

## 撚り構造が炭素繊維織物の力学的特性に及ぼす影響

田茂井 勇人 (京都工芸繊維大学 工芸科学研究科, info@tayuh.jp)

小林 彩香 (京都工芸繊維大学 工芸科学研究科, a.koba0601v@gmail.com)

仲井 朝美 (岐阜大学 工学部, nakai@gifu-u.ac.jp)

鋤柄 佐千子 (京都工芸繊維大学 工芸科学研究科, sukigara@kit.ac.jp)

### Effect of the twist structure on mechanical properties of carbon fiber fabric

Hayato Tamoi (Graduate School of Advanced Fibro-Science, Kyoto Institute of technology, Japan)

Ayaka Kobayashi (Graduate School of Advanced Fibro-Science, Kyoto Institute of technology, Japan)

Asami Nakai (Faculty of Engineering, Gifu University, Japan)

Sachiko Sukigara (Faculty of Advanced Fibro-Science, Kyoto Institute of technology, Japan)

#### 要約

本研究では、繊維の配向、繊維の種類、織組織を変化させた織物を使用し、撚り構造が炭素繊維織物の力学的特性に及ぼす影響について実験的に検討した。評価方法としてはKES法の標準測定試験条件を元に、圧縮試験、曲げ試験を用いた。圧縮特性については、各試料において撚り数10、30 T/mでは圧縮仕事量は増加し、その後減少した。扁平である繊維束に撚りを少し施すことで繊維束の形状が楕円から円に近づき、厚みを生じる。厚みが増加することにより、圧縮仕事量は増加する。一方、撚りが多くなるにつれて繊維束の締め付け力が大きくなり、硬くなる傾向にある。すなわち、圧縮仕事量は減少する。この繊維の性質が結果に表れたと考えられる。曲げ特性については、すべての織物において曲げ剛性は撚り数の増加とともに増加し、撚り数が100 T/m以上になると減少した。繊維束に撚りを施すことで繊維束の締め付け力が大きくなり硬くなる傾向にあるが、撚り数がある一定値を超えると織物が平面を保てなくなり、面外に変形した。以上のように、繊維構造ハイブリッドの概念を炭素繊維織物に適用することにより、強化形態である織物の力学的特性を変化させることが可能であることがわかった。

#### キーワード

織物, 撚糸, 炭素繊維, 力学的特性, KES法

#### 1. 緒言

繊維強化複合材料は、強化繊維、樹脂、およびこれらから形成される界面の3つの構成要素より構成されているが、単一の繊維および樹脂からなる複合材料では発現できない物性を材料に付与するため、2種類以上の繊維または樹脂を組み合わせた材料であるハイブリッド複合材料に関して数多くの研究がなされている。ハイブリッド化により、相互に短所を補い、それぞれの長所を生かすことによる高機能化が期待される。ハイブリッド化技術に関しては、“繊維ハイブリッド”、“樹脂ハイブリッド”、“界面ハイブリッド”に関する視点から研究例が報告されている。それぞれ、1つの複合材料中に、“複数の強化繊維を使用した材料”、“複数のマトリックス樹脂を使用した材料”、“異なる表面処理を有する複数の繊維を組み合わせた材料”と定義されている。

著者らは、“繊維ハイブリッド”の定義を、さらに、“繊維物性/繊維配置/繊維構造”ハイブリッドの3つの概念に拡張することを提案してきた。“繊維物性ハイブリッド”、“繊維配置ハイブリッド”、“繊維構造ハイブリッド”をそれぞれ、1つの複合材料中に、“特性の異なる繊維材料を併用した材料”、“材料の組み合わせおよび比率を変更せずに、異なる繊維材料同士の相対位置を変更した材料”、“同じ繊維材料を使用しているが、織度や撚糸状態等、構造が異なる繊維材料を併用した材料”と定義する。織物の一種であるちりめんは、繊維構造ハイブリッドの典型例であり、たて糸に無撚糸を使用し、よこ糸には強撚糸が

使用されている。ちりめんとは、たて糸に撚りの無い生糸と、よこ糸に強い撚りをかけた生糸を織り込んで生地にし、その後、精練することによって糸が収縮し、よこ糸の撚りがもどり、生地全面に細かい凸凹状の「シボ」がでた織物のことをいう(中田・岩淵, 1975)。山下他(1997)は、クレープ織物のしぼ形状の設計指針を構築するため、製織条件が収縮率、しぼ数、しぼ形状に及ぼす影響について明らかにした。西川他(2007)は、綿クレープ中の強撚糸の3次元変形についてらせん数を求める予測式を算出し、加撚トルクと解撚トルクの両方を実験的に測定し、トルクの違いがらせん数に及ぼす影響について明らかにした。浅井他(1998)らは、収縮する一越ちりめんの防縮加工法を検討し顕著な防縮効果を示す方法を見出した。鋤柄他(1992; 1999; 2009)は、アパレル用途の布について表面を感覚と物性の両面から評価することで布特有の性質を明らかにした。Pan and Brookstein(2002)は、天然繊維やナイロン、ポリエステルなどの合成樹脂繊維の糸やロープの撚りが特性に及ぼす影響について明らかにした。しかしながら、炭素繊維織物の撚り構造が力学的特性に与える影響について研究した例はない。

本研究では、繊維構造ハイブリッドの概念を炭素繊維織物に適用し、撚り数の異なる炭素繊維織物を作製した。繊維の配向、繊維の種類、織組織を変化させた織物を使用し、撚り構造が炭素繊維織物の力学的特性に及ぼす影響について実験的に検討した。評価方法としてはKES法の標準測定試験条件を元に、圧縮試験、曲げ試験を用いた。

#### 2. 供試材料

供試材料には、炭素繊維(TR 30S 3L A1, 三菱レイヨン(株)製)、

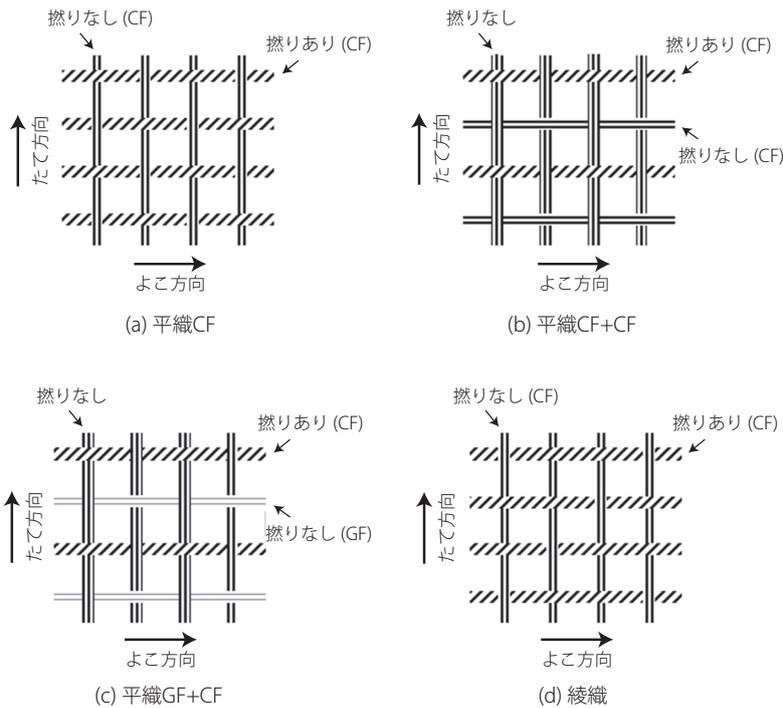


図1：織物

ガラス繊維 (ECG 75-1/0 z, 日東紡績(株)製) を用いて、4種類の織物を作製した。図1に模式図を示す。この4種類の織物のよこ糸に撚り加工をおこなった。平織CFは、たて糸、よこ糸ともに炭素繊維を使用してよこ糸に撚りを施した平織物である。平織CF+CFはたて糸、よこ糸ともに炭素繊維を使用し、よこ糸は撚り有と無しの繊維束を交互に配置させた平織物を作製した。平織CF+GFはたて糸が炭素繊維、よこ糸に炭素繊維とガラス繊維を交互に配置し、炭素繊維にのみ撚りを施して平織物を作製した。綾織はたて糸、よこ糸ともに炭素繊維を使用してよこ糸に撚りを施した綾織物を作製した。撚り加工の作製条件として、1mあたりの撚り数を0、10、30、50、100、200回の6種類とした。撚り加工はリング撚糸機を用いた。

図2に各試料の繊維密度と撚り数の関係を示す。全ての試料において撚り数の増加に伴い繊維密度は増加した。これは、織物作製時に撚りを施すことで繊維束が細くなり隙間が生じてしまうため、撚り数の増加に伴いよこ糸本数を増加させているためである。

図3に各試料の試験片厚さと撚り数の関係を示す。全ての試験片において、撚り数の増加に伴い試験片厚さは増加した。これは、撚り数の増加に伴い繊維束の形状が楕円から円に近づくことで厚さが増加したためである。

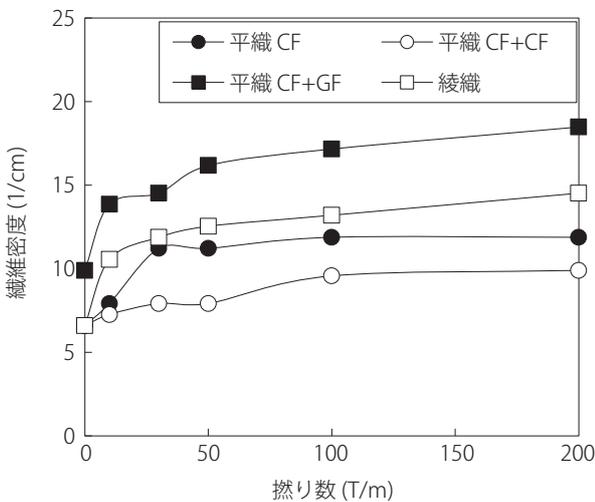


図2：繊維密度—撚り数

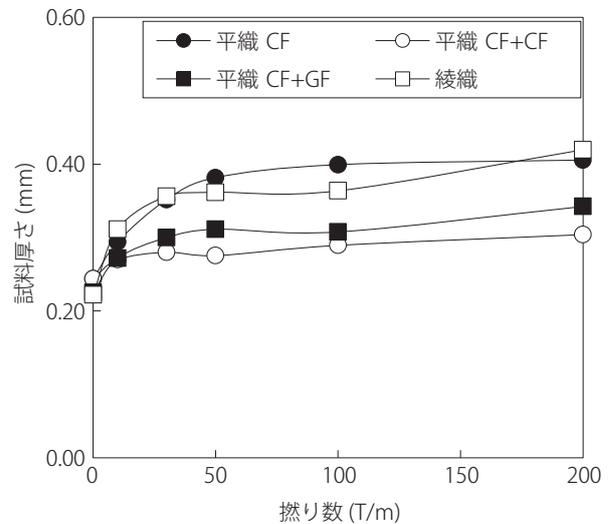


図3：試験片厚さ—撚り数

### 3. 圧縮試験

#### 3.1 供試材料および試験方法

供試材料には、4種類の織物に6種類の撚りを施した計23種類の試料を用いた。試料は15 cm × 15 cmに切断し、外枠を養生テープで固定した。

炭素繊維織物の圧縮試験はKES法の標準測定試験条件で測定をおこなった。圧縮特性とは、布に垂直方向に圧縮した時の布の厚みと圧力の関係をいう。圧縮試験は、ハンディー圧縮試験機 (KES-G5S) を用いて測定した (図4)。断面積が2 cm<sup>2</sup>の円形圧縮子を用いて、最大圧縮時圧力を50 gf/cm<sup>3</sup>、圧縮速度を20 μm/secで測定をおこなった。圧縮試験は、1つの試料につき同一箇所連続して3回おこない、それぞれの試料につき異なる4カ所で圧縮変形をおこなった。

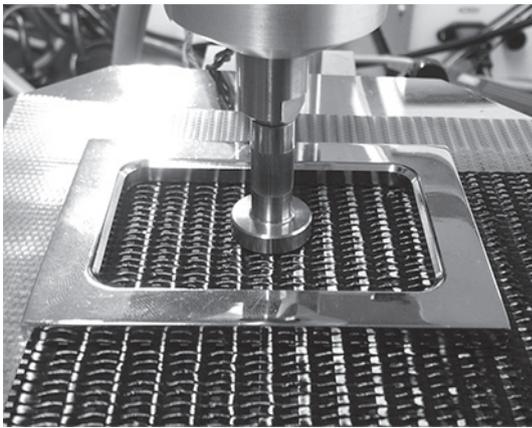


図4：圧縮試験機写真

圧縮試験により得られた圧力と圧子の移動距離の関係の一例として平織CF、30 T/mの結果を図5に示す。いずれも同様のヒステリシス曲線を示したが、織構造の違いによって曲線の軌跡が異なり、往路での違いが顕著であった。そこで、圧縮試験により得られた圧縮仕事量(WC)を特性値として比較、検討をおこなった。WCは最大圧縮荷重に圧縮するまでのエネルギーであり、往路を通るABCの面積で表される。一般的に圧縮仕事量が多いほど、布はつぶれやすい場合が多いと言われている。

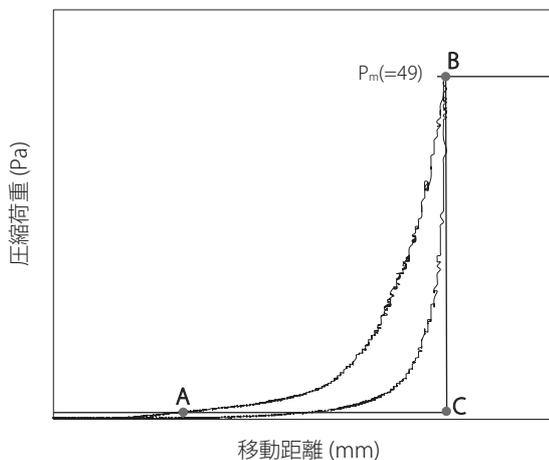


図5：圧縮荷重—移動距離

#### 3.2 試験結果

1つの試料につき同一箇所連続して3回圧縮試験をおこない、圧縮仕事量を算出した。それぞれの織物において1回目よりも2、3回目において仕事量が減少しており、2回目と3回目ではあまり差が生じなかったことから、特性値として3回目の値を使用した。

図6に各試料の圧縮仕事量と撚り数の関係を示す。各試料において撚り数10、30 T/mではWCの値は増加し、その後減少した。扁平である繊維束に撚りを少し施すことで繊維束の形状が楕円から円に近づき、厚みを生じる。厚みが増加することにより、圧縮仕事量は増加する。一方、撚りが多くなるにつれて繊維束の締め付け力が大きくなり、硬くなる傾向にある。すなわち、圧縮仕事量は減少する。この繊維の性質が結果に表れたと考えられる。

平織と綾織の圧縮仕事量と撚り数の関係を比較する。平織と綾織では撚り数を0から200 T/mと変化させた場合の圧縮仕事量の変化率はそれぞれ6.6%および6.7%とほぼ同じ値となった。変化率はほぼ同じにも関わらず、平織と比較して綾織の方が圧縮仕事量の値は大きい。これは、平織と綾織の織組織が異なるためだと考えられる。平織と比較して綾織は組織(糸の交差する点)が少ないため、よこ糸繊維束が動きやすい構造となっている。したがって綾織は繊維束が動きやすく圧縮仕事量が増加したと考えられる。

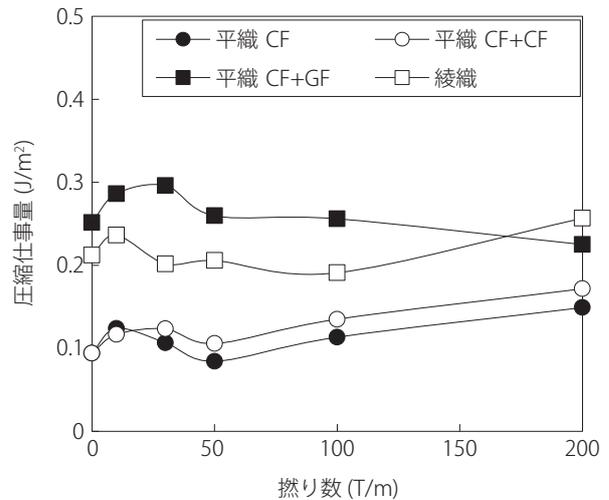


図6：圧縮仕事量—撚り数

### 4. 曲げ試験

#### 4.1 供試材料および試験方法

供試材料には、4種類の織物に6種類の撚りを施した計23種類の試料を用いた。試料は縦10 cm × 横25 cmに切断し、横端を養生テープで固定した。

炭素繊維織物の曲げ試験は、KES法の標準測定試験条件で測定をおこなった。曲げ特性とは、布の曲げ変形時のモーメントと、曲率との関係をいう。曲げ特性は純曲げ試験機 (KES-FB2) を用いて測定した (図7)。最大曲率は±2.5 cm<sup>-1</sup>、曲げ速度を0.5 cm<sup>-1</sup>/secとしてよこ糸に対して曲げ試験をおこなった。試験により得られた曲げモーメントと曲率半径の関係の

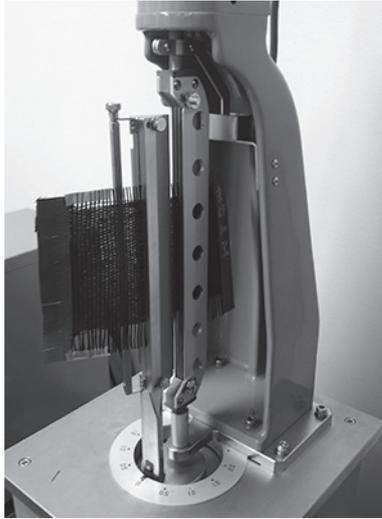


図7：純曲げ試験機写真

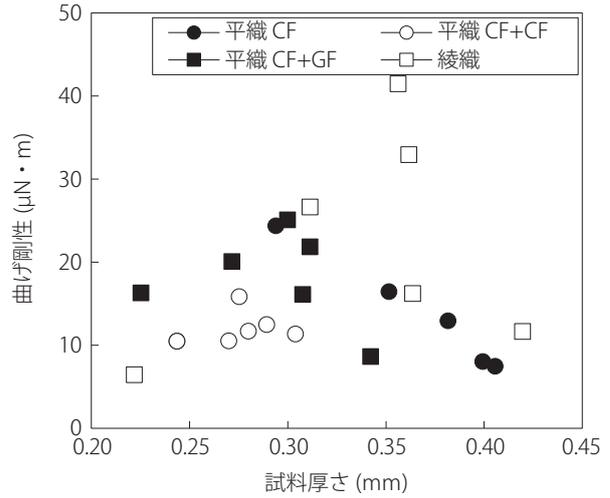


図9：曲げ剛性B1- 試料厚さ

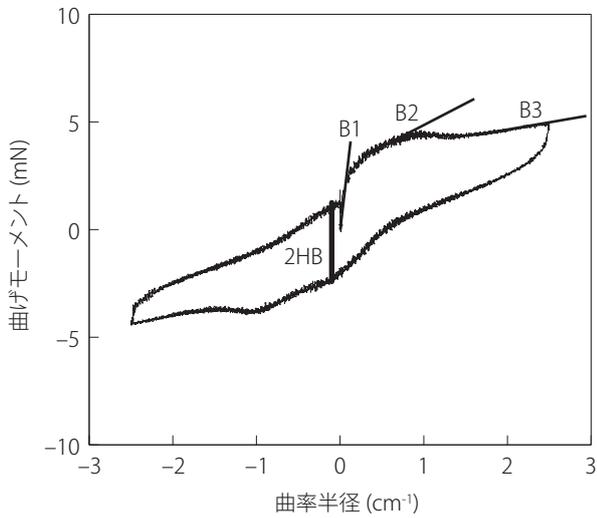


図8：曲げモーメント—曲率半径

一例として、平織CF、撚り数0 T/mの結果を図8に示す。いずれも同様のヒステリシス曲線を示したが、織構造の違い、撚り数の違いによって曲線の軌跡が異なった。そこで、図8に示すように曲げ初期での曲げモーメントから算出した曲げ剛性B1、曲率 $0.5 \text{ cm}^{-1}$ での曲げモーメントから算出した曲げ剛性B2、曲率 $2.0 \text{ cm}^{-1}$ での曲げモーメントから算出した曲げ剛性B3として算出した。曲げ剛性の値が大きいくほど、布は曲げにくいと言える。また、曲率 $-0.1 \text{ cm}^{-1}$ における往路と復路の曲げヒステリシスの差を曲げヒステリシス幅2HBとして算出した。曲げヒステリシス幅は曲げ変形によって生じる繊維間摩擦成分を示しており、この幅が大きいくほど曲げ変形からの回復性が悪いと言える。曲げ試験は、1つの試料につき場所を変えて3か所で測定をおこなった。各特性値はその平均値を使用した。

#### 4.2 試験結果

平織CF、平織CF+CF、平織CF+GF、綾織に0、10、30、50、100、200 T/mと撚りを施した試料の曲げモーメント図

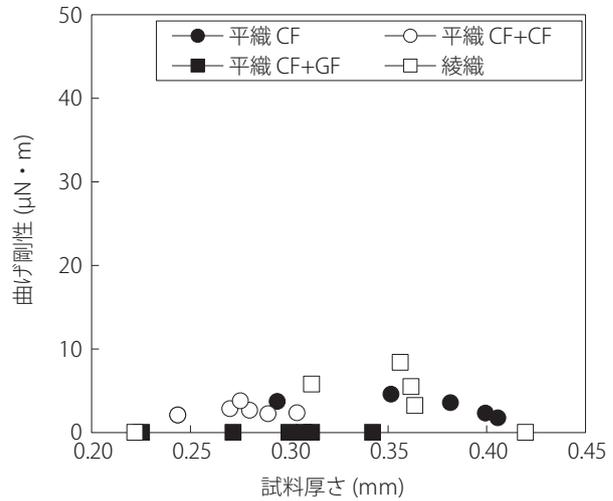


図10：曲げ剛性B2- 試料厚さ

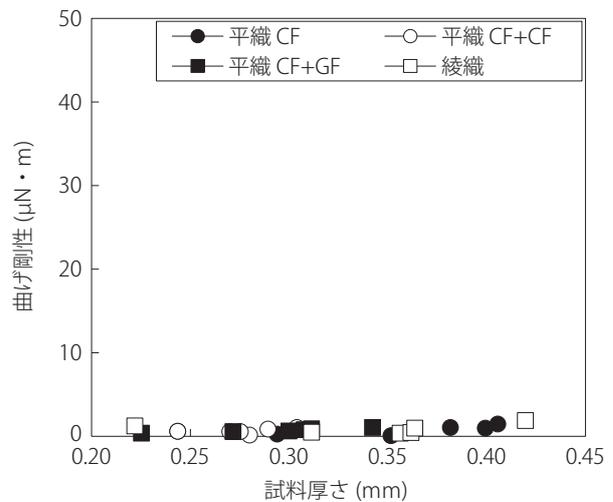


図11：曲げ剛性B3- 試料厚さ

では、各織物および撚り数によって曲げモーメントと曲率の関係図は異なった。この傾向を定量的に検討するために、曲げ剛性B1、曲げ剛性B2、曲げ剛性B3を測定した。それぞれの測定結果と試料厚さとの関係をそれぞれ図9～11に示す。B1、B2は試験片厚さの増加に伴い増加したが、B3は変化しなかった。一般的に、曲げ剛性は厚さに依存していることが知られていることから、本試料の曲げ剛性も同様に試験前の試料厚さに依存していることが明らかとなった。今後は、傾向が顕著に現れた曲げ初期での曲げ剛性B1で検討する。

図12に各織物の曲げ初期での曲げ剛性B1と撚り数の関係図を示す。平織CFは10 T/m、平織CF+CFは50 T/m、平織CF+GFと綾織は30 T/mで、曲げ剛性B1のピークが見られたことから、織構造、繊維の種類によって曲げ剛性値のピークが異なることがわかる。また、すべての織物において撚り数が100 T/m以上になると撚り数の増加に伴い曲げ剛性B1は減少した。繊維束に撚りを施すことで繊維束の締め付け力が大きくなり硬くなる傾向にあるが、撚り数がある一定値を超えると織物が平面を保てなくなり、面外に変形した。よって撚り数100 T/m以上では織物が曲がりやすくなったため曲げ剛性値が減少したと考えられる。さらに、撚り数を増加することで繊維束間に隙間が生じることから、曲げ剛性値が低下したと考えられる。

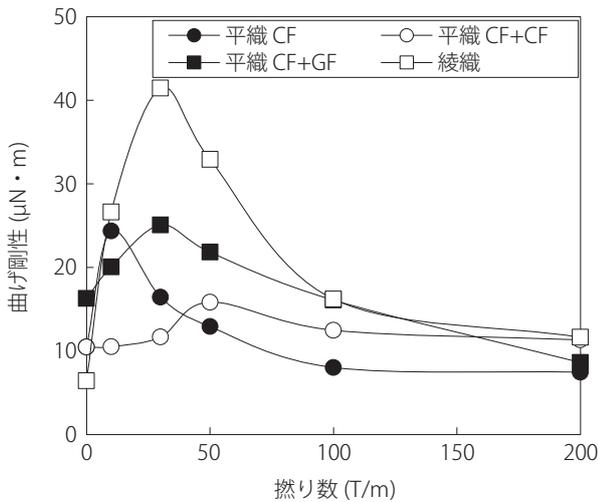


図12：曲げ剛性B1-撚り数

図13に各織物の曲げヒステリシス幅2HBと撚り数の関係を示す。平織CF+CFは10 T/m、平織CF、平織CF+GF、綾織は30 T/mで曲げヒステリシス幅2HBのピークが見られ、撚り数が100 T/m以上になると収束した。

平織CFと平織CF+CFの線図の挙動を比較すると、平織CF+CFの方が撚り数による曲げ剛性値および曲げヒステリシス幅の変化が少なかった。これは、平織CF+CFはよこ糸の撚りが1本毎に施されているため、撚りによる影響が現れにくかったためだと考えられる。また、平織CFと綾織を比較すると、綾織は撚り数10～50 T/mにおいて曲げ剛性値、曲げヒステリシス値ともに顕著に大きな値を示した。曲げ剛性値が大きくなった要因は平織に比べて綾織は組織点が少ないためよこ糸の影響を受けやすく、撚りが施されたことによって、よこ糸の曲げ剛性値が増加したと考えられる。また、曲げヒステリシス幅が大きくなった要因は、綾織はよこ糸が移動し、繊維が元の位置に戻らなかったためだと考えられる。

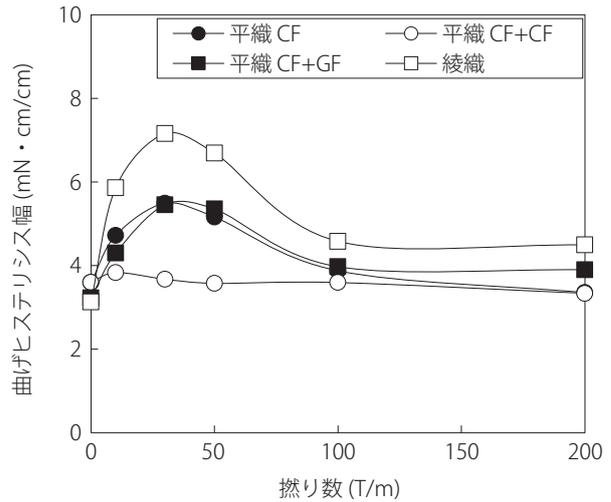


図13：曲げヒステリシス幅2HB-撚り数

め、よこ糸の影響を受けやすく、撚りが施されたことによって、よこ糸の曲げ剛性値が増加したと考えられる。また、曲げヒステリシス幅が大きくなった要因は、綾織はよこ糸が移動し、繊維が元の位置に戻らなかったためだと考えられる。

## 5. 結言

本研究では、繊維の配向、繊維の種類、織組織を変化させた織物を使用し、撚り構造が炭素繊維織物の力学的特性に及ぼす影響について実験的に検討した。評価方法としてはKES法の標準測定試験条件を元に、圧縮試験、曲げ試験を用いた。

圧縮特性については、圧縮仕事量を用いて評価した。各試料において撚り数10、30 T/mでは圧縮仕事量は増加し、その後減少した。扁平である繊維束に撚りを少し施すことで繊維束の形状が楕円から円に近づき、厚みを生じる。厚みが増加することにより、圧縮仕事量は増加する。一方、撚りが多くなるにつれて繊維束の締め付け力が大きくなり、硬くなる傾向にある。すなわち、圧縮仕事量は減少する。この繊維の性質が結果に表れたと考えられる。

曲げ特性については、曲げ初期での曲げ剛性および曲げヒステリシス幅を用いて評価した。すべての織物において曲げ剛性は撚り数の増加とともに増加し、撚り数が100 T/m以上になると減少した。繊維束に撚りを施すことで繊維束の締め付け力が大きくなり硬くなる傾向にあるが、撚り数がある一定値を超えると織物が平面を保てなくなり、面外に変形した。平織と綾織を比較すると、綾織は曲げ剛性値、曲げヒステリシス値ともに顕著に大きな値を示した。曲げ剛性値が大きくなった要因は平織に比べて綾織は組織点が少ないためよこ糸の影響を受けやすく、撚りが施されたことによって、よこ糸の曲げ剛性値が増加したと考えられる。また、曲げヒステリシス幅が大きくなった要因は、綾織はよこ糸が移動し、繊維が元の位置に戻らなかったためだと考えられる。

以上のように、繊維構造ハイブリッドの概念を炭素繊維織物に適用することにより、強化形態である織物の力学的特性を変化させることが可能であることがわかった。これらの成果をもとに、最終製品の形態を考慮して賦形性を制御し、賦

---

形・成形時のしわの問題や残留応力の問題を解決できる可能性が示唆された。

#### 謝辞

本研究の遂行に関して、京都工芸繊維大学の勇地有理氏には実験にご協力頂きました。ここに記し、謝意を表します。

#### 引用文献

- 浅井紀夫・林良之・岡川逸郎 (1989). 樹脂加工による一越ちりめん絹織物の防縮. 日本蚕糸学雑誌, Vol. 58, No. 1, 77-78.
- 中田英敏・岩渕幹寛 (1975). クレープ織物の設計に関する研究. 繊維機械学会, Vol. 28, No. 8, 471-478.
- 西川重和・高政行・三宅肇・篠原明 (2007). 綿クレープ織物中の強撚糸が作るらせん和の解析. 日本繊維機械学会, Vol. 53, No. 4, 151-157.
- Pan, N. and Brookstein, D. (2002). Physical properties of twisted structures. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.83, 610-630.
- 鋤柄佐千子 (2009). 表面テクスチャの完成評価と物性. 日本繊維機械学会, Vol. 112, No. 10861, 414-417.
- 鋤柄佐千子 (1999). 繊維集合体の風合い評価. 日本化粧技術会誌, Vol. 33, No. 3, 213-219.
- 鋤柄佐千子・藤本尊子・丹羽雅子 (1992). パンティーストッキングの性能評価について一肌触りに関わる素材物性の客観的評価一. 繊維製品消費科学, Vol. 33, No. 12, 32-40.
- 鋤柄佐千子・丹羽雅子 (1992). ポリエステル加工糸織物の風合いの改良に関する研究. 繊維機械学会誌, Vol. 38, No. 1, 105-114.
- 丹羽雅子・伊藤紀子・鋤柄佐千子他 (1997). アパレル科学美しく快適な被服を科学する. 朝倉書店.
- 山下重和・高寺政行・篠原昭 (1997). 綿クレープ設計における撚糸および織物構造の影響. 繊維機械学会誌, Vol. 50, No. 6, 77-85.

(受稿：2014年12月25日 受理：2015年2月25日)