

# 教材用簡易電子顕微鏡の製作

神野貴昭

工学系技術支援室 分析・物質技術系

## 概要

科研費奨励研究「電磁気学教材としての簡易電子顕微鏡製作」についての成果を報告する。この研究では、実際の実験装置と基礎的な電磁気学とのつながりを学生に意識させることを目的として、装置の仕組みや測定原理を解説するための、簡易的な電子顕微鏡の製作を行った。

### 1 はじめに

分析・物質技術系では、共用の実験装置の管理及び技術指導を主な業務の一つとしている。共用の実験装置は、不特定多数の人が装置を利用するという特性上、装置の取り扱いが容易なものが多くなる傾向がある。特に近年は装置の取り扱いやすさが向上しており、初めて扱う人であっても簡単なマニュアルさえあれば、簡単に良好な結果が得られることも珍しくない。装置の使いやすさの向上は、迅速な研究に貢献する一方で、装置の原理や仕組みのブラックボックス化を招くことがある。装置のブラックボックス化は、装置の仕組みや測定原理を覆い隠してしまうため、教育機関としては望ましくない側面がある。

そこで、学生たちの装置に対する理解を深めるために、単純な構造で分解や組み立てが容易に可能な装置を製作することを考えた。本研究は、装置の仕組みや測定原理と物理の基礎科目である電磁気学とのつながりを学生に意識させることを目的として、簡易電子顕微鏡の製作に取り組んだ。実際に研究で扱う実験装置の原理を学ぶことで、基礎科目の知識をより確かなものにしていくことが大学の教育としては望ましいと考え、本研究を計画した。

### 2 製作の概要

電子顕微鏡は、大きく分けて、透過型のもので走査型のものがある。本研究では、筆者が日常業務で管理している走査型の電子顕微鏡の製作を目指した。H28年度の研究では主に電子線照射系と電子レンズ系、H29年度の研究では主に制御系と検出器系の製作を目標とした。

現在の製作状況を図 1(a)に示す。本体は KF40 真空配管の規格をベースにして製作した。KF40 クロスの上部に接続した KF40 ニップルが電子顕微鏡の鏡筒になっており、下部は真空排気系、右側が検出系、左側が試料導入口となっている。

#### 2.1 鏡筒部

鏡筒内部には、電子銃、コンデンサレンズ、偏向コイルなどが入れてあり、鏡筒上部のフランジから電源系の配線などを取り出すようにしてある。

電子銃は、電子線の発生源であり、本研究では自作が比較的容易な熱電子銃を製作した。製作した熱電子銃は、電子源となるタングステンフィラメント、バイアス電圧を与えるウェーネルト、陽極の主に 3 部品から構成されている。フィラメントに電流を流し、高温に加熱すると熱電子が放射される。フィラメントには負の高電圧が印加されているため、陽極との間で電子が加速され、電子線として照射される。

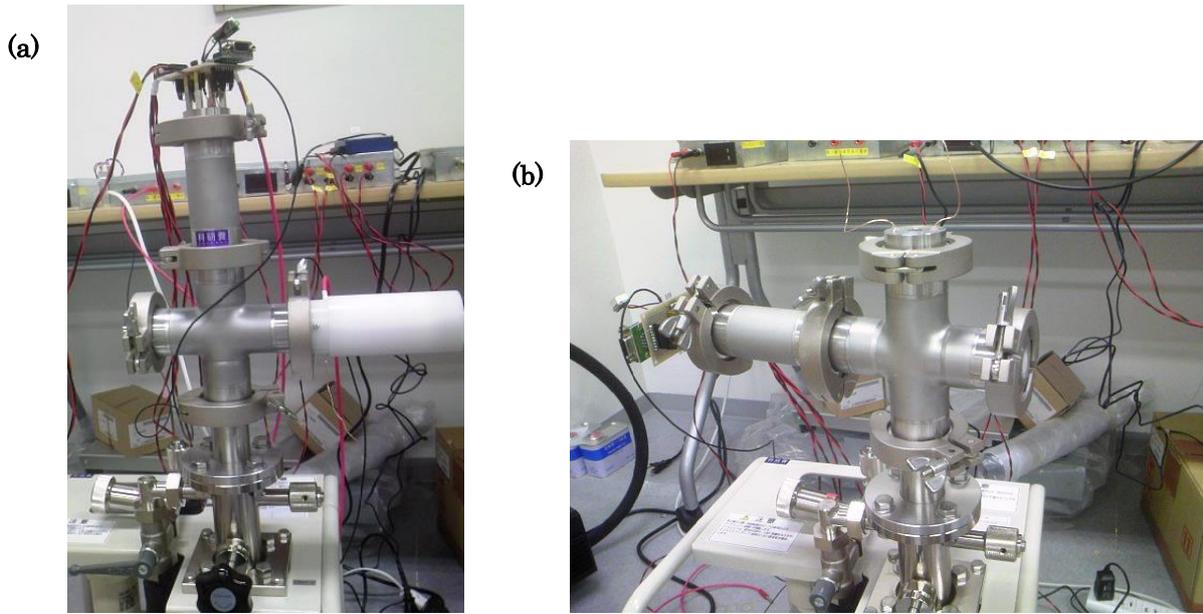


図 1. 製作した装置の現状、(a)通常の配置、(b)電子線観察のための配置

コンデンサレンズは、電子銃で発生した電子線を磁場によって収束させるためのものである。磁場によるコンデンサレンズは、比較的強い磁場が必要である。そのため、コイルを透磁率の高い材料(SS400D)で囲い、一部だけ透磁率の低い材料(真鍮)を使うことによって磁気回路を作り、磁場を集中させるようにした。

電子線が試料表面を走査できるように電子線の進む向きを曲げるためのものが偏向コイルである。偏向コイルは、電流を流した際に、電子線に対して垂直な磁場が発生するように、フェライトコアの左右に逆向きのコイルを巻いたものを製作した。

コンデンサレンズと偏向コイルが作る磁場については、ホールセンサー(A1324LUA-T)によって測定し、磁場の分布と大きさの励磁電流依存性を調べた。

## 2.2 電源系

電子銃のフィラメントを加熱するための電源とコンデンサレンズを励磁するための電源は、秋月電子の実験室用定電圧安定化電源キットを製作して使用した。

電子線を加速するための高圧電源は、冷陰極用のインバータ(K-G00-500-A11)の交流出力をコンデンサとダイオードを組み合わせたコッククロフト・ウォルトン回路に入力することで 1.5 kV の出力を得られるものを作成した。

## 2.3 制御系

走査型の電子顕微鏡では、偏向コイルに流す電流を制御し、電子線を走査させる必要がある。本研究では、National Instruments 社の LabVIEW と USB-6001 を利用した制御システムを製作した。

LabVIEW は計測制御などのアプリケーションを開発するためのグラフィカルプログラミング環境であり、USB-6001 はパソコンに USB で接続できる入出力用のデバイスである。USB-6001 を LabVIEW で制御することにより、電子線の走査信号を作成し、検出器からの信号を同期させることで、二次電子像を得ることを目指した。

電子線の走査信号は、ブラウン管などと同様に、X 方向と Y 方向の 2 つののこぎり波によって成り立っている。LabVIEW のプログラム上でのこぎり波の振幅や周期、原点電圧などを調整できるようにし、USB-6001

から2つののこぎり波の電圧信号が出力されるようにした。USB-6001は10Vまで電圧を出力することができるが、電流は数mAしか流すことができない。そのため、パワーオペアンプ(LM675T)を使用した電流ブースター回路を製作し、偏向コイルとの間に挿入した。

## 2.4 検出器系

走査型の電子顕微鏡で得られる二次電子像は、電子線が照射された部分から放出される二次電子の量をコントラストに反映させたものである。すなわち二次電子の量を測定するための検出器が必要である。本研究で製作するEverhart-Thornley検出器は、二次電子をシンチレータで一度光に変換してから、その光の強度を光電子増倍管で測定する検出器である。

シンチレータは、導電処理したプラスチックシンチレータを使用し、金具でアクリル製のライトガイドの先端に取り付けた。金具は、二次電子を加速してシンチレータに入射させるための高電圧電極にもなっている。ライトガイドは、真空の外部に取り付けた光電子増倍管(R11102 浜松ホトニクス)までシンチレーション光を導くためのものであり、加工したKF40フランジに取り付け、エポキシ系樹脂で真空封止した。

## 3 動作確認

製作した部品を組み上げて、狙い通りに動作するかの確認を行った。図1(b)に電子線の挙動を観察するための装置の構成を示す。KF40クロスの右側のフランジに蛍光板を取り付け、左側に鏡筒を配置した。この配置の状態、フィラメントに電流を流し加熱し、加速電圧を印加すると、蛍光板に緑色に光るスポットが現れることが確認できた。さらにコンデンサレンズに電流を流すとスポットのサイズが小さくなっていき、電子線が収束されていく様子が観察できた。電子線が収束された状態で、製作した制御用のプログラムを起動すると、スポットが蛍光板上で走査される様子が観察できた。

次に、図1(a)の状態に装置を戻し、二次電子像が取得できることを確認するべきであったが、本原稿執筆の時点では、いくつかの問題のため、まだ二次電子像の取得には成功していない。

## 4 電磁気の教材として

本研究は、電磁気学の教材の内容としては、主に「静電磁場中での電荷の運動」についての教材を目指した。電子線が加速電圧で加速される現象は静電場中、コンデンサレンズや偏向コイルによって軌道が曲げられる現象は、静磁場中での電荷の運動に相当する。

その他にもアンペールの法則、物質の透磁率、電気回路などの教材にもなるように意識して製作を行った。

## 5 今後の方針

今後についても継続して、現状の問題点の解決し、二次電子像の取得を目指すとともに、教材として上手く活用できるように調整していく予定である。

本研究の本来の目的は、装置の原理を解説し、基礎科目とのつながりを学生に意識してもらう教材を作ることであったが、一方で、分析・物質技術系としては携わることの少ない機械工作・電子工作・計測制御などに関する技術の自己研鑽という側面も持たせていた。可能な限りひとりの力で取り組んできたが、限界もある程度見えてきたので、今後は専門の方にも協力して頂き、横のつながりを強化するきっかけになれば良いのではないかと考えている。

## 6 謝辞

本研究は科学研究費補助金(奨励研究:課題番号 16H00298,17H00290)の助成を受けて実施しました。