

# 放電を考慮した帯電モデルによる 効率的なトナー帯電方式の検討

長谷川 達志 佐々木 浩紀

電子写真プリンタでは、感光ドラムに静電気の潜像を作り、それに帯電させたトナーを付着し、紙に転写、定着を行う。トナーを帯電するためには、トナーを摩擦する必要がある。しかし一方で摩擦はトナー材の摩耗による画質低下を生じさせ、さらに機器の電力消費にも影響する。摩擦を低減し、効率的なトナー帯電とすることで印字品質の劣化防止や機器の電力削減が期待できる。それにはトナー帯電のメカニズムを理解することが重要であるが、不明な点も多い。

本研究では、トナー摩擦帯電の実験系を構築し、帯電時の特性を解析することで、トナーの帯電現象を明らかにした。その結果、トナーを摩擦帯電する過程で、放電現象も同時に発生していること、放電の終了状態をコントロールすることによって、トナーの最終的な帯電量をコントロールできることが示された。今回構築した放電を考慮した帯電モデルによって、効率的な現像システムの実現が期待される。

## 一成分系現像システムにおけるトナー帯電

OKIデータのプリンタで採用されている一成分現像方式（用語解説参照）の概要を図1に示す。この方式では主に現像ローラと呼ばれる導電性のローラと、金属製の層規制ブレードの間でトナーを摩擦することによってトナーを帯電する。（摩擦帯電；用語解説参照）一方で、数千個のLEDを一列に並べたLEDアレイの発光パターンを回転する感光ドラム上に結像することで、プリンタで印刷する画像が、潜像として感光ドラム上に形成される。帯電したトナーは、現像ローラの回転に伴いそのまま感光ドラムまで運ばれ、静電力によって感光ドラムの潜像に付着し、画像を形成する。感光ドラムに付着したトナー画像は、最終的に印刷用紙に転写、定着され、一連の印刷動作が完了する。

トナーの帯電量が足りないと、感光ドラムに付着するトナーが減少して画像が薄くなってしまおうという問題がある。また帯電量にばらつきがあると、本来画像が存在しない部分にまでトナーが付着して、印刷結果に汚れが出る等の画質の劣化が発生する。また長時間

トナーを強く摩擦すると、トナーが損傷することによって、その帯電特性も変化し、画像が劣化するといった好ましくない現象がある。

このように、トナーの帯電は電子写真プリンタの画質に極めて大きな影響がある。しかしながらその帯電メカニズムや、最終的な帯電量がどう決まるのかの理論は解明されていなかった<sup>1)</sup>。

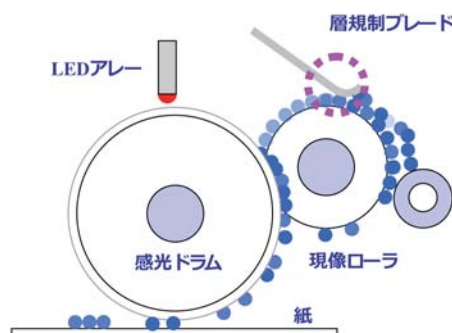


図1 一成分現像システム

## トナー摩擦帯電における放電現象

トナーの帯電においては、帯電量を安定化するため、層規制ブレードと現像ローラの間で適切なバイアス電圧を加える。このときバイアス回路の電圧-電流特性から、トナーが摩擦中に同時に放電している可能性が示唆されている。<sup>2)</sup> 動作中のプリンタで生じている現象は複雑すぎ、実験結果を明確に解析することは難しい。そこで我々は図2に示す、プリンタの現像システムを単純化した実験系を使い、トナーの摩擦帯電を観察した。現像ローラ上とほぼ同じ厚さのトナー層を、ブレードと同じ材質のステンレス電極対で挟み、現像ローラの回転を模して電極をスライドすることにより、トナー層を摩擦して電極間の電荷移動を観測した。電極をスライドしてトナーを帯電させると高周波の電磁波発生が確認された。これによりトナー帯電時に放電が発生していることが裏付けられた。この実験における上部電極電圧の変化を図3に示す。電極を動かした瞬間( $t=0$ )に上部電圧の電位がわずかに下がるのが確認された。

この電圧降下は、

- ①はじめに、電極と摩擦されることによりトナーが過剰に帯電する。それによりトナーと電極の間に大きな電位差が生じ、両者の間で電子なだれ（用語解説参照）が発生する。（図4①）
- ②最初の放電で生じた電子なだれの一部が反対側の電極に到達することによって、電極間の放電に発展する。（図4②）

という二段階の放電により生じたものであると仮定すれば、よく説明ができることがわかった。プリンタ内で起こっている放電もこれと同様のメカニズムで起こっているものと考えられる。

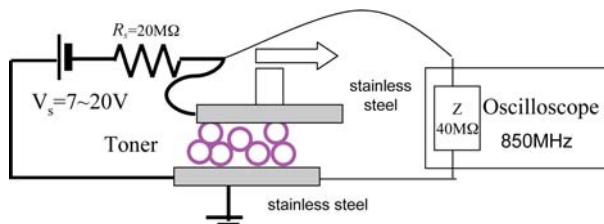


図2 トナー帯電現象観察のための実験系

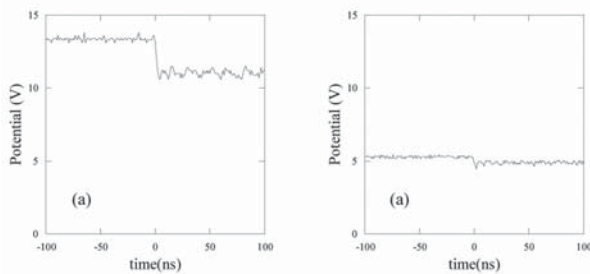


図3 トナー摩擦直後に生じる電圧降下  
(a) 初期電位差が13Vのとき (b) 5Vのとき

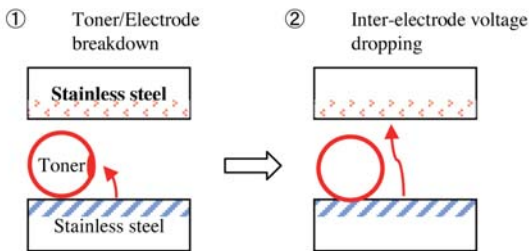


図4 トナーの摩擦帯電の仮説モデル。  
①最初にトナーと電極の間の放電が発生し、  
②その後電極間の電圧降下に発展する。

帯電したトナーが放電によって全ての電荷を失うのなら、トナーは結局帯電できないということになる。しかし図1の装置で1分間トナーを摩擦した後、図5に示すように、トナー1gあたり約15 $\mu$ Cの帯電量が得られ

ており、この帯電量は通常のプリンタにおけるトナーの帯電量と同等なレベルである。すなわち、通常のプリンタにおいて摩擦後に観測されるトナーの帯電量とは、放電により元の帯電量が失われた後の残りの帯電量であるということが判明した。

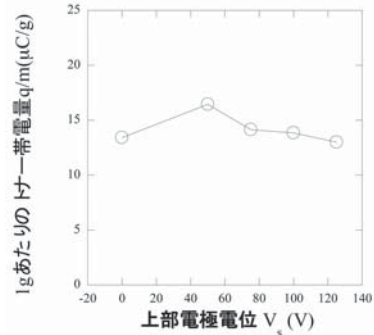


図5 図2の実験系で電極電位を変化させた場合の、一分間摩擦後のトナー1gあたりの帯電量。

### トナー帯電／放電のモデル

放電は帯電したトナーと金属電極が離れ、その間の電位差が大きくなる時に起こる。放電の発生に関しては従来からパッシェンの法則（用語解説参照）が知られている。しかし近年、数 $\mu$ m以下の短い間隔では、この法則で予想されるよりも低い電圧で放電が起こることがわかってきた。我々は図6に示す新規な観察方法を考案し、従来難しかった1 $\mu$ m以下の間隔での放電特性を測定した。

球電極と平板電極を接触した状態から引き離すと電極間に電位差が印加されるが、すぐさま放電が発生する。電極間距離に対して放電電圧をプロットしたのが図7である。（このプロットは絶縁破壊曲線と呼ばれる。）ギャップが大きくなり10 $\mu$ mに近づくと、放電電圧はパッシェンの法則の示す曲線に近づいてくる。しかしギャップが狭いとき、パッシェンの法則で予測される放電電圧は非常に高いが、実際には1 $\mu$ m以下のギャップで、50V程度の低い電圧で放電が生じることがわかった。

実験で得られた図7の絶縁破壊曲線が、トナーとステンレス電極との間の放電に対して適用できると仮定して、ステンレスなど金属と接触して帯電したトナーがどのように放電するかを検討した。そのためには最初にトナーがどれだけ帯電したかを知る必要がある。トナーと金属の接触時に発生する帯電量を計算するために、接触物の間の仕事関数（用語解説参照）の差で帯電が生じるとする最も標準的な理論を用いた。<sup>1)</sup>

図8に示すように、金属と接触した部分が帯電したトナーが金属を離れたときのギャップ $d$ とトナー先端の電位 $V_p$ の関係を計算した結果を、実験で求めた絶縁破壊曲線と併せて図9に示す。図9で仮定されているトナーと金属電極との接触面の半径 $r_0$ は、ブレード/ローラ間で挟まれたトナーを想定して見積もられた値である。接触半径 $r_0$ が200nm以上のとき $V_p - d$ 曲線は、ギャップ $0.2 \mu\text{m}$ ほどで絶縁破壊曲線と交わり、放電が発生すると予測される。この絶縁破壊曲線はステンレス電極間で測定されたものであるが、電子なだれの発生条件は、陰極側の素材のみに依存するため（用語解説参照）、ステンレス製の層規制ブレードと導電性ゴムの現像ローラ間においても、このような狭ギャップ放電が発生していると考えられる。

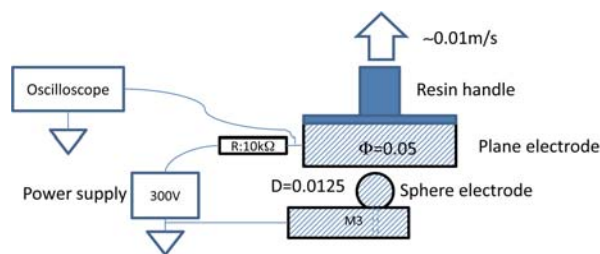


図6 空気の絶縁破壊特性の測定装置

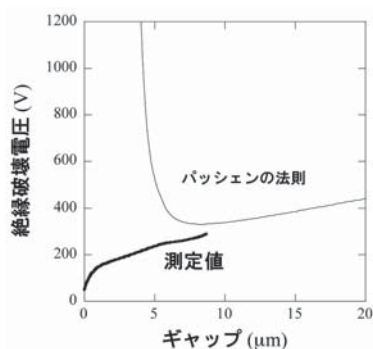


図7 大気の絶縁破壊曲線（測定値とパッシェンの法則による予測）

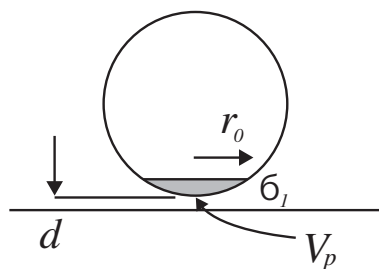


図8 帯電トナーを金属から引き離すと両者の電位差が上昇する

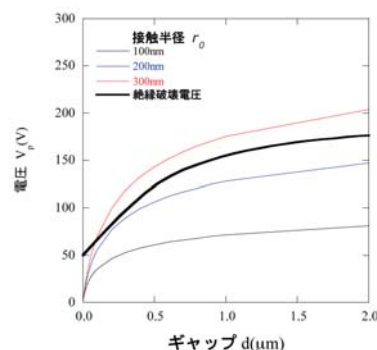


図9 トナー金属間のギャップ間隔と両者の電位差の関係（計算値）  
接触半径が一定以上の場合、あるギャップで絶縁破壊曲線（実測値）と交差して放電が生じる。

放電の後にトナーに残留する電荷量を予測するためには、放電の終了条件についての詳しい検討が必要である。トナーと電極との間の放電を前提とすると、トナーの最終的な帯電量はゼロになってしまうように思われるが、トナーと金属の間には仕事関数差が存在するため、その仕事関数の差異に応じて生じる電位差を打ち消すために必要な電荷がトナーに残留する。放電の終了条件、すなわちトナーの残留電荷 $q$ は下式で表される。

$$q = C \cdot \Delta W / e \quad (1)$$

$C$ は放電が生じるときのトナーと金属間の静電容量、 $\Delta W$ は仕事関数差、 $e$ は電気素量である。実際のトナーの帯電は、周りの帯電したトナーによる電界も含めて、外部電界が存在する中で行われる。トナーから電極に向かう外部電界 $E$ がある場合において、放電によりその外部電界も消去されるから、それを勘案すると放電終了条件は、

$$q = C \cdot \Delta W / e - E \cdot d_0 \quad (2)$$

とあらわされる。 $d_0$ は放電が生じたときのトナーと金属のギャップである。式(2)はトナーの帯電量が外部電界で制御できることを示す。しかしながら、図5の実験結果においては、電極間のバイアスによるトナーの帯電量の変化は見られない。これは摩擦を行うのに上下で同じ素材（ステンレス）を用い、完全に上下対称の構成になっているため、外部電界の効果がそれぞれの電極側で打ち消しあってしまうことによると考えられる。すなわち、式(2)における外部電界 $E$ はトナーから電極に向かう場合を正としたものであるから、上下の電極で符号は反対になるのである。そこ

で、図10のように、下部電極と疑似トナーとの間に誘電体のPETフィルムを挿入し、非対称な構成のもとで、疑似トナー（10 $\mu$ m径樹脂球）を摩擦帯電して、外部電界の影響を確かめた。その結果を図10右側のグラフに示す。印加する電圧を変化させることで、疑似トナーの帯電量を正から負の広い範囲で制御できることを確認した。一般にトナーの材質で初期帯電の極性が一意的に決定されるが、その初期帯電とは関係なく、その後の放電と外部電界の制御によってトナーの帯電量を制御できることが示されている。つまり放電は、単にトナーの電荷を減らすというだけでなく、電界に応じてトナーに電荷を再分配するという積極的な役割を果たしていることがわかった。

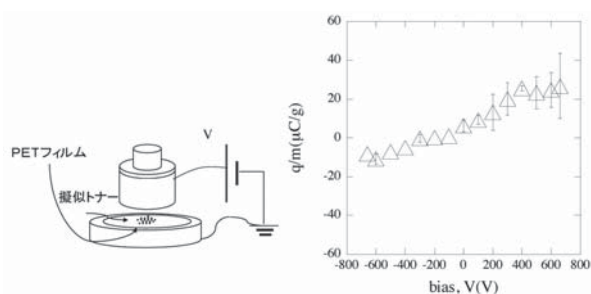


図10 与えた電圧と疑似トナー帯電量の関係

## おわりに

トナーの帯電量は、トナーを摩擦したときに決まるのではなく、トナーの放電が終了する条件で決まること、その条件は外部電界で制御できることを帯電モデルから導き出し、実験的に検証した。この結果は、プリンタにおいてトナーを必要以上に摩擦しなくとも、外部電界を調整することにより十分な帯電量が得られる可能性を示している。

今後、今回構築した帯電のメカニズムをプリンタ実機に応用することで、長時間の動作においてもトナーに負荷を与えて画質を劣化させることのない、効率的な現像システムの構築が可能になるものと期待される。

本研究を進める上で、電荷緩和モデル（用語解説参照）を提唱された創価大学の松山先生、トナーの仕事関数測定法を開発された千葉大学の石井先生、中山先生、大学院生の佐藤さんなど多くの方々にお世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。◆◆

## 参考文献

- 1) 松山他 1995 粒子の衝突帯電機構—電荷緩和を考慮する新しい帯電モデルについて 粉砕 39 p.73-82
- 2) 栗原他 2010 日本画像学会年次大会論文集 p113

## ●筆者紹介

長谷川達志：Tatsushi Hasegawa. 研究開発センタ  
佐々木浩紀：Hironori Sasaki. 研究開発センタ

## TIP 【基本用語解説】

### 成分現像

現像剤として、トナーのみを用いる電子写真現像の一形態。2成分現像（トナーを帯電、搬送するのにキャリアと呼ばれる粒子を併せて用いる）に対応する。2成分現像に比べ、コンパクトなプリンタが実現可能である。

### 摩擦帯電

異なる二種の物質を擦り合わせることで、一方から他方へ電荷が移動する現象。摩擦帯電の主な原因は、物質同士が接触するとそれぞれが持つ仕事関数の差によって物質間で電子が移動することによる。

### 仕事関数

物質の表面から1個の電子を取り出すのに必要エネルギー。物質によって異なり、単位は電子ボルト(eV)。金属や半導体において、仕事関数は光電子効果や熱電子効果により測定可能であるが、絶縁体の仕事関数の測定は困難であった。

### 電子なだれ

電界で加速された電子が、気体分子と衝突することによって、新たな電子を叩き出し、その第二の電子がまた加速されて、さらに別の分子と衝突して、第三の電子を叩き出し、という連鎖が生じ、電子の数がなだれ的に増える現象。電子なだれの生成条件は、電極間の電位差V、気体圧力p、電極の間隔d、気体の種類と陰極の材料に依存する。（パッシュェンの法則参照）

### パッシュェンの法則

放電（電子なだれ）のおこる電圧に関する半経験的な実験式。パッシュェンの法則によると、電極間で放電の生じる電圧Vは、電極間の気体圧力pが一定の場合、電極の間隔dの関数で表される。

### 電荷緩和モデル

仕事関数の差による帯電、その後の放電の過程を含んだ、一般の絶縁体粉体の帯電の仕組みを説明し、帯電量を予測するモデル。