研究論文

ポラス型を用いた VaRTM 複合材成形

横関 智弘^{*1}, 小林やよい^{*1}, 青木 隆平^{*1}, 吉田大志郎^{*2}, 平田 拓也^{*2}

(2012 年 5 月 16 日受付)

VaRTM Process of Composites Using Porous Mold

Tomohiro YOKOZEKI,^{*1} Yayoi KOBAYASHI,^{*1} Takahira AOKI,^{*1}
Daishiro YOSHIDA^{*2} and Takuya HIRATA^{*2}

(Received May 16, 2012)

Abstract: This paper introduces Porous Mold Process (PMP) as a reliable low-cost manufacturing process of fiber-reinforced composites. PMP using porous aluminum is applied to the vacuum-assisted resin transfer molding (VaRTM) process of carbon fiber reinforced plastics (CFRP). Experimental evaluation on resin infusion behavior and quality and mechanical properties of the cured plates is performed with varying the dimensions of the plates. The results show that quality and mechanical properties of the cured plates using PMP are satisfactory, stable, and almost independent of plate dimensions. It is concluded that PMP provides a reliable and knowhow-less resin infusion process of composite materials.

Key words: Composite manufacturing, VaRTM, Porous mold, Mechanical properties

1. 緒 言

民間航空機をはじめとして、炭素繊維複合材料 (CFRP) などの複合材料が強度・剛性が要求される主要構造へ本格的に適用されはじめてきている。CFRP 構造の多用が進むと共に、その製造コストの低減や製造性の向上、開発期間の短縮なども要求される。そのため、高品質な複合材部材を安定的に、且つ、低コストで成形可能な高付加価値のある成形技術に関する研究開発が求められている。

高品質で安定性のある複合材部材を製造する方法として、プリプレグをオートクレーブにて成形する手法が航空機分野をはじめとして標準的であるが、近年、低コスト化を目指した「脱オートクレーブ」成形に関する研究が盛んである^{1,2)}。CFRP 構造の代表的な低コスト成形法として、ドライプリフォームを所定の形状に配置し、真空や圧力をかけて樹脂を含浸させ硬化・成形する、樹脂含浸成形 (resin transfer molding, RTM) あるいは真空樹脂含浸成形 (vacuum assisted resin transfer mold-

ing, VaRTM) などが挙げられる¹⁾。複雑な構造でも一体で成形でき、部品点数の削減につながる点、成形型や設備に対する負担が比較的小さいため、多種品生産に向いている点などがメリットとして挙げられる。一方で、平面的に長大構造の多い航空機等の大型構造の製造時には、樹脂粘度の低減、樹脂供給や真空部の多点化により、樹脂含浸の促進や未含浸領域の低減が図られるが、品質の安定性や品質向上が大きな課題である。また、用いる素材や副資材の種類、樹脂供給部と真空部の位置関係、樹脂供給時間などにより品質が大きく影響し^{3~5)}、製造する上で試行錯誤が求められ、製造性の向上や成形品質の安定性などの課題が多くあるのが現状である。

高品質の安定した VaRTM 成形法として、VAP (vacuum assist process) 成形が提案されている^{6,7)}。基材と真空バッグシートの上に気体は透過するが樹脂は通さない膜を用いて VaRTM 成形を行うもので、高品質成形が可能とされ、航空機部材製造に用いられている。しかしながら、副資材や工程の増大を招き、また、複雑形状部品等への適用にも課題がある。

著者らは、複合材成形で使用する型に、形状保持と脱気機能を担う多孔質型を用いる、ポラス型プロセス (porous mold process, PMP) を提案し、低コスト成形

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 (113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

^{*2} 北斗株式会社

Fig. 1 VaRTM process using porous mold.

の代表格である VaRTM 成形に適用して、成形性の実証を行った⁸⁾。Fig. 1 に、VaRTM 成形に適用した場合のポーラス型プロセスを示す。型として必要な剛性を有しつつ、脱気可能なポーラスアルミ等を型に適用すること(型の多機能化)で、真空引きが可能な型面となる。樹脂は通過せず気体のみが透過可能な型面が得られることで、残留気泡の低減などの品質向上、品質の安定性、副資材の低減、工程低減による低コスト化や成形プロセスのノウハウレス化による開発期間の短縮を狙った手法である。

本論文では、通常の VaRTM 成形では、成形品サイズにより最適な含浸プロセスや成形板の品質が変化しやすいことを鑑み、ポーラス型プロセスを適用した場合に、同一の成形手順で VaRTM 成形を行い、成形板の厚みやサイズによる品質や特性への影響を実験的に調査する。含浸中の厚み変化測定や繊維含有率・ボイド率評価、成形板の力学的特性評価を通じて、ポーラス型プロセスの有効性(高信頼性、安定性、ノウハウレス化など)を検証する。

2. ポーラス型を用いた VaRTM 成形実験

ポーラス型を VaRTM 成形に適用する際、型として必要な加工性や剛性を持ちつつ、気体のみが透過するものを使用する必要がある。そこで、本研究では、通気性を有するポーラスアルミ METAPOR[®](材質: アルミニウム, 孔径: 平均 12 μm , 密度: 1.9 g/cm³, 気孔率: 16%) を型として用いた。ポーラスアルミの厚みは約 10 mm であり、連続開気孔型のポーラス素材である。Fig. 2 にポーラスアルミ表面の拡大写真を示す。

一方で、型の再利用性を確保するためには、ポーラスアルミ内への樹脂の目詰まりを防ぐ、もしくは樹脂が多少詰まっても再利用性に影響のないようにする必要がある。型内への樹脂含浸に関する簡易解析結果から、通常の VaRTM 成形で使用される樹脂の場合、ナノオーダーサイズの多孔質素材であることが必要であると推察され

Fig. 2 Microscopic image of porous aluminum.

Fig. 3 Overview during the resin infusion.

た⁸⁾。そのため、VaRTM 成形に適用する場合、ポーラス型上に樹脂をブロックするためのナノポーラスフィルムを置くことでポーラスアルミへの樹脂詰まりを防ぐこととした。

繊維基材として、炭素繊維平織材 T700SC-12K (480 g/m²)、樹脂としてはインフュージョン成形用エポキシ樹脂 XNR6815 (ナガセケムテックス製、硬化剤は XNH6815) を用いた。ピールプライ、フローメディアと共に繊維基材を積層し、中央部に樹脂供給用のチューブを配置し、真空バッグで覆い、型面側を真空引きすることで樹脂を含浸させ、常温にて硬化させた。Fig. 3 に樹脂含浸時の状況を示す。樹脂含浸を開始後は特段の作業は不要であり、硬化まで待つというプロセスをとった。

成形板サイズの影響を調査するため、各種サイズの CFRP 成形を行った。繊維基材サイズは主に 300 mm ×

300 mm とし、4 枚～24 枚の繊維基材を積層させた（成形後の板厚は約 2.2 mm～約 13 mm）。また、450 mm×450 mm サイズの 6 枚積層した板も別途成形した。樹脂含浸法は厚みや基材サイズによって変わらず、上述のように硬化まで待機する形で実施した。尚、一部の含浸実験中に、樹脂含浸時の板厚変化を計測する目的で、複数位置でのレーザー変位計による板厚変化計測を実施した。

本手法の特長を以下に述べる。従来 VaRTM 成形では、完全に樹脂含浸を終えるまで、樹脂が真空ポートへ流入しながら時間を待ち、真空ポート側を閉じるタイミングを検討する必要や、部材形状によっては真空ポートの位置や数を検討する必要もある。一方で、本手法は、真空は型全面から引いており、真空側からの樹脂流出はないため、真空側の操作や真空ポートの検討は不要である。したがって、樹脂含浸を開始後は特段の作業は不要で、硬化まで待つだけというプロセスをとることができる。また、本手法では、真空ポート側の副資材が不要であるため、その分の副資材の低減や工程低減が達成されているといえる。尚、今回の VaRTM 成形では、ナノポラスフィルムを使用しているため、この分の副資材や工程は増えるが、プリプレグ等で使用される粘度が比較的高い樹脂の場合など、樹脂ブロックフィルムが不要となる場合もあるため、副資材や工程は低減の方向に改善されていると考えられる。

3. 評価試験および結果

3.1 樹脂含浸時の挙動

300 mm×300 mm サイズの板の樹脂含浸時に、樹脂注入口から 50 mm および 100 mm 離れた 2 箇所の厚み変化の樹脂注入開始からの時刻歴変化の一例（6 枚積層の場合）を Fig. 4 に示す。尚、フローメディアや繊維基材の性質のためか、Fig. 3 のように表面から観察される樹脂含浸挙動に異方性が観察された。樹脂含浸による厚み変化は、樹脂が到達した時点で、わずかに厚み減少を生じ、その後は含浸するにつれ厚みがほぼ単調に増大する。6 層積層の場合は約 20 分以降はほとんど厚み変化はなくなっており、位置によるばらつきも小さいといえる。

Fig. 5 に、300 mm×300 mm 板の場合の、基材積層数と厚み変化の収束値（硬化前で十分時間が経過した時の値）をプロットしたものを示す。積層数に対し、厚み変化の収束値はほぼ線形に変化しており、積層数に比例した樹脂量が含浸されていることが確認できる。尚、フローメディア等を含んだ厚み変化であるため、Fig. 5 は原点を通らない直線状になっていることを付記する。

Fig. 4 Thickness variation as a function of time of a 300×300 specimen consisting of 6 ply fabrics.

Fig. 5 Steady-state thickness variation as a function of ply number.

以上から、ポラス型を用いた VaRTM では、樹脂含浸中の厚み変化計測から判断すると、樹脂含浸挙動は比較的単純であり、ある一定時間以降は厚み変化も生じない。また、場所による厚み変化のばらつきも少なく、積層数に依存せず、同程度の樹脂含浸が行えていることがわかった。通常の VaRTM プロセスでは、樹脂注入口や真空側の出口を閉じるタイミング等により厚み変化も複雑に変化し、場所による厚みも不均一になりやすい^{9,10)}。今回の実験条件では、採用したポラス型 VaRTM の樹脂含浸に対する簡易性、安定性を確認できたといえる。

3.2 成形板の品質評価

まず、各成形板の代表的な位置において短冊状にサン

(a) Fiber volume fraction

(b) Void content

Fig. 6 Effect of ply number on the quality of CFRP specimens.

プルを切り出し、X線CTにより、試験片断面のCT写真を多数取得した。本成形手法により成形したCFRPはいずれも、内部には目立ったボイドは観察されず、切断面の顕微鏡写真からもボイドは確認できなかったことから、良好な品質の成形品が得られたと判断できる。

次に、硬化後のCFRP板の品質評価のため、燃焼法による繊維含有率およびボイド率評価を実施した。硬化後の板から、代表位置における小型サンプルを切り出し、JIS K7075に従って、燃焼法により燃焼前後の質量を計測した。別途取得した密度データを用い、繊維含有率およびボイド率を算出した。

300 mm×300 mmサイズの板厚の異なる成形板について、繊維含有率およびボイド率を評価した結果をFig. 6に示す。概ね積層数によらず同等の繊維含有率であることがわかる。また、ボイド率も全て十分低い値で厚み

(a) Flexural modulus

(b) Flexural strength

Fig. 7 Mechanical properties of CFRP specimens.

によらず同等であることが確認できた。

450 mm×450 mmサイズの板（6枚積層）についても評価を行った結果、繊維含有率は約54%、ボイド率は約1.5%であった。したがって、300 mm×300 mm板と同等の品質であると考えられる。

今回成形したCFRP板の硬化後の板厚は、4枚積層で約2.2 mm、12枚積層で約6.5 mm、24枚積層で約13 mmであり、枚数にほぼ比例した成形後厚みとなっており、樹脂含浸時の厚み変化の収束値の結果や、繊維含有率が厚みにほぼ依存しない結果とも一致した傾向が得られている。成形板の厚みやサイズに依存せず、ほぼ同等の品質のCFRP板が得られたものと考えられる。

3.3 成形板の力学的特性評価

力学的特性評価については、JIS K7074に従って、3点曲げ試験により評価を行った。厚みの異なる試験片の特性評価を行うため、規格に従って試験片長さや支点間距離を決定し、試験片を成形板から切り出した。Instron

5582 試験機を用い、厚みに応じた支点間距離およびクロスヘッド速度にて荷重負荷を行い、曲げ剛性および曲げ強度を取得した。尚、24 枚積層のサンプル（厚み約 13 mm）については十分な試験片長さを取れなかったため、規格外ではあったが、支点間距離を 250 mm として試験を実施した。

300 mm×300 mm サイズの成形板について、得られた曲げ剛性および曲げ強度を比較したものを Fig. 7 に示す。曲げ剛性は厚みに依存せず、平均では 45~48 GPa であった。曲げ強度については、24 枚積層品以外は厚みに依らず、平均で 650~700 MPa を示していた。24 枚積層層の場合は、十分な支点間距離が取れなかったことが、低めの強度結果となった可能性が高い。以上から、今回成形した CFRP 板は、概ね厚みに依存せず、同じ曲げ特性を有していると判断できる。

450 mm×450 mm サイズの 6 枚積層の成形板については、平均の曲げ剛性は 46 GPa、曲げ強度は 682 MPa であった。このことから、今回成形した CFRP 板は、平面的なサイズにも依存せず、同等の力学的特性を有していることが確認された。

尚、同じ繊維と樹脂を用いて、従来 VaRTM 成形法（著者らが試みた中で最適と思われるプロセス）により成形した CFRP の曲げ強度は平均で 638 MPa であった¹¹⁾。このことから、ポーラス型を用いた VaRTM 成形により成形した CFRP は従来法と比較して同等以上の特性であり、品質も安定していることがわかる。

4. 結 言

本研究では、ポーラス型を用いた VaRTM を紹介し、成形板の厚みやサイズによる品質や特性の影響を実験的に調査した。

繊維基材の積層枚数を 4 枚~24 枚まで変えた、厚みを変化させた場合に、ポーラス型 VaRTM 成形を実施し、樹脂含浸中の厚み変化計測や、硬化した板の品質および曲げ特性評価を実施した。樹脂含浸中の厚み変化計測結果から、樹脂含浸挙動は比較的単純であり、場所による厚み変化のばらつきも少なく、積層数に依存せず、同程度の樹脂含浸が行えていることがわかった。また、成形板には目立ったボイドは観察されず、繊維含有率やボイ

ド率も厚みによらずほぼ同等の値であった。さらに、曲げ特性についても、厚みに依存せず、同等の特性を有していることを確認した。平面的なサイズを変化させた板の成形試験も行い、繊維含有率等の評価を実施した結果、板の平面サイズを変化させても、繊維含有率やボイド率は同等であり、曲げ特性も同じ特性を有していることが確認できた。

本研究で採用しているポーラス型プロセスによる VaRTM 成形は、樹脂含浸を開始後は硬化まで待つのみという意味で簡易なノウハウレスプロセスである。本研究結果から、得られた成形体の品質や力学的特性は、安定的に高い品質・特性であり、成形体の場所、サイズ、厚みに依存しないことが確認できた。CFRP の低コスト成形に対して、品質の向上、品質安定性、成形のノウハウレス化を達成できる手法が確立できたといえる。

本研究の一部は、金型技術振興財団の助成を受けて行われた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 岩堀 豊：日本複合材料学会誌, **37** (2011), 79-92.
- 2) 青木雄一郎：日本複合材料学会誌, **37** (2011), 159-163.
- 3) S.T. Lundstrom & B.K. Gebart : *Polymer Compos.*, **15** (1994), 25-32.
- 4) 松野下明弘, 宇田暢秀, 小野幸生, 永 安忠, 平川裕一, 永尾陽典：第 52 回構造強度に関する講演会講演集 (2010), pp. 149-151.
- 5) V.R. Kedari, B.I. Farah & K.-T. Hsiao : *J. Compos. Mater.*, **45** (2011), 2727-2742.
- 6) W. Li, J. Krehl, J.W. Gillespie, Jr. & D. Heider : *J. Compos. Mater.*, **38** (2004), 1803-1814.
- 7) P. Simacek, D. Heider, J.W. Gillespie Jr. & S. Advani : *Composites Part A*, **40** (2009), 913-924.
- 8) 横関智弘, 杉浦 綾, 小林やよい, 平田拓也, 吉田大志郎, 清海成明, 石橋 勝, 青木隆平：第 53 回構造強度に関する講演会講演集 (2011), pp. 85-87.
- 9) B. Yenilmez, M. Senan & E.M. Sozer : *Compos. Sci. Technol.*, **69** (2009), 1710-1719.
- 10) J. Yang, J. Xiao, J. Zeng, D. Jiang & C. Peng : *Appl. Compos. Mater.*, **19** (2012), 443-458.
- 11) 横関智弘, 小林やよい, 杉浦 綾, 平田拓也, 吉田大志郎, 清海成明, 石橋 勝, 青木隆平：第 36 回複合材料シンポジウム講演要旨集 (2011), pp. 189-190.