

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01355

研究課題名(和文)炭素繊維刺しゅう機によるCFRP自由曲面成形方法の開発と応用

研究課題名(英文) Fabrication of doubly-curved CFRP shell structures by tailored fiber placement embroidery machines

研究代表者

前川 卓 (Maekawa, Takashi)

早稲田大学・理工学術院・上級研究員(研究院教授)

研究者番号：70361863

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、Tailored fiber placementと呼ばれる繊維の刺しゅう技術と自由曲面の平面展開技術とを組み合わせることで複雑形状の自由曲面をCFRPで製作する方法を開発した。成形対象の形状に対して、繊維を配向させたい方向、例えば主応力の最大/最小方向に沿った2組の曲線群を計算する。次にその曲線群で囲まれた多角形パッチ(基本的には四角形パッチ)をすべて平面に展開し、展開された各パッチを二方向に繋ぐことにより二種類の平面展開図を作成し、展開図の境界線に沿って炭素繊維を基布に刺しゅうして二種類のプリフォームを製作し、それらを交互に積み重ねてCFRPを製作する新しい方法を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究においてコンピュータ制御されたマシンを使用して対象曲面内で切断されない炭素繊維が直交するCFRP成形方法を世界に先駆けて開発した。今後、さまざまなものづくりの分野においてこれまでにない利用技術を生み出すことが大いに期待される。特に、CFRPは環境対応素材として自動車、航空機の分野での用途が急速に広がる中、日本のメーカー3社で世界の70%以上のシェアを有しており、国策上も非常に重要な素材である。本研究のCFRPの成形加工方法は、高強度の3次元形状を生成できるため、世界における日本のCFRP技術の存在感をさらに後押しすることが期待される。

研究成果の概要(英文)：We introduced a fabrication method of doubly-curved shell structures by CFRP with control over fiber directions. Doubly-curved surfaces are tessellated into structured quadrilateral patches according to the purpose of use. One can design the tessellation in the parameter space, and map it to the 3D parametric surface, or use the orthogonal net of curves on surfaces such as lines of curvature, principal stretch lines, and principal stress lines. These patches, which we call generalized principal patches, are flattened onto a plane, and connected one by one by aligning the equi-length adjacent edges using translations and rotations forming generalized principal strips. Carbon fiber tows are placed onto these strips with one stroke by tailored fiber placement embroidery machines so that the fibers are not disconnected within strips. Preforms are stacked layer by layer into a mold of particular parts, and VaRTM or L-RTM method is employed to fabricate CFRP parts.

研究分野：形状処理工学

キーワード：炭素繊維強化プラスチック 刺しゅう機 ツールパス 曲率線 応力線 ストレッチ線 VaRTM法 L-RTM法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は鉄と比較して高価ではあるものの、重さが約4分の1、強度が10倍の高機能材料であり、鉄の代替材料として注目を集めている[1]。中でもとりわけ、自動車、航空機の翼と胴体とのブレード曲面、新幹線のノーズ、船舶のプロペラやハル等の形状は意匠性や流体力学特性を満たさなければならない複雑な曲面をしており、これらの形状をCFRPで製作する際、シワが寄らないように各層のCFRPに切込みを入れる必要があるが、強度の低下を認めない上、切込みをどのように決めるかという統一された基準が存在しない。

2. 研究の目的

本研究では、曲率線、主応力線、ストレッチ線等が自由曲面上で直交網を描くことに基づき、基布となる薄いガラスクロスに直交網の最大/最小主方向に沿って切込みを入れて展開し、ガラスクロスに写像した最大/最小主方向線に沿って炭素繊維束を一筆書きになるようにコンピュータ制御されたマシンで縫い付けてプリフォームを作成する方法を開発する。最大と最小主方向線に炭素繊維を配向したプリフォームを二種類作成し、これらのプリフォームを交互に重ね合わせることによって途中で切断されない炭素繊維が直交する新たなCFRP成形方法を開発する。

3. 研究の方法

3.1 全体の流れ

本研究では、Tailored fiber placement (TFP) と呼ばれる繊維の刺しゅう技術と自由曲面の平面展開技術とを組み合わせることで複雑形状の自由曲面をCFRPで製作する新しい方法を開発した。本手法のフローについて図1を用いて説明する。最初に成形対象の設計形状データ(図1(a)上段参照)に対して、繊維を配向させたい方向に沿った2組の曲線群を計算する(図1(a)下段参照)。CFRP成形では、一般的に複数枚のプリフォームを積層して成形するため、例えば、繊維を主応力の最大/最小方向に沿って交互に配向させたい場合は、設計曲面上に直交する主応力線群を配置することができる。次にその曲線群で囲まれた多角形パッチ(基本的には四角形)をすべて平面に展開する(図1(b)参照)。次に展開された各パッチを二方向に繋ぐことにより二種類の平面展開図を作成する(図1(c)参照)。展開形状はそれぞれ異なるものの、三次元空間では同じ形状に復元することができる。それぞれの展開図の境界線に沿って繊維の配置経路(ツールパス)を算出する(図1(d)参照)。このデータをTFP刺しゅう機に入力し、設計された配向方向に繊維をガラスクロス基布に刺しゅうしてプリフォームを製作し(図1(e)参照)、CFRPを成形する(図1(f)参照)。以上の手順により、目的の方向に繊維を連続的に配置したCFRPの設計・成形を実現することが可能となる。

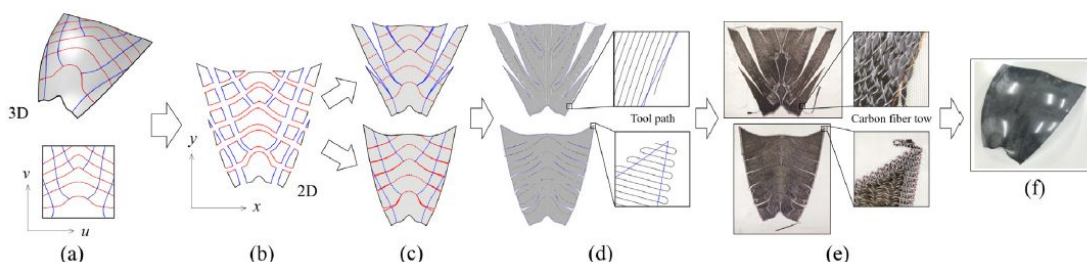


図1^[1] 自動車ボンネットモデルを例とした提案手法のフロー。(a) 設計曲面(上段)と繊維を配向させる方向に沿った曲線群の配置(下段)、(b) (a)の曲線群で構築された領域の展開図、(c) 展開パッチを並び替えることにより構築した2種類の平面展開図、(d) 展開図内部に算出したツールパス、(e) TFP刺しゅう機を用いたプリフォームの製作、(f) CFRPの成形。

3.2 ツールパスの生成

基布への炭素繊維トウの配置は、成形品の強度や品質を考慮すると、トウ(3.3節参照)が目的の方向に沿って配置されていること、トウが粗密のばらつきなく密に配置されていること、トウ同士の重なりがないこと、展開図内部での折り返しがないこと等が望まれる。例えば単純な配向方向と単純な展開形状であれば、～をすべて満たすことは可能であるが、一般的にこれらはトレードオフの関係にあり、すべてを同時に満たすことは困難である。特に目的の配向方向に粗密のばらつきが生じている場合は難しくなる。これは主応力線を例に挙げると、主応力線は一般的に等間隔に配置されない曲線群であるため、厳密に主応力線に沿ってトウを沿わせようとすると、トウ同士の重なりやトウの配置に粗密のばらつきが生じる。今回は、展開形状の外周線を基準にした等距離オフセットをベースとした手法を考案し、トウ同士の重なりが少なくなるようなツールパスを算出した。提案アルゴリズムを用いて、それぞれの展開図の内部に一筆書きのツールパスを算出し、刺しゅう機への入力データを生成した。その際に、刺しゅう機の性能を考慮し、鋭角な折り返しを避ける、入力データのサイズ容量を考慮

に入れた。

3.3 TFP 刺しゅう機

TFP はドイツ・ドレスデンにあるライプニッツポリマー研究所 (Leibniz Institute for Polymer Research) で発明された刺しゅう技術である。TFP 技術が搭載された刺しゅう機を図 2 (a) に示す。TFP では、入力された経路データに基づき、360 度任意の方向に沿って炭素繊維トウを基布上に配置することができる。ここでトウとは、撚りのほとんどない繊維フィラメントの束を指す。TFP は基布に対してトウを直接縫い付けるのではなく、トウをまたぐように、両脇を交互に縫っていくことで基布への配置している (図 2 (b) 参照)。TFP を用いて作製したプリフォームによる成形法は、従来のファブリック材を用いた方法と比較して、繊維を無駄なく活用することができ、また繊維方向を局所的に制御することができるため、これまでにない新しい製品設計が可能となる。

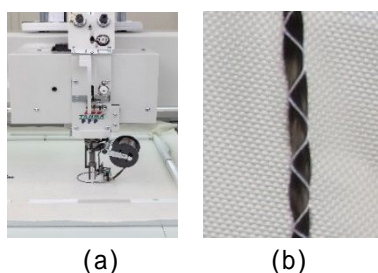


図 2^[1] TFP 刺しゅう機: (a) 「TCWM-101 TFP」^[3]、(b) 基布に配置された炭素繊維トウ。

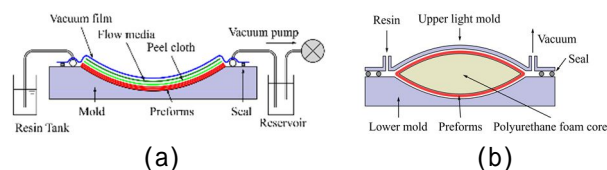


図 3^[1] 成形装置の概略図: (a) VaRTM 法、(b) L-RTM 法。

3.4 CFRP の成形法

本研究では大掛かりな設備を必要としない VaRTM 法 (Vacuum assisted Resin Transfer Molding、真空含浸工法 図 3(a) 参照) と L-RTM 法 (Light Resin Transfer Molding 図 3(b) 参照) を用いて CFRP を製造した。両手法ともに低コストであり、有機溶剤の揮散が少なく環境にもやさしいという利点がある。VaRTM 法は、雌型のみを用いるため安価であるが片面しか鏡面にならない。一方、L-RTM 法は、雌雄の両型を用いるため成形品の両面を鏡面に仕上げることができる。

4. 研究成果

提案手法を縮尺した船用プロペラモデルと自動車ボンネットモデルに適用し、手法の有効性について確認した。船用プロペラでは、曲面 (図 4 (a)) の曲率線を計算し (図 4 (b))、二種類の展開図を生成した。展開図上にツールパスを算出した結果が図 4(c) である。曲率線の最大主方向に沿った展開図 (図 4 (c) 上段) は、プロペラの前縁を横切るような展開図になっている。一方、最小主方向に基づく展開図 (図 4(c) 下段) では、曲率線がプロペラの前縁と一致するため、展開図の切断線は前縁に沿っている。これらのプリフォームを交互に積層し、L-RTM 法を用いて成形を行った。製品重量を軽くするために、プロペラの心材には発泡ウレタン材を使用している (図 3 (b) 参照)。L-RTM 法を用いることでプロペラを分割することなく、一体で形状全体を成形し、両面ともに鏡面に仕上げることが出来た (図 4(e) 参照)。成形後の製品については、自動車ボンネットモデル (図 1 参照) と同様に X 線透過試験を行い、炭素繊維トウが所望の角度に配向されているかを確認した [2]。

まとめ

本研究では、複雑な自由曲面形状を有する対象物を CFRP で製造する際に、炭素繊維が途中で切断されることなく、更に繊維の配向方向を制御することができる方法を創成し、実際に自動車ボンネットモデルを VaRTM 法で、船用プロペラモデルを L-RTM 法で製作した。これらの成果は、形状モデリングの分野で最高峰の 1 つである学術論文誌 Computer-Aided Design (IF=3.156) に掲載された [1]。今後は、強度解析・試験技術を確認し、需要が増加している水素タンクの CFRP による設計・製造等の開発を進めたい。

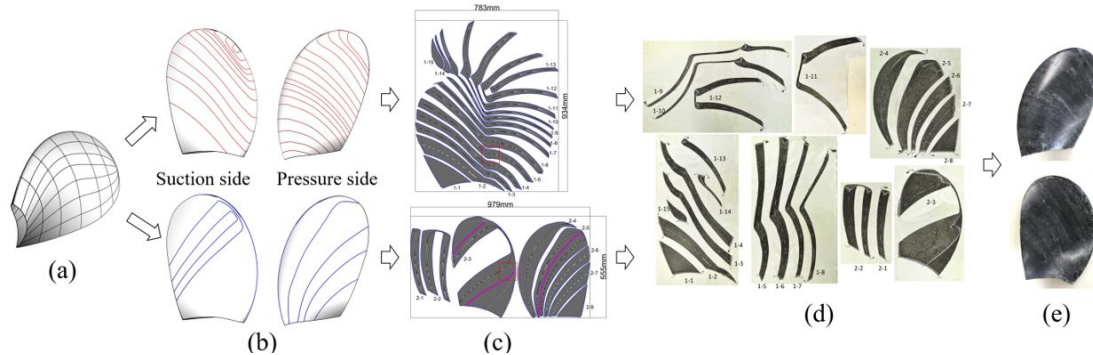


図 4^[1] 船用プロペラモデルへの適用例: (a) 設計曲面、(b) 曲率線: 上段が最大主方向、下段が最小主方向の曲率線、(c) 曲率線に基づき算出した 2 種類の平面展開図内部にツールパスを生成、(d) TFP 刺しゅう機を用いたプリフォームの作製、(e) CFRP の成形。

< 引用文献 >

- [1] M. Takezawa, Y. Otaguro, K. Matsuo, T. Shibutani, A. Sakurai and T. Maekawa, "Fabrication of doubly-curved CFRP shell structures with control over fiber directions", *Computer-Aided Design*, Volume 136, 2021, pages 103028
- [2] YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=AKZsAampw4g>
- [3] Tajima Industries Ltd., <https://www.tajima-tcwm.com/>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takezawa Masahito, Matsuo Kohei, Maekawa Takashi	4. 巻 75
2. 論文標題 Control of lines of curvature for plate forming in shipbuilding	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer Aided Geometric Design	6. 最初と最後の頁 101785 ~ 101785
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cagd.2019.101785	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takezawa Masahito, Otaguro Yuto, Matsuo Kohei, Shibutani Tadahiro, Sakurai Akio, Maekawa Takashi	4. 巻 136
2. 論文標題 Fabrication of doubly-curved CFRP shell structures with control over fiber directions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design	6. 最初と最後の頁 103028 ~ 103028
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cad.2021.103028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 宇佐美陸, 竹澤正仁, 松尾宏平, 櫻井昭男, 前川卓
2. 発表標題 Freeform shape forming of CFRP based on lines of curvature
3. 学会等名 Asian Conference on Design and Digital Engineering 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 曲面展開プログラム、ツールパス計算プログラム、複合材料を用いた曲面の製造方法、及び複合材料を用いた曲面の製造システム	発明者 竹澤正仁、松尾宏平、櫻井昭男、前川卓、滝沢研二、乙黒	権利者 海上・港湾・航空技術研究所、早稲田大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-151174	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
研究分担者	松尾 宏平 (Matsuo Kohei) (00399528)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員 (82627)	
研究分担者	澁谷 忠弘 (Shibutani Tadahiro) (10332644)	横浜国立大学・先端科学高等研究院・教授 (12701)	
研究分担者	竹澤 正仁 (Takezawa Masahito) (50782489)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員 (82627)	

	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	櫻井 昭男 (Sakurai Akio) (20373417)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・専門研究員 (82627)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

{ 国際研究集会 } 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関