

論文の内容の要旨

論文題目 炭素繊維テープ強化熱可塑性プラスチックに
おけるテープ薄層化の効果

氏 名 山下 慎一郎

炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP）は、これまで航空機やスポーツ・レジャー用途などに広く採用され、その優れた比強度・比剛性を活かした軽量化によって、製品の環境負荷低減や性能向上に貢献してきた。今後も量産車をはじめ様々な用途への展開が期待されているが、優れた力学特性、低い材料コスト、高速成形性、低圧複雑形状成形性、といった要求を同時に満たすことができていないのが現状である。そこで近年、自動車や航空機の複雑形状部材向けの CFRP として、Randomly oriented strands（以下、ROS）、中でも炭素繊維テープ強化熱可塑性プラスチック（以下、CTT）への期待が高まっている。CTT は 50%以上の高い繊維体積含有率（以下、 V_f ）を有し、熱可塑性を活かしたスタンピング成形による高速成形が可能で、かつ一方向性プリプレグシート（以下、プリプレグ）をカットしたチョップドテープ（以下、テープ）から構成されるため、他材料よりも低圧で複雑形状部材が成形できる。

このような特長から、世界の他の研究機関においても盛んに研究開発が行われてきたが、他の研究機関で扱っている比較的厚いプリプレグから作製した ROS は、連続繊維積層板やマット強化材などに比べると不均質であることから、高い V_f の割には剛性や強度が十分発現せず、かつ大きなバラツキを有することが課題となっている。したがって、高い信頼性を要する構造部材に ROS を適用するためには、力学特性を改善し、かつバラツキを低減させる必要がある。

CFRP の力学特性向上に関連する一つの成果として、熱硬化性 CFRP の連続繊維積層板では、薄層プリプレグの適用によって 90 度層のトランスバースクラックの発生が抑制され、力学特性が向上することが報告されている。しかし、これまでの薄層プリプレグを用いた研究のほとんどは熱硬化性 CFRP を対象としたものであり、さらに ROS、およびその一種である CTT に関する研究は通常と比較的厚いプリプレグを用いたものが主であった。したがって、熱可塑性 CFRP の薄層プリプレグを CTT に適用した例は数少なく、さらにその材料特性について体系的にまとめた研究は見られない。しかし、積層板に関するこれらの先行研究から、テープが積み重なった構造から成る CTT においても、テープ薄層化による均

質化や材料内のテープ数増加によって、力学特性の改善やバラツキの低減が期待できる。さらに、テープ薄層化に付随して、力学特性以外の材料特性の向上も見込まれる。そこで本論文では、CTT に薄層プリプレグを適用することで力学特性を改善し、さらに電気的特性の面からも付加価値の高い材料を開発することを目的として、CTT におけるテープ薄層化の効果について検証した。（【第1章】）

本研究では、まず、開繊技術に基づいて製造された炭素繊維強化ポリアミド6（以下、CF/PA6）の薄層プリプレグ、および厚みの異なる合計3種類のプリプレグから、湿式分散方式によりCTTを作製した。PA6は吸水性に関する問題を抱えるものの、比較的安価で、炭素繊維との接着性も良い、バランスの取れた熱可塑性樹脂である。作製した3種類のCTTを試験片として、引張試験、4点曲げ試験、3点曲げ衝撃試験を実施し、基礎的な力学特性におけるテープ薄層化の効果について検証した。同時に、アコースティックエミッション法による計測や高速度カメラでの撮影、光学顕微鏡による破断面観察、3次元X線CTによる繊維配向角測定を通じて、テープ薄層化が破壊挙動に及ぼす影響や力学特性改善のメカニズムに関して考察した。その結果、先行研究において示されたような連続繊維強化積層板だけでなく、CTTにおいてもテープ薄層化によって微視的損傷の発生が抑制され、力学特性の改善効果が見られること、また、曲げや衝撃においてはテープを薄くするほど破壊が脆性的になること、などの新しい知見を得た。さらに、CTTにおいてはテープ端の樹脂リッチ部、面内の繊維湾曲、面外方向の繊維配向が力学特性を左右することが示唆され、今後CTTのマイクロモデルを構築するにあたっての有益な知見が得られた。（【第2章】）

次に、力学特性向上を目的としたテープの薄層化に付随して、電気的特性が向上することに期待し、CTTの体積抵抗率におけるテープ薄層化の効果について検証した。その過程で、測定者の技量に依らず、かつ使用する導電性ペーストの量も少ない、低コストで安定した結果が得られる体積抵抗率測定手法を提案した。提案した手法によりテープ厚、テープ長の異なるCTTの体積抵抗率を測定し、体積抵抗率に対する各パラメータの寄与度を定量化した結果、CTTの電気的特性向上のためには、テープを長くする以上にテープを薄くする効果が大きいことが明らかになった。この検討により、テープ薄層化によって、電気的特性に関連する機能性が向上する可能性が示唆された。（【第3章】）

電気的特性に関連する機能性としては、熱可塑性CFRPを屋外のアプリケーションで用いる際、安全上必須の要件となる耐雷性に着目し、複合材料自体の耐雷性を把握するためにCTTおよび擬似等方積層板（以下、QI）を供試体として用い、実際の自然現象を模擬した雷撃試験を実施した。試験後の供試体の外観観察や超音波探傷により、損傷の程度に対するテープ薄層化の効果を定量的に評価した。同時に、高速度カメラを用いた被雷時損傷挙動の撮影を通じ、被雷時の損傷メカニズムに関する考察を行った。結果として、QI、CTTいずれにおいてもテープ薄層化により損傷が低減されるという新たな知見が得られ、電気的特性に関連する機能性向上が実証された。（【第4章】）

実際に CTT を屋外アプリケーションで使用する際には、第 2 章で検討したような材料が健全な状態での力学特性のみならず、第 4 章のような雷撃を受けた後の力学特性も大変重要である。そこで、雷撃試験後の供試体に対する残留力学特性評価試験を行い、被雷後の構造健全性という観点からテープ薄層化の効果について検証した。具体的には、模擬雷撃試験後の供試体から試験片を切り出し、4 点曲げ試験を実施することで、テープ薄層化による被雷時損傷の低減効果が被雷後の残留力学特性に及ぼす影響について評価した。さらに、第 4 章や先行研究の結果も踏まえ、熱可塑性 CFRP のテープ薄層化による損傷低減要因についてまとめた。その結果、QI、CTT いずれにおいてもテープ薄層化が被雷後残留力学特性の向上に繋がり、安全性確保の上で不可欠な耐雷性の改善効果があることが明らかになった。この成果により、薄層プリプレグの適用によって力学特性と耐雷性を兼ね備えた熱可塑性 CFRP を実現することが、実用上の落雷対策における一つの有効な手段であることが示された。（【第 5 章】）

以上、本研究で明らかにされた CTT におけるテープ薄層化の効果によって、従来の ROS が抱えてきた剛性や強度の低さ、大きなバラツキによる設計パラメータ取得の困難さといった課題を解決し、さらに耐雷性の向上によってより安全な複合材料構造が実現できることが示唆され、工学的寄与の非常に高い知見を得ることができた。今後は、CTT を用いた部材の設計、生産に向けた研究開発の加速が期待される。