

天然繊維撚糸およびこれを用いたグリーンコンポジットの力学特性に及ぼす撚糸構造の影響†

吉田 一 幾* 黒瀬 司* 中村 理 恵**
野田 淳 二*** 合田 公 一***

Effect of Yarn Structure on Mechanical Properties of Natural Fiber Twisted Yarns and Green Composites Reinforced with the Twisted Yarn

by

Kazuki YOSHIDA *, Tsukasa KUROSE *, Rie NAKAMURA **, Junji NODA *** and Koichi GODA ***

Natural fiber twisted yarn has high potential as a reinforcement of green composites, because the yarn is produced as a continuous form, which is necessary for exhibiting reinforcing mechanism in a composite. In a twisted yarn, spun yarn filaments meander from the twisted yarn surface to inner along the yarn axis. This phenomenon is called 'migration', and yarn structural mechanics has been developed by taking an ideal migration into consideration. In the yarn mechanics, yarn tensile properties are often expressed as a function of twist angle, while yarn structure depends strongly on performance of twisting machine. Thus, the present study deals with the effect of twist contraction ratio (TCR), one of the most important parameters in yarn structure, on tensile properties of twisted yarns and green composite reinforced with twisted yarn. Ramie spun yarn filaments were used as a test material, and the twisted yarn were produced using auto or hand twisting machine. The results show that relation between mechanical properties of the twisted yarn and yarn structure can reasonably be comprehended when choosing TCR as an evaluation parameter. Furthermore, this study additionally deals with relation between theoretical elastic modulus, and twist angle or TCR based on the experimental data of green composites as well as twisted yarns.

Key words : Natural fibers, Ramie, PVA, Green composites, Twisted yarn, Twist contraction ratio, Strength, Elastic modulus

1 緒 言

深刻な地球環境問題の解決に向けて、持続可能な材料に関わる取組みが活発に行われている。たとえば、人工繊維を用いた繊維強化プラスチック (FRP) は、その優れた強度、剛性ゆえに、様々な分野で使用されているが、上述のような背景から使用後のリサイクル処理に関する研究が進められている。^{1), 2)}一方、バイオマスの有効利用の観点から、強化材に天然繊維を使用した複合材料 (グリーンコンポジット) の研究も精力的に行われている。³⁾

通常、天然繊維は紡績工程を経て撚糸と呼ばれる連続糸に加工される。このような撚糸は、グリーンコンポジットに高い強度・剛性をもたらす強化材として期待されている。^{4), 5)}しかしながら、高強度・高剛性を示す撚り構造は、これまで十分に解明されていない。マイグレーション (migration) と呼ばれる繊維が撚糸表面から内部へと連続的に不規則に流れる構造により、撚糸の力学特性を向上させる最適形態を予測することが困難となるからである。⁶⁾

本研究は、撚糸構造が撚糸の力学的性質を支配することに着目し、従来の撚り角をパラメータとする評価に替わるものとして、撚り縮み比の妥当性を提示するもので

ある。まず、撚り縮みにマイグレーションを取り入れた従来の理論モデルについて論ずるとともに、撚り構造の異なる諸撚糸および諸撚糸に生分解性樹脂を含浸させた複合材の引張試験を実施し、力学特性と撚り縮み比の関係について調査した。加えて、撚糸弾性率理論による実験結果への適合性も試みたので報告する。

2 マイグレーション理論

Zeidman ら⁷⁾は、Treloar,⁸⁾Hearle ら^{6), 9)}によるマイグレーション理論は、従来の円筒モデルの欠点を補った撚糸構造にふさわしいものであることを指摘した。本章では、まず Hearle らの理論撚り縮み比の別解法について検討し、その撚り構造の意味するところを述べるとともに、これを修正した理論式について提案する。

2・1 Hearle らの理論モデルの別解法

Hearle ら²⁾は、Fig. 1 のように撚糸内に厚さ Δr 、長さ Δz の薄肉円筒層を考え、円筒内に存在する繊維が位置 A から B へらせん状に変化するモデルを考えた。そして繊維の長さ Δq と体積 ΔV が比例関係にあると仮定し、 $\Delta V \propto 2\pi r \Delta r$ とおいて理論解を導出した。この関係をそのまま記述すると、

† 原稿受理 平成 23 年 6 月 13 日 Received June 13, 2011 ©2012 The Society of Materials Science, Japan

* 山口大学大学院理工学研究科院生 〒755-8611 宇部市常盤台, Graduate School of Sci. and Eng., Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

** 正会員 日本大学工学部 〒963-8642 郡山市田村町徳定, College of Eng., Nihon Univ., Tamura-cho, Koriyama, 963-8642

*** 正会員 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 宇部市常盤台, Graduate School of Sci. and Eng., Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

$$\Delta q \propto \Delta V = 2\pi r \Delta r \Delta z \quad (1)$$

である。ここで、繊維の詰め込み密度は各点で均等と仮定している。本研究では式(1)の等式部を直接積分することで解の導出を試みる。いま、半径 r とらせん角 θ の比が撚糸半径 R と撚り角 Θ (撚糸表面のらせん角) の比に等しいような理想的なマイグレーションが半径方向に連続的に成立するとし、

$$\frac{\tan \theta}{r} = \frac{\tan \Theta}{R} \quad (2)$$

とおく。Fig. 1 の円筒を Fig. 2 に示すように軸方向に切断して半径方向に切り開くとき、 Δq と Δz の関係は、

$$\Delta q \cos \theta = \Delta z \quad (3)$$

と与えられる。 $\Delta \rightarrow d$ と書き換えて式(1)を積分すると、

$$V = \int_0^{L/2} \int_0^R 2\pi r dr dz = \frac{\pi R^2 L}{2} \quad (4)$$

となる。ここで、 $L/2$ はマイグレーションの半行程 (繊維の撚糸中心から表面に至るまでの長さ $Q/2$) に対応する軸方向長さである。式(2)(3)を式(4)に代入して解くと、撚り縮み比 L/Q は以下の Hearle らの解と一致する。

$$\frac{L}{Q} = \frac{2}{1 + \sec \Theta} \quad (5)$$

このように、Hearle らの理論は、微小体積 ΔV を繊維のらせん角 θ および繊維長 q の関数として表わし、これを全体積に一致するように積分することで得られる。式(2)から半径 r の座標位置によって θ は異なった値をとるので、 z 方向のみに積分するとき、 r に依存して長さの異なる繊維が与えられる。これを撚糸の長さ $L/2$ と等価とみなして平均化しているのので、式(5)は繊維長が大小混在する場合にも平均的な指標として適用できる。

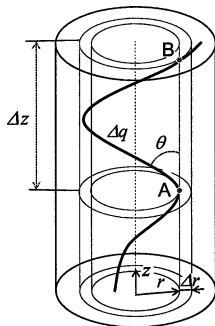


Fig. 1 Coordinate system for fiber migration in a twisted yarn.

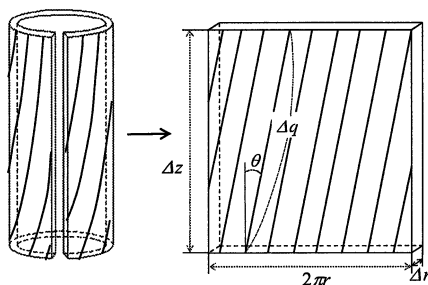


Fig. 2 Open-up structure of a lamina.

2・2 Hearle らの理論モデルの再考

Fig. 2 から判断できるように、実際は $2\pi r \Delta r$ は Δq に比例せず、 $\Delta q \times \sin \theta$ に比例して変化する。すなわち、

$$\Delta q = c \frac{2\pi r}{\sin \theta} \Delta r = c' \sec \theta \Delta r \quad (6)$$

と表わすことができる。ここで、 c および c' は比例係数であり、式(2)より $c' = c 2\pi R / \tan \Theta$ の関係にある。式(6)は θ の増加につれて Δq が大きくなることを意味するが、 Θ が小さいときその効果は低い。 $\Delta \rightarrow d$ と書き換えてこれを解くと、

$$\begin{aligned} \int dq &= c' \int \sec \theta d\theta = c' \int \sqrt{1 + \left(\frac{r}{R}\right)^2 \tan^2 \Theta} dr \\ &= \frac{c'R}{2 \tan \Theta} \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{r}{R} \tan \Theta \right) + \frac{1}{2} \sin \left(2 \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{r}{R} \tan \Theta \right) \right) \right\} + C \end{aligned} \quad (7)$$

となる。ここで、 C は積分定数である。 $r=0$ のとき $q=0$ 、 $r=R$ のとき、 $q=Q/2$ より、 $C=0$ が得られる。また、

$$c' = \frac{Q \tan \Theta}{R \{ \ln(\tan \Theta + \sec \Theta) + \tan \Theta \sec \Theta \}} \quad (8)$$

である。式(2)において、 r と θ の関係はほぼ線形関係にあるので、 r の変化に対応する $\Delta q \times \cos \theta$ の値 Δz もまた線形的な変化として関連付けられる。すなわち、

$$\Delta z \approx a \cdot \Delta r \quad (9)$$

である。ここで、 a は比例係数である。 $r=0$ のとき $z=0$ 、 $r=R$ のとき $z=L/2$ なので、

$$a \approx \frac{L}{2R} \quad (10)$$

となる。式(10)は、撚糸のアスペクト比を表わす。ここで、式(3)と式(6)から、 $\Delta q = c' \sec \theta \Delta r = \sec \theta \Delta z$ となるので、式(9)と照らし合わせると、

$$c' \approx a \quad (11)$$

が成立する。式(8)(10)(11)から撚り縮み比は

$$\frac{L}{Q} = \frac{2 \tan \Theta}{\ln(\tan \Theta + \sec \Theta) + \tan \Theta \sec \Theta} \quad (12)$$

となり、解析解が得られる。

2・3 Zeidman らの理論

Zeidman ら⁷⁾は Treloar の手法⁸⁾にしたがって、撚糸軸 z に対する繊維の行程を以下のように極座標系で表した。

$$\begin{aligned} (\Delta q)^2 &= (\Delta z)^2 + (r \Delta \varphi)^2 + (\Delta r)^2 \\ &= (\Delta z)^2 \left\{ 1 + \left(\frac{r \Delta \varphi}{\Delta z} \right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{\Delta z} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 φ は撚糸の周方向の角度であり、 $(r \Delta \varphi / \Delta z)^2$ および $(\Delta r / \Delta z)^2$ はそれぞれ撚りおよびマイグレーションの変化率を示し、繊維の幾何学的配置から以下のように与えられる。

$$\left(\frac{r \Delta \varphi}{\Delta z} \right)^2 = \left(\frac{\pi R}{2H} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{2H} z \right) \quad (14)$$

$$\left(\frac{\Delta r}{\Delta z} \right)^2 = (TR)^2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{2H} z \right) \quad (15)$$

ここで、 $H = Q/2$ 、 T は撚りの度合い（単位長さ当たりの撚り数）である。式(14)(15)を式(13)に代入して積分することにより、撚り縮み比は以下のように導出される。

$$\frac{L}{Q} = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\sqrt{1+T^2 R^2 E(k, \pi/2)}} \quad (16)$$

ここで、 $E(\cdot)$ はラグランジェの完全だ円積分である。

3 実験方法

第2章の応用として、以下では複数の紡績糸（単糸）に撚りを掛けた諸撚糸（Twisted yarn）を取り上げる。

3.1 供試材料

本研究では、天然繊維としてラミー単糸（No.16, TOSCO Co., Ltd.）を用いた⁵⁾これを自動撚り機（Mini Twister ATM-2W, Marui Textile Machinery Co., Ltd.）で撚り合わせて諸撚糸を作製した。使用した単糸数は、2本、3本、4本および5本である。1inchあたりの撚り数（Twist per inch, 以下、TPIと略記する）は、1.5、3.5、6.5および13と変化させた。なお、2本撚りの場合につきTPIは6.5までとした。以下、これらの諸撚糸は、単糸の本数-TPI（例えば3本の単糸でTPIが6.5の撚糸を3-6.5）と表記する。また、別途、手動撚り機を設計製作し、諸撚糸を作製した。このとき、諸撚糸に使用する単糸の長さを1200mmとした。手動撚り機による諸撚糸に含まれる単糸の数は2本、3本および5本とし、TPIを1.5、3.5および6.5とした。以下、自動撚り機で作製した諸撚糸をType A、手動撚り機で作製した諸撚糸をType Hとそれぞれ表記する。また、Type HにPVA（Poly-vinyl alcohol, クラレ製、ポバールPVA-217）を含浸させてラミー諸撚糸/PVA複合材を作製した。

3.2 撚り縮み比

Type AとType Hの撚糸を250mmに切り分け、手作業で解撚した。その後、各単糸の長さを測定し、以下の式(17)を用いて、撚り縮み比（Twist contraction ratio, 以下、しばしばTCRと略記する）を算出した。

$$TCR = \frac{L}{Q} \quad (17)$$

ここで、 L は撚糸長さ（すなわち250mm）、 Q は解撚後の各単糸長さである。また、各諸撚糸に対して表面写真を撮影し、撚り角（単糸の諸撚糸軸に対する配向角）を測定した。

3.3 引張試験

諸撚糸Type A、Type Hおよびラミー諸撚糸/PVA複合材の引張試験を行った。引張試験に使用した諸撚糸および複合材も長さ250mmに切り分け試験片を作製した。諸撚糸試験片の応力は、Tex（1kmの重さ）にラミー繊維の密度を掛けて平均断面積を算出することにより求めた。また、複合材試験片は、長さ方向に沿った幅4箇所をデジタルマイクロスコープ（株式会社ハイロックス, KH-1300）により測定し、断面形状を真円と仮定して断面積を算出した。諸撚糸または複合材の両端に強化プラスチック製タブをエポキシ系接着剤で固定した。引張試験は、小型引張圧縮試験機（JT トーシ社製）で一般紡績糸試験方法（JIS L 1095）に準じ、ゲージ長さ200mm、クロスヘッ

ド速度20mm/minで行った。各試験片のサンプル数はそれぞれ10本とした。

4 実験結果

4.1 諸撚糸の撚り縮み比

TCRの測定結果をTable 1に示す。サンプル数は各諸撚糸10本であり、1本の撚糸はそれぞれ2本、3本、4本および5本の単糸からなるので、各サンプルの単糸数は、20、30、40および50本である。TPIが大きくなるにしたがって、TCRは当然ながら低くなる（撚りを掛けると諸撚糸が縮んでいく）。また、TCRの減少割合は、明らかに単糸の数に依存している。たとえば、Type Aの2-6.5のTCRの平均は0.971であるが、5-6.5はTCRの平均が0.925と低下する。Type AとType Hを比較すると、TCRは前者が後者に比べて大きい値を示す。今回用いた自動撚り機において、単糸は1つのスプールに連続的に2つの単糸のグループ（例えば5本撚りを作る際、単糸2本と3本）を同時に送ることによって撚られる。このプロセスでは、2つの単糸の束が異なるモーターで送られるため、単糸の長さの変化が必然的にもたらされる。その結果、短い単糸グループがType Aの撚り縮みの均一性を低下させたものと考えられる。一方、Type Hでは所定長さの単糸の端をつかむことによって同時に撚られるので、撚り縮みは均一に生じ、同じTPIにおいて撚り縮みが効率的に起こる。

TPIが大きくなると、TCRの変動係数（CV）も大きくなる傾向がある。そして、単糸数が多くなるとその傾向が強くなる。上述のように、2つの単糸グループの長さのちがいがTCRの大きなばらつきを産む要因である。一方、Type HではTCRのばらつきは極めて小さく、最大値でも試験片5-6.5において1.46%であった。このためTable 1から除外している。すなわち、手動撚り機によって撚りの効率のみならずTCRのばらつきも抑えた諸撚糸

Table 1 TCR measured from Type A and H twisted yarn specimens (SY: Single yarn).

Number of SY	TPI	Type A		Type H
		Average	CV (%)	Average
2	1.5	0.996	0.159	0.991
	3.5	0.989	0.554	0.972
	6.5	0.971	2.78	0.92
3	1.5	0.994	0.271	0.988
	3.5	0.989	0.673	0.964
	6.5	0.976	1.97	0.895
	13	0.869	7.58	—
4	1.5	0.994	0.261	—
	3.5	0.983	1.01	—
	6.5	0.952	2.57	—
	13	0.811	5.46	—
5	1.5	0.99	0.393	0.986
	3.5	0.978	1.00	0.948
	6.5	0.925	4.58	0.842
	13	0.754	17.0	—

を作製できる. Fig. 3 は, 別途測定した撚り角 Θ を横軸にとり, TCR との関係を示したものである. 当然ながら, Θ の増加とともに TCR は小さくなる. Table 1 では TPI が同じでも TCR は異なったが, Θ も同様に変わり, 両者の関係はほぼ同一曲線上で変化することを見出すことができる. 言い換えると, 単糸本数や TPI のちがいは, TCR と撚り角の関係で整理することができる. Fig. 3 において Type A と Type H を比較すると, 同じ Θ にもかかわらず, 後者は前者に比べて大きく低下する. Fig. 3 に第 2 章で述べた TCR の理論曲線を示す. 同図には円筒形として切り開いた際に得られる撚り縮み比 $\cos\Theta$ (コサイン則) についても示している. これから, Type A は式 (12) による修正理論モデルに, Type H はコサイン則に比較的合致することがわかる. また, Hearle らのモデル (式 (5)) および Zeidman らモデル (式 (16)) は, 両者の中間に位置することがわかる.

Figs. 4 (a)(b) に Type A および Type H の代表的な表面写真をそれぞれ示す. 5 本撚りのうち 1 本に染色を施し, その行程がわかるようにした. 前述のように Type A では単糸の送り速度のずれから, 短い単糸ではマイグレーションが発生する. 一方, Fig. 4 (b) に示すように, 5 本撚りの Type H においてマイグレーションの発生はほとんど見られなかった. このためコサイン則に一致するものと推測される. 一方, 本研究で扱った撚り本数は比較的少なく, マイグレーションが短単糸に限定されており, これを引き起こす Type A においてマイグレーション理論の適用が可能である. すなわち, $\Delta q \propto 2\pi r \Delta r$ を仮定すれ

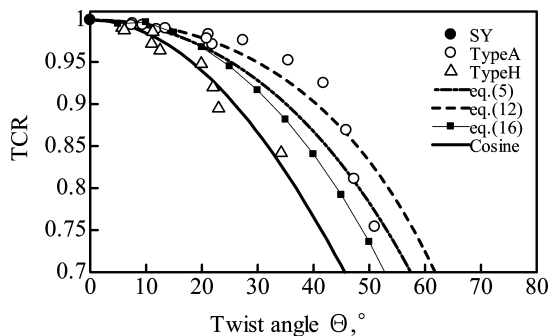


Fig. 3 Relation between TCR and twist angle in Type A and H twisted yarns.

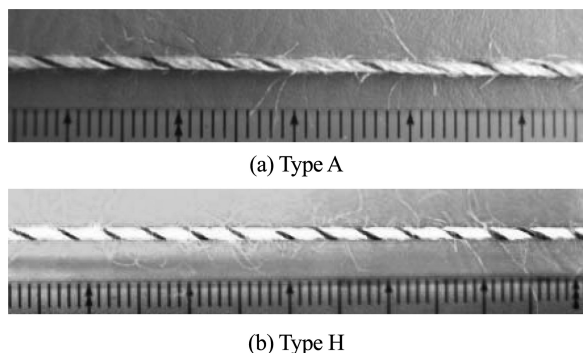


Fig. 4 Observation of migration on ramie twisted yarns.

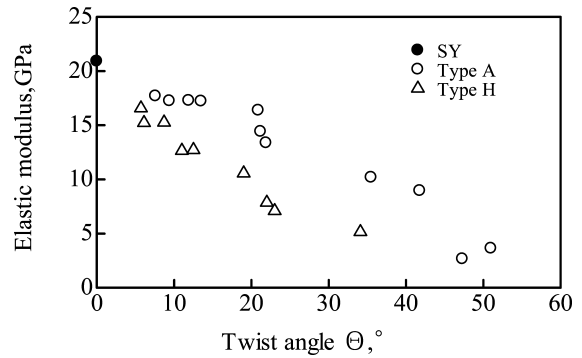


Fig. 5 Relation between twist angle and yarn elastic modulus of ramie twisted yarns.

ば同じ撚り角でも TCR を減少させる. 逆に $\Delta q \propto 2\pi r \Delta r / \sin\theta$ を仮定すると, 撚り縮みは起こりにくくなり, 撚りの効率の悪い Type A に比較的よく一致する. 以上のことから, 式 (12) とコサイン則は TCR の上限と下限を与える. 今後, 本数をさらに多くするなど, 撚り条件を増やすことによって TCR の理論曲線の適用性を検討する必要がある.

4・2 撚糸の引張特性

Fig. 5 に撚り角の変化にともなう諸撚糸 Type A および Type H の弾性率および引張強度の結果を示す. ここで, 諸撚糸の弾性率は, 応力-ひずみ線図上で傾きが最も大きく現れるひずみ 0.5% 区間とした. つまり, 後述の複合材の縦弾性率と比較するために, 諸撚糸内の繊維個々の縦弾性率が軸方向に最も効果的に発現される区間として取り上げた. これは最大傾斜率として理解できるが, 便宜上, 以下では撚糸弾性率と記す. なお, 単糸の撚糸弾性率については 2.5 ~ 3.0% の区間で安定して発現されたので, これを基準とした. これから, 撚り角の増加につれて撚糸弾性率は低下する傾向にある. 撚糸弾性率は同じ撚り角で比較すると, Type A が Type H に比べて高い値を示す. Fig. 4 (a) で示したように, Type A では短単糸がマイグレーションを起こしており長手方向にそろいやすい. このことから Type A が高くなったものと推測され, 撚り角が同じでも撚糸構造のちがいが両者に差をもたらされたと考えられる.

Fig. 6 に撚り角と引張強度の関係を示す. 引張強度も

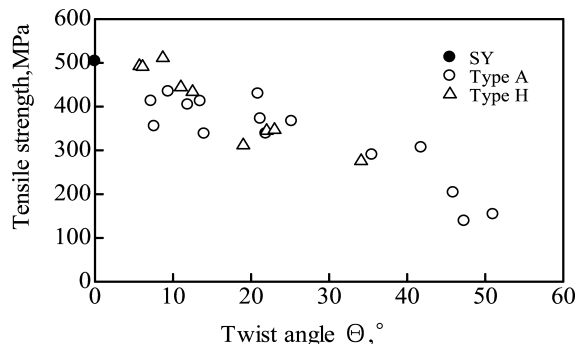


Fig. 6 Relation between twist angle and tensile strength of ramie twisted yarns.

撚り角の増加とともに減少する。撚糸弾性率とは異なり、 10° 程度の撚り角の小さい範囲では Type H の引張強度が Type A よりわずかながら大きな値を示す。しかし、 Θ が 20° 以上になると引張強度は Type A と同等かむしろ低くなる。Fig. 7 にほぼ同程度の撚り角を有する Type A と Type H の代表的な応力-ひずみ線図を示す。これから、両者のちがいは破断ひずみにあることがわかる。すなわち、Type A は上述のように、短単糸がより多くの荷重を受け持って早い段階で立ち上がるが、その短単糸の早期破断によって最終破断も早い。一方、Type H は撚糸弾性率が低いものの、大きく変形する間に荷重を受け持つことができ、Type A の破断応力レベルに近づく。つまり、強度レベルの類似性は撚り角が同じであることが原因ではない。

以上のように、Type A と Type H では撚り角が同じでも撚糸構造がちがうので、撚糸構造パラメータである TCR を基準に撚糸弾性率と引張強度を再整理した。その結果を Fig. 8 および Fig. 9 に示す。Fig. 8 から、TCR の変化によって撚糸弾性率はほぼ同一曲線上で変化することがわかる。つまり、Type A および Type H において TCR が同じであれば、撚糸弾性率は等しい。これは、単糸個々の TCR にばらつきがある Type A においては荷重分担にばらつきが生じるものの、平均をとって諸撚糸全体と比較すると、応力-ひずみ曲線の傾斜区間の最大値は Type H と同程度であることを示している。一方、Fig. 9 では Type A と Type H に明らかながいが見られる。すなわち、引張強度はともに TCR の減少によって低

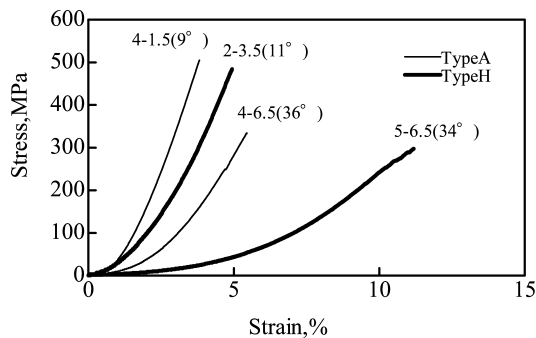


Fig. 7 Representative stress - strain diagrams of ramie twisted yarns.

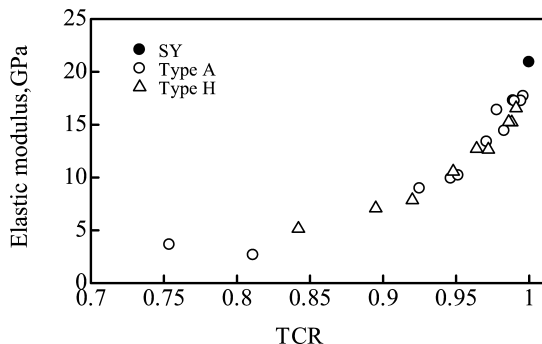


Fig. 8 Relation between TCR and yarn elastic modulus of ramie twisted yarns.

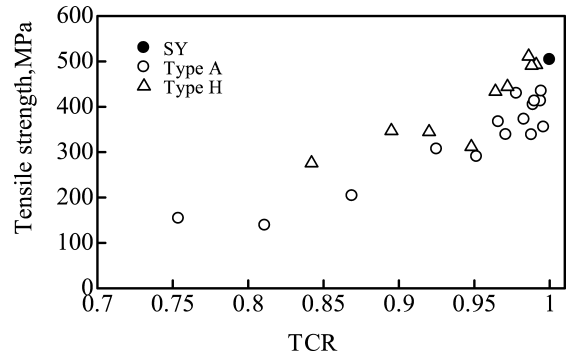


Fig. 9 Relation between TCR and tensile strength of ramie twisted yarns.

下するものの、前者は後者に比べて明らかに低い。上述のように、Type A では短単糸の早期破断によって全体破断が誘発される。これに対して、Type H は各単糸の TCR にばらつきが少なく、ほぼ同程度に荷重分担をすることで、高い荷重を維持することが可能となる。以上のように、TCR を用いると、撚糸構造を反映して引張強度と撚糸弾性率を整理することができる。

4.3 ラミー諸撚糸/PVA 複合材の引張特性

ラミー諸撚糸/PVA 複合材の引張試験を実施した。得られた結果の代表的な応力-ひずみ線図を Fig. 10 に示す。これから、諸撚糸の挙動に比べて、複合材の挙動は立ち上がりから 0.5% 程度まで線形的にふるまうことがわかる。PVA を含浸させることにより、これがマトリックスとしての応力伝達能を発現している。引張強度および縦弾性率の結果を Table 2 に示す。また、縦弾性率は立ち上がりのひずみ区間 0.2 ~ 0.5% で計算した。これから、

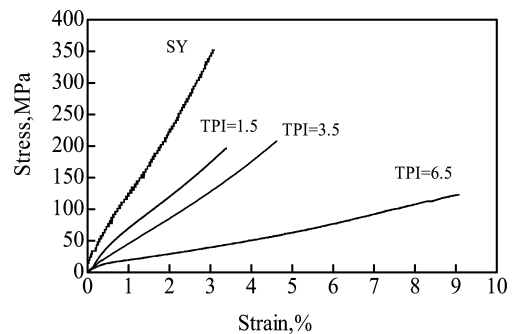


Fig. 10 Representative stress - strain diagrams of PVA composites reinforced with SY and several twisted yarns.

Table 2 Tensile properties of PVA composites reinforced with ramie twisted yarn.

TPI	V_f	Elastic modulus (Young's modulus) (GPa)	Tensile strength (MPa)	Fracture Strain (%)
(SY)	0.51	11.0	326	2.93
1.5	0.70	8.45	196	3.44
3.5	0.73	4.36	201	4.81
6.5	0.76	2.52	133	9.23

TPIの増加とともに引張強度, 縦弾性率ともに減少することがわかる. しかし, ラミー単糸/PVA材(SY)で得られた縦弾性率 11.0GPaは, 複合則から換算すると, ラミー単糸が発現した撚糸弾性率(最大傾斜率) 20.9GPaにほぼ匹敵する. このことは, 撚糸がマトリックスの応力伝達能によってその弾性特性を变形初期から発揮できることを意味する. また, 引張強度は全般に諸撚糸より低いものの, 複合則から換算して繊維1本あたり担う強度に換算すると, 複合材が諸撚糸より高くなる. 例えば, ラミー単繊維およびPVA単体の引張試験から得た値を用いると, 単糸/PVA複合材では600MPaが得られた. 樹脂の变形抵抗による増加だけでなく, 上述の立ち上がりから線形的にふるまうことで全体の応力レベルを上げる. つまり, 複合材料としての強化効果は諸撚糸を強化材としても十分に発揮される.

5 考 察

撚糸弾性率の理論予測として“撚糸の構造力学”なる分野が確立されてきた^{6), 7)}その多くは, 撚糸弾性率を撚り角 Θ の関数として表わすものである. 当初, Fig. 2の円筒切開モデルにしたがい, 撚糸弾性率 \hat{E} は

$$\hat{E} = E_f \cos^2 \Theta \quad (18)$$

と与えられた⁶⁾ここで, E_f は繊維の縦弾性率を示す. パワーコサイン則と呼ばれる式(18)では, マイグレーションによる繊維の蛇行が加味されておらず, 繊維の行程を考慮するためには θ が r の関数として与えられるべきである. すなわち, $\hat{E} = E_f \int_0^R \cos^2 \theta(r) dr$ のような解法も考えることができよう. しかし, 実際の変形では諸撚糸は半径方向も干渉が起こり, より詳細な議論を必要とする. Hearleら⁶⁾は, 撚糸のポアソン比を用いて繊維ひずみを表わすとともに, 繊維の応力-ひずみ関係から繊維軸方向の引張応力と繊維軸周りの圧縮応力の関係式①を導いた. 次に, 繊維軸方向の引張力, および繊維軸周りの圧縮力から分解される撚糸半径方向の力の釣り合い式②を導き, ①②の連立微分方程式から以下の解析解を導出している.

$$\hat{E} = E_f \frac{2c}{(1+2\nu_f)(1-c^2)} \left\{ (1+\nu) \left[\ln c + \frac{2(1+\nu_f)}{1+2\nu_f} (1-c^{2\nu_f+1}) \right] - \frac{\nu}{2} \left[\frac{3(1+2\nu_f)}{2\nu_f-1} - \frac{4(1+\nu_f)}{2\nu_f-1} c^{2\nu_f-1} - \frac{1}{c^2} \right] \right\} \quad (19)$$

ここで, ν_f は繊維のポアソン比, ν は撚糸のポアソン比, $c = \cos\Theta$ である. 以上の解析解は繊維の周方向と半径方向の圧縮応力を等価とみなしている点で正確なものではないが, $\nu_f = \nu = 0.5$ とおくとき, 様々な種類の撚糸弾性率をほぼ良好に予測できる⁶⁾.

一方, 天然繊維紡績糸を諸撚糸として使用, あるいはカーボンやアラミドのように異方性の強い繊維からなるヤーンでは, 式(18)(19)は十分ではない¹⁰⁾異方性が強くなると撚りの増加とともに, Hearleらの理論で考慮されていないせん断応力成分も無視できなくなるからである. Rao & Farris¹⁰⁾ Madhavan & Naik¹¹⁾は, 第2章での薄肉円筒層を同心軸周りに積層したモデルによって直交異方

性弾性理論を展開している. 各円筒層は異なるらせん角 θ を有しているので, 半径 r との関係が既知であれば, 各層の積分によって, 全体の応力-ひずみ関係が以下のように入れられる.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_y \\ \tau_{zy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \pi R^2 \int_0^R \bar{Q}_{ij}(\theta) 2\pi r dr \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{zy} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

ここで, y は円筒展開時の周方向, \bar{Q}_{ij} ($i = 1, 2, 3$ および $j = 1, 2, 3$)は縮約剛性係数を示す. さて, 式(2)で与えられた理想的らせん構造を仮定するならば, θ と r の関係は既知となる. すなわち,

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{r}{R} \tan \Theta \right) \quad (2')$$

とおける. 通常, z 方向に垂直負荷すると, Off-axis弾性率 E_z は式(20)に $\sigma_y = \tau_{zy} = 0$ を代入することにより,

$$\frac{1}{E_z} = \frac{\cos^4 \theta}{E_1} + \frac{\sin^4 \theta}{E_2} \cos^2 \theta \sin^2 \theta \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \quad (21)$$

が得られる. ただし, $\theta = \Theta$ の場合を示す. ここで, 単層材の繊維方向に座標系1-2を取るとき, $E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}$ は弾性定数を示し, それぞれ 0° 方向弾性率(縦弾性率), 90° 方向弾性率, せん断弾性率, ポアソン比である. Rao & Farris¹⁰⁾は式(2')(20)から, 以下のような撚糸弾性率に関する解析解が得られることを示した.

$$\hat{E}(\Theta) = \frac{1}{\tan^2 \Theta} \left[\frac{b}{2c^2} \ln \frac{(a+b+c)T_0^2}{(aT_0^2 + bT_0 + c)} - \frac{T_0 - 1}{cT_0} + \frac{(b^2 - 2ac)}{2c^2 \sqrt{b^2 - 4ac}} \ln \frac{(2a+b - \sqrt{b^2 - 4ac}) \times (2aT_0 + b + \sqrt{b^2 - 4ac})}{(2aT_0 + b - \sqrt{b^2 - 4ac}) \times (2a+b + \sqrt{b^2 - 4ac})} \right] \quad (22)$$

ここで, T_0, a, b, c は単層材の各弾性定数から得られる定数を示す. この手法では半径方向の応力を無視しているが, アラミド繊維等からなるヤーンの弾性率に適合することが示されている¹⁰⁾.

以上の式(18)(19)(22)より得られる弾性率曲線を Fig. 11に実験結果と併せて示す. ここでは, 諸撚糸と複合材の実験結果を比較するため, E_1 で除して基準化した. 実験結果も基準化されている. Fig. 11には式(21)によるOff-axis弾性率も併せて示す. なお, 材料定数として

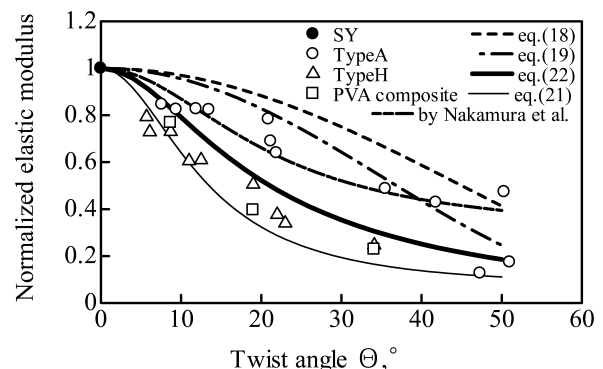


Fig. 11 Relation between twist angle and normalized elastic modulus.

$E_1 = 10.9\text{GPa}$, $E_2 = 0.996\text{GPa}$, $G_{12} = 0.498\text{GPa}$, $\nu_{12} = 0.5$ を用いた. これらの定数のうち, E_1 , E_2 は繊維およびPVAの縦弾性率に基づき複合則, ロイス則からそれぞれ算出した. G_{12} は E_2 に0.5~0.8を乗じた値で得られることが多く, ここでは便宜上, $G_{12} = 0.5E_2$ とした. また, ν_{12} は燃糸にしばしば用いられる0.5を当てはめた. これから, Type H および複合材は式(21)と式(22)の間にほぼ納まることがわかる. 一方, Type Aの弾性率ほどの理論曲線にも合致しない. 第4章において, 弾性率をTCRで整理することを試みたので, 第2章で論じた各理論燃り縮み比はすべて燃り角 Θ の関数であることを利用し, Fig. 11の横軸をTCRで整理した. その結果をFig. 12に示す. ここでは, Fig. 11で適合性が良好であった式(22)をベースに, TCRの上限と下限を与える式(12)とコサイン則による予測を示す. これから, 実験値は両者の間にほぼ納まることがわかる. このように, マイグレーションが起こらない均等な燃り構造を有するType Hにおいて, またTCRのばらつきからマイグレーションが発生するType Aにおいて, どちらの弾性率もともに直交異方性理論にTCR理論曲線を加味することで予測できる.

直交異方性理論をベースとする式(22)では, 材料定数の変化に依存して予測される弾性率は上下に幾らか変動する. 単糸/PVA単層材などから各々の材料定数を実験的に求めることでより正確な評価が必要であり, 今後の検討課題である. この意味で, 以上の理想化されたモデルと実験結果の一致性に関する議論のみならず, 燃り構造の不規則な情報に基づいて弾性率発現のメカニズムを把握しておく必要もある. Nakamuraら¹²⁾は理想的なマイグレーションである式(2')に代わるものとして, 以下の実験式を提案した.

$$\theta = \Theta \left(\frac{r}{R} \right)^\beta \quad (23)$$

ここで, β は実験定数であり, 自動燃り機による同様なラミー諸燃糸では $\beta = 1.87$ が得られることを示した.¹²⁾式(23)を用い, 式(23)に基づくNakamuraらの数値計算手法¹²⁾で弾性率を予測したところ, Fig. 11に追示するように, Type Aをほぼ予測することができた. 加えて,

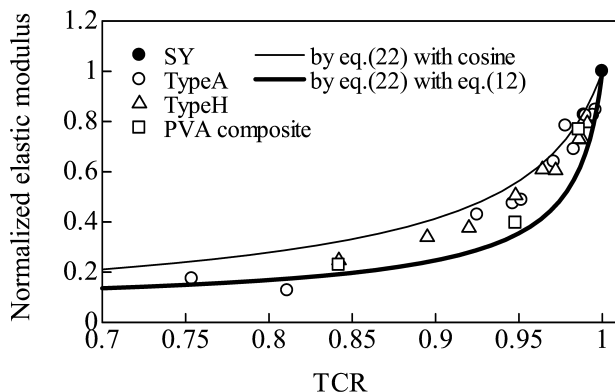


Fig. 12 Comparison of theoretical elastic modulus with experimental data.

Fig. 11におけるラミー諸燃糸/PVA複合材の実験結果に合うように β を予測したところ, 0.10が得られた(式(21)による曲線より若干上側に位置する). 式(23)では $\beta > 1$ のとき, 下に凸のべき乗型曲線となり, $\beta < 1$ のときは急激に立ち上がるべき乗型曲線となる. すなわち, $\beta > 1$ (Type A)では内部で単糸の傾きはほとんどなく表面近傍で大きく傾く(マイグレーションが起こる). 一方, $\beta < 1$ (Type H)では内部の単糸の傾きも大きく, 表面の傾き Θ に近い(マイグレーションは起こりにくい). それゆえ, Θ が同じであってもType HよりType Aの弾性率が大きくなる. Fig. 5での燃り角による燃糸弾性率発現のちがいが裏付けられる. β は燃り構造の度合いを表わす指標であり, これを用いることでコサイン則や式(12)によるTCRの上下限のみならず, 様々な燃り構造に対する弾性率予測の可能性を示唆している.

6 結 言

本研究では燃糸構造パラメータである燃り縮み比(TCR)を取り上げ, 諸燃糸およびこれを用いたグリーンコンポジットの引張特性に及ぼすTCRの影響について検討したものである. まず, 従来のマイグレーション理論の数学的意味を論ずるとともに, これを修正する理論モデルを提案した. 続いて, 自動および手動燃り機によるラミー諸燃糸のTCRが, 両者の燃り構造に依存してコサイン則と提案した修正モデルの間に位置することを示した. そして, TCRをパラメータとしてラミー諸燃糸の弾性率および引張強度を整理し, 燃り構造に反映してこれらを整理できることを見出した. さらに, PVAを母材とするグリーンコンポジットの引張特性についても検討し, 提案した修正モデルとコサイン則を直交異方性理論に基づく燃糸弾性率モデルに導入することにより, 実験結果を予測できる可能性を示した. また, 燃り構造を実験式で表わす場合においても, 直交異方性理論に基づく弾性率予測の適合性が期待できる.

本研究を遂行するにあたり, 山口大学学部生 桜田翔平氏にデータ整理の援助を受けました. 記して感謝の意を表します.

参 考 文 献

- 1) K. Shibata, "Composites recycling using depolymerizing thermosets under ordinary pressure", Journal of Adhesive Society of Japan, Vol.42, pp.153-157 (2006).
- 2) T. Ueda, Y. Shimamura, K. Tohgo, T. Fujii, I. Okajima, M. Hiramatsu and T. Sako, "Tensile strength of carbon fibers reclaimed from CF/Epoxy composite using subcritical water and supercritical methanol", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.59, pp.964-969 (2010).
- 3) K. Okubo, H. Takagi and K. Goda, "Green composites' research and today's progress", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.55, No.4, pp.438-444 (2006).
- 4) K. Haraguchi, N. Suizu, T. Uno, K. Goda, J. Noda and J. Ohgi, "Effect of alkali treatment on the tensile and impact properties of ramie plied yarn-reinforced green compos-

- ites”, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.58, pp.374-381 (2009).
- 5) R. Nakamura, H. Nomura, K. Goda, J. Noda and J. Ohgi, “Effects of fabric density and yarn twist on mechanical properties of textile green composites”, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.58, pp.382-388 (2009).
- 6) J. W. S. Hearle, P. Grosberg and S. Backer, “Structural mechanics of fibers, yarns and fabrics ” (1969) John Wiley & Sons, Inc. NY, USA.
- 7) M. I. Zeidman, P. S. Sawhney and P. D. Herrington, “Fiber migration theory of ring-spun yarns”, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, Vol.28, pp.123-133 (2003).
- 8) L. R. G. Treloar, “A migration-filament theory of yarn properties”, *Textiles Institute*, Vol.56, pp.T359-380 (1965).
- 9) J. W. S. Hearle and M. Konopasek, “On united approaches to twisted yarn mechanics”, *Applied Polymer Symposium*, No.27, pp.253-273 (1975).
- 10) Y. Rao and R. J. Farris, “A modeling and experimental study of the influence of twist on the mechanical properties of high-performance fiber yarns”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.77, pp.1938-1949 (2000).
- 11) V. Madhavan and N. K. Naik, “Elastic behavior of twisted impregnated yarns”, *Collection of Technical Papers–AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Vol.2, pp.936-944 (1999).
- 12) R. Nakamura, K. Goda, J. Noda and A. Netravali, “Elastic properties of green composites reinforced with ramie twisted yarn”, Vol.4, 1605-1614 (2010).