

審査の結果の要旨

氏名 高橋市弥

修士（工学）高橋市弥提出の論文は、「弾性波伝播挙動の変化を用いた CFRP 構造の衝撃損傷検出に関する研究」と題し、7 章よりなる。

複合材料は金属材料に比べ複雑な損傷形態を有している。また、その多くは材料内部に発生するため、損傷の検出は難しくなる。航空機整備での損傷診断には各種非破壊検査手法が利用されているが、それらの中には、複合材構造に対してそのまま適用することができないものや、大規模構造の検査を行う場合は設備や時間的コストを要するものも多い。よって、複合材料中に発生した損傷を高精度・高速で探傷可能な検査手法の構築が必要とされている。以上の観点から本研究では、今後増加が予想される航空機用の炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 積層構造および CFRP スカーフ補修構造に発生する衝撃損傷に注目し、材料中を伝播する弾性波の伝播挙動の変化を利用した損傷検出手法を提案している。パルスレーザー励起弾性波可視化手法を用いて、CFRP 複合材料中を伝播する弾性波を可視化し、その伝播挙動から損傷の検出に成功している。また、弾性波の周波数やセンサ配置による伝播特性の違いについて実験と解析によって評価を行い、本手法による損傷検出の定量性について検証している。

第 1 章は「序論」であり、本研究の背景についてまとめ、従来研究の問題点を総括するとともに、本研究の目的と本論文の構成について述べている。

第 2 章は、「パルスレーザー励起弾性波可視化手法を用いた損傷検出」であり、本研究で用いるパルスレーザー励起弾性波可視化手法の原理の理論的導出とその検証試験を行っている。同一経路を伝播する波の双方向における同一性について、相反定理を動的振動問題に拡張して理論的に明らかにしている。また、材料特性や損傷部での界面の接触などの非線形効果が可視化結果に及ぼす影響を評価するために、点接触部および衝撃損傷を有する 2 種類の CFRP 試験片を作成し、弾性波の可逆性検証試験を行い、非線形効果が及ぼす影響は十分に小さいことを確かめている。

第 3 章は、「CFRP 中を伝播するパルスレーザー励起弾性波の振幅異方性評価」であり、CFRP 中を伝播するパルスレーザー励起弾性波測定試験を行い、各方向における弾性波の振幅異方性が現れることを確認し、その強さを定量的に評価するとともに、弾性波の周波数によって異方性の強さが異なることを明らかにしている。また、有限要素法による CFRP 中の弾性波伝播特性解析を行い、振幅の異方性は、材料表面層の熱膨張係数の異方性が原因であることを明らかにしている。

第 4 章は「弾性波可視化手法による CFRP 積層板の衝撃損傷検出」であり、擬似等方積層板および直交積層板の 2 種類を対象として、衝撃損傷の検出を行っている。損傷部において、弾性波の散乱および剥離部での伝播速度変化を観察している。また、この伝播速度の変化は剥離による板厚の局所的な減少が原因であることを明らかにしている。

第 5 章は「CFRP スカーフ補修構造に発生する衝撃損傷の評価」であり、CFRP スカーフ補修複合

材に発生する低速衝撃損傷形態の観察および進展挙動の評価を行っている。スカーフ角、板厚、衝撃エネルギーが衝撃損傷形態に与える影響を定量的に示している。その結果、補修材と接着層の界面の剥がれが荷重点付近のせん断き裂から発生し、そこを起点に界面に沿って裏側方向へ進展していく損傷進展プロセスを明らかにしている。

第6章は「弾性波可視化手法による CFRP スカーフ補修構造の衝撃損傷検出」であり、パルスレーザー励起弾性波可視化手法を用いた CFRP スカーフ補修複合材の衝撃損傷検出可能性を実証している。まず、擬似欠陥を挿入した CFRP スカーフ補修試験片により、剥離境界における弾性波の散乱および剥離部における弾性波伝播速度の変化の2種類の伝播挙動変化を明らかにしている。また、剥離境界における弾性波の反射特性は剥離境界の板厚方向深さによって異なること、剥離部における弾性波伝播速度の変化は弾性波の周波数および板厚による速度分散性が原因であることを明らかにしている。さらに、実際の円形スカーフ補修を模擬した供試体による損傷部の可視化試験により、本手法の実構造への適用可能性についても検証している。

第7章は「結論」であり、本研究で得られた結論を述べ、今後の課題について検討している。

以上要するに、本論文では、パルスレーザー励起弾性波可視化手法を用いて、CFRP 複合材料中を伝播する弾性波を可視化し、その伝播挙動を定量的に明らかにしている。また、弾性波伝播挙動の変化を用いた CFRP 積層構造および CFRP スカーフ補修構造における、非接触衝撃損傷検出手法の基礎を確立することに成功している。本研究で得られた成果は、航空機複合材構造の非破壊損傷検出技術の構築の基礎となり、構造信頼性向上に資することが期待され、複合材料構造工学、非破壊評価工学の新しい発展に大いに寄与する有益な知見を与えている。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。