振動を利用した混合プラスチックの静電選別* (第2報, 3種類のプラスチック混合物について)

佐 伯 暢 人*¹

Vibro-Electrostatic Separation of Plastic Mixtures (2nd Report, Plastic Mixtures of Three Kinds of Components)

Masato SAEKI*²

*² Department of Mechanical and Control Engineering, Niigata Institute of Technology,
1719 Fujihashi, Kashiwazaki-shi, Niigata, 945-1195 Japan

The separation of mixture consisting of three kinds of plastic was studied experimentally and analytically. The principle behind the separation technique is based on the difference in Coulomb force acting on the plastic particles after triboelectric charging. The mixture is charged by friction in a mixer and is separated in a vibratory feeder equipped with two plate electrodes. The separation tests were performed on a sample containing polyvinylchloride (PVC), polyethylene terephthalate (PET) and polystyrene (PS). The charging distribution of plastic particles was measured. An analytical solution is provided to estimate the recovery of plastics. The influence of electric field strength and tribocharging time on the separation efficiency was investigated. It is shown that for several kinds of plastic mixtures it is possible to obtain high purity and recovery of plastics.

Key Words: Frictional Vibration, Nonlinear Vibration, Materials Handling Equipment, Environmental Engineering, Electrostatic Separation, Recycling, Plastic Waste

1. 緒 言

我が国では、限りある資源の有効利用と埋め立て地の延命化を目的として、大量生産、大量消費の使い捨て社会から循環型社会への転換がすすめられている。循環型社会を形成するにはリデュース (Reduce: 廃棄物の抑制) やリユース (Reuse: 製品・部品の再利用), リサイクル (Recycle: 再生資源の利用) といった3Rの取り組みが必要となるが⁽¹⁾, なかでも, リサイクルについては様々な面で活発な取り組みが行われ, 多くの材料において, 高いリサイクル率が報告されている⁽²⁾. しかし, プラスチックのリサイクル率は今だ55%と他の材料に比べて低く, 今後の向

上が切望されている⁽³⁾.

プラスチック製品は異なる種類のプラスチックから構成される場合が多く, 廃棄されたプラスチック製品をリサイクルするためには種類毎にプラスチックを選別する必要がある. ところが, ほとんどのプラスチックは比重などの機械的な性質が似ているため, 選別は容易ではなく, それがプラスチックのリサイクル率向上を妨げる要因の一つとなっている. それに対して, プラスチックの摩擦帯電特性を利用した静電選別手法が注目され, 高い選別精度を達成できることが報告されている^{(4)~(8)}. 特に, 2種類のプラスチックを選別対象とした場合には高い選別精度を得られることが報告されている. しかし, 3種類のプラスチック混合物の場合には選別の可能性は示されているが, 実現化のためには, さらなる選別精度の向上が必要とされている. そこで, 本研究では既報⁽⁸⁾, ⁽⁹⁾で提案した振動を利用した静電選別法を用いて, 3種類のプラスチ

* 原稿受付 2004年7月15日.

*¹ 正員, 新潟工科大学工学部 (〒945-1195 柏崎市藤橋1719).
E-mail: saeki@mce.niit.ac.jp

Fig. 1 Model of a vibro-electrostatic separation

ックの選別について、理論的、実験的に検討を行った。実験では、ファラデーケージを用いて、プラスチックの帯電量を計測した。また、その帯電量分布を用いて、プラスチックの回収率に関する理論解析を行い、実験との比較を行った。さらに、電界強度や帯電時間などの操作変数が選別性能に与える影響について検討したので以下に報告する。

2. 振動を利用した静電選別

3種類のプラスチックからなる混合物を摩擦帯電させると、その組み合わせによっては、1種類のプラスチックと他の2種類のプラスチックを異なる極性に帯電させることが可能である。そこで、本研究では3種類のプラスチックからなる混合物を摩擦帯電させ、クーロン力の違いを利用して、3種類のプラスチック混合物から1種類のプラスチックのみを選別する場合を考える。

図1は本研究で使用した選別装置のモデル図を示している。これは前報⁽⁸⁾で示した2種類のプラスチック混合物の選別で使用したものと同じである。地面に水平なX-Y平面に対して、角度 θ だけ傾けた2つの平板電極が3角柱の形状をなす振動台に剛に取り付けられており、それらはX軸に対して、角度 α の方向に往復直線振動する。また、上部電極にはマイナスの高電圧を印加し、下部電極を接地することで電極間には電界が形成されている。今、3種類A, B, Cのプラスチックからなる混合物を摩擦帯電させた後、選別装置へ投入する。ここで、摩擦帯電により、プラスチックA, Bは正に帯電し、プラスチックCは負に帯電したものとする。すると、投入されたプラスチックCには下部電極側へのクーロン力が作用するため、プラスチックCはY軸正方向へわずかにすべり落ちながら、X軸正方向へと振動輸送される。一方、正に帯電したプラスチックA, Bは上部電極板側へのクーロン力が作用するため、負に帯電したプラスチックCに

比べると、すぐに、Y軸正方向へ下部電極上をすべり落ちる。したがって、プラスチックCのみがAやBとは離れて下部電極上を落下することから、3種類のプラスチック混合物から、プラスチックCのみの除去が可能となる。なお、プラスチックCを取り除いた後のA, Bのプラスチック混合物については、前報⁽⁸⁾で示した2種類のプラスチック混合物の選別手法が適用可能と推察される。

3. プラスチック粒子の運動

次に、電界中のプラスチック粒子の運動について理論的に検討する。図2は下部電極上にある正に帯電したプラスチック粒子に働く力を示した図である。図に示すように、 $x-y-z$ 座標系を用いると、時刻 t における振動台の $x-y-z$ 各軸方向の位置 x_t, y_t, z_t は式(1)で表される。

$$\begin{aligned} x_t &= a \cos \alpha \sin \omega t \\ y_t &= -a \sin \alpha \sin \theta \sin \omega t \\ z_t &= a \sin \alpha \cos \theta \sin \omega t \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 a, ω はそれぞれ、振動台を振動させるときの振幅と角振動数を示す。また、プラスチック粒子を質点とみなし、その座標を x, y, z とすると、粘性抵抗がストークス抵抗と近似できる場合の粒子の運動方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= F_x - 6\pi\eta r\dot{x} \\ m\ddot{y} &= F_y + mg \sin \theta - 6\pi\eta r\dot{y} \\ m\ddot{z} &= R + F_z - F_i - mg \cos \theta - 6\pi\eta r\dot{z} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 m, r はそれぞれ、粒子の質量と半径、 F_x, F_y はそれぞれ、粒子に働く摩擦力の x, y 軸方向成分、 F_z, F_i はそれぞれ、粒子に働くクーロン力と影像力を示している。また、 R は粒子が下部電極板から受ける垂直抗力、 η は空気粘度($=1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)、 g は重力加速度、ドットは時間による微分を示す。

電極間の電界を平等電界とすると、下部電極上にある正に帯電した粒子に作用するクーロン力 F_c は次のように表される。

Fig. 2 Forces acting on a positively charged particle

Fig. 3 Triboelectric charger

Fig. 4 Faraday cage system

$$F_c = qE \quad (3)$$

ここで、 q および E はそれぞれ、粒子の帯電量と平行平板間の電界強度である。また、粒子に働く影像力は次のように表される⁽¹⁰⁾。

$$F_i = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 r^2} \quad (4)$$

ここで、 ϵ_0 は誘電率 ($=8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) を示す。

次に、粒子に働く摩擦力については次のように表される。

$$\begin{aligned} F_x &= \mu R \cdot \frac{\dot{x}_t - \dot{x}}{u_R} \\ F_y &= \mu R \cdot \frac{\dot{y}_t - \dot{y}}{u_R} \end{aligned} \quad (5)$$

$$u_R = \sqrt{(\dot{x} - \dot{x}_t)^2 + (\dot{y} - \dot{y}_t)^2} \quad (6)$$

ここで、 μ はプラスチック粒子と電極との間の摩擦係数を示す。

粒子が下部電極板上を飛び上がらない場合には $z = z_t$ が成り立つので、式 (1)、(2) より、

$$\begin{aligned} R &= F_i - F_c + \cos\theta(mg - m\omega^2 \sin\alpha \sin\omega t \\ &\quad + 6\pi\eta r\omega \sin\alpha \cos\omega t) \end{aligned} \quad (7)$$

粒子が下部電極上を飛行する場合の運動方程式は式 (2)、(5) において、 $R = 0$ とおき、次式となる。

Fig. 5 Cumulative frequency distribution of charge
($N = 540 \text{ rpm}$, $T_c = 180 \text{ sec}$) Fig. 6 Cumulative frequency distribution of charge
in normal scale
($N = 540 \text{ rpm}$, $T_c = 180 \text{ sec}$)

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -6\pi\eta r\dot{x} \\ m\ddot{y} &= mg \sin\theta - 6\pi\eta r\dot{y} \\ m\ddot{z} &= F_c - F_i - mg \cos\theta - 6\pi\eta r\dot{z} \end{aligned} \quad (8)$$

飛行する粒子が電極に衝突する際の運動量の変化は次式となる。

$$\begin{aligned} m(v_{t1} - v_{t0}) &= -\bar{F} \\ m(v_{n1} - v_{n0}) &= \bar{R} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 v_{t0} , v_{t1} は衝突前後の粒子の接線方向の速度を示し、 v_{n0} , v_{n1} は衝突前後の粒子の法線方向の速度を示している。また、 $\bar{F}$, $\bar{R}$ はそれぞれ、接線方向及び法線方向の力積を示している。

接線方向の力積 $\bar{F}$ は、衝突直前における粒子と電極の接線方向速度の大小関係によって決まるとすれば、次式で表される。

$$\bar{F} = \mu \bar{R} \frac{v_{t0} - V_{t0}}{|v_{t0} - V_{t0}|} \quad (10)$$

ここで、 V_{t0} は衝突直前の電極の接線方向の速度を示す。

Fig. 7 Experimental apparatus

粒子の質量が振動台の質量に比べてかなり小さいことから衝突後の粒子の法線方向の速度は次式となる.

$$v_{n1} = V_{n0} + e(V_{n0} - v_{n0}) \quad (11)$$

ここで, V_{n0} は衝突直前の振動台の法線方向の速度であり, e は反発係数を示す. 本研究では簡単のため, 反発係数は速度に関わらず一定として計算を行う. 衝突後の粒子の接線方向の速度は式 (9) ~ (11) から次式となる.

$$\begin{aligned} |v_{t0} - V_{t0}| > -\mu(v_{n0} - V_{n0})(1+e) \text{ のとき} \\ v_{t1} &= v_{t0} + \mu(v_{n0} - V_{n0})(1+e) \frac{v_{t0} - V_{t0}}{|v_{t0} - V_{t0}|} \quad (12) \\ |v_{t0} - V_{t0}| &\leq -\mu(v_{n0} - V_{n0})(1+e) \text{ のとき} \\ v_{t1} &= v_{t0} \end{aligned}$$

Table 1 Particle properties

PVC		PET		PS	
$m(\text{g})$	μ	$m(\text{g})$	μ	$m(\text{g})$	μ
0.024	0.41	0.027	0.42	0.016	0.49
e	ρ	e	ρ	e	ρ
0.31	1.32	0.51	1.27	0.44	1.05

したがって, 式 (1) ~ (8), (11), (12) を用いて, プラスチック粒子の挙動を計算することができる. 選別時において, プラスチック粒子は互いに衝突することもあるが, 解析を容易にするため,

(a) PVC

(b) PET

(c) PS

Fig. 8 Comparison of experimental and calculated results

$$\begin{aligned} (\theta = 10^\circ, \alpha = 15^\circ, a = 0.85\text{mm}, f = 32\text{Hz}, \\ T_c = 180\text{sec}, E = 850\text{kV/m}, N = 540\text{rpm}) \end{aligned}$$

本研究では各プラスチックについて, 単一粒子のみの運動に着目し, 解析を行った.

4. 実験

4・1 帯電量 次に, 本研究で提案する選別手法の妥当性を検討するために行った実験について示す. 本研究では市販されているポリ塩化ビニル (PVC), ポリエチレンテレフタレート (PET), ポリスチレン

Fig. 9 Effect of tribocharging time

($\theta = 10^\circ$, $\alpha = 15^\circ$, $a = 0.75\text{mm}$, $f = 32\text{Hz}$,
 $E = 750\text{kV/m}$, $N = 540\text{rpm}$)

Fig. 10 Effect of electric field strength

($\theta = 10^\circ$, $\alpha = 15^\circ$, $a = 0.85\text{mm}$, $f = 32\text{Hz}$,
 $T_c = 180\text{sec}$, $N = 540\text{rpm}$)

(PS) のペレットを各 30g ずつ混合した粒状体を用いて、帯電量の計測や選別実験を行った。PVC, PET 並びに PS の形状はいずれも直径 3mm, 高さ 3mm 程度の円筒状である。また、その特性は表 1 に示す通りである。ここで、 m , ρ はそれぞれ、粒子の平均質量と比重を示している。摩擦係数はそれぞれの静止摩擦係数を計測した値であり、反発係数は自由落下試験を行った様子をビデオに録画し、画像処理装置を用いて衝突前後の高さから算出した。粒子の帯電電荷量は湿度の影響を受けやすいことから、デシケータ内で保管したプラスチック粒子のみを実験に使用した。また、すべての作業は室温で湿度 31~40% の環境下で行った。

図 3 (a), (b) は本研究で使用した摩擦帯電装置である。内径 78mm の PVC 製円筒容器内に選別対象である混合プラスチックを投入し、直径 50mm のプロペラ型攪拌はねを有する市販の攪拌器でプラスチックを帯電させた。図 4 はプラスチックの帯電量を計測するために使用したファラデーケージシステムである⁽¹¹⁾。帯電量の計測は次の手順で行った。まず、図 3 に示す帯電装置で帯電させたプラスチックを同じ材質のピンセットを用いて、ファラデーケージの内側容器内に投入し、容器のふたを閉め、内側容器外面に誘導された帯電体と等しい電荷をエレクトロメータにより計測した。

図 5 は実験により得られた各プラスチックの帯電量累積度数分布である。図中に示す N , T_c はそれぞれ、プロペラの回転数と摩擦帯電時間を示している。また、図中に示す実線と点線は次式で表される正規分布の累積確率曲線である。

$$\frac{100}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^q \exp\left\{-\frac{(q-u)^2}{2\sigma^2}\right\} dq \quad (13)$$

ここで、 u , σ はそれぞれ、実験より得られた帯電量の平均値と標準偏差である。この結果から、PET と PS は正に帯電し、PVC は主に負に帯電していることがわかる。したがって、負に帯電した PVC のみを選別する可能性が推察できる。また、PVC は他の 2 つのプラスチックに比べて、帯電量のばらつきが大きいことがわかる。

図 6 は図 5 の縦軸を正規確率目盛りとした正規確率グラフである。正規確率グラフにおいて、いずれのプラスチックの帯電量分布データもほぼ直線で近似できることから、各プラスチックの帯電量分布データは正規分布に従うといえる。

4・2 選別実験 図 7 (a), (b) は実験に使用した選別装置である。傾けた振動試験器には 2 枚の電極と回収容器を備えた選別ユニットが固定されている。プラスチックの回収には図 7 (b) に示すように、10 個の容器を使用した。選別実験にも前述した帯電実験と同様な手順で帯電させた PVC, PET, PS を使用した。

図 8 (a) ~ (c) は回収された各容器内の PVC, PET, PS の回収率について、実験値と理論値を比較した結果である。PVC の回収率は次式を用いて算出した。

$$\text{回収率}(\%) = \frac{\text{容器内のPVCの質量}}{\text{PVCの全投入量} = 30\text{g}} \times 100 \quad (14)$$

PET, PS についても同様に、上式で下線を付した PVC を PET や PS に置き換えて算出した。理論値は、

図5で得られた平均値及び標準偏差を考慮し、式(1)～(11)を解くことにより、各回収率を算出した。理論値と実験値を比較すると、PETの1, 2番目の容器やPSの1番目の容器の回収率に違いが見られる。これは理論値が粒子同士の衝突を考慮しない一質点の解析に基づいているために生じた違いであると考えられる。このように、理論値と実験値に多少の違いはあるものの、PETやPSが主に1～4番目の容器内に、PVCの多くが10番目の容器に回収されている様子は理論結果も実験結果も同様であり、回収率の変化については理論値と実験値は定性的に一致しているといえる。図8の結果から、PETとPSの回収容器を1～4とし、PVCの回収容器を7～10とし、5～6の容器は再選別用として、次に選別精度を詳細に検討すべく選別実験を行った。選別精度の評価は上述した回収率に加え、次に示す純度という値を用いて行った⁽⁸⁾。

PVCについて

$$\text{純度}(\%) = \frac{\text{回収容器内のPVCの質量}}{\text{回収容器内にある全粒子の質量}} \times 100 \quad (15)$$

Table 2 Experimental result (PVC, PET and PS)

($T_c = 180 \text{ sec}$, $E = 850 \text{ kV/m}$, $f = 32 \text{ Hz}$, $a = 0.85 \text{ mm}$)

	Purity	Recovery
PVC	97.7～99.0%	90.2～92.3%
Mixture	98.7～99.2%	96.2～96.9%

Table 3 Experimental result (PVC, PET and PE)

($T_c = 300 \text{ sec}$, $E = 850 \text{ kV/m}$, $f = 32 \text{ Hz}$, $a = 0.85 \text{ mm}$)

	Purity	Recovery
PVC	98.8～99.4%	91.0～95.4%
Mixture	99.1～99.6%	96.2～96.9%

Table 4 Experimental result (ABS, PP and PS)

($T_c = 180 \text{ sec}$, $E = 750 \text{ kV/m}$, $f = 32 \text{ Hz}$, $a = 0.95 \text{ mm}$)

	Purity	Recovery
ABS	99.6～99.8%	88.2～89.3%
Mixture	99.6～99.8%	92.1～93.9%

3種類のプラスチック混合物の選別では、高い純度、回収率でPVCを回収することと同時に、PVCを取り除いた後の混合物についても、高い純度、回収率でPETとPSの混合物が得られることが重要である。すなわち、PETとPSの混合物を再び、静電選別を行う

ことでPETとPSのリサイクルが可能となるためである。そこで、PET、PSの混合物についても同様に、式(14)、(15)で下線を付したPVCを「PETとPS」に置き換えて混合物の回収率と純度を算出した。

図9は摩擦帯電時間が選別精度に与える影響を調べた実験結果である。帯電時間の増大と共にPVCの純度や回収率、PETとPSの混合物の回収率はわずかに減少している。また、実験で行った範囲内ではPETとPSの混合物の純度は帯電時間にはあまり影響を受けていないことがわかる。短い帯電時間でも高い選別精度が得られることが確認できる。

図10は電界強度が選別精度に与える影響を調べた実験結果である。電界強度の増大と共に、PVCや混合物の純度や回収率は増大する。これは電界強度の増大と共に、各プラスチックに作用するクーロン力が大きくなるために、選別精度が向上したものと推察される。

4・3 選別精度 PVC, PET, PSを使用した実験の結果から、特に優れた選別結果をまとめたものが表2である。ばらつきを調べるために、同一の条件下で3回の実験を行った。高い純度、回収率が得られていることがわかる。

さらに、異なる材料の組み合わせについて調べた結果を表3、表4に示す。いずれの材料についても、4章で示した材料の形状とほぼ同じ市販ペレットを用いて選別を行った。表3に示すPVC, PET, ポリエチレン(PE)の組み合わせに関する選別実験においては、前述した内容と全く同じ手順、装置を使用し、負に帯電したPVCを取り除いた。表4に示すアクリロニトリルブタジエンスチレン(ABS), PP, PSの組み合わせについては帯電に使用する投入容器をPVCから内径70mmのステンレス容器に変更し、正に帯電したABSを取り除いた。いずれの結果においても、高い純度、回収率が得られていることがわかる。

5. 結 言

振動を利用した静電選別手法を用いて、3種類のプラスチック混合物の選別について理論的、実験的に研究を行った。実験に使用した3種類の組み合わせでは摩擦帯電によって、1種類のみが異なる極性に帯電することから選別が可能となることが確認された。帯電量分布は正規分布にほぼ近似され、その結果を用いた理論解析結果は実験結果と定性的に一致することが確認された。最適な操作条件下では高い純度、回収率で選別が可能となることが確認された。

最後に、本研究の実験は阿達基己君、山崎 功君 (新潟工科大学) に協力していただいた。深く謝意を表します。

文 献

- (1) 例えば、片谷教孝, 鈴木嘉彦, 循環型社会入門, オーム社
- (2) 浅沼稔, 116(2000), 資源と素材, 737-744.
- (3) プラ再資源化フロー図, 2002, プラスチック処理促進協会.
- (4) D. K. Yanar and B. A. Kwekas 1995 *Journal of Electrostatics*, 35(1995), 257-266.
- (5) I. I. Inculet, G. S. P. Castle, and J. D. Brown: *Particulate Science and Technology*, 16(1998), 91-100.
- (6) 松下康志, 森範宏, 染谷太郎, 電学論, 117-D, 12(1997), 1449-1454.
- (7) G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki, and T. Fujita *Materials Transactions*, 44-1(2003), 161-166.
- (8) 佐伯暢人, 井上鉄也, 塚原正徳, 前畑英彦, 機論, 68-689C(2002), 1356-1362.
- (9) 佐伯暢人, 塚原正徳, 井上鉄也, 塚原正徳, 前畑英彦, 竹園恵, 機論, 69-686C(2003), 2653-2658.
- (10) 静電気ハンドブック, p.1014, オーム社
- (11) 例えば, 村田雄司, 静電気の基礎と帯電防止技術, 日刊工業新聞社.