



Title	使用済み家電製品からのリサイクル技術
Author(s)	中野, 善和; 上原, 康; 谷村, 純二 他
Citation	電気材料技術雑誌. 2014, 23, p. 42-47
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/76906
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

使用済み家電製品からのリサイクル技術

中野 善和¹⁾、上原 康¹⁾、谷村 純二¹⁾、塚崎 岳²⁾、井関 康人³⁾

¹⁾ 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所

〒661-8661 尼崎市塚口本町8-1-1

²⁾ 三菱電機株式会社 生産技術センター

〒661-8661 尼崎市塚口本町8-1-1

³⁾ 三菱電機株式会社 リビング・デジタルメディア事業本部 〒100-8310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号

Recycling Technologies with Used Home Appliances

Yoshikazu Nakano¹⁾, Yasushi Uehara¹⁾, Junji Tanimura¹⁾, Takeshi Tsukasaki²⁾, Yasuto Iseki³⁾

¹⁾ Mitsubishi Electric Corporation, Advanced Technology R&D Center,

8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661, Japan

²⁾ Mitsubishi Electric Corporation, Manufacturing Engineering Center,

8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661, Japan

³⁾ Mitsubishi Electric Corporation, Living Environment & Digital Media Equipment Group,

2-7-3 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8310, Japan

Abstract :

Mitsubishi Electric has developed recycling technologies for the plastics recovered from used home appliances, namely, separation of plastic types, processing for RoHS compliance, and product applications. These technologies help to recover a large amount of high-quality used plastics and expand their application to products. By combining them with the technology to recover rare earth magnets from air conditioner compressors, we will promote recycling of electric home appliances and make a contribution to construction of recycling-oriented society.

キーワード：リサイクル、プラスチック、希土類磁石

Keyword : Recycle, Plastic Materials, Rare-earth Magnets

1. はじめに

当社では、循環型社会の構築を目指し、「特定家庭用機器再商品化法」(家電リサイクル法)の施行に先立って、1999年に業界初の家電リサイクル工場となる㈱ハイパーサイクルシステムズ(HCS)を立上げた。さらに、2010年度には、HCSの機械破碎選別工程で発生する多種類の樹脂が混在した混合破碎プラスチックを高純度に選別する再生素材化工場である㈱グリーンサイクルシステムズ(GCS)を稼動させた。GCSでは、比重選別、静電選別技術等を用いたプラスチック選別ラインが構築されており、混合破碎プラスチックは、單一種の樹脂に選別・再生され、当社の一部の製品に再生プラスチックとして利用されている。また、エアコンの圧縮機からの希土類磁石回収装置も導入されている。

2. 自己循環リサイクルの拡大に向けて

混合破碎プラスチックから選別回収した樹脂をさらに大量に製品に適用するためには、選別工程の効率化による大量の樹脂の選別回収と品質の向上、再利用時の適用範囲の拡大が必要である。したがって、製品市場への大量循環を実現するためには、

- (1) プラスチック破碎片の樹脂種を高精度に識別する技術
静電選別前の成分比管理による選別効率の向上と選別樹脂の純度管理
- (2) 環境規制物質の大量選別除去技術
臭素(Br)含有樹脂片の除去によるRoHS適合化
- (3) 再生プラスチックの製品適用技術
新材料に匹敵する色合いの自由度の獲得や不可避的に残存する異物の露出低減
の開発が必要であり、また、樹脂の高純度化とRoHS適合化による高い品質とともに再利用時の意匠性等を確保することが重要である。

3. プラスチックリサイクルの高度化技術開発

3.1 樹脂識別技術

混合破碎プラスチックには、PP、PS、およびABS樹脂を中心に多様な種類のプラスチックが含まれており、これらの混合樹脂から高精度かつ自動で樹脂種を識別する装置の開発に取り組んだ。

樹脂の種類を非接触・非破壊で識別する方法として、近赤外光、中赤外光およびレーザラマン分光の利用が

ある。このうち、近赤外光の反射を用いた樹脂識別技術はこれまでに白色樹脂に対して有用性が示されているが、有色樹脂に対しては、有色樹脂が近赤外光を反射しないことから、適用が困難である。家電からの混合破碎プラスチックには、少なからず有色樹脂が含まれるため、有色樹脂に対しても識別可能な技術の適用が必要となる。レーザラマン分光は、1秒未満の短時間で樹脂種に特有の信号を検出することができるが、レーザ光の散乱強度やレーザ照射によって試料から発生する蛍光が影響して、白色樹脂と有色樹脂とを同一の条件で識別することは極めて困難であることが実験検討で判明している。これに対して中赤外分光は、レーザラマン分光に比べて評価所要時間の点で劣るもの、相対的に外乱を受けにくい条件で、全ての樹脂種の識別が可能である。そこで、連続して多数の樹脂フレークを非接触で評価するのに適した手法として、中赤外光の反射スペクトルを用いた樹脂識別法を採用することとした。

図1に、PP、PSおよびABSの主要3プラスチックの赤外吸収スペクトルを示す。グラフの横軸は波数(波長の逆数: 単位 cm^{-1})で、縦軸は吸光度である。これらの樹脂はいずれも炭素(C)と水素(H)が主要構成元素

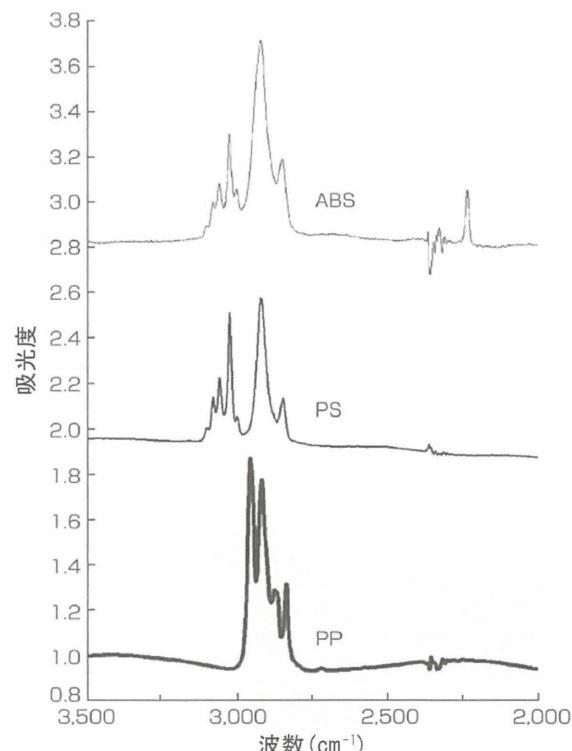


図1 PP、PS、ABSの赤外吸収スペクトル

Fig.1 IR spectroscopy of PP, PS and ABS

で、例えば、スペクトルの $3,000\text{cm}^{-1}$ 近傍の領域には、3樹脂ともにC-H結合に起因した吸収が現れる。その形状は各樹脂に違いがあり、この領域のスペクトル解析から、各樹脂の区別が可能である。ただし、PSとABS樹脂との比較では、この領域のスペクトル形状は似ており両者の区別は難しいが、ABS樹脂のスペクトルには $2,350\text{cm}^{-1}$ にPS樹脂のそれには見られない吸収があることがわかる。したがって、 $3,000\text{cm}^{-1}$ 近傍のスペクトル形状と $2,350\text{cm}^{-1}$ の吸収の有無から、未知のフレークがどのような樹脂種か（上記3種以外かも含めて）このアルゴリズムで区別できることを確認した。

赤外吸収(反射)スペクトルは、フーリエ変換型分光計(FTIR)で測定するのが最も高感度で短時間とされる。同分光計では、光源からの連続赤外光が干渉計を経ることで光路長差をもつ2つのビームに分けられて試料に照射され、その吸収または反射を測定する。測定中に干渉計の可動鏡が移動し、1回の往復で所定の波長領域をカバーする干渉光の集まりが測定され、その信号をフーリエ変換することによって波長と吸収（反射）強度の関係を示すスペクトルが得られる。短時間で測定を行うためには、可動鏡の移動をできるだけ早く、かつできるだけ短距離にした方が有利であるが、移動速度に限界があり、また、移動する絶対距離が短くなると波長分解能が低下する。通常の材料分析では、感度とともに高い波長分

解能が要求されるが、主要3プラスチックの高速識別に特化するため、 $3,000\text{cm}^{-1}$ 近傍のスペクトル形状解析の精度が低下しない分解能を見極めて可動鏡の移動範囲を制限することで、高速（1フレークあたり1秒未満）かつ高精度な識別を実現した。

図2に、㈱島津製作所と共同開発した樹脂種識別装置を示す。穴を設けた円盤状の搬送板を傾斜させることによって、自重を利用してプラスチックフレークを1個ずつ穴に吸着させ、識別位置に自動搬送する。中赤

外分光測定は、FTIR装置本体からの2つのビームが識別位置に集光・照射され、試料表面で反射した光を検出することによって行われ、前述のアルゴリズムに基づいて識別位置を通過したフレークの樹脂種が識別される。識別されたプラスチックフレークは、円盤下方位置でエアガンを用いて自動選別することで、分別回収される。この流れによって、PP、PS、ABSの主要3プラスチックを99%以上の精度で識別・分別することが可能となった。GCSで回収された製品の数ロットの純度検査に試用し、現行の化学分析で得られたPP、PSおよびABS樹脂の検査結果と良い一致を示し、自動純度検査としての有用性を実証した。

3.2 Br含有樹脂の大量選別除去技術の開発

再生プラスチックを家電製品に適用するためにはRoHS指令に適合する必要がある。これまでの調査から、当社の回収プラスチックでは、RoHS指令対象物質のうちBr系難燃剤の残留のみが問題であり、家電3大プラスチックと呼ばれるPP、PS、ABS樹脂において、Br濃度1wt%以上を含有するプラスチック片を除去することで、RoHS規制値に相当するBr濃度300ppm以下の達成が可能である。Br含有樹脂の除去のため、BrのX線吸収効果を利用してX線透過量の差から搬送される破碎プラスチック片全量に対し、Br含有量を評価し、除去すべき破碎プラスチック片を識別して、エアガンを用いて選択的に除去する技術を開発した。破碎プラスチック片の大量処理時に破碎片の搬送密度が高くなると、エアガンでBr樹脂片を除去する際に、除去不要な周囲の樹脂片と一緒に除去する「とも連れ」が顕在化する。本現象は、エアがBr樹脂片のみに限定して噴射されず、その周囲（主に移動するBr樹脂片の後ろ側）に広がるために発生すると考えられる。エアの実際の持続時間はエアガン配管内のエア量に依存す

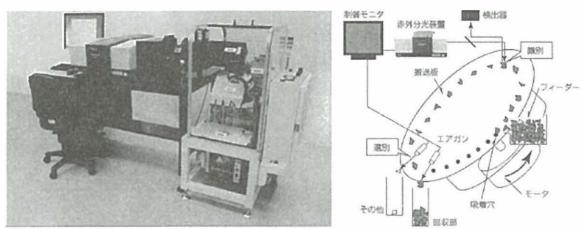


図2 中赤外分光応用樹脂識別装置

Fig.2 Plastic identification Equipment using mid-infrared spectroscopy



図3 Br含有樹脂の大量選別除去装置

Fig.3 Large-scale eliminating equipment for plastic flakes containing bromine

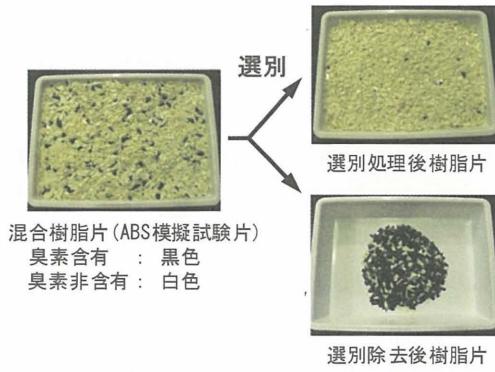


図4 選別前後の破碎プラスチック片（模擬試験片）

Fig.4 Plastic flakes (model samples) after bromine elimination process

るため、配管内体積を小さくすることで、気流制御精度を高められる。そこで、樹脂除去用エアガンの内部エア量を極めて少なくした電磁弁・エアノズル一体構造のエアガンを備えた図3に示す大量選別除去装置を開発した。図4は開発機にて、模擬試験片を用いて除去状態を確認した結果を示したものであり、Br樹脂片（黒色）を分離できていることがわかる。

大量選別除去装置はGCSのラインに導入され、比重および静電選別後の樹脂片に対して約750kg/Hrの速度でBr含有樹脂の識別除去処理を実施中で、除去済み樹脂片は全てRoHS適合であることを確認している。

3.3 再生プラスチックの適用技術

混合破碎プラスチック由来の再生プラスチックでは、前使用時の色が残ったり、異物が微量残存したりするなど、意匠性確保が困難である。高い素材純度や品質と併せ、製品適用可能な意匠性を確保しうる製品適用技術が求められる。

3.3.1 異物の露出低減成形技術

再生プラスチックの微量異物が成形品表面に現れるると、意匠性の低下を招く。異物の影響を緩和するため、表面に微細な凹凸を形成したシボ金型を用い、凹凸形状の成形体表面への転写による異物の露出低減成形を検討した。結果を図5に示す。成形品の表面が平滑な場合に比べて、シボ形成した場合は異物の露出が少なく、シボ付きの成形品では、一定温度保持型の金型温度制御の場合、樹脂温度の高温化で異物の露出低減効果が最も高い結果となった。

3.3.2 色彩選別技術

従来の再生プラスチックは、有色プラスチックが含まれており、また、異物の表出を目立たせないために、

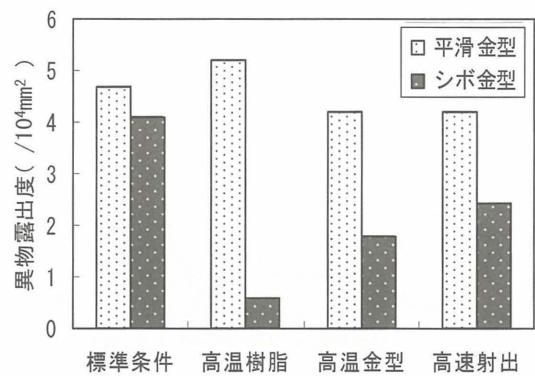


図5 異物の露出度評価結果（一定温度保持型）

Fig.5 Concealment levels vs. molding conditions (Constant mold temperature control)

表1 色彩選別前後の明度

Table1 Brightness before and after color sorting process

樹脂種	選別前	選別後（白色系）
PP樹脂	53%	77%
PS樹脂	49%	77%
ABS樹脂	54%	80%

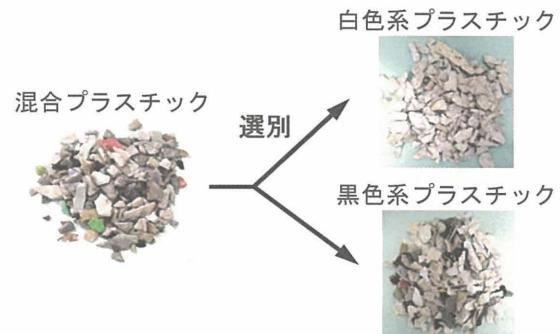


図6 色彩選別前後のプラスチック片

Fig.6 Plastic flakes after color sorting process

主に灰色や黒色の用途に用いられることが多かった。

プラスチックを、色の濃淡によって白色系と黒色系とに選別して分離できれば、適用時の色調範囲を拡げることができる。そこで、白色系プラスチックについて高い精度での選別を実現するため、色彩選別装置において搬送量などの種々の選別条件についてタグチメソッドを用いた最適化検討を行った。表1に色彩選別前後の明度を示し、図6に色彩選別前後のプラスチック片の一例を示す。ABS樹脂では目標明度80%を得ることに成功した。PS、PP樹脂においては目標明度80%に満たなかったが、酸化チタン等の白色着色剤を添加することにより、目標明度80%を得られる目処を付けることが出来た。

4. 開発技術の展開（リサイクルフロー）

図7に、開発技術の適用先となるプラスチックリサイクルのフローを示す。

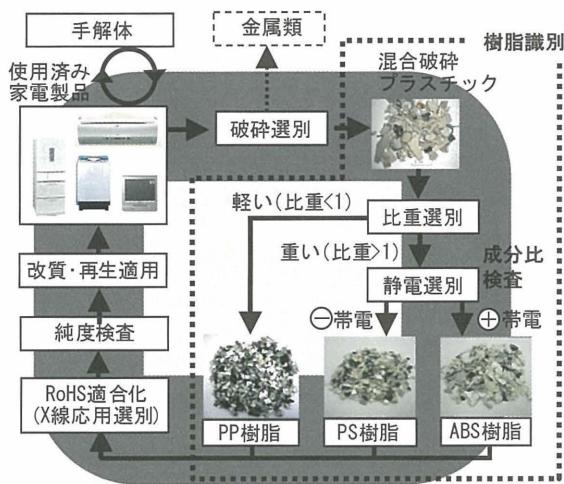


図7 プラスチックリサイクルのフロー

Fig.7 Flow chart of large scale and high purity plastic recycling

樹脂識別技術は、分別樹脂片の純度自動検査や、分別前樹脂片の組成比調査に適用する。現在、ラインでは、分別樹脂片の純度を手作業で検査しているが、自動化によって効率化と精度向上が期待される。また、分別前樹脂片の組成比をあらかじめ調べることで、静電選別の条件をロット毎に最適化し歩留りを改善できる可能性がある。

Br含有樹脂の大量選別除去により、回収プラスチックのRoHS適合性が保証され、家電品への再利用、すなわち完全な自己循環が可能になった。

また、再生プラスチックの製品適用技術により、意匠部材を含む幅広い部品への再利用が可能となる。意匠部品へ適用しうる要素技術としての目処は付けられたが、実用化に向けては複雑な形状を有する実際の部品への適用検討を進める必要がある。

5. リサイクルプラスチックの環境負荷評価

自己循環リサイクル技術の環境適合性を評価した。今回の評価では、破碎した使用済み家電からの混合破碎プラスチックを回収し、比重選別、異物除去、静電選別、Br含有樹脂選別除去を行い、外部委託先でのリペレットにより再生樹脂ペレットを得るまでの工程を対象とした。詳細な数値は省略するが、評価においては、HCS、GCSのリサイクルシステムにおける実際の処理量、処理時間、マテリアルバランス、各処理工程

のエネルギー量データを収集して用いた。また、各リサイクル手法のプロセスで不足する産物を新規製造によって補い、アウトプットが等価となるように設定した製品バスケット法により見積りを行った。評価の結果、自己循環リサイクルでの温室効果ガス排出量は、埋立、ケミカルリサイクルに比べそれぞれ、約76%、約83%の削減を見込むことができた。

6. 希土類磁石のリサイクル技術開発

使用済みエアコンの圧縮機は、GCSにて圧縮機解体装置を用いて銅材と鉄材とに解体、分離されている。当社では、今回さらに、半解体の圧縮機から希土類磁石を分離、回収する装置を開発した。本装置による希土類磁石回収は、図8に示すように、(1)半解体の圧縮機からのローター抜取、(2)減衰磁界を利用した室温下での減磁、(3)ローターの解体、の3つの工程からなる。各工程間は自動搬送システムにより統合されている。この装置は、ラインタクト30秒/機と効率的に希土類磁石を回収することができる。回収した希土類磁石は磁石メーカーに供給し、新たな磁石として当社製品への再利用を図っていく。

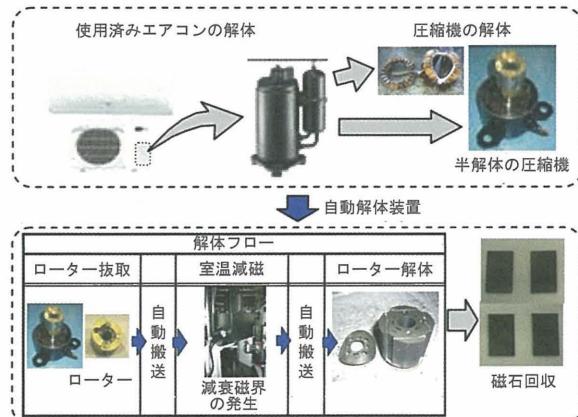


図8 使用済みエアコンからの磁石回収フロー

Fig.8 Recycling process for rare earth magnets in wasted compressors of air conditioners

7. まとめ

破碎混合プラスチックを更に大量に製品に適用するため、樹脂識別技術、環境規制物質の大量選別除去技術、製品適用技術の開発を行った。また、使用済みエアコンから希土類磁石の回収技術の開発を行った。これらの開発により、以下の結果を得た。

(1) 赤外分光法を応用した樹脂識別法により、PP、PS、

ABS の主要3プラスチックを99%以上の精度で識別・分別することが可能となった。今後、大量選別前の混合樹脂フレークの組成比把握にも応用先を広げる開発を進める予定である。

- (2) X線を応用して、樹脂中に混在するBr含有樹脂片の高速選別・除去が可能な大量選別除去装置を作製した。大量処理試験にてPP、PS、ABS樹脂の全回収プラスチックのRoHS適合化が可能であることを確認した。
- (3) 再生プラスチックの意匠部品への適用を可能とし、適用製品部材の大幅な拡大を実現しうる色彩選別、異物の露出度低減などの調色改質と成形にかかる要素技術を開発した。
- (4) エアコンの圧縮機から短時間で希土類磁石を回収するための自動解体装置を開発した。

なお、プラスチックのリサイクル技術開発は、平成21年度経産省委託事業である「プラスチック高度素材別分別技術開発」および平成23年度産業技術実用化開発事業費補助金「プラスチックの高度素材識別技術及びリサイクル素材化技術」により支援を受けた。また、光識別技術開発は㈱島津製作所と共同で実施した。一方、希土類磁石の回収装置の開発は、経済産業省「レアアース等利用産業等設備導入事業」の支援を受けた。

参考文献

- (1) 三菱電機株式会社：平成21年度経済産業省産業技術研究開発委託費（プラスチック高度素材別分別技術開発）事業報告書
- (2) Yasushi Uehara, Muneaki Mukuda and Takashi Tsukasaki: Mitsubishi Electric ADVANCE, 140, (2012)16

(2014年10月16日受理)

著者略歴

中野 善和

1980年7月埼玉県生まれ。2003年3月早稲田大学理工学部機械工学科卒、2005年3月早稲田大学大学院理工学研究科ナノ理工学専攻前期課程修了。

同年4月三菱電機(㈱)入社。以来、主として、金属材料(放電加工用電極、モータ用磁石、遮断器・開閉器用接点)開発に従事。日本金属学会会員。



上原 康

1959年9月大阪府生まれ。1982年3月京都大学工学部原子核工学科卒、1984年3月京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻前期課程修了。同年4月三菱電機(㈱)入社。

以来、主として、X線や電子線を用いた材料分析技術の開発やデバイス等の解析業務に従事。1995年9月Nevada大Las Vegas校の客員研究員としてAdvanced Light Source(米国)での放射光利用研究に従事(1年間)。応用物理学会、日本分析化学会、日本放射光学会会員。



谷村 純二

1965年6月京都府生まれ。1988年3月大阪大学基礎工学部物性物理工学科卒、1990年3月大阪大学大学院基礎工学研究科物理系物性学専攻前期課程修了。同年4月三菱電機(㈱)入社。

以来、主として、材料分析技術の研究に従事。顕微鏡学会、応用物理学会会員。



塙崎 岳

1965年7月京都府生まれ。1989年3月北海道大学工学部機械工学科卒、1991年3月北海道大学大学院工学研究科機械工学専攻前期課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。

主として生産ライン構築、設備開発、設計等、生産技術開発に従事。



井関 康人

1964年1月兵庫県生まれ。1987年3月大阪大学工学部産業機械工学科卒、1989年3月大阪大学大学院工学研究科産業機械工学専攻前期課程修了。同年4月三菱電機(㈱)入社。主として家電リサイクル技術開発、事業運営に従事。

(本論文は平成25年度電気材料技術優秀論文の受賞内容をまとめたものである)