

熱可塑性炭素繊維複合材料の成形における

賦形形状設計技術の研究

京都大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻
准教授 西川 雅章
(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-20017030)

キーワード: CFRTP, 賦形, シミュレーション

1. 研究の目的と背景

自動車産業を中心に、軽量かつ高強度である熱可塑性炭素繊維複合材料を用いた構造部材の成形技術開発が盛んとなっている。自動車構造の高い生産レートへの対応や量産車適用のための低コスト化といった観点から、成形時間の短縮や低コスト化が可能である熱可塑性炭素繊維複合材料 (Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics, CFRTP) を用いたプレス成形が一つの有望な技術として期待されている。一方、炭素繊維複合材料は繊維の方向に強く、繊維で強化されていない方向には弱いという力学特性の異方性を有する。したがって、プレス成形で製作する構造の強度や信頼性を設計段階で検討する際、上記の成形において、構造形状への基材の賦形プロセスで繊維配向がいかに変化するかを評価し、成形された構造内部での繊維強化の形態を適切に把握できることが重要とされている。

炭素繊維複合材料の賦形プロセスに関して、著者らのグループでは、これまでに、液相成形を対象として、ドライ織物基材を用いた基礎試験 (面内せん断特性を評価する bias-extension 試験や繊維束引抜き試験など) を実施し、賦形を模擬した半球状圧子による押込み試験結果と比較した結果、繊維束滑りに関わる面内せん断特性 (繊維束同士の回転摩擦抵抗) と繊維束引抜き特性 (繊維束平行方向の摩擦抵抗) が経糸・緯糸間の滑りや目ずれ発生に重要であることを見出した¹⁾。このような賦形時の基材変形メカニズムに関する検討を進展させ、本研究では、熱可塑性炭素繊維プリプレグ基材を用いた賦形プロセスにおける繊維配向設計の課題に応用した。

計算機を利用した CAD (Computer Aided Design) により、応力解析や強度解析と組み合わせた部材設計が実施されるようになってきた一方、成形プロセスにおける基材の賦形解析技術と組み合わせ、賦形性に優れ、成形欠陥の生じにくい部材形状を設計する試みはあまり多くない。このような検討は、近年の賦形解析技術の進歩と、自動車構造用複合材料成形へのプレス成形技術の適用から重要性が増している研究課題である。

本研究では、CFRTP 基材として、AP-PLY²⁾ (Advanced Placed Ply) 積層プリフォームを対象として、それを用いた賦形プロセスに関して実験と計算を併用して基礎的モデル化技術を確立するとともに、賦形対象とする構造形状の設計と基材の賦形性とを関連づける知見を得ることを目

的とした。ここでは特に大きく分けて3つの観点を踏まえて研究を遂行した。

(1) 熱可塑性プリプレグ基材を用いた賦形シミュレーションの検討

ドライ織物やコミングル繊維を用いた熱可塑性複合材料基材を対象として、Cao³⁾を中心として、賦形シミュレーションにおける材料構成則のモデル化技術に関するベンチマーク研究が実施されてきた。特に、賦形時の変形に伴う繊維配向変化を考慮した非直交モデルによる構成則の定式化⁴⁾は多数の研究者によりモデル化されており、現在では汎用有限要素法ソフトにも導入され、標準的な方法論が確立しつつある。

一方、プレス成形などを対象としたプリプレグ基材の賦形性には基材間摩擦が重要である。このような特性を実験的に計測したうえで、賦形シミュレーションを検討している研究例はまだ少ない。

(2) 炭素繊維複合材料構造の賦形形状と賦形性の関係についての評価

賦形形状に対する繊維配向の予測として、古くは、Potter⁵⁾や Suemasu⁶⁾による幾何学的な理論解析があるが、実際には基材間摩擦等の材料特性が賦形時に重要となるため、理論解析は繊維配向変化の範囲や傾向を大まかに予測するための方法である。また、賦形形状の影響を考慮するために、NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 曲面を利用した検討例⁸⁾もあるが、幾何形状に対して基材の変形特性や変形のメカニズムを考慮しながら検討しようとする試みは少ない。

(3) 基材設計の自由度を活用して賦形性を制御する方法の検討

AP-PLY 積層プリフォームは、基材設計に自由度を与える方法として、Nagelsmit⁹⁾により提案され、自動積層技術 (Automated Fiber Placement, AFP) を用いた基材の織物状積層技術として、面内特性を維持しつつ耐衝撃性を向上する手法として紹介されている。この積層基材は、賦形性の観点からも基材設計に自由度を与える手法として着目されている。

本研究では、この AP-PLY 積層基材の設計自由度を賦形性に応用する方法についても、賦形シミュレーションを利用して基礎的検討を行った。

2. 賦形性の基礎物性試験とそのモデル化

2.1 実験方法

熱可塑性炭素繊維複合材料の成形を対象とした賦形性評価のため、CFRTP プリプレグ基材の基礎物性を実験・解析により評価した。ここでは、AP-PLY 積層プリフォームと呼ばれる織物状のプリプレグテープ積層基材を対象として、高温賦形環境下でのテープ間摩擦特性や積層基材のせん断特性について評価した。

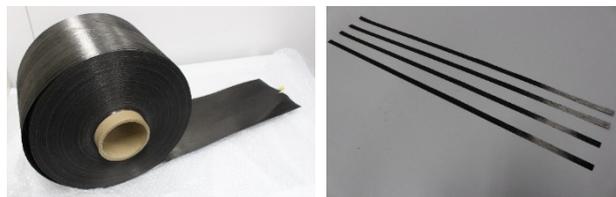
図 1 に、実験に用いた材料を示す。用いた材料は薄層 CF/PA6 プリプレグ (CF: TR50S, PA6: DIAMIRON C (三菱ケミカル)) であり (図 1(a)), 福井県工業技術センターが保有する特許技術である開織技術を用いて製作された薄層化プリプレグである。材料の諸元は表 1 に示したとおりである。このプリプレグをスリット加工することにより幅 10 mm のテープ基材を AP-PLY 積層プリフォーム用の材料として用いた (図 1(b))。図 1(c)にプリプレグの断面画像を示す。PA6 フィルムを両側から開織炭素繊維基材で挟み込むように製作されており、プリプレグの表面付近に炭素繊維が均一に分散している。

上記の基材を用いて、AP-PLY 積層プリフォームを作製し、賦形性に関する基礎物性試験を実施した。図 2 に、基礎物性試験に用いた AP-PLY 積層の模式図、および引抜き試験片の例を示す。縦横 8 本ずつ配置したテープが交差している正方形領域 80 mm × 80 mm が試験領域である。

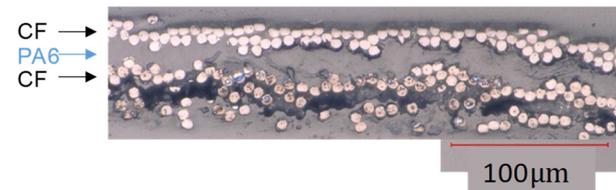
図 3 に、(i)テープ間摩擦特性を評価する引抜き試験、および、(ii)せん断特性を評価する Picture-frame 試験の様子を示す。試験機には恒温槽付き材料試験機 (マイズ試験機) を用い、荷重-変位関係を取得した (引抜き速度 0.5 mm/s)。

表 1 使用したテープ基材の諸元

	V_f [%]	Nominal thickness [μm]	Width [mm]
Prepreg	53.4	43	10

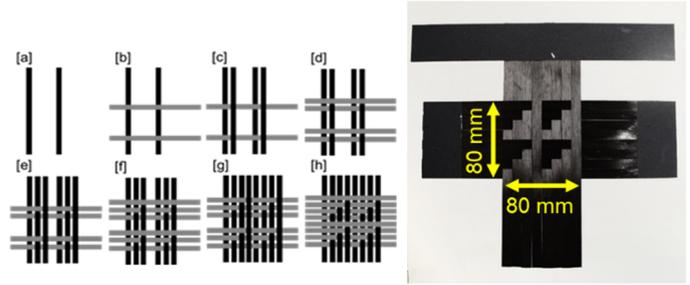


(a) 薄層化プリプレグ (b) スリットテープ基材



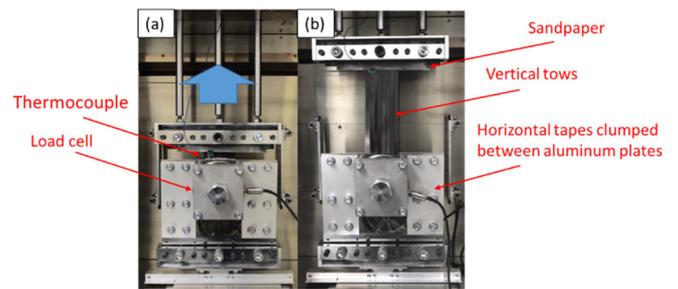
(c) プリプレグの断面画像

図 1 熱可塑性薄層化プリプレグ (CF/PA6) (福井県工業技術センターで製作)

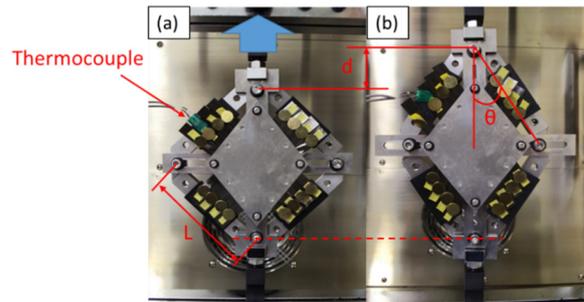


(a) 積層の模式図 (b) 引抜き試験片

図 2 AP-PLY 積層



(i) 引抜き試験の様子: (a)試験前, (b)試験後



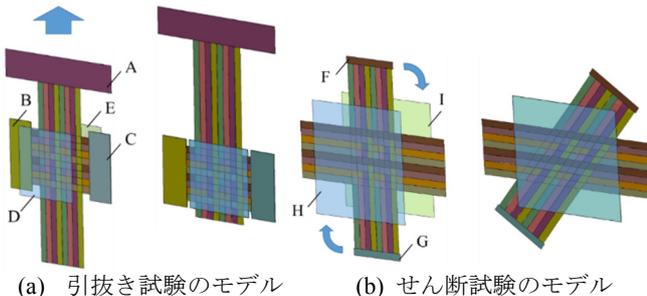
(ii) せん断試験の様子: (a)試験前, (b)試験後

図 3 高温環境での賦形基礎物性試験 (福井県工業技術センターで実施)

引抜き試験においては、試験領域に面外方向の圧力を PTFE シートを通じて均等に負荷し、面外荷重をロードセルで測定することで、摩擦係数を評価した。PA6 のガラス転移温度 (約 320 K) より高温で、融点 (約 500 K) 以下の温度で賦形することを想定し、350~400 K の範囲で経時変化がなく一定に安定した温度となった状態で試験を実施した。せん断試験においては、試験片が面外方向に浮き上がるのを拘束する程度の変位拘束を与えた (具体的には、0.32 mm の隙間をスペーサにより設けた)。

2.2 解析方法

2.1 節の基礎物性試験をモデル化するため、テープ基材を再現したメソスケールモデルを作成し、AP-PLY 積層プリフォームの構造を再現した。解析には動的有限要素解析ソフト LS-DYNA (R10.1.0, LS-Prepost 4.6) を用いた。図 4 に解析モデルを示す。テープ基材は厚さ 0.04 mm の完全積分シェル要素を用いてモデル化した。材料特性は、直交異



(a) 引抜き試験のモデル (b) せん断試験のモデル
 図4 メゾスケールモデルによる基礎物性試験のモデル化

方性弾性体とし、テープ基材の一軸引張試験によって取得した材料定数を与えた (E_1, E_2, ν_{12} を実測値で与えた)。

引抜き試験モデル (図4(a)) では、剛体プレート A により経方向基材に引抜き変位を与え、剛体プレート B, C に緯方向基材を拘束するとともに、剛体プレート D, E により面外方向の圧力を加えた。テープ間の摩擦係数は引抜き試験で得られた値を用いた。またシェルエッジの接触も考慮し、隣接するテープ間には 0.04 mm の間隔を与えた。テープモデルの要素数は 118,440 であった。変位速度は計算時間短縮のため、実験値の約 2000 倍の値を用いているため、計算上の高次の振動が現れるが、時間平均でみると実験と解析の比較が可能である。また、慣性項の影響が小さいと想定し、マススケーリングによりクーラン条件を緩和し、動的陽解法による解析の時間幅を大きくすることで、計算時間の短縮を図った。一例では、CPU コア数 4 で約 53 時間の解析であった。

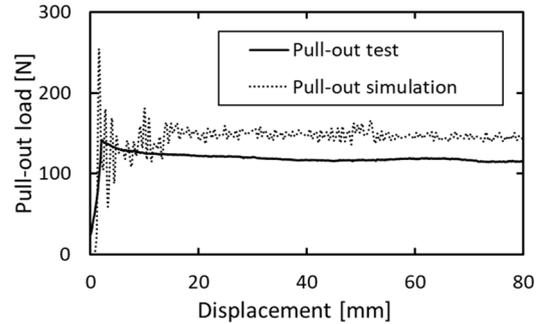
せん断試験モデル (図4(b)) においてもほぼ同様のモデルを用い、境界条件として、剛体プレート F, G に回転方向の変位によるせん断変形を付与するとともに、剛体プレート H, I による隙間をテープ基材 2 枚分の厚さとした。

2.3 結果と考察

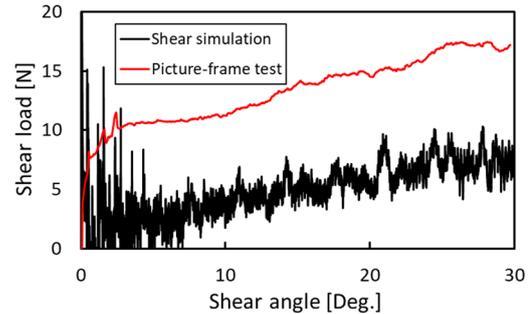
図5に基礎物性試験 (引抜き試験とせん断試験) それぞれの実験結果と解析結果を比較して示す。

引抜き試験のモデルは概ね実験結果の引抜き荷重を再現していた (図5(a))。したがって、引抜き試験で得た摩擦係数を用いてモデル化することで、AP-PLY プリフォームの挙動をよく表現できることが分かった。ただし、実際には実験を複数回行うと、引抜き荷重はばらついており、摩擦係数の評価には課題も残っている。図1(c)の断面画像にもあるように、プリプレグの表面状態は比較的均一ではあるものの、完全に一様ではなく、また AP-PLY プリフォームにおいても、場所によって試験中の面外圧力に偏りが生じることなどから、摩擦力が一様でなく、試験条件の影響を受けやすいことが要因として考えられる。

せん断試験については、治具の特性によって、試験片の変形開始時に形状が整うまでに荷重が上昇する現象がみられている (先行研究においても確認されている) が、その後のせん断荷重の上昇は材料特性が純粋に現れている領域であり、おおよそ実験と解析で同様の傾向を示した。



(a) 引抜き試験とその解析結果の比較



(b) せん断試験とその解析結果の比較

図5 基礎物性試験と解析モデルの比較

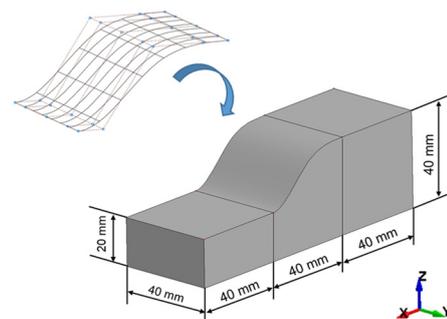
以上のことから、基礎物性試験に対するメゾスケールモデルについて一定の妥当性を確認できた。

3. 賦形形状の設計と賦形試験・シミュレーション

3.1 賦形形状の設計

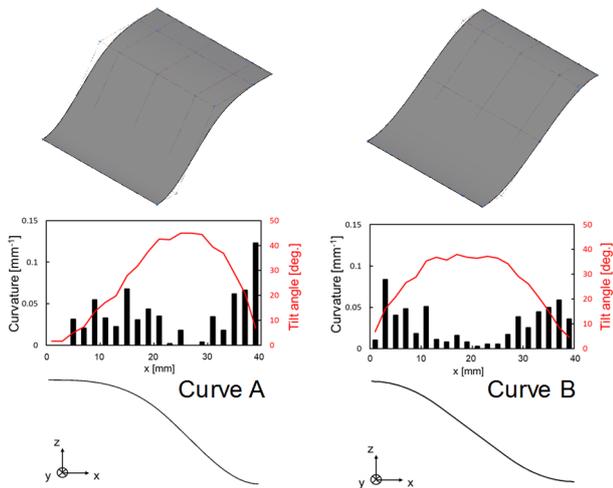
2章で得た AP-PLY 積層プリフォームの基礎物性とそれを用いたメゾスケールモデルを活用して、賦形時の欠陥発生を抑制する最適な賦形形状の設計方法について検討した。ここでは特に、賦形時の繊維配向変化による目ずれの発生を抑制し、均一に賦形するという観点で、賦形性に優れた形状を見出すことを目的とした。

図6に示すように、賦形型の形状の特徴を変化させた2パターンの型に賦形する状況を想定して比較した。段差のある部材の高さが滑らかに変化するように曲面で接続した形状を用い、この曲面部分の形状による影響を調べた。(なお、図6(a)において、y方向には高さは一定である)。



(a) 賦形形状の設計の模式図

図6 賦形形状の設計



(b) 曲率と傾斜角度の異なる形状の設計
図 6 (続き) 賦形状の設計

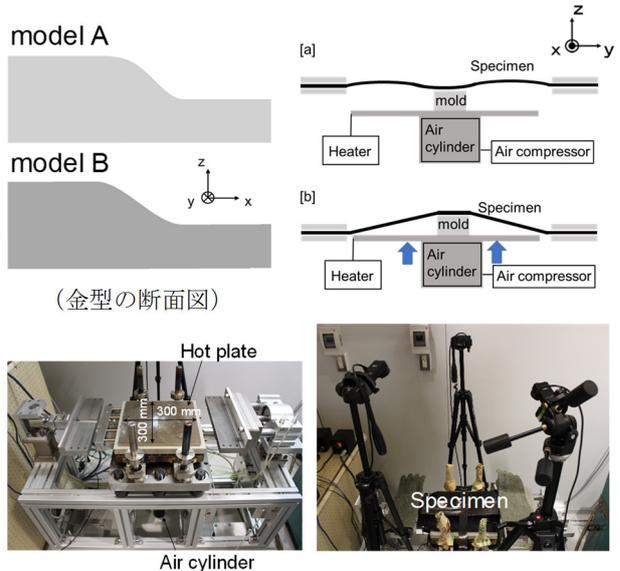
図 6 の賦形状を表現するため、NURBS 曲面と呼ばれる幾何学形状のモデル化技術を用いた。NURBS 曲面は滑らかな 3 次元幾何学形状を実現する CAD 技術であり、構造部材の意匠面設計に用いられている。特に、NURBS 曲面を用いることで、CAD モデリング時の曲率不連続の発生を解消することができる。曲率が変化する接続箇所で見ずれが発生しやすいことが示されており⁹⁾、このことは賦形状性にとっても重要な観点である。また、NURBS 曲面の制御点の位置や重みを修正することで、比較的単純な方法で賦形状性改善のための形状設計が可能である。設計ソフトに AutoCAD 2020 を用いた。

図 6(b) に 2 種類の賦形状に用いた曲面形状を示す。2 種類の形状は、型中央の一行の制御点の高さのみを変えることで作成している。また図には、それぞれの曲面の曲率と傾斜角度を示した。曲率については曲面 A の下部や曲面 B の上部で大きく、傾斜角度は曲面 B では全体的に傾斜角度が大きい形状である。

3・2 賦形状試験

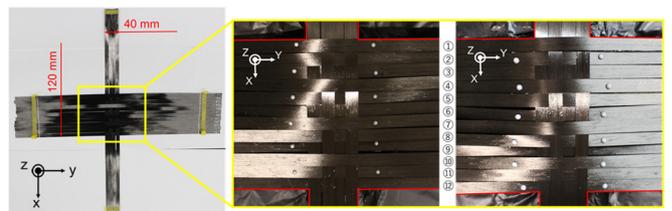
3.1 節で CAD により作成した形状を用いた賦形状を製作し、AP-PLY 積層プリフォームを用いた賦形状試験を実施した。図 7 に賦形状試験の概要を示す。賦形状試験には空圧式ホットプレス (HE-204SP, MSA ファクトリー) を用いた。図 7(i) に示すように、AP-PLY 積層プリフォームをホットプレスの左右に把持した状態で、プレス中央に置いた賦形状を加熱しながら空気圧で押し上げることで、賦形状の x 方向に曲面に沿わせるようにした (上昇量: 40 mm, 上昇に要する時間: 3 秒程度)。

また、賦形状試験中の個々のテープ基材の変位を三次元計測により測定した。ここでは撮影した画像の幾何情報に基づいて三次元変位を取得する多眼ステレオ法を利用した。画像計測機材には三台のカメラを利用したモーションキャプチャシステム (OptiTrack, アクイティ) を用いた。



(i) 賦形状試験の概要

(左上: 金型形状, 右上: 賦形状試験の模式図
左下: プレス機の外観, 右下: 三次元計測の様子)



(ii) 賦形状試験に用いた試験片

(左: 全体写真, 中央・右: 試験前の画像)

図 7 賦形状試験

変位計測点として、図 7(ii) に示すように、AP-PLY 積層した試験片の表面に反射マーカを貼付した。賦形状試験中、このマーカを追跡することで変位計測が可能である。変位計測の精度を左右するカメラのキャリブレーションは専用治具 (キャリブレーションワンドとスクエア) と専用ソフト (Motive 2.1.2) により実施した。予備実験により、変位計測の誤差はどの方向にも 1~2 mm 程度であることを確認した。

また賦形状試験時の温度を赤外線サーモグラフィ (IRS-640, Automation Technology) で測定した。ホットプレートの設定温度を 473 K とすると、おおむね 330~410 K 程度の温度を示し、実験開始時に賦形状と接していない計測点においても 330 K 以上の温度 (PA6 のガラス転移点以上の温度) であった。この温度条件で賦形状試験を実施した。

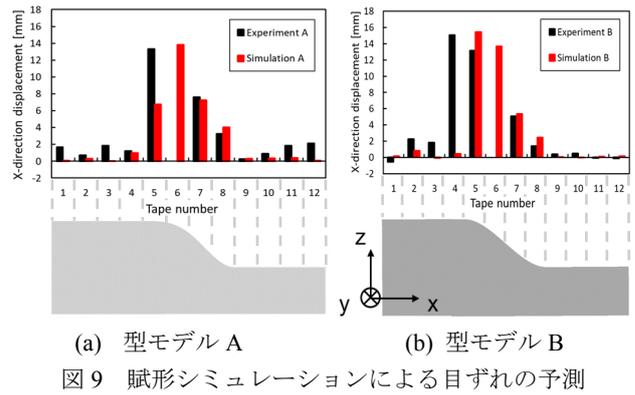
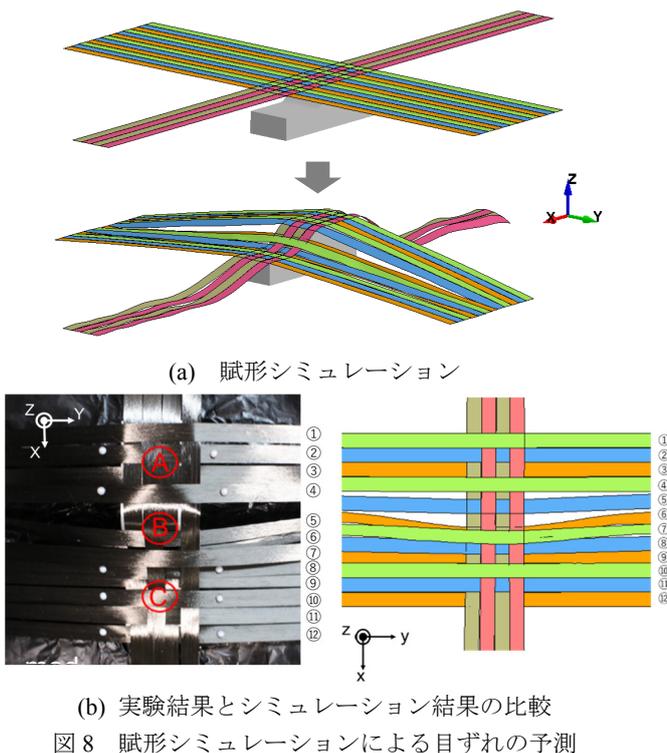
3・3 賦形状シミュレーション

2.2 節で述べた AP-PLY 積層プリフォームのメッシュモデルを用いて賦形状プロセスの有限要素シミュレーションを実施した。これにより、個々のテープ基材の変位による繊維配向 (テープ方向) の変化、および、それに伴う見ずれの発生を解析した。

図 8 に賦形シミュレーションによる解析の概要を示した。個々のテープ基材の特性やテープ基材間の摩擦係数は 2 章の基礎物性試験で得た値を用いている。引抜き解析と同様にシェルエッジの接触条件を考慮している。また解析では、賦形プロセスの解析の前にプレスプロセスを行い、節点座標を引き継ぐことで、実際の AP-PLY 積層プリフォームに近い状態から賦形プロセスを解析した。賦形型の上昇速度は賦形試験の約 30 倍としている。

図 8(b)に賦形試験後の目ずれの様子と賦形シミュレーションによる予測結果の比較を示した。⑥のテープが最も大きく変位し、その周辺の⑤や⑦のテープの目ずれが大きい様子がシミュレーションにおいても再現された。すなわち、本研究で提案したメソスケールモデルによる賦形シミュレーションの有効性が確認された。予備解析により、摩擦係数を大きく変化させると目ずれの様子が変わることを確認しており、2 章の基礎物性試験で得た摩擦係数についても、正確な値の決定は難しいものの、一定の信頼性があるものとする。

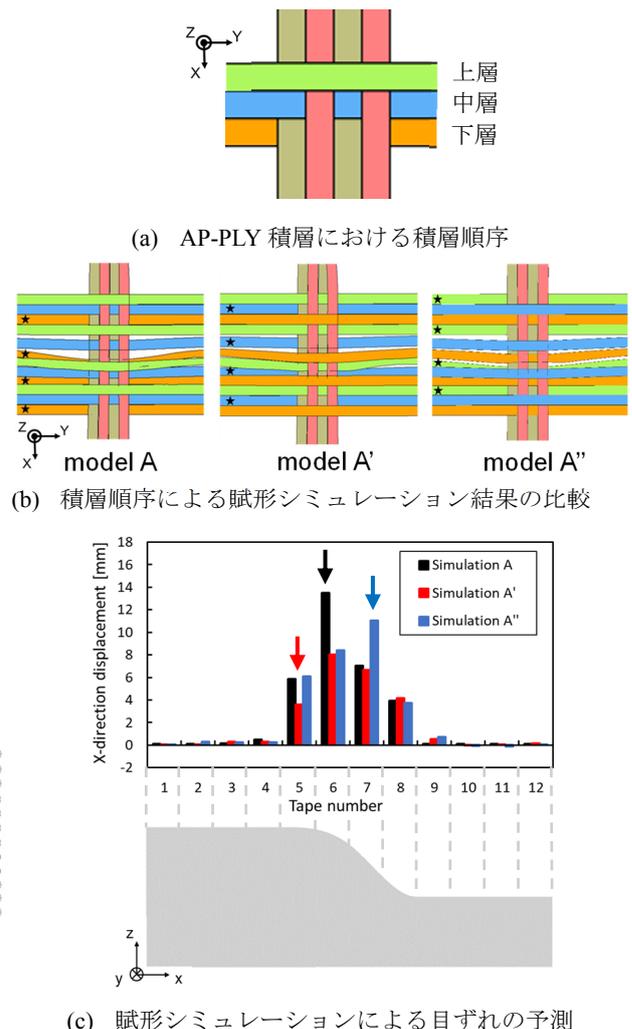
次に、賦形形状の設計によって、賦形時の繊維配向変化や目ずれ発生を実際に抑えることが可能であるかを検証するため、3.1 節において設計した 2 つの異なる曲面形状を持つ賦形型に対して賦形実験と賦形シミュレーションを実施した。その結果を図 9 において比較した。実験結果と比べて、曲面上方のテープの変位が小さい結果となった（型モデル A では 5 番のテープ、型モデル B では 4 番のテープ）が、これは実験では x 方向に変位する経方向テープの表面繊維に引っかかって緯方向テープが x 方向に変位することで見かけ上摩擦が大きくなっていたためである。型モデル B の方がより大きな変位が全体的にみられ、



特に傾斜角度による影響が大きいことが分かった。このように、賦形シミュレーションを用いて目ずれの様子を模擬しながら、目ずれ低減のための形状修正を検討できる。

3・4 基材設計の自由度を活用した賦形性の改善

最後に、AP-PLY プリフォームの特徴でもある基材の積層設計の自由度により基材特性を変化させた場合について検討した。例として、図 10(a)に示すような緯方向テープ基材の積層順序を変化させることで、意図的に賦形時の



変形を変化させることが可能である。実際の実験による検証は実施できなかったが、模擬的に賦形シミュレーションを実施し、積層設計の自由度を用いることによる目づれの低減について実証した。

図 10(b), (c)に、緯方向テープの積層順序を変更した 3 種類のモデルによる賦形シミュレーションの結果を比較した(図 10(b)における星印が最下層のテープを表している)。積層順序の変更により賦形型の曲面形状部における目づれの様子が変化していることが分かる。図 10(a)における中層のテープを最下層に配置したモデル A'において、テープ基材同士の重なりも小さく、最も均一に賦形ができていた。これは型形状の傾斜角度と最下層テープの位置との関係によるものである。このように、賦形形状に合わせて AP-PLY 積層の自由度を活用することで、基材特性と賦形性を関連づけて設計することが可能である。基材設計の自由度を活用して賦形性を制御する技術として有用である。

4. 結言

本研究では、AP-PLY 積層プリフォームを用いた CFRTP 基材の賦形プロセスについて、実験とシミュレーションの両面から、賦形形状を設計する技術について検討した。

まず、基礎物性試験(引抜き試験とせん断試験)とそのモデル化を実施し、AP-PLY 積層プリフォームのメゾスケールモデルを構築した。特に、テープ基材間の摩擦係数を取得することにより、解析結果は実験結果をよく再現することが分かった。

さらに、2種類の形状の異なる賦形型を用いた賦形実験と賦形シミュレーションにより、基材に対する曲面の傾斜角度が重要な形状因子であることが分かった。また、基礎物性試験で得た材料特性を基にした賦形シミュレーションの結果は賦形実験の結果をよく模擬できていた。本研究で確立した賦形シミュレーションを活用して、賦形形状に対して賦形性(繊維配向変化など)を解析し、目づれの生じやすい位置での形状修正に応用可能である。例えば、基材に対する傾斜角度を指標として形状設計に用いることが一例として考えられる。

上記は、基材の特性を固定して形状を設計する方法であるが、AP-PLY 積層プリフォーム自体の基材設計の自由度を活用することも有用である。賦形シミュレーションにより、基材の積層順序を変更することで目づれの低減が可能であることが明らかとなった。賦形形状から判断される目づれの起きやすい箇所では、単に形状修正だけでなく、基材設計の自由度も活用して賦形性を制御することが重要である。本研究で確立したメゾスケールモデルを用いた賦形シミュレーションが、賦形性を基材特性や形状設計と連携させて検討するための評価ツールとして今後活用されていくことを期待する。

謝 辞

本研究の材料試験(引抜き試験・せん断試験)は福井県工業技術センター・川邊和正氏、山田耕平氏、岩下美和氏のご協力のもと、同センターで製作したプリプレグ材料および試験機を利用して実施した。試験に用いた治具は、木村精工(引抜き試験)・マイズ試験機(せん断試験)・井元製作所(積層用治具)に設計・製作をご協力いただいた。賦形試験に利用した空圧プレス装置は MSA ファクトリーに製作いただき、本研究の賦形試験にあたり装置の調整にご協力いただいた。低コスト ZAS(型用亜鉛合金)を利用した賦形型は、クリモトに製作いただいた。賦形シミュレーションについては、JSOL の西正人氏にご指導いただいた。本解析は京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータシステムを利用した。本研究課題の遂行には、大学院生の阿保勇治君・田中陽祐君にご協力いただいた。改めて関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 高橋奈緒子: 京都大学修士論文, (2017).
 - 2) M. H. Nagelsmit, C. Kassapoglou, Z. Gürdal: *SAMPE Journal*, 47-2, (2011), 36-45.
 - 3) J. Cao et al.: *Composites A*, 39, (2008), 1037-1053.
 - 4) X. Peng, J. Cao: *Composites A*, 36, (2005), 859-874.
 - 5) W.-R. Yu, P. Harrison, A. Long: *Composites A*, 36, (2005), 1079-1093.
 - 6) K.D. Potter: *Composites*, 10-3, (1979), 161-167.
 - 7) H. Suemasu, K. Friedrich, M. Hou: *Composites Manufacturing*, 5-1, (1994), 31-39.
 - 8) M. Aono, D.E. Breen, M.J. Wozny: *Computer-Aided Design*, 26-4, (1994), 278-292.
 - 9) 森田早紀: 京都大学修士論文, (2015).
- (以下、本研究に関連する発表文献)
- 10) 阿保勇治, 西川雅章, 岩下美和, 山田耕平, 川邊和正, 松田直樹, 北條正樹: 第 43 回複合材料シンポジウム講演論文集, (2018).
 - 11) Y. Abo, Y. Tanaka, M. Nishikawa, M. Iwashita, K. Yamada, K. Kawabe, M. Nishi, N. Matsuda, M. Hojo: *Proceedings of the 22nd International Conference on Composite Materials 2019 (ICCM22)*, (2019).
 - 12) 田中陽祐, 阿保勇治, 西川雅章, 山田耕平, 岩下美和, 川邊和正, 西正人, 松田直樹, 北條正樹: 第 57 回飛行機シンポジウム論文集, (2019).
 - 13) Y. Abo, Y. Tanaka, M. Nishikawa, M. Iwashita, K. Yamada, K. Kawabe, M. Nishi, N. Matsuda, M. Hojo: *Extended abstracts of the 1st Russia-Japan Joint Workshop on Composite Materials*, (2019).