

## バガス繊維と生分解性樹脂による複合材料の曲げ弾性係数について\*

柴田 信一<sup>\*1</sup>, 曹 勇<sup>\*2</sup>, 福本 功<sup>\*1</sup>

### Bending Modulus of Elasticity of the Press Forming Composite Material from Bagasse Fiber and Biodegradable Resin

Shin-ichi SHIBATA<sup>\*2</sup>, Yong CAO and Isao FUKUMOTO

<sup>\*2</sup> Department of Mechanical Engineering Systems, University of the Ryukyus,  
1 Senbaru, Nishihara-cho, Nakagami gun, Okinawa, 903-0213 Japan

Bending modulus of elasticity of the composite material from bagasse fiber (remains after sugar cane squeezed) and biodegradable resin was investigated in view of the content of bagasse fiber and the fiber length. The result was validated by short fiber strengthen theory. The result is as followings. Bending modulus of elasticity increased with increasing the content of bagasse fiber. The increase of Bending modulus of elasticity is predicted by short fiber strengthen theory incorporated with the compression ratio of bagasse fiber, which has honeycomb structure in the cross section, was compressed in press forming, makes good agreement with the experimental result. Bending modulus of elasticity decreased when the fiber length of bagasse is under 3 mm (aspect ratio = 12). This result makes good accordance with the prediction value by the short fiber strengthen theory.

**Key Words:** Bagasse, Biodegradable Resin, Reinforced Plastic, Law of Mixture, Bending Modulus of Elasticity, Composite Material

## 1. 結 論

著者らは沖縄で生産されるサトウキビの絞りかすであるバガス繊維を用いたプラスチック複合材料の作製および機械的性質・成形条件の検討を行っている。前報<sup>1)</sup>では、バガス繊維と生分解性樹脂からなる複合材料をプレス成形により作製し、バガス繊維含有量と引張強度と、そのバラツキの関係について詳細に調べた。そこで、実験における引張強度とバラツキは短繊維強化理論に基づくモンテカルロ法による計算予測と良く一致することを示した。

近年、土中分解する環境負担の少ない生分解性樹脂が注目されている。ただし、この生分解性樹脂のみでは、従来のFRPやポリプロピレンにタルクなどを加えた複合材料と比較し、機械的強度・弾性率が低い。このため、機械的性質改善を目的に、生分解性樹脂と竹繊維・麻繊維・ジュート繊維などの天然繊維を組み合わせた複合材料の作製が試みられている<sup>2)</sup>。

このような複合材料の実用化にあたり曲げ弾性率を予測することは極めて重要であるにも関わらず、前述の研究においては、主に引張および曲げ強度について検討されており、曲げ弾性率については、詳しく調べられていない。さらに、著者らの知る限り、バガス繊維と生分解性樹脂の複合材料における曲げ弾性率に

ついて、実験と単繊維引張実験から計算予測を行った例は見当たらない。バガス繊維の場合、内部は空洞状のハニカム構造であり、圧縮成形による複合材料を作製する場合、繊維の圧縮率を考慮する必要がある。

そこで本研究では、バガス繊維と生分解性樹脂による複合材料を作製し、短繊維強化材料の曲げ弾性率に大きく影響する、繊維長(アスペクト比)および繊維含有量の曲げ弾性率に及ぼす影響を調べた。さらに、単繊維引張実験の結果から、曲げ弾性率の予測を行ったので、ここに報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 バガス繊維および生分解性樹脂

バガス繊維は製糖工場から排出された後に、温風で十分乾燥させ(含水率は0.01%)、粉砕した。その後、ふるいによって繊維長を4種類に大別した。図1に、それらの繊維長の度数分布を示す。それぞれの平均繊維長は13, 32, 9.1および16.1mmであった。生分解性樹脂は前報<sup>1)</sup>と同じ、修飾澱粉生分解性樹脂CP-300(ガラス転移温度 $T_g$  60°C, 軟化温度55-62°C, ミヨシ油脂㈱)を用いた。CP-300はエマルジョンタイプであるが、これを100°Cにて水分を蒸発させ、乾燥し、冷却後、ペレット状(直径2.25mm)に切断し、実験に供した。機械的性質は表1に示す通りである(添え字mはCP-300, fはバガス繊維を表している)。

### 2.2 熱間プレス成形

\* 原稿受付 2004年7月30日。

<sup>\*1</sup> 正員、琉球大学工学部(〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1)。

<sup>\*2</sup> 正員、琉球大学大学院理工学研究科。  
E-mail: shibata@tec.u-ryukyuu.ac.jp

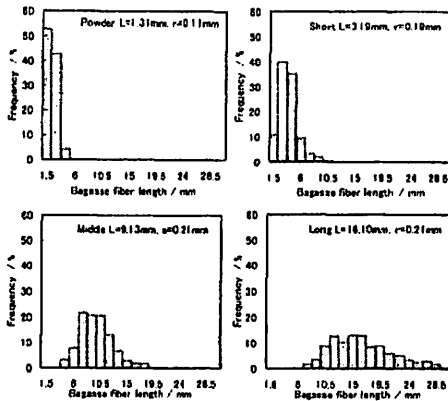


Fig.1 Frequency distribution of bagasse fiber length

熱間プレス成形方法は前報<sup>2)</sup>と同じである。まず、使用するパグス繊維半分を金型内に投入し、次に、樹脂をパグス繊維上に均等になるように置き、最後に残りの半分のパグス繊維を投入し金型を閉じた。その後、金型を加熱し 160℃に安定した時点で、圧力(10 MPa)を加え 10 分間保持した。保持後、金型周囲のウォータージャケットと扇風機による冷却を 10 分間行い、成形体を取り出した。成形品は重量が 1.6-1.7g になるようにパグス繊維と樹脂の量を調整し、パグス繊維の重量比率が 23, 36, 53, 66, 75%の成形体を作製した。各条件につき 5 個以上の試験片を作製した。なお、試験片の直径は 30mm、厚さ 1.8-2.0mm であった。得られた成形品の一例を図 2 に示す。表面は半透明の生分解性樹脂で隈なく覆われ、パグス繊維と生分解性樹脂が均一に混合した複合材料を作製することが出来た。

Table1. Properties of bagasse fiber

$\sigma_f$	113.7 MPa
$E_f$	2952 MPa
$\sigma_m$	9.8 MPa
$E_m$	496.4 MPa
$r_f$	0.187mm
L	1.31, 3.19, 9.13, 16.1 mm

2.3 成形品の曲げ試験とパグス単繊維引張試験

試験機は島津オートグラフ(DCSR-100)を使用した。試験は 3 点曲げ試験を行い、支点間距離は 18mm とした。カッターにて、成形体を長さ 30mm、幅 15mm に切り出し、曲げ試験片とした。試験後は荷重-変位線図の直線部分からヤング率を推定し、最大荷重から曲げ強さを算出した。単繊維引張試験については高木らの方法<sup>2)</sup>と同じく、図 3 のように台紙にパグス繊維を瞬間接着剤で接着し、引張試験直前に台紙部分を切断し、引張試験を行った。

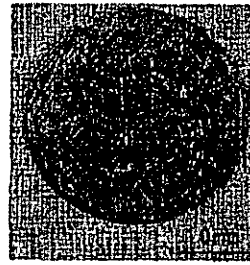


Fig2. The hot press forming specimen

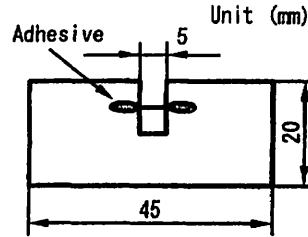


Fig.3 Shape and dimension for the tensile specimen

引張試験前には万能投影機(ニコン V16D)により、パグス繊維の幅を測定した。パグス繊維断面は円とみなし、面積で引張荷重を除き引張応力とした。

3. 曲げ弾性率の予測

短繊維強化複合材料の縦弾性率  $E_{comp}$  は複合則から以下の式で与えられる<sup>9)</sup>。

$$E_{comp} = \eta V_f \cdot E_f + (1 - V_f) \cdot E_m \quad (1)$$

$E_f$ ,  $E_m$ ,  $V_f$ ,  $V_m$  は繊維の縦弾性率、マトリックスの縦弾性率、繊維の体積率およびマトリックスの体積率である。 $\eta$  は長さ修正係数であり、Cox により以下のように導かれている<sup>9)</sup>。

$$\eta = 1 - (\tanh \frac{1}{2} \beta L) / \frac{1}{2} \beta L \quad (2)$$

$\beta$  は以下で表され、繊維長  $L$  が短くなるときの剛性低下の意味をもつ。

$$\beta = \left( \frac{2 G_m}{E_f r_f^2 \ln(R / r_f)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$G_m$  は横弾性率であり、マトリックスの等方性を仮定すると、

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (4)$$

であり, 2Rは繊維間隔を表し,

$$R = \frac{r_f}{2} \sqrt{\frac{\pi}{V_f}} \quad (5)$$

となる。 $r_f$ ,  $\nu_m$ は、繊維半径, ポアソン比(本研究では $\nu_m=0.3$ )である。

ただし, 式(2)は繊維の配向係数およびバガス繊維の圧縮成形後の圧縮率が組み込まれていない。配向係数については, Fukuda<sup>7)</sup>らが短繊維強化材料の配向係数を解析的に求めており, 成形体中に繊維が2次元でランダムに配向している場合の配向係数は $C=0.27$ となることを明らかにしている。そこで, 本研究での成形体中の繊維分布も2次元でランダムとみなし, 配向係数は $C=0.27$ とした。

さらに, バガス繊維の圧縮率 $K$ (初期体積に対する成形後の体積の比の逆数)を導入することで, 圧縮による強化の影響も計算式に組み入れた。すなわち, 空洞の多い繊維が圧縮されることにより, 単繊維引張試験で得られた弾性率は圧縮率 $K$ に比例して増加すると仮定した。以下がその式である。

$$E_{comp} = KC \eta V_f \cdot E_f + (1 - V_f) \cdot E_m \quad (6)$$

曲げ強度についても短繊維強化理論から計算することは可能であるが, 塑性から破壊に至るプロセスは複雑であるので, 本研究では, 曲げ弾性率のみ予測計算を行った。また, 短繊維強化材料では文献<sup>8)</sup>によれば, 引張および圧縮も同程度の剛性増加が期待できるので, 引張および圧縮の弾性率は等しいと仮定した。

#### 4. 実験および計算結果の考察

##### 4.1 バガス単繊維引張試験結果

式(6)を用いて曲げ弾性率を予測するために, バガス単繊維の引張試験を62本行った。単繊維の縦弾性率は荷重-変位線図の直線の傾きと予め測定した繊維径から算出した。結果を図4に示す。繊維径と弾性率の間には弱い負の相関(-0.54)が認められた。平均縦弾性率2962MPa, 標準偏差2318MPa, 尖度が6.02であった。つまり, バガス繊維の縦弾性率の分布は正規分布ではなく, 裾広がりの分布をしていた。この原因を調べるために, 引張強度と縦弾性率との関係を調べた。図5に結果を示す。図からわかるように, 縦弾性率と引張強度の間には, 強い正の相関(+0.87)が認められた。この実験結果について著者らは以下の2つの理由を考える。①本研究で得られたバガス繊維は, 製糖過程において粉碎され(数10~

100mm前後), さらに, 実験材料として粉碎され, 繊維径は短くされた(1mm~30mm前後)。この粉碎過程はバガス繊維に損傷を与え, 実際の引張に対する有効な繊維径はみかけの繊維径よりも細く, 大きくバラついていた可能性がある。実際の繊維径がみかけの繊維径よりもかなり細ければ, 弾性率, 引張強度が低くなり, 実際の繊維径がみかけの繊維径に近ければ, 弾性率, 引張強度は高くなる。これが図5の正の相関に現れていると考えられる。②繊維径の大きなバガス繊維の中央部には大きな導管が存在する場合があります。これが弾性率・引張強度の低下の原因になった。あるいは寸法効果により, 繊維径の小さな繊維の弾性率引張強度が高くなった。等の理由で, 図4のように弾性率と繊維径の間に負の相関が生じたと推測される。これらの実験事実にはバガス繊維などの天然繊維プラスチック複合材料として利用する場合の, 繊維の抽出方法あるいは繊維の種類選択についての重要性を示唆している。

単繊維引張実験で得られた結果は表1に示す通りである。次節でのバガス繊維複合材料の弾性率の予測は, これらの値を用いることにする。

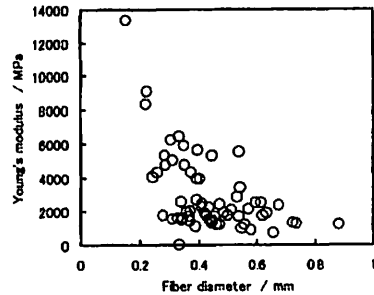


Fig.4 Relationship between Young's modulus of bagasse fiber and its diameter

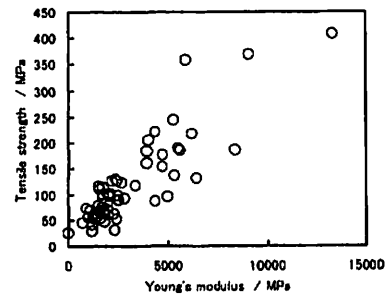


Fig.5 Relationship between tensile strength of bagasse fiber and Young's modulus

##### 4.2 バガス繊維含有率と曲げ弾性率との関係

図6は曲げ試験における応力-変位曲線図である。図からわかるように、バガス繊維の含有量が増加することで、弾性率、強度ともに著しく増加していることがわかる。次に、複合材料中のバガス繊維含有率(体積率)を変化させた場合の曲げ弾性率および引張強度と含有率との関係を図7と図8に示す。バガス繊維は平均9.13mmであり、平均繊維径は0.41mmである。曲げ弾性率と引張強度はともに増加する。図中の実線は、式(6)による曲げ弾性率の計算値である。計算値と実験値は非常に良く一致している。計算時の圧縮率Kは全て5.0である。実験では、64%含有率の時に平

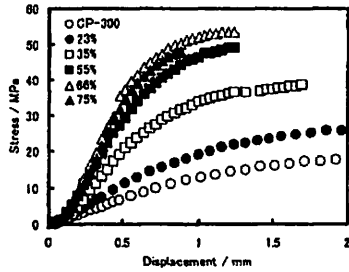


Fig.6 Relationship between stress and displacement on the bending test

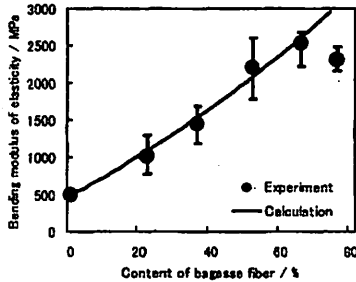


Fig.7 Comparison of Bending modulus of elasticity of the composite material and the predicted value by short fiber reinforced theory with bagasse fiber length

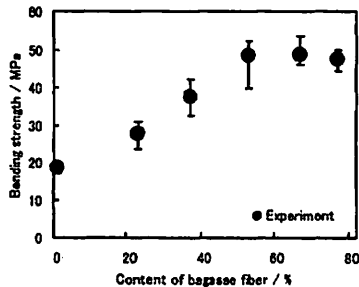


Fig.8 Change of content of bagasse fiber and bending strength of composite material

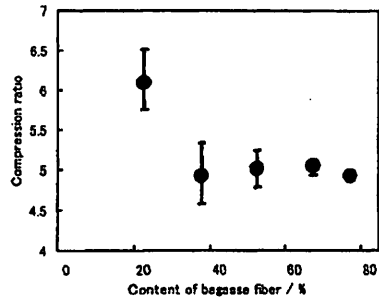


Fig.9 Relationship between content of bagasse fiber in composite material and compression ratio of bagasse fiber  
均曲げ弾性率は最大を示し 2525MPaであった。曲げ強度も、それに準じ 48.7MPaを示した。しかしながら、75%では、弾性率および曲げ強度は低下し、計算値と実験値が乖離している。これらは、繊維の表面全体を覆うための樹脂の不足が生じたと推測される。

図9はバガス含有量とバガス繊維圧縮率の関係である。平均圧縮率Kは5.0であった。バガス繊維の圧縮率は式(7)を用いて算出した。すなわち、成形体の体積から投入した樹脂を引き、残りをバガス繊維体積とし、その体積と投入したバガス繊維の体積から圧縮率Kを算出した。

$$K = (f_n * V_f) / \left[ V - \left( \frac{W - W_f}{\rho_m} \right) \right] \quad (7)$$

バガス繊維 23%では圧縮率は 6.1 程度であったが、それ以外の条件では 4.8-5.2 程度であった。バガス繊維 23%において圧縮率が高くなる理由は不明である。樹脂に対してバガス繊維が少なく、圧縮成形時に繊維間の潤滑が滑らかだったことが予測されるが、詳細は、これからの検討課題としたい。

#### 4.3 バガス繊維長と弾性率との関係

前節よりバガス含有率が 64%で曲げ弾性率および曲げ強度が最大値を示したので、含有率 64%にて、バガス繊維長を変化させ、曲げ試験を行った。結果を図10と11に示す。プロット点は実験結果であり、実線は圧縮率K=5.0とした計算値である。実験結果と計算結果は精度良く一致した。また、バガス繊維が3mm以下において、繊維長の原因による弾性低下が認められた。この条件での繊維長と繊維径のアスペクト比は約12である。繊維のアスペクト比と弾性率に関してはChunHwayが詳細に解析しており、アスペクト比20以下になると著しい、剛性低下が生じるとしている。繊維長9.13mmではアスペクト比が22であるの

で、本実験の結果と合致する。図 11 での曲げ強度についても類似した結果が確認された。

一方、繊維長が長くなれば、4.1 節で述べたように、繊維の損傷確率が高くなるため、繊維弾性率が低くなる可能性がある。その効果が今回の実験結果に現れないのは、繊維体積率が 64% と高く、たとえ長繊維が途中で千切れていても、3mm 以上の繊維であれば、近傍同士の繊維の応力伝達効果（成形体の弾性率）は長繊維の場合と同じになるためであると思われる。図 12 はバガス繊維長とバガス繊維圧縮率との関係である。圧縮率は繊維長が長くなるほど低下する。これにつ

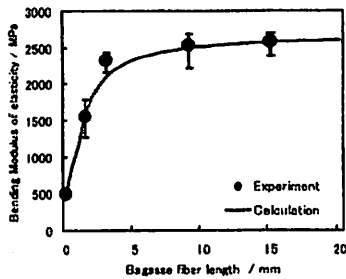


Fig.10 Comparison of Bending modulus of elasticity of the composite material and the predicted value by short fiber reinforced theory with bagasse fiber length

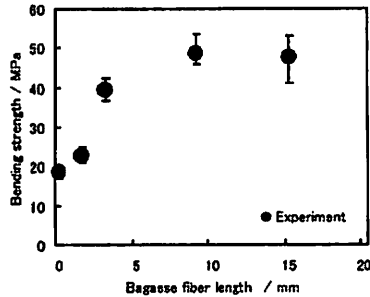


Fig.11 Variation of bending strength of the composite material with bagasse fiber length

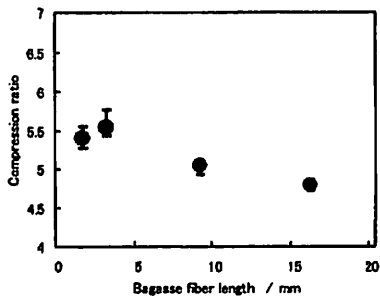


Fig.12 Relationship between content of bagasse fiber in composite material and compression ratio of bagasse fiber

いての明確な理由は①バガス繊維長が長くなるほど、成形体中のバガス繊維体積に対するバガス繊維両端の面積が低下し、バガス繊維に浸入する樹脂が少なくなるため圧縮率が低下する。②繊維長が長いほど、成形時に繊維同士の間隙による拘束が増加し、圧縮率が低下する。等が考えられるが詳細については、これからの検討課題としたい。

## 5. 結論

バガス繊維と生分解性樹脂による複合材料を熱間プレス成形によって作製し、単繊維引張試験および曲げ試験を行い、曲げ弾性率を調べた。得られた結論は以下の通りである。

- (1) バガス単繊維引張試験の結果、縦弾性率と引張強度には明確な正の相関が確認された。これは、バガス繊維粉末の中、繊維の損傷が生じ引張に有効な繊維直径はみかけの直径よりも小さく、大きくバラつくことためである。これは天然繊維を複合材料として用いる場合に繊維の抽出方法に注意を払う必要があることを示唆している。
- (2) バガス繊維の含有率が増加すると曲げ弾性率は増加し、最大 2525MPa に達した。実験結果はバガス繊維圧縮率を導入した予測式による計算結果と精度良く一致した。
- (3) バガス繊維長が短くなると曲げ弾性率は低下した。すなわち、繊維長が 3mm 以下（アスペクト比 12）では、繊維長による剛性低下が認められた。これも、予測式による計算結果と精度良く一致した。

## 謝辞

本研究で使用した生分解性樹脂 CP-300 はミヨシ油脂(株)より提供していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

## 文献

- 1) 福本功, 黒木義郎, 鈴木春栄, 中山清光, "バガスを充てん材として用いたBMCの射出成形技術の開発", (1995), 日本機械学会論文集(C編 59 巻 561 号) pp.1547-1552.
- 2) 柴田信一, 曹勇, 福本功 "バガス繊維と生分解性樹脂による複合材料の作製と機械的強度の検討", (2005), 日本機械学会論文集(C編 71 巻 704 号) pp.1400-1405.
- 3) 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", (2003), 材料, 第 52 巻, 第 10 号, pp.1245-1252.

- 4) 高木均, 田倉隆輝, “生分解性プラスチック—竹粉複合ボードの試作とその強度評価”, (2003), 材料, 第 52 卷, 第 4 号, pp.357-361.
- 5) 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”, (2003), 材料, 第 52 卷, 第 4 号, pp.353-356.
- 6) Hull D, (宮入裕夫, 池上皓三, 金原勲訳): 複合材料入門, (1983), 培風館.
- 7) H. Fukuda and T. W. Chou, *Journal of Materials Science*, (1982), 17, pp.1003-1011.
- 8) 長井謙宏, 横山敏士, 前川善一郎, 濱田泰以, 野口義治, “三次元強化繊維複合材料解析手法の研究 (第二報, 引張・圧縮強度の解析)”, (1994), 日本機械学会論文集, 60-570, pp.514-519.
- 9) Chun-Hway Hsueh, *Young's modulus of unidirectional discontinuous-fiber composites*, *composites Science and Technology*, (2000), 60, pp.2671-2680.