

高エネルギー電子ビーム放出による オーロラシミュレーション実験

河島信樹*・佐々木進*・金子 修[‡]

Auroral Simulation Experiments with a High Power Electron Beam

Nobuki KAWASHIMA*, Susumu SASAKI and Osamu KANEKO

Abstract: Laboratory and space experiments using a high energy electron beam (≤ 10 keV) are carried out. Excitation of auroral lines (5577 Å, 3914 Å) and strong VLF and HF emissions are observed. It is hoped that these active experiments are carried out by rockets in Antarctica to understand auroral phenomena

要旨 飛しょう体からパラメーターのはっきりした電子ビームを放出し、それによる発光現象を観測することは、オーロラ研究の今後の一つの方向を示している。我々はロケットによる実験技術を確認し、基礎的な情報を得ると共に、大型チェンバーを用いた室内実験によって、ビーム伝搬、飛しょう体の帯電現象等のシミュレーション実験を合わせて行ってきた。これらの経験を生かして、極域での実験を行うことが今後必要であろうと思われる。

1. 序

オーロラの発光やそれに伴う電磁波の発生には、エネルギー 0.1~10 keV の電子が重要な役割を果たしていることは、極域におけるロケットや衛星の観測によって明らかにされてきた。今後さらに研究を進めていく上で、重要な役割を占めていくだろうと考えられるのは、**controlled active experiment**、すなわち、人工的に飛しょう体から電子ビームを放出し、そのパラメータ（エネルギー、電流、ピッチ角）を制御することにより、人工オーロラを生成し、自然界におけるオーロラをシミュレートしようというものである。

宇宙空間における **active experiment** は、電離層、磁気圏研究の積極的な手段として発展し、**chemical release**、大出力電波放出、プラズマ放出等の方法が、それぞれの目的に応じて行われているが、特に電子ビーム放出は、オーロラのシミュレーションとして、diag-

* 東京大学宇宙航空研究所, Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, 6-1, Komaba 4-chome, Meguro-ku, Tokyo 153.

表 1 各国の電子ビームを用いた active experiments
 Table 1. Active experiments using a high power electron beam.

Date	Group	E(keV)	I(A)	ζ (s)	θ (°)	Results
1969. 1	Hess <i>et al</i>	8	0.5	0.1	180	Visible aurora
1970. 8	Minnesota	35-45	0.1	0.02	90	Echoes, wave excitation
1972. 9	Minnesota	45		0.08	0-180	Echoes
1972.10	DAVIS <i>et al.</i>	24	0.2	1		Aurora in Southern Hemisphere
1973. 4,6	Soviet	8-12	0.3	0.8	0,180	Visible aurora
1974. 4	Minnesota	40	0.07			Visible emission (3914)
1975. 1	France-Soviet	15 27	0.5	1 0.02	0,70 140	Aurora, echoes, wave generation
1976. 1	Minnesota	40		0.01, 0.1,1	30-150	Visible emission (3914)

nostics としての他、純粋に物理的な観点からも興味深いものであり、現在まで多くのグループが実験を行っている（表 1）。Hess *et al.* (1971) 等は 8 keV, 0.5 A の電子ビームを磁力線方向に打ち出し、人工オーロラの観測に成功し、Davis *et al.* (1973) 等は磁力線に沿って伝搬した電子が南半球でオーロラを作ることに成功している。一方 Minnesota のグループは、電子ビームが磁力線に沿って伝搬し、反射して戻ってくる現象（エコー）を詳しく観測している。その他、フランス、ソ連、ノルウェー等で同様な実験が行われている。我々も電子ビームを用いた実験に注目し、現在までに、K-10-11 および 12 号機において、300 V, 5 mA という小型電子銃を用いての実験を行うことから出発し、K-9M-57 および 58 号機では、5 kV, 350 mA の大型電子銃、K-9M-61 号機では 2 kV, 35 mA の中型電子銃を用いての実験を行う一方、実験室でのシミュレーションを大型チャンバーを使って行ってきた。以下ではこれらの結果について述べることにする。

2. ロケットによる制御電子ビーム放出実験

ロケットによる電子ビーム放出実験を行うにあたっては、重量や容積に制限のある中で、高圧、大エネルギーの電子銃を動作させねばならず、技術的な開発が必要であると同時に、ビーム放出に伴う諸現象（ロケット電位の変化、周辺プラズマへの影響等）の基礎的な測定が必要である。そのために我々は、まず 300 V, 5 mA の出力の小さな電子ビームによる実験から始め、基礎的なデータを得、さらに出力を 300 W, 1.5 kW とスケールアップすることに成功、技術的な面では確立したシステムを作り上げた。現在は規模を落とす反面、

精密なデータの採取を行っている(表2)。図1には我々の用いた電子ビームの出力を他のグループのものと比較してある。右上の斜線部は、ビームによる発光を地上から観測できる範囲を示しており、我々の実験は、ほぼこのレベルに近いところまで達している。以上のように我々は、技術的にはロケットから電子ビームを放出し、その光を地上で観測できるレベルに達していると考えているが、このシステムを用いて精密なシミュレーションを

表2 日本においてこれまでに行なわれた電子ビームを用いたロケット実験
Table 2. Active experiments using a high power electron beam in Japan

Date	Rocket	EBA power	Results
1975. 9	K-10-11	300 eV, 3.75 mA DC	Potential rise
1976. 1	K-10-12	200 eV, 3 mA DC, pulse	Potential rise, wave excitation (VLF/HF) Ambient plasma heating
1976. 8	K-9M-57	3 keV, 100 mA Pulse	Potential rise, wave excitation (VLF/HF)
1977. 1	K-9M-58	5 keV, 300 mA Pulse	Potential rise, visible emission (3914/5577)
1978. 1	K-9M-61	2 keV, 50 mA DC	

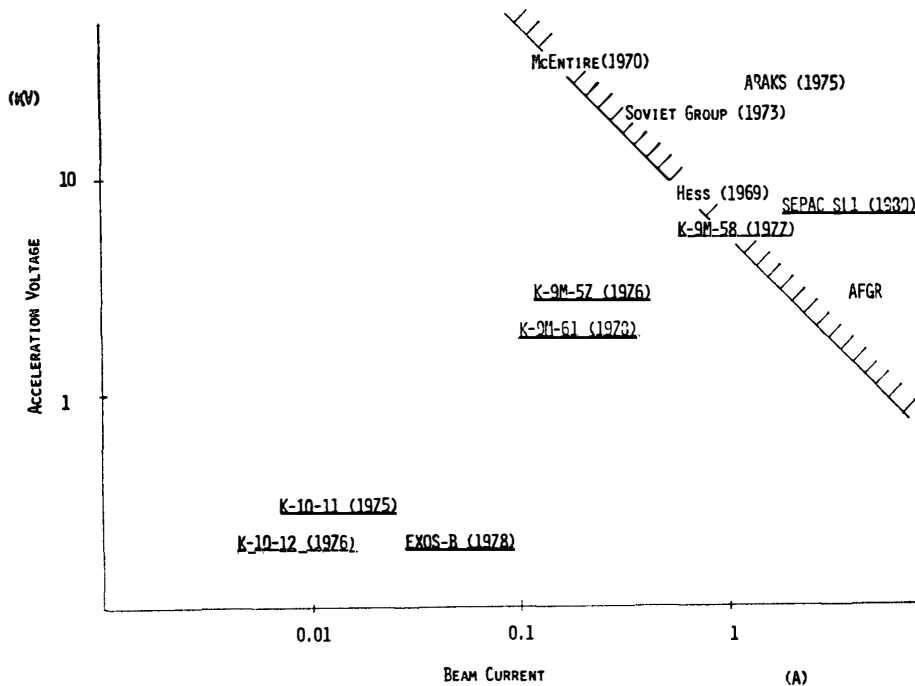


図1 各国で行われた電子ビームを用いたロケット実験の出力の比較
Fig. 1. Comparison of the beam power in the past active experiments using an electron beam.

行うためにはいくつかの定量的な情報を得ることが必要である。その中でもっとも重要なことは、ビーム放出に伴うロケット電位の上昇である。孤立した物体から電子を放出すれば当然物体は正に帯電する。真空中では従ってビームは物体から出ないことになるが、電離層中では周辺プラズマからの帰還電流があり、その量は物体の電位の関数であるので、放出ビーム量と帰還電子量とがバランスした電位に物体は落ち着く。ビームのエネルギーは、電子銃にかけた電圧から物体の電位を差引いたものになるため、この電位がどのようになるかを調べるのが重要である。図2はK-10-12号機における電位上昇の結果を示したものである。電位はビーム量の増加と共に上昇し、その値は高度の低いところほど、すなわち、プラズマ密度が小さいほど電位上昇は大きくなっていることが分かる。この傾向はビーム量の大きな実験(K-9M-57, 58, 61号機)においても見られ、電位上昇は高度300 kmでは数10 V、高度200 kmでは測定範囲の400 Vをはるかに越えた値が観測されている。図3および図4はK-9M-58号機に搭載したフィルター付のフォトマルで観測した3914 Åと5577 Åの結果である。58号機では、5 kV, 350 mAという出力の大きな電子ビームを放出しての実験を行ったが、エネルギーが大きいため、コンデンサーにエネルギーを一度蓄えた後、電子銃を動作させるという方式をとっている。そのため、電圧、電流値が時間

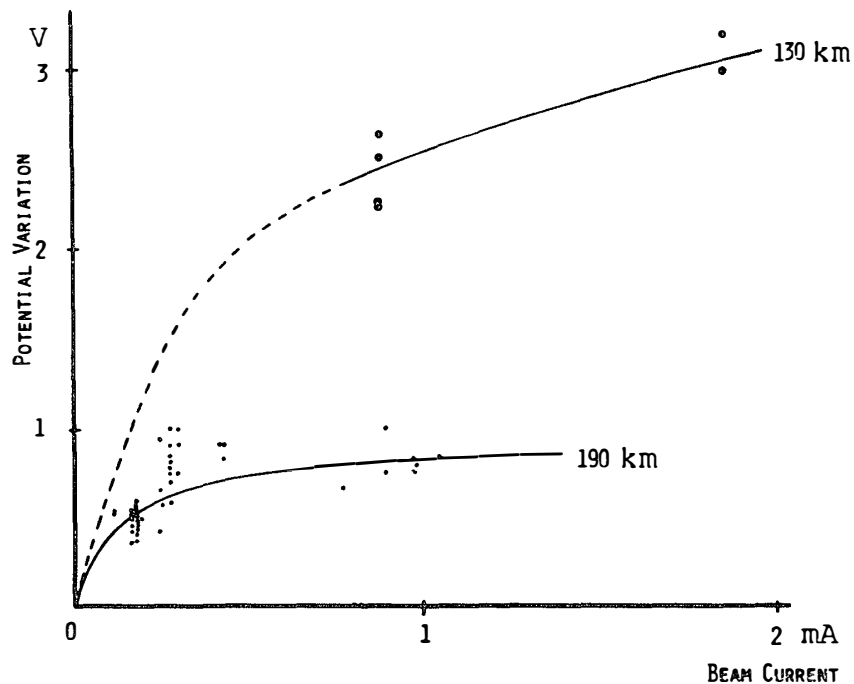


図2 K-10-12号機におけるロケット電位のビーム量依存性

Fig. 2 Dependence of the rocket potential on the beam current in the K-10-12 experiment

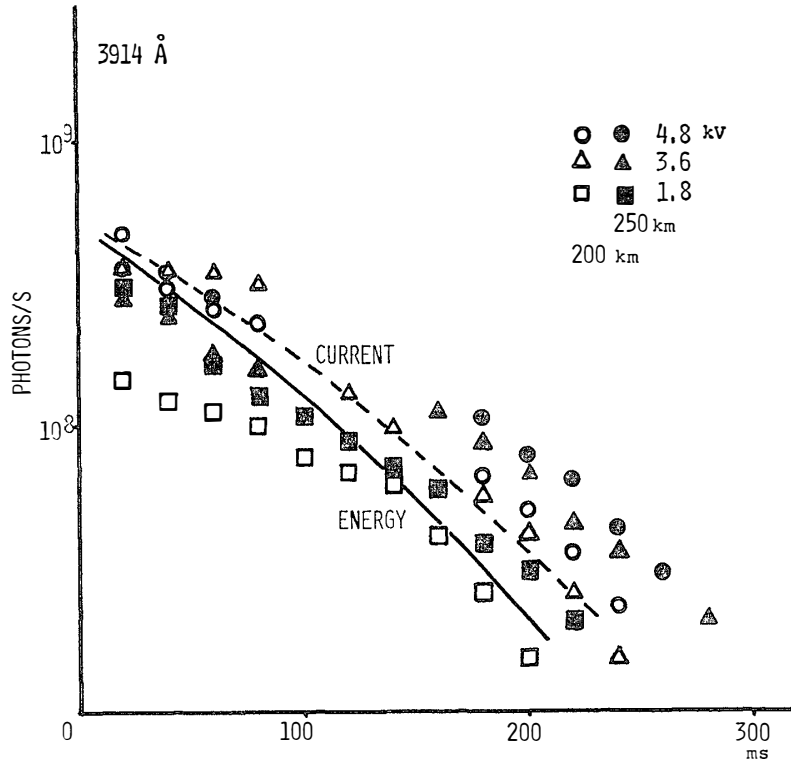


図 3 K-9M-58 号機における 3914Å のビーム量変化に伴う時間変化
 Fig. 3. Change of the intensity of 3914Å following the time decay of the beam.

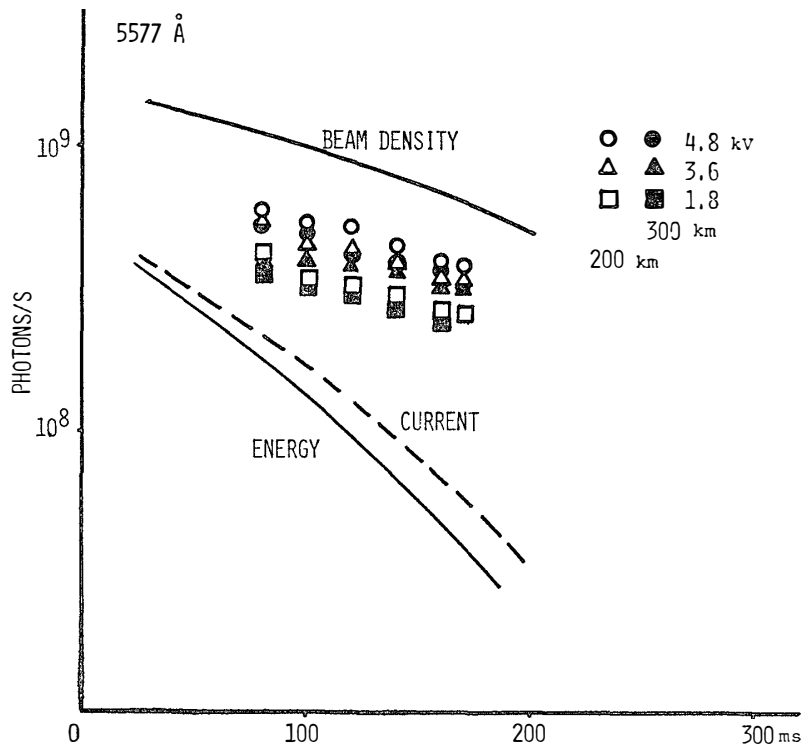


図 4 K-9M-58 号機における 5577Å のビーム量変化に伴う時間変化
 Fig. 4. Change of the intensity of 5577Å following the time decay of the beam.

と共に変化するパルスビームとなっている。図には各ラインの時間変化の様子をビームのエネルギー、電流値の変化と比較して示してあるが、 3914 \AA がビーム量に比例して減少するのに対して、 5577 \AA はそれよりもゆっくりと減少していることが分る。これは 5577 \AA の life time が、長いことのためであると解釈できる。高度による差は、周辺の中性大気密度の変化によるものと思われる。その他ビームに伴う現象として、VLF, HF 帯の波動励起、周辺プラズマ温度の上昇等の結果が得られている（佐々木他, 1977; 金子他, 1977）。

3. 大型チェンバーを利用した電子ビーム伝搬および帯電現象の研究

ロケットによる実験を進める一方で、我々は電子ビームの伝搬の様子や、ロケット電位上昇のシミュレーション実験を地上においても進めてきた。しかしながら、これらの実験には壁の影響が本質的に効いてくるため、大型のチェンバーでの実験が必要であった。そこで我々は宇宙研のスペースチェンバー ($2 \text{ m}\phi \times 3 \text{ ml}$) を始めとし、宇宙開発事業団の大型チェンバー ($8 \text{ m}\phi \times 13 \text{ ml}$)、NASA Johnson Space Center にある大型チェンバー ($17 \text{ m}\phi \times 27 \text{ ml}$) での実験を行い有意義な情報を得ることができた（表3）。図5は宇宙研のスペースチェンバーにおいて行った実験の概念図である。電子銃はロケット実験に使用したものと同型のものを使用し、ラングミュアプローブ、フローティングプローブ等の配置もロケット実験と同様にしてある。図6には、電子銃から出たビームの拡がりの様子の写真を示してある。このように電子ビームはアノードから出た直後は、自身の電場のために広がっていく傾向を持つ。しかしながら、この傾向はいつまでも続くわけではなく、磁

表3 大型チェンバーを使ったシミュレーション実験
Table 3. Laboratory experiments with an electron gun in the large vacuum facility.

Date	Space chamber	EBA power	Results
1976. 7	ISAS ($2 \text{ m}\phi \times 3 \text{ ml}$)	6 keV, 0.5 A	Charging and its neutralization by NGP. Wave excitation, beam propagation
1976. 11	JSC ($17 \text{ m}\phi \times 27 \text{ ml}$)	6 keV, 0.5 A 5 keV, 2.5 A	Charging and its neutralization by MPD. Wave excitation (C.H.R.), beam propagation
1977. 10	ISAS ($0.3 \text{ m}\phi \times 0.7 \text{ ml}$)	6 keV, 0.5 A	Charging
1977. 11	NASDA ($8 \text{ m}\phi \times 13 \text{ ml}$)	7.5 keV, 1.6 A	Charging, SEPAC hardware test Charge neutralization by MPD and NGP
1977. 12	ISAS ($2 \text{ m}\phi \times 3 \text{ ml}$)	6 keV, 0.5 A	Charging, potential control, beam propagation, potential distribution measurement, particle energy analysis

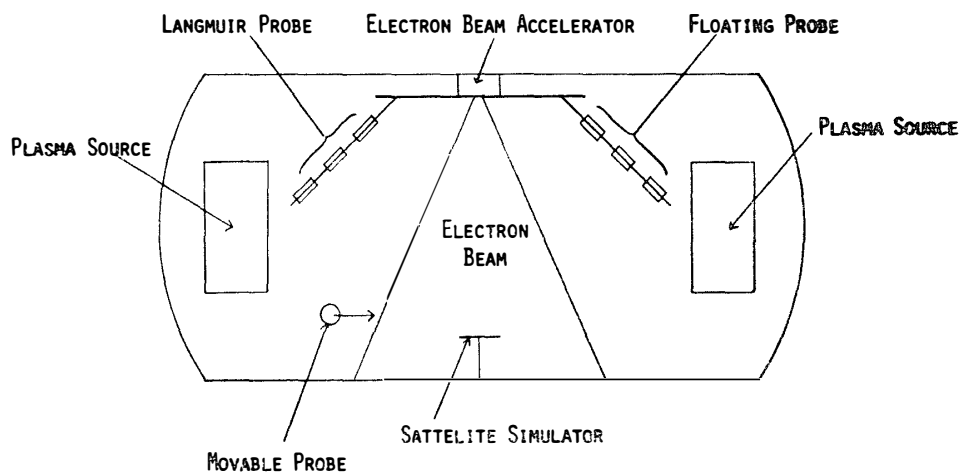


図 5 宇宙研スペースチャンバーにおける実験概念図

Fig 5 Schematic layout of the experiment at the ISAS space chamber

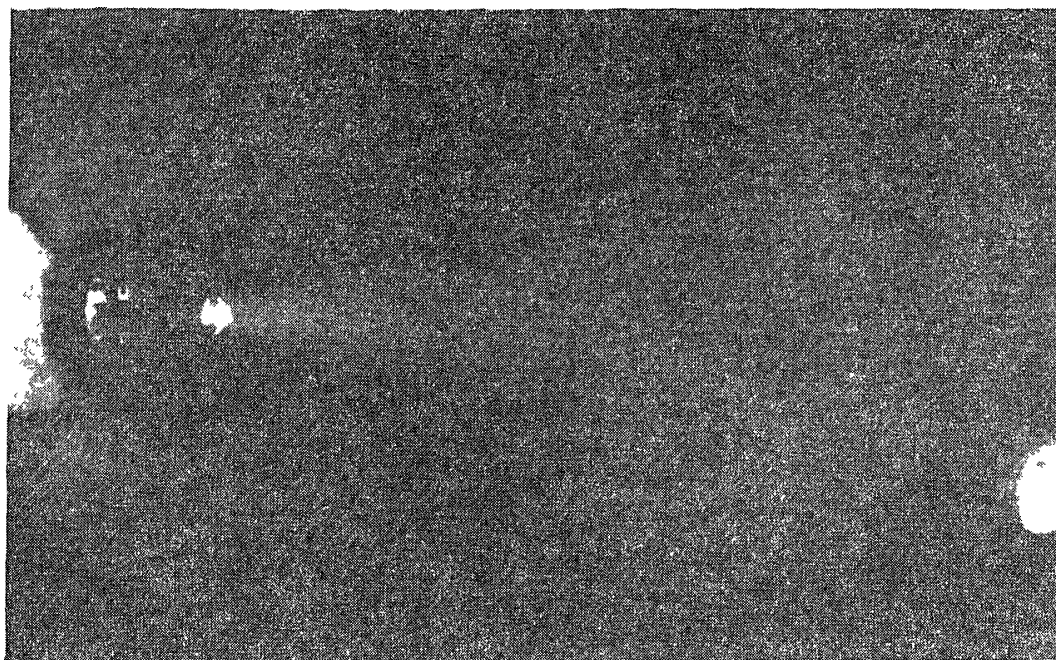


図 6 電子銃からの電子ビーム放出の様子 (宇宙研スペースチャンバーにて)

Fig 6 Photograph of the electron beam propagation near the electron gun

場の影響が効いてくるスケールでは再び収束, その後は空間的に振動する 図 7 には NASA のチャンバーで行った実験結果の写真を示してある これはビームを磁力線に平行に打ち出した場合の例であり, ビームが再び収束している様子がよくわかる. 図 7 から読み取った実際のビーム形状と理論値との比較をしたのが図 8 である 実際のビームは理論値に比べて細くなっているが, これはビームにより電離されたプラズマによって, ビームの自己電場が打ち消されているためと考えられる 図 9 には, 電子ビームの磁場に対する打ち出し

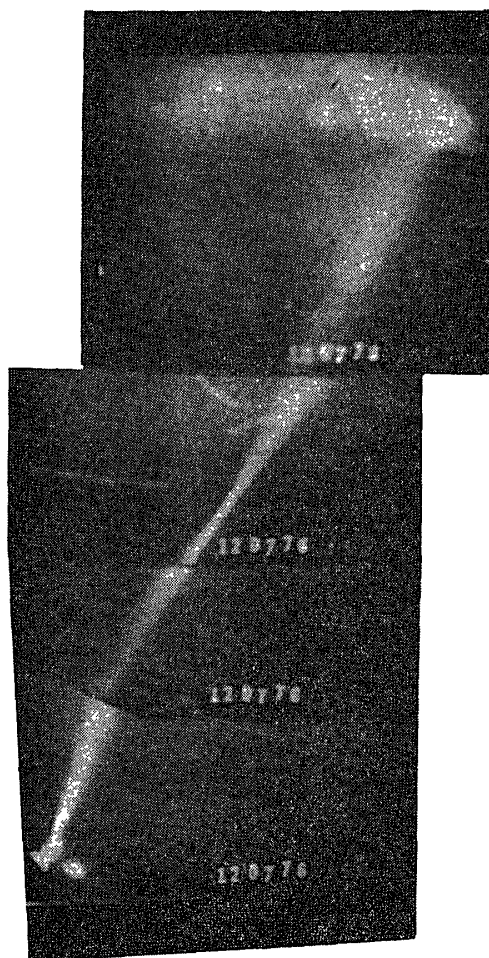


図 7 磁力線に沿った電子ビーム伝搬 (ピッチ角 0°) (NASA 大型チェンバーにて)
 Fig. 7. Whole profile of the electron beam for a pitch angle of $\sim 0^\circ$ in the space chamber of NASA.

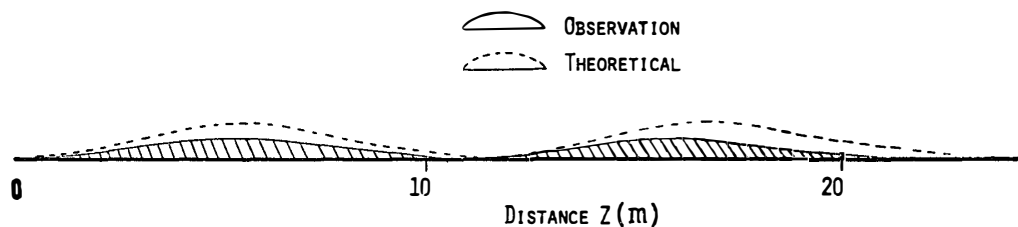


図 8 電子ビーム伝搬の理論値との比較
 Fig. 8. Comparison of the electron beam profile with the theoretical calculation

角を約 30° にした場合の様子を示した。ビームがスパイラル状に伝搬する様子がよくわかる。これまでの結果は電子銃のアノードとチェンバー壁の電位を共通にしての実験であったが、宇宙空間においては、電子銃は飛しょう体と共にプラズマ中に孤立しており、その

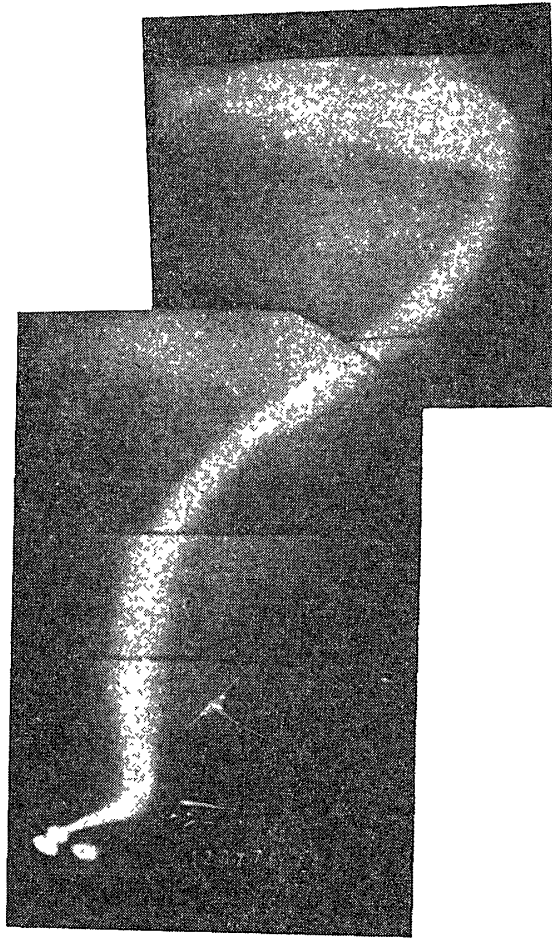
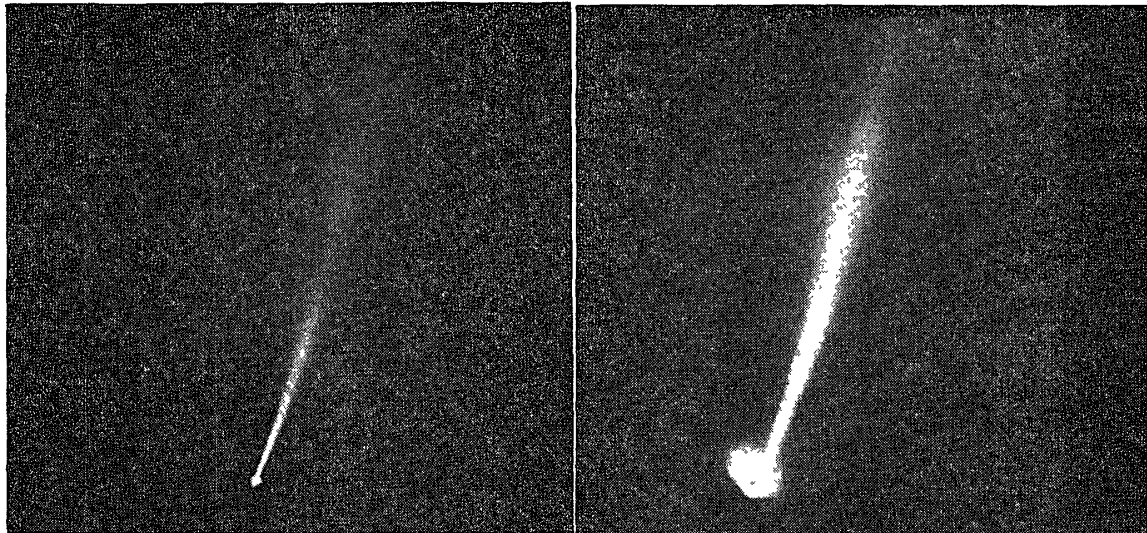


図 9 磁力線に沿った電子ビーム伝搬 (ピッチ角 30°)

Fig 9. Whole profile of the electron beam for a pitch angle of $\sim 30^\circ$.

ような状態をシミュレートするために電子銃システムをチェンバー壁と絶縁状態にしての実験を行ったのが、図 10 に示す結果である。図 10a には電子銃をアース状態で使った場合、図 10b には絶縁状態で使った場合の電子ビームの様子を示してある。絶縁状態では、電子銃から出た電子や電離してできたプラズマの電子が、チャージアップした電子銃にもどってくると考えられ、それによって電子銃周辺が明るく光っているのが見られる。このような発光現象は、一部のロケット実験では見られたという報告がある。また、強い波動の励起が、主にロケット周辺で起こっているという報告もあり、このような帰還電流に伴うものではないかと思われる。



(a) チェンバー壁と電位共通
 (a) *Electron gun is grounded
 to the chamber wall.*

(b) チェンバー壁と絶縁
 (b) *Electron gun is isolated
 from the chamber wall.*

図 10 電子銃のアース状態の違いによる電子ビーム伝搬の違い
 Fig. 10 *Photographic observation of the beam propagation.*

4. 結 び

以上述べてきたように、我々はロケットによる電子銃放出システムを確立し、ビーム放出に伴う基礎的なデータを得ている。オーロラ研究の今後の方向として、エネルギー、ビーム密度、ピッチ角等を自由に制御できる電子ビームを、望む場所、望む時間に打ち出して、それによる発光等を観測できることは、大きな意義を持つと思われる。特に極域では、磁力線が打ち上げ場所付近に連なっているため、打ち上げ場所での観測が可能である。また、磁力線が閉じているか、開いているかという情報も、エコーを用いれば決定することができる等、極域での電子ビームを使った実験の持つ意義は大きい。

文 献

- CAMBOU, F., DOKAUKINE, V. S., IVCHENKO, V. N., MANAGADZE, G. G., MIGULIN, V. V., NAZARENKO, O. K., NESMYANOVICH, A. T., PYATSI, A. Kh., SAGDEEV, R. Z. and ZHULIN, I. A. (1975): The ZARNITZA rocket experiment on electron injection. *Space Res.*, **15**, 491-500.
- DAVIS, T. N., HESS, W. N., TRICHEL, M. C. and WESCOTT, E. M. (1973): Initial results of a recent electron accelerator experiment. *EOS*, **54**, 436.
- HESS, W. N., TRICHEL, M. C., DAVIS, T. N., BEGGS, W. C., KRAFT, G. E., STASSINOPOULOS,

- E. and MAIER, E. J. R. (1971). Artificial aurora experiment experiment and principal results. *J. Geophys. Res.*, **76**, 6067-6081.
- 金子 修・佐々木進・矢守 章・萩原通信・河島信樹 (1977) K-9M-57 および 58 号機による宇宙空間への大出力電子ビーム放出実験結果と L-3H-9 および K-9M-61 号機による同実験計画. 宇宙観測シンポジウム, 昭和52年度, 東京大学宇宙航空研究所, 122-131.
- MCENTIRE, R. W., HENDRICKSON, R. A. and WINCKLER, J. R. (1974): Electron echo experiment 1 comparison of observed and theoretical motion of artificially injected electrons in the magnetosphere *J. Geophys. Res.*, **79**, 2343-2354.
- SASAKI, S., KANEKO, O., NAKAMURA, Y., KUBO, H., MURASATO, Y., KAWASHIMA, N. and MIYATAKE, S. (1976) Experiments of electron beam emission from rockets. *Uchû Kansoku Shinpojiumu, Showa 51-nen-do, Tokyo Daigaku Uchû Kôkû Kenkyûjo*, 207-217.
- 佐々木進・河島信樹・栗木恭一・中丸邦男・長友信人・大林辰蔵 (1977) スペースシャトル搭載用電子加速器を用いた大型スペースチェンバー (宇宙研 NASA) における室内実験・東京大学宇宙航研報, **13**, 1003-1018.
- SASAKI, S., KAWASHIMA, N., KURIKI, K., NAKAMARU, K., NAGATOMO, M., OBAYASHI, T., MISAWA, H., OKAMOTO, T. and GOMA, K. (1977). Laboratory experiment with electron beam accelerators in the large NASA JSC VACUUM facility. *ISAS Research Note RN34*.

(1978年6月10日受理)