

S-310 JA-2 号機による降下電子の観測

久保治也*・村田節夫*・伊藤富造*・国分 征**

Observation of Precipitating Electrons on Board the S-310JA-2

Haruya KUBO*, Setsuo MURATA*, Tomizo ITOH*
and Susumu KOKUBUN†*

Abstract: A cylindrical electrostatic analyzer on board the Japanese Antarctic sounding rocket S-310JA-2 launched on February 10, 1977 at Syowa Station obtained the energy spectra of energetic electrons in the Antarctic polar ionosphere. The geomagnetic activity was high and there was a diffuse aurora at the time of launch. The measured electron flux was about 1.8×10^3 electrons/cm²·sec·str·eV at the energy of 4.2 keV and about 2.3×10^4 electrons/cm²·sec·str·eV at 740 eV. The electrons whose energy was in the neighborhood of 500 eV had a considerable pitch angle dependence, and the field aligned current density due to these electrons resulted in about 1.47×10^{-6} A/m².

要旨・ 1977年2月10日に昭和基地から打ち上げられた S-310 JA-2 号機に、同軸円筒型エネルギー分析器を搭載して、南極電離層中の電子のエネルギースペクトルを測定した。打ち上げ時には地磁気活動が高く、diffuse aurora が発生していた。4.2 keV エネルギーで約 1.8×10^3 electrons/cm²·sec·str·eV の電子フラックスが、また、740 eV のエネルギーでは、約 2.3×10^4 electrons/cm²·sec·str·eV の電子フラックスが観測された。数 100 eV 近傍のエネルギーの電子は、ピッチ角依存性が大きく、約 1.47×10^{-6} A/m² の電流密度の電子流が、この数 100 eV 近傍の電子によって、磁力線に沿って流れている。

1. 緒 言

近年オーロラ電子のロケットを用いての観測が多々なされているが、オーロラは時間的にも空間的にも変化するので、実験結果は、オーロラの状態や、地磁気の状態にしたがって、種々異なっている。したがって種々の条件の下で、オーロラ電子のデータを蓄積する事は、

* 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.

** 東京大学理学部附属地球物理研究施設. Geophysics Research Laboratory, University of Tokyo, 11-16, Yayoi 2-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113.

オーロラ解明の上からも非常に大切である。

ここでは、南極ロケット S-310 JA-2 号機による オーロラ電子の観測結果について述べる。

2. 観測器および打ち上げ状況

観測器のブロック図を図 1 に示す。観測器はセンサー部とエレクトロニクス部より成る。センサー部は円筒型コリメーター、中心角 60° の同軸円筒型エネルギー分析器およびチャンネルترون (Galileo 4028) より成る。コリメーターはロケット軸と平行になっている。エネルギー分析器の内側電極に $+V$ ヴォルト、外側電極に $-V$ ヴォルトの電位を同時に与える。その時エネルギー分析器を通過する電子の中心エネルギー $E(\text{eV})$ は、 V と $E=20V$ なる関係式で与えられる。センサーの geometrical factor は $5.3 \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ である。エネルギーは階段的に掃引され、一掃引中一つのエネルギーの観測時間は 100 ミリ秒で、また、データ取得の基準時間も 100 ミリ秒になっており、掃引周期は 1.2 秒である。S-310JA-1 号機の実験では、太陽光によるデータの汚染があったので、今回は汚染による background を正しく評価するために、分析器の電極に電子が通過できないように逆極性の電圧を印加する phase を作り、その時のカウントを background とした。実際には、こ

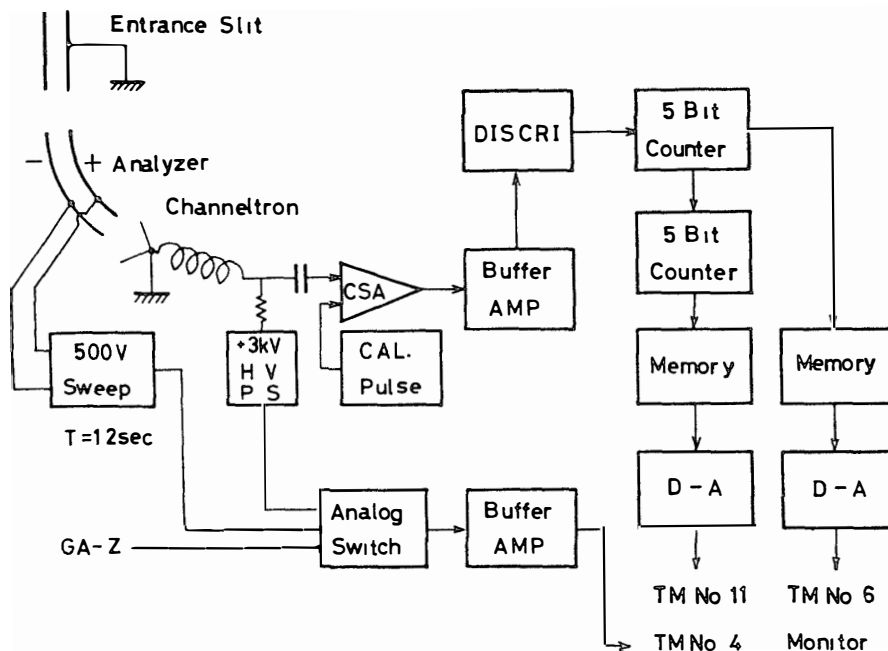


図 1 S-310JA-2 号機に搭載した電子フラックス測定器のブロック図

Fig 1. Block diagram of the detector system of the electron flux on board S-310JA-2.

の phase では、まったくカウントがなく、太陽光による汚染はなかった。

高電圧による放電を防止するために、センサー部は現地であらかじめ排気しておき、ペローバルブでシールした後、排気用パイプに chip off を行った。

この観測器を搭載した S-310JA-2 号機は、1977年2月10日 45°E 地方時 3 時 22 分 50 秒に昭和基地 (69.00°S, 39.36°E) から、方位角 315°, 発射角 80° で、磁力線方向に打ち上げられた。ロケットの軌道を図 2 に示す。打ち上げ時の太陽天頂角は 89.97° であった。

打ち上げ後 100 秒 (高度 135 km) でセンサーの開口を行い、120 秒 (高度 160 km) でチャンネルトロン用高電圧と掃引電圧を投入した。データは昇り 160 km から最高到達高度 213 km を経て、下りの 88 km まで取得できた。

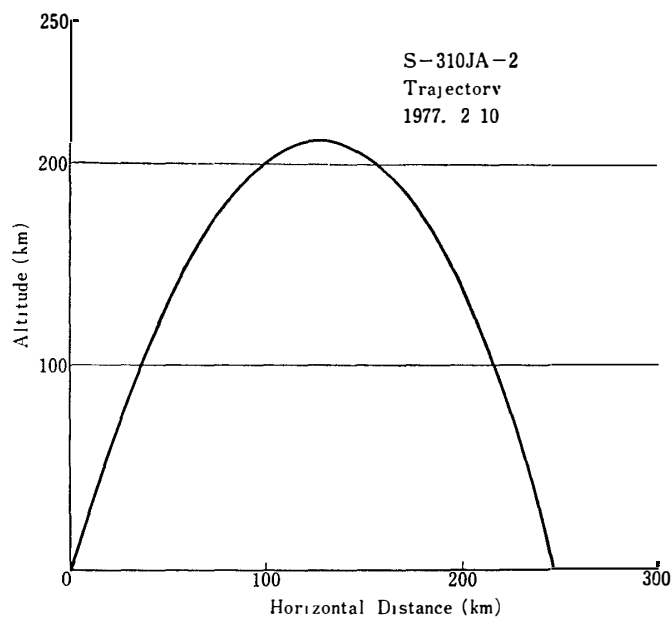


図 2 S-310JA-2 号機の軌道
Fig. 2. Trajectory of S-310JA-2.

3. 実験結果および検討

S-310 JA-2 号機は、中程度の polar magnetic substorm の expansion phase 中に打ち上げられた。この時には diffuse aurora が存在していたが、太陽光のために見えなかった。図 3 は打ち上げ時近傍の昭和基地での磁場記録で、矢印は打ち上げ時である。H 成分が 0030 UT を中心に約 600 γ の negative bay を示している。Z 成分は電流系の中心が昭和基地の南側にあることを示している。図 4 は昭和基地のリオメーターで測定した 30 MHz の CNA の記録で、矢印が打ち上げ時を示している。CNA は約 3.0 dB で、かな

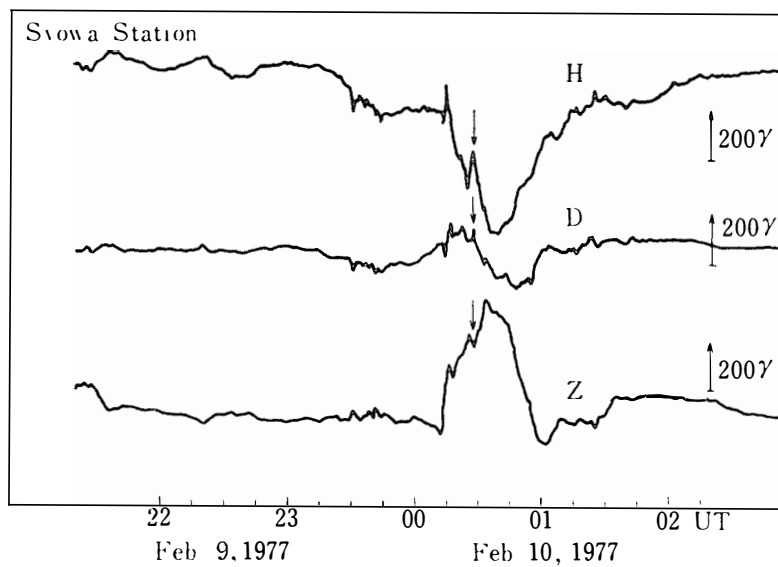


図 3 S-310JA-2 号機打ち上げ時近傍の磁場記録 矢印は打ち上げ時刻
 Fig 3 Magnetic record for the period around flight time of S-310JA-2
 Arrows show the time of launch

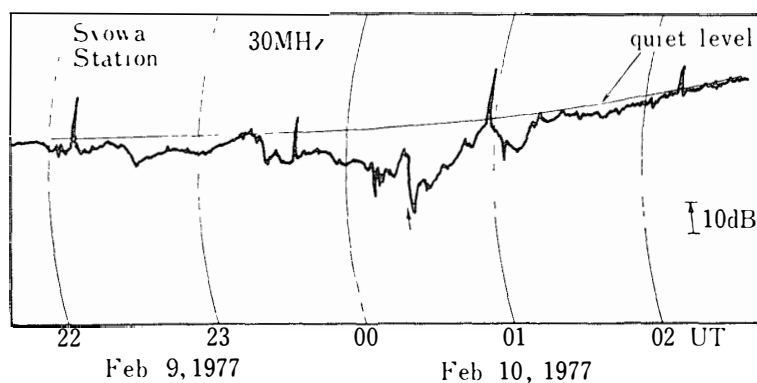


図 4 30 MHz の CNA 記録 矢印は打ち上げ時刻
 Fig 4 Record of 30 MHz cosmic noise absorption Arrow shows the time of launch

り高エネルギーの電子が極域 *D* 層まで侵入していることを示し ($E > 40$ keV 電子の観測からも明らかである), 打ち上げ時近傍は, かなり荒れた状態が支配的であったことを示している。

図 5 は生のデータの一例である。Low bit カウンターの一段階は 2 カウントで, high bit カウンターの一段階は 64 カウントである。逆極性の電圧を印加した phase では, カウントがゼロになり, 太陽光による汚染はなかったことを示している。

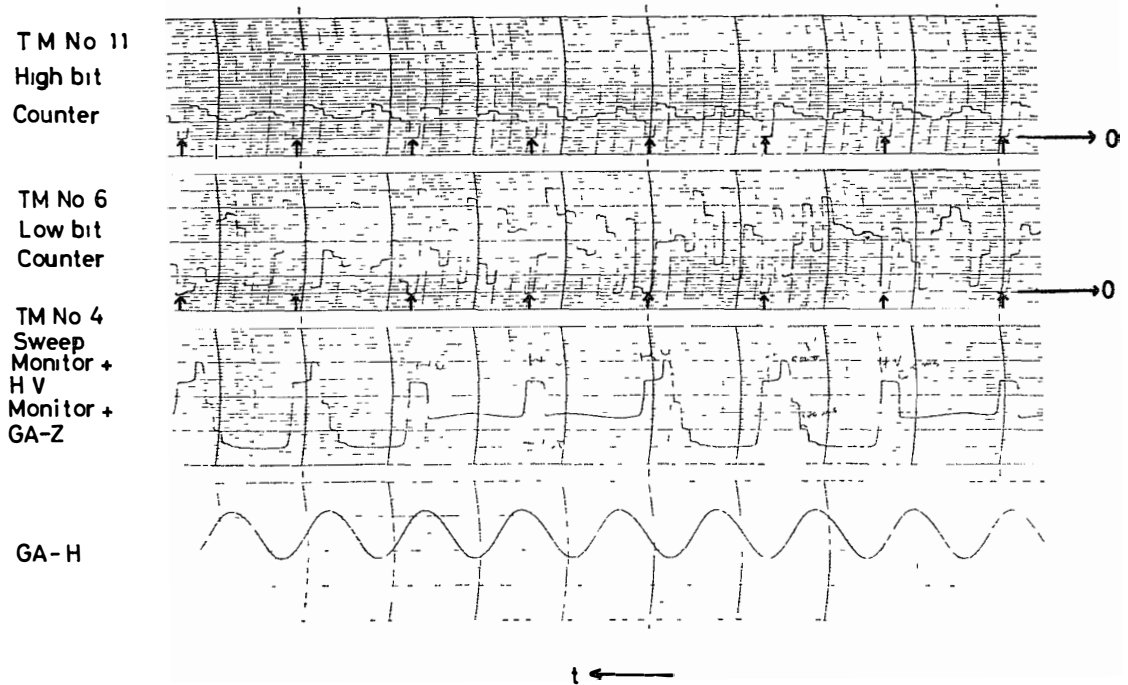


図 5 生のデータの一部。矢印が逆極性の *phase* に対応し、カウントがゼロになっている。

Fig. 5. An example of raw data. Arrows show the channels where the reverse potentials were applied. Counts corresponding to these arrows are zero.

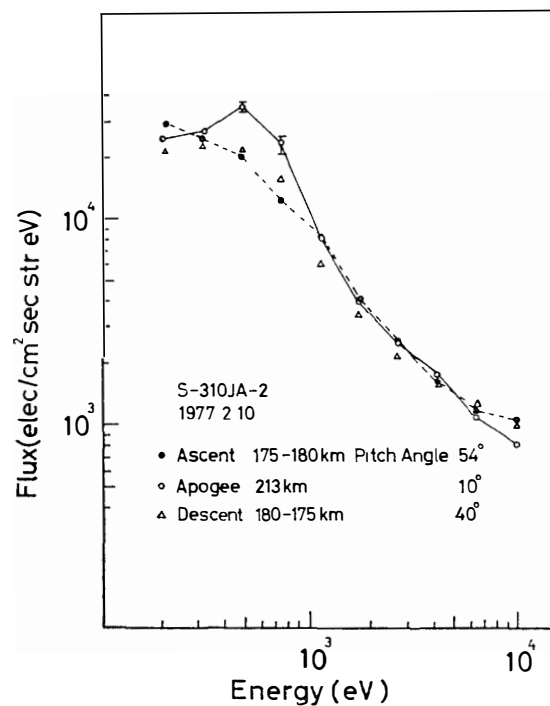


図 6 種々の高度およびピッチ角での電子のエネルギースペクトル

Fig. 6. Electron energy spectra at various altitudes and various pitch angles.

図6に異なる高度，異なるピッチ角での電子のエネルギースペクトルを示す．コリメーターとロケット軸が平行なので，磁力線とロケット軸のなす角が，測定された電子のピッチ角になる．480，740 eV の電子の磁力線に沿った強い flux が，ロケットの最高到達高度近傍で観測された．CHOY *et al.* (1971) が報告している数 keV 電子の磁力線に沿った flux は，ここで観測されなかった．この相違は彼等の実験は，auroral arc 中で行われたのに対して，我々の実験は diffuse aurora 中で行われたためであろう．数100 eV の電子の磁力線に沿った成分は，オーロラ中では WAHLEN and McDIARMID (1972) が，また，dayside cleft 中の実験では WINNINGHAM *et al.* (1977) が報告している．数100 eV の電子の energy flux は，diffuse aurora 中と cleft 中で同程度であるが，cleft 中の keV 電子の energy flux は，diffuse aurora 中のそれよりもはるかに小さい．観測された電子 flux は 1140 eV で， $7.3-8.3 \times 10^3 \text{ electrons/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{str} \cdot \text{eV}$ ，4.2 keV で $1.55-1.90 \times 10^3 \text{ electrons/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{str} \cdot \text{eV}$ であった．

図7に電子 flux の高度変化を示す．480 eV，740 eV ではロケットの最高到達高度付近で flux が增大しているが，他のエネルギーではそれほど顕著な flux の変化は見られない．しかし，上昇時の flux の方が下降時の flux よりも多い．同じロケットに搭載されてい

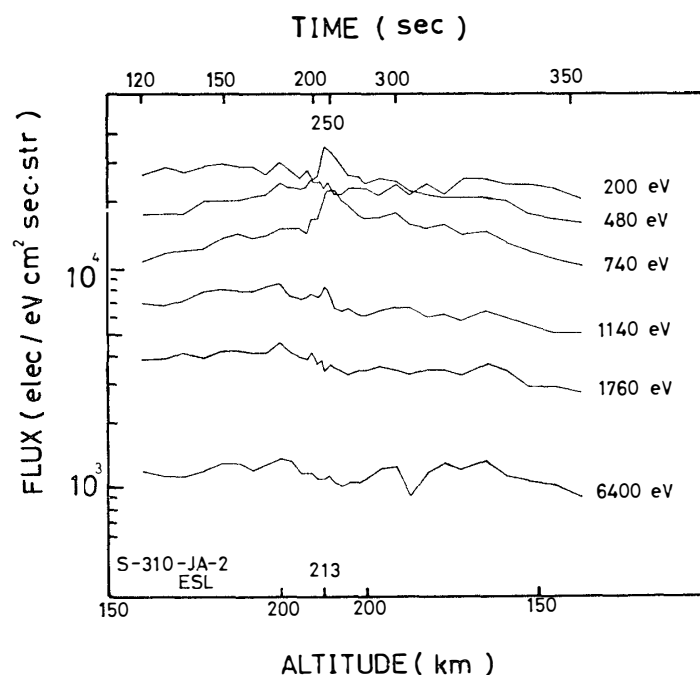


図7 電子フラックスの高度変化

Fig 7 Altitude dependencies of electron fluxes.

た 高エネルギー電子 ($E > 40 \text{ keV}$) や電子密度, 電子温度の 観測結果も 同じ傾向を示している.

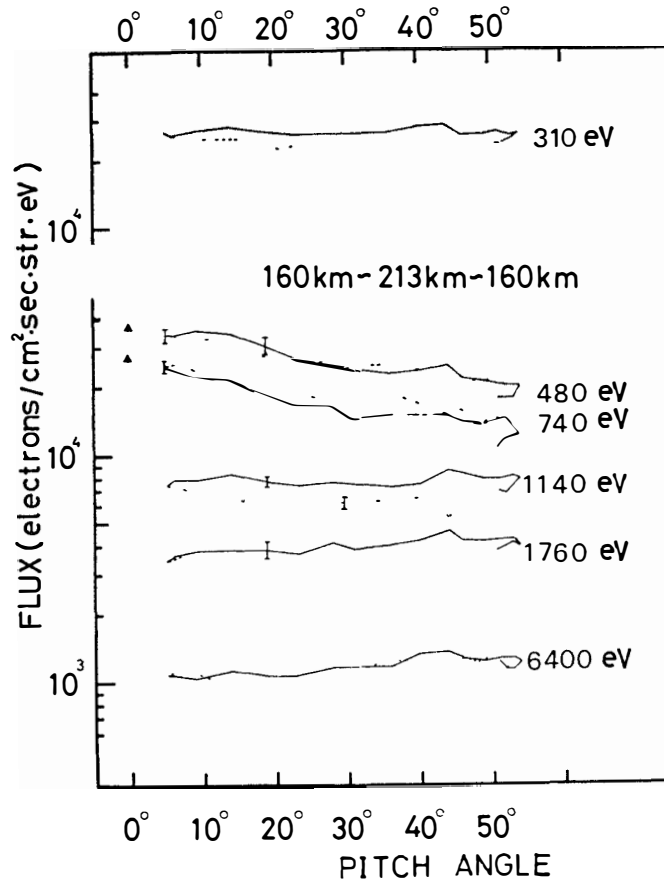


図 8 電子フラックスのピッチ角依存性. 実線は上昇時, 点線は下降時

Fig. 8. Pitch angle dependencies of electron fluxes (solid line: ascent, dotted line: descent).

高度変化はあまりなかったもので, 高度 160 km 以上の flux の変動が, ピッチ角によるものと仮定して書いたものが図 8 である. 最小のピッチ角 5° となるのは, 最高到達高度 213 km 近傍であった. 480 eV, 740 eV の flux は, ピッチ角が小さくなると少しずつ増大していくが, 他のエネルギーの flux は大した変化を示していない.

したがって, 観測された flux は, ピッチ角に依存する部分 (磁力線に沿った成分) と依存しない部分 (等方成分) とに分けられる. 等方成分をエネルギー E の power law, 磁力線方向の成分を Gauss 分布を用いて近似すると, 式 (1) のようになる.

$$\frac{dF}{dE} = AE^{-\alpha} + B \exp \left[-\frac{(E-E_0)^2}{2\sigma^2} \right] \text{electrons/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{str} \cdot \text{eV}, \quad (1)$$

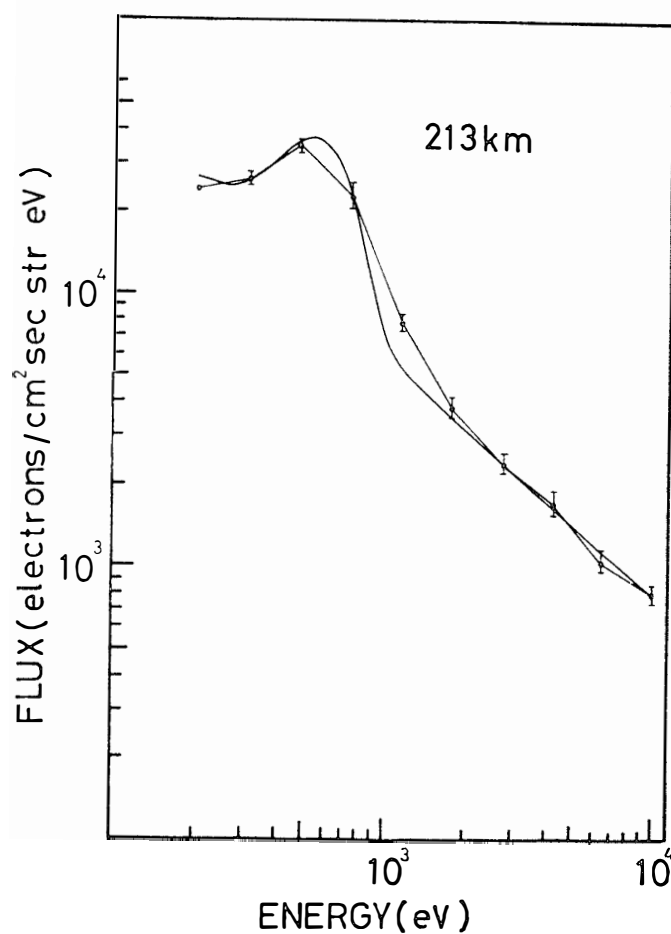


図 9 実測した電子のエネルギースペクトルと、ベキ分布とカウス分布で近似したエネルギースペクトル

Fig. 9 Measured electron energy spectrum and the spectrum fitted by power law distribution and Gaussian distribution.

ここに、 $A=2.4 \times 10^6$ $\alpha=0.87$

$B=2.8 \times 10^4$ $E_0=550 \text{ eV}$

$\sigma=170 \text{ eV}$ (ピッチ角 5° , 213 km).

式 (1) を観測された flux と一緒に示したのが図 9 で、1140 eV 付近以外は良く一致している。

ピッチ角 0° に外そうしたエネルギースペクトラムは、480 eV, 740 eV の flux は図 8 の \triangle 印の値を用い、他のエネルギーの flux は、ピッチ角 5° の値をそのまま 0° の値として用いて、図 10 に示されている。これをまた、 E の power law と Gauss 分布で近似すると、図 11 および式 (2) で表される。

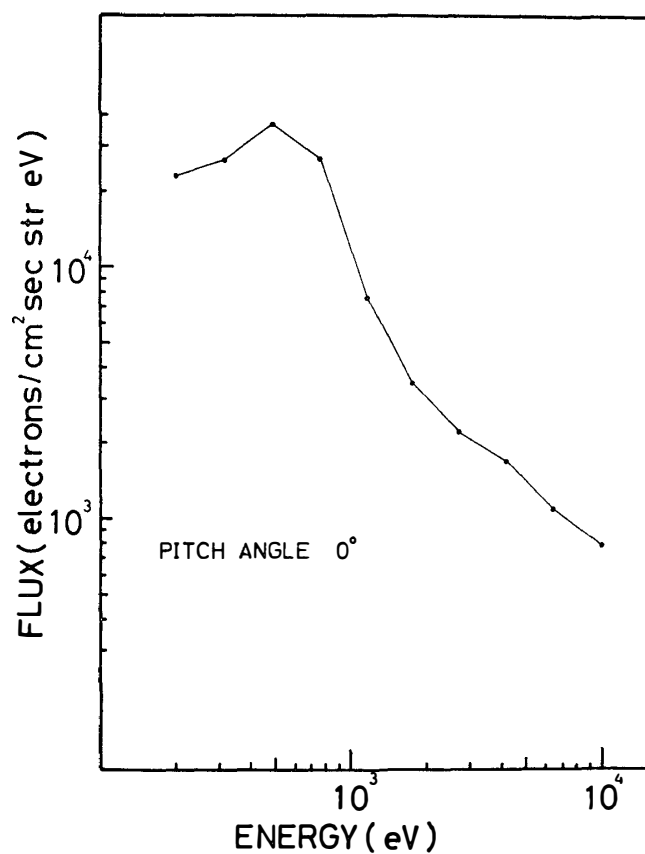


図 10 ピッチ角 0° に外そうした電子のエネルギースペクトル
 Fig. 10. Electron energy spectrum extended to pitch angle 0° .

$$\frac{dF}{dE} = AE^{-\alpha} + B \exp \left[-\frac{(E-E_0)^2}{2\sigma^2} \right] \text{electrons/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{str} \cdot \text{eV}, \quad (2)$$

ここに, $A = 1.6 \times 10^6$ $\alpha = 0.83$

$B = 3.0 \times 10^4$ $E_0 = 565 \text{ eV}$

$\sigma = 195 \text{ eV}$ (ピッチ角 0° , 213 km).

普通オーロラ中では E_0 は数 keV であるが, diffuse aurora 中なので $E_0 = 565 \text{ eV}$ という値もそれほどおかしい値ではない。

次に, 式 (2) の中で, 等方成分でないもの, すなわち, Gauss 分布の項から, 降下電子の速度分布を求めると, 図 12 のごとくなる。すなわち, $1.4 \times 10^7 \text{ m/sec}$ 程度の速度を持つ電子流が, 磁力線に沿って流れていることを示している。

次に, 降下電子によってどの程度の電流が運ばれているか計算する。降下電子の分布関数は,

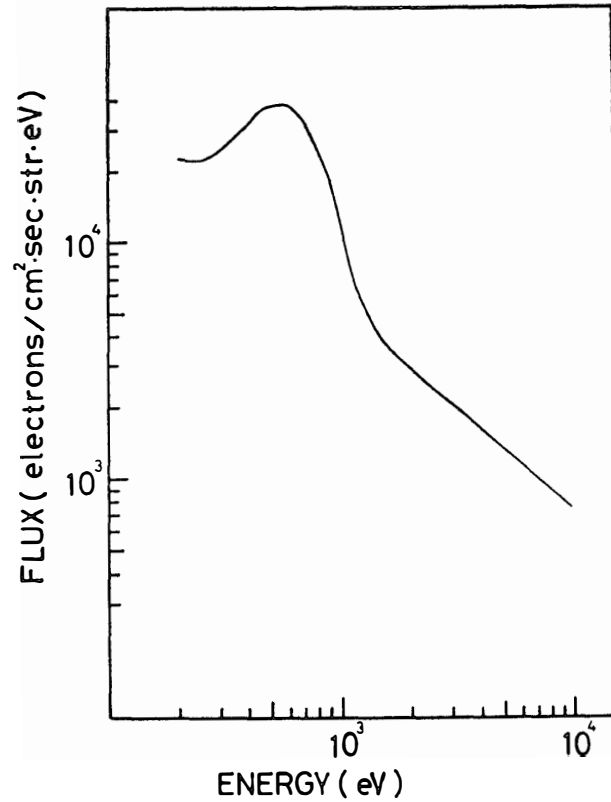


図 11 ベキ分布とガウス分布で近似したピッチ角 0° の電子のエネルギースペクトル

Fig. 11. Fitted electron energy spectrum fitted by power law and Gaussian distributions (pitch angle 0°).

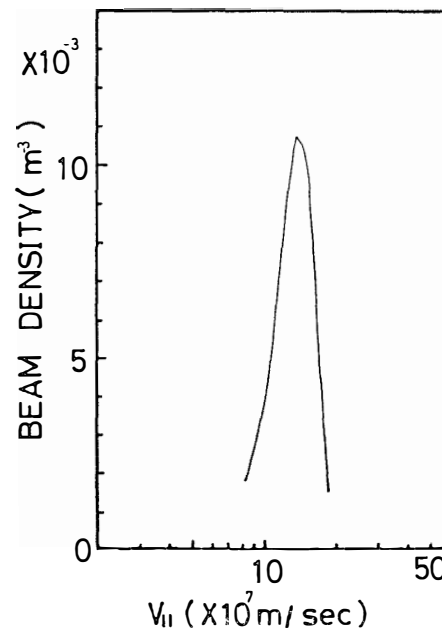


図 12 磁力線に沿う降下電子の速度分布

Fig. 12 Velocity distribution of field-aligned precipitating electrons.

$$\frac{dF}{dE} = B \exp \left[-\frac{(E-E_0)^2}{2\sigma^2} \right] \text{electrons/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{str} \cdot \text{eV}$$

であるから、電流密度 J は、

$$J = q \int \frac{dF}{dE} dE \cdot 2\pi = qB \int \exp \left[-\frac{(E-E_0)^2}{2\sigma^2} \right] 2\pi dE \quad (\text{ここに } q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C})$$

となる。ここで電流への寄与は $E=E_0$ 付近が大きいので、積分範囲を $-\infty$ から $+\infty$ までとると、

$$J = 2\pi qB \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[-\frac{(E-E_0)^2}{2\sigma^2} \right] dE = (2\pi)^{3/2} qB\sigma = 1.47 \times 10^{-7} \text{ A/m}^2$$

となる。

CHOY *et al.* (1971) による、数 keV 電子による磁力線に沿って流れる電流は $5 \times 10^{-7} \text{ A/m}^2$ で、また、WHALEN and McDIARMID (1972) の観測によると、auroral arc の北側の端で、550 eV で $2 \times 10^{-4} \text{ A/m}^2$ が観測されている。

一方、Triad 衛星の磁力計による磁力線に沿う電流の観測によると、約 10^{-6} A/m^2 (IJIJIMA and POTES, 1976; KAMIDE and AKASOFU, 1976) 程度とされている。しかし、磁力線に沿って流れる電流は、熱電子の寄与が大きいので、565 eV を中心とした Gauss 分布から導かれた $1.47 \times 10^{-7} \text{ A/m}^2$ という値は、妥当であると考えられる。

4. 結 論

Diffuse aurora 中の降下電子のエネルギースペクトルが得られた。また、磁力線に沿った電子 flux が数 100 eV のエネルギーで観測された。このエネルギーは、cleft での磁力線に沿った電子の侵入と同程度のエネルギーである。また、電子 flux のエネルギースペクトルは、power law と Gauss 分布で近似され、それから計算した 565 eV 近傍の磁力線に沿って降下してくる電子の電流密度は、 $1.47 \times 10^{-7} \text{ A/m}^2$ となった。

謝 辞

このロケット実験は、第18次南極観測隊によってなされたものである。著者は南極でこの実験を行う機会を与えて下さった国立極地研究所および、この実験を実際に組立て、打ち上げ、データを取得してきて下さった観測隊員に感謝の意を表する。

文 献

- CHOY, L. W., ARNOLDY, R. L., POTTER, W., KINTER, P. and CAHILL, L. J., Jr (1971) Field-aligned particle currents near an auroral arc. *J. Geophys. Res.*, **76**, 8279–8298.
- IJIMA, T. and POTEMRA, T. A. (1976) Field-aligned currents in the dayside cusp observed by Triad. *J. Geophys. Res.*, **81**, 5971–5979.
- KAMIDE, Y. and AKASOFU, S.-I. (1976): The location of the field-aligned currents with respect to discrete auroral arc. *J. Geophys. Res.*, **81**, 3999–4003.
- WHALEN, B. A. and McDIARMID, J. B. (1972): Observations of magnetic-field-aligned auroral-electron precipitation. *J. Geophys. Res.*, **77**, 191–202.
- WINNINGHAM, J. D., SPEISER, T. W., HONES, E. W., Jr, JEFFRIES, R. A., ROACH, W. H., EVANS, D. S. and STENBAEK-NIELSEN, H. C. (1977) Rocket-borne measurements of the dayside cleft plasma: The tordo experiments. *J. Geophys. Res.*, **82**, 1876–1888.

(1978年 6 月10日受理)