

学 位 論 文 題 名

数値解析モデルによる電子写真の印写プロセスの研究

学位論文内容の要旨

電子写真方式の印写システムは 1938 年にその基本原理が発明されて以来、米 Xerox 社を中心に多くの企業で研究が進められ 1980 年頃にはほぼ現在の印写方式が確立された。それは帯電した感光体上に可視光を用いて文字や図形を描き、その結果得られた静電潜像上にトナーを現像し、それを用紙上に転写して熱定着するもので、現在でも感光体、現像剤等の材料開発や種々の印写プロセスの高性能化が進められている。

初期には複写機として製品化されていたが、コンピュータの発展とともにそのデータ出力機器としてのレーザプリンタの需要が増し、今日では電子データ化された図形、写真や階調画像を印刷するための印刷機としての需要も高まってきている。したがって従来の文字印字のみでなく画像を高精細に印刷できるような解像度、均一性、安定性などが求められている。

凹凸の版を製作する必要があるオフセット印刷機に比べて、可変の電子データに応じて任意の画像を 1 枚ずつ印刷することができるレーザプリンタは、多種少量部数印刷や即座の要求に応じた単発的な印刷（POD: Print On Demand）に対して有利である。しかし解像度においてはオフセット印刷機には及ばない。また、レーザプリンタの場合、1 画素は照射されたレーザビーム径（30-60 μm ）の面積に凝集するトナー粉体であるため、粒状感（ザラツキ感）がつきまとう。一方、インクの場合は表面張力により 1 画素は自然になめらかな円形に近くなり、粒状感のない均一な画像が得られる。今後のレーザプリンタにおける重要課題は高画質化である。

電子写真印写プロセスは帯電、露光、現像、転写、定着のプロセスからなり、それらは感光体上での画像形成（帯電、露光、現像）とその後の用紙上への画像転写・定着（転写、定着）に分けることができる。以下に、各プロセスの目的を簡単に箇条書きした。

- ・帯電：感光体上の均一帯電
- ・露光：光照射による感光体上の静電潜像の形成
- ・現像：感光体上のトナー像形成
- ・転写：トナー像の用紙上への転写
- ・清掃：感光体上のトナー、紙粉等の清掃
- ・定着：用紙上トナーの熱熔融定着

用紙上に定着された画像が最終的な印刷出力となるが、高画質を得るためにはそれまでの各印写プロセスでの高性能化、最適化が必要になることは言うまでもない。

しかし、それぞれのプロセスにおいて詳細な現象解析は十分になされていない。そのため、従来より経験的、試行錯誤的な方法で製品開発が行われてきており、また高画質化のための方

策については未だに確たる方向性を見い出せていない。この原因は印写プロセスが様々な要因、現象が絡み合った複雑な現象であり、それらの影響を切り分けた詳細な実験を行うのが困難であることなどの理由で、まだ現象を十分に把握できていないことである。各印写プロセスにおいて現象の本質を見極め、様々な影響も考慮してより詳細に現象を解明することは印写プロセスの最適化、高画質化のために不可欠である。

本研究はレーザプリンタ開発における印写プロセスの最適化や高画質化を目的として、数値シミュレーションによる現象の解明と把握に取り組んだものである。

第2章で、まず印写プロセス全体を概観して、感光体上のプロセスでは電荷のつり合いが成り立つように最適化すべきであることを示した。

第3章ではコロナ帯電器による感光体への帯電電流を予測するために、コロナワイヤ近傍の放電を Townsend の放電理論を用いて解析し、得られた知見をもとに帯電機内空間のイオン電流分布を有限要素法で計算した。帯電器の形状、ワイヤの配置、ワイヤ印加電圧などを入力データとして感光体上の帯電電流分布を実験値と5%以内の精度で予測でき、実機開発にも適用した。

第4章では現像プロセスにおいて長年採用され続けているが、未だに微細な現象については十分には把握できていない2成分現像プロセスの中の磁気ブラシ現像の現象解明に取り組んだ。その結果、磁性粉体粒子であるキャリア粒子が磁力の作用によって磁気ブラシを形成しながら搬送されていく現象をシミュレートし、定性的な挙動特性を得ることができた。まず、解析の方針として、粉体粒子の挙動をシミュレートするための計算手法である個別要素法 (DEM : Distinct Element Method) を用いて、個々の磁性粉体粒子の挙動を求める必要があることを示した。次に、磁場を作っている磁気ロール内の永久磁化の分布を求めるために、有限要素法による磁気ロールの着磁シミュレーションを行った。さらに、凝集した磁性粉体粒子に働く磁力を知るためには、個々の粒子の表面上で異なっている磁束密度を詳細に計算して Maxwell の応力を求める必要があることを示し、これを行うために境界要素法で粒子表面を離散化して磁場計算を行った。計算によって得られた磁気ブラシの挙動特性は実験で検証することはできないが、従来より知られていた経験的事実と一致しており、高画質化のための新しい知見も得ることができた。

第5章では、他の2つのプロセスについて簡易モデルによるシミュレーションを示した。

5.1 節では2成分現像プロセスの中のトナーとキャリアの混合攪拌装置の最適化のためのシミュレーションを行った。混合攪拌装置内に補給されたトナーはキャリア粒子群の中を流動拡散しながらキャリアと接触して摩擦帯電するとともに、キャリアと均一に混ざり合う必要がある。この現象を簡易的な1次元流動拡散としてモデル化して解析し、装置内のトナー分布やトナーの帯電量分布について定性的な知見を得ることができた。5.2 節ではローラ転写プロセスについて、転写電流やトナー転写効率を予測するための解析を行った。電圧印加された導電性のゴムローラと感光体とに挟まれた用紙やトナー層の中の電界強度や電流密度について疑似的な2次元モデルで計算し、ローラの抵抗値や転写電流の最適化に利用できることを示した。

最後に今後の課題として、電子写真の印写プロセスが粉体挙動や静電気などに起因する微細な領域の現象であるため、その解明には微視的な数値解析が必要であることを述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 本 間 利 久

副 査 教 授 五十嵐 一

副 査 教 授 北 裕 幸

副 査 教 授 板 垣 正 文 (大学院工学研究科)

学 位 論 文 題 名

数値解析モデルによる電子写真の印写プロセスの研究

近年、電子写真の印写プロセスの数値解析に関する研究が盛んに行われている。それらはプロセスの最適化や高画質化を目的としたものであるが、多くは現象を簡易化したモデルで取り扱い、詳細までは立ち入っていない。特に、微小な帯電粉体（トナー）や磁性粉体（キャリア）の微視的な挙動の解析は未開拓の分野で、今後の発展が待たれている状況にある。

本論文は、このような現況にある印写プロセスの現象解明や最適化について、様々な数値解析手法を用いて現象の詳細を明らかにし、特に磁性粉体（キャリア）挙動に関しては微視的に解明し、印写プロセス開発上の有益な知見を得ることを目的として研究に取り組んだものである。

第2章で、まず印写プロセス全体を概観して、感光体上のプロセスでは電荷のつり合いが成り立つように最適化すべきであることを示した。

第3章ではコロナ帯電器による感光体への帯電電流を予測するために、コロナワイヤ近傍の放電を Townsend の放電理論を用いて解析し、得られた知見をもとに帯電機内空間のイオン電流分布を有限要素法で計算した。帯電器の形状、ワイヤの配置、ワイヤ印加電圧などを入力データとして感光体上の帯電電流分布を実験値と5%以内の精度で予測でき、実機開発にも適用した。

第4章では現像プロセスにおいて長年採用され続けているが、未だに微細な現象については十分には把握できていない2成分現像プロセスの中の磁気ブラシ現象の現象解明に取り組んだ。その結果、磁性粉体粒子であるキャリア粒子が磁力の作用によって磁気ブラシを形成しながら搬送されていく現象をシミュレートし、定性的な挙動特性を得ることができた。まず、解析の方針として、粉体粒子の挙動をシミュレートするための計算手法である個別要素法（DEM: Distinct Element Method）を用いて、個々の磁性粉体粒子の挙動を求める必要があることを示した。次に、磁場を作っている磁気ロール内の永久磁化の分布を求めるために、有限要素法による磁気ロールの着磁シミュレーションを行った。さらに、凝集した磁性粉体粒子に働く磁力を知るためには、個々の粒子の表面上で異なっている磁束密度を詳細に計算して Maxwell の応力を求める必要があることを示し、これを行うために境界要素法で粒子表面を離散化して磁場計算を行った。計算によって得られた磁気ブラシの挙動特性は実験で検証することはできていないが、従来より知られていた経験的事実と一致しており、高画質化のための新しい知見も得ることができた。

第5章では、他の2つのプロセスについて簡易モデルによるシミュレーションを示した。

5.1 節では2成分現像プロセスの中のトナーとキャリアの混合攪拌装置の最適化のためのシミ

ュレーションを行った。混合攪拌装置内に補給されたトナーはキャリア粒子群の中を流動拡散しながらキャリアと接触して摩擦帯電するとともに、キャリアと均一に混ざり合う必要がある。この現象を簡易的な1次元流動拡散としてモデル化して解析し、装置内のトナー分布やトナーの帯電量分布について定性的な知見を得ることができた。5.2 節ではローラ転写プロセスについて、転写電流やトナー転写効率を予測するための解析を行った。電圧印加された導電性のゴムローラと感光体とに挟まれた用紙やトナー層の中の電界強度や電流密度について疑似的な2次元モデルで計算し、ローラの抵抗値や転写電流の最適化に利用できることを示した。

最後に今後のさらなる取り組みについても、電子写真の印写プロセスが粉体挙動や静電気などに起因する微細な領域の現象であるため、その解明には微視的な数値解析が必要であることを述べた。

これを要するに、著者は、電子写真の印写プロセスについて、微視的な現象にまで立ち入って数値解析を行った結果、プロセスの基礎的現象の解明や最適化について新しい知見を得たものであり、それらの解析手法や結果は電子写真技術の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（情報科学）の学位を授与される資格あるものと認める。