開織された強化繊維束の樹脂含浸挙動†

川 邊 和 正* 松 尾 達 樹** 前 川 善 一 郎***

The Impregnation Behavior of Matrix Resin into the Opened Reinforcing Fiber Tows

by

Kazumasa KAWABE*, Tatsuki MATSUO** and Zen-ichiro MAEKAWA***

The technology for opening tow was applied to the opening of reinforcing fiber tow for thermoplastic composites. The effect of its opening on the impregnation behaviors of matrix resin was investigated in comparison with those for unopened tow through experiments and theoretical calculations. On-line measurement of void volume change during compression molding for carbon fiber/nylon 6 composite was carried out. Microscopic observation on the cross-section of parts fabricated at several molding time and measurement of transverse bending strength of these parts were also conducted. Based on the theoretical model presented previously, the void volume changes for several molding conditions were simulated under a certain assumptive void pressure-change. All these results show consistently that the tow opening makes the impregnation of matrix resin into the reinforcing fiber much easier.

Key words: Opening, Opened tow, Carbon fiber, Impregnation, Thermoplastic composites

1 緒 言

諸強化繊維束を開織させる方法について、繊維束をある一定の大きさに撓ませた状態にし、これに一樣な空気流を連続的に作用させるという空気開織法¹⁾を提案した。さらに一般の強化繊維束にも適用性を広げる目的で、本空気開織法の工程とその前段階としてロール開織工程を設けた併用方式を開発した。この方式を諸強化繊維束に適用した結果、従来にはない非常に優れた開織効果が得られることが判明した。²⁾

本報では、繊維束内への含浸が困難な熱可塑性樹脂による複合材料について、この含浸挙動に対する繊維束の開織効果について検討した。まず未開織および開織した繊維束とマトリックスとなる熱可塑性樹脂のフィルムを重ね合わせたものから一軸繊維強化複合材料を得るための圧縮成形加工を行った。この成形時の含浸挙動を、圧縮中の金型の時間的変位の測定を通して把握することを試みた。また繊維束への樹脂の含浸状態を成形途中で採取した成形品断面の顕微鏡観察によって確認し、さらに樹脂の含浸状態が力学的物性に与える影響を成形品の90度方向曲げ試験によって調べた。これらの実験結果と含浸理論³⁾から得られる数値計算結果とを比較しながら繊維束への含浸挙動を解析し、かつ樹脂の含浸に対する開織の効果を検討した。

2 実 験

2・1 試料

繊維束は下記の無撚炭素繊維束を使用した。

- ・TORAYCA T700SC-50C-12K (東レ(株)製造)
幅 6.1mm, 厚み 0.09mm

この繊維束を開織処理しない場合(未開織繊維束と表記する)と、本併用開織方法によって幅 16mm, 厚み 0.05mm に開織処理した場合(開織繊維束と表記する)の2つの状態のものをそれぞれ複合材料の強化繊維束として使用した。なお幅、厚みとも自然に放置した状態の繊維束について測定したものである。

マトリックス樹脂には下記のナイロン6を使用した。

- ・2軸延伸フィルム(ユニチカ(株)製造)
厚み 25 ミクロン

2・2 成形方法

上記繊維束を一軸に配向させた熱可塑性複合材料を成形する。

成形方法は一種のフィルムスタッキング法であり、Fig. 1 に示すように繊維束を一軸に配列した層とフィルムによる層とを交互に積み重ね、加熱加圧成形によって複合材料を得る方法である。

本成形方法では1つの繊維束の上下に樹脂フィルムが存在することから加熱により繊維束間には熔融マトリックスで満たされ、加圧によりマトリックス樹脂に圧力が働くと繊維束周りから繊維束中にマトリックス樹脂が含浸する系となっていると想定される。このとき含浸加圧系では繊維束は圧縮され圧密化する。もし繊維束内に大きな隙間があればその部分には上部の繊維が入り込み、繊維束内の断面状態ではどの部分も繊維が接近し合った、ほぼ同程度のばらけ度合いになると考えられる。よって本成形方法での繊維束中へのマトリックス樹脂の含浸は樹脂の含浸に要する距離が最も重要な要因として作用する系になっていると考えられ、そして含浸に要する距離

† 原稿受理 平成9年9月16日 Received Sep. 16, 1997

* 福井県工業技術センター 〒910-0102 福井市川合鷺塚町, Industrial and Technology Center, Kawaiwashitsuka-cho, Fukui, 910-0102

** 京都工芸繊維大学繊維学部 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎, Faculty of Textile Science, Kyoto Inst. of Tech., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585

*** 正 会 員 京都工芸繊維大学繊維学部 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎, Faculty of Textile Science, Kyoto Inst. of Tech., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585

Fig. 1. Schematic cross-section model of film/tow stacking.

は繊維束の厚みに相当していると考えられる。このことから本成形方法により、開織による繊維束が薄くなる、つまり繊維束の厚み方向に並ぶ見掛け上の繊維個数が少なくなるものと単純化して、含浸に要する距離が短くなる場合の樹脂含浸に対する影響が検討できる。

未開織繊維束を使用する場合、幅 50mm に繊維束の重なりが生じることなく横 8 列に並べ、その上にフィルムを 2 枚重ねる 1 段と 3 枚重ねる 1 段を交互に 7 段まで積み重ねた試料を作成する。また開織繊維束を使用する場合、幅 50mm に繊維束を同じ要領で横 3 列に並べ、その上にフィルムを 1 枚重ねた 1 段を 19 段に積み重ねた試料を製作する。

両試料において繊維束に樹脂が含浸しボイドが全くなかったと仮定される場合の成型品厚みと繊維体積含有率は、金型の幅および積層に使用した繊維束本数と樹脂フィルム枚数から計算できる。その結果、未開織繊維束を使用した場合には厚み 1.01mm、繊維体積含有率 50.8% となり、開織繊維束を使用した場合には厚み 1.00mm、繊維体積含有率は 49.9% となる。

両試料の製作方法から、両試料とも各段のどの部分においても繊維束へ含浸する樹脂の量はほぼ均等であると考えられる。また両試料とも繊維束へ供給される樹脂量が十分にあるため、両試料間での若干の繊維体積含有の差は、樹脂含浸の進行にはほとんど影響がないと考えられる。

そして、繊維束と樹脂フィルムをこのように積層した試料を金型内に設置し、所定の温度、圧力によって成形を行う。まず予め金型のみを加熱し所定の温度に達したところで素速く試料を設置し、さらに試料内部が所定の温度に達するまで加熱のみを行う。試料が所定の温度に達した後、所定の圧力で加圧を行うが、このとき金型の端部は Fig. 2 に示すような特別な方法で冷却⁴⁾している。これより加熱部と冷却部の境界近傍では加熱部側は比較的緩やかな温度低下があり、冷却部側ではかなり急激な温度低下が生じていると考えられるため、この効果により加熱部側からの樹脂流出はかなり抑えられている。また冷却部側は樹脂が溶融せず固化しているが金型の構造 (Fig. 2 参照) から成形品には圧力の負荷はされず、加熱部金型内の試料に対してのみ圧力が負荷されている。そして所定時間の加熱加圧が行われた後、金型を速やか

に万力で固定し水槽内にて急冷するという方法によって一軸繊維強化複合材料を得た。

なお成形時間は 10 分までとし、加熱温度は 255℃、265℃そして 275℃の 3 段階、また加圧力は 0.5MPa、1.0MPa そして 2.0MPa の 3 段階とした。

2・3 成形時の厚み変位測定方法と成形品の厚み測定方法

加熱加圧成形中のプレス機下部の変位の主たる原因は金型内の厚みの変化によるもので、成形品の厚みの変化は加圧時の最初の数秒を除くと繊維間のボイド部に樹脂が含浸することによる見かけの体積減少、つまりボイドのトータル厚みの減少によるものと考えられる。⁵⁾ よって、成形中の樹脂含浸の進行度合い、つまりボイドのトータル厚みの減少度合いを測定するために、レーザー変位測定器によって成形中の金型の変位を測定した。Fig. 2 にレーザー変位測定方法の概略図を示す。

なお、データのサンプリングは 1 秒間に 20 回程度行い、その平均値をその単位時間 (秒) の変位量とした。

そして成形後の成形品におけるボイドのトータル厚みを得るために、成形品の厚みを測定した。

測定器は最小測定厚み 1μm のものを使用し、成形品のあらゆる箇所 10 点を測定し、平均した値を成形品の厚みとした。

2・4 成形途上の成形品における断面写真観察方法

繊維束内への樹脂含浸状態を観察するために、成形途上の成形品から試験片を取り出し、樹脂包埋した後、その断面を研磨して金属顕微鏡により観察した。

樹脂包埋に使用した樹脂は常温硬化型の樹脂であり、かつ包埋の体積が φ20mm × 高さ 20mm 程度であることから樹脂硬化時の発熱はほとんどない。よってナイロン 6 の熱可塑性樹脂に対する樹脂包埋時の発熱影響はないと考えられる。

なお、成形品は予め計画した加圧時間で加圧を止め、即座に水槽で急冷することによってその成形時間での状

Fig. 2. Schematic view of compression molding and displacement measurement.

態を保持するようにして製作した。予め計画した加圧時間は5分と10分である。

2・5 成形品の90度方向曲げ試験方法

樹脂の含浸状態を力学的物性を通して把握するために、上記成形品中のボイド量や繊維と樹脂の接着性などの影響が力学的物性に比較的顕著に現れ、かつ圧子点の物性が必ず得られることからデータのばらつきが少なくなる理由により、90度方向（繊維軸直交方向）曲げ試験を行った。

成形品は2・4節で述べた方法により予め計画した成形時間の状態を保持するようにして製作した。予め計画した加圧時間は1分、2分、3分、5分と10分である。

曲げ試験用に取り出す試験片は、幅15mm、長さ50mmそして厚みはそのときの成形品の厚みである。

曲げ試験は常温（約20℃）での3点曲げ試験を行い、試験条件は $L/h = 20$ 、クロスヘッドスピード1mm/minで行った。

3 実験結果

3・1 成形時の厚み変位測定結果と成形品の厚み

まず各成形品の状態を観察したところ、加熱部側では繊維束中に樹脂が含浸した成形体となっているが、冷却部側では繊維とフィルムの状態がほぼ維持されていた。そしてその境界近傍では冷却部側のフィルムが溶融しているのと、加熱部側からの樹脂流出が観察された。しかし樹脂流出の量は非常に微量であり、加熱部金型内での成形体には基本的に問題はないと考えられる。

未開織および開織した繊維束を用いた圧縮成形時における厚み変位 - 時間曲線の成形圧力ならびに成形温度による変化をそれぞれFig. 3, 4に示す。

Fig. 3, 4においてHolding Time = 0の値は金型の初期位置に影響する。なお試料のトータル厚みは各試料により異なっているが成形品での厚みは約1.0mmになるよ

うに設定されている。そして下側金型が上昇する間の変位量は金型の上昇速度に関係し、試料に成形圧力が加わり繊維束中に樹脂が含浸しだした以後の変位量はボイドのトータル厚みの減少度合いを表していると考えられる。ただしHolding Time = 0から数秒間の変位量は繊維束の圧縮変形等に左右されるので、ボイド部への樹脂含浸の影響が反映されているわけではないと考えられる。

また、ボイドのトータル厚みが0mmになるということは、繊維束中に樹脂が含浸しボイドが全くなかった状態を表していると考えられる。

Fig. 3, 4の結果から、ボイドのトータル厚みは成形初期にある程度まで急激に減少した後、徐々にその変化量が減少し、次第に平衡状態に落ち着くことがわかる。未開織と開織した繊維束を比較すると、開織した繊維束においては初期の含浸進行の急激さが未開織に比べて大きく、その後期では未開織に比べ更に緩やかな変化となっている。そして変位が平衡状態に落ち着く時間も未開織に比べ著しく早くなっている。

また、Table Iに成形時間10分後に取り出した成形品の厚みを測定した結果を示す。これより、どの加工条件においても成形品の厚みは計算上の厚み約1.0mmになる場合はなく、それ以上の厚みとなっているが、開織繊維束を使用した成形品は比較的厚みが薄くなり、1.0mmに近づくことがわかる。

ここで、得られたデータの精度および有意性であるが本成形中の変位量を測定したレーザ変位測定器および成形品の厚みを測定した機器はいずれも十分な精度（1μmの測定が可能）をもっている。しかし本成形中での端部からの樹脂流出および加熱部金型内での温度・圧力の不均一性などもそれなりに存在するため、得られたデータが絶対的にボイド量（厚み）を正確に検出しているとはいえない。しかしながら本成形中での加熱部からの樹

(a)

(b)

Fig. 3. Change in thickness of void space during molding for various molding pressure conditions under the molding temperature 255°C.

Fig. 4. Change in thickness of void space during molding for various molding temperature conditions under the molding pressure 0.5 MPa.

Table I. Thickness of composite material by various processing conditions at the holding times 10 minutes.

Processing conditions		Measured Thickness	
Pressure (MPa)	Temperature (degree)	non-treatment (mm)	Opened Tow (mm)
0.5	255	1.10	1.06
0.5	265	1.08	1.05
0.5	275	1.07	1.04
1.0	255	1.07	1.05
2.0	255	1.05	1.03

脂流出および加熱部金型内への端部冷却の影響などをできるだけ小さくするように工夫したことから、少なくとも試料間のボイド厚みの相対差はかなり正しく検出されていると考えられる。

また本研究ではボイドの絶対量の正確な測定が目的ではなく、繊維束の開繊による樹脂含浸挙動への影響を検討することを目的としている。よって未開繊繊維束を使用した場合と開繊繊維束を使用した場合のデータにはその差が表れていることから、得られたデータには十分有意性があると考えている。

さらに成形品の厚みが0.01mm変化することは、ボイド量で約1.0%変化することに相当する。ボイド量が数%ある成形品は材料としては欠陥品となりうるため、ボイド量1.0%の変化は大きく、よって成形品の厚み0.01mmの変化は十分に有意性のあることと考えられる。

以上のことから開繊した繊維束ではより短時間に繊維束内に樹脂の含浸が進行することがわかる。つまり繊維束の初期状態において未開繊繊維束は6.1mm×0.09mm、開繊繊維束は16.0mm×0.05mmより開繊繊維束の方がボイド量が多いと考えられるが、トータルボイドの厚み(繊維束の厚み)では開繊繊維束の方が小さく(薄く)なっているため、樹脂の含浸に要する距離は短くなり、し

たがって開繊繊維束の方が樹脂の含浸は早まったといえる。そして短時間に繊維束内に樹脂が含浸するこの傾向は成形圧力、成形温度を変えても変わらない。

成形圧力または温度条件を高くした場合は、未開繊および開繊に関係なく樹脂の含浸性が向上していることがわかる。そして成形圧力、温度を高くするに従い未開繊繊維束では含浸性の向上の度合いは大きくなるが、開繊繊維束では含浸性の向上の度合いは小さくなっていることもわかる。このことは言い換えると開繊繊維束では成形条件が少々変化しても含浸性への影響は少なく、高い含浸性を保つことを意味している。

また、成形圧力や温度条件の変化は、後半の樹脂が緩やかに含浸するときの到達しうる成形品の厚み、言い換えればボイドのトータル厚みに影響を与える。すなわち成形圧力や温度が高くなると樹脂の含浸がより完全に進行することがわかる。なお成形温度が高くなると始めに樹脂が急激に含浸するが、成形圧力が低いと繊維束内へのそれ以上の含浸はなく成形品の厚みが薄くならないことがわかった。

3・2 成形品の断面写真観察結果

未開繊および開繊した繊維束を用いた圧縮成形における、加圧時間5分後と10分後の成形品の断面写真をFig. 5, 6に示す。

未開繊繊維束の場合、加圧5分後では繊維の集合した部分と樹脂の部分が帯状に明確に分かれて存在し、かつボイド部分も大きいボイドを含め多数存在していることが観察された。そして加圧10分後には繊維の集合した部分内にも樹脂が含浸するが樹脂だけの部分が残ることが観察された。なおボイドについてはその体積が小さくなり、かつその数も減少していることがわかった。

開繊繊維束の場合、加圧5分後には樹脂だけの部分も存在するが未開繊繊維束の加圧10分後の状態などに比べると繊維はかなり散らばった状態になり、帯状の繊

維の集合部分などは存在していないことが観察された。そして加圧 10 分後には繊維が均一に散らばり、かつ各繊維を囲むように樹脂が含浸していることが観察された。そしてボイドについても加圧 5 分後、10 分後とも存在はしているが、未開織繊維束の場合に比べその体積も小さく、かつその数も非常に少ないことがわかった。

3・3 成形品の 90 度方向曲げ試験結果

未開織および開織した繊維束を用いた圧縮成形における加圧時間 1, 2, 3, 5 そして 10 分後の成形品において 90 度方向曲げ試験を実施した後の曲げ応力-変位曲線を Fig. 7 に示す。

未開織および開織した繊維束の場合とも加圧時間が長くなるに従い応力の増大する傾き（曲げ弾性率）が大きくなり、最大応力も増大している。そして最大応力を示した後は段階的に応力が低下するが、加圧時間が長くなるに従いその低下も大きくなっている。

未開織および開織した繊維束を比較すると曲げ弾性率および最大応力とも開織繊維束の方が非常に大きくなり、

かつ最大応力後の応力低下も開織繊維束の方が加圧時間が長くなるに従い急激に低下することがわかった。

具体的にいえば最大応力から比較すると加圧時間 5 分後では未開織繊維束の場合約 40MPa、開織繊維束の場合約 58MPa と約 1.4 倍以上の高い値となり、加圧時間 10 分後では未開織繊維束の場合約 50MPa、開織繊維束の場合約 62MPa と約 1.2 倍以上の値を得ることがわかった。

4 考 察

4・1 含浸理論とその応用

4・1・1 含浸理論モデルと理論式 配列した繊維束に溶融樹脂含浸する典型的な方法として、樹脂流体に一軸的（y 軸方向）な外圧を加え、樹脂を配向している繊維束内に押し込むやり方が一般的であり、Fig. 8 のようにモデル化できる。このとき L_{vy0} は初期状態のトータルボイド厚みであるが、この系では厚密化された繊維束の厚みにほぼ等しいと考えられる。

このモデルに以下の仮定、前提を設ける。

(1) At 5 minutes of holding time

(2) At 10 minutes of holding time

Fig. 5. Cross-section of composite material using non-treatment tow obtained by compressional molding under the pressure 0.5 MPa and the temperature 255°C.

(1) At 5 minutes of holding time

(2) At 10 minutes of holding time

Fig. 6. Cross-section of composite material using opened tow obtained by compressional molding under the pressure 0.5 MPa and the temperature 255°C.

Fig. 7. Bending stress-displacement diagram at transverse direction.

①系は等温圧縮成形とする。②圧力は樹脂のみが担っている。③樹脂は非圧縮性ニュートン流体である。④樹脂の流動は Darcy 則による。⑤樹脂の流動による繊維の移動は特に考えない。⑥重力効果, 毛細管圧力は無視できるものとする。

これらの前提条件から以下に記すように含浸の時間的進行に関する方程式を導くことができる。³⁾

まず, 含浸領域内での質量収支式を導く。

Fig. 8 に示すように x 軸に配向する繊維束内に y 軸方向の外圧 P_{ext} を加えるモデルから樹脂の流れは y 軸方向の 1 次元流として取り扱え, かつ仮定⑤より繊維の体積含有率の時間的変化は無いと考えられるから, 含浸領域内での質量収支式は

$$\frac{S_{yy}}{\mu} \frac{\partial^2 P_m}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

と簡略化できる。なお式 (1) は空間固定座標系によるものである。ここで, S_{yy} は y 軸に垂直な面を通る一つの繊維束内の含浸部における y 軸方向の浸透係数であり定数, μ は樹脂流体の粘度であり定数, P_m は樹脂流体の静圧であり変数である。

一方ボイド部への樹脂流入は y 軸方向のみににおいて起

こり, かつボイド部の減少は樹脂の流入速度に相当して起こるから, ボイド表面の y 軸直交面からの樹脂の流入によるボイド厚みの変化に関する式は,

$$\frac{S_{yy}}{\mu} \left[\frac{\partial P_m}{\partial y} \right]_B + \varepsilon \frac{dL_{vy}}{dt} = 0 \quad (2)$$

と導かれる。⁴⁾なお式 (2) は含浸部とボイド部の境界に関する式である。ここで, ε は繊維束内の空間分率であり定数, L_{vy} はボイド部の y 長であり変数, $[]_B$ は $y = L_{vy0} - L_{vy}$ の境界面での値である。

ここで, P_m は $y = 0$ の位置で P_m の最大値 P_{ext} に, $y = L_{vy0} - L_{vy}$ の位置で繊維束のボイド部圧力 P_v になるという条件を与え, $0 \leq y \leq (L_{vy0} - L_{vy})$ の範囲において式 (1) を解くと,

$$P_m = \frac{P_v - P_{ext}}{L_{vy0} - L_{vy}} y + C \quad (3)$$

となる。そして式 (3) を式 (2) に代入し整理すると, $y = L_{vy0} - L_{vy}$ の境界面におけるボイド部厚みの変化速度 (dL_{vy}/dt) が求められる。

$$\frac{dL_{vy}}{dt} = \frac{S_{yy}}{\mu} \frac{P_v - P_{ext}}{L_{vy0} - L_{vy}} \quad (4)$$

なお, $(P_v - P_{ext}) / (L_{vy0} - L_{vy})$ がマイナス値をとるためボイド部厚みの変化速度はボイド部の減少速度となる。

ここでボイド部の圧力 P_v は流入する樹脂に対して抵抗を示すが, 典型的には以下の 3 つの形態に分類される。

①大気圧と通じた系となっている。

開放系: $P_v = 1 \text{ atm}$

②真空中で引かれた系となっている。

真空系: $P_v = 0$

③大気の入りが無い系である。

密閉系: $P_v \cdot V = \text{一定}$

今回の場合, 成形初期の段階では開放系に近い形態で含浸が進行し, ある程度になった状態で密閉系に移行すると考えられる。そしてボイド部の圧力 P_v が外圧 P_{ext}

Fig. 8. Pressure distribution of uni-axial simple impregnation system.

と釣り合った状態で含浸の進行がなくなり、平衡状態に落ち着くと考えられる。

4・1・2 理論計算結果と実験結果の比較 式 (4) に各条件を代入し数値計算した結果について Fig. 9 に示す。

なお未開織と開織した繊維束ではその厚みが大きく異なっており (2・1 節参照)、開織繊維束に対しては単純に厚みが薄くなるものとして計算している。また系は初期の段階では開放系にあり、厚みが半分以下になったところで密閉系に移行したとして計算した。

これより厚みの薄い繊維束を用いた場合、初期の樹脂含浸が急激に行われ平衡状態に落ち着くのも早くなっている。この結果は実際の厚み変位-時間曲線の結果、および開織繊維束ではボイド量が減少しているという結果に近似している。

そして成形圧力を大きくしたとき、初期では樹脂含浸が更に急激に行われているが、後期では平衡状態に落ち着き、より少ないボイド量に到達している。

また成形温度を高くしたとき、粘度 μ の低下にしたがって $S_{yy}/\epsilon\mu$ 値は増加するが、 $S_{yy}/\epsilon\mu$ 値の増加によって初期の樹脂含浸が非常に急激になることがわかる。この結果は実際に成形温度を高くすると繊維束への樹脂含浸が急激に行われる結果に一致している。これは高い成形温度では樹脂粘度が小さくなるため、繊維束への樹脂含浸が非常にスムーズとなり、よって急激に樹脂含浸が進行することを意味している。

なお繊維束の厚みが大きいときには成形圧力、温度が変化すると数値計算結果の曲線が大きく変化するが、厚みの薄いときには曲線の変化も小さくなることをわかる。この結果より実際の開織した繊維束が加工条件が少々変化しても樹脂含浸には影響が少なく、高い含浸性を保つという結果が説明される。

4・2 含浸状態と 90 度曲げ試験結果の関係

90 度曲げ試験の結果 (Fig. 7) と断面写真観察の結果 (Fig. 5, 6) ならびに成形中のボイドのトータル厚みの時間的変化測定結果 (Fig. 3, 4) とを結び付けて考察する。

Fig. 3, 4 と Fig. 5, 6 とは一致した対応関係にあり、開織繊維束の方が、かつ成形時間の長い方が含浸はより進行した状態になっている。また 90 度曲げ特性曲線がこれと全く対応して変化している。すなわち含浸が進行するにつれて曲線の勾配が大きくなり、最大応力も大きくなっている。

Fig. 10 は未開織繊維束 (a) ならびに開織繊維束 (b) から得られた成形品の曲げ破壊断面図である。含浸の不十分な成形品 (a) では、曲げの内側で繊維とマトリックスとが分離して繊維の座屈の破壊が生じているのに対し、含浸が十分に行われている成形品 (b) では、破壊開始点は曲げの外側表面の最大ひずみ位置である直線上に存在する。このような差が Fig. 7 の 90 度曲げ特性曲線での最大応力、曲げ弾性率の差や、最大応力に達した後の応力低下の度合いの差に反映しているものと解釈される。

4・3 開織の効果

繊維束は開織により幅広い、薄い状態になるが、繊維束の厚みを薄くすることにより樹脂の含浸に対し以下の効果があることがわかった。

- ①樹脂の含浸が短時間にスムーズに行われる。
- ②成形条件が多少変化しても高い含浸性は保持される。
- ③繊維を均一に分散させかつ各繊維を囲むように樹脂が含浸する。
- ④内部に存在するボイドは小さくなり、その数も減少する。

そして③および④の効果から開織繊維束を用いれば成形品としてより大きい機械的特性値が実現し易いこともわかった。

Fig. 9. Simulation curves of impregnation behavior.

Fig. 10. Cross-section of fractured composite materials which are obtained by the molding pressure 0.5 MPa and the molding temperature 255°C from (a) non-treatment tow and (b) opened tow.

5 結 言

以上の結果より,

(1) 開繊処理した繊維束を用いた場合, 開繊処理していない繊維束の場合に比べてマトリックス樹脂の含浸は著しく速やかに進行することが, ①成形中でのボイドのトータル厚みの時間的変化のオンライン測定結果, ②成形途中に採取した成形品の 90 度曲げ特性結果, ならびに③成形品の断面の顕微鏡観察結果から確認された.

(2) 著者らが先に提出した含浸理論式を用いて, a) 開繊によって繊維束の厚みが 2 分の 1 になるものとし, b) ボイド部としては含浸の前期ではボイド部の空気が抜ける開放系, 後期ではボイド部の空気が閉じこめられる密閉系になるものと仮定し, 含浸の進行状態の数値計算を行った. その結果は定性的には上記 (1) の①のオンライン測定結果と良く一致することがわかった.

(3) 成形圧力が高くなれば, また成形温度が高くなればより速やかに含浸は進行する. また成形圧力が高いほど最終的に到達するボイドのトータル厚みもより少なくなる. こうした測定結果は上記 (2) の数値計算結果とも定性的に一致する.

参 考 文 献

- 1) 川邊和正, 友田 茂, 松尾達樹, 日本繊維機械学会, **50**, T68 (1997).
- 2) 川邊和正, 松尾達樹, 前川善一郎, 材料, **47**, 727 (1998).
- 3) 松尾達樹, 弓場隆生, 日本材料学会第26回 FRP シンポジウム講演論文集, p.385 (1997).
- 4) G. O. Shonaike and T. Matsuo, Proc. Jap. Material Sci., FRP Symp., p.77 (1995).
- 5) G. Batch and S. Cumiskey, "Multilayer Compaction and Flow in Composites Processing", p.12 (1990) The Society of the Plastic Industry.