

# 博士論文審査報告書

## 論文題目

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

申請者

飯村 治雄

Haruo IIMURA

2013年7月

電子写真方式の画像形成装置は、普通紙に対して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し、オフィス等での情報出力機器の主流となっている。この電子写真方式の画像形成プロセスでは、静電気力を利用して帯電した着色粒子であるトナーの挙動を制御することにより画像を形成しているが、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、各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、トナー画像を紙等の記録媒体に移動する転写プロセスにおいて慢性的に発生する重要な画像劣化現象として、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が欠けてしまう「中抜け現象」に着目し、モデル実験とトナー挙動シミュレーションにより定量的解析をおこなっている。また、画像劣化現象を定量的に解析するには、転写プロセス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説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、さらにトナー付着力の制御を目的として、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ている。

本論文は 6 章から構成され、第 1 章は序論、第 2 章から第 5 章が本論で、第 6 章で結論を述べている。

第 1 章では、本研究の背景と目的、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ている。

第 2 章では、トナー付着力についての研究成果を示している。遠心力によってトナーを付着面から分離する遠心分離法を用いた付着力測定システムを構築し、転写プロセスに関与する部材とトナー間の付着力測定技術を確立している。また、トナー付着力の制御を目的として、トナー表面に付着させるナノ粒子である外添剤が、トナーの帯電に依存しない非静電付着力と帯電に依存する静電付着力に及ぼす効果について検討している。外添剤がトナー表面を被覆している割合である外添剤被覆率と非静電付着力との関係を明らかにし、この関係が外添剤による粒子表面の幾何学的構造の変化に伴う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ている。また、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ている。この特徴について、表面が不均一に帯電した粒子の静電付着力のモデルであり、Hays 等によって提案された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ている。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している。

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の

解析結果を示している．転写過程でのトナー挙動を可視化して転写チリの発生過程を明らかにするために，実際の転写システムにおける構成部材の動きを単純化して平行平板の接離過程で模擬したモデル実験装置を構築している．トナー挙動の観察結果および観察結果の定量化により，平行平板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しており，平行平板間の空隙が狭まると共に転写チリが増加し，一定の空隙以下で飽和する傾向を明らかにしている．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と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ている．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ている．さらに，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を定量化し，転写チリ発生量と転写条件に関する統一的な関係式を見出している．また，接近過程で転写チリが発生し始める空隙が狭いほど転写チリ発生量が少なくなること明らかにし，転写チリの抑制には転写領域における電位分布をトナー層内の転写電界が小さくなるように制御することが重要であることを提示している．

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の解析結果を示している．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，分離過程において転写トナー層からトナーが画像周辺に飛翔して多くの転写チリが発生しており，空隙の増大と共に転写チリ発生量が増加し，空隙が十分広くなると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を明らかにしている．また，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，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ている．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ている．さらに，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を観察し，重ねチリは転写トナー層の表面電位が一定値以上で発生し，その発生量は表面電位に比例して増加すること，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高くなり，重ねチリ発生量と表面電位間の比例係数が低下することを明らかにしている．また，様々な条件で重ねチリのシミュレーションを実施し，シミュレーションと実験の傾向が良く対応していることを確認している．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低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ことを提示している。

第5章では、中抜け現象についての解析結果を示している。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条件の関係を検討した結果、中抜け発生量が転写圧力に比例して増加し、その比例係数は、トナーの形状が球形に近いほど、またトナー付着力が小さいほど小さく、中抜けが発生しにくいことを明らかにしている。また、圧縮によるトナー層の凝集と中抜けの関係を検討するために、粉体層圧縮引張測定装置を用いてトナー層の破断力を測定した。圧縮後のトナー層破断力と中抜け発生量には良い相関があり、圧縮によるトナー層の凝集によって中抜けが発生することを明らかにしている。実験検討から得られた知見に基づいて、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、および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後の付着力測定により中抜け発生条件を検証した。中抜けの抑制には、圧縮トナー層におけるトナーの凝集の抑制と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、転写圧力の低圧化、トナー形状の球形化と低付着力化、感光体の低表面エネルギー化が有効となることを示している。

第6章では、本研究の結論を述べ、さらに今後の課題についても述べている。

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、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ている。また、トナー付着力が画像劣化抑制の重要な因子であることを明らかにし、さらに、トナー付着力に関する系統的研究により、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ており、ここで得られた研究成果は、電子写真技術の高度化・高画質化に大きく貢献するものである。よって本論文は、博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2013年7月

審査員

(主査) 早稲田大学 教授	工学博士(東京工業大学)	川本 広行
早稲田大学 教授	工学博士(早稲田大学)	大木 義路
早稲田大学 教授	工学博士(早稲田大学)	富岡 淳
早稲田大学 准教授	博士(学術)(東京大学)	柳尾 朋洋