

論文の内容の要旨

論文題目 熱可塑性CFRPの力学特性発現メカニズムと
構造部材への適用性に関する研究

氏 名 松尾 剛

自動車の車体構造を構成する各種部材の飛躍的な軽量化は、適用され得る材料のウェイトパフォーマンスの大幅な向上によって成し遂げられる。従来から、車体構造用材料の主流である鉄鋼は、材料そのものの高強度化とそれに伴う成形・加工・接合技術などの躍進によって、着々と車体の軽量化に貢献し続けている。非鉄金属も、特にアルミ合金は、比強度・比剛性が鉄鋼並もしくはそれ以上に高いことが有効活用され、鉄鋼に置き換えられる軽量材料の代表格であり、常に設計バリエーションの中の有力候補の一つとして捉えられている。また、プラスチック類も、剛性や耐久性が保証されるべき主要構造にはまだまだ適用される見通しが得られないものの、ポリマーアロイ技術や成形加工装置の高性能化によって、コストパフォーマンスの見合う部品への採用比率が増加傾向にある。しかしながら、車体構造全体を視野に入れて劇的な軽量化を目指すとなると、高品質・高信頼性・高性能のさらなる要求の高まりも相まって、従来の素材改良の延長だけでは、全体剛性や耐久性能といった車体構造の本質的なパフォーマンスを満足し、さらなる付加価値を創出するのは難しいのが現状である。

そのような中、最有力軽量材料として、熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維強化プラスチック（熱可塑性 CFRP）が注目されつつある。熱可塑性 CFRP、中でも、安価で汎用性が高いポリプロピレンをマトリックスとし、繊維長さを比較的長い状態で保持し強化された、連続繊維系または長繊維系の炭素繊維強化ポリプロピレン（CF/PP）は、長さがコントロールされた繊維が必要十分な力を伝達して高い剛性・高い強度を発現し、さらには、マトリックスの破断伸びが他の樹脂より高いことにより、より延性的な破壊挙動が期待できる。このため、衝撃吸収性能が要求される一般乗用車の車体構造にも適用され得ると考えられ、ボディ骨格も含めた車体全体の大幅な軽量化に貢献できる可能性が高い。また、圧縮流動成形によって複雑な形状をしかも高速に具現化できる。このような特徴を活かして、高い形状自由度という設計的な付加価値の創出と、現行の量産型製造ラインにも匹敵する高速連続生産を実現することができ、低コスト・大量生産が望まれる量産車用材料として、他の材料以上の優位性がある。

一方、熱可塑性 CFRP は、その破壊メカニズムや粘弾塑性挙動など、構造部材の品質や

信頼性・安全性を裏付ける力学特性の発現メカニズムが明らかになっていない。特に、繊維方向引張特性以外の力学特性は熱可塑性樹脂の粘弾塑性の影響を直接的に受け、構造部材の使用環境が変わったり、動的な挙動を与えられたりする場合に特性が大きく変化することが予測される。つまり、これら力学特性は、樹脂の粘弾塑性を考慮に入れるべき重要な設計因子であり、メカニズムの理論的な解釈が必要であると言える。

そこで本研究では、熱可塑性 CFRP を代表して、炭素繊維強化ポリプロピレン (CF/PP) を用い、その基礎的な力学特性の把握とメカニズムの解明に主眼を置いて、実験的な検証や理論的な説明を試みた。留意すべきは、マトリックスにポリプロピレンを採用していることであり、その粘弾塑性挙動が繊維強化された連続繊維系 CF/PP の様々な力学特性に与える影響を明らかにすることである。そして次に、生産性を重視した不連続繊維系 CF/PP の構造部材への適用性を検証する。熱可塑性 CFRP の特徴は、複雑断面形状や異なる基材の複合化・一体構造といった成形に関わる構造設計自由度の高さである。この特徴を活かした時、ますます高強度化が進む鉄鋼材料に対して、如何に設計的に対軽量性能を達成すべきかを実証する必要がある。そこで、実際に中空フレームを題材に、上記設計自由度を有効活用した高性能設計手法を提案して、試作・性能評価まで行って、熱可塑性 CFRP の優位性とその設計アプローチの効果を検証する。

第 1 章では、以上のような研究の背景と目的について、より具体的な事例を交えて説明した。とりわけ、現在も車体構造材料の主役である鉄鋼材料の取り組みは注視すべきことが示され、熱可塑性 CFRP が適用されるには、車体構造としてのパフォーマンスを鉄鋼材料より劣ることなく、それでいて鉄鋼材料以上の軽量化効果を達成する必要がある。その可能性について、自動車構成部品の重量内訳を調べて、中空フレーム構造をベースとした等剛性設計を想定した場合の全体車重の軽量化率を分析した。一方、過去の文献の調査結果を踏まえ、繊維強化複合材料の設計自由度の高さの半面、数値解析シミュレーションを適用する際の力学メカニズムの重要性とその解明の難しさについて考察した。続いて、熱可塑性 CFRP の最近の研究開発動向について述べ、その車体構造適用へのさらなる期待と、熱可塑性ならではの力学特性把握の着眼点について説明を加えた。

第 2 章では、本研究で扱う熱可塑性 CFRP のマトリックスであるポリプロピレンの、樹脂単体の弾塑性挙動と粘弾性挙動をベーシックな試験法によって明らかにすることから開始した。通常の引張試験によって弾塑性パラメータの検出を行い、また、動的粘弾性測定によって、温度と時間に依存する力学パラメータと粘弾性に関わる時間温度シフト関係を見出した。

第 3 章では、一方向 CF/PP プレス材の繊維方向および繊維直角方向の引張特性を検証し、破壊メカニズムとマトリックスであるポリプロピレンの力学特性との依存関係について考察した。特に、繊維方向引張試験においては、高速度カメラによる破壊現象の観察結果を

基に，破壊強度の正確な検出を解決する試験法について論じた。

第 4 章では，樹脂の粘弾塑性挙動の影響が明確に現れる繊維方向せん断特性を，連続繊維 CF/PP プリプレグテープを用いた $\pm 45^\circ$ 積層材の引張試験によって検証した。その際，環境温度条件を様々に変えて試験を行い，第 2 章で検出した樹脂単体の粘弾性挙動と繊維方向せん断挙動の温度変化に対応した関係性を明らかにした。

第 5 章では，本材料に適した，新しい繊維方向圧縮試験法を考案するとともに，面外方向に発生するキンクバンドに着目し，圧縮強度算出のための新たな理論式を提案した。そして，実際に実験を行い，圧縮破壊メカニズムが面外せん断特性から理論的に説明できることを証明した。さらに，その結果を基に，第 4 章で検証した，温度変化に伴う繊維方向のせん断特性の変化が，圧縮強度の温度依存性に直接的に影響することも明らかにし，繊維方向圧縮強度のマトリックスの粘弾塑性の依存性について論じた。

続いて第 6 章では，一方向 CF/PP プレス材の，繊維方向の曲げ破壊が常に圧縮側の破壊から生じることに着目し，曲げ強度についても樹脂粘弾性に依存するという予測が立てられた。それを足がかりとして，第 2 章で見出した樹脂の時間温度シフト関係を利用して，曲げ強度の温度依存・速度依存・時間依存の関係を統一的に説明するモデルを構築し，各種試験を行ってその妥当性を検証した。

第 7 章では，繊維方向圧縮破壊の根本要因として考えられる面外強度を評価して，それがマトリックスの塑性挙動の影響を受けるかどうかについて考察した。面外引張強度の評価には，連続繊維 CF/PP プリプレグテープを直角に湾曲させてプレス成形して製作した L 型試験片による引張試験法を，面外せん断強度の評価には，目違い切欠き溝を設けた試験片による圧縮試験法を用いた。

第 8 章では，以上の一連の力学特性を調べ上げた連続繊維 CF/PP のプリプレグテープを，ある決められた長さにカットし，繊維配向がランダムになるように配置させて積層させた，不連続テープ系のランダム積層材に焦点を当てた。そして，それを用いて，実物大のハット断面中空フレームを設計し，試作および性能評価を実施した。ところで，実際には，不連続ランダム積層材の面内方向の弾性率を標準試験法によって評価し，設計パラメータとして用いようとすると，有限長さのテープのランダム配向を原因とした，評価範囲の大きさに依存する評価値の不確実性が存在することが認められた。この不確実性を確率論的に解釈するために，評価範囲内に存在する個々のテープは，その評価軸に対する配向角によって理論的に弾性係数が変化することを用い，その個々のテープにランダムに配向角を設定し，相互作用による全体剛性を積層板理論によって計算する理論モデルを構築した。そして，実際に評価寸法を変えた引張試験を行って，計算モデルによる統計結果と比較および仮説検定することによって，その計算モデルの妥当性を検証した。これによって，不連続ランダム積層材を採用した実際の構造設計に際しては，部材の大きさが十分である場

合に、マクロでみれば弾性率の不確定性を考慮せずに設計できることが示唆された。これを前提として、上記フレーム部材の外形形状を固定した CAD モデルを作成し、それにシェル要素を割り当てて、弾性率パラメータを一意に設定して有限要素解析を実施した。ここでは、中空フレームの 3 点曲げ試験を数値解析シミュレーションによって模擬し、変形量と荷重反力の関係を出力することで、中空フレームの曲げ挙動に関する性能を検証した。そして高剛性設計のため、不連続テープランダム材と連続繊維材とのハイブリッド構造を設計バリエーションの一つに加え、断面形状および連続／不連続の構成比の最適解を求めた。これを実際に製造プロセスを検討して試作し、性能評価まで実施したところ、軽量かつ高性能な中空フレームを実現できることが立証された。

第 9 章では、以上をまとめ、本研究の成果について総括した。