衝撃吸収シートを用いた静電選別に関する研究*

小川 毅¹ 佐伯 暢人²

Study on Electrostatic Separation Using Shock Absorbing Sheets

by Tsuyoshi OGAWA^a and Masato SAEKI^{a*}

a. Shibaura Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, Toyosu 3-7-5, Koto-ku,
Tokyo, 135-8548 Japan (*Corresponding author, E-mail: saeki@sic.shibaura-it.ac.jp)

In this paper, the results of experimental and analytical studies of the performance of an electrostatic free-fall separator for plastic mixtures for recycling are presented. The principle behind the separation technique is based on the difference in the Coulomb force acting on the plastic particles after triboelectric charging. The separator has two thin sheets and makes it possible to suppress the rebounding of highly charged particles with the electrodes. Separation tests were performed on a sample containing 50% polystyrene (PS) and 50% Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) plastics. Plastic particles obtained from crushed plastic plates were used. The amount of charge accumulated on the plastics was measured with a Faraday cage system. Recovery rate in each collection tray was calculated, taking into account the charge distribution. The tray that collected PS or ABS in the largest quantities in the calculated results is the same as that in the experimental results. It was found that the separation efficiency depends on the tribocharging time, the rotation speed of the tribocharger, setting angle of the shock absorbing sheets and the distance between the electrodes. The experimental results confirm that it is possible to obtain a high purity and recovery rate for the initial compositions considered in this study.

KEY WORDS: Electrostatic Separation, Plastic Separation, Triboelectric Charging, Shock Absorbing Sheet

1. 緒 言

近年、我が国では、プラスチックリサイクルの技術開発が進み、廃プラスチックが有効に利用されるようになってきている。プラスチック処理促進協会のデータ¹⁾によれば、廃プラスチックの有効利用率は、2004～2012年の9年間で57%から80%へと大幅な上昇を示している。しかし、金属類と比べると、いまだ有効利用率は低く、取り組みの余地を充分に残している。

廃プラスチックの有効利用率を上げる手段の一つとして、プラスチックの種類毎の選別精度の向上が挙げられる。一般に、多くのプラスチック製品は、種類の異なる複数のプラスチックを用いて構成されているため、特定のプラスチックをリサイクルするには、他のプラスチックと選別する必要がある。一般的な選別方法として、比重選別が挙げられるが、精度の高い比重選別は湿式である場合が多く、廃液処理などの点から敬遠されることもある。一方、プラスチックの帯電特性を利用した、静電選別²⁾は乾式であるため、注目を集めるようになった。

これまで、混合プラスチックの選別に関しては、平行に設置した2枚の平板電極を用いた自由落下型の静電選別手法に関する検討が多く行われてきている³⁻¹¹⁾。この手法は、摩擦帯電させたプラスチックを電界の中に投入し、静電気力を作用させ、その軌

跡に差をもたせることで選別を行う方法である。処理量が多いため、プラスチックの選別手法として代表的で優れた点も多いが、高い電荷を持つプラスチックと電極の衝突により選別精度が低下してしまうという問題を抱えている。一方、衝突を防ぐために、電極をハの字型に配置するなどの工夫もなされているが、電極間距離の増大により電界強度が弱まるため、現状では、ユーザーが求めるほどの十分な選別精度は得られていない^{5, 10)}。そこで、本研究では、電極間に粒子の反発を抑制するシートを静電選別装置に採用し、その性能を実験的・理論的に評価した。実験では、家電製品に多く用いられ、比重差はほとんどなく、選別が難しいプラスチックの組み合わせの一つであるアクリロニトリル・ブタジエン・スチレン (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) とポリスチレン (Polystyrene, PS) の破砕片混合物を選別対象とした。理論解析では、プラスチックの電荷量の差が挙動に与える影響や、衝撃吸収シートの効果について検討した。実験では、印加電圧や電極の配置、帯電条件、シートの設置角度が選別精度に与える影響について検討した。さらに、プラスチックの挙動解析により得られる選別精度と実験結果とを比較し、解析手法の妥当性を検討した。それらの結果について、以下に報告する。

2. 衝撃吸収シートを備えた静電選別装置

Fig. 1 (a) に静電選別として、代表的な自由落下型静電選別装置を示し、(b) に本研究で新たに提案する静電選別装置のモデル図を示す。Fig. 1 (a) において、x-y 平面は地面に対して垂直である。地面に垂直に設置された、平行に並んだ2枚の同じ形状の平板電極には、向かって左側の電極に正の高電圧、右側の電極に負の高電圧が印加されている。高電圧を印加された電極間には、正

*2014年5月16日受付 2014年9月24日受理 資源・素材学会平成25年度春季大会にて一部発表

1. 芝浦工業大学 理工学研究科 修士 (現: キヤノン (株))

2. 正会員 芝浦工業大学工学部機械工学科 教授

[著者連絡先] FAX: 03-5859-8005

E-mail: saeki@sic.shibaura-it.ac.jp

キーワード: 静電選別, プラスチック選別, 摩擦帯電, 衝撃吸収シート

Fig.1 Electrostatic separator using shock absorbing sheets.

電極から負電極に向かって電界が形成される。選別対象である混合プラスチックは、選別する前に、摩擦帯電を行い、種類別に正と負に帯電させておくものとする。その帯電したプラスチックを座標原点付近から投入し、自由落下させると、帯電したプラスチックには静電気力が働くため、正に帯電したプラスチックは負の電極に向かって落下し、負に帯電したプラスチックは正の電極に向かって落下する。したがって、帯電の極性の違いにより、落下位置が異なることから選別が可能となる。しかし、Fig. 1 (a) に示す自由落下型の選別装置では、電荷の高いプラスチックは電極に衝突した後、期待とは反対方向に落下し、回収されてしまう場合がある。それにより、Fig. 1 (a) の方法では、選別精度を上げることが困難であった。そこで、本研究では、Fig. 1 (b) に示すように、2枚の衝撃吸収シートを平板電極間にハの字型に設置した。これにより、高い電荷をもったプラスチックは、衝撃吸収シートに衝突しても、プラスチックシートがその衝撃を吸収し、跳ね返りを極小に抑える役割をするため、衝突し、跳ね返った後も、衝突前と同様な方向へ落下していく。この様に本装置は、粒子の衝突による反発を最大限に抑える事で、選別精度低下を回避する構造となっている。

衝撃吸収シートには、厚さ $100\ \mu\text{m}$ の絶縁性物質を使用した。これは、プラスチック粒子の衝突後の反発を極力、抑制するためである。衝撃吸収シートがハの字型に傾けてあるのは、衝突後にプラスチック粒子が逆方向に移動する量を抑えるためである。

3. 理論解析

選別装置の特性を理解するためには、帯電した粒子の挙動を把握する必要がある。そこで、以下では、選別時の粒子挙動について、理論的に検討する。

Fig. 2 は、電極及び衝撃吸収シートの寸法と配置位置を示している。これらの値は、後述する実験装置を考慮して決定した値である。

Fig. 3 は、 x 軸方向の各位置における電界強度を有限要素法ソフト ANSYS を用いて算出した結果である。衝撃吸収シートの有無による違いを確認するために、シートのない場合と厚さ 1mm の PVC シートを用いた場合について計算を行った。さらに、 y 軸方向の位置の違いによる影響を確認するために、Fig. 2 に示した点 A 及び B の位置について計算を行った。2枚の平板電極には、左右それぞれに 45kV 及び -45kV の高電圧を印加した。衝撃吸収シートの有無により、電界強度の大きさに違いはあるが、その傾向は同様であることから、シートのない静電選別装置と同様に、Fig. 2 に示した原点中心付近から、帯電した粒子を投入すると、

Fig.2 Analytical model.

Fig.3 Electric field strength.

帯電極性の違いにより、粒子には異なる方向に静電気力が作用することが期待できる。

処理量の増大を考えると、電極間距離を大きくすることが好ましいが、選別精度を考えると、電界強度の最大値が空気の絶縁破壊強度 (3MV/m) を超えない範囲で、できる限り高くなるように、電極間距離を決定することが好ましいと言える。

次に、粒子の選別挙動について考える。Fig. 1 に示した座標系を用いると、粒子の運動は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= qE_x \\ m\ddot{y} &= qE_y - mg \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 m は粒子の質量を表し、 g は重力加速度、 E と q はそれぞれ、電界強度と粒子の帯電量を表している。また、添え字 x, y は方向を示している。簡単のため、粒子の質量はすべて同じとし、他の粒子による静電気力の影響や空気抵抗は無視できるものとする。さらに、電界強度は粒子の位置によって変化しないものとする、粒子の速度と位置は式 (1) を積分した式 (2), (3) で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= qE_x t / m + v_{x0} \\ \dot{y} &= (qE_y - mg) t / m + v_{y0} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= qE_x t^2 / (2m) + v_{x0} t + x_0 \\ y &= (qE_y - mg) t^2 / (2m) + v_{y0} t + y_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 (x_0, y_0) (v_{x0}, v_{y0}) は、それぞれ、粒子の初期位置と初期速度である。本研究では初期値は原点とし、初期速度は $v_{x0} = 0\text{m/s}$, $v_{y0} = -1.46\text{m/s}$ とした。

式 (2), (3) における電界強度は次のような手順で求めた。まず、ANSYS によって、粒子が移動する領域について電界強度を算出

Table 1 Analysis requirement.

	particle size[mm]	mass[g]	Charge [nC]		friction factor	coefficient of restitution
			mean μ	standard deviation σ		
ABS	2.2	0.046	0.82	0.23	1.09	0.054
PS	2.2	0.045	-0.91	0.25	1.07	0.058

Fig.4 Behavior of charged particles.

した。次に、算出結果である各要素を構成する4つの節点の座標及び電界強度を用いて、各時刻において粒子位置が含まれる要素を求めた。さらに、次の内挿式から粒子位置における電界強度を決定した。

$$E_x = \frac{\sum_{i=1}^4 w_{xi} E_{xi}}{\sum_{i=1}^4 w_{xi}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、重み w_{xi} は粒子位置と各節点までの距離を用いて、次式とした。

$$w_{xi} = 1 / \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

次に、粒子が衝撃吸収シートに衝突した後の速度については次の手順で求めた。まず、衝突時の力積と運動量の関係は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} m(v_{t1} - v_{t0}) &= -J \\ m(v_{n1} - v_{n0}) &= R \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 v_{t0} , v_{t1} はそれぞれ、衝突前後の粒子の接線方向の速度を表しており、 v_{n0} , v_{n1} はそれぞれ、衝突前後の粒子の法線方向の速度を表している。また、 J , R はそれぞれ、接線方向と法線方向の力積を示している。

クーロンの摩擦の法則により、次式が成り立つ。

$$J = \mu_0 R \frac{v_{t0}}{|v_{t0}|} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 μ_0 は粒子とシートとの摩擦係数である。粒子の法線方向における衝突後の速度は反発係数 e を用いると、次式となる。

$$v_{n1} = -e v_{n0} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(6)～(8)を用いると、粒子の接線方向の衝突後の速度は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} |v_{t0}| \leq -\mu(1+e)v_{n0} \cdots v_{t1} &= v_{t0} \\ |v_{t0}| > -\mu(1+e)v_{n0} \cdots v_{t1} &= v_{t0} + \mu(1+e)v_{n0} \cdot v_{t0}/|v_{t0}| \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

なお、粒子が衝撃吸収シートに衝突することによって生じる帯

電量は少ないものとみなし、本研究では考慮しなかった。

投入するプラスチック粒子の電荷量及び、粒子と衝撃吸収シートの摩擦係数、反発係数は、Table 1に示すように実験により得られた値を用いた。ここで、粒子の質量は質量を同じとする球相当径とした。

Fig. 4 (a), (b) は、電極間の電位差を 70kV 及び 90kV とした時の、帯電した ABS 粒子の落下挙動を示した結果である。ここで、 μ , σ は、それぞれ平均値と標準偏差を示している。Fig. 4 (a) より、帯電量が $\mu-3\sigma$ や $\mu-\sigma$, μ の粒子は、シートに衝突せずに落下しており、帯電量の高い粒子 (μ) の方が、静電気力をより強く受けるため、 x 方向への移動距離が大きい事が分かる。また、帯電量の高い粒子 $\mu+\sigma$, $\mu+3\sigma$ は、シートに衝突しながら落下していく様子が確認できる。この様に、シートに衝突した粒子は、シート面を跳ねるような挙動を示す事が分かる。Fig. 4 (b) より、帯電量の小さい粒子 $\mu-3\sigma$ は、 x 方向への移動が小さく、中央 ($x=0$) 付近に落下し、帯電量が μ や $\mu+\sigma$, $\mu+3\sigma$ の粒子は、 x 方向への移動が大きいため、衝撃吸収シートに衝突している。帯電量の大きい粒子 $\mu+3\sigma$ は、シート上部で衝突するため、衝突後も電極間の電界の影響を受け、 x 軸正方向に大きく移動するが、粒子 (μ) はシートの下部で衝突するため、衝突後は強い電界の影響を受ける時間が短く、衝突後の x 軸正方向への移動距離が小さい。Fig. 4 (a), (b) より、帯電量 $\mu+3\sigma$ の同帯電量の粒子について比較しても、電位差が高い方が静電気力を強く受けるため、衝突時に大きく跳ねることが分かる。しかし、跳ねる方向は衝突前と同様な方向となり、投入位置である $x=0$ から離れた位置に落下する。従って、衝撃吸収シートの効果が表れていることが分かる。

4. 選別装置

Fig. 5 は、本研究で使用した選別装置である。2枚の平板電極は、高さ 470mm、幅 450mm、厚さ 3mm のアルミ製である。電極間には、2枚の衝撃吸収シートを設置した。衝撃吸収シートには、電界への影響と反発防止を考慮して、厚さ 100 μm の PVC シートを用いた。選別装置の下側には、13 個の回収容器を設置した。

Fig. 6 は、選別対象として用いた ABS と PS 粒子である。いずれも、厚さ 2mm の板材を目開き 8mm のふるいが取り付けられ

Fig.5 Experimental apparatus.

Fig.6 ABS and PS.

Fig.7 Tribocharger.

た破砕機で破砕し、さらに、目開き 2mm のふるいで微細なプラスチック粒子を取り除いたものを選別対象とした。平均質量は ABS が 46 mg, PS が 45mg であり、粒子映像による円相当径の平均値は ABS が 5.2mm, PS が 5.1mm である。それらを 30g ずつ混合した試料を選別対象とした。なお、本研究で利用した粒径については筆者らがこれまで扱ってきたペレットのサイズより大きなものが選別可能かを確かめるために選定した¹²⁾。

Fig. 7 に、摩擦帯電で利用した摩擦帯電装置を示す。装置は、ABS 製回転容器と回転架台からなり、ABS と PS 粒子を回転容器に封入し、所定の回転速度、帯電時間で回転させることで、容器内の ABS と PS 粒子を帯電させた。帯電容器は ABS 製のものを使用した。回転容器は内径 75mm, 長さ 90mm とした。本装置を用いて、ABS と PS 粒子を摩擦帯電した結果を Fig. 8 に示す。こ

 Fig.8 Relative frequency of charge for ABS and PS.
(Charging time:15 minutes, Rotating speed:140rpm)

Fig.9 Electrodes and collection trays.

こで、各粒子の帯電量はファラデーケージ及びナノクーロンメータ (Monroe Electronics 社) を用いて計測を行った。ファラデーケージ内に粒子を投入する際には、接触帯電をできるだけ避けるためにピンセットの先に、粒子と同じ材質のプラスチックを貼り付けたものを使用した。Fig. 8 において、実線や破線は正規分布曲線である。ここで、各曲線の平均値 μ , 標準偏差 σ は Table 1 に示す値と同じである。この結果より、ABS は正に、PS は負に帯電していることから、極性の違いを利用した両者の選別が可能になるといえる。

本選別装置における、電極と回収容器の位置関係を Fig. 9 に示す。選別装置下側に設置された 13 個の回収容器には、Fig. 9 のように、正電極側から順に 1 ~ 13 の番号を付した。回収容器の大きさは、外側の 2 個を除き全て均一で、中心から対称となるように配置した。また、回収容器中央付近にある縦 0.055m, 横 0.030m の実線で示す長方形は投入口を示している。次に、電極と衝撃吸収シートの位置関係を Fig. 10 に示す。2 枚の平板電極は、アクリル製の固定具により固定し、衝撃吸収シートは、平板電極間に角度 θ でハの字型に設置した。電極固定具の下端から回収容器上端にかけては、衝撃吸収シートの角度をさらに広げて設置しており、粒子の移動を極力阻害しないように配慮した。また、これらのシートは、粒子の装置外への飛び出しを防止する役割も担っている。平板電極の電極間距離 d は、電極固定具の位置をずらすことで調整した。なお、電極の長さ L_a は 470mm, 固定具下端と回収容器上端の距離 L_b は 595mm とした。ここで、電極間距離 d や電極の長さ L_a , 固定具下端と回収容器上端の距離 L_b , 衝撃吸収シートの角度 θ については、各値を任意に設定して、3 節で示し

Fig.10 Electrodes and collision avoidance sheets.

た計算を行い、粒子の落下状況から、選別が可能となるような値を決定した。

5. 実験結果

選別結果については、次式で表わされる純度と回収率を用いて、選別性能を評価した。

ABS について

$$\text{純度 (\%)} = \frac{\text{指定容器内の ABS の質量}}{\text{指定容器内にある全粒子の質量}} \times 100 \quad \text{..... (10)}$$

$$\text{回収率 (\%)} = \frac{\text{指定容器内の ABS の質量}}{\text{ABS の全投入量}} \times 100 \quad \text{..... (11)}$$

ここで、PS については下線を付した箇所を PS に置き換えて計算

を行った。なお、本選別実験では、実施した実験結果に基づいて、PS 粒子の指定容器番号を No.1 ~ 5, ABS 粒子の指定容器番号を No.9 ~ 13 とした。

Fig. 11 (a), (b) は、衝撃吸収シートの有無による回収率と純度を比較した結果を示している。ABS と PS 粒子の純度と回収率は、いずれもシートを設置した場合の方が、高い値が得られており、回収率の方がシート設置の効果は顕著に表れている。この結果により、衝撃吸収シートによる選別精度への高い効果が確認できる。

Fig. 12 (a), (b) は、各電極の電界強度が ABS と PS の回収率に与える影響を調べた結果である。ここで、シートの設置角度 θ は 8° とした。また、(a), (b) はそれぞれ、電極間距離 d を 230mm, 310mm とした。ABS と PS 粒子について、いずれの電極間距離でも、電界強度の上昇に伴い、わずかながら、回収率が上昇していることが分かる。これは、電界強度が高くなることにより、帯電した粒子が受ける静電気力が強くなり、移動する距離が大きくなるからである。ABS と PS 粒子の回収率は、いずれも電極間距離による差は殆ど無く、電界強度に応じて概ね同様の回収率の上昇がみられた。電極間距離を縮めると、衝突する粒子量が増え、回収率が低下することを懸念したが、本選別装置では、衝撃吸収シートが衝突の衝撃を吸収することで反発を抑え、衝突による選別精度の低下が生じなかったと推察される。

Fig. 13 (a), (b) は、衝撃吸収シートの設置角度 θ が ABS と PS の回収率や純度に与える影響を調べた結果である。ABS と PS 粒子の純度は、いずれの設置角度でもほぼ同様に高い値であることがわかる。設置角度が大きい方が回収率は、わずかに増加する。これは、シートの設置角度が大きいほど、シートに衝突後の粒子が期待と反対の方向に移動しにくくなっているためと考えられる。

Fig. 14 は、各シート設置角度による回収率の実験値と解析値を比較した結果である。解析では、Fig. 8 で得られた帯電量の平

Fig.11 Effect of collision avoidance sheets.
(35kV, -35kV, $d=270\text{mm}$, $\omega=140\text{rpm}$, $T=15\text{min}$, $\theta=8^\circ$)

Fig.12 Effect of electric field strength.
($\omega=140\text{rpm}$, $T=15\text{min}$, $\theta=8^\circ$)

Fig.13 Effect of sheet angle θ on purity and recovery.
(35kV, -35kV, d=270mm, ω =140rpm, T=15min)

Fig.14 Comparison of experimental and calculated results.
(35kV, -35kV, d=270mm, ω =140rpm, T=15min)

Table 2 Best separation results. (45kV, -45kV, d=270mm, ω =140rpm, T=15min, $\theta=8^\circ$)

	PS(No.1~5)	ABS(No.9~13)
Purity[%]	99.3~100	99.4~99.6
Recovery[%]	96.6~97.5	93.8~95.9

均値と標準偏差を用いて、各容器の回収率を算出した。各回収容器の回収率をみると、衝撃吸収シートの設置角度が大きいと、粒子が中央から離れた回収容器に分布し、設置角度が小さいと、中央付近の回収容器に多く分布していることが分かる。これは、Fig. 4 に示した衝突時の粒子挙動から、次のように推察できる。ハの字型に設置した衝撃吸収シートは、設置角度が大きいくほど、y 軸負方向にすすむにつれシート間隔が広くなり、衝突が起りにくく、その回数も減るため、粒子の速度減少が少なくなり、投入位置である $x=0$ から離れた回収容器に落下する。逆に、設置角度が小さく衝突回数が多くなり粒子速度も減少すると、x 軸方向の移動距離が短くなり、比較的投入位置に近い回収容器に落下する。そのため、設置角度が小さいと、中央付近に多くの粒子が回収されると考えられる。また、実験と解析の結果を比較すると、設置角度 θ が 8° では最も多く回収される容器位置は実験と解析で一致しており、定性的ではあるが、回収の状況は概ね、予測可能であるといえる。

Table 2 は以上の実験から、特に優れた選別結果をまとめた結果である。衝撃吸収シートの設置角度 θ は 8° とし、3 回の実験を行うことで、再現性の確認も行った。選別に要した時間は 40

秒程度であった。近年、プラスチックのリサイクルでは、純度 99%、回収率 90% 以上の選別が求められているが、板電極を有する自由落下型に関する報告では、これまで、純度がその値を達成しても、回収率は 85% 程度の低い値しか得られていなかった^{5, 10)}。それに対して、本装置では、PS、ABS とともに、目標とする純度、回収率を十分に達成していることがわかる。また、実験回数は少ないが、実験毎の純度、回収率の違いはそれほど、大きくないといえる。

6. 結 言

衝撃吸収シートを備えた自由落下型静電選別装置の選別性能に関して、理論的、実験的に研究を行った。密度差がほとんどない ABS と PS の破碎試料を用いて選別実験を行い、印加電圧や電極、衝撃吸収シートの設置条件を調整することで高い選別性能が得られることを確認した。解析による選別精度の予測計算を行い、実験結果と概ね一致することを確認した。通常、実機では処理量は 100kg/h 以上が望まれることから、今後、実機化を目指すためには、処理量の増大や衝撃吸収シートの寸法・位置関係などを考慮に入れたスケールアップのための指標を構築することが課題となる。

References

- 1) プラスチック処理促進協会：プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況，(2012).
- 2) 佐伯暢人：日本機械学会論文集 C 編，**77**, 780 (2011), 2953-2961.
- 3) D. K. Yanar, and B. A. Kwetkus: Journal of Electrostatics, **35** (1995), 257-266.
- 4) S. Matsushita, Y. Mori, and T. Sometani: Electr. Eng. Japan, **117**-D, 12 (1997), 1449-1454.
- 5) I. I. Inculet, G. S. P. Castle, and J. D. Brown, Particulate Science and Technology, **16** (1998), 101-106.
- 6) C. Xiao, M. B. Biddle, and M. M. Fisher: Proc. of 6th SPE Recycling Div. Annual Recycling Conference, (1999), pp. 221-230.
- 7) J. Wei and M. J. Realff: AIChE Journal, **49**, 12 (2003), 3138-3149.
- 8) G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki and T. Fujita: Materials Transactions, **44**, 1 (2003), 161-166.
- 9) G. Dodbiba, A. Shibayama, J. Sadaki, and T. Fujita: Materials Transactions, **44**, 12 (2003), 2427-2435.
- 10) A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu and L. Dascalescu: Journal of Electrostatics, **63** (2005), 937-942.
- 11) C. H. Park, H. S. Jeon and J. K. Park: Journal of Hazardous materials, **144** (2007), 470-476.
- 12) 佐伯暢人：日本機械学会論文集 C 編，**71**, 707 (2005), 2180-2186.