

# High-Cycle RTMプロセスの開発

## Development of High-Cycle RTM Process

田淵喜瑛\*  神山成一\*  嶋田翔太\*  宮城光治\*  
Yoshiaki Tabuchi  Seiichi Koyama  Shota Shimada  Mitsuharu Miyagi

FRP 部品の品質は、材料や成形プロセス上の多くのパラメータが影響するため、確実な品質を実現できる管理を行いながら、かつ量産に対応するタクトタイムで成形を行うことができる技術が求められている。当社ではさまざまな部品の形状に対応する High-Cycle RTM の自動化技術開発に取り組んできた。本稿では、当社の自動化プラントでの運転事例を基に、複雑な形状のプリフォーム製造に対応する賦形技術と成形モード (HP-RTM, Gap-RTM, Wet Compression Molding) の特性について報告する。

The quality of FRP parts is affected by many parameters in terms of the materials and molding process. Therefore, it is necessary to have a production technology for molding at a production speed suitable for mass production while ensuring high quality. We have been working on the development of automation technology for a High-Cycle RTM process applicable to various component shapes. This paper describes preforming technology for complex shapes and the characteristics of High-Pressure RTM, Gap RTM, and Wet Compression Molding modes based on the case of our automated plant.

### 1 はじめに

航空機・風力発電・自動車・土木・建築業界など各種産業界からの軽量化ニーズは、益々高まっており、繊維強化樹脂複合材料 (以下 FRP) を構造部品に適用する検討が進んでいる<sup>1), 2)</sup>。FRP 部品は、適用する用途や仕様、生産数量などを考慮して材料やプロセスについての検討を行うことが重要である。自動車や土木・建築市場などで必要とされる大量生産用途には、材料の搬送装置や自動成形機を用いることなく、安定した品質を確保することは困難である。最適な組合せは一つではなく、各成形技術の長所・短所を正しく理解することが前提となる。また試作・実証を通じて、管理するパラメータの種類やレンジについての検証を行っていくことが重要である。

当社では、品質の安定性を確保しながらも成形サイクルの大幅な短縮を実現する High Cycle Resin Transfer Molding (以下 HC-RTM) 自動化プロセスと制御技術の開発に取り組んできた。従来は適用が困難であった複雑な形状に対応する賦形 (以下プリフォーム) 技術や、部品形状に応じた含浸 (成形) 制御モードなどである。

本稿では、当社コンポジットセンターに設置している HC-RTM 自動化設備を用いてプリフォームの自動化工程および各種の成形制御モードについて報告する。

### 2 HC-RTMプロセスの概要

#### 2.1 従来の RTM

成形工程は、主に裁断、積層、プリフォーム、樹脂の注入・含浸・硬化の 4 工程から構成されている。型紙を

用いて裁断した織物基材を金型に手作業で 1 枚ずつ貼り合わせてプリフォーム体を製作した後に、繊維の配向が乱れないように樹脂を穏やかに注入する。従来の RTM も比較的少量生産性の高い成形方法として知られているが、金型の占有時間は 2 ~ 3 h を要していた<sup>3)</sup>。

#### 2.2 HC-RTM

構成する基本工程は従来の RTM と同じであるが、本稿で記載する開発プロセスでは、約 3 ~ 5 min のサイクルタイムにて成形を完了させることを基本構想としている。HC-RTM のシステム構成図を図 1、当社センター内の実証設備を図 2 および 3 に示す。各工程は自動化技術を適用することにより、工程内での品質管理機能を高めている。全数の非破壊検査を不要としながら、ハイタクトな生産性を実現することができる。

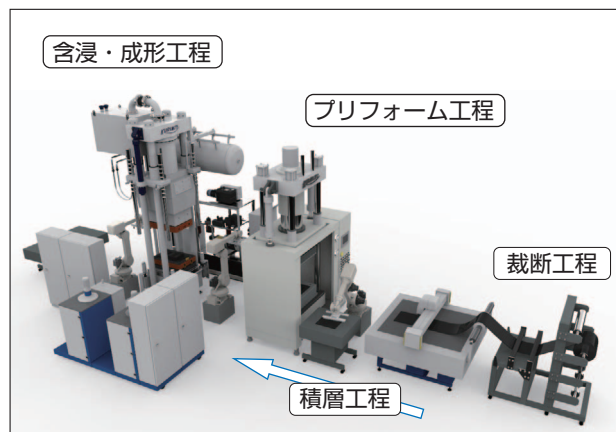


図1 HC-RTMシステム構成図

\*コンポジットプロジェクト室 コンポジットセンター 技術部

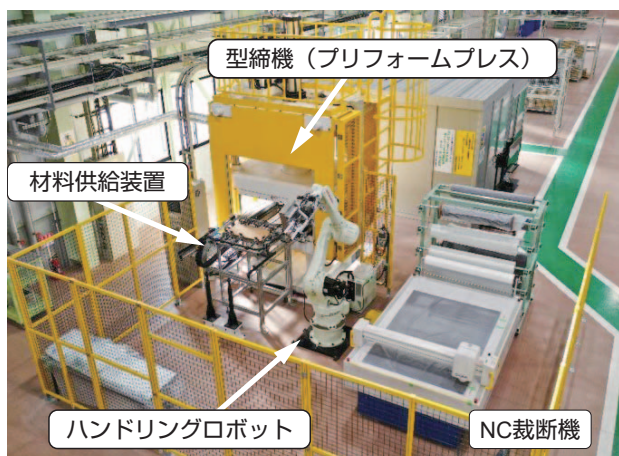


図2 プリフォーム試作装置

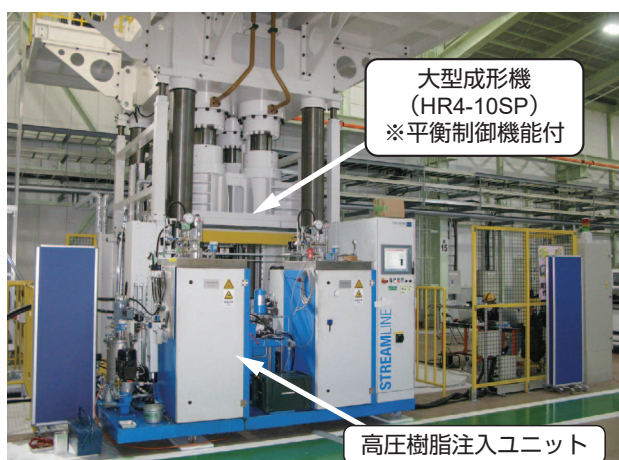


図3 HC-RTM成形装置（大型成形ライン）

### 2.2.1 材料の裁断工程

製品の展開形状（二次元形状）になるようにネスティングプログラムの作成を行う。織物基材の繊維配向を乱すことがないように、切断刃の種類や裁断速度を設定して自動で裁断を行う。

### 2.2.2 積層工程・プリフォーム工程

平面状の積層体を製作したのちに、1回のプレスモーションにて三次元形状のプリフォームを製作することができる。ここでは、積層体のハンドリングを高めるためのタック処理を含んでいる。複雑な三次元形状のプリフォームを効率よく製作する場合には、積層材料の任意の位置に適切な張力を付与しながら、徐々に形状をつくる逐次加圧技術を用いる。

裁断した織物基材は、計画された繊維配向設計に従ってロボットを用いて積み重ねられる。この積層操作時には、織物材料のタック性を高めるために樹脂の塗布を部分的に行うこともできる。部品形状に応じてタック処理を実施する位置を調整することにより、後工程で問題となるタック処理による賦形性の阻害や樹脂含浸工程における繊維の乱れに対する問題を解消することができる。プリフォームの製造は形状をつくるだけでなく、次工程の高速含浸工程と併せて条件を設定していくことが重要である。

### 2.2.3 樹脂の注入・含浸・硬化工程

本工程は、製作したプリフォームに樹脂を注入し、繊維フィラメントの隅々まで樹脂を高速で含浸させながら、液体状の樹脂を硬化させて部品として仕上げる工程である。含浸・硬化工程は、従来のプロセスにおいて最も時間を所要している工程であった。HC-RTMでは、1～3 min で含浸・硬化工程で含浸・硬化工程を終了することができるが、下記の原理に基づき設備を構成している。

#### 1) 含浸理論

樹脂のプリフォームへの含浸速度は(1)式に示すDarcy 則によって表現することができる<sup>3)</sup>。

$$u = \frac{K}{\mu} \Delta P \quad (1)$$

$P$ ：樹脂注入圧力

$\mu$ ：粘性係数

$K$ ：含浸係数

$K$ は積層材料および構成により定まる特有のパラメータであり、実験などにより取得することができる。(1)式より高速含浸操作には、含浸圧力と樹脂の粘性係数の管理が重要な因子であることがわかる。

#### 2) 高速含浸技術

含浸・成形工程の装置は高圧樹脂供給ユニット、混合ヘッド、油圧プレス、真空ポンプから構成される。

温度管理された主剤および硬化剤は各々、高圧ポンプを経由して混合ヘッドに供給される。混合ヘッドには、セルフクリーニングピストンが装備されており、注入指令によりピストンが上昇すると、主剤と硬化剤がヘッド内の混合室内に導かれる。この時に発生する2液の衝突エネルギーを利用して混合操作を行う。混合された樹脂は金型内に圧送され、プリフォーム体への樹脂の含浸操作が行われる。HC-RTMでは、タクトタイムを短縮するために含浸と硬化は同時平衡で実施するが、硬化反応による増粘と繊維の乱れには密接な関係がある。含浸操作は、樹脂混合物の粘性係数が約 200 mPa・s 以下の領域で完了することを目安として諸条件の調整を行っている。樹脂注入量の制御は、金型内の圧力もしくは設定注入量のいずれかを選択することで管理している。樹脂の粘性係数の管理制御と高圧操作により大幅な成形時間の短縮が可能となり、約 3～5 min で成形物を得ることができる。

#### 3) 含浸圧力（成形モード）

過剰な含浸圧力や樹脂の型内流速の付与は、繊維の直進性の阻害および設備の大型化（金型の耐圧設計や必要型締め力）を招く。当社コンポジットセンターでは、高速含浸操作に必要な圧力を高圧ポンプと油圧プレスで付与しているが、その負担率は任意に変更することができる。大別して以下の3つの制御プロセスを開発して搭載しており、部品の形状に応じた成形操作の検証を行うことができる。表1および図4に各成形モードの特長を示す。

表1 成形モード別の特長

成形モード	特長	含浸圧力	混合ヘッドの装着	概要
High-Pressure RTM (HP-RTM)	複雑な製品形状に対して良好な樹脂の含浸状態を得ることができる。	高压ポンプ	金型	金型を完全に締め切った後に金型内を減圧して、規定量の樹脂を注入する。
Gap-RTM	金型内圧のピーク値を低減することができる。金型および成形機のダウンサイジング設計が可能。複雑な形状への対応性はHP-RTMより低くなる。	高压ポンプ + プレス圧コンピネーション	金型	金型パッキンを利用して、金型上部に微小な隙間を得た状態で樹脂を注入する。(プレ含浸)。注入完了後に金型を締め切り、プレス圧を利用して含浸を完了させる。
Wet Compression Molding (WCM)	金型内の減圧操作時間などを削減できる。ハイタクトかつ設備のダウンサイジング設計が可能。	プレス圧	ロボット	金型は完全に開いた状態で、樹脂の塗布操作を行う。規定量の塗布が終了すると、金型を締め切り、プレス圧を利用した含浸操作を行う。

WCM: Wet Compression Molding

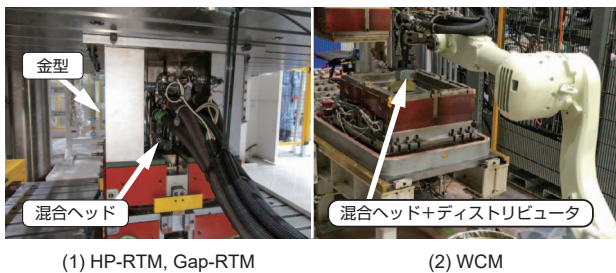


図4 成形モード別の実施状況

### 3 実証事例

実証事例を基にプリフォーム自動化技術および各種成形モードの特徴について記載する。

#### 3.1 プリフォームの自動化

##### 3.1.1 モデル形状

実証に用いるモデルパーツとしては、CFRP 製ルーピラーを選択した。製品形状および材料構成を図5に示す。アッパーシェルとローシェルから構成される中空断面形状で設計を行った。ローシェルには、サイドフレームへの組立を考慮して、金属インサート成形の適用を行っている。

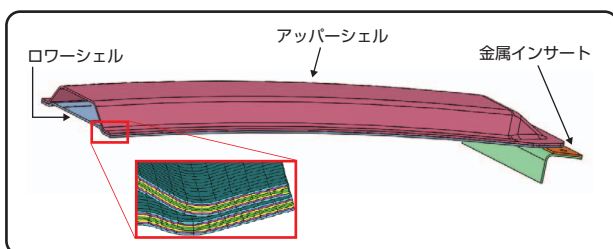


図5 モデルパーツ構成図

表2 材料構成

積層No	繊維配向 [deg]	計面层厚 [mm]	基材目付 [g/m <sup>2</sup> ]
1	0	0.3	312
2	+45	0.3	304
	-45		
3	90	0.3	312
4	-45	0.3	304
	+45		
5	0	0.3	312

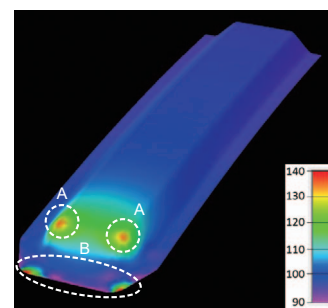
#### 3.2 複雑形状への自動化技術の適応

材料となる織物基材には、賦形が可能な限界変形角度が存在している。限界変形角度を超過するとシワの発生や繊維の破断が発生する。製品形状に織物基材を安定して追従させる(ドレープ性)ための設備的機能要件についての実証事例を示す。

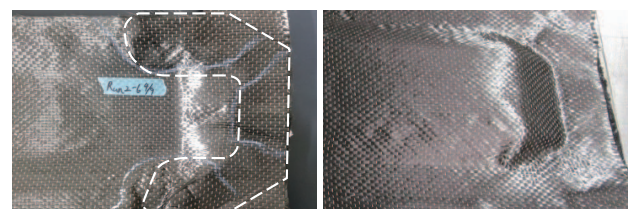
図6(1)に、本研究で使用したモデルパーツの2D展開シミュレーション結果を示す。カラーマップが100%を超えると、繊維材料は引張側に、100%を下回ると収縮側に作用する。図中のA、B部分に欠陥が発生し易いことがわかる。

図6(2)にプリフォームの製造方法の違いによって得られた賦形状態を示す。

CaseAは、分割構造のプリフォーム金型に積層材料を投入して加圧したケースであり、材料の付加する張力は制御していない。展開シミュレーション計算によって収縮側に作用する領域で多くのシワが確認された。従来のRTMでは熟練技能者によってシワを伸ばしながらプリフォームの製造を行うことも可能であるが、技能者のスキルに依存することは、検査工程が複雑になることに繋がる。



(1) 3D→2D展開シミュレーション



CaseA: 1段加圧

CaseB: 張力付与+逐次加圧

(2) プリフォームの賦形状態

図6 プリフォーム方案と賦形精度

CaseBは、織物基材に適正な張力を与えながら、徐々に形状をつくる逐次加圧制御を実施した状態である。最初に圧縮側に作用する部位を拘束した後に、他部位の加圧賦形を行っている。CaseAで発生したシワなどは確認されず、再現性のある結果が得られた。技能者のスキルに依存することなく、複雑な形状のプリフォームを製作できることが確認された。張力や材料温度を含めた設備側の操作パラメータの管理により、同工程内の品質を担保することができる。

### 3.3 成形モードの比較

含浸圧力の起源となる機械の負担率が相違するHP-RTMモード、Gap-RTMモード、WCMモードを用いた実験結果について示す。

#### 1) 硬化時の保圧状態と成形品質

図7にGap-RTMモードを用いて、硬化時の金型内の圧力保持の状態が成形物に及ぼす影響を示している。最終の保持圧力を3MPaと0.4MPaで比較を行っており、保圧状態の調整は金型内のシールを調整することによって実施している。

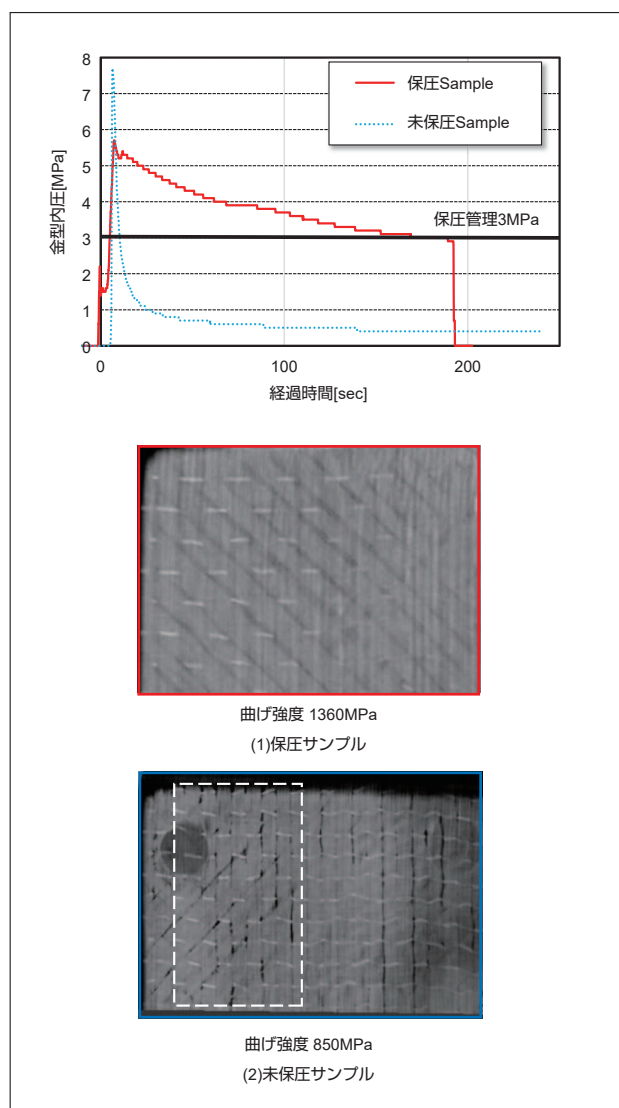


図7 硬化時の保圧の影響

注入終了後に金型内の圧力は、シール構造に関係なく硬化収縮現象によって一旦減少する。その後シールの状況によってリークする樹脂量が増えるため保持できる金型内の圧力も変化する。

各サンプルのX線CT画像から、保持圧力によって成形物の内部に形成されるボイドの状態が大きく変化することが確認された。ボイドの発生状態は、成形物の機械的性質にも大きく影響している。硬化終了時まで3MPaを維持したサンプルは、平均曲げ強度が1360MPaであるのに対して、圧力が保持できないサンプルは850MPaまで低下する結果であった。注入量や注入時間、樹脂温度の自動管理に加えて、金型内の圧力挙動をモニタリングすることで、成形時の異常を迅速に判別することができる。

なお、樹脂温度の管理理由として温度に対して粘性係数が影響するためである。

#### 2) 成形モードと金型内圧力挙動

図8に各成形モードによる金型内の圧力挙動を示す。各モードで金型内の圧力上昇に関する挙動が大きく相違することがわかる。高压ポンプによって含浸圧力を付与するHP-RTMモードでは、金型内の圧力に関する瞬時オーバーシュート値は最も高く、ピーク値に合わせた金型設計やプレス型締め力の設定が必要となる。一方で油圧プレスによる鉛直圧力により含浸圧力を付与するWCMモードでは、金型内圧力のオーバーシュートは発生しておらず、金型設計剛性値やプレス加圧力のダウンサイジング設計が可能であり経済的な合理性は高まる。

一方で部品形状への対応を考えると、高压ポンプを利用したHP-RTMモードでは全方向に含浸圧力を付与できるため複雑な形状部品にも容易に対応を行うことができる。WCMモードではプレスによる鉛直力が主体となるため斜壁部位が多い部品形状に対応する場合には制約が発生する。樹脂の塗布パターンに対する設定自由度が重要となる。

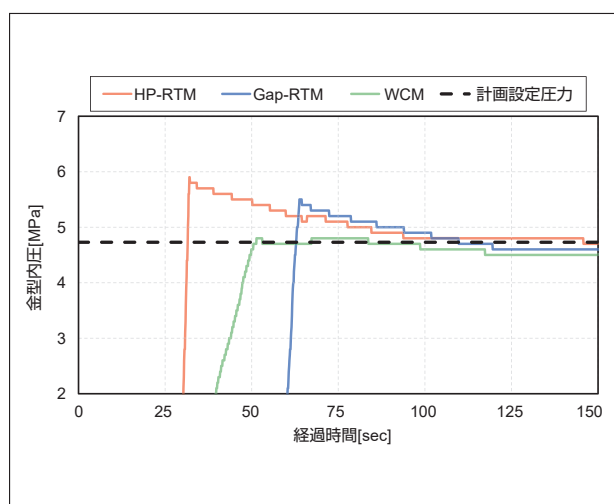


図8 成形モードとピーク圧力

### 3) 成形モードと機械特性

図9に成形モード別に得られた成形物の0 deg 方向の曲げ特性を示す。ここでの比較は繊維体積含有率 (Vf) =49 %,0/90 積層の平板を用いている。WCM モードは HP-RTM モードと比較して、やや曲げ強度は低下しているが、理論計画値の約 85 %の強度を得られることが確認された。

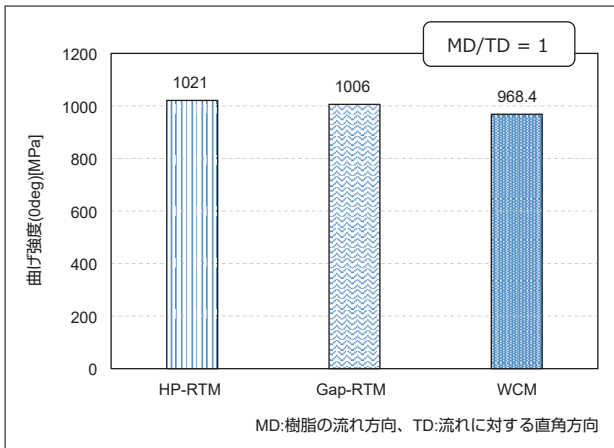


図9 成形モード別曲げ強度の比較

## 4 おわりに

当社コンジットセンターには、プリフォームを含めて、一連の HC-RTM の自動化テストプラントが設置されており、製品に応じて必要な成形モードやプロセス管理パラメータを検証しながら、試作開発を進めることができる。これらの設備・技術を活用し、最適なソリューションを提供していくことを目指す。

### 参考文献：

- 1) 石堀 豊、永尾陽典:Va-RTM成形技術の課題と展望、日本航空宇宙学会誌、57, 668, (2009), pp262-270
- 2) T. Kamae et al: Advanced-VaRTM system for Aircraft Structures Material Technologies, Proceedings of the ICCM-I7, (2009)
- 3) P. Rosenberg et al: Investigating cavity pressure behavior in high-pressure RTM process variants, AIP Conf. Proc, 1553, pp463-466, (2014)

### 執筆者：

**田淵喜瑛**  
2015年入社  
複合材料のプロセス開発に従事



**神山成一**  
2016年入社  
複合材料のプロセス開発に従事



**嶋田翔太**  
2018年入社  
複合材料製造設備の制御開発に従事



**宮城光治**  
1990年入社  
ダクタイル鉄管の製造および複合材料の製造技術開発に従事

