

電子写真での放電による画像劣化のシミュレーション

Numerical Simulation of Image Degradation Due to Discharge

門永 雅史*

Masami KADONAGA

要　　旨

本研究では、画像形成装置のひとつである電子写真装置において、ギャップ放電と沿面放電の2つの放電現象によって引き起こされる異常画像に注目し、発生メカニズム、対策についてシミュレーションを用いて研究を進めた。具体的には、紙とベルトが分離する際の剥離放電による異常画像を研究対象とした。ギャップ放電と沿面放電を考慮した新しいシミュレーションモデルによって剥離放電現象を再現し、さらにトナー挙動を考慮することでシミュレーションによって異常画像を再現した。本シミュレーションによって異常画像を抑制する方法についての理論的な考察を行ない、剥離前の紙表面帯電電位が低い程異常画像が発生しやすい傾向を確認した。また直流電圧印加時の帶電ローラによる帶電ムラ解析に本シミュレーションモデルを適用し、実験の傾向を再現した。

Abstract

Image degradations caused by electrical discharge and surface discharge are studied for high image quality of electrophotography system. In order to simulate image degradation due to separating discharge between the sheet and the belt, a new simulation model of discharge phenomena is proposed. Comparisons between simulation and experimental results are carried out extensively and the calculated results agree approximately with the measured ones. Toner-movement due to discharge is also numerically simulated using discrete element method, and the result shows that the image degradation occurs at low surface potential of the sheet, whereas it does not occur at high potential. From these studies, image degradations can be prevented with highly electrified sheet and high image quality is obtained. Numerical simulation of non-uniform charging by charging roller with DC voltage is also carried out with this simulation model and calculation results show good agreement with the experimental ones.

* 画像技術開発本部 FS開発室

Future System of Electro-Photography Development Department, Imaging Technology Division

1. 背景と目的

画像形成装置の主流は、電子写真方式とインクジェット方式であり、特に複写機や高速プリンタとしては、高速、高画質、普通紙対応といった点で有利な電子写真方式が用いられている。電子写真技術は静電気や放電を利用して画像を形成するが、予想外の放電によって異常画像が発生することが多々ある^{1) 2) 3)}。放電現象は環境の影響を受けやすく、実験による解析が困難であるため、シミュレーションによる考察が有効と期待されるが、放電による異常画像を再現する計算モデルは皆無である。本研究では、ギャップ放電と沿面放電が関与して発生する異常画像に注目し、シミュレーションモデルの提案と実験結果の再現を試みたので報告する。

2. 剥離放電によって生じる異常画像

本研究では、放電極性によって形状が異なる異常画像に注目した。具体的には剥離放電⁴⁾によって発生する異常画像⁵⁾を解析対象とした。異常画像が発生した実機構成をFig.1に示す⁶⁾。紙をベルトに吸着させて転写領域に運び、電界によってトナーを転写させる方式で、紙搬送転写ベルトシステムと呼ばれている。様々な紙種に対応し、紙ジャムが発生しにくいため、安定した転写が実現可能である。しかしながら紙が帶電しているため、ベルトから分離する際に剥離放電が発生し、まれにではあるが、紙上でトナーの飛び散りが発生する。Fig.2は剥離放電によってトナーが飛び散った例である。(a)は負に帯電した紙(実験ではPET(polyethylene terephthalate)シート)が剥離した場合、(b)は正に帯電した紙(PETシート)が剥離した場合である。極性によって形状の異なる異常画像が見られている。剥離放電によってシート帶電と逆極性の電荷がシートに移動するが、正電荷がシートに移動した場合には枝状、負の場合にはうろこ状の異常画像となる。この極性依存性は、沿面放電図形であるリヒテンベルグ図形の傾向と酷似しており⁷⁾、沿面放電の関与が予想される。また図ではわかり難いが異常画像は周期的に発生する。Fig.3は剥離前のシート帶電電位を変えた時の異常画像を観察した結果である。剥離前電位が大きくなるに従って、異常画像の大きさと周期が小さくなる傾向にある。正極性の場合のみを示しているが、負極性の場合にも同様の傾向がある。

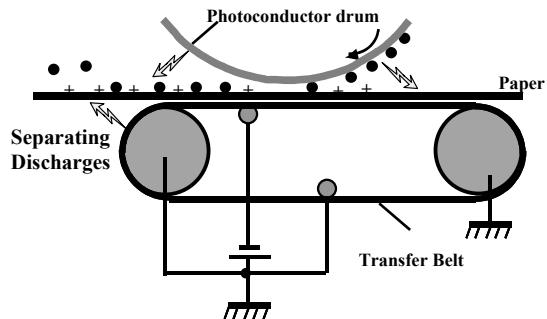
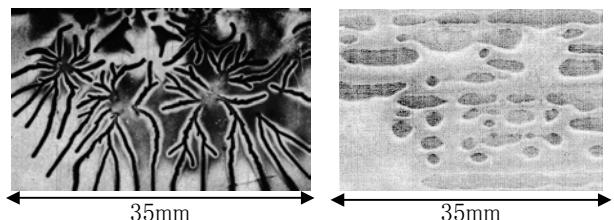


Fig.1 Schematic diagram of the belt transfer system.



(a) Negatively charged sheet (b) Positively charged sheet

Fig.2 Image degradations due to separating discharge.

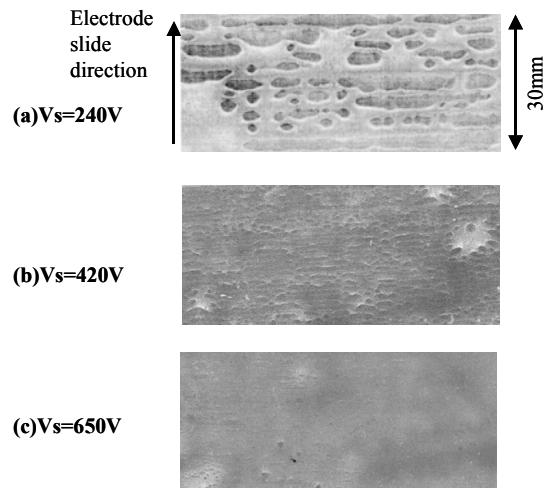


Fig.3 Image degradations for various sheet potentials.

Fig.2,3にみられる異常画像は、ギャップ放電だけでなく沿面放電の関与が考えられることから、Fig.4のような異常画像形成モデルが提案された⁵⁾。初期状態では、シートはその上に正負いずれかの極性のトナーを保持した状態で、ベルトと密着した状態にある。またシートは転写時の放電によってトナーと同極性に帶電している。シート上のある点に注目する。(a)帶電したシートとベルトの剥離が進行すると、シート上の注目点とベルト間の静電容量が低下するため、電

位差が大きくなり、シートとベルト間にギャップ放電が発生する。(b)シート上の注目点に放電電荷が移動し、電位の絶対値が局所的に高くなるために、沿面方向に強い電界が形成され、沿面放電が発生する。ここでシートが正に帯電していた場合にはウロコ状($V_s > 0$)、負に帯電していた場合には樹枝状($V_s < 0$)の放電パターンが形成される。この放電パターンはシート裏面に形成されており、この時点ではまだ異常画像は形成されていない。(c)放電パターン形成後、シート上面に存在する未定着トナーには、放電パターンによって形成された電界からの力を受ける。この力に従ってトナーは移動し、シート上面に異常画像が形成される。(d)一度放電が発生すると、シート電位は中和されて低下するために、しばらくは放電が発生しない。シート剥離が進行すると再びシートとベルト間電位差が上昇し、次の放電が発生する。一連の過程を繰り返すことによって周期的な異常画像が形成される。本モデルにより、周期的に発生する異常画像を説明可能と期待される。

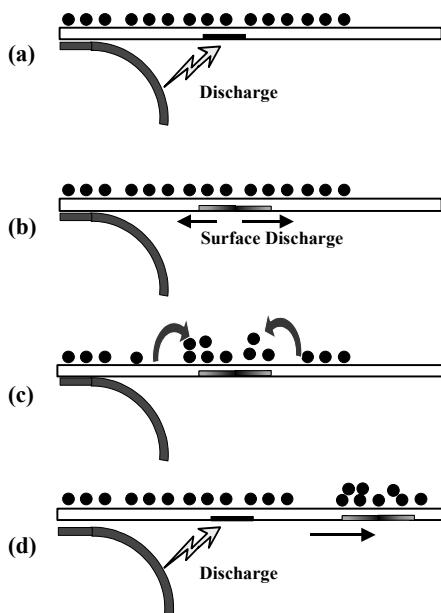


Fig.4 Generating model of image degradation.

3. 新しい計算手法の確立

前述の異常画像形成モデルをシミュレーションで再現することは、電子写真における異常画像対策検討に有用であるだけでなく、これら放電現象が関与する様々な工学分野の課

題においても大いに役立つと期待される。しかしながらギャップ放電と沿面放電を考慮した計算例は見当たらないため、本研究では新しい計算手法によって上記モデルのシミュレーションを試みた。シートの移動を考慮しながら放電を計算する必要があるため、物理方程式を反映しやすい差分法を採用した⁸⁾。さらに剥離部の曲面を再現するために、流体力学の分野で確立されている一般座標系による数値計算手法を採用した。

3-1 一般座標系でのポアソン方程式解法

電位分布はポアソン方程式を解くことで得られる。Fig.5(a)に示すように、計算対象領域を四辺形メッシュで分割し、次に(b)のように一般座標系($\xi - \eta$ 系)において、幅1の等メッシュ系に変換できるように、計量テンソル(g^{ij})を定義する。この計量テンソル(g^{ij})とEinsteinの略記法を用いて、ポアソン方程式を表現すると式(1)となる。Einsteinの略記法とは i, j それぞれについて和をとることを意味する。また、 $\xi_1 = \xi$, $\xi_2 = \eta$, g^{ij} は座標変換を規定する計量テンソルの各要素、 g は座標変換のヤコビアンの2乗値、 q は体積電荷密度、 ϕ は電位を示している。また x_ξ 等は x の ξ による偏微分を表す。他の記号も同様である。式(2), (3)を考慮して式(1)を解くことによって、任意の曲面を有した計算領域でも差分法でポアソン方程式の解を得ることが可能である^{9) 10)}。

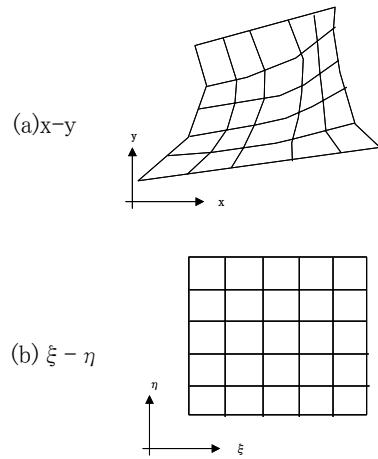


Fig.5 Calculation mesh.

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \cdot \frac{\partial}{\partial \xi^i} \cdot \sqrt{g} \cdot \left(\epsilon \cdot g^{ij} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \xi_j} \right) = -q \quad (1)$$

$i = 1, 2 \quad j = 1, 2$

$$(g^{ij}) = \frac{1}{g} \begin{bmatrix} x_\eta^2 + y_\eta^2 & -x_\xi x_\eta - y_\xi y_\eta \\ -x_\xi x_\eta - y_\xi y_\eta & x_\xi^2 + y_\xi^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\sqrt{g} = x_\xi \cdot y_\eta - x_\eta \cdot y_\xi \quad (3)$$

3-2 一般座標系での電荷移動量算出法

紙搬送転写ベルトシステムでは、シートやベルトは一定速度Vで移動するが、このとき物体上に存在する電荷は物体移動に伴って、同じ速度Vで移動する。これを移流と呼ぶが、この効果を考慮しないと、剥離するにつれて電界が変化する様子を計算できない。計算ではメッシュを固定しているため、移流による電荷移動を各メッシュ内の電荷量変化と考え、式(4)で表現する。

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{g}} \cdot \frac{\partial}{\partial \xi^i} \cdot \sqrt{g} \cdot (q \cdot V^i) \quad (4)$$

3-3 ギャップ放電モデル

次にシートとベルト間のギャップ放電モデルを説明する。放電は、厳密には電気力線に沿って起こると考えられるが、ここでは単純に剥離部ローラの半径方向に放電すると仮定した。これにより、電極表面の各メッシュに対して一意に対向電極上の放電点が定義される。この放電点間の電位差 V_g を、パッシエンの放電限界電圧 V_{pa} と比較する。空隙間電位差 V_g が放電限界電圧 V_{pa} 以上になる点間では放電が発生し、放電電荷がシート裏面の放電点に移動する(Fig.6)。式(6)はパッシエンの法則による放電限界電圧 V_{pa} である¹¹⁾。ここで G は放電が発生する空隙間距離(放電ギャップ) [m]である。

$$\left. \begin{array}{ll} G > 8\mu m & V_{pa}[V] = 312 + 6.2 \times 10^6 \cdot G \\ 8\mu m \geq G \geq 4.8\mu m & V_{pa}[V] = 362 \\ 4.8\mu m > G & V_{pa}[V] = 75.4 \times 10^6 \cdot G \end{array} \right\} \quad (6)$$

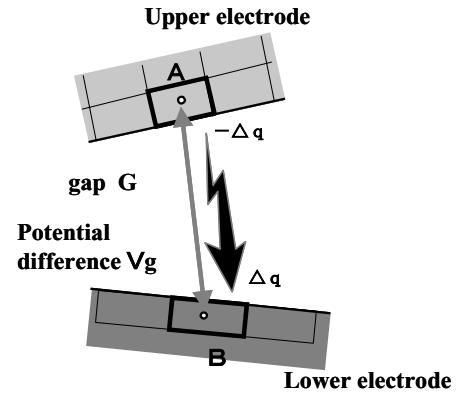


Fig.6 Discharge model.

放電が発生した場合に移動する電荷量 ΔQ は、放電ギャップGに依存すると考えられるが、理論式がないために実験から求める必要がある。本研究では実験から放電電荷量と空隙の関係を求め、近似式として考慮した。

3-4 沿面放電モデル

放電によって大量の電荷がシート裏面に移動すると、放電点周囲の沿面方向電界強度が局所的に強くなり、沿面放電が発生する。ギャップ放電による放電電荷をシート裏面に配置した後に、再度ポアソン方程式を計算し、シート裏面の電界強度分布を算出する。電界強度がある閾値 E_{lim} を超えたメッシュ間では、式(7)に従って沿面放電電荷を移動させる(Fig.7)。

$$dq = \alpha \times E \quad (7)$$

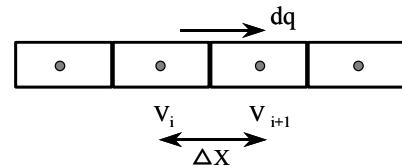


Fig.7 Surface discharge model.

ここで沿面放電が発生する閾値である E_{lim} を、沿面放電発生電界強度、 α を沿面放電パラメータと呼ぶことにする。沿面放電による電荷移動は、シート裏面の全メッシュ間の電界強度が E_{lim} 以下になるまで反復計算を行う。すなわち、電荷移動と電界計算を沿面放電が停止するまで繰り返す。本研究では、実験との比較から $E_{lim} = 2.0 \times 10^6 \text{ V/m} \sim 3.0 \times 10^6 \text{ V/m}$ の値を採用した。文献(12)によると、大気圧下でのリング状沿面

放電発生電界は $6\sim 8 \times 10^6 \text{V/m}$, 文献(13)によると, 沿面放電進展時, 終了時の電界強度は最大値 $3 \times 10^6 \text{V/m}$ 前後である。またギャップ放電が発生する電界強度が 10^6V/m オーダーであることから, 本研究で採用した値は妥当と判断した。電界強度に比例して電荷が移動することより, 沿面放電パラメータ α は物理的には電気伝導度と同じ意味を持つが, 放電が停止するまで反復計算を行うため, 値自体に意味はない。極端に大きな値ではない限り, 同じ結果が得られることは確認済みである。本計算では $\alpha = 4 \times 10^{-17}$ で統一した。一連の計算が終了した後, 時刻を ΔT だけ進め, 再び一連の計算を繰り返す。

3-5 計算フローチャート

本計算モデルの流れをFig.8に示す。①計算条件を読み込み, 計算領域を入力条件にしたがってメッシュ分割する。その際, あらかじめ各メッシュの計量テンソル, 放電点の組み合わせ等を算出しておく。②次にポアソン方程式を計算し, 計算領域の電位分布を得る。③シート移動にともなう電荷移動量を算出し, 電荷分布を修正する。電荷が移動すると電位分布が変化するため, 再度ポアソン方程式を計算し, 新しい電位分布を得る。④次に放電点間の電位差と空隙から放電が発生するかを判定し, 放電が発生する場合には放電電荷を各放電点に与える。やはり放電によって電荷分布が変化するため, 再度電位分布を算出しなおす。次にシート表面の電界に従って沿面放電の有無を判定し, 沿面放電が発生する場合には計算モデルに従って電荷を移動させる。シート裏面の全ての点で沿面放電が発生しなくなるまで, 沿面放電計算と電位分布計算を繰り返す。沿面放電が終了したら, 時刻を ΔT だけ進めて最初に戻る。このようにシート移動, ギャップ放電, 沿面放電によって電荷移動が発生すると, 電位分布が乱されるため, 電荷移動が発生するたびに電位分布を計算する。時刻 T があらかじめ設定しておいた終了時刻 T_{end} に達すると計算終了とする。

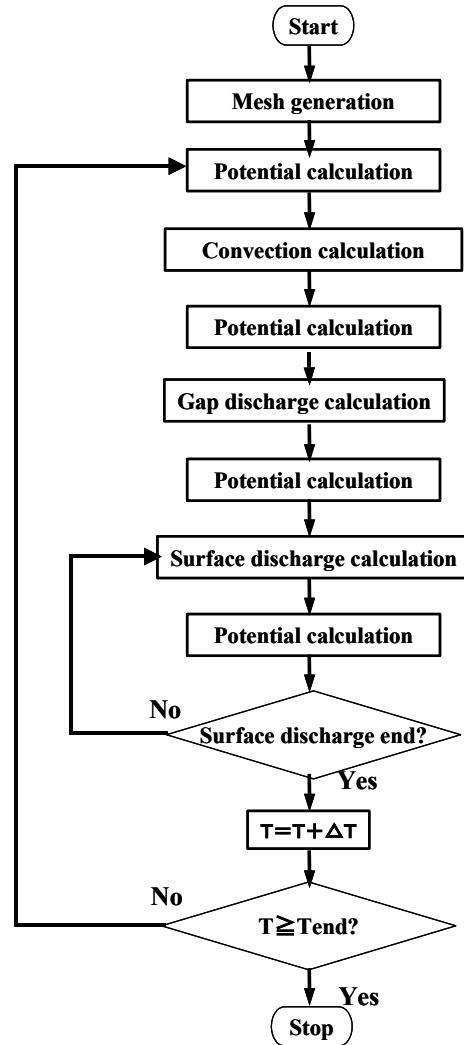


Fig.8 Flow chart of the simulation.

4. 剥離放電による異常画像シミュレーション

4-1 ギャップ放電モデル

実験から得られた放電ギャップと放電電荷量の関係をFig.9に示す。式(8)はフィッティングにより求めた放電電荷量と空隙の関係を表す近似式である。放電ギャップが大きいほど, 大量の電荷が一度に移動することになり, 剥離放電による電荷量の空隙依存性が予測可能となる。

$$\Delta Q = -4.27 \times 10^{-8} \cdot \ln(G) - 5.01 \times 10^{-7} \quad (8)$$

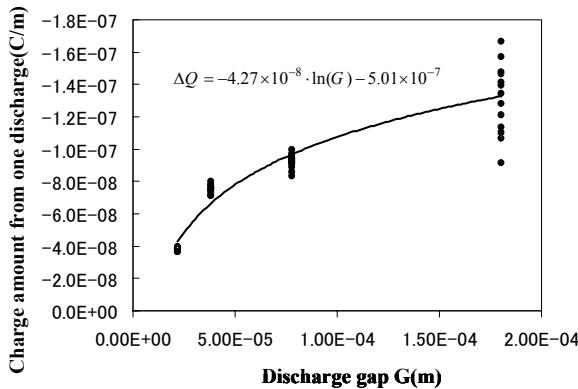


Fig.9 Relationship between the discharge gap and discharge density.

4-2 剥離放電パターンの計算結果

剥離放電パターンの形成過程を、シミュレーションで再現した結果をFig.10に示す。Table 1は計算に用いた条件である。シート表面が250Vに帯電した場合の、各時刻での放電とシート帶電分布を示している。またFig.3の実験時の剥離速度2.5mm/sの場合には、ベルトの影響が小さいことがわかつているため、ベルトを無視して計算を行った。

Table 1 Calculation parameters.

パラメータ	数値
シート厚さ	100 μm
比誘電率	3
シート移動速度	2.5mm/s
シート帶電電位	250V
帶電電荷量	62.5 μ C/m²
ローラ曲率半径	8mm
電位	0V
沿面放電発生電界Eth	2 × 10⁶V/m
沿面放電パラメータα	4 × 10⁻¹⁷S/m²

Top-viewはシート裏面の電荷密度を示しており、黒部が放電によって帶電した個所である。初期状態では、全ての空隙において放電が発生することを防ぐために、あらかじめシート裏面右半分に、表面電荷-Qsを付与する。時間とともに帶電していない裏面が左から現れ右に移動していく、電極と帶電していない部分の間に放電が発生する。なおシート上面は一面に表面電荷としてQsを付与している。なお、シート電荷量Qsとシート帶電電位Vs、シート容量Cの間には $Q_s = C \cdot V_s$ の関係がある。

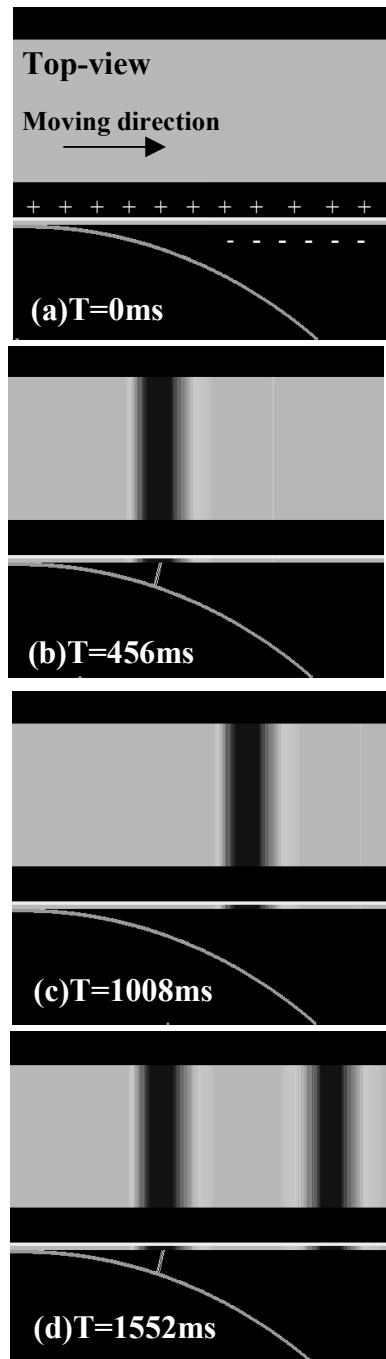


Fig.10 Simulation results of separating discharge.

(a)は初期状態である。時間と共にシートは右に移動し、(b)T=456msでは最初の放電が発生する。沿面放電によってシート裏面に帯状の放電パターンが形成される。(c)さらにシートは右に移動するが、先ほどの放電によってシートと電極間の電位差が小さくなるため、しばらく放電は発生しない。(d)T=1552msにおいて、次の放電が発生し、再び帯状の放電パターンが形成される。一連の過程をくりかえすことで周期

的な放電パターンが形成される。

Fig.11は、剥離前シート表面帯電電位Vsを変えた場合の計算結果である。(a)Vs=250V, (b)Vs=400V, (c)Vs=650Vの結果である。シートの帯電電位が大きくなるにつれて、放電パターンの大きさと周期が小さくなり、小刻みな放電に移行するといった結果が得られた。剥離前帯電電位が大きくなるにつれて異常画像が小さくなる傾向⁵⁾との関連が予想される。

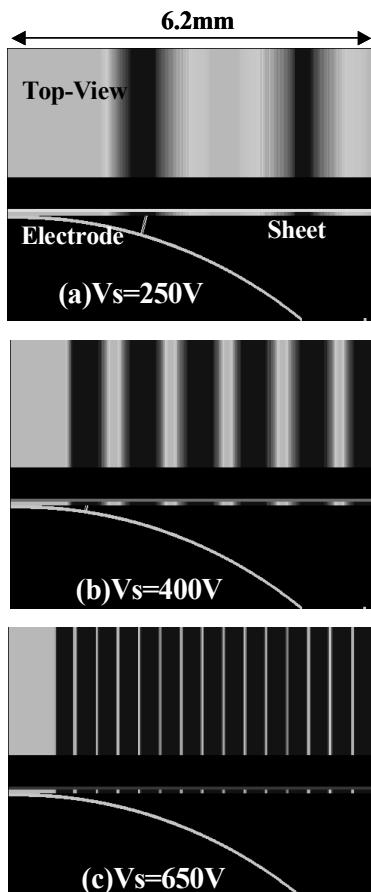


Fig.11 Simulation results of separating discharge pattern for various surface potentials.

4-3 異常画像形成シミュレーション

次に、異常画像を考察するために、剥離放電のシミュレーションに加えて、個別要素法^{14) 15)}を用いて、トナーの動きを計算した。トナーに働く力として、電界から受ける力 F_e 、トナー同士のクーロン反発力 F_q 、トナーとPETシート間の付着力 F_a 、空気抵抗 F_r を考慮し、ニュートンの運動方程式からトナーの速度、位置を算出した。

$$F(T) = m \cdot a = F_e + F_q + F_a + F_r \quad (9)$$

$$V(T+dt) = V(T) + (F(T)/m) \cdot dt \quad (10)$$

$$\begin{aligned} X(T+dt) = X(T) + & V(T) \cdot dt \\ & + 0.5 \cdot (F(T)/m) \cdot dt^2 \end{aligned} \quad (11)$$

m : トナー質量 q : トナー帶電量

V : トナー速度 X : トナー位置

F : トナーに働く力 dt : 計算の時間刻み

a : トナーの加速度

トナーの動きを計算した結果をFig.12に示す。剥離前シート帶電電位Vsが、290V, 400V, 560Vの場合の結果である。見やすくするために、トナー径を5倍に拡大し、白で表示しているが、実際は直径7μmである。またトナー帶電量q/m=20μC/g、紙との付着力を7nNとした。転写時の放電により、正に帶電したシート上に正帶電トナーが存在するため、クーロン反発力により付着力が小さくなると考えて、紙とトナーの付着力は、一般的なトナーと物体の付着力（数10nN）¹⁶⁾よりも小さい値を設定している。Fig.12より剥離前シート帶電電位Vs=290V, 400Vでは放電パターンに従って、異常画像が形成されるが、Vs=560Vではトナーの移動は起らないことがわかる。放電が発生しなければこのような異常画像は起らないが、発生しても小刻みな放電であれば異常画像にならないことがわかる。Fig.13に剥離前帶電電位Vsと、シート上面の電界強度分布を示す。剥離前電位Vsが高い程、放電パターンによって形成される電界強度が小さくなっている事がわかる。よって、剥離前にシートが十分に帶電していると、トナーの移動が抑制され画像劣化が起りにくくなることがわかる。さらに剥離前帶電電位が大きくなり、小刻みな放電になると、トナーに働く力がトナー・シート間の付着力よりも小さくなり、トナーが移動しなくなる。この場合には、異常画像が発生しないことが理解される。剥離放電による画像劣化を抑制するには、剥離放電自体を抑制する方法（すなわちシートを除電する方法¹⁷⁾）だけでなく、積極的にシートを帶電し剥離放電を発生させやすくすることによって、小刻みな放電を発生させてトナーに働く力を小さくするといったもう一つの方法があることが明らかになった。前者はシートを積極的に除電する方法であり、後者は積極的に帶電させる方法である。全く逆の方法で、異常画像が抑制可能であることは非常に興味深い。また、本シミュレーションによって、

実験結果の再現だけではなく、対策の方向性や理論的な根拠を示すことができるため、設計開発に有力である。

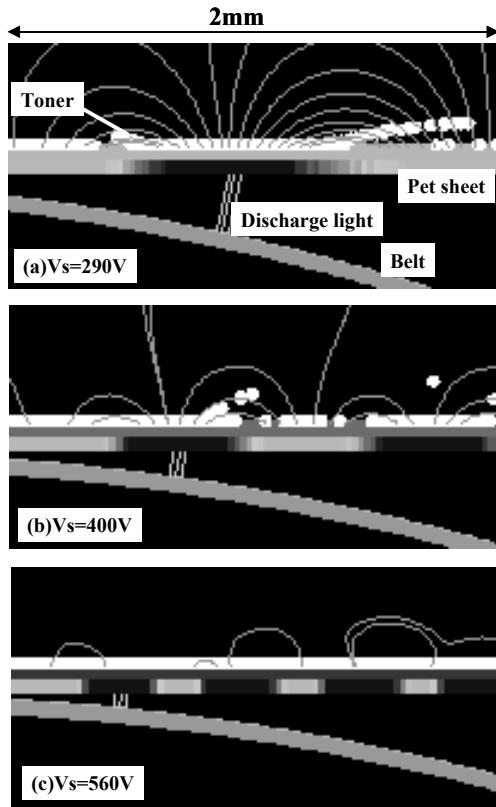


Fig.12 The simulation results with toner movement.

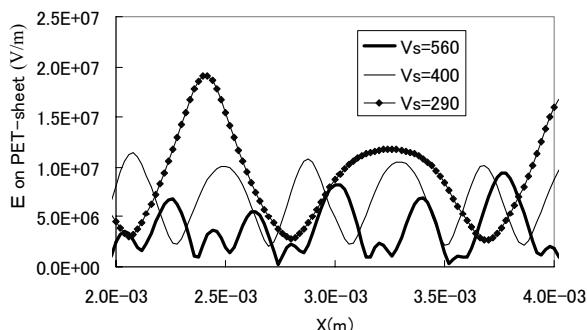


Fig.13 The electric field distribution at the surface of the PET sheet after separation.

5. 帯電ムラシミュレーションへの適用

本研究で考案した計算モデルによって、ギャップ放電と沿面放電が関与した現象をシミュレーションで考察することが可能となった。剥離放電による異常画像以外の現象に適用

した事例を紹介する。電子写真的帶電プロセスでは、ローラ帶電方式がよく用いられている¹⁸⁾。これは導電性ゴムローラに電圧を印加しながら感光体に押し当てて連れまわりで回転させ、ローラと感光体間の放電で感光体を帶電させる方式である (Fig.14)。

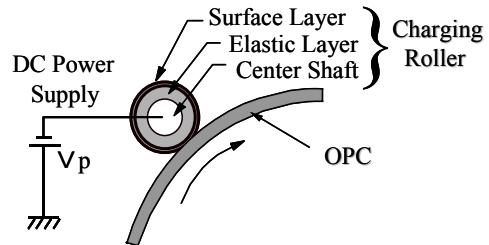


Fig.14 Schematic diagram of the charging roller system with DC voltage.

直流電圧を印加した帶電ローラでは、材料によっては帶電ムラが発生しやすいことが知られている。Fig.15は印加バイアスが異なる場合の帶電ムラである。感光体の代わりに、電気特性が感光体と似ている厚さ $25\text{ }\mu\text{m}$ のPETシートを用いており、カスケード現像で顕像化した結果である。図中矢印の方向がシート移動方向であり、周期的な帶電ムラが観察される。剥離放電と同様の極性依存性があり、ギャップ放電と沿面放電が関与していると考えられる。そこで前述のシミュレーションモデルで帶電ムラのシミュレーションを試みた。Fig.16は帶電ムラ発生モデルであり、4つのステップからなる。Fig.4に示した剥離放電による異常画像形成モデルと基本は同じである。(a)ローラとシート間の電位差がパッシエンの放電限界電圧以上になるとギャップ放電が発生する。ローラとシート間の電界を低下させるように放電電荷が移動するが、電荷量は放電ギャップに依存し、ギャップが大きい程多くの電荷が移動する。(b)放電によってシートは局所的に帶電するため、周囲との電位差が大きくなる。シート沿面方向の電界が大きくなり、表面に沿って放電（沿面放電）が発生する。この沿面放電によって、シート上に局在していた電荷がシート表面を移動し、放電パターン（帶電ムラ）を形成する。(c)シートはギャップ放電と沿面放電によって帶電しているため、ローラとシート間の電界が低くなり、しばらくは放電が発生しない。(d)シートが移動することによって、帶電個所がローラとシートのニップ側に移動し、次の放電が発生する。(a)～(d)の繰り返しによって周期的な帶電ムラが

形成されると考える。Fig.17は実験による帯電電位と帯電ムラ周期の関係から、一回の放電で移動する電荷量の放電ギャップ依存性を算出した結果である。この関係を式(10)の代わりに用いることでFig.18のような帯電ムラをシミュレーションすることが可能となった。なお沿面放電発生電界強度は $E_{lim}=3.0 \times 10^6 \text{ V/m}$ を用いている。印加電圧が高いほど帯電ムラのサイズと周期が大きくなるが、この傾向は実験でも確認されており、本シミュレーションが帯電ムラを定性的に再現していることが確認された。ローラ帶電の最適化設計に有用なツールとなることが期待される。

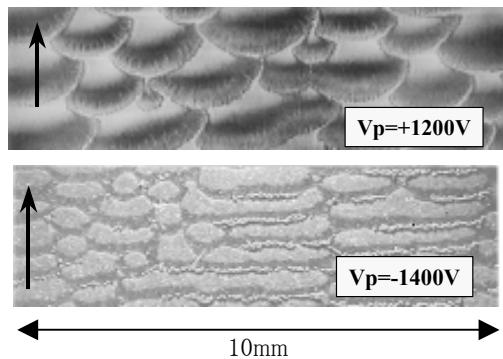


Fig.15 Non-uniform charging patterns by charging roller with DC voltage.

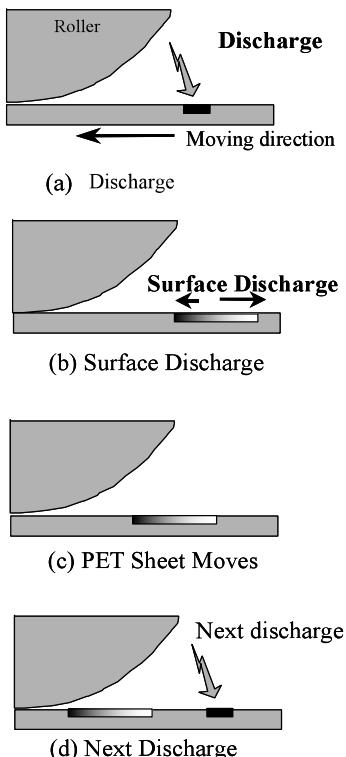


Fig.16 Model of generating non-uniform charging patterns.

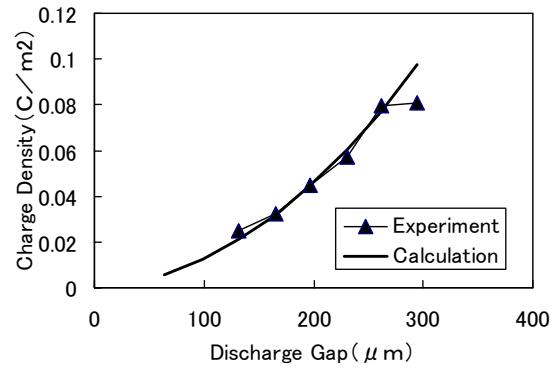


Fig.17 The relationship between the discharge gap and discharge density.

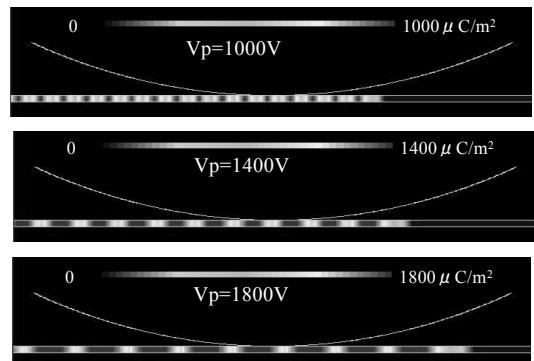


Fig.18 Non-uniform charging patterns obtained by simulation.

6. 最後に

剥離放電によって発生する異常画像に注目し、ギャップ放電と沿面放電を考慮した新しいシミュレーションモデルを考案し、異常画像を再現可能であることを確認した。また本モデルを用いて剥離放電現象を解析し、2つの異なる対策があることを理論的に明らかにした。さらに、同モデルを直流電圧印加時のローラ帶電による帯電ムラ現象に適用し、実験の傾向が再現可能であることを確認した。

本研究によってギャップ放電と沿面放電が関与した現象をシミュレーションで解析可能となり、実験のみでは不可能な理論的な考察と対策の方向性提示が可能となった。しかしながら製品の設計開発に役立たせるには、材料や環境の影響、パラメータのばらつき、表面性などをいかに考慮していくかといった課題が残存している。また放電のシミュレーションとしては、放電電荷量の空隙依存性や正負極性の違いの再現などが興味深い課題である。今後はこのような課題への展開

を考えていきたい。

謝辞

本稿は2003年12月に東京農工大学に博士論文として提出した内容の一部をRicoh Technical Report用に編集し直したもので、本研究を進めるにあたって、また学位取得にあたって、関連する多くの方々に御指導、御支援を頂戴しました。ここに感謝を記します。

参考文献

- 1) 黒須久雄, 門永雅史, 岸由美子 : 2成分現像における画像部白抜け現象の解析, 日本国像学会 Japan Hardcopy 2000 講演論文集, (2000), pp.141-144.
- 2) 羽山祐子, 竹平修, 門永雅史: 紙搬送姿勢による転写時トナーチリ現象のメカニズム, Ricoh Technical Report, 28 (2002), p.27.
- 3) 百武信男, 寺尾和男 : 静電転写の研究, 第8回静電気学界全国大会講演論文集(1984), pp.105-108.
- 4) Y.Takahashi et al: Discharge due to Separation of a Corona-charged Insulating Sheet from a Grounded Metal, IEEE Transaction on Electrical Insulation, 24(4), (1989), pp.573-580.
- 5) T.Katoh et al : A Study of Separating Discharge in the Belt Transfer System, IS&T's NIP12 : International Conference on Digital Printing Technologies, (1996), pp.370-373.
- 6) I.Matsuda, S.Takano and Y.Harasaki, U.S. Patent, No.5495317 (1996).
- 7) F.H.Merrill , A.von Hippel: Atomphysical Interpretation of Lichtenberg Figures and Their Application to the Study of Gas Discharge Phenomena, Journal of Applied Physics, 10, December (1939), pp.873-887.
- 8) 河野照哉, 宅間薰: 数値電界計算法, コロナ社(1980).
- 9) 河村哲也, 渡辺好夫, 高橋聰志, 岡野覚 : 応用数値計算ライブ ラリ 流体解析 II, 朝倉書店 (1997).
- 10) J.F.Thompson, F.C.Thames and C.W.Mastin : Comput. Phys., 15 (1974), p.299.
- 11) R.M.Schaffert : Electrophotography, 2-nd ed. Focal Press, London, (1975), pp.514-526.
- 12) 田代真一, 遠藤正雄 : 帯電電荷による沿面放電開始現象に関する研究, 電学論A, 121,8(2001), pp.795-796.
- 13) 熊田亜紀子, 千葉政邦, 日高邦彦 : ポッケルス効果を用いた負極性沿面放電進展時の電位分布直接測定, 電学論A, 118,6(1998), pp.723-728.
- 14) P.A.Cundall and O.D.L.Strack, Geotechnique, 29 (1979), p.47
- 15) 粉体工学会編 : 粉体シミュレーション, 産業図書 (1998).
- 16) 竹内学 : 帯電粉体の付着力に関与する因子, 電子写真学会誌, 36, 3 (1997), pp.175-184.
- 17) 九門明, 立川雅一郎: 弾性半導電ベルト転写方式, 電子写真学会誌, 33, 1 (1994), pp.43-49.
- 18) 中村俊治, 木須浩樹, 荒矢順治, 奥田幸一 : 帯電ローラの帶電機構, 電子写真学会誌, 30, 3 (1991), pp.302-305.