

縫合技術を利用した炭素繊維織物強化複合材料の開発

藤田浩行，東山幸央，中野恵之，古谷 稔

要旨 強化繊維である炭素繊維と熱可塑性樹脂繊維からなる複合糸の作製に、縫合技術を用いた新たな方法を開発した。開発した複合糸は、糸の作製段階で樹脂量などの規格を容易に設計できるとともに、熱可塑性樹脂による炭素繊維織物強化複合材料の製造において技術課題であった樹脂の含浸性や炭素繊維織物の生産性を大きく改善することができた。また、開発した方法により成形した複合材料は、優れた機械的性質を持つことが明らかになった。今後は、製品化に向けた取り組みを実施する予定である。

1 緒 言

炭素繊維などの高強度・高弾性率繊維を強化材とする複合材料は、主としてエポキシ樹脂などの熱硬化性樹脂をマトリックス樹脂として用いられているが、近年、高靱性、リサイクル性および量産性等に優れた特長を生かして熱可塑性樹脂をマトリックスとした複合材料の研究開発および用途開発が活発に行われている。一方、使用される強化繊維の形態は、短繊維（数十mm以下）、フェルトおよび織物などがあるが、織物は繊維の連続性から強度的に最も優れている。高い剛性を持つ複合材料を開発するためには、粘度の高い熱可塑性樹脂を強化繊維および糸の隙間に十分溶解含浸させることが必要である。しかし、熱可塑性樹脂の含浸性を向上させるために様々な技術開発が行われているが、付着樹脂量の制御や製造コスト等の面で技術課題が残されている。

上記の技術課題を解決するにあたり、含浸性や樹脂量制御等の面で自由度を持つ材料開発する新しい方法として、強化繊維と熱可塑性樹脂繊維からなる複合糸を作製することによって、織物や組紐などの基材を用いた複合材料を成形する方法が考えられる。

本研究では、ミシンの縫合技術を活用して作製した複合糸から、織物強化複合材料を製造する技術を開発した。工業用ミシンを利用することにより低コストで複合糸が作製できるとともに、樹脂の高い含浸性により優れた機械的性質を持つ織物強化複合材料の成形が期待できる。ここでは、複合糸の作製技術を紹介するとともに、炭素繊維とポリエステル糸からなる複合糸から炭素繊維織物強化複合材料の作製を試みたので、その機械的性質についても述べる。

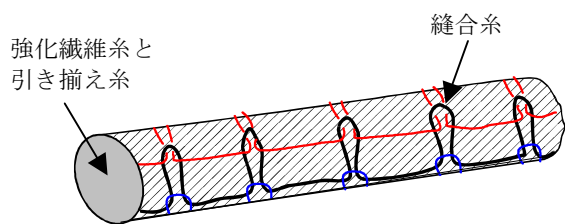
2 縫合複合糸の作製

2.1 複合糸の構造

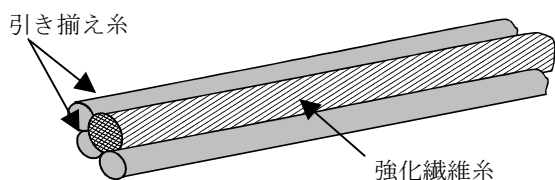
開発した複合糸は、強化繊維を芯とし、樹脂繊維により周りを巻くような形態をしている。また、強化繊維に樹脂繊維を複数本引き揃えた状態で、その周りを巻いた構造とすることも可能である。図1は、強化繊維である3Kの炭素繊維（ピッチ系）の周りを300Dのポリエステル（PET）のモノフィラメント糸により覆った複合糸である。周りの糸は、3本の糸により構成され、各々のループ形態の連続した編み構造により、強化繊維を覆っている。なお、複合糸の作製は、工業用ミシンの一つであるメローミシ

ンの縫合機構を用いて行うため、開発した複合糸を以降、縫合複合糸と呼ぶ。メローミシンは一般には、ハンカチの縁、ニットの裾処理などに利用されるミシンで布端を包み込むように縫うが、縫合複合糸は、この“巻縫い”という手法を用いて作製した。

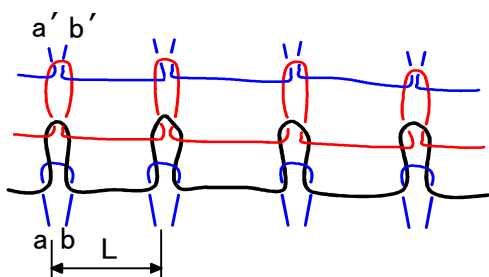
図2(a)に縫合複合糸の全体モデルを、図2(b)に強化繊維糸と引き揃え糸のモデルを示す。また、図2(c)に、図2(a)の縫合糸の平面への展開図を示す。なお、図2(c)のa-a'、b-b'の箇所糸は連続している。縫合糸は編み目により3本の糸が連結され、糸の長さ方向に連続した構造をしている。また、編み目の間隔Lは、縫合糸の送り量を変化させることにより変化できる。



(a) 縫合複合糸の全体モデル



(b) 強化繊維糸と引き揃え糸



(c) 縫合糸の展開図

図2 縫合複合糸の構造

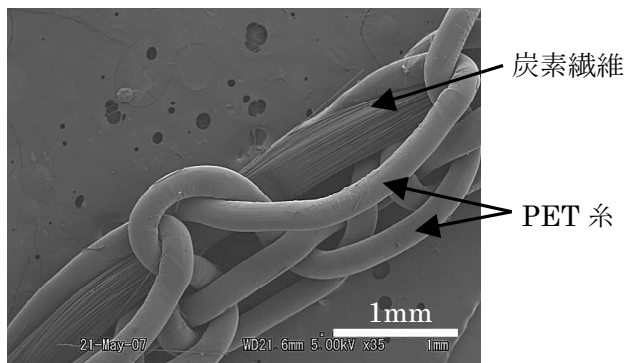
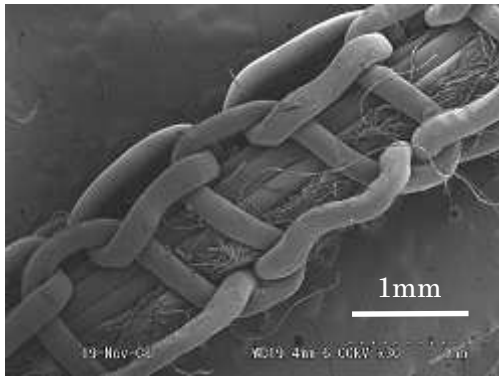


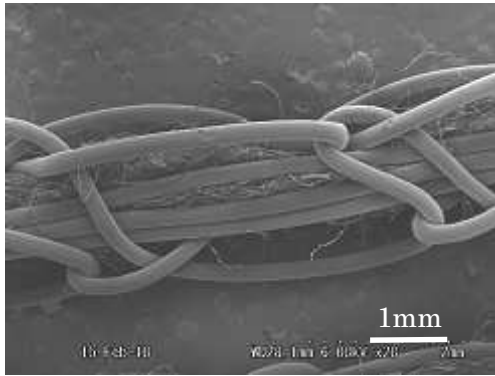
図1 炭素繊維とポリエステル糸の縫合複合糸

2.2 複合糸の企画設計

縫合複合糸は、強化繊維糸、縫合糸および引き揃え糸の3種類で構成され、各糸の素材や太さを選択できる。また、強化繊維糸および引き揃え糸の本数や縫合糸のピッチ等を任意に設定できる。したがって、縫合複合糸を用いた複合材料開発は、素材の選定や組み合わせおよび樹脂含有率制御などを糸の段階で容易に設計できることから、強度特性や衝撃特性など機能性を糸作製の段階で制御できる可能性がある。図3は、強化繊維に綿糸(10/4s)、縫合糸および引き揃え糸に300Dのポリプロピレン(PP)のモノフィラメント糸を用いた縫合複合糸であり、縫合ピッチを変化させた一例である。縫合に伴うループの回数が、図3(a)は13回/インチ、図3(b)は、6.5回/インチである。また、縫合ピッチ6.5回/インチの縫合複合糸について、引き揃え糸(PP)を1~5本と変化させた場合の繊維と樹脂の含有率変化の結果を表1に示す。引き揃え糸が多くなるにしたがい、ポリプロピレンの割合が増加している。また、縫合糸は、糸の曲げ剛性の影響を受けて編み目の形態や大きさが変化するとともに、縫合する強化繊維や引き揃え糸の見掛け直径の影響を受けて長さが増えると考えられる。そこで、縫合糸の長さの変化を表1の結果を基に以下のとおり検討した。本研究で用いた綿糸およびポリプロピレン糸の単位長さ当たりの重量は、式(1)および式(2)で表すことができる。単位長さ当たりの重量の関



(a) 13 回/インチ



(b) 6.5 回/インチ

図3 綿糸とポリプロピレン糸からなる縫合複合糸

$$\begin{aligned} \text{綿糸の単位長さ当たりの重量 } W_c(\text{gf/km}) &= \\ 453.6 / 2.5 \times 1000 / (840 \times 0.9144) &= 236.2 \\ \dots\dots\dots &(1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PP 糸の単位長さ当たりの重量 } W_{pp}(\text{gf/km}) &= \\ 300 \times 1000 / 9000 &= 33.3 \quad \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

係と表1の結果を基に、縫合糸1本当たりの長さを換算した結果をプロットし、図4に示す。その結果、綿/PP縫合複合糸の糸長に対して、約2.0~2.4倍の長さの縫合糸により覆われていることがわかる。また、引き揃え本数が多くなれば、縫合する糸の長さが増加している。これは引き揃え本数の増加により、中心部の糸の円周長さが大きくなったためである。つまり、縫合糸の糸長Lと引き揃え本数nは、式(3)の関係となると考えられることから、最小二乗法により近似式を計算した。その結果を式(4)に示し、図4に内挿する。式(4)は、糸の準備や樹脂含有

表1 綿/PP縫合複合糸の綿とPPの重量割合

引揃糸(本)	1	2	3	4	5
綿(wt%)	50.0	45.8	41.9	39.0	36.9
PP(wt%)	50.0	54.2	58.1	61.0	63.1

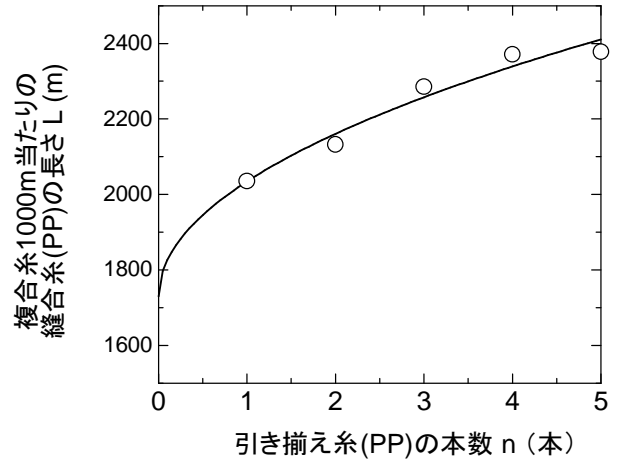


図4 引揃糸の本数と綿/PP縫合複合糸1000m当たりの縫合糸の長さ(計算値)の関係

率などの設計において重要であるとともに、定数は縫合糸の形態などの特長を定量評価する指標に有効であると考えられる。

$$L \propto \sqrt{n} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$L(n) = 305 \sqrt{n} + 1730 \quad \dots\dots\dots(4)$$

3 炭素繊維織物強化複合材料の作製

図1に示した炭素繊維とPET糸からなる縫合複合糸を作製し、得られた複合糸から複合織物を製織した。表2に複合糸の規格を、表3に作製した3種類の織物規格を示す。また、図5に規格-©の織物の外観を示す。なお、白っぽく見えるのは、PET糸である。複合糸に占める炭素繊維の重量割合は、約45wt%であった。

縫合複合糸の使用は、従来の綿用織機で炭素繊維織物が生産できるなど、炭素繊維の製織性を大幅に改善することができるだけでなく、加熱圧縮工程のみでマトリックス樹脂となる複合

表2 炭素繊維/PET縫合複合糸の規格

	素材	太さ	本数	ピッチ
強化繊維	炭素繊維	3K	1	5本/インチ
縫合糸	PET	300D	3	
引き揃え糸	PET	300D	6	

表3 炭素繊維/PET複合織物の規格

		規格 ①	規格 ②	規格 ③
織組織		平織	平織	平織
織密度 (本/インチ)	たて糸	24	21	11
	よこ糸	11	11	11

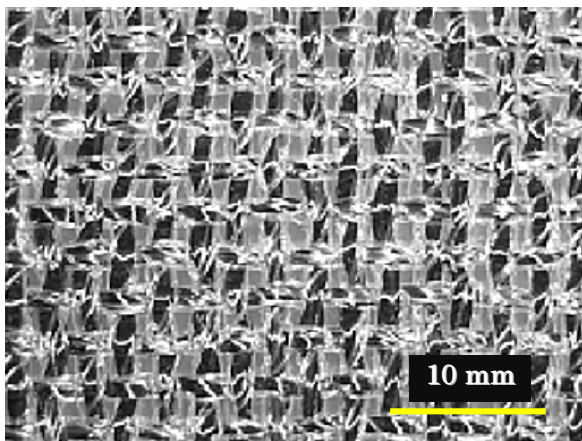


図5 炭素繊維/PET複合織物(規格-③)

織物のPET糸の熔融と織物間隙への高い樹脂含浸により高強度の複合材料の成形も期待できる。そこで、規格-①、②、③の織物を図6に示す積層構成により8枚重ね、ホットプレス機により加熱圧縮して炭素繊維織物強化複合材料を成形し、その曲げ特性を評価した。積層構成は曲げ弾性率が向上することを目的に、たて糸密度の多い織物が材料断面の外側とする構成にした。金型温度270℃、圧力3MPaで5分間加熱圧縮し、試料厚み1.5mmとなるようスペーサーで調整した。三点曲げ試験の結果、曲げ強度453MPa、曲げ弾性率63.4GPaが得られた。曲げ弾性率については、既に市販されているポリエーテルイミド(PEI)と炭素繊維の複合材料の曲げ弾性率をかなり上回る特性¹⁾が得られた。



図6 複合織物の積層構成

4 結 言

強化繊維である炭素繊維と熱可塑性樹脂繊維からなる複合糸の作製に、縫合技術を用いた新たな方法を開発した。開発した複合糸は、糸の作製段階で樹脂量などの規格を容易に設計できるとともに、熱可塑性樹脂による炭素繊維織物強化複合材料の製造において技術課題であった樹脂の含浸性や炭素繊維織物の生産性を大きく改善することができた。また、開発した方法により成形した複合材料は、優れた機械的性質を持つことが明らかになった。

今後は、製品化に向けた取り組みを実施する予定である。

参 考 文 献

- 1) “平成20年度熱可塑性樹脂複合材料の航空機分野への適用に関する調査報告書”，(社)日本機械工業連合会，(財)次世代金属・複合材料研究開発協会，P32，(2008)。