

# 静電インクジェット現象における液滴形成の メカニズム解析と成膜技術への応用

多田 一幸

印刷技術のデジタル化にともない、液晶フィルタなど産業分野への印刷技術の適用、いわゆるデジタルファブリケーションが盛んに検討されている。なかでも、印刷マスターを必要としない直接印字方式のインクジェット技術が特に注目され、様々な分野で意欲的な研究が行われている。このインクジェット法にはさまざまな方式があるが、そのひとつである静電インクジェット法は、種々の技術的な制約から、その工学的な応用例はほとんどない。しかし、この方式は、原理的に高粘度液の噴射が可能であること、他の方式よりも格段に大きなノズルを使用できるのでインクジェット法の本質的な課題であるノズルづまりに対して有利であること、マイクロスプレー状の噴射モードを有すること、サブフェムトリットルオーダーの極微細な液滴を形成可能であること、などからデジタルファブリケーションに最も適した方式の一つと考えられる。このため本研究では、静電インクジェット法を研究対象として、その液滴噴射メカニズムを解明し、その工学的な応用として電子写真用有機感光体の薄膜形成技術を開発した。

すなわち、静電インクジェット方式では印加電圧に依存して多様な噴射モードを有するが、実際の生産に適用するには安定噴射が必須であり、噴射メカニズムを理解することが肝要となる。これまで静電場での静電インクジェットに類似の構成を用いた解析と実験が報告されているが、噴射モードの変化にかかわる研究は少なく、とくに放電場においては皆無である。そこで、本研究では数値解析により、静電場および放電場での液滴に作用する力のバランスを表すモデルにより、安定噴射に必要な基礎特性を把握し、さらに解析結果を実験と比較することで、その妥当性を検証した。噴射という動的な現象を定常状態の静的なモデルで説明することに本解析の特徴がある。

さらに、静電インクジェット法では、極微細な液滴を重畳させることにより均一かつ平滑な成膜が期待できるため、その産業用途として、機能性を十分に発現するのに高い品質目標が要求される電子写真用有機感光体の成膜技術への適用事例を提示することで、実際に高品質成膜が可能であることを示した。

本論文は、第1章から第8章までの全8章で構成されており、第1章が序論、第2章から第7章までが本論、第8章が結論である。

第1章では、デジタルファブリケーション技術として最も注目され、かつ実用化の可能性の高いインクジェット法についてその特徴を明らかにした。その中でも最も有望な静電インクジェット法に関するこれまでの研究を

概観し、本研究で明確にすべき点を浮き彫りにした。つぎにデジタルファブリケーション技術として具現化するには適切な適用対象を選定することが重要であることから、機能性塗膜の成膜技術を選定し、成膜事例として用いた電子写真用有機感光体について説明を加えた。これにつづいて、研究の目的と意義をまとめ、本論文の全体構成について概説した。

第2章では、円柱状ノズルの先端に液滴を付与した針対平板電極系の構成を用い、印加電圧の上昇にともなう滴下状から安定なコーンジェット状への液滴の噴射状態変化が、液滴表面での静的な力のつりあいを示す静電モデルにより説明できることを示した。粘性が無視できる場合、電場中に置かれた液滴の定常状態の形状を把握する基礎式として、表面張力、重力、および電氣的応力のつりあいを表す拡張されたYoung-Laplaceの式を用いることができる。このYoung-Laplaceの式と電位分布を表すラプラスの式を連成させ、さらに体積一定という制約条件と安定性解析に用いるパラメータの項を加えた非線型問題を、印加電圧を徐々に上昇させながら解くことにより、液滴の変形と電位分布を同時に計算した。得られた計算結果と水の噴射実験結果を比較検証した結果、安定性解析により得られる系が安定な状態から不安定な状態へ変化する変化点での電位が、実験で得られた滴下状態から安定なコーンジェット状の噴射に変化する電位と良く一致することを示した。

第3章では、第2章に示したモデルにコロナ放電の効果を加え、その影響を把握することを試みた。コロナ放電を含むことから、基礎式として電位分布の計算にはポアソン方程式を適用し、さらに電荷密度保存則を追加している。コロナ放電が開始する電界強度の値として実験による文献値を採用し、液滴およびノズル表面の電界強度がこの基準値を超えた場合にコロナ放電が発生すると仮定して、電界強度を強制的に基準値に合わせることでコロナ放電の効果を表現した。結果として、コロナ放電がある場合、電界の緩和により安定な噴射領域が狭まることを明らかにした。なお、以上のような液滴形状とコロナ放電を含む電位分布を同時に計算するモデルはこれまでになく、初めての試みである。

第4章では、サブミクロンの極薄膜である電子写真用有機感光体の電荷発生層を静電インクジェット法によって成膜する技術について報告した。電荷発生層用の塗液は電荷発生機能を有する顔料を高分子に分散した希薄顔料分散液であるが、ノズルをつまらせることなく安定に極微細かつ均一な液滴を噴射し基板上で重畳させることで、溶剤揮発後の乾燥塗膜が、感光体に要求される高い

品質を確保できることを示した。液滴径の評価や飛翔中の乾燥割合など、成膜に重要な特性値の評価法も新たに開発した。

第5章では、数10ミクロンの厚膜である電荷輸送層の成膜可能性について報告した。電荷輸送層用の塗液は、感光性のある材料と高分子を溶剤に溶かした高粘度溶解液であるが、鎖状高分子を含むことから液滴化が困難であるため、液滴化しやすい材料（溶剤）を選定した。この溶解液を用いて、希薄分散液の場合と同様に噴射条件を探索し成膜の可能性を提示した。さらにノズル形状やシステムの構成の改善による液滴のスプレー状噴射促進法についても言及した。

以上の研究により、サブミクロンの電荷発生層と数10ミクロンの高粘性電荷輸送層の成膜が可能であることを示したが、単一ノズルでは成膜速度が遅く、工業的には問題があることも明らかになった。このため第6章では、マルチノズル化によりこの問題の解決を試みた。塗液として上述の希薄分散液および高粘度溶解液を用い噴射状態の観察を行ったところ、単一ノズルには劣ものの狙いとする膜厚に対し十分重量が可能な液滴径が得られる条件があることがわかった。つぎに以上の塗液各々を回転しているドラム状の基材上に複数のノズルから同時に安定な噴射条件で吐液することで成膜し、感光体ドラムを作成した。このドラムを電子写真方式のプリンタに搭載し印画したプリント画像と、現状の感光体の製法であるディップ塗布によって作成された感光体ドラムによる印画サンプルとを比較することで本技術の有効性を実証した。また実験と計算から、ノズル構成に工夫が必

要なことや印加電圧の調整が必要なことなど、マルチノズル化にともなう対応策も提示した。

第7章では、静電インクジェットのスプレーモードによって高品質成膜が可能となる領域の、薄膜側の限界を検証した。モデル材料として、有機薄膜太陽電池用の機能層を形成する塗液を用い、数10nmの薄膜が形成できることを示した。さらに透明電極と銀電極からなる電極の成膜実験も行い、有機薄膜太陽電池全層を静電インクジェット法で成膜した有機薄膜感光体の成膜の可能性についても確認した。さらにこれまでのまとめとして、静電インクジェット法による成膜可能なウインドーを実験結果に基づき予測した。

最後に8章では、本論文を総括し、今後の課題について言及した。

以上のとおり本研究では、インクジェット法によるデジタルファブ리케이션技術への展開を目指し、最も有望な技術である静電インクジェット法について、理論および実験の両面から可能性を調査し、以下の成果を得た。すなわち、動的な噴射現象に対し、電場中の液滴の形状変化を表す静的モデルが適用できることから、印加電圧に依存する静電インクジェット法の噴射モード変化が液滴表面での力学的なつりあい表現できることを示した。さらに、安定なコーンジェット状の噴射条件で形成した微細液滴を重畳させるといったコンセプトによって感光体機能層の高品質成膜が可能であることを実証した。さらに、マルチノズルによる生産性の改善方法まで提示した。