

電子写真プロセスにおけるトナー粒子  
の付着力と転写に関する研究

Study on Adhesion and Transfer of Toner  
Particles in Electrophotography Process

2013年7月

早稲田大学 基幹理工学研究科

飯村 治雄

Haruo IIMURA

## 目次

1 緒言	1
1-1 研究の背景	1
1-2 電子写真技術	4
1-2-1 帯電	4
1-2-2 露光	4
1-2-3 現像	5
1-2-4 転写	5
1-2-5 定着	5
1-2-6 クリーニング	5
1-2-7 除電	6
1-3 トナー付着力	6
1-3-1 トナー	6
1-3-2 転写プロセスとトナー付着力	8
1-3-3 トナー付着力に関する従来研究	9
1-4 転写	10
1-4-1 転写プロセス	10
1-4-2 転写プロセスの課題	17
1-4-3 転写プロセスに関する従来研究	18
1-4-4 転写に関する解析技術	19
1-5 本研究の内容	20
2 トナー粒子の付着力	22
2-1 研究の目的	22
2-2 付着力の測定技術	22
2-3 トナーの特性	26
2-3-1 トナーの構成	26
2-3-2 外添剤被覆率	27
2-4 非静電付着力	28
2-4-1 非静電付着力と外添剤被覆率の関係	28
2-4-2 非静電付着力のモデル	30
2-4-3 非静電付着力に対する外添剤の効果	31
2-5 静電付着力	34

2-5-1	静電付着力のトナー帯電量依存性	34
2-5-2	静電付着力と外添剤被覆率の関係	37
2-5-3	静電付着力のモデル	39
2-5-4	静電付着力に対する外添剤の効果	40
2-6	非静電付着力と静電付着力の比較	41
2-7	まとめと今後の課題	43
3	単色画像における転写チリの解析	44
3-1	研究の目的	44
3-2	トナー挙動の観察方法	44
3-2-1	転写モデル実験装置	44
3-2-2	転写チリ発生過程の観察方法	46
3-2-3	転写チリ発生過程の定量化方法	46
3-3	転写チリ発生過程の可視化	47
3-4	転写チリと転写パラメータの定量的関係	50
3-4-1	転写チリと転写電位の関係	50
3-4-2	転写チリと非画像部電位の関係	52
3-4-3	転写チリとトナー付着量の関係	55
3-4-4	転写チリとトナー付着力の関係	59
3-5	トナー挙動のシミュレーション方法	61
3-5-1	電界計算	62
3-5-2	トナー挙動計算	64
3-5-3	シミュレーションの流れ	66
3-6	転写チリ発生過程のシミュレーション	66
3-7	考察	70
3-7-1	単色画像における転写チリの発生メカニズム	70
3-7-2	転写チリに対する転写パラメータの影響	75
3-8	単色画像における転写チリの抑制	80
3-9	まとめと今後の課題	81
4	色重ね画像における転写チリの解析	82
4-1	研究の目的	82
4-2	重ねチリ発生過程の観察及び重ねチリ発生量の定量化	82
4-3	重ねチリ発生過程の可視化	84
4-4	重ねチリと転写パラメータの定量的関係	86
4-4-1	重ねチリ発生量とトナー帯電量及び付着量の関係	86

4-4-2	重ねチリに対するトナー付着力の影響	89
4-4-3	重ねチリ発生量とトナー層表面電位の関係	90
4-5	トナー挙動のシミュレーション方法	92
4-6	重ねチリのシミュレーション	93
4-6-1	重ねチリ発生過程	93
4-6-2	重ねチリと転写パラメータの関係	95
4-7	考察	97
4-7-1	色重ね画像における転写チリの発生メカニズム	97
4-7-2	重ねチリに対する転写パラメータの影響	101
4-8	色重ね画像における転写チリの抑制	105
4-9	まとめと今後の課題	105
5	中抜け現象の解析	107
5-1	研究の目的	107
5-2	中抜けの実験方法と定量化	107
5-3	中抜けと転写パラメータの定量的関係	111
5-3-1	中抜けと転写圧力の関係	111
5-3-2	中抜けに対するトナー特性の影響	112
5-4	中抜けとトナー凝集性の関係	114
5-4-1	圧縮トナー層のトナー凝集性評価方法	114
5-4-2	圧縮トナー層のトナー凝集性に対するトナー特性の影響	115
5-4-3	圧縮トナー層のトナー凝集性と中抜けの関係	117
5-5	考察	118
5-5-1	中抜けの発生メカニズム	118
5-5-2	中抜け発生条件の検証	122
5-6	中抜けの抑制	125
5-7	まとめと今後の課題	125
6	結言	127
	謝辞	132
	参考文献	133
	研究業績	140

# 第1章 緒言

## 1-1 研究の背景

近年、MFP(Multi Function Printer)等の画像形成装置は、情報の可視化だけではなく、情報の取り込み、伝送等の様々な役割を担うようになっており、現代の情報関連機器における重要性が増してきている。画像形成装置は、その用途や使用環境に合わせて、大きさや画像出力速度等の異なる様々な形態の装置が製品化されているが、画像を形成する方式としては主にインクジェット方式と電子写真方式に集約されている。インクジェット方式は、紙等の記録媒体に直接微小な液滴を飛ばして付着させているため、装置構成を簡素化できるために低コストであり、普通紙に対してはインクがにじみ易いがコート紙には高品質な画像を形成することができる。このため、一般家庭では写真等の出力機器としてインクジェット方式を用いた画像形成装置が広く普及している。一方、電子写真方式は、以下に説明するように複雑なプロセスを経て着色粉体(トナー)を記録媒体に付着させているため、インクジェット方式よりも高コストであるが、普通紙に対しても高品質な画像を形成でき、画像出力を高速化できるという優れた特性を有する。このため、電子写真方式を用いた画像形成装置はオフィス等での情報出力機器として用いられている。

ここで、電子写真方式による画像形成について簡単に説明する。電子写真方式では、図1-1に示すような複数のサブプロセスを経て画像が出力される。まず、帯電プロセスにおいて、光導電性を有する感光体表面を均一に帯電し、露光プロセスにおいて、原稿の濃淡および位置情報に対応するように光照射を行い、感光体上に静電的な画像(静電潜像)を形成する。つぎに、現像プロセスにおいて、帯電したトナーを感光体上に付着させて静電潜像に対応するトナー画像を形成し、転写プロセスにおいて、感光体上のトナー画像を記録媒体に転写する。さらに、定着プロセスにおいて、トナーを加熱溶融して記録媒体上のトナー画像を固定化する。転写されずに感光体上に残ったトナーはクリーニングプロセスで除去・回収され、除電プロセスで感光体上の残留電荷が除電され、再び帯電プロセスに戻る。

このように電子写真方式では複雑なサブプロセスを経て画像が形成されており、高画質化、高安定性、高耐久性、環境負荷低減等、年々高度化する要求に対応するには、各サブプロセスとプロセス全体の性能向上が必要であり、継続的な研究開発が行われている。これらの画像形成装置に対する要求の中で、特に画像の高画質化については、電子写真方式の画像形成装置の印刷分野への新たな展開等により求められる品質がより高度化し、重要な課題になっている。

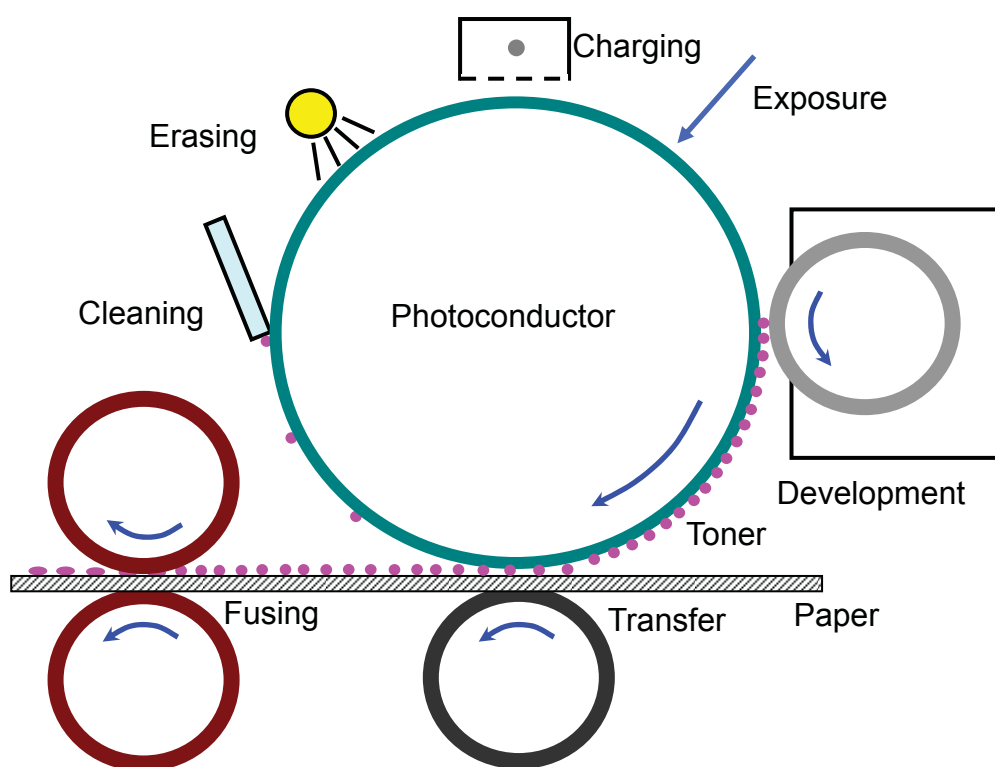


Fig.1-1 Schematic diagram of electrophotography process.

電子写真プロセスで高品質な画像を形成するには、上流のサブプロセスである現像プロセスにおいて静電潜像に忠実なトナー画像を形成し、下流のサブプロセスである転写および定着プロセスにおいて、トナー画像が劣化することなく記録媒体に移動して固定されることが必要である。しかし、実際には様々な要因によって画像の劣化が発生するため、画像劣化の抑制は電子写真プロセスにおける重要な技術課題となっている。画像の劣化現象には様々な現象があるが、図 1-2 に示すように画像の周囲にトナーが散乱する現象があり、画像周囲に多くのトナーが付着すると画像の輪郭が不鮮明になる。この現象は主に転写プロセスで発生することが明らかになっており、「転写チリ」と呼ばれている。また、転写チリと同様に転写プロセスで発生する重要な画像劣化現象として、図 1-3 に示すように細線や文字等の画像の一部が欠ける現象があり、主に画像の中央部が欠けるため、「中抜け」と呼ばれている。転写チリと中抜けは、電子写真方式の画像形成装置で慢性的に発生する画像劣化現象で、高画質化にはその抑制が必須となっている。

本研究では、この重要な画像劣化現象である転写チリと中抜けを抑制するために、現象のメカニズム解明と抑制指針の獲得を目的として系統的研究をおこなった。画像劣化現象が発生する物理過程を解明するために、可視化技術やシミュレーション技術を用いて、転写過程におけるトナーの挙動を明らかにした。また、画像劣化現象の発生に関与するトナーの物理特性を計測し、画像劣化現象の発生モデルを検証した。さらに、画像劣化現象と

様々な要因との定量的関係について検討し、抑制指針を明らかにした。転写過程でのトナー挙動を計算するには、トナーへ作用する様々な力を定量化する必要があるが、付着力は理論的な定量化が困難である。このため、本研究では、まずトナー付着力の測定技術を確立し、転写プロセスに関与するトナー付着力を定量化した。さらに、画像劣化現象に対する影響が大きいと考えられるトナー付着力の制御を目的として、付着力の作用メカニズムに関する系統的研究をおこなった。

以下のセクションでは、電子写真プロセスの概要、トナー付着力の従来研究、転写プロセスの課題と従来研究、および本研究の内容について述べる。

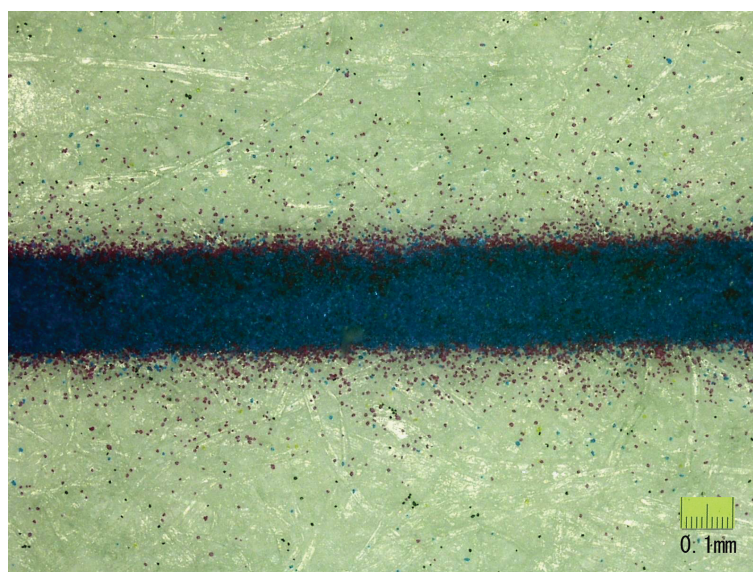


Fig.1-2 Photograph of toner scattering in line image of electrophotography.



Fig.1-3 Photograph of hollow defects in character image of electrophotography.

## 1-2 電子写真技術<sup>(1-1)・(1-7)</sup>

電子写真方式は複数のサブプロセスを経て画像が出力されるが、本セクションでは電子写真プロセスを構成する各サブプロセスについて概略を述べる。

### 1-2-1 帯電

帯電プロセスは、感光体表面に電子またはイオンを付与して、感光体を均一で一定の帯電電位にするプロセスである。電子またはイオンを付与する物理現象としては主に放電現象が用いられる。放電現象を用いた帯電装置としては、金属ワイヤーに高電圧を印加することによって発生するワイヤー近傍の強電界によって空気をイオン化するスコトロン帯電器、もしくはローラ状の電極と感光体間の空隙放電を利用するローラ帯電装置が用いられている。

### 1-2-2 露光

露光プロセスは、感光体に光を照射して静電潜像を形成するプロセスである。図1-4に負帯電の積層型感光体の構成を示す。負に帯電した感光体に光が照射されると、キャリア発生層(CGL : Carrier Generation Layer)で正負のキャリアが発生し、キャリア輸送層(CTL : Carrier Transfer Layer)内を正キャリアが移動して感光体表面の帯電電荷を中和するため、光照射部と未照射部の帯電電位が異なり、原稿に対応するように光を照射することによって感光体上に静電潜像が形成される。光を照射する方法としては、レーザーダイオード(LD : Laser Diode)で発光したレーザー光を高速回転するポリゴンミラーで感光体の軸方向(主走査方向)に走査するレーザー走査方式方法や、主走査方向にアレイ状に配置したLED(Light Emitting Diode)を用いるLEDアレイ方式がある。

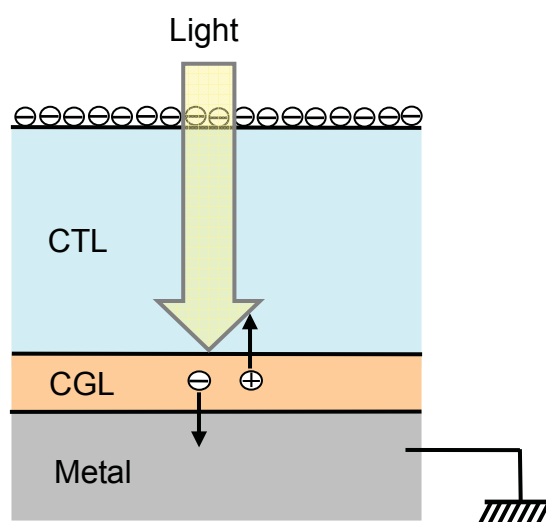


Fig.1-4 Schematic diagram of photoconductor.



### 1-2-3 現像

現像プロセスは、感光体の静電潜像上に帯電したトナーを付着させてトナー画像を形成するプロセスである。様々な現像方式が提案されているが、トナーとキャリアの二種類の粒子を用いる二成分現像方式とトナーのみを用いる一成分現像方式に分類される。二成分現像方式では、多磁極の磁石を内蔵したスリーブ上に保持されたトナーとキャリア(磁性粒子)の混合粉体(現像剤)が、スリーブの回転によって現像領域に搬送され、キャリアとの摩擦によって帯電したトナーが、感光体とスリーブ間の現像電界によってキャリアから分離して静電潜像上に現像される。また、一成分現像方式では、現像スリーブに供給されたトナーが、ブレードによって摩擦帯電され、現像領域で現像電界によって静電潜像上に現像される。図1-4のような感光体表面に負帯電トナーが現像される場合、負の帯電電位が低い光照射部に現像される。

### 1-2-4 転写

転写プロセスは、感光体上に現像されたトナー画像を紙などの記録媒体に転写するプロセスである。感光体上の帯電トナーは、感光体と記録媒体間に形成された転写電界によって記録媒体側に移動する向きの静電気力を受け、記録媒体上に転写する。転写電界は、記録媒体の裏面にコロナ帯電器等により付与される帯電電荷、または記録媒体の裏面に接触する導電性のローラに印加される電圧によって形成される。感光体上のトナーを記録媒体に転写するプロセスとしては、上記のように感光体から直接記録媒体に転写する直接転写方式と、感光体からベルトやローラ等の中間転写体に転写し、中間転写体から記録媒体に転写する中間転写方式があり、カラー画像を形成するプロセスではこの中間転写方式が採用される場合が多い。本研究の対象である転写プロセスについては、1-4で詳細に述べる。

### 1-2-5 定着

定着プロセスは、転写されたトナー画像に熱と圧力を印加して記録媒体(通常は紙)に固定するプロセスである。記録媒体上のトナー画像に熱と圧力が印加されると、トナーが変形・溶融して記録媒体へ浸透し、冷却後に固化して記録媒体にトナー画像が固定される。熱と圧力を印加する方式としては、内部に熱源を有する定着ローラと圧力印加用の加圧ローラ間に記録媒体を挟む熱ローラ定着方式が広く採用されている。熱源としてはハロゲンランプや電磁誘導加熱等が用いられている。

### 1-2-6 クリーニング

クリーニングプロセスは、転写プロセスで転写されずに感光体や中間転写媒体上に残留したトナーを除去するプロセスである。トナーを除去する力としては機械的な力や静電気力を用いるが、ゴムブレードを感光体や中間転写媒体に押し当ててトナーをかきとるブレードクリーニング方式が広く採用されている。

### 1-2-7 除電

除電プロセスは、画像形成後の感光体上に残留した帯電電荷を除電するプロセスである。除電する方法としては、光を照射する方式と放電を用いる方式がある。通常、除電装置は帯電プロセスの前に設置するが、転写性やクリーニング性を向上するために、転写やクリーニングプロセスの前に設置する場合もある。

## 1-3 トナー付着力

本セクションでは、まず電子写真プロセスで画像を形成する着色粒子であるトナーについて述べる。つぎに、トナー付着力と本研究の対象である転写プロセスとの関係、トナー付着力に関する従来研究と課題について述べる。

### 1-3-1 トナー<sup>(1-5)(1-6)(1-8)</sup>

電子写真プロセスにおける画像を構成しているトナーは、潜像形成以降のすべてのプロセスに関与しており、各サブプロセスで要求される機能に対応するように、結着樹脂、着色剤、電荷制御剤、外添剤等の様々な材料から構成されている。結着樹脂はトナーの構成材料の中で占める割合が最も高く、定着時の熔融特性や帯電特性等の要請から、スチレン-アクリル重合体やポリエステル等が用いられている。着色剤は主に有機顔料が用いられ、結着樹脂に対する高分散性が求められる。電荷制御剤(CCA : Charge Control Agent)はトナーの帯電特性を調整するために添加され、金属錯体等が用いられている。外添剤はトナーの流動性を向上するためにトナー表面に付着させるナノサイズの微粒子で、シリカ、酸化チタン等の無機微粒子または有機微粒子が用いられる。外添剤はトナーの流動性だけでなく、帯電性にも影響を及ぼしている。

トナーの製造方法には、構成材料を加熱・混練し、冷却後に粉碎・分級して粒子を作製する粉碎法と、構成材料を内包する粒子を液相中で重合する重合法がある。粉碎法で作製されたトナーのSEM(Scanning Micro Scope)画像を図 1-5 に示すが、図のように形状は不定形となる。これに対して、重合法では図 1-6 のような球形トナーを含めて様々な形状のトナーが作製される。上記のどちらの製造法でも生成されるトナーの粒径は均一ではなく、粒径には必ず分布が生じる。また、粒径、構成材料の含有量や分散状態が粒子毎に異なるため、トナーの帯電量にもばらつきが生じる。このように、トナーを特長づけるには特性の平均値だけではなく、分布も重要となる。

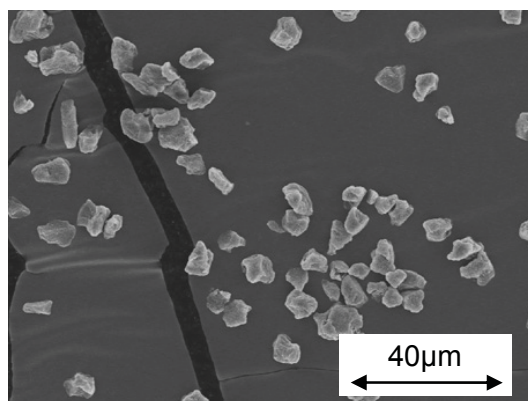


Fig.1-5 SEM image of pulverized irregularly shaped toner particles.

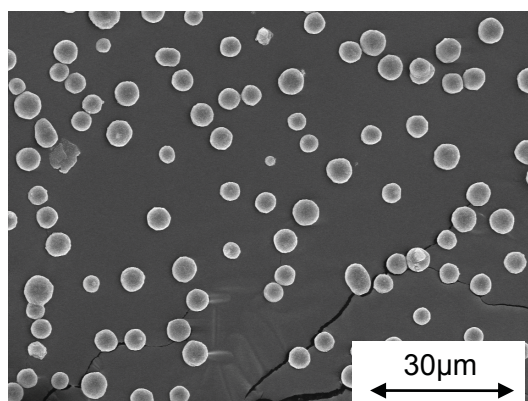


Fig.1-6 SEM image of chemical spherical toner particles.

## 1-3-2 転写プロセスとトナー付着力

電子写真プロセスでは、構成部材間でトナーの移動が繰り返されるが、トナーの分離や付着の際にはトナーと部材間で必ず付着力が作用しており、トナーの付着力は電子写真プロセスの性能を左右する重要な特性値である。本研究の対象である転写プロセスにおいても、トナー付着力は転写特性に大きな影響を及ぼしている。例えば、転写ベルトを用いた中間転写方式の転写プロセスでは、図 1-7 のようにトナーと感光体間付着力、トナーと中間転写ベルト間付着力、およびトナー間付着力が作用しているが、トナーと感光体間の付着力やトナーと中間転写ベルト間の付着力が大きいと、トナーが感光体や中間転写ベルトから分離しにくくなり、転写前のトナー量に対する転写トナー量の比率である転写率が低下する。また、本研究の対象である「中抜け」に、転写圧力によるトナー層の圧縮によるトナー間付着力の増大が関与していることが示されている<sup>(1-9)・(1-11)</sup>。逆に、トナー付着力が小さいと、本研究の対象である「転写チリ」が悪化することが報告されている<sup>(1-12)</sup>。このように、トナー付着力は転写特性に大きな影響を及ぼしており、付着力の制御は重要な課題となっている。トナー付着力を制御するためには、付着メカニズムの解明や付着力に關与する様々な要因との関係の明確化が必要である。

また、近年、電子写真プロセスにおける様々な現象を解析するには、シミュレーション技術が必須となっているが、シミュレーションを実施するには解析領域における作用力の定量化が前提となっており、転写プロセスにおいても、トナーの挙動が關与する現象を解析するにはトナーの接触する様々な部材とトナー間の付着力を定量化する必要がある。しかし、トナーは前記のように構成が複雑で、付着力は形状や構成材料等の様々な要因に依存するため、計算式によって定量化することが困難である。このため、計測によってトナーの付着力を定量化する必要であり、トナー付着力を精密に計測する技術を確立することが重要となる。

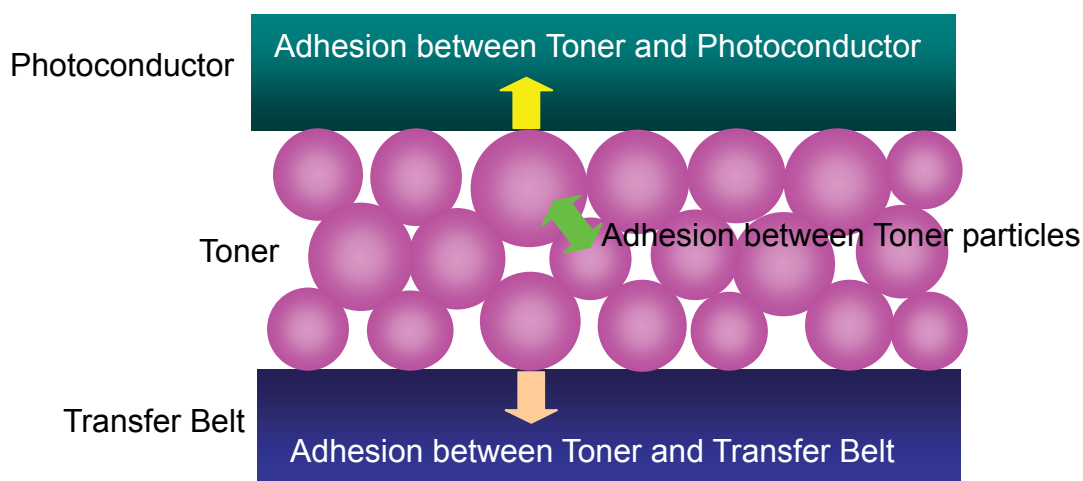


Fig.1-7 Adhesion of toner particles in transfer area.

## 1-3-3 トナー付着力に関する従来研究

これまでに、トナー付着力に関する様々な研究が行われているが、主な内容としては、帯電したトナーにおける静電的付着力と非静電付着力の寄与、静電付着力の物理モデル、トナー付着力と様々な因子の関係が挙げられる。

帯電したトナーの付着力は、帯電電荷に起因する静電付着力と帯電電荷に起因しない非静電付着力から構成される。帯電トナーの付着力に対する静電付着力および非静電付着力のどちらの寄与が大きいかという点に関して、いくつかの論文が発表されているが、付着力測定結果の食い違い等からこの議論は収束していない。例えば、帯電量の異なるトナーと感光体間の付着力を遠心分離法で測定した結果、Nebenzahl や Mastrangel らは、付着力の帯電量依存性が小さいために非静電付着力の寄与が大きいとしているが<sup>(1-13) (1-14)</sup>、Lee らは帯電による付着力の増大が大きいと静電付着力の寄与が大きいとしている<sup>(1-15) (1-16)</sup>。

非静電付着力の寄与が大きいとする理由の一つとして、静電付着力の大きさを均一帯電粒子の鏡像力の式で見積もると、計測値よりも大幅に小さくなる点が指摘されている。これに対して、大きな静電付着力を説明する理論が提案されている。Lee や Hays らは、トナーと付着面の接触領域を平行平板コンデンサーで近似し、トナー表面の不均一な帯電による局所的な高電荷密度領域を仮定することによって、大きな静電付着力を説明する Charge Patch Model を提案している<sup>(1-15) (1-17)</sup>。また、Feng らは、平行平板間の電界中の粒子に作用する静電力を有限要素法で計算し、静電付着力は、均一帯電粒子よりも、付着面近傍に局所的に帯電した粒子の方が大きいことを示している<sup>(1-18) (1-21)</sup>。

また、トナー付着力に影響を及ぼす因子と付着力の関係に関する様々な論文が発表されている。トナー付着力とトナー帯電量との関係では、トナーと感光体間の付着力が単位重量当たりのトナー帯電量  $Q/M$  が  $5 \mu C/g$  以下では  $Q/M$  の 1.6 乗に比例し、 $Q/M$  が  $5 \mu C/g$  以上では  $Q/M$  の 0.8 乗に比例する結果<sup>(1-15)</sup>、トナーとアルミニウム基板間の付着力が  $Q/M$  の 2 乗に比例する結果<sup>(1-22)</sup>が報告されている。

トナー付着力とトナーの粒径や形状の関係では、帯電トナーと感光体間の付着力が粒径に比例する結果<sup>(1-15)</sup>、帯電トナーとアルミニウム基板間の付着力が粒径の 1 乗～2 乗に比例する結果<sup>(1-22)</sup>が示されている。また、帯電した球形トナーと不定形トナーの付着力に差は無いが、未帯電の場合は不定形トナーよりも球形トナーの付着力が大きい結果が報告されている<sup>(1-23)</sup>。

トナーの表面に添加される外添剤がトナー付着力に及ぼす影響については様々な報告がある。Terao らは、外添剤が添加されたトナーと未外添のトナーについて非静電付着力の粒径依存性を計測し、外添トナーの粒径依存性が未外添トナーよりも小さいことを示している<sup>(1-24)</sup>。Akagi は、粒径の異なる外添剤を添加したトナーについて、トナーを金属板から分離する電界を計測し、外添剤粒径が大きいほど分離電界が低下することを示している<sup>(1-25)</sup>。Ott らは、表面処理、素材、粒径の異なる外添剤を添加したトナーについて、AFM(Atomic Force Microscope)を利用した測定法によって付着力を計測し、外添剤による付着力の違い

を報告している<sup>(1-26)</sup>。AFM を利用した測定法は、カンチレバーの先端にトナーを接着し、トナーを付着面に接触させ、分離時の作用力を計測する方法である。Gady らは、外添剤の添加量の異なるトナーについて付着力の計測と画像評価を実施し、外添剤添加量の増加と共に付着力が低下し、転写チリが増加することを報告している<sup>(1-12)</sup>。

この他に、トナーの特性ではなく、付着面の形状の影響についての報告があり、Mizes は、AFM 法により付着面の凹凸分布と付着力の面内分布を計測し、凹凸分布の偏差と付着力分布の偏差が対応していることを示している<sup>(1-27)</sup>。また、トナー付着力に対する環境の影響についての報告があり、Ott は、親水性と疎水性の外添剤を添加したトナーの付着力を AFM 法で計測し、親水性外添剤のトナーは付着力の湿度依存性が大きく、疎水性外添剤のトナーは湿度依存性が小さいことを示している<sup>(1-28)</sup>。Mizuguchi らも、AFM 法により付着面の表面粗さの増加とともに付着力が低下し、親水性粒子と疎水性粒子の付着力の湿度依存性が異なることを報告している<sup>(1-29)</sup>。

以上のように、これまでの研究では、帯電トナーに対する静電付着力と非静電付着力の寄与が明確になっておらず、各付着力に対するメカニズムの解明が不十分である。また、トナー付着力とその制御因子との関係についても更なる研究が必要であり、特にトナー表面構造を制御する外添剤はトナー付着力への影響が大きく、非静電付着力および静電付着力に対する外添剤の効果についての系統的な研究が必要である。

## 1-4 転写

本セクションでは、まず本研究の対象である転写プロセスと転写の基本的なモデルについて説明し、つぎに転写プロセスの課題と課題に対する従来研究、最後に転写プロセスに関する解析技術について述べる。

### 1-4-1 転写プロセス

転写プロセスは、感光体上に形成されたトナー画像を、直接または中間転写体を通して記録媒体に転写するプロセスである。図 1-8 に、転写ローラを用いた直接転写方式の説明図を示す。図のように、感光体上に現像されたトナー画像は、感光体の回転により感光体と記録媒体が接触する領域(転写ニップ)に接近する。転写ローラの電位によって感光体と記録媒体間に転写電界が形成され、転写電界による静電気力によって感光体上のトナーは記録媒体に移動する。転写電界は転写ローラの電位によって制御されるが、この転写電位は感光体上のトナー付着量に対する記録媒体上への転写トナー量の比率である転写率が最大となるように制御される。転写率は転写プロセスの性能を示す最も重要な指標であり、転写率と転写パラメータの関係や転写過程における転写率の変化について、簡易的な計算モデルを用いて説明する。

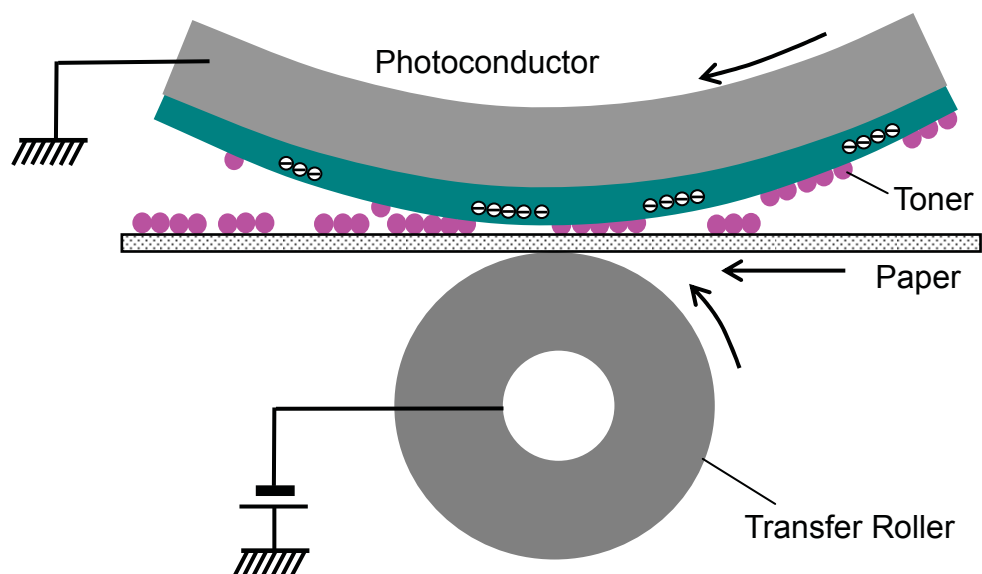


Fig.1-8 Schematic diagram of roller transfer process.

ベタ画像における転写電位と転写率の関係は、転写領域の各部材やトナー層を誘電体として近似する一次元多層構造モデル<sup>(1-30)</sup>を用いて解析的に求めることができる。ここでは、議論を簡略化するために、図 1-9 に示すように、トナー層と空気層以外の誘電体がない単純な構成で説明する。

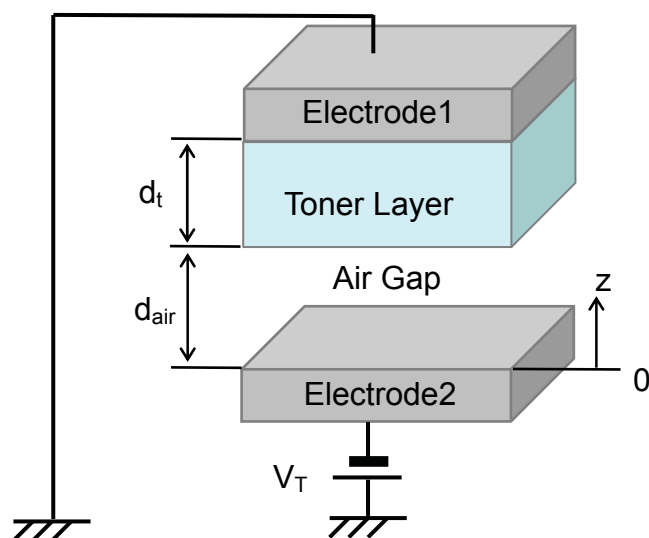


Fig.1-9 Schematic illustration of one-dimensional electric field calculation model in transfer process.

転写領域における電界は、トナー層を一定の体積電荷密度を有する誘電体層として、以下に示す一次元のポアソン方程式を解くことにより求めることができる。

$$\frac{d^2}{dz^2} \varphi_{air}(z) = 0 \quad (0 \leq z < d_{air}) \quad (1-1)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} \varphi_t(z) = -\frac{\rho}{\varepsilon_t \varepsilon_0} \quad (d_{air} \leq z \leq d_{air} + d_t) \quad (1-2)$$

ここで、 $\varphi_{air}$  は空気層の電位、 $\varphi_t$  はトナー層の電位、 $d_{air}$  は空気層の厚み(転写ギャップ)、 $\rho$ 、 $\varepsilon_t$ 、 $d_t$  はトナー層の体積電荷密度、比誘電率、厚み、 $\varepsilon_0$  は真空の誘電率を示している。空気層とトナー層の境界条件を式(1-3)～(1-5)に示す。ただし、 $V_T$  は電極 2 の転写電位を示し、空気層の比誘電率は 1 とした。

$$\varphi_{air}(0) = V_T \quad (1-3)$$

$$\varphi_t(d_{air} + d_t) = 0 \quad (1-4)$$

$$\frac{d}{dz} \varphi_{air}(d_{air}) = \varepsilon_t \frac{d}{dz} \varphi_t(d_{air}) \quad (1-5)$$

空気層の電界  $E_{air}$  は、式(1-1)を用いて式(1-6)のように求められ、 $z$  に依存せず、空気層内では一定の値となる。

$$E_{air}(z) = -\frac{d}{dz} \varphi_{air}(z) = E_{air} \quad (1-6)$$

一方、トナー層内の電界  $E_t$  は、式(1-2)および式(1-5)を用いて式(1-7)のように求められ、 $z$  に依存し、厚み方向に分布がある。

$$E_t(z) = -\frac{d}{dz} \varphi_t(z) = \frac{\rho(z - d_{air})}{\varepsilon_t \varepsilon_0} + E_t(d_{air}) = \frac{\rho(z - d_{air})}{\varepsilon_t \varepsilon_0} + \frac{E_{air}}{\varepsilon_t} \quad (1-7)$$

式(1-3)～式(1-7)より、電極間の電位差を求めると式(1-8)のようになる。



$$\begin{aligned}
 -V_T &= \varphi_t(d_{air} + d_t) - \varphi_{air}(0) = -\int_0^{d_{air}} E_{air} dz - \int_{d_{air}}^{d_{air}+d_t} E_t(z) dz \\
 &= -\frac{\rho d_t^2}{2\varepsilon_t\varepsilon_0} - E_{air} \left( d_{air} + \frac{d_t}{\varepsilon_t} \right)
 \end{aligned} \tag{1-8}$$

式(1-8)より、空気層の電界  $E_{air}$  は式(1-9)のように表わされ、 $E_{air}$  を式(1-7)に代入することにより、トナー層内の電界  $E_t$  は式(1-10)のように表わされる。式(1-11)の  $D$  は空気層とトナー層の誘電厚み(空気の厚みに換算した場合の誘電体層の厚み)の和を示している。

$$E_{air} = \frac{\left( V_T - \frac{\rho d_t^2}{2\varepsilon_t\varepsilon_0} \right)}{D} \tag{1-9}$$

$$E_t(z) = \frac{\rho(z - d_{air})}{\varepsilon_t\varepsilon_0} + \frac{\left( V_T - \frac{\rho d_t^2}{2\varepsilon_t\varepsilon_0} \right)}{\varepsilon_t D} \tag{1-10}$$

$$D = d_{air} + \frac{d_t}{\varepsilon_t} \tag{1-11}$$

まず、転写ニップ中( $d_{air}=0$ )における転写電位と転写率の関係について述べる。 $d_{air}=0$  における  $E_t$  は式(1-12)のようになる。

$$E_t(z) = \frac{\rho \left( z - \frac{d_t}{2} \right)}{\varepsilon_t\varepsilon_0} + \frac{V_T}{d_t} \tag{1-12}$$

トナーに作用する静電気力はトナーの電荷  $q$  と  $E_t$  の積  $qE_t$  で表され、負帯電トナーに対しては、 $E_t$  が正の場合は  $qE_t$  が負で静電気力は下向きに作用し、逆に  $E_t$  が負の場合は上向きに作用する。このため、トナー付着力等の静電気力以外の力を考慮しないと、トナー層は  $E_t=0$  となる位置  $z_s$  で分割され、 $z_s$  は式(1-13)のように表わされる。

$$z_s = \frac{d_t}{2} - \frac{V_T}{\left(\frac{\rho d_t}{\varepsilon_t \varepsilon_0}\right)} \quad (1-13)$$

分割前のトナー層厚  $d_t$  に対する電極 2 側の分割後トナー層厚  $z_s$  の比  $z_s/d_t$  を転写率  $\eta$  とすると、 $\eta$  は式(1-14)のように  $V_T$  に比例して上昇する。トナー層がすべて転写する電位  $V_T$  を  $V_{T1}$  とすると、 $V_{T1}$  は  $\eta=1$  により式(1-15)のように表される。転写率  $\eta$  と転写電位  $V_T$  の関係を図にすると、図 1-10 のようになる。

$$\eta = \frac{1}{2} - \frac{V_T}{\left(\frac{\rho d_t^2}{\varepsilon_t \varepsilon_0}\right)} \quad (1-14)$$

$$V_{T1} = -\frac{\rho d_t^2}{2\varepsilon_t \varepsilon_0} \quad (1-15)$$

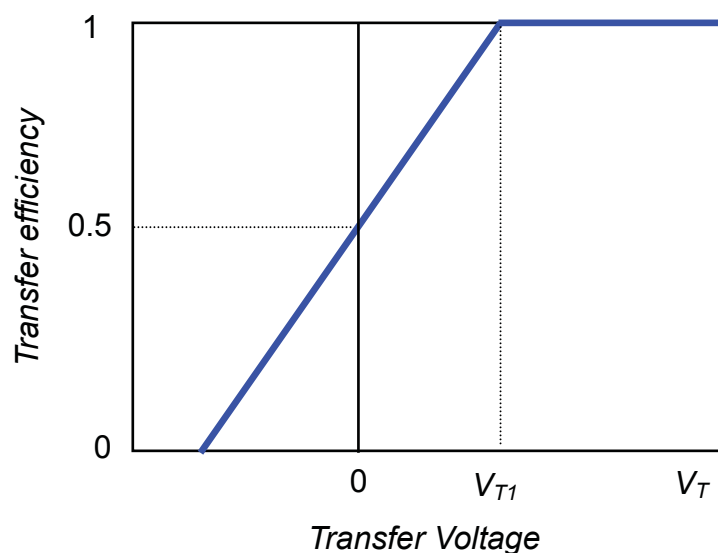


Fig.1-10 Relationship between transfer efficiency and transfer potential.

しかし、実際には転写電位が大きくなると、一定の転写電位以上で放電が発生するため、転写率が低下する。また、トナーには静電気力以外にトナー間付着力やトナーと転写部材間の付着力等が作用するため、十分な転写率を得るには  $V_{Tl}$  以上の転写電位が必要となる。実際の転写システムでは、転写電界が転写領域を構成する部材(感光体、記録部材、中間転写体、転写ローラ等)の特性値(厚み、抵抗、誘電率等)、静電潜像の電位等の様々な因子に依存するので、これらの因子に応じて最適な転写電位に設定される。

つぎに、転写過程における転写率の変化について説明するために、転写電位  $V_T$  を一定にして空気層の厚み  $d_{air}$  を変える場合について述べる。この場合、 $E_t=0$  となる  $z_s$  から電極 2 側の分割後トナー層厚  $z_s - d_{air}$  は式(1-16)のようになる。

$$z_s - d_{air} = -\frac{\varepsilon_0}{\rho \left( d_{air} + \frac{d_t}{\varepsilon_t} \right)} \left( V_T - \frac{\rho d_t^2}{2\varepsilon_t \varepsilon_0} \right) \quad (1-16)$$

$V_T$  が  $V_{Tl}$  の場合、式(1-17)のように、転写率  $\eta$  は空気層とトナー層の誘電厚みの和に対するトナー層誘電厚みの比になり、転写率は空気層厚みが薄くなると共に上昇する。

$$\eta = \frac{\left( \frac{d_t}{\varepsilon_t} \right)}{\left( \frac{d_t}{\varepsilon_t} \right) + d_{air}} \quad (1-17)$$

転写プロセスでは、図 1-8 のようにトナー画像が転写ニップに近づくにつれて転写ギャップが狭くなるが、上記のように転写ギャップ(空気層の厚み)の減少と共に転写率が上昇するため、転写ニップに接近する過程でトナー画像の一部が転写し、転写ニップ中で転写率が最大となる。転写ニップ通過後は転写ニップから遠ざかるにつれて転写ギャップが広くなるため、転写率は変化しない。

上記のように、ベタ画像の転写率については次元の多層構造モデルにより解析することができるが、文字やライン画像では、画像の周辺に電位の異なる非画像部領域があり、両者の境界領域は次元のモデルでは解析することができない。また、この節で用いた層構造モデルでは、本研究の対象である転写チリや中抜けのような現象は取り扱うことができず、トナーを粒子として扱う解析が必要となる。

つぎに、カラー画像形成における転写プロセスについて述べる。白黒画像の場合は、図 1-8 のように感光体から記録媒体に一度転写することにより画像を形成することができる

が、カラー画像の場合は、感光体上に現像された複数色のトナー画像をそれぞれ記録媒体に転写する必要がある。さらに、カラー画像を形成するには、複数色のトナー画像を記録媒体上で正確に重ね合わせる必要があり、転写する際に画像を精密に重ね合わせる記録媒体の搬送制御技術が要求される。しかし、記録媒体には様々な種類があり、それぞれ厚みや表面性等の特性が異なるため、様々な記録媒体に対する十分な重ね合わせ精度の確保が困難であり、各色のトナー画像の位置が合わずに色ずれした画像が生じやすい。これに対して、中間転写方式では、各色のトナーをベルトやローラ等の中間転写体上に重ねあわせ、中間転写体から記録媒体に一度に転写する。ベルトやローラ等は記録媒体に比べて制御しやすく、トナー画像を精密に重ね合わせることが可能で、色ずれのない画像を得ることができる。しかし、中間転写方式では、感光体から中間転写体への転写(1次転写)と、中間転写体から記録媒体への転写(2次転写)の2回の転写工程があるため、画像が劣化しやすい。図1-11に、複数の感光体を用いて各色のトナー画像を形成し、中間転写体として転写ベルトを用いたタンデム型中間転写ベルト方式の画像形成装置を示す。タンデム型中間転写方式は、各色のトナー画像が中間転写体上に順次転写されるため、カラー画像を白黒画像と同様の速度で形成することができる。また、中間転写ベルト方式は、装置の構成レイアウトの自由度が高く、カラー画像形成装置では広く採用されている。

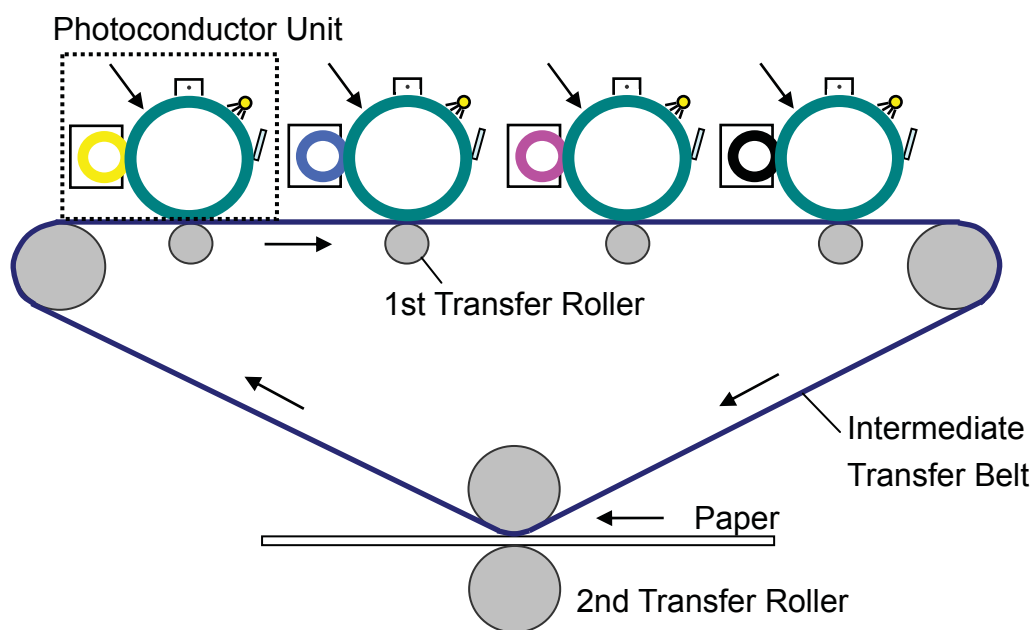


Fig.1-11 Schematic diagram of tandem type transfer process of color printer using intermediate transfer belt.

カラー画像の転写プロセスについても、基本的には白黒画像の場合と同様の解析が可能であるが、カラー画像の場合は複数色の画像を重ね合わせる場合があるので、トナー層を重ね合わせる際の解析が必要となる。カラー画像においても、文字やライン画像の周辺に転写チリが発生し、特に複数色の画像が重ね合わされた場合に顕著になる傾向にある。このため、カラー画像における転写チリを解析するには、トナー層の多重転写過程におけるトナー挙動を明らかにする必要がある。

#### 1-4-2 転写プロセスの課題

転写プロセスの役割は、現像プロセスで感光体上に形成された画像を、直接または中間転写体を経て記録媒体上に忠実に転写することであり、転写率が高く、感光体上の画像と記録媒体上の画像の変化が小さいことが求められる。しかし、様々な要因によって転写率の低下や画像が変化する画像劣化現象が生じるため、転写プロセスではこれらを抑制することが重要となる。

転写プロセスにおいてトナーを移動させる力は静電気力であり、転写電界が大きいほど高転写率となるが、放電の発生により電界の上限は制限される。また、トナーは接触している部材との間に付着力が作用しているため、トナーが付着部材から分離するには付着力以上の静電気力が必要となる。トナーの付着力は電子写真プロセス中でのトナーへのストレスにより増大する場合があります、このような場合は放電で制限される最大の静電気力で転写できないトナー粒子が増加するため、転写率が低下してしまう。また、記録媒体、特に紙は表面に凹凸があり、凸部ではトナー層と紙が接触するが、凹部では接触せずに空隙ができる。空隙がある場合は、ない場合よりも転写電界が低下するため、紙の面内で転写率のばらつきが生じやすい。特に、トナー付着力が大きな場合や紙の凹凸が大きな場合には、転写率のばらつきが大きくなり、画像の均一性が低下してしまう。

転写プロセスにおける画像劣化現象としては、転写チリ、中抜け、逆転写等の様々な現象がある。転写チリは、図 1-2 に示したように画像周辺にトナー粒子が付着して画像のにじみが生じる現象である。転写チリは、白黒画像でも発生するが、カラー画像、特に 2 色以上のトナー画像が重ねられた画像で顕著になる場合が多い。また、2 次転写において、特にベタ画像の周辺にトナー粒子が付着してしまう現象も確認されている。中抜けは、図 1-3 に示したように細線や文字等の画像の一部が欠けてしまう現象で、特に画像の中央部が欠けやすい。中抜けは転写時にトナー層に圧力がかかるローラ転写方式で発生しやすく、中抜けの発生には圧力によるトナー粒子の凝集が関与していると考えられている。中抜けの発生量は、転写圧力等のプロセス条件だけではなく、トナー特性、感光体や中間転写体の表面性等のサプライ条件にも依存する。逆転写はカラー画像形成時に転写画像の一部が感光体側に付着してしまう現象で、逆転写するトナー量が多いと、画像の濃度低下や廃棄トナー量の増加等の問題が生じる。逆転写は転写電圧または転写電流が大きい場合に発生しやすく、逆転写の発生には転写時の放電が関与していると考えられている。

以上のように、転写プロセスでは転写率低下や様々な画像劣化現象が課題となっているが、これらの課題に対する定量的な解析が不足しており、メカニズムの解明および抜本的対策が求められている。

### 1-4-3 転写プロセスに関する従来研究

電子写真プロセスの課題で述べた転写率や画像劣化現象に関して様々な研究が報告されている。転写率に関する研究としては、1次元層構造モデルを用いた解析が多数報告されている<sup>(1-30)-(1-45)</sup>。1-4-1項で述べたように、1次元層構造モデルでは、トナー層を一定の体積電荷密度を有する連続体として扱い、ポアソン方程式により電界のトナー層内分布を計算して転写率を求めている。さらに、Sasakiらは、2次元のシミュレーションによって感光体と転写ベルトの構成における転写率を求めている<sup>(1-46)</sup>。

転写チリに関する研究としては、その発生メカニズムについて様々なモデルが提示されている。Scheinらは、転写ニップ後の感光体と紙間の放電によって紙上トナー画像のエッジ部が乱れて画像が劣化するモデルを提示している<sup>(1-47)</sup>。Rushingらは、トナーの付着面に水平な方向の力がトナー層に作用し、トナー画像からトナーが移動するモデルを提示している<sup>(1-48)</sup>。Nakayamaらは、トナーが転写する際にトナー間の静電反発力によってトナーが広がるように飛翔して転写チリが発生する様子を、2次元の転写シミュレーションによって示している<sup>(1-11)</sup>。また、Nakayamaらは、多重転写におけるチリについても、転写トナー層から静電反発力によってトナーが飛翔して転写チリが発生することをシミュレーションによって示している<sup>(1-9)-(1-11)</sup>。また、Okamotoらは、多重転写における転写チリの発生量とトナー層の電荷量が比例関係にあることを実験的に示している<sup>(1-49)</sup>。また、Sugiyamaらは、2次転写において発生する転写チリをシミュレーションによって再現している<sup>(1-50)</sup>。

中抜けについては研究報告が少ないが、Katoらは、トナー層内の2次元電界分布を計算し、画像部の端部付近の電界が中央部よりも大きく、中央部が転写しにくいために中抜けが発生するモデルを提示している<sup>(1-51)</sup>。一方、Nakayamaらは、転写圧力によってトナー層が圧縮される場合に、画像部の端部よりも中央部の方が圧縮されやすく、圧縮されたトナーが凝集すると電界では転写できなくなって中抜けが発生することを、シミュレーションによって示している<sup>(1-9)-(1-11)</sup>。また、Inadaらは、中抜けの評価ランクが転写圧力の増加と共に悪化することを実験的に明らかにし、ライン画像中央部の圧力が高いことを計算で示している<sup>(1-52)</sup>。

逆転写については、Watanabeらが、トナーが中間転写ベルトからの電荷注入によって帯電極性が反転して逆転写するモデルを示している<sup>(1-53)</sup>。

以上のように、転写における画像劣化現象に関する研究報告は少なく、メカニズムの解明や発生要因との関係の明確化が不十分であり、更なる研究が必要である。本研究の対象である転写チリや中抜けについては、発生モデルが複数提案されており、可視化やシミュレーション等の解析技術を用いてモデルを検証する必要がある。また、転写チリおよび中

抜けと関連するパラメータとの定量的関係に関する報告が少なく、これらの関係を明確にして転写チリの抑制指針を明らかにする必要がある。

#### 1-4-4 転写に関連する解析技術

転写プロセスの技術開発では、1-4-2項で示した様々な課題の原因解明と対策立案のために、シミュレーション、可視化、計測等の解析技術の重要性が高まっている。本セクションでは、転写に関連する解析技術について述べる。

##### (1) シミュレーション技術

転写におけるシミュレーションは、主に電界計算と粒子挙動計算が対象となる。1-4-1項で述べたように、転写領域を構成する部材やトナー層を誘電体で近似する一次元層構造モデルでは、転写領域の電界を解析的に取り扱うことが可能で、物理的内容が把握しやすい。しかし、実際のプロセスでは、帯電電位は3次元で分布しており、転写領域の構成が転写部材の大きさや配置等に依存するため、一次元のモデルでは対応できない。このため、門永により二次元の転写領域についての電界シミュレーションが実施されている<sup>(1-54)</sup>。この二次元電界シミュレーションでは、転写領域における二次元の電荷移動も考慮されている。本研究の対象である転写チリ等について、トナーの運動を精密に計算するには、三次元の電界シミュレーションが必要になると考えられる。しかし、広い転写領域について三次元の電界計算を実施するには膨大な計算量が必要となるため、現実的ではない。そこで、本研究では、転写ニップ近傍における転写過程を、平行平板間の接離過程で近似し、平行平板間の三次元転写領域についての電界を計算する。

転写プロセスにおける粒子挙動の計算では、中山等により、トナー粒子の運動を個別に計算する個別要素法(DEM : Distinct Element Method)<sup>(1-7)(1-55)(1-56)</sup>を用いた中抜けおよび転写チリの解析が報告されており、トナーへ作用する様々な力が考慮され、運動方程式から時間ステップ毎の粒子の速度や変位が計算されている<sup>(1-9)(1-11)</sup>。本研究でも、個別要素法を用いて、平行平板間の三次元転写領域におけるトナー挙動を計算した。

##### (2) 可視化・計測技術

可視化技術は、様々な現象のプロセス解明やシミュレーションの検証等、物理現象の有用な解析技術である。電子写真プロセスに対する可視化技術の適用事例としては、現像領域におけるトナーやキャリアの運動<sup>(1-57)(1-58)</sup>、現像ニップ周辺の気流<sup>(1-59)</sup>等があり、現像プロセスの解析に用いられている例が多い。いっぽう、転写プロセスに対する適用事例の報告は少なく、放電光の観察事例<sup>(1-60)</sup>は報告されているが、詳細なトナー挙動の観察事例は報告されていない。図1-11のような画像形成装置では、様々な制約があり、転写プロセスにおけるトナー挙動を観察するのは困難である。そこで、本研究では、トナー挙動を観察できる転写モデル実験装置を開発し、転写チリの発生過程を可視化した。

また、転写プロセスの定量的解析を実施するには、転写プロセスに関連する構成部材の

電気特性や力学特性、トナーの粉体特性や帯電量等の計測技術が必須である。特に、トナー粒子挙動について精密なシミュレーションを実施するには、計算に必要な様々なパラメータに適切な値を設定する必要がある、本研究では転写プロセスに関連するトナー付着力の測定技術を確立した。

## 1-5 本研究の狙いと内容

電子写真プロセスで高品質な画像を形成するには、各サブプロセスにおける画像劣化を抑制することが重要である。本研究では、転写プロセスにおける重要な画像劣化現象である転写チリと中抜けを研究対象とする。特に、高品質な画像が要求されるカラー画像における画像劣化現象を抑制するために、カラー画像の形成方式として広く採用されている中間転写ベルト方式の転写プロセスを対象とする。中間転写ベルト上に転写されるトナー画像は、単色のトナー画像と、複数色のトナーが重ねられた画像から構成されており、本研究では単色および色重ね画像における各転写チリ現象および中抜け現象の発生メカニズム解明と抑制指針の獲得を目的とする。

転写チリを解析するには、トナーの作用力を定量化する必要がある、特に定量化が困難なトナー付着力について測定技術を確立する。また、転写チリを含む転写特性に大きな影響を及ぼす作用力であるトナー付着力の制御は、電子写真の高画質化にとって重要な課題となっている。そこで、トナーの表面構造を変える外添剤に着目して、トナー付着力に対する効果を定量化し、その作用メカニズムを明らかにする。

本論文では、第2章において、トナー付着力に関する研究について述べる。まず、転写プロセスに関与するトナー付着力の測定方法を説明する。また、トナー表面の外添剤付着状態の定量化方法および計測結果について示す。つぎに、非静電付着力とトナー粒径および外添剤被覆率の関係についての測定結果を示し、測定結果に対応する力の特長および非静電付着力の外添剤被覆率依存性を説明するモデルについて述べる。さらに、静電付着力とトナー帯電量および外添剤被覆率の関係についての測定結果を示し、測定結果に対応する静電付着力のモデルおよび静電付着力に対する外添剤の効果について述べる。最後に、トナー付着力における非静電付着力と静電付着力の占める割合を示し、外添剤による両付着力の制御について考察する。

第3章では、単色画像における転写チリに関する研究について述べる。まず、本研究で使用する平行平板型の転写モデル実験装置を用いたトナー挙動の観察方法および観察結果の定量化方法について説明する。つぎに、トナー挙動の観察から明らかにした転写チリ発生過程と様々な転写パラメータの組み合わせにおける観察結果から得られた転写チリと転写パラメータの定量的関係を示す。さらに、平行平板間の転写プロセスにおけるトナー挙動シミュレーションの計算方法について説明し、シミュレーションと観察による転写チリ発生過程の定量的比較によるシミュレーションの検証結果を示す。最後に、シミュレーシ



ョンに基づいた考察により、単色画像における転写チリ発生メカニズムを明らかにし、転写チリに対する転写パラメータの影響についての考察を述べ、単色画像における転写チリの抑制指針を示す。

第4章では、色重ね画像における転写チリ(以下、重ねチリとする)に関する研究について述べる。まず、多重転写過程におけるトナー挙動の観察方法、および重ねチリ発生量の定量化方法について説明する。つぎに、トナー挙動の観察から明らかにした重ねチリ発生過程、様々な転写パラメータと重ねチリ発生量の定量的関係を示す。さらに、多重転写におけるトナー挙動シミュレーションの計算方法について説明し、重ねチリ発生過程および重ねチリ発生量と転写パラメータの関係に関する実験結果との比較によるシミュレーション検証結果を示す。最後に、シミュレーションに基づいた考察により、重ねチリの発生メカニズムを明らかにし、重ねチリに対する転写パラメータの影響についての考察を述べ、重ねチリの抑制指針を示す。

第5章では、ライン画像における中抜けに関する研究について述べる。まず、中抜けのモデル実験方法、および中抜け発生量の定量化方法について説明する。つぎに、様々な転写パラメータと中抜け発生量の定量的関係を示す。さらに、中抜けの発生に大きな影響を及ぼすと考えられる、圧縮時のトナーの凝集性に対するトナー特性の影響を明らかにし、中抜けとの定量的関係を示す。これらの実験結果に基づいて中抜けの発生モデルを提案し、発生モデルに対する実験検証結果を示す。最後に中抜けの抑制指針を示す。

第6章では、本論文の結論と今後の課題について述べる。

## 第2章 トナー粒子の付着力

### 2-1 研究の目的

転写プロセスにおけるトナーの挙動を解析するには、トナーへの作用力の定量化が必要であり、特に定量化が困難なトナーの付着力については、計測による定量化が必要である。本研究では中間転写ベルト方式における画像劣化現象を研究対象としており、トナーの転写に關与する付着力としては、トナーと感光体間の付着力、トナーと中間転写ベルト間の付着力、トナー間の付着力が挙げられる。本研究で確立した、これらの付着力の測定技術について述べる。

また、トナー付着力は転写率や画像劣化等の転写特性に大きな影響を及ぼすため、トナー付着力の制御は転写プロセスの性能向上に対して重要な課題となっている。本研究では、トナー付着力の制御手段として、トナー表面に外添剤(シリカ)を付着させてトナーの表面構造を変化させる手法を用いた。トナー付着力は、トナーの帯電電荷による静電付着力と、帯電電荷に依存しない非静電付着力から構成されるが、本研究では、様々な外添剤被覆状態のトナーについての非静電付着力と静電付着力を測定して両者の寄与を明確化し、各付着力に対する外添剤の作用メカニズムを明らかにする。

### 2-2 付着力の測定方法

粉体の付着力を測定する方法は、粉体が付着している部材から粉体を分離するのに必要な力を見積もる方法が一般的である。粉体を分離させる方法としては、遠心力、振動、電界等を用いる方法が知られており、近年 AFM (Atomic Force Microscope) を利用した方法も開発されている。振動を用いる方法<sup>(2-1)</sup>は、トナーを付着させた基板を様々な振動数で振動させ、基板から分離したトナーの粒径と振動数から付着力を求めている。電界を用いる方法<sup>(2-2)-(2-5)</sup>は、トナーを基板から分離する電界強度から付着力を求める方法で、電流測定や光学的手段によりトナーの分離を検出している。AFM を利用した方法<sup>(2-6)-(2-9)</sup>は、カンチレバー先端にトナーを接着し、トナーを付着面に接触させ、分離時の作用力を計測する方法である。

本研究では、トナー付着力測定方法として遠心分離法<sup>(2-10)-(2-13)</sup>を用いた。遠心分離法を用いた理由としては、以下の3点が挙げられる。

- ① トナー分離力の精密な制御が可能：遠心分離の回転数の設定により遠心力を精密に制御できる。
- ② トナーの非静電的付着力について検討可能：電界分離法では静電気力を利用するため未帯電のトナーは付着力を測定できないが、遠心分離法では未帯電トナーも測定できる。

- ③ トナーの付着力分布が測定可能：AFM 法ではトナーをカンチレバーに固定するため、多数のトナーについて付着力を測定するのは困難であるが、遠心分離法では多数のトナーについて測定するため、付着力分布を測定できる。

本研究におけるトナー付着力の測定方法について述べる。まず、トナーを付着する測定基板の作製方法について説明するが、作製方法はトナーを付着させる対象によって異なる。トナーと感光体間の付着力を測定する場合は、図 2-1 のように、アルミニウムを蒸着したポリマーフィルムのアルミニウム面上に感光体を形成し、このフィルムを円形状に加工し、円盤状のアルミニウム製基板に貼り付けて測定基板を作製する。つぎに、未帯電のトナーまたは帯電したトナーを感光体上に散布する。また、トナーと中間転写ベルト間の付着力を測定する場合は、中間転写ベルトを円形に切り出してアルミニウム製基板に貼り付け、中間転写ベルト上にトナーを散布する。一方、トナー間付着力を測定するには、トナーを付着させる対象であるトナーが基板から分離しないように、図 2-2 のようにトナーを接着剤でアルミニウム製基板上に固定する。つぎに、基板に接着したトナー上に分離するトナーを散布する。なお、本章の付着力測定では、トナーを付着させる対象は全て感光体とした。

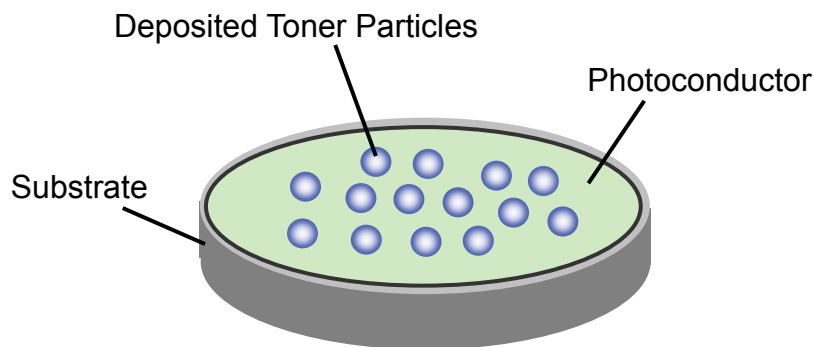


Fig.2-1 Schematic illustration of the substrate for measurement of the adhesion between toner particles and photoconductor.

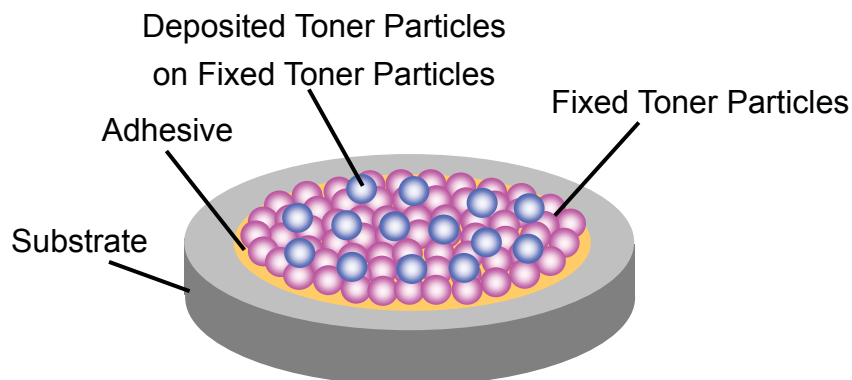


Fig.2-2 Schematic illustration of the substrate for measurement of the adhesion between toner particles.

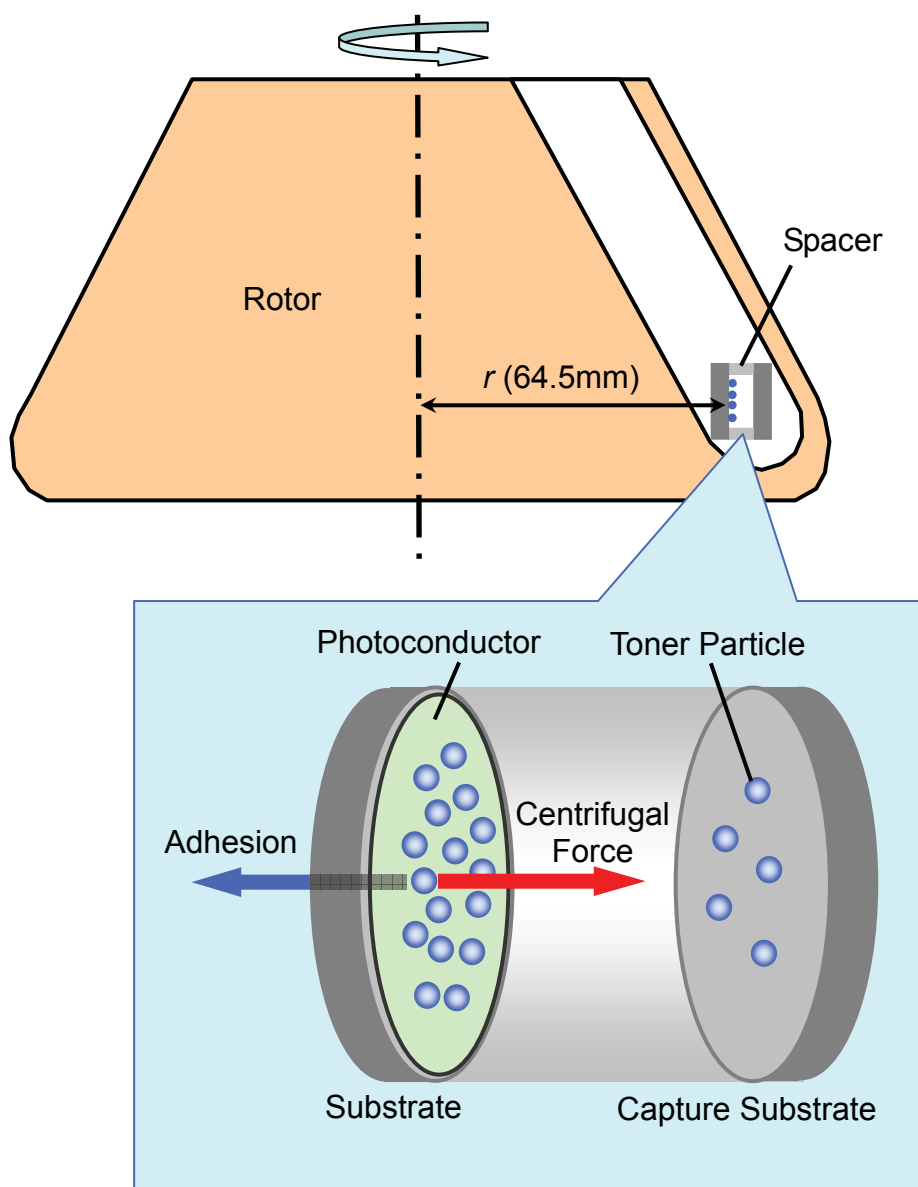


Fig.2-3 Schematic illustration of the centrifugal method.

つぎに、図 2-3 のように、測定基板から遠心力によって分離したトナーが付着する受け基板、測定基板と受け基板を隔てるスペーサーおよび測定基板を、測定基板面の垂直方向に遠心力が作用するように遠心分離装置のローター内に設置する。遠心分離装置は、日立工機製の超遠心機 CP100 $\alpha$ （最高回転数 100,000 rpm，最大遠心加速度 800,000 $\times$ g）を使用した。超遠心機 CP100 $\alpha$ の外観を図 2-4 に示す。ローターの回転によりトナーに遠心力が作用し、遠心力がトナーと付着面間の付着力よりも大きくなると、トナーは測定基板から分離して受け基板に移動する。ローターの回転数を低速から高速に段階的に変え、回転数毎に受け基板を交換しながらトナーの遠心分離を行なう。一連の遠心分離操作を終了後、各回転数において受け基板に付着したトナーの粒径を光学顕微鏡および画像処理装置を用

いて計測する。トナーが分離した回転数  $f$  と計測したトナー粒径  $D_t$  から、回転数  $f$  においてトナーに作用する遠心力  $F_j$  を式(2-1)により計算する。

$$F_j = \frac{4\pi}{3} \cdot \left(\frac{D_t}{2}\right)^3 \cdot \delta_t \cdot r \cdot \left(\frac{2\pi f_j}{60}\right)^2 \quad (2-1)$$

ここで、 $\delta_t$  はトナーの真比重、 $r$  はローターの回転中心からトナー付着面までの距離 (64.5 mm) である。トナーの真比重は、島津製作所製密度計(アキュピック 1330)を用いて測定した。この密度計では、校正した容積中のヘリウムの圧力変化から試料の容積が計測され、試料の容積と重量から真比重が求められる。トナーの付着力は、分離した回転数における遠心力  $F_j$  よりも小さく、一段階低速の回転数  $f_{j-1}$  における遠心力  $F_{j-1}$  よりも大きいので、 $F_j$  と  $F_{j-1}$  の平均値をトナー付着力とした。各トナーの付着力を求め、その常用対数の分布と平均値を算出した。トナー付着力の平均値は常用対数の平均値から求めた。



Fig.2-4 Photograph of Hitachi Koki CP100α Ultracentrifuge.

## 2-3 トナー特性

### 2-3-1 トナーの構成

本研究では、トナー付着力を制御するために、トナー表面にナノサイズの微粒子である外添剤を付着させ、トナーの表面構造を制御した。まず、結着樹脂、カーボンブラック、電荷制御剤、ワックスを混合・粉碎・分級することにより、平均粒径  $9 \mu\text{m}$  のトナー母粒子を作製した。トナー母粒子の SEM 画像を図 2-5 に示すが、粉碎法で作製しているために粒子形状は不定形である。つぎに、トナー母粒子に外添剤を一定の割合で添加し、攪拌装置で攪拌することにより、トナー表面に外添剤が固定される。トナー表面の被覆状態は、外添剤の添加量に応じて変化する。本研究で用いた外添剤は、一次粒子径の平均値が  $14 \text{nm}$  の疎水化処理したシリカで、外添剤添加量はトナー重量に対して  $0.1\text{wt}\%$  から  $3.0\text{wt}\%$  まで変化させた。

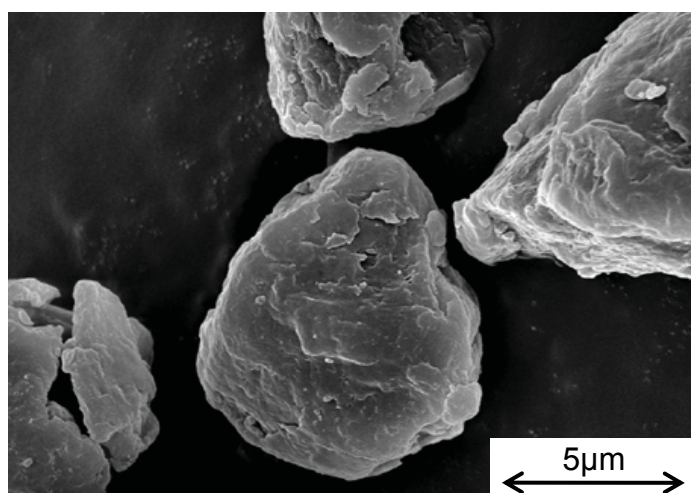


Fig.2-5 SEM image of toner samples for measurement of adhesion.

## 2-3-2 外添剤被覆率

図 2-6 に作製したトナーサンプル表面の SEM 画像の一例を示すが、白く反射している粒子が外添剤である。図のように、外添剤微粒子はトナー表面上で凝集体を形成しており、凝集体の平均粒径は 50~60 nm である。

外添剤の被覆状態を定量化するために、トナー表面積に対して外添剤の占める面積の割合を表す外添剤被覆率を計測した。図 2-6 のような画像について、画像計測ソフト (Media Cybernetics 社製、ImageProPlus) を用いて外添剤の面積を計測し、トナー表面画像の面積に対する外添剤面積の比を計算して外添剤被覆率を求めた。

作製したトナーサンプルについて外添剤被覆率を計測した結果を図 2-7 に示す。図のように、外添剤被覆率が外添剤添加量の増加と共に増大していることがわかる。トナーおよび外添剤が球形とした場合の外添剤被覆率  $C_a$  は式(2-2)のように表される<sup>(2-14)</sup>。

$$C_a = \frac{D_t \delta_t W_a}{4 D_a \delta_a} \times 100 \quad (2-2)$$

ここで、 $W_a$  はトナー重量に対する外添剤添加量の比、 $D_a$  は外添剤粒径、 $\delta_a$  は外添剤の真比重である。外添剤粒径として一次粒径の平均値 (14 nm) を用いて外添剤被覆率を計算すると、図 2-7(Calculation-1) に示すように測定値よりも 3~5 倍も大きくなる。一方、凝集体粒径の平均値を用いて計算した場合(Calculation-2) は測定値と良く一致しており、外添剤被覆率の計算には外添剤の凝集を考慮する必要がある。

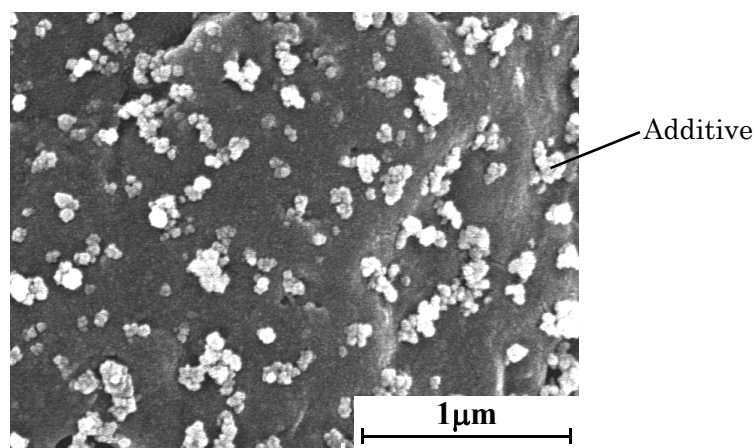


Fig.2-6 SEM image of toner surface.

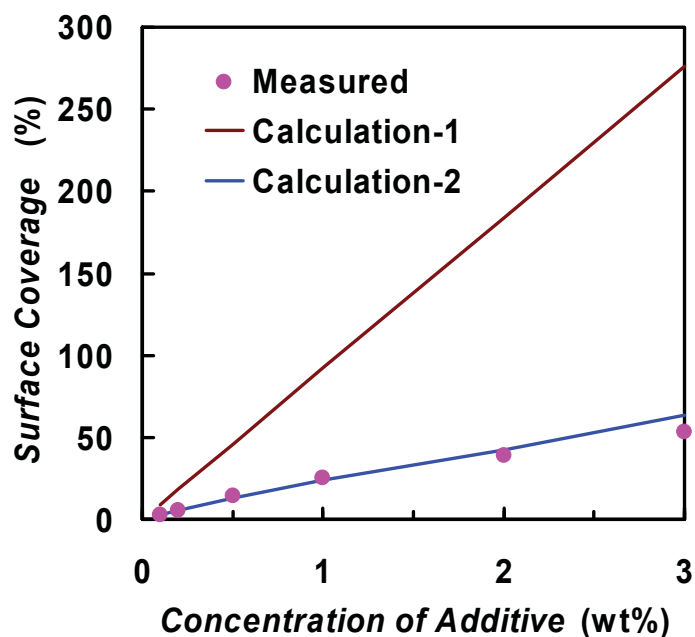


Fig.2-7 Relationship between the surface coverage of toner additive and the concentration of the additive. Calculation-1:  $D_a=14$  nm, Calculation-2:  $D_a$  = the average diameter of the aggregates.

## 2-4 非静電付着力

### 2-4-1 非静電付着力と外添剤被覆率の関係

外添剤被覆率の異なる各トナーサンプルについて、未帯電トナーと感光体間の付着力分布を測定した結果を図 2-8 に示す。未帯電トナーの付着力分布が外添剤被覆率の増加と共に低付着力側にシフトしていることがわかる。また、トナー母粒子の付着力は  $10^{-10}$  N から  $10^{-6}$  N まで広い範囲に分布しているのに対して、外添剤被覆率が 25%以上のトナーでは付着力が  $10^{-10}$  N から  $10^{-7}$  N までの範囲に分布し、トナー母粒子に比べて分布が狭くなっていることがわかる。

未帯電トナー付着力の平均値と外添剤被覆率の関係を図 2-9 に示す。付着力の平均値は外添剤被覆率の増加と共に急激に減少し、約 25%以上ではほぼ一定になることがわかる。

また、本測定では各トナーの粒径を計測し、その付着力を求めているため、トナー粒径毎の付着力の平均値を求めることができる。未帯電トナー付着力のトナー粒径依存性を図 2-10 に示す。未帯電トナー付着力はトナー粒径に比例して増加し、外添剤被覆率の増加と共にその傾きが減少していることがわかる。



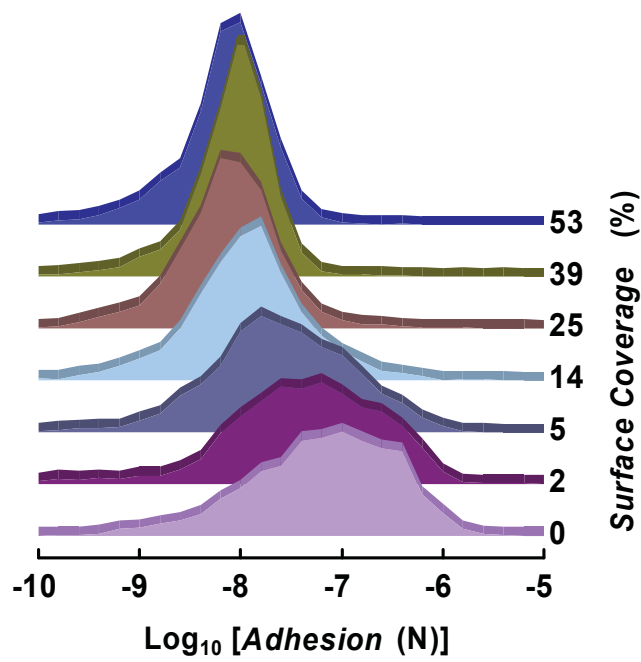


Fig.2-8 Distributions of adhesion force for non-tribocharged toner particles with various toner surface coverage.

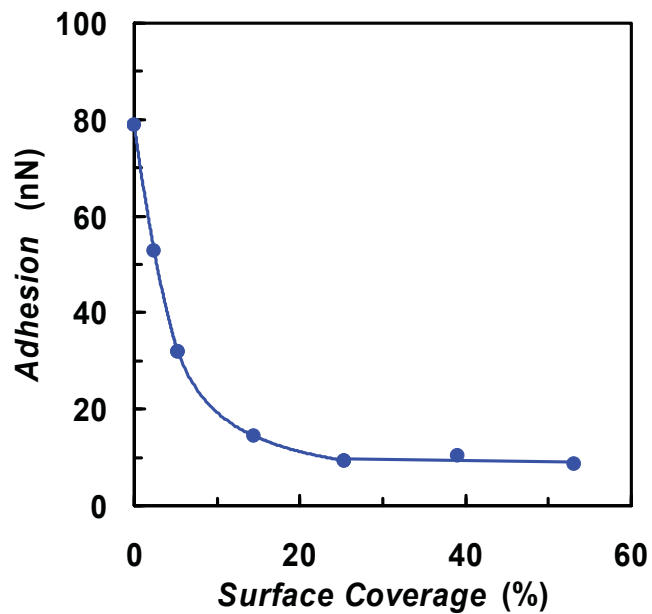


Fig.2-9 Dependence of the average adhesion force on the toner surface coverage for the non-tribocharged toner particles.

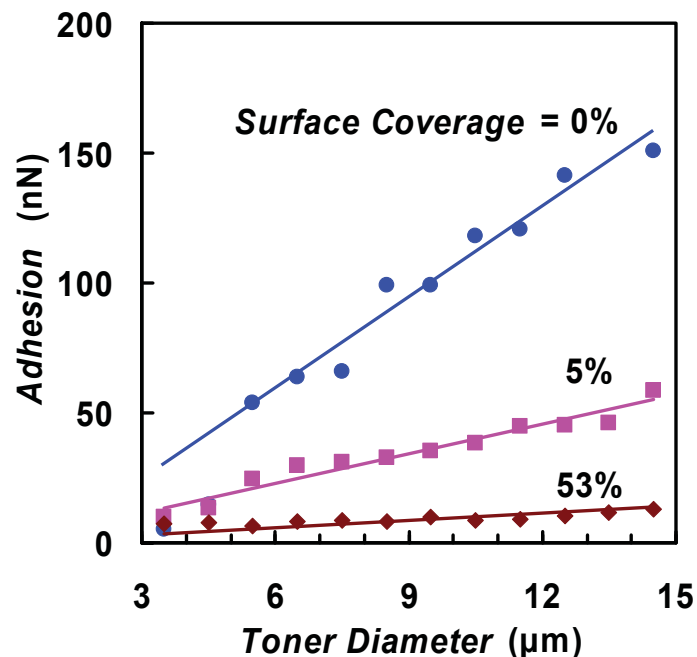


Fig.2-10 Size dependence of the adhesion force for the non-tribocharged toner particles with various toner surface coverage.

#### 2-4-2 非静電付着力のモデル

未帯電トナーの測定結果を考察するために、粉体に作用する非静電的な力として、液架橋力、重力、ファンデルワールス力について検討する。液架橋力は、高温環境において、接触部に水分が凝集してできる液架橋によって生じる力である。球形粒子と平面間の液架橋力  $F_L$  は式(2-3)で表され<sup>(2-15)</sup>、粒径に比例する。

$$F_L = 2\pi\sigma D \cos\theta \quad (2-3)$$

ここで、 $\sigma$  は水の表面張力、 $D$  は球形粒子の粒径、 $\theta$  は接触角である。 $\sigma = 0.0728 \text{ N/m}$ 、 $D = 9 \mu\text{m}$ 、 $\theta = 0^\circ$  として、式(2-3)から  $F_L$  の大きさを見積もると約 4000 nN、 $\theta = 45^\circ$  では約 2900 nN となる。トナー母粒子の非静電付着力の粒径依存性において、 $D = 9 \mu\text{m}$  の付着力は 100 nN で、液架橋力の見積もりよりも 1 桁小さく、液架橋力では測定された非静電的付着力の大きさを説明できない。

球形粒子の重力  $F_g$  は(2-4)式で表わされる。ここで、 $\delta$  は粒子の真比重、 $g$  は重力加速度である。 $\delta = 1200 \text{ kg/cm}^3$ 、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$  として式(2-4)から  $F_g$  の大きさを見積もると約 0.04 nN となり、測定値よりも 4 桁小さく、他の力に較べて無視できる大きさである。

$$F_g = \frac{4}{3} \pi D^3 \delta g \quad (2-4)$$

ファンデルワールス力は分子内の電荷ゆらぎによって生じる電気双極子間の相互作用に起因した力で、近接する物体間に作用する。球形粒子と平面間のファンデルワールス力  $F_v$  は式(2-5)で表わされる<sup>(2-16)</sup>。

$$F_v = \frac{HD}{12Z^2} \quad (2-5)$$

ここで、 $H$ はハマーカー定数(粒子と平面の構成物質に依存する定数)、 $Z$ は粒子と平面の分離距離である。式(2-5)のように  $F_v$ は粒径に比例し、図 2-10 の結果と対応している。 $H = 7 \times 10^{-20} \text{ J}$ <sup>(2-17)</sup>、 $D = 9 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $Z = 0.4 \text{ nm}$ <sup>(2-18)</sup>として、式(2-5)から  $F_v$ の大きさを見積もると約 330 nN となり、トナー母粒子の測定値よりも大きくなるが、オーダーは一致する。本実験に使用したトナーは不定形で表面には凹凸があり、感光体との接触点における曲率半径はトナーの平均半径よりも小さくなる。このため、トナー母粒子のファンデルワールス力は球形粒子の計算値よりも小さく、測定値に近い値になると推定される。以上のように、測定されたトナーの非静電付着力の大きさは、ファンデルワールス力の大きさに対応している。

### 2-4-3 非静電付着力に対する外添剤の効果

つぎに、トナーの非静電付着力に対する外添剤の効果について考察する。外添剤の粒径は 1~100 nm のオーダーであり、母体の粒径 (1~10  $\mu\text{m}$ ) に比べて十分小さい。ファンデルワールス力は粒径に比例するため、外添剤と感光体間のファンデルワールス力は、トナー母粒子と感光体間のファンデルワールス力よりも十分小さい。

まず、トナーの外添剤被覆率が低い場合の非静電付着力について検討する。図 2-11 に、感光体との接触状態が異なる 2 つのトナーを示す。図 2-11(a)はトナー母粒子表面が感光体と接触している場合、図 2-11(b)はトナー母粒子表面が感光体と接触せず、外添剤が接触している場合を示す。

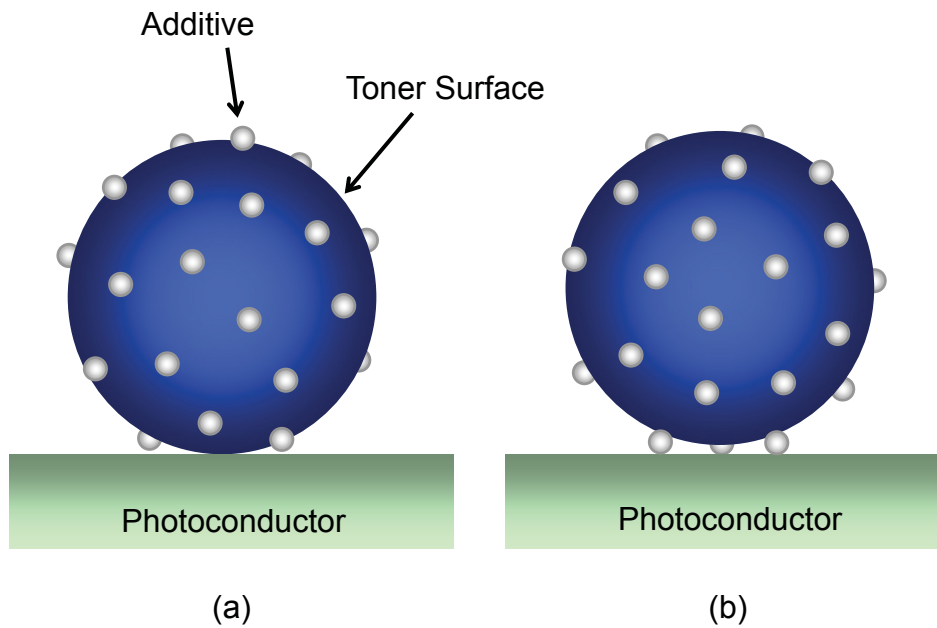


Fig.2-11 Contact models between a toner particle with additives and a photoconductor:  
 (a) Toner surface contacts photoconductor, (b) Additives contact photoconductor.

図 2-11(a)におけるトナーと感光体間のファンデルワールス力  $F_t$  は式(2-6)、図 2-11(b)におけるファンデルワールス力  $F_a$  は式(2-7)のように表わせる。

$$F_t = \frac{H_t D_t}{12Z^2} \quad (2-6)$$

$$F_a = \left( \frac{H_a D_a}{12Z^2} \right) \times N_a \quad (2-7)$$

ここで、 $H_t$ 、 $H_a$  はトナー母粒子および外添剤のハマーカー定数、 $N_a$  は感光体に接触している外添剤の粒子数を示す。感光体に接触しているトナーのうち、トナー母粒子表面が感光体と接触しているトナーの割合を  $P$  とすると、トナーと感光体間のファンデルワールス力の平均値  $\overline{F_v}$  は式 (2-8) のように表わせる。 $\overline{F_t}$ 、 $\overline{F_a}$  は  $F_t$ 、 $F_a$  の平均値を示す。

$$\overline{F_v} = P \times \overline{F_t} + (1-P) \times \overline{F_a} \quad (2-8)$$

外添剤被覆率が増加すると、トナー母粒子表面は感光体に接触しにくくなるので割合  $P$

が減少する。 $P$  が外添剤被覆率に比例して減少すると仮定し、 $\overline{F}_t$  としてトナー母粒子の非静電付着力の平均値、 $\overline{F}_a$  として高外添剤被覆率の非静電付着力の平均値を用いると、図 2-12 のように、低外添剤被覆率における非静電付着力の外添剤被覆率依存性を説明できる。

つぎに、高外添剤被覆率トナーの非静電付着力について検討する。高外添剤被覆率トナーでは、すべて図 2-11(b) のような接触状態になるため、トナーと感光体間のファンデルワールス力は式 (2-7) のように表わせる。外添剤被覆率の増加と共に  $N_a$  が増加すると仮定すると、 $F_a$  は  $N_a$  に比例して増大するので、外添剤被覆率と共に増大することになる。しかし、測定された非静電付着力は、一定の外添剤被覆率以上で一定となっており、外添剤被覆率が増加しても  $N_a$  は増加せず、トナーと感光体は一定数の外添剤を介して接触していると考えられる。

つぎに、外添剤被覆率による付着力分布の違いについて考察する。外添剤被覆率が低い場合は、母粒子表面と感光体が接触しているトナーと外添剤と感光体が接触しているトナーが混在しており、両者の付着力は大きく異なるために付着力の分布が広く、一方、外添剤被覆率が高い場合は、母粒子表面と感光体が接触しているトナーが無く、ほとんど外添剤と感光体が接触しているトナーなので付着力の分布が狭くなると考えられる。

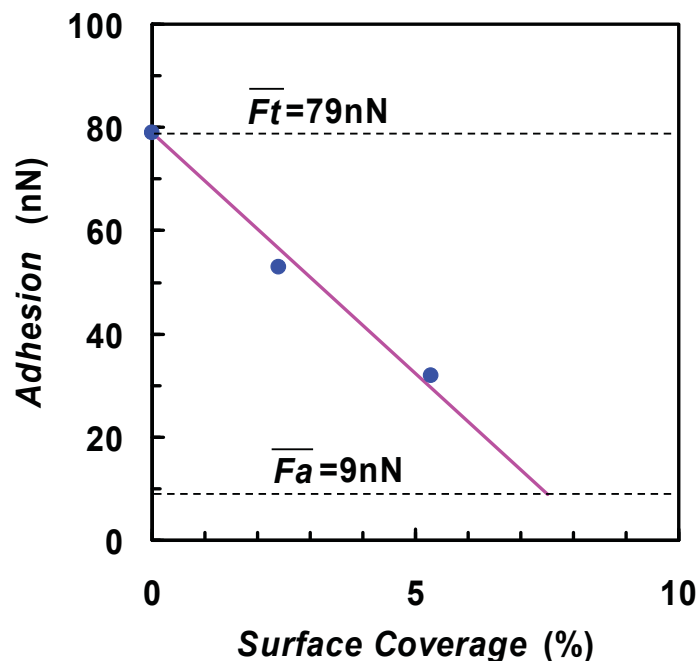


Fig.2-12 Dependence of the average adhesion force on the toner surface coverage for the non-tribocharged toner.

## 2-5 静電付着力

## 2-5-1 静電付着力のトナー帯電量依存性

各トナーサンプルについて、帯電したトナーと感光体間の付着力を測定した。トナーの帯電は、樹脂コートキャリアとの混合・攪拌によっておこなった。本実験では、一つのトナーサンプルについて帯電量を変えて付着力測定を実施したが、トナーの帯電量はキャリアとトナーの混合比率に依存するため、この混合比率依存性を利用してトナーの帯電量を調整した。トナー帯電量の測定は、ブローオフ法<sup>(2-19)</sup>により測定した。ブローオフ法は、トナー粒径よりも大きく、キャリア粒径よりも小さいメッシュを有するファラデーケージ内に収容した現像剤に、圧縮ガスを吹き付けてトナーを分離した後のキャリアの残留電荷  $Q$  を計測し、分離したトナーの重量  $M$  を計測することにより、単位重量当たりのトナー帯電量  $Q/M$  を計測する方法である。

外添剤被覆率が 39% のトナーに関して、各  $Q/M$  における付着力分布を図 2-13 に示す。図のように、トナー帯電量の増大と共に付着力分布が高付着力側にシフトしていることがわかる。

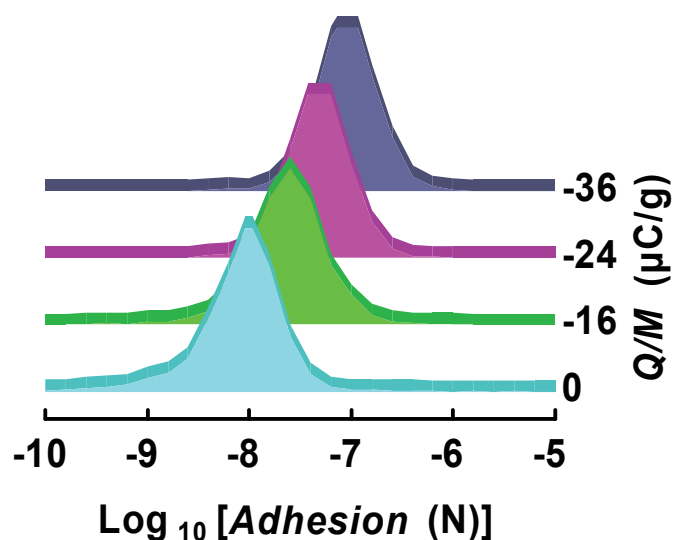


Fig.2-13 Distributions of adhesion force for tribocharged toner particles with various toner charge to mass ratio,  $Q/M$ .

図 2-13 におけるトナー付着力の平均値と  $Q/M$  の関係を図 2-14 に示す。図のように、トナー付着力は  $Q/M$  の増加と共に大きくなる。帯電トナーの付着力  $F$  は非静電付着力  $F_{ne}$  と静電付着力  $F_e$  から構成されるので、各トナー帯電量における付着力  $F$  から未帯電トナーの付着力  $F_{ne}$  を差し引いて  $F_e$  を求めた。  $\text{Log}_{10}F_e$  と  $\text{Log}_{10}(-Q/M)$  の関係を図 2-15 に示す。図 2-15 における近似直線の傾きは 2.07 で、 $F_e$  はほぼ  $Q/M$  の二乗に比例する。このため、式(2-9) に示すように、帯電トナーの付着力  $F$  は非静電付着力  $F_{ne}$  とトナー帯電量  $Q/M$  の二乗に比例する静電付着力  $F_e$  の和として表わされることがわかる。  $\gamma$  は  $F$  に対する  $(Q/M)^2$  の傾きを示している。図 2-16 にトナー付着力と  $(Q/M)^2$  の関係を示す。

$$F = F_{ne} + \gamma \left( \frac{Q}{M} \right)^2 \tag{2-9}$$

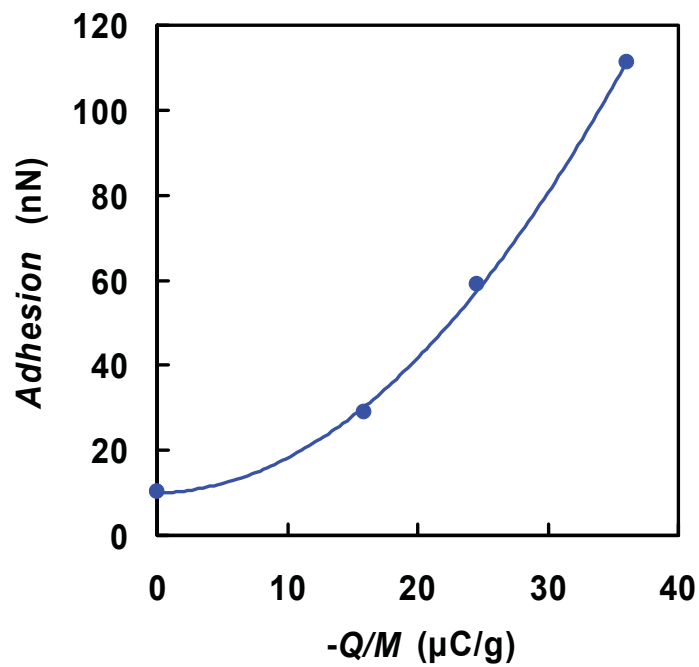


Fig.2-14 Dependence of the average adhesion force on the toner charge to mass ratio,  $Q/M$ .

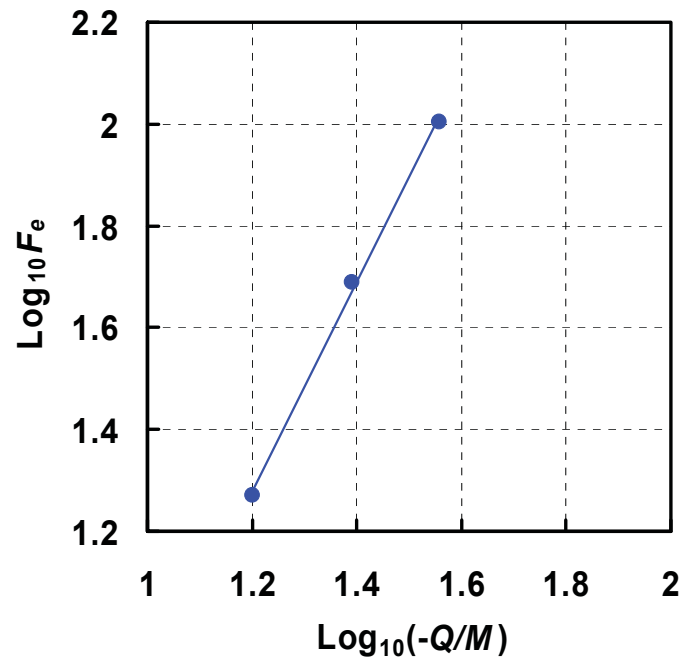


Fig.2-15 Log-Log plot between the average electrostatic adhesion force  $F_e$  and the toner charge to mass ratio,  $Q/M$ .

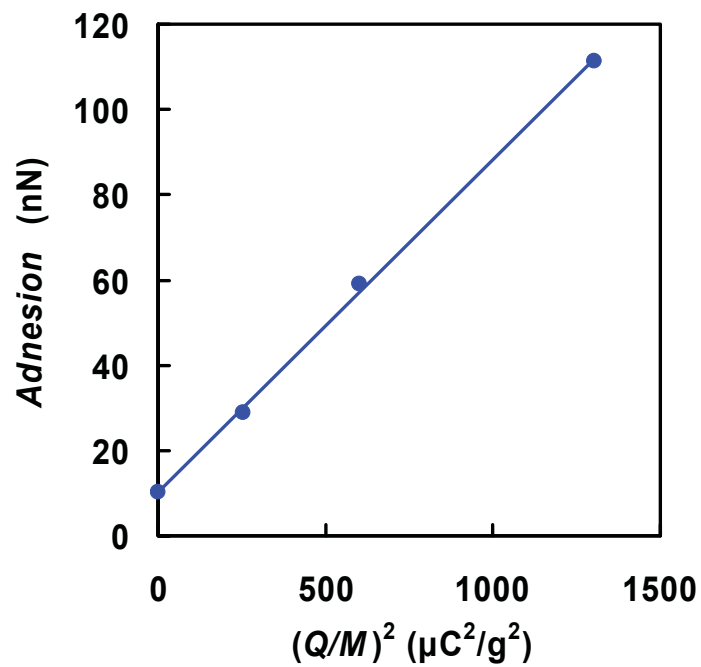


Fig.2-16 Dependence of the average adhesion force on the square of toner charge to mass ratio,  $(Q/M)^2$ .



2-5-2 静電付着力と外添剤被覆率の関係

各外添剤被覆率のトナーに関する静電付着力  $F_e$  の  $(Q/M)^2$  依存性を図 2-17 に示す。図 2-17 から求めた傾き  $\gamma$  と外添剤被覆率の関係を図 2-18 に示す。図のように、傾き  $\gamma$  が外添剤被覆率の増加と共に減少することがわかる。 $Q/M = -20 \mu\text{C/g}$  の場合に、傾き  $\gamma$  から求めた  $F_e$  と外添剤被覆率の関係を図 2-19 に示すが、静電的付着力が外添剤被覆率の増加と共に指数関数的に減少することがわかる。

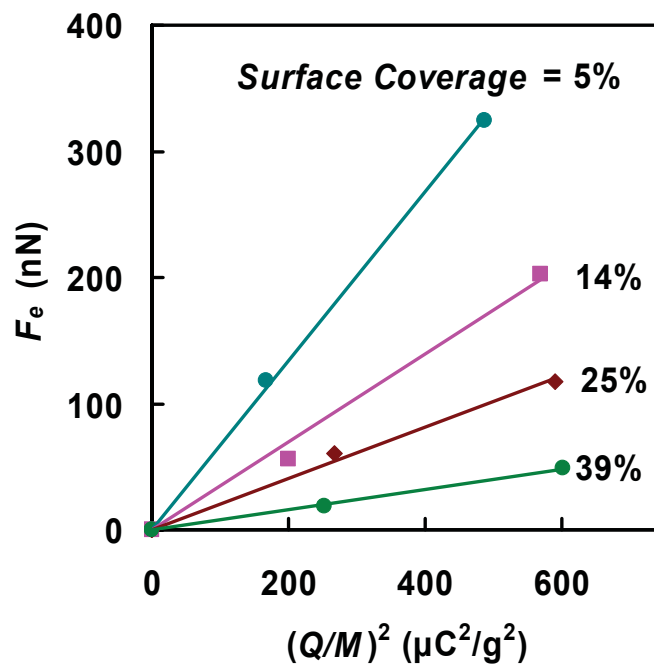


Fig.2-17 Dependence of the average electrostatic adhesion force  $F_e$  on the square of toner charge to mass ratio,  $(Q/M)^2$ .

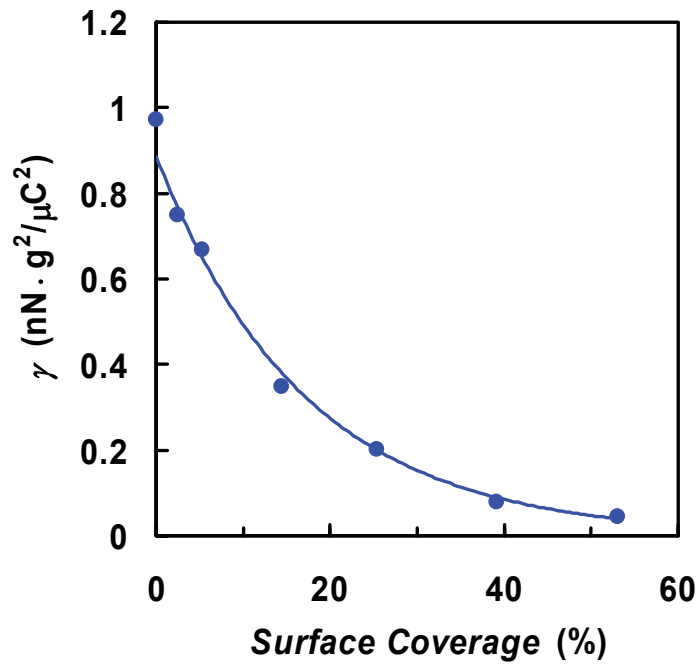


Fig.2-18 Slope between the average adhesion force and  $(Q/M)^2$ ,  $\gamma$ , plotted against the toner surface coverage.

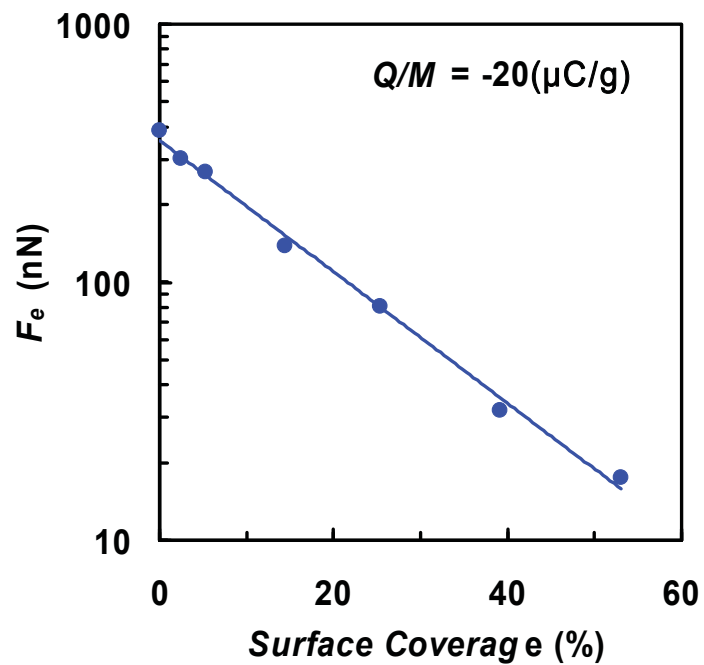


Fig.2-19 Dependence of the average electrostatic adhesion force  $F_e$  on the surface coverage.

## 2-5-3 静電付着力のモデル

まず、静電付着力のモデルとして、均一帯電粒子の鏡像力について検討する。均一に帯電した球形粒子と基板間の鏡像力  $F_i$  は(2-10)式のように表される<sup>(2-20)</sup>。

$$F_i = \alpha \frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon' + 1} \frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 D^2} \quad (2-10)$$

ここで、 $\alpha$ は粒子と基板の誘電率に依存する補正係数、 $\varepsilon'$ は基板の比誘電率、 $\varepsilon_0$ は真空の誘電率、 $q$ は粒子の帯電量、 $D$ は粒子径である。(2-10)式に、 $\alpha = 1.3$ <sup>(2-20)</sup>、 $\varepsilon' = 3.3$  (感光体の比誘電率)、 $D = 9 \mu\text{m}$ 、 $q = -9.7 \text{ fC}$  ( $Q/M = -20 \mu\text{C/g}$ ) を代入して鏡像力を見積もると約 7 nN となる。一方、図 2-19 から、静電付着力 ( $Q/M = -20 \mu\text{C/g}$ ) の測定値は 17~388 nN となる。したがって、均一帯電粒子の鏡像力では測定された静電付着力の大きさと外添剤による変化を説明できない。

つぎに、図 2-20 のように、表面が不均一に帯電した粒子の静電付着力のモデルとして提案されているチャージパッチモデル<sup>(2-2) (2-21)-(2-23)</sup>について検討する。チャージパッチモデルでは、粒子表面の帯電領域(チャージパッチ)において、特に基板に近接した領域と基板間の鏡像力に着目し、その大きさをコンデンサー電極間に働く静電引力の表式を用いて計算している。チャージパッチモデルでは、帯電粒子と基板間の静電的付着力  $F_e$  は(2-11)式のように表される<sup>(2-23)</sup>。

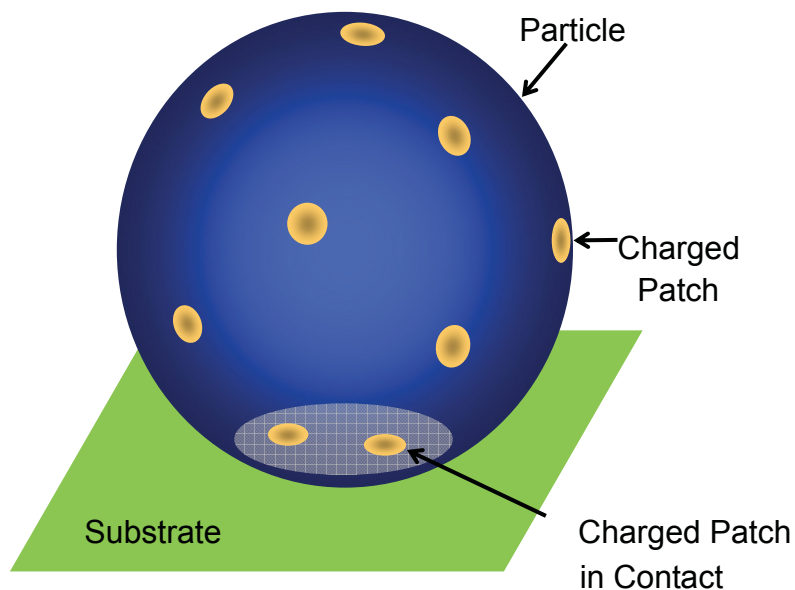


Fig.2-20 Schematic illustration of a particle with a non-uniform charge distribution.

$$F_e = \frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon' + 1} \frac{q^2 f}{2\varepsilon_0 A_t} \quad (2-11)$$

ここで、 $A_t$  は粒子表面における帯電領域の総面積、 $f$  は基板に近接した帯電領域の面積  $A_c$  と  $A_t$  の比  $A_c/A_t$  である。均一帯電粒子の場合は鏡像力が帯電量によって一意的に決まるが、チャージパッチモデルでは、帯電量が同じでも粒子表面の帯電面積に依存して静電的付着力が変化する。このため、トナーの静電付着力のモデルとしてチャージパッチモデルを用いると、静電付着力の大きさや外添剤被覆率による変化を説明できる可能性がある。

#### 2-5-4 静電付着力に対する外添剤の効果

チャージパッチモデルを用いて、静電付着力に対する外添剤の効果について検討する。式(2-11)より、静電付着力  $F_e$  は帯電面積  $A_t$  に反比例するので、 $A_t$  が小さい(粒子の帯電電荷が表面の小さな領域に集中する)ほど  $F_e$  が大きくなる。逆に、 $A_t$  が大きい(粒子表面の帯電が均一になる)ほど  $F_e$  が小さくなる。図 2-19 のように、トナーの静電付着力は外添剤被覆率の増加と共に減少するが、この結果にチャージパッチモデルを適用すると、外添剤被覆率の増加と共にトナー表面の帯電面積が増加すると推定することができる。トナー表面の帯電面積  $A_t$  は、静電付着力の測定値から式(2-11)を用いて見積もることができる。トナーを粒径  $9 \mu\text{m}$  の球形粒子としてその表面積  $S$  を求め、 $A_t$  と  $S$  の比  $A_t/S$  を計算した。 $f=0.2$ <sup>(2-23)</sup>、 $\varepsilon'=3.3$ 、 $q=-9.7 \text{ fC}$  ( $Q/M=-20 \mu\text{C/g}$ ) の場合について計算した  $A_t/S$  と外添剤被覆率の関係を図 2-21 に示す。

トナー母粒子の表面には帯電性の異なる様々なトナー構成物質が露出しており、トナー母粒子とキャリアを混合・攪拌すると、電荷制御剤等の帯電性の高い領域は帯電しやすく、帯電性の低い領域は帯電しにくいと考えられる。このため、帯電したトナー母粒子の表面電荷は帯電性の高い領域に集中しやすく、帯電面積が小さいと考えられる。また、外添剤被覆トナーとキャリアを混合・攪拌すると、トナー母粒子表面と外添剤が共に帯電する。外添剤被覆率が増加すると、外添剤の帯電が増加し、トナー表面の帯電面積が増加すると考えられる。以上のように、本研究の実験結果にチャージパッチモデルを適用することによって、静電的付着力に対する外添剤の作用メカニズムとして、外添剤の帯電によるトナー表面電荷分布の均一化によって静電的付着力が低下するモデルを提示した。ただし、このモデルを検証するにはトナー表面の電荷分布を計測する必要があり、微小領域の電荷分布計測方法等に関する研究の進展が期待される。

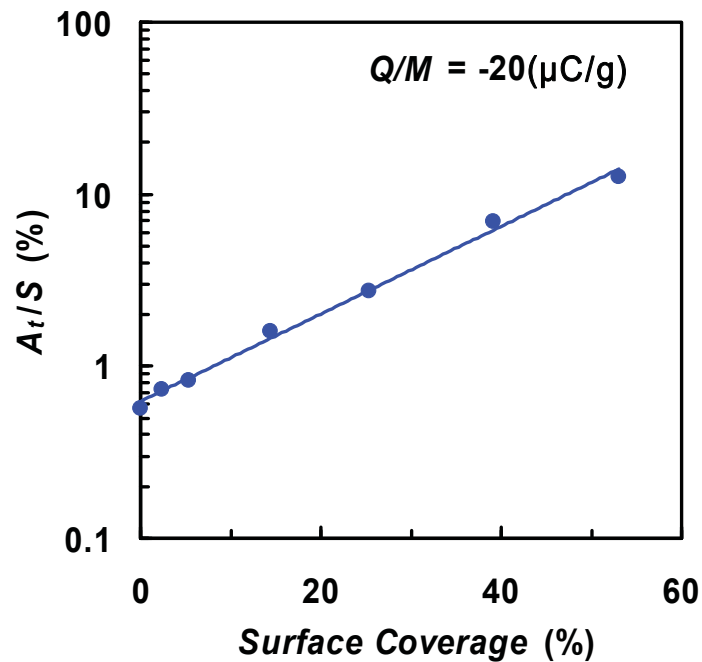


Fig.2-21 Ratio of the total charged area on the toner surface to the toner surface area,  $A_t/S$ , plotted against the surface coverage.

## 2-6 非静電付着力と静電付着力の比較

つぎに、トナー付着力に対する非静電付着力と静電付着力両者の寄与について検討する。静電付着力はトナーの帯電量に依存するため、一定の帯電量における寄与を比較する必要がある。静電付着力  $F_e$  の  $(Q/M)^2$  依存性における傾き  $\gamma$  と非静電付着力の外添剤被覆率依存性から求めた、様々な  $Q/M$  におけるトナー付着力の外添剤被覆率依存性を図 2-22 に示す。図のように、 $Q/M$  が小さい場合は静電付着力の寄与が小さく、非静電付着力の寄与が大きいが、 $Q/M$  が大きくなるほど静電付着力の寄与が大きくなる。電子写真プロセスでは、通常  $Q/M$  が  $10 \mu\text{C/g}$  以上で使用されるため、静電付着力の寄与が大きいと考えられる。

また、非静電付着力と静電付着力は外添剤被覆率依存性も異なる。図 2-23 に、トナー母粒子の非静電付着力と静電付着力で規格化した両付着力の外添剤被覆率依存性を示す。図のように、非静電付着力は低被覆率での変化が大きく、静電付着力は広い被覆率範囲で変化している。ファンデルワールス力が短距離力で、物質間の接触状態に強く依存し、トナー母粒子と感光体の接触状態が少量の外添剤で大きく変化することを反映していると考えられる。一方、静電付着力はトナー表面の電荷分布に依存し、静電付着力の外添剤被覆率依存性は、外添剤の被覆による電荷分布の変化を反映していると考えられる。

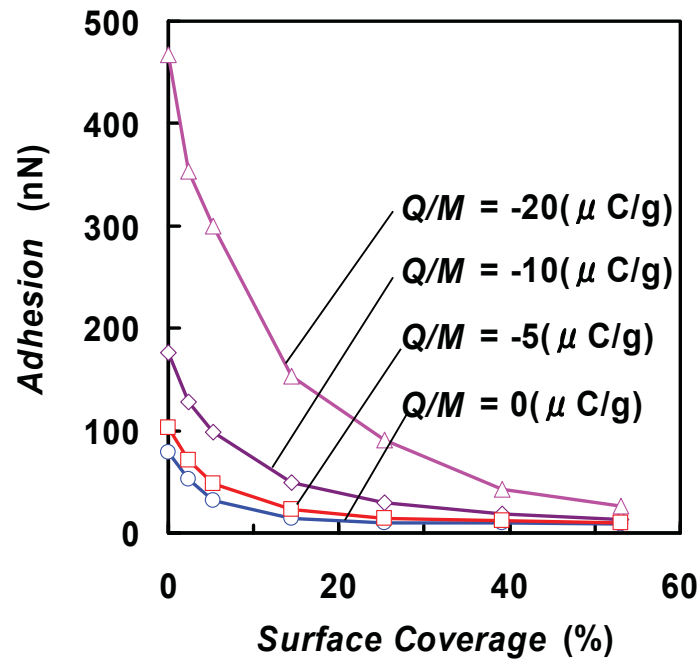


Fig.2-22 Dependence of the average adhesion force on the toner surface coverage for the non-tribocharged and tribocharged toner particles.

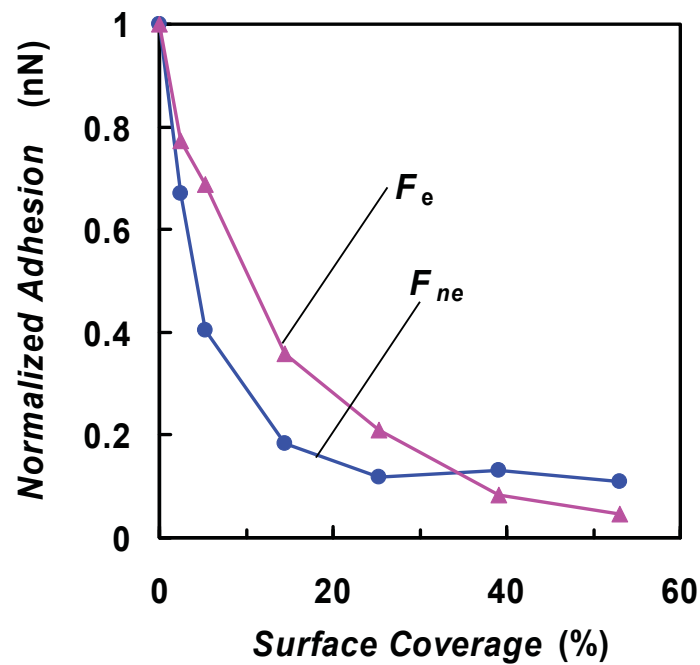


Fig.2-23 Dependence of the normalized non-electrostatic and electrostatic adhesion force on the toner surface coverage.

## 2-7 まとめと今後の課題

転写の画像劣化現象の解析に必要な重要な作用力であるトナー付着力について、系統的な研究をおこなった。まず、中間転写ベルト方式における転写の解析に必要なトナーと感光体間、トナーと中間転写ベルト間、トナー間の各付着力について、遠心分離法による測定技術を確立した。さらに、転写プロセスの性能を左右するトナー付着力を制御するために、トナーの非静電付着力と静電付着力に対する外添剤の作用メカニズムを検討した。非静電的付着力に関する検討では、様々な外添剤被覆率のトナーについて、未帯電トナーと感光体間の付着力を測定した。その結果、トナーの非静電付着力が外添剤被覆率の増加と共に急激に減少し、一定の被覆率以上で飽和することを明らかにした。この外添剤による非静電付着力の変化は、トナー母粒子および外添剤と感光体間の接触状態の違いによるファンデルワールス力の変化によって説明できることを示した。静電的付着力に関する検討では、様々な外添剤被覆率のトナーについて、帯電トナーと感光体間の付着力を測定した。その結果、トナーの静電付着力がトナー帯電量の二乗に比例し、その比例係数が外添剤被覆率の増加と共に減少することを明らかにした。チャージパッチモデルに基づいて解析した結果、この外添剤による静電付着力の変化を、外添剤の帯電によるトナー表面の電荷分布の変化によって説明できることを示した。従来の研究ではトナー付着力における非静電付着力と静電付着力の寄与や各付着力に対する外添剤の作用メカニズムが明確でなかったが、本研究により明確化することができた。

本研究により、トナー付着力を制御するには、トナー表面の幾何学的な構造および電荷分布を制御することが重要であることを明らかにした。しかし、トナー付着力は、トナーが付着している対象、環境条件、電子写真の様々なプロセス条件等の様々な要因に依存するため、これらの要因との関係を系統的に研究していく必要がある。また、トナー表面の電荷分布の計測等の微視的な計測、理論的な解析等により、トナー付着力のより詳細なメカニズムの解明が求められる。

本章で述べたトナーの付着力に関する測定技術および解析結果は、転写チリの解析におけるトナー挙動シミュレーション、中抜けの発生メカニズムの検証等、本研究の対象である転写の画像劣化現象の解析に活用されている。

## 第3章 単色画像における転写チリの解析

### 3-1 研究の目的

本章では、転写プロセスにおける重要な画質劣化現象である転写チリ、特に様々なモデル<sup>(3-1)-(3-3)</sup>が提示されている単色画像における転写チリの発生メカニズムを明らかにする。まず、転写チリの発生過程を明らかにするために、平行平板型の転写モデル実験装置を用いて、転写過程におけるトナー挙動を観察する。また、観察結果の画像解析により転写チリ発生過程を定量化し、様々な転写パラメータと転写チリの定量的関係を明らかにする。つぎに、平行平板間の転写プロセスにおける3次元トナー挙動シミュレーションを実施し、転写チリ発生過程の観察結果と比較することにより、シミュレーションを検証する。観察およびシミュレーションの結果から、単色画像における転写チリ発生モデルを示す。また、転写チリに対する転写パラメータの影響について考察し、転写チリの抑制指針を示す。

### 3-2 トナー挙動の観察方法

#### 3-2-1 転写モデル実験装置

感光体から記録媒体または中間転写体への転写過程におけるトナー挙動を可視化するには、転写ニップ近傍に光を照射する必要があるが、光を照射すると感光体上の静電潜像が消えてしまうため、感光体を用いたプロセスにおける可視化は困難である。そこで、感光体の潜像電荷の代わりに電極に電圧を印加し、電極上にトナーを現像する方式を採用した。また、トナー挙動の可視化が容易であり、シミュレーションとの対応を検証しやすいことから、図3-1のような平行平板型の転写モデル実験装置を作製し、トナー挙動の可視化をおこなった。平行平板の接近、接触、分離のプロセスは、実際の転写システムにおける感光体と転写体間の転写ギャップの変化に対応している。

本装置では、感光体の代わりに、透明なITO(Indium Tin Oxide)電極を形成したガラス基板上に厚さ約6 $\mu\text{m}$ のポリカーボネート(PC)膜を形成した擬似感光体を用いている。ITO電極は楕型ラインパターン(ライン幅:0.1mm、ライン間隔:1mm)になっており、ラインに画像部電位、ライン間に非画像部電位を印加する。本装置は、現像部、転写部、観察部から構成されている。現像は二成分現像方式を用い、回転する現像ローラ上を擬似感光体が平行移動することによりトナーを現像する。また、中間転写ベルト方式の転写システムを想定して、金属板に中間転写ベルトを貼り付けた転写体を上下させ、転写体と擬似感光体を接離することによりトナーを転写する。トナー挙動の観察は、擬似感光体の裏面からマイクロ스코プ(キーエンス社製、VH-5900)を用いておこなった。



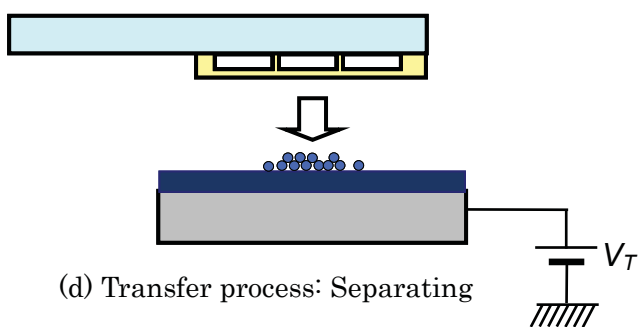
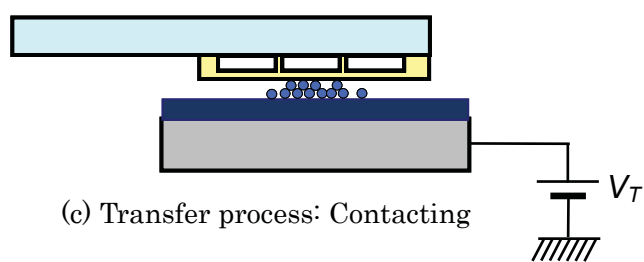
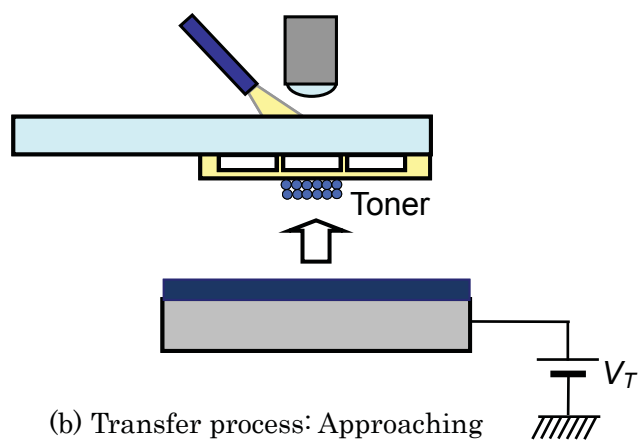
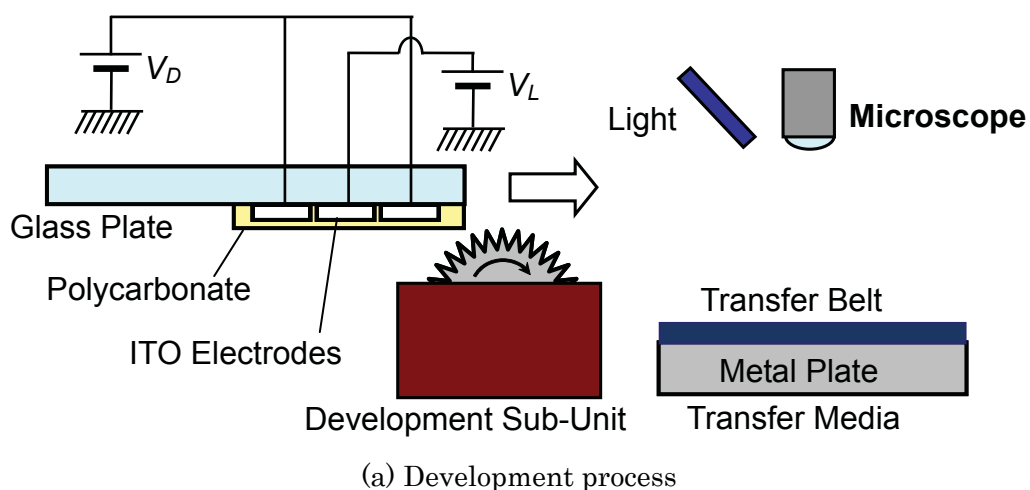


Fig.3-1 Schematic diagram of the experimental setup for single color transfer process between parallel plates.

### 3-2-2 転写チリ発生過程の観察方法

転写モデル実験装置を用いて転写チリの発生過程を観察する方法について述べる。まず、図 3-1(a)のように、ITO 電極に画像部電位  $V_L$  および非画像部電位  $V_D$  を印加した状態で、現像バイアスを印加した回転する現像ローラ上で擬似感光体を平行移動させ、擬似感光体上にライントナー画像を形成する。つぎに、図 3-1(b)のように転写電位  $V_T$  を印加した状態の転写体を一定速度で接近させ、図 3-1(c)のように一定の圧力でトナー画像を転写体に接触させ、図 3-1(d)のように一定速度で転写体を遠ざけて転写体上にトナー画像を転写する。この一連の転写過程におけるトナーの挙動を観察する。実際の転写システムでは、感光体と転写ベルトの接近および分離速度は転写ニップからの距離に依存して変化し、速度は 10~100 mm/s のオーダーであるが、本装置で使用した観察装置ではこの速度でのトナー挙動を観察することができないため、低速(4  $\mu$  m/s)で観察した。

トナー挙動を観察する際には、擬似感光体上または転写ベルト上のトナーに焦点を合わせる必要がある。転写ベルトに焦点を合わせる場合は、転写体が上下に移動するため、転写体の移動に合わせてマイクロスコップのレンズを上下に移動する必要がある。擬似感光体に焦点を合わせる場合は、レンズを移動する必要はないが、転写ベルトが擬似感光体から離れるに従って転写ベルト上のトナーが不鮮明になるため、焦点深度の深いレンズを用いる必要がある。

接近過程でのトナー挙動を観察する場合、転写ベルト上のトナーに焦点を合わせると、擬似感光体上の転写していないトナー画像が不鮮明になり、このトナー画像に遮られて転写ベルト上のトナー画像が広い範囲で遮られる。このため、接近過程では、擬似感光体上のトナーに焦点を合わせ、焦点深度の深いレンズ(キーエンス社製ズームレンズ Z-35)を用いてトナー挙動を観察した。一方、分離過程では、図 3-1(d)のように擬似感光体上のトナーが少ないので、擬似感光体上トナーにはほとんど遮られずに転写ベルト上のトナーを観察することができ、転写ベルトに焦点を合わせて観察することができる。

### 3-2-3 転写チリ発生過程の定量化方法

観察した動画像から転写チリ発生過程を定量化する方法について述べる。転写体が擬似感光体に接近する過程を観察した動画像から抽出した画像を図 3-2 に示す。ライン画像周辺部に付着しているトナーを「チリトナー」とし、転写チリ発生量としてこのチリトナーの数を計測し、接離過程における転写チリ発生過程を定量化した。チリトナー数の計測は、画像計測ソフトウェア(Media Cybernetics 社製、ImageProPlus)を用い、ライン画像の周辺部に付着したトナーの中でラインに接触していないトナー(図 3-2 において輪郭が赤いトナー)の粒子数を計測した。ライン画像の周辺部に付着したトナーには、現像時に非画像部に付着したトナーも含まれるため、ラインに非接触のトナー数から転写チリ発生前の非接触トナー数を差し引き、画像内のライン長さで割った値をチリトナー数  $N$  とした。

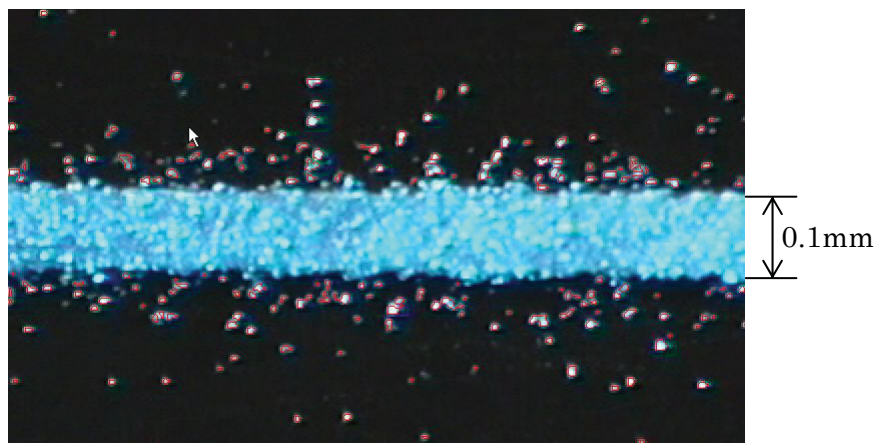


Fig.3-2 Photograph of a scattered line image.

転写体は一定速度で移動しているため、録画した動画像の各フレームにおける擬似感光体と転写体間の距離(転写ギャップ) $Z$ は、録画開始時の  $Z$ 、転写体の接近速度、経過時間から求めることができる。このため、各フレームにおけるチリトナー数  $N$  を計測することにより、チリトナー数  $N$  の転写ギャップ依存性を求めることができる。

### 3-3 転写チリ発生過程の可視化

3-2 で述べたトナー挙動観察方法により、転写チリ発生過程を観察した。本観察の実験条件を表 3-1 に示す。ただし、 $Q/M$  は現像トナーの単位重量当たりの帯電量を示し、 $M/A$  は現像トナーの単位画像面積当たりの重量を示している。

Table 3-1 Experimental conditions

Electric potential of image area $V_L$	-100 [V]
Electric potential of non-image area $V_D$	-280 [V]
Electric potential of transfer $V_T$	600 [V]
Average diameter of toner	6.8 [ $\mu$ m]
Charge-to-mass ratio of toner $Q/M$	-27 [ $\mu$ C/g]
Amount of toner $M/A$	0.6 [mg/cm <sup>2</sup> ]

観察により得られた動画像から抽出した静止画の拡大画像を図 3-3(a)~(f)に示す。図 3-3(a)は  $Z = 300 \mu$  m における画像で、ライン周辺に付着しているトナーは現像時に非画像部に付着したトナーで、転写チリは発生していない。図 3-3(b)は  $Z = 200 \mu$  m における画像で、 $Z = 300 \mu$  m の場合よりもライン周辺に付着しているトナーが増加しており、転写

チリが発生していることがわかる。図 3-3(c)、(d)は  $Z = 150 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$  における画像で、 $Z = 200 \mu\text{m}$  の場合よりもチリトナー数が増加している。 $Z = 100 \mu\text{m}$  までの画像では、ライン画像部の擬似感光体に接触しているトナーには変化が見られないことから、 $Z = 100 \mu\text{m}$  までに発生したチリトナーは、現像トナー層において転写体に近い層から転写したトナーの一部と考えられる。図 3-3(e)の  $Z = 50 \mu\text{m}$  における画像ではライン画像部に穴部が見られ、擬似感光体に接触しているトナーの一部が転写していることがわかる。また、チリトナー数は  $Z = 100 \mu\text{m}$  の場合とほとんど変わらないが、ライン画像のエッジ部が乱れている。図 3-3(f)は  $Z = 10 \mu\text{m}$  における画像で、ライン画像部の擬似感光体に接触しているトナーの多くが転写している。さらに、擬似感光体と転写体の分離過程についてもトナー挙動を観察したが、新たな転写チリは発生しておらず、転写体が擬似感光体に接近する過程でのみ転写チリが発生していることがわかった。

図 3-3 の転写チリ発生過程を定量化した結果を図 3-4 に示す。図 3-4 のように、転写ギャップ  $Z$  が約  $300 \mu\text{m}$  より狭くなると転写チリが発生している。 $Z$  が狭まると共にチリトナー数  $N$  が徐々に増加し、 $Z$  が約  $200 \mu\text{m}$  から急激に増加し、約  $120 \mu\text{m}$  以下で飽和する傾向にある。 $Z$  が狭い領域で  $N$  が減少しているが、この理由は、図 3-3(e)のようにライン画像のエッジ部が乱れ、チリトナーの一部がエッジ部に接触してライン画像に取り込まれたためである。図 3-4 における赤のラインは、非画像部における放電発生ギャップを示している。図 3-4 の結果は、放電が発生する前に転写チリが発生していることを示している。なお、放電発生ギャップは、非画像部にけるギャップ両端の電位差がパッシェンの放電電位に一致するギャップから求めた。画像部は転写電位との電位差が小さく、非画像部よりも放電しにくいので、放電ギャップはさらに狭い。

以上の観察結果から、転写チリは擬似感光体と転写体が接近する過程で発生していることを明らかにした。Schein<sup>(3-1)</sup>らは、放電によってトナー画像のエッジ部が乱れるモデルを提示しているが、図 3-4 の結果は放電が転写チリの主要因ではないことを示している。また、Rushing<sup>(3-2)</sup>らはトナー付着面に水平方向の作用力によって転写チリが発生するモデルを提示しているが、本観察は平行平板の近接過程でのトナー挙動を観察しており、トナー付着面に水平方向の力は作用しておらず、転写チリの主要因ではない。また、Nakayama<sup>(3-3)</sup>らは、2次元の転写シミュレーションによって、感光体と転写体が接近する過程でトナーが飛翔し、トナー間の静電反発力によって転写チリが発生する様子を示しているが、本観察により感光体と転写体の接近過程での転写チリ発生が確認され、このシミュレーションと整合している。3-6 の節では、2次元よりも現実に近い3次元の転写シミュレーションにより転写過程におけるトナー挙動を計算し、観察結果と比較する。さらに、3-7-1 項で転写チリの発生モデルについて考察する。

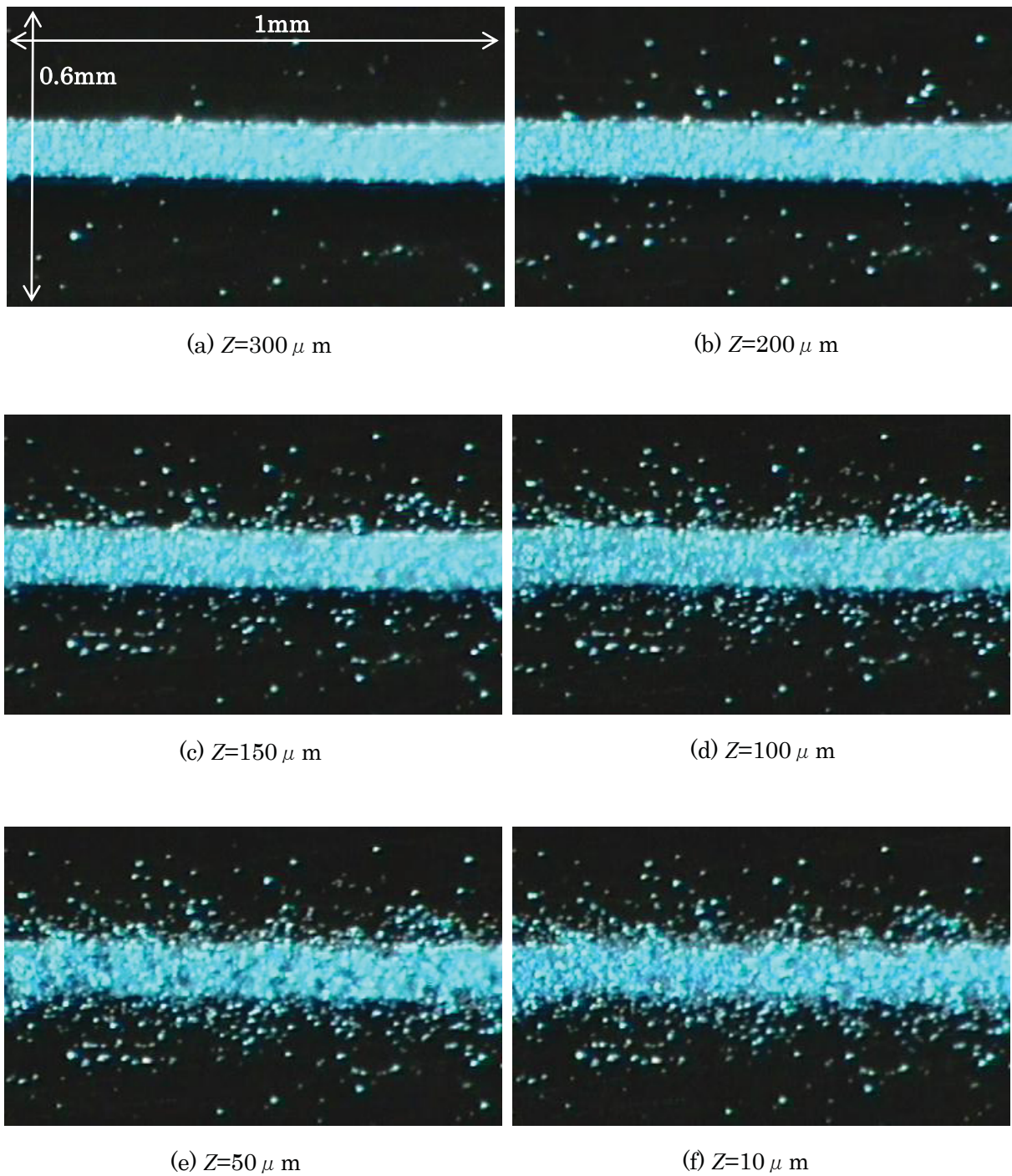


Fig.3-3 Observed toner scattering images.

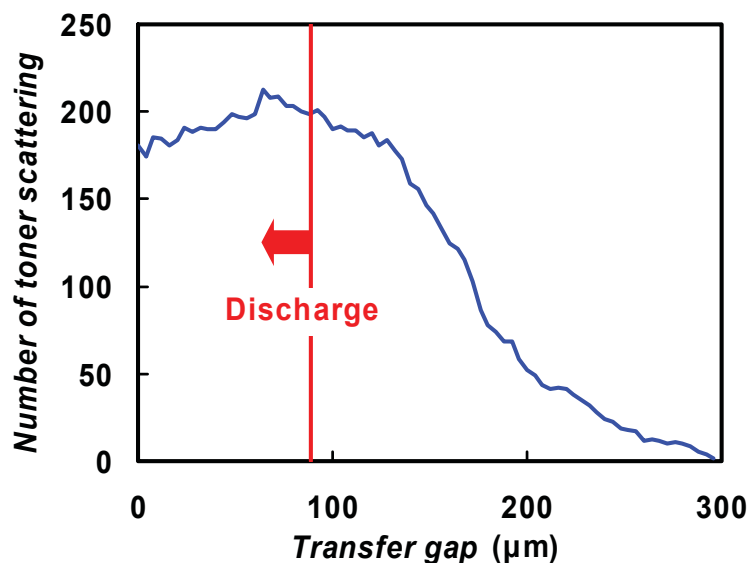


Fig.3-4 Experimental result of relationship between the number of toner scattering and the transfer gap.

### 3-4 転写チリと転写パラメータの定量的関係

つぎに、転写チリと転写パラメータの定量的な関係を明らかにするために、様々な転写パラメータの組み合わせについて、転写チリの発生過程を観察した。

#### 3-4-1 転写チリと転写電位の関係

まず、様々な転写電位  $V_T$  について転写チリ発生過程を定量化した結果を図 3-5 に示す。転写電位以外の実験条件は表 3-1 と同じである。図のように、 $V_T$  が大きいほど、広い転写ギャップから転写チリが発生しており、チリトナー数の飽和値が大きいことがわかる。このような傾向を定量的に示すために、図 3-5 に示すように転写チリが発生し始める転写ギャップ  $Z_{th}$  とチリトナー数の最大値  $N_{max}$  を求めた。図 3-5 から求めた  $N_{max}$  および  $Z_{th}$  と画像部電位と転写電位の電位差  $V_T - V_L$  の関係を図 3-6 および図 3-7 に示す。なお、横軸を  $V_T - V_L$  にしたのは、画像部における転写電界が画像部電位と転写電位の電位差に依存するためである。図のように、 $N_{max}$  および  $Z_{th}$  が  $V_T - V_L$  に比例して増加していることがわかる。図 3-5 からわかるように、 $N_{max}$  は各転写ギャップで発生したチリトナー数を累積した値であるが、 $Z_{th}$  が大きいとチリトナー数の累積範囲が広がるので、累積値である  $N_{max}$  が増加すると考えられる。したがって、 $V_T - V_L$  が大きいほど  $Z_{th}$  が増大し、 $Z_{th}$  の増大と共に  $N_{max}$  が増加すると考えられる。

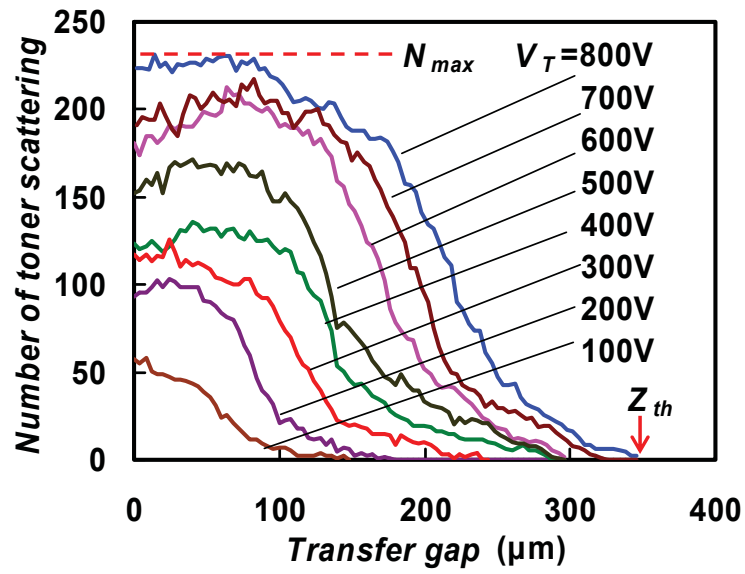


Fig.3-5 Experimental result of relationship between the number of toner scattering and the transfer gap at various transfer potential  $V_T$ .

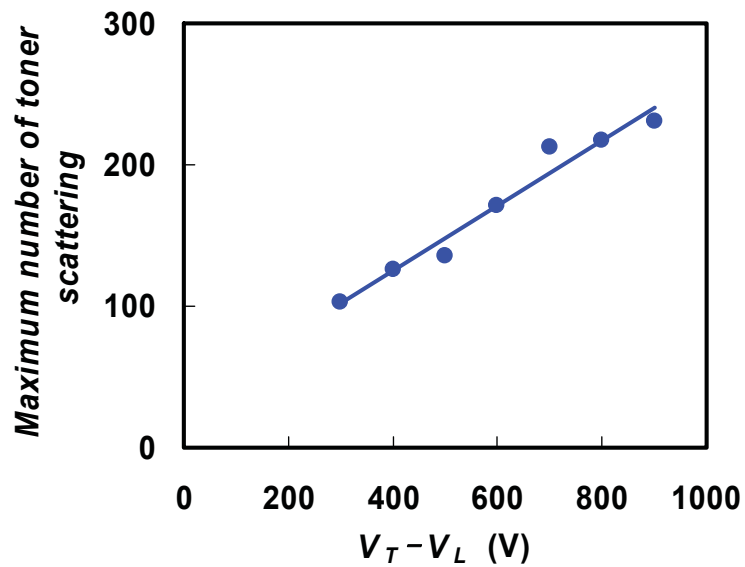


Fig.3-6 Relationship between the maximum number of toner scattering  $N_{max}$  and  $V_T - V_L$ .

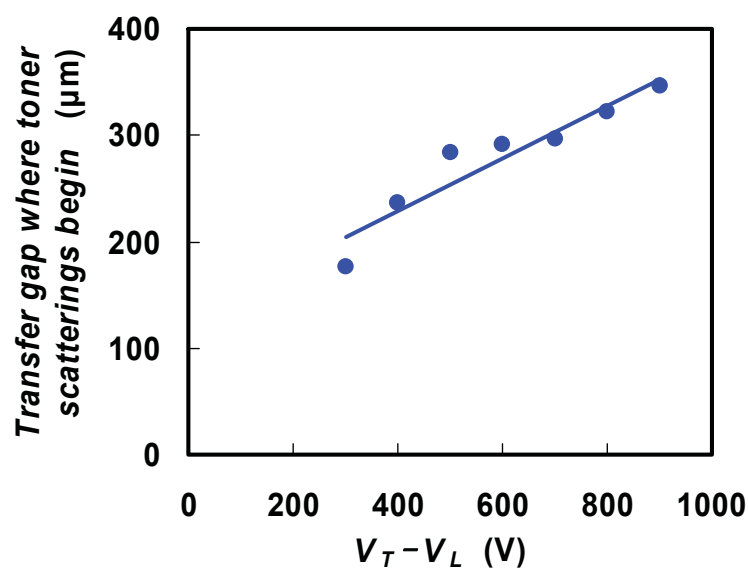


Fig.3-7 Relationship between the transfer gap where toner scatterings begin and  $V_T - V_L$ .

### 3-4-2 転写チリと非画像部電位の関係

つぎに、転写チリに対する非画像部電位  $V_D$  の影響について検討した。 $V_D$  と  $V_T$  以外は、表 3-1 と同じ実験条件で実験を行なった。なお、現像する際は一定の  $V_D$  (-300 V) で現像し、転写する際に  $V_D$  を変更した。様々な転写電位  $V_T$  における  $N_{max}$  および  $Z_{th}$  と画像部と非画像部電位差  $V_L - V_D$  の関係を求めた結果を図 3-8 および図 3-9 に示す。図のように、 $N_{max}$  および  $Z_{th}$  は  $V_L - V_D$  に比例して減少していることがわかる。この場合は 3-7-1 項と逆の傾向で、 $V_L - V_D$  が大きいほど  $Z_{th}$  が低下し、 $Z_{th}$  の低下と共に  $N_{max}$  が減少すると考えられる。

以上のように、 $N_{max}$  および  $Z_{th}$  は転写電位と画像部の電位差  $V_T - V_L$  に比例して増加し、画像部と非画像部の電位差  $V_L - V_D$  に比例して減少する。そこで、図 3-8 および図 3-9 の横軸を  $(V_T - V_L) - (V_L - V_D)$  にしたところ、図 3-10 および図 3-11 に示すように、ほぼ同一直線上にプロットされた。このように、 $N_{max}$  および  $Z_{th}$  は、チリトナーを増やす電位  $V_T - V_L$  とチリトナーを減らす電位  $V_L - V_D$  の差に比例し、転写チリが両者のバランスに依存していることがわかる。



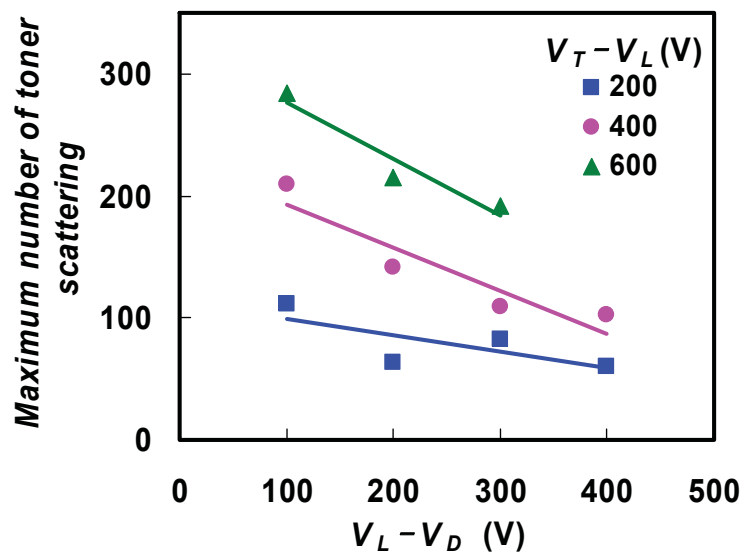


Fig.3-8 Relationship between the maximum number of toner scattering and  $V_L - V_D$ .

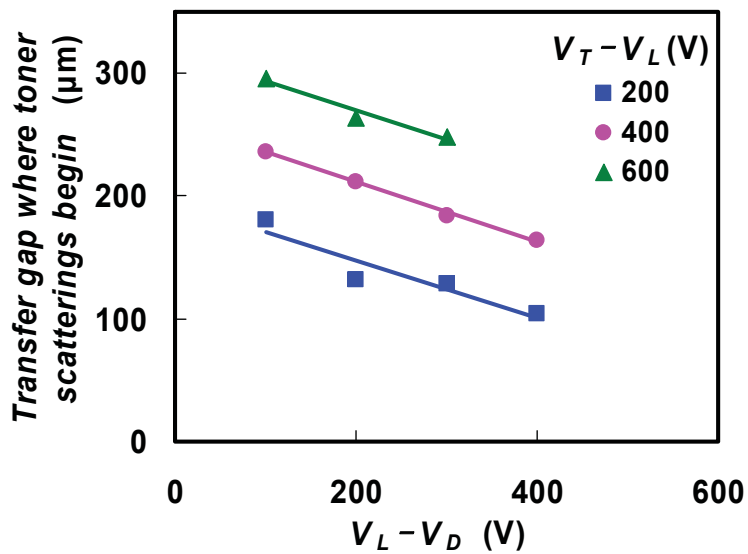


Fig.3-9 Relationship between the transfer gap where toner scatterings begin and  $V_L - V_D$ .

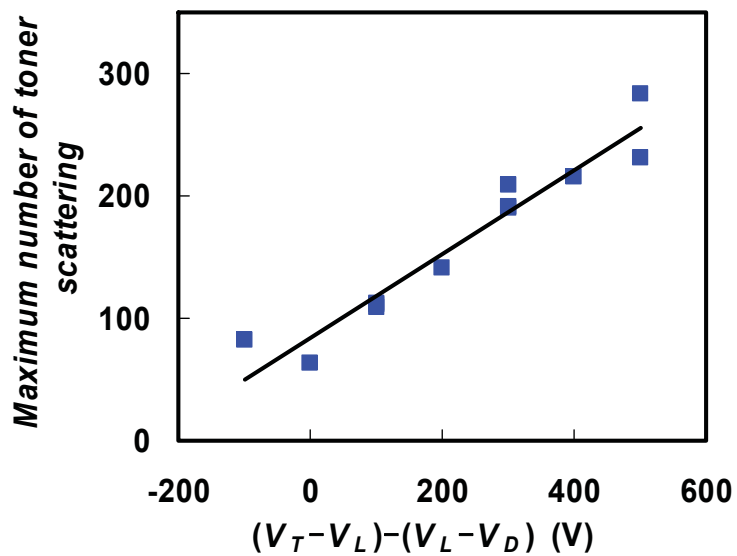


Fig.3-10 Relationship between maximum number of toner scattering and  $(V_T - V_L) - (V_L - V_D)$ .

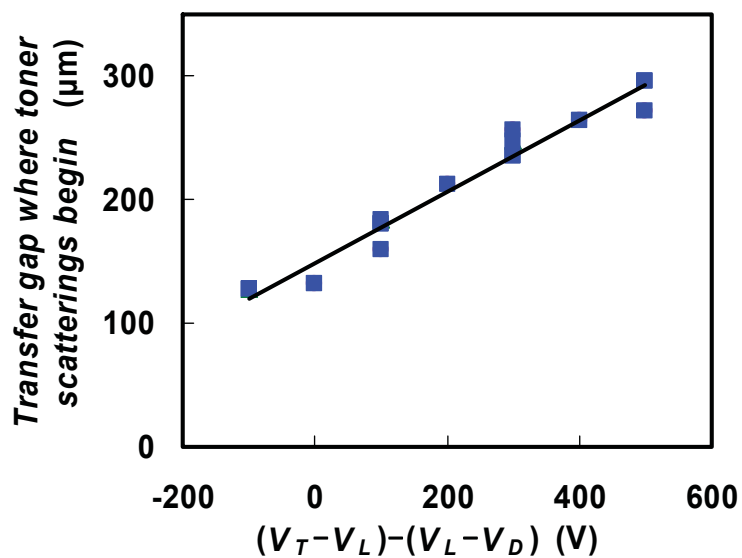


Fig.3-11 Relationship between the transfer gap where toner scatterings begin and  $(V_T - V_L) - (V_L - V_D)$ .

3-4-3 転写チリとトナー付着量の関係

3-4-1 項と 3-4-2 項では一定のトナー付着量 ( $M/A = 0.6 \text{ mg/cm}^2$ ) における転写チリに対する転写電位および非画像部電位の影響について検討したが、つぎに  $M/A$  が異なる場合について同様の検討を実施した。実験条件は、 $M/A$ 、 $V_T$ 、 $V_D$  以外は表 3-1 と同じである。なお、3-4-2 項の場合と同様に、現像の際には  $M/A$  に応じた一定の  $V_D$  で現像し、転写する際に  $V_D$  を変更した。各  $M/A$  についての  $N_{max}$  および  $Z_{th}$  と  $(V_T - V_L) - (V_L - V_D)$  の関係を図 3-12 および図 3-13 に示す。図のように、各  $M/A$  について  $N_{max}$  および  $Z_{th}$  は  $(V_T - V_L) - (V_L - V_D)$  に比例して増加し、 $M/A$  が大きいほど比例直線が上方にシフトしていることがわかる。

トナー付着量によって変化する電位としてはトナー層表面電位  $V_{toner}$  があり、 $M/A$  の増加と共に  $V_{toner}$  が増大する。この  $V_{toner}$  を用いることにより、図 3-12 および図 3-13 の  $M/A$  が異なる各比例直線を一つの直線関係で表わすことを試みた。トナー層表面電位は表面電位計によって計測することができるが、ライン画像は線幅が  $0.1 \text{ mm}$  と狭いため、通常の表面電位計ではライン画像のみの電位を計測することができない。そこで、 $V_{toner}$  を計算式によって見積もった。計算モデルを図 3-12 に示すが、ITO 電極上に形成されたポリカーボネート層(PC Layer)上のトナー層を示している。

ガウスの定理により、ポリカーボネート層内の  $z$  軸方向の電界  $E_p$  を求める。

$$\oint_S E_p dS = \frac{\sigma S}{\epsilon_p \epsilon_0} = \frac{-\rho_t d_t S}{\epsilon_p \epsilon_0} \tag{3-1}$$

ここで、 $S$  は電極面積、 $d_p$ 、 $\epsilon_p$  はポリカーボネート層の厚み、比誘電率、 $\sigma$  はトナー層電荷によって電極に誘導される電荷の面積電荷密度、 $\rho_t$ 、 $d_t$  はトナー層の電荷密度、厚みを示す。式(3-1)より、 $E_p$  は式(3-2)のように表わせる。

$$E_p = \frac{-\rho_t d_t}{\epsilon_p \epsilon_0} \tag{3-2}$$

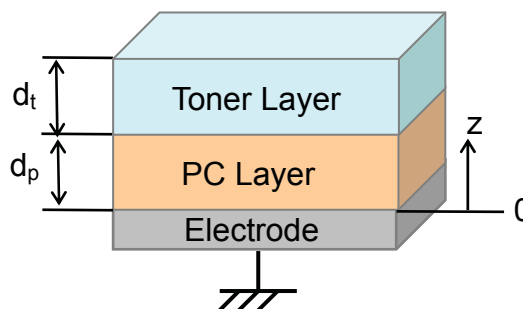


Fig.3-12 Schematic illustration of electric field calculation model.

式(3-2)より、ポリカーボネート層表面の電位  $V_p$  は式(3-3)のように示される。

$$V_p = -\int_0^{d_p} \frac{-\rho_t d_t}{\varepsilon_p \varepsilon_0} dz = \frac{\rho_t d_t d_p}{\varepsilon_p \varepsilon_0} \quad (3-3)$$

同様に、トナー層内の  $z$  軸方向の電界  $E_{toner}$  を求める。

$$\oint_S E_{toner}(z) dS = \frac{\rho_t(z-d_p)S + \sigma S}{\varepsilon_t \varepsilon_0} = \frac{\rho_t(z-d_p-d_t)S}{\varepsilon_t \varepsilon_0} \quad (3-4)$$

$\varepsilon_t$  はトナー層の比誘電率を示す。式(3-4)より、 $E_{toner}$  は式(3-5)のように表わせる。

$$E_{toner}(z) = \frac{\rho_t(z-d_p-d_t)}{\varepsilon_t \varepsilon_0} \quad (3-5)$$

式(3-3)、式(3-5)より、トナー層の表面電位  $V_{toner}$  は式(3-6)のように表わせる。

$$V_{toner} = V_p - \int_{d_p}^{d_p+d_t} \frac{\rho_t(z-d_p-d_t)}{\varepsilon_t \varepsilon_0} dz = \frac{\rho_t d_t}{\varepsilon_0} \left( \frac{d_p}{\varepsilon_p} + \frac{d_t}{2\varepsilon_t} \right) \quad (3-6)$$

以上より、ITO 電極に画像部電位  $V_L$  が印加されているライン画像のトナー層表面電位  $V_{toner}$  を式(3-7)により見積もった。

$$V_{toner} = \frac{\rho_t d_t}{\varepsilon_0} \left( \frac{d_p}{\varepsilon_p} + \frac{d_t}{2\varepsilon_t} \right) + V_L \quad (3-7)$$

トナー層厚  $d_t$  はキーエンス社製超深度形状測定顕微鏡 VK8500 により計測した。トナー層の電荷密度  $\rho_t$  は、以下の式(3-8)から見積もった。 $M/V$  はトナー層の緩み嵩密度で、JIS 規格 (Z2504) で定められた方法により測定した。

$$\rho_t = \left(\frac{Q}{M}\right)\left(\frac{M}{V}\right) \quad (3-8)$$

トナー層の誘電率 $\epsilon_t$ は以下の式(3-9)から見積もった。 $\delta_t$ はトナーの真比重、 $\epsilon_{tp}$ はトナー粒子の比誘電率で、トナーに使用している樹脂の誘電率を用いた。

$$\epsilon_t = \left(\frac{I}{\delta_t}\right)\left(\frac{M}{V}\right)(\epsilon_{tp} - 1) + 1 \quad (3-9)$$

図3-12および図3-13の横軸 $(V_T - V_L) - (V_L - V_D)$ における非画像部電位 $V_L$ の代わりに $V_{toner}$ を用い、横軸を $(V_T - V_{toner}) - (V_{toner} - V_D)$ とすると、図3-14および図3-15のようにほぼ同一直線上にプロットされた。このように、トナー層表面電位を用いることにより、転写チリと転写パラメータの関係に対するトナー付着量の影響を表わせることを確認できた。

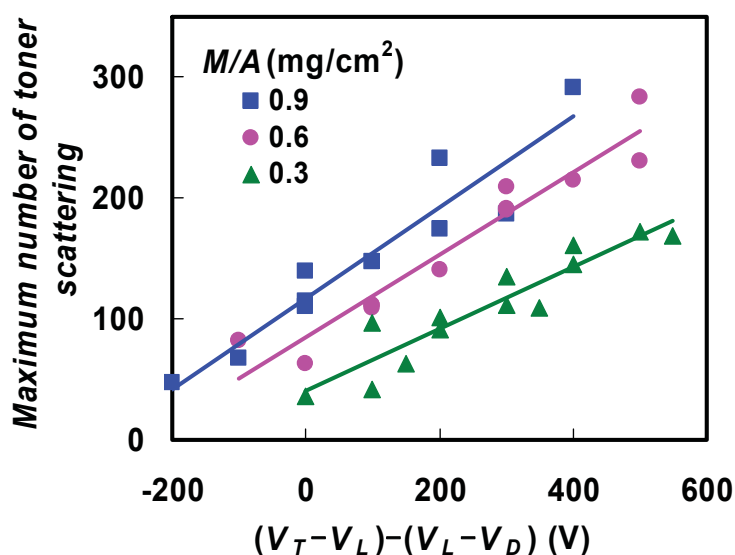


Fig.3-12 Relationship between maximum number of toner scattering and  $(V_T - V_L) - (V_L - V_D)$ .

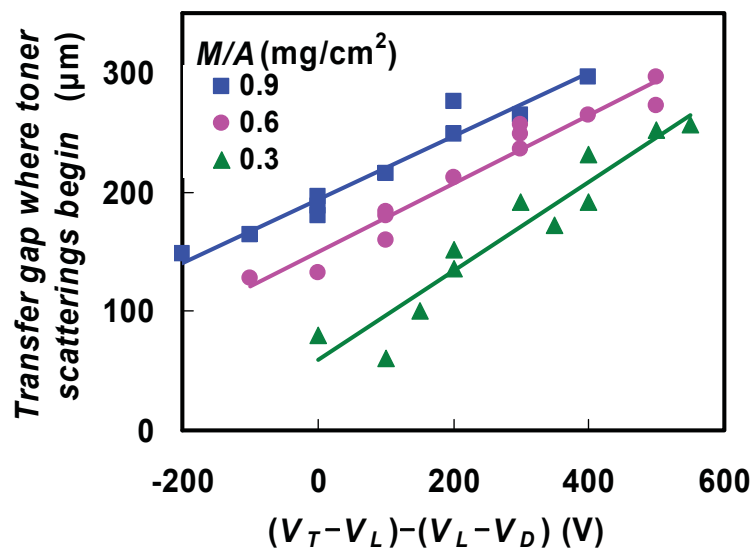


Fig.3-13 Relation between the transfer gap where toner scatterings begin and  $(V_T - V_L) - (V_L - V_D)$ .

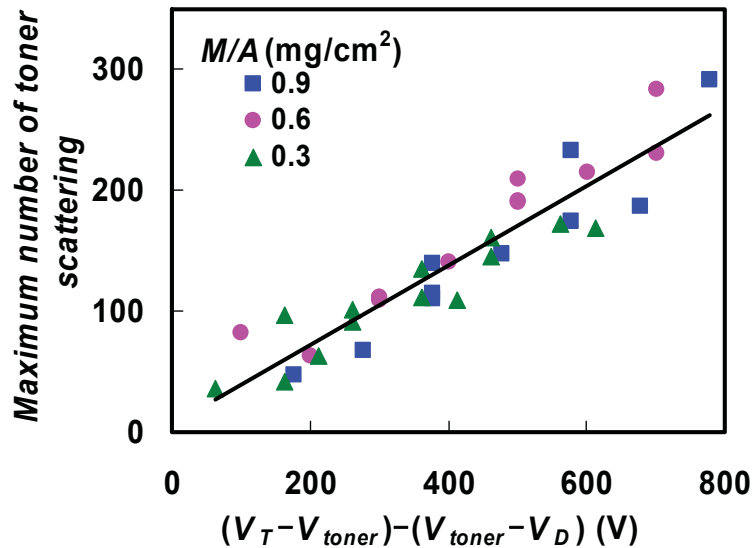


Fig.3-14 Relationship between maximum number of toner scattering and  $(V_T - V_{toner}) - (V_{toner} - V_D)$ .

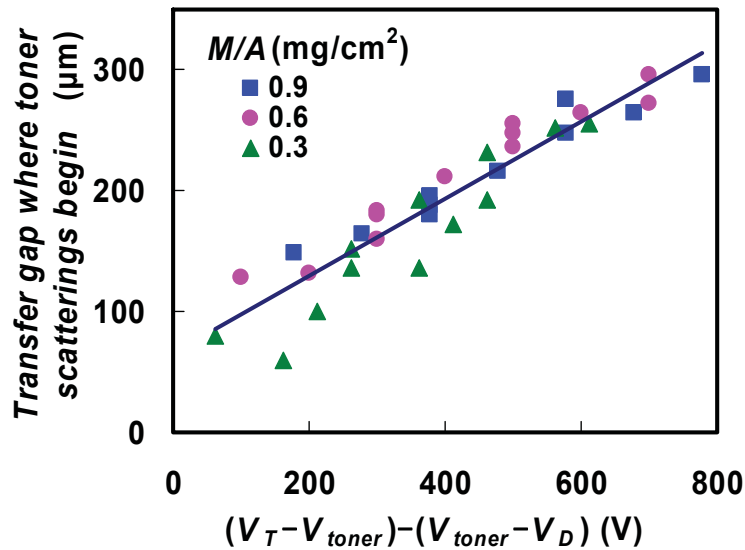


Fig.3-15 Relationship between the transfer gap where toner scatterings begin and  $(V_T - V_{toner}) - (V_{toner} - V_D)$ .

図 3-14 から、チリトナー数  $N_{max}$  と転写に関する電位  $V_T$ 、 $V_D$ 、 $V_{toner}$  の関係が式(3-10)のように表わせることが明らかになった。

$$N_{max} = \alpha[(V_T - V_{toner}) - (V_{toner} - V_D)] + N_0 \quad (3-10)$$

ここで、 $\alpha$  は比例係数、 $N_0$  は  $(V_T - V_{toner}) - (V_{toner} - V_D) = 0$  における  $N_{max}$  である。式(3-10)より、転写チリ発生量は転写チリを増やす項  $V_T - V_{toner}$  と転写チリを抑制する項  $V_{toner} - V_D$  の差によって決まる。このため、転写チリを抑制するには、 $V_T - V_{toner}$  が小さく、 $V_{toner} - V_D$  が大きくなるように、 $V_{toner}$  に合わせて  $V_T$  と  $V_D$  を設定する必要がある。

#### 3-4-4 転写チリとトナー付着力の関係

3-4-3 項まではすべて同じトナー(トナーA)を用いて検討したが、転写チリに対するトナー付着力の影響を明らかにするために、付着力の異なるトナー(トナーB)を用いた場合の転写チリと転写パラメータの関係について検討した。第 2 章で説明した測定方法で実験に使用したトナーと感光体間付着力を測定した結果、トナーAは  $36 \text{ nN}$  ( $Q/M = -27 \mu\text{C/g}$ )、トナーBは  $276 \text{ nN}$  ( $Q/M = -32 \mu\text{C/g}$ ) であった。実験条件は、転写電位  $V_T$  以外は表 3-1 と同じで、様々な  $V_T$  についての  $N_{max}$  および  $Z_{th}$  を求めた。トナーA とトナーB についての  $N_{max}$  および  $Z_{th}$  と  $(V_T - V_{toner}) - (V_{toner} - V_D)$  の関係を図 3-16 と図 3-17 に示す。図のように、付着力の大きなトナーBの  $N_{max}$  と  $Z_{th}$  についての比例直線は、トナーAに較べて下方にシフトしていること

がわかる。さらに、各トナーについての  $Z_{th}$  と  $N_{max}$  の関係を図 3-18 に示す。図のように、付着力の大きなトナーBの  $Z_{th}$  の範囲は、付着力の小さなトナーAに比べて狭ギャップ領域にあり、このためトナーBの  $N_{max}$  の範囲はトナーAよりも小さい領域になっており、転写チリ発生量が少ない。

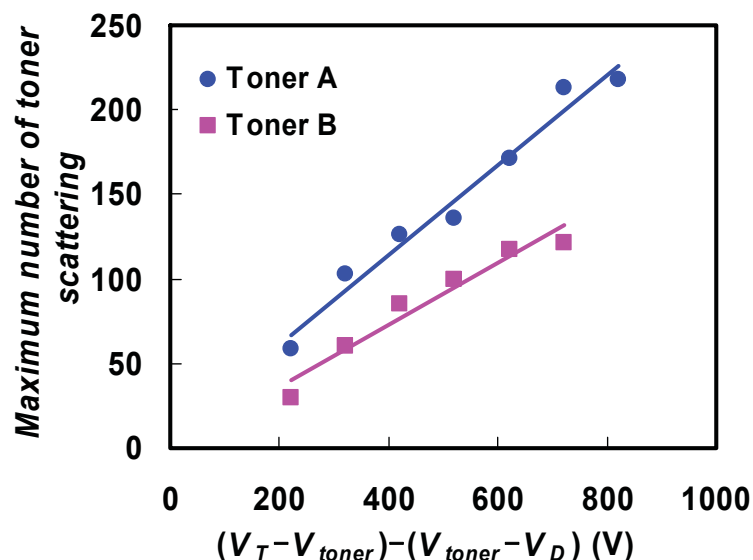


Fig.3-16 Relationship between maximum number of toner scattering and  $(V_T - V_{toner}) - (V_{toner} - V_D)$ .

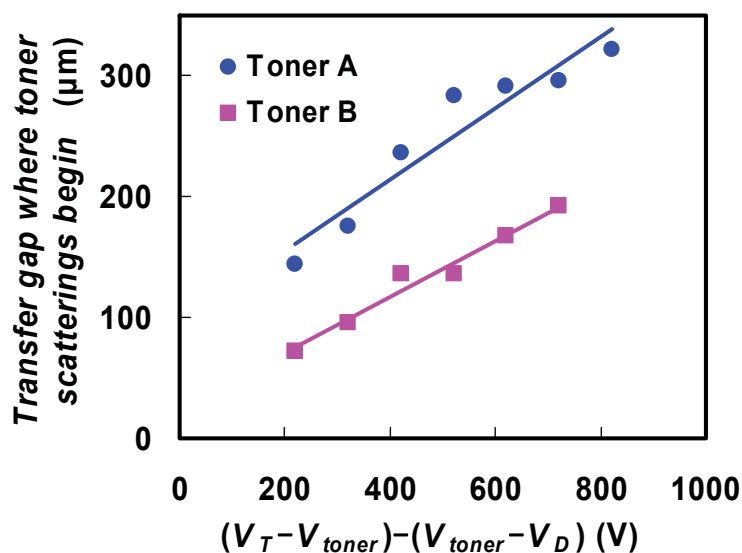


Fig.3-17 Relationship between the transfer gap where toner scatterings begin and  $(V_T - V_{toner}) - (V_{toner} - V_D)$ .



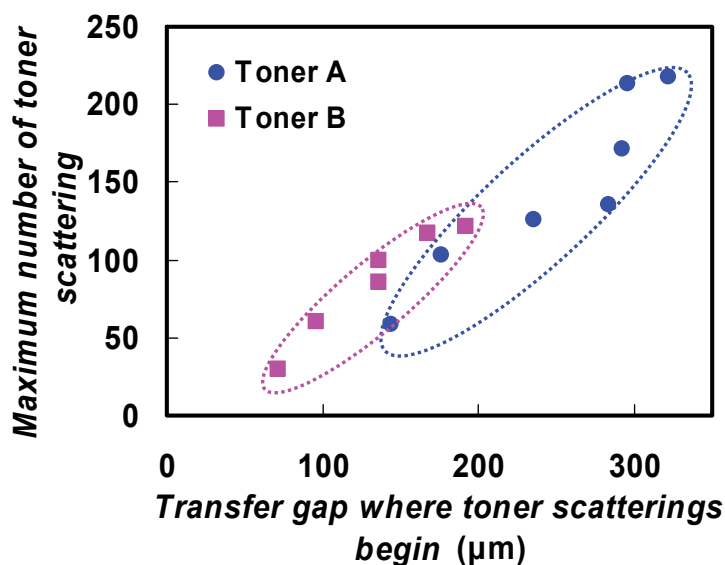


Fig.3-18 Relationship between maximum number of toner scattering and the transfer gap where toner scatterings begin.

### 3-5 トナー挙動のシミュレーション方法

これまでの実験で得られた結果の解析、転写チリのメカニズム解明のために、観察実験と同じ平行平板間での転写過程における3次元トナー挙動シミュレーションを実施するが、本セクションではシミュレーションの方法について述べる。現像や転写等、粉体が関与するプロセスでは、粉体の挙動を計算する方法として、粉体を構成する各粒子の運動を計算して粉体全体の挙動を明らかにする個別要素法<sup>(3-4)-(3-6)</sup>が用いられることが多い。個別要素法では、粒子に作用する様々な力を特定し、運動方程式により各粒子の運動を計算する。転写プロセスにおける最も重要な力は電界による静電気力であり、転写領域における電界計算が重要となる。また、各粒子の運動を計算するには、各粒子に物性値を付与する必要があるが、本シミュレーションではトナー粒子の物性値を計測値に基づいて設定している。本セクションでは、最初に電界計算方法、つぎに粒子挙動の計算方法、最後にシミュレーションの流れを示す。

3-5-1 電界計算

図3-19に本シミュレーションの計算領域の構成を示す。転写モデル実験における擬似感光体は、5 mmのガラス基板上に透明電極が形成され、その上にポリカーボネート膜が形成されているが、本計算では、ガラス基板とポリカーボネート膜をまとめて一つの基板部材とし、電極が埋め込まれている構成とした。ガラス基板は電氣的にフロートの状態であるが、計算上は接地しているものとして取り扱った。基板中には3つの電極があり、転写モデル実験と同様に一定の電位を与えるが、中央の電極の電位を画像部電位  $V_L$ 、両端の電極の電位を非画像部電位  $V_D$  に設定する。画像部電極の幅は擬似感光体と同じ  $100 \mu\text{m}$  にしているが、非画像部電極の幅は、擬似感光体では  $940 \mu\text{m}$  であるが、計算時間の都合上  $120 \mu\text{m}$  とした。また、転写モデル実験では転写体として金属板上に厚さ  $60 \mu\text{m}$  の中間転写ベルトが貼り付けられており、本計算でも中間転写ベルトの裏面に一定の転写電位  $V_T$  を与える。

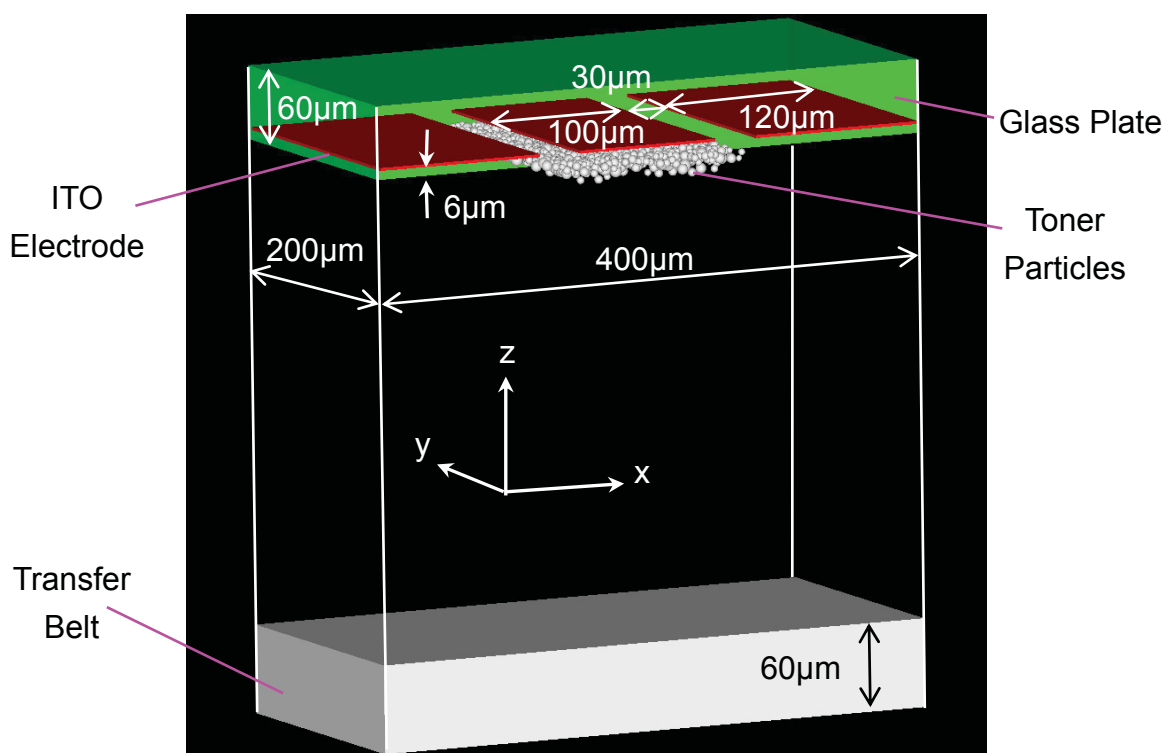


Fig.3-19 Calculation area of single color transfer process between parallel plates.

計算領域における電位 $\phi$ は、式(3-11)に示すポアソン方程式を特定の境界条件の下で解くことによって求められる。

$$\nabla^2\phi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (3-11)$$

ここで、 $\rho$ は体積電荷密度、 $\varepsilon$ は誘電率を示す。電界 $E$ は電位 $\phi$ の勾配として、式(3-12)によって与えられる。

$$E = -\nabla\phi \quad (3-12)$$

本シミュレーションでは、式(3-5)のポアソン方程式を差分化し、SOR (Successive Over Relaxation) 法を用いて電位分布を計算した。境界条件は、左右前後の境界を対象境界とし、上下境界は上記のように電位固定境界とした。ただし、トナー挙動計算においては、左右前後の境界は周期境界とした。電位および電荷はノード上、誘電率はメッシュの中で定義し、計算メッシュは3次元の直交メッシュを用いた。

トナーは粒径と帯電量に分布があり、各粒子の粒径と帯電量は計測データに基づいて設定する。トナーの粒径および帯電量の計測は、粒子帯電量分布測定装置（ホソカワミクロン製、イースパートアナライザ EST-3）を用いている。トナー粒子は画像部電極上の基板面に配置するが、トナー付着量に合わせて粒子数を設定し、粒子同士が重ならないように立体的に配置した。

転写プロセスでは、電気伝導や部材の移動による電荷の移動や放電による電荷の発生があるので、転写領域の電荷密度は時間的に変化している。平行平板間の転写過程では部材の移動による電荷の移動はないので、電気伝導と放電による電荷密度の時間変化を考慮する。電気伝導による電荷密度の時間変化は、式(3-13)に示すオームの法則により与えられる。

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = -\sigma\nabla\phi \quad (3-13)$$

ここで、 $t$ は時間、 $\sigma$ は導電率を示す。本シミュレーションでは、擬似感光体、トナーは絶縁体として取り扱い、これらの内部での電荷移動は考慮しない。一方、中間転写ベルトについては、オームの法則に基づいて電荷移動量を計算した。

転写領域における様々な空隙間の電位差 $\Delta\phi$ が、式(3-14)に示すパッシェンの放電電位 $\phi_{pa}$ 以上になると気中放電が発生する。本シミュレーションでは、擬似感光体と中間転写ベルト間の放電のみ考慮し、トナーと部材間およびトナー間の放電は考慮していない。放電によって生じる単位面積当たりの放電電荷量 $Q$ は式(3-15)で与えられ<sup>(3-7)</sup>、擬似感光体および

中間転写ベルト上に放電電荷を付与した。

$$\varphi_{pa} = \begin{cases} 75.4 \times 10^6 \times G & (G < 4.8 \times 10^{-6} \text{ m}) \\ 362 & (8 \times 10^{-6} \text{ m} \geq G \geq 4.8 \times 10^{-6} \text{ m}) \\ 312 + 6.2 \times 10^6 \times G & (G > 8 \times 10^{-6} \text{ m}) \end{cases} \quad (3-14)$$

$$Q = \frac{\varepsilon_0 (\Delta\varphi - \varphi_{pa}) \left[ \sum \left( \frac{d_i}{\varepsilon_i} \right) + G \right]}{G \sum \left( \frac{d_i}{\varepsilon_i} \right)} \quad (3-15)$$

ここで、 $G$ は空隙の大きさ、 $\varepsilon_0$ は真空の誘電率、 $\varepsilon_i'$ 、 $d_i$ は擬似感光体および中間転写ベルトの比誘電率、厚みを示す。

### 3-5-2 トナー挙動計算

個別要素法では、粉体中の粒子に作用する様々な力を特定し、運動方程式に基づいて微小時間ステップ毎に粒子の速度と変位を逐次計算することにより、粒子の軌跡が得られる。通常の個別要素法では、接触粒子間の弾性および粘性的相互作用はバネとダッシュポットで表現するフォークトモデル<sup>(3-5)</sup>が用いられる。バネに対応する弾性力は変位量とバネ定数の積として与えられるが、計算時間ステップが大きいと変位の時間増分が大きくなり、弾性力が過大に計算されてしまうため、粒子の運動が発散してしまう<sup>(3-6)</sup>。このため、接触粒子間の機械的相互作用をフォークトモデルで計算する場合は、時間ステップを十分小さくする必要があり、計算時間がかかる。転写ニップにおける転写圧力によってトナー層が圧縮され、トナーに大きな応力が作用して粒子変形が生じるような場合は、トナーの粘弾性特性が粒子挙動に大きな影響を及ぼすため、上記のような計算が必須となる。一方、観察結果から明らかなように、単色画像における転写チリは感光体と転写ベルトの接近過程で発生しており、転写チリ発生過程ではトナー層に圧力が印加されておらず、転写チリ発生時のトナー挙動に対する粘弾性特性の影響は小さいと考えられるので、本シミュレーションでは粘弾性的相互作用は考慮しない。接触粒子間の機械的相互作用をフォークトモデルで計算しない場合は、粒子間接触による運動状態の変化を剛体球間の衝突として取り扱う剛体球モデルが用いられる場合が多い<sup>(3-6)</sup>。剛体球モデルでは、フォークトモデルのような過大な弾性力が生じないので、時間ステップを大きくすることが可能で、フォークトモデルよりも計算時間を短縮することができることから、本シミュレーションでも剛体球モデルを用いて計算した。式(3-16)に運動方程式を示すが、 $\mathbf{F}$ はトナーに作用する力、 $m_i$ はトナ

一の質量、 $v_t$ はトナーの速度を表わしている。

$$F = m_t \frac{dv_t}{dt} \quad (3-16)$$

つぎに、本計算で考慮するトナーへの作用力について述べる。

(a) 静電気力

3-5-1で述べた方法により計算した各粒子の中心位置における電界  $E$ 、および各粒子の電荷  $q_t$  から、トナーに作用する静電気力  $F_q$  は式(3-17)により計算される。

$$F_q = q_t E \quad (3-17)$$

(b) 付着力

第2章で述べたように、トナーと接触対象(感光体、転写ベルト、トナー)間の付着力  $F_{ad}$  は非静電付着力  $F_{ne}$  と静電付着力  $F_e$  から構成され、 $F_{ad}$  が計測値に合うように  $F_{ne}$  と  $F_e$  を設定する。ファンデルワールス力はトナーの粒径  $D_t$  に比例するため、 $D_t$  の比例係数として計測値に合わせるための調整パラメータ  $K_{ne}$  を導入した。静電付着力は上記の静電気力の計算に含まれるが、第2章で述べたようにトナーと感光体間の静電付着力は均一帯電粒子の鏡像力では計測値に合わないため、静電付着力についても調整パラメータ  $K_e$  を導入した。感光体や転写ベルトに接触している各トナーには、式(3-18)の  $K_{ne}$  および  $K_e$  を調整して付着力の計測値に合うように設定した。また、トナー間の付着力についても、遠心分離法の計測値に合うように  $K_{ne}$  を調整した。なお、トナーの粒径  $D_t$  および帯電量  $q_t$  は、3-5-1項で述べたようにイースパートアナライザの計測値を用いた。

$$F_{ad} = F_{ne} + F_e = K_{ne} D_t + K_e \left( \frac{q_t}{D_t} \right)^2 \quad (3-18)$$

(c) 摩擦力

本計算ではトナーと接触対象間の静止摩擦力  $F_{fr}$  を考慮した。 $F_{fr}$  は接触対象物表面の接線方向に働き、式(3-19)のようにトナーと接触対象物表面との付着力  $F_{ad}$  を垂直抗力とした。 $\mu$  はトナーと接触対象間の静止摩擦係数を示す。

$$F_{fr} = \mu F_{ad} \quad (3-19)$$

(d) その他の力

トナーに作用する力としては、この他に重力と空気抵抗が挙げられる。第2章で述べた

ように、トナーの質量が小さいため、重力は他の力に比べて無視できる大きさであり、本シミュレーションでは考慮しない。また、空気の流れを考慮しない場合、空気抵抗力  $F_{air}$  は式(3-20)で与えられる<sup>(3-8)</sup>。

$$F_{air} = 3\pi\eta D_t v_t \quad (3-20)$$

$\eta$ は空気の粘性係数である。トナーの粒径  $D_t$  が  $7 \mu\text{m}$  で、速度  $v_t$  が  $1 \text{ m/sec}$  の場合、空気抵抗力の大きさは  $1 \text{ nN}$  程度となり、無視できない大きさとなるため、本シミュレーションでは空気抵抗力を考慮した。

### 3-5-3 シミュレーションの流れ

最初に、計算に必要な様々なパラメータを設定する。つぎに、転写ギャップ  $Z$  の初期設定値における計算領域のメッシュ構成、部材やトナーの配置等を設定し、電位分布・電界分布を計算する。擬似感光体と中間転写ベルト間の空隙が放電発生条件を満たす場合は、放電電荷量を計算して電荷を再配置し、再度電位分布・電界分布を計算する。トナーへの作用力を計算し、微小時間ステップ後のトナーの速度、位置を計算する。 $Z$  を微小時間ステップにおける変化  $dZ$  だけ小さくして計算領域の構成を再設定し、トナー挙動を計算する。転写ギャップが最小設定値  $Z_{min}$  になるまで同様の計算を実施する。なお、モデル実験では転写体を移動するが、本シミュレーションでは擬似感光体を移動する。

### 3-6 転写チリ発生過程のシミュレーション

3-5節で述べたシミュレーション方法により、擬似感光体と転写体の接近過程におけるトナー挙動のシミュレーションを実施した。シミュレーションで用いたパラメータを表 3-2 に示す。

Table 3-2 Parameters of calculation

Electric potential	$V_L$	-100 [V]
	$V_D$	-280 [V]
	$V_T$	600 [V]
Velocity of approach		0.3 [m/s]
PC film	Thickness	$6.0 \times 10^{-5}$ [m]
	Relative permittivity	3.3
Transfer belt	Thickness	$6.0 \times 10^{-5}$ [m]
	Relative permittivity	10.0
	Resistivity	$1.0 \times 10^7$ [ $\Omega \cdot m$ ]
Toner	Average diameter	$6.8 \times 10^{-6}$ [m]
	$Q/M$	-26.5 [ $\mu C/g$ ]
	$M/A$	0.61 [ $mg/cm^2$ ]
	Relative permittivity	1.0
Average toner adhesion	PC film	$6.0 \times 10^{-8}$ [N]
	Transfer belt	$6.0 \times 10^{-8}$ [N]
	Toner	$5.0 \times 10^{-9}$ [N]
Frictional coefficient	PC film	0.2
	Transfer belt	0.4
	Toner	0.2
Coefficient of restitution		$1.82 \times 10^{-5}$ [Pa·m]
Coefficient of viscosity		0.2
Mesh size		$2 \times 10^{-6}$ [m]
Time step		$1 \times 10^{-6}$ [s]
Transfer gap	Initial value	$3.28 \times 10^{-4}$ [m]
	Minimum value	$3.4 \times 10^{-5}$ [m]

図 3-21 および図 3-22 にトナー挙動のシミュレーション結果を示す。図 3-21 は観察実験と同じように擬似感光体の裏面から見た画像、図 3-22 は側面から見た画像を示している。図のように、転写ギャップ  $Z=304 \mu m$  ではトナーが転写していないが、 $Z=250 \mu m$  では少量転写しており、一部のトナーがライン画像周辺部に飛翔している。転写ギャップが  $Z=202 \mu m$ 、 $148 \mu m$ 、 $100 \mu m$  と狭まると共に転写トナー数が増加し、その一部がライン画像周辺部に飛翔している。このように、トナー挙動の観察によって明らかになった擬似感光体と転写体の接近過程におけるトナー挙動を、シミュレーションによって再現することができた。

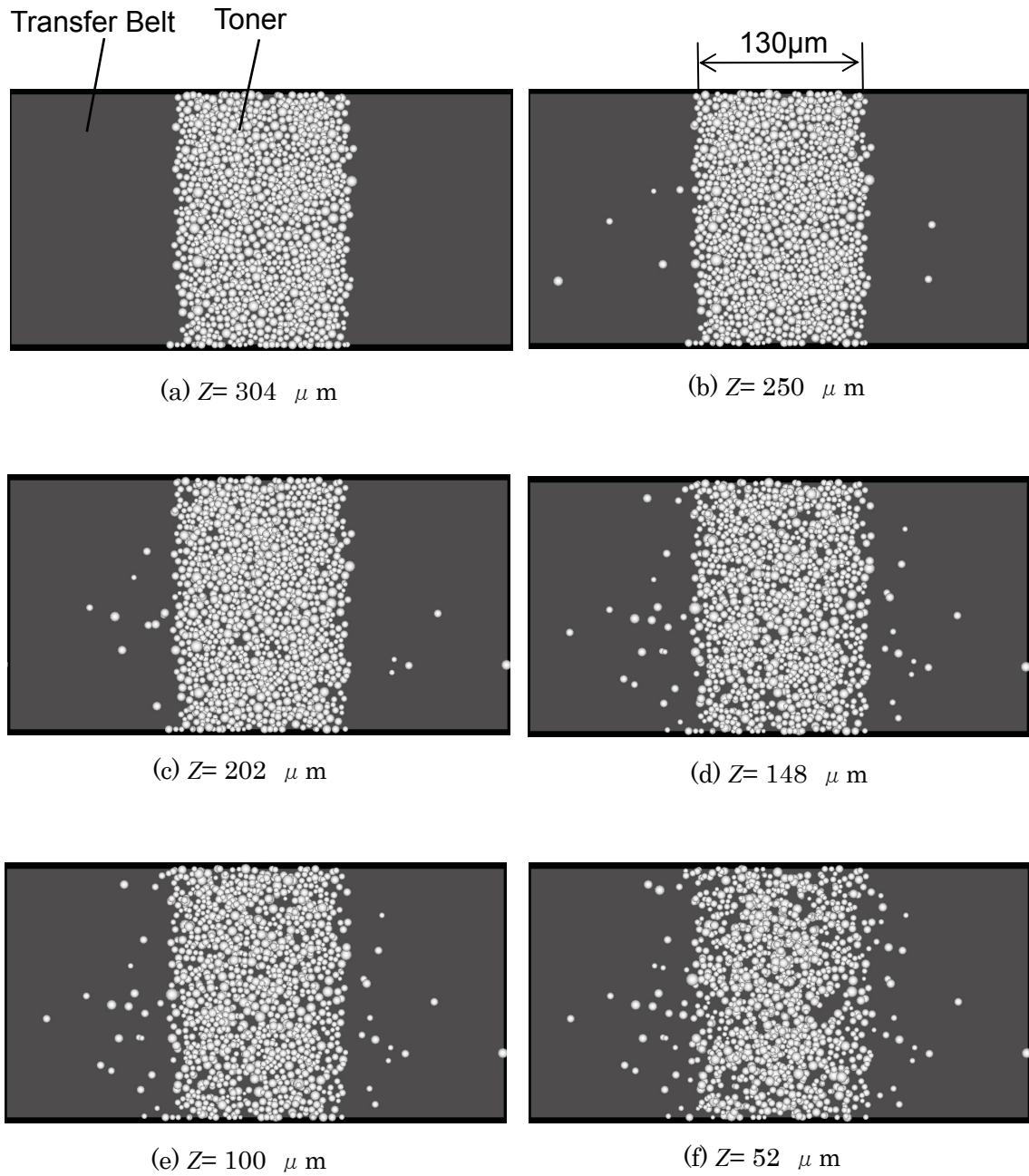


Fig.3-21 Top view of simulated toner scattering images.



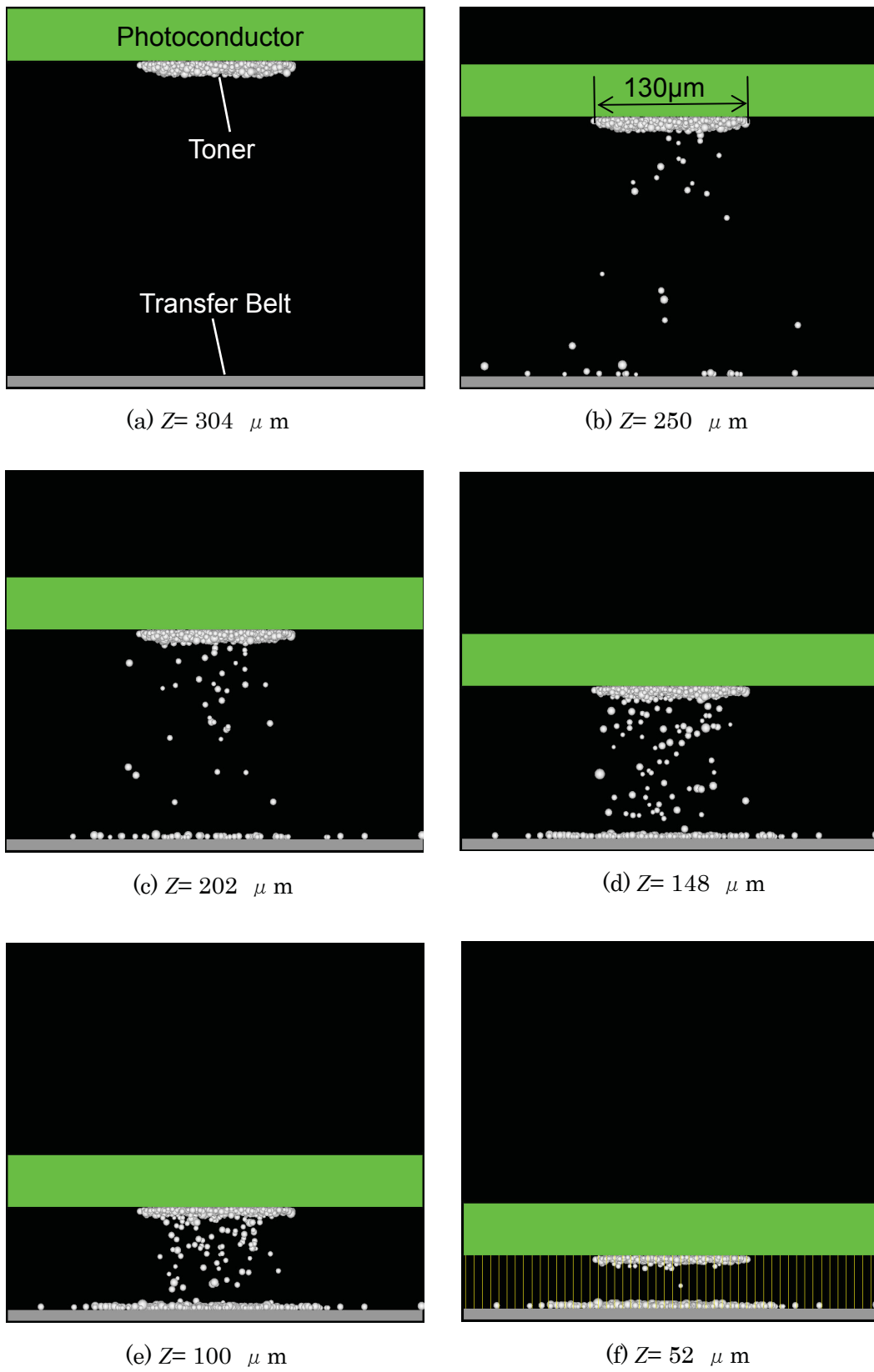


Fig.3-22 Perspective view of simulated toner scattering images.

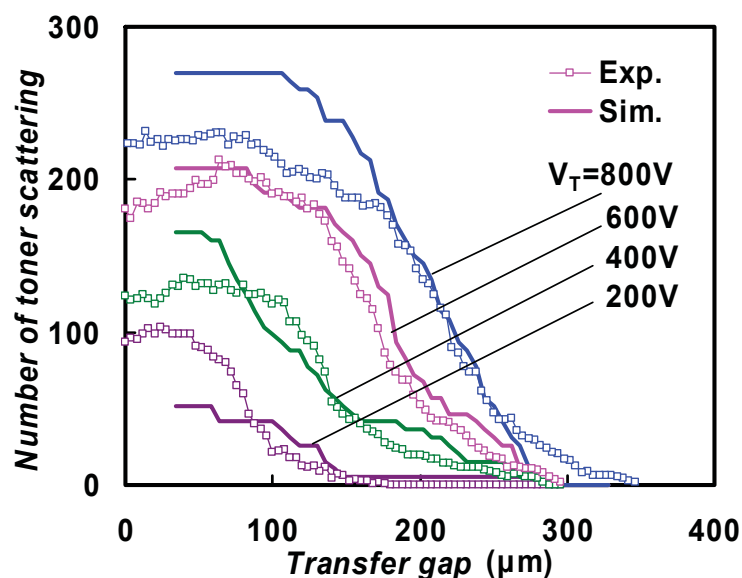


Fig.3-23 Experimental and simulation result of relationship between number of toner scattering and transfer gap.

さらに、シミュレーションと観察によるトナー挙動を定量的に比較するために、様々な転写電位  $V_T$  におけるトナー挙動を計算し、チリトナー数の転写ギャップ依存性を求めた。 $V_T$  以外の転写パラメータは表 3-2 と同じである。各  $V_T$  におけるチリトナー数の転写ギャップ依存性に関するシミュレーション結果および観察結果を図 3-23 に示す。図のように、シミュレーション結果と観察結果は、転写ギャップ依存性の傾向、転写電位による変化がよく一致している。以上のように、転写チリ発生過程を本シミュレーションによってよく再現できることが検証された。

## 3-7 考察

### 3-7-1 単色画像における転写チリの発生メカニズム

転写チリの発生メカニズムをシミュレーションに基づいて考察する。感光体上のトナー層における主な作用力は、静電気力、トナー間およびトナーと感光体間の付着力であり、これらの作用力によってトナー層からのトナー粒子の分離と分離時の運動状態が決まる。トナー粒子に作用する静電気力は、粒子位置における電界とトナー粒子の電荷量で決まるので、トナー層内の電界分布がトナー粒子の挙動に重要な影響を及ぼしている。

そこで、転写チリ発生過程におけるトナー層の電界分布について検討する。図 3-24 および図 3-25 を用いて電界の方向、電界分布を説明する。 $x$  方向はライン幅方向、 $y$  方向はライン長さ方向、 $z$  方向はトナー層厚み方向を示し、矢印の向きを正とする。電界の  $z$  成分  $E_z$  は、図 3-24 のように計算領域中央部の  $xz$  平面における分布を示す。また、電界の  $x$  成

分  $E_x$  は、図 3-25 のように  $xy$  平面における分布を示し、擬似感光体と  $xy$  平面の距離を  $H$  とする。

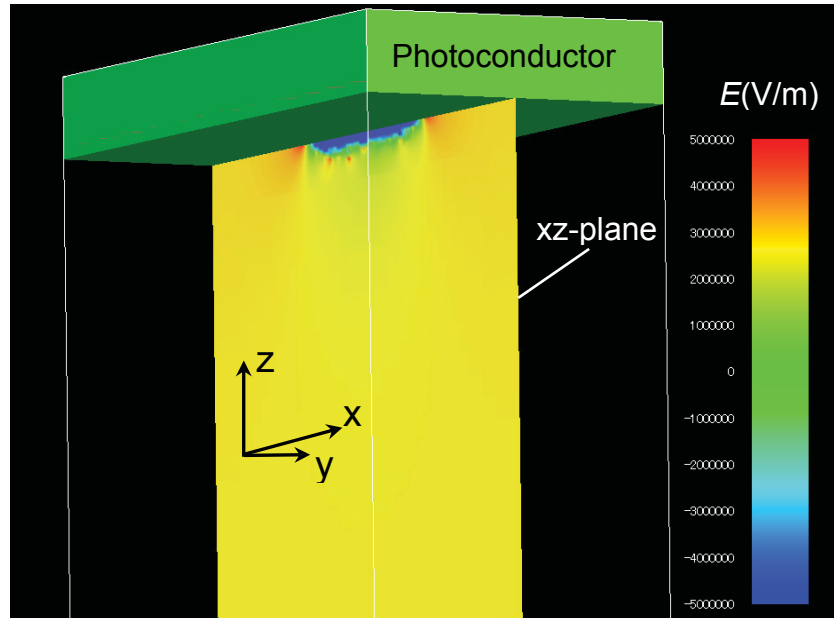


Fig.3-24 Distribution of  $E_z$  in  $xz$ -plane.

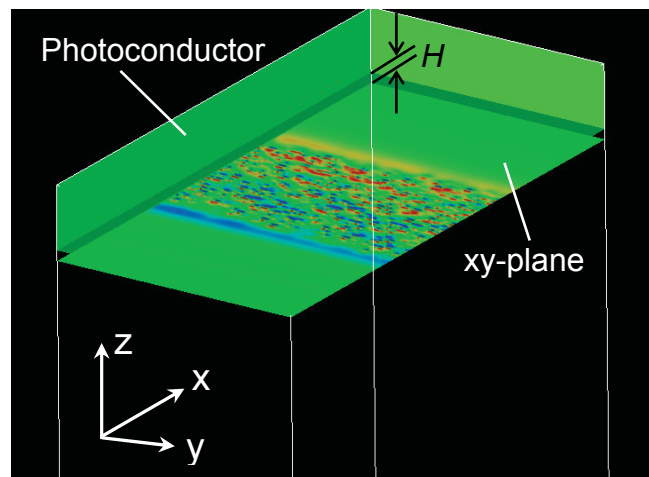


Fig.3-25 Distribution of  $E_x$  in  $xy$ -plane.

転写チリの発生過程を示した図 3-21 および図 3-22 に対応するトナー層の電界分布を用いて、転写チリの発生メカニズムについて検討する。転写ギャップ  $Z=328\ \mu\text{m}$  における電界  $E_z$  および  $E_x$  の分布を図 3-26(a) および (b) に示す。電界強度は、 $5\ \text{MV/m} \sim -5\ \text{MV/m}$  を赤～青で色分けしている。トナーの帯電極性が負なので、静電気力は電界と逆向きになる。 $E_z$  分布は、図 3-26(a) のように、擬似感光体表面に近いトナー層領域(トナー層上部とする)では負で、擬似感光体表面から離れたトナー層領域(トナー層下部とする)では正となっている。このため、トナー層上部のトナーには感光体面に付着する向きの静電気力が作用するが、トナー層下部ではトナー層から分離する向きの静電気力が作用し、静電気力がトナー間付着力よりも大きい場合はトナーがトナー層から分離する。このトナー層下部( $H=10\ \mu\text{m}$ )における  $E_x$  の分布は、図 3-26(b) のように、 $xy$  面内で正と負の領域が混在しており、赤の領域では左向き、青の領域は右向き静電気力が作用する。この赤や青の領域では、トナーが  $z$  方向と同程度の大きさの静電気力を受け、トナー層から分離する際には、 $x$  方向への加速度が  $z$  方向への加速度と同程度となり、 $x$  方向に  $z$  方向と同程度の速度で飛び出すことになる。トナー層から分離したトナーは、転写領域の電界による静電気力に応じて運動する。図 3-27(a) および (b) に、 $Z=328\ \mu\text{m}$  における転写領域全体の  $E_z$  および  $E_x$  の分布を示す。図のように、トナー層から離れた領域では  $E_x$  は小さく、 $E_z$  はほぼ一定であり、トナー層から分離したトナーは転写ベルトへ加速しながら飛翔するが、分離時に  $x$  方向の速度成分があると転写ギャップを飛翔する間に  $x$  方向に一定距離移動する。 $x$  方向の速度成分が大きく、 $z$  方向と同程度の速度で飛び出したトナーは、転写ギャップを飛翔する間にライン画像領域の外側まで飛翔して転写チリが発生すると考えられる。

転写ギャップ  $Z=304\ \mu\text{m}$ 、 $204\ \mu\text{m}$ 、 $154\ \mu\text{m}$ 、 $104\ \mu\text{m}$  における電界  $E_z$  および  $E_x$  の分布を図 3-28 および図 3-29 に示す。 $Z=204\ \mu\text{m}$  における  $E_z$  分布は  $Z=304\ \mu\text{m}$  に比べて正の領域が増え、 $Z=154\ \mu\text{m}$  における  $E_z$  分布はさらに正の領域が増え、転写ギャップが狭まると共にトナー層から分離するトナーが増加する。一方、トナー層上部における  $E_x$  分布は、 $Z=304\ \mu\text{m}$  の場合と同様に正と負の領域が混在しており、電界強度は転写ギャップが狭くなっても大きな変化は無い。転写ギャップが狭くなると、分離したトナーが転写ベルトに到達するまでの飛翔時間が短くなるために、 $x$  方向の移動量が小さくなる。このため、狭い転写ギャップで分離したトナーは、チリトナーになりにくい。このように、転写ギャップが狭くなると、分離トナー数が増加し、同時に分離トナーがチリトナーになる確率が低下するため、転写ギャップの狭まりと共にチリトナー数が増加後に飽和することになり、図 3-23 のようなチリトナー数の転写ギャップ依存性を説明することができる。

以上のように、チリトナーの発生は、トナー層内の電界分布に依存するトナーの飛翔によって説明することができ、放電やトナー付着面の水平方向の作用力等が原因ではなく、トナー間の静電反発力が主要因であることを検証することができた。

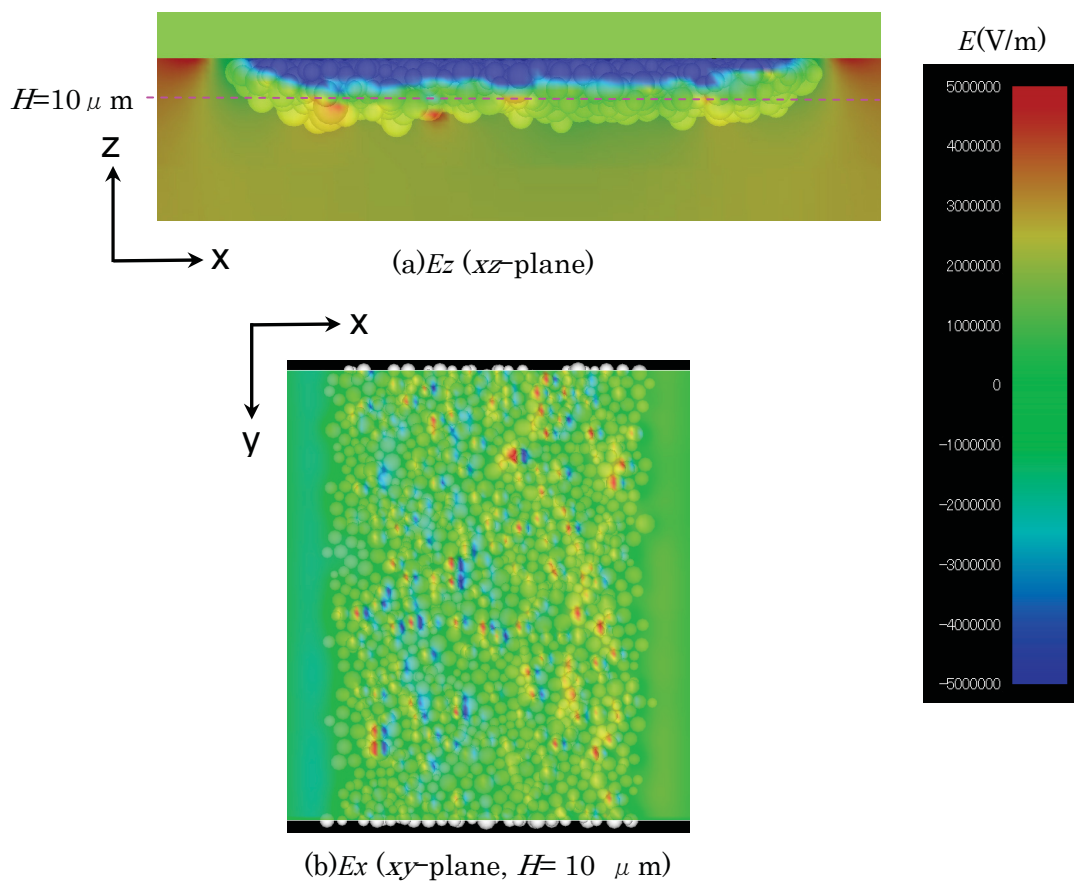


Fig.3-26 Distribution of  $E_z$  and  $E_x$  in toner layer. ( $Z = 328 \mu\text{m}$ )

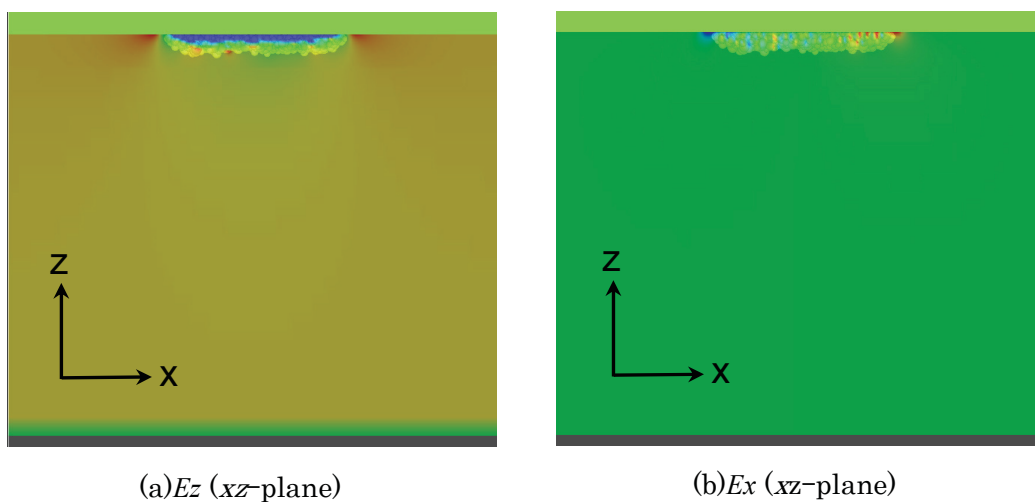


Fig.3-27 Distribution of  $E_z$  and  $E_x$  in transfer area. ( $Z = 328 \mu\text{m}$ )

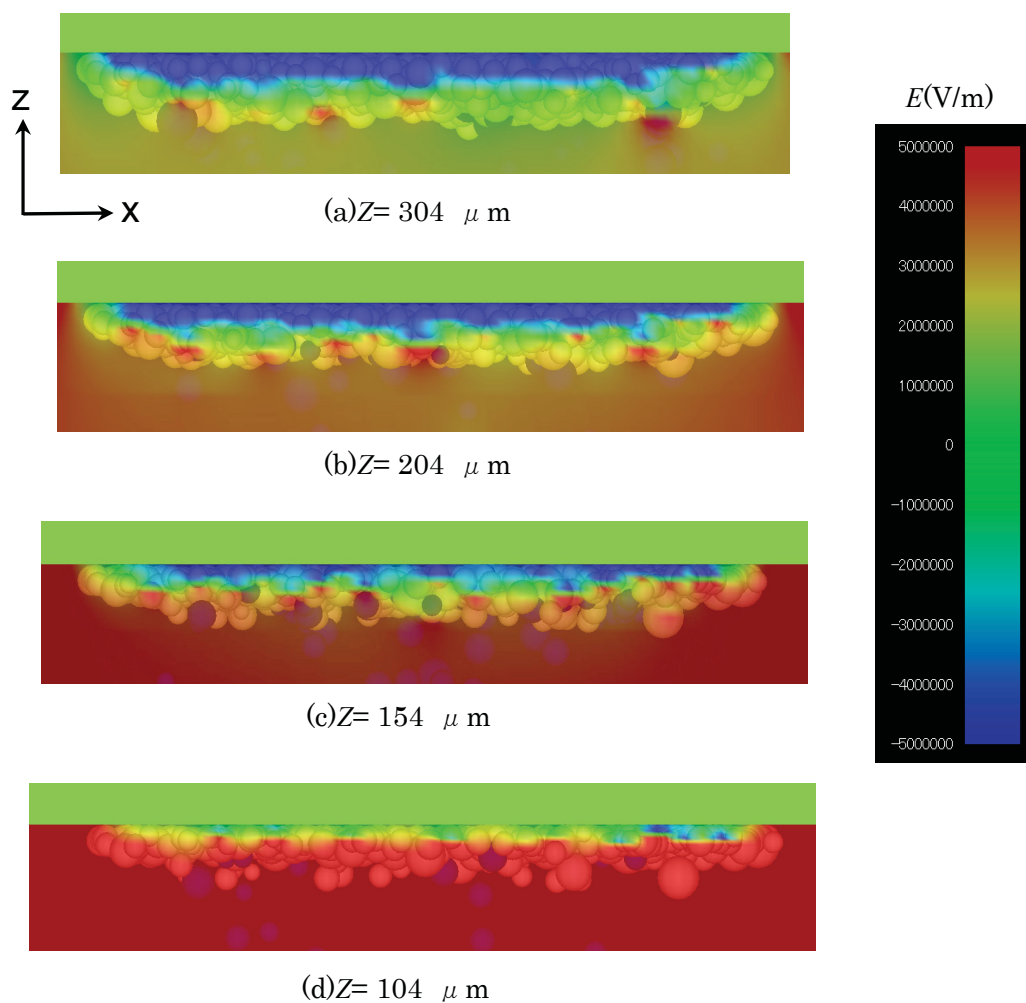


Fig.3-28 Distribution of  $E_z$  in toner layer.

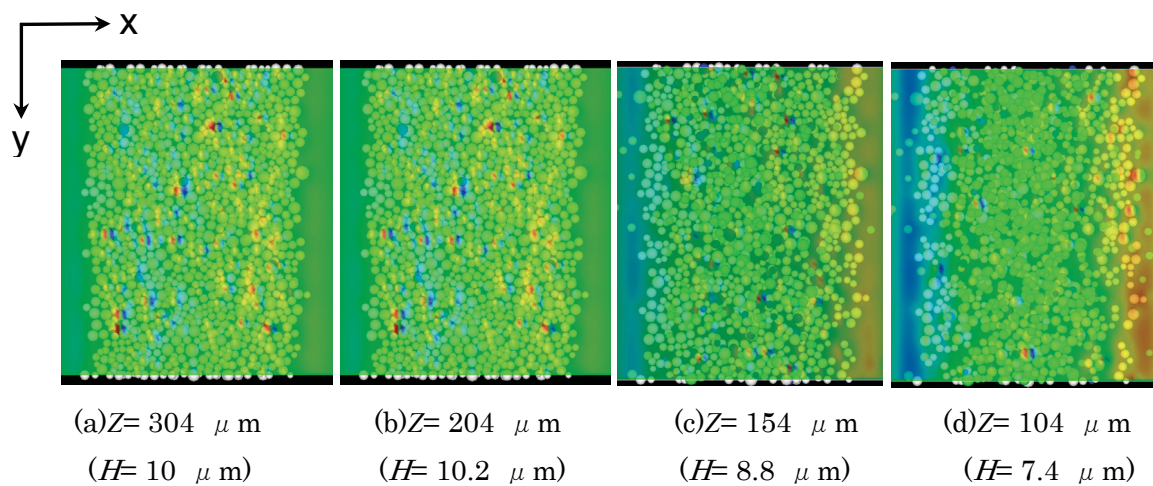


Fig.3-29 Distribution of  $E_x$  in toner layer.

### 3-7-2 転写チリに対する転写パラメータの影響

つぎに、転写チリに対する様々な転写パラメータの影響について、3-7-1項と同様にトナー層の電界分布を用いて考察する。

#### (1) 転写電位

3-4-1項において、転写電位  $V_T$  が大きいほど、転写チリが発生し始める転写ギャップ  $Z_{th}$  が広く、チリトナー数の飽和値  $N_{max}$  が増加する傾向にあることを示した。 $V_T=400\text{ V}$  と  $V_T=800\text{ V}$  の場合について、各転写ギャップ  $Z$  におけるトナー層の  $E_z$  分布を図3-30と図3-31に示す。 $V_T$ 以外のパラメータは表3-2と同じであり、電界強度は  $5\text{ MV/m} \sim -5\text{ MV/m}$  を赤～青で色分けしている。同じ転写ギャップにおける  $E_z$  分布を比較すると、 $V_T=800\text{ V}$  の場合は、 $V_T=400\text{ V}$  に比べて  $E_z$  が正で静電気力が転写する向きに作用する領域が広く、かつ電界強度が大きい。このため、広い転写ギャップからトナーが分離し、その一部がチリトナーになるため  $Z_{th}$  は広がる。3-7-1項で述べたように、転写ギャップが狭くなると、分離トナーはチリトナーになりにくくなるため、広い転写ギャップから分離した方がチリトナー数は多くなる。このように、転写電位が大きいほど、広い転写ギャップからトナーが分離し、チリトナー数が多くなる。

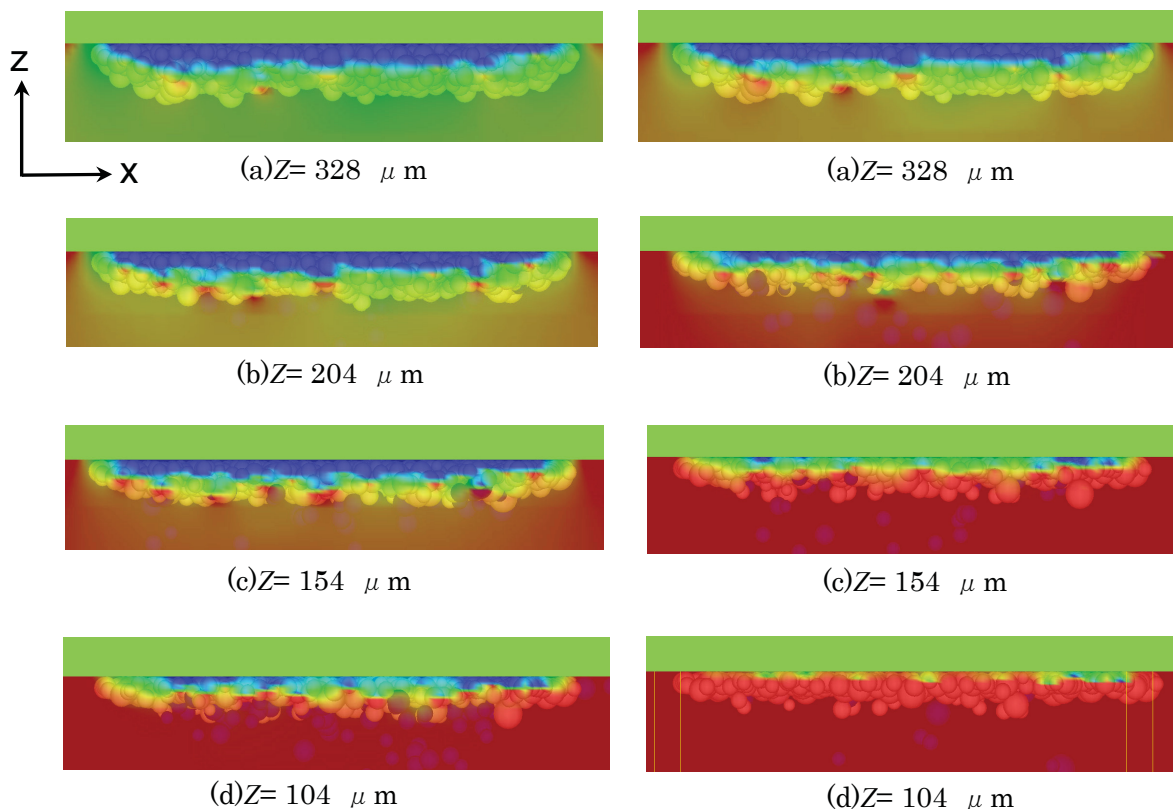


Fig.3-30 Distribution of  $E_z$  at transfer gap  $Z$ . ( $M/A=0.6\text{ mg/cm}^2$ ,  $V_T=400\text{ V}$ ,  $V_D=-280\text{ V}$ )

Fig.3-31 Distribution of  $E_z$  at transfer gap  $Z$ . ( $M/A=0.6\text{ mg/cm}^2$ ,  $V_T=800\text{ V}$ ,  $V_D=-280\text{ V}$ )

## (2) 非画像部電位

3-4-2項において、非画像部電位  $V_D$  が負に大きいほど  $Z_{th}$  が狭くなり、 $N_{max}$  が減少する傾向にあることを示した。 $V_D = -100\text{ V}$  と  $V_D = -500\text{ V}$  の場合について、各転写ギャップ  $Z$  におけるトナー層の  $E_z$  分布を図 3-32 と図 3-33 に示す。 $V_D$  以外のパラメータは表 3-2 と同じであり、電界強度は  $5\text{ MV/m} \sim -5\text{ MV/m}$  を赤～青で色分けしている。図のように、 $V_D = -500\text{ V}$  の場合は、 $V_D = -100\text{ V}$  に比べて  $E_z$  が正となる領域が狭く、電界強度が小さい。このため、トナーの分離する転写ギャップが狭く、 $Z_{th}$  は狭くなる。また、 $Z = 328\text{ }\mu\text{m}$  におけるトナー層付近の  $E_x$  分布を図 3-34 に示す。図 3-34(a) のように、 $V_D = -100\text{ V}$  の場合は、ライン右端が負、左端が正で、ライン端部での静電気力はトナーに対して画像部側から非画像部側の向きに作用する。また、図 3-34(b) のように、 $V_D = -500\text{ V}$  の場合は、ライン右端が正、左端が負で、 $V_D = -100\text{ V}$  の場合とは逆に、ライン端部では静電気力が中央部に向かって作用する。以上のように、非画像部電位が負に大きいと、トナーの分離する転写ギャップが狭く、またライン端部のトナーがチリトナーになりにくいため、チリトナー数が少なくなると考えられる。

上記のように、非画像部電位が負に大きいと、 $E_z$  分布は正の領域が狭く、電界強度が小さいが、この理由について考察する。図 3-35 に、 $Z = 328\text{ }\mu\text{m}$  における転写領域の  $E_z$  分布および電位分布を示す。 $E_z$  分布は電界強度の色分けで示し、電位分布は等電位線で示している。 $V_D = -100\text{ V}$  の場合は、図 3-35(a) のように、トナー層の電位が周囲の電位よりも負に大きく、トナー層内では中央部が負に大きいので、トナー層周囲からトナー層中央部に向かって電界が形成され、トナー層下部では  $E_z$  が正となる。一方、 $V_D = -500\text{ V}$  の場合は、非画像部電位がトナー層の電位よりも負に大きく、トナー層から非画像部への電界が形成される。トナー層の端部や下部では、図 3-35(b) のように等電位線がトナー層に対してほぼ垂直になっており、この領域では電界の方向はほぼ水平で、電界の垂直成分  $E_z$  は小さくなる。以上のように、非画像部電位が負に大きい場合は、画像部と非画像部の電位差によってトナーが転写する向きの電界が低下することがわかる。



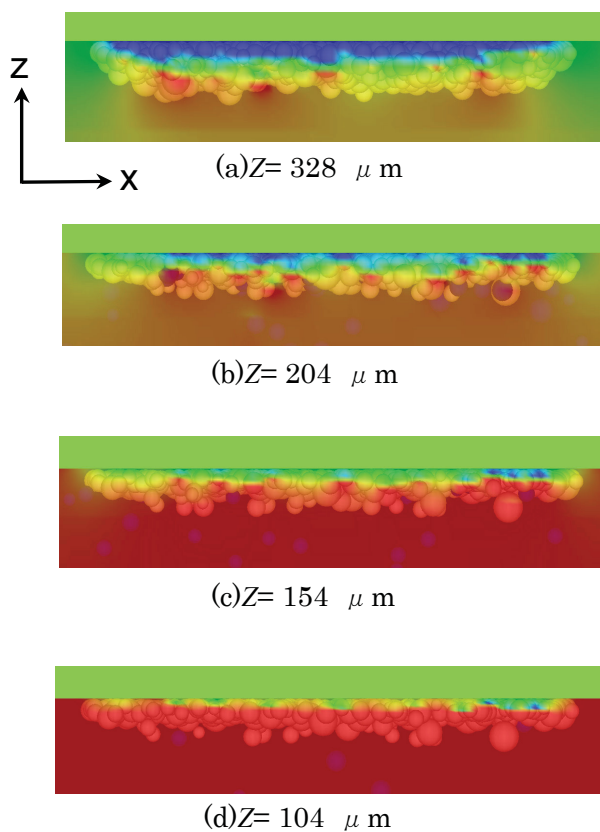


Fig.3-32 Distribution of  $E_z$  at transfer gap  $Z$ . ( $M/A = 0.6 \text{ mg/cm}^2$ ,  $V_T = 600 \text{ V}$ ,  $V_D = -100 \text{ V}$ )

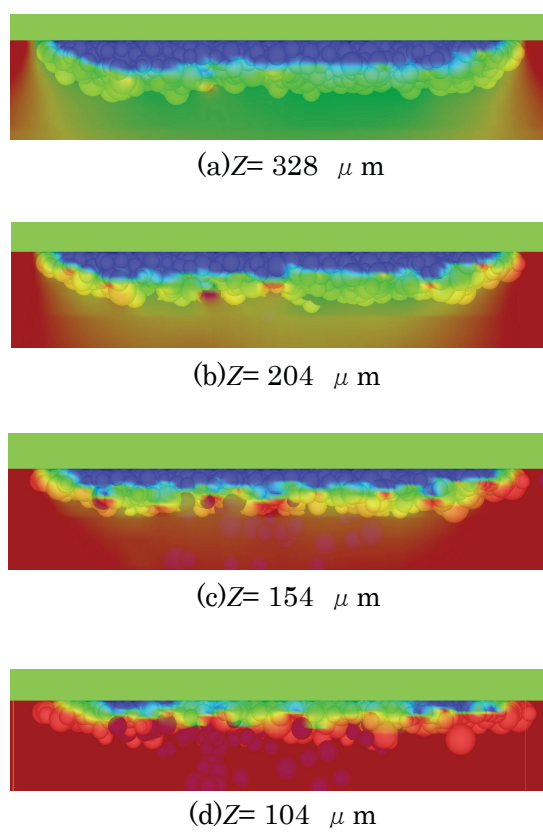


Fig.3-33 Distribution of  $E_z$  at transfer gap  $Z$ . ( $M/A = 0.6 \text{ mg/cm}^2$ ,  $V_T = 600 \text{ V}$ ,  $V_D = -500 \text{ V}$ )

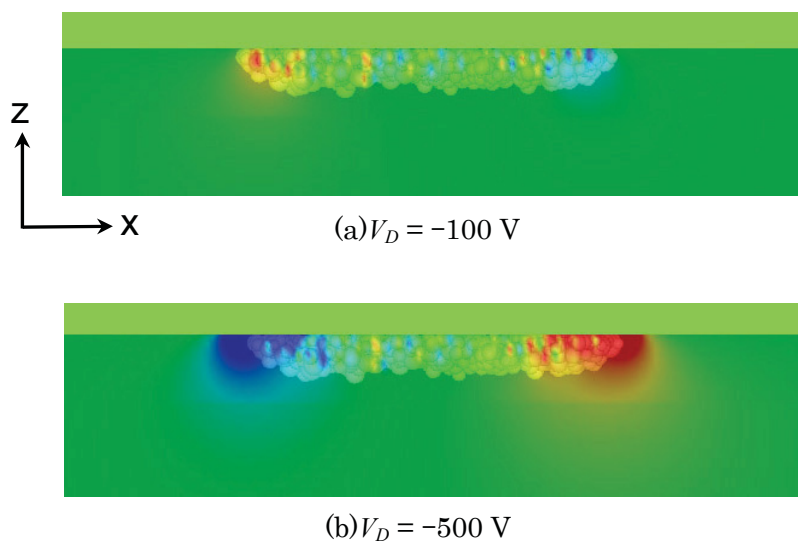


Fig.3-34 Distribution of  $E_x$  in transfer area. ( $Z = 328 \mu\text{m}$ )  
( $M/A = 0.6 \text{ mg/cm}^2$ ,  $V_T = 600 \text{ V}$ )

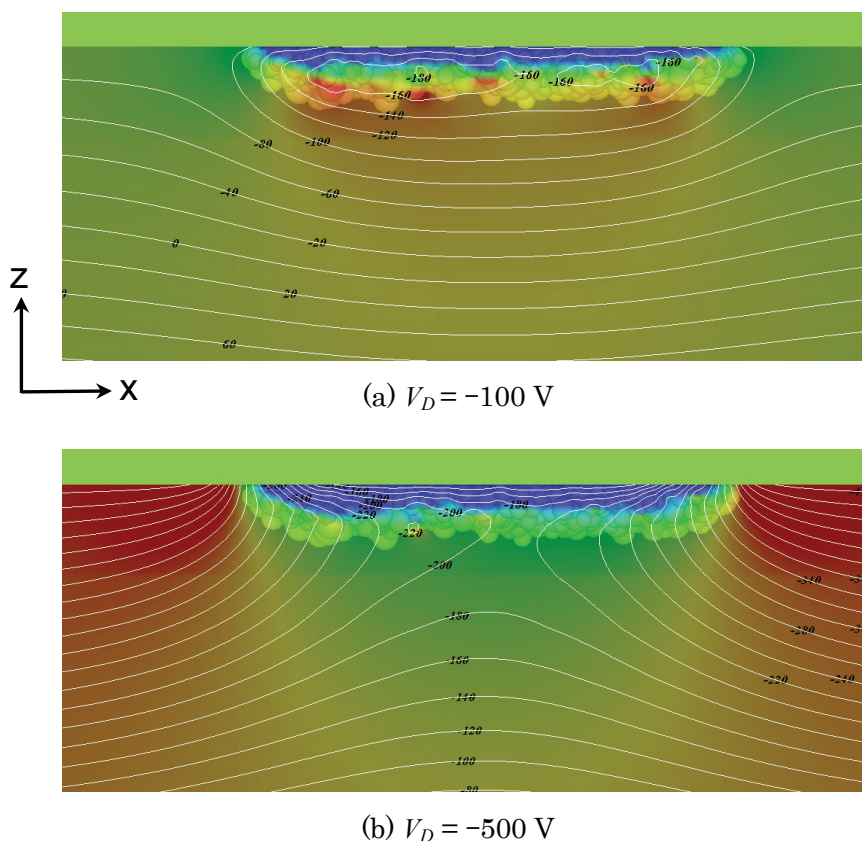
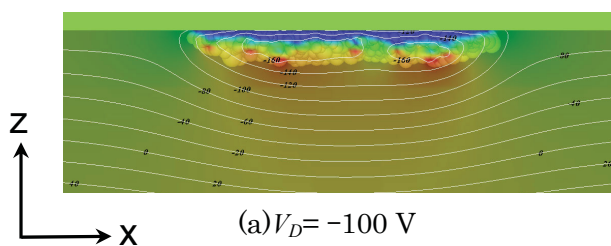


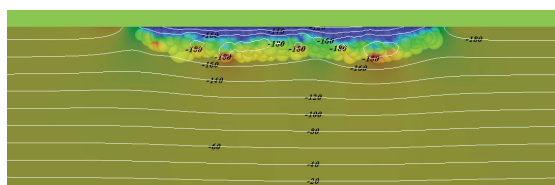
Fig.3-35 Distribution of Potential and  $E_z$  in transfer area. ( $Z= 328 \mu\text{m}$ )

### (3) トナー付着量

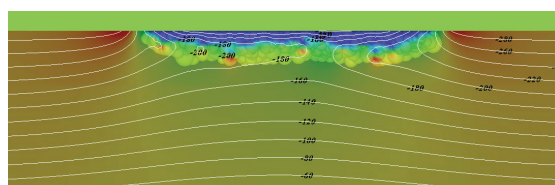
3-4-3 項において、転写チリと転写パラメータの関係に対するトナー付着量の影響が、トナー層表面電位を用いることにより表わせることを示した。トナー付着量  $M/A$  が  $0.6 \text{ mg/cm}^2$  のトナー層について、様々な  $V_D$  に設定した場合の  $Z= 328 \mu\text{m}$  における電位分布および  $E_z$  分布を図 3-36 に示す。  $V_T$  は全て  $600 \text{ V}$  に設定した。同様に、  $M/A= 0.9 \text{ mg/cm}^2$  のトナー層についての電位分布および  $E_z$  分布を図 3-37 に示す。  $M/A= 0.9 \text{ mg/cm}^2$  のトナー層下部の電位は  $M/A= 0.6 \text{ mg/cm}^2$  の電位よりも負に大きく、等電位線の形状はトナー層と非画像部の電位差に依存するため、等電位線がほぼ同形状になる  $V_D$  が負に大きくなることがわかる。このように、トナー層内の電界分布に対するトナー付着量の影響は、トナー付着量によるトナー層電位の違いによって説明できる。転写チリの発生はトナー層内の電界分布に依存するので、トナー層電位により転写チリに対するトナー付着量の影響を表わせると考えられる。



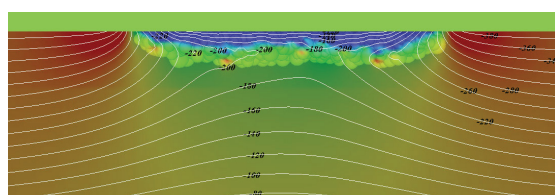
(a)  $V_D = -100$  V



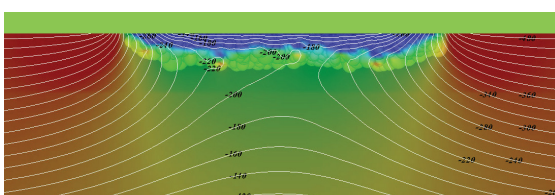
(b)  $V_D = -200$  V



(c)  $V_D = -300$  V

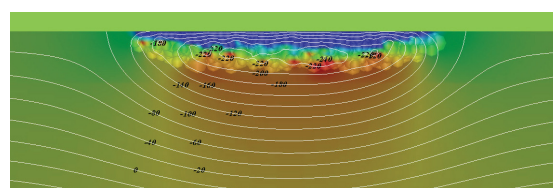


(d)  $V_D = -400$  V

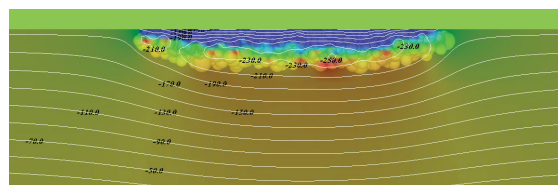


(e)  $V_D = -500$  V

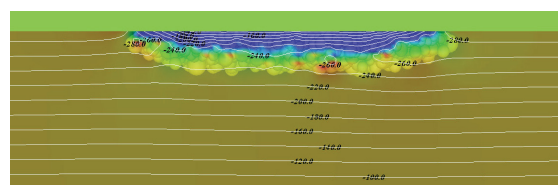
Fig.3-36 Distribution of Potential and  $E_z$  in transfer area. ( $M/A = 0.6$  mg/cm<sup>2</sup>,  $V_T = 600$  V,  $Z = 328$   $\mu$ m)



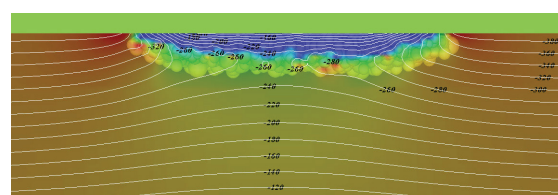
(a)  $V_D = -100$  V



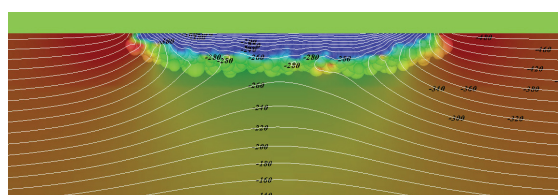
(b)  $V_D = -200$  V



(c)  $V_D = -300$  V



(d)  $V_D = -400$  V



(e)  $V_D = -500$  V

Fig.3-37 Distribution of Potential and  $E_z$  in transfer area. ( $M/A = 0.9$  mg/cm<sup>2</sup>,  $V_T = 600$  V,  $Z = 328$   $\mu$ m)

#### (4) トナー付着力

3-4-4 項において、トナー付着力が大きいほど、 $Z_{th}$  が狭くなり、 $N_{max}$  が減少する傾向にあることを示した。付着力の大きなトナーをトナー層から分離するには、付着力の小さなト

ナーよりも大きな転写電界が必要となる。転写電界は転写ギャップが狭まるほど増大するので、トナーの付着力が大きいほどトナー層から分離する転写ギャップは狭くなり、転写チリの発生する転写ギャップ  $Z_{th}$  が狭くなる。トナーの分離する転写ギャップが狭いと、3-7-1項で述べたように分離したトナーはチリトナーになりにくくなるため、 $N_{max}$  は減少する。

### 3-8 単色画像における転写チリの抑制

これまでの検討から、単色画像における転写チリは、感光体上のトナー層が転写体に接近する過程でトナー層から分離したトナーの一部が画像周辺に飛翔することにより発生しており、転写チリの発生する転写ギャップが狭いほど転写チリ発生量が少ないことが明らかになった。転写チリの発生する転写ギャップを狭くするには、接近過程におけるトナー層内転写電界の抑制が必要である。このトナー層内転写電界は転写領域の電位分布によって決まり、転写電位  $V_T$  とトナー層表面電位  $V_{toner}$  の差  $V_T - V_{toner}$  を小さく、非画像部電位  $V_D$  と  $V_{toner}$  の差  $V_{toner} - V_D$  を大きくすることによって、接近過程におけるトナー層内転写電界を抑制することができる。このため、転写チリを抑制するには、転写率が低下しない範囲で  $V_{toner}$  に合わせて  $V_T$  をできるだけ小さくし、 $V_{toner}$  よりも  $V_D$  を負に十分大きくする必要がある。

また、トナー層電界の制御以外では、トナー付着力の制御によって転写チリの発生する転写ギャップを狭くすることができる。しかし、トナー付着力を大きくすると、画像ムラや中抜け等の画像劣化現象の発生や転写率の低下等の副作用が生じるので、これらの副作用が生じない範囲でトナー付着力を制御する必要がある。

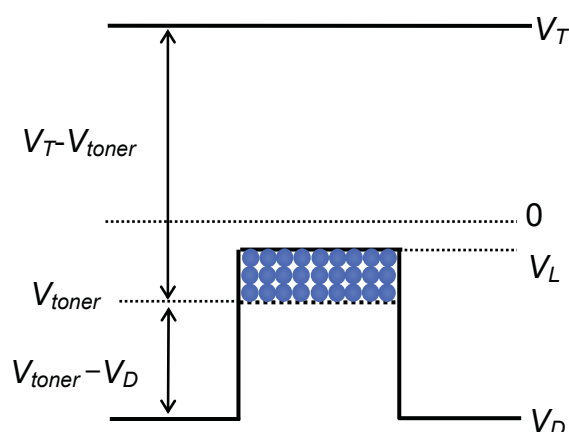


Fig.3-38 Potential related with transfer process,  $V_T$  : Transfer potential,  $V_L$  : Potential of image area,  $V_D$  : Potential of non-image area,  $V_{toner}$  : Surface potential of toner layer.

### 3-9 まとめと今後の課題

単色画像における転写チリ発生メカニズムを解明するために、平行平板間の転写過程におけるトナー挙動の観察および3次元トナー挙動シミュレーションを実施した。トナー挙動の観察により、感光体と転写体の接近過程でトナー層から分離したトナーが画像周辺に飛翔して転写チリが発生する過程を明らかにした。トナー挙動シミュレーションにより転写チリ発生過程の観察結果を再現でき、本シミュレーションの有効性を検証することができた。トナー挙動の観察とシミュレーションにより、単色画像における転写チリが接近過程におけるトナー層内の静電反発力に起因するトナーの飛翔によって発生することを検証することができた。

また、転写チリ抑制指針を獲得するために、様々な転写条件における転写チリ発生過程の観察および発生過程の定量化を実施し、転写チリ発生量および転写チリの発生する転写ギャップと転写パラメータに関する定量的関係を明らかにした。転写チリ発生量は転写チリの発生する転写ギャップが狭いほど少なくなり、接近過程におけるトナー層内の転写電界が低いほど転写チリの発生する転写ギャップが狭くなるため、転写チリの抑制にはトナー層内転写電界を抑制するような電位構造にすることが必要であることを示した。

今後の課題としては、より実際の転写システムに近い系での解析が必要で、平行平板モデルでは検討できない要素についての解析が必要となる。例えば、感光体ドラムは円筒形で回転しているが、平行平板ではトナー挙動に対する曲率や回転運動の影響が検討できない。また、平行平板モデルでは接近過程で転写ベルトは一定の電位になっているが、実際の系では、転写ベルトは電極である転写ローラに転写ニップ部で接触し、平行移動によって転写ニップに接近するため、転写ベルト上の電位が接近過程で変化する。このような要素について検討するには、解析装置やシミュレーションを改良していく必要がある。

## 第4章 色重ね画像における転写チリの解析

### 4-1 研究の目的

本章では、単色画像における転写チリに較べて研究報告が少ないが(4-1)-(4-4)、カラー画像における重要な画像劣化現象である、複数色のトナー画像を重ね合わせる際に発生する転写チリ(重ねチリ)の発生メカニズムを明らかにする。まず、転写モデル実験装置を用いてトナー画像を重ね合わせるプロセスを観察し、重ねチリが発生する過程の特定と発生過程におけるトナー挙動を把握する。また、重ねチリの発生量と様々な転写パラメータの定量的な関係を明らかにする。つぎに、平行平板間におけるトナー画像の重ね合わせ過程の3次元トナー挙動シミュレーションを実施し、重ねチリ発生過程および重ねチリ発生量と転写パラメータの関係の実験結果を比較し、シミュレーションの有効性を検証する。観察およびシミュレーションの結果に基づいて重ねチリの発生モデルを示し、重ねチリに対する転写パラメータの影響について考察し、重ねチリの抑制指針を示す。

### 4-2 重ねチリ発生過程の観察および重ねチリ発生量の定量化

3-2-1項で説明した転写モデル実験装置を用いた重ねチリ発生過程の観察方法について述べる。まず、1色目のトナー(トナー1)を含む現像剤を用いて、3-2-2項で述べた方法と同様にして擬似感光体上に1色目のライントナー画像を形成し、一定の転写電位にした転写体を一定速度で接近・離間することにより、転写ベルト上に1色目のトナー画像を転写する。つぎに、図4-2(a)のように、2色目のトナー(トナー2)を含む現像剤を用いて、擬似感光体上に2色目のライントナー画像を形成する。つぎに、図4-1(b)~図4-1(d)のように、転写電位 $V_T$ を転写体に印加した状態で1色目のトナー画像が転写された転写体を一定速度で接近させ、一定の圧力で1色目と2色目のトナー画像を接触させた後、一定速度で転写体を遠ざけて転写体上に重ねトナーライン画像を形成する。この一連の転写過程におけるトナーの挙動を観察する。

3-2-2項で述べたように、トナー挙動を観察する際には、擬似感光体上または転写ベルト上のトナーに焦点を合わせる必要がある。単色画像の転写過程では、転写チリが接近過程で発生し、かつ転写チリの発生する転写ギャップが比較的狭いので、焦点が変化しない擬似感光体上のトナーに焦点を合わせ、焦点深度の深いレンズを用いて転写ベルト上に付着したチリトナーを観察した。重ね画像の転写過程では、後述するように転写チリが分離過程でも発生し、転写チリの発生する転写ギャップが広いので、転写ベルト上のトナーに焦点を合わせて観察した。

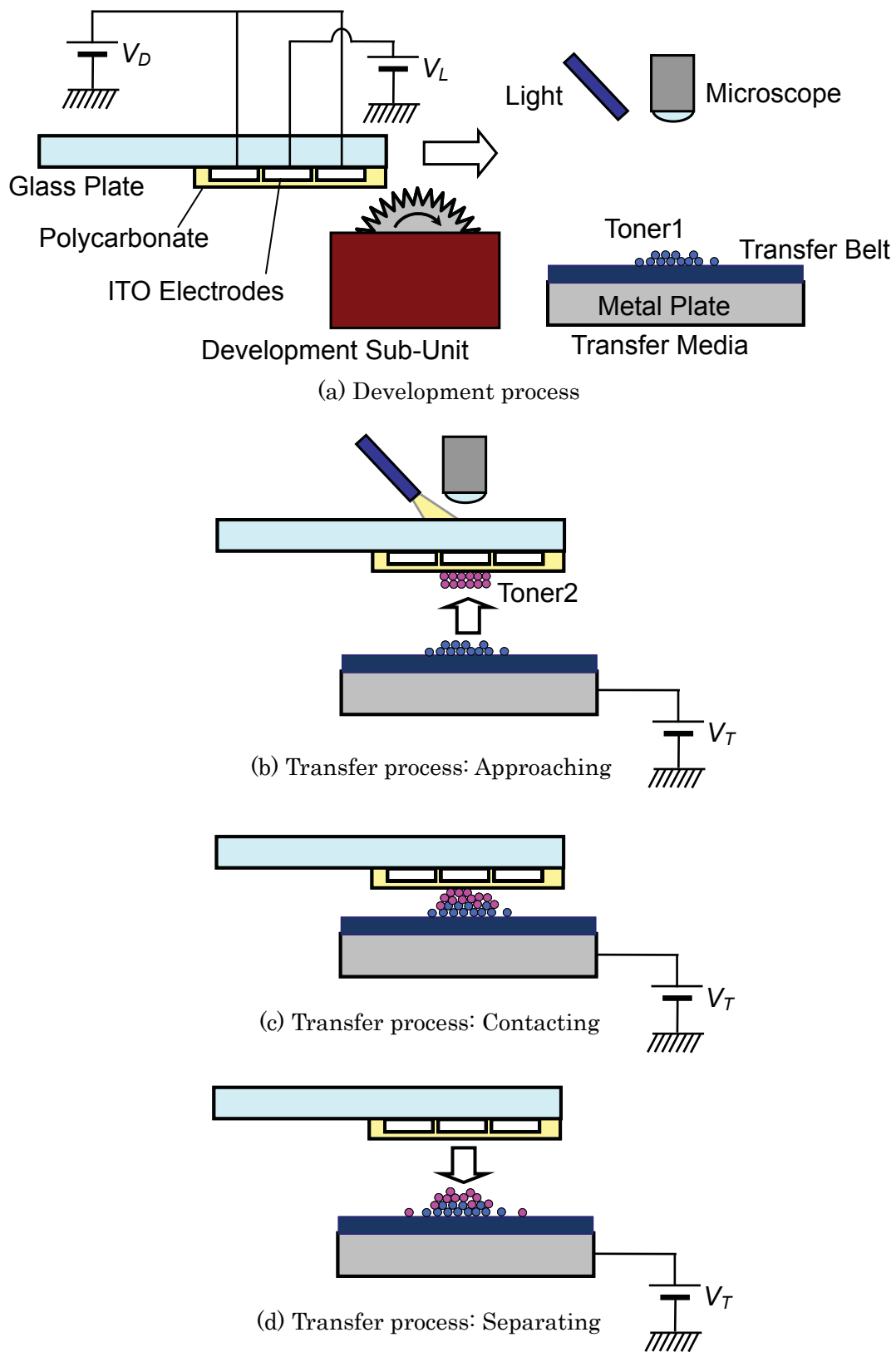


Fig.4-1 Schematic diagram of the experimental setup for multi-color transfer process between parallel plates.

転写ベルト上に焦点を合わせる場合は、転写体の移動に合わせてレンズを上下に移動する必要がある。レンズを上下に移動する際には、観察画像を見ながらレンズを保持するステージを手動で動かして焦点を合わせているため、常に転写ベルト上に焦点を合わせることは困難である。このため、単色画像の場合のように転写チリ発生過程を連続的に定量化することはできず、接近過程および分離過程での転写チリ発生量を計測した。接近前、接触後、分離後の各ライントナー画像について、ライン画像の周辺に付着したラインに非接触のトナー粒子数を画像計測ソフトウェア(ImageProPlus)を用いて計測し、接近前と接触後の粒子数の差および接触後と分離後の粒子数の差を画像内のライン長さで割った値から、接近過程および分離過程で発生したチリトナー数  $N$  を求めた。

### 4-3 重ねチリ発生過程の可視化

4-2 で述べたトナー挙動観察方法により、重ねチリ発生過程を観察した。本観察の実験条件を表 4-1 に示す。ただし、表 4-1 の  $Q/M$  および  $M/A$  は、2 色目の転写後の計測値を示している。

Table 4-1 Experimental conditions

Electric potential of image area $V_L$	-100 [V]
Electric potential of non-image area $V_D$	-280 [V]
Electric potential of transfer $V_T$	600 [V]
Average diameter of toner	6.8 [ $\mu$ m]
Charge-to-mass ratio of toner $Q/M$	-30 [ $\mu$ C/g]
Amount of toner $M/A$	1.52 [mg/cm <sup>2</sup> ]

観察により得られた動画画像から抽出した静止画の拡大画像を図 4-2(a)~(f)に示す。図 4-2(a)は 1 色目のシアントナーが転写した後の画像で、ライン画像周辺部に付着しているトナーは、転写体と擬似感光体の接近過程で発生したチリトナーである。図 4-2(b)はシアントナー上に 2 色目のマゼンタトナーが転写した画像で、シアンのチリトナーと転写体が接近する過程で発生したマゼンタのチリトナーが混在している。図 4-2(c)から図 4-2(f)は転写体と擬似感光体の分離過程における画像を示している。図のように、転写ギャップ  $Z$  の増大と共にマゼンタのチリトナーが増加し、転写ギャップが十分広くなると飽和する傾向にある。この分離過程で発生するチリトナーは、転写ベルト上の重ね画像から飛翔したトナーであり、接近過程で発生するチリトナーよりもライン画像から離れた位置まで飛翔していることがわかる。以上のように、2 色目トナーを 1 色目のトナー上に転写する際には、接近過程でも 2 色目トナーの転写チリが発生しているが、多くの転写チリが分離過程で発生しており、重ねチリが主に分離過程で転写トナー層から発生していることが明らかとなった。



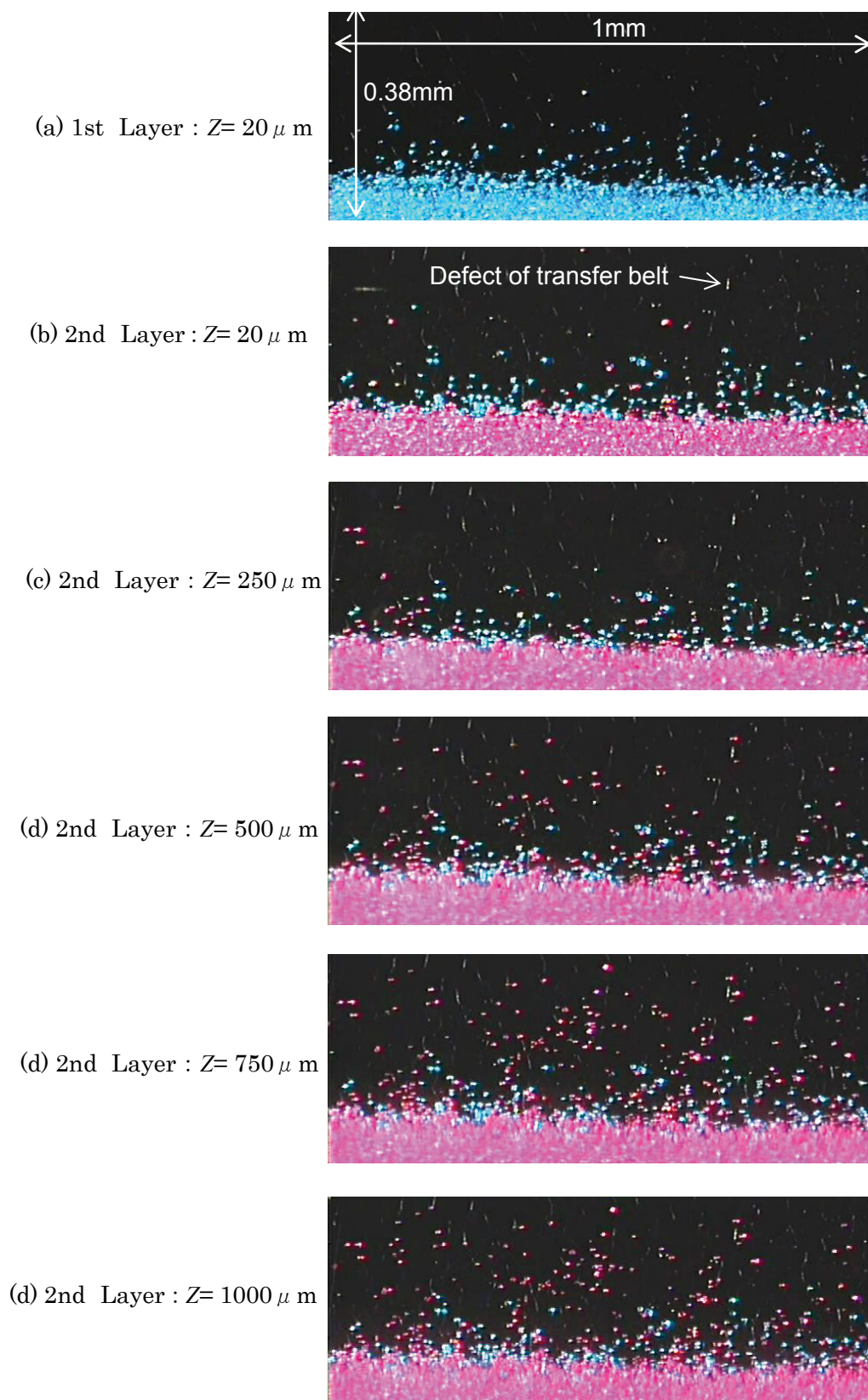


Fig.4-2 Observed toner scattering images in the separating process.

Nakayama<sup>(4-1)(4-3)</sup>らは、2次元の転写シミュレーションによって、多重転写過程における転写後のトナー飛翔によって転写トナー層の粒子数が減少することを示しているが、本観察により感光体と転写体の分離過程での転写チリ発生が確認され、このシミュレーションと整合している。4-6の節では、3次元の転写シミュレーションにより転写過程におけるトナー挙動を計算し、観察結果と比較する。さらに、4-7-1項で重ねチリの発生モデルについて考察する。

#### 4-4 重ねチリと転写パラメータの定量的関係

重ねチリ発生過程の観察により、重ねチリが主に分離過程で発生することが明らかになったので、分離過程での重ねチリ発生量と様々な転写パラメータとの関係について検討した。分離過程での重ねチリ発生量を計測するために、接近過程での転写チリが発生しにくい条件で実験をおこなった。第3章での検討から明らかになっているように、接近過程での転写電界を小さくすることにより転写チリの発生を抑制できる。そこで、転写電位  $V_T$  を擬似感光体の画像部電位  $V_L$  に設定した状態で、転写体を一定速度( $4 \mu\text{ m/s}$ )で擬似感光体に接近させ、擬似感光体上のトナーが転写ベルトまたは転写ベルト上のトナーに接触した状態で  $V_T$  を所定の電位に変更した。接近過程ではトナーが転写せず、接触後に転写するため、接近過程ではほとんど転写チリが発生しない。つぎに、転写体を一定速度( $10 \text{ mm/s}$ )で転写ギャップが  $1 \text{ mm}$  になるまで遠ざけた。転写体速度を  $4 \mu\text{ m/s}$  から  $10 \text{ mm/s}$  に変更した理由は、本実験では接触状態と  $1 \text{ mm}$  遠ざけた状態でのトナー粒子数のみを計測するため、分離過程を低速で観察する必要がないので、転写体速度として実際の転写プロセスでの分離速度に近い値を採用したためである。

##### 4-4-1 重ねチリ発生量とトナー帯電量および付着量の関係

様々な帯電量  $Q/M$  のトナーについて、トナー付着量  $M/A$  を変えて分離過程で発生したチリトナー数  $N$  を計測した。トナーの帯電量は、混合するキャリアを変更することによって調整した。また、 $V_L$  を  $-100 \text{ V}$  に固定し、 $V_D$  と  $V_T$  は  $Q/M$  および  $M/A$  に応じて変更した。 $Q/M$  と  $M/A$  の組み合わせを表 4-2 に示す。

Table 4-2 Experimental conditions

$Q/M$ [ $\mu\text{C/g}$ ]	$M/A$ [ $\text{mg/cm}^2$ ]		
-20	1.2	1.43	1.7
-27	1.0	1.3	1.6
-34	1.1	1.35	1.6

各  $Q/M$  のトナーに関する  $N$  と  $M/A$  の関係を図 4-3 に示す。図のように  $Q/M$  および  $M/A$  が大きいほど  $N$  が増加する。 $N$  と  $Q/M$  および  $M/A$  の関係を明らかにするために、様々な  $n$ 、 $m$  の組み合わせについて  $N$  と  $|Q/M|^n(M/A)^m$  の関係をプロットし、それぞれの関係に対する近似直線の決定係数  $R^2$  を求め、 $R^2$  が最小となる  $n$ 、 $m$  の組み合わせを選定した。各  $n$ 、 $m$  の組み合わせに対する  $R^2$  を図 4-4 に示すが、図のように  $n=1$ 、 $m=2$  の組み合わせが最小となっている。図 4-5 に  $N$  と  $|Q/M|(M/A)^2$  の関係を示す。図のように、特定の  $|Q/M|(M/A)^2$  以下となる転写トナー層では重ねチリが発生せず、特定の  $|Q/M|(M/A)^2$  以上では  $|Q/M|(M/A)^2$  に比例してチリトナー数が増加することがわかる。このように、重ねチリ発生量と転写トナー層の帯電量および付着量との定量的関係が明らかとなった。

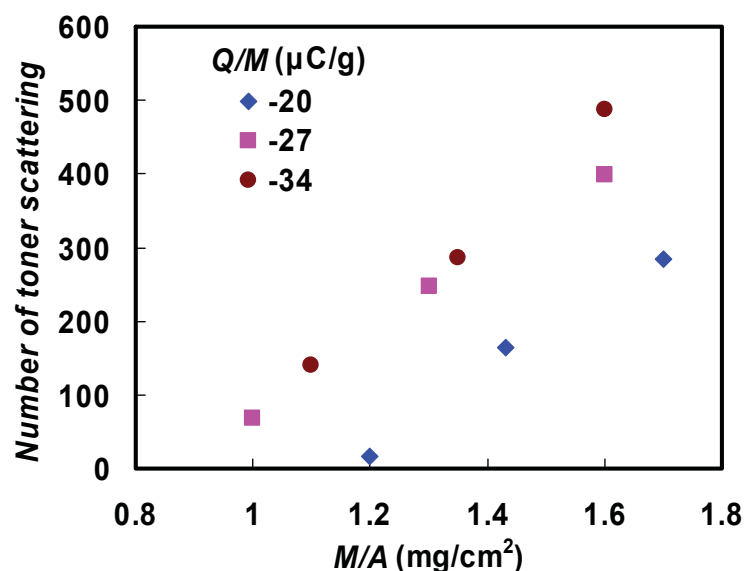


Fig.4-3 Experimental results of relationship between the number of toner scattering  $N$  and the amount of transferred toner  $M/A$ .

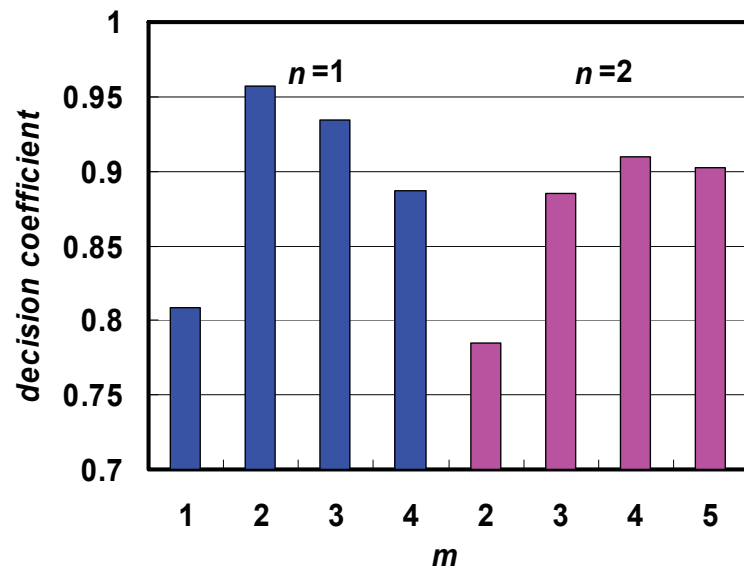


Fig.4-4 Decision coefficient  $R^2$  vs combination of  $n$  and  $m$  for  $N=|Q/M|^n(M/A)^m$ .

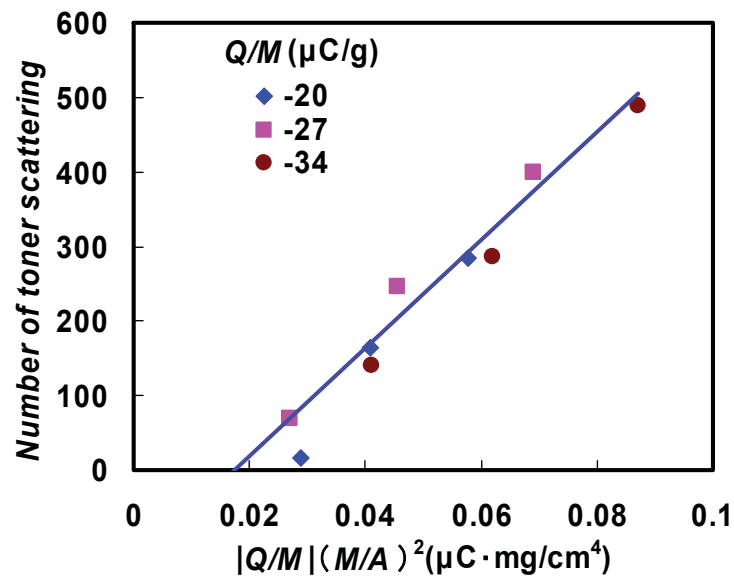


Fig.4-5 Experimental results of relationship between the number of toner scattering  $N$  and  $|Q/M|(M/A)^2$ .

4-4-2 重ねチリに対するトナー付着力の影響

つぎに、重ねチリに対するトナー付着力の影響について検討した。重ねチリ発生過程の観察結果から、分離過程で発生しているチリトナーはシアントナー上に転写されたマゼンタトナーで、重ねチリに影響するトナー付着力としてはトナー間付着力  $F_t$  が重要と考えられる。様々なトナーについて 2-2 で示した方法によりトナー間付着力  $F_t$  を計測し、各トナーについて  $M/A$  を変えて分離過程のチリトナー数  $N$  を計測した。なお、4-4-1 と同様に  $Q/M$  や  $M/A$  に応じて  $V_D$  と  $V_T$  を変更した。 $F_t$ 、 $Q/M$ 、 $M/A$  を表 4-3 に示す。

Table 4-3 Experimental conditions

$F_t$ [nN]	$Q/M$ [ $\mu\text{C/g}$ ]	$M/A$ [ $\text{mg/cm}^2$ ]			
		0.90	1.11	1.25	1.46
1.6	-30	0.90	1.11	1.25	1.46
2.2	-28	0.86	1.09	1.14	1.34
4.8	-28	0.95	1.11	1.38	1.60
17.1	-23	1.18	1.28	1.29	1.52
21.7	-41	0.86	1.23	1.45	1.74

各トナーについての  $N$  と  $|Q/M|(M/A)^2$  の関係を図 4-6 に示す。図のように、 $F_t$  が大きなトナーでは、重ねチリの発生する  $|Q/M|(M/A)^2$  の下限値が大きく、 $N$  と  $|Q/M|(M/A)^2$  の比例関係における傾きが小さくなっていることがわかる。

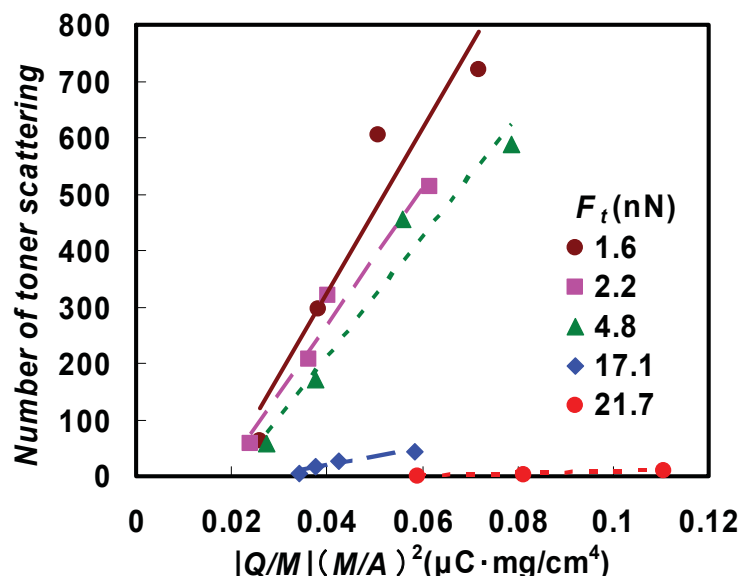


Fig.4-6 Experimental results of relationship between the number of toner scattering  $N$  and  $|Q/M|(M/A)^2$  for several toner-toner adhesion  $F_t$ .

4-4-3 重ねチリ発生量とトナー層表面電位の関係

4-4-1 項でチリトナー数  $N$  と  $(Q/M)(M/A)^2$  の比例関係を明らかにしたが、この  $(Q/M)(M/A)^2$  に対応する物理量について検討する。トナー層の体積電荷密度  $\rho_t$  は  $Q/M$  に比例し、トナー層の厚み  $d_t$  は  $M/A$  に比例するため、 $(Q/M)(M/A)^2$  は  $\rho_t d_t^2$  に比例する。接地された導電体上のトナー層表面電位  $V_{toner}$  は式(4-1)のように表わされ、 $(Q/M)(M/A)^2$  はトナー層の表面電位に対応していることがわかる。なお、式(4-1)の  $\varepsilon_t$  はトナー層の比誘電率を示している。

$$V_{toner} = \frac{\rho_t d_t^2}{2\varepsilon_t \varepsilon_0} \tag{4-1}$$

表 4-2 の各実験条件の転写トナー層について、 $d_t$  と  $\rho_t$  と  $\varepsilon_t$  を 3-4-3 項で記載した方法で見積もり、式(4-1)を用いて  $V_{toner}$  を求めた。図 4-5 の実験結果に対応する  $N$  と  $|V_{toner}|$  の関係を図 4-7 に示す。図 4-7 における近似直線の比例係数を  $K$ 、チリトナーが発生する  $|V_{toner}|$  の下限値を  $|V_{th}|$  とすると、 $N$  と  $V_{toner}$  の関係は、 $|V_{toner}|$  が  $|V_{th}|$  以上で式(4-2)のように表わせる。

$$N = K |V_{toner} - V_{th}| \tag{4-2}$$

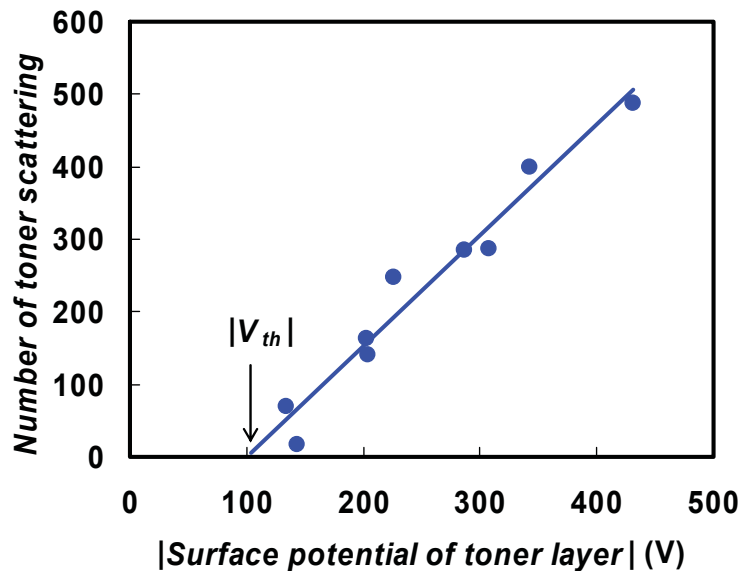


Fig.4-7 Relationship between the number of toner scatterings  $N$  and the surface potential of toner layer  $V_{toner}$ .

$K$  および  $|V_{th}|$  とトナー間付着力  $F_t$  の関係を図 4-8 および図 4-9 に示す。図のように、 $K$  は  $F_t$  の増大と共に小さくなり、 $|V_{th}|$  は  $F_t$  の増大と共に大きくなる。以上のように、重ねチリはトナー付着力に依存する一定の転写トナー層表面電位以上で発生し、重ねチリ発生量は転写トナー層表面電位に比例し、その比例係数がトナー付着力に依存することを明らかにした。

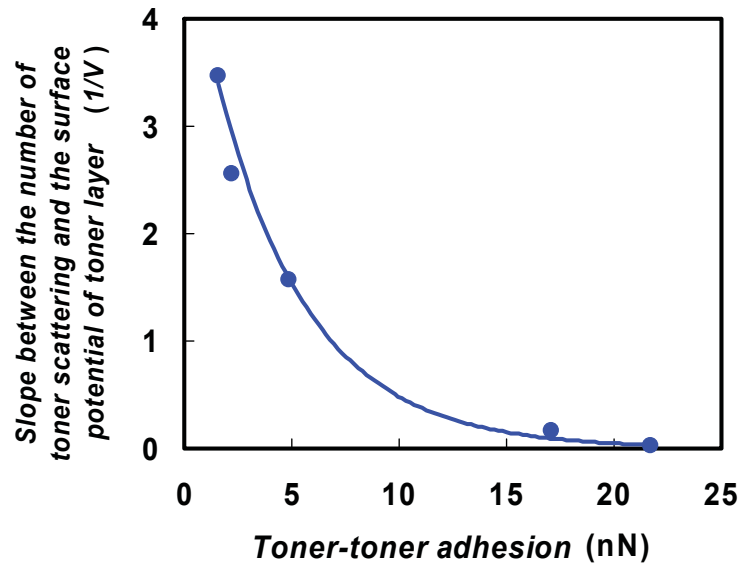


Fig.4-8 Slope between the number of toner scatterings and the surface potential of toner layer,  $K$ , plotted against the toner-toner adhesion  $F_t$ .

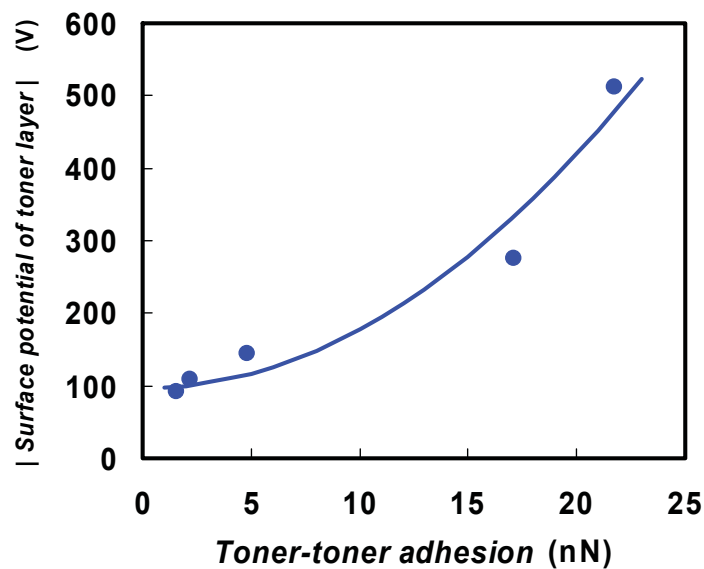


Fig.4-9 The surface potential of toner layer  $V_{th}$ , with which the number of toner scatterings equals to zero, plotted against the toner-toner adhesion  $F_t$ .

#### 4-5 トナー挙動のシミュレーション方法

重ねチリの発生メカニズムおよび重ねチリ発生量とパラメータの関係を考察するために、平行平板間での多重転写過程における3次元トナー挙動シミュレーションを実施した。電界やトナー挙動の計算は、3-5節で述べた単色画像における計算方法を用いる。まず、1色目トナーの転写過程を3-5節と同様に計算する。2色目トナーの転写過程の計算では、図4-10のように、1色目トナーの転写過程計算で得られた転写トナーを転写ベルト上に配置し、擬似感光体上に2色目トナーを配置する。まず、2色目トナーが接近する過程における転写挙動を、転写ギャップが最小設定値  $Z_{min}$  になるまで計算する。つぎに、擬似感光体を逆向きに移動し、転写ギャップが最大設定値  $Z_{max}$  になるまで分離過程のトナー挙動を計算する。

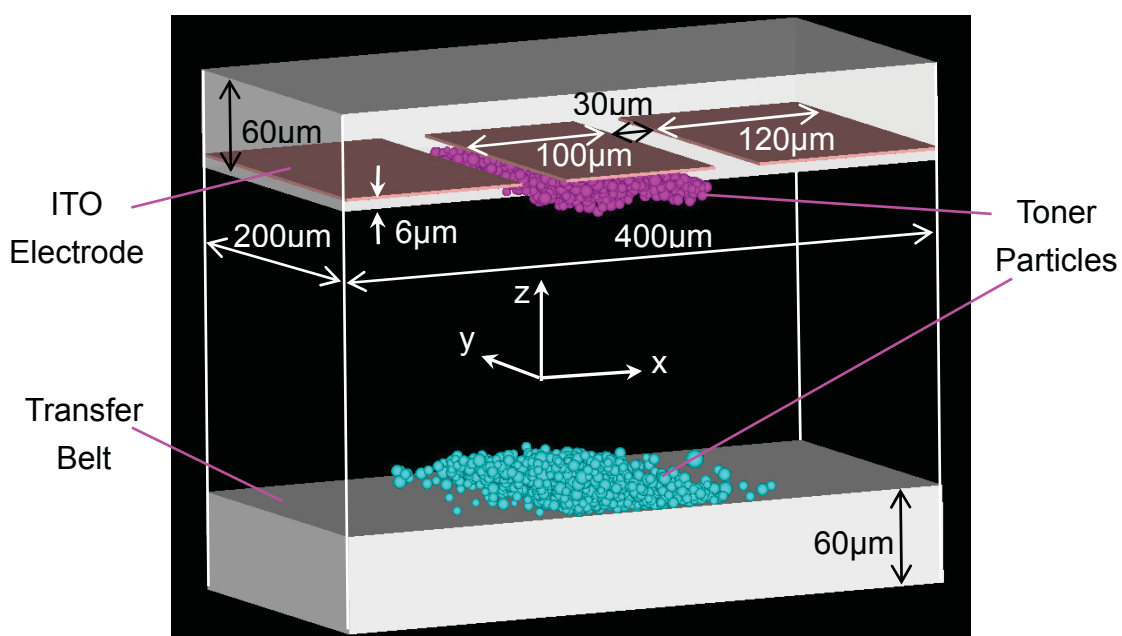


Fig.4-10 Calculation area of multi-color transfer process between parallel plates.



## 4-6 重ねチリのシミュレーション

## 4-6-1 重ねチリ発生過程

1色目のシヤントナー画像上に2色目のマゼンタトナー画像を転写する際の、擬似感光体と転写体の接触・離間過程におけるトナー挙動のシミュレーションを実施した。シミュレーションで用いたパラメータを表4-4に示す。ただし、表4-4の $M/A$ は2色のトナー層の合計を示し、シヤンとマゼンタのトナー特性は色以外は同一とした。

Table 4-4 Parameters of calculation

Electric potential	$V_L$	-100 [V]
	$V_D$	-400 [V]
	$V_T$	500 [V]
Velocity of separation		1 [m/s]
PC film	Thickness	$6.0 \times 10^{-5}$ [m]
	Relative permittivity	3.3
Transfer belt	Thickness	$6.0 \times 10^{-5}$ [m]
	Relative permittivity	10.0
	Resistivity	$1.0 \times 10^7$ [ $\Omega \cdot m$ ]
Toner	Average diameter	$6.8 \times 10^{-6}$ [m]
	$Q/M$	-27.9 [ $\mu C/g$ ]
	$M/A$	1.49 [ $mg/cm^2$ ]
	Relative permittivity	1.0
Average toner adhesion	PC film	$5.4 \times 10^{-8}$ [N]
	Transfer belt	$5.4 \times 10^{-8}$ [N]
	Toner	$1.5 \times 10^{-8}$ [N]
Frictional coefficient	PC film	0.2
	Transfer belt	0.4
	Toner	0.2
Coefficient of restitution		$1.82 \times 10^{-5}$ [ $Pa \cdot m$ ]
Coefficient of viscosity		0.2
Mesh size		$2 \times 10^{-6}$ [m]
Time step		$2 \times 10^{-6}$ [s]
Transfer gap	Initial value	$2.0 \times 10^{-4}$ [m]
	Minimum value	$3.5 \times 10^{-5}$ [m]
	Maximum value	$1.0 \times 10^{-3}$ [m]

図 4-11 にトナー挙動のシミュレーション結果を示す。図 4-11(a)は、擬似感光体と転写体が接近し、マゼンタトナー画像がシアントトナー画像上に転写した状態を示している。なお、擬似感光体は、転写トナー層が見えなくなるので省略している。図のように、接近過程でマゼンタトナーの転写チリが発生しており、観察結果と対応している。図 4-11(b)～図 4-11(e)は分離過程における転写トナー画像の変化を示している。図のように、接近過程で発生したチリトナー以外に、転写トナー層からマゼンタトナーが飛翔して新たなチリトナーが発生しており、転写ギャップ  $Z$  の増大と共にチリトナー数が増加していることがわかる。また、分離過程で発生したチリトナーは、接近過程で発生するチリトナーよりもライン画像から離れた位置まで飛翔している。このように、シミュレーションによる重ねチリ発生過程の計算結果は、観測結果の傾向とよく対応している。

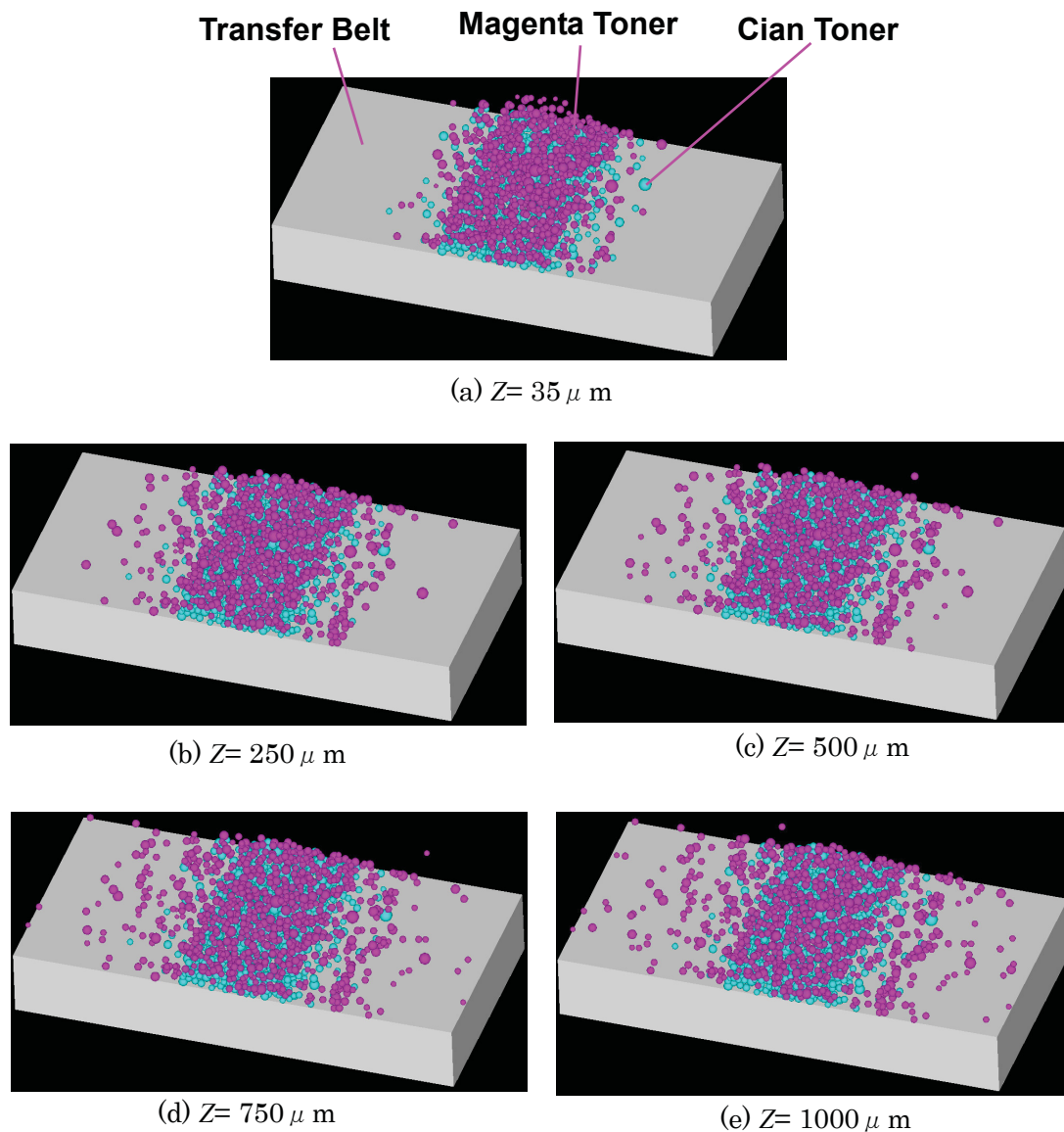


Fig.4-11 Simulated toner scattering images in the separating process.

4-6-2 重ねチリと転写パラメータの関係

つぎに、シミュレーションを用いて重ねチリ発生量と転写パラメータの関係を求め、実験結果とシミュレーションとの対応を検討した。 $Q/M$ 、 $M/A$  およびトナー間付着力  $F_t$  の様々な組み合わせについてシミュレーションを実施し、分離過程におけるチリトナー数  $N$  を求めた。計算に使用した  $F_t$ 、 $Q/M$ 、 $M/A$  の組み合わせを表 4-5 に示す。なお、4-4 の実験と比較するため、接近過程での転写チリが発生しにくくなるように、転写ギャップの初期設定値を 0.04 mm と十分小さく設定した。この他のパラメータは表 4-4 の値を用いた。

Table 4-4 Parameters of calculation

$F_t$ [nN]	$Q/M$ [ $\mu\text{C/g}$ ] and $M/A$ [ $\text{mg/cm}^2$ ]					
5	$Q/M$	-16.7	-27.9			
	$M/A$	1.49	1.49			
15	$Q/M$	-27.9	-16.7	-34.9	-34.9	-55.8
	$M/A$	1.49	1.49	1.49	1.16	1.16
20	$Q/M$	-27.9	-27.9	-34.9		
	$M/A$	1.49	1.16	1.16		
40	$Q/M$	-34.9	-34.9			
	$M/A$	1.49	1.16			

各  $F_t$  に対する  $N$  と  $|Q/M|(M/A)^2$  の関係を図 4-12 に示す。図のように、重ねチリの発生する  $|Q/M|(M/A)^2$  には下限値があり、下限値以上では  $N$  と  $|Q/M|(M/A)^2$  が比例関係となり、 $F_t$  の増大と共に比例係数が低下し、 $|Q/M|(M/A)^2$  の下限値が増大しており、図 4-6 の実験結果の傾向と対応している。

$F_t$  がほぼ同じ場合の  $N$  と  $|Q/M|(M/A)^2$  の関係に関するシミュレーション結果と実験結果を図 4-13 に示すが、チリトナー数の計算値は実験値よりも大きいことがわかる。実験では擬似感光体と転写体の接触時にトナー層へ一定の圧力を印加しているが、トナー層への圧力によって  $F_t$  が増大して遠心分離法による計測値よりも大きくなっている可能性があり、シミュレーション結果と実験結果が異なる理由の一つと考えられる。

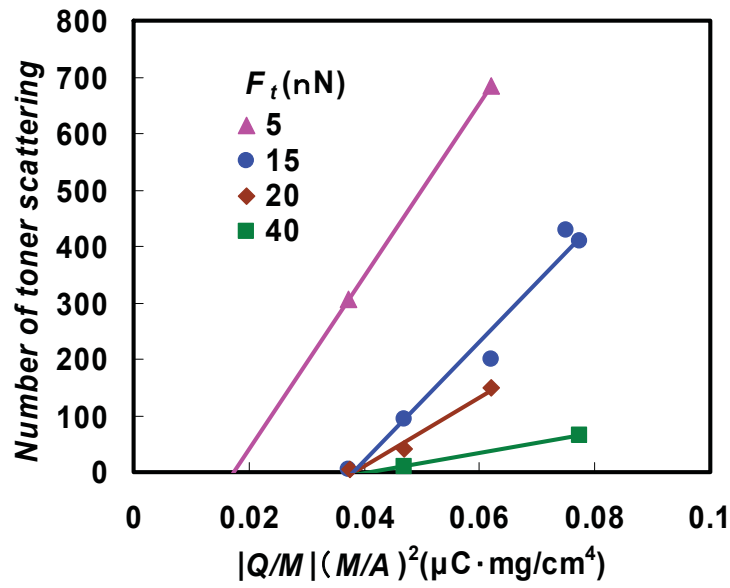


Fig.4-12 Simulation results of relationship between the number of toner scattering  $N$  and  $|Q/M|(M/A)^2$  for several toner-toner adhesion  $F_t$ .

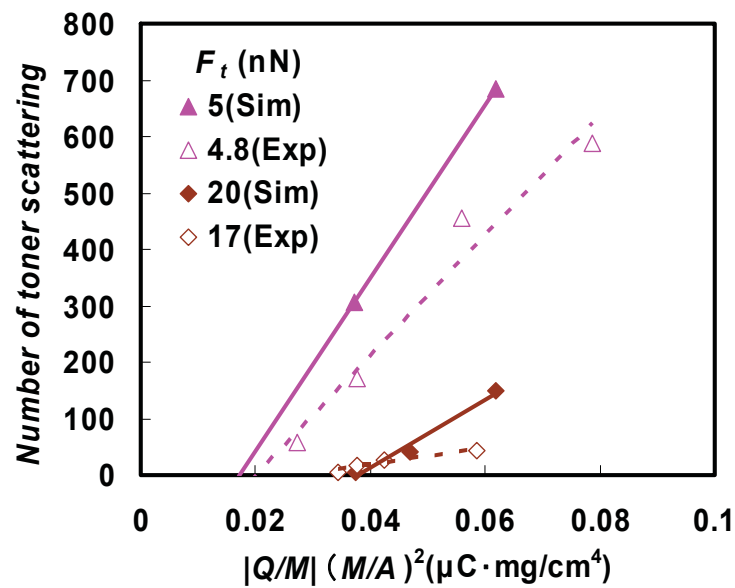


Fig.4-13 Simulation and experimental results of relationship between the number of toner scattering  $N$  and  $|Q/M|(M/A)^2$ .

## 4-7 考 察

## 4-7-1 色重ね画像における転写チリの発生メカニズム

シミュレーションに基づいて重ねチリの発生メカニズムを考察する。重ねチリ発生過程の観察およびシミュレーションの結果より、重ねチリは感光体と転写体の分離過程で転写トナー層からトナーが飛翔して発生することが明らかとなっている。このため、重ねチリの発生メカニズムを明らかにするには、分離過程における転写トナー層内作用力の変化について考察する必要がある。そこで、転写トナー層内の電界分布を計算し、トナー粒子に作用する静電気力の変化について検討する。

図 4-14 を用いて電界の方向および電界分布を説明する。電界の各成分  $E_x$ 、 $E_y$ 、 $E_z$  は、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ の矢印の向きを正とする。以下の説明では、図 4-14 のように、計算領域中央部の  $xz$  平面における  $E_x$  および  $E_z$  の分布を示す。電界強度は、 $5 \text{ MV/m} \sim -5 \text{ MV/m}$  を赤～青で色分けしている。

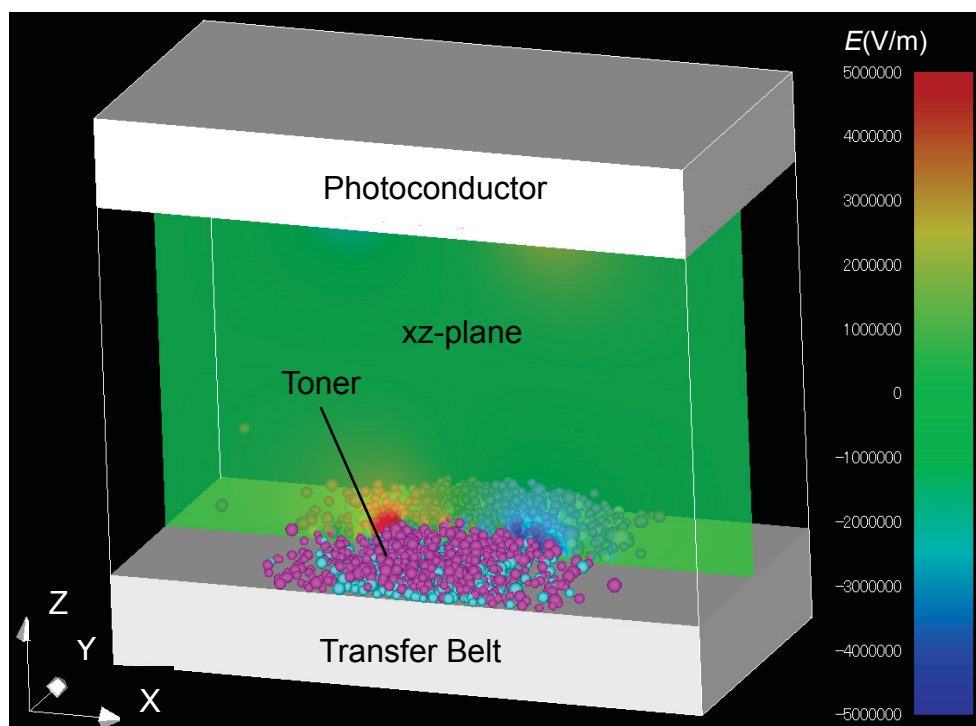


Fig.4-14 Distribution of  $E_x$  in  $xz$ -plane.

重ねチリの発生過程を示した図 4-11 に対応する転写トナー層の  $E_z$  および  $E_x$  分布を図 4-15 および図 4-16 に示す。転写ギャップ  $Z$  が  $35\ \mu\text{m}$  の場合、図 4-15(a) のようにトナー層内の  $E_z$  は正で、負帯電トナーが転写ベルトに付着する向きの静電気が作用する。一方、図 4-16(a) のように、 $E_x$  分布は転写トナー層の左側領域がほぼ正、右側領域がほぼ負で、特にトナー層端部の  $E_x$  が大きいことがわかる。このため、転写トナー層の左側領域では左向きに、右側領域では右向きの静電気がトナーに作用する。このように、 $Z = 35\ \mu\text{m}$  では、 $x$  方向には転写トナー層からトナーが分離する向きに静電気が作用するが、感光体と転写ベルト間の電位差による転写電界によって、 $z$  方向にはトナーを転写トナー層に保持する向きの静電気が作用するため、トナーは転写トナー層に保持される。

感光体と転写ベルト間の電位差による転写電界は、転写ギャップに反比例して低下するため、転写ギャップが広がると転写トナー層の電荷によって形成される電界が相対的に大きくなり、図 4-15(b) ( $Z = 250\ \mu\text{m}$ ) のように、 $E_z$  が転写トナー層上部の一部で負となる。この領域ではトナーが転写トナー層から分離する向きの静電気が作用し、静電気の大きさがトナー間付着力よりも大きい条件を満たすトナーはトナー層から分離する。図 4-16(b) のように、トナー層周囲でも左側領域では左向きに、右側領域では右向きの静電気がトナーに作用するため、分離したトナーはライン画像周辺に飛翔する。転写トナー層からトナーが飛翔すると、図 4-15(b) のように転写トナー層の層厚が低下することがわかる。

更に転写ギャップが広がると、転写トナー層の電荷による電界が更に相対的に大きくなり、図 4-15(c)~(e) のように  $Z = 250\ \mu\text{m}$  の場合よりも転写トナー層上部における負の電界強度が大きくなり、更なるトナーの分離とライン画像周辺への飛翔が生じ、更に層厚が低下する。

転写ギャップが広がると共に転写トナー層から飛翔するトナーは増加するが、一方で、転写トナー層を構成するトナー粒子数が減少するので、転写トナー層の電荷量が低下する。このため、転写トナー層電荷による電界が低下し、トナー間付着力よりも静電気が大きなトナーが少なくなり、新たなトナーの飛翔が発生しなくなる。

以上のように、重ねチリは、感光体と転写ベルトの分離過程における転写電界の低下に伴って、転写トナー層電荷による電界が相対的に増大し、転写トナー層からトナーが飛翔することによって発生する。このような分離過程におけるトナー飛翔は単色画像では発生せず、色重ねによって転写トナー層の電荷量が増加し、トナー層電荷による電界が大きくなった場合に発生する。また、トナー飛翔の発生は、転写トナー層電荷量に依存する静電気力と、トナーを転写トナー層に保持するトナー間付着力の相対的な関係によって決まる。

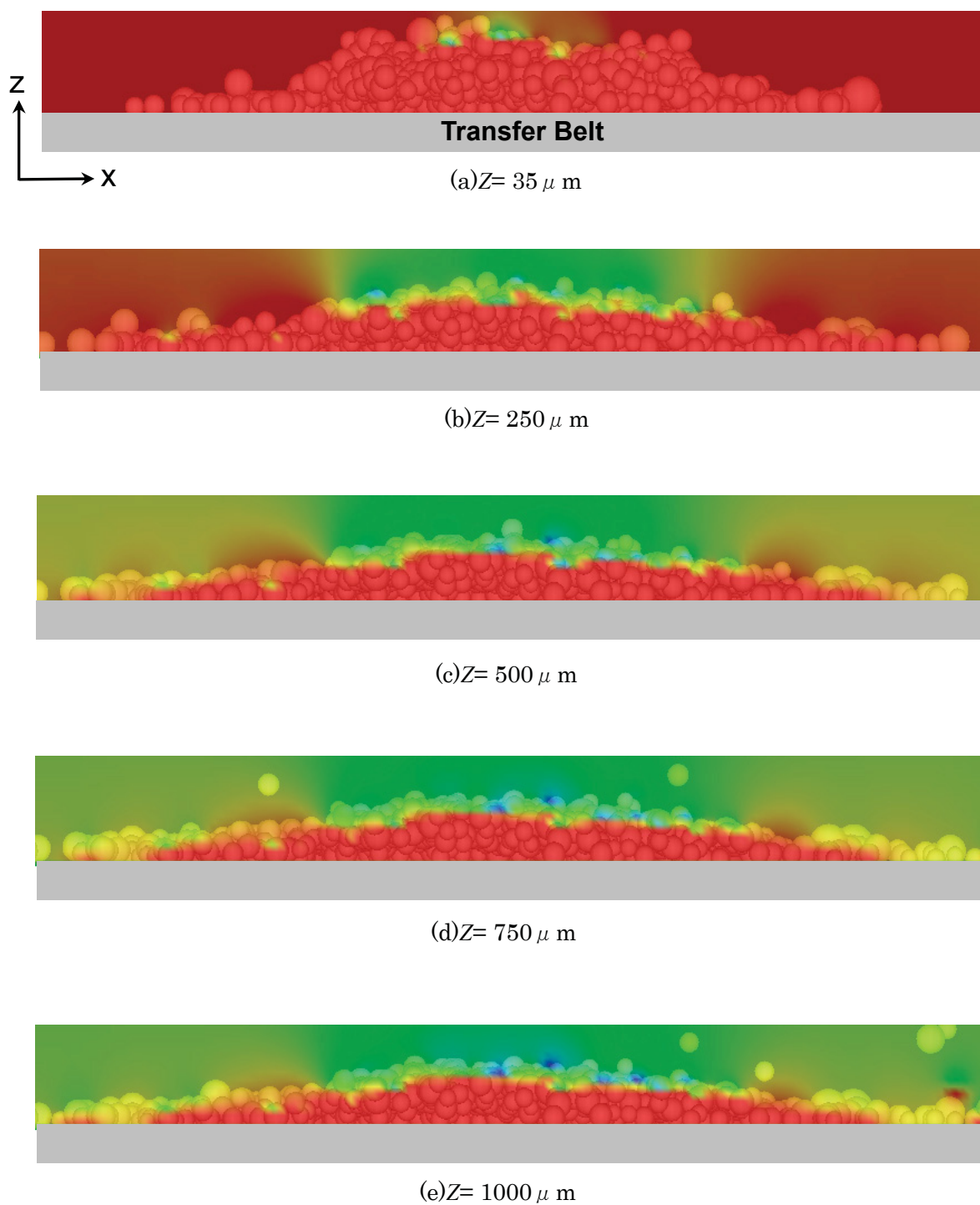


Fig.4-15 Distribution of  $E_z$  in  $xz$ -plane.  
( $M/A= 1.49 \text{ mg/cm}^2$ 、 $Q/M= -27.9 \mu\text{C/g}$ )

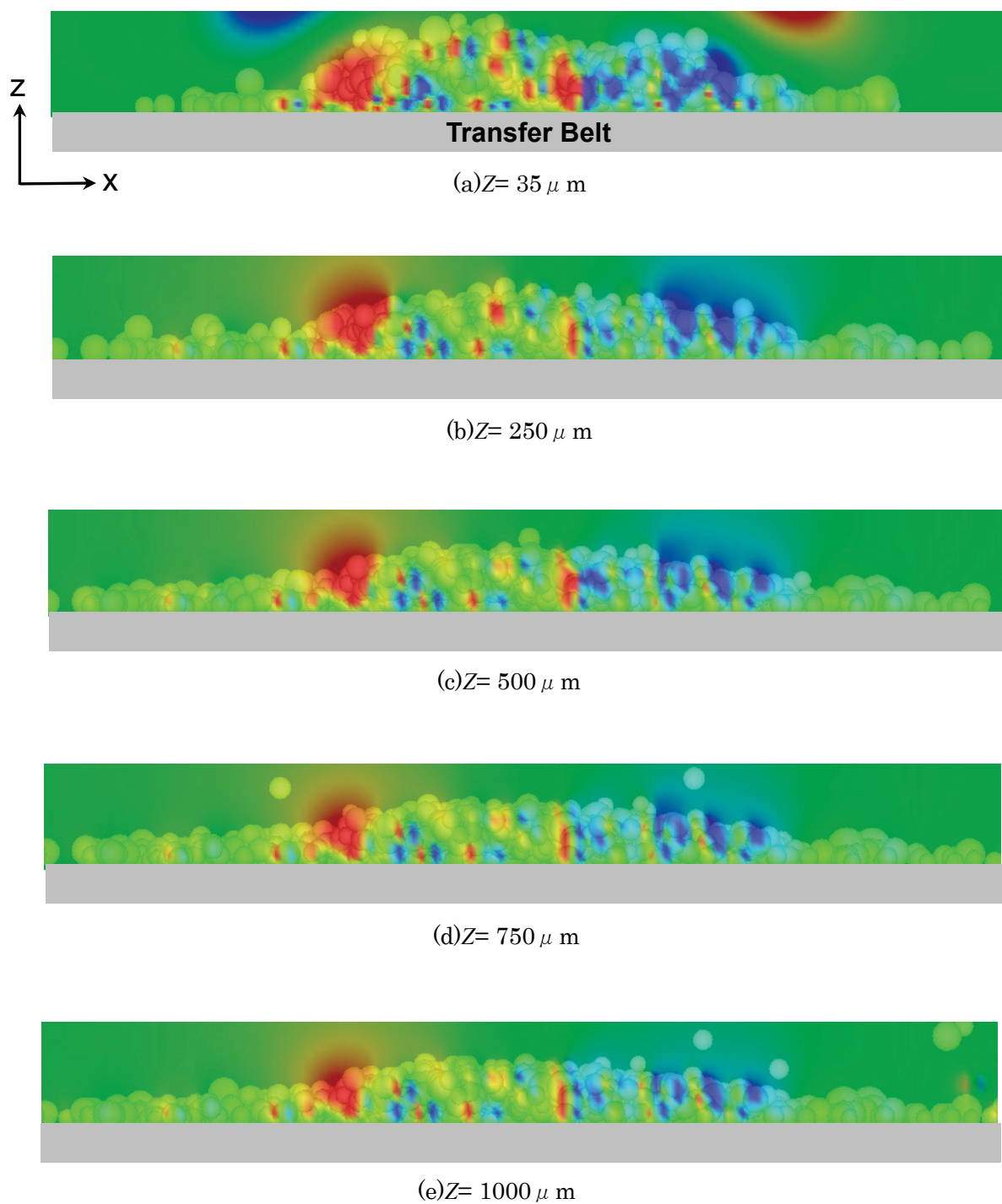


Fig.4-16 Distribution of  $E_x$  in  $xz$ plane.  
( $M/A= 1.49 \text{ mg/cm}^2$ ,  $Q/M= -27.9 \mu\text{C/g}$ )



## 4-7-2 重ねチリに対する転写パラメータの影響

つぎに、シミュレーションと重ねチリ発生モデルに基づいて重ねチリ発生量とパラメータの影響について考察する。

## (1) トナー付着量

まず、重ねチリ発生量に対するトナー付着量の影響について考察する。 $Q/M = -27.9 \mu\text{C/g}$  で  $M/A = 1.49 \text{ mg/cm}^2$  と  $M/A = 1.16 \text{ mg/cm}^2$  の転写トナー層の  $E_z$  分布を図 4-17 に示す。図 4-17(a)、(b) は  $Z = 35 \mu\text{m}$  での  $E_z$  分布を示すが、図のように  $E_z$  は  $M/A$  によらず全領域で正となる。図 4-17(b) の点線は図 4-17(a) のトナー層形状を表しており、 $M/A$  の大きな転写トナー層厚が高いことがわかる。また、図 4-17(c)、(d) は  $Z = 1000 \mu\text{m}$  での  $E_z$  分布を示すが、両者の  $E_z$  分布には顕著な差が無い。図 4-17(d) の点線は図 4-17(c) のトナー層形状を示すが、両者の層厚を比較すると、ライン画像中央部では差は小さく、ライン画像周辺部では飛翔したトナーにより  $M/A$  が大きい方が高くなっていることがわかる。

このように、トナー帯電量が同じで、付着量の異なる転写トナー層の分離過程を比較すると、転写ギャップが狭く、トナーの飛翔が無い状態では層厚の差が大きく、電界分布に差があるが、転写ギャップが広くなり、トナーが転写トナー層周辺に飛翔した後では、層厚の差が小さく、電界分布に差が無いことがわかる。つまり、両者の層厚、電界分布が同じようになるまでトナーが飛翔していることになる。これは、4-7-1 項で述べたように、静電気力がトナー間付着力よりも大きなトナーがなくなるとトナーの飛翔が発生しなくなるが、静電気力は電界分布によって決まるので、トナーが飛翔しなくなった状態の電界分布はトナー飛翔前の状態によらず同じになるためと考えられる。飛翔したトナーの粒子数は、飛翔前とトナーが飛翔しなくなった転写トナー層の構成粒子数の差に対応するため、飛翔後の転写トナー層の層厚が同程度であれば、飛翔前の転写トナー層の層厚が高いほど、つまり  $M/A$  が多いほど飛翔トナーの粒子数が多いことになる。

トナー飛翔後の転写トナー層の層厚が同程度になる理由は、以下のように考えられる。転写トナー層の層厚はトナーを飛翔させる静電気力がトナー間付着力よりも大きなトナーがなくなるまで低下するが、静電気力はトナー層の電荷量に依存するので、トナー帯電量が同じ場合は飛翔後の転写トナー層の層厚が同程度になると考えられる。

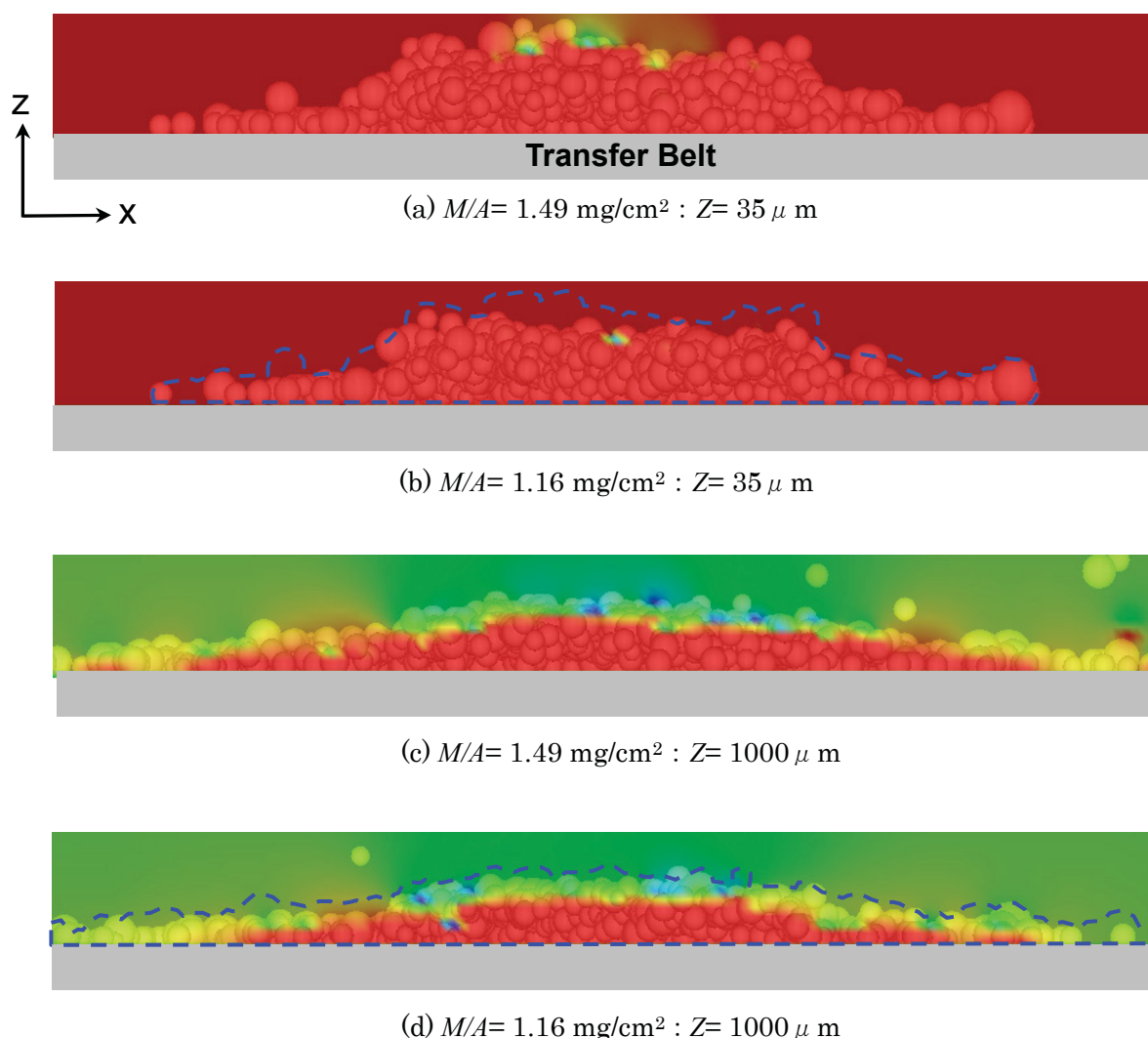


Fig.4-17 Distribution of  $E_z$  in  $xz$  plane.  
( $Q/M= -27.9 \mu\text{C/g}$ )

## (2) トナー帯電量

つぎに、重ねチリ発生量に対するトナー帯電量の影響について考察する。 $M/A= 1.49 \text{ mg/cm}^2$ で $Q/M= -27.9 \mu\text{C/g}$ と $Q/M= -16.7 \mu\text{C/g}$ の転写トナー層の $E_z$ 分布を図4-18に示す。図4-18(a)、(b)は $Z= 35 \mu \text{ m}$ での $E_z$ 分布を示すが、 $E_z$ は全領域で正となる。図4-18(b)の点線は図4-18(a)のトナー層形状を示しているが、付着量が同じなので転写トナー層の層厚は同じになる。また、図4-18(c)、(d)は $Z= 1000 \mu \text{ m}$ での $E_z$ 分布を示すが、 $Q/M$ が大きいほうがややトナー層上部の負の電界強度が大きい。図4-18(d)の点線は図4-18(c)のトナー層形状を示しており、 $Q/M$ が大きいほうが転写トナー層の層厚が低い。

このように、付着量が同じで、トナー帯電量の異なる転写トナー層の分離過程を比較すると、高帯電量のトナー層の方がトナー飛翔後の層厚は低く、飛翔前後の層厚の変化が大

きいため、飛翔トナーの粒子数が多くなる。高帯電量のトナー層の方がトナー飛翔後の層厚が低くなる理由は、トナー帯電量が高いほど、トナーが飛翔しなくなるトナー層電荷量に対応する層厚が低くなるためと考えられる。

以上のように、トナー付着量やトナー帯電量の増大により転写トナー層の電荷量が大きくなると、トナー飛翔前の転写トナー層の形状と、トナー飛翔により静電気力がトナー間付着力よりも小さくなった転写トナー層の形状との差が大きくなり、平衡状態に達するまでに多くのトナー飛翔が必要となるため、重ねチリ発生量が多くなると考えられる。

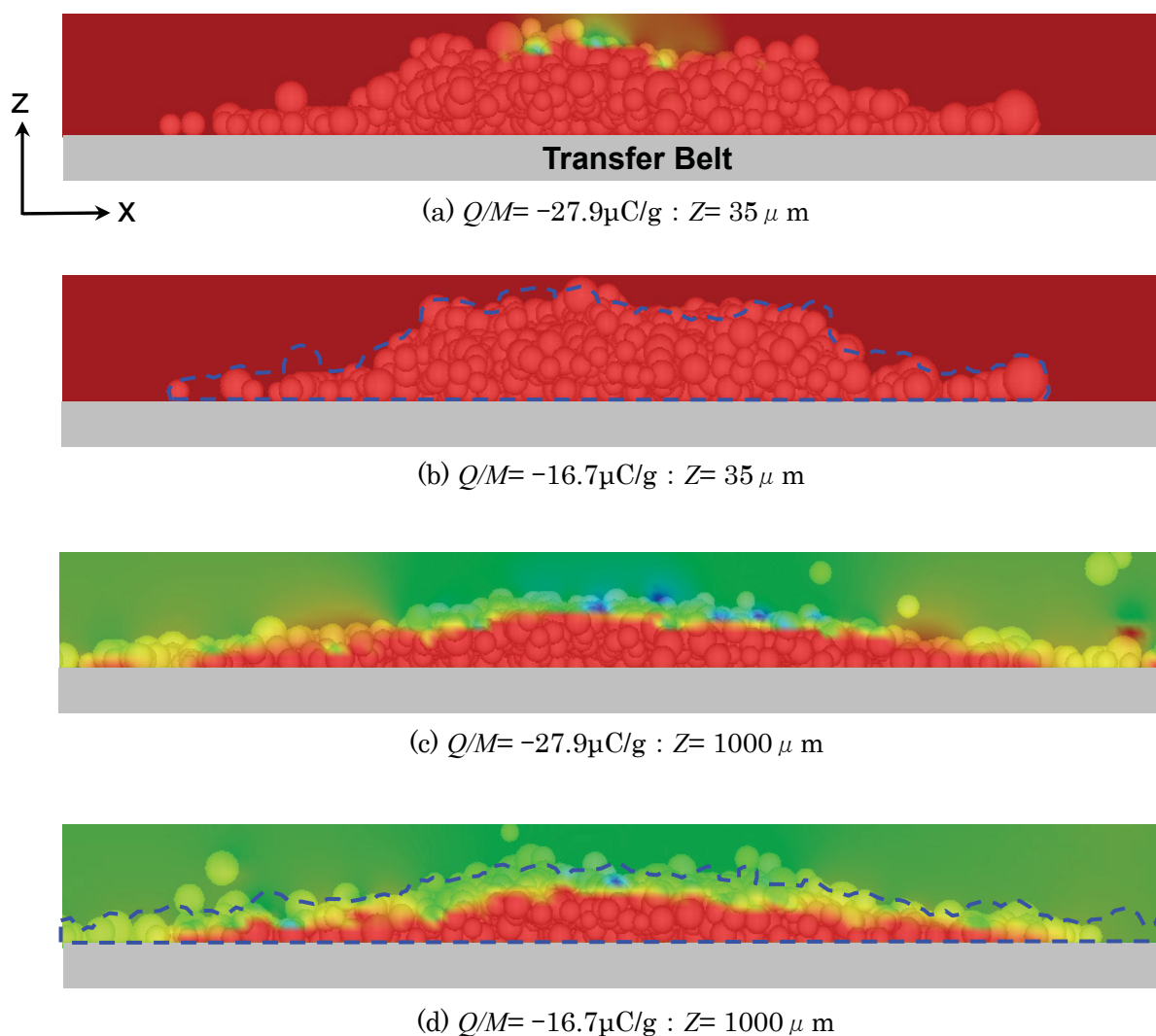


Fig.4-18 Distribution of  $E_z$  in  $xz$ -plane.  
( $M/A = 1.49 \text{ mg/cm}^2$ )

(3) トナー付着力

つぎに、重ねチリに対するトナー付着力の影響について考察する。図4-19のように、トナー間付着力  $F_t$  が大きなトナーは、 $|Q/M|(M/A)^2$  が同じ場合の重ねチリ発生量が少なく、重ねチリの発生する  $|Q/M|(M/A)^2$  の下限値が大きくなる。

まず、 $Q/M$  と  $M/A$  が同じ場合、 $F_t$  が大きなトナーほど重ねチリ発生量が少ない理由について考える。感光体と転写ベルトの分離過程における各転写ギャップにおいて、転写トナー層内の静電気力が  $F_t$  よりも大きなトナーが画像部周辺に飛翔してチリトナーが発生する。 $Q/M$  と  $M/A$  が同じ場合、 $F_t$  が大きなトナーほど、転写トナー層内で静電気力が  $F_t$  よりも大きなトナーは少ないので、各転写ギャップで発生するチリトナー数が少なく、その総数であるチリトナー数  $N$  は少ないと考えられる。

つぎに、 $F_t$  が大きいほど、重ねチリの発生する  $|Q/M|(M/A)^2$  の下限値が大きくなる理由について考える。前述のように、 $Q/M$  や  $M/A$  の増大と共に重ねチリ発生量が増加するが、逆に  $Q/M$  や  $M/A$  の減少と共に重ねチリ発生量が減少し、トナーを飛翔させる静電気力が  $F_t$  よりも小さくなると重ねチリは発生しない。 $F_t$  が大きい場合、転写トナー層からトナーが飛翔するにはより大きな静電気力が必要となり、対応する転写トナー層の電荷量が大きくなると考えられる。

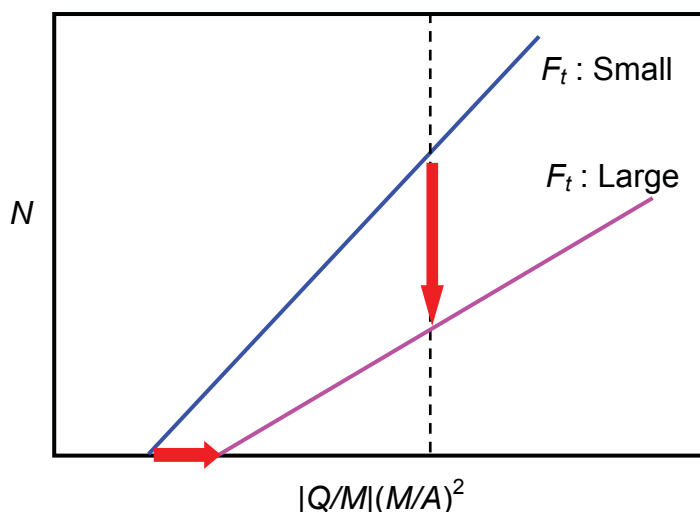


Fig.4-19 Relationship between the number of toner scatterings  $N$  and  $|Q/M|(M/A)^2$  for different toner-toner adhesion  $F_t$ .

#### 4-8 色重ね画像における転写チリの抑制

色重ねによって転写トナー層の電荷量が大きくなった場合に、感光体と転写ベルトの分離過程において、静電気力がトナー間付着力よりも大きなトナーが転写トナー層から飛翔することによって重ねチリが発生すると考えられ、その抑制にはトナーを飛翔させる静電気力とトナー付着力を制御する必要である。

重ねチリに対する転写パラメータの影響に関する検討から、転写トナー層の表面電位が一定値以上で重ねチリが発生し、転写トナー層表面電位に比例して重ねチリ発生量が増加することが明らかとなっている。このため、トナーを飛翔させる静電気力の制御としては、転写トナー層の表面電位が低くなるようなパラメータ設計が必要であり、トナーの低帯電量化と低付着量化が重要となる。特に、文字やライン等の画像は、画像部と非画像部の電位差の効果でベタ画像に較べて現像量が増大しやすく、ベタ画像の画像濃度を確保し、ライン画像の現像量を抑制するには、ライン画像とベタ画像の現像量が変わらないような現像プロセス設計が必要となる。

また、トナー間付着力が大きいトナーほど、重ねチリの発生する転写トナー層表面電位の下限值が大きく、重ねチリ発生量と転写トナー層表面電位の比例係数が小さくなっていることが明らかとなっている。このため、重ねチリの抑制には付着力の大きなトナーを用いることが有効となる。しかし、3-8節で述べたように、トナーの高付着力化には副作用があるので、これらの副作用が生じないような範囲に制御する必要があり、第2章で述べたように外添剤の設計が重要となる。

#### 4-9 まとめと今後の課題

色重ね画像における転写チリである重ねチリ発生メカニズムを解明するために、平行平板間におけるトナー画像の重ね合わせ過程におけるトナー挙動の観察および3次元トナー挙動シミュレーションを実施した。トナー挙動の観察により、感光体と転写体の分離過程で、転写トナー層から分離したトナーが画像周辺に飛翔して転写チリが発生することを明らかにした。実際の中間転写ベルトシステムでは、転写ニップ通過後に中間転写ベルト上で重ねチリが発生していることになる。この重ねチリ発生過程はトナー挙動シミュレーションにより再現することができ、シミュレーションに基づいて重ねチリ発生メカニズムを考察し、分離過程における転写電界の低下に伴って転写トナー層電荷による電界が相対的に増大し、トナーを飛翔させる静電気力がトナー間付着力よりも大きなトナーが飛翔することにより重ねチリが発生することを示した。

重ねチリ抑制指針を獲得するために、様々な転写条件における重ねチリ発生過程の観察を実施し、分離過程における重ねチリ発生量を定量化した。重ねチリはトナーの帯電量および付着量に依存する転写トナー層表面電位が一定値以上で発生し、重ねチリ発生量がトナー層表面電位に比例して増加することを明らかにした。さらに、重ねチリ発生量とトナ

一層表面電位の関係に対するトナー付着力の影響を明らかにした。様々な転写条件におけるトナー挙動シミュレーションを実施した結果、重ねチリ発生量と転写パラメータの関係に関するシミュレーション結果は実験結果と傾向が対応しており、本シミュレーションの有効性を検証することができた。この重ねチリ発生量と転写パラメータの関係について、シミュレーションと重ねチリ発生メカニズムに基づいた考察を示した。重ねチリの抑制には、トナーを飛翔させる静電気力の抑制が必要で、具体的にはトナーの低帯電量化と低付着量化が重要である。さらに、トナー付着力を適正に制御することにより、転写トナー層にトナーを保持する能力を高めることも重要である。

重ねチリは感光体と転写体の分離過程で発生するため、感光体と転写体の接触時にトナー層に印加される圧力の影響を考慮する必要があるが、本研究では重ねチリに対する転写圧力の効果については検討しておらず、今後の課題としては転写圧力の効果を解析する必要がある。また、圧力印加時のトナー挙動を解析するために、接触粒子間の弾性および粘性的相互作用を取り入れた計算モデル(4-1)-(4-3)(4-5)-(4-7)に改良していく必要がある。また、単色画像における転写チリで述べたように、実際の転写システムにおける重ねチリを解析するために、解析装置やシミュレーションを改良していく必要がある。

## 第5章 中抜け現象の解析

### 5-1 研究の目的

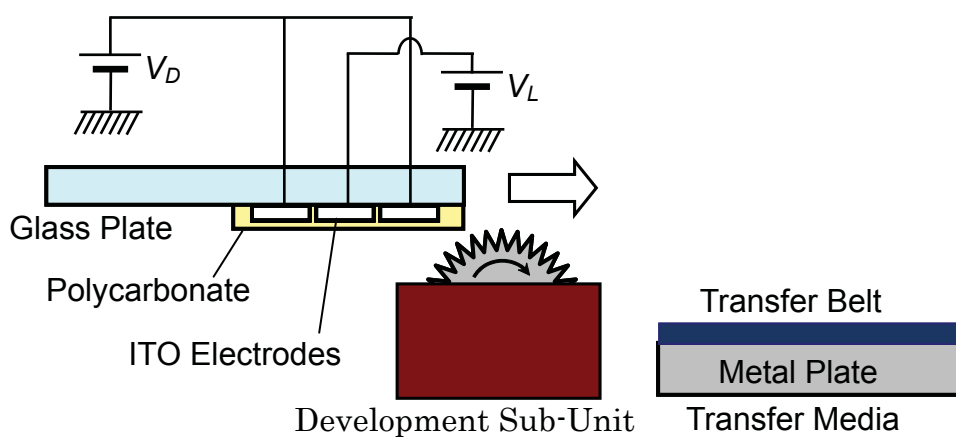
本章では、転写チリと共に重要な画像劣化現象で、細線や文字等の画像の一部が欠ける現象である中抜けの発生メカニズムを明らかにする。中抜け現象については、転写圧力によるトナー層中央部の圧縮によるトナーの凝集に起因して発生するモデルが提示されている(5-1)・(5-4)。本研究でも、この転写圧力によるトナーの凝集に着目し、まず中抜けと転写圧力の関係を確認する。さらに、圧縮トナー層の凝集性を定量的に評価し、中抜け現象との対応関係を明らかにする。中抜けおよび圧縮トナー層の凝集性がトナー特性の違いによってどのような影響を受けるか、特にトナーの粉体特性への影響が大きい粒子形状と付着力の影響を明らかにする。これらの実験結果に基づいて、中抜けの発生モデルおよび発生条件を提示し、発生条件に対する検証結果を示す。最後に中抜けの抑制指針について述べる。

### 5-2 中抜けの実験方法と定量化

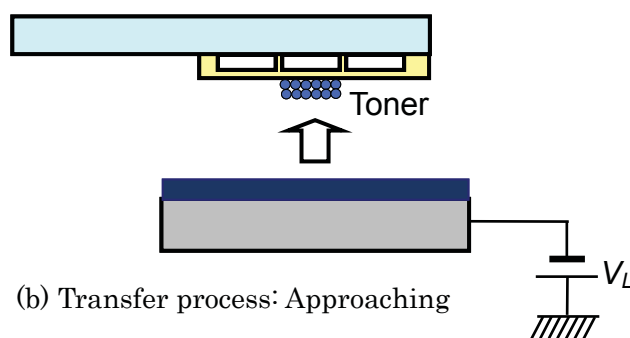
3-2-1 で説明した転写モデル実験装置を用いた中抜けの実験方法について述べる。まず、トナーを含む現像剤を用いて、3-2-2 で述べた方法と同様にして擬似感光体上にライントナー画像を形成する。つぎに、4-4 で述べた方法と同様に、転写電位を擬似感光体の画像部電位  $V_L$  に設定した状態で、転写体を一定速度( $4 \mu\text{m/s}$ )で擬似感光体に接近させ、擬似感光体上のトナー画像に接触させる。さらに、所定の圧力になるまで擬似感光体上のトナー画像に転写ベルトを押し付けた後、転写電位を所定の電位  $V_T$  に変更し、転写体を一定速度( $4 \mu\text{m/s}$ )で遠ざける。転写後に転写体を装置から取り出し、マイクロスコープ(キーエンス製 VHX-600)で転写ベルト上のトナー画像を撮影する。

つぎに、中抜けを定量評価する方法について説明する。転写モデル実験で中抜けの発生したライン画像の例を図 5-2(a)に、図 5-2(a)の一部を拡大した画像を図 5-2(b)に示す。画像計測ソフト(Media Cybernetics 製 Image-Pro Plus)を用いて、図 5-2(c)のようにライン画像の画像欠損部を含まない面積  $S_A$  と、図 5-2(d)のように画像欠損部を含めた面積  $S_B$  を計測する。 $S_A$  と  $S_B$  から、式(5-1)により画像欠損部の面積比率(中抜け面積率  $R_h$  とする)を求める。

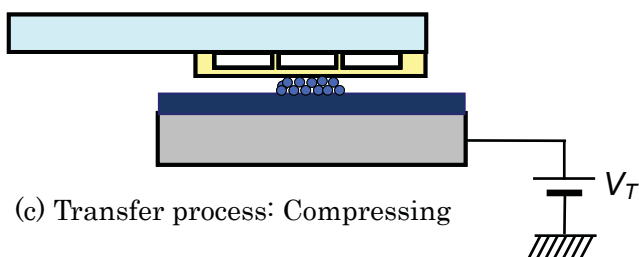
$$R_h = \frac{(S_B - S_A)}{S_B} \quad (5-1)$$



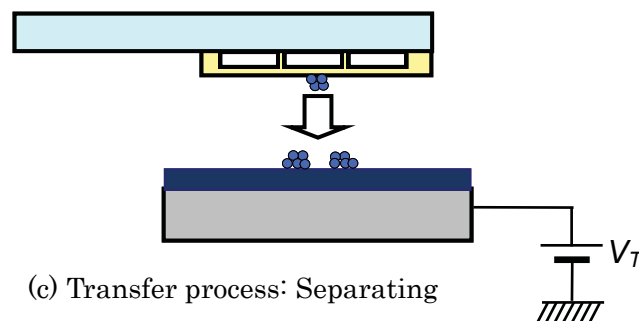
(a) Development process



(b) Transfer process: Approaching



(c) Transfer process: Compressing



(c) Transfer process: Separating

Fig.5-1 Schematic diagram of the experimental setup for transfer process of line image between parallel plates.



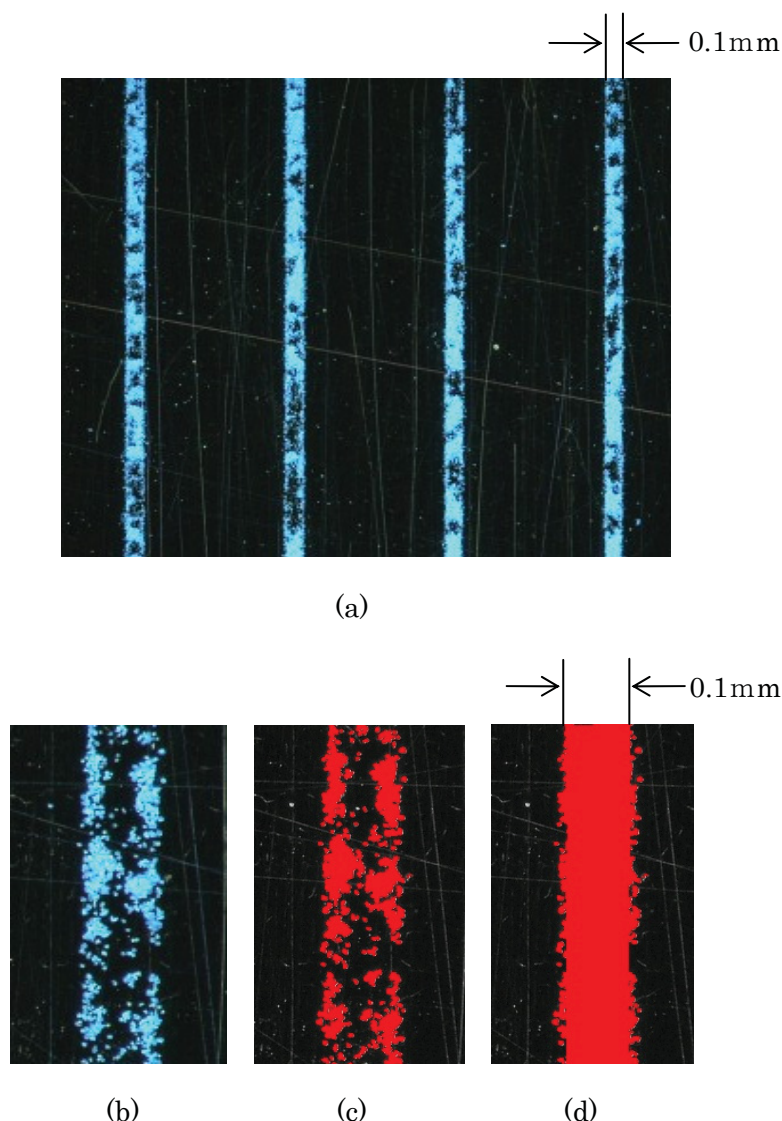


Fig.5-2 Photograph of hollow defects in line image.

本実験で使用したトナーの特性を表 5-1 に、SEM 画像を図 5-3 に示す。トナーA からトナーE は粒子表面を外添剤で被覆しており、トナーF とトナーG はそれぞれトナーA とトナーB の母粒子である。真円度  $R_c$  は、粒子の周囲長  $L$  と投影面積  $S$  から式(5-2)を用いて算出される値で、円の場合に 1 で、形状が複雑になるほど大きな値になる。周囲長  $L$  と投影面積  $S$  は、SEM 画像から画像計測ソフト(Media Cybernetics 製 Image-Pro Plus)を用いて計測した。また、 $F_{ne}$  はトナーと感光体間の非静電付着力で、第 2 章で述べた遠心分離法により測定した。

$$R_c = \frac{L^2}{4\pi S} \quad (5-2)$$

Table 5-1 Properties of toner

Toner	Average Diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Roundness $R_c$	$F_{ne}$ [nN]
A	7.62	1.524	13.19
B	6.44	1.207	11.12
C	6.29	1.279	8.59
D	4.80	1.509	7.01
E	5.82	1.308	21.30
F	7.62	1.524	68.87
G	6.44	1.207	77.64

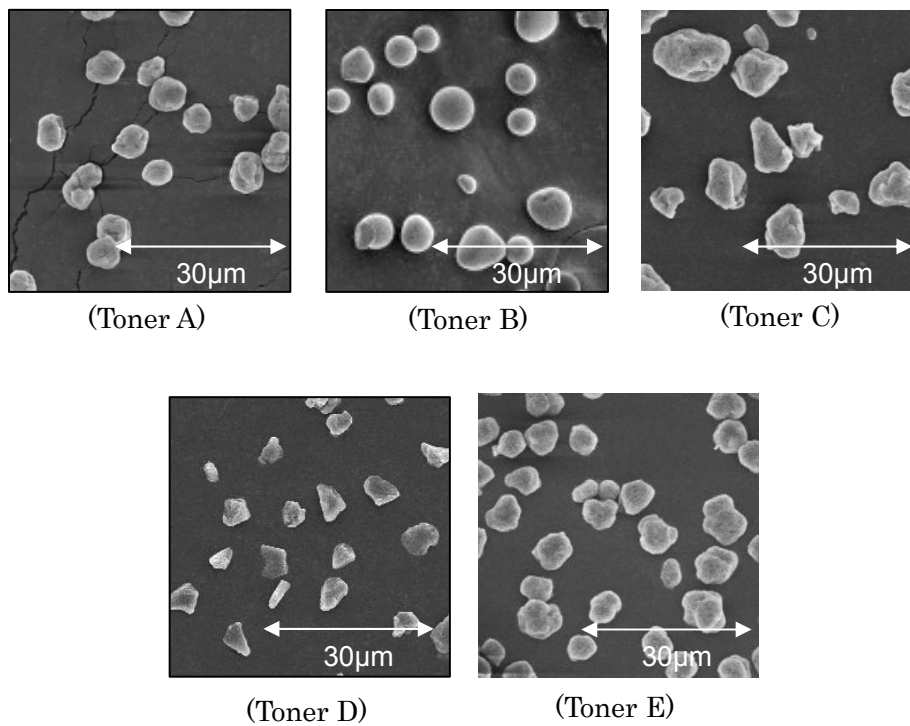


Fig.5-3 SEM image of toner samples for model experiment.

### 5-3 中抜けと転写パラメータの定量的関係

#### 5-3-1 中抜けと転写圧力の関係

最初に、転写モデル実験装置を用いて、中抜けに対する転写圧力の影響について検討した。実験条件を表 5-2 に示す。

Table 5-2 Experimental conditions

Electric potential of image area $V_L$	-100 [V]
Electric potential of non-image area $V_D$	-320 [V]
Electric potential of transfer $V_T$	350 [V]
Amount of toner $M/A$	0.6 [mg/cm <sup>2</sup> ]

トナーAからトナーEについて中抜け面積率と転写圧力の関係を測定した結果を図 5-4 に示す。横軸の圧力は、擬似感光体と転写体間の力をライン画像面積で割った値である。図 5-4 のように、どのトナーについても転写圧力の増大と共に中抜け面積率は増加しており、中抜け面積率の圧力依存性はほぼ比例関係になっていることがわかる。このように、転写圧力によってトナー層が圧縮された場合に中抜けが発生し、転写圧力が高いほど中抜けが悪化することをモデル実験で確認することができた。Inada<sup>(5-4)</sup>らは、転写圧力が高いほど中抜けのランク評価が低くなることを示しており、本モデル実験の結果と対応している。

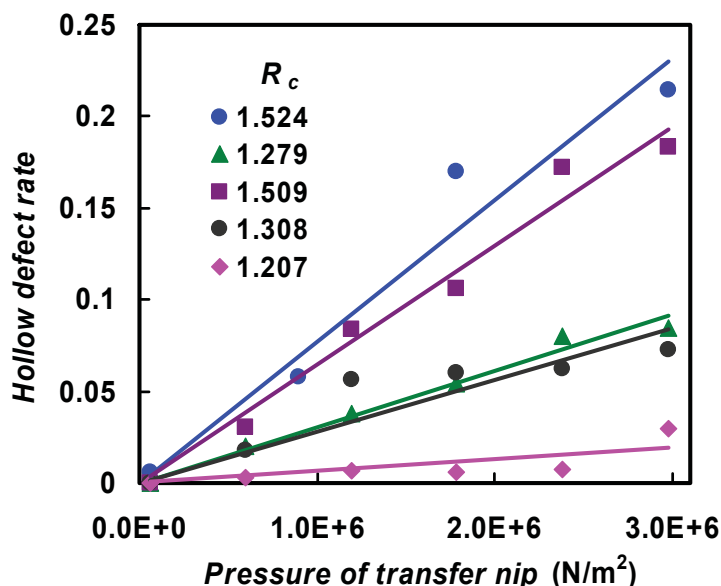


Fig.5-4 Relationship between the hollow defect rate and the pressure of transfer nip.

## 5-3-2 中抜けに対するトナー特性の影響

つぎに、中抜けに対するトナー特性の影響、特にトナーの粉体特性を左右する粒子形状と付着力の影響について検討した。

図5-4から、各トナーについて中抜け面積率の圧力依存性における比例係数 $K_h$ を求めた。比例係数 $K_h$ と真円度 $R_c$ との関係を図5-5に示す。図5-5に示すように、真円度が小さく形状が球形に近いトナーほど比例係数 $K_h$ が小さく、中抜けが発生しにくい傾向にある。

つぎに、トナー形状が同じで付着力の異なるトナーについて、中抜け面積率の転写圧力依存性を測定した結果を図5-6に示す。さらに、図5-6から求めた非静電付着力 $F_{ne}$ との関係を図5-7に示す。図5-7のように、付着力が大きなトナーほど比例係数 $K_h$ が大きくなり、真円度が大きいトナーほど比例係数 $K_h$ の付着力依存性が大きいことがわかる。つまり、真円度が大きいトナーでは付着力が大きいほど中抜けが悪化するが、真円度が小さいトナーでは付着力が大きくても中抜けしにくい。

以上のように、中抜けに対するトナーの形状と付着力の関係から、中抜けの抑制にトナー形状の球形化、トナーの低付着力化が有効となることを明らかにした。

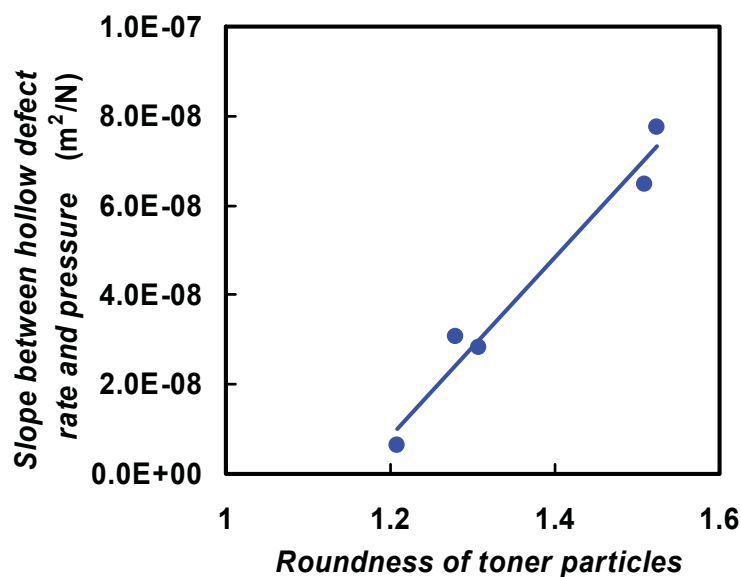


Fig.5-5 Slope between the hollow defect rate and the pressure of transfer nip,  $K_h$ , plotted against the roundness of toner particles.

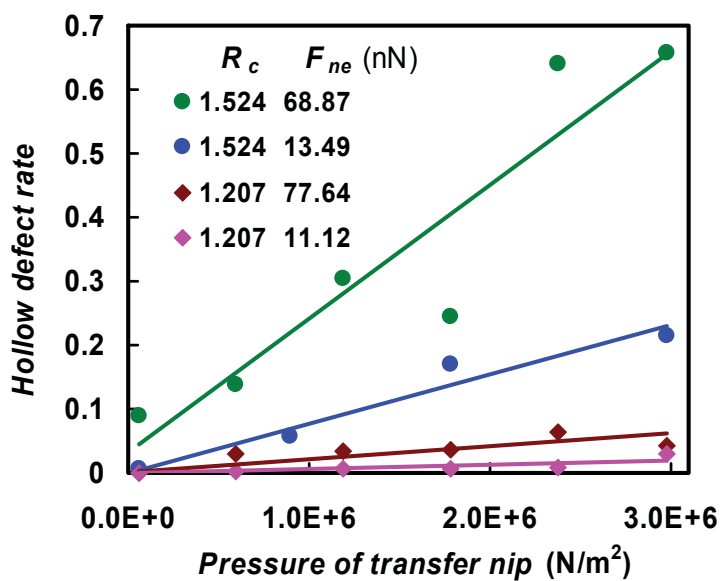


Fig.5-6 Relationship between the hollow defect rate and the pressure of transfer nip.

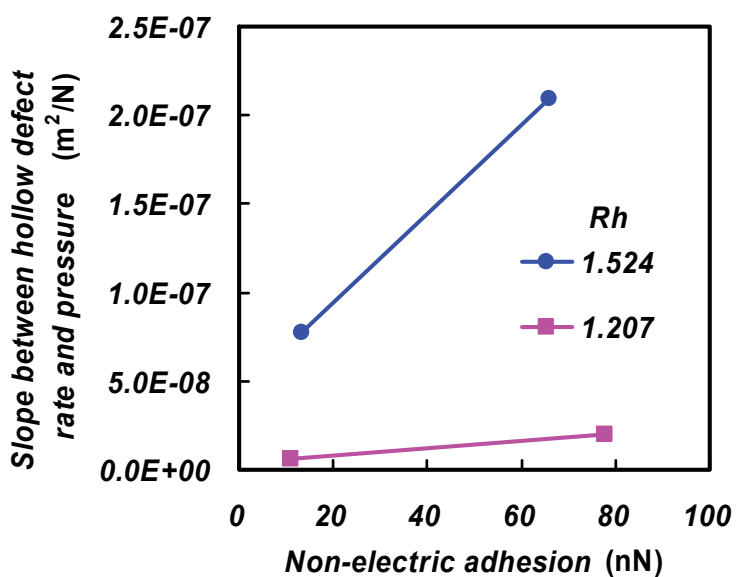


Fig.5-7 Slope between the hollow defect rate and the pressure of transfer nip,  $K_h$ , plotted against the non-electric adhesion force between toner and photoconductor.

#### 5-4 中抜けとトナーの凝集性の関係

5-3節で述べたように、中抜けは転写圧力によりトナー層が圧縮された場合に発生しており、圧縮されたトナー層の状態を定量的に評価することが重要である。特に、圧縮によってトナーが凝集すると、転写電界によるトナーの運動制御が困難となり、中抜けが発生する要因になると考えられることから、圧縮トナー層におけるトナーの凝集性を評価する必要がある。本節では、圧縮トナー層におけるトナーの凝集性に対するトナー特性の影響を明らかにし、中抜けとトナーの凝集性の関係を検討する。

##### 5-4-1 圧縮トナー層のトナー凝集性評価方法

圧縮されたトナー層内のトナーの凝集性を評価する方法としては、圧縮後の粉体層を2分割する際の破断力を測定する方法を用いた<sup>(5-5)</sup>。圧縮後の粉体が強く凝集しているほど、粉体層を分割する際の破断力が大きくなる。破断力の測定装置は、ホソカワミクロン製の粉体層圧縮引張測定装置(アグロボット)<sup>(5-6)</sup>を用いた。アグロボットの模式図を図5-8に示す。まず、図5-8(a)のように上下に2分割できる筒状のセルにトナーを封入し、一定の圧力で圧縮する。つぎに、図5-8(b)のようにセルの上半分を引張り、圧縮後のトナー層を2分割するのに必要な引張り力を測定する。破断力は、引張り力をセルの底面積で割ることにより算出する。

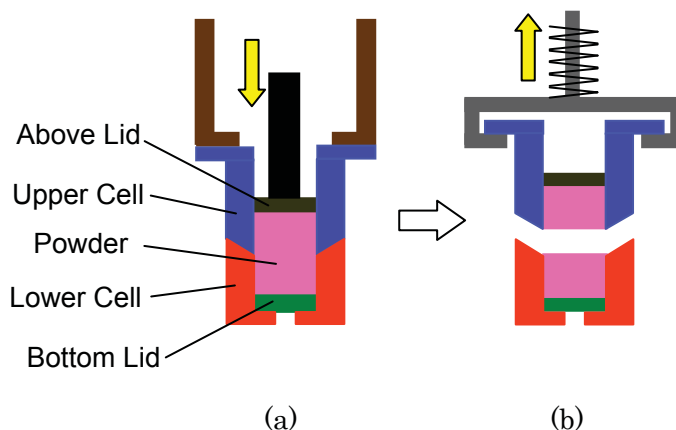


Fig.5-8 Schematic diagram of the compression tester.

## 5-4-2 圧縮トナー層のトナー凝集性に対するトナー特性の影響

破断力の測定ではトナー層を一定の圧力で圧縮するが、様々な圧力で圧縮後のトナー層破断力を測定し、トナー層破断力と圧力の関係について検討した。図 5-9 に、トナーA について測定したトナー層破断力の圧力依存性を示す。図 5-9 のように、トナー層破断力はほぼ圧力に比例して増大しており、圧縮圧力の増加と共にトナーが強く凝集することがわかる。Nakayama<sup>(5-1)-(5-3)</sup>らは、シミュレーションによってトナー層が圧縮されるほどトナー付着力が増大する傾向を示しているが、図 5-9 の実験結果と対応している。以下の検討では、一定の圧力( $1.3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ )でトナー層を圧縮した場合の破断力を用いてトナーの凝集性を比較した。

まず、トナー形状の影響について検討した。付着力が小さく、形状が異なるトナーA からトナーE について破断力を測定した。破断力と真円度の関係を図 5-10 に示す。図 5-10 のように、破断力と真円度には良い相関があり、真円度が 1 に近く、形状が球形に近いトナーほど破断力が小さい。図 5-10 と図 5-5 を比較すると、破断力と真円度の関係は、比例係数  $K_h$  と真円度の関係と傾向が一致していることがわかる。

つぎに、トナー付着力の影響について検討した。付着力の大きなトナーF とトナーG について破断力を測定し、形状が同じで付着力の小さいトナーA とトナーB の破断力と比較した。破断力と非静電付着力の関係を図 5-11 に示す。図 5-11 のように、真円度が大きいトナーでは、トナー付着力が大きいほど破断力が大きくなるが、真円度が小さいトナーでは、付着力が大きいトナーでも破断力が大きくならない。図 5-11 と図 5-7 を比較すると、破断力と非静電付着力の関係は、比例係数  $K_h$  と非静電付着力の関係に傾向が一致していることがわかる。

以上のように、トナー形状が球形に近いほど圧縮トナー層内のトナーの凝集性が低く、不定形トナーは付着力が大きいほど凝集性が高くなるが、球形トナーは付着力が大きくても凝集性が高くならず、トナーの凝集性とトナー特性の関係が中抜けとトナー特性の関係に対応していることがわかる。

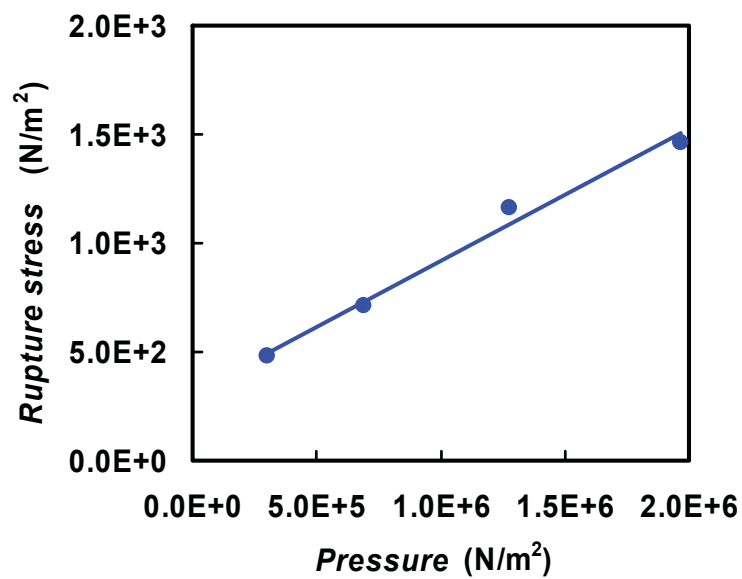


Fig.5-9 Relationship between the rupture stress and the pressure of preparatory consolidation.

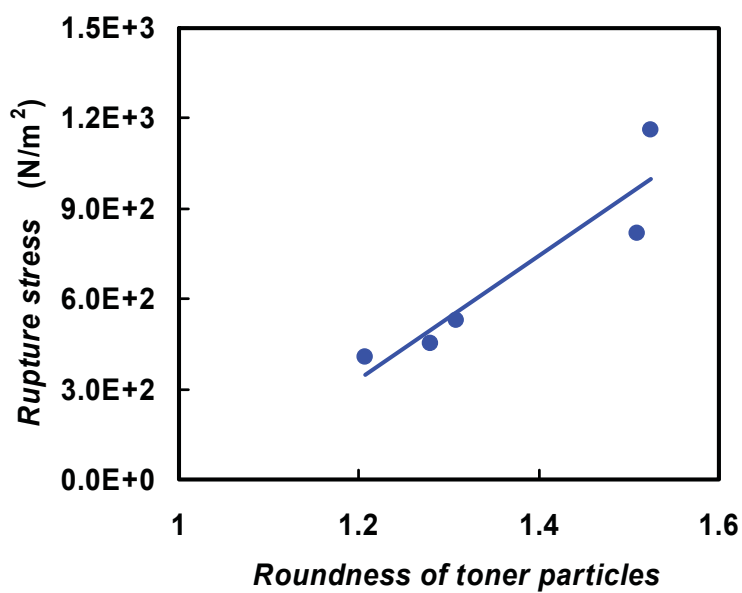


Fig.5-10 Relationship between the rupture stress and the roundness of toner particles.



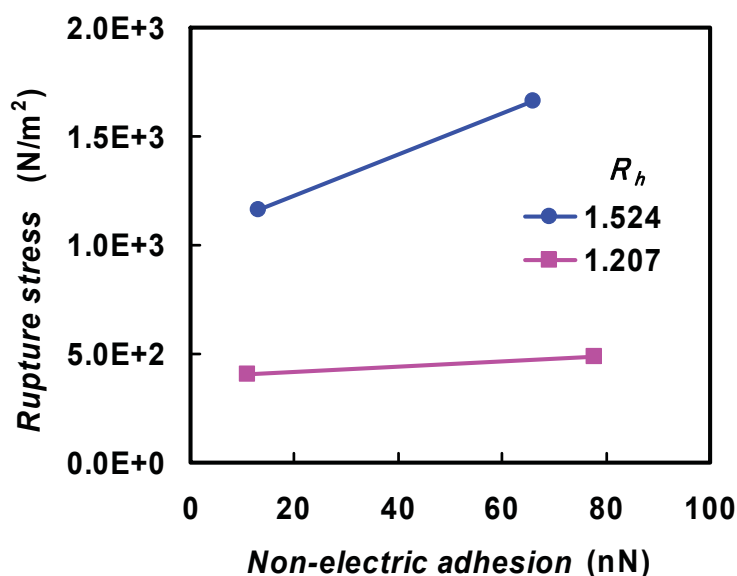


Fig.5-11 Relationship between the rupture stress and the roundness of toner particle.

上記のように、圧縮トナー層内のトナーの凝集性がトナー形状に依存し、形状が球形に近いほど凝集性が低いことを示したが、その理由について考察する。トナーの形状が不定形粒子の場合、トナー層が圧縮されると、凸部等の粒子の一部に応力が集中し、局所的な変形が生じやすいと考えられる。局所変形により接触部の面積が増大すると、接触面積に応じて粒子間の付着力が大きくなり、凝集性が増大する。これに対して、トナーの形状が球形粒子の場合、上記のような局所的な応力集中が無く、不定形に比べて局所変形が生じにくく、凝集性が増大しにくいと考えられる。しかし、粒子形状による局所変形の違いは検証されておらず、圧縮トナー層内のトナーの凝集性に対する粒子形状の影響に関するメカニズムについては、更なる解析が必要である。

#### 5-4-3 圧縮トナー層のトナー凝集性と中抜けの関係

5-3-2 項と 5-4-2 項の結果に基づいて、圧縮トナー層におけるトナーの凝集性と中抜けの関係について述べる。トナーA からトナーG について、中抜け面積率の圧力依存性における比例係数  $K_h$  と一定の圧力( $1.3 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup>)で圧縮後のトナー層破断力との関係を図 5-12 に示す。図 5-12 のように、比例係数  $K_h$  と破断力には良い相関が有り、破断力が大きいほど比例係数  $K_h$  が大きくなることがわかる。この結果は、圧縮されたトナー層におけるトナーの凝集性が高くなるほど、画像内の中抜けする領域が広くなることを示している。このため、中抜けする領域はトナーが凝集している領域であり、中抜けの抑制にはトナーの凝集を抑制することが重要となる。

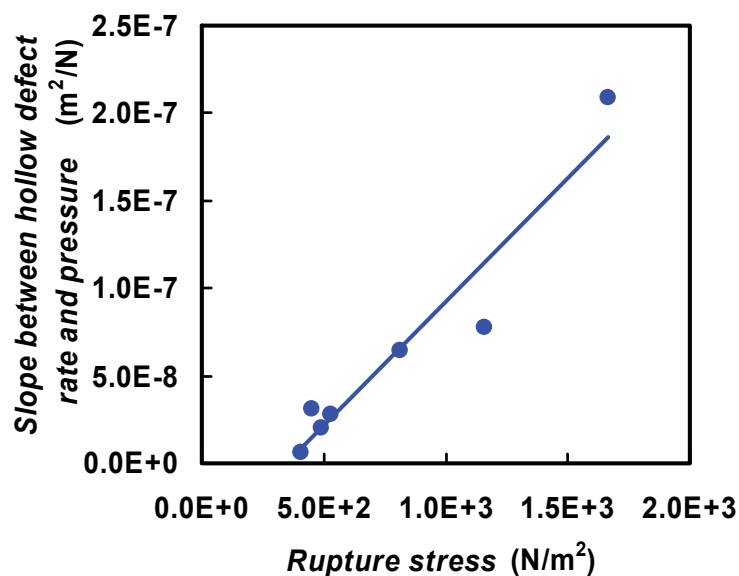


Fig.5-12 Slope between the hollow defect rate and the pressure of transfer nip,  $K_h$ , plotted against the rupture stress.

## 5-5 考察

### 5-5-1 中抜けの発生メカニズム

これまでの検討結果に基づいて中抜けの発生メカニズムについて考察する。5-4節で述べたように、転写圧力によってトナー層が圧縮され、層内にトナーが凝集する領域が形成されて中抜けが発生すると考えられる。ライン画像では、図 5-2 のようにライン中央部が欠けることから、中央部のトナー層が圧縮されていると推定される。ライン画像のトナー層形状を、キーエンス社製超深度形状測定顕微鏡 VK8500 を用いて計測した結果を図 5-13 に示す。図 5-13 のように、ライン画像のトナー層形状は中央部が周辺部よりも高く、トナー層に転写圧力が印加されると、中央部のトナー層が圧縮されることがわかる。また、トナー層中央部の高さに分布があることがわかるが、トナー層の高い領域がより圧縮され、中抜けが発生しやすいと考えられる。

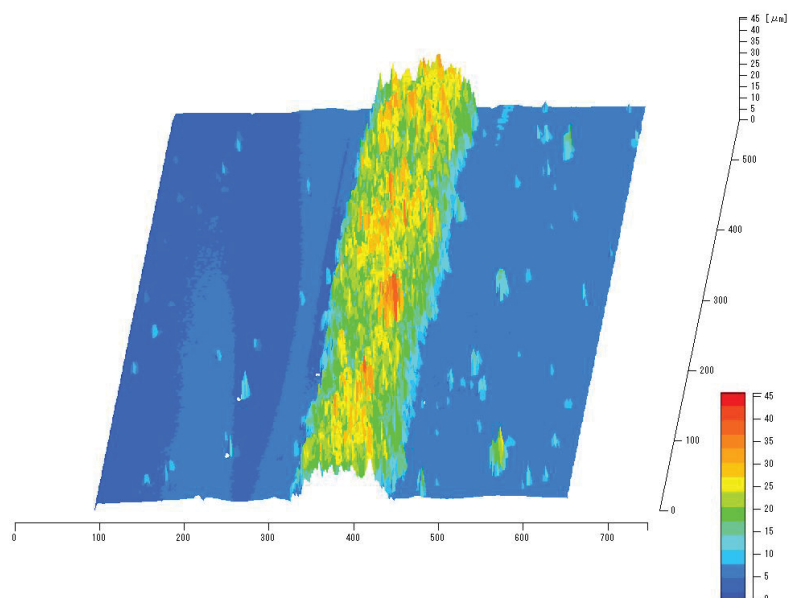


Fig.5-13 Thickness distribution of toner layer in line image.

転写圧力によってライン画像中央部のトナー層が圧縮されて中抜けが発生する過程の説明図を図 5-14 に示す。図 5-14(a)は転写圧力を印加する前のトナー層断面図で、トナー層断面は上記のようにライン中央部が高い釣鐘形状となる。図 5-14(b)は転写圧力が印加中のトナー層断面図で、トナー層中央部は転写圧力によって圧縮されるが、端部は圧縮されない。図 5-14 (c)は中抜けが発生している場合の転写圧力印加後のトナー層断面図である。転写圧力によって圧縮されたトナー層中央部では、トナーの粒子変形、感光体と転写ベルト表面の変形によって接触面積が増大し、トナー間の付着力、トナーと感光体の付着力、トナーと転写ベルト間の付着力が増大する。トナー間の付着力が増大すると、複数のトナーが強固に付着した凝集体が形成されやすくなる。転写ベルト面から感光体面までの凝集体が形成され、転写圧力印加後に凝集体が転写されずに感光体面に付着すると、トナー層端部は転写電界によって転写されるため、図 5-14 (c)のように中抜けが発生する。

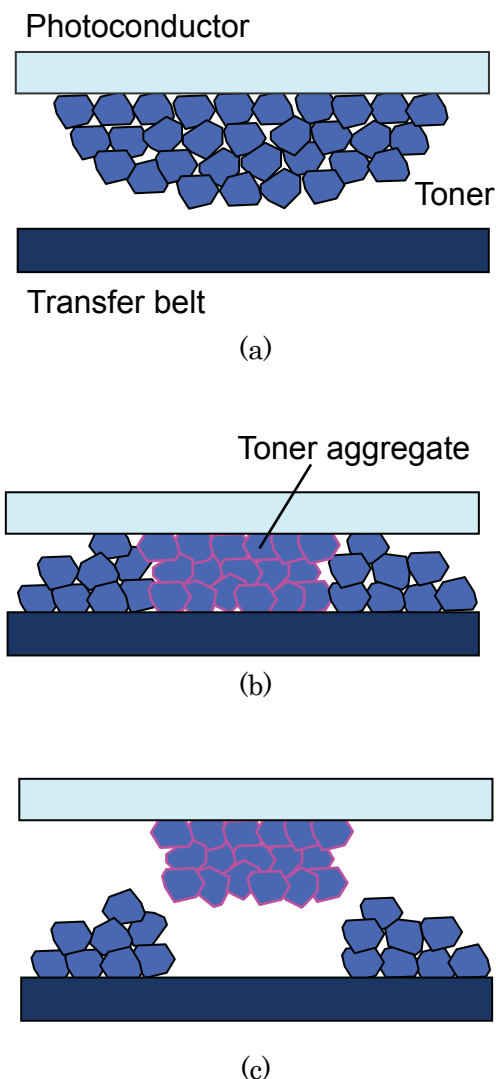


Fig.5-14 Model of hollow defect.

つぎに、中抜けが発生する場合のトナー層内の作用力の条件について検討する。図 5-15 に示すように、トナー層内ではトナー間の付着力  $F_t$ 、トナーと感光体間の付着力  $F_p$ 、トナーと転写ベルト間の付着力  $F_b$ 、転写電界による静電気力  $F_q$  が作用している。中抜けの発生モデルとしてトナーの凝集体形成と凝集体の感光体への付着を仮定しており、凝集体に関する作用力のバランスについて検討する必要があるが、以下のように凝集体に関する作用力を単純化して発生条件を検討した。まず、図 5-15 のように、トナーには様々な方向に力が作用しているが、中抜けの発生条件としてはトナー層厚み方向の作用力バランスについてのみ検討した。また、凝集体の分断及び付着に関する作用力の条件は、凝集体に作用する力を感光体または転写ベルトに接触しているトナーの数で割ったトナー1粒子当たりの作用力を用いて検討する。さらに、感光体と転写ベルトに接触している凝集体中のトナー

粒子数が同程度と仮定し、図5-16に示す単純なモデルで中抜け発生条件を検討する。図5-16において、 $F_q^p$ 、 $F_q^b$ はそれぞれ感光体に接するトナー、転写ベルトに接するトナーに作用する静電気力を示している。

圧力印加後にトナーの凝集体が感光体側と転写ベルト側に引っ張られ、凝集体が分断されずに感光体側に付着すると中抜けが発生する。そこで、まず凝集体が感光体側に付着する条件について考える。凝集体を感光体側に引っ張る力は凝集体と感光体間の付着力で、転写ベルト側に引っ張る力は凝集体と転写ベルト間の付着力と凝集体に作用する静電気力の和となり、凝集体が感光体側に付着する条件は式(5-3)のように表される。

$$F_p > F_b + F_q^p + F_q^b \quad (5-3)$$

つぎに、式(5-3)が成立し、かつ凝集体が分断されない条件について考える。凝集体が分断されないためには、転写ベルトに接触しているトナーを転写ベルト側に引っ張る力が、凝集体に保持する力よりも小さい必要があり、凝集体が分断されない条件は式(5-4)のように表される。

$$F_b + F_q^b < F_t \quad (5-4)$$

式(5-3)、式(5-4)を共に満足する場合、凝集体は転写ベルトとの界面で分離して感光体側に付着し、中抜けが発生する。中抜け発生条件は静電気力に依存し、静電気力が小さいほど中抜けが発生しやすい。このため、静電気力をゼロ( $F_q^p=0$ 、 $F_q^b=0$ )とした以下のトナー付着力に関する条件式(5-5)、(5-6)は、中抜け発生の必要条件を示しており、この条件式を満たさない場合は中抜けが発生しない。なお、図5-16はトナー層が2層の場合だが、トナー層が3層以上の場合もこの必要条件は変わらない。

$$F_p > F_b \quad (5-5)$$

$$F_t > F_b \quad (5-6)$$

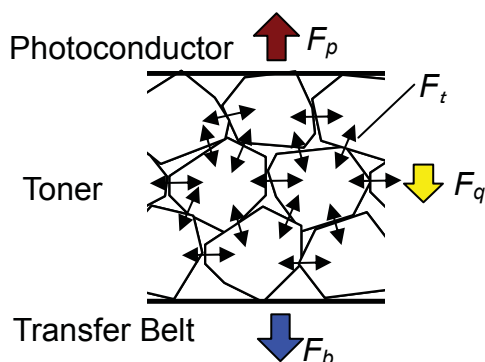


Fig.5-15 Forces acting on toner particles in toner layer.

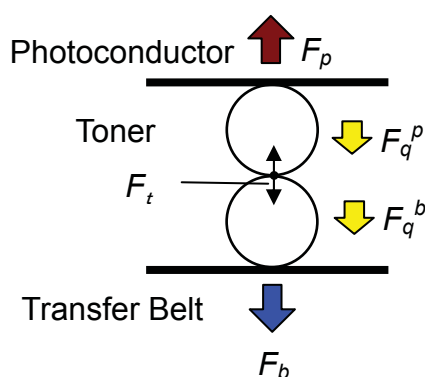


Fig.5-16 Simple model of forces acting on toner particles in toner layer.

### 5-5-2 中抜け発生条件の検証

つぎに、中抜け発生モデルで提示した中抜けの発生条件についての検証を試みた。中抜け発生の必要条件である関係式(5-5)と(5-6)は、圧縮されたトナー層におけるトナーと感光体間、トナーと転写ベルト間およびトナー間付着力の関係を示している。このため、一定の力でトナーを付着面に押し付けた後の各トナー付着力を測定し、トナー付着力間の関係と中抜け発生との対応を検討した。トナー付着力の測定は第2章で説明した遠心分離法を用いるが、トナーを付着面に押し付ける方法も遠心力を利用しておこなった。図5-17にトナーを感光体に押し付ける方法を示す。トナーを感光体に付着した測定基板と受け基板を、通常遠心分離の配置と逆になるようにローター内に設置し、ローターを一定の回転数で回転することにより、トナーが付着面に押し付けられるように遠心力を作用させた。トナーを転写ベルトやトナーに押し付ける場合も同様である。

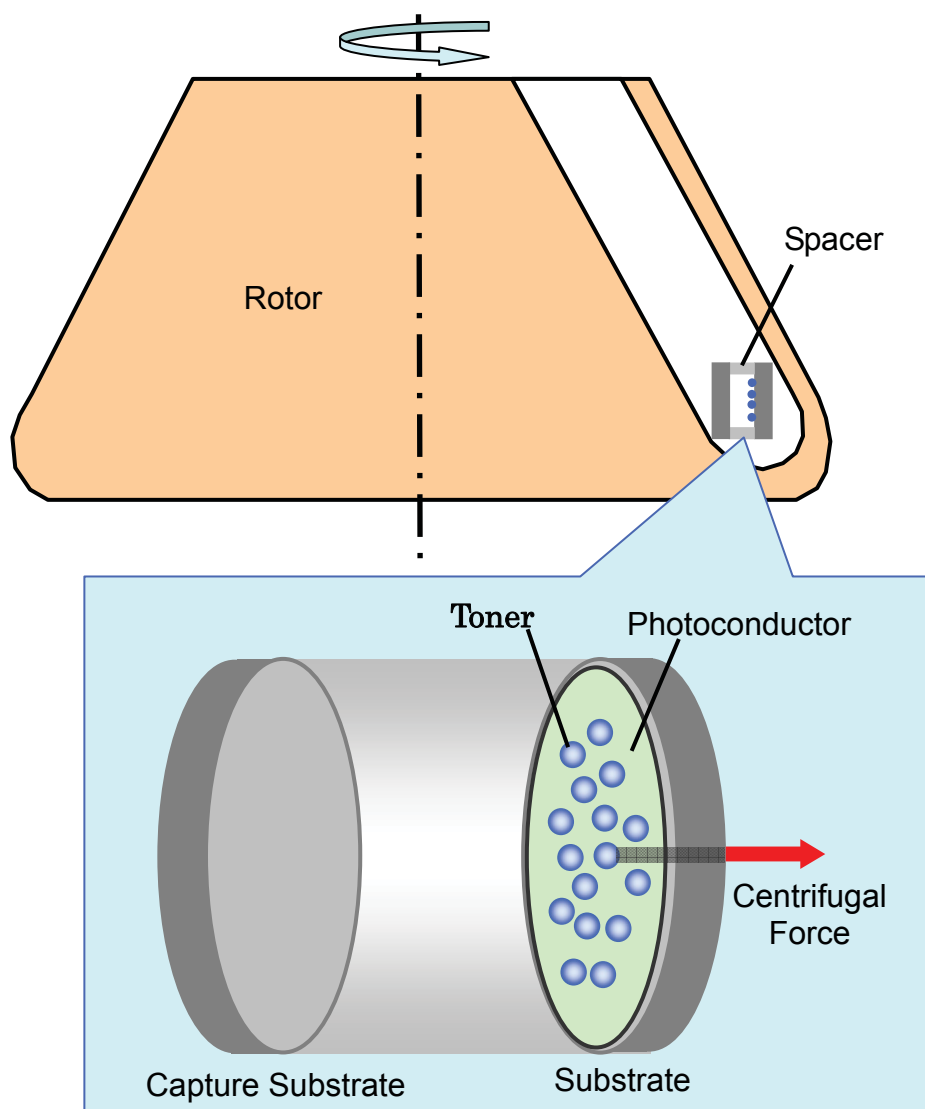


Fig.5-17 Schematic illustration of the method of pushing toner particles to photoconductor by the centrifugal force.

トナーを基板に押し付ける遠心力(逆遠心力)を変え、逆遠心力作用後のトナーと感光体間、トナーと転写ベルト間、トナー間の非静電付着力を測定した。中抜けの発生しやすい不定形のトナーAについて、逆遠心力と付着力の関係を図 5-18 に示す。図 5-18 のように、トナーA における付着力の大小関係は、逆遠心力が小さい場合は  $F_p > F_b > F_t$ 、逆遠心力が増加すると  $F_p > F_t > F_b$ 、逆遠心力が大きい場合は  $F_t > F_p > F_b$  となる。中抜け発生の必要条件は  $F_p > F_b$  かつ  $F_t > F_b$  なので、逆遠心力が小さい場合以外では、付着力の大小関係が中抜け発生の必要条件を満足している。一方、中抜けの発生しにくい球形のトナーB について、逆遠心力と付着力の関係を図 5-19 に示す。図 5-19 のように、トナーB における付着力の大小関係は、逆遠心力が小さい場合は  $F_p > F_b > F_t$ 、逆遠心力が大きい場合は  $F_p > F_b \geq F_t$  となり、中

抜け発生の必要条件を満足していない。以上のように、中抜け発生の必要条件と中抜けしやすさに対応しており、中抜け発生モデルで提示した発生条件を検証することができた。

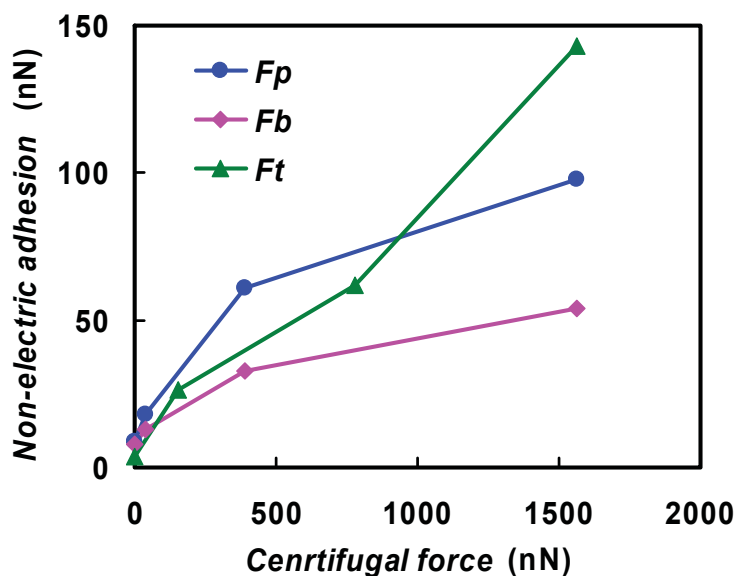


Fig.5-18 Relationship between non-electric adhesion force and centrifugal force in the case of toner A.

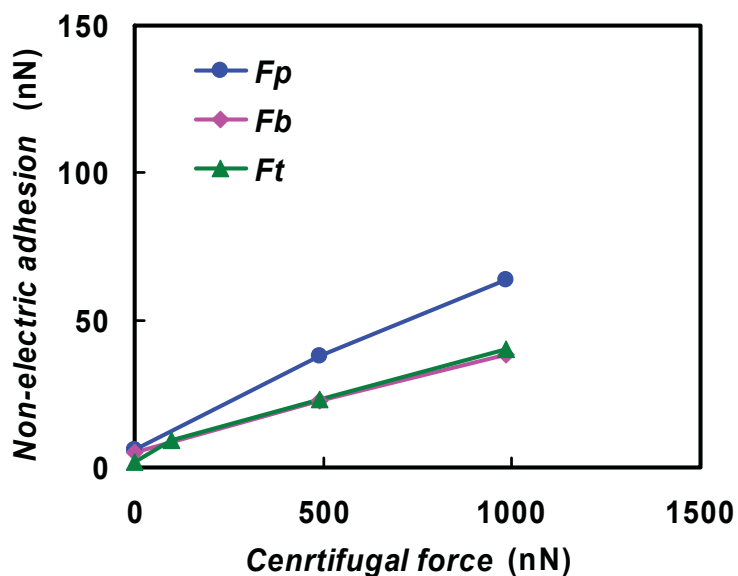


Fig.5-19 Relationship between non-electric adhesion force and centrifugal force in the case of toner B.



## 5-6 中抜けの抑制

中抜けとトナーの凝集性の関係から、圧縮トナー層におけるトナーの凝集性が高いほど中抜けが悪化することが明らかとなっており、トナー層内に凝集体が形成されることにより中抜けが発生すると考えられる。このため、中抜けの抑制には、トナー層を圧縮した際トナーの凝集性を抑制し、トナーの凝集体が形成されないようすることが重要である。トナー層が圧縮されなければトナーの凝集は生じにくいいため、転写圧力の低圧化が有効である。また、圧縮トナー層におけるトナーの凝集性がトナーの形状と付着力に依存することが明らかとなっており、トナーの凝集性の抑制にはトナー形状の球形化、低付着力化が有効である。中抜けの抑制にはトナーの球形化が有利だが、転写されずに残留したトナーをゴムブレードを用いてかきとるブレードクリーニング方式では、球形トナーはかきとられずにブレードを通過しやすく、転写とクリーニングの両プロセスを考慮したトナー形状制御が必要となる。

また、トナーの凝集体が形成された場合は、トナーの凝集体が感光体側に付着しないようにすることが必要である。前節で提示した中抜けの発生モデルから、トナーと感光体間の付着力がトナーと転写ベルト間の付着力よりも大きい場合に中抜けが発生することを示した。このため、中抜けの抑制には、トナーと感光体間の付着力を小さくすることが必要であり、感光体の構成材料の設計、低表面エネルギー材料の塗布等により、感光体の低表面エネルギー化が有効である。

## 5-7 まとめと今後の課題

中抜けの発生メカニズムの解明および中抜けの抑制指針獲得のため、様々な転写パラメータが中抜けに及ぼす影響に関する転写モデル実験、および圧縮トナー層におけるトナーの凝集性に関する検討をおこなった。転写モデル実験により、中抜け発生量が転写圧力に比例して増加し、この比例係数がトナーの特性に依存することを明らかにした。トナーの形状が球形に近いほど、またトナーの付着力が小さいほど比例係数が小さく、中抜けが発生しにくいことを示した。粉体層圧縮引張測定装置を用いたトナー層破断力の測定から、圧縮後のトナー層破断力がトナーの形状および付着力に依存し、トナーの形状が球形に近いほど、またトナーの付着力が小さいほどトナー層破断力が小さく、圧縮トナー層におけるトナーの凝集性が低いことを明らかにした。圧縮トナー層におけるトナーの凝集性と中抜け発生量に良い相関があり、トナー層の圧縮によるトナーの凝集によって中抜けが発生することを検証した。

中抜けに関する転写モデル実験と圧縮トナー層におけるトナーの凝集性の検討結果に基づいて、トナー層の圧縮による凝集体の形成と凝集体の作用力バランスに着目した中抜け発生モデルを示し、トナーと各転写部材間の付着力に関する中抜け発生条件を提示した。遠心力によってトナーを付着面に押し付けた後のトナー付着力測定により、このトナー付

着力に関する中抜け発生条件を検証した。

中抜けの抑制には、トナー層を圧縮した際のトナーの凝集性を抑制する必要があり、転写圧力の低圧化、トナー形状の球形化、低付着力化が有効である。また、凝集したトナーが感光体側に付着しないようにすることが必要であり、トナーと感光体間の付着力抑制が重要であり、中抜けの抑制には感光体の低表面エネルギー化が有効である。

中抜けの発生にはトナー層の圧縮が関与し、トナー層の圧縮状態は転写部材の弾性に影響を受けるが、本研究では転写部材の弾性については未検討であり、今後中抜けに対する転写部材、特に転写ベルトの弾性に関する影響を検討する必要がある。また、本研究では、中抜けについて実験的な解析をおこなったが、シミュレーションと連携した解析技術を構築することにより、より精密な解析が可能となる。転写チリの解析では、トナーの運動計算モデルとして粒子間接触による運動状態の変化を剛体球間の衝突として取り扱う剛体球モデル<sup>(5-7)</sup>を用いたが、中抜けを解析するには、粒子間の粘弾性的相互作用を考慮した運動計算が実施できるようにシミュレーションを改良する必要がある<sup>(5-7)・(5-9)</sup>。さらに、この粉体挙動計算と転写圧力による転写ベルトや転写ローラ等の変形を考慮できるシミュレーション技術を構築していく必要がある。

## 第6章 結 言

本研究では、静電気力を利用して帯電した着色粒子であるトナーの運動を制御することにより画像を形成する電子写真方式の画像形成プロセスにおいて、高画質な画像形成を阻害する画像劣化現象、特に転写プロセスにおける重要な画像劣化現象である転写チリ現象および中抜け現象に着目し、系統的な研究をおこなった。また、画像劣化現象の定量的解析に必要であり、電子写真プロセスにおける重要な作用力であるトナー付着力について系統的な研究をおこなった。

電子写真プロセスは複数のサブプロセスから構成されており、高品質な画像を形成するには各サブプロセスで画像を劣化させないことが重要である。画像形成過程ではトナーに対して電界による静電気力、静電反発力、付着力、圧力等の様々な作用力が関与しており、これらの作用力に依存する複雑なトナー挙動の精密な制御が必要であるが、様々な要因によってトナー挙動の制御が破綻し、画像の劣化が生じてしまう。この画像劣化を抑制するには、画像劣化現象の発生メカニズムに基づいて抑制指針を明らかにする必要がある。本研究では、転写プロセスにおける画像劣化現象の中で、画像周辺にトナーが付着して輪郭が不鮮明になる転写チリ現象と、細線や文字等の画像の一部、特に画像の中央部が欠けてしまう中抜け現象に着目し、発生メカニズム解明と抑制指針の獲得を目的として、計測、可視化、シミュレーションを用いた定量的解析をおこなった。また、画像劣化現象を定量的に解析するには、転写過程におけるトナー作用力の定量化が必要であるが、トナーへの作用力の中で付着力は理論的解明が不十分で定量化が困難なため、トナー付着力の測定技術を確立し、さらに画像劣化現象に対する影響が大きいトナー付着力の制御を目的として、トナー付着力に対する制御因子の作用メカニズムの解明を試みた。

第1章では、本研究の背景、電子写真技術の概略、研究対象であるトナー付着力と転写プロセスの課題と従来研究について述べた。トナー付着力については、トナーに関する概略、転写プロセスにおけるトナー付着力の役割、トナー付着力の従来研究を示した。転写プロセスについては、基本特性である転写率に関する理論を示し、転写プロセスの課題と従来研究、転写プロセスに関する解析技術について述べた。最後に、各章における研究の狙いと概略を示した。

第2章では、本研究の対象である転写プロセスにおける画像劣化現象の解析に必要なトナー付着力について系統的な研究をおこなった。本研究では、中間転写ベルト方式における画像劣化現象を研究対象としており、現象の解析に必要な付着力として、トナーと感光体間、トナーと中間転写ベルト間およびトナー間の各付着力について、遠心分離法による測定技術を確立した。また、画像劣化現象に重要な影響を及ぼすトナー付着力の制御を目的として、トナー粒子表面に付着させるナノ粒子である外添剤が、トナーの非静電付着力と

静電付着力に及ぼす効果について検討した。外添剤を様々な割合で添加したトナーを作製し、各トナーについて外添剤が粒子表面を被覆している割合である外添剤被覆率を定量化し、各外添剤被覆率のトナーについての未帯電および帯電したトナーと感光体間の付着力を測定した。トナーの非静電付着力に関する検討では、外添剤被覆率と非静電付着力との関係を明らかにし、この関係をトナー母粒子および外添剤と感光体間の接触状態の違いによるファンデルワールス力の変化によって説明できることを示した。また、トナーの静電付着力に関する検討では、静電付着力がトナー帯電量の二乗に比例し、その比例係数が外添剤被覆率の増加と共に減少することを明らかにした。この傾向について、表面が不均一に帯電した粒子の静電付着力のモデルとして提案されているチャージパッチモデルに基づいて考察し、外添剤被覆率の増加と共にトナー表面の電荷分布が均一化して静電付着力が低下するモデルを提示した。本研究により、従来研究では不明確であった、トナー付着力における非静電付着力と静電付着力の寄与、非静電付着力と静電付着力に対する外添剤の作用メカニズムを明確化し、トナー付着力制御に対するトナー表面の幾何学的構造および電荷分布の重要性を示すことができた。本章で確立した測定技術および得られた解析結果により、転写過程における重要な作用力であるトナーと部材間の付着力を定量化し、本研究の対象である転写における画像劣化現象の解析に活用した。

第3章では、単色のトナー画像を転写する場合の転写チリ現象について解析をおこなった。これまでの転写チリ現象に関する研究では、放電、トナー付着面に水平方向の作用力、トナー間の静電反発力等の様々な発生メカニズムが提示されているが、メカニズムに対応する発生過程が検証されていない。そこで、本研究では、平行平板間の転写電界中のトナー挙動を可視化する転写モデル実験装置を構築し、転写チリ発生過程の特定を試みた。トナー挙動観察の結果、現像プロセスで感光体上に形成されたトナー層が転写体に接近する過程で、トナー層から分離したトナーが画像周辺に飛翔して転写チリが発生していることが明らかとなった。実際の転写システムでは、転写チリが転写ニップ前の領域で発生していることに対応する。さらに、観察結果を定量化することにより、転写ギャップが狭まると共にチリトナーの数が増加し、一定の転写ギャップ以下で飽和することを明らかにした。このように、トナー挙動の可視化によって転写チリ発生過程を特定することができた。また、個別要素法を用いた平行平板間の転写電界中における3次元トナー挙動シミュレーションをおこない、転写チリ発生過程の観察結果およびその定量化結果をシミュレーションで再現できることを示し、シミュレーションの有効性を確認した。このシミュレーションに基づいた考察により、単色画像における転写チリ発生過程が、接近過程におけるトナー層内の静電反発力に起因するトナー飛翔によって説明できることを示した。

転写チリの抑制指針を獲得するために、様々な転写条件における転写チリ発生過程の観察および発生過程の定量化を実施した。その結果、転写チリ発生量と転写パラメータ(転写体電位、感光体上の非画像部電位およびトナー層表面電位)との定量的関係を明らかにし、両者の関係を統一的に示す関係式を見出した。また、接近過程で転写チリが発生し始める

転写ギャップが狭いほど転写チリ発生量が少なくなることを明らかにした。シミュレーションに基づいて転写チリに対する転写パラメータの影響について考察し、接近過程におけるトナー層内転写電界が小さいほど転写チリが発生し始める転写ギャップが狭くなることから、転写チリの抑制には転写領域の電位構造をトナー層内転写電界が小さくなるように設定することが必要であることを提示した。

第4章では、複数色のトナー画像を重ね合わせる際に発生する転写チリである重ねチリ現象について解析をおこなった。重ねチリ現象に関する研究報告は少なく、発生メカニズムは十分に解明されていない。そこで、本研究では、まず転写モデル実験装置を用いてトナー画像を重ね合わせるプロセスを観察し、重ねチリ現象の発生場所の特定を試みた。重ね合わせプロセスの観察により、感光体と転写体の接近過程で感光体上トナー層から飛翔したトナーによる転写チリも発生しているが、感光体と転写体の分離過程で転写トナー層から分離したトナーが画像周辺に飛翔して接近過程よりも多くの転写チリが発生していることを明らかにした。実際の転写システムでは、転写ニップ後の領域で中間転写ベルト上の転写トナー層から重ねチリが発生していることを特定することができた。また、重ねチリの発生過程の観察から、転写ギャップの増大と共に転写トナー層からのチリトナー数が増加し、転写ギャップが十分広くなるとチリトナー数は飽和する傾向にあり、接近過程で発生する転写チリよりも広範囲にトナーが飛翔することが明らかとなった。平行平板間におけるトナー画像の重ね合わせプロセスについてのトナー挙動シミュレーションを実施した結果、可視化によって得られた重ねチリ発生過程を再現できることを確認した。このシミュレーションに基づいた考察により、分離過程における転写電界の低下に伴う転写トナー層電荷による電界の相対的な増大により、静電気力がトナー間付着力よりも大きなトナーが転写トナー層から飛翔することにより重ねチリが発生することを示した。

重ねチリの抑制指針を獲得するために、様々な条件での重ねチリ発生過程の観察を実施した。その結果、重ねチリは転写トナー層の帯電量および付着量に依存する表面電位が一定値以上で発生し、重ねチリ発生量は転写トナー層表面電位に比例して増加することを見いだした。また、トナー付着力の増大と共に、重ねチリが発生する表面電位が大きくなり、重ねチリ発生量と表面電位の関係における比例係数が低下することを明らかにした。また、様々な条件での重ね合わせプロセスのシミュレーションを実施し、シミュレーション結果と実験結果の傾向が良く対応していることを確認し、シミュレーションの有効性を検証することができた。重ねチリ発生量と転写パラメータの関係から、重ねチリの抑制には、色重ねした転写トナー層の表面電位を小さくすることが重要で、トナーの低帯電量化や低付着量化が有効であり、さらに転写トナー層へのトナー保持力を高めるためのトナー付着力制御が重要となる。

第5章では、ライン画像における中抜け現象について解析をおこなった。これまでの中抜け現象に関する研究では、トナー層の圧縮で生じるトナーの凝集による発生メカニズムが提示されているが、中抜けに対するトナー特性の影響や中抜けが発生する条件等、中抜

け現象については十分に解明されていない。そこで、本研究では、まず転写モデル実験装置を用いてライン画像における中抜けと転写パラメータの関係を検討した。その結果、中抜け発生量が転写圧力に比例して増加し、その比例係数がトナー特性に依存し、トナーの形状が球形に近いほど、またトナーの付着力が小さいほど比例係数が小さく、中抜けが発生しにくいことを明らかにした。また、トナー層の圧縮によるトナーの凝集と中抜けの相関関係を検討するため、粉体層圧縮引張測定装置を用いてトナー層破断力を測定した。圧縮後のトナー層破断力は、トナーの形状が球形に近いほど、またトナーの付着力が小さいほどトナー層破断力が小さく、圧縮トナー層におけるトナーの凝集性と中抜け発生量に良い相関があることを示した。さらに、トナー層の圧縮による凝集体の形成と凝集体の作用力バランスに着目した中抜け発生モデルを示し、トナーと各転写部材間の付着力に関する中抜け発生条件を提示し、遠心力を利用したトナーへの圧力印加手法により中抜け発生条件を検証した。中抜けおよびトナーの凝集性とトナー特性の関係から、中抜けの抑制には、圧縮トナー層におけるトナーの凝集性を抑制する必要がある、転写圧力の低圧化、トナー形状の球形化、低付着力化が有効である。また、中抜け発生モデルから、凝集トナーが感光体側に付着しないようにすることが必要であり、中抜けの抑制には感光体の低表面エネルギー化が有効である。

以上のように、本研究では、電子写真の転写プロセスに関する基礎的解析技術として、トナー挙動の可視化技術とシミュレーション技術、トナー付着力の測定技術を確立した。これらの解析技術を用いた現象発生モデルの特定・検証プロセスを通して、転写プロセスにおける重要な画像劣化現象である転写チリと中抜けの発生メカニズムと抑制指針を明らかにした。また、画像劣化抑制の重要な因子であり、転写プロセスの性能を大きく左右する特性値であるトナー付着力についての系統的研究により、トナー付着力に関する制御因子の作用メカニズムを解明し、トナー付着力を制御するための指針を提示することができた。

最後に、本研究に関連する今後の課題を述べる。第2章で述べたトナー付着力に関する研究では、本研究で主に検討した外添剤以外の様々な要因との関係を系統的に研究していく必要がある。例えば、転写プロセスの転写性能はトナーの特性だけではなく、感光体や転写ベルト等の部材の弾性や表面特性、転写ニップの圧力等の様々な要因に依存するため、トナー付着力に対するこれらの要因の影響を定量的に把握する必要がある。また、トナー付着力のメカニズムに関しては、静電付着力がトナー表面の電荷分布に依存し、外添剤によって電荷分布が均一化していることを本研究で示唆したが、実際にトナー表面で電荷がどのように分布しているのかは明らかになっていない。トナーのようにミクロンオーダーの粒子表面におけるナノサイズの電荷分布を計測するのは困難であり、今後ナノテクノロジーの進展によってトナー表面の詳細な電荷分布の計測が実現することが期待される。

第3章と第4章では、単色画像および色重ね画像における転写チリ現象を解析したが、トナー挙動を可視化するために平行平板間の転写過程について解析をおこなった。今後は、

より実際の転写システムに近い系での解析が必要で、平行平板モデルでは検討できない要素についての検討する必要がある。例えば、感光体ドラムは円筒形で回転しているが、平行平板ではトナー挙動に対する曲率や回転運動の影響が検討できない。また、平行平板モデルでは転写ベルトは一定の電位になっているが、実際の系では、転写ベルトは電極である転写ローラに転写ニップ部で接触し、平行移動によって転写ニップに接離するため、転写ベルト上の電位は転写過程で変化する。このような要素について検討するには、解析装置やシミュレーションを改良していく必要がある。また、転写ニップではトナー層に圧力が印加されるが、本研究では転写チリに対する転写圧力の影響について検討しておらず、今後の課題として転写チリに対する転写圧力の効果を解析する必要がある。

第5章では、ライン画像における中抜け現象を解析したが、本研究ではトナー層の圧縮状態に影響を及ぼす転写部材の弾性について未検討であり、中抜けに対する転写部材、特に転写ベルトの弾性に関する影響を検討する必要がある。また、転写チリ現象に対するシミュレーション解析では、トナーの運動計算モデルとして剛体球モデルを用いたが、中抜け現象を解析するには粒子間の粘弾性的相互作用を考慮した運動計算が必要であり、さらに転写部材の弾性を考慮できるシミュレーション技術を構築していく必要がある。

本研究では、転写プロセスにおける画像劣化現象として転写チリ現象と中抜け現象の解析をおこなったが、この他にも転写率のばらつき、逆転写現象等の様々な画像劣化現象があり、これらの現象のメカニズム解明や抜本的対策立案のために解析技術を用いた系統的研究を実施していく必要がある。

## 謝 辞

早稲田大学理工学術院、川本広行教授には多大なるご指導、ご助言、ご支援をいただきました。ここに深く謝意を表します。

早稲田大学理工学術院、大木義路教授、富岡淳教授、柳尾朋洋准教授には、本論文をご審査いただき、適切な助言を頂戴しました。ここに深く謝意を表します。

共同研究者である門永雅史氏には、計算面でご協力をいただき、学会発表、学位修得を後押ししていただきました。また、共同研究者である前田一郎氏には計算面で、山口剛男氏、黒須久雄氏、荻野尉彦氏には実験面で多大なご協力をいただきました。心から感謝いたします。

計算や論文投稿でご協力頂いた青木信次氏、実験装置の製作に関してお世話になった榎田一美氏、実験用のトナーサンプルを提供頂いたトナー開発部門の方々に感謝いたします。

学会発表、論文投稿を薦めて頂いた松本冬彦氏、吉川雅夫氏、学位修得を後押ししていただいた三谷輝章氏に感謝いたします。



## 文 献

## 第1章 緒 言

- (1-1) R. M. Schaffert, *Electrophotography*, Focal Press (1965).
- (1-2) E. M. Williams, *The Physics and Technology of Xerographic Process*, Krieger Publishing (1984).
- (1-3) M. Scharfe, *Electrophotography Principles and Optimization*, John Wiley & Sons (1984).
- (1-4) L. B. Schein, *Electrophotography and Development Physics*, Springer-Verlag (1988).
- (1-5) 電子写真学会編：「電子写真技術の基礎と応用」，コロナ社 (1988).
- (1-6) 電子写真学会編：「続 電子写真技術の基礎と応用」，コロナ社 (1996).
- (1-7) 日本画像学会編：「電子写真 ―プロセスとシミュレーション―」，東京電機大学出版局 (2008).
- (1-8) 日本画像学会編：「ケミカルトナー」，東京電機大学出版局 (2008).
- (1-9) N. Nakayama and H. Mukai, Numerical Simulation of Electrostatic Transfer Process Using Discrete Element Method, *Proceedings of Pan-Pacific Imaging Conference / Japan Hardcopy '98* (1998), p.261-264.
- (1-10) 中山信行, 向井博和, 電子写真転写プロセスにおける中抜け現象の数値シミュレーション, *Fuji Xerox Technical Report No.12* (1998), p.103-111.
- (1-11) 中山信行, 転写における粒子挙動の数値シミュレーション, 日本画像学会 2001 年度シンポジウム (2001), p.9-16.
- (1-12) B. Gady, D. J. Quesnel, D. S. Rimai, S. Leone and P. Alexandrovich, *Journal of the Imaging Science and Technology*, Vol.43, No.3 (1999), p.288-294.
- (1-13) L. Nebenzahl, J. Borgioli, V. De Palma, K. Gong, C. J. Mastrangelo and F. Pourroy, Forces Involved in Cleaning of an Electrophotographic Layer, *Photographic Science and Engineering*, Vol.24, No.6 (1980), p.293-298.
- (1-14) C. J. Mastrangelo, The Effects of Charge, Size and Shape on Toner Photoconductor Adhesion in Electrophotographic System, *Photographic Science and Engineering*, Vol.26, No.4 (1982), p.194-197.
- (1-15) M. H. Lee and J. Ayala, Adhesion of Toner Photoconductor, *Journal of the Imaging Science and Technology*, Vol.11, No.6 (1985), p.279-284.
- (1-16) M. H. Lee, Toner Adhesion in Electrophotographic Printers, *Proceeding of the SID*, Vol.27 (1986), p.9-13.

- (1-17) D. A. Hays, Electric Field Detachment of Charged Particles, *Particles on Surfaces 1 : Detection, Adhesion and Removal*, K. L. Mittal, Ed., Plenum, New York (1988), p.351-360.
- (1-18) J. Q. Feng, E. A. Eklund and D. A. Hays, Electric Field Detachment of a Nonuniformly Charged Dielectric Sphere on a Dielectric Coated Electrode, *Journal of Electrostatics*, Vol.40&41 (1997), p.289-294.
- (1-19) J. Q. Feng and D. A. Hays, A Finite-Element Analysis of the Electrostatic Force on a Uniformly Charged Dielectric Sphere Resting on a Dielectric Coated Electrode in a Detaching Electric Field, *IEEE Transactions of Industry Applications*, Vol.34, No.1 (1998), p.84-91.
- (1-20) J. Q. Feng and D. A. Hays, Relative Importance of Electrostatic Forces on Powder Particles, *Powder Technology*, Vol.135-136 (2003), p.65-75.
- (1-21) J. Q. Feng and D. A. Hays, Theory of Electric Field Detachment of Charged Toner Particles in Electrophotography, *Journal of the Imaging Science and Technology*, Vol.44, No.1 (2000), p.19-25.
- (1-22) M. Takeuchi, K. Noguchi, M. Anzai and R. Kojima, Influence of Charged Particle Size on Adhesion Forces of Toners, *Proceedings of the 11th International Conference on Advantage in Non-Impact Printing Technology* (1995), p.169-172.
- (1-23) C. Yamaguchi, M. Hirata, H. Totsuka, H. Okada, R. Kojima and M. Takeuchi, Adhesion Forces of Irregular and Spherical Toner Particles, *Proceedings of ICISH '98* (1998), p.30-33.
- (1-24) 寺尾和男, 重廣清, 感光体とトナー粒子の非静電的な付着力, 電子写真学会誌, Vol.34, No.2 (1995), p.83-88.
- (1-25) H. Akagi, The Effects of Toner Charge, Size and Surface Structure on Its Adhesion Forces, *SPIE, Vol.1670 Color Hard Copy and Graphic Arts* (1992), p.138-145.
- (1-26) M. L. Ott and H. A. Mizes, Atomic Force Microscopy Adhesion Measurements of Surface-Modified Toners for Xerographic applications, *Colloid and Surfaces*, A87 (1994), p.245-256.
- (1-27) H. A. Mizes, Adhesion of Small Particles in Electric Fields, *Journal of Adhesion*, Vol.51 (1995), p.155-165.
- (1-28) M. L. Ott, Humidity Sensitivity of the Adhesion of Pigmented Polymer Particles Treated with Surface-Modified Surface Additives, *Proceedings of the 10th International Conference on Advantage in Non-Impact Printing Technology* (1994), pp146-150.
- (1-29) 水口由紀子, 宮本賢人, 原子間力顕微鏡による固体表面一粒子間の付着力測定と解

- 析, Konica Minolta Technical Report, Vol.1 (2004), p.21-24.
- (1-30) C. C. Yang and G. Hartmann, Electrostatic Separation of a Charged-Particle Layer Between Electrodes, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.23, No.3 (1976), p.308-312.
- (1-31) 高橋英男, 木村正利, 中島淳三, 堀江政勝, トナー像ローラ転写の研究, 電子通信学会論文誌, Vol.J60-C, No.4 (1977), p.213-218.
- (1-32) 木村正利, 中島淳三, 堀江政勝, 高橋英男, トナー像の静電転写, 電子写真学会誌, Vol.19, No.1 (1981), p.25-19.
- (1-33) 飛田正行, 中島淳三, トナー電荷量の転写に及ぼす影響, 電子写真学会誌, Vol.20, No.3 (1982), p.7-12.
- (1-34) M. Schleusener, Modeling of Electrostatic Toner Transfer Model, *Proceedings of the 7th International Conference on Advantage in Non-Impact Printing Technology* (1991), p.167-175.
- (1-35) 納浩史, 和納正弘, 木村正利, ローラ転写法の転写特性, Japan Hardcopy '92 論文集 (1992), p.259-262.
- (1-36) M. C. Zaretsky, Performance of an Electrically Based Transfer Roller in a Kodak ColorEdge™ CD Copier, *Journal of the Imaging Science and Technology*, Vol.37, No.2 (1993), p.187-191.
- (1-37) 吉田稔, 高橋雅司, 笠井利博, ベルト転写プロセスの数値解析 (第1報), Japan Hard Copy '97 論文集 (1997), p.185-188.
- (1-38) J. W. May and T. N. Tombs, Electrostatic Toner Transfer Model, *Proceedings of the 13th International Conference on Advantage in Non-Impact Printing Technology* (1997), p.71-76.
- (1-39) T. N. Tombs, Electrostatic Toner Transfer to an Intermediate Results from a Continuum Model, *Proceedings of the 14th International Conference on Advantage in Non-Impact Printing Technology* (1998), p.440-443.
- (1-40) 宮坂徹, 山本雅志, 島田昭, カラー電子写真プロセスにおける中間転写方式の検討, 日本画像学会誌, Vol.38, No.1 (1999), p.9-19.
- (1-41) 伊藤朋之, 川本広行, 電子写真のローラ転写シミュレーション, 日本機械学会論文集(C編), Vol.65, No.637 (1999), p.81-88.
- (1-42) 望月明, 佐藤五郎, 澁谷安洋, 中村安則, 電子写真方式冊子プリンタの印写条件, 日本画像学会誌, Vol.40, No.2 (2001), p.110-115.
- (1-43) Y. Furuya, Space and Time Dependence of Electric Transfer Process in Electrophotography, *Journal of the Imaging Science and Technology*, Vol.45, No.6 (2001), p.542-546.
- (1-44) Y. Furuya, Interfacial Force and Transfer Efficiency of Electrostatic Transfer

- Process in Electrophotography, *Journal of the Imaging Science and Technology*, Vol.46, No.6 (2002), p.583-590.
- (1-45) 野田明彦, 竹内学, 山口善郎, 勝田修弘, 福原琢, 電子写真の転写プロセスにおけるトナー粒径選択性, 粉体工学会紙, Vol.40, No.9 (2003), p.11-18.
- (1-46) 佐々木豊成, 那須誠司郎, 仲江川徹, 斎藤誠, 浅井淳, トナーを考慮した2次元転写プロセスシミュレーション, Japan Hardcopy 2004 論文集, (2004), p.287-290.
- (1-47) L. B. Schein and G. Beardsley, Offset Quality Electrophotography, *Journal of the Imaging Science and Technology*, Vol.37, No.5 (1993), p.451-461.
- (1-48) A. J. Rushing, R. D. Fields, D. S. Rimai and A. Hoskins, Toner Satellite Formation in Electrostatically Transferred Images, *Journal of the Imaging Science and Technology*, Vol.45, No.2 (2001), p.187-197.
- (1-49) 岡本佳和, 奥野辰男, 木村政夫, 辻芳彦, カラー用中間転写ベルトシステム, Fuji Xerox Technical Report, No.12 (1998), p.22-32.
- (1-50) 杉山 麻子, 佐々木 豊成, 大西 拓馬, 依田 寧雄, 前橋 洋一郎, 筧 豊, 浅井 淳, 2次元転写の電界シミュレーションII, Imaging Conference JAPAN 2006 論文集 (2006), p.259-262.
- (1-51) 加藤充, 芝田兆史, 浜田太, 児玉秀明, 電子写真における転写の数値解析, 静電気学会論文集 '94 (1994), p.235-238.
- (1-52) 稲田保幸, 森智英, 廣井俊顕, 川上勲, 横山知明, カラー中間転写方式の高画質化技術, Konica Minolta Technical Report, Vol.5 (2008), p.46-49.
- (1-53) 渡邊猛, 吉田稔, 石田晴彦, 八木均, 清水泉介, 再転写を考慮した1次元転写シミュレーション, Imaging Conference JAPAN 2007 論文集 (2007), B-13.
- (1-54) 門永雅史, 中間転写ベルトの2次元電界シミュレーション, 日本画像学会誌, Vol.42, No.2 (1999), p.128-135.
- (1-55) P. A. Cundall and O. D. L. Strack, A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, No.1 (1993), p.47-65.
- (1-56) 粉体工学会編:「粉体シミュレーション入門」, 産業図書 (1998).
- (1-57) J. Hirabayashi, Measurements and Analyses of Toner Motion in the Development Process, *Proceedings of the 19th International Conference on Digital Printing Technologies* (2003), p.36-39.
- (1-58) 黒須久雄, 榎木繁和, 二成分現像における現像剤の動的挙動観察, Japan Hardcopy 2003 論文集 (2003), p.21-25.
- (1-59) K. Uchida, Visualization Study of an Interaction Between Airflow and Scattering Toner, *Proceedings of the 18th International Conference on Digital Printing Technologies* (2002), p.18-21.
- (1-60) T. Takahashi, S. Iwai and M. Kadonaga, A Study of Transfer Process by

Observation of Discharge Light Emission, *Proceedings of the 19th International Conference on Digital Printing Technologies* (2003), p.28-32.

## 第 2 章 トナー粒子の付着力

- (2-1) J. Hirayama, T. Nagao, O. Ebisu, H. Fukuda, Size Dependence of Adhesive Forces on Electrophotographic Toners, *J. Imaging Science and Technology*, 47 (2003), p.9-12.
- (2-2) D. A. Hays, Electric Field Detachment of Charged Particles, *Particles on Surfaces 1 : Detection, Adhesion and Removal*, K. L. Mittal, Ed., Plenum, New York (1988), p.351-360.
- (2-3) H. Akagi, The Effects of Toner Charge, Size and Surface Structure on Its Adhesion Forces, *SPIE*, Vol.1670 *Color Hard Copy and Graphic Arts* (1992), p.138-145.
- (2-4) Elliott A. Eklund, Willam H. Wayman, Leonald J. Brillson, Dan A. Hays, Toner Adhesion Physics: Measurements of Toner/Substrate Contact Area, *IS&Ts 10th Int. Congress on Advances Non-Impact Printing Tech.* (1994), p.142-146.
- (2-5) M. Nagayama, M. Takeuchi, Particle Adhesion Force Measurements by Electric Field Detachment Method, *Proceedings of the 16th International Conference on Digital Printing Technologies* (2000), p.731-735.
- (2-6) M. Ott and H. Mizes, Atomic Force microscopy adhesion measurements of surface-modified toners for xerographic applications, *Colloids and Surfaces A*, 87 (1994), p.245-256.
- (2-7) M. L. Ott, Humidity Sensitivity of the Adhesion of Pigmented Polymer Particles Treated with Surface-Modified Surface Additives, *Proceedings of the 10th International Conference on Advantage in Non-Impact Printing Technology* (1994), pp146-150.
- (2-8) H. A. Mizes, Adhesion of Small Particles in Electric Fields, *Journal of Adhesion*, Vol.51 (1995), p.155-165.
- (2-9) 水口由紀子, 宮本賢人, 原子間力顕微鏡による固体表面一粒子間の付着力測定と解析, *Konica Minolta Technical Report*, Vol.1 (2004), p.21-24.
- (2-10) M. Takeuchi, A. Onose, M. Anzai, R. Kojima, K. Kawai, Measurements of Adhesion Forces of Toner Particles by Centrifugal Method, *IS&Ts 7th Int. Congress on Advances Non-Impact Printing Tech.* (1991), p.200.
- (2-11) M. Takeuchi, K. Noguchi, M. Anzai and R. Kojima, Influence of Charged Particle Size on Adhesion Forces of Toners, *Proceedings of the 11th International Conference on Advantage in Non-Impact Printing Technology* (1995), p.169-172.

- (2-12) 寺尾和男, 重廣清, 感光体とトナー粒子の非静電的な付着力, 電子写真学会誌, Vol.34, No.2 (1995), p.83-88.
- (2-13) C. Yamaguchi, M. Hirata, H. Totsuka, H. Okada, R. Kojima and M. Takeuchi, Adhesion Forces of Irregular and Spherical Toner Particles, *Proceedings of ICISH '98* (1998), p.30-33.
- (2-14) 清水義威, 樋口剛史, 石丸聖次郎, 岡本克己, 中野哲也, 竹下満三, トナー表面における流動化剤とトナーの挙動, 電子写真学会 第68回討論会 (1991) p.53-56.
- (2-15) 増田弘昭, 粉体粒子の付着力・凝集力, 電子写真学会誌, 36, 3 (1997) p.169-174.
- (2-16) H. C. Hamaker, The London-Van der Waals Attraction between Spherical Particles, *Physica*, 4 (1937), p.1058-1072.
- (2-17) 日本化学会編:「化学便覧基礎編」, 改訂4版, 丸善(1993), p. II.99.
- (2-18) Krupp, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 3 (1972) p.331.
- (2-19) 木村正利, 現像剤測定法(2), 電子写真学会誌, Vol.30, No.2 (1991) ,p.168-174.
- (2-20) T. B. Jones, *Electromechanics of Particles*, Cambridge University Press, New York (1995), p.197.
- (2-21) M. H. Lee and J. Ayala, Adhesion of Toner to Photoconductor, *Journal of Imaging Technology*, 11 (1985) p.279-284.
- (2-22) M. H. Lee, Toner Adhesion in Electrophotographic Printers, *Proceeding of the SID*, Vol.27 (1986), p.9-13.
- (2-23) D. A. Hays, Toner Adhesion, *Journal of Adhesion*, 51 (1995), p.41-48.

### 第3章 単色画像における転写チリの解析

- (3-1) L. B. Schein and G. Beardsley, Offset Quality Electrophotography, *Journal of the Imaging Science and Technology*, Vol.37, No.5 (1993), p.451-461.
- (3-2) A. J. Rushing, R. D. Fields, D. S. Rimai and A. Hoskins, Toner Satellite Formation in Electrostatically Transferred Images, *Journal of the Imaging Science and Technology*, Vol.45, No.2 (2001), p.187-197.
- (3-3) 中山信行, 転写における粒子挙動の数値シミュレーション, 日本画像学会 2001 年度シンポジウム (2001), p.9-16.
- (3-4) P. A. Cundall and O. D. L. Strack, A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, No.1 (1993), p.47-65.
- (3-5) 粉体工学会編:「粉体シミュレーション入門」, 産業図書 (1998).
- (3-6) 日本画像学会編:「電子写真 —プロセスとシミュレーション—」, 東京電機大学出版局 (2008).
- (3-7) R. M. Schaffert, *Electrography*, Focal Press, 1975, p. 522.
- (3-8) 今井功, 「流体力学」, 岩波書店 (1970)

## 第4章 色重ね画像における転写チリの解析

- (4-1) N. Nakayama and H. Mukai, Numerical Simulation of Electrostatic Transfer Process Using Discrete element Method, *Proceedings of Pan-Pacific Imaging Conference / Japan Hardcopy '98* (1979), p.261-264.
- (4-2) 中山信行, 向井博和, 電子写真転写プロセスにおける中抜け現象の数値シミュレーション, *Fuji Xerox Technical Report No.12* (1998), p.103-111.
- (4-3) 中山信行, 転写における粒子挙動の数値シミュレーション, 日本画像学会 2001 年度シンポジウム (2001), p.9-16.
- (4-4) 岡本佳和, 奥野辰男, 木村政夫, 辻芳彦, カラー用中間転写ベルトシステム, *Fuji Xerox Technical Report, No.12* (1998), p.22-32.
- (4-5) P. A. Cundall and O. D. L. Strack, A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, No.1 (1993), p.47-65.
- (4-6) 粉体工学会編:「粉体シミュレーション入門」, 産業図書 (1998).
- (4-7) 日本画像学会編:「電子写真 —プロセスとシミュレーション—」, 東京電機大学出版局 (2008).

## 第5章 中抜け現象の解析

- (5-1) N. Nakayama and H. Mukai, Numerical Simulation of Electrostatic Transfer Process Using Discrete element Method, *Proceedings of Pan-Pacific Imaging Conference / Japan Hardcopy '98* (1979), p.261-264.
- (5-2) 中山信行, 向井博和, 電子写真転写プロセスにおける中抜け現象の数値シミュレーション, *Fuji Xerox Technical Report No.12* (1998), p.103-111.
- (5-3) 中山信行, 転写における粒子挙動の数値シミュレーション, 日本画像学会 2001 年度シンポジウム (2001), p.9-16.
- (5-4) 稲田保幸, 森智英, 廣井俊頭, 川上勲, 横山知明, カラー中間転写方式の高画質化技術, *Konica Minolta Technical Report, Vol.5* (2008), p.46-49.
- (5-5) 粉体工学会編:「粉体層の操作とシミュレーション」, 日刊工業新聞社 (2009).
- (5-6) 辻本 広行, 井上 義之, 横山 豊和, 粉体層圧縮・引張強度自動計測システムアグロボット(AGGROBOT), 粉砕, Vol.38, (1994), p74-80.
- (5-7) 日本画像学会編:「電子写真 —プロセスとシミュレーション—」, 東京電機大学出版局 (2008).
- (5-8) P. A. Cundall and O. D. L. Strack, A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, No.1 (1993), p.47-65.
- (5-9) 粉体工学会編:「粉体シミュレーション入門」, 産業図書 (1998).

## 研究業績

種類別	題名，発表・発行掲載雑誌名，発表・発行年月，連名者
○ 論文 (筆頭)	<u>H. Iimura</u> , H. Kurosu and T. Yamaguchi, Effects of an External Additive on Toner Adhesion, <i>Journal of the Imaging Science and Technology</i> , Vol.44, No.5 (2000), p.457-461.
○ 論文 (共同)	門永雅史, 高橋朋子, <u>飯村治雄</u> , 転写チリの3次元シミュレーション, 日本画像学会誌, Vol.45, No.3 (2006), p.220-229.
○ 論文 (筆頭)	<u>H. Iimura</u> , M. Kadonaga, Observation of Toner Scattering Behavior in the Transfer Process, <i>Journal of the Imaging Science and Technology</i> , Vol.53, No.4 (2009), p.041205-041205-6.
○ 論文 (筆頭)	<u>飯村治雄</u> , 前田一郎, 電子写真の転写プロセスにおけるトナー挙動解析, 日本機械学会論文集(C編), Vol.76, No.769 (2010), p.102-110.
○ 論文 (共同)	荻野尉彦, <u>飯村治雄</u> , 一次転写における中抜け現象の解析, 日本画像学会誌, Vol.49, No.6 (2010), p.491-497.
国際会議 (共同)	M. Kadonaga, T. Takahashi and <u>H. Iimura</u> , Numerical Simulation of Toner Movement in a Transfer Process, <i>Proceedings of the 21th International Conference on Digital Printing Technologies</i> (2005), p.594-596.
国際会議 (筆頭)	<u>H. Iimura</u> , H. Kurosu and T. Yamaguchi, The Effects of Surface Treatment on Toner Adhesion Force, <i>Proceedings of the 15th International Conference on Digital Printing Technologies</i> (1999), p.535-538.
国際会議 (筆頭)	<u>H. Iimura</u> and M. Kadonaga, An Observation of Toner Scatterings Behavior in the Transfer Process, <i>Proceedings of the 24th International Conference on Digital Printing Technologies</i> (2008), p.334-337.
講演発表 (筆頭)	<u>飯村治雄</u> , 黒須久雄, 山口剛男, トナー付着力に対する外添剤の効果, <i>Proceedings of Japan Hardcopy '99</i> , (1999), p.61-64.



講演発表 (共同)	門永雅史, 高橋朋子, <u>飯村治雄</u> , 一次転写部での画像劣化現象 2, <i>Proceedings of Imaging Conference Japan 2005</i> , (2005), p.103-106.
講演発表 (筆頭)	<u>飯村治雄</u> , 門永雅史, 一次転写部での画像劣化現象 3, <i>Proceedings of Imaging Conference Japan 2007</i> , (2007), p.187-190.
講演発表 (筆頭)	<u>飯村治雄</u> , 一次転写部での画像劣化現象 4, <i>Proceedings of Imaging Conference Japan 2009</i> , (2009), p.265-268.
講演発表 (共同)	荻野尉彦, <u>飯村治雄</u> , 一次転写における中抜け現象の解析, <i>Proceedings of Imaging Conference Japan 2009</i> , (2009), p.269-272.
講演発表 (共同)	中村圭吾, 荻野尉彦, <u>飯村治雄</u> , 紙上転写における印刷濃度ムラ現象の解析, <i>Proceedings of Imaging Conference Japan 2012</i> (2012), p.193-196.
その他	<u>飯村治雄</u> , トナー付着力の研究 - 外添剤の効果, Ricoh Technical Report, No.26 (2000) ,p.34-41.
その他	<u>飯村治雄</u> , トナーの付着力, 2005 年度 第 1 回 日本画像学会 技術研究会 (2005), p.6-20.
その他	<u>飯村治雄</u> , トナー粒子の付着力と転写挙動, 2007年度 第2回粉体工学会 粒子帯電制御グループ講演会 (2007).
特許	出願総件数(筆頭発明者) 110 件 (2012 年 10 月 24 現在) 登録件数 (国内外) 国内 44 件、国外 9 件
	液晶表示素子 DE3737805 第 2803820 号 第 2847187 号 第 2749846 号 第 2881181 号 第 2897131 号 第 2805511 号 第 2805054 号 第 2825902 号
	液晶表示素子 第 2825903 号 第 3071204 号 US5056896

	<p>US5016988  US5150237  第 2881214 号  第 3000374 号  第 2926624 号  第 2869451 号  第 2879086 号  第 2879085 号  第 2585835 号  第 2869452 号  第 2869453 号  第 2893204 号  US5184237  第 3118054 号  第 3142405 号  第 3522422 号  第 3560400 号  第 3467122 号  第 3606482 号  第 3558787 号  粉体付着力測定装置  第 3544093 号  第 3676046 号  第 3585714 号  第 3585715 号  第 3592513 号  第 3585725 号  第 4065246 号  第 4282535 号  第 4326002 号  画像形成装置  US6284424  第 4400704 号  第 4093730 号  第 4030052 号  第 3911631 号  第 4201763 号  第 4787052 号</p>
--	--

	CN200610093191 US7662530 第 4676909 号 US8165481 第 5169702 号
--	--