研究報告

トロンメルによるプラスチック廃棄物のふるい分け

Sieving Characteristics for Plastic Wastes by Trommel

高橋 主人*

Kazue Takahashi

篠崎 正*

Tadashi Shinozaki

林 政 克*

Masakatsu Hayashi

内田 昭 就*

Akinari Uchida

1. はじめに

プラスチック廃棄物は年々増加しており、その再生利用に関する研究が多方面で行なわれている¹⁾。その手段の一つとしてのフルイ機についても、大振幅小振動数型のシェーキングセパレータや風力分級器などが紹介されている^{2,3)}。しかし、いずれも細片状のシート類（フィルム状のものを総称してシートと呼ぶことにする。）のふるい分けに難点があった。すなわち、振動型フルイ機には粗大シート類の滞留現象が現われるし、風力分級ではシート類を分級することが困難である。

筆者らは、プラスチック廃棄物の連続処理システムとして、粗砕、冷却、低温選別破碎、ふるい分けの4つの行程を想定した⁴⁾。その中のフルイ機は、ふるい分け性能をある程度犠牲にしても、長期にわたってシート類を滞留させることなくふるい分けなければならない。この条件を満足する可能性がもっとも高いものとして、回転円筒フルイ機（トロンメル）を選んだ。トロンメルは、ふるい分け性能が悪いとしても、シート類の滞留を生ずることなく運転できると考えた。

そこで、小形のトロンメルを試作し、性能試験を行なった結果、シート類のふるい分けに対しても良好な結果が得られたので以下に報告する。

2. 実験に用いた試料

実験に用いた試料は、都市系プラスチック廃棄物を模擬して調整した試料（以下標準廃棄物と称する。）を低温選別破碎したものである。

低温選別破碎とは、各種プラスチックの脆化点の違いを利用して、各材質別に選択的に破碎する技術である。

実際には、都市系プラスチック廃棄物が、主としてポリエチレン、ポリ塩化ビニル、ポリスチレン、ポリプロピレンの4種類からなっているため、廃棄物の焼却処理あるいは再生利用などに有害なポリ塩化ビニルを選択破碎することが目的である。

標準廃棄物は、ポリエチレン50%、ポリ塩化ビニル20%、ポリスチレン15%、ポリプロピレン15%からなり、破碎後の容積比でシート類は90%以上である（Fig.1）。

ポリエチレンの脆化点が -60°C 以下で、その他の脆化点は $-20\sim-10^{\circ}\text{C}$ 付近に分布している。本研究に用いた試料はできるだけ粒度分布が一樣なものを選んだ。そのため、細かく破碎されたポリ塩化ビニルリッチのものと、ほとんど破碎されずシート類が多いポリエチレンリッチのものに大別される。前者はソリッド状であり、後者はシート状である。

粒度分布は、破碎前の試料の大きさの影響を受ける30mm以上の粒子群を除くと、ほぼ対数正規分布を示すようである。Fig.2に粒度分布を示す。破碎試料の材質判定は、破碎前に材質別に着色し、破碎後に識別した。

(a) 30mm以上

30mm以上のポリエチレン粒子群は粗大シート類を除いて撮影した。

Fig. 1

昭和52年9月13日受理

* 日立製作所機械研究所（〒300 土浦市神立町502）
TEL 0298-31-5111

(b) 30~25mm

(f) 9~5mm

(c) 25~20mm

(g) 5~2mm

(d) 20~15mm

(h) 2~1mm

(e) 15~9mm

(i) 1mm以下

Fig. 1 供試試料の粒度分布

Fig. 2 供試試料の粒度分布

ポリエチレンなどのほとんど破碎されなかったものは、不定形の引きちぎられた様相を呈し、シート類が多い。また、ポリ塩化ビニルなどの細かく破碎されたものは、不定形ながら円板状あるいはダ円板状に近似できる。その破断部も脆性破断の特徴を呈し直線の形状である。

Table 1 供試試料の粉体物性

物 性	記 事
粒度分布	対数正規分布 $x_{50}=4.3\text{mm}$, $\log\sigma=0.349$
粒子形状	不定形。ふるい分け中も変形する
粒子密度	1.0g/cm ³ 程度
かさ密度	0.02~0.03 g/cm ³ 程度
表面性状	滑らか
硬 さ	軟らかい
破 碎 性	ふるい分け中に破碎されることなし
付 着 性	あり
凝 集 性	シート類によく現われる
水分含量	なし
帯 電 性	なし (乾燥状態であり)
流 動 性	なし
圧 縮 性	あり

Fig. 3 実験装置

左端の粗大シートはほとんど破碎されなかったポリエチレンである。

る。

次に、トロムメルの試料として見た標準廃棄物の粉体物性を Table 1 に示す。粒子形状は不定形で、かつ粗大シート類はふるい分け中にもその形状を変える。また、標準廃棄物の表面は滑らかで清浄であるが、実際の都市系廃棄物では、水分や油脂類などが付着していることが多い。表面の汚れは、凝集性に影響を及ぼし、通常ふるい分けを阻害する。すなわち、シート類は細かい粒子を巻き込んだり絡み合ったりして、ふるい分けを阻害することがあるが、表面の汚れは、この傾向を一層助長する。したがって、表面の汚れは少ない方が望ましいが、その点低温選別破碎の場合は、表面の付着物が凍結して、破碎時に表面からはく離することがあるため、常温破碎に比較して表面は清浄といえる。また、帯電性も表面の汚れと同様に、シート類の絡み合いなどを誘発しふるい分けを阻害する⁵⁾。常温破碎の際には、著しく帯電が認められたが、低温選別破碎後においては消失していた。

以上実験に用いた試料について述べたが、トロムメルのふるい分け特性を運転条件と関連付けて調べるために、すべて同一試料をくり返し使用した。

3. 実 験 装 置

試作したトロムメルは、その基本性能を調べるのが目的であるため、目詰り防止用ブラシや強制かくはん翼などは取付けていない。その形状は円筒形とし、直径 365 mm、長さ1920mm である。回転数は5~60rpm (周速換算で9.6~115cm/s)、傾斜角度は0~10度の間で連続可変とした。ふるい網はステンレス製クリンプ織りで、目開きが20mm、線径1.8mm、空間率84.2%である。トロムメルへの試料の投入は円錐状ホッパーから行なっ

Fig. 4 トロンメル実験装置

た (Fig.3)。

ふるい分けられた試料は、V字形の樋 (受け箱) で回収した。1個の受け箱の回収長さは70mmであり、20個連続的に配置した。配置図を Fig.4 に示す。V字樋状受け箱のほかに、投入側と出口側に受け箱AとBを設置した。受け箱Aは No.1 受け箱付近から飛びはねた試料などを回収する。Aに回収される量はわずかであるが、すべて No.1 受け箱に含めて考えた。また、ふるいの回転軸が出口部に設けられているために、出口部で試料が滞留したりすることがある。その時のふるい分け特性は正常なトロンメルの特性とは異なっている。出口部での異常なふるい分けを取り除くために受け箱Bを設けた。受け箱Bに回収された試料は、すべてフルイ上とみなした。

4. 粒度分布の測定

受け箱に回収した試料は、フルイ振という機 (ロータップシュエーカー; 回転数240rpm/50Hz, 打撃数1.37回/分, 50Hz) を用いて粒度分布を測定した。20mm以上の粒子群は手ふるいを使用した。用いたふるいは目開き1.0mm, 2.0mm, 2.83mm, 4.0mm, 6.73mm, 9.52mm, 15.9mm, 20mmである。なお、測定はすべて重量基準で行なった。

5. 実験結果

各受け箱に回収された試料の粒度分布を測定し、プラスチック廃棄物に対するトロンメルのふるい分け性能について調査した。また、粒度測定に基づいてふるい分け長さ l と網上残留率 R の関係、さらに50%分離粒子径との関係から、シート類のふるい分けに対する考察を試みた。

5.1 運転条件と網上残留率

各受け箱に回収された試料の粒度分布測定結果から、ふるい分け長さ l と網上残留率 R の関係を調べた。それ

を Fig.5 に示す。ここで、 R はふるい通過可能な粒子群の総重量を基準とし粗大粒子群 (ここでは20mm以上の粒子群を意味する。)は除いてある。

R は l に対してわずかに上に凹状の曲線を呈している。ただし、 $R \geq 0.2$ の領域では、 $\log R \propto l$ と近似できる。また、 $R < 0.2$ の領域では、 $R \geq 0.2$ に比較して単位ふるい分け長さあたりでの $\log R$ の減少率が小さい。粗大粒子群とふるい通過可能な粒子群は、ふるい分け相互に影響を及ぼし合っている。粗大粒子群の巻き込み絡み合いは細粒子群のふるい分けを妨害しているが、ふるい分けが進行するにつれ細粒子群が減少し、ふるい分け阻害因子の占める割合が増してくる。このため、 $\log R$ の減少率が小さくなったものと思われる。

Fig. 5 ふるい分け長さ l と網上残留率 R の関係

Fig. 6 網上残留率
(傾斜角度5度, 回転数10rpm)

Fig. 7 網上残留率
(傾斜角度 5 度, 回転数 20rpm)

Fig. 9 網上残留率
(傾斜角度 7.5 度, 回転数 20rpm)

Fig. 8 網上残留率
(傾斜角度 7.5 度, 回転数 10rpm)

Fig. 10 網上残留率
(傾斜角度 7.5 度, 回転数 30rpm)

また、運転条件による R の違いは、傾斜角度の影響が大きい。傾斜角度 5 度の場合に R はもっとも小さくなり、7.5 度、10 度の場合は差が認められない。回転数の影響もあると思われるが、 R については判別できなかった。

次に、各粒度区分別の粒子群に着目し、その網上残留率 r を調べた。その結果を Fig. 6~Fig. 12 に示す。トロムセルの運転条件にかかわらず、粒度が小さい程 r も小さくなる傾向にある。しかし、10mm 以下の粒子群につ

いては r の差が小さく、図中点線で示した領域内に密集している。Fig. 9 の 10mm 以下の粒子群は、他の運転条件の場合と異なる r を示した。 r の減少が阻止されたことは、粗大粒子群による巻き込みなどのため、ふるい分けが阻害されたことを示している。しかも、この現象は 10mm 以下の粒子群に限られており、シート類に巻き込まれてふるわれない粒子は、小さく軽いものに多いことを示している。

5.2 50%分離粒子径

Fig.11 網上残留率
(傾斜角度10度, 回転数10rpm)
粒度区分を他の運転条件と変えた例, 手ふるい使用)

Fig.12 網上残留率
(傾斜角度10度, 回転数20rpm)

Fig.6~Fig.12の $\log r$ と l の関係において, 10mm以下と10mm以上の粒子群のふるい分けに違いが認められた。10mm以上の粒子群は, 粒度が小さくなるにつれて r も小さくなる。それに対し, 10mm以下の粒子群は, ほぼ同じ r 値を示した。この現象がプラスチック廃棄物に特有なものか, あるいはトロンメルに特有なものなのかは明確にできなかった。しかし, これがシート類のふ

Fig.13 50%分離粒子径
(回転数10rpm, 30rpm)

Fig.14 50%分離粒子径
(回転数20rpm)

るい分けに関係していることを, 50%分離粒子径の解析から推定できた。

確率論的網上残留率の理論^{6,7)}では, ふるい網に触れることなく粒子が落下する確率過程としてふるい分けをとらえている。この場合, 確率過程のくり返し数(試行数 i) がトロンメルのふるい分け長さに比例すると仮定すると, 50%分離粒子径 x_{50} は近似的に次のように書ける。

$$x_{50} = a - \frac{0.832a}{\sqrt{\xi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{l}}$$

ここで, a はふるい目開き, ξ はふるい分け特性に依存する定数で $i = \xi \cdot l$ の比例定数である。以上の仮定がトロンメルに対して適用できるかどうかを, x_{50} と $1/\sqrt{l}$ の関係について調べてみると, Fig.13とFig.14が得られた。Fig.13は10rpmと30rpmの場合を示し, Fig.14は

20rpmの場合である。上述の確率理論、試行数とふるい分け長さの比例関係の両者がトロンメルに適用できるとすれば、 x_{50} と $1/\sqrt{l}$ の間に比例関係が存在するはずである。Fig.13とFig.14から $x_{50} \propto 1/\sqrt{l}$ が部分的に成立していることがわかる。この比例関係が成立する範囲においては、同一の確率現象のくり返しとしてトロンメルのふるい分けをとらえることができよう。さらに、ふるい分け特性は、 ξ で代表させて考えることができる。

x_{50} と $1/\sqrt{l}$ の比例係数 $(-0.832a/\sqrt{\xi})$ は、 x_{50} が10～15mmの領域で急激な変化を示し、この領域を境にしてそれぞれある一定値を取る。ただし、傾斜角度7.5度の場合は比例係数の変化が少ない。同一のふるい分け中に2つの ξ 値が現われたことは、2つのふるい分け特性が存在したことを意味する。さらに、標準廃棄物の粒度分布の形態は、10mm以上はポリエチレンを主としたシート類で占められ、10mm以下はソリッド状粒子群で占められている。また、第2の ξ 値は、ふるい分けが進行しシート類主体のふるい分けに移行してから現われ始める。以上のことを考え合わせると、シート類とソリッド状粒子群のふるい分け特性が異なるため、2つの ξ 値が現われたと推測できる。したがって、10mm以上と10mm以下の r と l の関係が異なる傾向を示した原因のひとつとして、シート類とソリッド状粒子群のふるい分け挙動の違いをあげることができよう。

次に、トロンメルの運転条件と ξ の関係について考察する。 $x_{50} \geq 10$ での第2の ξ 値は回転数に依存している。傾斜角度によっても ξ 値は変化すると思われるが、本実験においては差が認められなかった。これに対し、 $x_{50} \leq 10$ での ξ 値は運転条件との関連性が不明確である。また、前述した運転条件と R の関係では、傾斜角度の影響が大きかったが、これはFig.13、Fig.14において、 x_{50} の絶対値の差として現われている。この点を考慮すると、 R はふるい分けの性能を表わすが、ふるい分け特性を完全には表わしておらず、特性を論ずる際は x_{50} を比較検討するのが合理的といえる。

ξ 値の回転数依存性は、シート類のふるい分けと回転数の関係に置き換えて考えると、定性的に次のように説明できる。10～20mmのシート類についての観察結果から、シート類のふるわれ方を述べると、始めにシートの一部がふるい網に係留される。次に他の粒子群による押込みや網面運動等により、少しずつ係留の度合を増し、ついにはフルイ下となる。係留からフルイ下までの過程は網面の運動が特に重要な役割を果たしており、網面が高速運動する場合は係留しにくくかつ係留がはずれやすい。また、遅過ぎる網面運動は係留を進行させることができない。したがって、シート類のふるい分けに関しては、適度な網面運動が要求される。

最適運転条件は、(1)ふるい分け効率^{6,8)}が良い、(2)単位時間あたりの処理量が多い、(3)長時間運転においても目詰りなどのトラブルを生じない、の以上3点が満たされなければならない。したがって、ふるい分け効率、すなわち網上残留率 R が小さい、が良いからといって、トロンメルの運転条件を決定するのは早計であろう。処理量および長時間運転における問題点など、実機レベルでの運転試験が必要である。

6. む す び

(1) 細片状のシート類が多いプラスチック廃棄物に対するフルイ機として、トロンメルが有効であることを明らかにした。

(2) ふるい分けの確率論をトロンメルに適用し、それがソリッド状粒子群およびシート類各々に成立していることを確認した。

(3) ソリッド状粒子群とシート類のふるい分け特性につき、網上残留率と50%分離粒子径の変化において論じ、定性的に明らかにした。

最後に、本研究は弊社が通産省工業技術院より受託して行なった「都市可燃性廃棄物の低温破碎技術の研究開発」の一環であることを記し、関係者各位に深謝いたします。

引 用 文 献

- 1) たとえば、技術開発情報協議会編：産業廃棄物の処理と再生，発明通信社，S.51
- 2) 井伊谷鋼一他：粉粒体プロセス技術集成，産業技術センター，S.49
- 3) 三菱重工技報，12，[2]，(1975)
- 4) 境弘夫他：冷凍，50，[578]，93 (1975)
- 5) 八星泰：粉体工学研究会誌，5，[3]，1138 (1968)
- 6) 三輪茂雄：粉体のフルイ分け，日刊工業新聞社，S.40
- 7) 三輪茂雄：粉体工学研究会誌，7，[1]，41 (1970)
- 8) 三輪茂雄：ふるい分け読本，産業技術センター，S.49

Authors' Abstract

Sieving Characteristics for Plastic Wastes by Trommel

by

Kazue TAKAHASHI, Masakatsu HAYASHI, Tadashi SHINOZAKI and Akinari UCHIDA

(Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.)

Plastic wastes are expected to use again by recycling.

Cryogenic crushing is one of the techniques for this purpose.

After cryogenic crushing of plastic wastes, most films of them are not crushed and retains their original forms relatively.

So it is too difficult to sieve them. But Trommel shows good screening efficiencies which undergo a trommel's inclination influence rather than its rotatory number. On the contraries, the sizes of separation for films undergo a rotatory number's influence.