研究論文

ミシンステッチを利用した
細幅テープ熱可塑中間基材積層法の開発
—CF/PA6 一方向積層板の作製と曲げ特性の評価—

西田 裕紀^{*1}, 松 葉 朗^{*2}, 河野 洋輔^{*1}, 藤井 敏男^{*3},
山下 弘之^{*4}, 田 島 良^{*5}, 藤原 宗徳^{*6}, 荻原 慎二^{*7}

(2015 年 10 月 29 日受付)

Development of a New Laying Method for Narrow Tape of
Thermoplastic Intermediate Material Using Machine Stitching
—Fabrication of CF/PA6 Unidirectional Laminates and
Evaluation of Its Flexural Properties—

Hironori NISHIDA,^{*1} Akira MATSUBA,^{*2} Yousuke KOUNO,^{*1} Toshio FUJII,^{*3}
Hiroyuki YAMASHITA,^{*4} Ryo TAJIMA,^{*5} Munenori FUJIWARA^{*6} and Shinji OGIHARA^{*7}

(Received October 29, 2015)

Abstract: In this study, a new automatic tape laying (ATL) method for CFRTP intermediate material was developed by using machine stitching, which can be effective to reduce material waste and production costs in automotive manufacturing. Narrow CF/PA6 semipreg tapes were stacked and fixed onto a sheet of PA6 base film by a modified embroidery sewing machine. Subsequently unidirectional laminates were fabricated and flexural specimens without fiber break were cut out from the non-stinging region of the laminates. The flexural properties of this tape lay-up laminates were examined under three-point bending condition in comparison with those of a laminate laid up with conventional wide width semipreg sheets. As a result, it was found that there is no significant difference in the flexural properties for the fiber direction between the tape lay-up laminates without fiber break and the conventional sheet lay-up laminate under the same fiber volume fraction. However, the flexural modulus and strength showed relatively low values in the tape lay-up laminates due to the decline of the fiber volume fraction because of the use of subsidiary materials of PA6 such as the base film and stitching thread.

Key words: CFRTP, Narrow tape, Tape lay-up, Machine stitching, Flexural properties

^{*1,*3,*4} 広島県立総合技術研究所西部工業技術センター (737-0004 広島県呉市阿賀南 2-10-1)

Western Region Industrial Research Center, Hiroshima Prefectural Technology Research Institute, 2-10-1, Agaminami, Kure, Hiroshima 737-0004, Japan

^{*1} 研究員 Researcher, ^{*3} 担当部長 Charge Chief Director, ^{*4} 室長 Manager

^{*2} 広島県立総合技術研究所東部工業技術センター 副主任研究員 (721-0974 広島県福山市東深津町 3-2-39)

Assistant Chief Researcher, Eastern Region Industrial Research Center, Hiroshima Prefectural Technology Research Institute, 3-2-39, Higashifukatsu-cho, Fukuyama, Hiroshima 721-0974, Japan

^{*5,*6} タジマ工業株式会社 (461-0011 愛知県名古屋市中区白壁 3-19-22)

Tajima Industries LTD., 19-22 Shirakabe 3-chome, Higashi-ku, Nagoya, Aichi 461-0011, Japan

^{*5} 次長 Deputy General Manager, ^{*6} コンポジットプロジェクトリーダー Composites Project Leader

^{*7} 東京理科大学理工学部機械工学科 教授 (278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

Professor, Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science, 2641 Yamasaki, Noda, Chiba 278-8510, Japan

1. 緒 言

自動車業界では、CO₂ 排出量や燃費への規制強化により、車体の軽量化が喫緊の課題となっている¹⁾。軽量化材料として期待される熱可塑性炭素繊維強化プラスチック (CFRTP) は、熱硬化性 CFRP と比べて短時間成形が可能であり、リサイクルも比較的容易であることから、材料開発や成形法などに関する研究開発が活発に行われている^{1~4)}。

しかし、高価な CFRTP を量産車に適用するためには、大幅なコスト削減が必要である。従来、プリプレグなどの中間基材は幅広なシート状態で用いられることが多く、必要部位のカット後に大量の廃材が生じるため、これが材料コスト増加の一要因となってきた。そこで、Fig. 1 に示すように、細幅なテープ状基材を用いて適所に適量だけ使用すれば、廃材の大幅な削減による材料歩留まりの改善が期待できる。細幅テープ状熱可塑性中間基材を自動で積層する ATL (automatic tape laying) 法として、ホットガスやレーザーなどで中間基材を加熱溶融しローラーで圧着する方法^{5~9)} や、超音波溶着により熱可塑基材を固定しながら積層する手法^{10,11)} が提案されている。しかし、加熱圧着積層では、高温加熱による基材樹脂の熱劣化や急速な加熱冷却に伴う結晶化度の変化などにより、機械的性質の低下を招く恐れがある^{8,9)}。また、超音波溶着法では、溶着が部分的である上に、溶着部全域において強化繊維のゆがみやたるみなどの配向不整が生じやすい。さらに、このような不整を抑制するため溶着条件を弱めれば、接合強度の低下により、成形前の搬送工程で基材がはがれやすくなることも

考えられる。

上記を背景として、今回は刺繍分野で実績のある工業用ミシンに注目し、ミシンステッチ (縫合) することにより、基材を加熱溶融させることなく、適所に適量の細幅テープ状熱可塑性中間基材を迅速かつ正確に積層する手法を開発した¹²⁾。本報では、開発した基材積層法の概要を示すとともに、細幅 CF/PA6 一方向セミプレグテープをミシンステッチ積層して得られる一方向積層板に対して、静的曲げ試験を行い、本積層法の有効性を検証した。

2. ミシンステッチを利用した細幅テープ中間基材積層法

今回開発したミシンステッチによる細幅テープ熱可塑性中間基材積層法の概要図を Fig. 2 に示す。基盤となる樹脂製の布あるいはフィルム上に、目的とする製品形状の輪郭に合わせて、細幅テープ基材を所定方向にミシンステッチすることにより固定し、固定後には基材を切断する。ここで、基材は目的の製品形状を覆うのに必要最小限の量とし、製品外の余長部分 (廃棄部分) が最小となるように基材の長さを調整する。これを基材の幅方向に繰返し、基材が製品形状の全輪郭を覆った段階で、1 層分の基材配置が終了する。この一連の作業を、目的の積層構成に応じて繊維配向を変えながら必要な回数繰り返して、積層工程が完了する。

また、本方法を実際の製造現場で適用するには、これらの工程を自動で迅速に実施可能な積層機械が必要となる。次章以降で述べる今回の積層体作製では、Fig. 3 に示すタジマ工業製コンポジットファイバー縫付機 TCWM-T01 を使用した。本機は刺繍用ミシンを改良したもので、可動式 XY テーブルと、ドライ状態の CF トウ (ポビン) を設置可能な 360° 可変のロータリーテーブルを有

Fig. 1 Schematic illustrations how the material waste is reduced by using narrow tapes.

Fig. 2 Schematic illustration of narrow CFRTP tapes laid up on a sheet of base cloth/film by machine stitching.

Fig. 3 Automated fiber placement machine using machine stitching.

し、所定の位置で所望の繊維配向となるよう制御しながら、CF トウのステッチ固定を自動で効率よく行うことができる。今回の実験時には、プリプレグなど中間基材に対応した材料供給機構や切断機構がなく、一部の積層工程を手作業で行う必要はあったが、中間基材に合わせた改造を行うことにより、一連の全工程を自動化できる。

このように、今回提案する基材積層法の特徴は、実績のある刺繍用ミシンの技術を利用することで設備コストを抑制できること、自己粘着性のない熱可塑性基材を加熱工程なしで強固に固定できること、自動で高速かつ正確な積層ができるなどの点にある。その一方で、樹脂基布やステッチ糸など副資材の増加や、通針に伴う強化繊維の折損および成形品の機械的特性低下などの懸念がある。特に、機械的特性の低下は製品の機能や信頼性に大きな影響を与えるため、ステッチはできる限り製品外の余長部分で行うこと、製品内でステッチを行う場合は応力が高い部位での通針を避けるなどの対策が必要となる^{*1}。

3. ステッチ積層による一方向積層板の作製

細幅テープ熱可塑中間基材積層法では、上述の通針による成形品の機械的特性低下の恐れ以外に、細幅テープの整列の問題がある。すなわち、所定の幅の成形品を得るためには、細幅テープを必要本数、樹脂基布上に所望の方向に並べ置きしなければならない。しかし、基材上

Fig. 4 Micrograph of the cross section of CF/PA6 intermediate material.

(a) Original sheet.

(b) Tape cut from the original sheet.

Fig. 5 Appearance of CF/PA6 intermediate material.

にテープを一方向に並べて置こうとすれば、テープ幅寸法のばらつきや、基材自身が柔軟性や変形を有する場合には積層時に安定しにくいことなどが関係して、ステッチング工程でテープ間に隙間や重なりが生じやすく、その結果、成形品の機械的特性が低下する恐れがある。そこで、今回は、開発した基材積層法の有効性を検証するための第一段階として、これら細幅テープ基材の整列に伴う問題が成形後の機械的特性に及ぼす影響に注目した。同一の材種で基材形態のみが異なるシート状および細幅テープ状の2種類の基材を用い、最も単純な積層構成である一方向積層板を作製した。細幅テープ基材から作製した積層板からは、テープ基材整列の影響のみを評価できるよう、通針の影響を受けない部位から試験片を切り出して繊維方向に静的曲げ試験を行い、従来のシート基材を成形した積層板の試験結果と比較検討した。

3.1 供試材

中間基材として、強化繊維が三菱レイヨン製炭素繊維 TR50S(目付 133 g/m²)、マトリックス樹脂が PA6 からなる一方向基材を使用した。基材断面の観察写真を Fig. 4 に示す。PA6 樹脂は炭素繊維の表面のみに附着しており、内部には含浸していないセミプレグ状態であるため、厚さ方向に一定の柔軟性を有している。また、納入時の基材形態は、Fig. 5(a) に示すように幅 280 mm のシート状であった。今回、テープとシートの両基材を同一材料とするため、Fig. 5(b) のように紙管に巻かれた

^{*1} 一方、ガラスなどの強化繊維をステッチすることにより、層間はく離強度が増すことが期待されることから¹³⁾、本方法により、耐衝撃性を高めることができる可能性もある。

状態のままスリッターにより幅 15 mm に切断し、これを細幅テープ基材として使用した。なお、作製したテープ基材の幅寸法のばらつき範囲は、長さ 1 m 当たり 0.3 mm 程度であった。

3.2 テープ中間基材の積層法

第2章で述べたように、今回使用した Fig. 3 の縫付機では、基材の切断と整列に関する作業を自動で実施できなかったため、手作業にてテープ基材を長さ 260 mm に切断し、Fig. 6 のように、一層分計 18 枚の基材を厚さ $50\ \mu\text{m}$ の PA6 フィルム上に並べて設置した。その後、Fig. 3 の機械を用いてテープ両端付近の幅中心部をミシンステッチにより固定した。さらに、この基材上に同様のステッチ積層を計 8 層にわたって繰り返し行い、8 層分の積層体を作製した。なお、今回は試験片作製時に通針の影響を受けないよう、ステッチ点は端部付近のみとしている。このように、作製した積層体には基盤のフィルムやステッチ糸など基材以外の副資材も含まれるが、これらはマトリックス樹脂と同じ PA6 であるため、加熱成形後には異材を含まない CF/PA6 複合材料を作製できる。

また、細幅テープ基材積層時における整列の影響を検討するため、Fig. 7 のような異なる 2 種類の積層形態を用いた。各層のテープ継目が重ならないよう、テープ幅半分オフセットして積層したものを Type A、継目が揃うよう積層したものを Type B とした。

なお、曲げ試験に用いる板厚約 2 mm の積層板を得るためには、16 層分の基材積層が必要である。そこで、8 層の積層体を 2 つ作製し、互いの PA6 フィルムが内側となるよう重ね合わせて使用した。

完成した積層体 (8 層) の例として、Type A のステッチ点近傍における表面観察写真を Fig. 8 に示す。これより、目視上の大きな隙間や重なりなどはなく、テープ基材が良好に固定および積層されていることがわかる。また、積層体をカッターにより切断し、テープ継目付近の切断面を顕微鏡により観察した。その結果を Fig. 9 に示す。このように詳細に観察すると、積層形態の異なる Type A と B の間でわずかに違いがあった。Fig. 9(a) の Type A では、薄い樹脂フィルム上に柔らかいテープ基材を積層しているにもかかわらず、テープ継目部の隙間も小さく、安定した積層状態となっている。一方、同列上に基材を積層した Fig. 9(b) の Type B では、通針時に受ける荷重により基材が傾きやすく安定に欠けており、基材設置を手作業で行ったことも関係して、継目部の隙間もやや大きい傾向があった。

Fig. 6 Schematic illustration of stacked CF/PA6 tapes for fabricating unidirectional laminate.

(a) Type A.

(b) Type B.

Fig. 7 Schematic illustrations of stacking pattern of CF/PA6 tapes.

Fig. 8 Stacked CF/PA6 tapes near the stitching points (Type A).

Fig. 9 Cross sectional micrographs of stacked CF/PA6 tapes.

3.3 積層板の成形

作製したテープ基材の積層体および同一積層数のシート基材を、平板成形用金型に投入できるようキャビティ部寸法（長さ 250 mm×幅 250 mm）に合わせて切り出し、50°C で 8 時間乾燥した後、温度 250°C、圧力 3 MPa で 5 分間プレス成形を行って一方向積層板を作製した。ここで、圧縮成形時に材料が金型外に流動して強化繊維の配向が乱れるのを防ぐため、成形金型は密閉式を採用した。以下、作製した積層板をそれぞれテープ積層板およびシート積層板と称する。

両積層板ともに目視による外観上の差異はほとんど無く、ほぼ同様の様相であった。テープ積層板において、テープ継目付近に相当する部分の表面を顕微鏡観察した結果を Fig. 10 に示す。これより、基材テープの継目が重複していない Type A (Fig. 10(a)) では、継目部においても繊維の乱れが少ない良好な成形状態である。一方、継目を一箇所に揃えた Type B では、Fig. 10(b) のように、強化繊維の隙間部への移動により、繊維配向の不整や樹脂リッチ領域の形成などが局所的に生じやすい傾向があった。

各積層板の比較的内部から、テープ幅と同寸法である 15 mm 四方の試料を切り出し、燃焼法により繊維含有率 V_f をそれぞれ 5 点ずつ測定した。それらの平均値を Table 1 に比較して示す。これより、シート積層板に対して、テープ積層板では V_f 値が Type A で約 4%、Type

Fig. 10 Micrographs of the surface at the seam of tape lay-up laminates.

Table 1 Fiber volume fraction of CF/PA6 laminates.

	Tape lay-up (%)		Sheet lay-up (%)
	Type A	Type B	
Fiber volume fraction, V_f	54.8	52.8	58.6

B で約 6% 程度それぞれ低下しており、テープ継目を揃えた Type B の方が V_f の低下がやや大きいことがわかる。

次に、各積層板の断面を光学顕微鏡により観察した結果を Fig. 11 に示す。全ての積層板において、マトリックス樹脂の未含浸や顕著なボイドといった成形不良は見当たらない。さらに、全積層板に共通して空洞率は 0.5% 以下であり、今回製作した積層板の成形状態は良好であることがわかる。

Fig. 11(a) および (b) の両テープ積層板の板厚中央部において、積層時に使用した PA6 フィルムによるものと思われる層状の樹脂リッチ領域が生じている。これより、テープ積層板では、フィルムやステッチ糸など副資材の使用によって樹脂含有量が増加し、Table 1 で示した V_f 値の低下が生じたものと考えられる。さらに、Type B では、積層時にテープ継目部で隙間が生じやすいことから、結果として基材テープの配列間隔が Type A と比べてわずかに大きくなり、金型のキャビティ寸法に合わせて積層体を切り出した後には、樹脂フィルム上の基材の量が相対的に少なくなるため、成形後の V_f 値が比較的大きく低下したと思われる。また、本図は

Fig. 11 Micrographs at the cross section of CF/PA6 laminates.

テープの継目付近を観察したものであるが、Fig. 11(b)に示すように、隙間が生じやすい Type B では、板厚方向にも強化繊維や樹脂の流動が生じていることがわかる。一方、Fig. 11(a) の Type A においては、このような顕著な材料の流動は観察されなかった。

4. 一方向積層板の曲げ特性評価

4.1 実験方法

成形された各積層板から、曲げ試験片として、試験片の長手方向が繊維方向 (0°) となるよう、幅 15 mm、長さ 100 mm の短冊状に切り出した。板厚は約 2 mm である。ここで、曲げ試験結果が Table 1 の V_f 測定結果と正しく関連付けられるよう、曲げ試験片は V_f 測定試料と隣接する位置から切り出した。なお、テープ積層板においては、通針の影響を受けないよう、積層板の比較的内部側から切り出しを行った。また、試験は JIS K 7074 に基づき、支点間距離 80 mm、試験速度 5 mm/min の条件で静的三点曲げ試験を行った。

4.2 曲げ試験結果

三点曲げ試験で得られた荷重-変位曲線から、はりの曲げ理論により求めた負荷点における試験片表面上の応力-ひずみ曲線の例を Fig. 12 に示す。今回作製したテープ積層板の応力-ひずみ関係はシート積層板とほぼ同様の挙動を示している。ただし、詳細に比較すると、曲げ弾性率および曲げ強度ともにテープ積層板の方がわずかに小さいことがわかる。

そこで、曲げ試験により得られた曲げ弾性率 E および

Fig. 12 Stress-strain curves of the bending test.

Fig. 13 Comparison in flexural properties between tape lay-up and sheet lay-up laminates.

(a) Entire fracture surface.

(b) Detail of A
(Compression side). (c) Detail of B
(Tension side).

Fig. 14 SEM images at the fracture surface of tape lay-up laminate (Type B).

曲げ強度 σ_U を、シート積層板の値 E^{sheet} および σ_U^{sheet} によりそれぞれ基準化して Fig. 13 に示す。これより、テープ積層板の曲げ弾性率および曲げ強度はいずれもシート積層板の各値よりも 10% 程度小さい結果となった。ただし、ばらつき範囲はテープおよびシート両積層板の間で大きな違いはなく、繊維方向の曲げ特性に対して、本積層法の適用による曲げ特性の顕著な低下は生じていないことがわかる。

4.3 破面観察

曲げ試験により分析した試験片の破面に対して、走査型電子顕微鏡による観察を行った。テープ積層板の観察結果を Fig. 14 に、シート積層板の結果を Fig. 15 にそれぞれ示す。なお、テープ積層板の破面形態は Type A と B でほぼ同様であったため、ここでは Type B のみの結果を示した。まず、Fig. 14(a) に示したテープ積層板の破面全体写真に注目すると、引張側と圧縮側の領域で明確に破面が異なっており、CF/エポキシ^{14~16)} や CF/PEEK¹⁷⁾ など従来の報告例と同様の、典型的な一方向積層板の曲げ破壊形態を示している。さらに、圧縮側破面を詳細に観察した Fig. 14(b) では、マイクロバックリングにより破壊したと思われる炭素繊維の微細な破片が多数観察される一方、Fig. 14(c) に示した引張側では引抜けを伴った繊維破断が支配的であった。この破面形態は、Fig. 15 のシート積層板でもほぼ同様であり、中間基材を従来のシートからテープ状に変えても、曲げ破壊形態は変化していないことがわかる。

(a) Entire fracture surface.

(b) Detail of C
(Compression side). (c) Detail of D
(Tension side).

Fig. 15 SEM images at the fracture surface of sheet lay-up laminate.

4.4 テープ積層板の曲げ特性と繊維含有率の相関

4.2 節において、テープ積層板の曲げ特性はシート積層板のそれに対してわずかに低下することを示したが、両者の繊維含有率は異なっており、本来は同じ V_f 値の下で比較する必要がある。そこで、テープ積層板と同じ V_f 値におけるシート積層板の曲げ弾性率および曲げ強度を複合則により推定し、テープ積層板の実験値と比較を行った。なお、一般に強度については関係因子が多く、複合則のみによる強度推定は本来難しいが、今回はあえて弾性率と同様に推定を試みた^{*2)}。まず、曲げ試験により得られたシート積層板の曲げ弾性率 $E (=E^{\text{sheet}})$ 、曲げ強度 $\sigma_U (= \sigma_U^{\text{sheet}})$ および繊維含有率 V_f の各実測値およびマトリックス樹脂の弾性率 $E_m = 2.6 \text{ GPa}^{18)}$ から、式(1)により強化繊維自身の見かけ上の軸方向曲げ弾性率 E_f を算出した。次に、 E_f および E_m にそれぞれ破断ひずみ ($\epsilon_U = \sigma_U/E$) を乗じて、繊維とマトリックスの各最大応力値 σ_{fu} および σ_{mu} をそれぞれ求めた。それらの結果を Table 2 に示す。これら表中のパラメータ値と式(1)および(2)により、任意の V_f 値におけるシート積層板の曲げ弾性率 E および曲げ強度 σ_U を推定した。

$$E = V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (1)$$

^{*2)} 一方向強化積層板について、強度の場合も式(2)のような複合則が成立するとは限らない。しかし、実験結果によれば、応力と強化繊維含有率の関係が直線状になることから、狭い含有率範囲では、強度についても同複合則が成り立つものと考え、式(2)の直線式を当てはめた。

Table 2 Flexural modulus and ultimate stress of both fiber and matrix in sheet lay-up laminate.

Flexural modulus (GPa)		Ultimate stress (MPa)	
Fiber, E_f	Matrix, E_m	Fiber, σ_{fU}	Matrix, σ_{mU}
194	2.6 ¹⁸⁾	2925	39

$$\sigma_U = V_f \sigma_{fU} + (1 - V_f) \sigma_{mU} \quad (2)$$

その値をシート積層板の実験値 E^{sheet} および σ_U^{sheet} によりそれぞれ基準化し、実験値と比較して Fig. 16 および Fig. 17 にそれぞれ示す。まず、Fig. 16 の曲げ弾性率に注目し、テープ積層板の2つの実験値 (Type A, B) をそれぞれ同一 V_f 値のシート積層板の推定値と比較すると、いずれも両者の差は小さく、ほぼ近い値であることがわかる。これはすなわち、テープやシートなど中間基材の形態や、積層時における整列の影響は主に V_f の違いとして現れており、 V_f で整理することにより、テープとシート両積層板の結果がほぼよい一致を示すものと考えられる。このような V_f 依存性は、Fig. 17 に示した曲げ強度についても同様に現れており、繊維方向に対して行った今回の実験結果では、曲げ強度の推定についても複合則が適用でき得ることを示している。

ただし、Fig. 16 および 17 両図のデータを詳細に検討すると、テープ積層板の実験値がシート積層板の推定値よりもわずかに低い傾向にある。この原因は明確ではないが、曲げ変形時の面外 (層間) セン断応力が最大となる板厚中央部に柔らかい樹脂リッチ領域が形成されていることに加え、テープ継目部に生じる繊維配向の局所的な不整などが関係し、曲げ弾性率や曲げ強度がごくわずかに低下したものと考えている。しかし、その差は顕著ではなく、曲げ特性に大きな影響を及ぼす程度ではないことがわかる。

以上の結果から、テープ積層板の曲げ弾性率および曲げ強度の相対的な低下については、本積層法に伴う V_f の低下が最も大きな要因である。ただし、この V_f の低下を考慮すれば、テープ積層板の曲げ特性はシート積層板と本質的に同等であり、通針の影響がない部位においては、本細幅テープ積層法は積層板の繊維方向における機械的特性に顕著な影響を及ぼさない。さらに、今回のテープ積層に使用した樹脂フィルムおよびステッチ糸による樹脂体積増加分をシート積層板に加えた場合の平均的な V_f 値を計算すると 54.5% 程度となり、今回の Type A テープ積層板のそれと近い値になることを確認している。これはすなわち、本テープ積層工程において、基

Fig. 16 Relationship between flexural modulus and fiber volume fraction.

Fig. 17 Relationship between flexural strength and fiber volume fraction.

盤となる樹脂フィルムを成形後除去可能にするなど、 V_f の低下を防ぐ技術的工夫を行うことで、曲げ特性を改善できる可能性を示唆している。以上のことから、ミシンステッチによる細幅テープ基材積層法は、従来手法と比較して機械的特性を大きく損なうことなく、低コスト化と廃棄物低減を実現できる熱可塑基材積層法として、その有用性が期待できる。

ただし、今回行った検討は一方向積層板の繊維方向についてのみであり、その有用性を明確に実証するためには、テープ継目の影響を受けやすいと予想される繊維垂直方向や多方向積層板に加えて、通針が機械的特性に及ぼす影響など、今後さらなる検討が必要と考えられる。

5. 結 言

ミシンステッチを利用して、適所に適量の細幅テープ状熱可塑性中間基材を加熱溶融させることなく、迅速か

つ正確に積層する手法を開発した。それにより細幅テープCF/PA6 基材を積層し、ホットプレスにより一方向積層板を成形して、繊維方向に静的三点曲げ試験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 細幅テープ基材をミシンステッチ積層して得られた積層板の繊維含有率は、通常のシート状基材を成形した積層板のそれに比べて4~6% 程度低下した。これは、本積層工程における樹脂製副資材の追加によるものである。
- (2) テープ積層板繊維方向の曲げ弾性率および曲げ強度は、繊維含有率の低下を考慮すれば、シート積層板のそれらと同等である。通針がない部位においては、本細幅テープ積層法は積層板における繊維方向の機械的特性に顕著な影響を及ぼさない。
- (3) 樹脂製副資材を削減することにより、テープ積層板の繊維含有率および機械的特性を改善することが可能である。
- (4) ミシンステッチを利用した細幅テープ熱可塑性中間基材積層法は、材料を有効活用し、廃棄物低減を図る手法として、その有用性が期待できる。

参 考 文 献

- 1) 林 達彦：日経 Automotive Technology, **5** (2012), 40-55.
- 2) 浜田基彦：日経 Automotive Technology, **3** (2014), 64-69.
- 3) 大楠恵美：素材開発から見た自動車構造材の軽量化, 三井物産戦略研究所レポート, **5** (2012), 1-2.
- 4) 高田憲一：日経ものづくり, **10** (2014), 38-55.
- 5) P.D. McCowin : U. S. Patent 5700347 (1997).
- 6) J. Mondo, S. Wijskamp & R. Lenferink : *Proc. of International Conference & Exhibition on Thermoplastic Composites (ITHEC)* (2012), D2.
- 7) Z. August, G. Ostrander, J. Michasiow & D. Hauber : *SAMPE Journal*, **50**, 2 (2014), 30-37.
- 8) A.J. Comer, D. Ray, W.O. Obande, D. Jones, J. Lyons, I. Rosca, R.M. O'Higgins & M.A. McCarthy : *Composites Part A*, **69** (2015), 10-20.
- 9) C.M. Stokes-Griffin & P. Compston : *Composites Part A*, **78** (2015), 274-283.
- 10) D.R. Cramer, N.J. Beidleman, C.R. Chapman, D. O. Evans, M.K. Passmore & M.L. Skinner : U. S. Patent 8048253 (2011).
- 11) B. Hangs, A. Burkhart, D.R. Cramer, S.T. Jespersen & F. Henning : *Z. Kunststofftechnik/J. Plast.*, **8**, 2 (2012), 206-229.
- 12) 下原伊智朗, 池田慎哉, 松葉 朗, 河野洋輔, 西田裕紀, 近藤徹朗：日本国特許第 5660563 号 (2015).
- 13) K. Dransfield, C. Baillie & Yiu-Wing Mai : *Compos. Sci. Technol.*, **50**, 3 (1994), 305-317.
- 14) E.S. Greenhalgh : *Failure Analysis and Fractography of Polymer Composites*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge (2009), pp. 126-128.
- 15) D. Purslow : *Composites*, **12**, 4 (1981), 241-247.
- 16) 金原 勲, H. Chul Kim, 大沢 勇, 竹鼻三雄：材料, **28**, 315 (1979), 1160-1166.
- 17) D. Purslow : *Composites*, **19**, 5 (1988), 358-366.
- 18) 福本 修：ポリアミド樹脂ハンドブック, 日刊工業新聞社 (1988), p. 33.