

令和 2 年 5 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06219

研究課題名(和文)自由繊維形状を有する新機能熱可塑性複合材の開発

研究課題名(英文)Development of carbon fiber reinforced thermoplastic with arbitrary shaped fibers

研究代表者

本田 真也 (Honda, Shinya)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：90548190

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：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。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。圧縮試験の結果より、円筒深絞り加工品において、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。4点曲げ試験を想定したモデルにトポロジー最適化を行い、最適な形状を求めた。三種類の一般的な形状を持つモデルと剛性係数を比較したところ、最適化を行った形状が最も大きい剛性係数を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複合材シェル部材の深絞り成型などに発展・応用可能である。一般的な平織材や一方向材による熱可塑性複合材をプレスした場合、底抜けなどの割れが発生してしまう問題があった。しかしながら、本手法を用いて、プレス成型後を考慮した最適な繊維形状・繊維分布を有するプリフォームを作成することで、より加工性が高く、高性能な複合材部材の成型が可能となり、複合材の利用拡大につながると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The present study proposes a new fabrication method for Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastic (CFRTP) by using a Tailored Fiber Placement (TFP) machine. Instead of the CF or glass plain weaves, the thermoplastic sheets are used as a base layer for the TFP fabrication. That is, Carbon Fiber (CF) tows are sewn on a Polypropylene (PP) sheet directly, and the PP sheet is impregnated into CF tows by using a hot-pressing machine as a matrix material of composites. After the CFRTP flat sheet are fabricated, they are drawn deeply to cylindrical shapes by using a hot servo-pressing machine. Flat CFRTP sheets have spiral or radial fiber shapes and they becomes hoop or straight layers for the sidewall of cylinder after the drawing process. Due to these reinforcements, the fabricated works result in higher rigidity for compression. Then, four-point bending specimen is employed for the topology optimization. Obtained shape has highest stiffness coefficient than those with general shapes.

研究分野：機械工学

キーワード：複合材料 最適設計 塑性加工 自由繊維形状 ファイバー縫付機 深絞り加工

1. 研究開始当初の背景

- 近年の製造技術の発展により、曲線状の強化繊維を有する複合材の作製が可能となり(図1)、目的に特化した高性能複合材の作製を目指して、欧米諸国の先進的な複合材料研究グループが活発に繊維形状の設計法に関する研究を行っている[1]. また、国内では以前から著者らが曲線状繊維の設計に着目しており、多くの実績[2]をあげている.
- 複合材の成型には一般に熱硬化性の樹脂を用いるが、経済性や成型性の高さから複合材利用の更なる拡大には、熱可塑性樹脂を用いた複合材料(CFRTP; Carbon Fiber Reinforced ThermoPlastics)の採用と高性能化が必須であり、国内外の研究機関や民間企業が生産技術の確立に注力している.

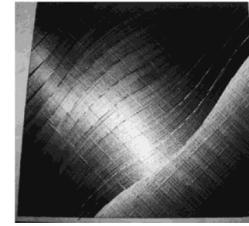


図1 Lopesらによる曲線状繊維複合材[1]

[1] C. S. Lopes, et. al., Composite Structures, Vol. 86 (2007), pp. 897-907 など

[2] S. Honda and Y. Narita, Composite Structures, Vol. 93 (2011), pp. 902-910 など

2. 研究の目的

- 本研究では、自由繊維形状を有し、熱可塑性樹脂により成型された新機能複合材を開発する。曲線状など任意の形状で樹脂含浸前の強化繊維シート(プリフォーム)を作製できるファイバー縫付機を用いて、直接、熱可塑性シートに繊維束を縫付け、ホットプレスにより複合材を成型する。これにより、縫付け先である熱可塑性シート基材が成型過程に繊維層側に含浸し、不織布や平織材などを基材として用いる従来手法よりも繊維含有率を高め、かつ自由形状強化繊維を有する新たな熱可塑性複合材の作製が可能となる。

3. 研究の方法

- これまで自由形状繊維を有する複合材プリフォームが作製できるファイバー縫付機を導入し、自由繊維形状の設計技術を実験により検証するとともに新たな機能を有する複合材シェルの開発を行ってきた.
- ファイバー縫付機は繊維を縫付ける不織布などの基材が必須であり樹脂注入による成型では、成型後に基材部が樹脂リッチとなり剛性の向上に寄与しない問題点があった(図2)。この基材部を熱可塑性シートに置き換えることで、ホットプレス成型時に基材が繊維層に含浸し、基材部がなく、さらに自由形状繊維を有する、新たな熱可塑性複合材の作製が可能である.
- ファイバー縫付機は、刺繍機を援用したプリフォームの作製装置である。図3に示すようにボビンから供給される繊維束を縫い糸で不織布などの基材に縫付けることで、自由な繊維形状を有する積層複合材の作製を可能にする。作製したプリフォームには通常、真空樹脂含浸法(VaRTM; Vacuumed Resin Transfer Method)により、熱硬化性樹脂を含浸する.
- 以上のように、ファイバー縫付機には基材が必須であるが、図2に断面写真を示したように、成型した後、基材部が樹脂リッチとなり、結果として積層板全体としての繊維含有率が低下するなどの問題点があった。そのため、本研究では熱可塑性シートに直接、繊維束を縫付ける手法を提案する。これにより、VaRTMに比べて工程が簡易なホットプレスにより成型が可能になり、また、基材は成型過程に繊維束側に母材として含浸していくため樹脂リッチ部が無くなり、より繊維含有率が高く、かつ熱可塑性積層材が作製可能になる。図4に両手法により作製した複合材断面のイメージ図を示す.
- 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。図5に示す通り、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プレーで固定する。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、熔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.
- 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), 図4)を用いた。型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

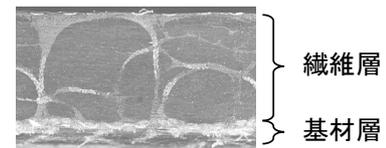


図2 ファイバー縫付機により作製した複合材の断面図

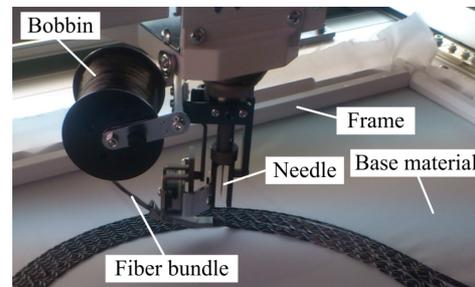


図3 ファイバー縫付機によるプリフォーム成型の様子

- より予熱し、手早く金型にセットし、深絞り成形を行う。
- 絞り成型後に最適な繊維形状を設計するためにトポロジー最適化技術を援用する。形状の算出には、汎用の有限要素法ソフトウェア (ANSYS) に搭載されている機能を用いる。最適化条件として残存体積率を低めに設定することで、境界条件に適したトラス構造のような形状を得ることができる。この形状を参照して、各種の三次元構造に適した形状で繊維を配置した CFRTP 部材を設計する。ただし、トポロジー最適化で得られた擬似的な繊維形状は等方性であるため、異方性材である CF トウで構成した場合との差異を数値計算により事前に評価し、設計案を調整した上で供試体の成型を行う。

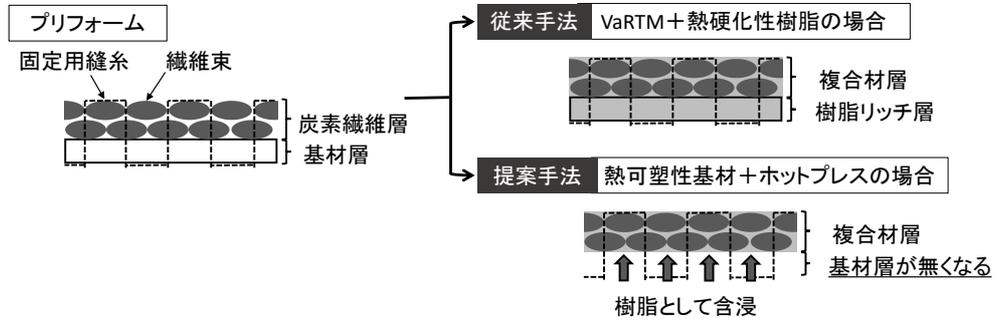


図 4 従来手法と提案手法による成型後の断面のイメージ図

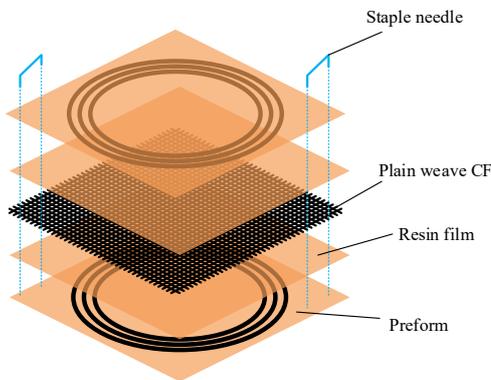


図 5 プレス成型時の積層例



図 6 サーボプレス機 NC1-800 (D)

4. 研究成果

- 雌型が直径 60 mm、雄型が直径 58 mm の円筒深絞り金型の寸法を用いて図 7 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製した。(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 8 に示す。加工後は (b) 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)となり、(c) 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)となる。
- 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 9 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製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り、自由繊維形状の有用性が確認できた。

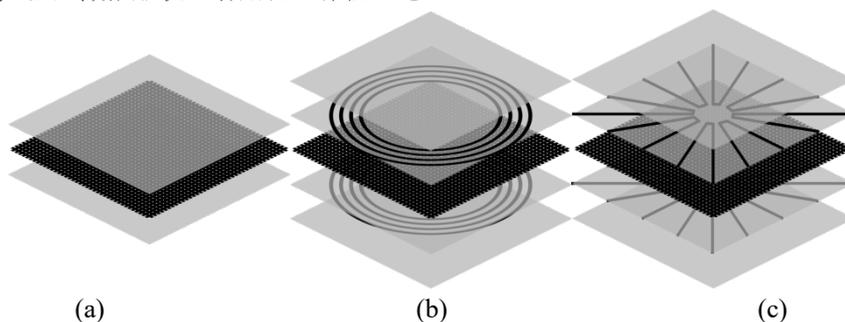


図 7 プリフォームの積層構成

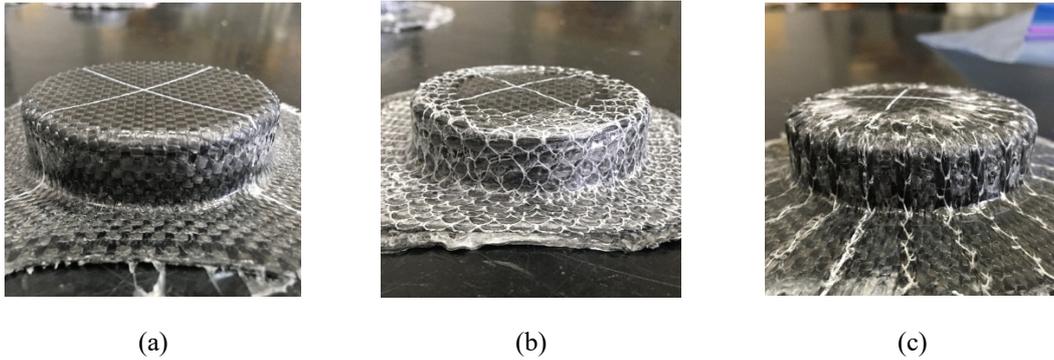


図 8 深絞り後の供試体

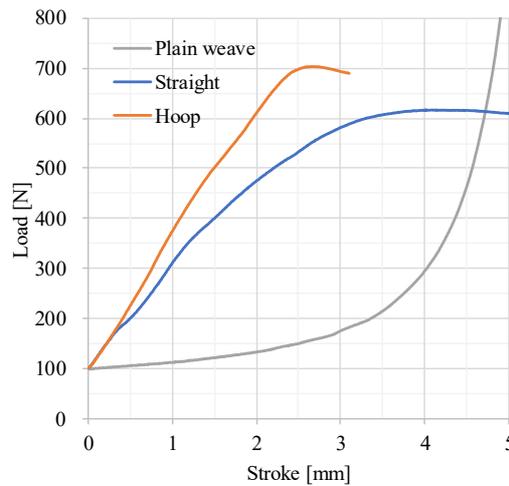


図 9 供試体の圧縮試験結果

- トポロジー最適化の対象としては、プレスで曲げ加工により作製することを想定し、図 10 に示すようなチャンネル型断面を持つ部材の 4 点曲げ試験を採用した。積層構成は図中の Y 軸方向に $[0]_4$ 、厚さは 1.7 mm とした。境界条件として剛体棒により Y 方向に 5 mm の変位を与える。目的関数をコンプライアンス最小化（剛性最大化）とした。なお、トポロジー最適化形状の体積は、元のモデル形状の 20 % とした。最適化の結果得られた形状を背面に付加した部材を図 11 に示す。補強がなされた部分の厚さは全体で 2.5 mm とした。4 点曲げを行った際に主応力が低い要素が最適化によって取り除かれた形状が得られた。
- 最適化の有効性を示すため、同体積を持つ一般的な形状と比較を行なった。(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。それぞれモデルに対する体積率は 20 %、19.8 %、20 % とした。表 1 にそれぞれの剛体棒の反力を変位量で除した剛性係数を示す。トポロジー最適化により得られた形状が最も高い値を示しており、その有用性が確認できた。

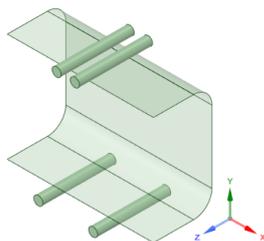


図 10 チャンネル部材の 4 点曲げ試験

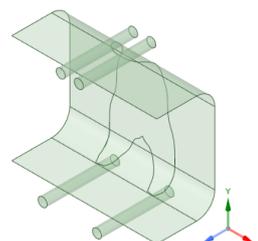


図 11 最適化により得られた補強形状

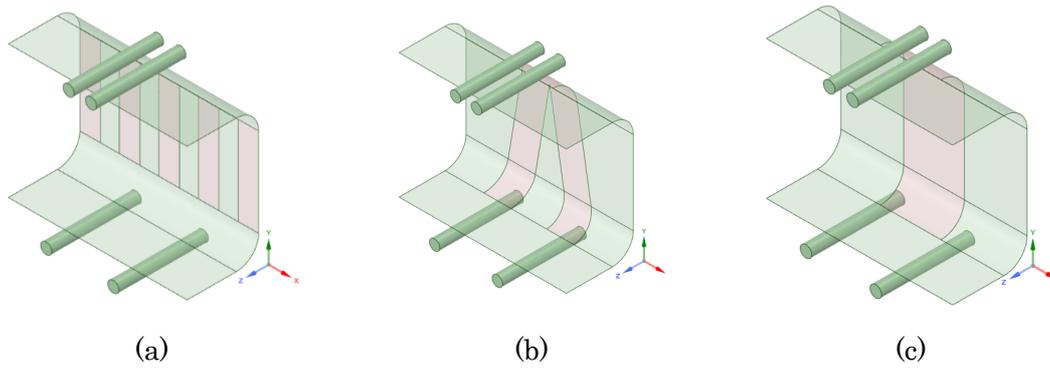


図 12 比較対象とした補強形状

表 1 剛性係数の比較

	Topology	(a)	(b)	(c)
Stiffness coefficient [N/mm]	347.4	273.9	314.2	322.8

5. まとめ

- 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。
- 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。
- 圧縮試験の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，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。
- 4点曲げ試験を想定したモデルに体積を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。効果の確認のため比較用の三種類のモデルと剛性係数を比較したところ，最適化を行った形状が最も大きい剛性係数を示したため，最適化手法の有効性を示したが，最適化結果の実験による検証まで至らなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 村上 大地, 本田 真也, 佐々木 克彦, 武田 量
2. 発表標題 ファイバー縫付機により作成した熱可塑性複合材のプレス成形
3. 学会等名 日本機械学会D&D2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安田 真輝, 本田 真也, 佐々木 克彦, 武田 量
2. 発表標題 主応力方向を参照した曲線状繊維を有する複合材の振動特性
3. 学会等名 日本機械学会D&D2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本健吾, 本田真也
2. 発表標題 ファイバー縫付機を用いた熱可塑性複合材料の作製と曲げ剛性に関する研究
3. 学会等名 日本塑性加工学会 東北・北海道支部 平成30年度若手研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daichi MURAKAMI and Shinya HONDA
2. 発表標題 A Study on Fabrication of Thermoplastic Composite by Tailored Fiber Placement Machine and its Vibration Characteristics
3. 学会等名 The 5th Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics & Control (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮島 渉, 村上 大地, 本田 真也
2. 発表標題 曲線状強化繊維を有する熱可塑性複合材の振動特性
3. 学会等名 日本機械学会, Dynamics and Design Conference 2017 (D&D2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 村上大地, 本田真也, 佐々木克彦
2. 発表標題 ファイバー縫付機で作成した熱可塑性複合材料のサーボプレス成形
3. 学会等名 平成29年度日本塑性加工学会 東北・北海道支部 若手研究発表会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>本田 真也, 炭素繊維強化複合材料の新たな製造手法の紹介 刺繍機による熱可塑性複合材および電着樹脂含浸法, 日本機械学会, 機械力学・計測制御部門ニュース DYNAMICS No.62, July, 27, 2018.</p>
--

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	鶴谷 知洋	地方独立行政法人北海道立総合研究機構	
	(Tsuruya Tomohiro)	(80122)	