金属との摩擦帯電において擬似トナーを流れる電流の観測

Measurement of Current due to Tribo-charging of Model Toner by Metal Electrodes

長谷川 達志^a, 小森 智裕^b, 松山 達^c

Tatsushi Hasegawa, Chihiro Komori, Tatsushi Matsuyama

Received 25 March 2010; Accepted 13 July 2010

To discuss charge generation on small particles by a rolling friction, a model experiment was performed. In the experiment, a single layer of dielectric spherical particles of 10 μm in diameter, as a simulant of electrophotographic toner, was pinched by two flat electrodes, and a current generation between the two electrodes was measured with sliding of the upper electrode. The current generation was explained by 'condenser model', in which work function difference between two contacting surfaces is assumed as electromotive force of the charge transfer. Nevertheless the final amount of charge on particles did not correspond to the order of magnitude of the measured current and even did not depend on electrode materials. The result implied that the charge determining process is not the contact electrification but the charge relaxation from the charged spheres.

Keywords: Triboelectrification, Rolling electrification, Condenser model, Charge relaxation, Electrophotography, Toner

1. はじめに

電子写真のトナーには、仕事関数の差を起電力とする接触帯電、電荷の拡散、イオン移動、あるいは大気中の放電など様々な機構の電荷移動が生じていると考えられる¹⁾。電子写真システム内のトナーに流れ込む電荷、また、トナーから流出する電荷をリアルタイムで観測する方法があれば、これらの電荷移動の機構を詳細に検討でき、トナー設計に極めて有益な指針を与

えることだろう。このような観点からの現像システムにおける研究としては、例えば現像ロール、供給ロール、規制ブレードの接地電流を測定することによって、トナーとそれらの部材の間の電荷移動の機構を検討した例²⁾がある。われわれは単純なモデル実験系で、単一成分の擬似トナーに的を絞ってその帯電過程を研究している³⁾。今回、摩擦帯電の機構を評価する目的で、異種金属の電極対で 10 μm 径の擬似トナーを摩擦する際、電極間に生じる電流を測定した。得られた電流を検討した結果、擬似トナー摩擦帯電過程において、①仕事関数差による帯電モデル（コンデンサーモデル）の妥当性、②電荷緩和現象の存在に関して知見を得ることができた。

2. 測定原理

Fig. 1 に、摩擦時の電流測定概念図を示す。一様な誘電体球（擬似トナー **Table 1**）を単層にして、それぞれ接地した 2 種の異なる素材の金属電極 A, B 間に挟み込んだ構成である。上方の電極上に荷重をかけ電極をスライドさせて球を摩擦する。このとき、電極 A, B 間に電流 I が発生する。この電流を説明するた

a 沖電気工業株式会社 研究開発センター
(〒335-8510 埼玉県蕨市中央1-16-8 沖電気システムセンター)
TEL 048-431-5498

Research & Development Center, Oki Electric Industry Co., Ltd.

(1-16-8 Chuo, Warabi, Saitama 335-8510, Japan)

b 株式会社沖データ 画像・メディア研究所
(〒370-8585 群馬県高崎市双葉町3-1) TEL 027-328-6158
Imaging & Media Laboratory, Oki Data Corporation
(3-1 Futaba-cho, Takasaki, Gunma 370-8585, Japan)

c 創価大学 工学部 環境共生工学科
(〒192-8577 東京都八王子市丹木町1-236)
TEL 0426-91-8169

Department of Environmental Engineering for Symbiosis,
Faculty of Engineering, Soka University
(1-236 Tangimachi, Hachioji, Tokyo 192-8577, Japan)

Fig. 1 Schematic illustration of the tribo-current measuring system

Table 1 Characteristics of model toner

Density	1190 kg/m ³
Dielectric constant	1.57
Diameter	10 μm
Standard deviation of diameter	0.5 μm
Young's modulus	4.7 GPa
Poisson's ratio	0.35

めには、①接触帯電、②帯電した球の運動による誘導電荷の電極間での再分配の2種類の電荷移動を考える必要がある。①、②の電荷移動の模式図をそれぞれ**Fig. 2** (a), (b) に示す。**Fig. 2** (a) に示すように接触帯電による電荷移動は、接触界面に電気二重層を形成する形で起こる。電極A, Bから球に電荷 dq_A , dq_B が移動するときに生じる誘導電荷 $-dq_A$, $-dq_B$ はそれぞれの電極上に留まる。すなわち、電極間電流は生じない ($I=0$)。それに対し、帯電した球が運動するとき、**Fig. 2** (b) に示すように、各電極の誘導電荷が変動することにより電極間を電荷が移動する。本測定のように球を摩擦しながら回転させる場合、以上説明した2種の電荷移動が重ね合わせて生じている。微小時間 dt における電極A, B上の誘導電荷の変化 dQ_A , dQ_B は次式で与えられる。

$$dQ_A = Idt - dq_A \quad dQ_B = -Idt - dq_B \quad (1)$$

また、電流 I については次式になる。

Fig. 2 Charge transfer due to (a) contact electrification and (b) induction current

Fig. 3 Charge distribution on a sphere and electrodes at the time (a) t , (b) $t+dt$, and (c) steady state. Slanted line parts show the charged surface of the sphere

$$I = \frac{dQ_A}{dt} + \frac{dq_A}{dt} = -\frac{dQ_B}{dt} - \frac{dq_B}{dt} \quad (2)$$

I は誘導電荷の時間変化と電極から球に注入される電荷の時間変化（以下注入電流と呼ぶ）の和として表わされる。しかしながら、Eq. (2) における観測電流はリアルタイムに注入電流を反映するものではない。つまり、**Fig. 2** (a) に示すように、注入電流 (Eq. (2) 第2項) の変動は誘導電荷の変動 (第1項) によって打ち消されるため、ただちに電流 I としては現れない。

以下、初期状態において帯電していない ($Q=0$) 球が角速度 ω で回転する場合について、注入電流がどのように観測電流に反映するか検討する。簡単のため、電極と球の帯電していない箇所が接触するとき、球は電極A, Bとの接点でそれぞれ一定量の電荷 dq_A , dq_B を受け取るものとする。(帯電した他の箇所の dq_A , dq_B に与える影響は無視する。) また、球の比誘電率を1と仮定する。**Fig. 3** (a), (b) に示すように、時刻 t の鏡像電荷とそれより微小時間 dt 経過した後の誘導電荷を比較すると次式が得られる。(Appendix 1 参照)

$$\begin{aligned} \frac{dQ_A}{dt} &= -\frac{1-\cos(\omega t)}{2} \frac{dq_A}{dt} \\ &\quad -\frac{1+\cos(\omega t)}{2} \frac{dq_B}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

上式を Eq. (2) に代入すると電流 I が得られる。

$$I = \frac{1}{2} \left(\frac{dq_A}{dt} - \frac{dq_B}{dt} \right) + \frac{\cos(\omega t)}{2} \left(\frac{dq_A}{dt} - \frac{dq_B}{dt} \right) \quad (4)$$

電流は、電極間での注入電流の差を直接反映する部分と、球の回転に同期する部分からなる。球の回転周期より大きなタイムスパンでの電流を観察する限りでは、(われわれの実験では 0.1 ms 以下) 次式が成り立つ。

$$\bar{I} = \frac{1}{2} \left(\frac{dq_A}{dt} - \frac{dq_B}{dt} \right) \quad (5)$$

さて、さらに球を摩擦し続けた場合、球の帯電量 Q が飽和する定常状態について考える。次式で表されるように、定常状態での注入電流の総計は 0 であり、

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dq_A}{dt} + \frac{dq_B}{dt} = 0 \quad (6)$$

が成立する。このような状態では球上の電荷分布も時間的に変化がなく、電極上の誘導電荷 Q_A, Q_B も

$$\frac{dQ_A}{dt} = \frac{dQ_B}{dt} = 0 \quad (7)$$

となる。したがって、Eqs. (2), (6), (7) より

$$I = \frac{dq_A}{dt} = -\frac{dq_B}{dt} \quad (8)$$

が得られる。つまり、定常状態で観測される電流は、一方の電極から球に渡され、球から他方の電極に渡される電流である (Fig. 3 (c))。定常状態 (帯電の飽和した状態) において、どんな電流も球に流入しないのであれば観測される電流も 0 である。

3. 実 験

Fig. 4 に、実験装置の概要を示す。金属電極 A および B として、アルミウム電極、SUS 電極、ニッケルメッキを施した SUS 電極 (以下ニッケル電極) を用いた。電極 A, B とも直径 50 mm の円柱型の金属塊であり、電極面はいずれもラップ研磨により表面を平滑にした。Fig. 4 には示していないが、装置全体の側面、底面を金属シールドにより覆った。電極 B は電

Fig. 4 Experimental apparatus

流電圧変換回路を構成するオペアンプの反転入力端子に接続し、電極 A, 金属シールドは接地した。擬似トナーとしてジビニルベンゼン架橋重合体である 10 μm 径の球 (積水化学工業㈱: ミクロパール) を用いた。ミクロパールは液晶パネル等のギャップ調整用に用いられるものであり、その目的のため真球に近く径の標準偏差は 0.5 μm とシャープな径分布を持つ。電極 A の中央部に 5~50 mg の擬似トナーを散布した。これは粒子個数として、 $8.0 \times 10^6 \sim 8.0 \times 10^7$ 個に相当する。測定は、散布したトナーの上に上部電極を置き、擬似トナー 1 個あたりに $10^{-7} \sim 10^{-5}$ N の荷重を印加して行った。荷重の調整は上部電極として重量の異なるものを用いることによった。擬似トナーが電極からこぼれないように、上部電極に付属する絶縁性の取手を手で持ち、手動で速度が一定になるよう円を描くように動かして擬似トナーを摩擦しつつ、Fig. 4 に示した電流電圧変換回路により電極間電流を測定した。電極を動かす速度はおよそ 0.005~0.01 m/s, 円を描く周期は 1 Hz 周辺である。電極を動かしているとき必要な駆動力と電極の荷重の比、すなわち動摩擦係数はおよそ 0.03 であった。擬似トナーを別の金属板に固定し、その上を電極 B でこすったときの摩擦係数、すなわち滑り摩擦係数は 0.4 であり、動摩擦係数はこの値より 1 桁以上小さいことから、本測定において擬似トナーは金属上を滑らないで回転している状態と考えられる。擬似トナーとの間で二つの電極ともに滑りがないことを前提とすれば、各電極と擬似トナーの間の相対速度 (球中心の移動速度、以下転がり速度と称する) は下部電極に対する上部電極の移動速度の半分である。電流測定後、電荷の供給と蓄積の収支を評価するため、上部電極と下部電極を分離した後、擬似トナーを吸引し、ファラデーケージで帯電量の測定を行った。

4. 結果と考察

4. 1 電流および帯電量

測定結果の一例として、アルミニウム電極を電極 A, SUS 電極を電極 B として擬似トナーを摩擦した際の電流を Fig. 5 に示す。未帯電の擬似トナーを摩擦した場合 (Fig. 5 (a)), 摩擦開始直後 ($t=0$ s) から、摩擦終了まで短周期のばらつき、長周期の微妙な変動はあるもののサンプル 1 g につき測定時間内で平均して 11 μA の電流が観測された。短期的な電流の周期は、約 2~3 Hz である。本実験においては電極を手動で動かしているため、速度の制御に問題がある。ま

Fig. 5 Relation between the current and the time ; electrode A : Aluminum electrode, B : SUS ; The load per sphere with rolling velocity 0.005 m/s, load per sphere 2×10^{-7} N. The current obtained (a) by using fresh (uncharged) (b) after 10 seconds interval from (a). A Thick line represents a smoothing line

た、摩擦熱により擬似トナーおよび電極の温度がある程度上昇することが予測されるが、本実験においては温度、湿度などの管理が十分されていない。これらの理由で、短周期、長周期含めて電流の変動の要因について、現在のところは論ずることができない。

Fig. 5 (b) は、いったん摩擦を終えた後 ($t=37$ s)、摩擦を再開したときの電流を示す。摩擦再開より Fig. 5 (a) と同じく、 $10 \mu\text{A}$ のオーダーの電流が流れており、この時間範囲において電流が定常であることを示す。

一方、同じ条件で最終の帯電量を測定した結果を、Fig. 6 に示す。帯電量は10~20秒以内に飽和する。

前節で示したように、定常状態で観測される電流は、一方の電極から擬似トナーを通り抜け、他方の電極へ受け渡される電流である。Fig. 5 においては $10 \mu\text{A/g}$ 、つまり 1 秒間に $10 \mu\text{C/g}$ の電荷が擬似トナーを通り抜ける。1 分間の摩擦過程において、擬似トナーを通り抜けた電荷の総量は、 $650 \mu\text{C/g}$ にまで達するが、これは最終の帯電量 $2 \mu\text{C/g}$ に比べはるかに大きい値である。本実験における帯電量の測定においては、擬似トナーを電極から分離しているので、この操作の際に電荷緩和が生じて測定電荷が極端に減少した

Fig. 6 Relation between the charge amount of resin spheres and the time

可能性も否定はできない。

擬似トナーへの荷重、金属材料を変化させ、1 分間摩擦した後の電流および擬似トナーの帯電量を比較した。Fig. 7 に、球 1 個あたりの荷重に対する電流を示す。電極の組み合わせによって電流の向きが定まることが分かる。アルミニウム電極とニッケル電極の組み合わせにおいて、未処理のアルミニウム電極を用いた場合と、5% 塩酸溶液で処理直後のアルミニウム電極を用いた場合では、電流の向きが逆転した。未処理のアルミニウム電極とニッケル電極、および、未処理のアルミニウム電極と SUS 電極の組み合わせでは、同じレベルの大きさの電流が流れ、ニッケルの電極とアルミニウム電極の組み合わせではより小さな電流しか得られなかった。以上から、電極の素材、表面状態によって擬似トナーへの電荷供給に一定の序列があることが示唆される。荷重と電流値の関係については、電

Fig. 7 Relation between the load per sphere and the current I from SUS electrodes to aluminum electrodes (○), nickel electrodes to aluminum electrodes (△), HCl aq. treated aluminum to nickel electrodes (▲), nickel electrodes to SUS electrodes (◇) with rolling velocity 0.0025 m/s

Fig. 8 Relation between the load per sphere and the charge amount of spheres charged between (a) different material electrodes ; aluminum and SUS (○), aluminum and nickel (△), nickel and SUS (◇) electrodes and (b) charged between pairs of aluminum (●), SUS (▲), nickel (◆) electrodes

流値の小さい SUS 電極とニッケル電極の組み合わせにおいてははっきりしないが、その他については荷重が増えると電流値が増える傾向が見られた。

Fig. 7 と同じ電極の組み合わせ、また、同種電極同士で擬似トナーを摩擦した際の電荷を **Fig. 8** に示す。結果は、上で見たような摩擦電流の摩擦素材依存性、荷重依存性に対して、計測されたトナー電荷量はほぼ一定で、電極材料およびその組み合わせに影響を受けていないことが分かる。

4. 2 コンデンサーモデル

電極の素材、表面状態によって擬似トナーへの電荷供給能力に序列があることが示唆されたが、**Fig. 8** の結果は仕事関数を起電力とする一般的な帯電モデルで説明するため、接触面での電荷移動に「コンデンサーモデル⁴⁾」を導入し、異種金属間に挟まれた粒子の

Fig. 9 Schematic illustration of 'Condenser Model'

摩擦帯電を考える。コンデンサーモデルの概念図を **Fig. 9** に示す。誘電体球（仕事関数 ϕ_s ）と金属（仕事関数 ϕ_m ）が接するとき、電位差 $(\phi_s - \phi_m)/e$ が生じる。コンデンサーモデルによると金属／誘電体球界面の電荷密度は次式で表される。

$$\sigma = \epsilon_0 \left(\frac{\phi_m - \phi_s}{e \cdot d} - E \right) \quad (9)$$

d は接触時に、トンネル電流により接触面の電位差を接触電位差に保つことが可能なギャップ量、すなわち接触帯電が生じるギャップ量であり、仮に接触ギャップと称する。トンネル電流が生じる距離は、多く見積もって数 nm のオーダーとされる⁵⁾。 E は接触界面以外の電荷が作る界面での電界である。実験のように両側を異なる仕事関数 ϕ_A, ϕ_B の電極 A, B で挟まれている場合、それぞれの電極から球への電流 i_A, i_B は

$$\begin{aligned} i_A &= \left\{ \epsilon_0 \left(\frac{\phi_A - \phi_s}{e \cdot d} - E_A \right) - \sigma_A \right\} wv \\ i_B &= \left\{ \epsilon_0 \left(\frac{\phi_B - \phi_s}{e \cdot d} - E_B \right) - \sigma_B \right\} wv \end{aligned} \quad (10)$$

ここでは、摩擦中粒子が電極上で滑らないことを前提としている。 $E_A, E_B, \sigma_A, \sigma_B$ はそれぞれの界面における電界、接触前に存在していた電荷の密度、 w は接触径、 v は転がり速度である。ここで、球上の電荷分布が変化しない定常状態を考える。 σ は球表面で均一と仮定する。多くの球の平均としての特性を考えるとこの近似は妥当だろう。Eq. (10) において次の関係と

$$\sigma = \sigma_A = \sigma_B \quad (11)$$

$$E = E_A = E_B \quad (12)$$

前節で得られた定常状態の仮定

$$I = i_A = -i_B \quad (13)$$

とを合わせると、電荷密度 σ 、球の仕事関数 ϕ_s および電界 E の影響が全て消去され、電極の仕事関数と

Fig. 10 Contacts between non-uniform size spheres and electrodes

電流の間に次の単純な関係が得られる。

$$I = \varepsilon_0 \left(\frac{\phi_A - \phi_B}{2ed} \right) wv \quad (14)$$

すなわち、観測される電流は二つの金属の仕事関数差、接触径、および摩擦時の速度に比例する。

一般に仕事関数は、表面の清浄度、吸着ガスなどによって変化し、特に大気中のそれを評価することは難しく、本研究においても仕事関数の測定は行っていない。しかしながら、Fig. 7 で示された電極の素材や表面状態により電流が変化する事実は、Eq. (14) により定性的に説明可能である。

荷重と電流値の関係については、前述したように、荷重が増えると電流値が増える傾向がある (Fig. 7)。粉体帯電が粉体に印加される荷重とどのような関係を持つかは、帯電メカニズム自体の問題として、また、電子写真システム内のトナー帯電プロセスの実用上の問題としても興味あるものである。荷重 P の影響は、Eq. (14) においては、接触径 w に現れる。Hertz の接触理論により半径 r の真球に荷重 P がかかるときの接触半径 a ($=w/2$) は、 Y を球のヤング率、 γ をポアソン比として次式で与えられる。

$$a^3 = \frac{3}{4} rP \left(\frac{1-\gamma^2}{Y} \right) \quad (15)$$

しかしながら、サンプルの径にばらつきがある (Table 1) ことを考慮しなければならない。Fig. 10 に示すように、荷重が大きくなるとより多くの球と金属が接触することになるため、粒径分布を有する場合の平均接触半径 $\bar{a}$ は、平均荷重 $\bar{P}$ に対して Eq. (15) より大きな依存性を持つことになるものと考えられる。Fig. 11 に、実際の球径のばらつきを考慮して計算した球 1 個あたりの荷重と平均接触半径を示す (Appendix 2 参照)。接触半径は荷重の 0.73 乗に比例するが、Fig. 7 に示される電流もそれに近い荷重依存性を持つ。コンデンサーモデルが予想するように、荷重による電流の

Fig. 11 Relation between load per sphere and calculated average contact radius

増加は接触面積の増加によるものと考えることができる。

以下、あくまで大雑把な議論であるが、トナー 1 個当たりの荷重 10^{-6} N の場合において、コンデンサーモデルにより推算される電流と実際の電流を比較する。 10^{-6} N の荷重条件では、Fig. 11 より平均接触半径は 2 nm と見積もられる ($w=4$ nm)。本実験において電極の仕事関数差は測定していないが、見積もりにおいては金属間の仕事関数差のオーダーである 0.1 V とする。接触ギャップ d に関してもトンネル電流が生じる距離としか分からないが、接触時の原子間距離としてよく仮定される 0.4 nm とおく。速度 v を実験に則して 0.0025 m/s とする。以上を Eq. (14) に代入すると

$$I = \left(\varepsilon_0 \frac{\phi_{M1} - \phi_{M2}}{2ed} \right) wv = 11.2 \text{ fA} \quad (16)$$

サンプル 1 g 当たりで

$$I = 18 \mu\text{A/g} \quad (17)$$

この値は、Fig. 7 に示されるトナー 1 個当たりの荷重 10^{-6} N で得られる電流にオーダー的に近い。この計算は、仕事関数差や接触ギャップの値など根拠のない値を用いている。しかしながら、非常にラフな見積もりの範囲では、Fig. 7 に示される電流値に関して、仕事関数差に基づく帯電という単純な帯電モデル (コンデンサーモデル) により説明することが可能である。

4. 3 電荷緩和

以上、コンデンサーモデルが擬似トナーを流れる電流のデータと矛盾しないことを示した。一方、Fig. 8 に示す電荷量のデータに目を向けると、摩擦素材依存性がほとんど見られないことが注目される。しかし、

コンデンサーモデルによると帯電量は電極素材に固有な仕事関数に依存するはずで、つまり Fig. 8 はコンデンサーモデルだけでは説明できない。Fig. 7 の電流量から、電荷が全く緩和しない場合の擬似トナー帯電飽和時の電荷を考える。例えば、Fig. 7 では荷重 10^{-6}N での条件では、アルミニウム電極とニッケル電極の組み合わせにおいて、 $30\mu\text{A/g}$ 、粒子 1 個当たりに換算して 20fA の電流が発生している。この電流が、アルミニウム／擬似トナー界面を通過することを考えると、接触界面の単位面積当たりの電荷 σ は、接触径 w 、速度 v を用いて

$$\sigma = \frac{I}{w \cdot v} = \frac{20\text{fA}}{2\text{nm} \times 0.0025\text{m/s}} = 0.004\text{C/m}^2 \quad (18)$$

と非常に大きくなる。この σ が、反対電極に接するまで保たれるものとしたら、擬似トナーの帯電量は非常に大きなものとなるだろう。しかしながら、Fig. 8 から計算される電荷密度は $4 \times 10^{-6}\text{C/m}^2$ と Eq. (18) と比べ 3 桁小さい。以上のことから、この系においては、摩擦中あるいは摩擦後電極を分離する過程において、なんらかの電荷緩和の機構が働いている可能性が示唆される。

摩擦中において電荷緩和による電荷の流れがあるのなら、コンデンサーモデルによって観測される電流を説明することはできないのではないかと、つまり電荷緩和は電荷測定時に起こったのではないかと、という見方がでてくる。しかしながら、①電荷密度 σ は球表面で均一であること、②擬似トナーの電荷が両方の電極に平等に緩和すること の二つを仮定すると、電荷緩和による電流が生じている場合においても Eq. (14) は成立する。

電荷緩和により Eqs. (11), (12) に示す電荷密度 σ 、電界 E の値は減少するが、それらは Eq. (14) を導く際にキャンセルされる項なので、観測される電流 I に影響を及ぼさない。電荷緩和の過程を精密に評価するためには、摩擦がなされているときにおいて、擬似トナーを電極から離さずに、その帯電量を知る方法があれば非常に有効である。しかしながら、そのような方法は現在のところ開発されていないので、ここでは粒子がどれだけの電荷を蓄え得るかという観点から電荷緩和の可能性を考える。Eq. (18) に示された値がそのまま擬似トナーの表面に留まると仮定すると、擬似トナー 1 個当たり 1.2nC の帯電量を持ち、表面での電界は 460MV/m に達することになる。この電界値は、いわゆる大気の絶縁破壊電界 (3MV/m) より 2

桁大きく、実際には擬似トナーがそのレベルの電荷を持つ以前に放電が生じる可能性が大きい。本実験の帯電量の測定においては、擬似トナーを電極から分離する時点において電荷緩和が生じた可能性を無視できないのであるが、摩擦時の電流量からの考察によると、大部分の電荷緩和は摩擦時に既に生じていたのではないかと考えられる。

5. ま と め

擬似トナーを電極間で摩擦した際の電極間電流を測定するモデル実験の装置を開発し、いくつかの電極の組み合わせで電流を計測した。電極間電流は擬似トナーの帯電が飽和した後においても定常的に流れ続けた。この電流は接触面での電荷移動の後、粒子の回転に伴って生じる誘導電荷の電極間再配分によって生じる。この電流発生メカニズムについて、簡単なモデルに基づいていくつかの検討を行った。流れた電荷の総和は電極より分離後の擬似トナーの帯電量よりはるかに大きく、また、帯電量は電流を反映しないこと、電流が電極の組み合わせに依存するのに対して、最終的な粒子帯電量は一定値を示すこと、などの結果から、この系における最終的な粒子帯電量が何らかの電荷緩和の過程に支配されている可能性が示唆された。

Appendix 1

接地された平行平板電極 A, B の間にそれぞれの電極から x, y の距離に点電荷 q があるとき、点電荷 q が二つの電極に誘導する電荷の総計は $-q$ であり、それらは両電極に x と y の比に応じて分配される⁶⁾。

$$Q_A = -\frac{y}{L}q \quad Q_B = -\frac{x}{L}q \quad (A1-1)$$

$L (=x+y)$ は電極間距離である。

Fig. 3 (a) (b) において球上の電荷分布を比較すると、微小回転により Fig. 3 (b) で実線の小円内に示した電荷 dq_A と、破線の小円内に示した電荷 dq_B が、球表面に加わっている。それらの電荷の電極 A からの距離はそれぞれ $\{1 - \cos(\omega t)\}L/2$, $\{1 + \cos(\omega t)\}L/2$ であるから、微小回転により電極 A 上に生じる誘導電荷は、Eq. (A1-1) を用いて次式で与えられる。

$$dQ_A = -\frac{1 - \cos(\omega t)}{2}dq_A - \frac{1 + \cos(\omega t)}{2}dq_B \quad (A1-2)$$

Fig. A1 Probability density function of sphere radius

$$P = \frac{4}{3} \left(\frac{Y}{1-\gamma^2} \right) \cdot r^2 \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{L}{2r} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}$$

Fig. A2 Relation between radius of sphere r , contact radius a , stress P and interelectrode distance L

単位時間当たりの誘導電荷の変化として Eq. (3) が得られる。

$$\frac{dQ_A}{dt} = -\frac{1-\cos(\omega t)}{2} \frac{dq_A}{dt} - \frac{1+\cos(\omega t)}{2} \frac{dq_B}{dt} \quad (\text{A1-3})$$

Appendix 2

電極間距離 L の平行平板電極の間に十分大きな数の球があることを仮定する。球径のばらつきは Fig. A1 に示す密度関数 $\xi(r)$ であらわされる。 r は球の半径である。両方の電極と接触し荷重を受ける粒子はその直径 $2r$ が、 L より大きいものだけである。そのとき接触径 a は Fig. A2 に示すように

$$a = \sqrt{r^2 - \left(\frac{L}{2} \right)^2} \quad (\text{A2-1})$$

Hertz の法則 Eq. (15) に Eq. (A2-1) を代入し、荷重 P を求めると

$$P = \frac{4}{3} \left(\frac{Y}{1-\gamma^2} \right) \cdot r^2 \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{L}{2r} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}} \quad (\text{A2-2})$$

Eq. (A2-1), Eq. (A2-2) は 1 個の球についての接触径、荷重であるが、球の集団について、平均接触径 $\bar{a}$ 、平均荷重 $\bar{P}$ を求めるにはそれらに $\xi(r)$ を乗じ、 r が $L/2$ より大きな範囲で積分すればよい。

$$\bar{a} = \int_{L/2}^{\infty} \sqrt{r^2 - \left(\frac{L}{2} \right)^2} \cdot \xi(r) \cdot dr \quad (\text{A2-3})$$

$$\bar{P} = \int_{L/2}^{\infty} \frac{4}{3} \left(\frac{Y}{1-\gamma^2} \right) \cdot r^2 \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{L}{2r} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}} \cdot \xi(r) \cdot dr \quad (\text{A2-4})$$

数値積分により Eqs. (A2-3), (A2-4) を求めることにより、ある電極間距離 L に対して、 $\bar{P}$ と $\bar{a}$ の組み合わせを求めることができる。 L を連続的に変化させ、 $\bar{P}$, $\bar{a}$ プロットしたものが Fig. 11 である。

Nomenclature

a	: contact radius	(m)	q_A, q_B	: contact charge	(C)
d	: contact gap length	(m)	r	: radius of a sphere	(m)
E	: electric field	(V/m)	t	: friction time	(s)
e	: elementary electric charge	(C)	v	: rolling velocity	(m/s)
I	: electric current	(A)	w	: contact diameter	(m)
i_A, i_B	: contact charge transfer per second	(A)	x	: distance from electrode A	(m)
L	: interelectrode distance	(m)	Y	: Young's module	(Pa)
P	: load	(N)	y	: distance from electrode B	(m)
Q	: charge on model toner	(C)	γ	: Poisson's ratio field	(—)
Q_A, Q_B	: induction charge on electrodes	(C)	ε_0	: dielectric constant of free space	(F/m)

ξ	: probability density function of radius	(—)	ϕ_A, ϕ_B, ϕ_S	: work function	(eV)
σ_A, σ_B	: contact charge density	(C/m ²)	ω	: angular velocity	(rad/s)

References

- 1) Kurihara, K, T. Goto, T. Ebe, K.Hasegawa, S. Sasaki, H. Soga and C. Komori : “Study of toner behavior analysis including the movement of the electric charge” Imaging conference Japan 2009 Fall meeting pp.1-4, Kyoto (2009)
- 2) Mio, H., R. Fujimura, A. Shimosaka, Y. Shirakawa and J. Hidaka : “Effect of composition of development roll on toner charge in mono-component electrophotographic system”, *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **45**, 402-410 (2008)
- 3) Hasegawa, T., C. Komori and T. Matsuyama : “Charging mechanism of model toner : The role of stress in contact electrification”, Imaging conference Japan 2009 Fall meeting pp.253-256, Kyoto (2009)
- 4) Matsuyama, T. and H. Yamamoto : “Impact charging of particulate materials”, *Chem. Eng. Sci.*, **61**, 2230-2238 (2006)
- 5) Simons, J. G. : “Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrode separated by a thin insulating film”, *J. Appl. Phys.*, **34**, 1793-1803 (1963)
- 6) “Denjikigaku-Enshu”, p. 103, Kyoritsu Shuppan (1970)