

## 爆砕処理法により取り出した竹繊維の動的引張特性

高橋明宏・山元直行・石山裕介<sup>1</sup>・野村國彦<sup>2</sup>

## Dynamic Tensile Properties of Bamboo Fibers Prepared by Steam Explosion Method

Akihiro TAKAHASHI, Naoyuki YAMAMOTO, Yusuke ISHIYAMA<sup>1</sup> and Kunihiko NOMURA<sup>2</sup>

(Received October 2, 2006)

**Abstract** In recent years there has been a rising interest and researches in using high strength natural fibers as filler for biodegradable resin matrix composites. The present work deals with mechanical elements of deformation and fracture behavior of bamboo fiber bundle (*Phyllostachys pubescens*). The steam explosion treatment was applied to extract the bamboo fibers from natural bamboo. Dynamic tensile test, using a Hopkinson bar of low impedance bar (polyvinyl chloride, PVC) setup and conventional quasi-static test were carried out with this fiber. The tensile stress-strain response of bamboo fiber was observed elastic material response. A maximum strength bamboo fiber was given from near the outside of bamboo culm. Fiber strength decreased with increasing gage length in test piece. Experimental results show the fracture strength of the bamboo fiber has strong dependence on its volume. The PVC long bar was ascertained to be quite useful for a device measuring stress waves in dynamic tensile tests, if the behavior of the wave propagation in the PVC bar such as the decreasing rate of the wave amplitude and the propagation velocity are obtained by wave propagation pre-experiment beforehand.

**Keywords** [Bamboo Fiber, Steam Explosion Treatment, Split Hopkinson bar method, Tensile Strength]

## 1 序論

竹類は植物生態学的な分類では、イネ科・タケ亜科に属し<sup>1)</sup>、竹材は古来より民家建築や箸・籠・網・竿・定規などの細工用材料として用いられている。宮崎県都城圏域では竹製大弓や破魔矢の生産が盛んであり、平成7年にそれらが伝統工芸品に認定され、7名の弓師が伝統工芸士として認証されている<sup>2)</sup>。近年になってから竹炭・竹酢油のような二次処理材の開発・販売が精力的に展開し、市場には多種多様の製品が並んでいる。竹に関する中で最も身近なものといえばタケノコであり、毎年の季節食材として非常に人気が高い。このように、竹はあらゆる生活場面で出会うことができ、価値レベルの変わらない天

産物として大変有用である。さらに竹は生育期間が短く、生態範囲も関東から九州地方にまで広範囲に渡る。地下茎の成長力・繁殖力が強いことから、しばしば住宅地下水道・ガス管に損傷を与えたり、さらに里山管理不足による放任竹林が増大するといった報告<sup>3)</sup>もある。ここ数年、劇的に増加したプラスチック製品が竹製品の代替となり、安価な竹製品が大量輸入されていることや、竹林管理者の高齢化が進み、後継者が不足していることが竹林荒廃の原因と考えられる。現在、全国規模で放任竹林の増加が認められるようになり、自治体・行政機関を中心に竹の新たな利活用技術に関する研究・開発が要請されるようになってきた<sup>4)</sup>。

一方、持続可能な循環型社会の形成が声高になる

1 日野自動車株式会社

Hino Motors

2 都城高専非常勤講師

Miyakonojo National College of Technology, A Part-Time Lecturer

中で、ゴミ問題および化石資源の枯渇問題等の環境問題が世界規模で重大視されており、国民的な環境志向を促進した。例えば、非木材パルプ製の葉書、飲料用ろ過フィルター、とうもろこし等を原料とした生分解性樹脂製品の実用化などである。これらすべてに共通することは、廃棄・焼却の際に土壌・大気汚染することなく、製品は二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)と水に分解されることである。廃棄・焼却の際に発生するCO<sub>2</sub>は、植物の光合成のために大気中から吸収されたCO<sub>2</sub>であり、換言すればカーボンニュートラル(炭素中立)<sup>9)</sup>が成立する。

このような中で、高強度天然植物繊維として特に竹繊維に期待が寄せられている。これまでに準静的な負荷条件下での繊維強度<sup>6)</sup>や、生分解性樹脂との複合化材料の成形条件<sup>7)</sup>、およびそれらの強度評価<sup>8)</sup>に関する報告が行われているが、竹繊維そのものの動的な材料特性に関する研究報告は皆無である。著者らは、竹繊維を今後複雑化・高速化する機械要素・輸送機器用の先端素材と考え、安全性をより高い次元で保証するために、衝突を想定した高速負荷条件下での竹繊維の力学的性質を詳しく知ることがこれまで以上に重要になると考えている。

本研究では、インストロン型万能試験機および Split・Hopkinson 棒法試験装置を用い、準静的および動的な負荷条件下にて竹繊維の引張試験を行った。供試する竹繊維は高分子材料であるため、Split・Hopkinson 棒法で用いる Hopkinson 棒の物性を考慮し、粘弾性応力棒<sup>9)</sup>を採用し、さらに応力波の速度分散および減衰特性を明らかにし、改良型 Split・Hopkinson 棒法高速引張試験装置を新たに製作した<sup>10)</sup>。また、竹繊維の引張強度とその信頼性の観点から、最適な竹繊維採取場所を提案するとともに、採取部位による強度変化についても評価を行った。

## 2 実験方法

### 2.1 供試材

供試材は、香川県産の5年生のモウソウ竹(*Phyllostachys pubescens*)である。地上から3mのものを切り出し、それを1mごとに三等分した。さらに縦方向に四分分割した。竹は維管束鞘(竹繊維束、以後竹繊維)と柔細胞(以後、リグニン)とで構成されているが、爆砕処理<sup>11)</sup>はこのリグニンを急速粉砕する処理方法である。そのためには竹内部が湿潤状態であることが必要のため、伐採した直後に爆砕処理を行った。爆砕処理プロセスは、密閉容器内にて常態から水蒸気を含む高圧・高温雰囲気に変化させ、それを数回繰り返し、最終的に一気に容器内圧を開放する

といった工程で行い、バン株式会社所有の爆砕処理装置を用いて実施した。竹繊維の採取部位は、Fig.1に示すような外側・中央・内側の各範囲で変化させた。採取した際、リグニンが繊維表面に付着しているため、湿ったタオルを用いて除去した。竹繊維の採取、およびリグニンを拭き取る作業の途中で、竹繊維に残留ひずみが導入されやすいため、どの作業も慎重に行った。

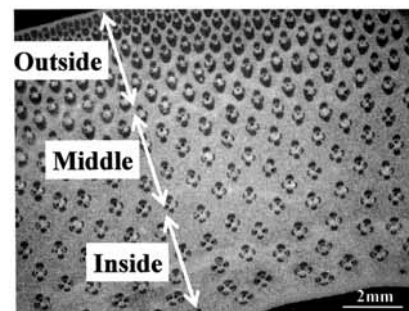


Fig.1 Cross section of the bamboo microstructure and each location at which tensile specimens are picked out

### 2.2 準静的引張試験

竹繊維の準静的な引張試験は、JIS R 7601 法<sup>12)</sup>および文献<sup>13)</sup>を参考にして行った。Fig.2は、準静的引張試験用試験片の形状および寸法である。ケント紙から「コ」の字型の台紙を作製し、繊維が中心線に沿うように両面テープを用いて一旦仮止めを行った。その後エポキシ系接着剤(アラルダイト)を塗布し、接着剤および繊維の乾燥を兼ねて313Kで21.6 ksec 乾燥処理を行い、台紙と繊維との接着を堅持した。各繊維直径は読取り顕微鏡を用い、互いに直交する二方向を1/1000mm オーダーまで測定した。断面積は楕円近似することで面積を算出した。断面積測定は、繊維軸方向に三箇所を行い、その平均値を強度評価で用いる面積とした。

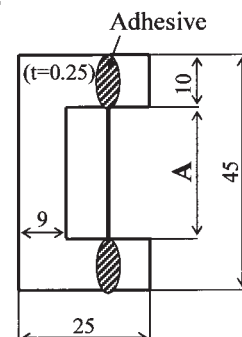


Fig.2 Schematic illustration of tensile specimen for Bamboo fiber

準静的引張試験は、インストロン型引張試験機(JT トーシ製 LSC-1/30 および LSC-1/300, 共に容量1000N)を用いて行い、Fig.2中のA寸法を25mmとし、

引張速度を 1、3、10、30 および 100mm/min(ひずみ速度 :  $6.7 \times 10^{-4} \sim 6.7 \times 10^{-2}$  [1/s]に相当)にそれぞれ変化させて行った。また A 寸法を 10、25、50 および 100mm に変化させた試験片を用意し、引張速度を 1mm/min 一定とした試験も行った。なお、準静的ひずみ速度および A 寸法を変化させて行う引張試験の竹繊維は Fig.1 の Inside 周辺から採取したものをを用いた。

すべての試験片は各 30 ケ用意し、試験後の力学的性質を単純平均でまとめた。なお、試験環境は、室温  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度  $33 \pm 5\% \text{RH}$  であり、各繊維の直径は、0.180~0.220mm の間で選択・採取した。

### 2. 3 動的引張試験

動的引張試験に使用した装置は、Harding 型の直接引張方式を採用した<sup>14),15)</sup>。ゴム駆動で加速された Striker tudu (打撃円管) が、Input bar(入力棒)の片端に取り付けられている Loading block(負荷ブロック)に衝突し、そこからの反射引張応力波を入力棒に伝えるといった構造である。本実験で用いた竹繊維試験片は引張ひずみが金属材料に比べて極端に低いため、通常 Split・Hopkinson 棒法試験で用いられている金属棒ではひずみの検出が困難である。そこで金属棒に代えて縦弾性係数の低いポリ塩化ビニル棒を応力棒として用いた。最終的に、ホプキンソン棒(入出力棒共に長さ 2000mm、直径 16mm)、打撃円管および負荷ブロックは全てポリ塩化ビニル材で製作した。

入力棒内を通過する引張応力波は、試験片を通過し、一部は反射し、一部は透過する。この入射・反射・透過の各パルス在所定の位置に貼付したひずみゲージにより出力し、その出力をブリッジボックスに通して、データロガー(横河電機製 WE7245)にて記録した。このように計測した入射・反射・透過パルスを一次元波動伝ば理論<sup>16)</sup>より得られた次式に適用することにより、高ひずみ速度域におけるひずみ  $\varepsilon(t)$ 、ひずみ速度  $\dot{\varepsilon}(t)$ 、応力  $\sigma(t)$  を得ることができる。 $E$  はポリ塩化ビニルの縦弾性係数であり、JIS K 7181 法<sup>17)</sup>により実験的に求め、3.39GPa という値を用いた。

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C_0}{L_0} \int_0^t \varepsilon_r(t') dt \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L_0} \varepsilon_r(t) \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{AE}{A_s} \varepsilon_i(t) \quad (3)$$

ここで  $C_0$  は棒内を一次元的に伝ばする縦波音速の速度、 $L_0$  は標点間距離、 $\varepsilon_r$  は反射波によるひずみ、 $\varepsilon_i$  は透過波によるひずみ、 $A$  は棒の断面積、 $A_s$  は試験片の断面積である。 $t'$  は反射波と透過波の波頭を一致させるために導入した積分変数である。

### 2. 4 高精度計測のための工夫

竹繊維の直径は入出力棒のそれに比べ約 1% であるため、実験当初、応力波の伝播計測は困難であった。そのため、入出力棒の端面に強い拘束力で固定する等の工夫が必要であることがわかった。そこで Fig.3 に示すようなスリットタイプのアタッチメント治具を用いて竹繊維を取り付けた。スリットを設けることで、竹繊維と入出力棒の軸調整作業が容易となり、竹繊維は繊維破断荷重の十数倍ある粘着テープで固定することで解決できた。さらにアタッチメント治具と入出力棒の間、およびネジ部には、端面の摩擦をできるだけ軽減させ完全に密着させるために潤滑剤(ダウコーニング社製モリコート G-n ペースト)を塗布させた。

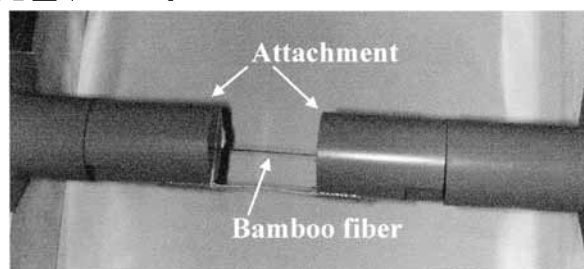


Fig.3 Appearance of the attachment assembled into the split Hopkinson bar apparatus

また、ひずみゲージの貼付方法について、応力波が干渉することなく高精度測定できるように考慮した。まず、Lagrangian diagram を作成し、ひずみゲージ貼付位置を決定した。また、曲げひずみの影響を除去できるように上下面に貼付した 2 枚のひずみゲージにより検出した。ブリッジ回路の抵抗は  $120\Omega$  で、直列に組んで  $240\Omega$  の抵抗とした。計測データはサンプリングタイム  $10\mu\text{sec}$  で取り込んだ。本装置で得られる高速引張試験のオシロスコープの波形の一部を Fig.4 に示す。このようにして、竹繊維のような細い繊維でも応力波が伝播・検出できるように工夫を行った。

### 2. 5 ポリ塩化ビニル棒の波動伝播試験

応力波がポリ塩化ビニル棒を伝播するとき、その粘性効果のため応力波は減衰する<sup>18)</sup>。そこで、荷重計測を簡便に可能にするため、Fig.5 のように、ポリ塩化ビニル棒にひずみゲージを三箇所貼付し波動

伝播試験を行った。打撃円管を負荷ブロックに衝突させ、各ゲージの応力波形信号を検出した。Fig.5に、各ゲージで計測された応力波形の一例を示す。応力波のピーク値は、伝播するにつれ徐々に減衰してい

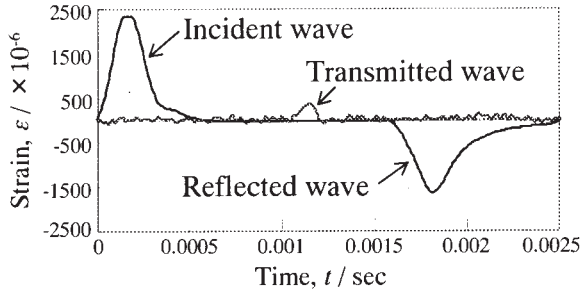


Fig.4 Typical elastic waves of the split Hopkinson bar test on the bamboo fiber

く様相が認められた。この減衰を定量的に見積もるため、G1部でのピーク値を他の位置で計測されたピーク値で除して比を求めた。Fig.6は、その実験結果である。これにより、入力側で89.5%、出力側で101.8%の補正を行って応力波の解析を行い、竹繊維の変形抵抗の推定を行った。

以上のような動的引張試験は、準静的試験と同様の試験片本数を準備し、室温・大気中にて実施された。

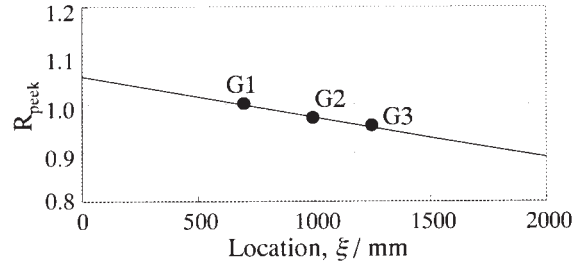


Fig.6 Results of the peak value ratio obtained from strain pulse propagation tests through a PVC bar

ら採取したが、各繊維の引張変形・破壊挙動は、荷重負荷開始とともに直線的な変形抵抗を呈し、最高引張強度に達した直後に破壊するといった線形力学

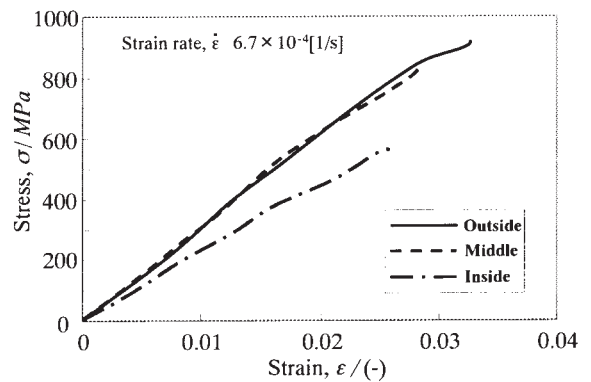


Fig.7 Typical stress-strain curves of bamboo fibers at various locations obtained by quasi-static test

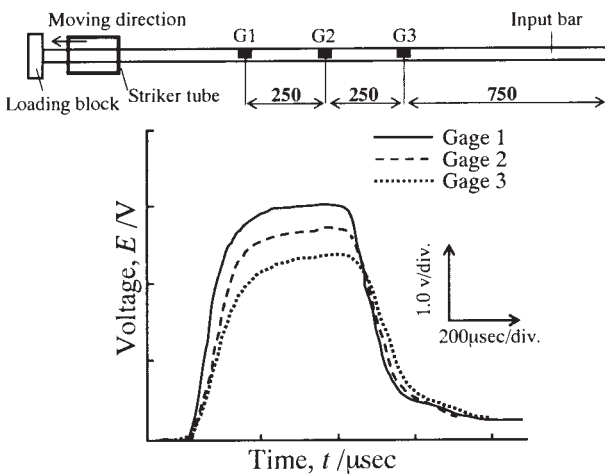


Fig.5 Locations of strain gages and typical strain pulses measured on PVC bar

### 3 実験結果および考察

#### 3.1 準静的引張試験の結果

Fig.7は、ひずみ速度  $6.7 \times 10^{-4}$  [1/s] で試験した竹繊維の応力-ひずみ曲線である。異なる三箇所の部位か

挙動を示した。また、外側で採取した竹繊維は、縦弾性係数、引張強度および破断ひずみが他で採取される竹繊維よりも増大することが認められた。

Fig.8は、竹繊維の引張強度を採取場所ごとに示したものである。本研究で供試したモウソウ竹の他に、真竹 (*Phyllostachys bambusoides*) および淡竹 (*Phyllostachys nigra* MUNRO var. *Henosis*) の結果も共に示した<sup>10)</sup>。モウソウ竹の平均繊維強度は外側で高

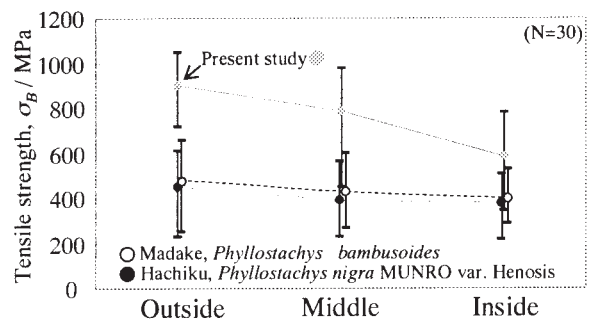


Fig.8 Strength change in the cross section for bamboo fibers of three types

く、内側で低いといった傾斜的な変化を示すことが認められた。他の二種も同様に、外側の領域の平均繊維強度が最も高くなった。Fig.1 からわかるように、竹は横断面の半径方向に対する繊維の分布密度を増加させ、それによって竹全体の強度を効率よく高くしているといった生体構造である。天然物のため物性値のばらつきが目立つが、繊維の分布密度に加えて、繊維自身に強度変化を持たせ、それが竹の強さに寄与していることが明らかとなった。

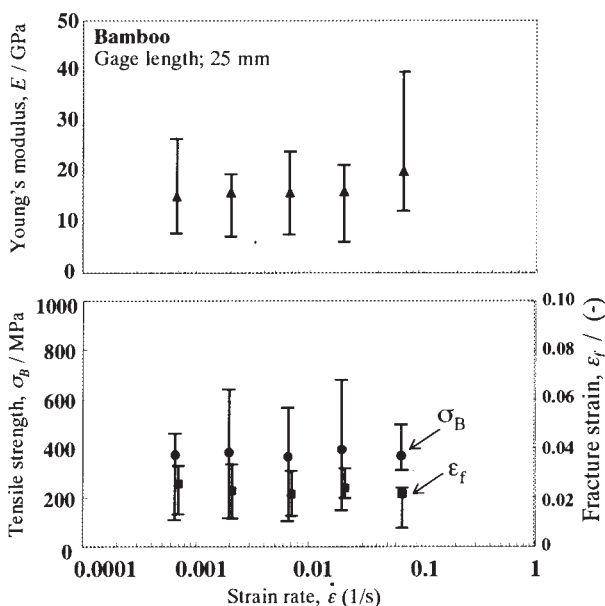


Fig.9 Changes in the mechanical properties of the bamboo fiber at strain rate region between  $6.7 \times 10^{-4}$  to  $6.7 \times 10^{-2}$  [1/s]

Fig.9 は、準静的なひずみ速度範囲内( $6.7 \times 10^{-4} \sim 6.7 \times 10^{-2}$  [1/s])で引張試験したときの縦弾性係数、引張強度および破断ひずみの変化である。なお、ゲージ部長さ 25mm 一定である。各力学的特性すべて、結果の平均値をひずみ速度ごとに比較すると、すべての繊維において、ほぼひずみ速度依存性は認められない。また、この傾向は採取部位が異なっても同様であると思われるが、実験を行っていないため今後の課題としたい。

Fig.10 は、ひずみ速度を  $6.7 \times 10^{-4}$  [1/s]とし、Fig.2 の A 寸法を 10~100mm までの 4 水準に変化させて引張試験を実施したときの縦弾性係数、引張強度および破断ひずみをまとめたものである。引張強度および破断ひずみはゲージ長さが 10mm のときに最高値を示し、ゲージ長さが長くなるにつれて次第に低下していく傾向が確認された。ゲージ部長さ 10mm では

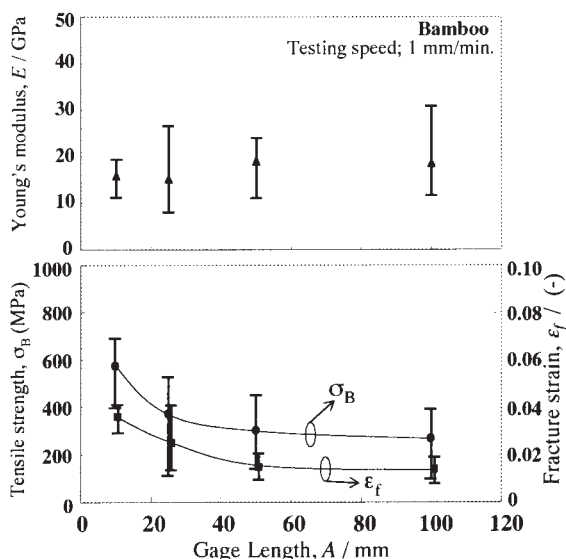


Fig.10 Size effect changes in the mechanical properties of the bamboo fiber

強度の平均値が 572MPa であるのに対して、100mm のそれは 269MPa となり約 53%迄低下した。試験片を作製する際に繊維直径を加工制御することは大変困難であり、ゲージ部が長くなるにつれて直径分布の粗さが顕著になる事や、内在する欠陥が増加する事で変形途中にマイクロクラックが多量発生し、それらが起点となり早期に合体することで破壊が誘発され、そのために平均強度が低下したと考えられる。

マニラ麻の繊維束においても、ゲージ部長さの増加と共に平均強度が低下し、ゲージ部長さ 10mm の引張強さに対して 100mm のそれは約 55%低下したという報告<sup>19)</sup>があり、本研究と非常に類似した結果が報告されている。

一般的に材料強度が最弱リンク理論<sup>20)</sup>に従うと考えられるとき、寸法効果の関係式は次のように表される<sup>21)</sup>。

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left[ \frac{V_1}{V_2} \right]^{\frac{1}{2\alpha}} \tag{4}$$

ここで、 $\sigma_1$ と $\sigma_2$ は、体積がそれぞれ  $V_1$ と  $V_2$  の場合の強度である。 $2\alpha$ は寸法効果を表す係数である。この値が小さいほど(4)式左辺の値が大きくなり、寸法効果が大きいことになる。試験前後で体積変化がないと仮定すると、体積  $V$  はゲージ長さ  $L$  に置き換えられる。(4)式の両辺を対数化し、さらに  $\ln \sigma_2$  でまとめると、以下のようになる。

$$\ln\sigma_2 = -\frac{1}{2\alpha} \ln\left[\frac{L_2}{L_1}\right] + \ln\sigma_1 \quad (5)$$

Fig.11 は Fig.10 のデータを用いて、縦軸に  $\ln\sigma$ 、横軸に  $\ln(L_2/L_1)$  をとり、プロット点の回帰直線を作成し相関係数を求めたものである。プロット点の相関係数は  $r=0.977$  を示すことから、竹繊維の強度は最弱リンク理論に従うものと判断された。また竹繊維の  $2\alpha$  と、他のマニラ麻繊維<sup>19)</sup> やスギ<sup>22)</sup>、アカマツ<sup>22)</sup>、ベイマツ<sup>22)</sup> のそれとを比較すると、ベイマツと近い値を示した。これは天然植物繊維が元々セルロースから形成されていることや、素繊維の長さや結晶度、および含有する欠陥密度に左右されると考えられる。

これまでの研究より、天然繊維を強化フィラーとして用いた生分解性樹脂複合材料の引張強度試験は、

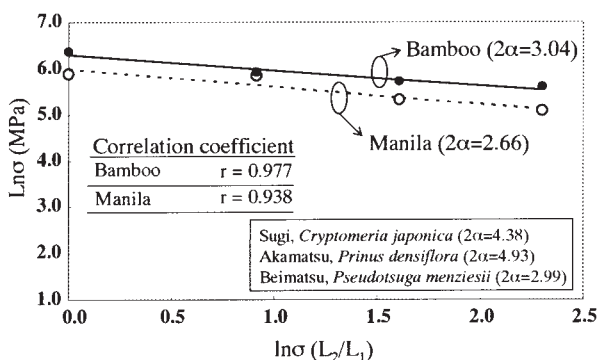


Fig.11 Relationship between  $\ln\sigma$  and  $\ln(L_1/L_2)$  of the bamboo fiber

主に JIS K7054 法<sup>23)</sup>等に従って行われている。この場合、複合材試験片のゲージ部長さは 100mm として実施していることが多い<sup>24),25)</sup>。一方、繊維そのものの引張試験では、繊維ゲージ部長さを 20~25mm とする例が多い<sup>26),27)</sup>。本研究の結果から、竹繊維は線形力学的性を有する材料であり、著しい寸法効果を示すことが確認されたため、材料設計・開発の観点から、複合材料の引張試験片のゲージ部長さと天然繊維のそれを統一して実施する必要があることが示唆された。

準静的引張試験から得られる縦弾性係数は、本研究で行ったひずみ速度範囲およびゲージ長さ範囲に依存せず、約 14~17GPa であった。尾田<sup>28)</sup>は、竹材の力学試験結果と試験片内の竹繊維含有率から複合則を用いて、竹繊維の縦弾性係数を 47GPa と提案した。中馬ら<sup>29)</sup>は、やはり竹材の力学試験結果と竹断面の構成組織含有率を画像解析により求め、複合則

を用いて竹繊維の縦弾性係数を 48GPa、引張強度を 498MPa であると推定した。最近の超音波を用いた天田らの研究<sup>30)</sup>によれば、54.6GPa が提案されている。いずれも竹繊維とリグニンが混在した竹材を用いた研究結果である。一方、堀川ら<sup>31)</sup>によれば、爆砕処理を軽度に行ったモウソウ竹の繊維を取り出し、本研究と同様に繊維引張試験を行い、縦弾性係数は 15.6~27.8GPa であったことを報告している。爆砕処理を施して採取された竹繊維を直接試験することで物性を得る場合、尾田らの研究よりも約 3 割近くまで低い値となった。弾性係数は材料組織の変化に敏感に反映される。爆砕処理は、竹繊維間に存在するリグニンの粉碎処理である。しかしながら竹繊維は素繊維であるモノフィラメントが束状になっており、少なからずリグニンがモノフィラメント同士のバインダーとなっている。従って、モノフィラメント間のリグニンが爆砕によって粉碎され、爆砕処理繊維の欠陥密度が高くなり、結果として縦弾性係数が低くなったと考えられる。

### 3. 2 動的引張試験の結果

Fig.12 は、改良型 Split・Hopkinson 棒法試験装置を用いて、ひずみ速度 95[1/s] で試験したときの応力-時間曲線である。準静的な変形・破壊挙動と同様、動的な負荷条件下においても線形力学挙動を示した。また、外側から採取した竹繊維の引張強度が最高値を示し、内側の繊維は最も低くなるという結果が得られた。荷重開始付近の弾性コンプライアンスは、採取場所に限らずおおむね同レベルになっているが、この要因は、Split・Hopkinson 棒法の試験原理の影響

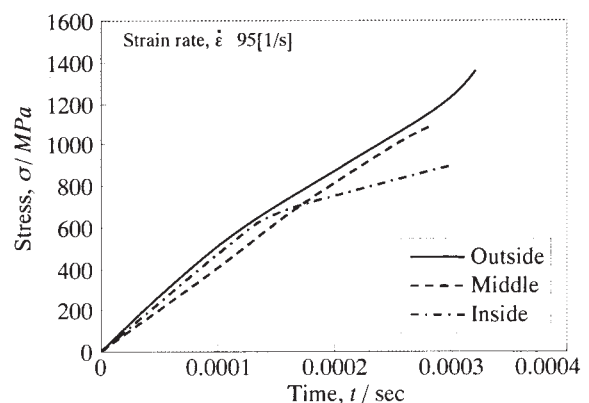


Fig.12 Typical stress-time curves of bamboo fibers at various locations obtained by dynamic tensile test

<sup>32)</sup>であり、本来の弾性係数の 70~80% になるため、動的コンプライアンスの見方には注意を要する。

Fig.13 は、準静的から動的までの負荷条件下で試験

した竹繊維の引張強度のひずみ速度依存性を示したものである。外側から採取した繊維の動的引張強度の平均値は 1262MPa となり、準静的のそれに比べ約 28% 向上し、内側の繊維は約 52% にまで向上した。

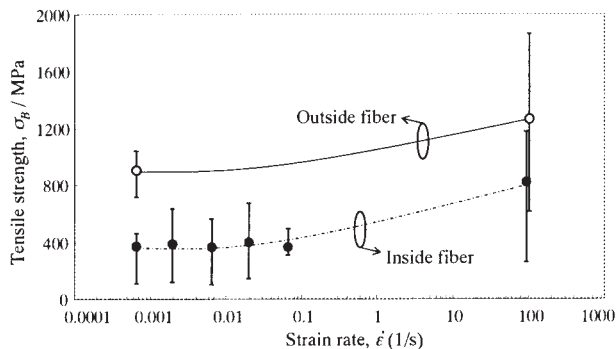


Fig.13 Variations of the tensile strength of the bamboo fibers at various strain rates

いま、温度一定条件下における材料の強度が、ひずみおよびひずみ速度のそれぞれ  $n$ 、 $m$  のべき乗近似によって表現されるとすれば、材料学的な強度のひずみ速度感受性指数  $m^{33)}$  は次式で記述される。

$$m = \left( \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right)_{T, \epsilon} \quad (6)$$

応力-ひずみ速度間に必ずしも厳密な線形関係は成立しないが、代表値として準静的および動的強度値 ( $6.7 \times 10^{-4}$  [1/s] および 95 [1/s]) を用いて便宜上算出された  $m$  値は、外側の竹繊維では 0.028、中央では 0.022、そして内側では 0.063 となった。内側から採取される竹繊維の強度は、外側および中央の竹繊維にくらべ 2 倍以上もひずみ速度の影響を受けやすいことが判明した。綿や羊毛繊維を供試材とし、破壊強度は負荷速度増大にともなって増加するといった報告<sup>34)</sup>はあるが、動植物系繊維は、構成組織の複雑さから動的での強度向上機構の考察は、いずれも実験結果をうまく説明しうるものとなっていないのが現状である。本研究でもこの点に言及しないが、外側および内側の竹繊維のミクロ構造や、動的試験後の破壊形態の詳細な観察等を行い、内部モノフィラメント構造に関連する材料の内因的影響、およびひずみ速度、温度、湿度に関連した材料の外因的影響の両面からのアプローチによる解明が今後の課題である。

#### 4 結論

爆砕法によって採取した竹繊維について、 $6.7 \times 10^{-4}$

～ $6.7 \times 10^2$  [1/s] のひずみ速度範囲と、ひずみ速度一定でゲージ長さ 10～100mm の間で準静的引張試験を行った。また動的試験装置として改良型 Split-Hopkinson 棒法高速引張試験装置を製作し、高ひずみ速度下での引張変形・破壊挙動を調査した。さらに強度保証の観点から、繊維の採取部位や強度のひずみ速度依存性に関する検討を行った。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- 1) 竹繊維の準静的引張挙動は、負荷開始から線形力学的に変形し、最高強度で破断するといった応力ひずみ挙動を示した。また竹断面の表皮近傍から採取した繊維が最も高強度であった。
- 2) 準静的試験において、ゲージ長さを長くすると強度が低下した。竹繊維は変形・破壊挙動が脆性的様相を示すことから、最弱リンク機構が働くと判断された。
- 3) あらかじめ応力波の伝播試験等を行い、波形の減衰や応力波の伝播様式が明らかであれば、繊維のような細径材であっても、ポリ塩化ビニル材を用いて動的引張荷重を計測することは十分可能であることが確認できた。
- 4) 竹繊維の強度において、正のひずみ速度依存性が確認された。ひずみ速度感受性を表す指数を算出した結果、竹断面の内側から採取した繊維の強度は、外側のそれよりもひずみ速度の影響を受けやすいことが明らかとなった。

#### 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。また本研究の一部は、科学研究費補助金(若手研究(B)16760554)によったことを付記し、御援助に感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 相賀徹夫:園芸植物大事典 3,小学館,1990
- 2) 都城市役所ホームページ: <http://www.city.miyakonojo.miyazaki.jp/>
- 3) 紫藤貴之,大窪和也,藤井透:竹繊維を用いた低環境負荷型複合材料の開発とその強度特性,Bamboo Journal, No.19, pp.15-23, 2002
- 4) 山本哲朗,楠木覚士,鈴木素之,島重章:現地調査と航空写真に基づく山口県内の竹林分布とその周辺環境への影響,土木学会論文集, No.776/ VII

- 33,pp.107-112,2004
- 5)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
  - 6)高木均,田倉隆輝,一原洋平,越智真治,三澤弘明,仁木龍祐:爆砕法により取り出した竹繊維の引張強度特性,材料, Vol.52, No.4, pp.353-356, 2003
  - 7)越智真治,高木均:竹繊維および麻繊維で強化した生分解性複合材料の力学的特性に及ぼす加熱処理の影響,材料, Vol.53, No.6, pp.673-677, 2004
  - 8)松尾晃,北村佳之,合田公一,大木順司,友永文昭:射出成形による竹粉グリーンコンポジットの強度評価,日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集, No.05-1, Vol.1, pp.541-542, 2005
  - 9)中川紀壽,関口泰久,坂本淳一郎:衝撃荷重を受ける印刷樹インクロール皮膜用軟質ゴムの圧縮特性評価,日本機械学会論文集 A 編, Vol.64 ,No.621 ,pp.1363-1368, 1998
  - 10)高橋明宏,山元直行:竹繊維の引張強度特性,第 5 6 回日本木材学会大会, 研究発表要旨集(CD-ROM 版), E09-1445, 2006
  - 11)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, No.9, pp.605-611 ,2003
  - 12)日本規格協会 JIS ハンドブック :JIS R 7601, pp.750-765, 2004
  - 13)越智真治,高木均,仁木龍祐:加熱処理した天然繊維の力学的特性,材料, Vol.51, No.10, pp.1164-1168, 2003
  - 14)J.Harding, "Materials at High Strain Rate (ed. Blazynski, T. Z. )": Elsevier Science, pp.143,1987
  - 15)小川欽也:チタン合金時効材の衝撃引張強度,材料, Vol.50, No.3, pp-198-203, 2001
  - 16)日本機械学会編:衝撃破壊工学,技報堂出版, pp.29-40, 1999
  - 17)日本規格協会 JIS ハンドブック :JIS K 7181, pp.420-426, 2004
  - 18)小林秀敏,臺丸谷政志,田中健一:発泡紙の圧縮変形におけるひずみ速度依存性と吸収エネルギー, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.68, No.673, pp.1395-1400, 2002
  - 19)高橋明宏,山元直行:竹繊維および麻繊維の機械的性質に及ぼす試験速度の影響,日本機械学会九州支部講演会論文集, No058-1, pp.77-78, 2005
  - 20)材料強度学:日本材料学会, pp.29-30, 1993
  - 21)藤井毅,林知行,宮武敦:スギラミナの引張強度における寸法効果,木材工業, Vol.52, pp.15, 1997
  - 22)林知行,宮武敦:バットジョイントを有する集成材および単板積層材の引張強度特性,材料, Vol.52, No.4, pp.341-346, 2003
  - 23)日本規格協会 JIS ハンドブック :JIS K 7054, pp.1117-1121, 2005
  - 24)木村照夫,倉田正博,松尾達樹,松原弘一,迫部唯行:ラミー/PLA 無燃り糸を用いたグリーンコンポジットの圧縮成形と成形品の機械的特性,材料, Vol.53, No.7, pp.776-781, 2004
  - 25)合田公一,浅井隆,山根達也:プレス成形法によるラミー麻/生分解性樹脂複合材料の創製と化学処理効果,材料, Vol.50, No.10, pp.1245-1252, 2004
  - 26)越智真治,高木均:一方向強化グリーンコンポジットの生分解挙動,材料, Vol.53, No.4, pp.454-458, 2004
  - 27)越智真治,高木均,田中秀行:マニラ麻繊維強化クロスプライ・グリーンコンポジットの引張特性,材料, Vol.52, No.8, pp.916-921, 2003
  - 28)尾田十八:竹材の力学的構造と形態,日本機械学会論文集 A 編, Vol.40, No.409, pp.997-1006, 1980
  - 29)中馬丞,広橋光治,大釜敏正,笠原康弘:モウソウチクの複合構造と引張特性材料: Vol.39, No.7, pp.847-851, 1990
  - 30)天田重庚,矢島正毅,桑原史和:超音波を用いた竹の繊維と柔細胞の弾性率の測定, Bamboo Journal, No.19, pp.8-12, 2002
  - 31)堀川晃玄,村瀬繁満:爆砕竹繊維の吸着特性, Bamboo Journal, No.22, pp.114-121, 2005
  - 32)北田明夫,榎田努,三村耕司,谷村真治:動的引張試験に適した丸棒試験片の形状・寸法に関する検討, 日本機械学会 A 編, Vol.70, No.690, pp.313-320, 2004
  - 33)G.E.Dieter: "Mechanical Metallurgy", SI Metric Edition, McGraw-Hill, pp.297, 1987
  - 34)繊維物理学:繊維学会編, pp.205, 1962