

## 審査の結果の要旨

氏名 西川 雅章

修士(工学) 西川 雅章 提出の論文は、「繊維強化複合材料の微視損傷過程と破壊に関するマルチスケールモデリング」と題し、8章よりなる。

近年、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) は、航空機一次構造を含む、軽量化を要する様々な分野で実用化段階に入っている。一般に CFRP として用いられる長繊維強化プラスチックは、幾何形状の複雑な構造部位への適用においては、成形性の面から、その利用は限られる。部材によっては、成形性に優れる短繊維の利用が不可欠である。しかし、短繊維強化プラスチックは現在のところ、比強度に問題があり、適用可能な構造部位は限られている。これは短繊維強化複合材料において生じるマトリクスクラックや界面剥離が強度に大きな影響を与えるためである。長繊維の優れた強度特性を保持した短繊維強化複合材料の開発といった観点から、このような繊維強化プラスチックの強度向上につながるメカニズムを解明することは重要である。本研究では、炭素繊維・エポキシ樹脂の材料系について、繊維強化複合材料に特徴的な微視損傷過程と破壊に関する知見を基に、ミクロ的視点からマクロ的視点までを網羅した新しいマルチスケールモデルを提案するとともに、微視損傷過程の効率的な可視化が可能な数値解析手法を開発し、材料の微視構造が短繊維強化プラスチックの強度に与える影響を詳細に議論している。

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、「ダグデール型損傷進展要素を基にした微視損傷モデルの検討」であり、繊維強化複合材料における典型的な損傷である繊維破断やマトリクスクラック、界面剥離を有限要素法で扱うための微視損傷モデルを提案している。とくに、界面剥離のモデル化について、ダグデール型損傷進展要素の定式化を示し、有限要素法への実装を行い、多数の損傷が累積する場合でも順々に損傷進展を追跡する有限要素シミュレーションを可能としている。

第3章は、「単繊維複合材料における微視損傷過程のマイクロメカニクス」であり、単繊維複合材料 (Single-Fiber Composite、SFC) 試験を用いた構成材料特性評価を行う上で必要な知見を得るため、SFC における繊維破断過程のモデリングを行い、その力学的支配因子を明らかにしている。繊維・母材界面の破壊特性パラメータを変化させると、SFC における繊維破断過程に関わる微視損傷形態が大きく変化することを定量的に明らかにしている。

第4章は「単繊維複合材料試験を用いた構成材料の破壊特性同定」であり、実際の単繊維複合材料試験結果における破断累積過程や界面剥離進展過程を用いて、繊維強化複合材料における構成材料単位の破壊特性を定量化することに成功している。

第5章は「マイクロボンド試験を用いた界面特性評価に関する微視力学的検討」であり、SFC 試験では界面特性を定量化できない場合の代替手法として、界面に剥離を進展させて繊維の引抜

きを行うマイクロボンド試験法を用いた界面特性評価の方法を検討している。母材破壊を考慮しつつ、微視力学的破壊現象をモデル化し、ナイフエッジ位置の変化により、クラックがナイフエッジ位置から界面に到達する場合や、メニスカス領域でクラックが発生する可能性があることを明らかにし、クラック発生による誤差を排除した適切な界面特性評価が行えることを示している。

第6章は「短繊維強化プラスチックにおける材料構造に依存する破壊モード」であり、短繊維強化プラスチックの基本的な損傷メカニズムを理解するため、これまでの章において検討してきた微視損傷モデルを用いた周期セルシミュレーション法を提案している。また、このシミュレーション法を用いて、繊維配向角や繊維体積含有率などの材料構造が複合材料の破壊特性に及ぼす影響について調べ、前者は最大応力を与えるひずみとして、後者は最大応力を与えるひずみと最大応力後の応力低下挙動として、巨視的応力-ひずみ応答に現れることを明らかにしている。

第7章は「不連続繊維強化プラスチックの強度特性に関連する微視損傷遷移メカニズム」であり、引張方向に繊維が配向した短繊維強化プラスチックが長繊維強化プラスチックに比べて強度特性が劣っている要因について、材料内の微視損傷メカニズムを明らかにすることで検証している。一方向不連続繊維強化プラスチックにおいては、繊維端から生じるマトリクスクラックが、繊維を回避して進展する破壊形態と、繊維を破断させて進展する破壊形態があり、どちらの破壊形態をとるかは繊維長によって制御され、上記の破壊形態の遷移が起きる近傍の繊維長においては、複合材料強度が著しく低下する要因を解明している。これらの知見は、長繊維強化複合材料の強度特性を保持した短繊維強化複合材料を製作する材料設計に貢献するものである。

第8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、繊維強化複合材料に特徴的な微視損傷過程と破壊に関する知見を基に、ミクロ的視点からマクロ的視点までを網羅した新しいマルチスケールモデルを提案するとともに、微視損傷過程を詳細に可視化できる数値解析手法を開発し、材料の微視構造が短繊維強化プラスチックの強度に与える影響を定量化することに成功している。本論文で得られた成果は、繊維強化複合材料の材料設計を支援する汎用的な数値シミュレーションプラットフォームを提供しており、複合材料工学、損傷力学、複合材料設計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。