

博士論文概要

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 |

2015年5月

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、レーザーのビームスポット径より十分小さいマイクロスケールの空間分解能で計測する技術を開発することである。また、本研究のさらなる目的は、静電潜像の計測技術を活用して、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。

電子写真方式を用いたプリンタは、オフィス機器分野だけに限らず、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。2011年における世界のプリンタの方式別シェアで見ると、金額ベースでは、電子写真方式の割合が81.9%と圧倒的なシェアを維持している。電子写真方式とは、静電気の力を利用して紙に画像を出力するものである。そ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。

潜像形成は、例えるなら、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ので静電潜像という。」と定義される。この静電潜像は、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を有しておらず、実用化には至らなかった。

本論文は7章により構成される。第1章は序論、第2章から第6章が本論で、第7章で結論を述べる。各章の概要を以下に示す。

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た。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た。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の技術課題を明らかにした。

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た。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。電荷密度の高い領域では、反発する方向に力が働く加速電界であるため、二次電子は検出器に到達する。これに対して、電荷密度の低い領域では減速電界が生じているので、二次電子は試料側に引き戻されて検出器には到達しない。したがって、電子ビームを走査し検出器に到達する二次電子量をカウントすることで、感光体に形成さ

れた静電潜像を可視化することができる。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た。

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た。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。このため、帯電手段として、電子ビーム照射によるチャージアップ方式を採用した。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た。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た。

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た。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た。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た。また、電子写真技術の高性能化に資するためには、露光手段は、実際の電子写真の作像プロセスと同等条件の静電潜像を再現することが望ましい。そこで、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た。

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た。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。真空中では、運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの和が常に一定であることに着目した。すなわち、電子の運動エネルギーがあらかじめわかっているならば、試料のポテンシャルエネルギーが決定されて試料の電位情報を取得できると考えた。一次電子検出法による計測原理は次の通りである。一次電子のエネルギーが試料のポテンシャルエネルギーより大きい領域では、一次電子は試料の表面に到達し検出器に捕獲されない。一方、試料のポテンシャルエネルギーの方が一次電子のエネルギーより大きい領域では、一次電子の速度は徐々に減速し、試料表面に到達する前にゼロとなる。その後、一次電子は反転して試料から離れる方向に進み、検出器に捕獲される。その結果、一次電子が検出器に捕獲された領域は明るく、一次電子が捕獲されなかった領域は暗いコントラスト像を検出することができる。このようにして、試料の潜像電位の情報を検出することができる。

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た。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が検証された。また電位分解能が2 Vあることを確認した。

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た。具体的には、まず、コンピュータ上に実際と同等の実験環境を構築し、試料に仮の潜像電位を与えた。次に、電場における電子の運動方程式を解くことにより電子の軌道を計算して、実験を模擬した。そして、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した。このようなシミュレーションを開発し、実験結果からの逆問題を解くことで、精度良く潜像電位分布を計測することに成功した。

第6章では、静電潜像計測の活用事例を提示した。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た。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た。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た。

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た。ビームスポット径を変化させた条件で潜像 MTF を実験検証した。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た。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に関する考察を述べた。

第7章では、本研究の結論と今後の課題を述べた。静電潜像計測の実現は、電子写真方式の技術開発に大いに役立つと考えている。具体的には、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、開発期間の短縮をもたらすと考えている。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に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。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 須原 浩之 印

(2015年6月24日 現在)

| 種 類 別 | 題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む） |
|-------|---|
| 論文 ○ | <u>H. Sahara</u> , "High-Resolution Measurement of Electrostatic Latent Image Formed on Photoconductor Using Electron Beam Probe," Imaging Society of Japan, 52 (6), pp.501-508 (2013). |
| 論文 ○ | <u>H. Sahara</u> , T. Ueda and Hiroaki Tanaka, "Potential Profile Measurement and Mechanism Analysis of Electrostatic Latent Image by Detecting Primary Electrons", Journal of Imaging Science & Technology, 57 (6), pp.060502-1_060502-7 (2013). |
| 論文 ○ | 須原浩之, 橘 弘人 : レーザー走査によるドットパターンの潜像計測と潜像解析, 日本画像学会, 54 (1), pp.3-10 (2015). |
| 著書 | 村田英一, 下山 宏, 須原浩之, 田中宏昌 : ナノエレクトロニクスにおける絶縁超膜技術-第2節 誘電体表面付近電荷密度分布シミュレーション, (株)エヌ・ティー・エス出版, pp.118-136 (2012). |
| 国際会議 | <u>H. Sahara</u> , "Measurement of Electrostatic Latent Image on Photoconductors by Use of Electron Beam Probe," IS&T NIP 25, pp. 482-485 (2009). |
| 国際会議 | <u>H. Sahara</u> , N. Kubo, T. Ueda and Hiroaki Tanaka, "Potential Profile Measurement and Mechanism Analysis of Electrostatic Latent Image by Detecting Primary Electrons," IS&T NIP 28, pp294-297 (2012). |
| 国際会議 | <u>H. Sahara</u> , M. Iio and H.Tachibana, "Latent Image Measurement for Dot Pattern Formed by Scanning Laser Beam," IS&T NIP 30, pp.264-267 (2014). |
| 国際会議 | T. Nakashima, H. Murata, <u>H. Sahara</u> and H. Shimoyama, "Development of charge density distribution simulation on dielectric surface," 9th International Conference on Charged Particle Optics, p.85 (2014). |

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

| 種 類 別 | 題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む） |
|-------------|--|
| 講演 | <u>須原浩之</u> ：電子ビームプローブによる感光体の静電潜像計測, Imaging Conference JAPAN 2009, pp.121-124 (2009). |
| 講演 | <u>須原浩之</u> , 久保信秋, 上田健, 田中宏昌：一次電子検出による潜像電位計測と潜像メカニズム解析, Imaging Conference JAPAN 2012, pp.173-176 (2012). |
| 講演 | <u>須原浩之</u> ：電子ビームプローブによる光電導体上の電荷分布の可視化計測, 日本顕微鏡学会第 70 回記念学術講演会, p.199 (2014). |
| 講演 | <u>須原浩之</u> , 飯尾雅人, 橋 弘人：レーザー走査によるドットパターンの潜像形成と可視化計測, Imaging Conference JAPAN 2014, pp.27-30 (2014). |
| 講演 | 石原嘉隆, 村田英一, 池田 晋, 下山 宏, <u>須原浩之</u> ：SEM における帯電絶縁物の電子軌道シミュレーション, 日本顕微鏡学会 第 65 回学術講演会, p.143 (2009). |
| 講演 | 野田啓介, 村田英一, <u>須原浩之</u> , 田中宏昌：誘電体表面の電荷密度分布シミュレーションの開発, 日本顕微鏡学会 第 67 回学術講演会, p.231 (2011). |
| 講演 | 野田啓介, 村田英一, 下山 宏, <u>須原浩之</u> , 田中宏昌：誘電体表面の電荷密度分布シミュレーション, 第 72 回 応用物理学会学術講演会, p.07-17 (2011). |
| 講演 | 野田啓介, 村田英一, 下山 宏, <u>須原浩之</u> , 田中宏昌：誘電体表面上の帯電電荷密度分布シミュレーションの開発, 平成 23 年度電気関係学会東海支部連合大会, E3-2 (2011). |
| 講演 | <u>須原浩之</u> ：電子ビームプローブによる感光体静電潜像の高分解能計測, 第 25 回 フリートーキング“Imaging Today”『最先端の電子写真シミュレーション・解析技術』 (2014). |
| その他 (論文) | S. Komatsu, <u>H. Suhara</u> , and H. Ohzu, "Laser scanning microscope with a differential heterodyne optical probe," Appl. Optics, 29, pp.4244-4249 (1990). |
| その他 (論文) | <u>H. Suhara</u> , "Interferometric measurement of the refractive-index distribution in plastic lenses by use of computed tomography," Applied Optics, 41 (25), pp.5317-5325 (2002). |
| その他 (総説) | <u>須原浩之</u> , 佐久間伸夫, 鈴木清三, 大沢孝之, 露崎 晋, 豊岡 了：断面干渉縞解析によるトロイダル面の測定方法, 光技術コンタクト, 30 (2), pp.7-15 (1992). |

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

| 種 類 別 | 題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む） |
|-------------|---|
| その他 (総説) | 須原浩之, 鈴木清三, 佐久間伸夫: トロイダル面の新しい計測技術の開発, リコーテクニカルレポート, No. 22, pp.25-32 (1996). |
| その他 (総説) | 須原浩之, 伊藤 悟, 上田 健, 伊藤達也: 屈折率分布測定装置 (RIMEI) の開発, リコーテクニカルレポート, No. 25, pp.120-124 (1999). |
| その他 (総説) | 須原浩之: CT 解析を用いた光学素子の屈折率分布計測, 精密工学会誌 Vol. 70, No. 5, pp.606-609 (2004). |
| その他 (特許) | <p>国際登録特許（筆頭発明のみ）</p> <p>H. Suhara, "Electrostatic latent image evaluation device, electrostatic latent image evaluation method, electrophotographic photoreceptor, and image forming device," US8168947.</p> <p>H. Suhara and N. Kubo, "Electrostatic latent image measuring device," US8143603.</p> <p>H. Suhara, "Latent-image measuring device and latent-image carrier," US8314627.</p> <p>H. Suhara, "Light scanning apparatus, latent image forming apparatus and image forming apparatus," US8411123.</p> <p>H. Suhara, "Method and device for measuring surface potential distribution, method and device for measuring insulation resistance, electrostatic latent image measurement device, and charging device," US7783213.</p> <p>H. Suhara, "Method and device for measuring surface potential distribution," US7239148.</p> <p>H. Suhara, "Method and device for measuring surface potential distribution, method and device for measuring insulation resistance, electrostatic latent image measurement device, and charging device," US7400839.</p> <p>"Method and device for measuring surface potential distribution, method and device for measuring insulation resistance, electrostatic latent image measurement device, and charging device," US7869725.</p> <p>H. Suhara, "Multi-beam scanning apparatus and multi-beam detection method for the same," US5834766.</p> <p>H. Suhara, "Surface-potential distribution measuring apparatus, image carrier, and image forming apparatus," US7612570.</p> <p>その他 国際登録特許（筆頭発明）10 件以上</p> <p>国内登録特許（筆頭発明）40 件以上</p> |