

■ 技術賞内容紹介 ■

# リサイクル性を向上したモールドモータ

## Molded Motor with Improved Recyclability

大西 宏\*・寺田 貴彦\*\*・山下文敏\*\*\*

Hiroshi Onishi Takahiko Terada Fumitoshi Yamashita

山縣 芳和\*\*\*\*・渡辺 彰彦\*\*\*\*\*

Yoshikazu Yamagata Akihiko Watanabe

### 1. 緒言

近年、環境問題の1つとして廃棄物の再資源化と減容化が国内でクローズアップされており、例えば1997年4月から施行された容器包装リサイクル法により包装材の再資源化が活発に試みられている。家電製品に関して「特定家庭用機器再商品化法」通称廃家電リサイクル法が2001年に施行される見通しになっており、その再使用から再資源化を含めた総合的なリサイクルが強く求められている。

電気業界では製品のリサイクル性を向上させることを目的として、解体し易い設計技術<sup>1), 2)</sup>や部品のリサイクル技術<sup>3)</sup>などが検討されている。我々は家電製品に使用される大きな部品の中で処理が困難なモールドモータに着目した。モールドモータは鉄芯や巻線をBMC (Bulk-Molding-Compound) と呼ばれるモールド材で覆っているため、鋼板枠モータに比べてコンパクトで静穏性、低振動性、生産性に優れ、エアコンや洗濯機のモータによく利用されている。しかし廃棄時はモールド材の分離が困難なために内部の鉄芯や銅線等の金属有価物を回収できず、そのまま埋め立て処理されているのが現状である。

そこでモールドモータとしての特徴を維持しつつ、内部金属類のリサイクルも可能にするモールドモータを開発するために、加温した強アルカリ水溶液中での加水分解性を促進させたモールド材を検討してきた<sup>4-9)</sup>。本稿では開発したモールド材の材料設計と処理方法、および1997年10月から実証している開発モ-

ールド材を適用したモールドモータの分解処理装置について報告する。

### 2. モールドモータの構造

従来のモールドモータに使用されているモールド材は、表1に示すように熱硬化性の不飽和ポリエステル樹脂(硬化剤であるスチレンを含む)、収縮防止剤、硬化開始剤、ガラス繊維、及び炭酸カルシウムや水酸化アルミニウム等のフィラー等を混練した混合物である<sup>10)</sup>。このモールド材は成型中の加熱によりスチレンとのラジカル重合反応が生じて不飽和ポリエステル樹脂が硬化し、強固な構造材となる。

モールドモータの構成例を図-1に示す。ロータは殆ど金属のみから構成され、ステータと分離が容易なのでリサイクルが可能である。しかしステータは硬化したモールド材に覆われているので、内部の鉄芯や巻線(例えばステータ1kg当りに各300g程度の鉄と銅を含む)を回収することは困難であった。

表1 一般的なモールド材の構成例

| 構成成分        | 重量部   |
|-------------|-------|
| 不飽和ポリエステル樹脂 | 20~30 |
| 収縮防止剤       | 1~5   |
| 硬化開始剤       | 0.4~2 |
| 離型剤         | 0.5~5 |
| フィラー        | 55~75 |
| ガラス繊維       | 5~30  |

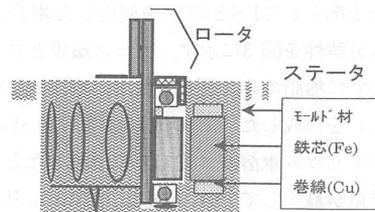


図-1 モールドモータの構成例

\* 松下電器産業(株)研究本部生活環境システム開発センター主席技師  
\*\* " " " 技師

〒570-8501 大阪府守口市八雲中町3-1-1

\*\*\* 松下電器産業(株)モータ社モータ技術研究所主席技師

\*\*\*\* " " " 技師

〒574-0044 大阪府大東市諸福7-1-1

\*\*\*\*\* 武生松下電器(株)技術部技師

〒915-8558 福井県武生市今宿町20-1

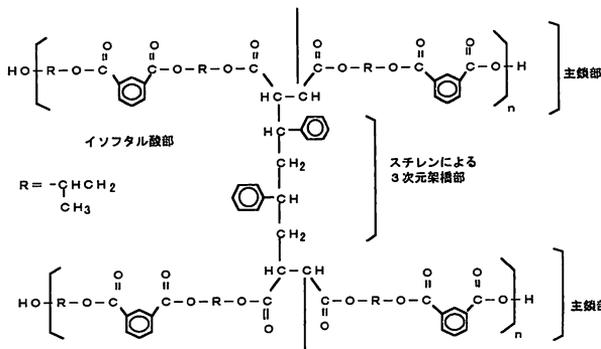
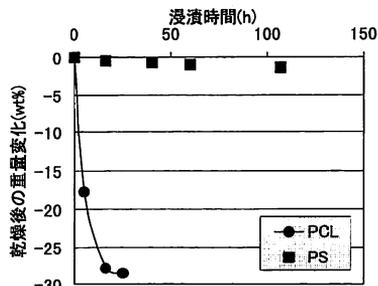


図-2 熱硬化後の不飽和ポリエステル樹脂の化学構造



浸漬：5 mol/kgの水酸化ナトリウム水溶液（80℃）  
乾燥：100℃，5h

図-3 各収縮防止剤（PS，PCL）を用いた樹脂の硬化後の加水分解性

### 3. モールド材の開発

今回のモールド材は、硬化時の収縮を抑える収縮防止剤の変更と、熱硬化性を付与する硬化剤の一部変更により開発した。下記に材料設計とモールド材としての基本特性について述べる。

#### 3.1 樹脂の加水分解性の促進

モールドモータからモールド材を除去するために、硬化後のモールド材を任意に軟化させることを考えた。まずモールド材のバインダの役割をしている不飽和ポリエステル樹脂（UP）の加水分解性を促進して、モールド材を易崩壊させることを検討した。

モールド材に使用している不飽和ポリエステル樹脂は、図-2に示すようにスチレンが加熱時のラジカル反応により架橋した三次元網目構造をしている（2量体の反応例を図示）。この熱硬化後のUP主鎖のエステル結合部をアルカリで加水分解させて網目構造を崩すことによって、バインダ力を低下させ、モールド材の易崩壊化を促進できると考えた。

加水分解性を促進するため、樹脂中の収縮防止剤を従来から用いられているポリスチレン（PS）や芳香族ポリエステルに代わり、脂肪族ポリエステルに置換した。脂肪族ポリエステルとして、収縮防止剤としての機能を有し、かつアルカリで加水分解しやすいポリカプロラクトン<sup>4), 5)</sup>（PCL）を用いることができる。

収縮防止剤としてPSとPCLを使用した場合の各樹脂の加水分解性を図-3に示す。ガラス繊維とフィラーを添加せずに樹脂のみで硬化させて、樹脂成形体（厚さ1mm）を作成した。この成形体を5 mol/kgの水酸化ナトリウム水溶液（80℃）に浸漬したところ、徐々に重量が減少していき、約20hで25wt%以上の重量減少を確認した。この成形体中に占めるPCLの量

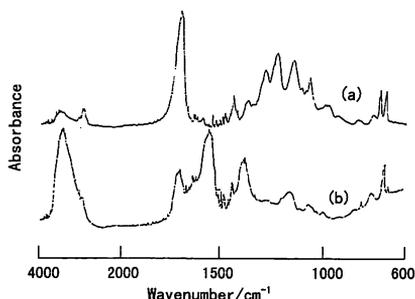


図-4 硬化後のUP（PCL：6 wt%）の浸漬前（a）と後（b）のIRスペクトル

は6 wt%であるため、添加した収縮防止剤が全て分解したと仮定しても、20wt%程度は不飽和ポリエステル樹脂部分が分解していることになる。なお、同じ水溶液に室温で200h浸漬した場合は、PCLを含んだ樹脂でも殆ど重量変化はなかった

PCLを6 wt%含んだ熱硬化後の不飽和ポリエステル樹脂（UP）の分解試験前後におけるIRスペクトル例を図-4に示す。分解試験後は $1730\text{cm}^{-1}$ のエステル $\text{>C=O}$ 伸縮振動、 $1298\text{cm}^{-1}$ および $1238\text{cm}^{-1}$ のイソフタル酸エステル部の $\text{C-O}$ 逆対称伸縮振動などエステル結合由来のピークが減少し、 $1570\text{cm}^{-1}$ および $1397\text{cm}^{-1}$ にカルボン酸塩 $\text{-COO}^-$ の $\text{C-O}$ の逆対称および対称伸縮振動由来のピークが観測された。このことから不飽和ポリエステル樹脂の主鎖にある主にイソフタル酸部分のエステル結合が分解され、イソフタル酸が水溶液に溶出したと考えている。

なお収縮防止剤として従来使用されていたポリスチレン（PS）を用いた成形体では、同様のアルカリ処理を施しても殆ど重量減少がみられないことから（図-3参照）、収縮防止剤を変えるだけで従来殆ど分解されなかった不飽和ポリエステル樹脂自身の加水分解を促

進できることが判った。これは、PSは疎水性が強く加水分解を受けなかったのに対して、今回使用した収縮防止剤であるPCLはアルカリによって加水分解を受け易いので樹脂成形体中にアルカリ性水溶液が浸透し易く、その結果UPのエステル結合部が分解されたと考えている。

次にこのPCLを収縮防止剤に用いた樹脂の20重量部に、ガラス繊維やフィラーなどを80重量部加えてモールド材成形体（円柱状成形体：Φ19mm, H10mm程度）を作成した。この成形体を5 mol/kgの水酸化ナトリウム水溶液（80℃）に浸漬したところ、50hで3 mm程度の液の浸透が見られた。なお液の浸透部は若干白濁するので、成形体断面の目視により確認した。PCLを用いることでモールド材内部に水溶液を浸透させることができた。

3.2 モールド材の軟化促進

次に浸透した水溶液に濡れ易くすることで軟らかくすることを考えた。そこで不飽和ポリエステル樹脂（UP）の硬化剤であるスチレンの一部を、親水性基を有していて、かつ重合反応性も良好な2-ヒドロキシエチルメタクリレート（HEMA）に置換することで、アルカリ性水溶液への浸漬後におけるモールド材成形体の軟化を検討した。

スチレンに対するHEMAへの置換率を0～36mol%に変化させた樹脂を用いて、前述と同様の円柱状成形体を作成し、5 mol/kgの水酸化ナトリウム水溶液（80℃）に50h浸漬した。浸漬後に液の浸透度及び成形体の表面硬度を測定した。その結果を図-5に示す。スチレンに対するHEMAへの置換率が大きくなるほど表面硬度は低下し、水酸化ナトリウム水溶液の浸透性も向上する。HEMAで36mol%置換した成形体の硬度は75°まで低下させることができた。

但しこの硬度でも手で千切るには硬すぎる。そこで更に2～5h水に浸漬すると、特にHEMAへの置換率が30mol%以上の場合では水浸漬後の硬度が20°未

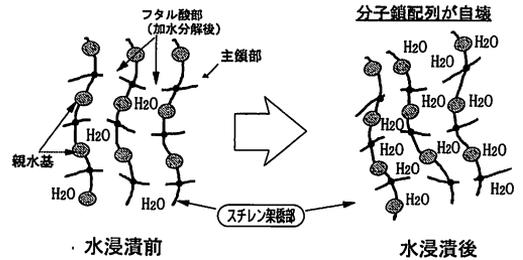


図-6 水浸漬による軟化現象のモデル図

満と大きく硬度が低下することを見出した。このときのモールド材は素手でも千切ることができる軟らかさである。これは加水分解したエステル部とHEMAの親水基部の周辺に水が浸透し、樹脂の分子間力を低下させて軟化しているからと考えている（図-6参照）。

以上から、従来のモールド材の組成で収縮防止剤をPCLに変更し、さらに硬化剤であるスチレンの36mol%をHEMAに置換することで、5 mol/kgの水酸化ナトリウム水溶液（80℃）と水に浸漬することで必要に応じて硬化後でも軟化させることができる熱硬化性のモールド材を開発できた。

3.3 開発したモールド材の基本物性

前項までに開発したモールド材の材料設計について示したが、ここではモールド材としての基本物性について示す。

表2に従来のモールド材（従来品）と開発したモールド材（開発品）の基本物性のいくつかを比較した。従来品は収縮防止剤としてポリスチレンを用い、硬化剤はスチレンのみである。開発品は収縮防止剤としてPCLを用い、硬化剤であるスチレンに対するHEMAの置換量を36mol%にした樹脂であり、フィラーなど他の組成は従来と同一（樹脂が20重量部、その他が80重量部）である。

スパイラルフロー値が若干大きく、従来品よりも流れ易いモールド材であることを示しているが、組成比の変更により十分調整できるものである。成形収縮率、

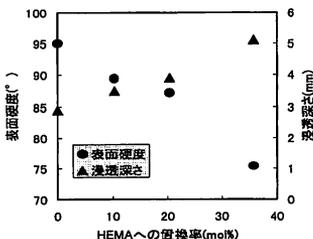


図-5 液の浸透性及び浸透後の硬度に及ぼす HEMA置換率の影響

表2 モールド材の基本物性

| 評価項目                | 従来品                         | 開発品      |          |
|---------------------|-----------------------------|----------|----------|
| スパイラルフロー (cm, 150℃) | 124.5                       | 145.9    |          |
| 成形収縮率 (% , 150℃)    | 0.14                        | 0.15     |          |
| 曲げ強度                | 室温 (kgf/mm <sup>2</sup> )   | 5.41     | 5.12     |
|                     | 120℃ (kgf/mm <sup>2</sup> ) | 3.08     | 2.41     |
| 絶縁性                 | 160℃ (kgf/mm <sup>2</sup> ) | 2.12     | 1.81     |
|                     | 体積抵抗率 (Ω・cm)                | 1.77E+15 | 1.16E+15 |
| 耐水性                 | 24h後の吸収率 (wt%)              | 0.24     | 0.17     |
|                     | 体積抵抗率 (Ω・cm)                | 9.80E+14 | 5.30E+14 |
| 煮沸試験                | 1h後の吸収率 (wt%)               | 0.17     | 0.37     |
|                     | 体積抵抗率 (Ω・cm)                | 5.10E+14 | 1.90E+14 |

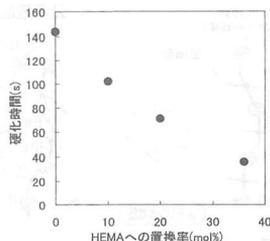


図-7 HEMAへの置換率の硬化時間への影響

曲げ強さは、従来と殆ど同等である。絶縁性も十分確保できているが、耐水性と煮沸試験での測定値と比較すると、開発品では特に吸水後の絶縁低下が若干大きくなる傾向にある。しかしサンプルを乾燥すると、体積抵抗率は試験前の値に戻り、また実機評価ではこれらの問題はなかったため、開発品と従来品の基本物性には殆ど差がないと考えている。

従来品と大きく異なった物性はモールド材の硬化時間である。図-7にキュラストメータによる硬化時間測定結果(150℃)を示すが、HEMAへの置換率36mol%までの範囲では、置換率が大きいほど硬化時間は短縮している。この特性を生かしてモールド材に軟化性を付与すると同時に、モールドモータ成形時間の短縮化によるモータ生産のハイサイクル化も可能である。

#### 4. モールドモータ分解処理方法の基礎検討

開発したモールド材を適用したモールドモータの分解処理方法の一例を図-8に示す。モータを加熱した強アルカリ性水溶液と水に所定時間浸漬処理する。次にこの浸漬によって硬度が低下したモールド材を剥離除去し、更に巻線と鉄芯を分離して銅と鉄資源としてリサイクルする。

実際に新規モールド材を適用したモールドモータ(Φ90mm, ステータ高さ約50mm, 最大モールド厚さ約8mm)を試作し、上述した方法で処理した例を写1に示す。写真の左は、解体処理前のモールドモータである。このモータからまずロータを取り外して、回収する(写1中央上)。次にステータを5mol/kgの水酸化ナトリウム水溶液(80℃)に100h、次に水に5h浸漬してモールド材が軟化したところで、ブラシやピンセットなどでモールド材を完全に剥離除去して、ステータ内部の金属部分を回収した(写1中央下)。このステータ部の巻線をカットして、鉄芯(写1右上)と巻線に分離し、巻線はさらに高周波真空溶解(0.5kW/kg, <66.66Pa)することによって銅塊とした

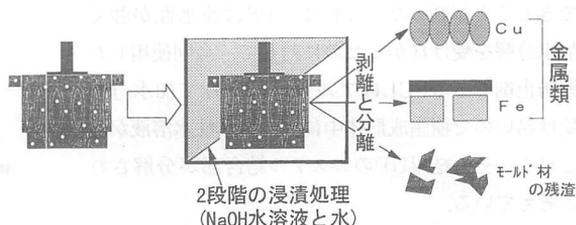
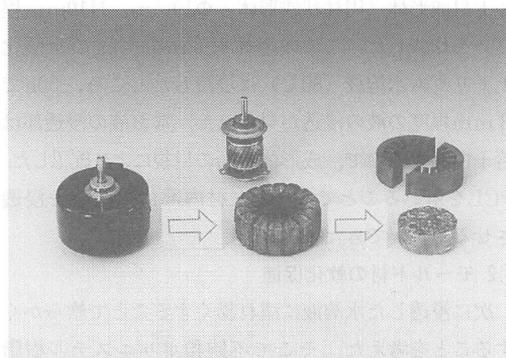


図-8 モールドモータの分解処理方法



写1 モールドモータの分解実験例

(写1右下)。高周波真空溶解することで純度99.9%以上の電気銅として再資源化できた。

このように化学処理でモールド材を軟化させ、剥離除去して内部金属を回収するため、金属を傷つけることなく、ほぼ100%の回収率で鉄と巻線の回収が可能である。また巻線に施してある絶縁被膜もアルカリ性水溶液への浸漬中に劣化して分解しやすくなるため、写1に示すような高周波溶解して銅塊とした場合、スラッジの発生が少なく、高純度の銅が90%以上の高回収率で再生できる。

#### 5. 分解処理装置による実証

前述の分解処理方法をもとに処理装置(処理能力: 24台/回処理)を試作し、実証試験を行った。その工程モデル図を図-9に示す。まず分解処理槽にモールドモータを入れ、アルカリ性水溶液を添加して加熱し、所定の時間浸漬処理を行う。その後にアルカリ性水溶液は分解液回収槽に回収して、次に市水を満たす。これら2段階の浸漬処理後に沈分解槽に水を回収し、処理後のモールドモータはモールド材剥離槽に移される。この剥離槽では、高圧水(供給圧力 $8.826 \times 10^6$  Pa)を照射してモールド材を除去する。最後にモールド材を除去したモータを取り出し、巻線と鉄芯に分離する。

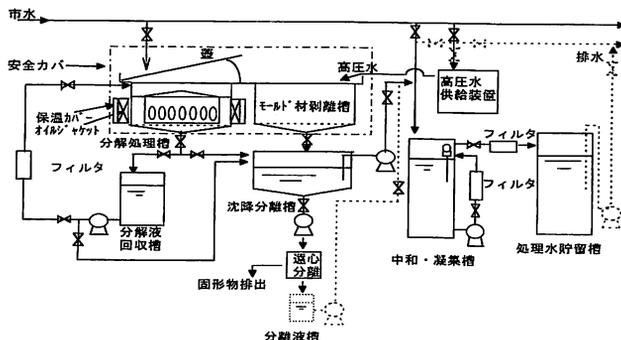


図-9 モールドモータ分解処理装置の工程モデル図

浸漬処理と剥離に使用した水と剥離除去されたモールド材残さは、沈降分離槽に送液して、大きなモールド材残さを沈降分離させる。上澄み液は中和・凝集槽に移送して、硫酸アルミニウムと高分子凝集剤を用いて、中和・凝集処理される。凝集物はフィルターを通すことで除去し、上澄み液は活性炭フィルターを通して処理水貯留槽に貯められ、再利用される。なお沈降分離槽に沈殿したモールド材残さを含んだ液は、槽下部から抜き出され、遠心分離器によりモールド材残さを除去した後、中和・凝集槽に送られ、上記と同様に処理される。また分解液回収槽に回収したアルカリ性水溶液は、フィルターを通して分解処理槽に戻され、再利用される。

現在は本装置による処理を確認した後、処理時間を短縮して連続処理性を改善するために、モータをそのままアルカリ性水溶液で処理するのではなく、アルカリ浸漬前にできるだけ余分なモールド材を除去する前処理工程を検討している。

## 6. 結言

再生が困難であった従来のモールドモータに対して、収縮防止材の変更と硬化剤の一部変更だけで、強アルカリ水溶液での加水分解性を促進して硬化後でも任意に軟化できるモールド材を開発し、このモールド材を用いた場合に内部の鉄と銅を化学的な処理により分離する処理プロセスを確認した。モールドモータとしての基本的特性は維持したまま、鋼板枠モータに対して唯一劣っていた内部金属類のリサイクル性を向上させることができ、本モールドモータを用いれば電気製品全体のリサイクル性を改善できると考えている。

今後は、余分なモールド材を機械的に除去する前処理と開発した化学分解処理を組み合わせた処理方法について更に詳細に検討して各処理条件の確立を図ると

共に、技術的条件確立のみならず、処理コストや回収金属類の価値（売却益）などの経済性も考慮した処理方法として確立する予定である。最後に、今回はモールドモータ構成成分中、最も価値が大きい銅の回収・高純度化に重点をおいて検討したが、他の回収物の高付加価値化や、モールドモータ以外への材料、及び処理方法の適用も検討していくつもりである。

## 参考文献

- 1) 大西宏, 寺田貴彦, 清水時彦; 家庭電化製品に対する分解性評価方法の検討, 廃棄物学会論文誌 Vol. 6, No. 1 (1995), 1~6.
- 2) 永田勝也 監修; 製品アセスメントとリサイクル設計事例, (財)クリーン・ジャパン・センター.
- 3) 木下幸治, 高橋弘泰, 北川武生; ECEE'96第1回エレクトロニクスにおける環境技術シンポジウム (1996), 105~106.
- 4) 寺田貴彦, 大西宏, 清水時彦; 生分解性ポリマーを含むプラスチック構造体の分解性に関する検討, 高分子学会予稿集 Vol.43, No.4 (1994), 1653.
- 5) 寺田貴彦, 山縣芳和, 大西宏; 加熱架橋後のポリマーブレンド, 高分子学会予稿集 Vol.44, No.5 (1995), 727.
- 6) 山縣芳和, 寺田貴彦, 大西宏; 分解性不飽和ポリエステル樹脂の開発に関する検討, 日本化学会第70春季年会予行集 II (1996), 689.
- 7) 大西宏, 山縣芳和, 寺田貴彦, 山下文敏, 村野克裕, 黒住誠治; リサイクル性を向上したモールドモータ, 回路実装学会誌, Vol.12, No.2 (1997), 110~112.
- 8) Takahiko Terada, Hiroshi Onishi, Yoshikazu Yamagata, Fumitoshi Yamashita; Molded Motor with Improved Recyclability, Proceedings of The Third International Conference on ECOMATERIALS (1997), 391~394.
- 9) 寺田貴彦, 大西宏, 山縣芳和; 分解性熱硬化性樹脂に関する研究, 高分子論文集 Vol.54, No.8 (1997), 491~498.
- 10) 滝山栄一郎; ポリエステル樹脂ハンドブック, 日本工業新聞社 (1988).