

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	曲繊維CFRPを伝搬する弾性波挙動の解明
Title(English)	
著者(和文)	芦澤剛
Author(English)	Takeshi Ashizawa
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11412号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:水谷 義弘,轟 章,井上 裕嗣,因幡 和晃,中野 寛,青野 祐子
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11412号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

# 論文要旨

## THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学) Academic Degree Requested Doctor of
学生氏名： Student's Name	芦澤 剛		指導教員 (主)： 水谷 義弘 Academic Supervisor(main)
			指導教員 (副)： 轟 章 Academic Supervisor(sub)

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

第 1 章「緒論」では、研究の背景と目的を示した。本論文は、曲率を有する繊維をもつ炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) の内部を伝搬する弾性波の挙動について調べた研究である。固体材料を伝搬する弾性波は、超音波デバイスや非破壊検査をはじめとする工学分野において、広く利用されている。等方性材料を伝搬する弾性波挙動に関する多くの理論は既に構築されている。また、連続かつ直線形状の繊維をもつ CFRP を伝搬する弾性波挙動に関する理論についても既に構築されている。これに対して、曲率を有する繊維 (以下、曲繊維) をもつ CFRP を伝搬する弾性波挙動に関する理論については構築されておらず、十分な知見も得られていない。さらに近年では、3D プリントによる連続繊維 CFRP の成形に関する研究・開発が盛んに行われていることから、今後は自由な繊維配向を持つ CFRP 構造が増えることが予測される。そのため、曲繊維 CFRP を伝搬する弾性波の挙動を明らかにし、その理論を構築する必要がある。以上の背景から、曲繊維 CFRP の弾性波伝搬挙動の解明と理論の構築、構築した理論の応用例を示すことを研究目的とした。

第 2 章「数値シミュレーションによる弾性波伝搬挙動の可視化」では、曲繊維 CFRP における弾性波の 2 次元伝搬挙動を可視化するために、有限差分法を用いた数値シミュレーションを行った。CFRP の繊維が直線形状である場合には、波面形状が群速度分布曲線の形状と一致することを確認した上で、曲繊維である場合には一致せず、波面形状が繊維の方向にゆがむことを明らかにした。さらに曲繊維 CFRP に線音源を付与した場合、波面が傾きを変えながら伝搬していくことを示した。

第 3 章「超音波可視化装置による弾性波伝搬挙動の可視化」では、曲繊維 CFRP 試験片を伝搬する弾性波を、レーザー超音波可視化装置 (LUVI) を用いることで実験的に可視化した。これによって第 2 章の数値シミュレーション結果の検証を行い、さらに 3 次元的に伝搬した場合の波面形状についても調査した。繊維含有率が一定であることなどの条件下では、連続繊維 CFRP は直線形状繊維 CFRP と同心円形状に曲繊維を持つ CFRP の組み合わせとして表現できることを指摘し、曲繊維の中でも同心円形状曲繊維に着目することとした。3D プリンタを利用して作製した同心円形状曲繊維 CFRP 試験片中の弾性波の 2 次元伝搬挙動を LUVI によって可視化し、第 2 章で得たシミュレーション結果が妥当であることを示した。さらに、厚さが異なる同心円形状曲繊維 CFRP 試験片を用意し、それぞれの試験片について弾性波の伝搬挙動を可視化することで、弾性波が同心円形状曲繊維 CFRP を 3 次元的に伝搬する場合には、その波面形状がクロワッサン型にゆがむことを示した。

第 4 章「波面形状のゆがみを予測する Stip 法の提案」では、曲繊維 CFRP 中を弾性波が 2 次元的に伝搬した場合について、その波面形状ゆがみを予測するための方法を提案した。この提案した最短時間経路線分布図法 (Stip 法: Shortest time path distribution method) は、材料の群速度分布曲線を用いて波面形状を求める方法であり、材料中に点音源と経路線の終点を定め、これらを結ぶ経路線の到達時間を最短にするようにすることで波面形状を求めるものである。Stip 法で推定した波面形状と LUVI で実測した波面形状が一致することを示し、提案手法の有効性を明らかにした。

第 5 章「同心円形状曲繊維 CFRP の弾性波伝搬挙動に関する相似則」では、同心円形状曲繊維 CFRP を伝搬する弾性波の波面形状に関する相似則について示した。伝搬時間、代表群速度、曲率中心からの距離からなる無次元数を定義し、これが同値の条件では、波面形状が幾何学的に相似形になることを発見した。これについて、2 次元および 3 次元的に伝搬するバルク波について、支配方程式に基づいた数学的な証明を行い、同心円形状曲繊維 CFRP が均質円筒異方性材料かつ線形弾性体であるとみなせる場合に、この相似則が成立することを示した。また、LUVI による可視化実験を行い、実際の同心円形状曲繊維 CFRP 試験片においても相似則が成立することを示した。

第 6 章「曲繊維 CFRP に関する弾性波の挙動と理論の応用」では、前章までに解明した曲繊維 CFRP 中の弾性波伝搬挙動と、提案した理論の応用例を示した。具体的には超音波の伝搬経路を切り替える超音波経路スイッチへの応用例と、曲繊維 CFRP におけるアコースティック・エミッション源の位置標定問題への応用例について、可視化実験を行って適用の可能性を示した。また、曲繊維 CFRP におけるフェーズドアレイ探傷の実施に対する適用の可能性を、数値シミュレーションによって示した。

第 7 章「結論」では、本研究の各章で得られた成果を総括して述べるとともに、本研究で構築した曲繊維 CFRP の弾性波伝搬挙動に関する知見と理論についてまとめた。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	( 工学 )
学生氏名： Student's Name	芦澤 剛		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	水谷 義弘
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)	轟 章

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words )

This paper describes a study for the elastic wave propagation in CFRP (Carbon fiber reinforced plastic) with curved fibers.

In chapter 1, it is described that the behavior of elastic wave propagation in CFRP with curved fibers needs to be clarified and formulated for engineering fields such as non-destructive testing and ultrasonic device.

In chapter 2, 2D elastic wave propagation in CFRP with curved fibers was visualized by the numerical simulation with finite difference method. It was realized that the wave front shape was distorted in the fiber direction.

In chapter 3, the results in chapter 2 was confirmed by the visualization experiment for 3D printed CFRP specimen with concentrically curved fibers. Furthermore, it was shown that the wave front shape was distorted in a croissant shape when elastic wave propagates three-dimensionally through the specimen.

In chapter 4, the method, Stip (shortest time path distribution method), to estimate the two-dimensional wave front distortion of CFRP with curved fibers was proposed. Using this method, wave front distortion can be obtained only from group velocity distribution curve of the materials. The utility of the proposed method was proved by showing that the estimated wave front shape matched to that from the experiment.

In chapter 5, the dimensionless number consisting of propagation time, representative group velocity and distance from the center of the curvature was defined, and the similarity law for elastic wave propagation in CFRP with concentrically curved fibers was described based on this number. It was found that the wave front shape of elastic waves with the same dimensionless number becomes geometrically similar. This similarity law was proved mathematically from governing equation, and verified by conducting experimental visualization for 3D printed CFRP specimen.

In chapter 6, the application examples which are applying characteristic elastic wave behavior in CFRP with curved fibers and the theories proposed up to the previous chapters are introduced.

In chapter 7, the results obtained in each chapter of this study was summarized.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).