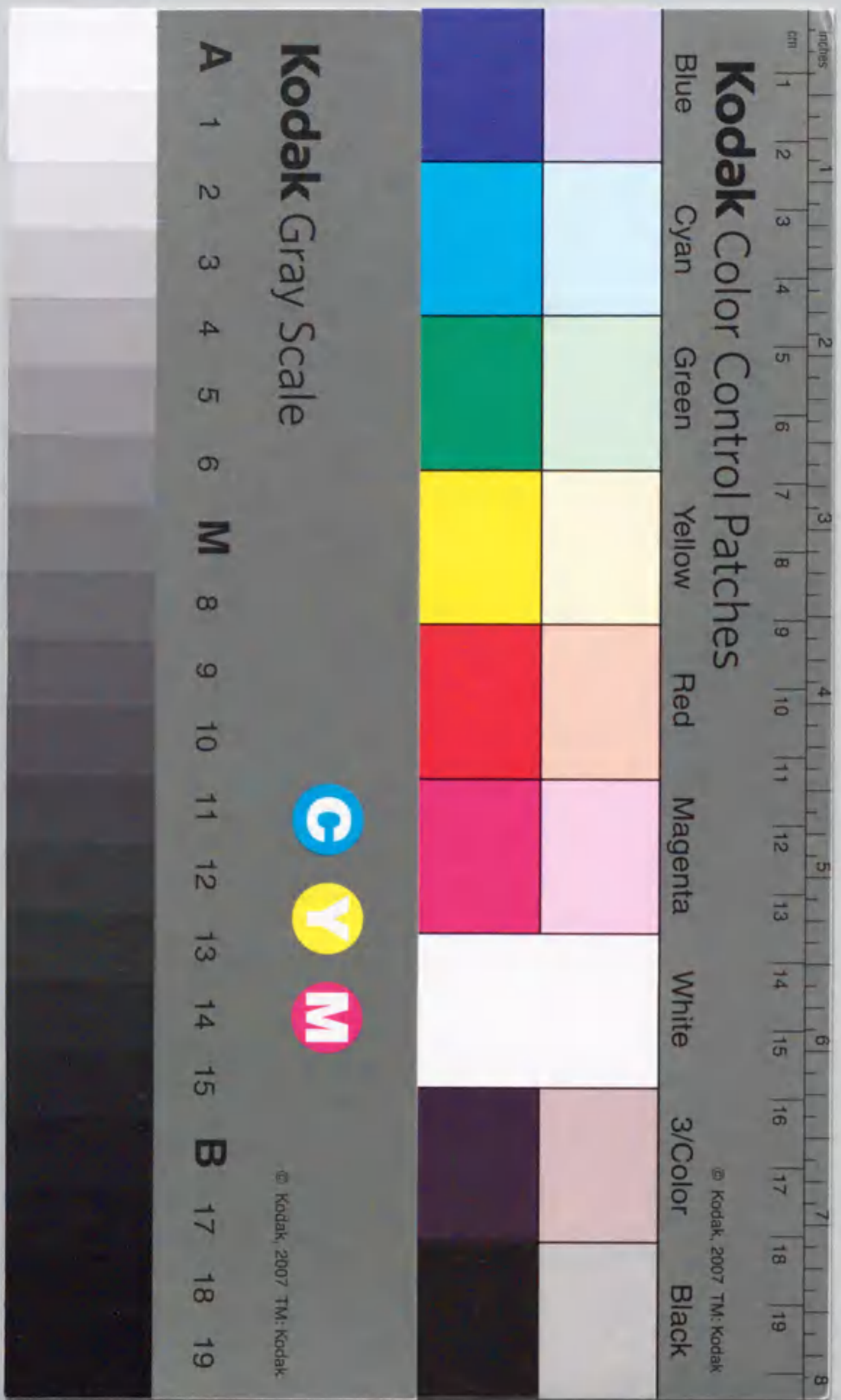


電子衝撃局所加熱方式電子銃
に関する研究

飯吉 僚



電子衝擊局所加熱方式電子銃
に関する研究

飯吉 僚

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の目的	7
1.3 本論文の概要	9
第2章 電子衝撃局所加熱方式電子銃の設計・製作	12
2.1 はじめに	12
2.2 従来のポイント陰極電子銃の輝度と寿命	12
2.3 予備実験による陰極加熱用電子銃の検討	17
2.3.1 従来の陰極加熱用電子銃	18
2.3.2 予備実験のために試作した電子銃	20
2.3.3 実験結果と問題点	21
2.3.4 改良方法の検討	26
2.4 収束用電極を付加した局所加熱用電子銃	34
2.4.1 電子銃の構成	34
2.4.2 特性の評価	36
2.4.3 数値解析による特性の検討	37
2.5 最終的に決定した電子銃の構造	40
2.6 まとめ	47
第3章 電子放出特性と寿命	49
3.1 はじめに	49
3.2 陰極加熱特性	49
3.3 電子放出特性	53
3.3.1 バイアス-放出電流特性	53

3.3.2 輝度特性	55
3.4 寿命	60
3.4.1 陰極形状	60
3.4.2 バイアス電圧特性と寿命	62
3.4.3 先端後退速度の検討	64
3.5 漏れ電子	65
3.6 まとめ	67
第4章 陰極の先端曲率半径	69
4.1 はじめに	69
4.2 陰極先端の観察	70
4.3 先端曲率半径に影響する要因	70
4.3.1 表面張力	70
4.3.2 表面の電界	73
4.3.3 蒸発	73
4.4 表面張力と蒸発を考慮した先端曲率半径	74
4.5 まとめ	78
第5章 最適動作のための電子衝撃条件の検討	80
5.1 はじめに	80
5.2 衝撃電子密度分布	80
5.2.1 計算方法	81
5.2.2 計算結果	85
5.3 陰極の温度分布と蒸発	97
5.3.1 計算方法	97
5.3.2 計算結果	101
5.4 電子衝撃条件の検討	108
5.5 まとめ	111

第6章 LaB ₆ 陰極を用いるとき期待される輝度と寿命	113
6.1 はじめに	113
6.2 計算方法	113
6.2.1 輝度	115
6.2.2 蒸発速度	115
6.3 比較結果	116
6.4 まとめ	118
第7章 結論	120
謝辞	124

第1章 序論

1.1 研究の背景

電子顕微鏡や電子ビーム微量分析装置は、 μm から nm に至る微小領域の観察および分析用装置として、幅広い分野で利用されている。また、同様の電子光学系で構成される電子ビームリソグラフィ装置は、微細パターン描画用装置として高集積化が進む半導体の分野で利用されている。これらの電子ビーム応用装置においては、電子ビーム径を使用目的に合わせて調整したときに、ビーム電流を大きな値まで増加できることが求められる。利用可能なビーム電流は、主として電子銃から放出される電子ビームの輝度、すなわち単位立体角あたりの電子密度で定義される電子光学的輝度によって決まる量である。このため、電子銃の高輝度化が装置の性能向上のために重要な課題の一つになっている。

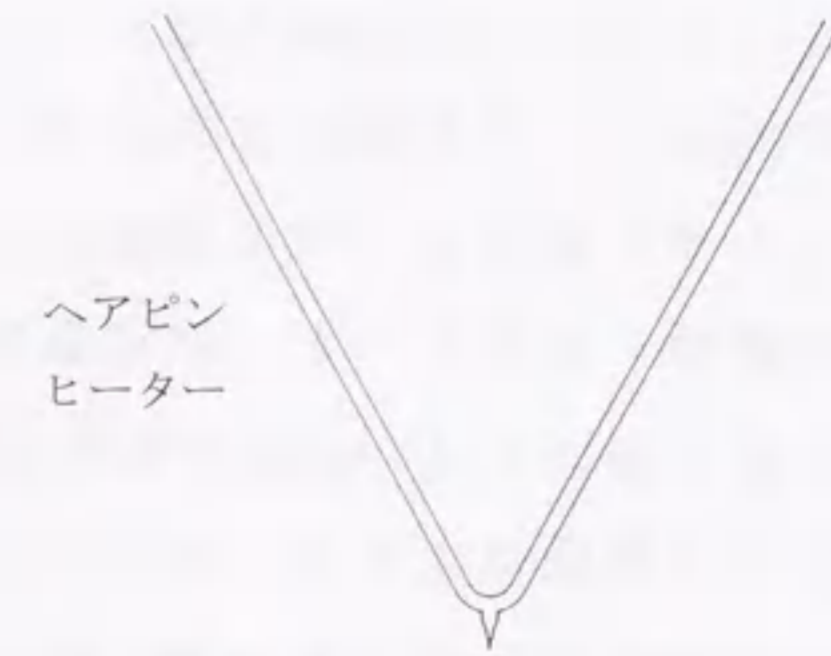
これらの装置には、電子放出の方法が異なる熱電子放出型電子銃、電界放出型電子銃、ショットキー放出型電子銃が使用されている。熱電子放出型電子銃は、通常の真空 10^{-3} Pa で動作するために多くの装置に使用されている電子銃である。電界放出型電子銃やショットキー放出型電子銃は、熱電子放出型電子銃に比べると二桁程度高い輝度をもつ。しかし、動作のために超高真空 10^{-8} - 10^{-7} Pa を必要とするために、これらの電子銃を使用する装置の構造や操作は複雑になる。各電子銃の輝度特性、動作のために必要とされる真空条件は異なるので、いずれの電子銃を使用するかは装置の利用目的に合わせて決められている。各電子銃の輝度特性をさらに向上するために、電極の形状や配置方法および動作方法を最適化する研究が進められているほか、現在使用されている

陰極材料に比べてより低い仕事関数と長い寿命をもち、広い真空範囲で安定な電子放出特性を与える陰極材料の開発も進められている状況にある¹⁾。

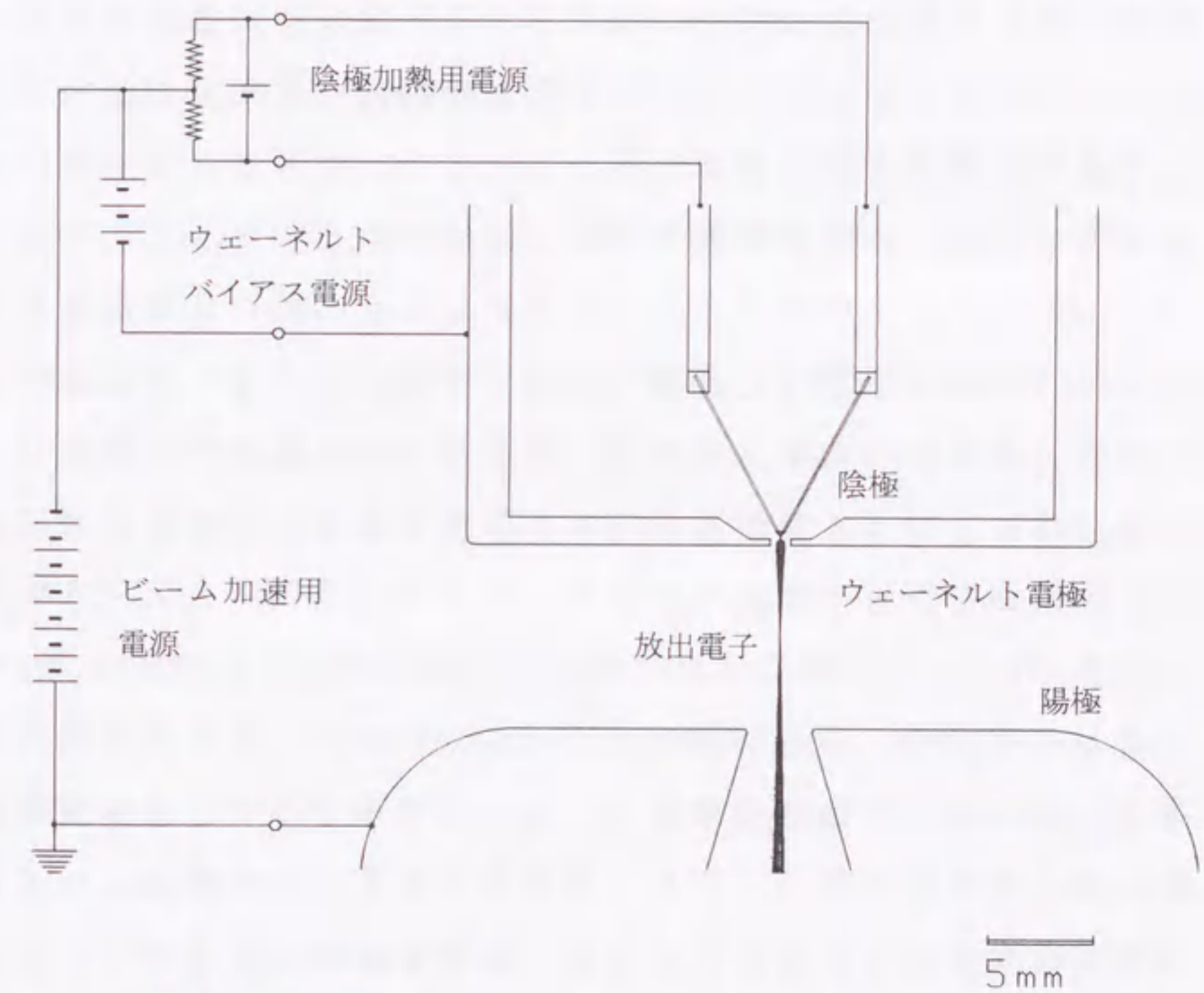
熱電子放出型電子銃には、陰極に使用する材料や形状が異なるタングステンヘアピン陰極電子銃、タングステンポイント陰極電子銃、 LaB_6 ポイント陰極電子銃がある。いずれの電子銃も図1(a)に示すように、陰極、ウェーネルト電極、陽極の3電極で構成される。陰極はウェーネルト電極の円形開口部近くに配置し、ウェーネルト電極には陰極に対して負のバイアス電圧を加える。このバイアス電圧によって陰極先端部の電子放出範囲すなわち放出電子量と放出電子の発散角度を調整する。輝度は陰極温度とともに指数関数的に増加するが、このとき陰極の蒸発量も増加して陰極寿命が短くなるので、輝度は陰極寿命から制約される。この型の電子銃は、構造や動作方法、陰極の交換などが簡単であるために多くの装置に使用されている。

タングステンヘアピン陰極は、直径約 0.1 mm のタングステン線をヘアピン状に曲げた形状であり、この先端部を陰極として使用する。陰極の加熱はヘアピン自体に電流を流す通电方式を採用している。ヘアピン陰極電子銃の輝度は、陰極温度 2,800 K 程度で飽和する。輝度が飽和する原因は、放出電子が形成する空間電荷のために特に陰極近傍の電界が低下し、放出電子量が制限されることにある。この陰極の寿命は、ヘアピン部が蒸発によって消耗し溶断するまでの時間によって決まり、陰極温度 2,800 K 付近で 20 時間程度である。

タングステンポイント陰極は、図1(b)に示すような形状の陰極であり、空間電荷効果を除去してより高い輝度を得る目的のために、電子顕微鏡用電子源として開発された陰極である。この陰極は、タングステンヘアピンの先端に別のタングステン線を溶接



(b) タングステンポイント陰極



(a) 構造

図1 熱電子放出型電子銃

したあと、これを電解エッチングで円錐状に鋭く尖らせて作製する。こうして作製した円錐部先端は $1\ \mu\text{m}$ 以下の曲率半径に先鋭化されている。小さな先端には高い電界が発生するので、ヘアピン陰極よりも高い温度まで空間電荷効果のない電子放出特性を与える。この陰極を使用すると、陰極温度 $3,100\ \text{K}$ においてヘアピン陰極電子銃に比べて 10 倍高い輝度²⁾が得られる。しかしながら、従来のポイント陰極は、ヘアピン部を通電加熱して陰極先端を高温に保つ方式を採用しているため、動作寿命はヘアピン陰極と同じである。先端温度を $3,000\ \text{K}$ 以上に加熱すると、ヘアピン部の寿命は著しく減少して 1 時間以下¹⁾ になってしまうために、この陰極の優れた電子放出特性は活用されていないのが現状である。ヘアピン部が溶断したときでも、陰極先端部の蒸発はわずかであり引き続き使用できる形状を保っているが、ヘアピン部の短い寿命がこの陰極の高輝度動作を制限している。

LaB_6 ポイント陰極は、タングステンよりも低い仕事関数をもつ LaB_6 単結晶を使用した陰極である。空間電荷の発生を防止するために、先端部の曲率半径を $10\ \mu\text{m}$ あるいはそれ以下に加工した陰極が用いられる。この陰極は $1,900\ \text{K}$ 程度でヘアピン陰極に比べて数倍高い輝度を与える。このときの蒸発速度はタングステンよりも低いので、陰極の寿命は数 100 時間から 1,000 時間と長い。こうした特性は、この陰極を $10^{-4}\ \text{Pa}$ よりもよい真空で使用した場合に得られる。通常の真空 $10^{-3}\ \text{Pa}$ で使用すると、仕事関数が高くなって輝度が低下したり、残留ガスイオンの衝撃によって先端部が侵食されて寿命が短くなる。陰極温度を上昇すれば、さらに高い輝度を得ることができるが、蒸発速度が増加して寿命は著しく減少するので、通常 $1,850\ \text{K}$ で使用される。この陰極の加熱には、タングステンやレニウムなどの金属ヒーターあるいはカーボンヒーターが使用される。加熱した LaB_6 は、金属と反応して組

成が変化し電子放出特性が劣化するので、金属ヒーターを使用する場合にはグラファイトなどで支持してヒーターとの接触を避ける方法が採用されている。上記の動作温度は、支持方法の耐熱性の問題も考慮して決められている。

電界放出型電子銃は、タングステンポイント陰極の先端部に、高電界 $10^9\ \text{V/m}$ を加えて電位障壁および障壁の幅を減少し、トンネル効果で高輝度の放出電子を得る電子銃である。高電界を得るために、ポイント陰極先端から数 mm の位置に第一陽極を配置した電極構成を採用している。陰極には低い仕事関数をもつ単結晶タングステン線が使用される。陰極は室温で動作するので、熱陰極のような寿命の制約はない。しかし、真空中の残留気体が陰極表面に吸着すると、仕事関数が増加して放出電流が不安定になる。室温に保った陰極表面には残留気体が吸着し易いために、動作に必要なとされる真空条件は非常に厳しく超高真空 $10^{-8}\ \text{Pa}$ が要求される。

ショットキー放出型電子銃は、電界放出型電子銃の非常に厳しい真空条件を緩和するために、陰極を $1,500\text{--}1,800\ \text{K}$ 程度に加熱して残留気体の吸着を防止し、おもに高電界による電位障壁の減少(ショットキー効果)に基づく熱電子放出によって高輝度を得る電子銃である。陰極には、単結晶タングステンポイント陰極の先端部を薄い Zr 層で覆った ZrO/W 陰極が用いられる。この陰極は、仕事関数を小さくすると同時に、先端が放出電子の発散角度を小さくする形状を保つように実用化されたものである。陰極はヘアピンヒーターで加熱するので、ヘアピン部からの熱電子放出を抑える必要がある。ヘアピン部はサブレッサーあるいはショットキーシールドと呼ばれる電極の内部に配置して、この電極には負のバイアス電圧を印加している。この電極を付加している点も電界放出型電子銃と異なる。この型の電子銃でも緩和される真空条件

は 10^{-7} Pa である。

真空度の問題を解決するために、陰極の動作温度をさらに上げて、ショットキー効果によって高輝度を得る試みも行われている。 10^{-3} Pa 程度の通常の真空で動作するショットキー放出型電子銃は、van der Mast ら^{3,4)}によって研究された。この電子銃では、陰極として直線状のタングステン細線(直径 20 μm)を使用し、この先端部を集光した YAG レーザーによって融点(3,650 K)直下という非常に高い温度に加熱する方式が検討された。このような高温になると、先端部は短時間で蒸発してしまうので、タングステン線を常時移動して蒸発を補う機構を付加している。彼らは、融点に達しない温度であれば、蒸発が進む間も陰極先端部は円錐形状を保持すること、このため陰極を常時移動する機構によって陰極寿命は改善できることを示した。また、陰極を融点近くまで加熱したときに得られる輝度は、電界放出型電子銃と同程度であることを示した。

この電子銃では、陰極先端部の電界強度をできるだけ高くするために、ショットキーシールドの使用を避け、電界放出型電子銃と同じ電極構成が採用された。このような電極構成において従来型ポイント陰極のようにヘアピンによる通電加熱を行うと、ヘアピン部からの電子放出によって陽極電流は増加してしまう。陽極電流が増加すると、加速用高電圧電源の負荷が増加するばかりでなく、陽極に衝撃する電子によって X 線発生量が増加する問題も生じる。van der Mast らは、レーザー光加熱方式を採用して、陰極の加熱範囲を先端部に制限すれば、放出電子量の余分な増加を抑えることができるので、こうした問題を回避できると述べている。彼らは、開発当初の予備実験において、電子衝撃による加熱方式も試みているが、陰極先端部の電界が非常に高いために衝撃電子の軌道の制御が難しいことや、加熱にともなって発生する二

次電子や反射電子の量が多いという理由から、電界に影響されず余分な電子も発生しないレーザー光加熱を採用するに至ったと報告している⁴⁾。

レーザー光加熱方式を採用したショットキー放出型電子銃の開発は、その後、Möllenstedt ら⁵⁾や内川ら⁶⁾によっても試みられている。ここでは、陰極先端部を融点付近まで加熱して蒸発量が増加すると、電界強度を決定する陰極先端部の位置や形状を一定に保つことが難しいという理由から、加熱温度は 2,500 K 程度として先端部の蒸発を抑えた条件における電子銃動作が検討された。この方法によって、ヘアピン陰極電子銃に比べて一桁高い輝度が得られると報告されている。

ポイント陰極の加熱には数 W のレーザー光が必要である。このような光出力をもったレーザー装置は長さ 1 m 程度の大きさになるので、レーザー装置は電子銃の外に配置してレーザー光を陰極先端部に集光する方法を採用する。陰極の加熱温度を一定に保つためには、レーザー光を照射する範囲を一定に保つ必要があるため、レーザー装置の固定方法には特に注意を払って機械的な振動が入らないようにしなければならない。しかしながら、レーザー装置の冷却水によって発生する振動の問題が残ると報告されている⁵⁾。陰極温度を一定に保つには、こうした振動の防止に加えて、レーザー光の強度を変調・制御する特別な技術も必要とされる^{4,5)}。このような問題点があるために、その後この方面の研究は中断されている。

1.2 本研究の目的

熱電子放出型タングステンポイント陰極電子銃は、通常の真空で動作する電子顕微鏡用電子銃として開発され、陰極温度を 3,100 K に上昇したとき、ヘアピン陰極に比べて 10 倍高い輝度を

与える。しかしながら、ヘアピン部を通電加熱するために、この電子銃の寿命はヘアピンの寿命で制限され、実用上必要な寿命が得られない。本研究は、タングステンポイント陰極の寿命を改善するために、陰極の先端部のみを電子衝撃で局所的に加熱する方式について検討した。

陰極を電子衝撃で加熱する方式は、陰極の直径が大きく通電加熱が適用できない場合の加熱手段として、電子ビーム溶接装置など電子ビーム加工装置用の電子銃に使用されていて、この加熱方式を採用した電子銃は電子衝撃加熱型電子銃と呼ばれている。電子衝撃は効率の高い加熱方法であるので、直径1mm程度のタングステン陰極やLaB₆陰極の加熱に必要とされる数10Wの加熱電力を、ウェーネルト電極内部に配置した小型の加熱用電子銃で供給できる利点をもつ。本研究では、この利点に着目した。

電子ビーム加工装置の電子銃に使用される陰極加熱用電子銃は、電子衝撃で加熱する陰極範囲が数mm程度と広いために、そのままでは本研究の目的である電子顕微鏡用電子銃には適用できない。ポイント陰極の蒸発を先端部に制限して寿命を改善するためには、衝撃電子を先端部に集中する特性を備えた従来とは異なる陰極加熱用電子銃が必要である。また、加熱時に発生する二次電子や反射電子の量を低減することも求められる。これらは、微小領域の観察や分析を行なうときにバックグラウンドを形成し、像質および分析精度を低下させるばかりでなく、電子を加速する高電圧電源の負荷を大きくすることにもなる。加熱用電子銃の電極構成や動作電圧などを工夫することによってこうした条件を満たすことができれば、ポイント陰極電子銃はヘアピン陰極電子銃よりも一桁高い輝度で長い時間動作できる。本研究は、ウェーネルト電極の内部に陰極加熱用電子銃を備えた電子銃を試作して、その動作特性を明らかにすることを目的として行なった。

1.3 本論文の概要

本論文は7章からなる。以下に各章の概要を述べる。

第1章では、本研究の背景、本研究の目的、本論文の概要を述べる。

第2章では、電子顕微鏡用電子銃として検討した電子衝撃局所加熱方式電子銃の設計と製作について述べる。陰極加熱用電子銃の電極構成や動作電圧については、電子銃を試作して問題点を検討しながら改良を進める方法をとった。予備実験のために試作した電子銃には、衝撃電子を陰極先端部に集中できないという問題点や、陰極を電子衝撃で加熱したときに発生し陽極に到達する反射電子が多いという問題点があった。この章では、こうした問題点とその検討結果を説明したあと、検討結果を基に、加熱用電子銃の電極構成や動作電圧などに加えたいくつかの改良点を説明して、最終的に決定した電子銃の電極構成と動作電圧を示す。

第3章では、製作した電子銃の電子放出特性と寿命を測定した結果について述べる。まず、衝撃電子電流に対する陰極先端温度を測定して調べた陰極加熱特性を示して、加熱用電子銃は陰極先端を融点まで加熱できることを説明する。つぎに、異なる陰極先端温度において陰極先端から放出されるビーム電流を測定したバイアス-放出電流特性、および電子銃を透過型電子顕微鏡に装着して測定した輝度特性を示して、局所加熱方式を採用した電子銃の電子放出特性を説明する。寿命は電子銃を異なる輝度で動作し、陰極先端の蒸発量を測定して調べた。測定した輝度と寿命の関係を示して、従来型ポイント陰極電子銃と比較し、局所加熱によって改善される寿命を評価する。

第4章では、陰極の先端曲率半径について述べる。タングステンポイント陰極の先端曲率半径については、従来の通電加熱方式陰極が使用される2,800Kまでの温度範囲においてすでに調べ

られている⁷⁾。この範囲では、先端曲率半径は温度とともに増加し、2,800 Kにおいては1 μm 程度になる。この現象は小さな先端に作用する表面張力によるものであることがわかっている。表面張力だけを考えると、高温で使用した陰極の先端曲率半径はさらに増加することになる。しかしながら、2,800 K以上で使用した陰極の先端を走査型電子顕微鏡で観察すると、先端は温度とともに減少する曲率半径を保持しており、表面張力の作用だけでは説明できないことがわかった。観察結果を示したあと、表面張力の効果に加えて、蒸発の効果を検討した解析を行なって、高温における先端曲率半径を説明する。

第5章では、電子銃の動作に適した電子衝撃条件について検討する。加熱される陰極では蒸発が生じるが、蒸発を先端部に制限して寿命を長くすることと、蒸発が進む間も先端温度の変化を小さく保って一定の電子放出を得ることが必要である。蒸発を先端に制限するだけであれば、先端の狭い範囲を電子衝撃すればよい。しかし、この場合には先端のわずかな蒸発で、陰極に衝撃する電子量は大幅に減少するので、先端温度は短時間で大きく低下してしまう。先端温度の低下を防ぐためには、先端部のやや広い範囲を電子衝撃しなければならないが、この場合においても陰極の蒸発は先端から進み、先端部は円錐形状を保持していることが重要である。この章では、加熱用電子銃から放出される衝撃電子の軌道を計算して、陰極の電子衝撃範囲および衝撃電子密度分布を調べた結果を示す。また、衝撃電子密度分布から陰極に入射する熱エネルギーを求めて、陰極の温度分布および蒸発量を計算した結果を示す。衝撃電子密度分布が異なる場合の計算結果を比較して、電子銃の動作に適した衝撃条件について考察する。

第6章では、電子銃の構造と陰極加熱方式が陰極を他の材料に置き換えた場合にも適用できることから、タングステンよりも

低い仕事関数をもつ LaB_6 陰極を使用した場合に期待できる輝度と寿命について述べる。3章で述べた局所加熱陰極の輝度と蒸発速度、および寿命の関係を基に、タングステンと LaB_6 の輝度と蒸発速度を比較した結果を示して、 LaB_6 陰極で期待できる寿命を説明する。

第7章では、本研究の結論を述べる。

参考文献

- 1) たとえば、学振第141委員会編：マイクロビームアナリシス。pp.94-102, 朝倉書店(1985)
学振第132委員会編：電子・イオンビームハンドブック。pp.113-133, pp.153-163, 日刊工業新聞社(1998)
- 2) Ohshita A, Shimoyama H, Maruse S: Brightness of the hot cathode electron gun at high emission densities. *J Electron Microscopy*, **27**, 253-257 (1978)
- 3) van der Mast KD, Barth JE, Le Poole JB: A continuously renewed Laser heated tip in a T.F. emission gun. in Sanders JV, Goodchild DJ ed. *Proceedings of the eighth international congress on electron microscopy*, Vol 1. pp.120-121, Canberra: Australian Academy of Science (1974)
- 4) van der Mast KD: A Laser heated Schottky emission gun for electron microscopy. Dissertation. Delft University of Technology (1975)
- 5) Möllenstedt G, Lichte H, Lau B, Uchikawa Y: Die Anwendung eines fokussierten Laserstrahls zur Heizung der Kathode eines Elektronenstrahl-Erzeugungssystems. *Optik*, **51**, 417-421 (1978)
- 6) 内川嘉樹, 尾崎一幸, 大下昭憲, 丸勢 進: レーザー光加熱電子銃. 電子顕微鏡学会 第34回学術講演会予稿集, 191 (1978)
- 7) Barbour JP, Charbonnier FM, Dolan WW, Dyke WP, Martin EE, Trolan JX: Determination of the surface tension and surface migration constants for tungsten. *Phys Rev*, **117**, 1452-1459 (1960)

第2章 電子衝撃局所加熱方式電子銃の 設計・製作

2.1 はじめに

この章では、電子顕微鏡用電子銃として用いられる従来のタングステンポイント陰極電子銃の輝度と寿命の関係について説明したあと、陰極寿命を改善するために検討した電子衝撃局所加熱方式電子銃の設計と製作について述べる。陰極の蒸発を先端部に制限し寿命を改善するためには、衝撃電子を先端部に集中する特性を備えた加熱用電子銃が必要である。加熱用電子銃は、陰極先端部を3,000 K以上の温度に加熱できる十分な衝撃電力を供給できるものでなくてはならない。衝撃電力は、衝撃電子電流と衝撃電圧の積である。加熱用電子銃の電極構成と動作電圧は、予備実験用の電子銃を試作して検討した。検討結果を基に、加熱用電子銃に加えた改良点を説明し、最終的に決定した電子銃の電極構成と動作電圧を示す。

2.2 従来のポイント陰極電子銃の輝度と寿命

従来のタングステンポイント陰極電子銃の構造は、前章図1に示した。ポイント陰極はヘアピンヒーターに電流を流す通電方式で加熱する。陰極とヘアピンヒーターには、直径約0.1 mmのタングステン線が使用される。陰極先端は、ウェーネルト電極の開口部近くに配置する。ウェーネルト電極は、直径30 mm程度の円筒状電極であり、直径約1 mmの開口部を備えている。この電極には陰極に対して負のバイアス電圧を印加する。陰極先端から放出される電子は、陰極-陽極間の電圧で加速する。

ウェーネルトバイアス電圧が深いときには、陰極先端前面の電位は陰極よりも低い電位になって電子は放出されない。バイアス電圧を浅くしていくと、陰極先端前面の電位が陰極電位より高くなって電子が放出されるようになる。陰極先端の電子放出範囲すなわち放出電子量は、このバイアス電圧によって調整する。電子放出が始まる直前をカットオフ状態と呼び、このときのバイアス電圧をカットオフバイアスと呼んでいる。カットオフバイアスは、ウェーネルト電極開口部の直径と陰極先端の位置によって決まる。

ウェーネルト開口部付近の電界は、放出電子を収束するレンズ作用をもつ。このレンズ作用によって、放出電子は最小断面を形成したあと発散していく。この最小断面をクロスオーバーと呼ぶ。バイアス電圧はクロスオーバーの大きさと位置、発散角度を調整する働きをもつ。電子ビーム応用装置では、このクロスオーバー像を試料面上に収束・結像して利用する。このため、陽極の下には電子レンズと電子ビームの発散角度を制限する角度制限絞りを配置している。

バイアス電圧をカットオフバイアスから浅くしながら、試料面上に結像したクロスオーバー像を観察すると、放出電子量の増加とともにクロスオーバー像は明るくなって輝度は上昇する。タングステンポイント陰極電子銃で得られる電子ビームの輝度は、カットオフバイアス電圧よりも5-6 V浅いところで最大になる。このバイアス電圧を最適バイアスと呼び、電子銃はこのバイアス電圧で動作させる。

ポイント陰極電子銃の輝度は、大下ら¹⁾によって調べられている。彼らは陰極先端の電界を解析して、先端の曲率半径が10 μm 以下であれば、この電子銃は陰極温度3,300 Kまで空間電荷効果のない電子放出特性を与えることを示した。また、電子銃の輝度

を陰極温度 2,600-3,100 K の範囲において測定し、各陰極温度で測定される最大輝度は以下に述べる理論輝度に等しいことを明らかにしている。熱電子放出型電子銃で得られる理論輝度 B は、陰極の温度を T 、電子放出密度を J 、ビーム加速電圧を V としたとき次式で与えられる。

$$B = J \frac{eV}{\pi kT} \quad (2.1)$$

ここで k はボルツマン定数である。この式はラングミュアの理論輝度と呼ばれている。空間電荷効果が存在しないとき、電子放出密度はリチャードソン・ダッシュマンの式

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right) \quad (2.2)$$

で与えられる。ここで A はリチャードソン定数、 Φ は仕事関数であり、陰極材料によって決まる値である。大下ら¹⁾はタングステン陰極について測定される輝度は、電子放出密度 J を $A=120$ [$\text{A}/\text{cm}^2\text{K}^2$]、 $\Phi=4.4$ [eV] として計算した理論輝度に一致することを明らかにしている。

輝度は陰極温度とともに指数関数的に増加する。しかし、陰極温度の上昇は同時にヘアピンヒーター部の蒸発速度を増加するために、ヘアピン部は図 2.1 に示すように短時間で溶断してしまう。従来型ポイント陰極の動作寿命は、ヘアピン部が溶断するまでの時間で決まる。蒸発がヘアピン部で速く進むのは、次のような理由による。ポイント陰極はヘアピンからの熱伝導によって加熱される。高温においては輻射によって失われる熱エネルギーが大きい。輻射エネルギーは表面積に比例する量であるので、陰極を溶接したヘアピン部の温度は少し低くなり、隣接する高温部において蒸発は速く進む。高温部の断面積が蒸発によって減少すると、線抵抗は増加して加熱電流は減少し温度は低下する。陰極先

端の温度を一定に保つために加熱電流を増加すると、断面積が減少した部分の温度は他よりも上昇して、蒸発がさらに速く進む熱暴走が起こる。この熱暴走のために、残りは短時間で蒸発し溶断に至るのである。溶断するまでの時間は、ヘアピン部の加熱温度を一定と仮定したときにヘアピン径がわずか 6% 減少する時間にしかない²⁾。ヘアピンが溶断したときでも、陰極先端部の蒸発はわずかであり、まだ使用できる形状を保っている。



図 2.1 ヘアピンヒーターの溶断

陰極温度に対する輝度と寿命²⁾の関係を図 2.2 に示す。輝度はビーム加速電圧 50 kV の場合における値を示した。ヘアピンヒーターの寿命は 2,800 K で 15 時間程度であるが、3,000 K を超えると 1 時間以下に減少する。このような陰極寿命を考えて、通常の使用においては陰極温度 2,800 K 以下で電子銃を動作している。2,800 K のときの輝度は $7 \times 10^5 \text{ A}/\text{cm}^2\text{sr}$ である。陰極温度を 3,100 K まで上昇すれば、2,800 K のときに比べて 7 倍高い輝度が得られるが、寿命はきわめて短くなる。

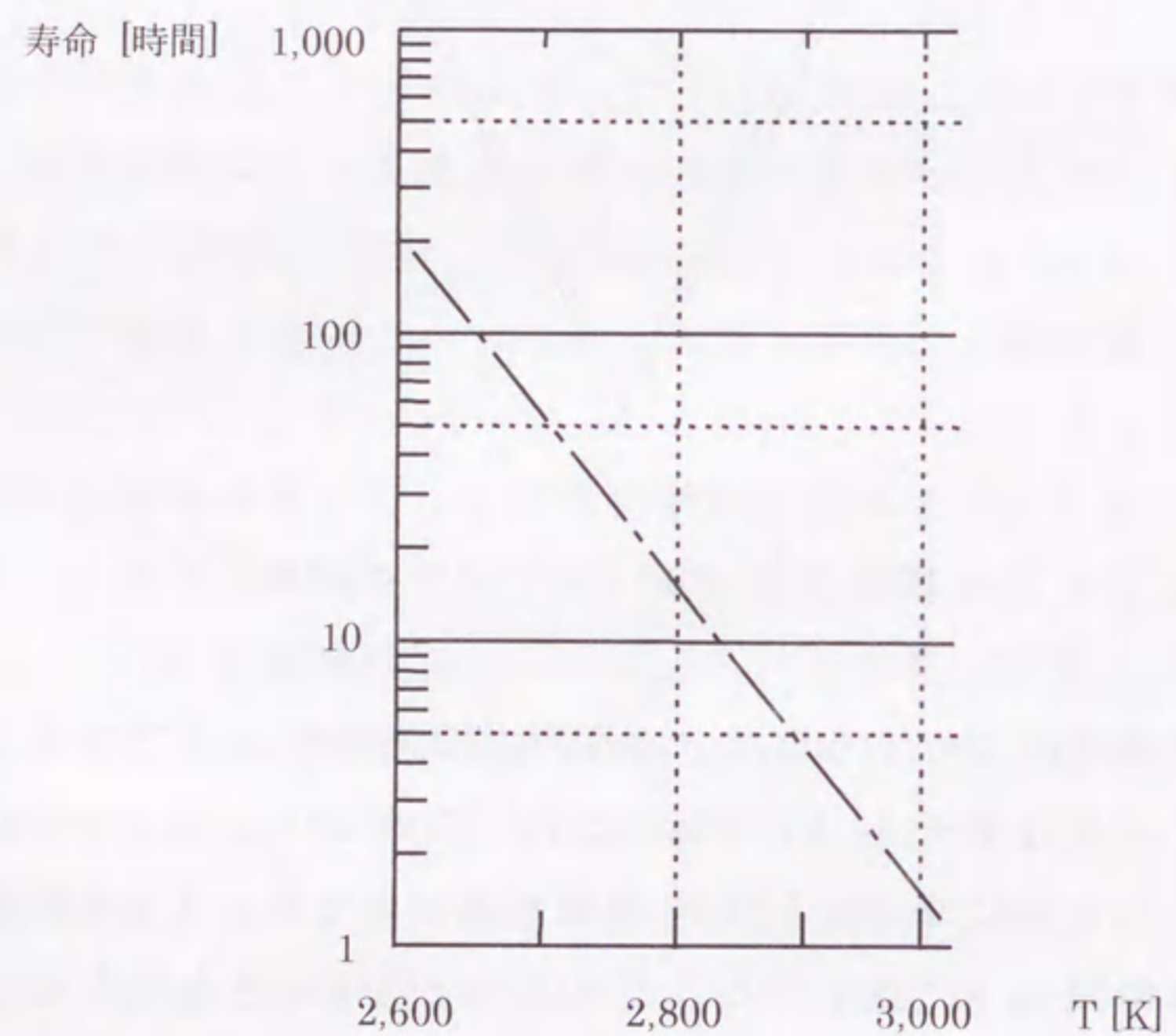
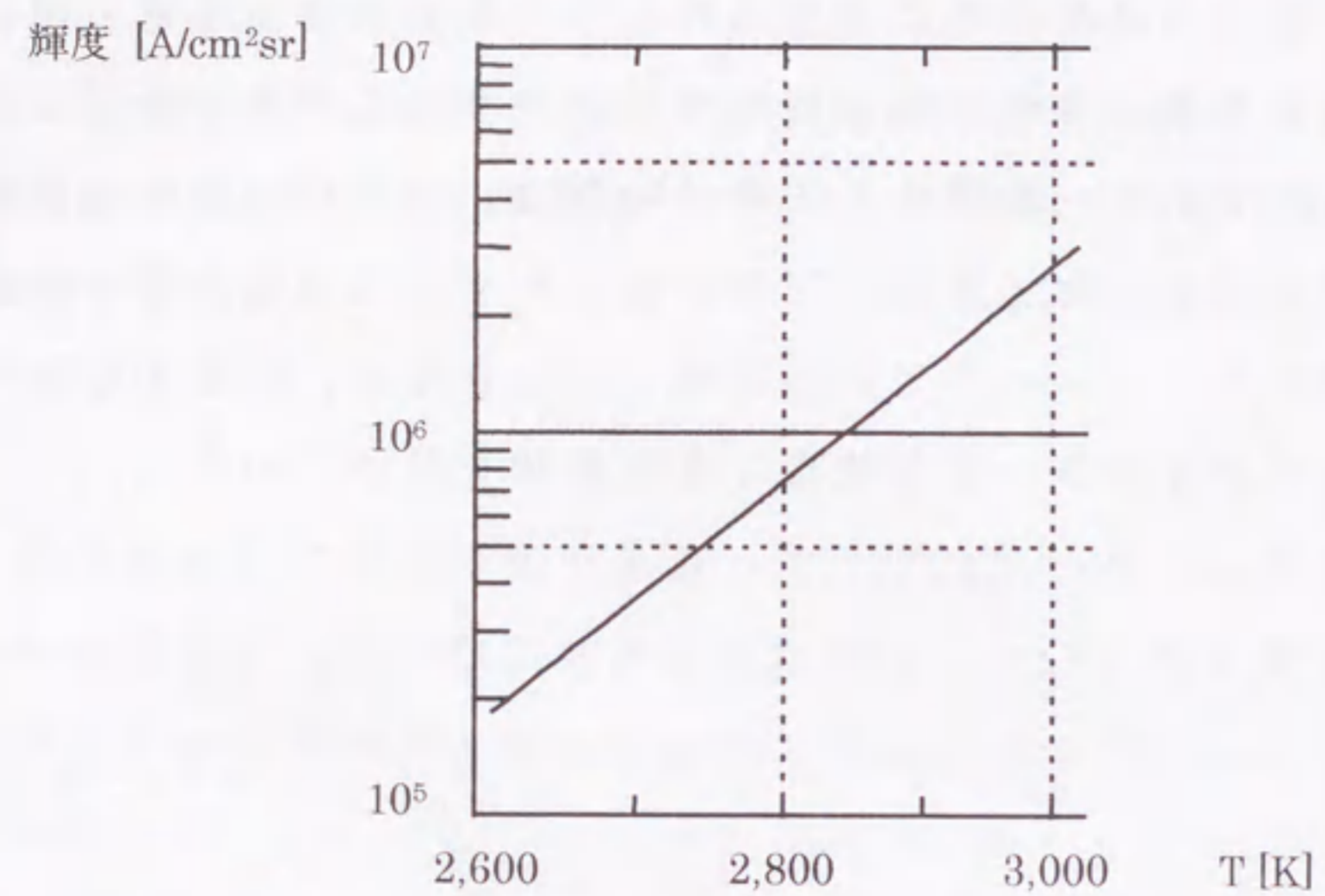


図 2.2 輝度と寿命の関係

2.3 予備実験による陰極加熱用電子銃の検討

通電方式で加熱する従来型ポイント陰極は、前節で述べたように寿命が短いという欠点がある。この欠点は、図 2.3 に示すように陰極の先端部のみをレーザーあるいは電子衝撃で局所的に加熱する方式を採用し、陰極の蒸発を先端部だけに制限すれば除去できる。

衝撃電子を陰極の先端部に集中する特性を備えた加熱用電子銃の電極構成および動作電圧については、予備実験用の電子銃を試作して検討することにした。本節では、電子ビーム溶接装置など電子ビーム加工装置の電子銃に使用される陰極加熱用電子銃の電極構成と動作電圧を説明したあと、これを参考にして試作した予備実験用電子銃の構造と実験結果を示す。次に、予備実験で明らかにした問題点とその検討結果を述べて、こうした問題点は加熱用電子銃の電極構成と動作電圧を改良することによって解決できるものであることを説明する。

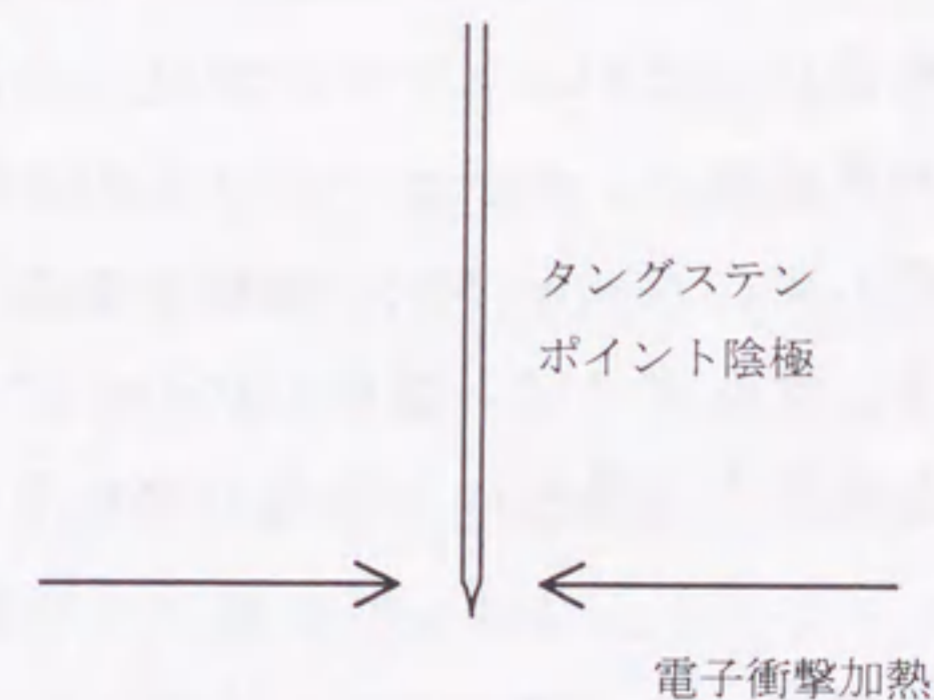


図 2.3 ポイント陰極の局所加熱

2.3.1 従来の陰極加熱用電子銃

電子ビーム溶接装置などのビーム加工用装置においては、高輝度というよりは大きなビーム電流を与える電子銃が求められる。このため、電子顕微鏡用電子銃の陰極に比べて電子放出面積の広い陰極を備えた高パービانس電子銃が使用される。放出面積の広い陰極は通電方式で加熱することができないので、電子衝撃で間接的に加熱する方式が採用されている。図 2.4 に直径 1 mm の棒状タングステン陰極の加熱に使用される陰極加熱用電子銃³⁾の電極構成を示す。加熱用電子銃は、陰極を中心として配置したらせん状ヒーターコイルと、これを取り囲むように配置した円筒状の防熱用電極からなる。防熱用電極は直径 5 mm、長さ 10 mm 程度の寸法であり、ウェーネルト電極内部に配置している。

衝撃電子を放出するヒーターコイルとしては直径 0.2 mm のタングステン線が用いられ、通電方式により 2,300-2,500 K に加熱する。ヒーターコイルと陰極の間に印加する衝撃電圧 V は 100-200 V であり、この電圧範囲でヒーターコイルからは $I=50-100$ mA の衝撃電子が放出されて、5-20 W の衝撃電力が得られる。衝撃電力 20 W で直径 1 mm タングステン陰極を 2,800 K に加熱できる。衝撃電力は、衝撃電圧あるいはヒーターコイルの加熱温度によって調整する。防熱用電極は、ヒーターコイルおよび陰極から発生する輻射熱を遮蔽して、ウェーネルト電極の温度上昇を防止するために配置される。タングステン陰極の代わりに、仕事関数の小さい LaB₆ 陰極を使用する場合にも同様の加熱用電子銃が使用されている⁴⁾。

この電極構成では、ヒーターコイルをウェーネルト電極よりも高い電位に置いて、衝撃電子がウェーネルト電極に流れるのを防止する必要がある。このため、衝撃電圧は 200 V 程度までに制限される。また、ヒーターコイルは 2,500 K までの加熱温度で

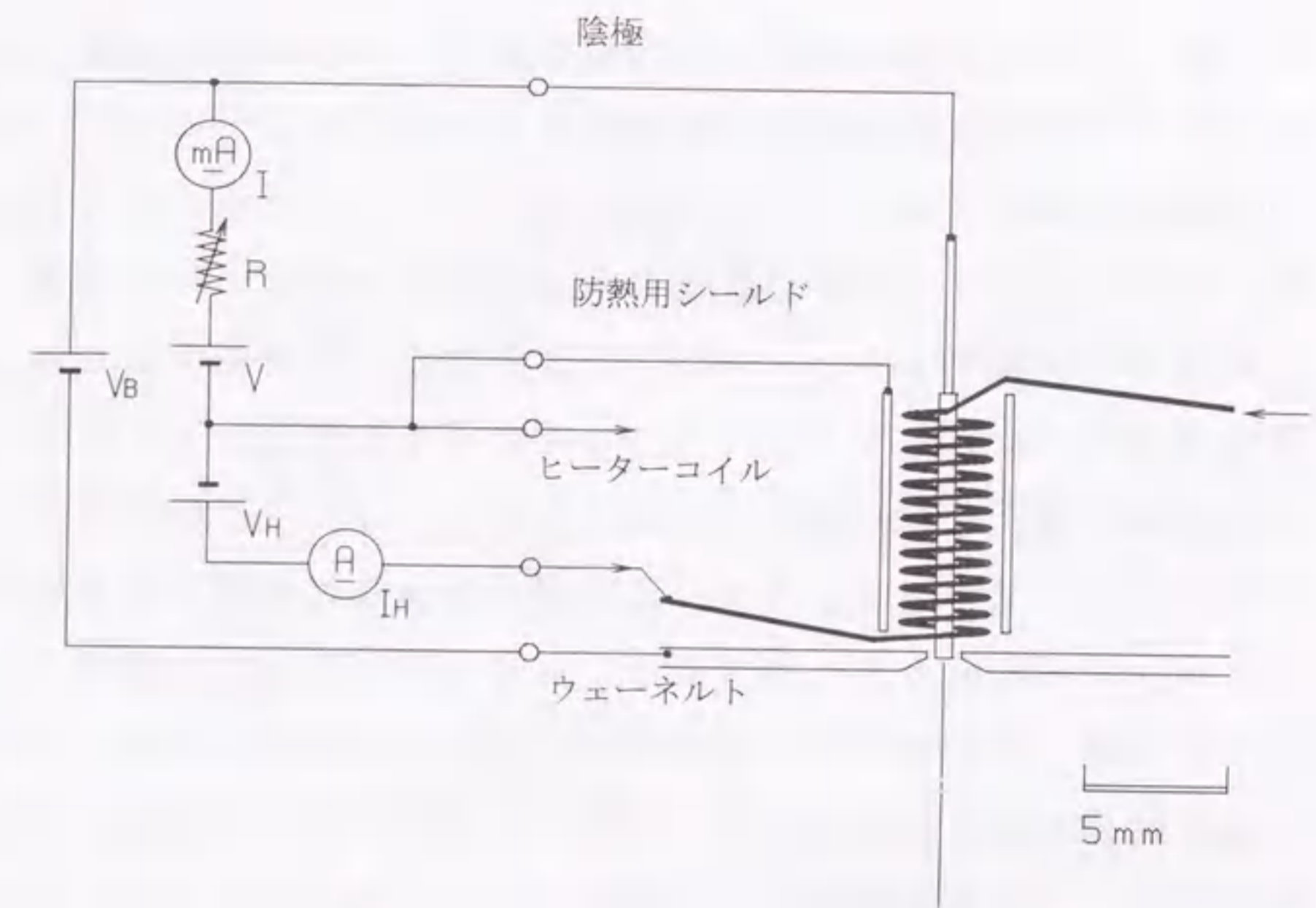


図 2.4 加工用電子銃に使用される陰極加熱用電子銃
ウェーネルトバイアス用電源 V_B 、衝撃電源 V 、ヒーターコイル加熱用電源 V_H

使用して、長い寿命を確保することが望ましい。こうした制約のもとで、陰極の加熱に必要な衝撃電力を得るには、衝撃電子の放出面積を広くしなければならないので、10 数回巻きのみらせん状ヒーターコイルが使用される。ヒーターコイルの長さは 6-7 mm 程度であるので、電子衝撃で加熱する陰極範囲も同程度の範囲になる。陰極の加熱温度はこの範囲で一様になるというわけではない。高温に加熱されて蒸発が速く進む位置は、ヒーターコイルの中央から 1-2 mm 程度陰極先端よりになる^{3,4)}。蒸発位置が陰極先端方向にずれるのは、陰極の固定端(図 2.4 の上部)から熱伝導で失われる熱エネルギーが多く、固定端方向の温度勾配が大きくなるため

である。

ビーム加工用装置に使用する電子銃では、陰極の先端をヒーターコイルの外に配置して電子衝撃しないようにしている。このように配置する理由の一つは、陰極先端近くで二次電子や反射電子が発生しないようにするためである。陰極先端近くで二次電子や反射電子が発生すると、これらの電子はウェーネルト開口部を通過して陽極に流れてしまう。このような電子が増加すると、ビーム加速用高電圧電源の負荷が増加するだけでなく、陽極を衝撃してX線の発生量を増加したり、陽極が加熱されて溶融するなどの問題が生じる。もう一つの理由は、大きなビーム電流を必要とするビーム加工用装置では、陰極先端の蒸発をできるだけ抑えて広い電子放出面積を確保したほうがよいことである。このような配置にしても、陰極先端はイオン衝撃や蒸発によって、しだいに消耗し放出面積は減少するので、新しい陰極と交換して電子銃を動作する方法が採られている。

2.3.2 予備実験のために試作した電子銃

ビーム加工用装置で使われている陰極加熱用電子銃は陰極の加熱範囲が広いので、そのままではポイント陰極の先端部を局所加熱する目的には利用できない。電子衝撃で加熱する陰極範囲を小さくするためには、まず、衝撃電子の放出面積を小さくすることが必要である。このような考えから、衝撃電子源を円形のループフィラメントに置き換えた簡単な構造の電子銃を試作して、ポイント陰極先端部の加熱、陽極に達する二次電子や反射電子の量など基本的な特性を調べ、局所加熱に必要とされる電極構成や動作電圧について検討することにした。

予備実験のために試作した電子銃の構造を図2.5に示す。直径0.2mmのタングステン線で製作した円形ループフィラメントを

ポイント陰極の周りに配置した。ループの直径は5mmとした。予備実験では、ポイント陰極にも直径0.2mmのタングステン線を使用した。シールド電極は、電子衝撃で加熱する陰極範囲を制限する目的で付加した。シールド電極はウェーネルト電極と同電位とし、ループフィラメントはこれらの電極よりも数V高い電位に置く。このような電位でループフィラメントを通電加熱して、ウェーネルトバイアス電圧を深くしていくと、衝撃電子を陰極に向けて加速できるので、ウェーネルトバイアス電圧を衝撃電圧として利用した。

実験においては、ウェーネルトとシールド電極を接地して、陰極に正の電圧 V_B を、陽極に正の高電圧を印加した。陰極電圧を基準にすると、ウェーネルト電極にはバイアス電圧 $-V_B$ が印加されたことになる。衝撃電子がウェーネルト電極やシールド電極に流れるのを防止するために、これらの電極とループフィラメントの間に抵抗 R_D を付加して、衝撃電子が放出されたときループフィラメントを数V高い電位に保つようにした。ループフィラメントの加熱には交流電源を使用した。加熱電流が発生する交流磁界は、陰極先端から放出する電子の軌道を変える恐れがあるが、実験をさらに進める段階で直流電源に置き換えることを考えた。

2.3.3 実験結果と問題点

2.3.2で述べた構造の陰極加熱用電子銃を採用しても、電子衝撃で陰極を加熱できることや、陰極先端から熱電子ビームを放出できることがわかった。しかし、この電子銃には、陰極の蒸発を先端部に制限することが難しいことや、熱電子以外に陽極に到達する漏れ電子が多いことなどいくつかの問題点があることがわかった。以下に実験結果と問題点を示す。

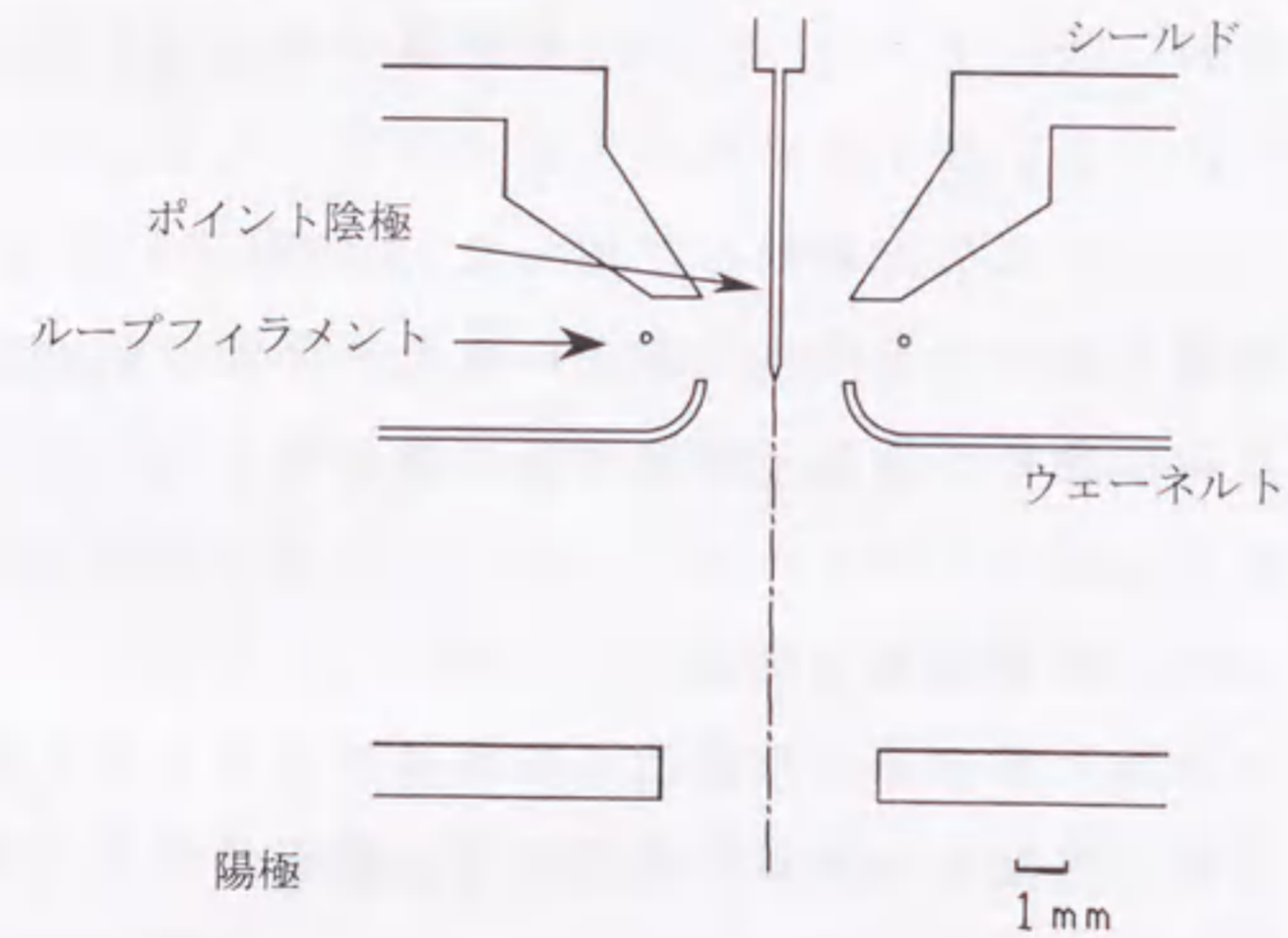
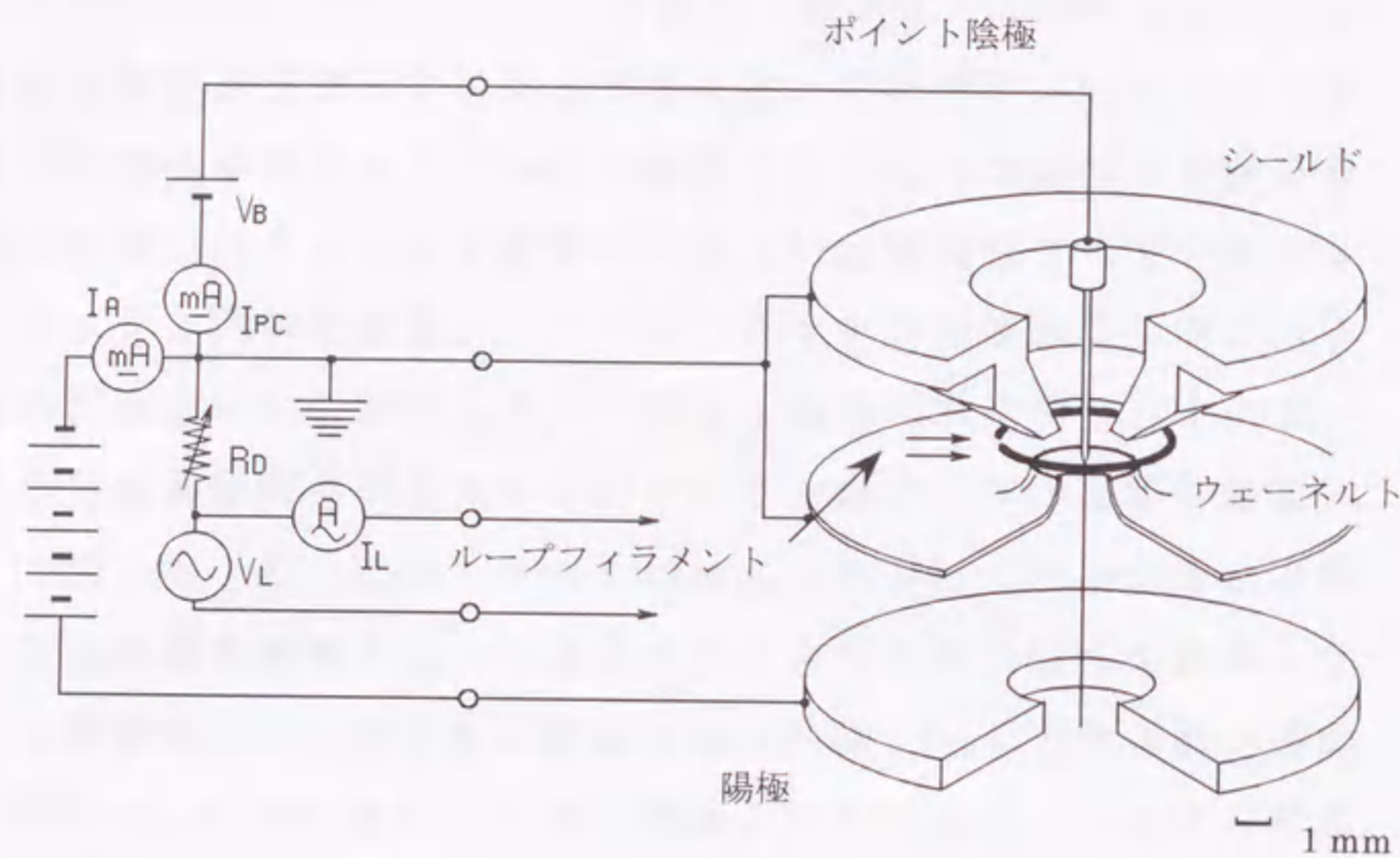


図 2.5 予備実験のために試作した電子銃

2.3.3. a 陰極の加熱

ループフィラメントを 2,500 K に通電加熱して、バイアス電圧を深くし衝撃電圧を高くすると、陰極を衝撃する電子は増加する。バイアス電圧 -1 kV において、衝撃電子量は 5 mA になる。このときの衝撃電力は 5 W である。この衝撃電力で陰極は 3,000 K に加熱されることがわかった。バイアス電圧をさらに深くすれば、衝撃電力は増加して陰極の加熱温度はさらに上昇することも確認した。温度はマイクロピロメータ (PYRO-WERK GmbH 製) を使用して測定し、測定誤差は ± 20 K である。

加熱後の陰極形状を観察して蒸発が速く進む位置を調べた。陰極の先端をウェーネルト開口部と同じ高さに配置して行なった実験では、陰極の先端から約 0.5 mm 上のところで蒸発が速く進むことがわかった。すなわち、衝撃電子はこの付近に集中している。先端部を加熱するために、陰極先端を 0.5 mm 上に配置した場合には、陰極先端が集中的に加熱できることもわかった。この配置においても、バイアス電圧 -1 kV で陰極は 3,000 K に加熱される。

バイアス電圧は、陰極先端の電子放出領域すなわち電子放出量を調整する役割をもつ。バイアス電圧を深くすると、陰極先端の電子放出領域は減少してカットオフバイアス状態となり、熱電子放出が起こらなくなる。陰極先端部を集中的に衝撃するように、陰極先端をウェーネルト開口部よりも約 0.5 mm 上に配置したときには、カットオフバイアス電圧は -800 V 程度に浅くなる。このため、たとえ 1 kV の衝撃電圧で 3,000 K に加熱できても、電子放出はできないことになる。バイアス電圧 -1 kV (衝撃電圧 1 kV) で電子放出を可能にするためには、陰極先端をウェーネルト開口部に近づけてカットオフバイアス電圧を深くする必要がある。

そこで、シールド電極やループフィラメントの位置を変更して、蒸発位置をウェーネルト開口部近くに置いた陰極先端部に近

づけることができるか調べた。シールド電極の位置を下げてウェーネルト電極との間隔を狭くし、ループフィラメントをこの間に配置すると、衝撃電子量は減少し陰極を加熱できなくなった。衝撃電子量の減少は、ループフィラメント近傍の電界が低下して空間電荷効果が大きくなるために起こる。逆に、シールド電極を上へ移動して、ウェーネルト電極との間隔を広くすると衝撃電子量は増加する。しかし、このときの蒸発位置は上へ移動して陰極先端からさらに離れてしまう。この電極構成では、電極位置を変更してもウェーネルト開口部近くに配置した陰極先端部に衝撃電子を集中できないことがわかった。

2.3.3.b 磁界の影響

衝撃電圧すなわちバイアス電圧を -1 kV としたとき、陰極を $3,000\text{ K}$ に加熱するためには、ループフィラメントを $2,500\text{ K}$ に通電加熱する必要がある。このときのループフィラメント加熱電流は 4.5 A であるが、加熱電流をさらに増加すると陰極の温度はかえって低下してしまう現象が観察された。この現象は、加熱電流によって発生する磁界によって衝撃電子の軌道が偏向され、陰極を衝撃する電子が減少するために起こったと考えられる。衝撃電子の集中性を高めるためには、ループフィラメント加熱電流が発生する磁界を小さく抑える必要もあることがわかった。

2.3.3.c 電子放出

陽極の下 80 mm の位置に蛍光板を配置して、陽極孔を通過する電子を観察した。陽極電圧は 30 kV とした。この陽極電圧において、カットオフバイアス電圧を -1 kV にするためには、ウェーネルト開口部の直径を 2 mm と大きくして、陰極先端を開口部と同じ高さに配置しなければならない。バイアス電圧を浅くしていく

と、蛍光板の中心に直径 1 mm 以下の明るいスポットが観察される。スポットの直径や明るさはバイアス電圧とともに変化し、バイアス電圧をカットオフ電圧 -1 kV よりも深くすれば消失する。こうした結果から、観察されるこの明るいスポットは陰極先端から放出する熱電子によるものであることを確認した。

しかし、カットオフバイアス状態においても、蛍光板の広い範囲が明るく輝いていて、熱電子以外の多くの電子が到達していることがわかった。これらの電子は、衝撃加熱に伴って発生する漏れ電子である。

2.3.3.d 漏れ電子

漏れ電子の量は衝撃電子量に比例して増加し、衝撃電子量 5 mA のときには 1 mA にもなる。バイアス電圧をカットオフ電圧 -1 kV からさらに -50 V 程度深くしても、漏れ電子の量や発散角度はほとんど変わらない。このことから、漏れ電子は熱電子に比べて大きなエネルギーと発散角をもつことがわかった。

この漏れ電子は、衝撃電子により発生する陰極からの二次電子および反射電子と衝撃電子自身の一部の可能性がある。しかし、二次電子は数 eV のエネルギーで放出するものももっとも多く、放出エネルギーが高いものでも 50 eV 以下である。それゆえ、バイアス電圧をカットオフ電圧 -1 kV より 50 V 深くすると、二次電子はウェーネルト開口部を通過できなくなる。漏れ電子は陰極で発生する二次電子ではないと考えられる。一方、衝撃電圧が 1 kV のときに陰極で発生する反射電子は、数 100 eV から 1 keV までの高いエネルギーで放出される。このような反射電子は、カットオフバイアスの状態であってもウェーネルト開口部を通過するので漏れ電子になり得る。また、陰極に衝撃することなく先端近くを通過し、陽極に向かう衝撃電子が存在すれば、これも 1 keV 程度

のエネルギーをもつので漏れ電子になる。カットオフバイアス近傍でのバイアス電圧の変化に対しても、漏れ電子の量や広がりには変化しないことから、陰極からの反射電子や衝撃電子の一部が漏れ電子になっていると考えられる。

漏れ電子の量と電極位置の関係についても調べた。ループフィラメントの位置を下げ、ウェーネルト開口部と同じ高さに配置すると、漏れ電子量は 1 mA から 0.4 mA に減少する。このときの陰極の蒸発位置は先端から約 1 mm 上に移動する。漏れ電子が減少したのは、衝撃電子が集中する位置がウェーネルト開口部から離れたために、開口部まで進む陰極からの反射電子や開口部を直接通過する衝撃電子が減少したものと考えられる。

電子ビーム応用装置では、陽極の下の光軸上に小さな絞りを配置して放出ビームの発散角度を制限し、この絞りを通過するビームを利用する。こうした使用条件を考えると、熱電子よりも大きな発散角度をもつ漏れ電子は、この絞りによって除去できるものである。しかし、漏れ電子量が多いと、その一部は放出ビーム中に混入することも予想される。また、ビーム加速用高電圧電源の負荷が増加するという問題もある。ポイント陰極先端から放出される熱電子放出ビームの量は 100 μA 程度の値である。電子銃の動作を実用的なものにするためには、漏れ電子量を放出電子ビーム量以下に抑える改良が必要である。

2.3.4 改良方法の検討

2.2.3 の予備実験で明らかにした問題点を解決するために、試作した電子銃の電位分布や衝撃電子の軌道を数値解析して検討した。以下では、数値解析結果からわかる各問題点の原因を述べて、問題点を解決するために検討した改良方法について説明する。

2.3.4. a 陰極の加熱

ループフィラメントの位置が異なる場合について行なった、電位分布と衝撃電子軌道の数値解析結果を図 2.6 に示す。陰極とループフィラメント間の電位分布は 50 V 間隔、陰極と陽極間の電位分布は 100 V 間隔で示している。ウェーネルト電極の開口部には、電子を陽極に向けて加速する電界が存在する。衝撃電子が直接陽極に流れないようにするためには、ループ径をウェーネルト開口径よりも大きくする必要がある。実験に使用したループ径は、こうした点を考慮して決めたものであるが、ループ径を大きくしたためにループフィラメント近傍の電界は弱くなっている。

電界が弱いことにくわえて、ループフィラメントの電子放出範囲が広いために、衝撃電子の軌道の広がり大きい。ループフィラメントの上面から放出した電子は、シールド電極の近くで軌道を大きく変えたあと陰極の先端近くに衝撃している。一方、ループフィラメントの下面から放出した電子は、ウェーネルト電極の近くで軌道を大きく変えて陰極の上のほうに衝撃する。このような電子が存在するために衝撃範囲は 1 mm を超えている。しかし、陰極と向かい合う面から放出した衝撃電子の軌道の広がり比較的小さく、図 2.6(a)においては陰極先端から約 0.5 mm 上に、図 2.6(b)では先端から約 1 mm 上に集中している。この位置は 2.3.3. a および 2.3.3. d で述べた実験において観察される陰極蒸発位置に等しいことから、数値解析は実験結果を検討するうえで有効な手段であることが確認される。

陰極の寿命を改善するためには、衝撃範囲をもっと小さくして、陰極の先端部を衝撃加熱しなければならない。衝撃範囲を小さくするためには、ループフィラメントの電子放出範囲を陰極と向かい合う面だけに制限すると同時に、ループフィラメント付近の加速電界を強くして、衝撃電子の軌道の広がりを抑える必要が

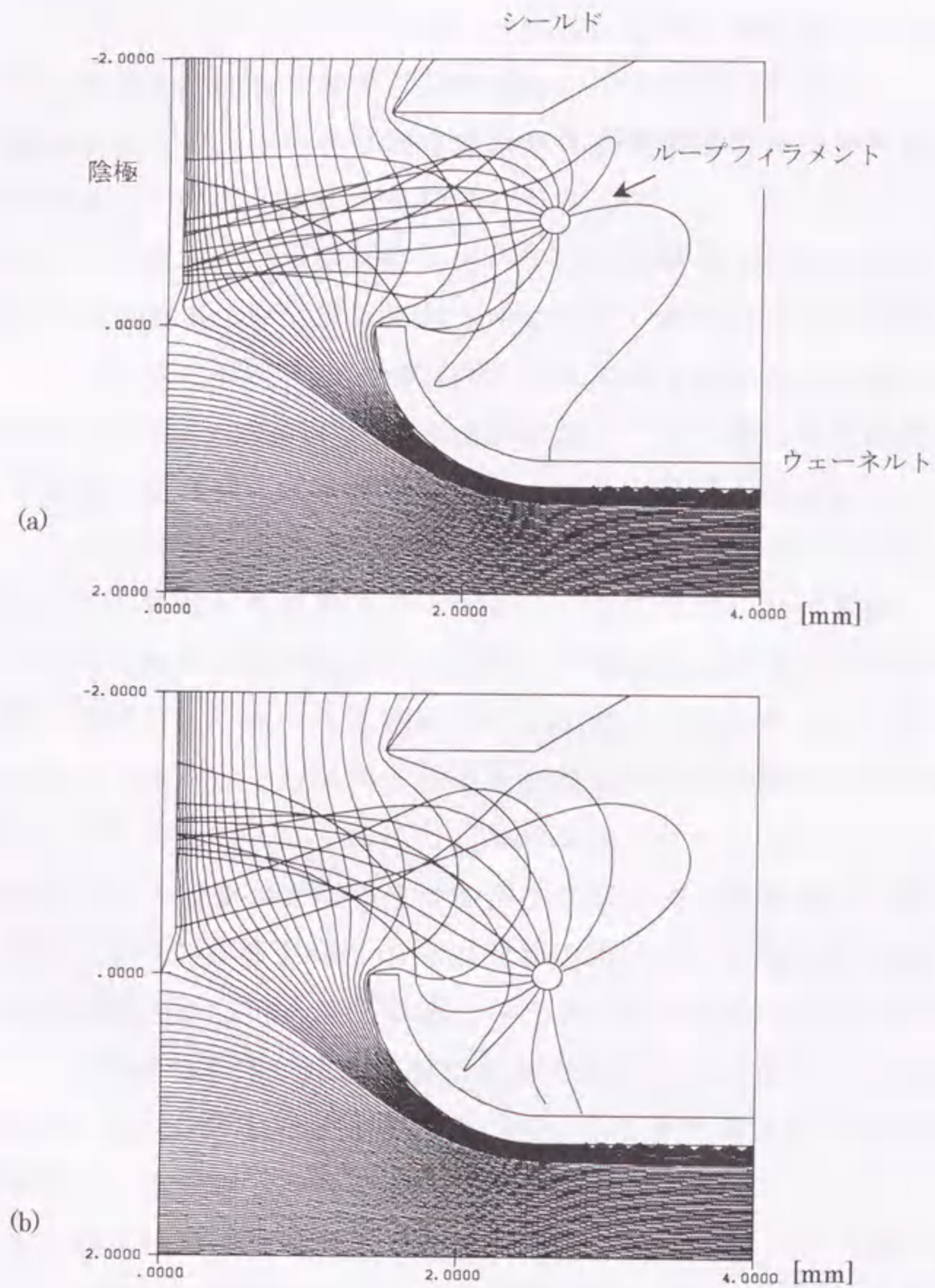


図 2.6 予備実験用電子銃の電位分布と衝撃電子軌道
 (a) (b) はループフィラメント位置が異なる場合の結果。電位分布：陰極-ループフィラメント間 50 V 間隔、陰極-陽極間 100 V 間隔。ループフィラメントから出て陰極に達する曲線が衝撃電子軌道。

ある。そこで、ループフィラメントの近くにウェーネルト電極と同じ働きをする収束用電極を配置して、放出範囲を制限する方法をとる。次節で詳しく説明するが、収束用電極は図 2.8 に示すように、陰極と対向する面に円筒状の開口部をもつものにして、この開口部の中にループフィラメントを配置する。予備実験用電子銃のようにループ径が小さく、ウェーネルトやシールド電極までの距離がわずかであると、収束用電極を付加することは難しい。しかし、ループ径を大きくすればこのような改良は可能と考えた。

衝撃電子の加速電界を強くするためには、ウェーネルトやシールド電極に対して、ループフィラメントと収束用電極を負の高電位に置いて、この間で衝撃電子を加速すればよい。電極の動作電圧をこのように変更すると、ウェーネルトバイアス電圧とは別に衝撃電子の加速電圧を決めることができる。また、ループフィラメントの電子放出範囲とループフィラメント近傍の加速電界を、収束用電極の電圧によって制御すれば、広がり小さなディスク状衝撃電子ビームを作り出すことも可能になる。

電極の形状や配置を最適化すれば、衝撃電子ビームを任意の位置の陰極先端部に集中して局所的に加熱できると考えられる。バイアス電圧を衝撃電圧として利用した予備実験においては、バイアス電圧を深くして陰極温度を上昇すると、陰極先端の電子放出範囲が減少して必要な電子放出量が得られなくなる問題があった。収束電極を付加することにより、衝撃電子の加速電圧と衝撃位置はバイアス電圧とは無関係に調整できるので、この問題も解決できるものと考えられる。

2.3.4.b 磁界の影響

ループフィラメントに流す通電加熱電流によって生ずる磁界の影響について調べた。図 2.7 上段に示した衝撃電子軌道は、

図 2.6(a)の配置に対して行なった数値解析結果であり、ループフィラメントの子午面(光軸を含む平面)内の各点から子午面内に放出された電子の軌道を、放出位置を含む子午面に投影した様子を示したものである。図 2.7 中段は、この衝撃電子軌道を光軸に垂直な面に投影した様子を示したものであり、下段は陰極付近の拡大図である。電界 E は衝撃電子を陰極に向けて加速する作用をもつが、衝撃電子は放出直後に子午面の外に偏向したあと陰極に向かう。この偏向はループフィラメント加熱電流 I_L を直流 4.5 A としたときの磁界 B の影響によるものである。速度 v の電子にはニュートン・ローレンツの式で与えられる力 $\vec{F} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ が作用するので、衝撃電子の軌道は図のようになる。陰極付近の拡大図からわかるように、衝撃位置は中心から約 0.08mm ずれた位置に変位している。この変位量は、加熱電流とともに直線的に増加する。図 2.6(b)の配置に対しても同様の結果が得られる。

予備実験に用いた実効値 4.5 A の交流電流における変位量は、上記の値の $\pm\sqrt{2}$ 倍となる。すなわち、電子衝撃位置は約 ± 0.1 mm の範囲で変動していることになる。この変動範囲は、予備実験に使用した陰極の半径 0.1 mm に等しい値である。加熱電流を増加したときに陰極の加熱温度が低下した原因は、変位量が増加して陰極を衝撃する実効的な電力が減少していたのである。磁界の影響は、ループフィラメントの近くに加熱電流と反対方向の電流を流すことによって軽減できる。しかし、この方法は収束用電極を付加した場合に、加熱用電子銃の電極構成が複雑になるという問題がある。

そこで、ループフィラメントに使用するタングステン線を直径 0.2 mm から 0.1 mm のものに変更して抵抗を大きくし、加熱電流を減少する方法をとる。このようにすると、ループフィラメントを 2,500 K に加熱するのに必要な電流は約 1.5 A になる。加熱

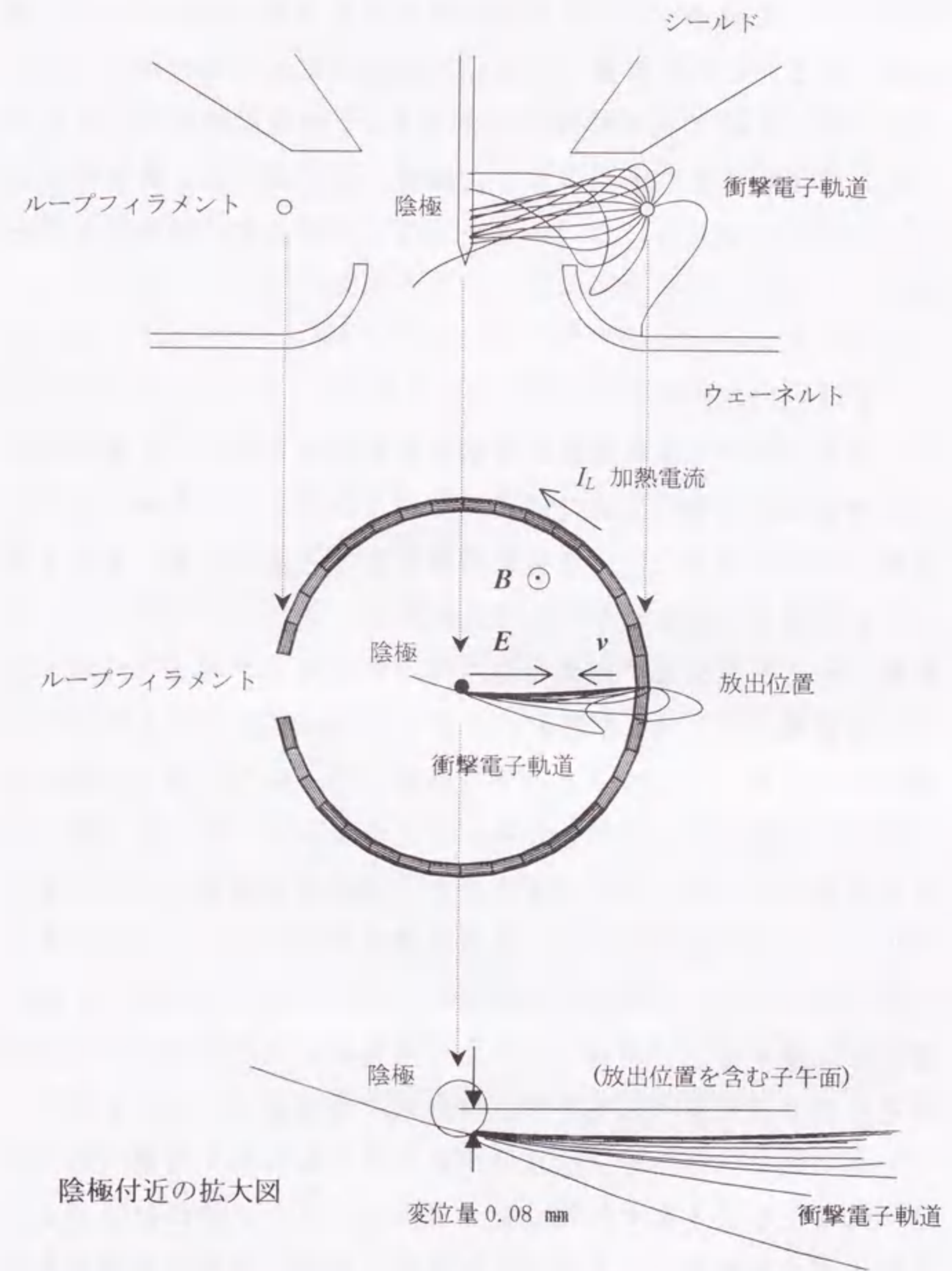


図 2.7 衝撃電子軌道におよぼす磁界の影響
ループフィラメント加熱電流 4.5 A の場合

電流を 1/3 に減少すれば、陰極衝撃時の軌道の変位量は 0.02 mm 程度になる。この変位量であれば、陰極に使用するタングステン線を直径 0.1 mm のものに交換してもよい。陰極に使用するタングステン線の直径を小さくすると、加熱に必要なとされる衝撃電力は減少するはずであるので、陰極をさらに高い温度に加熱できると考えられる。

2.3.4.c 漏れ電子

図 2.6 に示した数値解析結果からわかるように、先端を除く陰極表面は負の等電位面で囲まれているので、この範囲からは二次電子は放出できない。陰極に衝撃することなくウェーネルト開口部を通過する衝撃電子もほとんどない。こうしたことから、漏れ電子の主な原因は、陰極で発生する反射電子と考えられる。

衝撃電圧が 1 kV のときに発生する反射電子は 1 keV までの高いエネルギーをもつ。このような電子は、陰極の周りの電位分布によって減速されながらループフィラメントの近くまで進んだ後、陰極に押し戻されることになる。減速時に軌道は大きく変化するので、反射電子の一部は発生位置よりも上の方へ、他は下の方に向かって進む。下の方に進んだ反射電子がウェーネルト開口部近くに達すると、陽極に向かって加速されることになる。開口部近くまで押し戻されたとき、反射電子は放出時に近いエネルギーをもつので、カットオフ状態であっても開口部を通過する。バイアス電圧を深くしても漏れ電子量が減少しない理由は、バイアス電圧を衝撃電圧として利用したため、バイアス電圧を深くすると反射電子の放出エネルギーが増加し、開口部を通過する量が減少しないことにある。

タングステンの反射電子放出比は、衝撃電圧 1 kV、入射角度 0° (垂直入射) のとき 0.3 程度⁵⁾ の値である。磁界の影響によっ

て、衝撃電子軌道は子午面外に偏向されるので、陰極に衝撃するときの入射角度は大きい(図 2.7)。反射電子放出比は入射角度とともに増加する値である。反射電子放出比が 0.3 以上であることを考えると、衝撃電子量が 5 mA のときに陰極から発生する反射電子は 1.5 mA 以上の量になる。

反射電子は放出角度分布⁶⁾をもち、鏡面反射に近い角度に放出されるものが多い。図 2.6(a) に示した電極配置のときに測定された漏れ電子が 1 mA の量であったのは、陰極先端近くに衝撃する電子が多く、軌道がやや下向きになっていることから、下方に向かって放出される反射電子が多いためと考えられる。このように考えると、図 2.6(b) に示した電極配置にしたときに漏れ電子量が 0.4 mA に減少したのは、衝撃範囲が上に移動したことや軌道が上向きになったことで、下方に放出される反射電子が少なくなっているためと考えることができ、定性的ではあるが実験結果を説明できる。

漏れ電子量を低減するためには、加熱に必要なとされる衝撃電子量を減らして反射電子の発生量を抑える必要がある。収束用電極を付加した加熱用電子銃を採用して、衝撃電子の加速電圧を高くすると、加熱に必要なとされる衝撃電子量は減らすことができる。たとえば、衝撃電子の加速電圧を 5 kV まで高くすると、1 mA の衝撃電子量で 5 W の衝撃電力が得られる。この衝撃電圧では反射電子放出比は 0.4 程度⁵⁾ の値に増加するのであるが、衝撃電子量を 1/5 にする効果のほうが大きい。衝撃電子量を減少すれば、漏れ電子量もほぼ同じ割合で減少できるはずである。

ウェーネルト開口部の直径が 2 mm と大きいことも、漏れ電子量が多い原因の一つである。収束用電極を付加した加熱用電子銃を採用すると、バイアス電圧を浅くすることができる。そこで、ウェーネルト開口部の直径を従来のポイント陰極電子銃と同じ 1

mmに小さくする。開口部の面積を1/4に減少すれば、漏れ電子量はほぼ同じ割合で低減するはずである。この効果に衝撃電圧を5kVにして衝撃電子量を1/5にする効果を加えると、漏れ電子量は予備実験結果の1/20、すなわち50 μ A程度まで低減できると考えられる。

2.4 収束用電極を付加した局所加熱用電子銃

2.4.1 電子銃の構成

加熱用電子銃に収束用電極を付加した場合の効果を調べるために、図2.8に示す電子銃を試作した^{7,8)}。収束用電極の寸法や形状は、実際に電極をいくつか製作して、どの程度小さなものが製作できるか検討して決めた。収束用電極は、陰極と対向する開口部の直径を7mmにすると、開口部の加工も容易にできるとわかった。この寸法を基にして、他の電極の寸法と形状を変更した。ループフィラメントは収束用電極の開口部の少し外側に置く必要があるため、ループ直径は5mmから8mmに変更した。ループフィラメントは直径0.1mmタングステン線で製作し、発生する磁界を小さくするようにした。ウェーネルトとシールド電極の形状も変更して、衝撃電子を陰極に収束できるようにした。ウェーネルト開口部の直径は1mmにした。また、陰極は直径0.1mmタングステン線に交換した。

ウェーネルトとシールド電極は同電位とし、これらの電極に対してループフィラメントに負の電圧を加える。収束用電極にはループフィラメントよりもさらに負の電圧を加えて、衝撃電子の放出範囲を調整すると同時に衝撃電子の軌道の広がりを抑える。ループフィラメントと収束用電極間の電圧は、自己バイアス抵抗で供給する方法をとった。衝撃電子がループフィラメントから陰極に流れると、バイアス抵抗の電圧降下だけ収束電極の電位が

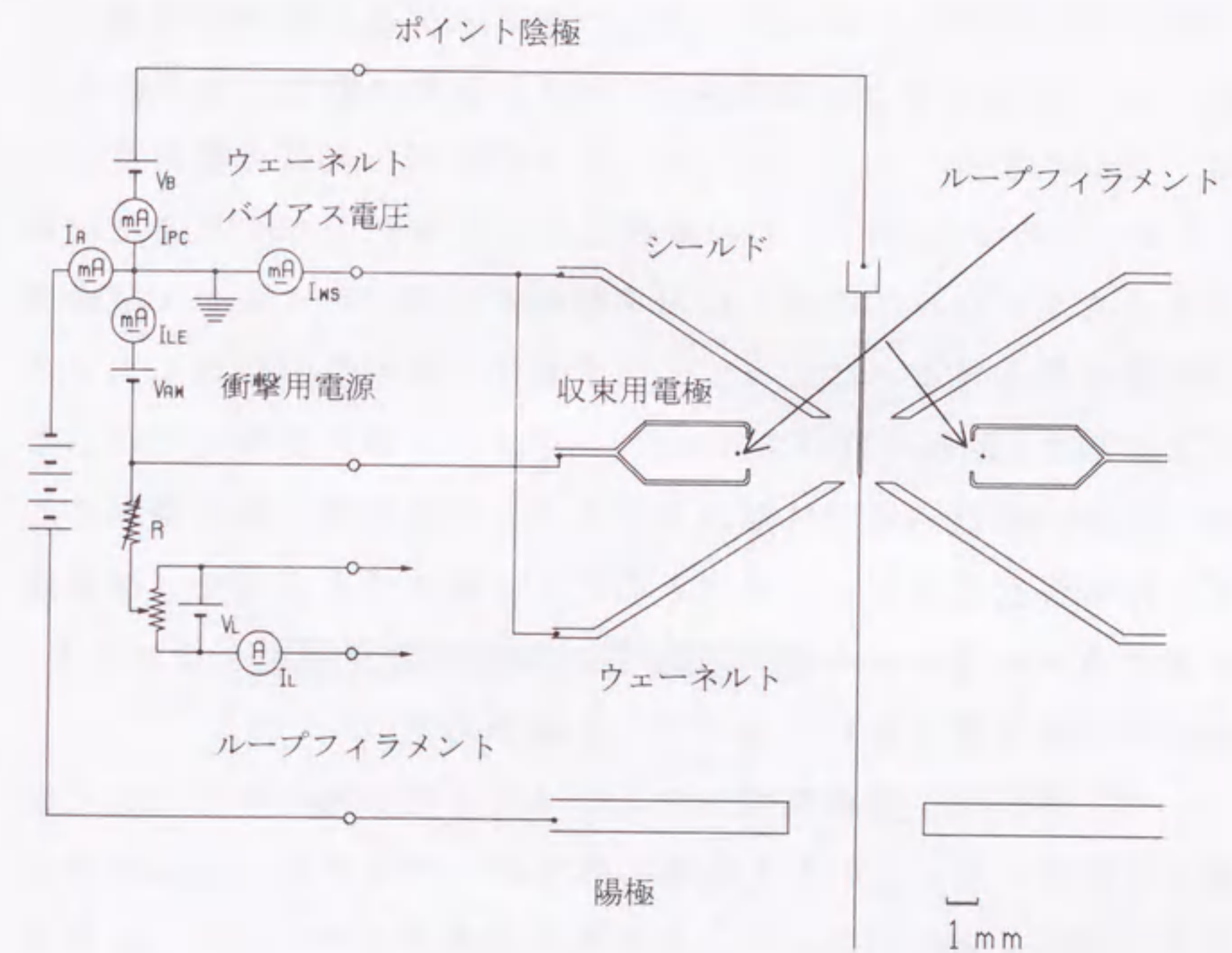


図2.8 収束用電極を付加した局所加熱用電子銃

下がる。交流磁界の発生を防止するために、ループフィラメントの加熱用電源は直流に変更した。

2.4.2 特性の評価

陰極の加熱は、衝撃用電圧 V_{AW} を -5.5 kV とし、ループフィラメントを $2,500$ K に通電加熱して調べた。ウェーネルトバイアス電圧 V_B は -200 V とした。自己バイアス抵抗を調整し衝撃電子量を 0.6 mA にすると、陰極は $3,000$ K に加熱されることがわかった。このときのループフィラメントと陰極間の実質の衝撃電圧は 5.2 kV であった。約 3 W の衝撃電力で陰極を $3,000$ K まで加熱できるようになったのは、収束用電極を付加したことおよび磁界の影響を抑えたことによつて、衝撃電子の集中性が改善していることに加え、陰極を直径 0.1 mm タングステン線に交換しているためである。自己バイアス抵抗を小さくして衝撃電子量を増加すれば、陰極温度はさらに上昇できることも確かめた。また、衝撃電子量はウェーネルトバイアス電圧を ± 100 V 変えても一定であり、陰極の加熱温度は変わらないことを確かめた。

この実験は、陰極先端をウェーネルト開口部と同じ高さに配置して行なった。このとき陰極の蒸発は、先端から 0.7 mm 程度上で速く進むことがわかった。先端部を加熱するためには、収束用電極およびループフィラメントの位置の変更が必要である。

つぎに、陰極先端からの電子放出を陽極電圧 30 kV で調べた。陰極先端をウェーネルト開口部と同じ高さに配置したときのカットオフバイアス電圧は -200 V であった。バイアス電圧をカットオフから浅くすれば、陰極先端から放出する電子ビームスポットが観察される。電子放出は、従来のポイント陰極電子銃と同じようにバイアス電圧で容易に調整できることが確かめられた。また、漏れ電子も減少して、陰極を $3,000$ K に加熱したときの量は 50 μ A

であることが確かめられた。

2.4.3 数値解析による特性の検討

この電子銃の電位分布と衝撃電子軌道を数値解析した結果を図 2.9 に示す。陰極に対して、ウェーネルトおよびシールド電極 -200 V、ループフィラメント -5.2 kV、収束用電極 -5.4 kV としたときの結果である。ループフィラメント-ウェーネルト間の電位分布は 500 V 間隔の値を示している。

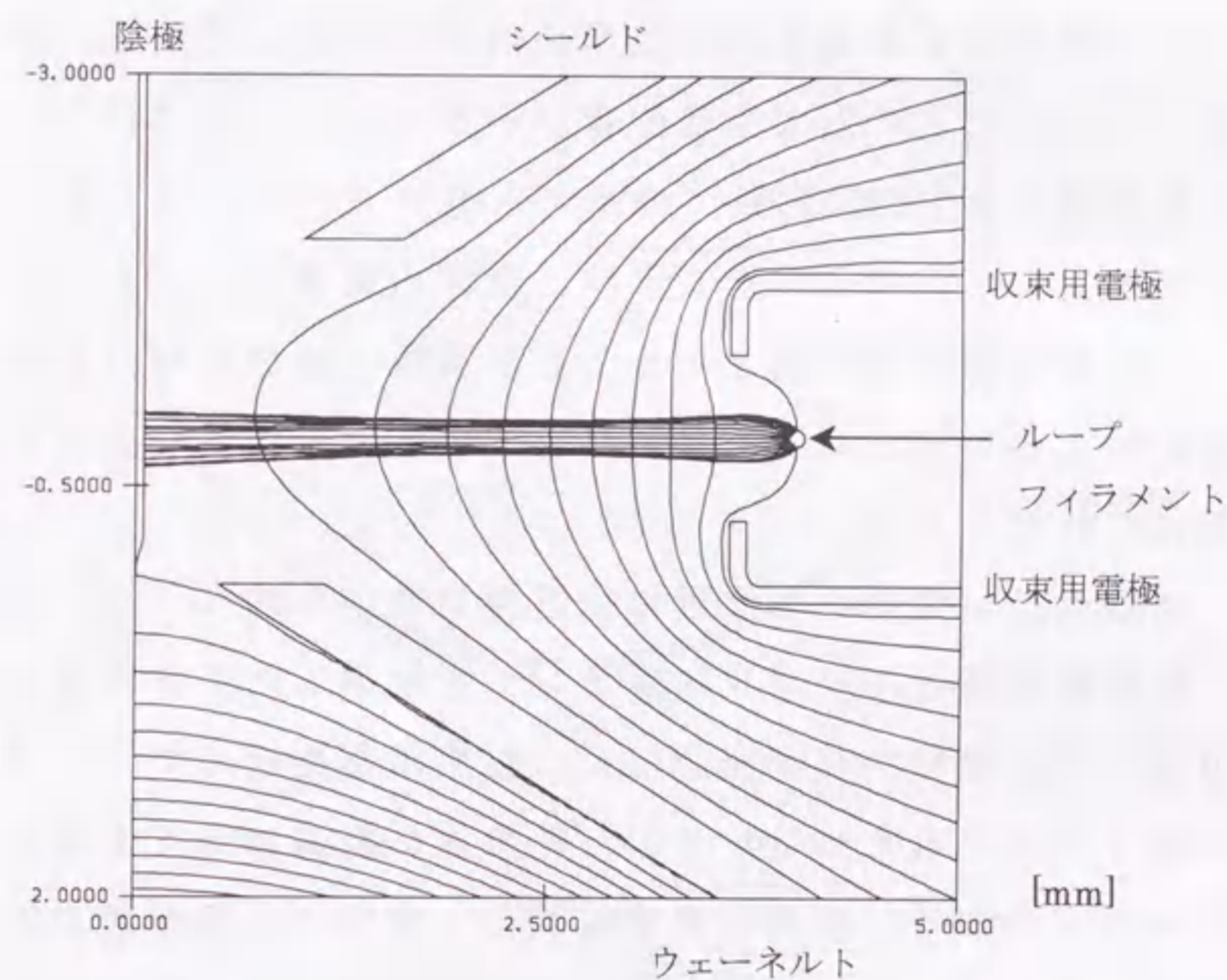


図 2.9 収束用電極を付加した局所加熱用電子銃の数値解析例 陰極 0 V、ウェーネルトおよびシールド電極 -200 V、ループフィラメント -5.2 kV、収束用電極 -5.4 kV の場合。電位分布は 500 V 間隔。

収束用電極を付加したことによって、ループフィラメントの電子放出範囲は陰極に対向する面だけに制限されている。また、衝撃電子の軌道の広がりも抑えられていて、衝撃電子はディスク状のビームを形成している。放出範囲と軌道の広がり、ループフィラメント近くの電位分布によって決定されていることもわかる。軌道解析は、ループフィラメントを 2,500 K に通電加熱する電流 1.55 A によって発生する磁界を考慮して行なっている。

図 2.10 に衝撃電子軌道を光軸に垂直な面に投影した様子を示す。加熱電流 I_L を減少したことによって磁界 B は小さくなり、陰極における衝撃電子軌道の変位量は中心から 0.02 mm に減少している。衝撃電子の集中性はこの面内でも向上している。ループ直径を 8 mm に大きくしても変位量が小さく抑えられていることには、衝撃電子を中心に向けて加速する電界 E が強くなっている影響もある。2.3.2 で述べたように、収束用電極を付加することにより、陰極加熱特性が向上することが実験で確かめられたが、数値解析によるシミュレーションによっても実験結果を裏付ける結果が得られた。

衝撃電子が集中する位置は、陰極先端から約 0.7 mm 上にあり、収束用電極とループフィラメントを配置した高さに等しい。衝撃電子は、光軸から半径 3 mm の収束用電極近くで 1-1.5 keV に加速されているため(図 2.9)、その後の軌道はほぼ直線状のまま陰極に到達する。陰極の衝撃位置は、電極の位置を変えることによって調整できる。陰極先端部を局所加熱するためには、ループフィラメント、収束用電極およびシールド電極の位置を 0.7 mm 下げる変更を加えることにより実現できると考えられる。

ループフィラメント、収束用電極およびシールド電極の位置を 0.7 mm 下げて実験を行なった結果、陰極先端部を加熱できることがわかった。しかし、このときの漏れ電子量は増加し 100 μ A

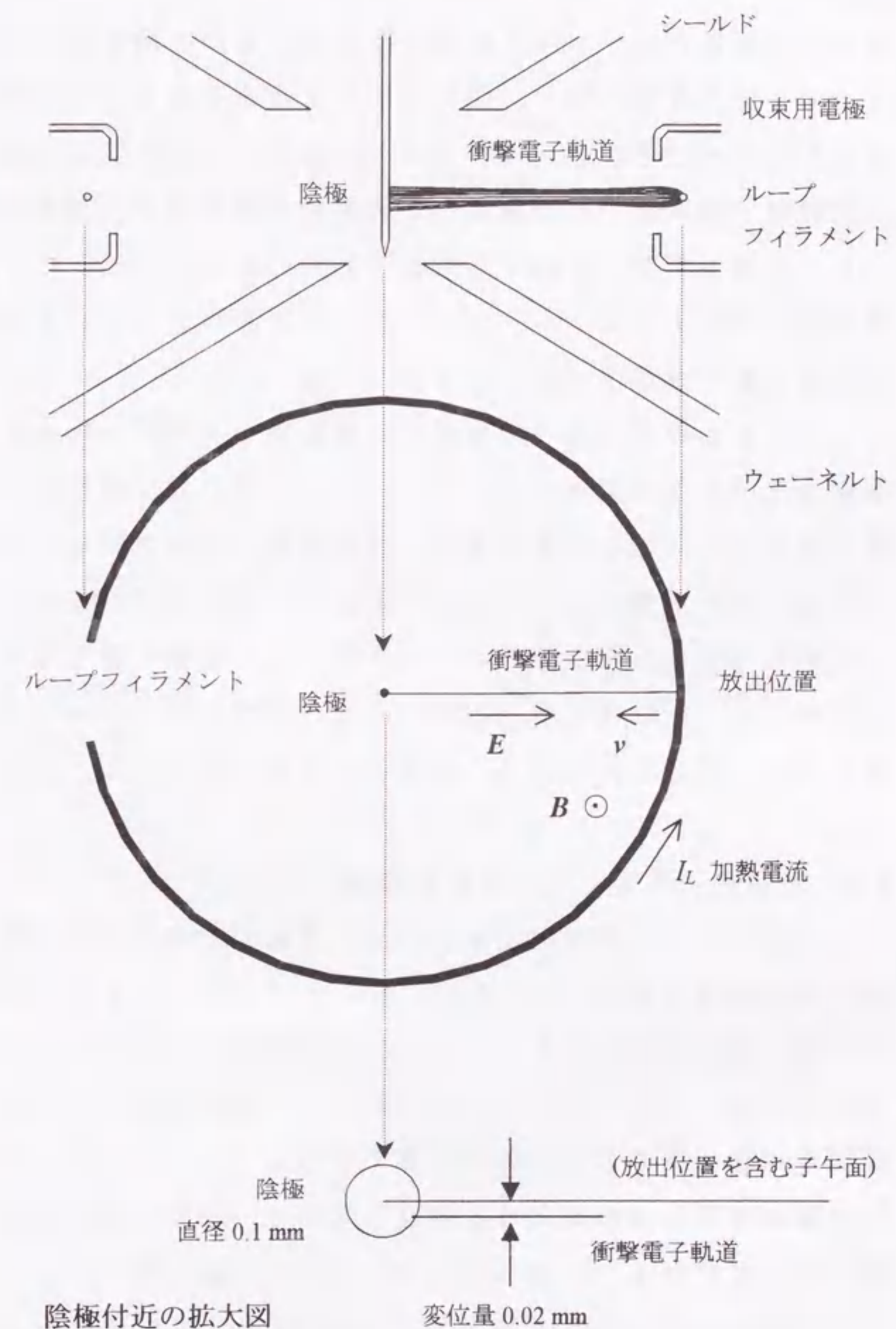


図 2.10 衝撃電子軌道におよぼす磁界の影響
ループフィラメント加熱電流 1.55 A の場合

程度になった。漏れ電子が増加する原因を調べたところ、陰極先端近くにあるウェーネルト電極の開口部付近に、衝撃電子や反射電子の一部が直接入射し、開口部から二次電子および反射電子が発生していることがわかった⁸⁾。ウェーネルト開口部に衝撃電子や反射電子が入射する問題は、この電極を衝撃電子の加速用電極として利用したために起こる問題であり、2.2.2 で述べた予備実験用電子銃のように、ループフィラメントをウェーネルト電極と同電位に置く方法では起こらなかったものである。

こうした原因によって発生する漏れ電子を抑えるためには、衝撃電子の軌道を変更して、ウェーネルト開口部に衝撃電子が入射しないようにする必要がある。このため、ループフィラメントをウェーネルト開口部よりも下に配置し、陰極先端部を下の方から衝撃する方法を検討することにした^{8,9)}。電極位置をこのように変更して、衝撃電子軌道をやや上向きにすれば、ウェーネルト開口部に入射する衝撃電子は減少できるものと考えた。

2.5 最終的に決定した電子銃の構造

前節で述べた考えを基本として、電極の配置方法を改良した電子銃の構造を図 2.11 に示す。ループフィラメントはウェーネルト開口部の上面よりも 0.3 mm 下に配置した。これに合わせて、収束用電極、ウェーネルトおよびシールド電極の形状を変更し、陰極先端部を下の方から衝撃加熱できるようにした。ウェーネルト電極の形状には次のような改良も加えた。まず、開口部の上面を平坦な形状にして、開口部の厚みは 0.1 mm に薄くした。これは開口部の内面や下面に入射する衝撃電子を減らすための改良である。また、陽極にもっとも近いウェーネルト電極の下の面から開口部までの入り込み距離を小さくする改良も加えた。これは開口部付近の加速電界を強くして、陰極先端を開口部よりも少し

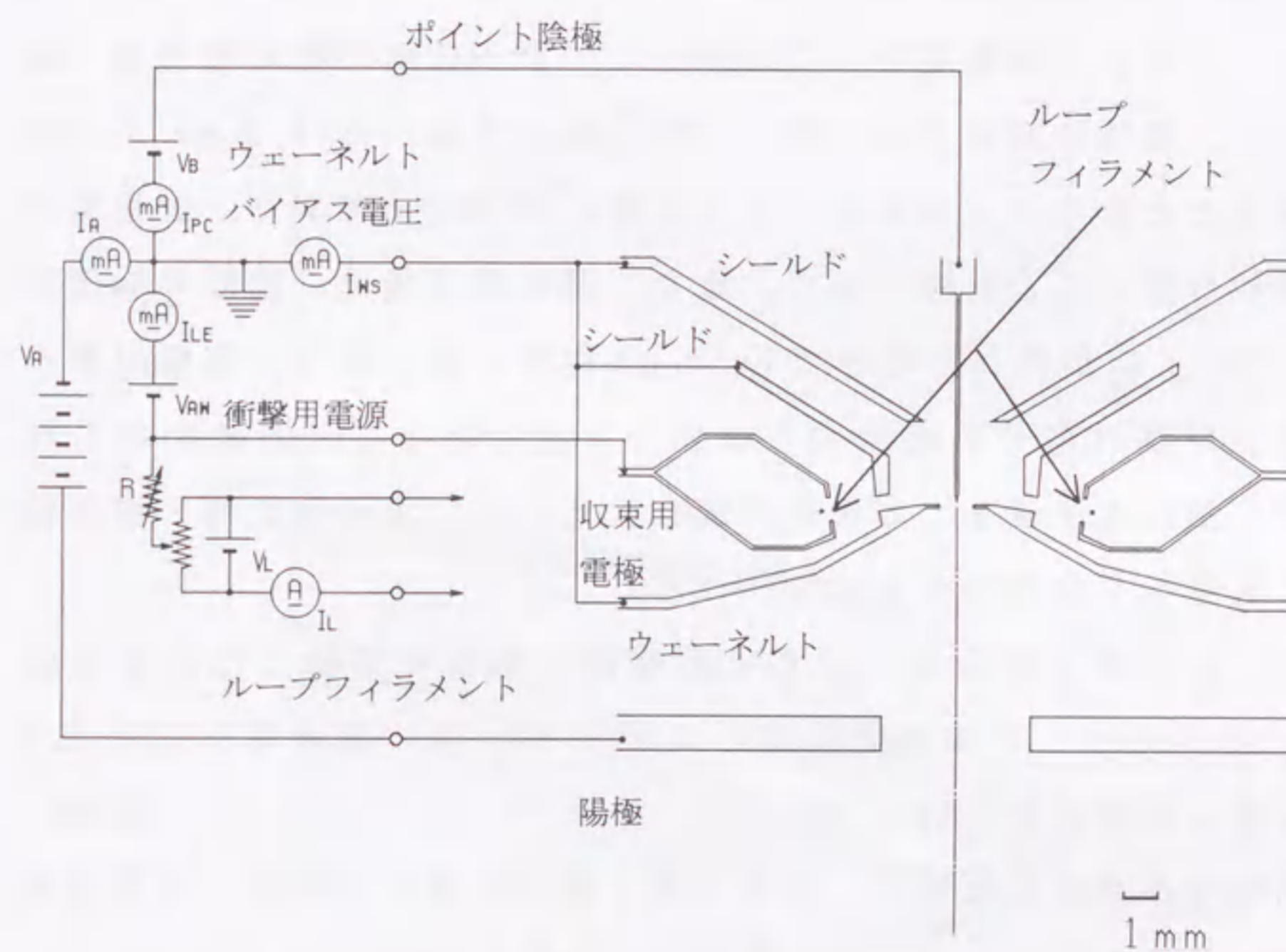


図 2.11 最終的に決定した電子銃の構造

上に配置できるようにした改良である。反射電子の発生源となる陰極先端部を開口部よりも少し上に配置すれば、開口部に直接入射する反射電子を減少できると考えた。

陰極の加熱は、陰極先端をウェーネルト開口部の下面から 0.3 mm 上に配置して調べた。ウェーネルトバイアス電圧は -200 V とし、ループフィラメント温度は 2,500 K、衝撃電圧は 5.2 kV とした。衝撃電子量 0.6 mA、約 3 W の衝撃電力で、陰極先端部は 3,000 K に加熱されることがわかった。

つぎに、陽極電圧を 30 kV として電子放出と漏れ電子量を調べた。陰極先端はウェーネルト開口部の下面から 0.3 mm 上に配置したときのカットオフバイアス電圧は -200 V であり、改良前と変わらないことを確かめた。また、漏れ電子量は、陰極先端部を 3,000 K に加熱したときでも 15 μ A 程度の値であり、電極配置の改良が漏れ電子を低減する有効な方法であることが確かめられた。漏れ電子量をこの程度の値に抑えれば、電子銃を電子顕微鏡に装着して動作できる。

この電子銃の電位分布と衝撃電子軌道を解析した結果を図 2.12 に示す。収束用電極電圧は -5.5 kV、他の電極電圧は図 2.9 に示した解析例と同じ値である。ウェーネルトとシールド電極の間隙を小さくしたので、加熱用電子銃部の電位分布は、収束用電極の近くに集中している。衝撃電子の軌道の広がりはやや大きく、陰極の衝撃範囲は広いが、このような場合でもウェーネルト電極の開口部に入射する衝撃電子はない。磁界の影響による軌道の変位量は、図 2.10 に示した結果と同じであった。

陰極から発生する反射電子については、次のことが考えられる。衝撃電子軌道を上向きにしたので、陰極で発生する反射電子の多くは上方に放出される。このような反射電子は、シールド電極の突き出し部に入射しているものと考えられる。ウェーネルト

とシールド電極の間を通過して加熱用電子銃の内部まで進んだ反射電子は、押し戻されてウェーネルトやシールド電極に入射する。ウェーネルトとシールド電極間の間隙を狭くしたので、押し戻されたあと陰極やウェーネルト開口部まで進む反射電子はわずかである。このことも、漏れ電子量が低減した理由の一つになっていると考えられる。

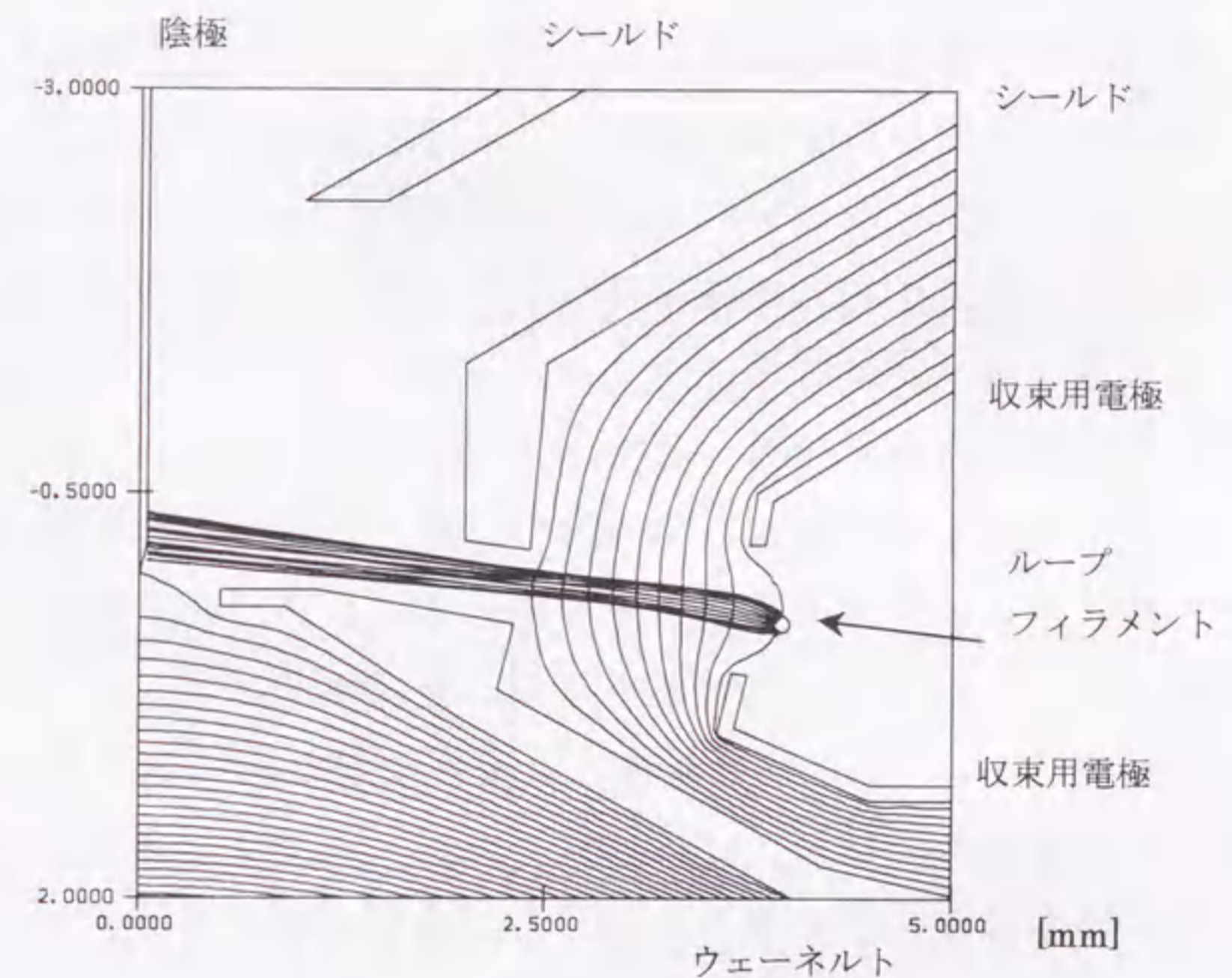


図 2.12 最終的に決定した電子銃の数値解析例

陰極 0 V、ウェーネルトおよびシールド電極 -200 V、ループフィラメント -5.2 kV、収束用電極 -5.5 kV の場合。電位分布はループフィラメント-ウェーネルト間 500 V 間隔、陰極-陽極間 200 V 間隔。

これまでは、電子銃を構成する電極の主要な部分の形状を示しながら改良点について説明してきた。以下では、これまでに触れなかった電子銃の全体の構造、電極の支持方法や製作方法などについて説明する。電子銃の設計と製作は、電子銃を電子顕微鏡に装着して動作特性を調べることを予め想定して進めた。電子顕微鏡に装着するためには、ウェーネルト電極の円筒部の直径を通常の電子銃と同じ程度にしておくことが望ましい。このため、陰極加熱用電子銃は直径約 30 mm の円筒電極の内部に配置した。製作した電子銃全体の構造を図 2.13 に、円筒電極の内部に配置する電極の組立図を図 2.14 に示す。

ループフィラメントと収束用電極は、上下二つの絶縁体リングの間に固定する。絶縁体リングには加工が比較的容易で耐熱温度が高いボロンナイトライド(BN)を使用した。ウェーネルトとシールド電極は厚さ 0.3 mm、収束用電極は厚さ 0.1 mm のステンレス板で製作した。図 2.14 に示すように、円筒電極の内部には下から順にウェーネルト電極、下部絶縁体リング、収束用電極、ループフィラメント、上部収束用電極、絶縁体リング、シールド電極を配置していく。上部絶縁体リングに直径 2 mm のステンレス製ボルト 3 本を取り付け、このうち 2 本はループフィラメント固定用および加熱電流供給用の端子として使用する。他の 1 本は収束用電極の電圧供給用端子として用いる。

加熱用電子銃を構成する電極は、各電極の開口部が光軸を中心として同心円状になるように配置する。この軸調整はウェーネルト開口部を基準にして行う。このようにして組み立てた電極は、図 2.13 に示すように円筒電極の上部から押え板とボルトで固定する。このあと、ループフィラメントを真空中で一度 2,800 K まで加熱する。ループフィラメントは、加熱後も真円に近いループ形状を保つものだけを用いる。ループ部分が楕円形になったもの

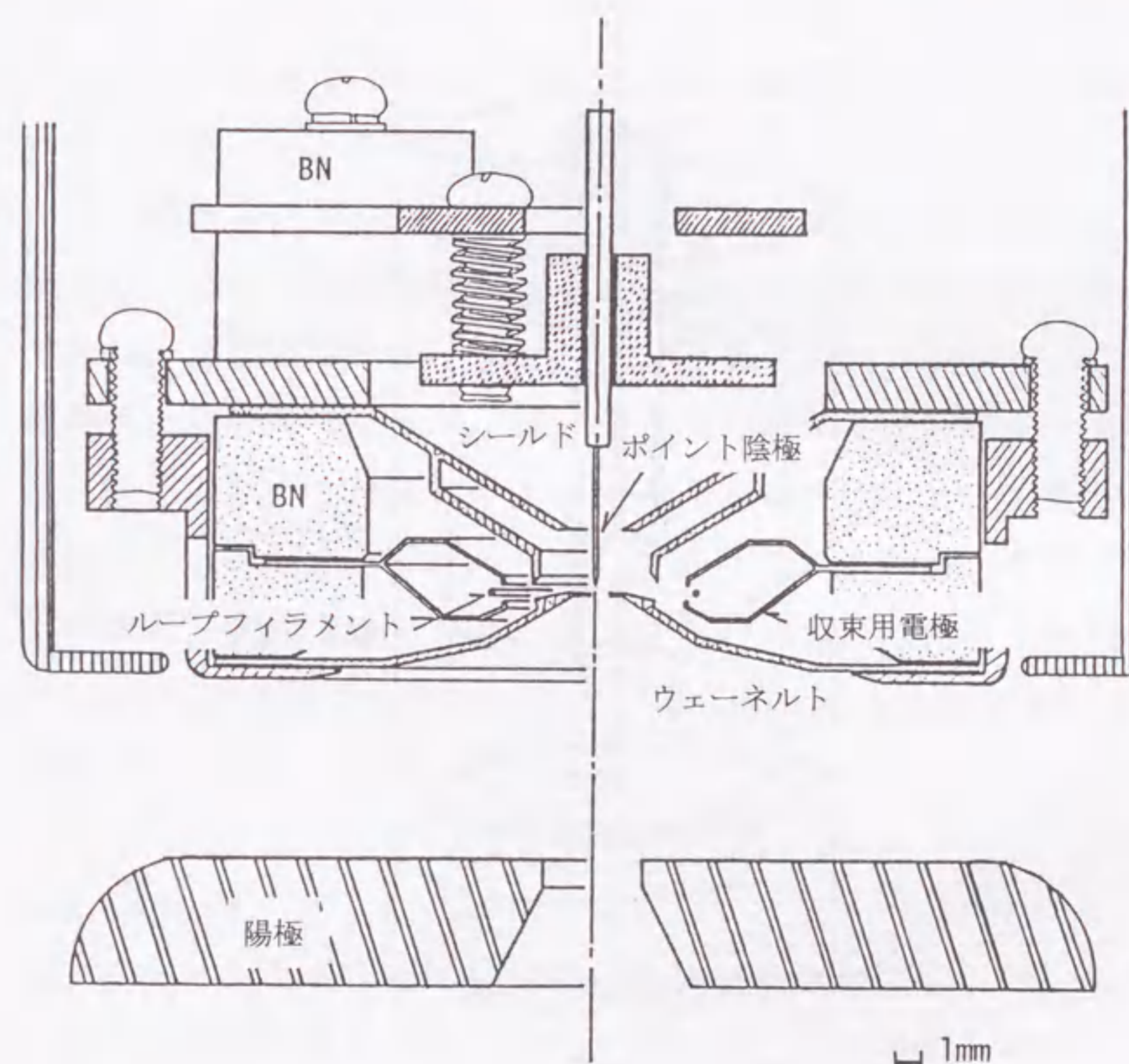


図 2.13 製作した電子銃の全体の構造

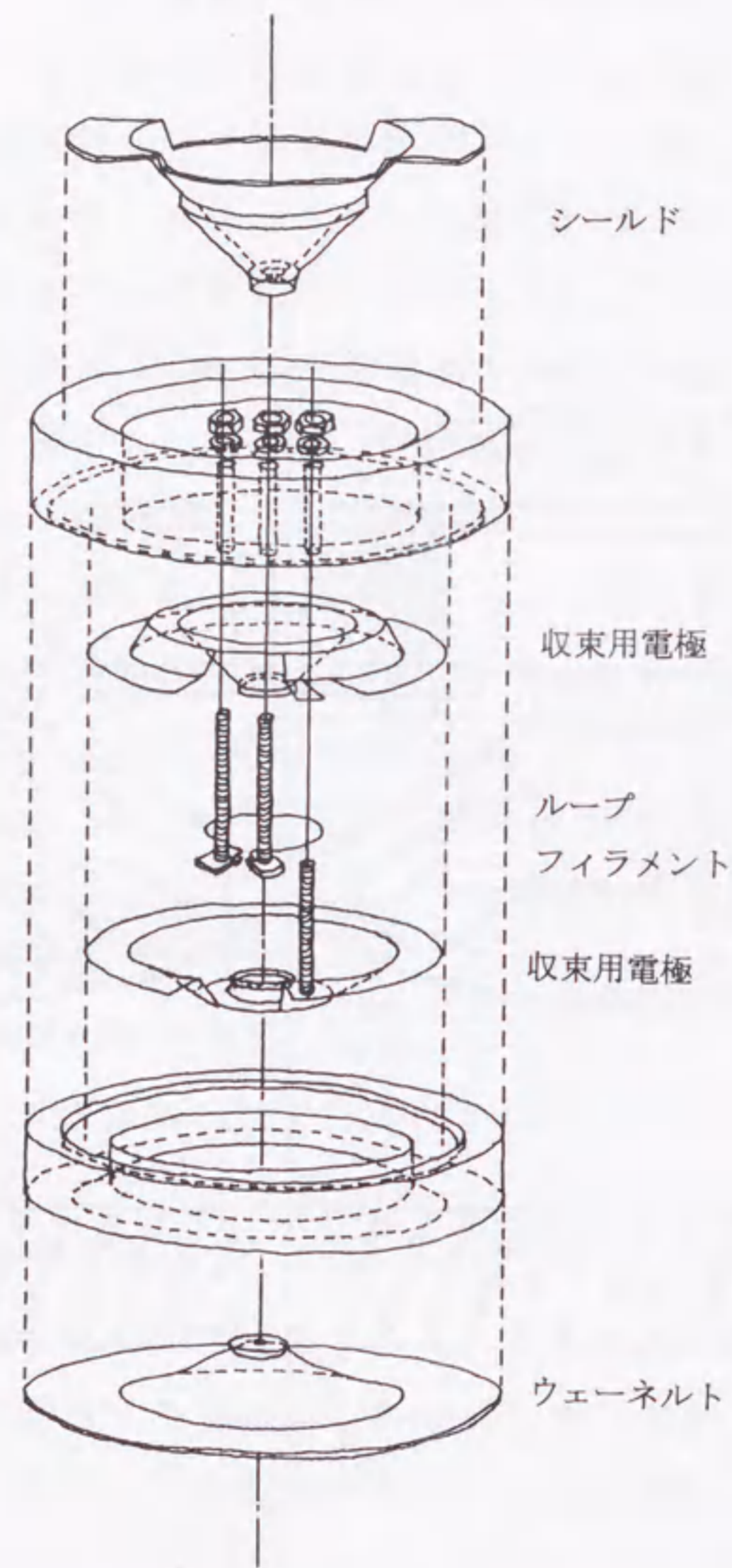


図 2.14 ウェーネルト円筒電極の内部に配置する電極と絶縁体

や、ループ位置が移動してループの中心が陰極から外れてしまったものはこの段階で交換する。

陰極は、直径 1 mm 長さ約 30 mm のタングステン線の一端に、直径 0.1 mm 長さ 20 mm 程度のタングステン線をスポット溶接で固定したあと、固定部から約 6 mm のところを電界エッチングして作製した。直径 1 mm のタングステン線を支持部に固定する。支持部はボロンナイトライド (BN) で絶縁されたステンレス板にスプリングを介したボルトで取り付けて、陰極先端位置の調整を容易にした。

陰極を取り付けたあと、2.4 で述べた条件で加熱用電子銃を動作し、陰極の加熱温度を調べる。2-3 回の軸調整で陰極を加熱できる。異なるループフィラメント温度において測定される陰極加熱特性については次章で述べる。加熱用電子銃を構成する電極は、陰極先端から絶縁体リングが見えない形状にして、蒸発した陰極材料が絶縁体リングの内面に付着しないようにしている。電子顕微鏡に装着するときは、円筒電極の周囲に放電防止用電極を取り付ける。このようにすることで電子銃はビーム加速電圧 50 kV で動作できる。

2.6 まとめ

ポイント陰極の先端部を電子衝撃で局所加熱する方式を採用した電子銃の設計と製作について述べた。予備実験と衝撃電子軌道の数値解析を基に、局所加熱のために必要とされる電極の構成と動作電圧を検討した結果、衝撃電子を陰極先端部に集中するためには、加熱用電子銃に収束用電極を付加して、衝撃電子を高い電圧で加速する必要があることがわかった。このような加熱用電子銃を採用すれば、陰極加熱に必要なとされる衝撃電子量は減少して、陰極から発生する反射電子量も低減できる見通しが得られた。

収束用電極を付加した加熱用電子銃の試作と改良を進めた結果、衝撃電子の収束性は向上し、陰極先端部を加熱できるようになった。また、陰極の加熱に必要なとされる衝撃電子量は減少し、陽極に到達する反射電子量は抑えられた。最終的に決定した電子銃の電極構成、各電極の動作電圧について説明した。

参考文献

- 1) Ohshita A, Shimoyama H, Maruse S: Brightness of the hot cathode electron gun at high emission densities. *J Electron Microscopy*, **27**, 253-257 (1978)
- 2) Bloomer RN: The lives of electron microscope filament. *Brit J Appl Phys*, **8**, 83-85 (1957)
- 3) Bas EB: Die Bolzen-Kathode. Eine indirekt geheizte Wolfram-kathode für Elektronenkanonen. *Z angew Physik*, **7**, 337-344 (1955)
- 4) Broer AN: Some experimental and estimated characteristics of the lanthanum hexaboride rod cathode electron gun. *J Phy E*, **2**, 272-276 (1969)
- 5) Kollath R: Sekundärelektronen-Emission fester Körper bei Bestrahlung mit Elektronen. *Handbuch der Physik*, **34**, pp.232-303, Springer-Verlag, Berlin (1954)
- 6) Schiller S, Heisig U, Panzer S: *Electron Beam Technology*. pp.36-38, John Wiley & Sons, New York (1982)
- 7) 飯吉 僚, 竹松英夫: 電子衝撃加熱型電子銃内の衝撃電子軌道. 愛知工業大学研究報告, **17**, 27-32 (1982)
- 8) 飯吉 僚, 竹松英夫: 電子衝撃加熱型電子銃の改良. 愛知工業大学研究報告, **18**, 13-17 (1983)
- 9) 丸勢 進, 飯吉 僚: 電子衝撃加熱型電子銃. 科学研究費総合研究 A「ビームプロセス技術に関する総合的研究」研究会報告書, **8** (1982)

第3章 電子放出特性と寿命

3.1 はじめに

電子顕微鏡用電子銃の電子放出特性の中で重要なものは、序論で述べたように輝度特性である。電子銃から放出されるビームの輝度を測定するためには、ビーム発散角を制限したうえで、ビーム電流密度を測定する必要がある。ポイント陰極電子銃から放出されるビームの発散角は数 mrad であり、ビームを収束したときに得られるスポットは直径 1 μm 程度と小さい。このため輝度を測定する場合には、後述するように電子顕微鏡のレンズ系と絞りを利用して発散角を制限し、ビームスポットを拡大して電流密度を測定する方法が用いられる。電子銃を電子顕微鏡の鏡筒部に装着すると、陰極先端温度を測定することが難しくなるので、加熱用電子銃の陰極加熱特性を調べておく必要がある。

この章では、加熱用電子銃から放出される衝撃電子量(以下、衝撃電流)と陰極先端温度の関係を調べた結果について述べたあと、電子銃のバイアス-放出電流特性および輝度特性を測定した結果と陰極寿命を調べた結果について述べる。測定結果を基に、製作した電子銃の電子放出特性と寿命を説明する。

3.2 陰極加熱特性

加熱用電子銃を図 2.11 に示した回路で動作させて、陰極加熱特性を調べた。各電極の電圧については、陰極の電圧を基準としてウェーネルトとシールド電極を $V_B = -200 \text{ V}$ 、ループフィラメントを -5.2 kV とした。収束用電極はループフィラメントより低い電圧であり、ループフィラメントの電子放出領域(すなわち放

出電流)を決める働きをもつ。また、放出された衝撃電子の収束性にも影響し、陰極の電子衝撃範囲を調整する働きをもつ(図 2.12 参照)。自己バイアス抵抗 R の値を変えて衝撃電流 I_{LE} を調整すると、ループフィラメントと収束用電極間の電圧 V_R は変化する。電圧 V_{AW} を調整してループフィラメント電圧すなわち衝撃電圧を一定に保った。ループフィラメントは 1.5 A、1.55 A、1.6 A、1.65 A の各電流で加熱し、それぞれの場合の陰極加熱特性を測定した。各加熱電流に対応するループフィラメント温度は 2,480 K、2,520 K、2,570 K、2,620 K である。陰極先端部の温度は陽極孔の下からマイクロパイロメータ (PYRO-WERK GmbH 製) を使用して測定した。

ウェーネルト開口部の下面から陰極先端までの距離 h (図 3.6 参照) が 0.3 mm のとき、電圧 V_{AW} の関数として測定した結果を図 3.1 に示す¹⁾。下から順にループフィラメントから放出される衝撃電流 I_{LE} [mA]、電流 I_{LE} と衝撃電圧 5.2 kV の積で評価した衝撃電力 P [W]、ループフィラメントから陰極に流れる陰極衝撃電流 I_{PC} [μA]、陰極先端部の温度 T_{PC} [K]、陽極に流れる漏れ電子電流 I_{AS} [μA] を示している。自己バイアス抵抗を小さくすると、収束用電極電圧はループフィラメント電圧 -5.2 kV に近づく。このとき、ループフィラメントの電子放出領域は広くなり衝撃電流は増加する。陰極先端部の温度は衝撃電流の増加とともに上昇する。ループフィラメント温度が 2,520 K (T_2) 以上のときは、陰極先端部を 3,150 K まで加熱できていることがわかる。

陰極加熱温度を 3,150 K までとしたのは、先端部の蒸発量を小さく抑えて、測定中に加熱特性が変わらないようにしたためである。衝撃電流を増加すれば、陰極はさらに高温まで加熱できる。たとえば、ループフィラメント温度を 2,570 K (T_3)、収束用電極電圧を -5.5 kV とし、衝撃電流を 1 mA まで増加すると、陰極

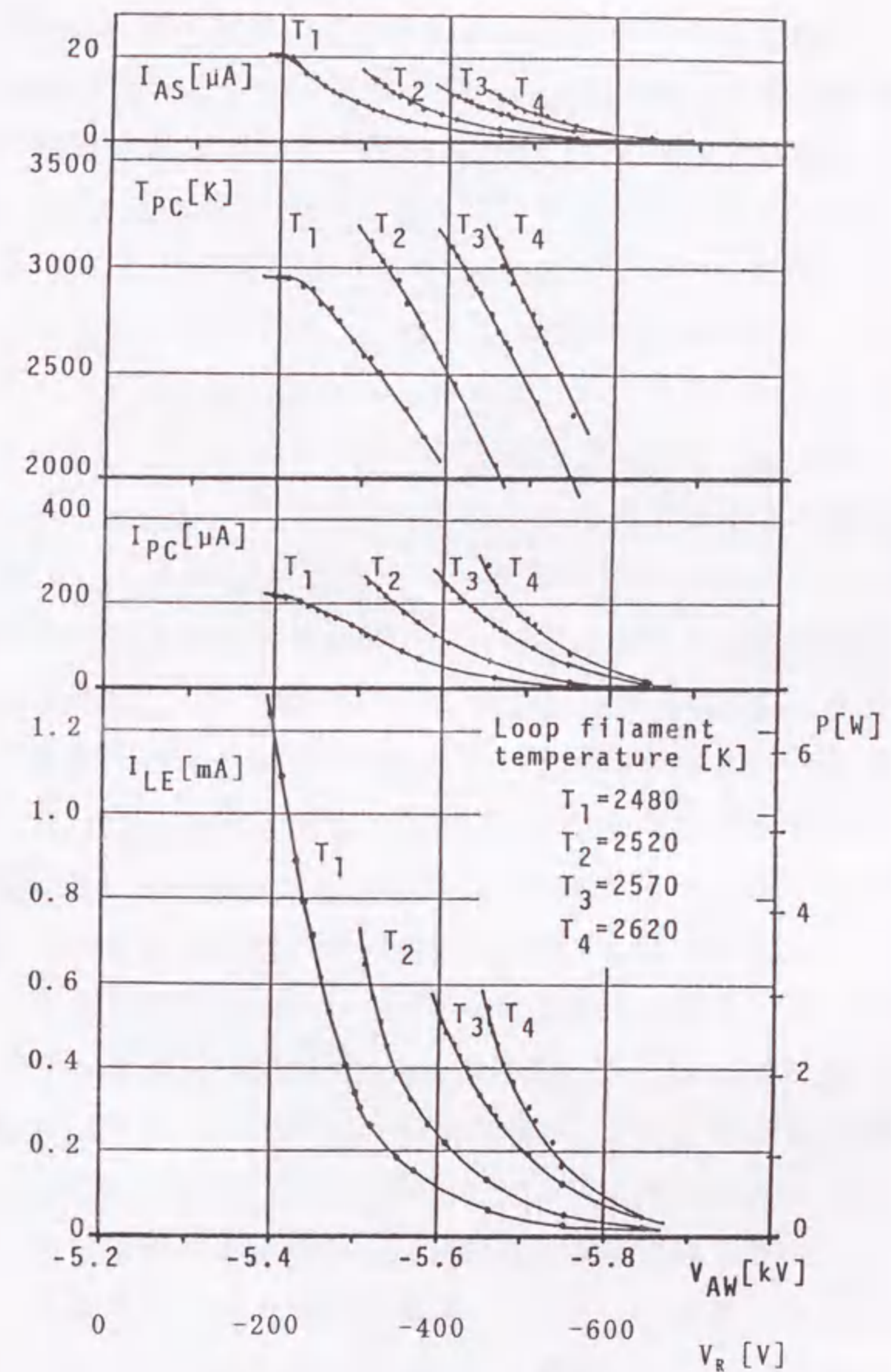


図 3.1 陰極加熱特性

衝撃電圧 5.2 kV 一定で測定。 T_{1-4} ループフィラメント温度。横軸 V_{AW} は収束用電極電圧。 I_{LE} ループフィラメントから放出される衝撃電子電流、 P 衝撃電力、 I_{PC} 陰極衝撃電流、 T_{PC} 陰極先端温度、 I_{AS} 陽極に流れる漏れ電子電流(図 2.11 参照)。

の先端部は溶融して球状になる。この結果から、加熱用電子銃は陰極先端部を融点(3,650 K)まで加熱できることを確認した。

陰極先端部を3,150 Kに加熱するのに必要な衝撃電流 I_{LE} は、ループフィラメント温度 2,520 K (T_2) のとき 0.7 mA であるが、ループフィラメント温度 2,570 K (T_3) および 2,620 K (T_4) のときには 0.6 mA 以下に減少する。これは、自己バイアス抵抗の電圧降下が大きくなり、衝撃電子の放出領域は小さくなるが、収束効果が強くなり、軌道の広がり小さく抑えられるために、陰極先端部を衝撃する電子が多くなるからである。

一方、ループフィラメント温度 2,480 K (T_1) の場合には、衝撃電流を 1 mA 以上にしても陰極を 3,000 K まで加熱できなくなる。これは、自己バイアス抵抗の電圧降下が小さくなり、衝撃電子の放出領域が大きくなるが、収束効果が弱く衝撃電子の軌道の広がりが大きくなって、ウェーネルトおよびシールド電極を衝撃する電子のみが増加するためである。このことは、陰極衝撃電流 I_{PC} が 200 μ A の一定値になっていることからわかる。衝撃電流に比べて陰極衝撃電流が少ないのは、ループフィラメントから放出された電子の一部はウェーネルトおよびシールド電極を衝撃することに加え、陰極に衝撃した電子の一部は反射電子としてウェーネルトおよびシールド電極に流れるためである。

陰極先端部の蒸発が進むと、先端位置は上に移動して衝撃範囲は減少する。このため、先端温度は次第に低下することが観察される。しかし、このような先端温度の低下は、自己バイアス抵抗を小さくし衝撃電流を増加する調整によって防止できる。自己バイアス抵抗を小さくして収束用電極の作用を弱くすると、衝撃範囲が広がるためである。陰極先端部の電子衝撃範囲は、加熱用電子銃をループフィラメント温度 2,520 K で動作すると広がる。この動作条件で自己バイアス抵抗を調整すると、陰極先端が

$h=0.5$ mm に移動したときでも衝撃加熱できることを確かめた。こうした実験結果によって、加熱用電子銃は衝撃電圧 5.2 kV、ループフィラメント温度 2,520 K で動作すればよいことがわかった。

3.3 電子放出特性

3.3.1 バイアス-放出電流特性

陽極電圧 30 kV において、陽極の下 80 mm の位置に置いた蛍光板上で観察される放出パターンを図 3.2 に示す。蛍光板は光軸に対して 45° 傾けて配置している。中心の明るいスポットは直径 1 mm 以下である。ウェーネルトバイアス電圧 V_B (図 2.11 参照) を調整すると、中心スポットの明るさや大きさは変化するが、周囲のパターンの明るさや広がりには変わらない。中心の明るいスポットが陰極先端から熱電子放出されたビームの断面であり、この周囲に広がっているのは漏れ電子である。熱電子放出ビームの発散角は半角 10 mrad 以下であり、漏れ電子の発散角に比べて小さい。

そこで、発散角 10 mrad に相当する直径 1.4 mm の絞り孔をもつ蛍光板を用いて、絞り孔を通過するビーム電流とバイアス電圧の関係を調べた。図 3.3 に測定結果を示す。異なる陰極加熱温度におけるビーム電流を測定した結果である。バイアス電圧を浅くすると、陰極先端の電子放出範囲が増加してビーム電流は増加する。カットオフバイアス電圧は -210 V 付近である。電子放出範囲は、カットオフからのバイアス電圧変化 $V_B - V_{cut-off}$ によって決まる。陰極温度が異なる場合でも、この電圧変化が同じであれば放出範囲は同じと考えてよい。同じ電圧変化におけるビーム電流を比べると、ビーム電流は陰極温度とともに指数関数的に増加していて、3,100 K のときでも空間電荷の影響は見られない。

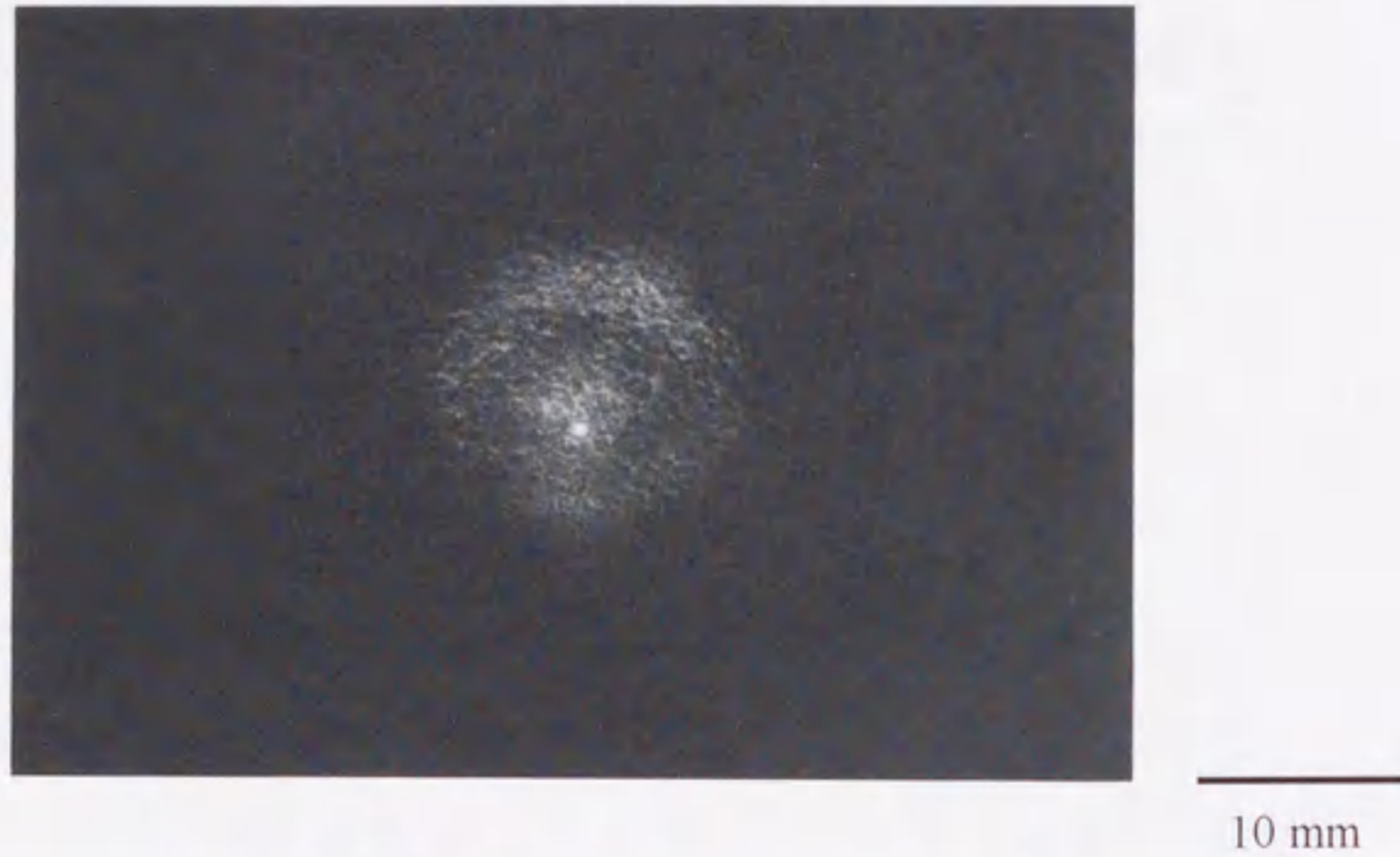


図 3.2 蛍光板上で観察される放出パターン
中心スポットは熱電子放出ビーム、周囲は漏れ電子。

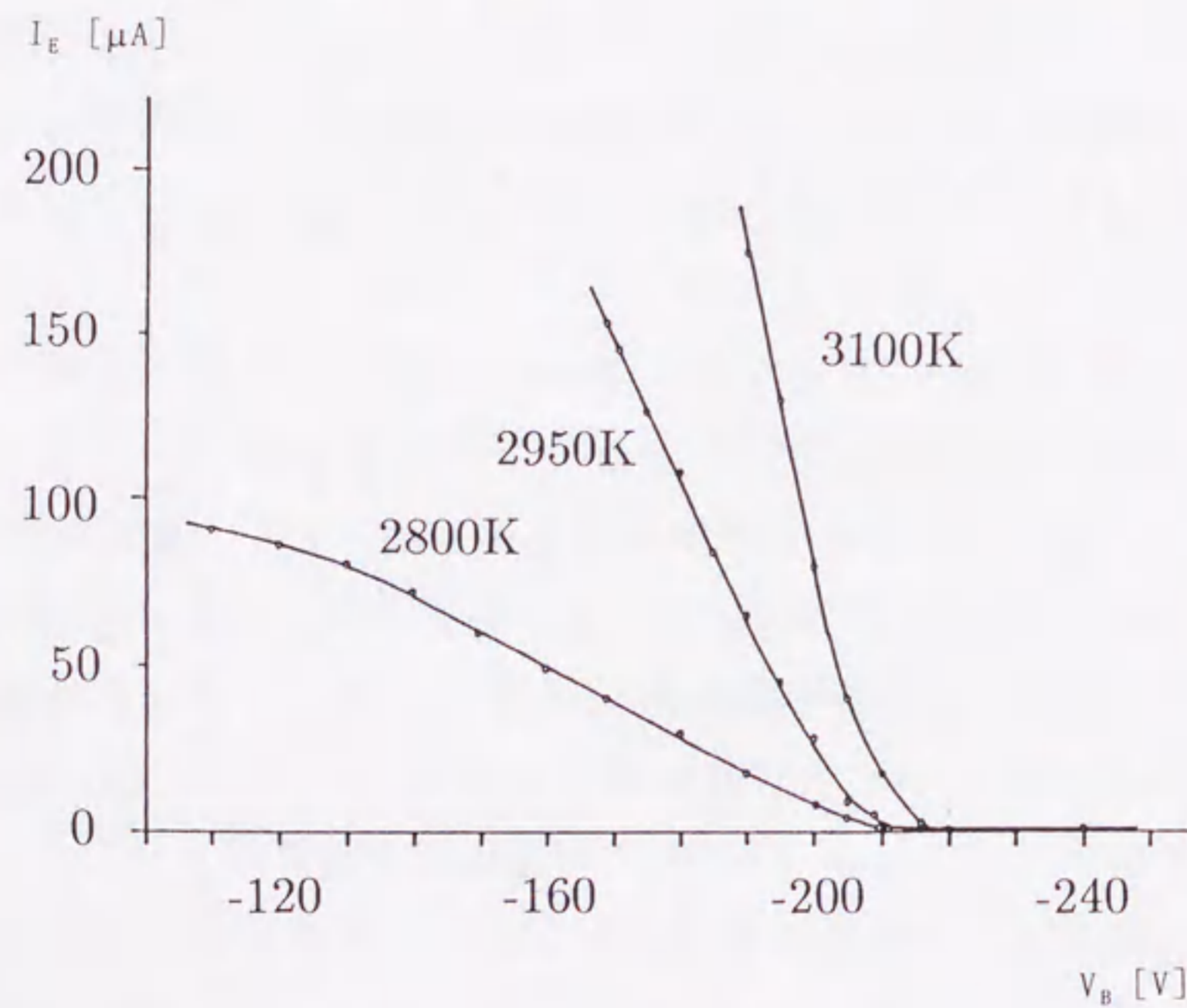


図 3.3 バイアス-放出電流特性
半角 10 mrad の角度制限絞りを通過する放出電流。

この測定結果から、電子銃は従来のポイント陰極電子銃と同じバイアス-放出電流特性をもつことがわかった。

陰極先端部の加熱温度を 3,100 K に上昇したとき、カットオフバイアス電圧が数 V 深くなっているのは、陰極の長さが熱膨張によってわずかに増加し、先端位置がウェネルト開口部に近づいたためである。熱膨張あるいは蒸発によって陰極先端位置が変化しても、カットオフからバイアス電圧を浅くすれば放出電流は図 3.3 と同じように増加する。先端位置の変化は、バイアス電圧の調整で補正できることがわかった。

3.3.2 輝度特性

3.3.2.a 測定方法

放出ビームの輝度を測定するためには、ビームの発散角を制限したうえで、最小ビーム断面の電子密度を測定しなければならない。こうした測定条件は、透過型電子顕微鏡のレンズ系を利用すると精度よく設定できる²⁾。このため、電子銃を日立 HU-11 型透過型電子顕微鏡の鏡体に装着して輝度を測定した¹⁾。この測定方法を採用すると、電子銃の動作を実際の使用条件のもとで検証できる。ビーム加速電圧は 50 kV とした。

使用した電子顕微鏡のレンズ系を図 3.4 に示す。放出電子は電子銃の内部で最小断面(クロスオーバー)を形成する。このクロスオーバー像を第 1 および第 2 コンデンサーレンズを用いて試料面に収束結像した。ビーム収束角は、第 2 コンデンサーレンズの絞り(半径 $r_c=250 \mu\text{m}$)を使用して 1.2 mrad に制限した。試料面上に収束結像したビーム断面の電流密度は、このビーム断面を拡大レンズ系(対物レンズ、中間レンズ、投影レンズ)によって蛍光板上に拡大投影したあと、蛍光板に設けた絞り($r=2.2 \text{ mm}$)を通過する電流をファラデーケージで測定した。拡大倍率は $M=10,000$

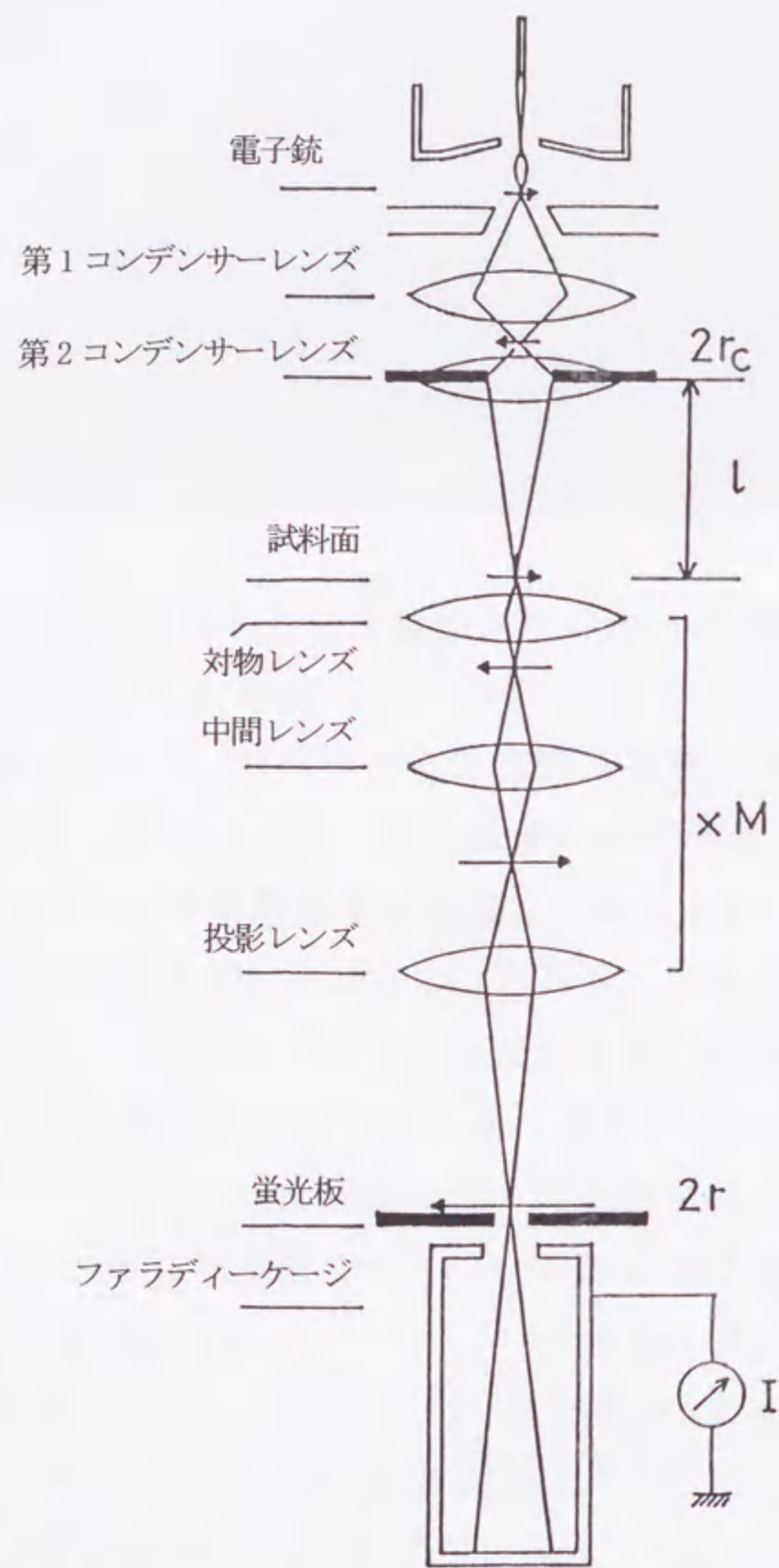


図 3.4 輝度測定に使用した電子光学系

倍とした。このとき測定されるケージ電流を I とすると、輝度の測定値 B_m は次式で与えられる。

$$B_m = \frac{I}{\pi (r/M)^2 \cdot \pi (r_c/l)^2} \quad (3.1)$$

電子銃を電子顕微鏡に装着すると、陰極先端温度をマイクロパイロメータで測定することが難くなる。このため、陰極の加熱温度は、図 3.1 に示した陰極加熱特性を基にして、加熱用電子銃の動作条件、すなわちループフィラメント温度、収束用電極電圧、衝撃電流から推定する方法をとった。

3.3.2.b 輝度

加熱用電子銃の動作条件を調整し、異なる陰極温度で得られる輝度を測定した。陰極先端はウェーネルト開口部の下面から高さ $h=0.3$ mm に配置した。輝度は一般にバイアス電圧とともに変化する。図 3.5 は、横軸をカットオフ電圧からのバイアスとして、縦軸に測定される輝度を示したものである。カットオフ付近では、陰極先端の電界が弱く熱電子放出密度が空間電荷によって制限されるために輝度は小さい値である。バイアス電圧を浅くしていくと、空間電荷は除去されて輝度は増加して最大になる。最大輝度を与える最適バイアスはカットオフよりも約 5 V 浅い電圧であり、最適バイアス付近 3 V の範囲において一定の輝度を得られる。観察されるビーム直径は蛍光板上で 15 mm、試料面上に換算して $1.5 \mu\text{m}$ であり、電流密度はガウス分布である。バイアス電圧をさらに浅くしたとき輝度が低下する理由は、ビームの発散角が増加して球面収差の影響が大きくなり電流密度が低下するためである。今後は、最大輝度を単に輝度と呼ぶ。

カットオフからわずか 5 V 浅いバイアス電圧で空間電荷が除去されるのは、陰極の先端が小さく、先端の電界が強くなるから

である。図 3.3 に示したように、最適バイアス付近における放出電流は、陰極温度 2,800 K のとき数 μA 、3,100 K のとき 20 μA 程度である。わずかな放出電流で最大輝度が得られることも、陰極が小さな先端をもつためであり、ポイント陰極の特徴の一つである。

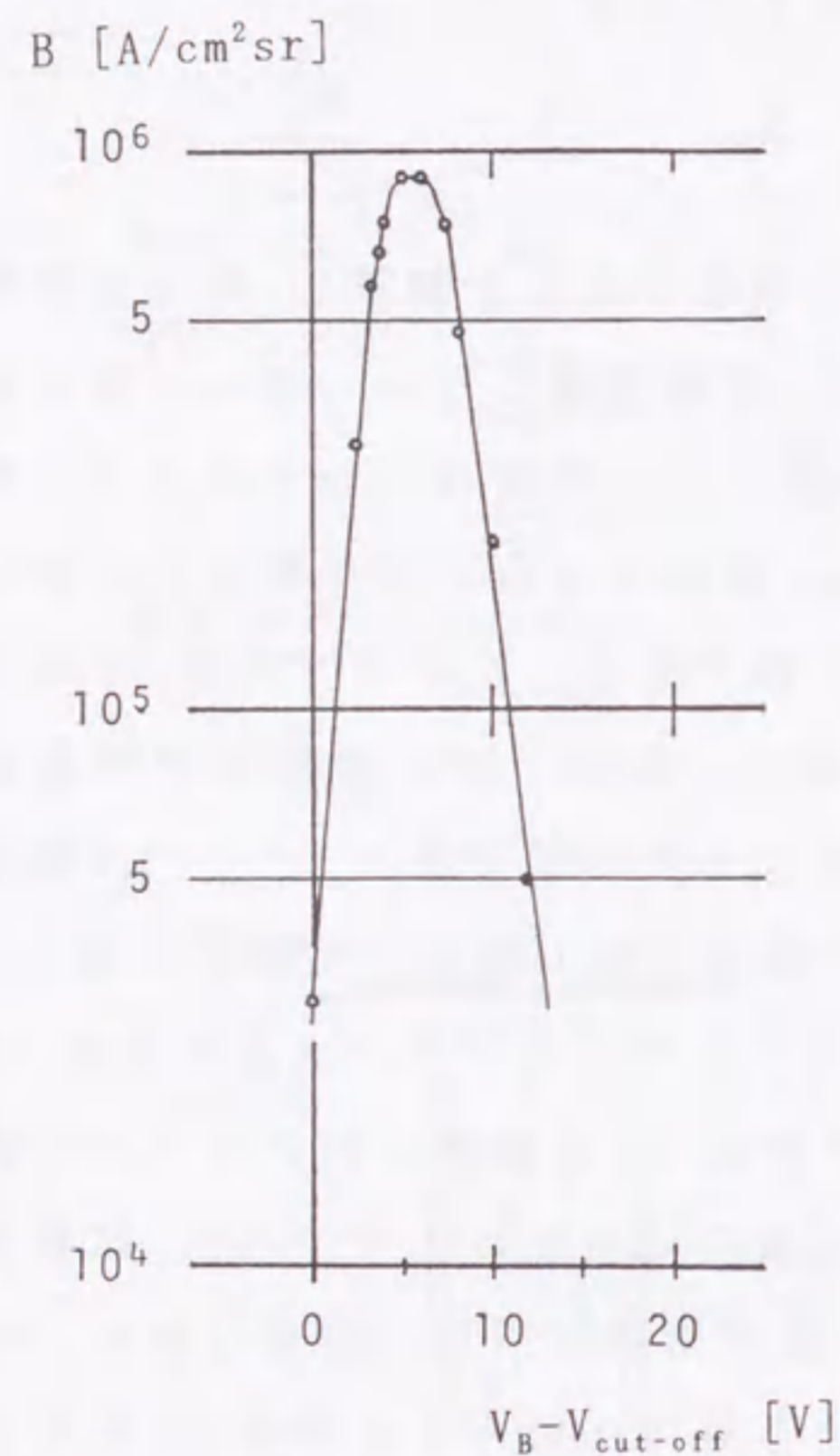


図 3.5 バイアス電圧に対する測定輝度
横軸はカットオフからのバイアス電圧。

異なる加熱条件で測定された輝度を表 3.1 に示す。ループフィラメント温度を 2,520 K (T_2)、収束用電極電圧を -5.55 kV とし、衝撃電流を 0.4 mA に調整すると陰極先端部は 2,800 K に加熱される。このとき測定された輝度は $8 \times 10^5 \text{ A/cm}^2\text{sr}$ であった。衝撃電流を 0.5 mA および 0.7 mA に増加すると、陰極先端部は 3,000 K、3,150 K に加熱される。各衝撃電流で測定された輝度は $3 \times 10^6 \text{ A/cm}^2\text{sr}$ 、 $6 \times 10^6 \text{ A/cm}^2\text{sr}$ であった。陰極温度 3,150 K において測定された輝度は、ヘアピン陰極電子銃に比べて 10 倍高い値である。表 3.1 に示した測定輝度は、陰極温度から計算される理論輝度に $\pm 10\%$ の範囲で一致する。

表 3.1 陰極加熱条件と測定した輝度

ループフィラメント温度と 衝撃電流 I_{LE}	陰極加熱 温度	輝度 B_m [A/cm ² sr]
2,520 K 0.4 mA	2,800 K	8×10^5
2,520 K 0.5 mA	3,000 K	3×10^6
2,520 K 0.7 mA	3,150 K	6×10^6
2,570 K 0.8 mA	3,400 K	2×10^7

さらに高い陰極温度における測定も行なった。ループフィラメント温度を 2,570 K (T_3) に上昇し、収束用電極を -5.55 kV に調整して、衝撃電流を 0.8 mA に増加した。図 3.1 からこのときの陰極温度は 3,400 K と推定される。バイアス電圧をカットオフから約 5 V 浅くすると、輝度は $2 \times 10^7 \text{ A/cm}^2\text{sr}$ まで増加したあと減少することが観察された。輝度の減少は、陰極先端部が蒸発し、陰極温度が低下するために起こる。衝撃電流をさらに増加すると、1 mA を超えたところでビームスポットは突然消え、バイアス電圧を浅くしても観察できなくなった。ビームスポットが消失する原因は、陰極先端部が溶けて上方に移動するためであることがわかった。

蛍光板上のビーム位置は、陰極温度を変化しても変わらない。このため、輝度測定は高い陰極温度まで容易に行なうことができた。従来型ポイント陰極電子銃においては、陰極温度を上昇すると蛍光板上のビーム位置が光軸外にドリフトする現象が観察される。ビーム位置のドリフトは、ヘアピンヒーター部(図1参照)の熱膨張が左右均等でないために、陰極先端部が光軸外に移動することが原因で起こる³⁾。局所加熱方式を採用した電子銃において、このようなビーム位置のドリフトが観察されない理由は、陰極として直線状のタングステン線を使用しているからである。この場合、熱膨張によって陰極の長さが変化しても、先端は光軸上を動くだけであり、軸外に移動することはない。ビーム位置のドリフトは、陰極先端部が蒸発し輝度が減少するときでも見られないことがわかった。

3.4 寿命

3.4.1 陰極形状

陰極温度 2,900 K までは長い時間にわたって一定輝度が得られるが、陰極温度を 3,000 K 以上にすると、輝度が時間とともに減少することが観察される。これは陰極先端部が蒸発し先端位置が上方に移動して、電子銃の最適な動作条件が変化するためである。図 3.6 に陰極形状の観察例を示す。(a) は電子銃を動作する前の陰極、(b) は動作後の陰極である。陰極の形状は蒸発によって変化するが、局所加熱方式を採用したことによって蒸発は先端に近い部分に制限され、先端位置は上方に移動する。このあと、陰極全体を下に移動して数回電子銃を動作したあとも先端形状は変わらず同じ円錐形状を保つ。

図 3.6(c) に示した陰極は、先端部を融点まで加熱した場合の例である。溶けた先端部は表面張力で丸くなり上に移動する。

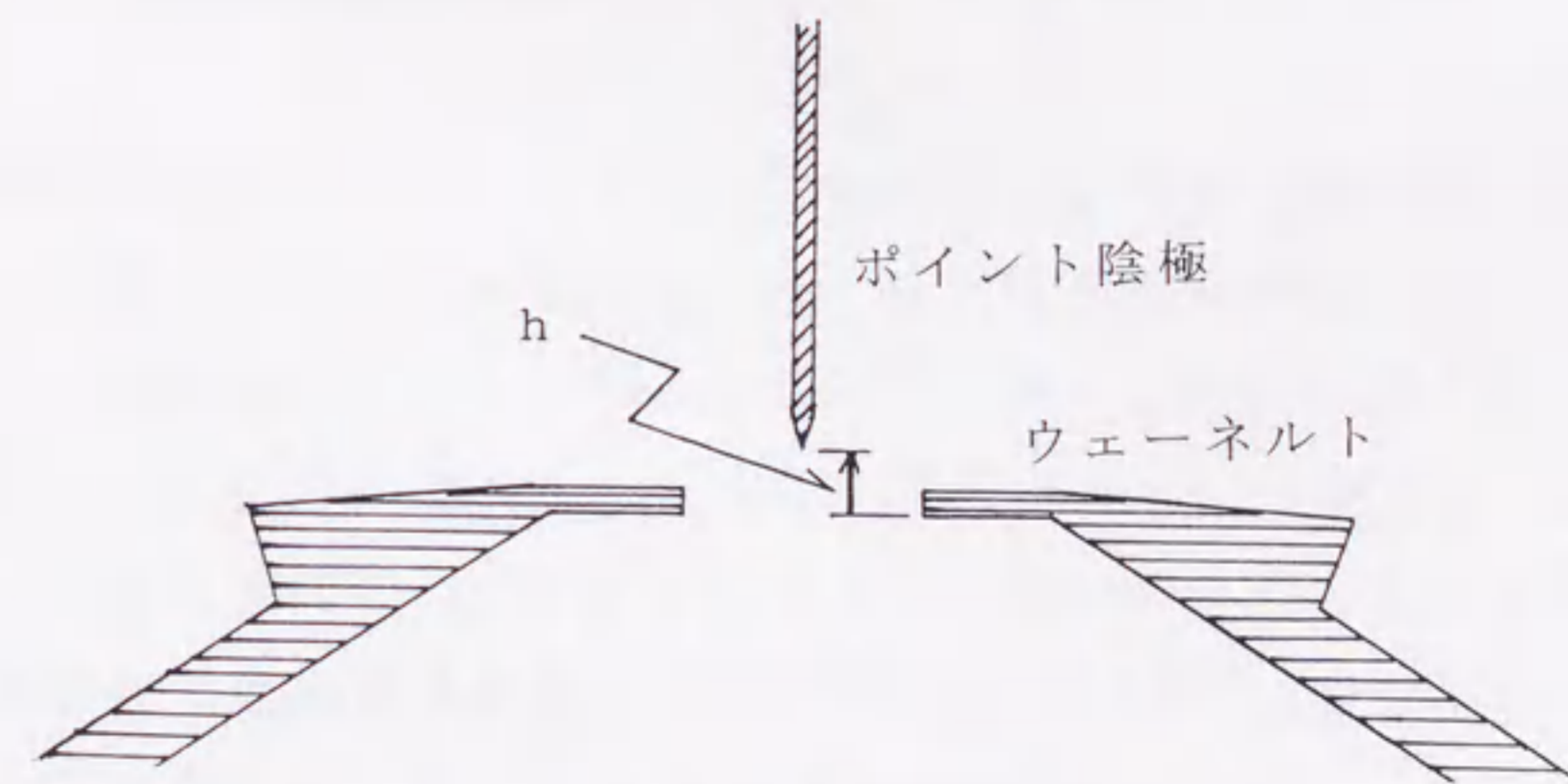
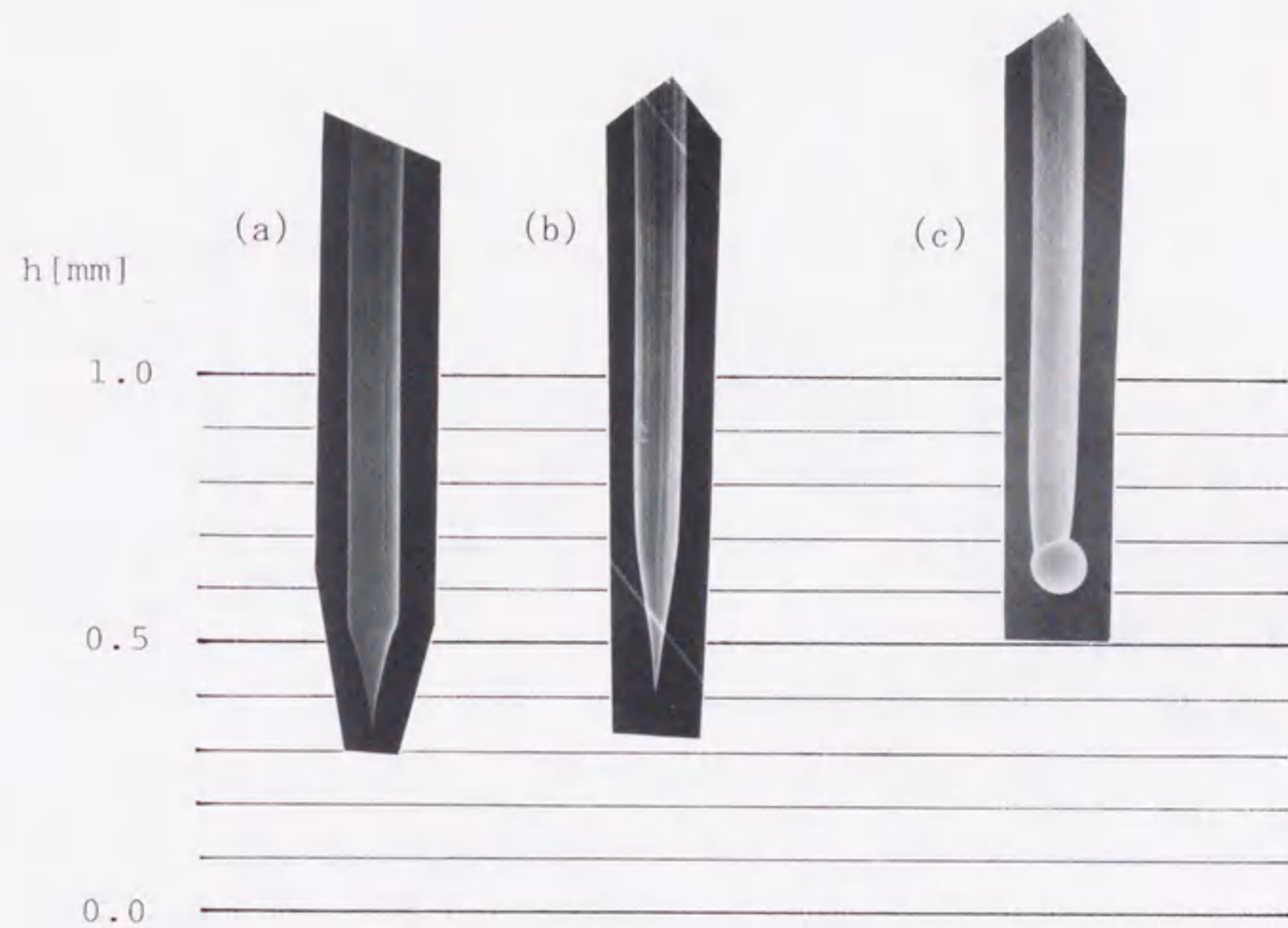


図 3.6 陰極の形状と先端位置

(a) (b) は電子銃動作前と後の陰極、(c) は融点 3,650 K まで加熱した陰極。h 陰極先端位置。

先端が溶融したときには、放出ビームが蛍光板上から消失することが観察される。先端位置の移動量は大きいので、陰極を衝撃する電子は減少し加熱温度は低下する。このため、バイアス電圧を浅くしても放出ビームは観察できなくなる。

3.4.2 バイアス電圧特性と寿命

電子銃を高い輝度で動作する場合には、蒸発で陰極先端位置が変化するときでも陰極先端部を衝撃加熱できることと、バイアス電圧を調整して理論輝度が得られることが重要であり、これが寿命を決めることになる。そこで、陰極先端位置を変えてバイアス-輝度特性を測定し、陰極先端位置が変化する場合の電子銃の動作を調べた。

図 3.7 に異なる陰極先端位置でのカットオフバイアスを示す。陰極先端位置を $h=0.27$ mm から 0.53 mm まで変えると、カットオフバイアス $V_{cut-off}$ は -217 V から -106 V まで浅くなるが、カットオフより約 5 V 浅いバイアス電圧で最大輝度が得られ、その付近 3 V の範囲で輝度が一定であることは、陰極先端位置に依存せず図 3.5 と同じであった。

陰極先端位置が $h=0.27$ mm から 0.53 mm まで 0.26 mm 後退すると、カットオフバイアスは 111 V 浅くなる。これは、先端後退量 2.4 μm あたりバイアス電圧が 1 V 浅くなることを意味する。一方、図 3.5 のバイアス-輝度特性は、最適バイアス電圧付近 3 V の範囲において輝度は変わらないことを示している。 3 V のバイアス電圧変化は、先端後退量にして 7 μm の距離に相当するので、蒸発によって先端が 7 μm 後退する間、電子銃は一定の輝度を与える。先端後退速度が 1 時間あたり 7 μm の場合には、バイアス電圧調整は 1 時間おきに行なえばよい。電子銃が陰極温度 $2,900$ K まで、長い時間にわたって一定輝度のビームを与えるのは、

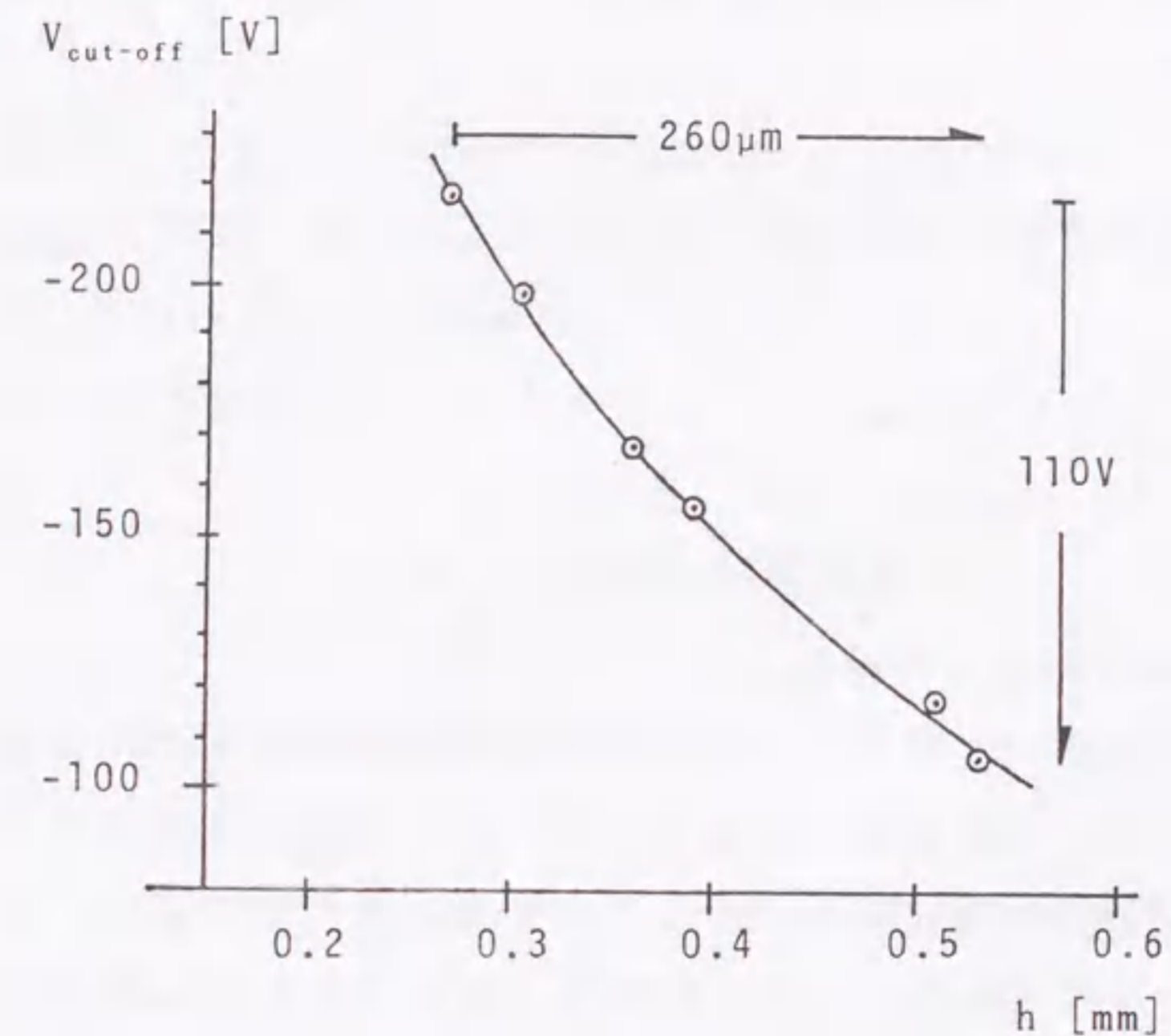


図 3.7 陰極先端位置とカットオフバイアスの関係

先端後退速度が 7 $\mu\text{m}/\text{h}$ あるいはそれ以下であるためである。

輝度 3.4×10^6 A/cm²sr ($3,040$ K) で電子銃を動作すると、約 15 分経過したところで輝度はゆっくり減少し始めることが観察される。バイアス電圧を浅くすると輝度は元の値に戻る。2-3 回のバイアス調整のあと、輝度は少し低い値になるが、加熱用電子銃の収束用電極電圧を浅くして衝撃電流を増加すると、輝度は上昇し一定値に保つことができる。陰極先端を $h=0.27$ mm に配置してこのような調整を行なうと、電子銃はこの輝度で 10 時間動作できることがわかった。動作後、陰極先端は $h=0.53$ mm に後退している。動作時間と先端の後退量から求めた先端後退速度は 26

$\mu\text{m/h}$ である。陰極先端位置が $h=0.53\text{ mm}$ 以上になると、先端部を $3,000\text{ K}$ 以上に衝撃加熱できなくなる。この輝度における寿命は 10 時間である。

輝度 $6.4 \times 10^6\text{ A/cm}^2\text{sr}$ ($3,150\text{ K}$) で動作すると、一定輝度のビームが観察される時間は約 5 分であり、バイアス電圧と加熱条件を調整することによって動作できる時間は 4 時間になる。陰極先端位置は 0.24 mm 後退していることから、この輝度における先端後退速度は $60\text{ }\mu\text{m/h}$ であることがわかった。

3.4.3 先端後退速度の検討

3.4.2 で述べたように、先端の後退が陰極寿命を決めることがわかったので、蒸発による先端後退について検討を行なう。タングステンの蒸発速度が $2,800\text{--}3,500\text{ K}$ の範囲で測定されているので、それから先端後退速度を求める。測定されている蒸発速度は質量蒸発速度 $m(T)$ [$\text{g/cm}^2\text{s}$] で次式で与えられている⁵⁾。

$$m(T) = 6.52 \times 10^7 \exp\left(-\frac{96,430}{T}\right) \quad (3.2)$$

ここで T は温度 [K] である。質量蒸発速度 $m(T)$ をタングステンの密度 19.3 g/cm^3 で割ったものが、陰極の厚さ減少速度 [m/s]

$$E(T) = 3.37 \times 10^4 \exp\left(-\frac{96,430}{T}\right) \quad (3.3)$$

となる。先端後退速度 $\left|\frac{dz}{dt}\right|$ は、図 3.8 に示すように陰極の厚さ減少速度を $\sin\alpha$ (α : 円錐半角) で割った値であり、

$$\left|\frac{dz}{dt}\right| = E(T)/\sin\alpha \quad (3.4)$$

となる。

寿命の測定に用いた陰極の円錐先端部半角 α は約 7° であり、 $3,040\text{ K}$ および $3,150\text{ K}$ における先端後退速度はおのおの $17\text{ }\mu\text{m/h}$ 、

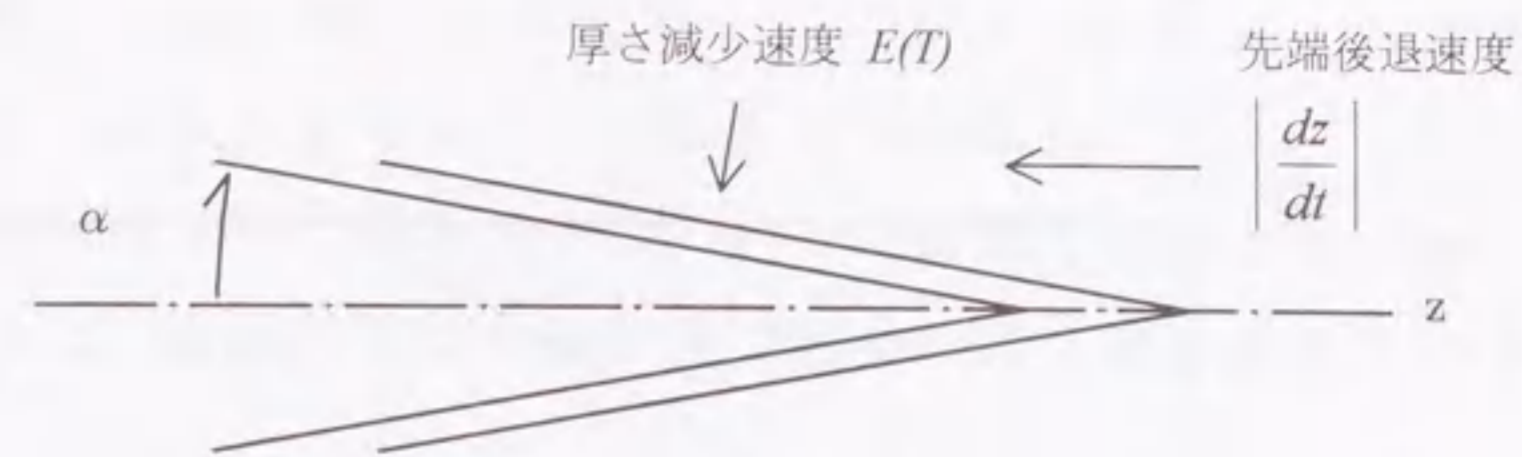


図 3.8 陰極先端後退速度

$50\text{ }\mu\text{m/h}$ となる。これらの計算値は測定値 $26\text{ }\mu\text{m/h}$ 、 $60\text{ }\mu\text{m/h}$ にほぼ等しい。図 3.9 に陰極温度に対する輝度、寿命、先端後退速度を示す。○印は各測定値である。(a)の直線は理論輝度、(b)の直線は寿命の測定値を外挿した値である。先端後退速度の直線は、円錐半角を 7° としたときの計算値である。寿命を比較するために、従来型ポイント陰極の寿命(図 2.2)を一点鎖線で示した。従来型ポイント陰極に使用されるヘアピンヒーターは直径 0.1 mm のタングステン線であり局所加熱陰極と同じ太さであるが、通電加熱に伴う熱暴走と溶断のために寿命は短く、 $2,800\text{ K}$ で 15 時間程度であるが、 $3,040\text{ K}$ では 1 時間、 $3,150\text{ K}$ では 0.3 時間に減少する。この比較から、局所加熱によって改善される寿命は、通電加熱方式の 10 倍であることがわかった。

3.5 漏れ電子

電子衝撃に伴って発生し陽極に流れる漏れ電子電流 I_{As} は、図 3.1 に示したように加熱条件を変えたときでも $20\text{ }\mu\text{A}$ 以下の値である。この値は、陰極先端から熱電子が放出されない陽極電圧 10 kV において測定した値であるが、陽極電圧やバイアス電圧

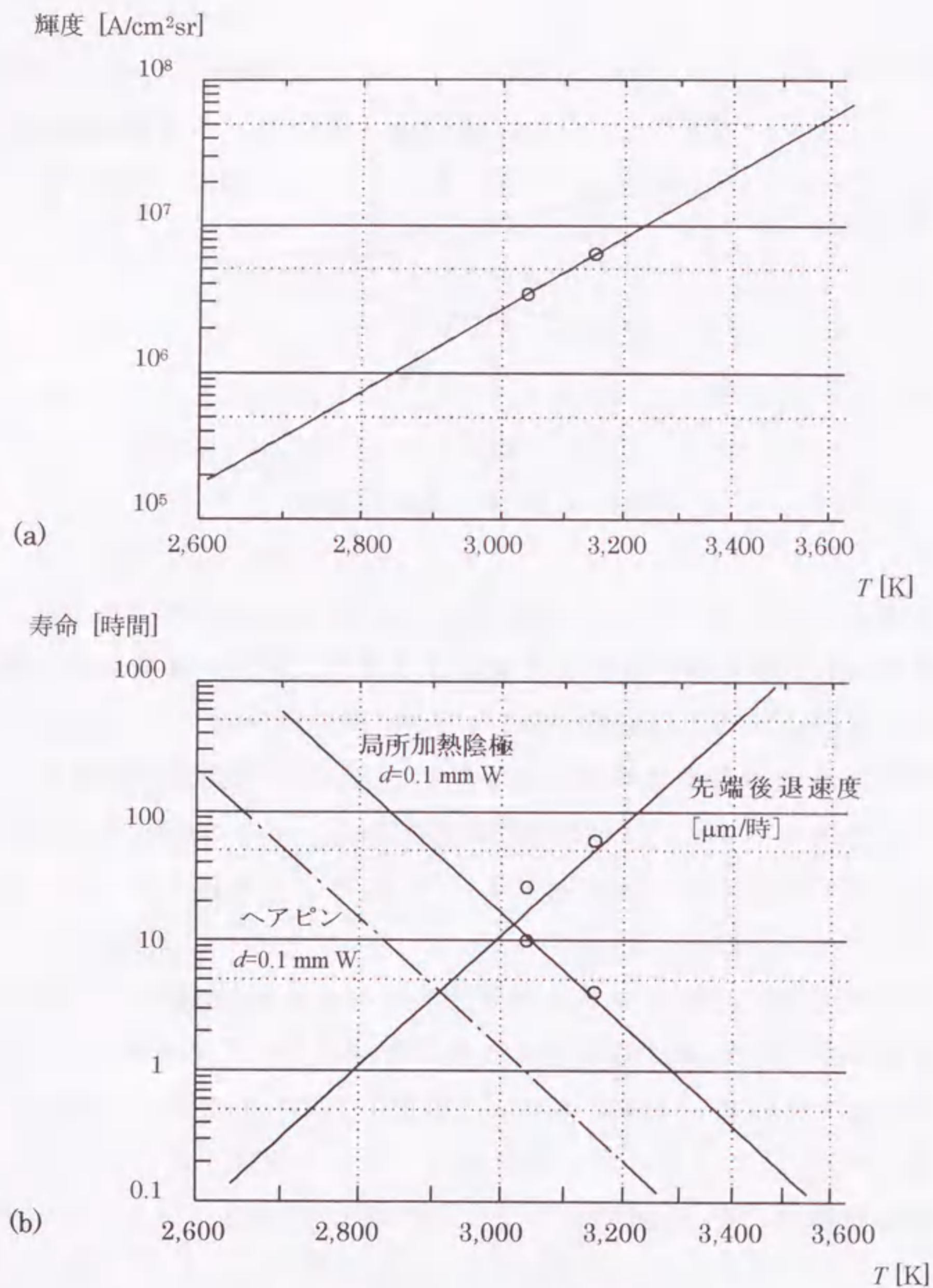


図 3.9 陰極温度に対する輝度と寿命

(a)輝度、(b)寿命および先端後退速度。○測定値。先端後退速度を示す直線は、タングステン蒸発速度から計算した陰極先端円錐半角 $\alpha=7^\circ$ における値。局所加熱陰極およびヘアピンの寿命は、いずれも直径0.1 mm タングステン線に対する値。

を変えても変化しない。電子銃の動作においては、動作条件を変えたときでも漏れ電子が放出ビームに混入しないことが重要である。図 3.2 に示したように、漏れ電子は放出ビームに比べて大きな発散角をもつ。発散角を 10 mrad に制限する絞りを光軸上に配置すると、漏れ電子はこの絞りで除去でき、電子銃動作の支障にはならない。

3.6 まとめ

製作した電子衝撃局所加熱方式電子銃の陰極加熱特性、電子放出特性および寿命について述べた。陰極加熱特性は衝撃電圧を 5.2 kV とし、加熱用電子銃から放出される衝撃電流と陰極先端温度の関係を測定して調べた。ループフィラメントを 2,500 K 程度に加熱し、収束用電極電圧によって衝撃電流を調整すると、陰極先端部の加熱温度は衝撃電流とともに上昇する。衝撃電流 1 mA において、陰極先端部を融点まで加熱できることを示した。

ビーム発散角を 10 mrad に制限して測定した放出電流特性は、従来のポイント陰極電子銃と同様のバイアス電圧依存性を示した。また、電子銃を透過型電子顕微鏡の鏡筒に装着して輝度特性を測定した結果、陰極温度 3,400 K まで理論値に等しい輝度が得られることがわかった。陰極温度 3,150 K で得られる輝度は、ヘアピン陰極電子銃に比べて 10 倍高い。陰極先端部が蒸発するためにおこる輝度の減少は、陰極温度を 3,000 K よりも高くしたときに観察される。3,150 K までの陰極温度であれば、電子銃はバイアス電圧と加熱条件を調整して動作できることを説明した。

寿命は電子銃を一定の輝度で動作して調べた。局所加熱によって蒸発は陰極先端部の近くに制限され、先端部は円錐形状を保ちながら後退する。測定した輝度と寿命の関係を、通電加熱方式の電子銃と比較し、局所加熱によって改善される寿命は通電加熱

方式の 10 倍であることを示した。

参考文献

- 1) Iiyoshi R, Takematsu H, Maruse S: Point cathode electron gun using electron bombardment for cathode tip heating. *J Electron Microscopy*, **37**, 1-7 (1988)
- 2) Ohshita A, Shimoyama H, Maruse S: Brightness of the hot cathode electron gun at high emission densities. *J Electron Microscopy*, **27**, 253-257 (1978)
- 3) Ohshita A, Shimoyama H, Maruse S: Temperature of point cathode and Fresnel fringes. *J Electron Microscopy*, **20**, 281-285 (1971)
- 4) Iiyoshi R, Maruse S: Tungsten-point-cathode electron gun using electron bombardment for cathode tip heating: cathode life and operating characteristics at cathode temperatures above 2,800 K. *J. Electron Microscopy*, **45**, 128-134 (1996)
- 5) Reimann AL: The evaporation of atoms, ions and electrons from tungsten. *Philos Mag*, **25**, 834-848 (1938)

第 4 章 陰極の先端曲率半径

4.1 はじめに

従来型のヘアピンヒーターを用いるポイント陰極の先端曲率半径は、2,800 K までの温度範囲において調べられている¹⁻⁴⁾。電解エッチングで作製した陰極の先端は、曲率半径 0.1 μm 以下の非常に鋭い先端をもつ。陰極を加熱すると、先端はほぼ球形になり、曲率半径は増加することが知られている。この現象は、鋭い先端に作用する表面張力によって表面原子が移動することにより説明されている。後述するように、表面原子の移動速度は温度とともに増加する関数であり、2,800 K において先端半径は数時間後に 1 μm 程度の大きさになる。

表面張力だけを考えて、陰極を 2,800 K 以上に加熱すると先端半径は数時間で 1 μm を超え、その後も増加し続けることになる。先端半径が増加すると先端の電界は低下し、熱電子放出密度が空間電荷によって制限されるバイアス電圧範囲は広がることになる。しかし、3 章 3.3.2 において述べたように、電子銃のバイアス-輝度特性は 3,000 K 以上の陰極温度においても変わらず、バイアス電圧をカットオフよりも約 5 V 浅くしたところで輝度が最大になることが観察される。陰極温度を高くしてもバイアス-輝度特性が変わらない理由は、陰極先端の電界が強いためであり、先端が高温においても小さな曲率半径を保っていることを示唆している。こうした理由から、陰極の先端曲率半径を調べることにした。

この章では、陰極先端を観察した結果を示して、2,800 K 以上で使用した陰極は温度とともに減少する曲率半径をもつこと

を説明する。このような結果が得られるのは、蒸発によって陰極先端が先鋭化される効果に加わるためである。先端曲率半径に影響する要因としては、蒸発以外に表面張力と電界がある。これらの影響を検討して、高温における先端曲率半径について説明する。

4.2 陰極先端の観察

陰極が温度とともに減少する平衡曲率半径をもつことを確かめるために、電子銃を真空ベルジャー内に配置し、陰極先端部を一定温度に長時間加熱する実験を行なった。陰極先端部の温度はマイクロピロメータを使用して測定した。実験には、電界エッチングで作製した陰極を用いた。実験は 1.3×10^{-3} Pa 以下の真空度で行なった。タングステン陰極の場合、この真空度は残留ガスイオンの衝撃によって先端が侵食されるのを避けるのに十分な値である。十分長い時間陰極を加熱したあと、走査型電子顕微鏡 (SEM) で先端部を観察した。

図 4.1 に 2,800 K および 3,040 K に加熱した陰極先端の SEM 像を、表 4.1 に SEM 像から測定した異なる加熱温度における陰極先端曲率半径を示す。高温になると曲率半径が減少するのは、表面原子が蒸発し、先端部が先鋭化されるためと考えられる。以下では、先端曲率半径に影響する要因として知られている表面張力と電界について説明し、蒸発を考慮したときの計算結果を示す。計算結果と測定される結果を比較して、陰極を 2,800 K 以上の温度範囲で使用したときの先端曲率半径について検討する。

4.3 先端曲率半径に影響する要因

4.3.1 表面張力

曲率半径 $1 \mu\text{m}$ 以下の陰極先端には、強い表面張力が作用する。曲率半径の増加は、表面張力によって陰極先端の表面原子が

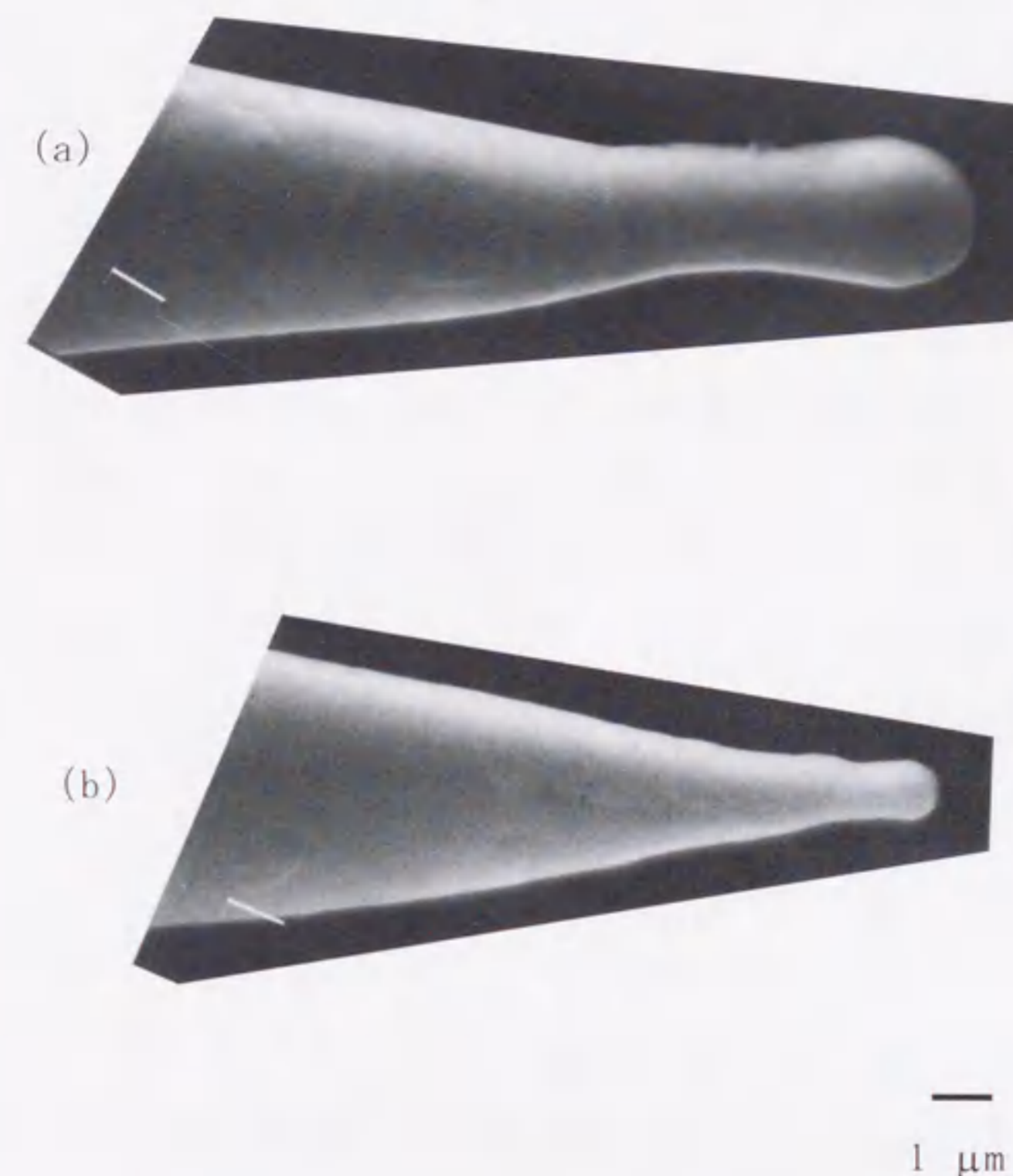


図 4.1 陰極先端の観察例

(a) 2,800 K、(b) 3,040 K で使用した陰極。
先端曲率半径はそれぞれ $1 \mu\text{m}$ 、 $0.4 \mu\text{m}$ 。

表 4.1 先端曲率半径の測定値

T [K]	r [μm]
2,800	1.0
2,950	0.51
3,040	0.40
3,120	0.38
3,240	0.29

曲率半径の大きな位置に移動するために生じる。Dyke ら³⁾は、陰極先端部の円錐半角を α [rad]としたとき、先端曲率半径の増加速度は次式で与えられることを示した。

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)_{ST} = \frac{\Omega_0^2 D_0 \exp(-Q/kT)}{A_0 kT} \cdot \frac{1.25\gamma}{r^3} \cdot \alpha \quad (4.1)$$

ここで、 Ω_0 と A_0 は1原子の体積と表面積、 D_0 は表面移動の拡散定数、 Q は活性化エネルギー、 k はボルツマン定数、 T は温度、定数1.25は円錐形状に関係した平均値、 γ は表面張力、 r は先端の曲率半径である。タングステンポイント陰極に対する各値を表4.2に示す。

表 4.2 タングステンに対する値²⁾

Ω_0	1.58×10^{-29} [m ³ /atom]
A_0	10^{-19} [m ² /atom]
D_0	4×10^{-4} [m ² /s]
Q	3.14 [eV]
γ	2.9 [N/m] (2,000 K)
γ	2.3 [N/m] (3,650 K) ⁵⁾

Barbour ら²⁾は、電界放出顕微鏡法を利用して、陰極先端表面原子が移動するために生じる電界放出パターンの時間変化を観察し、この観察結果と(4.1)式から2,000 Kにおける表面張力を2.9 [N/m]と評価した。後述するように、陰極先端に強い電界が加わると表面原子の移動速度は変化するので、ここでは電界の影響を抑えるためにパルスモードで動作する電界放出顕微鏡法が用いられた。この方法で求めた表面張力は、Calverley⁵⁾が溶融したタングステンを落下・冷却して作製した球の直径を調べて評価した表面張力2.3 [N/m]に近い値であると報告している。

表面原子の移動速度 $D_0 \exp(-Q/kT)$ は、温度とともに増加するために、先端曲率半径は高温で増加する。(4.1)式を積分して得られる半径の時間変化 $r_{ST}(t)$ は、2,800 Kまでの陰極温度において観察される先端半径の増加に一致することが示されている。

半径が大きくなると増加量は減少するが、増加速度は0になることがないので、半径は時間とともに増加し続ける。これは、表面張力の効果だけを考えたときの結果である。

4.3.2 表面の電界

陰極先端の電子放出領域には、陰極表面に向かう電界が加わる。この電界は半径の増加を抑える力を生じる。電界によって生じる力による曲率半径の増加速度は次式で与えられる³⁾。

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)_F = -\frac{\Omega_0^2 D_0 \exp(-Q/kT)}{A_0 kT} \frac{0.63\gamma}{r^2} \left(\frac{\epsilon_0 E^2}{2}\right) \cdot \alpha \quad (4.2)$$

ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率、 E は陰極先端の電界である。 $\epsilon_0 E^2/2$ は電界が先端におよぼす単位表面積あたりの力すなわち圧力であり、表面張力とは逆に先端曲率半径を減少させるように働く。

熱電子放出型電子銃における陰極先端の電界は 10^8 [V/m]程度の値^{6,7)}である。先端半径が $r=0.4 \mu\text{m}$ のとき、この電界によって生じる圧力は 10^5 Pa程度であり、表面張力による圧力($2\gamma/r$)に比べて二桁小さい値である。したがって、熱電子放出型電子銃においては、電界が先端半径に与える影響は無視できる。

4.3.3 蒸発

陰極温度を上昇し、表面原子の蒸発量が増加すると、陰極先端部は図4.2に示すように先鋭化され、先端曲率半径は小さくなる。蒸発による半径減少速度 $(dr/dt)_{EV}$ は、3.4.3で用いた陰極の厚さ減少速度(3.3)式に等しく、 $(dr/dt)_{EV}=-E(T)$ である。半径減少

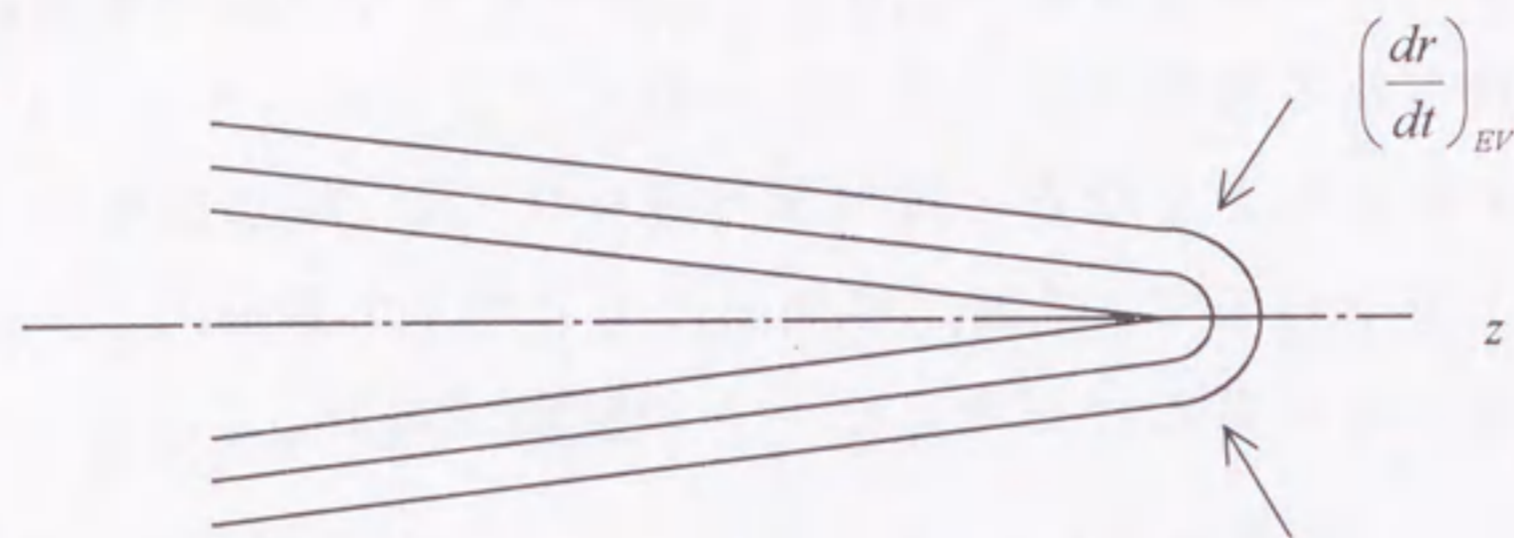


図 4.2 蒸発による陰極先端の先鋭化

表 4.3 蒸発による半径減少速度

T [K]	$(dr/dt)_{EV}$ [$\mu\text{m}/\text{h}$]
2,800	-0.13
2,900	-0.44
3,000	-1.3
3,100	-3.7
3,200	-9.9

速度は陰極温度 T だけに依存する量であり、表 4.3 に示すように 2,800 K 以上の温度において大きな値になる。

4.4 表面張力と蒸発を考慮した先端曲率半径

4.3 で検討したように、この場合は電界の効果は小さいので無視し、表面張力による半径の増加と蒸発による半径の減少を考えると、先端半径の時間変化は次式で与えられる。

$$\left(\frac{dr}{dt}\right) = \left(\frac{dr}{dt}\right)_{ST} + \left(\frac{dr}{dt}\right)_{EV} \quad (4.3)$$

蒸発の影響を考慮したときの先端半径の時間変化は、(4.3) 式を積分することによって求められる。表面張力による半径増加速度

として (4.1) 式、蒸発による半径減少速度として (3.3) 式を用い、(4.3) 式を数値積分して求めた時間変化を図 4.3 に示す。初期半径は $r_0=0.1 \mu\text{m}$ 、円錐半角は $\alpha=7^\circ$ とした。

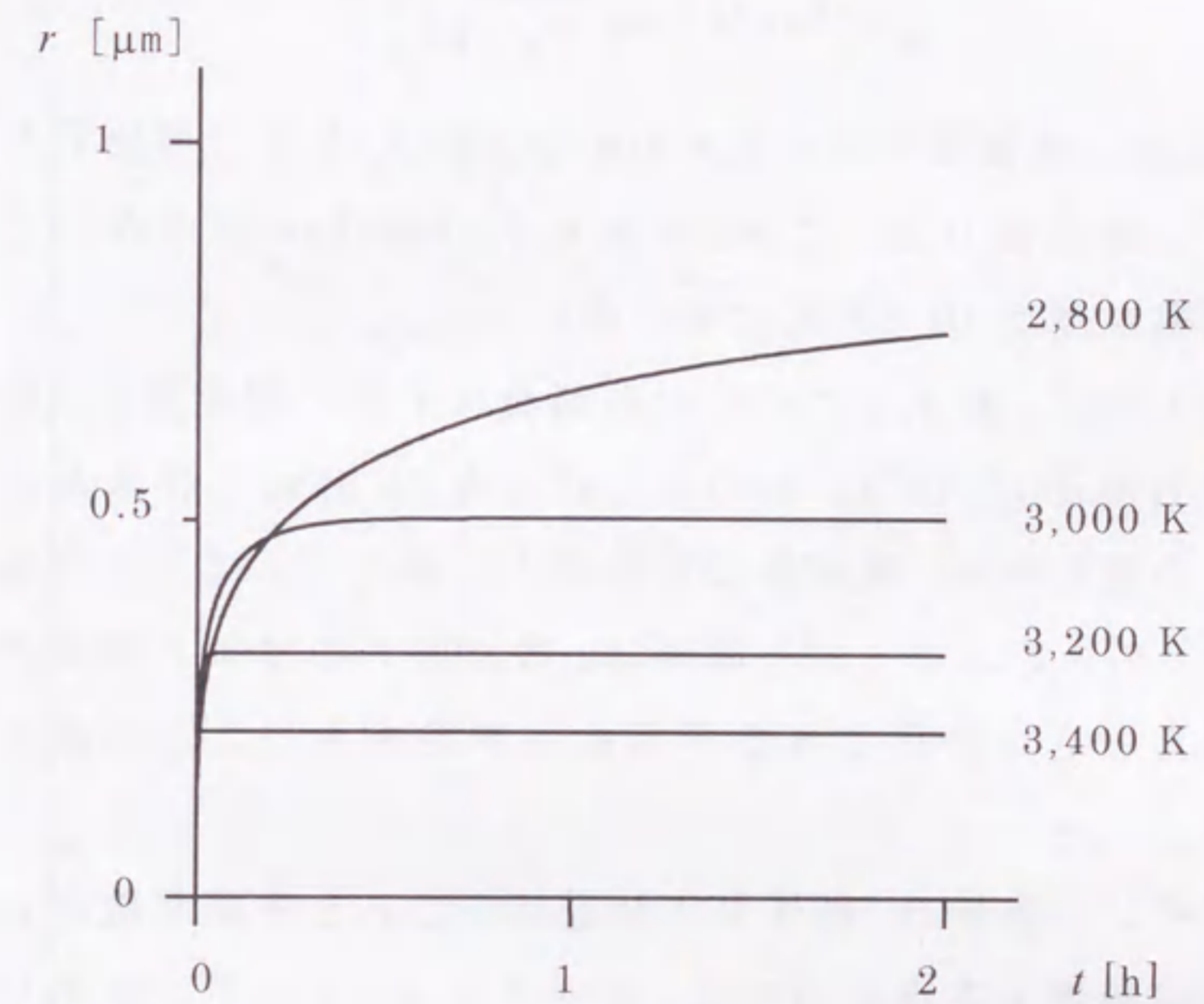


図 4.3 表面張力と蒸発を考慮した計算による先端曲率半径の時間変化 初期半径 $r_0=0.1 \mu\text{m}$ 、円錐半角 $\alpha=7^\circ$ の場合。2,800 K の場合、半径は 8 時間後に $0.8 \mu\text{m}$ まで増加。

蒸発の影響を考慮すると、3,000 K 以上に加熱した陰極の先端曲率半径は短い時間で一定値になる。これは、表面張力による半径増加速度 $(dr/dt)_{ST}$ が、蒸発による半径減少速度 $(dr/dt)_{EV}$ によ

って打ち消され、 $(dr/dt)=0$ になるためである。すなわち、陰極先端は

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)_{ST} = -\left(\frac{dr}{dt}\right)_{EV} \quad (4.4)$$

となるところで平衡半径をもつ。この条件から、平衡曲率半径 r_{eq} [μm]として次式を得る。

$$r_{eq} = 1.84 \times 10^{-2} \exp\left(\frac{20,043}{T}\right) \cdot \left(\frac{\alpha}{T}\right)^{1/3} \quad (4.5)$$

(4.5)式は、表面張力を $\gamma=2.3$ N/m (3,650 K)として導出した式である⁸⁾。表面張力として $\gamma=2.9$ N/m (2,000 K)の値を用いると、平衡曲率半径は10%程度大きい値になる。

図4.4に、表4.1に示した先端曲率半径の測定値と、先端の円錐半角を $\alpha=7^\circ$ (0.12 rad)としたとき(4.5)式で計算される平衡曲率半径を示す。測定値は計算値と一致している。この結果から、タングステンポイント陰極は、表面張力の効果と蒸発の効果と考えたときに計算される平衡曲率半径をもつことが確かめられた。

ポイント陰極は、動作中に放電がおこると先端が破損して曲率半径が増加する場合がある。陰極を2,800 K以上で使用していると、蒸発の効果によって先端は先鋭化され、先端半径は平衡値まで減少することが観察される。図4.5は、初期半径が $r_0=1$ μm に増加したときを想定し、半径の時間変化を(4.3)式で計算した結果である。円錐半角は $\alpha=7^\circ$ とした。初期半径が大きいときには、表面張力による半径増加速度が小さいので、先端半径は蒸発によって減少していく。先端半径が減少すると、表面張力の効果は大きくなり、やがて先端半径は平衡値に達する。先端が平衡値まで減少する時間は、陰極温度が3,000 Kのとき約50分、3,200 K以上では7分以下である。初期半径を10 μm として同様の計算

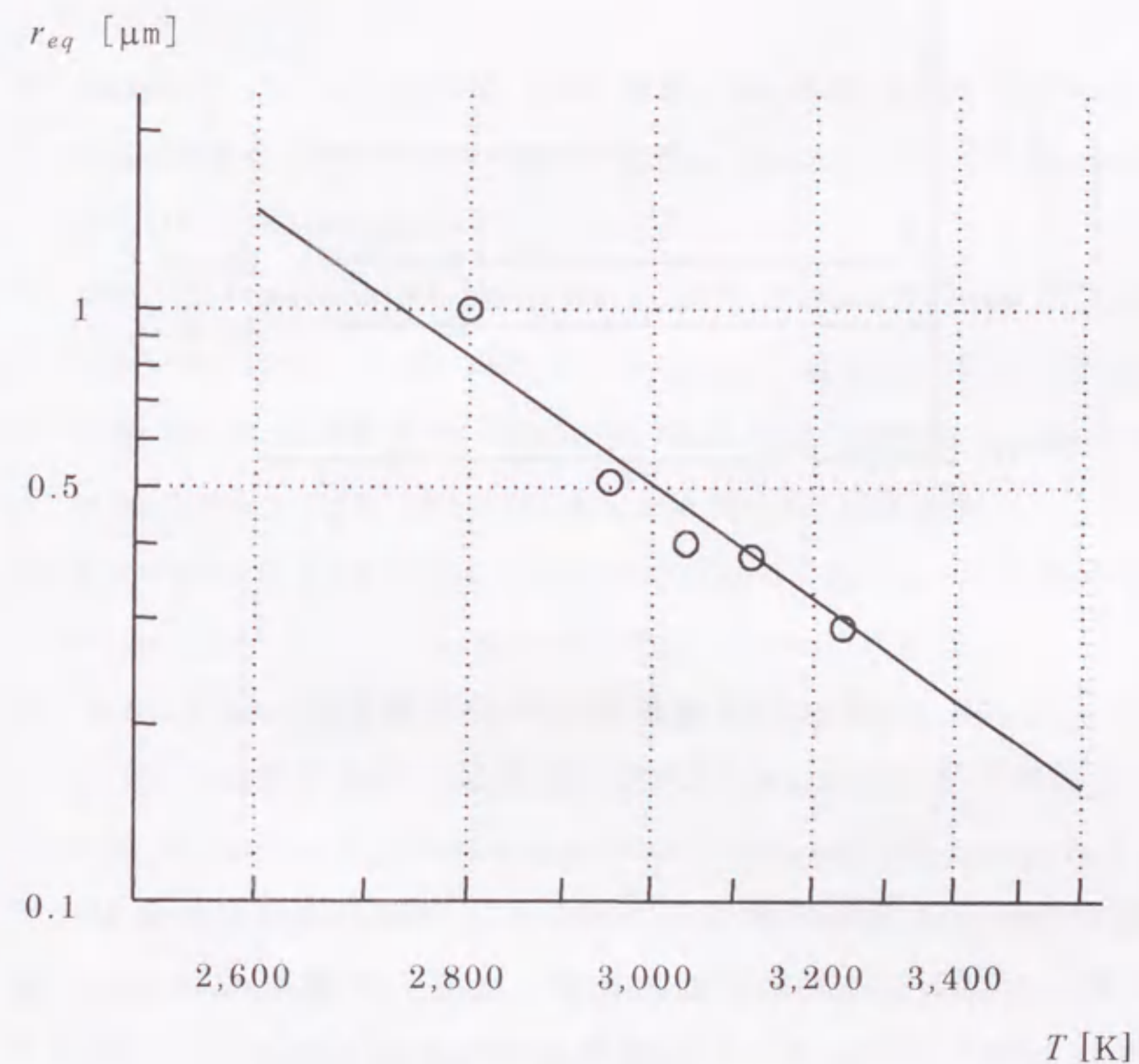


図4.4 温度に対する陰極先端曲率半径

○は表4.1に示した測定値。実線は円錐半角を $\alpha=7^\circ$ (0.12 rad)とし、(4.5)式から計算した平衡曲率半径。

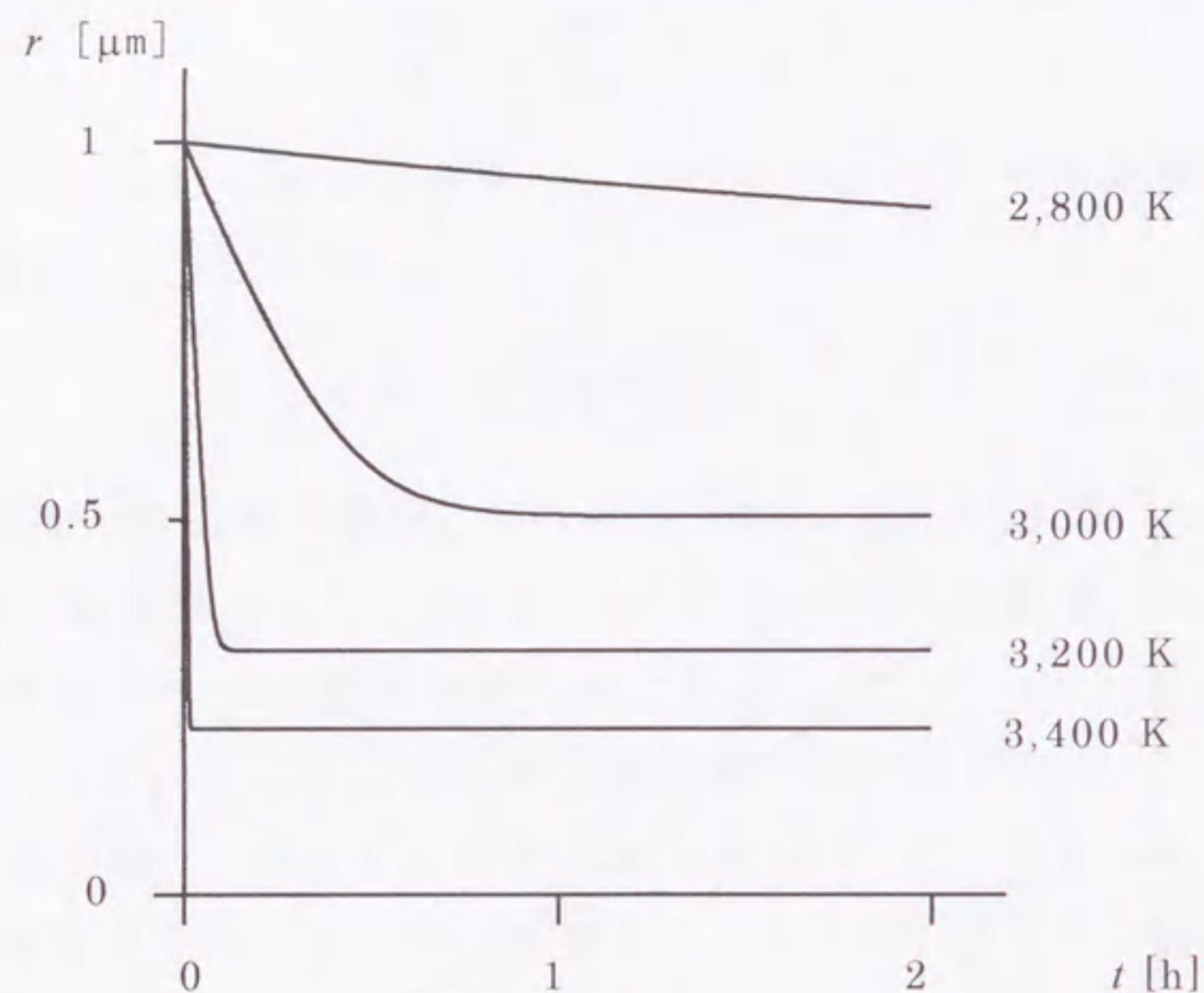


図 4.5 先端曲率半径の時間変化

初期半径 $r_0=1 \mu\text{m}$ のときの計算結果。円錐半角 $\alpha=7^\circ$ 。

を行なうと、平衡曲率半径まで減少する時間は、3,000 K において 8 時間、3,200 K において約 1 時間となる。計算した時間は、観察された時間にほぼ等しい。局所加熱方式電子銃では、先端が放電によって破損した場合でも小さな先端を再形成できる。

4.5 まとめ

2,800 K 以上の温度で使用した陰極の先端曲率半径について述べた。陰極は $1 \mu\text{m}$ 以下の先端半径を保ち、先端半径は温度とともに減少する。先端半径に影響する要因を検討し、観察される

半径は、表面張力によって先端半径が増加する効果と蒸発によって先端半径が減少する効果をとともに考慮したときに計算される平衡半径に等しいことを説明した。

参考文献

- 1) Boling JL, Dolan WW: Blunting of tungsten needles by surface diffusion. *J Appl Phys*, **29**, 556-559 (1958)
- 2) Barbour JP, Charbonnier FM, Dolan WW, Dyke WP, Martin EE, Trolan JX: Determination of the surface tension and surface migration constants for tungsten. *Phys Rev*, **117**, 1452-1459 (1960)
- 3) Dyke WP, Charbonnier FM, Strayer RW, Floyd RL, Barbour JP, Trolan JK: Electrical stability and life of the heated field emission cathode. *J Appl Phys*, **31**, 790-805 (1960)
- 4) Dyke WP, Dolan WW: Field emission. in Martin L ed. *Advances in electronics and electron physics*, Vol.8, pp.153-163, Academic Press, London (1956)
- 5) Calverley A: A determination of the surface tension of liquid tungsten by the drop-weight method. *Proc Phys Soc (London)*, **B70**, 1040-1044 (1957)
- 6) Ohshita A, Shimoyama H, Maruse S: Brightness of the hot cathode electron gun at high emission densities. *J Electron Microscopy*, **27**, 253-257 (1978)
- 7) Ozaki K, Uchikawa Y, Maruse S: Dependence of brightness characteristics upon point cathode electron gun geometries. *J Electron Microscopy*, **31**, 137-143 (1982)
- 8) Iiyoshi R, Maruse S: Tip radius of tungsten point cathode at temperatures above 2,800 K. *J. Electron Microscopy*, **44**, 326-330 (1995)

第5章 最適動作のための電子衝撃条件の検討

5.1 はじめに

3章において述べたように、電子銃を陰極温度 3,000 K 以上で動作すると、陰極先端部は蒸発して上方に移動する。この場合の電子衝撃条件としては、蒸発を先端部に制限して寿命を長くすることと、蒸発が進む間も先端の温度変化を小さく保ち、輝度の低下を抑えることが求められる。蒸発を先端に制限するだけであれば、先端の狭い範囲を電子衝撃すればよい。しかし、衝撃電子を先端の狭い範囲に集中すると、蒸発によって先端が上方に移動したとき陰極に衝撃する電子は減少し、先端温度は速く低下することになる。先端温度の低下を抑えるためには、先端部のやや広い範囲を電子衝撃しなければならないが、このような場合においても蒸発が陰極先端から進み、先端部は円錐形状を保つことが重要である。

この章では、衝撃範囲と蒸発範囲の関係を調べた結果について述べる。衝撃範囲については、加熱用電子銃から放出される衝撃電子の軌道を種々の動作条件下で計算し、衝撃電子密度分布を求める。つぎに、衝撃電子密度分布から陰極の温度分布と蒸発範囲を計算する。計算結果の比較から、電子銃の動作に適した電子衝撃条件について考察する。

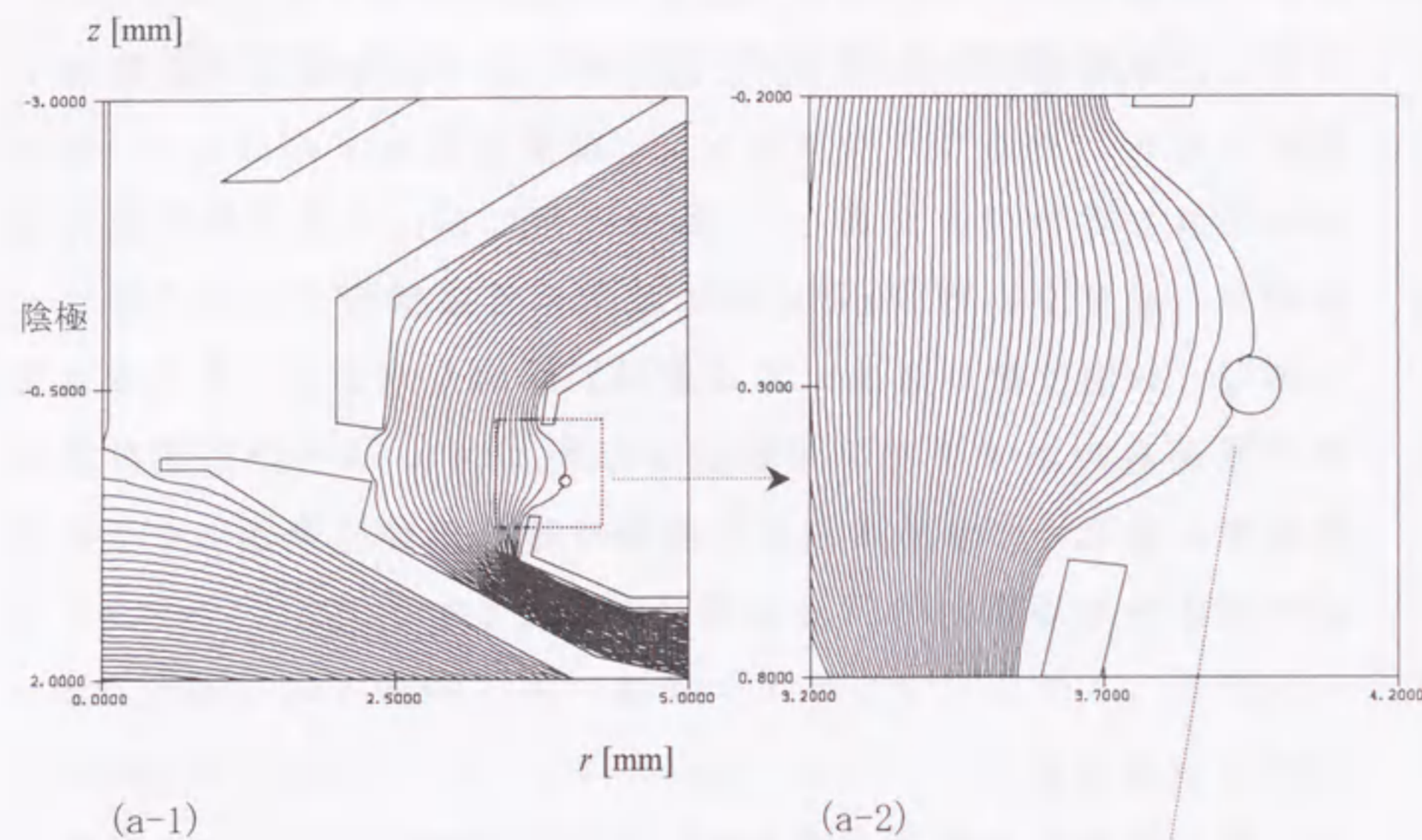
5.2 衝撃電子密度分布

陰極衝撃電子の密度分布は、加熱用電子銃から放出される電子の軌道を計算して調べた。2章図 2.12 に示した軌道計算結果は、陰極先端部を衝撃するために必要とされる電極の配置方法と

形状を検討した結果であり、ループフィラメント表面の代表的な点から法線方向に放出される電子の軌道を計算したものである。計算した軌道数が少ないので、この結果から陰極近くの衝撃電子密度分布を求めることはできない。密度分布を求めるには、放出条件の異なる軌道を計算して、陰極近傍における軌道の密度分布を調べる必要がある。陰極近傍の軌道密度に影響する放出条件としては、放出位置、放出エネルギー、放出角がある。そこで、異なる点から放出する電子の軌道を放出エネルギーおよび角度を変えて計算し、放出条件と陰極衝撃位置の関係を検討して、衝撃電子密度分布を求めた。計算方法と結果を述べる。

5.2.1 計算方法

電子銃内部の電位と電界は、表面電荷法^{1,2)}を用いて計算した。各電極の電圧は、3.2で述べた陰極加熱特性の測定と同じ値、陰極に対するウェーネルトバイアス電圧は-200 V、ループフィラメント電圧は-5.2 kVとした。衝撃電流を調整する働きをする収束用電極の電圧は、ループフィラメントに対して-300 Vと-400 Vの場合を調べた。図 5.1 に収束用電極-300 Vのときの電位分布と電子放出範囲を示す。(a-1)は加熱用電子銃部の 200 V 間隔の電位分布であり、(a-2)はループフィラメント付近の 50 V 間隔の電位分布である。いずれも、ループフィラメント電圧-5.2 kV よりも高い等電位線を示した。ループフィラメント表面に交わる等電位線の左側の範囲が電子放出可能な範囲である。放出範囲は図に示す角度 ξ で与えた。収束用電極-300 Vのときの放出範囲は $\xi=-80^\circ$ から 45° である。衝撃電子の放出位置 P_ξ は、この範囲のループフィラメント表面上にとった。収束用電極が-400 Vの場合には、電子放出範囲は狭くなり $\xi=-70^\circ$ から 30° になる。



(b) 電子放出範囲を示す角度 ξ と放出位置 P_ξ

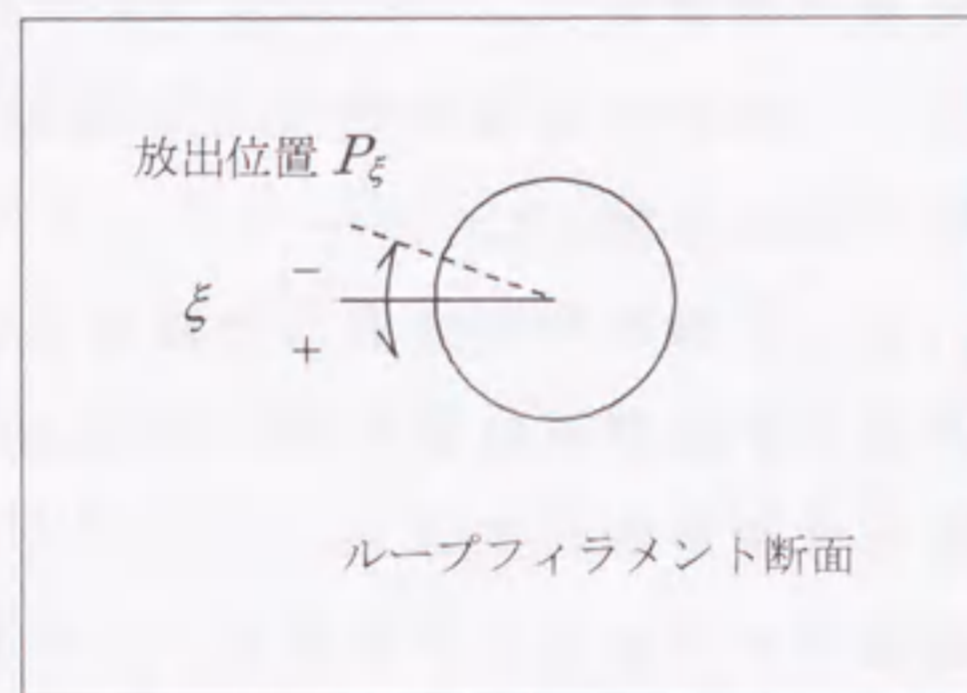


図 5.1 加熱用電子銃部の電位分布と電子放出範囲
収束用電極-300 V の場合。(a-1) 200 V 間隔の電位分布。(a-2) ループフィラメント付近 50 V 間隔の電位分布。(b) 電子放出範囲を示す角度 ξ と放出位置 P_ξ 。陰極 0 V、ウェーネルトおよびシールド-200 V、ループフィラメント-5.2 kV。

ループフィラメント加熱電流によって発生する磁界は、電子軌道に影響を与えるので、その影響を考慮した。ループフィラメントは円形であるので、加熱電流による磁界は解析的に求めることができる。加熱電流は、陰極加熱特性の測定に用いた値、収束用電極-300 V のとき 1.55 A、収束用電極-400 V のとき 1.6 A とした。

電子軌道は、軸対称電磁界中の電子に対して導かれる微分運動方程式を直接数値積分して計算した。電子の運動方程式は、ニュートン・ローレンツの式

$$\vec{F} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (5.1)$$

で与えられる。軸対称電磁界中においては、 (z, r, θ) についての運動方程式はつぎのように与えられる³⁾。

$$\frac{d^2 z}{d\tau^2} = -E_z(z, r) + \left(\frac{e}{m}\right)^{1/2} f(z, r) B_r(z, r) \quad (5.2)$$

$$\frac{d^2 r}{d\tau^2} = -E_r(z, r) - \left(\frac{e}{m}\right)^{1/2} f(z, r) B_z(z, r) + \frac{1}{r} f^2(z, r) \quad (5.3)$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{1}{r} f(z, r) \quad (5.4)$$

ここで

$$\tau = \left(\frac{e}{m}\right)^{1/2} t \quad (5.5)$$

$$f(z, r) = \frac{r_0^2}{r} \left(\frac{d\theta}{d\tau}\right)_0 - \left(\frac{e}{m}\right)^{1/2} \left[\frac{\Phi_{FLX}(z_0, r_0) - \Phi_{FLX}(z, r)}{2\pi r} \right] \quad (5.6)$$

であり、 (z_0, r_0, θ_0) は電子の初期座標、 Φ_{FLX} は磁束である。電子軌道は初期座標と初速度 $((dz/dt)_0, (dr/dt)_0, r_0(d\theta/dt)_0)$ のもとで式(5.2)、(5.3)、(5.4)を積分して得られるが、ロンバーグ積分法の一つである Bulirsch-Stoer 法⁴⁾を用いて数値積分した。

図 5.3 にループフィラメント表面からの電子放出条件を

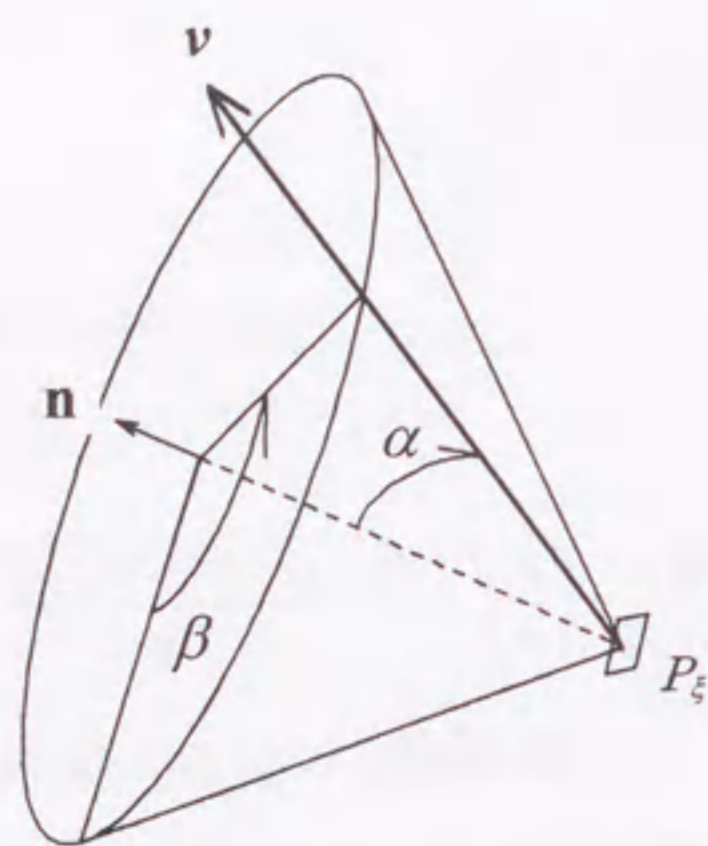
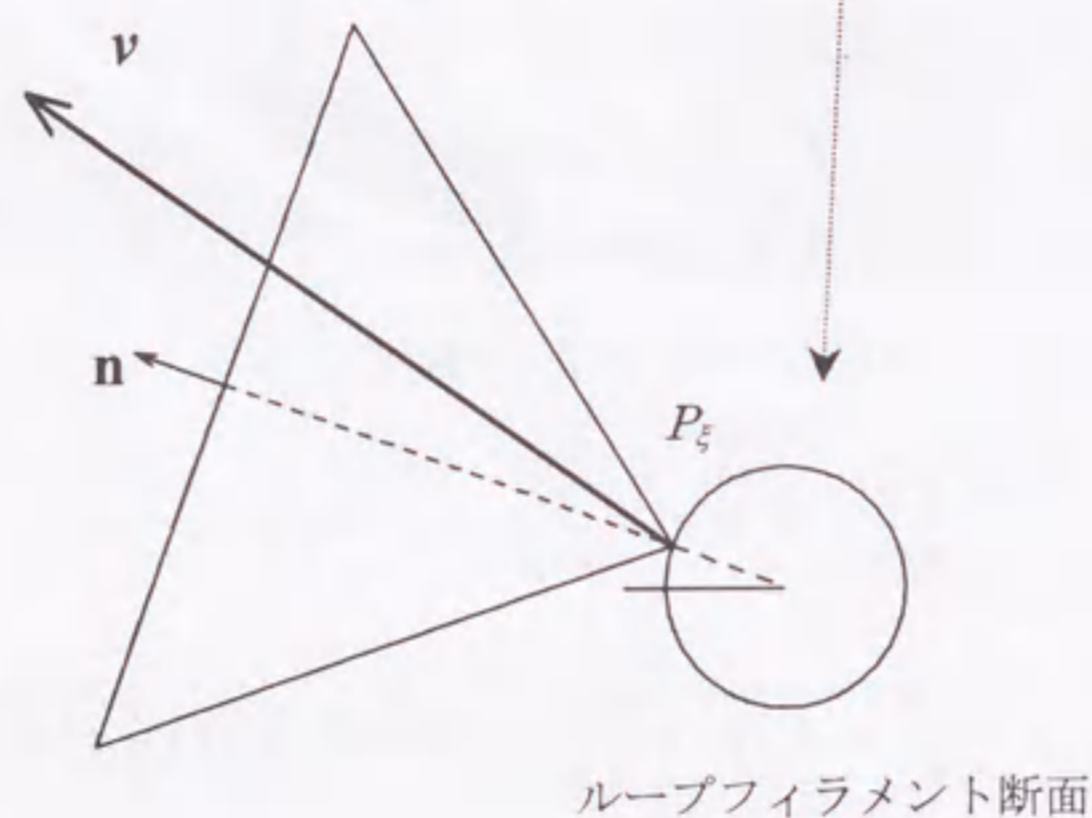
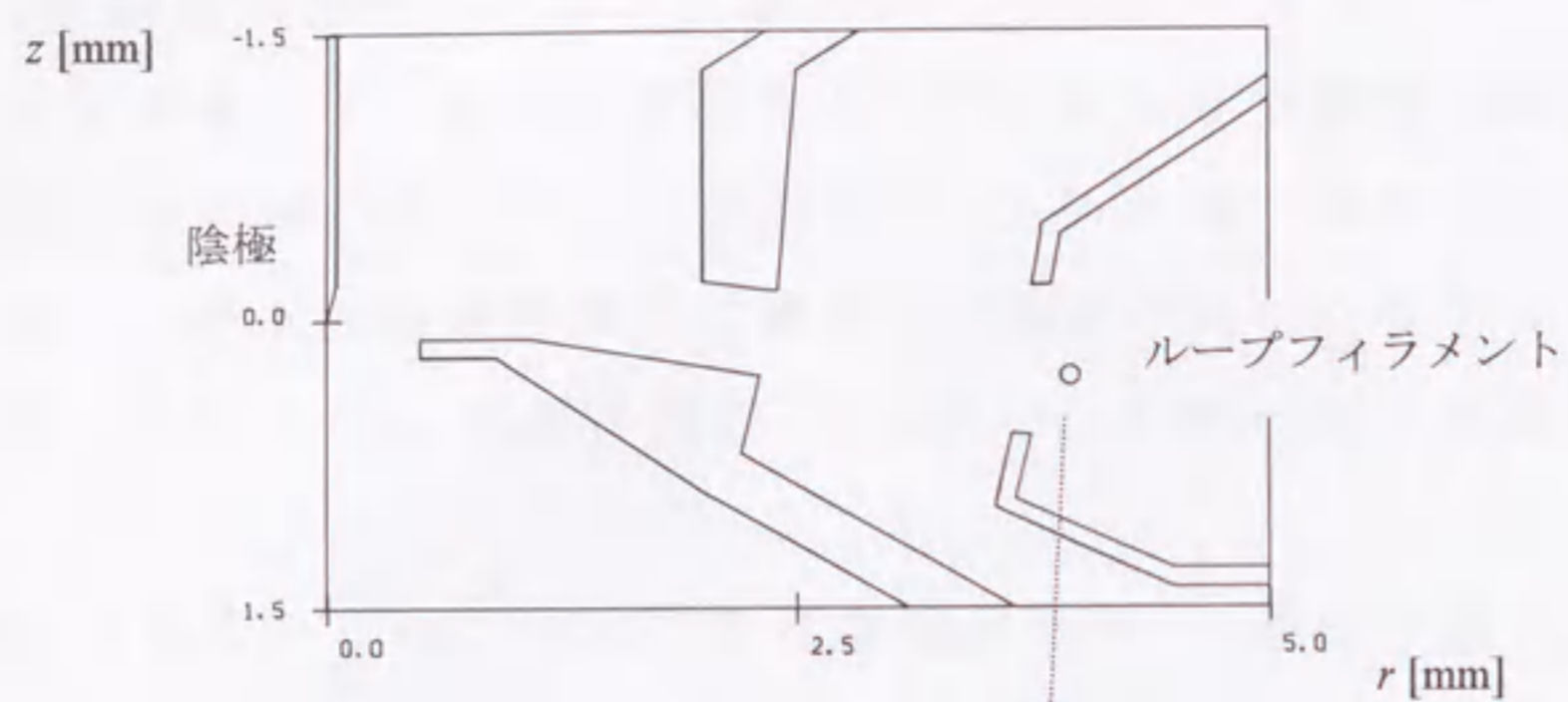


図 5.2 電子放出条件
放出位置 P_ξ 、速度 v 、角度 α 、 β 。

示す。電子は放出時にエネルギー分布と角度分布⁵⁾をもつ。エネルギー分布からは、 kT で放出される電子がもっとも多く、平均のエネルギーは $2kT$ であることが示される。 kT の値は、ループフィラメント温度 $T=2,500-2,600$ K のとき 0.22 eV 程度である。 kT の値を目安にするので、放出エネルギーは kT の整数倍で与え、速度 v は放出エネルギー $W (=mv^2/2)$ から計算した。角度分布は、ランベルトの法則に従い、法線方向 n に放出する電子がもっとも多い。放出角は、ループフィラメント表面の法線方向からの角度 $\alpha [0, 90^\circ]$ と、法線の周りの角度 $\beta [0, 360^\circ]$ で与えた。角度 β が 0° および 180° のとき、電子は子午面内に放出される。速度 v 、角度 α および β 、放出位置を示す角度 ξ から、各座標方向の初速度成分 $((dz/dt)_0, (dr/dt)_0, r_0(d\theta/dt)_0)$ を求めた。

5.2.2 計算結果

5.2.2.a 放出位置と角度が軌道に及ぼす影響

収束用電極 -300 V の場合について述べる。図 5.3 は、位置 $P_\xi = -60^\circ, -20^\circ, 20^\circ$ からエネルギー $W=kT$ 、角度 $\beta=0^\circ$ および 180° の子午面内に放出する電子軌道を計算した結果である。放出角 α は $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ とした。図 5.3(a) は放出位置を含む $r-z$ 面に軌道を投影した様子、(b) は陰極付近、(c) はループフィラメント付近の拡大図である。放出位置が異なると、陰極衝撃時の軌道の広がり (z 方向) は変わり、 $P_\xi = -60^\circ$ および 20° から放出する電子軌道の広がり比べて、 $P_\xi = -20^\circ$ から放出した電子軌道の広がり大きい。 $P_\xi = -20^\circ$ から放出した電子軌道の z 方向の広がり、陰極の直径とほぼ同じ 0.1 mm 程度である。

図 5.4 は、図 5.3 と同じ位置から、同じエネルギー、同じ放出角 α で、角度 $\beta=90^\circ$ および 270° 方向に放出する電子軌道を計算した結果である。図 5.4(a) は放出位置を含む $r-z$ 面に軌道を

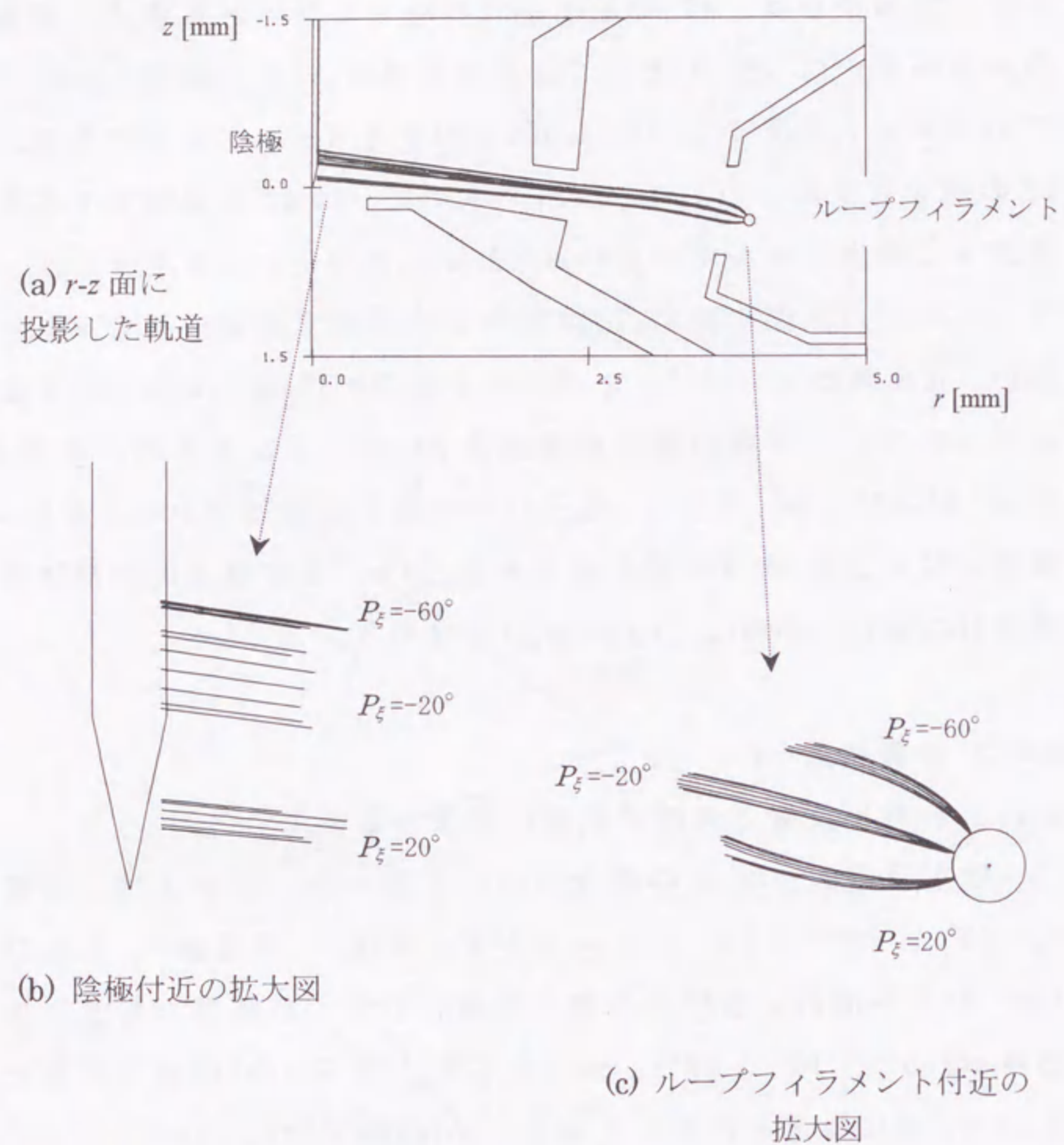


図 5.3 放出位置および角度の影響： r - z 面
位置 $P_\xi = -60^\circ$ 、 -20° 、 20° からエネルギー $W = kT$ 、角度 $\beta = 0^\circ$ および 180° の子午面内に放出する電子軌道。放出角 α は 0° 、 30° 、 60° 、 90° 。(a) は放出位置を含む r - z 面に軌道を投影した様子。(b) は陰極付近、(c) はループフィラメント付近の拡大図。収束用電極 -300 V、ループフィラメント加熱電流 1.55 A の場合。

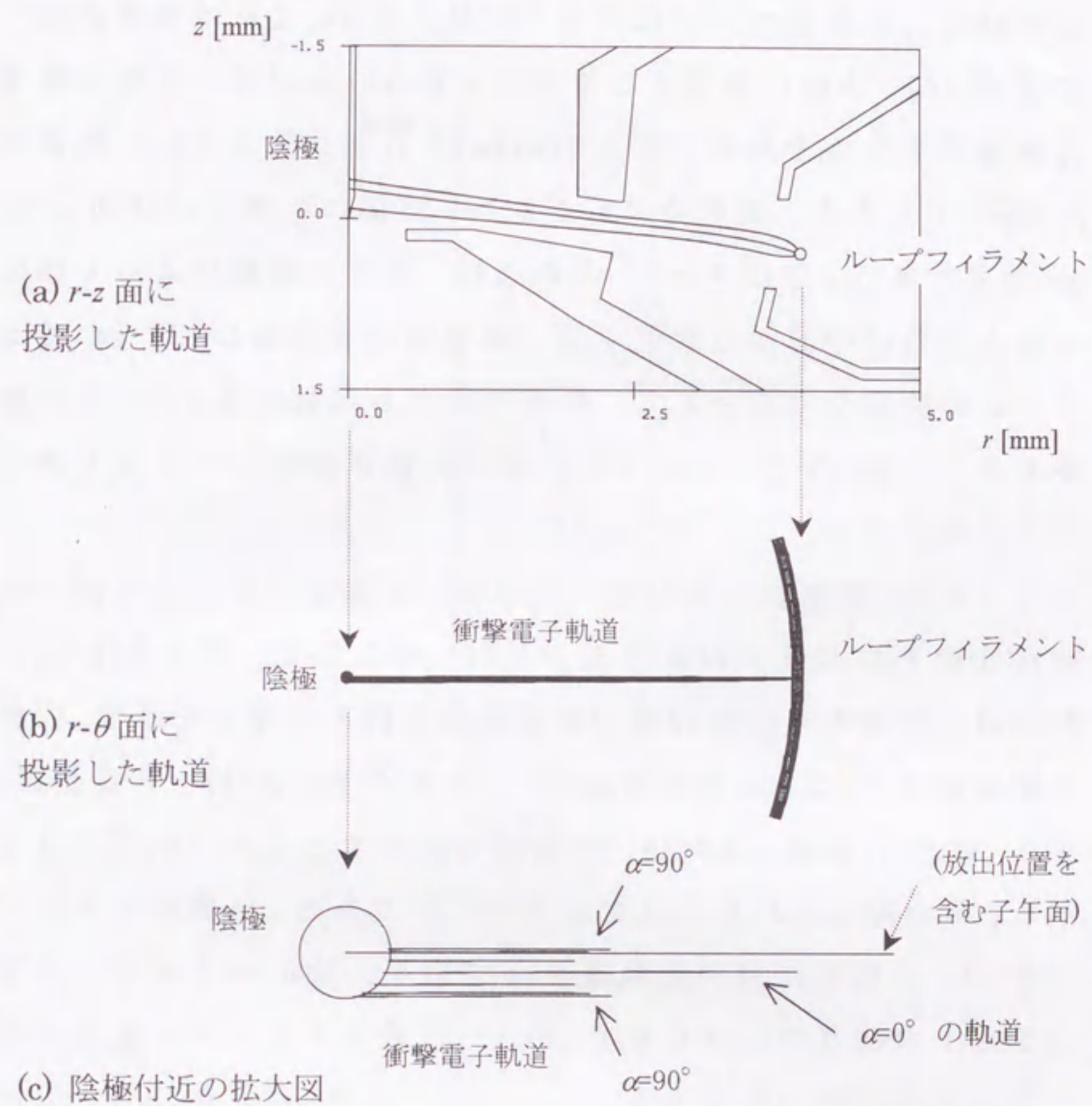


図 5.4 放出位置および角度の影響： r - θ 面
位置 $P_\xi = -60^\circ$ 、 -20° 、 20° から、エネルギー $W = kT$ 、角度 $\beta = 90^\circ$ および 270° 方向に放出する電子軌道。放出角 α は 0° 、 30° 、 60° 、 90° 。(a) は軌道を r - z 面に投影した様子。(b) は r - θ 面に投影。(c) は陰極付近の拡大図。収束用電極 -300 V、ループフィラメント加熱電流 1.55 A の場合。

投影した様子、(b)は $r-\theta$ 面に投影した様子であり、(c)は陰極付近の拡大図である。図 5.4(a)では、異なる位置から放出する 3本の軌道しか示されていないように見えるが、これは角度 $\beta=90^\circ$ および 270° 方向に放出する電子が z 方向に広がることなく陰極に到達するためである。図 5.4(b)(c)からわかるように、軌道は $r-\theta$ 面内で広がる。衝撃時の広がり、陰極の半径とほぼ同じ $50\ \mu\text{m}$ 程度である。放出角 $\alpha=0^\circ$ の軌道は、磁界の影響によって放出位置を含む子午面から変位する。衝撃時の変位量は $23\ \mu\text{m}$ である。この軌道を中心として、軌道の広がり、放出角 α とともに増加する。 $r-\theta$ 面内での広がり、放出位置に関係なく一定であることがわかった。

つぎに、異なるエネルギーで放出する電子の広がりを調べた。放出位置 P_ξ は図 5.3 および 5.4 と同じ値にした。図 5.5(a)に、放出点の方向から陰極近傍の軌道断面を眺めた様子を示す。内側の閉曲線上の+は、放出角度 $\alpha=90^\circ$ 、エネルギー $W=kT$ 、角度 $\beta=0^\circ$ から 360° の範囲に $\Delta\beta=30^\circ$ の間隔で放出する電子の軌道位置を示し、閉曲線はこれらの点を結んだものである。外側はエネルギー $W=2kT$ の電子に対する軌道断面であり、放出エネルギーが異なる電子の軌道の広がりを示している。放出エネルギー W が大きくなると広がりが増加する。

各閉曲線の中心に示したやや大きい+は、 $\alpha=0^\circ$ の軌道位置である。 $\alpha=0^\circ$ で放出した軌道の位置は、放出エネルギーを増加してもあまり変化しない。各点から放出する電子の多くはこの軌道の近くに到達していると考えてよい。

5.2.2.b 衝撃電子密度分布

陰極と陽極が平行平板電極であるときの放出電子の微分電流密度は、放出面と垂直な運動量成分 p_x 、 p_y を用いて次式で与え

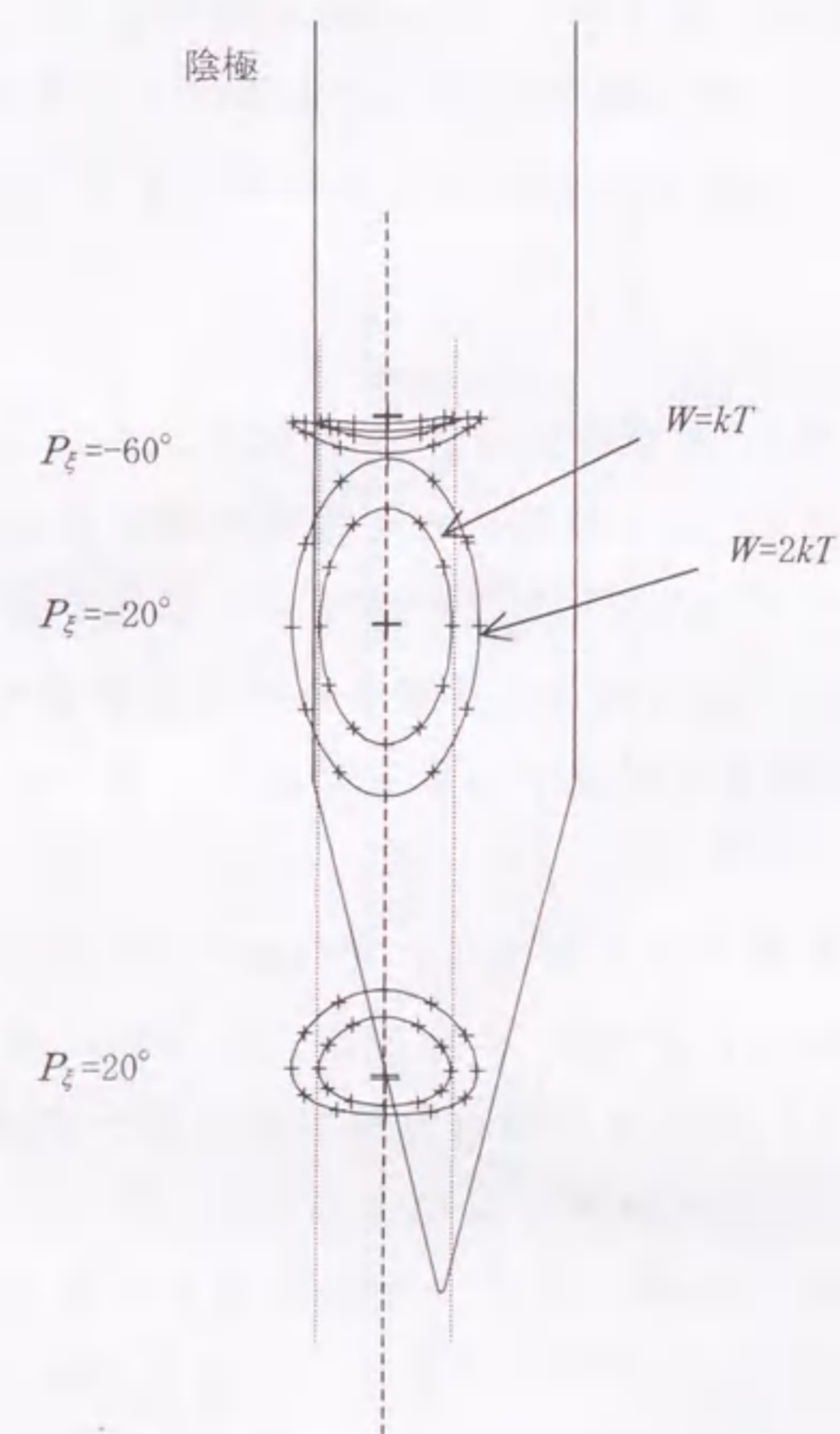


図 5.5 放出エネルギーの影響

放出位置から陰極近傍の軌道(+)を眺めた様子。位置 $P_\xi = -60^\circ$ 、 -20° 、 20° から、エネルギー $W=kT$ および $2kT$ で、角度 $\alpha=90^\circ$ 方向に放出する電子軌道を、 $\beta=0^\circ$ から 360° の範囲、 $\Delta\beta=30^\circ$ 間隔で計算。各閉曲線の中心の+は $\alpha=0^\circ$ 方向に放出する軌道の通過点。収束用電極 $-300\ \text{V}$ 、ループフィラメント加熱電流 $1.55\ \text{A}$ の場合。

られる⁵⁾。

$$d^2j = \frac{J}{2\pi mkT} \exp\left(-\frac{p_x^2 + p_y^2}{2mkT}\right) dp_x dp_y \quad (5.7)$$

この式は $p_x=p_y=0$ で最大値をもつ回転対称のガウス分布であり、法線方向に放出される電子がもっとも多いことを示している。微分電流密度は、接線方向の放出エネルギー W_i が平均値

$$\langle W_i \rangle = \frac{1}{2m} \langle p_x^2 + p_y^2 \rangle = kT \quad (5.8)$$

になるところで e^{-1} に減少する。(5.7)式をもとに、各放出点のまわりの微小表面 ΔS から放出される電子を考えると、接線方向の放出エネルギーが $\langle W_i \rangle$ より小さい電子は、陰極の近くで図 5.5 に示した閉曲線の内部に到達し、電子密度は閉曲線のほぼ中心、すなわち $\alpha=0^\circ$ の軌道が到達する位置において最大になることが予想される。

このことを確かめるために、 $W=4kT$ で角度 $\alpha=60^\circ$ 方向に放出する電子軌道と、 $W=6kT$ で角度 $\alpha=24^\circ$ 方向に放出する電子軌道を計算した。いずれも、接線方向エネルギー $W_i=kT$ で放出する電子である。図 5.6 に計算した軌道の陰極近傍における広がり、図 5.5 の $W=kT$ で角度 $\alpha=90^\circ$ 方向に放出する電子の軌道の広がり、を示した。放出エネルギー W が大きい場合でも、接線方向エネルギー $W_i=kT$ で放出する電子の θ (横)方向の広がりには変わらない。 z (縦)方向の広がりもほぼ同じであり、放出エネルギー W を大きくしても軌道の移動量はわずかである。したがって、接線方向エネルギーが $W_i=kT$ 以下の電子は、 $W=kT$ で角度 $\alpha=90^\circ$ 方向に放出する電子軌道から求めた閉曲線内部に到達していると思なしてよい。また、閉曲線内部の θ (横)方向の電子密度は、中心で最大となり、閉曲線上で e^{-1} に減少するガウス分布で近似できる。この方向の電子密度がガウス分布で近似できることは、Basら⁶⁾に

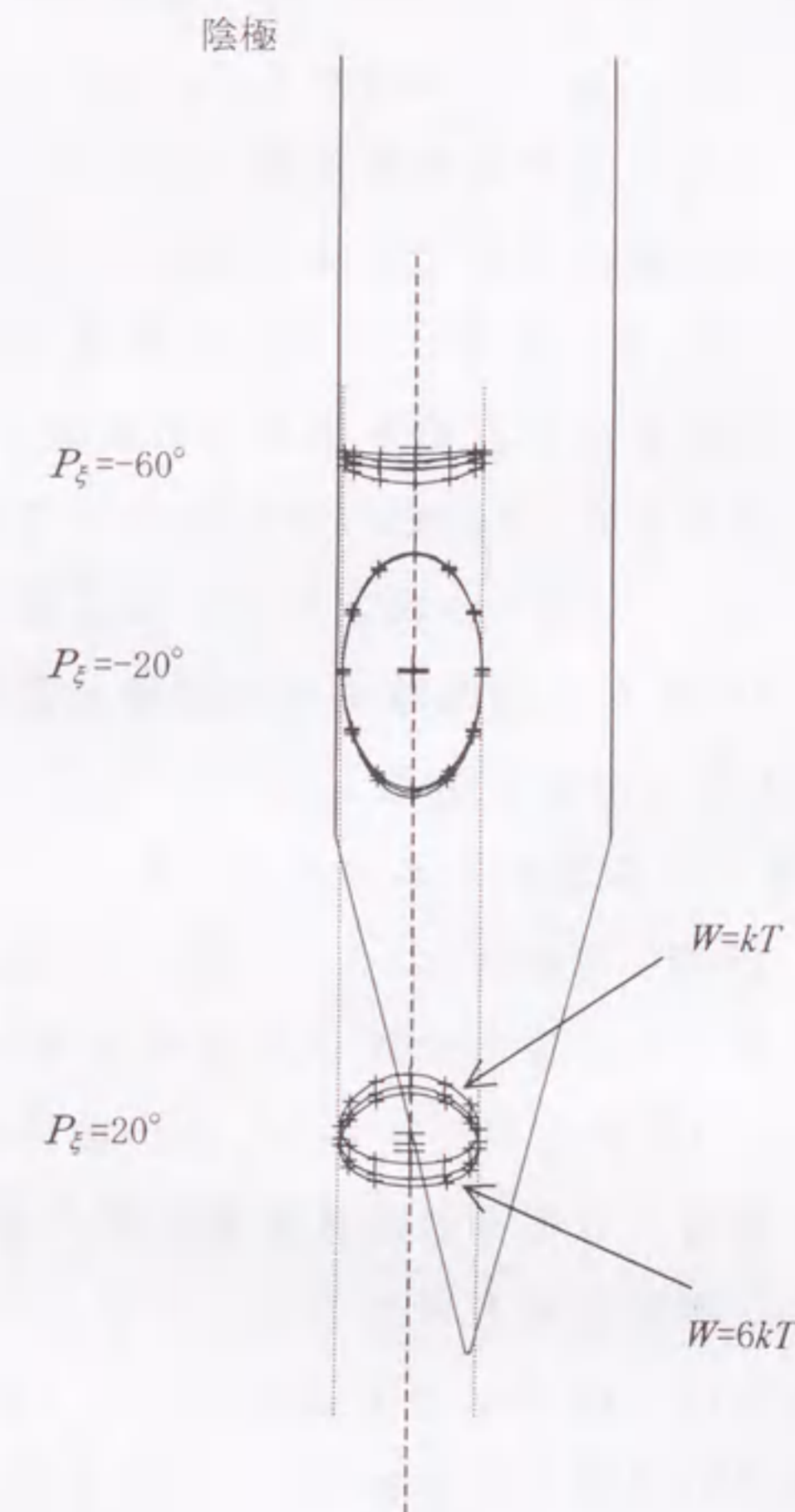


図 5.6 接線方向の放出エネルギー $W_i=kT$ の軌道の広がり
放出位置から陰極を眺めた様子。+は陰極近傍の軌道通過点。放出位置 $P_\xi=-60^\circ$ 、 -20° 、 20° から接線方向エネルギー $W_i=kT$ で放出する電子軌道。軌道の広がり、を示す閉曲線は、それぞれ $W=kT$ 、角度 $\alpha=90^\circ$ の軌道、 $W=4kT$ 、角度 $\alpha=60^\circ$ の軌道、および $W=6kT$ 、角度 $\alpha=24^\circ$ の軌道に対するもの。収束用電極-300 V、ループフィラメント加熱電流 1.55 A の場合。

よっても解析的に示されている。

電子密度は $P_{\xi}=-60^{\circ}$ から放出する電子のように z 方向の広がり小さい場合に高く、 $P_{\xi}=-20^{\circ}$ から放出する電子のように z 方向の広がりが大きい場合に低くなる。ループフィラメント表面の各点から放出される電子の陰極衝撃時の z 方向電子密度は、このような広がりを考慮に入れて計算した。

図 5.7 にエネルギー $W=kT$ 、 $\alpha=90^{\circ}$ の軌道の z 方向の広がりから求めた電子密度を示す。電子密度は閉曲線上で e^{-1} に減少するガウス分布で近似した。 $P_{\xi}=-60^{\circ}$ から放出する電子のように閉曲線が一方向に偏り、 $\alpha=0^{\circ}$ の軌道が外になる場合には、図に示すように $\alpha=0^{\circ}$ の軌道から閉曲線までの距離を基に、密度分布を 2 つに分割したガウス分布で近似した。

図 5.8 は、異なる位置からエネルギー $W=kT$ で $\alpha=0^{\circ}$ 方向に放出する電子と、 $\alpha=90^{\circ}$ で $\beta=0^{\circ}$ および 180° 方向に放出する電子の軌道のみを計算して、放出位置 P_{ξ} と衝撃位置 z の関係を調べた結果である。この関係を利用すると、放出範囲の任意の位置から上記の条件で放出する電子の陰極衝撃位置 z がわかるので、 z 方向の広がりから密度分布を求めることができる。衝撃電子全体の z 方向密度分布は、図 5.8 の関係を用いて、位置 $\Delta P_{\xi}=1^{\circ}$ 間隔から放出する電子の密度分布を計算し、これを積分して求めた。

図 5.9 に収束用電極 -300 V のときの衝撃電子全体の z 方向密度分布と、同様の方法で求めた収束用電極 -400 V のときの密度分布を示す。横軸は陰極先端位置 ($z=0$) を基準にとった z 座標と、ウェーネルト開口部の下面からの高さ h で示した。このときの先端位置は $h=0.3$ mm である。収束用電極 -400 V の場合には、ループフィラメント加熱電流 1.6 A の磁界を考慮して軌道を計算した。加熱電流を 1.6 A としても、 $\alpha=0^{\circ}$ の軌道が陰極衝撃時に放出位置を含む子午面から変位する量は 24 μm であり、 1.55 A

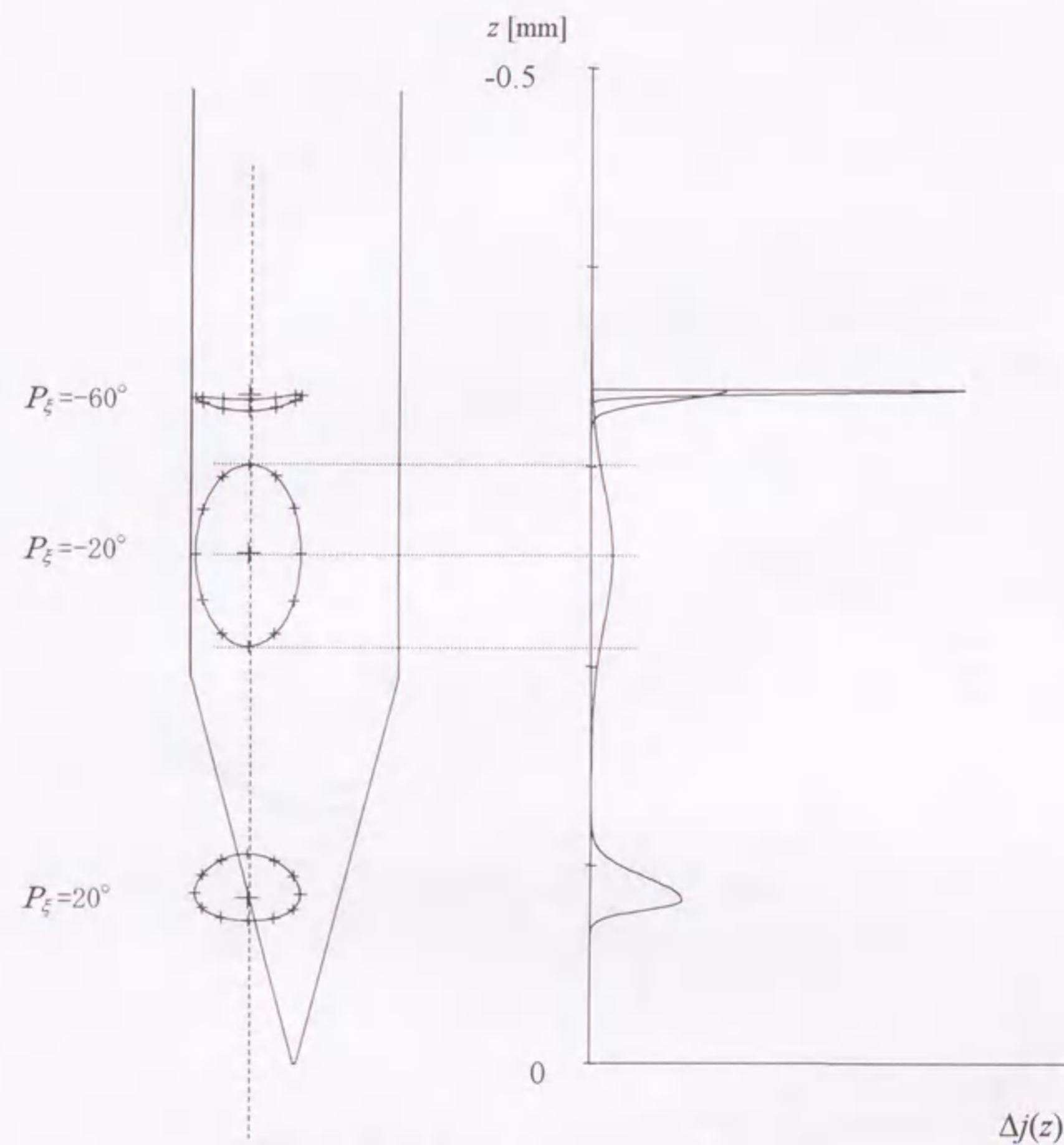


図 5.7 異なる位置から放出される電子の z 方向密度分布位置 $P_{\xi}=-60^{\circ}$ 、 -20° 、 20° から $W=kT$ 、 $\alpha=90^{\circ}$ 方向に放出する電子の軌道の広がり(左)と、 z 方向の広がりから求めた密度分布。収束用電極 -300 V、ループフィラメント加熱電流 1.55 A の場合。

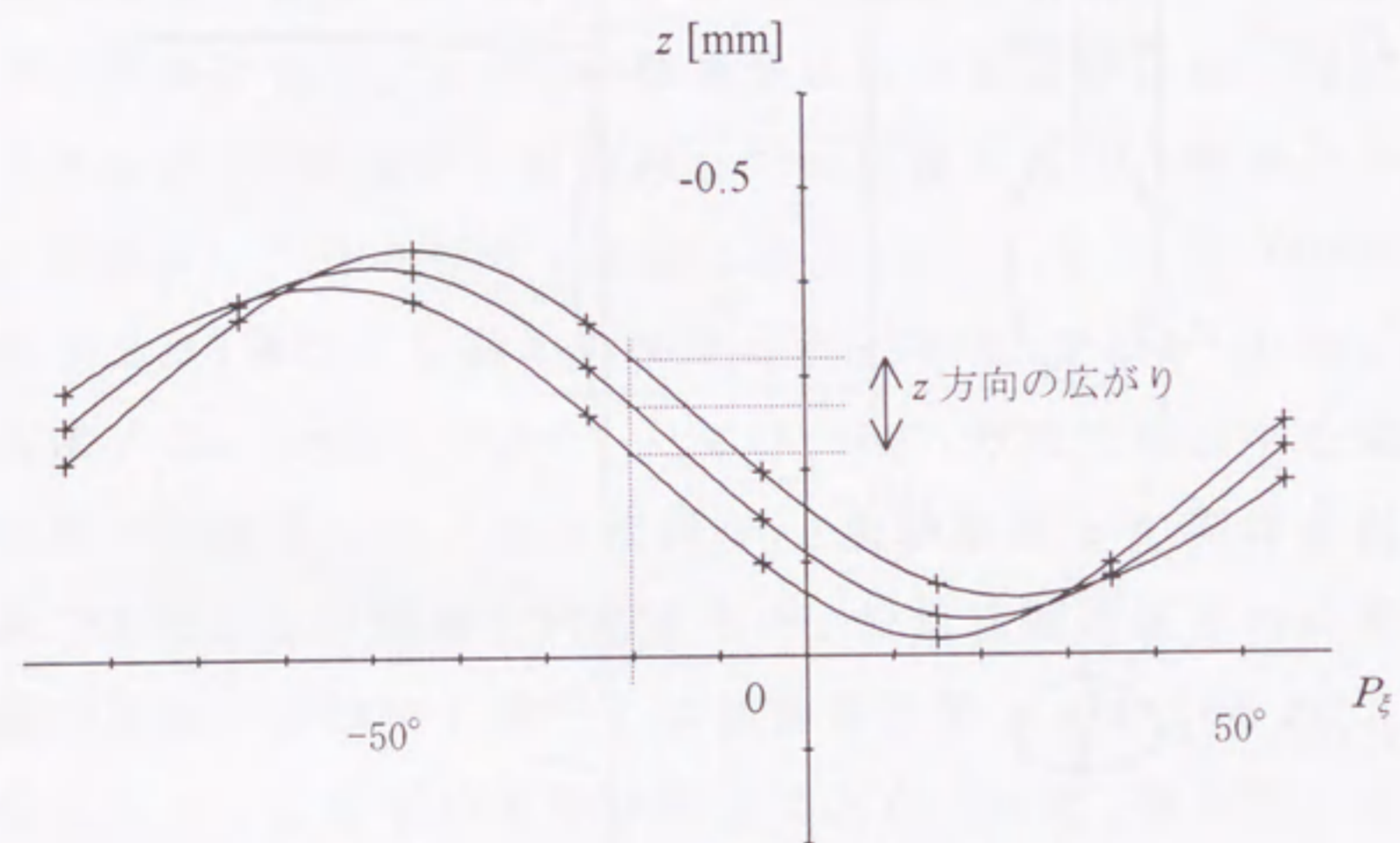
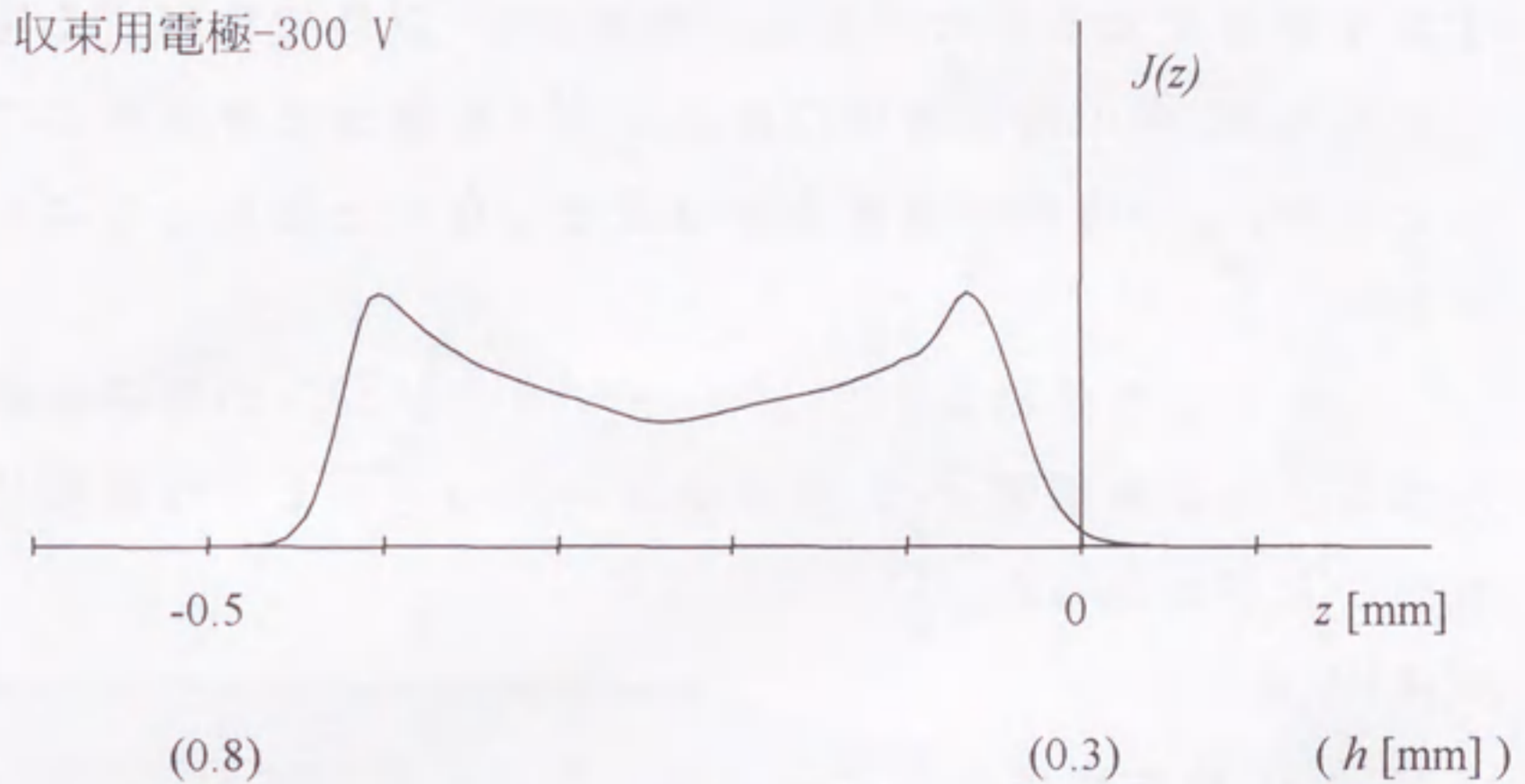


図 5.8 放出位置と衝撃位置の関係

異なる位置からエネルギー $W=kT$ 、 $\alpha=0^\circ$ 方向に放出する電子と、 $\alpha=90^\circ$ で $\beta=0^\circ$ および 180° 方向に放出する電子の軌道のみを計算して求めた放出位置 P_z と衝撃位置 z の関係。収束用電極 -300 V の場合。

(a) 収束用電極 -300 V



(b) 収束用電極 -400 V

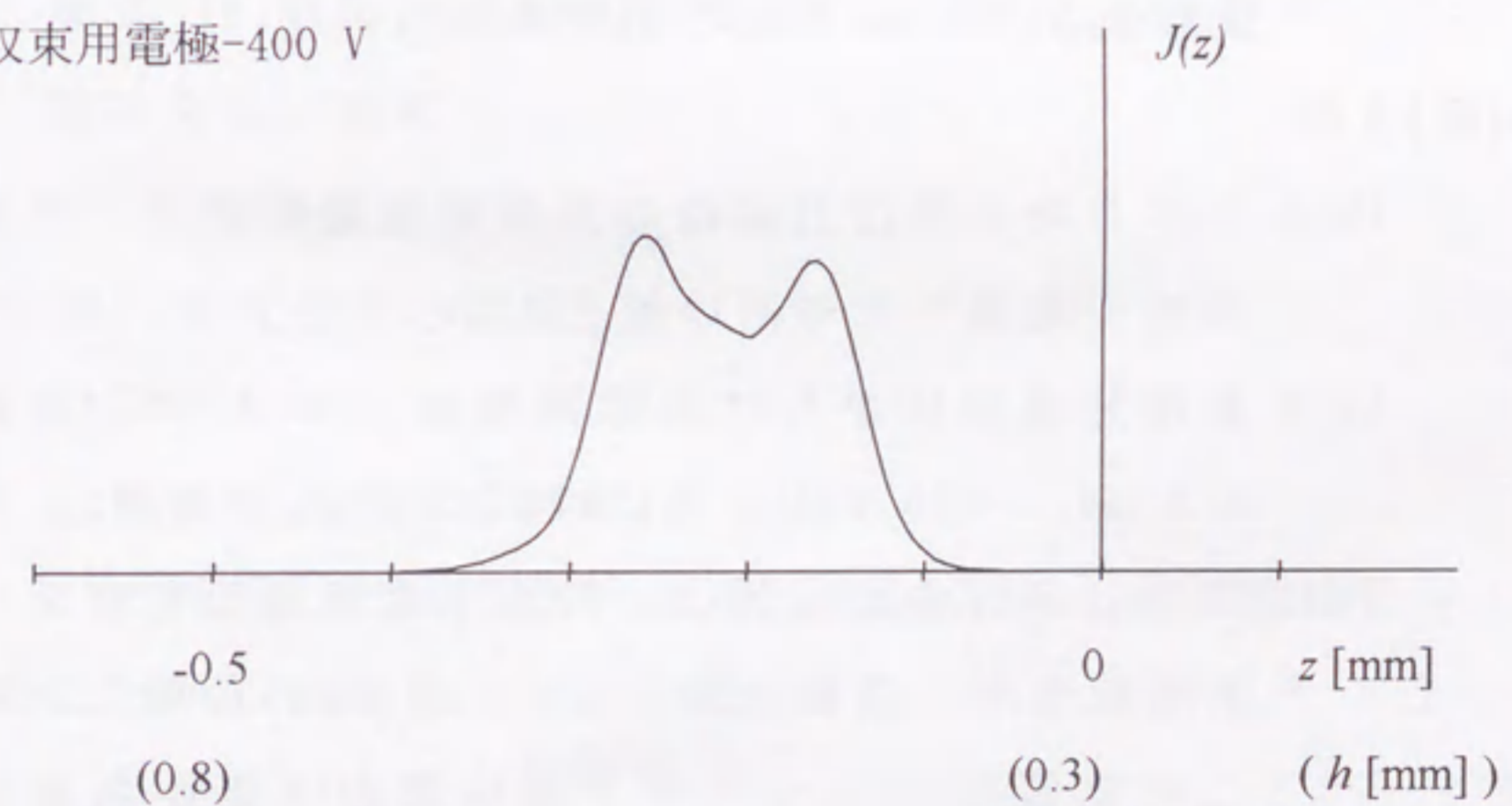


図 5.9 衝撃電子の z 方向密度分布

(a) 収束用電極 -300 V 、(b) -400 V に対する結果。 $z=0$ は $h=0.3\text{ mm}$ のときの陰極先端位置。

の場合とあまり変わらない。これは θ 方向の軌道変位量が加熱電流に比例する量であり、加熱電流の増加分 0.05 A が約 3 %とわずかな割合であるためである。角度 $\alpha=0^\circ$ 以外で放出する電子についても θ 方向の陰極衝撃位置は 1.55 A の場合とほぼ同じであることから、この方向の密度分布は変化しないと見なしてよいことがわかった。

こうした計算結果から、ループフィラメントの各子午断面から放出される衝撃電子は、陰極衝撃時につぎのような密度分布をもつことがわかった。

θ (横)方向

- (a1) 最大密度を与える位置は放出位置を含む子午面から 23-24 μm 変位したところであり、密度分布はガウス分布で近似できる。
- (a2) 密度が e^{-1} に減少する位置は、最大密度を与える中心から約 25 μm のところである。

z (縦)方向

- (b1) この方向の密度分布は収束用電極電圧によって変わり、両端でやや高い値をもつ。
- (b2) 密度分布の広がりには収束用電極 -300 V のとき約 0.5 mm、-400 V のときには約 0.2 mm である。
- (b3) 密度分布の中心位置は、収束用電極電圧を変えても変化せず、陰極先端から -0.22 mm の位置にある。この位置はウェーネルト開口部の下面から高さ $h=0.52$ mm の位置である。

図 5.10 に θ および z 方向を考慮したときの衝撃電子密度分布を示す。密度分布は収束用電極 -300 V のときのものである。

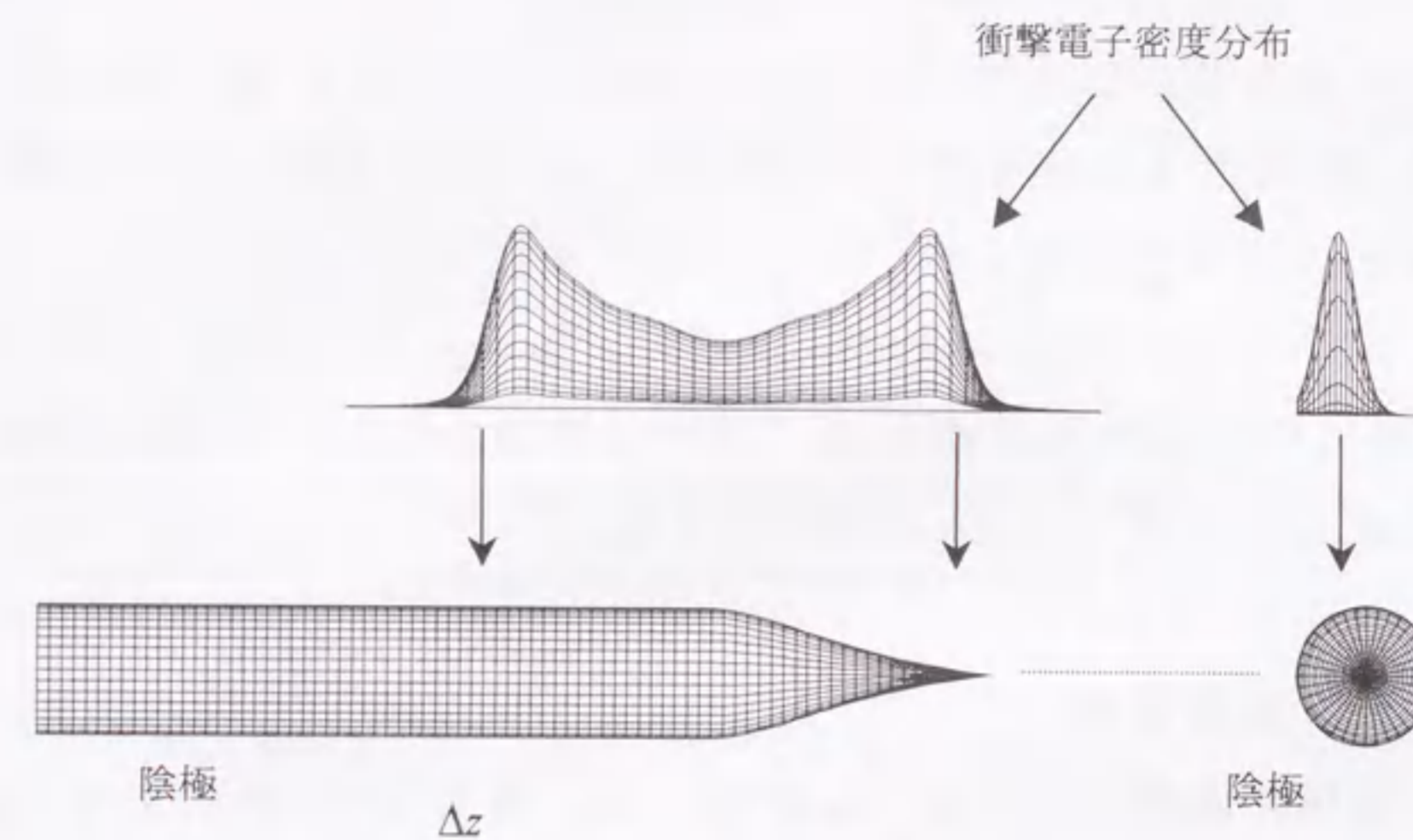


図 5.10 収束用電極電圧 -300 V のときの衝撃電子密度分布と陰極

5.3 陰極の温度分布と蒸発

5.3.1 計算方法

5.3.1. a 陰極に入射する熱量

5.2 で計算した衝撃電子密度の全積分値は衝撃電流に等しくなることから衝撃電流密度が決まり、これと衝撃電圧 5.2 kV の積から衝撃電力密度が計算できる。図 5.10 に示したように陰極の表面を微小要素に分割し、各要素の衝撃電力から陰極への入射熱量を計算した。

陰極の長さは 4 mm とし、 z 方向を $\Delta z = 1 \mu\text{m}$ の区間に分割した。入射熱量を計算するために、各区間の表面 ΔS を円周方向に角度 2° 間隔で細分割した。細分割した微小表面要素 Δs 上の電力

密度を Q 、衝撃電子の入射角度を χ とすると、 Δs に入射する熱量 Δq は、

$$\Delta q = (1 - \eta(\chi)) Q \Delta s \cos \chi \quad (5.9)$$

で与えられる。ここで、 $\eta(\chi)$ は入射角に対する反射電子放出比である。反射電子放出比は、タングステンについて調べられた値⁷⁾をもとに次式で計算した。

$$\eta(\chi) = 1 - (0.52 + 3.4 \times 10^{-8} \chi^{3.8}) \cos \chi \quad (5.10)$$

z 方向に分割した各区間 Δz に入射する熱量 ΔQ_{IN} は、この区間の表面要素 Δs に入射する Δq の和で与えた。

5.3.1.b 温度分布

陰極に入射した熱量 Q_{IN} の多くは、図 5.11 に示すように熱伝導によって陰極固定端に向かって流れる。伝導熱流を $Q_c(z)$ と置くと、熱流と温度分布 $T(z)$ の関係は熱伝導則

$$Q_c(z) = -K_c S_c(z) \frac{dT(z)}{dz} \quad (5.11)$$

で与えられる。ここで、 K_c は熱伝導率、 $S_c(z)$ は陰極の断面積である。陰極の表面からは輻射によって熱が失われるので、陰極固定端に向かって流れる伝導熱は次第に減少していく。単位表面積から失われる輻射熱 $Q_R(z)$ は、ステファン・ボルツマン則

$$\frac{dQ_R(z)}{dS} = \sigma \varepsilon (T(z)^4 - T_{SR}^4) \quad (5.12)$$

で与えられる。ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数、 ε は輻射率、 T_{SR} は周囲温度である。

陰極範囲 $[z, 0]$ ($z < 0$) を考え、この範囲の表面積を S と置くと、熱エネルギー保存則は次式となる。

$$\int_S \left(\frac{dQ_R}{dS} \right) dS - Q_c(z) = \int_S \left(\frac{dQ_{IN}}{dS} \right) dS \quad (5.13)$$

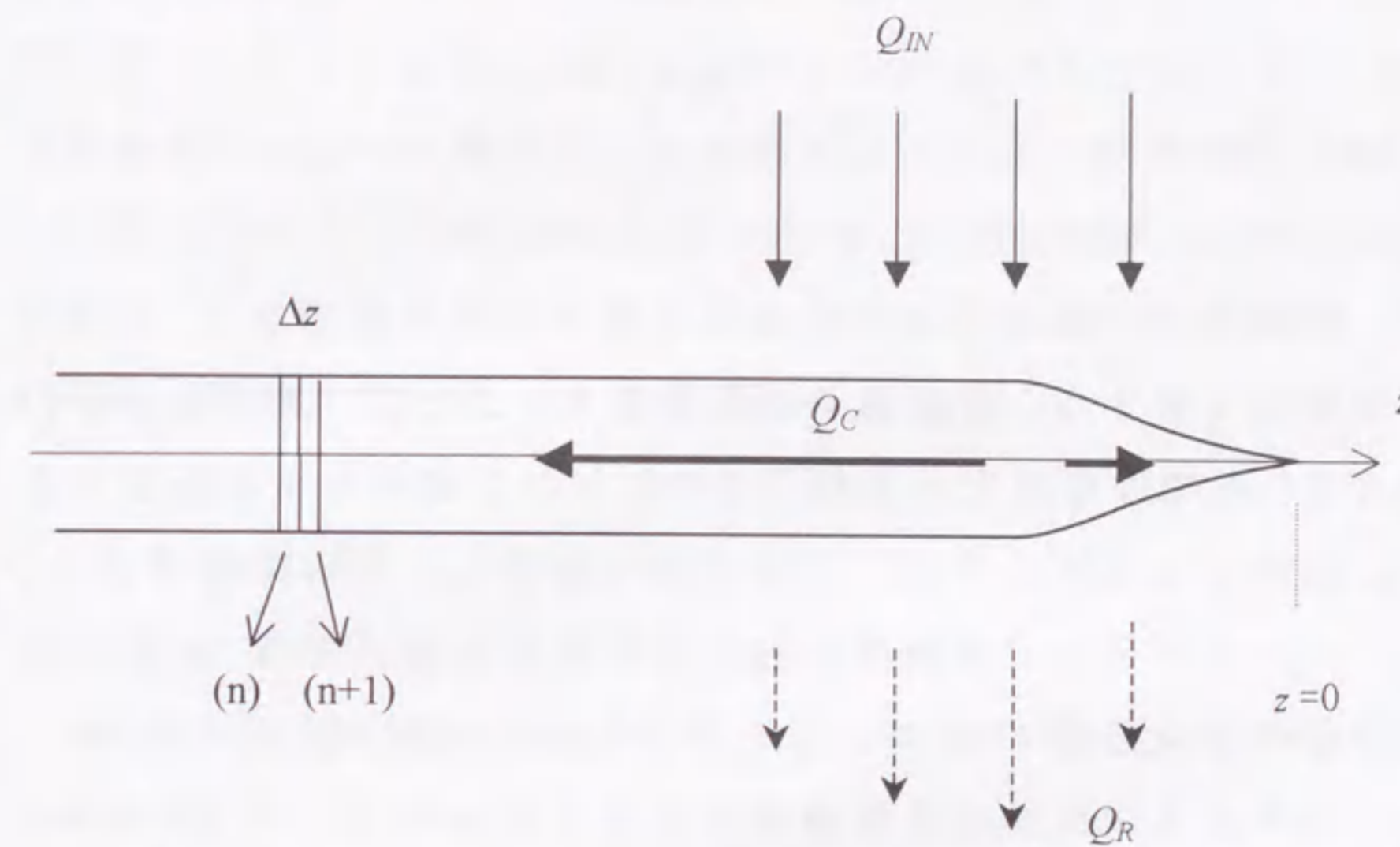


図 5.11 熱流計算

陰極を流れる伝導熱流 Q_c 、輻射熱 Q_R 。温度分布 $T(z)$ は、陰極に入射する熱量エネルギー保存則を満たす熱流から計算。

ここで、左辺の第 1 項は輻射損、第 2 項は位置 z の断面を流れる伝導熱であり、右辺はこの範囲に入射する熱量である。陰極範囲 $[z, 0]$ を衝撃範囲よりも広くとると、右辺は陰極に入射する全熱量に等しくなる。

エネルギー保存則を満たす伝導熱流 $Q_c(z)$ は、 $z = -4$ mm の位置から陰極先端までの各分割区間 $\Delta z(n)$ に対して、式 (5.11)、(5.12)、(5.13) を差分化した式

$$T_{(n+1)} = T_{(n)} + \Delta T_{(n)} = T_{(n)} + \left(-\frac{Q_{C(n)}}{K_C S_{C(n)}} \right) \Delta z \quad (5.14)$$

$$\Delta Q_{R(n)} = \sigma \varepsilon (T_{(n)}^4 - T_{SR}^4) \Delta S_{(n)} \quad (5.15)$$

$$Q_{C(n+1)} = Q_{C(n)} - \Delta Q_{R(n)} + \Delta Q_{IN(n)} \quad (5.16)$$

を順次適用することによって求めた⁸⁾。位置 $z = -4$ mm の陰極温度は 1,500 K、周囲温度 T_{SR} は 400 K とした。

衝撃電力を増加すると陰極に入射する熱量が増加し、先端部の温度は上昇する。衝撃電子密度を変えて、上述の熱流計算を行なうと、先端温度がたとえば 3,040 K となる温度分布を計算できる。後述する温度分布は、この方法で計算したものである。

タングステンが蒸発するときの昇華熱については、温度分布に影響を与える量でないことを以下に述べる検討によって確かめた。タングステンの昇華熱は 3,000 K において 205 kcal/mol の値であり、温度にほとんど影響されないことが報告⁹⁾されている。この値は 4.66 kJ/g に相当するので、蒸発速度が 1 mg/cm²s のとき陰極の単位表面積から 4.66 W/cm² の熱量が昇華熱として失われることになる。タングステンの質量蒸発速度は 3.4.3 で示した (3.2) 式を用いて計算することができ、3,000 K において 7.14×10^{-7} g/cm²s の値であるので、このときの単位表面積あたりの昇華熱は 3.33×10^{-3} W/cm² となる。一方、(5.12) 式から求めた単位表面積あたりの輻射熱は 3,000 K において 100 W/cm² オーダーの値である。したがって、陰極表面からの熱損は主として輻射熱によって決まり、昇華熱は無視できる。

5.3.1.c 陰極の蒸発

温度分布を計算すると、3.4.3 で述べた厚さ減少速度 (3.3) 式を使用して陰極各部の半径減少速度を計算できる。半径減少速度と加熱時間から各分割区間 Δz の半径減少量を計算し、これを

元の半径から差し引いて蒸発後の陰極形状を調べた。

蒸発によって陰極径が減少すると、衝撃範囲は小さくなり入射熱量が減少するので、陰極温度は低下する。このときの温度分布は、蒸発後の陰極に入射する熱量を計算し直したあと、熱流計算を再度行なって求めた。このため、半径減少量の計算に用いる加熱時間は 0.2 時間と短くして、陰極形状が大幅に変化しないようにした。次節で示す計算結果は、この方法で陰極の温度分布と蒸発の時間変化を調べた結果である。

5.3.2 計算結果

5.3.2.a 陰極先端位置 $h = 0.27$ mm の場合

計算結果を図 5.12 に示す。(a) は収束用電極 -300 V、(b) は -400 V における衝撃電子密度分布に対する結果である。横軸を z とし (陰極先端は $z = 0$)、上から順に衝撃電子密度分布、陰極の形状と温度分布を示した。衝撃電子密度分布の下に示した矢印は、陰極衝撃範囲を示す。衝撃電子密度は、加熱直後に先端温度 3,040 K を与える値にした。温度分布と陰極の形状は 1 時間ごとの変化を 5 時間まで示した。温度分布の右の矢印は、加熱直後と 5 時間後の先端温度を示している。陰極の形状は変化が小さいために一本の線として表わされているが、外側が最初の形状、内側が 5 時間後の形状である。

陰極先端部が蒸発すると衝撃範囲は減少し、入射熱量が減少するので、先端温度は時間が経過するとともに低下する。(a)(b) いずれの場合も、先端温度は 5 時間後に 3,000 K よりもやや低い温度になる。どちらの場合も、蒸発は先端から進む。(a) の場合のように、先端を含む広い範囲を衝撃した場合でも、高温に加熱される位置は先端近くである。(b) の場合には、衝撃範囲が円錐部分の底面近く狭い範囲であるために、この範囲に最高温度が

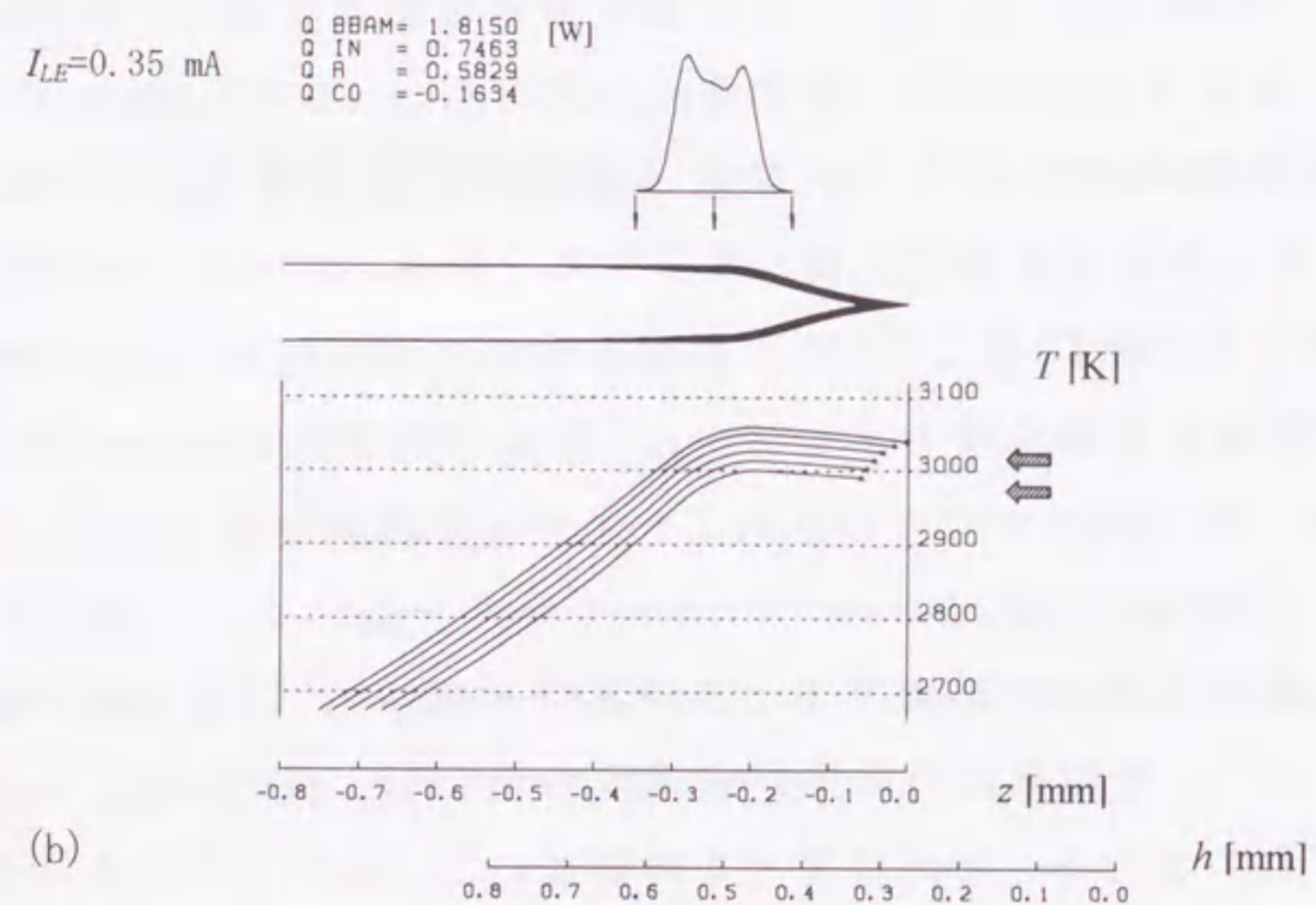
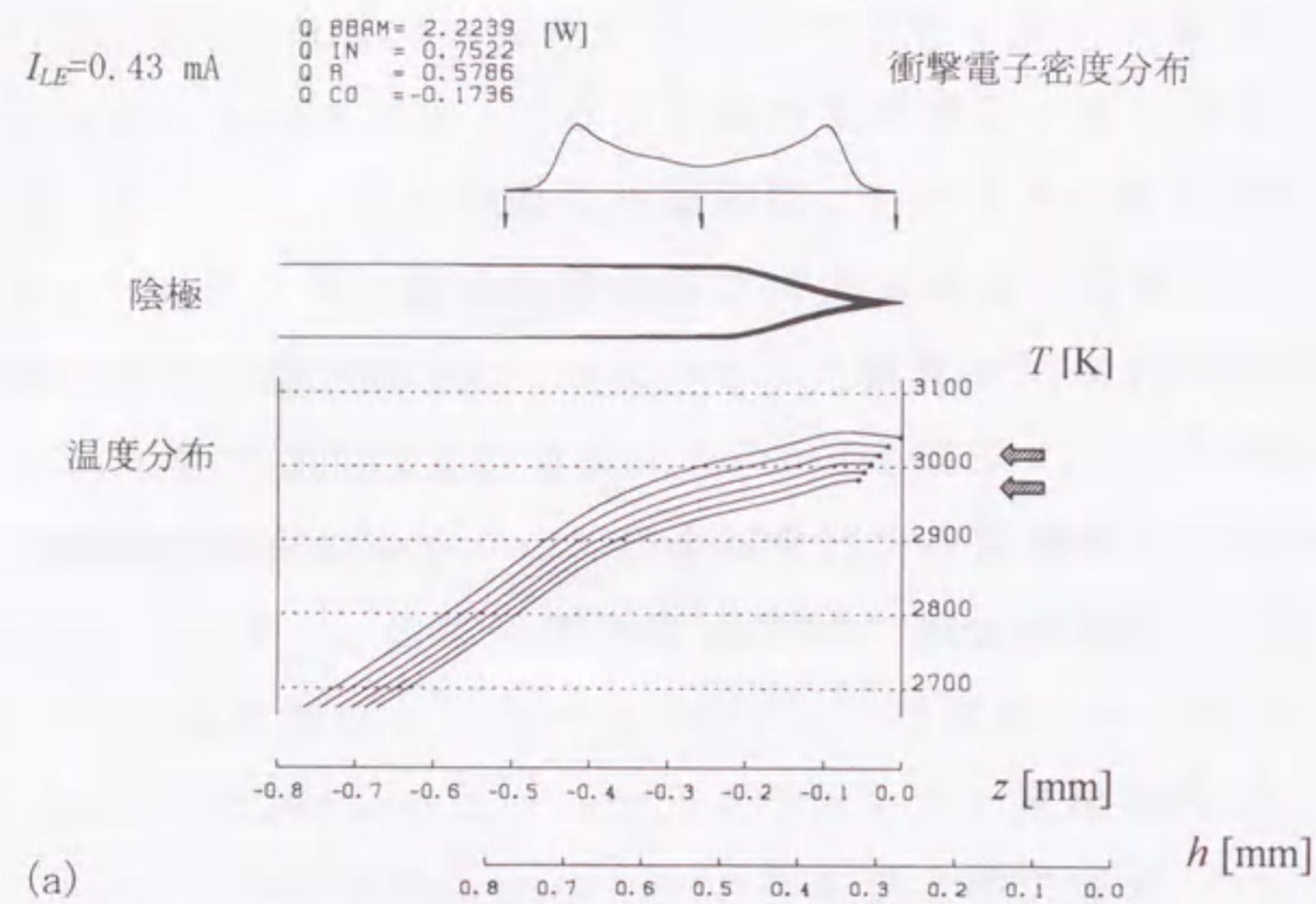


図 5.12 陰極の温度分布と蒸発：先端位置 $h=0.27$ mm の場合
(a)収束用電極-300 V、(b)-400 V の衝撃電子密度分布に対する結果。1 時間間隔の変化を 5 時間まで示した。

現れる。先端までの温度降下は 20 K 程度のわずかな量であるので、蒸発は先端から進むが、蒸発範囲は (a) に比べて広がっている。

各図の左上に示した数値は、計算に用いた衝撃電流 I_{LE} と、各熱量の計算値である。 Q_{BEAM} は全衝撃電力 [W]、 Q_{IN} は陰極に入射した全熱量 [W]、 Q_R は陰極表面からの全輻射損 [W] である。 Q_{CO} は $z=-4$ mm の陰極固定端から流れ出る熱伝導損 [W] である。全輻射損と熱伝導損の和は陰極に入射した全熱量に等しい値であり、エネルギー保存則 $Q_R - Q_{CO} = Q_{IN}$ を満たしている。陰極先端を 3,040 K に加熱するのに必要な衝撃電力は図 5.12(a) の場合 2.2 W、(b) の場合 1.8 W である。衝撃電力の違いは、衝撃範囲が異なることによる。(a) の場合と比べると、(b) の衝撃範囲は円錐部の狭い範囲であり、陰極に衝撃する電子が多いために、加熱に必要なとされる衝撃電力は小さくなる。

5.3.2.b 陰極先端位置 $h=0.4$ mm の場合

図 5.13 は先端位置を $h=0.4$ mm にしたときの計算結果である。先端位置が後退すると、衝撃範囲は減少する。先端部が蒸発したときにおこる先端温度の低下は、(a) の場合のように衝撃範囲が広いときに小さくなる。(b) の場合には、先端円錐部が衝撃範囲であるために、蒸発は先端の狭い範囲に制限される。しかし、蒸発が進むときにおこる先端温度の低下量は大きくなる。この結果から、先端温度の変化を小さくするには、陰極先端部の広い範囲を低密度の衝撃電子で加熱したほうがよいことがわかる。

5.3.2.c 先端円錐部が長い陰極を使用した場合

円錐部の長さが約 0.5 mm と長い陰極に対する計算結果を図 5.14 に示す。陰極先端位置 $h=0.27$ mm の場合の結果である。

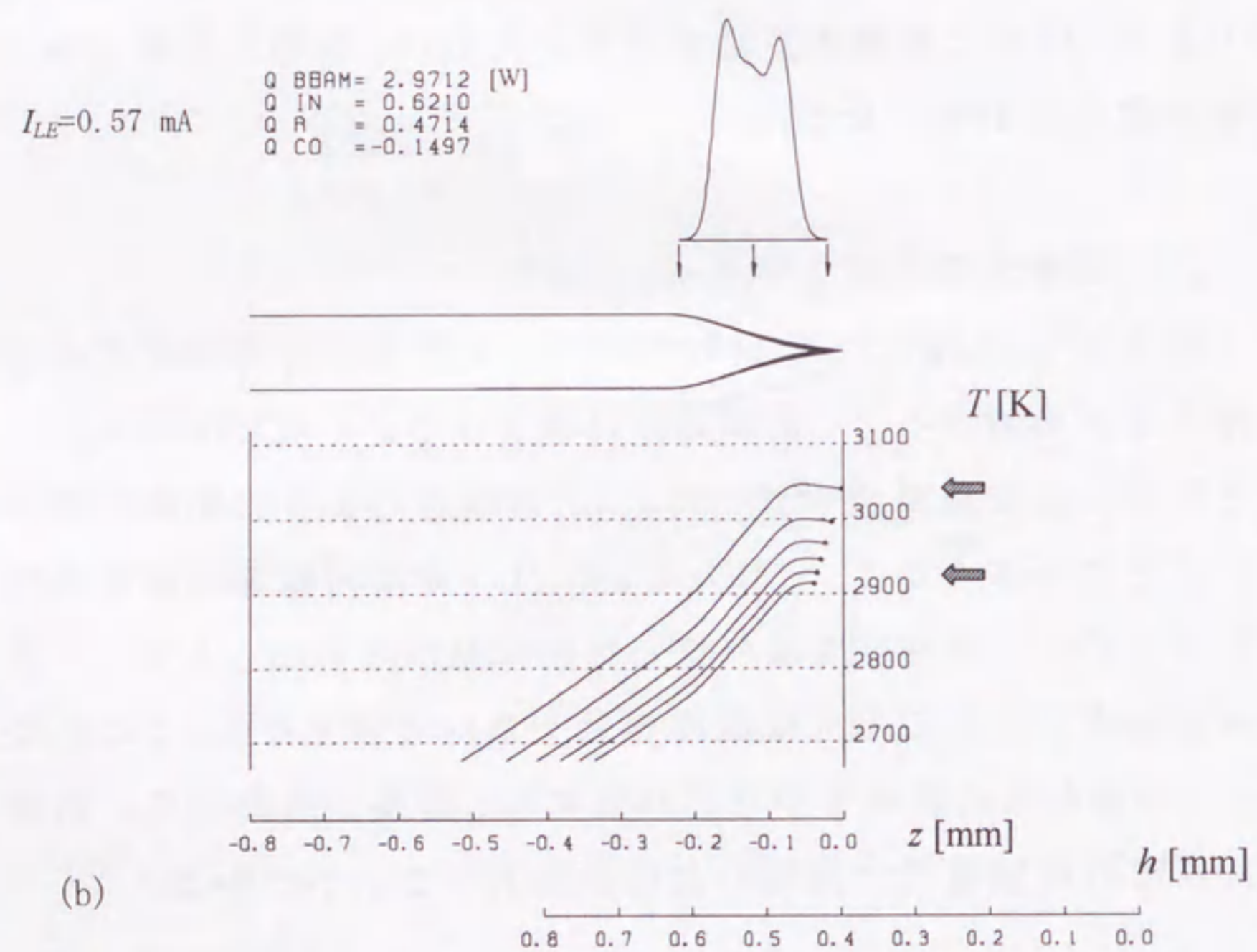
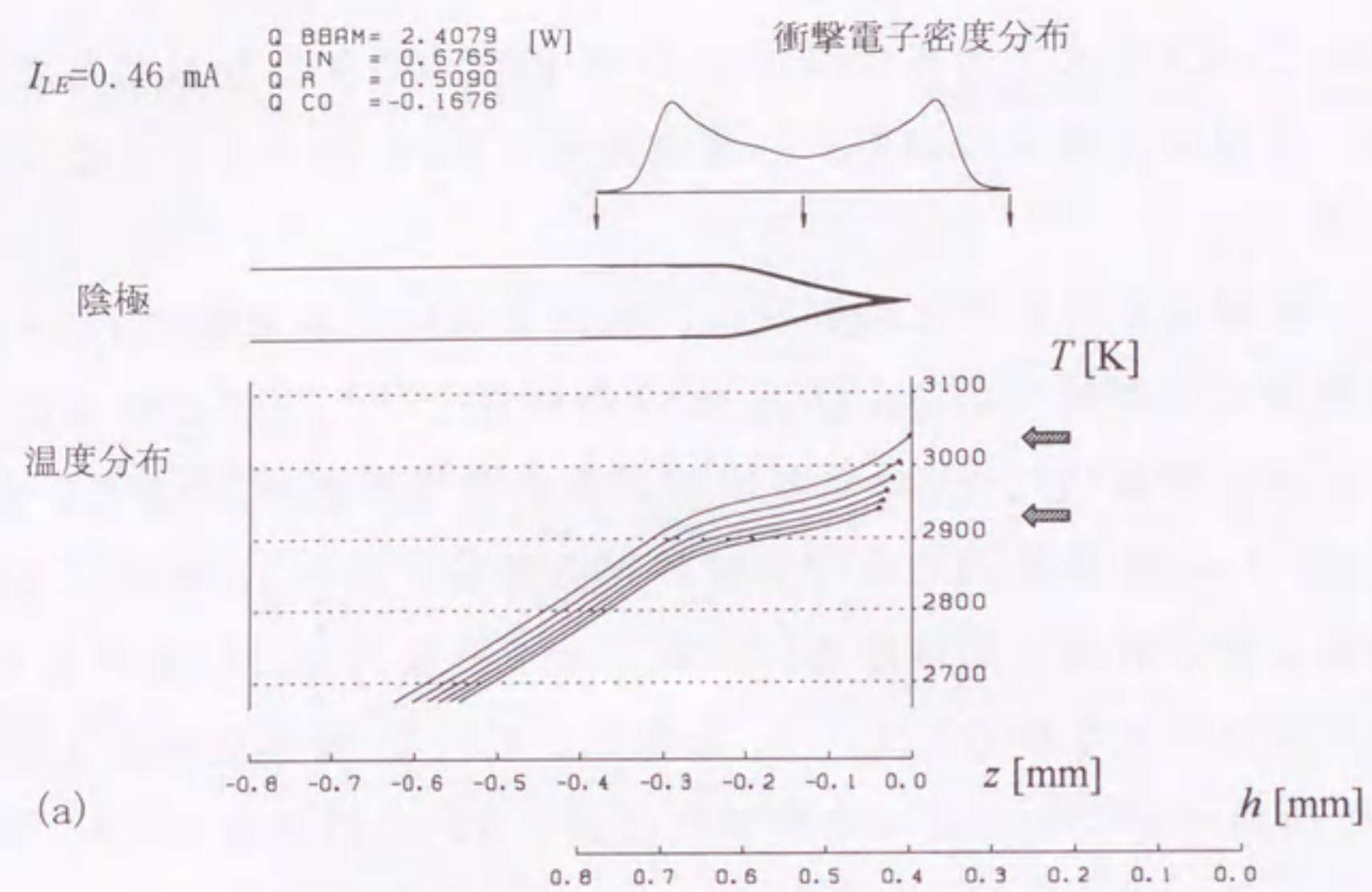


図 5.13 陰極の温度分布と蒸発：先端位置 $h=0.4$ mm の場合
(a) 収束用電極-300 V、(b)-400 V のときの衝撃電子密度分布に対する計算結果。1 時間間隔の変化を 5 時間まで示した。

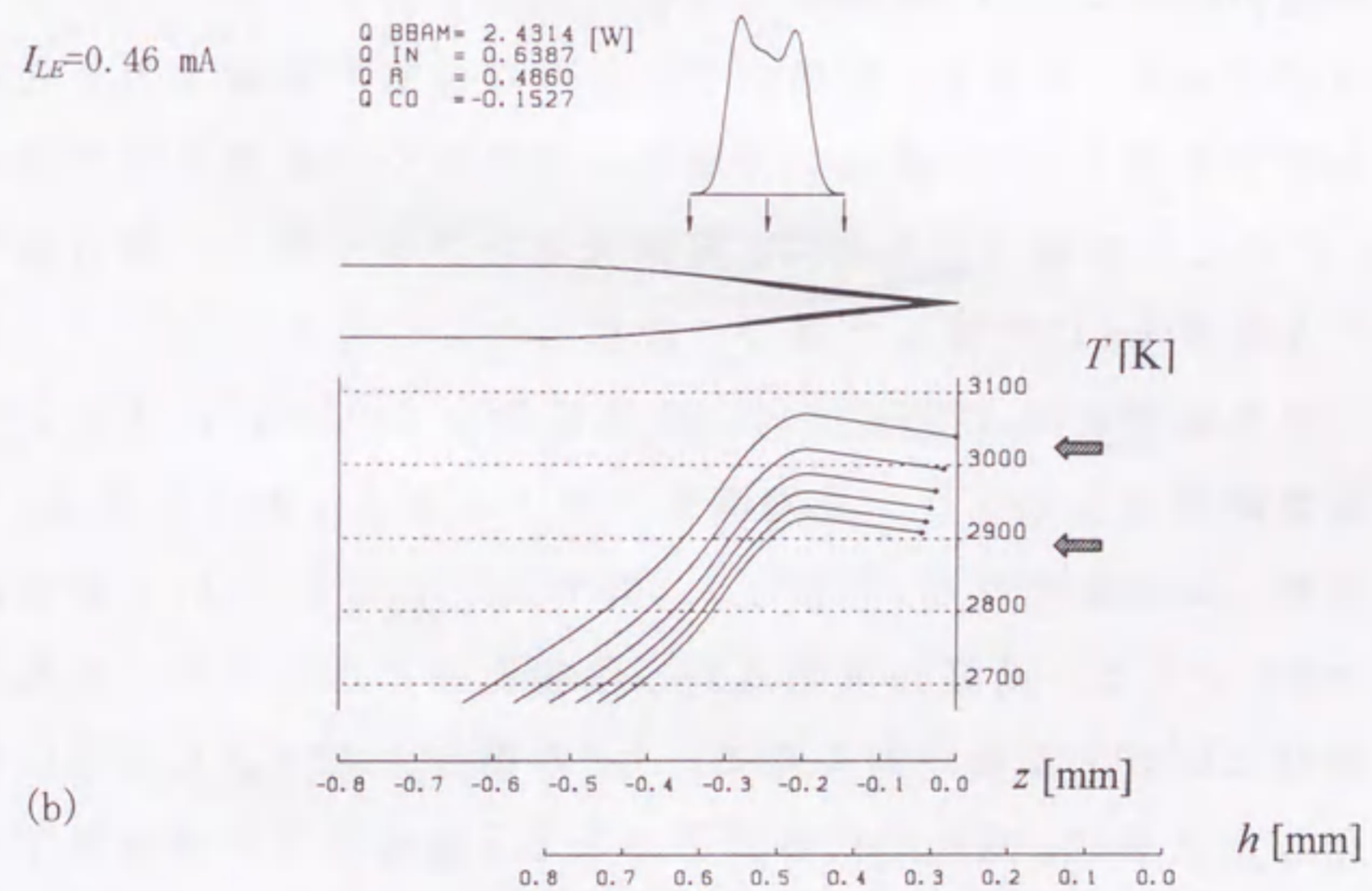
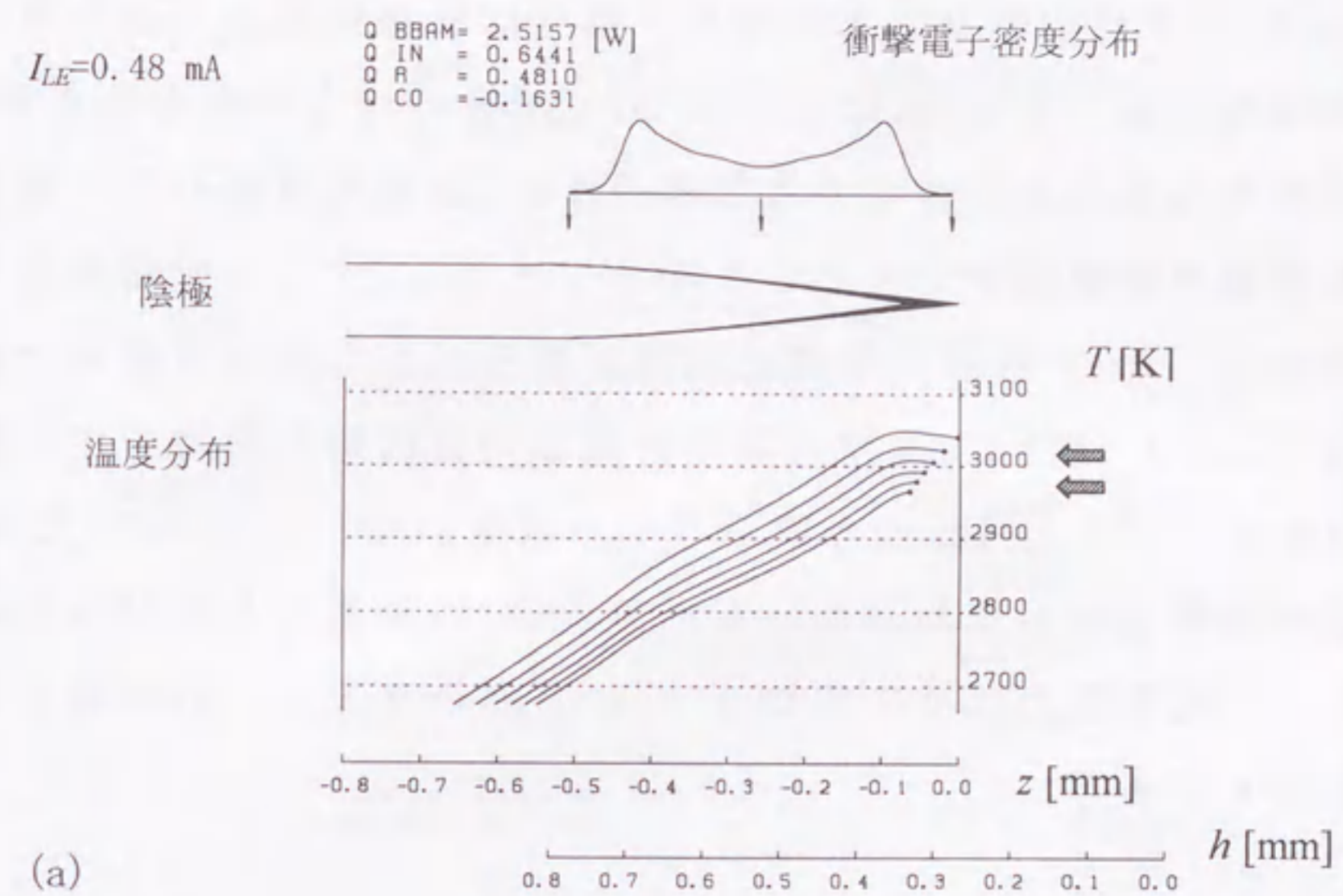


図 5.14 円錐部が長い陰極：先端位置 $h=0.27$ mm の場合
(a) 収束用電極-300 V、(b)-400 V の衝撃電子密度分布に対する計算結果。1 時間間隔の変化を 5 時間まで示した。

(a) (b)いずれの場合においても、蒸発は陰極先端から進むが、先端温度の低下量は(a)に比べて(b)の場合のほうが大きくなる。先端温度の変化を小さくする加熱条件は、陰極先端部の広い範囲を低密度の衝撃電子で加熱した場合であることは、この結果からもわかる。(a)の場合、先端の蒸発が進んでも、先端温度が大きく低下しない理由は、衝撃範囲が円錐部の底面近くまでの広い範囲であることと、円錐部の底面近くの蒸発がほとんどなく、この付近の衝撃面積が変わらないためである。円錐部分の径が小さいために、衝撃電力はやや増加し、(a)の場合 2.5 W、(b)の場合には 2.4 W である。

5.3.2.d 陰極先端位置と蒸発範囲の関係

陰極先端をウェーネルト開口部近くに配置すると、円柱部の衝撃範囲は広くなり、先端温度の低下を小さく抑えることができるはずである。しかし、陰極をこのような位置に配置すると先端を衝撃できなくなり、蒸発が先端から進まなくなる恐れが出てくる。このことを調べるために、陰極先端をウェーネルト開口部の近く $h=0.2$ mm に配置した場合を計算した。

計算結果を図 5.15 に示す。先端位置を $h=0.2$ mm にすると陰極衝撃範囲は広くなり、先端温度の低下は小さく抑えられる。5 時間後、先端温度は(a)の場合 3,000 K よりも高く、(b)の場合は 3,000 K である。高温に加熱される陰極範囲は広くなり、先端から離れた位置の温度が高くなる。(a)の場合、もっとも高温に加熱される位置は、先端の円錐部分である。先端までの温度降下はわずかであるため、蒸発は先端から進む。一方、(b)の場合には、衝撃範囲が円柱部分だけになり、円錐部分よりも円柱部分の温度が高くなる。蒸発は円柱部分で速く進む。このまま加熱を続けると先端円錐部が取り残され、落下する恐れが出てくる。この計算

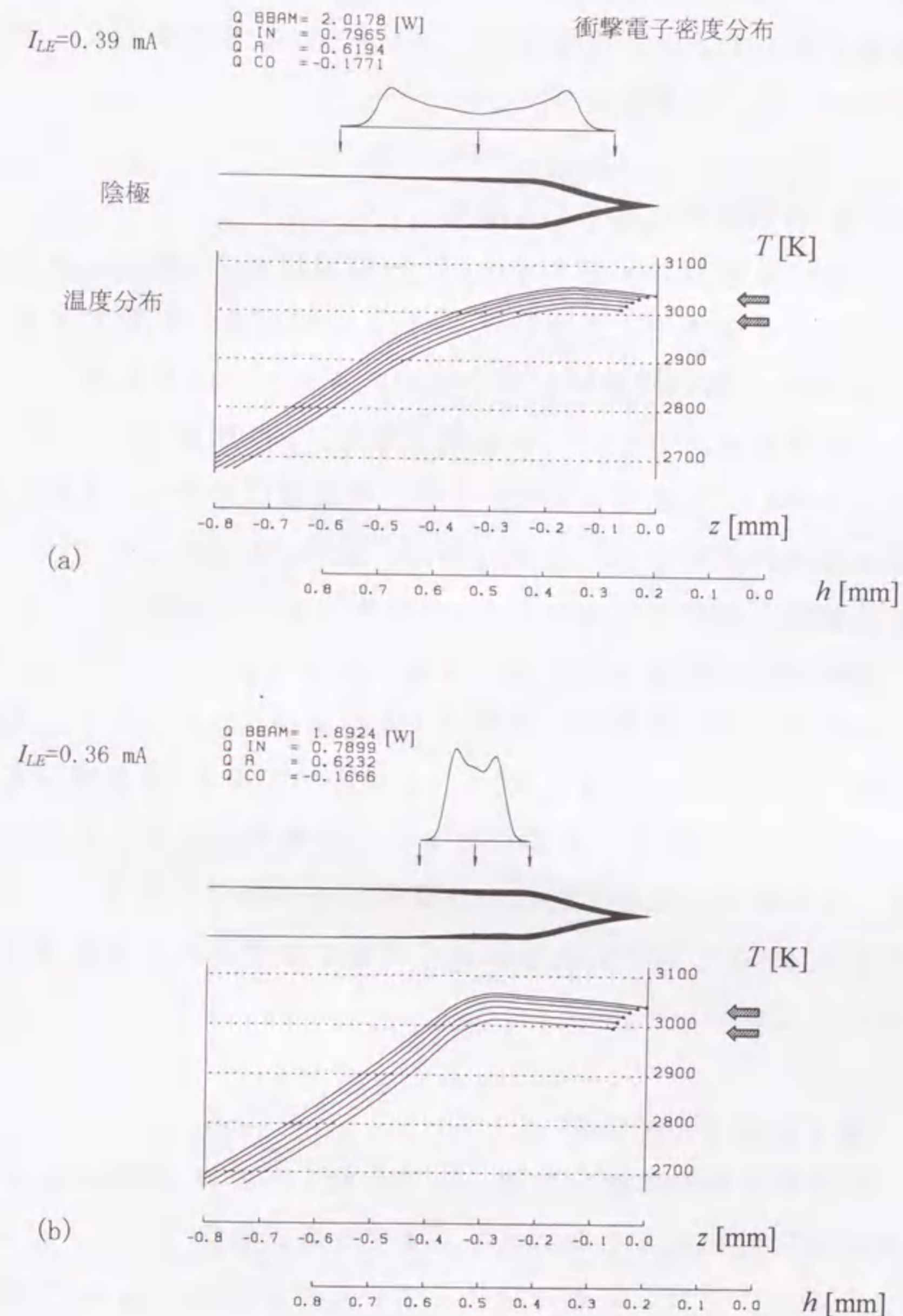


図 5.15 陰極の温度分布と蒸発：先端位置 $h=0.2$ mm の場合 (a) 収束用電極電圧 -300 V、(b) -400 V の衝撃電子密度分布に対する結果。1 時間間隔の変化を 5 時間まで示した。

結果から、加熱用電子銃を収束用電極-300 V 近くで動作し、衝撃範囲を広くすると、先端位置を $h=0.2$ mm とした場合でも寿命は改善できることがわかった。

5.3.2.d 加熱温度を高くした場合

陰極の温度分布と形状変化は、先端温度が 3,040 K 以外の場合についても調べた。先端温度 3,150 K の場合の計算結果を図 5.16 に示す。長い円錐部をもつ陰極を $h=0.27$ mm に配置したときの結果である。これまでの結果と同様、1 時間間隔の変化を 5 時間まで示した。温度を上昇すると、蒸発量は増加し、先端温度の低下量は大きくなる。温度分布は、図 5.14 に示した 3,040 K の計算結果と類似したものとなる。温度分布の形が変わらないので、各衝撃電子密度分布における蒸発範囲も図 5.14 と同じになる。加熱に必要な衝撃電力は約 2.8 W および 2.7 W であり、先端温度を 3,040 K とした場合(図 5.14)に比べて約 0.25 W 増加する。

計算は、上記以外の先端位置および陰極形状においても行なった。その結果、先端位置および陰極形状が同じであると、先端温度を 3,150 K にしても蒸発範囲や高温に加熱される位置は変わらないことがわかった。

5.4 電子衝撃条件の検討

電子銃の動作に適した電子衝撃条件としては、蒸発が進む間も先端温度の変化を小さく保ち、輝度の低下を抑えることと、蒸発を先端部に制限して寿命を長くすることが求められる。先端温度の変化を小さく保つ条件としては、陰極先端部の広い範囲を衝撃した場合であることが、5.3.2 に示した計算結果によって確かめられた。衝撃範囲を広くするためには、加熱用電子銃をループフィラメント加熱電流 1.55 A、収束用電極電圧-300 V 付近で

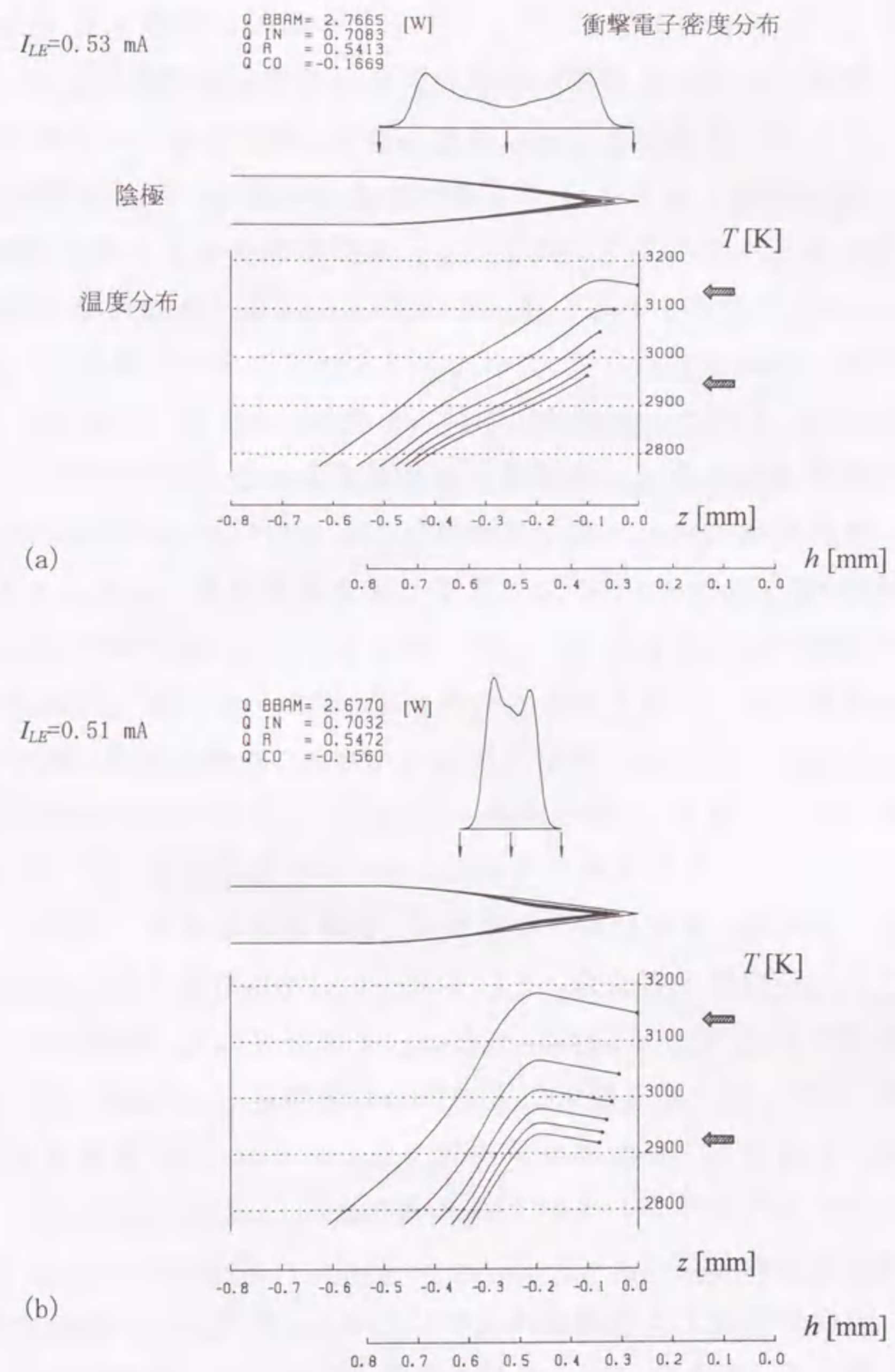


図 5.16 長い円錐部をもつ陰極の温度分布と蒸発: 先端位置 $h=0.27$ mm、先端温度 3,150 K の場合 (a) 収束用電極-300 V、(b)-400 V における衝撃電子密度分布に対する結果。1 時間間隔の変化を 5 時間まで示した。

動作し、陰極先端はウェーネルト開口部の近くに配置すればよい。

蒸発を先端部に制限し寿命を長く保つ電子衝撃範囲には、比較的広い許容範囲があることがわかった。図 5.15 に示したように、陰極先端を $h=0.2$ mm に配置すると、先端の一部は衝撃範囲の外になる。このような場合でも、加熱用電子銃を収束用電極-300 V 付近で動作すれば、蒸発は先端から進み、先端部は円錐形状を保って後退するので、寿命を改善できることが計算によって示された。このことは実験においても確認し、計算した陰極の蒸発が観察される結果にほぼ等しいことが確かめられている。

加熱用電子銃を収束用電極電圧-400 V 付近で動作すると、陰極先端が後退したとき先端温度の低下量が大きくなることは、輝度の減少が大きいためから確かめられる。この加熱条件で電子銃を陰極温度 3,150 K で動作すると、輝度を一定に保つために行なう収束用電極の電圧調整が難しくなる。この場合には、陰極温度を上昇しすぎて、先端を溶融してしまうことがしばしば観察される。これは、計算結果で示されたように、先端温度の低下が速くおこるため、輝度の減少が大きく、衝撃電流を増加しすぎてしまうことが原因で起こる。これに対して、加熱用電子銃を収束用電極電圧-300 V 付近で動作すると、先端温度の低下はわずかになり、また、収束用電極電圧を調整して衝撃電流を増加したとき、輝度が上昇することも容易に確認できるようになる。加熱用電子銃はこの条件で動作したほうがよいことが、上記の計算によっても確かめられた。

陰極を移動する機構を電子銃に付加し、動作中に先端部の蒸発を補うと、寿命はさらに延長できる。このような機構を付加する場合においても、陰極は衝撃範囲が広い条件で加熱したほうが操作が容易である。

5.5 まとめ

電子銃の動作に適した電子衝撃条件を検討するために、陰極衝撃電子の密度分布、陰極の温度分布と蒸発について調べた。衝撃電子密度分布は、加熱用電子銃から放出される衝撃電子の軌道を計算して求めた。収束用電極-300 V および-400 V のときの陰極近傍の密度分布を示し、密度分布の広がりを中心位置を明らかにした。

つぎに、陰極の先端を異なる位置に配置したときの温度分布と蒸発量について調べた。先端を含む広い範囲を衝撃すると、蒸発によって先端位置が後退しても、先端温度の低下はわずかになることを示し、この衝撃条件が 3,000 K 以上の陰極温度で電子銃を動作する場合に適した条件であることを説明した。また、先端円錐部分よりも広い範囲を電子衝撃したときでも、蒸発は先端から進み、先端部は円錐形状を保持することを示して、寿命を改善する衝撃範囲には広い許容範囲があることを説明した。

参考文献

- 1) Rauh H: Ein Näherungsverfahren zur Berechnung rotations-symmetrischer elektrostatischer Felder mit beliebigen Randbedingungen und seine Anwendung auf einen Elektronenstrahlerzeuger mit Spizenkathode. *Z Naturfor*, **26a**, 1667-1675 (1971)
- 2) 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*, 101-A, 263-270 (1981)
- 3) Iiyoshi R, Maruse S, Takematsu H: Electron gun with electron-beam-heated point cathode: numerical analysis of electron beam for cathode tip heating. *Nucl Instr Meth Phys Res*, **A363**, 284-300 (1995)
- 4) Bulirsch R, Stoer J: Numerical treatment of ordinary differential equations by extrapolation methods. *Numer Mathematik*, **8**, 1-13 (1966)
- 5) Hawks PW, Kasper E: Principle of Electron Optics. pp.921-924, Academic Press,

London (1989)

- 6) Bas EB, Gaug H: Theoretische Betrachtung uber die Elektronenoptik einer Ringstrahl-Elektronenkanone. *Z angew Math Physik*, **18**, 557-574 (1967)
- 7) Schiller S, Heisig U, Panzer S: *Electron Beam Technology*. pp.36-38, John Wiley & Sons, New York (1982)
- 8) Iiyoshi R, Maruse S, Takematsu H: Local heating of point cathode: numerical calculations of temperature distribution and cathode shape variation by evaporation. *J Electron Microscopy*, **39**, 215-222 (1990)
- 9) Prante ER, Sessoms AB: Vapor pressure and heat of sublimation of tungsten. *J Res Natl Bur Stand A*, **77A**, 237-242 (1973)

第 6 章

LaB₆ 陰極を用いるとき 期待される輝度と寿命

6.1 はじめに

1 章で述べたように、LaB₆ を陰極とする通電加熱方式の電子銃はタングステンヘアピン電子銃に比べて高い輝度を与え、寿命も長い。たとえば、1,900 K の温度で動作する LaB₆ 電子銃は 2,800 K で動作するタングステンヘアピン電子銃に比べて数倍高い輝度を与え、寿命はタングステンヘアピン電子銃の 20 時間程度に対し数 100 時間から 1,000 時間程度と長い^{1,2)}。この違いは、おもに LaB₆ が小さい仕事関数をもつことに由来する。しかし、このような特性を得るためには LaB₆ を 10⁻⁴ Pa よりもよい真空において使用しなければならない。通常真空 10⁻³ Pa で使用すると、仕事関数が高くなって輝度が低下したり、残留ガスイオンの衝撃によって先端部が侵食されて寿命が短くなる。電子衝撃局所加熱方式電子銃においても LaB₆ 陰極を使うことが可能であるので、10⁻⁴ Pa よりもよい真空で LaB₆ を使用するとき期待される輝度と寿命の検討を行なった。

6.2 計算方法

タングステンと LaB₆ の電子放出密度と蒸発速度の比較については、Lafferty³⁾、Broer⁴⁾、Crawford⁵⁾ による報告がある。Lafferty³⁾ が異なる温度における電子放出密度と質量蒸発速度を比較した結果を図 6.1 に示す。表 6.1 は各陰極の電子放出密度の計算に使用されたリチャードソン定数と仕事関数である。LaB₆ の質量蒸発速度は、

電子放出密度
[A/cm²]

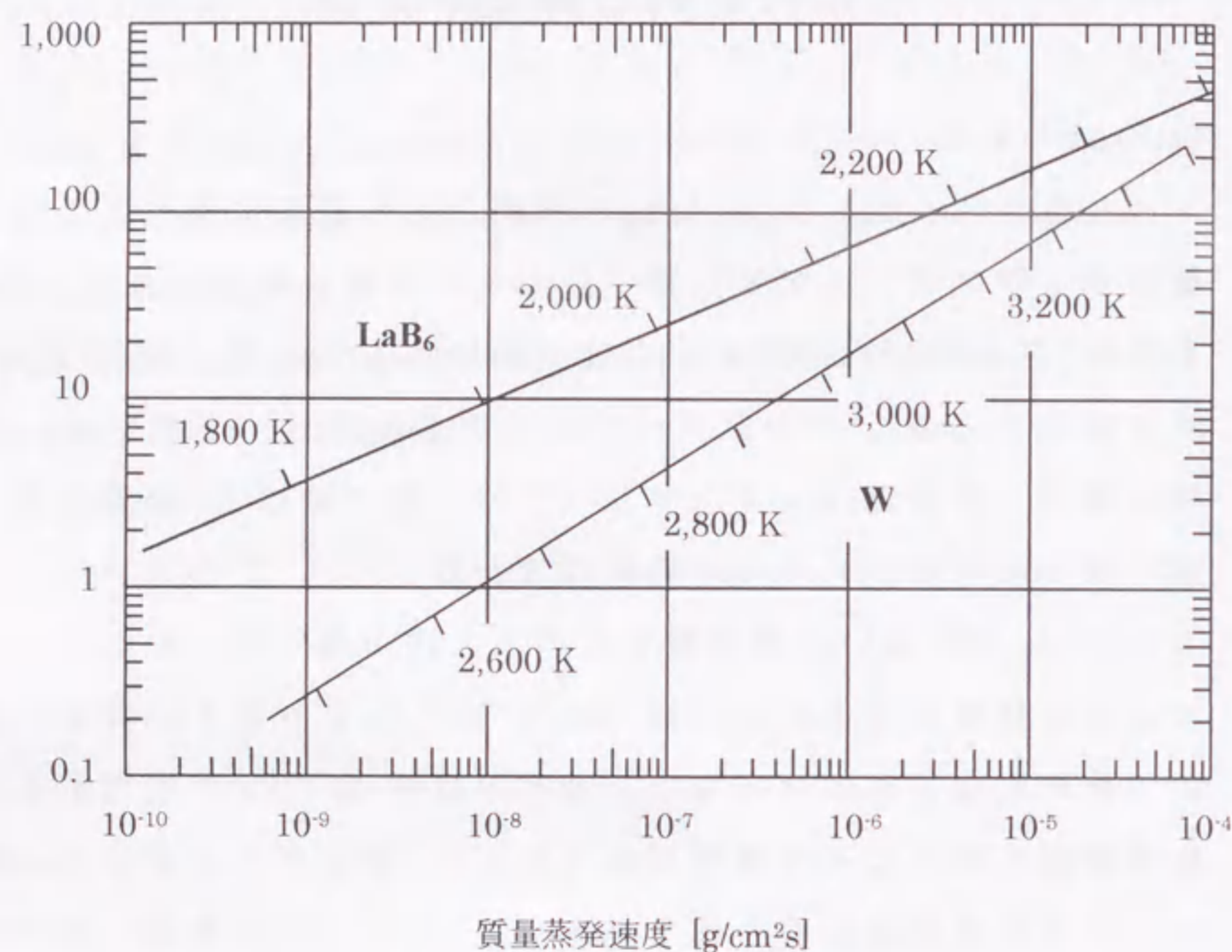


図 6.1 電子放出密度と質量蒸発速度

従来の比較結果。電子放出密度は表 6.1 に示した熱電子放出定数で計算した値。質量蒸発速度は(6.1)式および(3.2)式で計算した値。

表 6.1 従来の比較方法に用いられたリチャードソン定数

A と仕事関数 Φ		
陰極	A [A/cm ² K ²]	Φ [eV]
タングステン	60	4.5
LaB ₆	29	2.66

$$\log_{10} m_{LaB_6}(T) = 13 - \frac{1}{2} \log_{10} T - \frac{36,850}{T} \quad (6.1)$$

により計算された値であり、タングステンの質量蒸発速度は、(3.2)式により計算されている。

こうした比較が示された時期は、熱電子源として LaB₆ 陰極の実用化研究が始まったばかりのころであり、LaB₆ 焼結体が使われていた。そのため、Lafferty が密度 2.6 g/cm³ の焼結体について測定した電子放出密度と蒸発速度が用いられている。その後、単結晶の LaB₆ 陰極が供給されるようになり、リチャードソン定数、仕事関数、蒸発速度などが測定されている。この章では、これらの新しいデータを用いてタングステン陰極と比較する。

6.2.1 輝度

電子顕微鏡用電子銃においては、すでに述べたように電子放出密度というよりも輝度の値が重要であるので、各陰極のリチャードソン定数と仕事関数は、測定される輝度から求められている。ビーム制限角 1×10^{-3} rad において測定された輝度から求められた値を表 6.2 に示す。これらの値は、測定輝度を与える実効的なリチャードソン定数および仕事関数と呼ばれる。LaB₆ 陰極に対する実効的な値は、 $\langle 100 \rangle$ および $\langle 110 \rangle$ 方位の単結晶陰極で調べられた値である^{6,7)}。各陰極の輝度は、表 6.2 に示した値を用いて計算した。

表 6.2 測定輝度を与える実効的なリチャードソン定数 A

と仕事関数 Φ		
陰極	A [A/cm ² K ²]	Φ [eV]
タングステン	120	4.4
LaB ₆ 単結晶	30	2.6

6.2.2 蒸発速度

従来の比較方法では、各陰極の消耗を質量蒸発速度で比べている。しかし、3章3.4において述べたように、陰極の寿命は蒸発による陰極寸法の減少量によって決まる値である。したがって、蒸発速度は陰極の厚さ減少速度を用いて比較した。タングステンの厚さ減少速度 [$\mu\text{m}/\text{h}$] は、寿命を計算するとき用いた(3.3)式で計算した。LaB₆の厚さ減少速度 [$\mu\text{m}/\text{h}$] は、二本ら⁸⁾によって示された実験式

$$E_{\text{LaB}_6}(T) = 4 \times 10^{14} \exp\left(-\frac{570 \times 10^3}{RT}\right) \quad (6.2)$$

で計算した。Rはガス定数である。この式は1,800-2,200 Kの範囲で調べたLaB₆単結晶の厚さ減少量と加熱時間の関係から求めた式である。

厚さ減少速度は、質量蒸発速度を各陰極材料の密度で割った値である。タングステンは密度19.3 g/cm³であるのに対して、LaB₆は単結晶であっても4.7 g/cm³と小さくタングステンの約1/4である。このため、質量蒸発速度が同じ値であるとき、LaB₆陰極の厚さはタングステンに比べて約4倍の速度で減少していることになる⁹⁾。

6.3 比較結果

輝度と厚さ減少速度の関係を比較した結果を図6.2に示す。輝度は式(2.1)を用いてビーム加速電圧50 kVの場合を計算した。輝度は電子放出エネルギーの最確値kTに反比例する。仕事関数が小さいLaB₆陰極は、低い温度でタングステンと同じ電子放出密度を与えるので、最確エネルギーkTが小さい分、輝度はやや高くなる。

通電加熱方式において通常使われる代表的な動作温度に

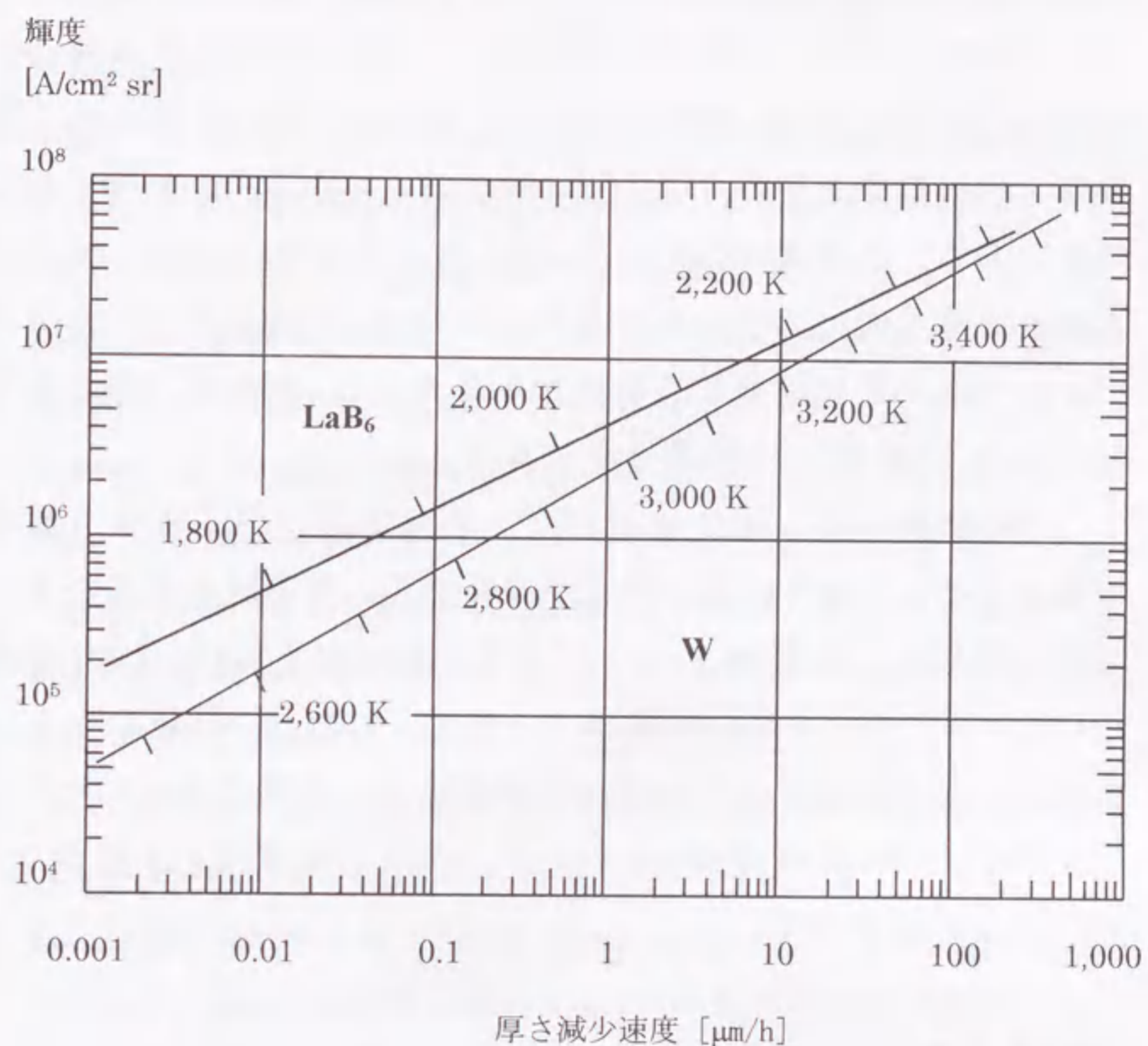


図 6.2 輝度と厚さ減少速度の関係
輝度はビーム加速電圧 50 kV のときの値

おける輝度と厚さ減少速度を比べてみる。LaB₆陰極は1,850 Kで $8.5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2\text{sr}$ の輝度を与える。タングステン陰極は2,800 Kで $7.5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2\text{sr}$ の輝度を与える。代表的な動作温度で比較した輝度には大きな差はないことがわかる。一方、陰極の厚さ減少速度は、LaB₆が0.032 $\mu\text{m}/\text{h}$ であるのに対して、タングステンは0.13 $\mu\text{m}/\text{h}$ である。LaB₆陰極の消耗速度はタングステンの約1/4である。

本研究の実験に用いたタングステンポイント陰極と同じ、直径 0.1 mm の LaB₆ 陰極を使用したときの輝度と寿命を評価する。タングステンポイント陰極の寿命は、3,150 K において 4 時間、3,040 K において 10 時間であった。各温度において得られる輝度は、LaB₆ 陰極を使用すると 2,090 K および 2,010 K で得られる輝度である。各輝度において LaB₆ はタングステンの約 1/3 の厚さ減少速度をもつので、局所加熱した LaB₆ 陰極がタングステンポイント陰極とほぼ同じ先端形状を保つとき、寿命は 3 倍となり、おのおの 12 時間、30 時間と長くなる。

LaB₆ 陰極の厚さ減少速度がタングステンと同じになる温度で動作すると、さらに高い輝度が得られる。厚さ減少速度がタングステンポイント陰極 3,150 K と同じ値になるのは、LaB₆ 陰極 2,160 K のときであり、輝度は 1.5 倍の 1×10^7 A/cm²sr になる。また、厚さ減少速度がタングステンポイント陰極 3,040 K と同じになるのは、LaB₆ 陰極 2,080 K のときであり、輝度は 1.7 倍の 5.8×10^6 A/cm²sr になる。

6.4 まとめ

タングステンと LaB₆ の輝度と蒸発速度を比較して、LaB₆ 陰極を使用して電子銃を動作したときに期待できる輝度と寿命を評価した。タングステンポイント陰極を 3,150 K および 3,040 K で動作したときの輝度は、LaB₆ 陰極を使用した場合 2,090 K および 2,010 K で得られる輝度に等しい。各輝度において、LaB₆ 陰極はタングステンに比べて約 1/3 の厚さ減少速度をもつ。厚さ減少速度の比較から、LaB₆ 陰極を使用したとき期待できる寿命は、タングステン陰極の約 3 倍であることを示した。

参考文献

- 1) 学振第 132 委員会編：電子・イオンビームハンドブック. pp. 153-163, 日刊工業新聞社 (1998)
- 2) Hohn FJ: Development and use of high brightness lanthanum hexaboride electron guns. In: Johari O, ed. Scanning Electron Microscopy 1985, IV, 1327-1338 (1985).
- 3) Lafferty JM: Boride cathodes. *J Appl Phys*, **22**, 299-309 (1951)
- 4) Broers AN: Some experimental and estimated characteristics of the lanthanum hexaboride rod cathode electron gun. *J Phys E*, **2**, 273-276 (1969)
- 5) Crawford CK: Mounting methods and operating characteristics for LaB₆ cathodes. In: Johari O, ed. Scanning Electron Microscopy 1979, I, 19-30 (1979).
- 6) Shimizu R, Shinike T, Tanaka T, Oshima C, Kawai S, Hirota H, Hagiwara H: Brightness of single crystal LaB₆ cathodes of <100> and <110> orientations. In: Johari O, ed. Scanning Electron Microscopy 1979, I, 11-18 (1979)
- 7) Gesley M, Hohn F: Emission distribution, brightness, and mechanical stability of the LaB₆ triode electron gun. *J Appl Phys*, **64**, 3380-3392 (1988)
- 8) Futamoto M, Nakazawa M, Usami K, Hosoki S, Kawabe U: Thermionic emission properties of single-crystal LaB₆ cathode. *J Appl Phys*, **51**, 3869-3876 (1980)
- 9) Iiyoshi R, Shimoyama H, Maruse S: A comparison of thermionic emission current density and brightness against evaporation loss for LaB₆ and tungsten. *J Electron Microscopy*, **45**, 514-517 (1996)

第7章 結論

電子顕微鏡や電子線微量分析装置などの電子ビーム応用装置においては、電子ビーム径を使用目的に合わせて調整したときに、ビーム電流を大きな値まで増加できることが求められる。利用可能なビーム電流は、電子銃から放出される電子ビームの輝度、すなわち単位立体角あたりの電子密度で定義される電子光学的輝度によって決まる量である。このため、電子銃の高輝度化は装置の性能向上のために重要な課題の一つである。

タングステンポイント陰極電子銃は、通常の真空中で動作する電子顕微鏡用電子銃として開発され、たとえば陰極温度 3,100 K で動作するとヘアピン陰極電子銃に比べて 10 倍高い輝度を与える。しかし、従来のポイント陰極は、加熱のために使用するヒーター寿命が、3,000 K を超えたあたりで 1 時間以下に減少するために、この電子銃の高輝度動作は活用されていない。

本研究は、タングステンポイント陰極先端部のみを電子衝撃によって局所的に加熱する方式により、長寿命化を目的とした研究である。電子衝撃加熱を採用した理由は、この方法が効率のよい加熱方法であり、電子銃のウェーネルト電極内部に配置した小型の加熱用電子銃で陰極加熱に必要なとされる電力を供給できる利点をもつと考えたからである。

以下に、本研究で得られた結果をまとめる。

- 電子衝撃局所方式電子銃の設計・製作について

陰極のまわりに置いたループフィラメントを通電加熱して熱電子を放出し、この電子を陰極に衝撃させる予備実験用の電子銃を試作して、局所加熱用電子銃の電極構成と動作電圧を検討し

た。実験と数値解析による衝撃電子の軌道のシミュレーションから、衝撃電子の陰極衝撃範囲および収束性について調べた結果、衝撃電子の収束性をよくするためには、ループフィラメントの近くに収束用電極を付加する必要があることがわかった。また、衝撃電圧が低く衝撃エネルギーが小さいと、加熱に必要な衝撃電流は多くなるために、陰極からの反射電子量が増加する問題も明らかになった。反射電子の問題は、衝撃電圧を数 kV に高くして衝撃電流を減らすことで、実用上支障がない量まで減らせる見通しを得た。

この検討結果を基に、収束用電極を備え、衝撃電圧 5 kV で動作する加熱用電子銃を製作して、特性評価を行なった。この改良によって、陰極先端部のみを加熱できるようになり、加熱にともなって発生する反射電子量も低減した。陰極加熱特性については、ループフィラメント温度 2,480 - 2,620 K の範囲において測定した。5.2 kV の衝撃電圧において 0.6 mA と小さな衝撃電流で先端部を 3,150 K に加熱できること、また、衝撃電流を 1 mA まで増加すると先端部を融点 (3,650 K) まで加熱できることがわかり、小電力の陰極加熱が実現できた。

- 電子放出特性と寿命について

電子放出特性については、バイアス-放出電流特性が従来の電子銃と同様の特性を示し、ビーム中に混入する反射電子は無視できることがわかった。また、透過型電子顕微鏡の鏡体に電子銃を装着し、加速電圧 50 kV において輝度を調べた結果、陰極温度 3,150 K においても空間電荷の影響のない理論輝度が得られ、ヘアピン陰極電子銃に比べて 10 倍高い輝度が実現できた。

陰極先端部を高温に加熱すると、蒸発によって先端は後退する。7 μm 以上後退すると輝度は低下するが、バイアス電圧を調整すれば理論輝度に戻ることがわかった。また、バイアス電圧と

衝撃電流を調整すると、先端が 0.26 mm 後退するまで電子銃を動作できることがわかった。それゆえ、先端が 0.26 mm 後退するまでの時間が寿命となるが、局所加熱による寿命は、従来の通電加熱方式の 10 倍と長いことがわかった。

また、2,800 K 以上の温度で使用した陰極の先端曲率半径を走査電子顕微鏡で調べ、陰極は高温で使用しても曲率半径 1 μm 以下の先端を保持し、曲率半径は温度とともに減少することを明らかにした。この実験結果は、蒸発によって陰極先端部が先鋭化される効果と表面張力の効果を考慮して計算される値に等しいこともわかった。

- 最適動作のための電子衝撃条件について

電子銃を高輝度で動作する場合の電子衝撃条件としては、蒸発が進む間も先端温度の低下を小さく保つことと、蒸発を先端部に制限することが求められる。衝撃電子の軌道を計算して衝撃電子の密度分布を求め、この密度分布を基に陰極の温度分布と蒸発範囲を計算した結果を示し、動作に適した衝撃条件はループフィラメント温度 2,520 K、収束用電極 - 300 V 付近で動作したとき得られること、このときの陰極衝撃範囲は 0.5 mm 程度のやや広い範囲であることを明らかにした。

- LaB₆ 陰極を使用したときに期待できる輝度と寿命について

局所加熱陰極の寿命は、蒸発による陰極の厚さ減少速度の関数になる。輝度と厚さ減少速度の比較から、タングステン陰極 3,150 K で得られる輝度は LaB₆ 陰極 2,090 K のときの輝度に等しく、このとき LaB₆ 陰極はタングステンの約 1/3 の厚さ減少速度をもつことを示し、LaB₆ 陰極を使用した場合に期待できる寿命はタングステン陰極の 3 倍程度であることを示した。

本研究によって、電子衝撃局所方式がポイント陰極の寿命を改善する手段として有効なものであることが明らかになった。寿

命は、陰極先端部の蒸発を補うように陰極自体を移動する機構を付加することによってさらに延長できる。今後は、このために必要とされる陰極移動機構についても検討を進めたい。

タングステンに比べて低い仕事関数と蒸発速度をもつ熱陰極材料として、LaB₆ がすでに実用化されているほかに、TiC あるいは WC などの炭化物陰極についても実用化に向けて研究が進められている。炭化物陰極は脆い材料であるので、ヘアピンヒーターに溶接することが難しく、支持方法と加熱方法が実用化を妨げる問題点になっている。タングステンポイント陰極と同じように長さ 5-6 mm 程度の陰極を使用して先端部を局所加熱すれば、陰極の固定端は低い温度に保つことができる。このようにすると、支持部の耐熱温度は緩和されるので、支持方法を工夫する余地は広がるものと考えられる。今後は、こうした点についても検討して、他の陰極材料を使用したときの電子銃の性能を調べていきたい。

謝辞

本論文をまとめるにあたり懇切丁寧なご指導と多くの有益なご助言をいただきました名古屋大学理工科学総合研究センター教授 日比野倫夫先生に心より厚くお礼申し上げます。また、本論文のとりまとめにあたり有益なご教示をいただきました名古屋大学大学院工学研究科教授 菅井秀郎先生、名古屋大学大学院工学研究科講師 花井孝明先生に厚くお礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、名古屋大学名誉教授 丸勢 進先生、愛知工業大学名誉教授 竹松英夫先生には当初より懇切丁寧なご指導とご助言をいただきました。厚くお礼申し上げます。また、電子銃の特性評価および輝度測定法などについて討論していただきました名城大学理工学部電気電子工学科教授 下山宏先生、名古屋大学大学院工学研究科教授 内川嘉樹先生、三重大学工学部電気電子工学科教授 大下昭憲先生に感謝申し上げます。

