

タングステン ポイントフィラメントの 電界放出模様を観察 (III)

バイアス電圧の影響について

竹松 英夫 北村 隆 森田 千明

Observations of the Field Emission Pattern of Tungsten Point-Filament (III) The Effects of the Bias Voltage

Hideo TAKEMATSU, Takashi KITAMURA, Chiaki MORITA

In order to study the electron optical properties of a point filament in the electron microscope gun, this experiment has been worked. Successive observations of the field emission patterns of a point filament were made by variation of the bias voltage. As a result it was found that the brightness and size of the pattern depended on the bias voltage, and the field emission pattern and the thermoionic pattern were superposed in the case of using the filament at higher temperature. It may be said that the pre-treatment of the filament has an effect on the field emission pattern at lower temperature.

まえがき

電子顕微鏡の電子銃に用いられるポイントフィラメントの電子光学的性質を明らかにするために、我々はその先端からの電界放出模様の観察から研究を進めている。前報告¹⁾ まではウェーネルト電極を持たない、いわゆる、Müller型電子顕微鏡で観察をしていたが今回はウェーネルト電極を取り付け、それがどのような影響を及ぼすかについて調べているので報告する。

実験方法

ポイントフィラメントの先端、および、ヘアピン部分は共に前回の $\frac{1}{2}$ の直径 0.1 [mm ϕ] の市販のタングステン線を用いた。作製方法は前報告¹⁾ と同様である。ただ $1N$ の $NaOH$ 水溶液で電蝕をする前の 10^{-6} (Torr) 程度の真空中での加熱は約 2.4 (Amp) 15分間とする。

電極系は Fig 1 のような寸法であり、ウェーネルト電極は $D_1=1.5$ [mm ϕ] および 0.8 [mm ϕ]、 D_1' はそれぞれ 2.7 [mm ϕ]、 1.5 [mm ϕ] の2種類である。蛍光板はそれらのウェーネルトの穴径により、陽極板からそれぞれ、 7 [cm]、 9 [cm] の位置に置き、蛍光板の後の超真空蒸着装置の窓から放出模様を観察し、撮影する。

観察方法は陰極先端の位置、すなわち、引込み“ g ” (Fig. 1) を色々変化させてセットし、真空度が 10^{-8} Torr 台に到達してから、脱ガスのためにフィラメントを 2.0

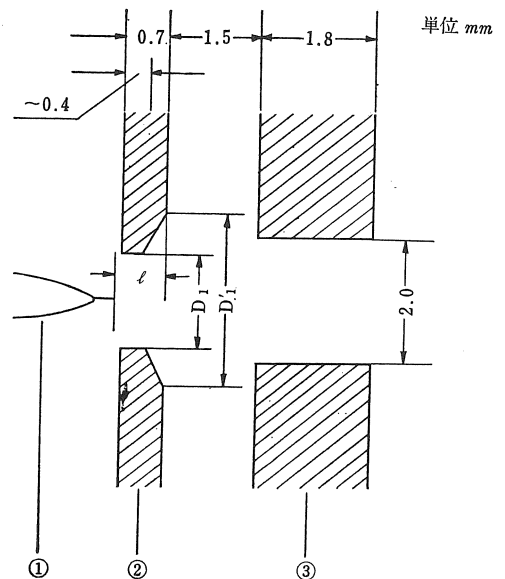


Fig. 1. 電極系の寸法
① ポイントフィラメント
② ウェーネルト電極
③ 陽極

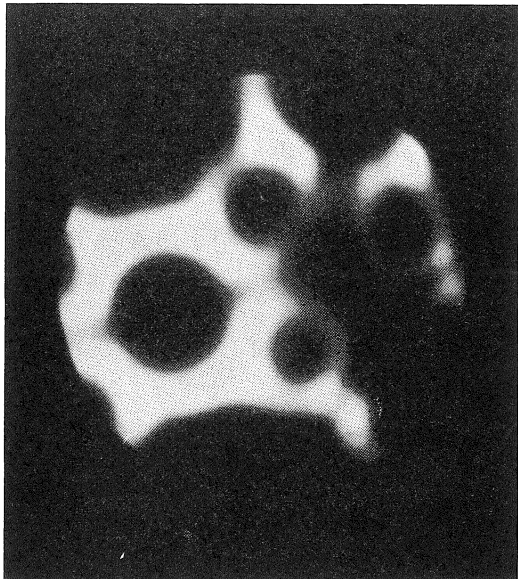


Fig. 2. $\ell=0.0$ [mm], 加熱電流 1.7[Amp]
加速電圧 5.1[KV], バイアス電圧 0[V]



Fig. 3. (b) バイアス電圧 -100 [V]

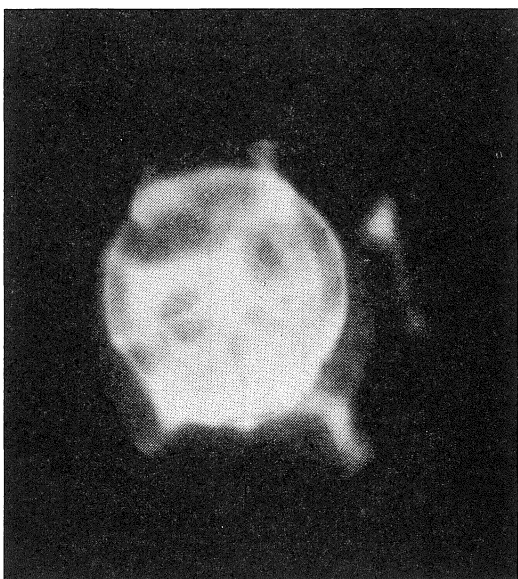


Fig. 3. (a) バイアス電圧 0 [V]

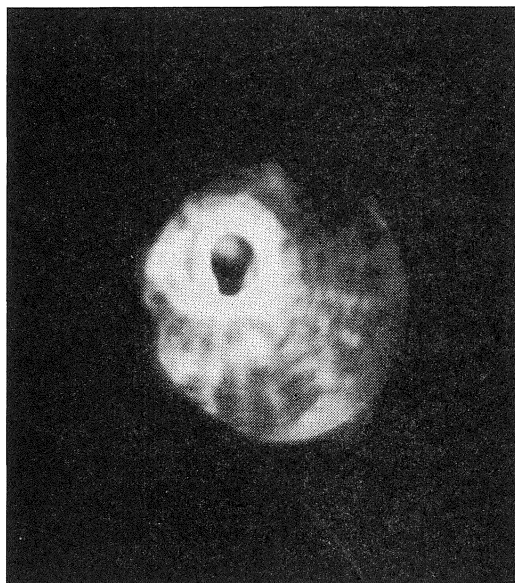


Fig. 3. (c) バイアス電圧 -300 [V]

Fig. 3. $\ell=0.2$ [mm] 加熱電流 1.8[Amp]
加速電圧 9.0[KV]

[Amp] で5分間程度の予備加熱を行う。次に、希望する加熱電流値、すなわち、陰極先端温度にし、電流値が安定するまで5分程度待ってから、バイアス電圧（ウェーネルト電圧）0[V]の状態のまま陽極電圧、すなわち、電子加速電圧を0から徐々に上昇させ、電界放出模様の全体が見分けられる電圧を測定する。更に、加速電圧を上昇させ、電界放出模様が鮮明になった所で固定する。次に、バイアス電圧（ウェーネルト電圧）を種々変化させ、放出模様への影響を観察する。また、フィラ

メント加熱電流も適宜変化させる。

なお、陰極先端の位置の測定、および、中心合せは倒立型金属顕微鏡を用いて行っている。観察中の真空度は常に 10^{-8} [Torr] 台である。

実験結果

(i) ウェーネルト電極 $D_1=1.5$ [mm ϕ] $D_1'=2.7$ [mm ϕ] の場合

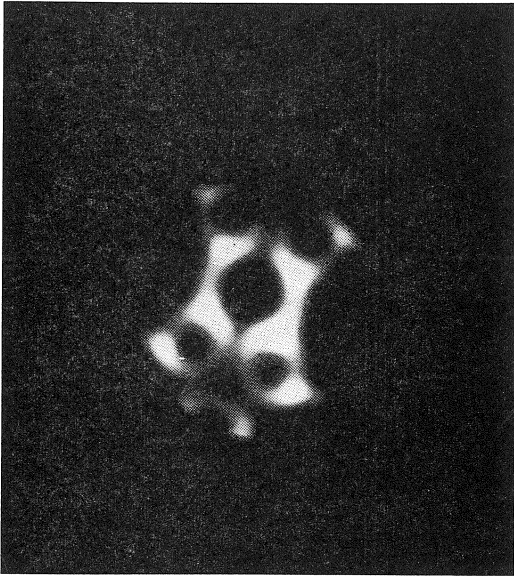


Fig. 4. (a) バイアス電圧 0[V]



Fig. 4. (c) バイアス電圧 -300[V]

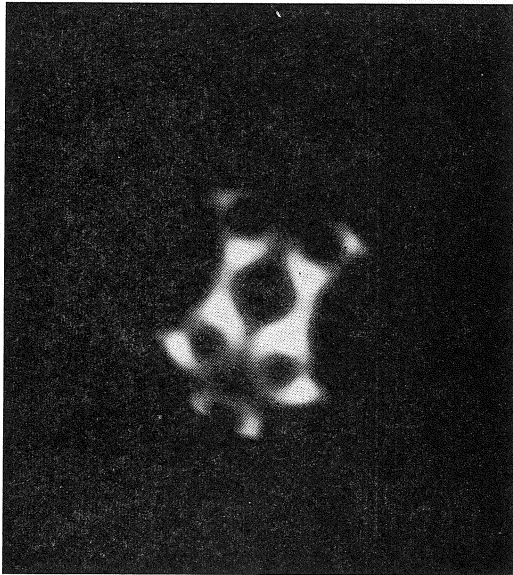


Fig. 4. (b) バイアス電圧 -100[V]

陰極先端の位置, すなわち, 引込み l を 0[mm] から順次増して行き, 電界放出模様を観察すると, 例えば, ウェーネルト電圧 0[V] において, 引込み l が 0[mm] では (電子) 加速電圧約 4[KV] 以上で電界放出模様が蛍光板上で確認でき, 5.1[KV] で Fig. 2 のような写真が得られる. 次に, 同じ先端を $l=0.2$ [mm] に引込めると, 加速電圧約 7.5[KV] 以上で電界放出模様が確認でき, 9.0[KV] で Fig. 3(a) が得られる. この写真で明らかのように, (フィラメント) 加熱電流が Fig. 2 では, 1.7[Amp] に対して, Fig. 3(a) では 1.8[Amp] に上昇

Fig. 4. $l=0.4$ [mm] 加熱電流 1.6[Amp]
加速電圧 12.0[KV]

しているため, 熱電子流が多くなり, 電界放出模様に熱電子によるものが重畳した放出模様となっている. 更に加熱電流を増すと熱電子流が増大して電界放出模様は判別出来なくなる.

更に, $l=0.4$ [mm] に引込めると, (上記のものと同様の先端であるが) 加速電圧約 9[KV] 以上で確認され, 12.0[KV] で Fig. 4(a) が得られた. これから, 引込み l が増すほど電界放出模様の観察は当然, より高い加速電圧を必要とすること, 放出模様の円形の面積が小さくなり, それ以上に電界放出模様の寸法が小さくなることから観察される. なお, $l=0.5$ [mm] 以上引込めると, ウェーネルト電圧 0[V] においても, 加速電圧 13[KV] 以下では電界放出模様は見られず, 熱電子放出によるもののみであった.

次に, ウェーネルト電圧による変化については, 前述の Fig. 3(a) の状態でウェーネルト電圧のみ 0[V] から -100[V], -300[V] とすると, それぞれ, Fig. 3(b), (c) のようになり, 熱電子放出による模様が非常に変化していることがわかる. また, Fig. 4(a) の状態で同様に -100[V], -300[V] をにすると, それぞれ Fig. 4 (b), (c) が得られ, バイアス順次深くして行くことにより電界放出模様の寸法がやや小さくなり, 暗くなって行くことが観察される. この寸法が小さくなることは Fig. 3 でもわかるが, l が増すほど, 顕著になる傾向がある. Fig. 4(c) の状態から更にバイアス電圧を深くし行くと遂には電界放出模様は消えてしまう. しかし, 消

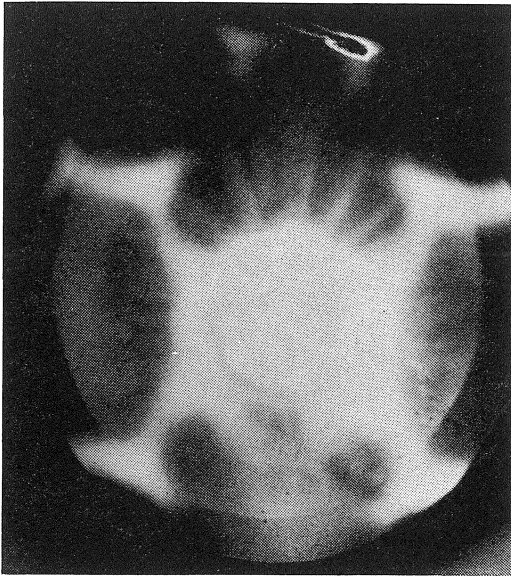


Fig. 5. (a) バイアス電圧 0[V]

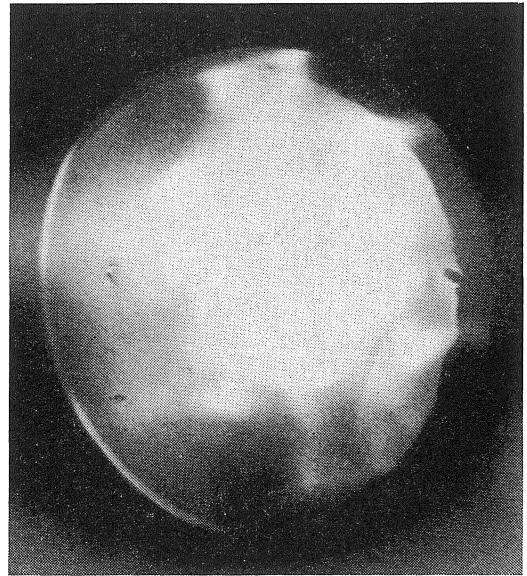


Fig. 6. (a) バイアス電圧 0[V]

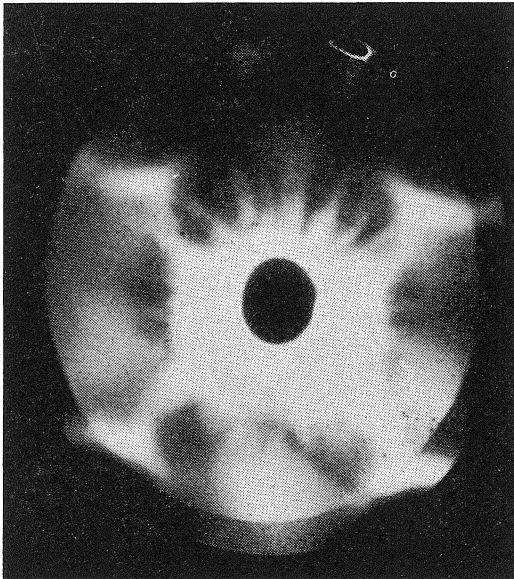


Fig. 5. (b) バイアス電圧-200[V]

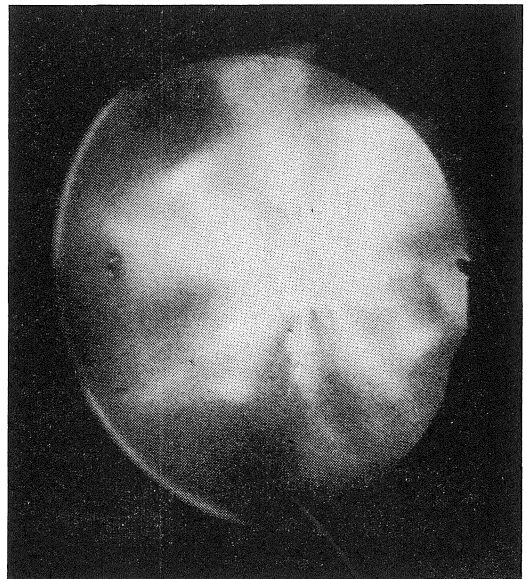


Fig. 6. (b) バイアス電圧-100[V]

Fig. 5. $\ell=0.0[\text{mm}]$ 加熱電流 1.9[Amp]
加速電圧 13.8[KV]

えてしまうまでの間にその電子流が光軸と交わることは観察されなかった。

(ii) ウェーネルト電極が $D_1=0.8\text{mm}\phi$, $D_1'=1.5\text{mm}\phi$ の場合

ウェーネルト電極の穴径が小さくなると、引込み ℓ が $0[\text{mm}]$ であっても、加速電圧を 12KV 以上に上昇させないと電界放出模様が観察されなくなる。例えば、ウェーネルト電圧 0[V] で、加速電圧 13.8[KV] において

Fig. 5(a) のような写真が得られている。 $\ell=0.1\text{mm}$ にすると 15(KV) 程度以上で観察され、加速電圧 16.0(KV) で Fig. 6(a) が得られた。

逆に、 $\ell=-0.1\text{mm}$ すなわち先端をウェーネルト面より外に出すと、約 11(KV) で電界放出模様が観察され、Fig. 7 のような高温部の電界放出模様も得られている。引込み ℓ による放出模様の寸法の変化も、前述の穴径 $D_1=1.5[\text{mm}\phi]$ のときと同様で $\ell=-0.1[\text{mm}]$ と $\ell=0.0[\text{mm}]$ であるところの Fig. 7 と Fig. 5(a) とではあまり変化がないが $\ell=0.1[\text{mm}]$ である Fig. 6(a) はそれら

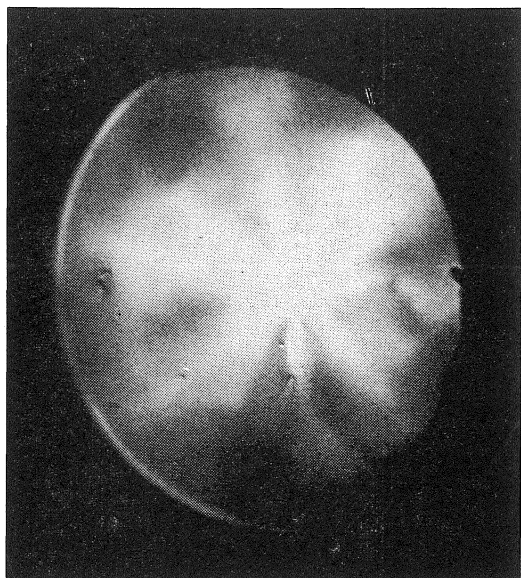


Fig. 6. (c) バイアス電圧 $-200[V]$

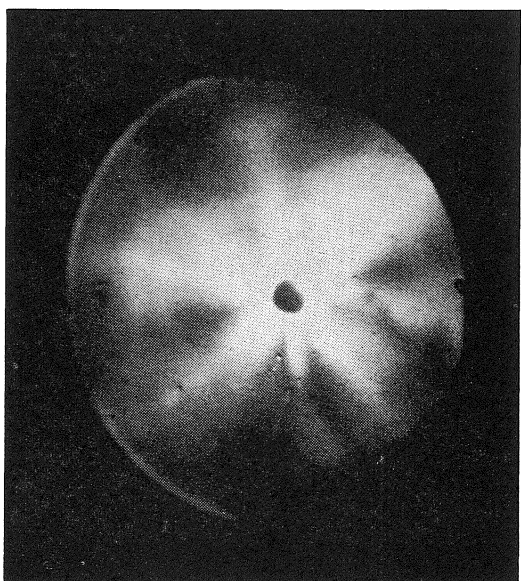


Fig. 6. (d) バイアス電圧 $-300[V]$

Fig. 6. $\ell=0.1[mm]$ 加熱電流 $1.57[Amp]$
加速電圧 $16.0[KV]$

よりも小さくなっている。バイアス電圧のみを深くして行く場合も $D_1=1.5[mm\phi]$ の場合と同様で放出模様は小さくなる傾向がある。例えば、Fig. 5(a) の状態でウェーネルト電圧を $0[V]$ から $-200[V]$ にした Fig. 5(b) と比べるとわずかではあるが後者の方が小さいことがわかる。

また Fig. 6(a) の状態でバイアス電圧のみ $-100[V]$, $-200[V]$, $-300[V]$ と深くして行くと Fig. 6 の (b),

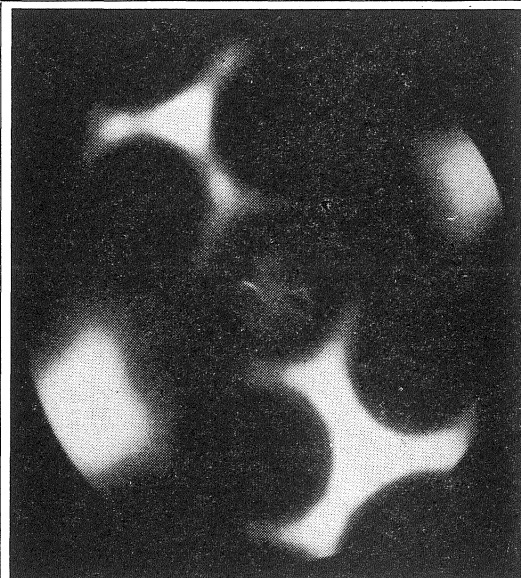


Fig. 7. $\ell=-0.1[mm]$ 加熱電流 $1.6[Amp]$
加速電圧 $12.3[KV]$ バイアス電圧 $0[V]$

(c), (d) となり、 $-200[V]$ 近くで電界放出模様は判別しにくくなり、 $-300[V]$ である Fig. 6.(d) ではもはや熱電子放出による模様のみと思われる。

(iii) 予備加熱における温度の相違による影響

実験方法で述べたように、実験を初める前に予備加熱として $10^{-8}(\text{Torr})$ 台の真空中で $2.0[Amp]$, 5分間フィラメントを加熱している。この加熱により先端は表面張力によるタングステン原子の移動により適当なまるみとなると考えられる²⁾。しかし、作製したポイントフィラメントの不揃いにより加熱電流を $2.0[Amp]$ に一定としても、温度が多少異ってくる。そこで、我々は真空系の外の電流端子間の電圧を測定し、その温度が低い(端子電圧が低い)場合の影響について、ウェーネルト電極が $D_1=0.8mm\phi$, $D_1'=1.5mm\phi$ のときに調べたので付け加える。

陰極先端の引込み $\ell=0.0[mm]$ において、 $2.0[Amp]$, $1.08[V]$ 5分間予備の加熱を行った後、 $1.88[Amp]$ に下げ5分間待つてから、ウェーネルト電圧 $0[V]$ のまま加速電圧を $0[V]$ から上昇させると、約 $6.5[KV]$ 近くから電界放出模様が観察され、 $8.1[KV]$ では Fig. 8.(a) のような写真が得られた。この状態でウェーネルト電圧を種々変化させ約20分間、および加熱電流を $2.0[Amp]$ にして、同様約20分間観察をつづけた。次に、一旦、加速電圧を $0[V]$ にして、 $2.2[Amp]$, $1.54[V]$, 5分間の予備加熱を行い、 $1.9[Amp]$ に下げ、加速電圧を加えると、 $12[KV]$ 以上で電界放出模様が観察され、 $13.8[KV]$ では前述の Fig. 5(a) となった。これからわかるように、

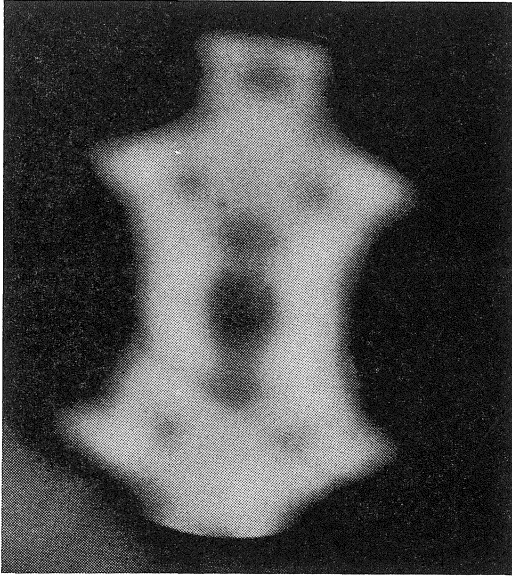


Fig. 8. (a) バイアス電圧 0[V]

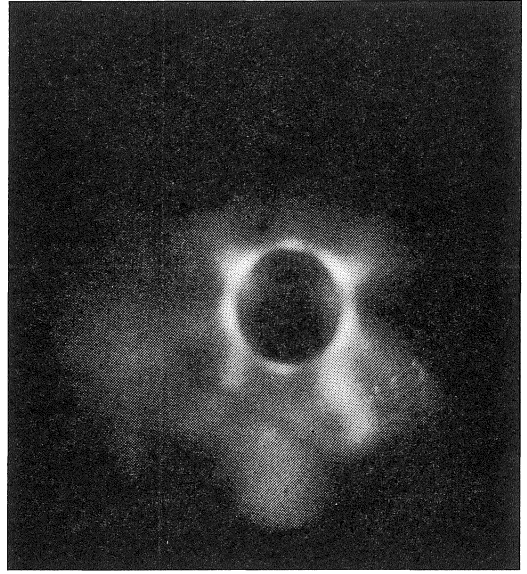


Fig. 8. (c) バイアス電圧 -400[V]

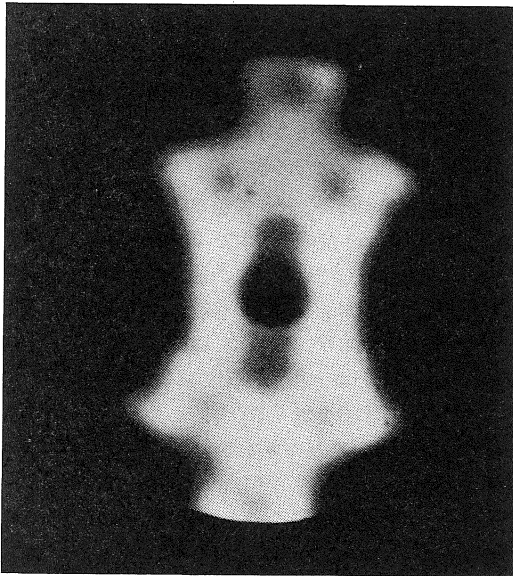


Fig. 8. (b) バイアス電圧 -200[V]

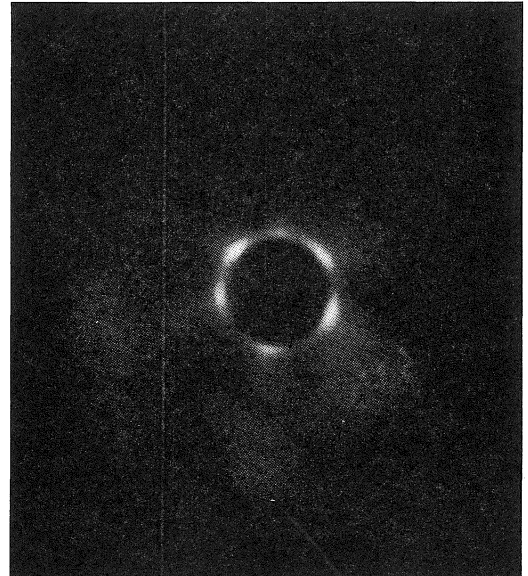


Fig. 8. (d) バイアス電圧 -500[V]

Fig. 8. $\ell=0.0$ [mm] 加熱電流 1.88[Amp] 加速電圧 8.1[KV]

予備加熱温度が低い場合は電界放出模様が小さく、低い加速電圧でも観察できる。

Fig. 8(a) の状態で バイアス電圧のみ -200 [V], -400 [V], -500 [V] と変えて行くと、それぞれ、Fig. 8(b), (c), (d) となり。前述と同様、電界放出模様が寸法が小さくなると共に暗くなる、 -500 [V] の Fig. 8(b) ではもはや電界放出模様は消えてしまい、熱電子放出によるもののみとなった。

$\ell=0.1$ [mm] では、 2.0 [Amp], 0.79 [V] の先端にお

いて、 10 [KV] 以上で電界放出模様が観察され、ウェーネルト電圧 12.0 [KV]で Fig. 9 の写真が得られる。バイアス電圧の影響も前述と同様な傾向が見られた。

予備加熱温度の相違によって、電界放出模様の確認できる加速電圧の差異は陰極先端の曲率半径の違いと考えられる。加熱時間が一定で加熱温度が低くければ、曲率半径が小さくなる³⁾ことから、同じ加速電圧において、曲率半径が小さいほど、先端表面の電界が高くなる²⁾ことを考えれば了解できる。電界放出模様の寸法の大小に

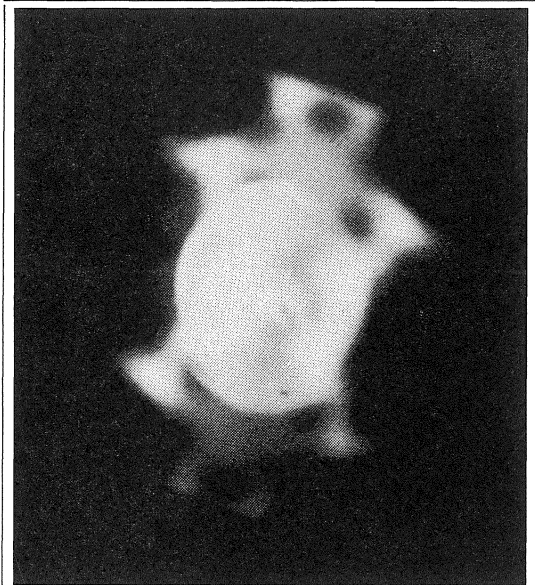


Fig. 9. $l=0.1[\text{mm}]$ 加熱電流 2.03[Amp]
加速電圧 10.1[KV] バイアス電圧 0[V]

については、加速電圧の相違によって、当然放出模様の倍率も変わってしまうので、今の所ははっきり断定できない。

考 察

以上の結果から、ウェーネルト電圧が 0[V] であっても、引込み l が増すほどより高い加速電圧を必要とすること、およびバイアス電圧が深くなるほど電界放出模様が暗くなることについては、ウェーネルト電極、および、電圧によって陰極先端の表面電界の低下がありうることを考えれば当然であろう。

なお、 l が増すほど、また、バイアス電圧が深くなるほど全体の放出模様、および電界放出模様の寸法が小さくなることについては、ウェーネルト電極、および、陽極によるレンズ作用によるものと考えられる。

以上のことから言える事は、電子顕微鏡にポイントフィラメントを使用して、電界放出による高輝度の電子線を得るためにはフィラメントを浅く位置させることが必要であろう。

以上述べた限りに於ては、実験結果の定性的な考察を示しただけであるが、我々は他方実験条件と関連して、ポイントフィラメント先端の電位分布及び電子軌道の算出を電子計算機を用いて行いつつあるので、その結果に依り総合的に定量的な考察を行う計画である。

それにしても、この報告に於ける電子銃の実験条件は、実際に使用されている電子顕微鏡の電子銃と次の点に於いて相違している。

1) 陽極とウェーネルト電極の距離が実際のもは、20mm 前後であるのに対して前述の様に遥かに小さい

事。

2) 従って加速電圧が実際の 50KV, 75KV, 100KV, であるに対して 10KV 前後である事。

3) 真空度が $10^{-8} \sim 10^{-6} [\text{Torr}]$ 台が実際の場合であるが、我々は $10^{-8} [\text{Torr}]$ 台の高真空で行った事。

我々の差し当りの研究目的が、実際に使用している電子銃のポイントフィラメントの電子光学的諸性質の解明にあるのであるから、1), 2) の点に於いては、電子放出模様と、電子計算機による両者の銃に於ける電位分布の算出等に依り、実際の銃の動作時の条件とこの本実験の条件が如何なる関連を持つかを明確にする事がこの研究の肝要なまとめと考えている。

なお、真空度に就いては、我々の実験を差し当り電界放出模様の観察に限るとしても陰極の温度を室温から高度まで変化させて行いたい希望もあるので、低温での電界放出も安定で、放電も少なく、実験が容易であることを考える時此の程度の真空度で行う事が効果的であった。

なお、将来は冷陰極放出のみの電子銃を研究して行きたい考えもあるのでこの真空度を選んだ。

終りに、日頃、御討論下さっている名古屋大学の丸勢教授に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 愛知工業大学研究報告, 第 3 号 P. 37
- 2) Dyke. W.P, & W.W. Dolan: "Advsneces in Electronics and Electron Physics" VIII P. 89 (1956) New York
- 3) Dyke. W.P. et al: J. App. Phys. 31, P 790 (1960)