

使用済みプラスチックの乾式分離技術

Dry Separation Technology of Waste Plastics

清水 浩 エンジニアリング研究所 燃焼システム研究部 主任研究員
宮澤 智裕 エンジニアリング研究所 燃焼システム研究部
山崎 茂樹 環境開発部 開発推進グループ 主査

Hiroshi Shimizu
Tomohiro Miyazawa
Shigeki Yamazaki

使用済みのプラスチックリサイクルには成分ごとに分離選別する技術が必要である。特に使用済み容器包装プラスチックをリサイクルするには、塩素含有プラスチックを分離選別する技術が必要とされている。当社はプラスチックの種類ごとの熔融温度の違いを利用して、一部目的成分のみを選択的に造粒することで、プラスチック成分間に形状差を与え、エアテーブルによりプラスチックを高精度に分離することを可能とした。

In order to recycle waste plastics, it is necessary the separation technology for plastics. NKK developed new sorting technology. This technology has many benefits such as, simplicity of the process, applicability for mass separation and no-need for waste-water treatment. In this paper, the separation efficiency of PVC from packaging waste using the technology is reported.

1. はじめに

プラスチックの廃棄物は体積割合で一般廃棄物の約6割を占めており、数年前まではその多くが焼却、あるいは埋め立てされており、あまりリサイクルはなされていなかった。その問題を解消するため、2000年4月より容器包装リサイクル法が完全施行され、容器包装プラスチックは種々のマテリアルリサイクルあるいはケミカルリサイクルを行うことが義務付けられた。

本来、廃プラスチックをリサイクルするには、プラスチックを単一種類のプラスチックとして回収し、リサイクルすることが望ましい。しかし、廃棄物として回収されるものには、どうしても異種成分のプラスチックが混入している。そのため、プラスチックをリサイクルするにはプラスチックを成分ごとに分離選別する技術が必要不可欠である。

現在に至るまで、その必要性から、種々のプラスチック分離技術が開発されてきている。乾式法としては静電選別、湿式法としてはハイドロサイクロンなどである。しかし、これらの分離技術にはいくつか解決すべき問題がある。

まず、静電気を利用した静電選別は分離対象物の表面特性を利用するため、効率の良い分離を達成するには表面を洗浄する必要がある。また、帯電させるために分離対象物を帯電行程で単一層に広げる必要があり、大量処理が困難であることなどが問題である。また、ハイドロサイクロンでは水を利用するため水処理が必要になること、また、表面に油などの汚れが付着していると、プラスチックが水になじまず浮遊してしまい、分離効率が低下するなどの問題がある。

とりわけ、容器包装プラスチックの分離において、フィルム形状のプラスチック(ラップ、袋類など)は、他の形状をしているプラスチックに比べ分離が比較的困難である。これは、フィルム形状のプラスチックは比表面積が非常に大きく、分離対象物間の接触による相互作用、表面状態の影響が大きいためである。

そこで当社は、分離が比較的困難とされるフィルム形状プラスチックを大量に含む使用済み容器包装用プラスチックに着目し、低コストな乾式分離により効率的に成分分離することを試みてきた。本稿では、エアテーブルによるプラスチックの比重分離試験について報告し、次に、分離試験からの知見より考案した、熔融温度の差を利用して、プラスチック成分ごとに熔融造粒により形状差を与え、その後、エアテーブルでプラスチックを分離する新方式の廃プラスチック乾式分離技術について報告する。

2. エアテーブル単体による分離試験

2.1 概要

容器包装プラスチックをリサイクルする認定再商品化方法として、再資源化、高炉原料化、油化、ガス化、コークス炉化学原料化などがある。これらのリサイクル技術の多くは、塩素含有プラスチックを分離除去する前処理を必要としている。そこで、本試験では第一に容器包装プラスチックから、特にポリ塩化ビニル(以下、PVCと略記する)、ポリ塩化ビニリデンといった塩素含有プラスチックを分離する試験を行った。

廃プラスチックを種類ごとに物理的に分離するためには、プラスチック成分ごとに異なる物性値を利用する必要があ

る。その物性値には表面特性や形状や比重などがあるが、特に比重に着目すると、容器包装プラスチック中の多くのプラスチックが比重 0.8~1.1 程度であるにもかかわらず PVC は比重が 1.4 程度と大きくなっている。そこで、この PVC と他プラスチックとの比重差を利用した乾式比重分離試験を行った。

2.2 試験装置

分離に用いた装置はエアテーブルという乾式比重分離装置である。エアテーブルとは分離対象物の形状差、比重差を利用し分離する装置として 19 世紀に作られた装置である。当初は石炭を比重差で分離する装置として用いられていたが、その後大豆など穀類の種子と殻とを形状差で分離する装置として使用されるようになった。そして、最近では廃棄物中から有価成分を回収する技術としての適用が試みられている¹⁾。

特に、他の分離技術と比較すると装置が簡単で安価であることや、大量処理が可能であることから比重差の大きなものや形状差の大きなものに対し幅広い用途への適応が試みられている。たとえば、比重差による分離としては銅とアルミの分離、金属とプラスチックの分離があり、形状差による分離としては被覆銅線破砕物の銅と被覆樹脂との分離がある。また、使用済み廃家電の分離選別ラインに使用されている例もある²⁾。

2.3 エアテーブルの選別原理³⁾

上述のようにエアテーブルはテーブル面の振動と空気流によって、比重差・形状差から対象物を成分分離する装置である。

テーブル面に投入された分離対象物はテーブル面の揺動運動によって重量物回収側（図内左方向）に運搬される力を受ける。一方、それと同時にテーブル面からの空気流によってテーブル面から浮遊し、重力の影響で傾斜したテーブル面を軽量物回収側（図内右方向）に滑落させられる力を受ける。比重の小さなものは空気流の影響が強く、テーブル面を滑落し軽量側から回収され、比重の大きなものは空気流の影響をそれほど受けず、テーブル面の振動によって重量物側に運搬される（Fig.1）。装置の概観を Photo 1 に装置の仕様を Table 1 に示す。

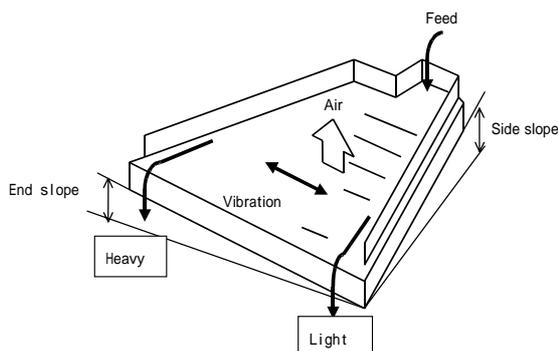


Fig.1 The separation process of air-table



Photo 1 Air-table

Table 1 Specification

Maker	TRIPLE/S DYNAMICS INC.
Model no.	T-20
Power	16 kW
Table area	1.68 m ²
Vibration acceleration	24.6 m ² /s
End slop	5.5-14 deg.

2.4 分離試験

容器包装ごみとして回収された廃棄物から金属類、ボトル類を除去し破砕したものを試料としてエアテーブルに投入した。この試料の塩素濃度は 2.8%であった。テーブル面の傾斜角度は過去の知見より、最も分離効率の良い最大の 14° に固定した。分離成績としては重量側回収物、軽量側回収物についてそれぞれの重量割合を算出し、さらにそれぞれを元素分析し塩素濃度を測定した（Fig.2）。

その結果、塩素含有率 1.2%、歩留まり 90%という、結果を得た。これは元ごみの塩素濃度が 2.8%であることから算出すると、PVC の約 6 割しか除去できないこととなる。また、高炉原料としてリサイクルするには塩素濃度をより低いものとする必要がある。しかし、エアテーブルのパラメータ調整のみではこれ以上の分離成績向上は難しいという結果であった。

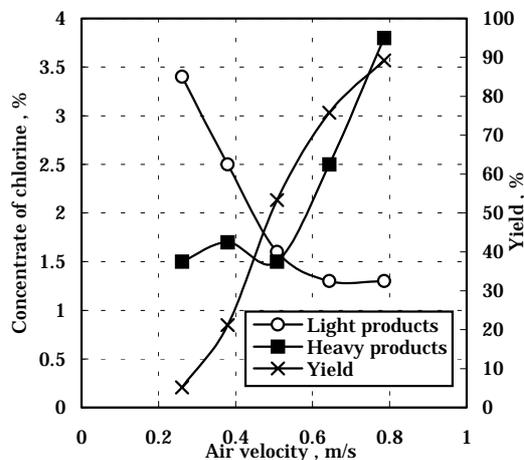


Fig.2 Relationship between the frequency of air velocity and the concentration of chlorine

2.5 エアテーブルによる分離結果の考察

一般に分離において、回収率を増加させると、混入する成分が増加し、純度（品位）は悪くなる。この試験であれば軽量物側の回収量が増加するとともに不用成分である塩素含有プラスチックの混入確率が増加して、塩素濃度が増加することが予想される。しかし、本実験では廃プラスチックを分離した結果では回収率が増加するとともに塩素濃度が減少するという結果が得られた。このような結果となった原因として考えられる理由は2つある。

その一つは塩素含有プラスチックが非常に重量物側に濃縮しやすい形状をしている可能性である。廃プラスチック中には厚さ、形状ともさまざまなプラスチックフィルムが入っており、比重差だけでなく形状差が大きく分離に影響する。特に、厚さのあるものは、比重の大きな物と同じような挙動をとる。これらの実験では軽量物側の回収率を増加させるために空気流速を増加させているのであるが、空気流速を増加させると、フィルムは浮遊しテーブル面からの摩擦力が減るために多くのプラスチックは傾いたテーブル面を滑落し、軽量物側から回収されるのである。そこから、ここで塩素濃度が増加しないということは非常に空気流速の影響を受けづらい形状をした（おそらく厚手のプラスチック）PVCが多いために空気流速が増加してもテーブル面を滑落しないためであると考えられる。

もう一つ理由として考察されるのは、厚さの非常に薄いフィルムプラスチック（特にラップ状プラスチック）の中にPVCが濃縮している可能性である。比重が大きなPVCではあるが、厚さが非常に薄いフィルムであれば軽量側に濃縮する。特にこれらの実験では流速を上げることで軽量物側から回収されず飛散する非常に薄いプラスチックフィルムが回収率にほとんど影響しない程度の重量で存在した。この飛散するプラスチックフィルムの中に塩素含有プラスチックがあり、塩素濃度が減じたと考えられる。

3. 溶融造粒 + エアテーブル分離試験

3.1 概要

以上のエアテーブル単体の分離試験から、エアテーブルによる分離は比重差だけではなく、形状差も非常に大きな影響を与えるということがわかった。すなわち、形状差をつければより回収率を上げられるということである。これはテーブル表面から出ている空気から生じる浮揚力の大きさが比重によって変化するだけでなく形状差によっても変化するためである。

エアテーブルに、これらのような形状差のあるものを供すると、厚いものや球形に近い形状の物は空気流の影響をあまり受けないため、たとえ比重の小さなものでも、重量物と同様の挙動をする。また薄いフィルムや、シート状のプラスチックは空気流の影響を強く受けるため、比重の大きなものでも軽量物と同様の挙動をする（Fig.3）。

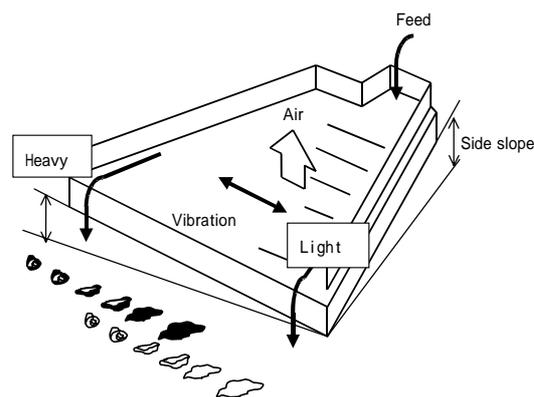


Fig.3 The characteristic of the air-table separation

このようなエアテーブルの特性から、さらに分離効率を向上させるためには、エアテーブルにかける前に形状差を調整する必要があることがわかった。形状差を調整する方法としては、

(1) 前処理方法を変え、フィルムプラスチック破碎物の形状差を少なくし、比重差によって分離を達成する。

あるいは、まったく逆に

(2) 何らかの前処理により、プラスチック成分ごとに選択的に形状差を与えた後、その形状差によって分離する。

の2つが考えられる。

(1) の方法としてはエアテーブルの前処理に用いている破碎機の形式を変え、破碎形状を揃えることによって、ある程度分離が可能となった。しかし、分離効率を飛躍的に上昇させるものではなかった。

そこで、(2) の方法として、プラスチックは成分により融点の異なり、また変形する温度なども異なることから、プラスチックの熱に対する変形によって形状差を与える方法を考案した。

プラスチックを加温して変形しやすいプラスチックのみを変形させ、熱に強いプラスチックはそのまま変形させず、成分ごとに形状差を与え分離するという方法である。そこで、プラスチックの種類による変形温度の差について模擬ごみ試料を用いて調査することとした。

3.2 プラスチック変形試験

試料には実際のごみを模擬するため市販のフィルムプラスチックのシートを一軸高速回転型破碎機でスクリーン径20mm以下に破碎したものをを用いた。

プラスチックの成分として選択したものは、容器包装プラスチックの主成分となっているポリエチレン（以下、PEと略記する）、PVC、ポリプロピレン（以下、PPと略記する）、ポリスチレン（以下、PSと略記する）の4種類を用いた。

試験方法としては、プラスチックをそれぞれ恒温槽に入れ、恒温槽の温度を100 から20刻みに180まで上昇させ、変形状態を観察した。

試験結果を Table 2 に示す。完全に溶融したものを○，変形したものを×，一部変形したものが△である。

Table 2 Temperature of plastics transformation

Temp.	120	140	160	180
PE			-	-
PVC	×	×		○
PP	×		○	
PS				-

この結果，模擬ごみプラスチックにおいて，PE，PS は 160 以下で完全に溶融し，また，PP も 160 でほとんど変形した。それに対し PVC は，180 以上で変形していた。

これにより PVC とその他のプラスチックの変形温度に差のあることがわかり，廃プラスチック中の PVC を変形させずに，その他を変形させるには，およそ 160 から 180 で変形させれば良いことがわかった

3.3 造粒装置

今回試験に用いた溶融造粒装置はプラスチックと装置壁面の摩擦熱によって溶融造粒する装置である。装置の概略図を Fig.4 に示す。

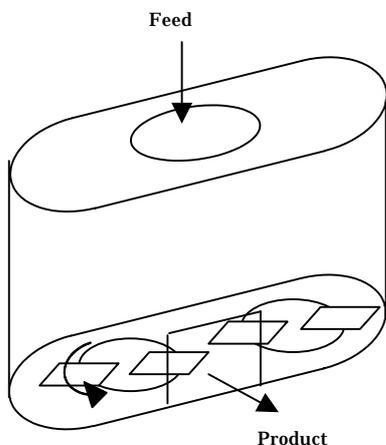


Fig.4 Agglomerate machine

溶融造粒装置は装置下部に高速回転する回転羽があり，この羽の回転によってプラスチックは攪拌される。この攪拌によりプラスチックは装置壁面と摩擦され，プラスチックの温度は徐々に上昇する。一定温度に達すると，プラスチックは溶融し始める。この溶融した状態のプラスチックを高速攪拌しつづけると，造粒物は徐々に成長し球形の粒子となる。このようにして造粒された粒子に水を噴霧し，表面を急冷固化すると周囲の粒子と付着することがなくなり，粒子の形状も球形のまま安定する。その後，排出扉を開き造粒物を排出する。以上のように，至って簡単な操作によって，プラスチックを溶融造粒する装置である。

この溶融造粒方法で，

(1) 一般廃棄プラスチック中の特定の成分を造粒し，他の成分をフィルム形状のままとし，プラスチック成分ごとに選択的に形状差を与えることができるか。

(2) 溶融したプラスチックが溶融していないプラスチックを巻き込むことなく，単体分離した状態で造粒することができるか。

という以上の2点について検討することとした。

3.4 模擬ごみプラスチック造粒試験

試料としては加熱変形試験で用いたものと同様の模擬ごみプラスチックを用いることとした。これらのプラスチックから代表的なプラスチックである PE と塩素含有プラスチックである PVC を混合したものを造粒することとした。また混合する際に成分比で PE : PVC = 9 : 1 で混合することとし，分離の状態が明らかになるように，PE は透明のシート，PVC は赤色のシートを用いた。

これらのフィルムプラスチックを混合し，造粒試験を行った。また，造粒温度はプラスチックの変形試験で得られた PE の変形温度である 120 とした。

その結果，造粒温度を PE の変形する 120 として造粒すると，(1) PE のみを造粒し PVC をフィルム形状のままという形状差を与えることができ，かつ(2) PVC を巻き込まずに造粒できることがわかった。造粒物の写真を Photo 2 に示す。

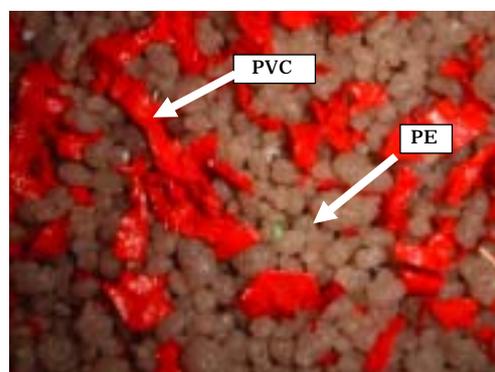


Photo 2 The agglomerated plastics

3.5 模擬ごみ造粒物分離試験

以上の造粒試験により，プラスチックの異種性分が混入することなく変形する温度の低いプラスチックから順に造粒できることが確認できた。

そこで次に 模擬ごみプラスチックの溶融造粒物を用い，PE 造粒物と造粒されなかったフィルム形状の PVC をエアテーブルにより分離する試験を行った。その結果，分離のパラメータであるテーブル面の角度，空気流速を最適に調整することにより回収率 98.7%，純度 99.97%のポリエチレンを回収することが可能となった。分離された造粒物の写真を Photo 3 に示す。

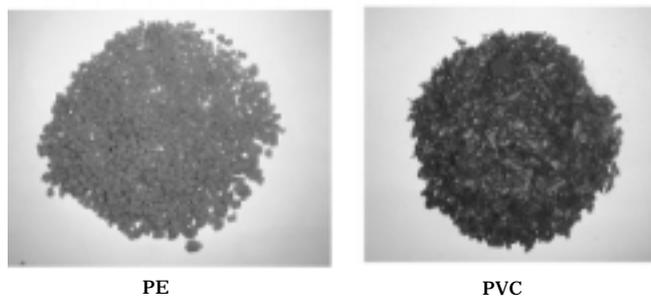


Photo 3 Separated plastic sample by air-table

3.6 実ごみ造粒試験

模擬ごみプラスチックの分離試験結果より、プラスチックを選択的に熔融造粒し、エアテーブルにて形状差分離できる可能性が示唆された。そこで、以上の試験結果の知見から実ごみについて造粒試験を行うこととした。

試験に用いたサンプルは容器包装プラスチックとして現在収集されているものから、固形系のプラスチックであるボトル、トレーなどを分離したものを用いることとした。また、投入する試料の塩素濃度は 2.8%であった。

フィルムプラスチックは破碎粒径を模擬ごみプラスチックと同様の 20mm 以下とした。また造粒温度は 140 から 200 まで、6 点の温度で造粒することとした。

試料は一部が造粒され残りがフィルム形状となっていた。造粒する温度によって混入する PVC の割合を確認するために、造粒物を手で分離、回収したものについて塩素濃度を測定した。測定方法は、凍結粉碎して均一化し、燃烧イオンクロマト法により分析した。

その結果を Fig.5 に示す。結果は造粒温度が 140 から 170 においては PVC がほとんど造粒物に混入することなく、造粒物塩素濃度が 0.3%であり、170 を超えると急激に塩素濃度が高くなり 200 ではほとんどすべての PVC を熔融造粒しているという結果であった。

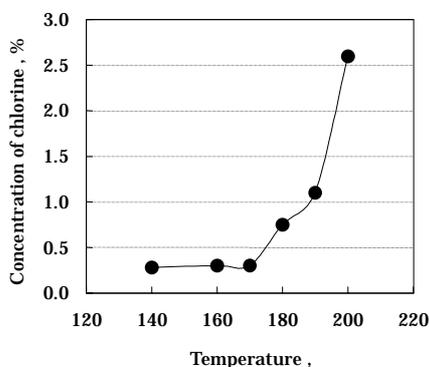


Fig.5 Relationship between temperature and concentration of chlorine

3.7 実ごみ造粒物分離試験

実ごみの造粒物は造粒温度により、混入される塩素濃度が異なることがわかった。また、170 までは塩素濃度が低いものの造粒されるプラスチックの割合が 60%~70%と低いため、80~90%造粒できる 180 での造粒物について分離試験を行うこととした。

エアテーブルの条件を最適化し、滞留時間を長くすることでエアテーブルによって良好に造粒物と、非造粒物とに分離することが可能になった。エアテーブルによって分離された試料の写真を Photo 4 に示す。また、その際の歩留まりは 90%、塩素濃度は 0.7%であった。

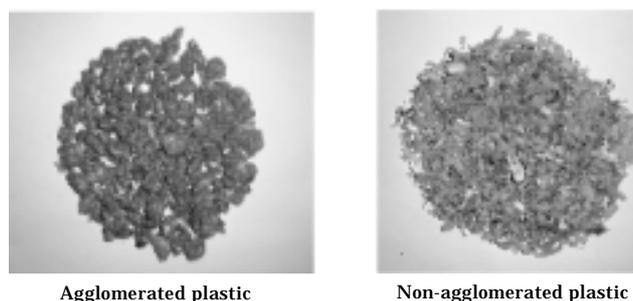


Photo 4 Separated waste plastic by air-table

4. おわりに

プラスチックを比重差によって分離するのではなく、目的成分を選択的に造粒するために、その主要なパラメータである造粒温度を調整し形状差を与え、エアテーブルにより形状差分離をすることが可能となった。特に、容器包装プラスチック中の PVC を分離除去することにより、歩留まり 90%、塩素濃度 0.7%にて分離回収することが可能となった。今後は他の成分のプラスチックの分離、マテリアルリサイクルへの更なる適応を検討する予定である。

参考文献

- 1) 荒川和明ほか. 資源処理技術. Vol.45, No.1(1992).
- 2) 大井英節ほか. “廃電子部品破碎物のエアテーブルによる分別”. 資源・素材学会誌. Vol.113, No.7.
- 3) 山崎茂樹ほか. “プラスチックの乾式分離技術”. NKK 技報. No.171(2000).

<問い合わせ先>

エンジニアリング研究所 燃烧システム研究部

Tel. 044 (322) 6317 宮澤 智裕

E-mail address : tmiyaza@lab.keihin.nkk.co.jp