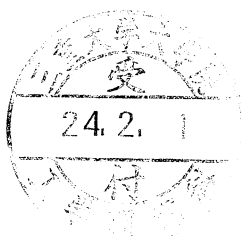


顕微 X 線励起用集束 1 次電子線の発生と
そのプローブ径評価システムの開発

平成 23 年度

三重大学大学院 工学研究科 博士前期課程
電気電子工学専攻 電子設計システム研究室

前田 達也



目次

第1章 序論.....	2
第2章 理論.....	4
2-1 X線の発生.....	4
2-1-1 連続X線と特性X線.....	4
2-1-2 透過型X線顕微鏡の分解能を制限する要因.....	6
2-2 電子放出.....	8
2-2-1 電界電子放出.....	8
2-3 電子光学.....	11
2-3-1 近軸軌道方程式.....	11
2-3-2 レンズの収差.....	14
2-3-3 クロスオーバー.....	16
2-4 走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscopy).....	17
第3章 新規製作したX線顕微鏡と構成要素.....	21
3-1 透過型X線顕微鏡の概要.....	21
3-2 静電型バトラーレンズ.....	24
3-3 十二極子偏向器.....	25
3-4 磁界型対物レンズと反射電子検出器.....	29
3-5 ターゲット材料とBe窓設計.....	32
3-6 真空排気システム.....	33
第4章 集束一次電子線のプローブ径評価プログラム開発.....	34
4-1 プローブ径評価システムの制御系構成要素.....	34
4-2 走査波形電圧と非点補正電圧を重畳したプログラム開発.....	37
4-3 走査波形電圧と非点補正電圧を重畳した電圧走査波形の特性評価.....	50
4-4 画像表示プログラムの動作特性評価.....	54
第5章 まとめ.....	55
参考文献.....	56
謝辞.....	57
付録.....	58

第 1 章 序論

大きな透過能を持つ、新種の放射線である X 線は W.C.Röntgen によって 1895 年に発見された^[1]。X 線が発見されて以降、X 線はさまざまな分野で利用されており、特に X 線を顕微鏡に用いた X 線顕微鏡は電気、電子デバイスの非破壊検査や生物細胞内の微細な構造を生きたまま観察するなどの用途で実用化されている。近年では、集積回路(IC)の小型化が進んでおり IC 配線の検査や、癌などの病気早期発見のために生きた生物細胞内の観察にナノレベルの分解能を持つ高分解能 X 線顕微鏡が強く求められている。

X 線顕微鏡の歴史は、1939 年に von Ardenne が電子光学的に電子線を絞って金属ターゲット当てれば、 $1\mu\text{m}$ 以下の X 線スポットを持った X 線源が得られることを提案したことから始まった^[2]。そして、1953 年に V.E.Cosslett と W.C.Nixon は低収差の磁界型レンズを用いて X 線顕微鏡を開発した^[3]。近年では、矢田らが 1999 年に LaB_6 を電子源に用いて、世界で初めて分解能 $1\mu\text{m}$ を切る X 線顕微鏡を製品化し^[4]、2008 年には LaB_6 熱電子放出電子源よりも 2 桁以上高い輝度を実現できる $\text{ZrO}/\text{W}(100)$ 熱電界放出電子源を採用し、世界で初めて分解能 40nm の透過型 X 線顕微鏡を製品化している^[5]。

我々の研究室でも藪下らにより多層カーボンナノチューブ(MWCNT)電界放出型電子源を搭載したサブミクロン X 線顕微鏡が開発され、 400nm の分解能を得ている^[6]。しかしながら、ターゲット上でプローブ電流が小さいため実時間観察が困難といった問題があった。実時間観察が可能な高分解能 X 線顕微鏡を開発するには、金属ターゲット上で大電流かつ微小径の集束一次電子線を形成する輝度($\text{A}/\text{sr}/\text{cm}^2$)が高い電子源が必要になる。

そこで、高輝度かつ大電流を解決するために我々は液体金属を用いた電子源に着目し、開発を重ねてきた^[7]。液体金属の動作原理を説明すると、表面張力と電界応力が釣り合ったときに、Taylor cone と呼ばれる微小円錐形状を形成し、Taylor cone 先端からは大電流かつ極めて高輝度な電子線が放出される。さらに、液体金属にリチウムを用いた場合、Taylor cone から放出される電流値は数 $100\mu\text{A}$ 以上であり、電子放出領域が cone 先端部であるために電子線の輝度は極めて高いことが期待できる。ここで、表 1 に述べてきた主な電子源の特徴を述べる。表 1 に示す放射角電流密度($dI/d\Omega$)は電子源の性能を表す指標の一つで、 $dI/d\Omega$ を電子源のソースサイズ(cm^2)で割ると輝度を表す。表 1 からわかるように実用化されている電子源と比べても液体 Li 電子源は有意な点をもっていることがわかる。

表 1 各電子源の特徴

	$dI/d\Omega(\text{mA/sr})$	Emission current(μA)
Tungsten hairpin	0.04	100～300
LaB_6	0.1	100～300
ZrO/W	0.2～0.8	10～200
MWCNT	0.1～0.4	10～50
リチウムTaylor cone	10～20	100～700

液体 Li 電子源を搭載する高分解能透過型 X 線顕微鏡の新規開発を最終目標に、本研究では、まず X 線顕微鏡の分解能を決定する要素の一つである金属ターゲット上での集束一次電子線のプローブ径を評価するシステムを開発した。まず、第 2 章では、電子光学の理論と X 線像の分解能を制限する要因について記述する。次に、第 3 章では、電子源として有望な液体 Li 電子源を搭載する新規製作した透過型 X 線顕微鏡と集束一次電子線のプローブ径を評価するシステムの構成要素について記述する。第 4 章の前半では、第 3 章で述べたシステムを電氣的に制御するプログラム開発について記述する。後半では、開発したプログラムを実装させ、動作特性評価について記述する。最後に第 5 章では本論文のまとめを記述する。

第2章 理論

2-1 X線の発生

電子ビームが固体試料中に照射された場合、電子のエネルギーによって固体中を透過するが、その際、試料を構成する原子核や電子との相互作用によって弾性的な衝突、散乱(弾性散乱)やエネルギー損失を伴う非弾性散乱を起こす。非弾性散乱によってX線を放出し、それに相当するエネルギーを損失する。

2-1-1 連続X線と特性X線発生^[8]

エネルギー E の入射電子が、金属ターゲット内に侵入する電子を金属ターゲット原子のクーロン場によって曲げられる(図2-1)。このような減速事象で生じたエネルギー損失 ΔE は光子として放出される。この光子のエネルギーは $\Delta E = h\nu$ である。ここで、 h はプランク定数、 ν は電磁波の振動数である。この放出は連続X線と呼ばれている。この相互作用は不規則であるので、電子は単位減速事象において任意にエネルギーを失う。それ故、連続X線は0から最大電子ビームの初期エネルギーまで値を持ちうる。連続X線のうち、最大エネルギーを持ったときのX線の波長はもっと短く、X線の波長は式(2.1)で表わされる。

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{1.24}{E} \text{ (nm)} \quad (2.1)$$

ここで、 h はプランク定数、 c は光速、 E は光子のエネルギー(keV)である。また、連続X線強度の式は

$$I_{cm} = 1.1 \times 10^{-9} Z E_0^2 i_p \quad (2.2)$$

ここで、 Z は原子番号、 E_0 は電子のエネルギー(eV)、 i_p はプローブ電流(A)を指す。

金属ターゲットに侵入する電子は、金属ターゲット原子の内殻電子と相互作用し、内殻から電子を取り出しうる。入射電子は少なくとも E_k のエネルギーを失って原子を離れる。ここで、 E_k はK殻電子の束縛エネルギーである。取り出された軌道電子は、相互作用に依存した数eVから数keVまでの運動エネルギーを持って原子を離れる。励起状態にある原子は、外殻電子の許容された脱励起遷移過程によりおよそ1ps以内にその基底状態に緩和する(図2-2)。このときのエネルギーの差を電磁波で放出し、それが特性X線と呼ばれている。各殻の電子の束縛エネルギーは元素固有の値を持っているため、電子殻内のエネルギーの差は各元素に対して固有の値である。

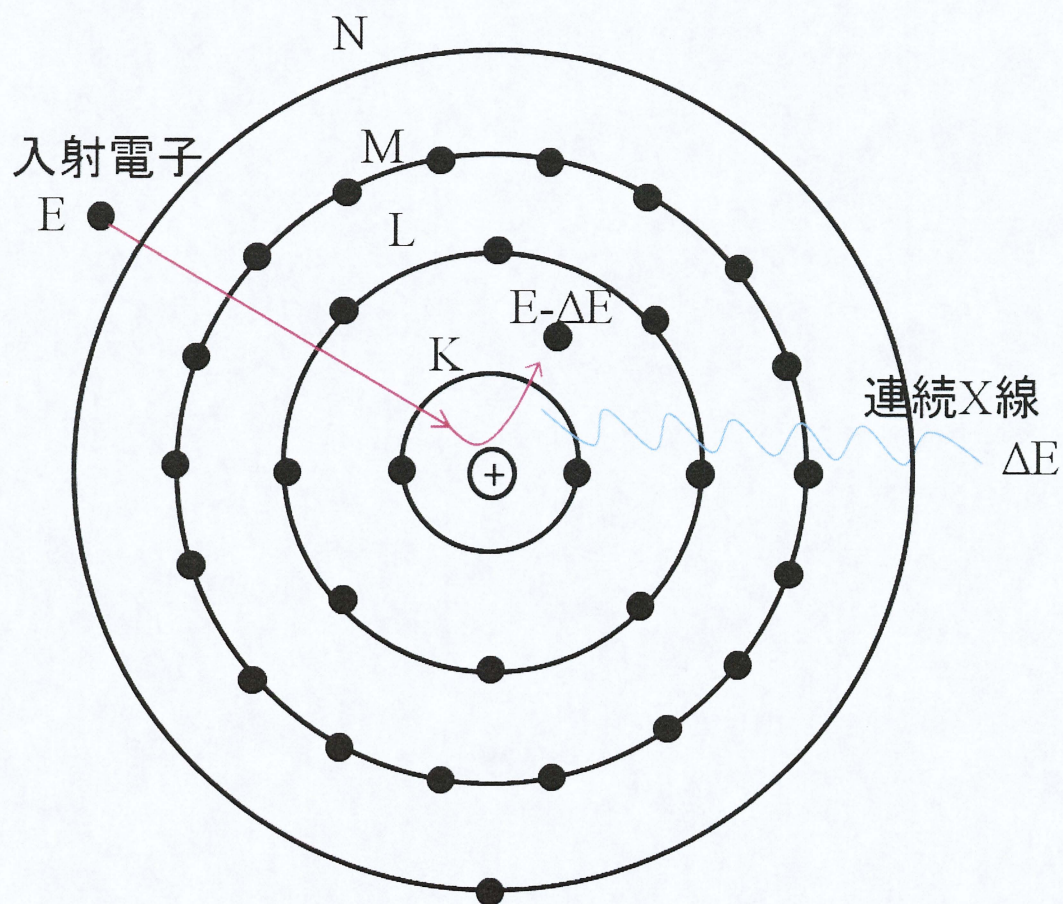


図 2-1 連続 X 線の発生

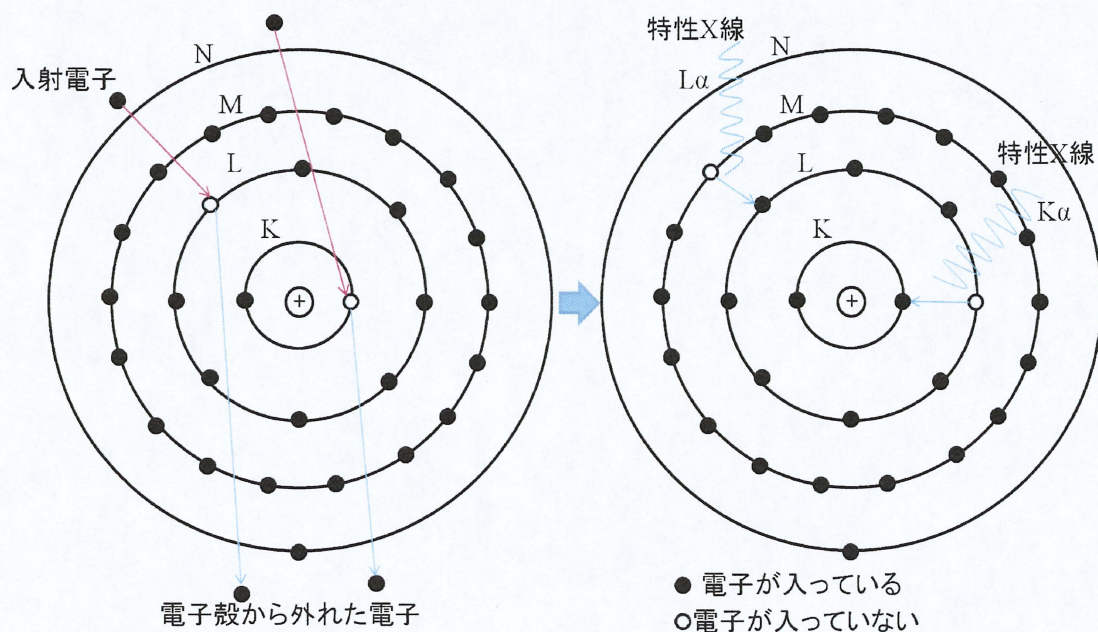


図 2-2 特性 X 線の発生

2-1-2 透過型 X 線顕微鏡の分解能を制限する要因^[9]

透過型 X 線顕微鏡の理論的分解能は式(2.3)と表わされる。

$$d = \{d_e^2 + d_s^2 + d_F^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

ここで、 d_e は金属ターゲットに当たるプローブ電流の径、 d_s はターゲット内での電子線の拡がりである。この二つの項が X 線の発生領域を示す。 d_F は X 線が試料のエッジで回折してできるフレネル回折によるボケを示す。

まず、プローブ電流の径について述べる。X 線顕微鏡のような大きいプローブ電流を必要とする系では、口径の大きい絞りをを用いるためプローブ径は主に球面収差によって制限される。次に、金属ターゲット内での電子線の拡がりについて述べる。固体に入射したエネルギーのプローブ電流は固体中の原子と散乱を繰り返し、そのエネルギーを徐々に失い、ある深さになるとエネルギーを失う。エネルギーが増加すると、電子は高いエネルギーを持って金属ターゲットに侵入し、低い割合でエネルギーを失うので、電子はより深くに侵入できる。また、金属ターゲットを薄くすると金属ターゲット内での電子の拡がりはいく小さくできる^[10]。

最後にフレネル回折によるボケについて述べる。図 2-3 に示すように X 線発生点から X 線検出器までの距離を a 、試料までを b とし、試料のエッジにおけるフレネル回折を考える。フィルム上での回折によって発生した波面強度のフリンジの第 1 極大までの距離 p は、回折理論により

$$p = \left\{ \frac{a(a-b)\lambda}{b} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

で与えられる。ここで、 λ は X 線の波長である。撮影倍率 $M=a/b$ は一般的にかなり大きいので、 $a \gg b$ であり、 $a-b \approx a$ の近似から、試料面で換算したフレネル回折によるボケは、 p は M で割って、

$$d_F = \frac{p}{M} \approx (\lambda b)^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

で与えられる。高分解能を得るためには、この d_F を小さくしなければならない。加速電圧を高くすると、金属ターゲット内での電子線の拡がりが増え、 d_s が大きくなる制限から波長はそれまで短いものは使えない。

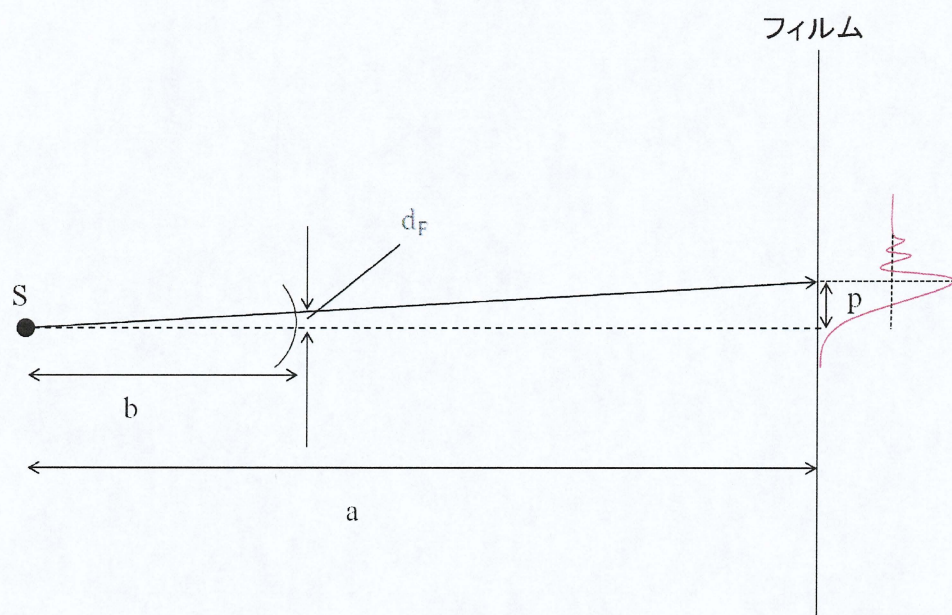


図 2-3 フレネルフリッジ形成

2-2 電子放出

金属の表面近傍にある電子は表面の電位障壁を超えるエネルギーを得ると、金属表面から真空中に放出される。これを電子放出と呼び、本研究で用いる。

2-2-1 電界電子放出^[11]

電界電子放出は、金属表面に 5×10^7 V/cm 程度の強電界を印加すると金属表面の電子に対する電位障壁の厚みが数 nm となり、伝導帯の電子がこの電位障壁をトンネリングして真空中へ引き出される現象である。この電子放出では、金属中の電子は電位障壁を超えるためのエネルギーが要らないので、電子放出面を加熱する必要がない。

図 2-4 は電界放出時のポテンシャル図を示す。鏡像力に基づくポテンシャルエネルギー $= -e^2/4z$ と、表面に外部から印加された電界 F に基づくポテンシャルエネルギー $= -eFz$ の合成によって $V(z) = E_0 - e^2/4z - eFz$ と表わされる。この式より電界 F を大きくすると電位障壁の厚さが薄くなる。厚さが十分薄くなると、フェルミ準位近傍の電子はトンネリング効果により障壁を超えて、真空中に放出される。

電界電子放出に適した強電界を得るには、形状が制御された針状の電極が必要である。電界電子放出による放出電流密度電子に対して高さが数 V、幅がサブ nm 程度の電位障壁が存在する場合、電子の波動性から、このような電位障壁内の電子が障壁を透過する確率がある。電位障壁の他方の側に電子の存在確率があるということは、電子は電位障壁を通り抜ける事が出来る事を意味し、この現象をトンネリング効果と呼んでいる。

金属表面に 5×10^7 V/cm 程度の強電界を印加すると、金属の仕事関数が数 eV であるので、鏡像力を考えなければ、フェルミ準位にある電子に対する電位障壁の形状は三角ポテンシャルで幅は 1 nm 程度となる。このような三角ポテンシャルの電位障壁を仮定したときの電界電子放出電流密度を計算する。

電界 F がかったときの表面上の電位障壁の形は、表面からの距離 z に対して $V(z) = E_0 - e^2/4z - eFz$ であるから、エネルギー E_z を持つ電子の電位障壁を透過する確率、すなわち透過係数 $T(E_z)$ は、1 次元のシュレディンガー方程式に WKB 近似を用いて、式(2.6)のように求められる。

$$T(E_z) = \exp \left\{ -\frac{8\pi\sqrt{2m}}{3heF} (W - E_z)^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (2.6)$$

m は電子の質量、 W は真空準位を示す。金属表面から電界放出によって電位障壁を透過する全電子の数は、

$$N_z = \frac{4\pi mkT}{h^3} \int_0^\infty \ln \left\{ 1 + \exp \left(-\frac{E_z - E_f}{kT} \right) \right\} \times \exp \left\{ -\frac{8\pi\sqrt{2m}}{3heF} (W - E_z)^{\frac{3}{2}} \right\} dE_z \quad (2.7)$$

と計算できる。 E_f はフェルミ準位を示す。積分内の第1項、第2項に関して、次の近似を行う。第1項においては、 E_z が E_f より大きいときにはほぼ0になるので、

$$\ln \left\{ 1 + \exp \left(-\frac{E_z - E_f}{kT} \right) \right\} \cong \frac{E_f - E_z}{kT} \quad (E_f > E_z) \quad (2.8)$$

$$\ln \left\{ 1 + \exp \left(-\frac{E_z - E_f}{kT} \right) \right\} \cong 0 \quad (E_f < E_z) \quad (2.9)$$

とすることができる。

また、第2項は E_z が E_f より小さくなると急激に減少する関数のため、積分には E_z が E_f より小さいごく狭い領域を考えればよいから、 E_f の周りで展開した関数で表すことができる。

$$\exp \left\{ \frac{-8\pi\sqrt{2m}}{3heF} (W - E_z)^{\frac{3}{2}} \right\} \cong \exp \left\{ \frac{-8\pi\sqrt{2m}}{3heF} \left\{ \varphi^{\frac{3}{2}} - \varphi^{\frac{1}{2}} \frac{3}{2} (E_f - E_z) \right\} \right\} \quad (2.10)$$

ここで、 φ はまた、式(2.6)の積分に際して、 E_z の積分範囲として $-\infty$ から0までを加えても積分値にはほとんど影響がないので、 E_z を $-\infty$ から E_f まで積分を行う。電界電子放出電流密度 J は eN_z で与えられる。

$$J = \frac{e^3 F^2}{8\pi h \varphi} \exp \left\{ -\frac{8\pi\sqrt{2m}}{3heF} \varphi^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (2.11)$$

電流密度 J [A/cm²]、電界 F [V/m]、仕事関数 φ (eV) で表わすと、

$$J = 1.54 \times 10^{-6} \times \frac{F^2}{\varphi} \exp \left\{ -6.83 \times 10^7 \times \frac{\varphi^{\frac{3}{2}}}{F} \right\} \quad (2.12)$$

となる。電界による放出電流 I [A] は電流密度 J [A/cm²] と陰極の電子放出面積 A [cm²] の積で与えられ、

$$I = JA = \frac{1.54 \times 10^{-6} A F^2}{\varphi} \exp \left\{ -6.83 \times 10^7 \times \frac{\varphi^{\frac{3}{2}}}{F} \right\} \quad (2.13)$$

となる。陰極に印加される電界 F [V/cm] は陰極と陽極間の電圧 V [V] に比例し、

$$F = \beta V \quad (2.14)$$

と表わされる。ここで、 β [cm⁻¹] は陰極の幾何学的形状により決まる定数である。

(2.13)式のように放出電流 I は指数関数内の $\varphi^{\frac{3}{2}}/F$ に強く依存するため、仕事関数 φ が低くなり、また電界 F が高くなれば放出電流が増加する。式(2.14)を式(2.13)に代入すると

$$I = \frac{1.54 \times 10^{-6} A (\beta V)^2}{\varphi} \exp \left\{ -6.83 \times 10^7 \times \frac{\varphi^{\frac{3}{2}}}{\beta V} \right\} \quad (2.15)$$

となる。ここで、 $a = 1.54 \times 10^{-6} A \beta^2 / \varphi$ 、 $b = -6.83 \times 10^7 / \beta$ とし、さらに上式の両辺を V^2 で割り、自然対数をとると式(2.15)になる。これは Fowler-Nordheim (F-N)

の方程式と呼ばれ、さらに縦軸に $\ln(I/V^2)$ 、横軸に V^{-1} をプロットしたものを、F-N プロットと呼ぶ。

$$\ln I \left\{ \frac{I}{V^2} \right\} = \frac{b\phi^{\frac{3}{2}}}{V} + \ln(a) \quad (2.16)$$

となる。また、F-N プロットの直線の勾配 ξ は、

$$\xi = -\frac{6.83 \times 10^3 \phi^{\frac{3}{2}}}{\beta} \quad (2.17)$$

と表される。頂点が半径 r の半球でキャップされた直円錐に対して、 β は

$$\beta \cong \frac{1}{kr} \quad (2.18)$$

と近似される。ここで k は陰極の形状に依存する係数であり、通常 $k \cong 5$ である。従って、直線の勾配を求めて、曲率半径と仕事関数のどちらか一方が既知であれば、未知のもう一方を求めることができる。

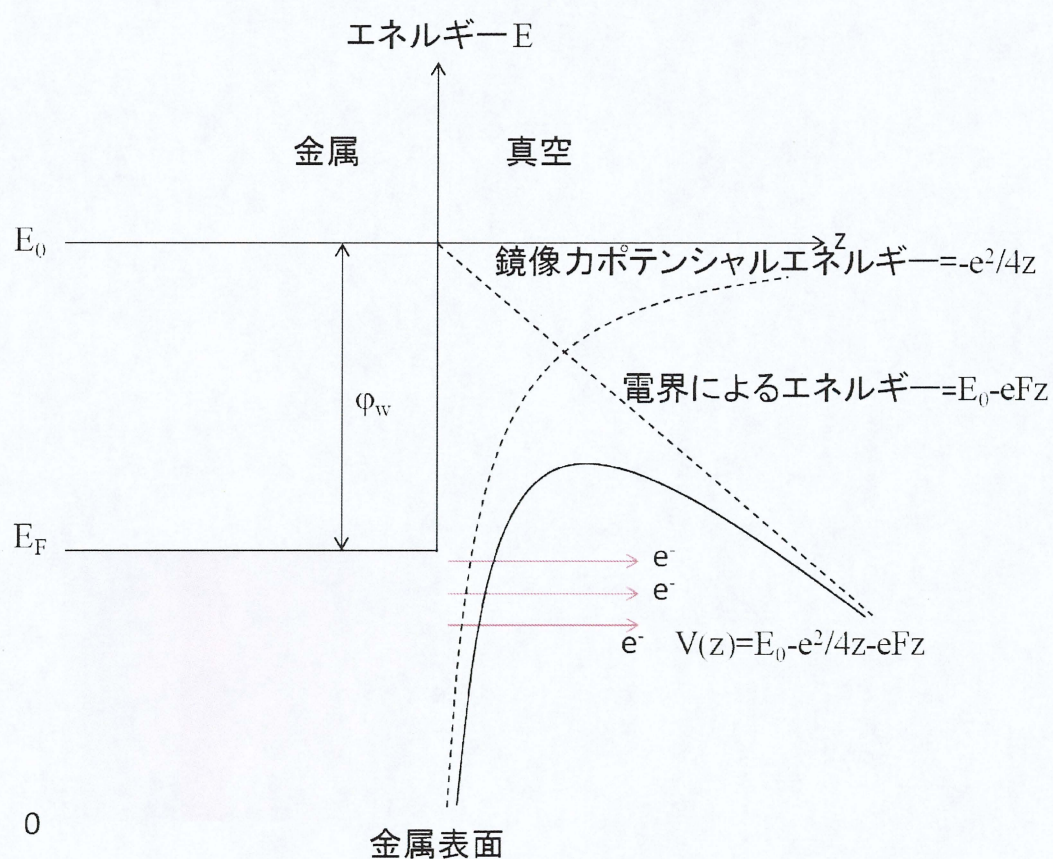


図 2-4 電界放出時のポテンシャル分布

2-3 電子光学

真空中の電子およびイオンは電磁界によって、そのエネルギーと方向を容易に制御できる。また電子は比電荷 $e/m (=1.759 \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1})$ が大きく、電磁界の速い変化に応ずることができる。電子ビーム(electron beam)は、速度ベクトルがよく揃って、ある方向に流れ、有限断面を持つ電子の集まりである。

この電子ビームはある中心軌道の周囲に沿って動く電子の集団であるから、それを記述する電子光学の数学的手法は摂動論がおもなものである。1次項は線形性をもち、その性質は線形数学を用いて記述できる。光学では、この線形理論を近軸理論と呼んでいる。2次以上の高次項は非線形項であり、光学ではこれを収差(aberration)と呼んでいる。

2-3-1 近軸軌道^[12]

電子ビームは、ある方向に有限の広がりをもって進行する電子の集団である。まず、各々の電子が空間中に描く軌道を、中心軌道または基準軌道とその周辺の軌道に分ける。

静電界中における荷電粒子の軌道は運動領域の電位分布によって決定されるが、軸対称ビームの場合には、中心軸に近い領域の電位分納は中心軸の電位分布で表わすことができるため、軸上の1次元電位情報だけでレンズの性質を議論することができる。これは電位の3次元情報が、ラプラス方程式で結ばれており、互いに独立ではなく相関があることによる。軸上電位分布だけで中心軸に近い荷電粒子の軌道を表わす式を近軸軌道方程式という。

軌道が円筒対称となる円形断面のビームを考える。ビーム進行方向の中心軸を z 座標、径方向を r 座標とし、 θ 方向には変化がない円筒座標系を用いる。このとき荷電粒子の運動エネルギーは次式で表わされる。

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = -q \frac{\partial V(z, r)}{\partial r} \quad (2.19)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -q \frac{\partial V(z, r)}{\partial z} \quad (2.20)$$

荷電粒子の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの和は保存されるから、次式のエネルギー保存則が成り立つ。

$$\frac{1}{2} m \left\{ \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \right\} = qV(z, r) \quad (2.21)$$

式(2.18),(2.19),(2.20)から時間 t を消去して、軌道方程式を得る為に

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dr}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dz}{dt} \frac{dr}{dz} \right) = \frac{dz}{dt} \frac{dz}{dt} \frac{d}{dz} \left(\frac{dr}{dz} \right) + \frac{d^2 z}{dt^2} \frac{dr}{dz}$$

$$= \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 \frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{d^2 z}{dt^2} \frac{dr}{dz} \quad (2.22)$$

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 = \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 \left\{1 + \left(\frac{dr}{dz}\right)^2\right\} \quad (2.23)$$

の関係を使うと、荷電粒子の軌道を表す一般式が得られる。

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{1 + \left(\frac{dr}{dz}\right)^2}{2V(z,r)} \frac{\partial}{\partial z} V(z,r) \frac{dr}{dz} - \frac{1 + \left(\frac{dr}{dz}\right)^2}{2V(z,r)} \frac{\partial}{\partial r} V(z,r) = 0 \quad (2.24)$$

式(2.24)は荷電粒子が運動する領域の電位だけによって表され、荷電粒子の電荷及び質量は含まれていない。したがって、どのような質量電荷比を持つ電子やイオンでも、同じ軌道をとることが分かる。

電位が与えられている電極の半径に比べ、 r が小さい z 軸近傍の荷電粒子の運動を考える。簡単化の為、荷電粒子の空間電荷を無視する。電位 $V(z,r)$ はラプラス方程式を満たす。

$$\frac{\partial^2 V(z,r)}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V(z,r)}{\partial r} \right) = 0 \quad (2.25)$$

式(2.25)の関係を用いて、電位 $V(z,r)$ を r のべき級数展開する。

$$V(z,r) = V(z,0) - \frac{r^2}{4} \frac{d^2 V(z,0)}{dz^2} + \frac{r^4}{64} \frac{d^4 V(z,0)}{dz^4} - \dots \quad (2.26)$$

式(2.26)から、 z 軸近傍の電位勾配を軸上電位 $V(z,0)$ によって表すことができる。

$$\frac{\partial V(z,r)}{\partial r} \cong -\frac{r}{2} \frac{d^2 V(z,0)}{dz^2}, \quad \frac{\partial V(z,r)}{\partial z} \cong \frac{dV(z,0)}{dz} \quad (2.27)$$

式(2.27)の関係を式(2.24)に入れ、ビームの仮定 $\left(\frac{dr}{dz}\right)^2 \ll 1$ を使うと、荷電粒子の近軸軌道方程式が得られる。

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{1}{2V(z,0)} \frac{dV(z,0)}{dz} \frac{dr}{dz} + \frac{1}{4V(z,0)} \frac{d^2 V(z,0)}{dz^2} r = 0 \quad (2.28)$$

次に軸対称の磁界だけ存在する中での荷電粒子ビームの軌道を考えてみる。磁位 U を考えると、磁位もラプラス方程式を満たすから、軸上の磁位 $U(z,0)$ と r のべき級数によって次式のように表すことができる。

$$U(z,r) = U(z,0) - \frac{r^2}{4} \frac{d^2 U(z,0)}{dz^2} + \frac{r^4}{64} \frac{d^4 U(z,0)}{dz^4} - \dots \quad (2.29)$$

z 方向および r 方向の磁界は、それぞれ $B_z = \frac{\partial U}{\partial z}$ および $B_r = \frac{\partial U}{\partial r}$ によって表わされる近軸の荷電粒子に対する運動に限定するので、 r の高次項は無視すると

$$B_z \cong B(z, 0), B_r \cong -\frac{r}{2} \frac{dB(z, 0)}{dz} \quad (2.30)$$

が得られる。また、 $B_\theta = 0$ である。このような磁界中における荷電粒子の運動を求めればよいが、磁界レンズの多くは電子に対して用いられるので、以下の荷電粒子の運動方程式は負の電荷の粒子に対するものに合わせておく。

θ 方向の運動方程式は次式のようになる。

$$\frac{m}{q} \frac{1}{r} \frac{d}{dt} \left(r^2 \frac{d\theta}{dt} \right) = B(z, 0) \frac{dr}{dt} + \frac{r}{2} \frac{dB(z, 0)}{dz} \frac{dz}{dt} \quad (2.31)$$

t について積分し、 $t=0$ のとき $d\theta/dt=0$ の初期条件で解くと

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{q}{m} \frac{B(z, 0)}{2} \quad (2.32)$$

となる。一方、 r 方向の運動方程式は

$$\frac{q}{m} \left\{ \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right\} = -B(z, 0) r \frac{d\theta}{dt} \quad (2.33)$$

であるから、式(2.28)を代入し、また $\frac{d^2 r}{dt^2} \cong d^2 r / dz^2 \left(\frac{dz}{dt} \right)^2$ であることを考慮すると、次式の近軸軌道方程式が得られる。

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{q}{8mV_{acceleration}} B(z, 0)^2 r = 0 \quad (2.34)$$

ここで、 $V_{acceleration}$ は荷電粒子の加速電圧である。

こうして、レンズの中心軸に近い電子の軌道を示す、静電場中の近軸軌道方程式と磁界場の近軸軌道方程式が得られる。

2-3-2 レンズの収差^{[13][14]}

電子レンズには多くの収差がある。その結果、各点の Gauss 像は隣の面の最小散乱円内へ広がってしまう。ここではいくつかの収差について記述し、それぞれの収差を図 2-5 に示す。

- (a) レンズに入射する電子の入射角の違いによって発生する収差を球面収差と呼ぶ。球面収差があると、収束角の異なる点に収束して一点に集まらないため、プローブ径が増加する。このとき、最も細くなる所を最小散乱円という。大きい角度を持ったビームは光軸付近のものと比べて大きく屈折されるため、一点に集まらず拡がりを持つ。そして、球面収差だけならば、最小散乱円の直径は

$$d_s = \frac{1}{2} C_s \alpha^3 \quad (2.35)$$

となる。ここで C_s は最終段レンズの球面収差係数、 α ビーム開き角である。また、球面収差係数は焦点距離が短いほど小さくなる。

- (b) 電子エネルギーの広がり、レンズ電源や加速電圧の変動からも収差を生じ、これらを色収差と呼ぶ。色収差だけならば、最小散乱円の直径は

$$d_c = C_c \alpha \frac{\Delta E}{E_0} \quad (2.36)$$

となり、ここで C_c は最終段レンズの色収差係数、 ΔE はレンズに入る電子のエネルギー広がり、そして E_0 は電子の平均エネルギーである。また、加速電圧が低くなると色収差が大きくなり、焦点距離が短くなるほど小さくなる。

- (c) 光軸上の 1 点から出た電子ビームが絞りのエッジにおいて回折する事で生じる収差を回折収差と呼ぶ。

$$d_d = \frac{1.2\lambda}{\sin \alpha} \quad (2.37)$$

ここで、 λ は電子の波長である。

- (d) 非点収差はビーム光軸を Z 軸とすると、レンズの X 軸方向と Y 軸方向の焦点位置が異なることから起こる収差である。

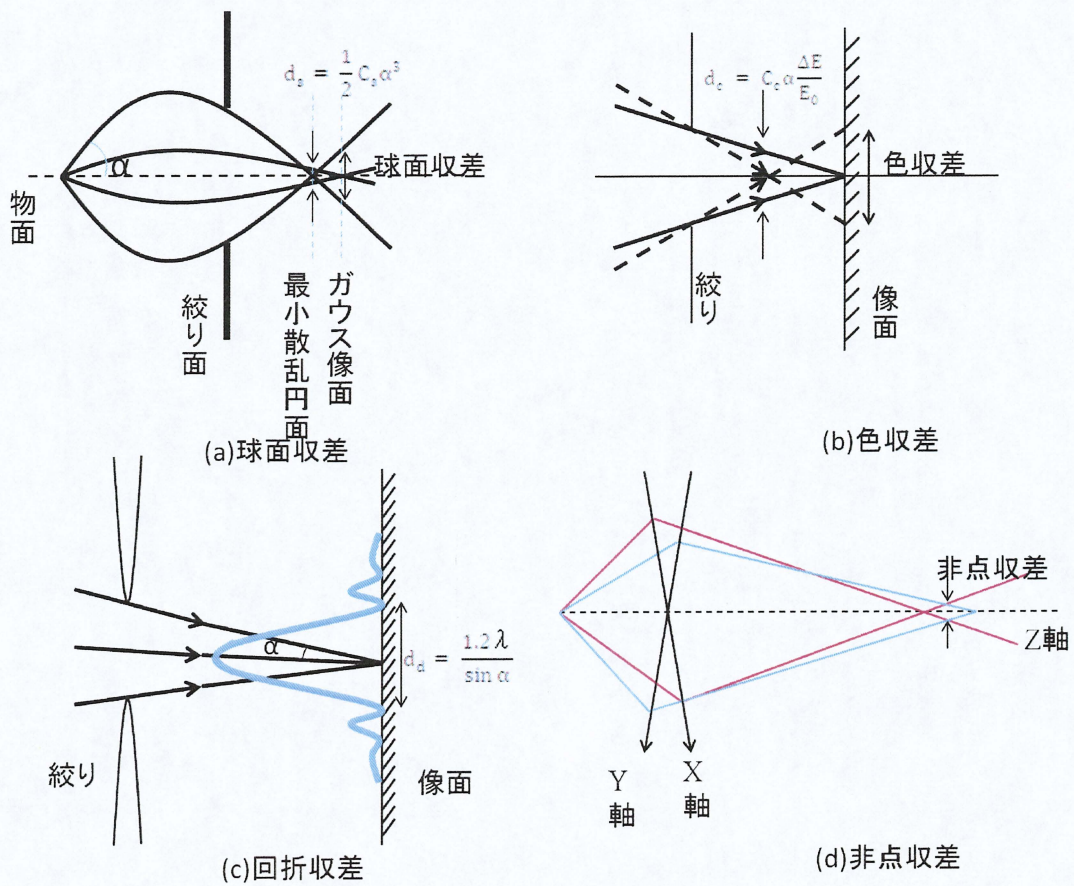


図 2-5 各収差の説明図

2-3-3 クロスオーバー

本電子光学装置で用いられる電子銃の基本を、図 2-6 に示す。点 O を出た電子の大部分は、図に示すような束管の内部にその軌道を取り、点 P に焦点を結ぶ。同様に点 Q、S から出た電子もそれぞれ点 R、T に焦点を結ぶ。図 2-6 で、軌道を示す 3 つの束管の交点に注目すると、それらの束管はすべて共通の場所を通りクロスオーバーと呼ばれる。そこでは全体としての電子の流れの断面が最小になっている。更に、クロスオーバー内の各点から右へ向かう電子の軌道は発散線束となるので、クロスオーバー自身を小さな電子源とみなすことができる。走査型電子顕微鏡で電子プローブとして試料を照射するのは、このようなクロスオーバーの縮小像である。この図ではクロスオーバーは電界のない、電子が直進する領域につくられると仮定する。そして、このように点 S、Q のように角度を持った電子がクロスオーバー位置で電子線の断面は広がりを持ち、ソースサイズの大きい電子源になる。高角な電子は絞りを使ってカットする事で、ソースサイズの小さい電子源になる。

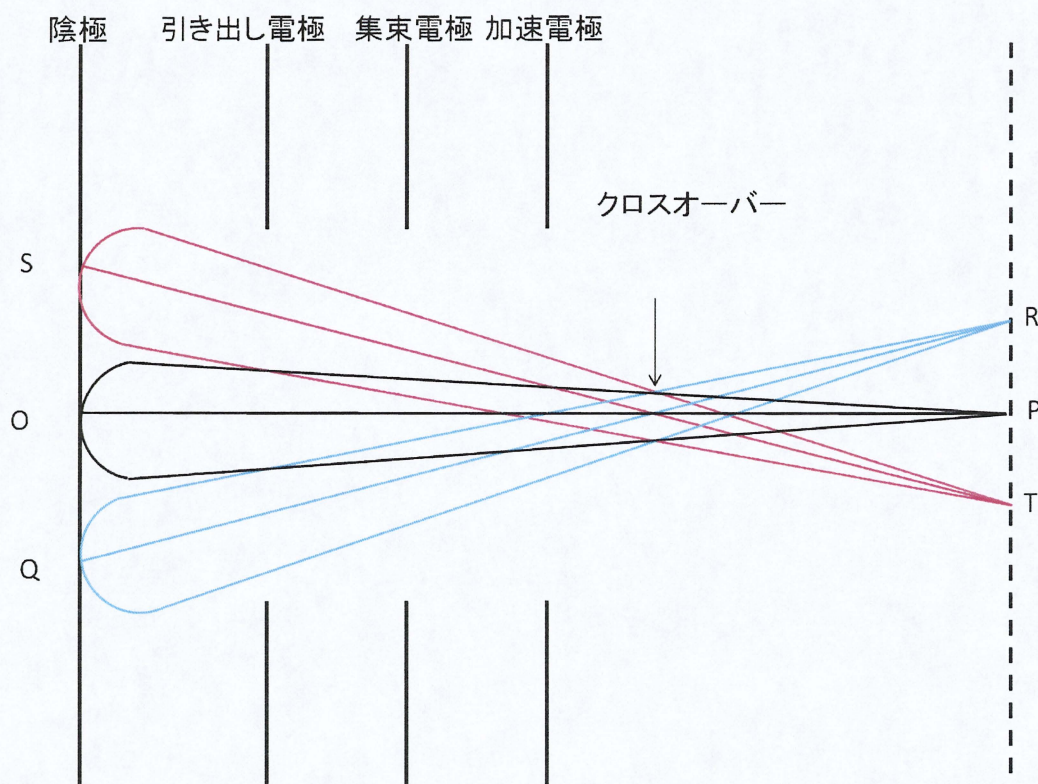


図 2-6 クロスオーバーの概要

2-4 走査型電子顕微鏡(SEM)^[15]

SEM は虫眼鏡(凸レンズ)で太陽の光を一点に集束するように、電子レンズを使って、光では不可能な微小径に電子ビームを集束し、このスポットビーム(探針)として試料に照射して、試料から得られる信号を使って像を形成する顕微鏡である。

SEM の動作原理は電子源から放出された電子(一次電子)ビームを陽極で加速したのち、電子レンズで試料上に微小径に集束させた電子プローブを二次元走査し、試料から放出される二次電子、反射電子(後方散乱された一次電子)などの信号量の違いを基に拡大像を得る顕微鏡である。

SEM は図 2-7 に示すような電子光学系を主体とする本体と電気・制御系から構成されている。本体は電子銃、電子レンズ、偏向・非点収差補正器から構成された電子光学系および試料室とこれらを真空中に維持するための排気系から構成されている。制御系は電子ビームを発生させる電子銃用の高電圧安定化電源、レンズ電源、プローブを走査・偏向する偏向制御回路、二次電子や反射電子などの試料からの信号を検出・処理する信号検出増幅回路および排気制御系から構成されている。

近年の SEM の装置上の特徴はマイクロプロセッサ制御である。操作卓から調整用スイッチ、ダイヤルを大幅に減らすとともに、電子光学系調整の自動化、デジタル画像データを利用した画像処理、画像データファイルの管理などが容易となった。自動にはビームアライメント、焦点合わせ、非点補正、表示画像の輝度・コントラストの自動調整のほか、排気操作の自動化がある。図 2-7 に示したように SEM 本体は電子銃から放出された電子ビームを電子レンズで縮小して、試料面上に微小な電子プローブを結像させるとともに偏向器によって試料上の電子プローブの移動、走査を行なうための電子光学系から構成されている。電子銃を含む円筒状の SEM 本体を電子光学鏡筒、または電子光学コラムと呼んでいる。非点収差補正器はスティグメータ(stigmator)とも呼ばれ、微細なスポット状に電子ビームを集束させる際の電子レンズの軸非対称な集束特性などに起因する非点収差を補正するものである。

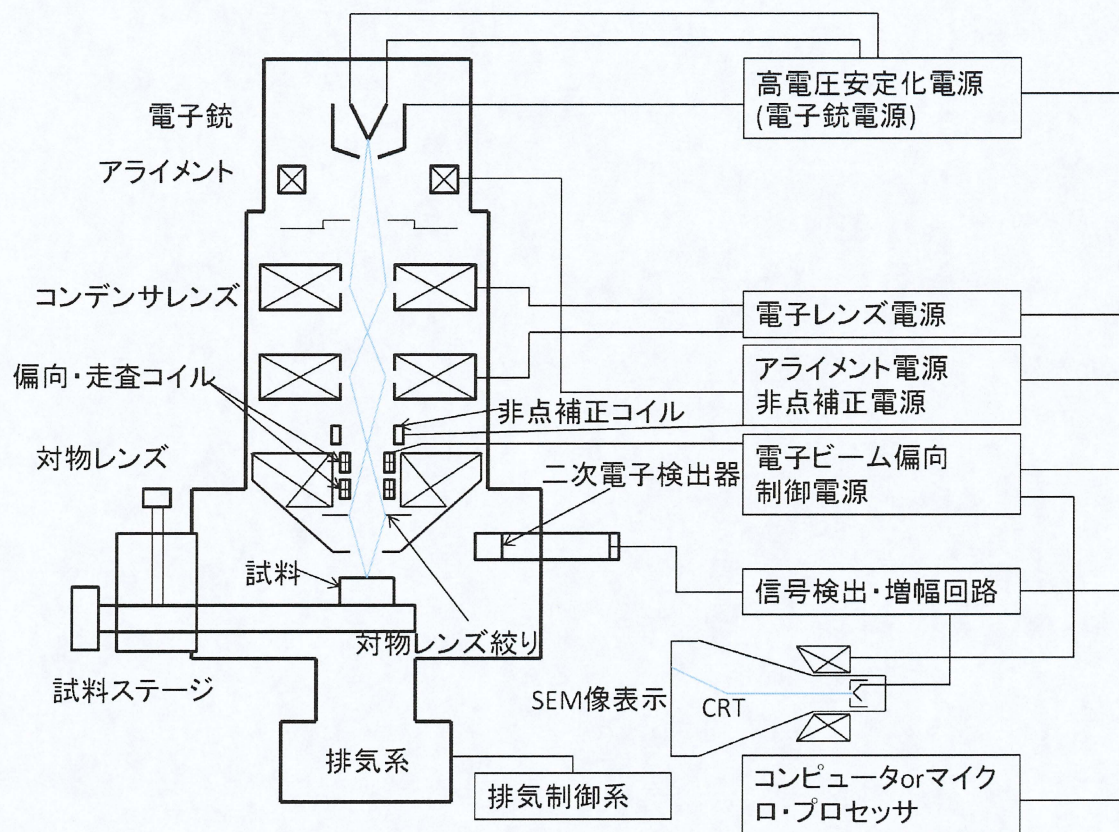


図 2-7 SEM の構成

そして、電子線を走査するラスタ走査を図 2-8 に示す。図 2-8(a)は試料表面上でのラスタ走査を示し、図 2-8(b),(c)はその電気波形を示す。図 2-8(b)のように、ある回数だけ X 方向に鋸波を形成させある回数形成されると、Y 方向に一ステップ上がり、また X 方向に鋸波を形成させある回数形成されると、Y 方向にもう一ステップ上がる。これを繰り返し、最終的に Y 方向に一つの大きな鋸波を形成する。これがラスタ走査である。

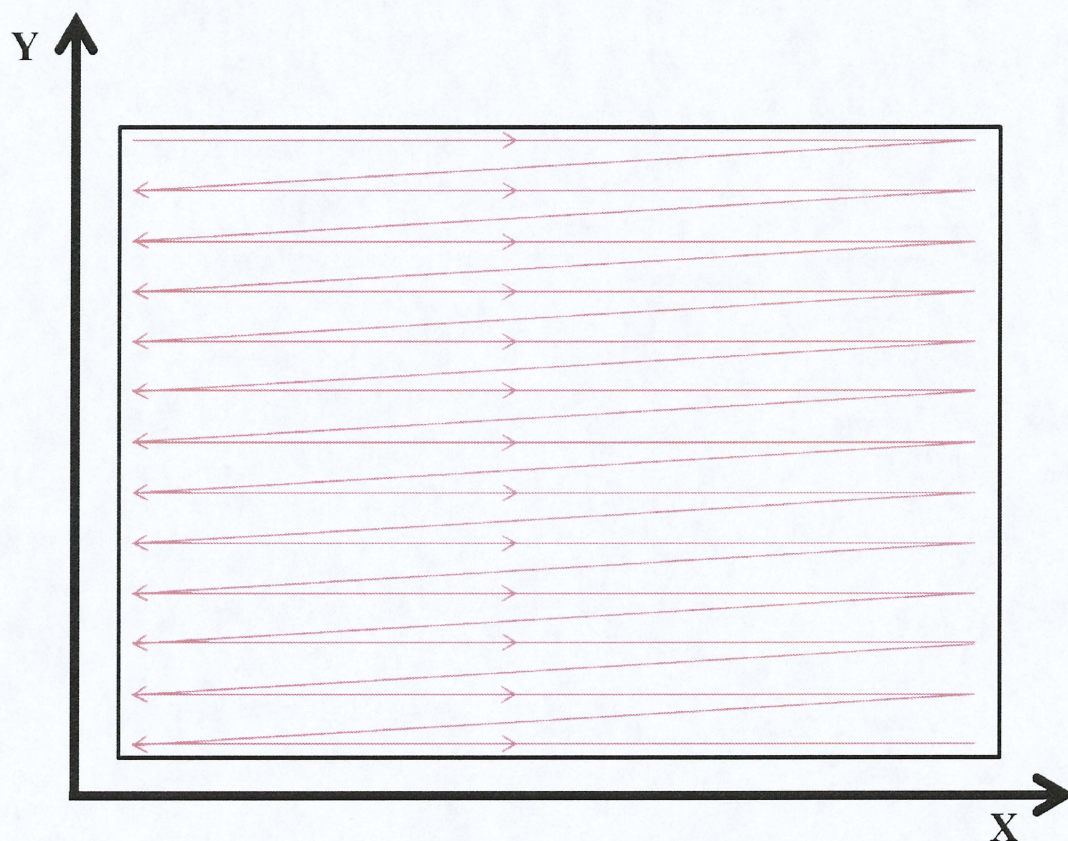
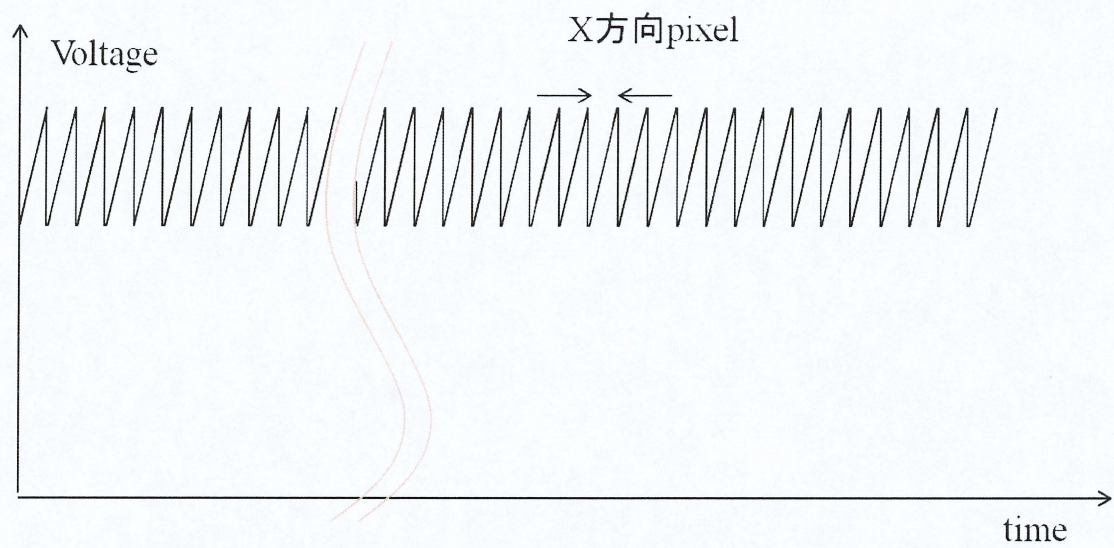
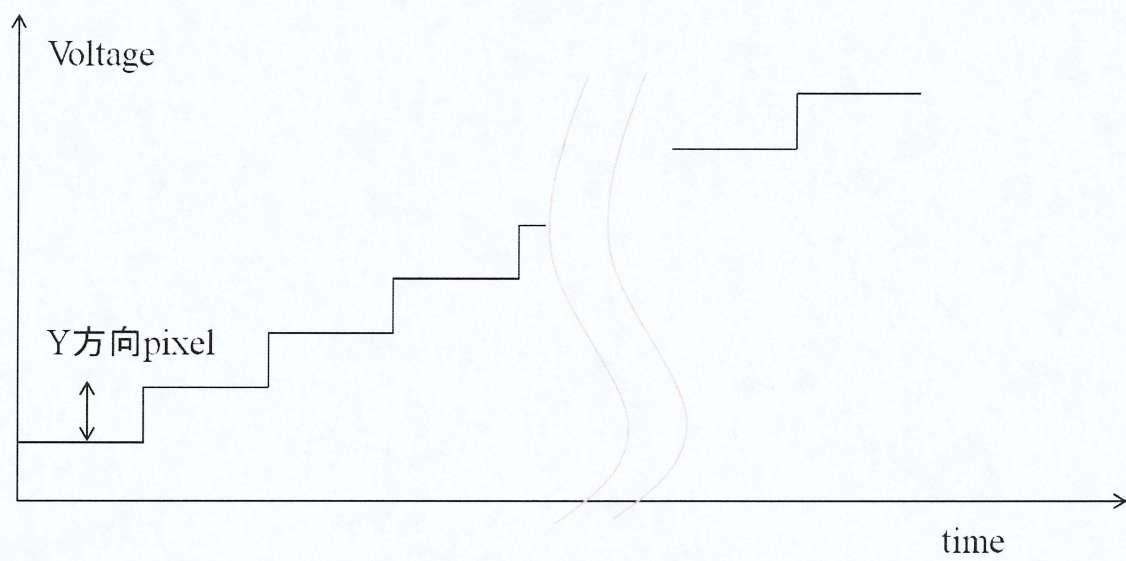


図 2-8 (a)ラスタ走査の模式図



(b) X 軸走査波形



(c) Y 軸走査波形

図 2-8 ラスター走査の電気信号図

第3章 新規作製した X 線顕微鏡と構成要素

本章では、作製した液体 Li 電子源を搭載した高分解能透過型 X 線顕微鏡の各構成要素について述べる。そして、液体 Li 電子源を搭載する高分解能透過型 X 線顕微鏡の新規開発を最終目標に、本研究で行ったまず X 線顕微鏡の分解能を決定する要素の一つである金属ターゲット上での集束一次電子線のプローブ径を評価するシステムの開発について述べる。

3-1 液体 Li 電子源を搭載する透過型 X 線顕微鏡の概要

電子源に用いる液体 Li 陰極は大電流、高輝度といった特徴を有しており、実時間観察可能な高分解能 X 線顕微鏡の陰極として有望である。本透過型 X 線顕微鏡の光学システムは、電界放出型液体 Li 陰極の搭載を目的に最適化されている。

新規作製した透過型 X 線顕微鏡の外観の写真を図 3-1 に示し、その概略図を図 3-2 に示す。鏡体は大気側の回転直線導入器のノブから Be 窓フランジまで全長約 700 mm とコンパクトに設計した。陰極から放出される電子量を調整するため、陰極は回転直線導入器に繋がれており、陰極と蛍光板との距離は調整可能である。さらに、陰極の機械的アライメントを可能にするため、陰極は X-Y ステージに搭載されている。つまり、陰極の位置は X-Y-Z の 3 軸で調整可能である。加速電圧上で 15 kV にフローティングされたフィラメント電源、及び陽極電源で構成されているコム電子社製の電源を用いた。また、これにより実験を行う上で、加速電圧に関わらず、引き出し電圧の制御が可能である。

液体 Li 電子源を動作させるために、シャッター機構を備え、膜厚量を制御できるためこの蒸着源を採用した。電解研磨した陰極にリチウムを陰極側面から真空蒸着させる。蒸着源(ユニソク社製)は、高融点のタンタル製のるつぼを持ち、このるつぼに純度 99%以上の固体リチウムを挿入して、加熱して真空蒸着を行う。蒸着源の先には膜圧計を備えており、蒸着面の開口径は膜圧計と同径になっており、蒸着制御電源(INFICON 社製)で膜厚を制御する事が可能である。そして、膜圧計はシャッター機能を兼ねる。また、回転導入器によってシャッターは開閉される。シャッターを閉じて外部蒸着電源で膜厚量を制御し、シャッターを開けて蒸着を行う。尚、このるつぼで発生した熱を抑えるため、るつぼには水冷パイプが接続されている。

陰極から電子を引き出し加速させ、可動絞りにクロスオーバーを結ばせる役割を持つ Butler 型静電レンズを搭載した。第 1 電極に蛍光体を塗布し、陰極先端の放出パターンを表す蛍光スクリーンの役割も果たすようにした。ビューイングポートから蛍光スクリーンに映し出された像を確認できる。集束電極に

は、印加する電源は Matsusada 製の高圧電源を用いた。Butler 型静電レンズについては 3-2 で述べる。次に可動絞りの絞りは $\phi 4\text{ mm}$ 、 $\phi 500\text{ }\mu\text{m}$ 、 $\phi 250\text{ }\mu\text{m}$ と三段階に変更でき、X-Y 方向に動かすことができる。偏向器は十二極子の二段で構成されており、これについては 3-3 節で詳述する。偏向器を通過した電子線は試料上で、対物レンズによりさらに絞られる。対物レンズと検出系については 3-4 節で述べる。電子線によって試料表面上から発生した反射電子は検出器で検出され、画像化される。高分解能 X 線像を発生するために金属ターゲットと高分解能像を取得するための Be 窓設計を新規設計した。この作製した Be 窓の設計指針については 3-5 節で述べる。尚、真空排気システムについては 3-6 節で述べる。

実験装置を搭載している除振台は X 線撮影時に倍率の変化幅をもたせるため、X 線窓よりも後ろ側のスペースは広くとれるようにした。そして、X 線像取得の時には X 線イメージインテンシファイア(浜松ホトニクス社製)を用いる。この検査器は微弱な X 線像を可視像に変換する大型のイメージ管で、医療用 X 線テレビ装置や X 線非破壊検査装置などに使われている。

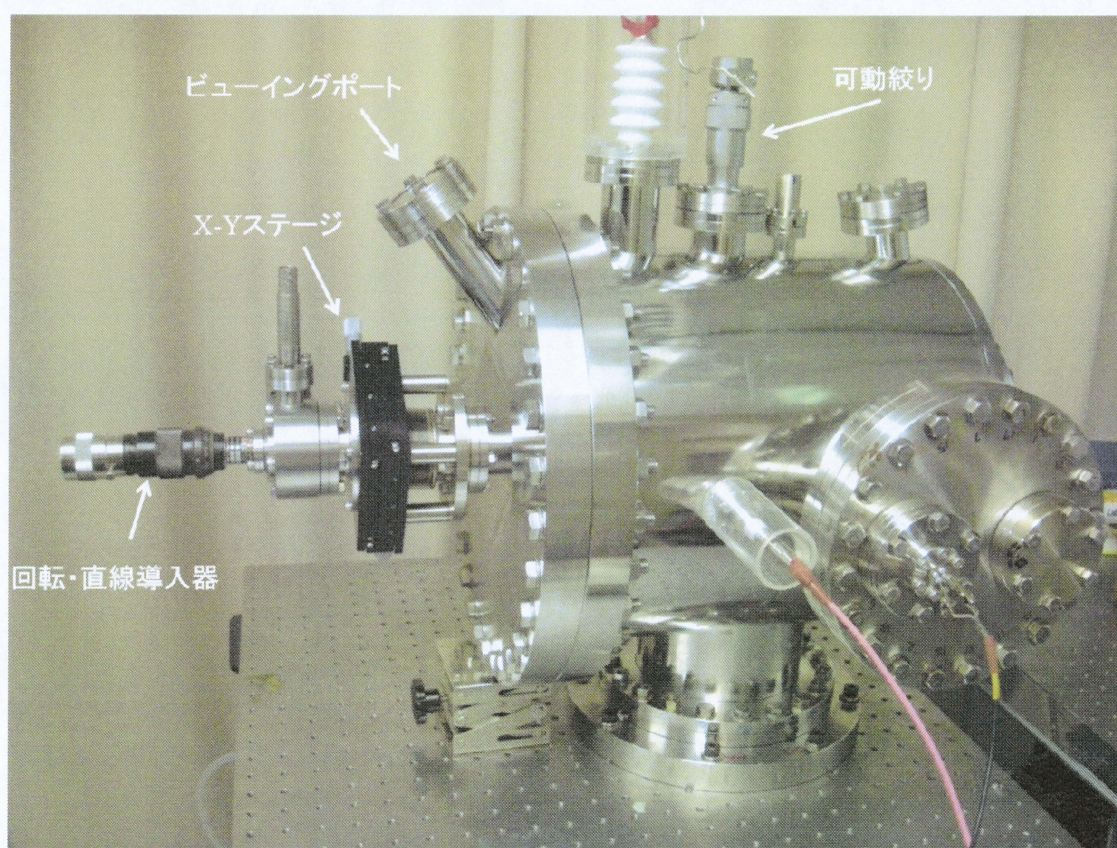


図 3-1 装置の外観

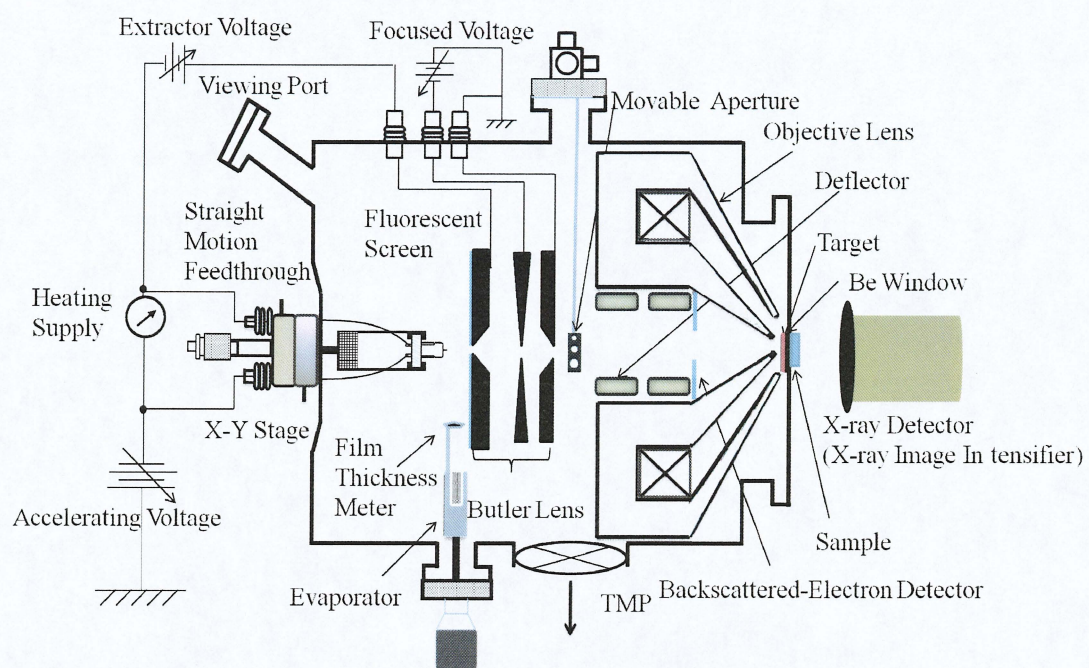


図 3-2 装置の概略図

3-2 Butler 型静電レンズ

Butler 型静電レンズ^[17]は 3 枚の陽極電極から構成されている。Butler レンズの第 1 電極は、引き出し電極と電子放出像観察用の蛍光板の機能を兼ねる。第 2 電極は集束電極であり、Butler レンズ後段の可動絞り上に電子線を集束させる。第 3 電極の電位は接地電位であり、第 1 電極と第 2 電極が加速電圧上に浮いているため、電子線は最終加速される。集束電極について述べる。Butler レンズの第 2 電極の集束電極でクロスオーバーの位置を調整する。ここで、可動絞りにクロスオーバー結ばせることで、電流値が高く取れる電子線が形成される。

また、陰極先端から第 1 電極までは 10 mm、第 1 電極から第 2 電極までは 30 mm、第 2 電極から第 3 電極までは 33.5 mm となっている。尚、三枚の電極の中心穴径はすべて 1.5 mm である。各電極間は絶縁碍子で完全に絶縁されている。また、その碍子に穴を空け、電気接触を取ると共に Butler レンズの内部まで真空が引けるように設計した。本静電レンズ系と対物レンズ系の合成収差係数は、電子光学シミュレーションにより、収差係数は $C_s = 0.93 \text{ mm}$ 、 $C_c = 6.9 \text{ mm}$ と見積もられた。これは、一般的な SEM の収差係数である $C_c=20\text{mm}$ 、 $C_s=50\text{mm}$ に比べて、かなり収差の小さい像を得られる。

3-3 十二極子偏向器

この節では、本装置で用いた静電偏向器について述べる。SEM像を得るには、偏向器によってプローブを試料表面でラスタ走査させる必要がある。本装置の静電偏向器は二段の不等分割された十二極子偏向器で構成されている。その概略及び電極配置を図 3-3 に示し、実際に用いた十二極子偏向器の外観を図 3-4 に示す。図 3-3 の電極の幅を 20°、50°と不等分割にすることで、収差の小さい均一な電界範囲が最も広い条件となっている^[18]。

また、偏向電圧を印加する電源の数が多ければ多い程、実用性に優れていないため、電源の数は、少ない程良い。図 3-3 に示すように、十二極子偏向器は、三枚一組で色付けした電極が同じ電位で動作する。そのため、二段の十二極子偏向器の電源の数は八台で済み、経済性・操作性に優れている。また、この十二極子偏向器を非点補正器として動作させる為に一段目から 45°回転させて二段目を配置する。さらに、偏向量は少なくても良いので、十二極子偏向器を採用した。

図 3-5(a)において、一段目の偏向器では X 軸と Y 軸に沿った成分しか非点補正ができないが、45°回転させて二段目の偏向器を配置する事で図 3-5(b)に示すように斜め成分の非点補正もでき、全方向に対する非点補正器としても動作させる事が出来る。

二段の十二極子偏向器の各電極に図 3-7 に示す電圧を印加すると等電位面を形成し、偏向器として動作する。一段目の偏向器で偏向された電子線を試料に垂直に入射させるために、二段目の偏向器では、極性を逆にして、電子線をふり戻す(図 3-6)。そして、図 3-8 に示す電圧を印加すると非点補正器として動作する。そして、各電極 E₁~E₈ に印加する偏向電圧、X-Y 非点補正電圧、X-Y アライメント電圧を重畳した電圧式を式(3.1)~(3.8)に示す。

$$E_1 = V_Y + V_{\text{stig}X} \quad (3.1)$$

$$E_2 = V_X - V_{\text{stig}X} \quad (3.2)$$

$$E_3 = -V_Y + V_{\text{stig}X} \quad (3.3)$$

$$E_4 = -V_X - V_{\text{stig}X} \quad (3.4)$$

$$E_5 = 1/\sqrt{2} V_X + 1/\sqrt{2} V_Y + V_{\text{stig}Y} + V_{\text{align}X} + V_{\text{align}Y} \quad (3.5)$$

$$E_6 = 1/\sqrt{2} V_X - 1/\sqrt{2} V_Y - V_{\text{stig}Y} + V_{\text{align}X} - V_{\text{align}Y} \quad (3.6)$$

$$E_7 = -1/\sqrt{2} V_X - 1/\sqrt{2} V_Y + V_{\text{stig}Y} - V_{\text{align}X} - V_{\text{align}Y} \quad (3.7)$$

$$E_8 = 1/\sqrt{2} V_X - 1/\sqrt{2} V_Y - V_{\text{stig}Y} - V_{\text{align}X} + V_{\text{align}Y} \quad (3.8)$$

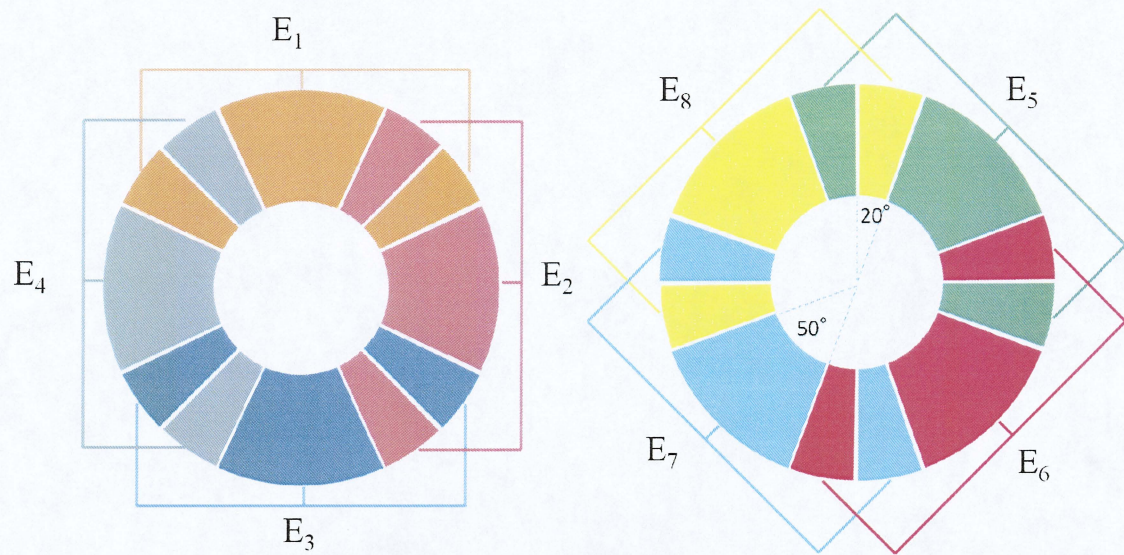


図 3-3 不等分割された十二極子偏向器の印加電圧

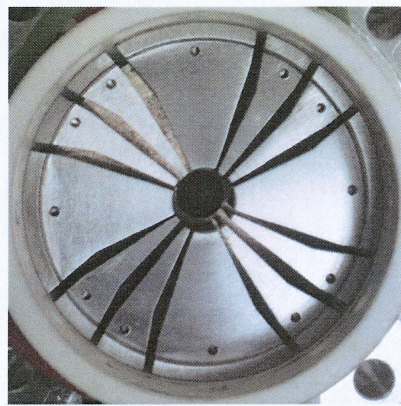


図 3-4 実際に用いた十二極子偏向器

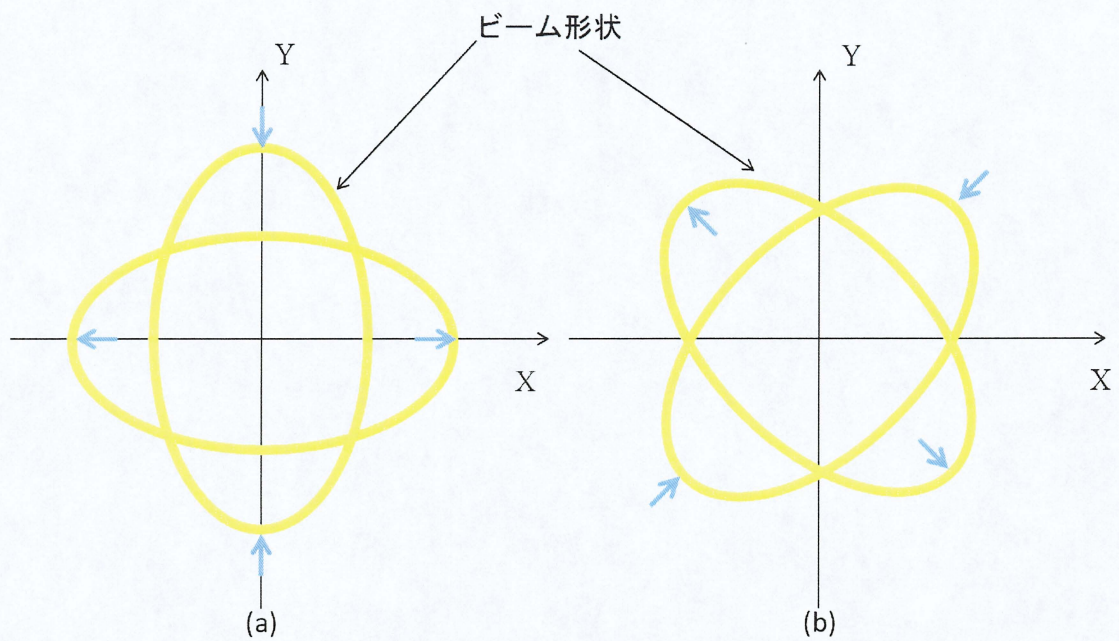


図 3-5 非点補正

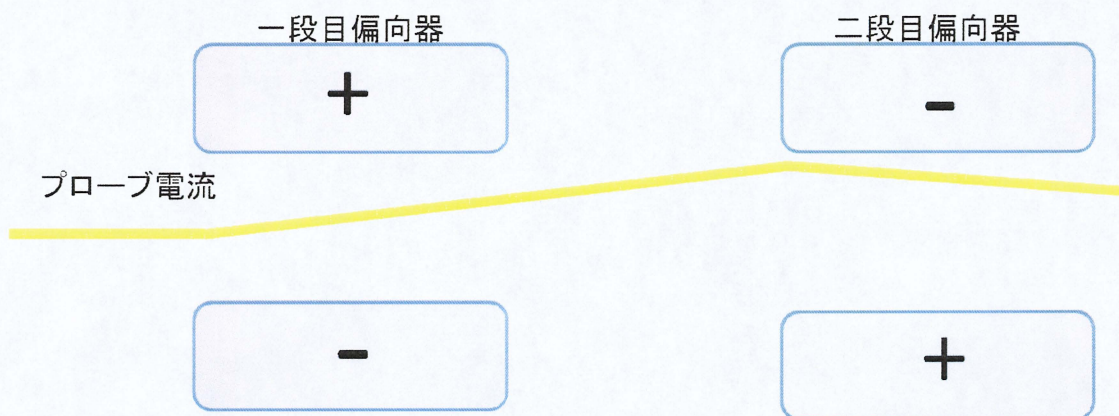


図 3-6 二段構成の偏向器

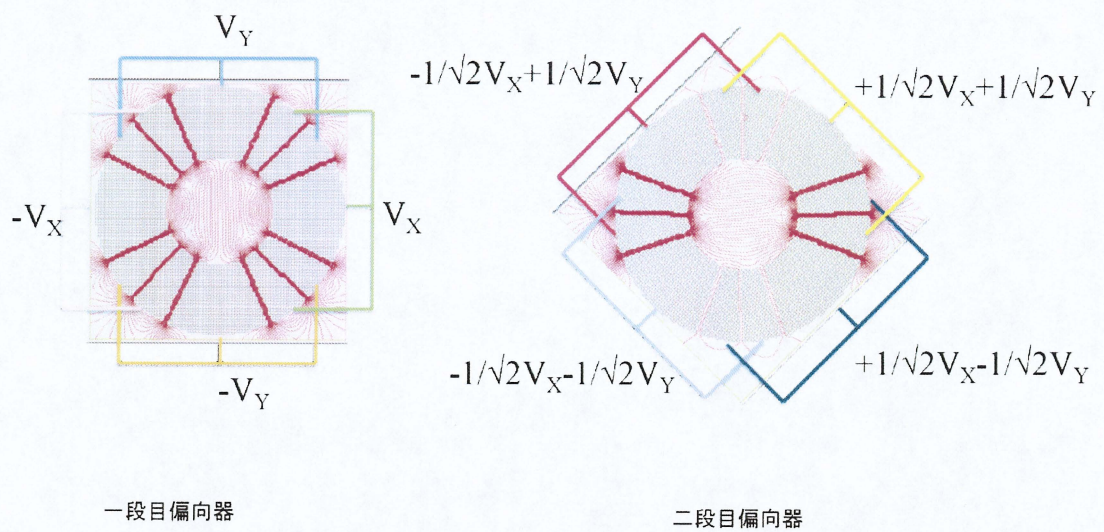


図 3-7 十二極子偏向器として動作する電圧

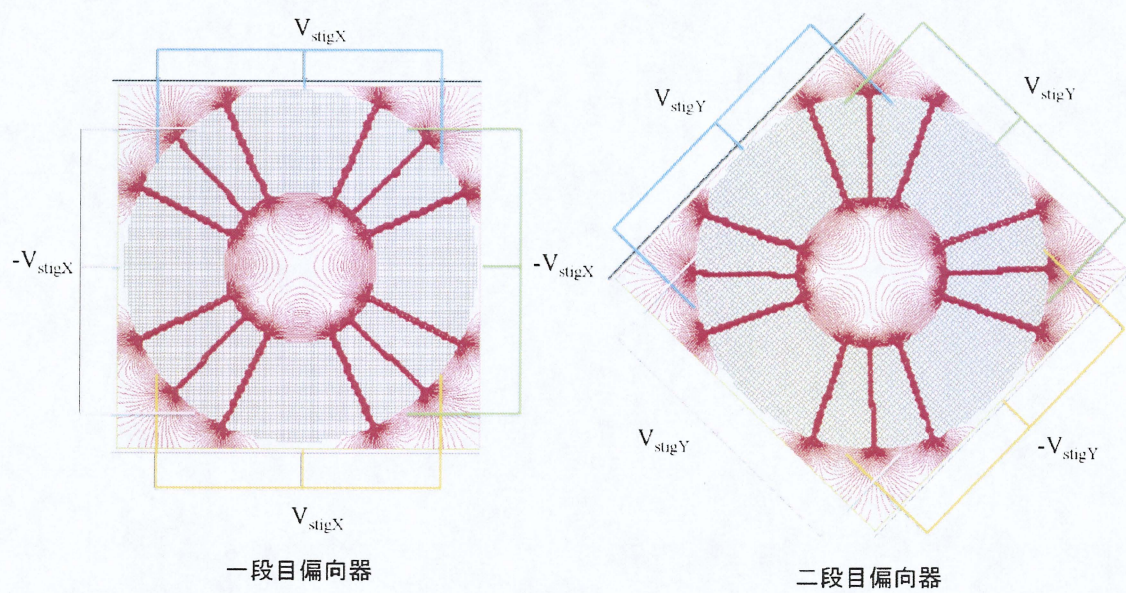


図 3-8 十二極子偏向器を非点補正器として動作させる電圧

3-4 磁界型対物レンズと反射電子検出器

試料上で極微小プローブ径を得るには、試料直前に対物レンズが必要となる。また、極微小プローブ径を達成するには収差が一番の問題となる。収差の値を小さくするには、ポールピースの穴径を小さくし、上極と下極の距離をできるだけ短くし、強励磁にする必要がある。本装置で用いた T.T.Tang 等によって最初に提案された^[19]シュノーケル型対物レンズの概略図を図 3-9 に示す。収差は焦点距離とともに急激に増加するので、焦点距離はできるだけ、短くする必要がある。このシュノーケル型対物レンズは焦点距離を小さくできるため、収差を小さくする利点を持つ。そこで、対物レンズのポールピースと試料との距離を狭める設計とした。その結果、励磁電流によって試料は磁場中に存在することになる。

銅製のヨークの外枠中にコイルを挿入した。コイルとヨークはポリアミドテープ(耐熱 300℃)によって電氣的に絶縁されている。そして、コイルを鏡体内に入れる事で、全体をコンパクトにすることができた。コイルの巻き数は 3500 ターンであり、これに数 mA~数 A 程度の励磁電流を流すと、コイルには熱が発生する。コイルが真空内に配置されると、励磁電流によって、発生する不純ガスが鏡体内の真空値を悪化させるため、コイルの周りをヨークで仕切り、接着面を銀ロウ付けし、ヨークの中は大気になっている。また、発生した熱を抑えるため、ヨークの回りを水冷用に SUS のパイプで覆っている。水冷用のパイプに大気側から水を循環式によって水冷している。

多くの商用 SEM の二次電子検出器は、シンチレータと光電子増倍管で構成されており、試料側面に配置され、シンチレータ先端に数 kV の高電圧を印加して二次電子を捕集する。しかしながら、本装置では試料とポールピースの距離が 5mm と狭いため、シンチレータと光電子増倍管で構成された検出器を試料側面に配置して、シンチレータ先端に数 kV 印加しても二次電子が捕集できない。図 3-10 は試料表面から放出された二次電子の軌道を示す。図 3-10 のように、 $\theta_a \leq 60^\circ$ の角度を持つ試料表面から放出された二次電子は、螺旋軌道を描いて対物レンズに向かう。そして、 $70^\circ \leq \theta_a \leq 90^\circ$ の角度を持つ二次電子は再び試料へ戻る^[20]。

この理由の為、一般的な二次電子検出器を試料側面に配置するのではなく、本装置では対物レンズの光軸に沿った位置に反射電子検出器を配置して、試料表面から発生した電子を検出する必要がある。対物レンズ内の近軸軌道軸上に設置可能な、中央にプローブを通す穴を持つ、電子線検出器用 Si の pn 接合型円形フォトダイオード(図 3-11)を二次電子検出器として採用した(図 3-12)。この検出器は、半導体に入射した電子のエネルギーに比例して生成される電子・正孔対を電流パルスで検出するものである。この検出器の中央には $\phi 1\text{mm}$ の穴が

空けられており、一次電子線はこの穴を通して後段の試料に入射する。尚、この穴の周り是一次電子線を検出しないように、シールドされている。試料表面上で発生した反射電子は検出器で検出され、プリアンプ(テクネックス社製)を通して電流電圧変換される。

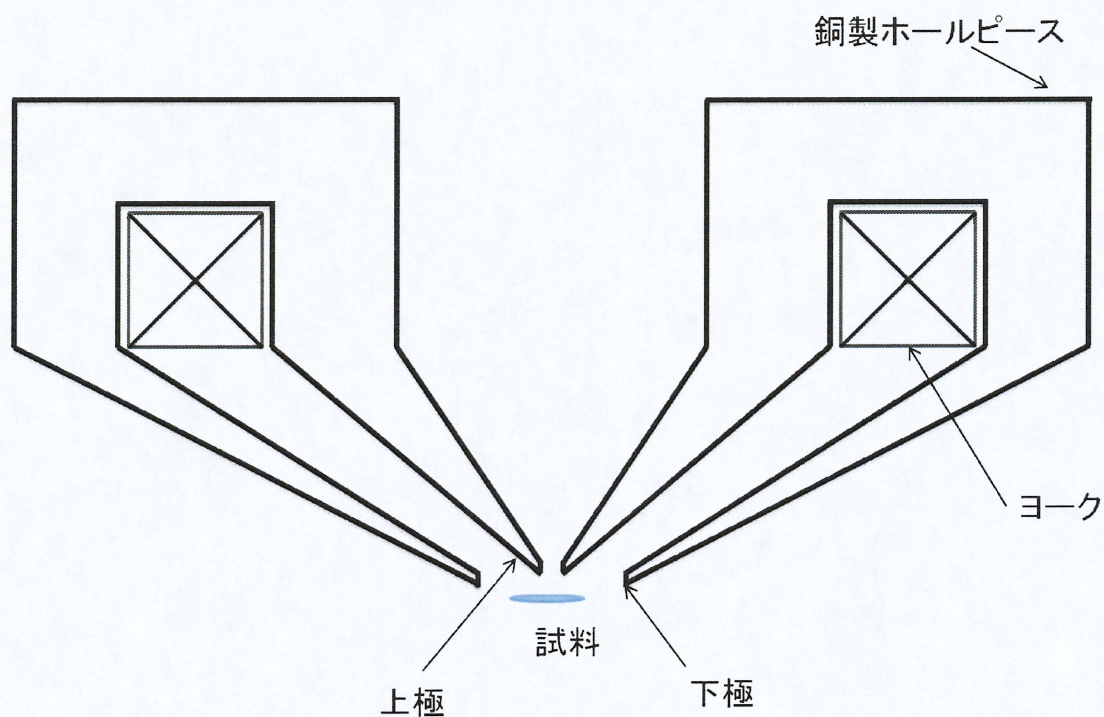


図 3-9 シュノーケル型対物レンズの概略図

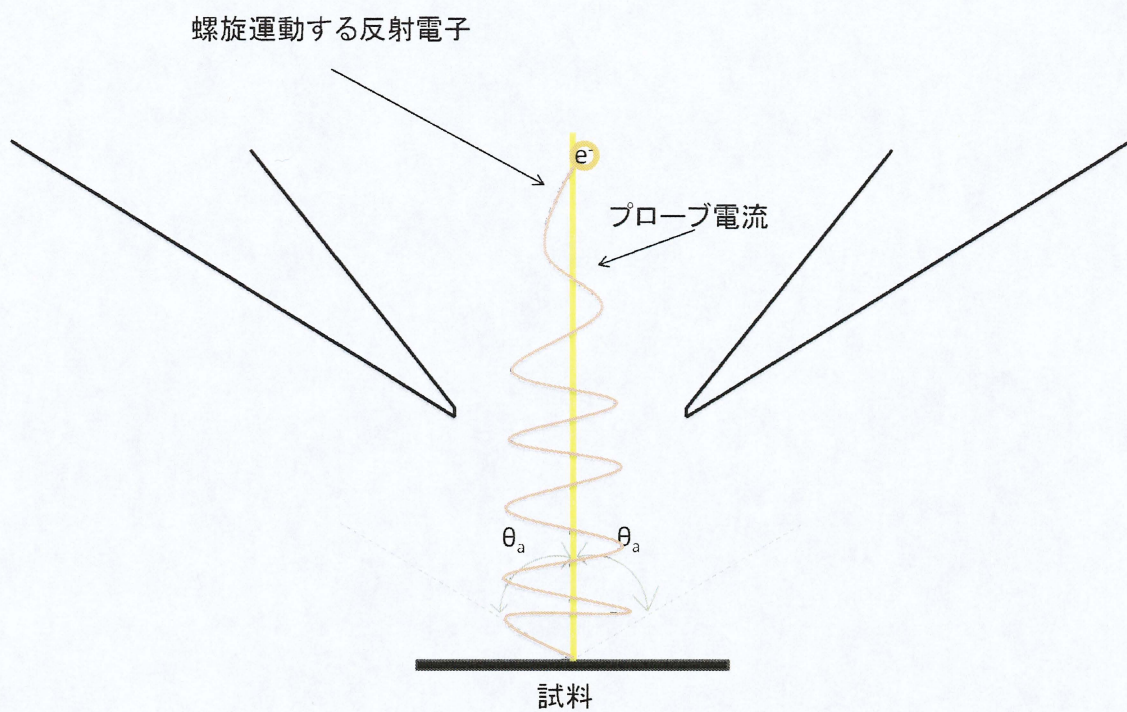


図 3-10 本対物レンズ動作時の反射電子の軌道

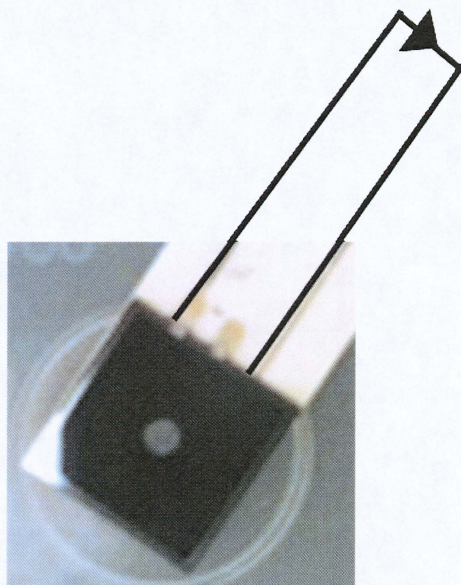


図 3-11 Si フォトダイオード

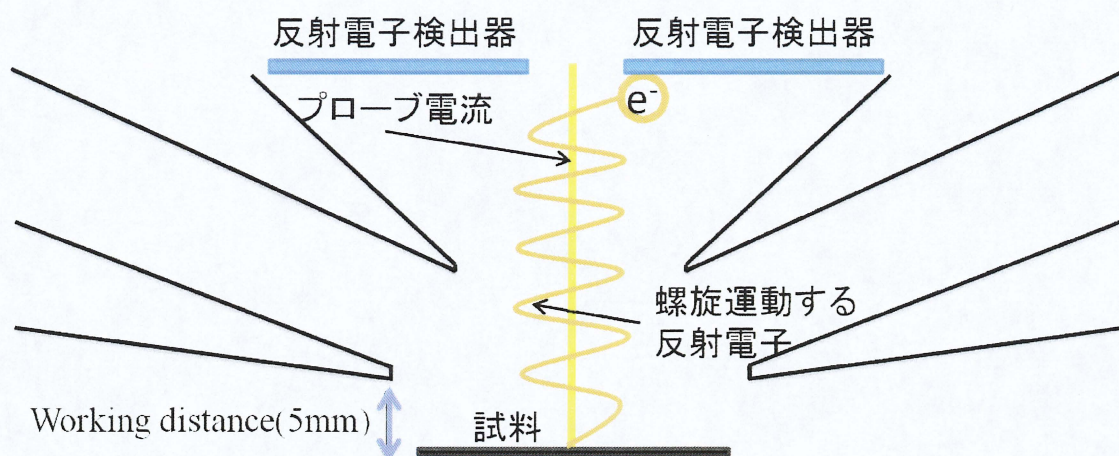


図 3-12 光軸上に配置した反射電子検出器

3-5 金属ターゲット材料と Be 窓設計

ターゲットとして用いた金属材料の選定理由を述べる。ターゲット材料には融点、熱伝導性、化学的安定、及び X 線吸収等の要素を考慮して選ぶ必要がある。連続 X 線強度の式(2.2)より、強い X 線強度を得るために、原子番号が大きくかつ高融点のタングステン($Z=74$)を金属ターゲット材料として選定した。

本装置の最大加速電圧は 15 kV であり、タングステンを金属ターゲットに用いた時に励起可能な特性 X 線は、M 殻の $M\alpha_1$ 線($\lambda=0.6983\text{nm}$)と L 殻の $L\alpha_1$ 線(0.1476nm)である。それぞれの殻の電子を励起するには M 殻が 1.814 keV、L 殻が 10.20 keV のエネルギーが必要である^[21]。加速電圧の低い時には、特性 X 線を用いる。さらに、金属ターゲット内での電子に飛程を考え、飛程によりも金属を厚くしないと、Be 窓にまで電子が到達し、発熱する。そこで、ターゲットの膜厚を決定する際に、加速電圧 15 kV に対しての入射電子の侵入深さを考えなくてはならない。2-1-2 節で述べたようにターゲットは薄い方が良いので、岡山等が考案した式(3.10)^[22]より、加速電圧 15kV に対するターゲット内の最大飛程 R は 524 nm と計算できるため、タングステンの膜厚を 530 nm と決定した。

$$R = \frac{2.76 \times 10^{-11} A E_0^{\frac{5}{2}}}{Z^{\frac{8}{3}} \rho} \quad (3.10)$$

ここで、 A は原子量(g)、 E_0 は入射電子ビームのエネルギー(eV)、 ρ は密度(g/cm³)を示す。

次に本実験装置用に考案した Be 窓の設計図を付録 1 に載せる。ザグリ位置には分解能を評価するためのマイクロチャート(日本検査機器工業会製)が挿入できる仕様になっている。X 線顕微鏡の試料位置にタングステンターゲットを配置し、鏡体内の真空側と試料を配置する大気側は X 線吸収が比較的小さいベリリウム窓により隔てられている。タングステンターゲットは、100 nm のベリリウム窓上にスパッタ蒸着により成膜されている。ターゲット・試料間距離は、2.3 mm である。X 線 II を最も近づけたとすると金属ターゲット・X 線 II 間距離が約 44.3mm から、X 線像の倍率は約 19.2 倍~可能である。

ターゲット部はフランジとベリリウム窓を真空ロウ付けすることにより真空気密している。またこの Be 窓の ICF70 フランジを ICF256 フランジに固定する為の 6 本のネジには対物レンズにより強励磁が発生することで、磁性体のボルトでは磁化され、レンズ磁場を乱してしまう。そこで、非磁性体のボルトであるチタン(Ti)を採用した。非磁性のボルトを用いる事によって、試料表面上でのレンズ磁場の乱れを無くした。

3-6 真空排気システム

これまで、当研究は低真空下において、液体 Li 陰極を搭載した改良された Tiny-SEM(テクネックス社製)により、SEM 像取得した。しかしながら、X 線像取得に至らなかった。その理由は、Tiny-SEM では真空値が 10^{-6} Pa 台であったのに対して、液体 Li 電子源を安定に動作させるには 10^{-8} Pa 以下の超高真空が要求される^[23]。

そこで、液体 Li 電子源を安定に動作させるために、本装置の真空排気では、電子線照射によるコンタミネーションの低減と排気速度 210 l/s のボールベアリング式ターボ分子ポンプと補助ポンプとしてロータリーポンプに加え、Ti のゲッター作用を用いて排気するイオンポンプとサブリメーションポンプを備え付けた。ロータリーポンプとターボ分子ポンプの排気で、本装置の到達圧力はベークリング無しで 2×10^{-5} Pa まで真空排気できる。また、液体 Li 電子源を安定に動作させるために、試料室の真空圧の維持、残留ガスの影響の低減は、電子ビーム照射によるコンタミネーション膜の堆積を抑える上で重要である。また、地面から伝わる振動は高分解能な像観察において重大な問題となるため、本装置には除振機構を備えつけ、床からの振動を軽減した。

第4章 走査電圧と非点補正電圧を重畳した出力波形プログラム開発

本章では4-1節で偏向器に電圧を印加する電源、その電源を制御するデジタル I/O ボード、反射電子信号をデジタル信号に変換するために用いた A/D コンバータといったハードウェアの構成について述べ、4-2節でその各種ハードウェアを制御するソフトウェアの構成について述べる。また、4-3節では8ch電源からの出力波形の確認について述べる。4-4節では画像表示プログラムの動作確認のために、ファンクションジェネレータの出力を疑似信号とした動作特性評価について述べる。

4-1 プローブ径評価システムの制御系構成要素

本装置において、SEM機能は光軸調整とプローブ径を見積もるために、付加したものであって、あくまでも最終目標は高分解能 X 線像取得である。そこで、8ch電源を制御するプログラムの言語は短期間でマスターでき、計測制御に特化したものである LabVIEW8.0(ナショナルインスツルメンツ社製)を用いることにした。図4-1に本研究で用いた偏向器に電圧を印加する8ch電源、8ch電源を制御するデジタル I/O ボード、そして反射電子信号を量子化する A/D コンバータといった本研究で用いたハードウェアの構成を示す。

偏向器に電圧を印加する8chの特注電源(豊伸電子社製)について述べる。この特注電源の出力電圧は-100V~+100Vであり、その出力値はデジタル制御可能である。12bitで分割された出力値設定のアップデートは10kHzである。図4-2はポートの割り当てを示しており、上位4bitはチャンネル番号、下位12bitは出力値の設定に用いられる。2進数の12bitを10進数で表すと最大4096(以下10進数表示で表したものをGPIOと呼ぶ)まで表わす事ができる。

次に、8ch電源制御するデジタル I/O ボードについて述べる。SEMは電子線の走査信号と各点で得られた信号を同期させ、mappingをする。走査信号の走査速度が1画面を取得するのに必要な時間を決定する。そのため、走査信号の走査速度が遅いと1画面を取得するのに時間を要するため、実時間観測が問題になる。一般的に計測器を制御するには GPIB が主流である。しかし、3線ハンドシェイクという3線のクロックのタイミングを有効にしてデータを送受信するため、本装置のように設定と測定値の読取りを繰り返すような場合には、動作が遅くなり、GPIBでは8chのデータを実時間観測が可能な走査速度に満たないことがわかった。そこで、本研究は GPIB ではなく、デジタル I/O ボードを用いることにした。このデジタル I/O ボードの仕様は LabVIEW8.0 対応、高速(サンプリングレート 2MHz)、高分解能(32bit)と特注電源に適應する PCI-6533(ナショナルインスツルメンツ社製)を用いた。

最後に、二次電子信号をデジタル信号に変換する A/D コンバータには LabVIEW8.0 対応、高分解能(16bit)かつ高速(サンプリングレート 1MHz)な PCI-6220(ナショナルインスツルメンツ社製)を採用した。

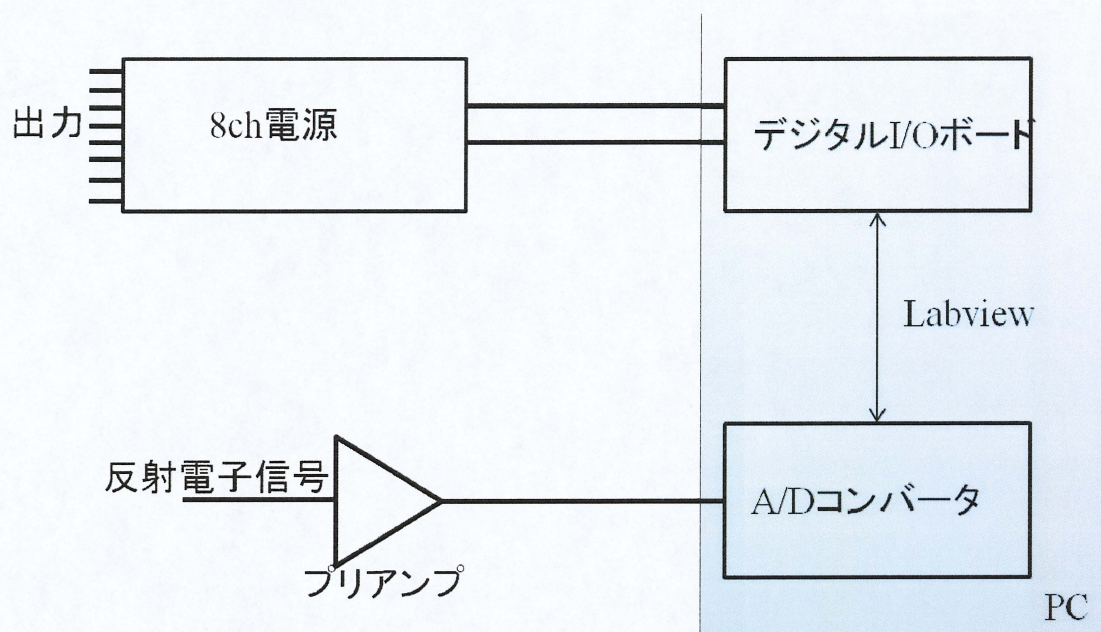


図 4-1 制御系の構成

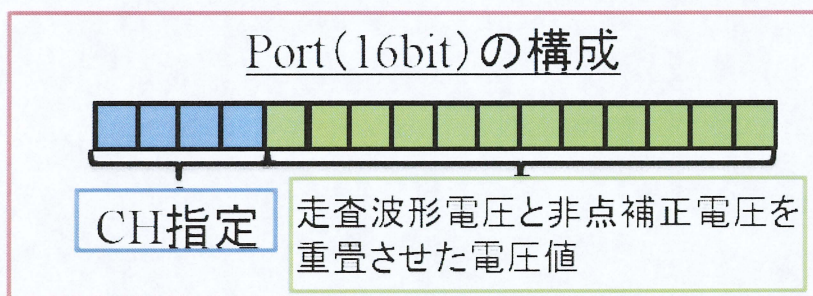


図 4-2 8ch 電源の Port 構成

4-2 走査波形電圧と非点補正電圧を重畳したプログラム開発

この節では走査波形電圧と非点補正電圧を重畳したプログラム開発手順について述べる。最初にラスタ走査のフローチャートを図 4-3 に示し、まず X 方向について述べる。図 4-3(a)に示す X 方向の走査波形群の 1 つ(図 4-3 のフローチャートでは i を示す)が、指定した X 方向の pixel 数(図 4-5(c)では m_1 を示す)実行されるまで、走査する。次に Y 方向に 1 段階ステップして、これを繰り返す。その繰り返す回数は図 4-3(b)に示すステップ(図 4-3 のフローチャートでは j を示す)が、指定した Y 方向の pixel 数(図 4-3(c)では m_2 を示す)実行して、Y 方向に 1 つの走査波形を形成する。また、走査線 1 つ毎に各 pixel で得た信号と走査線を随時同期する。このフローチャートをもとに LabVIEW でプログラムを開発した。

$i=0, j=0$ (i =X方向の走査線数、 j =Y方向の走査線数)

図(a),(b)の振幅設定(走査範囲設定)、非点補正、アライメント電圧設定

図(c)の m_1 =X pixelの数、 m_2 =Y pixelの数

ハンドシェイクを最初だけ行い、それ以降二度と実行しない

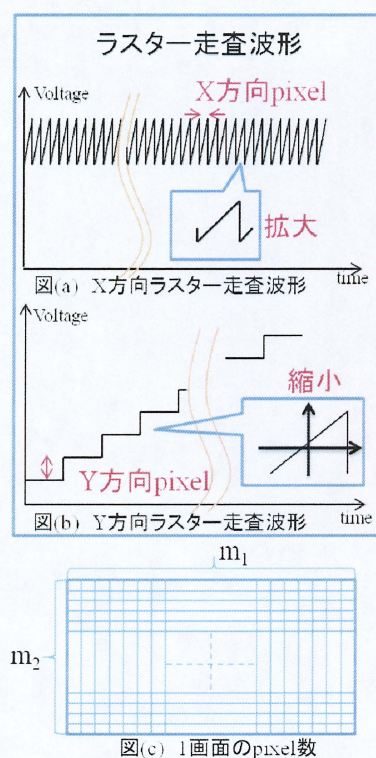
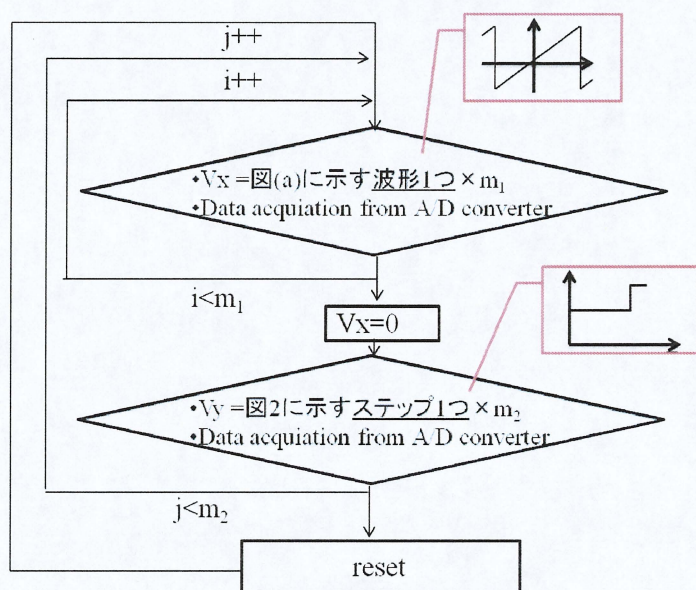


図 4-3 ラスタ走査のフローチャート

外部デバイス(本研究では8ch電源を指す)と信号を交換することによって各データ転送を要求または認識することを、ハンドシェイクと呼ぶ。図4-4に示すようにクロックタイミングの同期をハンドシェイクで行っている。

ここでは、デジタル I/O ボードと 8ch 電源のハンドシェイクについて述べる。図4-5の赤、緑、黒の点線で囲った部分はデジタル I/O ボード内でのハンドシェイクを示す。赤点線で囲んだ output 設定にしてデータを送信側の設定にする。device 1 はデジタル I/O ボードに割り当てられたデバイス番号を割り振る。digital channel list を 0 と 1 にすることで、PC がデジタル I/O ボードを認識する。緑の点線で囲った部分で、デジタル I/O ボードと 8ch 電源を同期させる。緑の点線で囲んだ acknowledge polarity は 8ch 電源のクロック、request polarity はデジタル I/O ボードのクロックを指す。これを共に active high とすることで、図4-4に示すように、デジタル I/O ボードと 8ch 電源のタイムチャートを同期させている。こうして、デジタル I/O ボードのハンドシェイク設定をする。最後に黒で囲った部分で 8ch 電源に転送するデータの書き込みを port に行い、8ch 電源とデータ処理を行う。

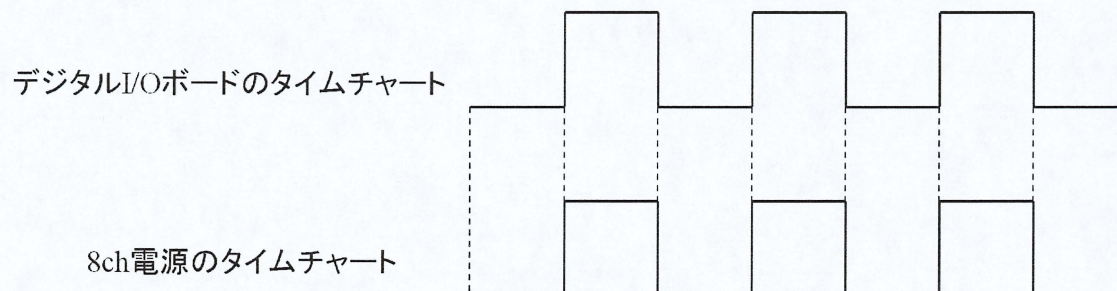


図 4-4 デジタル I/O ボードと 8ch 電源のタイムチャートの同期

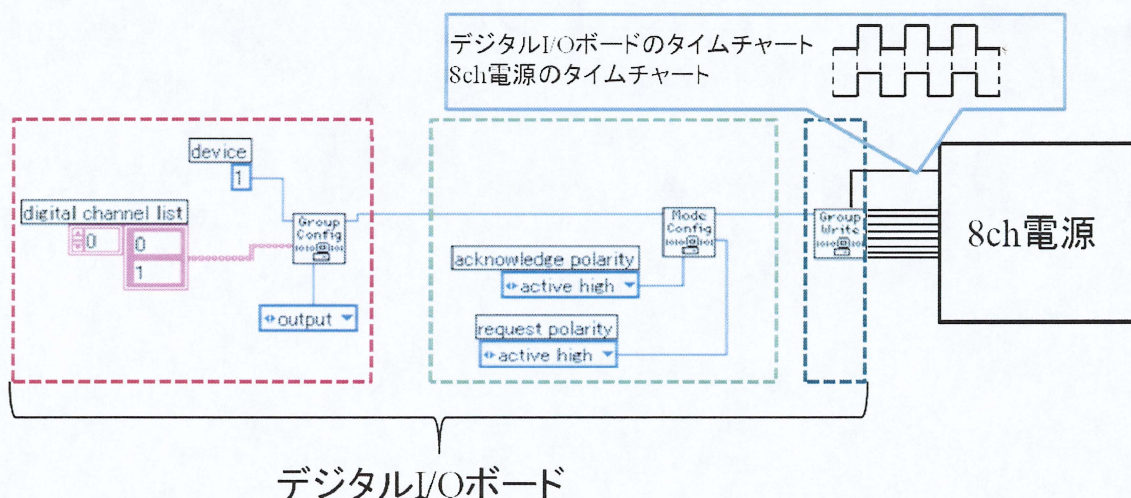


図 4-5 デジタル I/O ボードと 8ch 電源の通信

ここでは、図 4-3 に示したラスタ走査を LabVIEW を用いて開発したプログラムについて述べる。このプログラムでは、ラスタ走査の速度を劇的に向上させ、1 画面取得する時間を早め、実時間観測できるまで達成した。図 4-6 に示すように、まず、①青色点線で囲った部分はデジタル I/O ボードのポート指定を行っている。次に、②緑色点線で囲ったデジタル I/O ボードと 8ch 電源とのハンドシェイクを For ループの外に出すことで、For ループ一回毎に毎回 8ch 電源とデジタル I/O ボードのハンドシェイクをせずに、一度ハンドシェイクを実行すれば、後々の事象ではハンドシェイクを一切行わないように設定した。つまり、最初に同期を行って、それ以降は常に同期された状態を保っている。③赤色点線で囲った四角は、ハンドシェイクをせずにクロックタイミングを保持するために用いている。8ch 電源とデジタル I/O ボードは常に同期された状態に保たれたまま、プローブの走査速度を満たすように開発した。④各電極に印加する電圧式を作成することについて述べる。そして、⑤電源が 16bit で構成され、上位 4bit はチャンネル指定、下位 12bit が電圧指定ということから、図 4-6 の黒色点線で囲んだ部分はチャンネル指定を行っている。そして、⑥紫色点線で囲った部分は上位 4bit と下位 12bit を組み合わせて信号にしている。⑦茶色点線で囲った部分で 16bit を電源に書き込む。

ここまでは、主に 8ch 電源をデジタル I/O ボードを用いた、制御方法とラスタ走査をもとに開発したプログラムについて述べた。次からは④各電極に印加する電圧式を作成することについて述べる。図 4-6 の橙色点線で囲った点線には、各電極に印加する式を挿入する。そして、プログラムは①→⑦の順に実行される。

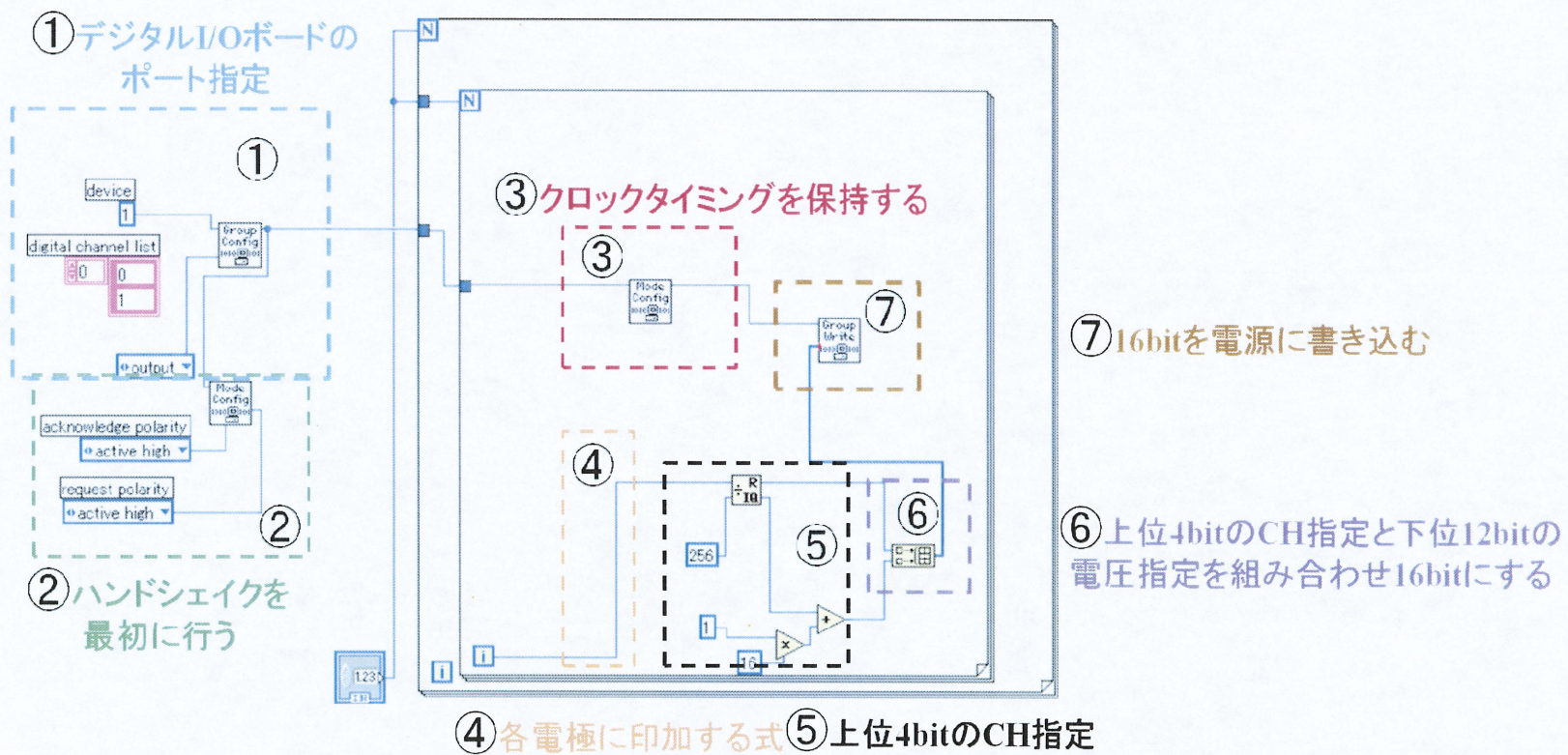


図 4-6 ラスター走査速度を向上させ、チャンネル指定を行う

そこで、ここからは各電極に印加する電圧式の作成について述べる。各 GPIO の値に対して 8ch 電源の出力端子 1~8 の出力値を測定し、それをグラフにしたものを図 4-7 に示す。この図 4-7 に示すように、各々の出力端子は各 GPIO に対して異なった出力値を示した。つまり、出力端子毎に関数を設定して、プログラミングを対応させる必要性がある。正確な反射電子像取得に向けて、極性の違いで関数を正確に算出する事は、より正確な波形を出力させる。そして、この図 4-7 からフィッティングの各出力端子の一次関数を表 2 にまとめる。また、高分解能 SEM 像取得のときは、0V 付近の振幅で走査するため、各 GPIO の値に対して 8ch 電源の出力端子 1~8 の出力値を測定し、それをグラフにしたものを図 4-8 に示す。そして、この図 4-8 からフィッティングの各出力端子の一次関数を表 3 にまとめる。

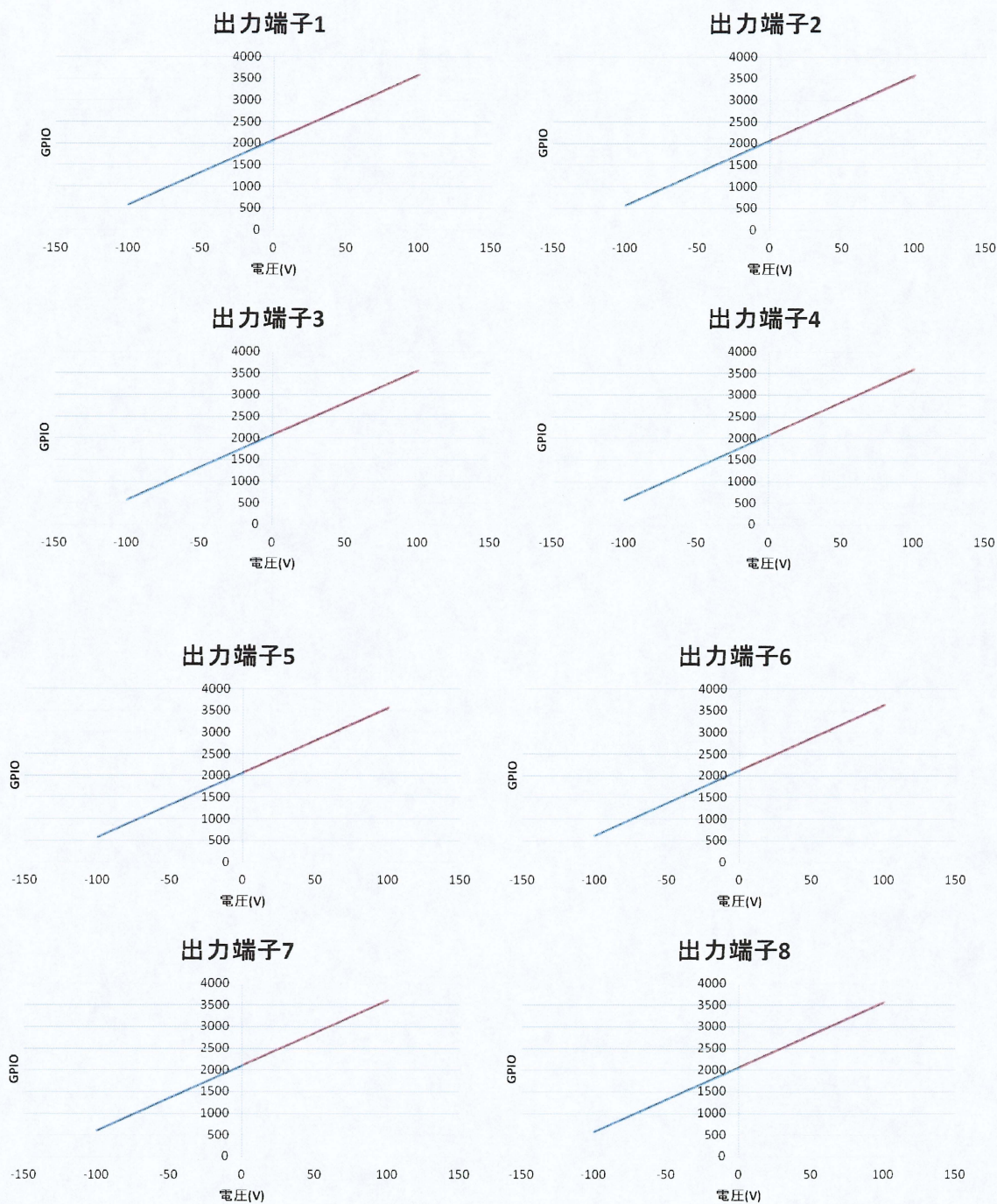


図 4-7 各出力端子の出力に対する GPIO の値

表 2 各出力端子の一次関数

	出力端子1	出力端子2	出力端子3	出力端子4	出力端子5	出力端子6	出力端子7	出力端子8
+100~0V	$y = 15.043x + 2082.8$	$y = 15.048x + 2073.5$	$y = 14.946x + 2072.5$	$y = 15.11x + 2079.5$	$y = 14.925x + 2070.1$	$y = 15.1x + 2123.3$	$y = 15.037x + 2099.7$	$y = 14.938x + 2063.3$
0~+100V	$y = 15.046x + 2077.7$	$y = 15.009x + 2070.4$	$y = 14.929x + 2069.2$	$y = 15.076x + 2076.6$	$y = 14.918x + 2067$	$y = 15.09x + 2120.3$	$y = 15.041x + 2096.5$	$y = 14.911x + 2060.1$

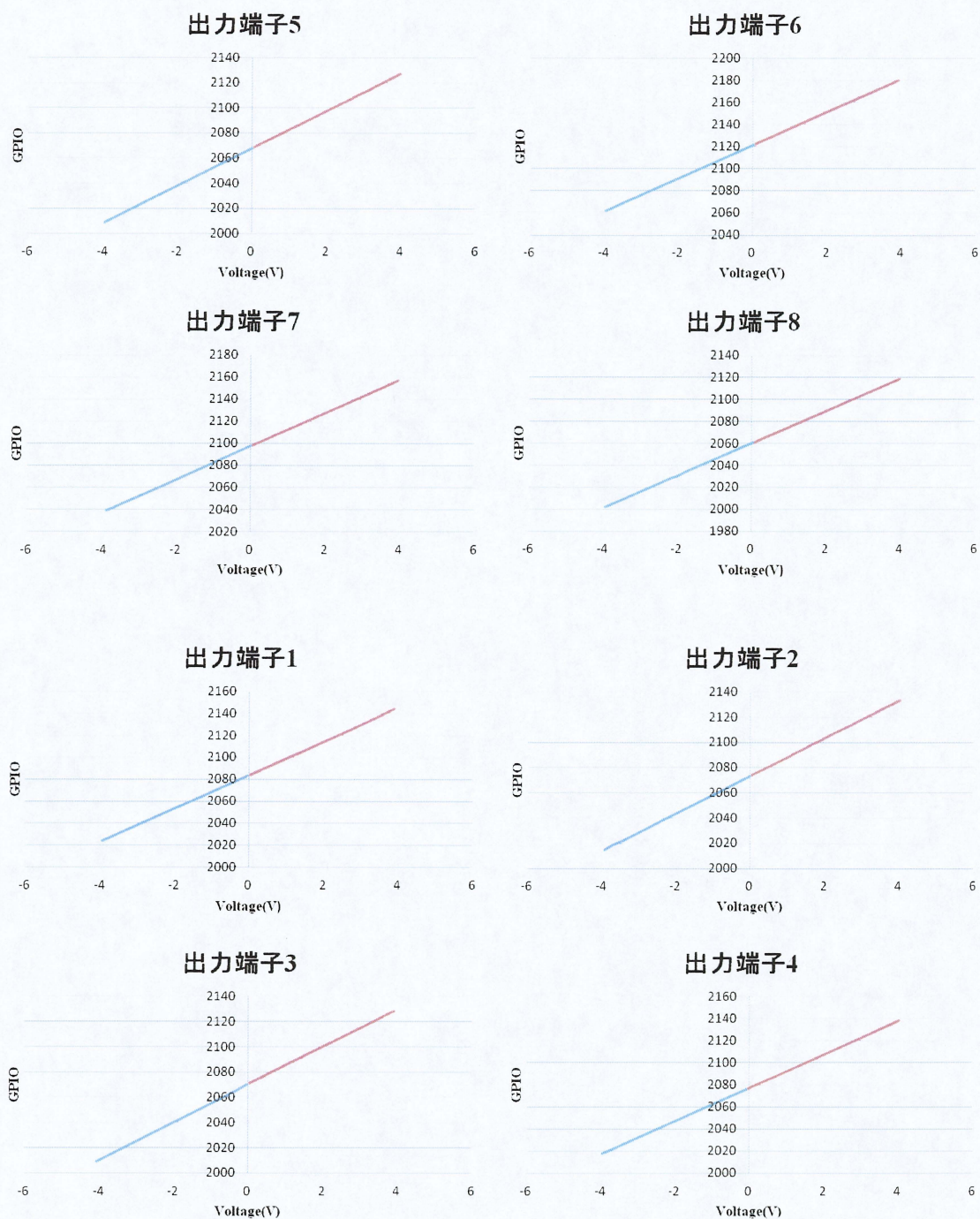


図 4-8 各出力端子の出力に対する GPIO の値
表 3 各出力端子の一次関数

	出力端子1	出力端子2	出力端子3	出力端子4	出力端子5	出力端子6	出力端子7	出力端子8
-100~0V	$y = 15.088x + 2083.5$	$y = 14.774x + 2073$	$y = 14.946x + 2070$	$y = 15.024x + 2077.4$	$y = 14.883x + 2067.9$	$y = 14.996x + 2121.4$	$y = 14.964x + 2097.6$	$y = 14.757x + 2060.2$
0~+100V	$y = 15.453x + 2083.4$	$y = 15.028x + 2073$	$y = 14.964x + 2070.2$	$y = 15.124x + 2077.2$	$y = 14.866x + 2067.7$	$y = 14.958x + 2121.6$	$y = 15.237x + 2097.6$	$y = 14.81x + 2060.2$

走査波形電圧・非点補正電圧の各電極に印加するラスタ一走査を基に、LabVIEW 上の電圧理論式を $V_1 \sim V_8$ で示す。表 2 と表 3 に示した各出力端子固有の一次関数の X に以下で示す式(4.1)~(4.8)の $V_1 \sim V_8$ を導入するプログラムを開発した。それを図 4-9 に示す。尚、 $V_1 \sim V_8$ は図 3-3 に示す電極 $E_1 \sim E_8$ に印加する電圧である。この式(4.1)~(4.8)は走査波形電圧と非点収差補正電圧を重畳した式である。

$$V_1 = -V_y + \frac{2V_y}{N}j + V_{stigX} \quad (4.1)$$

$$V_2 = -V_x + \frac{2V_x}{N}i - V_{stigX} \quad (4.2)$$

$$V_3 = V_y - \frac{2V_y}{N}j + V_{stigX} \quad (4.3)$$

$$V_4 = V_x - \frac{2V_x}{N}i - V_{stigX} \quad (4.4)$$

$$V_5 = + \left(V_{alignX} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \left\{ -V_x + \frac{2V_x}{N}j \right\} + \left(V_{alignY} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \left\{ -V_y + \frac{2V_y}{N}i \right\} + V_{stigY} \quad (4.5)$$

$$V_6 = + \left(V_{alignX} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \left\{ -V_x + \frac{2V_x}{N}j \right\} - \left(V_{alignY} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \left\{ -V_y + \frac{2V_y}{N}i \right\} - V_{stigY} \quad (4.6)$$

$$V_7 = - \left(V_{alignX} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \left\{ -V_x + \frac{2V_x}{N}j \right\} - \left(V_{alignY} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \left\{ -V_y + \frac{2V_y}{N}i \right\} + V_{stigY} \quad (4.7)$$

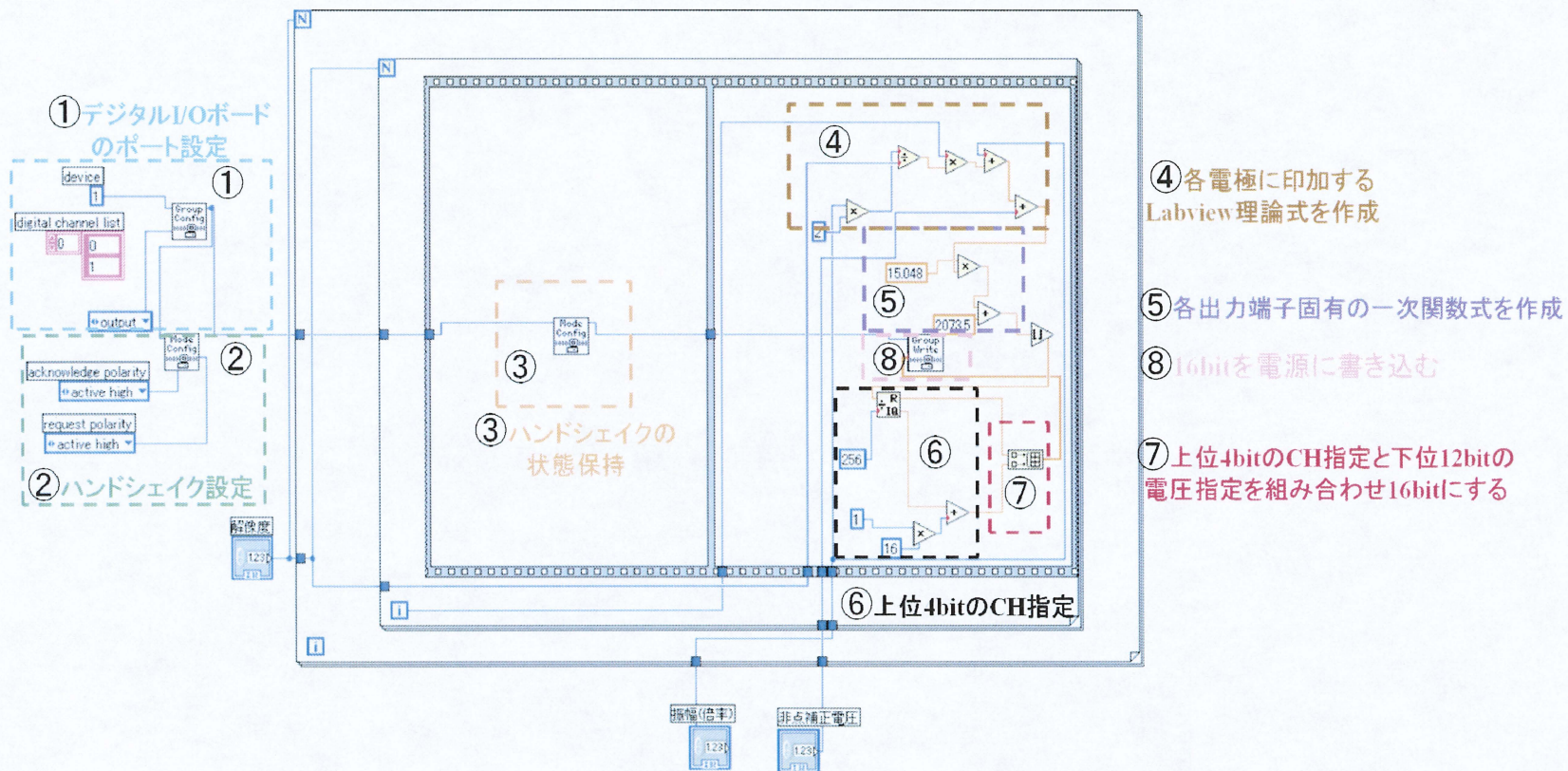
$$V_8 = - \left(V_{alignX} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \left\{ -V_x + \frac{2V_x}{N}j \right\} + \left(V_{alignY} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \left\{ -V_y + \frac{2V_y}{N}i \right\} - V_{stigY} \quad (4.8)$$

ここで、 N は解像度、 V_x, V_y は鋸波の振幅の大きさ、 V_{alignX} と V_{alignY} はX-Y 方向アライメント電圧、 V_{stigX} と V_{stigY} はX-Y 方向非点補正電圧、 i はY 方向の For ループの回数(Y_{pixel} 数)、 j はX 方向の For ループの回数(X_{pixel} 数)を示す。また、ここで鋸波の振幅とは倍率を示し、0~70 V である。また、式(4.5)~(4.8)は二段目の偏向器に印加する電圧の式を示しており、括弧内の係数はそれぞれ一段目で偏向された電子線をふり戻す係数である。関数の変数である $N, V(=V_x = V_y), V_{alignX}, V_{alignY}, V_{stigX}, V_{stigY}$ は任意に設定でき、画像一枚表示毎に変えられるように設定した。 V は1 V 単位で変更でき、 $V_{alignX}, V_{alignY}, V_{stigX}, V_{stigY}$ は0.1 V 単位で変更可能である。

そして、表 2 と表 3 の出力端子 2 の 0~100 V もとに、図 4-9 を八つの出力端子分、極性毎に 16 個プログラムを作成する。図 4-9 の①水色点線で囲った部分はデジタル I/O ボードのポート指定を行い、②緑色点線で囲った部分でハンドシェイクの設定を行う。そして、③ハンドシェイクの状態を橙色点線部分で保持する。④電圧指定は茶色点線で囲った部分で各電極に印加する理論式を作成し、

⑤紫色点線で囲った部分で理論式を関数にする。⑥黒色点線で囲った部分で上位 4bit の CH 指定を行い、⑦赤色点線で囲った部分で、CH 指定上位 4bit と電圧指定下位 12bit を組み合わせる。最後に、⑧桃色点線で囲った部分で、8ch 電源に書き込む。作成したプログラムは①→⑧の順で実行される。

図 4-9 電極 2 のプラス側に印加するプログラム

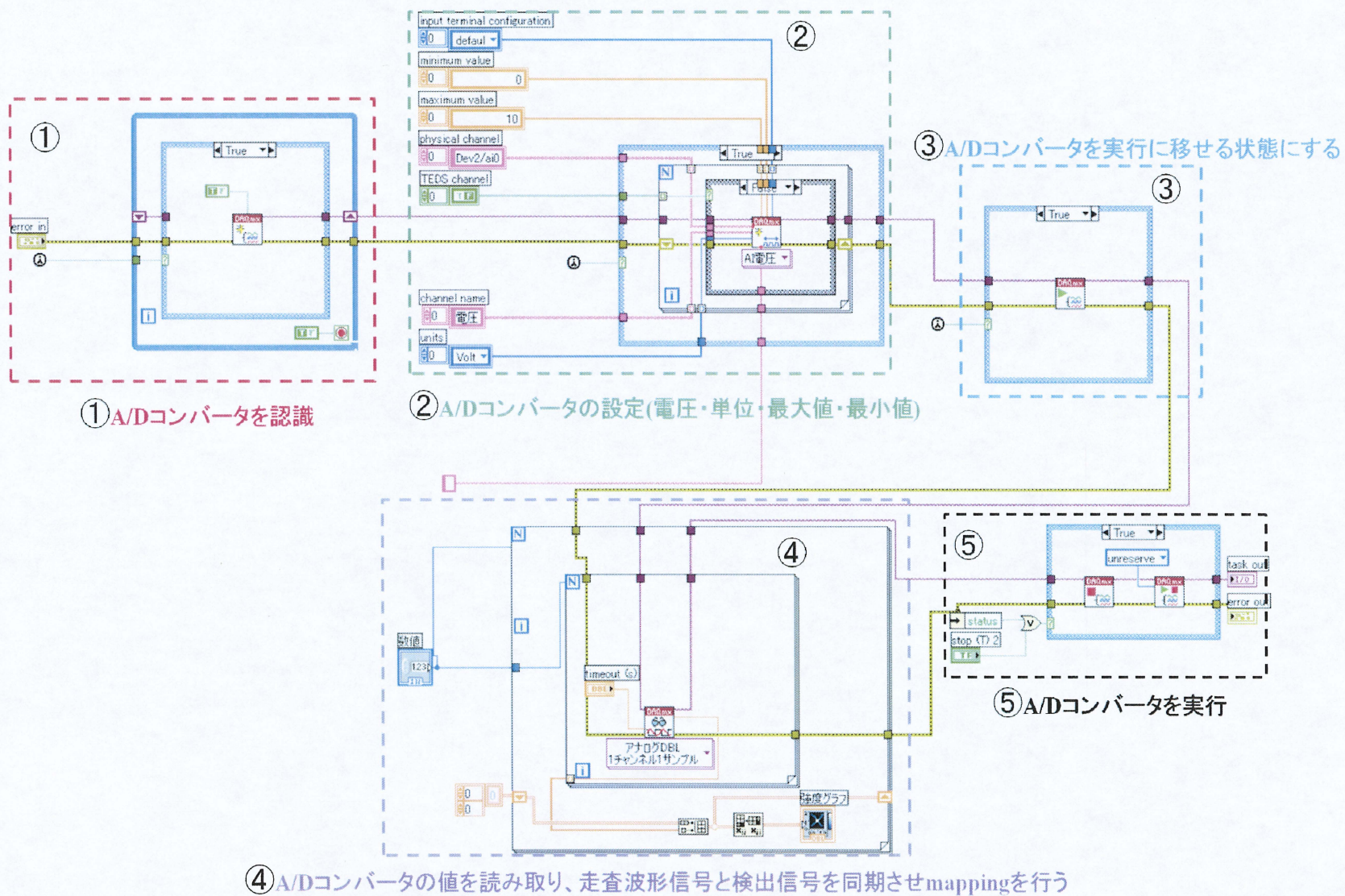


最後に画像化するプログラムをここで述べる。1 ピクセル毎の反射電子の電流強度をプリアンプ(テクネックス工房社製)介して電圧変換する。電圧信号の強度によって色の濃淡を決定するように設定し、画像化を可能にした。また、このプログラムを実現するためには、走査信号と画像化信号を同期させる必要があるため、1 ピクセル毎に正確に同期させた。得られた反射電子信号をデジタル変換する A/D コンバータを最終的に介して画像化される。プリアンプからのアナログ信号を A/D コンバータで変換し、信号の強度で二次元 mapping する LabVIEW プログラムを図 4-10 に示す。

まず、①赤色点線で囲った部分では、A/D コンバータの認識を行う。次に、②緑色点線で囲った部分では、A/D コンバータの設定を行う。本研究では A/D コンバータに入力する信号は電圧(V)であり、0~10V で信号を受ける設定を行う。そして、③青色点線で囲った部分では A/D コンバータが実行に移せる状態にすることを示す。そして、For ループの④紫色点線で囲った部分では信号強度に応じて mapping することを示し、同時に For ループ内で mapping を行うことで、走査信号と検出信号を同期させている。最後に⑤黒色点線で囲った部分では、A/D コンバータを実行に移す。このプログラムは①→⑤の順で実行される。

mapping は A/D コンバータの入力を 0~10V に設定し、0V で入ってきた信号は黒色、10V で入ってきた信号は白色に設定し、その間の値は色の補間を行い 16bit のグレースケールとすることで信号に応じた画像が得られるプログラムを開発した。

図 4-10 信号強度に応じて mapping を行うプログラム



また、その他の機能として、重畳した電圧が $\pm 100\text{V}$ を超えると GPIO の値が 4095 を超えてしまい、CH 番号が含まれる上位 bit を置き換えてしまう。そこで、 $\pm 100\text{V}$ を超えるとエラーメッセージが発生し、ラスタ走査を止めるようなプログラムを追加した。これにより電圧範囲を超えた人的ミスを防ぐように設定した。また、より高空間分解能の像を検出するときには分解能判定が便利のように解像度を変更できるように設定した。

開発したプログラムをまとめると、このプログラムは 8ch 同時に制御でき、1 画面取得時間が実時間観測可能である。そして、偏向電圧と非点補正電圧とアライメント電圧が重畳でき、偏向電圧・非点補正・アライメント電圧・解像度を 1 画面取得毎に変更できるように設定し、走査波形信号と反射電子信号を同期している。また、検出信号の強度に応じて画面上の色の濃淡が変化するように開発して、プリアンプのコントラスト・ブライツネス調整にも対応がとれるようになっている。

ここからは LabVIEW で作成した走査波形制御プログラムを実装し、その動作特性評価について述べる。4-3 節では 8ch 電源からの出力波形の確認について述べる。また、4-4 節では画像表示プログラムの動作確認のために、ファンクションジェネレータの出力を疑似信号とした動作特性評価について述べる。

4-3 非点補正電圧と走査波形電圧を重畳した電圧走査波形の特性評価

まず、一段目の偏向電圧の出力波形について述べる。出力波形の振幅は 70 V で、走査線数を 128×128(以下走査線数は変化させない)に設定した。振幅は電子プローブの走査範囲を一番大きくした(低倍率)。図 4-11(a)(b)に示す、オシロスコープの黄、青、桃、緑それぞれの波形は一段目の偏向器の電極 E_1, E_2, E_3, E_4 に印加する波形を示している。図 4-11(a)では、オシロスコープの横軸は 1 目盛 50 ms、縦軸は 50 V である。まず、X 方向の走査信号に着目する。図 4-11(a)において、電極 E_2, E_4 に印加する X 方向の走査波形は図 2-8(b)に示したラスタ走査を表す信号として出力されており、振幅 70 V の X 方向に走査された波形が出力されていることがわかる。尚、緑の波形の上側にだけ出た電圧オーバーシュートはプログラムの仕様によるものである。また、X 方向の走査波形が少し膨らんで見えるのは、出力画像をタイミングの関数で制御しているので、無視してもよいと判断した。LabVIEW の For ループ実行は時間で制御しているわけではなく、For ループ内の事象が実行されると、次の For ループに実行が移されるまでタイミングで制御しているため、線形でなくても良い。

次に Y 方向の走査信号に着目する。図 4-11(a)から、オシロスコープの横軸のレンジを 50 ms から 1 s に変化させた波形を図 4-11(b)に示す。図 4-11(b)に示すように電極 E_1, E_3 に印加する Y 方向の走査波形は図 2-8(c)に示したラスタ走査を表す信号として出力されており、振幅 70 V の Y 方向の走査波形が出力されていることがわかる。Y 方向に関しても、このプログラムはタイミングの関数で制御しているので、X 方向の走査波形が膨らんでいるように、Y 方向も微小ではあるが膨らんで出力されていることがわかる。

そして、二段目の偏向器の出力波形を、図 4-11(c)に示す。オシロスコープの黄、青、桃、緑それぞれの波形は二段目の偏向器の E_5, E_6, E_7, E_8 に印加する波形を示している。横幅の 1 目盛は 2.5s で縦軸の 1 目盛は 50 V である。一段目の偏向器より 45°ずらして二段目の偏向器が配置されていることから、波形は X 方向と Y 方向の両方成分で構成されている。また、4 つの電極に印加される波形の終始タイミングはすべて同じであり、8ch 電源から出力される電圧はすべて同じタイミングで印加されていることがわかる。

また、図 4-11(b)で示すように、Y 方向の走査波形をひとつ取得するのにかかる時間は約 6 秒弱であった。これは 1 フレーム画面取得するのにかかる時間で

ある。走査線のは数は 128×128 、 256×256 、 512×512 、 640×640 と変化できるため、像取得にかかる時間もそれに対応して約 6 秒、約 24 秒、約 96 秒、約 384 秒間要する。

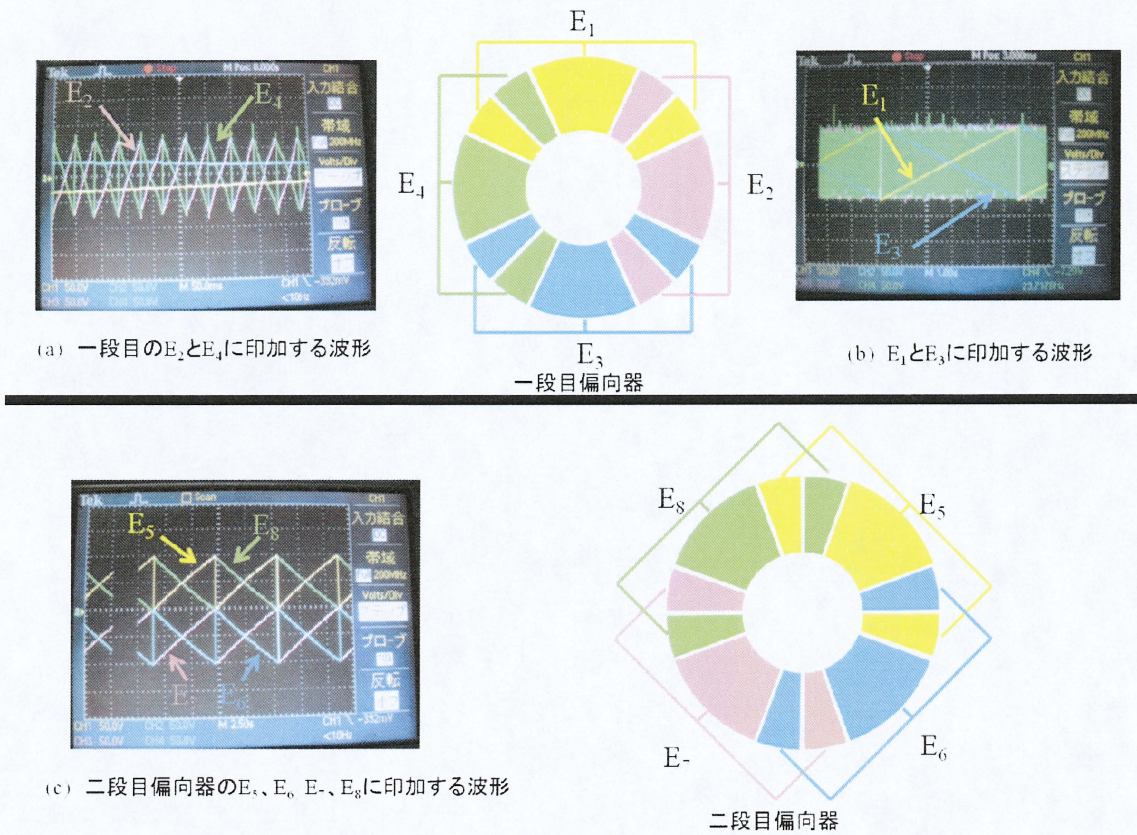


図 4-11 振幅 70V の各電極に印加する波形

そして、振幅 4 V の走査波形に、非点補正電圧を重畳させたものを図 4-12 に示す。図 4-12 の(a)~(d)で、オシロスコープの横軸は 1 目盛 1 s、縦軸は 1 目盛 5 V である。非点収差を補正するのは、走査範囲の狭いとき(高倍率)に主に用いる。図 4-11(a)の黄、青、桃、緑はそれぞれ一段目の偏向器の電極 E_1, E_2, E_3, E_4 に印加する振幅 4 V の走査波形を示す。そして、図 4-12(b)は図 4-12(a)で示した走査波形に非点補正電圧 $V_{stgX}=10$ V, $V_{stgY}=10$ V と重畳した波形を示す。図 4-12(b)のように非点補正電圧 $V_{stgX}=0$ V, $V_{stgY}=0$ V と比較して、X 方向と Y 方向の出力波形が 0 を中心に振幅 4 V で出力しているのに対して、Y 方向出力波形は -10 V 中心に、X 方向出力波形は 10 V 中心に振幅 4 V で出力しているのがわかる。これは式(3.1)~(3.4)の走査波形電圧と非点補正電圧が重畳されて、出力されていることがわかる。

次に、図 4-12(c)の黄、青、桃、緑の波形は二段目偏向器の電極 E_5, E_6, E_7, E_8 に印加する振幅 4 V の走査波形を示す。そして、図 4-12(d)は図 4-12(c)で示した走査波形に非点補正電圧 $V_{stgX}=10$ V, $V_{stgY}=10$ V と重畳した波形を示す。図 4-12(c)のように非点補正電圧 $V_{stgX}=0$ V, $V_{stgY}=0$ V と比較して、図 4-12(d)では、走査波形に式(3.5)~(3.8)の $V_{stgY}=10$ V、 $V_{stgX}=10$ V を重畳した波形となっている。このように式(3.5)~(3.8)の走査波形電圧と非点補正電圧が重畳されて、正確に出力されていることがわかる。つまりすべての偏向器に印加する走査波形と非点補正電圧を重畳させた出力波形プログラムが動作しているといえる。

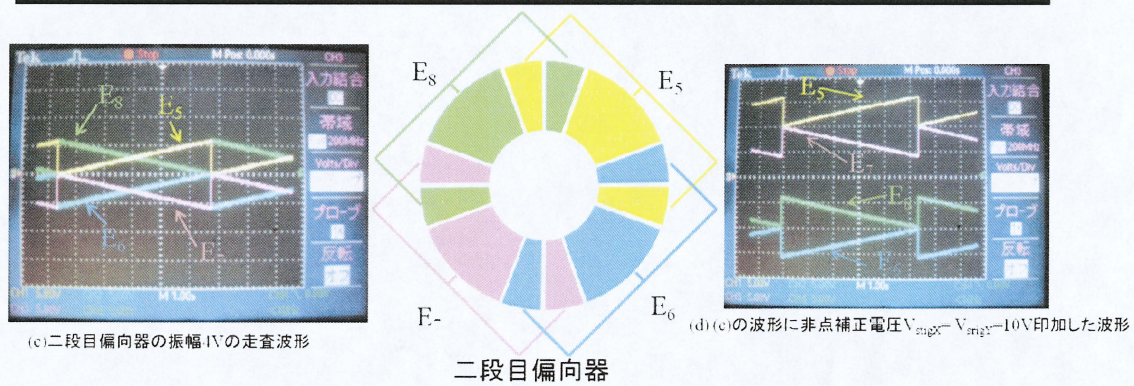
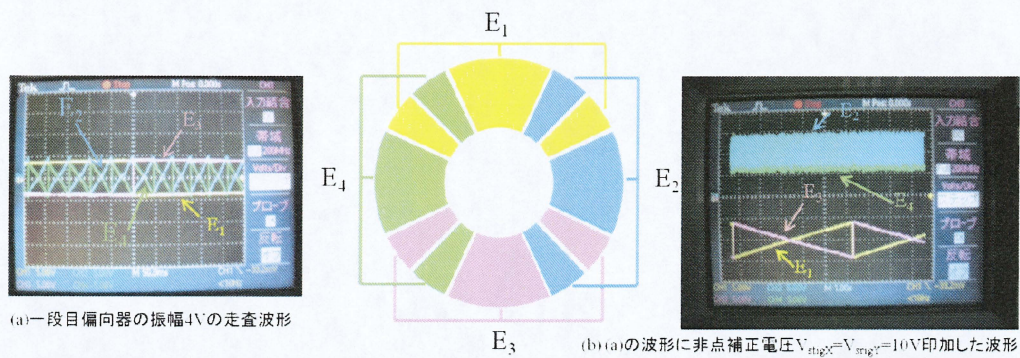
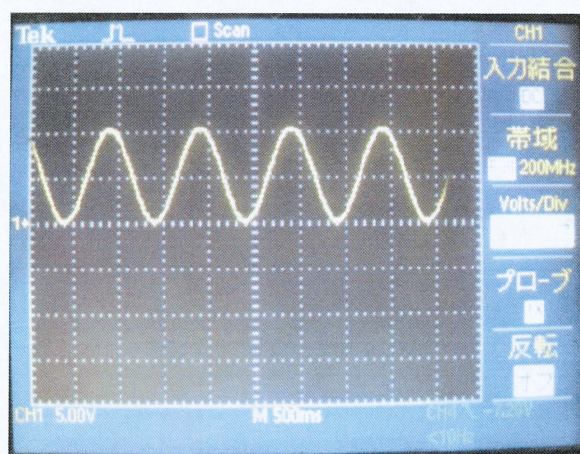


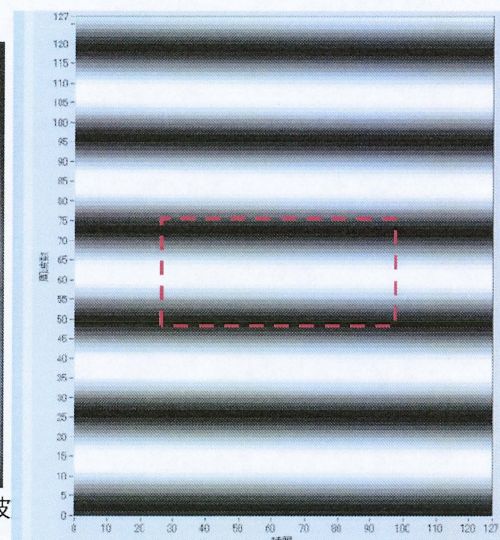
図 4-12 非点補正電圧を重畳させた波形

4-4 画像表示プログラムの動作特性評価

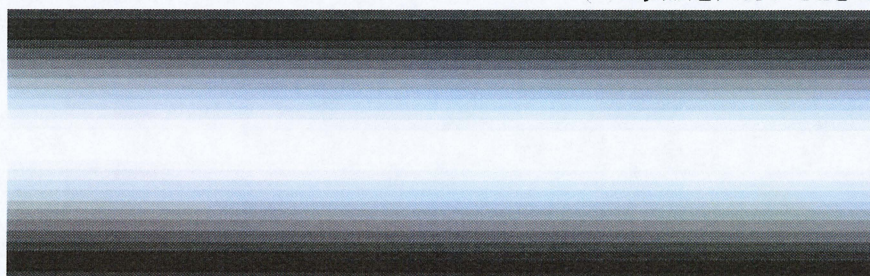
次に画像表示プログラムの動作特性評価を行う。まず、ファンクションジェネレータを用いて、図 4-13(a)に示す $E_{pp}=10\text{ V}$ 、周波数 1 Hz の正弦波を発生させる。この正弦波を A/D コンバータに入力して、画面に表示される画像プログラムの動作特性評価を行う。図 4-13(b)は図 4-13(a)の波形を入力した時の表示画面を示す。図 4-13(b)は周期性をもって、256 階調で色の濃淡が画面上に表示されている事がわかる。また、図 4-13(b)の赤点線で囲った部分を拡大したものを図 4-13(c)に示す。図 4-13(c)から、中心部分から外側に向けて徐々に色が白から黒に変わっていく様子が読みとれる。これは図 4-13(c)の中心部分が図 4-13(a)の正弦波の山のピークであり、ピークを中心に縦方向に白色の濃淡が徐々に黒に変化していることがわかる。つまり(a)の正弦波を濃淡したものが(b)になる。以上より、検出器に入射する反射電子の信号強度に応じて 256 階調で画像化を行うプログラムが動作しているといえる。



(a) ファンクションジェネレータを用いて発生させた正弦波



(b) 正弦波を入力したときの表示画面



(c) (b)の赤点線を拡大図

図 4-13 信号強度に応じて画像が変化する検証図

第5章 まとめ

液体 Li 陰極は大電流、高輝度の特徴を有しており、実時間観察可能な高分解能 X 線顕微鏡の陰極として有望である。そこで、液体 Li 電子源を搭載する高分解能透過型 X 線顕微鏡の新規開発を最終目標に、本研究では、まず X 線顕微鏡の分解能を決定する要素の一つである金属ターゲット上での集束一次電子線のプローブ径を評価するシステムを開発した。また、本透過型 X 線顕微鏡の光学システムは電界放出型液体 Li 陰極の搭載を目的に最適化されている。

第 1 章では X 線顕微鏡の歴史と各 X 線顕微鏡に搭載されている様々な電子源について述べ、その中でも液体 Li 電子源は有望電子源として期待されていることを紹介した。

第 2 章では、電子光学の基本的な理論について述べた。X 線顕微鏡を作製するために、参考にした金属ターゲット選定や X 線発生領域の広がりについても記載した。また、集束一次電子線のプローブ径評価に用いるラスタ走査の電気的な理論を述べた。

第 3 章では、新規設計・作製した液体 Li 電子源を搭載するため高分解能 X 線顕微鏡とそれを構成する各要素について述べた。また、集束一次電子線のプローブ径評価システムを付け加えたことについて述べた。そのシステムは電源の数を減らすために不等分割された十二極子偏向器と Si フォトダイオードを素子にした反射電子検出器で構成されている。

第 4 章の前半では、集束一次電子線のプローブ径評価システムのハードウェア構成とソフトウェア構成について述べた。ハードウェア構成は十二極子偏向器に電圧を印加する特注電源とそれを制御するデジタル I/O ボード、そして反射電子検出器からの信号をデジタル信号に変換する A/D コンバータから構成されている。そして、これらのハードウェアを制御するのに LabVIEW を用いた。ソフトウェア構成では、ラスタ走査の走査速度を向上させた事、そして、十二極子二段の偏向器に走査波形電圧と非点収差補正電圧を重畳させたプログラムを開発した事について述べた。また、同時に反射電子信号の強度に応じて画像化を行うプログラム開発についても述べた。第 4 章の前半で述べた、開発したプログラムの動作特性評価を行った。十二極子偏向器に印加する出力波形をオシロスコープで動作確認し、所望の波形が出力されていることを確認した。そして、ファンクションジェネレータで発生させた $E_{pp}=10\text{ V}$ 、周波数 1 Hz の正弦波波形を A/D コンバータに入力して、画像の変化について画像化プログラムの動作評価を行った。

このシステムを用いて、プローブ径評価ができれば、試料を金属ターゲットと Be 窓に変えると X 線顕微鏡として動作できる。

参考文献

- [1] W.C.Rontgen: Nature(London)53,274(1896)
- [2] M. von Ardenne: Naturwiss **27**, 485 (1939)
- [3] V.E. Cosslett, W.C. Nixon: The X-ray shadow microscope, J. Appl. Phys. **24** (1953)
- [4] M.Watanabe,H.Kai,K.Yada and B.Willis,"X-Ray Microscope Achieves 0.4-Micro Resolution."Review of progress in quantitative nondestructive evaluation",Vol.21A,pp606-612.American Institute of Physics(2001)
- [5] K.Minami,Y.saito,H.Kai,K.Shirota and K.Yada,"High Resolution Projection X-Ray Microscope Equipped with Fluorescent X-Ray Analyzer and Its Applications",9th International Conference on X-ray Microscopy,Book of Abstracts p153(2008)
- [6] 畑 浩一,藪下 綾介,岡田 知幸:表面科学,29(11),682(2008)
- [7] 畑 浩一, 大下 昭憲:電子顕微鏡 **31**, 51 (1996)
- [8] J. Goldstein, D. Newbury, D. Joy, C. Lyman, P. Echlin, E. Lifshin, L. Sawyer and J. Michael, Chapter 3 in Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis (Springer, New York, 2003), pp. 271-275.
- [9] V.E.Cosslett and W.C.Nixon: The X-Ray Shadow Microscope. *J. Appl. Phys.* **24**, 616-623 (1953).
- [10] T.Mitsui,W.Hiraoka,T.Horikoshi,H.Chiba,and K.Yada;Construction of a Projection X-Ray Microscope and Its Application to Biological Studies Part1 Structure and Performance of the Microscope.(1994)
- [11] 石川 順三:荷電粒子ビーム光学,コロナ社:pp50-52
- [12] 石川 順三:荷電粒子ビーム工学,コロナ社:pp103-105
- [13] C.W.Oatley:走査電子顕微鏡,コロナ社 pp64-pp72
- [14]走査電子顕微鏡:日本電子顕微鏡学会関東支部,共立出版社,pp34-36
- [15]走査電子顕微鏡:日本電子顕微鏡学会関東支部,共立出版社,pp2-pp4
- [16] E.Monro:Proc.15th Euro.Cong.Electron Microscopy1,P22(1972)
- [17] 電子光学入門, Journal of Surface Analysis Vol.14, No. 3 (2008) pp. 243-266
- [18] 裏克己: 電子・イオンビーム工学.共立出版社
- [19] T,T,Tang and J,P,Song:Side pole-gap magnetic electron lenses.optik **84**:pp108-112(1990)
- [20] K.Tsuno,N.Handa,S.Matsumoto and A. Mogami :Optical properties of immersion objective lenses and collimation of secondary electrons in low voltage SEM(1996)
- [21]J.Goldstein,D.Newbury,D.Joy,C.Lyman,P.Echlin,E.Lifshin,L.Sawyer and J.Michael, Chapter 3 in Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis(springer,New York,2003),pp279
- [22] K.Kanaya and S.Okayama.Phys.D,5,pp43-pp58(1972)
- [23] K.Hata,H.Akahori,T.Takemoto,Y.Saito,A.Ohshita: Control of emission current from a Li/W(111) field emitter by sequential deposition of Li: Surface Science **146** P387-390(1999)

謝辞

本研究の遂行にあたり、熱心な御指導、激励および貴重な御意見を賜った三重大学大学院工学研究科の畑 浩一教授、永井 滋一助教に深く感謝致します。梶原 和夫客員教授、岩田 達夫客員教授には研究において大変貴重な御助言を頂き、深く感謝致します。また、小林 嘉技術職員には、実験装置の加工など技術面で多大なご協力を頂きました。ありがとうございます。

本 X 線顕微鏡を作製するにあたり、光学シミュレーションに関して御協力、御助言を頂いた、元日本電子株式会社 津野 勝重氏および鏡体設計及び機械加工に御協力、御助言頂いた伊藤設計事務所 伊藤 匡氏に深く感謝致します。

当研究室 M1 の長井 遼君、伊藤 雅智君、鈴木 優介君、浅井 貴之君、内田 直志君、B4 の土手 徳人君、長縄 陽介君には実験を手伝って頂いたことや、研究生活を共に励ましあえて、深く感謝致します。また、有益な大学院生活を共に過ごしてくれた M2 の大川 隆太君、杉浦 康史君をはじめ、研究室のみなさん、卒業生および出会ったすべての人に感謝致します。

そして、最後に学生生活を支えてくれた家族に心から感謝申し上げます。

付録1 Be窓設計図

