

電子軌道計算及び引き出し電流値の計測による LaB₆熱電子カソードの性能評価

Numerical and Experimental Study on Electron Emission Performance of LaB₆ Hot Cathode

○藤森 蒼天・高崎 大吾・白須 健人・関根 北斗・小泉 宏之(東大)
中川 悠一・渡邊 裕樹(Pale Blue)・小紫 公也(東大)

○ Aoma Fujimori・Daigo Takasaki・Kento Shirasu・Hokuto Sekine・Hiroyuki Koizumi(The University of Tokyo)
Yuichi Nakagawa・Hiroki Watanabe(Pale Blue, Inc.)・Kimiya Komurasaki(The University of Tokyo)

Abstract (概要)

The use of alternative propellants, such as water and iodine, for electric propulsion has been the subject of much research. However, the corrosive properties of these propellants are known to adversely affect conventional cathodes. To solve this problem, we have developed a corrosion resistant LaB₆ thermionic cathode. In this study, current draw experiments and electron orbit calculations were carried out to evaluate the electron emission performance of the cathode. As a result of the study, the dependence of the electron emission on surface temperature and collector voltage was confirmed. Moreover, it was shown that the space charge limitation is the main factor that reduces the electron emission performance, and the limitation can be mitigated by applying a voltage to the multi-layer insulation.

記号の説明

A	: 熱電子放出定数, $1.204 \times 10^6 \text{ A m}^{-2} \text{ K}^{-2}$
B	: 格子点における磁束密度, T
e	: 電気素量, $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
E	: 格子点における電場, V m^{-1}
I_{cathode}	: カソード投入電流, A
I_{chamber}	: チャンバ損失電流, A
$I_{\text{collector}}$: コレクタ電流, A
j_{sat}	: 空間電荷制限電流, A m^{-2}
j_{th}	: 熱電子電流密度, A m^{-2}
k	: ボルツマン定数, $1.381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
l	: 平板間隔(Child-Langmuir 則), m
m_e	: 電子質量, $9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
P_{cathode}	: カソード投入電力, W
r	: 径方向位置, mm
v	: 時間, s
T_{LaB_6}	: LaB ₆ 表面温度, K
v	: 超粒子の速度, m s^{-1}
V	: 格子点における電位, V
V_0	: 平板間電圧(Child-Langmuir 則), V
V_{cathode}	: カソード電源電圧, V
$V_{\text{collector}}$: コレクタ印加電圧, V
V_{MLI}	: MLI 電位, V

z	: 軸方向位置, mm
ϵ_0	: 電気定数, $8.854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
ρ	: 格子点上における電荷密度
ϕ	: 仕事関数, eV

1. 背景・目的

小型衛星は短期間で安価に開発・運用が行えるため、大学や企業といった小規模な組織でも開発が可能であり、大きな注目を浴びている¹⁾。小型衛星の打ち上げ数は年々増加しており、この傾向は今後も続くと考えられる。また、近年の小型衛星は発電能力の向上に後押しされ、推進機を搭載するものが増えている。キューブサットとして世界初の惑星間飛行に成功した Mars Cube One や、2022 年に打ち上げ予定で地球-月ラグランジュ点を目指す EQUULEUS のように、推進機を搭載することで自立的な軌道変更が可能となり、小型衛星であっても多様で高度なミッションを計画することが可能となる^{2,3)}。

小型衛星に搭載する推進機としては、比推力が大きく推進剤重量を削減できる電気推進が適している。従来の電気推進では高効率で安定した Xe を推進剤として用いてきたが、小型衛星用の推進剤としては、入手性が悪く高価であることや、高圧ガスとして貯蔵するためにタンク重量がかさむことが欠点となる。そこで、Xe に代わる推進剤として I や H₂O を用いる研究が進められている^{4,5)}。I は昇華性のある個体であ

り、推進剤充填密度を高めることができる。また、 H_2O は常温常圧で液体貯蔵が可能であり、安全、安価で入手性に優れることから小型衛星用の推進剤として適している。一方で、これらの代替推進剤は腐食性を有し、カソードに及ぼす悪影響が懸念されている。

電気推進で用いられる代表的なカソードとして、ホローカソードや高周波カソードが挙げられる。ホローカソードは電子放出材が作動ガスに曝露され、腐食による性能劣化が免れない。高周波カソードは耐腐食性には問題ないものの、作動に大きな電力や多量の推進剤を必要とし、小型衛星との親和性が低い。従って、代替推進剤を用いた小型電気推進を実現するためには、耐腐食性を有する小型カソードの新規開発が課題となる。

そこで我々は、熱電子カソードに注目し研究を行ってきた。熱電子カソードは作動ガスが不要であり、耐腐食性に優れている。また、作動原理が単純であり、系の小型・低電力化が可能である。我々は電子放出材に LaB_6 を用いた LaB_6 熱電子カソードの開発を行っている。目標性能は作動電力 50 W において引き出し電流量 300 mA と設定し、これを達成するために必要な電子放出材温度を 1700 K と見積もった。先行研究では、 LaB_6 熱電子カソードの 1700 K での作動が実証され、熱性能の評価が行われた⁶⁾。図1は、熱計算モデルにより予測した投入電力と LaB_6 表面温度の関係及び分光測定による実測値を示している。一方で、電子放出性能は未評価であった。

本研究は、 LaB_6 熱電子カソードの電子放出性能の評価・向上を目的として、電流引き出し実験による電子放出量の実測と、PIC法を用いた電子軌道計算を行った。さらに、得られた結果をもとに電子放出量を制限する要因を明らかにし、性能向上指針について検討した。

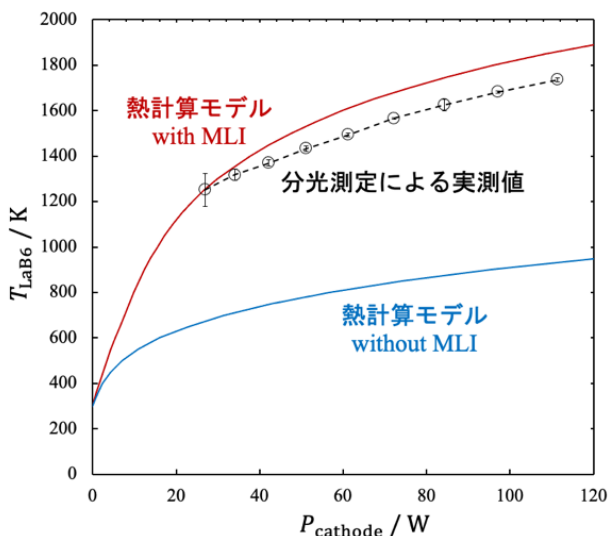


図1 投入電力と LaB_6 表面温度の関係。実線は熱計算モデルによる予測値。プロットは分光測定による実測値

2. 手法

2.1 電流引き出し実験

LaB_6 熱電子カソードの電子放出性能を評価するために電流引き出し実験を実施し、電子放出量の LaB_6 表面温度及びコレクタ印加電圧に対する依存性を調査した。

2.1.1 LaB_6 熱電子カソード LaB_6 熱電子カソードの構造を図2に示す。電子放出材として、仕事関数が低く酸化耐性に優れた LaB_6 を採用した。 LaB_6 は直径 6 mm のコイン形状で、炭素コイルによって支持される。なお、本実験では多結晶の LaB_6 を使用した。炭素コイルに電流を流すことで、ジュール加熱により LaB_6 を昇温した。また、電子放出部の周囲にタンタル製の多層断熱材(MLI)を配置することで輻射による熱損失を低減し、低電力化を図った。 LaB_6 表面温度が 1700 K であるとき、 LaB_6 表面から放出される熱電子電流は 309 mA と試算される。

2.1.2 真空装置 電流引き出し実験には、真空チャンバとしてSUS製六法クロスを用いた。 LaB_6 熱電子カソードはパンチングメタル製の支柱によってNW100フランジに取り付け、チャンバ内に固定した。真空引きには、ロータリーポンプ及びターボ分子ポンプを用いた。実験中の背圧は $3.0 \times 10^{-4}\text{ Pa}$ 程度であった。

2.1.3 実験系 実験系統図を図3に示す。電力投入ラインを通して LaB_6 熱電子カソードへ電力を投入した。カソードから放出された電子は、 LaB_6 表面から 28 mm の位置に固定したグラファイトコレクタによって捕集した。実験中は、カソード電源電圧 V_{cathode} 、カソード投入電流 I_{cathode} 、コレクタ印加電圧 $V_{\text{collector}}$ 、コレクタ電流 $I_{\text{collector}}$ 、チャンバ損失電流 I_{chamber} をロガーで記録し、 V_{cathode} と I_{cathode} の積からカソード投入電力 P_{cathode} を計算した。また、 LaB_6 表面温度 T_{LaB_6} は P_{cathode} の値と先行研究による作動実績(図1)から推定した。

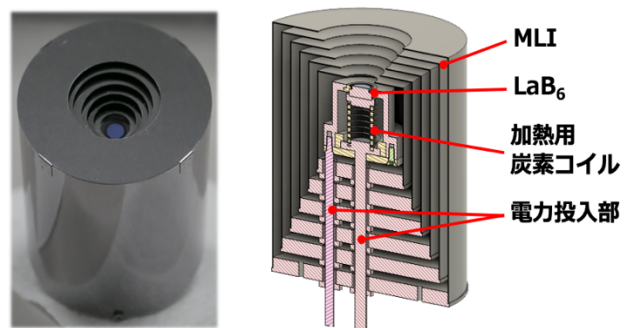


図2 (左) LaB_6 熱電子カソードの外観。(右) LaB_6 熱電子カソードの断面図

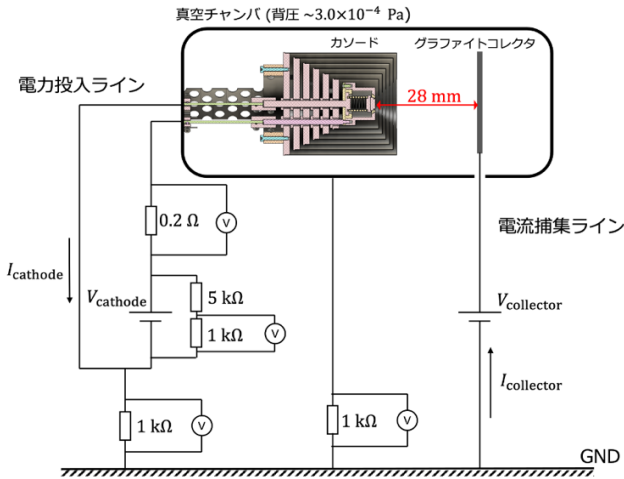


図3 実験系統図

本実験において MLI 各層は電気的に絶縁され、電位はフロートであった。また、本実験における引き出し電流量は、Child-Langmuir 則

$$j_{sat} = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e V_0^{3/2}}{m_e l^2}} \quad (1)$$

より、 $V_0 = V_{collector} = 1300 \text{ V}$ 、 $l = 28 \text{ mm}$ のとき 3.9 mA 程度に制限されると予想された。

2.2 電子軌道計算

PIC 法を用いた電子軌道計算によってカソード内部の電子の運動を解析し、実験結果との比較を通して計算結果を検証した。

2.2.1 計算手法 数値計算には、二次元軸対称を仮定した PIC 法を用い、重み N_{SP} を持つ超粒子の運動を解いた。また、超粒子の形状関数には 0 次の nearest grid point 法を使用した。初期条件として LaB₆ 表面温度 T_{LaB_6} 、コレクタ電位 $V_{collector}$ 、MLI 電位 V_{MLI} を与えることで時間発展を計算する。計算は、図 4 のような流れで行った。

- 1) 計算領域を設定し、メッシュ幅 dx で等分割してセルを定義した。
- 2) 格子点上でポアソン方程式

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2)$$

を解いて電位分布を計算した。なお、ポアソン方程式は有限体積法によって離散化し、SOR 法によって解いた。さらに、各格子点における電場を

$$E = -\nabla V \quad (3)$$

から求めた。

- 3) 運動方程式

$$m_e \frac{dv}{dt} = -e(E + v \times B) \quad (4)$$

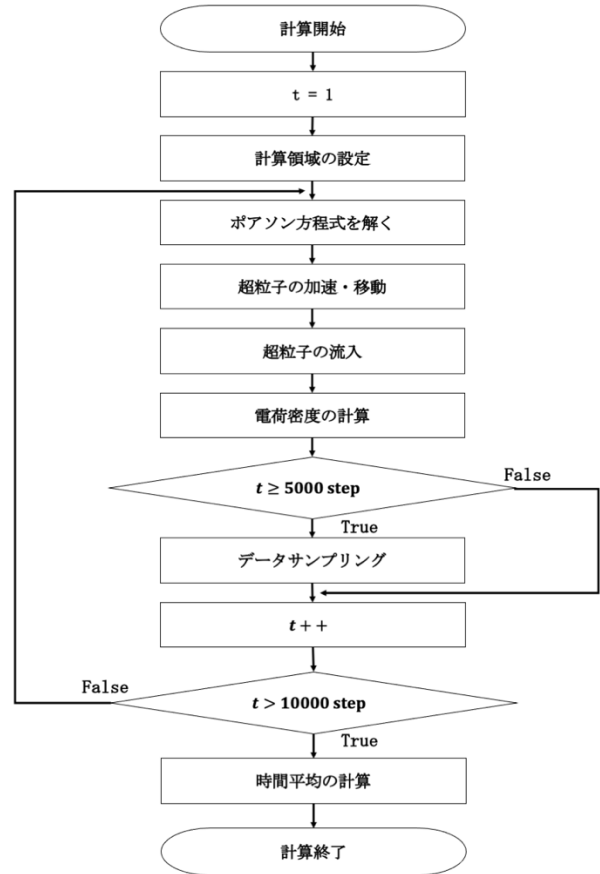


図4 計算の流れ

を Buneman-Boris 法によって解いて超粒子の運動を計算し、速度と位置を更新した。さらに、移動後に境界を通過した超粒子を計算から除外し、その数をカウントした。

- 4) 後述する流入部 ($z = 0 \text{ mm}$, $0 \leq r \leq 3 \text{ mm}$) から計算領域内に超粒子を流入させた。なお、流入する超粒子数は、Richardson-Dushman の式

$$j_{th} = A \cdot T_{LaB_6}^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT_{LaB_6}}\right) \quad (5)$$

をもとに計算した。なお、仕事関数の値には、 $\phi = 2.66 + 1.23 \times 10^{-4} T \text{ eV}$ を用いた⁷⁾。超粒子の初速度について、 r 成分は温度 T_{LaB_6} の Maxwellian によって与え、 z 成分は同温度の half-Maxwellian によって与えた。

- 5) 各格子点に電荷を分配し、電荷密度を計算した。
- 6) 2)~5) を 1 ステップとして 10000 ステップの試行を行い、時間発展を計算した。5000 ステップ以降を定常状態と判断し、各ステップでセル毎の電位、電場、数密度、平均速度をサンプリングした。また、計算領域の右端、左端及び MLI 模擬領域で除外された粒子数から、それぞれコレクタ電流、流入部損失電流、MLI 損失電流を計算した。
- 7) 時間発展の計算終了後、6) のサンプリングをもとに各物理量の時間平均を計算した。なお、電子同士の衝突は考慮せず、中性粒子やイオンの存在も無視して計算を行った。また、本計算では $B = 0$ とした。

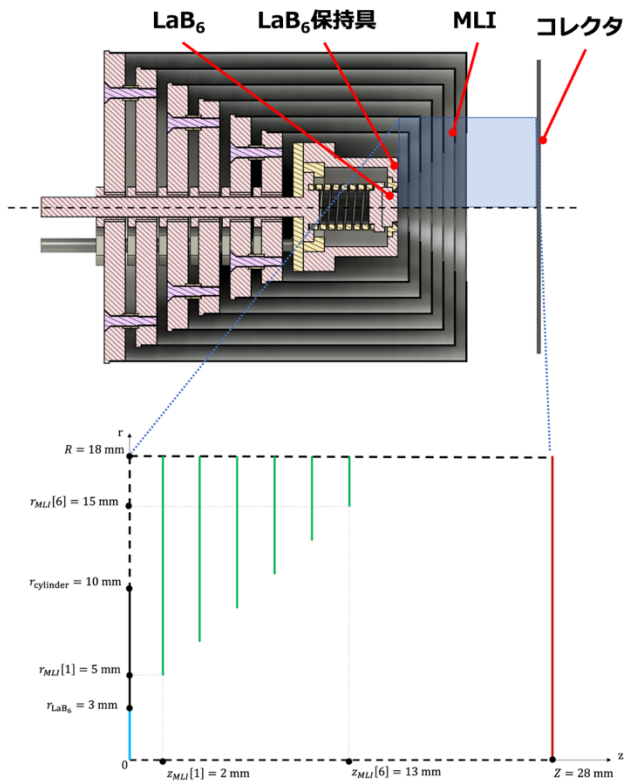


図5 計算領域の模式図

2.2.2 計算領域, 境界条件 本計算における計算領域の模式図を図5に示す。本計算では電流引き出し実験系のうち、LaB₆熱電子カソード及びグラファイトコレクタを再現した。また、軸対称を仮定し、二次元で計算を行うことで計算コストを削減した。

電位境界条件 左端($z = 0$ mm)のうち、 $0 \leq r \leq 3$ mm, $3 \leq r \leq 10$ mmはそれぞれLaB₆表面及びLaB₆保持具を模擬した領域であり、 $V = 0$ Vとした。右端($z = 28$ mm)はコレクタを模擬した領域で、 $V = V_{\text{collector}}$ とした。左端の残りの領域($r > 10$ mm)及び下, 上端($r = 0, 18$ mm)の電位境界条件は、それぞれ $\partial V / \partial z = 0$, $\partial V / \partial r = 0$ とした。また、 $z = 2$ mmから2.2 mm間隔で6つ配置された厚さ0.2 mmの長方形(図5緑線)はMLIを模擬しており、 $V = V_{\text{MLI}}$ とした。

粒子境界条件 $z = 0$ mm, $0 \leq r \leq 3$ mmを流入部とし、前項4)に示した通り超粒子を流入させた。また、計算領域の端及びMLI模擬領域を通過した超粒子は計算から除外した。

2.2.3 計算条件 本計算では、メッシュ幅及び時間ステップの間隔をそれぞれ $dx = 0.1$ mm, $dt = 5.0 \times 10^{-12}$ sとした。また、 $T_{\text{LaB}_6} = 1000, 1100, \dots, 1700$ K, $V_{\text{collector}} = 1300$ V, の7条件で計算を行った。なお、電流引き出し実験ではMLI電位はフロートであったが、 $V_{\text{MLI}} = 0$ Vと仮定して計算を行った。

3. 結果

3.1 電流引き出し実験の結果 電流引き出し実験から得られたコレクタ電流 $I_{\text{collector}}$ とカソード投入電力 P_{cathode} の関係を図6に示す。カソード投入電力、すなわちLaB₆表面

温度の増加とともにコレクタ電流量が増加することが確認された。さらに、 $I_{\text{collector}} = 0.35$ mA付近で電流-電力特性が変化することが確認された。本実験で得られた最大の電流量は 0.43 ± 0.01 mAであり、実験前に予測した引き出し電流量の制限値3.9 mAに対し約1/9の大きさとなった。

次に、各作動電力におけるコレクタ電流 $I_{\text{collector}}$ とコレクタ電圧 $V_{\text{collector}}$ の関係を図7に示す。全ての作動点で、コレクタ電圧に対するコレクタ電流の依存性が確認された。投入電力36, 43, 52 Wでは、コレクタ電圧に対するコレクタ電流の飽和が確認された。一方、投入電力62, 76, 87 Wでは、コレクタ電圧の増加に伴ってコレクタ電流が単調に増加することが確認された。なお、全ての実験条件で、チャンバに損失する電流はログアーの検出性能の範囲内で検出されなかった。

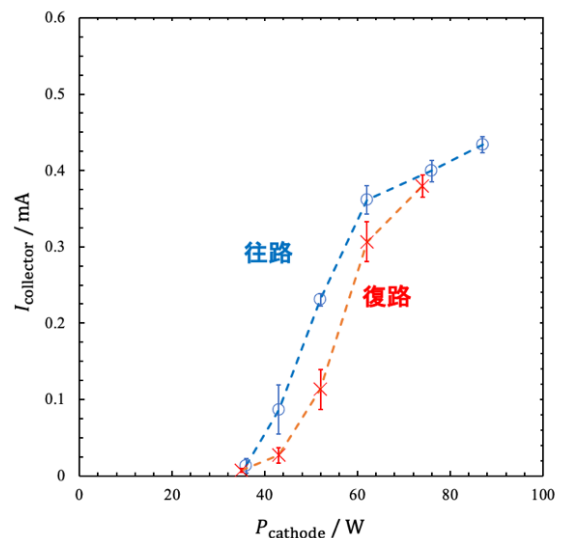


図6 電流引き出し実験から得られたコレクタ電流とカソード投入電力の関係

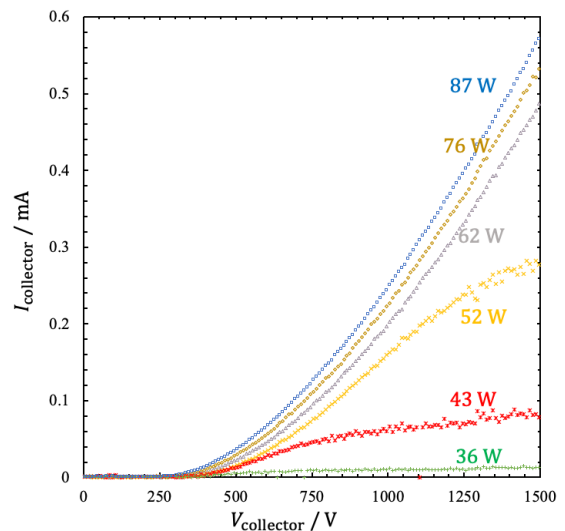


図7 電流引き出し実験から得られたコレクタ電流とコレクタ電圧の関係

3.2 電子軌道計算の結果 計算結果の例として、

$T_{\text{LaB}_6} = 1700 \text{ K}$, $V_{\text{collector}} = 1300 \text{ V}$, $V_{\text{MLI}} = 0 \text{ V}$ における電位分布及び数密度分布を図8に、各種電流量の一覧を表1に示す。電位分布より、カソード上流では電位が上昇せず、流入部付近では電位が負に落ち込んでいることがわかる。数密度分布からは、電位が負に落ち込んだ領域で数密度が大きくなっていることが読み取れる。また、 LaB_6 から放出される電流量309 mAに対して、その99.7%に相当する308 mAが電子流入部へと逆流し損失するという結果が得られた。

次に、7条件での計算結果から得られたコレクタ電流と LaB_6 表面温の関係を図9に示す。 $T_{\text{LaB}_6} = 1200 \text{ K}$ 以下の計算では流入部損失量が0 mAであった一方、それ以上の温度では流入部損失量が温度の上昇とともに増加した。また、電流引き出し実験の結果と比較すると、コレクタ電流の最大値は約2倍の値となり、電流の立ち上がり位置がより低温側となった。実験と同様に、 LaB_6 表面温度の増加とともにコレクタ電流量が増加し、ある電流値以上で電流-温度特性が変化した。実験結果の電流-温度特性を定性的によく再現しており、妥当な計算結果が得られた。

表1 $T_{\text{LaB}_6} = 1700 \text{ K}$, $V_{\text{collector}} = 1300 \text{ V}$, $V_{\text{MLI}} = 0 \text{ V}$ における各電流の計算結果

熱電子放出量	309 mA
コレクタ電流	0.9 mA
MLI 損失電流	0.02 mA
流入部損失電流	308 mA

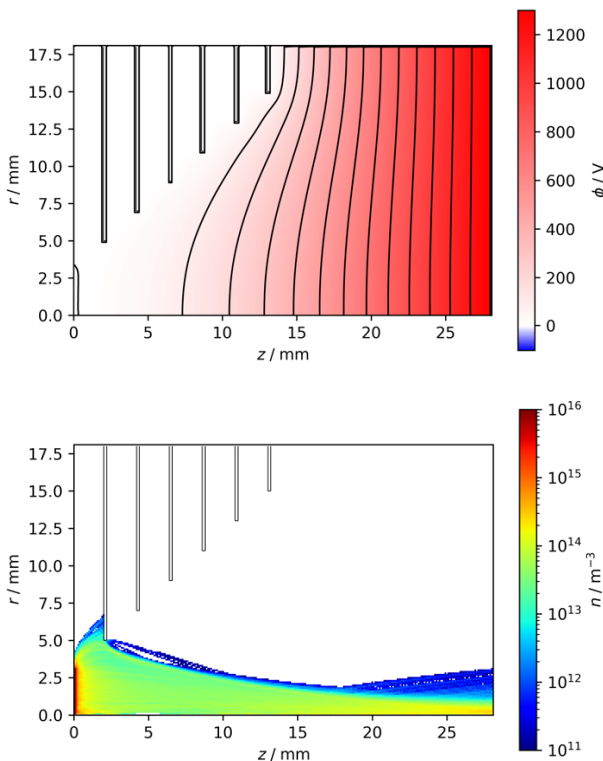


図8 $T_{\text{LaB}_6} = 1700 \text{ K}$, $V_{\text{collector}} = 1300 \text{ V}$, $V_{\text{MLI}} = 0 \text{ V}$ における計算結果。(上)電位分布、(下)電子数密度分布

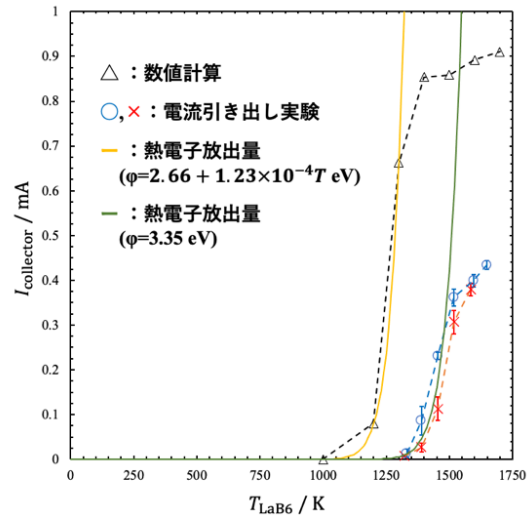


図9 コレクタ電流と LaB_6 表面温度の関係。△は電子軌道計算の結果。○, ×は電流引き出し実験の結果。横軸 T_{LaB_6} の値は先行研究の作動実績(図1)から推定。実線は仕事関数 $\phi = 2.66 + 1.23 \times 10^{-4} T \text{ eV}$ 及び、 $\phi = 3.35 \text{ eV}$ における熱電子放出量。

4. 考察

まず、コレクタ電流の立ち上がり位置について考察する。図9の実線は、数値計算に用いた仕事関数($\phi = 2.66 + 1.23 \times 10^{-4} T \text{ eV}$)及び、実験結果を再現する仕事関数($\phi = 3.35 \text{ eV}$)における熱電子放出量を示している。このグラフより、本実験に用いた LaB_6 の実効的な仕事関数が3.35 eV程度であった可能性が示された。 LaB_6 の仕事関数が増加する要因として、 LaB_6 表面の酸化や LaB_6 の異方性、CやOといった不純物の吸着が挙げられる。 LaB_6 の主要な酸化生成物である La_2O_3 の仕事関数は3.31 eVであり⁸⁾、本実験結果に近い。また、 LaB_6 は結晶面によって異なる仕事関数を持つことが知られている。このうち、(111)結晶面の仕事関数は3.4 eVであり⁹⁾、本実験で用いた多結晶 LaB_6 ではこの面からの電子放出が卓越していた可能性がある。

次に、引き出し電流の大きさについて考察する。引き出し電流量を律速する要因として、(i)熱電子放出量による制限、(ii)空間電荷制限、(iii)中性粒子との衝突、(iv)チャンバやMLIへの電子の流入が挙げられる。(iii)について、圧力 $3.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ で常温の空気が存在する時の電子の平均自由行程は $1.2 \times 10^5 \text{ mm}$ 程度と LaB_6 表面とコレクタ間の距離28 mmに対して十分大きい。 LaB_6 付近でアウトガス等による局所的な数値程度の背圧上昇が生じたとしても、中性粒子との衝突が引き出し電流量に与える影響は限定的である。また、(iv)について、実験中はチャンバへの電子流入は検出されなかったほか、数値計算の結果より、MLIへの損失量はコレクタ電流の1/45程度とごく僅かであり、引き出し電流の制限には大きく寄与していない。従って、これ以降、(i)、(ii)をもとに引き出し電流の大きさについて議論する。

実験及び計算の結果から、電流-温度特性はある一定の温

度を境に変化することが確認された。特性変化前後の作動領域をそれぞれ低温作動、高温作動と呼ぶこととする。まず低温作動について、本実験では、52 W 以下でコレクタ電圧に対するコレクタ電流の飽和が確認された。また、計算において、1300 K 以下の計算条件では流入部への損失が見られなかった。従って、低温作動時には引き出し電流量は熱電子放出量によって制限を受けたと理解できる。次に、高温作動時には、コレクタ電流はコレクタ電圧の増加とともに上昇した。また、コレクタ電流量は実験、計算ともに熱電子放出量を大きく下回ったほか、計算結果から、流入部付近における負電位への落ち込みと、流入部への電子の損失が確認された。従って、高温作動時には空間電荷制限によって引き出し電流量が律速されると考えられる。LaB₆ 熱電子カソードの目標作動点の 1700 K はこの領域にあり、電子放出性能の向上には流入部付近の空間電荷制限の緩和が欠かせないことがわかった。

数値計算の結果より、流入部の電位は MLI の電位に大きく影響されることが判明した。従って、MLI に電圧を印加することで空間電荷制限を緩和できる可能性がある。そこで $T_{\text{LaB}_6} = 1700 \text{ K}$, $V_{\text{collector}} = 1300 \text{ V}$, $V_{\text{MLI}} = 400, 800, \dots, 2000 \text{ V}$ の条件で追加の計算を行った。図 10 に電位分布及び数密度分布の例を、図 11 にコレクタ電流及び流入部損失電流と MLI 電位の関係を示す。MLI 電位の上昇とともにコレクタ電流が増加し、 $V_{\text{MLI}} = 2000 \text{ V}$ のとき放出された全ての熱電子がコレクタに到達することがわかった。追加計算の結果から、空間電荷制限の緩和には MLI への電圧印加が効果的であり、高電圧の印加によって電子放出性能の大幅な向上が可能であることが示された。

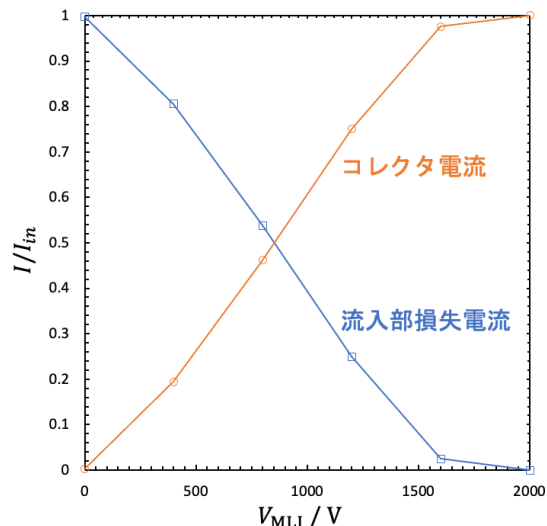
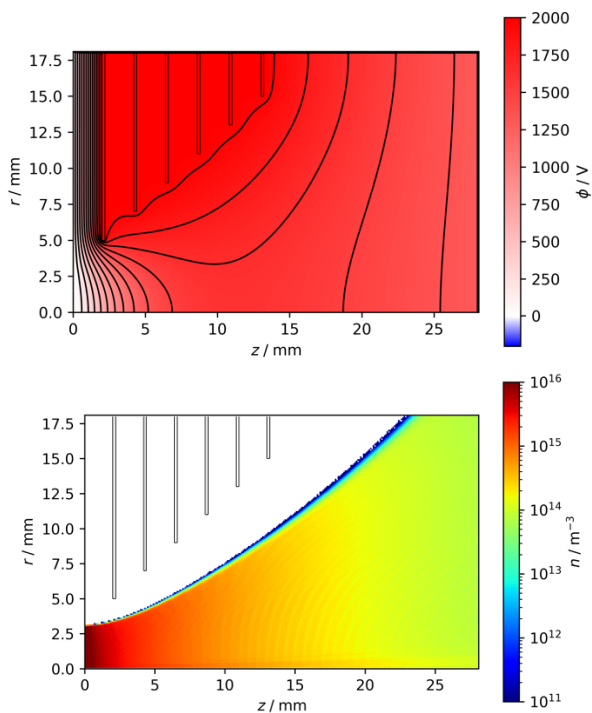


図 11 熱電子放出量 309 mA で規格化したコレクタ電流及び流入部損失電流と MLI 電位の関係

5. 結論

本研究では、LaB₆ 熱電子カソードの電子放出性能の評価・向上を目的として、電流引き出し実験及び電子軌道計算を行った。電子軌道計算の結果、得られた引き出し電流量は実験結果の 2 倍程度となった。定性的には電流-温度特性をよく再現しており、本計算の結果は妥当であると結論づけた。

実験の結果、引き出し電流量は LaB₆ 表面温度とコレクタ電圧に依存することが確認された。また、本実験条件で引き出せる最大の電流量は $0.43 \pm 0.01 \text{ mA}$ であった。実験と電子軌道計算の結果から、電流量を制限する要因は LaB₆ 表面温度によって決まる熱電子放出量と、コレクタ電圧, MLI 電圧, MLI 形状によって決まる空間電荷制限であると示唆された。特に、目標とする 1700 K 程度での高温作動時には、空間電荷制限によって引き出し電流量が大きく律速されるため、電子放出性能の向上には空間電荷制限の緩和が必要である。電子軌道計算の結果、空間電荷制限の緩和には MLI への電圧印加が有効であると示された。高電圧の印加により、目標電子放出量である 300 mA を達成できる可能性がある。

謝辞

本研究は、文部科学省宇宙研究科学技術推進委託費 JPJ000959 の助成を受けて行われました。ここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) Creech, S. D. et al. : Nasa's Space Launch System: Deep Space Access for Cubesats, 70th International Astronautical Congress, 2019.

図 10 $T_{\text{LaB}_6} = 1700 \text{ K}$, $V_{\text{collector}} = 1300 \text{ V}$, $V_{\text{MLI}} = 2000 \text{ V}$ における計算結果. (上)電位分布, (下)電子数密度分布

- 2) Asmer, S. et al. : Mars Cube One (MarCO) Shifting the Paradigm in Relay Deep Space Operations, SpaceOps 2016 Conference, 2016.
- 3) Funase, R. et al. : Mission to Earth–Moon Lagrange Point by a 6U CubeSat: EQUULEUS, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 35, no. 3, pp. 30-44, 2020.
- 4) Doyle, K. P. et al. : Water Electrolysis Propulsion as a Case Study in Resource-Based Spacecraft Architecture (February 2020), IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 34, no. 9, pp. 4-19, 2019.
- 5) Tsay, M. et al. : Maturation of Iodine-Fueled BIT-3 RF Ion Thruster and RF Neutralizer, 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2016.
- 6) 高崎大吾, 他, : 耐腐食性を有する推進剤不要 LaB₆ 熱電子カソードの設計と初期作動, 第 65 回宇宙科学技術 連合講演会, 2021.
- 7) Goebel, D. M. et al. : LaB₆ Hollow Cathodes for Ion and Hall Thrusters, Journal of Propulsion and Power, vol. 23, no. 3, pp. 552-558, 2007.
- 8) Oshima, C. et al. : Thermionic work function of LaB₆ single crystals and their surfaces, Journal of Applied Physics, vol. 48, no. 9, pp. 3925-3927.
- 9) 大島忠平, 他, : LaB₆ の電子放射特性と表面物性, 真空, 24 巻, 5 号, 1981.