

博士論文審査報告書

論 文 題 目

電子写真における静電潜像計測
に関する研究

Study on Measurement of Electrostatic
Latent Images in Electrophotography

申 請 者

須原 浩之

Hiroyuki SUHARA

本研究の目的は、従来計測することが困難であった、電子写真における感光体上の静電潜像を、レーザービームのスポット径より十分小さいマイクロオーダーの空間分解能で計測する技術を開発し、これを活用して、静電潜像形成（潜像形成）のメカニズムを解析し、電子写真の画像品質向上に役立てることである。電子写真とは、静電気の力を利用して紙に画像を出力するものであり、電子写真方式を用いたプリンタは、オフィス機器分野だけでなく、パーソナル分野から工業印刷分野まで幅広く普及している。この電子写真の基本工程は、感光体への帯電、露光による潜像形成、トナーによる現像、紙への転写、および定着で構成されるが、潜像形成は、オフセット印刷の原版作製にあたる重要な工程である。静電潜像とは、感光体や誘電体層上に静電荷が画像状に分布した状態のことで、トナー等で現像するまでは目に見えないものであり、現像処理によって顕像化されて初めて可視画像として現れる。このため、帯電された感光体上に露光によって形成された静電潜像を高分解能で計測する技術は、電子写真黎明期からの重要な課題であり、これまでも静電潜像計測の研究事例が報告されている。しかしながら、いずれの計測方式もマイクロオーダーの分解能と感光体の暗減衰特性に対応できる即応性を有しておらず、実用化には至らなかった。本研究は、このように見えない像を見る（計測する）技術を開発したものであり、電子写真技術者の長年の夢を実現したものである。

本論文は7章により構成されている。第1章は序論、第2章から第6章が本論で、第7章で結論を述べている。各章の概要は以下のようなものである。

第1章では、本研究の歴史的背景を述べ、電子写真方式の技術開発における静電潜像計測の重要性を明らかにしている。また、電子写真の潜像形成に必要な感光体と露光の構成について述べ、それらの特性から計測に求められる技術課題を提示している。具体的には、1 kV程度の高電位試料を計測できること、感光体が有する暗減衰特性のため潜像形成直後の短い時間でデータを取得しなければならないこと、露光で用いるビームスポット径に比べて十分小さい分解能で計測できることなどである。

第2章では、本研究で考案した静電潜像の計測方法と、静電潜像の可視化技術について述べている。計測方法は、電子ビームをプローブとして用いる真空環境の計測装置内に、静電潜像を形成するための帯電手段と露光手段を備え、走査電子ビームの二次電子を検出することで、その場観察を行う手法である。開発した静電潜像計測システムは、1 μm の繰り返し再現性があり、ビームスポット径に比べて十分小さい測定感度があることを実験で検証している。

第3章では、真空中で静電潜像を形成するための、帯電手段と露光手段について詳述している。真空中では、コロナ放電など空気を媒体とした帯電方

式が適用できないので、電子ビーム照射によるチャージアップ方式を採用している。電子顕微鏡を使って試料を観察する場合、試料がチャージアップしないような条件に設定することが一般的であるが、本方式では、このチャージアップ現象を積極的に利用し、電子ビーム条件を通常観察条件よりも意図的に高い加速電圧に設定することで、電荷を試料に蓄積させている。この電子ビーム照射による帯電技術により、真空中でも感光体を所望の帯電電位に設定することに成功している。

露光手段については、静止ビーム露光として、ビームスポット露光とマスクパターン露光の2つの露光光学系を開発している。このうち、マスクパターン露光光学系では、シャインプルーフの原理を利用した光学設計を取り入れている。その結果、解像度チャートのマスクパターンを感光体面に焦点が合った状態で投影露光することが実現でき、感光体の潜像解像度を評価可能にしている。また、電子写真技術の高性能化に資するため、電子写真装置で用いる走査光学系と同等の潜像形成を可能とする走査ビーム露光光学系を開発し、ラインやドットパターンなどの様々な静電潜像を形成することに成功している。

第4章では、潜像電位の検出方法と、その妥当性検証について述べている。考案した潜像電位の検出方法は、試料に到達せずに反転した一次電子を検出する一次電子検出法である。実験検証の結果、試料下部の印加電圧の変更に応じて潜像径が変化していることを確認し、この事実から、入射電子が試料に到達する前に反転する一次電子検出法の妥当性を検証し、電位分解能が2Vあることを確認している。

第5章では、一次電子検出法で得られた実験結果から、潜像電位分布を導出する手法について述べている。具体的には、実験結果とシミュレーションとを比較・照合し、両者が一致するように、シミュレーションで与えた試料の潜像電位を修正する逆問題的な方法によって、精度良く潜像電位分布を計測することに成功している。

第6章では、静電潜像計測の活用事例を提示している。露光条件と潜像特性、感光体材料と潜像特性、露光および感光体材料の複合要因と潜像特性の解析結果を提示し、潜像設計への知見を述べている。一例として、マルチビーム走査光学系で生じる画像濃度むらの原因が、相反則不軌現象によるものであることを実証している。そして、この相反則不軌現象のメカニズムが、露光の走査時間と感光体の電荷輸送層の移動度との複合要因で生じることを解明している。

また、露光ビームの潜像形成能力を評価する方法として、潜像MTFという新たな評価尺度を提案し、ビームスポット径を変化させた条件で潜像MTFを実験検証している。また、潜像MTFの活用事例として、露光ビームの最

適化設定に対する考え方を提示し、最後に潜像・現像・紙画像の相関関係を把握し、潜像改良による現像の画質改善を考察している。

第7章では、本研究の結論と今後の課題を述べている。

以上のように、本研究では、電子写真の静電潜像計測技術を確立し、これを活用して、静電潜像形成（潜像形成）のメカニズムを解析し、電子写真の画像品質向上に役立てている。すなわち、これまで、トナーが付着された現像工程以降の実験でしか得られなかった問題解析に対して、問題の原因が潜像工程以前であるか、潜像工程以降であるかを特定でき、開発期間を短縮することができる。また、紙の消費もまったくないため環境負荷を大幅に低減させることも期待できる。感光体開発にとっては、感光体の静電特性評価や問題解析といった、分析評価力を飛躍的に向上させることができ、感光体の高耐久化や低コスト化に貢献することが期待できる。また、露光光学系開発にとっては、露光と潜像形成との関連付けを把握することができるため、露光パラメータ最適化の設計指針となり、今後開発する多くの露光光学系を進化させる技術基盤を構築することが可能となる。そして、電子写真プロセスで理論の解明が途切れている、レーザー露光から静電潜像形成への至る静電潜像メカニズムを解明し、電子写真の高画質化・高安定化の実現に役立てていくことが期待できる。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。

2015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	川本広行
早稲田大学 教授	工学博士(早稲田大学)	富岡 淳	富岡 淳
早稲田大学 教授	工学博士(早稲田大学)	川原田 洋	川原田 洋
早稲田大学 准教授	博士(情報理工学)(東京大学)	岩瀬 英治	岩瀬 英治