

論 文

トナー粒子に作用する付着力の測定法

山本 洋一^{*1}, 谷口 慶治^{**}, 高原 慶久^{**},
仲野 豊^{**}, 山本 弘明^{**}, 渡辺 貞一^{**}

(1998年12月22日受付; 1999年3月10日受理)

A Method for Measuring Adhesion Force Acting on a Toner Particle

Yoichi YAMAMOTO,^{*1} Keiji TANIGUCHI,^{**} Yoshihisa TAKAHARA,^{**}
Yutaka NAKANO,^{**} Hiroaki YAMAMOTO^{**} and Sadakazu WATANABE^{**}

(Received December 22, 1998; Accepted March 10, 1999)

This paper describes a new method for measuring the adhesion force of a spherical toner particle onto a metal plate. Forces which act on this particle put on the inner surface of the parallel electrodes connected to the power supply consist of the adhesion, gravity and Coulomb forces, respectively. Furthermore, the component of the adhesion force consist of the image force and the non-electrostatic one. By the movement of the spherical toner particle under these conditions, the adhesion force is calculated by the formula of $2gd(V_1 - V_2)$, where V_1 , V_2 , d and g are the voltage applied across parallel (upper and lower) electrodes in the case that the toner particle put on the lower electrode is lifted toward the upper one, the voltage in the case that the toner particle gets back again to lower one, air gap distance between two electrodes and acceleration of gravity, respectively. By this method, the adhesion force distribution of the spherical toner particles can be measured easily and precisely.

1. まえがき

デジタル複写機, レーザビームプリンタが立脚する電子写真は, 帯電させたトナー粒子の挙動を静電気力により制御することにより成り立つ技術である。一般に, 金属または誘電体上にある帯電したトナー粒子には電気映像力をはじめファンデルワールス力, 水架橋力など種々の付着力が働く。ファンデルワールス力, 水架橋力などの非静電的付着力は電子写真の現象プロセスにおいては好ましいものでなく, トナー粒子の挙動を制御する立場からいえば, この力はできるだけ小さい方がよい。高解像度を必要とする電子写真現象プロセスおよび静電転写においてトナー移動を制御できるただ一つのパラメータである。すなわち, 電荷を持ったトナーを現像スリーブから OPC 感光体へ, ま

た OPC 感光体に現像されたトナー像を記録紙に静電転写する場合, トナーを輸送する力はトナーの持つ電荷量と現像や転写時にトナーに働く電界から受けるクローン力が支配している。このようにトナーに働くクローン力以外の力はすべて正確なトナーの移動を妨げる要因となる。したがって, 高精細印刷を検討する手段としての, 簡便な非静電気力を計測評価できる手段の開発が望まれている。本論文は上記目的のための手法を提供することにより, 電子写真技術のさらなる向上にはトナー粒子の付着力の制御が不可欠である。

今までトナー粒子の付着力の測定はおもに電界法¹⁻²⁾と遠心法³⁻⁵⁾を用いて行われている。文献 1) と 5) は光の反射を利用してトナーの検出を行う方法であり, 2) はトナーの飛翔を電流で検知し, 3) と 4) は顕微鏡観察によりトナーの検出を行っている。本論文で述べる方法は著者等がすでに発表した付着力の測定方法 6) をもとに, トナー粒子の動きを画像でとらえ観測しやすいうように改良を加えたものである。本論文で試みた付着力の測定には, 文献 7), 8) において得られたトナー粒子の帯電量と質量の比 (q/m) のデータを用いた。この論文は球形トナー粒子の付着力の新しい測定方法をまとめたものである。

具体的には, トナーの電荷量を計測する目的で開発した電荷量計測法⁹⁾で開発した測定系とこれを用いて測定した

キーワード: 画像計測, 球形トナー粒子, 付着力の測定, 映像力, ファンデルワールス力

* シャープ株式会社液晶開発本部液晶研究所 (632-8567 天理市樺本町 2163 番地の 1)

Liquid Crystal Display Laboratories, Liquid Crystal Display Development Group Sharp Corporation, 2613-1, Ichinomoto-cho, Tenri 632-8567, Japan

** 福井大学工学部情報工学科 (910-8507 福井市文京 3-9-1)

Department of Information Science, Faculty of Engineering, Fukui University, 3-9-1, Bunkyo, Fukui 910-8507, Japan

¹ yamamoto-y@cmn3.tnr.sharp.co.jp

トナーの電荷量(計測値)をもとに, 付着力を(11)式から求め, 非静電気力をファンデルワールス力主体と考えこれを(3)式³⁾を用いて算出し, この結果は寺尾³⁾の結果と比較しほぼ一致している. このように評価が簡便に行えることから, レーザプリンタやデジタル複写機の設計現場においてトナー仕様と現像プロセス, そして転写プロセスの開発設計が手軽に使える有効な手段として利用できる.

2. トナー粒子に働く付着力の測定原理

図1(a)に示すように, 2枚の平行平板電極の下部に位置する電極板上に帯電した球形のトナー粒子1個を置き, このトナー粒子に働く付着力を測定することを考える. 図1(a)のように, 電極間には直流電圧が印加されている. この場合, トナー粒子には下部電極への付着力(adhesion force), 電界によるクローン力および重力が作用する³⁾.

(1) 下部電極への付着力 f_0 は影像力(image force) f_i とファンデルワールス力(van der Waals force) f_v , その

他の力 f_n からなる³⁾.

$$f_0 = f_i + f_v + f_n \tag{1}$$

なお本論文ではその他の力 f_n は無視する.

(a) 帯電した球形トナー粒子の場合, 影像力 f_i は次のように表される.

$$f_i = q^2 / 16\pi\epsilon r^2 \tag{2}$$

ここで, q , r , ϵ は, それぞれ, トナー粒子の帯電電荷量, 半径, 誘電率である.

(b) ファンデルワールス力 f_v は次のように表わされる³⁾.

$$f_v = \frac{\hbar \bar{\omega} r}{8\pi Z^2} \tag{3}$$

ここで, r はトナー粒子の半径, Z はトナー粒子と電極表面間の距離, \hbar はプランクの定数, $\bar{\omega}$ は

$$\bar{\omega} = \int_0^\infty \frac{\epsilon_1(i\xi) - 1}{\epsilon_1(i\xi) + 1} \cdot \frac{\epsilon_2(i\xi) - 1}{\epsilon_2(i\xi) + 1} d\xi \tag{4}$$

である. 上の式で ϵ_1 , ϵ_2 は, それぞれ, トナー粒子, 電極の複素誘電率である³⁾.

(2) 電極間の電界が平等電界であるとすれば, トナー粒子に作用するクローン力 f_1 は次のように表される.

$$f_1 = q(V/d) \tag{5}$$

ここで, V , d は, それぞれ, 電極間の印加電圧, 電極間の距離である.

(3) トナー粒子に作用する重力 f_2 は次のように表される.

$$f_2 = mg \tag{6}$$

ここで, m , g は, それぞれ, トナー粒子の質量, 重力加速度である.

図1(a)において, 直流印加電圧 V を増加させて, $V = V_1$ になったとき下部電極 A の上に置かれているトナー粒子が電極 B の方向に移動し始めるとすれば, その瞬間には力の釣り合い

$$qV_1/d = mg + f_0 \tag{7}$$

が成立する. そして, 上方向に移動したトナー粒子は電極 B に付着する.

次に, 図1(b)のように電源の極性を反転させ, $V = V_2$ になったときに電極 B に移動していたトナー粒子が, 再び, 電極 A の方向に戻り始めるとすれば, その瞬間には力の釣り合い

$$-qV_2/d = mg - f_0 \tag{8}$$

が成立する. (7), (8)式より, トナー粒子に作用する付着力 f_0 と重力 mg との比は次のように表される.

$$\frac{f_0}{mg} = \frac{V_1 + V_2}{V_1 - V_2} \tag{9}$$

ここでトナー粒子が球形の場合, その半径を r , 密度を σ とすれば, 質量 m は次のように表される.

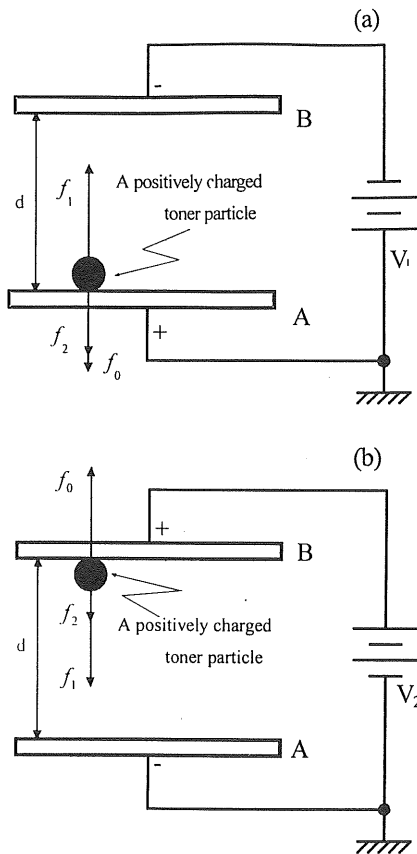


図 1 平行平板電極上に置かれたトナー粒子 (a) 電極 A の表面に付着する正帯電トナー, (b) 電極 B の表面に付着する負帯電トナー.

Fig. 1 A toner particle placed on the inner surface between two parallel electrodes.

(a) A positively charged toner particle adhered on the surface of the electrode A. (b) A positively charged toner particle adhered on the surface of the electrode B.

$$m = (4/3) \pi r^3 \sigma \quad (10)$$

(9), (10) 式から, トナー粒子に作用する付着力 f_0 は次のように表される.

$$f_0 = \frac{V_1 + V_2}{V_1 - V_2} \left(\frac{3}{4} \pi r^3 \sigma \right) \quad (11)$$

(11) 式から明らかなように, 付着力 f_0 は下部電極上のトナー粒子が上部電極に向かって移動し始める電圧 V_1 と, トナー粒子が再び下部電極に戻り始める電圧 V_2 を測定することによって求めることができる.

以上の議論において, 同一のトナー粒子について言えば, それが下部電極に位置している場合と, 上部電極に移動したときに回転などにより相対的な位置関係が変わって上部電極に付着した状態でも, 付着力 f_0 は同じでなければならない. この条件を常に満たす理想的なトナー粒子の形状は, 帯電電荷の中心点がトナー粒子の重心と一致する形, すなわち球形である. また, トナー粒子が球形であれば, 摩擦帯電が均等に行われやすいので, トナー粒子の表面が均等な帯電状態になることが期待される. 以上のことから, 本方式により付着力を精度よく測定できるトナーは

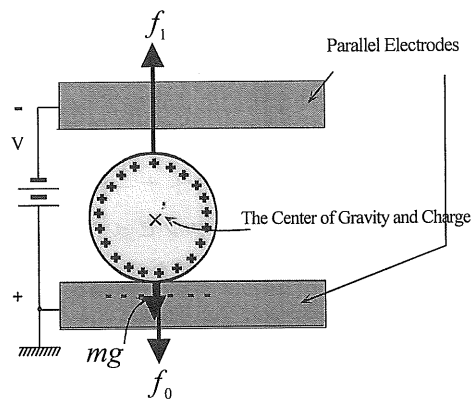


図 2 表面が均等に帯電されたトナー粒子のモデル
Fig. 2 Model for an uniformly charged toner particle.

球形トナーということになる.

図 2 に均等に帯電した球形トナーのモデルを示す.

3. 測定実験

3.1 測定装置の構成

本研究では測定装置を図 3 のように一対の平行平板電

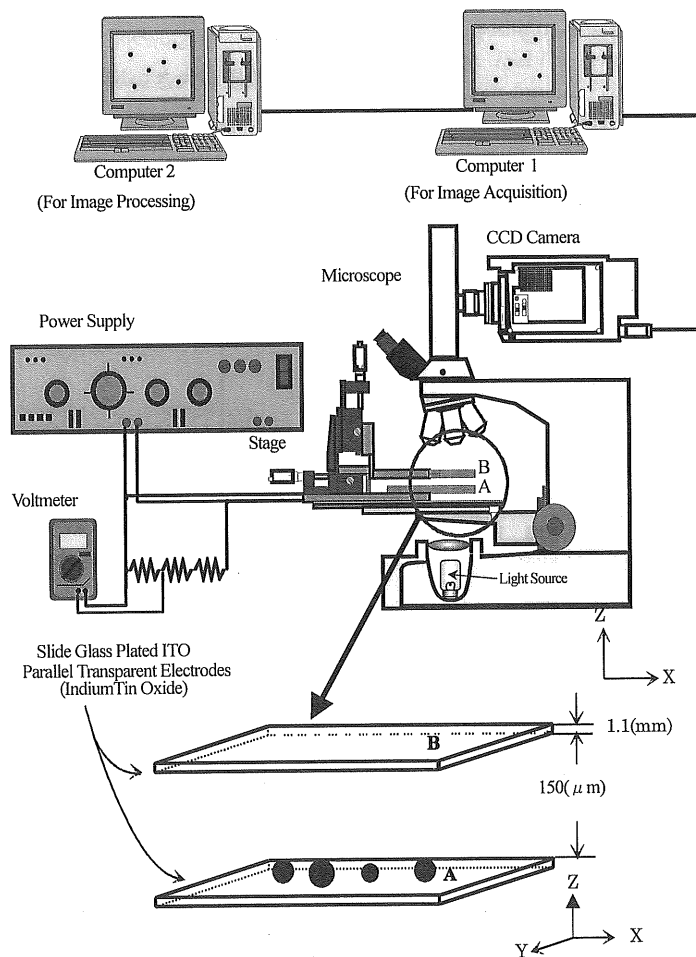


図 3 測定装置の構成

Fig. 3 Configuration of the measurement system.

極, 光学顕微鏡, CCD カメラ, 直流電流, 電圧計, コンピュータで構成した. コンピュータ (Computer 1) は CCD カメラからの信号を画面上に表示するために用いる平行平板電極には透明電極を用いて Z 軸方向に光の透過ができる様にし, 顕微鏡によりトナー粒子を拡大して CCD カメラにより画像化してコンピュータ (Computer 2) にデータを取り込んだ. この像をディスプレイ上に表示して測定時のトナー粒子の挙動を確認する. 以上の仕組みにより, 個々のトナー粒子が移動するときの印加電圧の値と移動するトナー粒子の半径を同時に測定する. 以下に装置の構成を詳細に述べる.

電極部分の拡大図を図3の下部に示した. ここで, 地面と平行な平面を X-Y 平面とし, これに垂直な方向を Z 軸に定めている. 電極はステージの A に下部電極が, ステージの B に上部電極が設置されている. ステージの A ではマイクロメータを電極間の距離を設定するのに用いた. トナー粒子すべてについて, その移動と半径に関する情報を透明電極上部方向から得た. 片面は透明電極 ITO を施したガラス (幅 2.45 mm, 長さ 3.3 mm, 厚み 1.1 mm) である. 電源には 0~1,200 V の範囲で電圧を調整することができる直流電源を用いた. 図のように光学顕微鏡の光源により電極部を照射し, 40 倍の拡大倍率でトナー粒子の挙動を観測した.

3.2 トナー粒子の形状分布の測定

本研究では化学重合法により作製された, いわゆる球形トナー (日本ゼオン製) を使用した. 図3に示した測定装置によりトナー粒子の投影面積 S を測定した. 測定されたトナー粒子の円形度 (circular rate: 円形度: $4\pi S/L^2$, S : トナー粒子の投影面積, L : トナー粒子の投影周囲長, 円の場合はこの値が 1) の分布を図4に示す. この測

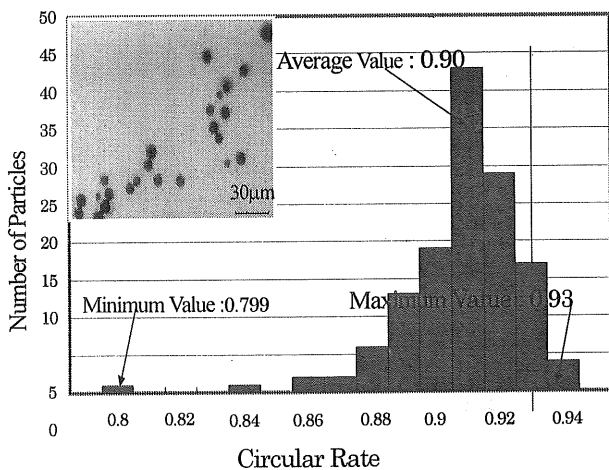


図4 トナー粒子の円形度分布の例
Fig. 4 An example of the distribution of the circular rate for toner particles.

定では3次元形状のトナー粒子を, 顕微鏡を用いて投影して2次的に捉えている. したがって, 厳密には円形度はトナー粒子をどの角度から撮像するかによって変わってくるが, ここでは角度に依存しないものとして扱う. 本研究で使用したトナー粒子の円形度は約 0.8 から 0.95 の間に分布しており, 平均値は約 0.91 である.

3.3 付着力の測定結果

図5は球形のトナー粒子の半径と付着力との関係を測定した結果である. 付着力はトナー粒子が電極間を移動するときの電圧 V_1, V_2 , 並びにトナー粒子の半径 r の測定結果から (11)式を用いて計算した. 使用したトナー粒子の密度は $\sigma=1.11 \text{ g/cm}^3$ である.

前述のように本論文では, トナー粒子の付着力は電気影像力 f_i とファンデルワールス力 f_v とからなると考える. 図5の測定結果の中にはトナー粒子に働く影像力, 並びにファンデルワールス力, それぞれ, (2), (3) 式を用いて計算した結果も合わせて示した. なおトナー粒子に働く影像力の計算では, トナー粒子の q/m の測定データ⁸⁾ を使用した. またファンデルワールス力の計算では, 電極表面とトナー粒子の表面との距離 Z を 12 nm とした. 影像力とファンデルワールス力の計算結果を合わせたものは, 粒径の小さいところでは測定された付着力とかなり一致するが, 粒径が大きい場合には大きく食い違う.

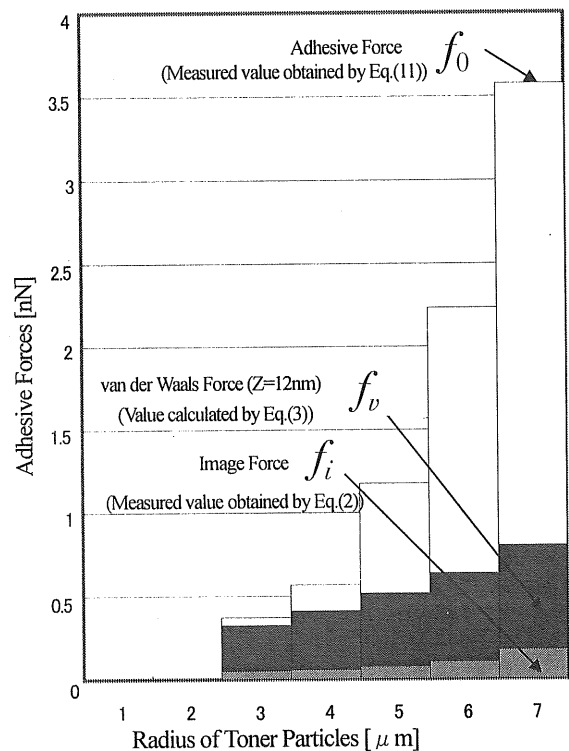


図5 トナー粒子の半径と付着力の関係の測定例
Fig. 5 An example of the measurement of the adhesive force as a function of the radius of the toner particle.

表 1 ファンデルワールス力の計算例
Table 1 Relationship between the radius of toner particles and van der Waals force.

Radius of the toner particle (μm)		3	4	5	6	7
Van der Waals force (nN)	$Z=6$ (nm)	1.06	1.42	1.77	2.12	2.48
	$Z=12$ (nm)	0.27	0.35	0.44	0.53	0.62

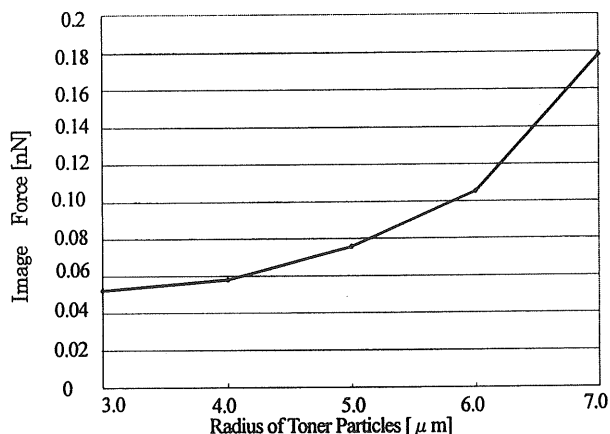


図 6 トナー粒子の半径と映像力の関係の計算例
Fig. 6 An example of the calculation of the image force as a function of the radius of the toner particle.

そこで、電極表面とトナー粒子の表面との距離 Z を 6 nm とした場合のファンデルワールス力の計算結果を表 1 に示す ($Z=12$ nm のときの結果ももう一度示した)。 $Z=6$ nm のときは、粒径の大きいところで付着力の計算結果は実測値に近づくが、粒径が小さいところでは両者は大きく食い違う。以上の計算において、 $\hbar\omega=2$ eV³⁾ とした。

以上の議論より、ファンデルワールス力の計算における $Z=6$ nm (あるいは、12 nm) なる仮定が妥当かどうかの判断はこの段階ではできないが、本測定により得られたファンデルワールス力の値は文献 3) の結果とほぼ一致している。

つぎに、映像力について考える。図 5 に示した映像力のトナー半径依存性の計算結果を拡大したものを図 6 に示す。

映像力 f_i に関しては、トナーの単位表面積当たりの帯電電荷量を Q_0 とすると、(2)式と

$$q=4\pi r^2 Q_0$$

の関係より映像力は

$$f_i=\pi r^2 Q_0/\epsilon_0$$

と書ける。図 6 の帯電電荷量の実測結果に基づく映像力の計算結果に関して見れば、 f_i と r の間の関係は r の 2 乗より小さくなっている。

4. むすび

帯電した球形トナー粒子の平板電極への付着力をトナー粒子の帯電電荷量と質量比 (q/m) の測定と同時に測定することができる方法を提案した。この方法は簡単な装置構成でトナー粒子を画像としてとらえ、高精度に付着力を測定できるのが特徴である。

参考文献

- 1) E.A. Eklund, W.H. Wayman, L.J. Brillson and D.A. Hays : *Proc. IS&T's Tenth International Congress on Advances in Non-Impact Printing Technology*, p. 142, New-Orleans, Louisiana (1994)
- 2) Y. Hoshino, N. Kutsuwada, Y. Watanabe and H. Izawa : *Proc. IS&T's Tenth International Congress on Advances in Non-Impact Printing Technology*, p. 167, New-Orleans, Louisiana (1994)
- 3) 寺尾和雄, 重廣 清 : 電子写真学会誌, **34** (1995) 83
- 4) M. Takeuchi and K. Noguchi : *Proc. IS&T's Eleventh International Congress on Advances in Non-Impact Printing Technology*, p. 169, Hilton Head, South Carolina (1995)
- 5) M. Ott, E. Eklund, H. Mizes and D. Hays : *Proc. NIP 12: IS&T's International Conference on Digital Printing Technology*, p. 313, San Antonio, Texas (1996)
- 6) Y. Yamamoto, K. Taniguchi, H. Yamamoto and K. Matsubara : *Proc. IS&T's Tenth International Congress on Advances in Non-Impact Printing Technologies*, p. 165, The Sheraton New Orleans Louisiana (1994)
- 7) Y. Yamamoto, K. Taniguchi, H. Yamamoto and Y. Takahara : *Proc. IS&T's NIP 12: International Congress on Non-Impact Printing Technologies*, p. 556, San Antonio, Texas (1996)
- 8) 山本洋一, 谷口慶治, 仲野 豊, 山本弘明, 高原慶久 : 電気学会論文誌 (E), **119** (1999) 302