

CFRP RTM 成形におけるギャップ金型技術の開発

Development of Gap Mold Technology for RTM of CFRP Parts

菅 野 大 行*

Hiroyuki KANNO

高 塚 隆 行*

Takayuki TAKATSUKA

清 本 弘*

Hiroshi KIYOMOTO

安 斎 正 広*

Masahiro ANZAI

西 野 文 悟*

Bungo NISHINO

松 本 恒 平*

Kohei MATSUMOTO

梶 浦 陽 平*

Yohei KAJIURA

要 旨

CFRP RTM 成形における金型内の圧力低減手法であるギャップ RTM 成形を、位置制御機能を持たない通常油圧プレス設備で実現できる金型構造を開発した。真空工程から樹脂注入工程において金型に必要な一定のギャップ量を保持するためにガススプリングを用いた。また、真空工程時の負圧と樹脂充填時の正圧の双方に対応できる専用シール形状を開発した。以上の技術を適用した金型を用いてギャップ RTM 成形をおこなった結果、大型部品であるロアダッシュボードにおいても金型内の圧力低減を実現するとともに、良好な成形品を得ることができた。

ABSTRACT

A mold structure making it possible to conduct gap resin transfer molding (RTM), a method that reduces the internal pressure of the mold during molding of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) parts, using standard hydraulic pressing equipment with no position control function has been developed. Gas springs have been employed in order to maintain the necessary fixed gap in the mold from the vacuum process to the resin injection process. In addition, a specialized seal shape able to withstand both the negative pressure produced during the vacuum process and the positive pressure produced during the resin filling process was also developed. The results of gap RTM using a mold applying these technologies demonstrated that they made it possible to both realize reduced internal mold pressure and produce a good quality molded part even in the case of a large part (a lower dashboard).

1. はじめに

近年の環境問題に対する取り組みとして自動車の低燃費化が課題となっている。燃費向上手法のひとつとして自動車の軽量化が検討されており、その実現手段として軽量で高強度な素材である炭素繊維複合材料 Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) の適用が挙げられる。しかし、CFRP 部品は材料費だけでなく、成形サイクルが数十分から数時間と長いことによる製造コストも高い。そのため、レース車両や航空機などの高価であっても軽量化が求められる少量生産部品に限られており、自動車部品に適用するには安価に大量供給が可能な製造手法が必要である⁽¹⁾。その手法のひとつとして、連続的に成形でき形状自由度も高い Resin transfer molding (RTM) 成形手法が期待されている。

RTM 成形工程の概要を [Fig. 1(a)] に示す^{(1), (2)}。はじめに金型内にあらかじめ賦形したシート状の繊維をセットし、樹脂含浸の促進とエアボイドの発生を抑えるために金型内を真空引きする。次に金型内に液体樹脂を注入し繊維への含浸をおこない、加熱硬化させた後に製品を取り出す。この RTM 成形を安価にする手段としてハイサイクル化があり、そのひとつに成形工程の樹脂注入の高速化がある。しかし、金型を閉じた状態で樹脂を高速注入すると金型内圧力が高くなるため、高圧樹脂注入が可能な専用設備が必要となる⁽³⁾。また、部品の大型化にともない注入圧がより高圧になるため、プレスに必要な荷重も高くなる。このように、注入設備やプレス設備に求められる能力から設備費用が高くなり、ハイサイクル化の費用効果が得られにくくなる。

そこで、型内圧を低減する手法としてギャップ RTM 成

*四輪 R&D センター

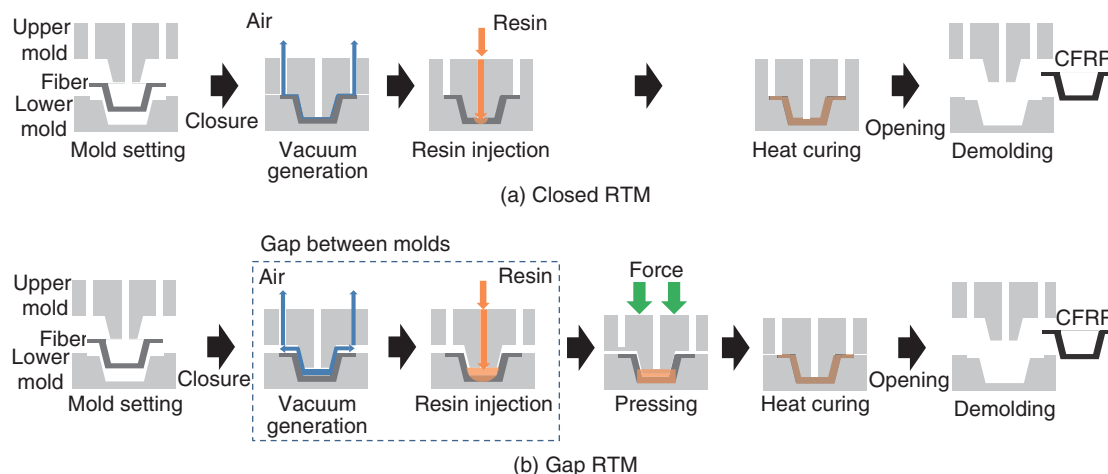


Fig. 1 RTM process

形が提案されている^{(4), (5)} [Fig. 1(b)]. ギャップ RTM 成形は、上下金型間にギャップをもたせて樹脂を注入し、その後の型締め工程で樹脂を含浸させ金型全体に充填させる。この手法では高速樹脂注入をおこなっても型内圧が上がらないため、大型部品でも RTM 成形のハイサイクル化が可能である。しかしながら、この手法はギャップ量の制御が必要であるため、サーボプレスなどの位置制御可能な高価な設備が必要となる。そこで通常の樹脂成形で用いる油圧プレス設備でギャップ RTM 成形が可能であれば、設備費用が低減できると考えた。

本稿では、ギャップ RTM 成形による型内圧低減を通常の設備で実現する金型技術について報告する。

2. 製法の考え方

通常 RTM 成形では予備賦形したシート状の繊維をセットした金型内に樹脂注入をおこなう。この時、繊維は樹脂流動の抵抗になる。流路となりうる空間をつくり出すことで抵抗緩和に繋がり、金型内の圧力低減になる。この考え方をを用いて、樹脂の注入時間短縮を実現したのがギャップ RTM である。

樹脂流速と圧力の関係は、粘性流体が一定管径の円筒管内を流れる場合には Hagen-Poiseuille law により式 (1) のように示される。

$$Q = (\pi a^4) / 8 \times \Delta P / \mu l \quad (1)$$

Q : 流量, a : 管半径, ΔP : 圧力勾配, μ : 流体粘度, l : 管長

成形時間の短縮をねらい、単位時間あたりの注入流量 Q を増やすと、式 (2) からわかるように圧力勾配 ΔP は増加する。

$$\Delta P / l = Q \times \mu \times 8 / \pi a^4 \quad (2)$$

圧力勾配は粘度 μ に比例し、管半径 a の 4 乗に反比例する。ギャップ RTM 成形は上下金型間のギャップにより流動断面積が広げられるため、時間当たりの注入量を増加することができる。これにより型内圧の低減と注入時間の削減が可能となる。

RTM 成形では樹脂含浸検討について式 (3) に示す Darcy's law が適用されることがほとんどである。

$$Q = \frac{-kA}{\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (3)$$

Q : 流量, k : パーミアビリティ, A : 断面積, ΔP : 圧力勾配, μ : 流体粘度, L : 流動距離

ギャップ部分は論理的には繊維密度がゼロとなり、もともこの Darcy's law の運用にはなじまないことがあるが、Navier-Stokes Equation を併用する研究⁽⁶⁾などの結果から考察すると、Darcy's law で用いられるギャップ部分でのパーミアビリティの値は Darcy's law から考えられる繊維部分の値と比べ 1/100 ないし 1/1000 になると考えられる。

一方で、型内真空工程では真空圧に金型投影面積を乗じた力が金型を閉じる方向に発生し、ギャップ量が減少する傾向を有する。ここでは油圧プレス機の位置制御機能、金型剛性などがギャップ精度の要因として関与するので、設備上も高コスト化を招きやすい。そこで、本開発ではスプリングの反力を用いた金型構造を検討する。

なお、目標要件としては任意のギャップ量を真空工程に必要な 120 秒間保持できることとした。

また、RTM 成形用金型では真空工程時の負圧と樹脂充填時の正圧とに耐えられる二つの性能をもったシールが必要となる。通常の RTM 成形では真空圧、樹脂圧ともに型締めで押し潰した際に性能を発揮するシール構造で対応が可能である [Fig. 2(a)]。一方、ギャップ RTM 成形では金型にギャップがある状態でも、ない状態でもシール性能を満

足させるために、通常はシェアエッジのシール構造を用いる⁽⁷⁾[Fig. 2(b)]. シェアエッジ構造は金型のギャップ量にかかわらずシール性能を発揮するが、シール性能を保证するために高い金型精度が必要である。また、シールを設定する位置が金型外周部に限られるため、金型サイズが大きくなる。

本開発では、通常の RTM 成形用金型と同じシール溝構造でギャップ RTM 成形できるシール形状を検討した。目標要件は真空工程と樹脂注入後の型締め工程の二つにわけて設定した。真空工程ではギャップ量 5 mm、型内真空 5 kPa 以下を 120 秒間保持できることとした。ここでのギャップ量は賦形したシート状の繊維のスプリングバックを考慮し設定した。また、型締め工程では樹脂圧 8 MPa を 120 秒間保持できることとした。樹脂圧は想定する部品サイズとプレス設備能力から算出した上限値であり、保持時間は型締め工程に必要な時間である。

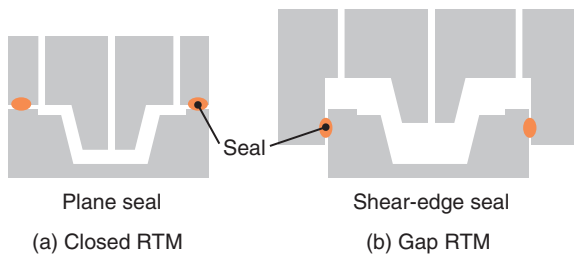


Fig. 2 Difference in seals for closed RTM and gap RTM

3. 真空工程におけるギャップの安定化実験

3.1. 実験構成

ギャップ RTM 成形プロセスにおけるギャップ量と成形のイメージを Fig. 3 に示す。スプリングには、真空工程では金型を閉じようとする力に抵抗してギャップ量を一定に保持し、型締め工程ではプレス設備からの荷重により、ギャップ量を 0 mm までストロークすることが求められる。

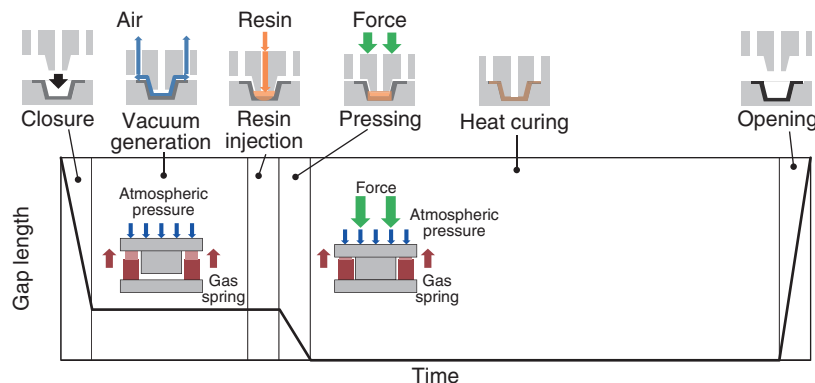


Fig. 3 Gap RTM cycle

そこで、スプリングにはガススプリングを採用した。ガススプリングは中に封入するガスの量を調整することにより、ストロークがはじまる初期荷重を自由に設定できる。金型内にこのガススプリングを複数個設置し、それらの初期荷重の和を金型の閉じようとする力以上に設定することでギャップ量を一定に保持できる。また、サイズがコンパクトであるにもかかわらず高荷重を発揮するため、スペースに限りのある金型への設置に適している。

なお、本実験では金型の荷重 - ストローク線図を Fig. 4 のように設定した。

3.2. 実験結果

ガススプリングによるギャップ保持性能を実際の RTM 成形金型を用いて検証した。プレス設備は位置制御機能を持たない油圧プレス設備を使用し、ギャップ量 5 mm から型内真空引きをおこないギャップの変化量を測定した。結果を Fig. 5 に示す。ガススプリングを設置しない場合ギャップ量は徐々に小さくなり、真空工程が 120 秒経過した後では 1 mm 以下となり、その後 40 秒ほどで金型は完全に閉じてしまった。このように、一般的な油圧プレス設備ではギャップ量を保持できないことがわかった。これに対して、ガススプリングを設置した場合は 5 mm のギャップ量を 120 秒以降も保持しており、ガススプリングのギャップ保持性能が示された。

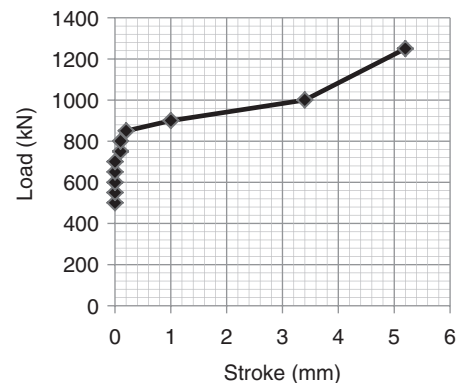


Fig. 4 Relationship between load and stroke for gas spring

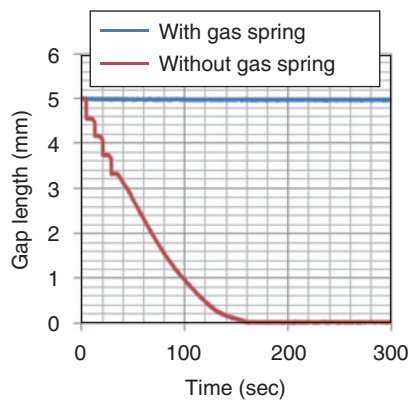


Fig. 5 Relationship between gap length and time during vacuum generation process

4. シール構造の提案と実験結果

4.1. 実験構成

通常の RTM 成形用金型のシール溝形状でギャップ RTM 成形を可能とするシール形状のコンセプトを Fig. 6 に示す。通常の RTM 成形用のシール形状 (i) は 5 mm ギャップ時には金型と接しない。この中実シールをギャップ分だけ伸ばしたシール形状 (ii) では、型締めした時にシールが溝へ収まりきらない。そこで、ギャップが 5 mm ある状態でも上下の金型と接触し、かつ型締め工程で荷重を受けつつ徐々に変形し最終的には溝内に収まることをねらい、o-ring の設計^{(8), (9)}を参考に中空シール形状 (iii) を考案した。シールの材質は樹脂の離型性や耐熱性からシリコンゴムとし、硬度はギャップ量が増える際の変形性を考慮して、JIS 規格の o-ring に求められる硬度⁽¹⁰⁾の範囲内で低く設定した。

検討したシール断面形状 (a) から (c) を Fig. 7 に示す。シール形状 (a) は頭頂部が荷重を受け、両脇の肉厚部が左右に膨らみすぎるのを防止することをねらい、頭頂部に向けて細く尖った形状とした。シール形状 (b) は、潰した時にねらった位置で折れるよう形状に変曲点を設けた。シー

		Gap 5 mm	Gap 0 mm
Solid shape	(i) Short type (for RTM)		
	(ii) Long type		
(iii) Hollow shape			

Fig. 6 Seal shape

ル形状 (c) は、(a)、(b) とは異なった考え方で、真空保持性をねらった上部リングと、溝への設置性および上部リングの収まり性をもたせた下部の角リングとを繋げた形状とした。また、潰した時により大きな反発力が発生するように、上部リングが下部リングに押し込まれた際に断面積が密になるように設計した。

4.2. 実験結果

5 mm ギャップ時と 0 mm ギャップ時のシールの潰れ方を Fig. 8 に示す。5 mm ギャップ時のシールはいずれも中空部の変形のみで、シール自体は圧縮されていない状態である。この状態でもすべてのシール形状において型内真空 5 kPa 以下を保持した。次に、型締め時の性能を比較する。シール形状 (a) は、変形時に中空部が内側に潰れず、溝外部に広がるため、金型を完全に閉じることができない。シール形状 (b)、(c) は、溝に収まり金型を完全に閉じることができた。次に樹脂圧保持性能の結果を (Fig. 9) に示す。シー

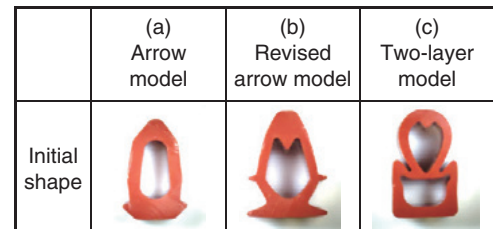


Fig. 7 Hollow seal shape

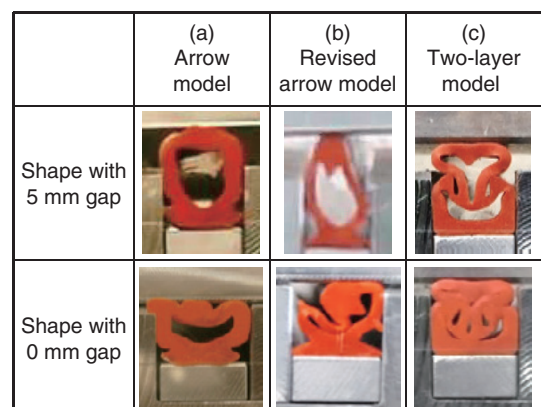


Fig. 8 Comparison of modified seal shapes

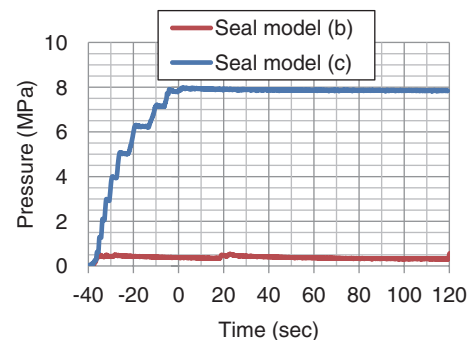


Fig. 9 Results of resin pressure test

ル形状 (b) は樹脂圧に耐えられず樹脂漏れが発生し、シール形状 (c) は目標である樹脂圧 8 MPa を 120 秒保持した。

シール形状 (b), (c) において、金型ギャップ量を 7 mm から 0 mm へと変化させた際のシールの溝内充填率と、シールと金型との接触面圧の関係を示す (Fig. 10)。溝内充填率はシール溝の断面積とシールの断面積とから算出し、接触面圧は感圧紙を用いて測定した。シール形状 (b) はギャップ量 0 mm となっても溝内充填率が 70% 程度であり、樹脂圧に耐えられなかった。対して、シール形状 (c) は溝内充填率が 90% 近くになり、シール反力により樹脂圧を保持できた。よって溝内に収まり充填率が高く面圧を保証できる上下二層構造を持つシール形状 (c) が、適正な断面形状であると判断した。

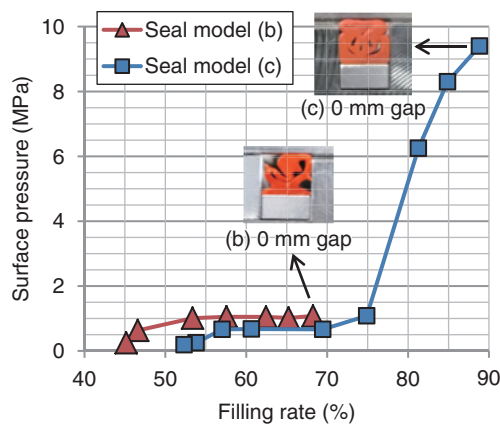


Fig. 10 Filling rate and surface pressure on seal contact area measured using pressure-sensitive paper

5. 成形実験

5.1. 金型基本構造

本研究によるギャップ保持技術とシール技術を既存の RTM 成形用金型に適用し (Fig. 11)、位置制御機能を持たない油圧プレス設備を用いてギャップ RTM 成形をおこなった。部品形状はロアダッシュボードで、金型サイズは 1.8 m × 1.2 m であり、型内圧測定用に圧力センサを 6 箇所設置した [Fig. 11(i)-(vi)]。また、ギャップ RTM 成形において樹脂注入と型締めとの二つの工程でどのように樹脂が充填するか把握するため、型内に温度センサを 24 箇所設置した (Fig. 12)。

5.2. 実験結果

ギャップ RTM 成形時のギャップ量変化を測定した (Fig. 13)。真空工程から樹脂注入工程まではギャップ量 5 mm を保持し、その後の型締め工程では金型が閉じきっていることがわかる。設定したガススプリングはギャップ量制御に対してねらい通りに機能することが示された。

さらに真空工程において、金型に設置した真空計が型内真空 5 kPa 以下を達成していることを確認した。また、Fig. 14 に示すように成形後の金型シール溝周辺部では、シール溝の外側に樹脂が漏れた様子はない。以上のことから、開発したシールは大型サイズの高金型でも真空圧および樹脂圧に対して機能することが示された。

成形時の樹脂温度と金型温度が異なることを利用して、温度センサの反応から各工程での樹脂の充填を確認した。

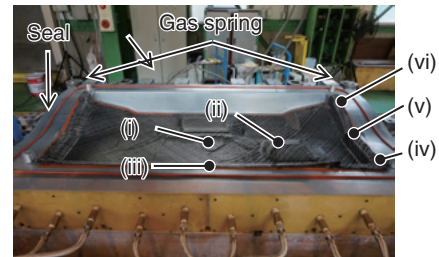


Fig. 11 Mold structure for gap RTM with gas spring, seal, and pressure sensor positions

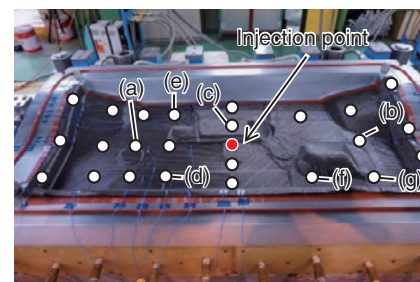


Fig. 12 Thermocouple measurement positions

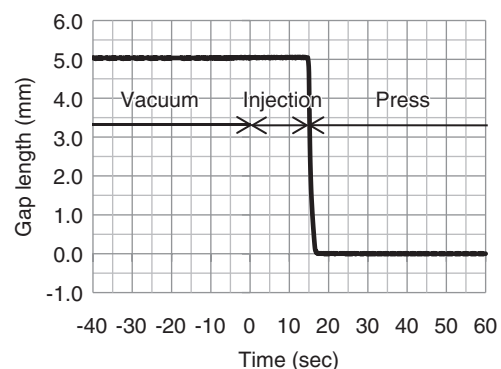


Fig. 13 Gap length in gap RTM process



Fig. 14 Result for gap RTM mold after shot

代表箇所 [Fig. 12(a)-(g)] の温度変化を Fig. 15 に示す。樹脂注入工程では、おおむね注入点に近い箇所からセンサが反応している。樹脂注入完了後も注入点から遠い箇所のセンサ (g) は反応せず、樹脂が到達していないことがわかる。その後の型締め工程ではすべてのセンサが反応し、型全体に樹脂が充填していることが示された。以上の結果から、各工程での樹脂の充填領域を推定した [Fig. 16(a)]。

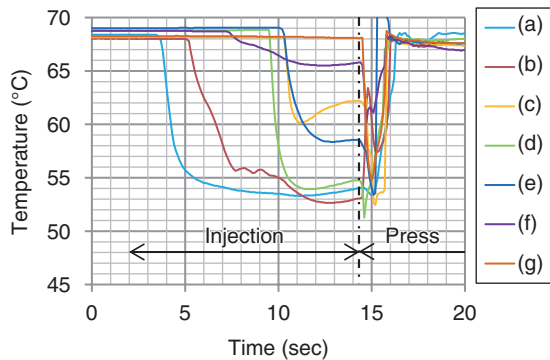


Fig. 15 Results for thermocouple temperature change

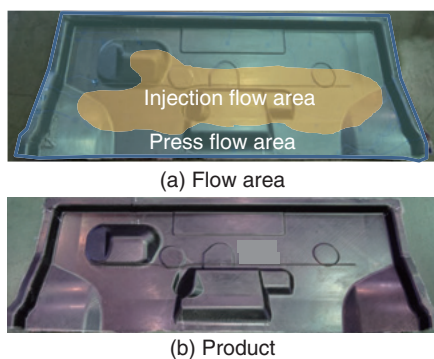


Fig. 16 Lower dashboard produced using gap RTM

Table 1 Comparison of test measurements and theoretical calculations using Darcy's law

	Measured pressure	Calculated pressure	Flow rate	Permeability	Cross-sectional area
Ratio with/without gap	146	100	3	100	3

成形品の外観を [Fig. 16(b)] に示す。異なる充填工程での外観上の差は見られず、未含浸部のない良好な成形がおこなえた。

同じ金型を用いた場合のギャップ RTM 成形と通常の RTM 成形との型内圧変化を Fig. 17 に示す。通常の RTM 成形では、樹脂注入速度が 80 g/sec で最大圧が 7 MPa を超えた。対して、ギャップ RTM 成形では 3 倍の注入速度である 240 g/sec でも注入工程での圧力上昇は見られなかった。その後の型締め工程で発生する最大圧も 3.5 MPa と通常の RTM 成形時の半分程度であり、樹脂充填に要した時間も半分以下であった。

Table 1 に Darcy's law による机上計算と本実験の比較を示す。ギャップ RTM 成形の垂直含浸プロセスはプレス機で決定されるので、本検討には含めず樹脂注入工程のみとする。ギャップ RTM 成形と RTM 成形における、それぞれのパラメータの比率を示し、繊維部分と空間のパーミアビリティの比率は 100 とした。流体粘度および流動距離は同じ値とした。実験値と計算値の比較は良好な結果を得ている。

高速樹脂注入でも型内圧を低減でき、CFRP 部品のハイサイクル成形手法として成立しうることを確認した。

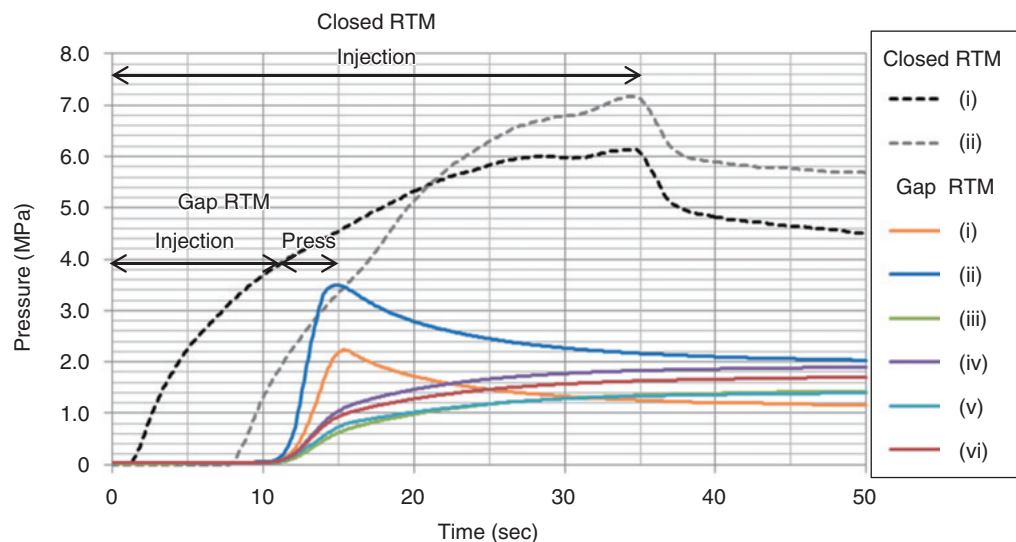


Fig. 17 Pressure profiles for closed RTM process (injection rate: 80 g/sec) and gap RTM process (injection rate: 240 g/sec)

6. まとめ

ギャップ RTM 成形を、位置制御機能を持たない通常油圧プレス設備で成形できる金型構造を開発した。

- (1) ガススプリングを金型に設置することにより、通常油圧プレス設備で真空工程の 120 秒間ギャップ量を一定に保持できた。
- (2) 専用シール形状を開発することにより、通常の RTM 成形用金型でギャップ RTM 成形を可能にした。ギャップ時の型内真空 5 kPa と、樹脂充填時の樹脂圧 8 MPa の双方を目標時間の 120 秒間保持できた。

参考文献

- (1) Brady, M., Brady, P.: Technology developments in automotive composites, Reinforced Plastics, Vol. 54, Issue 6, p. 25-29, (2010)
- (2) Young, W., Tseng, C.: Study on the Pre-Heated Temperatures and Injection Pressures of the RTM Process, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 13, p. 467-482, (1994)
- (3) Fais, C.: Lightweight automotive design with HP-RTM, Reinforced Plastics, Vol. 55, Issue 5, p. 29-31, (2011)
- (4) Simacek, P., Advani, S., Iobst, S.: Modeling Flow in Compression Resin Transfer Molding for Manufacturing of Complex Lightweight High-Performance Automotive Parts, Journal of Composite Materials, Vol. 42, p. 2523-2545, (2008)
- (5) JP, 2005-271551, A
- (6) Kobayashi, M., Dan, K., Baba, T., Yamakawa, K., Nakano, R.: VISUALIZATION EXPERIMENT AND NUMERICAL SIMULATION OF LIQUID IMPREGNATION WITH RACE-TRACKING FOR RTM PROCESS, 17th European Conference on Composite Materials (ECCM17), (2016)
- (7) Chang, C., Hourng, L., Chou, T.: Effect of Process Variables on the Quality of Compression Resin Transfer Molding, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 25, p. 1027-1037, (2006)
- (8) NOK 株式会社:B-g. O リングの設計基準, テクニカルノート, p. 130
- (9) JIS B 2401-2: 2012, O リングー第 2 部:ハウジングの形状・寸法
- (10) JIS B 2410: 2005, O リングーゴム材料の選定指針

■著 者■



菅野 大行



清本 弘



西野 文悟



梶浦 陽平



高塚 隆行



安斎 正広



松本 恒平