

電子写真シミュレーション技術

後藤 拓哉

栗原 一晃

近年、電子写真方式を用いたプリンタや複写機の需要が急速に広まっている。印刷装置のカラー化に伴い、オフィスでのドキュメント印刷に限らず、DTPやPOP印刷などにもその用途を広げている。その中で、高速化・高画質化など要求される性能も高くなっている。

電子写真方式の印刷装置では、トナーと呼ばれる直径5から10 μ m程度の微粒子を摩擦帯電し、静電気力を利用して画像の形成を行っている。高速化や高画質化のためには非常に精密な制御が必要であるが、摩擦帯電を始めとしてトナー粒子の挙動には未だ解明されていない部分が多い。そのため、経験やノウハウに基づいてパラメータを抽出し、実験を繰り返して最適化を行いつつ開発を進めている。必要とされる機能を on time で商品化するためには開発期間の短縮化が必須である。

そこで、数値解析を用いてその原理を明らかにし、開発に役立つシミュレーションツールの構築を進めている。今回は、実際の現象を再現することが可能なレベルに至ったので報告する。

印刷プロセス概要

電子写真方式の印刷プロセスの概要について紹介する。図1は印刷カートリッジの概略図である。印刷プロセスには、帯電、露光、現像、転写、定着、クリーニングの各プロセスがある。

帯電プロセスでは帯電ローラに電圧を印加して感光ドラム表面に様に電荷を与える。

露光プロセスでは、LEDヘッドにより画像信号に対応した光を感光ドラム表面に照射し、静電潜像を形成する。

現像プロセスでは、まず供給ローラと現像ローラの摩擦により、その間にあるトナーが摩擦帯電される。現像ローラおよび供給ローラにはトナーが現像ローラ側に引き付けられるような電圧が印加されている。現像ローラに供給されたトナーはローラ表面に保持され、層規制ブレードとの接触部を通過する際に薄層に形成される。ここでもトナーは、層規制ブレードおよび現像ローラとの摩擦により帯電する。そして、薄層に形成されたトナー

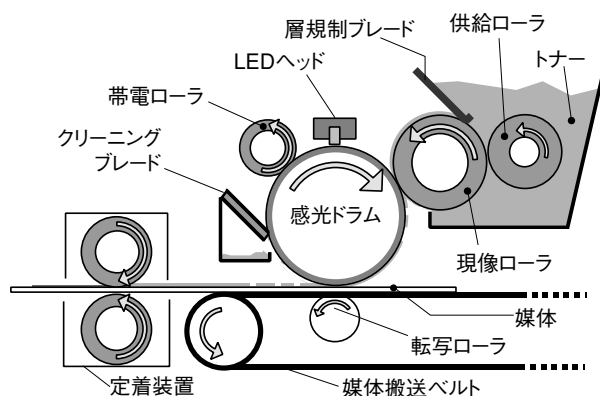


図1 印刷プロセス概略図

は現像ローラの回転により、感光ドラムとの接触部に運ばれる。感光ドラムと現像ローラの間には、露光プロセスで光が照射された部分ではトナーが感光ドラム側に移動し、光が照射されていない部分ではトナーが現像ローラ側に保持される様な電界が形成されている。

転写プロセスでは、感光ドラムに現像されたトナーを静電気力により媒体上へ移動する。上記動作をブラック、イエロー、マゼンタ、シアンの色について順次行い、媒体上にカラー画像を形成する。

定着プロセスでは、媒体上のトナーを熱や圧力により溶融し定着する。

クリーニングプロセスでは、転写プロセスで媒体上に移動されずに感光ドラム上に残った、少量のトナーをゴムブレードにより掻き落とす。

今回の報告は、現像プロセスのトナー層形成部の解析とクリーニングプロセスの解析について行う。

離散要素法によるシミュレーション

シミュレーションに用いた方法は離散要素法 (Distinct Element Method : DEM) である。離散要素法とは1つ1つの粒子（ここではトナー粒子）の運動を、運動方程式に基づいて追跡することにより粉体層の挙動をシミュレートする方法である。

粒子の接触力モデルには図2に示すフォークトモデル (Voigt model) を使用した¹⁾。

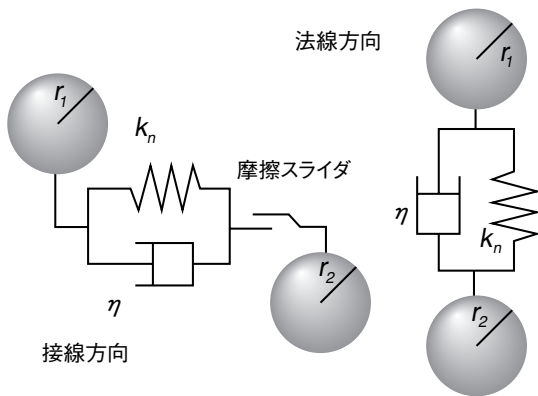


図2 フォークトモデル

フォークトモデルではバネ、ダッシュポットおよび摩擦スライダといった力学の基礎要素を用いて、接触面に対し法線方向、接線方向それぞれについて弾性反発力、接触変形に伴うエネルギーの消散、さらに接線方向に対するすべりと摩擦力が表現されている。

まず、トナーの1粒子に働く力 f_t は、

$$f_t = f_o + f_e + f_i + f_v$$

である。トナーには衝突の際に生じる外力 f_o のほかに、周囲の電界から受けるクーロン力 f_e 、さらにファンデルワールス力 f_v 、鏡像力 f_i といった付着力も考慮した。

粒子の質量を m 、位置を x, y 、そして時間を t とすると、

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \sum f_x$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = \sum f_y$$

である。ここで、 f_x, f_y はそれぞれ粒子の各方向にかかる力である。さらに、粒子には回転運動も生じるため、慣性モーメントによる力も必要となる。慣性モーメントを I 、粒子の重心を中心とした反時計回りのモーメントを M 、そして角運動量を ω とすれば、

$$I \frac{d\omega}{dt} = \sum M$$

となる。

以上の運動方程式を数値計算で解くことによって、時々刻々と変化するトナー粒子の運動を求めることができる。

トナー層形成シミュレーション

非磁性一成分現像方式のトナー層形成のシミュレーションについて紹介する。

現像ローラ上に帯電したトナーの薄層を形成する工程は、印刷品質を左右する非常に重要な工程である。ここで形成されるトナー層が安定しないと、印刷濃度が安定せず、特にカラー画像を印刷する場合には色の再現に不具合が生じる。

トナーの薄層形成に影響を与えるパラメータは、トナーの物性として帯電量や凝集度、層規制ブレードの物性、形状および取り付け設定、現像ローラの物性として摩擦係数や表面粗さ、などさまざまな要因が挙げられる。これらのパラメータを検討するためのシミュレーションモデルを構築した。モデルを図3に示す。

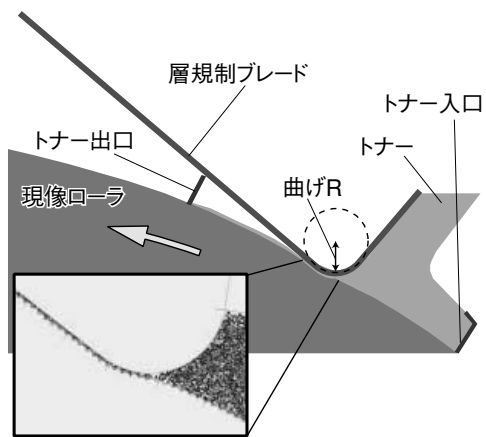


図3 層形成シミュレーションモデル

モデルの層規制ブレードは金属製の板をL形状に形成しており、そのエッジ部を現像ローラに圧接している。エッジ部の曲率半径を R とする。現像ローラは、金属シャフトの周りにゴムを円筒形に成型したものである。現像ローラの表面は粗さを持っており、その平均粗さを R_z とする。層規制ブレードと現像ローラの当接圧力や接触部の変形形状は、有限要素法による構造解析により求めた。現像ローラは図中の矢印方向に回転するものとし、トナーは回転方向上流側に入口を設け、供給する。回転方向下流側で、層規制ブレードと現像ローラの接触領域の後に、トナーの出口を設けた。出口を出たトナーはその履歴を保持したまま、再度入口より供給することができる。

また、トナー粒子の摩擦帯電は、以下の法則に従うものとする。

- トナー粒子が層規制ブレードまたは現像ローラと擦れ

た場合、その摩擦距離に応じて電荷を蓄積する。

- 蓄積された電荷量が、予め定めた飽和帯電量に達するとそれ以上電荷を蓄積しない。

以上のモデルにより、トナーが消費されずに何度も層規制プレートを通じた場合のトナー層厚の変化とトナーの帯電量の変化をシミュレーションした。出口を通過したトナーが入口から供給され、再度出口に到達する過程を現像ローラ1回転とみなし、回転回数を横軸にとった結果を図4、図5に示す。

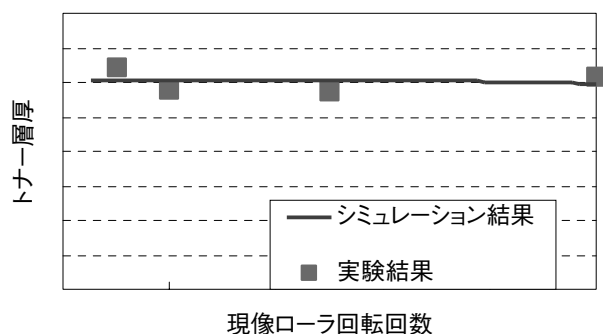


図4 トナー層厚の変化

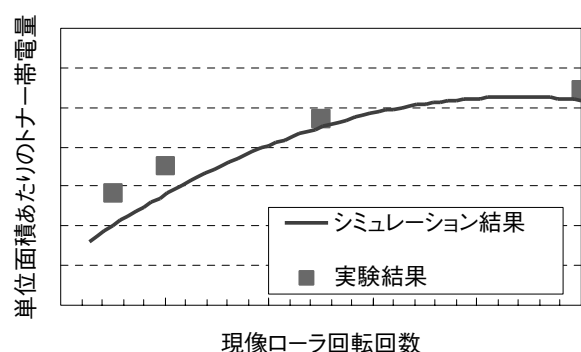


図5 トナー帯電量の変化

図4および図5中でプロットされている点は、シミュレーションモデルと同等の実験を行った結果である。トナー層厚、帯電量のどちらもシミュレーション結果と非常によく一致しており、モデルの妥当性が検証できた。

次に、薄層形成に影響を与えていると考えているパラメータについて検討を行った。今回は層規制プレートのエッジ部の曲率半径Rを大きくした場合と、現像ローラの表面粗さRzを大きくした場合の二つのケースについて、トナー層厚をシミュレーションした。同等の条件で行った実験結果も併せて、図6に示す。

図6より、層規制プレートのエッジ部の曲率半径Rを大

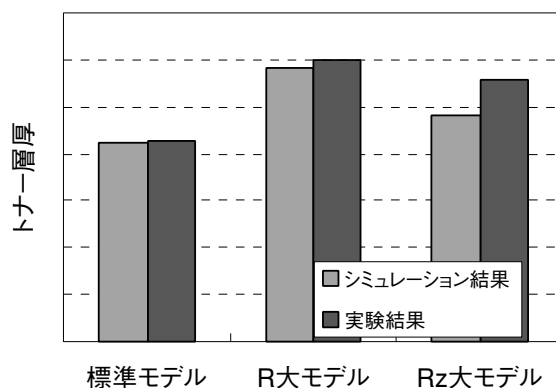


図6 パラメータ検討

きくするとトナー層が厚くなることが分かる。また、現像ローラの表面粗さRzを大きくすることでもトナー層が厚くなる。シミュレーション結果と実験結果は同様の傾向を示しており、開発の過程でのパラメータ検討に充分使えるレベルのシミュレーションモデルと考える。

クリーニングシミュレーション

ゴムブレードを用いたクリーニングプロセスのシミュレーションについて紹介する。

プリンタの高画質化への要求に伴い、トナーの小粒径化、球形化が有効な技術として注目されている。トナーの小粒径化、球形化は、微細領域の画像再現を可能とする。しかし、これらの印刷画質向上の施策によってプレートクリーニングの特性が劣化する傾向にある。図7に、トナーの球形化がプレートクリーニング特性におよぼす影響についての実験結果を示す。

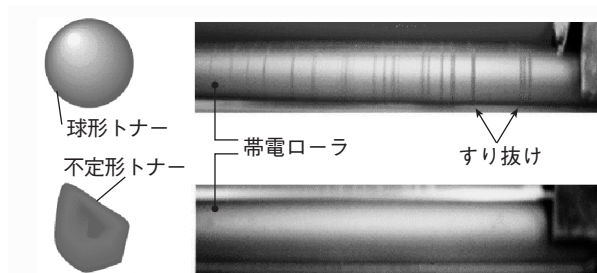


図7 連続印刷試験結果

ここでは、形状の異なる2種類のトナーを使用している。一方は球形のものであり、もう一方は不定形のトナーである。右側の写真は、連続印刷試験を行った後の帯電ローラの写真である。球形トナーでは、トナーがクリーニングブレードをすり抜け、帯電ローラに付着している。トナーが帯電ローラに付着したことによって、感光ドラムへの帯電不良を引き起こし、連続印刷を行っていきにし

たがって印刷品質の劣化が生じた。一方、不定形のトナーでは同様の耐久試験を行った際、ブレードをすり抜けることはなく、経時の印刷品質の劣化は生じなかった。

このように、形状の異なるトナーを用いることによって、クリーニング性能に差が生じ、画像品質に影響を与える。

そこで、トナーおよびブレードの挙動を調べ、ブレードクリーニングのプロセスを解明し、クリーニング不良発生の要因を検討するために、クリーニングシミュレーションのモデルを構築した。モデルを図8に示す。

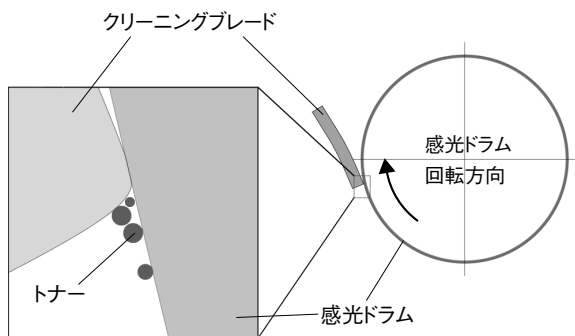


図8 クリーニングシミュレーションモデル

ブレードクリーニングではトナーの挙動以外にブレードの挙動も重要となる。ゴムブレードは回転する感光ドラムと接触しているため、スティック・スリップ運動が生じ、ブレード先端は振動を繰り返している。そこで、ゴムブレードの挙動についてはトナーから受ける力も考慮し、境界要素法によって時間ステップごとに構造解析を行った。

シミュレーションでは感光ドラムの回転によってトナーがブレード先端部へ供給される。供給されたトナーがブレード先端をすり抜けるのかどうかについて評価を行った。シミュレーション結果を図9、図10に示す。

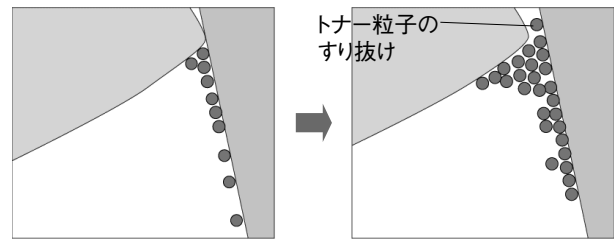


図9 球形トナーシミュレーション

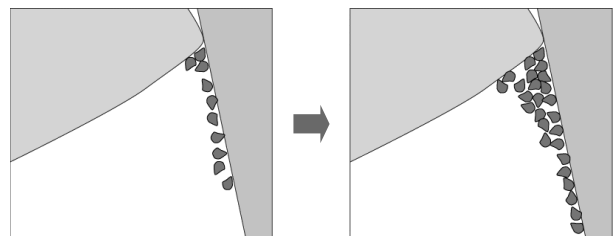


図10 不定形トナーシミュレーション

シミュレーションにおいても、実験結果と同様に不定形のトナーではすり抜けは生じず、球形のトナーではすり抜けが生じた。

以上のことから、クリーニングプロセスのシミュレーションは、実際の現象を再現することができる。

あ と が き

以上、沖データが取り組んでいる電子写真シミュレーションについて紹介した。今後はこれらのツールを用いて解析主導型の設計手法を確立し、開発期間の短縮化を実現したい。

参考文献

1) 粉体工学会編：粉体シミュレーション入門，初版，産業図書株式会社，pp.29-80，1998年発行

●筆者紹介

後藤拓哉：Takuya Goto. 株式会社沖データ NIP事業本部 プロセス開発センタ プロセス開発第二部 ID開発第六チーム
栗原一晃：Kazuteru Kurihara. 株式会社沖データ NIP事業本部 プロセス開発センタ 要素技術開発部 要素開発第一チーム

TIPS【基本用語解説】

DTP (Desktop publishing)

日本語では卓上出版または机上出版といい、コンピュータ上で印刷物の編集やレイアウト作業を行うこと。

POP (Point of purchase advertising)

スーパーマーケットや商店の店頭で用いられる、値段やセール品の情報を記した広告媒体。