

南極ロケットによるオーロラ帯降下電子の観測

奥谷晶子*・和田雅美*・竹内 一*・小玉正弘*・今井 喬*

Observations of Auroral-Zone Precipitating Electrons by the Antarctic Rockets

Shoko OKUTANI*, Masami WADA*, Hajime TAKEUCHI*,
Masahiro KODAMA* and Takashi IMAI*

Abstract: During one year from January 1976, five sounding rockets carrying the electron detector were launched from Syowa Station, Antarctica. One of them was made on a geomagnetically quiet time, while the others all encountered a certain degree of auroral disturbance. The rocket-borne detector consists of both proportional and plastic scintillation counters and can measure high energy electrons greater than 40 keV. Preliminary results thereby obtained are presented, giving an account of characteristics of vertical profile and pitch angle distribution of energetic electrons during auroral disturbances, compared with those for the quiet time.

要旨. 1976年1月からの1年間に、オーロラ電子検出器搭載の観測ロケット5台が、昭和基地から打ち上げられた。うち1台は静穏日に、残り4台はオーロラ活動時に行われた。電子検出器は、比例計数管とプラスチックシンチレーション計数管である。測定の下限エネルギーは40 keVである。ここでは、オーロラ出現時における高速電子の高度分布、ピッチ角分布について速報する。そしてすでに報告した静穏時における特性と比較する。

1. はじめに

オーロラに伴う降下電子の物理的諸性質を詳しく調べることは、その加速機構や加速領域、ひいてはオーロラのメカニズムを探る上で、不可欠な研究手段の一つである。特に、最近は人工衛星による観測技術の進展に伴って、数 eV から数 keV の低エネルギー電子に関する情報が集積されつつある（たとえば、LUI *et al.*, 1977）。これらに対し、10 keV 以上の高エネルギー電子は、磁気圏後部磁気中性点あたりでの粒子加速に密接な関係を持つと考えられるので、低エネルギー部分と同様に、その観測は重要である。特にその絶対

* 理化学研究所宇宙線研究室。The Institute of Physical and Chemical Research, 7-13, Kaga-1 chome, Itabashi-ku, Tokyo 173

表 1 高エネルギー電子観測ロケット

Table 1. List of sounding rockets for measurement of energetic electrons.

観測隊	ロケット号機	打ち上げ日	発射時刻 (45° EMT)	到達高度	同時搭載計器
17次	S-210JA-20	June 25, 1976	0240	118 km	PWL, PWH, NEL.TEL, GA
	S-210JA-21	July 26, 1976	0323	116	PWL, PWH, NEL.TEL, GA
	S-210JA-22	Jan 26, 1976	0220	119	NNP-NO, NEL.TEL, GA
	S-210JA-23	Sep. 13, 1976	0731	120	NNP-NO, NEL.TEL, GA
18次	S-310JA-2	Feb. 10, 1977	0322	212	PWL, PFX, PWH, NEL.TEL, ESL, GA
	S-310JA-3	July 26, 1977	1835	222	PWL, PWN, NEL TEL, MGF, MS

ESL: 低エネルギー電子, GA: 地磁気姿勢計, MGF: 磁場, MS: 月センサー,
NEL TEL: 電子密度, 温度, NNP-NO: 一酸化窒素, PFX: VLF ポインティングフラックス,
PWH: HF帯プラズマ波, PWL: VLF スペクトル, PWN: 電子プラズマ波, イオン音波

強度, エネルギースペクトル, ピッチ角分布ならびにそれらの時間的変動は, オーロラのダイナミクスと直結する物理量である.

昭和基地では, 1976年1月からロケットによる高速電子の観測が行われ, 現在までに表1に示すような打ち上げを終了している. 最初に行われた22号機(第17次)は, オーロラの出現しない静穏時に相当するので, >40 keV 電子の定常状態における諸性質が明らかになった (KODAMA *et al.*, 1978). すなわち, ピッチ角分布は高度と共に鋭くなり, 電子の大部分は磁力線に直角に巻きついていること, エネルギースペクトルはピッチ角に依存し, 角度が小さいほどソフトになること, 100 keV あたりから急激に下方に折れ曲ること等である. これらの結果から, ピッチ角やエネルギー分解能をさらに向上させた観測が必要であると判断され, 第19次のロケット(S-310JA-6)に生かされた. 第18次では, 非荷電粒子と電子との分離を正確にするため, 同一規格の検出器を2組用意し, 一方を永久磁石を使って低エネルギー荷電粒子を除去した.

本報告では, オーロラ出現中に打ち上げられたS-210JA-20, 21, 23号機と, S-310JA-2号機による観測結果の概要について速報するが, 主として20, 21号機によるピッチ角分布とオーロラの2つのタイプ—diffuse型とdiscrete型との関係について述べる.

2. 測定装置

電子検出器としては比例計数管(PC: Proportional Counter)とプラスチックシンチレーション計数管(SC: Scintillation Counter)の2種類が用意された. 前者は大きさ $6\phi \times 16.5$ mm で2気圧のPRガスが封入された. 電子入射口として, 1.5 mg/cm² 厚のマイ

カ窓1個が、開口角 $\pm 20^\circ$ のコリメータ付で設けてある。その幾何学的断面積は $0.028 \text{ cm}^2 \text{ str}$ である。後者は 1.7 mg/cm^2 のアルミ箔で遮蔽された円板型プラスチックシンチレータで、4個の入射窓の全幾何学的断面積は、 $0.019 \times 4 = 0.076 \text{ cm}^2 \text{ str}$ である。両検出

表2 電子検出器の測定エネルギー範囲と各号機別取付角度
Table 2. Specifications of rocket-borne electron detectors.

測定器 チャンネル エネルギー*	比例計数管			プラスチックシンチレーション計数管			データ チャンネル 数
	PC-L	PC-H	PC-BG	SC-L	SC-H	SC-BG	
	keV 40-60	keV 60-110	keV >110	keV 60-80	keV 80-170	keV >170	
ロケット号機							
S-210JA-20	90°				90°		5
S-210JA-21	90°				90°		5
S-210JA-22	45°						7
	90°				90°		
S-210JA-23	45°						7
	90°				90°		
S-310JA-2	65°				65°		11
	65°M				65°M		
S-310JA-3	65°				65°		11
	65°M				65°M		

* 検出器のディスクリレベル設定値 M: 永久磁石つき

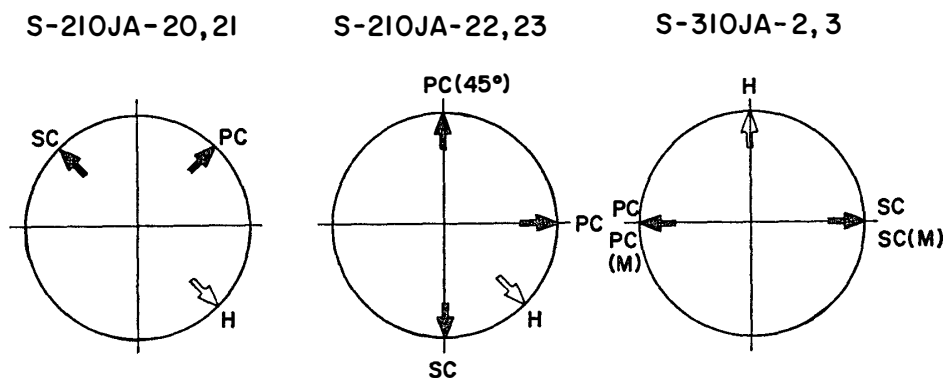


図1 ロケット搭載用高速電子検出器の配置 (上から見た図). HはGAセンサー方位
Fig. 1. Bird's view diagram of arrangement of rocket-borne electron detectors.

器の測定エネルギー範囲および各号機毎の配置仕様は、表 2 と図 1 に示される。1 機当たり 2 個ないし 4 個の検出器が搭載されたが、図 1 に見るように、310 号機以外はお互いに直角に取付けられた。搭載場所は 210 号機ではノーズコーン内、310 号機では胴体内部である。各 4 チャンネルのデータ伝送は次のように行われた。SC-BG と PC-BG は、宇宙線によるバックグラウンドなので、計数量はあまり多くないことと、短周期変動も少ないと予測されたので、1 フレーム（約 1 秒）の間の積算値を出した。また、実験中のモニターの必要性から、一番変動が大きいと思われる低エネルギー電子のデータを、1 パルスが 1 ステップの電圧波形となるように変換し出力した。210 号機の場合、それ以外の 4 ないし 6 チャンネルからのデータが、50 ms 毎に集積され、その 4 けた表示の各数字がアナログ量に変換された後、次の 50 ms の間に順次送り出された。したがって、ロケットのスピンの周期が 2 rps なら、各データは約 36° の角度分解能を持つ。実際には解析方法の工夫により約 5° の分解能を得た（和田他，1979）。310 号機の場合も同様に、50 ms 毎に送り出された。ただし、テレメータが 2 波利用できたので、4 チャンネルと 6 チャンネルがそれぞれに割り当てられた。なお、スピン周期は約 1 rps なので、210 号機に比べ角度分解能は 2 倍向上した。

3. 観測結果

まず、各号機の打ち上げ時におけるオーロラ活動度の概要を知るため、SC による 60-80 keV チャンネル (SC-L) の 5 秒計数値の高度変化を図 2 に示した。静穏時の 22 号機に比べ、他はいずれも 100 km 以上の高度で、1 けたないし 2 けた多い強度を示している。しかし、100 km 以下の高度で逆に 22 号機の方が多なのは、SC 検出器が電子の他に、カンマ線に対して若干の感度を持つため、その寄与があるのではないかと考えられるが、結論はまだ得られていない。低高度で 310 号機の計数が 210 号機より多いのは、検出器用の窓が最初から開いている事によるバックグラウンドの寄与である。

3.1. タイムプロファイル

受信記録用磁気テープのデータを A/D 変換した後、50 ms 毎の計数値の全生データをそのまま時間に対しプロットした S-210 JA-20 号機の一部の例が図 3 に示される。この一連の操作は、すべて計算機処理によった（和田他，1979）。この図からは、スピン周期変化の存在がはっきり分かるだけでなく、その波形や振幅の変動までも明らかに識別でき

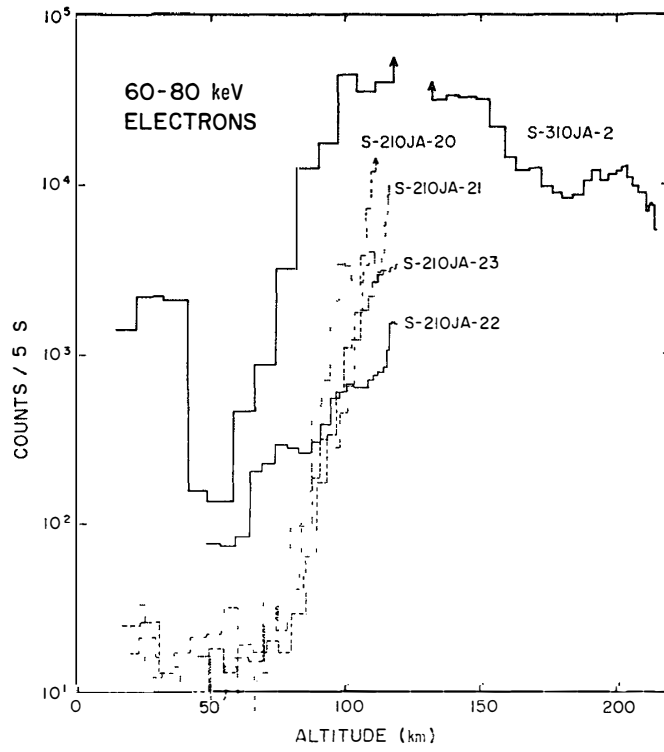


図 2 60-80 keV 電子のロケット号機別高度変化

Fig. 2. Altitude variations of 60-80 keV electron fluxes from several rocket flights

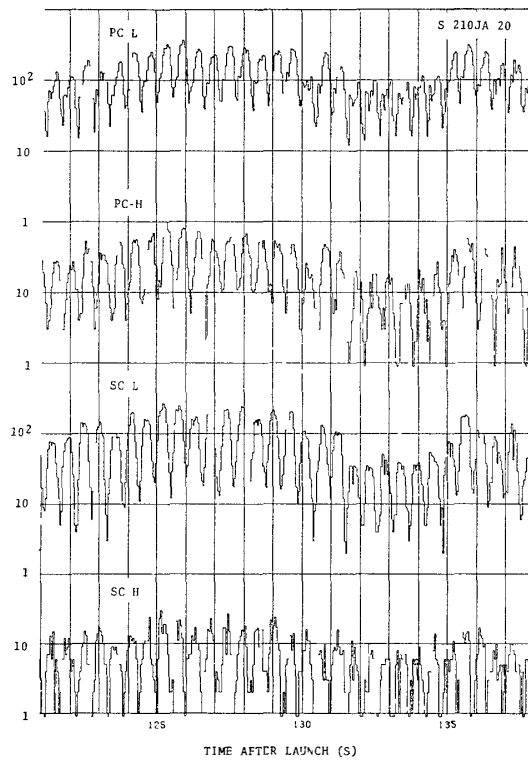


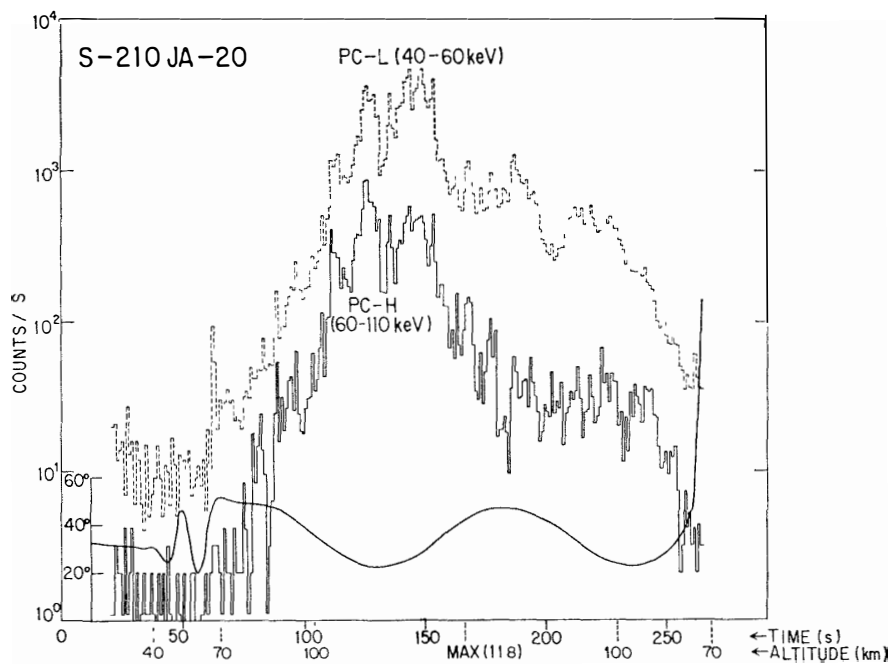
図 3 電子強度のタイムプロファイル, S-210JA-20 号機の例

Fig 3 Intensity-time profiles of auroral electrons at S-210JA-20 rocket flight.

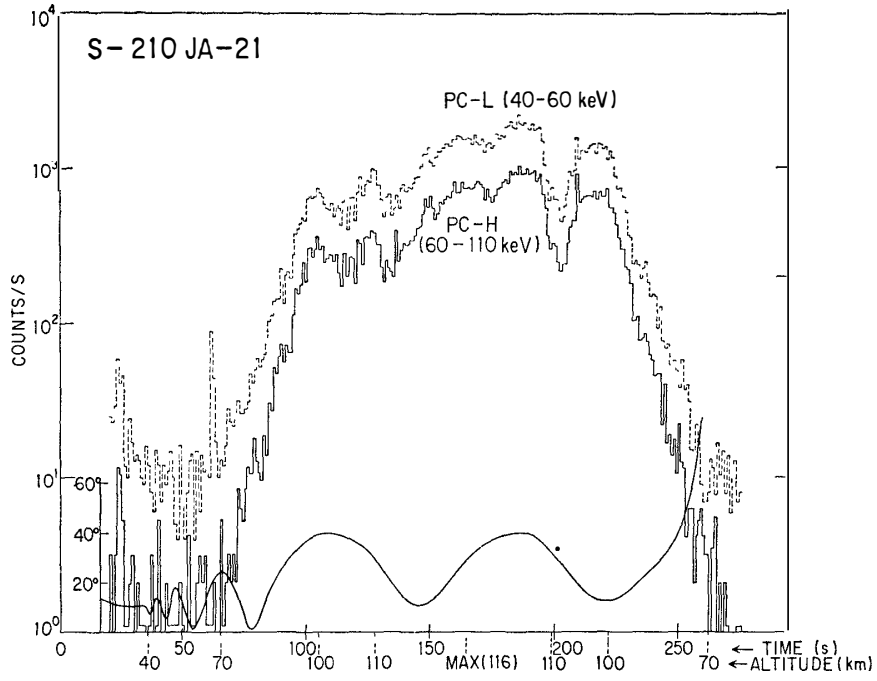
る。特定のパターンがある期間継続する事から、それが統計的なふらつきではなく、十分物理的な意味を持った変化であるといえる。これについては後述する。

3.2. 高度変化

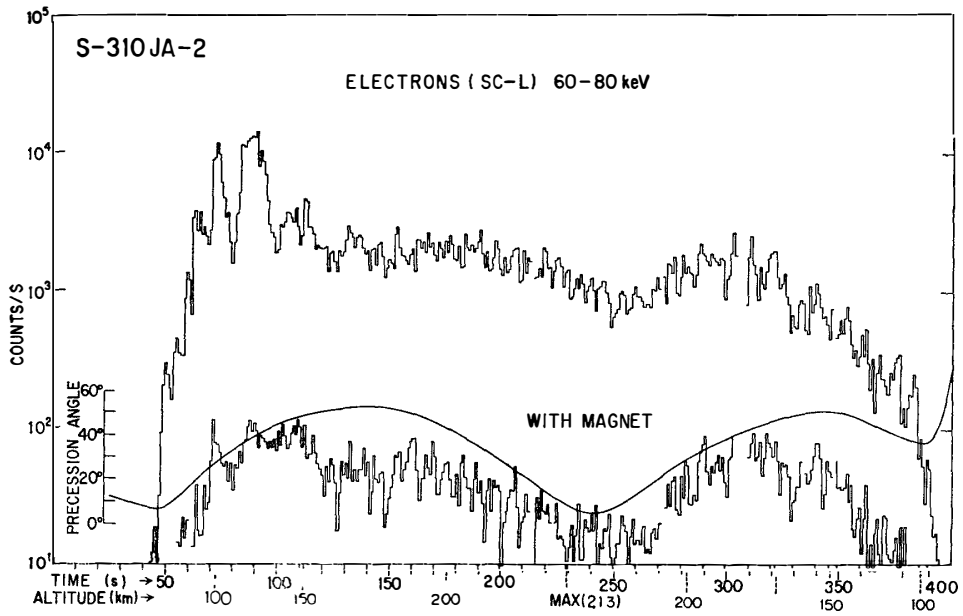
図4 a, b に S-210 JA-20, 21号機による高度変化を示した。それぞれ PC-L と PC-H の2チャンネルからの1秒値が、時間と高度に対してプロットしてある。20号機では全体に大きな変動を伴いながら最高高度に達する前に、最大強度となるのに対し、21号機の変動率は比較的小さく、最高高度通過後のロケット下降時に最大となっている。バックグラウンドに対するピーク値の比率は、それぞれ約500倍と200倍である。磁力線に対するロケットの姿勢の電子計数率に対する影響は、スピン周期が1秒以下なので、ピッチ角分布が平均化され、図4 a, b の1秒値プロットの高度変化には現れてこない。ただし、数秒から数10秒単位の準周期的変動には(特に20号機で顕著)、ピッチ角分布が関係していることが後で示される。310号機の1例は図4 c に示される。到達高度が100 km 以上で高いことと、スピン周期が長く、約1 rps であることが210号機と異なる。また、数100 keV 以下の低エネルギー電子を排除して、比較用データを得る目的で、別の1組の検出器には1200 Gaussの永久磁石が付加された。図4 c には SC-L チャンネルだけだが、磁石有無の結果が示される。全体に見られる10秒前後の周期変化は、スピン周期が正確に1秒でない



(a) S-210JA-20



(b) S-210JA-21



(c) S-310JA-2

図 4 電子強度 1 秒計数値の時間と高度による変化

Fig. 4. 1-s counts of electrons as a function of time and altitude.

ために現れた疑似的なもので特に意味はない。

3.3. ピッチ角分布

入射電子のピッチ角は、検出器の取付角度、ロケットのプレセッション角度とスピン周期が与えられれば一義的に決まる。50 ms 時間単位毎に計算されたピッチ角とそれに対する計数值をプロットすればピッチ角分布が得られる。図5 a, b にその1例を示した。ただし、ここでは、図3に基づき、全体を2つの型、すなわち precipitated 型と trapped 型とに分類した。1スピン毎に2個の山が現れるが、その波形が sin カーブに近いもの（たとえば、+124 s ~ +130 s）を前者に、波形に高周波成分の含まれるもの（たとえば、+132 s ~ +135 s）を後者とした。ピッチ角 90° 近くにピークを示した22号機の分布に比べると、じょう乱時の20, 21号機は共により小さいピッチ角の方にずれており、特に、precipitated 型で顕著である。このことは、じょう乱時には磁力線に沿った粒子成分が増えることを意味する。上記2個の型は、ある期間継続した後、かなり突然に他の型に移行

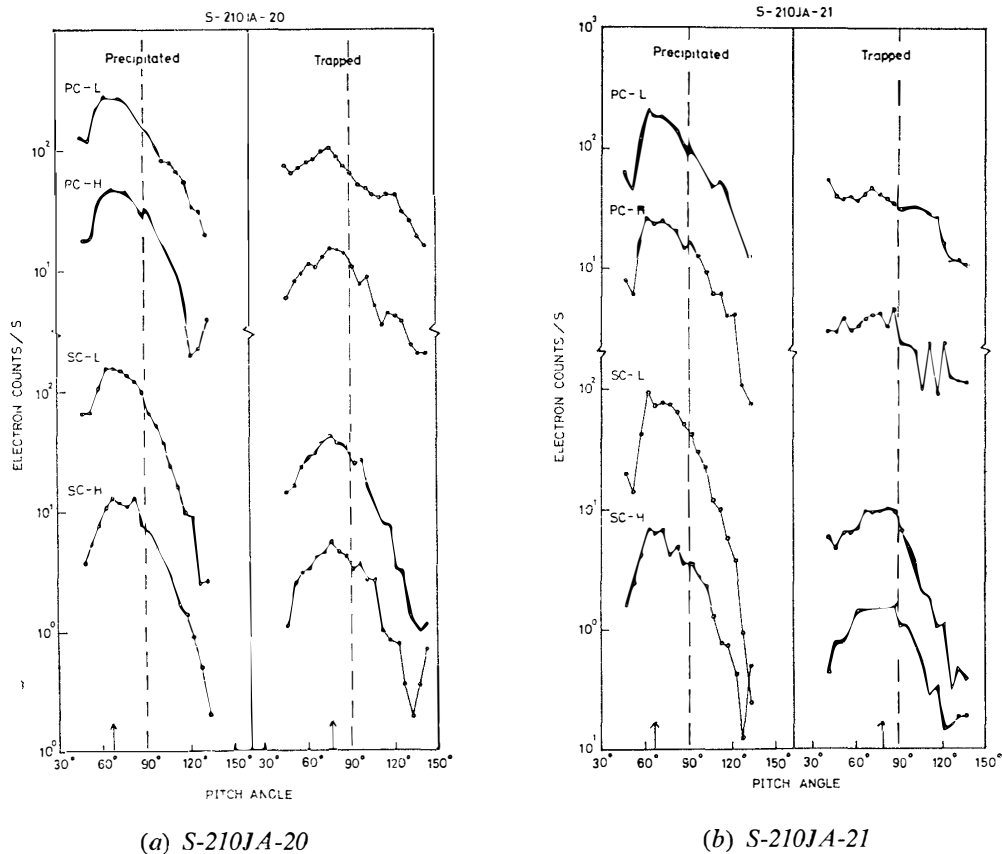
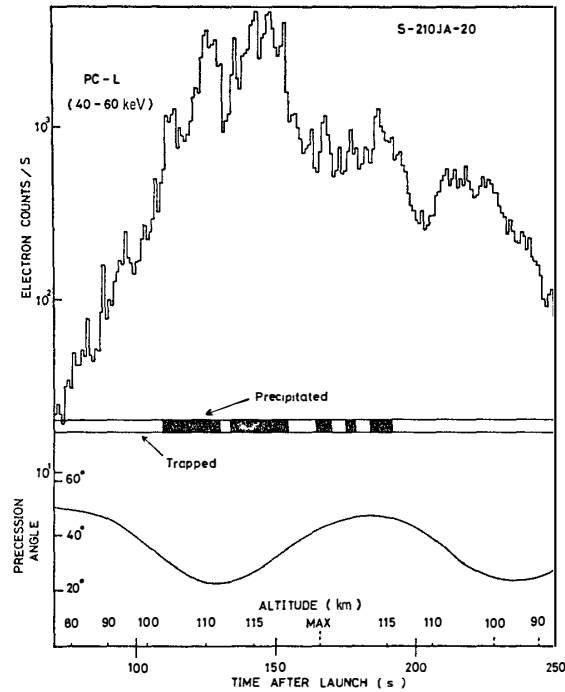
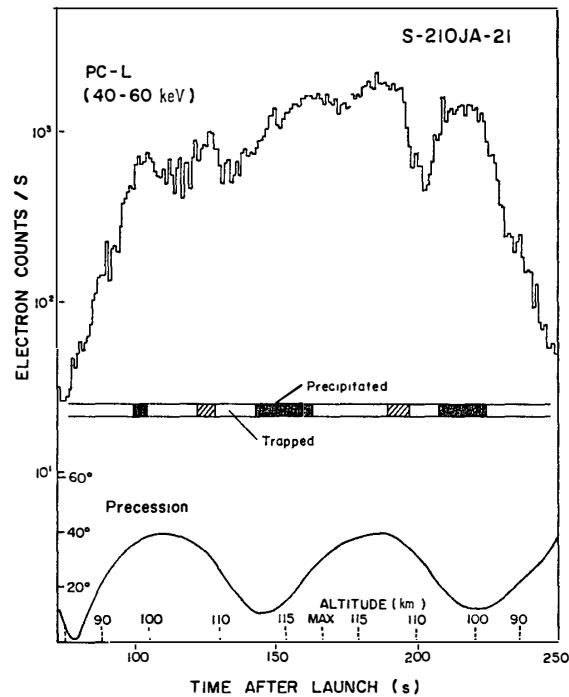


図5 オーロラ電子のピッチ角分布

Fig 5 Pitch angle distributions of auroral electrons



(a) S-210JA-20

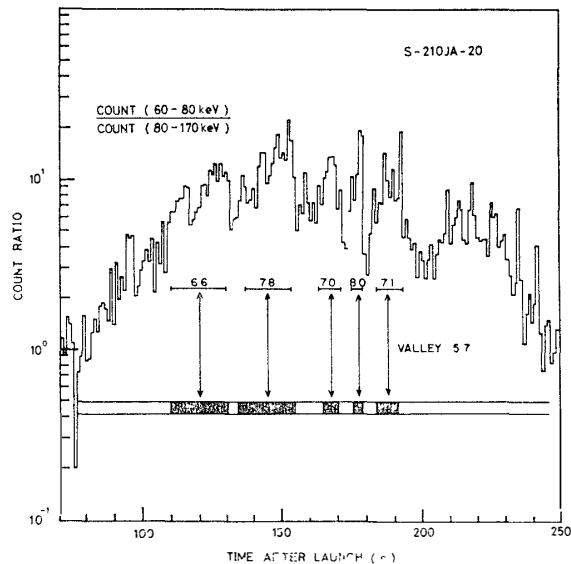


(b) S-210JA-21

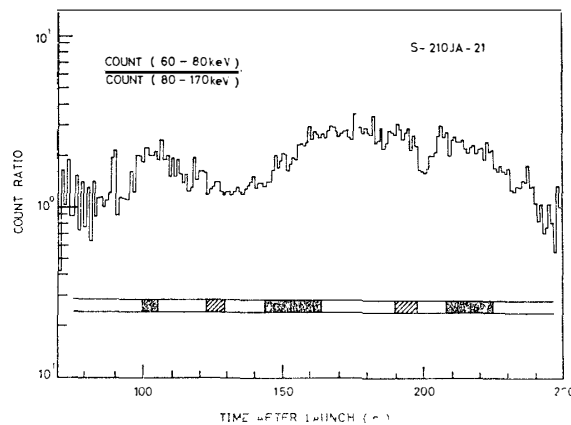
図 6 オーロラ電子の計数変化と2つのピッチ角分布型との関係, 下のカーブはプレセッションの変化

Fig. 6. Time variation of auroral electron fluxes and two types of pitch angle distributions.

する場合が多い。しかもその交代はフラックスの増減と関係がある。その様子を図 6 a, b に示した。20号機の例では, precipitated 型でフラックス増大, trapped 型で減少となる傾向にある。ピッチ角の小さい成分が増えることは, 磁気圏からの新たな粒子の流入と考えられるので, その時フラックス増大となるのはもっともらしい。しかし, 21号機の例ではこの関係はそれほど明瞭でない。これはオーロラの型と関連がありそうである。全天カメラ写真によると, 20号機では多数のオーロラアークの存在する discrete 型, 21号機では diffuse 型であったと判断される (DEEHR *et al*, 1976)。したがって前者では, ロケッ



(a) S-210JA-20



(b) S-210JA-21

図 7 オーロラ電子の異なる 2 チャンネル間の計数比とピッチ角分布型との関係, 数字はエネルギースペクトルのベキ指数

Fig. 7 Count ratio of auroral electrons between two different energy channels and two types of pitch angle distributions.

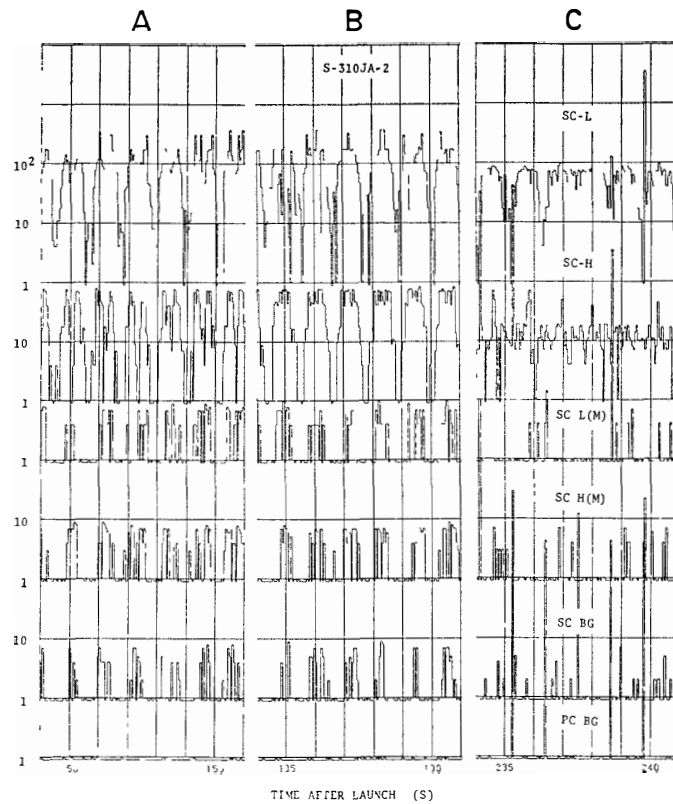


図 8 電子強度のタイムプロファイル, S-310JA-2号機の例, 異なるプレセッション角度. (A)~ 50° , (B)~ 30° , (C)~ 10° に対するスピン周期変化の差に注意

Fig. 8. Intensity-time profiles of auroral electrons at S-310JA-2 rocket flight. Precession angles of rocket are roughly 50° , 30° , and 10° for (A), (B), and (C), respectively.

トが細かいアークまたはその近くを逐次横切って行き, それに応じて precipitated と trapped の 2 個の型が交互に現れたと解釈される. その際, 新しく流入した電子は低エネルギー部分が多いことが, 異なるエネルギーチャンネル同志の比 (SC-L/SC-H) から分かる. 図 7 a は 20 号機の例で, ピッチ角分布が, precipitated 型の場合にこの比が大きくなる. エネルギースペクトルにベキ関数を仮定して求めた指数が図に示してあるが, trapped 型の平均値 5.7 に対し, precipitated 型では 6.6~8.0 の範囲にある. 図 7 b の 21 号機では, 対応するようなスペクトル変化は見られない. 310 号機の場合については, 図 4 c に見るように, 全体の強度変動はプレセッション角の変化とかなり良い相関にある. 特に磁場によるカットオフエネルギー (数 100 keV) 以上の粒子にも, それが見られることに注意したい. プレセッション角の大小は, 検出器の探査視野範囲の広さに対応する. 図 8 の生記録によると, プレセッション角の大小に応じて, スピン周期変化に著しい差を認めることができる. もし 90° 方向にピークを持つようなピッチ角分布を仮定するとこの現象を説

明できるが、いずれピッチ角分布の計算結果を得た上でくわしく議論したい。

4. 討 論

22号機の観測によれば、静穏時における電子の絶対強度は $\sim 10^3/\text{cm}^2 \cdot \text{str} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ である。これがじょう乱時にいくらになるかは、各ロケット搭載の検出器の仕様が同一であるので、近似的には特定チャンネルのフラックス比から推定できる。表3は SC-L チャンネルの比である。正確にはエネルギースペクトルを考慮すべきであるが、オーロラ時にはフラックスは数倍から数10倍に増大した。

表3 オーロラ静穏時に対するじょう乱時の 60-80 keV 電子の計数比
Table 3 Count ratio of 60-80 keV electrons between auroral disturbed and quiet times.

	S-210JA-20	S-210JA-21	S-210JA-23	S-310JA-2
カウント比	12.5	5	2	50

ピッチ角分布については、じょう乱時では静穏時に比べより小さいピッチ角成分の寄与が大きくなるが、オーロラの diffuse 型と discrete 型とでは大差ない。分布のピークは precipitated 型で約 65° 、trapped 型で約 80° にある。一般に、discrete 型オーロラは 90° にピークを持つ trapped 型と解釈されている(福西, 1977)。今回の観測ではピッチ角分布のピークは 90° 以下にあり、precipitated 電子の寄与も現れている。これは210号機の打ち上げ高度がオーロラ帯中心部まで到達せず、オーロラ底部に降下してくる散乱電子を捕捉したためではないかと思われる。Diffuse 型オーロラでは、ピッチ角散乱が主要な機構であるとされているが、図3の trapped 型期間にそれらしい形跡が見られる。

エネルギースペクトルのベキ指数は、静穏時の4~5.7に比べ、20号機の場合は5.7~8と大きい。ピッチ角依存性を考慮すると、両者の差はさらに大きくなる。つまり、オーロラ出現時には、降下電子のピッチ角は小さくなり、絶対強度は増大し、エネルギースペクトルはソフトになると結論される。

以上本報告で述べた結果は、テレメータ受信用磁気テープからのデータ再生に基づくが、その復調過程において一部技術的に不備な点があり、満足すべき S/N 比が得られなかった。このため定量的なくわしい議論のために310号機の解析も含めて、再復調の磁気テープによるデータ処理を進めている。この意味から、本報告は序報的なものであることを断っておきたい。

終りに、南極でのロケット観測に従事された第17次隊、第18次隊各隊員諸兄のご努力に対し深く感謝いたします。

文 献

福西 浩 (1977) オーロラフレアにおける粒子入射 IMF シンポジウム報告, 東京大学宇宙航空研究所, 181-188.

KODAMA, M., IMAI, T., TAKEUCHI, H. and WADA, M. (1978): Rocket measurements of auroral-zone energetic electrons at Syowa Station, Antarctica I. Characteristics of electrons under no geomagnetic disturbance. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 9, 11-23.

DEEHR, C. S., WINNINGHAM, J. D., YASUHARA, F. and AKASOFU, S.-I. (1976): Simultaneous observations of discrete and diffuse auroras by the Isis 2 satellite and airborne instruments. J. Geophys. Res., 81, 5527-5535.

LUI, A. T. Y., VENKATESAN, D., ANGER, C. D., AKASOFU, S.-I., HEIKKILA, W. J., WINNINGHAM, J. D. and BURROWS, J. R. (1977): Simultaneous observations of particle precipitations and auroral emissions by the ISIS 2 satellite in the 19-24 MLT sector. J. Geophys. Res., 82, 2210-2226.

和田雅美・奥谷晶子・今井 喬・竹内 一・小玉正弘 (1979) オーロラ電子観測資料処理. 南極資料, 63, 53-59.

(1978年6月10日受理)