

絞り加工により成型した局所異方性を有する 熱可塑性複合材の最適設計に関する研究

北海道大学 大学院工学研究院 機械・宇宙航空工学部門
准教授 本田 真也
(2019年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2019036-C2)

キーワード：CFRTP，プレス成形，局所異方性

1. 研究の目的と背景

近年、炭素繊維強化複合材料 (CFRP) の機械構造物への適用は益々拡大してきており、航空機やスポーツ用品のみではなく、自動車などの大量生産品への適用も期待されている。従来の熱硬化性 CFRP (CFRTS) は成形時間が長く、大量生産には不向きなため、塑性加工も可能な熱可塑性樹脂を用いた CFRP (CFRTP) の研究・開発が盛んに行われている。また、①ロボットアームによる自動積層、②3D プリンター、③刺繍機を援用した装置など、新たな複合材の成型技術が開発・実装されている。これにより、これまでの一方向にのみ強化繊維を配向した均質な異方性材ではなく、繊維を曲線状に配置、また部分的に配向角を変化させるなど、局所的な異方性を有する複合材の製造が可能となった。局所的な異方性は目的に合わせて最適に分布することで、従来よりも優れた構造の実現が可能である^{1,2)}。

上記の新たな製造方法のうち、最も大量生産に適した製造方法は、③刺繍機を援用した装置 (ファイバー縫付機) であるが、この装置による効率的な CFRTP 材の作製方法は確立されていない。また、塑性加工後の立体形状を考慮した最適な局所異方性配置の設計方法が必要である。すなわち、本研究は、近年の複合材研究動向における「CFRTP 材による利用拡充」、「局所異方性構造の実装」という二つの流れを融合し、新機能複合材の開発を目指す。

2. 実験方法

2-1 局所異方性複合材の作製方法

図 1 にファイバー縫付機による炭素繊維プリフォームを作製している様子を示す。ファイバー縫付機では、ボビンから供給される炭素繊維束 (CF トウ) を基材に針と糸で縫い付けて固定する。ヘッド部分は回転可能であり、また機材を固定しているフレームが自由に平面移動可能のため、曲線状の強化繊維配置が可能である。

従来は炭素繊維やガラス繊維の平織材を基材として採用し、CF トウを縫い付けた後に、真空樹脂含浸 (VaRTM) 法などにより熱硬化性樹脂を繊維間に含浸し、熱硬化することで複合材とする (図 2 中段)。これが複合材の軽薄化を妨げ、また非対称性による成形後の歪みとなることがある。一方、申請者の提案方法では、図 1 のように、ポリプロピレン (PP) などの熱可塑性シートを基材として採用

し、直接、繊維を PP シートに任意の形状で縫い付ける。その後、熱間プレス (200°C) により、基材となった PP シートを樹脂内へ押し込むことで、熱可塑性複合材を成型する (図 2 下段)。通常の PP シートでは粘度が高く、繊維間に樹脂がうまく含浸しないが、マレイン酸変性ポリプロピレンを混合した PP シートを用いることで、樹脂粘度が低下し、樹脂がよく含浸することが知られている。一方向材の引張試験の結果、本手法で作製した熱可塑性複合材は市販品と同等の剛性 (およそ 120 GPa) を持つことがわかっている³⁾が、今回は加工成形が目的のため、プリフォームの基材としてシート状のポリプロピレンのみを用いた。

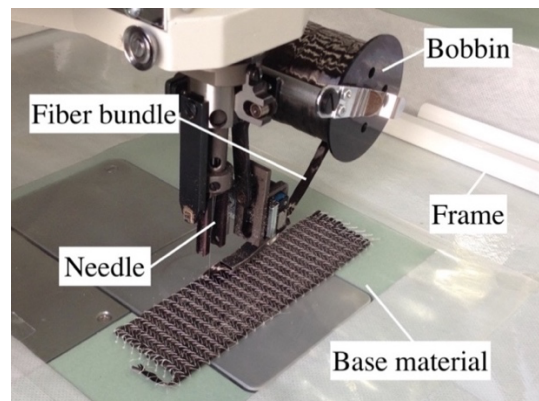


図 1 ファイバー縫い付け機 (株式会社 TIMS, TCWM-101) のヘッド部分

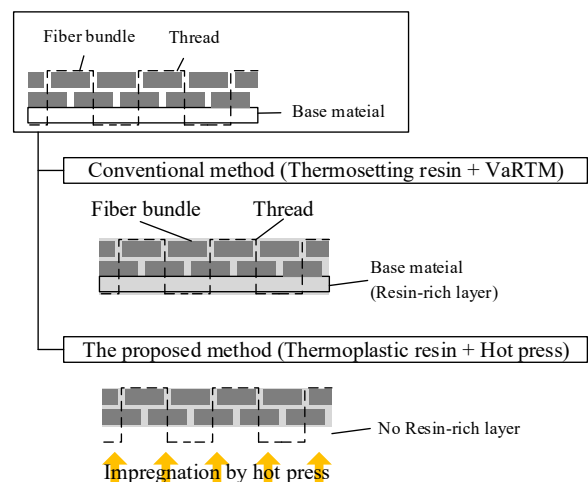


図 2 提案している熱可塑性複合材の作製方法

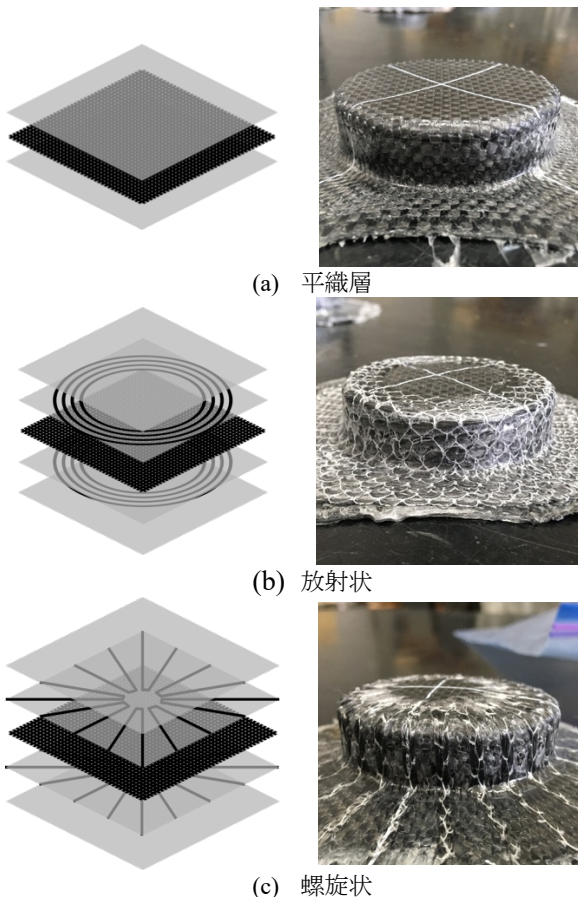


図3 プリプレグの積層構成と絞り後の供試体

ホットプレス成形にはテスター産業株式会社製加熱プレス機 SA-302 を用いた。整形したプリフォームや平織CFを樹脂シートとともに積層し、加圧中にずれないようにステーブラーで固定する。ホットプレスによるプリプレグの成形過程は以下の通りである。

1. プレス温度 200°Cで 2 トンの荷重をかけて予熱する。
2. その後同じく 200°Cで荷重を 10 トンまで上げ、溶融した樹脂を炭素繊維に含浸する。
3. 加圧したまま雰囲気温度まで冷却する。

2・2 熱間深絞り成形

作製したプリプレグの深絞り加工には北海道産業技術総合研究機構・工業試験場のサーボプレス機 (アイダエンジニアリング株式会社 NC1-800(D)) を用いた。円筒深絞り金型の寸法は雌型が直径 60 mm, 雄型が直径 58 mm である。内部には螺旋状の電熱線が埋め込まれており、制御器による温度制御が可能である。加工中は上下のダイともに 135°Cに加熱した。深絞り加工前にプリプレグを恒温器 (200°C, 10 分) により予熱し、手早く金型にセットし、深絞り成形を行う。

図 3 左列に示す 3 種類のプリフォームおよび積層構成を持つ供試体を作成した。(a) 平織 CF 1 層からなるもの、

(b)放射状のプリフォーム 2 枚で平織 CF を挟んだもの、(c)螺旋状のプリフォーム 2 枚で平織 CF を挟んだもの。また絞り深さは 25 mm とした。これらをホットプレスにより樹脂含浸した後に、サーボプレス加工を施した供試体を図 3 右列に示す。加工後は(b)放射状のプリフォームは軸方向に繊維を有する層(ストレート層)となり、(c)の螺旋状のプリフォームは周方向に繊維を有する層(フープ層)となる。

2・3 圧縮試験

成形された供試体の力学特性比較のため、絞り方向に圧縮試験を実施した。圧縮試験の結果を図 4 に示す。縦軸は試験力、横軸はクロスヘッドの変位量を表す。ファイバー縫付機で作成した補強用プリフォームを有する供試体(b)、(c)は、供試体(a)よりも高い剛性を示した。また、フープ層を有する供試体がストレート層を有する供試体より高い剛性を有していた。これは供試体が圧縮され側壁が径方向に変形する際、フープ層がその変形を拘束したためである。

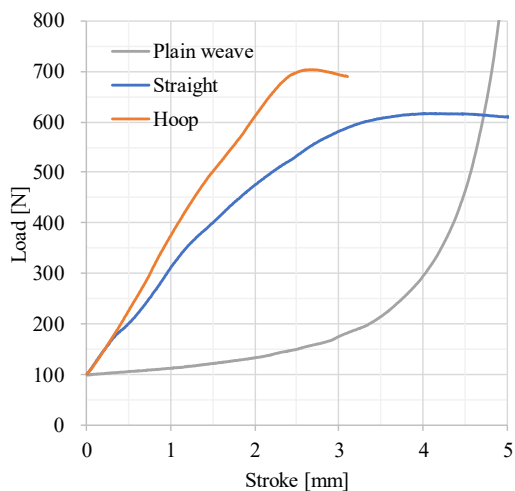


図 4 圧縮試験結果

3. 局所補強形状の設計

3・1 チャンネル型モデルと供試体

トポロジー最適化には汎用有限要素法ソフトウェアの ANSYS Workbench 19.2 の機能を用いた。図 5 左に示すようなコ字断面を持つチャンネル型の熱可塑性複合材を対象に局所的な補強形状をトポロジー最適化により行う。有限要素モデルには 4 節点 SHELL181 要素を使用し、要素数は 600 とした。積層構成は繊維を全て Y 方向に配向した[0]₄、厚さは 1.7 mm とした。上部と下部の丸棒 2 本とモデルは接触条件を定義し、摩擦係数は 0.2 とした。境界条件は上部の丸棒の Z 方向を固定し、Y 方向に 5 mm の変位を与え、下部の丸棒を全方向に並進固定した。材料定数は、予備実験の結果より、繊維方向ヤング率(E_1)を 67.8GPa、繊維と垂直方向ヤング率(E_2)を 1.05GPa、せん断剛性(G_{12})

を 1.03GPa, ポアソン比(ν_{12})を 0.236 とした. シミュレーションによる最大主応力分布を図 6 に示す. 上部で圧縮される部分から下部で支えられる部分にかけて, 高い応力値が分布していることがわかる.

図 5 右に前章と同様にして作製したチャンネル型供試体の写真を示す. シミュレーションモデルと同様の条件で 4 点曲げ実験を行い, 比較結果を図 7 に示す. 両者はよく一致しており, シミュレーション条件や予備実験で得られた材料定数の妥当性が確認でき, 本モデルをトポロジー最適化に適用可能であることを確認できた.

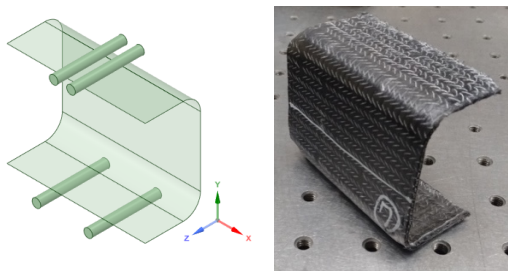


図 5 チャンネル部材の 4 点曲げシミュレーションモデルと作成した供試体

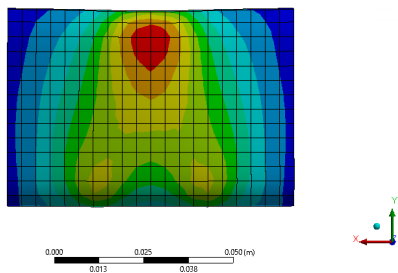


図 6 4 点曲げシミュレーションによる最大主応力分布

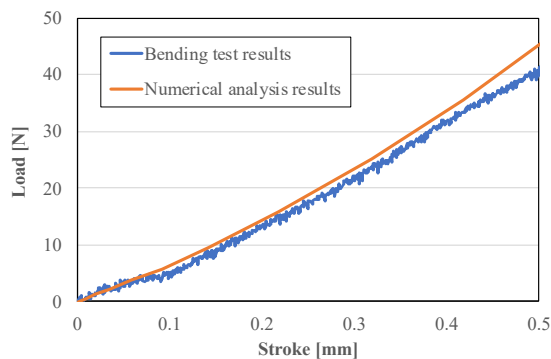


図 7 4 点曲げ試験の結果の数値解析と実験の比較

3・2 トポロジー最適化

最適化領域は丸棒を除いた全体とし, 最適化目的を剛性最大化と同義であるコンプライアンス最小化とした. また, トポロジー最適化後の体積は, 元のモデル形状の 20 %を

保つことを条件とした. トポロジー最適化の結果から得られた形状を図 8 に示す. 図 6 で示された主応力の値が低い要素が取り除かれ, 応力値の高い部分に部材が残る結果となった.

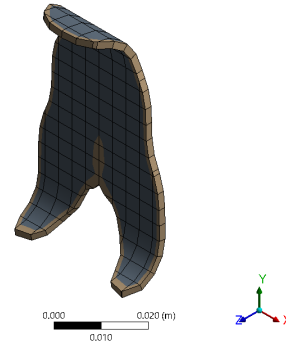


図 8 得られたトポロジー最適形状

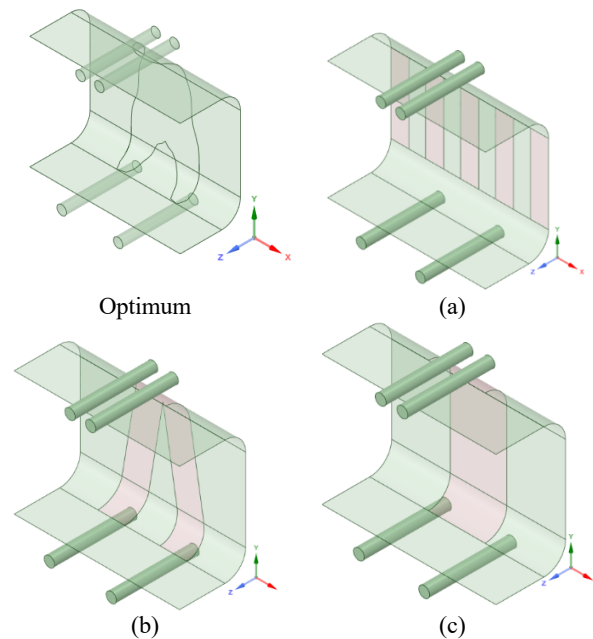


図 9 最適形状と同体積の比較対象

3・3 最適化結果の検証

得られた形状をチャンネル型 CFRTP の外側に積層したモデル(図 9 左上)を作成し, 最適化形状の効果を検証する. 図 9 に強化部が最適化結果と同体積となるように作成した 3 つのモデルを示す. (a)は, 背面に 5 本の長方形を等間隔に配置することで背面の強化を行った. 長方形は縦 40 mm, 横 9.2 mm で, 8.5 mm おきに配置させた. (b)は, 上部の棒から下部の棒にかけて平行四辺形を八の字に配置し, 背面と曲面部の強化を行った. 平行四辺形の底辺は 13 mm とした. (c)は, 横 26 mm の長方形で, 縦は上下の曲面部までとし, 背面と曲面部の強化を行った. それぞれモデルで強化部分の体積は, 元の体積の 20 %, 19.8 %, 19.8 %

20%であり、トポロジー最適化により得られた形状とほぼ同様である。また、全モデル共通して強化部のないエリアの厚さを 1.7 mm、強化層を追加するエリアの厚さを 2.5 mm に設定し、強化部分の配向角度は Y 方向に並行である。

前節と同様の条件で 4 点曲げ試験シミュレーションを行い、反力(N)と最大変位(mm)の比を剛性係数(N/mm)と定義し、それぞれのモデルの剛性計数値を表 1 に示す。最適化によって得られた形状が最も高い剛性係数を示すことがわかり、トポロジー最適化の有用性が確認できた。

表 1 剛性係数の比較

Model	Optimum	(a)	(b)	(c)
Stiffness				
Coefficient	347.4	273.9	314.2	322.8
[N/mm]				

4. 結言

本研究ではファイバー縫付機および加熱プレス成形により熱可塑性樹脂を母材とする炭素繊維強化複合材料を成形し、熱可塑性複合材料の積層板の円筒深絞り加工を行った。成形品の圧縮試験を行い、結果を比較した。サーボプレスを用いた深絞り加工では、作製した熱可塑性複合材の積層板に対し加熱工程は恒温器、プレス工程はサーボプレス機と工程を 2 つに分けたスタンピング成形を行った。加工した積層板は次の 3 種類とした。(a) 平織 CF 1 層からなるもの、(b)放射状のプリフォーム 2 枚で平織 CF を挟んだもの、(c)螺旋状のプリフォーム 2 枚で平織 CF を挟んだもの。サーボプレスを用いて加工した円筒状の供試体に圧縮試験を行い、得られた結果を比較すると高い順に(c)フープ、(b)ストレート、(a)平織材のみとなり、補強の効果

を確認できた。このことから繊維強化複合材料の円筒深絞り加工品において、ファイバー縫付機による最適な繊維配置により力学的特性が向上することが確認できた。

続いて、作成したチャンネル型供試体で 4 点曲げ試験を行い、それを模擬した数値解析結果と比較し妥当性を確認した。また、1 mm 変位の反力値を剛性係数として、実験と数値解析を比較した結果、それぞれ近い値を示した。4 点曲げ試験を行ったモデルに体積を 20 %に制限したトポロジー最適化を行い、境界条件に対し最適な形状を求めた。最適形状をモデルの背面に積層し、再度 4 点曲げ試験を行い強化した結果、58.8%剛性係数が大きくなった。トポロジー最適化の効果測定のため比較用のモデル (a), (b), (c) と剛性係数を比較したところ、最適化を行った方が大きい剛性係数を示した。また、(a), (b), (c) の結果の比較から曲面部と主応力の大きい部分を補強することで剛性係数が大きくなる傾向を確認できた。

参考文献

- 1) S. Honda, T. Igarashi and Y. Narita, Multi-Objective Optimization of Curvilinear Fiber Shapes for Laminated Composite Plates by Using NSGA-II, Composites Part B: Engineering, Vol. 45, 2013, pp. 1071-1078.
- 2) K. Katagiri, S. Honda, et. al., Resin molding by using electro-activated deposition for efficient manufacturing of carbon fiber reinforced plastic, Composite Structures, Vol 182, 2017, pp. 666-673.
- 3) D. Murakami and S. Honda, A Study on Fabrication of Thermoplastic Composite by Tailored Fiber Placement Machine and its Vibration Characteristics, The 5th Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics & Control, Aichi University, Toyohashi, 2017. 7. 29. USB, J15.