

## 爆砕処理法によって採取された竹繊維の高温引張試験

高橋明宏・榮徳幸祐<sup>1</sup>・山元直行・豊廣利信Tensile Test at Elevated Temperature of Bamboo Fiber Prepared  
by Steam Explosion MethodAkihiro TAKAHASHI, Kousuke EITOKU<sup>1</sup>, Naoyuki YAMAMOTO  
and Toshinobu TOYOHIRO

(Received October 1, 2010)

**Abstract** In this study, the bamboo fiber(*phyllostachys pubescens*) was prepared by steam explosion method. Tensile tests of the bamboo fiber were carried out to measure the mechanical properties at temperature of room and 373K(100°C). Buckling deformation was observed on the bamboo fiber during tensile test at elevated temperature. To investigate influence of the buckling deformation, pre-deformed bamboo fiber was used in this research. Tensile strength decreased with increasing to testing temperature. The result on tensile strength was considered with *Weibull* analysis. Fiber fracture was demonstrated with splitting type. The brittle tendency with pre-deformed bamboo fiber was strongly in evidence.

**Keywords** [Bamboo fiber, Steam explosion method, Mechanical properties, Temperature, Buckling]

## 1 序論

竹材は昔から籠、竿、建設現場の足場など様々な所で使われてきた。しかし近年では、アジア諸国で大量生産された安価な石油由来の製品が市場を占めているため、竹製品の需要が大きく低迷している<sup>1)</sup>。

このような中で、高強度天然植物繊維として竹繊維が注目されている。本研究室の研究結果から、竹繊維の強度は、採取部位によっては軟鋼を上回るものがあることが確認されている<sup>2),3)</sup>。また、天然繊維であるため環境への負荷が著しく低く、処分の際に放出される二酸化炭素は植物の光合成により吸収されたものなので、いわゆるカーボンニュートラルが成立する<sup>4)</sup>。このような特長を有効的に活用するために、最近では水溶性スターチベースの生分解樹脂を母相とした竹繊維強化オールグリーン複合材料の開発的研究が盛んに行われており<sup>3)</sup>、強化材としての竹繊維の力学的性質の解明が急務とされている。

ところで、一般的に複合材料に用いられる強化材

は、成形時や実際に使用される状況下で加熱を伴うことが多い。しかしながら複合材料の生産において、現状では常温下の引張試験で得られたデータ等を用いた製造設計が行われており、大変問題視されている。そのような製品が高温雰囲気中で使用された場合、早期に劣化してしまうことが予想されるため、それを回避するためには高温下での基礎的な材料特性のデータを取得し、それを基づいて成形工程や設計工法を見直す必要がある。

以上のことを踏まえ、竹繊維を複合材料の強化繊維として用いることを想定し、高温・乾燥雰囲気での竹繊維の引張応力-ひずみ応答の取得を主目的として実験を行った。また今回の高温引張試験で、試験前の昇温中に竹繊維に伸び変形が認められた。Fig. 1 は、竹繊維の試験片を 473K で 20 分間静置させた後の伸び変形の様子である。軸方向に竹繊維を配して繊維両端を固定していることから、熱変形によってオイラー座屈変形が形成されている。そこで、熱変形によって座屈変形を生じたケースを想定し、常

温下であらかじめ座屈変形を付与させた後の竹繊維の基礎的な力学特性も調査した。

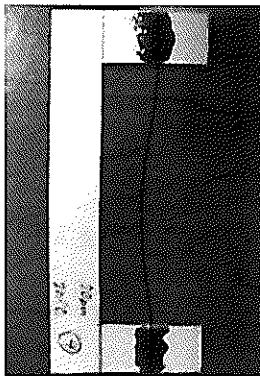


Fig.1 Photograph of the bamboo fiber heated at temperature of 473K(200°C)

## 2 実験方法

### 2.1 竹繊維の採取および引張試験片

竹は香川産(6年生)の孟宗竹を使用した。地上から3m以内の竹穂を伐採し、それを長さ方向に1mずつ三等分した。その後縦方向に4分割し、それらをまとめたものを爆砕処理<sup>5)</sup>に施した。この処理を行うことによって、柔細胞組織であるリグニンが爆砕され、竹繊維束の採取が容易になる。本研究ではパン株式会社所有の爆砕処理装置を用いて、処理を数回繰り返し実施した。Fig.2は本研究で行った爆砕処理条件である。その後、外皮を除去し、厚さ方向の外側近

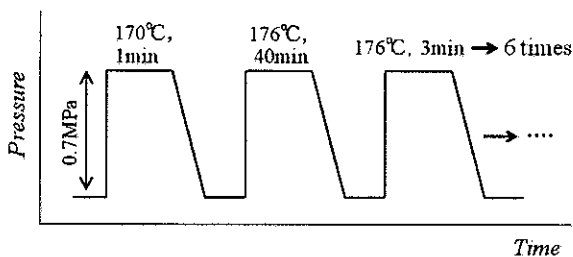


Fig.2 Pressure-Time profile for the steam explosion method on this study

傍から竹繊維束を採取した。以前の研究で、厚さ方向によって竹繊維束の強度が変化し、外表面に近くなるほど高強度になることがわかっている<sup>2)</sup>。そこで本研究では、以前の常温引張試験結果と比較するため、外表面近傍の竹繊維束(以後、竹繊維と略記)を高温引張試験に供することにした。採取された竹繊維の繊維表面にリグニンが付着しているので、これを水道水で湿らしたウエスを用いて拭き取った。Fig.3は引張試験用の試験片形状及び寸法である。ケント

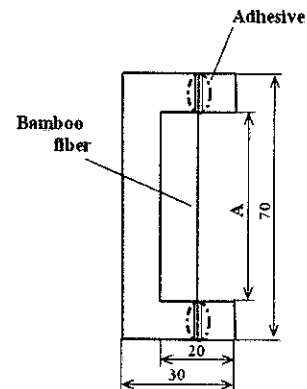


Fig.3 Schematic illustrations of the tensile specimen in conformity to JIS R7606

紙を用いて「コ」の字型の台紙を作製し、台紙に対して竹繊維を垂直に固定し易いようにあらかじめ中心線を引いた。その後、竹繊維を中心線に沿って両面テープで慎重に仮止めをし、エポキシ系接着剤(昭和高分子製, アラルダイト)を塗布した。塗布後、乾燥機にて313K(40°C)~323K(50°C)で一晩静置させ、乾燥処理を行うと同時に硬化を堅持させた。

### 2.2 繊維断面積の測定方法

竹繊維の直径は測微顕微鏡を用いて、千分の一ミリメートルのオーダーまで測定した。すなわち、正面方向と90°方向の二方向から平均直径を導き出し、それを繊維軸方向にそれぞれ三点測定し、それら三点の直径から、楕円近似の公式を用いて断面積を求め、強度算出用として用いた。

### 2.3 常温および高温引張試験

竹繊維の引張試験は、JIS R 7606 法<sup>6)</sup>及び文献<sup>7)</sup>を参考にして行った。引張試験機は小型卓上試験機(JT トーシ製, LSC-1/30, 容量1000N)を用いて行った。引張負荷速度は1mm/min。(ひずみ速度 $0.33 \times 10^{-2}$ [1/sec]に相当)で行った。Fig.3に示しているA寸法(標点間距離)は50mmとした。

Fig.4は、高温引張試験で用いた自作の恒温槽である。恒温槽は、熱風機(BOSCH製, GHG 660LCD型)により上部から熱風を送り込み、下部の排気口から熱風を排気することで、恒温槽内の空気を静かに対流循環させ、外側を断熱材で囲むことで温度を保つという構造になっている。今回は、熱風機の温度を393K(120°C)に設定し、恒温槽内の温度が $373\text{K} \pm 1\text{K}$ ( $100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ )に達した時に引張試験を行った。温度は熱電対で測定した。この時、熱電対の先端に竹繊維を巻きつけ、それをダミー繊維として試験片の温度を擬似的に測定した。引張試験の条件は、常温での引張試験方法と同様にした。

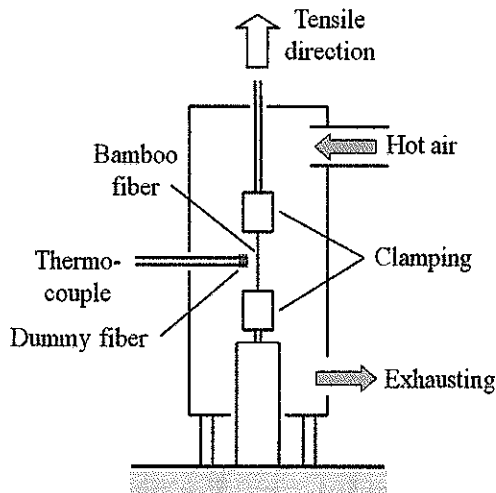


Fig.4 A schematic of a tensile testing apparatus at elevated temperature. The tensile axis is vertical

高温引張試験時において、両端固定による竹繊維のオイラー座屈変形が観察された。そこで熱風を加えている間に座屈変形が発生しないようにするため、絶えず試験機のクロスヘッドを微動させ、竹繊維に座屈変形が生じないようにした。

ところで、もしも座屈変形したまま引張試験を実施した場合に、竹繊維の力学特性結果にどのような影響を及ぼすかは非常に興味がある。そこで座屈変形の影響の調査を行うため、常温にて一軸圧縮負荷によって座屈変形させた後の竹繊維の引張試験を行った。ここでは Fig. 3 の A 部は 53mm のものを使用した。試験片をセットした後、試験機のクロスヘッドを 3mm 圧縮することで、標点間距離を 50mm になるようにした。圧縮した状態を 15 分間保持し、その後標点間距離を 53mm に戻して引張試験を行った。引張試験の条件は、常温引張試験と同様にした。

破断後の繊維試験片の破壊様相を目視にて観察した。常温と高温雰囲気中で引張試験を行った後の試験片の着色の様子や繊維破断の相違に注目して観察した。

### 3 実験結果および考察

#### 3.1 竹繊維の応力-ひずみ線図

Fig. 5、Fig. 6、および Fig. 7 は、それぞれ常温下、100℃の高温下、およびあらかじめ座屈変形を施した竹繊維の引張試験から得られた応力-ひずみ曲線である。試験を行った 30 本すべてのデータを掲載した。これらの試験結果から、負荷開始から線形的な応力ひずみ応答を示し、最高荷重点で破断するといった変形・破壊挙動を示すことが明らかとなった。

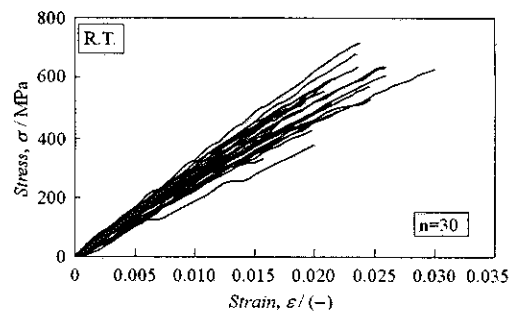


Fig.5 Schematic tensile stress-strain curves tested at room temperature

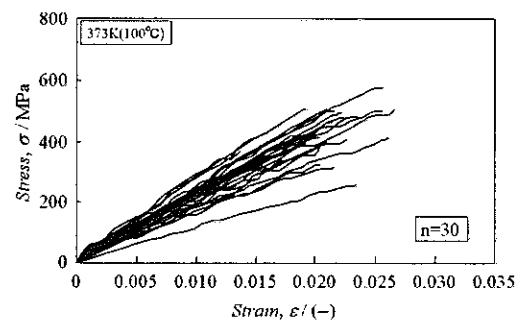


Fig.6 Schematic tensile stress-strain curves tested at temperature of 373K(100°C)

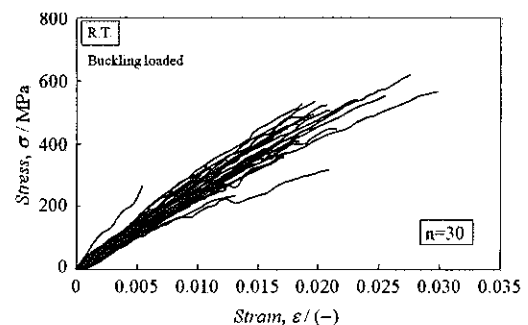


Fig.7 Schematic tensile stress-strain curves for Bamboo fibers pre-loaded to axis compression. Specimens are tested at room temperature

#### 3.2 力学物性に及ぼす高温及び座屈変形の影響

複合材料の強化繊維の評価には一般的に二母数単一ワイブル分布が使用されているので、今回はそれを使用した解析を行った。Fig. 8 は、常温、100℃および座屈を発生させたときの引張強度の単純平均とワイブル統計解析から得られた期待値をまとめたものである。図の黒丸が単純平均値、破線が期待値である。単純平均値と期待値はほぼ一致するという結果が得られた。高温(100℃)の引張強度 $\sigma_B$ は 400MPaであったが、常温のそれに比べ 20%低下するという

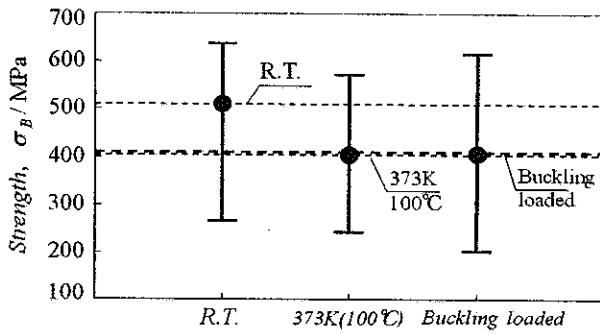


Fig.8 Tensile strength for the Bamboo fiber of different test conditions

結果が得られた。座屈を付与させた竹繊維の引張強度は高温試験での結果に近い値が得られた。常温での試験結果を比較した場合、あらかじめ座屈変形を施すと引張強度は低下することがわかった。

複合材料に使われる強化繊維の強度について、一般的に JIS に準じた単繊維試験法<sup>8)</sup>によって求められた後、そのデータからワイブル母数を推定<sup>9)</sup>することが多い。そこで竹繊維の引張試験から得られたデータをワイブル分布化し、ワイブル形状母数  $m$  を推定した。この  $m$  値は、値が小さいほど引張強度のばらつきが大きいことを意味する。本研究の結果、常温では  $m=4.91$ 、高温では  $m=4.68$ 、そして座屈変形を施したときは  $m=3.76$  となった。常温および高温引張試験において、 $m$  値に有意差は認められなかった。一方、座屈変形を施した場合の  $m$  値は常温および高温引張試験のそれらよりも低下していた。これは、座屈変形を付与させたことによって破断に至らしめる重要欠陥の生成が、本質的に不安定変形であるオイラー座屈変形によって律速しているため、最終的な強度のばらつきに反映した結果であると推測される。合田らは、中国産孟宗竹の繊維束を採取し、標点間距離 10mm で常温引張試験を行った結果、ワイブル形

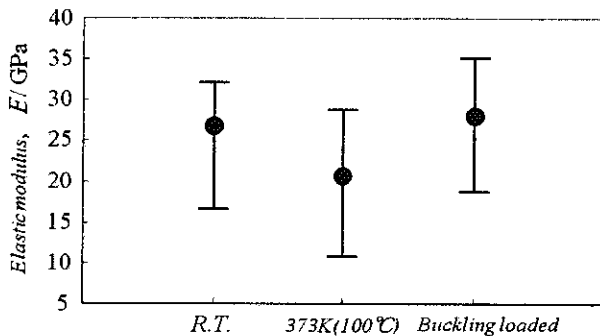


Fig.9 Elastic modulus for Bamboo fiber of different test conditions

状母数  $m=2.74^{10)}$ と報告している。本実験と比較して標点間距離が 80%短いため、内部欠陥の存在確率が低いことから、 $m$  値も低くなるのは明らかに不合理である。しかしながら合田らはローラーを用いて竹繊維を採取している。採取段階で多量の欠陥が導入されたために  $m$  値の低下に繋がったと示唆される。

Fig. 9 は、常温、高温(100°C)および座屈変形を付与させて試験したときの縦弾性係数  $E$  である。常温および高温引張試験のデータを比較すると、引張強度の変化と同様、常温よりも高温で 23%低下する結果となった。座屈を発生させたときのデータは常温引張試験から得られたデータに近い値を示した。このことから縦弾性係数に対しては試験温度による影響が強いと考えられる。

Fig. 10 は、常温、高温(100°C)および座屈を付与させて試験したときの破断ひずみである。引張強度および縦弾性係数の傾向とは異なり、試験温度が上昇

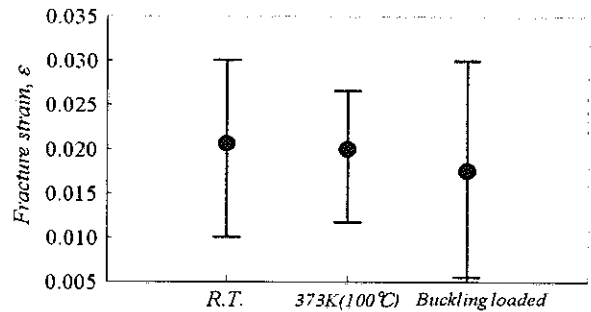


Fig.10 Fracture strain for Bamboo fiber of different test conditions

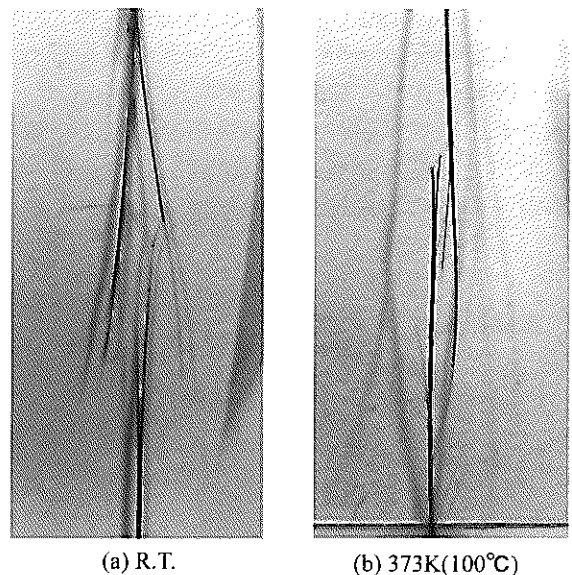


Fig.11 The fracture appearances of tensile test specimens, broken at different test temperatures

してもほぼ変化しないという結果が得られた。しかし、座屈を付与させたときの破断ひずみは常温試験での平均値に比べて 15%低下した。

### 3.3 破壊様相と試験温度との関係

Fig. 11 は、常温および 373K(100°C)で試験したときの試験後の繊維破断の形態について観察した結果である。両者ともに典型的な繊維破断であるスプリッティング破壊<sup>11)</sup>を呈していた。高温よりも常温の方がモノフィラメントの散らばりが激しくなっていることが認められた。若干ではあるが、100°Cで試験した場合の脆化傾向が示唆された。座屈変形を施した試験片の破壊は、常温試験後のそれとおおむね同一であった。箕島らによれば、セラミックス系繊維およびアラミド系繊維は環境中の水分により引張強度が低下し、アラミド繊維については吸水することによりスプリッティングが生じやすくなって強度低下を招くと報告している<sup>11)</sup>。本研究では常温での試験で引張強度が向上し、スプリッティング破壊が顕著となった。そもそも竹繊維はフィラメント繊維が束上になっている構造であるため、単純に破壊事象の素単位であるマイクロクラックがフィラメント繊維同士の接続部分で引張変形中に至る所で形成され、それらが合体する過程でスプリッティングが生成すると考えられる。高温で試験を行うと、加熱のために繊維内部の水分が放出され、繊維組織がより連続的になるに伴い、き裂抵抗の arrest 効果が減少するためにスプリッティングが抑制されて脆化傾向が高まり、繊維強度が低下すると推測される。

## 4 結論

竹繊維の基礎材料特性の取得・調査を目的として、常温および高温下での引張試験を実施し、応力ひずみ応答および引張強度特性の調査および、あらかじめ座屈を施した竹繊維の基礎特性の調査に関する研究を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 様々な条件による竹繊維の引張試験を行った結果、負荷開始から線形的な力学変形挙動を示し、最高荷重点にて破断するといった変形・破壊挙動を示した。
- 2) 高温引張試験の際、竹繊維が軸方向に伸長するといった熱変形挙動を呈し、両端固定したオイラー座屈変形を示した。高温での引張強度および縦弾性係数は、常温よりも低下した。
- 3) 座屈変形を施した竹繊維の常温における引張強度および破断ひずみは、座屈変形が生じない通常の試験結果に比べて低下することが認められた。

- 4) すべての試験において、竹繊維は典型的なスプリッティング破壊を呈した。

## 謝辞

竹類に関する多くの御指導と御助言を御教授下さいました、京都市洛西竹林公園専門員 農学博士 渡邊 政俊様に深甚なる感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 内村悦三, 「竹」への招待～その不思議な生態～, 研成社, 2005
- 2) 高橋明宏, 山元直行, 石山裕介, 野村國彦: 爆砕処理法により取り出した竹繊維の動的引張特性, 都城工業高等専門学校研究報告, Vol.41, pp.25-32, 2007
- 3) 高橋明宏, 山元直行, 小園一也, 村雲未知夫, 野村國彦, 豊廣利信, 単一竹繊維強化生分解性樹脂複合材料のフラグメンテーション試験, 都城工業高等専門学校研究報告, Vol.43, pp.15-22, 2009
- 4) 横山伸也; バイオマスで拓く循環型システムー循環バイオマスの創生, 工業調査会, 2003
- 5) 藤井透, 大窪和也, 持続的再生産可能天然資源としての竹の有効活用～竹繊維を用いた環境適合型複合材料～, 成形加工, Vol.15, pp.605-611, 2003
- 6) 日本規格協会 JIS ハンドブック 31, JIS R 7606, pp.790-794, 2004
- 7) Kazuya Okubo, Toru Fujii, Yuzo Yamamoto: Development of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties, Composites Part A 35, pp.377-383, 2004
- 8) 日本規格協会 JIS ハンドブック 35, JIS R 1625, pp.399-403, 2004
- 9) 合田公一, 福永秀春, 東原昭仁: 数種類の欠陥を有するセラミック繊維の引張強さ分布に関する研究, 日本機械学会論文集(A 編), Vol.50, pp.1848-1853, 1986
- 10) 合田公一, 北村佳之, 大木順司: プレス成形および射出成形による竹繊維グリーンコンポジットの開発, 山口大学工学部研究報告, Vol.54, pp.119-123, 2003
- 11) 箕島弘二, 鶴一隆, 駒井謙治郎: アラミド繊維の引張破壊特性に及ぼす真空・水環境効果と繊維損傷の AFM 微視観察, 日本機械学会論文集(A 編), Vol.63, pp. 66-72, 1997