

福井県産地合繊織物繊維屑のマテリアルリサイクルの試み

A Proposal on Material Recycle of Waste Cord of Synthetic Fabrics from Fukui

木村 照夫*

(福井大学工学部機械工学科)

I. はじめに

江戸時代からの絹織物産地としての伝統を受け継ぎ、現在でも県製造業出荷額に占める繊維製品出荷額の占める割合が23.6% (平成5年度)¹⁾に達するほど福井県では繊維産業が盛んである。中でも合成長繊維織物 (合繊織物) 生産量は全国の47.4% (平成5年度)¹⁾を占めており、福井県は世界最大級の合繊織物産地として位置付けられている。このような合繊織物の製造工程においては「捨て耳」と呼ばれる大量の繊維屑が生じるが、従来まではその殆どは焼却するか地中に埋められてきた。しかし近年の地球環境問題や産業廃棄物処理問題に対する世の中の関心の高まりと共にこの繊維屑の処理方法が繊維業界で大きな問題となっている。このような状況を鑑み、筆者らは合成繊維屑の再利用手法についての研究を行っているが、ここでは現在までに得られた知見を報告する。

II. 合繊織物と繊維屑

図1は合成長繊維織物を製造するWater Jet織機 (WJ織機) を示している。このような織機を用いた織物の製造工程においては織布端部の耳崩れを防止するために特殊機構が施され²⁾「捨て耳」と呼ばれる繊維屑が生じる。これは織物端部に存在する連続的なたて糸 (キャッチャー糸) に織物端部で切断された不連続な横糸が絡んだものである。このような繊維屑は織機1台当たり月間15~20kg発生すると言われており、合繊織物関連のWJ織機が現在福井県に1万数千台あることを考慮すると、200~250t/月もの繊維屑が生じる計算になる。図2はある織物工場で各織機から回収された繊維屑が放置されている様子を示しているが、このような繊維屑を焼却するためには高額の焼却炉を必要と

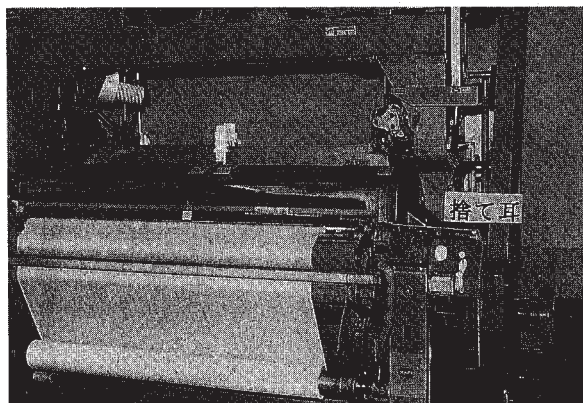


図1 WJ織機



図2 回収された捨て耳

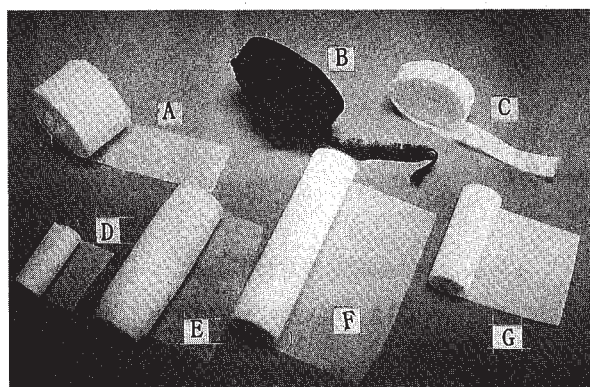
(Key words: Recycle, Waste cord, Synthetic fabrics, Injection molding, Composite material)

* Teruo Kimura
Faculty of Engineering, Fukui University

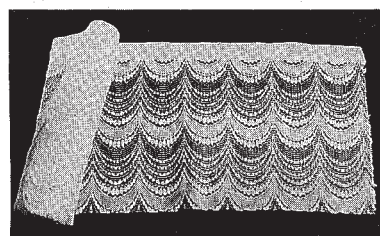
し、また廃棄物業者に処理を委託する場合においても数万円/トンの回収費が必要とされている。したがって環境に優しくかつ効果的な処理方法の確立が急務となっている。このような合成繊維の繊維屑の発生は本研究で対象とする織物製造工程に限られたものではなく、図3に示すように多方面に用途をもつ不織布やレースに代表される編み物等の製造工程などでも大量に発生し、その合計は福井県の合成繊維原糸の消費量が94,662ト(平成5年度)¹⁾であることから莫大な量であることが推察される。

Ⅲ. リサイクル手法

繊維屑は現在ではその殆どが前述のように焼却するか地中に埋められているが、焼却による煤煙や、埋め立てによる環境破壊等が問題視され、繊維屑の再利用(広義のリサイクル)手法の検討が必要となってきた。合成繊維屑のリサイクル手法としては大きく分けて、材料として再利用するマテリアルリサイクル、燃料として用いるサーマルリサイクルおよび油に戻して利用するケミカルリサイクルが考えられ、各方面で研究が進められている。しかし、経済的、技術的困難さにより実用化された有効なリサイクル事例は現状では見あたらない。本報ではとくに繊維屑のマテリアルリサイクルに着目し繊維屑再利用の可能性を追求した筆者らの事例を報告する。合成繊維屑のマテリアルリサイクルとしては、繊維屑をそのままクッション材や断熱材として用いる方法や繊維屑を一旦熔融・固化してペレット化し、プラスチック製品や繊維の原料として用いる方法等が容易に考えられる。しかし、リサイクルは一般にコストがかかり、わざわざ廃棄物を用いることの経済的利点が少なく、リサイクル社会の実現の妨げになっている。従ってリサイクル手法を考える場合にはその材料特有の付加価値を設ける必要があるように思われる。例えば、繊維屑を断熱材として用いる場合には通常は最初に構造物が存在し、その空間に繊維屑を挿入するのが一般的であるが、合成繊維の熱可塑性に着目すると繊維屑集合体の一部表面のみを熔融したのち圧縮成形することによって断熱材一体型の構造物の実現が可能になる。一方、繊維屑をプラスチック製品の原料として用いる場合、射出成形あるいは押出成形用に一旦ペレット化すると製造工程の増加とともに樹脂の熱劣化の原因にもなり、通常のバージン成形原料を用いた場合に対する利点が見いだせない。しかし、繊維屑をペレット化することなく直接プラスチック製品の原料として使用できれば繊維屑の再利用の有効性も見いだせるものと考えられる。このような状況において繊維屑を素材として断熱性にすぐれた板材の圧縮成形を試みた例³⁾と繊維屑を直接供給することによるプラスチック射出成形を試みた例⁴⁾を以下に示す。さらに、近年は多様な工学的要求に対して新素材の開発が各方面でなされ、優れた機械的性質をもつ材料の一つとして、繊維強化複合材料の開発研究も数多く見られる。このような繊維強化複合材料の発展には目を見張るものがあるが、近年の環境問題に対する関心の高まりとともに、リサイクルが容易な熱可塑性樹脂をマトリックスとする複合材料が注目されるようになってきた。本研究で取り扱う合成繊維の捨て耳は熱可塑性



(a) 不織布繊維屑



(b) 編み物レース繊維屑

A: NY6/NY66/NY12 B: PET/NY6/PA
 C: PP/PE D: PE/PET E: PP
 F: PET G: NY6

図3 各種繊維屑

樹脂を素材としており、したがって、捨て耳をマトリックス素材とする複合材料の成形が可能になれば、繊維層のリサイクル製品の用途範囲が大いに広がるものと考えられる。そこで合成繊維層をマトリックス素材とし、繊維強化複合材料を試作した結果⁵⁾についても合わせて示す。一般にリサイクルシステムを確立する場合、廃棄物の回収、洗浄および分別といった前段階に相当の労力を費やすことになるが、本研究で対象とする織物製造工程で生じる繊維層は素材が明確であり、汚れも少なく、自工場にリサイクルシステムを構築すれば回収の手間も省ける利点がある。

IV. 断熱板材の圧縮成形

1. 成形方法

福井県における合繊維物の繊維層に限ると、その約8割がポリエステル繊維層である。本研究で提案する圧縮成形原理は繊維素材が熱可塑性であればいずれの場合も同様であり、ここではポリエステル繊維層を用いた場合について示す。繊維集合体の表面付近だけを溶融させる手段として本研究ではポリエステル繊維の赤外線吸収波長帯を考慮して遠赤外線加熱を試みた。すなわち成形方法の概略は次の通りである。まず、図4に示すような、上下に表1に示す仕様のヒーターを配置した炉内の中央部に図5のような所定量の繊維層を挿入した上蓋のないアルミ製の金型を置き、遠赤外線により繊維集合体の上表面を適当量溶融させる(工程A)。その後、炉外で溶融面より圧縮成形する(工程B)。次に素材の上下を入れ替え、再び繊維集合体の上表面より遠赤外線加熱し(工程C)、適当量溶融後、炉外で圧縮成形する(工程D)。本報では研究の第一歩として成形工程中の材料の様子と材料各所の温度変動を測定した結果について述べる。温度測定には素線径0.2mmのクロメル-アルメル熱電対を用いた。

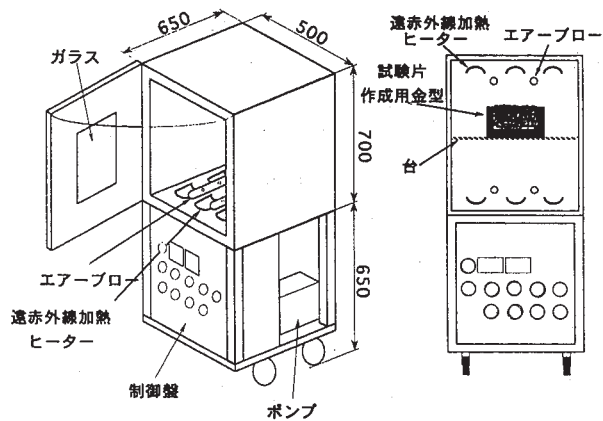


図4 加熱炉外観

表1 加熱炉仕様

温度	炉内雰囲気温度 : MAX 300℃
	ヒーター温度 : MAX 500℃
ヒーター	遠赤外線ヒーター”インフラスティン”
ヒーター電力	上面 200V400W 3ヶ連×3台=3.6kW
	下面 200V400W 3ヶ連×3台=3.6kW
	合計 7.2kW 熱電対ヒーター2ヶ含む
温度調節方式	ON-OFF上限比例式
温度制御法	ヒーター温度または雰囲気温度
加熱炉外寸法	500mm×650×mm1350mm

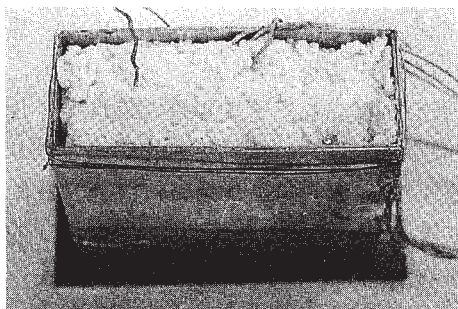


図5 成形用金型

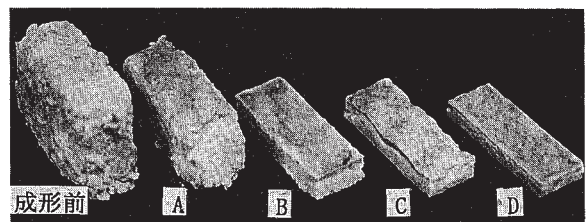


図6 各工程の材料の様子

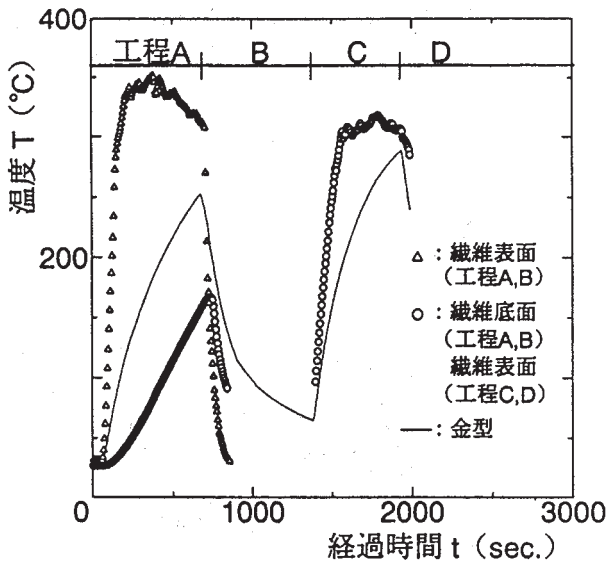


図7 成形過程中の温度変動

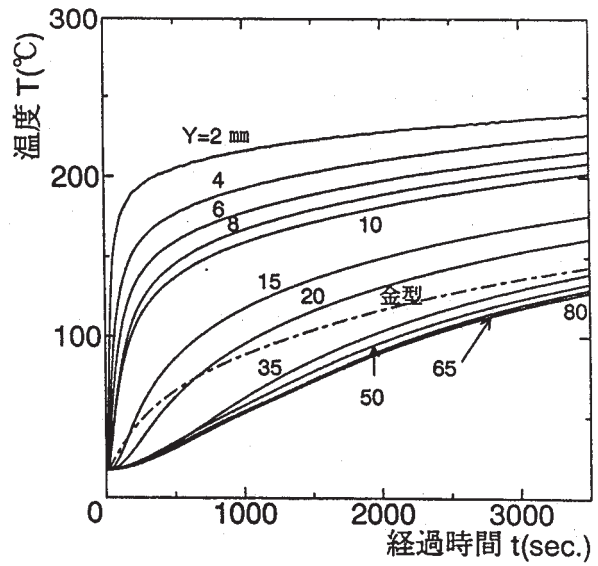


図8 繊維集合体各所の温度変動

2. 結果と考察

図6に完成品に至るまでの各工程での材料の様子を示す。これは各工程終了時にその時点の様子を炉外で写真撮影したものである。また、図7は成形過程中的繊維集合体上下表面の約1mm内部の温度と金型表面温度を示している。図中のA~Dは前述の工程A~Dに対応している。一例として75gのポリエステル繊維層を金型に挿入し(空隙率約91%)、ヒーター温度450°Cで加熱を開始すると図7に示すように繊維上部表面付近の温度(△印)はおよそ350°Cまで急激に上昇し繊維層が溶融する。ここでは10分間の加熱で表面の約25mmの繊維層が溶融した。そのときの様子が図6のAである。その後炉外で3.9MPaで圧縮した結果が同図Bで、表面が平滑化されるとともに初期の体積の約23%まで圧縮されている。資料の上下を入れ替え再び加熱溶融し(同図C)炉外で4.9MPaで圧縮成形すると同図Dのように両表面がプラスチック板化され、内部は繊維状に保たれた板材が完成する。このときの板厚は15mmとなり、初期の高さの約16%にまで圧縮されている。このように本研究で提案した方法により断熱板の成形が可能であることがわかったが、表面板厚、内部繊維空隙率等を制御するためには繊維集合体の伝熱特性を把握する必要がある。図8、

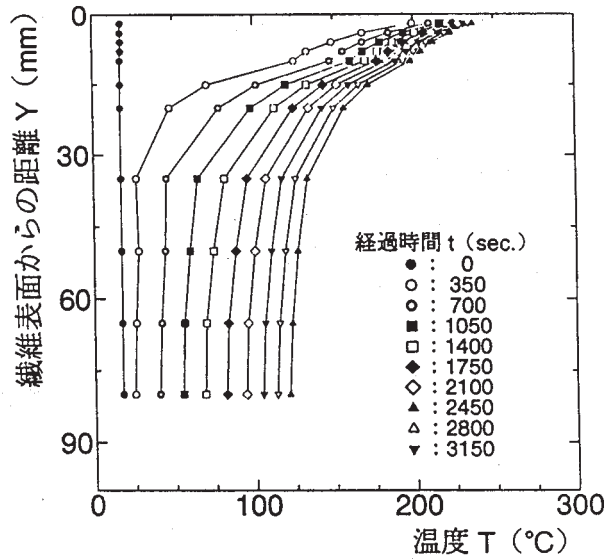


図9 繊維集合体温度分布の変動

図8、図9は試みに金型内の数カ所に熱電対を配置し、繊維が溶融しない程度のヒーター温度(300°C)で加熱した場合の繊維集合体内の温度測定結果である。図8は各測温点の温度の時間的変動を、また図9は任意の時間における温度分布を示している。図中のYは繊維集合体の上表面より下方に計った距離である。両図より知られる様に、加熱開始とともに繊維表面付近は急激に温度上昇するのに対し、Yの大きな位置では温度上昇が緩やかである。図では表面より約20mmの範囲でとくに温度上昇が大きく、繊維集合体の表面付近のみを短時間に溶融させる目的に、遠赤外線加熱が有効であることがわかる。

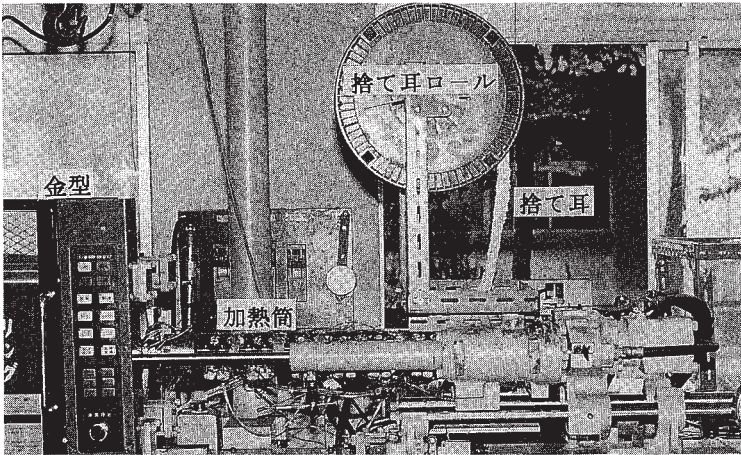


図10 射出成形機外観

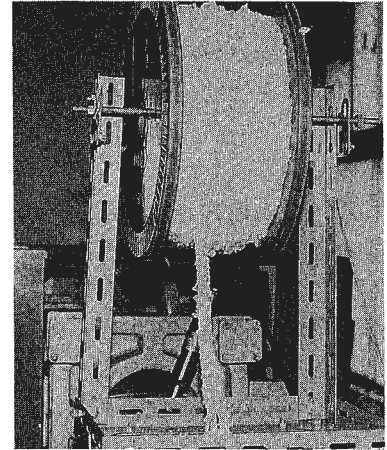


図11 成形機供給口

V. プラスチック射出成形

1. 成形方法

捨て耳を成形素材としてプラスチック製品化する方法には圧縮成形、押出成形など、種々の方法が考えられるが、伝熱特性に劣る捨て耳を均一に熔融し、迅速に固化させるためには加熱筒内で混練り・加熱熔融し、金型内で冷却固化させる射出成形法が好ましいと考えられる。そこで、本研究では捨て耳を成形素材とするプラスチック射出成形を試みた。図10は成形実験に使用した射出成形機の外観を示している。この成形機は加熱筒、スクリュとも、成形素材としてペレット状の樹脂を用いるときのことで、現在通常のプラスチック成形に使用されているものをそのまま用いている。本研究では、コスト面、あるいは工程の簡素化を考慮して捨て耳をペレット化することなく、図11に示すように乾燥させた捨て耳を数本束ねて巻き付けたロールを成形機の素材供給口上方にセットし、捨て耳端部を供給口より直接供給する方法を試みた。実験の結果、成形開始時に捨て耳端部を供給口に軽く挿入することにより、回転するスクリュが捨て耳を咬み込み、後は自動的に捨て耳が成形機に供給されるとともにプラスチック製品の連続成形が可能となった。

2. 結果と考察

図12はポリエステル(PET)繊維の捨て耳を成形素材として成形された、ヘアブラシとコースターを示している。いずれの製品も部分的に細かな形状をもつ構造をしているが、捨て耳を直接供給する方法においても外見上は充分満足のいく成形品が得られることがわかる。したがって、機械的性質などの製品特性がバージン材（ここでは通常の成形に用いられるペレット状の樹脂を意味する）を用いた場合に比較して見劣りしなければ、バージン材の代わりにリサイクル材（捨て耳）が使用でき、資源の有効利用と廃棄物対策に役立つことは言うまでもない。そこで、バージン材とリサイクル材からなる成形品の機械的性質を比較した。ここでの成形品は図13に示すJIS K7113に準じた寸法の引張試験片で、表2に成形品の引張強度の結果を示す。捨て耳を成形素材とした成形品の強度は若干のばらつきはあるもののバージン材（ペレット）を用いた場合の成形品の強度にほぼ匹敵している。したがって、多少のばらつきがあっても支障のないプラスチック製品に対しては、本研究の方法で、捨て耳を成形素材として再利用することが充分可能であると言える。

VI. 繊維強化複合材料の射出成形

1. 成形方法

通常、射出成形法により繊維強化複合材料を成形する場合にはあらかじめ短繊維を混入した樹脂ペ

レットが成形素材として用いられる。したがって繊維長はペレットの大きさによって制限を受け、長繊維強化の複合材料の成形には射出成形法は不向きであるとされている。しかし、本研究の方法によれば、合繊維物の捨て耳と同様に強化繊維を連続繊維の状態で成形機に直接供給可能であり、このような場合には強化繊維長は成形過程中に生じる繊維の切断状態に依存することになる。図14は強化繊維と捨て耳の供給状態を示している。すなわち、ここでは合繊維物の捨て耳と強化繊維とを別個のロールに巻き付けたものを、供給口の上方にセットし、強化繊維と捨て耳の端部を同時に成形機に供給する方法を考えた。このような方法においても先の捨て耳だけを供給する場合と同様、成形開始時に成形機の供給口に捨て耳と強化繊維の端部を軽く押し込むことによって、後は自動的かつ連続的に複合材料の成形が可能となった。本方法によれば捨て耳と強化繊維の束ねる本数を適当に選ぶことによって、容易に任意の繊維含有率の複合材料の成形が可能となる。さらに強化繊維としてガラス繊維と炭素繊維を適当に組み合わせて供給することによってハイブリッド複合材料の射出成形も容易に行える。以下にこのような方法で成形された成形品の機械的性質（引張強度と弾性率）を示す。

2. 結果と考察

図15、図16はマトリックス素材としてポリエステル繊維の捨て耳を用い、強化繊維としてそれぞれガラス繊維（鐘紡 G37 1/0）および炭素繊維（東レ トレカ T400HB）を用いた場合の成形品の引張強度と弾性率を、横軸に成形機供給時の強化繊維の体積含有率をとって示している。図より明らかなように強化繊維の種類に関わらず、繊維含有率の増加とともに、強度、弾性率ともに向上し、その補強効果は炭素繊維の場合にとくに顕著に現れている。強度の結果は弾性率に比べてとくに含有率が大きくなるほどばらつ

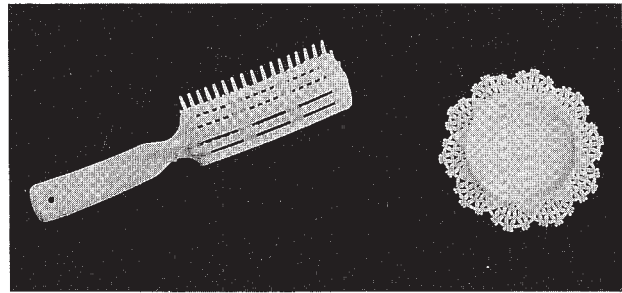


図12 成形されたヘアブラシとコースター

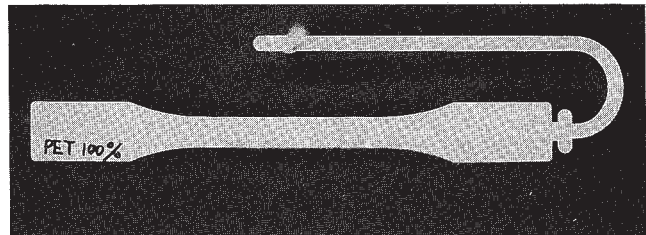


図13 成形された引張試験片

表2 引張強度

番号	（MPa）	
	バージンペレット	ポリエステル繊維屑
1	55.6	52.1
2	55.6	56.1
3	55.4	52.9
4	56.0	53.4
5	54.9	53.2
平均	55.5	53.5
標準偏差	0.4	1.4

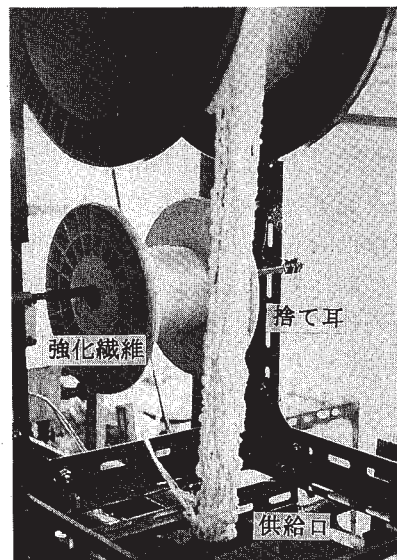


図14 供給状態

きも大きくなるが、これは、強化繊維の量が多くなるほど成形品中の繊維の分散が悪くなることが一因であると考えられる。

図17、図18は上記の2種類の強化繊維を同時に供給したハイブリッド複合材料の強度と弾性率を示している。ここに示す結果は、強化繊維（ガラス繊維+炭素繊維）の質量含有率を約20wt%一定とし、ガラス繊維と炭素繊維の混合割合を種々変化させた場合のものであり、図の横軸は強化繊維中に占める炭素繊維の質量割合を示している。図より明らかなように、強度、弾性率にすぐれた炭素繊維の含有率が増加するとともに、複合材料の強度と弾性率に大きな向上が得られる。以上のように合繊維物の捨て耳を複合材料のマトリックス素材として再利用することが可能であるといえる。

VII. おわりに

本報告では、福井県産地合繊維物繊維廃棄物のマテリアルリサイクル手法に対する筆者らの取り組みの現状を報告したが、同様の手法により、不織布やレース製造工程で生じる繊維層の再利用が可能

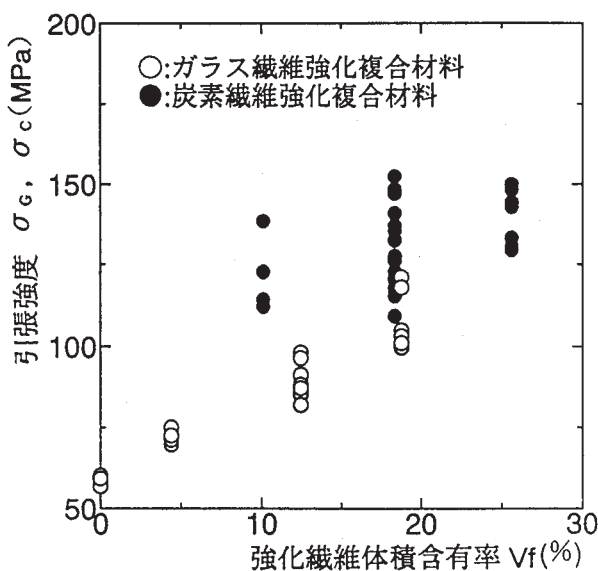


図15 繊維強化複合材料の引張強度

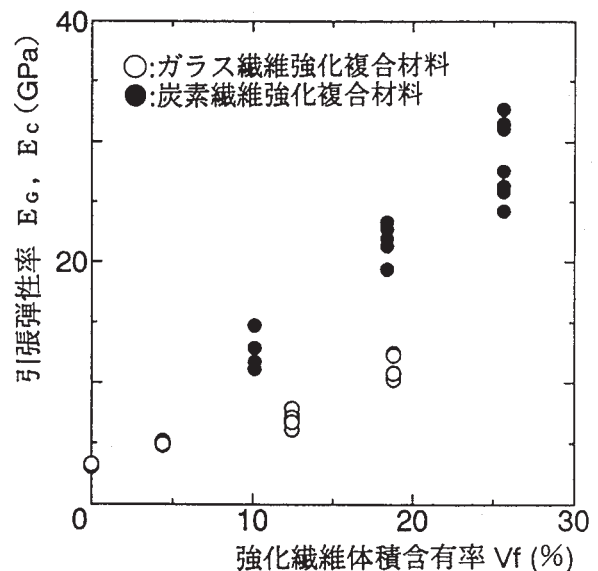


図16 繊維強化複合材料の引張弾性率

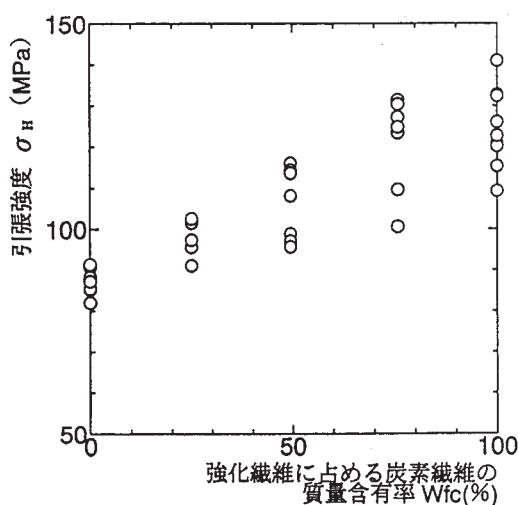


図17 ハイブリッド複合材料の引張強度

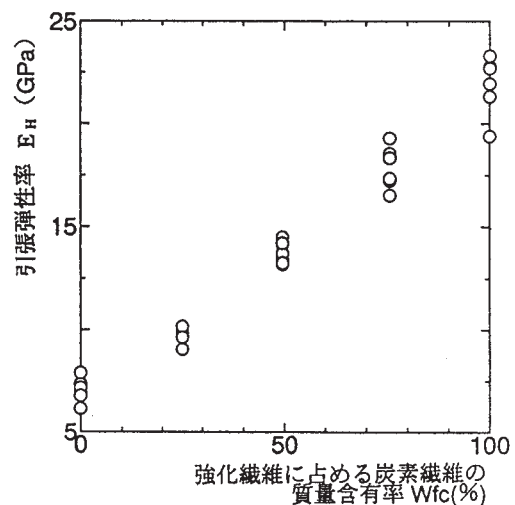


図18 ハイブリッド複合材料の引張弾性率

であることが確かめられている。いずれの場合も、バージン材を用いた場合に比べて機械的性質のばらつきが大きくなる欠点があり、リサイクル品の用途開発のためにはばらつきを少なくする成形条件の吟味が必要である。

今後はますます繊維層のリサイクル化が要求される様になるものと考えられるが、リサイクル手法の開発とともに一方では廃棄物を生じさせない製造方法の検討が必要である。

参考文献

- 1) 福井県産業情報センター、1994、福井県繊維産業生産の動き（平成5年1月～12月）
- 2) 中村 耀、1992、繊維の実際知識、154、東洋経済新報社。
- 3) 木村ら、1995、合繊織物捨て耳のマトリアルリサイクル—圧縮成形による断熱板の試作—、第48回日本繊維機械学会年次大会講演論文集、226。
- 4) 木村ら、1993、製織工程で生じる繊維の捨て耳を用いたリサイクル射出成形の試み、成形加工シンポジア '93、138。
- 5) 木村ら、1994、合成繊維層をマトリックス材料とする繊維強化複合材料の射出成形、成形加工、6(12)、896。