テキスタイル・グリーンコンポジットの 力学特性に及ぼす織物密度および糸撚りの影響†

中 村 理 恵* 野 村 宏 樹** 合 田 公 一***
野 田 淳 二*** 大 木 順 司***

Effects of Fabric Density and Yarn Twist on Mechanical Properties of Textile Green Composites

by

Rie NAKAMURA *, Hiroki NOMURA **, Koichi GODA ***, Junji NODA *** and Junji OHGI ***

In recent years, development of environmentally friendly materials including relatively high mechanical properties is demanded by various industrial fields. Especially, composites consisting of plant-based natural fibers and biodegradable resin, so-called fully green composites, are one of the most promising environmentally friendly materials for practical use. The purpose of this study is thus to explore the effects of fabric density and yarn twist on the mechanical properties of the composites reinforced with ramie woven fabrics, and clarify a difference between mechanical properties of the composites and reinforcing fabrics. The results show that tensile strength and Young's modulus of the composites are substantially different from those of the fabrics, because of the stress transfer mechanism of the matrix resin. In addition, the effects of fabric density and yarn twist on the tensile properties of the composites are discussed from results of a finite element analysis.

Key words : Textile, Natural fibers, Ramie, Green composites, Fabric density, Yarn twist, Tensile strength, FEM

1 緒 言

化石燃料への依存を低減させ、持続的に発展可能な社会を目指すため、2002年にバイオマス・ニッポン総合戦略が制定された。¹⁾現在、これに従ったバイオマス（生物資源）の利活用に関する様々な取り組みが行われている。バイオマスを機械材料に適用する分野に限ると、竹や麻等の高強度天然繊維を用いた複合材料に関する研究が注目を浴びている。中でも、天然繊維と生分解性樹脂からなる100%植物由来の複合材料、いわゆるグリーンコンポジット（Green Composites、以下、GCと記す）は幅広い使用が期待されているバイオマス材料のひとつである。^{2), 3)}

一般にGCの強化形態は成形方法によって異なり、射出成形材では短繊維状のものが、圧縮成形材では長繊維が使用されることが多い。前者はケナフ／ポリ乳酸の実用例も含めてGCの主流をなしている。一方、強度発現に有利な後者では、連続繊維としての形態をとる必要性から紡績糸が使われることがあり、さらに紡績糸を製織機に通した織布などが強化材として使用される。例えば、Ochiら⁴⁾や著者ら⁵⁾はこれまで麻系紡績糸を使った一方向グリーンコンポジットや積層材を作製し、その機械的性質について解明を試みている。さらに著者ら⁶⁾は、ラ

ミー糸から成る平織布を強化材とした、テキスタイル・グリーンコンポジットを圧縮成形により作製するとともに、その力学特性について調査してきた。ところで、繊維工学分野では織布の力学的性質が、繊維の性質のみならず、構成糸の構造（太さ、撚り数など）や力学的性質（引張、圧縮、曲げなど）、さらに織構造（平織、綾織、朱子織など）、織物密度（経糸数、緯糸数）に深く係わることが指摘されている。⁷⁾例えば、織布の剛性は変形初期において織構造や織物密度に依存するものの、織布の強度は構成糸の特性に支配される。⁸⁾その際、構成糸の撚り数は織布の強度・剛性に大きな影響を及ぼす。⁹⁾織物密度と構成糸の撚り数は織布のせん断振動特性にも影響を及ぼすことが知られている。¹⁰⁾一方、織布によって強化されたGCの力学特性が上述のパラメータによってどのように影響されるかを論じた報告は、著者らの知る限り、ほとんどみられない。カーボン繊維などを使ったテキスタイル・コンポジットの力学特性に関しても、糸うねりモデル¹¹⁾によって織構造の影響は論じられているものの、通常は構成糸の構造まで注視されない。

そこで、本研究ではパラメータとして織物密度および構成糸の撚り数を取り上げ、平織布を強化材とするテキスタイル・グリーンコンポジットの力学特性に及ぼす影

† 原稿受理 平成20年9月10日 Received Sep. 10, 2008 ©2009 The Society of Materials Science, Japan

* 学生会員 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 宇部市常盤台, Graduate Student, Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

** 山口大学大学院理工学研究科（現在 トヨタ九州株） 〒755-8611 宇部市常盤台, Graduate Student, Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

*** 正会員 山口大学工学部機械工学科 〒755-8611 宇部市常盤台, Dept. of Mech. Eng., Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

Table 1 Properties of ramie fibers.

Density (Mg/m ³)	Cellulose (wt%)	Lignin (wt%)	Hemi-cellulose (wt%)	Pectin (wt%)	Wax (wt%)	Microfibrillar angle (°)	Moisture Content (wt%)	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)
1.50	68.6-76.2	0.6-0.7	13.1-16.7	1.9	0.3	7.5	8.0	23.1	610

響を実験的に解明することを目的とした。すなわち、異なる織物密度および異なる撚り数をもつラミー糸平織布を強化材とする GC（以下、しばしば平織布 GC と記す）を圧縮成形法により作製するとともに、その引張特性を調査した。結果を平織布単独の引張特性と比較検討し、平織布 GC 固有の特性を見出した。さらに、その特性について FEM 解析による考察を試みたので報告する。

2 実験方法

2・1 供試材料

強化材としてラミー諸撚糸（16 番手 5 本撚り、織度：105tex × 5、(株)トスコ製、以下、しばしばラミー糸と記す）、母材にはコーンスターチから誘導された加工澱粉樹脂（コーンポール樹脂フィルム、CPR-F3A、日本コーンスターチ(株)製）を用いた。用いた繊維とマトリックス材の諸特性を Table 1 および Table 2 にそれぞれ示す。

2・2 平織布の作製方法

手動織物機を用い、ラミー糸を種々の密度をもつ平織布に製織した。その平織布の緯糸数、経糸数および緯糸の撚り数を Table 3 に示す。HT0、HT1、HT2 および HT3 は緯糸数を変化させたもの、LD1 および LD2 は経糸の織間隔を拡げたものである。また、緯糸の撚りを初期状態から 1inch あたり 3 回転戻して製織した平織布 (TL)、および緯糸の撚りをさらに 1inch あたり 3 回かけて製織した平織布 (TH) をそれぞれ用意した。初期状態のラミー糸、TL および TH に用いた緯糸の外観写真を Fig. 1 に示す。外径はほぼ同じに見えるが、実際には TH の緯糸がやや細径化している。また、写真から撚り角（白線部は糸配向を示す）の異なることもわかる。このとき、TL および TH の緯糸の織度は 103tex × 5 および 111tex × 5 であった。これから、TH が他と比べて密度がやや高くなっていると判断される。

Table 2 Properties of biodegradable resin.

Density (Mg/m ³)	Melting Point (°C)	Tensile Strength (MPa)	Fracture Strain (%)	Young's Modulus (GPa)
1.17	68	14.2	670	0.46

Table 3 Number of yarns and twist per inch of the ramie woven fabrics.

	HT0	HT1	HT2	HT3	TH	TL	LD1	LD2
Weft (picks/inch)	46	34	25	7	25	25	34	34
Warp (ends/inch)	8	9	9	8	8	9	3	2
Twist per inch of weft	3.5	3.5	3.5	3.5	6.5	0.5	3.5	3.5

Fig. 1 Surface morphology of various ramie yarns.

2・3 平織布 GC 試験片の作製方法

平織布 GC は、ホットプレス装置 (mini TEST PRESS-10、東洋精機(株)製) を用い、圧縮成形法で作製した。平織布と樹脂フィルムを 150℃ に熱した加熱プレート間に挿入し、圧力 2.33MPa で 10 分間保持した。その後、加圧したまま冷却した。得られた材料を短冊状に切り出し、試験片に加工した。その際、緯糸方向が変形に対してより敏感に反応すると考え、緯糸方向を長手方向にとった。以下、各平織布 GC の名称は織布の名称のあとに C をつけ、HT0C のように表す。Fig. 2 に例として HT0C、HT2C、HT3C および LD1C の試験片の表面形態を、および Fig. 3 に HT1C の長手方向の断面組織写真をそれぞれ示す。これから、織物密度のちがいによる様相がわかり、また構成糸のうねり状態も把握することができる。Fig. 4 に引張試験片の形状および寸法を示す。チャックの締め付けによる試験片の損傷を防ぐため、試験片の両端に GFRP タブを取り付け、ゲージ長さを 50mm とした。

また、平織布単独の引張試験を行うために HT1、HT2、HT3、TH、TL および LD1 を幅 25mm、長さ 200mm で切り出した。この両端に 50mm のつかみ部を設け、ゲージ長さ 100mm とした。

Fig. 2 Surface morphology of (a) HT0C, (b) HT2C (c) HT3C and (d) LD1C.

Fig. 3 Cross sectional microstructure of HT1C.

Fig. 4 Shape and dimension of tensile specimen.

2・4 引張試験方法

平織布 GC の引張試験は引張圧縮試験機 (IS-5000, 株式会社津製作所製) を使用し, 引張速度 0.5mm/min で実施した。試験中, 試験片の伸びを伸び計により測定した。試験本数は各平織布 GC に対して 4 ~ 6 本である。平織布の引張試験は, 電気油圧式材料試験機 (サーボパルサー, EHF-EB10, 株式会社津製作所製) を使用し, 引張速度 150mm/min で実施した。なお, 混乱を避けるために, 以下では試験片の長手方向に配列された糸 (緯糸) を縦構成糸, 横方向に配列された糸 (経糸) を横構成糸とそれぞれ記す。

3 実験結果

3・1 平織布 GC の引張特性に及ぼす織物密度の影響

3・1・1 縦構成糸数の影響 Fig. 5 に HT0C, HT1C, HT2C および HT3C の代表的な応力-ひずみ線図を示す。これらは横構成糸の本数が同程度の平織布 GC である。HT0C, HT1C, HT2C の応力-ひずみ関係はひずみ 0.5%

Fig. 5 Stress-strain diagrams of woven fabric composites. (HT0C, HT1C, HT2C and HT3C)

辺りまでは直線的に変化するが, その後, 傾きがわずかに低下してひずみ 2 ~ 4% で破断する。また, HT3C は変形抵抗が非常に小さい。Table 4 に各平織布 GC の引張強度, ヤング率, 破断ひずみを示す。値はすべて平均値を示している。これから, 縦構成糸を多く含む平織布 GC ほど, 引張強度およびヤング率が増加し, 破断ひずみが低下することがわかる。試験片はすべて同程度の断面積を有することから, 試験片内の縦構成糸数の違いによる各値の増減は妥当である。ここで, 引張強度およびヤング率を縦構成糸数 N_l で除し, 糸 1 本が発現する値として基準化強度および基準化ヤング率を導出した。その結果を Fig. 6 および Fig. 7 に示す。これから, 基準化強

Table 4 Tensile properties of composites.

	Fiber volume fraction (%)	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Fracture strain (%)
HT0C	43.3	8.09	108	2.30
HT1C	42.4	6.75	104	3.35
HT2C	39.1	3.91	74.8	4.28
HT3C	32.8	1.14	36.5	4.77
LD1C	39.7	11.2	116	2.03
LD2C	35.1	11.9	135	1.97
TLC	40.2	3.22	75.2	4.11
THC	39.1	6.01	75.0	2.83

Fig. 6 Relation between tensile strength and N_l . Fig. 7 Relation between Young's modulus and N_l .

度は N_f の増加とともに低下するが、基準化ヤング率は、同程度の値を示すことがわかる。換言すると、平織布 GC のヤング率は複合則で表現できるが、強度は複合則に合致しない。人工繊維を使った一方向連続繊維強化複合材（以下、一方向材と記す）の強度およびヤング率の複合則に対する適合性¹²⁾と似通った傾向を示している。

平織布 GC と平織布単独の挙動の違いを調査するために、HT1, HT2 および HT3 の引張試験を実施した。Fig. 8 にそれぞれの初期変形挙動における代表的な荷重-ひずみ線図を示す。Fig. 8 の荷重軸は比較のために縦構成糸数で除している。Fig. 5 と比較すると、立ち上がりの挙動は大きく異なり、変形抵抗はほとんど示さないが、ひずみの増加とともに徐々に大きくなる。ここで、Fig. 8 は荷重を基準化しているにもかかわらず、縦構成糸数の多い HT1 は他と比べると早い段階で立ち上がることに注目したい。この立ち上がりは、一般に織物を製織する際に各糸へ付与される張力の大きさ（伸長状態）によって異なることが明らかにされている。¹³⁾ 本研究においても、製織時に経糸に適度に張力を付与するが、緯糸数が多くなるにつれて織間隔を縮めるために、緯糸を加重する。このため経糸も変形して経糸-緯糸間の接触面積が増え、その結果、製織後は経糸および緯糸に張力が内包される。このことが HT1 の変形抵抗が早く現われる要因であると考えられる。逆に HT3 は緯糸数が少ないために、緯糸をさほど加重することなく製織でき、経糸-緯糸間の接触摩擦は少なく、内包される張力も小さい。そのため、初期挙動において変形抵抗をほとんど示さないが、縦構成糸が変形して引張方向にそろい始めると急激に大きな抵抗を示す。これに対して、平織布 GC はマトリックス樹脂の荷重伝達により、縦構成糸数に係わらず縦構成糸には最初から応力が負荷された結果、基準化ヤング率が同程度になったものと判断される。

今回の実験では、縦構成糸の引き抜けによって平織布の強度を正確に評価することができなかったため、文献を挙げて考察する。Watanabe ら⁹⁾は、ビスコースレーヨン糸から成る平織布の引張試験を行い、織物密度の変化にともなう強度推移を調査している。この結果によると、糸 1 本あたりが受け持つ引張強度は、 N_f の増加とともに

増加する。これは、 N_f の増加によって、互いの接触摩擦が増え、早期破断する糸の荷重を回復できるような荷重伝達能（摩擦による）を付与するからである。一方、平織布 GC では N_f が小さくても樹脂の荷重伝達能（せん断応力による）を通して縦構成糸は荷重を負担できる。しかし、 N_f の増加によって糸間の樹脂の体積は減り、破壊過程におけるせん断破壊等でせん断荷重伝達能は低下する。そのため、 N_f の増加とともに基準化強度は減少したと考えられる。

3・1・2 横構成糸数の影響 Table 4 に LD1C および LD2C の結果を追加して示す。両者は縦構成糸の本数が同程度の平織布 GC である。これより、LD2C, LD1C, そして HT1C の順に破断ひずみは低下するが、ヤング率および引張強度は逆に増加することがわかる。横構成糸数が少なくなると、クリンプ間の距離が増大する。つまり、縦構成糸のクリンプ角は小さくなり、各糸の強度およびヤング率がより有効に発現された結果と考えられる。

平織布 LD1 の代表的な引張試験結果を Fig. 8 に追加して示す。同様に荷重軸は縦構成糸数 N_f で除して基準化している。これから、LD1 の変形抵抗は HT1 を大きく上回ることがわかる。LD1 は HT1 より織物密度は小さく、内包される張力も小さいと予想されるが、低クリンプ角によって縦構成糸にかかる荷重はすぐさま現れたものと判断される。つまり、平織布 GC のヤング率と平織布単独の初期変形抵抗に及ぼす横構成糸数の影響は同様に現れる。

Watanabe ら⁹⁾は、平織布の強度に及ぼす横構成糸の影響についてもビスコースレーヨン糸を用いて解明している。これによると、横構成糸の増加とともに強度は増加する。平織布単独の場合、変形が大きく、変形が進行する中で縦構成糸は負荷方向にそろっていく。そして、横構成糸数の増大とともにクリンプ間の摩擦が多くなり、摩擦力の増加にともなう荷重伝達効果がより発揮されたためである。この結果は平織布 GC と逆の傾向である。

3・2 平織布 GC の引張特性に及ぼす縦構成糸の加熱効果

Table 4 に THC および TLC の引張試験結果を追加し、HT2C, THC および TLC を比較する。これらは縦構成糸および横構成糸の数が同程度の平織布 GC である。これから、TLC はヤング率および破断ひずみがやや低下するものの大きな変化はみられない。一方、THC ではヤング率は増加し、破断ひずみは減少することがわかる。2・2 節で述べたように、THC の縦構成糸は撚り数の増加によって密度が高くなり、半径方向に対して固くなる特徴があった。これから、クリンプ交差部における半径方向の変形を抑えた結果、剛性が増したものと考えられる。一方、引張強度についてはさほど大きな違いはみられない。縦構成糸の半径方向の剛性増加によって周囲へ応力集中が生じ、低ひずみで破壊を起こしたのと考えられる。

平織布 HT2, TL, TH の引張試験を実施した。Fig. 9 にそれぞれの初期変形挙動における代表的な荷重-ひずみ

Fig. 8 Typical Load-strain diagrams of ramie woven fabrics. (HT1, HT2, HT3 and LD1)

Fig. 9 Typical Load-strain diagrams of ramie woven fabrics. (HT2, TL and TH)

み線図を示す。縦軸は荷重を縦構成糸数で除して基準化している。これより、THの初期変形挙動はHT2、TLに比べ立ち上がりに遅れが見られる。これはTHの負荷方向の変形抵抗が小さいことを意味する。平織布単独ではクリンプ間の拘束はなく、立ち上がりの差異は縦構成糸そのものの変形抵抗に関わるものと考えられる。一般に、撚り数の増加とともに、撚糸自体の軸方向の変形抵抗は若干増加するものの、その後大きく低下することが知られている。¹⁴⁾以上の理由から、平織布においてもクリンプ間における縦構成糸の剛性低下が全体の剛性を低下させたものと判断される。このような傾向は平織布GCと逆である。しかし、平織布GCにおいても、構成糸の更なる加撚によって剛性低下の可能性を否定できず、撚り数との関係について今後詳細な検討が必要である。

Watanabeら⁹⁾はビスコースレーヨン糸織物の引張試験を行い、強度に及ぼす構成糸の撚り効果を論じている。これによると、加撚糸平織布の強度は無撚糸平織布より高いが、さらに強く加撚することにより強度は低下することを指摘している。撚り数にともなう繊維間の接触摩擦の増加および縦構成糸内の単糸配向角の低減によってこのような変化が生じるものと考えられる。しかし、上述のように、平織布GCでは強度の変化はみられなかった。ところで、Otaら¹⁵⁾は、ガラス繊維平織布/ビニルエステル樹脂の引張強度に及ぼす撚り数の影響を報告している。この結果によると、加撚による拘束によってクリンプ交差部を起点とするクラックが発生しやすくなり強度は低下する。平織GCの場合も加撚による応力集中の発生が予想され、強度に及ぼす撚り数の影響についてもさらなる解明が必要である。

4 考 察

4.1 解析方法

テキスタイル・コンポジットの代表的な力学解析として、糸うねりモデル¹¹⁾が挙げられる。Ishikawaら¹⁶⁾のモデルでは糸目繰返し数をパラメータとし、織構造のちがいが弾性率に及ぼす影響を論じた。さらに、Naikら¹⁷⁾はより正確なモデルとしてこれを3Dモデルへ修正を図っている。しかしながら、古典積層理論に基づく解析のため、

繊維間の力学干渉やマトリックス樹脂のひずみ分布など、詳細な力学情報は得られない。一方、Uetsujiら¹⁸⁾は3D-FEMを用いて、テキスタイル・コンポジットの損傷進展を予測している。この手法では繊維束とマトリックス樹脂を分けて要素分割を行っているので、構成要素の詳細な力学情報が得られる。そこで、本研究でも構成素材ごとに要素分割する方法に倣い、平織布GCのFEM解析を実施した。ここでは、クリンプ部の相互干渉を定性的に把握することを目的に、より簡便な解析条件として、2次元平面応力状態を仮定し、有限要素に定ひずみ三角形要素を用いた。その要素分割をFig. 10に示す。この分割は、Fig. 3で示した断面組織写真に基づき、縦構成糸を1/2周期分、横構成糸を左右に半円ずつ配置し、平織布をモデル化したものである。そして各々の糸間をマトリックス樹脂(灰色部)が埋めている。クリンプ間距離は1.6mm、y方向高さは0.7mmである。境界条件として、要素の左端節点すべてをx軸方向に固定、および右端節点のすべてにx方向の強制変位を与える。今回、全体の公称ひずみが0.29%になるように強制変位を与えた。Fig. 10に示す要素分割(モデルA)では、節点数1817、縦構成糸要素数1568、横構成糸要素数572、マトリックス樹脂要素数1328とした。クリンプ間距離を2倍に増大させたモデル(モデルB)についても解析を実施した。この場合、節点数3523、縦構成糸要素数3192、横構成糸要素数572、マトリックス樹脂要素数3000とした。

本研究で用いる構成糸は多数の繊維が集合した束であり、これに樹脂が含まれているので、構成糸は一方方向繊維強化複合材料とみなすことができる。そこで、縦構成糸に対しては、これを直交異方性弾性体と仮定し、糸の軸方向と引張方向のなす角度に配慮して各要素の応力-ひずみ関係を決定した。一般に、直交異方性弾性体は、平面応力状態において次のような応力-ひずみ関係を有する。⁶⁾

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{66} = G_{12}$$

Fig. 10 FEM model. (Model A)

ただし、面内座標 1-2 は繊維軸方向を 1、繊維軸と直角方向を 2 としている。 E_i ($i=1, 2$) は i 方向におけるヤング率を示し、 ν_{ij} は i 方向に負荷されたときの j 方向のひずみ（横ひずみ）に対するポアソン比を表わし、 $\nu_{ij} = -\varepsilon_j / \varepsilon_i$ ($i, j=1, 2$) で定義される。 G_{12} は面内座標 1-2 におけるせん断弾性係数である。

これを座標変換した、傾き θ における直交異方性弾性体の応力-ひずみ関係¹¹⁾を用い、縦構成糸に対して適用した。その際、縦構成糸の軸方向と引張方向の角度に配慮して、各要素における応力-ひずみ関係に角度 θ を代入した。また、横方向の構成糸およびマトリックスは等方性弾性体と仮定し、通常の平面応力下における応力-ひずみ関係式を適用した。

材料定数 E_1 , E_2 , ν_{12} , ν_{21} は、一方向 GC の 0° および 90° 方向の引張試験によって決定した。⁷⁾ また、 G_{12} は一方向 GC の 45° 方向の引張試験を行い、 E_{45} を求めるとともに以下の式により決定した。

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1}}$$

さらに、 E_m についてはマトリックス材の引張試験によって決定した。なお、今回 ν_{23} および ν_m に関しては仮定した値を用いた。以上のように求めた材料定数を Table 5 に示す。

4・2 解析結果

Fig. 11 (a) にモデル A の FEM 解析結果を示す。これから、 σ_x は主に縦構成糸に生じており、平織布 GC に対する負荷は縦構成糸によって支持されることがわかる。特に縦構成糸が負荷方向につながっている中心軸近傍において σ_x が大きく現われることが特徴である。また、この挙動は **3・1・1** 項で触れた、平織布 GC の引張特性が一方向材のものと類似していることを裏付けている。マトリックス樹脂のない平織布単独の特性とは明らかに異なる所以である。

Fig. 11 (b) に横構成糸間を上げたモデル B の解析結果を示す。縦構成糸にさらに大きな応力が負荷されていることがわかる。これは、前述のように、クリンプ角の低下にともなって縦構成糸の軸が負荷方向に近づいたためである。一般に、一方向材の off-axis 負荷は、配向角が大きくなるにつれて強度および弾性率ともに低下する。よって、Fig. 11 (a) と (b) の比較は、**3・1・2** 項において平織布 GC が横構成糸数の増加とともに強度およびヤング率

を低下させたことを裏付けている。なお、Fig. 11 (a) および (b) に生じるヤング率を計算した結果、モデル A は B に比べて 0.57 倍であり、上述のヤング率低下を確認した。

3・2 節の撚り数の影響については撚り数の増加によって縦構成糸の密度が高くなった。そこで、応力分布の変化を明瞭に表わすために、便宜上、 E_2 を 3 倍にしてモデル A による解析を行った。Fig. 11 (c) および (d) に σ_y に関するそれぞれの結果を示す。これから縦および横構成糸間でより大きな圧縮応力の生成を確認できる。このとき、負荷方向のヤング率を計算したところ、 E_2 を 3 倍にした場合は、僅かながら 3% ほど増加することが判明した。すなわち、半径方向の高剛性化は負荷方向の剛性を増加させる可能性を有し、平織布単独の挙動とは異なる。

(a) Distribution of σ_x at model A (Unit: MPa)

(b) Distribution of σ_x at model B (Unit: MPa)

(c) Distribution of σ_y at model (Unit: MPa)

(d) Distribution of σ_y in the case of $E_2 \times 3$ at model A (Unit: MPa)

Fig. 11 Stress distributions in FEM models A and B.

Table 5 Material constants used in FEM.

	Fiber	Matrix
Young's modulus E_1 , E_m (GPa)	11.7	0.457
Young's modulus E_2 (GPa)	1.37	—
Poisson's ratio ν_{12} , ν_m	0.4	0.4
Poisson's ratio ν_{23}	0.06	—
Shear modulus of elasticity G_{12} (GPa)	0.63	—

今後、ワイヤ法¹⁹⁾などの横圧縮特性による E_2 の測定を行い、詳細な議論を進める予定である。

しかし、先の実験結果で得られたような大幅なヤング率の向上ではないことから、さらなる検討が必要である。

5 結 言

本研究は、テキスタイル・グリーンコンポジット (GC) の力学特性に及ぼす平織布の織物密度および構成糸 (ラミー糸) の撚り数の影響について調査し、平織布単独の特性とは異なる同材料固有の特性を見出したものである。得られた結論を以下に要約する。

(1) 平織布 GC は、平織布単独の初期変形抵抗と異なり、マトリックス樹脂のせん断荷重伝達能により、縦構成糸のヤング率をより有効に発揮させる。一方、平織布単独では、縦構成糸数の増加とともに、糸間の接触摩擦が原因で初期変形抵抗は増加する。引張強度に関しては、縦構成糸数の増加とともに、樹脂の体積減少にともなうせん断荷重伝達能の低下により、糸 1 本あたりが発現する基準化強度は減少する。

(2) 横構成糸数の減少にともない、平織布 GC の強度とヤング率は増加することが明らかとなった。これは縦構成糸の配向角の減少が原因である。平織布単独の初期変形抵抗は、同様に横構成糸数の減少によって大きくなる。

(3) 縦構成糸の撚り数の増加にともない平織布 GC のヤング率は大きくなる。一方、平織布単独では撚り数の増加とともに初期変形抵抗の低下が見出された。一方、撚り数の増加にかかわらず、強度はさほど影響しない。

(4) FEM 解析から、平織布 GC に関する力学特性の変化を考察し、実験結果と定性的に一致することを確認した。すなわち、横構成糸数の減少により強度およびヤング率が増加する。また、撚り数増加にともなう半径方向の剛性増加は負荷方向の剛性を増加させるが、大幅な向上はみられない。

本研究を遂行するにあたり、日本学術振興会 (JSPS) から DC2 による奨学金援助を受けました。また、TOSCO (株) 中央研究所の上用秀樹氏からラミー諸撚糸の供給ならびに貴重なコメントを頂きました。記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) <http://www.maff.go.jp/biomass/index.htm>
- 2) K. Okubo, H. Takagi and K. Goda, "Composites science/Technology and New Challenges for Tomorrow's Applications IV : Green Composites' Research and Today's Progress", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.55, No.4, pp.438-444 (2006).
- 3) K. Goda, "III. FRP using natural fibers", Reinforced Plastics, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.52, No.4, pp.171-174 (2006).
- 4) S. Ochi, H. Takagi and H. Tanaka, "Tensile Properties of Manila Hemp Fabric Reinforced Cross-Ply "Green" Composites", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.52, No.8, pp.916-921 (2003).

- 5) K. Goda, T. Asai and T. Yamane, "Development of ramie fiber reinforced biodegradable resin matrix composites by press forming and effect of chemical treatments", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.52, No.10, pp.1245-1252 (2003).
- 6) R. Nakamura, M. S. Sreekala, K. Goda and H. Jouyou, "Creation of Plasticity in Textile Green Composites Using Ramie Woven Fabrics", International Journal of Plastics Technology, Vol.9, No.1 and 2, pp.406-415 (2005).
- 7) The Society of Fiber Science and Technology, Sen'i-binran (Textile handbook), pp.233-250 (1994).
- 8) A. Watanabe, S. kurosaki, F. Konda and H. Kondoh, "Tensile Property of Fabric and Yarn Deformation in Fabric", Journal of the Society of Fiber Science and Technology, Japan, Vol.29, No.8, pp.T-313-T-321 (1973).
- 9) A. Watanabe, S. kurosaki, F. Konda and H. Kondoh, "Tensile Property of Fabric and Yarn Deformation in Fabric", Journal of the Society of Fiber Science and Technology, Japan, Vol.37, No.2, pp.T71-T-76 (1981).
- 10) M. Sugimura and M. Matsudaira, "The Effect of Number of Yarns per Unit Length and Yarn Twist on Shear Vibrating Properties of Fabrics and Relationships between Them", Journal of the Japan Research Association for Textile End-Uses, Vol.8, No.8, pp.700-708 (2000).
- 11) G. Ben and T. Ishikawa, Senshin-fukugou zairyou-kougaku (Advanced composite materials engineering), pp.56-67 and pp.25-41 (2005).
- 12) D. Hull, An introduction to composite materials, pp.81-101 and pp.125-142 (1981).
- 13) T. Sasai and S. Kawabata, "Equal Biaxial Tensile Properties of Textured Yarn Fabrics", Journal of the Textile Machinery Society of Japan, Vol.36, No.2, pp.580-584 (1983).
- 14) The Textile Machinery Society of Japan, Kiso-sen'i Kougaku I (Basic Textile engineering), pp.298-303 (1968).
- 15) T. Ota, T. Matsuoka and K. Sakaguchi, "Effect of Twist on Mechanical Properties of Woven Fabric Composites", Proceedings of Materials and Mechanics conference, pp.331-332 (2004).
- 16) T. Ishikawa and T. W. Chou, "Stiffness and strength behavior of woven fabric composites", Journal of Materials Science, Vol.17, No.11, pp.3211-3220 (1982).
- 17) N. K. Naik and P. S. Shembekar, "Elastic Behavior of Woven Fabric Composites : I-Lamina Analysis", Jputnal of Composite Materials, Vol.26, No.15, pp.2196-2225 (1992).
- 18) Y. Uetsuji and M. Zako, "Damage Analyss of Woven Fabric Composite Materials", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.48, No.9, pp.1029-1034 (1999).
- 19) S. Kawabata, M. Niwa and M. Matsudaira, "Wire Method for the Measurement of Yarn Thickness Change Caused by Tension and Side Pressure", Journal of the Textile Machinery Society of Japan, Vol.34, No.2, pp.T33-T40 (1981).