

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

2015 年 7 月

須原 浩之

Hiroyuki SUHARA

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

2015 年 7 月

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

須原 浩之

Hiroyuki SUHARA

# 目次

## 第1章：序論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-22

1-1 研究の背景・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
1-2 電子写真技術の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
1-2-1 画像形成装置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
1-2-2 帯電・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
1-2-3 露光・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
1-2-4 感光体・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
1-2-5 現像・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
1-2-6 転写・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
1-2-7 定着・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
1-2-8 クリーニング・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
1-2-9 除電・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	8
1-2-10 レーザー走査光学系・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	8
1-2-11 有機感光体・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
1-2-12 静電潜像・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	15
1-3 静電潜像計測の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	15
1-4 従来の研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	16
1-5 本研究の目的と内容・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	21

## 第2章：静電潜像の計測原理と可視化技術・・・・・・・・・・・・ 23-46

2-1 緒言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	23
2-2 静電潜像計測の基本原理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
2-3 潜像形成方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	27
2-3-1 帯電方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	27
2-3-2 露光方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	29
2-4 静電潜像計測システムの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
2-4-1 静電潜像計測システムの特徴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
2-4-2 静電潜像計測システムの真空装置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	31
2-4-3 静電潜像計測システムの真空試料ステージ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	35

2-4-4 外部磁場の影響の抑制	36
2-5 実験結果と考察	40
2-5-1 導体電位パターンによる二次電子信号のコントラスト像解釈	40
2-5-2 静電潜像の測定結果	43
2-6 結 言	45

## 第 3 章：静電潜像の形成 47-78

3-1 緒 言	47
3-2 真空中での帯電手段	48
3-2-1 帯電・観察共用電子光学系の特徴	48
3-2-2 帯電・観察共用電子光学系の構成	49
3-2-3 電子ビーム照射部	50
3-2-4 コンデンサレンズによるプローブ電流制御	51
3-2-5 ビームブランキングによる帯電領域制御	53
3-2-6 プローブ電流の実験結果と考察	54
3-3 帯電電位の制御方法	56
3-3-1 帯電モデル	56
3-3-2 帯電電位制御の測定と考察	58
3-4 露光手段：静止ビーム露光	61
3-4-1 ビームスポット露光	61
3-4-2 マスクパターンを用いた投影露光	62
3-4-3 マスクパターンによる潜像観察結果	65
3-5 露光手段：走査ビーム露光	66
3-5-1 レーザー走査光学ユニット (LSU) を用いた露光方式	66
3-5-2 半導体レーザーの駆動制御	68
3-5-3 レーザー走査光学ユニット (LSU) の光学特性評価と考察	70
3-5-4 半導体レーザーのオフセット発光の遮光機能	72
3-5-5 メカシャッタによるオフセット発光の遮光の効果	75
3-5-6 走査ビーム露光による潜像測定結果と考察	76
3-6 結 言	77



## 第4章：潜像電位の検出・・・・・・・・・・・・・・・・ 79- 98

4-1 緒 言・・・・・・・・・・・・・・・・	79
4-2 一次電子検出法による潜像プロファイル計測・・・・・・・・	80
4-2-1 一次電子検出法の計測原理・・・・・・・・	80
4-2-2 力学的エネルギー保存則による一次電子検出法の考え方・・・	81
4-2-3 潜像プロファイル分布 ( $V_{th}$ 分布) の導出方法・・・・・・・・	84
4-3 静電潜像計測に対応する電子検出技術・・・・・・・・	86
4-3-1 従来型電子検出器の概要と潜像計測適用への課題・・・・・・・・	86
4-3-2 静電潜像計測用電子検出器の構成・・・・・・・・	88
4-3-3 放出電子発生部材の形状と表面処理・・・・・・・・	89
4-3-4 一次電子検出器の構成・・・・・・・・	91
4-4 実験と考察・・・・・・・・	93
4-4-1 一次電子検出による静電潜像の測定・・・・・・・・	93
4-4-2 孤立ドットパターンの潜像電位の測定結果・・・・・・・・	94
4-4-3 電位分解能の検証と考察・・・・・・・・	97
4-5 結 言・・・・・・・・	98

## 第5章：逆問題解析による潜像電位分布の導出・・・・・・・・ 99-119

5-1 緒 言・・・・・・・・	99
5-2 潜像電位分布導出の考え方・・・・・・・・	100
5-3 電子軌道解析による潜像電位の導出・・・・・・・・	101
5-3-1 一般3次元境界電荷法による見かけの電荷密度の算出・・・・・・・・	101
5-3-2 電子軌道を計算するシミュレーションモデルの構築・・・・・・・・	104
5-3-3 電子軌道計算方法・・・・・・・・	107
5-3-4 一次電子検出の境界値判定・・・・・・・・	110
5-3-5 実測とシミュレーションの比較および電荷修正・・・・・・・・	114
5-4 計算結果と検証・・・・・・・・	116
5-5 結 言・・・・・・・・	119

## 第6章：潜像特性および潜像設計への指針・・・・・・・・ 120-145

6-1 緒 言・・・・・・・・	120
6-2 静電潜像特性の解析・・・・・・・・	121

6-2-1 露光エネルギーと潜像特性	121
6-2-2 露光パターンと潜像特性	122
6-2-3 レーザービームのサイドローブと潜像特性	123
6-2-4 感光体材料と潜像特性	125
6-3 相反則不軌のメカニズム解析	129
6-3-1 相反則不軌とは	129
6-3-2 実験方法	130
6-3-3 実験結果および相反則不軌メカニズムの考察	131
6-4 露光ビームの潜像形成能力評価法	134
6-4-1 潜像 MTF 導入の背景	134
6-4-2 潜像 MTF の考え方	135
6-4-3 潜像 MTF 評価の特徴	137
6-4-4 露光ビームスポット径に対する潜像 MTF 測定結果と検証	137
6-4-5 露光ビームスポット径の最適化設定に関する考察	138
6-5 静電潜像の現像への影響の考察および潜像設計への指針	139
6-5-1 ドットばらつきの静電潜像・現像・紙画像の相関性	139
6-5-2 現像の画質要求に対する露光ビームスポット径の考察	140
6-5-3 潜像改良による現像の画質改善	142
6-6 結 言	144

## 第 7 章：結 論 146-149

## 謝辞 150

## 参考文献 151-158

## 研究業績目録 159-165

発表論文	159
その他の論文	160
登録特許リスト	162

## 第1章

## 序論

### 1-1 研究の背景

電子写真技術<sup>[1-5]</sup>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生産規模は、台数ベースで 171,607,412 台、金額ベースでは 5,089,272 百万円である。プリンタの方式別シェアで見ると、台数ベースでは、近年台頭してきたインクジェットプリンタが 47.8%に対して、電子写真方式の割合は 23.9%（レーザー方式：23.1%、LED 方式：0.8%）と 2 番目のシェアである。しかしながら金額ベースでは、電子写真方式の割合が 81.9%（レーザー方式：79.4%、LED 方式：2.5%）と圧倒的なシェアを維持している<sup>[6]</sup>。

この電子写真技術は、カールソン (Chester F. Carlson) によって 1938 年に発明された<sup>[7]</sup>。電子写真とは、静電気や導電性などの電気現象を利用して、光像から直接感光体上に静電潜像を形成する写真法の総称<sup>[8]</sup>である。電子写真プロセスの基本原理は、光導電性材料に静電潜像を形成し、静電潜像に着色粒子であるトナーを静電的に付着させて、静電潜像を顕在化させ、これを紙に形成するものである。感光体への帯電、露光による静電潜像形成、トナーによる現像、紙への転写、および定着という工程から構成される電子写真の基本工程は、カールソンが発明してから 75 年以上経過した現在でも受けつながられており、個々の機能を進歩させながら、今なお発展し続けている。

電子写真プロセスにおける静電潜像の形成（潜像形成）は、オフセット印刷でいうならば、いわば原版作製にあたる重要な工程である。潜像形成工程以降に現像・転写・定着の工程を経て、最終的な出力画像を得るわけであるが、それぞれの工程は、前工程の像を忠実に再現することが理想となる。その点では、出力画像の解像度は、潜像形成段階で決定されるとみなしてよい。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。」と定義されている<sup>[8]</sup>。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の要求は、電子写真黎明期からの重要な課題であり、高いニ-

ズがあった。

露光は、潜像形成の重要な工程のひとつである。露光とは、帯電によって感光体上に蓄積された電荷のうち、画像情報に対応して光照射された領域の電荷を逃がして、静電潜像を形成するものである。その露光方式は、電子写真技術が80年代後半よりアナログ方式からデジタル方式に進んだことで大きく変化した。アナログ方式とは、原稿に光を照射したときの反射光あるいは拡散光がレンズを通して感光体上に結像されて、静電潜像を形成するものである<sup>[9]</sup>。一方、デジタル方式とは、原稿からの光情報を電気信号に変換した画像データに対して、種々の画像処理を施したあと、感光体上に、画素単位で光ビームのスポットを露光させるものである<sup>[10]</sup>。デジタル方式として世界初のレーザープリンタは、1975年に発売されたIBM3800とされる<sup>[11]</sup>。アナログ方式の露光像は、実質的にレンズの結像性能で決定されるため、潜像形成に対する自由度は限られていた。これに対して、デジタル方式では、画像処理方法（階調補正やエッジ強調）や露光方法（光出力、点灯・消灯時間、ビームスポット径）など、潜像形成に対する自由度が増え、その結果として画像品質も改善された<sup>[12]</sup>。

高解像、高画質化を実現するためには、活版印刷の版に相当する静電潜像を高解像度にすることが望ましく、そのためには、露光ビームを小径化することが近道といえる。IBM3800の画素密度(pixel density)は、240 dpi すなわちドットピッチ 106  $\mu\text{m}$  であった。その後、画素密度は、300 dpi (同、84.7  $\mu\text{m}$ )、400 dpi (同、63.5  $\mu\text{m}$ )、600 dpi (同、42.3  $\mu\text{m}$ )、そして1200 dpi (同、21.2  $\mu\text{m}$ ) と高密度化し、人間の視覚特性を十分満足できる解像度に達してきた。これに対応するように、露光ビームの小径化、1ドット再現性に向けた開発が進められてきた<sup>[13]</sup>。

静電潜像の形成状態を把握することは、電子写真がデジタル方式に進んでからますます重要となり、光像から潜像形成をシミュレーション予測する試みがなされるようになった<sup>[14,15]</sup>。シミュレーション技術は計算速度の向上とともに発展し、静電潜像計測技術の開発への期待も高まった。しかしながら、静電潜像を高分解能で計測する技術は、高いニーズがありながらも伸び悩んできた。商品化された静電潜像計測としては、試料表面にコンデンサを近づけて機械的に振動させる振動容量型の表面電位計がよく知られている。振動容量型は、電位分解能や応答性に関して優れているが、数 mm 程度の分解能しか有していない。別方式として、センサープローブを試料表面に近接して、感光体の静電潜像を計測する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。

電子写真プロセスでの露光にともなう感光体上の静電潜像は、トナー粒子の挙動に直接影響を与える重要なファクターであり、その詳細を把握することが極めて重要である。しかしながら、静電潜像は計測することが困難であるため、

露光から静電潜像形成に至るメカニズムは、理論的に十分に解明されていない。このため、感光体の静電潜像を1ドットより十分に小さいミクロンオーダーの空間分解能で計測する技術開発が期待されていた。

## 1-2 電子写真技術の概要

静電潜像計測の基本構成を説明するにあたり、電子写真プロセス<sup>[5]</sup>における潜像形成プロセスを理解しておく必要がある。このため、電子写真プロセスの概要と、潜像形成に特に関わる感光体と露光について詳細を述べ、それらの特性や制約条件を明らかにする。

### 1-2-1 画像形成装置

まず、画像形成装置全体について説明する。図1-1は、電子写真プロセスによる画像形成装置の形態を示す中央断面図である。画像形成装置としてレーザープリンタの概略構成が示されている。レーザープリンタは、帯電ユニット、露光ユニット、現像ユニット、転写ユニット、定着ユニット、クリーニングユニット、除電ユニット、および感光体を有する。

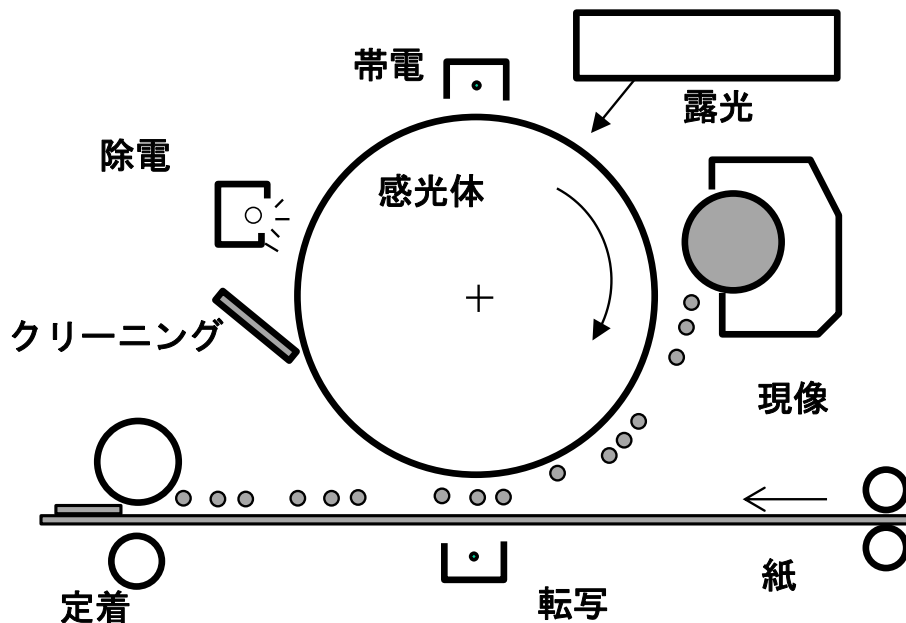


図 1-1 電子写真プロセスによる画像形成装置

## 第1章：序 論

感光体は、円柱形状をしており、その表面には感光層が形成されている。感光体の表面が露光の被走査面である。そして、感光体は、駆動機構により図 1-1 における矢印方向に回転される。帯電ユニットは、感光体の表面を均一に帯電させる。帯電装置には、オゾン発生が少ない接触式の帯電ローラや、コロナ放電を利用するコロナチャージャを用いている。露光ユニットは、帯電ユニットで帯電された感光体の表面を、プリンタ制御装置からの画像情報に基づいて変調された光束により走査して露光し、感光体の表面に画像情報に対応した静電潜像を形成する。露光ユニットにより形成された静電潜像は、感光体の回転にともなって現像装置の方向に移動する。

現像ユニットでは、感光体の表面に形成された潜像にトナーカートリッジから供給されたトナーを付着させて、静電潜像を顕像化させる。ここで、トナーが付着した像（トナー像）は、感光体の回転にともなって転写ユニットの方向に移動する。記録紙は、給紙ローラを介して給紙トレイから 1 枚ずつ取り出される。転写ユニットには、感光体の表面のトナーを電氣的に記録紙に引きつけるために、トナーとは逆極性の電圧が印加されている。この電圧により、感光体の表面のトナー像が記録紙に転写される。トナー像が転写された記録紙は、定着ユニットに送られる。定着ユニットでは、熱と圧力とが記録紙に加えられ、これによってトナーが記録紙上に定着される。ここでトナーが定着された記録紙は、排紙ローラを介して排紙トレイに送られる。除電ユニットは、感光体の表面を除電するものである。クリーニングユニットでは、感光体の表面に残ったトナー（残留トナー）を除去する。残留トナーが除去された感光体の表面は、再び帯電ユニットに対向する位置に戻る。

各工程については、以下に詳細を説明する。露光ユニット（露光光学系）については、静電潜像の形成および計測に大きく関わる部分であり、特に詳しく述べる。

### 1-2-2 帯 電

帯電とは、感光体を高いエネルギー状態に引き上げる工程である。帯電粒子（トナー）を動かすエネルギーを作り出すため、帯電電位は数 100 V～1 kV 程度の高電位に設定される。帯電には、コロナ帯電やローラ帯電などの方式があり、感光体を均一に帯電させて所望の電位にすることができる。

#### ①コロナ帯電

コロナ帯電はコロナ放電で発生したイオンや電子で、感光体を帯電させる方法である<sup>[16]</sup>。図 1-2 (a) に示すスコロトロン帯電器は、高圧電源に接続されたワ

イヤー電極と、ケーシングの開口部に網目状のグリッド電極がある構成で、グリッド電極で帯電電位を調整することが可能であり、感光体の帯電電位を安定化させやすいことが特徴である。

## ②ローラ帯電

ローラ帯電は、帯電ローラを感光体に近づけて、感光体を帯電する方法である。ローラ帯電の種類としては、ローラと感光体を接触させる接触ローラ帯電（図 1-2 (b) 参照）と、わずかに隙間を与える非接触ローラ帯電がある。また、ローラ帯電には、交流電圧を印加する方法と直流電圧を印加する方法がある。感光体への電荷移動は主に微小間隔での放電による。このローラ帯電は、コロナ帯電器よりオゾンの発生量が少ない、印加電圧が低い等の利点がある。

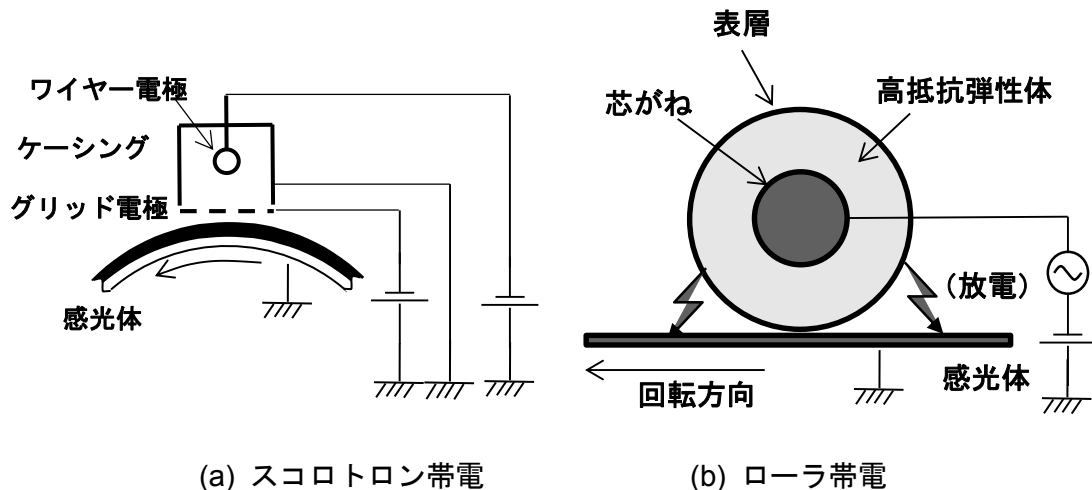


図 1-2 電子写真の帯電方式の例

## 1-2-3 露 光

露光とは、感光体に蓄積されたエネルギーを、画像情報に対応して変調した光照射で開放し、静電潜像を形成する工程である。現在、電子写真で用いる露光光学系には、レーザー光を感光体上に集光させて走査する「ラスタースキャン方式（レーザー走査光学系）」と、LED をプリント解像度分だけ並べ、それを感光体上に結像させる「LED アレイ（LEDA）方式」がある<sup>[9]</sup>。レーザー走査光学系については、本研究の静電潜像方法として重要であり、1-2-10 項に詳細を述べる。

### 1-2-4 感光体

感光体の機能は、帯電工程によって与えられた、表面の均一な電荷を保持し、露光によって光照射された部分のみの電荷を除去することで、画像に応じたトナーを付着させるための静電潜像を形成することにある。感光体の基本性能としては、均一に帯電させる耐絶縁性、電荷を保持する暗減衰特性、露光の感度を有する光減衰特性、および残留電荷特性が求められる。

感光体が開発された初期には、感度や高耐久性に優れた非晶質のセレン系 (Se) やアモルファスシリコン (a-Si) の感光体が主流であったが、近年では、コスト的に有利な有機感光体 (Organic photoconductor, OPC) が主流となってきた。有機感光体の特徴は静電潜像計測に深くかかわるため、1-2-11 項に詳細を述べる。

### 1-2-5 現 像

現像とは、静電気力によって静電潜像に着色されたトナーを静電的に感光体に付着させて、潜像を顕在化させる工程である。この現像の基本は、静電潜像が作る電界で、電荷をもつトナーを感光体に付着させることである。トナーと感光体間の付着力には、トナーの帯電に起因する静電気力以外に、磁気力、ファン・デル・ワールス力、空気抵抗力などが関係する。

現像方式は、現像剤により 1 成分現像方式と 2 成分現像方式に分類される。2 成分現像方式とは、キャリアとトナーの 2 成分からなる現像剤を用いる現像方式である。キャリアとは、トナーを静電潜像の近傍まで運ぶ役割を担うと同時にトナーに適正な電荷を与える機能を有した粒子である。この 2 成分現像方式は、高速現像が可能である特徴を有する。1 成分現像方式とは、キャリアを必要としないトナーのみの現像剤を用いた現像方式であり、トナーには粒子中に磁性粉を含有する磁性トナーと、非磁性トナーとがある。この 1 成分現像方式は、キャリアを使わないので、現像器の構造がシンプルで、なおかつ低コストの特徴がある。

### 1-2-6 転 写

転写とは、現像により可視化されたトナー画像を紙または他の転写材に移動させる工程である。感光体の付着力よりも大きな静電気力を与えることで、トナーは転写材へ移動することができる。転写の種類としては、感光体から用紙



に直接転写する直接転写方式と、感光体に形成したトナー像をいったん中間転写材に転写を行った後、用紙に転写する中間転写方式がある。中間転写方式は、転写を2回行うので転写効率が低下するデメリットがあるものの、厚紙から薄紙までの分離性能の安定性を向上させるメリットがある。直接転写方式のひとつであるローラ転写方式は、転写ローラを感光体に適度な接触圧力で押圧し、用紙を搬送するとともに、転写ローラを介して用紙の背面にトナーと逆特性の電荷を与えることで、用紙にトナーを転写する方式である。また、ローラ転写方式は、少ないスペースで構成可能であり、またオゾンの発生が少ないなどのメリットがある。

### 1-2-7 定 着

定着とは、転写画像を形成しているトナーを融着して、転写材上に画像を固定するとともに、色や光沢を発現する工程である。定着の前工程で静電転写されたトナー像は静電気力で付着しているので、外力が作用すると容易に移動してしまう。そこで、トナー像と用紙との界面に外力に対抗できる接着力をもたせることが、定着の機能である。

定着力を発生させるには、トナーを熔融して液体にすることが必要である。これにより、トナーと用紙との距離が接近して分子間力が作用する。また、熔融トナーの浸透により機械的結合力が増加する。さらに、トナー同士が合体して、トナー強度が増すことも接着力の増大に寄与する。定着方式としてよく知られる熱ローラ定着は、加熱された定着ローラと加圧ローラが圧接してニップを形成する。トナー粒子はニップ内部で熱と圧力により、熔融・流動・合体・浸透する。ニップ出口で、トナーは定着ローラから剥離し、凝集しながら固化して定着が完了する。

### 1-2-8 クリーニング

クリーニングとは、感光体上の残留トナーおよび汚染物質を清掃する工程である。クリーニングプロセスに求められる基本機能には、感光体表面に残留しているトナーの除去、用紙繊維やキャリアといったトナー以外の異物や帯電プロセスで発生する放電生成物の除去、および除去したトナーなどの搬送と回収がある。クリーニング方式の種類としては、機械的や静電的など様々な方式があるが、一般的であるブレードクリーニング方式は、感光体表面にゴムブレードを当接させ、トナーを機械的な力で除去する方式である。このブレードクリーニング方式は、構成が簡易で小型・低コストであり、クリーニング性能・信頼性に優れている。

### 1-2-9 除 電

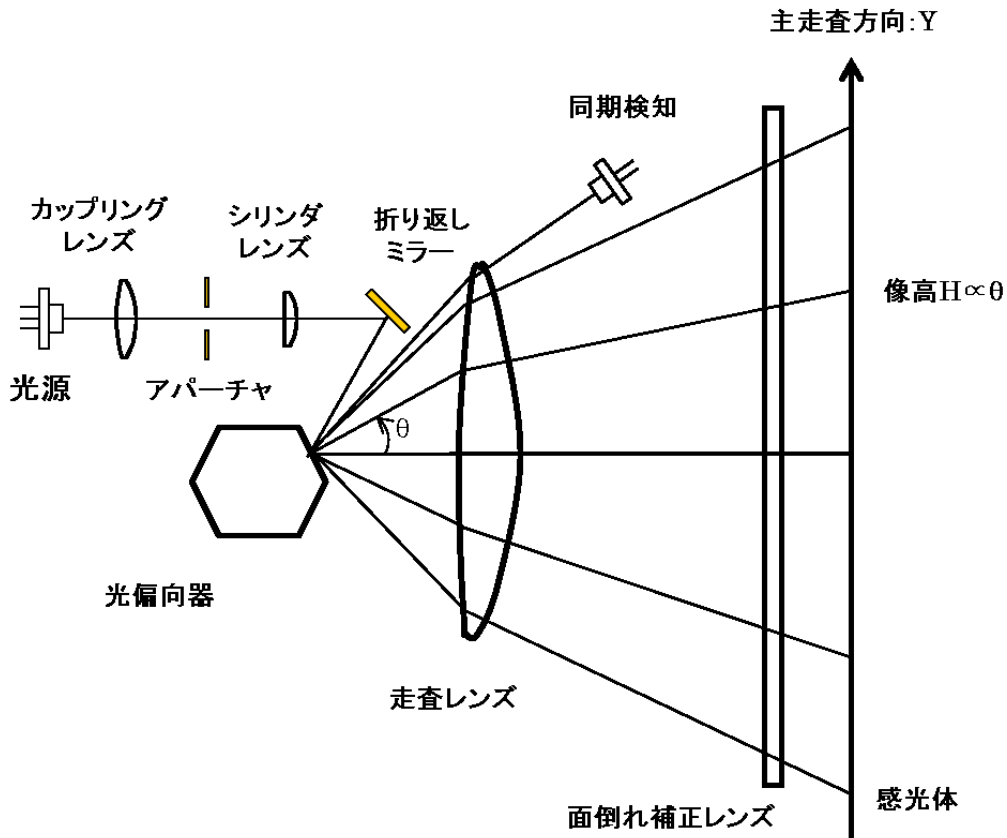
除電とは、感光体の表面と内部に残留した電荷を除去し、初期状態に戻す工程である。感光体を除電する主な目的は、前回の作像の履歴を消去して残像といった異常画像の発生を防止したり、残留電荷の蓄積を抑制したりすることにある。感光体を除電する方式としては、光照射による方式と、放電による方式とに分類される。ここでは、一般的な光照射方式について説明する。光除電は光照射で発生したキャリアにより感光体の電荷を除去するものである。感光体表面だけでなく、内部にトラップされた電荷も除電することが可能である。光除電の光源としては安価で小型化が容易な LED（発光ダイオード）が広く用いられている。

### 1-2-10 レーザー走査光学系

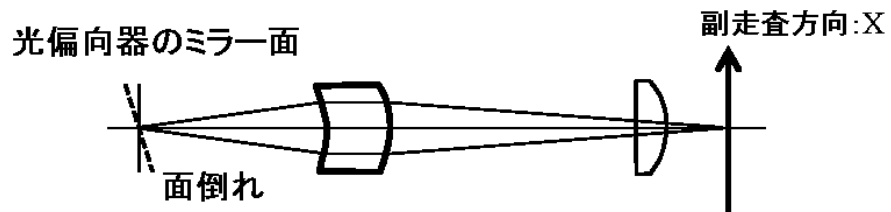
ラスタースキャン方式であるレーザー走査光学系の構成を図 1-3 に示す<sup>[5]</sup>。世界初のレーザープリンタは、1975 年に発売された IBM3800 とされる。当時は、光源が He-Ne レーザーであり、単独変調できずに音響光学素子で ON/OFF する方式であったため、非常に大掛かりであった。その後半導体レーザー (LD) の出現とともに、小型・低コストへと進化するが、レーザープリンタの光学系の基本的なコンセプトは、40 年も前の機種にほとんど盛り込まれている<sup>[11,17]</sup>。

光路の中心に位置するのが光偏向器であり、これよりも光源側にはカップリングレンズ、アパーチャ、シリンドリカルレンズが配置される。そして光偏向器よりも感光体側には、走査レンズ、面倒れ補正レンズ、同期検知手段などが配置される。光偏向器による光ビームの偏向にともなって感光体上に走査線が描画されるが、この方向を主走査方向、主走査方向と垂直な方向を副走査方向と呼ぶ。用紙が進む方向は副走査方向である。

潜像形成における走査光学系の基本特性は、感光体に感度を有する波長、感光体像面上のビームスポット径、像面光量、ON/OFF の点灯時間であり、ビームスポット径は、特に重要なパラメータとなる。ビームスポット径は、数 10  $\mu\text{m}$ ～100  $\mu\text{m}$  が主流であり、一般的に小径ビームであるほど、高コストになるが高画質傾向となる<sup>[18]</sup>。したがって、ビームスポット径と潜像形成の関係を把握することは、低コストかつ高画質な画像を形成する上で非常に重要であり、静電潜像計測としては、ビームスポット径よりも十分小さい、ミクロンスケールの分解能が求められる。以下に各部品の役割・特徴について詳説する。



(a) 主走査方向断面



(b) 副走査方向断面

図 1-3 レーザー走査光学系の構成

### ①光 源

光源の機能は、感光体に感度を有する波長の光を用いて、感光体の像面光量に達する光出力であり、点灯・消灯させることである。IBM3800 に搭載された初期の光源は He-Ne レーザーであったため、点灯・消灯させるために、音響光学素子という間接変調器を用いていた。現在は、直接変調が可能で、小型・低コストに有利な半導体レーザーが主流である。出力は 5～15 mW 程度、波長は 780 nm もしくは 655 nm がよく用いられる。画素密度の高密度化に対応するため、パルス信号入力時の光応答波形において、立上り／立下りの高速性、およびピーク強度の安定性（ドループ特性）が、特に強く要求されている。

## 第1章：序 論

近年、電子写真の高速化に対応するべく、光源数が複数となるマルチビーム化が進んでいる。マルチビーム光源の方式としては、複数の光源を同一の半導体基板上に形成された半導体レーザーアレイを用いて、マルチビーム化を進める方式の開発が盛んに進められている。ビーム数は、従来の延長として端面発光レーザーの2ビームから、垂直共振器型面発光レーザーを2次元に配列した40ビームの高密度実装のものまで様々ある。

### ②光偏向器

光偏向器の機能は、光源の進行方向を時間的に変化させて、光ビームを感光体面上に走査させることである。主な光偏向器としては、正多角柱の側面が反射鏡に加工されたポリゴンミラーである。このポリゴンミラーが等速で回転することで、光源から射出された光ビームを反射により偏向走査させる。

### ③カップリングレンズ

カップリングレンズの機能は、半導体レーザーから射出された光ビームを光学系に効率よく伝搬させることである。平行光束へと変換する場合はコリメーターレンズという。以前は射出光を平行光束とすることが一般的であったが、近年、各部品に多機能性を持たせているため、平行よりも発散光あるいは収束光に設計することが増えており、カップリングレンズと表現することが一般的となった。

### ④アパーチャ

アパーチャの重要な機能は、カップリングレンズ通過後の光束周辺部をカットすることで、所望の大きさのビームスポットを感光体上に形成することである。感光体面上のビームスポット径は、画像品質と直結する重要なファクターであり、所望の大きさで安定的に形成することが求められている。一般的に、ビームスポット径は、アパーチャサイズが大きくなるにしたがい、小径化するという逆比例の関係にある。したがって、所望のビームスポット径は、アパーチャサイズで設計することができる。

### ⑤シリンドリカルレンズ（シリンダレンズ）

シリンドリカルレンズの機能は、副走査方向にのみレンズ作用を与えて、入射した光ビームは副走査方向にだけ集光して、ポリゴン面に結像させることである。

### ⑥走査レンズ

走査レンズの機能は、主にポリゴンの回転に対して感光体上で等速に走査され

るように補正することにある。ポリゴンモータは等角速度運動をしているため、走査レンズがないと、像高を  $H$ 、走査レンズの焦点距離を  $f$ 、ポリゴンの回転角を  $\theta$  としたとき、 $H = f \tan \theta$  の関係式となってしまう。すなわち、感光体の中心から離れて像高が高くなるほど走査速度が速くなってしまう。図 1-3 (a) で示されるように、走査レンズで補正して  $H = f\theta$  の特性にすることで、主走査方向に対して、ポリゴンの回転に比例した位置に光ビームが集光することができる。

### ⑦面倒れ補正レンズ

ポリゴンミラー面が、副走査方向への傾き誤差、すなわち、面倒れを生じていると、光ビームの集光位置が副走査方向にずれてしまうという問題がある。面倒れ補正レンズの機能は、面倒れが発生しても、光ビームの集光位置がずれずに、正しい位置に集光させることにある。ポリゴン面倒れの影響を抑制する具体的な方法としては、シリンドリカルレンズを用いてミラー面上で副走査方向にのみ結像させ、副走査方向に関してポリゴンミラーと感光体とが共役関係となるように設計すればよい。共役関係とは、一つの点から発した光が他の一つの点に結像する二点の関係のことであり、ここでは、図 1-3 (b) に示されるように、ポリゴンミラーの点から発した光が感光体の一つの点に結像することを指す。共役関係にあると、面倒れがあってもポリゴン面から反射する光ビームの進行方向がずれていても、光ビームは、レンズを通過した後で感光体上の走査線の位置はほとんど変化せず、正しい位置に集光することができる。

### ⑧折り返しミラー

折り返しミラーの機能は、光ビームの光路進行方向を自由に変更させることである。ミラー自体にはレンズ効果がないため、レイアウト上自由に配置することが可能であり、折り返しミラーは、主に光学系全体を小型化したり、感光体を含むシステム全体を最適配置したりするために用いられる。

### ⑨同期検知

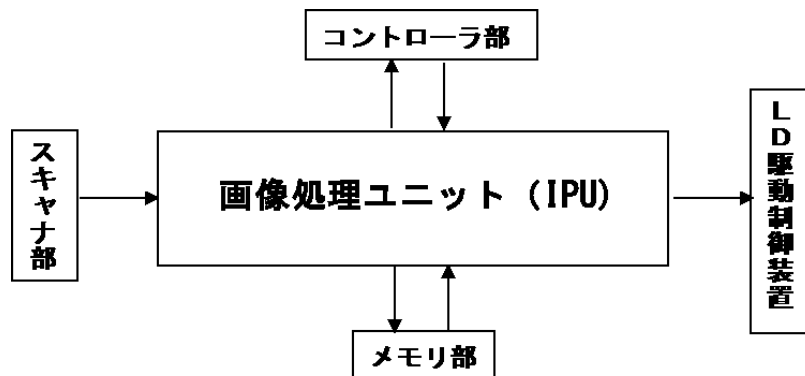
同期検知の機能は、各ポリゴン面で走査したときの、画像の露光位置を規定する走査開始点を、常に感光体面上の同じ位置に揃えることである。同期検知手段は、露光開始位置を決定するため、感光体面上とほぼ等価な位置に設置され、同期信号を得る。

ポリゴンモータは高速で回転されるため、回転ムラや面毎の加工精度にばらつきがあると、走査毎に露光位置がずれを生じてしまう不具合がある。このため、感光体面上の有効走査領域外に同期検知手段を配置して、走査された光ビームが同期検知素子を通過する際に、同期検知信号を LD 駆動制御装置に出力するようにしている。LD 駆動制御装置は、同期検知信号を基準にして、光ビームの発

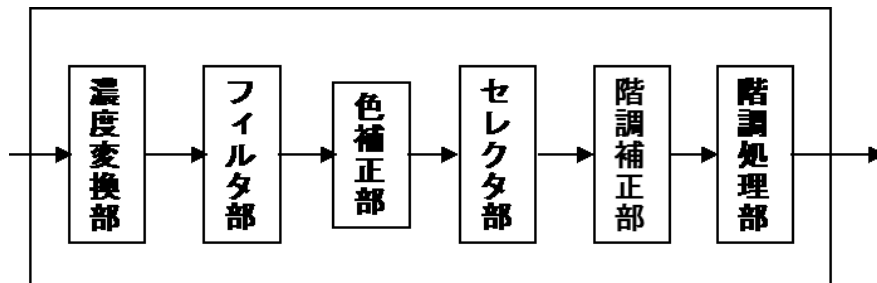
## 第1章：序 論

光タイミングを決定する。これにより、位置ずれのない画像を出力することが可能となる。このように、同期検知信号は、発光タイミングだけでなく、後述する画素クロック生成や光源制御の基準となるため、走査光学系と LD 駆動制御のインターフェイスとして極めて重要な役割を果たしている。

図 1-4 に画像処理部を示す。画像処理部は、画像処理ユニット (Image Processing Unit, IPU)、コントローラ部、メモリ部、LD 駆動制御装置がある。スキャナ部からの入力画像は、画像処理部を経て、光ビームとして出力される。コントローラ部では、画像の回転・リピート・集約・圧縮伸張などの処理を行ったあと再度 IPU に出力する。画像処理ユニットは、図 1-4 (b) に示すように、濃度変換部、フィルタ部、色補正部、CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, 黒) のセレクタ、階調補正部、階調処理部等を備えている。種々のデータを記憶する記憶手段としては、メモリ部にルックアップテーブルを用意している。LD 駆動制御装置では、画像処理ユニットからの画像データをインプットとし、制御ドライバにより点灯データに応じて光変調を行い、感光体に露光像を形成する。その LD 駆動制御装置については、第 3 章で詳しく述べる。



(a) 画像処理部



(b) 画像処理ユニット (IPU)

図 1-4 電子写真の画像処理部の一例

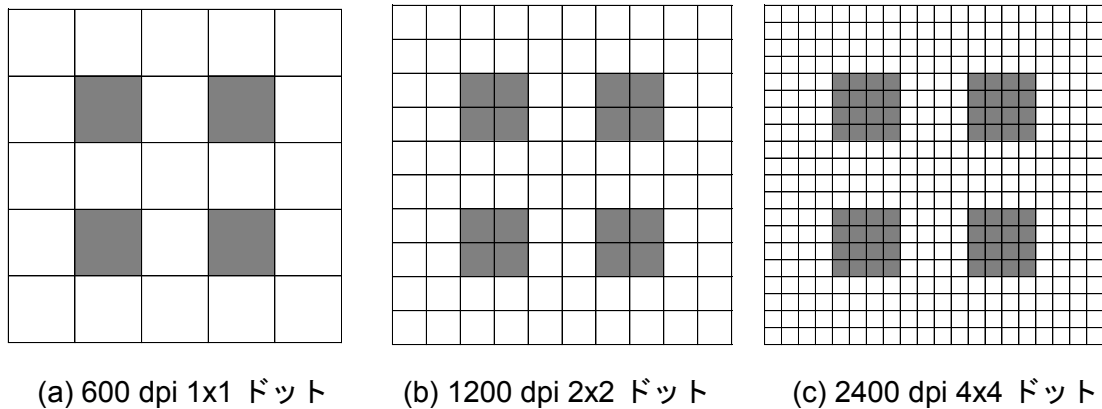


図 1-5 画像パターン例と画素密度（dpi）の関係

図 1-5 は、画像データの例であり、図の一マスは最小画素を表している。黒マスは露光画素、白マスは非露光画素を表す。画素の大きさは、画素密度あるいは、dpi（dot per inch）で表現され、

600 dpi の画素サイズは、 $25.4 \text{ mm} / 600 = 42.3 \text{ } \mu\text{m}$

1200 dpi の画素サイズは、 $25.4 \text{ mm} / 1200 = 21.2 \text{ } \mu\text{m}$

2400 dpi の画素サイズは、 $25.4 \text{ mm} / 2400 = 10.6 \text{ } \mu\text{m}$

となる。dpi は、1 インチの長さにくつのピクセルが入るかを示している。LD 露光の場合、主走査方向は LD の点灯時間、副走査方向は感光体の移動速度（線速）や光源数に依存するため、主および副走査方向のサイズが必ずしも同じとは限らない。

図 1-5 (a) と比較して (b), (c) は描かれる画像パターンとしては、実質同じものを指していることになるので、ユーザーが要求する画像は同じといってもよい。ところが、実際に出力される画像としては、ビームスポット径、像面光量、点灯タイミングなどが異なるため、厳密には一致しない。例えば、図 1-5 (c) は、図 1-5 (a) と比べると、点灯時間が 4 倍となるので、1 回あたりの像面光量は 1/4 となる。また、時間軸で考えると、感光体は異なる時刻に露光されることになる。これらは、潜像としてわずかな差異を生じ、画像に影響を及ぼす。言い換えると、その潜像の差異を計測することが要求されることになる。

### 1-2-11 有機感光体

電子写真用で使用される有機感光体 (Organic photoconductor, OPC) の構成を図 1-6 に示す。一般的な有機感光体は、導電性基体 (Conductive substrate) の上に、下引き層 (Undercoat layer, UL)、電荷発生層 (Charge generation layer, CGL)、電荷

輸送層 (Charge transport layer, CTL) で構成される。感光体表面に電荷が帯電している状態で露光されると、電荷発生層 (CGL) の電荷発生材料によって、光が吸収され電荷キャリア (ホール) が発生する<sup>[5]</sup>。この電荷キャリアは、電荷輸送層 (CTL) を移動し、感光体表面の電荷と結合して消滅する。これにより、感光体表面では、電荷分布を生じることになり、静電潜像を形成することができる。

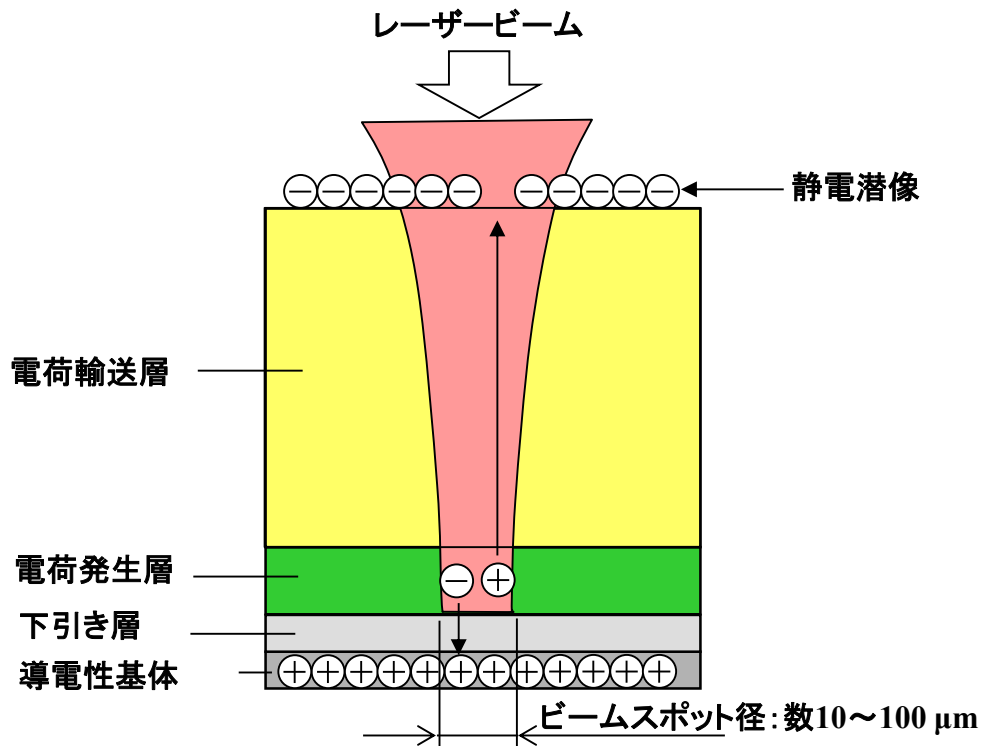


図 1-6 電子写真の有機感光体の構成と静電潜像

図 1-7 は、有機感光体の静電特性と光減衰カーブの模式図を示している。感光体を帯電すると、時間とともに感光体電位は上昇し、やがて飽和する。帯電を停止すると感光体電位は低下する。この電位低下が暗減衰である。光を照射すると感光体電位は大きく減衰する。これを光減衰と呼ぶ。感光体は十分な光量を照射させても、電荷は完全には除去されず、残留電位が残る。暗減衰は、感光体の静電潜像計測に関わる重要な静電特性である。暗減衰は帯電された感光体の表面電位が、暗所においても注入キャリア、熱励起キャリア等により減衰していくために起こる。この暗減衰は、非晶質セレン (a-Se) では比較的小さいが、有機感光体では減衰量が大きい特徴がある。有機感光体の場合、暗減衰の時定数は数 10 秒程度とされる。感光体の暗減衰は、静電潜像形成の状態を維持できる時間は短いことを意味する。すなわち、感光体との暗減衰特性を鑑み



ると、露光直後の限られた時間でデータを取得することは、静電潜像計測の必須の構成要件といえる。

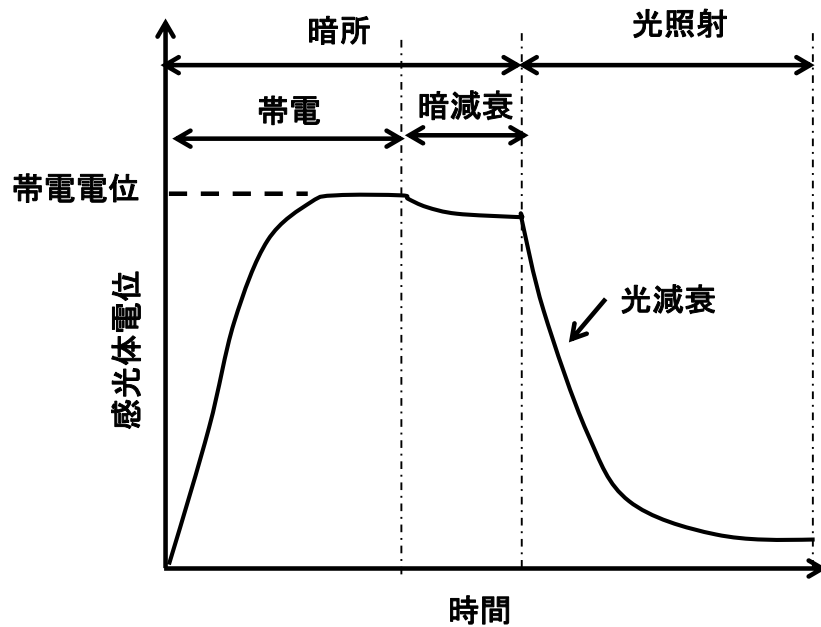


図 1-7 有機感光体の静電特性と光減衰カーブの模式図

### 1-2-12 静電潜像

第 1-1 節で述べたように、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。」であると一般的に定義されている。本論文では、「帯電された感光体に対して、露光によって生じた静電荷の密度分布のこと」を静電潜像と述べることにする。そして、露光前あるいは、露光されていない静電荷は、帯電像と述べることにする。

### 1-3 静電潜像計測の課題

前節で、電子写真技術に関して述べたことを整理すると、電子写真における感光体上の静電潜像を計測するための課題は以下の通りである。

- 1) 試料は、数 100 V～1 kV 程度に帯電されており、高電位計測に対応できるものでなければならない。
- 2) 感光体は、暗減衰特性（時定数は数 10 秒程度）を有しており、刻一刻と潜像状態が変化する。このため、露光による潜像形成後の暗減衰時間よりも十分短い時間で計測を完了しなければならない。
- 3) 測定精度は、電子写真のビームスポット径（数 10 $\mu$ m）よりも十分小さい分解能を有していなければならない。

## 1-4 従来の研究

本節では、静電潜像および帯電像測定例について述べる。帯電像の測定手段としては、振動容量型の表面電位計が、良く知られている。この振動容量型電位計<sup>[19,20]</sup>の模式図を図 1-8 に示す。振動容量方式とは、表面電位  $V_s$  の試料表面にコンデンサを近づけて機械的に振動させ、振動電極に直流電圧  $V_m$  を印加するとともに、振動と同期して流れる交流電流を検知し、その交流電流が 0 となる  $V_m$  を測定することで、試料電位を測定する方式のことである。この振動容量方式は、静電気のようなインピーダンスの高い測定に向いており、電位分解能や応答性に優れているが、空間分解能は数 mm 程度であり、ミクロンオーダーの分解能で静電潜像を計測することはできない。

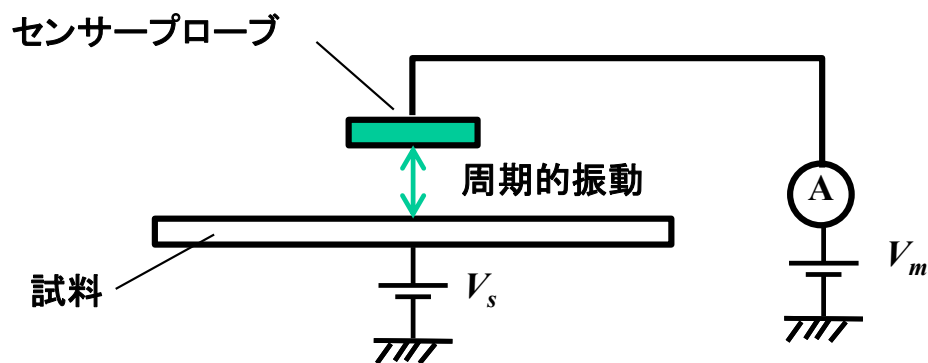


図 1-8 振動容量方式による表面電位測定

感光体の静電潜像を高分解能で計測する試みとして、誘導電流方式やカンチレバー方式など、センサープローブを試料表面に近接させる方式が報告されている<sup>[21-24]</sup>。図 1-9 はカンチレバーを用いた方式である。この方式は、試料表面と探針との間に働く静電引力による片持ちばりの振動状態変化を光学的に検出す

る方式として、古くから研究が進められており、ケルビンフォース顕微鏡 (Kelvin Force Microscope, KFM) といわれる。しかしながら、この方式は、短針を試料に近接させる必要があるため、セッティングに時間がかかり、導体のように電位を保持できる試料に対しては有効であるが、電子写真用感光体のように暗減衰を有する試料では適用が難しい。また、この方式の測定領域は、数  $10\ \mu\text{m}$  と狭い。さらに静電引力は、電位が短針－試料間距離の 2 乗で影響するため、絶対距離制御が必要などの課題を有する。

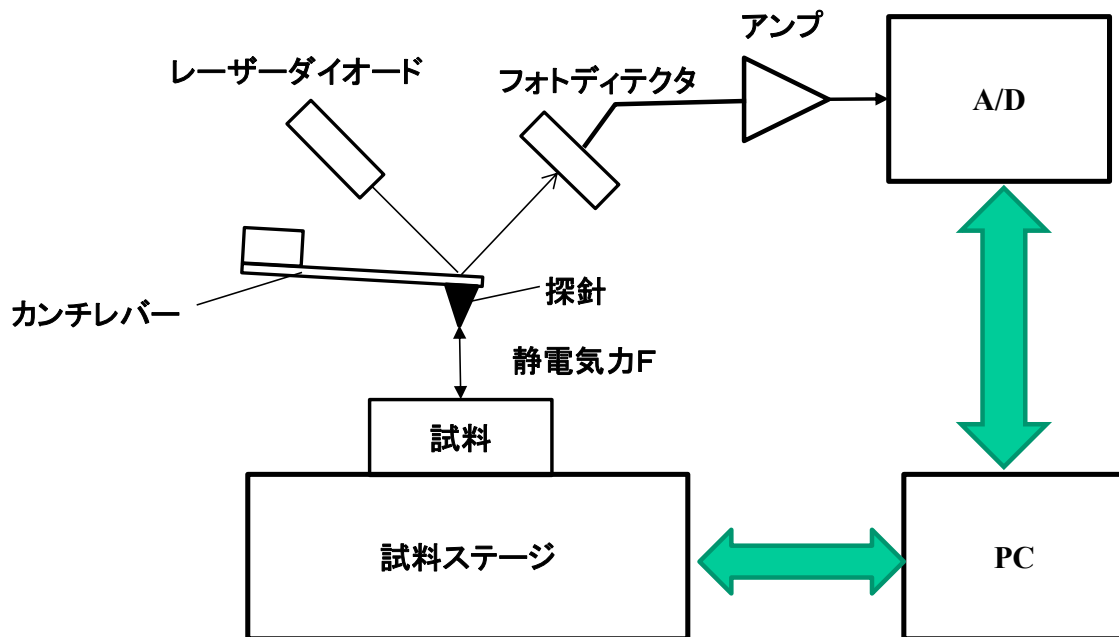


図 1-9 カンチレバー方式による表面電位測定

図 1-10<sup>[25]</sup> は誘導電流を利用したものであり、電位センサーに試料表面の電位変化による誘導電流を発生させ、これを電圧値に変換する方式である。センサーを試料表面に接近させる方式としては Yarmchuk<sup>[26]</sup>、宮坂<sup>[27,28]</sup>、島田<sup>[29]</sup>らの報告がある。この方式は、振動容量方式に比べて、データ取得時間は比較的早いものの、空間分解能が  $100\ \mu\text{m}$  程度と不足しており、また、絶縁ガスなどの放電防止策が必要である<sup>[28]</sup>。

図 1-11 は、誘導電流計測の別方式である。静電潜像が形成された試料に約  $10\ \mu\text{m}$  の小径ビームを照射させたときに発生する誘導電流を計測し、これを電圧値に変換する方式<sup>[30]</sup>のものである。透明電極は試料から離れた位置に配置せざるを得ないため、分解能が不足しており、ミクロンスケールの信号検出感度を得ることは難しい。上記方式以外にもいくつかの方式が試みられている<sup>[31-36]</sup>が、いずれの方式も 1 ドットレベルを解像する十分な分解能を有しておらず、商品

化には至っていない。

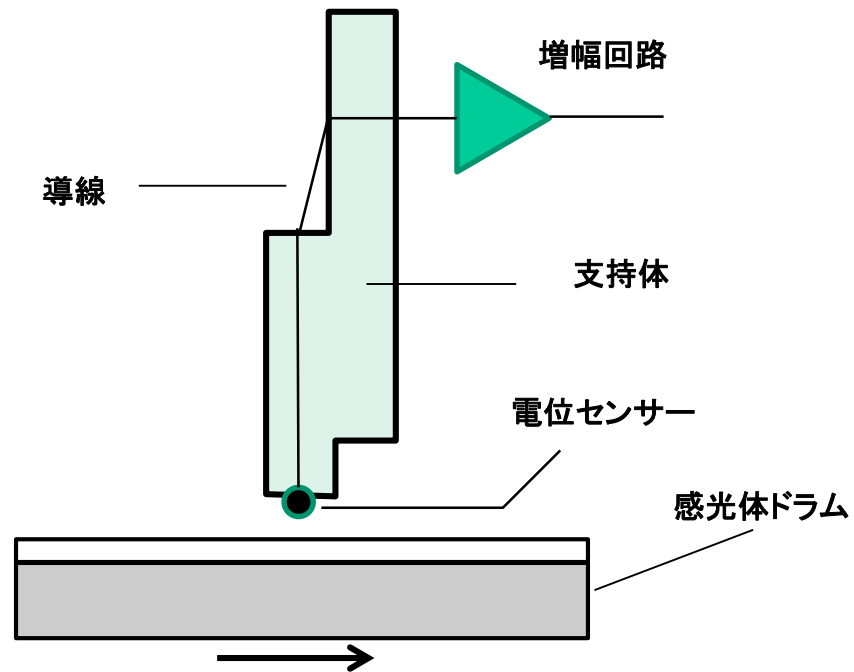


図 1-10 誘導電流方式による表面電位測定

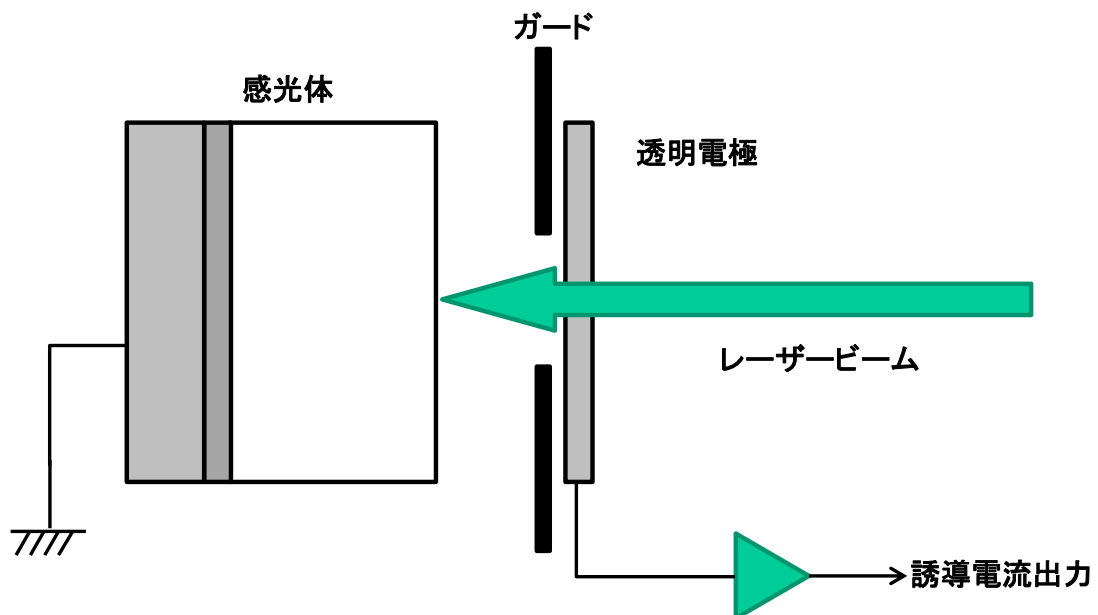


図 1-11 レーザー照射を用いた誘導電流方式による表面電位測定

図 1-12 は、感光体上静電潜像の電界強度分布の等高線図を計算したものである。帯電電位は $-800\text{ V}$ 、潜像電荷分布は $60\text{ }\mu\text{m}$ で計算した。センサーヘッドのタイプが電流・電位センサーであれ、カンチレバーであれ、試料から離れた位置では、電界が鈍ってしまい、表面電荷分布を計測できない。したがって、センサーヘッドは、試料に近接させなければならない。しかしながら、センサーヘッドを試料に近接させることには、以下に示す共通問題がある。

- 1) セッティングに時間がかかり、その間に暗減衰で潜像状態が変化する。
- 2) 約 $1\text{ kV}$ の高電位では、放電・吸着が生じ、正しく動作しない。
- 3) センサーヘッド自身が電場を乱す。
- 4) 探針-試料間の高精度距離制御が必要である。

すなわち、センサーヘッドを試料に近接させて、水平方向に走査させる方式では、1ドットスケールを解像する十分な分解能を得ることは困難であると結論付けられる。

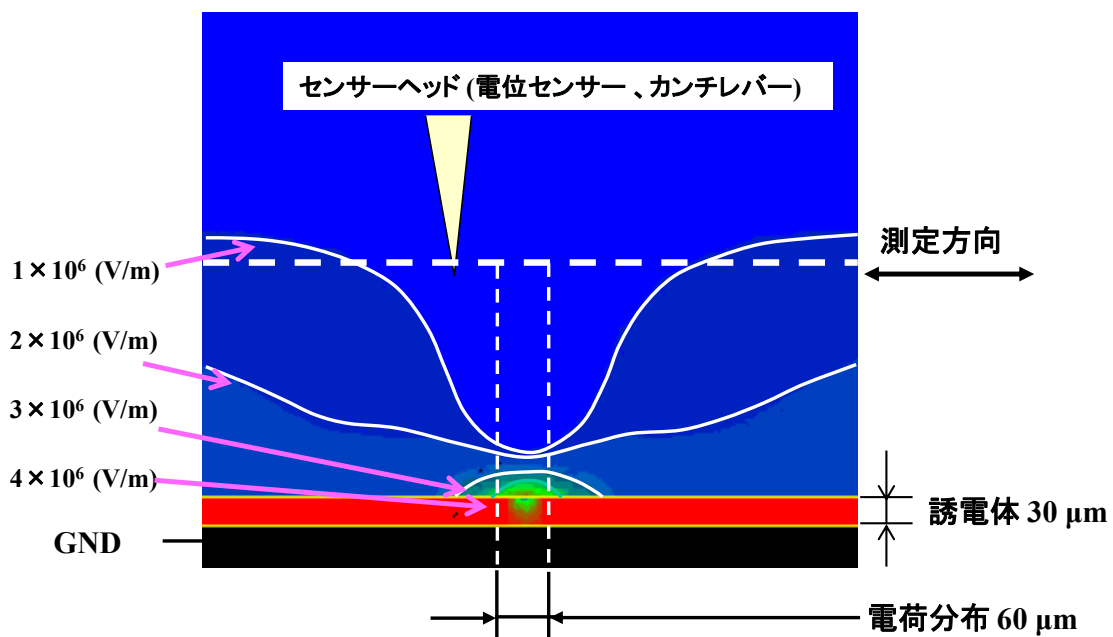


図 1-12 潜像電荷分布と感光体上電界強度分布計算

電子顕微鏡は、ナノメートルスケールと極めて高い分解能を有する観察装置であり、電位測定例としては、電位コントラスト法が知られている<sup>[37]</sup>。正電位が高い電極では、電極から放出された二次電子が、電極側に引き戻される力を受けやすく、相対的に検出器に到達する二次電子量が減少する。したがって、

## 第1章：序 論

この電位コントラスト法は、二次電子を検出することで、LSIなどの導体パターンに対して、電位に応じたコントラストを得ることが可能であり、LSI故障用途のEBテストとして実用化されている<sup>[38]</sup>。ただし、導体パターンに対しては、観察時間や照射電流の制約を受けずに最適条件で電子ビームを照射することが可能であるが、絶縁体上の電荷分布パターンに対して電子ビームを照射すると、電荷分布が大きく乱れてしまうので、そのまま適用することは困難である。また、LSIを対象としているため、報告された試料の電位はせいぜい5 V程度であり、電子写真の帯電電位の約1/100以下である。したがって、この方式は最大値が5 V程度のLSIには適用できるが、電子写真のように100倍以上高い電位を対象物としたときに適用できるかどうかは、明らかでなかった。

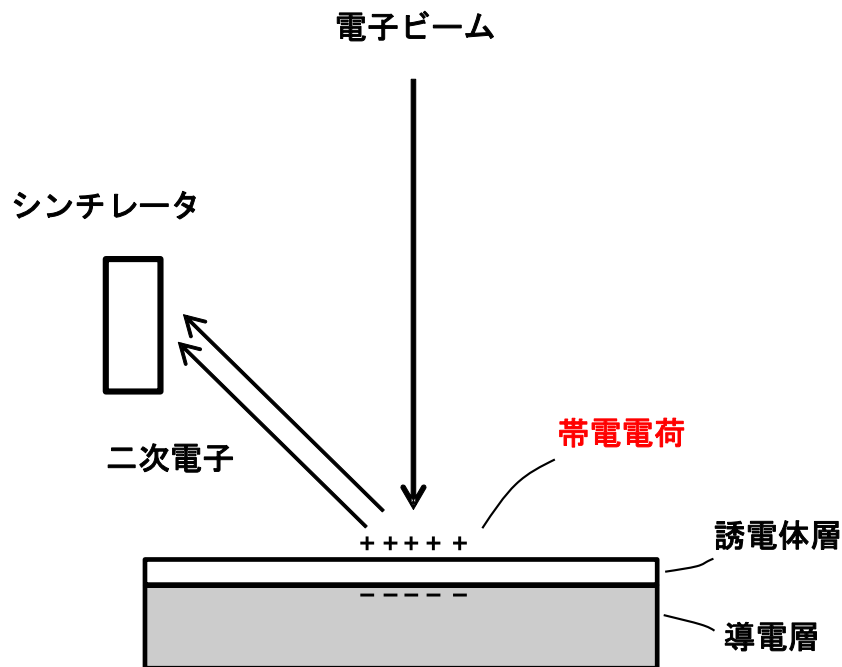


図 1-13 電子ビームによる帯電像観察の一例

また、絶縁体のように電荷を半永久的に保持することができる試料に対して帯電像を観察した報告がある<sup>[39-43]</sup>。図 1-13 は電子ビームを用いて誘電体の帯電像を観察した事例である。また、電子ビームの代わりに荷電粒子ビームを使用した報告例もある<sup>[44,45]</sup>。これらは試料が電荷を長時間保持できる絶縁体であれば、電荷分布を形成した後に、電子ビーム装置内に試料をセットしてから時間をかけて観察できる可能性もある。しかしながら、電子写真で用いる有機感光体 (OPC) は、抵抗値が無限大ではないため暗減衰を生じ、電荷を保持できずにせいぜい数十秒程度で消失してしまう。したがって、静電潜像形成後の極めて

短い時間で計測する必要がある感光体に対して、電子ビームを用いた計測方式での研究事例はこれまでなかった。

以上の従来技術をまとめると、計測方式としては、センサーヘッドを試料に接近させる方式と電子ビームを用いた方式に分類される。センサーヘッドを用いた方式では、高い帯電電位と潜像形成直後に計測する課題を克服するためには、センサーヘッドを試料から離れた位置に配置せざるを得ない。したがって、ミクロンスケール分解能の達成は困難である。一方、電子ビームを用いた方式では、ミクロンスケール分解能の達成は実現可能であるが、静電潜像形成後の極めて短い時間で計測することは困難である。

### 1-5 本研究の目的と内容

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ミクロン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、静電潜像計測技術を活用して、潜像形成のメカニズムを解析することであり、静電潜像の現像および最終画像への影響について考察することである。本論文の内容は、以下の通りである。

本章では、電子写真の基本について述べ、電子写真の静電潜像形成に必要な感光体と露光の構成を説明するとともに、それらの特性から計測に求められる課題と仕様を明らかにした。電子写真の静電潜像を計測するためには、感光体の暗減衰特性から、潜像形成直後にデータを取得しなければならず、潜像を形成してからセンサープローブをセットする時間の余裕はない。また、計測精度は、露光で用いるビームスポット径に比べて十分小さくなくてはならない。

第2章では、考案した静電潜像計測の測定原理について述べる。具体的には、電子ビームをプローブとして用い、試料を走査させたときの二次電子信号を取得する方法について詳細を述べる。つぎに開発した計測システムについて述べる。具体的には、真空中で潜像形成をするための真空装置と真空試料ステージについて説明する。そして、考案した測定原理と開発した計測システムを用いた実験により、潜像がミクロンスケールで可視化計測できるかを検証する。さらに導体電位パターンを用いて、可視化されたコントラスト像の物理解釈について論じる。

## 第1章：序 論

第3章では、計測対象となる真空環境下で静電潜像を形成する方法について詳説する。まず、真空中で試料を所望の電位に設定する帯電手段について述べる。電子写真用の感光体に電子線を照射させると、作像プロセスに相当する帯電電位を与えることができるかとの技術課題に回答できる先行研究はなかった。そこで、電子線照射による帯電現象とそのメカニズムについて論じ、実験で検証した成果について述べる。つぎに、露光手段について述べる。電子写真プロセスで感光体上に形成されるドットやラインパターンといった様々な静電潜像を形成可能とする、走査ビーム露光の露光方式を開発したので、それらの露光光学系および制御方式について述べる。最後に、これら露光方式を用いた潜像観察実験により、潜像が狙い通りに形成できていることを実証した成果について述べる。

第4章では、静電潜像の電位分布を計測する技術を開発することを目的としており、検出方法として、試料に到達せずに反転した一次電子信号を取得する一次電子検出方法を提案する。そして、検出信号に試料の潜像電位情報が含まれているという物理モデルとコントラスト像の解釈を示す。つぎに、従来の二次電子検出器を用いて静電潜像を検出する場合の課題が何であることを提示し、静電潜像に適した電子の検出方法について述べる。そして、潜像電位情報を含んだ潜像プロファイルが計測されていることを実験で確認し考察する。

第5章では、一次電子検出法によって得られた潜像プロファイルから、潜像電位分布を導出する解析方法について述べる。具体的には、コンピュータ上に実験装置と同じ環境を構築し、電子軌道計算を実行する。そして、電子軌道計算から得られたシミュレーション結果と、実測で得られた結果を比較・照合することで、シミュレーションの電荷分布を修正し、実際の試料の電荷密度分布を逆問題として解く。これらのアルゴリズムを提案するとともにその検証結果について述べる。

第6章では、第2章から第5章で報告した、静電潜像計測技術を活用した事例として、露光条件と潜像特性、感光体材料と潜像特性の潜像解析および考察を述べる。つぎに相反則不軌の評価実験を行い、そのメカニズムについて考察する。また、露光ビームの潜像形成能力を評価する新たな方法について述べた後、静電潜像の現像への影響について考察する。

第7章では、第2章から第6章で報告した、静電潜像計測技術および計測によって得られた研究を総括し、結論を述べる。



## 第2章

### 静電潜像の計測原理と可視化技術

#### 2-1 緒言

電子写真プロセスにとっては、露光にともなう感光体上の静電潜像が、トナ一粒子の挙動に直接影響を与える重要なファクターであり、その詳細を把握することが求められている。このため、電子写真プロセスにおける、感光体上の静電潜像を高分解能で計測する技術の要求は、電子写真黎明期からの重要な課題であり、高いニーズがあった。しかしながら、センサーヘッドを試料に近接させて、水平方向に走査させる方式では、1ドットスケールを解像する十分な分解能を得ることが困難であることを前章で述べた。

電子顕微鏡技術<sup>[1,2]</sup>を用いれば、十分な空間分解能で試料を観察することはできるが、静電潜像形成後に電子顕微鏡で観察を試みても静電潜像を計測することはできない。なぜなら、感光体は暗減衰特性を有しており、セットアップ時間中に電荷は消失してしまうからである。暗減衰とは、帯電された感光体の表面電位が、暗所においても注入キャリア、熱励起キャリア等により減衰していくことであり、有機感光体の場合時定数は数10秒程度とされる。感光体の暗減衰は、静電潜像形成の状態を維持できる時間が短いことを意味する。すなわち、感光体の暗減衰特性を鑑みると、露光直後の限られた時間でデータを取得することは、静電潜像計測の必須の構成要件といえる。そこで、画像形成装置に潜像計測装置を組み込むのではなく、潜像計測装置に画像形成装置を組み込むことができれば、静電潜像を計測することが可能となると発想した。

本章では、まず、考案した静電潜像計測の測定原理について述べる。具体的には、電子ビームをプローブとして用い、試料を走査させたときの二次電子信号を取得する方法について詳述する。つぎに開発した計測システムについて述べる。具体的には、真空内で潜像形成ができるための真空装置と真空試料ステージについて詳述する。そして、考案した測定原理と開発した計測システムを用いた実験により、潜像がミクロンスケールで可視化計測できるかを検証する。さらに電位が既知の電極パターンを用いて、可視化されたコントラスト像の物理解釈について論じる。

## 2-2 静電潜像計測の基本原理

静電潜像の計測原理図<sup>[3,4]</sup>を図 2-1 に示す。露光するためのレーザービーム、静電潜像を観察するための電子ビーム、および二次電子を捕獲する検出器で構成されており、電子写真用の感光体に、静電潜像が形成されている状態であることを示している。電荷分布を有する感光体試料に電子ビームを当てると二次電子が放出される。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。ところが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、試料に対し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、電荷密度の粗密を識別することができる。その結果、電荷密度の高い帯電部は明るく、電荷密度の低い露光部は暗いコントラスト像を取得できる<sup>[5]</sup>。

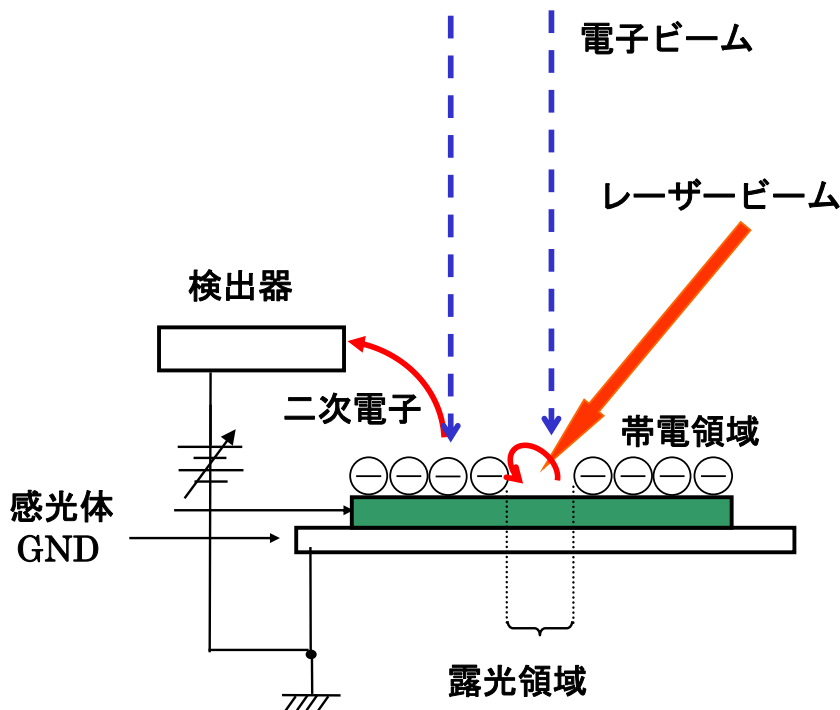


図 2-1 二次電子検出による静電潜像の計測原理

図 2-2 は、電荷分布が存在するときの試料垂直方向における電位等高線の計算結果である。露光部上方では、電界の方向（電界偏向）が他の領域と異なっている。露光部上方では、電位鞍点が存在する。電位鞍点とは、帯電および露光によって形成された電荷分布の真上に生じた空間電位分布の極値のことであり、

その極値が鞍型形状している点をさす。具体的には、空間電位を絶対値で表現したときに、試料面に平行な方向に対しては極小値、そして試料面に垂直な方向に対しては極大値を有している。この電位鞍点が電位障壁となるため、検出器に到達する電子量は、帯電領域と比較して著しく減少する。

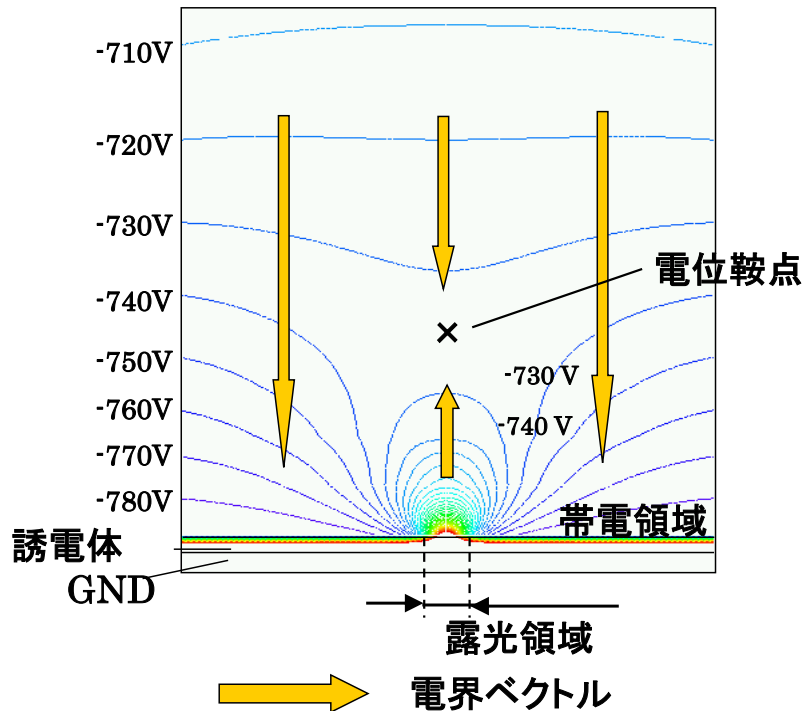
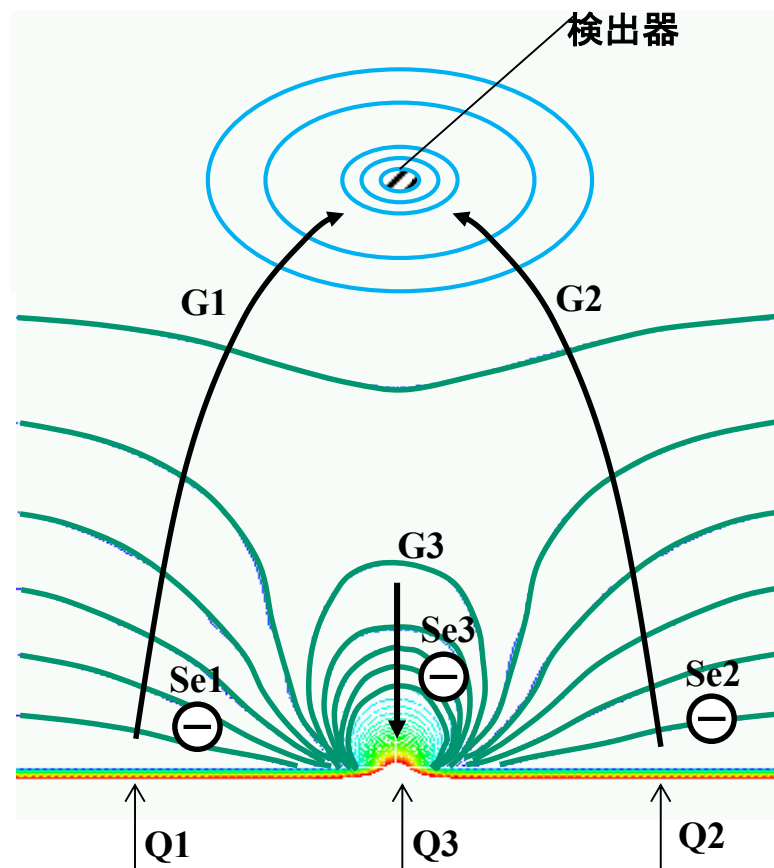
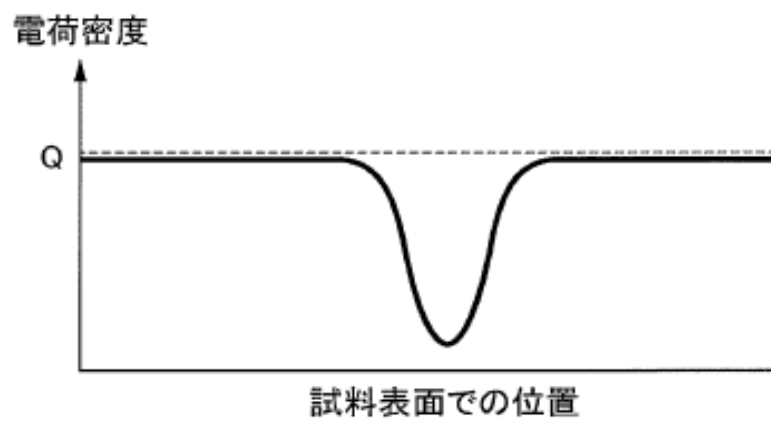


図 2-2 試料垂直方向の電位分布の計算結果

この電荷密度と電子の動きとの関係を図 2-3 の模式図に沿って説明する。電子光学系の射出開口を経て電子ビームが試料設置部上に配置された感光体試料に衝突すると、試料から二次電子が発生する。電子ビームの照射を受ける感光体試料の表面に電位分布あるいは電荷分布があると、空間に表面電荷分布に応じた電界分布が形成される。電荷密度が相対的に高い領域では、電子ビームの照射による二次電子に感光体試料から離れる方向への力が働くような電界強度、すなわち加速電界が生じる。そのため、電荷密度が高い領域からの二次電子は検出器に達する。これに対し、電荷密度が相対的に低い領域では、逆に感光体試料に引き戻す方向への力が働くような電界強度、すなわち減速電界を生じるため、この電荷密度が低い領域で発生した二次電子は、この電界によって引き戻され、検出器に到達する量が減少する。したがって、検出器である信号検出手段からの信号処理によって、感光体試料の表面電荷分布に応じたコントラスト像を検出することができる。



(a) 空間電位分布と二次電子軌道の関係



(b) 試料の電荷分布モデル

図 2-3 試料面上の二次電子による電位分布を示す模式図

図 2-3 (a) は、電子を捕獲する検出器と、感光体試料との間の空間における電位分布を、等高線表示で説明図的に示したものである。感光体試料の表面は、光減衰により電位が減衰した部分を除いては、負極性に一様に帯電した状態であり、検出器には正極性の電位が与えられているから、実線で示す電位等高線群においては、感光体試料の表面から検出器に近づくにしたがい電位が高くなる。したがって、感光体試料における負極性に均一帯電している部分である図中の点 Q1 や点 Q2 で発生した二次電子 Se1、Se2 は、検出器の正電位に引かれ、矢印 G1 や矢印 G2 で示すように移動して、検出器に捕獲される。他方、図 2-3 (a) において、点 Q3 は、光照射されて負電位が減衰した部分であり、この部分の電位分布では点 Q3 に近いほど負電位が低くなっている。換言すると、点 Q3 の近傍で発生した二次電子 Se3 には、矢印 G3 で示すように、試料側に拘束するクーロン力が作用する。このため二次電子 Se3 は、電位等高線の示すポテンシャルの穴に捕獲され、検出器に向って移動しない。図 2-3 (b) は、光照射によって形成された電荷分布を模式的に示している。

### 2-3 潜像形成方法

静電潜像計測が実現できた大きな要因のひとつは、静電潜像形成後の極めて短い時間での計測要求に応えられるように、真空環境での計測装置内に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ための帯電・露光手段を備えて、潜像形成直後の潜像をその場観察する方法を考案したことにある。潜像形成のメカニズムと詳細については、第 3 章で述べるとし、本章では、帯電方法と露光方法の基本的な技術について述べる。

#### 2-3-1 帯電方法

通常の電子写真で用いる帯電器は、コロナ放電など空気を媒体としたものであるため、真空中では使えない。このため、電子ビーム照射による帯電方式を採用している。図 2-4 に電子ビーム照射による帯電モデルを示す。測定対象物である誘電体試料に電子ビームを照射させる。入射電子  $I_p$  は、試料から放出される電子と試料に蓄積される電子とに分けられる。放出電子としては、透過電子、反射電子、二次電子があるが、二次電子が支配的であるため、ここでは、放出電子を二次電子  $I_e$  とする。二次電子放出比  $\delta$  は、

$$\delta = \frac{I_e}{I_p} \quad (2.1)$$

と表すことができる。 $\delta = 1$  の条件では、入射した電子数と放出した電子数が等しいため、帯電が起きず、平衡状態を保っている。 $\delta < 1$  のときは入射電子数に比べて放出電子数が少ないため、残りの電荷は蓄積されて負帯電となる。逆に  $\delta > 1$  のときは正帯電となる。したがって、誘電体試料を負帯電させるためには、 $\delta < 1$  の状態を作り出せばよい。

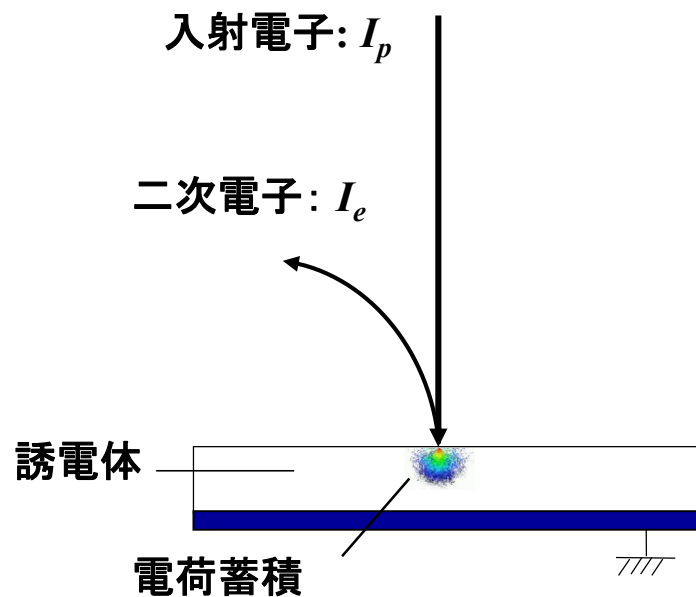


図 2-4 電子ビーム照射による帯電モデル

二次電子放出比  $\delta$  は、電子ビームの加速電圧に依存し、一般的に図 2-5 に示すような関係になっている<sup>[6]</sup>。横軸が電子ビームの加速電圧を表している。加速電圧が大きくなるにしたがい、 $\delta$  は大きくなり、いったん  $\delta > 1$  の条件となる。さらに加速電圧を大きくさせると  $\delta$  は最大値をとり、その後は  $\delta = 1$  となる加速電圧  $V_{\delta=1}$  より大きくすると、 $\delta < 1$  の条件となる。

走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) で誘電体を観察する場合、二次電子放出比  $\delta$  が 1 となる加速電圧  $V_{\delta=1}$  の条件で使うことが一般的である。 $\delta$  が 1 以外の条件では、試料がチャージアップして、像障害を生じ、微細形状の観察が困難になるからである。本帯電方式では、このチャージアップ現象を積極的に利用し、 $V_{\delta=1}$  よりも高い加速電圧に設定することで、電荷を試料に蓄積させ、試料を負帯電にしている。

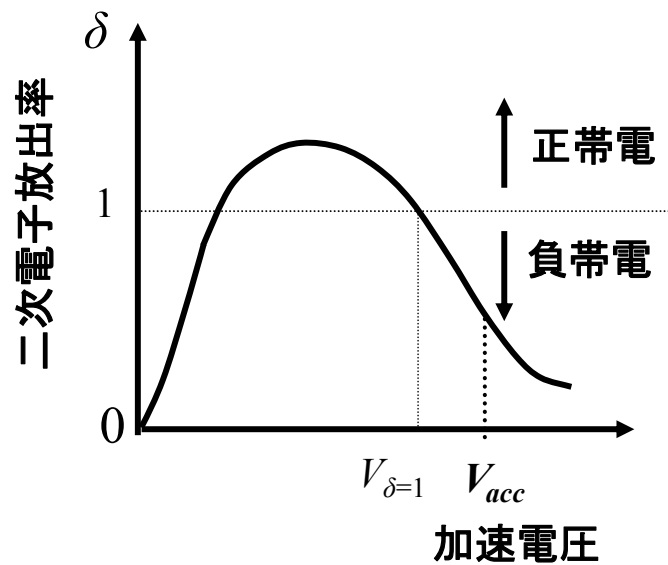


図 2-5 加速電圧に対する二次電子放出特性

### 2-3-2 露光方法

感光体表面に電荷が帯電している状態で露光されると、電荷発生層の電荷発生材料によって、光が吸収され電荷キャリアが発生して、静電潜像が形成されることは、前章で述べた。本章では、最もシンプルな露光方法の基本構成として、レーザービームスポットの潜像を計測できる静止ビーム露光光学系について述べる。

図 2-6 は実験装置のレイアウトであり、露光光学系が真空内に配置されている。感光体に感度を持つ波長の半導体レーザー (LD) から放射された光束は、コリメートレンズにより平行光束化され、アパーチャ、結像レンズ、折り返しミラーなどを通過して試料に 45 度の入射角で集光する構成となっている。アパーチャサイズを変えることで、所望のビームスポット径を生成することが可能である。レーザービームスポットによって生成される潜像を計測するため、静止ビーム露光の潜像が形成できる構成としている。LD ドライバを外部から制御することにより、像面光量と露光時間は、適切なタイミングで設定することができる。その結果、狙いの露光エネルギー密度が制御可能となっている。また、電荷を消去する除電手段として、試料全面に照射するための LED が配置されている。試料の帯電と静電潜像の観察用として用いる電子光学系は、露光光学系および LED とともにコンピュータで連携動作することができる。

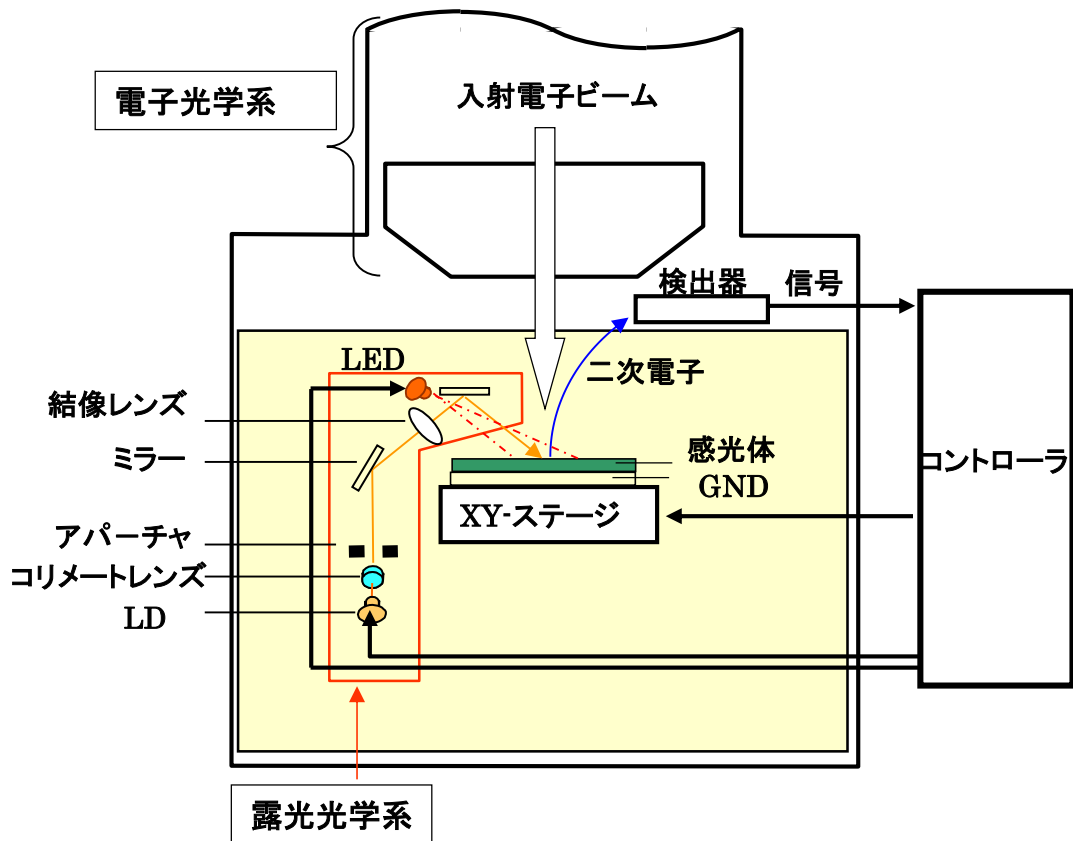


図 2-6 実験装置および露光光学系

## 2-4 静電潜像計測システムの開発

前節で説明したように、本方式で静電潜像を計測するためには、真空チャンバ内で、電子写真の静電潜像を形成できる環境を整えなければならない。特に潜像形成用の露光光学系が搭載可能な条件を満たす装置が市販品はなかった。そこで、静電潜像計測可能なシステムを新たに開発する必要性が生じた。

### 2-4-1 静電潜像計測システムの特徴

開発した静電潜像計測システム ELIMS (Electrostatic Latent Image Measuring System) <sup>[3,7]</sup> の外観を図 2-7 に示す。システムの真空チャンバ装置内には、電子銃から放出された電子を試料に導く電子光学系と、潜像形成機構と、検出手段と、除電手段と、真空試料ステージがある（図 2-6 参照）。開発した電子光学系の特徴のひとつは、通常の SEM が高分解能を重視した設計であるのに対し、装置内に露光光学系が入るためのワークスペースを確保できることを重視した長作動距離の電子光学系を採用している。また、電子ビームの照射電流は、静電



潜像が乱れない程度の微弱電流量で電子ビームを走査する必要があるため、帯電時の電流から観察時の微弱電流へ瞬時に切り替え可能となっている。電子光学系の詳細については、第3章で述べる。検出手段は、電子ビームを走査したときの放出電子を効率良くシンチレータに導く構成とし、光電子増倍管で増幅後に、電気信号に変換する方式を用いている。試料ステージは、感光体形状が平板と曲面のどちらでも対応可能であり、ステッピングモータの駆動により位置決め調整できる構成となっている。

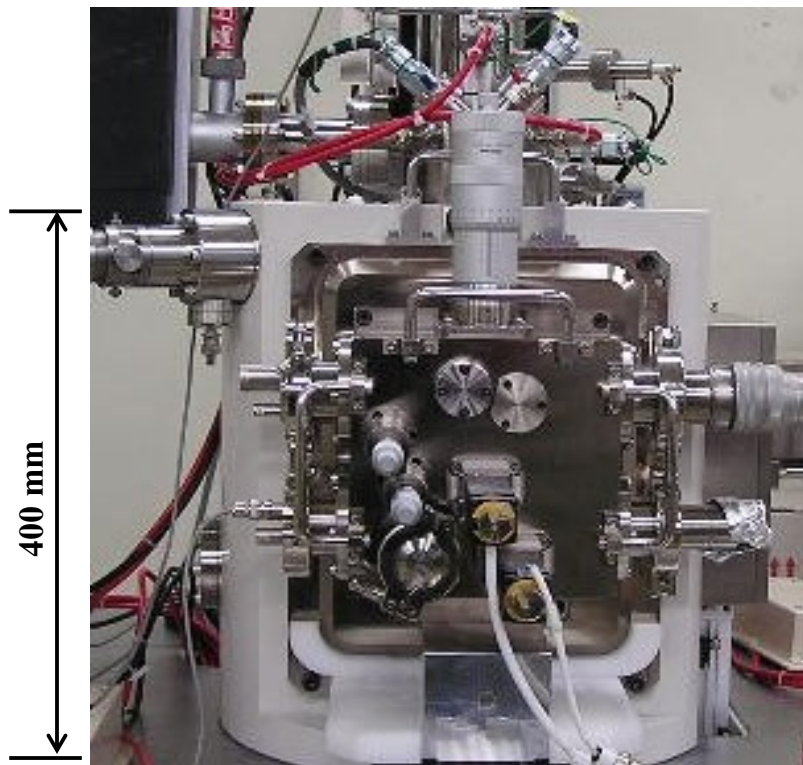


図 2-7 静電潜像計測システム ELIMS

### 2-4-2 静電潜像計測システムの真空装置

静電潜像計測システムで必要不可欠な、真空チャンバ装置を構成する真空装置について述べる。静電潜像計測で用いる真空装置は、真空室、および真空ポンプ、真空計と真空バルブで構成される。これらについて説明する。

#### A) 真空室

真空室は、電子銃室、試料室（メインチャンバ）、中間室、試料交換室で構

成される。図 2-8 に真空室の構成および真空排気系統図を示す。

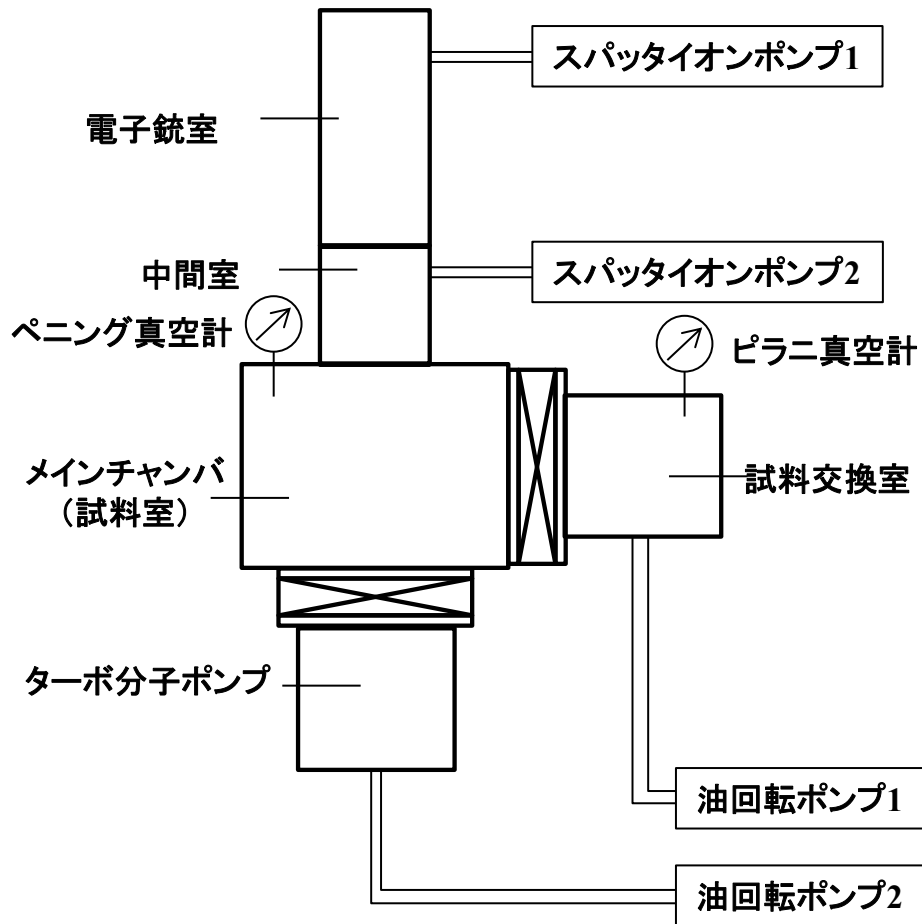


図 2-8 真空室の構成および真空排気系統図

### ① 電子銃室

電子銃室とは、電子源を格納する密閉空間である。電子銃室は、帯電時の電子ビームと観察時の電子ビームをメインチャンバに供給すること、また、いかなる状態であっても高い真空度を維持しておくことが求められる。電子銃室は、常に  $10^{-7}$  Pa 以下の高真空度が要求される。

### ② 中間室

中間室は、メインチャンバと電子銃室の間に配置された密閉空間である。中間室は、計測中に試料からガスが発生して真空度が低下しても、電子銃への侵入を防止し、電子銃室の真空環境を維持する役割がある。また、電子銃室と試

料室に大きな圧力差があるため、差動排気機構<sup>[8]</sup>とし、オリフィス<sup>[9]</sup>を挿入して別々な排気系で排気することで、圧力差を保っている。差動排気機構があることで、真空引きの時間が短縮されるとともに、感光体試料から予測不能の発生ガスが、電子銃室に直接到達することを未然に防いでいる。

### ③ 試料室（メインチャンバ）

試料室は、感光体試料がセットされる真空試料ステージと、一次電子や二次電子を捕獲する検出器がある密閉空間である。また、試料室は露光光学系や除電装置が搭載できるように大容量な空間となっている。試料交換時には、一時的に真空度が低下する。潜像実験では、試料室を大気状態にした後、短時間で真空状態にすることが要求される。真空試料ステージについての詳細は後述する。

### ④ 試料交換室

試料交換室は、感光体試料を頻繁に交換する可能性があるため、メインチャンバの真空度を保ったまま、試料を短時間で交換する空間であり、メインチャンバと連結されている。試料交換方法について説明する。試料を真空チャンバ内の試料載置台にセットする場合は、端面にガラスを嵌め込んだ試料交換室内にある先端にねじを切った連結棒に試料を載せた試料台をねじ込む。メインチャンバ内にはゲートバルブが取り付けられている。試料交換室は、メインチャンバと密着させた後、試料交換室内を排気して真空にする。ゲートバルブが開かれた後、試料台は、連結棒でメインチャンバ側にスライドして、試料載置台にセットされて、ばねの押圧で固定される。連結棒は、ねじ部を反時計方向に回転してねじ部を外すことで引き抜かれる。試料の取り外しはこの逆である。

## B) 真空ポンプと真空計

図 2-8 に真空排気系統図を示す。真空ポンプ<sup>[10,11]</sup>は、電子光学系、試料室などを真空排気するために用い、油回転ポンプ (Rotary pump, RP)、ターボ分子ポンプ (Turbo molecular pump, TMP)、スパッタイオンポンプ (Sputter ion pump, SIP)<sup>[11]</sup>の3種合計5台の構成としている。真空室の真空度状態は、大気  $10^5$  Pa から、電子銃室環境の  $10^{-7}$  Pa まで  $10^{11-12}$  のダイナミックレンジがあるため、ひとつの真空ポンプで実現することは難しい。このため、目標真空度へ達するには、複数の真空ポンプを連携させている。具体的には、SIP は到達真空度  $10^{-8}$  Pa 以上と TMP よりもさらに高真空にできるが、 $10^{-3}$  Pa 以下では動作せずに消耗してしまうため、RP、TMP と2段の粗引き後に使用している。また、真空計は、試料室

や試料交換室などの真空度を計測して、真空度に合わせた真空装置の制御を行うために、ピラニ真空計 (Pirani gauge) とペニング真空計 (Penning gauge) が用いられる<sup>[10,11,12]</sup>。真空制御装置の主な仕様を表 2-1 に示す。

表 2-1 真空制御装置の主な仕様

室名	排気ポンプ	到達圧力	計測
電子銃	SIP 20 l/s	$\sim 10^{-8}$ Pa	SIP ion 電流
中間室	SIP 20 l/s	$\sim 10^{-6}$ Pa	//
試料室	TMP 300 l/s	$\sim 10^{-4}$ Pa	Penning
試料交換室	RP 160 l/m	$\sim 10^{-0}$ Pa	Pirani

### C) 真空度動作実験結果

図 2-9 は、真空メインチャンバが大気状態での、真空度動作計測結果である。差動排気機構を用いているので、メインチャンバの真空度状態が、電子銃が劣化するなどの影響を与えることはない。静電潜像計測では、約  $10^{-3}$  Pa 前後で実験可能な真空度に達する。このため、開発した計測システムでは、大気状態から 20 分と比較的短時間で、目標真空度に達することができていることが確認された。

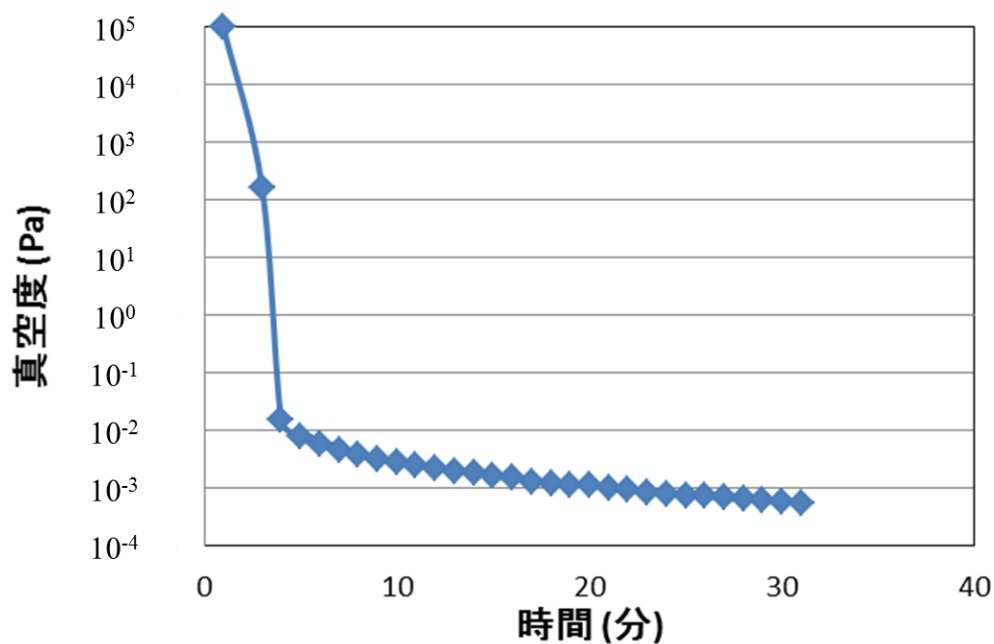


図 2-9 真空メインチャンバの真空度動作実験結果

### 2-4-3 静電潜像計測システムの真空試料ステージ

真空試料ステージ<sup>[13]</sup>の機能は、感光体試料を支持するとともに、静電潜像を画像として取り込むための、様々な信号を安定的に検出することにある。以下の設計構想に基づいて、仕様を作成した。

[真空試料ステージの設計構想]

- 1) 試料のXYステージは、コンピュータによる駆動制御が可能であること
- 2) 静止ビーム露光光学系の光軸中心が電子ビーム中心軸と一致するように、調整可能であること
- 3) 外部から入出力信号や電圧印加が可能であること
- 4) 表面電位プローブが、ケーブルを切断せずに真空内に設置可能であること
- 5) 電子検出器やグリッド電極などの部品を配置可能であること
- 6) 地磁気などの外乱磁場の影響を抑制し、かつ軽量であること
- 7) 真空試料ステージ本体の着脱が容易であること

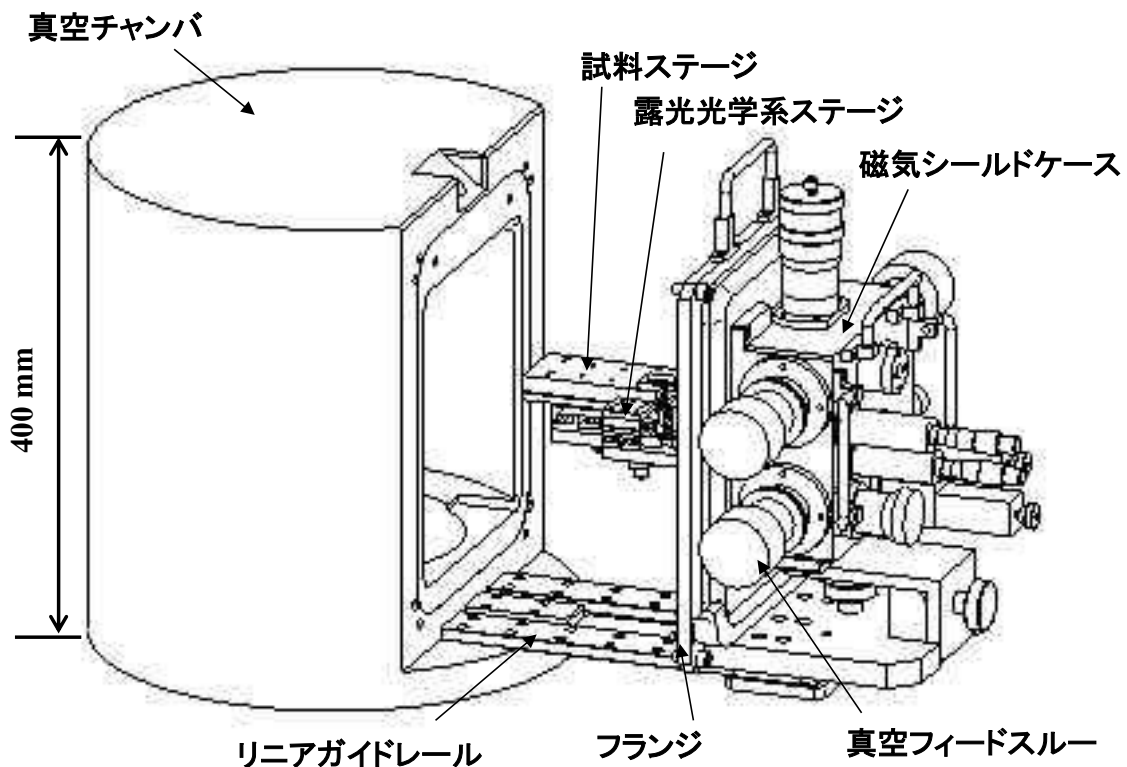


図 2-10 真空試料ステージのレイアウト

開発した真空試料ステージのレイアウトを図 2-10 に示す。真空試料ステージは、メインチャンバに取り付けるためのフランジ部、試料ステージ、露光光学系ステージ、フィードスルー、外乱磁場の影響を抑制する磁気シールドケースからなる。

真空試料ステージを真空チャンバに連結するためのフランジ<sup>[14]</sup>には、真空チャンバで試料を XYZ 3 軸に移動させるための試料ステージユニットが取り付けられている。このうち、XY の 2 軸については、ステッピングモータ駆動で、外部から制御可能となっている。露光光学系ステージは、静止ビーム露光光学系の光軸中心が電子ビームの中心と一致するように、2 軸のマイクロステージで調整可能となっている。フランジの基準面が、真空チャンバのフランジ取り付け面にガスケット<sup>[14]</sup>をねじ締結することで装着を完了する。ガスケットはフッ素ゴム材の O リングを用いている。開口部と直交する方向にガイドレールが取り付けられている。真空試料ステージは、リニアガイドに固定された台の上に載置し、ガイドレールに沿ってスライドすることで真空チャンバに対する脱着が可能となっている。

真空フィードスルーとは、真空状態を保っている真空チャンバ内部へ、電気信号をコントロールするために、真空状態と大気を遮る真空壁に取り付けられる真空部品のことである。真空チャンバ内部への電源供給および信号取り出しのためのハーネスは、フィードスルーで真空を保ったまま中継されている。真空試料ステージには、マクロ電位センサーとプローブ電流センサー等が装着されており、フィードスルーで信号を取り出している。

### 2-4-4 外部磁場の影響の抑制

電子銃を用いた電子顕微鏡では、外部からの外乱磁場により観察画像が揺らいだり、あるいは画像が多くノイズを含んだりすることで、画質が劣化する要因となるため、外乱磁場の影響を遮断する必要がある。具体的には、地磁気の強さ約 30000 nT (= 300 mGauss) 程度の小さな外部磁場であっても、入射電子を曲げるのに十分な大きさである。拡大率を上げると、その影響は顕著になってくるという課題があった。磁気シールドケースは、真空試料ステージの外側を覆うカバーであり、外部からの入出力信号やマイクロステージの操作に対して、真空封止するとともに、外部磁場の影響を受けないような材質を選定しなければならない。一般的には鋼製の厚い磁性材料で筐体を構成すれば外乱磁場の影響を遮断することができる。しかし、このような材質を使用すると、真空ステージ全体の重量が重くなるため、真空チャンバへの取り付け・取り外しや持ち運びに大きな労力を要するといった難点がある。そこで、磁気シールドケースは、外側構造体と内側構造体の 2 重構造とした。外側構造体は、

磁性材料であるが、剛性面を重視した機械構造用炭素鋼 (S25C など) を用いた。また、内側構造体は、薄い板金箱型の強磁性体パーマロイからなる磁気シールドケース用いており、ねじで締結することで外側構造体と一体化して磁気シールド効果を高めている。パーマロイは、比透磁率が鉄の 20 倍から 40 倍 (鉄 5000、パーマロイは 10 万から 20 万<sup>[15]</sup>) と非常に高い磁化特性を有しており、薄くても磁気シールドの効果が高く、磁界ノイズからチャンバ内を守るのに適している<sup>[16]</sup>。

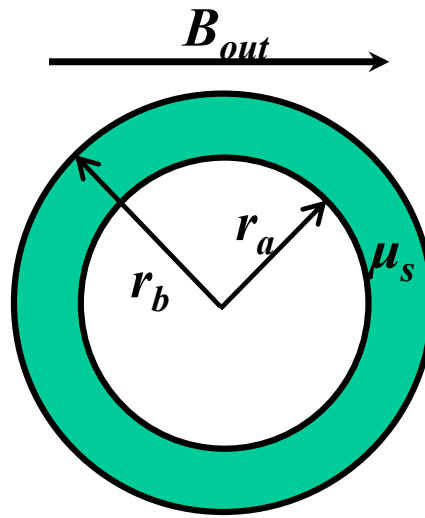


図 2-11 強磁性体球による外部磁場シールドの模式図

図 2-11 は、中空強磁性体球による外部磁場シールド効果を計算する模式図である。外部磁場を  $B_{out}$ 、強磁性体の比透磁率を  $\mu_s$ 、中空の内径を  $r_a$ 、中空の外形を  $r_b$  とすれば、中空内の磁場  $B_{in}$  は、式 (2.2) で表される<sup>[17]</sup>。

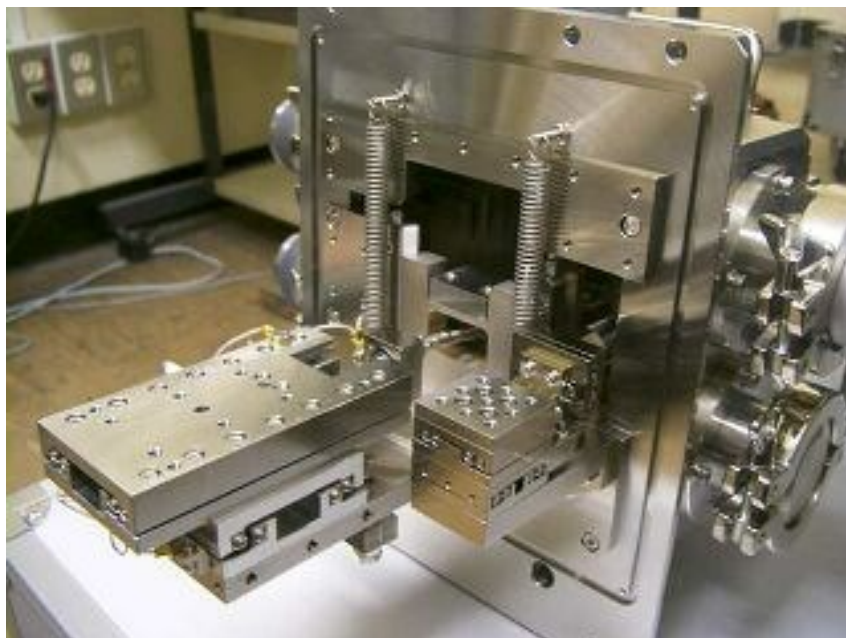
$$B_{in} = \frac{9B_{out}}{9 + \frac{2(\mu_s - 1)^2}{\mu_s} \left(1 - \frac{r_a^3}{r_b^3}\right)} \quad (2.2)$$

内径 300 mm のチャンバで、比透磁率 20 万、厚さ 1 mm のパーマロイを用いるとすれば、 $r_a=300$  mm、 $r_b=301$  mm、 $\mu_s=2 \times 10^5$  であるため、 $B_{in}/B_{out}=2.26 \times 10^{-3}$  の遮蔽効果が見込める。これは、300 mGauss と想定される地磁気の影響を 0.7 mGauss にまで低減することを意味する。同じ遮蔽効果を比透磁率 5000 の鉄で実現するには、鉄の厚さを 55 mm にする必要がある。このように、磁気シールドケースの材質をパーマロイとし、磁気シールド部材の端部を挿入して締結することで、磁気シールド性能を落とさずに真空試料ステージの軽量化を図って

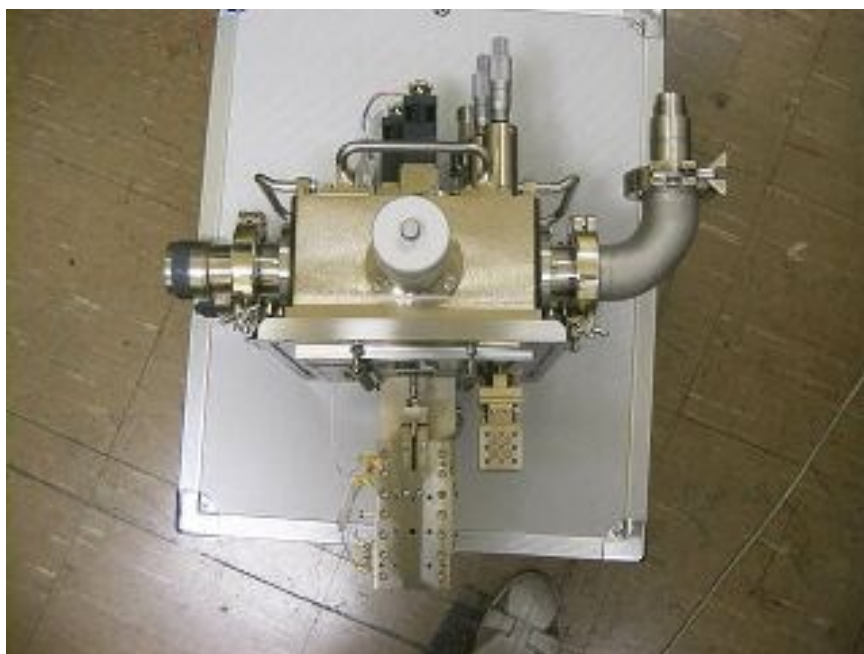


## 第2章：静電潜像の計測原理と可視化技術

いる。開発した真空試料ステージの写真を図 2-12、および真空ステージ仕様を表 2-2 に示す。



(a) 真空試料ステージ（フランジ部側）



(b) 真空試料ステージ（上部側）

図 2-12 開発した真空試料ステージの写真



## 第2章：静電潜像の計測原理と可視化技術

表 2-2 真空試料ステージ仕様

項目		仕様
耐圧環境	使用圧力	$10^{-4}$ Pa以下
	リーク量	$10^{-9}$ Pa・m <sup>3</sup> /s以下
試料ステージ	試料の大きさ	最大25 mm
	X軸 (左右方向)	移動量 : ±10 mm 移動方法 : ステッピングモータ駆動 最小幅 : 0.25 μm →モータは前方に配置しL字アングルで左右に変換
	Y軸 (前後方向)	移動量 : ±30 mm 移動方法 : ステッピングモータ駆動 最小幅 : 0.69445 μm
	Z軸 (上下方向)	移動量 : ストローク 25 mm(+10/-15 mm) 移動方法 : 手動 最小幅 : 10 μm
露光光学系ステージ	XY軸 (2軸共通)	移動量 : ±5 mm 移動方法 : 手動 最小幅 : 1 μm
フィードスルー	標準電圧対応 (2ポート)	仕様 : 700 V-4.8 A, 20ピン, フランジ: NW40 →LD制御および標準電圧印加等に使用
	高電圧対応入力ポート	仕様 : 12 kV-13 A, 4ピン, フランジ: NW40 →10kV以下の高電圧印加に使用
出力センサー	マクロ電位センサー	表面電位プローブ対応 ケーブルを接着により真空シール
	プローブ電流センサー	ファラデーカップ装着
その他		<ul style="list-style-type: none"> <li>・試作治具取り付け基準穴</li> <li>・試作治具の配置スペースの確保</li> <li>・脱着容易なガイドシャフト機構</li> <li>・運搬用取手</li> </ul>

## 2-5 実験結果と考察

### 2-5-1 導体電位パターンによる二次電子信号のコントラスト像解釈

考案した静電潜像計測原理と開発した計測システムを用いた実験により、静電潜像がミクロンスケールで可視化計測できるかを検証した。最初に微細導体電位パターン<sup>[3]</sup>を用いて、本計測システムが、導体の電位を検出できるかを確認した。印加電圧が0～5 V程度であれば、電位コントラスト法による報告例があるが、同じ導体であっても、マイナス数100 V以上の高電位の微細パターンに対するコントラスト像については、明らかではなかった。実験に用いたサンプルは、ガラス基板（ソーダライムガラス：2.3 mm厚）上に、幅50  $\mu\text{m}$ の電極部にCr-Auコートを蒸着させて、100  $\mu\text{m}$ ピッチで11本の微細導体パターン試料を製作したものである。各電極には、1本毎に電圧を印加できる構成として、擬似的に電位分布ができるようにした（図2-13参照）。

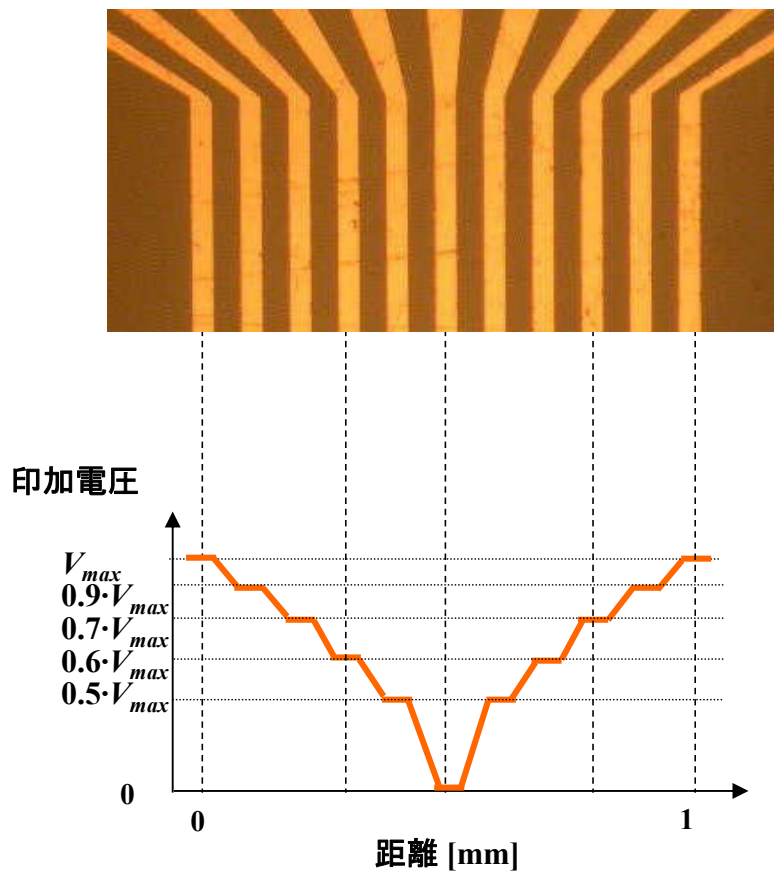
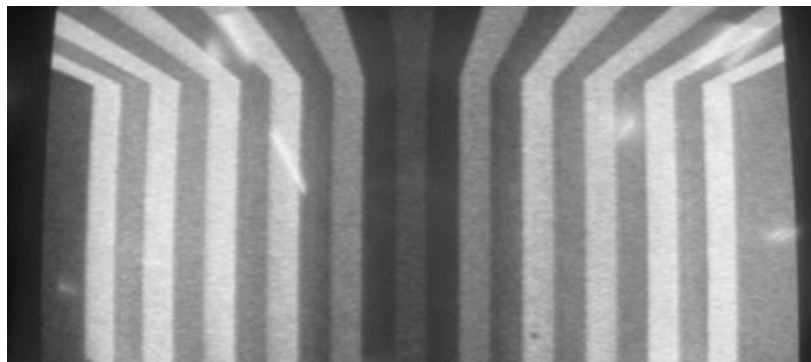


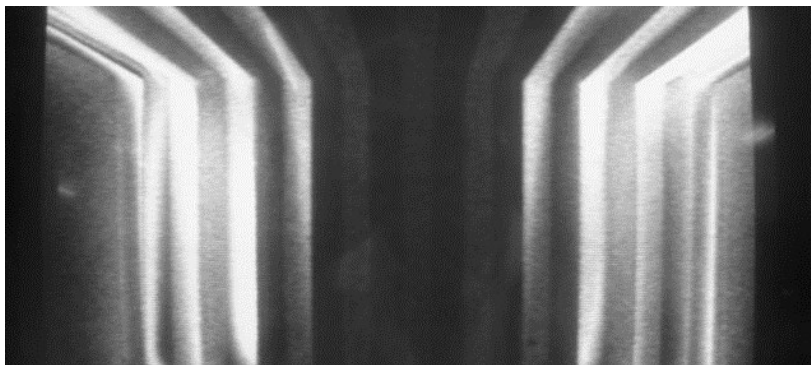
図 2-13 電極パターンと印加電圧の関係：ラインピッチ 100  $\mu\text{m}$ .

## 第2章：静電潜像の計測原理と可視化技術

加速電圧 $-2\text{ kV}$ で観察したコントラスト像を図2-14に示す。結果を見ると $50\text{ }\mu\text{m}$ の配線パターンの境界が明確に観察されており、ミクロンオーダーの分解能があることがわかる。ただし、最大印加電圧 $V_{\max}=-50\text{ V}$ と電位が低いときは、電位に応じた輝度のコントラスト像が確認できるのに対し、 $V_{\max}=-400\text{ V}$ と電位が高いときには、コントラスト像の様子が変わることがわかった。1つは、コントラスト像が2値化傾向を示すということであり、2つ目は同電位であるはずの導線に明暗が見えることである。導体は内側が明るく外側が暗くなる傾向がある。同電位領域でも異なる輝度で検出された実験結果は、コントラスト像が電位ではないことを示している。



(a)  $V_{\max} = -50\text{ V}$



(b)  $V_{\max} = -400\text{ V}$

図2-14 電極電位パターンのコントラスト像: (a)  $V_{\max} = -50\text{ V}$  (低電位条件)、(b)  $V_{\max} = -400\text{ V}$  (高電位条件)

コントラスト像が2値化傾向であり、同電位の導線に明暗が見える理由を二次電子のエネルギー分布で考察する。図2-15のように二次電子のエネルギー分布<sup>[18]</sup>は、大多数が $10\text{ eV}$ 以下であり、 $5\text{ eV}$ 以下で最大値に達する。二次電子のエネルギーはせいぜい $5\text{ eV}$ 程度である<sup>[18,19]</sup>。試料の表面電位で生ずる空間電位

障壁のポテンシャルエネルギーが、二次電子放出のエネルギーに比べて大きい  
ため、電界強度の影響が支配的であることで説明できる。

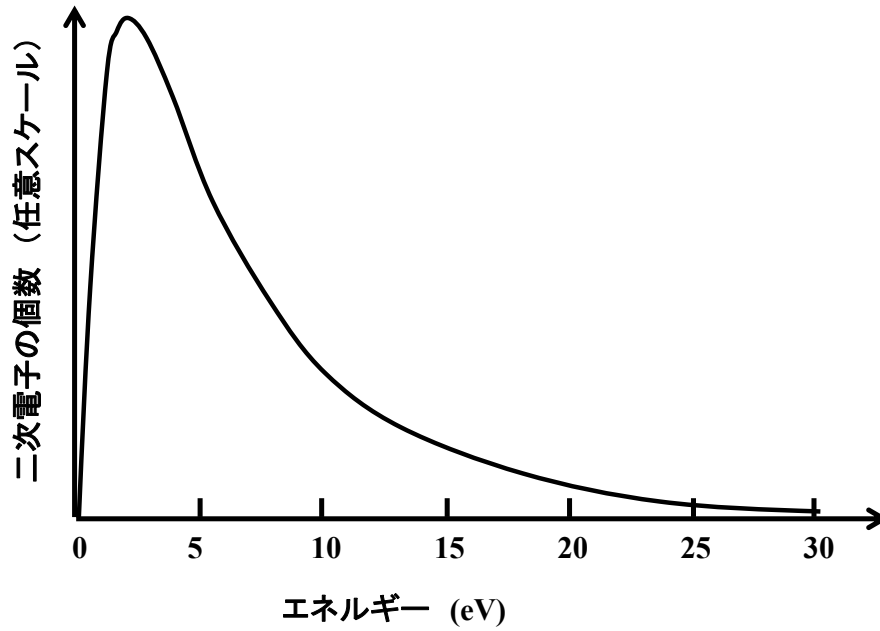


図 2-15 二次電子のエネルギー分布

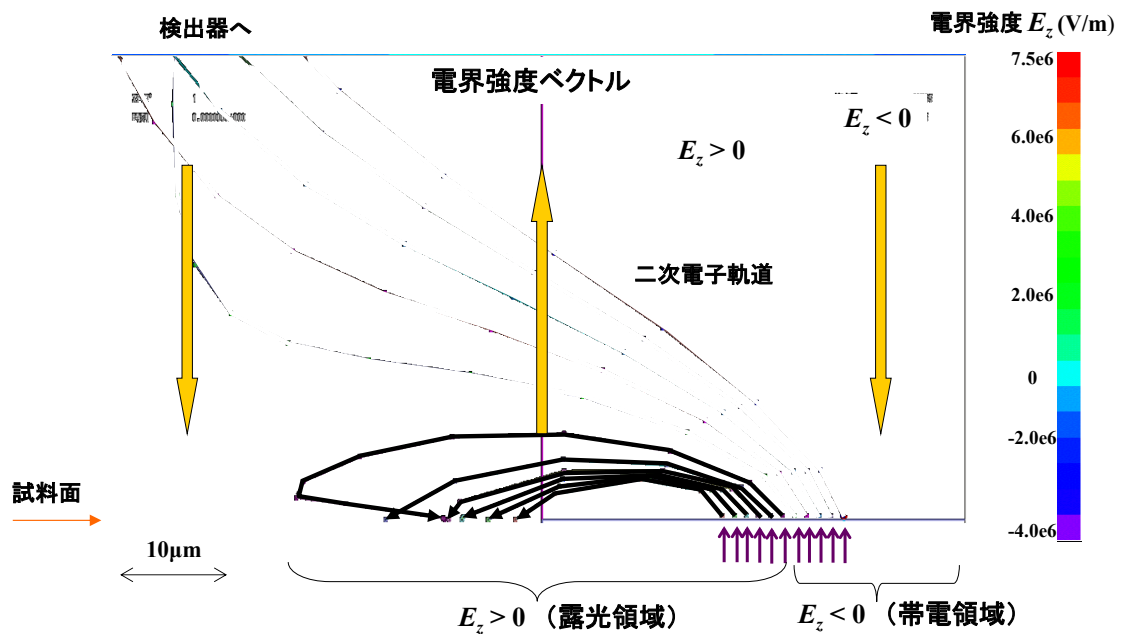


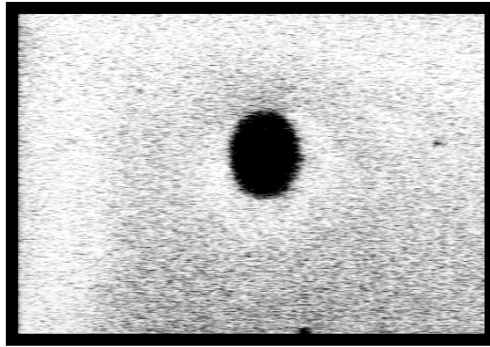
図 2-16 静電潜像が形成された試料から放出された二次電子軌道のシミュレーション  
 $E_z$ : 試料垂直方向の電界強度

この仮説を検証するため、二次電子軌道をシミュレーションした。図 2-16 は、静電潜像が形成された試料による電界等高線図と、二次電子軌道のシミュレーション結果を示すものである。シミュレーション条件としては、実際の電子写真プロセスを想定して、帯電電位は $-850\text{ V}$ 、潜像電荷分布は $28\text{ }\mu\text{m}$ で計算した。試料垂直方向の電界強度 $E_z$ の符号は、帯電領域が $E_z < 0$ 、露光領域が $E_z > 0$ としている。シミュレーション結果を見ると、 $E_z$ が正の領域で放出された二次電子は、試料に引き戻されていることがわかる。これに対して、 $E_z$ が負の領域で放出された二次電子は、潜像電界の影響を受けて軌道が大きく曲げられているものの、試料から離れる方向に進行し、検出器へ向かっていることがわかる。二次電子軌道のシミュレーション結果は、電界強度の影響が支配的であることを裏付けるものである。したがって、二次電子像は、電位コントラスト像ではなく、試料垂直方向の電界、すなわち電界コントラスト像であるといえる<sup>[3]</sup>。

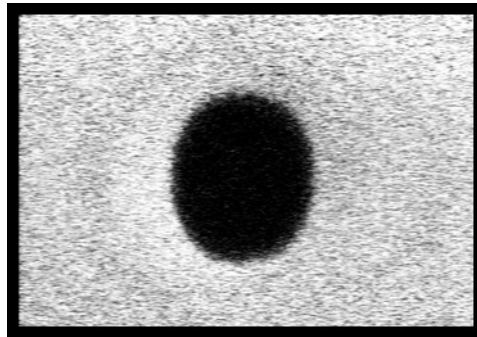
### 2-5-2 静電潜像の測定結果

二次電子検出による静電潜像の測定結果<sup>[20]</sup>を図 2-17 に示す。試料は、膜厚 $30\text{ }\mu\text{m}$ の有機感光体 (OPC) であり、帯電電位は $-800\text{ V}$ に設定した。露光は波長 $655\text{ nm}$ の半導体レーザーを用いて実験した。観察領域は横幅が約 $0.27\text{ mm}$ で統一している。図 2-17 (a) は、ビームスポット径が横 $28\text{ }\mu\text{m}$ 、縦 $43\text{ }\mu\text{m}$  (H28×V43  $\mu\text{m}$ ) の楕円ビームを静止露光させたときの 1 ビームスポット潜像である。帯電部が明るく露光部が楕円状に暗く検出されており、静電潜像を可視化計測できていることが明らかになった。図 2-17 (b) は、ビームスポット径が横 $57\text{ }\mu\text{m}$ 、縦 $83\text{ }\mu\text{m}$  (H57  $\mu\text{m}$ ×V83  $\mu\text{m}$ ) と大きめのビームで露光させたときの測定結果である。その他の条件は、図 2-17 (a) と同じである。本計測システムは、ビームスポット径による 1 ビームスポット静電潜像の違いを明瞭に識別できることがわかった。図 2-17 (c) は、露光エネルギー密度が図 2-17 (b) に比べて約 20%大きい $4.8\text{ mJ/m}^2$ としたときの測定結果である。ビームスポット径が一定でも潜像径は、露光エネルギー密度で変化していることがわかる。開発した静電潜像計測装置 ELIMS は、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 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確認した。

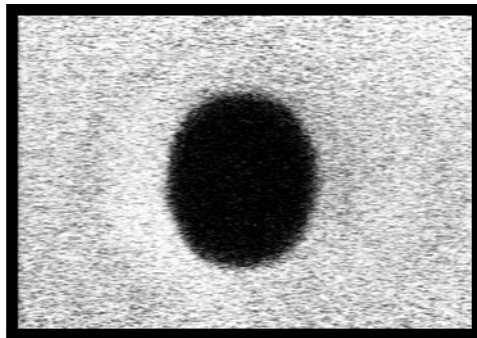
二次電子検出で可視化計測された静電潜像の物理解釈を示す。図 2-18 は、静電潜像の電界強度分布と二次電子信号で得られた明暗コントラスト像との関係を模式図として示したものである。静電潜像が形成された試料の二次電子像は、前項で述べたように、電界に依存した電界コントラスト像であり、さらに具体的には、試料垂直方向の電界強度がゼロをスレッショレベルとして 2 値化した画像であると考えている。



(a) ビームスポット径:  $H28 \times V43 \mu\text{m}$ , 露光エネルギー密度:  $4 \text{ mJ/m}^2$



(b) ビームスポット径:  $H57 \mu\text{m} \times V83 \mu\text{m}$ , 露光エネルギー密度:  $4 \text{ mJ/m}^2$



0.27mm

(c) ビームスポット径:  $H57 \mu\text{m} \times V83 \mu\text{m}$ , 露光エネルギー密度:  $4.8 \text{ mJ/m}^2$

図 2-17 静電潜像の可視化計測結果

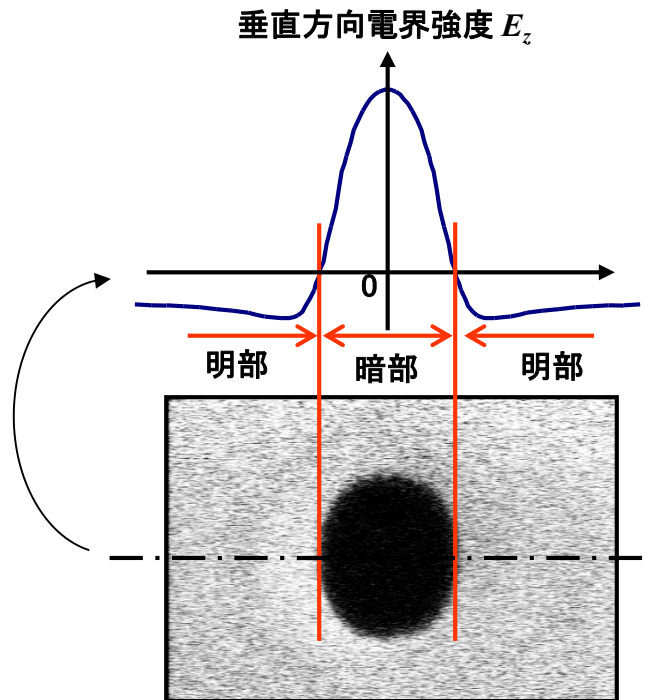


図 2-18 静電潜像の電界強度と二次電子信号で得られたコントラスト像の関係

## 2-6 結 言

本研究では、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、静電潜像をその場観察する手法を考案した。帯電手段としては、通常の電子写真で用いる帯電器が真空中で適用できないため、電子ビーム照射による帯電方式を採用した。露光手段としては、最もシンプルな構成でレーザービームスポットの潜像を計測できる、静止ビーム露光光学系を用いた。その結果、真空内で静電潜像を形成することが実現できた。

静電潜像計測システム ELIMS (Electrostatic Latent Image Measuring System) を開発するために必要な、真空装置と真空試料ステージの構成について詳細を述べた。また、真空装置を試作し、構成および真空排気系統について述べた。差動排気機構を用いているので、試料室の真空度は、 $10^{-3}$  Pa 前後で実験可能真空度に達する。これにより、大気状態から 20 分と比較的短時間で、目標真空度に達することが確認できた。真空試料ステージを開発し、設計思想と仕様につい

## 第2章：静電潜像の計測原理と可視化技術

て述べた。特徴のひとつは、地磁気などの外乱磁場の影響を抑制し、かつ軽量であるために、2重構造体としたことがある。内側構造体は、板金箱型の強磁性体パーマロイを用いて、磁気シールド効果を高めており、その外部磁場シールド効果を理論的に見積もった。

静止ビーム露光による1ビームスポット潜像実験では、ビームスポット径や露光エネルギー密度の違いをコントラスト像の大きさとして識別できており、感光体の静電潜像を可視化計測できていることが確認された。開発した静電潜像計測装置ELIMSは、1  $\mu\text{m}$  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が確認できた。また、導体電位パターンによるコントラスト像観察では、従来の電位コントラスト像の解釈では説明がつかないことが明らかになった。静電潜像が形成された試料の二次電子検出信号は、電界強度の影響が支配的であることから、新しい物理解釈として、試料垂直方向の電界強度を2値化した電界コントラスト像であると判断した。



## 第3章

### 静電潜像の形成

#### 3-1 緒言

前章では、従来技術で困難であった静電潜像を計測する方法として、真空環境の計測装置内に静電潜像を形成して、電子ビームのプロープでその場観察を行う手法を考案し、感光体の静電潜像をミクロンスケールの分解能で可視化計測を可能にしたことを述べた。静電潜像の計測結果を電子写真の開発や設計に反映させるためには、実際のレーザープリンタやデジタル複写機で形成される静電潜像を真空環境で形成することが重要である。その静電潜像は、感光体上に帯電し露光することで形成される。感光体の帯電電位は、概ね数 100 V～1 kV と高い電位であり、その範囲で狙いの帯電電位を制御することが求められる。露光では、感光体上に画素単位で光ビームを照射するため、ビームスポット径、像面光量、ON/OFF の点灯時間を制御することが求められる。

本章では、計測対象となる真空環境で静電潜像を形成する方法について詳述する。まず、真空中で感光体を所望の電位に設定する帯電手段について述べる。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。このため、本研究では電子ビーム照射による帯電方式を用いている。この帯電方式は、チャージアップという現象を利用したものである。チャージアップとは、走査電子顕微鏡などで非導電体の試料を観察する際に、試料が帯電して像障害を起こし、適切な結果が得られなくなる現象のことである。チャージアップ現象自体は、電子顕微鏡関連で様々な報告事例<sup>[1,2]</sup>がある。しかしながら、多くはチャージアップが起きないための回避策に関する内容であり、具体的には試料に導電膜を蒸着させる技術や、電子ビームの加速電圧を適正化させる技術、あるいは帯電を防止する技術<sup>[2]</sup>である。帯電シミュレーションの報告事例もある<sup>[3-5]</sup>ものの、チャージアップさせた後の帯電現象に関する研究事例はきわめて少ない。このため、電子ビームを照射させることで、光導電体である感光体を数 100 V～1 kV と高い帯電電位に設定できるかとの技術課題に回答できる先行研究はなかった。本研究では、帯電現象とメカニズムについて論じ、実験で検証する。

つぎに、真空中で静電潜像を形成するための露光手段として、静止ビーム露光によるビームスポット露光方式とマスクパターン露光方式について述べる。

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、本研究では、電子写真の作像プロセスで感光体上に形成されるドットやラインパターンといった様々な静電潜像を形成可能とするために、走査ビーム露光方式を開発した。本章では、走査ビーム露光方式の光学ユニットおよび半導体レーザーの駆動制御について述べ、走査ビーム露光としての光学的な妥当性を検証する。最後に、これら露光方式を用いての潜像観察実験により、静電潜像が狙い通り形成できているかを実証する。

### 3-2 真空中での帯電手段

#### 3-2-1 帯電・観察共用電子光学系の特徴

本研究では、真空中で帯電させる手段として、電子ビーム照射方式を用いている。電子ビームは観察手段としても使用されるため、帯電手段と観察手段の両方を共用する電子光学系を開発する必要があった。電子光学系<sup>[1,6]</sup>の機能は、電子源から発生した電子ビームを、所望のエネルギーと所望の照射電流（プローブ電流）で、試料の所望の位置に与えることである。開発仕様を決めるにあたり、以下の項目を考慮した。

- 1) 電子光学系は帯電時と観察時のプローブ電流が、瞬時に変更できること
- 2) 観察時の電流が安定していること
- 3) 帯電領域を設定できること
- 4) 作動距離は、露光光学系を配置するためのスペースを確保すること
- 5) 帯電電位を決める加速電圧は、細かいステップで設定できること
- 6) 各電子レンズ条件を直接、設定できること

開発した電子光学系の特徴のひとつは、通常電子顕微鏡が高分解能を重視して作動距離が短い設計であるのに対し、真空装置内に露光光学系が入るためのワークスペースを確保できることを重視して、長作動距離の電子光学系を採用している。一方、通常電子顕微鏡で重要なパラメータである分解能は、1  $\mu\text{m}$  以下の測定精度が確保されれば十分と判断した。また、観察時は静電潜像が乱れない程度の微弱電流量で電子ビームを走査する必要があるため、電圧・電流を個別に設定可能とすることで、帯電・観察時の電流密度が短時間で切り替え可能な構成となっている。

### 3-2-2 帯電・観察共用電子光学系の構成

図 3-1 は、潜像計測で用いる帯電と観察を行うために開発した電子ビームを照射する光学系の構成とその模式図である。

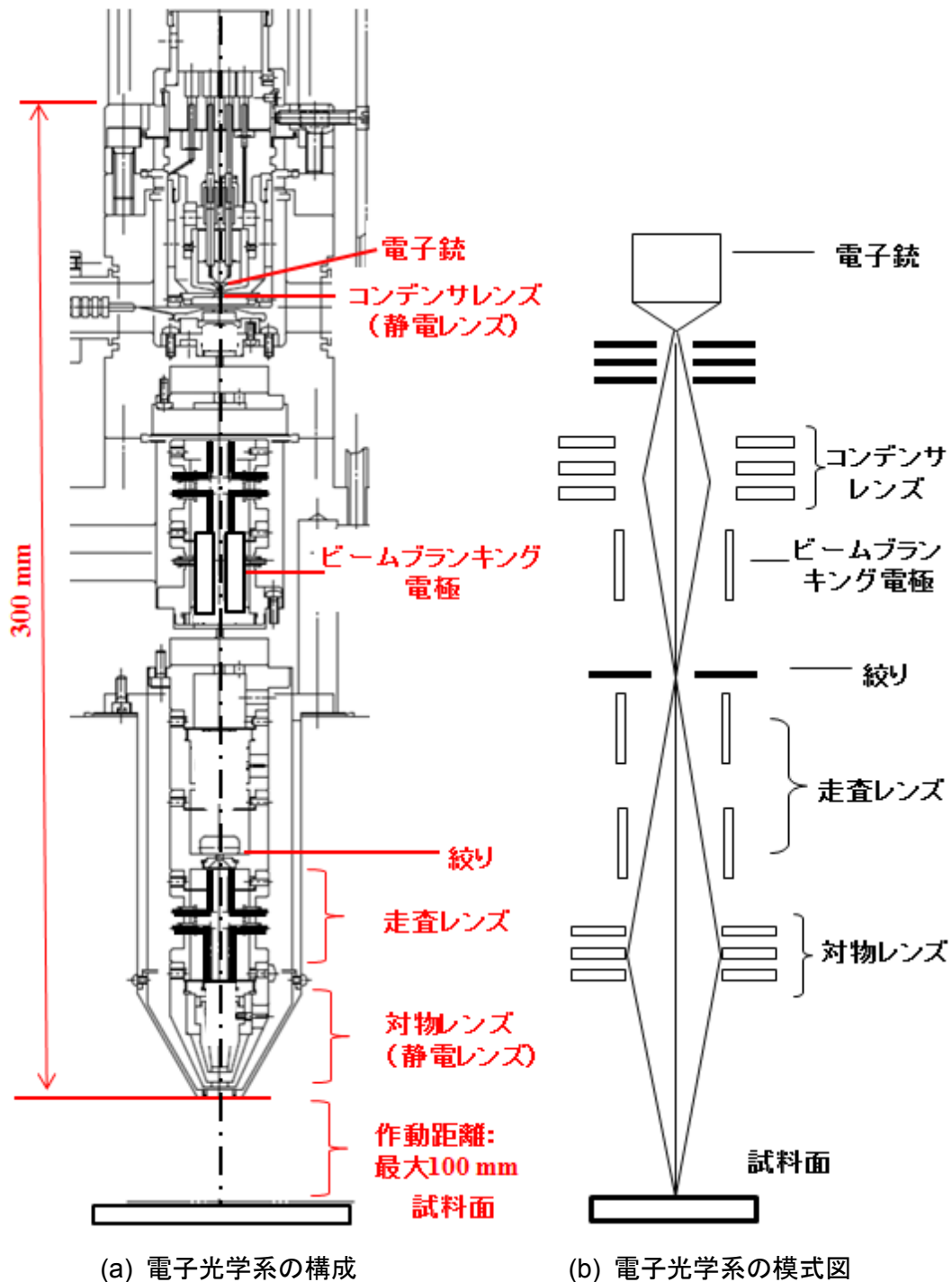


図 3-1 開発した電子光学系の構成

### 第3章：静電潜像の形成

電子光学系の大きさは 300 mm であり、対物レンズの先端から試料面までの距離は、最大 100 mm まで焦点距離を確保できる設計となっている。これにより、静電潜像の形成に必要な露光光学系が、チャンバ内にレイアウト可能としている。図 3-1 (b) は、電子光学系の結像関係を示す模式図<sup>[7]</sup>である。電子光学系<sup>[1,6]</sup>は、電子ビームを放出させる電子銃、電子ビームを集束させるためのコンデンサレンズ（静電レンズ）、電子ビームを ON/OFF させるためのビームブランカ、電子ビームを走査させるための走査レンズおよび、走査レンズを経た電子ビームを試料上に集光させるための対物レンズ等で構成される。これらレンズ等の各光学系要素には、駆動用電源が接続されている。ここでは、一般的な電子光学系の説明は省略し、静電潜像計測する上で、重要視して開発した装置の構成や部品選定の根拠について、具体的に述べる。

#### 3-2-3 電子ビーム照射部

電子ビーム照射部の機能は、電子を取り出して、その電子に所望のエネルギーを与えることにある。電子ビーム照射部の構成を図 3-2 に示す。電子ビーム照射部は、電子銃と、電子ビームを制御するためのサプレッサ電極  $V_{sup}$ 、引き出し電極  $V_{ext}$  と、電子ビームのエネルギーを制御するための加速電極  $V_{acc}$  とからなる。静電潜像計測において、加速電極は試料の帯電電位を所望の値に設定するための制御因子である。

電子銃には、熱電子銃や電界放出電子銃など様々な種類があるが、電流安定性を重視すると熱電界放出電子銃がよい。熱電界放出電子銃とは、陰極を高温に加熱し、かつ電界を印加させて電子を放出させる電子銃を指す。陰極の加熱温度が 1000 K 以下 700 K 程度であれば、熱電界放出現象であり、陰極の加熱温度が 1000 K 以上で 1800 K と高温であれば、ショットキー放出となる。熱電界放出電子銃は、熱電子銃と比べて輝度が高く、電子源が小さい。また、熱電界放出電子銃は、電界放出電子銃（フィールドエミッション電子銃）と比較して、電流安定度が高いこと、大きなプローブ電流が得られること、動作圧力が若干高くてもよいこと、などの優位性を持つ。静電潜像計測では、観察時の電流安定性を重視し、熱電界放出電子銃を使用している。エミッタには酸化ジルコニウムタングステン (ZrO/W) を使用した。

電子は、引出電極に電圧  $V_{ext}$  を印加して発生した強電界の働きにより、熱電界放出電子銃のエミッタ先端から放出される。そして、加速電極に加速電圧  $V_{acc}$  を印加することで、電子が所望のエネルギー ( $e \times V_{acc}$ ) を得ることができる。このとき、エミッタの電位と加速電極の電位差は  $V_{acc}$  であるが、電位はエミッタの方が低電位側である。そして、加速電極は GND に接地している。言い換える

と、エミッタ先端の電位が  $V_{acc} (< 0)$  であるといえる。電子顕微鏡では、加速電圧の値を正で表現することが一般的であるが、物理的意味を含めるなら、加速電圧  $V_{acc}$  を負で表現する方が数式化しやすいため、以後、加速電圧  $V_{acc}$  は、負で表現することにする。なお、加速電圧  $V_{acc}$  が、試料の帯電電位を所望の値に設定する重要な制御因子であることについては、後述する。

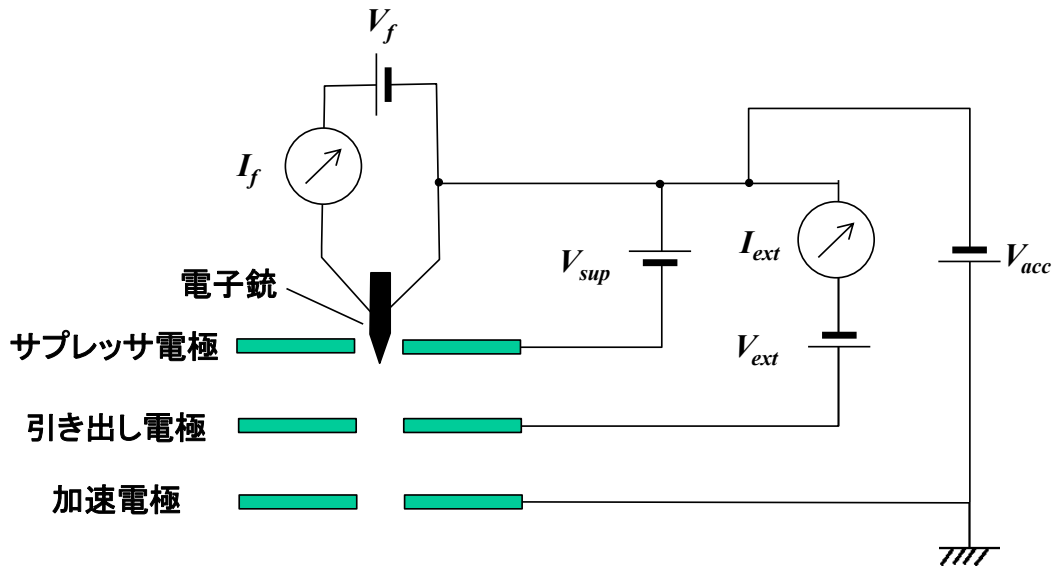


図 3-2 電子ビーム照射部の構成

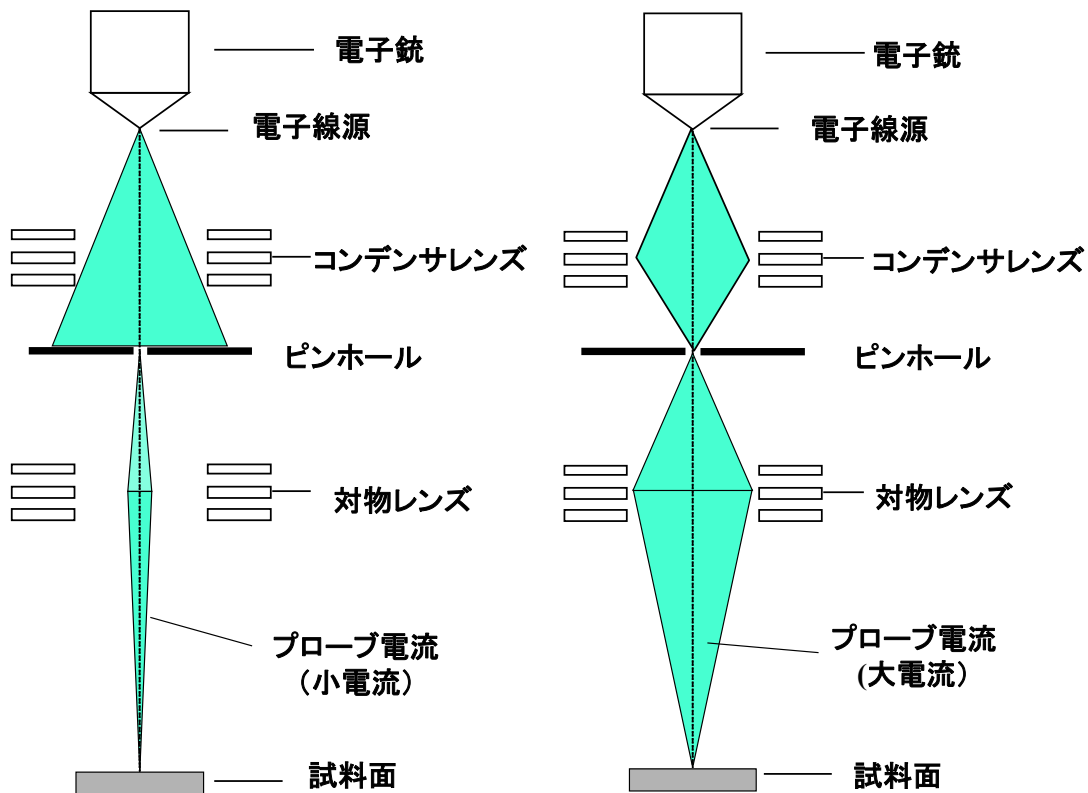
### 3-2-4 コンデンサレンズによるプローブ電流制御

静電潜像計測におけるプローブ電流は、帯電時では短時間で所望の帯電電位に達するために大電流とし、観察時には静電潜像が乱れない程度の電子線照射量に設定しなければならない。試料への電子線照射量は、プローブ電流と照射時間の積である。静電潜像測定の標準的な条件を感光体試料の膜厚  $d$  が  $30 \mu\text{m}$ 、比誘電率  $\epsilon'$  が 3、帯電電位  $V_d$  が  $-800\text{V}$  としたとき、試料表面の電荷密度  $Q$  は、 $Q = \epsilon_0 \cdot \epsilon' / d \cdot V_d = -7.08 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$  である。 $\epsilon_0$  は真空誘電率である。この電荷密度は、 $1 \mu\text{m}^2$  あたりの電子個数にしてわずか 4419 個 ( $= 7.08 \times 10^{-4} [\text{C/m}^2] / 1.602 \times 10^{-19} [\text{C}] / 10^{12}$ ) に過ぎない。この電子個数は、 $1 \text{ mm}$  角の領域をプローブ電流  $700 \text{ pA}$  で  $1 \text{ 秒}$  間照射したときの電子線照射量に相当する ( $700 \text{ pA} \times 1 \text{ sec} / 1 \text{ mm}^2 = 7 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$ )。電子線照射量は、電荷量の  $1/100$  以下であれば潜像測定への影響は少ないと考えている。実験条件における 1 画像あたりの電子線照射量は、電荷量の  $1/400$  すなわち、電位換算で約  $2 \text{ V}$ 、 $1 \mu\text{m}^2$  あたりの電子個数で 10 個程度となるようにプローブ電流を設定している。このときのプローブ電流は数  $\text{pA}$  から 10 数  $\text{pA}$  という微弱電流である。開発した計測装置は、帯電時の大電流と観察時の小電流をひとつ

### 第3章：静電潜像の形成

の電子光学系で共用している。このため、プローブ電流を大電流から小電流へ切り替えることが求められる。

コンデンサレンズとは、電子ビームを集束させたり、発散ビームを平行ビームへ変換させたりするためのレンズであり、電子銃と対物レンズとの間に配置される。静電潜像計測で求められるコンデンサレンズの機能は、プローブ試料電流を瞬時にかつ安定的に切り替えることにある。コンデンサレンズは、静電レンズを使用している。静電レンズとは、静電界により電子線を集束させるレンズを指す。静電レンズは、磁界型レンズより収差が大きいデメリットがあり、走査電子顕微鏡<sup>[8]</sup>の場合、対物レンズとして磁界レンズを用いるほうが一般的である。しかしながら、静電レンズは磁界レンズと違ってヒステリシスがないため焦点距離の制御が正確にできる特徴を有している。また、静電レンズでは、電子光学系の近軸軌道方程式<sup>[9]</sup>を解くことで、働きや特性をある程度予測することができる。これらの理由により、本研究では、静電レンズを採用した。



(a) プローブ電流が小さい観察時の設定      (b) プローブ電流が大きい帯電時の設定

図 3-3 コンデンサレンズとプローブ電流の関係

図 3-3 (a) は、コンデンサレンズの印加電圧が OFF の状態であり、電子銃から放出された電子はピンホールでは大部分がカットされて、プローブ電流は小電

流となる状態を示している。これに対して、図 3-3 (b) は、コンデンサレンズの印加電圧が ON の状態であり、レンズ効果でピンホールを通過する電子量が増えるので、プローブ電流は大電流となる。このように、コンデンサレンズの印加電圧を変えてピンホールを通過する電子量を調整することにより、プローブ電流量は、帯電時と観察時で切り替え可能となる。

### 3-2-5 ビームブランキングによる帯電領域制御

ビームブランカの機能は、試料に電子線を照射させたくない場所に対して、電子ビームを遮断することであり、帯電領域を設定することにある。電子銃は、LD の直接変調のように ON/OFF をすることができない。このため、電子銃から放出された電子ビームは、電子光学系による間接変調で ON/OFF されなければならない。具体的には、電子ビームを電氣的に試料に当たらない方向に向ける構成にすればよく、走査電子の信号にあわせてビームブランカ信号を ON にすることで帯電領域の設定が実現できる。図 3-4 は、ビームブランキングの構成である。帯電領域は最大 4 mm 角まで設定可能とした。

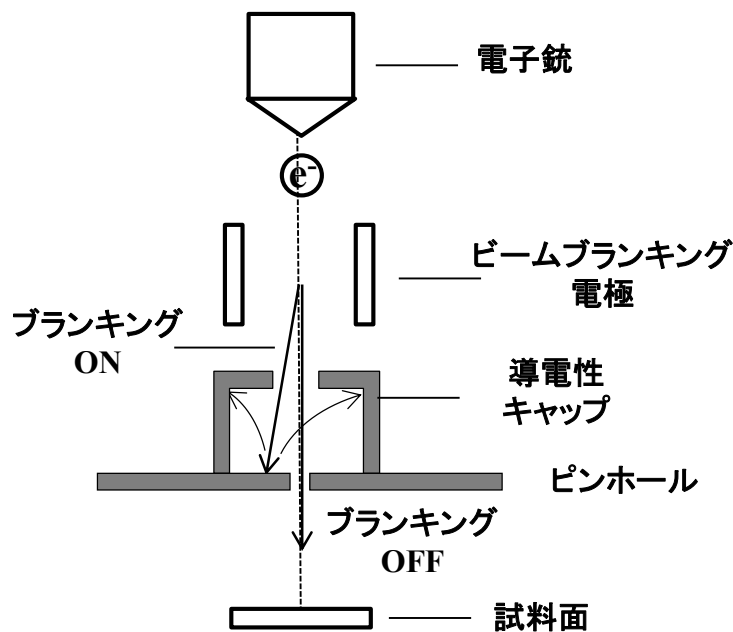


図 3-4 ビームブランキングの構成

電子ビームは、ブランキング電極に電圧を印加することで曲げられて、後段のピンホールを通過しなくなり、試料に到達しない。その結果、電子ビームが試料に当たらないようにすることができる（図 3-4 参照）。すなわち、帯電して

ほしくない領域については、ビームブランカ信号を ON にすればよい。これにより、所望の領域のみを帯電させることができる。電子ビームがピンホールを通過せず部材に当たる場合には、部材から放出された二次電子が誘電体材料に衝突することで、電荷が蓄積されて電場環境が変化し、電子ビームの安定化を妨げることになる。ピンホール上部の導電性のキャップは、誘電体に電荷が蓄積されて電場環境が変わることを防止するために装着している。

### 3-2-6 プローブ電流の実験結果と考察

帯電・観察共用電子光学系の動作確認として、プローブ電流を測定した。開発したファラデーカップを図 3-5 に示す。ファラデーカップは、電子ビームのプローブ電流を測定するために用いる。直径 1 mm のホールへ侵入した電子ビームは、ファラデーカップと試料台の導体に囲まれて、ファラデーカップから外へ脱出できず、吸収電流  $I_a$  かあるいは放出電流  $I_b$  となる。したがって、帯電および観察時のプローブ電流は、試料電流  $I_a + I_b$  を計測することで求められる。

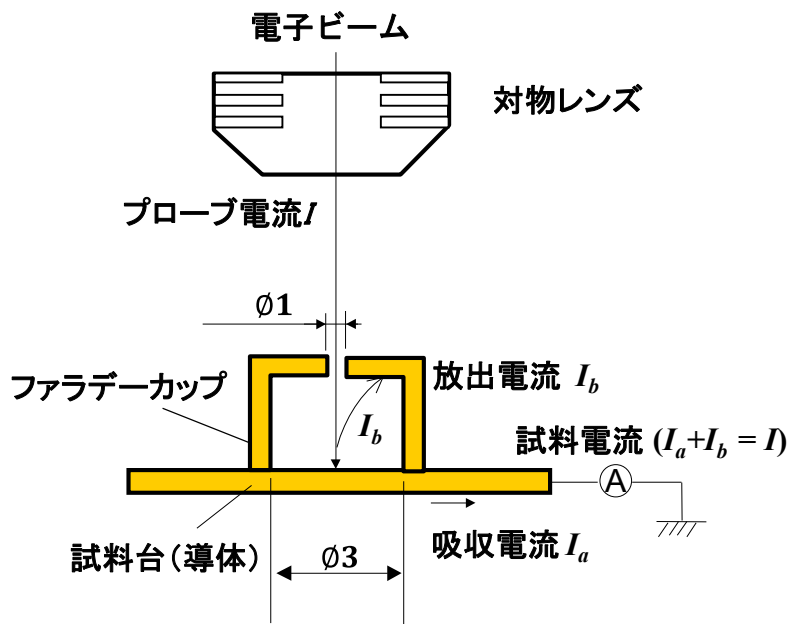


図 3-5 プローブ電流測定用ファラデーカップ

図 3-6 は、コンデンサレンズの印加電圧に対するプローブ電流の測定結果である。横軸は、コンデンサレンズの印加電圧  $V_{col}$  と加速電圧  $V_{acc} = -1.8 \text{ kV}$  との電位差で表示している。縦軸は、プローブ電流である。加速電圧との差が約 200 V のときに、プローブ電流が最大値となる。最大値以後、プローブ電流は  $V_{col} - V_{acc}$



### 第3章：静電潜像の形成

が大きくなるしたがい減少し、GND で最小値となった。プローブ電流の最大電流は 2.4 nA、最小電流は 6 pA という結果であった。この結果は、コンデンサレンズの印加電圧の ON/OFF のみを切り替えるだけで、約 400 倍の電流を供給可能であることを示している。静電潜像計測では、帯電時の大電流と、観察時の小電流とを瞬時に切り替えなければならない。コンデンサレンズの印加電圧の ON/OFF 切り替え方式は、アパーチャサイズを切り替えるメカニカルな方式と比べて、短時間なおかつ安定動作が実現可能である。

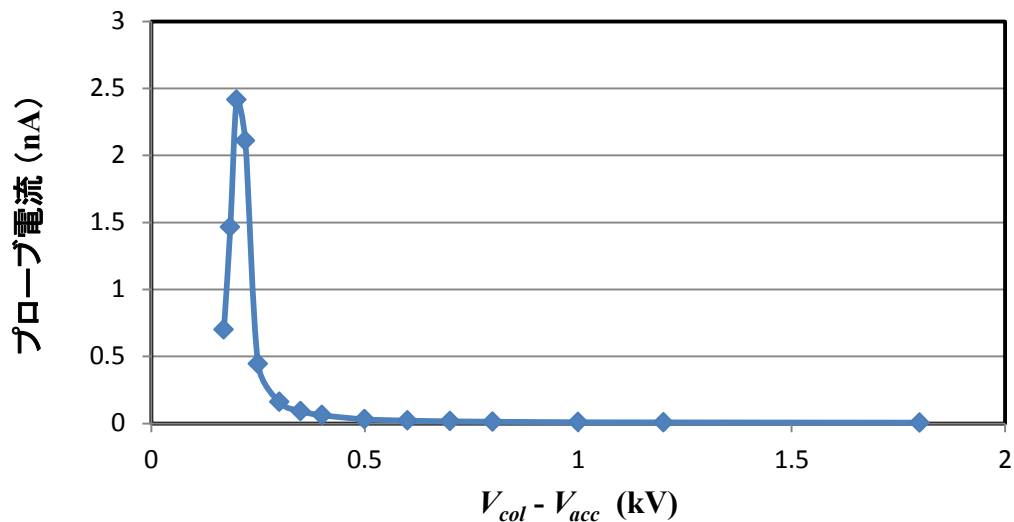


図 3-6 コンデンサレンズの印加電圧  $V_{col}$  に対するプローブ電流の測定結果  
加速電圧  $V_{acc} = -1.8$  kV

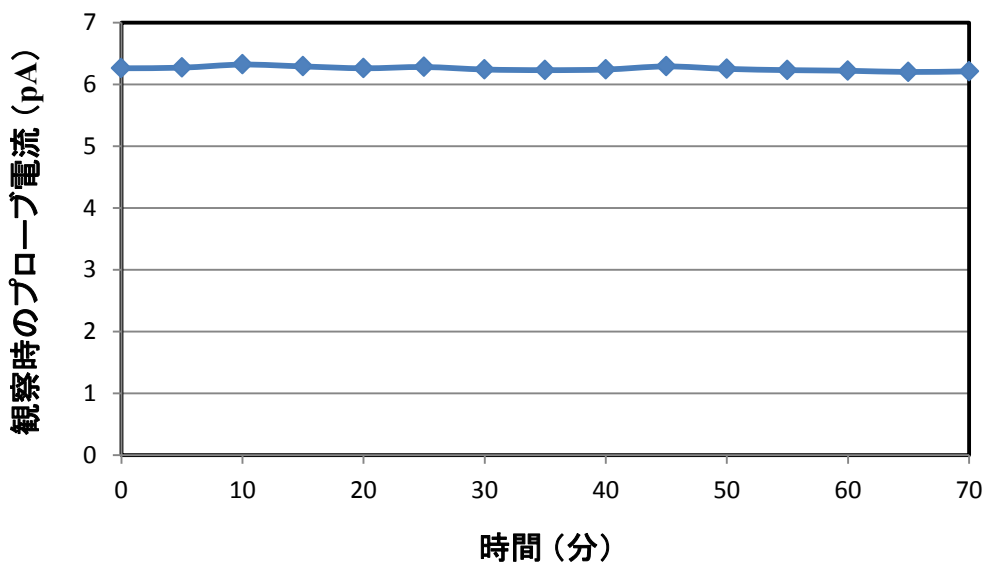


図 3-7 観察条件におけるプローブ電流の測定結果

## 第3章：静電潜像の形成

図 3-7 は、観察条件でのプローブ電流の測定結果である。この実験は、電子銃の電源を ON にしてから約 4 時間経過した後に測定した。プローブ電流は、最大 6.32 pA、最小 6.20 pA、平均 6.25 pA であった。電流の変動幅（最大値-最小値）は 10%を超えると、コントラスト像の違いとして目立ってくる。電流の変動幅は 0.12 pA で平均電流の 2%、ばらつきは 0.5%程度と非常に安定しており、良好な条件下で、静電潜像を計測できる電子光学系であることが確認できた。開発した電子光学系の主な仕様を表 3-1 に示す。

表 3-1 電子ビーム光学系の主な仕様

電子銃	熱電界放出
加速電圧	最大-5 kV、1 V ステップ
作動距離	20～100 mm
帯電領域	4 mm
プローブ電流	最大 2 nA
観察電流安定性	1%以下
特徴	帯電・観察共用

## 3-3 帯電電位の制御方法

### 3-3-1 帯電モデル

通常の電子写真で用いる帯電器は、コロナ放電など空気を媒体としたものであるため、真空内で使うことができない。このため、電子ビーム照射による帯電方式<sup>[10]</sup>を採用したことは前章で述べた。前章の図 2-5 の二次電子放出特性は、導体にも誘電体にも当てはまる。ただし、導体試料の場合、電荷が GND 側に流れて平衡状態を維持するのに対して、誘電体試料の場合、電荷が蓄積されて試料の電位状態が時間とともに変化する点が異なる。二次電子放出特性は、横軸を加速電圧で表すことが一般的である。

図 3-8 は、電荷蓄積にともなう影響を考慮できるようにするために、二次電子放出特性の横軸を試料に到達する直前の入射電子の電圧（ランディング電圧： $V_L$ ）としたものである。この図で試料を所望の電位に設定する物理モデルを説明する。電子ビーム照射直後は、試料に電荷が蓄積されていくが、時間の経過にしたがい、試料の負帯電電位の影響で入射電子が減速される。

電子の質量、電荷量をそれぞれ  $m$ 、 $e$  とし、加速電圧  $V_{acc}$  は物理的意味を持た

### 第3章：静電潜像の形成

せるため  $V_{acc}$  ( $< 0$ ) とすると、入射電子の初期速度  $v_0$  は、古典物理学的には式 (3.1) で表される。

$$v_0 = \left( \frac{2e|V_{acc}|}{m} \right)^{1/2} \quad (3.1)$$

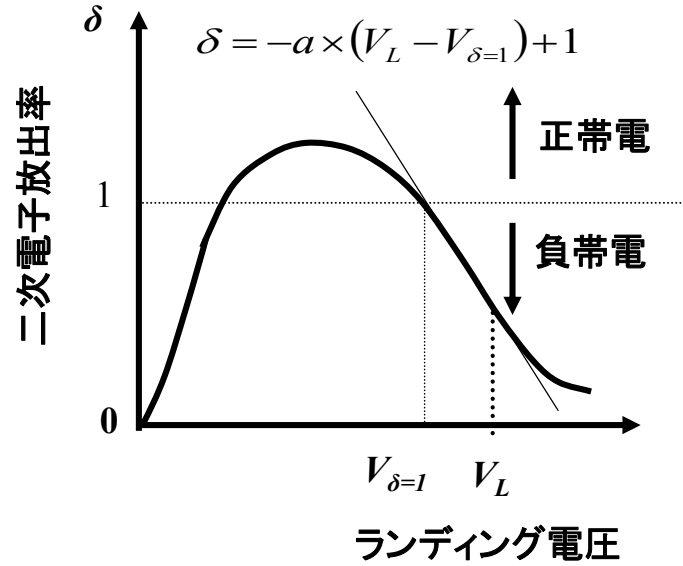


図 3-8 ランディング電圧に対する二次電子放出特性

$V_s = 0$  の場合にはこの式 (3.1) の速度で試料に到達するが、表面電位  $V_s$  ( $< 0$ ) における試料表面到達時の電子速度  $v_L$  は、

$$v_L = \left( \frac{2e|V_{acc} - V_s|}{m} \right)^{1/2} \quad (3.2)$$

と表すことできる。これは、相対的に加速電圧  $V_{acc}$  が小さくなっていることと等価であり、単位時間あたりの電荷蓄積量が減少する<sup>[11]</sup>。そして、 $V_{acc} - V_s$  が  $V_{\delta=1}$  に近づくと、二次電子放出比が 1 となり、試料は飽和帯電電位に達して平衡安定する。蓄積電荷密度  $Q$  は、入射電流密度  $I_p$  と二次電子放出比より式 (3.3) で表される。

$$\frac{dQ}{dt} = I_p(1 - \delta_t) \quad (3.3)$$

ここでは、二次電子放出比が時間で変化すること明示するため、 $\delta_t$  として表現し

た。式 (3.3) は式 (3.4) に変換される。

$$\frac{dQ}{dt} = C \frac{dV_s(t)}{dt} \quad (3.4)$$

$V_s(t)$  は帯電電位であり、 $C$  は静電容量である。 $\delta_t$  は、図 3-8 の  $V_L$  と  $V_{\delta=1}$  の間の条件で直線近似すると、式 (3.5) で表される。

$$\delta_t = -a(V_L - V_{\delta=1}) + 1 \quad (3.5)$$

ここで、 $a (>0)$  は 1 次関数の傾きを表している。ランディング電圧  $V_L$  は、加速電圧と帯電電位の電位差で表されるので、

$$V_L = V_{acc} - V_s(t) \quad (3.6)$$

となる。式 (3.4) から式 (3.6) を式 (3.3) に代入すると、

$$C \frac{dV_s(t)}{dt} = -a \cdot I_p \{V_s(t) - (V_{acc} - V_{\delta=1})\} \quad (3.7)$$

式(3.7) の微分方程式を解くことにより、

$$V_s(t) = (V_{acc} - V_{\delta=1})\{1 - \exp(-\alpha t)\} \quad (3.8)$$

を得る。ただし、 $\alpha = a \cdot I_p / C$  であり、初期条件  $V_s(0) = 0$  である。帯電電位  $V_s(t)$  は、提案した帯電メカニズムより理論的に導出することができた。 $V_s(t)$  は、はじめ急激に立ち上がり、後に飽和する指数関数で表現される。飽和帯電電位は、加速電圧に依存することがわかる。

### 3-3-2 帯電電位制御の測定と考察

電子ビーム照射によるチャージアップを利用した帯電方式が、電子写真でよく使われる  $-500 \text{ V} \sim -1 \text{ kV}$  程度の帯電電位を得ることが可能であるかを実験で確認し、物理モデルの妥当性と帯電電位制御の可能性を検証した。ビーム照射条件は、加速電圧  $V_{acc} = -2 \text{ kV}$ 、入射電流密度  $I_a = 80 \text{ pA/mm}^2$ 、照射領域が約  $4 \text{ mm}$  角である。照射領域は、市販の表面電位計である Trek 社製 Model344 の適用範囲内での使用が可能とするために、約  $4 \text{ mm}$  角に設定した。表面電位計のプロー

ブは、電子ビーム照射領域から約 10 mm 程度離れた場所に配置しており、帯電後に試料の帯電領域をステージでプローブの中心に移動させてから、試料の帯電電位を測定した<sup>[12]</sup>。

電子ビームの照射時間に対する帯電電位の測定結果を図 3-9 に示す。帯電電位は、電子ビーム照射直後に急激に立ち上がり、時間の経過につれ次第に変化が小さくなり飽和する傾向が実測でも確認できた。これらの実験結果は、帯電の物理モデルを肯定する結果と判断できる。帯電電位  $V_s(t)$  は、式 (3.8) を変形して式 (3.9) で表される。

$$V_s(t) = V_d\{1 - \exp(-\alpha t)\} \quad (3.9)$$

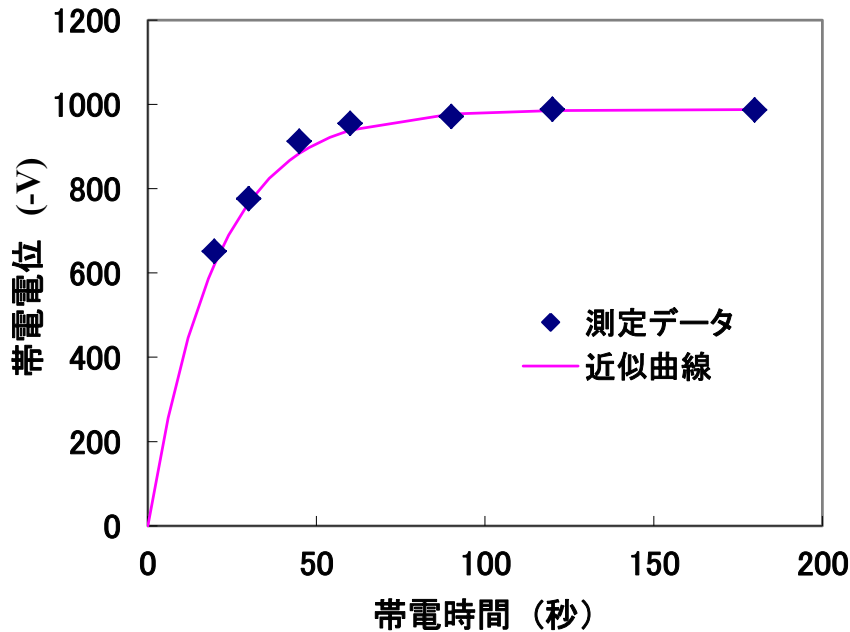


図 3-9 電子ビームの照射時間に対する帯電電位の測定結果：加速電圧  $V_{acc} = -2$  kV

$V_d$ は飽和帯電電位を表し、 $\alpha$ は立ち上がり速度を表す。照射電流密度  $I_a$  が大きいほど、 $\alpha$ は大きくなって早く収束する。実際に図 3-9 の測定結果は、式 (3.9) の近似曲線と重なり合っている。このときの実測  $\alpha$  は 0.05 (1/sec) であった。感光体試料の加速電圧に対する二次電子放出特性は研究事例がないため、1 次関数の傾き  $a$  は正確に測定することはできない。感光体の静電容量は  $C=100$  (pF/cm<sup>2</sup>) であり、1 次関数の傾き  $a$  は  $V_L - V_{\delta=1} = 1$  kV のとき  $\delta = 0.5$  と推定すると  $a = 0.5 \times 10^{-3}$  (1/V) であるため、式 (3.9) より導かれる  $\alpha$  は、 $\alpha = a \cdot I_p / C = 0.04$  (1/sec) である。理論式からの導出結果は、実測結果とよい一致を示していることがわかった。

### 第3章：静電潜像の形成

図 3-10 は、加速電圧を変更して飽和帯電電位  $V_d$  を測定した結果である。測定データと直線近似はほぼ重なっており、加速電圧と飽和帯電電位  $V_d$  は、直線関係が成立することがわかる。式 (3.8) と式 (3.9) より、電子ビームの加速電圧  $V_{acc}$  と飽和帯電電位  $V_d$  には、近似的に以下の関係式が成立する。

$$V_d = V_{acc} - V_{\delta=1} \quad (3.10)$$

$V_{\delta=1}$  は、基本的に表面の材質に固有の特性であるため、あらかじめ測定しておくことが可能である。したがって、帯電電位は、加速電圧と照射電流密度を適切に設定することで制御することが可能である。

図 3-10 に示すように、式 (3.10) から算出された理論直線は、測定データと比較して相関性は高いものの、傾きにややずれがある。この要因としては、帯電領域が 4 mm 角と小さいことによる電位計測誤差の可能性もあるが、電位が高くなると感光体がリーク電流を生じて、帯電電位を減少させている可能性の方が高いと考えられる。実験でよく用いる狙いの帯電電位 -500 V ~ -800 V の範囲では問題のない範囲であると判断している。高電位部については、測定データからキャリブレーションすることで精度を上げることができる。

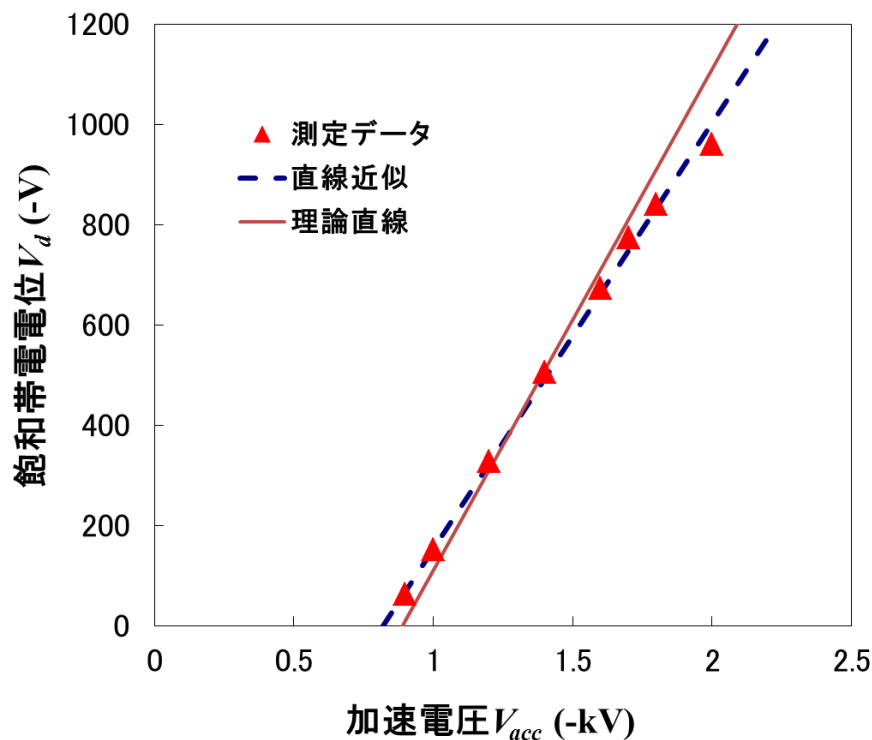


図 3-10 電子ビームの加速電圧に対する飽和帯電電位の測定結果

### 3-4 露光手段：静止ビーム露光

露光手段は、静電潜像を形成する上で必要不可欠な工程である。静止ビーム露光は、前章の実験検証でも用いた最も基本的な構成である。本節では、静止ビーム露光についてレーザービームスポットを計測するビームスポット露光と、感光体の解像度を評価するマスクパターン露光方式について述べる。

#### 3-4-1 ビームスポット露光

図 3-11 は、静止ビーム露光光学系の最もシンプルなレイアウトであり、これにより露光光学系を説明する。感光体に関して感度を持つ波長の半導体レーザーから放射された光束は、コリメートレンズにより平行光束化され、アパーチャ、結像レンズを通過して結像レンズの焦点距離の位置を像面として、集光する構成となっている。レーザービームは、アパーチャサイズを変えることで、所望のビームスポット径で集光される。

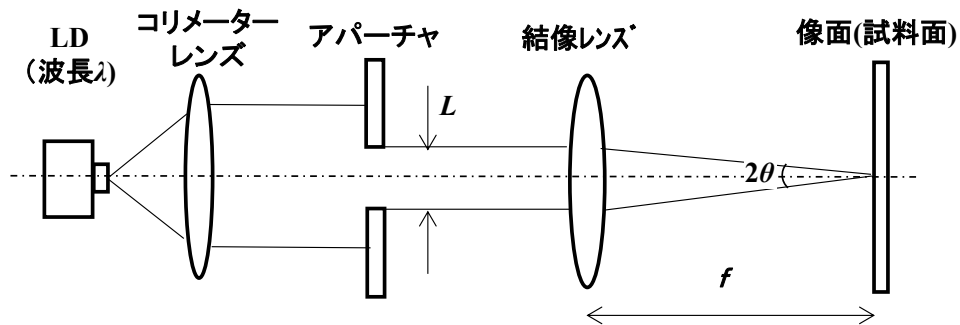


図 3-11 静止ビーム露光光学系のレイアウト

レーザービームが、理想的なガウシアンビームであるとき、ビームウエスト半径  $w_0$  は、ビーム広がり半角  $\theta$ 、レーザー波長  $\lambda$  より、

$$w_0 = \frac{\lambda}{\pi\theta} \quad (3.11)$$

という、シンプルな式で求められる<sup>[13]</sup>。図 3-11 でアパーチャサイズを  $L$  (mm)、結像レンズの焦点距離を  $f$  (mm) とすれば、ビーム広がり半角  $\theta$  は、

$$\tan \theta = \frac{L}{2f} \quad (3.12)$$

である。このため、像面上でのビームスポットの直径  $BS (=2w_0)$  は、

$$BS = \frac{2\lambda}{\pi \tan^{-1}\left(\frac{L}{2f}\right)} \quad (3.13)$$

で導出される。このとき、 $\theta \ll 1$  なので、 $\tan \theta \doteq \theta$  とすることができ、

$$BS = \frac{4 \cdot \lambda \cdot f}{\pi \cdot L} \quad (3.14)$$

が成立する。したがって、 $\lambda=655 \text{ nm}$ 、 $f=60 \text{ mm}$  とすると、 $L=1 \text{ mm}$  角のとき、 $BS=50 \text{ }\mu\text{m}$  と算出され、 $L=2 \text{ mm}$  角のとき、 $BS=25 \text{ }\mu\text{m}$  と算出される。レーザービームは理想的なガウシアンビームから少しずれているものの、一般的にビームスポット径がアパーチャサイズに逆比例する関係は成立しており、アパーチャサイズを設計することで、所望のビームスポット径を像面上に作り出すことができる。前章の図 2-16 (a) は  $L=1 \text{ mm}$  角であり、図 2-16 (b), (c) は  $L=2 \text{ mm}$  角を用いて潜像を形成した結果である。

### 3-4-2 マスクパターンを用いた投影露光

図 3-12 にマスクパターンを用いた投影露光の光学レイアウトを示す。この投影露光の構成は、ビームスポット露光と比べて、アパーチャと結像レンズの間にマスクパターンが設置されている点異なる。半導体レーザーから放射された光束は、コリメートレンズにより平行光束化され、アパーチャにより光束径を規制されてマスクを照射する。マスクを通過した光束は、結像レンズの作用により、マスクの有するマスクパターンの像を像面上に結像する。ビームスポット露光のときは、結像レンズの焦点距離位置を像面としていたのに対し、マスクパターンの位置と像面とが、結像レンズに対して共役関係（点線）となるように配置した。

マスクパターンから結像レンズまでの距離を  $a$ 、結像レンズから像面までの距離を  $b$  としたとき、結像レンズの焦点距離  $f$  は、近軸結像公式<sup>[14]</sup>より、

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (3.15)$$

が成立する。試料は、式 (3.15) の条件を満たす像面位置に配置される。このと



### 第3章：静電潜像の形成

き、マスクパターンは像面上に  $b/a$  倍で投影される。このようにして、マスクパターンに対応する露光パターンが、感光体試料面に静電潜像として形成可能となる。

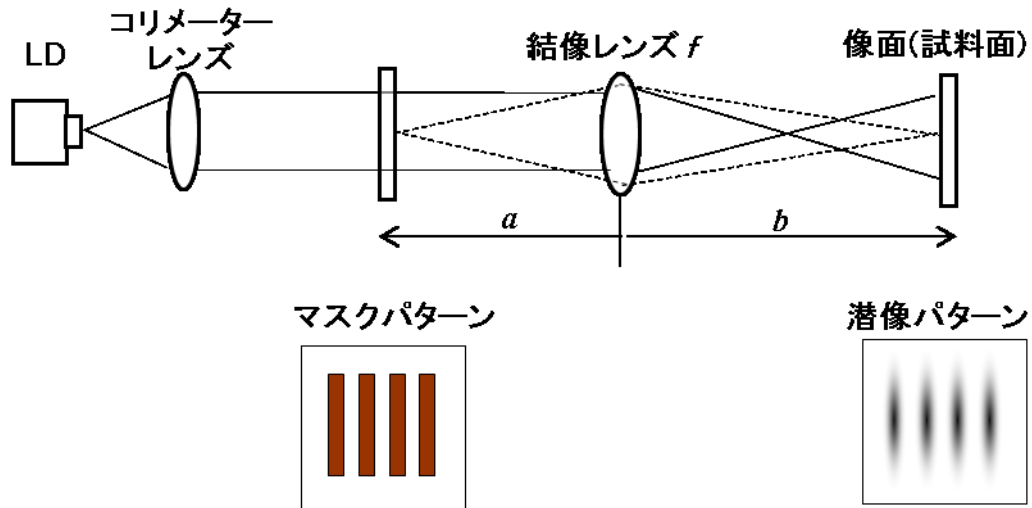


図 3-12 マスクパターンを用いた投影露光の光学レイアウト：垂直入射条件

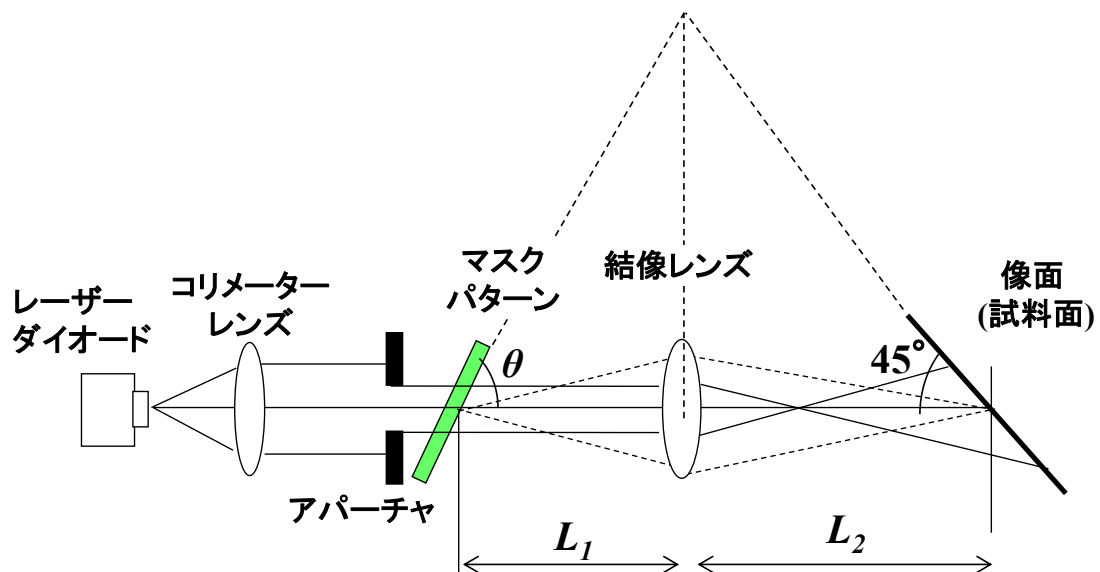


図 3-13 シャインプルーフの原理を用いた投影露光のレイアウト：斜め 45 度入射条件

図 3-13 は、像面が光軸に対して 45 度傾斜した投影露光のレイアウトである。図 2-6 の実験装置で示した通り、露光光学系は電子ビームと干渉しないように試料面に対して、斜めから入射する構成となっている。したがって、像面は結像レンズ主面に対して 45 度傾いた構成としている。像面が傾いているため、フォ

### 第3章：静電潜像の形成

一カス位置が近距離側と遠距離側で異なる。像面とレンズ主面を平行ではない配置にすると、物体面は平行ではなくなる。このため本研究では、図 3-13 に示すシャインプルーフの原理を満たす光学系を採用した。像面・レンズ主面・物体面が同一直線上で交わるというのがシャインプルーフの原理である。いいかえると、物体面の角度は、レンズ主面・像面が同一直線上で交わる位置に、物体面をもまた同じ直線で交わるように、傾けて配置するというものである。

像面が結像レンズ主面に対して  $\alpha$  傾いている場合、物体距離  $L_1$ 、像距離  $L_2$  とすると、像面傾き角  $\alpha$  とマスクパターンの角度  $\theta$  には、

$$L_1 \tan \theta = L_2 \tan \alpha \quad (3.16)$$

の関係式が成立する。物体面であるマスクパターンの角度  $\theta$  は、像面傾き角  $\alpha$  が 45 度であるため、 $L_1$  と  $L_2$  の比で決定される。結像レンズの光軸に対して垂直な方向の結像倍率  $\beta = L_2 / L_1$  であり、この倍率に応じたマスクパターン像が結像される。以上のように結像レンズを配置することにより、マスクパターンと像面は共役関係となる。マスクパターン露光方式は、マスクパターンを変更するだけで、様々な 2 次元の静電潜像を形成することが可能である。

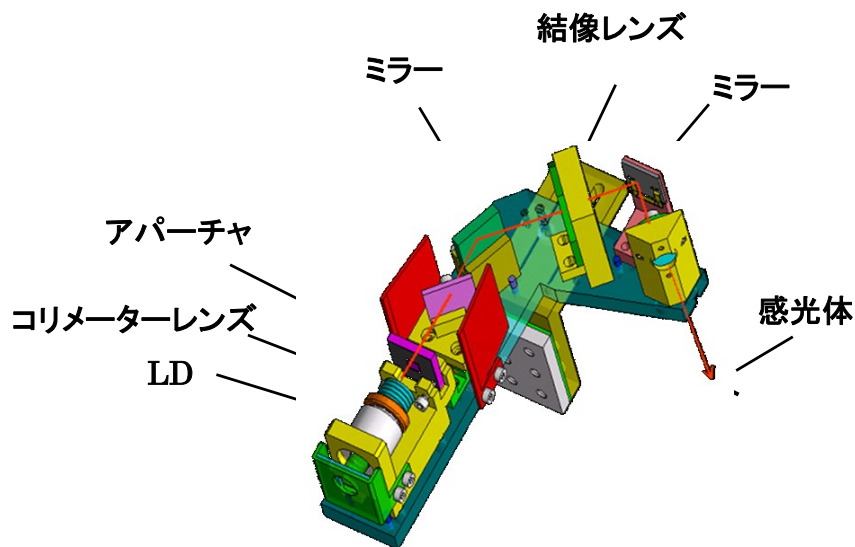


図 3-14 露光光学系の 3D レイアウト

図 3-14 は、露光光学系の 3D レイアウト<sup>[15]</sup>である。前述のように、静止ビーム露光とマスクパターン露光は多くの部品を共有化できる。静止ビーム露光光学系にマスクパターンを設置し、結像レンズ部品を交換すれば、他の光学部品はそのまま使える。したがって、ひとつの光学系で共用することが可能である。

### 3-4-3 マスクパターンによる潜像観察結果

マスクパターンを用いた投影露光が、狙い通りの静電潜像を形成しているか確認実験を行った。図 3-15 は、感光体の解像度評価のマスクパターンに用いた分解能テストターゲット (USAF1951) である。このマスクパターンは、ネガティブタイプであるため、明部がシールド領域であり、ダーク部が透過する領域を示す。

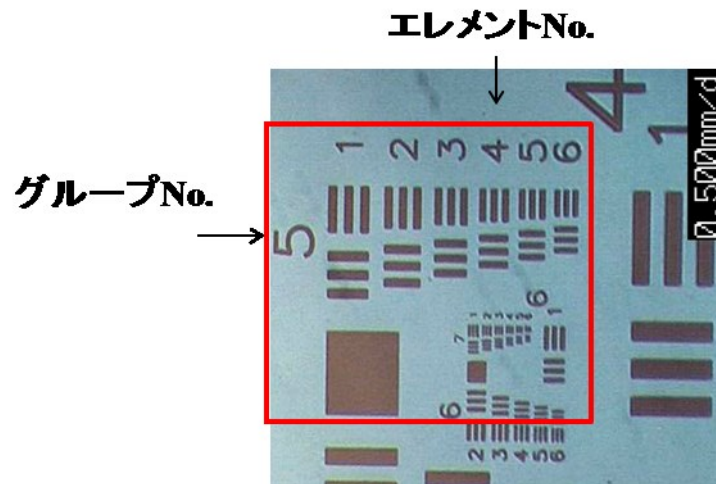


図 3-15 マスクパターンに用いた分解能テストターゲット

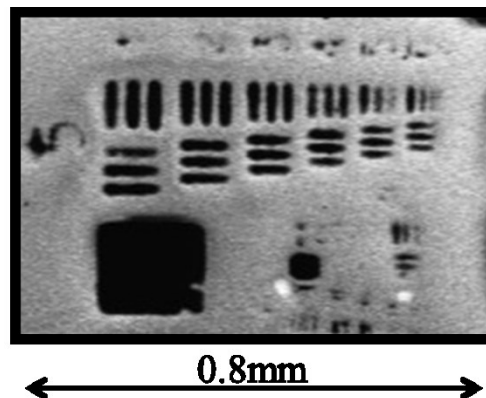


図 3-16 マスクパターンによる潜像観察結果

このマスクパターンによる投影露光<sup>[10]</sup>による潜像観察結果を図 3-16 に示す。図 3-15 の枠で囲まれた解像度評価パターンが、静電潜像として測定領域で焦点が合った状態であることが確認された。このマスクパターン露光方式の実現により、様々な感光体の解像度を評価することが可能となる。

### 3-5 露光手段：走査ビーム露光

前節での露光手段は静止ビーム露光方式であったため、実際の電子写真プロセスで感光体上に形成されるドットやラインパターンといった走査光学系での様々な静電潜像を形成することができなかった。そこで新たに、実機の電子写真で用いる走査光学系<sup>[16-18]</sup>と同等の潜像形成を可能とするレーザー走査光学ユニット（Laser Scanning optical Unit, LSU）を開発<sup>[19,20]</sup>し、計測装置に搭載した。

#### 3-5-1 レーザー走査光学ユニット (LSU) を用いた露光方式

図 3-17 に LSU のモデル図<sup>[20]</sup>を示す。LSU は、光源ユニット、走査レンズ、同期検知手段、光偏向器であるポリゴンミラー等で構成される。半導体レーザーを含む光源ユニットから射出したレーザービームは、コリメーターレンズ、シリンドラレンズを介してポリゴンミラーに導かれる。レーザービームは、ポリゴンミラーが回転駆動することにより偏向走査され、複数枚の構成からなる走査レンズにより感光体上に結像される。

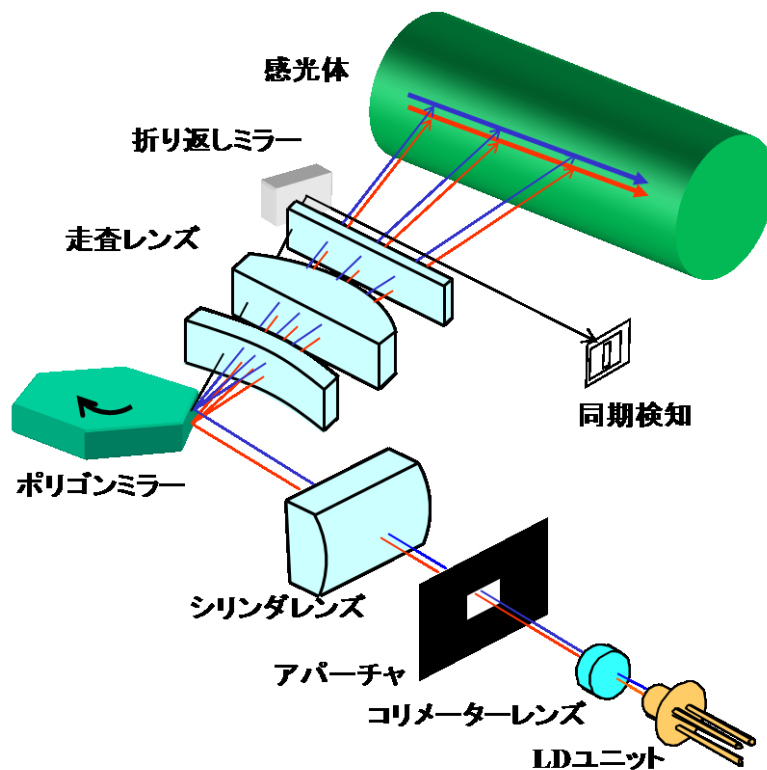


図 3-17 レーザー走査光学ユニット (LSU)

### 第3章：静電潜像の形成

走査レンズは  $f\theta$  特性を有しており、ポリゴンミラーが一定速度で回転しているときに、レーザービームは像面に対して等速に移動する構成となっている。また、ビームスポット径も一定に走査可能な設計となっている。開発した LSU は、1-2-10 項で述べた電子写真にレーザー走査光学系の光学部品とその機能を網羅している。

図 3-18 は、LSU を実験装置に組み込んだ断面図である。LSU は真空チャンバの鉛直軸に対して 45 度の方向に配置した構成となっている。LSU は、ポリゴンミラーを回転駆動するポリゴンモータ起因の振動や電磁場ノイズが電子ビームの軌道に影響を与えないように、電子ビーム軌道位置から遠ざけて真空チャンバの外に配置した。レーザービームの入射窓は、光学的に高精度平面であり、なおかつ、真空封止の機能を有している。

LSU は試料に対して、45 度入射の構成であるため、副走査方向のビームスポット径は、垂直入射より  $\sqrt{2}$  倍大きくなる。このため、アパーチャサイズが偏心した像面上に所望のビームスポット径で集光するように設計されている。

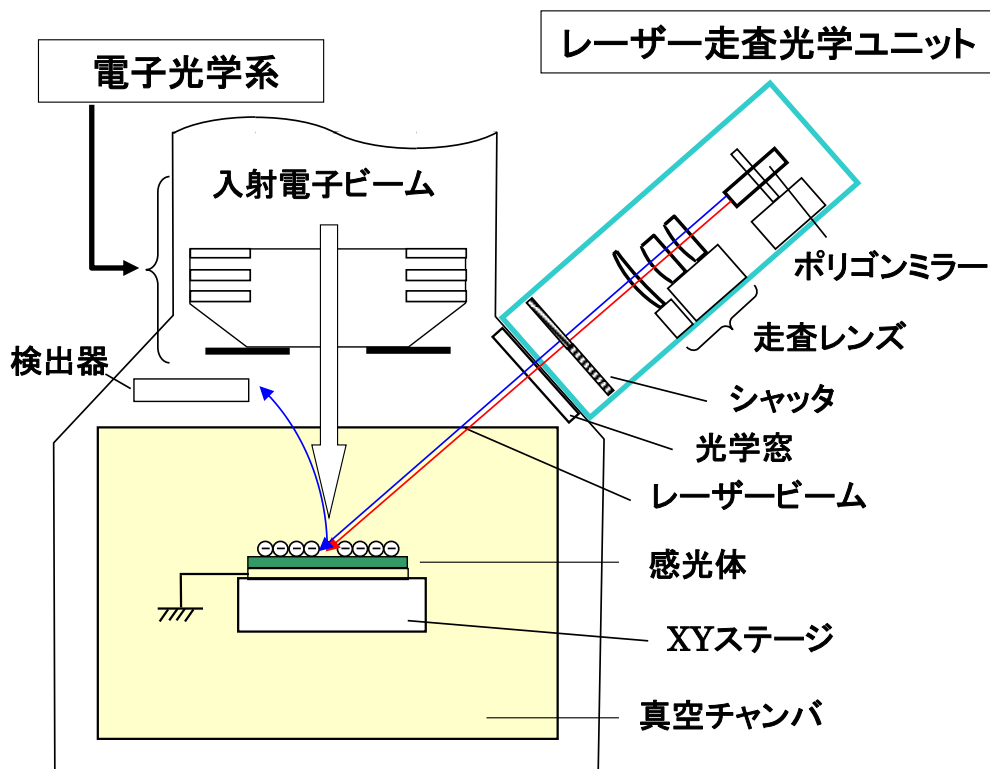


図 3-18 レーザー走査光学ユニット (LSU) を搭載した装置断面図

LSU の主な仕様を表 3-2 に示す。試料を回転する機構は持たせていないが、副走査方向には、光源をマルチビームとすることで、複数チャンネル分の任意画像パターンを形成することが可能となっている。

表 3-2 レーザー走査光学ユニット (LSU) の主な仕様

レーザー波長	655 nm
ビーム数	2
画素密度	600, 1200 dpi
最大露光エネルギー密度	10 mJ/m <sup>2</sup>
デューティ	1/32 画素ステップ
露光開始位置	1/16 画素ステップ

マルチビームの副走査ピッチは切り替え可能であり、600/1200 dpi あるいはそれ以上の画素密度にも対応可能である。露光エネルギー密度、デューティ、露光開始位置およびドットパターンなどの露光パラメータは、外部からのLDドライバを駆動制御することにより、適切なタイミングで設定可能となっている。

### 3-5-2 半導体レーザーの駆動制御

半導体レーザー (LD) を適切なタイミングで、駆動制御する LD 駆動制御装置について説明する。LD 駆動制御装置は、図 3-19 に示されるように、基準クロック生成回路、画素クロック生成回路、光源変調データ生成回路、光源選択回路、露光タイミング信号生成回路、および同期タイミング信号発生回路を備えている。

基準クロック生成回路は、制御装置全体の基準となる高周波クロック信号を生成する。画素クロック生成回路は主に位相同期回路 (Phase Locked Loop, PLL) からなり、同期信号 s1 および基準クロック生成回路からの高周波クロック信号に基づいて、画素クロック信号を生成する。画素クロック信号は高周波クロック信号と同一で、位相は同期信号 s1 と一致している。したがって、画素クロック信号に画像データを同期させることで、走査ごとの露光位置を揃えることができる。ここで生成された画素クロック信号は、光源駆動回路に供給されるとともに光源変調データ生成回路に供給され、露光データ s4 のクロック信号として使われる。光源変調データ生成回路では、画像処理ユニットからの画像パターン情報を元に、最適な潜像が形成されるように、画像データを出力信号に変換する。光源選択回路は、光源が複数の場合に用いる回路である。走査光の像面が走査終端に達すると、光源選択回路は次の走査の開始を検知するのに用いられる発光部を選択して、選択された発光部を指定する信号を出力する。この光源選択回路の出力信号 s3 は、前記駆動情報の 1 つとして光源駆動回路に供給される。また、s2 は露光タイミング信号生成回路の出力信号 (LGATE 信号) を示す。図 3-20 に画像出力の動作時期を示すタイミングチャートを示す。

### 第3章：静電潜像の形成

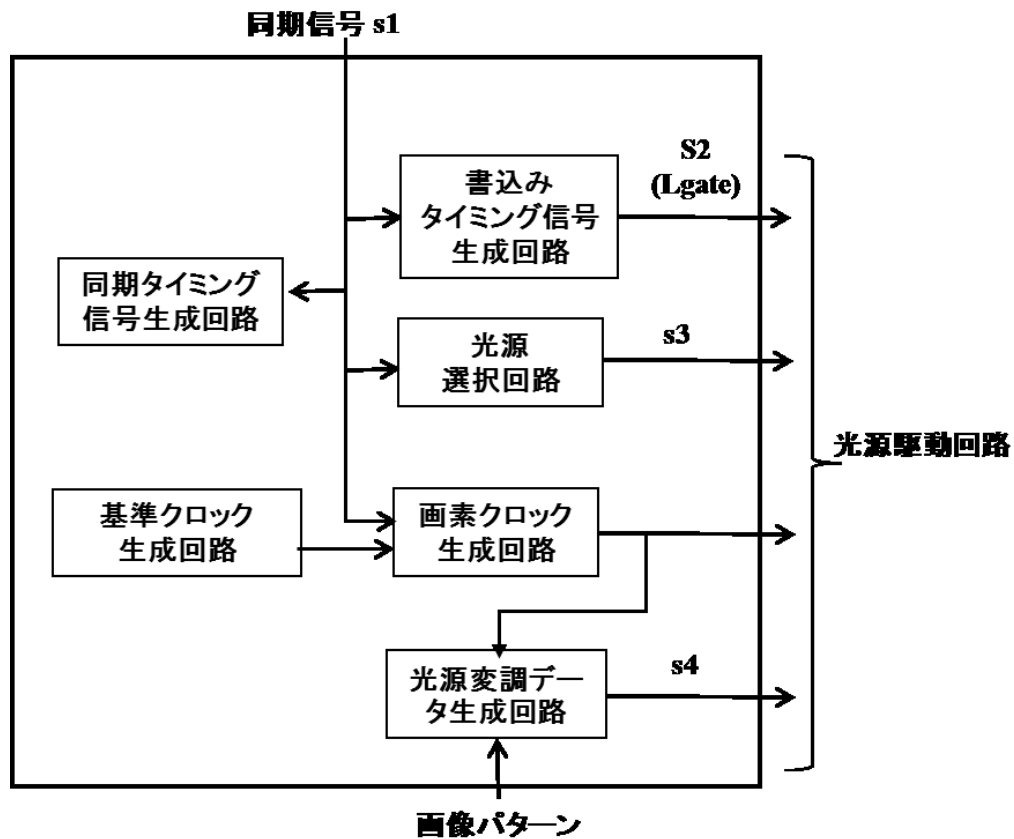


図 3-19 LD 駆動制御装置の回路構成

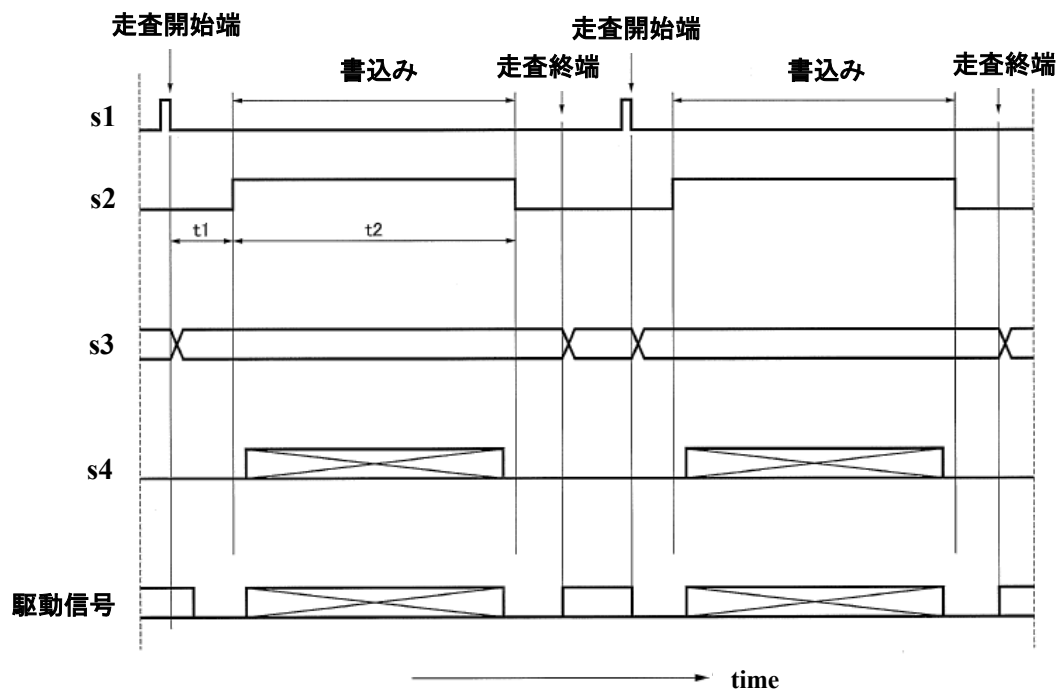
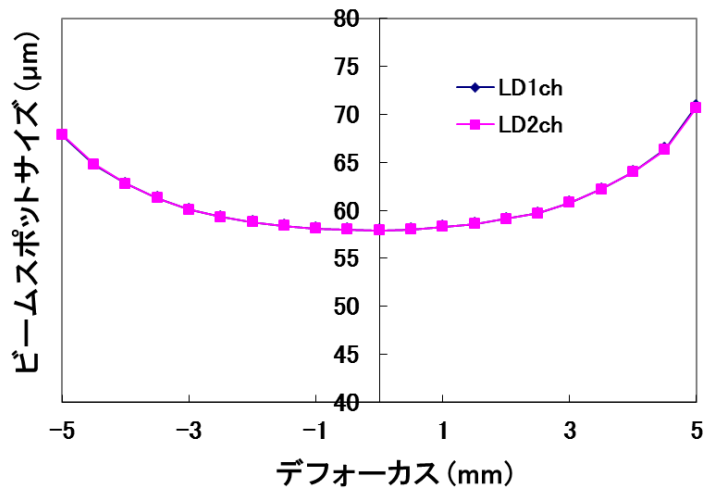


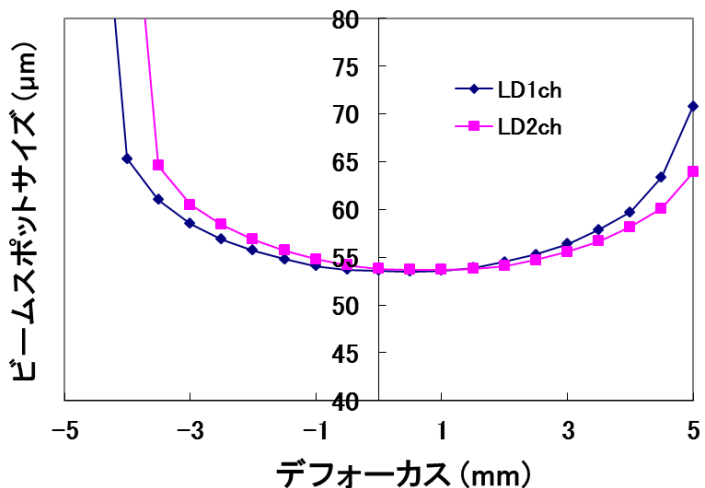
図 3-20 画像出力の動作時期を示すタイミングチャート

### 3-5-3 レーザー走査光学ユニット (LSU) の光学特性評価と考察

走査ビーム露光の基本特性には、ビームスポット径が揃っている静的特性と、露光パルスが揃っている動的特性がある。これらの基本特性について動作を検証した。図3-21は、開発したLSUのビームスポット径測定結果の一例である。横軸は感光体位置を原点とした光軸方向のデフォーカス量であり、縦軸は光軸垂直方向のビームスポット径計測結果である。感光体面での副走査方向ビームスポット径は入射角度分補正することで得られる。主走査方向（図3-21 (a)）は2つのビームがほとんど重なっている。副走査方向（図3-21 (b)）は若干ずれがあるものの、実使用上問題ない性能であることが確認された。



(a) 主走査方向ビームスポット径の測定結果



(b) 副走査方向ビームスポット径の測定結果

図 3-21 レーザー走査光学ユニット (LSU) のビームスポット径測定結果



### 第3章：静電潜像の形成

走査ビーム露光の動的検証では、繰り返し動作による光出力値のばらつきを評価した。像面光量は  $0.54\text{ mW}$ 、点灯時間は、画素密度  $600\text{ dpi}$  で1画素（デューティ 100%）に相当するパルス幅  $25\text{ ns}$  とし、半導体レーザー（LD）を点灯させたときの、フォトダイオード（PD）の出力信号を測定した。

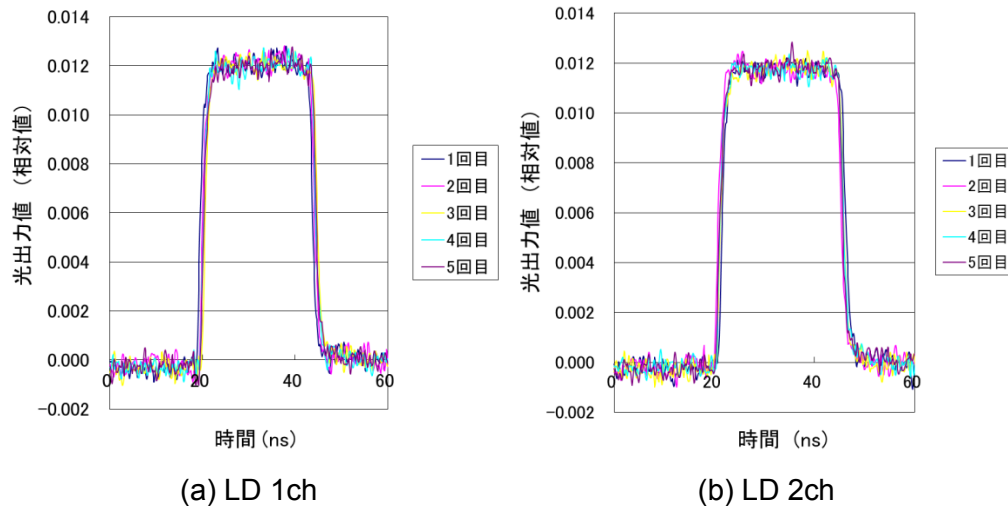


図 3-22 走査ビーム露光における光応答波形

図 3-22 は、走査ビーム露光における光応答波形の実験結果である。5 回の繰り返し測定を評価したところ、パルス幅のばらつきは、LD の 1ch、2ch とともに  $0.4\%$ 、また光出力の平均値のばらつきは、LD の 1ch が  $1.0\%$ 、2ch が  $1.6\%$  という結果であった。パルス幅のばらつきは十分に小さいといえる。

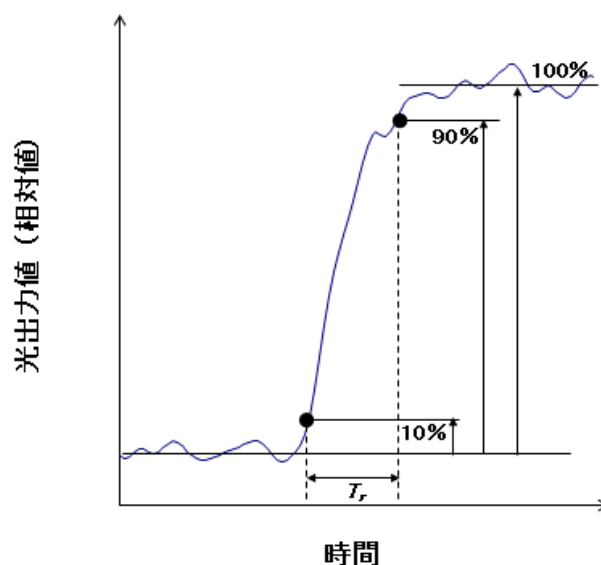


図 3-23 走査ビーム露光における立ち上がり特性（ $T_r$  値）評価の模式図

また、図 3-22 の結果を用いて、走査ビーム露光における立ち上がり特性を評価した。図 3-23 は、走査ビーム露光における立ち上がり特性 ( $T_r$  値) 取得の模式図である。光出力が OFF から ON に立ち上がるときの 10% から 90% の経過時間を  $T_r$  としたとき、LD の 1ch が 1.8 ns、2ch が 2.0 ns という結果であった。光出力が ON から OFF になるときの立ち下がり特性も、ほぼ同様の結果が得られた。レーザー走査光学ユニット (LSU) は、600 dpi 1 画素の 1/10 以下の高速な立上り・立下り特性を備えていることが実験により得られた。以上により、LSU は潜像評価に使用可能なパルス基本特性を備えていることを確認した。

#### 3-5-4 半導体レーザーのオフセット発光の遮光機能

半導体レーザー (LD) は、基準以上の駆動流を与えることでレーザー発振をするが、光応答性を高めるため、光の消灯のタイミングでも基準以下の一定の駆動電流 (バイアス電流) を常に供給している。バイアス電流があると LED 発光 (オフセット発光) が起こる。すなわち、半導体レーザーは消灯の状態であっても発光していることを意味する。

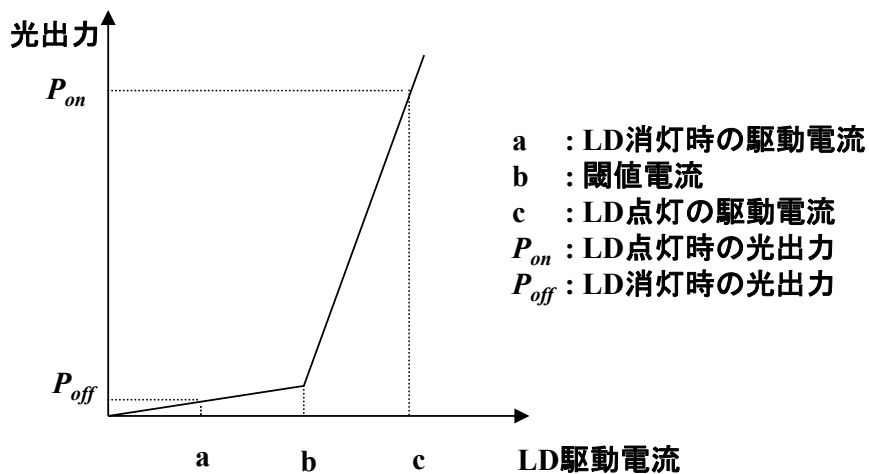


図 3-24 LD 駆動電流と光出力の関係

図 3-24 に、LD の駆動電流と光出力の関係を示す。 $a$  が消灯時の駆動電流、 $b$  がレーザー発振をする基準電流、そして、 $c$  が LD 点灯の駆動電流である。光出力は  $P_{on}$  を LD 点灯時の値、 $P_{off}$  を LD 消灯時の値で示している。駆動電流が小さい場合には、LED 発光で微弱であり、駆動電流が基準電流に達するとレーザー発振をする。LD 消灯時の露光量は、LD 点灯時の露光量に比べて 1/100～1/1000 程度であり、通常では問題になることはほとんどない。このため一般的な使用では、光応答

### 第3章：静電潜像の形成

性を重視して、LD消灯時でもバイアス電流を流しつづけている。

しかしながら、本装置に組み込んだレーザー走査光学ユニット (LSU) では、感光体の同じ場所を繰り返し走査することになるので、長時間照射されると積分光量が増加し、感光体の必要露光量に達すると、静電潜像が形成されてしまう。オフセット発光量は、レーザー発光量の1/100の光量だとしても、100回走査すれば潜像形成に十分な露光量に達する。1回の走査時間を250  $\mu\text{s}$ とすれば、必要露光量に達する時間は、25 msという短い時間である。この時間は、ポリゴンモータが回転し始めてから定速になり、LD露光までの待機時間に比べて十分短いものである。所望の静電潜像を形成するためには、感光体がオフセット発光で暴露される時間を1 ms以下に抑える必要がある。

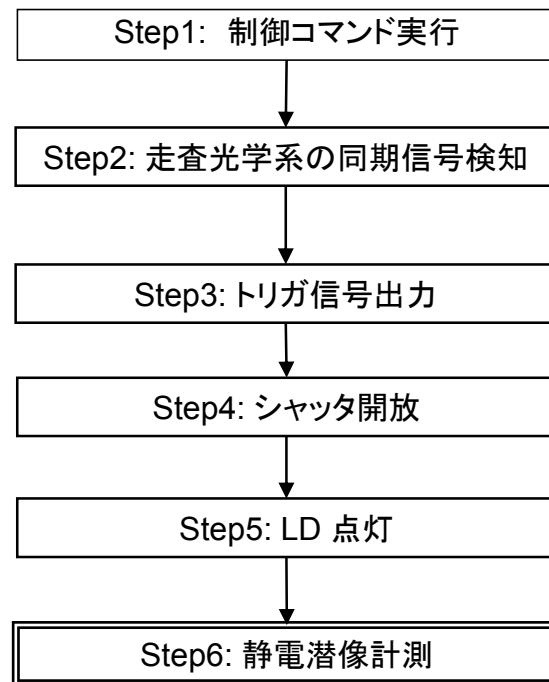


図 3-25 制御系の動作フロー

そこで、本研究では、半導体レーザーを用いて所望の静電潜像を形成するにあたり、消灯時のバイアス電流にともなうオフセット光の試料への照射時間を極力抑えるため、シャッタ機能を搭載した。露光前はシャッタを閉じて光束が通過しないような構成とし、露光時はシャッタを開けて光束が通過するように構成にすることで、感光体がオフセット発光に対して暴露されなくすることができる。シャッタ手段としては、カメラのシャッタに使用されるような、複数のシャッタ羽根を用いて中心から周辺に開閉するメカニカルシャッタを用いた。

### 第3章：静電潜像の形成

LDのバイアス電流によるオフセット発光の影響を低減させるためには、静電潜像形成のために露光させる時間だけシャッタが開いている状態が理想的である。メカニカルシャッタは命令を与えてから実際に開くまでに時間のずれが生じる。いま、トリガ信号を検知してから、シャッタが開き始める時間を $T_d$ 、シャッタが開き始めてから、レーザー光の有効径相当が開くまでの時間を $T_r$ とすれば、シャッタはトリガ出力から $T_d + T_r$ の時間だけ遅れて開く。ここでの問題は、 $T_d + T_r$ 時間だけで1 msを超えてしまうことにある。この応答性の問題を解消するためには、レーザー露光のタイミングとシャッタ開閉のタイミングを連動させればよい。レーザー露光のタイミングは、走査光学系の同期信号によって決定されるため、メカニカルシャッタを走査光学系の同期信号に連動して開放できれば、シャッタの開放はレーザー露光のタイミングと揃えることができる。

すなわち、レーザー露光の点灯開始時刻は、走査光学系の同期信号を受け取ってから、メカニカルシャッタを開放させるトリガ出力をした後、メカニカルシャッタが開放になるまでの時間に相当する $T_d + T_r$ 時間だけ遅らせる構成としている。この結果、感光体がオフセット発光で暴露されることなく、所望の静電潜像を形成することが可能となった。

制御系の動作フローを図3-25に示す。動作ステップとしては、測定のための制御コマンドが実行されたあと (Step1)、走査光学系の同期信号を検知し (Step2)、その検知信号をシャッタ開放のためのトリガ信号として出力する (Step3)。つぎに、シャッタが走査光学系の有効径にまで開放されたタイミングにあわせて (Step4)、半導体レーザーは点灯し (Step5)、試料に静電潜像を形成した後で、静電潜像が計測される (Step6)。

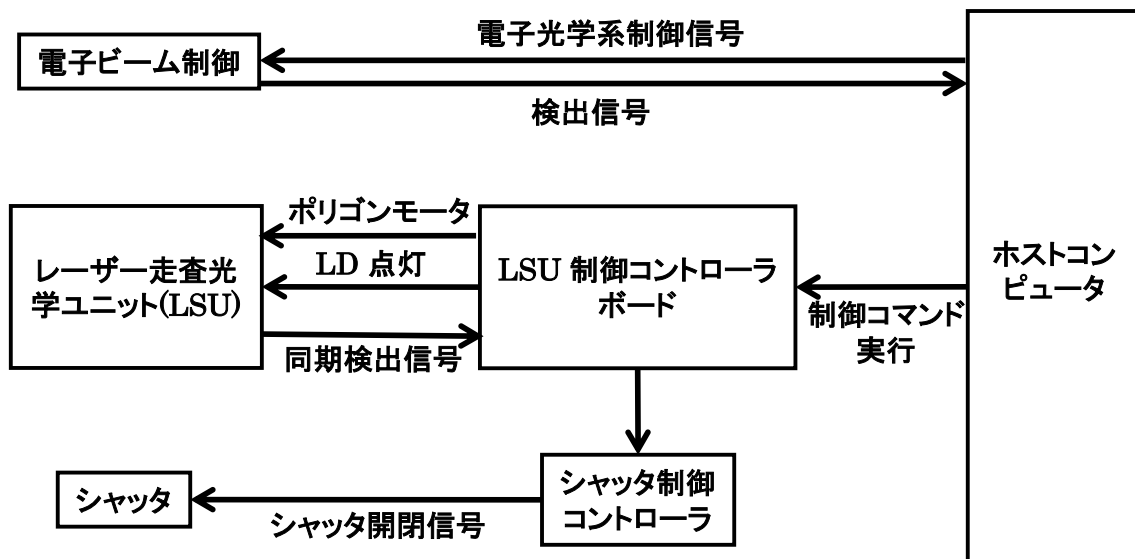


図 3-26 制御系の構成

制御系の構成を図3-26に示す。ホストコンピュータからは、電子ビーム制御装置に電子光学系を制御する信号が送られ、電子ビーム制御装置からは、検出器からの検出信号がコンピュータに出力される。コンピュータはまた、LSU制御ボードに対して走査ビームの露光条件設定のデータを送信し、制御ボードは各種の条件設定を行う。LSU制御ボードは、LSUに対して、LDおよびポリゴンミラー制御信号を出力して、同期検出信号が入力される。そして、LSU制御ボードは同期検出信号を元に、シャッタ制御コントローラにトリガ信号を送る。シャッタ制御コントローラは、トリガ信号に基づきシャッタに開閉信号を送ることで、シャッタの開閉を制御することができる。

#### 3-5-5 メカシャッタによるオフセット発光の遮光の効果

図3-27は、メカシャッタによるオフセット発光の遮光の効果を示す潜像測定結果である。図3-27 (a) の実験は、25 ms間オフセット発光された後にLD点灯したものである。LDチャンネル当たりのオフセット光量は1/1000程度と小さいが、オフセット発光による潜像がライン状に形成されていることが明瞭にわかる。図3-27 (b) は、メカシャッタの開放にあわせて適切なタイミングで露光された潜像であり、正しく潜像を計測できていることを示している。

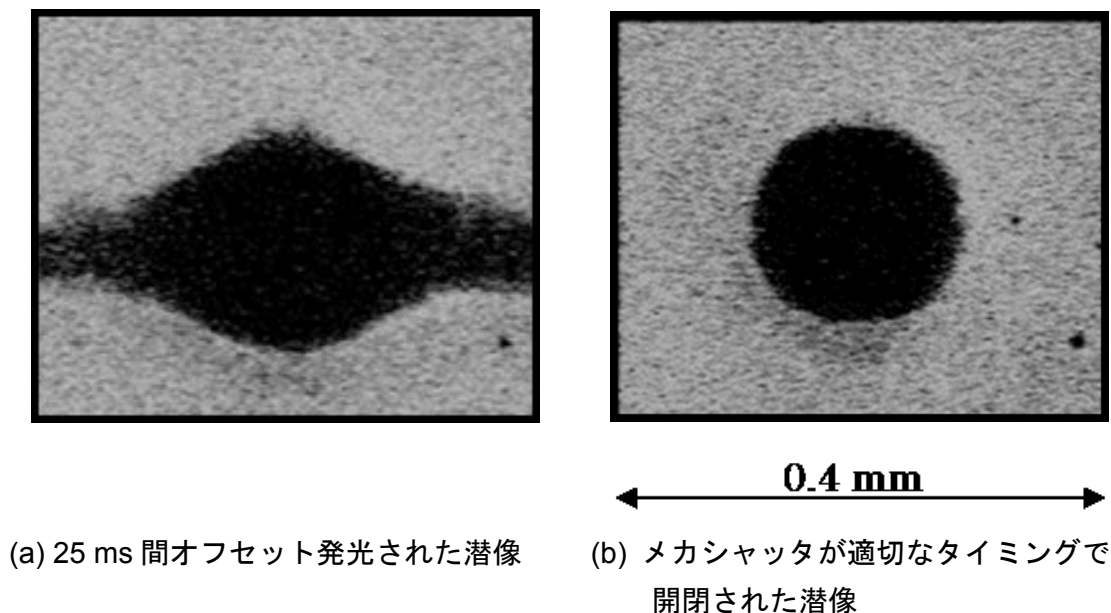


図 3-27 メカシャッタによるオフセット発光の遮光の効果

### 3-5-6 走査ビーム露光による潜像測定結果と考察

図 3-28 は、画素密度 600 dpi の走査ビーム露光によって潜像形成された静電潜像<sup>[20,21]</sup>の観察結果を示したものである。試料は膜厚 30  $\mu\text{m}$  のフタロシアニン系有機感光体を用い、帯電電位は約 $-800\text{ V}$  に設定した。露光条件としては、ビームスポット径 H60  $\mu\text{m}\times\text{V}80\text{ }\mu\text{m}$ 、デューティ 50%であった。孤立ドット、1 ドットおよび 2 ドット繰り返しパターン<sup>1</sup>の静電潜像が形成されており、観察できることが確認できた。走査範囲は電子ビーム観察領域の制約上 2 mm 程度に限定されるが、図 3-28 のパターン以外にもライン等、様々な潜像パターンが、ツインビームのレーザー走査を用いることによって形成可能となった。

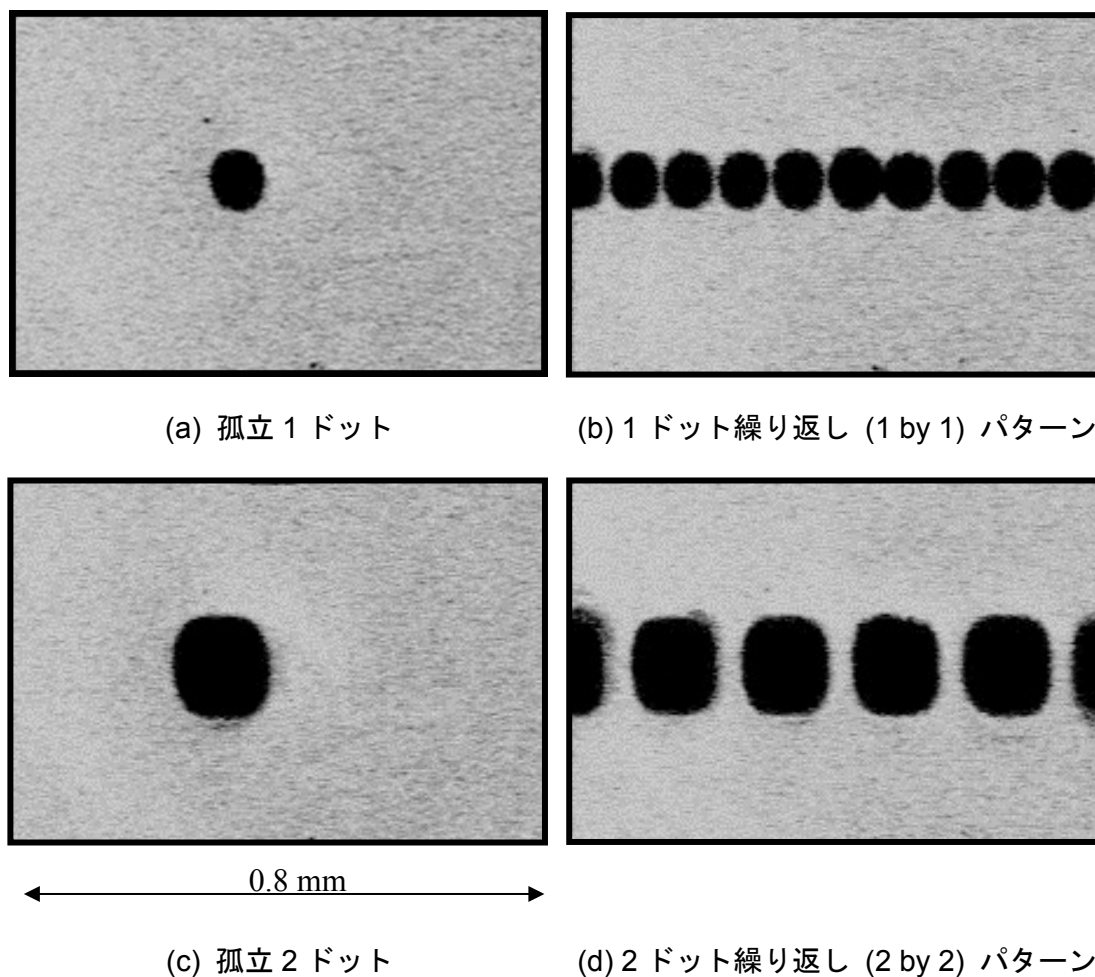


図 3-28 レーザー走査で形成されたドットパターンの測定結果

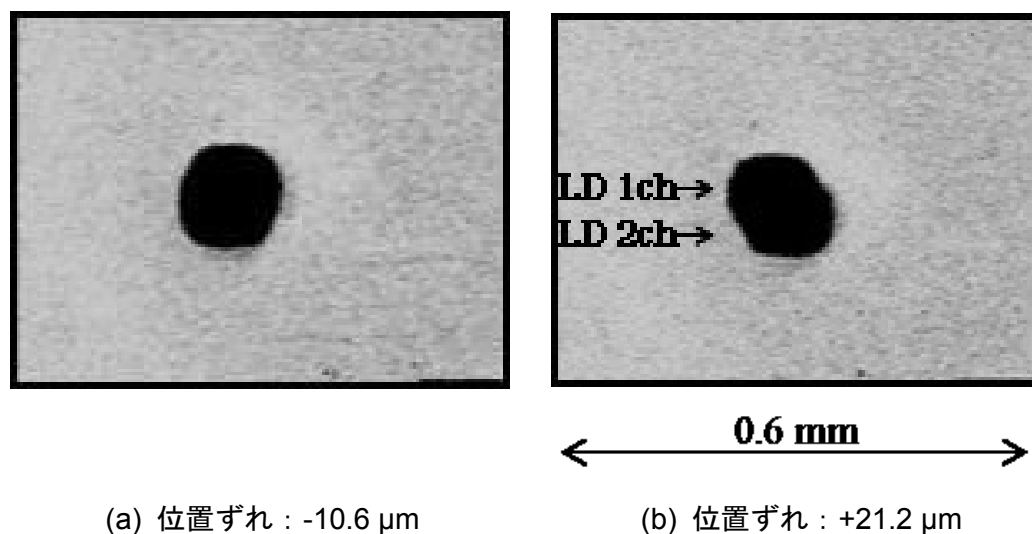


図 3-29 露光開始位置ずれの潜像への影響

図 3-29 は、図 3-28 (c) の 2 ドット孤立パターンを意図的にずらして、潜像を観察したものである。LD 2ch の露光開始位置が、図 3-29 (a) は左に 4/16 ドット ( $10.6\ \mu\text{m}$ )、図 3-29 (b) は右に 8/16 ドット ( $21.2\ \mu\text{m}$ ) シフトして露光させた。潜像は明らかに台形形状に歪んでおり、 $10\ \mu\text{m}$  のずれは潜像として顕著に現れることが明らかになった。露光位置ずれは、ドット再現性、粒状性あるいは縦線ゆらぎとして、画像に影響を及ぼす可能性がある。

## 3-6 結 言

本章では、まず、真空中で電子ビーム照射を用いて、感光体を所望の負帯電位に設定する方法と物理モデルを提示した。通常、誘電体を SEM で観察する場合、二次電子放出比が 1 となる加速電圧の条件を使用することが一般的である。その理由は、試料がチャージアップを起こして、像障害を生じ、微細形状の観察が困難になるからである。本方式では、このチャージアップ現象を積極的に利用し、通常観察条件よりも高い加速電圧に設定することで、電荷を試料に蓄積させ、試料に負帯電を生じさせている。飽和帯電電位は加速電圧を変数とする一次関数で表される。また、一次関数の定数は感光体固有の静電特性であるため、所望の帯電電位は、加速電圧を制御することで得ることができる。帯電と観察を共用するための電子光学系を開発し、実験で動作検証した。

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

### 第3章：静電潜像の形成

パターン露光の2つの露光光学系を開発した。露光光学系にとって重要な特性であるレーザービームは、アパーチャサイズを変更することにより、所望のビームスポット径で集光させることができる。また、像面が光軸に対して45度傾斜した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。

さらに本研究では、静止ビーム方式を発展させて、実機の電子写真で用いる走査光学系と同等の潜像形成を可能とする、複数光源のレーザー走査光学ユニット (LSU) を開発した。実験では、ビームスポット径および光応答波形の測定で良好な光学性能であることを示す結果を得た。半導体レーザーのオフセット発光対策として搭載したメカシャッターは、電子ビーム制御装置およびLSUと連携動作を可能な構成とすることで、適切なタイミングで開閉され有効に機能した。これらの開発の結果、様々な露光条件をパラメータとしてドットパターンの静電潜像を形成することに成功した。



## 第4章

### 潜像電位の検出

#### 4-1 緒言

従来技術<sup>[1,2]</sup>では困難であった静電潜像が計測できたことについては、第2章で述べた。その計測方法は、電子ビームをプローブとして用い、二次電子を検出することで、ミクロンスケールで静電潜像を可視化する計測原理<sup>[3]</sup>に基づくものである。そして、第3章では、真空中で感光体を所望の電位に帯電させ、静止ビーム露光や走査ビーム露光により、静電潜像が形成できることを述べた。その結果、実際の電子写真プロセスで形成される様々な静電潜像を可視化計測することで、露光条件や感光体製作条件などのパラメータと、静電潜像との関係を把握し、設計にフィードバックすることができるようになった<sup>[4]</sup>。

ただし、この二次電子で検出する計測方法では、ミクロンスケールで静電潜像を可視化計測することはできても、潜像の電位を検出すること、例えば帯電領域と露光領域の電位差を検出することができない。言い換えると、「潜像の大きさ」は情報として得ることができても、「潜像の電位」は情報として得ることができない。潜像の電位は、トナー層高さ（パイルハイト）を決めるファクターであり、画像の濃さ（画像濃度）やカラー画像の色に影響するため、電子写真プロセスにとって重要なパラメータである。静電潜像が電位や電荷などの物理量として定量的に計測できるようになると、設計にフィードバックできるだけでなく、潜像形成メカニズムの解明や、シミュレーション検証など、幅広い応用展開が期待できる。

第2章で述べた通り、二次電子検出で得られる二次電子像は、試料に垂直方向の電界強度を2値化した画像である<sup>[3]</sup>。このため、二次電子像の画像1枚から潜像電位分布を得ることは、情報量が不足しているため原理的に不可能である。しかしながら、実験条件を変更させて複数の潜像画像を取得すれば、不足している潜像電位情報を補うことができる。すなわち、潜像電位計測は、得られた複数の画像をデータ解析あるいは再構成することで、実現可能になると考えた。

また、静電潜像を計測するための信号を検出する手段として、二次電子検出器を使用してきたが、従来の二次電子検出器では、実際の静電潜像の情報を正確に検出できないことが研究の課程でわかってきた。電子ビームを検出する方

## 第4章：潜像電位の検出

法としては、走査電子顕微鏡 (SEM) <sup>[5]</sup>がよく知られている。走査電子により試料から発生する二次電子を検出して得られる二次電子像は、試料の微細な凹凸を反映している。また、反射電子は試料の原子に当たって跳ね返された電子であり、その反射電子を検出することで、原子番号や結晶方位など試料の組成を反映した像が得られる。しかしながら、これらの検出手段は、試料の表面構造や元素といった組成を反映した画像を作るために最適化されているものの、帯電した試料の静電潜像を検出するために最適化されているとは限らない。帯電のコントラスト像については、これまでにいくつか研究事例<sup>[6-8]</sup>があるが、電子写真の静電潜像計測に関しては明らかにされておらず、静電潜像に適した検出方法と像解釈が求められる。

以上の背景に鑑み、本研究では、静電潜像の電位を定量計測する技術を開発することを目的とし、潜像電位を検出する方法として、試料に到達せずに反転した一次電子信号を検出する方法を考案した。本章では、その一次電子検出法と、その妥当性検証について述べる。そして、検出された信号には、試料の潜像電位情報が含まれているという物理モデルとコントラスト像の解釈を示す。つぎに、従来の二次電子検出器で静電潜像を検出する場合の技術課題を提示し、静電潜像に適した検出方法を述べる。そして、開発した計測装置により潜像電位情報を含んだ潜像プロファイルを計測できることを実験で確認し考察する。

## 4-2 一次電子検出法による潜像プロファイル計測

### 4-2-1 一次電子検出法の計測原理

図 4-1 は、潜像電位の計測原理図<sup>[9]</sup>である。この計測システムは、露光するためのレーザービーム、静電潜像を観察するための電子ビーム、および電子を捕獲する検出器で構成されており、電子写真用の感光体が静電潜像を形成している状態については二次電子検出法と共通である。二次電子検出法と異なっている構成としては、試料上部にグリッドメッシュが配置されていることと、静電潜像が形成された感光体試料の下部に電圧を印加する電極が配置されていることである。グリッドメッシュは、試料の近傍に配置しており、帯電試料の影響で空間電界が乱されないようにする機能である。試料下部電極に電圧を印加した状態で電子を入射させたときに、試料に到達せずに反転する一次電子を検出することで、潜像電位を定量的に計測することができる。ここでは、一次電子検出法と呼ぶことにする。

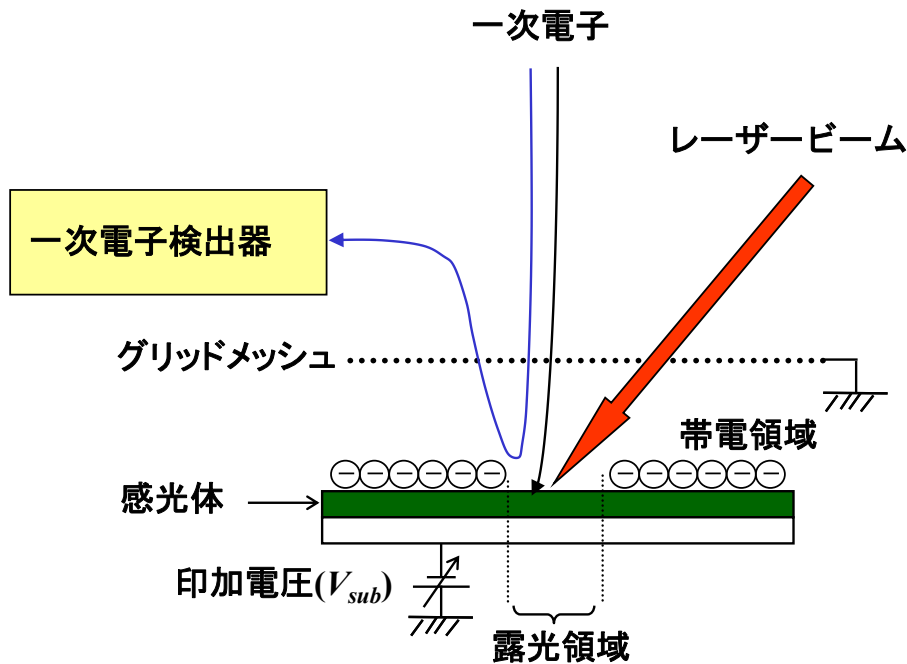


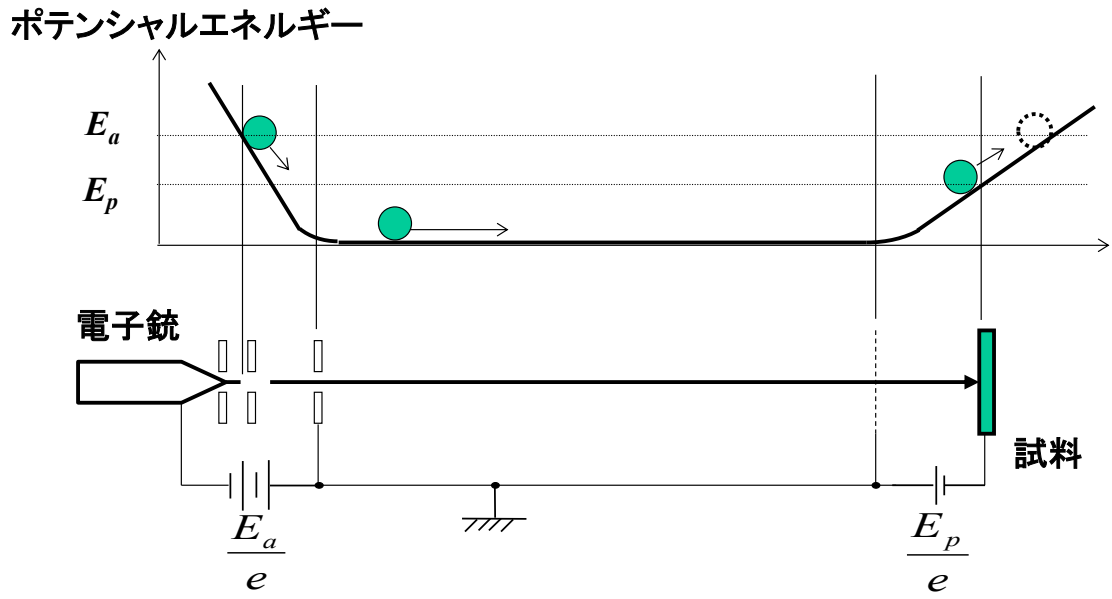
図 4-1 一次電子検出法の計測原理

#### 4-2-2 力学的エネルギー保存則による一次電子検出法の考え方

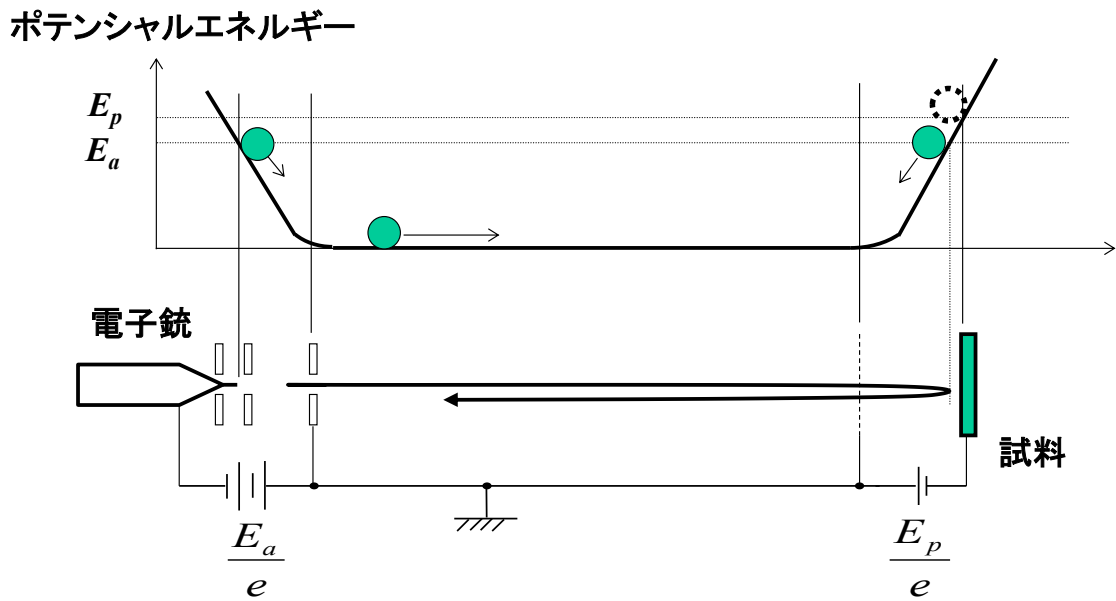
本計測法の要である検出手段のコンセプトについて、力学的エネルギー保存則のモデルで説明する。図 4-2 に、試料のポテンシャルエネルギーと入射電子のエネルギーの関係を示す。一次電子のポテンシャルエネルギーを  $E_a$ 、試料のポテンシャルエネルギーを  $E_p$  としたとき、試料面での速度  $v_L$  は式 (4.1) となる。

$$v_L = \left\{ \frac{2(E_a - E_p)}{m} \right\}^{1/2} \quad (4.1)$$

$E_a > E_p$  の領域では、一次電子は試料の表面に到達して、一次電子は検出器に捕獲されない（図 4-2 (a) 参照）。一方、図 4-2 (b) で示す  $E_a < E_p$  の領域では、一次電子の速度は徐々に減速され、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む。その結果、一次電子は検出器に捕獲される。したがって、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。



(a)  $E_a > E_p$  の場合



(b)  $E_a < E_p$  の場合

図 4-2 力学的エネルギー保存則のモデルによる一次電子検出法の原理説明

$E_a$ ：一次電子のポテンシャルエネルギー

$E_p$ ：試料のポテンシャルエネルギー

一次電子の加速電圧  $V_{acc}$  ( $< 0$ ), 試料表面の座標  $(x,y)$  での電位を  $V_p(x,y)$  とすると、 $E_a = eV_{acc}$ ,  $E_p = eV_p(x,y)$  と表すことができる。図 4-3 は、表面電位  $V_p(x,y)$  の試料に加速電圧  $V_{acc}$  の一次電子を照射したときのコントラスト像と電子軌道をイメージしたものである。

## 第4章：潜像電位の検出

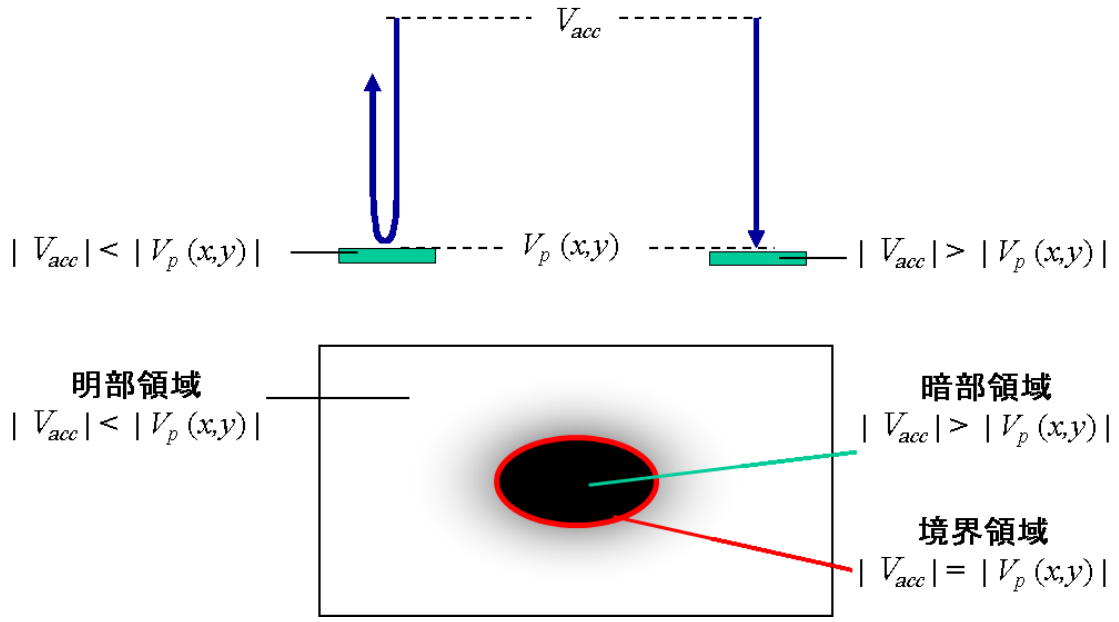


図 4-3 一次電子のコントラスト像の模式図

真空中では、摩擦や空気抵抗など影響を受けないため、力学的エネルギー保存則により、電子の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となる。このため、明暗の境界のポテンシャルが、

$$V_{acc} = V_p(x, y) \quad (4.2)$$

で表され、表面の電位状態が計測可能となる。潜像プロファイルを計測する方法として、試料下部電極に測定閾値を変化させるためのバイアス電圧  $V_{sub}$  を印加している。下部電極がアース時の表面電位を  $V_s(x, y)$  とすると、 $V_p(x, y)$  は、

$$V_p(x, y) = V_s(x, y) + V_{sub} \quad (4.3)$$

と電位ポテンシャルを嵩上げできる。式 (4.2) と式 (4.3) より  $V_{th}$  を

$$V_{acc} - V_{sub} = V_{th} \quad (4.4)$$

と定義すると、明暗の境界は、閾値毎に輪切りされた  $V_{th}$  の等高線図を意味することになる。したがって、一次電子検出によるコントラスト像を 2 値化処理して潜像径を算出するプロセスを、印加電圧  $V_{sub}$  を変えながら繰り返し実行し、輪切りデータを繋ぎ合わせることで、潜像プロファイルを測定することができ

る。試料下部電極に電圧を印加して、入射電子を減速させる研究事例はこれまでも報告されている<sup>[10]</sup>が、入射電子到達・非到達を判定し、コントラスト像を輪切りにして、潜像プロファイルを得る手法はこれまでになかった。ここでは潜像プロファイルを  $V_{th}$  分布と呼ぶことにする。

### 4-2-3 潜像プロファイル ( $V_{th}$ 分布) の導出

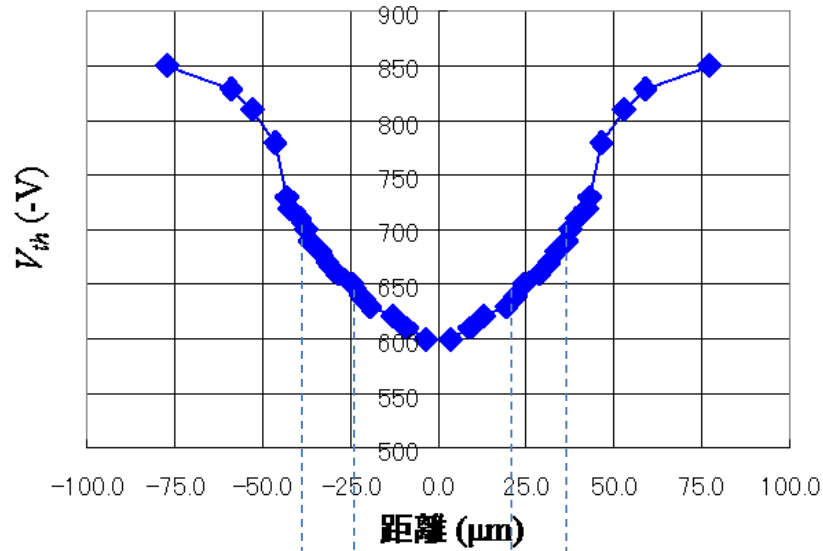
図4-4は、潜像プロファイル ( $V_{th}$  分布) 計測の模式図を示している。 $V_{acc}$  は  $-1800$  Vとしている。静電潜像の中心では、電位が約  $-600$  Vであり、静電潜像の中心から離れるにつれて、電位がマイナス側に高くなる。静電潜像の中心から  $75\text{ }\mu\text{m}$  を超える周辺領域の電位は、約  $-850$  Vになっている。図4-4 (b) は、 $V_{sub} = -1150$  V に設定したときの検出器の出力を画像化したものである。 $V_{th}$  の値は、 $V_{th} = V_{acc} - V_{sub} = -650$  Vである。このとき、明暗コントラスト像の境界領域の値より潜像の直径  $76\text{ }\mu\text{m}$  を取得する。同様に、図4-4 (c) は、 $V_{sub} = -1100$  V に設定したときの検出器の出力を画像化したものである。 $V_{th}$  の値は、 $V_{th} = V_{acc} - V_{sub} = -700$  Vであり、明暗コントラスト像の境界領域の値より潜像の直径  $50\text{ }\mu\text{m}$  を取得する。このように、印加電圧  $V_{sub}$  を変更しながら、潜像の直径とそのときの  $V_{th}$  値を取得することを繰り返し実行して、コンピュータで輪切りデータを繋ぎ合わせることで、潜像プロファイル ( $V_{th}$  分布) を測定することができる。すなわち、一次電子を検出して静電潜像のプロファイルを求める方法では、 $V_{acc}$  または  $V_{sub}$  を変えながら、試料表面を電子ビームで走査させ、 $V_{th}(x,y)$  を計測することにより、試料の潜像電位情報を得ることができる。 $V_{th}(x,y)$  は、電位分布  $V_s(x,y)$  と高い相関関係があり、電荷分布がなだらかなであれば、 $V_{th}(x,y)$  は近似的に電位分布  $V_s(x,y)$  と等価となる。一様電荷の条件では表面電位と一致する。

$V_{th}$  分布計測では、 $V_{sub}$  を変えて複数回コントラスト像を取り込むため、試料への電子線照射量が回数に比例して増大する。画像1枚取得時の電子線照射量が、3-2-4項で示したように帯電電荷量の  $1/400$  と微小であったとしても、20枚の画像では帯電電荷量の5%に相当し、潜像測定への影響が無視できなくなる。このため、測定手順としては、まず全領域で一次電子が反転する高い  $V_{sub}$  条件から先に測定し、徐々に  $V_{sub}$  を下げる方法を採用している。この方式は、試料への電子線照射量を極力抑えるとともに、 $V_{th}$  分布の中でも最も重要な極小値を電子線照射のダメージを少ない条件のときに測定できる長所がある。

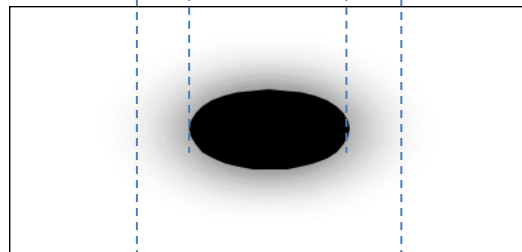
なお、一次電子を検出して静電潜像のプロファイルを求める方法では、入射電子のエネルギーが極端に変化するため、入射電子の軌道がずれて、走査倍率が変わったり、歪曲収差を生じたりする場合がある。この問題を解決するための手段としては、電子軌道を計算しその計算結果に基づいて検出結果を補正す

## 第4章：潜像電位の検出

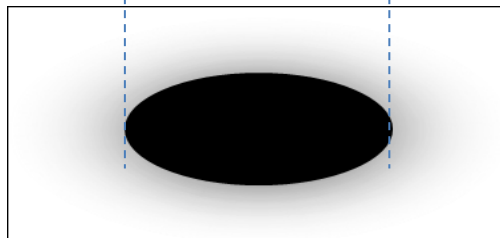
ることにより、静電潜像のプロファイルを高精度に求める方法がある。本研究では、実測の $V_{th}$ 分布から電子軌道計算による逆問題を解いて電荷分布  $Q(x,y)$  を探索するプロセスにより、電位分布を導出する方法を開発している。逆問題の解析については、第5章で詳細を述べる。



(a) 潜像プロファイル( $V_{th}$  分布)



(b)  $V_{sub} = -1150$  V でのコントラスト像



(c)  $V_{sub} = -1100$  V でのコントラスト像

図 4-4 潜像プロファイル ( $V_{th}$  分布) 計測を示す模式図

加速電圧  $V_{acc}$  :  $-1800$  V、 $V_{th} = V_{acc} - V_{sub}$

### 4-3 静電潜像計測に対応する電子検出技術

電子検出器の機能は、潜像画像として表示するために潜像の情報が含まれた電子を正しく捕獲することにある。図 4-5 に、従来の二次電子検出器を用いたときの帯電像を示す。画像の左上の輝度が明るく、右下の輝度が暗い。この原因は、検出すべきはずの一次電子あるいは二次電子を検出器が正しく捕獲できていなかったことによる。この問題は、静電潜像特有の現象であることがわかった。このため、静電潜像に適した検出手段の開発が求められた。

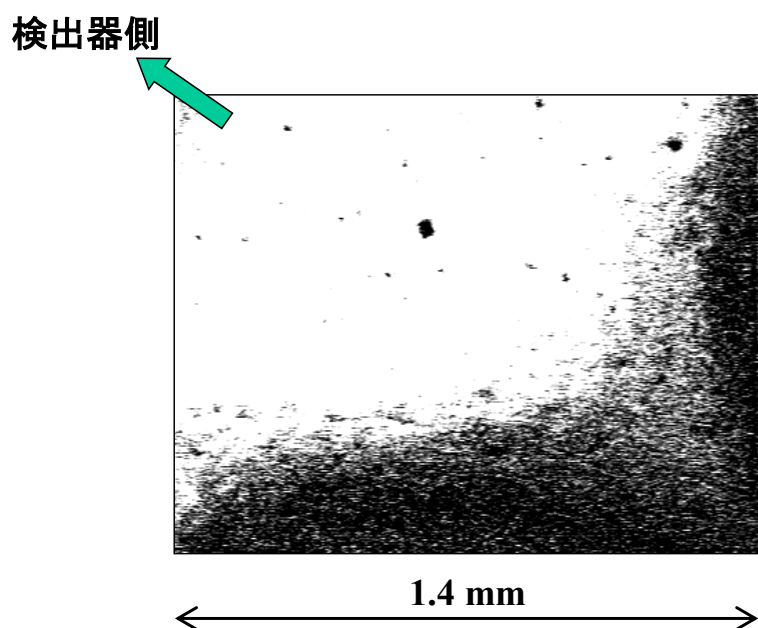


図 4-5 従来の二次電子検出器を用いたときに発生した帯電画像の輝度むら

#### 4-3-1 従来型電子検出器の概要と潜像計測適用への課題

まず、走査電子顕微鏡(SEM)で用いる二次電子検出器(Secondary Electron Detector, SED)の方式を説明し、その方式の静電潜像に適用する上で原理的な問題点を述べる。図 4-6 は、SEM の二次電子検出器として一般的な ET 検出器(Everhart-Thornley 検出器)の構成を示している。二次電子検出器は、シンチレータと、ライトガイドと、光電子増倍管からなり、試料から約 100 mm 程度離れた場所に配置される。試料から放出された二次電子は、約 10 kV 程度の引き



込み電圧が印加されたシンチレータへ導かれる。そして、電子がシンチレータに衝突すると、電子が光に変換されて、ライトガイドを通過し、光電子増倍管に達する。光電子増倍管の光電陰極から放出された光電子は、電子レンズ系に導かれて第1ダイノードに衝突し、その数倍の二次電子、あるいは三次以上の電子を放出する。その二次電子は後続のダイノードでさらに増倍を繰り返し、陽極に達する。ゲイン電圧を調整することにより、 $10^4$ から $10^7$ 倍に増幅される。このような原理で光電子増倍管は、わずかな電圧差で大きな利得を得ることができる。

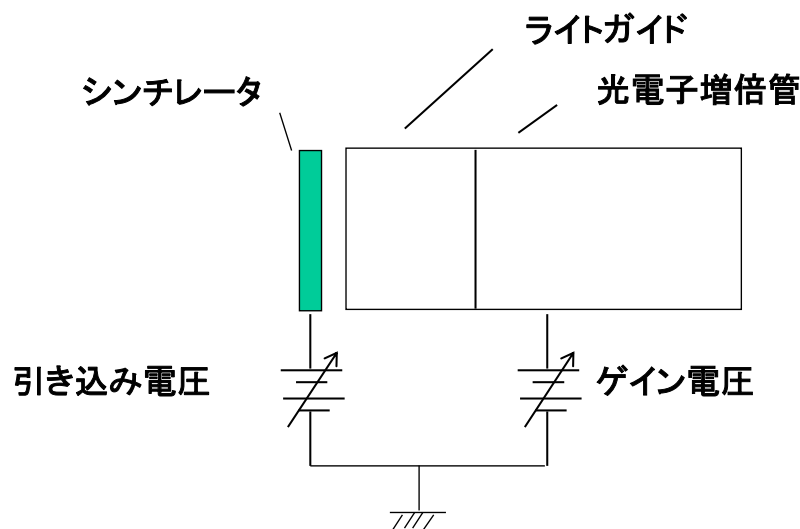


図 4-6 一般的な二次電子検出器（Everhart-Thornley 検出器）の構成

走査電子顕微鏡 (SEM) など試料の構造を観察する場合と、静電潜像の場合とで、二次電子を検出する際の大きな違いは、二次電子のエネルギーにある。試料の構造を観察する場合、二次電子のエネルギーは高々数  $\text{eV}^{[1],[2]}$  と小さいため、二次電子がどのような方向に発生しようとも  $10 \text{ kV}$  の引き込み電圧で、問題なく捕獲することができる。一方、静電潜像計測の場合、試料は数  $100 \text{ V}$  から  $1000 \text{ V}$  程度に帯電している。帯電試料の電位は、通常の LSI で扱う電位の約  $100$  倍から  $500$  倍程度である。二次電子のエネルギーは、試料電位の分だけ増加する。

図 4-7 は、従来の二次電子検出器で検出した場合、輝度むらが発生する要因を模式図として示したものである。検出器と反対側の二次電子は、試料の加速電界の影響を強く受けて、捕獲されにくくなると考えられる。

具体例を示すと、 $100 \text{ mm}$  離れた  $10 \text{ kV}$  の電圧が作る電界強度は、 $10 \text{ kV}/0.1 \text{ m} = 2 \times 10^5 \text{ V/m}$  であり、膜厚  $30 \mu\text{m}$  の感光体が  $600 \text{ V}$  に負帯電したときの電界強

度は、 $600\text{ V}/30\text{ }\mu\text{m}=2\times 10^7\text{ V/m}$  と、100 倍電界が高い。それゆえ、検出器は二次電子のすべてを捕獲することができなくなる。検出器に近い方向に放出された二次電子は捕獲しやすく、検出器から離れた方向に放出された二次電子は捕獲しにくくなる。

二次電子のすべてを捕獲するためには、

- 1) 引き込み電圧を 100 倍以上にする。
- 2) 試料と検出器の距離を 1/100 以下にする。

などの方法が考えられる。しかしながら、前者は印加電圧を 1 MV に設定する必要がある、また後者は試料に近接状態となるため、露光光学系と干渉する上に入射電子ビームの軌道を乱してしまい、どちらも実現できない。そこで、本研究では、静電潜像計測に対応する電子検出器を開発した。

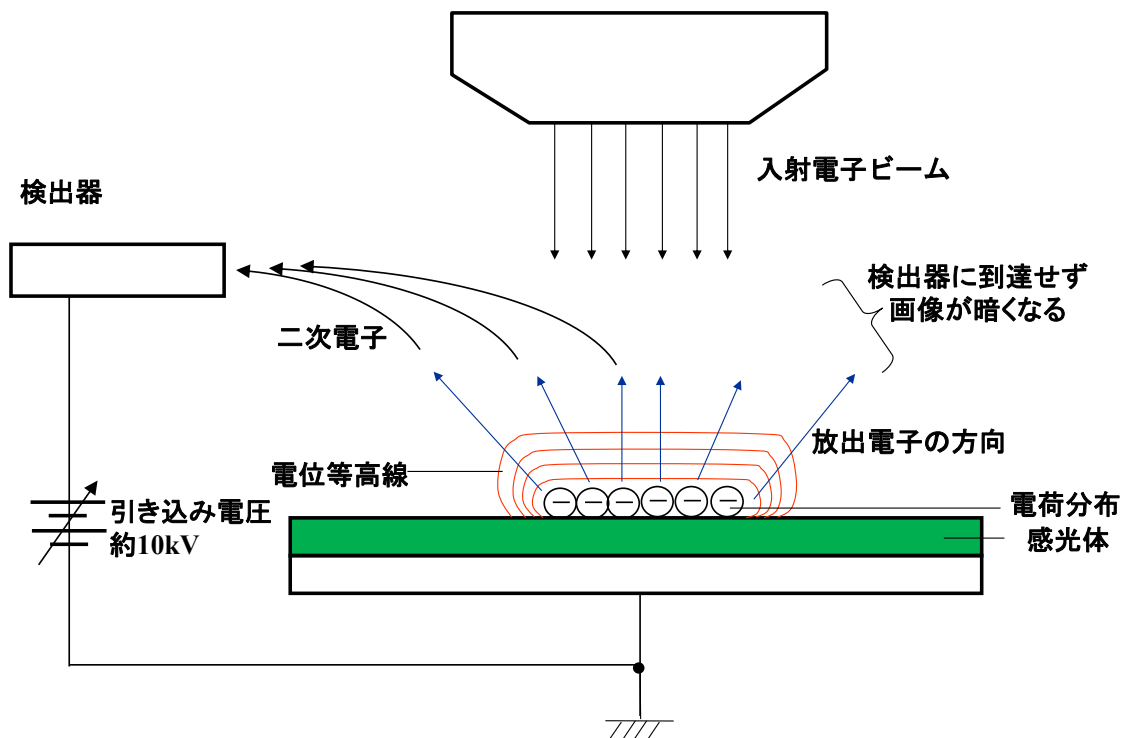


図 4-7 従来の二次電子検出器での輝度むら発生を示す模式図

### 4-3-2 静電潜像計測用電子検出器の構成

図 4-8 に、開発した静電潜像計測用の電子検出器の構成を示す。ここでは、まず第 2 章で述べた二次電子検出による可視化計測と共通して使用する構成について記述し、一次電子検出専用の構成部分については後述する。開発した検出

器は、放出電子発生部材<sup>[13]</sup>と、シンチレータと、ライトガイドと、光電子増倍管とで構成される。放出電子発生部材は、電子銃鏡筒先端近傍に配置した構成となっている。放出電子発生部材は、薄い円盤形状をしており、取り付けねじで、電子銃鏡筒に固定する構成となっている。これにより、試料から放出された二次電子が、高いエネルギーをもって、検出器と反対方向に進行した場合でも、放出電子発生部材に衝突し、そこで新たに二次電子を放出する。その二次電子は、低エネルギーであるため、検出器の引き込み電圧により、検出器に到達することができる。

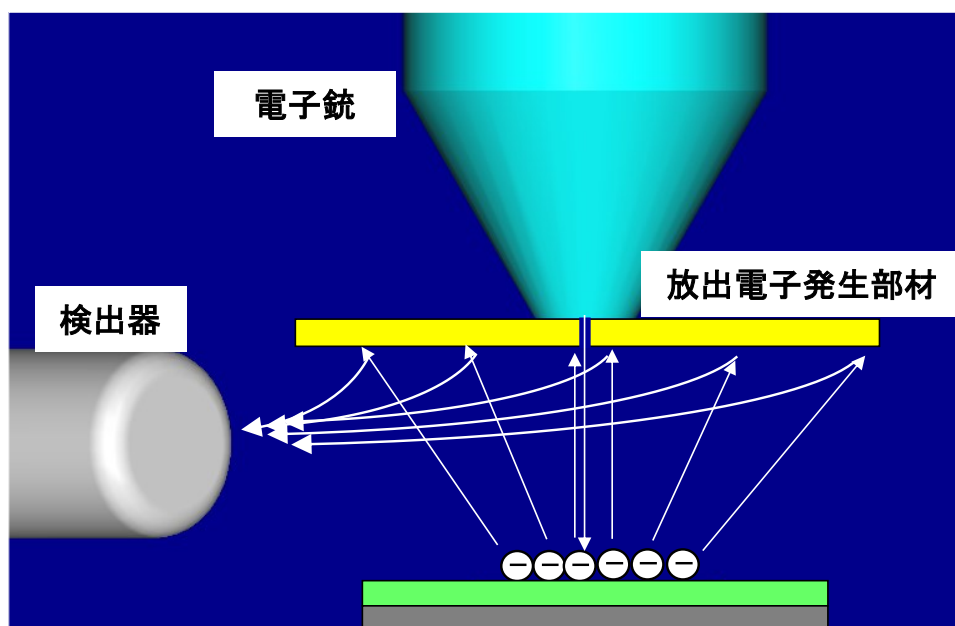


図 4-8 静電潜像計測用電子検出器の構成

### 4-3-3 放出電子発生部材の形状と表面処理

放出電子発生部材の形状を図 4-9 に示す。放出電子発生部材が薄い円盤形状をしていることにより、真空チャンバ内の空間スペースを確保するとともに、試料からの二次電子が衝突することで、放出される二次電子を検出器に導くことが可能となる。角部が少ない円盤形状であることは、二次電子検出器の引き込み電圧の電極と発生部材間の放電を抑制する効果をもたらしている。

また、入射電子が通過する射出開口は極力小さい構成とすることが望ましい。入射電子の射出開口は、通常5 mm以上の開口径を有していることが一般的であ

## 第4章：潜像電位の検出

る。電荷を有する試料では、二次電子にしても一次電子にしてもエネルギーが高いので、電子光学系の射出開口部へ逆戻りしやすい。この結果、本来検出器に到達すべき電子を検出することができなくなり、ノイズの発生要因となる可能性がある。そこで、開口径を直径2 mm以下とすることで、放出電子が電子光学系の射出開口部へ逆戻りする現象を防止し、検出効率を向上させている。

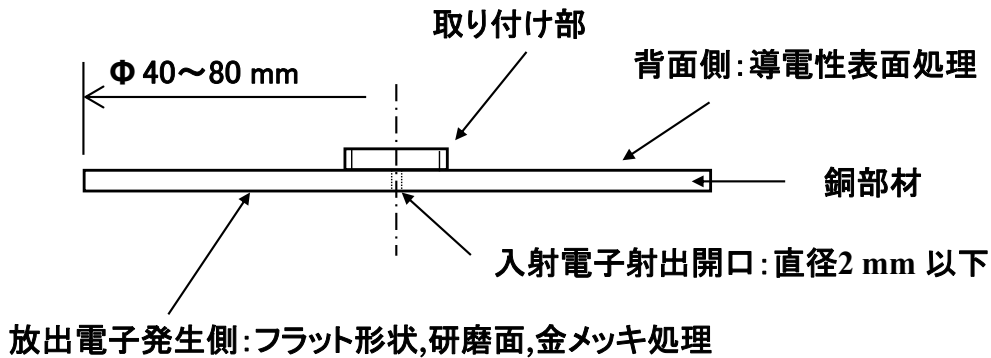


図 4-9 放出電子発生部材の側面形状

放出電子発生部材の電子が衝突する面に凹凸があるとそこから発生する新たな二次電子量がばらつきを生じて、コントラスト像に影響を及ぼす可能性がある。このため、放出電子発生部材の表面は、凹凸のないフラットな表面形状でなければならない。表面の平滑性を上げるためには、表面を研磨して鏡面仕上げにすることが望ましく、この場合、材質としては、銅やアルミニウムなどがよい。しかしながら、銅やアルミニウムは、表面を研磨して平滑性を上げるには適しているが、二次電子の放出量が不足しており、放出電子発生部材としては適さない。そこで、放出電子発生部材の表面には、二次電子の放出量が増加するような表面処理を施している。

測定時に用いる加速電圧は2 kV 前後であり、そのときの二次電子放出比が0.8以上である材料で表面処理をするとよい。二次電子放出比は、金属の原子番号に依存し計算で求めることも可能である<sup>[14-16]</sup>。金は二次電子放出特性として好適である。そこで、放出電子発生部材の表面には、金の薄膜を被覆した表面処理を施している。また、金めっきの下地としては、無電解ニッケルめっき（カニゼンメッキ）を施している。無電解ニッケルめっきは、めっき液に含まれる還元剤の酸化によって放出される電子により、液に含浸することで被めっき物に金属ニッケル皮膜を析出させる無電解めっきの一種であり、素材の形状や種類にかかわらず均一な厚みの皮膜が得られることが特徴である。また、試料か

## 第4章：潜像電位の検出

らの二次電子、入射電子が到達しない部材の背面側にも表面処理を施している。部材をアルミニウムにすると酸化されて絶縁膜となり、電荷が蓄積されてしまう可能性がある。この場合には、入射電子軌道に影響を与えて、画像がゆがむだけでなく、放電を起こす可能性がある。したがって、背面側にも導電膜を形成する表面処理を施している。

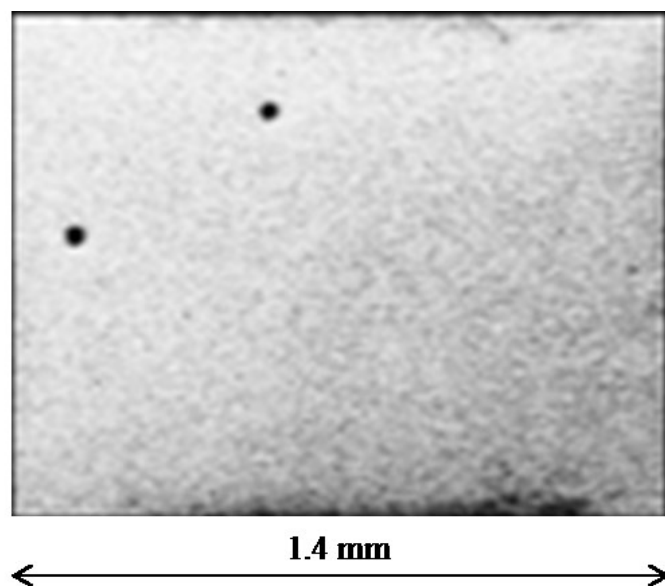


図 4-10 放出電子発生部材装着後の帯電像

図 4-10 は、放出電子発生部材装着後の帯電像である。装着前は、検出器方向の輝度が大きい反面、検出器と反対方向は輝度が小さく、図 4-5 のような輝度むらを生じていた。検出器と反対方向の輝度が小さかった理由は、試料の加速電界の大きさが、引き込み電圧が作る電界よりも大きかったため、検出器に捕獲されにくい状態となっていたためである。図 4-10 の帯電像は、帯電試料の高い二次電子エネルギーを放出電子発生部材に当てる構成とすることで、検出器と反対方向の電子も捕獲しやすくなり、輝度むらの少ない信号を検出することが可能となったことを示している。

### 4-3-4 一次電子検出器の構成

一次電子検出器は、二次電子検出器で用いられた放出電子発生部材と、シンチレータと、光電子増倍管の構成に、上部電極と側面電極が加わることで構成される。図 4-11 に一次電子検出器の構成を示す。試料下部に電圧を印加して、入射電子の加速電圧より高い電位ポテンシャルを形成することで、一次電子は、

## 第4章：潜像電位の検出

検出器に到達することができる。このとき一次電子は、試料直前で大きく減速される。減速された一次電子は、電界の影響を敏感に受けて本来進むべき軌道から逸脱しやすくなる。試料が電荷分布を有している場合には、空間電界に与える影響は特に大きい。そこで、試料電荷の影響を極力排除して、一次電子が試料に到達する本来の軌道を確保するために、試料と電子光学系の間には、上部電極と側面電極が配置されている。

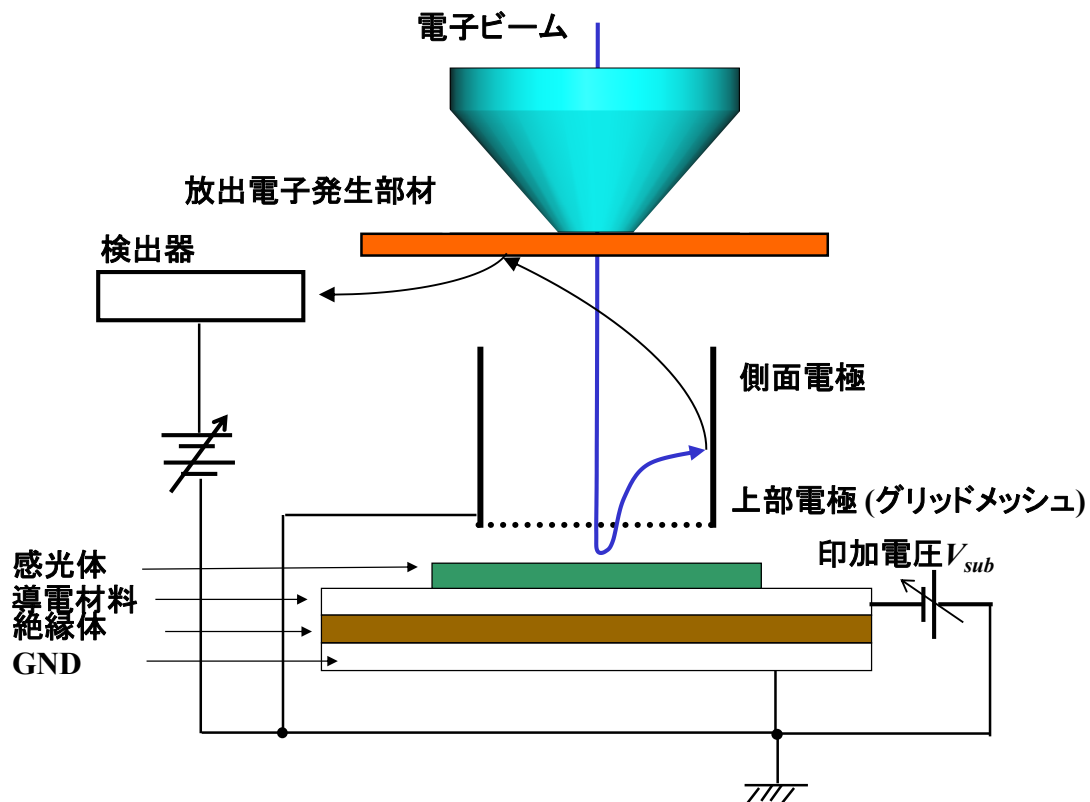


図 4-11 一次電子検出器の構成

上部電極と側面電極は、試料に入射する電子の等速電界空間領域を確保するためにある。等速電界とは、電子に力が働かない状態であること、すなわち空間電界がゼロであることを示す。上部電極と側面電極は、入射電子軌道の周辺を覆うことで、試料に入射する直前まで等速電界空間領域を確保する役割を果たしている。上部電極は、グリッドメッシュ形状である。等速電界のためには、グリッドメッシュの面積が小さい方がよいが、その分電子が試料に到達できる面積が減ってしまう。このため、帯電試料の影響の排除と測定領域の両立を考慮して、グリッドメッシュのピッチは 1mm に設定した。

## 4-4 実験と考察

### 4-4-1 一次電子検出による静電潜像の測定

一次電子検出法を用いて、表面電位分布のプロファイルの測定結果を図 4-12 から図 4-14 に示す。試料は膜厚 30  $\mu\text{m}$  の有機感光体 (OPC) であり、設定した帯電電位は $-800\text{ V}$  である。露光条件は、波長 655 nm の半導体レーザー (LD) を用いて、横 57  $\mu\text{m}$ , 縦 83  $\mu\text{m}$  (H45  $\mu\text{m}$ ×V50  $\mu\text{m}$ ) のビームスポット径で実験した。

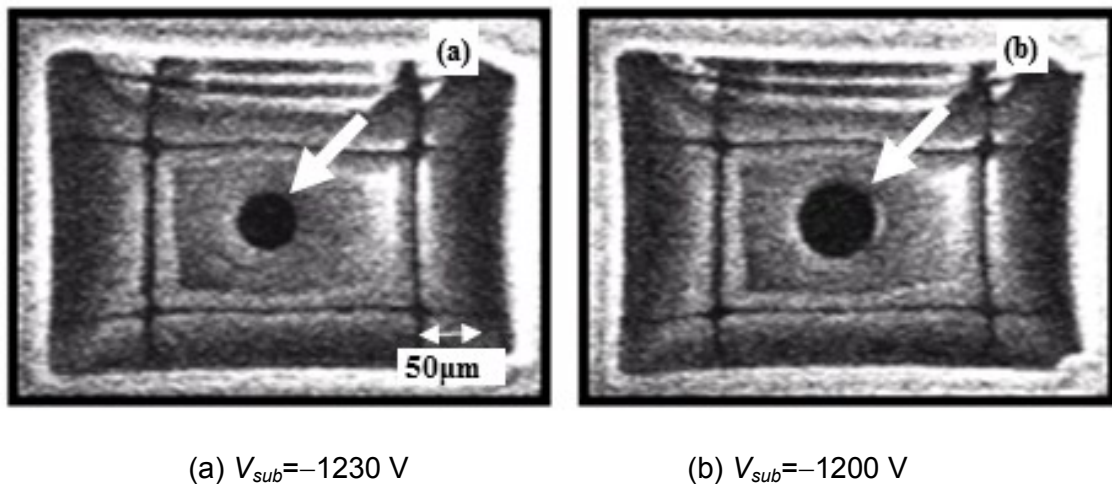


図 4-12 印加電圧  $V_{sub}$  条件における、静止ビーム露光の潜像コントラスト

図 4-12 (a), (b) は、下部電極に電圧  $V_{sub}$  を印加したときに、静止ビーム露光させたときの 潜像のコントラスト像である。本計測法で、1 ドットをミクロンスケールで可視化できており、なおかつ、 $V_{sub}$  に応じて潜像径が変化していることが確認された。図 4-13 は、図 4-12 のコントラスト像を 2 値化処理して潜像径を算出するプロセスを、印加電圧  $V_{sub}$  を変えながら繰り返し実行し、潜像径の輪切りデータを繋ぎ合わせて得られた潜像プロファイル ( $V_{th}$  分布) の測定結果である。コントラスト像はノイズが多く、単純に 2 値化しても潜像径を抽出することが出来ない。そこで、2 値化処理前にメディアンフィルタなどの処理で、解像度を極力落とさずに平滑化処理を施している。2 値化画像は、2 次微分処理 (ラプラシアンフィルタ処理) により輪郭抽出される。その抽出された潜像の輪郭に最もフィットする楕円を探索することで、潜像径を算出することができる。測定された  $V_{th}$  分布は、4-2-3 項で説明したように、潜像電位情報が含まれているため、露光条件や感光体条件の違いによる潜像への寄与や影響を評価することが可能であり、第 6 章で述べる相反則不軌の解析にも活用している。

## 第4章：潜像電位の検出

実際の表面電位分布は、 $V_{th}$  分布データを解析することで求められる。図 4-14 は、 $V_{th}$  分布を第 5 章の逆問題解析することで表面電位分布を算出した結果である。図 4-14 の表面電位分布測定結果では、帯電電位-780 V、ボトム電位-464 V、PV 値（最大高低差）316 V であった。

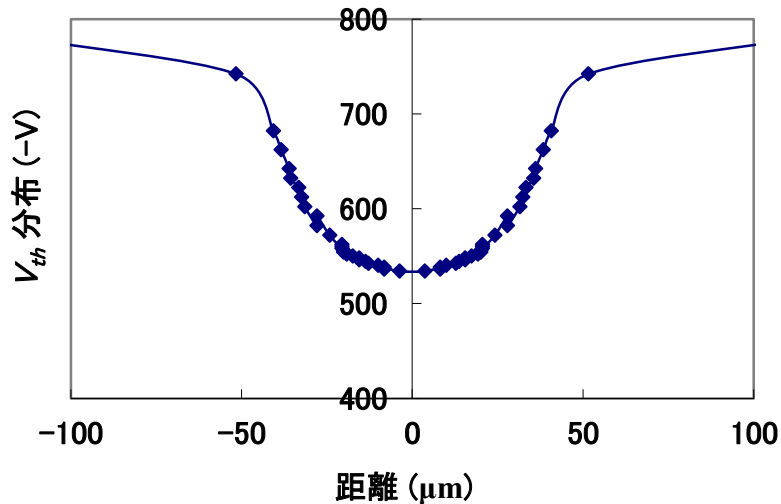


図 4-13 潜像プロファイル ( $V_{th}$  分布) の横方向断面の測定結果

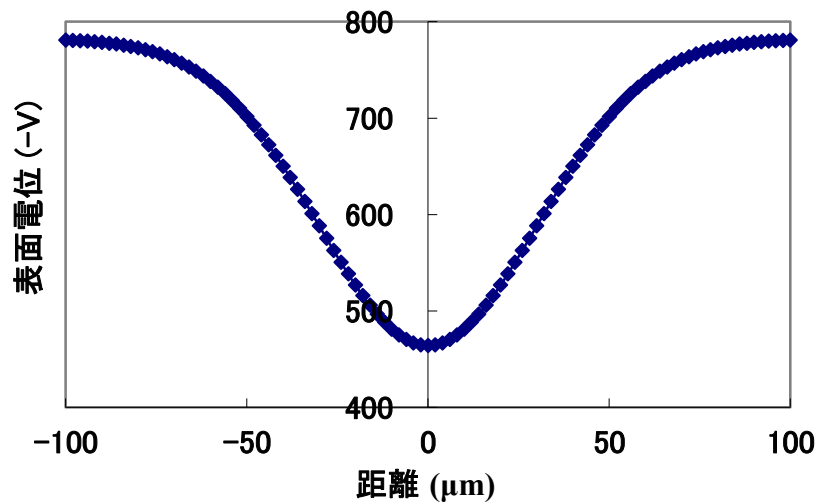


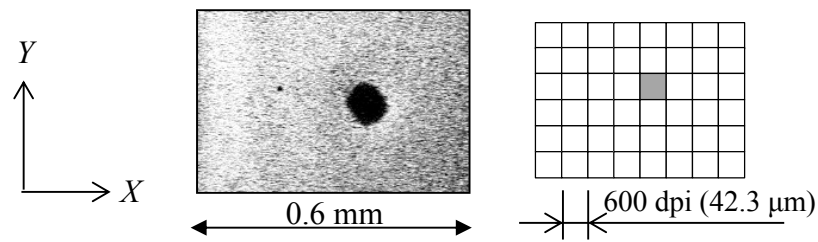
図 4-14 表面電位分布の測定結果

### 4-4-2 孤立ドットパターンの潜像電位の測定結果

図 4-15 と図 4-16 は、第 3 章で述べた画素密度 600dpi の走査ビーム露光で孤立ドットパターンの静電形成を形成したときの潜像電位の測定結果である。

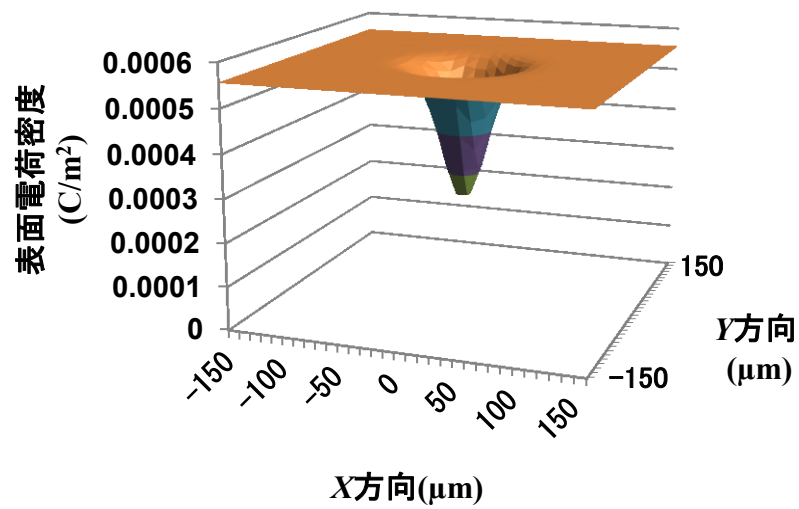


## 第4章：潜像電位の検出

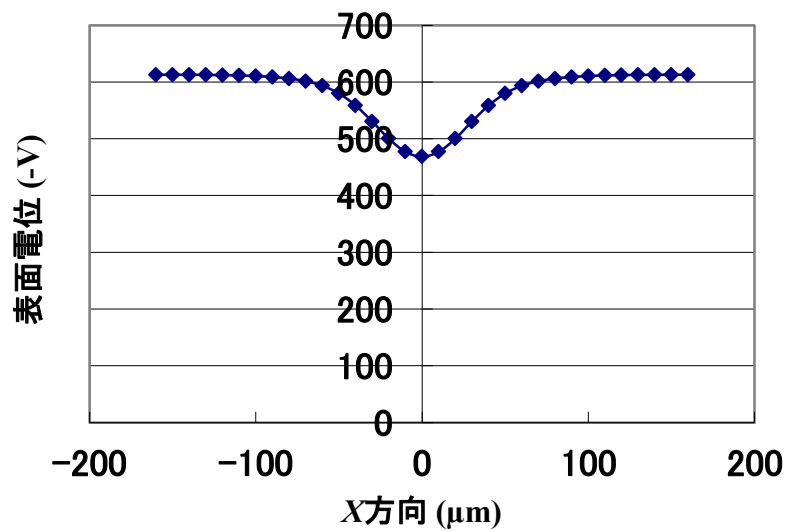


(a) 孤立1ドット潜像パターン

横:副走査方向(X方向), 縦:主走査方向(Y方向)



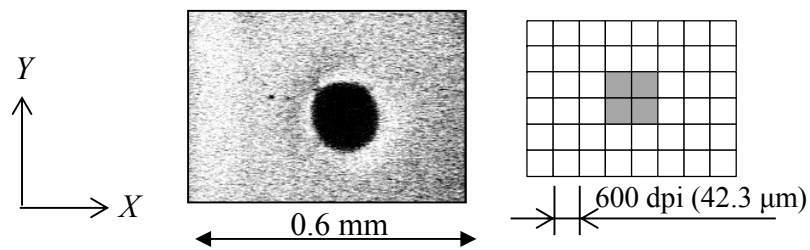
(b) 表面電荷密度分布の3次元鳥瞰図



(c) 表面電位分布の測定結果

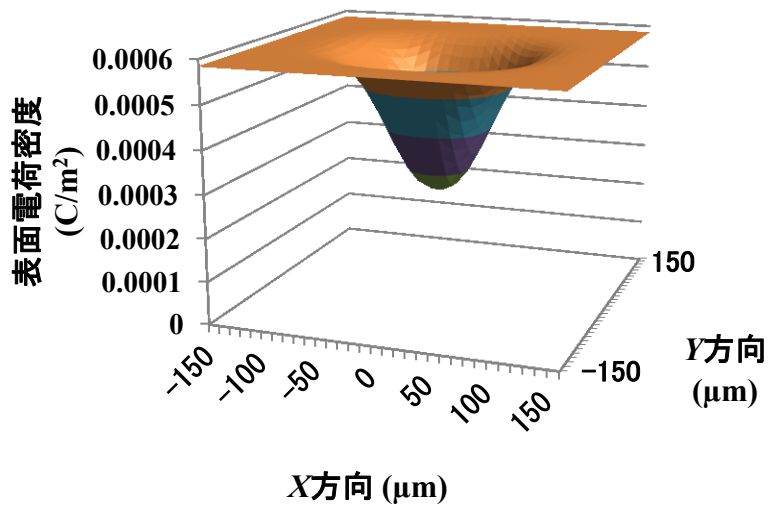
図 4-15 孤立1ドットの潜像電位の測定結果

## 第4章：潜像電位の検出

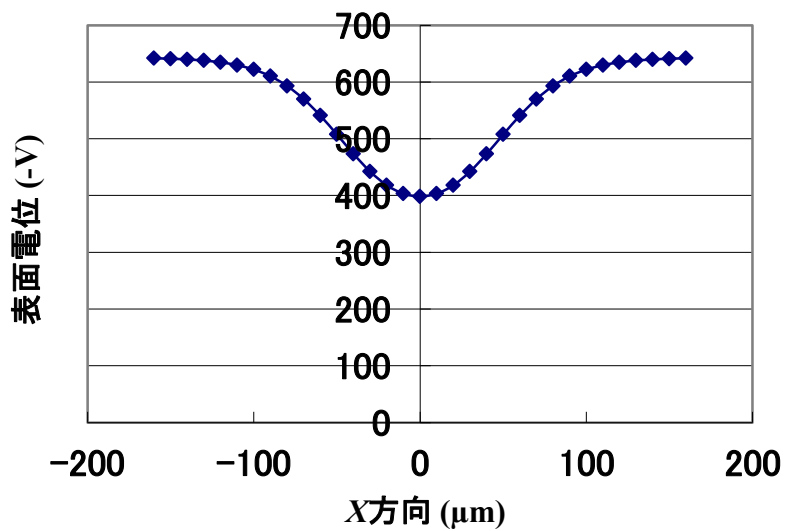


(a) 孤立2ドット潜像パターン

横:副走査方向(X方向), 縦:主走査方向(Y方向)



(b) 表面電荷密度分布の3次元鳥瞰図



(c) 表面電位分布の測定結果

図4-16 孤立2ドットの潜像電位の測定結果

## 第4章：潜像電位の検出

実験条件として、試料は有機感光体を用い、帯電電位は約 $-630\text{ V}$  に設定した。画像パターンは、孤立1ドットと孤立2ドットで実施した。走査ビーム露光条件は、半導体レーザー (LD) の波長は $655\text{ nm}$ 、ビームスポット径は横 $45\text{ }\mu\text{m}$ 、縦 $50\text{ }\mu\text{m}$  ( $H45\text{ }\mu\text{m}\times V50\text{ }\mu\text{m}$ )、像面光量は $283\text{ }\mu\text{W}$ 、デューティは100%で統一した。図4-15と図4-16の(a)は二次電子検出によるコントラスト像、(b)は電荷密度分布の測定結果、そして(c)は表面電位の測定結果である。表面電位の測定結果を比較すると、孤立1ドットのボトム電位が $-469\text{ V}$ 、孤立2ドットのボトム電位が $-398\text{ V}$ であり静電潜像のボトム電位に差があることが確認された。走査ビームの像面光量が同じであっても、潜像電位が異なることが明らかとなった。

### 4-4-3 電位分解能の検証と考察

電位分解能を評価した一次電子検出によるコントラスト像を図4-17に示す。

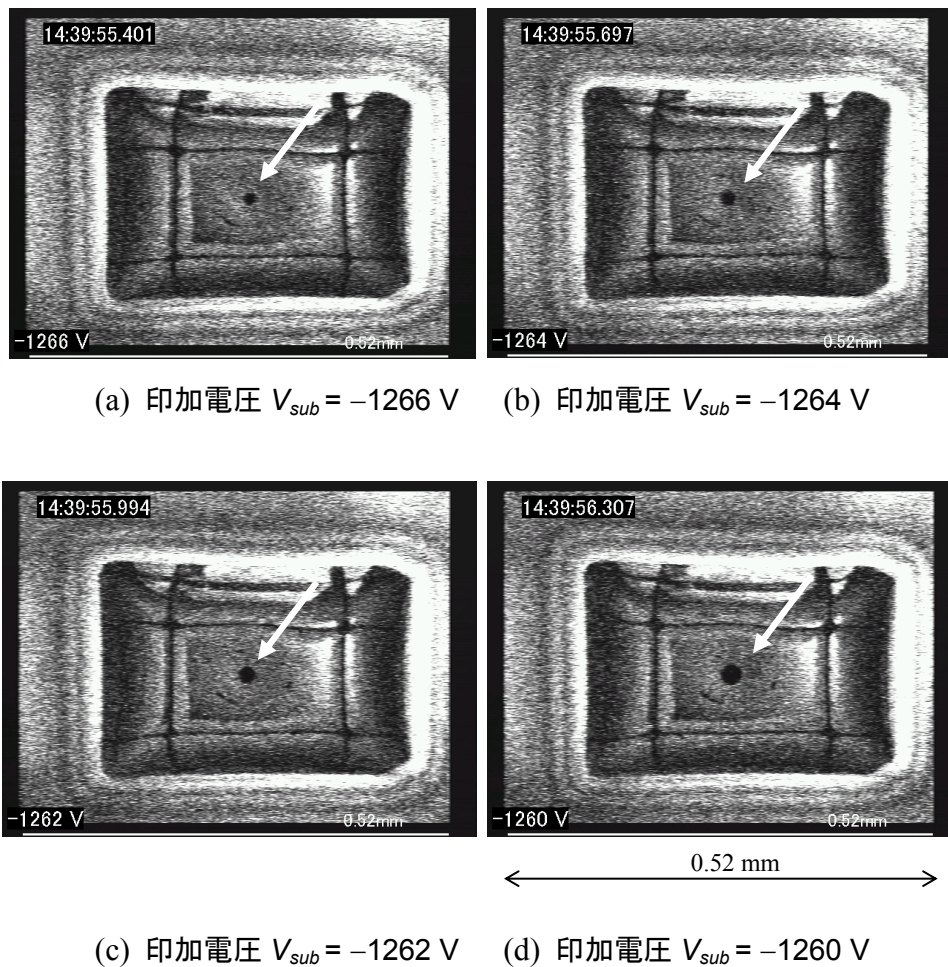


図4-17 一次電子検出によるコントラスト像

印加電圧  $V_{sub}$  を  $-1266\text{ V}$  (図 4-17 (a))、 $-1264\text{ V}$  (図 4-17 (b))、 $-1262\text{ V}$  (図 4-17 (c))、 $-1260\text{ V}$  (図 4-17 (d)) と  $2\text{ V}$  間隔で変化させたところ、中心付近 (矢印) の潜像の大きさが変化していることがわかる。開発した静電潜像計測装置 ELIMS は、 $2\text{ V}$  の電位分解能があることが確認されている。 $2\text{ V}$  の分解能は、入射電子ビームのエネルギーばらつきが制約条件になっていると考えている。

### 4-5 結 言

本章では、感光体の潜像電位を検出する方法として、試料に到達せずに反転した一次電子信号を取得する一次電子検出法を考案し、物理モデルで妥当性を述べた。検出された一次電子信号には、試料の潜像電位情報が含まれており、一次電子検出によるコントラスト像を 2 値化処理して潜像径を算出するプロセスを、印加電圧を変えながら繰り返し実行して、輪切りデータを繋ぎ合わせることで、潜像プロファイルを計測することができることを説明した。

従来の二次電子検出器で静電潜像を検出した場合には、輝度むらが発生することが明らかになった。負帯電試料の二次電子は試料の加速電界の影響を受けて、高いエネルギーを有することが輝度むら発生の原因である。本研究では、静電潜像検出器用に放出電子発生部材を開発した。放出電子発生部材を用いることで、試料から放出された二次電子が高いエネルギーを有する場合でも、検出器と反対方向に放出された電子でも捕獲しやすくなる。このため、輝度むらの少ない信号を検出することが可能となった。

実験の結果、静電潜像のコントラスト像がミクロンスケールで可視化されており、なおかつ、印加電圧の変更に応じて潜像径の変化を検出していることを確認した。すなわち、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有効性が確認された。孤立 1 ドットと孤立 2 ドットでは潜像電位が異なっていることが明らかとなった。また、電位分解能が  $2\text{ V}$  であることを確認した。

## 第 5 章

# 逆問題解析による潜像電位分布の導出

## 5-1 緒 言

試料に到達せずに反転した一次電子信号を取得する一次電子検出法を用いることで、従来技術では計測困難であった、感光体の潜像電位を検出できることについては、第 4 章で述べた。具体的には、一次電子検出によるコントラスト像を 2 値化処理して潜像径を算出するプロセスを、印加電圧を変えながら繰り返し実行して複数の潜像画像を取得し、複数の画像データを繋ぎ合わせることで、潜像プロファイル ( $V_{th}$  分布) を計測するものである。その結果、露光条件や感光体条件の違いによる潜像への寄与や影響を評価できるようになった。しかしながら、この  $V_{th}$  分布は、厳密には実際の表面電位と少しずれがあることがわかった。その大きな理由は、試料下部電極への電圧印加によって、入射電子の軌道が変化し、本来到達すべき位置からずれた座標の潜像情報を検出するためである。入射電子の位置ずれ量を補正することで、 $V_{th}$  分布から潜像電位分布を精度よく導くことが可能であると考えた。本来であれば、 $V_{th}$  分布の測定結果から潜像電位分布を解析的に解くことが理想的といえるが、極めて困難であることがわかった。

そこで、測定結果から入射電子の位置ずれ量を導くことはできないが、電位が既知の試料に対して、シミュレーションで入射電子の位置ずれ量を正確に計算することは実現可能であることに着目し、電子軌道を計算することで、試料表面に帯電している電荷密度分布の様子を見積もれるのではないかと考えた。以上の背景に鑑み、本章では、実験装置と同じ環境をコンピュータ上に構築して、試料に電荷分布を与えて電子軌道計算を実行し、 $V_{th}$  分布をシミュレーションする技術を開発して、潜像電位分布の計測を実現することを試みる。

具体的には、まず、第 4 章の一次電子検出法<sup>[1,2]</sup>において電位の情報（実験による  $V_{th}$  分布）を取得する。つぎに、空間の任意の点の電位・電界や電子軌道計算を高速かつ高精度に計算することが可能な一般 3 次元境界電荷法<sup>[3,4]</sup>を用いて、コンピュータ上に実験装置と同じ環境を構築し、電子軌道シミュレーションを実行する。実験と同様に、その電子の軌道の変化から得られる間接的なデータ（シミュレーションによる  $V_{th}$  分布）を取得する。これら 2 つの電位情報を比較

することで、実際に試料表面に帯電している電荷密度分布を探索できることを見出した。以下、これらの手法について詳述する。

## 5-2 潜像電位分布導出の考え方

潜像電位分布導出の考え方を図 5-1 の模式図で説明する。まず、第4章の一次電子検出法を用いて、潜像電位情報を有する潜像プロファイル ( $V_{th}$  分布) を実験で取得する。 $V_{th}$  分布から電位分布あるいは電荷分布を解析的に導出することが理想であるが、極めて困難であることがわかっている。

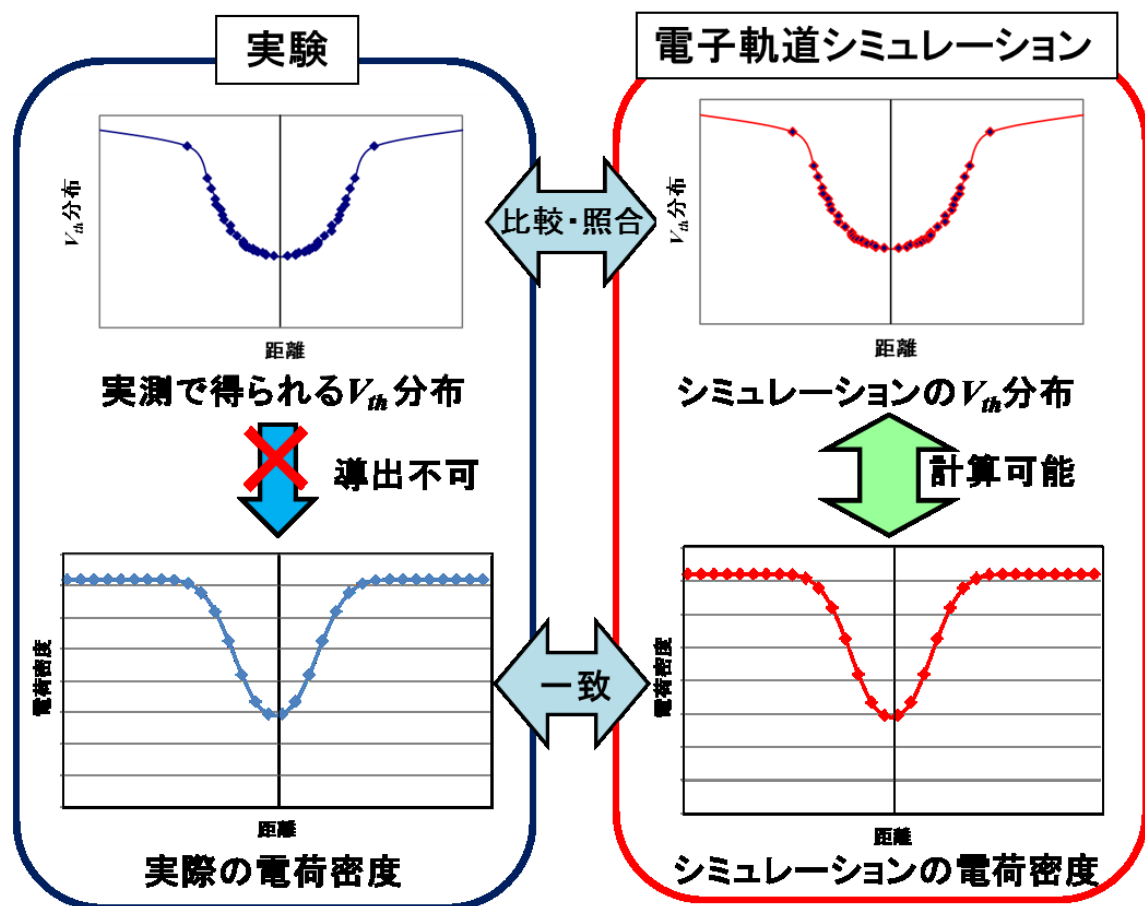


図 5-1 潜像電位分布導出の考え方を示す模式図

しかしながら、コンピュータ上に実験装置と同じ環境を構築し、試料に電荷分布を与えて電子軌道計算を実行すれば、 $V_{th}$  分布は計算できるはずである。そこで、本研究では、実験から得られた  $V_{th}$  分布とシミュレーションから算出され

た  $V_{th}$  分布を比較・照合する方法を用いた。両者に結果に差が生じていれば、その差が小さくなるように、シミュレーションの電荷分布を修正して、再度電子軌道を計算する。これらの電荷分布探索のシミュレーション計算を繰り返し実行する。そして、実測の  $V_{th}$  分布と照合し、両者の  $V_{th}$  分布が一致した場合は、実測とシミュレーションの電荷分布も一致しているはずである。一致した条件でのシミュレーションの電荷分布が、実際の電荷分布であると決定される。決定された電荷分布から静電場計算をすることで、最終的な潜像電位分布を導出することができる。

### 5-3 電子軌道解析による潜像電位の導出

#### 5-3-1 一般 3 次元境界電荷法による見かけの電荷密度の算出

通常、空間の電位・電界の数値シミュレーションとして有限要素法<sup>[5]</sup>が多く用いられている。有限要素法は、実際には複雑な形状・性質を持つ物体を含む全空間を小さな要素で分割し、その 1 つ 1 つの要素の特性を、数学的な方程式を用いて近似して、全体の挙動を予測しようとするものである。その特徴としては、形状が複雑な構造体や、複数の材料で構成されたものにでも対応しやすく、汎用性があり、適用分野が広い長所がある。一方、モデル規模が大きいと要素数が膨大となり計算負荷がかかる懸念がある。解析対象となる空間が何らかの対称性を有し、2 次元的に取り扱うことが可能であれば、分割した要素の総数もさほど問題にならない。しかしながら、本研究の解析対象のような一般 3 次元系を取り扱う場合に、3 次元空間を小さな要素で分割する同手法は、それらの要素の総数が膨大な数となる。

そこで本研究では、空間を分割するのではなく、導体表面あるいは誘電体界面のみを小さな微小面積として分割する境界電荷法を使用した。取り扱う系は、導体と誘電体から構成されるため、複合誘電体系における境界電荷法を用いている。境界電荷法は、表面を微小面積要素に分割しているので、分割要素が少なく済む長所がある。さらに、電界計算が、電位の微分を経由せずに直接計算が可能である長所も有する。電子軌道計算の場合は、電界計算を逐次実行しなければならないため、電界計算の時間と精度は本研究にとって重要な課題のひとつである。境界電荷法は、空間の電位から電界を求めるのではなく、導体の電極電位を誘電体と電極の境界面での見かけの電荷密度<sup>[6,7]</sup>に変換させる処理を行い、導体および誘電体界面上の見かけの電荷密度から、直接空間電界を求



める計算手法である。このため、計算精度が高くなおかつ極めて短時間での計算が可能である。

点  $\mathbf{R}_0$  の電界  $\mathbf{E}(\mathbf{R}_0)$  は、以下のように表される。

$$\mathbf{E}(\mathbf{R}_0) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint_S \nabla_{\mathbf{R}_0} \frac{\sigma(\mathbf{R})}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}_0|} dS \quad (5.1)$$

ここでの  $\nabla_{\mathbf{R}_0}$  は点  $\mathbf{R}_0$  における勾配を示し、積分は、点  $\mathbf{R}_0$  を固定して全面積  $S$  に亘って実行される。式 (5.1) は、各界面での見かけの電荷密度  $\sigma(\mathbf{R})$  を使って、空間の電位および電界を計算することが可能であることを意味している。

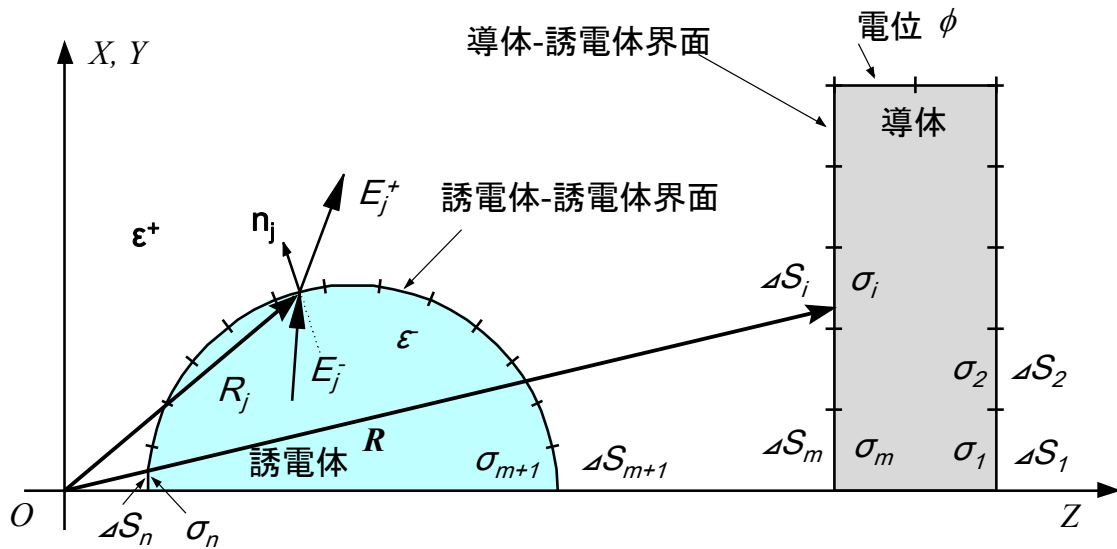


図 5-2 複合誘電体系の境界電荷法のモデル

いま、図 5-2 のような導体と誘電体から構成される複合誘電体系を考える。各界面に分布している見かけの電荷密度  $\sigma(\mathbf{R})$  を決定する過程で、まず、導体－誘電体界面は、 $m$  個の微小面積  $\Delta S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) に、そして、誘電体－誘電体界面は、 $(m-n)$  個の微小面積  $\Delta S_i$  ( $i = m+1, m+2, \dots, n$ ) に分割される。このとき、分割された個々の微小面積での見かけの電荷密度は一様と仮定する。

$$\sigma(\mathbf{R}) = \sigma_i \text{ on } \Delta S_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.2)$$

電位  $\phi_j$  は、見かけの電荷密度  $\sigma_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) を未知数とする以下の連立方



程式で表される。

$$\phi_j = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \sigma_i \iint_{\Delta S_i} \frac{1}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}_j|} dS \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5.3)$$

したがって、見かけの電荷密度 $\sigma_i$ は、以下の $n$ 元連立1次方程式で表される。

$$\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_m \\ (\sigma_t)_{m+1} \\ \vdots \\ (\sigma_t)_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mn} \\ B_{m+11} & B_{m+12} & \cdots & B_{m+1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{n1} & B_{n2} & \cdots & B_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_m \\ \sigma_{m+1} \\ \vdots \\ \sigma_n \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

ここでの係数マトリックス要素 $A_{ji}$ は、電位係数と呼ばれ、

$$A_{ji} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint_{\Delta S_i} \frac{1}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}_j|} dS \quad (i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m) \quad (5.5)$$

で与えられる。また、係数マトリックス要素 $B_{ji}$ は、

$$B_{ji} = (\epsilon_j^- - \epsilon_j^+) C_{ji} + \frac{\epsilon_j^+ + \epsilon_j^-}{2\epsilon_0} \delta_{ji} \quad (5.6)$$

$$(i = 1, 2, \dots, m, \quad j = m+1, m+2, \dots, n)$$

$$C_{ji} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint_{\substack{\Delta S_i \\ \mathbf{R} \neq \mathbf{R}_j}} \frac{\partial}{\partial n_j} \left\{ \frac{1}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}_j|} \right\} dS \quad (5.7)$$

で与えられる。上式で $\delta_{ji}$ は、クロネッカーのデルタを表す。添字の $i$ と $j$ が等しいときその値は1であり、それ以外ではゼロとなる。

式(5.5)の積分 $A_{ji}$ を見ると、 $i=j$ のとき、 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_j$ において特異点を含んでいる。このタイプの積分は、近特異積分<sup>[8]</sup>と呼ばれている。特異点を含む積分は、数値計算の分野において、精度良く計算することが容易でないとされている<sup>[9]</sup>。式(5.5)および式(5.7)は、通常、2重積分をそのまま数値的に実行することにより得られる<sup>[10,11]</sup>が、これには膨大な計算時間を必要とし、境界電荷法の実

用上の大きな障害となっていた。この問題点を克服するために、任意の導体および誘電体形状は、6つの基本モデル面（平面、円筒面、円錐面、円板面、球面、トーラス面）だけで構成することにより、式(5.5)の $A_{ji}$ および式(5.7)の $C_{ji}$ での2重積分のうち、1回の積分は解析的に実行可能なことがわかっている<sup>[12,13]</sup>。その結果、残りの1回の積分のみを数値的に実行するだけでよくなり、同手法の計算精度を一切落とすことなく、大幅に計算時間を短縮させることに成功している。本研究では、6つの基本モデル面のうち、平面のみを採用して、次項に示す実験装置の構成をモデル化した。

### 5-3-2 電子軌道を計算するシミュレーションモデルの構築

実験装置と同じ環境をコンピュータ上に構築するために、まず、構造体モデル<sup>[14]</sup>を設定する。図5-3は信号を検出する計測装置の構成をコンピュータ内でモデル化したものである。構造体モデルは、電子軌道への影響が特に大きい要因となる試料の形状、膜厚、試料下部の電極形状、また試料近傍の導体および誘電体を幾何学的に配置された。誘電体は誘電率を設定し、導体には電位を設定した。試料から離れた位置での構造物は電子軌道への影響が小さくなるので省略した。モデル化された誘電体試料と電極板を図5-4に示す。

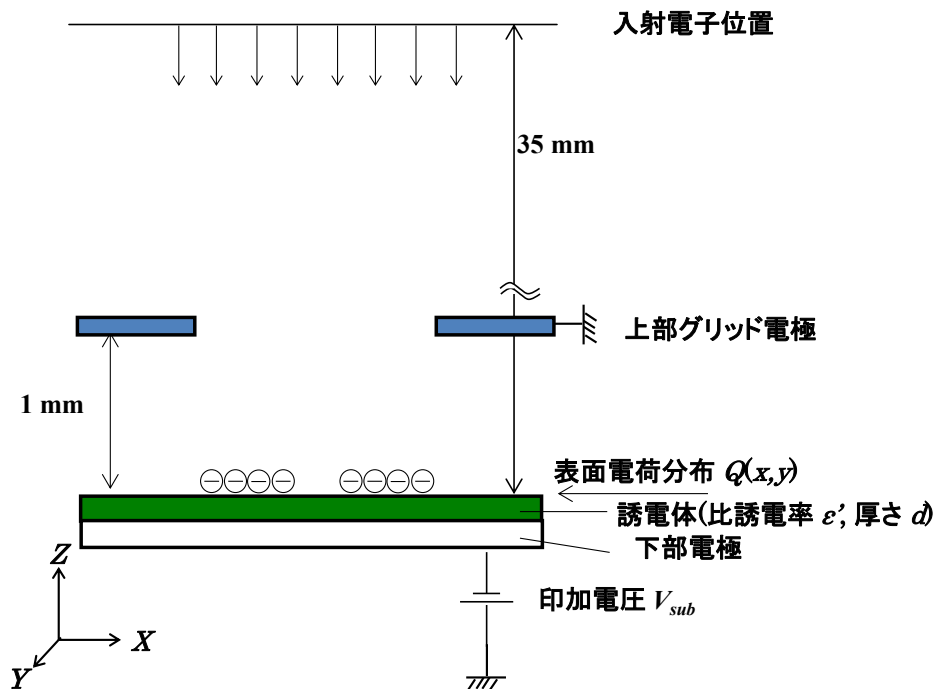
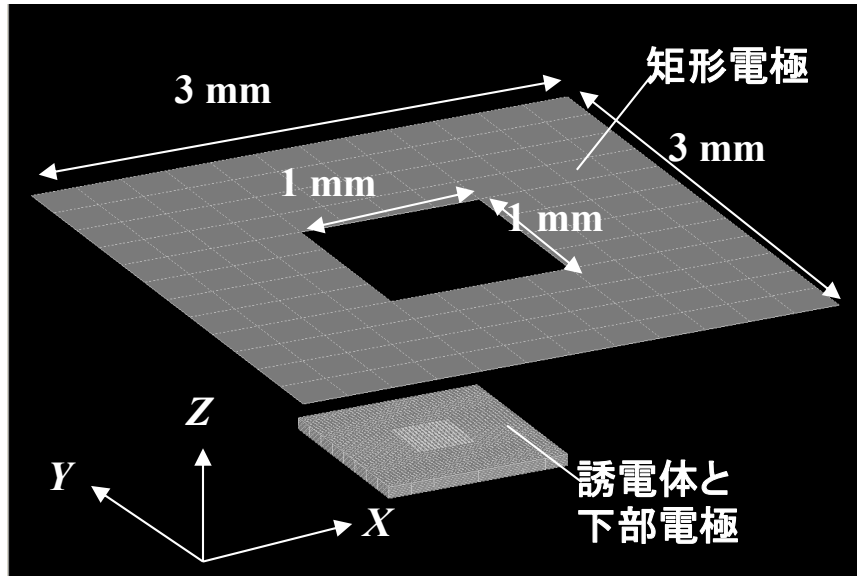
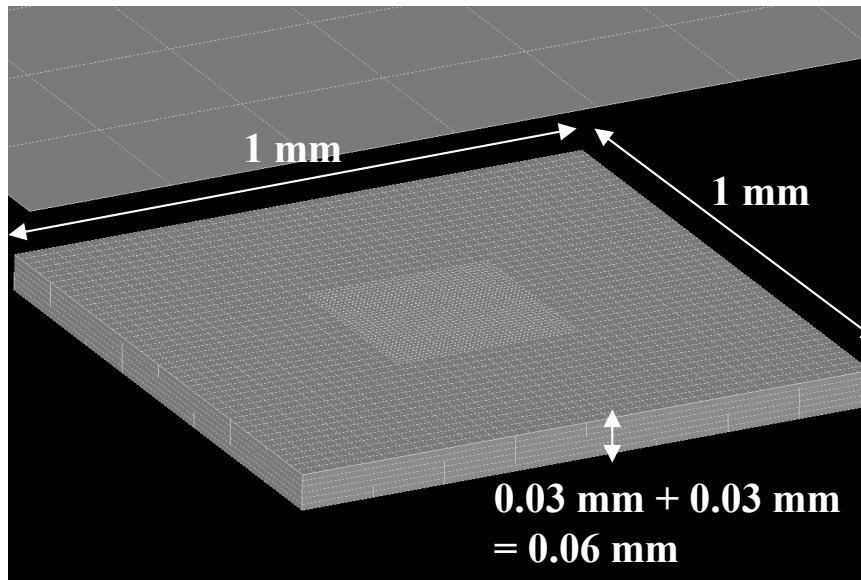


図 5-3 シミュレーションモデル（モデル化された計測装置）



(a) 誘電体試料と電極板

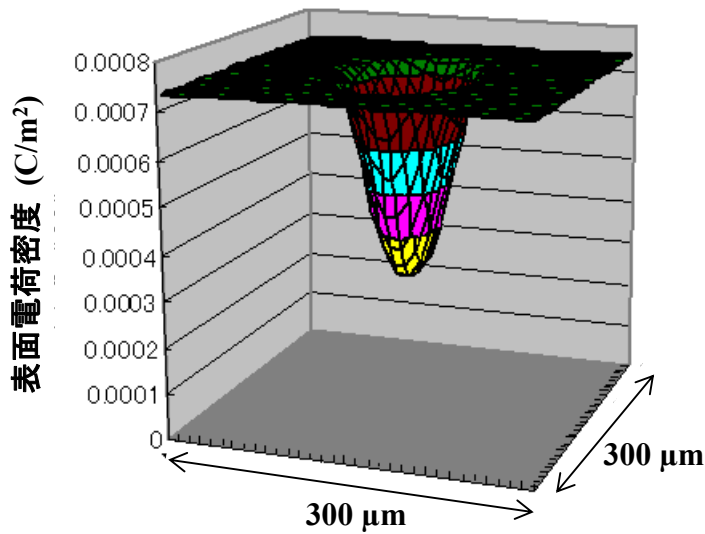


(b) 誘電体試料の拡大図

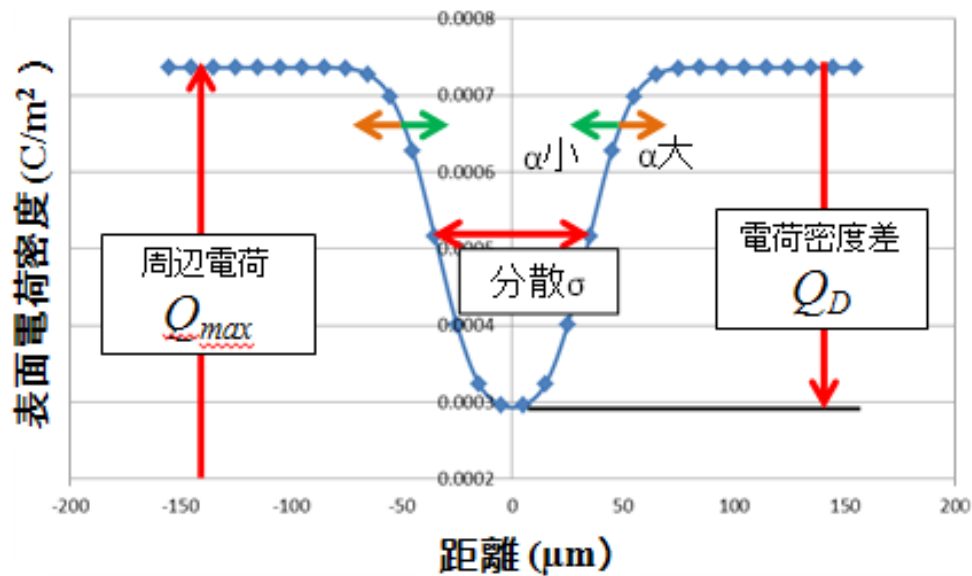
図 5-4 モデル化された誘電体試料と電極板

未知の初期表面電荷密度は、式 (5.8) で表される 2 次元ガウス分布の変形式に基づいた電荷密度分布を、シミュレーションの初期条件（境界電荷法の境界条件）として与えられる<sup>[14]</sup>。

$$Q(x, y) = Q_{max} - Q_D \times \exp \left\{ - \left( \frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right)^\alpha \right\} \quad (5.8)$$



(a) 表面電荷密度の3次元鳥瞰図



(b) X軸方向の断面プロファイル

図 5-5 試料表面に帯電していると仮定した初期の表面電荷密度分布

式 (5.8) での  $Q_{max}$  は周辺電荷密度の値、 $Q_D$  は電荷分布の中心部と周辺部の電荷密度差を示し、 $\sigma_x$  および  $\sigma_y$  は、それぞれ、その分布の  $x$  方向および  $y$  方向の分散を示す。 $\alpha$  は、その分布の尖鋭度を調整する係数であり、 $\alpha$  が大きくなるほ

どより尖った分布となる。図 5-5 (a) は、式 (5.8) で与えられた初期の表面電荷密度分布の 2 次元鳥瞰図を表す。図 5-5 (b) は、 $X$  軸方向の断面のプロファイルを示している。

つぎに、モデル化されたシミュレーション上で、電子の軌道計算を実行する。電子の軌道は、電子の運動方程式を微小時間毎に逐次数値積分することにより求められる。前節でも述べている通り、空間の任意の点の電位および電界は、誘電体界面および導体上に分布している見かけの電荷密度より算出される。

### 5-3-3 電子軌道計算方法

電子軌道を計算する方法としては、近軸軌道方程式<sup>[15,16]</sup>を用いる方法があるが、この方法では計算精度が足りない。このため静電界の場合は、クーロン力による電子の運動方程式を、静磁界の場合には、ローレンツ力による電子の運動方程式を、電磁界の場合には、クーロン力とローレンツ力の両方による電子の運動方程式を用い、常微分方程式の数値解法を用いて数値的に精度よく解く必要がある。計算精度を上げるためには、電界計算をする際の時間間隔をできるだけ小さく設定する方法がよい。しかしながら、電子軌道を計算する際の電界計算が、最も計算時間を必要とするアルゴリズムの一つであり、電子軌道計算ではその電界計算を逐次実行しなければならない。したがって非常に小さな時間間隔一定のままでは、その計算時間が膨大なものになってしまう。

常微分方程式の数値解法として用いるルンゲ・クッタ・ギル法の多くは、独立変数  $t$  の刻み幅  $\Delta t$  を一度定めたら、計算が終了するまでその間隔のままである。本計測条件の場合、試料表面近傍では電界が特に集中しているが、試料表面より遠く離れた場所では、ほとんど電界が存在しないフィールドフリーな空間である。このような問題を取り扱う場合、一般的には、電子の軌道計算を精度良く実行するために、最も電界が集中する箇所を想定して、独立変数  $t$  の刻み幅  $\Delta t$  を設定する。しかしながら、このように設定してしまうとその刻み幅  $\Delta t$  は非常に小さな値となるため、試料表面より遠く離れた電界がほとんど存在しない場所でも、電子軌道計算は非常に小さく設定された刻み幅  $\Delta t$  で実行されてしまい、必要以上に多くの計算時間を消費してしまうことになる。本シミュレーションモデルの場合、フィールドフリーな空間では  $\Delta t=1\times 10^{-11}$  秒の時間間隔で十分な精度が得られるが、電界が集中する試料近傍では  $\Delta t=5\times 10^{-14}$  秒と 1/200 小さな時間間隔に設定しないと十分な精度が得られない。

このため、高速かつ高精度に軌道計算するためには、適正な刻み時間を設定することが望ましい。そこで本研究では、まず時間間隔を  $\Delta t$  に設定し、1 ステップだけ電子軌道を計算する。つぎに、同じ条件のもとで、時間間隔  $\Delta t$  を半分

にして、2ステップで同様な計算を行う。そして、これら2つの結果より時間間隔  $\Delta t$  を動的に可変して計算する方法を用いている。時間間隔を可変にする場合、各ステップ3回の電界計算が必要であるが、時間間隔を最初のステップのままで可変しない場合、計算精度のチェックをする必要がないので、各ステップ1回の電界計算でよい。したがって、単純に計算すると、計算速度の比は  $=1 \times 10^{-11} \div 5 \times 10^{-14} \times (1/3) = 66.7$  倍となる。すなわち、フィールドフリーな空間を電界が集中する空間の時間間隔で電子軌道計算する  $\Delta t$  一定の方法と比較して、 $\Delta t$  を可変する電子軌道の計算時間は、最大67倍速くなる可能性がある。

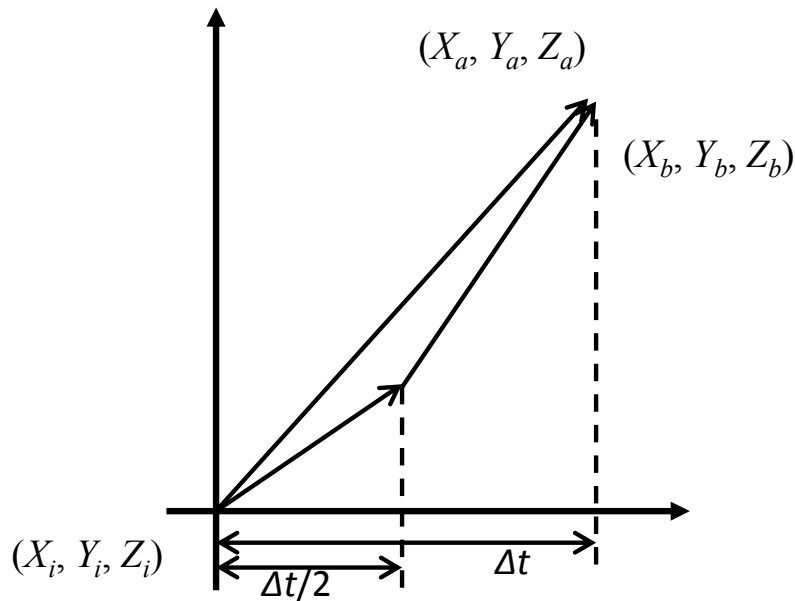
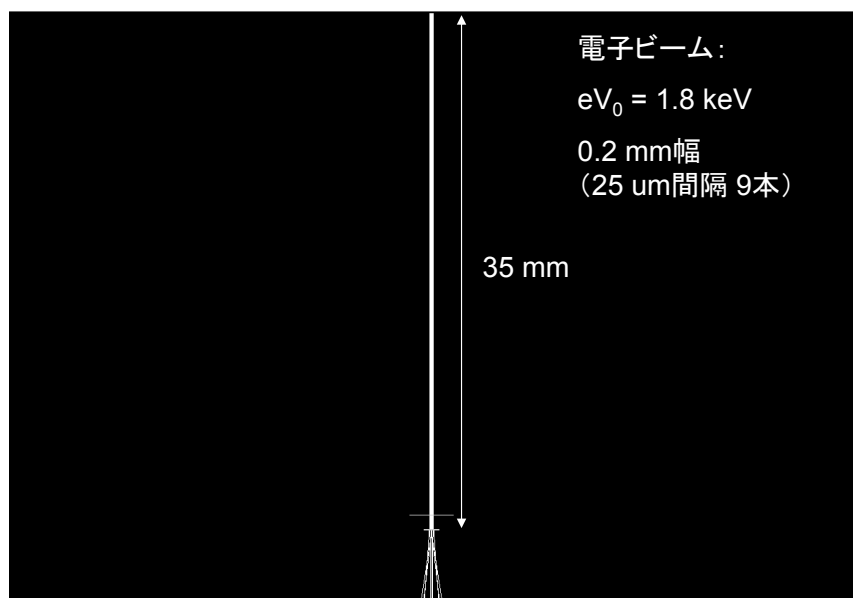


図 5-6 時間間隔を可変して電子軌道を計算する模式図

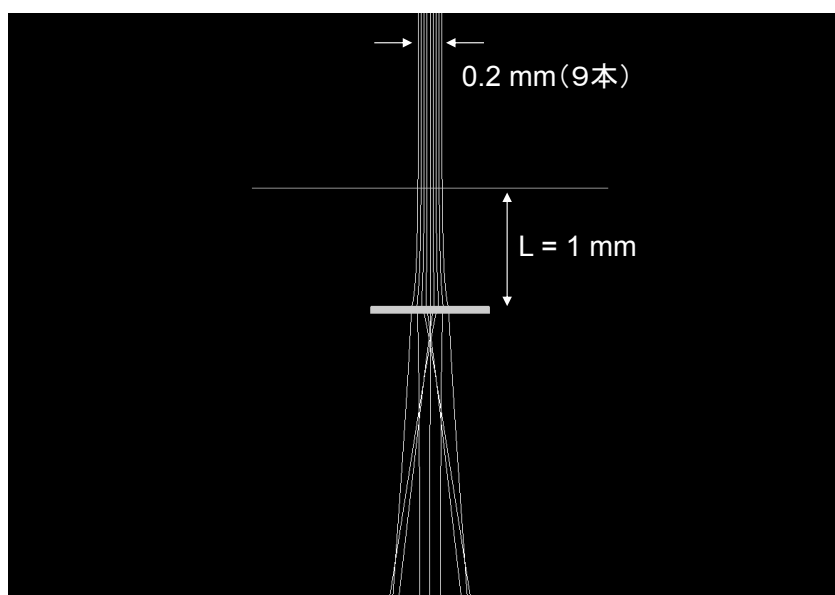
図 5-6 は時間間隔を可変して電子軌道を計算するイメージをグラフで示したものである。この方法を詳しく説明すると、まず、起点  $P_0(X_i, Y_i, Z_i)$  の位置から次のステップ位置である  $(X_i+1, Y_i+1, Z_i+1)$  を計算するとき、時間間隔  $\Delta t$  で1ステップ目の計算で座標  $P_1(X_a, Y_a, Z_a)$  が得られる。これを (a) 計算と定義する。つぎに、その時間間隔を半分にした  $\Delta t/2$  で電子軌道を計算したときの座標  $P_2$  を新たな起点とし、もう一度時間間隔  $\Delta t/2$  で、電子軌道を計算する2ステップ目の計算で座標  $P_3(X_b, Y_b, Z_b)$  が得られる。これを (b) 計算と定義する。(a) 計算と(b) 計算とを比較し、それぞれの座標の値を相対誤差  $P_3 - P_1$  により評価する。もし、それらの誤差が設定された許容値より小さい場合には、 $(X_b, Y_b, Z_b)$  を解  $(X_i+1, Y_i+1, Z_i+1)$  として採用する。そして、次のステップの計算からは、 $\Delta t$  の値を倍にして再び (a) 計算と (b) 計算を実行する。逆に、誤差が設定され

## 第5章：逆問題解析による潜像電位分布の導出

た許容値に達していない場合は、もう一度同じ計算を、時間間隔  $\Delta t$  を半分にして、(a), (b) 両方の計算とも実行する。さらに、それでも精度に達しない場合は、もう一度時間間隔を半分にして (a), (b) 両方の計算をともに実行する。



(a) 電子軌道（広域図）



(b) 電子軌道（拡大図）

図 5-7 シミュレーションの電子軌道の一例

このようにして、設定された許容値に達するまで時間間隔  $\Delta t$  を半分にして計算を実行し、設定された許容値に達したところで、 $(X_b, Y_b, Z_b)$  の値を解  $(X_i+1, Y_i+1, Z_i+1)$  として採用する。また、時間間隔  $\Delta t$  を倍にした場合でも、計算精度の判定は実行され、もし、設定された許容値に達していなければ、直ちに、時間間隔  $\Delta t$  を半分に戻して計算をやり直す。こうすることにより、ステップ幅を倍にしたために所定の精度が得られなくなってしまう場合にも対応することが可能となる。

電子の放出位置は、試料表面 ( $Z=0$ ) より上方へ 35 mm 離れた位置 ( $Z=35$  mm) に設定され、電子の初速度（初期エネルギー）は 1800 eV（電子の加速電圧  $V_{acc} = -1800$  V）となる。電子の放出方向は、試料面に対して垂直方向に設定された。その電子軌道の様子を図 5-7 に示す。これらを見ると、照射された電子は、試料表面に帯電している電荷密度と下部電極の電位によりその軌道が変化していることが分かる。この結果は、本方法を用いた電子軌道計算が精度よくできていることを示している。

### 5-3-4 一次電子検出の境界値判定

図 5-8 は、電荷分布を与えられた試料に対して、下部電極  $V_{sub}$  を  $-1020$  V から  $-1220$  V まで 40 V 刻みで変化させたときの入射電子軌道計算による電子の軌跡と空間電位を表示したものである。 $V_{sub}$  の値で、入射電子が試料に到達する位置が異なっていることがわかる。

静電潜像の横幅は、試料表面の表面電荷密度と試料下部電極の電位により、入射電子が到達する領域の大きさを示している。実際には、実験と同様に、電子が試料へ到達する場合の電子軌道の放出位置と、電子が試料へ到達する前に反転されてしまう場合の電子軌道の放出位置との境界の領域  $X$  を求めることになる。

このシミュレーションより得られる境界の領域  $X$  を、以下「シミュレーションから算出された  $V_m$  分布」と呼ぶことにする。入射電子が試料に到達せずに反転する領域と、試料に到達する領域の境界を検出することにより、電子軌道計算から、試料反転領域と試料到達領域の境界値を算出する。境界値を検出する最も単純な方法は、要求される分解能（例えば 1 画素毎）で等間隔に電子軌道を計算することである。しかしながら、この方法では、解像度が VGA (640x480 画素) 程度でも約 30 万本、1 ラインに限定しても 640 本の電子軌道を計算する必要があるため現実的でない。また、単純に電子の放出間隔を間引いて、本数を減らして電子軌道の計算を行う場合には、計算時間を短縮できるが、電子軌道の数が少ないために計算精度を落としてしまう。



## 第5章：逆問題解析による潜像電位分布の導出

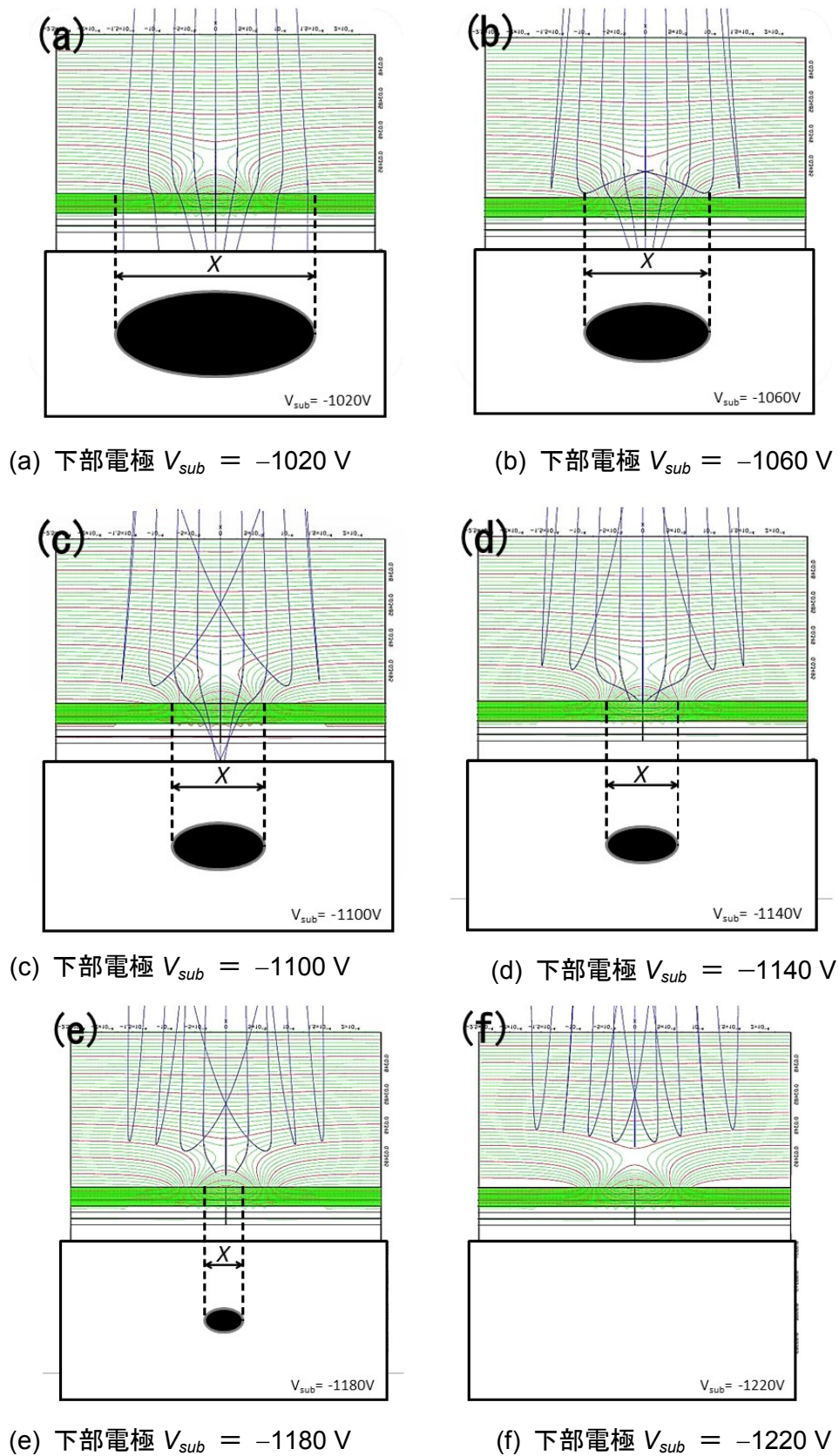


図 5-8 下部電極電圧の違いによる電子軌道計算

そこで、本シミュレーションでは、電子の放出位置の精度向上と計算時間短縮のため、数値計算でよく用いられる二分法<sup>[14]</sup>を用いて、これらの計算を行った。二分法とは、一次電子が試料に到達せずに反転する条件での試料面に平行な入射開始座標を  $X_i$ 、一次電子が試料に到達する条件での試料面に平行な入射開始座標を  $X_j$  としたときに、 $X_i$  と  $X_j$  の中間点  $(X_i + X_j)/2$  を入射開始座標として電子軌道を計算する操作を繰り返すことで境界値を決定する方法である。

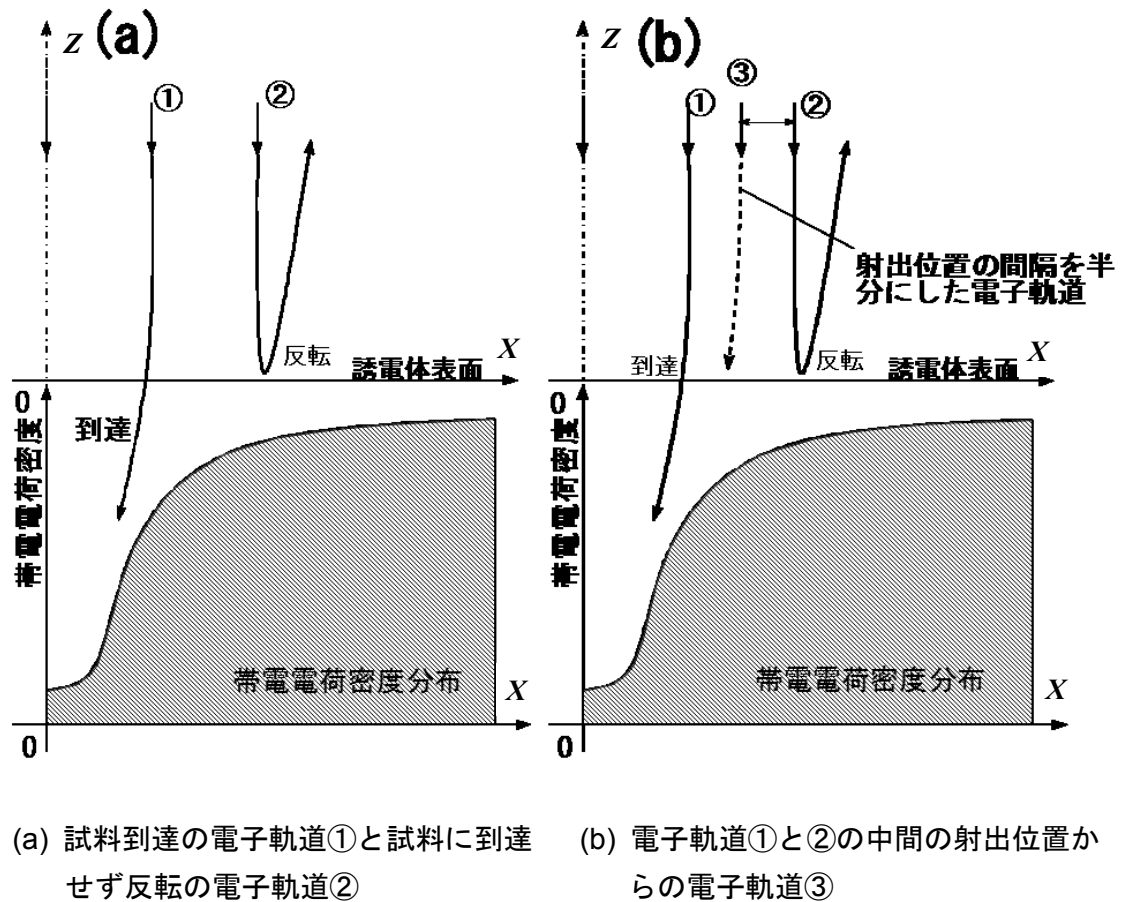


図 5-9 二分法による境界値判定モデル

図 5-9 に二分法による境界値判定モデルを示す。境界値は、試料に到達した射出位置の電子軌道（図 5-9 (a) の ①）と、試料到達前に反転した射出位置（図 5-9 (a) の ②）の電子軌道間に存在するものとして、その到達および反転位置の中間の位置（図 5-9 (b) の ③）から電子軌道計算を実行する。そしてその電子が到達したか反転したかを判定することで、境界値の領域を絞り込む。上記操作を繰り返し実行することにより、1 回の軌道計算で射出位置の間隔を  $1/2$  ずつ狭めることができる。

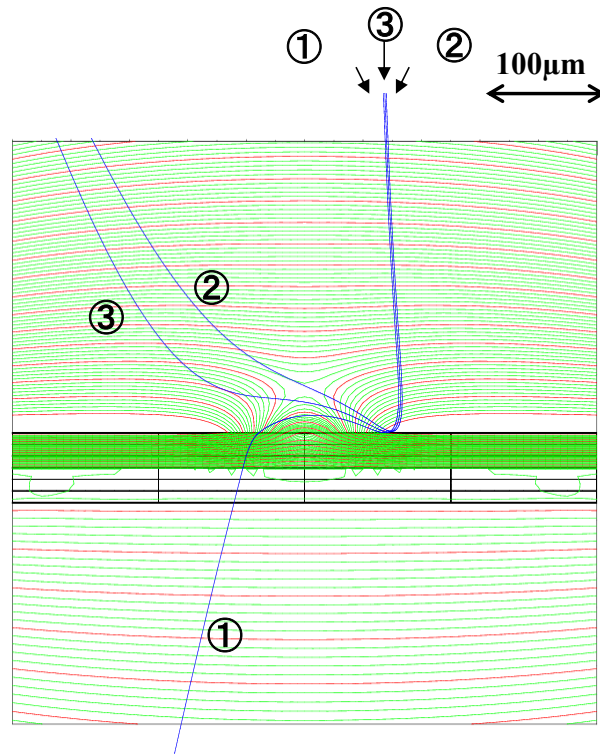


図 5-10 二分法による境界値判定

以下に実際のシミュレーションで実行している具体的なステップを示す。

1. 各射出位置の電子が試料表面上へ到達するか、到達する前に反転するかを判定する。図 5-10 は、 $V_{acc} = -1.8 \text{ keV}$  の入射電子が、試料表面より  $35 \text{ mm}$  上方から、垂直方向に入射させたときの電子軌道である。① が  $X_i = 62 \text{ } \mu\text{m}$  で試料到達 ② が  $X_j = 64 \text{ } \mu\text{m}$  で試料到達前に反転であることから、境界値は、① の電子軌道と ② の電子軌道の間、すなわち  $62 \sim 64 \text{ } \mu\text{m}$  の間であることが確定される。
2. 到達した電子軌道の射出位置と反転した電子軌道の射出位置の間に、到達するか反転するかの境界が存在するものとして、そのちょうど中点の射出位置である  $X_k = 63 \text{ } \mu\text{m}$  から（図 5-10 の③のように）電子を打ち込み、さらに到達するか反転するかの境界を絞り込む。試料到達前に反転であることから、境界値は、① と ② の間、すなわち、 $62 \sim 63 \text{ } \mu\text{m}$  の間であることが確定される。
3. 上記 4 を繰り返し実行することにより、射出位置の間隔を二分法により  $1/2$  ずつ狭め、到達する領域と反転する領域の境界を特定する。
4. このとき、その最終的な放出位置を  $X$ 、 $V_{th} = V_{acc} - V_{sub}$  を  $Y$  として、 $V_{th}$  分布の 1 点をプロットする。
5. つぎに、下部電極の電位  $V_{sub}$  を変更して設定し、見かけの電荷密度を求める。

その後、上記1～4の過程を実測の範囲で繰り返し実行する。

以上のようにして、「シミュレーションから算出された  $V_{th}$  分布」の一連のデータを求めることができる。このように二分法を用いることで、N 画素の判定に  $\log_2 N$  回の計算で境界値を決定することができ、計算時間の大幅な短縮化に成功している。図 5-11 は、実際に、図 5-5 のような表面電荷密度分布を初期条件として与えた場合での「シミュレーションから算出された  $V_{th}$  分布」の一例である。

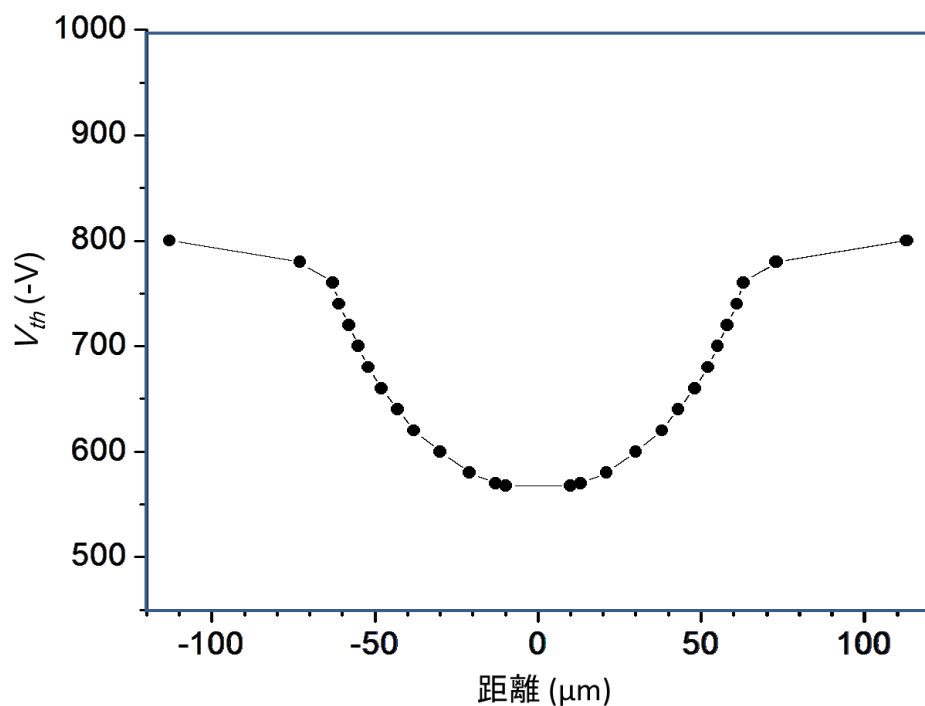


図 5-11 シミュレーションから算出された潜像プロファイル ( $V_{th}$  分布)

### 5-3-5 実測とシミュレーションの比較および電荷修正

図 5-12 は、実測とシミュレーションとを比較し、電荷を修正しながら、電荷分布を探索することで、表面電荷密度および表面電位分布を導出するフローチャートである。図 5-12 に示される「電荷密度分布の修正」は、以下のような手順で行われる。

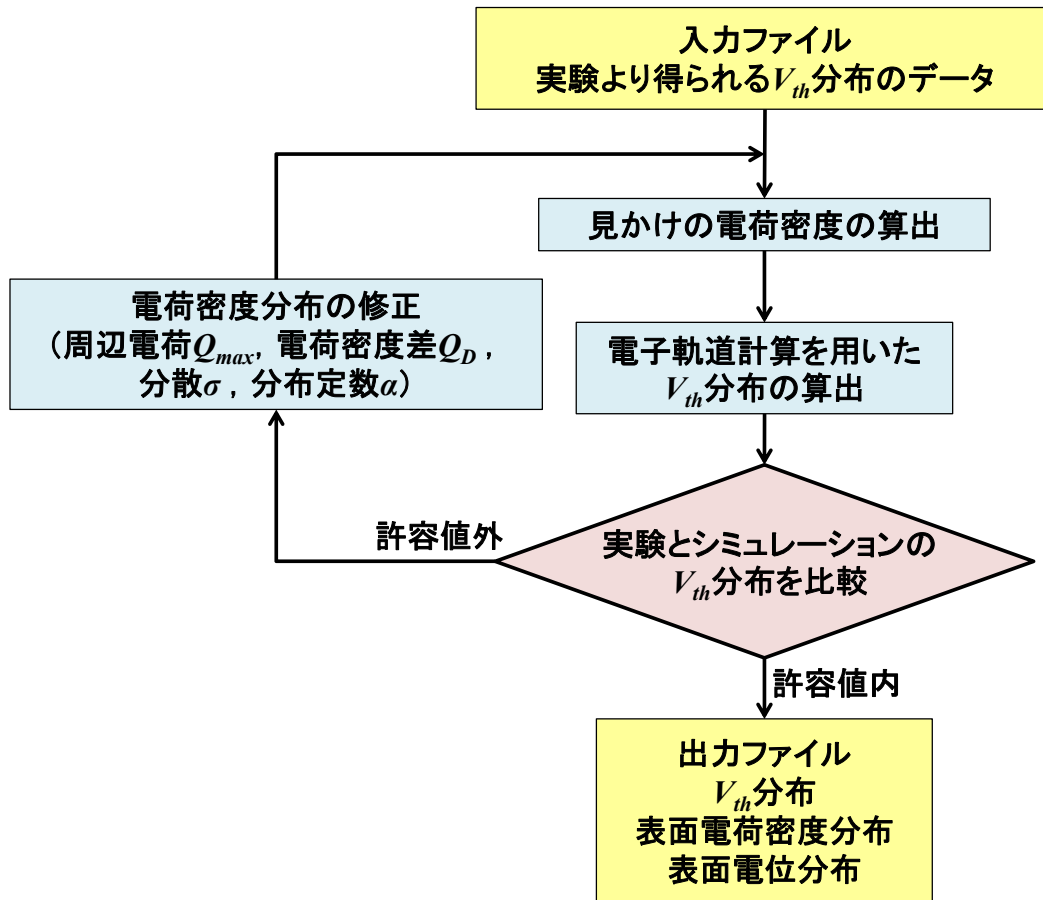


図 5-12 表面電荷密度および表面電位分布導出のフローチャート

1. 「実験から得られた  $V_{th}$  分布」と「シミュレーションから算出された  $V_{th}$  分布」の最大値を比較し、両者の差が小さくなるように、表面電荷密度分布の最大値  $Q_{max}$  をその差の分だけ係数倍して修正を行い、シミュレーションを繰り返し実行する。
2. 「実験から得られた  $V_{th}$  分布」と「シミュレーションから算出された  $V_{th}$  分布」の半値幅を比較し、両者の差が小さくなるように、表面電荷密度分布（正規分布の変形式）の分散  $\sigma$  および係数  $\alpha$  を修正し、再びシミュレーションを繰り返し実行する。
3. 「実験から得られた  $V_{th}$  分布」と「シミュレーションから算出された  $V_{th}$  分布」の中心での電荷密度差を比較し、両者の差が小さくなるように  $Q_D$  を修正し、再びシミュレーションを繰り返し実行する。

上記 1～3 を繰り返し実行し、両者の差が設定された範囲内に収まったとき、境界電荷法の境界条件である真電荷密度（式（5.4）の左辺の  $\sigma_t$ ）が、最終的に求めたい試料表面の表面電荷密度分布となる。また、そのときの解である見か

けの電荷密度（式（5.4）の右辺の $\sigma$ ）より、試料表面の電位分布が算出される。

## 5-4 計算結果と検証

本節では、実際に試料表面に帯電している試料に対して、 $V_{th}$  分布を測定し、開発したシミュレーションを適用して、電荷密度分布および表面電位分布を探索できるかを検証した。シミュレーションにおける初期条件の表面電荷密度として、2次元ガウス分布の変形式（5.8）に基づいた電荷密度分布を与えたとき、その表面電荷密度分布を用いて「シミュレーションにより算出された  $V_{th}$  分布」と「実験から得られた  $V_{th}$  分布」は、図 5-13 のようであった。

これを見ると、両者の間には、幅および深さともに大きな差があることが分かる。この「シミュレーションにより算出された  $V_{th}$  分布」は、図 5-12 のフローチャートにしたがって、「実験から得られた  $V_{th}$  分布」にほぼ一致するまで、表面電荷密度分布の形状を変化させ、シミュレーションを繰り返し実行した。その結果、最終的には図 5-14 のような「シミュレーションから得られた  $V_{th}$ 」を得ることができた。

図 5-14 では、比較のために「実験から得られた  $V_{th}$  分布」も併せて表示している。これを見ると、両者の差はほとんどなくほぼ一致していることが分かる。また、このときの電荷密度分布は、図 5-15 (a) のようになり、式（5.4）を解くことにより、見かけの電荷密度に変換される。図 5-15 (b)は、この見かけの電荷密度を用いることによって算出された潜像電位分布を表している。

また、図 5-15 (a) および (b) のグラフの中の図は、それぞれ電荷密度分布の等高線図と表面電位の等電位図を示している。このようにして、これまで試料表面に帯電した未知の表面電荷密度の分布形状やその量を、間接的にはあるが、精度良く見積もることができる。実験データや初期の表面電荷密度分布の状態にもよるが、以上のような結果を得るまでに約 9 回の繰り返し計算（電荷密度の修正）を行った。これらの一連の計算に費やされる時間は、本手法では、最終的な結果を得るまでに約 1 日（CPU Intel Core i7 の計算機を用いた場合）を必要としてしまう場合がある。これは、シミュレーションによる  $V_{th}$  分布を精度良く求めるために電子軌道計算を多く実行する必要がある、これに多くの計算時間を費やすためである。

電子軌道計算を実行して  $V_{th}$  分布を精度よく計算する代わりに、その特徴量を抽出して比較および照合するなど、シミュレーションの精度を落とすことなく電子軌道計算回数を省略できる方法を用いることで、さらなる計算時間を短縮できると考えている。

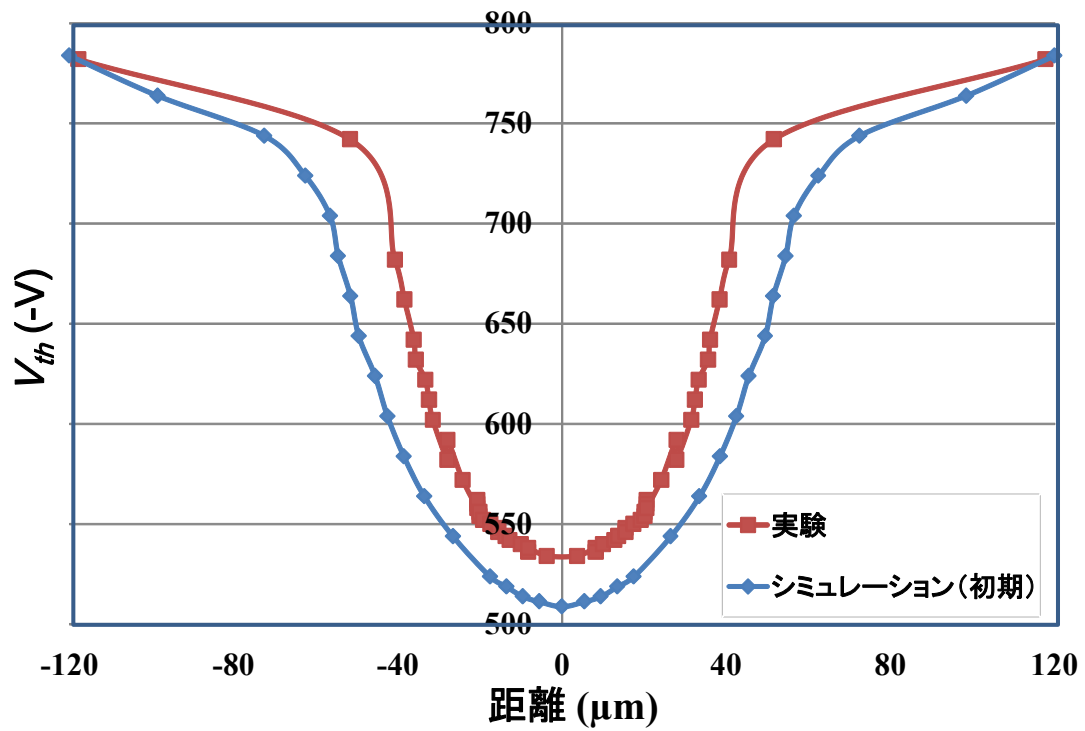


図5-13 実験から得られた  $V_{th}$  分布とシミュレーションにより算出された  $V_{th}$  分布(初回)の比較

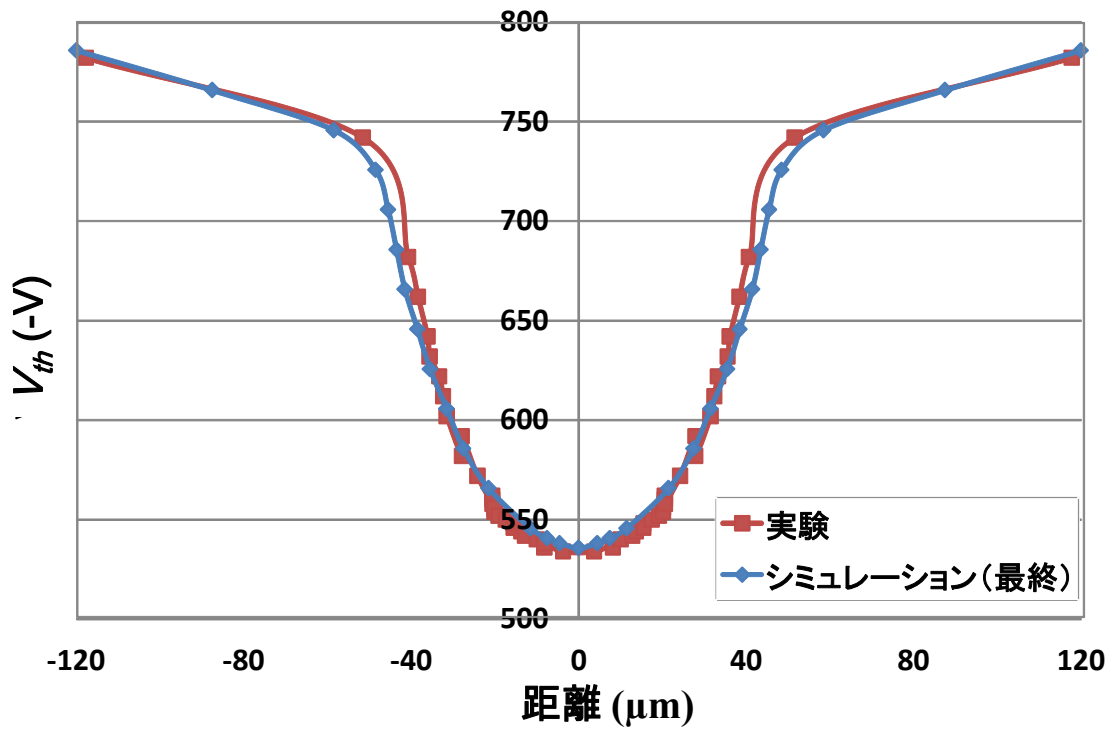
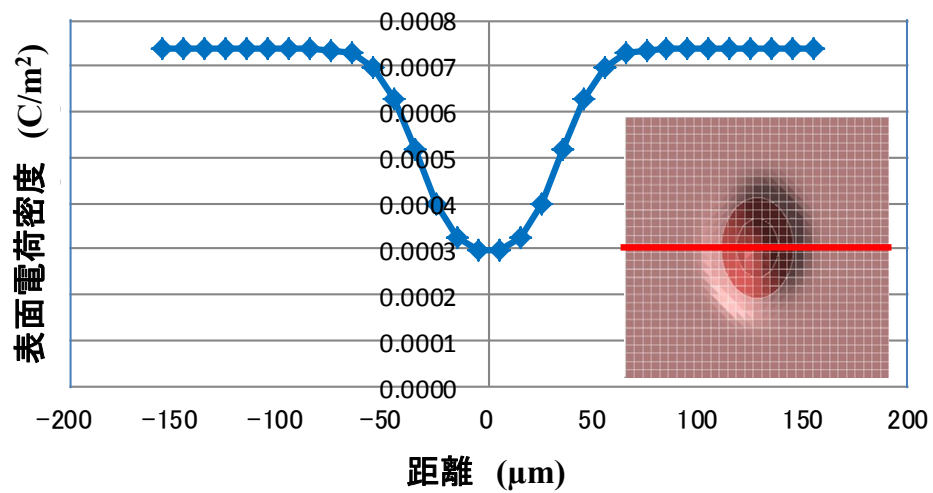
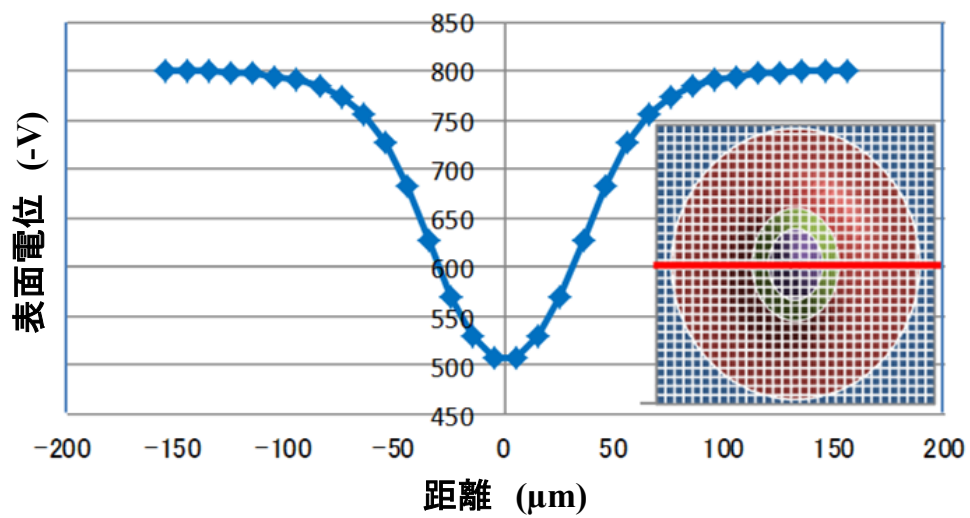


図 5-14 実験から得られた  $V_{th}$  分布とシミュレーションにより算出された  $V_{th}$  分布(最終結果)の比較





(a) 最終的に得られた表面電荷分布



(b) 最終的に得られた表面電位分布

図 5-15 最終的な結果で得られた試料の表面電荷分布および表面電位分布



## 5-5 結 言

本研究では、空間の任意の点の電位・電界や電子軌道計算を高速かつ高精度に計算することが可能な一般 3 次元境界電荷法を用いて、潜像電位分布を導出するシミュレーションの開発を行った。具体的にはコンピュータ上に実験装置と同じ環境を構築し、実験で得られる潜像プロファイル分布 ( $V_{th}$  分布) と、コンピュータ上で電子軌道計算によるシミュレーションにより算出された  $V_{th}$  分布とを比較および照合することで、未知の電荷密度分布を探索する方法である。境界値判定では、二分法を用いることで計算時間の短縮化を実現することができた。その結果、従来方法では困難であった感光体表面の潜像電位分布を計測することに成功した。

本論文では、測定対象となる未知の電荷密度分布は、2 次元ガウス分布の変形式で近似できるパターンに限定されているが、この技術を応用することで、ライン状の電荷や複数の潜像パターンなど実機に近い複雑なパターンへも適用も可能であると考えている。

## 第6章

### 潜像特性の解析および潜像設計への指針

#### 6-1 緒言

電子写真にとって、露光から潜像形成に至るプロセスを理解することは重要であり、潜像形成パラメータの特性値を評価する研究事例がこれまでも報告されている。感光体に期待される性能としては、より鮮明な画像と高い耐久性の両立<sup>[1]</sup>が求められており、感光体の電荷移動度などの特性値をパラメータとして潜像測定を行った研究事例がある<sup>[2-4]</sup>。また、レーザー露光に対する相反則不軌<sup>[5]</sup>の影響を評価した報告がある<sup>[6,7]</sup>。相反則不軌とは、光照度と露光時間の積が一定ならば、反応する物質の量も同じになるという相反則が成立しないことであり、露光と感光体の複合要因が静電潜像に影響する特性である。そのほかにも、レーザー走査光学系の特性値と画像品質を潜像形成の視点での関係把握に取り組む研究も報告されている<sup>[8-10]</sup>。しかしながら、これらの研究事例では、静電潜像をドットレベルで計測できなかったため、測定可能な広い領域でのマクロ評価やシミュレーション予測に基づいており、実測に基づくドットサイズスケールでの静電潜像への影響が不明確であった。

これまでに、静電潜像計測の基本原則と計測システム開発による可視化技術（第2章）、要素技術である静電潜像の形成（第3章）、潜像電位の検出（第4章）、逆問題解析による潜像電位分布の導出（第5章）に関する研究について述べてきた。これらの技術開発により、電子写真プロセスの解析技術として、静電潜像をミクロンスケールの高分解能で可視化し定量化計測することが可能となった。

本章では、これらの計測技術を活用した事例として、露光条件と潜像特性、感光体材料と潜像特性の潜像解析および考察を述べる。感光体の膜厚と潜像解像度の関係については、マスクパターン露光光学系を用いて評価する。つぎに、マルチビーム走査光学系で生じる画像濃度むらの原因とされる、相反則不軌の評価実験を行い、相反則不軌のメカニズムについて考察する。そして、露光ビームの潜像形成能力を評価する新たな方法について述べた後、最後に静電潜像、現像、紙画像の相関関係を把握し、静電潜像が現像に与える影響について考察する。

## 6-2 静電潜像特性の解析

静電潜像計測技術を活用した事例を述べるにあたり、本節の実験条件を示す。ビームスポット径については、様々な条件で行っているので、実験毎に示すことにする。記載がない場合には、表 6-1 の実験条件で測定した。

表 6-1 実験条件

サンプル	有機感光体 (OPC)
サンプルサイズ	最大 20 mm 角
帯電電位	-800 V
レーザー波長	655 nm
ビーム数	1
露光エネルギー密度	1.5～8 mJ/m <sup>2</sup>
測定方法	二次電子検出による可視化計測

### 6-2-1 露光エネルギーと潜像特性

露光パラメータと静電潜像特性を把握するため、露光エネルギーを変化させたときの、静止ビームスポット潜像の潜像径を測定した結果を図 6-1 に示す<sup>[11]</sup>。測定は二次電子検出による可視化計測法を用いた。ビームスポット径は横 28  $\mu\text{m}$ 、縦 43  $\mu\text{m}$  (H28  $\mu\text{m}$ ×V43  $\mu\text{m}$ ) の楕円ビームであり、横方向の潜像径を測定した。なお、感光体および帯電条件は一定である。

測定結果を見ると、ビームスポット径が一定であるにも関わらず、露光エネルギーの増加にともない潜像径が大きくなることが明らかになった。この事実は、静電潜像の大きさがビームスポット径で一意的に決定されるわけではないことを示している。静電潜像の大きさは、露光エネルギーすなわち光子数に応じて消失した電子数で決まると考えれば、潜像径が露光エネルギーの増加にともない大きくなることを説明できる。また、一般的に潜像径はビームスポット径に比べて、全体的に大きい傾向にあるが、その理由は、電荷が電荷輸送層 (CTL) の移動にともなってクーロン反発により広がった結果であり、予測と一致する。ただし、図 6-1 の測定結果で示されるように、露光エネルギー密度 2.1 mJ/m<sup>2</sup> の条件では、潜像径がビームスポット径に比べて小さいという結果を得た。小さい静電潜像を形成するためには、ビームスポット径の小径化が一番の有効な方法であることは第 1 章で述べた。それに対して、本測定結果は、ビームスポット径よりも小さい静電潜像も設計可能であることを示唆している。

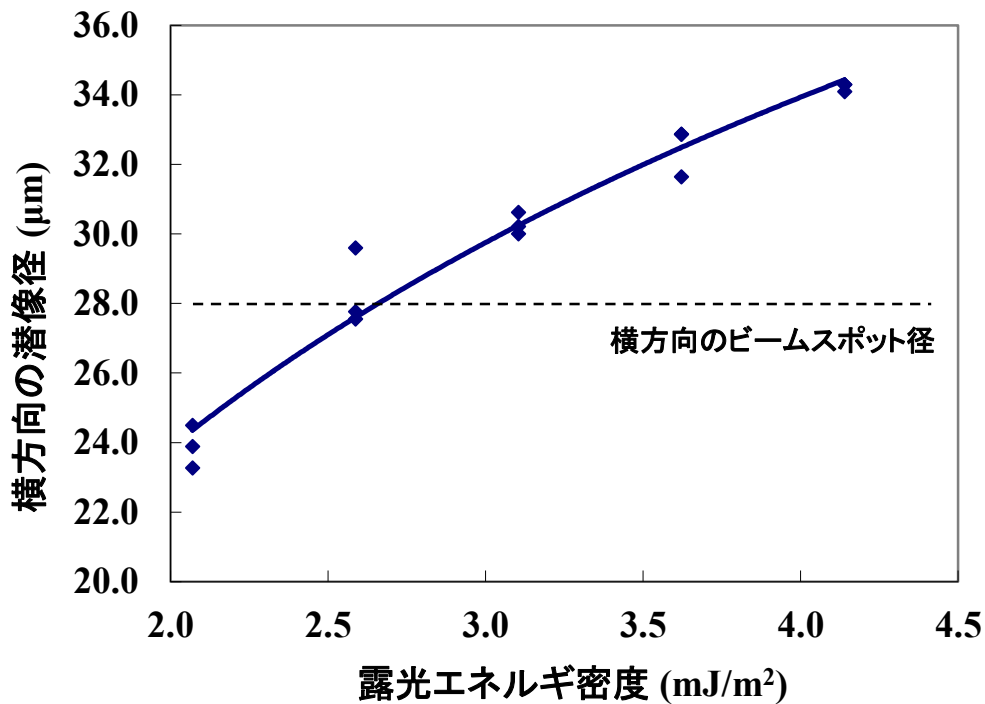


図 6-1 露光エネルギー密度と潜像径の関係  
(ビームスポット径：H28 μm×V43 μm)

### 6-2-2 露光パターンと潜像特性

図 6-2 は、第 3 章の図 3-28 の孤立 1 ドットと 1 ドット繰り返しパターン条件に対して、露光エネルギーを変化させたときの潜像径の測定結果である。横軸は露光エネルギー密度であり、縦軸は、計測された潜像面積を元に真円に換算した潜像円相当径である。潜像円相当径は、式 (6.1) で与えられる。

$$\text{潜像円相当径} = 2 \times \sqrt{\frac{\text{潜像面積}}{\pi}} \quad (6.1)$$

測定方式は二次電子検出による可視化計測法を用い、露光は走査ビーム光学系を用いた。ドットパターン以外の露光条件および帯電・感光体条件は一定である。測定結果を見ると、レーザーの点灯時間が一定の場合には、1 ドット繰り返しの静電潜像に比べて、孤立 1 ドットの静電潜像が大きく形成されることが明らかになった。孤立ドットに比べて繰り返しドットは、周辺電位が孤立ドットに比べて相対的に減少し、潜像電界が鈍ったために起きたと考えられる。ド

ットサイズを揃えるためには周辺ドットとの干渉の影響を考慮した潜像を設計する必要がある。

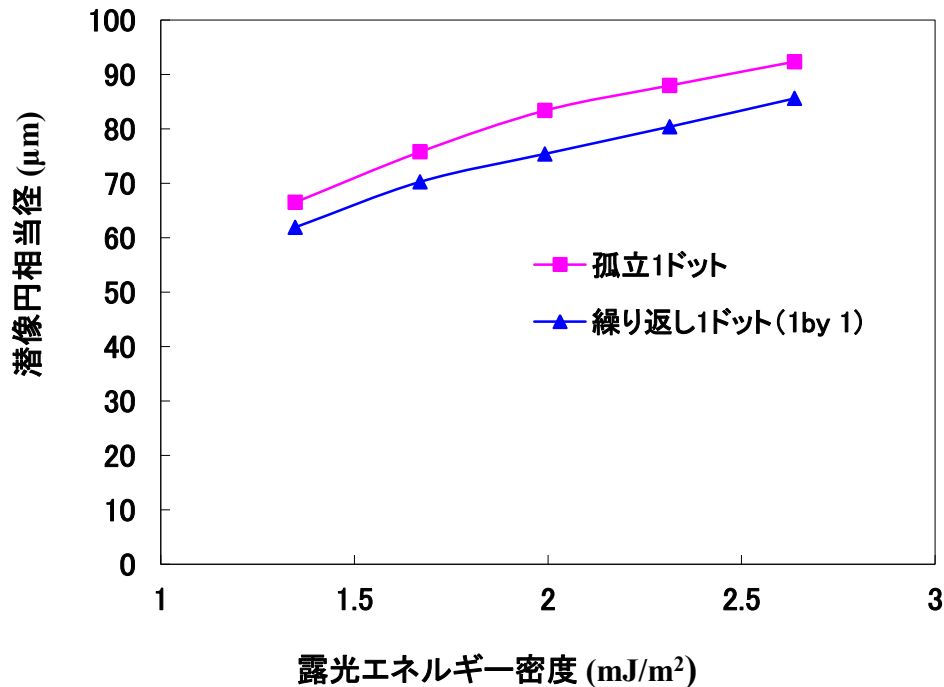


図 6-2 孤立 1 ドットと繰り返しドットの潜像径の測定結果

### 6-2-3 レーザービームのサイドローブと潜像特性

レーザービームのビームスポット径は、一般的に、メインローブ中心の光強度の  $1/e^2$  すなわち、13.5%のレベルで測定された光強度分布の幅と定義されている。これはガウシアンビームの伝搬が基本となっていることに由来する。しかしながら、実際の電子写真では、アパーチャを通過しているので、理想的なガウシアンビームのプロファイルではなく、サイドローブが存在する。このため、ビームスポット径の算出において 13.5%以下の光強度は無視される。このサイドローブ低減が光学設計する上で、重要な要求項目であることはわかっていたが、実際に、サイドローブの大きさがどの程度で静電潜像として可視化されるかは明らかでなかった。

そこで、特殊なアパーチャを用いることで、像面上でメインローブ径が同じで、サイドローブピークのみが異なる露光光学系を設計試作した。図 6-3 は、実

験に使用したサイドローブピークが異なる 2 種類のビームプロファイルを示している。

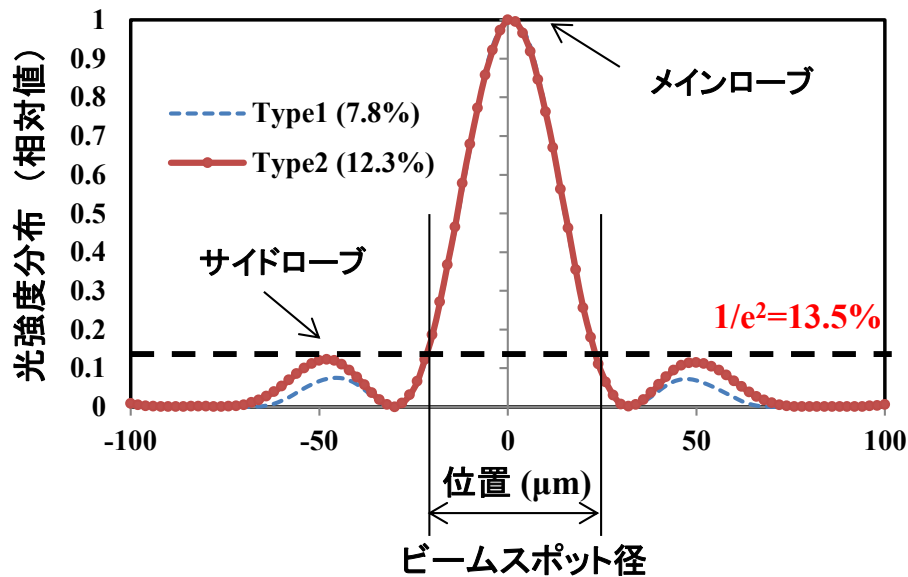


図 6-3 実験に使用したビームプロファイル

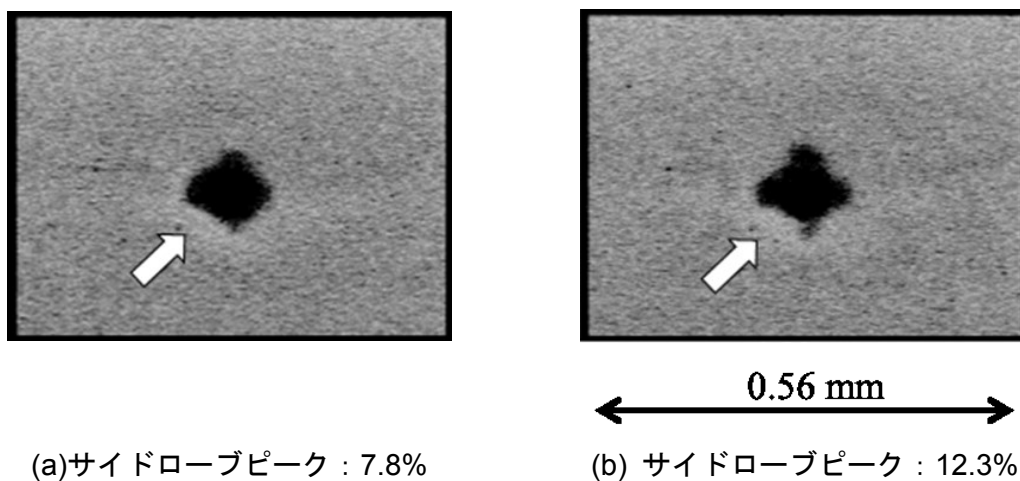


図 6-4 サイドローブピークの静電潜像への影響  
(ビームスポット径 : H45 μm×V50 μm. 帯電電位 : -600 V)

図 6-4 は、図 6-3 で示されたサイドローブピークが異なるビームプロファイルを露光したときの静電潜像である。ビームスポット径は H45 μm×V50 μm、帯電電位は-600 V であった。図 6-4 の潜像測定結果を見ると、サイドローブピークはメインローブピークの 12.3% 条件 (図 6-4 (a) ) では静電潜像として完全に顕在化していることが明らかになった。また、サイドローブピークが 7.8% という

小さなピーク（図 6-4 (b)）でも静電潜像として可視化していることが明らかになった。そして、サイドローブが大きい程、露光エネルギー密度による静電潜像の大きさが敏感に変化し、再現性が低下する傾向にあることがわかった。また、サイドローブピークの増加にともなってドットが分離しにくくなることも明らかになった。このように、高画質プリンティングに向けて、サイドローブの最適化設計は重要なパラメータのひとつであることが確認できた。

#### 6-2-4 感光体材料と潜像特性

電子写真の高画質化に向け、感光体には、レーザー照射による露光像を忠実に再現する高解像度の潜像形成が求められる。そこで、潜像形成段階での解像度（潜像解像度）と感光体の膜厚の関係を評価するための実験を行った。感光体の解像度評価のマスクパターンは、第 3 章 図 3-15 で記した分解能テストターゲット (USAF1951) を用いた。

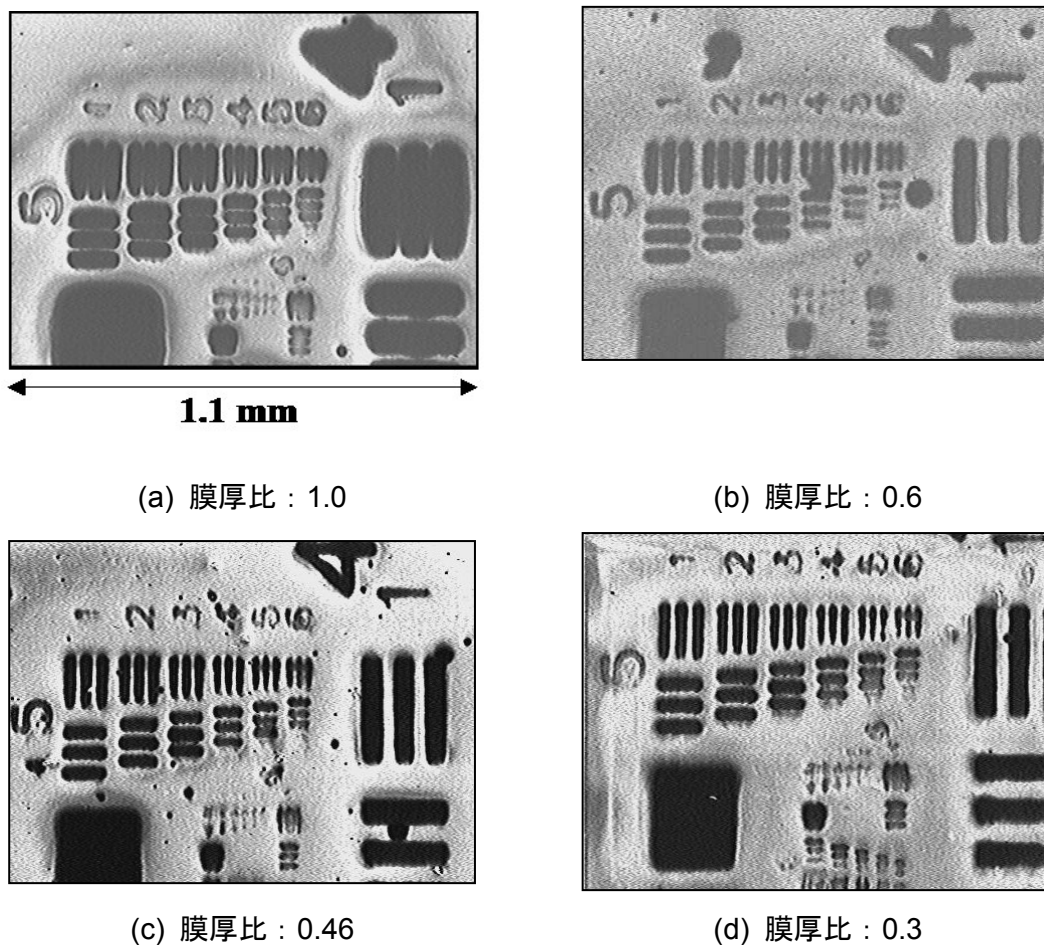


図 6-5 マスクパターン露光による潜像解像度評価

このマスクパターン露光<sup>[12]</sup>による潜像解像度評価結果を図 6-5 に示す。実験条件は、レーザーの波長は 655 nm、帯電電位は-800 V であり、試料は電荷発生層 (CGL) がアゾ顔料系の有機感光体を用いた。図 6-5 (a) から (d) の 4 枚の測定結果は、感光体の膜厚のみが異なるものであり、図 6-5 (a) から (d) の膜厚比は、1.0, 0.6, 0.46, 0.3 の順で相対的に割合が薄くなっている。膜厚の違いが静電潜像の違いとして明瞭に現れていることが確認された。図 6-5 (a) の静電潜像は、どの種類のパターンも隣とつながってしまい、潜像解像度が悪いことを示している。図 6-5 (b) を見ると、小さい潜像パターンは繋がっているが、いくつかの大きめの潜像パターンは、分離されており、図 6-5 (a) よりも解像度が高いことを示している。感光体の潜像解像度は、薄膜になるにしたがい高くなっているのが確認された。図 6-5 (d) の静電潜像は、どの種類のパターンも分離されており、この中で潜像解像度が一番よいことを示している。ライン No.5-6 は、像面上では 13  $\mu\text{m}$  であり、そのレベルで解像していることが確認されている。すなわち、図 6-5 (d) の感光体の解像度は、実機条件で、少なくとも 13  $\mu\text{m}$  の空間分解能で可視化できることを実験で確認した。

感光体の潜像解像度が、厚膜になるにしたがい悪くなる要因は、大きく 2 つある。一つは、厚膜になると、有機感光体の電荷発生層 (CGL) で発生したキャリアホールが電荷輸送層 (CTL) 移動中に拡散することによるものである。もうひとつには、帯電電位を一定で考えると平均電荷密度が膜厚に反比例して小さくなるため、電位分布が鈍ることによるものである。これら両方の効果で、有機感光体の薄膜の方が、潜像解像度や忠実性が高くなると考えている。

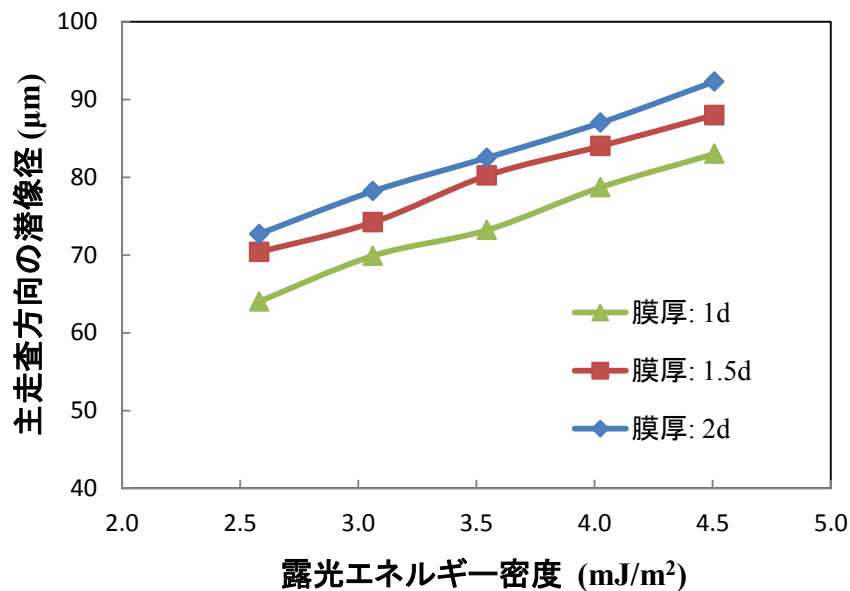
このように、感光体膜厚に対する静電潜像への影響を評価することが可能となった。測定サンプルや用途に応じて、マスクパターンのピッチや形状を選択することが可能であり、本測定法を用いることにより、感光体条件と解像度の関係を把握できる可能性がある。

図 6-6 は、感光体膜厚の違いによる静電潜像への影響について走査ビーム露光方式を用いて評価した測定結果である。グラフ凡例の 1*d*, 1.5*d*, 2*d* は、基準試料の膜厚を *d* としたとき、試料の膜厚比が 1 : 1.5 : 2 の関係であることを示している。実験で使用した露光エネルギー密度の範囲は、3 種類の有機感光体 (OPC) の感度が比較的揃っている 2.5~4.5  $\text{mJ}/\text{m}^2$  で評価した。薄膜感光体の方が、同じ露光エネルギー密度に対して主走査および副走査方向の潜像径とも小さくなる傾向があることが確認された。

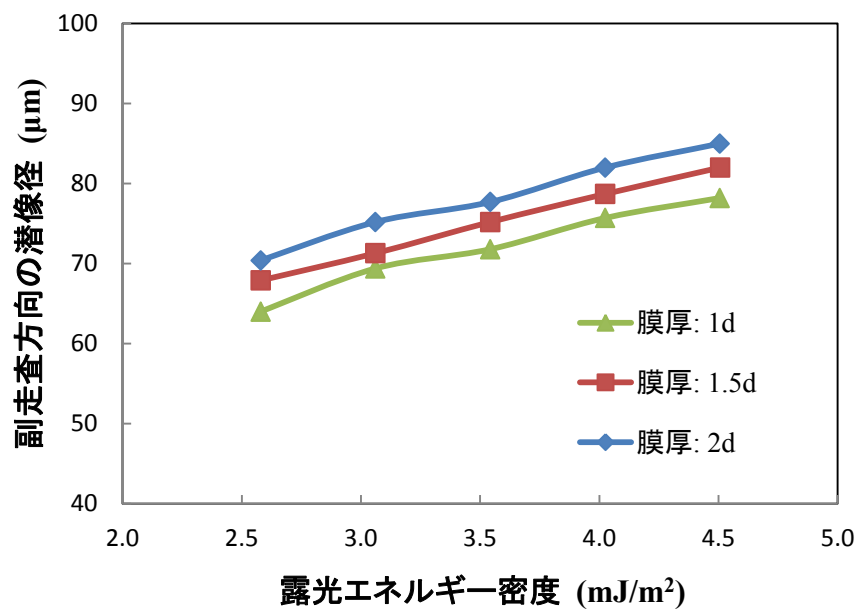
図 6-7 は、図 6-6 (a), (b) の測定結果をひとつのグラフにまとめたものである。すなわち、横軸を主走査方向の潜像径で表し、縦軸を副走査方向の潜像径で表したものであり、潜像径マップと呼ぶことにする。3 種類の有機感光体の測定結果が同一のライン上に重なる特徴があることがわかる。このことは、感光体膜厚によらず主走査の潜像径が決まれば副走査の潜像径が確定すると解釈するこ



とができる。すなわち、膜厚が変化しても露光エネルギーを調整することで同じ大きさの静電潜像を形成することが可能であることを意味する。潜像径マップは、露光パラメータと潜像形成との関連性を俯瞰しやすく、潜像解析や特徴を抽出しやすいため潜像設計をする上で有効なツールであるといえる。



(a) 主走査方向の潜像径



(b) 副走査方向の潜像径

図 6-6 感光体膜厚の違いによる静電潜像への影響

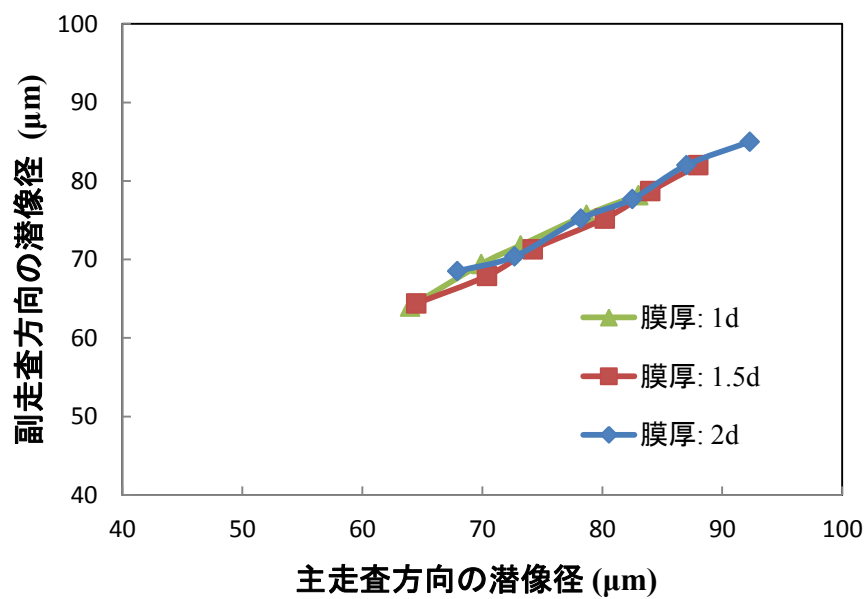


図 6-7 図 6-6 の主走査方向潜像径と副走査方向潜像径との関係を示す潜像径マップ

## 6-3 相反則不軌のメカニズム解析

### 6-3-1 相反則不軌とは

相反則不軌とは、光照度と露光時間の積が一定ならば、反応する物質の量も同じになるという相反則 (Bunsen-Roscoe law) が成立しないことである。電子写真における相反則不軌 (Reciprocity Law Failure, RLF) とは、露光エネルギー密度が一定でも出力画像濃度が異なる現象を指す。一般的に、光強度と露光時間の積で表される積算光量が同じ場合、大きな光強度で短い時間露光する方が、小さな光強度で時間をかけてエネルギーを分割露光よりも、薄い画像濃度になるとされている (図 6-8 参照)。相反則不軌は、露光パラメータと感光体材料の両方の特性が最終的な画像濃度に影響する重要な特性であり、露光や感光体それぞれ単独で現象を説明することは難しかった。そこで、本計測方式を活用して、相反則不軌現象のメカニズム解析を試みた。

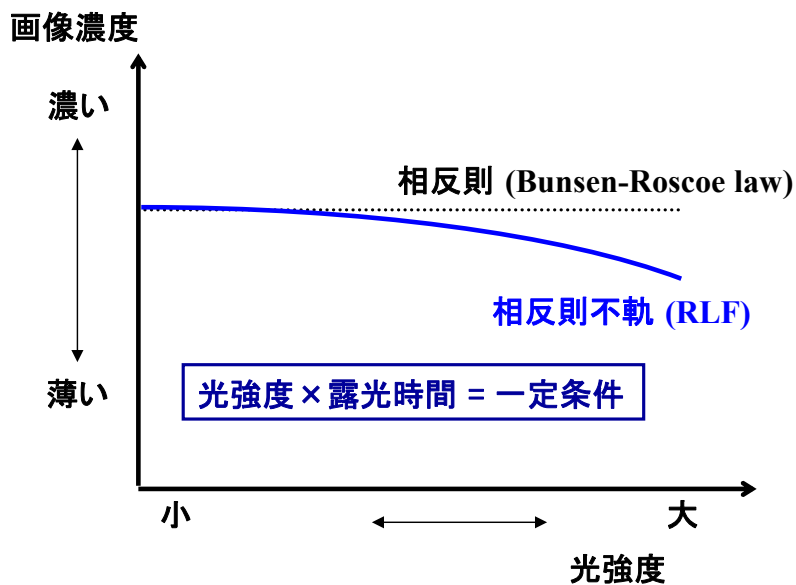


図 6-8 相反則不軌の現象を示す模式図

図 6-9 は、半導体レーザーを 4 チャンネル (LD1～LD4) 使用したマルチビーム走査システムで生じた画像濃度むらの模式図を示している。LD4 および LD1 の境界領域で、トナーが余分に付着し、その結果画像濃度が濃くなるという現象が発生した。LD 間隔や光強度およびビームスポット径といった、機械的および電氣的な誤差要因を排除しても発生することから、画像濃度が濃くなる現象は、潜像形成段階で起きていると推測された。LD1 と LD2 など他の LD 境界では同時露光であるのに対し、LD4 と LD1 の境界はポリゴン面が異なるためタイムラグ露光である点が、唯一の相違点であった。

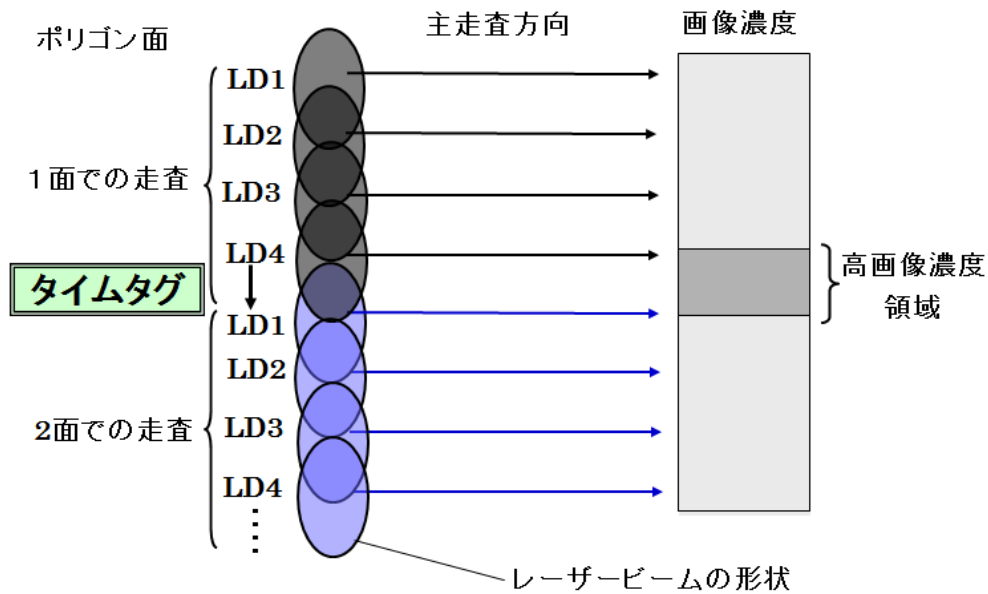


図 6-9 マルチビーム走査光学系で生じる画像濃度むらの模式図

### 6-3-2 実験方法

露光エネルギー密度一定の条件で、同じ位置を2回露光したときの遅延時間をパラメータとしたときの潜像電位を計測<sup>[13]</sup>することで、相反則不軌現象が起きているか否かを検証する実験を試みた。相反則不軌現象が起きているなら、潜像電位分布は、遅延時間の違いで異なる結果が出ると予測した。測定方法は、一次電子検出法による潜像電位計測であり、露光は静止ビームのスポット露光を2回行うダブルパルス露光方式を用いた。

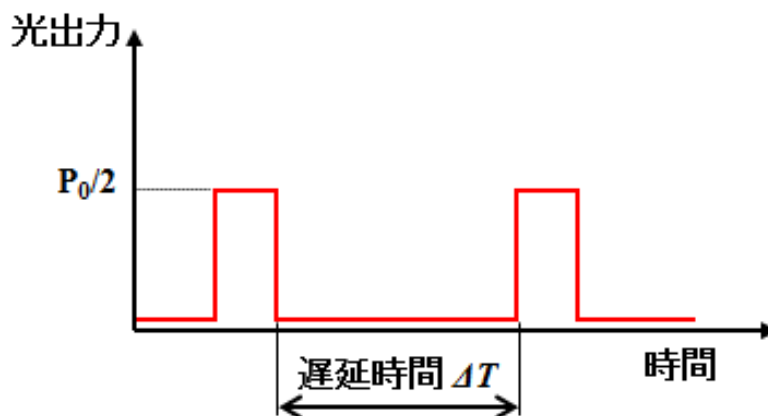


図 6-10 ダブルパルス露光の発光パターン

図 6-10 は、ダブルパルス露光の発光パターンを示している。露光エネルギー  $P_0$  は、感光体を露光するのに適正な光量であり、その  $1/2$  の光強度  $P_0/2$  で 2 回露光した。実験では、2 回目露光時の遅延時間  $\Delta T$  のみを変化させて行われた。試料は膜厚  $30\ \mu\text{m}$  の有機感光体 (OPC) であり、帯電電位は  $-800\ \text{V}$ 、ビームスポット径は  $H57\ \mu\text{m} \times 83\ \mu\text{m}$  であった。

### 6-3-3 実験結果および相反則不軌メカニズムの考察

図 6-11 は、遅延時間  $\Delta T$  を  $1\ \mu\text{s}$ ,  $100\ \mu\text{s}$ ,  $10\ \text{ms}$  と変化させたときの潜像電位分布の測定結果である。遅延時間が長くなると、中心の潜像電位が低く形成されており、相反則不軌現象が起きていることが測定によって実証できた。

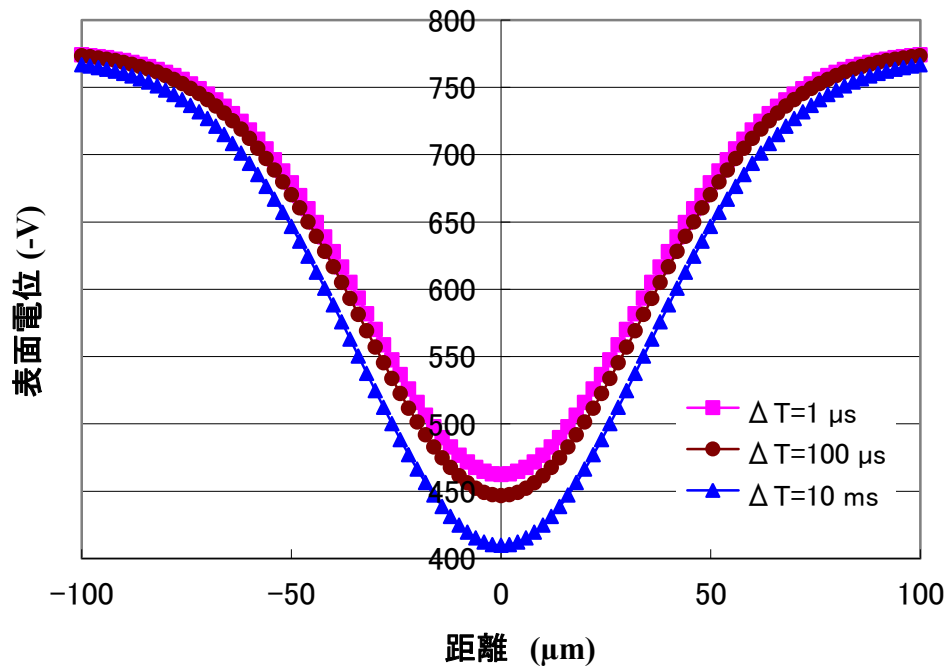
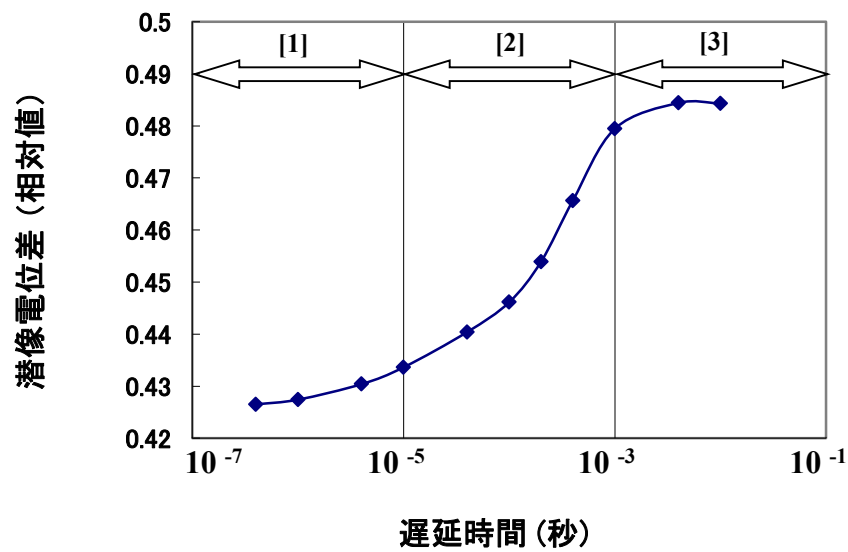


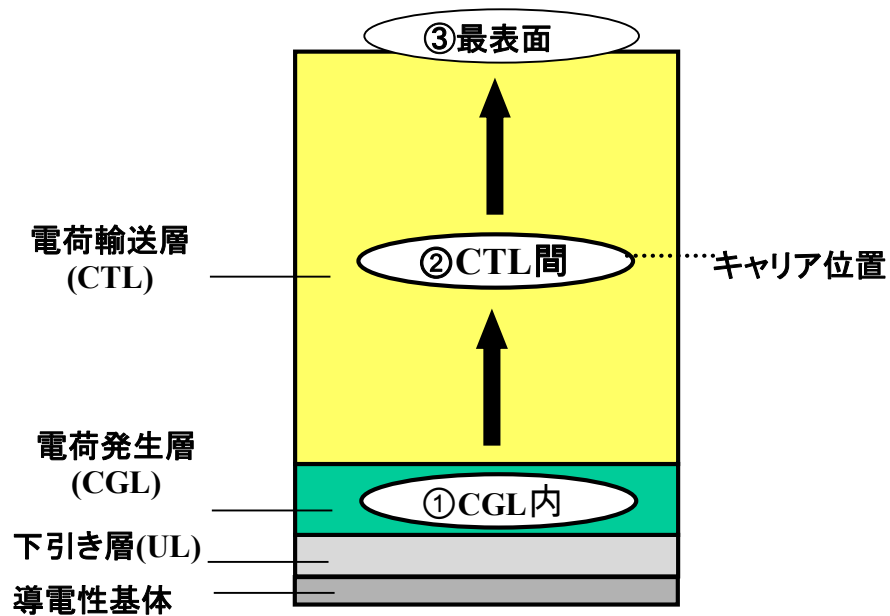
図 6-11 遅延時間 ( $\Delta T$ ) を変化させたときの潜像電位分布

図 6-12 (a) は、遅延時間を  $400\ \text{ns}$  から  $10\ \text{ms}$  まで変化したときの潜像電位差の測定結果である。帯電電位に対する潜像プロファイルの最大高低差の割合を潜像電位差と定義した。遅延時間が長くなるにしたがい潜像電位差が高く形成される傾向にあり、全体としては、遅延時間に対して S 字カーブ的に変化していることがわかった。相反則不軌による潜像形成メカニズムは、2 回目露光した時刻での 1 回目露光で発生した電荷キャリア (ホール) の位置が関係していると考察した。図 6-12 (b) は、図 6-12 (a) での電荷キャリア位置の状態をイメー

ジ化したものである。



(a) 遅延時間と潜像電位差との関係



(b) 1 回目露光で発生したキャリア位置の状態

図 6-12 相反則不軌と潜像形成メカニズム

図 6-12 より相反則不軌の潜像形成メカニズムは以下に示す 3 状態に分類できると考えている。

### ① 状態 [1] ・ ・ ・ 電荷発生層 (CGL) 移動時間内

遅延時間が 10  $\mu\text{s}$  以下の条件では、潜像電位差はほぼ一定であった。1 回目露光で発生した電荷キャリアが CGL 内にとどまっている状態である。すなわち、1 回目と 2 回目に発生した電荷キャリアが CGL 内に共存しているため、再結合条件が時間に依存せず、ほぼ一定となると予測される。

### ② 状態 [2] ・ ・ ・ 電荷輸送層 (CTL) 移動時間内

遅延時間が 10  $\mu\text{s}$ ～数 ms の範囲では、時間が長くなるにしたがい、高い潜像電位差が形成された。1 回目露光で発生した電荷キャリアが CTL 間を表面方向に移動している状態である。1 回目電荷キャリア位置で、CGL 電界強度が変化し、2 回目露光時の電荷キャリア生成量に相当する量子効率 (感度)<sup>[14]</sup>が変化したと予測した。移動キャリアによる電界の向きは、帯電による電界と逆方向である。このため、移動キャリアが CGL から近い場合には、移動キャリアによる逆方向の電界が強く、全体としての電界強度は弱められるが、遠ざかるにつれて電界強度が強くなる。したがって、遅延時間が数  $\mu\text{s}$ ～数 ms の範囲では、時間が長くなるにしたがい、高い潜像電位差が形成されたと考えている。

### ③ 状態 [3] ・ ・ ・ 最表面到達後

遅延時間が数 ms 以上の条件では、潜像電位差はほぼ一定であった。1 回目露光で発生した電荷キャリアが最表面に到達して、電荷キャリア位置が不変のため、電荷キャリア生成量および再結合量に変化はなく、潜像電位差はほぼ一定となったと考えている。

マルチビーム走査光学系で起きた画像濃度むらは、露光条件である走査時間と感光体の電荷輸送層での電荷キャリアの移動度に影響する。図 6-9 で示された LD1 と LD2 などの同時露光条件は、状態[1]である。2 回目露光した時刻での 1 回目露光で発生した電荷キャリア位置が状態[2]、あるいは状態[3]であるなら、画像濃度むら発生の説明がつく。実際に起きた画像形成装置は状態[2]の条件であった。これにより、画像濃度むらの原因が、相反則不軌によるものであることが明らかになった。

## 6-4 露光ビームの潜像形成能力評価法

第2章から第5章の技術を用いることで、様々な静電潜像を形成し、ミクロンスケールで計測することが可能となった。しかしながら、これまでミクロンスケールで静電潜像を計測した実績がなかったため、評価手法が確立しておらず、判断基準が明らかでなかった。このため、本計測システムによって計測された静電潜像が、果たして望ましい静電潜像であるか否かを判断できなかった。そこで、露光パラメータと潜像形成との関連付けを明確化するため、潜像形成能力の定量的な評価指標の開発が求められ、潜像 MTF が導入された。潜像 MTF (Modulation Transfer Function) とは、像面光量を変動させたときの潜像面積変化を空間周波数として表現したものである。潜像 MTF 評価法の妥当性については、ビームスポット径を変えて潜像実験を行い、評価結果を比較することで検証した。そして、潜像 MTF の測定結果をもとに、電子写真プロセスにおける最適なビームスポット径設定の考え方を考察する。

### 6-4-1 潜像 MTF 導入の背景

図 6-13 は、ビームスポット径が、主走査方向  $90\ \mu\text{m}$ 、副走査方向  $110\ \mu\text{m}$  ( $H90\ \mu\text{m} \times V110\ \mu\text{m}$ ) のときの像面光量と潜像円相当径との関係を示す測定結果である。測定方式は、二次電子検出による可視化計測法を用いた。

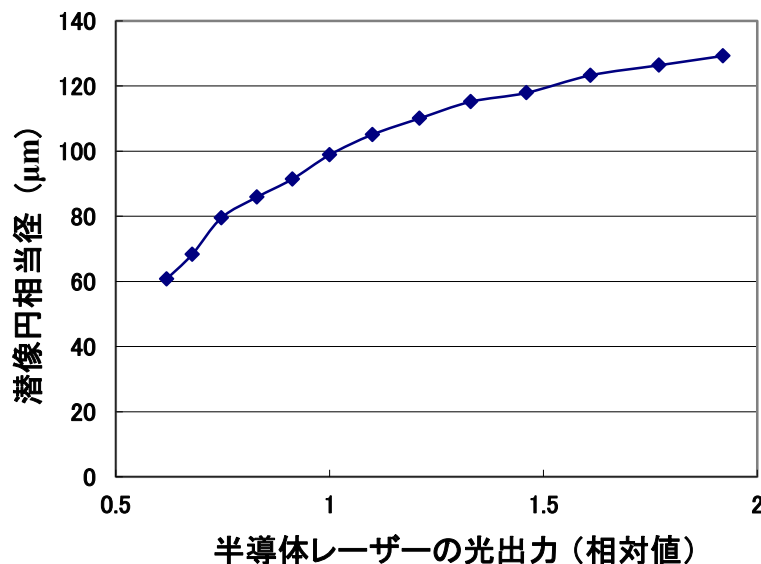


図 6-13 像面光量と潜像円相当径との関係  
ビームスポット径： $H90\ \mu\text{m} \times V110\ \mu\text{m}$



一般的に、小径ビームの方が小さな静電潜像ができると考えがちであるが、潜像円相当径は像面光量に依存し、 $H90\ \mu\text{m} \times V110\ \mu\text{m}$  と太いビームでも  $60\ \mu\text{m}$  と小さな静電潜像を作ることは可能である。このことは、潜像サイズの大小が潜像形成能力の大小を表す指標にならないことを意味する。すなわち、ビームスポット径と同じサイズの静電潜像が作れたとしても、あるいはビームスポット径と同じサイズの出力画像を得られたとしても、潜像形成能力が高いことや、露光から静電潜像への伝達特性が高いことを示すことにはならない。

従来から伝達特性をコントラスト  $[(\text{Max}-\text{Min})/(\text{Max}+\text{Min})]$  の減少度の比率で求める方法としてコントラスト伝達関数 (Contrast Transfer Function, CTF) があるが、出力信号強度に線形性があることを前提とした特性の式である。開発初期段階でこの CTF を導入し、入力を露光量パターン、出力を潜像パターンとして評価したところ、伝達特性が 1 を超えることがあり、この方法をそのまま適用することが有効でないことがわかっていた。そこで、今回新たに静電潜像への伝達特性に適した評価指標として、潜像 MTF を導入した。

## 6-4-2 潜像 MTF の考え方

図 6-14 に潜像形成能力を表す潜像 MTF の概念図を示す。図 6-14 (a) は、シャープな静電潜像が形成されているため、露光量が変化しても、潜像面積の変化は小さく、潜像形成能力は高いといえる。一方、図 6-14 (b) は、静電潜像がなだらかに変化しているため、露光量変化に対する潜像面積の変化の割合が大きい。したがって、図 6-14 (a) よりも潜像形成能力は低いといえる。このように、潜像形成能力は、露光量変化に対して敏感に潜像面積が変動する度合いで評価することができる。

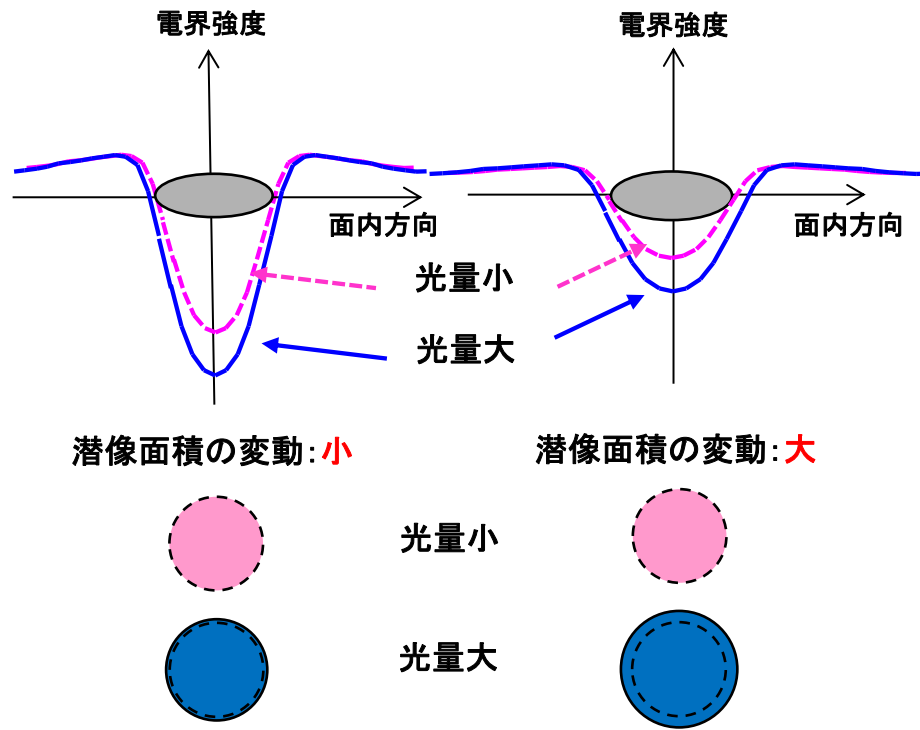
この潜像形成能力を定量的に表すため、潜像 MTF という評価指標を新たに導入した。潜像 MTF は、基準光量に対して像面光量を  $\pm 10\%$  変動させたときの潜像面積変化を空間周波数毎で評価すると定義した<sup>[15]</sup>。基準光量  $P_0$  で露光したときの潜像円相当径を  $L_{tD}(P_0)$ 、潜像面積を  $L_{tS}(P_0)$  としたとき、潜像 MTF は、式 (6.2) と式 (6.3) を用いて表される。

$$\text{潜像 MTF} = \frac{L_{tS}(0.9 \times P_0)}{L_{tS}(1.1 \times P_0)} \quad (6.2)$$

$$\text{空間周波数} = \frac{1}{2 \times L_{tD}(P_0)} \quad (6.3)$$

## 第6章：潜像特性の解析および潜像設計への指針

式 (6.3) は、式 (6.2) を基準光量における潜像円相当径より空間周波数を算出したものである。この評価を空間周波数 (cycle/mm) 毎に実施する。



(a) 潜像形成能力が高い状態 (b) 潜像形成能力が低い状態

図 6-14 潜像形成能力を表す潜像 MTF の概念図

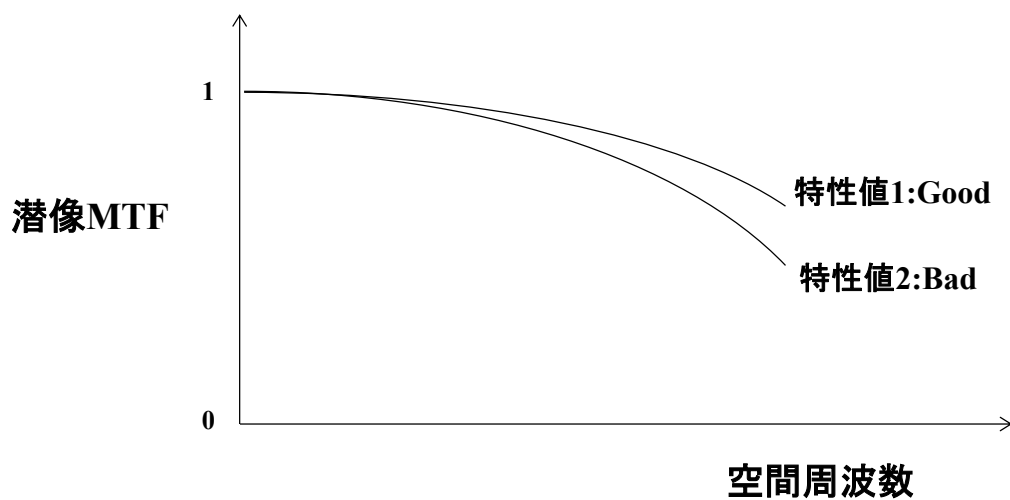


図 6-15 潜像 MTF グラフの模式図

図 6-15 に潜像 MTF グラフの模式図を示す。高周波数帯域まで、MTF が高い値であるとその特性値の潜像形成能力が高いことを示す。

### 6-4-3 潜像 MTF 評価の特徴

前節で、露光ビームの潜像形成能力を定量的に表す評価指標として導入した潜像 MTF 評価は、以下の特徴を有している。

- ①潜像再現性は空間周波数に依存しており、空間周波数毎に評価することができる。潜像 MTF の値は、最良が 1 で最悪が 0 であり視覚的に理解しやすい。
- ②像面光量の変動に対して、潜像面積率の変化が小さい方が、それだけドット再現性の優れた深い静電潜像が形成されているとみなす。したがって、特性値に対する静電潜像への寄与を掴みやすい。
- ③像面光量は、光学系だけでなく感光体や現像の評価でも共通して使用するパラメータであるため、モジュールや物理量の異なる潜像形成パラメータを同じ指標で、評価することができる。

### 6-4-4 露光ビームスポット径に対する潜像 MTF 測定結果と検証

潜像 MTF による評価方法の有効性を確認するため、2 種類のビームスポット径で、潜像実験を実施した。試料は、膜厚 30  $\mu\text{m}$  の有機感光体 (OPC) であり、帯電電位は -800 V で実験した。測定方式は、二次電子検出による可視化計測法を用いた。

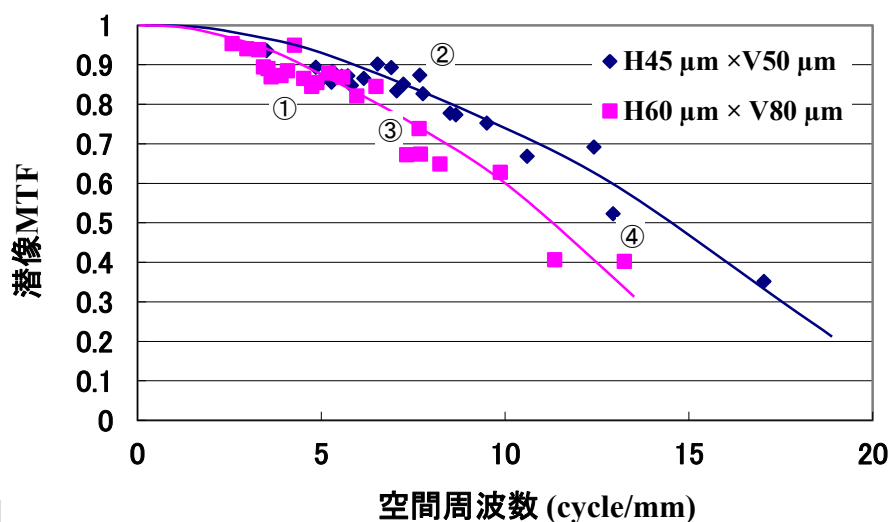


図 6-16 ビームスポット径の違いによる潜像 MTF の測定結果

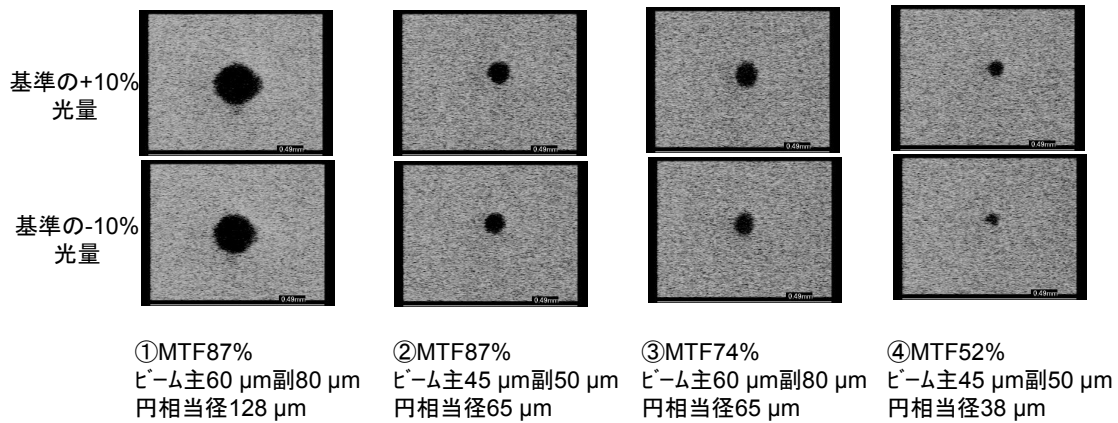


図 6-17 潜像画像：[上段] 基準光量の+10%、[下段] 基準光量の-10%

図6-16の測定結果が示すように、小径ビーム (H45  $\mu\text{m}$ ×V50  $\mu\text{m}$ ) の方が、空間周波数特性がよいという予測と一致する結果を得た。これにより、潜像MTF評価が、潜像形成能力を定量的に表す指標とする方法であることの有効性を確認できた。図6-17は、測定された潜像画像である。潜像サイズが小さくなると、少しの光量の違いに対する、潜像変化の度合いが目立ってくるのがわかる。図6-17の②と③は、潜像サイズは65  $\mu\text{m}$ と同じであるが、MTFが87%と高い②の方が潜像変化の度合いは小さく良好であるといえる。

#### 6-4-5 露光ビームスポット径の最適化設定に関する考察

図6-18は、図6-16の横軸を潜像円相当径としたときの潜像MTFを示すものである。潜像MTF値80%が潜像解像度の基準としたとき、以下の特徴が見られることがわかった。

- ①潜像円相当径70  $\mu\text{m}$ 以上の静電潜像では、両者のビームによるMTFの差異はない。すなわち、低周波数領域において、ビームスポット径の大小による潜像形成に対する寄与は小さく優位性はない。
- ②潜像円相当径55  $\mu\text{m}$ 以下では、両者ともMTFが低下しており、安定した潜像形成は容易でない。
- ③潜像円相当径55～70  $\mu\text{m}$ の範囲では、H45  $\mu\text{m}$ ×V50  $\mu\text{m}$ の小径ビームに優位性がある。

このように、横軸を潜像円相当径すると、潜像サイズと潜像MTFの因果関係を掴みやすいことがわかった。図6-18の結果を見ると、潜像円相当径が、55～70  $\mu\text{m}$ のドット再現性を確保する場合にのみ、主および副走査方向のビームスポット径がH60  $\mu\text{m}$ ×V80  $\mu\text{m}$ に比べて、H45  $\mu\text{m}$ ×V50  $\mu\text{m}$ の小径ビームの方に優位性があるといえる。すなわち、最終画像として、設計上必要な最小ドットサイズが

わかれば、過剰スペックとならない最適なビームスポット径を決定することが可能であると考ええる。本実験条件にあてはめると、潜像設計上求められる静電潜像の最小ドットサイズが $55\ \mu\text{m}$ であれば、 $H45\ \mu\text{m} \times V50\ \mu\text{m}$ の小径ビームを使うべきである。もし、潜像設計上求められる静電潜像の最小ドットサイズが $70\ \mu\text{m}$ であれば、 $H45\ \mu\text{m} \times V50\ \mu\text{m}$ の小径ビームは過剰スペックであり、 $H60\ \mu\text{m} \times V80\ \mu\text{m}$ のビームで十分であると判断できる。また、別な見方として、600 dpiの2ドットは、約 $84.7\ \mu\text{m}$ であるため、2ドット以上の画像に対しては、ビーム小径化に対する画質への改善効果は小さいと解釈することもできる。このように、潜像MTF評価法を活用することで、電子写真プロセスにおける最適なビームスポット径を決定するための指針とすることができる。

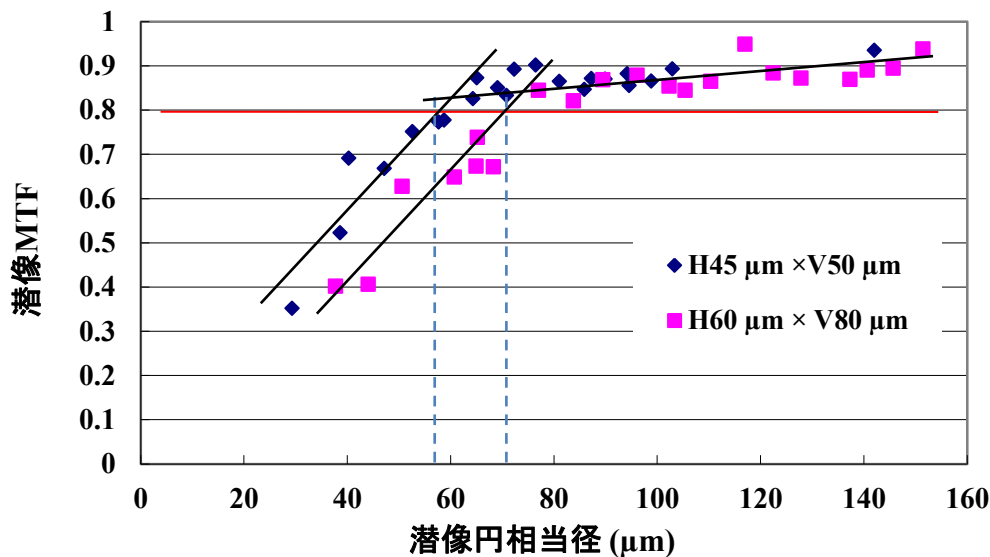


図 6-18 潜像円相当径と潜像 MTF の関係

## 6-5 静電潜像の現像への影響の考察および潜像設計への指針

### 6-5-1 ドットばらつきの静電潜像・現像・紙画像の相関性

露光・現像・定着のプロセスを経ることで最終画像が得られるが、従来の評価では、トナー像の挙動に直接影響を与える静電潜像の評価は行われていない。そのため、走査ビームの露光パラメータとトナー像の連関性を十分に把握することはできなかった。本研究により、静電潜像が計測可能となり、静電潜像を介した連関評価を行うことが可能となった。そして、露光パラメータと、静電

潜像およびトナー像の連関性を把握することにより、露光パラメータの最適化設計が実現できる環境が整った。

ドット再現性の連関評価としては、評価パターン（1ドット、2ドット、3ドット）で露光したときの各工程でのドット面積ばらつきを測定した。なお、本節での1ドットサイズは、いずれも  $42.3\ \mu\text{m}$  (600 dpi 解像度) を表す。ここで、感光体上トナー像と紙画像の作像は、市販の画像形成装置の光学系を改造して行われた。ビームスポット径が  $H45\ \mu\text{m} \times V50\ \mu\text{m}$  の条件において、静電潜像、現像（感光体上トナー像）、紙画像（定着後）におけるドット面積のばらつきを計測し、現像工程以降のドット面積ばらつきに対する潜像面積ばらつきの寄与を評価した。各工程におけるドット面積ばらつきの推移を図 6-19 に示す。

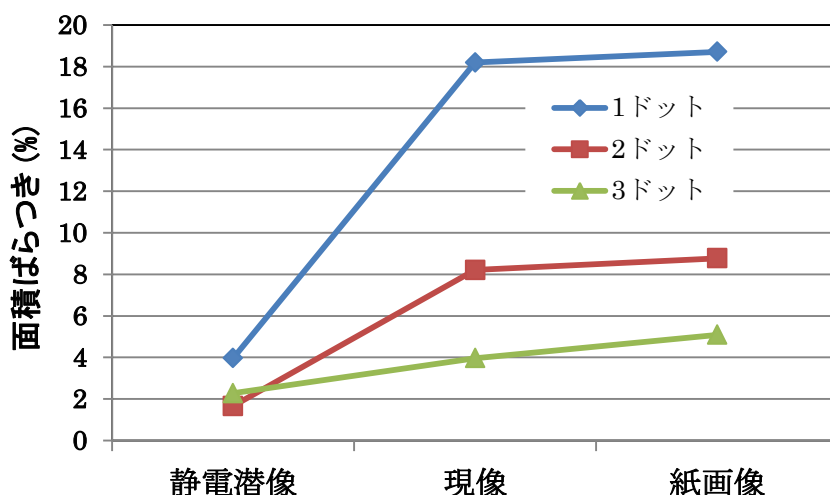


図 6-19 各工程におけるドット面積ばらつき

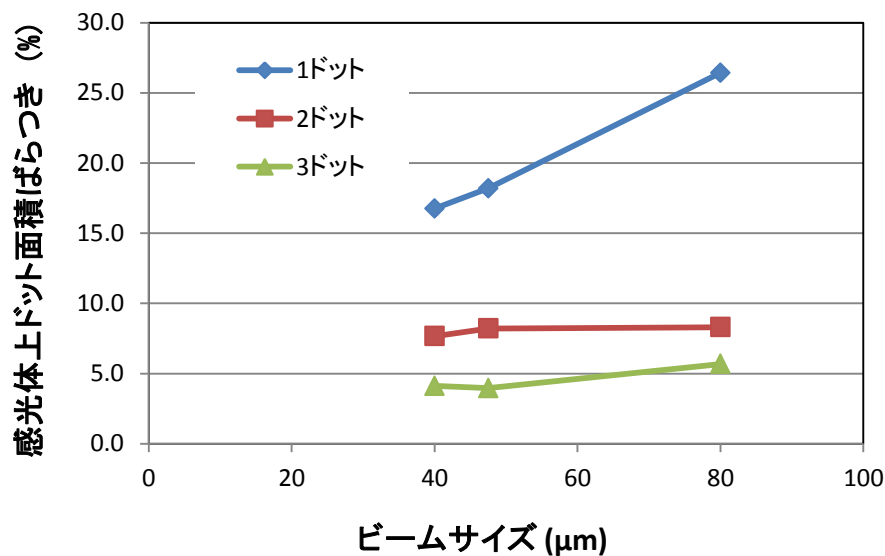
図6-19の測定結果は、現像工程以降のドット面積ばらつきに対して、潜像段階でのばらつきの占める影響が小さいことを示している。すなわち、トナー像で生じるばらつきは現像工程以降によるものが支配的であるといえる。ただし、感光体の潜像面積ばらつきは2~4%程度で現像工程に比べて小さいとはいえ、オフセット印刷並みの画質を実現するためには、これでも無視できない量である。

### 6-5-2 現像の画質要求に対する露光ビームスポット径の考察

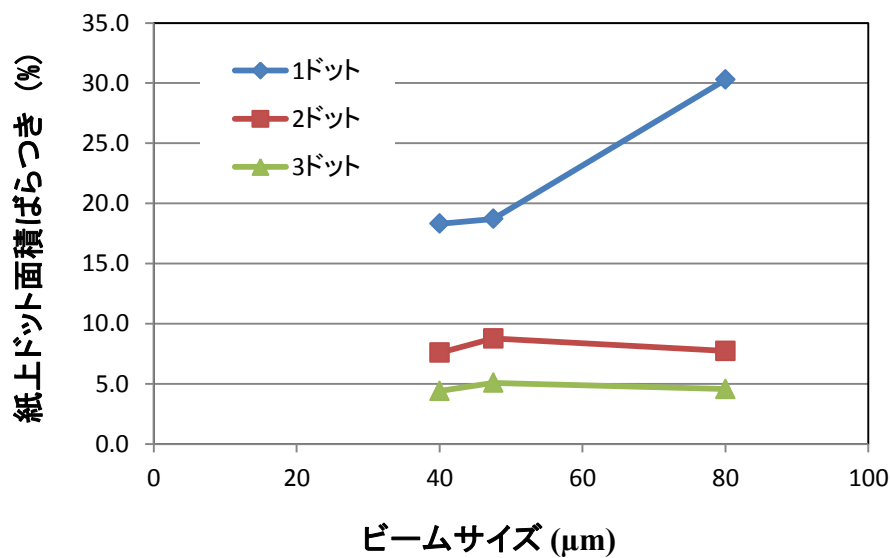
静電潜像、現像（感光体トナー像）、紙画像の形成工程において、ビームスポット径を  $H40\ \mu\text{m} \times V40\ \mu\text{m}$ 、 $H45\ \mu\text{m} \times V50\ \mu\text{m}$ 、 $H70\ \mu\text{m} \times V90\ \mu\text{m}$  の3水準で変化させたときのドット面積ばらつきを計測し、ビームスポット径によるドット面

積ばらつき低減効果の確認を行った。感光体上トナー像、紙画像の測定結果を図 6-20 に示す。ビームサイズは、式 (6.4) で定義した。

$$\text{ビームサイズ} = \sqrt{\{(\text{主走査ビーム径}) \times (\text{副走査ビーム径})\}} \quad (6.4)$$



(a) 感光体上ドット面積ばらつき



(b) 紙上ドット面積ばらつき

図 6-20 ビームサイズとドット面積ばらつきの関係

図 6-20 の結果をみると、潜像 MTF 評価結果の予測通り、1 ドットにおいては

ビームスポット径を小径にすることで、ばらつきは低減できることがわかる。しかしながら、2,3 ドットでは、小径にしてもばらつき低減に対する効果は小さいことが明らかになった。また、感光体上と紙上の差異は見られないということもわかった。

画質の評価項目としては、解像度の他にも、粒状性など画像のざらつきを示す評価指標がある。粒状度は、視覚特性である視覚の空間周波数（VTF）を考慮すると、1 ドットでは感度として鈍くなり、むしろ2,3 ドットのばらつきの方が高相関性であるとされる。したがって、ビームスポット径が粒状度改善に対して直接与える寄与は小さいといえる。

以上をまとめると、ビームスポット径は、600 dpi 条件での1 ドット以下の解像度には影響するが、2 ドット以上のドット再現性に与える寄与は小さい。小径ドット再現性を確保する場合に、小径ビームの優位性が生じるといえる。したがって、ビームスポット径は、システムとして求められる最小ドットサイズによって決定されるべき潜像設計のファクターであるといえる。

### 6-5-3 潜像改良による現像の画質改善

感光体の薄膜化は、6-2-4 項で述べた通り、露光像に対する感光体上のトナー像の解像度や忠実性が高まる効果があるが、その反面、忠実性が高まったことで、感光体上のトナー像の歪みが顕著に現れる懸念がある。トナーの付着像をよく調べてみると、薄膜感光体でのトナー像に歪みがあることが観察された（図 6-21 (a) 参照）。

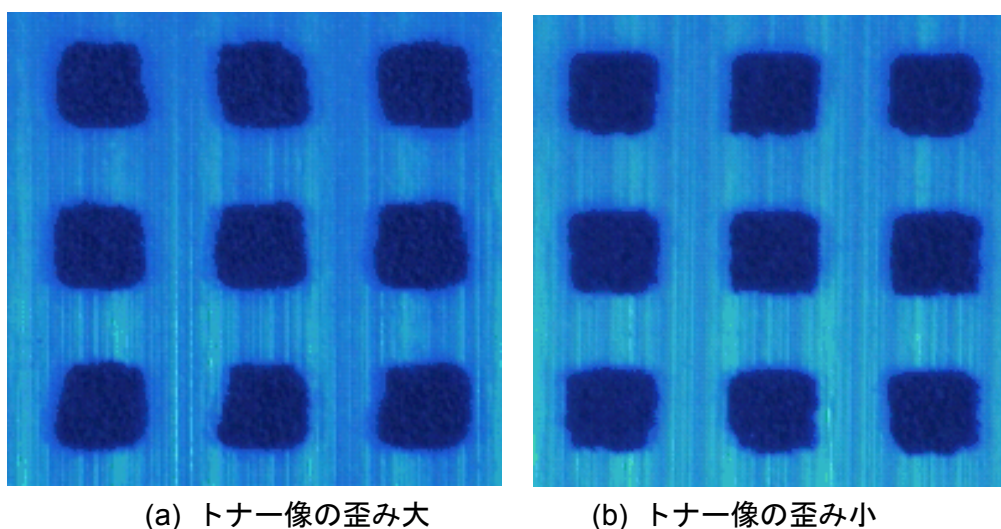


図 6-21 露光開始位置ずれにともなう感光体上トナー像の歪み（4 ドット）



12ドット周期で変動していることから、トナー像の歪みは、走査光学系のポリゴン面の各面毎の面精度ばらつきに起因する縦線揺らぎと推定された。例えば、6面ポリゴンの2ビーム光学系の場合は12ドット周期で現れる。

すなわち、薄膜感光体にすることで静電潜像の輪郭部がシャープに再現されるようになり、感光体トナー像が露光分布に対する忠実性が高まったため、露光像の歪みを顕著に再現した状態でトナーが付着したと推測した。なお、歪み量はドット位置のずれとして最大でも  $1/2$  ドット =  $20\ \mu\text{m}$  以下と小さな量であることがわかっている。しかしながら、図 3-29 で示したとおり、わずか  $10\ \mu\text{m}$  の位置ずれ量でも、静電潜像として顕著に現れることが明らかになっており、画像品質として無視できない量である。

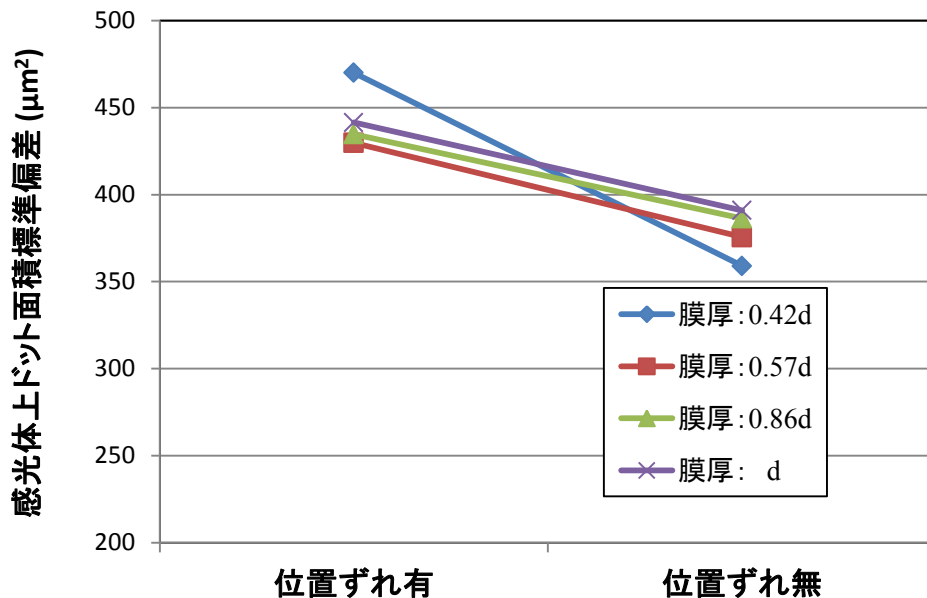


図 6-22 2 ドット面積標準偏差

図 6-22 は、露光開始位置ずれの有無と 2 ドットの面積標準偏差の関係を示すものである。グラフ凡例の  $0.42d$ 、 $0.57d$ 、 $0.86d$ 、 $d$  は、基準とする感光体の膜厚を  $d$  としたときの膜厚比を示している。露光開始位置ずれがない条件で画像評価を行うことで、露光像歪が低減され、2 ドット面積標準偏差が平均で約 15% 改善することが分かった。いずれの膜厚条件でも低減効果は確認され、薄膜である方が画像歪みの低減効果が大きいことが確認された。画像有効領域全体の画像の歪みを減らすためには、ポリゴン面精度を向上させる方法や、同期精度を向上して電氣的にジッター補正を行う方法が現実的に実現可能であり、有効な方法であるといえる。

### [潜像改良による現像の画質改善への一考察]

高画質化実現のためには静電潜像はどうあるべきか、どのような状態であることが望ましいのかを検討した結果、考え方として2通りのアプローチが考えられる。一つには、潜像段階でのばらつき自体を低減することであり、もう一つは現像以降の工程を楽にするというアプローチの方法である。これらにより、潜像改良による画質改善の余地が十分にあると考えられる。

潜像段階でのばらつきを低減する方法とは、静電潜像を形成する帯電・露光・感光体の変動要因を減らすことであり、具体例としては、潜像パターンの歪みを低減することや、潜像パターンサイズのばらつきを低減する方法などがある。潜像パターンの歪みは、露光開始位置ずれによって生じる問題であり、露光光学系的要因といえる。また、潜像パターンサイズのばらつき原因のひとつは、感光体感度要因であり、具体的には電荷キャリアの生成特性や耐絶縁特性の不均一性がある。その他の要因としては、露光量の変動や、相反則不軌現象が考えられる。

現像以降の工程を楽にする潜像形成方法として、円形ドットが考えられる。円形ドットは、1つのドット内でのエッジ電界の強弱が少ないためドット内での付着量のばらつきが少なくなり転写での悪化が低減され则认为している。ドットが矩形形状に近いとエッジ電界が大きいため、余分に付着しやすく、また剥がれ易いと予測する。また、矩形ドットであっても転写定着と工程が進むにしたがい、劣化して丸みを帯びてくるので、あらかじめドットが円形状とすることで、劣化しても目立ちにくいという効果もあると考えている。

## 6-6 結 言

本章では、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と潜像特性で潜像形成の特徴および潜像設計への指針を述べた。潜像径は、露光エネルギーの増加にともない大きくなるという事実は、静電潜像の大きさが露光すなわちフォトン数によって消失した電子数で決まると考えれば、説明がつく。言い換えると、潜像径はビームスポット径だけでは決まらないため、ビームスポット径より小さい静電潜像を設計することが可能であることを示唆している。

感光体の潜像解像度は、薄膜になるにしたがい高くなる。その要因の一つは、厚膜になると、電荷発生層 (CGL) で発生した電荷キャリア (ホール) が電荷輸送層 (CTL) 移動中に拡散することによるものである。もうひとつには、帯電電位を一定とすると平均電荷密度が膜厚に反比例して小さくなるため、電位分布

## 第6章：潜像特性の解析および潜像設計への指針

が鈍ることによるものである。これら両方の要因の相乗効果で、感光体の薄膜化にともない、潜像解像度が高くなる。電子写真における解像度は、一般的には、ビーム小径化と感光体の薄膜化といわれるが、前述のように、露光側には他の要因で克服できる可能性がある。このため、露光および感光体材料で生じる潜像特性を把握することが、潜像設計をする上で重要であると考えている。

マルチビーム走査光学系で生じる画像濃度むらの発生には、露光条件である走査時間と感光体の電荷輸送層での電荷キャリアの移動度の複合要因が影響している。2回目露光した時刻での1回目露光で発生した電荷キャリアの位置が関係していると考えられる。上記画像濃度むらは、露光設計と感光体設計を別々に設計したことによるもので、この事実をつかんで潜像設計を行えば、十分回避可能といえる。

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。最後に静電潜像・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対する一考察を述べた。

## 第7章

### 結 論

本研究では、電子写真における静電潜像を計測する方法として、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、潜像形成直後の静電潜像をその場観察する手法を考案した。そして、本計測システムでは、暗減衰のある感光体の静電潜像の大きさをミクロンスケールで可視化を実現することに成功した。さらに、潜像形成のメカニズム解析を行い、潜像設計への指針を提示した。以下、各章の研究内容について、その結論を述べる。

第1章では、本研究の歴史的背景を述べ、電子写真プロセス開発にける静電潜像計測の重要性を明らかにし、本研究の目的を述べた。また、電子写真の静電潜像の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 程度の高電位に帯電された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ミクロンオーダーの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。

導体電位パターンによるコントラスト像観察では、従来の電位コントラスト像の解釈では説明がつかず、二次電子検出信号は、電界強度の影響が支配的であることから、新しい物理解釈として、試料の垂直方向の電界強度を2値化した電界コントラスト像であることが妥当と判断した。

## 第7章：結 論

静止ビーム露光による 1 ビームスポット潜像実験では、ビームスポット径や露光エネルギー密度の違いをコントラスト像の大きさとして識別できており、感光体の静電潜像を可視化計測できていることが確認された。開発した静電潜像計測装置 (ELIMS) は、1  $\mu\text{m}$  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精度があることを確認した。

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。そこで、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。帯電モデルから帯電電位の理論式を導出し、実験結果と相関があることを確認した。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、マスクパターン露光の 2 つの露光方法を開発した。露光光学系にとって重要な特性であるレーザービームスポット径は、アパーチャサイズを変更することで、所望のビームスポット径を設定できる露光光学系の開発に成功した。また、感光体にとって重要な特性である潜像解像度は、シャインプルーフの原理を利用した露光光学系を用いて、解像度チャートのマスクパターンを投影露光する光学系開発に成功した。

さらに、静止ビーム方式を発展させて走査ビーム露光方式を開発した。実機の電子写真で用いる走査光学系と同等の潜像形成を可能とするレーザー走査光学ユニットの開発し、様々な露光条件をパラメータとしてドットパターンの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

## 第7章：結 論

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、試料下部電極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、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と潜像特性の 3 つで潜像形成の特徴および潜像設計への知見を述べた。潜像径は、露光エネルギーの増加にともない大きくなるという事実は、静電潜像の大きさが露光すなわちフォトン数によって消失した電子数で決まると考えることで説明がつく。言い換えると、潜像径はビームスポット径だけでは決まらないため、ビームスポット径より小さい静電潜像の設計も可能であることを示唆している。

感光体の潜像解像度は、薄膜になるにしたがい高くなる。その要因の一つは、厚膜になると、CGL で発生したキャリアホールが CTL 移動中に拡散することによるものである。もうひとつには、帯電電位を一定で考えると平均電荷密度が膜厚に反比例して小さくなるため、電位分布が鈍ることによるものである。この両方の要因の相乗効果で、感光体の薄膜化にともない、潜像解像度が高くなる。電子写真における解像度は、一般的には、ビーム小径化と感光体の薄膜化によって向上するといわれるが、上記のように、露光側には他の要因で克服できる可能性があるため、潜像設計としては、感光体の薄膜化が非常に重要な要素であると判断できる。

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

## 第7章：結 論

明した。この画像濃度むらは、露光設計と感光体設計を別々に設計したことによるもので、この事実をつかんで潜像設計を行えば、十分回避可能と考えている。

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。最後に静電潜像・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。

静電潜像計測の実現が、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を、その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、開発期間が短縮できる。また、紙などの消費も全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。

## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり、多大なる御指導と御鞭撻を賜りました早稲田大学 基幹理工学部 機械科学・航空学科 川本 広行教授に心より御礼申し上げます。また、本論文の作成にあたり、早稲田大学 基幹理工学部 電子物理システム学科 川原田 洋教授、機械科学・航空学科 富岡 淳教授、岩瀬 英治准教授には、細部にわたり親切な御教示と御助言を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

学位論文の取得を後押ししていただいた三矢輝章博士に心から感謝いたします。また、本論文作成を支援していただいた長山智男博士、前田一郎博士に感謝いたします。

本論文第 5 章の潜像電位分布導出の研究を進めるにあたり、研究上のご協力をいただいた名城大学 村田英一准教授、下山 宏名誉教授、中島卓也氏、野田啓介氏、石原嘉隆氏に心から感謝いたします。

装置の設計でご協力いただきました久保信秋氏、伊藤 悟氏、石田雅章氏、大森淳史氏、酒井浩司氏、二瓶靖厚氏、上田 健氏、そして、実験面でご協力いただきました田中宏昌氏、伊藤 泉氏、逢坂敬信氏、飯尾雅人、橘 弘人氏、浅見 彰氏、川上晃弘氏に心から感謝いたします。

また、論文作成で苦勞していたときにアドバイスを頂いた薦田弘敬博士、ならびに励ましてくれた同期の友に心から感謝いたします。

最後に、いつも学位論文作成を応援し支えてくれた素晴らしい妻に心から感謝いたします。



## 参考文献

### 第 1 章

- 1) 電子写真学会：電子写真技術の基礎と応用，コロナ社 (1988).
- 2) 電子写真学会：続 電子写真技術の基礎と応用，コロナ社 (1996).
- 3) M・シャーフイー：ゼログラフィの原理と最適化，コロナ社 (1987).
- 4) R.M.シャファート：電子写真，共立出版株式会社 (1980).
- 5) 平倉浩治，川本広行（監修）：電子写真－プロセスとシミュレーション－，東京電機大学出版局 (2008).
- 6) 2012 プリンタ市場の全貌，中日社 (2012).
- 7) C. F. Carlson, "Electrophotography," US2,297,691.
- 8) 日本画像学会用語委員会(編)：画像技術用語集，日本画像学会 (2007).
- 9) 辻内順平，黒田和男，大木裕史，河田 聡，小島 忠，武田光夫，南 節雄，谷田貝豊彦，山本公明（編）：光学技術ハンドブック，朝倉書店 (2002).
- 10) 羽根田哲（監著）：カラーレーザプリンタ技術，トリケップス (1996).
- 11) J. M. Fleischer, M. R. Latta and M. E. Rabedeau, "Laser-Optical System of the IBM 3800 Printer," IBM J. Res. Develop., 21 , pp. 479-483 (1977).
- 12) 伊藤哲也：デジタル電子写真イメージングにおける画質向上技術の展望，日本写真学会誌, 57 (2), pp.97-107 (1994).
- 13) 香川敏章，牧浦 尚，中野暢彦，豊島哲朗：1200dpi 画像形成技術の開発，シャープ技報, 76, pp.46-51 (2000).
- 14) 渡辺好夫，川本啓之，庄司尚史，鈴木宏克，岸由美子：レーザ露光による潜像形成のシミュレーション, Japan Hardcopy 2000 論文集, pp.125-128 (2000).
- 15) 岸由美子，門永雅史，渡辺好夫：二成分現像トナー挙動シミュレーション, Ricoh Technical Report No.26 , pp.26-33 (2000).
- 16) 渡辺好夫：電子写真用コロナ帯電器の放電シミュレーション，静電気学会誌, 14 (6) , pp.494-505 (1990).
- 17) 酒井浩司：レーザープリンターの歴史と最新動向，光技術コンタクト, 47 (9) , pp.476-485 (2000).
- 18) 河合直利，稲垣義弘，長坂泰志：小径ビーム走査光学系の画質への効果，Konica Minolta Technology Report Vol.9 , pp.47-52 (2012)
- 19) 吉田洪二：電子写真とその装置，日刊工業新聞社 (1967).
- 20) 静電気ハンドブック：静電気学会，オーム社 (1998).
- 21) 上原利夫，谷 学，鈴木 健，中川活二，伊藤彰義：電化分布可視化のための静電気力顕

- 微鏡の有限要素法による解析, Japan Hard Copy, pp.89-92 (1996).
- 22) J. Takahashi and T. Katoh, "High Voltage and High Resolution Surface Potential Imaging using Scanning Electrostatic Force Microscope," T. IEE Japan, Vol. 117-E, No. 12, pp.594-599 (1997).
  - 23) M. Tani, T. Uehara, K. Nakagawa and A. Itoh, "An Analysis of Electrostatic Force and Designing/Manufacturing of a Detector with Cantilever for Electrostatic Force Microscope," IS&T NIP 13, p.284 (1997).
  - 24) F. Inoue, A. Itoh and T. Uehara, "A study to visualize charge distribution with electrostatic force," IS&T NIP 10, pp.291-294 (1994).
  - 25) 大脇弘憲, 河田将也, 唐木哲也, 江原俊幸, 栢 孝明, 山崎晃司: 感光体表面の静電潜像の測定方法及び電子写真方法及び電子写真装置, 特開平-184188.
  - 26) E. J. Yarmchuk and A.G. E. Keefe, "High-resolution surface charge measurements on an organic photoconductor," J. Appl. Phys., 66 (11), pp. 5435-5439 (1989).
  - 27) 宮坂 徹, 梅田高雄, 永田徹也, 伊川辰夫: 感光体上静電潜像の高分解能測定, 電子写真学会誌, 30 (2), pp.123-130 (1991).
  - 28) 宮坂 徹, 梅田高雄, 永田徹也, 伊川辰夫, 堀 康郎: 静電潜像の解析による感光体解像度特性の検討, 電子写真学会, 30 (4), pp.432-438 (1991).
  - 29) 島田 昭: 微小面積プローブを用いた高解像度表面電位測定, 静電気学会誌, 12 (3), pp.210-215 (1988).
  - 30) 会沢宏一, 上野芳弘, 竹嶋基浩: 感光体評価技術 (1 ドット潜像電位評価技術), 富士時報, 75 (3), pp.194-197 (2002).
  - 31) 松井 満: 微小面積表面電位計, 静電気学会, 10 (4), pp.217-224 (1996).
  - 32) 浅野和俊: 静電気工学における電界・電位測定法, 10 (4), p.205 (1986).
  - 33) 前野 恭, 福永 香, 田中康寛, 高田達雄: 高分解能 PEA 空間電荷測定装置における信号処理, 電気学会論文誌A, 115 (5), pp.405-410 (1995).
  - 34) 長谷哲宏, 村田雄司: 走査型ケルビンプローブフォース顕微鏡 (KFM) を用いた高分子表面の帯電状態の観察, 静電気学会誌, 22 (1), pp.23-28 (1998).
  - 35) 三井 勉, 北井 茂, 宮本俊治: ポッケルス効果を利用した静電気測定, 静電気学会誌, 10 (4), pp.231-236 (1986).
  - 36) 山田博章, 小林徹也: 振動型表面電位センサ, 静電気学会誌, 10 (4), pp.213-216 (1986).
  - 37) 裏 克己, 藤岡 弘: 電子顕微鏡で観る LSI の世界—LSI はこうして生まれる, 日刊工業新聞社 (1990).
  - 38) 日本学術振興会第 132 委員会: 電子・イオンビームハンドブック第 3 版, 日刊工業新聞社, pp.839-848 (1998).
  - 39) G. F. Fritz, D.C.Hoesterey and L.E.Brady, "Observation of Xerographic Electrostatic Latent Images with a Scanning Electron Microscope," Appl. Phys. Lett., 19 (8), pp.277-278 (1971).
  - 40) 松木 真: 画素形静電記録法における記録密度, 電子通信学会論文誌, J63-C, No.8, pp.545-552 (1980).

- 41) 葛西正直：SEMによる静電潜像測定，電子写真学会第41回研究討論会，pp.33-37 (1978).
- 42) 面谷 信，田中知明，星野担之：コロナイオン照射により作成した表面電荷のSEM観察，静電気学会講演論文集，pp.179-180 (1986).
- 43) 不動寺浩：電子ビームを用いたセラミック基板上への帯電像の形成とその観察，日本セラミック協会，104，pp.556-561 (1996).
- 44) T. Ishitani, Y. Kawanami and H. Todokoro, "Aluminum-Line Cutting End-Monitor Utilizing Scanning-Ion-Microscope Voltage-Contrast Images," Japanese Journal of Applied Physics, 24 (2), pp.133-134 (1985).
- 45) 不動寺浩：集束イオンビームによるセラミック基板上への帯電像の形成，日本セラミック協会，105，pp. 611-615 (1997).

## 第2章

- 1) 外村彰編：電子顕微鏡技術，丸善 (1989).
- 2) 上田良二：電子顕微鏡，共立出版 (1982).
- 3) H. Suhara, "High-Resolution Measurement of Electrostatic Latent Image Formed on Photoconductor Using Electron Beam Probe," Imaging Society of Japan, 52 (6), pp.501-508 (2013).
- 4) 須原浩之：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).
- 5) K. Ura, "Contrast mechanism of negatively charged insulators in scanning electron microscope," Journal of Electron Microscopy, 47 (2), pp.143-147 (1998).
- 6) M. Kotera, "Simulation of charging-up of insulating materials under electron beam irradiation," Electron Microscopy, 33 (3), pp.166-172 (1998).
- 7) H. Suhara, "Surface-potential distribution measuring apparatus, image carrier, and image forming apparatus," US 7612570.
- 8) 森田千明：超高压電子顕微鏡用電界放出電子銃開発に関する基礎的研究，名古屋大学博士学位論文 (2005).
- 9) 谷田和雄（著）：真空システム工学，養賢堂 (1977).
- 10) 熊谷寛夫，富永五郎，吉野達治（編）：真空の物理と応用，裳華房 (1977).
- 11) 堀越源一（著）：真空技術 [第3版]，東京大学出版会 (1994).
- 12) P. A. Redhead and E. V. Kornelsen（著）：超高真空の物理，岩波書店 (1977).
- 13) H. Suhara, N. Kubo, "Electrostatic latent image measuring device," US 8143603.
- 14) 中山勝矢（著）：真空技術実務読本，オーム社 (1985).
- 15) 日本真空技術（編）：真空ハンドブック，オーム社 (1992).
- 16) 久保信秋：真空チャンバ装置、静電潜像形成装置および静電潜像測定装置，特願

2005-116106.

- 17) 電気学会：電気磁気学，オーム社 (1989).
- 18) 裏 克己，藤岡 弘：電子顕微鏡で観るLSIの世界—LSIはこうして生まれる，日刊工業新聞社 (1990).
- 19) H. Seiler, "Secondary electron emission in the scanning electron microscope," J. Appl. Phys. 54 (11), R1-R18 (1983).
- 20) H. Suhara, "Measurement of Electrostatic Latent Image on Photoconductors by Use of Electron Beam Probe," IS&T NIP 25, pp.482-485 (2009).

### 第3章

- 1) 日本学術振興会第132委員会：電子・イオンビームハンドブック第3版，日刊工業新聞社 (1998).
- 2) 薦田弘敬：ULSI のレーザ・電子・イオンビームを用いた欠陥解析と修正技術の開発，大阪大学 博士論文, pp.60-78 (2006).
- 3) M. Kotera, "Simulation of charging-up of insulating materials under electron beam irradiation," Electron Microscopy, 33 (3), pp.166-172 (1998).
- 4) 小寺正敏，山口 清：電子ビーム照射に伴う絶縁物帯電のシミュレーション, J.Vac.Soc.Jpn (真空) , 43 (2) , pp.151-156 (2000).
- 5) 小寺正敏：電子ビーム照射に判う絶縁物試料の帯電現象のシミュレーション，電子顕微鏡, 33 (3), pp.166-172 (1998).
- 6) 裏 克己：電子・イオンビーム光学，共立出版 (1994).
- 7) H. Suhara, "Surface-potential distribution measuring apparatus, image carrier, and image forming apparatus," US 7612570.
- 8) 日本電子顕微鏡学会関東支部：走査電子顕微鏡，共立出版 (2000).
- 9) 嘉藤 誠：電子光学入門, Journal of surface analysis, 12 (1), pp.24-45 (2005).
- 10) H. Suhara, "High-Resolution Measurement of Electrostatic Latent Image Formed on Photoconductor Using Electron Beam Probe," Imaging Society of Japan, 52 (6), pp.501-508 (2013).
- 11) 藤井治久，広 三壽：電子ビーム照射によるPETフィルムの帯電特性とその解析，静電気学会誌, 24 (1), pp.36-41 (2000).
- 12) H. Suhara, "Measurement of Electrostatic Latent Image on Photoconductors by Use of Electron Beam Probe," IS&T NIP 25, pp.482-485 (2009).
- 13) 辻内順平，黒田和男，大木裕史，河田 聡，小島 忠，武田光夫，南 節雄，谷田貝豊彦，山本公明（編）：光学技術ハンドブック，朝倉書店 (2002).

- 14) 松居吉哉：結像光学入門，啓学出版 (1988).
- 15) H. Suhara, 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, pp.294-297 (2012).
- 16) J. M. Fleischer, M. R. Latta and M. E. Rabedeau, "Laser-Optical System of the IBM 3800 Printer," IBM J. Res. Develop., 21, pp.479-483 (1977).
- 17) 酒井浩司：レーザープリンターの歴史と最新動向，光技術コンタクト, 47 (9), pp.476-485 (2000).
- 18) 羽根田哲（監著）：カラーレーザープリンタ技術，トリケップス (1996).
- 19) 須原浩之, 飯尾雅人, 橘 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).
- 20) 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).
- 21) H. Suhara, M. Iio and H.Tachibana, "Latent Image Measurement for Dot Pattern Formed by Scanning Laser Beam," IS&T NIP 30, pp.264-267 (2014).

## 第 4 章

- 1) E. J. Yarmchuk and AG. E. Keefe, "High-resolution surface charge measurements on an organic photoconductor," J. Appl. Phys., 66 (11), pp. 5435-5439 (1989).
- 2) G. F. Fritz, D.C.Hoesterey and L.E.Brady, "Observation of Xerographic Electrostatic Latent Images with a Scanning Electron Microscope," Appl. Phys. Lett., 19 (8), pp.277-278 (1971).
- 3) H. Suhara, "High-Resolution Measurement of Electrostatic Latent Image Formed on Photoconductor Using Electron Beam Probe," Imaging Society of Japan, 52 (6), pp.501-508 (2013).
- 4) H. Suhara, M. Iio and H.Tachibana, "Latent Image Measurement for Dot Pattern Formed by Scanning Laser Beam," IS&T NIP 30, pp.264-267 (2014).
- 5) 日本電子顕微鏡学会関東支部：走査電子顕微鏡，共立出版 (2000).
- 6) K. Ura, "Contrast mechanism of negatively charged insulators in scanning electron microscope," Journal of Electron Microscopy, 47 (2), pp.143-147 (1998).
- 7) 裏 克己：電子顕微鏡における絶縁物試料の帯電コントラスト(1) 正帯電コントラスト，電子顕微鏡, 35 (3), pp.254-257 (2000).
- 8) 裏 克己：走査電子顕微鏡における絶縁物試料の帯電コントラスト (2) 負帯電コントラスト，電子顕微鏡, 36 (1), pp.53-56 (2001).
- 9) H. Suhara, T. Ueda and H. 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).
- 10) 高藤敦子, 村越久弥, 品田博之, 松井 都, 西山英利, 野副真理: 大電流高速 SEM 画像評価用二次電子エネルギーアナライザの開発, LSI テスティングシンポジウム, pp.233-238 (2001).
  - 11) H. Seiler, "Secondary electron emission in the scanning electron microscope," *J. Appl. Phys.* 54 (11), R1-R18, (1983).
  - 12) 裏 克己, 藤岡 弘: 電子顕微鏡で観る LSI の世界—LSI はこうして生まれる, 日刊工業新聞社 (1990).
  - 13) 須原浩之: 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, p199 (2014).
  - 14) 志水隆一, 居安 猛: 二次電子の話 (その 1) —生成モデルと普遍曲線について, *Journal of Surface Analysis*, 9 (2), pp.213-224 (2002).
  - 15) D. C. Joy, "A Database on Electron-Solid Interactions," *Scanning*, pp.270–275 (1995).
  - 16) Y. Lin and D. C. Joy, "A new examination of secondary electron yield data," *Surf. Interface Anal.*, 37, pp.895–900 (2005).

## 第 5 章

- 1) H. Suhara, T. Ueda and H. 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).
- 2) H. Suhara, N. Kubo, T. Ueda and H. Tanaka, "Potential Profile Measurement and Mechanism Analysis of Electrostatic Latent Image by Detecting Primary Electrons," *IS&T NIP* 28, pp.294-297 (2012).
- 3) 村田英一: 一般3次元境界電荷法の開発に関する研究, 名城大学博士論文 (1999).
- 4) H. Murata, T. Ohye and H. Shimoyama, "Improved 3D boundary charge method for high-accuracy calculation of potential and electric field in composite dielectric system," in *Charged Particle Detection, Diagnostics, and Imaging*, O. Delage, E. Munro and J. A. Rouse, eds., *Proc. SPIE* 4510, pp.107-118 (2001).
- 5) 河野照哉, 宅間 薫: 数値電界計算法, コロナ社 (1980).
- 6) 電気学会: 電気磁気学, オーム社 (1989).
- 7) 渋谷義一, 安田 勝, 林 成男, 武智盛明: 表面電荷法による複合絶縁系の電界解析, 電気学会論文誌 A, 99 (5), pp.200-206 (1979).
- 8) K. Hayami, "A robust numerical integration method for three-dimensional boundary element

- analysis", in Boundary Elements XII, M. Tanaka, C. A. Brebbia and T. Homma, eds., Proc. 12th Int. Conf. on Boundary Element Methods in Engineering 1, Computational Mechanics Publication with Springer-Verlag, pp.33-51 (1990).
- 9) 内川嘉樹, 大江俊美, 後藤圭司: 表面電荷法の改良, 電気学会論文誌 A, 101 (5), pp.263-270 (1981).
  - 10) Y. Kuno, A. Yagi, T. Morishima and Y. Uchikawa, "Fundamental study for high accuracy calculation of 3-D electromagnetic field," IEEE Transaction on magnetics, 24 (1), pp.295-298 (1988).
  - 11) 久野裕次: 境界要素法による三次元電界計算の基礎的研究, 名古屋大学 博士論文 (1988).
  - 12) H. Murata, T. Ohye and H. Shimoyama, "Improved 3-D boundary charge method," in Charged-Particle Optics II, E. Munro, ed., Proc. SPIE 2858, pp.103-114 (1996).
  - 13) H. Murata, T. Ohye and H. Shimoyama, "Improved 3-D boundary charge method for high-accuracy electric field calculation," in Charged Particle Optics III, E. Munro, ed., Proc. SPIE 3155, pp.113-124 (1997).
  - 14) 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).
  - 15) 裏 克己: 電子・イオンビーム光学, 共立出版 (1994).
  - 16) 嘉藤 誠: 電子光学入門, Journal of surface analysis, 12 (1), pp.24-45 (2005).

## 第 6 章

- 1) 成田 満, 大日方孝: 感光体の現状と展望, 富士時報, 83 (4), pp.281-285 (2010).
- 2) 伊丹明彦, 志田和久: 電子写真有機感光体の高解像度設計〜1 ドット潜像測定による感光体のパラメータ設計, コニカミノルタテクノロジーレポート Vol.2, pp.55-58 (2005).
- 3) 会沢宏一, 長谷川知貴: 有機感光体の評価技術——潜像評価——, 富士時報, 83 (4), pp.301-306 (2010).
- 4) 会沢宏一, 千住 亘, 人見美也子, 長谷川智貴, 成田 満, 中村洋一, 森田啓一: 潜像解析技術の検討, ICJ2008 Fall Meeting, pp.33-36 (2008).
- 5) 日本画像学会用語委員会(編): 画像技術用語集, 日本画像学会 (2007).
- 6) 増田 潔: デジタル機における OPC 光減衰カーブについて, Ricoh Technical Report No.27, pp.94-99 (2001).
- 7) 小斉平隆, 鈴木 裕一郎, 高橋恭介, 山本芳孝, 坂田 俊文: 電子写真感光体のレーザー露光に対する相反則不軌の測定, 電子写真学会誌, 21 (3), pp.183-189 (1983).

- 8) 河合直利, 稲垣義弘, 長坂泰志 : 小径ビーム走査光学系の画質への効果, Konica Minolta Technology Report Vol.9 , pp.47-52 (2012)
- 9) 篠原浩一郎 : レーザー走査光学系における画像の高画質化, 第 62 回日本画像学会講習会, pp34-41 (2006).
- 10) 本井俊博 : デジタルカラー複写機における潜像設計 –レーザー走査と画像の対応–, コニカミノルタテクノロジーレポート Vol.5, pp.89-94 (1992).
- 11) H. Suhara, "High-Resolution Measurement of Electrostatic Latent Image Formed on Photoconductor Using Electron Beam Probe," Imaging Society of Japan, 52 (6), pp.501-508 (2013).
- 12) H. Suhara, M. Iio and H.Tachibana, "Latent Image Measurement for Dot Pattern Formed by Scanning Laser Beam," IS&T NIP 30, pp.264-267 (2014).
- 13) H. Suhara, 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).
- 14) 平倉浩治, 川本広行 (監修) : 電子写真ープロセスとシミュレーションー, 東京電機大学出版局 (2008).
- 15) H. Suhara, "Electrostatic latent image evaluation device, electrostatic latent image evaluation method, electrophotographic photoreceptor, and image forming device," US 8168947.



## 研究業績目録

### 〔発表論文、審査付〕

- 1) S. Komatsu, H. Suhara, and H. Ohzu, "Laser scanning microscope with a differential heterodyne optical probe," Appl. Opt. 29, pp.4244-4249 (1990).
- 2) H. Suhara, "Interferometric measurement of the refractive-index distribution in plastic lenses by use of computed tomography," Applied Optics, 41 (25), pp.5317-5325 (2002).
- 3) H. Suhara, "High-Resolution Measurement of Electrostatic Latent Image Formed on Photoconductor Using Electron Beam Probe," Imaging Society of Japan, 52 (6), pp.501-508 (2013).
- 4) H. Suhara, 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).
- 5) 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, 日本画像学会誌, 54 (1), pp.3-10 (2015).

### 〔出版物〕

- 1) 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).

## 〔国際発表〕

- 1) H. Suhara, N. Sakuma, S. Suzuki, T. Ohsawa, S. Tsuyuzaki and S. Toyooka, "Development of the toroidal surface measuring system," SPIE Vol. 1531, Advanced optical manufacturing and testing II, pp.72-79 (1991).
- 2) H. Suhara, "Measurement of Electrostatic Latent Image on Photoconductors by Use of Electron Beam Probe," IS&T NIP 25, pp. 482-485 (2009).
- 3) H. Suhara, 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, pp.294-297 (2012).
- 4) H. Suhara, M. Iio and H. Tachibana, "Latent Image Measurement for Dot Pattern Formed by Scanning Laser Beam," IS&T NIP 30, pp.264-267 (2014).
- 5) T. Nakashima, H. Murata, H. Suhara and H. Shimoyama, "Development of charge density distribution simulation on dielectric surface," 9th International Conference on Charged Particle Optics, p.85 (2014).

## 〔国内発表〕

- 1) 須原浩之：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).
- 2) 須原浩之, 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).
- 3) 須原浩之：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).
- 4) 須原浩之, 飯尾雅人, 橘 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).
- 5) 石原嘉隆, 村田英一, 池田 晋, 下山 宏, 須原浩之：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).
- 6) 野田啓介, 村田英一, 須原浩之, 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).
- 7) 野田啓介, 村田英一, 下山 宏, 須原浩之, 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).
- 8) 野田啓介, 村田英一, 下山 宏, 須原浩之, 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).
- 9) 須原浩之, 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).
- 10) 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).
- 11) 須原浩之, 仲瀬知子：CT 解析を用いた光学レンズの屈折率分布測定方法, Japan Optics '96, p.331 (1996).
- 12) 須原浩之, 仲瀬知子：CT 解析を用いた光学素子の屈折率分布測定干渉計, 第 22 回光学シンポジウム, p53 (1997).
- 13) 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).
- 14) 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).
- 15) 須原浩之：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).
- 16) 中島卓也, 須原浩之, 村田英一, 下山 宏：誘電体表面における電荷密度分布の推定, 日本顕微鏡学会 第 71 回学術講演会, p.113 (2015).

国際特許登録リスト（筆頭発明のみ）

番号	登録番号	出願番号	出願日	発明の名称
1	US8168947	US12/481209	2009/06/09	Electrostatic latent image evaluation device, electrostatic latent image evaluation method, electrophotographic photoreceptor, and image forming device
2	US8143603	US12/390243	2009/02/20	Electrostatic latent image measuring device
3	US8314627	US11/866758	2007/10/03	Latent-image measuring device and latent-image carrier
4	US6891678	US10/735690	2003/12/16	Lens for optical scanning, optical scanner, and image forming apparatus
5	US8411123	US12/230013	2008/08/21	Light scanning apparatus, latent image forming apparatus and image forming apparatus
6	US7783213	US12/143318	2008/06/20	Method and device for measuring surface potential distribution, method and device for measuring insulation resistance, electrostatic latent image measurement device, and charging device
7	US7239148	US11/1048	2004/12/02	Method and device for measuring surface potential distribution
8	US7400839	US11/751671	2007/05/22	Method and device for measuring surface potential distribution, method and device for measuring insulation resistance, electrostatic latent image measurement device, and charging device
9	US7869725	US12/788989	2010/05/27	Method and device for measuring surface potential distribution, method and device for measuring insulation resistance, electrostatic latent image measurement device, and charging device
10	US5834766	US08/901256	1997/07/28	Multi-beam scanning apparatus and multi-beam detection method for the same

番号	登録番号	出願番号	出願日	発明の名称
11	US8451309	US12/694521	2010/01/27	Optical scanning apparatus and image forming apparatus
12	US6555810	US09/666473	2000/09/20	Optical scanning device comprising a plurality of scanning units having one lens in common
13	US6400391	US09/588342	2000/06/06	Optical scanning lens, optical scanning device and image forming apparatus
14	US6532094	US09/865523	2001/05/29	Optical scanning lens, optical scanning device and image forming apparatus
15	US6744545	US10/143013	2002/05/13	Optical scanning lens, optical scanning device and image forming apparatus
16	US6870652	US10/820733	2004/04/09	Optical scanning lens, optical scanning device and image forming apparatus
17	US7072127	US11/50724	2005/02/07	Optical scanning lens, optical scanning device and image forming apparatus
18	US7130130	US10/315183	2002/12/10	Optical scanning lens, optical scanning device and image forming apparatus
19	US7345826	US11/483665	2006/07/11	Optical scanning lens, optical scanning device and image forming apparatus
20	US7612570	US11/847790	2007/08/30	Surface-potential distribution measuring apparatus, image carrier, and image forming apparatus

## 国内特許登録リスト（筆頭発明のみ）

出願番号	出願日	登録番号	発明の名称
H02-268293	1990/10/08	2877936	トロイダル面の測定装置
H02-268292	1990/10/08	2877935	面精度の測定方法および測定装置
H07-154948	1995/06/21	3423486	光学素子の屈折率分布の測定方法および装置
H07-031937	1995/02/21	3365881	レンズの屈折率検査装置
H08-062203	1996/03/19	3496786	位相物体の測定方法および測定装置
H08-281281	1996/10/03	3599921	屈折率分布の測定方法及び装置
H09-028846	1997/02/13	3731020	2 ビーム走査装置および2 ビーム走査装置用の2 ビーム検出方法・マルチビーム走査装置およびマルチビーム走査装置用のマルチビーム検出方法
H09-216968	1997/07/29	3699810	屈折率分布の測定方法及び装置
H09-345751	1997/12/02	3617916	シアリング干渉計
H11-069467	1999/03/16	4009036	マルチビーム走査装置
H11-049404	1999/02/26	3957911	シアリング干渉計及び該干渉計を備えた屈折率分布測定装置及び屈折率分布の測定方法
H11-163037	1999/06/09	3503929	光走査用レンズおよび光走査装置および画像形成装置
H11-195230	1999/07/09	3913407	屈折率分布の測定装置及び方法
2000-134643	2000/05/08	3871183	光学素子の3次元形状測定方法及び測定装置
2001-019116	2001/01/26	4027605	光学面の形状測定方法および装置および記録媒体
2002-109282	2002/04/11	4344909	静電潜像の測定装置および静電潜像の測定方法
2002-364278	2002/12/16	4139209	光走査装置
2004-031910	2004/02/09	4438439	表面電荷分布測定方法及び装置並びに、感光体静電潜像分布測定方法及びその装置
2004-006814	2004/01/14	4319554	屈折率分布の測定方法および測定装置
2004-247035	2004/08/26	4404724	静電潜像測定装置並びに潜像担持体の評価方法及び装置
2003-406002	2003/12/04	4559063	表面電位分布の測定方法および表面電位分布測定装置
2004-094245	2004/03/29	4478491	帯電装置、静電潜像の形成装置、画像形成装置、静電潜像測定装置、帯電方法、静電潜像の形成方法、画像形成
2004-186177	2004/06/24	4383264	表面電位分布測定方法および測定装置

出願番号	出願日	登録番号	発明の名称
2004-272069	2004/09/17	4608272	耐絶縁性測定方法および装置および潜像担持体評価方法
2004-360996	2004/12/14	4619765	表面電荷分布または表面電位分布の測定方法およびその装置
2004-381042	2004/12/28	3762420	屈折率分布の測定方法及び装置
2005-116953	2005/04/14	5089865	表面電位分布測定方法及び表面電位分布測定装置
2005-167679	2005/06/08	4702880	表面電位分布測定方法及び表面電位分布測定装置
2005-235018	2005/08/12	3955072	マルチビーム走査装置およびマルチビーム走査装置用のマルチビーム検出方法
2006-280105	2006/10/13	5374816	静電潜像の測定装置、潜像担持体、及び画像形成装置
2006-253048	2006/09/19	5369369	表面電位分布の測定方法、表面電位の測定装置、感光体静電潜像の測定装置、潜像担持体及び画像形成装置
2006-233005	2006/08/30	5116134	表面電位分布測定装置、潜像担持体及び画像形成装置
2007-006267	2007/01/15	5176328	静電特性計測方法及び静電特性計測装置
2007-070836	2007/03/19	5086671	静電潜像の評価方法・静電潜像評価装置
2007-218254	2007/08/24	5103644	光走査装置及び潜像形成装置及び画像形成装置
2007-150449	2007/06/06	5358898	光学面の形状測定方法および装置および記録媒体
2007-230642	2007/09/05	5072081	感光体静電潜像の測定装置、画像形成装置及び感光体静電潜像の測定方法
2007-304362	2007/11/26	4851426	光走査用レンズ、光走査装置、および画像形成装置
2008-064114	2008/03/13	5081024	静電潜像の測定装置、静電潜像の測定方法および画像形成装置
2008-152206	2008/06/10	5262322	静電潜像評価装置、静電潜像評価方法、電子写真感光体および画像形成装置
2008-270203	2008/10/20	5091081	表面電荷分布測定方法および装置
2009-128224	2009/05/27	5299085	潜像形成方法、潜像形成装置、画像形成装置および静電潜像計測装置
2012-104473	2012/05/01	5081328	静電潜像の測定装置、静電潜像の測定方法および画像形成装置