

# 論文審査の結果の要旨

氏名 高垣 和規

修士（科学）高垣 和規 提出の論文は、「複雑形状CFRPの成形時内部ひずみ評価と残留変形メカニズムの解明」と題し、7章より構成される。

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) は、航空宇宙用構造部材としての適用が拡大し、主荷重を受け持つ一次部材へも適用されている。また、様々な複雑な形状を有するCFRP部材が必要とされているが、成形時に角度変化 (Spring-in) をはじめとする残留変形が発生する。このため、形状が設計値からずれるという不具合が発生しがちであるが、そのメカニズムには未だに不明確な部分が存在する。本論文では、埋込み光ファイバセンサを利用した複雑形状CFRP内部に発生する成形ひずみを計測する新たな計測手法を提案するとともに、この実験と理論・数値解析を併せることで、複雑形状CFRPの残留変形メカニズムを合理的、定量的に明らかにすることを目的としている。

第1章は「序論」であり、研究の背景についてまとめ、CFRP成形に関する既存研究とその問題点について総括し、本研究の目的と論文の構成について述べている。

第2章は「L型材の理論・数値解析手法の開発」であり、先行研究のC型材に関する理論モデルを拡張し、L型材のフランジを取り入れた理論解析およびその妥当性を検証するための有限要素解析を行った。樹脂の弾性率、板厚、フランジ長さの効果を検証し、フランジによりC型とは大きく異なる変形が発生することを明らかにしている。

第3章は「垂直・せん断ひずみ計測技術の開発」であり、光ファイバひずみセンサの一種である Fiber Bragg grating (FBG) センサを面外 $\pm 45^\circ$  方向に埋め込むことにより、面外垂直・せん断ひずみの成形中その場計測・評価方法を提案している。光ファイバに発生するせん断遅れ現象を考慮した詳細な検討を行い、本研究で定義した「低減ひずみ」および「せん断・垂直ひずみ比」の計測法について述べている。また、X線CT観察による光ファイバセンサの埋込み状態の評価を行っている。

第4章は「L型材における成形時内部ひずみモニタリング」であり、成形時の面外垂直・せん断ひずみの計測を行い、硬化に伴う内部状態の変化および板厚による違いを求め、理論解析との比較から解析における適切な境界条件について検証した。また、成形時のせん断変形の大きい厚肉試験片では残留変形 (Spring-in) が小さくなる傾向を得た。さらに、実験・解析の結果から Spring-in 変形を予測する新たな手法を提案し、従来手法よりも精度良く変形を予測することに成功している。

第5章は「U型材における内部ひずみ・残留変形」であり、2つのフランジおよび1つのウェブからなるU型材について、実験・解析から、硬化時のモーメントによりウェブでは反り変形が発生し、その結果フランジ部での Spring-in 角度がL型材よりも大きくなることを明らかにした。このことから、U型材はL型材の単純な重ね合わせとは異なる

る変形メカニズムを有することを示している。

第 6 章は「大型部材へのひずみ計測手法の適用」であり、板厚変化する構造 (Ply-drop-off 構造) に対し、本研究で提案したひずみ計測法を使用し、大型構造への適応可能性を示した。同一の板厚部では長手方向でひずみの分布が生じないこと、一方、成形後の残留変形は長手方向に分布することを明らかにした。

第 7 章は「結論」であり、本論文で得られた結論と今後の展望について述べている。本研究で開発した内部ひずみ計測手法により、従来計測不可能であった成形時の内部状態が計測可能となり、解析と併せることで複雑形状における残留変形のメカニズムがより明確になった。今後、より実際に近い構造に対し本手法を応用することで、実構造の寸法精度・健全性の向上が見込まれ、CFRP のより効率的な利用に繋がると考えられる。これらの研究成果は、先端エネルギー工学、とくに次世代複合材料工学、極限材料工学の発展に大いに寄与する有益な知見を与えている。

なお、本論文第 2-6 章は、水口周、武田展雄との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって博士 (科学) の学位を授与できると認める。

以上 1、670 字