

熱可塑性CFRPプレス成形品の最適設計手法の開発

— U字型フレームの積層構造・設計形状の最適化 —

根田崇史* 森大介** 奥村航** 長谷部裕之** 斎藤譲二** 高野昌宏*

熱可塑性CFRPのプレス成形品に適用可能な積層構造および設計形状の最適化手法の構築を目的とし、多目的遺伝的アルゴリズム(MOGA: Multi-Objective Genetic Algorithm)とトポロジー最適化を組み合わせ、解析によって最適値を得る設計手法を構築した。検証としてU字型フレームの解析を実施し、MOGAを用いることで少ない試行回数で積層構造の最適化を行うことが可能であることを確認した。また、最適積層構造を基にトポロジー最適化を用いて形状の最適化を行うことで剛性を維持しながら20%の軽量化を達成した。

キーワード: 熱可塑性CFRP, プレス成形, 積層構造の最適化, 軽量化

Development of an Optimal Design Method for Press-Formed CFRTP Products
- Optimization of Laminated Structure and Design Shape of U-shape Frames -

Takashi KONDA, Daisuke MORI, Wataru OKUMURA, Hiroyuki HASEBE, Joji SAITO and Masahiro TAKANO

For the purpose of constructing an optimization method for laminated structures and design shapes applicable to press-formed carbon fiber reinforced thermoplastics (CFRTP) products, a design method for obtaining optimal values by analysis was constructed by combining multi-objective genetic algorithm (MOGA) and topology optimization. For verification, a U-shaped frame was analyzed, and it was confirmed that a laminated structure can be optimized with a small number of trials by using MOGA. It was also confirmed that a weight reduction of 20% could be achieved while maintaining rigidity by optimizing the design shape using topology optimization based on the optimum laminated structure.

Keywords: CFRTP, press forming, Optimization of laminated structures, weight reduction

1. 緒 言

積層した炭素繊維を樹脂で固めた炭素繊維複合材料(CFRP)は比剛性、比強度が鉄やアルミ等の金属材料と比べ高く、軽量化が求められる部材の材料として期待されている¹⁾。

CFRPの力学的特性は炭素繊維の方向の影響が大きく、性能を活かすためには用途に応じた繊維方向の最適化が不可欠である。所定の方向に積層した際の材料の特性については数学的に求めることが可能である²⁾³⁾。しかしながら、繊維方向の組み合わせは膨大であり、それらの中から用途に応じた最適な方向を手動で求めるには非常に労力がかかる。そこで、遺伝的アルゴリズム(GA)や応答曲面法といったコンピュータを用いた最適化が検討されており、最適解を短時間で得られる

ことが知られている⁴⁾⁶⁾。

近年では板材からプレス加工によって成形品が得られることから、熱可塑性樹脂を用いた熱可塑性CFRPが量産向けの素材として期待されている⁷⁾。しかし、プレス用途として市販されている熱可塑性CFRPの板材は織物状の炭素繊維を一様に積層したものや、中～短繊維をランダムに配向させた材料である。熱可塑性CFRPのプレス成形においても、繊維方向の最適化を行うことでCFRPの特徴を活かした部品の高機能化が期待できる。

そこで、本研究では多目的遺伝的アルゴリズム(MOGA)による積層構造の設計、およびトポロジー最適化による成形品形状の設計を組み合わせ、熱可塑性CFRPのプレス成形品に適用できる設計手法を構築し、実際のプレス成形品によりその適用性を実証した。

*機械金属部 **繊維生活部

2. 積層構造の最適化

2.1 対象形状

本研究ではロボットの搬送用フォークを想定し、板材からプレス成形で実現できる形状として図1に示すU字型の成形品を対象形状とした。内部は炭素繊維の方向が一方向に揃えられた厚さ0.2 mmのシート20層からなる構造とし、繊維方向は板厚中央で対称とした。また、目標を従来の熱可塑性CFRP板材の積層構造に近い 0° と 90° を交互に積層したものと比較して20%の軽量化とした。

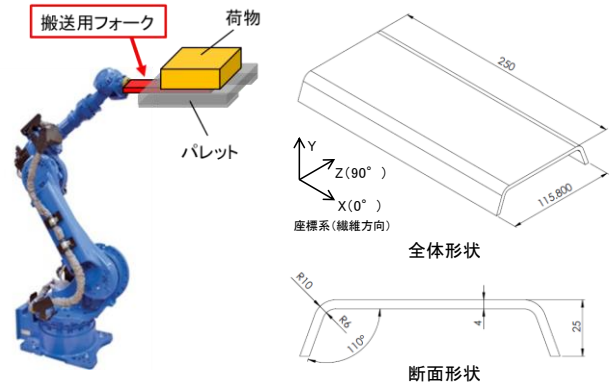


図1 対象形状

2.2 成形品の剛性最適化問題

2.2.1 解析条件

成形品の曲げ、ねじりに対する剛性向上を目的として各層の繊維方向の最適化を実施した。剛性は有限要素法(FEM)解析における荷重に対する変形量の大きさとして評価し、図2に示すように曲げ剛性ではフレーム先端の中央部に-Y方向に70Nの力を与えた際のY方向の変形量 δ_{bend} 、ねじり剛性ではフレーム先端の各コーナー部にY方向で対向するように70Nの力を与えた際の各コーナー部の変形量 $\delta_{tortion1}$ 、 $\delta_{tortion2}$ を評価パラメータとした。曲げ、ねじり剛性が最大となる積層構造を求めるため、目的関数は δ_{bend} 、 $\delta_{tortion1}$ 、 $\delta_{tortion2}$ を最小となるよう定義した。

その他、積層構造の制約条件として前述の板厚中央での対称性のほか、製造条件として2層分を同一方向に重ねて利用することから解析でも2層分を1層として10層で実施した。また、図1中のXZ平面上の方向で示される繊維方向についても 0° 、 $\pm 45^\circ$ 、 90° の4種類に限定することとした。

FEM解析にはANSYSを使用した。各層はソリッドモデルを用い、節点数は70650、要素数は9280である。材料定数は $E_x = 123.4\text{GPa}$ 、 $E_y = E_z = 1.6\text{GPa}$ 、 $\nu_{xy} = \nu_{xz} = 0.27$ 、 $\nu_{yz} = 0.4$ 、 $T_{xy} = T_{xz} = 3.34\text{GPa}$ 、 $T_{yz} = 2.203\text{GPa}$ とした。上記条件の下、各層の繊維方向をパラメータとしてMOGAを用いて最適化を行った。MOGAで用いられている遺伝的アルゴリズムは図3に示すように初期世代の評価結果を基に適応度の高い個体を選別、交叉、あるいは突然変異を行いながら次世代の個体を生み出すことで最適化を行う手法である。今回の解析では41種類の積層構造の組み合わせを初期世代とし、5回の世代交代を経て205回の結果から最適構造を求めた。

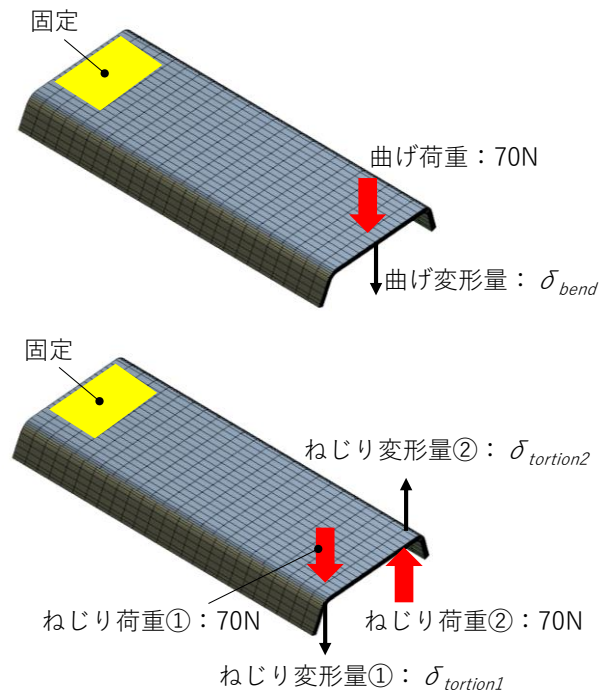


図2 剛性解析条件

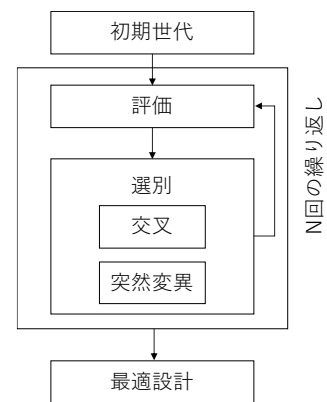


図3 遺伝的アルゴリズムの流れ

2. 2. 2 解析結果

解析で計算した各積層構造における曲げ変形量 δ_{bend} を横軸、ねじり変形量 $\delta_{torsion}$ を縦軸とした結果を図4中に□で示す。また、従来の熱可塑性CFRP板材の積層構造に近い 0° と 90° を交互に積層したものを図中に●印で示す。最終的な曲げ、ねじれ剛性量が最も高くなる最適積層構造として $[0/0/45/-45/0]_s$ を得た。今回の解析条件において総当たりでは1024回(4方向×5層=4⁵)の解析が必要である。今回、約5分の1の試行回数で最適な積層構造が得られており、MOGAの有効性が確認できた。

2. 3 薄肉化による成形品の軽量化

2. 3. 1 解析条件

2.2.2項より、積層構造を最適化することで従来のCFRP板材より高剛性化を達成できることが明らかになった。そこで、従来と同等以上の剛性を維持しつつ軽量化を実現する方法として、積層数を減じた場合について検討した。減ずる層は曲げ内側の層とし、18層(10%の軽量化)、16層(20%の軽量化)の場合について2.2.1項と同様の解析条件で曲げ変形量、ねじり変形量を求めた。

2. 3. 2 解析結果

各積層数における解析結果を図5に示す。図中に積層数毎の結果の包絡線を図中に示す。この結果より、18層の場合は従来品と同等以上の剛性が得られるが、16層の場合は曲げ剛性が低下することから、薄肉化では目標とする20%の軽量化を実現できないことが判明した。

3. 形状の最適化

3. 1 成形品の穴形状最適化問題

2.3節では薄肉化による軽量化について検討したが、軽量化の目標値によっては今回のように薄肉化のみでは対応できない場合も考えられる。そこで、薄肉化ではなく、プレス成形で実現できる肉抜きによる軽量化について検討した。肉抜き部の形状についてはトポロジー最適化を用いた。

3. 2 解析条件

今回の解析では、U字型フレームの初期形状を設計領域として、図6に示す曲げとねじりの負荷を同時に

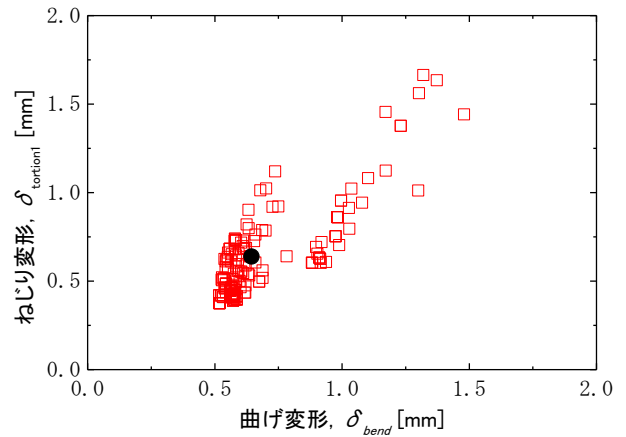


図4 曲げ変形とねじり変形の関係
(積層数20層)

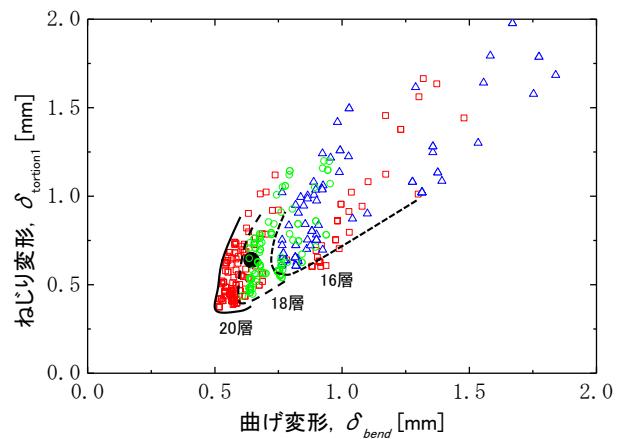


図5 曲げ変形とねじり変形の関係
(積層数を減じた場合)

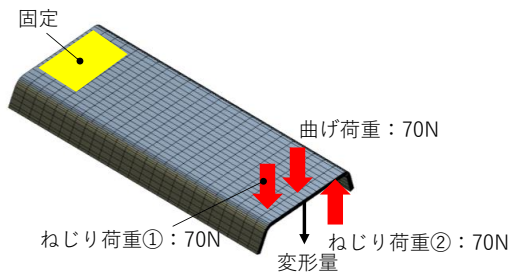


図6 形状最適化条件

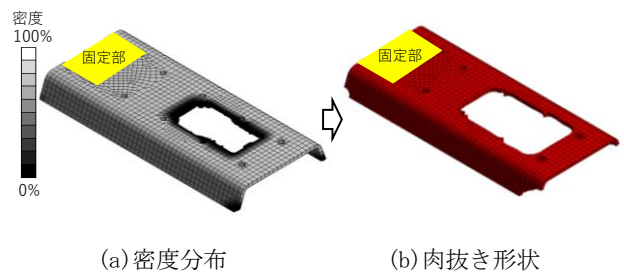


図7 トポロジー最適化結果

与え、その際の変形量を指標として重量が20%減になるよう形状を変化させながら、最も変形量の小さい条件を探索した。制約条件として、板厚が薄くなるような変形を行わず、肉抜きを行う形とした。解析ソフトはANSYSを用いた。

3. 3 解析結果

トポロジー最適化によって得られた材料の密度分布を図7(a)に示す。天面部中央に肉抜き部、その周辺に密度の低い部分が生じている。この結果から密度が80%以下の領域を肉抜き部とし、図7(b)に示す肉抜き形状を得た。

4. 設計手法の検証

4. 1 プレス成形

解析によって得られた結果を検証するため、実際に成形品をプレス成形にて試作した。プレス成形に用いる基材の積層構造は2.2.2項で得られた最適積層構造および従来のプレス向け板材を模擬した0°と90°を交互に積層した2種類とした。素材としてTENCATE製CetexTC910(ナイロン6/一方向炭素繊維、1層の厚さ0.2mm)を用い、積層後に赤外線ヒータを用いて280℃まで加熱し、板状に成形した後、シャーリングマシンで260mm×160mmに切断した。

成形に用いた装置の構成を図8に示す。プレス機は加圧能力3000kNのサーボプレス機(㈱アマダ製：SDE-3030)を用いた。金型温度は室温とした。基材を赤外線ヒータで280℃に加熱後、手で金型上に搬送し、プレス成形を行った。成形時の最大荷重を投影面積で除して求めた面圧は2.3MPaであった。

4. 2 成形品の質量評価

プレス成形後、不要な部分のトリミングを行い、最適積層構造を持つ成形品については3.3節で得られた最適形状を参考に上面内側の肉抜き加工を行った。作製した成形品の外観を図9に示す。

成形品の乾燥重量を電子天秤で測定し、通常品に対する質量比を求めた結果、形状最適化なしの成形品は153g、形状最適化した成形品は120gとなっており、20%の質量削減効果が得られていることが確認できた。

4. 3 成形品の剛性評価

成形品の剛性を評価するため、成形品はテーブル上

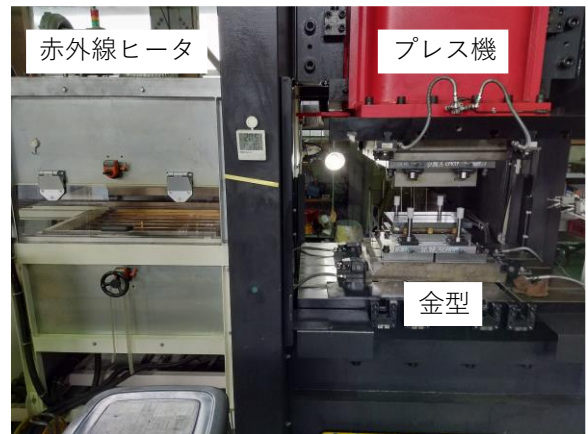


図8 成形に用いた装置

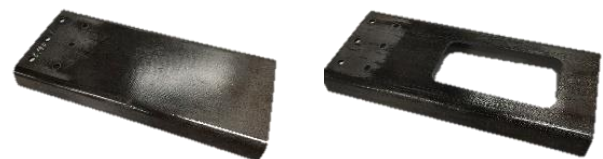


図9 作製した成形品

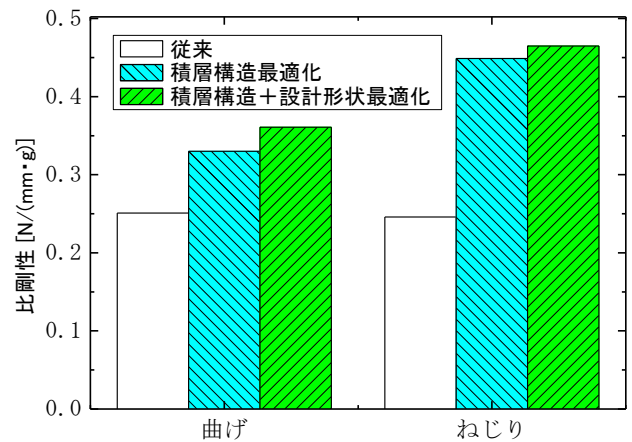


図10 各成形品の比剛性の比較

の治具に6本のボルトで固定した。曲げ剛性評価ではアーム先端の中央部、ねじり剛性評価ではアーム先端の中央部から40mm離れた位置にデジタルフォースゲージ(㈱アマダ製：DPU-500N)の端子(φ15mm平板)を押し当て、デジタルフォースゲージに表示された値を試験荷重、ダイヤルゲージの値の変化を変形量とした。各成形品について10N、20N、40Nの試験荷重に対する変形量を測定し、その結果から求めた切片0の近似直線の傾きを剛性とし、成形品の重量で除すことで比剛

性を得た。各成形品の比剛性を図10に示す。この結果から、積層構造最適化と設計形状最適化を行うことで高い比剛性を有する成形品が得られることを確認できた。

5. 結 言

本研究では、熱可塑性CFRPのプレス成形における成形品の設計手法として、MOGAを用いた積層構造の最適化を検討し、少ない試行回数で最適積層構造が得られることを確認した。次に、トポロジー最適化を用いた設計形状の最適化を行うことで、成形品の軽量化が可能であることを確認した。さらに、本設計手法で得られた積層構造および設計形状を有する成形品を実際にプレス成形で作製し、適用できることを実証した。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、プレス成形作業にご協力頂いた北陸プレス工業㈱に感謝します。

参考文献

- 1) 清水信彦. 炭素繊維複合材料(CFRP)の開発状況について. レーザー研究. 2010, vol. 38, no. 8, p. 603-608.
- 2) 内田盛也. 先端複合材料の設計と加工. 工業調査会, 1988, 264 p.
- 3) 末益博志(著), 日本複合材料学会(監修). 入門 複合材料の力学. 培風館, 2009, 159 p.
- 4) Satchi Venkataraman, Raphael T. Hfika, 轟章. 複合材料パネルの最適設計(方法と実践). 日本複合材料学会誌, 2000, vol. 26, no. 6, p. 203-212.
- 5) 轟章, 石川哲也. GAを用いた複合材料の積層構成最適化における応答曲面の実験計画法. 日本機械学会論文集 A編. 2000, vol. 66, no. 645, p. 978-985.
- 6) 藤井大地, 小泉智彦, 森村毅. 位相最適化手法を用いたCFRPによる中空スラブの最適補強. 日本建築学会構造系論文集. 2004, No. 585, p. 109-114.
- 7) 寺田幸平. 炭素繊維強化熱可塑性プラスチック -現状, 応用分野および課題-. 精密工学会誌, 2015, vol. 81, no. 6, p. 485-488.