

気流制御を用いた混合樹脂の3種同時選別技術

Techniques for Simultaneous Sorting of Three Kinds of Resin Using Air Flow Control

濱田 真吾

Shingo Hamada

八田 健一郎

Ken-ichiro Hatta

山口 直志

Naoshi Yamaguchi

楠元 寛史

Hiroshi Kusumoto

宮坂 将稔

Masatoshi Miyasaka

南田 幸廣

Yukihiro Minamida

要 旨

使用済み家電のリサイクル工程で発生する混合樹脂から近赤外線を利用し、臭素非含有の樹脂を高速・高精度に選別する技術の開発に取り組んできた。しかしながら、主要樹脂3種類（PP、PS、ABS）を選別するためには、1種選別を3回繰り返す必要があった。そこで筆者らは、一度の選別工程で3種を同時に選別する技術を開発した。樹脂を精度良く回収するためには、樹脂の飛翔（ひしょう）軌道のばらつきを抑制することが一番の課題であった。そのため、樹脂の飛翔軌道に沿ってコンベア速度と同じ風速の気流を発生させ、空気抵抗を相対的にゼロにすることで、樹脂の飛翔ばらつきを低減させることに成功し、高精度な3種同時選別を実現した。

Abstract

We have developed a technology that uses near-infrared to achieve high-speed, high-precision sorting of the shredder dust generated in the process of recycling used home appliances. It can only sort plastic that does not contain bromine. We have developed recycling technology that can sort three kinds of resin simultaneously. Suppressing the variability in trajectories of pieces of flying resin is essential to achieve accurate sorting. We supplied a flow of air at the same speed as the flying resin so that the relative speed of the air to the resin was zero. As a result, we succeeded in suppressing the air resistance.

1. はじめに

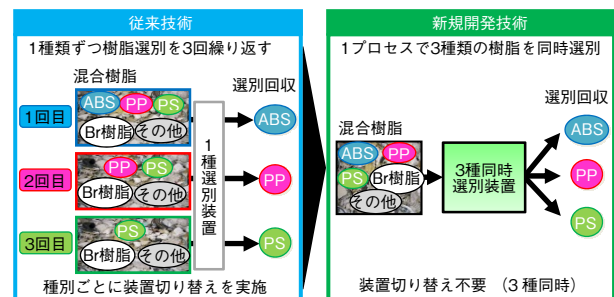
急速に経済成長が進むにつれ、資源に対する社会的な課題・関心が高まっている。当社では、資源循環型のモノづくりを推進しており、事業成長と環境貢献に向けた取り組みを加速している。その取り組みの1つとして、当社家電リサイクルプラントでは、使用済み家電から樹脂を回収し、再び自社製品の成形材料として活用させ、社内循環に貢献している[1]。

この取り組みをさらに促進させるため、筆者らは、使用済み家電の混合樹脂から、主要樹脂であるPP（ポリプロピレン）、PS（ポリスチレン）、ABS（アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン）の3種類の樹脂を、高純度でかつ、異物やRoHS（Restriction of Hazardous Substances）規制対象となる臭素（Br）含有樹脂の混入なく、自動選別する技術の開発に取り組んできた。その結果、混合樹脂から樹脂を1種類ずつ選別する高精度樹脂選別装置を開発し、パナソニックエコテクノロジーセンター（兵庫県加東市）、パナソニックエコテクノロジー関東（茨城県稲敷市）の当社家電リサイクル工場2社へ導入した。この樹脂選別装置は、樹脂片をベルトコンベア上に流し、近赤外線を用いた[2]センサによって分光測定、演算処理を行い、コンベアから飛翔（ひしょう）した樹脂のうち、所望の樹脂片のみをエアで射落として樹脂片を回収する自動選別システムである。

しかしながら、従来の選別装置では、第1図に示すように、選別1回目に残った樹脂をもう一度2回目として投入し、さらに2回目に残った樹脂を3回目として投入するため、選別仕掛かり中の材料の仮置き場所の確保や搬送、再投入が選別の都度発生しており、いかにして選別の生産性を上げるかが大きな課題であった。

そこで、本開発では上記課題解決のため、世界初となる1回の選別プロセスで3種類の樹脂を同時に選別する技術の開発を行った。

本稿では、これまでの樹脂種判別技術における開発の取り組みと、今回開発した気流制御を用いた世界初3種同時選別技術について述べる。



第1図 従来技術と新規開発技術の比較

Fig. 1 Comparison of conventional technology and new technology

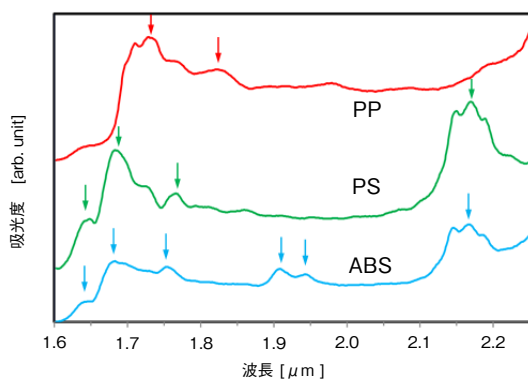
2. これまでの開発取り組み

2.1 近年の樹脂選別技術

近年の樹脂選別技術としては、従来の水比重選別や静電分離、近赤外線を使用した連続処理選別などがある。水比重選別は、水に浮くPPの選別のみ可能である。静電分離は、ABSとPSのみ選別が可能で、PPの選別には水比重との併用が必要となり、3種の樹脂を回収するためには選別コストが大きくなってしまふ。

近赤外線による選別は、第2図に示すように近赤外線領域における樹脂の吸収スペクトルの違いを利用することで樹脂種を判定し選別する方式である。3種の樹脂判別においては、1.7 μm ~1.8 μm および2.1 μm ~2.2 μm 付近でPP、1.9 μm ~2.0 μm 付近でPSとABSの吸収スペクトルに差が生じ、この近赤外線領域に着目することで判別が可能となる。

しかしながら、RoHS禁止物質の対象となる臭素含有樹脂を除外しなければ家電製品の再生材として使用できない。そのため、従来ではX線選別装置を樹脂選別工程前もしくは後に追加して臭素含有樹脂を除外するなど、多くの周辺設備を必要としていた。



第2図 近赤外線領域における樹脂の吸収スペクトル
Fig. 2 Absorption spectrum of the resin in the NIR (Near Infrared)

2.2 樹脂種判別における開発目標

樹脂種判別および臭素含有樹脂の判別における課題を解決すべく、筆者らは臭素の高精度検出が可能な新しい近赤外線選別の技術開発を行ってきた。開発スペックとしては、当社製品に使用可能な選別純度^(注1)99%以上を目標とした。

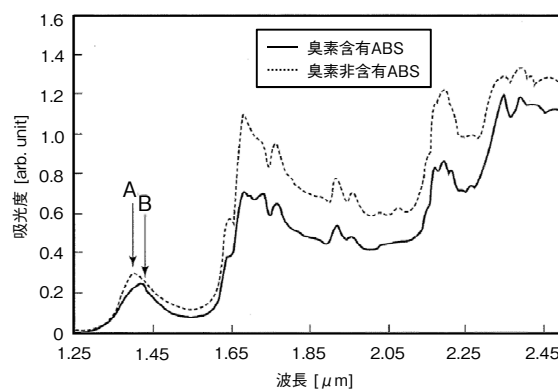
また、臭素濃度に関しては、出荷前検査で当社の基準である臭素濃度300 ppm以下を保証する必要があった。

(注1) 選別純度：回収した製品樹脂 / (回収した製品樹脂 + 回収した異物)。

そのため、本選別工程での回収品臭素濃度^(注2)は、これまでの実験結果とそれを用いた統計分析から導き出し170 ppm以下を目指した。

2.3 臭素含有樹脂の判別

樹脂に多く用いられている臭素系難燃剤としては、テトラプロモビスフェノール系またはヘキサプロモシクロドデカン系などの臭素化合物がある。これらの臭素系難燃剤は、C-Br結合以外にもC-H結合をもつ分子構造のものが多い。そのため、近赤外線領域における吸収はC-Br結合による非調和性の振動を受けることになる。したがって、C-H結合は、本来のC-H結合の伸縮振動と変角振動の吸収ピークが現れる波長からシフトする。筆者らはこれに着目し、第3図に示すように、1.4 μm 付近で臭素系難燃剤を含有されていない樹脂の吸収ピーク (A) に対して、臭素系難燃剤を含有されている樹脂のピーク (B) のようにピークシフトが生じ、判別が可能となることを見いだした。



第3図 BrによるC-H結合のピークシフト
Fig. 3 Peak shift of the carbon-hydrogen bond due to bromine

2.4 高速かつ高精度な樹脂選別アルゴリズムの確立

選別対象となる混合樹脂は500 kg/h~1500 kg/hと大量で、樹脂種および臭素含有樹脂を瞬時に判別しなければならなかった。しかしながら、一般的な分析器などに多く用いられるマッチング手法であるPLS (Partial Least Squares) 回帰分析法などを採用した場合、演算回数が多くなり、高速判別に対応できず、生産性を落としてしまう。

そこで筆者らは、2.3節で見いだした臭素判別の波長領域のみに重み付けをして、ピーク差を特徴づけるように独自のアルゴリズムを開発した。その結果、演算回数を極端に少なくしても、判別の信頼性を維持したまま樹脂

(注2) X線検査器による全臭素測定による。

種および臭素含有樹脂を高速に判別することが可能となった。

これにより、目標スペックであった選別純度99%以上、臭素濃度170 ppm以下を達成し、近赤外線による樹脂種および臭素含有樹脂の判別技術を確立した。

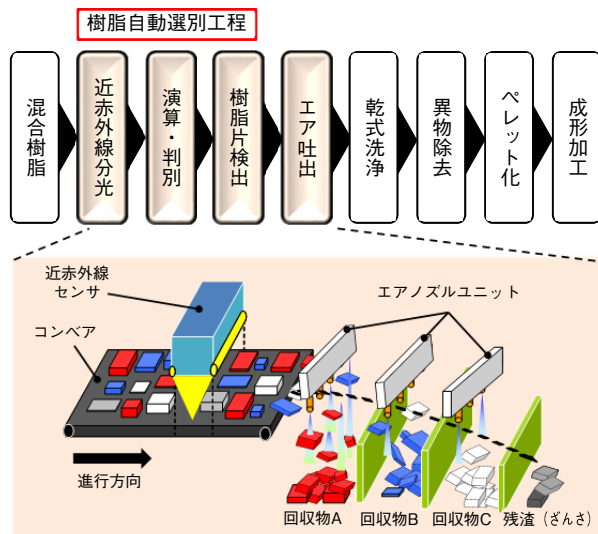
3. 3種同時選別技術の開発

3.1 開発ターゲット

樹脂選別のシステムフローを第4図に示す。筆者らが開発した樹脂選別装置はベルトコンベア上に混合樹脂を供給し、その上を流れる混合樹脂を近赤外線センサで高速検知・判別し、その端部から飛翔する樹脂のうち回収したい樹脂をエアノズルで高速に射落として選別する。

これまで当社で開発してきた、1種選別の樹脂選別装置をベースに、ベルトコンベアの流れ方向にエアノズルを3連配置し、それぞれの樹脂が回収できるように4つの回収容器を備えることで、1回の選別で3種類の樹脂を回収できる装置構成をとった。

ここで近赤外線を用いた樹脂選別装置の性能比較を第1表に示す。家電リサイクル樹脂を対象とした選別装置においては、臭素判別を行えないが、選別純度は90%~95%まで達成している。容器リサイクル樹脂やRPF (Refuse Paper & Plastic Fuel) を対象とした選別装置では、臭素判別機能はあるものの、回収樹脂の臭素濃度170 ppm以下を実現することができなかった。一方、当社では第2章で述べたように、高精度な臭素判別機能と選別純度99%以上を達成する高精度な選別技術を確立してきた



第4図 樹脂リサイクルシステムのフローと模式図
Fig. 4 Flowchart and schematic diagram of resin recycling system

が、これに加えて、世界初^(注3)となる3種同時選別技術の確立を目指した。

第1表 近赤外線を用いた選別装置の性能比較
Table 1 Benchmark of NIR sorting technology

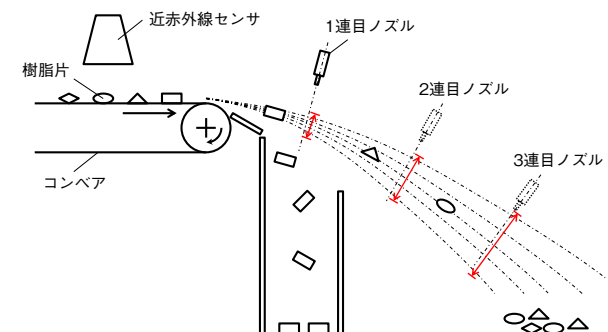
		家電用	容器リサイクル RPF用	当社 (開発)
性能	樹脂 (PP, ABS, PS)	○	○	○
	回収率*	60%~80%	70%	70%
	臭素判別	×	300 ppm	170 ppm
	選別純度	90%~95%	97%~98%	99%以上
	1回の選別数	1種	1種	3種

※回収率：回収した製品樹脂/回収したい製品樹脂の総量

3.2 3種同時選別における課題

当初の3種同時選別システム構成では、第5図に示すように、1連目のノズル下を通過した後、下流になるにつれて、樹脂片の飛翔中に空気抵抗を受けて飛翔ばらつきが大きくなった。その結果、近赤外線センサで認識した位置情報と、実際にエアノズルで射落とすべきタイミングがわずかにずれてしまい、回収したい樹脂を正確に射落とすことができなかった。また、対象樹脂へのエアの当たる部分によっては、他の回収容器に誤って射落とされ、選別純度の悪化を起こす原因となっていた。そのため、「コンベア先端部から離れた位置に設置したエアノズルで、いかに精度良く樹脂を射落とすか」が、解決すべき大きな課題であった。

まず初めに、飛翔する樹脂片に作用する力の関係を検討し、第6図に示す空気抵抗の力学的関係図を得た。この図によると、樹脂片が風速 U の気流中を速度 V で飛翔している場合、(1)式より空気抵抗 D を受ける。この空気

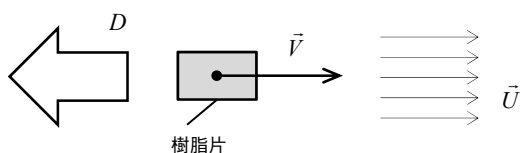


第5図 3種同時選別における課題
Fig. 5 Problems with a system for simultaneously sorting three kinds of resin

(注3) 2016年10月現在 (当社調べ)。

$$D = C_D \frac{\rho(\vec{V} - \vec{U})^2 S}{2} \dots\dots\dots (1)$$

- D : 空気抵抗
- C_D : 抵抗係数
- V : 樹脂片の飛翔速度
- U : 周辺気流の風速
- ρ : 空気密度
- S : Uに対する樹脂の投影面積



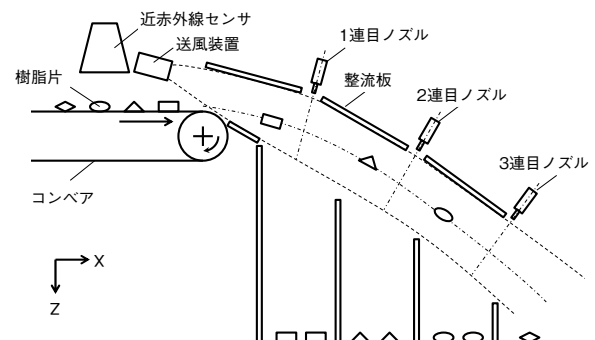
第6図 樹脂片に生じる空気抵抗
Fig. 6 Air resistance occurring in the resin pieces

抵抗Dが、樹脂片の大きさや形状によって個々に異なるため、樹脂片一つ一つの飛翔軌道が異なり、その結果、射落とし精度の悪化を招くことがわかった。

3.3 気流制御による飛翔ばらつきの抑制

3.2節で述べた課題を解決するため、周辺気流の風速Uと樹脂片の飛翔速度Vの相対速度を限りなくゼロにすることで、空気抵抗Dを大幅に抑制する対策を考案した。

その装置構成の一例を第7図に示す。ここで、コンベアの流れ方向をX方向、コンベアの幅方向をY方向、コンベア面に対して垂直方向をZ方向として定義し、以降の図説においても同様に定義する。大きな構成としては従来の装置に送風装置と気流整流板を設置し、樹脂片の飛翔軌道に沿ってコンベア搬送速度と同じ風速の気流を発



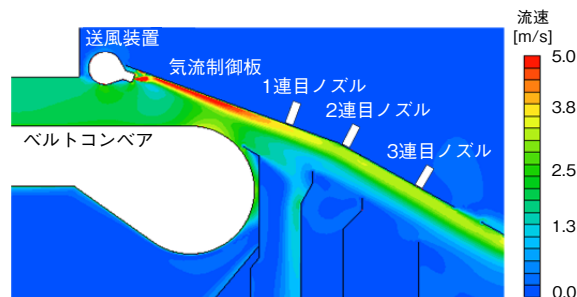
第7図 気流制御を用いた選別機構
Fig. 7 Sorting system with assisting blow

生させる形態をとった。これにより、コンベアから飛び出した樹脂片は、飛翔方向から受ける空気に対して相対速度ゼロに近い状態で飛翔することが可能になり、樹脂片の飛翔ばらつきを抑制できるように設計した。

3.4 気流制御のシミュレーション

上記の設計を最適化するため、送風装置と気流整流板を使用して、樹脂片の飛翔軌道であるエアノズル下50 mmの位置で、樹脂飛翔方向に風速がベルトコンベア速度(3±0.5 m/s)と同じになるように、送風装置および気流制御板の位置、角度、風速を2次元解析のシミュレーションによって求めた。このときの気流制御のシミュレーション結果を第8図に示す。この結果から、送風装置から出たエアは初期風速が速いものの、気流整流板に沿って下流へ拡散されていく。これは、送風装置からの気流によって、流れる空気が気流整流板に引き寄せられるコアンダ効果によるものである。その結果、ベルトコンベア付近の風速と、各連のエアノズル下50 mmを通る樹脂飛翔軌道の風速を、ベルトコンベアと同じ3±0.5 m/sにすることができ、コンベアから放たれた樹脂片が、空中をあたかもコンベアの延長上で移動しているような状態を作り上げる条件を導き出した。

このシミュレーションによって得られた各条件を、樹脂選別装置に反映させ、実際に樹脂片を流して飛翔ばらつきの測定を行った。



第8図 気流制御のシミュレーション
Fig. 8 Simulation of airflow control

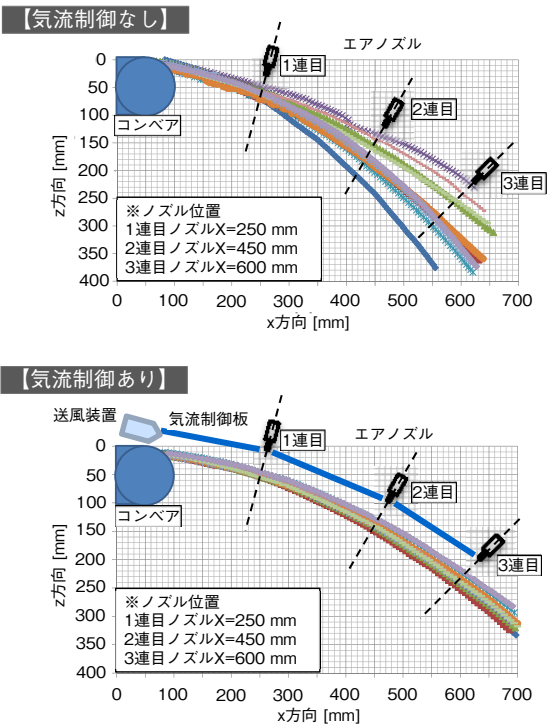
3.5 飛翔ばらつきの測定および測定結果

第6図および第7図における樹脂片が、各ノズルの直下を通過するときのX、Y、Z方向の時間および位置の各ばらつきを3次元的に測定する必要があったため、ステレオ法による3次元解析手法を用いた。ステレオ法は、複数の異なる角度からの2次元画像から、対象物の大きさや位置情報などを高精度に取得する測定手法である。今回は高速度カメラ2台を使用し、飛翔する樹脂片を双方向から撮

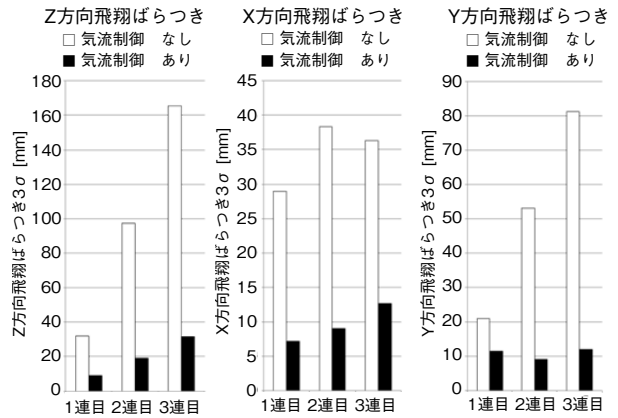
影することで、連続的に樹脂片の3次元座標データを取得し、飛翔軌道を数値化した。測定には40 mm~50 mm程度の大きさの冷蔵庫破砕樹脂（ABS）を用い、送風装置からの気流を、樹脂片の飛翔経路に沿った風速がコンベア速度である 3 ± 0.5 m/sと同じになるように調整した。

飛翔ばらつき目標値としては、これまでの射落としの実績より、2連目、3連目のばらつきが、気流制御なしの1連目のばらつきと同等もしくはそれ以下となることを目指した。飛翔ばらつきの測定結果を第9図に示す。気流制御によって、後方のノズル下の飛翔ばらつきが大幅に減少していることがわかる。また、第9図より得られた各方向の飛翔ばらつきをそれぞれ3 σ で表し、気流制御の有無で比較した結果を第10図に示す。

この結果より、気流制御によって、各方向における樹脂片の飛翔ばらつきは、大幅に減少している。特に3連目のノズル位置においては、気流制御の有無でX方向では約1/3、Z方向では約1/5、Y方向では約1/7まで抑制することができた。また、目標であった気流制御なしの1連目の飛翔ばらつき以下に3連全てにおいて達成した。これに加え、ノズル位置・角度・吐出タイミングなどの各条件を最適化することによって、高精度に3種吹き分けが可能なエア選別工法を確立し、99%以上という高純度で高速処理が可能な樹脂選別技術を実現した [3]。



第9図 樹脂片の飛翔軌道測定
Fig. 9 Results of measuring trajectories of resin pieces



第10図 樹脂片の飛翔ばらつき
Fig. 10 Variation in flying resin pieces

5. まとめ

近赤外線を用いて樹脂種および臭素含有樹脂を高速・高精度に判別する技術を開発した。また、飛翔する樹脂片に生じる空気抵抗に着目した独自の気流制御により、世界初となる3種同時選別技術を確立した。

本技術を用いた選別装置は、当社リサイクル工場2社へ導入・量産稼働を行っており、生産効率向上へ貢献している。当社家電リサイクル工場で選別したPP, PS, ABSは、当社の冷蔵庫やエアコン製品に採用されているだけでなく、社外向けとしても販売し、樹脂の資源循環量拡大に貢献している。上記の取り組みが認められ、2015年度資源循環技術・システム表彰において最高賞である「経済産業大臣賞」を受賞した[4]。

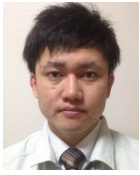
また、本技術を用いた選別装置において「世界初3種同時選別」の有用性が認められ、2015年度、環境省より「省CO₂型リサイクル高度化設備導入促進事業」の補助金交付対象として採択された。

今後、まずは国内にある家電リサイクル工場に向けて外販展開していき、さらなる高資源循環社会の実現に向けて貢献していく。

参考文献

- [1] パナソニック (株), サステナビリティレポート 2013, pp.57-67, <http://www.panasonic.com/jp/corporate/sustainability/pdf/sr2013j.pdf>, 参照 Oct.20.2016.
- [2] 尾崎幸洋 他, 近赤外分光法, (株)学会出版センター, 2008, pp.40-45.
- [3] 山口直志 他, “3種類の樹脂を同時選別可能なリサイクル技術,” プラスチック成形加工学会第26回年次大会講演論文集, pp.23-24, 2015.
- [4] 池本義寛 他, “使用済み家電品廃棄混合樹脂からの樹脂循環リサイクル,” 環境管理, vol.51, no.12, pp.42-45, 2015.

執筆者紹介



濱田 真吾 Shingo Hamada
生産技術本部 環境生産革新センター
Green Manufacturing Innovation Center,
Manufacturing Technology and Engineering Div.,



山口 直志 Naoshi Yamaguschi
パナソニック プロダクションエンジニアリング
(株)
Panasonic Production Engineering Co., Ltd.



宮坂 将稔 Masatoshi Miyasaka
生産技術本部 環境生産革新センター
Green Manufacturing Innovation Center,
Manufacturing Technology and Engineering Div.,



八田 健一郎 Ken-ichiro Hatta
パナソニック プロダクションエンジニアリング
(株)
Panasonic Production Engineering Co., Ltd.



楠元 寛史 Hiroshi Kusumoto
パナソニック プロダクションエンジニアリング
(株)
Panasonic Production Engineering Co., Ltd.



南田 幸廣 Yukihiro Minamida
パナソニック プロダクションエンジニアリング
(株)
Panasonic Production Engineering Co., Ltd.