

論 文

トナーとキャリア粒子の摩擦帶電の解析

増田 弘昭*, 板倉 隆行**, 湯蓋一博*

(1996年4月13日受理)

Analysis of Tribo-Charging between Toner and Carrier Particle

Hiroaki MASUDA*, Takayuki ITAKURA**, Kazuhiro YUBUTA*

(Received April 13, 1996)

The contact potential difference (CPD) against Au (reference material) was measured directly for model toner and carrier particles. Furthermore, tribo-charging characteristics in mixing between these particles have been analyzed quantitatively by the measured CPD-values and two different time-constants for charging τ_g and charge relaxation τ_r . As a result, it was found that specific charge of model toner \bar{Q} took the maximum value \bar{Q}_{\max} at certain mixing time and then it showed a tendency to decrease gradually. Besides, the time until to reach \bar{Q}_{\max} became longer with increasing the fraction of added guest particles. The experimentally obtained charging-curve between model toner and carrier particles was well explained by a new charging model which considered contact frequency between particles. It was also found that the stability of toner-particle charging depended on τ_r . On the other hand, the relationship between τ_g and the fluidity of model toner was found to be almost linear, and therefore, the charging-curve could be controlled through the evaluation of the time constant τ_r and toner fluidity. The maximum specific charge \bar{Q}_{\max} was directly proportional to the CPD-values against carrier particles. This fact suggests that \bar{Q}_{\max} of toner can be controlled by changing CPD-values between toner and carrier.

1. 緒 言

近年における世界的規模での急速な情報化の進展を背景に、複写機、ファクシミリ、プリンタ等は、情報ネットワーク社会における必要不可欠な出力機器として成長を遂げている。これらの情報機器の多くは、粒子の摩擦に伴う帶電を利用する電子写真プロセスを応用している。一方、情報機器に搭載され、その性能を左右するキーデバイスである半導体や液晶ディスプレーの製造、および医薬品製造等の先端装置産業では、帶電した粒子がデバイス上や管壁内に付着することにより^{1,2)}、最終製品の品質に様々な悪影響を及ぼしている。いずれにしても現在、産業上の各分野において、粒子の帶電特性を制御するための基礎研究の充実が求められている。

キーワード：接触電位差、摩擦帶電、電子写真

* 京都大学工学部化学工学教室 (606-01 京都市左京区吉田本町)

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-01, Japan

** 三田工業株式会社技術部第1プロセスセンター (540 大阪市中央区玉造1-2-28)

Electrophotography Process Center 1st Department, Mita Industrial Co., Ltd., 1-2-28, Tamatsukuri, Chuo-ku, Osaka 540, Japan

電子写真プロセスは、静電潜像の現像に使用する粉末インクであるトナーを帶電させるシステムの違いによって、1成分現像方式と2成分現像方式に大別される。1成分現像方式では、トナーを金属製やゴム製のブレードに圧接することによって、また2成分現像方式では、トナーと鉄製やフェライト製のキャリア粒子を攪拌混合することによって電荷を発生させる³⁾。いずれのシステムにしても、鮮明なコピー画像を得るためにトナーの帶電量をある一定の範囲に制御することが最も重要な課題である。しかし、トナーの帶電特性を定量的に評価する方法は確立されておらず、現在のところトナーとキャリア粒子との摩擦帶電を行った際に生じる比電荷を測定する方法⁴⁾(ブローオフ法)が主に用いられている。一方、筆者らは粉体の接触電位差(CPD: Contact Potential Difference)を直接測定する方法について検討しており^{5,6)}、電子写真プロセスにおいて必要となるトナーやキャリア粒子の帶電特性を定量的に評価できる可能性がある。

本研究では、モデルトナーとキャリア粒子を試作し、両粒子の摩擦帶電特性を接触電位差の測定結果を用いて定量的に解析した。その結果、電子写真プロセスの評価に応用できる新しい知見が得られたので報告する。

2. 実験方法

2.1 試料粉体の作製

2成分現像剤として実際に用いられるトナーは、母材となる熱可塑性樹脂中に、カーボンをはじめとする着色剤や帯電制御剤などを分散させ、その表面上に各種の外添用超微粒子を付着させた10 μm 程度の複合粒子である。本実験では、母材の樹脂のみによって構成されるモデルトナーを作製して用いた。モデルトナー作製の前処理として、攪拌混合機(奈良機械社製, OMD-3)によって、以下に述べるホスト粒子とゲスト粒子の予備混合を行った。ホスト粒子は球形のPMMA粒子(総研化学社製, MX-1500)の微粉部分を遠心式空気分級機(日清エンジニアリング社製, TC15)によってカットしたもの(質量中位径15.2 μm)であり、またゲスト粒子はほぼ単分散のスチレンアクリル粒子(総研化学社製, MP-5000: 質量中位径0.4 μm)である。なお、攪拌条件としてはホスト粒子の周りにゲスト粒子が均一に付着するような条件を種々検討し、回転数を1,800 rpm、処理時間を1分間とした。

予備混合後の試料粉体の機械的処理に用いた高速気流衝撃システム(奈良機械社製, HYB-1)の装置概略を図1に示す。本装置は主に、高回転するロータ(1)と循環管(2)などから構成される。ホスト粒子の周りにゲスト粒子が均一に付着した混合粉体はホッパー(3)から装置内に投入され、(1)に付随するブレード(4)から衝撃・剪断力を繰り返し受けることにより、ゲスト粒子の成膜化や固定化が行われる⁷⁾。なお、予備混合されたゲスト粒子

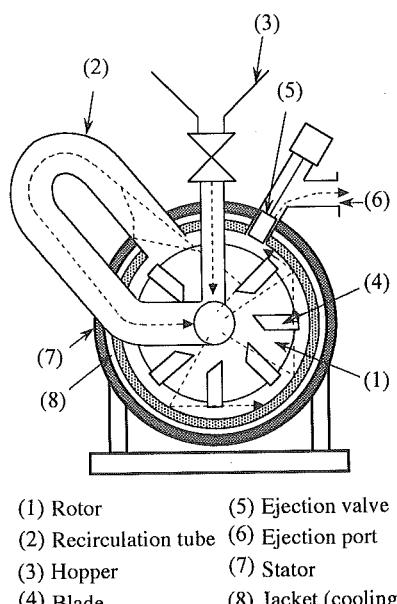


図1 粉体の機械的処理に用いた実験装置

Fig.1 Experimental apparatus for mechanical treatment of powder.

とホスト粒子が完全に固定化されること、および両粒子の表面が処理によって化学的に変化しないことを考慮して、回転数を8,000 rpm、処理時間を30分間とした。

表1に、作製したモデルトナーのゲスト粒子添加率R(ホスト粒子に対するゲスト粒子の重量比)と見掛けの比誘電率 $\bar{\epsilon}$ [-]および見掛けの比抵抗 $\rho[\Omega\text{m}]$ の測定結果を示す。なお、R=0のモデルトナーとは、ホスト粒子のことを表す。表に示した $\bar{\epsilon}$ [-]は、電極間距離を一定にした平行平板セルに同一条件で粉体を充填し、静電容量計(Kuwano製, MC-IIIB)を用いて求めた。また、 $\rho[\Omega\text{m}]$ はJIS規格(JIS B9915)に基づいて求めた。

図2(a)～(d)に、R=0.05, 0.15における機械的処理前のSEM写真の一例を示す。これらの観察結果より、予備混合によってホスト粒子の周りにほぼ均一に付着したゲスト粒子が、機械的処理を施すことによって表面上にほぼ一

表1 モデルトナーの性質

Table 1 Characteristics of model toner.

No.	Mass fraction of added guest particles, R[-]	Specific dielectric constant, $\bar{\epsilon}$ [-]	Specific resistance, $\rho[\Omega\text{m}]$
(1)	0	1.786	1.09×10^{15}
(2)	0.025	1.643	1.11×10^{15}
(3)	0.05	1.690	1.15×10^{15}
(4)	0.10	1.548	1.17×10^{15}
(5)	0.15	1.607	1.16×10^{15}
(6)	0.20	1.732	1.20×10^{15}

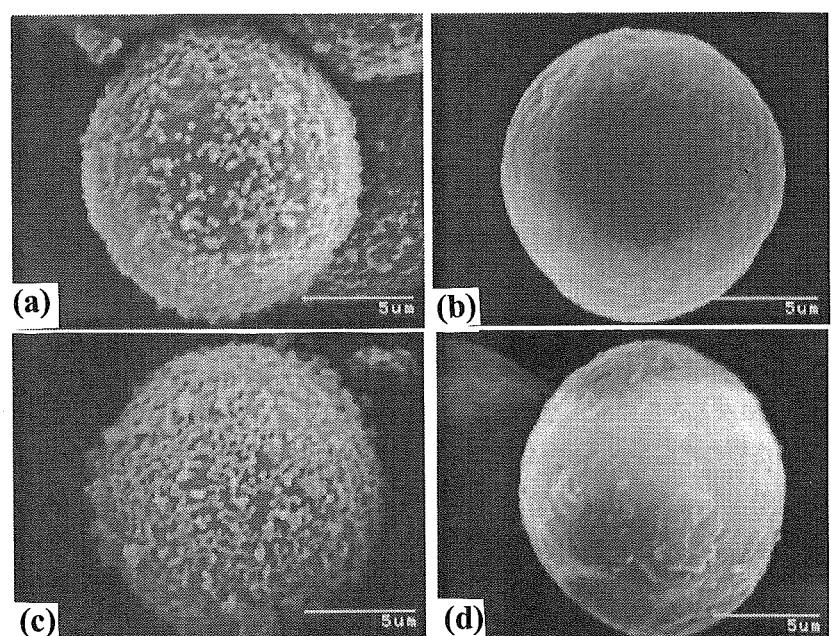


図2 試料粉体のSEM写真(モデルトナー)

Fig.2 SEM photographs of sample powders (model toner).

(a) Before mechanical treatment ($R = 0.05$), (b) After mechanical treatment ($R = 0.05$), (c) Before mechanical treatment ($R = 0.15$), (d) After mechanical treatment ($R = 0.15$).

様にコーティングされていることがわかる。

一方、キャリア粒子としてはモデル粒子ではなく、実際に用いられているものと同等品を以下の手順で作製して用いた。すなわち、流動層コーティング装置(フロイント産業社製、SPIR-A-FLOW)を用いて、フェライト製コア粒子(同和鉄粉社製、質量中位径88.1 μm、比重4.8)の周りに電子吸引性のフッ化ビニリデン(ダイキン工業社製、CA-16)をコーティングし、これを一定温度のオーブン内で硬化させた。なお、作製したキャリア粒子の樹脂コーティング率(キャリアコア粒子に対する樹脂の重量比)をカーボンアライザ(堀場製作所製、EMIA-110)によって定量した結果、0.32 wt%であった。また、 ϵ [-] および ρ [Ωm] の測定結果は、それぞれ $\epsilon = 6.89$, $\rho = 8.78 \times 10^8 \Omega\text{m}$ であった。

2.2 摩擦帶電特性の評価

摩擦帶電特性の評価は、トナーとキャリア粒子から構成される2成分現像剤の複写機内での挙動を考慮して行った。すなわち、トナーはホッパーから補給されると、現像器内でキャリア粒子と攪拌混合されることによって電荷を帯びる。このシステムを模擬的に実現させるために、次の方法でモデルトナーとキャリア粒子の摩擦帶電を行った。まず、正確に秤量したモデルトナー0.018 gとキャリア粒子0.582 gをポリプロピレン製円筒容器(容量: 3 ml)に入れ、そのまま24時間以上放置した。次に、2本ロール上で容器を回転(100 rpm)させることによって両粒子の摩擦帶電を行った。その結果、キャリア粒子の周りにモデルトナーが静電的に付着し、2成分現像剤が作製される。容器を一定時間回転させた後、直ちにブローオフ法(試作機)によってモデルトナーの帶電量を求めた。このようにして容器の回転時間を変えて同様の実験を繰り返し、トナーの帶電立ち上がり特性を評価した。なお、測定は温度18~20°C、相対湿度40~50%の環境で行った。

2.3. 試料粉体の接触電位差の測定

図3に、接触電位差の測定に用いた装置の概略を示す。この装置の検出部分は上下運動する上部電極(1)、粉体を充填する下部電極(2)、上部電極を駆動させるためのモーター(3)などから構成されている。この検出部をノイズ対策のための電磁シールド(4)を介してシリカゲルを入れたデシケータ(5)の中に設置することによって、温度を18~20°C、相対湿度を9~13%に維持している。なお、測定時における温湿度は、デジタルマルチメータ(アドバンテスト社製、R6452A)に接続されたセンサにより同時にモニターできるようにした。(5)の外部には、上部電極からは可変直流電源(アドバンテスト社製、R6144)が、また下部電極からは電流検出用のエレクトロメータ(アドバンテスト社製、TR8652)がそれぞれ接続されており、印加電圧のタ

イミングおよび検出電流の入力をコンピュータのGP-IBによって自動制御した。なお、本装置の測定精度は、データ処理の自動化および微少電流測定におけるノイズ対策により、±0.005 V以内にすることができた。

試料粉体の接触電位差の測定は、下部電極セル内に電磁振動を1分間与えながら充填し、SUS304製の金属刃を用いて表面を水平にカットし、粉体層の初期電荷を除電した後に検出部に設置して行った。粉体層の初期電荷の除電には、軟X線照射除電装置(高砂熱学工業社製、IRISYS-SX)を用いた⁸⁾。

上部基準電極(1)の上下運動によって発生する変位電流が零になるように印加した電圧を V_0 [V] とするとき、次式が得られる⁵⁾。

$$V_0' = V_{\text{Sample/Au}} + \frac{\rho_a}{2\epsilon_a} d^2 \quad (1)$$

ここで $V_{\text{Sample/Au}}$ [V] は Au に対する試料粉体の接触電位差、 d [m] は粉体層の厚さ、 ρ_a [Cm⁻³] は粉体層の体積電荷密度である。式(1)の右辺第2項の ρ_a [Cm⁻³] が緩和して零になると、次式のように、そのとき得られる印加電圧 V_0 [V] が接触電位差 $V_{\text{Sample/Au}}$ [V] として測定される。

$$V_0 = V_{\text{Sample/Au}} \quad (2)$$

式(1), (2)の妥当性は、実験によって検証済みである⁶⁾。

3. 実験結果および考察

鮮明なコピー画像を得るためにトナーの帶電量をある一定の範囲に制御することが重要である。中でも特に、トナーの帶電立ち上がり特性と最大帶電量を制御すること、および帶電の安定性が重要な課題である。ここでは、トナーの帶電立ち上がり特性とその安定性、および最大帶電量について考察を行う。

3.1 帯電立ち上がり特性の測定結果と帶電曲線の解析

6種類のモデルトナーについて、摩擦時間に対するトナ

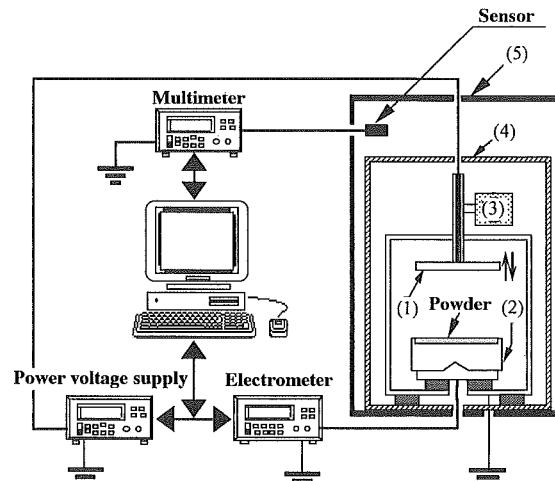


図3 CPD測定システム

Fig.3 CPD measuring system.

ーの比電荷 \bar{Q} [μC/g] の経時変化を図4に示す。すべてのモデルトナーは、一定時間経過後に最大値 \bar{Q}_{\max} [μC/g] に達し、その後、減少する傾向がある。また、 \bar{Q}_{\max} [μC/g] に到達するまでの時間は、ゲスト粒子添加率 $R[-]$ が大きい方が長いことがわかる。なお、図中の実線は後に述べる計算式である。

いま、トナーとキャリア粒子は互いに接触・分離を繰り返すことにより帶電し、これらの粒子の比表面積に対する容器内壁の総面積は極めて小さいことより、粒子の容器との接触分離は無視できると仮定する。このとき、キャリア粒子と接触しているトナー粒子1個の帶電を以前に報告した管内固気二相流の場合と同様に考えると次式が得られる (Appendix 参照)。

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{kV_c}{\tau_g} - \frac{Q}{\tau_g} \quad (3)$$

ただし、 Q [C] はトナー粒子の帶電量、 V_c [V] はトナー粒子とキャリア粒子の接触電位差である。また、 k [F] はトナー粒子とキャリア粒子間の電気影像効果を考慮すると次のようになる。

$$k = \frac{\pi \epsilon_0 D_p^2}{2z_0} \quad (4)$$

ここで、 D_p [m] はトナー粒子径、 z_0 [m] は接触時のトナー粒子とキャリア粒子の分離距離で 0.4 nm 程度とされている⁹⁾。

一方、 τ_g [s] は帶電時定数であり、次のようにある。

$$\tau_g = \frac{\pi D_p^2 \tau_{g0}}{2Sf \Delta t} \quad (5)$$

ここで、 S [m²] は接触面積、 f [s⁻¹] はトナー粒子とキャリア粒子の接触頻度、 Δt [s] は接触時間、 τ_{g0} [s] は1回の接触における電荷移動の速さを表す帶電時定数である。

一方、帶電電荷の緩和も同時に起こるとすると、トナー粒子の電荷は次式に従って減衰する(指數則)。

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{\tau_r} \quad (6)$$

ここで、 τ_r [s] は次式で表される緩和時定数である¹⁰⁾。

$$\tau_r = \epsilon_a \rho \quad (7)$$

式(3), (6) より、トナー粒子の帶電過程は次式で表される。

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{kV_c}{\tau_g} - \left(\frac{1}{\tau_g} + \frac{1}{\tau_r} \right) Q \quad (8)$$

上式を積分すると、次式が得られる。

$$Q = \frac{kV_c}{1 + \left(\frac{\tau_g}{\tau_r} \right)} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{1}{\tau_g} + \frac{1}{\tau_r} \right) t \right\} \right] \quad (9)$$

式(9)は時間の経過とともに帶電量が飽和に達する式であるのに対し、図4に示した実験結果は一定時間経過後に最大値に到達した後に、徐々に減少する傾向がある。これは、式(9)ではキャリア粒子とトナーが無限に接触・分離

を繰り返しながら帶電する場合を想定しており、接触頻度 f [s⁻¹] の変化を考慮していないためである。実際には帶電したトナーはキャリア粒子の周りに徐々に付着していくので、有効な接触が行われなくなる。そこで、2成分現像剤の帶電過程を \bar{Q} [μC/g] が最大値に達するまで(領域I)と、それ以降(領域II)の時間領域に分ける。領域Iはモデルトナーとキャリア粒子が接触頻度 f [s⁻¹] で接触・分離を繰り返す時間帯であり、領域IIはキャリア粒子の周りにモデルトナーが完全に付着した状態であり、そこでの接触頻度 f [s⁻¹] は零とする。なお、領域Iにおける f [s⁻¹] は実際には徐々に変化するはずであるが、ここでは平均的な定数として取り扱った。このとき、領域Iにおける帶電曲線は次の式(10)で表され、領域IIでは $f = 0$ によって式(5)の τ_g [s] が無限大になり、電荷の発生はなくなるので、帶電曲線を表す式は式(11)になる。

$$Q = Q_{\max} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{1}{\tau_g} + \frac{1}{\tau_r} \right) t \right\} \right] \quad (10)$$

$$Q = Q_{\max} \exp \left(- \frac{t}{\tau_r} \right) \quad (11)$$

ここで、緩和時定数 τ_r [s] は、表1に示した ϵ [-] と ρ [Ωm] の測定結果を式(7)に代入することによって求めた。

図4に、式(10), (11)の計算結果を示す。これより、モデルトナーとキャリア粒子との接触頻度を考慮に入れた帶電モデル式は、ゲスト粒子添加率 $R[-]$ にかかわらず実験結果と良く一致することがわかった。また、図4の最大値以降の帶電量の減少、すなわち帶電の安定性は τ_r [s] に依存することがわかる。

次に、時定数 τ_r [s] と τ_g [s] に関する検討を行った。 τ_g [s] は図4に示した帶電の立ち上がりの傾きが、式(10)における $(1/\tau_g + 1/\tau_r)$ であることより逆算して求めた。図5に、時定数 τ_r [s] および τ_g [s] と $R[-]$ の関係を示す。 $R[-]$ の変化に

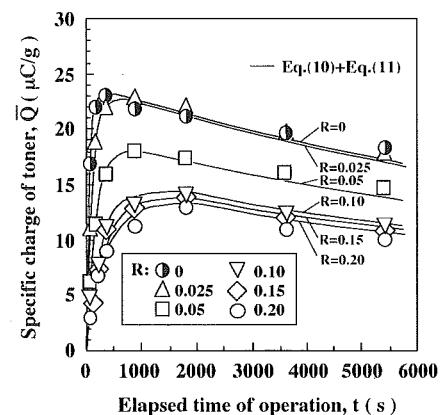


図4 モデルトナーの比電荷の経時変化

Fig.4 Change of specific charge of model toner with elapsed time of operation.

対して、 $\tau_r [s]$ はほとんど変化していないが、 $\tau_g [s]$ は $R [-]$ の増加とともに大きくなる傾向がある。

$\tau_g [s]$ のこの傾向を明らかにするために、帶電の立ち上がり特性の検討を行った。 $\tau_g [s]$ は式(5)に示す通り接触頻度 $f [s^{-1}]$ の関数であるので、モデルトナーの流動性との関係を調べた。図6に、モデルトナーの $\tau_g [s]$ とパウダーテスター(ホソカワミクロン社製、PT-E)によって測定した粉体の流動性の指標となる圧縮度 $C [\%]$ の関係を示す。なお、圧縮度が大きいほど流動性が悪いことを表す。 $\tau_g [s]$ と $C [\%]$ には良い相関があり、図4に示した6種類のモデルトナーの最大値に到達するまでの時間は、モデルトナーの流動性に依存することがわかった。これは、モデルトナーの流動性が良いとキャリア粒子との接触頻度が大きくなるためと考えられる。

3.2. 接触電位差の測定結果と最大帯電量の解析

図7に、図3に示した装置によって測定したモデルトナーのAuに対する接触電位差 $V_{Toner/Au} [V]$ と $R [-]$ の関係を示す。ホスト粒子の接触電位差は、 $R [-]$ が増加するに従って連続的に変化し、ゲスト粒子の接触電位差に近づくことがわかる。これは、図2に示したモデルトナーのSEM写真からもわかるように、 $R [-]$ の増加に従い、ホスト粒子の表面がゲスト粒子でコーティングされるためであるといえる。また、キャリア粒子のAuに対する接触電位差 $V_{Carrier/Au} [V]$ を別途測定した結果、-0.167 Vであった。

図8に、モデルトナーをキャリア粒子と摩擦帶電させたときの $\bar{Q}_{max} [\mu C/g]$ と、モデルトナーのキャリア粒子に対する接触電位差 $V_{Toner/Carrier} [V]$ の関係を示す。ここで $V_{Toner/Carrier} [V]$ は、図7に示した $V_{Toner/Au} [V]$ と $V_{Carrier/Au} [V]$ の測定結果を基に、次式から求めた。

$$V_{Toner/Carrier} = V_{Toner/Au} - V_{Carrier/Au} \quad (12)$$

これより、すべての試料粉体に対し $\bar{Q}_{max} [\mu C/g]$ と $V_{Toner/Carrier} [V]$ の関係は原点を通る1本の直線で表されることがわかる。

モデルトナーの $\bar{Q}_{max} [\mu C/g]$ は、領域Iの終点において帶電がほぼ飽和していることから、式(8)において $dQ/dt = 0$ とすることにより、次式で表される。

$$\bar{Q}_{max} = \frac{kV_{Toner/Carrier}}{1 + \left(\frac{\tau_g}{\tau_r} \right)} \quad (13)$$

図5に示した通り、実験に用いたモデルトナーの $\tau_g [s]$ は $\tau_r [s]$ に比べて非常に小さいため、式(13)は次式となる。

$$\bar{Q}_{max} = kV_{Toner/Carrier} \quad (14)$$

図8に示した通り、 $\bar{Q}_{max} [\mu C/g]$ と $V_{Toner/Carrier} [V]$ の関係は、原点を通る1本の直線、すなわち式(14)で表すことができる($k' = 6.25 \times 10^{-5} Fg^{-1}$)。よって、トナーの最大帯電

量は、キャリア粒子に対する接触電位差を変えること(本研究の場合はゲスト粒子のコーティング率)によって制御することができる。

4. 結 言

モデルトナーとキャリア粒子を試作し、両者間における摩擦帶電特性に関する検討を行った結果、以下の結論が得られた。

- 1) モデルトナーの比電荷は、キャリア粒子と一定時間摩擦後に最大値に達し、その後は減少する傾向がある。また、最大値に到達するまでの時間は、ゲスト粒子の添加率の大きい方が長い。
- 2) モデルトナーとキャリア粒子の帶電立ち上がり特性の実験結果は、両者の接触頻度を考慮に入れた帶電モデル式によって説明できる。また、帶電の安定性は緩和時定数に依存する。
- 3) 帯電時定数とモデルトナーの流動性には、良い相関

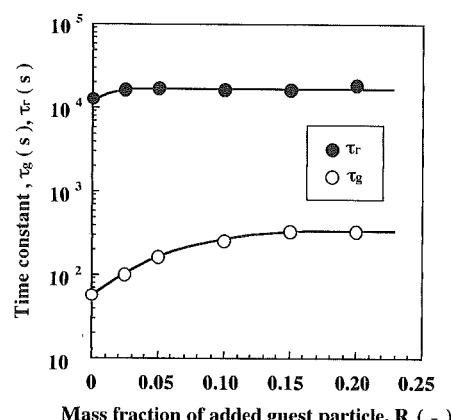


図5 時定数とゲスト粒子添加率の関係

Fig.5 Time constants as a function of the mass fraction of added guest particle.

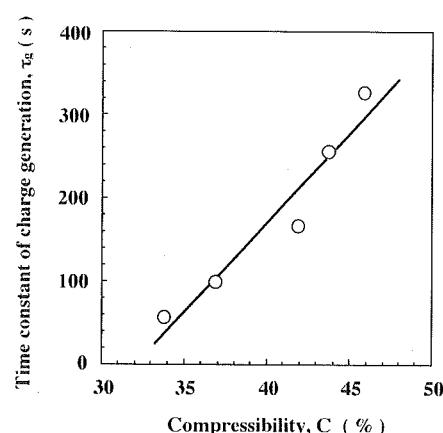


図6 帯電時定数と圧縮度の関係

Fig.6 Relationship between time constant of charge generation and compressibility of powder.

がある。よって、トナーの帶電立ち上がり特性は、緩和時定数と流動性の評価を行うことによって制御することができる。

4) モデルトナーの最大比電荷とキャリア粒子に対する接触電位差の関係は、原点を通る1本の直線で表される。したがって、トナーの最大帶電量はキャリア粒子に対する接触電位差を何らかの方法によって変えれば制御することができる。

試料粉体の提供をしていただいた総研化学株式会社ならびに軟X線照射除電装置を貸与していただいた高砂熱学工業株式会社の原 豊氏に謝意を表します。また、キャリア粒子の試作に協力していただいた三田工業株式会社の川田秀明氏ならびにモデルトナーの分級に協力していただいた日清製粉株式会社の村田 博氏に謝意を表します。

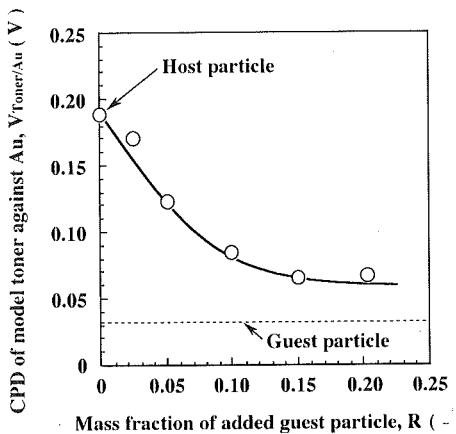


図7 モデルトナーのAuに対するCPDとゲスト粒子添加率の関係

Fig.7 Relationship between CPD of model toner against Au and mass fraction of added guest particle.

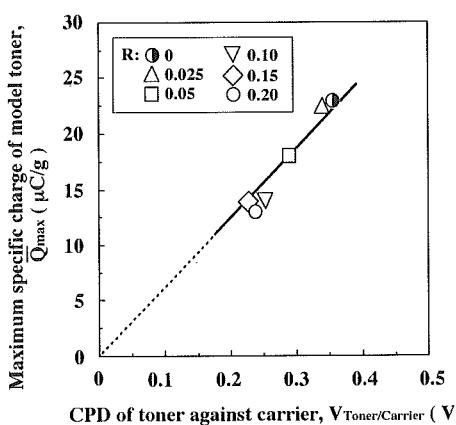


図8 モデルトナーの最大比電荷とキャリア粒子に対するCPDの関係

Fig.8 Relationship between maximum specific charge of model toner and CPD against carrier particle.

Appendix

粒径 D_p [m] の粒子が平面壁に接触した状態を考える。粒子・壁間の電位差 V_t [V] は次式で表される¹¹⁾。

$$V_t = V_c - V_e \quad (A.1)$$

ただし、 V_e [V] は電気影像効果による電位差であり、次式で近似される¹²⁾。

$$V_e = \frac{2Qz_0}{\pi\epsilon_0 D_p^2} \quad (A.2)$$

電荷の収支をとると、1回の接触・衝突で移動する電荷は式(A.1)の V_t を用いて次のように表される¹²⁾。

$$\frac{dQ}{dn} = \frac{\epsilon_0 SV_t}{z_0} \left\{ 1 - \left(-\exp \frac{\Delta t}{\tau_{g0}} \right) \right\} \approx \frac{\epsilon_0 SV_t \Delta t}{z_0 \tau_{g0}} \quad (A.3)$$

上式の dQ/dn を次の関係を用いて dQ/dt に変換する。

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dt} \Big| \frac{dn}{dt} = \frac{dQ}{dt} \Big| f \quad (A.4)$$

ここで、 $f[s^{-1}]$ は接触・衝突頻度である。式(A.1)～(A.4)より、次式が得られる。

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{kV_c}{\tau_g} - \frac{Q}{\tau_g} \quad (A.5)$$

ただし、

$$k = \frac{\pi\epsilon_0 D_p^2}{2z_0} \quad (A.6)$$

$$\tau_g = \frac{\pi D_p^2 \tau_{g0}}{2Sf \Delta t} \quad (A.7)$$

式(A.5)～(A.7)は、本文中の式(3)～(5)である。

参考文献

- 吉田英人, 三野岡 亮, 増田弘昭 : 化学工学論文集, 14 (1988) 665
- 吉田英人, 二宮 徹, 増田弘昭 : 粉体工学会誌, 26 (1989) 770
- 田中勝彦 : 静電気学会誌, 19 (1995) 15
- 小口寿彦 : 色材, 58 (1985) 476
- H.Masuda, T.Iitakura, K. Gotoh, T. Takahashi and T.Teshima : Adv. Powder Technol., 6 (1995) 295
- 板倉隆行, 野村俊之, 増田弘昭 : 粉体工学会誌, 32 (1995) 472
- 小石真純 : 微粒子設計, p.260, 工業調査会 (1987)
- 稻葉 仁, 大見忠弘, 吉田隆紀, 岡田孝夫 : 静電気学会誌, 18 (1994) 34
- H.Krupp : Adv. Colloid Interface Sci., 1 (1967) 111
- 静電気学会編 : 静電気ハンドブック, p.827, オーム社 (1981)
- B.N.Cole, M.R.Baum and F.R.Mobbs : Proc. Inst. Mech. Engrs., 184, Pt3C (1969-1970) 77
- H.Masuda, T.Komatsu and K.Iinoya : AIChE J., 22 (1976) 558s