

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13833

研究課題名(和文) 積層構造における超音波バンドギャップ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 Ultrasonic Bandgaps of Layered Structures toward a Novel Principle of 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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)： 積層構造の材料特性を対象とした新しい非破壊評価原理の確立に向けて、積層構造における超音波バンドギャップに関する理論解析と実験的検討を行い、主に以下の成果を得た。(1)異なる積層構成を有する炭素繊維強化複合材料積層板の超音波バンドギャップ特性を明らかにするとともに、実測値と理論解析を対応させて構成層の複素弾性率と層間界面剛性を評価できることを示した。(2)バンドギャップ周波数における層間界面反射波の持続特性に着目して複合材料積層板の成形不良を評価できることを示した。(3)積層構造における二次高調波発生特性を理論的に解析し、分散性やバンドギャップの影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)： The ultrasonic bandgap characteristics of layered structures have been studied theoretically and experimentally in order to establish a novel principle of nondestructive evaluation for their material properties. The main findings of this study are as follows. (1) The ultrasonic bandgap characteristics of carbon fiber reinforced composite laminates with different stacking sequences have been elucidated. It has been shown that the layer complex moduli and the interlaminar interfacial stiffnesses can be determined by fitting the analytical model to the experimental data. (2) It has been shown that poorly manufactured composite laminates can be characterized based on the temporal features of interlaminar interface echoes at the bandgap frequency. (3) The second-harmonic generation characteristics in layered structures have been analyzed theoretically, and the influence of the dispersion and the bandgap on the harmonic generation behavior has been elucidated.

研究分野：固体力学

キーワード：機械材料・材料力学 超音波 積層構造 バンドギャップ 非破壊評価

1. 研究開始当初の背景

航空機構造をはじめとして適用が拡大している炭素繊維強化複合材料 (carbon fiber reinforced plastics、以下 CFRP) は積層された形態で用いられることが多く、その健全性の評価に際しては層間界面の特性評価が重要である。CFRP の材料特性評価には超音波が広く用いられている。例えば、超音波伝搬速度や減衰の測定による弾性・粘弾性特性評価やポロシティ (分布した微視空孔) 含有率の非破壊評価が行われているが、超音波伝搬経路に沿って積分 (平均化) された評価となり、構成層と層間界面を個別に評価することは困難である。また、開口したはく離欠陥の画像化は既存の手法で可能であるが、密着したはく離や接着不良の評価は困難である。

CFRP 積層構造の層間界面では、界面の両側で繊維方向が異なることによる異方性弾性特性のミスマッチと、層間界面に存在する薄い樹脂領域により、超音波が散乱される。層間界面における超音波散乱は低い周波数では十分に弱いですが、周波数が高くなると伝搬挙動への影響が無視できないレベルになる。特に波長がプライ厚さの二倍程度となると、散乱波が強め合うことにより超音波のバンドギャップが生じる。CFRP 積層構造における超音波バンドギャップ特性は層間界面特性を反映していると考えられ、これを層間界面の特性評価に応用することが考えられるが、これまでのところ、このような観点からの研究はあまり見当たらない。

また、層間界面に存在するはく離や接着不良は、比較的大振幅の超音波に対して非線形に応答することが知られており、この特徴を非破壊欠陥評価に利用することに 관심이集まっている。固体同士の接触界面における非線形超音波特性についてはこれまでの多くの研究が行われているが、積層構造内部のように多数の界面が存在する場合、分散性やバンドギャップの影響で非線形超音波特性は極めて複雑になることが予想され、十分に明らかにされていない。

以上の背景から、積層構造における超音波バンドギャップ特性や、その非線形超音波特性への影響を明らかにできれば、層間界面の特性評価を可能とする新しい非破壊評価原理の構築につながることを期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、従来の CFRP 積層構造の非破壊特性評価・欠陥評価とは異なる、層間界面特性も対象とした新しい非破壊評価原理の構築のため、積層構造における超音波のバンドギャップ特性およびその非線形超音波特性への影響を理論的、実験的に明らかにすることを目的とした。具体的には、異なる積層構成を有する CFRP 積層板に対して、任意の角度で入射する超音波の反射・透過特性を理論的、実験的に調べてバンドギャップ特性を明らかにするとともに非破壊評価への応用

を検討すること、また、積層構造における非線形超音波特性について理論的に解析し、分散性やバンドギャップの影響を明らかにすること、を主な検討課題とした。

3. 研究の方法

(1) CFRP 積層板における超音波バンドギャップの解析と実験的評価

積層構造における超音波バンドギャップについて理論的に明らかにするため、図 1 に示すように水中に配置された CFRP 積層板に平面調和縦波が任意の角度で入射する場合の透過特性を stiffness matrix 法を用いて解析した。積層板の各層は異方性粘弾性体と仮定し、異なる積層構成 (一方向積層、直交積層、擬似等方積層) をモデル化した。層間樹脂領域はスプリング界面としてモデル化した。Stiffness matrix 法は、各層の両側境界および各層間界面両側における応力と変位を行列表現で関係づけ、それを全ての層および層間界面に関して組み合わせることにより、積層板全体に対する反射波と透過波を求めるもので、高周波数までの範囲で安定した計算を行うことが可能である。この解析により、水中に透過した縦波の透過率およびバンドギャップ特性に及ぼす周波数、入射角度、積層構成、層間界面剛性の影響を調べた。

また、超音波バンドギャップ特性の実験的評価のため、CFRP 積層板 (一方向積層板、直交積層板、擬似等方積層板) に水中で異なる角度から超音波を入射し、透過波を測定した。図 2 に測定系の概要を示す。圧電探触子 (直径 0.5 インチ、公称中心周波数 10 MHz) にスパイク波形を加えて CFRP 積層板に超音波を送信し、積層板の裏側に透過した超音波をもう一つの圧電探触子 (直径 1 インチ、公称中心周波数 10 MHz) で測定した。測定した透過波形に高速フーリエ変換を施して振幅スペクトルを計算し、水中を同じ距離だけ

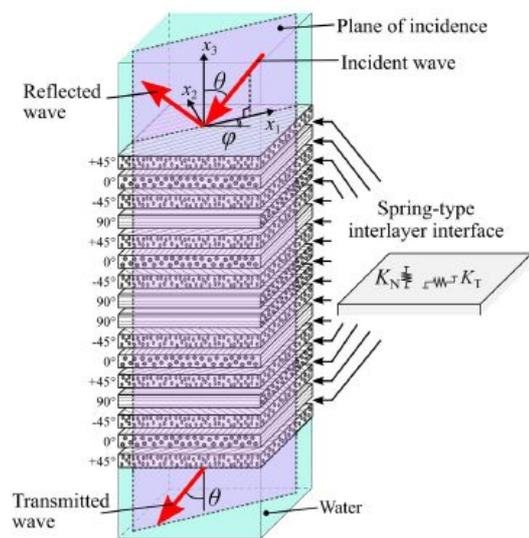


図 1 積層板の超音波透過解析モデル

伝搬した超音波波形の振幅スペクトルとの比として透過スペクトルを求めた。これにより、異なる積層構成の CFRP 積層板に対して、バンドギャップ特性を含む透過率の周波数、入射角への依存性を調べた。

#### (2) 層間界面反射波に着目した CFRP 積層板の成形不良の評価

超音波バンドギャップ特性に着目した CFRP 積層構造の成形不良評価の可能性を検討するため、図 2 に示したのと同様の測定系を用いて、故意に成形条件を変えて作製された一方方向 CFRP 積層板試験片に対して水中で垂直に超音波を入射し、反射波を測定した。測定に用いた試験片は、正常の成形条件からのずれの程度に応じて、異なる含有率のポロシティを含んでいる。CFRP 積層板に超音波を垂直に入射した場合、波長が層厚さの二倍となる周波数（バンドギャップ周波数）において各層間界面からの反射波が強め合い、表面反射波に続く信号（層間界面反射波）として観測される。層間界面反射波の持続特性は、成形条件による層間界面特性の違いや微視空孔の存在に影響を受けると考えられる。このことを実験的に調べるため、各試験片に対して公称中心周波数 10 MHz の探触子を用いて反射波形を測定し、時間 - 周波数解析を適用してバンドギャップ周波数成分の信号持続特性を解析した。また、公称中心周波数 2.25 MHz の探触子を用いた反射波測定も行い、測定波形から積層板厚さ方向の超音波伝搬速度および減衰係数を求めた。

上記の実験的検討に対する理論的考察のため、微視空孔の分布を含む一方方向 CFRP 積層板に水中で超音波が垂直に入射した場合の伝搬挙動を有限要素法により解析した。個々の微視空孔は正方形断面で繊維方向に平行に伸びた形状としてモデル化し、その断面寸法や含有率（断面での面積比）を変化させて解析を行った。積層板の各層間界面はスプリング界面としてモデル化した。有限要素解析は、繊維方向に垂直な二次元断面での平

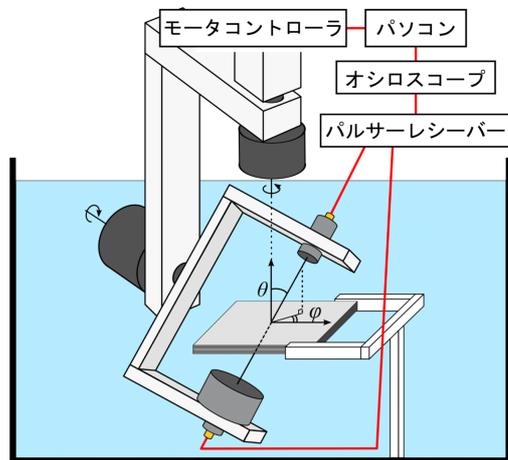


図 2 超音波透過測定の様式図

面ひずみ問題として周波数領域で行い、得られた複素反射振幅に逆フーリエ変換を適用して時間領域での反射波形を求めた。この解析により、超音波反射特性、特に層間界面反射波の特徴に及ぼす空隙寸法・含有率の影響を調べた。また、同様の数値解析によって低周波数領域での反射波形も計算し、個々の微視空孔モデルに対して積層板厚さ方向の伝搬速度と減衰係数を評価した。

#### (3) 積層構造における高調波発生特性の理論解析

積層構造における非線形超音波特性を理論的に検討するため、同一材料からなる同一厚さの弾性層が非線形スプリング界面を介して積層された構造を考え、積層方向における平面縦波の一次元伝搬挙動を解析した。非線形スプリング界面は界面での応力が変位の跳び（不連続性）に比例する項に加え、跳びの二乗に比例する項を含む二次非線形界面としてモデル化した。摂動法によって問題を逐次線形化し、基本波として調和縦波が積層方向に伝搬する状況を transfer matrix 法を用いて解析し、積層構造における縦波の分散特性と各層間での変位の跳びを求めた。つづいて、界面の非線形性により発生した二次高調波が積層構造を伝搬する問題を再び transfer matrix 法により解析した。計算例として、積層構造中の単一の界面が非線形性を有する場合、およびある範囲に存在する複数の界面が非線形性を有する場合に対して二次高調波発生特性を計算し、これに及ぼす周波数や層間界面剛性の影響を調べた。

## 4. 研究成果

### (1) CFRP 積層板における超音波バンドギャップの解析と実験的評価

異なる積層構成を有する 16 層の CFRP 積層板（一方方向積層板、直交積層板、擬似等方積層板）に対する超音波透過特性の理論解析の結果、透過率に及ぼす周波数、入射角度、層間界面剛性の影響を明らかにすることができた。また、本解析で、特定の条件下で透過率が極めて低い値を取ることがあり、これが超音波のバンドギャップに起因することが示された。異なる超音波バンドギャップに対して積層板内部のエネルギー流束密度分布を詳しく検討することにより、各層内で伝搬するモード（準縦波および二個の準横波）のうち、どれがバンドギャップに関与しているかを明らかにした。さらに、積層板の超音波透過特性に見られるバンドギャップの特徴は、無限積層構造に対する Floquet 波の特徴と良く対応することもわかった。

一方方向積層板の透過スペクトルの実験結果と理論解析結果が最も良く一致するように決定した CFRP 層の異方性複素弾性率および層間界面剛性を用いて、直交積層板および擬似等方積層板の超音波透過率を解析し、実測結果と比較したところ、両者は良く一致す

ることが確認された．例として，直交積層板に対して入射方位面 $\phi = 0^\circ$ （図1参照）で超音波を入射した場合のエネルギー透過率と周波数，入射角の関係を図3に示す．以上の内容については雑誌論文で詳しく論じている．さらに，雑誌論文では，積層構成ごとにCFRP層の異方性複素弾性率および層間界面剛性の評価を行い，妥当と考えられる評価結果を得ている．以上の結果から，超音波バンドギャップを含む透過スペクトルに着目することにより，CFRP積層板の層内粘弾性特性および層間界面特性の非破壊評価が可能であることが明らかとなった．

(2) 層間界面反射波に着目したCFRP積層板の成形不良の評価

異なる条件で成形され，異なるポロシティ含有率を有する一方向CFRP積層板に対して，中心周波数2.25 MHzおよび10 MHzの探触子を用いた超音波反射波の測定を行い，超音波伝搬速度，減衰係数，および層間界面波持続特性とポロシティ含有率の関係を明らかにすることができた．すなわち，ポロシティ含有率の増加とともに超音波伝搬速度は低下し，減衰係数は増加することを確認した．また，層間界面反射波の時間・周波数解析の結果（図4）から，バンドギャップに対応する周波数が約8 MHzであること，またこの周波数成分の持続時間がポロシティ含有率の増

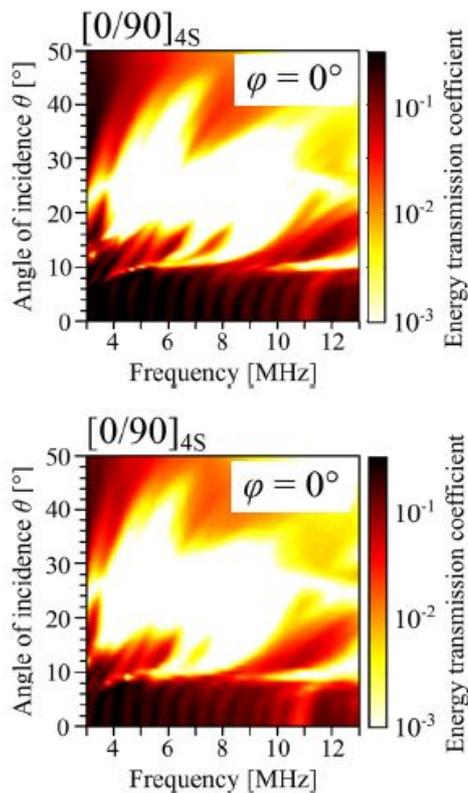


図3 直交積層板（入射面方位面 $\phi = 0^\circ$ ）に対するエネルギー透過率の周波数・入射角依存性（上図：理論解析，下図：実験）

加とともに短くなることがわかった．この周波数における層間界面反射波の振動持続特性の定量化指標として，スペクトル振幅の時間に対する対数減衰率を求めたところ，ポロシティ含有率の増加とともに大きくなることを確認した．以上の傾向は微視空孔の分布を仮定した数値解析でも確認することができた．また，数値解析との比較の結果，高いポロシティ含有率を有する試験片では，実験結果は個々の空孔が大きい場合，また層間界面剛性の値が低い場合の数値解析結果により良く合うことがわかった．このことから，積層板の成形条件が正常な条件からずれるにしたがって，ポロシティ含有率が高くなるだけでなく，層間界面の剛性も低下していることが示唆された．以上の内容については雑誌論文で詳しく論じている．

本検討の結果から，層間界面反射波の持続特性に着目することによって，CFRP積層板の成形不良を評価できる可能性が示された．超音波伝搬速度や減衰係数に基づく評価が積層板厚さ方向に積分した（平均化した）特性評価となるのに対して，層間界面反射波に着目することにより，積層板表面近傍の材料特性を評価でき，従来の評価法と相補的な利用が期待できる．例えば，厚さ方向にポロシティの偏在（厚さ方向に関して片側に約4%）を有する一方向CFRP積層板に対して，水中で探触子を走査しながら反射波形を測定し，層間界面反射波の持続特性に基づく画像化を行ったところ，図5に示すようにポロシティが偏在した側から測定した場合とその反対側（ポロシティ無し）から測定した場合とは明瞭に異なる画像が得られた．この積層板に対して，超音波伝搬速度や減衰係数に基づく画像化では両側からの測定結果にほと

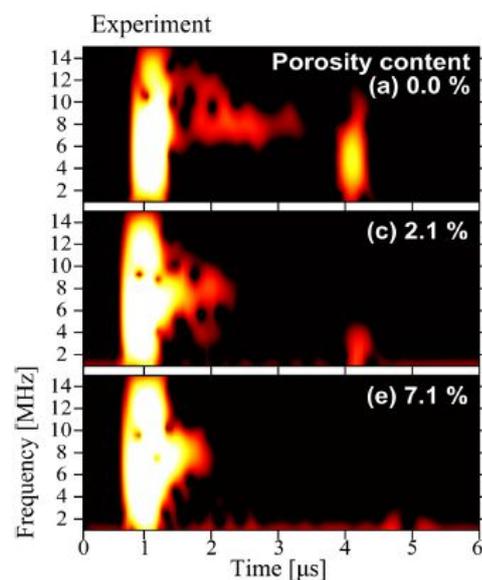


図4 異なるポロシティ含有率を有する一方向積層板に対する反射波形の時間・周波数解析結果

んど差が見られなかったことから、超音波バンドギャップで生じる層間界面反射波に着目することにより、厚さ方向の偏在を含む成形不良（ポロシティ含有率）の評価が可能であることが示された。

### (3) 積層構造における高調波発生特性の理論解析

弾性層と層間スプリング界面により構成された無限積層構造において、基本波として平面調和縦波が伝搬する場合の高調波発生特性に対して、摂動法と transfer matrix 法による解析方法の定式化を行うことができた。この解析による計算例として、積層構造の中で一つの界面だけが非線形性を有する場合には、基本波周波数およびその二倍の高調波周波数がパスバンドとストップバンドのどちらに含まれるかによって、遠方で観測した高調波振幅が大きく異なることが明らかとなった。また、積層構造中のある範囲に含まれる界面がすべて同様の非線形性を有する場合にも、基本波周波数と高調波周波数がパスバンド、ストップバンドのどちらに含まれるかにより異なる挙動を示すことが明らかとなった。すなわち、両者がともにパスバンドに含まれる場合、高調波は伝搬距離とともに増加、減少を繰り返すという分散性媒質特有の挙動を示した。また、基本波周波数がストップバンドに含まれる場合、高調波振幅の増加は非線形界面の存在範囲のごく一部に限られ、高調波周波数がストップバンドに含まれる場合、高調波振幅の増加は非線形界面の

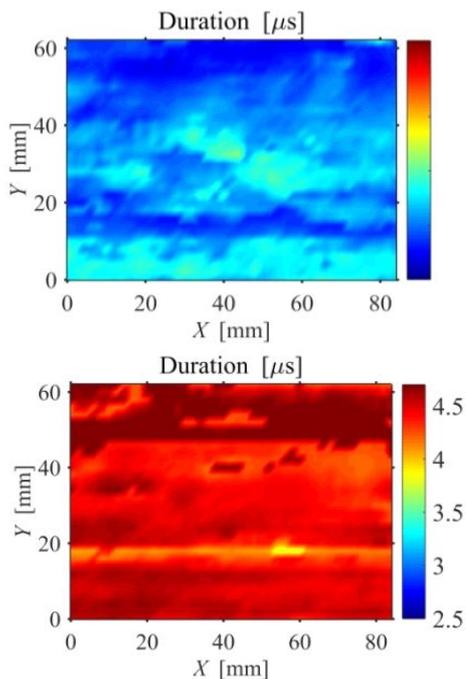


図5 ポロシティ偏在を有する一方向積層板に対する層間界面反射波持続特性に基づく画像化結果（上図：偏在した側から測定した場合，下図：反対側から測定した場合）

存在範囲とその近傍に限られることが示された。

さらに、高調波発生特性に及ぼす非線形界面の数および層間界面剛性の影響についても明らかにすることができた。図6は、界面剛性の逆数を無次元化したパラメータが  $\Lambda = 0.2$  の場合に、積層構造の特定位置での無次元化二次高調波振幅  $|U_2|/(\beta a_0^2)$  を無次元化基本波周波数  $\Omega$  の関数として示している。図6で、基本波周波数のストップバンド（およそ  $\Omega\pi = 0.8 \sim 1$ ），および高調波周波数がストップバンドに含まれる  $\Omega\pi = 0.4 \sim 0.5$  では高調波振幅はほぼ0となっている。また、高調波振幅は必ずしも非線形界面数  $N$  とともに増加してはいない。このように、積層構造中での高調波発生特性は、積層構造が有する分散性およびバンドギャップを反映して極めて複雑になることが明らかとなった。以上の内容は雑誌論文で詳しく論じている。また、非線形界面を含む積層構造が有限の長さを有しており、異なる材質の半無限媒質に結合している場合の二次高調波発生特性については、同様な解析法を適用した場合の結果を雑誌論文で詳しく論じている。

### (4) 成果のまとめと今後の課題

本研究により、CFRP 積層板を任意の角度で超音波が伝搬する場合のバンドギャップ特性について、理論解析および実験による検討を行い、積層構成が異なる場合のバンドギャップ特性の違いや層間界面剛性の影響について多くの特徴を明らかにすることができた。有限な厚さを有する積層板の超音波透過特性におけるバンドギャップの特徴は、無限積層構造の Floquet 波の特性と良く対応することも明らかにした。また、本研究では、バンドギャップを含む透過スペクトルの特徴をもとに CFRP 積層板の層間界面剛性を評価できること、また、バンドギャップ周波数で顕著に生じる層間界面反射波の持続特性に着目して、ポロシティが偏在した場合も含めた CFRP 積層板の成形不良の評価が可能であることを示した。さらに、積層構造におい

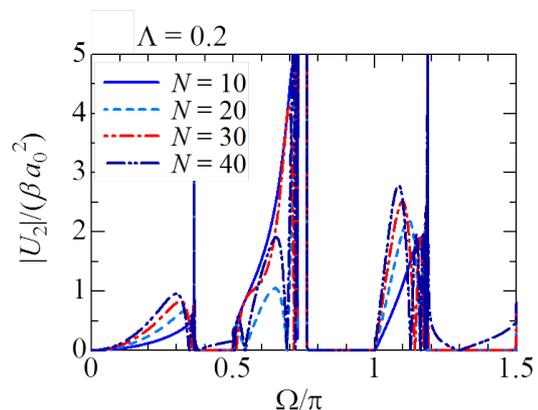


図6 積層構造における二次高調波振幅の基本波周波数依存性

て層間界面が非線形性を有する場合の二次高調波発生特性について、摂動法と transfer matrix 法に基づく定式化を行い、理論解析によりその特徴を明らかにすることができた。

以上のように、本研究では積層構造における超音波バンドギャップの解明と新しい非破壊評価原理への展開に向けて多くの知見を得ることができた。本研究では主に CFRP 積層板における超音波バンドギャップ特性を調べたが、その他の積層構造についても検討を加えることにより、積層構造の超音波バンドギャップについてさらに理解が深まることが期待できる。また、積層構造における非線形超音波特性については、本研究では理論解析により基礎的な知見が得られたが、実験的検証を進めることにより、非破壊評価への展開に向けてさらなる知見が得られると考えられる。

#### 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)

Y. Ishii, S. Biwa, T. Adachi, Second-harmonic generation in a multilayered structure with nonlinear spring-type interfaces embedded between two semi-infinite media, *Wave Motion*, Vol. 76 (2018), pp. 28-41. 査読有。

DOI: 10.1016/j.wavemoti.2017.07.009

石井陽介, 琵琶志朗, 足立忠晴, 超音波透過特性を用いた炭素繊維強化複合材料積層板の層間界面剛性およびプライ複素弾性率の評価, *実験力学*, Vol. 17, No. 2 (2017), pp. 124-130. 査読有。

DOI: 10.11395/jjsem.17.124

Y. Ishii, S. Biwa, Ultrasonic wave transmission and bandgap in multidirectional composite laminates with spring-type interlayer interfaces, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 141, Issue 2 (2017), pp. 1099-1110. 査読有。

DOI: 10.1121/1.4976062

<https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/226601>

Y. Ishii, S. Biwa, A. Kuraishi, Influence of porosity on ultrasonic wave velocity, attenuation and interlaminar interface echoes in composite laminates: Finite element simulations and measurements, *Composite Structures*, Vol. 152 (2016), pp. 645-653. 査読有。

DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.05.054

<https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/230378>

S. Biwa, Y. Ishii, Second-harmonic generation in an infinite layered structure with nonlinear spring-type interfaces, *Wave Motion*, Vol. 63 (2016), pp. 55-67. 査読有。  
DOI:10.1016/j.wavemoti.2016.01.004

<https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/226600>

[学会発表](計5件)

S. Biwa, Y. Ishii, Ultrasonic bandgaps and interlaminar interface echoes of composite laminates: analysis and experiments (invited), 174th Meeting of the Acoustical Society of America, New Orleans Marriott Hotel (New Orleans, Louisiana, USA), December 6, 2017.

小山 徹, 石井陽介, 琵琶志朗, 倉石 晃, 超音波を用いた CFRP 積層板のポロシティ率とその偏在分布の評価, 日本材料学会第 66 期学術講演会, 名城大学天白キャンパス(名古屋市), 2017 年 5 月 27 日。  
琵琶志朗, 複合材料積層構造の超音波バンドギャップと非破壊材料評価への応用, 日本物理学会第 72 回年次大会, 領域 10 領域 11 領域 7 領域 5 合同シンポジウム「フォノン物理学のフロンティア: 格子振動解析から超音波応用研究まで」, 大阪大学豊中キャンパス(豊中市), 2017 年 3 月 18 日。

石井陽介, 琵琶志朗, 足立忠晴, CFRP 積層板の超音波バンドギャップ発生挙動に及ぼす積層構成の影響, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス, 神戸大学六甲台キャンパス(神戸市), 2016 年 10 月 8 日。

石井陽介, 琵琶志朗, CFRP 積層板の斜角入射超音波透過特性に及ぼす積層構成の影響, 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, 西之表市民会館(西之表市), 2016 年 3 月 17 日。

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

#### 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

なし

(3) 連携研究者

石井 陽介 (ISHII, YOSUKE)  
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 70781706