

# 低コスト CFRTP 開発のための炭素繊維自動最適配置システムの構築

## Construction of an Automated Optimal Allocation System for Carbon Fiber for Low-Cost CFRTP Development

研究代表者 呉工業高等専門学校 機械工学分野 助教 野波諒太

Ryota Nonami

In this study, we developed a method to optimize the orientation and alignment of carbon fibers to maximize the use of CFRP molding technology using 3D printers, which has become popular in recent years. Therefore, the proper design of carbon fibers is necessary. However, a manual design could be more manageable and costly for designers. Therefore, computer-aided automatic design is necessary. In this study, we developed a method to optimize the orientation of carbon fibers. The optimization of fiber orientation is challenging with conventional optimization methods due to many design variables. Therefore, the new optimization method based on GA has been developed to enable optimization, demonstrating its effectiveness. Next, we developed an optimization process that optimizes the fibers' arrangement and orientation. As a result, this optimization process gives the arrangement and orientation of carbon fibers that maximizes stiffness with the minimum amount of carbon fibers. This optimization process enables low-cost CFRP design with less expensive carbon fibers.

### 要旨

本研究では近年普及してきている3DプリンタによるCFRPの成形技術を最大限に活かすための炭素繊維の配向・配置の最適化手法を構築した。3DプリンタによるCFRPの成形は従来の成形技術よりも自由度の高い炭素繊維の配置・配向が可能であるため、炭素繊維の適切な設計が必要となる。しかしながら、手動による設計は設計者の負担が高く、コストも要する。そのため、コンピュータによる自動設計が必要となる。そこで、本研究では炭素繊維の配向の最適化手法を構築した。繊維配向の最適化は設計変数の多さから従来の最適化手法では最適化が困難であったが、GAをベースとした新たな最適化手法を構築することで最適化を可能としその有効性を示した。次に、繊維の配置・配向を同時に最適化する最適化プロセスを構築し、最低限の炭素繊維量で最大限の剛性を持つ、炭素繊維の配置・配向を求めることも可能とした。この最適化プロセスにより高価な炭素繊維の使用を抑えたコストパフォーマンスの高いCFRPの設計を可能とした。

### 1. まえがき

軽量かつ高剛性・高強度な特性を持つCFRPは軽量化による燃費向上を目的として航空機への適用が進められており、自動車においても従来の金属材料からのリプレイスが検討されている。CFRPは金属材

料と異なり炭素繊維の配向方向に依存した異方性を有した材料である。仮に炭素繊維の配向が最適となっていない場合、強化効果の薄い炭素繊維が含まれたCFRPとなるため、非常にコストパフォーマンスの低い材料となる問題点がある。この問題点を克服するためには、CFRPに対して想定される荷重条件に対応した最適な炭素繊維の配向を設計する必要がある。近年では3Dプリンタや自動繊維束配置装置の普及により自由度の高い炭素繊維の配置となったCFRPが成形可能となってきた<sup>1)2)3)4)</sup>。これらの成形技術を最大限に活かすためにも炭素繊維の最適な配向方向を求めることは重要である。しかしながら、繊維配向角の最適化は膨大な数の設計案の中から最適解を探索する必要があるため、従来の最適化手法では最適化が困難という問題点がある。また、CFRPのコストパフォーマンスをさらに向上させるために配向方向の最適設計だけではなくVf(炭素繊維含有率)を減らす必要がある。しかし、Vfと剛性・強度は基本的にトレードオフの関係にあり、コスト低減のためにVfを減らすとCFRPの剛性・強度の低下が生じる。そのため、材料コストを抑えつつ剛性・強度をある程度維持するためには、剛性・強度を最大化させることのできる、炭素繊維の最適配置位置の設計も重要となる。しかし、繊維の配向・配置を同時に最適化した事例は調べた限りでは見受けられない。

そこで、本研究では繊維配向の最適化手法として遺伝的アルゴリズム(GA)をベースとした多数の設計変数を有する最適化問題の最適化が可能な手法を提案する。さらに、繊維の配向・配置の最適化にはトポロジー最適化を用いた最適化プロセスを提案する。これら2つの提案手法で繊維の最適化の検証を行い、有効性を示す。

## 2. 繊維配向最適化のための提案最適化手法

### 2.1 提案最適化のフロー

本最適化は、図1に示すようにFEMモデルの要素ごとの配向角を設計変数として、ひずみエネルギー最小化を行うことで、剛性が最大となる繊維配向角の設計案を算出する<sup>5)6)</sup>。提案する最適化手法は図2に示す手順で最適化計算を行う。この最適化計算のフローはGAに近いものであり、初期設計案の生成→適応度の算出→親の選択→次世代設計案の生成を繰り返し行う。従来の単純GAと異なる点は適応度の算出を各要素のひずみエネルギーを別個体の設計案と比較して算出することである。この適応度の計算方法では配向角を直接設計変数として扱わないため、膨大な数の組み合わせ最適化となる配向角最適化において少ない設計案の検討数で最適解を得ることが可能となる。具体的な最適化計算の手順としては[1]で乱数によりランダムな繊維配向角を持った設計案をn個作成する。[2]では汎用構造ソルバーのLS-DYNAにてFEM解析を行いひずみエネルギーを取得する。次に[3]でひずみエネルギーから適応度を計算する。ひずみエネルギーUを同一の要素の他の個体と比較することで、ひずみエネルギーが低いものほど適用度は高く算出される。この適応度を用いて[4]にて適応度の高い個体をエリートとして保存する。最後に[5]にて要素i、設計案jの適応度 $F_{ij}$ から親となる設計案を選択し次世代の設計案を作成する。具体的には、要素数m、設計案数nの場合、図3に示す手順で次世代の設計案を作成する。例えば最適化対象のFEMモデルの要素1の適用度 $F_{11} \sim F_{1n}$ の値を仮定した場合、適応度に応じた面積を持つルーレットを作成する。このルーレットから乱数によって親となる設計案の要素1の繊維配向角 $\theta_{1j}$ を選択する。最も適応度の高い $F_{13}$ がルーレットにより選択されたとすると、設計案 $d_3$ の要素1の繊維配向角 $\theta_{13}$ が

次世代設計案 $d'_1$ の要素1の繊維配向角 $\theta'_{11}$ となる。この手順を設計案数分繰り返して行うことで次世代の要素1の繊維配向角 $\theta'_{11} \sim \theta'_{1n}$ が決定される。さらにこの繊維配向角の決定を要素数分繰り返すことで、次世代設計案 $d'_1 \sim d'_n$ が生成される。この方法により適応度の高い配向角を持った要素が親として選択されていき、世代が進むごとにひずみエネルギーの低い設計案が生成されていく。この計算を繰り返すことで、繊維配向角の最適化を行う。

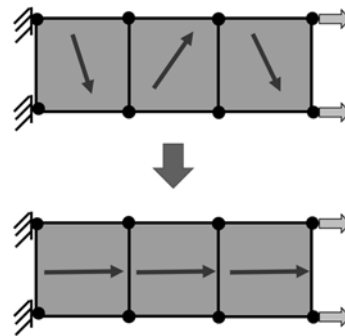


図1 FEMによる配向角の最適化概要

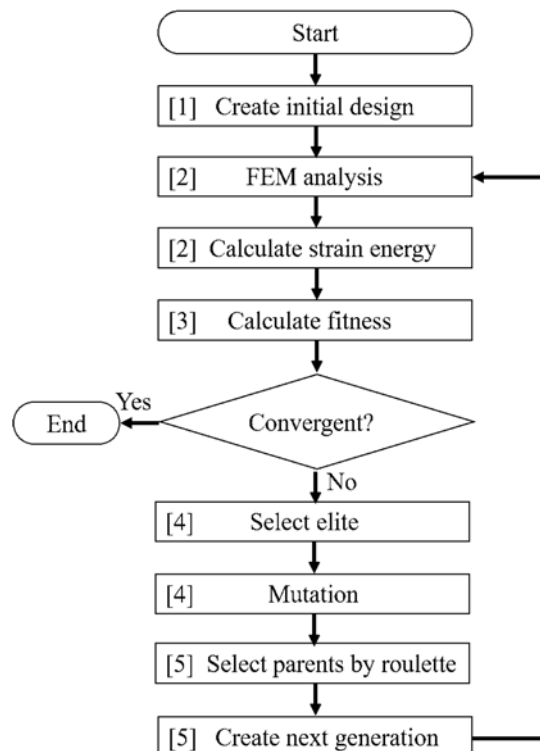


図2 繊維配向最適化のための提案最適化手法

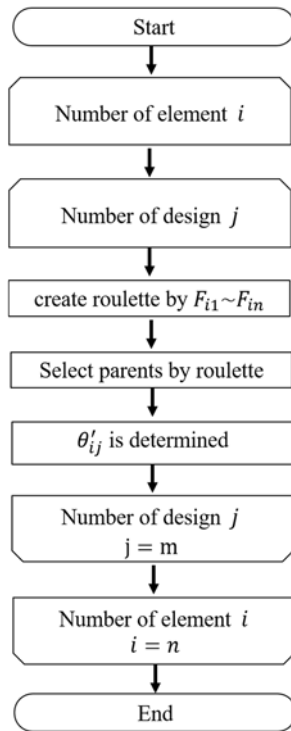


図3 次世代設計案の作成フロー

## 2.2 繊維配向最適化計算例

提案最適化手法の検証のため単純引張モデル，2軸荷重が加わる平板モデルとBピラーモデルを対象に最適化を行った。さらに，最適化結果を従来の設計方法である主応力設計及び単純GAによる最適化結果と比較することで本手法の有効性を示す。

### 2.2.1 単純引張モデル

単純引張モデルでの繊維配向の最適解は全ての要素を引張方向と同じ向きに繊維配向角としたものである。そのため，本提案最適化手法によって最適解を求めなくとも最適解は判明しているが，提案最適化手法の妥当性の検証のために単純引張モデルを対象とした最適化を実施する。図4に最適化対象とする単純引張モデルの境界及び荷重条件を示す。要素数は60である。設定した最適化パラメータは個体数30，エリート保存数2，突然変異確率2%である。このモデルを用いて繊維配向角の最適化を行った。図5に最適化の過程を示す。1世代目は配向角が各要素でランダムであるが，25世代目では，配向角が荷重方向となる要素が増え，最適解到達時には全要素の配向角が荷重方向となる妥当な最適解が得られていることを確認できる。また，図6に最適化の履歴を示す。提案手法は乱数を使用しているため最適解への

収束性の確認のため4回の試行計算を行っている。さらに，単純GAとの比較も行った。縦軸はひずみエネルギーであり，低い値であるほど剛性が高いことを示している。提案手法では世代が進むごとにひずみエネルギーが低下し適切に最適化されていることが確認できる。一方，単純GAでは世代が進むごとにひずみエネルギーは減少しているが，提案最適化手法と比較すると同じ検討数でのひずみエネルギーは高い値となり，200世代目では提案手法で得られた最適解に到達できていない。また，提案最適化手法及び単純GAにより得られた設計案のひずみエネルギーと最大変位，最大ミーゼス応力の比較を表1に示す。ひずみエネルギー，最大変位，最大ミーゼス応力共に提案最適化手法により得られた設計案が低い値となっている。これらの結果から，単純GAと比べて少ない計算量で最適解に到達可能である本提案最適化手法は繊維配向角の最適化問題に対して有効であることが示された。

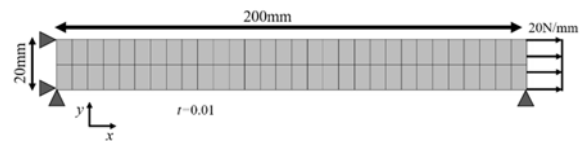


図4 単純引張モデルの荷重・境界条件

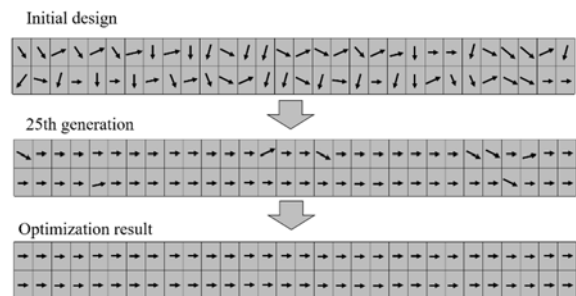


図5 単純引張モデルの最適化過程

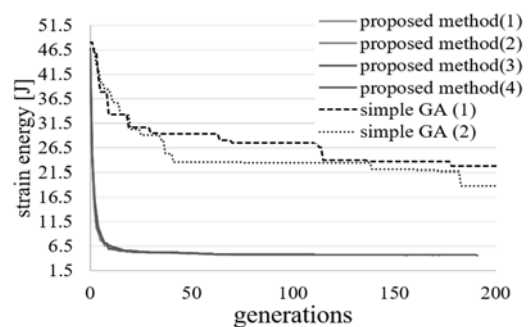


図6 最適化履歴の単純GAとの比較(単純引張モデル)

表1 最大変位と最大応力の比較(単純引張モデル)

	Maximum displacement	Maximum Mises stress
Proposed method	0.23[mm]	200.0[MPa]
Simple GA	0.93[mm]	380.9[MPa]

### 2.2.2 2軸荷重平板モデル

図7に示す平板モデルを対象として各要素の繊維配向角の最適化を行った。材料物性値は直交異方性のCFRPの値を用いている。要素数は650、設定した最適化パラメータは個体数100、エリート保存数5、突然変異確率2%である。図8にひずみエネルギーの最適化履歴と同様の条件による単純GAによる最適化履歴を示す。本提案手法は乱数を使用しているため4回の試行計算を実施している。ひずみエネルギーは世代が進むごとに低下しており、適切に最適化が進んでいることが確認できる。4回の試行計算では300世代目に到達した最適解もほぼ同様なものとなっているため収束性も高い。また、単純GAと比較して低いひずみエネルギーとなっているため、本提案手法は単純GAよりも高い最適化性能があることを示している。最適化後の最大変位、最大ミーゼス応力を単純GA、従来設計法である主応力設計と比較したものを表2に示す。いずれの値も本提案手法によるものが最も低く、剛性の高い優れた設計案であることが示された。これらの結果から、提案最適化手法により適切な繊維配向角が得られることが確認できる。

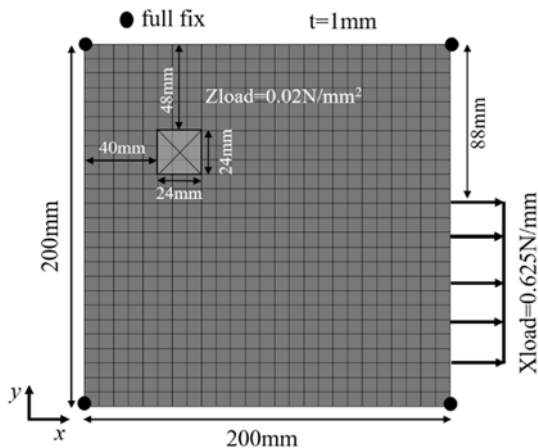


図7 2軸荷重平板モデルの荷重・境界条件

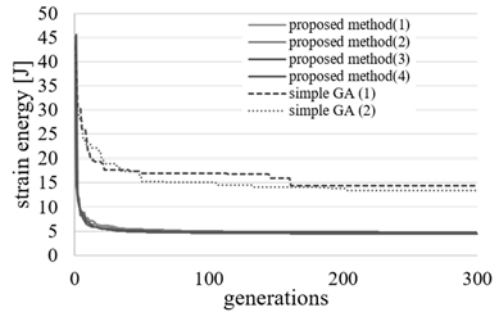


図8 最適化履歴の単純GAとの比較(2軸荷重平板モデル)

表2 最大変位と最大応力の比較(2軸荷重平板モデル)

	Maximum displacement	Maximum Mises stress
Proposed method	1.4[mm]	30.8[MPa]
Simple GA	1.8[mm]	69.9[MPa]
Principal stress	2.5[mm]	188.7[MPa]

### 2.2.3 Bピラーモデル

図9に示すBピラーモデルを対象として各要素の繊維配向角の最適化を行った。要素数は1310、設定した最適化パラメータは個体数100、エリート保存数5、突然変異確率2%である。図10に平板モデルと同様に、ひずみエネルギーの最適化履歴を示す。単純GAと比較して低いひずみエネルギーの最適解が得られている。最適化後の最大変位、最大ミーゼス応力を単純GA、主応力設計と比較したものを表3に示す。平板モデルと同様に提案最適化手法によるものが最も低い値となっており、従来手法よりも高い剛性となる設計案が得られることが確認できた。以上の結果から提案最適化手法は単純GAでは最適化困難な多数の設計変数を持つ繊維配向最適化を適切に行えることを示した。

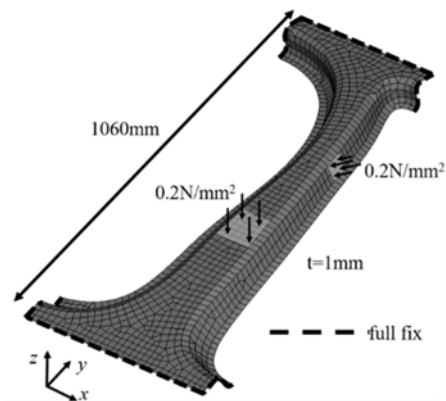


図9 Bピラーモデルの荷重・境界条件

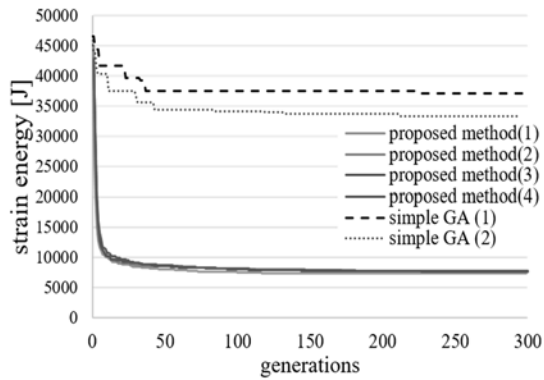


図10 最適化履歴の単純GA との比較(B ピラーモデル)

表2 最大変位と最大応力の比較(B ピラーモデル)

	Maximum displacement	Maximum Mises stress
Proposed method	15.3[mm]	1253[MPa]
Simple GA	25.1[mm]	2149[MPa]
Principal stress	30.5[mm]	1977[MPa]

### 3. 繊維配置・配向最適化のためのプロセスの提案

2章では繊維配向角の最適化のための手法を提案した。しかし、CFRPのコストパフォーマンスをさらに向上させるためには繊維の配置・配向の同時最適化が必要となる。そこで、本章では配向・配置の同時最適化を行うための最適化プロセスを提案する。

#### 3.1 最適化プロセス

提案する最適化プロセスは炭素繊維の配置位置・配向を最適化することで、必要最適限の炭素繊維で構成された低コストCFRPの開発を可能とするものである。提案最適化プロセスでは、炭素繊維の最適配置位置に関してはトポロジー最適化<sup>7)</sup>を利用し、剛性・強度の向上効果が高い位置を特定する。炭素繊維の最適配向に関しては、主応力方向に繊維が配置されるように最適化を行う。これは、連続繊維強化樹脂においては、剛性最大化に最も効果のある繊維配向は主応力方向と一致するという理論に基づくものである。具体的な本提案最適化手法の計算手順を図11に示す。『STEP1』では炭素繊維による強化を行っていない材料を設定し、境界条件及び荷重条件を与えFEM解析を実施し、主応力を算出する。

『STEP2』では『STEP1』のFEM解析と同一の条件にてトポロジー最適化を実施する。本研究ではこのトポロジー最適化を利用し補強効果の高い炭素繊維配

置位置を特定する。

『STEP3』では『STEP1』のFEM解析により得られた主応力 $\sigma_p$ と主応力角 $\theta$ から要素ごとの主応力ベクトル $p$ を式(1)により算出する。

$$p = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \sigma_p \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

u:主応力ベクトルのx方向の成分

v:主応力ベクトルのy方向の成分

『STEP4』では『STEP2』のトポロジー最適化により得られた構造部分のみの主応力ベクトル $p$ を取り出すことで補強効果の高い箇所のみで主応力ベクトル場を構成する。

『STEP5』では『STEP4』で得られた主応力ベクトル場から定常流の場合の流線を算出する。流線を用いて炭素繊維の配向を決定する手法はいくつかの研究報告があり、本研究においてもこの手法を利用することで主応力方向に沿った剛性・強度を最大化可能な炭素繊維配向を算出する。

『STEP6』では『STEP5』で算出した流線に基づきFEMモデルの作成・解析を実施し剛性・強度を評価する。本提案最適化手法で得られる繊維配向は自由度の高い複雑なものとなるので、従来の直行異方性材料を使用したモデリングは容易ではない。そこで本研究では、マトリックス材をsolid要素、炭素繊維をbeam要素でそれぞれモデル化し、CC法(constraint coupling method)によるカップリングを用いて最適化により創出された複雑な繊維を有したCFRPのFEM解析を行う。

以上の『STEP1』～『STEP6』の計算を実施することで補強効果の高い位置のみに剛性・強度を最大化する配向となる炭素繊維が得られる。これにより、必要最小限のVfで剛性・強度を最大化した低コストCFRPの設計案の創出が可能となる。

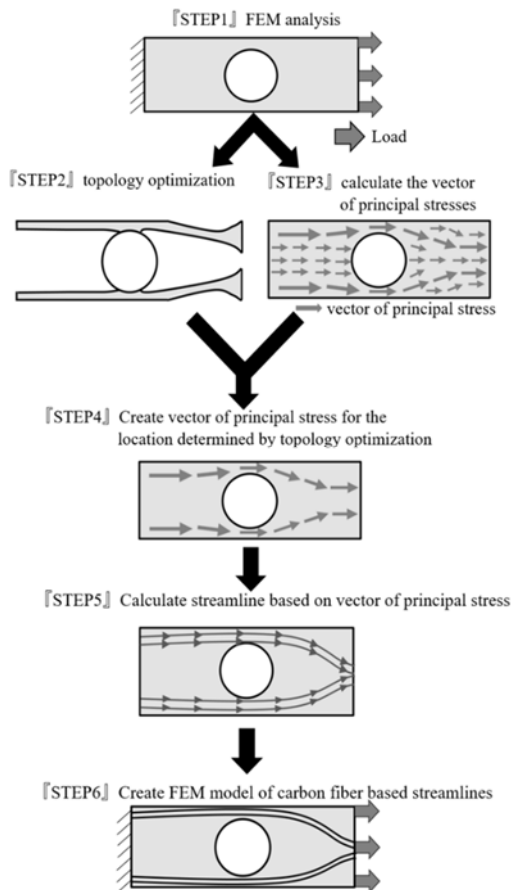


図 11 繊維の配置・配向最適化プロセス

### 3.2 繊維配置・配向最適化計算例

#### 3.2.1 片持ち梁

図 12 に最適化対象となる片持ち梁の形状と境界・荷重条件を示す。この片持ち梁に対して提案最適化手法を用いた最適化の過程を図 13 に示す。図 13 では『STEP2』において体積制約を初期質量の 30%以下と設定しトポロジー最適化を実施し、『STEP4』として『STEP3』で算出された主応力ベクトルを『STEP2』のトポロジー最適化により構造として必要とされた箇所のみ抽出している。次に『STEP5』で『STEP4』にて作成した主応力のベクトル場から流線を算出し、『STEP6』にて流線の位置に beam 要素を使用して炭素繊維を FEM モデル化し FEM 解析により剛性を評価した。

本提案最適化手法では『STEP2』のトポロジー最適化の体積制約の条件によって得られる炭素繊維の配置・配向は異なることが予想されるため体積制約を 30%以下、40%以下、50%以下と 3 種の異なる条件それぞれで最適化を行った結果、 $V_f=21\%$ 、 $V_f=33\%$ 、 $V_f$

$=41\%$ となる図 13 に示される炭素繊維の配置・配向が得られた。最適化の過程で体積制約の値が大きくなるほどトポロジー最適化によって構造的に必要なとされる箇所は多くなるため、 $V_f$  も高くなっている。また、炭素繊維の直径は繊維配置・配向が比較的自由となるように今回は 0.1mm と仮定し炭素繊維同士の重なりを防ぐために間隔が 0.1mm 以下とはならないように流線の密度を調整し流線の計算を行っている。また、剛性を同一の  $V_f$  を有する 1 方向配置の CFRP を最適化により得られた炭素繊維配置・配向の設計案と比較した結果、図 15 に示すようにストロークに対する荷重が高くなっており高い剛性となっていることが確認できる。片持ち梁の問題の場合の剛性とは曲げ剛性のことであり、断面二次モーメントが大きいほど高い値となるが CFRP は樹脂内に炭素繊維が埋め込まれているため曲げ剛性を大きくするためには等価断面から算出される断面二次モーメントを大きくする必要がある。そのためには梁の上端と下端への補強が最も効果的である。本最適化手法によって得られた炭素繊維は上端・下端部分に集中的に配置されており、等価断面から算出される断面二次モーメントを最大化する妥当な配置が最適化により得られていることが確認できる。さらに、片持ち梁問題では曲げ応力は固定端に近い程高くなるため、最適化により固定端付近が集中的に補強され、曲げ応力の低い先端部分に対しては炭素繊維の配置が少ない適切な配置が得られている。これらのことから最適化により補強効果の低い不要な炭素繊維を排しつつ高剛性となる炭素繊維配置・配向が得られていることが確認でき、本提案最適化手法の有効性が示された。

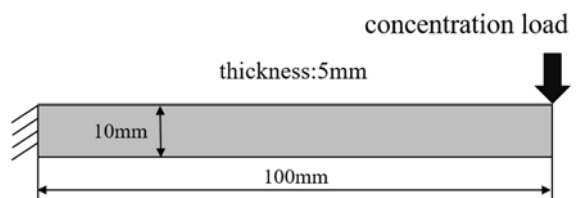


図 12 片持ち梁モデルの荷重条件と境界条件

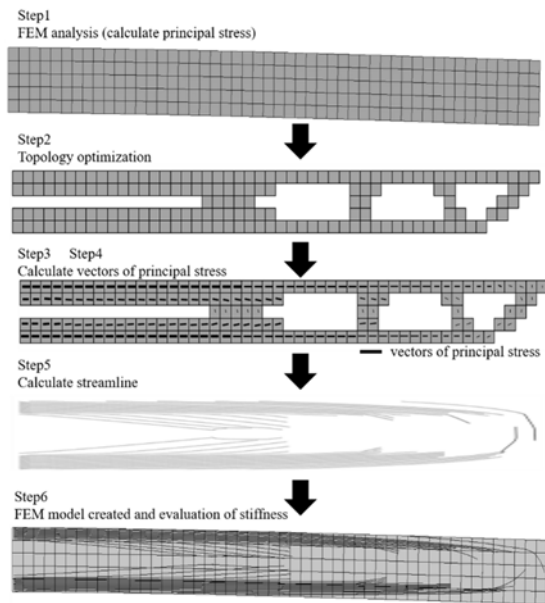


図13 片持ち梁モデルの最適化過程

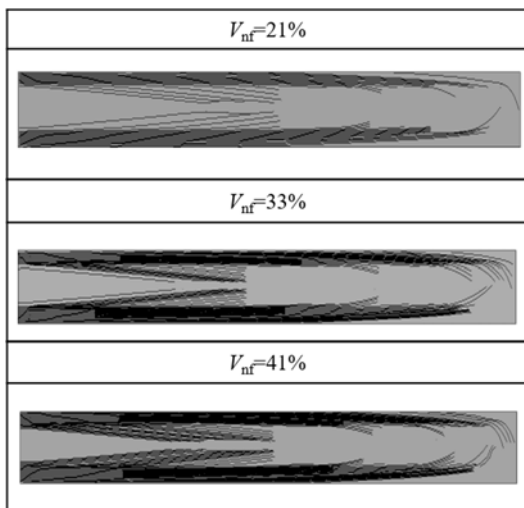


図14 最適化結果( $V_f=21\%$ ,  $V_f=33\%$ ,  $V_f=41\%$ )

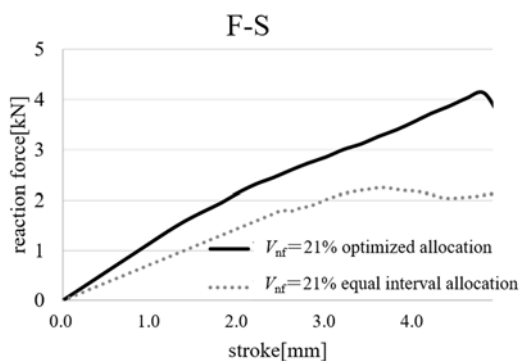


図15 片持ち梁の最適設計案と1方向配置の剛性比較( $V_f=21\%$ )

### 3.2.2 円孔板

本項では3.2.1の片持ち梁とは異なる図16に示す円孔板に対して左端を完全固定とし右端に荷重を与える引張問題を対象として提案最適手法の有効性を検証する。

提案最適化手法の設定ではトポロジー最適化の体積制約を30%以下及び50%以下の2パターンを設定し炭素繊維配置・配向を最適化した結果、図17に示すように $V_f=13\%$ 及び $V_f=23\%$ となる炭素繊維の配置・配向が得られた。最適化により得られた炭素繊維の配置・配向は固定端から荷重点に向かって円孔を避けるように少し湾曲したものがとなった。また、図18に $V_f=13\%$ の場合の最適設計案と1方向配置のCFRPのF-Sカーブの比較結果を示す。最適化されたCFRPモデルの方が同じ炭素繊維量において高い剛性を示している。この結果から円孔板モデルにおいても提案最適化手法により炭素繊維の補強効果を最大限に発揮可能な配置・配向が得られ少ない炭素繊維量で高い剛性となっていることが確認できる。

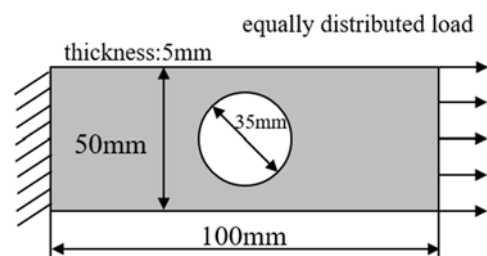


図16 円孔板モデルの荷重条件と境界条件

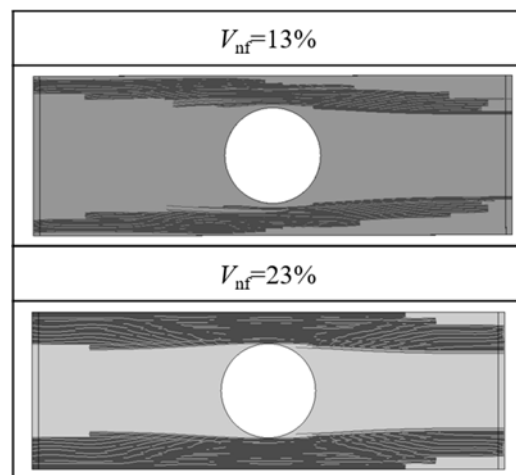


図17 最適化結果( $V_f=13\%$ ,  $V_f=23\%$ , )

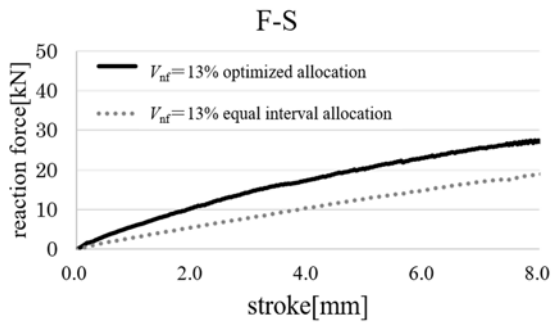


図 18 円孔板の最適設計案と 1 方向配置の剛性比較( $V_f=13\%$ )

#### 4. まとめ

本研究では、炭素繊維の配向最適化手法と配置・配向の同時最適化プロセスの 2 つを構築し検証を行った。配向最適化手法は GA をベースとして多数の設計変数の最適化を可能とした手法である。この繊維配向最適化手法を単純引張、2 軸荷重が負荷される平板、B ピラーモデルにそれぞれ適用し剛性最大化の最適化を行った結果、全てのモデルで単純 GA では得られなかった剛性の高い設計案を得ることが可能であることを示した。次に構築した繊維の配置・配向の最適化プロセスではトポロジー最適化と主応力を用いることで剛性向上効果の高い繊維配置箇所と、その際の繊維配向の同時最適化を可能とした。この最適化プロセスを用いて片持ちはりモデルと円孔板モデルで最適化を行った結果、妥当な繊維の配置・配向となる設計案を得ることができた。この最適化プロセスを用いることで少ない炭素繊維で最大限の剛性を持つ低コスト CFRP の設計を行うことができる。以上の 2 つの構築した最適化手法を用いることで、3D プリントによって可能となった自由度の高い CFRP の成形技術を最大限に活かすことが可能となり、CFRP の普及が今後進んでいくことが期待される。

#### 発表論文

- [1] 野波 諒太, 上岡 真太郎, 山脇 正雄: 低コスト CFRTP 開発のための炭素繊維の配置・配向の最適化. 日本複合材料学会誌, 47, 6: 241-248. 2021 年 11 月
- [2] 野波 諒太, 山脇 正雄: 遺伝的アルゴリズムをベースとした繊維配向角の最適化手法の提案. 日本複合材料学会誌, 48, 3: 86-95. 2022 年 5 月

#### 口頭発表, 受賞等

- 1) 野波 諒太, 上岡 真太郎, 山脇 正雄: 低コスト CFRTP 開発のための炭素繊維配置・配向の最適化. 日本複合材料学会 第 45 回複合材料シンポジウム, B211, 2020 年 9 月
- 2) 野波 諒太, 山脇 正雄: 複合荷重を受ける CFRP の剛性最大化を目的とした繊維配向角の最適化. 日本複合材料学会 第 46 回複合材料シンポジウム, A112, 2021 年 10 月
- 3) 野波 諒太, 広岡伸樹, 木村直司, 山脇 正雄: GA をベースとした積層構成最適化手法の提案. 第 13 回日本複合材料会議 JCCM-13, 3C-11, 2022 年 3 月
- 4) 福井 健太, 野波 諒太: IFM-GA による炭素繊維の配置・配向同時最適化. 第 47 回複合材料学会シンポジウム, A107, 2022 年 9 月

#### 参考文献

- (1) 岡 功介, 池田 忠繁, 仙場 淳彦, 上田 哲彦: 刺繍機による CFRP ドライプリフォームの最適繊維配置. 日本複合材料学会誌, 40, 1, 2014, 10-16
- (2) 野村 壮史, Axel Spickenheuer, 吉川 勝治, 川本 敦史, 岩野 吉宏: 異方性トポロジー最適化と Tailored Fiber Placement による連続繊維複合材料軽量自動車部品の設計試作. 自動車技術会論文集, 51, 1, 2020, 127-133
- (3) 山脇 正雄, 河野 洋輔: 3D プリントによる連続炭素繊維強化プラスチックの積層造形と機械的特性評価. 日本複合材料学会誌, 43, 3, 2017, 97-103
- (4) Kentaro Sugiyama, Ryosuke Matsuzaki, Masahito Ueda, Akira Todoroki, Yoshiyasu Hirano: 3D printing of composite sandwich structures using continuous carbon fiber and fiber tension. Composites Part A, 113, 2018, 114-121
- (5) Pedersen P: On optimal orientation of orthotropic materials. Struct Optim, 1, 1989, 101-106.
- (6) Khosravi P, Sedaghati R.: Design of laminated composite structures for optimum fiber direction and layer thickness, using optimality criteria. Struct Multidiscip Optim, 36(2)2008, 159-167
- (7) P. Bendsoe & O. Sigmund: Material interpolation schemes in topology optimization. Archive of Applied Mechanics 69, 1999, 635-654