電子写真システム設計のための粉体シミュレーション

Powder Simulation for Design of Electrophotographic System

日高 重助

Jusuke Hidaka

Powder simulation which supports the design of electro photographic system is described. The simulation of the charging behavior of toner particles is performed by using the charge transfer equation obtained by impact experiments between plastic spheres and plastic or metal plate. This simulation method, which gives the relation between the charging properties and the chemical components of toner particles, can be applied to the design of toner particles with the optimum charging behavior.

The development and flow behavior of a two-component developer are simulated by large scale discrete element method taking into account the magnetic and electrostatic interactions between developing particles. The proposed simulation gives very useful information for the design of a two-component development system. New simulation methods of melting behavior of toner particles in fixing process and blade cleaning behavior are proposed.

Keywords : Discrete element method, Toner charge distribution, Two-component development, Fixing process, Cleaning process

1. はじめに

帯電微粒子である粉体トナーを用いて画像情報を可視化するシステムを電子写真システムと呼び、我々が毎日利用しているコピー機やレーザプリンタに採用されている。現代社会では、オフィスはもちろん、家庭にもコピー機、プリンタやファクシミリなどの情報機器が入り込み、オフィスや家庭からの情報の入出力端として、情報化社会の形成に大きな役割を演じてい

る。

いわゆる情報には、音声情報と文字を含む画像情報がある。情報量が豊かな画像情報は、質の高い情報を伝達するので情報化社会におけるその重要性は高いが、その画像情報を人間が利用するには電気信号で送られる画像を可視化する必要がある。この可視化法には、ブラウン管あるいは液晶などのディスプレイを用いる方法と、紙などの媒体の上に可視化する二つの方法がある。紙などの媒体上への情報可視化法は、さらに1) インクジェット方式、2) 電子写真方式、3) 感熱方式などに分かれる。このうち、粉体トナーを用いて画像を可視化する電子写真方式は、(a) 画像形成速度が大きい、(b) 画像の保存性が高いこと、および(3) 紙など画像を可視化する媒体が自由であるなどの特長があり、複写機、プリンタやファクシミリにおける可視化法の主流になりつつある。

電子写真システムは、電場を用いて帯電トナー粒子の運動を精密に制御し、希望の位置へトナー粒子を素早く運ぶシステムということができ、Fig. 1に示すプロセスから構成されている。すなわち、①感光体の均一帯電、②感光体上に静電潜像を形成する露光、③感光体上に描かれた静電潜像のトナーによる現像、④感光体に形成されたトナー像の紙への転写、⑤転写され

2008年1月31日受付

同志社大学 理工学部 化学システム創成工学科

(〒610-0321 京田辺市多々羅都谷1-3) TEL 0774-65-6608

Department of Chemical Engineering and Materials Science, Doshisha University

(1-3, Tatara Miyakodani, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321, Japan)

< 著者紹介 >

1972年同志社大学大学院 工学研究科 工業化学専攻修士課程修了、1972年昭和電工株式会社、1976年同志社大学 工学部助手、講師、助教授を経て、1990年同志社大学 工学部教授、1991年同志社大学大学院 工学研究科教授、本会会長、同志社大学 理工学研究科所長、日本粉体工業技術協会電子写真技術分科会コーディネーター、科学技術振興機構京都府地域結集型共同研究事業研究統括
専門：粉体力学、粉体シミュレーションによる粉体材料ならびにプロセスの設計、分級、品析、乾燥など

Fig. 1 Electro-photographic system

たトナー像の定着、そして⑥感光体上に残った未転写トナーをクリーニングするプロセスである。

コピー機、プリンタやファクシミリ内部は、初めの感光体の帯電と露光を除けば、まさに粉体プロセスであり、現在このシステムのさらなる高速化、高画質化と小型化が強く求められている。

粉体工学にすっかり定着した粉体シミュレーションは著しい進展を見せており、電子写真システムの中で起こる複雑で、高速な現象の詳しい理解を可能にし、電子写真システムの設計に有益な情報を与え始めている。そこで、電子写真システムの設計を支援する粉体シミュレーションの現状とその有用性について概説する。

2. 現像剤流動挙動のシミュレーション法

2.1 離散要素法 (Discrete Element Method, DEM)

粉体トナーを含む現像剤の挙動のシミュレーションには、粉体流れのシミュレーション法として代表的な離散要素法¹⁾が用いられる。このシミュレーション法は、粉体を構成する個々の粒子の挙動を運動方程式にもとづいて追跡するので粉体挙動の特徴である離散的性質をよく表現するが、計算負荷が非常に大きく、多数の粒子を用いる大規模シミュレーションが難しい。

ところが、電子写真システムにおける主要な現象法の一つである2成分現像システムでは、刻々変化する

電場と磁場の計算を行い、その電場や磁場の中を運動する粒子径比が約10:1であるキャリアとトナー混合粒子群の挙動をシミュレートしなければならない。この粒子径比は大きな計算負荷を招き、加えて数 μm のトナー微粒子で形成される画像の画質に関する情報を得るには100万個のオーダーの粒子が必要で、離散要素法シミュレーションの相当な高速化と大規模化が必要である。離散要素法の計算は、接触粒子の検索、粒子間作用力の計算、粒子座標の更新から成り、粒子の検索が計算負荷の大部分で3/4を占める。最近、三尾ら^{2,3)}は、粒子セルサイズの最適化を含む粒子検索部の効率化やプログラムの最適化により、1CPU当たり50~100万個の粒子の計算が可能までの高速化に成功し⁴⁾、離散要素法シミュレーションの実用性は非常に高くなっている。

2.2 電磁場内での粒子間相互作用力

電子写真システム内を運動する現像剤粒子(帯電トナー粒子とキャリア粒子)は、電場や磁場からの作用力を受けており、これらを考慮して現像剤粒子間接触力 F を求めなければならない。

磁場内にあるキャリア粒子間に働く磁氣的吸引力は、円形粒子要素を用いる2次元シミュレーションでは次のように表される。

磁場内に置かれた i 番目のキャリア粒子(Fig. 2 a)への磁気力 F_{mi} と回転モーメント N_{mi} はそれぞれ次式で表される。

Fig. 2 Magnetic interaction between carrier particles

$$F_{mi} = (m_i \cdot \nabla) B_i, \quad N_{mi} = m_i B_i \quad (1)$$

式中の磁気双極子モーメント m_i は次式で与えられる。

$$m_i = \frac{4\pi\mu - d_i^3}{\mu_0\mu + 18} B_i \quad (2)$$

ただし、 d_i は i 粒子の粒子径、 μ_0 は真空の透磁率、 μ は粒子の比透磁率、 B_i は i 粒子の位置における磁束密度である。磁束密度 B_i は外部磁場による磁束密度 B_{i0} と外部磁場により磁化した i 粒子の周りにある n 個の他粒子 j が作る磁界による磁束密度 B_{ij} を重ね合わせた次式で表される。

$$B_i = B_{i0} + \sum_{j=1}^n B_{ij}$$

$$B_{ij} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(m_i r_{ij})}{|r_{ij}|^5} r_{ij} - \frac{m_i}{|r_{ij}|^3} \right] \quad (3)$$

ここで、 r_{ij} は粒子 i と j の 2 粒子間の距離である。

Eqs. (2), (3) により磁束密度 B_i を求めるには大変な計算を必要とするので、とくに厳密な計算を要しない場合は、Eq. (3) の B_i は外部磁束密度 B_{i0} で近似されることが多い。したがって、Eq. (1) の作用力 F_i を外部磁場による力と磁化した他粒子による力 (Fig. 2 b) に分けて表すと次式となる。

$$F_i = (m_i \nabla) B_{i0} + \sum_{j=1}^n (m_i \nabla) B_{ij} \quad (4)$$

また、帯電したトナー粒子 i と j 間に働くクーロン相互作用力 F_c 、ならびにトナー粒子と壁（ロール、ブレード）との間に働く鏡像力 F_l は次式により与えられる。

$$F_c = \frac{q_i \cdot q_j}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_{ij}^2}, \quad F_l = \frac{q_i^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l_i^2} \quad (5)$$

Fig. 3 Experimental apparatus for measuring impact charge of a particle

ここで、 $q_{i,j}$ は i または j 粒子の帯電量、 ϵ_0 と ϵ はそれぞれ真空の誘電率と比誘電率、 l_i は i 粒子の中心と壁、ロールやブレードとの距離である。

また、数ミクロンのトナー粒子では、Van der Waals 力 F_v が無視できない。トナー表面には外添剤としてシリカ粒子などがあるので複雑であるが、簡単には次式で与えられる。

$$F_v = -\frac{A}{12a_{ij}^2} \frac{d_i d_j}{d_i + d_j} \quad (6)$$

ここで、 A は Hamaker 定数、 a_{ij} は i, j 粒子の表面間距離である。

3. 粉体トナー粒子の帯電挙動シミュレーション

電子写真システムの高速度化、小型化と高画質化を図るうえでのキーポイントは現像部の最適設計である。それには、現像部で異種物質やトナー粒子同士と接触しながら流れる過程で刻々変化するトナー帯電量の正確な予測を可能にするシミュレーション法が必要である。しかし、粉体トナーの基材である高分子粒子の接

Fig. 4 Relationship between impact charge and initial charge of a particle (for impact angle 0°)

触帯電機構さえもまだ不明であり、現像部内で流動するトナー帯電量の予測は難しい。そこで、トナーの基材である高分子球形粒子の衝突帯電実験により帯電予測式を得る。つづいて、その実験式を利用して金属容器中で振動流動するトナー粒子の帯電挙動のシミュレーションを行い、実験にもとづく帯電量予測法の信頼性と有用性を検討しよう。

3.1 高分子球形粒子の衝突接触帯電⁵⁾

1個の高分子粒子が異物質に接触するときの帯電量は、Fig. 3に示す衝突帯電実験装置で測定することができる。エアガンから打ち出された球形高分子粒子は、ファラデーケージ①を通過し、任意の衝突角度 θ にセットした衝突板に衝突する。このときファラデーケージ①により、粒子が衝突前に所持していた帯電量(初期帯電量) Q_{mi} とファラデーケージの電圧波形から初速度 v_0 が測定できる。また、衝突した粒子が通過するようにファラデーケージ②を配置すると、衝突後の帯電量 Q が測定できる。この二つのファラデーケージにより測定される帯電量の差から、粒子が

衝突で獲得した帯電量が得られる。

Fig. 4は、粒子の初期帯電量と衝突により獲得した帯電量の関係である。これらの結果は粒子を衝突角度(θ) 0° で打ち出した場合であり、衝突板と粒子の間にすべりが発生しない。金属板と高分子球の衝突では衝突速度が大きくなるにつれて、接触面積が増大するので帯電量が増加する。これに対して、高分子板と高分子粒子の衝突では、衝突速度に無関係に帯電量が一定になる。ところが、Fig. 5のように、衝突角度を変えて衝突板と粒子の間にすべりを発生させると、帯電量が増加する。

これらの知見を整理すると、金属板-高分子粒子間、および高分子板-高分子粒子間の衝突による球形粒子の帯電量は、それぞれ Eqs. (6), (7) で表すことができる⁵⁾。

$$Q_{mp} = K_{m1}S + K_{m2} \sum (\bar{F} dl) \quad (6)$$

$$Q_{pp} = K_{p2} \sum (\bar{F} dl)^{0.5} \quad (7)$$

ここで、 S は衝突接触面積、 $\bar{F}$ と dl はFEMシミュ

(a) Al(plate)-PP(particle) ($v \cos \theta = 8.8 \text{ m/s}$)

(b) PP(plate)-PP(particle) ($v \cos \theta = 8.8 \text{ m/s}$)

Fig. 5 Dependence of impact angle on impact charge of a particle

レーションで得られる接触力および接触時の滑り距離を示す。また、 K_{m1} 、 K_{m2} 、 K_{p2} は初期帯電量を考慮する係数で、1 粒子衝突帯電実験から次式のように決定される。

$$K_{m1} = K_{ma1} + K_{mb1} (Q_{ini} + K_s Q_{ave}) \quad (8)$$

$$K_{m2} = K_{ma2} + K_{mb2} (Q_{ini} + K_s Q_{ave}) \quad (9)$$

$$K_{p2} = K_{pa2} + K_{pb2} (Q_{ini} + K_s Q_{ave}) \quad (10)$$

ここで、 K_{ma1} 、 K_{ma2} 、 K_{pa2} 、 K_{mb1} 、 K_{mb2} 、 K_{pb2} は単一粒子衝突帯電実験から得られる定数であり、 Q_{ave} は帯電粒子群の帯電挙動を予測する際の粒子群平均帯電量、 K_s は空間電荷効果^{6,7)}に依存する係数である。

3. 2 高分子粒子の振動流動における帯電挙動

実験的に導いた接触帯電量予測式の信頼性を、振動容器内で振動流動する高分子粒子の帯電挙動のシミュレーションにより確かめよう。シミュレーションの対象は、Fig. 6 に示すような、Al 製振動容器 (100 × 100 × 100mm) の中で振動流動するポリプロピレン (PP) 粒子群の帯電実験である。PP 粒子の振動流動挙動のシミュレーションには粒子要素法を用い、振動流動過程で PP 粒子が Al 容器壁と接触するときの帯電量は Eq. (6) により、また、粒子同士の接触による帯電量は Eq. (7) を用いて計算した。このとき、振動

Fig. 6 Experimental apparatus for measuring the charge of toner particles in vibration flow

流動過程で粒子は他の粒子あるいは容器壁と頻繁に衝突を繰り返し、その都度電荷の授受をしている。そこで、高分子材料は絶縁体であり、帯電サイトを有すると考え、粒子表面を Fig. 7 に示すようにいくつかのサイトに分割した。各衝突で接触したサイトのみに Eq. (6) あるいは Eq. (7) による帯電量を与え、各サイトの帯電量の総和をその粒子の帯電量とした。

空間電荷効果依存係数 K_s を 4.0 として得た振動時間と表面がすべて負の帯電サイトを有する PP 粒子群の総帯電量の関係を Fig. 8、また粒子の振動流動挙動の様子を Fig. 9 に示す。振動数や振動時間によって総

Fig. 7 Charging sites on the surface of a toner particle (number of sites ; 200)

Fig. 8 Time dependence curve of total charge of Polypropylene particles

Fig. 9 Charging behavior of Polypropylene particles in vibration flow

Fig. 10 Toner particles (mean particle diameter : 1.60mm)

帯電量が変化の様子は実験結果と非常によく一致しており、また、振動流動過程で粒子間接触での電荷移動により粒子層内に電荷が拡散する微視的な情報も得

Fig. 11 Charge distribution of toner particles

Fig. 12 Development system for DEM simulation

ることができる。

つづいて、Fig. 10 に示すモデル粉体トナー（平均粒子径 1.6mm）を用いた同様の振動帯電実験における帯電量分布の経時変化を Fig. 11 に示す。Fig. 11 b に示すように、実験とシミュレーション結果は非常に良く一致している。Fig. 7 に示した帯電サイトはトナーの化学組成に比例するようにセットすると、化学組成による帯電挙動の違いを表すことができ、粉体トナーの帯電設計に有用である。

4. 2 成分現像剤の現像挙動

4. 1 2 成分現像システム内磁気ブラシの形成挙動
まず、2 成分現像機内における磁気ブラシの形成挙

Fig. 13 Formation behavior of magnetic brush

Fig. 14 Flowing behavior of developers

動をシミュレートする。シミュレーションに用いた系を Fig. 12 に示す。マグネットローラの下部に搬送された現像剤（キャリアーとトナー）は、マグネットローラ上で磁力を受けて、いわゆる磁気ブラシを形成する。シミュレーションでは、計算に必要な粒子数を

少なくするために、マグネットローラの左下部に現像剤タンクを置いた。Fig. 13 は、N 極部で穂立ちを形成し、磁力線に沿ってその穂立ちが変化する様子を示している。図 (a) は実験装置で撮影した磁気ブラシの挙動、図 (b) はシミュレーションであり、両者は

Fig. 15 Snap shot of developing behavior of toner particles

非常に良く一致する。Fig. 14 は、現像剤がブレードを通過する瞬間のスナップショットである。図 (a) 現像剤粒子群の様子、(b) は現像剤粒子の速度ベクトル、(c) は現像剤粒子への作用力の様子である。図 (b) からブレード下部に向かう現像剤の流れの様子、ならびに (c) からブレードへの現像剤の衝突および磁力線に沿って大きな応力が現像剤に作用することが分かる。高速機が多い2成分現像機では、この作用力が現像剤の劣化に与える影響が大きく、流動場の幾何学的形状を少し変化させると、現像剤への作用力を小さくすることができる。

現像剤への作用力と現像剤の供給安定性に及ぼす規制ブレード、磁極位置など種々のパラメータの影響をシミュレーションから詳しく知ることができる⁸⁾。

4. 2 現像剤の現像挙動と画質の評価

2成分現像では、粒子表面にトナーを付着したキャリア粒子が磁気ブラシを形成しながら感光体に接近する。感光体表面には静電潜像と現像バイアス電圧による電界があり、この電界 E による帯電トナー粒子への作用力 F 。($=qE$, q は帯電トナー粒子の電荷) がキャリア粒子とトナー粒子間の付着力より大きくなると、トナー粒子は感光体表面に移動して静電潜像を現像する。トナー粒子とキャリア粒子間の付着力は、帯電によるクーロン力と Van der Waals 力である。

Fig. 15 は、マグネットローラにより感光体へ搬送される現像剤の3次元シミュレーションである。感光

Fig. 16 Contact length between photoreceptor and magnetic roll

Fig. 17 Snapshots of developing behavior

体とローラの最近接点を0度として、磁極位置の違いによる感光体の摺擦幅の変化を Fig. 16 に示す。極付近で磁気ブラシが立ち上がり、極間では磁極線に沿って寝た状態で搬送され、磁極位置により感光体の摺擦幅が変化する。

Fig. 17 は、キャリア粒子により搬送されるトナー粒子が現像電位による電気力を受け、感光体ドラム上の静電潜像を現像する様子である⁴⁾。感光体は左方に回転しており、初め右端にあった格子状の静電潜像は現像されながら左に移動する。この過程で、現像場には交流のバイアス電圧が重畳されているので、トナー粒子群は上下に運動している。Fig. 18 は、ドットの

Experimental

Simulated

Fig. 18 Development of dot latent image by toner particles

静電潜像を現像したトナーの様子である⁹⁾。現像電位により画質が異なることをシミュレーションはよく捉えており、DEMシミュレーションの大規模化により、静電潜像を現像した画像の評価も可能になった。

4. 3 定着プロセス

粉体トナーの定着は画質の彩度、色相や明度に関係する非常に大切なプロセスであり、定着条件とトナー溶融挙動の関係を詳しく知ることが必要である。定着プロセスのシミュレーションには、粉体トナー粒子の溶融挙動のシミュレーションが必要であり、固相から液相への相変化を表現しなければならない。この相変化を MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法¹⁰⁾

a) Simulated

b) Experimental

Fig. 19 Melting behavior of Polyethylene particle

Fig. 20 Relationship between melting time and H/D

を採用してシミュレートした。MPS法は、連続体を有限個の粒子によって表現し離散化するメッシュ非依存解法で、連続体の挙動をラグランジュ法で記述する。

ホットプレート上における球状ポリエチレン粒子(粒子径; 5.56mm)の溶融挙動のシミュレーションと実験観察結果を Fig. 19 に示す¹¹⁾。両者の溶融挙動を定量的に評価するために、溶融過程における粒子の高さ H と初期直径 D との比の変化を測定した。このシミュレーションでは粒子径 5.56mm のポリエチレン粒子 1 個を 800 個の要素粒子で表したが、Fig. 20 に示すように、シミュレーション結果は実際の溶融挙動と非常によく一致している。また Fig. 21 は、溶融時間とトナー粒子群の溶融表面の粗さの関係を示している。このシミュレーションにより、粉体トナー粒子群の定着条件と定着挙動に関する詳しい情報を得ることができる。

4. 4 クリーニングプロセス

クリーニングプロセスは、転写されずに感光体上に残ったトナーを取り除くプロセスである。最近では、高画質化を図るために球形微粒子である重合トナーが用いられるようになり、簡単に効果的なクリーニング法でスプレッドクリーニングにおいてトナーのすり

Fig. 21 Dependence of melting time on surface roughness of melted toner particle layer

Fig. 22 Blade cleaning system

Fig. 23 Cleaning behavior of rubber blade

抜けが起こり、クリーニング不良が起こりやすい。このクリーニング不良を解決し、ブレードクリーニングシステムを設計するには、ゴム製ブレードのクリーニング挙動とトナー粒子のすり抜け挙動の理解を得るために、シミュレーションによる微視的観察が不可欠である。

クリーニングプロセスは、Fig. 22に示すように、ゴム製のクリーニングブレードが感光体に押し付けられており、感光体が回転すると摩擦により stick-slip 運動を起こしながら粉体トナーを感光体から掻き取っている。このゴムブレードの stick-slip 運動を粘弾性モデルを用いて FEM (Finite Element Method, 有限要素法) シミュレーションで行った例を Fig. 23 に示す¹²⁾。変形量が非常に大きいゴムの変形挙動の FEM シミュレーションは非常に難しいが、Fig. 24 に示す高速度ビデオカメラにより観察された実際の感光体上のブレード形状と非常に良く一致しており、また、stick-slip 挙動もよく表現する。Fig. 25 に示す通り、離散要素法シミュレーションをハイブリッドさ

Fig. 24 Blade edge observed by using high speed video camera

Fig. 25 Cleaning behavior of rubber blade

せて、トナー粒子を入れると、クリーニング挙動に関する詳しい理解と設計情報を得ることができる。

5. おわりに

電子写真システムの設計を支援する粉体シミュレーションについて概説した。粉体シミュレーションは、粒子の化学的性質を予測する計算化学シミュレーションから各種粒子法シミュレーション、そして有限差分法や有限要素法シミュレーションと、現代工学が利用する全てのシミュレーション法を駆使しながら、粉体材料とそのプロセス設計に有用な情報を与え始めている。

本稿では、帯電微粒子の挙動を精密に制御して画像情報を可視化する電子写真システムにおけるいくつかのプロセスに対する粉体シミュレーションの適用例を紹介し、ますます進展する電子写真システムの設計に対するシミュレーションの重要性について述べた。

References

- 1) Hidaka, J.: "Funtai simyuresyon nyumon", p.29, Sangyotosyo (1998)
- 2) Mio, H., A. Shimosaka, Y. Shirakawa and J. Hidaka: "Optimum cell size for contact detection in the algo-

- rithm of the discrete element method", *J. Chem. Eng. Japan*, **38**, 969-975 (2005)
- 3) Mio, H., A. Shimosaka, Y. Shirakawa and J. Hidaka : "Optimum cell condition for contact detection having large particle size ratio in the discrete element method", *J. Chem. Eng. Japan*, **39**, 409-416 (2006)
 - 4) Mio, H., Y. Matsuoka, A. Shimosaka, Y. Shirakawa and J. Hidaka : "Analysis of developing behavior in two-component development system by large-scale discrete element method", *J. Chem. Eng. Japan*, **39**, 1137-1144 (2006)
 - 5) Yoshida, M., J. Hidaka et al. : "Estimation of electrostatic charge distribution of flowing toner particles in contact with metal", *Powder Technol.*, **135**, 23-34 (2003)
 - 6) Masuda, H., T. Komatsu and K. Iinoya : *A. I. Ch. E. Journal*, **22**, 558 (1976)
 - 7) Masui, N. and Y. Murata : *Japan. J. Appl. Phys.*, **23**, 550 (1984)
 - 8) Hidaka, J., Y. Sasaki, A. Shimosaka and Y. Shirakawa : "Simulation of flow behavior of two-component developer in an electro-photographic system", *Advanced Powder Technol.*, **13**, (3) 317-332 (2002)
 - 9) Kawamura, J., A. Shimosaka, Y. Shirakawa and J. Hidaka : Proc. of the 20th computational mechanics conference, JASME, pp.623-624 (2007)
 - 10) Koshizuka, S. : "Ryuushihou", pp.9-19, Maruzen (2005)
 - 11) Kinoshita, H., A. Shimosaka, Y. Shirakawa and J. Hidaka : Proc. of the 20th computational mechanics conference, JASME, pp.489-490 (2007)
 - 12) Yoshioka, K., A. Shimosaka, Y. Shirakawa and J. Hidaka : Proc. of the 20th computational mechanics conference, JASME, pp.625-626 (2007)