

# 電子写真における転写チリの3次元解析

門永雅史

株式会社リコー 画像エンジン開発本部

## 1. はじめに

電子写真(Electrophotography)とは複写機やレーザープリンタに用いられている作像方式であるが、本研究会の参加者の大部分の方は、電子写真の原理に精通していないと思われる。そこで最初に電子写真の歴史と基本原理を紹介し、4章以降で本題である転写チリの3次元解析結果について紹介する。

## 2. 電子写真の歴史<sup>(1)</sup>

電子写真の歴史は1935年に始まる。物理を学んだ若い特許弁理士 Chester Carlson が発明者である。彼は1930年カリフォルニア工科大学物理学部を卒業後、ニューヨークで職を転々とし、最後にP.R. マロニー社の特許部に就職した。彼は日夜特許申請のためにタイプと手書きで書類作成を行っていた。そして、早くて正確な複写機を物理的手段で完全なドライな複写方法で実現したいとの、強い執念を持つに至った。当時の複写技術には、銀塩やジアゾ方式があった。しかしながら銀塩はスピードが遅く、コストが高かった。ジアゾは専用紙を必要とし、また両面複写ができなかった。

Carlson は多くの文献調査の後、静電記録技術(絶縁フィルムの上に、電子銃で電子を照射して電子画像を形成し、そこにパウダーをふりかけて現像する記録方法)と光導電性物質を組み合わせることで画像を形成し、紙に転写することで複写画像を得ることができると気がついた。数ヶ月たった一人で研究した後、彼は助手を一人雇った。そしてさらに数ヶ月後(1938年10月22日)、ニューヨークの貧しい実験室で、場所と日時をガラス板の上に記録することに成功した。その時彼は硫黄をコートした金属板をハンカチで擦って電荷を与え(帯電)次に文字を書いたガラス板を重ねて全面露光し、次にその硫黄板に粉を振掛けて現像し、ワックスペーパーに転写して最初のコピー画像を作成した。カールソンはこの複写機の基本原理で特許を取得した。70年近くが経過した現在、電子写真方式は隆盛を極めていますが、基本原理はほとんど変わっていない。

## 3 電子写真の原理<sup>(2),(3)</sup>

電子写真は、帯電した誘電体表面に光導電性を利用して静電潜像を形成し、この静電潜像に微粒子を電氣的に付着させて画像を形成する。光導電性とは、通常は絶縁体であるが、光が照射されると抵抗が低下する現象であり、この特性を有する誘電体を感光体と呼ぶ。

電子写真で画像を形成するには、通常次に述べる7つのプロセスを経る。(図1)

- 1 帯電：感光体を均一に帯電させる。
- 2 露光：感光体に光を照射して、部分的に電荷を逃がし、静電潜像を形成する。
- 3 現像：帯電した微粒子(トナー)で、静電潜像上に可視画像を形成する。
- 4 転写：現像された可視画像を紙に移動させる。
- 5 定着：熱により転写画像を融着して、転写材上に画像を固定する。
- 6 クリーニング：感光体上の残トナーを清掃する。
- 7 除電：感光体上の残留電荷を消す。

除電後は、帯電にもどり次の画像を形成する。

図2に感光体をドラムにした場合を示す。ほとんどの電子写真方式は、同様な構成となっている。

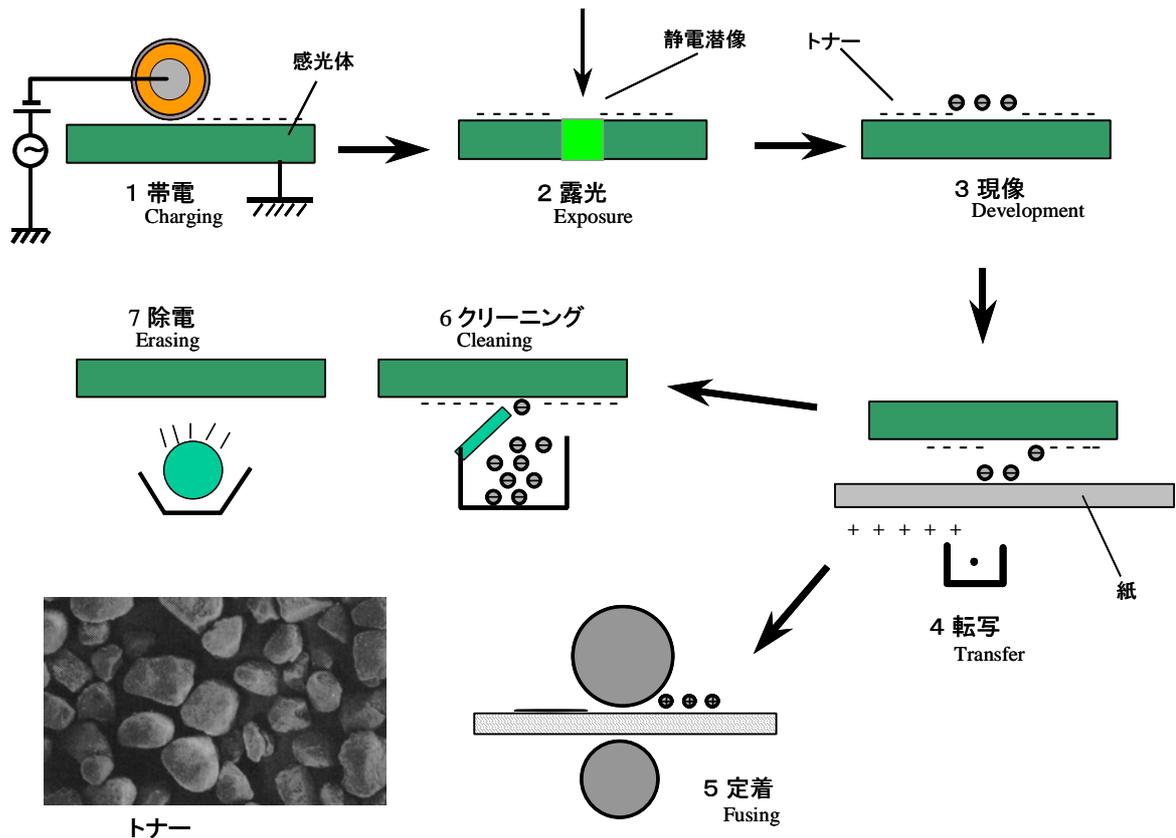


図 2 電子写真プロセス

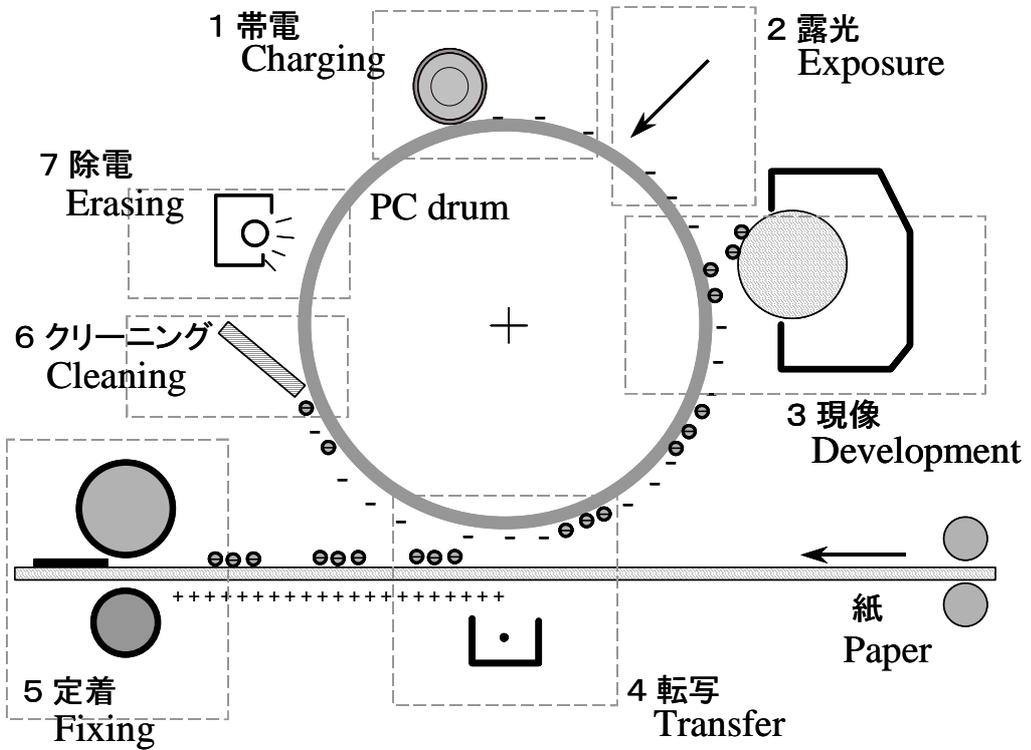


図 3 ドラム周りプロセス

上記プロセスは黒単色（モノクロ）画像用である。カラー画像を作成するには、色の3原色であるシアン（C：水色）、マゼンタ（M：赤紫）、黄（Y）のトナーが必要である。CMYを等量混合すると理想的には黒となるが、現実には灰色がかった黒となるために、実際には黒トナー（B）を含めた4色（YMCKB）のトナーが必要である。カラー電子写真では、前述のプロセスを4回繰り返して4色のトナーを紙の上に乗せていくことになる。図3は近年主流となっている中間転写ベルト方式によるカラー電子写真方式である。一旦ベルト上に4色のトナーを転写（1次転写）し、最後に一括して紙に転写（2次転写）することで、紙上に4色画像を形成する。

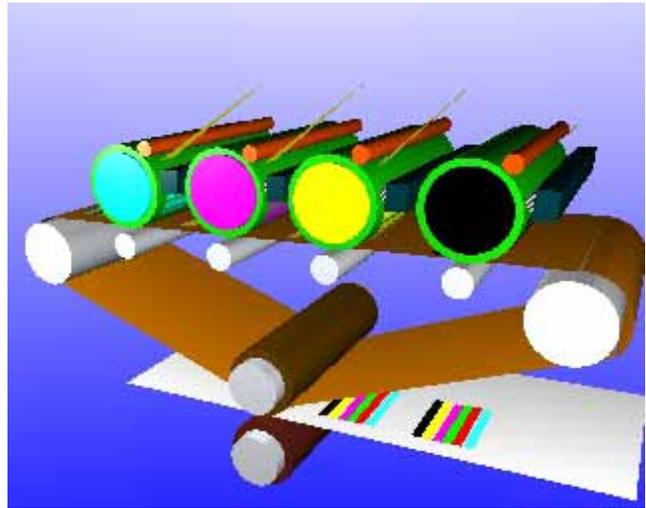


図3 中間転写ベルト方式

#### 4 転写プロセスにおける異常画像

中間転写方式では、感光体から中間転写体へ、中間転写体から紙へと二回の転写を経て画像が形成されるため、画像劣化が発生しやすい。図4は転写プロセスで発生する様々な画像劣化の例である。通常の条件ではめったにこのような異常画像は見られないが、温度・湿度の変動や、放電、トナー帯電量変動、転写圧力過多、静電反発力等の要因でまれに発生する。高画質の達成にはこれらの画像劣化を防止する事が不可欠である。本研究では転写チリ（単色）を対象とし、平行平板モデル実験と3次元シミュレーションで、転写チリの解析を行なったので報告する。

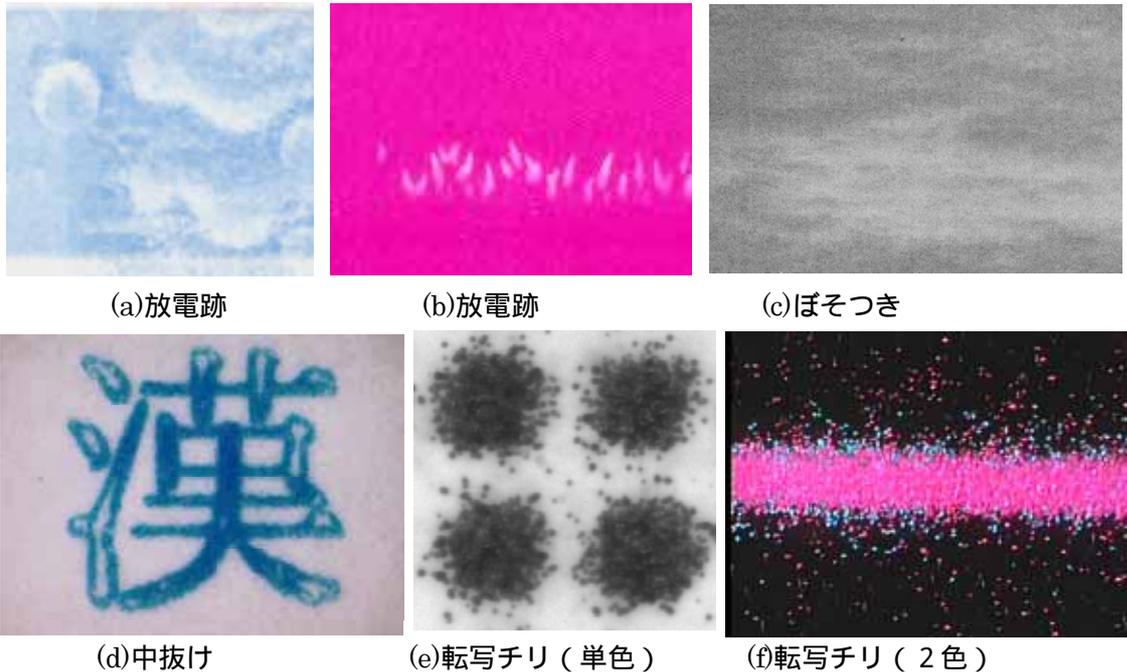


図4 転写プロセスにおける画像劣化の例

#### 5 . モデル実験

##### 5 . 1 モデル実験機構成

計算対象としたモデル実験装置と結果を示す。図5は擬似感光体と転写ベルト間のトナー転写挙動を観察するためのモデル実験機の概略図である。疑似感光体としてガラス基板上にITO電極と、その上にポリカーボネート膜（厚さ約 $3\mu\text{m}$ ）を形成した。最初に現像器で疑似感光体上にトナーを付着させる。図6にITO電極構成を示す。図7は電極Aに画像部電位( $V_1=-100\text{V}$ )、電極Bに非画像部電位( $V_2=-300\text{V}$ )を印加してトナー（シアントナー）を現像した結果である。次に疑似感光体を移動させて、下電極上の

ベルトと平行に配置する。下電極に転写バイアスを印加させながらベルトを擬似感光体に近づけ、トナーを転写させる。非画像部電位  $V_2$  を 0V から -600V まで変えて転写を行い、転写チリと非画像部電位の関係を観察した。

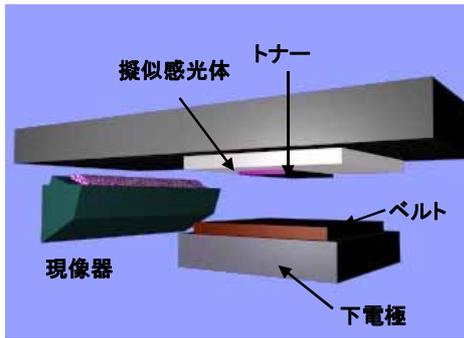


図5 実験装置概要

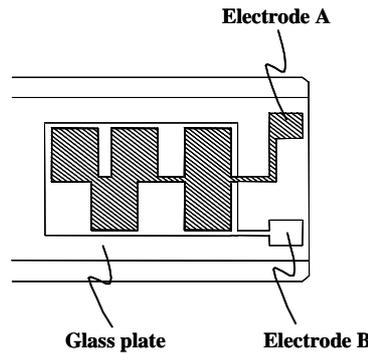


図6 擬似感光体構成

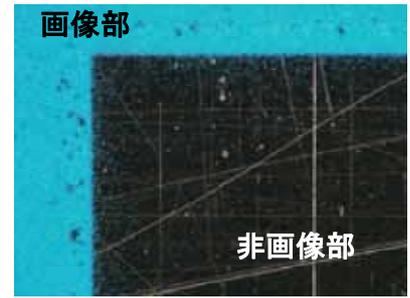


図7 現像後のトナー画像

## 5.2 転写チリ実験結果<sup>(4)</sup>

転写時の非画像部電位と転写チリの関係を観察した結果を図8に示す。チリの良否は、非画像部へ飛散したトナーの面積の和として評価した。値が大きいほど、チリが多いことを示している。図は画像部付着量が  $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$  と  $0.7\text{mg}/\text{cm}^2$ 、転写バイアス 400V の場合の結果である。付着量が多く、また非画像部電位が 0V に近いほどほど転写チリが多いことがわかる。

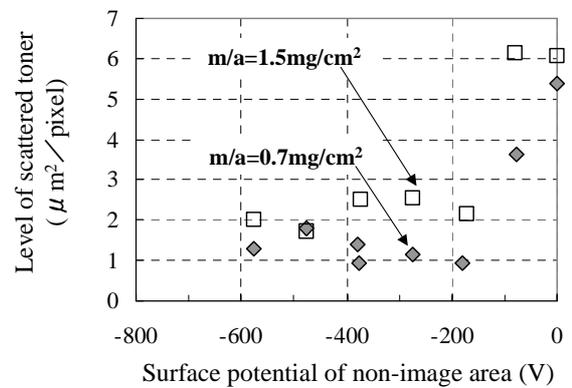


図8 トナーチリ量と非画像部電位の関係

## 6. シミュレーション

### 6.1 シミュレーションモデル

転写チリの傾向を解析するために、モデル実験と同条件でトナー挙動シミュレーションを実施した。2次元モデルでのシミュレーションはいくつか報告されているが<sup>(5)</sup>、より詳細な解析のために3次元で計算を行った<sup>(6)</sup>シミュレーションは4つの部分からなり、電界計算、放電計算、トナー挙動計算、転写空隙を狭めメッシュ再分割、を繰り返す。トナー挙動を計算する場合には、トナー電荷を考慮して電界計算を行い、トナー位置の電界  $E$  とトナー帯電量  $Q$  から  $F=QE$  でトナーに働く力を算出し、運動方程式を解く方法が正攻法であろう。しかしながらこの場合にはトナーよりも十分に小さなメッシュ分割が必要となり、3次元解析では膨大なメッシュ分割と計算時間を要する。本解析ではトナーのない状態（すなわち擬似感光体とベルトのみ）で各電極に電圧を印加した場の電界計算を行い、次に各トナー電荷と鏡像電荷の影響を足し合わせるといった手法を用いた。ただし、複数の誘電体が存在する場合、鏡像電荷の考慮が非常に複雑になるため、誘電体層を誘電厚さ（=厚さ/比誘電率）が同じ空気層と置き換えて上下の電極間に誘起される鏡像電荷として考慮した。本手法により計算メッシュの大きさが数  $\mu\text{m}$  程度でもトナーに働く電界が精度良く計算可能となった。放電は擬似感光体とベルト間で垂直方向に発生すると考え、パッセン則から放電発生の有無を判断した。放電が発生した場合には、擬似感光体とベルト間の電位差が放電発生電圧以下になるように正負電荷を移動させた。トナーは径と帯電量を考慮し、さらに擬似感光体とトナー間には付着力を設定しており、ベルト方向の電界による力が付着力より大きくなるとトナーが移動を始めるとした。トナー間の衝突は転写チリの主原因ではないと仮定し、衝突を無視して、ニュートンの運動方程式からトナー挙動を計算した。ただしトナーが不均一に帯電している場合には、近接時のクーロン反発力が理論値よりも大きくなると仮定し、接触時のみクーロン反発力に補正係数を乗じてトナーに働く力を算出した。またベルトに衝突したトナーは反発せずに停止すると仮定している。次に擬似感光体を所定の速度で下に移動させ、メッシュ再分割を行い、再び電界計算からの手順を繰り返していく。擬似感光体とベルト間空隙が  $14\mu\text{m}$  になった時点で計算終了とした。

## 6.2 計算条件

計算領域全体を図9に示す。計算領域は転写方向をZ軸にとり、X軸方向に700 $\mu\text{m}$ 、Y方向200 $\mu\text{m}$ である。X方向に幅300 $\mu\text{m}$ の画像部を設けている。(b)は画像エッジ部((a)の白点線枠)の拡大図である。ベルトは厚さ50 $\mu\text{m}$ 、比誘電率9の絶縁体とし、ベルト裏面に転写バイアス400Vを印加した。電極Aに画像部電位として $V_1=-100\text{V}$ 、電極Bに非画像部電位として $V_2=0$ から-800Vを印加した。空隙は初期275 $\mu\text{m}$ から14 $\mu\text{m}$ までを速度300mm/sで移動させた。

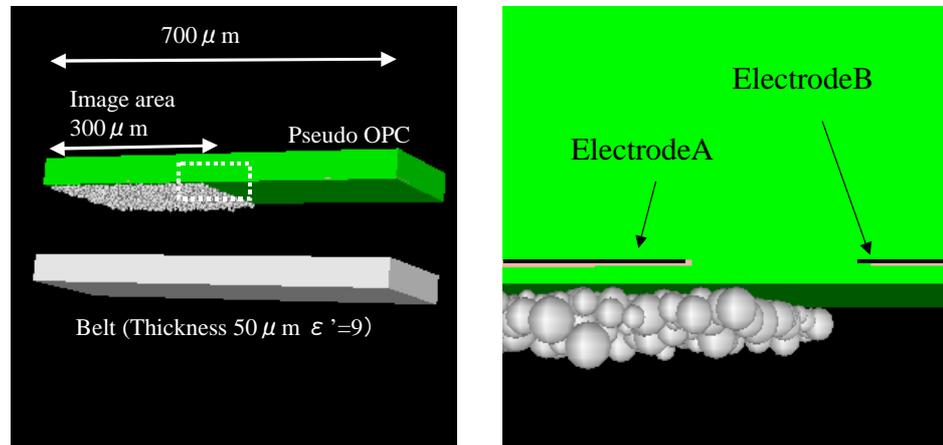


図9 計算モデル

(a) 計算領域全体

(b) トナー層の拡大図

## 6.3 トナー飛翔計算結果

図10 トナー付着量1.02mg/cm<sup>2</sup>、平均帯電量-21 $\mu\text{C/g}$ 、非画像部電位 $V_2$ が0Vと-300Vの場合のトナー挙動である。擬似感光体上トナーは白、転写したトナーは緑、飛翔中のトナーは青で示している。空隙200 $\mu\text{m}$ で、既にトナーは飛翔しており、また $V_2=-300\text{V}$ では空隙14 $\mu\text{m}$ で非画像部に放電が発生している様子がわかる。図11 非画像部電位を変えた場合の転写後の画像である。非画像部電位が0~-100Vでは激しくトナーが散っているが、-300~-400Vではトナーチリが抑制されていることがわかる。

## 7 考察

画像部から外にはみ出しているトナーの個数をカウントした結果を図12示す。図8実験結果に対応している。非画像部電位 $V_2$ が0Vに近い場合には非常に多くのチリが観察されるが、非画像部電位が負に大きくなるとチリが少なくなる傾向は一致している。この傾向は実機において、PTL照射によって転写チリが悪化するという経験的な知見を裏付けるものでもある。計算、実験ともに放電は非画像部電位 $V_2=-200\text{V}$ 以下で発生しているが、図10ら明らかのように放電が発生する前に、すでにかかなりのトナーが飛散していることから、前報告で述べていた放電によるチリ抑制効果は考えにくい。非画像部電位が負に大きくなると、電極が形成する電界からの力がトナーの静電反発力に打ち勝つため、チリが抑制されたと考えられるべきである。逆に言えば、非画像部電位が0Vに近い場合には、静電ポテンシャルによるトナー押さえ込み効果が弱いため、プレ転写とクーロン反発力によってチリが形成されると考えられる。

## 8 結論と今後の展開

モデル実験をシミュレーションで解析した結果、本実験条件では放電が発生する前に転写が始まりクーロン反発力で転写チリとなっていることが明らかになった。ただし本解析では放電による影響を詳しく考察していない。今後はモデル実験機による観察とあわせて放電のチリへの影響を研究する予定である。さらに実機を想定し、静電潜像上でのトナーの転写挙動をシミュレーションで詳細に解析していく。

## 参考文献

- 1) 小田富士雄, 鬼頭司朗: 「複写機の基本特許、特許申請業務の費用と時間の節約が動機」, 日経エレクトロニクス, 5.15, 473(1989).
- 2) 電子写真学会編: 電子写真技術の基礎と応用, コロナ社.
- 3) 電子写真学会編: 続電子写真技術の基礎と応用, コロナ社.
- 4) 高橋朋子, 岩井貞之, 飯野綾子, 小杉秀樹: Japan Hardcopy2003, pp53-56(2003).
- 5) N.Nakayama, H.Mukai: Proceedings of Pan-Pacific Imaging Conference/Japan Hardcopy '98, pp261-264 (1998).
- 6) 門永雅史, 高橋朋子, 飯村治雄: 「3次元転写チリシミュレーション」, 日本画像学会誌, 45, 3, p220-229(2006).

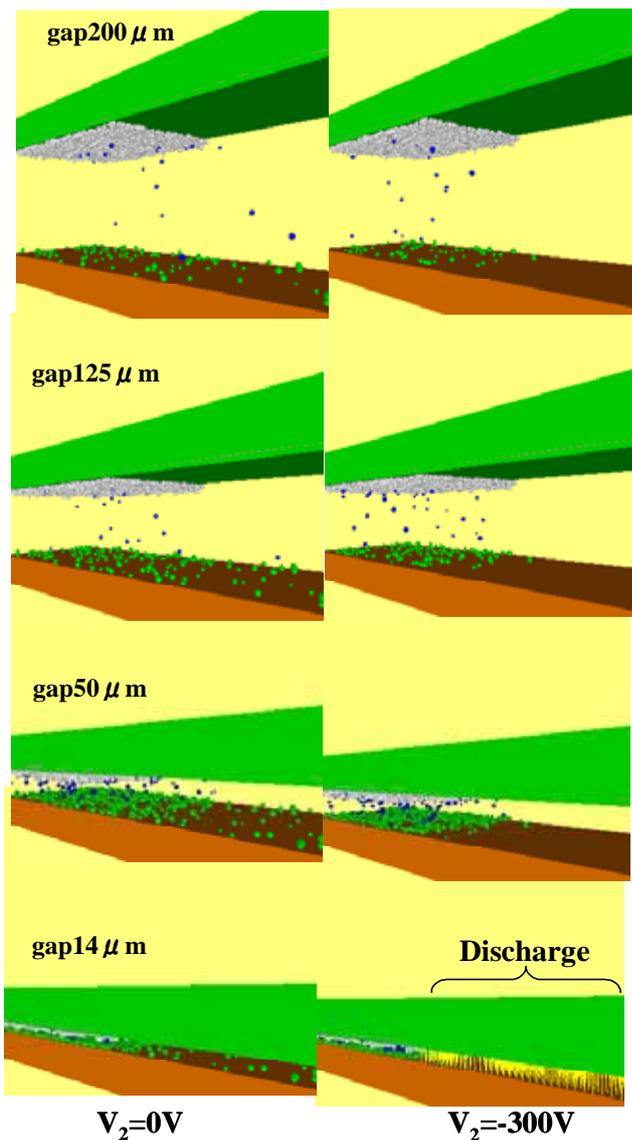


図 10 転写チリシミュレーション結果

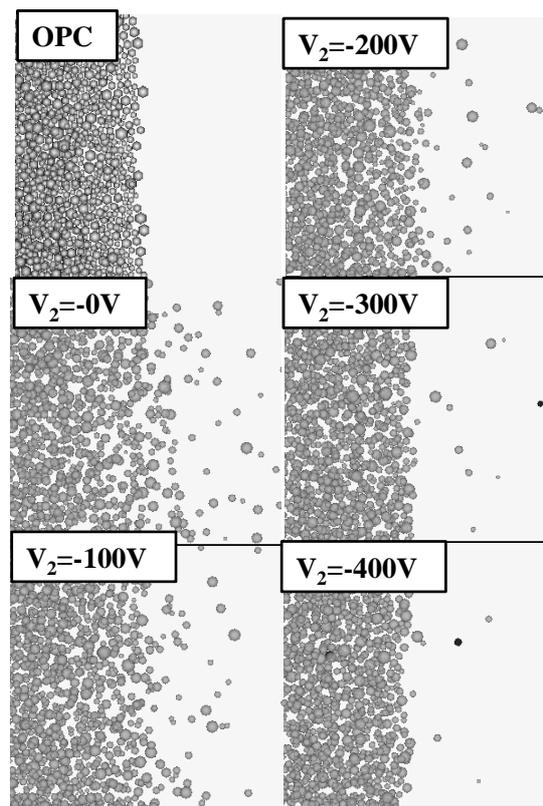


図 11 非画像部電位とトナーチリの様子

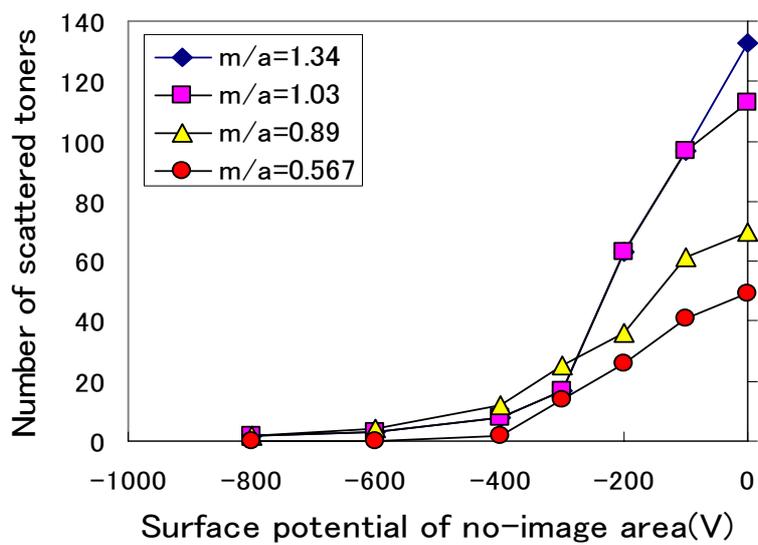


図 12 画像部電位とトナーチリ量の関係 (シミュレーション)