

琉球大学学術リポジトリ

バガス繊維による複合材料の射出成形体の曲げ弾性率について

メタデータ	言語: 出版者: 日本機械学会 公開日: 2007-04-10 キーワード (Ja): キーワード (En): Bagasse, Polypropylene, Reinforced Plastic, Law of Mixture, Flexural Modulus, Composite 作成者: 柴田, 信一, 曹, 勇, 福本, 功 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/370

バガス繊維による複合材料の射出成形体の曲げ弾性率について*

柴田 信一^{*1}, 曹 勇^{*2}, 福本 功^{*1}Flexural Modulus of Injection Molding Composites Made
from Bagasse Fiber and PolypropyleneShin-ichi SHIBATA^{*3}, Yong CAO and Isao FUKUMOTO^{*2} Department of mechanical engineering systems, University of the Ryukyus,
1 Senbaru, Nishihara-cho, Nakagami gun, Okinawa, 903 0213 Japan

Flexural modulus of injection molding composites made from bagasse fiber and polypropylene was investigated. The results were validated with the numerical calculation based on Cox's model. Flexural modulus increased with increasing the volume fraction of bagasse fiber and the prediction by the calculation was in good agreement with the experiment. However, the flexural modulus of the composites without kneading, which is the process of making the pellets from bagasse fiber and polypropylene, was lower than that with kneading. Without kneading, the sizes of bagasse fibers in the composite were larger than that without kneading. These bagasse fibers resulted in a heterogeneous distribution in the composite and bagasse fibers failed to be bridging fibers which transfers load each other. Furthermore, at mold temperature 30°C, the flow marks with white turbidity occurred on the surface. In the observation of the flow mark, there were lots of the fibers, which were not bonded with polypropylene. This was another factor to decrease the flexural modulus.

Key Words: Bagasse, Polypropylene, Reinforced Plastic, Law of Mixture, Flexural Modulus, Composite

1. 結論

著者らは沖縄の基幹作物であるサトウキビの絞りかすであるバガス繊維をプラスチックと組み合わせた複合材料の作製および評価を継続的に行っている^{①②}。前報では、熱間プレス成形で作製したバガス繊維/生分解性樹脂複合材料の曲げ弾性率に及ぼすバガス繊維含有量および繊維長の影響について詳細に検討した。バガス繊維含有量と曲げ弾性率の関係では、単繊維引張実験から得られた繊維剛性を Cox のモデル^③に適用し、さらに圧縮率をモデルに組み入れることで、計算値と実験値が非常に良い一致を示すことを明らかにした。また、繊維長と曲げ弾性率の関係では繊維長の短さに起因する剛性低下がバガス繊維複合材料でも見られ、これも実験値と数値計算値が良い対応を示すことを示した。

一方、プラスチックの成形方法としては生産性の高い射出成形があり、とりわけ、自動車部品のプラスチック部品は射出成形により作製されている部品が多い。その中でもポリプロピレンは主なる樹脂として使用されている。しかしながら、ポリプロピレンは剛性が低い^④ため、高い剛性が必要な部品ではタルク・ガラ

ス繊維などの充填材を加えることにより剛性が高められている。

そこで、本研究では、バガス繊維とポリプロピレンによる複合材料の射出成形による成形を行い、その曲げ弾性率の評価を行った。また、複合材料の曲げ弾性率を予測する目的で Cox モデルの適用を行い、計算値を実験値と比較した。さらに、曲げ弾性率に及ぼす混練過程および金型温度の影響を調べたので、ここに報告する。

2. 供試材料および射出成形

バガス繊維は製糖工場にて搾汁後に、温風で十分乾燥させた(含水率は 0.01%)。その後、篩により繊維長を 3 種類に大別した。①外皮を多く含み繊維長が長いもの、②繊維長が 10-25mm、③繊維長が 10mm 以

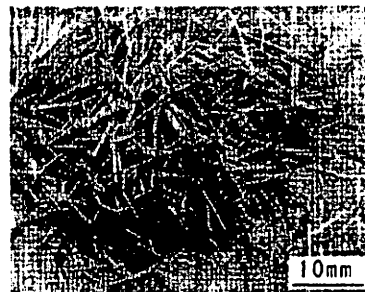


Fig.1 Bagasse.

* 原稿受付 2004年9月27日。

^{*1} 正員、琉球大学工学部(〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1)。^{*2} 正員、琉球大学大学院理工学研究科。

E-mail: shibata@tec.u-ryukyu.ac.jp

ドでありピスを含むものである。今回は、②を使用した。図1はその様子である。樹脂はポリプロピレン (AZ864N, 住友化成, 曲げ弾性率 1315MPa) を使用した。

複合材料としてのペレットは、バガス繊維とポリプロピレンを混合し、混練機 (森山製作所製双腕型ニーダー) にて 190°C, 1 時間混練を行うことで作製した。十分な混練が行えるように、一回の混練で 1kg の材料を投入した。混練後、材料を冷却過程で粉碎し、直径 2.4mm のペレットを得た。

射出成形は日精樹脂工業 (株) PS10E1ASE を用い、図2に示すような成形体を作製した。成形条件は射出温度 165°C, 射出圧力 110kg/cm², 金型温度 30°C および 90°C とした。図2に示す成形体はスプルー、ランナー部を含む、成形直後の様子である。曲げ試験片として使用したのは、図2.上部の試験片の長い直線部分 (円柱) であり、成形後にこの部分をカッターで切り出し、曲げ試験片とした。成形体の直径は円柱の両端および中心の 3 箇所直径をマイクロメータにより測定し、その平均値とした。曲げ試験前には重量の測定を行い、密度を求めた。曲げ試験は実験条件毎に 5 本行った。

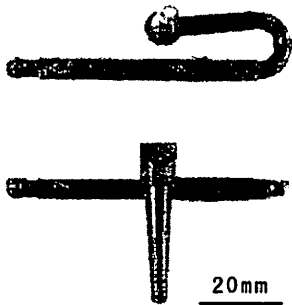


Fig2. Injection molding product.

曲げ試験は 3 点曲げ試験 (JIS K6931) とし、試験機は島津オートグラフ (DCS-R-100) を使用した。支点間距離は 55mm とした。なお、曲げ弾性率の算出にあたっては、曲げ試験から得られた荷重-変位曲線の曲げ最大応力の 5% と 15% を直線で結び、その傾きから曲げ弾性率を求めた。支点間距離が小さいと支点にて塑性変形が生じて、曲げ弾性率は低めに測定されるが、そのようなことのないように支点間距離を設定し、特に、弾性率測定範囲では支点での塑性変形が無いことを確認した。

3. 曲げ弾性率の予測

複合則から短繊維強化複合材料の弾性率 E_{comp} は以下の式で与えられる⁶⁾。

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

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。 η は長さ修正係数であり、Cox モデルによれば以下の式で与えられる。

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

β 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。

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

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, ν_m は、繊維半径、ポアソン比 (本研究では $\nu_m = 0.3$) である。バガス繊維の機械的性質は前報⁶⁾で報告した通りであり、表1に用いた数値を示す。

Table 1. Mechanical properties of bagasse fiber and polypropylene.

σ_f	89.9 MPa
E_f	4526 MPa
σ_m	24.0 MPa
E_m	1354 MPa
r_f	0.198mm
L	1.35 mm

式(1)は一様引張変形を仮定して導かれた式であるが、①本研究での射出成形体中の繊維径は成形体直径の 1/20 以下であり、繊維長は成形体長さの 1/40 以下である。②曲げ弾性率の評価は曲げ試験の初期段階 (最大曲げ強さの 5-15%) で行っているため、中立軸から表面への応力勾配が小さい (応力で 3-6MPa, ひずみ換算で 0.02-0.04%)。以上から、曲げ変形の効果は無視できるほど小さいと仮定して式(1)を用いることにする。ただし、式(2)は繊維の配向係数およびバガス繊維の圧縮率が組み込まれてい

ない。配向係数については、Fukuda⁶⁾らが短繊維強化材料の配向係数を解析的に求めており、配向関数を余弦関数で近似した場合、配向係数は、

$$C = \frac{1}{16} \left[\frac{1}{1+q} \sin \frac{\pi}{2} (1+q) + \frac{1}{1-q} \sin \frac{\pi}{2} (1-q) \right] \times \left[\frac{3}{1+q} \sin \frac{\pi}{2} (1+q) + \frac{3}{1-q} \sin \frac{\pi}{2} (1-q) \right] + \frac{1}{1+3q} \sin \frac{\pi}{2} (1+3q) + \frac{1}{1-3q} \sin \frac{\pi}{2} (1-3q) \quad (6)$$

ここで、 $q=2\alpha/\pi$ である。 α は臨界角度であり、繊維配向関数 $g(\theta)$ を以下の式で近似した結果で与えられる。

$$g(\theta) = \pi/2\alpha \cos(\pi\theta/2\alpha) \quad (7)$$

さて、図3および図4は成形体のバガス繊維長と軸方向に対する角度を万能投影機(ニコン V16D)で直接測定した結果である。測定は200本行った。その結果、繊維角度は軸方向に向いている繊維を角度0度とすると、これが最も多く、90度に近づくほど繊維の頻度が少なくなっていた。また、平均繊維長は1.35mmであった。繊維長が使用したバガス(10-25mm)に比較して非常に短いのは混練時に短くなるためである。

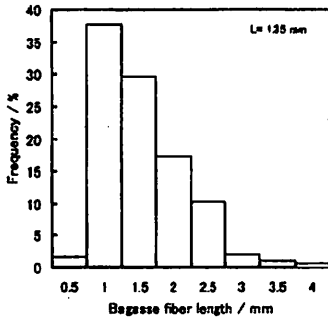


Fig.3 Distribution of bagasse fiber length of the specimen

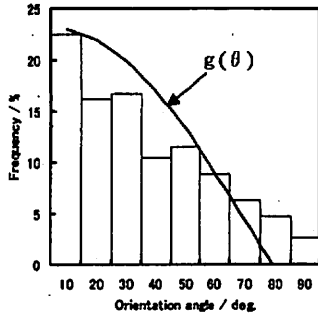


Fig.4 Distribution of orientation angle of bagasse fiber along the axis direction in the specimen.

このように射出成形体の軸方向に対する繊維の角度分布は矩形よりも余弦関数形⁶⁾に近いと判断し、式(7)と図3の分布の誤差が最小になるように近似を行ったところ α は74度となった。図4には用いた配向関数を示してある。これを式(6)に代入すると $C=0.56$ となる。

最後に、バガス繊維の後述する圧縮率 K (初期体積に対する成形後の体積の逆数)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。最終的に曲げ弾性率を予測するのに以下の式を用いた。

$$E_{comp} = KC \eta V_f \cdot E_f + (1 - V_f) \cdot E_m \quad (8)$$

なお、曲げ試験時に同一試験片内では引張および圧縮ひずみが生じるが短繊維強化による剛性増加は引張・圧縮ともに等しいと仮定した⁶⁾。

4. 実験および計算結果の考察

4.1 複合材料の曲げ弾性率に及ぼすバガス繊維含有量と混練の影響

複合材料であるペレットは混練前にバガス繊維の重量比を10%、20%、30%に調節し、3種類作製した。また、次節と関係する金型温度は90℃とした。曲げ弾性率予測式(8)に必要なバガス繊維体積率は以下の式から算出した。すなわち、射出成形体の重量を測定し、重量比率から樹脂重量を引き、残りをバガス繊維とみなし、試験片全体の体積に占めるバガス繊維の体積とした。式で表すとバガス繊維の体積率は、

$$V_f = \left[V - \left(\frac{W - W_m}{\rho_m} \right) \right] / V \quad (9)$$

となる。ここで、 W_m :樹脂重量、 ρ_m :樹脂密度(0.902 g/cm³)、 V :試験片体積、 V_f :バガス繊維体積。

図5は上式から求めた成形体中のバガス繊維体積率と曲げ弾性率との関係を示した図である。バガス繊維は圧縮されると樹脂よりも密度が重いので、重量比率よりも体積率は図のように小さくなる。図中黒丸はペレットを予め混練(190℃、1時間)により作製した場合であり、白丸は混練無しに所定のバガス繊維と樹脂を直接、射出成形機のホッパーに投入して成形した場合である。なお、曲げ弾性率予測式(8)における圧縮率は5.46を採用し、計算値は図中の線で示した。図中には臨界角度の測定誤差を考慮して、臨界角度64、74、84度の場合の計算結果を示してある。

図からわかるように、混練した材料の実験値と計算値はおおよそ一致している。ただし、混練材は計算値よりも若干高く、混練無し材は若干低い値である。

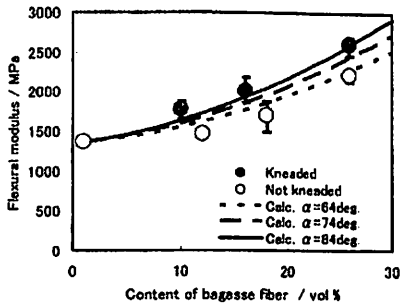


Fig. 5 Relationship between content of bagasse fiber (vol. %) and flexural modulus.

一方、バガス繊維の圧縮率はバガス体積と投入バガス重量およびバガス繊維の密度から次式より求めた。

$$K = (f_n * V_f) / \left[V - \left(\frac{W - W_f}{\rho_m} \right) \right] \quad (10)$$

ここで、 f_n ：バガス繊維本数、 V_f ：バガス繊維1本あたりの体積である。表2に各材料における重量、体積、曲げ強さ、密度、圧縮率の測定結果を示す。図6は圧縮率とバガス体積率との関係である。図からわかるように、バガス繊維の圧縮率はバガス体積率が増えるほど高くなった。

Table 2. Mechanical properties of the composite specimens.

	Content of bagasse fibers	Weight (g)	Volume (c m)	Bending Strength (MPa)	Density (g/c m)	Compression ratio
Polypropylene	0%	379	4.20	37.75	0.90	—
	10%	397	4.41	38.01	0.90	3.91
Kneading	20%	418	4.42	41.20	0.95	5.25
	30%	435	4.44	40.50	0.98	5.46
	10%	388	4.42	40.20	0.88	3.14
Not kneading	20%	404	4.44	40.00	0.91	4.24
	30%	435	4.44	40.40	0.98	5.46

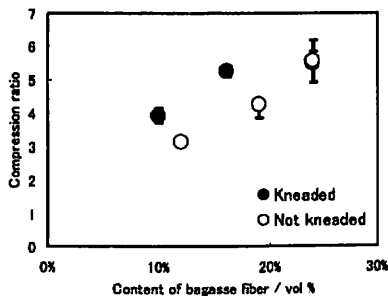


Fig. 6 Relationship between content of bagasse fiber in composite material and compression ratio of bagasse fiber.

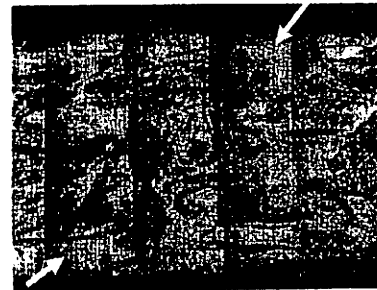
一方、成形体の体積および重量は表2からわかるようにバガス繊維含有量に関係なくほぼ一定である。また、射出成形時の材料射出量も同一で行った。よって、

これらの違いは射出成形前にもノズル先端直径(3mm)あるいはスクリーを通る際にバガス繊維含有量が多いほどは縮されやすいため生じたと推測される。

しかしながら、バガス体積率 24%(バガス重量比 30%)では圧縮率に差が無いにもかかわらず、曲げ弾性率は明瞭な差が認められた。そこで射出成形体の断面を研磨し光学顕微鏡で観察した。図7はその写真を示す。写真中のモアレ模様は写真を貼り合わせたために生じたものである。写真から解かるように、混練した場合はバガスが粉砕され細くなり、均一に分散していることがわかる。また、バガス繊維は円柱表面よりも中央部分が長い傾向があった。一方、混練無しの場合はバガス繊維が不均一であり、図中の白矢印で示すように繊維の全くない箇所が多く観察された。



(a) Kneaded



(b) Not kneaded
3mm

Fig. 7 Cross-sectional view of the injection molding specimens along longitudinal direction with an optical microscope.

Fukuda⁹⁾らは短繊維強化材の強化メカニズムを述べているが、短繊維強化材には繊維同士がある一定の距離内にあることにより、互いに力を伝達するブリッジ関係が生じ、結果的に材料は強化されると述べている。

したがって、混練無しの図7(b)のような場合は、混練材に比べ繊維長・繊維径が大きく、成形体中で互い

にブリッジ関係を構成しない部分が生じるために、強化材としての効果が低くなったと考えられる。このことは繊維による曲げ弾性率の向上を期待するには、成形体中に繊維が均一分布する程度に繊維サイズが短い必要があることを示唆している。

また、図5において混練材では計算値よりも実験値が高かったのは、計算値算出のための繊維長を測定したのは表面近傍の繊維であったために、内部では表面よりも繊維が長く、見積もった繊維長が短く、結果的に計算値が実験値よりも低くなったと考えられる。

4.2 金型温度と曲げ剛性の関係について

図8は金型温度 30°C と 90°C における曲げ弾性率とバガス繊維含有量との関係である。図からわかるように、

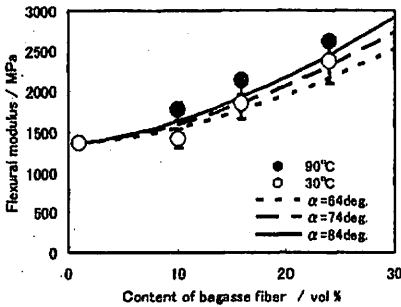


Fig.8 Relationship between content of bagasse fiber (vol %) in the composite material and flexural modulus.

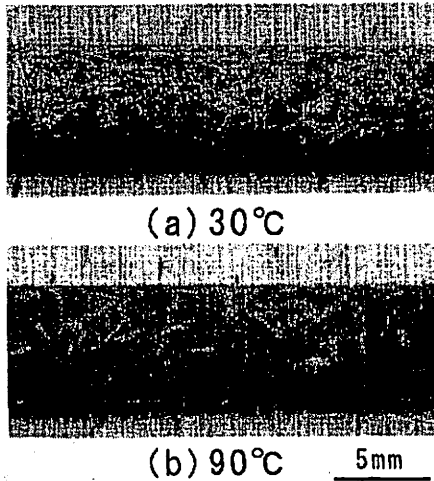
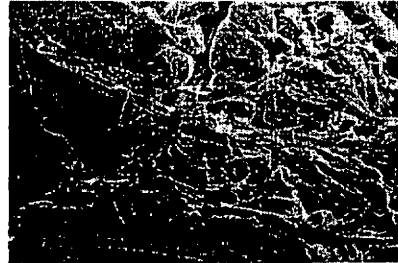


Fig.9 Appearance of the specimens for mold temperature at (a) 30°C and (b) 90°C.

金型 30°C では含有量に関係なく曲げ弾性率が金型 90°C に比べて 10-20% 程度低かった。そこで、バガス

繊維圧縮率を調べたが有意な差は認められなかった。しかしながら、金型 30°C では図9に示すように試験片の表面が白く、表面ではバガス繊維の浮きが明瞭に観察された。さらに、成形体の表面の SEM 観察を行ったところ、図10に示すように、金型 30°C では亀裂が多数観察された。ポリプロピレンは変形を受けると白濁化することを併せると、金型温度が低い場合には、成形直後に金型に面した凝固層に伸長流あるいはせん断流による変形が生じたと考えられる¹⁰⁾。そのため表面にバガス繊維が浮き、亀裂が多数発生したと思われる。

このような部分はバガス繊維と樹脂が良く密着しておらず、結果的に図8に示したように曲げ弾性率が低下したと考えられる。この実験事実はその射出成形体の曲げ弾性率の予測を行う際に、バガス繊維のような天然繊維複合材料の弾性を評価する場合、金型温度による



(a) 30°C



(b) 90°C 0.5mm

Fig.10 SEM microphotographs of the surface of the specimens for mold temperature at (a) 30°C and (b) 90°C.

表面性状に注意を払うことを示唆している。なお、樹脂 100% の場合は、このような表面の白濁化は観察されなかったので、樹脂にバガス繊維が混入することによる、粘性の低下、熱伝導性の低下などが表面性状に影響していると考えられるが、詳細は今後の課題としたい。

5. 結論

バガス繊維とポリプロピレンによる複合材料の試験片を射出成形によって作製し、その曲げ弾性率を調べた。さらに、曲げ弾性率をCoxモデルによって予測した。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 射出成形体の繊維配向および繊維長を測定し、バガス繊維の弾性率を用いてCoxモデルの適用を行ったところ、実験で得られた曲げ弾性率と数値計算の値はおおよそ一致した。ただし、バガス繊維とポリプロピレンを混練無しに射出成形機に投入して成形を行った場合は混練を行った場合に比べ低く、計算値よりも低かった。これはバガス繊維が長いために繊維が均一に分布せず繊維同士ブリッジによる剛性向上が機能しなかったためである。
- (2) 射出成形時の金型温度が低い場合(30℃)は高い場合(90℃)に比べて、成形体の表面は白濁化し、バガス繊維が浮き、表面に露出した。SEM観察の結果、表面には多数の亀裂が観察された。これは凝固後に表面層が伸長流等の流れにより変形を受けるためである。また、曲げ弾性率は10-20%ほど低下した。したがって、バガス繊維と樹脂の射出成形体では表面性状が曲げ弾性率に影響することが判明した。

謝辞

本研究で使用したポリプロピレンは内浜化成様より提供していただいた。実験では、琉球大学工学部機械システム工学科土里健一、荒谷伸幸、崎山篤史君の熱心な協力を得た。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, 銘菊春栄, 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) 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曲げ弾性係数について", (2006), 日本機械学会論文集 C編 71巻 707号 pp.2411-2416.
- 4) Hull D, (宮入裕夫, 池上皓三, 金原勲訳): 複合材料入門, (1983), 培風館.
- 5) H. Fukuda and T. W. Chou, "A probabilistic theory of the strength of short-fiber composites with variable fiber length and orientation", *Journal of Materials Science*, (1982), 17, pp.1003-1011.
- 6) 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 A編, 60巻 570号, pp.514-519.
- 7) Z. Tadmor, "Molecular Orientation in Injection Molding", *Journal of Applied Polymer Science*, (1974), 18, pp.1753-1772.
- 8) 片岡保人, 斉藤誠, 田谷稔, "マイクロメカニクスによる短繊維複合材料の力学的挙動の解析(第1報, 射出成形板の剛性の予測)", (1997), 日本機械学会論文集 A編 63巻 614号 pp.2213-2219.