

博士論文（要約）

不連続 CFRTP の不均質性と
面外異方性を考慮した構造最適化

志田 龍亮

近年、自動車を取り巻く環境は大きく変化しており、動力源の電動化、自動運転、シェアリング等のイノベーションによってモビリティの在り方が従来と違ったものになりつつある。こうした外部環境変化は自動車産業のビジネスモデルや製造プロセスだけでなく、自動車材料といった観点でも大きな影響を与えうる。例えば、環境規制の更なる強化は燃費向上に資する軽量化材料のニーズを生み、自動運転等により交通事故発生件数や事故形態が大幅に変化すれば自動車の安全基準も見直される可能性がある。材料選択や構造設計の考え方が変われば、構造最適化に関する知見も改めて蓄積・検証していくことが必要となると考えられる。

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）はこれまで航空機や高級車等に適用され優れた軽量化ポテンシャルを発揮してきたが、量産車への適用という観点では高速成形、簡便・高強度な接合、リサイクル性を実現する不連続繊維を用いた炭素繊維強化熱可塑性プラスチック（CFRTP）への期待が大きい。その中でも炭素繊維テープ強化熱可塑性プラスチック（CTT）、および炭素繊維マット強化熱可塑性プラスチック（CMT）は高い機械特性と成形性を兼ね備えており特に注目が集まっている。他方、CTTやCMTは面外方向に強い異方性を有すると共に、小型部材では不均質性が原因となり力学特性のバラツキが大きくなる傾向にある。特に力学特性のバラツキの大きさはCAE（Computer Aided Engineering）による性能把握・最適設計の難しさに繋がっており、不連続CFRTPの適用範囲を狭めている状況にある。不連続CFRTPのポテンシャルを最大限に発揮するためには、材料面での改良だけでなく、力学特性発現のメカニズムを把握し、その特質を踏まえた最適設計を行うことが極めて重要と考えられる。以上の背景から、本論文では不連続CFRTPの不均質性、面外異方性が最適構造へ及ぼす影響について、その基本的なメカニズムを明らかにし、実構造物の最適設計に向けた具体的な指針を得ることを目的に主に理論解析・シミュレーションの面から検討を行った。

まず、序論として不連続CFRTPのこれまでの研究開発動向と幅広い実用化に向けた現在の課題についてまとめると共に、特に不連続CFRTPの最適設計に関する現状とその必要性を論じた上で、本研究の位置づけとアプローチの新規性を整理した。

次に、形状最適化に関する検討として、不連続CFRTPでは従来の鉄板や連続繊維複合材料よりフレキシブルな最適設計が可能であることに着目し、ワンショットで成形可能な「板厚徐変構造」における理論解析を実施した。Euler-Lagrange方程式により条件付き変分問題と定義することで、陽に最適板厚分布が得られることを示し、FEMによる形状最適化結果とも良い一致を示すことを明らかにした。また、実験値との比較においてもリブ構造で問題となった繊維配向の乱れは確認されず、ほぼ理論解通りの力学特性が発現されることが確認された。等板厚梁との比較において、理論的な軽量化率は16.0%と算出されるが、材料代替までを考慮した際には、CTTでは70.1%、CMTでは67.9%の軽量化ポテンシャルを持ち、中空梁の活用も含め従来では難しかった70%台の軽量化率の達成が可能であることが示唆されている。ロバスト性の観点では、板厚徐変構造は剛性面では任意の荷重分布に対してロ

バラストであることが証明されたが、強度面では若干の裕度を持たせる必要があることが示された。せん断力を考慮した際には端部にて最低板厚を設ける必要があることが示され、不連続 CFRTP は面外異方性 (E_1/G_{13} 比) が大きく、また、温度上昇によってさらにその値が大きくなることも確認されていることから、端部での最低板厚は金属材料と比べて十分確保する必要があることも定量的に示された。

続いて、特に不均質性が強く、力学特性のバラツキの大きい CTT を対象に、先行研究では考慮されていなかった CTT の内部構造を詳細に再現する引張特性シミュレーションモデルを新たに考案し、実験値との比較を実施した。先行研究とは異なるアプローチでモデルを構築することによって、より実際の試験片に近い UD テープの分散・積層が模擬され、樹脂リッチ部や積層構成のバラツキが再現された。その結果ひずみ分布は実測データとも定性的な整合性を示すと共に、引張弾性率と引張強度においては実験値とシミュレーション結果が良好に一致する結果となった。特に従来モデルでは再現が困難であった UD テープの長さや厚さ等のパラメータの影響についても、一定程度実測データを模擬できることが明らかになった。UD テープの引き抜けについては現状のモデル上は組み入れられていないが、テープ間の重なり長さを評価することで、強度の飽和傾向が再現できる可能性があることが示された。

最後に、上記で構築したシミュレーションモデルを活用し、CTT の不均質性および面外異方性を考慮した位相最適化手法について検討を行った。構造部材の長さ・厚さと CTT の力学特性のバラツキの関係性を定式化し、有効長さ・有効厚さに基づくペナルティパラメータの考え方を新たに導入したところ、ペナルティの有無によって導出される最適構造が異なり、よりロバスト性を有する構造が導出されることが確認された。

以上、本研究の結果、不連続 CFRTP における不均質性や面外異方性が最適構造に及ぼす影響についてそのメカニズムが一定程度明らかになり、実構造への適用の際に留意すべき具体的な箇所や設計時の安全率についての知見を得ることができた。本研究にて開発された手法により明らかにされた不連続 CFRTP の最適構造とその特性発現メカニズムに基づくことで、目的に応じた最適中間基材（繊維長、テープ厚さ等）、最適製造法（金型設計、プロセスウィンドウ等）、ロバスト構造設計に関する知見を得ることが可能となり、不連続 CFRTP 構造部材の実現に一步近づいたと言える。