

バガス繊維で強化された射出成形体の機械的性質の評価*

曹 勇^{*1}, 福本 功^{*2}Evaluation of Mechanical Properties of Injection Molding Product
Reinforced by Bagasse FiberYong CAO and Isao FUKUMOTO^{*3}*¹Department of Mechanical Systems Engineering, University of the Ryukyus,
1 Senbaru, Nishihara-cho, Okinawa, 903-0213 Japan

BMC (Bulk Molding Compound) is composed of glass fiber, UP (unsaturated polyester) resin and filler. Bagasse is the waste obtained after squeezing sugar cane. Our purpose is use bagasse fiber as a reinforcement and filler of BMC, and fabricate product by injection molding and injection compression molding. The mechanical properties of product were improved after adding bagasse fiber. Viewing the fracture surface on tensile test specimen through SEM, we could observe the glass fibers were penetrated into the bagasse fibers longitudinally. Along with the UP resin solidifying, the glass fibers were firmly fixed into the bagasse fibers and finally united with them. This effect indicated the glass fiber length was prolonged so that the adhesion interface with UP resin became larger, and led to increase the mechanical properties. Otherwise, it was observed the UP resin was sufficiently permeated through the bagasse fibers and solidified. These phenomena also contributed to enhance the mechanical properties drastically.

Key Words: Bagasse, Sugar Cane, BMC, Injection Molding, Composite Material, FRP, Biomass, Reinforcement, Filler

1. 緒 論

砂糖キビの世界的な生産は 12.8 億トン(2002 年)とされており^①, 砂糖キビの搾りかすであるバガスは 2.14 億トン程度と推定される。この大量に排出されるバガスをどのように処理し, 有効利用するかはそれぞれの国にとって大きな社会問題になっている。

ところで, バガスの有効利用の方策としては従来製糖工場におけるボイラーの燃料, 肥料, 飼料又はパルプ材料等として使われているが, 近年ではバガスを用いた複合材料の作製^{②③}や, セメントの複合材料の増強材^④等の報告がなされている。

著者らは, 長年バガスの高度有効利用の立場より工業材料として射出成形に適用し, FRP の新たな用途として展開づける研究を行っている^{⑤⑥}。その際バガス繊維は強化材と充填材, そして改質材としての役割が期待されており, BMC (Bulk Molding Compound) 複合材料としての適用が極めて有効であり, 射出成形加工への適用を検討している。すなわち, 植物繊維であ

るバガス繊維と不飽和ポリエステル樹脂との濡れ性と親和性, 又粉碎したバガス繊維とガラス繊維の針状の形状特性の類似性に着目した最適射出成形条件について検討する。

本研究では, 特に射出成形において, ガラス繊維がバガス繊維に突き刺さる現象が見い出され, それはバガス繊維がガラス繊維と類似した針状の形状特性に依存していることを明らかにする。そして, ガラス繊維がバガス繊維に突き刺さる現象は, いかに, どのような成形条件に依存しているかを詳細に検討した。

また, バガス繊維を混合した BMC 材料は粘性が極めて高いことから, 射出圧力によって材料の流動が大きく左右される。そこで, 成形体の付加価値をさらに高める技術として射出圧縮成形加工を取りあげ, 射出成形と射出圧縮成形による成形体の機械的性質の比較検討を行ったので報告する。

2. 実験装置及び方法

バガスを図 1 に示すが, 製糖工場から排出される際には束状の形状を呈しているが, 粉碎することにより (A) に示すように針状の形状変化を生じる。またバガス繊維の内部は (B) に示す多くの空洞部から構成されるハニカム構造となっている。

* 原稿受付 2003 年 11 月 5 日。

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

E-mail: fukumoto@tec.u-ryukyuu.ac.jp

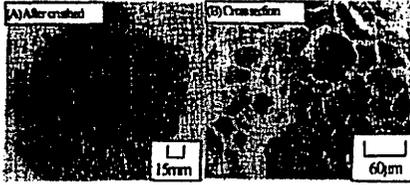


Fig.1 The bagasse

BMC の作製は著者らの過去の研究を参考にして、総重量を 900g として、混合比を表 1 に示す割合で混練を行った。混練は森山製双型攪ニーダを用いて、最初に不飽和ポリエステル樹脂と硬化剤のパーブチル Z を 5 分間混練し、その後粉碎したバガス繊維を入れ 10 分間混練する。最後にガラス繊維を入れ、さらに 3 時間半の混練を行った。尚、ガラス繊維は旭ファイバークラス(株)のチョップドストランドタイプ(繊維長さ 13mm)を用いた。

Table 1 Ingredient ratio

Materials	Wt(%)		
	I	II	III
Glass fiber (GF)	0	0	10
Bagasse fiber (BF)	0	23	10
Unsaturated polyester (UP)	99.8	76.8	79.8
Perbutyl Z	0.2	0.2	0.2
Total	100	100	100

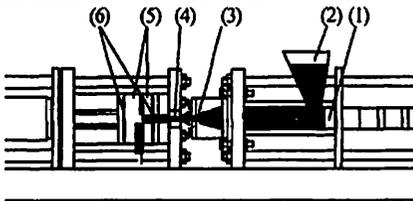


Fig.2 Injection molding

BMC 材料は粘性が極めて高いことから、射出成形時に目詰まりの防止とガラス繊維の損傷を防止する目的から、プランジャータイプの射出成形装置を試作した。射出成形は図 2 に示すようにホッパー (2) より BMC 材料を投入し、プランジャ (1) で押し出す。材料はノズル (3)、スプール (4) を通過し、最終的には金型 (5) のキャビティへ充填される。尚、不飽和ポリエステル樹脂は熱硬化性樹脂であることから金型後部にヒータ (6) を設置してある。表 2 に成形条件を示す。

Table 2 Molding conditions

Injection pressure (MPa)	9~20
Sift pressure (MPa)	9
Mold clamping pressure (MPa)	12~23
Mold temperature (K)	403~423
Hold time (min)	5

成形体の機械的性質の評価として、ロックウェル硬さ試験、引張試験、曲げ試験そしてシャルピー衝撃試験を行った。硬さ試験は、明石製作所製ロックウェル硬さ試験機 (AR-10) を用いて M スケール (荷重 980N) で行った。引張試験と曲げ試験は、島製作所製オートグラフ万能試験機 (AG-50KND) を用いてクロスヘッドスピード 0.5mm/min で行った。引張試験の際のつかみ具間距離は 125mm とした。曲げ試験においては、試験片の大きさを 8×4×92mm として三点曲げ試験を行った。尚、スパン長さは 62mm とした。シャルピー衝撃試験は、島製作所の U-F IMPACT TESTER を用いた。8×6×60mm に加工した試験片を用い、切欠き形状は U 字型、切欠き深さは 1mm を施した。尚、各材料試験はそれぞれ 5 本ずつ行った。

3 実験結果と考察

3.1 バガス繊維を含有した BMC の最適射出成形条件の検討 粉碎バガス繊維とガラス繊維はいずれも針状の形状を呈しており、不飽和ポリエステル樹脂に混合することにより相乗効果が期待される。そこで、機械的性質として引張強度にどのような影響を与えるか検討した。まず基礎的なデータを得る目的で不飽和ポリエステル樹脂のみの場合 (材料 I)、不飽和ポリエステル樹脂にバガス繊維を 23% 添加した場合 (材料 II)、さらに不飽和ポリエステル樹脂にバガス繊維 10%、ガラス繊維 10% を添加した場合 (材料 III) の 3 種類の BMC 材料を作製し、射出成形体の引張強さを比較検討した。その際の成形条件として、材料 I の場合は射出圧力 9MPa 金型温度 403K、材料 II と材料 III の場合は射出圧力 15MPa 金型温度 403K である。尚、不飽和ポリエステル樹脂のみの場合は、射出圧力が高すぎると、金型より樹脂漏れが多く、成形体の形状に影響を与えるため、樹脂漏れない条件で選定した。実験結果を図 3 に示す。不飽和ポリエステル樹脂のみの場合は引張強さは 8MPa に対し、バガス繊維を添加することにより 17MPa と引張強さは向上し、バガス繊維が強化材の役割を果たしていることがわかる。さらに、ガラス繊維を添加することにより、引張強さは 23MPa まで増加した。そこで、定性的な原因を調べるため引張破断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察した。その結果を図 4 に示す。材料 II のバガス繊維を混合した場合は繊維による強化効果だけでなく、(A) に示すようにバガス繊維の空洞部には不飽和ポリエステル樹脂が十分含浸されており、空洞部が充填された状態で固化されるため、引張強さの向上に大きく寄与していることがわかる。さらに材料 III のガラス繊

維を添加した場合は (B) に示すようにガラス繊維がバガス繊維にほぼ垂直に突き刺さっており、かつ先端は折損されている現象が認められた。これは、ガラス繊維がかなり強固にバガス繊維に固定化されていることを示している。すなわち、バガス繊維の断面はハニカム構造で多くの空洞部から構成され、また空洞部の穴の大きさとガラス繊維の直径はほぼ等しいことから突き刺さる現象が生じる。そこで、この現象を定性的に模式的に示したのが図5である。ガラス繊維がバガス繊維に突き刺さり固定化されると、ガラス繊維とバガス繊維は一体化し、ガラス繊維の動的な挙動はバガス繊維に大きく左右される。すなわち、バガス繊維の界面に大きく影響されるが、バガス繊維は植物繊維であることから、不飽和ポリエステル樹脂が毛管現象により浸透するため、バガス繊維と不飽和ポリエステル樹脂との界面の接着力が大きくなり、摩擦抵抗も大きくなる。さらに、ガラス繊維がバガス繊維に突き刺さることにより、繊維長さがより長くなる効果を生じ、不飽和ポリエステルとの界面の接触面積が増加することにもつながり、引張強さの向上に大きく寄与していると考えられる。次に、ガラス繊維がバガス繊維に突き刺さる現象は、混練の過程においても考えられることから、混練を終了した時点で材料を採取し SEM 観察を行った。その結果を図6に示す。図よりガラス繊維がバガス繊維に突き刺さる現象は認められず、射出成形の加工時において、この現象は生じていると言える。すなわち、射出成形時の閉じた金型空間において射出圧力が作用した結果、細長いスプール、ランナーを通過する際にガラス繊維とバガス繊維は同一方向に流れが制御され、さらに金型内において、ガラス繊維とバガス繊維のドッキング現象を生じ、結果的に突き刺さる現象が生じたと考えられる。次に、射出成形条件が引張強さに及ぼす影響について検討した。まず射出圧力のみを9~20MPaの範囲で変化させ、成形体の引張強さに及ぼす影響について検討した。その結果を図7に示す。射出圧力が増加するに従って引張強さは増加する傾向を示し、特に射出圧力15MPaにおいて引張強さは最大値の23MPaを示し、その後は低下する傾向となっている。そこで、射出圧力15MPaの場合の引張破断面をSEM観察した結果を図8に示す。射出

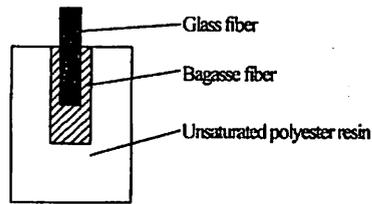


Fig.5 The model of relationship among a glass fiber, a bagasse fiber and unsaturated polyester resin

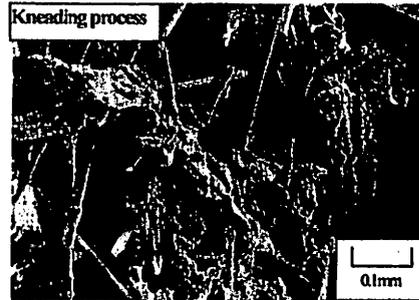


Fig.6 SEM micrograph of surface on the BMC material after kneading process

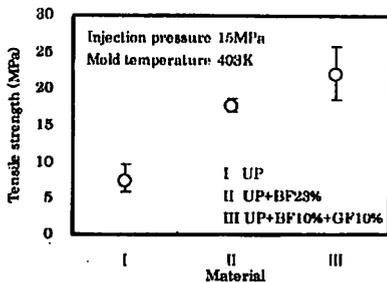


Fig.3 Comparison of tensile strength among different specimens

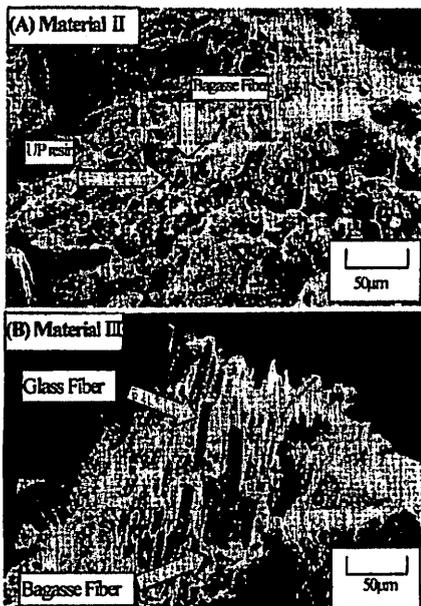


Fig.4 SEM micrographs of fracture surface on the tensile test specimen produced by different BMC materials

脂との界面の接着力が大きくなり、摩擦抵抗も大きくなる。さらに、ガラス繊維がバガス繊維に突き刺さることにより、繊維長さがより長くなる効果を生じ、不飽和ポリエステルとの界面の接触面積が増加することにもつながり、引張強さの向上に大きく寄与していると考えられる。次に、ガラス繊維がバガス繊維に突き刺さる現象は、混練の過程においても考えられることから、混練を終了した時点で材料を採取し SEM 観察を行った。その結果を図6に示す。図よりガラス繊維がバガス繊維に突き刺さる現象は認められず、射出成形の加工時において、この現象は生じていると言える。すなわち、射出成形時の閉じた金型空間において射出圧力が作用した結果、細長いスプール、ランナーを通過する際にガラス繊維とバガス繊維は同一方向に流れが制御され、さらに金型内において、ガラス繊維とバガス繊維のドッキング現象を生じ、結果的に突き刺さる現象が生じたと考えられる。次に、射出成形条件が引張強さに及ぼす影響について検討した。まず射出圧力のみを9~20MPaの範囲で変化させ、成形体の引張強さに及ぼす影響について検討した。その結果を図7に示す。射出圧力が増加するに従って引張強さは増加する傾向を示し、特に射出圧力15MPaにおいて引張強さは最大値の23MPaを示し、その後は低下する傾向となっている。そこで、射出圧力15MPaの場合の引張破断面をSEM観察した結果を図8に示す。射出

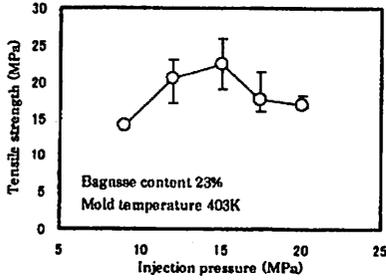


Fig.7 Relationship between tensile strength and injection pressure

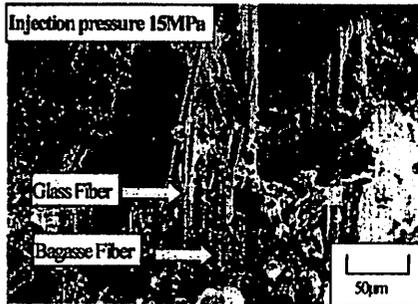


Fig.8 SEM micrograph of fracture surface on the tensile test specimen

圧力 15MPaにおいて、ガラス繊維がバガス繊維に突き刺さっている現象が数多く認められることから 15MPa は最適な射出圧力と判断される。それに対して射出圧力が 15MPa 以上になると、ガラス繊維が高圧力のため破損したり、ガラス繊維とバガス繊維の配向がランダムになるためガラス繊維がバガス繊維へ突き刺さりにくくなり強度は低下する。

次に、金型温度と成形体の引張強さについて検討した。その結果を図 9 に示す。金型温度 403K の場合は 423K に比べて高い引張強さを示しており、この原因として 423K の場合は 403K に比べ不飽和ポリエステル樹脂の硬化作用が早く始まるため、金型内において BMC 材料の流動が悪くなり引張強さの低下を招く。

そこで、不飽和ポリエステル樹脂の硬化作用は 373K 以上で促進されることから、BMC 材料の粘性を低くし流動を良くする目的で、ノズル部分にヒータを取り付け 343K に加熱した場合の予熱の有無の影響について検討した。尚、その際金型温度は 403K に設定した。実験結果を図 10 に示す。図から予熱の場合が、引張強さは増加していることがわかる。そこで、引張破断面の SEM による観察結果を図 11 に示す。両者を比較すると、予熱無 (A) の場合は、ガラス繊維の分布が不均一なのに対し、予熱有 (B) の場合はガラス繊維が均一に分散しており、強度の向上に寄与して

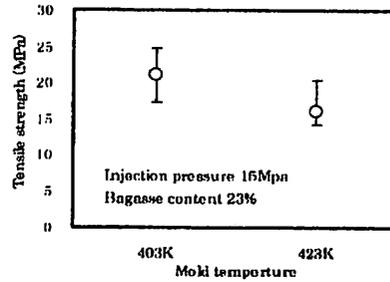


Fig.9 Relationship between tensile strength and mold temperature

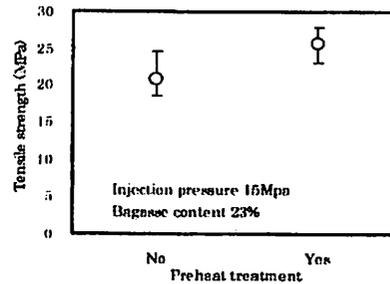


Fig.10 Relationship between tensile strength and preheat treatment

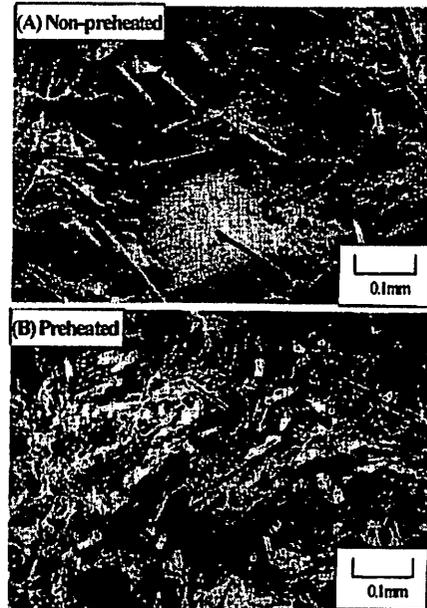


Fig.11 SEM micrographs of fracture surface on the tensile test specimen by different treatment

いる。すなわち、予熱することにより BMC 材料の粘性が低下し、ガラス繊維が金型キャビティ内にスムーズに流れ込むため引張強さは向上すると考えられる。

3.2 射出成形と射出圧縮成形との比較 射出成形は金型を閉じた状態でノズル部分から高圧力で射出するため、BMC 材料の粘性が高い場合は極めて高い射出圧力が要求される。それに対して、射出圧縮成形は図 12 に示すように最初は金型をわずかに隙間を設けた状態で接触させ、低圧力で金型キャビティ内に BMC 材料を充填させ、その後型締力の高圧力を利用して圧縮することによって成形される。金型形状によっては、射出圧縮成形が有利な場合も想定されることから図 13 に示す平板の場合を想定して、射出成形と射出圧縮成形の比較を行った。まず、射出圧縮成形では、金型を 1mm 程度開いた状態で射出圧力 8MPa で BMC 材料を充填した後、型締力 12MPa で圧縮成形した。比較のため、射出成形は型締力 20MPa で金型を閉じた後、射出圧力 15MPa で射出成形を行った。尚、その際バガス繊維の長さが BMC の材料に大きく影響を与えることから、バガス繊維の長さを種々変化させ実験を行った。そこで、ふるいメッシュサイズの #6~10(1.70~3.35mm)を長繊維(Long)、#14~20(0.85~1.18mm)を中繊維(Medium)、#28~35(425~600 μ m)を短繊維(Short)、そして#48~270(63~300 μ m)を粉末(Powder)として 4 種類に分類し比較検討した。まず成形体の比重の測定結果を図 14 に示す。バガス繊維長さの影響はそれほど認められず、射出成形と射出圧縮成形を比較した場合は、いずれのバガス繊維長さも射出圧縮成形の成形体の場合が高い値を示している。これは、射出圧縮成形の成形体は成形体内部に空孔が少ないことを意味している。次に、成形体のロックウェル硬度について検討した。その結果を図 15 に示す。この場合もバガス繊維長さの影響は認められず、ほぼ同じ程度の硬度を示している。射出成形と射出圧縮成形を比較した場合は、射出圧縮成形による成形体が高い値を示す。前述の比重の結果と照らし合わせて考察すると、射出圧縮成形においては、金型に圧縮力が均一に作用するため、バガス繊維内部に残存している空気が押し出され、さらにバガス繊維内部に樹脂が含浸した状態で固化されるため硬度は増加する。

曲げ強さについて検討した結果を図 16 に示す。バガスの繊維長さの影響は、若干のばらつきが認められるが、粉末バガスと繊維状バガスと比較すると、平均値では繊維状バガスの曲げ強さが高いことがわかる。これはバガスの針状の形状特性に依存していることを示している。次に、射出成形体と射出圧縮成形体を比較すると、いずれも射出圧縮成形の場合が高い値を示している。そこで、曲げ破断面を SEM 観察した結果を図 17 に示す。両者を比較すると、射出成形に比較

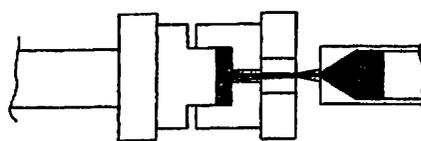


Fig. 12 Injection compression molding

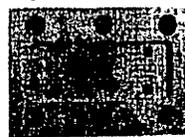


Fig. 13 The mold

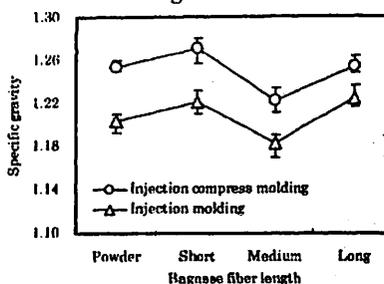


Fig. 14 Specific gravity of specimens produced by the BMC filled bagasse fibers of different length

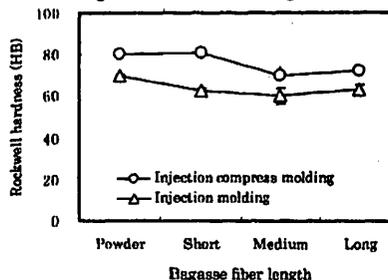


Fig. 15 Rockwell hardness of specimens produced by the BMC filled bagasse fibers of different length

して、射出圧縮成形体の場合はバガス繊維が均一に分散していることがわかる。射出圧縮成形の場合は圧縮力が均一に負荷するため、バガス繊維が均一に分散し強度は向上することを示している。次に、シャルピー衝撃試験の結果を図 18 に示す。この場合もいくらかのばらつきがあるが、粉末バガスと繊維状バガスと比較すると、平均値では繊維状バガスがより高い値を示している。また、射出成形と射出圧縮成形を比較すると、いずれの繊維長さにおいても、射出圧縮成形が高い値を示していることがわかる。

以上のことから、射出成形と射出圧縮成形を比較した場合、射出圧縮成形体の機械的性質が優れていることから粘性の高い BMC 材料には射出圧縮成形が極めて有効な加工技術であると言える。

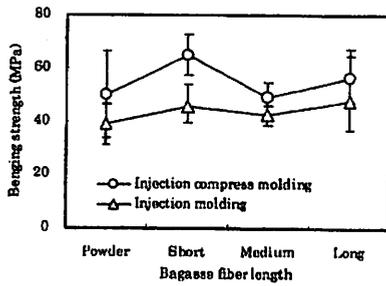


Fig. 16 Bending strength of specimens produced by the BMC filled bagasse fibers of different length

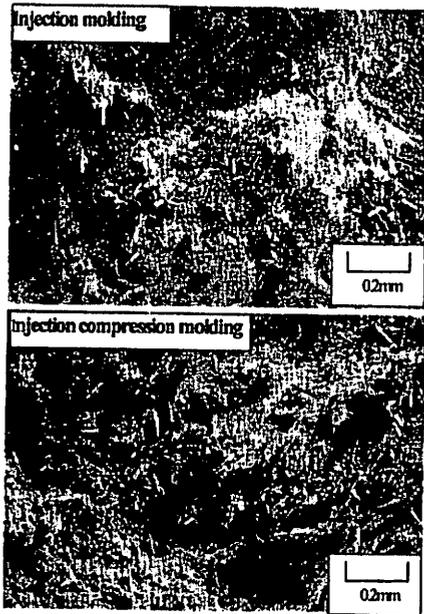


Fig. 17 SEM micrographs of fracture surface on the bending test specimen by different molding method

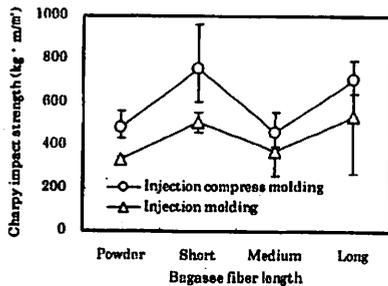


Fig. 18 Charpy impact strength of specimens produced by the BMC filled bagasse fibers of different length

4. 結論

バガスの付加価値を高める加工技術として、不飽和ポリエステル樹脂にガラス繊維とバガス繊維を複合化した BMC 材料を製作し、射出成形と射出圧縮成形に適用した。成形体の機械的性質を検討した結果、以下のことが明らかになった。

(1) 不飽和ポリエステル樹脂のみの場合は、引張強さ 8MPa に対し、バガス繊維を添加すると繊維による強化効果とバガス内部の空隙部に樹脂が含まれることにより引張強さは 17MPa を示し、バガス繊維は強化材の役割を果たすことが明らかになった。

(2) 射出成形においては、成形体内部でガラス繊維がバガス繊維に突き刺さる現象が見出され、ガラス繊維がバガス繊維に固定化されることにより、引張強さはさらに向上することが認められた。

(3) 最適射出成形条件として、射出圧力 15MPa、金型温度 403K、さらにノズル部分に 343K の予熱を与えた場合、引張強さは著しく向上する。

(4) 射出成形と射出圧縮成形の比較においては、射出圧縮成形体の比重、ロックウェル硬さ、曲げ強さ、そして衝撃値はいずれも高い値を示す。

文 献

- (1) FAOSTAT Database, <http://apps.fao.org/>, (2003).
- (2) Mamdohu M. Nasser, Eman A. A. and Seddik S. W., *J. Appl. Polym. Sci.*, 61, (1996), 885-890.
- (3) S. N. Monteiro, R. J. S. Rodriguez and M. V. De Souza, *Adv. Perform. Mater.*, 5, (1998), 183-191.
- (4) C. N. Zarate, M. Aranguren and M. Reboledo, *J. Appl. Polym. Sci.*, 77, (2000), 1832-1840.
- (5) Mohammad L. Hassan, Roger M. Rowell, Naim A. F., Samira F.Y. and Alfred W.C., *J. Appl. Polym. Sci.*, 76, (2000), 575-586.
- (6) Jane M. F. Paiva and E. Frollini, *J. Appl. Polym. Sci.*, 83, (2002), 880-888.
- (7) K. Bilba, M.A. Arsene and A. Quensanga, *Cement Concrete Comp.*, 25, (2003), 91-96.
- (8) 福本・黒木・銘菊・中山, *機論*, 59-561, C(1993), 1547-1552.
- (9) Fukumoto I. and Mekaru S., *Proc. of PPS 12 Meeting*, (1996), 851.
- (10) 福本・銘菊, *プラスチック成形加工学会誌*, 10-11, (1998), 898-905.
- (11) Fukumoto I., Mekaru S. and Cao Y., *10th JSME/ASME Mater. & Proc. Conf.*, (2002), 507-510.