

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：13401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14842

研究課題名（和文）繊維強化複合材料における共鳴散乱理論に基づく非線形弾性波伝搬挙動の解明

研究課題名（英文）Nonlinear Elastic Wave Propagation Behavior in Fiber Reinforced Composites Based on Resonant Scattering Theory

研究代表者

松田 直樹（Matsuda, Naoki）

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：90756818

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本検討では繊維強化複合材料における繊維-母材間のはく離と、母材樹脂そのものの材料非線形性に与える影響を明らかにすることを目的に検討を行った。その結果、繊維-母材間ではく離が存在する場合の1本の繊維の散乱波についての新たな理論を提案した。また、複合材料においては、繊維-母材間のはく離の程度を、単一周波数 f の波を入射した場合に発生する二次高調波（周波数 $2f$ ）によって評価するための基礎的な知見を得た。さらに、複合材料の母材樹脂そのものの力学的な非線形性を評価し、複合材料全体の非線形性を理解する上での基礎データを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

繊維強化複合材料の繊維-母材界面ではく離は強度に大きな影響を与える。また樹脂の劣化は特に繊維強化複合材料を構造材に用いる際の弱点となる圧縮特性への影響が大きい。一方でこうした損傷は、そのスケールが超音波の波長に比べて小さすぎるため、従来の超音波測定では評価が困難であった。これに対し本検討は、材料の非線形力学的特性に着目する非線形超音波法によるアプローチを試みた。特に本検討では繊維-母材間のはく離と、樹脂そのものが非線形弾性波伝搬特性に与える影響を明らかにすることで、繊維強化複合材料における非線形特性について基礎的な知見を得た。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to clarify the influence of fiber-matrix delamination and the effect of the matrix resin on the material nonlinearity in fiber-reinforced composites. As a result, we proposed a new theory for the scattered wave of a single fiber with fiber-matrix delamination. We also obtained basic knowledge to evaluate the fiber-matrix delamination from the second-harmonic waves (frequency $2f$) generated by an incident wave of a single frequency f . In addition, the mechanical nonlinearity of the matrix resin utilized in the composites was evaluated, and basic data were obtained for understanding the nonlinearity of the composite materials.

研究分野：超音波非破壊評価

キーワード：超音波非破壊評価 繊維強化複合材料 非線形超音波法 弾性波散乱問題 共鳴散乱理論 材料非線形性

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

繊維強化複合材料は、金属材料に比べて、高い比強度・比剛性を有することに加え、優れた耐蝕性を有するため、近年では特に運輸分野への応用が急速に拡がりつつある。マクロなレベルでは積層複合材料に生じる層間はく離から、ミクロなレベルでは繊維 - 母材間のはく離まで、複合材料には様々なスケールの損傷が生じうる。このため、それぞれの損傷の特徴に合わせた非破壊評価法の開発が重要である。非破壊評価は基本的に超音波の対象物での反射を原理としており、その強さは損傷の幾何的な大きさに強く依存している。一方で、本検討で評価の対象とする繊維 - 母材界面ではく離面の大きさは繊維直径程度(数十 μm ~ 数 μm)と超音波の波長に比べて桁違いに小さいため、反射波の直接的な測定は困難である。こうした中、対象物の大きさや弾性波の反射の強さとは異なる、材料の非線形な力学的特性に着目する手法が注目を集めており、非線形超音波法と呼ばれている。材料中のはく離面は圧縮・引張応力に対して非対称な応答を示すことから、一般に力学的な非線形性を有する。特に多数のはく離が集積した材料は全体として非線形な応答を示す非線形弾性体とみなせる。このような非線形性は一般に極めて微弱で引張試験などではほとんど検出不能であるが、狭帯域超音波(周波数 f)を用いることで、非線形性に応じて生じる高次高調波(周波数 $2f, 3f, \dots$) 振幅として鋭敏に捉える事ができる。

高調波の発生以外にも、様々な弾性波の非線形伝搬特性が知られており、それらを利用して繊維強化複合材料の損傷を評価する研究が多数なされている。Meoらは、非線形弾性波スペクトロスコーピー(NEWS)を用いた目視点検困難な衝撃損傷の評価のうち、非線形共鳴超音波スペクトロスコーピー(NRUS)と非線形周波数変調スペクトロスコーピー法(NWMS)について検討している。NRUSでは駆動振幅の増加に対する共鳴周波数のシフトを評価し、NWMSでは駆動振幅に対する和周波数・差周波数成分の振幅の大きさの変化を評価している。これらを用いて実験を行い、NEWSによってより詳細な目視点検困難な衝撃損傷の検出が可能であることを示している。ほかにも、Chrysochoidisらや、Aymerichらが、NWMSを用いて炭素繊維強化複合材料に生じた樹脂割れや、衝撃損傷によって生じた層間はく離の評価を行っている。このように非線形超音波法を用いた損傷評価に関する様々な研究が存在し、それを炭素繊維強化複合材料の損傷評価に適用した検討も多数行われている。一方で、これらの研究では、未損傷の試験片や負荷前の試験片における弾性波の非線形伝搬特性と、損傷後の試験片における非線形伝搬特性をそれぞれ評価して比較するなど、損傷の程度と非線形な弾性波伝搬特性の関係を評価した検討が多くみられる。一方で、個々の損傷がどのように非線形伝搬特性を変化させるかなど、繊維強化複合材料の損傷と弾性波の非線形伝搬特性の関係は十分に明らかにされていない。

2. 研究の目的

繊維強化複合材料における損傷と弾性波の非線形伝搬特性の関係を明らかにすることは非線形超音波法を繊維強化複合材料に適用するうえで重要である。本課題ではミクロスケールの損傷が非線形性に与える影響について着目した。具体的には繊維 - 母材間のはく離と、樹脂そのもの材料非線形性について検討を行った。そこで、繊維 - 母材界面のはく離が非線形超音波伝搬挙動に与える影響を第一の目的とした。このために、単一の繊維における超音波の散乱挙動に加え、多数の繊維が存在する場合に、はく離によって生じる高調波がほかの繊維によって受ける散乱の影響に着目する。

また、繊維強化複合材料は粘弾性樹脂と弾性繊維からなるため、測定により得られる弾性波伝搬特性は、損傷によるものだけでなく、繊維による散乱や樹脂の粘弾性特性や非線形弾性特性も含んでいる。特に、非線形弾性特性は高次弾性定数を用いて表されるが、樹脂などの粘弾性材料における高次弾性定数の評価は不十分であるのが現状である。したがって、本検討では、第二の目的として、繊維強化複合材料の非線形弾性特性を理解するために、樹脂の高次弾性定数を評価する。

3. 研究の方法

複合材料中での高調波発生挙動の解明のため本検討では、複合材料中で発生する2種類の非線形性について検討を行った。すなわち、繊維—母材界面に起因する非線形性、樹脂の材料非線形性である。

1. 本検討では繊維—母材界面の非線形性が巨視的な超音波伝搬挙動に与える影響について評価した。このために、単純1本の円柱が弾性対中に埋め込まれている状況から、多数の繊維が存在する場合の巨視的な散乱挙動についての検討を順次行った。具体的には、まず(1-a)現象の理論的な理解のため、1本の繊維と母材の界面にスプリング界面モデルが与えられる場合の共鳴散乱現象についての理論的な展開を行った。また、(1-b)1本の繊維の界面にスプリング界面モデルを置いた場合の数値解析を行い、実験的な測定によりこの結果を検証した。さらに多数の繊維がある場合の巨視的な散乱挙動に付いて解析するために、(1-c)既存の解析手法を元に、多数の繊維が存在する複合材料中での界面に非線形スプリング界面モデルを適用した解析手法の提案を行った。この解析手法を用いて、(1-d)非線形スプリング界面モデルを有する複合材料中での弾性波散乱挙動に付いて解析を行った。

2. 複合材料に用いられる樹脂の非線形性を音弾性法と呼ばれる手法を用いて定量的に評価した。また超音波の減衰特性を評価し、シミュレーションモデルへの適用が可能なパラメータを実験的に評価した(2-a)。

4. 研究成果

下記にそれぞれの研究成果を示す。

(1-a) ばね界面を有する円柱によって生じる散乱波動場の共鳴散乱理論

既往の共鳴散乱現象の研究において扱われた系の多くは水中の円柱を仮定しており、弾性体中の円柱を仮定した系の場合の報告例はあまり多くはない。また、それらの多くは母材と円柱が完全に接着した界面を仮定しており、母材 - 円柱界面にスプリング界面モデルを適用した系における共鳴散乱現象について解析的に詳細な検討を行った報告例は筆者の知る限りなかった。

そこで、本検討では図1のようなばね界面を有する円柱によって生じる散乱波動場の共鳴散乱理論を展開した。弾性体中を伝搬する波の支配方程式より、固有関数展開を用いた各波動場の導出方法を示した。得られた固有関数展開における展開係数について、Breit-Wigner の式の導出法をもとに、散乱関数を定義し、弾性体円柱の散乱関数から剛体円柱の散乱関数をくりだすことで共鳴散乱関数を定義した。

また、散乱関数の分母の実部が零となる周波数が存在することを示した。さらに展開係数と散乱関数の関係から、波動場が共鳴散乱をおこさない背景項および共鳴散乱を励起する共鳴項の重ね合わせによって表されることを解析的に示した。

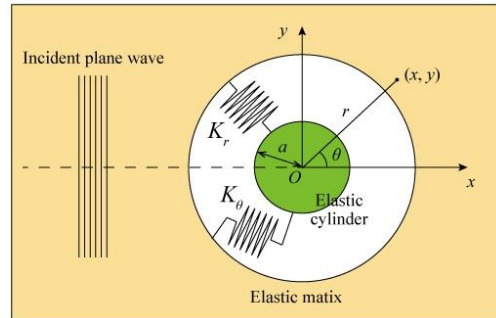


図1 バネ界面を有する繊維—母材界面モデル

(1-b) スプリング界面モデルを有する1本の繊維に対する散乱波の数値解析および実験的検討

ばね界面を有する弾性体内部の円柱によって生じる後方散乱波についての数値解析を行った。後方散乱波振幅の周波数特性と部分波における共鳴項の周波数特性との比較や、共鳴散乱関数における実部の周波数特性を数値的に解析することで、(1-a)の検討で行ったばね界面を有する円柱の共鳴散乱理論の妥当性を示した(図2)。また、後方散乱波振幅の周波数特性に現れるノッチの周波数において、円柱界面における変位分布を数値的に解析した。その結果、ノッチ周波数における円柱界面での変位分布は、ノッチに起因すると考えられる部分波の次数における円柱の固有振動に類似した分布を示すことが明らかになった。このことから、ばね界面を有する円柱の散乱波動場においても円柱の固有振動に起因して共鳴散乱現象が生じるものと考えられる。共鳴散乱関数が、共鳴周波数において位相が急激に変化することに着目し、ある次数の共鳴項とその他の次数の部分波の和の位相差を検討した。その結果、ある共鳴周波数では位相差が $\pm\pi$ となっていることが明らかになった。このため、後方散乱波振幅の周波数スペクトルには特定の周波数でノッチが生じるものと考えられる。さらに、ばね界面と完全接着界面における共鳴散乱現象の差異について考察した。それぞれの後方散乱波振幅の周波数特性、後方散乱波振幅のノッチ周波数での変位分布の数値解析の結果を比較した。その結果、完全接着界面の場合には、後方散乱波振幅の周波数スペクトルに現れるノッチはばね界面の場合よりも少なく、変位分布はいずれも複雑な形状を示すことが明らかになった。これは、共鳴散乱現象は円柱の固有振動に起因する現象であり、完全接着界面の場合にはばね界面の場合よりも円柱の固有振動が生じる条件から外れているためと考えられる。

本検討でのバネ界面モデルにおける共鳴散乱理論の妥当性の検討のため、円柱形状のアルミニウム(A5056)内部に鋼(高炭素クロム軸受鋼材, SUJ2)の円柱が圧入された試験片を対象に実験を行った。まず、鋼円柱によって生じる後方散乱波振幅の周波数特性を実験的に測定した。また、実験で

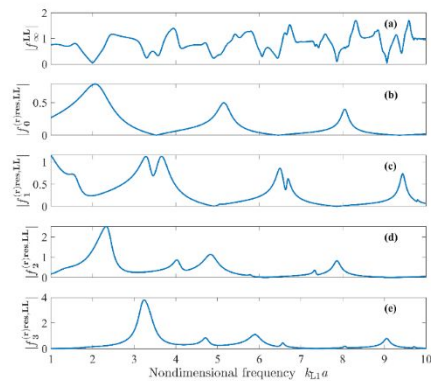


図2 後方散乱波の周波数依存性(a)と(1-a)の理論に基づく固有関数の次数ごとの共鳴項の周波数依存性(b),(c),(d),(e)

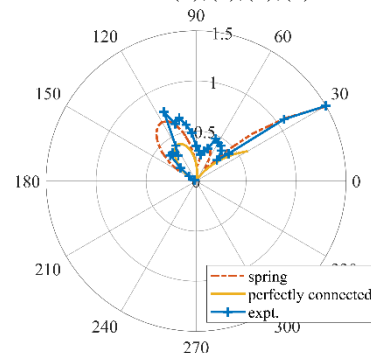


図3 鋼円柱の散乱波の散乱角度分布(青実線)とバネ界面モデル(オレンジ鎖線)および完全接続界面モデル(黄実線)の解析結果

得られた後方散乱波振幅の周波数特性とばね界面モデルおよび完全接着界面モデルにおける後方散乱波振幅の周波数特性とを比較した。その結果、本実験で用いた試験片の場合、完全接着界面モデルよりもスプリング界面モデルのほうが実験結果をよく表すモデルであることを示し、スプリング界面モデルの妥当性を示した。これに加えて、実験で得られた後方散乱波振幅の周波数特性に現れるノッチ周波数において、アルミニウム円柱の円周上の散乱波を測定した。測定を行った周波数における周波数応答の値を角度方向の依存性の一例を図3に示す。まず、定常状態の時間領域より得られた散乱波振幅の角度方向の分布と、ばね界面モデルおよび完全接着界面モデルの場合における散乱波振幅の角度方向の分布と比較した結果、実験によって得られた分布はばね界面モデルにおける数値解析の結果に類似していた。また、実験で得られた共鳴モードは、周波数特性にピークが現れる後散乱波の部分波の共鳴項の次数と一致していることを示した。これら結果から、ばね界面を有する円柱の共鳴散乱理論の妥当性を実験的に示した。

(1-c) 界面に非線形スプリング界面モデルを適用した解析手法の提案

固有関数展開による空隙幅依存型剛性モデルの定式化は著者の知る限り報告されていない。そこで、円柱界面の非線形力学特性を考慮した固有関数展開による定式化を行った。固有関数展開を用いた手法では繊維強化複合材料のような多数の円柱が存在する場合にも容易に拡張が可能であることを考慮し、固有関数展開を用いた。本定式化では、二次高調波による波動場を基本波波動場に対する摂動として扱うことで、界面の非線形性によって、二次高調波のモードが駆動される問題を解いている。

(1-d) 非線形スプリング界面モデルを有する複合材料中での弾性波散乱挙動の解析

(1-c)での定式化に基づく解析により界面の結合状態が高調波発生挙動に与える影響を数値的に検討した。単一繊維のみ存在する場合、円柱-母材界面の結合状態の指標である接触面剛性によって二次高調波の散乱波の指向特性が大きく異なることを示した。Ti合金母材とSiC円柱での前方散乱波と後方散乱波の振幅比の界面剛性依存性の解析結果を図4に示す。これにより適切な入射波の周波数を用いれば応力振幅比から接触面剛性を特定できる可能性が示唆された。また、応力振幅比と無次元化接触面剛性との関係における、半径垂直方向とせん断方向の接触面剛性の比による影響を考察した。解析結果から、接触面剛性比は無次元化接触面剛性と応力振幅比との関係に大きく影響しないことを示した。

多数の円柱が存在する繊維強化複合材料中の高調波発生挙動の解析を行い、前方と後方における高調波のエネルギー流束比と無次元化接触面剛性との関係を示した。Ti合金母材とSiC円柱での解析結果を図5に示す。無次元化接触面剛性がおよそ 10^{-1} 以下では後方へのエネルギー流束が大きく、 10^1 以上の範囲では前方へのエネルギー流束が大きいという傾向は繊維配置に依存せず、単一繊維の場合と一致することを示した。また、無次元化接触面剛性が 10^{-1} から 10^1 の範囲では、各繊維-母材界面で発生する二次高調波どうしの干渉、および複合材料中での基本波波動場の変化が原因と考えられる影響が見られた。

(2-a) 複合材料に用いられる樹脂の非線形性と減衰の評価

繊維強化複合材料は粘弾性樹脂と弾性繊維からなるため、測定により得られる弾性波伝搬特性は、損傷によるものだけでなく、繊維による散乱や樹脂の粘弾性特性や非線形弾性特性も含んでいる。特に、非線形弾性特性は高次弾性定数を用いて表されるが、樹脂などの粘弾性材料における高次弾性定数の評価は不十分であるのが現状である。繊維強化複合材料における非線形弾性特性を理解するためには、樹脂の高次弾性定数を評価する必要がある。そこで繊維強化複合材

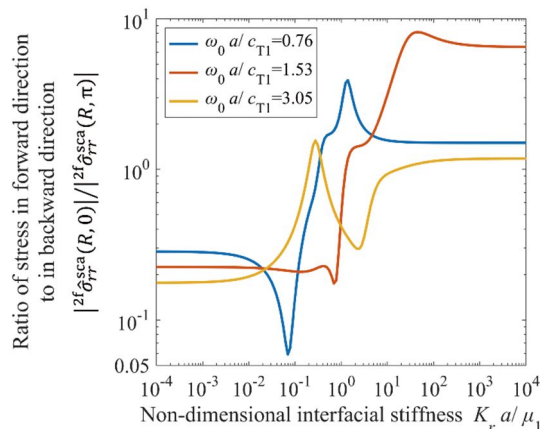


図4 単一の円柱に対する二次高調波の前方散乱波と後方散乱波の振幅比の界面剛性依存性

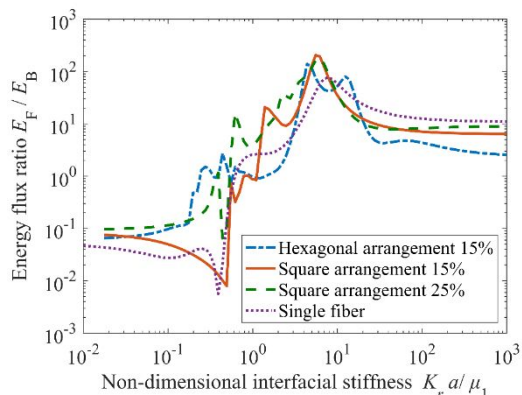


図5 複合材料中の二次高調波の前方散乱波と後方散乱波の振幅比の界面剛性依存性

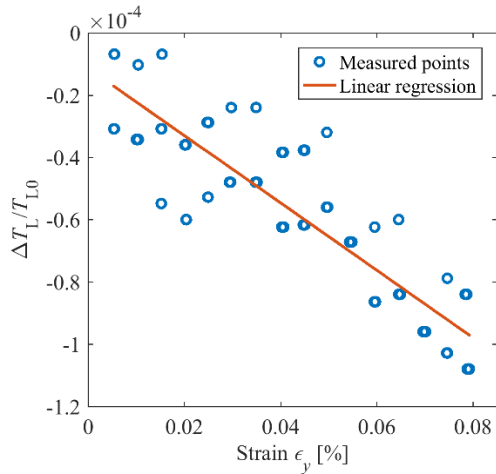


図6 母材樹脂に負荷した引張ひずみに対する伝搬時間の変化（縦波を入射した場合）

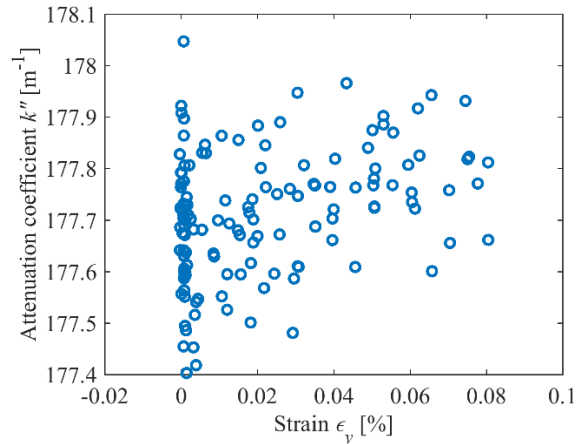


図7 減衰係数の引張ひずみに対する依存性

料の母材として用いられるエポキシ樹脂を対象として、三次弾性定数を実験的に評価することを目的とした。先行研究における音速の評価では、シングア라운드法などの複雑な実験方法が用いられてきた。しかし、近年のADコンバータの高速化・広帯域化によりオシロスコープの時間解像度が大幅に向上したことにより、より単純な実験系での音速の評価が可能となった。そこで、本検討では、最大 20 GSa/s の時間分解能を有するオシロスコープを用いることで、これまでの音速測定に関する先行研究と比べ、より単純な実験系において音弾性法に基づく非線形性の評価を行った。先行研究において音速の変化が測定されているアルミニウムを用いて実験系の妥当性を評価した後、複合材料の母材樹脂として用いられる樹脂のモデル樹脂に対して三次弾性定数を評価した。また、樹脂の粘性のひずみ依存性を評価するため、微小な単軸引張ひずみを与えながら、粘性と相関のある減衰係数を評価した。

図6は母材樹脂のひずみに対する伝搬時間の変化の一例（縦波を入射した場合）を示す。これらの結果から三次弾性定数 v_1, v_2, v_3 はそれぞれ $5.44 \pm 0.15, 1.70 \pm 0.06, -126 \pm 56, -16.9 \pm 2.1, -2.33 \pm 0.24$ GPa（1本の試験片に対して3回行った試験の平均および95%信頼区間）であり、評価されたそれぞれの三次弾性定数から、高調波発生挙動における基本波振幅の二乗と二次高調波振幅の比に比例する非線形パラメータ β は12.41と同定された。また、樹脂の粘性のひずみ依存性を評価するため、微小な単軸引張ひずみを与えながら、粘性と相関のある減衰係数を評価した結果を図7に示す。この結果から、ひずみ ϵ_y を変えた際の減衰係数の変化はみられなかった。したがって、今回の検討で負荷したひずみ0.08%までの範囲では、単軸引張ひずみによる減衰係数および粘性への影響は非常に小さく、一定とみなして良いことを示した。

本課題では、繊維-母材界面や樹脂そのものの損傷といった、ミクロスケールの損傷が非線形性を与える影響について上記のような結果を得た。特にによる影響では、界面の剛性を複合材料の前方散乱波と後方散乱波の高調波振幅比から評価しうることを示した。また、の結果からは、樹脂そのものが非線形性に与える影響について定量的に評価した。一方で、実際の繊維強化複合材料では双方の非線形性の要因による高調波が発生する。特に興味深いのが、繊維の散乱波動場と材料非線形性の連成による高調波の発生メカニズムである。繊維の散乱によって複合材料の樹脂中には局所的に繊維に大きな応力がかかる場所が発生する。非線形性によって発生する高調波は基本波振幅の二乗に比例するため、このような不均一な応力場においては樹脂の非線形性が増幅される可能性がある。このようなメカニズムについては十分に考察されておらず、繊維強化複合材料での非線形特性を考慮するうえで、今後検討される必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松田 直樹, 森 直樹, 古田 康晃, 小原 輝久, 西川 雅章, 北條 正樹
2. 発表標題 三層積層構造における2界面のばね剛性の独立推定
3. 学会等名 日本機械学会M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小原輝久, 松田直樹, 森直樹, 西川雅章, 北條正樹
2. 発表標題 接着接合部の超音波共振特性に基づく被着体汚染の評価法
3. 学会等名 第29回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小原輝久, 松田直樹, 森直樹, 西川雅章, 北條正樹
2. 発表標題 非線形ばね界面を有する三層積層構造中の非線形弾性波伝搬挙動
3. 学会等名 日本音響学会2022春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田 直樹, 山口 知紗, 西川 雅章, 北條 正樹
2. 発表標題 弾性体母材中における円柱の共鳴散乱特性の解析および母材 - 円柱界面の接触面剛性の実験的評価
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口 知紗 松田 直樹 西川 雅章 北條 正樹
2. 発表標題 ばね界面を有する弾性体円柱における弾性波の共鳴散乱理論
3. 学会等名 第40回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム (USE2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口知紗,松田直樹,西川雅章,北條正樹
2. 発表標題 母材 - 円柱界面における接触剛性の実験的評価
3. 学会等名 第11回日本複合材料会議 (JCCM-11) (大会中止のため論文原稿投稿のみ)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田直樹,野々垣拓,西川雅章,北條正樹
2. 発表標題 エポキシ樹脂における材料非線形性の実験的評価
3. 学会等名 日本機械学会若手シンポジウム2019
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
---------	---------