

## ロケット高度における $>40$ keV オーロラ電子のピッチ角分布

小玉正弘\*・奥谷晶子\*・和田雅美\*・今井 喬\*・竹内 一\*

### Pitch Angle Distribution of $>40$ keV Auroral Electrons Observed at Rocket Altitudes

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

**Abstract:** Pitch angle distributions of auroral electrons with energies greater than 40 keV measured by three sounding rockets (S-210JA-20, -21 and S-310JA-2), which were launched from Syowa Station, Antarctica, during moderate disturbances of auroral activity, are presented. The observations were carried out in the altitude range up to 220 km near magnetic midnight. It is shown that pitch angle distributions above 110 km depend upon both energy and altitude. This is in contrast with pitch angle distributions measured at the quiet time or in the northern polar region, where the trapped type distribution with a peak at  $90^\circ$  pitch angle is observed regardless of energy and altitude. A possible influence of auroral X-rays on the observation results is discussed in connection with pitch angle.

**要旨:** オーロラ出現中に昭和基地から打ち上げられた S-210JA-20, -21, S-310JA-2 の 3 機のロケット観測により,  $>40$  keV 電子のピッチ角分布とエネルギーおよび高度との関係を調べた。その結果, ピッチ角分布はどちらにも依存して変化することが分かったが, これは静穏時や北半球での観測結果とは異なる。オーロラ X 線の寄与についても議論する。

### 1. ま え が き

昭和基地で 1976 年 1 月から 1977 年 7 月までに, 40 keV 以上の高速電子検出器を搭載した観測ロケットが 6 機打ち上げられた。そのうち, S-210JA-22 号機 (以下 22 号機と略記) の観測結果から, 静穏時における高速電子のピッチ角分布, エネルギースペクトルが得られた (KODAMA *et al.*, 1978)。また, S-210JA-20 (20 号機) および S-210JA-21 (21 号機) 号機についての序報 (奥谷他, 1979) では, じょう乱時におけるその特性, 特にオーロラの 2 つのタイプ discrete 型と diffuse 型とに対応した計数の変化率の違いが見出された。すなわ

\* 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.

ち、静穏時の 22 号機は全般に変動が少なく、ピッチ角分布のピークは  $90^\circ$  近くにある trapped 型であり、エネルギースペクトルは hard (べき指数は 4-5) である。これに対してじょう乱時の 20 号機、21 号機では、それぞれ激しい変動と regular な変動が入り混り、分布のピークはいずれも  $\sim 60^\circ$  と小さくなって precipitate 型つまり磁力線に沿った粒子成分の増加を示した。同時に 20 号機のエネルギースペクトルは soft になる (べき指数は 6-8) ことを述べた。

ここでは 20 号機、21 号機について 50 msec 毎に計算された各検出器の磁力線からの角度を用い、ピッチ角分布の高度、エネルギーに対する変化を調べた。さらに、同じくじょう乱時に打ち上げられた S-310JA-2 号機 (2 号機) による観測についても報告する。

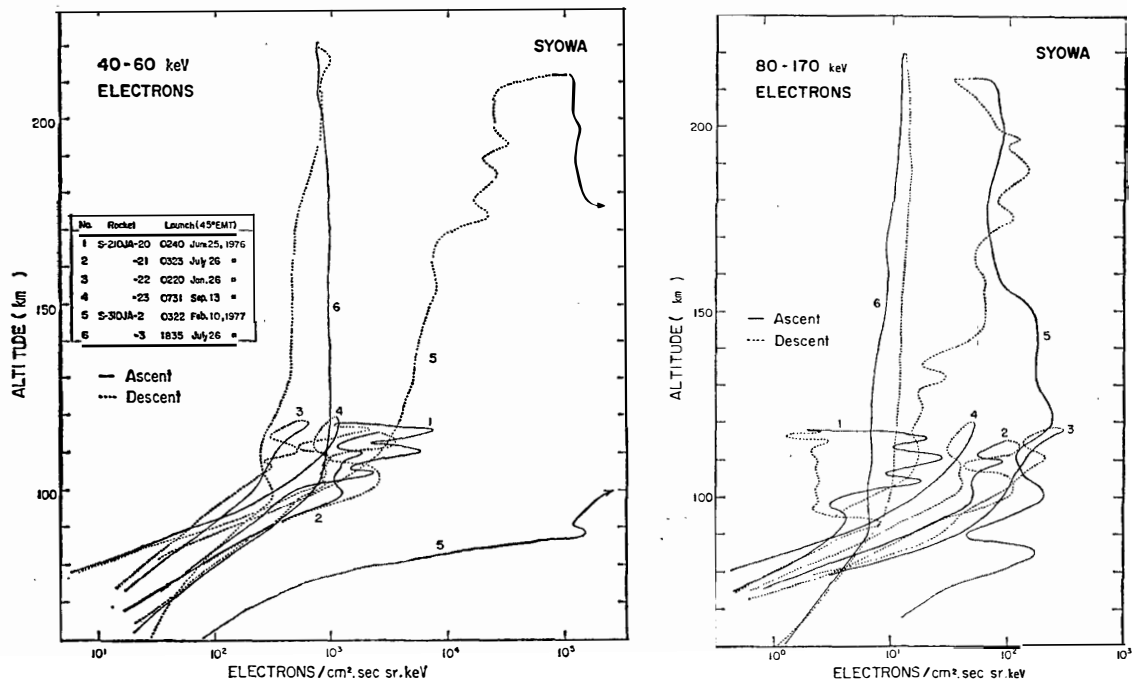
## 2. 観 測 結 果

表 1 の  $\Delta H$ ,  $\Sigma Kp$ , 30-MHz riometer 等から、22 号機、23 号機、3 号機が静穏時、他はじょう乱時に相当することが分かる。図 1 に全 6 機についての electron flux の高度変化を示した。図 1a は比例計数管による 40-60 keV エネルギー領域、図 1b はシンチレーションカウンタによる 80-170 keV エネルギー領域の結果である。S-210 シリーズ (No. 1-4) は約 120 km まで上昇 (実線) 後下降 (点線) した。多少の変動はあるが全体として高度の上昇と共に flux の増加、下降と共に減少の傾向が見られる。S-310 シリーズ (No. 5, 6) は約 220 km まで到達した。100 km まではいずれも高度に応じた増加、減少が見られる。100-200 km の間、3 号機 (No. 6) の flux はほぼ一定であるが、2 号機 (No. 5) の低エネルギー帯の flux は上昇時 100-180 km 間で著しく増大し検出器が窒息した。この増加と下降時 210-110 km 間に見られるゆるやかな減少 (図 1a, No. 5 の点線)、およひ中間エネルギー帯 (図

表 1 40 keV 以上の高速電子のロケット観測  
Table 1 List of Antarctic rockets for  $> 40$  keV electron measurements

Rocket No	Launch	$\Delta H$	$\Sigma Kp$	30-MHz Riometer	50-keV Electron flux*
S-210JA-20	June 25, 1976	200 $\uparrow$	4 $+$	0.1 dB	7
-21	July 26, 1976	50	3 $-$	0.1	10
-22	Jan 26, 1976	0	1 $-$	0.0	0.4
-23	Sep 13, 1976	0	1 $+$	0.0	1.6
S-310JA-2	Feb 10, 1977	500	3 $+$	0.7	85
-3	July 26, 1977	0	1 $+$	0.0	0.6

\* Units:  $10^3$  electrons/cm<sup>2</sup> sec str keV



a. 40-60 keV electron

b. 80-170 keV electron

図 1 電子フラックスの高度変化。実線は上昇時、点線は下降時、各カーブに付された数字はロケット各号機に対応。

Fig. 1. Altitude dependences of electron fluxes. Solid and dotted curves, labeled by the flight number, correspond to the ascending and descending paths.

1b, No. 5) に見られるうねり等は、高度よりもむしろ時間や位置の変化に関連していると思われる。高度 115-120 km において、各号機ごとに求めた 50 keV 電子の絶対強度は表 1 に示すとおりで、それぞれの activity (たとえば  $\Sigma Kp$ ) に対応している。

### 3. ピッチ角の計算と電子フラックス時間変化

検出器のロケット軸に対する取付角を  $\delta$ 、ロケットのプレセッション角を  $\varepsilon$  とすると、ピッチ角  $\theta$  は次式であらわせる (和田他, 1979)。

$$\cos \theta = \cos \delta \cdot \cos \varepsilon + \sin \delta \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \varphi \quad (1)$$

ただし、 $0 \leq \theta \leq \pi$ 、 $\varphi$  は自転角で  $\theta = 90^\circ$  の点を原点とし  $\theta$  が小さくなる方に進む。したがってもし  $\delta = \pi/2$  なら

$$\cos \theta = \sin \varepsilon \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

と簡単になる。 $\varphi$  の原点は各機ごとに磁気センサーの記録から決定した。実際には  $\delta$  と  $\varepsilon$  の変化幅との関係によって、測り得る  $\theta$  の範囲がきまる。表 2 にそれを示した。また、各エネ

表 2 ピッチ角の測定可能範囲

Table 2. Pitch angle range measurable for each of six rocket flights for  $>40$  keV electron measurements.

	S-210JA-20	S-210JA-21	S-210JA-22	S-210JA-23	S-310JA-2	S-310JA-3
Pitch angle	40°–140°	50°–130°	0°–142°	0°–157°	12°–118°	53°–77°

ルギーチャンネルにおいて1回のデータサンプリング時間は 50 msec なので、ある時刻  $t$  秒から  $t+0.05$  秒までの平均の  $\theta$  を、50 msec データのすべてについて計算した。次にピッチ角分布を見るため、あらためて 15° ピッチ角ごとの計数を算出した。たとえばピッチ角 90° に相当する計数/50 msec を得るためには、90° の前後 2 点の 50 msec データを用いた補間法によった。このようにして求めたピッチ角別の計数タイムプロファイルが、20 号機は図 2 に、また 21 号機は図 3 に示される。ただし a, b, c, d はそれぞれ異なる 4 つのエネルギー範囲に相当する。2 号機については、3 つのエネルギー範囲について、ピッチ角 30°–105° 間の 6 通りが図 4 に示される。プロファイルの途中でところどころデータの切れたところは、ロケットの姿勢の関係から、たまたまその方向にはその検出器の視野が向かなかったため、測定自身が途切れたわけではない。以上の図 2, 3, 4 において、時間と高度との換算表は図 5 に示される。

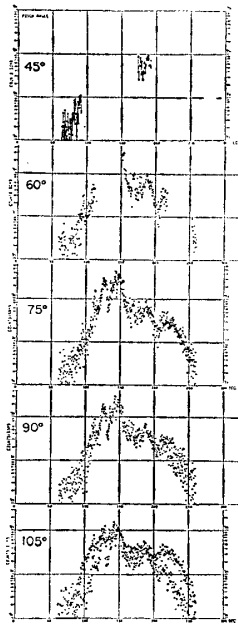
## 4. 考 察

### 4.1. S-210JA-20 号機

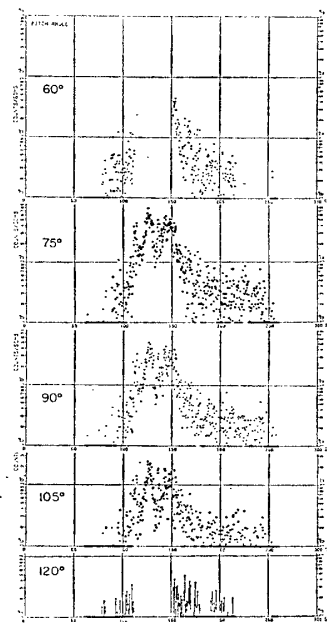
図 2a–d から分かるように、この時の discrete 型オーロラに対応してフラックスの変動が激しいのが特徴的である。個々の点の分散が大きいのは激しい振動をしているからである。振動の周期は 5–15 秒、水平距離に換算して 5–15 km である。この変動を時間的なものと見るよりは、多数のオーロラアークをロケットが順次横切っていったためと考えられる。測定器の取り付け角度が 90° なので、プレセッション角度が最大 ( $\sim 50^\circ$ ) の時にピッチ角 40° のデータが得られた。したがってピッチ角の広い範囲にわたっての分布は、最高高度に近い 180 秒 (117 km) 近辺でのみ得られた。60–80 keV の場合の例が、図 6 で示されるが、そのピークは約 60° である。ほかの時間帯 (高度) については、測定ピッチ角範囲が狭いため 75° から 105° にかけての減少のみがみられ、この範囲ではピークは存在しない。

### 4.2. S-210JA-21 号機

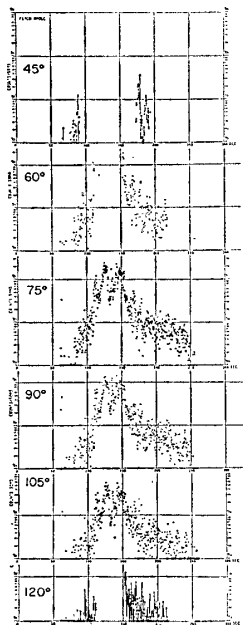
20 号機の場合とは対照的に全体として変化はなだらかである。最高高度でプレセッション



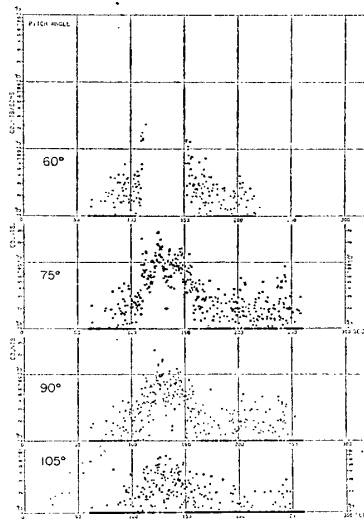
a. 40-60 keV



b. 60-110 keV



c. 60-80 keV



d. 80-170 keV

図 2 S-210JA-20 号機で  $15^\circ$  おきのピッチ角ごとに分類された電子フラックス (計数/50 msec) のタイムプロファイルの例

Fig. 2. Electron fluxes as a function of the flight time of S-210JA-20. The electron fluxes are given every 50 msec and every  $15^\circ$  step in the pitch angle range from  $45^\circ$  to  $120^\circ$ .

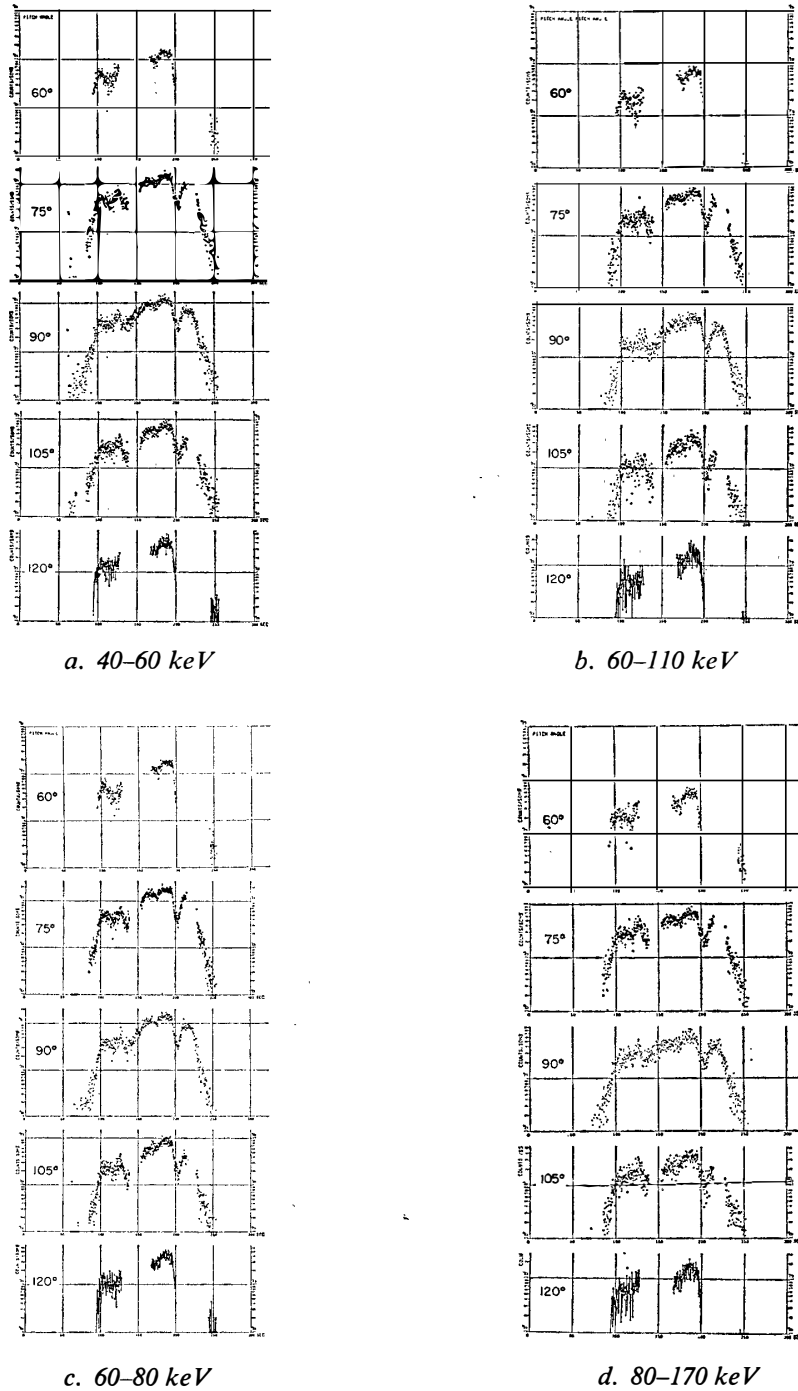


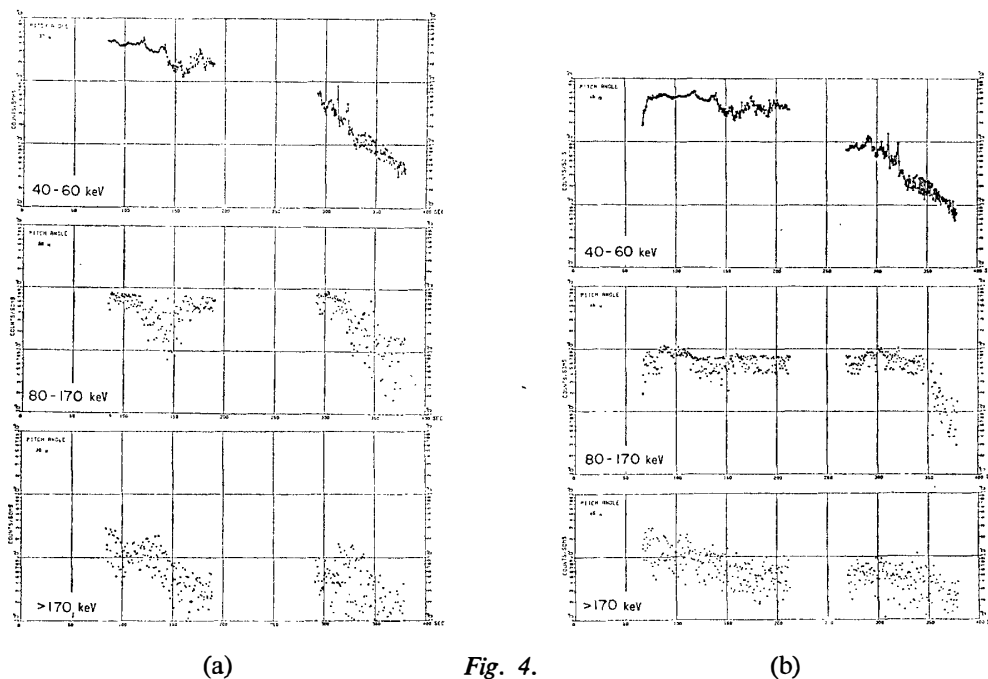
図 3 S-210JA-21 号機で  $15^\circ$  おきのピッチ角ごとに分類された電子フラックス (計数/50 msec) のタイムプロファイルの例

Fig. 3. Electron fluxes as a function of the S-210JA-21 flight time. The fluxes are given every 50 msec and every  $15^\circ$  step in the pitch angle range from  $60^\circ$  to  $120^\circ$ .

ン角度が最大となり  $50^\circ$ – $130^\circ$  にわたるピッチ角分布が観測された (図 3a–d). 図 6 に示される様に,  $60$ – $80$  keV チャンネルで同じく約  $60^\circ$  ピークとなった. しかし 20 号機に比べると分布の形はゆるやかである. これより低高度ではピッチ角範囲が狭く, 分布の形については何もいえない.

#### 4.3. S-310JA-2 号機

$40$ – $60$  keV の低エネルギー帯 (図 4 の上カーブ) では, 上昇時検出器の比例計数管が窒息するほど計数が高くなり, 下降時には約 1 桁下がって, 高度の低下と共に計数がゆるやかに減少した. ロケットは磁力線方向に向け  $315^\circ$  の方向に打ち上げられたが, 下降時には磁力線を横切って水平距離で約  $250$  km,  $L$ -value で約  $1.4$  小さい方に移動した. したがって下降時の大幅な計数の減少は高度によるものではなく,  $L$  の変化によるものと思われる. 次に, 2 号機の下降時におけるピッチ角分布の高度変化の様子を 3 つのエネルギー範囲別に図 7\* に示す.  $80$ – $170$  keV の中間エネルギー帯を見ると, 高高度の  $180$  km– $190$  km で  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  が高く,  $75^\circ$  から  $90^\circ$ ,  $105^\circ$  にかけてずっと下がる. しかし高度が低下するにつれて,  $30^\circ$  が減少する. これから次のことがいえる. (1) ピッチ角分布のピークは高度の低下と共に大きい角度にずれる. (2) 同一高度では, エネルギーが低いほど大きい角度にずれる.



\* 図 4 の  $>170$  keV エネルギー領域は,  $1200$  ガウスの永久磁石付による測定であるが, 図 7 の同領域は永久磁石のない測定である.

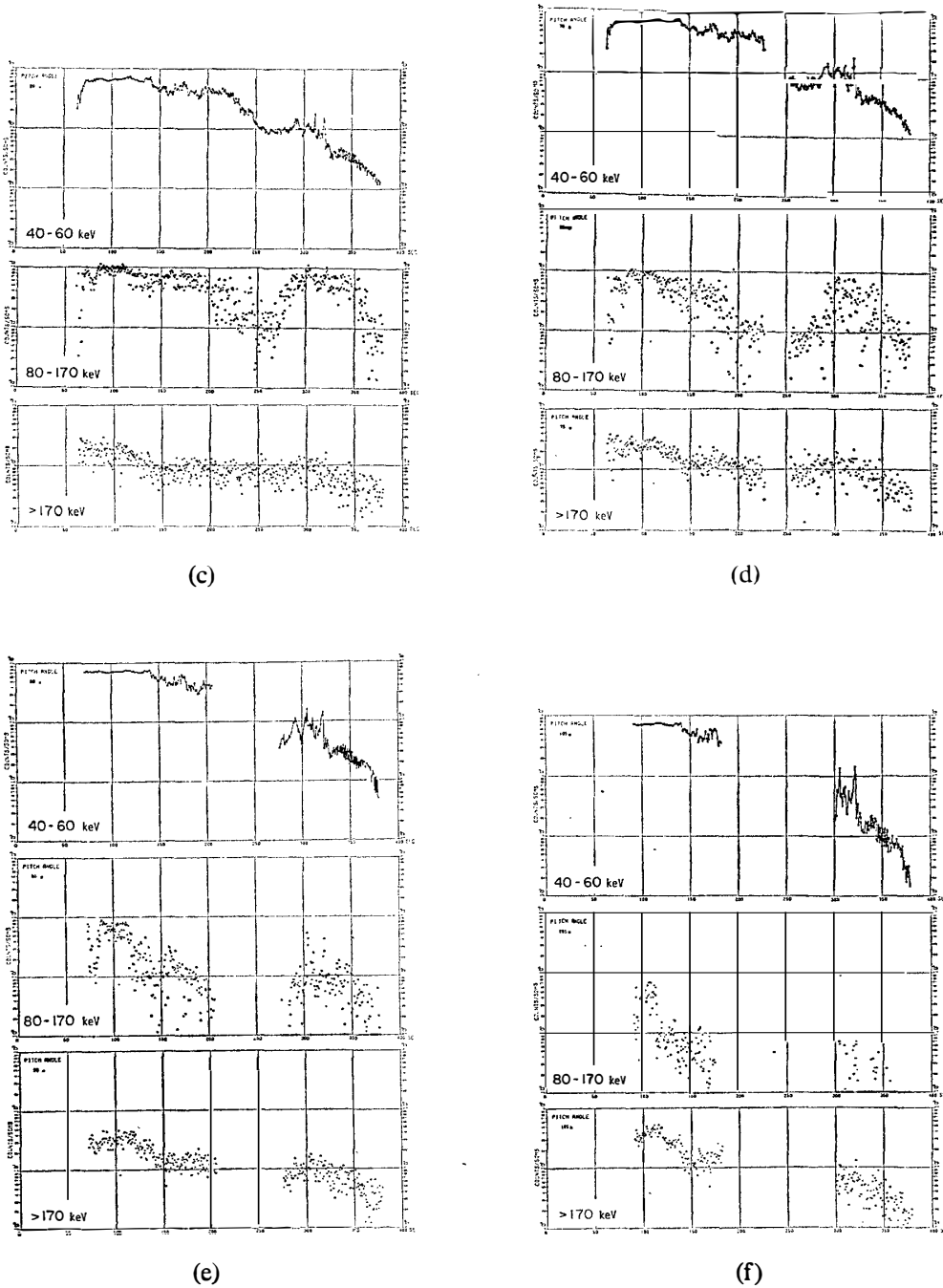


図 4 S-310JA-2 号機でエネルギー別タイムプロファイルの例. ピッチ角は (a) 30°, (b) 45°, (c) 60°, (d) 75°, (e) 90°, (f) 105° ただし >170 keV チャンネルデータは永久磁石つき検出器による.

Fig. 4. Electron fluxes measured every 50 msec and in three different energy channels on S-310JA-2. They are grouped into the six different pitch angles: (a) 30°, (b) 45°, (c) 60°, (d) 75°, (e) 90° and (f) 105°, where >170 keV channel data are given by the proportional counter with magnet-shielded collimator.



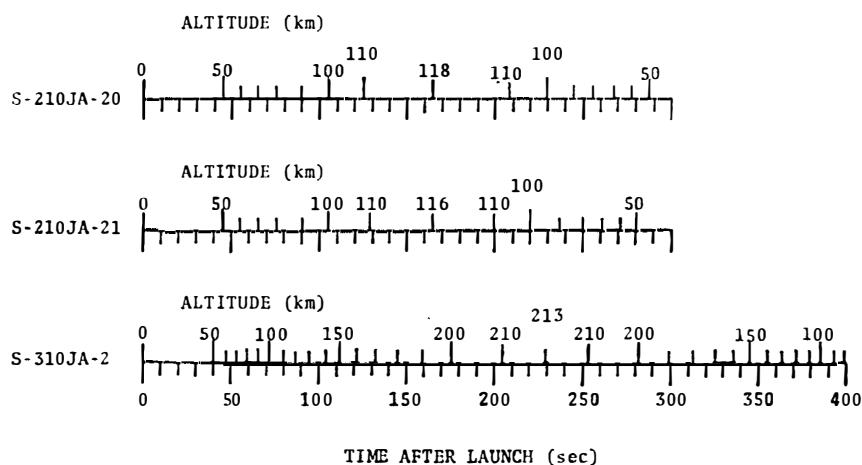


図5 ロケット発射時の時間と高度との変換座標

Fig. 5. Relation between flight time and rocket altitude.

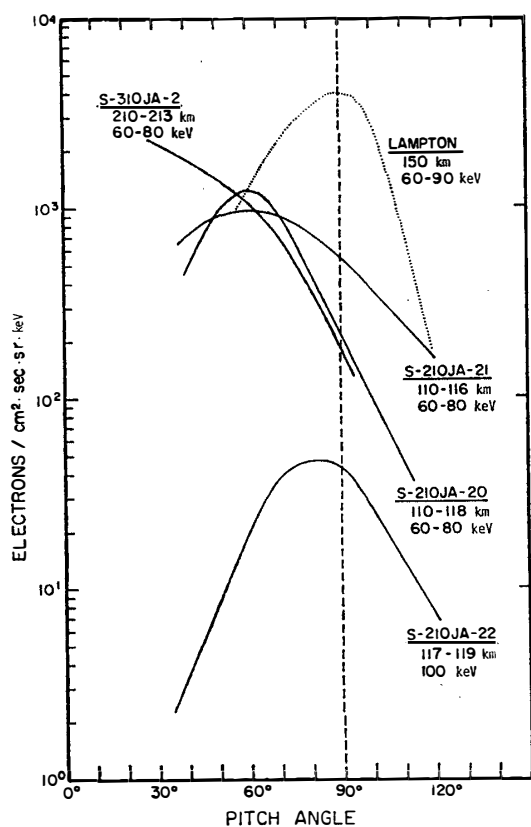


図6 電子フラックスのピッチ角分布. 観測高度とエネルギーはそれぞれに記入, 点線は Fort Churchill でのロケット観測結果の例

Fig. 6. Typical pitch angle distributions of electron fluxes measured during the four rocket flights: S-210JA-20, 21, 22 and S-310JA-2. A dotted curve is the result obtained in the Fort Churchill rocket experiment (LAMPTON, 1967). The electron energy ranges and the rocket altitudes are also given.

このことは次のように解釈される。電子は高高度で磁力線に沿った小ピッチ角で入射してくるが、大気密度の増加と共に scatter されてピッチ角の大きな電子が現われる。その効果は低エネルギー電子ほど著しく現われる。しかし図6に見られるように、じょう乱時におけるピークの位置は静穏時(22号機)のそれよりも、また、北半球の Churchill における結果

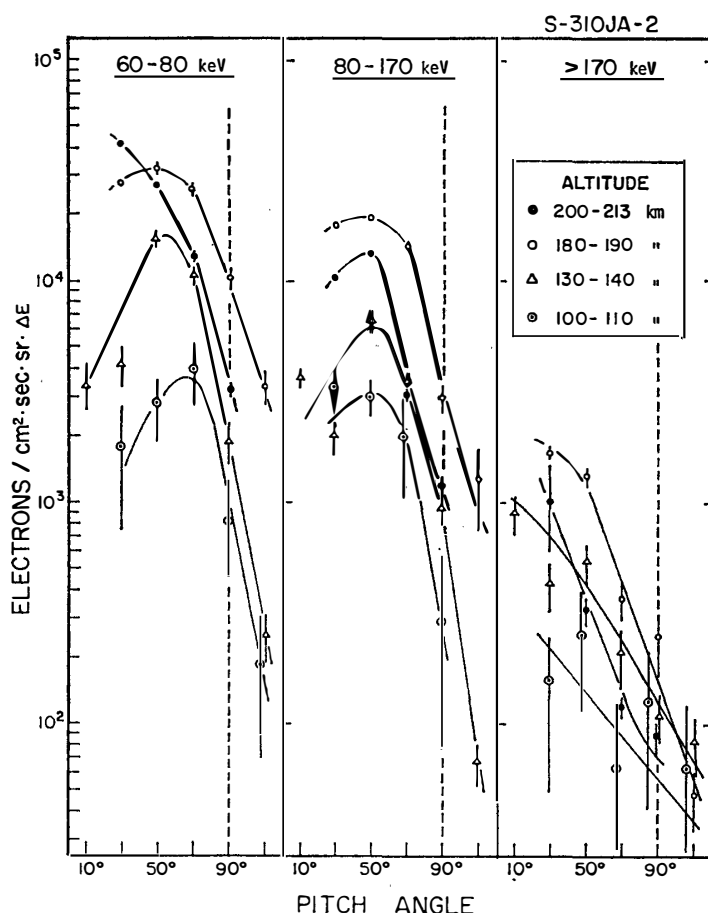


図 7 S-310JA-2 号機による高度別、エネルギー別電子フラックスのピッチ角分布  
 Fig. 7. Pitch angle distributions of electron fluxes at the four different altitudes in the S-310JA-2 experiment. Three panels represent the three different energy channels.

(LAMPTON, 1967) よりもかなり小さい角度側にずれている。つまり field-aligned 成分がかなり低高度まで卓越していることを示すもので、これには、昭和基地の地磁気異常による低い mirror 高度（双極子磁場と比較して約 50 km 低い）が関係しているかもしれない。

図 2a のピッチ角  $105^\circ$  の例を見ると、あきらかに 2 重のパターンになっている。ピッチ角の計算では、磁力線からの検出器視野の方向を与えるだけで、方位を与えるわけではない。つまり 1 スピンの間に 1 つのピッチ角について異なる 2 つの方位を見ることになる。その方位別すなわちスピン位相別にプロットしたのが図 8 である。図 8a はピッチ角  $75^\circ$  で両者の間には有意な差はなく、図 8b はピッチ角  $105^\circ$  の場合で、2 つのグループはそれぞれ別の方位に属している。これは、もし測定されたものが荷電粒子だけだとすると説明できない。たとえばオーロラ X 線のように磁場とは関係のない非荷電粒子を同時に検出し、その源が特

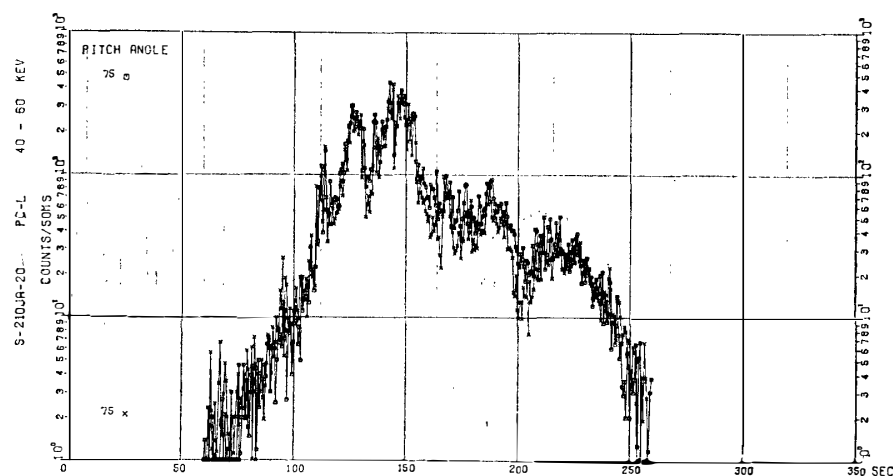
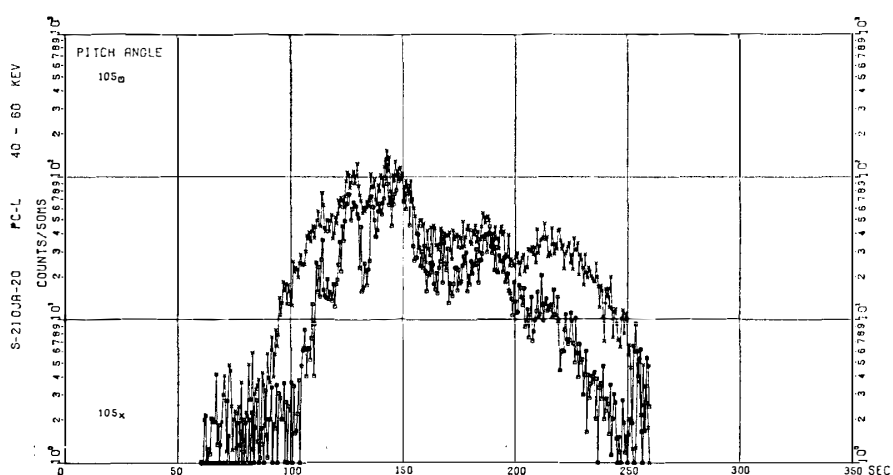
a. ピッチ角  $75^\circ$ b. ピッチ角  $105^\circ$ 

図 8 スピンの位相別に見た 40–60 keV 電子フラックスのタイムプロファイル. 任意のピッチ角について□印はピッチ角が増加する位相, ×印は減少する位相に対応する.

Fig. 8. Electron fluxes in the 40–60 keV in the S-210JA-20 experiment. The fluxes are given at two different spin phases with the same pitch angle. The symbols, squares and crosses, represent the spin phases in which the pitch angle is increasing and decreasing, respectively.

定の方位にのみ存在したとすれば説明がつく. 比例計数管は数 keV–数十 keV の光子に対してもある程度有効な検出感度をもつので, オーロラ X 線の寄与は十分考えられる. しかし図 2a をよく見ると, スプリットはピッチ角の増大と共に大きくなっている. ということは, 昭和基地での伏角  $66^\circ$  を考慮すると, ピッチ角  $105^\circ$  の方向は, ほぼ水平方向, および水平より約  $40^\circ$  下方なので, どちらかがオーロラ X 線を検出したとしても, もっともらしい. 同じような現象は 2 号機についても一部見られた. この観測では比例計数管を 2 本使用

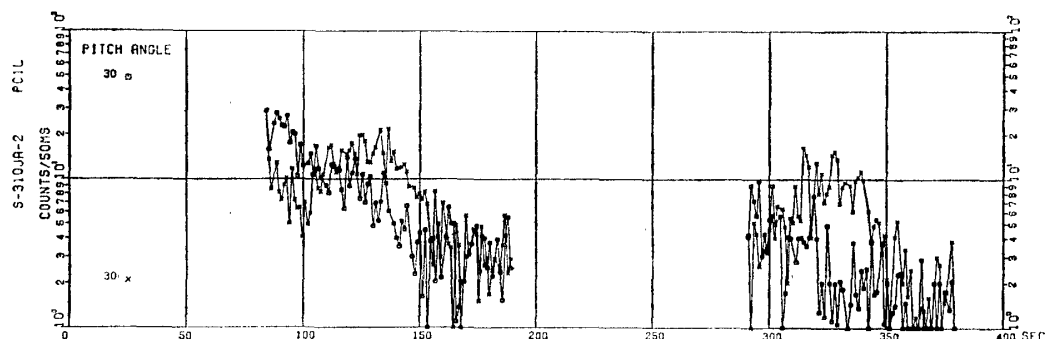


図 9 磁気シールド型比例計数管で測定された粒子フラックスのタイムプロファイル。□印と×印は図 8 と対応する。ただしピッチ角は  $30^\circ$  の例。

Fig. 9. Particle fluxes measured by a proportional counter with magnet-shielded collimator (S-310JA-2 experiment). The fluxes at the pitch angle of  $30^\circ$  are plotted. The notation is the same as that in Fig. 8.

し、うち 1 本は永久磁石でシールドして  $\sim 300$  keV 以下の荷電粒子を除去した。それによるピッチ角  $30^\circ$  の例を図 9 に示した (図 4a の  $>170$  keV にあたる)。この場合は全フライトを通じてではなく、図に見られる 2 カ所だけである。ただピッチ角に対するスプリット変化は、 $60^\circ$  で極小で、角度の増大または減少に伴って大きくなっている。スプリットが方位の違いによるとして、現在、方位を含めた解析を計画している。くわしくは次の報告にゆずる。

## 謝 辞

おわりに、ロケット観測を実施された第 17 次および第 18 次南極地域観測隊員各位に厚く御礼申し上げます。

## 文 献

- 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.
- LAMPTON, M. (1967): Daytime observations of energetic auroral-zone electrons. J. Geophys. Res., 72, 5817-5823.
- 奥谷晶子・和田雅美・竹内 一・小玉正弘・今井 喬 (1979): 南極ロケットによるオーロラ帯降下電子の観測。南極資料, 63, 29-41.
- 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.

(1979 年 6 月 4 日受理)