

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289005

研究課題名(和文) 不完全界面の高効率・高感度な超音波非破壊評価のためのガイド波非線形挙動の解明

研究課題名(英文) Study of Nonlinear Guided Wave Behavior at Imperfect Interfaces for Efficient and Sensitive Ultrasonic Nondestructive Evaluation

研究代表者

琵琶 志朗 (BIWA, Shiro)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90273466

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：接着不良や閉口き裂などの不完全界面を有する積層構造や薄板構造を伝搬する超音波(ガイド波)の非線形挙動を解明するための理論的、実験的研究を行った。その結果、(a)ラム波やレイリー波を含むガイド波の高調波発生挙動における伝搬距離や周波数の影響、(b)平板の不完全接合部(接着部、接触部)におけるガイド波反射・透過特性および共振挙動、(c)炭素繊維強化複合材料積層板の超音波反射・透過スペクトルに及ぼす不完全界面(層間樹脂層)の影響、に関して学術的ならびに実用上有用な知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：Theoretical and experimental studies have been carried out to elucidate the nonlinear behavior of guided ultrasonic waves at single and layered plate structures with imperfect interfaces such as weak bonding and closed cracks. As the result of these studies, some findings of academic as well as practical importance have been obtained for the issues such as (a) the influence of propagation distance and frequency on the higher harmonic generation behavior of guided waves including Lamb waves and Rayleigh waves, (b) the reflection/transmission characteristics of guided waves and the resonance behavior at an imperfect (adhesive or contacting) joint of plates, and (c) the influence of imperfect interfaces (interlayer resin-rich regions) on the ultrasonic reflection/transmission spectra of carbon fiber reinforced composite laminates.

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 ガイド波 不完全界面

1. 研究開始当初の背景

各種の輸送機やエネルギープラントなどの材料・構造に対して超音波計測による欠陥評価が行われているが、欠陥が閉口している場合に明瞭なエコーが得られないことが問題となっている。そこで、大振幅の超音波を入射して、欠陥の非線形開閉口振動に起因する特徴的なスペクトル成分(入射周波数の整数倍の周波数を持つ高調波、分数周波数を持つ分調波、など)を観測する非線形超音波法が、高感度な非破壊評価法として国内外で注目されるようになった。しかしながら、ほとんどの研究は分散性のない超音波(バルク波、主に縦波)の非線形特性に着目していた。

一方、積層構造や薄肉構造の健全性評価には、構造境界に沿って伝搬する超音波(ガイド波)が有効である。ガイド波のうち、平板を伝搬するラム波については、研究開始当時、応力-ひずみ非線形性に起因した高調波発生に関する理論解析や実験結果が報告されていた。しかしながら、ガイド波特有の複雑な分散性、多モード性のため、高調波発生挙動をはじめとする非線形挙動は極めて複雑である。したがって、接着不良部や閉口欠陥などの不完全界面を有する積層構造や薄板構造について、非線形超音波挙動に関する研究はあまり進んでいなかった。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究では、積層構造の接着不良部や薄板構造における閉口き裂などの不完全界面に対する高効率・高感度な非破壊評価原理の確立につなげるため、構造中を伝搬するガイド波の非線形挙動を理論的、実験的に解明することを目的とした。具体的には、応力-ひずみ非線形性や界面非線形性を考慮に入れた超音波伝搬解析法を開発し、それを用いたガイド波伝搬解析を行うこと、ならびに、ガイド波非線形特性の計測評価法の構築を行うことを主な検討課題とした。

また、上記の目的達成のための基礎的研究として、不完全界面におけるガイド波伝搬および反射・透過特性の解明や、積層構造において不完全界面(層間樹脂層)が超音波伝搬挙動に及ぼす影響の解明も検討課題とした。

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) ラム波の高調波発生挙動の解析

応力-ひずみ非線形性を有する弾性平板におけるラム波の高調波発生挙動について、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した時間領域有限差分法による二次元数値解析コードを新たに開発した。研究代表者らが以前に導出したラム波の位相整合条件にもとづいて、高調波が伝搬距離とともに累積的に増大するラム波モードと周波数をあらかじめ求め、その周波数近傍での同モードの伝

搬波形を計算し、伝搬波形のスペクトル成分を求めることにより、高調波振幅と入射周波数、伝搬距離の関係を調べた。

(2) 二層平板におけるガイド波の高調波発生挙動の解析

不完全界面を介して積層された二層平板におけるガイド波の高調波発生挙動について、有限体積法にもとづく二次元数値解析を行った。不完全界面は二次的非線形項を含む非線形スプリング界面と仮定した。まず、非線形性が無視できる場合に対して、スプリング界面を有する二層平板の線形分散関係を解析的に導出し、位相整合が実現するガイド波伝搬モードと周波数を求めた。そのうえで、この周波数近傍でのガイド波の伝搬挙動を数値的に計算し、伝搬波形に含まれる高調波成分の大きさと周波数、伝搬距離の関係を求めた。

(3) レーザ・ドップラー振動計を用いたガイド波伝搬挙動の実験的評価

レーザ・ドップラー振動計のセンサ部を空間的に走査することによりガイド波伝搬波形を多点で計測し、計測した波形に含まれる高調波成分を評価するための計測システムを構築した(図1)。この計測システムを用いて、圧電探触子とウェッジによりアルミニウム合金ブロックの表面に励起した超音波(レイリー波)に対して、伝搬方向および直交方向の各点で面外速度波形を収録した。収録波形のスペクトル解析を行うことにより、ブロック表面上の異なる点での基本波および高調波成分の大きさを算出した。これにより、レイリー波の高調波発生挙動を実験的に検討した。

二枚のアルミニウム合金平板を積層し接着した二層平板試験片に対して、圧電探触子とウェッジを用いて励起したガイド波の伝

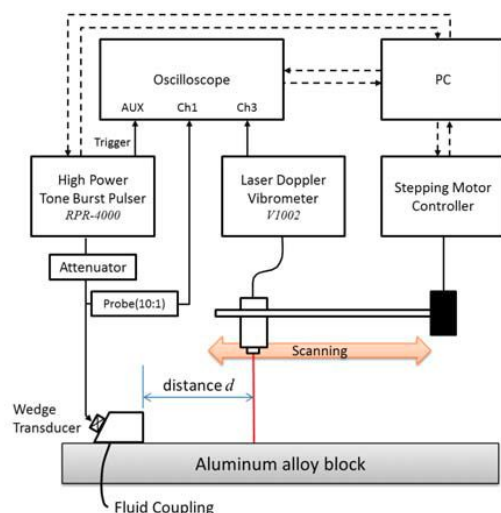


図1 レーザ・ドップラー振動計を用いた多点計測の模式図

搬波形を，レーザ・ドップラー振動計を用いて多点で計測し，二次元フーリエ変換により波数 - 周波数特性を求めた．これにより，ガイド波分散特性に及ぼす接着状態の影響を調べた．

#### (4) 突合せ接着部・接触部を有する平板におけるラム波反射・透過挙動の解析と実験

二枚の弾性平板を突合せ接合させた状態を想定し，接合界面をスプリング界面としてモデル化した．この接合界面に，単一モード，単一周波数のラム波が入射する場合の反射・透過挙動を，ハイブリッド有限要素法を用いて周波数領域で解析した．入射するラム波モードとしては，0次対称モード（S0モード）および0次反対称モード（A0モード）を仮定し，異なる周波数および異なる界面剛性に対して反射波，透過波を構成する各ラム波モードの振幅を求めた．

対応する実験的検討として，アルミニウム合金平板を突合せ接着または接触させた状態で，S0モードおよびA0モードのラム波を入射し，透過波を測定してスペクトル解析により各周波数における透過率を求めた．突合せ接着状態としては，異なる大きさの力で異なる時間圧縮力を加えて接着剤を硬化させることにより，接着剤層厚さの異なる接着試験片を作製した．一方，突合せ接触状態としては，二枚の平板をガイドレール内に保持して端部を突き合わせ，両端から圧縮力を加えることにより，端部の接触状態を変化させながらラム波透過波の測定を行った．

#### (5) 不完全界面を有する積層構造の超音波透過挙動に関する解析と実験的評価

炭素繊維強化複合材料（CFRP）積層板の超音波伝搬特性に及ぼす層間の薄い樹脂層の影響を明らかにするため，樹脂層をスプリング界面としてモデル化し，水中で積層板に垂直方向に入射する超音波の反射・透過特性について伝達マトリクス法により周波数領域解析を行った．これにより，積層板の超音波反射率に及ぼす周波数と層間界面剛性の影響を解析した．

一方向積層板を対象として，斜め方向に入射した超音波透過率に及ぼす周波数，入射角，層間界面剛性の影響をステイフネスマトリクス法により解析した．また，水中で積層板試験片に超音波を斜め方向に入射し，二回透過波（試験片背後に配置した反射ブロックからの反射波）を計測するためのポーラスキャン測定システムを構築した（図2）．このシステムを用いて，一方向強化CFRP積層板における斜角入射超音波の透過率を測定し，周波数および入射方向との関係を実験的に調べた．

### 4. 研究成果

#### (1) ラム波の高調波発生挙動の解析

板厚 2 mm のアルミニウム合金板において

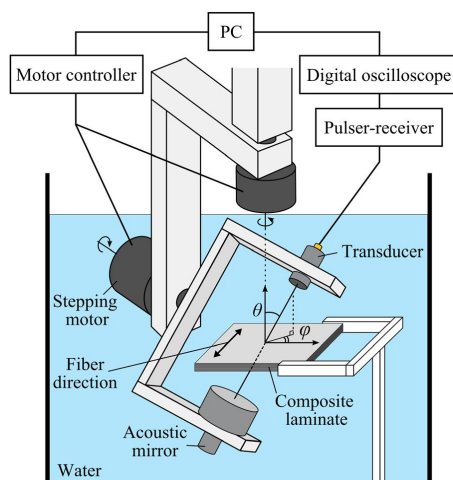


図2 ポーラスキャン測定システムを用いた複合材料積層板における斜角入射超音波の透過率の測定

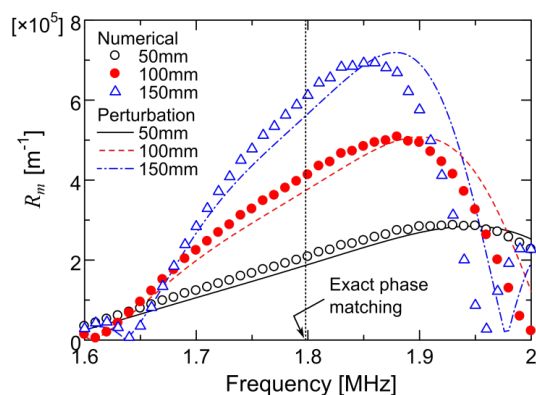


図3 異なる伝搬距離におけるラム波高調波相対振幅の周波数依存性

1次対称モード（S1モード）の基本波ラム波が伝搬する状況を想定し，開発した時間領域有限差分法解析コードを用いて非線形伝搬解析を行った．このとき，基本波周波数が約1.8 MHzのとき2次対称モード（S2モード）の二次高調波が理論上，伝搬距離とともに累積的に増大する．S1モード基本波とS2モード高調波の板表面での水平方向振幅を $A_1, A_2$ としたとき，数値解析により求めた $R_m = A_2/(A_1)^2$ と周波数の関係を異なる伝搬距離について図3に示す．同図には，線形性が十分小さいと仮定した場合の摂動解析により求めた結果も合わせて示している．

この結果から，位相整合を厳密に満たす周波数（約1.8 MHz）付近では高調波振幅が距離とともに増大することが確認された．ただし有限な伝搬距離では，位相整合を厳密に満たす周波数からずれた周波数で高調波振幅が極大となることも明らかとなった．摂動解析にもとづく検討の結果，このずれは主に基本波・高調波モードの組み合わせに依存する高調波励起効率の周波数依存性に起因することが明らかとなった．

非破壊材料評価のためのラム波高調波計測では、累積的に高調波が発生する条件をあらかじめ見出して測定条件を決める必要があるため、本数値解析で得られた知見は実用上有用と考えられる。

### (2) 二層平板におけるガイド波の高調波発生挙動の解析

解析例として、厚さ 1.5 mm のアルミニウム合金平板が垂直剛性 0.4 MPa/mm、接線剛性 0.1 MPa/mm、非線形パラメータ  $2.5 \times 10^{-4}$  の非線形スプリング界面を介して積層された場合、周波数 1.288 MHz の 1 次対称モード基本波と周波数 2.576 MHz の 2 次対称モード高調波が位相整合を満たすことが二層平板の分散関係からわかった。そこで、周波数 1.2 ~ 1.35 MHz の範囲で、1 次対称モードのガイド波を伝搬させた場合の平板表面各点での面外速度成分を計算で求め、二次元フーリエ変換を施した後、基本波モードと高調波モードの大きさを抽出した。図 4 に、異なる伝搬距離における高調波モードの相対振幅を示す。この結果からもわかるように、位相整合を満たされる周波数近傍において高調波モードの振幅が伝搬距離とともに増大している。したがって、積層平板においても、線形分散関係にもとづく位相整合周波数の解析が、高調波計測に適した測定条件を見出すうえで有用であることが明らかとなった。

### (3) レーザ・ドップラー振動計を用いたガイド波伝搬挙動の実験的評価

図 5 に、アルミニウム合金ブロックの表面に、直径 20 mm の圧電探触子とウェッジを用いて中心周波数 2.25 MHz、40 サイクルのバースト波信号で励起したレイリー波に対する測定結果を示す。図 5(a)は伝搬波形の基本波成分、(b)は二次高調波成分の振幅分布を示している。また、励起したレイリー波が測定機器に起因する高調波を含んでいる場合に測定結果に及ぼす影響を検討するため、上記の測定に加え、同じ探触子を中心周波数 4.5 MHz、80 サイクルのバースト波信号で駆動した場合のレイリー波の基本波振幅分布を求めた(図 5(c))。図 5(c)では、入射位置付近では 4.5 MHz 成分が複雑な分布を有しているが、ある程度離れた位置では十分に弱くなっている。このことから、図 5(b)に示した高調波振幅分布においては、入射位置から十分に離れた領域での高調波振幅分布は、材料の非線形性に起因するものと考えられる。

実験結果から、有限寸法の探触子で励起したレイリー波の基本波振幅は伝搬方向と垂直な方向に複雑な分布を有していることが確認された。このことは、実際の測定における高調波発生挙動を理論的に解析するうえで、基本波ビームの振幅分布を適切に考慮することが重要となることを示唆している。このように高調波発生挙動を二次元的分布として実験的に明らかにしたことは貴重な成

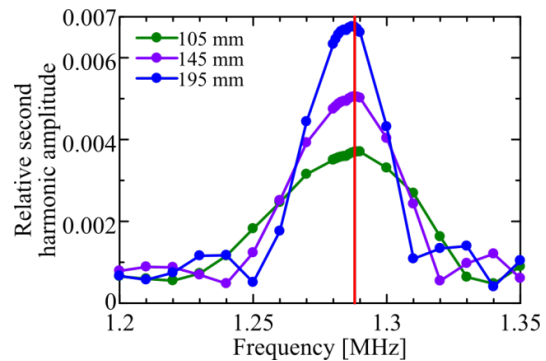


図 4 異なる伝搬距離におけるガイド波高調波相対振幅の周波数依存性

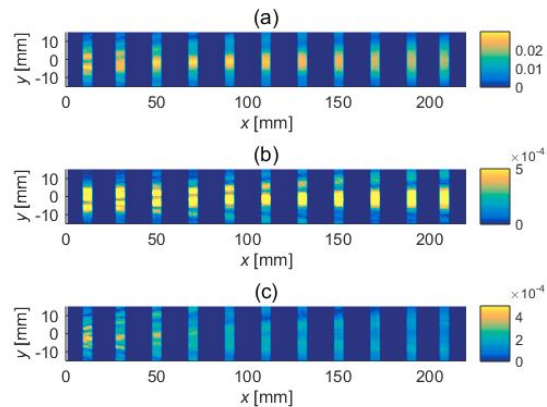


図 5 直径 20 mm の圧電探触子とウェッジで励起した基本波周波数 2.25 MHz レイリー波の(a)基本波振幅分布、(b)二次高調波振幅分布、および(c)基本波周波数 4.5 MHz レイリー波の基本波振幅分布

果と考えられる。

二枚のアルミニウム平板からなる二層接着平板に対してガイド波の伝搬波形を多点で測定し、二次元フーリエ変換によってガイド波の分散関係を求めた結果、二層平板の接着状態の違いによって分散関係が変化することが確認された。また、異なる接着状態の二層平板の分散関係が、界面剛性を変化させた場合のスプリング界面を有する二層平板の理論的分散関係と良く対応することも確認された。

本研究で構築したレーザ・ドップラー振動計による多点計測システムは、積層構造や薄板構造にも適用可能である。ただし、これらの構造に対しては、ガイド波の多モード性のために、単一モードのガイド波を実験的に励起することは容易ではない。実際、複数のガイド波モードが伝搬する状況での高調波発生挙動は極めて複雑となることが数値解析でも確認されている。このような場合における非線形挙動の解明は今後の研究に残された課題である。

(4) 突合せ接着部・接触部を有する平板におけるラム波反射・透過挙動の解析と実験

突合せ接合部をスプリング界面でモデル化した場合において、S0 モードラム波の入射に対する S0 モードの反射、透過係数の周波数依存性を解析した結果、界面剛性の値に依存したある周波数で急激な増大・減少を示すことが明らかとなった(図6)。この周波数では、界面で比較的大きな振幅の高次ラム波モードが発生し、界面近傍に局在していることが解析により明らかとなった。すなわち、界面剛性に依存した特定の周波数で界面近傍が共振するという現象が見出された。

また、スプリング界面モデルに非線形項を加えた場合の解析により、S0 モードラム波の入射に対する二次高調波発生挙動を解析した結果、低周波数領域では一次元的薄板近似の妥当性が確認されたが、特定の周波数では上記の共振効果により、二次高調波振幅が大きくなることが明らかとなった。

異なる接着状態を有する平板の突合せ接着部、および圧縮荷重を変化させて密着度を異なる段階に変化させた平板の突合せ接触部にラム波を入射し、透過波を測定した結果、透過係数の周波数依存性や共振現象の存在に関して、スプリング界面モデルにもとづいて理論的に明らかにした特徴を実験的にも確認することができた。理論解析の結果が実験的にも検証できたことにより、不完全接合を有する平板構造の非破壊評価に関する有用な知見がもたらされたと考えられる。

また、疲労き裂を導入した平板に対して行ったラム波透過測定において、平板に引張荷重を加えることによりラム波透過波の振幅が変化することが確認された。疲労き裂におけるラム波透過挙動をスプリング界面モデルによる解析と比較することは今後の重要な課題である。

(5) 不完全界面を有する積層構造の超音波透過挙動に関する解析と実験的評価

積層板に超音波を垂直に入射した場合、反射率が周波数とともに増大、減少を繰り返す解析の結果、反射スペクトルにおいて反射率が極大値、極小値を取る周波数は積層板の層間界面剛性および各層内の縦波速度に依存することが確認された。そこで、極点周波数に着目して層間界面剛性と層内縦波速度を同定する方法の提案を行った。CFRP 直交積層板に対して垂直入射超音波の反射スペクトルを実験的に求め(図7)、本手法を適用した結果、同定された層間界面剛性と縦波速度は、それぞれ樹脂と炭素繊維の弾性特性から理論的に推定される結果と良く対応することがわかった。

ステイフネスマトリックス法を用いて積層板に斜めに入射する超音波の透過率を解析し、周波数、入射角、層間界面剛性の影響を明らかにした。また、透過率が低くなる周波数範囲は、無限積層構造におけるストップ

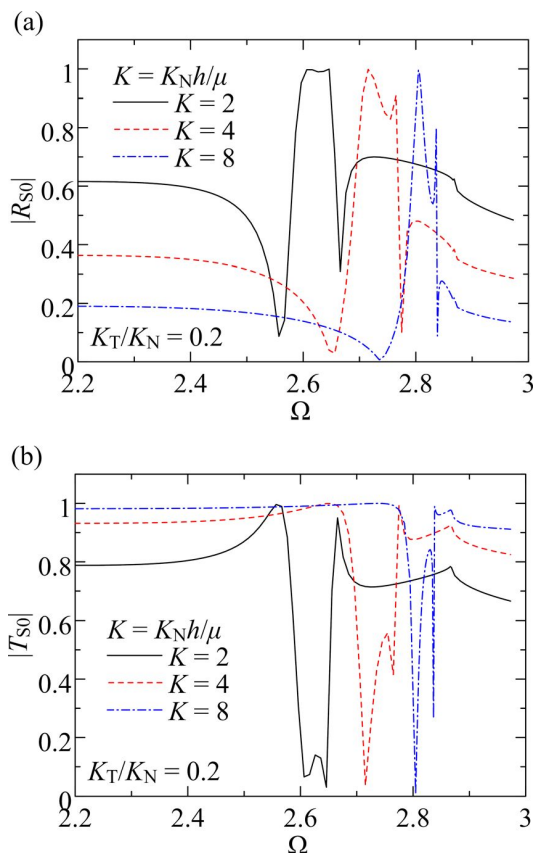


図6 異なる界面剛性を有する突合せ不完全接合部におけるS0モードラム波の(a)反射係数、(b)透過係数

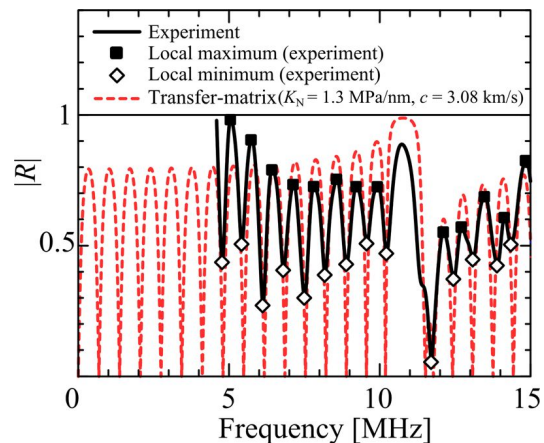


図7 CFRP 直交積層板に対する反射スペクトル(黒実線:実験,赤破線:同定した界面剛性・縦波速度による理論的反射スペクトル)

バンドに対応することを確認した。さらに、一方向強化CFRP積層板に対して斜角入射超音波の透過率をポラスキャン計測システムにより測定した。理論解析結果が実験結果に良く合うように層間界面剛性を同定した結果、実験により求められた透過率の周波数、

入射角依存性が理論的に良好に再現されることを確認できた。

以上の研究により、これまで直接評価することが困難であった複合材料積層板の層間樹脂層の特性を非破壊的に評価することが可能となった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

琵琶志朗, 松田直樹, ラム波の分散性と高調波発生挙動(解説), 非破壊検査, 第64巻12号(2015), pp. 554-559, 日本非破壊検査協会.(査読有)

Y. Ishii and S. Biwa, Transmission of ultrasonic waves at oblique incidence to composite laminates with spring-type interlayer interfaces, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 138(2015), pp. 2800-2810. (査読有)

DOI: 10.1121/1.4934265

<http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/207703>

N. Mori and S. Biwa, Resonance of an imperfect joint of plates by the lowest-order symmetric Lamb mode, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 137(2015), pp. 3139-3148. (査読有)

DOI: 10.1121/1.4921610

<http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/201592>

Y. Ishii and S. Biwa, Evaluation of interlayer interfacial stiffness and layer wave velocity of multilayered structures by ultrasonic spectroscopy, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 136(2014), pp. 183-191. (査読有)

DOI: 10.1121/1.4881920

<http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/193601>

N. Matsuda and S. Biwa, Frequency dependence of second-harmonic generation in Lamb waves, J. Nondestruct. Eval., Vol. 33(2014), pp. 169-177. (査読有)

DOI: 10.1007/s10921-014-0227-y

<http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/194150>

[学会発表](計24件)

N. Matsuda and S. Biwa, Experimental observation of harmonic generation in Rayleigh waves using a laser Doppler vibrometer, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015, October 6, 2015, Loisir Hotel Toyohashi (Toyohashi).

Y. Ishii and S. Biwa, Effects of interlayer interfacial stiffness on ultrasonic wave propagation in composite laminates at oblique incidence, 2015 International Congress on Ultrasonics, May 14, 2015, Metz (France).

N. Mori and S. Biwa, Interaction of Lamb

waves with an imperfect joint of plates: reflection, transmission and resonance, 2015 International Congress on Ultrasonics, May 13, 2015, Metz (France).

S. Biwa and N. Ito, Nonlinear response of a closed defect to Lamb waves: perturbation analysis using hybrid finite element method, The APCFS/SIF-2014 Congress Uniting the Asian-Pacific Conference on Fracture and Strength (APCFS-2014) and the International Conference on Structural Integrity and Failure (SIF-2014), December 10, 2014, Sydney (Australia).

S. Biwa, Material/interfacial nonlinear effects in Lamb waves (invited), The Workshop on Current and Future of Nonlinear Ultrasonic Techniques for NDE, October 23, 2014, Seoul (South Korea).

N. Mori, S. Biwa, and T. Hayashi, Numerical simulation of Lamb waves interacting with contacting edges of plates, 2013 International Congress on Ultrasonics, May 3, 2013, Singapore.

N. Matsuda, S. Biwa and T. Hayashi, Numerical analysis of harmonic generation in Lamb waves in an isotropic plate with distributed material nonlinearity, 2013 International Congress on Ultrasonics, May 2, 2013, Singapore.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

琵琶 志朗 (BIWA, Shiro)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 90273466

### (2) 研究分担者

林 高弘 (HAYASHI, Takahiro)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30324479

### (3) 連携研究者

安部 正高 (ABE, Masataka)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・助教

研究者番号: 50582623

### (4) 研究協力者

松田 直樹 (MATSUDA, Naoki)

京都大学・大学院工学研究科・博士後期課程学生, 日本学術振興会特別研究員 DC1 (現: 京都大学・大学院工学研究科・助教)

石井 陽介 (ISHII, Yosuke)

京都大学・大学院工学研究科・博士後期課程学生, 日本学術振興会特別研究員 DC1 (現: 豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教)

森 直樹 (MORI, Naoki)

京都大学・大学院工学研究科・博士後期課程学生, 日本学術振興会特別研究員 DC1