

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17979

研究課題名(和文) 複合材料中の繊維-樹脂界面に起因する非線形超音波伝搬挙動の解明

研究課題名(英文) Clarification of Nonlinear Ultrasonic Propagation Behavior Due to Fiber-Matrix Interface in Composite Material

研究代表者

松田 直樹 (Matsuda, Naoki)

京都大学・工学研究科・助教

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)：本研究では、複合材料中の繊維-母材界面の非線形性に起因する高調波発生挙動を数値的に検討した。数値解析の結果、繊維-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など、従来知られていなかった非破壊評価に有用と考えられる現象が確認された。これに加えて、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を対象として、その微視的・巨視的な損傷と超音波伝搬に伴う非線形性の変化との関係について検討を行った。本検討では非線形パラメータとCFRPに生じる損傷についての知見を得るとともに、減衰係数と高調波発生特性による、CFRPに生じる損傷の評価の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, harmonic generation behavior due to nonlinearity of fiber-matrix interface in composite material was numerically investigated. The results shows that the directivity characteristics of the scattered wave of the second harmonics varies depending on the contact surface rigidity which is an index of the bonding state of the fiber-matrix interface. In addition, we investigated the relationship between microscopic / macroscopic damage and change of harmonic generation characteristics in carbon fiber reinforced plastic (CFRP). In this study, we obtained knowledge on the relationship between the nonlinear parameter and the damage occurring in the CFRP, and showed the possibility of evaluating damage in CFRP by the attenuation coefficient and harmonic generation characteristics.

研究分野：動弾性力学に基づく超音波伝搬挙動、特に非線形現象を利用した超音波非破壊評価

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 共鳴散乱理論 多重散乱 炭素繊維強化複合材料

1. 研究開始当初の背景

複合材料はその比剛性、比強度や疲労耐久性等の点で優れた特徴をもち、運輸、土木などの分野において利用範囲が拡大している。特に炭素繊維を強化材、エポキシ樹脂等を母材とする炭素繊維強化複合材料は優れた力学特性を有するために大型民間航空機や一部の自動車などの構造材料として用いられている。こうした利用の拡大に応じて、精度の高い非破壊評価法の開発が、安全性の向上のみならず複合材料の製造、運用コストの削減のための重要な課題となっている。超音波を用いた非破壊評価においては、積層された複合材料のマクロな層間のはく離の検出に関して多くの検討がなされてきた。これに対し、繊維方向に対して平行なき裂を生じるような層内の破壊（トランスバース破壊）の起点となる繊維-樹脂間のはく離の評価を行うことができれば、巨視的ななき裂が生じるより前の段階で複合材料の損傷の評価を行うことができる。ところが、繊維-樹脂間のはく離は超音波の波長（数 mm～サブ mm）に比べてはるかに小さく（ μm ～ nm のオーダー）、その検出は困難であると考えられていた。一方で、金属材料においては、塑性ひずみや繰り返し応力によって生じるミクロスケールのき裂に対して、超音波伝搬に伴う非線形性に着目することで評価が可能になると期待されている。超音波伝搬に伴う特有の微弱な非線形性は、複合材料の内部損傷状態によって鋭敏に変化することが実験的な検討により知られており、革新的な非破壊評価法を実現する手法として期待されている⁽¹⁾。一方で、複合材料において、損傷によって非線形性が変化する要因やそのメカニズムについての検討は十分ではない。

2. 研究の目的

現在、複合材料に特有の非線形性の要因として、層と層のマクロなはく離に起因して生じる非線形性が知られており、理論的・実験的にメカニズムの検討が行われている⁽²⁾。しかし、繊維-樹脂界面に起因して生じる力学的非線形性については、その実験的な立証が難しく、繊維-樹脂界面のはく離と非線形超音波伝搬挙動の関係について検討した例は、申請者の知る限りでは存在しない。

また、繊維のような円柱形状の物体による弾性波の散乱問題については、繊維強化複合材料の非破壊評価や地震学などの分野において数多くの研究が行われてきた。円柱による弾性波の散乱問題において特徴的な現象の一つに、特定の周波数で円柱の固有振動を励起する共鳴散乱と呼ばれる現象がある。共鳴散乱により生じる波動場は、円柱の物性や円柱-母材界面の結合状態などの影響を受ける。実際の超音波測定では、検査対象の円柱以外にも反射や散乱を生じることが多いが、共鳴散乱のような周波数に対する急峻な変化はこれらのノイズから分離しやすい。以上の特徴から、共鳴散乱現象は非破壊評価に応用でき

ると期待されている。その一方で、散乱波の特徴的な変化を引き起こす共鳴現象は複雑である。

本研究では、繊維-樹脂間のはく離と非線形超音波伝搬挙動の関係を明らかにすることを目的とする。これにより非線形超音波法による繊維-樹脂界面の損傷状態のモニタリングを実現する可能性を拓く。はく離の生じた界面は非線形な応力-開口変位関係を有することで知られており、例えば積層材料における層間の接着状態をモデル化するのに用いられている。そこで第一に、繊維-樹脂間に本モデルを適用することで、数値的に超音波伝搬挙動を解析することで、繊維-樹脂間のはく離と非線形超音波伝搬挙動の関係を明らかにする。さらに本解析結果を共鳴散乱理論の検知から解釈することにより、繊維-母材間の特性に敏感な手法に関する理論的な検討を行う。また、第二に直交積層 CFRP における、微視的な損傷が非線形超音波伝搬挙動に与える影響を評価することで、本モデルの妥当性を検証する。

3. 研究の方法

第一の検討として、共鳴散乱理論に基づき、繊維強化複合材料のような多数の円柱を有する材料中の弾性波散乱挙動、および円柱界面における二次高調波発生挙動を評価することを目的とした。この目的を達成するため、本検討では主に、多重散乱の効果を考慮可能な、固有関数展開による手法を用いた。本手法は、複合材料中の波動場を固有関数を用いて解析解の重ね合わせとして表現し（固有関数展開）、その係数行列に関する方程式を立てて解く、半解析的な手法である。

また、直交積層 CFRP における、微視的な損傷が非線形超音波伝搬挙動に与える影響を評価することを目的とし、直交積層 CFRP において静的引張負荷によって生じた損傷が高調波発生特性に与える影響を評価した。特に、引張負荷中に継続的に波形を記録することで、負荷中の高調波発生特性の変化を評価した。また、デジタルマイクロスコープを用いたその場観察やレプリカ法による損傷評価を行い、高調波発生特性の変化と損傷の挙動を対応させて検討を行った。なお、本検討にあたり、ジグの試作および観察条件の最適化のためのジグの作成において、本研究費にて購入したレーザー加工機（桜井株式会社）を用いた。

4. 研究成果

以下に第一の検討の成果として(1)-(4)、第二の検討の成果として(5)、(6)を示す。

(1) 弾性体中の弾性体円柱上の界面波の分散関係に関する理論的解析

散乱波の特徴的な変化を引き起こす共鳴現象は円柱を含む材料中を伝搬する弾性波に大きな影響を与える。共鳴現象は、円柱とそれを取り囲む母材との間に発生する界面波と強い関係がある。一方で、円柱の周りの界面波の

波数は周波数に対して複雑に変化する．そこで本研究では，固体円柱において共鳴散乱を生じる周波数を導出するために，円柱界面を伝搬する界面波の分散関係を数値的に解析し，円柱の各振動モードの固有振動数とその固有振動を引き起こす界面波を求めた．円柱上の界面波の分散関係式は，

$$\det \mathbf{K}_{\hat{n}}^{\text{perf}} = 0,$$

と与えられる．ここで $\mathbf{K}_{\hat{n}}^{\text{perf}}$ は，波数 \hat{n} の波に対する垂直および接線応力・変位の連続を仮定した際の入射波および散乱波の係数を表す行列である．ただし波数 \hat{n} は複素数である．エポキシ樹脂中のステンレス鋼円柱に対する分散曲線を図1に示す．図では $l=1,2,3$ で表現された複数の曲線が示されているが，これはある周波数に対して上記の分散関係式を満たす \hat{n} が複数存在することを示している．円周上の波の数 $\text{Re}[\hat{n}_l]$ が整数 n となる周波数では，円柱を一周した波と元の波の位相が一致し，干渉によって強め合い円柱の固有振動を引き起こす．図より， $\text{Re}[\hat{n}_l]$ が整数となる周波数を求めることができる．本周波数は円柱における共鳴散乱の影響を考慮する上で重要な意味を持つ．

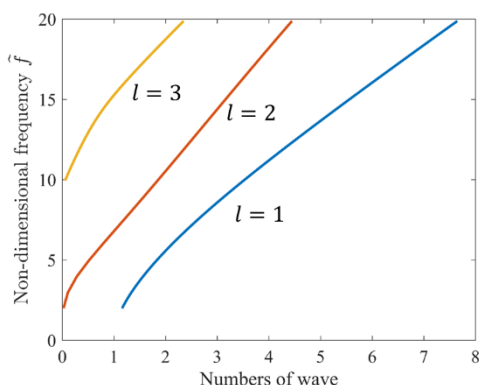


図1 円柱上の界面波の分散曲線

(2) 共鳴散乱理論に基づく複合材料中の弾性波散乱挙動の解析

繊維における共鳴散乱現象に着目して複合材料の非破壊評価を行うためには，多重散乱を考慮した弾性波伝搬挙動を検討する必要がある．しかしながら，共鳴散乱を扱った研究では単一の円柱か，非常に少数の円柱に対する検討が多く，多数の円柱による多重散乱を考慮した研究は極めて少ない．そこで，多数の繊維が存在する複合材料中の弾性波散乱挙動の数値解析を行い，繊維体積含有率や繊維配置，繊維-母材界面の結合状態が後方散乱波振幅に与える影響を考察した．

その結果，繊維体積含有率が 20%，40%，60% の正方配列の複合材料モデルでは，多くの共鳴周波数において，単一繊維モデルの場合と同様の後方散乱波振幅の減少が見られた (図2)．これらの周波数では，共鳴している表面の繊維群による散乱波が複合材料モデルにお

ける後方散乱波振幅に対して大きく影響を与えていることが明らかになった．また，繊維体積含有率が大きくなるにつれて，表面の繊維における回折波が複合材料内部の繊維群に与える影響が小さくなる．そのため，複合材料内部の繊維群による散乱波は小さくなり，複合材料モデルにおける後方散乱波振幅には，表面の繊維群による後方散乱波振幅の減少という共鳴の特徴がより明瞭に表れることが明らかになった．次に，正方配列と六方配列の複合材料モデルの検討から，複合材料の各繊維における散乱波の指向特性が多重散乱によって変化するため，繊維配置によっては共鳴散乱による後方散乱波振幅の減少が明瞭に表れない場合があることを示した．また，正方配列の複合材料モデルでは単一繊維モデルと同様に，接触面剛性の影響により共鳴周波数において後方散乱波振幅の減少量が変化した．一方，六方配列の場合には共鳴周波数において，単一繊維モデルで見られるような接触面剛性と後方散乱波振幅の減少量との対応関係は見られなかった．したがって，共鳴周波数における単一繊維モデルの接触面剛性と後方散乱波振幅の減少量との対応関係は，正方配列のように単一繊維モデルと同様の後方散乱波振幅の減少を示す繊維配置を除いて，繊維配置によっては明瞭に表れなくなることが示唆された．

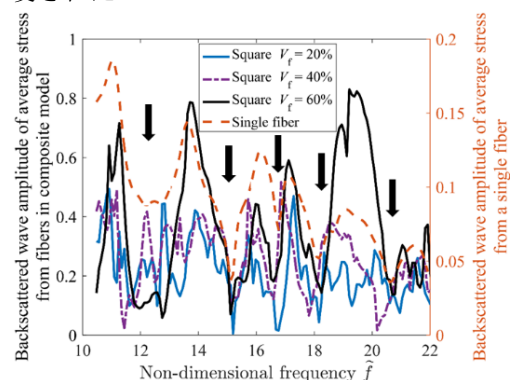


図2 単一繊維および複数の繊維を含む複合材料の後方散乱振幅の周波数依存性

(3) 円柱界面における高調波発生挙動の解析

円柱-母材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い，基本波と二次高調波の展開係数の関係式を示した．この解析手法により，円柱-母材界面における二次高調波発生挙動を解析することが可能となった．また，本定式化に基づく解析により，界面の結合状態が二次高調波発生挙動に与える影響を数値的に検討した．SiC 繊維強化 Ti 合金基複合材料を対象とした数値解析の結果，接触面剛性によって界面で発生する二次高調波の指向特性が大きく異なることを示した．さらに，無次元化接触面剛性がおよそ 10^2 以下では二次高調波の後方散乱波振幅が大きく， 10^2 以上の範囲では前方散乱波振幅が大きくという傾向は複数の入射波周波数に関わらず

一致した。一方、無次元化接触面剛性がおよそ 10^2 から 10^0 の範囲における接触面剛性と散乱波振幅比との関係は周波数により異なった。以上の関係から、適切な入射波の周波数を用いることで散乱波振幅比から接触面剛性を評価できる可能性が示唆された。また、半径に対して垂直方向とせん断方向の接触面剛性比は、接触面剛性と散乱波振幅比との関係に大きく影響しないことを示した。

さらに、多数の繊維が存在する複合材料中の二次高調波発生挙動の解析を行い、前方と後方における二次高調波のエネルギー流束比と接触面剛性との関係を示した。無次元化接触面剛性がおよそ 10^{-1} 以下では後方へ、 10^{-2} 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^{-2} 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複数のピークが見られた。

(4) 共鳴現象と二次高調波発生挙動との関係についての検討

前項(3)で提案した解析手法により二次高調波発生挙動の周波数特性を数値的に検討することで、共鳴現象と二次高調波発生挙動との関係を考察した。界面で発生する二次高調波の周波数が円柱の固有振動数に近い領域では、二次高調波の前方・後方散乱波振幅比および指向特性が大きく変化することを示した(図3)。また、これらの変化は、界面で発生する二次高調波によって励起される円柱の固有振動に起因することが示唆された。したがって、界面で発生する二次高調波によって円柱の固有振動が励起され、二次高調波の散乱波動場が周波数に対する急峻な変化を示すことから、これらの現象は二次高調波の共鳴現象であると解釈された。また、共鳴周波数では、励起される固有振動の振動分布に類似した指向特性が表れることを示した。さらに、基本波の共鳴周波数では、基本波の共鳴散乱により界面の振動分布が変化し、二次高調波発生挙動に影響を与えることを示した。円柱

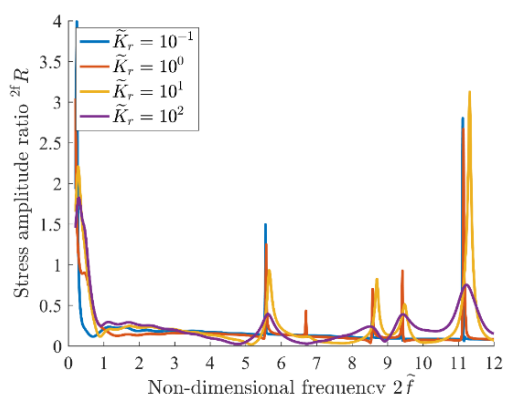


図3 二次高調波における前方・後方散乱波の振幅比の周波数依存性

母材界面の変位差は基本波により励起される固有振動の影響を受け、二次高調波の指向特性はその振動分布に類似することが明らかになった。また、二次高調波の共鳴周波数において二次高調波の発生エネルギー量が大きく変化することを示した。これらの変化は円柱の固有振動などに起因していると考えられるが、詳しい原因は不明である。

(5) 直交積層 CFRP における減衰率の変化が高調波発生挙動に与える影響

一般に、弾性波の減衰は非線形パラメータ β' の評価に影響を与えうる。そのため、負荷前後での減衰率の変化を考慮した非線形パラメータ β' の評価について検討した。まず、直交積層 CFRP 試験片の減衰率を引張負荷の前後にそれぞれ実験により評価した。実験の結果、負荷前の減衰係数は周波数に対して線形なことが示された(図4)。また、負荷後の減衰係数について周波数に対して線形な成分と振動する項が足しあわされていることが示唆された。続いて、損傷前後で減衰係数が変化するモデルを導入し、減衰とその変化を考慮した非線形パラメータ β' の評価について検討した。また、入射波に含まれる二次高調波成分についても考慮し、非線形パラメータ β' の評価に与える影響を検討した。実験結果を参考に、負荷前・負荷後の減衰係数がそれぞれ周波数に対して線形であると仮定すると、減衰係数は非線形パラメータ β' に影響を与えないことが示された。また、入射波に含まれる二次高調波成分は、非線形パラメータ β' の変化に対して影響を与えないことが示された。このことから、非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ を用いて評価を行うことで、減衰や入射波に含まれる高調波成分の影響を受けず、材料の非線形性の変化を評価できることが示された。

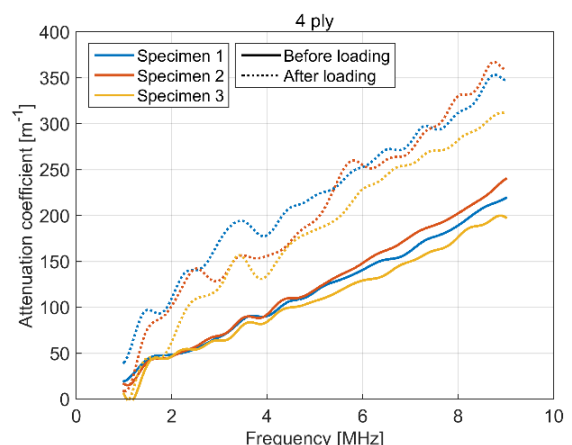


図4 引張負荷の前後における直交積層 CFRP の減衰係数の周波数特性

(6) 直交積層 CFRP 中の損傷が高調波発生挙動に与える影響

直交積層 CFRP 試験片において、引張負荷によって生じた損傷が高調波発生特性に与える影響について検討を行った。試験片に対して

準静的引張負荷により損傷を与えるとともに、負荷中は継続的に弾性波を入力・記録することで、負荷中の非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ の増減を評価した。また、デジタルマイクロスコープを用いたその場観察やレプリカ法により試験片に生じた横き裂密度および発生した層間はく離の大きさを評価した。非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ の変化と評価した損傷をあわせて考察を行い、非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ を変化させる要因について検討を行った。

はじめに、積層構成の異なる直交積層 CFRP 試験片に対して、引張負荷により損傷を与え、それによる非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ の変化について検討した。その結果、どの積層構成においても、ひずみを負荷する過程では非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ は減少し、ひずみを除荷する過程では非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ が増加していた。この挙動は材料非線形性に由来すると考えられる。材料の損傷による非線形性の変化に着目するために、ひずみがゼロの間の非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ の平均をとり平均非線形パラメータ変化 $\overline{\Delta\beta'}$ を求めた (図 5)。90°層の厚い試験片では負荷した最大のひずみに応じて平均非線形パラメータ変化 $\overline{\Delta\beta'}$ は上昇し、90°層が薄い試験片では平均非線形パラメータ変化 $\overline{\Delta\beta'}$ は減少する傾向がみられた。本研究で用いた試験片は積層構成によって損傷形態が異なっていると考えられるので、平均非線形パラメータ変化 $\overline{\Delta\beta'}$ を増加させる損傷と減少させる損傷が存在することが示唆された。また、0°一方向材でも同様に平均非線形パラメータ変化 $\overline{\Delta\beta'}$ を評価したところ、その変化は非常に小さかった。このことから、平均非線形パラメータ変化 $\overline{\Delta\beta'}$ に対する 0°層の影響が小さく、90°層や 0°-90°層間に発生する損傷によって平均非線形パラメータ変化 $\overline{\Delta\beta'}$ が変化すると考えられる。さらに、非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ の変化履歴において、非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ の不連続な増加や、極大値をとるような挙動など、積層構成によって特徴的な変化が観測された。

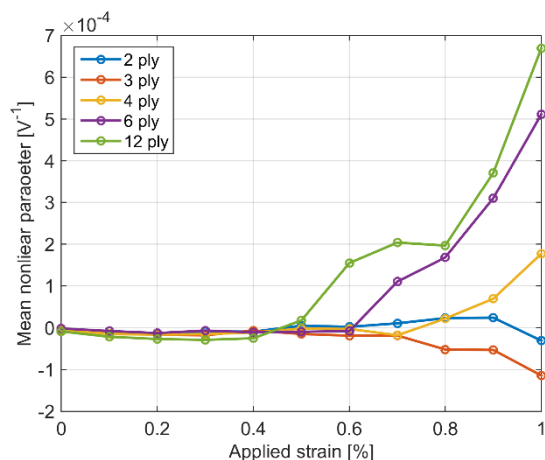


図 5 直前に負荷した引張ひずみに対する平均非線形パラメータ変化の関係

次に、レプリカ法による微視観察を行い、積層構成ごとの損傷形態の比較を行った。レプ

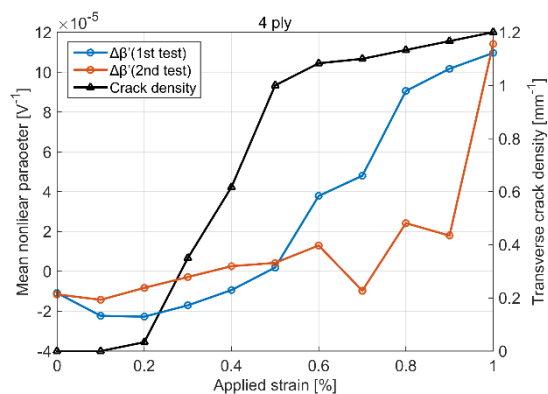


図 6 引張ひずみに対する平均非線形パラメータの変化と横き裂密度の関係

リカから横き裂密度を評価し、平均非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ と比較した。その結果、横き裂密度の急増するひずみと、平均非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ の大きく増減するひずみの大きさが約 0.3% 異なっており、非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ の横き裂密度依存性は小さいことが示された (図 6)。

さらに、デジタルマイクロスコープによるその場観察を行いながら、引張負荷および高調波発生特性の評価を行った。まず、低倍率で比較的広い範囲を観察し、損傷の発生する時刻と非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ の変化する時刻を比較した。次に、発生した横き裂に追従するように高倍率で観察を行うことで、発生した横き裂がひずみの負荷除荷に伴ってどのような挙動を示すかを評価した。非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ の不連続な増加がみられた 90°層の厚い試験片において、デジタルマイクロスコープによる観察から、非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ の不連続な増加とほぼ同時に横き裂が発生している様子が観察された。一方、高倍率の観察では横き裂の発生と同時に層間はく離が観察された。さらに、非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ の横き裂密度依存性は小さいことから、非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ の急増は、層間はく離が原因であると考えられる。逆に、90°層の薄い試験片では、均非線形パラメータ β' の変化が小さいことや、低倍率では判別できないほど横き裂が小さいこと、層間はく離が発生していない様子が観察された。これは、非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ が横き裂密度に依存しないことや、層間はく離によって、非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ が急増するという考察を支持している。

今回対象とした試験片の中では中程度の 90°層厚さを持つ試験片では、ひずみを負荷あるいは除荷する過程で、非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ がいったん増加した後に減少し、負荷あるいは除荷中に非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ が極大値を示す挙動を示していた。そこで、横き裂の開閉口による弾性波伝搬特性の変化に着目し、ひずみを除荷する過程における横き裂の挙動を観察した。しかし、横き裂は、非線形パラメータ変化 $\Delta\beta'$ が極値をとった後も閉口していなかった。したがって、非線形パラメ

ータ変化 $\Delta\beta$ が極値を示す挙動に対してき裂の閉口が与える影響は小さいといえる。最後に、前項で評価した損傷形態および非線形パラメータ変化 $\Delta\beta$ の特徴と、本報告書の項目 (5) において評価した減衰特性との関係について考察した。損傷後の減衰係数について、試験片ごとのばらつきはあるが、積層構成に対する規則性は見られなかった。一方、非線形パラメータ変化 $\Delta\beta$ は積層構成ごとに異なる傾向を示していたことから、減衰特性と高調波発生特性は、それぞれ異なる要因から影響を受けていると考えられる。したがって、減衰特性の評価と、高調波発生特性の評価で、それぞれ異なる損傷の評価に利用できることが示された。

<引用文献>

1. Meo et. al., J. Acoust. Soc. Am., 2011.
2. S. Biwa, T. Shibata, *Compos. Sci. Tech.*, 2000.

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 2 件)

- ① 河原 康太, 松田直樹, 北條正樹, 西川雅章, 「円柱界面における非線形力学特性を考慮した高調波発生挙動の数値解析法」, 日本機械学会論文集, 査読あり, 83, 2017, pp. 16-00587.
- ② 松田直樹, 「材料非線形を有する材料中のラム波の伝搬挙動」, 超音波 TECHNO, 査読なし, 5-6, 2018, pp. 66-71.

[学会発表] (計 7 件)

- ① 山本洋介, 松田直樹, 北條正樹, 西川雅章, 「静的負荷中の CFRP における高調波発生特性の実験的評価」, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス, 2016, OS04-06.
- ② 河原康太, 松田直樹, 北條正樹, 西川雅章, 「一方向繊維強化複合材料中の繊維-母材界面における高調波発生挙動の数値解析」, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス, 2016, OS12-17.
- ③ 山本洋介, 松田直樹, 北條正樹, 西川雅章, 「静的引張負荷による損傷が CFRP の高調波発生特性に与える影響の実験的検討」, 第 24 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 2017, 6-4.
- ④ 河原康太, 松田直樹, 北條正樹, 西川雅章, 「繊維-母材界面における非線形性を考慮した一方向繊維強化複合材料中の高調波伝搬挙動の数値解析」, 第 24 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 2017, 6-5.
- ⑤ 河原康太, 松田直樹, 北條正樹, 西川雅章, 「一方向繊維強化複合材料中における弾性波の共鳴散乱に関する基礎的検討」, 複合材料学会第 42 回複合材料シンポジウム, 2017, A2-3-2.

- ⑥ 山本洋介, 松田直樹, 北條正樹, 西川雅章, 「直交積層 CFRP 中の横き裂が非線形弾性波伝搬特性に与える影響」, 複合材料学会第 42 回複合材料シンポジウム, 2017, A2-3-3.
- ⑦ Naoki Matsuda, Kota Kawahara, Masaki Hojo, Masaaki Nishikawa, “On relationship between contact surface rigidity and harmonic generation behavior in composite materials with mechanical nonlinearity at fiber-matrix interface”, 15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT), 2017, #3853.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

なし

[その他]

京都大学アカデミックデイ 2016 および京都大学アカデミックデイ 2017 において、研究成果の報告およびアウトリーチ活動を行った。
<http://research.kyoto-u.ac.jp/academic-day/2016/>
<http://research.kyoto-u.ac.jp/academic-day/2017/>
ホームページにて研究成果の報告を行った。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 直樹 (Naoki MATSUDA)

京都大学・工学研究科・機械理工学専攻・助教

研究者番号：90756818

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし