マルチセル構造を有する天然繊維の引張負荷による回転現象 －ケナフ繊維による確認実験と理論考察－

合田 公一^{*1, #}・新田 悠二^{*2}

Rotation of a Multi-Cell Structure Natural Fiber during Tensile Loading －Experimental Validation and Theoretical Consideration by Using a Kenaf Fiber－

Koichi Goda^{*1, #} and Yuji Nitta^{*2}

^{*1}Department of Mechanical Engineering, Yamaguchi University, 2-16-1, Tokiwadai, Ube,
Yamaguchi, 755-8611 Japan

^{*2}Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, 2-16-1, Tokiwadai, Ube,
Yamaguchi, 755-8611 Japan

Abstract : The purpose of this study is to confirm a rotation phenomenon around the fiber axis of a kenaf fiber, a representative multi-cell type fiber, during tensile loading, and clarify the rotation mechanism through 3D finite element analysis. The degree of rotation was quantified by measuring rotation angle during the tensile test of a single fiber, by giving a *free* mechanical condition perpendicular to the tensile direction. Results showed that, although many fiber specimens did not rotate during tensile loading, the rotation was confirmed for approximately one fourth of all the specimens. Young's moduli of the rotation identified specimens are almost the same level as non-rotating fibers, while these fibers indicated a slight decrease in strength, as compared with non-rotating fibers. The coordinates transformation matrix simulating a spatial spiral structure of cellulose microfibrils (CMF) was constructed, and applied for 3D finite element analysis. The calculation results show that rotation occurs in one-cell and seven-cell finite element models, but the magnitude of rotation is much smaller in the seven-cell model. Furthermore, a cell twisted finite element model was carried out to simulate a small-scale disorder in the multi-cell orientation structure, which was observed on the kenaf fiber surface. Finally, it is estimated from the calculation results that rotation occurs only for the fiber in which the mechanical balance between CMF spiral structure and multi-cells' intertwist is not enough.

(Received 18 June, 2014 ; Accepted 31 July, 2014)

1. 緒 言

昨今、環境負荷低減の観点から、亜麻、大麻、ジュート、ケナフなどの植物系天然繊維が複合材料の強化材として多々用いられるようになった。このような複合材料は、一方向単層板や射出成形品として幅広い実用化が期待されている。一般に、植物系天然繊維は単繊維ではなく、多くの素繊維細胞(以下、セルと略記する)が集まって構成された繊維束状構造体である。セル内にはセルロースミクロフィブリル(Cellulose microfibrils, 以下 CMF と略記する)と呼ばれるセルロースの集合体がセルの軸周にらせん状に配向する。CMF のらせん配向角度(以下、CMF 角と略記する)は、天然繊維の強度・剛性を左右する重要

なパラメータであり、実験的解析的に CMF 角の役割が明らかにされている。このような生体由来内部構造と機械的性質の関係について、従来はセル 1 本から成る天然繊維(以下、シングルセル繊維と記す)に基づいて論じられてきたが[1,2]、最近では上述の多数のセルから成る天然繊維(以下、マルチセル繊維と記す)を対象とした議論も展開されている[3,4]。

ところで、植物系天然繊維固有の現象として、吸水等による膨潤時に繊維の回転が確認されている[2,5,6]。これは、CMF のらせん状配向がゆえに生じるものであり、引張りによる力学的負荷によっても回転することが示唆されている[2,4]。しかしながら、このような現象の機構はシングルセル繊維に基づいて考察されたものであり、マルチセル繊維に対する機構については触れられていない。Fig. 1 に天然繊維の回転現象に係わる概念図を示す。上述の CMF がらせん状に配置する部位は、 S_1 細胞壁と呼ばれている。この細胞壁には S_1 および S_2 と呼ばれる CMF

corresponding author

^{*1} 山口大学 機械工学科

^{*2} 山口大学大学院 理工学研究科

Table 1 Properties of kenaf fibers [9,10]

Cellulose (wt%)	Hemicellulose (wt%)	Lignin (wt%)	Pectin (wt%)	Density (g/cm ³)	CMF angle (deg)
45-57	21.5	8-13	3-5	1.4	10

Fig. 1 Concept of multi-cell structure and rotation during tensile loading of a natural fiber. (In this figures, only the secondary walls S₂ are drawn schematically to easily understand the relation between the rotation and cellulose microfibrils (CMF) orientation. α : CMF angle)

角の大きな細部壁も接しているが、S₂細胞壁のCMF角が20°以下程度と比較的小さいため、この部位が天然繊維の力学的性質を支配すると言われている[1,4]。Fig. 1では簡単のため、この部分のみを表示している。Fig. 1の個々のシングルセルに着目すると、回転矢印で示すように、引張負荷の作用によって回転が生じることは容易に推測できよう。これに対しマルチセル繊維では、セル同士が膠着している部分においてCMFがクロスして配置されているので、回転が起こらないか、または回転したとしてもわずかであると予想される。このようなマルチセル繊維の回転挙動やそのモデリングに関する報告は、著者らの知る限り、皆無である。

そこで、本研究では代表的なマルチセル繊維であるケナフを用い、まず引張負荷時に繊維の回転が生じ得るかどうかを確認するとともに、回転が生じる場合と生じない場合の力学的性質のちがいについて調査した。続いてCMFを空間内でらせん状に配置できるようにモデル化するとともに、これを有限要素解析に組み込み、回転機構の定性的解明を試みたので報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材料

実験に用いた天然繊維は、代表的なマルチセル繊維であるケナフ (*Hibiscus cannabinus*, ベトナム産)である。こ

Fig. 2 Typical cross-section of a kenaf fiber.

の繊維は、環境に優しい資源として紙や薄板用素材、あるいはPLA系複合材料の強化材としてしばしば用いられている[7,8]。ケナフ繊維の特性および横断面写真をTable 1およびFig. 2にそれぞれ示す。Fig. 2から、用いたケナフは明らかにマルチセル構造を呈することがわかる。

2.2 引張試験および回転角の導出

ケナフ単繊維の引張試験は、JIS規格「炭素繊維－単繊維の引張特性の試験方法(JIS7606)」に準じ、引張圧縮試験機(山口大学製、容量:19.6N)を用いて実施した。張試験片のゲージ長さは25mm、引張速度は1.0mm/minである。試験片の投影幅はレーザスキャンマイクロメータ(LSM-500S, Mitutoyo Co.)を用い、繊維の軸方向に沿って0.1mm間隔で0°、60°、および120°の3方向から測定するとともに、繊維断面積をDBA(Data-Based Approximation)法[11,12]より推定した。ここでは、文献[11]と同様に断面形状を六角形と仮定した。その結果、今回測定した断面積の平均値は3438μm²、変動係数は0.208であった。なお、試験本数については、統計処理におけるばらつきの収束性として試料数40以上が推奨されており[13]、本研究でもこれに準じた。

繊維の回転現象を観察するにあたり、試験機の掴み治具の上部は金属製丸棒で支え、金属リングを介した連結構造とした。この機構により、リングは180°未満の角度範囲で回転することができる。

繊維回転角はデジタルマイクロスコープ(KH-1300, HiROX)によって引張試験中に撮影された動画像から測定した。最初の画像で、特徴点を初期点に設定し、この点が破断するまで連続的に存在するかを確認した。特徴点が最後の画像まで存在するとき、回転角 ψ と画像上での移動距離 L の関係はFig. 3に示すようになる。 L は

$$L = x_0 - x_0 \cos \psi + y_0 \sin \psi \quad (1)$$

であり、 x_0 と y_0 はX-Y平面上の原点(0,0)から設定された初期特徴点の位置座標である。実験では、 L を初期画像からの最終画像の移動距離とした。本研究では、原点を

Fig. 3 Schematic of movement path from initial feature point (x_0, y_0) to final feature point (x, y) , and measured distance L .

DBA から導出した仮定 6 角形の 3 本の対角線の交点として認識し、 y_0 は 6 角形の辺上の点として仮定した。以上より、回転角 ψ は式 (1) を陰解法で解くことによって得られる。

3. 実験結果

Fig. 4 に引張試験中の繊維表面写真を示す。矢印で示すように、特徴点(突起物)は上側に移動するだけでなく、徐々に左(Fig. 4 (a))から右(Fig. 4 (c))へ移動していくことがわかる。このとき、突起物が手前に移動し、その形状が見えにくくなったことから回転していると判断できる。すなわち、本研究においてマルチセル繊維の引張負荷による回転現象が確認された。以下、このような回転を反時計回りと称す。Fig. 4 では回転とともに、繊維の幅も変化することが観察される。これは、Fig. 2 に一例を示すように、ケナフ繊維の断面が複雑な形状をしており、回転によって繊維幅が変わりながら観察されるためである。一方、この例とは逆に時計回りに回転する試験片もいくつか確認できたが、多くの繊維において回転を確認することはできなかった。Table 2 に試験片の引張試験結果を示す。回転が確認された試験片は 11 本であった。以後、回転が確認された試験片を RI-試験片(Rotation-identified specimen)、回転を確認できなかったものを NRI-試験片(Non-rotation-identified specimen)とそれぞれ略記する。RI-試験片のうち、時計回りのものは 5 本、反時計周りは 6 本であった。つまり、RI-試験片は全体の約 1/4 を占め、引張負荷によって回転が生じる確率は 1/4 程度である。また、すべての試験片の結果と比較すると、引張強度はやや低くなることがわかる。一方、ヤング率についてはほぼ同程度の値を示した。回転現象がマルチセル繊維の内部構造に起因するならば、他の構造材料と同じく、植物系天然繊維もまたその強度は構造に敏感であり、剛性は構造に鈍感な特性であると思われる。Fig. 5 に測定した回転角と引張強度およびヤング率との関係を示す。引

Table 2 Tensile properties of kenaf fiber specimens

	Corresponding number	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
Total	42	350 (0.331)	33.0 (0.303)
RI specimens	11	331 (0.266)	32.8 (0.330)
NRI specimens	31	357 (0.347)	33.1 (0.293)

The values in parentheses are coefficients of variation.

Fig. 4 Observation of rotation during tensile test of a kenaf fiber.

Fig. 5 Effect of rotation angle on tensile strength and Young's modulus. Rotation angles of two specimens were not measured in the total number of RI-specimens, because the feature points moved to the outside of observation image (black arrows) or became defocus (white arrows) during tensile test.

張強度は回転角と相関があるように見えるが、相関係数はわずか -0.211 と算出された。すなわち、繊維強度の回転角への依存性は小さいと思われる。一方、ヤング率と回転角の関係について相関係数を求めたところ -0.518 と算出された。この値は両者の間に少なからず相関関係を認めるものである。しかしながら、本研究で見積もった上述の係数値は、RI-試験片のうち回転が計測できなかった 2 つを除外しており、わずか 9 個のデータによる推定値であることから十分に信頼性のある値とは言えない。RI-試験片の回転角と強度・剛性の関係については、今後の課題としてさらなる検討を要する。

以上の回転の機構は、CMF のらせん状配向が主要因であると考えられる。すなわち、文献[14,15]でも指摘されているように、天然繊維のセル内の CMF の多くは 'Z' 型

Fig. 6 Schematic of coordinates transformation on x-z and y-z planes.

のらせん配置(以下、Z-helixと記し、‘S’型のらせん配置をS-helixと記す)を取っている。このため、引張負荷によりCMF角が減少し、これにともなって回転が生じると考えられる。しかし、マルチセル繊維では、セルが互いにリグニン等の細胞間物質で膠着されているので、緒言でも述べたように、相対するセル間においてCMF角はクロスし、回転を妨げる。そこで、本研究では以上のようなマルチセル繊維の回転機構を、力学モデルを通して検証する。

4. 考 察

4.1 解析方法

マルチセル繊維の回転現象のモデリングにあたり、その構造を以下のように仮定する。

- ① 各セルを巨視的には直交異方性体で表現できるものとし、連続体として扱う。
- ② CMFは、10°程度の小傾角を有しながら、セルの中心軸周りにらせん状に一樣に配置される。
- ③ セル間のリグニン等の存在を除外できるものとする。

セル内のCMFは、結晶秩序が分子鎖方向に寸断された準周期的不均質構造を呈するものの[16]、巨視的な力学挙動を論ずる場合、ヘミセルロースを含んだ直交異方性連続体としてしばしば扱われる[4,18-20]。①はその仮定である。CMFはセルの表層において無秩序に配列され、また内部の一部においても比較的大きく傾いて配置される[19]が、本研究では体積の多くを占め、また荷重の大半を担うS₂細胞壁の挙動に着目した。②はその仮定である。一方、後述の有限要素分割に対してリグニンをセルの要素間に配置することは可能である。しかしながら、リグニンは巨視的異方性を持ち合わせない要素であり、かつ低弾性率要素なので[1,4,21]、これを導入せずとも回転機構の定性的解明に支障はないと考えた。③はその仮定で

ある。

力学モデルとして、仮定①②で述べたように、CMFのらせん構造を直交異方性体の応力-ひずみマトリックスの座標変換によって表現する。一般に、直交異方性体の応力-ひずみマトリックス[D]は、

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{23}\nu_{32}}{E_{22}E_{33}\Delta} & \frac{\nu_{12}-\nu_{13}\nu_{32}}{E_{11}E_{33}\Delta} & \frac{\nu_{21}+\nu_{21}\nu_{32}}{E_{22}E_{33}\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{12}-\nu_{13}\nu_{32}}{E_{11}E_{33}\Delta} & \frac{1-\nu_{31}\nu_{13}}{E_{11}E_{33}\Delta} & \frac{\nu_{23}-\nu_{21}\nu_{13}}{E_{11}E_{23}\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32}}{E_{22}E_{33}\Delta} & \frac{\nu_{23}-\nu_{21}\nu_{13}}{E_{11}E_{23}\Delta} & \frac{1-\nu_{12}\nu_{21}}{E_{11}E_{22}\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

と表わされる。ここで、 E_{11} 、 E_{22} はそれぞれ主軸であるCMF軸(3-軸)に垂直方向のヤング率であり、 E_{33} はCMF軸方向のヤング率である。 $\nu_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$ は、 i 軸方向に負荷されたときの j 軸方向の横ひずみに対するポアソン比である。 G_{23} 、 G_{31} 、 G_{12} はそれぞれ2-3、3-1、1-2面のせん断弾性係数である。また、

$$\Delta = \frac{1}{E_{11}E_{22}E_{33}}(1-\nu_{12}\nu_{21}-\nu_{23}\nu_{32}-\nu_{31}\nu_{13}-2\nu_{12}\nu_{23}\nu_{31})$$

である。また座標変換マトリックス[T]は

$$[T] = \begin{bmatrix} l^2 & m^2 & n^2 & 2lm & 2mn & 2nl \\ l'^2 & m'^2 & n'^2 & 2l'm' & 2m'n' & 2n'l' \\ l''^2 & m''^2 & n''^2 & 2l''m'' & 2m''n'' & 2n''l'' \\ ll' & mm' & nn' & lm'+l'm & mn'+m'n & nl'+n'l \\ l'l' & m'm' & n'n' & l'm'+l'l'm' & m'n'+m'm'n' & n'l'+n'l'l' \\ ll'' & mm'' & nn'' & lm''+l''m & mn''+m''n & nl''+n''l \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} l &= \cos \phi & m &= -\sin \phi \sin \theta & n &= -\sin \phi \cos \theta \\ l' &= 0 & m' &= \cos \theta & n' &= -\sin \theta \\ l'' &= \sin \phi & m'' &= \cos \phi \sin \theta & n'' &= \cos \phi \cos \theta \end{aligned}$$

と表わされる。ここで、 ϕ と θ は3次元直交座標系において、それぞれ主軸(ベクトルOR上の軸)のx-z平面およびy-z平面上におけるz軸およびベクトルO'R'からの傾角である。Fig. 6にその座標系と主軸が傾いた様相を示す。このとき、角度 α は式(3)の n'' にあたる $\cos \phi \cos \theta$ の逆関数で与えられる。 α を満たす ϕ と θ の組み合わせは無数にあるので、これを仮定②で述べたように、セルの周軸に一樣に配置させるためにx-y平面上におけるy軸からの周方向になす角度 β を導入した。

Fig. 6に、CMFを有する6面体要素が角度 β ほど旋回してZ-helix状に配置される例を追示している。CMF角 α とCMF軸は、原点Oからx-y平面内で半径方向に伸びた法線に対する垂直面(Fig. 6のCMFを有する6面体要素上の面)では常に一定に与えられる。これをFig. 6内の矢印で示すように、原点Oに向けて移動させるとき、CMF軸はベクトルORと一致し、またCMF角は先述の $\cos \phi \cos \theta$ の逆関数で与えられ、それぞれ3次元表示となる。これをz軸周りでらせん状に一樣に表現するために、 β を各要素の座標に応じて割り振ることで ϕ と θ を見積もった。その換算式をTable 3に整理して示す。 α と β を適宜与えることにより ϕ が算出でき、これを用いて θ を見積もることができる。各値は第1象限から第4象限にかけて異

Fig. 7 FEM mesh of one elementary cell. (a) Cross-sectional FE mesh, (b) 3D-FE mesh

なった換算式になるものの、これを各要素の座標に応じて配置することにより、らせん構造の空間的表現が可能となる。らせん構造の応力-ひずみ関係式は、 $[T]^{-1}[D][T]$ によって表わされるが、マルチセル繊維の回転機構をより詳しく調査するために、本研究ではこれを3次元有限要素解析に導入した。有限要素分割として、まず Fig. 7 に示すような縦方向にセル層を直線状に積上げたマルチセル繊維モデルを作成した。使用した有限要素は、後述のセルのねじれ構造を考慮し、アイソパラメトリック8節点6面体要素とした。また、要素分割は Fig. 7 (a)に示すように、1つのセルモデルの断面は中央にルーメンを有する六角形と仮定し、Fig. 7 (b)のように単一セルを積上げた(以下、1-cell モデルと記す)。また、セルの1辺の長さはケナフ繊維の断面観察から0.005mmとし、軸方向の高さは0.02mmとした。

本研究では、文献[14,15]からCMFのらせん構造をZ-helixに仮定して計算を実施した。また、上述の周方向角度 β については、以下のように割り振った。①②⑥⑦⑮⑯⑲⑳㉓㉔に対して $\beta=0^\circ$ とし、その他の要素には $\beta=60^\circ$ を代入した。各要素が位置する象限の換算式に所定の α および $\beta=0^\circ$ または 60° を代入することにより、座標変換マトリックスに用いる ϕ および θ を得た。本計算で用いた弾性定数の値を以下に示す。

$$E_{11}=E_{22}=10.0\text{GPa}, E_{33}=30.0\text{GPa}, G_{12}=G_{23}=G_{31}=7.0\text{GPa},$$

$$\nu_{31}=\nu_{32}=0.2, \nu_{12}=0.3$$

E_{33} は文献[11]で得られた実験結果を参考にして決定した。 E_{11} , E_{22} は文献[3,18,19]から E_3 のおおよそ1/3程度であったことから10.0GPaとした。せん断弾性係数については、一方向繊維強化材については E_{11} , E_{22} のおおよそ0.5~0.8倍の値を取ることが多く、本研究では簡単のため、すべて0.7倍の値として統一した。ポアソン比についてはセルロース等の軸方向のポアソン比が0.2程度であるため、 ν_{31} を0.2とした[1]。また、 ν_{12} については著者らが調べた範

Fig. 8 Nodal-points (•) before and (○) after calculation displacement vectors of one-cell model at $\alpha=10^\circ$ (Top view)

囲内において出典が見当たらず、便宜上0.3とおいた。境界条件として、要素底面の節点の z 軸方向を固定条件とし、上面の各節点に対して z 方向に強制変位0.002mm(ひずみ1.0%に相当)を与えた。また、底面のルーメンに当たる節点についても x および y 方向に対して固定し、上面節点の x および y 方向はすべて拘束を外した。なお、本研究で用いた有限要素コードは著者らで作成したものである。

4.2 解析結果

Fig. 8に1-cellモデルで得られた上面節点の変位ベクトルを示す。文献[10]を参考に、Fig. 8は便宜上、 $\alpha=10^\circ$ で設定した結果であり、すべての節点は時計回りに回転することが確認できる。Z-helixは、上から見ると反時計回りのらせん構造であるが、負荷を与えることによりその逆回りの回転が生じる。このとき、回転角は0.2mmの繊維長あたり 4.89° ($24.5^\circ/\text{mm}$)であり、繊維軸方向(非主軸方向)のヤング率は28.6GPaが得られた。一般に、直交異方性材料の非主軸方向におけるヤング率は以下のように与えられる[17]。

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

ここで、 α は非主軸角であり、本研究のCMF角に相当する。同じ弾性定数を用い、 $\alpha=10^\circ$ を式(4)に代入すると、28.5GPaが得られた。1-cellモデルから得られる値とさほど変わらないものの、式(4)によるヤング率は0.1GPaほど低くなる。マルチセル構造をシミュレートするために、Fig. 9に示すように、有限要素分割を7-cellモデルに拡張した。ここでは、現象の定性的理解を目的とするため、すべて1-cellモデルと同じ大きさの六方配列としている。その結果、Fig. 10に示すように、1-cellモデル同様に時計回りの回転が確認できた。回転角度として 0.95°

Table 3 Relation of CMF and location angles α, β with coordinate transformation angles ϕ, θ

	First quadrant	Second quadrant	Third quadrant	Forth quadrant
ϕ	$\tan^{-1}(\tan \alpha \cdot \cos(\pi - \beta))$	$\tan^{-1}(\tan(\pi - \alpha) \cdot \cos(\pi + \beta))$	$\tan^{-1}(\tan(\pi - \alpha) \cdot \cos(-\beta))$	$\tan^{-1}(\tan \alpha \cdot \cos \beta)$
θ	$\cos^{-1}(\cos \alpha / \cos \phi)$	$\cos^{-1}(-\cos(\pi - \alpha) / \cos \phi)$	$\cos^{-1}(\cos(\pi - \alpha) / \cos \phi)$	$\cos^{-1}(-\cos \alpha / \cos \phi)$

Fig. 9 FEM mesh of seven elementary cells. (a) Cross-sectional FE mesh, (b) 3D-FE mesh.

Fig. 10 Nodal-points position (●) before and (○) after calculation of seven-cell model at $\alpha=10^\circ$ (Top view)

Fig. 11 Young's moduli of one-, two- and seven-cells obtained in the present FE model.

($4.75^\circ/\text{mm}$)が得られ、回転はするものの1-cellモデルより規模が小さくなる。これは、セルとセルが接している要素間では、上述のようにCMF角がクロスして配置されており、回転が生じにくくなったことが原因と考えられる。得られたヤング率は29.1GPaであり、1-cellモデルより大きな値を示した。CMF角の変化にともなうヤング率の推移をFig. 11に示す。比較のため、2-cellモデルの場合も結果に加えた。これから、ヤング率は直交異方性材料におけるよりもすべて大きく、特にCMF角が 10° を過ぎた辺りからその傾向が顕著になる。また、セル数が多くなるにつれて、より高いヤング率を示すようになり、繊維の回転を小さくするマルチセル構造は、ヤング率を増加させる効果を有する。

これまでの計算結果から実際の回転機構を推測すると、シングルセルの回転がCMFのらせん構造によって生じる

Fig. 12 3D-FE mesh with torsional cells. (a) Clockwise torsion, (b) Anticlockwise torsion.

Fig. 13 Effect of cell torsional angle on rotation angle during tensile loading by 3D-FE analysis. (CW : Clockwise, ACW : Anticlockwise)

限り、セルが多数隣り合ったケナフを始めとするマルチセル繊維もまたCMFのらせん構造に起因して回転が発生すると考えられる。そして力学的性質に関しても、同じ繊維素材をシングルセルとして扱う場合に比べ、ヤング率はより大きく発現されると推測される。

ところで、第3章においてNRI試験片はRI試験片より数多く存在した。引張負荷による回転がCMFのらせん状配置に依存するならば、CMF角が極端に小さくない限り、回転はどの試験片でも生じるはずである。そこでこの矛盾点を解くために、本研究ではセルの繊維方向の絡み合いに着目した。Fig. 4に示すように、セル間の境界を示す縦方向のしわは、ほぼ直線的に伸びている。しかしながら、各試験片を注意深く観察すると、しわはその配向の傾きに微小ながら変動をともなって配置されていることがわかった。セルは成長する過程で隣り合うセル同士が密に凝集し、互いに絡まり合って伸びていくと考えられる。そこで、Fig. 9の直線状に積み上げたセル構造を改良し、絡み合いを有する有限要素分割を別途作成した。ここでは簡単のため、絡み合い構造をセルの積み上げの段階で時計回りまたは反時計回りのねじれ構造に単純化した。ねじれ構造を有する有限要素分割をFig. 12に示す。このとき、Table 3の換算式についてはセルのねじれ構造によるモデルの傾きを考慮した。すなわち、本研究では、中心のセルを除く6つのセルそれぞれの各層における重心座標に応じて各象限ごとに角度 ϕ , θ を考慮しTable 3の換算式に加算した。

Fig. 14 Schematic of the non-rotating mechanism of a multi-cell type fiber. (α and η are CMF angle and cell torsional angle, respectively.)

Fig. 13 に計算結果を示す。計算ではセルのねじれ角を $-5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ の小規模な範囲に留め、CMF 角 α は 0° または 10° とした(ねじれ角は時計回りを正とする)。図中、○および□印は $\alpha = 10^{\circ}$ の結果を示す。これから、回転角はセルのねじれ角の増加とともに減少することがわかる。その割合は、例えばねじれ角 $7^{\circ} \pm 2^{\circ}$ 辺りでは回転角度が $\pm 2^{\circ}/\text{mm}$ 程度となり、回転の大きさとしては極めて小さい範囲にあると考えられる。一方、●および■印は $\alpha = 0^{\circ}$ の場合の結果である。このときもねじれ角の増加とともに回転角は減少する。すなわち、セルのねじれ構造のみでも回転の発生を確認することができた。この結果は、マルチセル繊維の回転機構が CMF のらせん構造だけによるものではないことを示唆する。

以上の計算結果を実際の現象に照らし合わせ、以下にマルチセル繊維の回転機構を総括する。まず NRI-試験片は、Fig. 14 に示す概念図のように、CMF のらせん構造 (Fig. 14 左図) とセルの絡み合い構造 (Fig. 14 右図) において力学的均衡が保たれ、CMF による回転をセルの逆向き回転で抑制していると推測される。一方、セルの絡み合いは統計的に時計方向または反時計方向に規模の大きい場合も幾らか存在し、CMF のらせん構造と力学的均衡が保てなくなった場合、RI-試験片のようにどちらかの回転として発現されたのではないかと推測される。そして、均衡の保てないようなセルの絡み合い構造は、強度に影響する構造欠陥としても作用し、RI-試験片の引張強度を低下させた原因に関わったのではないかと考えられる。

今後は、セル構造をより詳細に観察するとともに現実 に即した構造を把握した上で、マルチセル繊維の回転現象の定量的解明に取り組む予定である。

5. 結 言

代表的なマルチセル繊維であるケナフを取り上げ、引張負荷による繊維軸周りの回転現象について調査した。

また、CMF を空間内でらせん状に配置するための座標変換マトリックスを考案するとともに、これを有限要素解析に組み込み、マルチセル繊維の回転機構について考察を行なった。得られた結論は以下のように要約される。

- (1) ケナフ繊維が引張負荷によって繊維軸周りに回転することを確認した。ただし、すべての繊維で回転が起こるとは限らず、試験数全体の約 4 分の 1 程度の割合であった。また、その回転方向は時計回りまたは反時計回りのどちらかであった。
- (2) 回転の確認された繊維は、回転の確認できなかった繊維の引張強度と比較し、若干低いことが認められた。一方、ヤング率については両者ともほぼ同程度の値を示した。
- (3) CMF のらせん構造を Z-helix と仮定し、シングルセル繊維およびマルチセル繊維の有限要素解析を行なったところ、ともに時計回りの回転が確認できた。ただし、後者の回転の割合は前者におけるより小さい。
- (4) さらに、マルチセルの絡み合い構造を時計回りまたは反時計回りの微小なねじれ構造と仮定し、同様な有限要素解析を実施したところ、時計回りのねじれ構造において回転が生じないセルのねじれ角の存在を確認した。
- (5) 以上から、ケナフ繊維の引張負荷時に観察される回転は、CMF のらせん構造とマルチセルの絡み合い構造の力学的均衡が保たれない場合に生じる現象であると推測される。

文 献

1. L. Salmén, A. Ruvo, *Journal of Wood and Fiber Science*, **17**(3), 336-350 (1985).
2. E. Markland and J. Varna, *Plastics, Rubber and Composites*, **38**, 118-123 (2009).
3. A. Beakou and K. Charlet, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, **43**, 54-59 (2013).
4. V. Placet, F. Trivaudey, O. Cisse, V. Gucheret-Retel, M. Lamine Boubakar, *Composites: Part A*, **43**, 275-287 (2012).
5. Kh. M. Mannan and Z. Robbany, *Polymer*, **37**(20), 4639-4641 (1996).
6. T. Okano and Y. Nishiyama, *Cellulose communications*, **2**, 2-5 (1995).
7. K. Inoue, S. Serizawa, M. Yamashiro, M. Iji, *Proceedings of 6th International IEEE Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics*, 73-76 (2007).
8. T. Oda and M. Yamato, *SAE Technical Paper*, 2004-01-0731 (2004).
9. H. M. Akil, M. F. Omar, A. A. M. Mazuki, S. Safiee, Z. A. M. Ishak, A. Abu Bakar, *Materials and Design*, **32**, 4107-

- 4121 (2011).
10. N. Reddy, Y. Yang, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **55**, 8570-8575 (2007).
  11. Y. Nitta, K. Goda, J. Noda, and W.-I., Lee, *Composites: Part A*, **49**, 132-138 (2013).
  12. K. Tanabe, T. Matsuo, A. Gomes, K. Goda, J. Ohgi, *Zairyo/ Journal of the Society of Materials Science, Japan*, **57**, 454-460 (2008).
  13. M. Kawai and H. Abe, *Reports Res. Lab. Asahi Glass Co., Ltd.*, **30**, 111-120 (1980).
  14. Jörg Müssing. “*Industrial Applications of Natural Fibres Structure, Properties and Technical Applications*”, John Wiley and Sons, Ltd. (2012).
  15. C. Sellén and P. Isaksson, *Journal of Composite Materials*, **48**, 277-289 (2014).
  16. Cellulose Society of Japan, “*Serurosuo no jiten (Dictionary of cellulose)*”, Asakura Publishing Co., Ltd., p.100 (2000).
  17. T. Komori, *Textile Research Journal*, **71**(10), 898-904 (2004).
  18. C. Baley, *Composites : Part A*, **33**, 939-948 (2002).
  19. P. Xu and H. Liu, *Wood Science and Technology*, **38**, 363-374 (2004).
  20. J. Gassan, A. Chate and A. K. Beldzki, *Journal of Material Science*, **36**, 3715-3720 (2001).
  21. A. Bregander and L. Salmén, *Journal of Materials Science*, **37**, 151-156 (2002).