

# 電子レンズの設計技術（後篇） （基礎理論から実装技術，装置応用まで）

## On the Design of Electron Lenses 2

小瀬 洋一<sup>a</sup>，米澤 彬<sup>b</sup>

Yoichi Ose and Akira Yonezawa

<sup>a</sup>(株)日立ハイテクノロジーズ

<sup>b</sup>米澤電子技研\*

**要旨** 電子レンズの設計技術について2回に分けて概説している。前篇では光学設計の基礎を解説し、高分解能SEMに用いられる対物レンズは短焦点化によって低収差化が進んだことを示した。短焦点化にはリターディングやブースティングなどの電界磁界重畳レンズが有効であることを学んだ。後篇（本講座）では電界磁界重畳レンズの設計シミュレーション手順と具体的な最適化の例を冒頭で解説する。後半は最も多用される磁界レンズの実装に必要な技術についてまとめる。所望の焦点距離，分解能を得る短焦点磁界レンズを設計，作製するには，磁界レンズ間隙付近以外の鉄部で磁気飽和しない磁気回路，および非軸対称な磁界を極力小さく抑える磁界レンズの加工，組立が重要である。短焦点磁界レンズの例として，TEMにおける超高分解能対物レンズ，およびSEMにおける単極レンズを紹介する。

キーワード：収差，シミュレーション，磁気回路，磁束密度，磁気飽和

### 7. 低収差レンズ設計最適化の流れ

前篇では低収差レンズ実現の戦略として，磁界レンズと電界レンズを重畳した対物レンズの短焦点化が重要であることを概説した。詳細は成書<sup>6-8)</sup>で理解を深めて頂きたい。単体のレンズでは先人による理論式や実験式により最適設計を進めることができるが，電界磁界重畳レンズでは設計自由度が増えたため，数値シミュレーションの利用が不可欠となる。

本章では数値シミュレーションを用いた軸対称レンズ設計最適化の流れを解説する。図15のシミュレータ<sup>9)</sup>は，初めに電極，磁極およびコイル形状を入力して電界磁界を計算し，軸上の電界磁界分布を出力する。なお，本解析モデルは測長SEMに用いられるリターディングとブースティングを併用した対物レンズを模擬している。次いで近軸軌道解析により，収差係数や倍率等の光学パラメータを計算した後，電子ビーム径を最小化する集束半角を導出する。

電界磁界重畳レンズの近軸軌道方程式は次式であり，本方程式を数値積分することで近軸主軌道（g軌道とh軌道）を計算する。

$$U'' + \frac{\Phi'}{2\Phi} U' + \frac{\Phi''}{4\Phi} U + \frac{eB^2}{8m\Phi} U = 0 \quad (13)$$

$$\theta' = \sqrt{\frac{e}{8m\Phi}} B \quad (14)$$

ここで， $\Phi$ は電子のエネルギーに相当する軸上電位， $B$ は軸上磁束密度， $e$ は素電荷， $m$ は電子の質量である。 $\theta$ は磁界による軌道面の回転角度であり，固定座標 $u = x + jy$ と回転座標 $U = X + jY$ には $u = Ue^{j\theta}$ の関係がある。

ビーム径 $d_{opt}$ と最適集束半角 $\alpha_{opt}$ を計算するために必須な球面収差係数 $C_{so}$ と軸上色収差係数 $C_{co}$ の積分式を式(15)(16)に示す<sup>10)</sup>。なお，添字<sub>o</sub>は物面，添字<sub>i</sub>は像面での収差係数を示しており，倍率 $M$ と角度倍率 $M_\alpha$ を使って式(17)で変換できる。

$$C_{so} = \frac{1}{32} \int_{z_o}^{z_i} \left\{ \frac{\Phi}{\Phi_{z_o}} \right\}^{1/2} \left[ - \left( \frac{3\Phi'^2}{\Phi^2} + \frac{2eB^2}{\Phi} \right) h^2 h'^2 + \left( \frac{5\Phi'^2}{2\Phi^2} + \frac{25\Phi'^4}{4\Phi^4} - \frac{7\Phi'^2\Phi''}{\Phi^3} + \frac{e\Phi''B^2}{\Phi^2} + \frac{23}{4} \frac{e\Phi'^2 B^2}{2m\Phi^2} - \frac{4e\Phi'BB'}{\Phi^2} + 3 \left( \frac{eB^2}{2m} \right)^2 + \frac{2eB'^2}{\Phi} \right] h^4 dz \quad (15)$$

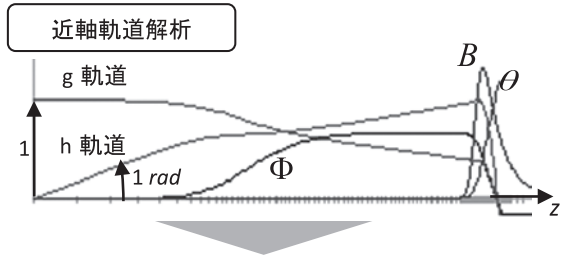
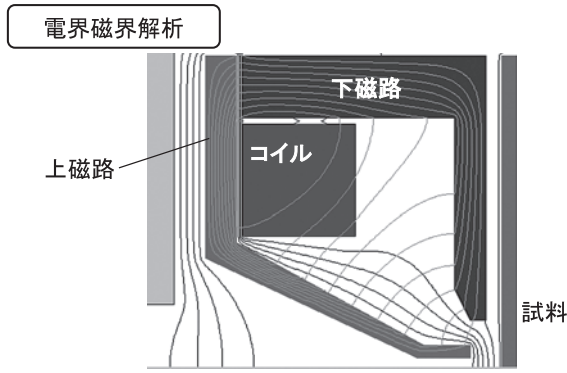
〒312-8504 茨城県ひたちなか市市毛882

<sup>a</sup> TEL: 080-1150-0600; FAX: 029-275-5199

E-mail: yoichi.ose.zp@hitachi-hightech.com

\*米澤電子技研 E-mail: akyonezawa@ab.auone-net.jp

2016年12月15日受付，2017年3月21日受理



収差解析と最適条件探索

倍率:  $M$ 、角度倍率:  $M_\alpha$   
 球面収差係数:  $C_s$ 、色収差係数:  $C_c$   
 最適集束半角:  $\alpha_{opt}$ 、最小ビーム径:  $d_{opt}$

図 15 電界磁界重畳レンズの設計手順

$$C_{co} = -\frac{1}{4} \int_{z_0}^{z_i} \left\{ \frac{\Phi_{z0}}{\Phi} \right\}^{1/2} \left[ 2h^2 + \frac{1}{2} \frac{\left[ \Phi'' - \frac{eB^2}{2m} \right]}{\Phi} h^2 \right] dz \quad (16)$$

$$C_{si} = \frac{M}{M_\alpha^3} C_{so}, \quad C_{ci} = \frac{1}{MM_\alpha^3} C_{co} \quad (17)$$

その他の ( $C_o$ : 非点,  $D_o$ : 像面湾曲,  $E_o$ : コマ,  $F_o$ : 歪曲,  $c_o$ : 非等方性非点,  $e_o$ : 非等方性コマ,  $f_o$ : 非等方性歪曲,  $C_{c2}$ : 倍率色,  $C_{c3}$ : 回転色) 収差係数も計算しておけば, SEM で重要な図 16 に示す偏向歪の最適設計が可能である。

偏向パラメータ  $\beta = -M_\alpha / (M(z_p - z_0))$  とすると, 偏向歪  $\Delta U_i^{(3)}$  は次式で表現できる。

$$\Delta U_i^{(3)} = (A_{pb} + jA_s) |U_i|^2 U_i \quad (18)$$

$$A_{pb} = \beta^3 C_{si} + 3\beta^2 F_i + \beta(2C_i + D_i) + E_i \quad (19)$$

$$A_s = \beta^2 f_i + \beta c_i + e_i \quad (20)$$

ここで  $A_{pb}$  と  $A_s$  はそれぞれ糸巻/樽型歪係数と S 字歪係数である。  $A_{pb}$  は  $\beta$  の 3 次式であるので図 16 (2) のように糸巻/樽型歪をゼロにする偏向支点  $z_p$  が決まる。物面で等間隔に走査しても像面で僅かに S 字歪が残る。一方, 図 16 (3) では S 字歪を最小とすると糸巻/樽型歪が大きくなる。

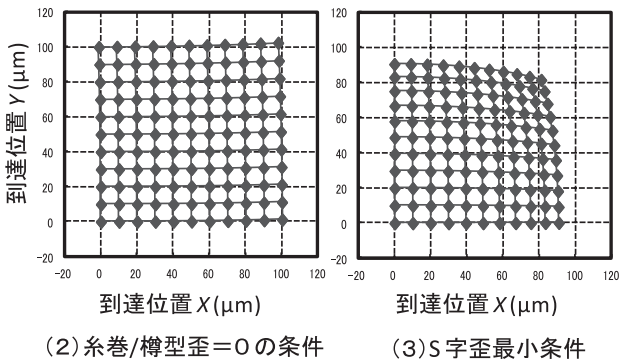
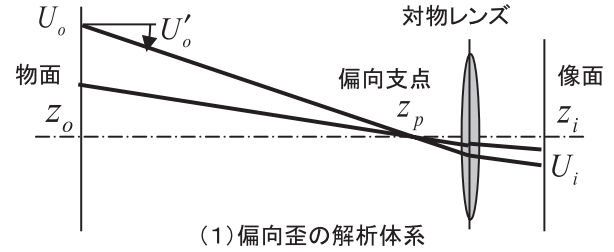


図 16 偏向条件の最適化

## 8. 磁界レンズ実装技術

前篇では, 電子光学設計の方法について理論的に解説され, 低収差レンズは, 短焦点化することにより得られることが示された。本章では, 短焦点磁界レンズを実際に設計し作製する場合に必要なと思われる基礎的な事項: 1) 磁界レンズの構造, 2) 磁気回路, 3) 磁束密度の見積, 4) 磁界レンズの加工, 組立, 5) 励磁コイル, について説明する。

短焦点磁界レンズでは, 励磁コイルに比較的大きな電流を流すため, 磁界レンズの鉄部が磁気飽和しその部分から磁束が漏れやすい。この漏洩磁束が付加的なレンズを生じて所望の焦点距離, 分解能が得られないことがある。磁界レンズ間隙付近以外の鉄部で磁気飽和しないように設計しなければならない。さらに, 高分解能像を得るには磁界レンズを軸対称で高精度に加工, 組立することが重要である。また, 励磁コイルについても, 発生する熱により, 観察中の像の移動やボケが生じ, さらにコイルが損傷することもあるので, 注意が必要である。

### 8.1 磁界レンズの構造

図 17 に磁界レンズの基本構造を示す。ドーナツ状のコイル (巻数  $N$ ) を軸対称の鉄材で囲み (磁気ヨーク), 鉄材の一部に間隙部 (間隙  $S$ , 穴径  $D$ ) を設ける。コイルに直流電流  $I$  を流すと間隙部に生じた軸対称磁界がレンズ作用をする。レンズの焦点距離  $f$  と, 間隙部の寸法  $S, D$ , 起磁力  $NI$  および加速電圧  $U$  との関係は, G. Liebmann により統一的に求められた<sup>11)</sup>。間隙部の寸法 ( $S + D$ ) を小さく, レンズ強度  $(ND)^2/U$  を大きくすることにより, 短焦点化可能であることが示された。

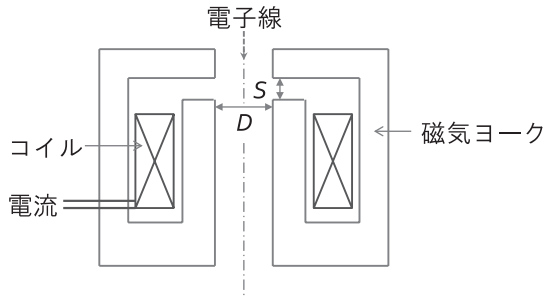


図 17 磁界レンズの構造

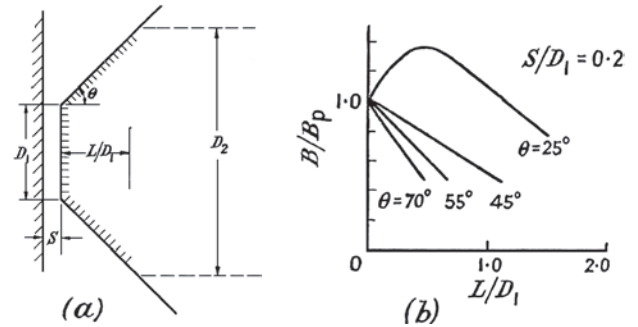


図 20 テーパー角  $\theta$  の効果<sup>12)</sup>

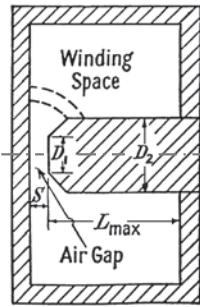


図 18 測定に用いられた磁気回路<sup>12)</sup>

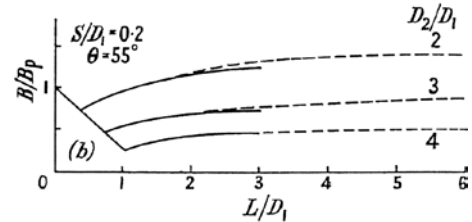


図 21 テーパー部及び内筒の磁束密度<sup>12)</sup>

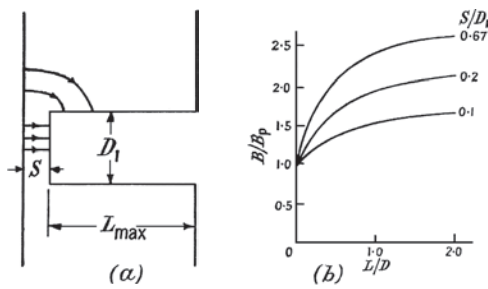


図 19 テーパー部のない内筒の磁束密度<sup>12)</sup>

## 8.2 磁気回路

鉄の飽和磁束密度は、ほぼ 2 T 程度であるので、磁気回路の鉄部での磁束密度は、例えば 1.5 T を超えないように設計される。T. Mulvey は、磁気飽和を生じにくい磁気回路形状を検討した。図 18 のような磁気回路各部の磁束をサーチコイルとフラックスメータを用いて測定し、これを各部の断面積で除して各部の磁束密度を求めた<sup>12)</sup>。

図 19 は測定結果の一例で、内筒の磁束密度  $B$  は、内筒頂面 ( $L/D_1 = 0$ ) から、すなわち間隙  $S$  から遠ざかるほど大きくなっている (図 19b)。頂面の他に円筒面からも磁束が内筒に流入するためである (図 19a)。 $Bp$  は内筒頂面における磁束密度であり、式 (21) で与えられる (MKSA 単位)<sup>12)</sup>。 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $NI$  は起磁力である。

$$Bp = \frac{\mu_0 NI}{S} \quad (21)$$

この式から、 $Bp$  が 1.5 T を超えない間隙  $S$  と起磁力  $NI$  を

見積もることができる。

図 19b は、起磁力を大きくすると内筒頂面より先に内筒部が磁気飽和することを示している。これでは付加的なレンズが生じて、所望の短焦点レンズが得られない。そこで内筒頂面から図 20a のようにテーパー角  $\theta$  で内筒部断面を大きくすると、内筒部の磁束密度の増大を防止できることが示された。すなわち  $45^\circ < \theta < 70^\circ$  では内筒部の磁束密度  $B$  は  $L$  とともに減少し内筒頂面の磁束密度  $Bp$  よりも小さくなる (図 20b)。

さらにテーパー状部分の途中から円筒状 (直径  $D_2$ ) にした場合 (図 18)、内筒部の磁束密度  $B$  がどのように増加するかが示された (図 21)。図 21 より、 $D_2/D_1 \geq 3$ 、 $L/D_1 \leq 6$  では、 $B$  は  $Bp$  を超えないことが分かる。従って、この条件の場合、式 (21) により  $Bp$  を 1.5 T 以下になるように  $S$  及び  $NI$  を設定すれば、磁気回路内筒部にて磁気飽和を防止することが可能となる。

T. Mulvey の以上の考察から、磁気回路設計の指針が得られる: 1) 内筒部は、頂面 (直径  $D_1$ ) からテーパー状にし (角  $\theta$ ) 断面積を増大させる。2) テーパー角  $\theta$  は  $55^\circ \pm 10^\circ$  とする。3) 内筒部は、直径  $D_2$  で円筒形状にする。4) 直径  $D_2$  は、磁極先端部の直径  $D_1$  の 3 倍以上とする。5) 磁気回路はコンパクトに設計し、コイルの大きさが許す限り内筒部の長さは長くしない。

また、外筒等の内筒部以外の鉄部分の必要な断面積は、内筒部の断面積と同程度以上として各部の磁束密度が  $Bp$  を超えないように設定される。特に内筒部の根元で磁束密度が大きくなり磁気飽和を生じやすいので注意を要する。

レンズの頂面径  $D_1$  の大きさは、通常穴径  $D$  の 2~3 倍となるように設定される。穴径  $D$  は、TEM 対物レンズでは 2~5 mm 前後である。

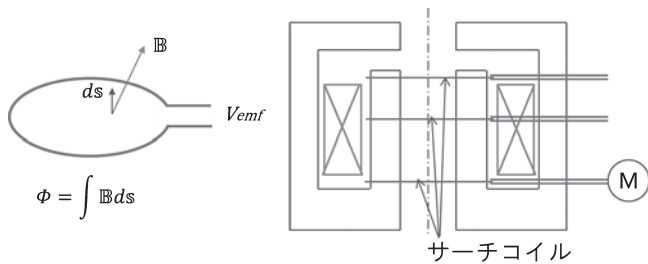


図 22 a. サーチコイル (左) b. 磁束の測定 (右)

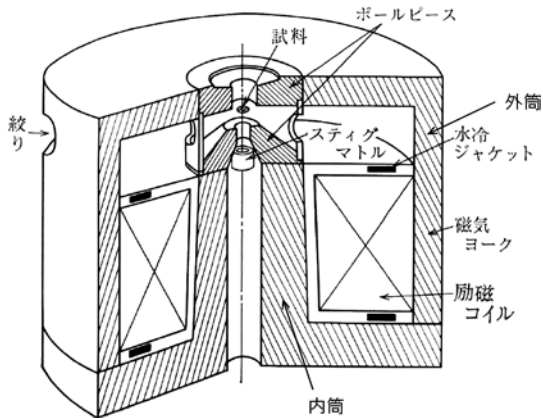


図 23 対物レンズの組立例<sup>13)</sup>

### 8.3 磁束密度の見積

磁気回路各部の磁束は、電磁誘導の法則に基づいて測定可能である。すなわち図 22a のようなサーチコイルを通る磁束  $\Phi$  が時間的に変化するとサーチコイルに起電力  $V_{emf}$  を生ずる。この原理を利用して、図 22b のように磁気回路各部の磁束を、複数設けたサーチコイルにフラックスメータ (M) を接続して測定できる。各部の磁束密度は、磁束を鉄部の断面積で除すれば得られる。

また有限要素法を用いたシミュレーションソフトでは磁気回路各点の磁束密度を求めることができる。図 15 はシミュレーションソフトによる磁束線の出力例を示す。

### 8.4 磁界レンズの加工、組立

磁界レンズ (TEM 対物レンズ) の組立例を図 23 に示す<sup>13)</sup>。図 23 では、1) ポールピース (上極と下極からなる)、2) 内筒、3) 外筒に 3 分割されている。SEM の対物レンズでは、ポールピースを使用せず 2 分割構成とされている場合がある。

対物レンズが軸対称に加工・組立されないと、非軸対称磁界を生じ、電子線光軸の曲がりや非点収差を生じ、分解能が劣化する。図 23 において、例えばポールピースが片寄り、片側で外筒に密着し、反対側で間隔をあけて外筒に接合した場合、磁束は密着している側に多く流れるため、磁束の流れが均一でなくなる。その結果光軸上に非軸対称磁界を生じる。これを防止するため、ポールピースの上下極を非磁性のリン青銅のスペーサーに圧入し、スペーサーの一部の径をわずかに上磁極より大きくし、その部分で外筒部に嵌め合うように

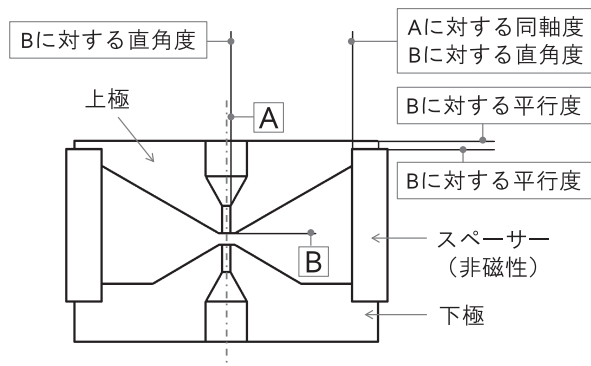


図 24 対物レンズポールピースの加工精度指定例

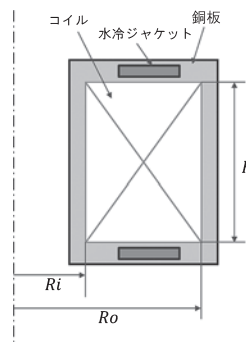


図 25 コイルの水冷

すると、上磁極と外筒部はわずかな隙間を介してほぼ均等に接合する<sup>14)</sup>。この結果非軸対称磁界の発生は小さく抑えられる。分解能上許容される、非軸対称磁界による電子線光軸の曲がり、 $10^{-4}$  rad 以下と考察されている<sup>14)</sup>。

ポールピースはレンズ磁界を生ずる部分であるので、加工・組立精度は最もよく、また均質になるようよく管理された鉄が使用される。図 24 は、TEM の超高分解能レンズポールピースと上極の加工精度指定の例を示している<sup>15)</sup>。加工精度は、 $3\mu\text{m}$  程度が指定されている。下極、スペーサーについても同様である。

### 8.5 励磁コイル

磁界レンズ励磁用コイルは、マグネットワイヤと呼ばれる絶縁被膜銅線を銅製の巻枠にドーナツ状に整列巻き (一定巻数  $N$ ) して作製される。銅線表面の絶縁被膜樹脂の違いにより、耐熱温度が異なる。ポリエステル銅線 PEW (耐熱温度  $155^\circ\text{C}$ ) は磁界レンズコイルに一般的に使用される。ポリイミド銅線 PIW (耐熱温度  $220^\circ\text{C}$ ) は有機被膜で最高の耐熱性を有するが、固くて使い勝手が悪い。

コイルの発熱量は、起磁力の 2 乗及びコイルの平均半径に比例しコイルの断面積に反比例する<sup>16)</sup>。短焦点磁界レンズでは起磁力が比較的大きくコイルからの発熱量が大きいため、巻枠に水冷ジャケットを設け、コイルを水冷する (図 25)。この場合の発熱量  $W$  及びコイルの最大上昇温度  $\Delta T_m$  は、例えば式 (22) のように見積もられている。 $\Delta T_m$  は  $50^\circ\text{C}$  を超えないことを、設計の目安としている。

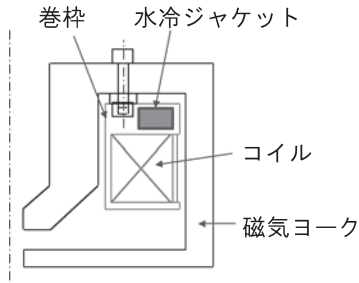


図 26 コイル巻棒の固定

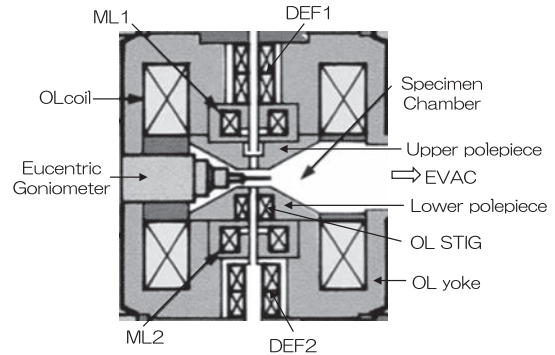


図 28 TEM 対物レンズ全体の断面<sup>17)</sup>

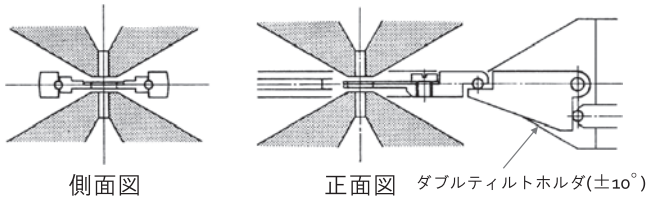


図 27 ポールピース概略形状と性能

加速電圧 (kV)	Cs (mm)	Cc (mm)	理論分解能 (nm)	プローブ径 (nm)
120	0.3	0.6	0.21	0.7
200	0.4	0.8	0.18	0.5

上下極の穴径は 1 mm 程度、磁極間隙は 2 mm 程度である。試料は、上下極間隙のほぼ中央に設置されており、 $\pm 10^\circ$  のダブルティルト観察を可能としている。

試料より電子源側の対物レンズ磁界は、結像側のレンズ磁界同様大きな集束レンズ作用をする。このような対物レンズは、コンデンサーオブジェクトブレンズ (C-O レンズ) とよばれている。上下極は、純鉄よりも飽和磁束密度が大きいパーメンジュール (Fe と Co の合金、飽和磁束密度 2.45 T) が用いられている。両磁極先端部のみで磁気飽和させることで、最小の Cs, Cc が得られている。試料は上下磁極中央に設置されているので試料へのプローブ形成時も同様に最小の Cs, Cc が得られている。

図 28 に対物レンズ (OL) 全体の断面図を示す。従来通常の対物レンズでは必要とされなかった以下の機能が組み込まれた。機能 1) OL 近傍に ML1 を設置する。一般に C-O レンズでは集束レンズ (CL) からの平行ビームは試料に集束するので、TEM 観察に適した照射ビームを得にくい。OL 間隙近傍に設けた ML1 により比較的広い照射ビームを得ることができる。また、試料上へのプローブ形成は ML1 と OL で行いその縮小率を 1/30 程度に抑えているので、例えば 0.01 mm の試料高さ変化で生ずる物面位置の高さ変化 ( $: 0.01 \text{ mm} \times 30^2 = 9 \text{ mm}$ ) は比較的小さい。この変化には前段の CL 強度を変えて合わせることができる。従ってプローブ形成時に ML1 及び OL 強度を変えずに CL によりフォーカスでき、プローブ位置精度が向上する<sup>15)</sup>。機能 2) OL 近傍に ML2 を設置する。対物レンズポールピース間隙は 2 mm 程度と小さいので、下極面付近に形成される焦点面に対物絞りを設置することが空間的に難しい。OL 間隙近傍に設けた ML2 を用いて、TEM に通常設けられる制限視野絞りに第 2 の焦点面を拡大形成することにより、制限視野絞りを対物絞りとしても用い、この第 2 の焦点面で開き角を制限することが可能である<sup>18)</sup>。

## 9.2 SEM 単極レンズ

図 29 で示される単極レンズは、T. Mulvey によって考案された<sup>16,19)</sup>。試料は単極頂面付近の強いレンズ磁界内に設置されている。

図 29 に示された単極レンズでは、レンズ磁界のピーク位置に対して電子源側の分布幅が大きいので、短焦点レンズと

$R_i$ : コイル内半径,  $R_o$ : コイル外半径,  $NI$ : 起磁力 (コイル巻数  $\times$  コイル電流),  $A$ : コイル断面積 (MKSA 単位)

レンズの鉄部 (磁気ヨーク) の温度が変化すると、像移動やフォーカス変動を生じ像観察に支障がある。従ってコイル周囲の銅板に移動した熱が冷却水にほとんど移動するように、コイル巻棒と磁気ヨークの間に空間を設け、コイル巻棒を固定する (図 26)。電子ビームが通る真空部の汚れを防止するため、コイル及び巻棒は O リング等により真空外に設置されるよう構成する。

## 9. 短焦点低収差レンズの例

最近の例ではないが、著者が開発に参加し製品化された 2 例について紹介する。

### 9.1 TEM 超高分解能レンズ

TEM では、高分解能化の要求から試料を対物レンズポールピース間隙内に設置するインレンズ型が通常用いられる。次の例は、ポールピース間隙、穴径を、可能な限り小さくして、超高分解能像及び試料解析用の極めて小さいプローブ径を得るようにしたものである。図 27 に対物レンズのポールピース部分の概略形状と性能について示す<sup>15)</sup>。

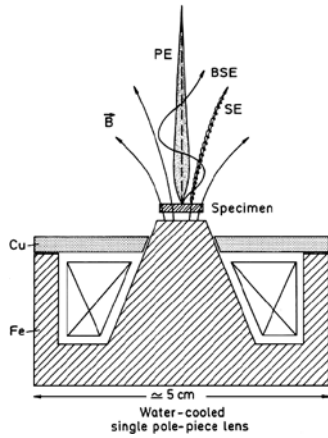


図 29 T. Mulvey の単極レンズ<sup>19)</sup>

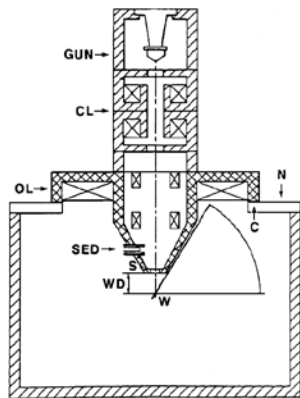


図 30 単極レンズを組み込んだウェハ観察用 SEM 鏡筒<sup>21)</sup>

しては動作させにくい。そこでこのレンズを逆向きにして電子源側の磁界分布幅を小さくした単極レンズ（図 30, OL : クロス線部）が試作され SEM 像が得られた<sup>20)</sup>。これを用いて大径のウェハ表面を高分解能観察及び最大加速電圧 30 kV で EDS 分析可能な装置が製品化された<sup>21)</sup>。

レンズ磁界内に試料を設置するレンズいわゆるイマージョンレンズとして、他に“セミインレンズ”がよく知られている。セミインレンズでは、内側と外側の磁極面の光軸方向の位置がほぼ同じであるが、図 30 で示された単極レンズでは、外側磁極面 (C) を電子源方向に大きく後退させている。この構造により、大径のウェハを大角度 ( $45^\circ \sim 60^\circ$ ) 傾斜して高分解能観察が可能となる。8 インチウェハを  $45^\circ$  傾斜可能な観察条件で、単極頂面径 6 mm、穴径 3 mm、WD 4.4 mm とすることにより、Cs 5.4 mm、Cc 2.4 mm を得ている。これらの収差係数は、アウトレンズ型で同様な観察条件の場合の約 10 分の 1 である。この単極レンズでの、ショットキー電子銃を用いた場合の加速電圧 1 kV の理論分解能は、5.7 nm@プローブ電流 10 pA と見積もられ、アウトレンズ型に比べ約 1/3 に向上した。

さらに、磁気回路をよりコンパクトにするとともに、ブラスティング法やリターディング法を用いた電界重畳単極レンズも開発された<sup>22)</sup>。これにより 1 kV 程度の低加速電圧の像質が向上した。またイマージョンレンズでは試みられていなかった二次電子による表面の凹凸表示が可能となった。

## 10. まとめ

軸対称レンズ系の収差をゼロや負にできないことは Scherzer によって証明され、多極子による収差補正器が普及している。しかし、これらの最終性能は基盤となる軸対称レンズ系の基本性能に大きく依存する。電子顕微鏡の継続的な性能向上のため、本講座が将来を担う技術者、研究者にとって電子光学技術の研鑽の糧になれば幸いである。

## 謝 辞

本講座は電子光学設計技術研究部会の第 71 回学術講演会でのチュートリアルセッションと研究会（2016 年 3 月 26 日開催）の内容を纏めたものです。編集に携わった研究部会メンバー、および低収差レンズ実現の戦略執筆にご協力頂いた日立ハイテクノロジーズの佐藤貢博士、日立製作所の森下英郎氏に感謝します。

## 文 献

- 6) 裏 克己：ナノ電子光学，共立出版（2005）
- 7) Lencova, B.: Electrostatic Lenses. Handbook of Charged Particle Optics 2nd Edition, CRC Press (2009)
- 8) 佐藤 貢：顕微鏡, 51(1), 37-42 (2016)
- 9) Ose, Y., Ezumi, M. and Todokoro, H.: Proceeding of SPIE vol. 3677, 930-939 (1999)
- 10) Szilagy, M.: Electron and Ion Optics, chap. 5, Plenum Press (1988)
- 11) Liebman, G.: Proc. Phys. Soc. B68 (1955)
- 12) Mulvey, T.: Proc. Phys. Soc. B66 (1953)
- 13) 代田 昶平, 米澤 彬, 谷中隆志：電子顕微鏡, 12, 74-78 (1977)
- 14) 谷中隆志：電子顕微鏡学会 第 20 回学術講演会予稿集, A-1 (1964)
- 15) 谷中隆志, 米澤 彬, 大澤一夫, 岩城哲郎, 中村 修, 渡辺 勝：電子顕微鏡学会 第 39 回学術講演会予稿集, 130 (1983)
- 16) Mulvey, T.: Magnetic Electron Lenses, Springer, 359 (1982)
- 17) 電子顕微鏡 EM002A カタログ CAT No. R83FDD (1983)
- 18) 米澤 彬, 谷中隆志, 渡辺 勝：電子顕微鏡学会 第 39 回学術講演会予稿集, 142 (1983)
- 19) Reimer, L.: Scanning Electron Microscopy, Springer, 22 (1985)
- 20) Yonezawa, A., Takeuchi, A., Kano, T. and Ishijima, H.: 12<sup>th</sup> Int. Congr. Electron Microsc., 1, 396 (1990)
- 21) 米澤 彬, 大井正道, 森田誠司, 高橋正則, 足立達哉, 加藤樹理：荷電粒子ビームの工業への応用第 132 委員会, 153 (1994)
- 22) Yonezawa, A., Maruo, M., Takeuchi, T., Morita, S., Noguchi, A., Takaoka, O., Sato, M. and Wannberg, B.: J. Electron Microsc., 51, 149-156 (2002)