

CAD データに基づいて作成される熱可塑性炭素繊維セミプレグによるプリフォーム材を用いた順送プレス成形法の開発

上智大学 理工学部 機能創造理工学科
准教授 田中 秀岳

(2019 年度 重点研究開発助成 課題研究 AF-2019002-A3)

キーワード：CFRTP，連続繊維，3D プリンタ，プレス成形，サーボプレス

1. 研究の目的と背景

自動車産業，航空機産業は環境問題の対策として，車体の軽量化による二酸化炭素排出量の削減のため，車体・機体への炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics, 以下 CFRP と呼ぶ)の適用が拡大してきている。自動車においては一般車乗用車への CFRP の適用が課題となっており，採用されているのは量産数の少ない車体のプロペラシャフトあるいは外板のごく一部分などに留まる。これは，CFRP で自由曲面を成形する難しさや，サイクルタイムの長さ起因する。プレスにおいては，金属と異なり材料の伸びが乏しいため，成形する形状によっては圧縮ひずみによる強度低下が問題となる。以上のような背景から，CFRP の自動車産業への適用には生産効率の底上げとコスト削減が課題となるが，そのためには金型内で迅速に硬化する必要がある。日産が発表した C-RTM (Compression Resin Transfer Molding) 工法¹⁾では，従来は 10 分かかった成形時間が 2 分まで短縮され，ハイサイクルな成形を達成している。しかし，自由曲面を成形する場合，プリフォームの製作では明確な基準が存在せず，作業者の経験による部分が大きい。

シート状材料を用いて，材料の伸縮を最小限に留めながら立体形状を製作可能な手段として，ペーパークラフト等に用いられる展開図がある。自由曲面を展開可能な形状に近似する手法について，ペーパークラフト用途の展開図生成の分野で研究が行われている。特に，帯状のポリゴンメッシュを用いて可展面に近似する手法²⁾は，近似による形状変化が少なく，また，繊維束を配置する上で，繊維の連続性の保持に有利であると考えられる。そのため，展開図を CFRP 用プリフォームに適用することで，自由曲面上への適切かつ迅速な繊維配置が可能となることが期待される。このような予備成形品の製作には，寸法が保証され，CAD モデルから展開図を生成できる容易かつ自動的な手法が求められる。すなわち，自由曲面を含む CAD モデルを適切な多面体に近似し，展開しなければならない。また，展開図上の繊維の連続性を考慮する必要がある³⁾。

生成された展開図を元に CFRP のプリフォームを出力する方法として，付加製造法(AD: Additive Manufacturing)に分類される 3D プリント技術が挙げられる。3D プリンタを用いることで，ノズル経路の制御により任意の繊維配向・形状に加工できるためである。また，繊維の連続性も

保持しやすい。ただし，サイクルタイムと加工精度はトレードオフの関係にあることと，精度を落としても量産に耐えうる生産性を発揮するのは困難であることには注意が必要である。

本研究の最終目標は，3D プリントした炭素繊維と樹脂の積層板を金型に適用し，自由曲面形状にプレス加工する手法の開発である。ポリゴンに近似した CAD データの展開図を元に，3D プリンタで繊維配向を制御したプリフォームを作成し，各種条件におけるプレス加工への最適化を図る。これにより，強度を保ちながら，ひずみ・しわ・たわみのない寸法が保証された自由曲面の加工を実現する。本論文では，基礎実験として行った半円筒面の加工と評価の手法およびそれらの最適化について検証した。

2. プリフォームによる CFRTP 成形

2.1 一般的なプリフォーム

プリフォームは樹脂の予備成形品だが，CFRP においては強化繊維を立体的な形状にした RTM 法等の成形用基材である。主に炭素繊維から成る織物基材を目標形状に合わせて裁断・積層し，金型に入れて熱と圧力を加えたものがプリフォームである。その後，プリフォームは型締めされ，熱硬化性樹脂と硬化剤を高压で注入し，硬化後に脱型する。プリフォームを用いた成形は，自動車の外板のような単純な面形状に採用されやすく，中規模の量産に適している。

2.2 本研究のプリフォーム

本研究では，市販の熱可塑性炭素繊維強化樹脂スタンパブルシートおよび FDM 方式の 3D プリンタを用いて，熱可塑性樹脂のナイロンと炭素繊維からなるプリフォームを作成する。このプリフォームは目標形状を同一平面上に展開した形状として造形されるため，シートから裁断して繋ぎ合わせる従来のプリフォームと区別して，2D プリフォームと呼称するものとする。2D プリフォームは型締めされ，樹脂や硬化剤の注入は行わずに熱と圧力加える。最後に，樹脂の硬化温度まで冷却・脱型する。なお，一般的なプリフォームにおいては，航空材料として高強度が求められる構造材のように，炭素繊維の高い体積含有率を求められることがある。本研究では構造材に適用できない体積含有率 28% のプリフォームで実験を行うが，3D プリンタのスライサーソフト上で炭素繊維の積層を制御することにより，同じ形状のプリフォームであっても体積含有率の

調整が可能となる。

2・3 本研究での自由曲面プリフォーム生成方法

先行研究にて開発されたプリフォーム生成CAMシステムにより、図1に示すように3D-CADで設計された自由曲面形状を中間フォーマットであるIGES形式に変換し、点群やカットラインを生成した。また、このデータをテキスト形式の幾何情報として扱い、三角ポリゴンメッシュに近似する。最後に、カットラインを用いて同一平面上に展開する。本研究の最終目標は、この展開図形状のプリフォームを3Dプリンタで造形し、金型でプレス成形することで、設計した自由曲面形状を近似的に得ることである。本研究では可展面を目標形状として、作成されたプリフォームを成形するための条件の最適化に着目している。

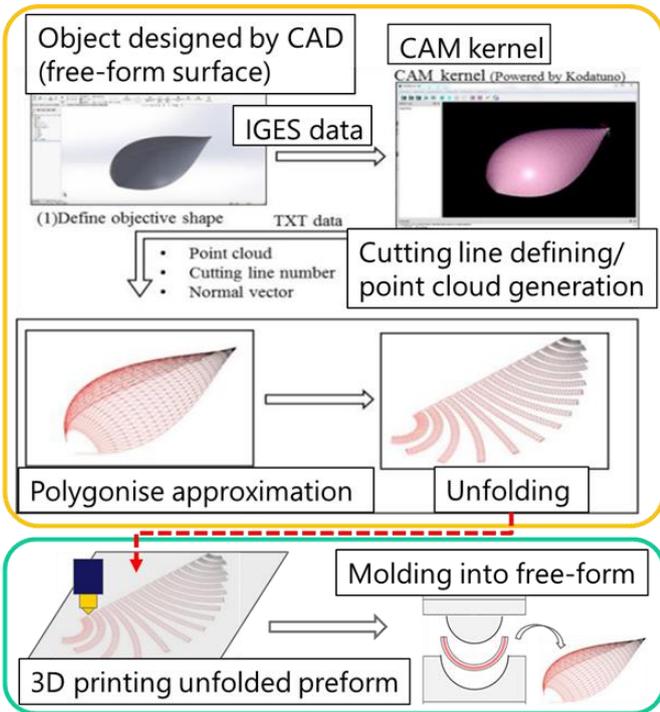


図1 2Dプリフォームを用いたCFRPの成形

3. 実験機器および手法

3・1 実験概要

本研究ではCADデータに基づいて展開されたプリフォームによる成形加工の実証のため、2つの実験を行った。1つはCFRTP（熱可塑性炭素繊維強化樹脂）のスタンパブルシートを用いて、CAMにより計算された展開形状に切り取り、金型を用いて成形実験を行うものである。本実験には足踏み式油圧プレス装置を用いた。2つ目はプリフォームをFDM方式の3Dプリンタで作成し、基礎的な形状である半円筒面を用いて成形特性を評価したものである。本実験にはサーボプレス装置を用いた。いずれの実験もA2017で製作した簡易金型を用いた。また、図2に示すような断熱板、放熱板、ヒートプレートおよび金型からなる成形実験プラットフォームを用いた。

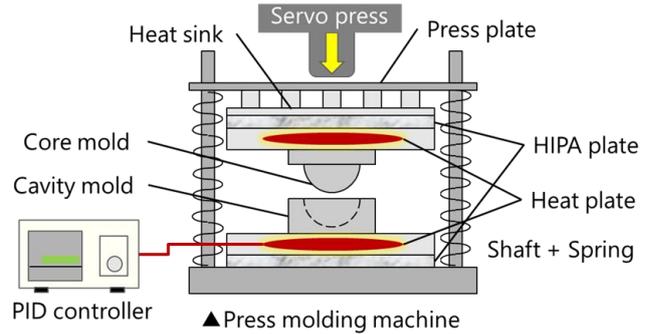


図2 成形実験プラットフォーム

3・2 油圧プレス装置

実験1では足踏み式油圧プレス装置（折原製作所, G-12）を用いた。長期間に渡り連続的なストロークを維持できるように検査用バルブを備えた、足踏みペダル式の油圧プレス機である。最大出力は70MPaである。また、一度の足踏みによる加圧が、油圧シリンダのストロークを7mmずつ動かし、最大ストロークは300mmである。

3・3 サーボプレス装置

油圧プレス機では成形中の荷重の低下などが確認され、加圧力の制御が困難であった。原因として、油圧シリンダ内で油がピストンとシリンダ壁面の間から漏れていた可能性が考えられる。そこで実験2では、より精密な圧力制御のために導入したサーボプレス成形装置（ジャノメ製, JP-2004）を使用した。最大・最小加圧力はそれぞれ22kN・0.2kNであり、11kNまで999.9秒間加圧保持可能である。

3・4 金型

成形形状として可展面である円筒面と非可展面が組み合わせられた基本的な形状とした。図3にスタンパブルシートによるプリフォーム成形実験を行う金型形状を示し、図4に3Dプリンタで作成したプリフォームでの成形実験用の金型を示す。金型は簡易型とし、A2017で製作した。体積の大きい方の金型の熱容量は式(1)により約3000[J/K]である。ここで、 C は熱容量、 m は質量、 c は比熱である。したがって、金型の常温を15℃とすると、例えば265℃まで加熱するには744.1kJ必要である。なお、プリフォームの厚さのばらつきを考慮して、クリアランスは450μmとなっている。また、3Dプリントプリフォーム用の金型は成形品のバリを抑制するため、キャビティ側に溝を加工してOリングを装着した。

$$C = mc = 1.27 \times 2.79 \times 840 = 2976 \quad (1)$$

3・5 ヒートプレート

本研究では加熱のためにA2017製のヒートプレートを製作した。加熱は300Wカートリッジヒータ（坂口電熱(株)製, HI-SD ROD）を5本用い、PIDコントローラ（坂口電熱(株)製, SBX-303-004W-OP-P2）による温度制御のため、ヒートプレートには2対の熱電対も設置した。ヒートプレートと金型を成形温度まで加熱するには、 $1511.5 + 744.1 = 2255.6$ [kJ]必要だが、全体の出力が3000Wの

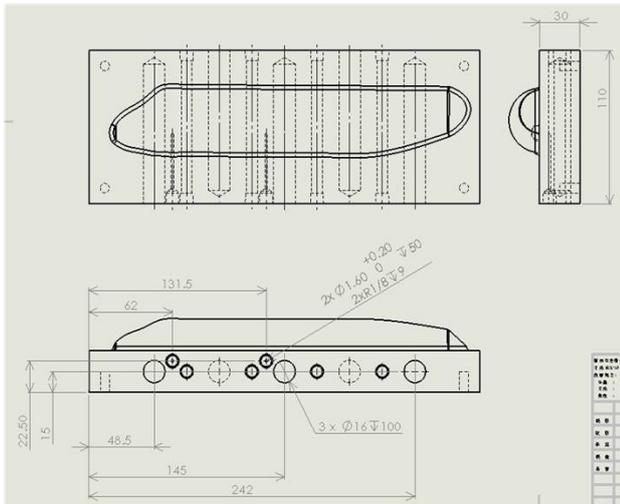


図3 スタンパブルシートプリフォーム用金型

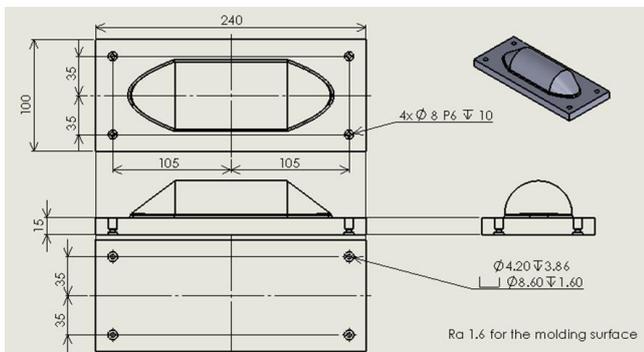


図4 3Dプリントプリフォーム用の金型

ため 752s で到達できる。ただし、温調器による制御と断熱板への熱伝導を考慮すると、実際の到達時間はより長くなる。

4. スタンパブルシートプリフォーム実験

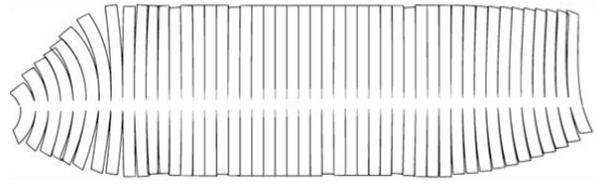
4.1 実験概要

本実験は本研究で提案している2Dプリフォームの有用性を検証するため、熱可塑性炭素繊維強化樹脂のスタンパブルシート (BOND-LAMINATE 製, TEPEX) によるプリフォームを用い、自由曲面を含む成形形状の成形実験を行った。スタンパブルシートの厚さは0.25mm、母材はナイロン66、炭素繊維は3K トウあや織りのものを用いた。プリフォームの形状は先行研究にて開発されたプリフォーム生成CAMシステムを用いて生成し、スタンパブルシートをカッティングプロッタ (ブラザー工業(株)製, CM650W) を用いて作成した。図5にプリフォーム形状およびカットされたプリフォームを示す。足踏み式油圧プレス装置を用い、プレス加重はひずみゲージを用いたロードセルにより計測して設定した。表1に成形条件を示す。

4.2 実験結果

図6に成形温度ごとの成形実験結果を示す。繊維束の配向を観察すると、260~270℃の温度範囲での成形品は繊維

Unfolded diagram



Fabricated preform



図5 スタンパブルシートプリフォーム

表1 スタンパブルシートプリフォーム成形実験条件

加圧力	10KN
加熱温度	240, 250, 260, 270, 280℃
加圧保持時間	10分
プリフォーム	90度
繊維方向	

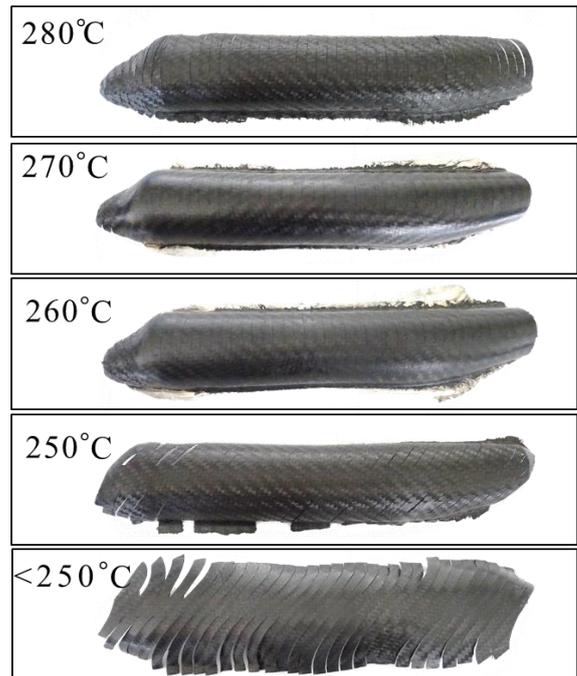


図6 スタンパブルシートプリフォーム成形実験結果

配向が目標形状に成形された理想的な形状となっていることがわかる。本研究で提案している2Dプリフォームの有用性が視覚的に確認できる。260℃以下の場合には樹脂が熔融せず、プレスのみで変形が見られた。280℃の場合、高熱により樹脂が消失したことが観察できる。270℃の場合、金型全体でカットラインの隙間がつながっており、炭素繊維の周囲に樹脂が存在し、滑らかに成形できている。

従って 270℃がこの実験に最適な範囲内と考えられる。しかし、位置決め誤差があり、成形されたプリフォームが x 軸方向にねじれ、ヘッド部分の分割線ができてくる。260℃の場合も 270℃と同様の結果を示した。250℃以下の場合、プリフォームは加熱時に樹脂熔融せず、目的の形状に成形不可能であった。

5. 3D プリントプリフォーム実験

5・1 実験概要

本実験は 3D プリンタによって作成された 2D プリフォームの有用性を検証することを目的としている。プリフォーム作成に使用した 3D プリンタ (Markforged 社製, MarkII) は FDM 方式で連続繊維を含む強化層を出力することが可能である⁴⁾。母材となるフィラメント材質はナイロン 6 である。用いた 3D プリンタの仕様上、2D プリフォーム生成用 CAM システムを用いる事ができず、専用のクラウドスライシングソフト⁴⁾を用いる必要があり、任意の形状に対して任意の方向に炭素繊維を配置することができないため、本実験形状は最も基本的な形状である可展面の円筒面とした。図 7 に目標形状と展開形状を示す。また、金型へのセットを容易にするために 3D プリントするプリフォームの形状は図 8 に示すような支持ピンに固定できる形状とした。この 3D モデルを 3D-CAD で定義し、STL 形式に変換し、スライサーソフトによりモデルの各層に材料を指定する。積層ピッチは 125 μ m であり 3 層構成で厚さは 125 \times 3=375 μ m となる。繊維配向は一方向で出力したものを用いた。成形条件を表 2 に示す。

5・2 単層実験結果

成形品は図 9 のようになっており、いずれも赤枠内または表面全体にヒケが確認された。図 10 に成形品表面をレーザー顕微鏡 (OLYMPUS(株)製 LEXT OLS4100) で観察した画像をしめす。赤と緑の矢印で示した 2 種類の直線状の痕が確認できる。赤で示した痕は、金型の表面をエンドミルで切削した際のカスプが、成形品表層部の樹脂に転写されたものである。そのため、半円筒面の高さ方向と垂直に、エンドミルの送り量と等しい幅 0.2mm 程度の痕となる。一方で、緑で示した痕は、3D プリンタが樹脂を積層する際に残ったノズルの経路である。そのため、ノズルが往復した方向に、ナイロンの押し出し幅と等しい幅 0.9mm 程度の痕が確認される。両者の痕の内、目標形状に対して精密な成形性を得ているのは赤い矢印の方であるため、金型のカスプが転写される成形条件が最適である。これまでの実験から、250~270℃程度の加熱温度が最適であることが分かった。理論上は金型の加熱温度が高いほど樹脂の粘度が低下し、加圧力が高いほど流動性が向上するが、後述のとおり必要以上に高温高圧な条件下では表面性状が改善しない。

次に、プリフォームおよび成形品の断面を観察して得られた知見について述べる。この断面は、プリフォームと成形品をそれぞれ炭素繊維と垂直な平面で切断し、研磨して

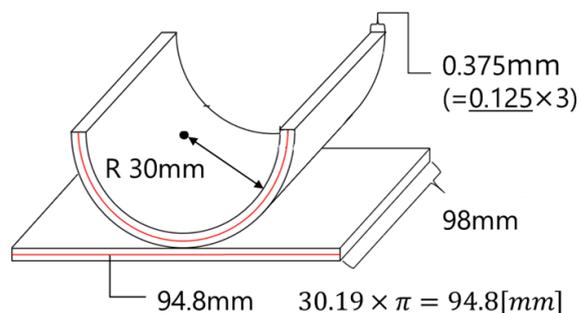


図 7 3D プリントプリフォーム成形実験目標形状

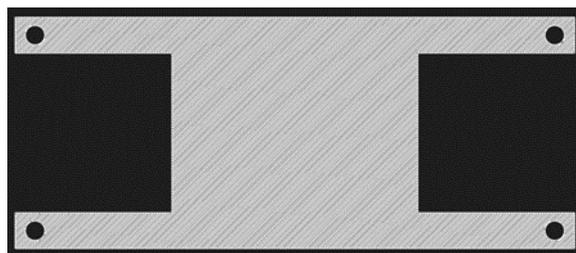


図 8 3D プリントプリフォーム

表 2 3D プリントプリフォーム成形実験条件

加圧力	1KN - 15KN
加熱温度	210, 240℃
加圧保持時間	16分
プリフォーム繊維方向	0, 45度



図 9 成形後の外観

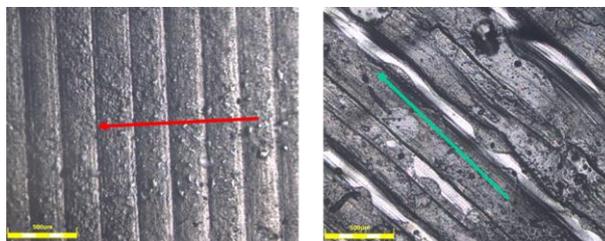


図 10 レーザー顕微鏡画像

得たものである。図 11 にそれぞれプリフォームと成形品の断面の顕微鏡画像を示す。まず左図において、赤線の輪郭はプリフォーム三層目のナイロン 6 の表面であり、反対側の平らな面が 3D プリンタのプリントベッドに接地していた。また、黒く見える二層目が炭素繊維であり、三層目の樹脂は炭素繊維の幅と等しい周期で波形に積層されて

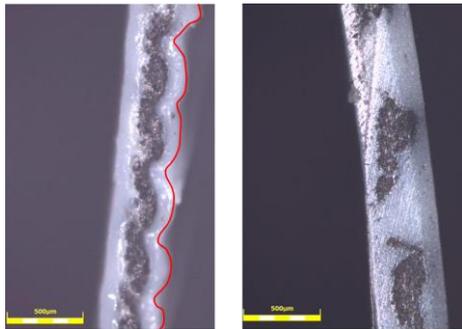


図 11 成形品の断面観察結果

いる様子が確認できる。なお、成形中に半円筒面の外側(すなわち、金型のコア側に接している方)となるのは一層目であり、内側(金型のキャビティ側に接している方)となるのは三層目である。そのため、成形品表面においては、断面の輪郭が波面となっている内側にヒケと呼ばれる微小なくぼみが生じやすい。これは、波面が平滑な面に成形される際に、樹脂の粘度が十分に下がらず、波面の谷間に気泡が残ったと推定される。一方で、右図において、成形品の表面はどちらも平滑になっており、プリフォーム三層目の波形の輪郭が消失している。また、二層目には炭素繊維の束が間隔を空けて並んでおり、樹脂が繊維束間に含浸している様子が確認できる。

ヒケやボイドの支配的な因子は3Dプリンタによる積層時の層間への空気の侵入であると推定され、金型のCADデータを用いた熱解析上では金型の熱膨張によるクリアランスのばらつきにも影響が見られる。積層という3Dプリンタの加工特性上、層間への空気の侵入は避けられないと考えられる。そのため、層間への空気の侵入を防止するのではなく、これを許容するような成形条件の最適化が必要である。これまでの実験結果より、表面性状における最適な成形条件は加熱温度が250~270℃程度であると推定され、加圧力は相関性が認められない。

5・3 最適成形条件の検討

成形条件の最適化に際し、支配的な因子を検証するために実験計画法に基づきL9直交表⁹⁾に沿って成形実験を行った。表3に制御因子と水準を示す。制御因子として金型の加熱温度・プリフォームへの加圧力・炭素繊維の配置角度・樹脂の配置角度の四つを三水準で考慮した。評価方法は、半円筒面である成形品の半径測定値のばらつきを田口メソッドにおけるSN比で評価した。加圧保持時間はどの条件でもサーボプレス機の最大加圧時間である16分である。加熱温度の水準幅はこれまでの実験結果を基に定めた。270℃より高い成形品では樹脂の焦げや気化が生じたため、210℃から270℃の間に設定した。また、加圧力はサーボプレス機の仕様上、2MPaの圧力下では最大の加圧保持時間が15秒となる。樹脂が流動する十分な時間を確保するため、0.1から1MPaの間に設定した。繊維の配置角度は半円周上に沿う方向を90度とし、直線部分と平行な姿勢を0度とした。

表 3 制御因子と水準

因子\水準	1	2	3
成形温度 ℃	210	240	270
加圧圧力 MPa	0.1	0.5	1
繊維方向 度	0	45	90
母材方向 度	15	30	45

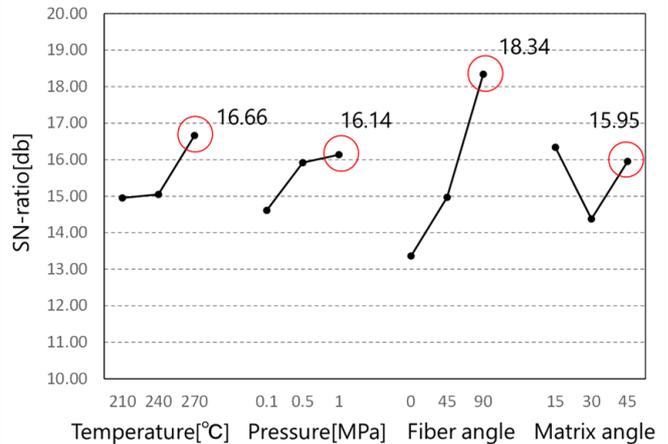


図 12 要因効果図

図12は直交表実験の結果を示す要因効果図である。加熱温度は一貫した正の効果を示している。これは、熱可塑性樹脂であるナイロン6は加熱に伴い粘度が低下するため、樹脂の流動性が高まることで成形性が向上したと推定される。また、加圧力も一貫した正の効果を示している。これも同様に、クリアランス内の樹脂の流動が促進され、成形性が向上したと推定される。次に、炭素繊維の配置角度も一貫した正の効果を示しており、水準に対するSN比の変化量が最大であることから、四つの制御因子の中で最も支配的な因子である。繊維の配置角度が大きいほど曲面の円周に沿った方向になるため、繊維の曲げ剛性が作用して半円筒面の曲率が減少すると予想した。しかし、実験結果では繊維角度が大きいほどSN比が高いため、より均一で設計値通りの曲率となった。この原因として挙げられるのが、成形品の内外層における肉厚の変化である。平面のプリフォームを半円筒面に曲げ変形させる場合、外面層に引張が、内面層は圧縮の応力がかかる。プリフォームの上下層は何れも同じ厚さの樹脂であるため、変形時には圧縮側の内面の方が、相対的に引張側の外側よりも樹脂が厚くなると予想できる。したがって、加熱により応力がある程度解放され冷却により樹脂が収縮すると、樹脂の断面積が大きい内側の方が引張り力が大きくなる。これにより繊維を支柱にして内側に曲がるため、設計値通りの曲率が保たれる可能性がある。一方で、樹脂の配置角度はSN比との相関が見られず、成形性に影響しない、あるいはその他の因子との間に交互作用があると考えられる。本実験は誤差因子を考慮しない静特性のSN比によって評価するが、樹脂の配置角度と温度・圧力・繊維角度の間に作用する交互作用は、工程の原理上無視できるものとする。したがって、

樹脂は成形性に影響しない制御因子であり、考慮されていない他の因子が効果のばらつきの要因になると推定される。

5・4 2層実験結果

3Dプリンタを用いて2層の炭素繊維層を含むプリフォームを作成し、複層プレス成形について基礎的な実験を行った。図13に作成したプリフォームの構成を示す。ナイロン6をはさみ45度方向と-45度方向の2層の炭素繊維層を含むプリフォームを作成した。表4に成形条件を示す。

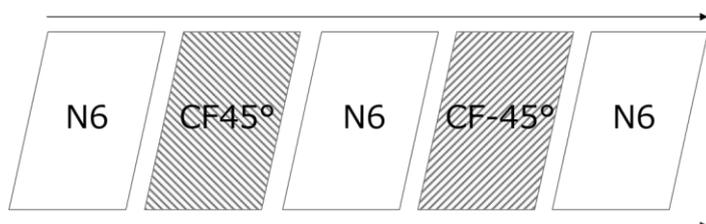


図13 2層プリフォームの構成

表4 2層プリフォーム成形実験条件

加圧圧力	0.1, 0.5, 1.0 Mpa
加熱温度	200, 210, 220, 240, 250, 270 °C
加圧保持時間	16分
プリフォーム繊維方向	0, 45度
離型温度	60度

2層実験を行った結果、図14に示すように全ての成形後の試験片においてゆがみが発生した。ゆがみの角度を測定すると最大で30度であった。また加工条件によっては10度程度のゆがみの成形結果も得られた。最適な加工条件としては、成形温度210度から230度、加圧力0.5MPaから1MPa、離型温度60度以下であった。図15に成形温度210度、加圧力1MPa、離型温度60度で成形した成形品を示す。表面性状は良好であり、樹脂の流動も最小限であるが、ゆがみは30度と大きく発生している。



図14 2層プリフォーム成形結果

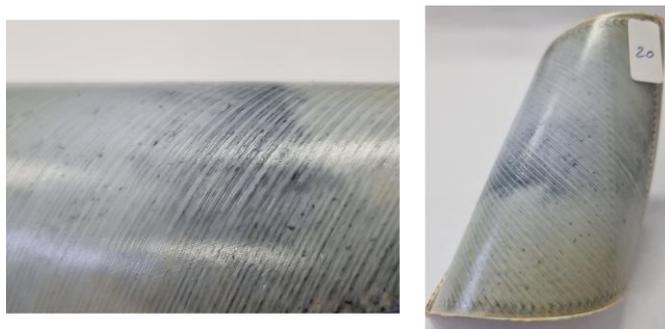


図15 最適成形条件における良好な表面性状

6. 結論

本研究では連続繊維の炭素繊維強化樹脂の自由曲面形状をプレス加工する手法開発のため、ポリゴンに近似したCADデータの展開図を元に、スタンププルシートプリフォームでの自由曲面を含む形状の成形実験、3Dプリンタで繊維配向を制御したプリフォームを作成し、基礎的な形状での各種条件におけるプレス加工への最適化実験および、複層でのプレス成形実験による検証を行い以下の知見を得た。

1. 3次元CADデータに基づき2Dプリフォーム生成用CAMにより生成したスタンププルシートプリフォーム実験により、自由曲面を含む形状での成形実験を行い、2Dプリフォームの有用性を確認できた。
2. 2Dプリフォームを3Dプリンタで作成し、基礎的な形状での成形実験を行い、その成形特性と成形品について検証した。
3. 実験計画法に基づき3Dプリンタで作成したプリフォームでの成形における成形条件の最適化を試みた。
4. 3Dプリンタで作成した複層炭素繊維強化樹脂プリフォームでのプレス成形実験を行い、成形性の課題を明らかにした。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団からの重点研究開発助成(2019年度重点研究開発助成課題研究AF-2019002-A3)により実施した。同財団および関係諸氏に厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 山口りえこ, 水谷篤, 高津亮一, 柳橋清人: 日産技報, (2021), 87, 113-118
- 2) Jun Mitani, Hiromasa Suzuki: ACM SIGGRAPH 2004 Papers, New York, NY, USA, (2004), 259-263
- 3) 猪狩 龍樹: 上智大学大学院学位論文, (2018)
- 4) <https://markforged.com/3d-printers/mark-two>
- 5) 立林和夫: 入門田口メソッド, 日科技連, (2004)