

## 審査の結果の要旨

氏名 吉田 啓史郎

修士（工学）吉田啓史郎提出の論文は「三軸織物複合材料の力学的特性に関する研究」と題し、本文6章と付録10項から成っている。

宇宙構造物では、輸送系の搭載能力やコストの点から高比強度、高比剛性の材料を使うことが不可欠で、運用中の過酷な温度環境に対して高い温度安定性が要求されることも多い。これらの条件を満たす材料として炭素繊維強化複合材料が多用されつつある。一方構造様式の点からは、打ち上げ時の重量・容積の制約から軽量・高収納効率を追求した展開方式が一般化しており、同時にその作動の信頼性を確保することが不可欠になっている。繊維束を面内で三方向に等角度間隔に織った三軸織物複合材料は、繊維の長手方向の特性を利用しつつ、繊維束間の相対変位を容易にして曲げ変形を許容する材料システムである。これを展開構造の構成要素として利用することで、アンテナ、太陽電池パネル、伸展トラス構造などの性能や信頼性向上が期待されている。この論文は三軸織物複合材料を宇宙用展開構造に適用することを想定し、材料の基本的な力学的特性を解析的・実験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、まず研究の学術的背景について述べ、研究対象とする三軸織物複合材料を明確に定義している。次に本研究に関連する国内外の研究動向についてまとめた後、研究の目的を述べ論文の構成について概説している。

第2章では、微視構造を有する材料を均質体と見なして、力学的特性を解析するための基礎式を提示している。基本的な面内特性だけでなく、展開構造の収納性評価基準としての曲げ特性をも扱える解析手法を示している。幾何学的に不均質でも周期性がある材料の解析に適した均質化法を採用し、ユニットセルと呼ぶ単位周期領域をとって、これに周期境界条件を課すことで材料の巨視的な力学的特性を求める方法を示している。さらにこの解析法に基づいた数値解析を行うために、幾何学的非線形性までを考慮した三次元有限要素法による定式化を行っている。また、従来から用いられている剛性平均法と本方法を比較し、前者による剛性評価の問題点を明らかにしている。

第3章では、三軸織物複合材料が持つ本質的な力学的特性を損なうことなく、これを簡易に解析するモデルとして、材料を構成する繊維束をはり(beam)で置き換え、その交差部を相互に連結したはり連結モデルを提案している。このモデルを第2章で示した均質化法に組み入れるための定式化を行っている。またはり連結モデルを、幾何学的非線形性を考慮した解析に適用する方法についても示している。

第4章では、前の2つの章で示した解析方法に基づいたモデル化と解析を行い、その結果を詳述している。まず三次元ソリッド要素によるモデルの作成手順を詳細に述べ、はり連結モデルについては繊維束交差部の性質を考慮した改良をおこなっている。次にユニッ

トセルを使って平板としての等価剛性を示し、三軸織物複合材料の面内及び曲げ剛性が等方性を示すこと、また、引張-ねじりのカップリングがあることを明らかにしている。これらの結果から剛性が等方性であることによる三軸織物複合材料の扱い易さを論じている。一方、有限寸法のモデルも使い部材寸法あるいは自由端が存在する場合の影響を評価している。さらに、幾何学的非線形性を考慮した解析まで拡張し、荷重増加に伴う繊維束の面外方向うねり形状の変化が、引張挙動に及ぼす影響を明らかにし、特に材料方向によって引張挙動に違いが生ずることを詳述している。これらの解析ではいずれも三次元ソリッド要素モデルとはり連結モデルおよびその発展型である改良はり連結モデルによる解析結果を比較し、はり連結モデルとその改良モデルの有用性と適用限界を論じている。

第5章では、三軸織物複合材料の力学的特性を実験的に評価している。まず引張剛性と引張変形挙動を把握するため、単軸引張試験を実施している。また曲げ剛性を評価するため三点曲げ試験および純曲げ試験を行い、さらに曲げ破壊が生じる際の最大曲率を求めるために押し潰し試験も試みている。これらの試験では、力学的挙動の荷重負荷方向依存性を明らかにするため、材料の切り出し方向を変えた試験片を使っている。また引張試験では、試験片の幅方向寸法を変え、試験片形状が測定結果に与える影響を確認している。これらの結果から、解析で予測したとおりこの材料が等方性を示し、一方で有限幅の試験片で見かけの剛性が等方性にならないことも確かめている。また非線形の引張挙動が発現するメカニズムについての詳細な観察を行い、繊維束方向の引張剛性の増大が繊維束のうねりの減少によるものであること、繊維束に垂直方向への引張では荷重とともに剛性が低下し、これが繊維束間の接着部の破壊に起因していることを予測している。

第6章は結論であり、三軸織物複合材料の基本的な力学的特性について、この研究で得られた知見をまとめている。

以上要するに、本論文は三軸織物複合材料の基本的な力学的特性を明らかにし、同時に他の織物材料へ拡張可能な解析手法を提案しており、高性能な宇宙用展開構造の実現に寄与するもので、宇宙構造工学、複合材料工学に貢献するところが大きい。

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。