

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

---

### 曲率線展開成形の航空機CFRP構造への適用

Application of principal strips for manufacturing of curved aircraft CFRP structures

安岡 哲夫, 竹澤 正仁, 平野 義鎮, 松尾 宏平, 櫻井 昭男

YASUOKA Tetsuo, TAKEZAWA Masahito, HIRANO Yoshiyasu  
MATSUO Kohei and SAKURAI Akio

2020年12月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 目 次

概 要	1
1. 緒 言	2
2. 曲率線展開法について	3
2.1. 曲率線	3
2.2. 曲率線展開法の原理	4
2.3. シート状部材への曲率線展開法の適用	5
3. 曲率線展開成形による CFRP 成形試作	6
3.1. VaRTM 法による成形事例	6
3.1.1. VaRTM 法とは	6
3.1.2. 自動車エンジンフードの曲率線展開	6
3.1.3. カーボンクロスによる成形	7
3.2. オートクレーブ成形法による成形試作	8
3.2.1. 試作部材形状および成形条件	9
3.2.2. 成形試作品の評価	9
4. 航空機外板への曲率線展開成形の適用	12
4.1. 航空機外板への曲率線配置	12
4.2. 機首外板の曲率線展開	12
4.3. 機首外板部材の成形試作	15
5. 折れ曲がり構造を有する曲面部材への曲率線展開成形の適用	16
5.1. 曲面フランジを有するスパー部材への曲率線配置	16
5.2. 曲面フランジを有するスパー部材の曲率線展開	17
5.3. 考察	18
6. 結 言	19
謝 辞	19
参考文献	20

# 曲率線展開成形の航空機 CFRP 構造への適用

安岡 哲夫<sup>\*1</sup>, 竹澤 正仁<sup>\*2</sup>, 平野 義鎮<sup>\*1</sup>, 松尾 宏平<sup>\*2</sup>, 櫻井 昭男<sup>\*2</sup>

## Application of principal strips for manufacturing of curved aircraft CFRP structures

YASUOKA Tetsuo<sup>\*1</sup>, TAKEZAWA Masahito<sup>\*2</sup>, HIRANO Yoshiyasu<sup>\*1</sup>, MATSUO Kohei<sup>\*2</sup>, SAKURAI Akio<sup>\*2</sup>

### ABSTRACT

In this study, a novel manufacturing technique using orthogonal principal strips based on lines of curvature applicable to aircraft composite parts having double curvature surfaces was proposed. A double curvature surface is non-developable; it is difficult to layup intrinsically two-dimensional prepreg tapes on such a surface without any fiber wrinkles, gaps and laps of tows, which induce stiffness and strength degradation of the resulting product. The applicability of this technique was investigated by arranging the orthogonal nets based on lines of curvature onto non-developable surfaces, unfolding the orthogonal principal strips into the two-dimensional shapes and molding several types of composite parts from those strips. Three types of the parts with non-developable surfaces were considered: an engine hood of automobile, aircraft nose/cockpit skins and a spar with curved surface flanges. The orthogonal nets were successfully arranged on both the engine hood with no steep change of curvature and the aircraft nose/cockpit skins with steep change of curvature around windshield, and unfolded into the two-dimensional shapes. Then the prepreg sheet of woven fabric was cut into the unfolded shapes, stacked onto a mold, and cured with an autoclave process. The resulting composite parts were successfully manufactured with high quality, no wrinkles and voids. In other words, the proposed technique is effective composite manufacturing method. On the other hand, regarding the spar with curved surface flanges, which consisted of developable flange/web surfaces and an undevelopable flange/web joining part surface, the orthogonal net was also successfully arranged on the surfaces and unfolded into the orthogonal strips; however, it was considered that the obtained unfolded strips were not suitable for prepreg tapes cutting and composite molding. It was concluded that the scope of application of the proposed method is limited for this type of surfaces with joining parts.

**Keywords:** CFRP, Curved surface molding, Lines of curvature, Non-developable surface, Aircraft structures

### 概 要

本研究では、複曲率を有する航空機複合材部材に曲率線に基づく展開成形技術を適用することを提案する。複曲率を有する曲面は伸縮なく平面展開することができない非可展面であるため、2次元の平面形状であるプリプレグテープをレイアップすると、本質的に繊維のしわや、トウのすき間・重なりといった欠陥の発生を避けることができず、これらの欠陥は剛性および強度低下の要因となる。本研究では、曲率線展開成形技術の航空機 CFRP 構造への適用性について検討した。具体的には、曲率線配置を行い、曲率線を基準線として曲面を2次元平面に展開し、展開平面を用いてオートクレーブ法による成形試作を行いその結果を評価した。非可展面を有する3種類の形状について検討を行った。まず、曲率変化が緩やかな自

<sup>\*</sup> 2020 年 10 月 22 日受付 (Received October 22, 2020)

<sup>\*1</sup> 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 構造・複合材技術研究ユニット  
(Structures and Advanced Composite Research Unit, Aeronautical Technology Directorate)

<sup>\*2</sup> 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所  
(National Maritime Research Institute, National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology)

動車のエンジンフードと、ウィンドシールド周りで急激な曲率変化を有する航空機の機首外板については、曲率線を部材表面に配置することができ、また2次元平面形状に展開することができた。さらに、織物プリプレグシートを展開平面形状に切断し、成型型に積層し、オートクレーブ法により硬化させた結果、しわやボイドもなく高品質に成形することができ、当該技術の有効性を確認できた。また、折れ曲がり部が複曲率の表面となっている曲面フランジを有するスパーについても検討を行った。この部材については、曲率線配置および2次元平面への展開は成功したものの、得られた展開形状は複合材成形に不向きであり、このような折れ曲がり部を有する部材については複合材成形への効果は限定的であると考えられた。

## 1. 緒 言

炭素繊維強化ポリマー（Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP）は軽量で比強度が高く、航空機の構造部材として優れた性質を有している。近年ではCFRPを主構造材とした大型旅客機も運航されるようになり、その適用は一般化しつつある。航空機構造のCFRPは、その品質安定性を確保するため、プリプレグと呼ばれる炭素繊維束にあらかじめ半硬化樹脂（エポキシ樹脂等）を含浸させた材料を使用することが多い。プリプレグは幾層かに積層した上で、高温高压で硬化成形させて構造部材とする。ここで、プリプレグはシート形状もしくはテープ形状であり、“平面”を有する材料であるため、曲面構造に対する賦形に課題が生じる。

曲面には伸縮なしに平面に展開できる“可展面”と、平面展開に伸縮を要する“非可展面”がある。旅客機の構造でいえば、円筒である胴体は可展面であり、おわん型の形状になっている機首・後部胴体外板の一部やベリーフェアリングは非可展面である。基本的に複曲率（2方向に曲率を持つ）の部材は非可展面である。

伸縮なしに平面展開できる可展面の構造については、プリプレグの整列配置によって曲面を形成できる。一方、非可展面の構造については、プリプレグをどこかで伸縮させないとその面構造を形成することができない。一方向プリプレグは繊維方向には伸縮せず、繊維直交方向の伸縮とせん断変形がわずかに生じるのみである。そのため現在は、スリットテープと呼ばれる細幅の一方向プリプレグテープを用いることにより、プリプレグ配置時に生じる繊維束内のしわや、繊維束同士のGap（すき間）／Lap（重なり）といった欠陥を分散させ、これらを許容することで非可展面の製造を実現しているが、これらの欠陥は強度低下の要因となりうる。既存の大型旅客機は構造そのものが大きく曲率が小さいため、生じる欠陥もまだ小さい。しかし、リージョナル機等の比較的小型の機体では曲率が大きくなるほか、今後の成長が見込まれる超音速機やエアモビリティのような航空機ではその形状はより複雑となり、曲率の大きい非可展面形状の部材が多く使用されると見込まれる。例えば、現在JAXAで設計検討されている静粛超音速旅客機などは、低抵抗と低ブーム性を両立させるため、主翼、胴体ともに非可展面で構成される非常に複雑な曲面形状を有している。そのような曲面構造では生じる欠陥も顕著になり、プリプレグを整列して配置する従来法では設計・製造が難しくなる。

非可展面へのプリプレグの積層で上述のような欠陥が生じるのは避け難いが、繊維束を適切に配置するなどして欠陥を制御し、その強度を評価できるような構造設計技術を構築できれば、これらの欠陥は許容可能となり、曲率の大きい非可展面形状のCFRP構造部材を実現できる。そのために解決を要する技術課題として、プリプレグ／繊維束／欠陥の配置法構築、部材の強度予測手法の構築等があげられるが、もっとも深刻な問題は、曲面構造部材の強度評価試験が容易ではない点である。クーパーン試験、エレメント試験で行うような単純な引張・圧縮付与の条件だと、曲率の大きい曲面部材に対して適切に荷重を付与できない。実大構造レベルであれば、構造に合わせた治具の設計やアクチュエータの配置によって評価可能と思われるが、多数の試験を行うのは費用面から難しいと想定される。一方、平面部材であれば強度試験は容易であるため、曲面部材を平面に展開する技術と、展開平面部材から曲面を再構築する技術を利用することで、曲面構造部材の強度評価を容易にできる可能性がある。

非可展面の曲面を平面に展開する方法は、目的に応じて数多くの手法が存在し、様々な産業分野



において利用されている。例えば、造船を例に挙げると、船体を構成する複雑な 3 次元形状を平らな鋼板から成形するために、設計した 3 次元形状を平面に展開する必要がある。造船で利用される展開手法として「測地線展開法」、「基線展開法」、「たすき送り展開」などが挙げられる<sup>1)</sup>。現在も主流となっている測地線展開法は、曲面内の任意の 2 点の最短を結ぶ曲線（測地線）を展開基線として、それを直線に展開する方法であるが、測地線の求め方が近似的であることや展開に伴って生じる伸びしを原理的に考慮できないことなどの問題点がある<sup>2)</sup>。本報において著者らは「曲率線展開法<sup>2)</sup>」に着目した。曲率線展開法は、曲率線を展開の基準線として平面に展開する手法である。ここで曲率線とは、各点における接線がその点における主方向（法曲率の最大または最小となる方向）と一致する曲面上の曲線群を指す。これはある曲面に対して一意に定まる曲線群となる。また、曲率線展開した平面から曲面を再構築することも可能である。言い換えると、展開平面形状をあらかじめ得ていれば、平面部材から目的の曲面構造を成形できる。

曲率線展開法は、元々は造船において効率的な板金加工を行う手段として開発されたが<sup>2)</sup>、伸縮しないシート状の部材へ応用する方法として、複数枚の短冊状の展開図を生成する手法も開発されている<sup>3)</sup>。曲率線展開図から曲面形状部材を成形することを「曲率線展開成形」と称することとする。具体的な流れとしては、製作したい曲面部材の 3 次元図面をもとに、その曲面に曲率線を配置、曲率線で平面展開、展開図をもとに平面部材を製作、平面部材を曲面部材に賦形・成形する、となる。

曲率線展開成形技術の航空機 CFRP 曲面構造への適用可能性については、強度や剛性に関する解析的評価と、実際の成形品質に基づく強度試験評価を総合して判断する必要がある。本研究はそれらの評価を行う前段階として、曲率線展開法および曲率線展開成形により航空機 CFRP 曲面構造の成形が可能かどうか検討することを目的とする。FRP 部材の曲率線展開成形はこれまでも取り組まれているが<sup>4)6)</sup>、航空機構造用途の CFRP 成形で一般的なオートクレーブ成形法は適用されていない。また、航空機構造に曲率線展開成形を適用した例はない。本研究ではまず、適当な曲率の大きい非可展面形状部材の曲率線展開図を用いて、オートクレーブ成形法による成形試作を行い、その特徴について評価した。次に、JAXA で概念設計を行った機体モデルである TRA2022B<sup>7)</sup>を用いて、航空機外板への曲率線配置を行い、その中から機首形状の一部を選定して曲率線展開および成形試作を行った。最後に、曲率線展開成形のさらなる適用可能性を検討するため、折れ曲がり構造を有する曲面部材について曲率線展開法を適用し、その有効性を検証した。

## 2. 曲率線展開法について

### 2.1. 曲率線

曲面上の任意の点では、法曲率の最大・最小値をとる方向が存在し、それらの主方向は互いに直交する。そのため主方向を追跡した 2 組の曲線群である曲率線は、曲面上で直交網を形成する。図 1 は、船体を構成する 1 枚の外板曲面上に曲率線を計算した例を示す。赤い曲率線が最大の曲がり方向を追跡した最大主曲率線、青い曲率線が最小の曲がり方向を追跡した最小主曲率線を示している（本誌ではそれぞれ、第 1 曲率線と第 2 曲率線と称することとする）。曲率線は、非線形関数の連立常微分方程式の初期値問題を解くことで求めることができ、ルンゲ・クッタ法などの数値計算手法により描画することができる。また、どの方向にも法曲率が等しい点は、臍点（曲面の臍、umbilics）と呼ばれ、主方向が定まらない曲率線直交網の特異点となる。例えば、球体はどの点においても主方向が定まらない臍点であり、曲率線を定義することができない形状の一例である。

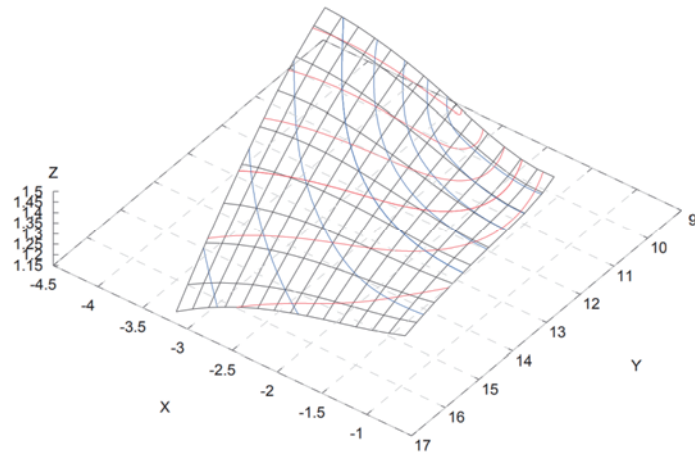


図1 船体のねじれ外板の曲率線の様子<sup>8)</sup>。

## 2.2. 曲率線展開法の原理<sup>8)</sup>

曲率線展開法は、3次元曲面の平面展開手法、ならびに当該展開形状から目的の3次元形状へ成形する手法（曲率線展開成形）である。多くの製造業では曲面部材を平面部材から成形する。平面部材から目的の曲面部材を成形するためには、曲面形状の平面展開図が必要となるが、非可展面の展開形状は一意に定まるものではなく、その目的に応じて展開手法も数多く存在している。曲率線展開法は、曲面上の曲率線を展開基線とすることで、成形性および成形品質の向上を実現する。

曲面上の曲線が曲率線であるための必要十分条件は、曲線に沿った測地的振率がゼロであることが知られている。この性質により曲率線は、測地的展開（測地的曲率を保ったまま法曲率成分を除くして実長展開）すると、平面に展開することができる（図2参照）。

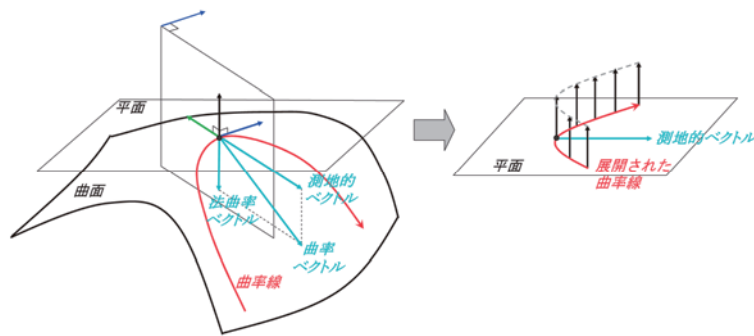


図2 曲率線の測地的展開<sup>8)</sup>。

曲率線展開法では、この曲率線の性質を用いて、曲面上の曲率線を平面に展開したのち、展開された曲率線を平面上で接続していくことで、目的曲面の平面展開図を算出する。この際、曲率線の平面への展開と接続は、幾何学的に厳密に計算することができるため、平面展開に要する曲げ量（逆操作にあたる復元に要する曲げ量）、展開の際に内部に生じる伸ばしの箇所・量（逆操作にあたる復元に必要な収縮の箇所・量）を把握することができる。曲率線展開法では、非可展面を平面展開する際に発生する伸ばしを定量的に考慮しながら展開する点が、これまでの展開法と異なる点である。図3に、ある外板曲面に対して曲率線展開法を適用して出力された展開図を示す。造船における曲げ加工では、図中の青い曲率線（第2曲率線）がプレスによる冷間曲げ加工に対応する施工線となり、赤い曲率線（第1曲率線）がガス加熱による熱間加工に対応する施工線となる。曲率線展開法により、プレス加工の箇所や量、ならびにガス加熱の箇所や必要収縮量を定量的に把握することが

可能となり，成形性および成形品質の向上に繋がる．

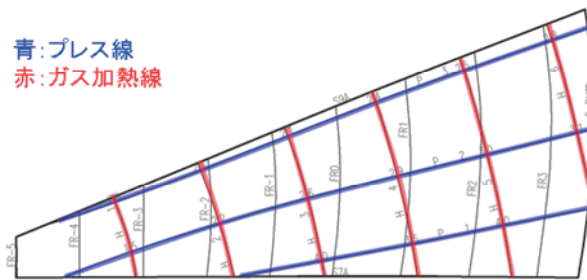


図 3 曲率線展開法による外板曲面の展開例<sup>8)</sup>．

### 2.3. シート状部材への曲率線展開法の適用

造船の外板曲面の成形では，1枚の鋼板から非可展面形状を成形することになるが，伸縮しないシート状の部材へ応用する方法として，従来の曲率線展開法のアルゴリズムをベースに，複数枚の短冊状展開図（曲率線ストリップ，**principal strip**）を生成する手法<sup>3)</sup>も開発されている．当該手法では，これまでに紙，薄いプラスチック板，金属シートなど様々な部材への適用例がある．本研究では本展開手法を採用することとし，算出された展開形状に沿ってプリプレグシートを裁断する．

当該手法では，曲面上の曲率線で囲まれた領域である曲率線パッチ（**principal patch**）に着目し，それらすべてを平面上に展開した後で，それぞれの展開パッチを接続して並べていくことで展開形状を生成する．従来の曲率線展開法<sup>2)</sup>と比べた本手法の特徴は，生成される2種類の展開図が複数枚に分かれた短冊状（ストリップ）として算出されることである．

展開アルゴリズムの概要を説明する．まず曲率線パッチを構成する4本の曲率線（図4左図）について，測地的展開によりそれぞれの曲率線を平面に展開する（図4中央）．この時点では，4本の曲率線の位置は不定である．そこで，元の曲面上の曲率線パッチにおける接続関係に従い，図4右図のように，4本の曲線を平面上で接続することで展開パッチを形成する．しかし，展開パッチはリンク機構のように自由度を有しており，形状は一意に定まらない．そこで曲率線パッチが可展面であると仮定すると，等角写像の性質により展開パッチの4頂点角度はそれぞれ，元の曲率線パッチの頂点角度を保つはずである．そこで4頂点角度について元の3次元上での接続角度（90度）からの差が最も小さくなるような展開形状を求める．この計算は一変数の非線形方程式を解く問題に帰着する．得られたすべての展開パッチを，第1曲率線方向に並べることで最大主曲率ストリップ（**maximum principal strip**），第2曲率線方向に並べることで最小主曲率ストリップ（**minimum principal strip**）の展開形状を得ることができる．本手法を楕円体曲面に適用した例を図5に示す．このように曲面上の曲率線パッチに着目した展開手法に基づき，目的の3次元形状に対して，2種類の短冊状の展開図を生成することができる．

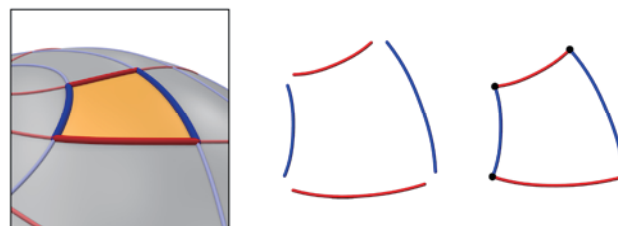


図 4 曲率線パッチの展開<sup>3)</sup>．

左図：曲面上の曲率線パッチ，中央図：展開された4本の曲率線，右図：展開パッチの生成．

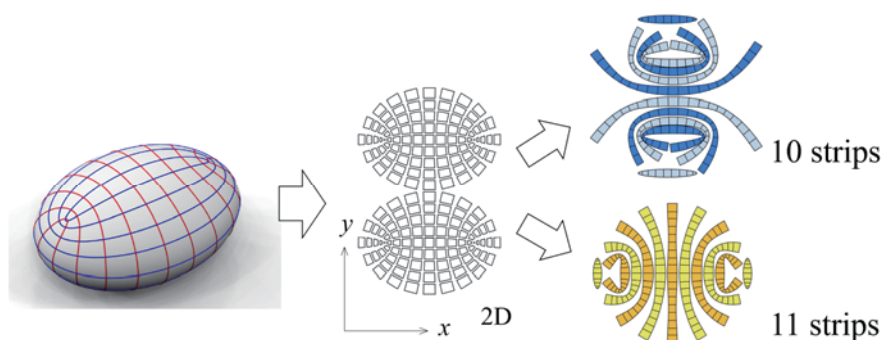


図 5 楕円体曲面の展開<sup>3)</sup>.

左図：楕円体曲面と曲率線パッチ，中央図：展開された曲率線パッチ，右図：2種類の短冊状の展開図（上図：minimum principal strip，下図：maximum principal strip）.

### 3. 曲率線展開成形による CFRP 成形試作

#### 3.1. VaRTM 法による成形事例

海上技術安全研究所では，先行研究としてこれまでに VaRTM（Vacuum Assisted Resin Transfer Molding）法により曲率線展開成形を行っている．本節では，その一例として自動車のエンジンフード曲面への適用事例について紹介する．

##### 3.1.1. VaRTM 法とは

VaRTM法とは，プリフォームをオープンモールドにセットし，バギングフィルム等で覆った後，内部を真空引きし，発生する負圧を利用して樹脂を含浸させて成形する方法である．概略図を図 6 に示す．本成形では，後述する曲率線展開法により生成したエンジンフード曲面の展開図を基に，繊維基材を裁断したプリフォームを用い，FRP製のエンジンフード曲面の雌型により VaRTM成形を行った．

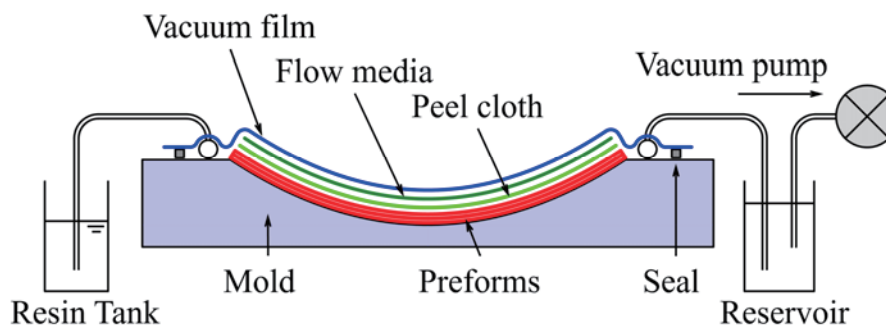


図 6 VaRTM 法概略図．

##### 3.1.2. 自動車エンジンフードの曲率線展開

曲率線展開法を用いて，エンジンフード曲面の平面展開図を算出する．対象の3次元曲面と，その曲率線を図7(a)に示す．曲率線はその特性上，高曲率の領域において曲線同士が密集する．しかしその状態のまま展開を行うと極端に細いストリップの展開図が生成されてしまい，部材の取り扱いが困難になる．そこで(b)のように，曲率線の積分計算を途中で止め，かつ曲率線の配置本数を調整することで曲率線の密集を防ぐ．(c)は，曲率線パッチを構成するために不要な曲率線をトリムした状態である．(d)に示すようにすべての曲率線パッチを平面に展開したのち，展開パッチを2方向に並び替えることにより，(e)の2種類のストリップ状の展開図を生成する．さらにプリプレグの扱いが容易



になるように、それぞれのストリップ同士を接合することにより、(f)の展開形状が得られる。

得られた展開図に対して、紙を用いて復元を検証した様子が図 8 である。ペーパークラフトによる成形曲面は、元の形状を精度よく再現している。

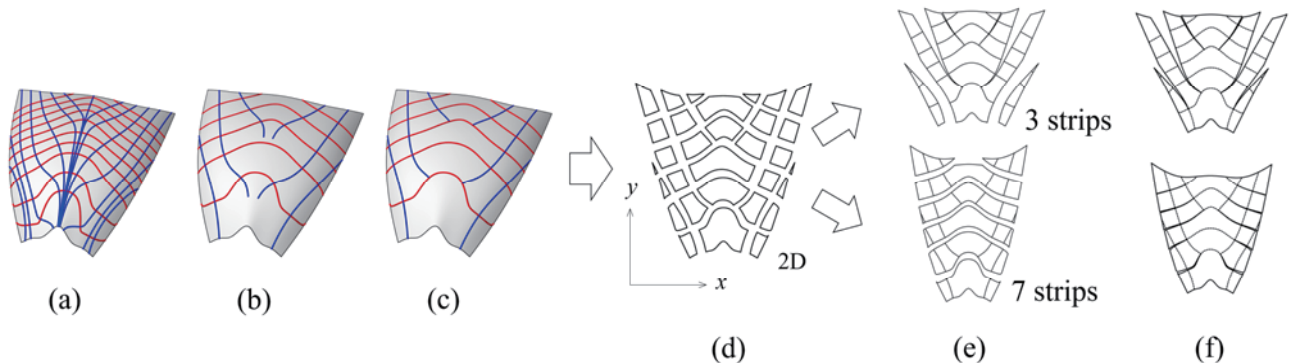


図 7 自動車エンジンフード曲面の展開。

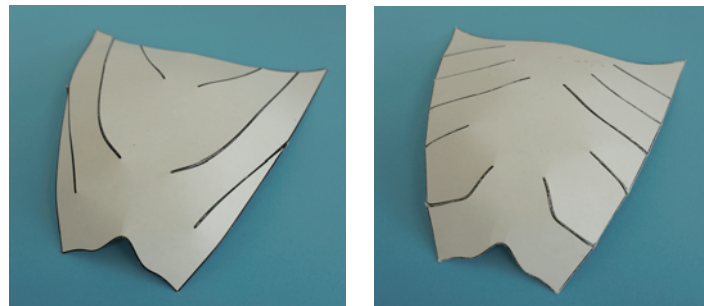


図 8 紙による復元の検証。

左図：図 7 (f)上段の展開図から復元された形状，右図：図 7 (f)下段の展開図から復元された形状。

### 3.1.3. カーボクロスによる成形

前項で得られた展開形状を元に、VaRTM法により成形を行った。成形に使用した材料を表 1に示す。基材には12Kの平織カーボクロスを用いた。マトリックスは炭素繊維に対応可能な常温硬化型のウレタンアクリレート樹脂であり、樹脂100部に対して、促進剤1部、硬化剤2部を混合攪拌して使用した。ゲル化時間は25°Cにおいて、およそ25分であった。

成形作業は、展開形状を元に作成した図 9に示す規定の型紙を用いて基材を裁断し、ゲルコート塗布した型に沿わせてスプレーのりで固定した。積層は第1曲率線方向，第2曲率線方向の順で行っている。その後通常の方法でVaRTM成形を行った（図 10）。フルバキュームで注入を行ったが、完全含浸までおよそ10分であった。

成形品を図 11に示す。ボイド等の欠陥はほとんど見られなかった。また、2プライ積層したことにより、かなり強固なものが出来上がった。ただ、基材裁断の際に生じた繊維方向の乱れがそのまま残っている箇所があり、基材の裁断、配置には細心の注意を要した。さらに、樹脂注入ポート部（図 10の中央部）でポート治具の圧力により繊維乱れがあり、治具類の配置についても注意を要した。

表 1 VaRTM成形に使用した材料

基材	三菱パイロフィル TRK101M
ゲルコート	TOMATEC NC-19001P (クリアー)
マトリックス樹脂	ユピカ CBZ500LM-AS
促進剤	ユピカ PR-CBZ01
硬化剤	化薬アクゾ 328E
成形副資材	バギングフィルム，ピールクロス，フローメディア等

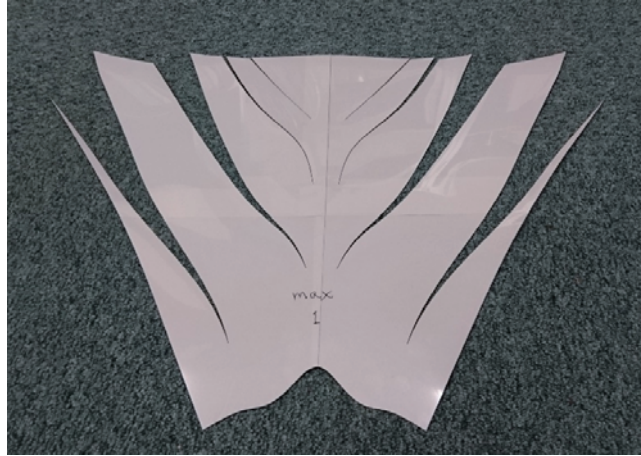


図 9 型紙の一例（第1曲率線方向）.

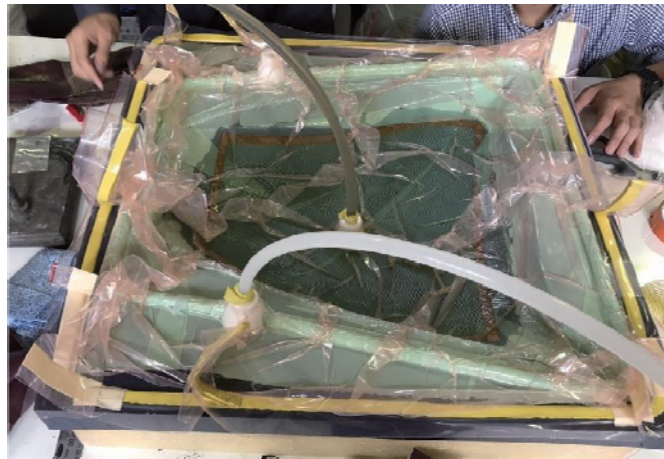


図 10 VaRTM 成形における樹脂注入作業.



図 11 成形品.

### 3.2. オートクレープ成形法による成形試作

本研究は航空機構造用途の CFRP 成形をターゲットとしている．そこで航空機構造用 CFRP の成



形方法として一般的なオートクレーブ成形法により、曲率線展開成形の試作を行い、成形品の特徴について評価した。

### 3.2.1. 試作部材形状および成形条件

試作部材は図 7 に示す自動車エンジンフードを模した曲面形状の部材とした。部材の 3 次元形状と、本成形で使用した曲率線展開図および概寸を図 12 に示す。

材料は炭素繊維／エポキシ樹脂の平織プリプレグ（T300/2500，東レ株式会社）を使用した。以下の 3 つの条件で成形し、成形品を比較評価した。

(ア) 第 1 曲率線に沿った展開図（図 12 中央）の 1 層のみで成形したもの。

(イ) 曲率線展開を実施せずにプリプレグシートをそのまま曲面に賦形して成形したもの。

(ウ) 第 1 曲率線に沿った展開図（図 12 中央）と第 2 曲率線に沿った展開図（図 12 右図）、これら 2 つの展開図を各 1 層積層（合計 2 層）して成形したもの。

成形試作の手順は次の通りである。まず、自動裁断機（GERBER DCS 2500 CUTTER, Gerber Technology LLC）を用いてプリプレグシートを曲率線展開図の切り込み線に沿ってカットした。次に、カットしたプリプレグを、自動車エンジンフードを模した曲面形状のパールボード製の雌型に賦形した。賦形完了後、バギングして 12 時間以上の真空引き処理を行った。その後、オートクレーブ（株式会社羽生田鉄工所製）により、135℃、0.3MPa で 2 時間保持し硬化させた。硬化後、部材を脱型し成形完了となる。成形試作の流れについて、図 13 に示す。

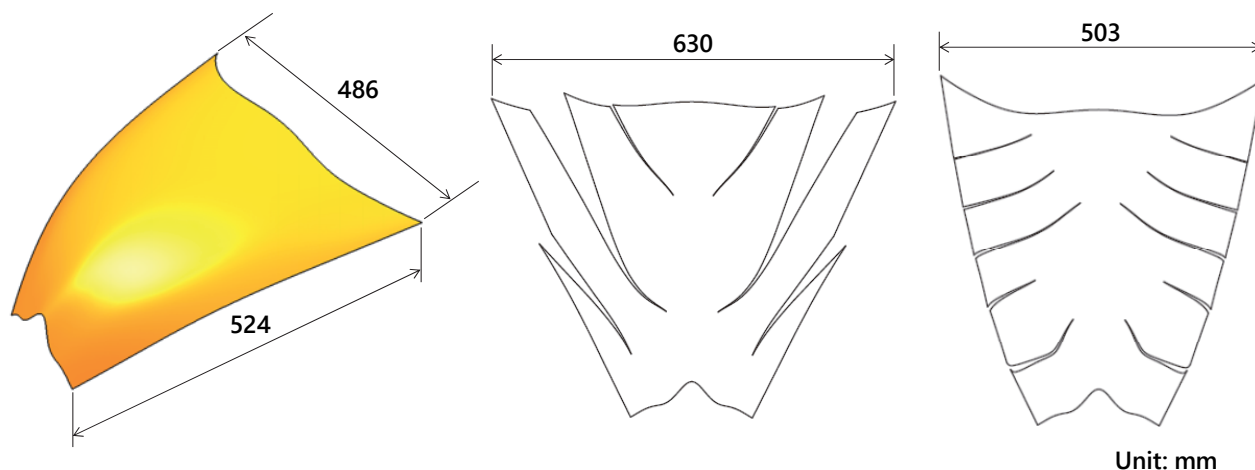


図 12 成形試作部材の形状と曲率線展開図。

左図：3 次元形状，中央図：第 1 曲率線に沿った展開図，右図：第 2 曲率線に沿った展開図。

### 3.2.2. 成形試作品の評価

図 14 に第 1 曲率線に沿った展開図 1 層のみで成形した成形結果を示す。全体としてしわや繊維よれはなく、また目視ではボイド等も確認されず、高品質に仕上がった。図 14 にはまた、展開図の切り込み線のつなぎ目部分について拡大図を示した。つなぎ目部分にはごくわずかにすき間（Gap）、重なり（Lap）を生じたが、全体としては段差もなく、シームレスに成形されている。しかしながら、つなぎ目部分では繊維が切断されており、つなぎ目を境に繊維方向が不連続に変化する結果となった。また、このつなぎ目部分は繊維が連続していないために強度的に脆弱であり、手で曲げ荷重を付与すると容易に割れ損傷を生じた。

図 15 に曲率線展開せず、プリプレグシートをそのまま曲面に賦形して成形した結果を示す。図 15 の拡大図に示すように、特に成形品の周辺部分に集中して繊維のしわが残留する結果となった。今回用いた基材は平織であり、ある程度の伸縮性とせん断方向の変形が可能であるが、部材形状は曲率の大きい非可展面であることから、しわなく成形することは困難であった。すなわち、曲率線展開成形を用いることで、曲率の大きい形状であっても賦形・成形を容易にできることが示された。

図 16 に、第 1 曲率線に沿った展開図と第 2 曲率線に沿った展開図をそれぞれ 1 層ずつ積層（合計 2 層）して成形した結果を示す。1 層では切り込み線部分が強度的に弱かったが、2 つの展開図を積層することで切り込み線が直交して強度が向上し、手による曲げでは容易に損傷しなかった。構造強度の観点からは、2 つの展開図を両方使用して積層成形することが肝要であることが示された。

本研究ではプリプレグシートを用いたが、この材料では展開図の形にカットする際に繊維を切らざるを得ず、また曲面成形時には切り込み線で繊維方向が不連続に変化してしまうため、構造強度の観点では好ましくない。これらの問題を解決するためには、曲率線に沿って繊維を曲線的に配置できるような材料（例えば、細幅の繊維束）とその配置技術が必要となると考えられる。



図 13 成形試作の流れ.



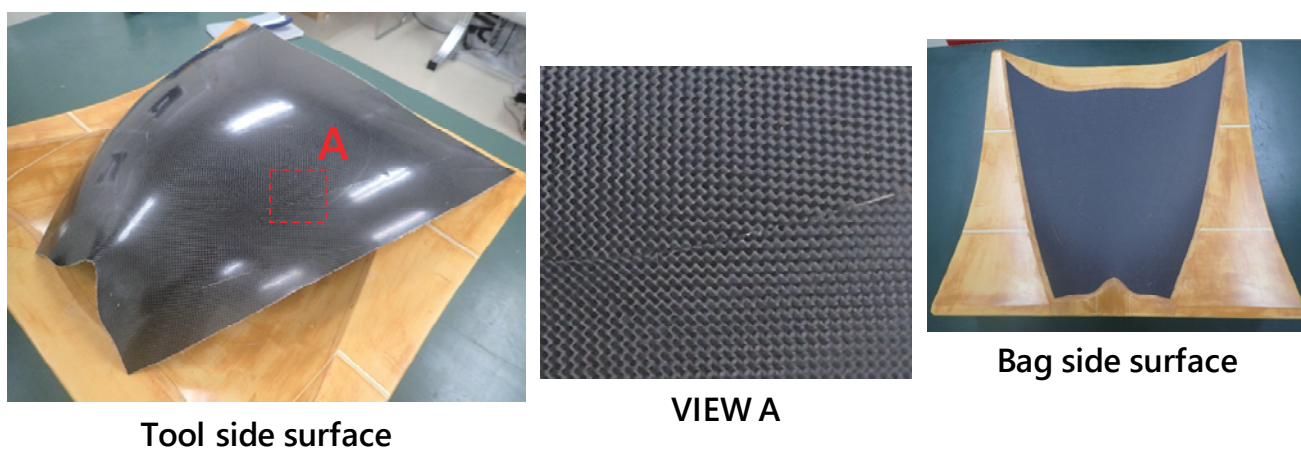


図 14 第 1 曲率線に沿った展開図 1 層のみで成形した試作品.

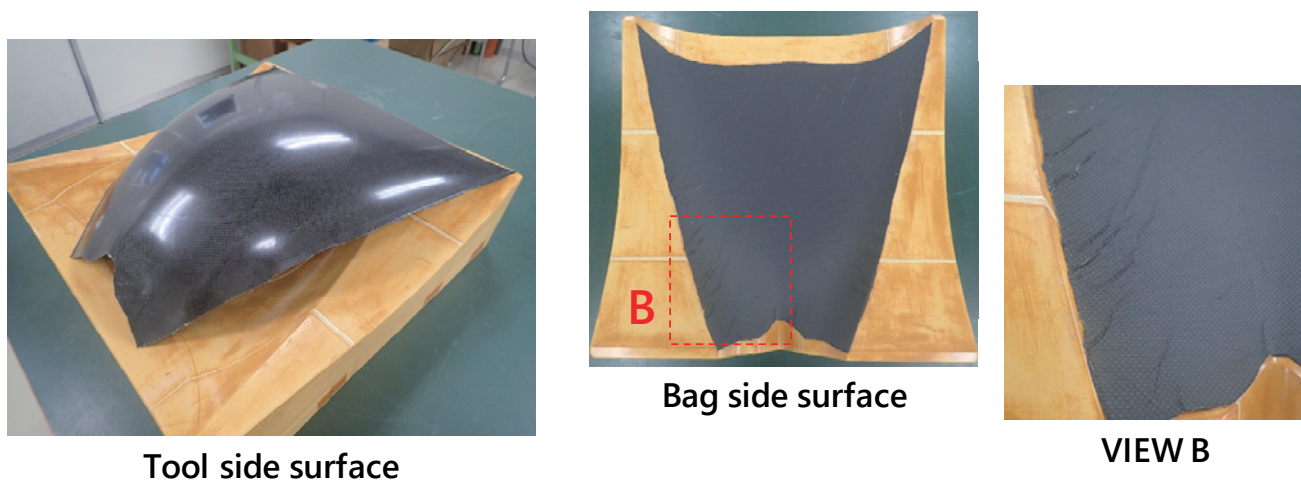


図 15 曲率線展開せずに曲面に賦形して成形した試作品.

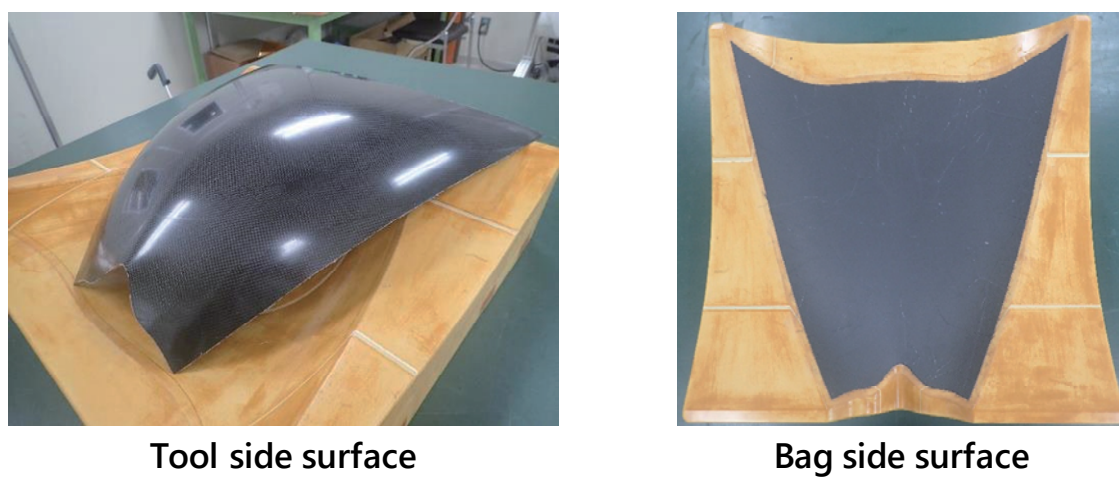


図 16 2 つの曲率線展開図を各 1 層積層して成形した試作品.

#### 4. 航空機外板への曲率線展開成形の適用

航空機外板（スキン）は、形状に連続性があり、また複曲率の曲面部材も存在することから、曲率線展開成形の適用先として有望である。しかし、これまで航空機構造に曲率線展開成形を適用した例はない。そこで、本研究では JAXA にて概念設計を行った将来機体モデルである TRA2022B の外形形状を使用して、航空機外板に対する曲率線展開成形の適用性を検討した。

##### 4.1. 航空機外板への曲率線配置

まず、TRA2022B の外形形状に対して曲率線配置を行った。機首、翼根周辺、胴体尾部に曲率線を配置した例を図 17 に示す。曲面の複雑さに応じ、曲率線配置も複雑になる。本配置結果をみると、機首のウィンドシールド周辺、翼付根、胴体の水平尾翼取合部といった特に形状変化が大きい領域で曲率線も複雑に配置された。

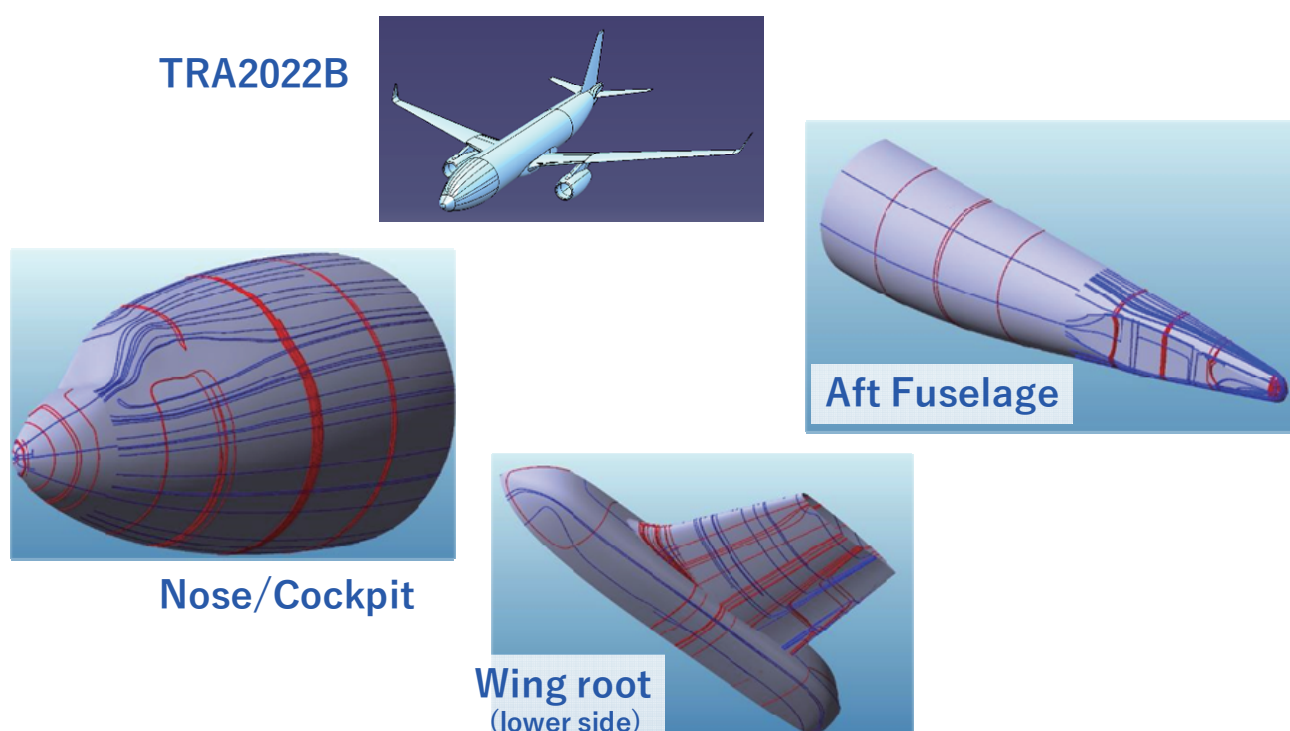


図 17 TRA2022B 外形形状への曲率線配置.

赤い線：第 1 曲率線（最大主曲率方向の曲率線）、青い線：第 2 曲率線（最小主曲率方向の曲率線）。

##### 4.2. 機首外板の曲率線展開

前項で得られた曲率線配置のうち、機首構造を代表形状として選定し、曲率線展開を実施した。前項で行った曲率線配置はコンピュータにより機械的に配置したものであり、成形するための切り込み線（実際に展開する線）としての曲率線配置ではない。よって機首外形形状について、成形実施の目的で改めて曲率線を配置し直した。図 18 に機首下半分の形状への曲率線配置を、図 19 に機首上半分の形状への曲率線配置を示す。いずれも、機首構造の左半分のみを表示している。機首下半分の形状はゆるやかな曲率変化のある構造であり、シンプルな曲率線配置となっている。一方、機首上半分の形状はウィンドシールドがあるため、複雑な曲率線配置となった。

図 20 および図 21 には、それぞれ機首下半分の曲率線展開図、機首上半分の曲率線展開図を示す。

曲率線展開図は、第 1 曲率線に沿った展開図と第 2 曲率線に沿った展開図の 2 種類の展開図が得られる。展開図を見ると、機首下半分の形状は比較的単純な展開図面であるのに対し、機首上半分の形状は複雑な展開図であった。機種上半分の形状については、複雑な曲率線配置に伴って展開図もまた複雑になるものの、ウィンドシールド周辺部のような複雑な形状であっても曲率線展開法が適用可能であることを確認できた。

第 1 曲率線と第 2 曲率線は直交するため、仮に曲率線に沿った繊維配置を行うことができれば、機首上半分のような複雑な形状であっても、曲面上の任意の点で直交積層となる曲面構造を実現可能と考えられる。一方、曲率線は曲面に対して一意に決まるため、角度を付けて平面展開を行うことは難しい。そのため今回適用した曲率線展開法では、アングルプライの適用が困難となり、実機設計で多用される疑似等方積層や、様々な異方性を有する積層構成の曲面構造を作ることが困難である。アングルプライの適用については、曲率線展開法とは別の手段による平面展開および成形を検討する必要がある。

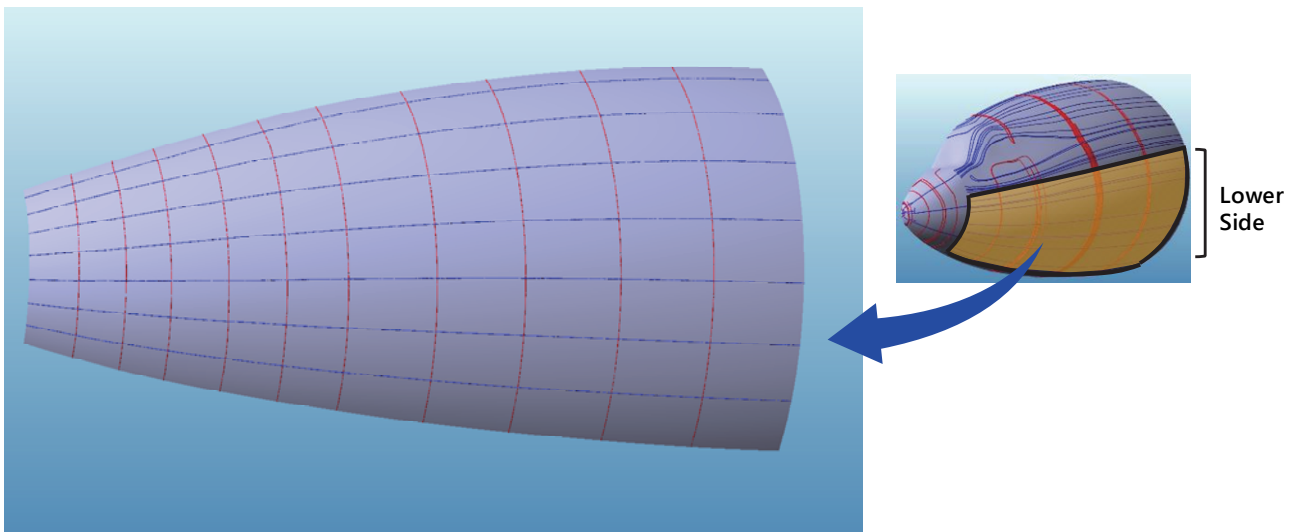


図 18 TRA2022B 機首（レドームを除く）下半分の形状への曲率線配置.

赤い線：第 1 曲率線（最大主曲率方向の曲率線）、青い線：第 2 曲率線（最小主曲率方向の曲率線）.

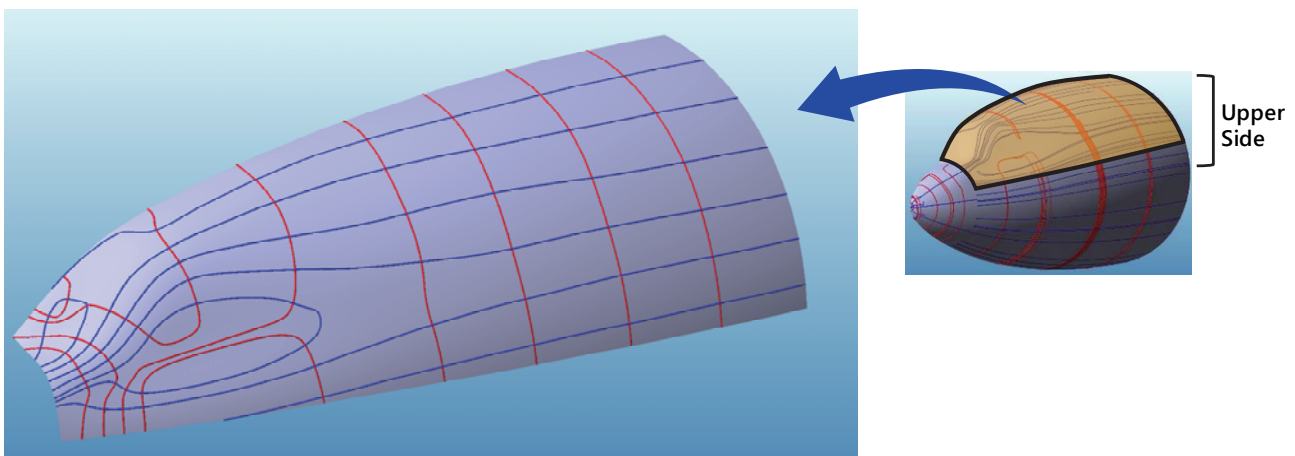


図 19 TRA2022B 機首（レドームを除く）上半分の形状への曲率線配置.

赤い線：第 1 曲率線（最大主曲率方向の曲率線）、青い線：第 2 曲率線（最小主曲率方向の曲率線）.



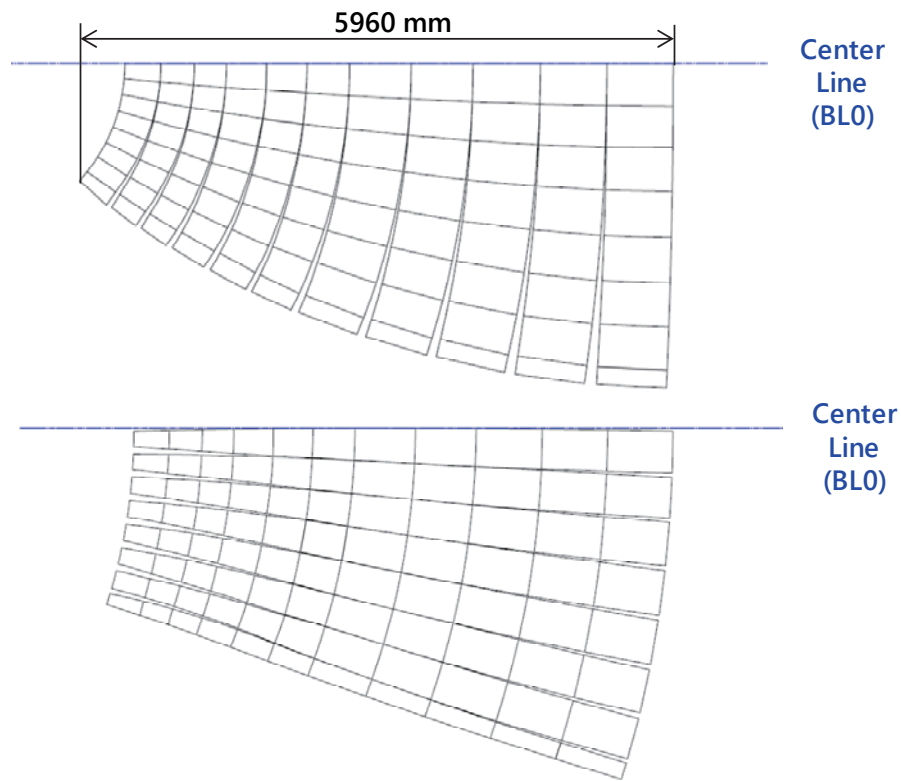


図 20 TRA2022B 機首（レドームを除く）下半分の形状の曲率線展開図.  
上図：第 1 曲率線に沿った展開図，下図：第 2 曲率線に沿った展開図.

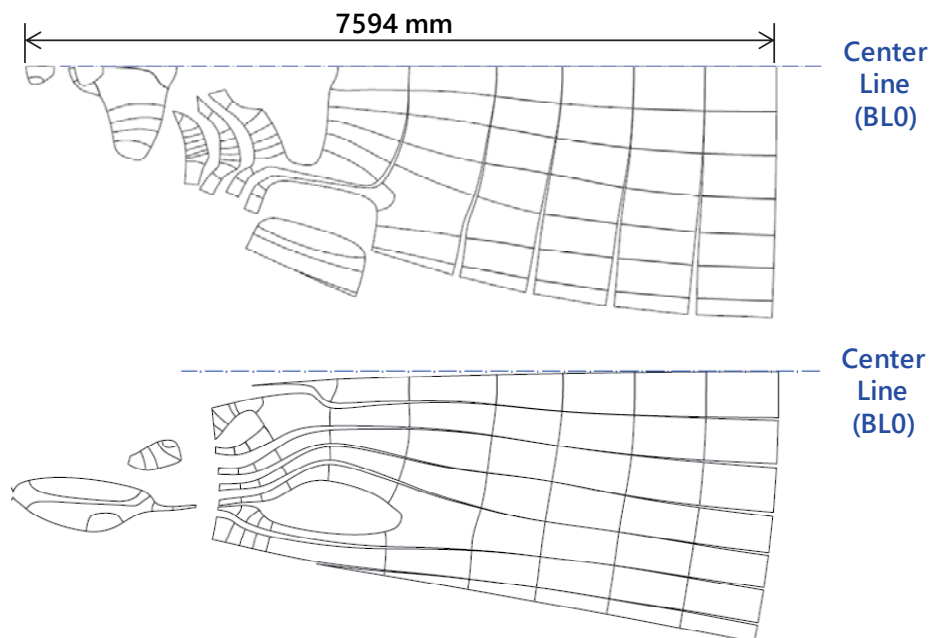


図 21 TRA2022B 機首（レドームを除く）上半分の形状の曲率線展開図.  
上図：第 1 曲率線に沿った展開図，下図：第 2 曲率線に沿った展開図.



### 4.3. 機首外板部材の成形試作

複雑な曲率線展開図を用いた場合の成形性を確認するため、オートクレーブ成形法による成形試作を行った。試作対象は機首上半分の形状とし、製作寸法は10分の1スケールとした。材料は炭素繊維／エポキシ樹脂の織物プリプレグ（T300/2500，東レ株式会社）を使用した。成形試作の流れとその結果を図22に示す。

試作の流れは次の通りである。まず、自動裁断機（GERBER DCS 2500 CUTTER, Gerber Technology LLC）を用いてプリプレグシートを曲率線展開図の切り込み線に沿ってカットした。本試作においては、第1曲率線に沿った展開図と第2曲率線に沿った展開図についてそれぞれ1枚分ずつ得た。次に、カットしたプリプレグを機首の外形形状を再現したパールボード製の曲面形状型に賦形した。1層目には第2曲率線の展開図を、2層目には第1曲率線の展開図を賦形した。賦形完了後、バギングして12時間以上の真空引き処理を行った。その後、オートクレーブ（株式会社羽生田鉄工所製）により、135℃、0.3MPaで2時間保持し硬化させた。硬化後、部材を脱型し成形完了となる。

図22に成形完了後の部材の写真も示す。ウィンドシールド付近は展開図のパーツが細かく数も多いため、賦形にやや苦労したが、結果としては表面にしわやボイドはみられず、高品質に成形することができた。複雑な展開図でもオートクレーブ成形法で成形可能であることを確認できた。

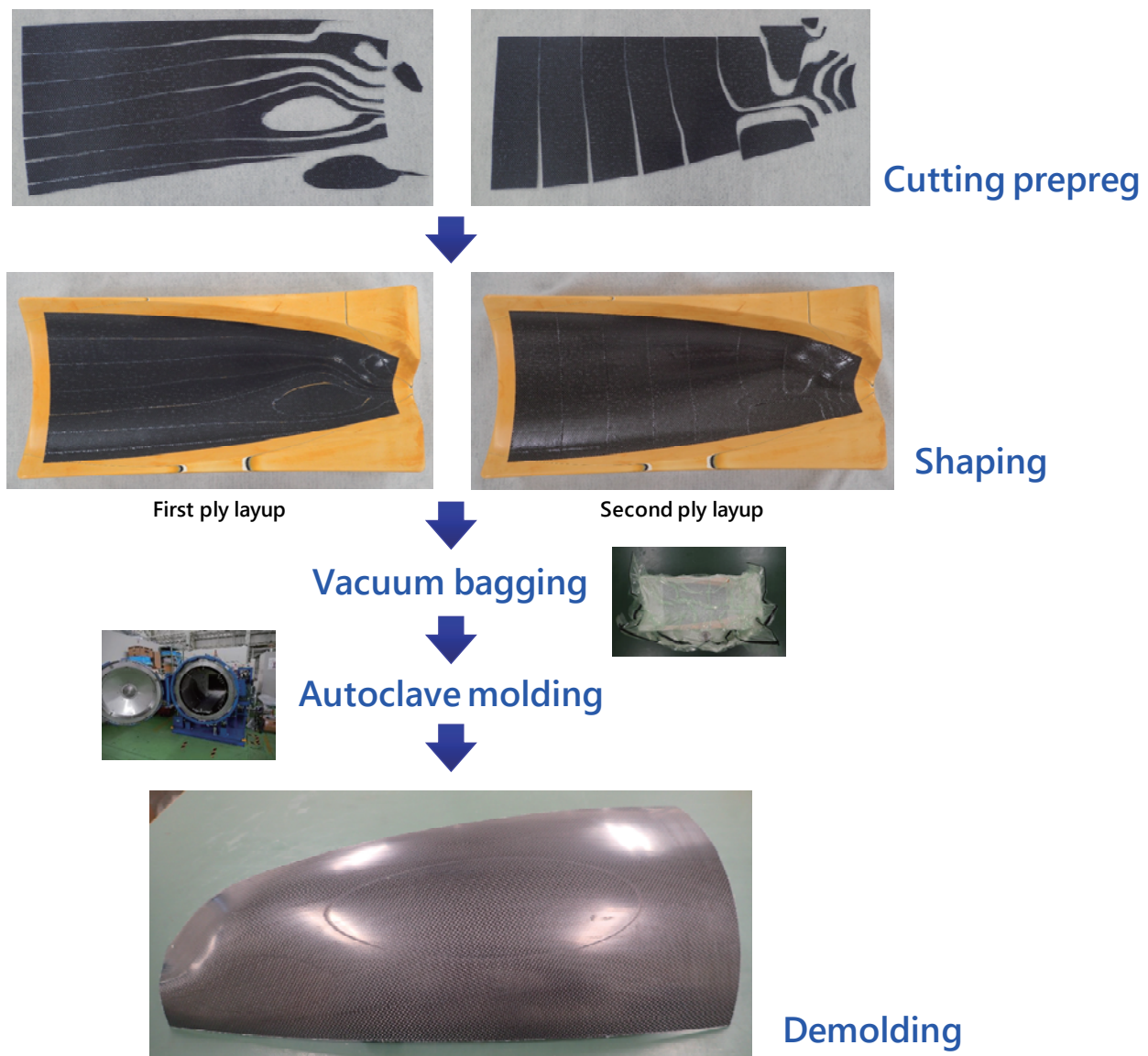


図22 成形試作の流れとその結果.

## 5. 折れ曲がり構造を有する曲面部材への曲率線展開成形の適用

航空機外板以外の主構造であるスパー、フレーム、ロンジロンといった部材の中には、曲面形状を有する部材もある。しかしながら、これらはC型、I型等の断面形状を有している。すなわち、曲面同士あるいは曲面と平面が折れ曲がり部で突き合わされた構成となるような部材であり、形状が不連続的である。このような折れ曲がり構造を有する曲面部材に対して曲率線展開成形を適用できれば、その適用範囲は飛躍的に拡大するが、その適用性について検討した例はない。そこで、本研究では折れ曲がり構造を有する曲面部材の代表として曲面フランジを有するスパーを対象部材とし、その適用性を検討した。

### 5.1. 曲面フランジを有するスパー部材への曲率線配置

本研究で検討対象とするスパーを図 23 に示す。この部材はフランジとウェブを突き合わせて構成されており、その接続部にはRのある継ぎ目部がある。詳細には図 24 に示すように、継ぎ目部は 2 方向に曲率を有する非可展面である一方、フランジ単体、ウェブ単体では曲率線展開せずとも平面展開できる可展面である。このため、継ぎ目部の平面展開が実施できれば、この部材全体を平面展開することが可能になる。

図 25 は、継ぎ目部の細い非可展面領域内に曲率線を配置したものである。先に述べた通り、曲率線は第 1 曲率線（最大主曲率方向）と第 2 曲率線（最小主曲率方向）の 2 種類が存在し、これらはそれぞれ直交する。

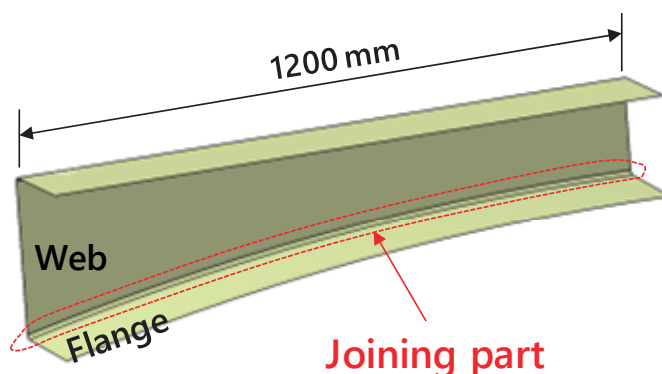


図 23 曲面フランジを有するスパー.

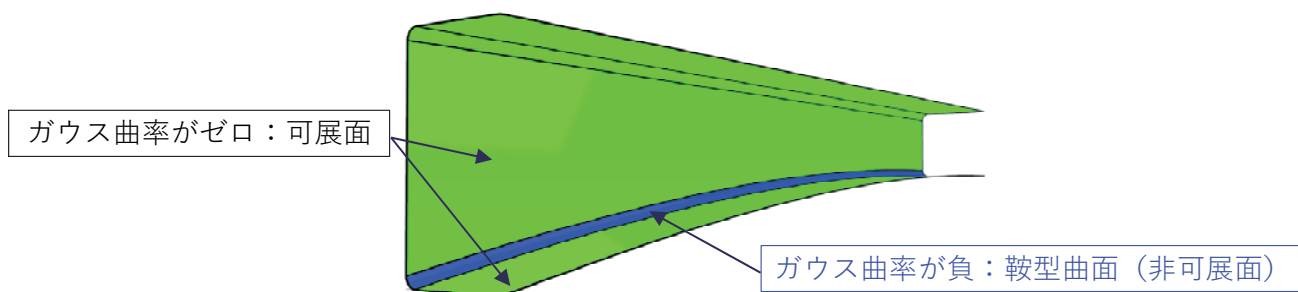


図 24 スパーに対するガウス曲率の分布.

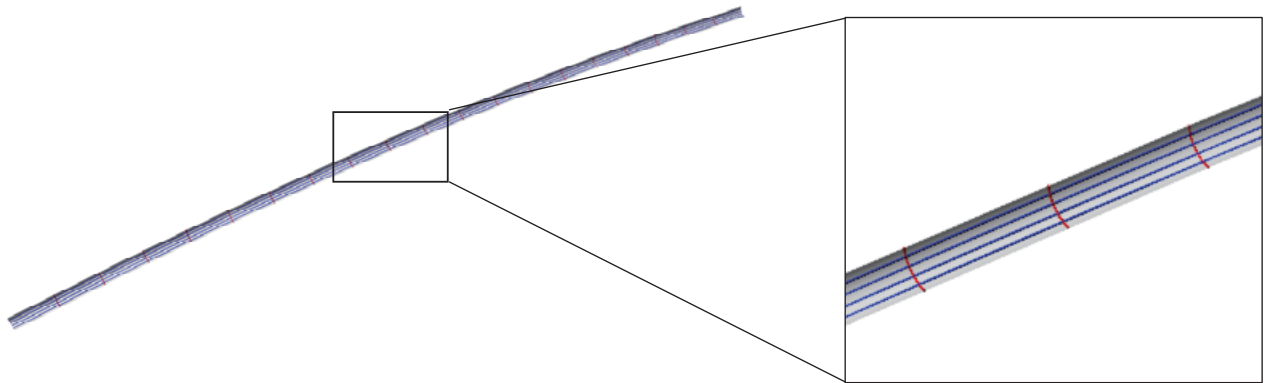


図 25 非可展面の継ぎ目部に対する曲率線の様子。

赤い線：第 1 曲率線（最大主曲率方向の曲率線），青い線：第 2 曲率線（最小主曲率方向の曲率線）。

## 5.2. 曲面フランジを有するスパー部材の曲率線展開

図 26 は，図 25 の曲率線によって継ぎ目部に対して曲率線展開<sup>3)</sup>を実施したものである．図 26 に示す通り，展開図は曲率線に沿って構成される短冊状の要素ごとに展開される．

図 27 が最終的なスパー全体の展開図となる．フランジ部およびウェブ部は可展面のため一意に展開形状が定まる．これに，図 26 で示した継ぎ目部の展開図を合わせたものが最終的な展開形状となる．

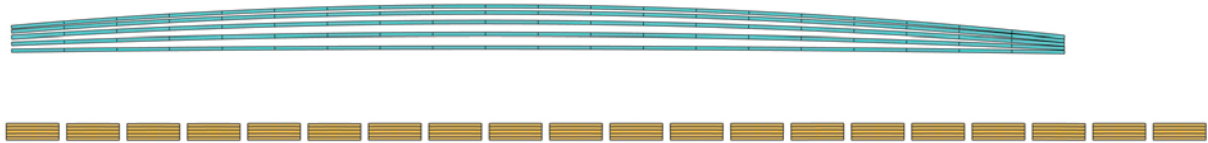


図 26 継ぎ目部に対する曲率線展開図。

上図：第 2 曲率線に沿った展開図，下図：第 1 曲率線に沿った展開図。

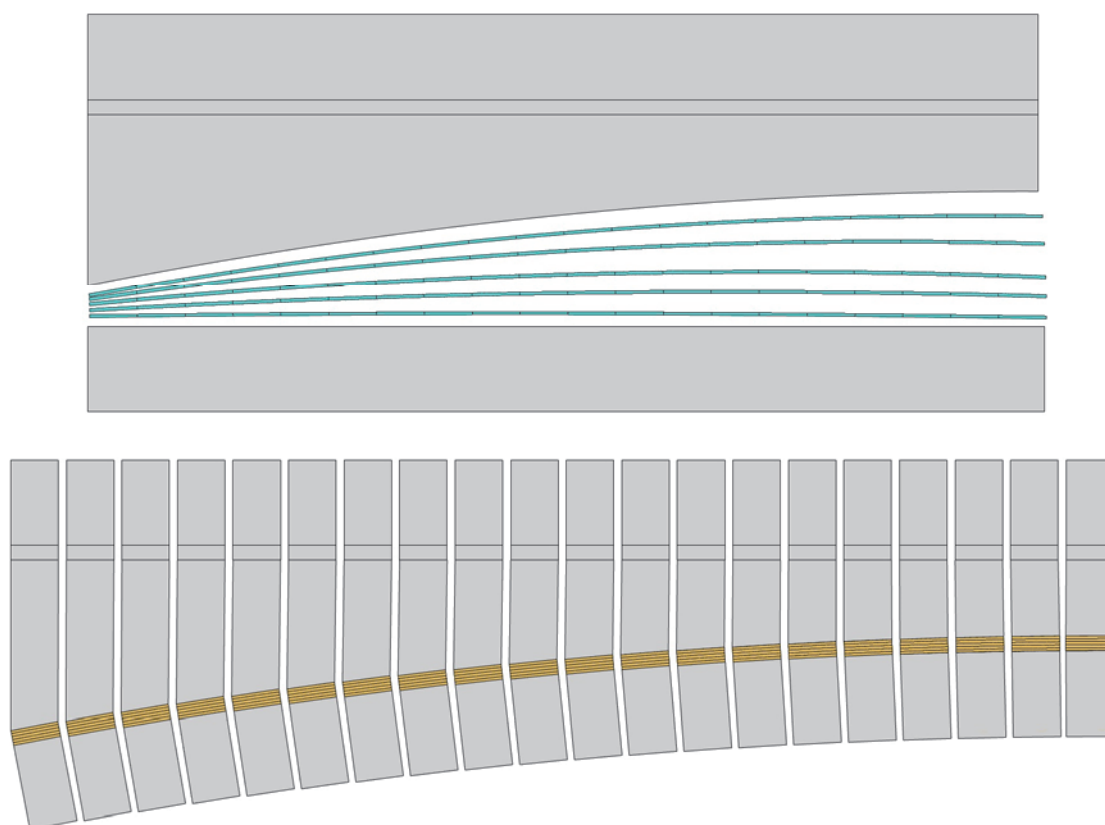


図 27 曲面フランジを有するスパーの平面展開図.

上図：第 2 曲率線に沿った展開図，下図：第 1 曲率線に沿った展開図.

### 5.3. 考察

実際の成形では、図 27 で示す展開図に従って、プリプレグを切断し、それらを成型型の正しい位置にセットする。ここでプリプレグが全く伸縮しないと仮定した場合、滑らかな復元形状を得るためには、図 27 上図の継ぎ目部の展開図（水色のパーツ）は十分に細かい（幅の狭い）短冊要素で構成される必要があり賦形は容易ではない。一方、図 27 下図は、継ぎ目部を介し、フランジとウェブが一体となった展開図となっている。こちらはある程度幅を持った展開図になっており、部材の裁断は容易である。しかしプリプレグが伸縮しないと仮定した場合、継ぎ目部は長手方向に沿って短冊枚数分の直線要素で表現されることになるため、実際には不連続な復元形状になる（図 28）。滑らかな復元形状を得るためには、図 27 に示した展開図よりも、更に細かい（幅の狭い）短冊要素で構成される必要がある。

本研究では、実際にフランジ部とウェブ部とが分離された展開図（図 27 上部）やフランジ材とウェブ材が一体化した展開図（図 27 下部）を生成することで、折れ曲がり部を有する部材に対しても曲率線展開法が適用可能であることを示した。しかしスパー形状全体に対して、非可展面となる領域は非常に小さく、スパーの非可展面のみに着目すると、対象領域内における曲率変化は単純である。領域は小さいながらも非可展面ではあるため、曲率線展開法によって高精度な平面展開図を生成することはできるものの、プリプレグもわずかながら変形させられることも考慮すれば、曲率線展開法を使わずとも、対象領域を三角形メッシュで近似するなどして簡易的な平面展開を行っても、成形自体は十分可能であると考えられる。すなわち、曲率線展開成形の適用自体は可能ではあるものの、成形品質や成形性の向上といった観点での有効性は限定的であると考えられる。

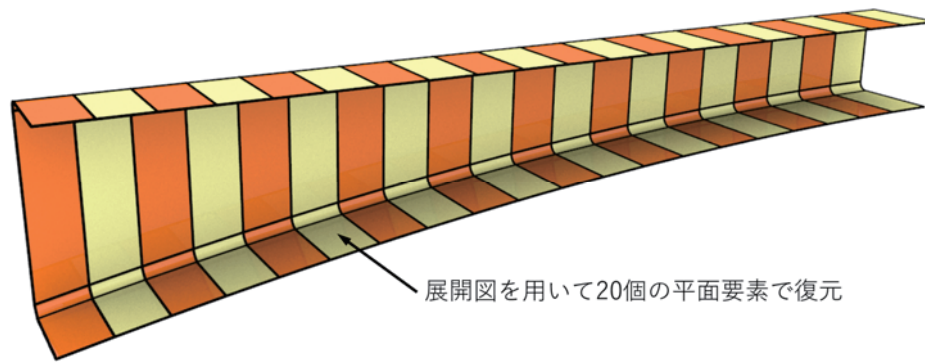


図 28 図 27 下図の展開図で復元されるスパー形状のイメージ。

## 6. 結 言

本研究では、曲率線展開法を導入することで、航空機曲面部材を平面展開し、作成された展開図から曲面部材の複合材料成形が可能かどうか検討を行った。得られた知見は次のとおりである。

曲率の大きい非可展面形状部材である自動車エンジンフードの曲率線展開図を用いて、オートクレーブ成形法による成形試作を行った。その結果、容易に賦形でき、またしわやボイドもなく高品質に成形できることを確認した。しかし、プリプレグシートでは切り込み線で繊維が切断され、繊維方向が不連続に変化するため、強度観点では好ましくない。これについては曲率線に沿って繊維束を曲線的に配置する方が望ましく、繊維配置の方法についてのさらなる検討が必要である。

JAXA による将来機体の概念設計モデルである TRA2022B の外形形状のうち、機首のウィンドシールド周辺、翼付根、胴体の水平尾翼取合部といった複雑形状を含む部位に対して曲率線配置を行った結果、特に形状が複雑な領域で曲率線も複雑に配置された。これらのうち、機首構造について曲率線展開を実施し、成形試作を行った。その結果、曲率線展開図は複雑になるものの、ウィンドシールド周辺部のような複雑な形状に対しても、曲率線展開法が適用可能であることを確認できた。また、複雑な展開図となった場合でも、オートクレーブ成形法により高品質に成形可能であることを示した。

更に、折れ曲がり構造を有する曲面部材の代表例として、曲面フランジを有するスパーについて曲率線展開成形の適用可能性を検討した。その結果、曲率線展開成形の適用は可能ではあるものの、成形品質および成形性向上の効果は限定的であることを確認した。

## 謝 辞

本研究の成形試作遂行にあたっては、東京農工大学 大学院工学府 機械システム工学専攻の浅川健司氏にご尽力をいただいた。ここに謝意を表する。



### 参考文献

- 1) 財団法人 日本小型船舶工業会, “造船現図指導書—数値現図—”, 日本財団図書館 (電子図書館), 1999.
- 2) 松尾宏平, 松岡一祥, “船舶の曲り外板製造を支援する新しい外板展開システムの開発”, 日本機械学会論文集 (C 編), 76, 771 (2010), pp. 2797–2802.
- 3) M. Takezawa, T. Imai, K. Shida and T. Maekawa, "Fabrication of Freeform Objects by Principal Strips", ACM Transactions on Graphics, Article No.: 225, pp.1-12, 2016.
- 4) K. Matsuo, M. Takezawa and A. Sakurai, “On a Concept of a 3D CAD/CAM System Based on Geometric Theory for CFRP Plates Molding”, International Conference on Computer Applications in Shipbuilding 2017 (ICCAS 2017), 2017.
- 5) 松尾宏平, 竹澤正仁, 櫻井昭男, “複合材における炭素繊維の曲率線配置に関する研究”, 第 9 回日本複合材料会議 (JCCM-9), 京都市, 2018.
- 6) 宇佐美陸, 櫻井昭男, 松尾宏平, 竹澤正仁, 鈴木健稔, 飯村峻, 澁谷忠弘, 前川卓, “曲率線展開法に基づく新たな CFRP 成形技術の開発”, 第 9 回日本複合材料会議(JCCM-9), 1A-03, 京都市, 2018.
- 7) 野村聡幸, “燃料消費削減を目指した将来旅客機概念設計”, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 (JAXA-RR), JAXA-RR-13-007 (2013), pp. 1–14.
- 8) 松尾宏平, 藤本修平, “曲率線展開システム及びプレス施工支援システム”, 海上技術安全研究所報告, 第 15 巻第 4 号 (2015), pp. 471–485.



宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-20-002

JAXA Research and Development Report

曲率線展開成形の航空機CFRP構造への適用

Application of principal strips for manufacturing of curved aircraft CFRP structures

---

発 行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1  
URL: <http://www.jaxa.jp/>

発 行 日 2020年12月2日  
電 子 出 版 制 作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。  
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

---

