

FRP 廃棄物の再利用技術に関する研究 (第一報)

- FRP 砕成物の特性 -

大市 貴志, 山岸 暢, 吉田 光則

Study on recycling technology of waste FRP (Part I)

- Characteristic of pulverized FRP -

Takashi OHICHI, Tohru YAMAGISHI, Mitunori YOSHIDA

抄 録

FRPは、熱可塑性樹脂と異なり熱溶解ができず、強化繊維や充填材等が複合化されているためリサイクルが比較的しにくい材料である。廃棄物の減量化と再資源化が社会的に大きな課題となっている中で、FRP廃棄物の再利用技術についても対応が求められている。

本研究では、各種成形方法で製造されたFRP廃棄物を破碎・粉碎し、その砕成物を充填材や強化材として再利用する技術について検討を行った。その結果、一般的な回転式剪断粉碎機でもFRP廃棄物を数mm程度に粉碎が可能であったが、FRP廃棄物の原料組成により砕成物の粒径分布や形状などの特性が大きく異なっていた。そのため、それらに適したリサイクル方法を検討しなければならないことが明らかになった。

キーワード：繊維強化プラスチック，廃棄物，再利用，粉碎

1. はじめに

FRP (Fiber Reinforced Plastics : 繊維強化プラスチック) は、「軽くて強い、錆びず、腐らず」という優れた性質と成形が容易であるという特徴から建築資材、住宅機材、船舶等をはじめ、あらゆる産業分野において工業製品や部材の材料として発展してきた。しかしながら、FRPは、発泡スチロールなどの熱可塑性樹脂と異なり熱溶解や薬液による溶解ができず、また、ガラス繊維や充填材等が複合化されているため、リサイクルが比較的行われにくい材料である。現状ではその大部分が産業廃棄物として解体・破碎後埋め立て処分されているが、廃棄物の減量化と再資源化が社会的に重要な課題となっている中で、他の廃棄物と同様にFRP廃棄物の再利用技術についての対応が求められている。

FRPのリサイクル方法の一つにメカニカルリサイクルがある。これは、廃棄されたFRP製品を機械的に粉碎し、この砕成物を充填材や強化材などとして再利用する方法である。この方法は、リサイクルに伴う副生成物が発生せず、有用なリサイクル方法であるが、再利用するためにはFRP砕成物の特性に適した成形方法や用途等の検討が必要である。

FRPは、その製品の大きさ、形状や要求性能に合わせてハンドレイアップ成形、レジンインジェクション成形、プレス成形や引抜成形など多種類の成形方法があり、成形方法によってFRPの原料組成(樹脂含有率、充填材の種類等)やガラス繊維基材の形態等の特性が大きく異なっている。そのため、砕成物の形状や特性は、その成形方法の種類により大きく異なることが考えられる。

本研究では、FRP廃棄物の再資源化を目的に、各種成形方法で製造されたFRP製品を回転式剪断粉碎機を用いて粉碎し、得られた砕成物の粒径分布や形状などの粉体特性の把握を試みた。

2. 実験方法

2.1 FRP 試料

粉碎に供したFRP板の組成を表1に示す。ハンドレイアップ成形品は、マトリックス樹脂に一般タイプの不飽和ポリエステル樹脂を用い、ガラス繊維基材としてチョップドストランドマット(以下マットとする)とロービングクロス(以下クロスとする)を交互に積層した厚さ約5mmの平板(以

下MR-HLUとする)およびマット4層を積層した厚さ約4mmの平板(以下M-HLUとする)を使用した。プレス成形品として汎用タイプのシートモルディングコンパウンド(以下SMCとする)およびパルクモルディングコンパウンド(以下BMCとする)を用いた成形品を使用した。SMCについては、製品の板厚の違いによる砕成物への影響を検討するため、厚さ3mm、5mmおよび10mmの平板を使用した。引抜成形品(以下Pultとする)は、ローピングのみを一方方向に引き揃えた断面が15×4mmの平板を使用した。

表1 各種成形方法で作られたFRPの組成

FRPの種類	ハンドレイアップ成形品		プレス成形品		引抜成形品
	MR-HLU	M-HLU	SMC	BMC	Pult
ガラス繊維	ローピングクロス連続 チョップドストランドマット 約50mm	約50mm	25.4mm	6.4mm	ローピング連続
含有率	45wt%	35wt%	30wt%	20wt%	70wt%
樹脂含有率	55wt%	65wt%	35wt%	30wt%	25wt%
充填材含有率	0wt%	0wt%	35wt%	50wt%	5wt%

2.2 粉砕機

FRPの機械的強度は、一般にはガラス繊維含有率とともに著しく増大するが、剪断強さはあまり大きくはならない。そのため粉砕機として剪断力を主な粉砕力とする回転式剪断粉砕機を使用し、各種FRP材料の粉砕を試みた。

使用した回転式剪断粉砕機(株ホーライ製:VBC-420)の構造を図1に示す。回転刃は約800rpmで回転し、回転刃と固定刃のクリアランスは0.3mmに調整した。粉砕は、回転刃と固定刃との間に発生する剪断力を、主粉砕力として行われる。上部から投入された材料は、下部の円孔が開いたスクリーンを通過して排出される。ここで、スクリーンの開目穴の口径より大きな砕成物は、回転刃により持ち上げられ、繰り返し粉砕を受け、スクリーンの口径の大きさ以下になってから排出される。また、口径の異なるスクリーンを用いることにより、粒径の異なる砕成物を得ることが出来る。

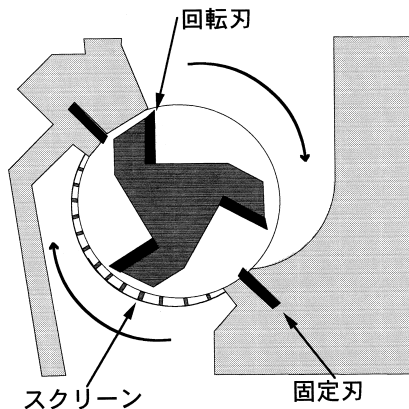


図1 回転式剪断粉砕機の構造

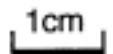
2.3 FRPの粉砕方法および砕成物の評価方法

各種FRP試料を一边が15cm以下になるように切断し、回転式剪断粉砕機を用いて粉砕した。この時、異なる口径を持つスクリーン(1, 3, 10および20mm)を使用し、各種サイズのFRP砕成物を得た。得られたFRP砕成物の粒径分布は、標準ふるいとふるい振とう機により分級した各成分の重量を測定して求めた。ふるい分けした各粒径毎の組成はJISK7052「ガラス繊維強化プラスチックの繊維含有率測定方法」により測定した。また、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM)による形態観察を行い、マイクロメーターにより粉砕片の板厚を測定した。

3. 実験結果と考察

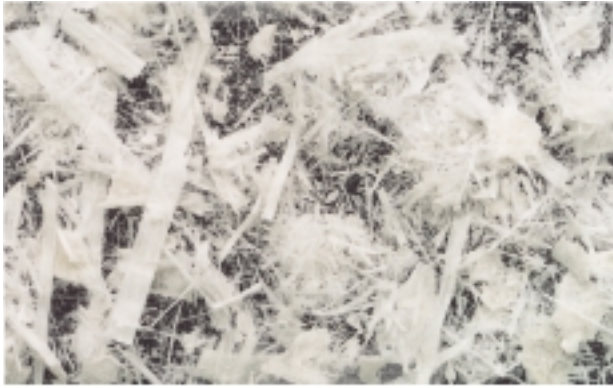
3.1 ハンドレイアップ成形法によるFRPの砕成物の特性

図2, 図3にM-HLUおよびMR-HLUを粉砕して得られた砕成物の写真を示す。砕成物の形状は、被粉砕物のFRPのガラス繊維基材構成により異なり、スクリーン径が大きい程度その差異が顕著であった。M-HLUの場合は、ガラス繊維



上段:スクリーン径10mm 下段:スクリーン径3mm

図2 M-HLUの砕成物



1cm

上段：スクリーン径10mm 下段：スクリーン径 3 mm

図3 MR-HLUの碎成物

の束であるチョップドストランドが面内方向に積み重なった鱗片状の碎成物およびマトリクス樹脂に覆われたチョップドストランドの束状の碎成物等が観察された。また、厚さが1mm以上ある鱗片状の碎成物が多く観察された。MR-HLUの碎成物には、M-HLUの碎成物と同様な鱗片状や束状の碎成物の他に、長尺なガラス繊維が引き揃えられた幅が広い束状の碎成物が観察された。

MR-HLUはガラス繊維強化材であるマットとクロスを交互に積層した構成となっている。各ガラス基材間にはガラス繊維が無いので層間強度があまり強くない。そのため、碎成物は各層毎に分離し、ガラス繊維の配向の状態から鱗片状はマット層由来、巾広の束状はクロス層由来の碎成物と思われる。

M-HLUはマットを積層した構成となっているため、MR-HLUと同様に層間強度があまり強くないが、MR-HLUと異なりクロス層が無いので、一部では層間剪断よりも横剪断により破壊が進行し、マット層の厚さ(約1mm)より厚い鱗片状の碎成物が発生したと考えられる。

スクリーン径を小さくすると何れのFRPも鱗片状の破片とガラス繊維束やガラスの短繊維が絡み合い毛玉状になった碎成物が得られた。また、MR-HLUの碎成物は、M-HLU

に比較して繊維状の碎成物が多く観察され、クロス層に用いられているローピングは単繊維に分離しやすいと考えられる。

図4、図5に各スクリーン径を用いて得られた碎成物の粒径分布を示す。碎成物の形状は両者の間で大きく異なっていたが、粒径分布はほぼ同様の傾向を示し、何れのスクリーン径においても粒径が各スクリーン径の約50~20%のサイズの成分が多く得られた。また、スクリーン径を小さくしても0.1mm以下の成分を得る事は困難であった。

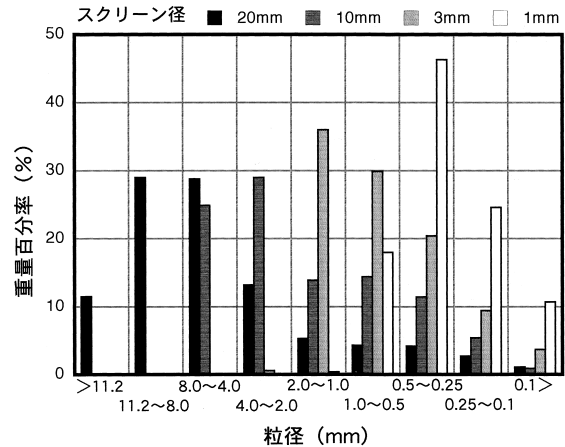


図4 M-HLUの各スクリーン径における碎成物の粒径分布

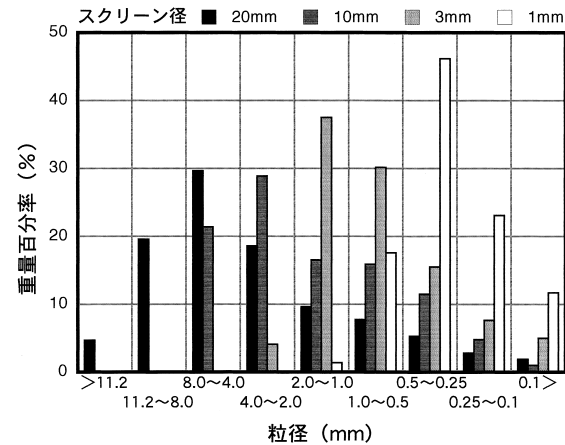


図5 MR-HLUの各スクリーン径における碎成物の粒径分布

図6に口径3mmのスクリーンを用いて粉碎して得られた碎成物の各粒径におけるガラス繊維含有率を示す。また、図7にMR-HLU碎成物の0.25~0.1mmおよび0.1mm以下の成分のSEM像を示す。

碎成物のガラス含有率は各粒径により異なり、粒径が1mm以上および0.1mm以下の碎成物は粉碎前のFRPよりガラス含有率が高くなっていった。逆に、0.5~0.1mmの粒径はガラス含有率が低く、その差はMR-HLUの方が顕著であった。SEM像より、0.1mm以下の碎成物はガラス繊維のモ

ノフィラメントが、0.5~0.1mmの粒分はマトリックス樹脂からなる粒状の碎成物が多く観察された。また、M-HLUについても同様な形状をしていた。

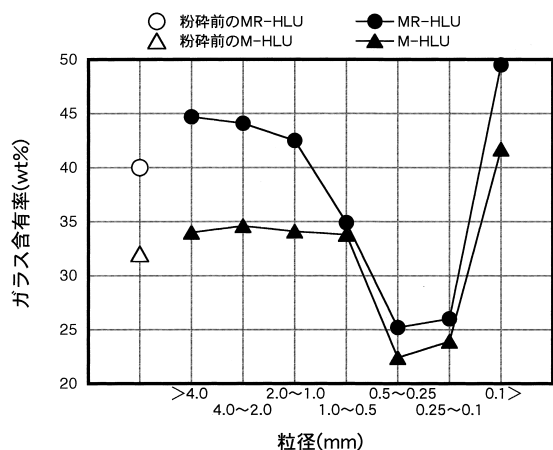
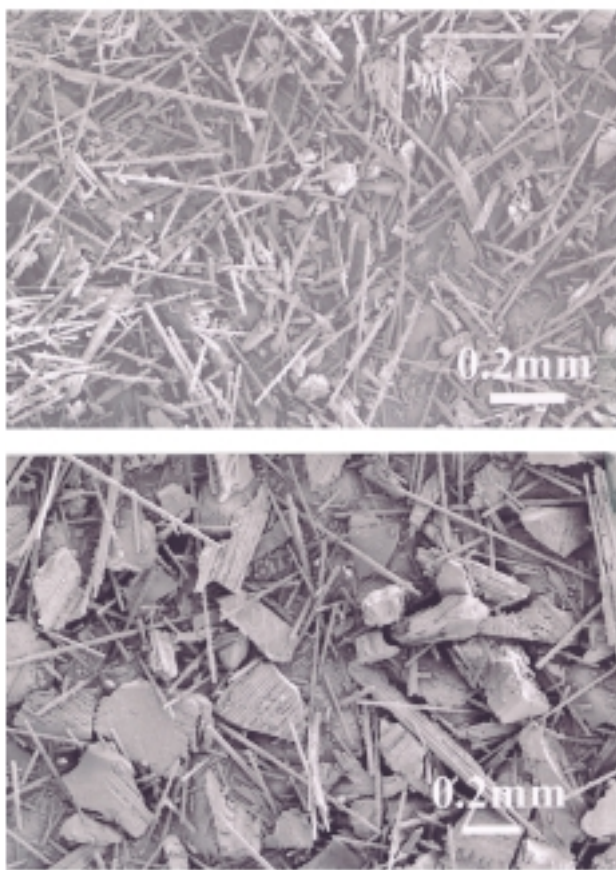


図6 各粒径における碎成物のガラス含有率



上段：0.1mm以下 下段：0.25~0.1mm
図7 MR-HLU 碎成物の各粒径におけるSEM像

ハンドレイアップ成形品では、マット層のチョップドストランドが重なり交差する部位やクロス層のローピングの織り目にマトリックス樹脂が溜まり易く、この部位が分離し0.5

~0.1mmの粒状の碎成物が得られたと思われる。また、ガラス繊維の直径は約10μmと細いため、ほぼ短繊維に分離したガラス繊維が0.1mm以下にふるい分けされたと思われる。

これらより、ハンドレイアップ成形品の碎成物は、マトリックス樹脂と繊維が分離しやすく、強化繊維としての再利用が期待できる。ただし、ガラス基材構成により碎成物の形状が異なる事や碎成物が毛玉状に成り易いことなどを考慮しなければならない。

3.2 SMCプレス成形法によるFRPの碎成物の特性

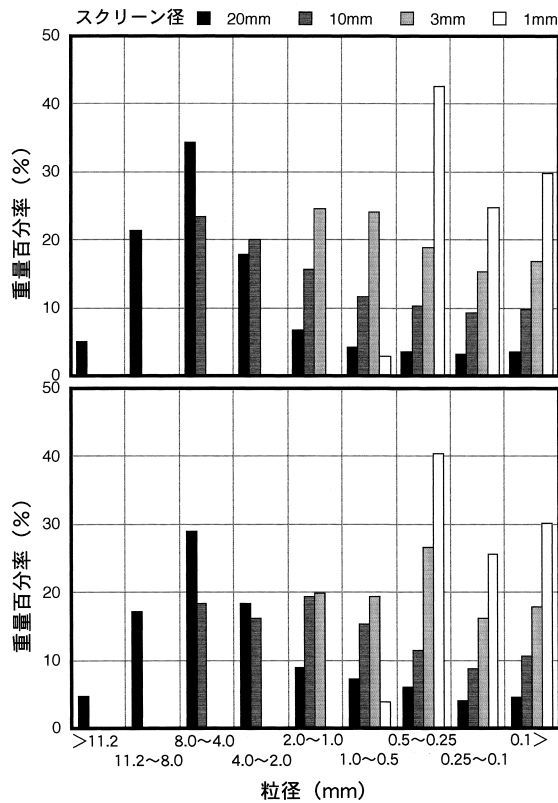
図8に厚さ3mmのSMCを粉砕して得られた碎成物の写真を示す。また、板厚の異なるSMCをそれぞれ各スクリーン径で粉砕して得られた碎成物の粒径分布を図9に示す。

何れのSMCの碎成物も粒径分布は各スクリーン径の1/2



上段：スクリーン径10mm 下段：スクリーン径3mm
図8 SMCの碎成物

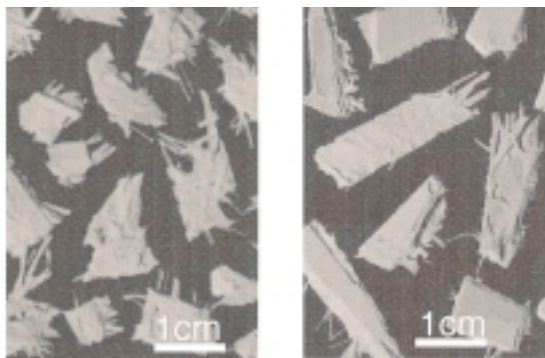
以下のサイズで幅広い分布をしているが、被粉砕物のSMCの板厚が薄いほど粒径が大きい碎成物が多く得られた。さらに、粒径の大きい碎成物の形状は、図10に示すように被粉砕物のSMCの板厚により影響を受けていた。被粉砕物の板厚が厚い場合は、層間剪断の破壊が起こり、ガラス繊維束が飛



上段：被粉碎物の厚さ3mm 下段：被粉碎物の厚さ10mm
 図9 SMCの各スクリーン径における砕成物の粒径分布

び出た鱗片状の砕成物が得られた。逆に被粉碎物の板厚が薄い場合は、層間剪断破壊は見られず元の厚さを保持したまま横剪断で破壊し、ガラス繊維束があまり見られない長尺な形状をしていた。SMCプレス成形法によるFRPは、繊維長25.4mmのチョップドストランドを面内方向にランダムに分散させた強化材形態をしているため、層間剪断の破壊が発生しやすいが、ガラス繊維含有率が少なく繊維長が短いため横剪断強度が比較的低いことにより、板厚が薄くなると横剪断により破壊が起こったものと考えられる。

ふるい目開き2mm以下の粒径の小さい砕成物は、被粉碎



左：被粉碎物の厚さ10mm 右：被粉碎物の厚さ3mm
 図10 板厚の異なるSMCの砕成物
 (5.6mmふるい上の砕成物)

物の板厚や粉碎機のスクリーン径の影響を受けず、主として樹脂が付着したガラス繊維束および樹脂と充填材の塊状の粒子からなっていた。

これらより、SMCについては、砕成物の粒径分布が幅広く、0.1mm以下の小粒径の砕成物も得やすい。また、2mm以下の粒径の小さい砕成物は、形状も繊維状よりも粒子状をしているため比較的取り扱いやすく、充填材としての再利用が適していると考えられる。ただし、被粉碎物の厚さにより砕成物の形状が異なる場合があるので考慮しなければならない。

3.3 BMCプレス成形法によるFRPの砕成物の特性

図11にBMCを粉碎して得られた砕成物の写真を示す。また、各スクリーン径で得られた砕成物の粒径分布を図12に示す。粒径分布は何れのスクリーン径においても粒径が各スクリーン径の約40~20%の成分が約50wt%を占めていた。砕成物の形状は、他のFRPで見られるようなガラス繊維束状の砕成物は無く、何れの大きさの砕成物も塊状で無方向にガラス繊維が僅かに飛び出した形状を成していた。また、粒径



上段：スクリーン径10mm 下段：スクリーン径3mm

図11 BMCの砕成物

が大きい砕成物は粉碎前の製品の板厚を保持していた。

BMCはガラス繊維含有率が少なく、繊維長も約6mmと

非常に短い。さらに、充填材を多量に含んでいるため衝撃強度が低いFRPである。また、ガラス繊維に配向性が無いため強度の方向性がほとんど無い。そのため、BMCは衝撃破壊により粉碎が進行し、塊状の碎成物が得られたと考えられる。

BMCの碎成物は、繊維状の成分がほとんど無く、FRPの碎成物としては粒径が揃っている。また、微細な粒分も比較的容易に得易いため、充填材としての再利用方法が適していると考えられる。

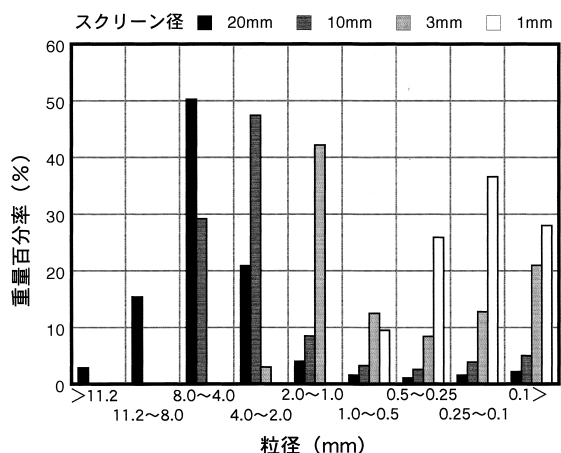


図12 BMCの各スクリーン径における碎成物の粒径分布

3.4 引抜成形法によるFRPの碎成物の特性

図13にPultを粉碎して得られた碎成物の写真を示すように、大部分の碎成物はモノフィラメントにまで分離し、ガラス繊維が絡み合い毛玉のようになっていた。Pultは、強化材としてガラス繊維が一方向に引き揃えられたロービングが使用され、繊維方向には強いが横方向の強度が低いFRPである。そのため、ガラス繊維が切断されずにガラス繊維に沿って縦割れを起こしながら破壊が進行したと思われる。しかしながら、図14に見られるようにガラス繊維が比較的長尺のまま残っているため、強化繊維としての再利用が考えられる。



図13 Pultの碎成物



図14 Pult 碎成物の顕微鏡写真

4.まとめ

FRP廃棄物の再資源化を目的に、各種成形方法で製造されたFRP成形品の粉碎を試みた。その結果、一般的な回転式剪断粉碎機でもFRP廃棄物を数mm程度に粉碎が可能であったが、FRP廃棄物の原料組成により碎成物の粒径分布や形状などの特性が大きく異なっていた。以下にその特徴を示す。

- 1) ハンドレイアップ成形品の碎成物は、マトリックス樹脂と繊維が分離しやすく、強化繊維としての再利用ができる。ただし、ガラス基材構成により碎成物の形状が異なる事や碎成物が毛玉状に成り易いことなどを考慮しなければならない。
- 2) SMCについては、碎成物の粒径分布が幅広く、0.1mm以下の小粒径の碎成物も得やすい。また、2mm以下の粒径の小さい碎成物は、形状も繊維状よりも粒子状をしているため比較的取り扱いやすく、充填材としての再利用が適していると考えられる。ただし、被粉碎物の厚さにより碎成物の形状が異なる場合があるので考慮しなければならない。
- 3) BMCの碎成物は、繊維状の成分がほとんど無く、FRPの碎成物としては粒径が揃っている。また、微細な粒分も比較的容易に得易いため、充填材としての再利用方法が適していると考えられる。
- 4) 引抜成形品では大部分の碎成物はガラス繊維がモノフィラメントに分離している状態となっていた。ガラス繊維が比較的長尺のまま残っているため、強化繊維としての再利用が考えられる。

今後は、各種成形方法から得られるFRP碎成物の特性を考慮した再利用方法の検討を行う予定である。