
二成分現像トナー挙動シミュレーション

Numerical Simulation of Toner Motion in Magnetic Brush Development System

岸 由美子* 門永 雅史** 渡辺 好夫***
Yumiko KISHI Masami KADONAGA Yoshio WATANABE

要 旨

電界計算、トナー挙動解析と潜像電荷計算を統合して、二成分現像方式に対応した露光から現像までのトータルな解析が可能な現像シミュレータを開発した。このシミュレータを用いた解析の結果、AC現像に関して以下のようなトナーの挙動が明らかになった。1)ACバイアスはキャリアから離れるトナーを増加させ、現像能力を向上させる。2)トナーがACバイアスに応じて往復運動をすることにより、画像部周辺のトナーが画像部に集まって現像される。3)非画像部についてのトナーも画像部に再配置される。これらの特性により、AC現像方式は画像濃度が高く、良いドット再現性が得られることが確認された。

ABSTRACT

A numerical simulation of magnetic brush development using the charge distribution on photoconductor obtained by the latent image simulation is carried out, and comparison of DC and AC development is made. The advantage of AC development system is obtained as follows; the AC voltage accelerates the toner separation from the carrier brush and gathers to image region, thus the development efficiency is increased. Also, it makes image on photoconductor clear because the electric field collects the toner particles existing non-image region to the image region. It is confirmed that AC development system realizes high image density and fine dot reproducibility from these simulation results.

* 画像技術開発本部 DI開発室
Digital Image Development Department,

** 画像技術開発本部 EP開発室
Electro-Photography Development Department,
Imaging Technology Division

*** 研究開発本部 中央研究所
Research and Development Center,
Research and Development Group

1. 背景と目的

近年、電子写真プロセスがデジタル化、カラー化へと進展する中で、画質への品質要求は大きく高まっており、数々の要求に対応するために研究開発が進められている。電子写真方式の複写機およびプリンタの画質特性は、帯電・露光・現像・転写・定着等の各プロセスに密接に関わっており、特に露光・現像プロセスは画質を左右する重要なプロセスである。そのため、ある露光条件のもとでどのような潜像が形成されるか、またその潜像にどのようにトナーが付着するかのメカニズムを明らかにすることが高画質を目指した開発の上で必要である。しかし、潜像電位やトナー粒子挙動の直接計測は大変困難であり、シミュレーションを用いた解析例が数多く報告されている。

露光プロセスにおけるこれまでの研究としては、露光量と実験的な光減衰曲線を組み合わせて静電潜像を求め、画質評価と結びつける研究¹⁾や、感光体の材料特性に注目した解析^{2, 3)}がなされてきている。また、Fourier変換を用いた画像パターンと潜像の表面電位とを詳細に論じた報告もなされている⁴⁾。

現像プロセスは現像剤としてトナーだけを用いる一成分現像方式と、トナーとキャリアを用いる二成分現像方式に大別できる。一成分現像方式は、簡易な現像方法で装置の小型化に有利である。この方式の解析例としては、運動方程式を用いたトナー飛翔シミュレーションの解析例がいくつか報告されている^{5, 6)}。さらにシミュレーションだけでなく、一成分非接触現像プロセスにおいてトナー挙動を直接計測した研究⁷⁾も報告されている。二成分現像方式は、一成分現像方式と比較して高速現像が可能で階調画像の再現性に優れており、広く用いられているプロセスである。しかし、構成が複雑でパラメータが多岐にわたり、それらが複雑に絡み合っているため詳細な解析は難しい。この解析例としては、感光体と現像スリーブの周速比と、付着トナー量の関係⁸⁾や各種現像要因の影響を求めた研究⁹⁾および、主要現像要因と付着トナー量の関係を求めた研究¹⁰⁾がある。また最近ではCundall modelとhard sphere modelを組み合わせたモデルを用いて、二成分接触現像方式の現像領域におけるキャリア粒子とトナーの挙動を解析した報告¹¹⁾もある。

本研究では、潜像電荷計算と電界計算、トナー挙動解析

とを統合して、露光から現像までトータルに解析が可能な現像シミュレータを開発し、二成分現像プロセスの理論解析を行うことを目的とする。

2. 方法

2-1 対象部と現像方法

電子写真プロセス概略図とシミュレーションの解析モデル概略図をFig.1に示す。本研究では各プロセスのうち、露光部と現像部についてのシミュレーションを行う。

シミュレーションのフローをFig.2に示す。解析は、潜像電荷シミュレータで任意の露光条件における潜像の電荷密度分布を計算し、その結果をもとに現像領域の電界計算を行い、現像時のトナー挙動を計算している¹²⁾。

露光部の解析では、ビームスポット径、レーザーパワー、感光体特性(量子効率、移動度、厚さ等)、画素クロック等のパラメータを、現像部の解析では、現像バイアス、トナー特性(粒径、帯電量)等を考慮することができる。このシミュレータを使用することにより、任意の露光、現像条件時の感光体上の画像を予測することができる。

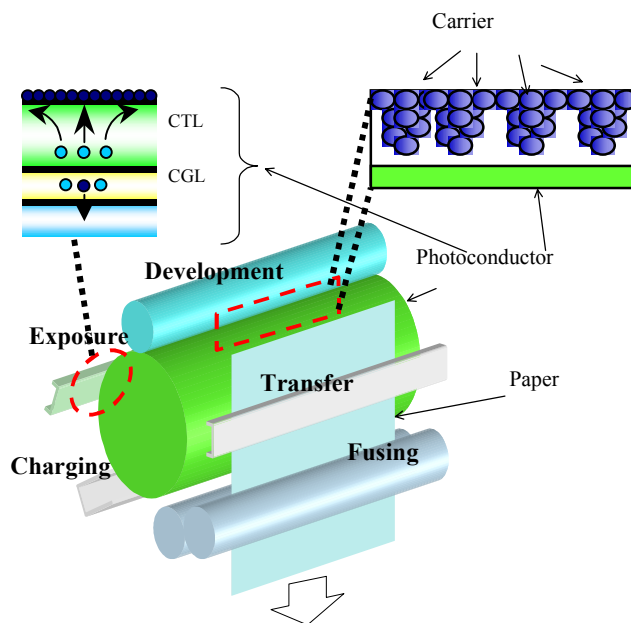


Fig.1 Schematic diagram of electrophotographic analysis. (Exposure and development)

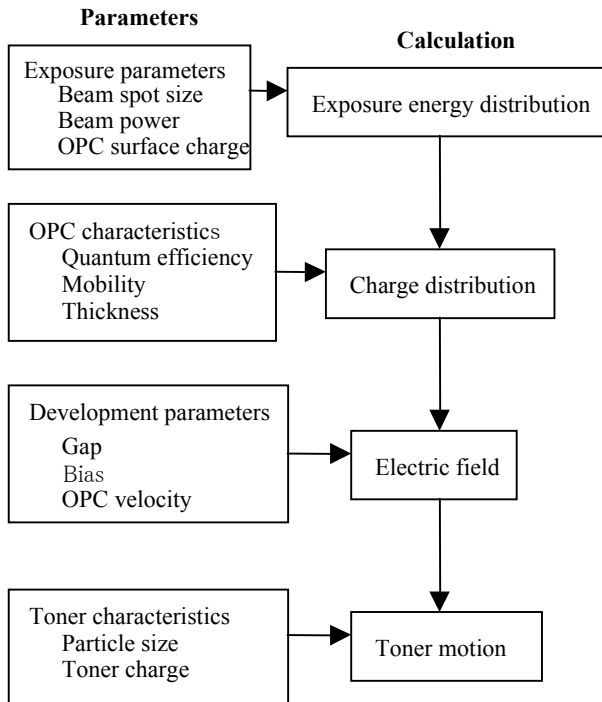


Fig.2 Block diagram of simulation.

2-2 計算手法

1) 潜像電荷の計算

潜像電荷シミュレータは、感光体中の量子キャリアの動きを解析することで、ビーム露光による潜像の電荷密度分布を計算している¹³⁾。

照射ビームのパワー密度分布は式(1)を使用し、露光パターンに応じて、各時刻の露光量を計算する。主走査はx方向、副走査をy方向としている。P₀はビームパワー、ω_x、ω_yはビームスポット径(1/e²半径)、vはスキャン速度を示す。

$$I(x, y) = \frac{2P_0}{\pi\omega_x\omega_y} \exp\left\{-\frac{2(x-vt)^2}{\omega_x^2} - \frac{y^2}{\omega_y^2}\right\} \dots\dots\dots (1)$$

感光体内部の露光時におけるキャリアの移動を模式的に示したものがFig.3である。負帯電感光体の場合、ビームの入射光によりCGLで生成した正負のキャリアのうち、負のキャリアは基体に吸収されるが、正のキャリアはCTLを移動して感光体表面の負の表面電荷と結合し潜像を形成する。この現象は、感光体内部における各キャリアの連続の式(2)、(3)とPoisson方程式(4)によって記述される¹⁴⁾。これらの式をCGL、CTLについて計算する。

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} + \text{div}(\mu_p \mathbf{E} n_p) = \Gamma \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} + \text{div}(-\mu_n \mathbf{E} n_n) = \Gamma \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{div}(\epsilon \mathbf{E}) = e(n_p - n_n) \dots\dots\dots (4)$$

ここでn、μ、E、Γ、ε、eは、それぞれキャリアの数密度、移動度、電界強度、単位時間あたりのキャリア生成量、誘電率および電荷素量を示す。また添字p、nはそれぞれ正のキャリア、負のキャリアを示す。

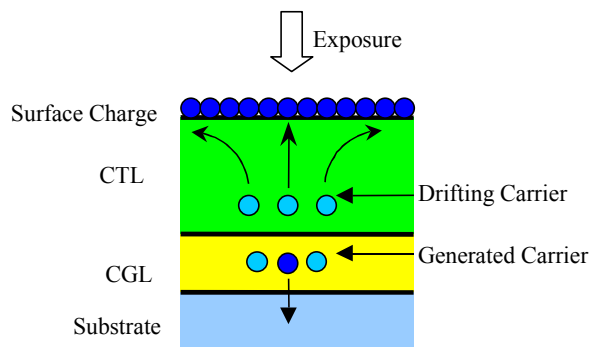


Fig.3 Schematic diagram of photoconductor.

2) 電界計算

潜像シミュレータより得られた電荷密度分布を感光体表面に与え、二次元Poisson方程式を解くことによって各点の電位を算出する。物理モデリングの容易さから、計算手法として差分法を採用した。

Q_vを体積電荷密度、εを誘電率、φを電位とおくとPoisson方程式は式(5)で表される。

$$\text{div}(\epsilon \text{grad} \phi) = -q_v \dots\dots\dots (5)$$

Einsteinの略記法¹⁵⁾を用いると、等方性の場合には式(6)が成立する。従って式(5)を一般化座標系で表すと式(7)となる。

$$(\epsilon \text{grad} \phi)^i = \epsilon g^{ij} \frac{\partial \phi}{\partial \xi^j} \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{div}(\epsilon \text{grad} \phi)^i = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^i} (\sqrt{g} F^{\xi^i}) = -q_v \dots\dots\dots (7)$$

$$g = \det(g_{ij}) \quad F^{\xi^i} = \epsilon g^{ij} \frac{\partial \phi}{\partial \xi^j}$$

g^{ij} 反変計量テンソルGの $\xi^i \xi^j$ 成分

ここでは、2次元の場合のみを考え $\xi^1 = \xi$, $\xi^2 = \eta$ と置くと式(8)が得られる。

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\sqrt{g} F^\xi \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\sqrt{g} F^\eta \right) \right] = -q_v \dots \dots \dots (8)$$

$$F^\xi = \varepsilon \left(g^{\xi\xi} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + g^{\xi\eta} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right)$$

$$F^\eta = \varepsilon \left(g^{\eta\xi} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + g^{\eta\eta} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right)$$

さらにオームの法則を考慮し、 \mathbf{J} を単位断面積あたりの電流、 σ を導電率、 \mathbf{E} を電界の強さとおき、感光体の移動を考慮するため、移流項を加えた式(9)を解く。

$$\frac{\partial Q_v}{\partial t} = -\text{div} \mathbf{J} = -\text{div}(\sigma \mathbf{E} + Q_v \mathbf{V}) \dots \dots \dots (9)$$

$$= \text{div}(\sigma \text{grad} \phi) - \text{div}(Q_v \mathbf{V})$$

等方性の場合には式(6)が成立するので式(9)の第一項は式(10)で表すことができる。

$$\text{div}(\sigma \text{grad} \phi)^i = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^i} \left(\sqrt{g} H^{\xi^i} \right) = \frac{\partial Q_v}{\partial t} \dots \dots \dots (10)$$

$$g = \det(g_{ij}) \quad H^{\xi^i} = \sigma g^{ij} \frac{\partial \phi}{\partial \xi^j}$$

g^{ij} 反変計量テンソルGの $\xi^i \xi^j$ 成分

また、移流項は式(11)で表される。

$$-\text{div}(Q_v \mathbf{V})^i = -\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^i} \sqrt{g} (Q_v \mathbf{V}) \dots \dots \dots (11)$$

$\xi^1 = \xi$, $\xi^2 = \eta$ と置くと式(12)が得られる。

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\sqrt{g} H^\xi \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\sqrt{g} H^\eta \right) \right]$$

$$- \frac{1}{\sqrt{g}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \sqrt{g} Q_v \mathbf{V}^\xi + \frac{\partial}{\partial \eta} \sqrt{g} Q_v \mathbf{V}^\eta \right] = \frac{\partial Q_v}{\partial t} \dots \dots (12)$$

$$H^\xi = \sigma \left(g^{\xi\xi} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + g^{\xi\eta} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right)$$

$$H^\eta = \sigma \left(g^{\eta\xi} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + g^{\eta\eta} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right)$$

ここでは感光体の移動速度を v とし、 $\mathbf{V}^\xi = v, \mathbf{V}^\eta = 0$ と

している。式(8)(12)を差分化し交互に解き進めることで、電位分布の時間変化を計算している。ただし、今回の解析においてはメッシュに直交座標系を使用している。

3) トナー挙動計算

各トナーに働く力 F は式(13)で示される。 F が求めれば、ニュートンの運動方程式により、各トナー粒子の時間的変化を追うことで、軌跡が計算できる¹⁶⁾。

$$F = F_e + \sum F_t + F_a + F_h \dots \dots \dots (13)$$

F : トナーに働く力

F_e : 電界から受ける力

F_t : トナー間クーロン反発力

(すべてのトナーから受ける力を積算)

F_a : トナーとキャリアまたは感光体の付着力

(静電的付着力と非静電的付着力の合力)

接触している場合のみ考慮する)

F_h : 空気抵抗により受ける力

電界計算時にはトナーの持つ電荷を無視しているが、各トナーに働く力を計算する際には、全てのトナー間のクーロン反発力を積算することでトナー電荷による電界の乱れを考慮している。トナー電荷による鏡像力は考慮していないため厳密性に欠けるが、接触時以外は鏡像力の影響は小さいため、トナーとキャリアまたは感光体の付着力を適当な値とすることでほぼ正しい解を与えることができる。この計算手法は、計算時間が大幅に短縮できる利点がある。

この計算ではトナーとキャリア・スリーブ・感光体、トナー同士の間も考慮している。さらに、トナーの粒径と帯電量には任意の分布を持たせることができる。

2-3 計算モデル

現像部の解析モデルをFig.4に示す。現像スリーブと感光体の間を平行平板で近似し、その間にキャリアを配置する。キャリアブラシの形状は高速カメラを用いて観察した結果¹⁷⁾を使用しているため、キャリアブラシによる電位の乱れを考慮できる。またキャリアの抵抗を考慮することもできるが、今回の解析では高抵抗のキャリアを使用しているため、キャリアを絶縁体として扱っている。トナーは初期状態でキャリア表面にランダムに分布している。

潜像電荷は、任意の露光条件における感光体上の電荷分布をシミュレーションした結果を用いる。現像スリーブに現像バイアスを印加し、感光体をアースに落としてある状態で、前記潜像電荷が計算領域の左端から右方向に向かって動いていくときの電界計算を行い、トナー挙動を解析する。

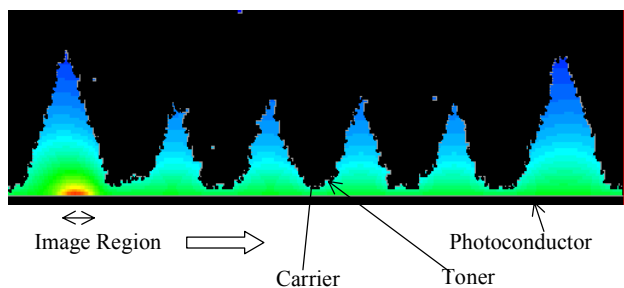


Fig.4 Simulation model of development system.

3. 結果

下記露光条件における主走査方向3ドットライン潜像を用いて、二成分DC現像と二成分AC現像のシミュレーションを行う。潜像電荷分布をFig.5に、現像シミュレーション結果をFig.6に示す。現像バイアスのDC成分は同じで、AC現像の

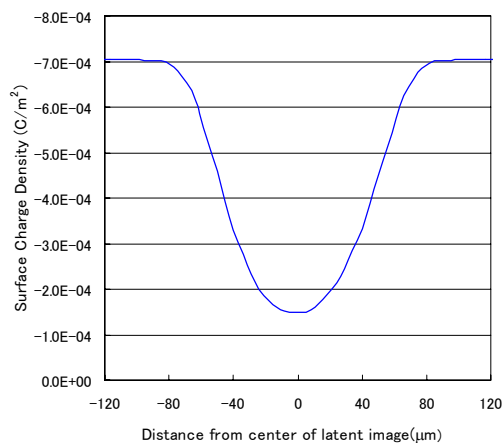
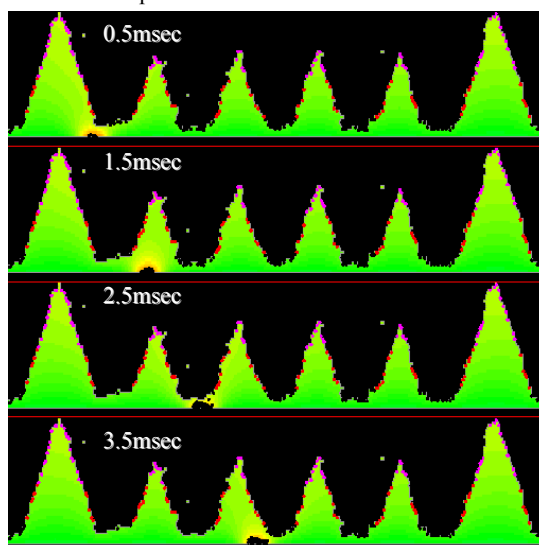


Fig.5 Simulation result of latent image.

露光条件

レーザーパワー	: 636μW
ビームスポット径	: 72×72μm(主×副)
感光体線速	: 200mm/s
感光体膜厚	: 30μm
感光体表面電位	: -890V

DC Development



AC Development

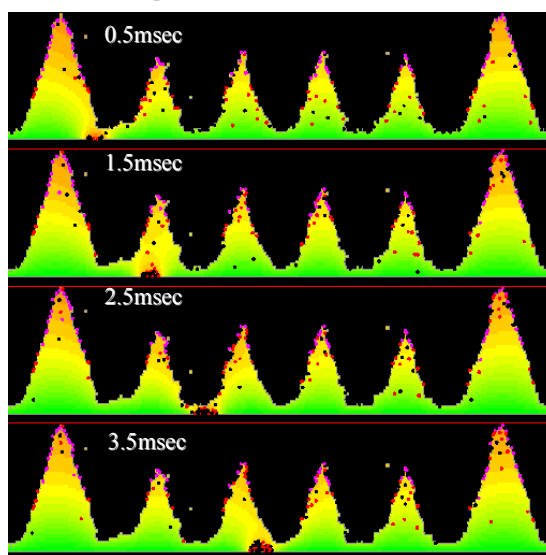


Fig.6 Time sequence of toner motion for AC and DC developments.

現像条件

現像ギャップ	: 600μm
現像バイアス	: -600V
トナー粒径	: 8~10μm
トナー帯電量	: -15~-25μC/g

場合は矩形波を重畳している。キャリアブラシのスリーブに近い方から3つに分け、初期状態で一番スリーブ側に配置さ

れているトナーをマゼンタ，中央に配置されているトナーを赤，感光体に一番近い側に配置されているトナーを黒に色分けしてある。表示ステップはどちらも1.5msec毎である。

シミュレーション結果を同じ経過時間で比較すると飛翔しているトナー量などが違うことがわかる。二成分DC現像方式では，画像部近辺のキャリア先端に付着しているトナー(黒)だけが現像され，それ以外のキャリアについたトナーはほとんど動かないことが特徴である。一方，二成分AC現像方式では，キャリア先端のトナーだけでなく比較的スリーブに近い位置に配置されていたトナー(赤)も現像されている。さらに，画像部から遠い位置のキャリアブラシに付着しているトナーも飛翔している。またトナーがキャリアと感光体間で往復運動をしていることがわかる。

ただしどちらの現像方式でも，スリーブにもっとも近いトナー(マゼンタ)は現像されていないことがわかる。

4. 考察

4-1 AC現像方式のメカニズム

ACバイアスを印加すると現像効率が向上し，鮮鋭性の高いシャープな画像が得られることが実験結果よりわかっている。これらのメカニズムをシミュレーション結果より明らかにする。

現像効率向上の要因の一つに，キャリアから飛翔して現像に寄与するトナー量が多いということがあげられる。これは瞬間的に高いバイアスがかかることが一つの原因である。また，トナーの振動により付着力が小さくなるからという説もある。そこで，実際にどのくらい現像量が違うのかを比較するために，感光体上に現像されるトナー付着量(M/A)の時間変化を比較する。

このシミュレーションでは現像量の時間変化は，計算の初期状態に大きく影響される。実際は現像ニップ中のキャリアブラシ形状は常に同じではないので，その状態に近づけるためにキャリアブラシの配置を変えて何通りかシミュレーションを行う。感光体上M/Aの平均値の時間的な変化を算出したものをFig.7に示す。x軸は現像時間，y軸はM/Aを示す。(シミュレーションにはスキヤベンジ等の要因が考慮されていないので，x軸は実際の現像時間とは異なる。)

この結果を比較すると，同じ現像時間ではAC現像のほうが早く飽和することが分かる。このため，DC現像方式と比較するとAC現像方式は，現像効率が向上し画像濃度が高くなっていると考えられる。

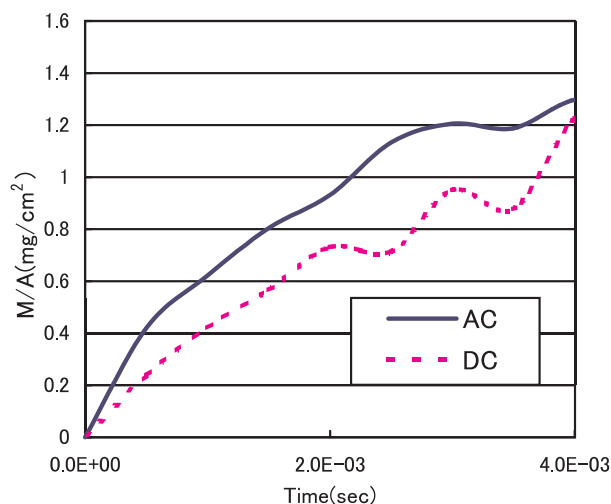


Fig.7 Simulation results of M/A.

以上のように，AC現像方式では飛翔するトナー量が多いことが明らかになったが，どちらの現像方式においてもスリーブにもっとも近いトナー(マゼンタ)は現像されていない。計算領域の電界強度分布をFig.8に示す。印加バイアスが異なってもスリーブに近い部分の電界強度はあまり変化しないことがわかる。したがってどちらの現像方式においてもスリーブに近いトナーは現像されにくいと考えられる。

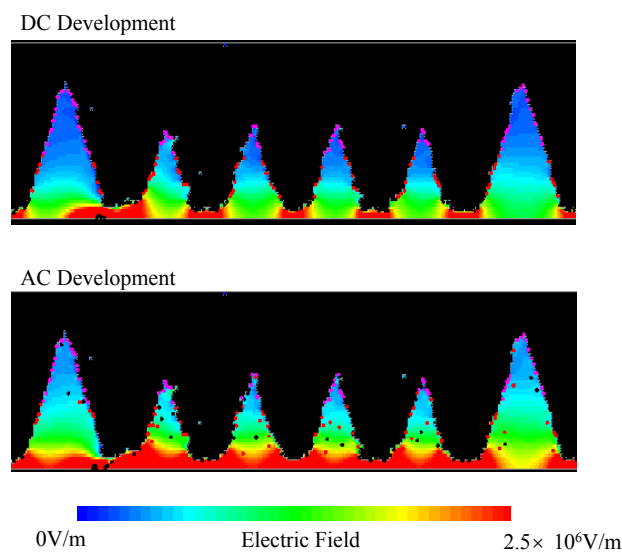


Fig.8 Comparison of electric field between AC and DC .

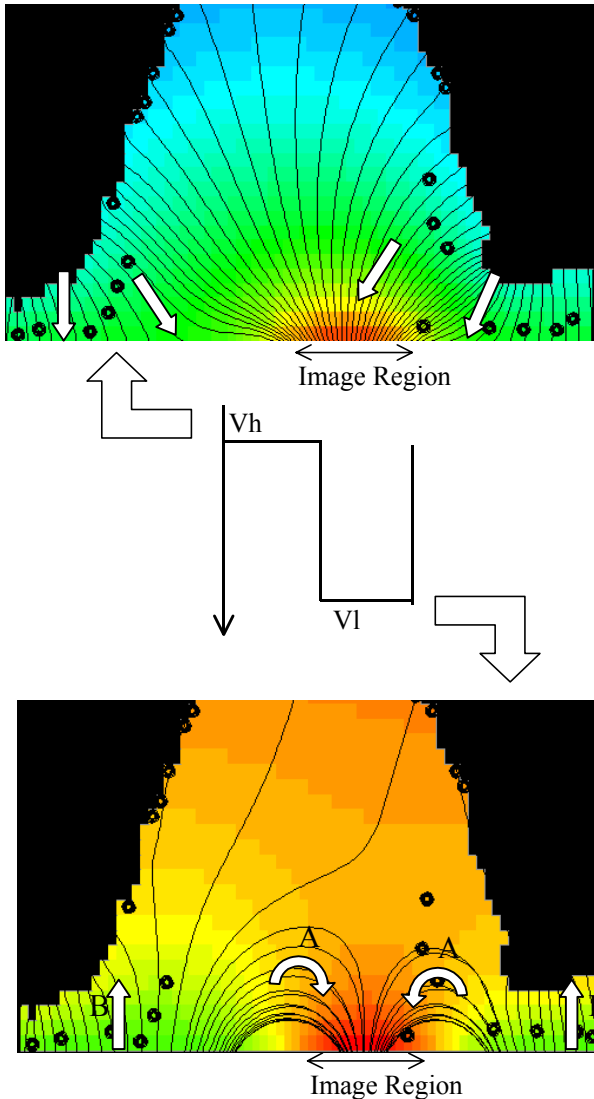


Fig.9 The effect of AC voltage corresponding to V_h (upper) and V_l (lower).

AC現像方式では、トナーがキャリアと感光体間で往復運動を行っている。トナーが画像部に集まるメカニズムは次のようになっている。画像部付近の電気力線の様子をFig.9に示す。ACバイアス波形の V_h の部分では、負に帯電しているトナーは電気力線に沿ってキャリアから感光体に向けて動く。このとき非画像部にもトナーが移動する。一方ACバイアス波形の V_l の部分では、画像部周辺の電気力線Aは画像部中心に向かっており、それ以外の電気力線Bは感光体からキャリアブラシ方向に向かっており、従って、画像部周辺のトナーは画像部中心方向に向かって集まり、それ以外のトナーは感光体からキャリアブラシ方向に戻ろうとする。しかし、画像部上のトナーは電氣的に拘束されているためほとんど移動し

ない。次にまたバイアスが V_h になると、トナーは感光体に向けて移動する。バイアスの切り替わりにあわせて何度も往復する間に、画像部周辺のトナーが画像部に集まり現像される。この往復運動によりトナーの再配置が起こり現像効率が向上し、画像部の周囲にチリの少ないシャープな画像が得られていると考えられる。

現像に寄与するトナー量が多いことについては弊害もある。Fig.10に示すように、二成分AC現像では、非画像部にもトナーが移動するため地汚れが起こりやすいと考えられる。このシミュレーションではスキヤベンジの効果は考慮していないが、感光体に付着し、スキヤベンジされなかったトナーが地汚れとなりやすいのではないかと推測される。

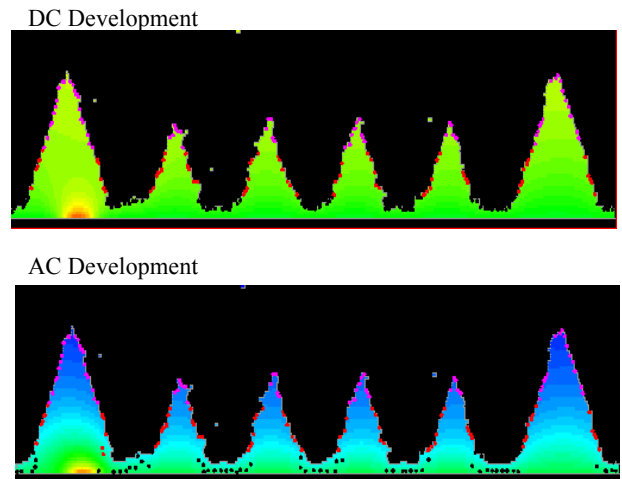


Fig.10 Comparison of background noise between AC and DC developments.

4-2 実験結果との比較

シミュレーションにより二成分AC現像方式のメカニズムが明らかになったところで、実験結果と矛盾がないかを確認する。二成分AC現像方式での作像実験より得られた周波数、ACバイアス振幅と画像特性(ドット再現性、ベタ濃度、地汚れ)の関係をFig.11に示す。実験結果より、周波数が高くなるとドット再現性が向上し、地汚れが減っている。周波数が高いと現像時間内でのトナーの往復回数が多くなるため、非画像部についたトナーが画像部に集められるチャンスが増加する。このため、画像部の周囲にチリが少なく鮮鋭性の高い画像が得られると考えられる。しかし、ベタIDは周波数によらない。これは、今回解析した現像条件では、画像部電位が V_l よりも負に小さいためベタ画像を現像するときにトナーが

往復運動を行わないためと考えられる。

また、AC電圧を高くするとトナーが画像部に引き付けられる力が強くなるため、ドット再現性が良くなると考えられる。さらにトナーにかかる力が大きくなるため、キャリアから離れるトナーが増え、ベタIDが向上する。しかし、トナーにかかる力が大きくなるとトナーはより大きな速度で感光体上に押しつけられるため、その際トナーの付着力が増加し地汚れが顕著になると考えられる。

以上のように、シミュレーションを用いて考察したメカニズムにより、実験結果を矛盾なく説明できる。

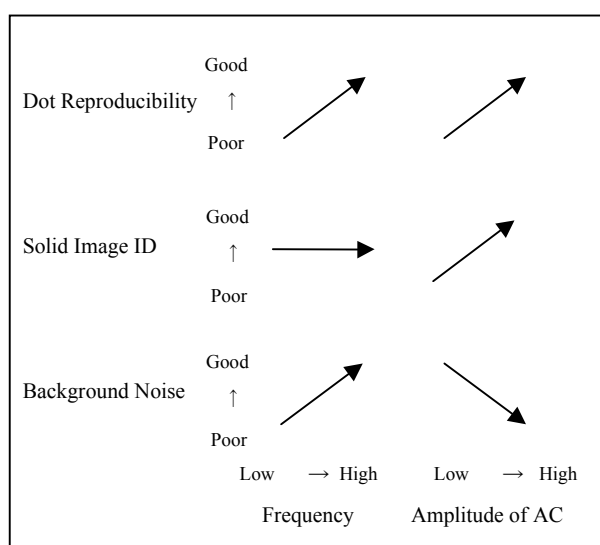


Fig.11 Relationship between AC voltage and image quality.

5. 結論

二成分現像に対応した、露光から現像までのトータルなシミュレータを開発した。このシミュレータを用いてDC現像方式と比較したAC現像方式の特徴を理論的に考察し、以下の特徴を明らかにした。

- ・キャリアから離れるトナー数が多い。
- ・トナーがACバイアスに応じて往復運動をすることにより、画像部周辺のトナーが画像部に集まって現像される。また、非画像部についたトナーも画像部に再配置される。

これらの効果により、AC現像方式ではDC現像方式と比較すると画像濃度が高く、良いドット再現性を得ることができる。

本シミュレータは作像実験の理論的解析に有用であり、開発の方向性を提示することができる。

6. 今後の展開

スキヤベンジ効果、スリーブ形状、キャリアの動き等を考慮し、より現実に近い解析モデルを構築する。また、帯電・転写・定着も含めたトータルなシミュレータを構築する。

参考文献

- 1) 片倉真一, 根本雅子, 佐藤浩明, 芦田賢一: 電子写真プロセスシミュレーション, 沖電気研究開発, 65, No178, (1998), p87.
- 2) 丁錦利, 内藤裕義, 奥田昌宏: アモルファス半導体の過渡光電流における分散パラメータの温度依存性について, 電子写真学会誌, 33(1), (1994), p2.
- 3) I. Chen: Analyses of photodischarges induced by bulk generation, J. Appl. Phys., 73, (1993), p1261.
- 4) T. Iwanatsu, T. Toyoshima, N. Azuma, Y. Mutou, and Y. Nakajima: A Study of High Resolution Latent Image Forming and Development, IS&T's NIP15, (1999), p732.
- 5) 川本広行: 粉体挙動のシミュレーション, 日本画像学会シンポジウム論文集, (1998), p50.
- 6) 仲野正雄: 現像プロセスでの帯電粉体の挙動解析, 電子写真学会誌, 36(3), (1997), p185.
- 7) 平林純: 現像プロセスにおけるトナー粒子の挙動測定, Japan Hardcopy '99論文集, (1999), p177.
- 8) L. B. Schein: Phot. Sci. Eng., 5, (1975), p.255.
- 9) G. Harpvat: IEEEIAS '75 Annual, (1975), p.128.
- 10) 中島淳三, 木村雅俊, 堀江政勝, 高橋英男: 二成分磁気ブラシ現像の解析, 電子写真学会誌, 19(2), (1981), p52.
- 11) 久保田哲行, 井上博之, 飯野良雄, 日高重助: 粒子法による2成分磁気ブラシ方式における現像剤挙動の数値解析, 第84回日本画像学会研究討論会予稿集, (1999), p26.
- 12) 岸由美子, 門永雅史, 渡辺好夫: 二成分現像トナー挙動シミュレーション, Japan Hardcopy '99論文集, (1999), p177.
- 13) 渡辺好夫その他: レーザー露光による潜像形成シミュレーション, Japan Hardcopy 2000論文集, (2000), p125.
- 14) 電子写真学会編: 電子写真技術の基礎と応用, コロナ社, (1988), p102.
- 15) J.F.Thompson, F.C.Thames and C.W.Mastin: J. Comput. Phys., 15 (1974), p299.
- 16) 柴田兆史: 個別要素法による粉体現象の数値計算法, 電子写真学会誌, 34(2), (1995), p125.
- 17) 黒須 久雄, 門永 雅史, 岸 由美子: 二成分現像における画像部白抜け現象の解析, Japan Hardcopy 2000論文集, (2000), p141.