガイド波の非線形散乱挙動の解明に向けての研究はまだ十分ではなかった。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、密着欠陥におけるガイド波の非線形散乱挙動を理論的、実験的に明らかにし、薄肉構造における欠陥の有無や性状を非破壊かつ高感度に評価できる新しい原理の確立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、ガイド波の代表例であるラム波を対象として、非線形スプリング界面としてモデル化した閉口き裂によるラム波の非線形散乱挙動を摂動法により数値的に解析すること、ならびに平板の突合せ接触部や疲労き裂におけるラム波の高調波発生や周波数ミキシングを実験的に調べることを主な検討課題とした。

3. 研究の方法

(1) 閉口き裂によるラム波高調波発生の数値解析

薄肉構造に発生した疲労き裂や、接着構造の界面に生じた剥離欠陥が外力や温度変化のもとで閉口して密着欠陥となっている場合の理想化したモデルとして、平板内部に存在する平面状の閉口き裂にガイド波(ラム波)が入射した場合の非線形散乱挙動を以下の方法で解析した。

図1に示すように、無限に広がった弾性平板内部に存在する閉口き裂に、無限遠から単一周波数の最低次反対称モード(A0モード)のラム波が入射する場合の散乱挙動を解析した。解析は二次元問題として扱い、き裂は平板面に平行に存在すると仮定した。また、平板は均質・等方な線形弾性体、き裂面は非線形性を有するスプリング界面と仮定した。このとき、支配方程式はNavierの式で、境界条件として平板の上下面は自由表面であり、き裂面では垂直応力 σ_{22} とせん断応力 σ_{12} が非線形スプリング界面モデル^[1]($\sigma_{22} = K_N(y_2 - \beta y_2^2)$, $\sigma_{12} = K_T y_1$)にしたがう。ここで y_1 と y_2 はき裂面の接線方向および垂直方向の相対変位であり、 K_N , K_T は垂直および接線界面剛性、 β は界面非線形性を表すパラメータである。なお、解析結果の解釈を容易にするため、単一のパラメータ β により界面非線形性を表している。

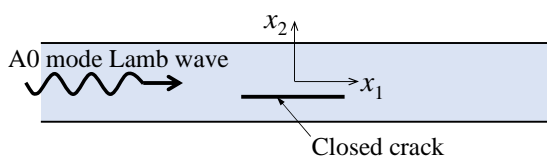


図1 閉口き裂によるラム波の散乱

入射するA0モードラム波に対する散乱挙動を解析するにあたり、き裂面の非線形性は弱いと仮定して摂動法^[1]を用いた。すなわち、上に設定した問題の解を、き裂面の非線形項 βy_2^2 を無視した線形散乱問題の解と、そこからの摂動(ここでは最低次の摂動のみを解析した)の和として近似した。このとき線形問題の解が入射波周波数の反射波、透過波を与え、摂動が非線形応答(周波数0の静的変位と二次高調波成分の散乱波)を与える。

線形問題の解を周波数領域で求め、 $-K_N \beta \bar{y}_2^2$ (\bar{y}_2 は線形問題の解として得られるき裂面の垂直方向相対変位)の二次高調波成分をき裂面上で分布垂直応力として与えた場合の解をふたたび周波数領域で求めた。周波数領域における解析には汎用有限要素解析ソフトウェアCOMSOLを用いた。以上の解析により、異なる周波数のA0モードラム波に対して入射波周波数の反射波・透過波およびき裂から放射される二次高調波の振幅を求め、反射・透過特性や高調波発生特性に

及ぼすき裂寸法、き裂面界面剛性やき裂位置の影響を調べた。なお、解析する入射波周波数は A1 モード (A0 モードの次の次数の反対称モード) の遮断周波数の 0.4 倍までの範囲とした。この場合、線形な反射・透過波、き裂で発生する二次高調波とともにき裂から遠方に伝搬するラム波は A0 モードと S0 モード (最低次対称モード) のみとなる。

上記の解析は単一周波数を有する入射波に対して行ったが、実際の計測では入射波が有限な周波数帯域を有することを考慮して、補助的解析としてガウス関数形の振幅スペクトルを有する A0 モードラム波が閉口き裂に入射する場合の散乱挙動の解析を有限要素法により時間領域で行った。このとき、閉口き裂は薄い非線形弾性層としてモデル化した。

(2) 突合せ接触部および疲労き裂におけるラム波高調波発生の実験的検討

平板を伝わるラム波の突合せ接触部および疲労き裂における高調波発生挙動に関して以下の実験的検討を行った。突合せ接触させた二枚のアルミニウム合金平板 (寸法 150 mm × 150 mm × 2.5 mm) および繰り返し負荷を加えて導入した疲労き裂を含むアルミニウム合金平板 (80 mm × 300 mm × 2.5 mm) を実験に用いた。突合せ接触部は密着欠陥を実験的に模擬するもので、接触荷重を変えながら高調波発生特性を調べることができる。

図 2 に示すように、高出力超音波パルサーを用いて周波数 0.5 MHz、6 サイクルのバースト波信号で圧電探触子 (公称中心周波数 0.5 MHz) を励振し、アクリル樹脂製ウェッジを介して平板に S0 モードラム波を入射した。送信側ウェッジの角度は 0.5 MHz の S0 モードラム波 (位相速度 5.4 km/s) を支配的に励起するため 30 度に設定した。突合せ接触部またはき裂を透過したラム波をウェッジと

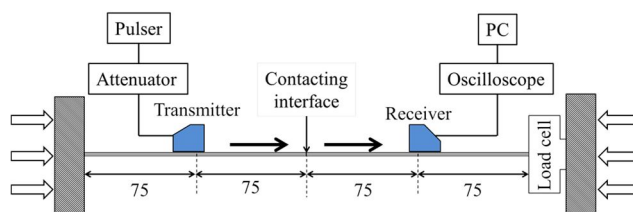


図 2 ラム波高調波測定の様式図

圧電探触子 (公称中心周波数 1 MHz) で受信し、デジタルオシロスコープで記録した。受信側ウェッジの角度は 1 MHz の S0 モードラム波 (位相速度 3.9 km/s) に合わせて 43 度とした。突合せ接触させた二枚の平板にはガイドレールで支えながら圧縮荷重を加えた状態で測定を行った。

測定した透過波形に対して短時間フーリエ変換を用いた時間 - 周波数解析を行い、透過波形に含まれる二次高調波成分を調べた。なお、接触部やき裂のない同じ厚さのアルミニウム合金平板に上記の方法で 0.5 MHz の S0 モードラム波を伝搬させ、送信側ウェッジからの距離が接触部 (き裂) と同じ位置における伝搬波形をレーザドップラー振動計で測定し、正弦波と仮定した場合の変位振幅に換算して入射波振幅とした。これにより、送信側探触子に加える励起電圧振幅と入射波振幅との対応を求めておき、接触界面を透過したラム波に含まれる高調波振幅の入射波振幅依存性を評価した。

(3) 突合せ接触部および疲労き裂におけるラム波周波数ミキシングの実験的検討

上記と同じアルミニウム合金平板の突合せ接触部および疲労き裂に対して、対向する二方向からラム波を入射した場合の周波数ミキシングの測定も行った。実験方法は以下の通りである。

高出力超音波パルサーから周波数 0.45 MHz (3 サイクル) と 0.6 MHz (4 サイクル) のトーンバースト信号を圧電探触子 (公称中心周波数 0.5 MHz) に送信し、ウェッジを介して S0 モードのラム波を接触部 (き裂) の両側から入射した (図 3)。ウェッジ角は 0.45 MHz に対しては 30.4 度、0.6 MHz に対しては 31.5 度と設定した。両ウェッジはともに接触部 (き裂) から 75 mm 離れた位置に設置し、レーザドップラー振動計を用いて、接触部から 30 mm の位置でラム波を計測した。パルサーから送信する信号の

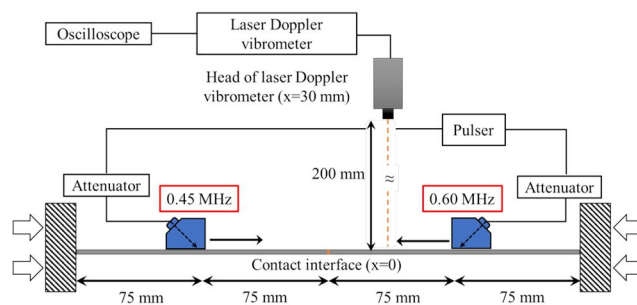


図 3 ラム波周波数ミキシング測定の様式図

一方に時間遅れを与えることにより、入射した二つのラム波が交差する位置を平板上で一次的に走査した。各交差位置に対して、二つのラム波をともに入射した場合の測定波形と、片方ずつ入射した場合の測定波形の差の波形に対して時間 - 周波数解析を行うことにより、交差するラム波の非線形効果により発生する周波数成分を評価した。

4. 研究成果

(1) 閉口き裂によるラム波高調波発生の数値解析

閉口き裂 (非線形スプリング界面としてモデル化) における A0 モードラム波の非線形散乱挙動を損動法により解析した結果、以下の結果が得られた。

A0 モードラム波がき裂に入射した場合、線形な応答としてき裂の前方には A0 モード、S0 モードのラム波が透過波として伝搬し、き裂の後方には A0 モード、S0 モードの反射波が伝搬する。各ラム波モードの振幅を異なる入射波周波数に対して計算したところ、特定の周波数で A0 モードの反射波振幅が鋭いピークを示し、A0 モードの透過波振幅が大きく低下することが確認された。一方、S0 モードの反射波振幅、透過波振幅は、上述の周波数でわずかに増加する以外はほとんどの周波数で無視できる大きさであった。き裂部近傍に着目した固有振動解析の結果、A0 モードの反射波振幅、透過波振幅が鋭く変化する上記の周波数はき裂部近傍の共振周波数に対応しており、これらの共振周波数を有するラム波が入射した際、き裂面が特に大きく開閉口することが明らかとなった。

閉口き裂の界面非線形性の効果により、き裂からは入射波周波数の二倍の周波数を持つ A0 モード、S0 モードのラム波がき裂の両側に放射される。解析の結果、これらのラム波高調波の振幅も幾つかの周波数でピークを示すことがわかった。詳しい検討の結果、ラム波高調波振幅がピークを示す入射波周波数は、き裂部の共振周波数あるいは共振周波数の二分の一の周波数に対応していることが明らかとなった。これは、入射波周波数がき裂部の共振周波数に一致する場合、き裂面は大きく開閉口して非線形効果を増大させ、一方、入射波周波数が共振周波数の二分の一に一致する場合、非線形性により発生した高調波がき裂部の共振効果によって増幅されることを示している。この特徴はき裂寸法、き裂面界面剛性、き裂位置を変えて解析を行った場合にも共通して見られた。

上記の特徴は、有限な周波数帯域を有するラム波に対する時間領域解析でも確認することができた。なお、この解析では入射波の周波数帯域が複数のき裂部共振周波数を含むことにより、異なる周波数のミキシングにより発生したと考えられるラム波モードの発生も確認することができた。以上の通り、本解析の結果、き裂部の共振効果によりラム波の高調波発生特性が顕著な影響を受けることが明らかとなった。なお、本結果については J. Acoust. Soc. Am. 誌に発表した論文（主な発表論文等の欄に記載）において詳しく述べている。

(2) 突合せ接触部および疲労き裂におけるラム波高調波発生の実験的検討

アルミニウム合金平板の突合せ接触部および疲労き裂に周波数 0.5 MHz の S0 モードラム波を入射した場合の透過波形を時間 - 周波数解析により調べた結果、励起した周波数 0.5 MHz 付近の成分が支配的である一方で、微弱ではあるが 1 MHz 付近にも二次高調波と思われる一定の信号強度が確認された。突合せ接触部の場合の時間 - 周波数解析結果を図 4 に示す（破線で囲んだ部分が二次高調波成分に対応する）。

送信側ウェッジ内を縦波が伝搬する時間、0.5 MHz の S0 モードラム波（群速度 5.0 km/s）がウェッジ直下から接触部まで伝搬する時間、接触部で発生した 1 MHz の S0 モードラム波（群速度 1.8 km/s）が受信側ウェッジ直下まで伝搬する時間、および受信側ウェッジ内を縦波が伝搬する時間を理論的に見積もると、接触部で発生したラム波高調波が観測される時刻は理論上約 79 μ s となり、実験結果で高調波成分の信号強度が増加し始める時刻と良く対応することが確認された。二次高調波成分の振幅と入射波振幅の関係を調べた結果、両者の関係が二次式で良く近似できることも確認された。また、両ウェッジ間の距離を固定したまま、ウェッジと接触部との相対位置を変えて同じ実験を行ったところ、0.5 MHz 成分の観測時刻はほとんど変わらなかったのに対して、1 MHz 成分の観測時刻には明らかな変化が見られた。この変化は、上記の理論計算で各ウェッジと接触部の距離を変えた場合の高調波観測時刻と対応しており、0.5 MHz と 1 MHz における S0 モードの群速度の違いにより説明できることが確認された。

上記の傾向は、疲労き裂を透過したラム波の時間 - 周波数解析を行った結果でも同様に確認された。以上の結果から、実験で観測された高調波は接触部および疲労き裂で発生したものと考えることができる。高調波計測では通常、測定系に起因して入射波に含まれる高調波成分が測定波形にも含まれ、欠陥の非線形性により発生した高調波成分と識別することが困難である。本実験結果は、ラム波の分散性のため、観測時刻の違いから入射波に含まれる高調波と欠陥で発生した高調波を識別できる可能性があることを示している。

上記の実験では送受信ともに圧電探触子とウェッジを用いたが、送信に圧電探触子とウェッジ、受信にレーザドップラー振動計を用いた実験も疲労き裂を含む平板に対して行った。その結果、測定波形の時間 - 周波数解析結果において、き裂で二次高調波が発生する場合に理論的に予測される観測時刻付近で二次高調波成分が確認された。ただし、透過波測定にレーザドップラー振動計を用いる場合、特定のラム波モードを優先的に受信することはできず全ての伝搬モードの振動が計測されるため、き裂で発生した高調波を完全に識別するにはさらに検討が必要なか

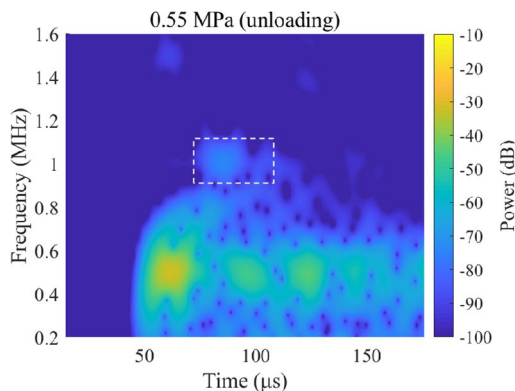


図 4 測定波形の時間 - 周波数解析結果
（平板突合せ接触部）

とも明らかとなった。

(3) 突合せ接触部および疲労き裂におけるラム波周波数ミキシングの実験的検討

アルミニウム合金平板の突合せ接触部および疲労き裂に周波数 0.45 MHz と 0.6 MHz の S0 モードラム波を両方向から入射した場合の散乱波形を時間 - 周波数解析により調べた結果、以下のことが明らかとなった。

両方向からのラム波が交差する位置を突合せ接触部に一致させた場合、および突合せ接触部から 30 mm 離れた場合の測定波形の時間 - 周波数解析結果を図 5 に示す。この結果から、前者の結果において入射波の和周波数

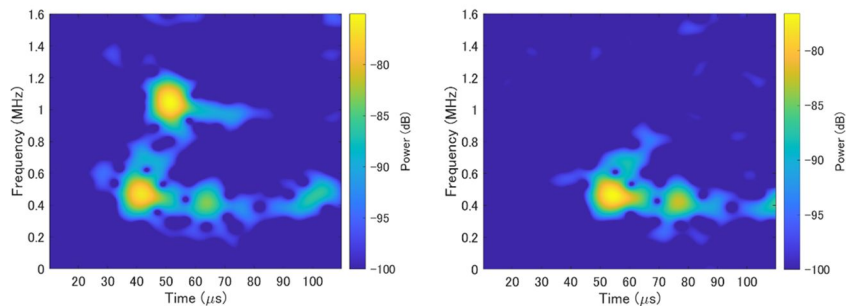


図 5 ラム波交差位置が平板突合せ接触部に一致する場合（左）と一致しない場合（右）の測定波形の時間 - 周波数解析結果

成分である 1.05 MHz に対応する成分を明瞭に確認することができる。入射した S0 モードラム波および和周波数の S0 モードラム波の群速度にもとづいて理論的に計算した和周波数成分の観測時刻は実験結果と良く対応しており、観測された和周波数成分は接触部で発生したものと考えることができる。さらに、交差位置を接触部の前方 40 mm から後方 40 mm までの範囲で走査して和周波数成分の信号強度を記録したところ、交差位置が接触部に一致するときに和周波数成分の強度がピークを持つことが明らかとなった。

疲労き裂に対して行った測定でも上記と同様の傾向が確認された。この結果から、ラム波の交差位置を走査しながらミキシング成分（和周波数成分）を測定することにより、密着欠陥の存在や位置を同定できることが示唆された。

(4) 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、平板の突合せ接触部に S0 モードラム波が入射した場合の高調波発生特性に関する解析も行った。また、密着欠陥におけるガイド波非線形散乱挙動の理解を深めるうえでの基礎となる研究として、固体同士の接触界面における超音波（縦波）の高調波発生や周波数ミキシングに関する理論解析とその実験的検証に関する研究も進め、その成果について国際会議で招待講演を行った。

本研究で行った数値解析により、密着欠陥によりラム波が散乱される場合の高調波発生特性は欠陥の共振に依存して非常に複雑になり得ることが示された。これは近年注目を集めている局部欠陥共振（local defect resonance）^[3]による高感度非破壊評価に関する基礎的知見としても価値がある。また、平板の突合せ接触部および疲労き裂にラム波が入射した場合の高調波発生および周波数ミキシングに関して実験的検討を行い、ラム波の分散性を利用して測定系に起因する高調波と欠陥で生じる高調波を識別できる可能性があること、また二方向から入射するラム波の交差位置を走査しながら散乱波に含まれるミキシング成分を調べることで欠陥の存在や位置を同定できる可能性があることなどが示された。突合せ接触部と疲労き裂を対比させてラム波の非線形挙動を調べた結果は国内外の研究でも報告例がないため、本研究で得られた成果は今後論文としてまとめて発表する予定である。

周波数ミキシングでは入射波周波数の高調波とは異なる周波数成分に着目するため、測定系に起因する高調波の影響を受けずに高感度な非破壊評価を行ううえで有利である。今後の展望としては、より一般的な入射波伝搬方向の組み合わせに対してラム波周波数ミキシングを理論的、実験的に明らかにすること、また密着欠陥を非線形スプリング界面としてモデル化し、ラム波周波数ミキシングについてより詳細な解析を行うことが興味深い課題として残っている。

< 引用文献 >

- [1] S. Biwa, "Second-harmonic generation at contacting interfaces," In: Nonlinear Ultrasonic and Vibro-Acoustical Techniques for Nondestructive Evaluation, Chapter 7, pp. 263-299, Springer, Cham, 2019.
- [2] N. Matsuda and S. Biwa, "Phase and group velocity matching for cumulative harmonic generation in Lamb waves," J. Appl. Phys., Vol. 109, 094903 (2011).
- [3] I. Solodov, J. Bai, S. Bekgulyan and G. Busse, "A local defect resonance to enhance acoustic wave-defect interaction in ultrasonic nondestructive evaluation," Appl. Phys. Lett., Vol. 99, 211911 (2011).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Tianming Ye, Shiro Biwa, Naoki Mori | 4. 巻 148 |
| 2. 論文標題 Second-harmonic generation of the lowest-order antisymmetric Lamb wave at a closed parallel crack | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the Acoustical Society of America | 6. 最初と最後の頁 2073-2085 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1121/10.0002171 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 Naoki Mori, Shiro Biwa, Takayuki Kusaka | 4. 巻 86 |
| 2. 論文標題 Harmonic generation at a nonlinear imperfect joint of plates by the S0 Lamb wave incidence | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Trans. ASME Journal of Applied Mechanics | 6. 最初と最後の頁 121003 (9 pp) |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4044457 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 3件/うち国際学会 3件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shiro Biwa, Takuya Takahashi |
| 2. 発表標題 Frequency mixing of elastic waves at a nonlinear spring-type interface |
| 3. 学会等名 27th International Congress on Sound and Vibration (on-line, July 2021) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 琵琶志朗 |
| 2. 発表標題 接触界面におけるラム波の非線形周波数ミキシング |
| 3. 学会等名 日本非破壊検査協会2021年度第1回先進超音波計測に関する萌芽技術研究会（オンライン開催，2021年7月）（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 西 泰生, 琵琶志朗 |
| 2. 発表標題 平板接触部におけるラム波の周波数ミキシング特性に関する実験的検討 |
| 3. 学会等名 日本非破壊検査協会2020年度秋季講演大会（オンライン開催, 2020年10月） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shiro Biwa, Takuya Takahashi |
| 2. 発表標題 Harmonic generation at contacting interfaces for oblique incidence of ultrasonic waves |
| 3. 学会等名 2019 International Congress on Ultrasonics (Bruges, Belgium, September 2019) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Tianming Ye, Shiro Biwa |
| 2. 発表標題 Second-harmonic generation of Lamb waves at a closed defect |
| 3. 学会等名 6th Joint-Symposium on Mechanics of Advanced Materials & Structures (Hamamatsu, November/December 2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田康平, 琵琶志朗 |
| 2. 発表標題 平板接触部におけるラム波の高調波発生特性に関する実験的検討 |
| 3. 学会等名 日本機械学会M&M2019材料力学カンファレンス（福岡市, 2019年11月） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 棚原誉雄, 琵琶志朗 |
| 2. 発表標題 固体接触面における超音波の周波数ミキシング特性に関する実験的検討 |
| 3. 学会等名 日本機械学会M&M2019材料力学カンファレンス(福岡市, 2019年11月) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 | | |
|---------|-------------------|--|--|
| 中国 | Tongji University | | |