

地球磁気圏尾部観測衛星 (GEOTAIL) 搭載用
低エネルギー電子ビーム装置の設計及び試作*

筒井 稔**・大西嘉昭**・松本 紘**・木村磐根**

(1987年12月25日受理)

Low Energy Electron Gun on Board a Scientific
Satellite GEOTAIL

By

Minoru TSUTSUI, Yoshiaki ONISHI, Hiroshi MATSUMOTO
and Iwane KIMURA

Abstract: A low energy electron gun to be used for beam-plasma interaction experiments by a scientific satellite GEOTAIL has been designed and manufactured. Electrodes of the gun have been modified from the Pierce type gun because of the use of a directly heated cathode. Spatial density distributions of beam electrons emitted from the new gun have been measured in a large vacuum chamber, and characteristic curves of emission currents for some beam energies and cathode powers have been checked repeatedly for the next design. Finally the most suitable structure of the electrodes has been decided, which can make it possible to realize a low energy electron gun with a high power performance.

Key Words: GEOTAIL, Beam-plasma interaction experiment, Electron gun.

概 要

地球磁気圏尾部観測衛星 (GEOTAIL) に搭載し, 背景プラズマ

* 宇宙研特別事業費による研究論文
** 京都大学 超高層電波研究センター
*** 京都大学 工学部

の密度測定, ビームプラズマ相互作用による波動励起実験, 衛星の電位制御等を行なうための低エネルギー電子ビーム装置(電子銃)の設計及び試作を行った。試作された装置を大型真空チェンバー内に設置しビーム放出試験を行ない, ビーム密度の三次元空間分布, 陽極電圧(ビームエネルギー)対放出電子流特性, 直熱形陰極の電力対放出電子流特性, 実験空間への電子放出効率等の測定を行なった。これらの測定は様々な電極構造をもった電子銃について行われた。その結果最適電極構造を決定するための貴重な知見が得られた。GEOTAIL 搭載用装置としては直熱形陰極, 変形 Wehnert 電極をもった改良 Pierce 型電子銃が最適である事が決定された。

重要語 GEOTAIL, ビームプラズマ相互信用実験, 低エネルギー電子銃, 放出電子ビームの特性測定試験

1. 序

GEOTAL が飛翔する地球磁気圏尾部の内 $200 R_e$ (R_e は地球の半径) 付近の領域ではプラズマ密度が 1 m^3 当り 10^5 個と言われている。このように密度の希薄なプラズマの測定には通常のプローブ法では不可能であるため, 様々な測定法が考えられている。プラズマ粒子の直接計測による方法の他にビーム・プラズマ相互作用によるプラズマ応答から背景プラズマ密度を測定する方法がある。これは広い空間に一様に存在する希薄なプラズマと, 一様な分布をもって流れる電子流とが相互作用する時に励起される静電波動のうち, 上部ハイブリッド共鳴 (Upper Hybrid Resonance) 角周波数 ω_{UHR} を観測する事により背景プラズマの電子密度 N を次式によって求める方法である。

$$N = \frac{\epsilon_0 m_e}{e^2} (\omega_{\text{UHR}}^2 - \Omega_e^2)$$

ここで m_e, e は電子の質量及び電荷であり, ϵ_0 は真空中の誘電率, Ω_e は電子のサイクロトロン角周波数であり同時搭載されている磁力計から得られた磁場強度から求められる。

このような ω_{UHR} による背景プラズマ密度測定の他にビームプラズマ相互作用により他の種々の波動励起も期待される。これらの種々の波動を検出する事は GEOTAIL が飛翔している磁気圏領域のプラズマパラメータを知る上でも重要と考えられている。

筆者等はこのようなビームプラズマ相互作用実験を地球磁気圏尾部で行なうための低エネルギー電子ビーム放出装置 (以下電子銃という) の設計及び試作を行なった。試作に当っては真空チェンバー内での性能試験も繰り返し行った。そして最終的には実機搭載に適した構造をもった装置を得るに到ったのでそれらについて報告する。

2. 電子銃の設計仕様

我が国で最初に電子銃が搭載されたのは 1978 年 9 月 16 日に打ち上げられた科学衛星

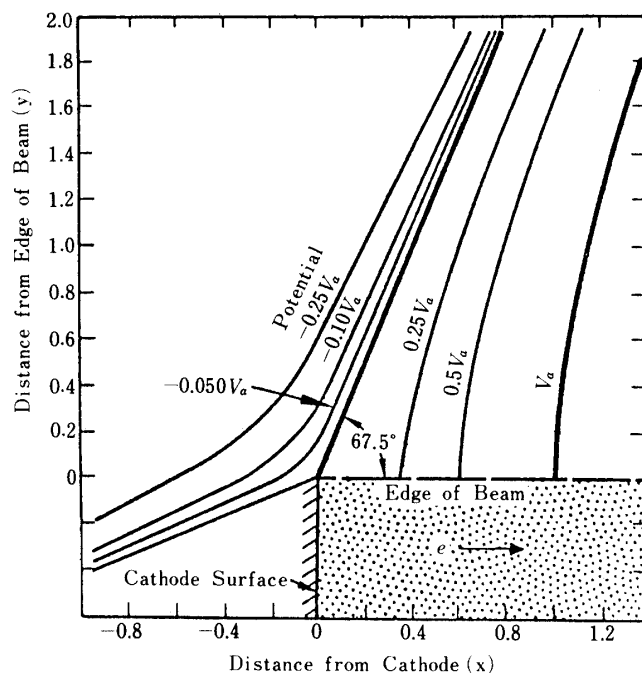


図1 電子ビーム(点で示した領域)と軸平行ビーム形成用電極(太線部)。ビーム軸と Wehnert 電極との角度は図示の如く 67.5° に取る(文献[5])。

(Exos-B)「磁気圏」であり、電子ビーム放出実験は成功し各種波動が励起された事が報告されている[1][2]。今回新たに試作した電子銃はこの「磁気圏」で成功したものを基礎にして GEOTAIL 飛翔空間に適した仕様のための改良設計を行なった。

GEOTAIL の飛翔する領域は上記の通りプラズマは極めて希薄であるため、相互作用による波動を効率よく励起させるため、放出電子ビームの広がりが見らるまで、ビーム密度(放出電子電流)も制御ができ、又観測領域の関係上、高感度に設計されている他の観測機器への影響を少なくする事を考慮して、放出電子ビームのエネルギーは Exos-B で使用されたものより小さく決められた。ビーム電流 I_b 及びビームエネルギー E_b は、

$$I_b = 2 \mu\text{A}, 10 \mu\text{A}, 50 \mu\text{A}, 250 \mu\text{A}$$

$$E_b = 0 \text{ v}, 25 \text{ v}, 50 \text{ v}, 100 \text{ v}$$

と、各々4段階に切替え可能とし、計16通りのモードで実験する事が計画された。又本装置は波動観測項目の一部である事から重量は250g以下、電力は1W以下と決められた。

以上のような仕様を満足し且つ電子ビーム放出効率が良く、放出ビームが軸方向に出来る限り平行であり、耐久性の良いものを実現する事が望まれている。限られた電力及び重量で要求項目を満足するためには、その装置自体の構造が簡単である事が肝要である。これらの事を考慮して Pierce 型電子銃を基本とし改良を行なう事になった。

3. Pierce 型軸対称平行ビーム電子銃の電極構造

電子レンズ方式を用いず軸対称平行電子ビームを形成するために考えられたのが Pierce の理論[3]である。この考え方は、電極としては基本的には陰極と陽極の2極からなっているが、平行ビームを形成するために両電極はほぼ円錐状としてその面のビーム軸との角を図1に示すように 67.5° にすれば実現される事になる。ただしこの場合、陰極の円錐状部分を Wehnert 電極と呼びその奥の部分の円板状になっている部分が電子放出面で傍熱形陰極となっており、Wehnert 電極と同電位になっている。今回改良すべき点はこの陰極部分を直熱形にする事であり、それに伴って放出ビーム形状を軸対称平行にするための工夫が主な研究対象である。

4. 放出電子ビーム形状の測定装置と測定系

新型電極構造を開発するためには、様々な電極形状に対して実際に放出電子ビームの空間分布を測定する事が最も現実的で且つ重要であるためそれを繰返して行なった。測定実験は京都大学超高層電波研究センターに設置されている内径 80 cm, 直胴部 150 cm の真空容器内で行なわれた。真空度は 10^{-6} Torr であるため放出電子ビームと中性粒子との衝突は無視する事ができる。図2に電子ビームの空間分布測定系等の模式図を示す。図(a)中 Probe とは図3に示すごとく巾 5 mm 長さ 20 cm の短冊状の電極を 40 枚並べてそれぞれに導線が接続されており、各短冊状電極に入射してきた電子流を切替えて測定できるようになっている。故に短冊を横切る方向に対しての空間的分解能は 5 mm である。この電極面を直角に貫く軸を中心に 90° 回転させて測定し両者の測定結果から電子ビームの断面における2次元の密度分布の一応の目安が得られる。この電極は更に電子ビーム軸方向に対して可動であるため、電子銃からの距離に対する分布も測定できるようになっている。

図2(b)において V_0 , A_0 は直熱形陰極の電圧及び電流を表わし、 A_2 は陰極から飛び出した電子の陽極への流入分を、 A_3 は実験領域へ放出された全電子流を表示する。又 A は電子ビームの空間分布を測定するためにスイッチを介して $5\text{ mm} \times 20\text{ cm}$ の短冊状電極に接続されている。 V_1 は電子エネルギーを制御するための電圧である。又 A_3 とチャンパー間に接続されている抵抗は衛星で実際に放出された電子流を測定するために用いるもので、本測定実験でも接続しておく。この測定回路により

- i) 加速電圧対放出電流 ($V_0 \times A_0$ を固定) は、 V_1 対 V_3
- ii) 陰極加熱電力対放出電流 (V_1 を固定) は、 $V_0 \times A_0$ 対 A_3
- iii) 加速電圧対電子放出効率 は、 V_1 対 $A_3 / (A_2 + A_3)$ で求める事が出来る。(以下陽極電圧と加速電圧は等しいとする。)

5. 改良型電極構造

使用する熱陰極は衛星打上げ時の振動にも耐え得るものが必要であるが、そのためにはフィラメントを支持するガラスとして特別のものを考慮するが、フィラメント自体は使用電力が 1 W 以下である事を考慮して定格電圧 3 V 定格電流 300 mA のタングステ線から

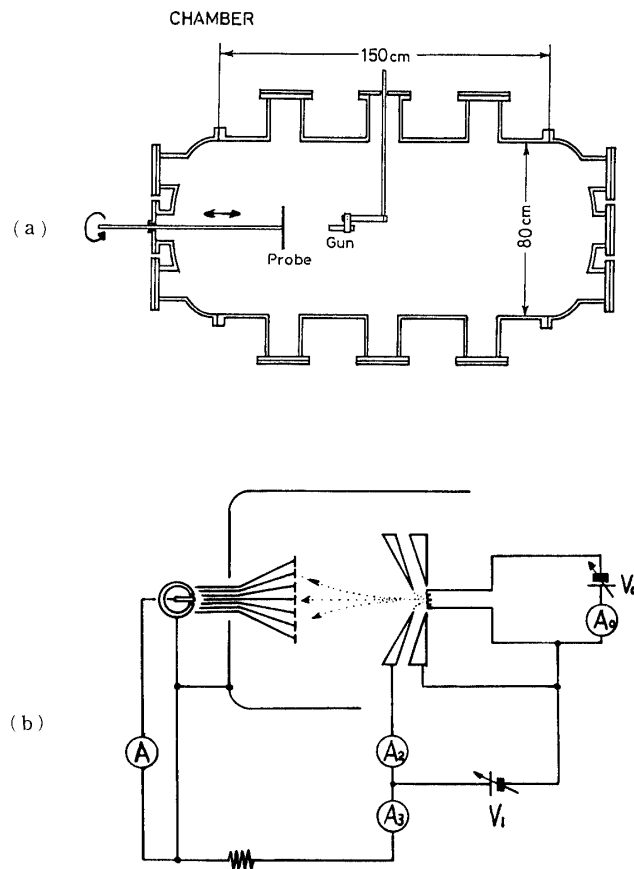


図2 (a)電子ビームの空間分布測定用大型真空容器内に配置された電子銃と測定プローブ。(b)ビームパラメータ測定のための回路系。

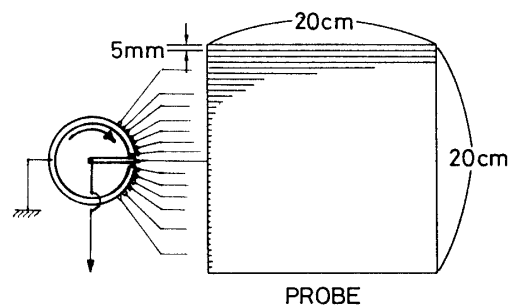


図3 電子ビーム断面の密度の空間分布測定用短冊形プローブ (5 mm×200 mm, 40枚) と切換スイッチ。

なる豆電球に使用されているものを購入した。フィラメント製造工程において製品のばらつきがあるため、信頼性の高い物を選ぶため、室温での抵抗値の測定を行なった。その結果図4の分布が得られたので、分布中ピークになる抵抗をもったものを用いた。

3節でも述べたように直熱形陰極を用いる場合、従来の Wehnert 電極の構造では Pierce の理論を満足しなくなる。本研究では Pierce の理論での本質的な部分、即ち「陰極面と Wehnert 電極の面とは常に 22.5° の角度を保つ」とい事を念頭において改良を加え、構造毎に異ったビームの各パラメータの測定を行なった。

図5は Wehnert 電極を変形せずに円錐状のまま直熱形陰極を設置した時の放出電子ビームの空間分布を示している。同図(a)はフィラメント陰極に沿った方向から見た分布、(b)はそれに直角方向から見た分布である。両者共加速電圧が50Vの場合である。(b)の距離5cmにおける分布では明らかにガウス分布を示しているが、これは電子銃を出した時点で平行ビームを保っている事を示唆している[4]。一方同図(a)での分布図では放射状に電子ビームが広がっている事を示している。電極配置図から見ても明らかなように、フィラメント陰極と陽極の間での電気力線が軸平行になっておらず放射状になっているだろう事は容易に想像される。この時の陽極電圧と放出電流の関係を図6に示す。図中各曲線はフィラメント電力をパラメータとしている。電流が0に近い(陽極電圧が13V以下の)範囲では電子は実験空間へは放出されていない。これは陰極周囲に生じる空間電荷効果によるものと思われる。しかしそれ以上の電圧においては2極管の特性そのものを表わしている。陽極電圧が150Vの時熱陰極の電力が1Wから1.3Wに30%の変化に対して放出電流は約3倍の増加を示している事から仕様を示された電流制御が十分可能である事が判る。

上述のように Pierce の理論の基本部分、即ち陰極面と Wehnert 電極との角度が 22.5° 度

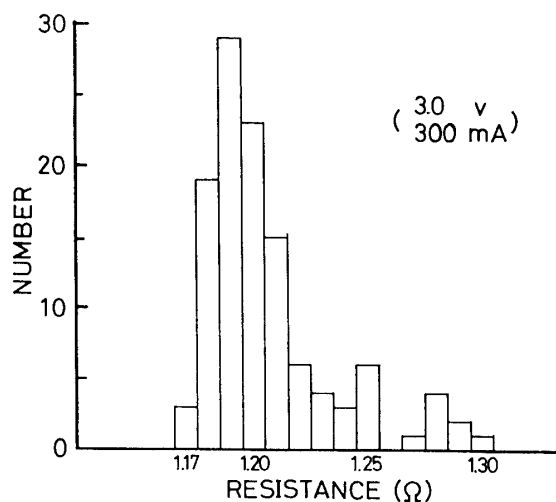


図4 電子銃直熱形陰極に使用されたフィラメントの抵抗値のばらつき分布。

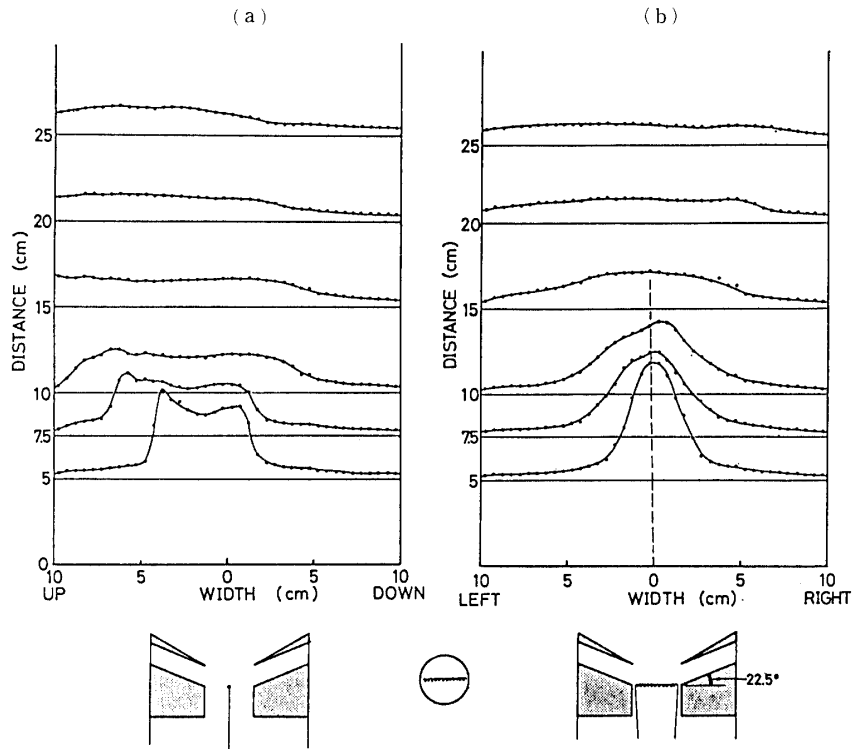


図5 円錐状 Wehnert 電極と直熱形陰極（フィラメント）による放出ビームの空間分布。(a)フィラメント軸方向から見た場合、(b)フィラメントを横から見た場合。

を保ちさえすれば軸平行ビームが容易に実現出来る事が示された。そこで図5(a)に示す配置において、陰極から陽極に到る電気力線が放射状になる事を防ぐ方策としてフィラメント陰極が入りだけのスリットをあけた円板を Wehnert 電極に取付けた構造のもので、電子ビームの分布を測定した。図7はその時の分布を示したもので、フィラメント軸方向から見た分布(図(a))においても同図(b)と同様軸平行ビーム形成を示唆するガウス分布(ビーム断面において)を表している。この時の陽極電圧に対する放出電子電流の関係を図8に示す。図6と同様にフィラメント電力をパラメータして描かれている。この結果と図6との比較での相違点では放出電子電流が熱制御限領域に達するためには陽極電圧を相当高くしなければならない事が挙げられる。この事はフィラメント陰極へかかるべき電界の多くがスリット付き円板へ掛ってしまっている事を示唆している。軸平行ビームを形成するためには Wehnert 電極と陰極面との間の角度を 22.5° に保つ事は極めて重要である事がこの測定でも明らかとなった。しかし、フィラメント陰極にも十分加速のための電場が掛るようにするためには、スリット付き円板を用いずに 22.5° の角度を保つ工夫が必要である。それは図9に示すように円錐形の Wehnert 電極の奥(頂点部)を横から圧縮しフィラメント陰極が入るような細長いスリット状にすれば解決出来るものと思われる。このような形状を製作するには特殊な工作技術が必要とされているので今回の研究においては実現していないが今回の一連の測定結果からその構造が最適である事が十分理解される。

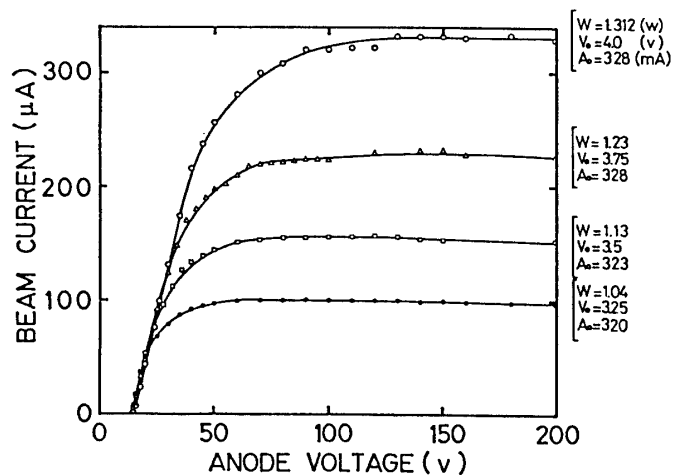


図6 図5で使用された電子銃による陽極電圧（ビームエネルギーに相当）対放出電子電流の関係。パラメータはフィラメント電力

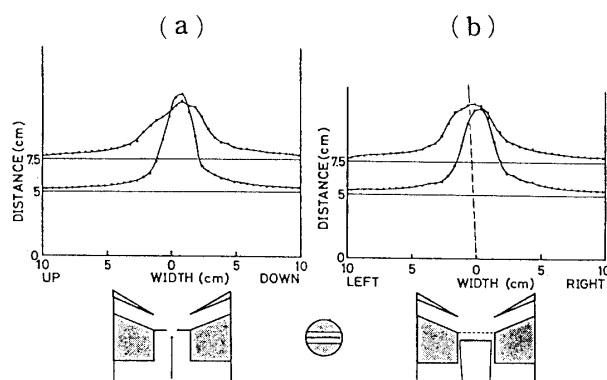


図7 図5のWehnert電極の奥部にスリットのあいた円板を取り付けた時のビーム空間分布。

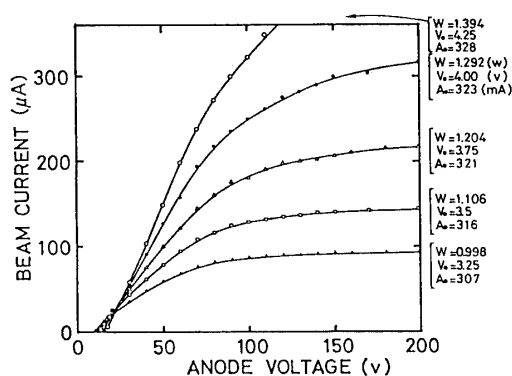


図8 図7で使用された電子銃による陽極電圧対放出電子電流の関係。パラメータはフィラメント電力

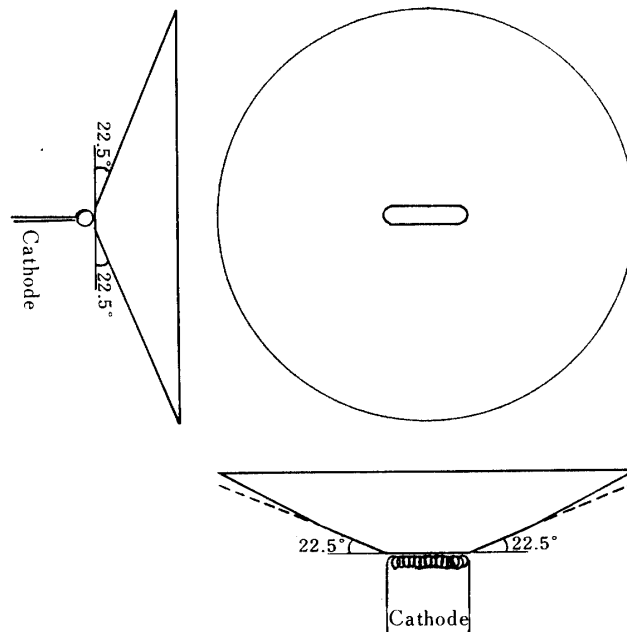


図9 直熱形陰極を使用する電子銃での変形 Wehnert 電極の構造。
開口上部は円形とし奥部は長円開口とする。

6. フィラメント電力に対する放出電子電流特性

宇宙空間での電子ビーム放出実験ではビームエネルギー4種類、放出電子電流4種類合計16種類のパラメータで行なう事が要請されているが、加速電圧(電子ビームのエネルギー)を一定に保ったまま放出電流を制御する方法として陰極表面状態(パービアン)を変化させる方法がある。本装置の場合それをフィラメント電力の変化で実現させる事になる。図5及び図7での構造によるフィラメント電力対放出電子電流の関係をそれぞれ図10(a)及び(b)に示す。図中各曲線は加速電圧をパラメータとして測定されたものである。両構造共1W(定格値)を越えた範囲で放出電流が急激に増加している事が見られる。この事から実機において使用するフィラメント陰極は定格値が1W以下のものを使用しなければならない事を教えてくれた。図中(b)の結果は(a)に比べて放出量があまり増加していない事を示しているがこれは前節で述べた理由による。

7. 電子放出効率

異なった電極構造をもった3種類の電子銃による電子の実験空間への放出効率(フィラメント陰極から飛び出した電子電流に対する実験空間への放出電子流分)を陽極電圧に対してプロットしたのが図11である。図中 Electrodes-1及び Electrodes-2は図5の構造をしたもので Electrodes-1は陽極の円錐頂部(電子銃の奥の方)の穴がビーム通過軸方向に沿って約2.5mmの厚みを持っている。これに対して Electrodes-2は厚みを持たず刃状になっている。そして New Electrodesが図7に示した構造である。Electrode-1の特性は陽

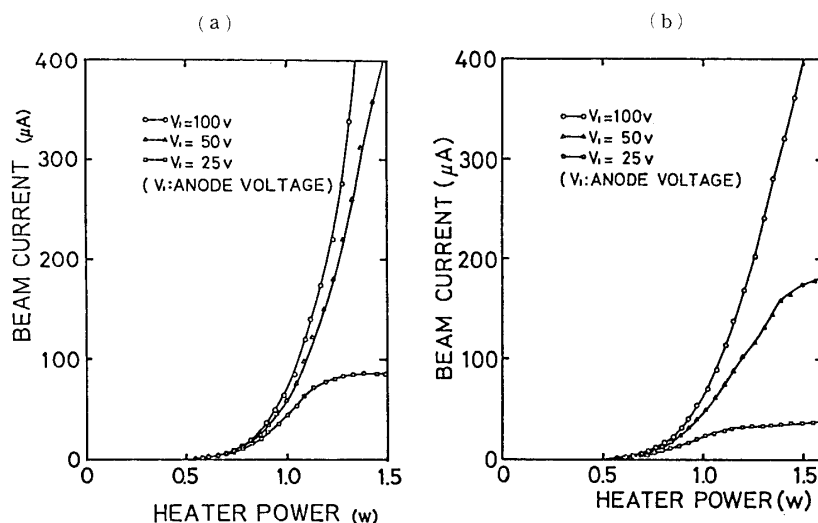


図10 フィラメント (Heater) 電力に対する放出電子電流の関係。パラメータは陽極電圧, (a)図5で使用されたもの, (b)図7で使用されたもの。

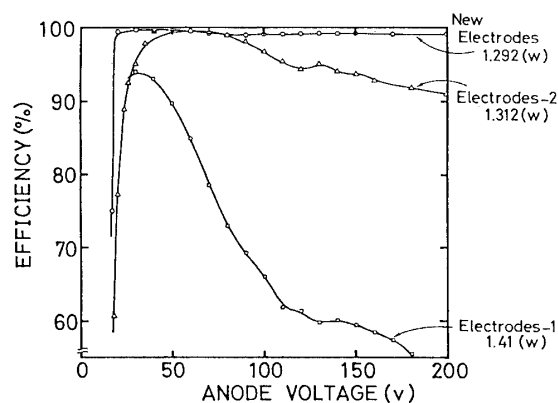


図11 3種類の電極構造をもった電子銃の電子放出効率 (フィラメント陰極から飛び出した電子流に対する実験空間への放出電子流分)。

極電圧の増加と共に放出される電子が急激に減少している事が示されている。又 Electrodes-2 もその傾向は小さいが加速電圧の上昇と共に減少している事が見られる。この現象は印加電圧による陽極への電子流入の傾向が電圧増加と共に上昇している事を示しており電気力線が変形していている事を示唆している。それに比べて改良された電子銃の電子放出効率は陽極電圧の上昇とは無関係に一定で 99% となっている。これは電気力線の変形が顕著に現われていない事を示唆しており改良型電子銃は軸平行ビーム及び電子放出効率において極めて性能が良い事が示された。

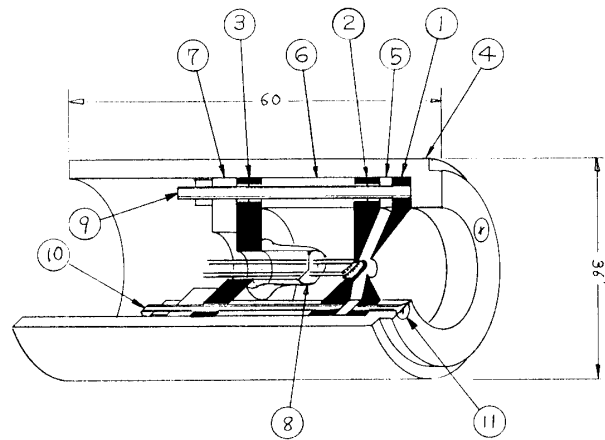


図12 実機用電子銃の内部構造。①陽極，② Wehnert 電極，⑧直熱形陰極支持用航空機仕様ガラス，④セラミック外壁。(他の部分については説明省略)

8. 検討

上記測定実験の結果，理想的な電極構造は図9に示す Wehnert 電極をもったもので，その時の電子ビームエネルギー（陽極電圧）対放出電子電流の関係は図6となり，電子放出効率に関しては図11における New Electrodes による99%となる事が予想される。

本測定結果から明らかなように，電子ビームのエネルギーと放出電子電流は独立して制御出来る事が示されたが，物理実験から要請された仕様に関しては図6に示す結果により電子ビームのエネルギー及び放出電流は表1に示す組み合わせに限定される事になった。

表1. 実現可能な電子ビームのエネルギーと放出電流の組合せ範囲（○印が実現可能）

$I_b (\mu A)$	$E_b (V)$			
	0	25	50	100
2	×	○	○	○
10	×	○	○	○
50	×	○	○	○
250	×	×	○	○

9. 結論

プラズマ密度が 10^5 [個/ m^3] という希薄な地球磁気圏尾部を飛翔する GEOTAIL から電子ビームを放出し，ビームプラズマ相互作用のアクティブ実験が計画された事から，この目的に合致した電子銃に関する資料を得るため，設計及び試作を行なった。更に放出され

る電子ビームの空間的密度分布をあらかじめ把握する事は、磁気圏で得られた波動現象の解釈には大変重要である事も考慮し、各試作装置は真空容器内で測定実験が繰返えし行なわれた。その結果直熱形陰極を用いた改良 Pierce 型電子銃により低電力、高放出効率をもった低エネルギー軸平行ビームが実現可能であるという決論を得た。この得られた知見を基に実機搭載用として電子銃の構造が確定した。尚参考のために実機用電子銃の内部構造を図 12 に示す。

謝 辞

本電子銃の設計に当り資料の提供と有益な助言を頂いた河島信樹教授に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- [1] N. Kawashima, A. Ushikoshi, Y. Murasato, A. Morioka, H. Oya, M. Ejiri, . Miyatake, and H. Matsumoto, Beam-Plasma Interaction Experiment in the Magnetosphere by Emitting an Election Beam from Satellite JIKIKEN (EXOS-B), *J. Geomag, Geoelectr.*, **33**, 145-159, 1981
- [2] N. Kawashima, K. Akai, Y. Murasato, and S. Sasaki, Electron Beam Emission from the EXOS-B (JIKIKEN) Satellite as a Powerful Diagnostic Tool in the Magnetosphere, *Astrophys. Space Sci.* **106**, 117-123, 1984
- [3] J. R. Pierce, *Theory and Design of Electron Beams*, (D. Van Nostrand Co. Inc.) , Chapt. 10, 1954
- [4] P. T. Kirstin, Thermal velocity effects in axially symmetric solid beams, *J. Appl. Phys.*, **34**, 3479, 1963
- [5] Septier, *Focusing of Charged Particles*, Vol. 2 (Academic Press), chapt. 3, 1967