

研究活動

2

環境とファイブ科学

工芸科学研究科 木村 照夫

1. はじめに

科学技術の急速な発展とは裏腹に、地球の温暖化、増え続ける廃棄物、熱帯林の減少、オゾン層の破壊など地球環境は人間生活には決して優しいとは言えない状態に追い込まれている。このような状況を鑑み各産業界では環境を配慮した種々の取り組みを開始している。とくに廃棄物問題では、平成12年4月には容器包装リサイクル法（容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律）が本格施行され、さらには平成13年からは家電リサイクル法（特定家庭用機器再商品化法）が実施される見通しで、法律による縛りもきつくなってきた。繊維廃棄物に関するリサイクル関係の法案が国会に提出されるという

話は現在のところは聞かないが、繊維関連企業が率先して廃棄物問題に取り組まなければ近い将来に法律で強制化されるのは目に見えている。したがって繊維業界においても今後はますます環境調和型産業の構築に積極的に取り組む必要がある。

繊維材料は従来より環境保護には大いに貢献している。例えば、保温材や断熱材として用いられ省エネルギーに貢献し、衣服は悪環境から人体を守り、また、オイルフェンスなどの産業資材として海洋汚染を守ったり、土木関係では各種ネット材料として地盤の補強安定化や排水など、さらには砂漠の緑化推進で環境保護に活躍している。しかし、今後はますます環境に優しい繊維材料の開発と応用を進めることが必要であるとともに、前述の増え続ける廃棄物対策が重要な課題である。

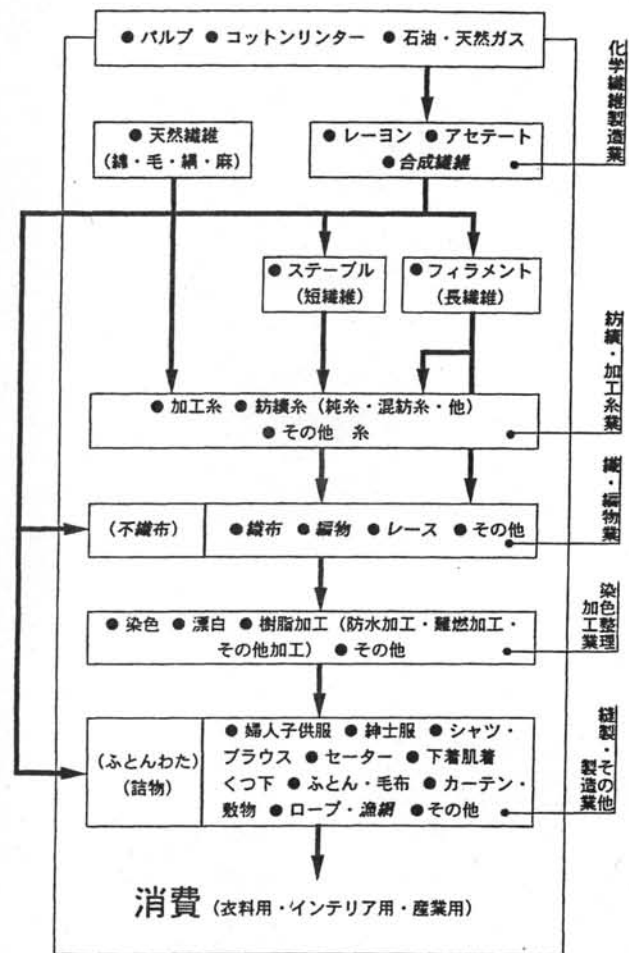


図1 繊維産業の構造

(資料：日本化学繊維協会「日本の化学繊維工業1990」)

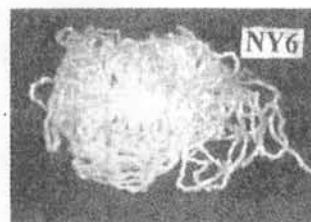
ここでは、廃棄物対策と資源の有効利用の観点から種々の繊維屑を再利用する筆者の試みについて報告する。

2. 繊維系廃棄物

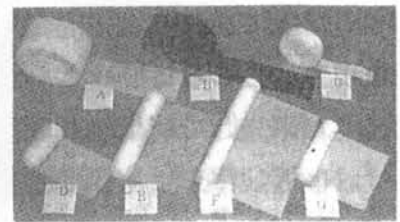
図1は繊維の製造から消費に至るまでの繊維産業の構造を示している。それぞれの工程では不良品や製造工程での端材が大量に生じ、一部は再利用されているものの、その多くは産業廃棄物として処分されている。図2は繊維関連企業から生じた繊維屑の一例を示している。図(a)は合成繊維織物の織り工程で生じる「捨て耳」と呼ばれる繊維屑である。図(b)は種々の不織布の幅揃えのために生じた裁断屑である。また(c)は同様に編み物レースの裁断屑で図(d)は漁網の製造工程で生じた繊維の余り屑である。これらはすべて合成繊維であるが、図(e)のように綿とポリエステルからなる混紡繊維屑、図(f)のような再生繊維（レーヨン）屑など種類、形状ともに様々である。さらに綿、麻などの天然繊維屑も発生し、着物業界の多い京都では絹織物の廃材が大量に発生し、処分されないままに山積みされている例も少なくない。一方、消費者からは毎日のように繊維系廃棄物が排出され、それらの多くは一般廃棄物として埋め立てあるいは焼却処分されているのが現状である。

データは少し古いがこれらの繊維系廃棄物は平成6年においては産業廃棄物が45～65万トンに、また一般廃棄物が175～200万トンにもおよんでいる。したがって、焼却による有毒ガスの発生や埋め立てによる環境破壊を防ぐには、これら廃棄物を資源として有効利用する手法の開発が必要不可欠である。

さらに、平成12年4月には前述の容器包装リサイクル法が本格施行されるに当たり、一部の繊維系包装材（例えば果物などに使われるネット状のもの）の廃棄物の再商品化も義務付けられ、リサイクル手法の確立はますます重要と



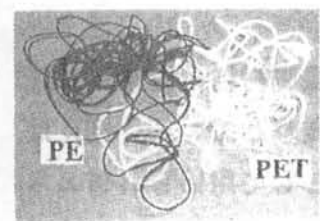
(a) 捨て耳



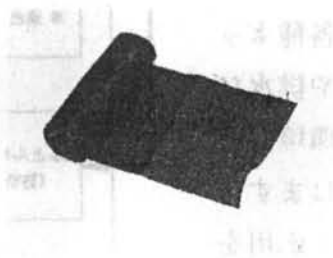
(b) 不織布裁断屑



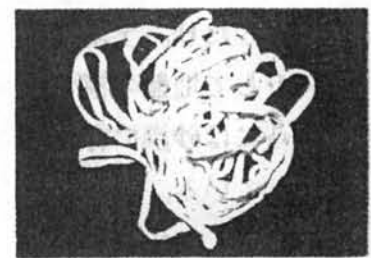
(c) 編みレース裁断屑



(d) 漁網屑



(e) 綿/PET混紡裁断屑



(f) レーヨン裁断屑

図2 種々の繊維屑

なっている。

3. リサイクルの方法

繊維屑のリサイクルの方法としては繊維屑をそのままウエスや断熱材として使用したり、熱可塑性の繊維屑であればプラスチック成形素材として用いる、いわゆるものからものへのマテリアルリサイクル、化学的手法によって重合前のモノマーに戻して再利用するケミカルリサイクル、および燃焼によって生じる熱を利用するサーマルリサイクルが考えられる。一般廃棄物に対しては回収・輸送、分別、分離、洗浄などリサイクルにとって多くの困難があるが、産業廃棄物に関しては素材が明確であり、汚れも少なく、廃棄物発生現場で処理すれば輸送の必要もなく、比較的にリサイクルが容易である。

筆者は従来より種々の繊維屑に対して繊維屑をプラスチック射出成形素材として用いる手法や圧縮によって断熱機能板を成形する手法、あるいは対流抑制材としての利用手法について検討を重ねている。ここでは、前者の繊維屑をプラスチック射出成形素材として用いる試みについて概説する。

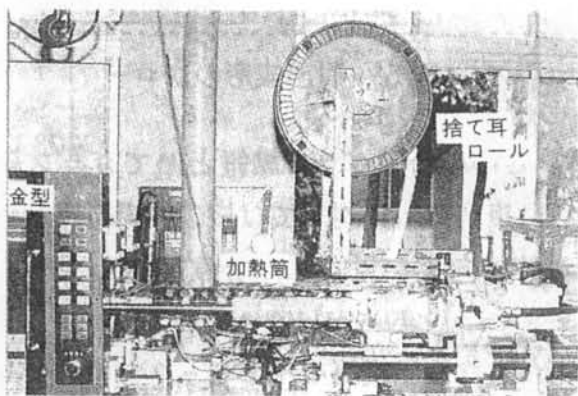


図3 射出成形機概観

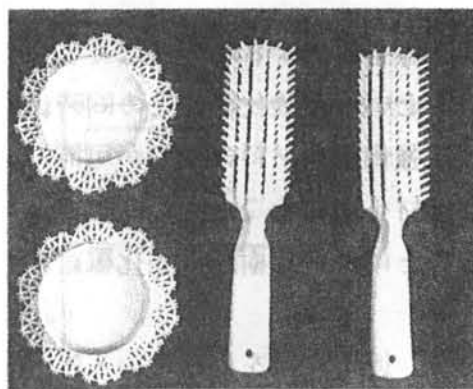


図4 成形品（コースタ、ヘアブラシ）

4. プラスチック射出成形素材としての再利用

通常のプラスチック射出成形にはペレット状の樹脂素材が用いられ、繊維屑のペレット化も可能である。しかしここでは材料への熱負荷の軽減および工程の簡素化のために図3に示すように繊維屑を巻き付けたロールを通常のペレット用成形機の供給口の上方にセットし、繊維屑を成形機に直接投入する手法を試みた。図4はポリエステル繊維屑を用いて成形したヘアブラシとコースターを示している。いずれも複雑な形状をしているが繊維屑から容易に成形が可能であった¹⁾。そこで種々の繊維屑の成形性を調べるために図2に示した熱可塑性のすべての繊維屑をはじめとして図5に示す種々の繊維屑を対象に図のようなフローで成形実験を行った。成形品はJISK7113に準じた引張試験片とした。実験の結果、熱可塑性の合成繊維屑、天然／合成混紡繊維屑は成形機に直接供給する手法で成形が可能であった²⁾。再生繊維や天然繊維屑はそれら単独では成形不可能であるが、合成織

繊維屑と同時供給することによって成形が可能であった³⁾。様々な用途に用いられる不織布においてはポリエステル (PET) / ナイロン (NY), ポリプロピレン (PP) / ポリエステル (PET) あるいはポリプロピレン (PP) / ポリエチレン (PE) などの異種樹脂素材が混合している場合も少なくない。このような繊維屑を各構成素材に分離しないで直接供給射出成形すると異種材料の相溶性が悪い場合には繊維屑を構成する素材単独の強度よりも低下することも少なくなかった。そのような場合には適当なバインダー樹脂を同時に成形機に投入することによって強度改善が得られた⁴⁾。また、成形品の強度上昇を期待する場合にはガラスやカーボンといった強化繊維との同時供給で、繊維強化複合材料の成形が可能であった⁵⁾。この場合、ガラス繊維としてガラス繊維織物の端材を用いることも可能であった。さらに複合材料に対しては接着性繊維を同時供給することによって樹脂 / 強化繊維界面の接着性に向上が見られ、強度改善につながった⁶⁾。

その他、近年注目を浴びている生分解性樹脂からなる繊維屑をマトリックス素材として、また綿、麻、絹などの天然繊維屑を強化繊維として用いることによって生分解性の複合材料も成形可能であった⁷⁾。さらには合成繊維屑と金属屑 (例えばアルミ箔や銅線) とを成形機に同時供給すればプラスチックと金属の両者の特徴をもつ材料の成形も可能であり⁸⁾、このような成形手法は繊維屑のみならず金属屑の再利用にも大いに役立つことになる。以下には成形品の機械的特性について幾つかの例を示すことにする。

5. リサイクル材の機械的特性

図6は成形品の機械的性質を向上させる一手段としてマトリックスとなるポリエステル繊維屑と強化繊維 (ガラス繊維) を成形機に同時供給している様子を示している。いずれの繊維も供給前は連続状であるがポリエステルは加熱筒内で熔融し、ガラス繊維は短く切断され、お

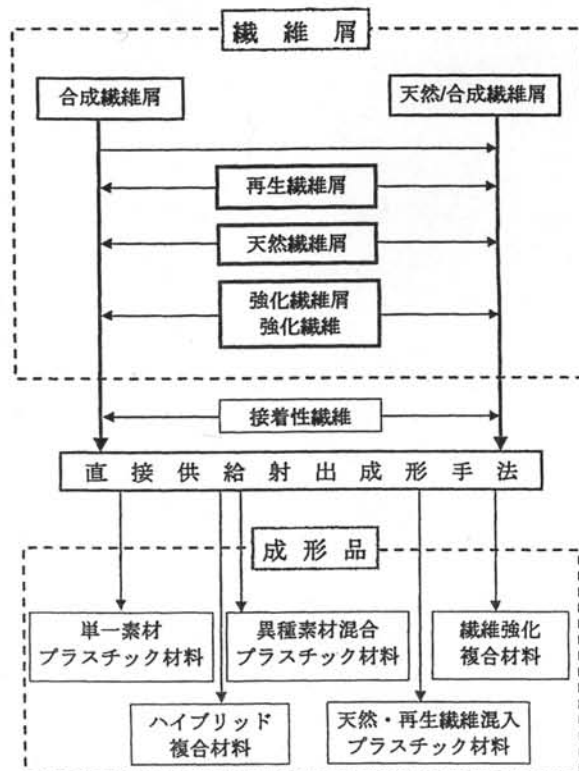


図5 射出成形のフロー



図6 成形機供給

互いが混合される。ガラス繊維長はスクリュウ形状や成形条件によって左右されるが市販の複合材料ペレットの繊維長に比べて長い繊維が期待できる。強化繊維の含有率は供給時のお互いの繊維の束ね本数を調節することによって自由に変えることができる。図7は本研究で対象とした成形品である引張試験片を示している。成形品の機械的性質について図



図7 射出成形品（引張試験片）

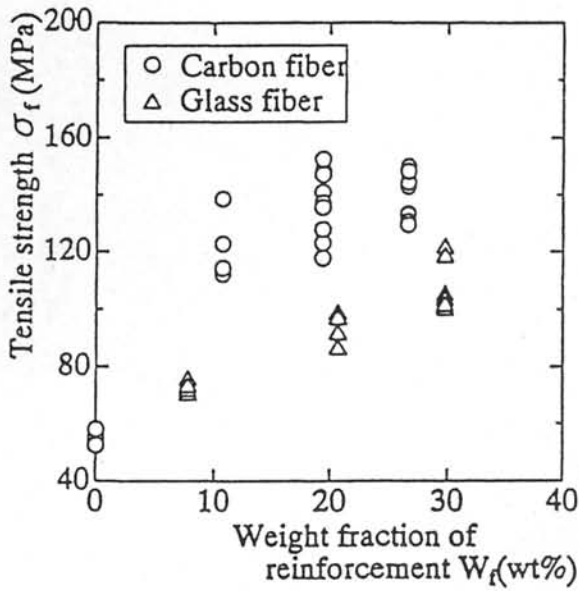


図8 引張強度 (PET/Glass, PET/Carbon)

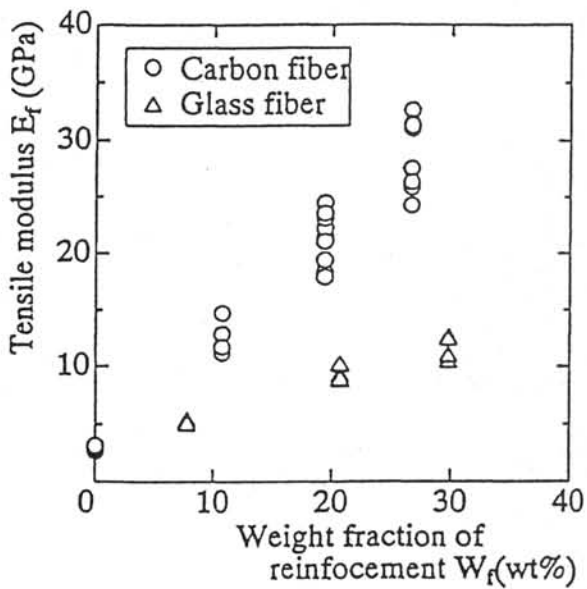


図9 引張弾性率 (PET/Glass, PET/Carbon)

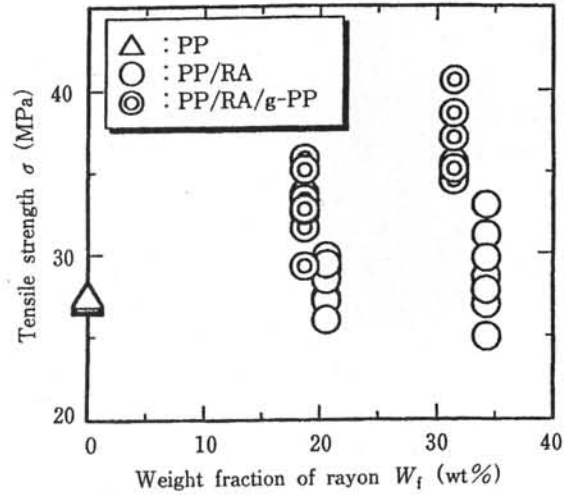


図10 引張強度 (PP/RA)

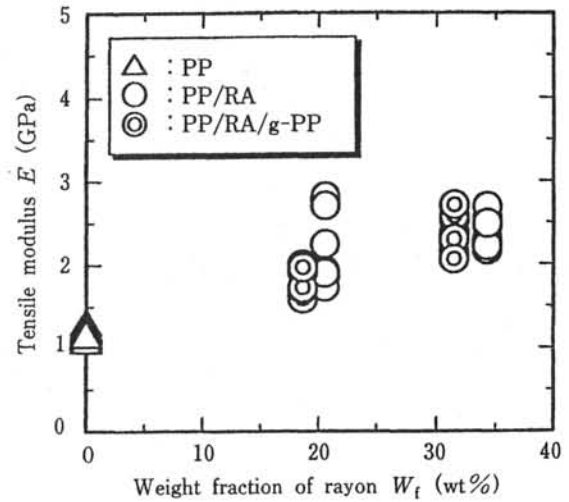


図11 引張弾性率 (PP/RA)

8, 図9はそれぞれ強化繊維の含有率と引張強度および引張弾性率を示している。図には強化繊維として炭素繊維を用いた場合の結果についても示している。強化繊維を複合化しない場合のポリエステルみの結果 ($W_f = 0\%$) はポリエステル樹脂の特性の文献値とほぼ一致することが確かめられた。図に示されるように含有率の増加とともに強度, 弾性率ともに向上し, とくに炭素繊維を用いた場合に補強効果が顕著である。値には多少ばらつきはあるが, 本成形手法で繊維屑から複合材料が成形できることが明らかである。ガラス繊維と炭素繊維を適当に配合して同時供給すれば種々の特性をもつハイブリッド複合材料も容易に成形できる。また, 合成繊維屑の素材によって種々のマトリックスの複合材料の成形が可能である。

図10, 図11は強化繊維にレーヨン繊維屑 (RA) を, またマトリックスとしてポリプロピレン不織布屑 (PP) を用いた場合の結果を示している。図10より明らかかなように○印で示される PP/RA の強度は RA の含有率が増加しても殆ど向上が見られない。これは PP と RA の界面接着不良が原因であることが破断面の顕微鏡観察から明らかになった。そこで接着性樹脂として無水マレイン酸変性した PP (g-PP) を添加した結果が◎印で示してある。g-PP の添加により強度に大きな向上が得られている。弾性率に関しては g-PP の添加の有無に関わらず RA の含有率の増加とともに大きな向上が得られる。このようにガラス繊維や炭素繊維ほど大きな補強効果は得られ

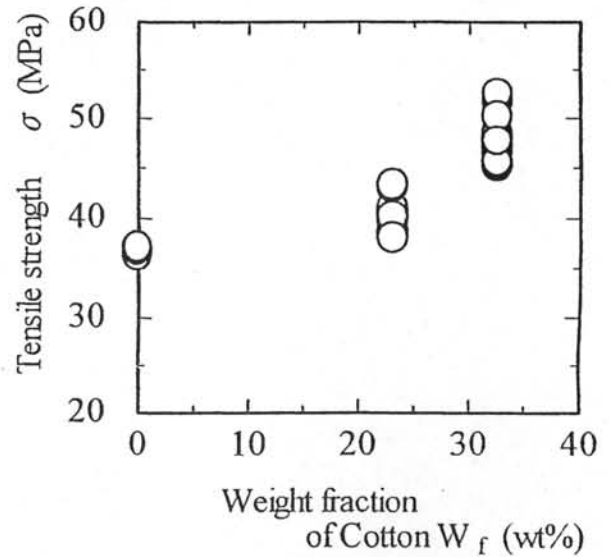


図12 引張強度 (PBS/CO)

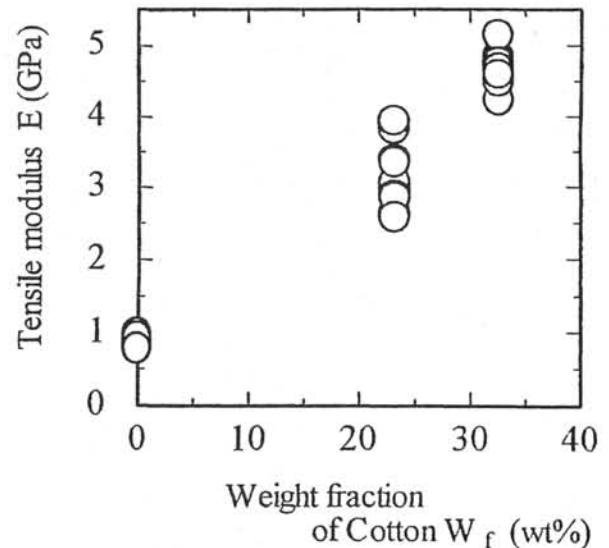


図13 引張弾性率 (PBS/CO)

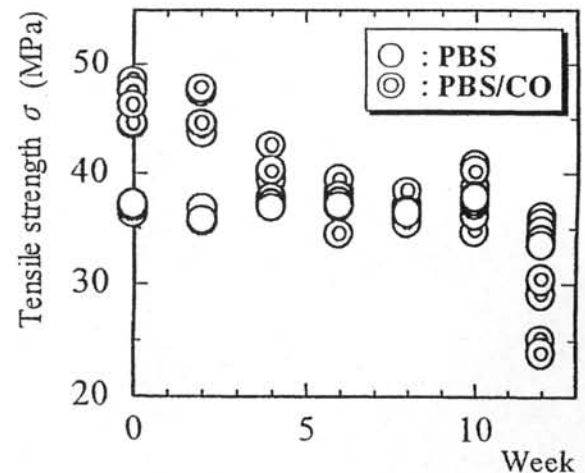


図14 土壌埋蔵日数と強度の関係 (PBS/CO)

ないにせよ、レーヨン繊維屑は複合材料の強化材として充分再利用可能であることがわかる。また、今後自動車内装材や家電製品における樹脂の統一化によってますます使用量が増えるであろうPPやPEといったポリオレフィン系繊維屑と他の物質を複合化させる場合には接着性樹脂の利用が重要であると言える。図12、図13は生分解性樹脂（ポリブチレンサクシネート；PBS）からなる不織布裁断屑をマトリックスに、また、綿屑（CO）を強化材に用いて射出成形した生分解性複合材料の引張強度と弾性率を示している。前述までの他の繊維屑の組み合わせと同様に強化繊維の含有率の増加とともに強度、弾性率ともに大きな向上が得られる。身近な天然繊維にはここで示した綿の他に、麻や絹あるいはケナフや藤など種々存在し、これらの熱劣化温度がマトリックス樹脂の融点よりも高ければ、強化繊維としての利用が充分可能と思われる。

図14はPBSに綿を複合化したことによる生分解性への影響を調べたものである。横軸は成形品の土壌中への放置日数であり、縦軸には引張強度をとっている。図より明らかなようにPBSのみを成形素材とした場合は放置日数が増加しても強度に殆ど変化はないが、綿を混入した場合（PBS/CO）は放置日数が増加するにしたがって早い時期に強度が大きく減少している。これは、PBS/CO複合材料では綿とPBSとの界面接着が完全でないために微少な隙間が存在し、このような隙間は綿繊維表面に沿って材料内部まで連なっており、微生物に接するPBS表面積が増加するとともに初期の段階で材料内部にまで生分解が進むためと考えられる。このように天然繊維で強化した生分解性複合材料は使用時には強度が大きく、廃棄時には早く生分解が進むという利点がある。しかし、生分解性複合材料については使用時の吸湿性や耐久性など今後の検討課題が数多く残っている。

6. おわりに

繊維屑を直接供給する射出成形手法で種々の繊維屑をプラスチック成形の素材として再利用可能であることが明らかになった。また、素材の組み合わせを考慮することによって興味ある特性の成形品が種々得られた。しかし、ここで示した成形手法が即実用化に結びつくかと言えばノーである。通常のリサイクルの概念ではコストを押さえて品質をどこまでバージン材に近づけるかに重点が置かれているが、リサイクル材にバージン材と同等の特性を求めるのは本質的ではない。リサイクル材をひとつの新材料としてとらえ、その特性に見合った利用法を考える必要がある。リサイクル材特有の利点を追求し、それを活かす工夫が必要である。したがってリサイクルの可否は技術的な問題よりも用途開発が鍵を握っているのではなかろうか。また、各種成形品において既存材料にこだわることなく勇氣をもって再生材料に置き換える姿勢が必要である。

参考文献

- 1) 木村, 他3名, 繊維工業研究協会報告, 5 (1995) 27-33
- 2) 木村, 他2名, 繊維学会誌, 53-9 (1997) 400-407

- 3) 木村, 他 3 名, 成形加工, 10-11 (1998) 906-912
- 4) T. Kimura, et al., Adv. Composite Mater., 7-4 (1998) 403-409
- 5) T. Kimura, et al., J. of Thermoplastic Composite Materials, 10 (1997) 573-584
- 6) 木村, 他 3 名, 成形加工, 9-6 (1997) 442-448
- 7) 木村, 他 3 名, 材料, 49-1 (2000) 111-116
- 8) T. Kimura, et al., Proc. of ATC5, 2 (1999) 1180-1183

(工芸科学研究科先端ファイブ科学専攻 教授)