

**要 旨****廃FRPのケミカルリサイクル****Feedstock Recycling of Fiber Reinforced Plastics Wastes**

株式会社 京屋 (正) 坂本 準・寺川博人  
福岡県工業技術センター 鍛冶茂樹・吉海和正  
北九州市立大学国際環境工学部 松本 亨  
福岡県プラスチック工業会 阿部俊彦  
和歌山県工業技術センター 久保田静男

**はじめに**

戦後、日本は高度成長期に入り、生産時に生産効率を高める技術を駆使し、あらゆる製品を造り続けてきたが、現在環境世紀と言われる 21 世紀において、各種環境法案等が施行される中、それまでに生産した製品の処理方法と、今後の製品開発における素材や、設計、生産方法を考えさせられる事となった。これはマネキンメーカーにおいても同様である。顔や足がない「ボディ」と呼ばれている製品については、極端に流行に左右されない事もあり、熱可塑性樹脂を使用しての、金型等を用いた成型品も多く流通しているが、顔や足がある等身大のマネキンにおいては様々な形状やポーズもあり、多品種少量生産となってしまう。そういう事情もあり開発コストがあまりかけられず、比較的成型時の制限が少なく、軽量且つ、強度を兼ね備えた材料が必要であると言う事と、夏場におけるショーウィンドウ内が 80 近くなる場合もあるので、耐熱性も必要となってくる。それらの条件をクリアする素材は、FRP が最適であり、世界中の多くのマネキンは FRP で成型されている。この事により、成型素材自体は長寿命であっても、流行に左右される商品であるが故、新作発表から、10 年程度経過したマネキンは流行遅れとなり、まだ使用出来るマネキンであっても、その時点でお役ゴメンとなってしまう。そうなったマネキンは、自社回収を行い何らかのかたちで処分やリサイクルを行う事になってくるが、FRP 廃棄物が難処理廃棄物であることから、有効なリサイクル方法は未だ確立していない。通常の焼却施設で焼却してもガラス残渣が残ってしまう問題や、昨今の埋め立て処理場の枯渇化などの理由で、後処理の方法においても今後まだまだ厳しくなってくる事が予想される。これはマネキンメーカーだけに言える事ではなく、その他の FRP 製造企業においても同様である。近年は、マネキンを使用する百貨店等においても、環境を重要視してきており、ISO14001 を取得しているところも出てきている。マネキンメーカーに対しても環境に配慮したマネキン造りが求められてきている。

このような状況の下、京屋においては3R「リデュース・リユース・リサイクル」を開発基準として位置づけ、マネキンの設計方法の見直しから取り組んだ結果、マネキンの構成に必要な不可欠なジョイントパーツのリユースを可能にする事で、金属等が混在している製品破砕時の問題や、各種リサイクル時に利便性が出てくる、同業界初の DFD(Design for Disassembly:分解配慮設計)マネキンを実現し、従来品と同価格帯で商品化に成功した。また、その商品に使用している材料においても、廃 PET ボトルをケミカルリサイクル技術で再生した、PET 再生不飽和ポリエステル樹脂（再生材料）を使用し、補強材においても、成型作業環境の改善や、焼却問題やサーマルリサイクルにも対処出来る有機繊維であるビニロン繊維を使用し成型(VFRP)している事により、商業施設業界においても十分アピール出来るマネキンとなっている。(図-1 参照)



しかしながら、使用済みマネキンのリサイクルについては未だ十分な解決策を見いだせていない。(現状、セメント原燃料化にて対応。)そこで今回、廃 FRP のケミカルリサイクル研究会で、使用済みマネキンをケミカルリサイクルする技術開発に取り組んだ。また、ライフサイクルアセスメント(LCA)により、開発したケミカルリサイクル技術や DFD、PET 再生不飽和ポリエステル樹脂の使用等がマネキン製造の環境負荷に与える効果を定量し、マネキン製造における環境負荷低減について検討した。

### ケミカルリサイクル

FRP は、ベースである不飽和ポリエステル樹脂が熱硬化性であることや、ガラス繊維等の無機物が 50%近く複合されていること等から、熱可塑性樹脂において行われるようなマテリアルリサイクルは困難である。また、サーマルリサイクルも、FRP が低発熱量であることや、大量に発生する焼却残渣の問題もあり、効果的な方法とはなり得ていない。一方で、不飽和ポリエステル樹脂は縮重合性の樹脂である為、熱や酸・アルカリ等の作用によって容易に解重合する。グリコール類を用いて解重合させると、不飽和ポリエステル樹脂の原料成分である二価アルコールが得られる。これをグリコール原料として用い、再び不飽和ポリエステル樹脂を合成することが出来る。この方法は、ケミカルリサイクルの一種である。ケミカルリサイクルは、一般に大規模な装置を必要とする為、高付加価値の原料が

回収される場合以外は採算が合わないと言われている。しかし、不飽和ポリエステル樹脂のグリコール分解は、300 以下の比較的穏和な条件において十分進行するため簡易な装置で十分であり、低コストのケミカルリサイクルが可能である。

今回検討したケミカルリサイクルの実験方法については以下に示す。

使用済みマネキンは約 2mm に粉砕した後、エチレングリコール、触媒の水酸化ナトリウムと共に耐圧硝子工業（株）製の TAS-05 型オートクレーブに投入し、290 で槽内を攪拌しながらグリコール分解を行った。分解終了後、分解生成物を吸引濾過してガラス繊維やフィラー等の残渣を取り除いて分解液とした。分解液は硫酸によって中和した後、不飽和ポリエステル樹脂合成のグリコール原料とした。分解液を無水マレイン酸、無水フタル酸と共に四つ口フラスコに投入し、窒素気流下で攪拌しながら加熱して不飽和ポリエステル樹脂の合成を行った。反応終了後、試料温度が 150 まで下がったところで、スチレンモノマーの含有量が 40wt% になるように t-ブチルカテコールを 120ppm 添加したスチレンモノマーを加え、再生不飽和ポリエステル樹脂（再生樹脂）とした。

また、分解生成物を濾過せずにガラス繊維やフィラーを含んだまま用いて、同様にして再生樹脂の合成を行う方法も検討した。合成した再生樹脂は、JIS K 6901 に従って密度、粘度、揺変度、常温硬化特性を調べた。また、分子量を Waters 製 GPC-150C を用いて、ポリスチレン換算で定量した。再生樹脂より FRP 成型板を成型し、JIS K 7017 に従って曲げ強さ、曲げ弾性率の測定を行った。また、総合的な樹脂の成型性を評価する意味で、マネキン一体の成型を行った。図-2 に不飽和ポリエステル樹脂の分解、合成装置の写真を示す。また図-3 に不飽和ポリエステル樹脂の合成から FRP 成型に至る流れを示す。



図-2 研究に使用した分解装置と合成装置

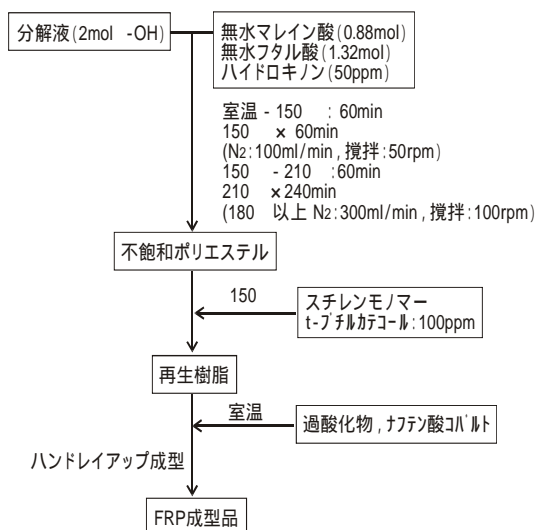


図-3 不飽和ポリエステル樹脂の合成と FRP 成型の流れ

## ライフサイクルアセスメント (LCA) による環境負荷定量

JIS Q 14041(ISO14041)に準拠して、マネキンの製造から廃棄に至るまでのインベントリ（環境負荷データ収集）を行い、環境負荷を定量した。LCA の範囲は、粘土原型制作から使用済みマネキンの処理までとした。LCA の対象製品として洋婦人スカルプチャーマネキンを選択し、表-1 のように使用材料、DFD の有無、ビジネスモデル（レンタルか売却か）、廃棄物の処理方法を変えた場合のライフサイクルにおける環境負荷の違いを比較した。インベントリは、京屋におけるマネキン製造に関わるエネルギー消費等の各種データ、産業連関表による環境負荷原単位データブック（（独）国立環境研究所提供）を用いて行った。

表-1 マネキンにおける LCA ケース設定

(株)京屋マネキン LCAケース設定		対象製品:洋婦人スカルプチャーマネキン										
ケース		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	備考
使用樹脂	バージン材											不飽和ポリエステル樹脂 (FRP用)
	リサイクル材 (PET再生樹脂)											廃PET再生樹脂
	リサイクル材 (FRP再生樹脂)											再生不飽和ポリエステル樹脂
易解体性設計	なし											一体設計
	あり											接続部品、樹脂の変化考慮
ビジネスモデル	レンタル											寿命10年と仮定
	売却											寿命5年×2と仮定 (マネキンモデル変更)
廃棄後の処理方法	全量埋立											100%埋立と仮定
	セメント原燃材+その他埋立											原料分は未考慮
	接続部品リユース+その他埋立											
	接続部品リユース+セメント原燃材											原料分は未考慮
	接続部品リユース+FRP再生樹脂											FRPオープンリサイクル

## 研究結果

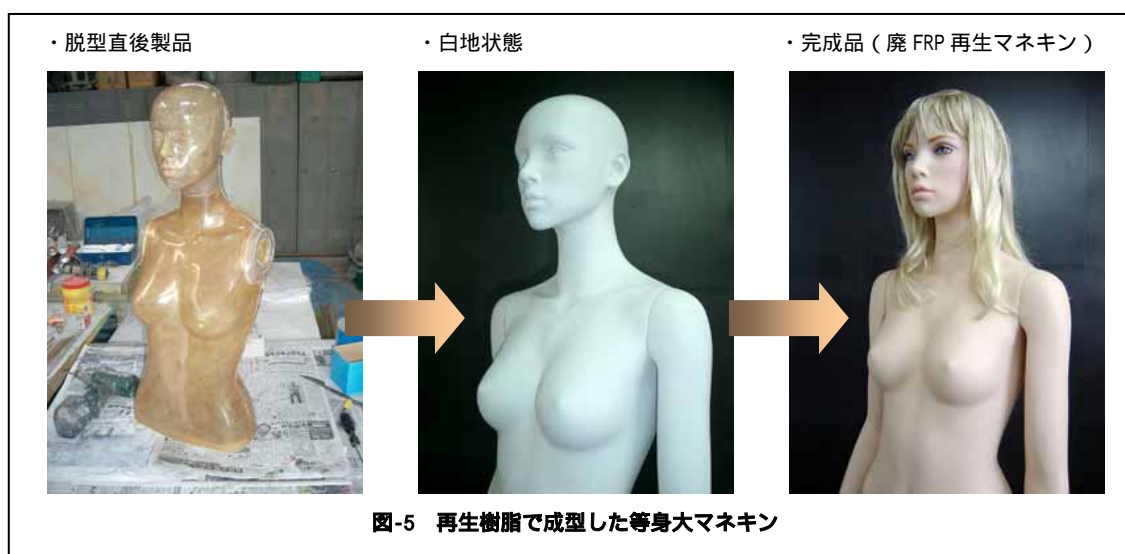
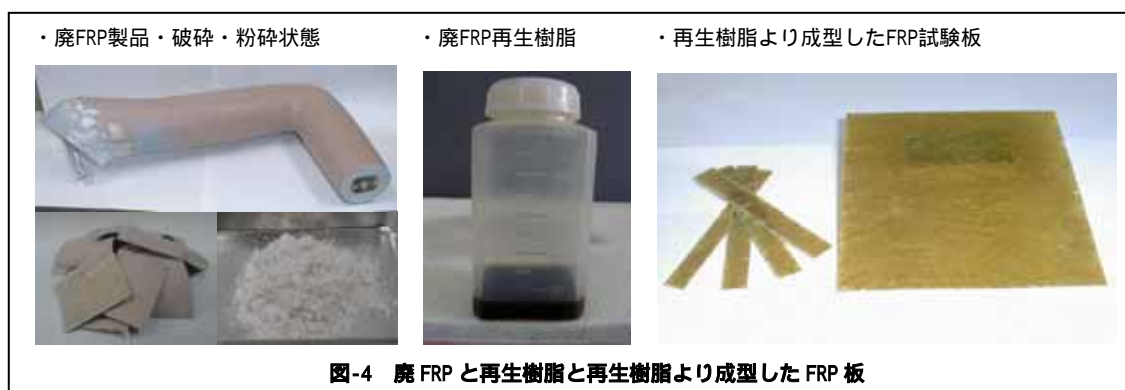
### ケミカルリサイクル

使用済みマネキンは、290 において等量から 5 倍量のエチレングリコールにより 2 時間でほぼ分解した。得られた分解液を用いて不飽和ポリエステル樹脂の合成を行い、茶褐色で低粘度の再生不飽和ポリエステル樹脂を得ることができた。再生樹脂は着色しているが、当初懸念していた分解生成物による強い臭気は認められず、一般の不飽和ポリエステル樹脂と同様のスチレン臭のみが認められた。分解生成物中の強い臭気の原因と考えられる低分子の成分が再生樹脂の合成過程で揮発してしまったためであろうと考えられる。着色に関しては、マネキンは通常成型品表面を塗装するため、再生樹脂をマネキン用として再利用する場合においては特に問題とはならない。合成して得た再生樹脂の特性及び再生樹脂より成型した FRP の物性をマネキン用の新樹脂の特性と共に表-2 に示す。また、図-4 に再生樹脂より成型した FRP の写真を示す。再生樹脂は、ほぼ新樹脂並の特性を示すことがわかった。また、成型した FRP も弾性率が若干低いもののほぼ新樹脂並の物性を示すこと

がわかった。マネキン一体の成型による再生樹脂の成型性に関する検討の結果、再生樹脂はマネキンを十分成型可能なレベルの良好な成型性を有していることが確認された。図-5に再生樹脂を使ってハンドレイアップ成型したマネキンの写真を示す。

表-2 合成した再生樹脂と新樹脂の諸特性の比較

再生樹脂と新樹脂の諸特性	再生樹脂	新樹脂
数平均分子量	1700 ~ 2320	2000 >
密度 / g / m l :25	1.15	1.11
粘度 / P · s :25	0.20 ~ 0.56	0.43
揺変度 (6rpm/60rpm)	1.05 ~ 1.16	3.50
ゲル化時間 / min	4 ~ 8	33
最小硬化時間 / min	14 ~ 50	45
最高発熱温度 /	70 ~ 145	130
曲げ強度 / Mpa	112 ~ 145	133
曲げ弾性率 / Mpa	2490 ~ 3060	3730



また、表-4 でも分かるように、分解生成物を濾過せずにガラス繊維やフィラーを含んだまま用いて、同様にして再生樹脂の合成が可能であること、得られた再生樹脂の性状は濾過して得た分解液を使用した場合と大差ないことも確認した。

残渣を除去せずに再生樹脂を合成する方法は、ガラス繊維やフィラーの再利用になるだけでなく、工程の簡素化を可能とする、実用化に向けて有用な方法であると考えられる。

表-4 残渣を除去せずに合成した再生樹脂の評価結果

再生樹脂（残渣含）の諸特性	再生樹脂（残渣除去）	再生樹脂（残渣含）
分解条件（グリコール/FRP）	2	2
分子量	1700～2320	1409
粘度/P・s :25	1.20～0.56	0.25
揺変度（6rpm/60rpm）	1.05～1.16	1.59
ゲル化時間/min	4～18	10
最小硬化時間/min	14～50	28
最高発熱温度/	70～129	77
曲げ強度/Mpa	112～145	70～100
曲げ弾性率/Mpa	2490～3060	2100～3300

#### ライフサイクルアセスメント（LCA）による環境負荷定量

LCA 評価の結果、セメント原燃料化、ケミカルリサイクルを行うことで消費エネルギー、二酸化炭素発生量共に減少し、環境負荷が低減される事が明らかになった。この環境負荷の減少はケミカルリサイクルの方がセメント原燃料化よりも大きいことが明らかになった。また、マネキンの設計思想の相違によるライフサイクル環境負荷を評価した結果、DFD（分解配慮設計）を取り入れる事により効果が出る事を明らかにした。DFD マネキンの製造は環境負荷の低減に向けて有効な方法の一つであることが確認できた。さらに、材料として再生材料を用い、ビジネスモデルとして売却を選択することで、環境負荷が低減可能であることも確認できた。

#### まとめ

：グリコール分解を利用したケミカルリサイクルによって FRP マネキンから FRP マネキンへのリサイクルが可能であることを明らかにした。

：LCA の結果、ケミカルリサイクル、DFD マネキンの製造、再生材料の使用、売却による流通が、マネキンのライフサイクルにおける環境負荷低減に有効であることを明らかにした。

### おわりに（残された課題）

- ・ 中型以上のプラントを使用した廃 FRP 再生樹脂での各種 FRP 成形物の成形試験、及び各種実証データの検証。
- ・ 廃 FRP の循環型システムの構築。
  - （ 廃 FRP 材の回収システム作り（パートナー構築）
  - （ 廃 FRP 再生樹脂の販売システム作り（パートナー構築）
  - （ 廃 FRP 再生樹脂を使用した各種 FRP 成形製品の開発（パートナー構築）

### 謝 辞

本研究は、福岡県リサイクル総合研究センターの研究会（廃 FRP のケミカルリサイクル研究会）として、研究助成を受けて実施されたものである。記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 福岡県工業技術センター化学繊維研究所 吉海和正：平成 15 年廃 FRP のケミカルリサイクル研究会報告書, 2004
- 2) 北九州市立大学 松本亨 他：FRP 廃棄物のケミカルリサイクルのライフサイクル環境負荷評価：マネキンを事例としたケーススタディ，第 15 回廃棄物学会研究発表会講演論文集，2004（印刷中）
- 3) 福岡県工業技術センター化学繊維研究所 吉海和正：FRP 製マネキンのグリコール分解を利用したケミカルリサイクルに関する研究, 2004
- 4) 廃 FRP のケミカルリサイクル研究会企画書, 2003

---

[連絡先] 〒838-0058 福岡県甘木市馬田 3690-2 株式会社 京屋 プロダクト本部 プロダクト統括課 坂本 準

Tel (0946)23-2467 Fax (0946)23-2053 E-mail: jun\_sakamoto@kyoya.co.jp