

|             |   |
|-------------|---|
| 氏 名         | じょう しゅんけつ<br>常 俊 傑                            |
| 学位(専攻分野)    | 博 士 ( 工 学 )                                   |
| 学 位 記 番 号   | 博 甲 第 3 8 9 号                                 |
| 学位授与の日付     | 平成 17 年 3 月 25 日                              |
| 学位授与の要件     | 学位規程第 3 条第 3 項該当                              |
| 研 究 科 ・ 専 攻 | 工芸科学研究科 先端ファイブ科学専攻                            |
| 学 位 論 文 題 目 | <b>複合材料における超音波伝播挙動解析と材料特性評価への応用研究</b><br>(主査) |
| 審 査 委 員     | 教授 岩本正治<br>教授 中山純一<br>教授 濱田泰以<br>助教授 倪 慶清     |

## 論文内容の要旨

高分子系複合材料は軽量、高比強度・比剛性など多くの優れた特性を有していることから、航空機や宇宙構造物など様々な分野に応用されている。このような優れた特性を持つ反面、母材のクラックや繊維の破断または繊維／母材界面のはく離、層間のはく離といった損傷が生じやすい。これらの損傷は材料表面からの目視検査では検出困難であり、複合材料部材・構造物の信頼性、安全性の確保に支障をきたしている。そこで、材料・構造物のヘルスマonitoring技術が不可欠である。その中で近年超音波ヘルスマonitoring技術が注目され、超音波画像検査、超音波レーザーなどの超音波探傷に関する機器の開発や安全性、有効性の検証に有限要素法によるシミュレーションが行われている。しかしながら、高分子系複合材料では、材料の異方性や母材の粘弾性効果または母材／繊維界面での反射や屈折、散乱などが生じ、超音波の伝ば挙動は非常に複雑ため、超音波伝ばシミュレーションに関する研究は限られている。

そこで、最近開発された時間領域有限要素法（PZFlex）を用い、高分子系繊維強化型複合材料に対し、複雑な超音波伝ば挙動を明らかにするため、単なる界面形状および繊維形状を含む複合材料モデルを用い受信波形への影響を解析し、その結果を可視化することで超音波の伝ば特性を解明した。特に、繊維による波動散乱や母材の粘弾性によるエネルギー損失を考慮した超音波伝ば減衰特性のメカニズムを検討し、母材と繊維の材料特性、複合材料の微視構造と、巨視的な超音波伝ば特性との関連の一端を明らかにした。本論文は、これらの研究成果をまとめたもので、第 1 章から第 8 章で構成されている。以下に各章の研究結果を要約する。

第 1 章は緒論である。

第 2 章では、本論文で議論される超音波の数値解析及び実験的検討の基礎となる弾性波動方程式を述べ、超音波の伝ば特性解析コード（Pzflex）の特徴についても述べた。また、この時間領域有限要素解析コードを用いて弾性繊維と粘弾性母材からなるモデル複合材に対し、超音波伝ばエネルギー損失を評価し、複合材料を伝ばする超音波の基礎的特性を確認した。特に、母材の粘弾性によるエネルギー吸収、弾性繊維による散乱、および繊維の配列による伝ばエネルギーへの影響を調べ、超音波伝ば減衰特性のメカニズムの一端を解明した。

第 3 章では、繊維／母材界面における超音波伝ば様子を数値解析シミュレーションを用いて調べた。その結果、繊維／母材界面での反射、透過及び散乱からなる複雑な超音波伝ばメカニズムの一端をガラス繊維とエポキシ母材の界面形状、はく離の有無を比較検討することにより明らかにした。特に、界面形状の変化により超音波の透過エネルギーが大きく変化していることがわかった。また、繊維と母材界面でのはく離領域幅は超音波エネルギー反射率に大きな影響を及ぼしていることを明確にした。

第 4 章では、斜め界面および単繊維埋蔵複合材料モデルを用い、はく離の有無による超音波伝ば特性の違いを調べ、縦波と横波における繊維／母材界面及び繊維内部の散乱による波動への顕著な影響を明らかにした。また、反射縦波、反射横波、透過縦波及び透過横波の 4 つの波を分けて考察を行い、先の二つのモデルにおける複雑に応力波分布の一端を明らかに

した。

第5章では、繊維／母材界面に中間層を有する3P複合材料を取り上げ、超音波伝ば特性解析は中間層を有する複合材料の損傷評価への応用が可能であることを示した。中間相にはく離損傷を有するモデル複合材では、透過と反射エネルギーは中間相のインピーダンスのみならず、損傷領域の大きさとその方位及び入射波に対する入射角度によって複雑な時間履歴変化を示すことが確認された。

第6章では、シリカ充填ゴム材料の粘弾性特性評価を行うため、超音波による底面反射波法と表面反射波法の測定理論を明確にし、超音波伝ば解析と実際の超音波実験をともにを行い、同材料の粘弾性を評価した。両手法間の評価誤差は非常に小さいことを明らかにした。また、実験結果との比較から、両手法の妥当性が確認された。

第7章では、解析と実験の両面から、縦波パルスの入射波に対して、相互相関関数を用い、群遅延時間を精度よく求めることにより、薄層材料の物性（音速、密度、ヤング率など）を間接に評価するアプローチを確立した。また、同アプローチは横波にも同様に適用でき、せん断弾性係数間接測定の可能性が示された。

第8章は本論文の総括である。

## 論文審査の結果の要旨

本論文では、時間領域有限要素解析コード（PZFlex）を用い、高分子系繊維強化型複合材料における複雑な超音波伝ば挙動の一端を明確にし、また実験実測とともに超音波伝ば解析に基づき、実用材料の物性評価のアプローチを明らかにした。とりわけ、まず、複合材料中を伝ばする超音波の基本特性に対して、母材の粘弾性によるエネルギー吸収、繊維による散乱及び繊維の配列による伝ばエネルギーへの影響を調べ、超音波伝ば減衰特性のメカニズムの一端を解明した。また、繊維／母材界面における超音波伝ば挙動に対して、繊維／母材界面での反射、透過及び散乱からなる複雑な超音波伝ばメカニズムの一端をガラス繊維とエポキシ母材の界面形状、はく離の有無を比較検討することにより明らかにした。特に、界面形状の変化、繊維と母材界面でのはく離損傷領域有無とそのサイズ・位置による超音波の透過エネルギー、反射エネルギーに大きな影響を及ぼしていることが確認された。また、反射縦波、反射横波、透過縦波及び透過横波の4つの波を分けて考察を行い、縦波と横波における繊維／母材界面及び繊維内部の散乱による波動への顕著な影響を明らかにし、複合材料における複雑な応力波の分布の一端を明らかにした。その上、実際のシリカ充填ゴム材料を用い、超音波計測を行い、超音波伝ば解析とともに超音波による高分子系複合材料の物性評価の可能性を検討した。また、材料層内の多重反射を利用し、検出波に相互相関関数法を適用することで薄層材料でも材料の物性評価が可能であることが明確された。

なお、本論文の内容は主に下記の4篇の論文を基礎に構成されたものである。これらの論文のうち2編は申請者が筆頭著者となっている。

### 【本学位論文の基礎となった学術論文】

1. Junjie Chang, Qing-Qing Ni and Masaharu Iwamoto, “Simulation of Ultrasonic Wave Propagation in Model Composite Materials ” Japanese Journal of Applied Physics, Vol.43, No.5B, 2004, pp.2926-2931.
2. Qing-Qing Ni, Junjie Chang and Masaharu Iwamoto, “Ultrasonic Wave Propagation in Single Fiber Composite ” Information, An International Journal, 掲載可
3. Qing-Qing Ni, Junjie Chang, and Masaharu Iwamoto, “Evaluation of Interfacial Behavior of Fiber/Matrix Based on Ultrasonic Wave Propagation ”, Composite A, 投稿中
4. Junjie Chang, Qing-Qing Ni, Masaharu Iwamoto, “Simulation of Ultrasonic Wave Propagation in Composite Materials”, Proc. 8th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition Tokyo, (JISSE-8), 2003, pp.1059-1062.

【参考論文】

- 1) 倪慶清, 常俊傑, 岩本正治, “纖維／母材界面における超音波伝播シミュレーション”, 超音波 TECHNO, 5-6, pp.63-68 (2004) (解説)
- 2) Junjie Chang, Qing-Qing Ni and Masaharu Iwamoto, “Simulation of Ultrasonic Wave Propagation no Fiber/Matrix Interface”, Present Study and Application of Composite Materials, CJAJCC-6 2004, pp.92-98.
- 3) 常俊傑, 倪慶清, 岩本正治, “複合材料媒体における超音波伝播シミュレーション”, 第 32 回 FRP シンポジウム, 2003, pp.247-248.
- 4) 常俊傑, 倪慶清, 岩本正治, “複合材料における超音波の伝播特性”, 第 10 回複合材料界面シンポジウム要旨集／最新の複合材料界面科学研究, O-31(2003).
- 5) 常俊傑, 倪慶清, 岩本正治, “繊維界面における超音波伝播シミュレーション”, 第 24 回超音波シンポジウム, 2003, pp.35-36
- 6) 常俊傑, 倪慶清, 岩本正治, “繊維埋蔵モデル複合材料における超音波の伝播シミュレーション”, 第 47 回日本学術会議材料研究連合講演会, 2003, pp.1-2.
- 7) Junjie Chang and Qing-Qing Ni, “Simulation of Ultrasonic Wave Scattering and Propagation in Composite Materials”, Proceeding of The 8<sup>th</sup> Conference on Achievements in Scientific Research of Chinese Scholars Japan, 2003, pp.362- 365.
- 8) 常俊傑, 倪慶清, 岩本正治, “高分子系複合材料における超音波減衰の伝播シミュレーション”, 第 25 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, 2004, pp.27-28.
- 9) 倪慶清, 常俊傑, 倉鋪憲, 岩本正治, “モデル複合材料における超音波伝播シミュレーション”, 第 29 回複合材料シンポジウム講演要旨集, 2004, pp.223-224
- 10) Junjie Chang and Qing-Qing Ni, “Simulation of Ultrasonic Wave Propagation in Model Composite Materials”, Proceeding of The 9<sup>th</sup> Conference on Achievements in Scientific Research of Chinese Scholars Japan, 2004, pp.213-19.
- 11) Qing-Qing Ni, Junjie Chang, Masaharu Iwamoto, “Simulation of Ultrasonic Wave Propagation in Composites,” The 5th Japan-Canada Joint Conference, 2004, pp.197-203.
- 12) 常俊傑, 倪慶清, 倉鋪憲, 岩本正治, “超音波伝播特性を用いた薄層材料物性の評価”, 第 34 回 FRP シンポジウム, 2005 年 3 月