

ポーラーパトロールバルーン（極域周回大気球）観測による
オーロラ X 線の広域空間分布およびエネルギースペクトル特性

鈴木裕武*

Broad-Spatial Characteristics and Energy Spectrum Characteristics
of Auroral X-Rays Observed by a Polar Patrol Balloon

Hiromu SUZUKI*

Abstract: Polar Patrol Balloon (PPB) No. 6 experiment was performed over Antarctica, in order to observe wide-area characteristics of bremsstrahlung X-rays radiated from energetic precipitated electrons. PPB No. 6 was launched from Syowa Station on 5 January 1993 and flew along one and a half circumpolar paths. Distinct enhancements of auroral X-rays were often observed during the entire flight period of 27 days. This is the first observation of broad-spatial distribution of auroral X-rays by a unique instrument onboard a long life balloon. X-ray enhancements were dominant in the magnetic local dayside, and some small enhancements were observed at low latitude below 60° . Such low latitude enhancements have simple temporal structures similar to plasmaspheric hiss. The harder spectrum events tend to occur in the lower invariant latitudes, except for a few events. Latitudinal dependence of auroral X-ray spectrum agrees with latitudinal dependence of characteristic energy for cyclotron resonance. Diurnal energy variation of the X-ray spectrum was observed. This variation can be explained by theoretical precipitation lifetime on cyclotron resonance. All of the observed facts suggest that energetic electron precipitation is caused by cyclotron resonance.

要旨: 高エネルギー降下電子による制動放射 X 線の広域特性の観測を目的とした Polar Patrol Balloon (PPB) 6 号機実験が南極域にて行われた。PPB-6 号機は 1993 年 1 月 5 日昭和基地より放球され、27 日間で約一周半の極域周回飛行を達成し、オーロラ X 線の広域特性の観測に成功した。同一の観測装置によるオーロラ X 線の広域かつ長時間の観測は、本実験により初めて成功した。解析の結果得られたオーロラ X 線の広域空間分布は昼間側で X 線現象が卓越し、かつ、小さなイベントながら不変磁気緯度 55° 以下の低緯度にまで広がっていた。また、 $\sim 60^\circ$ 以下の低緯度で観測されたイベントの計数率時間変化は顕著な時間的構造を持たず、プラズマ圏ヒスの放射特性に似た特徴を示すものが多い事が分かった。オーロラ X 線のエネルギースペクトルは不変磁気緯度依存性を示し、 $\sim 60^\circ$ 以上では緯度の低下とともにハードになり、 $\sim 60^\circ$ 以下では高緯度よりソフトである。この不変磁気緯度に対する変化はサイクロトロン共鳴波動粒子相互作用に関する電子の共鳴エネルギーの不変磁気緯度に対する変化と一致しており、電子の降下原因としてホイッスラーモードの電磁波とのサイクロトロン共鳴の可能性を示唆している。エネルギースペ

*立教大学理学部。Faculty of Science, Rikkyo University, Nishi-Ikebukuro 3-chome, Toshima-ku, Tokyo 171.

クトルは磁気地方時に関して依存性を示し、時間の進行とともにハードになる傾向を示した。この磁気地方時依存性はドリフト電子のサイクロトロン共鳴に関連する軌道存続時間（ライフタイム）により説明が可能である。以上の観測結果はいずれも電子の降下原因としてサイクロトロン共鳴を示唆するものであり、本論文はオーロラ X 線を放射する高エネルギー電子の降下原因がサイクロトロン共鳴により矛盾なく説明される可能性を、初めて極域全体にわたるオーロラ X 線現象の観測結果から提示するものである。

1. はじめに

オーロラ現象に関連した降下電子のエネルギー分布は数百 keV にまでわたっており、数十 keV 以上の高エネルギー降下電子は制動放射により X 線を発生させる。この制動放射 X 線はオーロラ X 線と呼ばれており、高度 100 km 付近で発生する。オーロラ X 線を観測する主な目的は、エネルギースペクトル、フラックス、空間分布やそれらの時間変化に関する情報から高エネルギー降下電子の加速機構、加速領域および流入機構等を推定し、地球磁気圏内の高エネルギー現象のダイナミクスを解明することである。様々な測定装置を用いたオーロラ X 線観測が大気球、ロケットおよび人工衛星などの飛翔体により行われてきたが、まだ多くの究明すべき事項が残っている。

可視光オーロラを光らせる降下電子のエネルギーは主に ~ 10 keV 以下であるのに対し、オーロラ X 線を発生させる降下電子はより高いエネルギーを持つので、両者の加速機構は同一ではないと考えられる。したがって、両者の空間分布は異なったものとなる可能性がある。オーロラ X 線の地球規模の分布に関しては、オーロラ X 線帯もしくはオーロラ X 線オーヴァルなどという呼び名はなく、過去の観測の統計より X 線が観測される領域が示されているにすぎない。高エネルギー降下電子の流入機構や降下原因を解明するためにはオーロラ X 線の広域空間分布を明らかにする必要がある。また、X 線の空間分布だけでなく、エネルギースペクトルに関する分布や時間変化などの特性に関する分布も求めなければならない。それらを総合的に検討することにより初めて地球磁気圏内の高エネルギー現象のダイナミクスが明らかにされるだろう。そのためにはオーロラ X 線の計数率やエネルギースペクトルの時間変化を様々な地点で観測する必要がある。

オーロラ X 線の時間変化を観測するためには定点測定に等しい大気球による観測が望ましいが、通常の大気球の連続観測時間は多くとも数十時間であり、オーロラ帯全域をカバーする観測は行えなかった。通常の大気球を複数用いたとしても一つの基地からの放球では観測する領域は限られたものとなる。一方、極軌道の人工衛星を用いれば X 線の観測と同時に降下電子の観測も可能であり、数年にわたる統計を取ることもできる。しかし、人工衛星は移動速度が速く X 線イベントの時間的連続観測は困難であり、降下電子の観測では時間変化と空間変化を分離することは難しい。これらの諸問題を解決し広く極域をカバーする長時間観測を可能にしたのが、南極大陸を周回するポーラーパトロールバルーン (Polar Patrol

Balloon, 以下“PPB”と略記)である。

南極域の大気球高度の成層圏には, 季節に応じて安定した偏西風(冬期)や偏東風(夏期)が南極大陸に沿うように吹くことが知られている。この風を利用して南極点を中心にして大気球を周回させ, 長期間にわたる広域観測を行う PPB プロジェクトが提案された(小玉, 1972)。こうした気球実験の可能性は宇宙科学研究所と国立極地研究所を中心として 1982 年より本格的に検討が進められ, 1987 年と 1989 年には昭和基地において気球工学的飛翔実験が実施され南極大陸周回飛翔の確実性が立証されていった(NISHIMURA *et al.*, 1985; HIRASAWA *et al.*, 1990; KADOKURA *et al.*, 1991)。観測機器を搭載した本実験は 1990 年度から 3 年計画で開始され, 1990 年度の実験では 1 機の大気球が南極域の周回に成功した(EJIRI *et al.*, 1993)。

本論文で解析したオーロラ X 線データは 1992 年度の PPB 実験で PPB-6 号機(以下 PPB #6 と略記)により観測されたデータである。オーロラ X 線観測装置および宇宙線観測装置を搭載した PPB#6 は 1993 年 1 月 5 日に昭和基地より放球された。PPB#6 は大気深度 6–13 g cm⁻² の高度を保ち 1 月 31 日までの 27 日間で約一周半の南極大陸周回を行った。高度 30 km 以上での観測時間の総計は 584 時間であり, 観測領域についてはオーロラ帯を 4 度通過し不変磁気緯度 49°–81°にわたっている。これはオーロラ X 線の広域空間分布を知るためには十分な観測時間と観測域である。オーロラ X 線のエネルギー測定範囲は 30–120 keV であった。一カ月近い観測期間で多くの X 線現象を観測したが, 多くの X 線現象は昼間側で発生しており, その内の幾つかは不変磁気緯度 55°以下の低緯度で観測された。観測期間中の地磁気活動度は中程度であり, *Kp* の平均は 3– であった。本観測は単独の大気球の長期間観測により, 極域におけるオーロラ X 線の広域空間分布およびエネルギースペクトルの広域特性を初めて同一の検出器により長時間観測したものである。PPB#6 の観測結果の初期報告は KODAMA *et al.* (1995) によって行われた。本論文では PPB#6 により観測されたオーロラ X 線の広域空間分布および広域のエネルギースペクトル特性を明らかにし, 磁気圏内における高エネルギー電子の運動学との関連から観測結果の物理的意味を検討した。

2. オーロラ X 線について

大気球高度での 50–150 keV のエネルギー領域では, オーロラ X 線の微分エネルギースペクトルは,

$$\frac{dN_x}{dE} = N_{x0} \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right), \quad (1)$$

の指数関数で近似できることが知られている。ここで E は X 線のエネルギーである。 E_0 は *e*-folding energy (ここで単位は keV とし, 以下この単位を用いる) と呼ばれる変数でスペクトルを特徴づける量である。X 線のエネルギーが 0~∞ keV にわたっているとすると E_0 は

平均エネルギーとすることができる。観測される E_0 は通常数 keV から数十 keV の範囲にある (例えば **BARCUS and ROSENBERG, 1966**)。50 keV 以下の X 線は大気を伝播する時に効率よく光電効果による吸収を受けるため、大気球で観測される 50 keV 以下の X 線計数値は 50 keV 以上の高エネルギー側のスペクトルから外挿した値よりも小さくなる。

オーロラ X 線のスペクトルはしばしば二つの指数関数を重ねあわせた二重指数関数スペクトル (double exponent spectrum) を示す。**BARCUS and ROSENBERG (1966)** は $E_0=25-50$ keV の平均的な X 線の降り込みの上に、可視光オーロラを光らせている $E_0 < 5$ keV のソフトなエネルギー成分の降り込みが重なっている可能性を指摘した。**MAUK et al. (1981)** は大気球により 50 keV 付近に knee を持つスペクトルを観測した。このときソフトな成分の E_0 は ≤ 9 keV であり、ハードな成分の E_0 は $\sim 30 \pm 5$ keV であった。

オーロラ X 線のエネルギースペクトルは現象発生中一定というわけではなく時間変化を示すことが多い。典型的な変化は、初めはスペクトルはハードであるが計数率の増加とともにソフトになり、計数率の減少とともに次第にハードになり終了するというパターンである (**BARCUS and ROSENBERG, 1966; KREMSEK et al., 1973**)。このような X 線現象でスペクトルが最もソフトになるのは最大計数率を記録するときである。 E_0 の変化は 20–40 keV の範囲にあることが多い。

一般に、上述のエネルギースペクトル変化はあくまでも X 線観測装置の視野内での小さな空間スケールで起きている変化であり、時間的には短時間の変動にすぎない。このような細かな変化とは別に、オーロラ X 線のスペクトルは日変化を示し、複数の大気球観測の統計によるとスペクトルは地方時が進むとともにハードになることが知られている。**BEWERSDORFF et al. (1966)** は、真夜中において最もソフト ($E_0 \sim 20$ keV) である X 線スペクトルが、時間とともにハードになり地方時 20 時頃に極大 ($E_0 \sim 50$ keV) となることを示した。**BEWERSDORFF et al. (1966)** の観測結果は図 10 中に破線で示してある。

オーロラ X 線は緯度的には不変磁気緯度 $55^\circ-75^\circ$ の範囲で経度的には全経度、あらゆる地方時において観測されている。1974 年から 1976 年にかけて北部スカンジナビアで行われた SAMBO 計画では、実験期間中におけるオーロラ X 線発生領域の低緯度側境界が不変磁気緯度 60° 付近にあることが示された (**LAZUTIN, 1986**)。MATTHEWS et al. (1988) は南極サウスポール基地付近 (不変磁気緯度 75°) の昼間側で、 $E_0 \sim 50$ keV をもつオーロラ X 線を観測した。最もよく観測されるのはほぼオーロラ帯に一致する磁極を中心とした円形の領域である。この領域におけるオーロラ X 線の観測頻度はかなり高く、**BARCUS and ROSENBERG (1966)** はアラスカ (磁気緯度 $64^\circ-67^\circ$) で行った複数の大気球実験で、各大気球の全観測時間のうち平均 80% で X 線を観測した。上述の SAMBO 計画では、地磁気擾乱時における観測であるが、全観測時間の 80% 以上で X 線が観測された (**LAZUTIN, 1986**)。

CNA は可視光オーロラと X 線との中間のエネルギーの降下電子に対応すると考えられる

が、CNA の観測データは一般にオーロラ X 線の観測データと良い一致を示すことが知られている。BERKEY *et al.* (1974) は北半球のオーロラ帯からポーラーキャップに位置する観測基地で測定された 60 サブストームの CNA データを用いて、CNA の発生領域を明らかにした。彼らの示した CNA 発生領域の境界は地磁気活動度や地方時に依存するが、最も拡大したとき高緯度側で 74° 、低緯度側で 58° である。

オーロラ X 線の増加が始まってからバックグラウンド計数率に戻るまでの X 線増加の継続時間は、多数のイベント（特性が変化しない一連の X 線増加現象をここではイベントと呼んでいる。4.4. 節参照）を含んで 10 時間を越えることがしばしばある。しかし、そのような長時間の X 線増加現象は、数分から 2-3 時間程度の継続時間を持つ異なった複数のイベントが連続して発生したものであることが多い。連続した X 線増加から個々のイベントを分離するのは容易ではないが、計数率の時間変化の様子、エネルギースペクトルの変化などから判断することは可能である。

一つの X 線イベントは激しい時間変化を見せるバーストの集まりであったり、数時間にわたるイベントが計数値の単調増加単調減少というような時間的変化の構造に乏しいものもある。時間変化は数ミリ秒のマイクロバーストと呼ばれるものから立ち上がりからピークまでが 1 時間を越えるようなゆっくりした変化を示す場合もある。X 線の時間変化に対応する時間変化を示す磁気圏内の他の現象を見いだすことが出来れば、高エネルギー電子降下の直接原因を解明する糸口を得ることができる。

3. 搭載観測装置と大気球の飛翔

本観測で用いた X 線観測装置は、直径 2 インチ厚さ 5 mm の NaI(Tl) クリスタルに光電子増倍管を組み合わせたもので、厚さ 2 mm の Sn と厚さ 1 mm の Pb とで構成されたシリンダー型のコリメーターを用いて遮へいしたシンチレーションカウンターである。全視野角は天頂を中心とした 165° であり、幾何学的因子 ($S\Omega$) は $52.7 \text{ cm}^2 \text{ str}$ である。解析には後述する ARGOS システムにより取得されたデータを用いたが、このデータの時間分解能は 30 秒で、エネルギーチャンネルはチャンネル 1: 30-50 keV、チャンネル 2: 50-70 keV、チャンネル 3: 70-90 keV、チャンネル 4: 90-120 keV の 4 チャンネルである。本論文では ARGOS で取得された X 線データの計数率の単位はすべて counts/30s に統一してある。また、シンチレーターのエネギー分解能は 60 keV で約 13% であった。

ARGOS システムとは極軌道にある人工衛星 NOAA を経由してデータを伝送する通信システムである。PPB#6 は大気球オンボードのメモリーに蓄積された 60 分間のデータを送信し続けるのであるが、PPB#6 と NOAA 衛星とが接近会合する度に PPB#6 からのデータは衛星に受信され、衛星が受信基地上空を通過するときデータを基地に送信する。60 分以内に 1 回会合している場合は全データを取得できるが、会合間隔が 100 分前後になるとデータ欠損

が起こる可能性がでてくる(藤井ら, 1992). 実際には全観測時間のうち約 20% のデータが NOAA と PPB#6 との会合がなかったため失われた.

PPB#6 の位置は ARGOS システムにより得られた. 位置検出の頻度は観測期間を通じての平均として 1 日当たり 16.6 回であった. 三陸で行われた予備実験によると, 大気球搭載時の ARGOS システムによる地理的位置の決定精度は 10–20 km である(太田ら, 1985). PPB#6 はオーロラ X 線の広域空間分布の観測を目的としているため, この程度の位置の誤差は問題にならない.

PPB#6 は PPB シリーズ中最大の気球であり, 体積は 59467 m^3 , 総重量は 434.2 kg であった. 大気球の総浮力は 477.6 kg で, 理論到達高度は 34.7 km であった. PPB#6 は, 1993 年 1 月 5 日 0855 UT に南極昭和基地(南緯 69.0° , 東経 39.6°)より放球され, 30 km から 36 km の飛行高度を保ち西回りに飛翔した. PPB#6 の飛行航路を図 1 に示す.

PPB#6 は 1 月 31 日までの 27 日間で南極域を約一周半して南緯 70.6° , 東経 176.7° 付近の海域に着水した. 放球オペレーションについては並木ら(1995)に詳しい報告がある. 1 月 29 日以降は光電子増倍管への印加電圧低下により X 線計数率が低下したため, 27 日間のうち有効なデータが得られたのは 1 月 5 日から 1 月 28 日までの 24 日間であった. PPB#6 は地理的緯度については 63° から 70° の限られた範囲を飛翔したが, 不変磁気緯度については 49° か

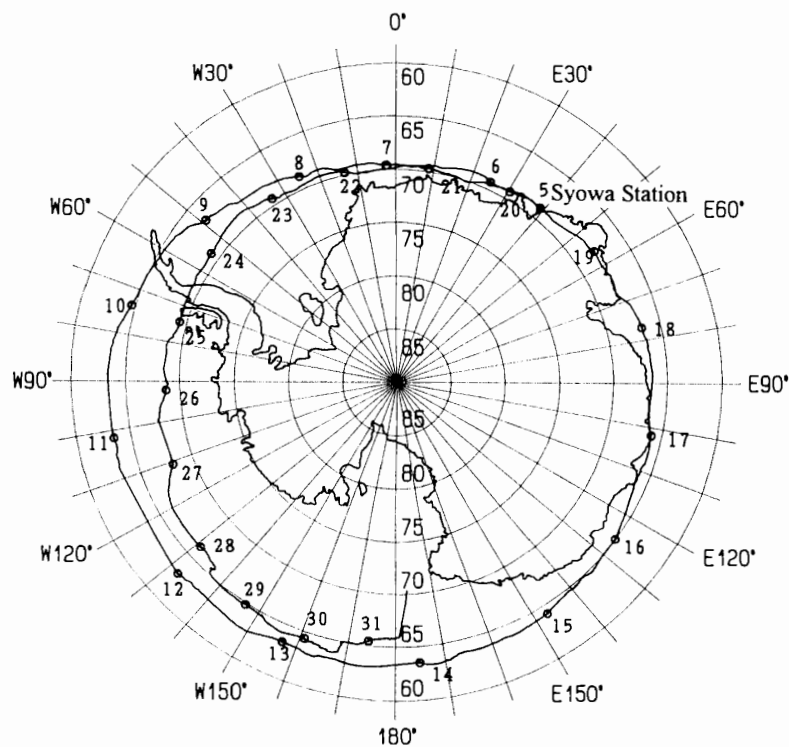


図 1 PPB#6 の飛行航路. 航路上の白丸は 00h UT における PPB#6 の位置

Fig. 1. The trajectory of Polar Patrol Balloon No. 6 (PPB#6), where numerical values attached indicate the dates at 00 UT.

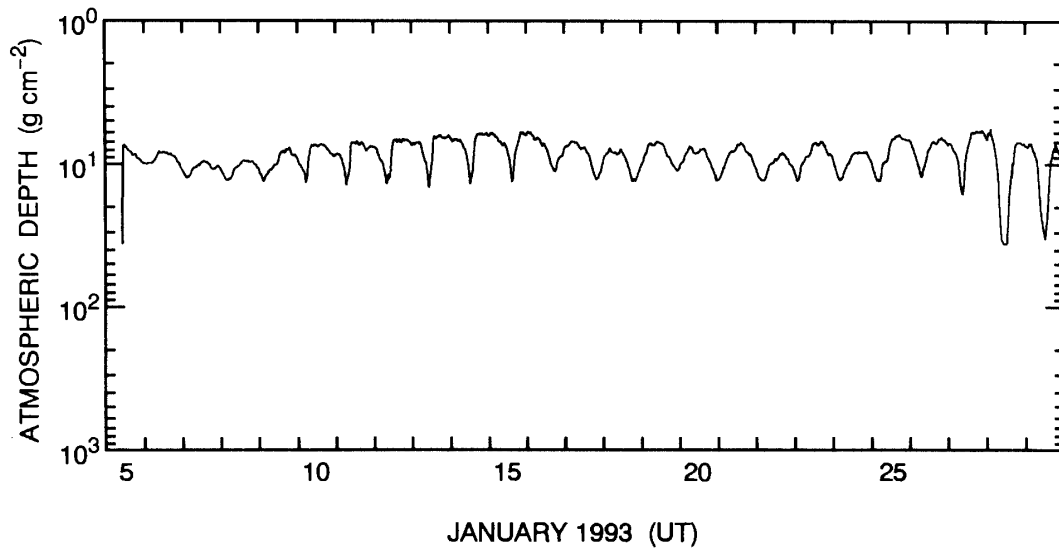


図 2 PPB#6 の飛行高度変化

Fig. 2. Time profiles of the PPB#6 altitudes.

ら 81° ($L=2.3-40.9$) に及ぶ広範囲の観測を行った。

図 2 は PPB#6 の飛行高度変化を示したものである。PPB#6 は西回りに飛行したため 1 日よりやや長い周期で上昇下降を繰り返している。PPB#6 の上下運動の主な原因は太陽光の照射仰角の変化である。そのため、PPB#6 は地方時間に応じて上昇下降を繰り返しており、低高度の時は大気球が夜側にある時であり、高高度の時は昼側にある時である。PPB#6 の高度変化は 30.7 km にセットされたオートバラストコントロールシステムにより $6-13 \text{ g cm}^{-2}$ の範囲に抑えられていたが、1 月 28 日にはバラスト (総重量 150 kg) が尽きてしまい PPB#6 の高度コントロールはできなくなった。

4. 観測結果

4.1. 観測結果の概要

PPB#6 飛翔中の全観測時間について、1 時間の平均値で表した X 線総計数率の時間変化を図 3 パネル (a) に示す。パネル (b) は大気球の存在位置の不変磁気緯度の時間変化である。PPB#6 飛翔中の地磁気活動度を見るために、 K_p 指数の時間変化をパネル (c) に示す (COFFEY, 1993)。

図 3 パネル (a) の X 線計数率の時間変化には数日間連続した 4 回の周期的な計数率の増加が見られるが、この内初めから 3 回は PPB#6 が不変磁気緯度の 60° から 70° の範囲にあった時である。この範囲はオーロラ帯に相当する。4 回目は不変磁気緯度 60° 以下のところで発生している。

図 3 パネル (a), (c) によると、 60° 以下においてオーロラ X 線が観測された 24 日から 27

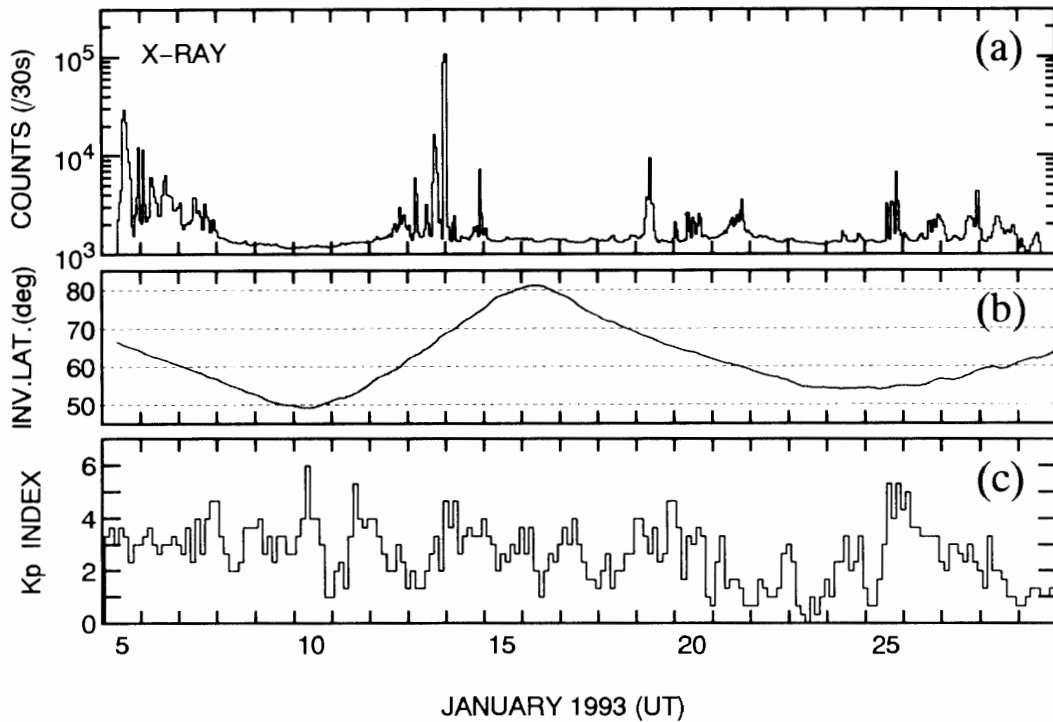


図 3 パネル (a): X 線総計数率 (30–120 keV) の時間変化. パネル (b): PPB#6 の存在位置の
不変磁気緯度の時間変化. パネル (c): PPB#6 飛行中の K_p 指数の時間変化
Fig. 3. Panel (a): Time profiles of X-ray counting rates during the entire flight. panel (b):
Invariant latitudes of the balloon locations. panel (c): K_p indices during
corresponding time.

日において、25日は $K_p=5+$ と大きいですが、24, 26, 27日の K_p 指数の平均は3程度であり地磁気の活動度が特に高かったわけではない。また、 $K_p=6$ を示した10日にX線の増加は観測されていない。これはPPB#6が 50° 以下の低緯度に位置していたためと考えられる。X線現象が発生していたときの K_p 指数の平均は3+であり、X線現象が無いときの K_p 指数の平均は2+であった。 Dst 指数についても比較的静穏であり、 -47 nT から $+31\text{ nT}$ の間で変化していた。PPB#6飛行中の地磁気活動度はあまり高くなく、低～中程度の活動度といえる。

4.2. X線バックグラウンド

大気球高度におけるX線バックグラウンドは主に宇宙線に起源しており、高度に依存した計数率とスペクトルの変化を示す。宇宙X線もX線バックグラウンドの起源であり、特にチャンネル1 (30–50 keV) への寄与は大きい。イオンチェンバーやGM (ガイガー—ミュラー) カウンターによる観測では、大気中の宇宙線電離成分強度は高度とともに上昇し大気深度 $50\text{--}60\text{ g cm}^{-2}$ の宇宙線電離成分のPfozter maximumで最高となり、それ以上では高度とともに減少していく (例えば ANDERSON, 1961; NEHER and ANDERSON, 1962)。NaI(Tl) 検出器によるX線バックグラウンドも宇宙線電離成分と同様に高度に依存した計数率の変化を

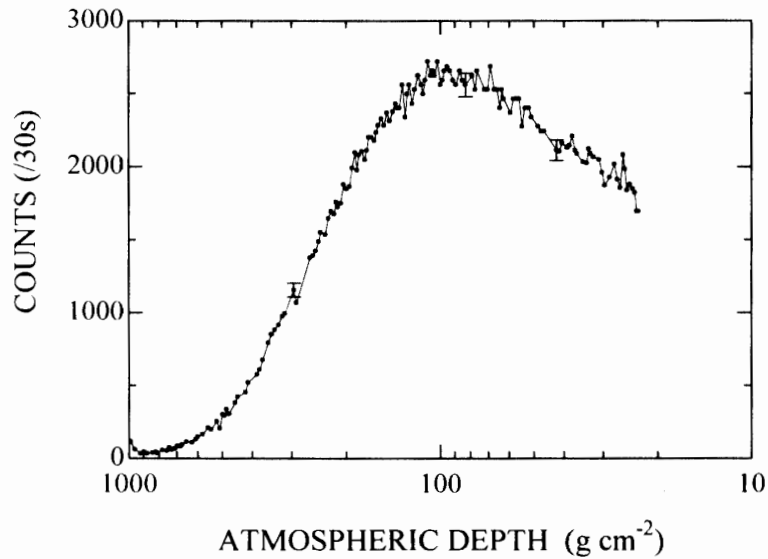


図 4 X 線バックグラウンド総計数率 (30-120 keV) の高度変化
 Fig. 4. X-ray background counting rate (30-120 keV) versus atmospheric depth.

示し、数十～数百 keV の X 線では、エネルギーに依存するが、大気深度 $80-100 \text{ g cm}^{-2}$ に強度の最高点がある (例えば ANDERSON, 1961).

PPB#6 放球時の X 線総計数率の高度変化を図 4 に示す。 $90-100 \text{ g cm}^{-2}$ の大気深度に計数率の最高点が見られ、これは過去の観測結果に一致しており、X 線観測装置が正常に動作したことを示している。

イオンチェンバーを用いた NEHER (1961), NEHER and ANDERSON (1962) による宇宙線電離成分の観測では計数率の磁気緯度に対する変化を示した図の $50^{\circ}-60^{\circ}$ 付近に knee が現れ

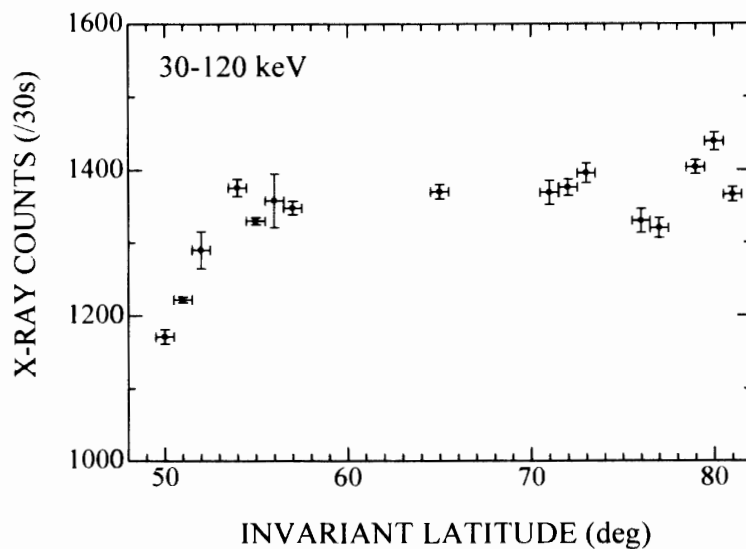


図 5 X 線バックグラウンド総計数率 (30-120 keV) の不変磁気緯度に対する変化
 Fig. 5. X-ray background counting rate (30-120 keV) versus invariant latitude.

ている。X線バックグラウンドは主に宇宙線荷電粒子に起源しているため不変磁気緯度に関して依存性がある。図5はX線バックグラウンド総計数率(30–120 keV)の不変磁気緯度に対する変化である。ここでは高度変化による影響をのぞくため $8 \pm 0.2 \text{ g cm}^{-2}$ におけるデータを用い、不変磁気緯度 1° ごとの計数率の平均をとった。図5によるとX線バックグラウンド強度のkneeは 54° 付近にあり、それ以上の高緯度ではほぼ平坦になっている。これは同じソーラーサイクルにおける NEHER and ANDERSON (1962) による宇宙線電離成分の観測結果と一致しており、同時に搭載された宇宙線プロトン測定器による観測結果とも一致している (YAMAGAMI *et al.*, 1994)。

4.3. オーロラ X 線の広域空間分布特性

オーロラ X 線現象の広域空間分布を同一の観測装置で、1機の大気球により観測したのは PPB#6 が初めてである。X線観測装置が異なれば観測結果を規格化するのに問題が生ずるので、広域における観測では同一の観測装置による測定が重要な意味を持つといえる。

PPB#6 は太陽仰角に応じた高度変化をしており、昼側では 10 g cm^{-2} より高い高度を飛行しているが、真夜中付近では 13 g cm^{-2} まで高度が低下することがある。PPB#6 の高度変化は観測される X 線フラックスに大きな影響を及ぼすため、夜側で PPB#6 の高度が低下した時に観測された X 線は、同程度の昼間側の X 線現象に比べて低計数率になる。昼間側と夜側との X 線計数率を同基準で評価するために、X 線が大気を通過する際に受ける散乱・吸収として、レーリー散乱、コンプトン散乱、光電効果を仮定したモンテカルロシミュレーションを行い、高度変化に対応する X 線フラックスの変化を求めた。ここでは、バックグラウンドを差し引いた計数率を X 線の大気通過シミュレーションのデータを用いて、大気球の平均的な飛行高度である 8 g cm^{-2} で観測される X 線計数率に変換し、オーロラ X 線の広域空間分布を求めた。

上述の補正を行ったうえで $1500 \text{ counts}/30 \text{ s}$ 以上の計数率を記録した X 線の発生地点の分布(5分ごと)を、地磁気極座標(不変磁気緯度-MLT)上に表示したものが図6aである。ここでは X 線計数率に応じて5段階にマークの大きさを変えてある。図中における一連のマークの連なりの長さは、ほぼ X 線増加現象の継続時間に対応する。明らかに昼間側の X 線現象数が夜側(18–06 h MLT)のそれを上回っていることがわかる。X 線現象のほとんどは 60° – 70° の範囲で発生していることも明らかである。夜側においては大きな X 線現象は 60° – 70° の範囲に限られているが、昼間側においては 74° – 75° 付近の高緯度や小さな増加ではあるが 60° 以下の低緯度 (55° 付近) でも多くの X 線現象が見られることは注目すべき点である。

図6aはX線現象の発生地点の生のプロットであり統計的な処理はされていない。大気球の各緯度および各 MLT に対する観測時間は不均一であるため、統計的に意味のあるオーロラ X 線の極域全体にわたる広域空間分布を知るためには X 線発生頻度を地磁気極座標上に

表示する必要がある。そこで、不変磁気緯度について 5° 、MLT について 1 時間の領域内 (1 セクター) における全観測時間に対する平均計数率を求めた。図 6b に計数率を 6 つのグレードに分けて表示したものを示す。ここではバックグラウンドを差し引いたデータを用いているので、図中の 500 counts/30s 以上を示すセクターはオーロラ X 線が観測されたセクターと

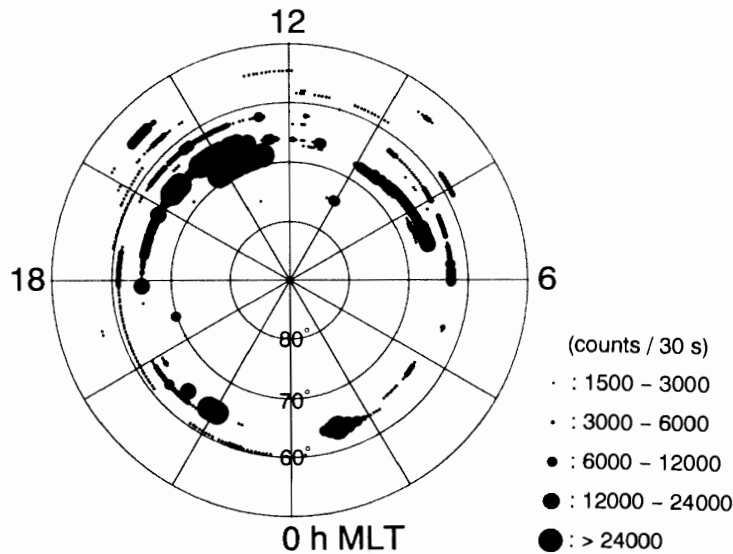


図 6a 地磁気極座標上でのオーロラ X 線の広域空間分布

Fig. 6a. Global distributions of auroral X-ray events displayed in polar coordinates of invariant latitude and MLT.

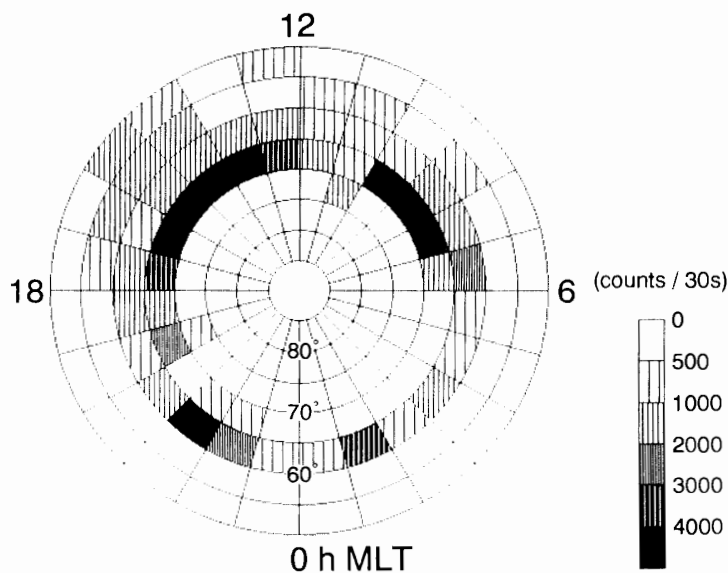


図 6b 地磁気極座標上でのオーロラ X 線の広域空間分布。不変磁気緯度について 5° 、MLT について 1 時間の領域内 (1 セクター) における全観測時間に対する平均をとった。

Fig. 6b. Global distributions of mean auroral X-ray counting rates within sectors of 5° latitude and one hour MLT displayed in polar coordinates of invariant latitude and MLT.

判断できる。図 6b から昼間側で X 線現象が卓越していることは明らかである。PPB#6 は不変磁気緯度について 49° – 81° の範囲を飛行したが、地磁気極座標上での大気球の飛行航路を考慮すると統計的に意味のある有効セクターは 50° – 80° の範囲にある 144 個のセクターと考えられる (KODAMA *et al.*, 1995)。有効セクターのうち 52 セクターで 500 counts/30s 以上のオーロラ X 線が観測された。この 52 セクターのうち約 67% (35 セクター) が昼間側にあり、約 33% (17 セクター) が夜側に分布している。また、昼間側で発生した 1000 counts/30s 以上のセクターが 50° – 75° の広い範囲に分布しているのに対して、夜側では計数率の多いセクターは 60° – 70° のオーロラ帯の中に限られている。オーロラオーヴァルは夜側で広く昼間側で狭いのが通常であるから、オーロラ X 線の空間分布はオーロラオーヴァルとは逆の形態を示している。ただし、3000 counts/30s 以上の X 線現象については昼間側では主に 65° – 70° の高緯度側で発生し、夜側では 60° – 65° の低緯度側で発生していることは一般的なオーロラオーヴァルの形態に一致する。図 6b が示す領域は X 線オーロラ帯に相当するものと考えられる。

オーロラ X 線の広域空間分布図には表示されていないバックグラウンドの 5σ 程度の小さな X 線の増加まで含めると、X 線が観測された緯度範囲は、 0 ± 2 h MLT で 58° – 71.6° 、 12 ± 2 h MLT で 54° – 76° であった。また、ポーラーキャップでは顕著な X 線現象は観測されていないものの、昼間側においてバックグラウンドの 2σ 程度の極めて弱い X 線の増加が見られた。

地球磁気圏内の高エネルギー現象に対応する X 線現象の広域空間分布が 1 機の大気球により観測されたのは本観測が初めてである。本観測で明らかになったオーロラ X 線（すなわち高エネルギー電子降下）の広域空間分布の特徴は昼間側で多くの現象が発生し、かつ、低緯度から高緯度までの広い範囲に分布していることである。これはオーロラオーヴァルと一致する点と逆の様相を示している点の両方を含んでいる。また、一般的なオーロラ帯より低緯度の 55° 付近においても X 線現象が発生していることは、昼間側の磁気圏の物理的プロセス（ダイナミクス）を解明するための非常に重要なデータであると考えられる。

4.4. オーロラ X 線計数率の時間変化特性

電子降下の原因が異なれば X 線現象が示す様々な特性に違いがでてくるものと思われる。不変磁気緯度や MLT が異なれば電子降下の原因も違ったものとなる可能性があり、X 線現象の様々な特性を不変磁気緯度や MLT をもとに分類することが必要である。特性が変化しない一連の X 線増加現象を“イベント”と呼ぶことにする。X 線イベントを確定したのちに、イベントの計数率時間変化の特性を分類し、エネルギースペクトルの *e*-folding energy (E_0) を求めた。計数率の統計上の問題から、X 線総計数率 (30–120 keV) の最大値が 3000 counts/30s 以上のイベントを解析に用いた。イベントの確定に用いた基準は次の通りである。

表 1 観測された X 線イベントの諸特性
 Table 1. Characteristics of observed X-ray events.

Event No.	開始時間 Day: UT	継続時間 min	最大計数率時刻		Max. counts /30s	Inv. lat. deg	Geogr. long. deg	E_0 keV	TP type	Day- side
			UT	MLT						
1	5:1054	60	1056	1109	1.4×10^4	66.3	39	31	Ii	o
2	5:1208	33	1214	1222	2.2×10^4	66.1	38	27	Ii	o
3	5:1318	104	1328	1330	5.3×10^4	65.7	37	27	I	o
4	5:1523	52	1533	1524	4.4×10^4	65.4	35	35	Ig	o
5	5:1616	129	1629	1614	1.4×10^4	65.3	34	36	I	o
6	5:1826	31	1839	1810	2.4×10^4	65.0	32	69	Ii	
7	5:1904	7	1906	1834	7.0×10^3	65.0	31	43	Ii	
8	5:2035	42	2059	2016	6.1×10^3	64.7	29	70	Ii	
9	5:2126	50	2156	2107	1.4×10^4	64.6	28	68	I	
10	5:2225	40	2258	2204	6.1×10^4	64.4	27	65	I	
11#	6:0141	180	0212	0114	2.2×10^4	63.8	24	24	Ig	
12	6:0641	21	0653	0608	1.6×10^4	62.8	18	46	Ii	o
13	6:0702	39	0708	0623	8.0×10^3	62.8	18	51	P(12)	o
14	6:0750	171	0756	0712	6.7×10^3	62.8	69	44	I	o
15	6:1142	59	1239	1138	6.5×10^3	62.2	12	54	I	o
16	6:1341	44	1347	1244	8.6×10^3	62.0	11	50	Ii	o
17	6:1426	195	1552	1434	1.1×10^4	61.7	9	46	Ig	o
18	6:1841	240	1908	1727	5.5×10^3	61.2	5	46	Ig	o
19	6:2341	195	0050	2245	4.6×10^3	60.4	359	48	P(45)	
20	7:0941	60	0944	0752	6.5×10^3	58.9	350	35	Ig	o
21	7:1141	198	1339	1129	4.3×10^3	58.5	346	48	Ig	o
22	7:1652	59	1736	1503	4.3×10^3	57.6	342	62	Ig	o
23	12:1802	118	1913	1054	3.5×10^3	60.0	210	38	Ig	o
24	13:0407	179	0516	2031	1.0×10^4	63.1	199	36	I	
25#	13:1105	134	1230	0329	5.0×10^3	64.8	192	19	Ig	
26#	13:1610	223	1635	0700	3.2×10^4	66.0	187	15	Ii	o
27	13:2242	118	2344	1325	2.6×10^5	68.6	178	23	I	o
28	14:0141	28	0151	1523	5.0×10^3	69.1	176	57	I	o
29	14:0534	16	0539	1912	3.2×10^4	69.8	172	10	Ii	
30	14:0551	72	0612	1945	5.0×10^3	70.0	171	12	Ig	
31#	14:1957	15	2008	0818	3.7×10^3	74.1	157	36	I	o
32#	14:2207	77	2216	1008	2.3×10^4	74.6	155	13	Ii	o
33#	14:2324	34	2331	1114	3.8×10^3	74.9	154	31	I	o
34	15:0141	18	0147	1319	5.5×10^3	75.7	151	11	Ii	o
35	19:0533	130	0721	0744	8.6×10^3	67.7	48	24	Ii	o
36#	19:0753	108	0917	0940	1.6×10^4	67.5	46	27	I	o
37	19:1042	67	1045	1106	5.3×10^3	67.3	45	29	I	o
38	20:0024	98	0159	0111	3.3×10^3	64.8	30	19	I	
39	20:0841	76	0902	0822	4.2×10^3	63.9	23	25	I	o
40	20:1133	122	1234	1142	3.3×10^3	63.7	20	30	Ig	o
41	20:1519	142	1614	1505	3.5×10^3	63.1	17	45	Ig	o
42	21:1731	239	1909	1651	4.4×10^3	59.8	352	48	Ig	o
43	25:1326	116	1412	0915	6.1×10^3	54.2	274	19	Ig	o
44	25:1641	173	1742	1229	4.9×10^3	54.6	271	22	Ig	o
45	25:1954	236	2020	1459	1.1×10^4	54.9	270	23	I	o

表 1 つづき
Table 1. (Continued)

Event No.	開始時間 Day:UT	継続時間 min	最大計数率時刻		Max. counts /30s	Inv. lat. deg	Geogr. long. deg	E_0 keV	TP type	Day- side
			UT	MLT						
46	26:0115	64	0120	1948	3.5×10^3	54.9	267	23	P(25)	
47	27:1803	163	1833	1140	4.0×10^3	57.9	234	42	Ig	o
48	27:2046	314	2254	1540	5.4×10^3	58.8	230	44	Ig	o

- 1) Inv. Lat. (不変磁気緯度), Geogr. Long. (地理的緯度) および E_0 は最大計数率時刻での値である.
- 2) #は二重指数関数スペクトル (double-exponent spectrum) イベントを表す.
- 3) TP type: タイムプロファイルの型 (詳しくは本文参照)
 I: Irregular
 P: quasi-Periodic, 括弧内の数字は周期 (min) を表す.
 i: impulsive (時定数 < 3 min)
 g: gradual (時定数 > 10 min)

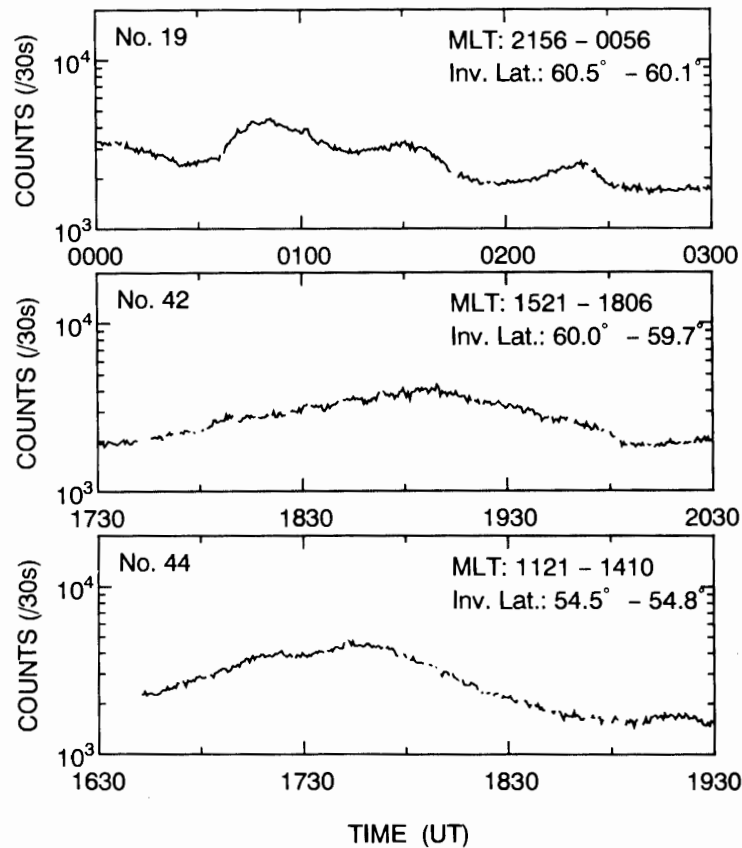


図 7 低緯度における典型的な X 線イベントの X 線総計数率 (30-120 keV) 時間変化. No. は表 1 の Event No. である.

Fig. 7. Typical examples of temporal variations observed in low latitude events. Event Nos. (see Table 1) are denoted at the left-hand top of each panel.

- 1) 基本的には、バックグラウンドから立ち上がり、またバックグラウンドに戻るまでを 1 イベントとする。
- 2) サブストームの平均的な継続時間は 2~3 時間であるので、1 イベントの継続時間の上限は ~3 時間とする。ただし長時間にわたりイベントの特徴が変わらないもの、すなわち、以下の 3), 4) の基準に対してはるかに小さな変化しかないものは同一イベントとする。
- 3) エネルギースペクトルが急激に大きく変化 (E_0 の変化で 10 keV 程度) したときは別イベントとみなす。
- 4) 計数率の時間変化特性が大きく変化したときは別イベントとみなす。計数率の時間変化特性の分類は以下のように行う。不規則な変化であるものを **Irregular (I)** タイプ、準周期的変化であるものを **quasi-Periodic (P)** タイプとする。また、時定数 3 分以内の変化があるものを **impulsive (i)** タイプ、時定数 10 分以上の変化であるものを **gradual (g)** タイプとする。ここでの時定数とは計数率の極小値から極大値までの時間である。

以上の基準により 48 イベントが確定され分類された。各々のイベントの計数率時間変化の特性と最大計数率時における E_0 とを表 1 に示す。ここでは X 線計数率の時間変化の不変磁気緯度に対する依存性に焦点を当てて調べた。不変磁気緯度 $\sim 60^\circ$ 以上で発生したイベントは時定数 10 分以下の早い計数率の変動を示すのに対して、 $\sim 60^\circ$ 以下で発生したイベントのほとんどは時定数 20 分以上の緩やかな時間変化を示す **gradual** なイベントである。また、 $\sim 60^\circ$ 以下では 2 イベントを除く全イベントが昼間側で発生している。時定数 3 分以下の **impulsive** なイベントのほとんどは $\sim 65^\circ$ 以上で観測されており、低緯度で発生したイベントと高緯度で発生したイベントとの計数率時間変化に明らかな違いが見られる。 $\sim 60^\circ$ 以下で発生したイベントの中には時定数が 60 分を越えるものもある。このようなイベントの中には単純な時間変化 (単調に増加しピークに達し、また単調に減少するような変化) を示し、計数率時間変化に顕著な時間的構造を持たないものが数例ある。図 7 に低緯度における典型的な X 線イベントの時間変化を示す。このような低緯度イベントの計数率時間変化の特徴は電子降下の原因を特定する鍵となるものと考えられる。

4.5. エネルギースペクトルの不変磁気緯度依存性

放射線帯の粒子は地球に近い内側ほど相対的にエネルギーの高い粒子が多いので、不変磁気緯度が 60° 以上 ($L \geq 4$) では観測される X 線のエネルギースペクトルは低緯度ほどハードになると予想される。X 線のスペクトルと不変磁気緯度との相関を概観するために、表 1 に示した X 線イベントの最大計数率時の E_0 を不変磁気緯度の関数としてプロットしたものを図 8a に示す。前述したようにチャンネル 1 のエネルギー範囲の X 線は大気による吸収が他のチャンネルのエネルギー範囲の X 線よりも大きく指数関数型スペクトルからはずれるので、本論文で示すすべての E_0 を求める計算において、観測時近くの静穏な期間に観測された

バックグラウンドを引いたチャンネル2, チャンネル3, チャンネル4の計数率を用いた, E_0 の値は不変磁気緯度が約 60° 以上では緯度の低下とともに増加しており, 低緯度ほどスペクトルがハードになっていることがわかる. 図8aの中央付近にある E_0 の変化を「主系列」と呼ぶことにする. 不変磁気緯度 54° 付近には主系列から外れてソフトなイベントがあり, 65° , 69° , 74° 付近にはハードなイベントが発生している. これらのハードなスペクトルを持つ7イベントは一つの直線に乗るように見えるが, この直線が主系列とほぼ同じ傾きを持っている点が注目される.

図8aはX線イベントの最大計数率時の E_0 をサンプリングしたものであり, X線イベント全体をとらえたものではない. X線イベント全体に対する E_0 の不変磁気緯度依存性を明らかにするために, X線総計数率(30–120 keV)が3000 counts/30 s以上のときの E_0 について不変磁気緯度 2° ごとに平均をとったものを図8bに示す. E_0 の分布は図8aの主系列と同様の傾向を示している. 図8b中の曲線は, 特に E_0 の大きな二点を除く各点について最小二乗法により求めた曲線である. 曲線の頂点はほぼ不変磁気緯度 60° ($L=4$)であり, これは平均的なプラズマポーズの位置である. 60° 以下はプラズマ圏に磁力線でつながっている領域とみ

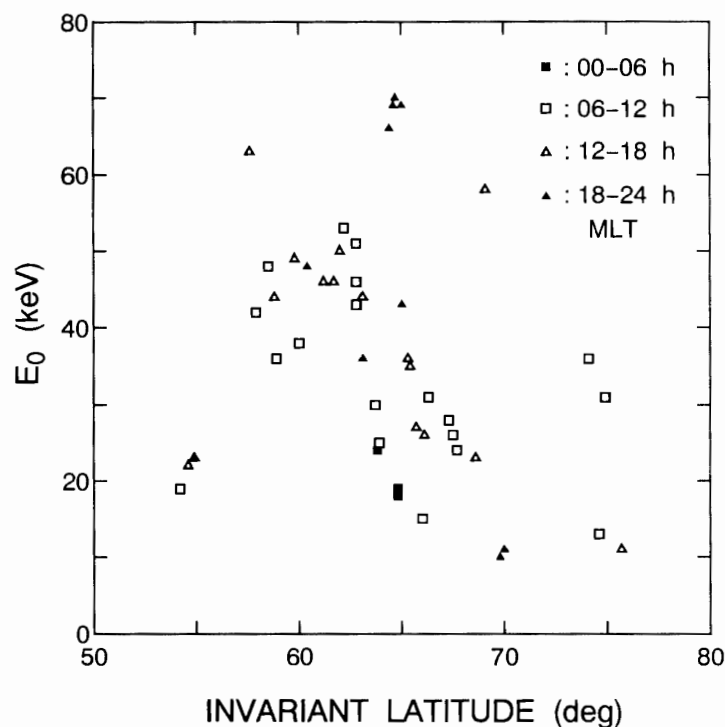


図 8a E_0 の不変磁気緯度依存性. 昼側のイベントと夜側のイベントとを open marks と solid marks とで区別した. 四角マークは午前イベントを現し, 三角マークは午後イベントを現す.

Fig. 8a. Invariant latitude dependence of the spectral exponent E_0 (e-folding energy). Dayside and nightside events are distinguishable by open and solid marks respectively. Square marks denote dawn side events, and triangle marks denote dusk side events.

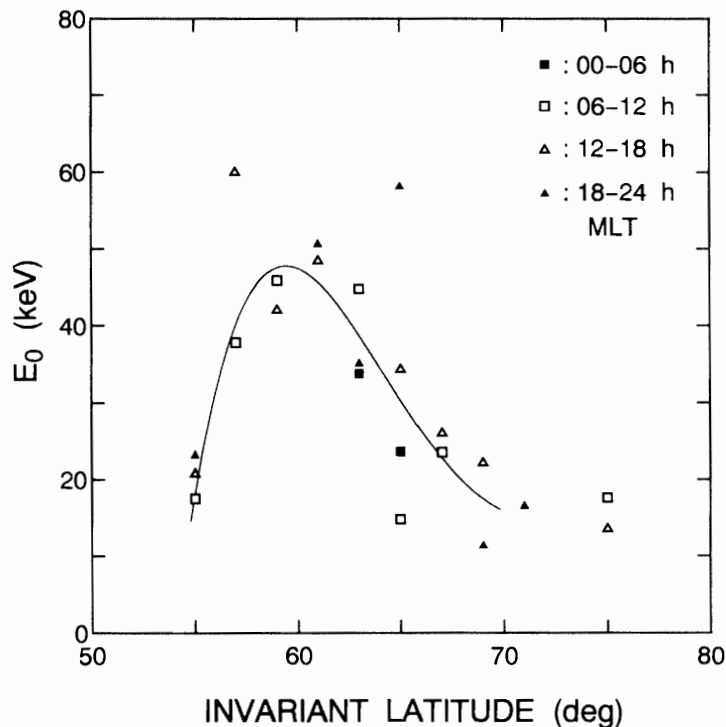


図 8b E_0 の不変磁気緯度依存性. X 線総計数率 (30–120 keV) が 3000 counts/30 s 以上の計数率のデータについて不変磁気緯度 2° ごとに平均をとった.

Fig. 8b. Invariant latitude dependence of the spectral exponent E_0 . Mean values of E_0 on energy 2° invariant latitude. X-ray counting rates higher than 3000 counts/30 s are adopted.

なすことができ、そこでは E_0 の値が緯度の低下とともに急激に小さくなっている。このようにプラズマポーズ付近でエネルギースペクトルが最もハードになることから、高エネルギー電子の降下とプラズマ密度との間に何らかの関係があることが推察される。

図 8a に見られるように 65° , 69° , 74° 付近には主系列から離れてエネルギースペクトルがハードな 7 イベントが起きている。これらのうち 6 イベントには共通した特徴がある。普通のオーロラ X 線イベントのスペクトルは計数率の増加とともにソフトになるかあまり変化しないものが多い。このような計数率とスペクトルとの相関を調べるためには E_0 を計数率の関数として表すとわかりやすい。図 9 (パネル (a), (b), (c)) に典型的な E_0 と計数率との相関を示す。 E_0 はチャンネル 2, 3, 4 (50–120 keV) の計数率から求めたので、横軸は 50–120 keV の計数率である。パネル (a), (b) は多くのオーロラ X 線イベントで見られる E_0 と計数率との相関であり、計数率の増加とともにスペクトルはソフトになるかあまり変化しないタイプである。主系列に属するイベントの多くがどちらかに分類される。前述した図 8a の 65° , 69° , 74° 付近の 7 イベントの内 6 イベントは、パネル (c) のように計数率の増加とともにスペクトルはハードになるタイプであり、主系列のイベントとは明らかな違いを見せている。これは電子降下の原因もしくは降下電子の加速機構が異なっているためではないかと思われる。

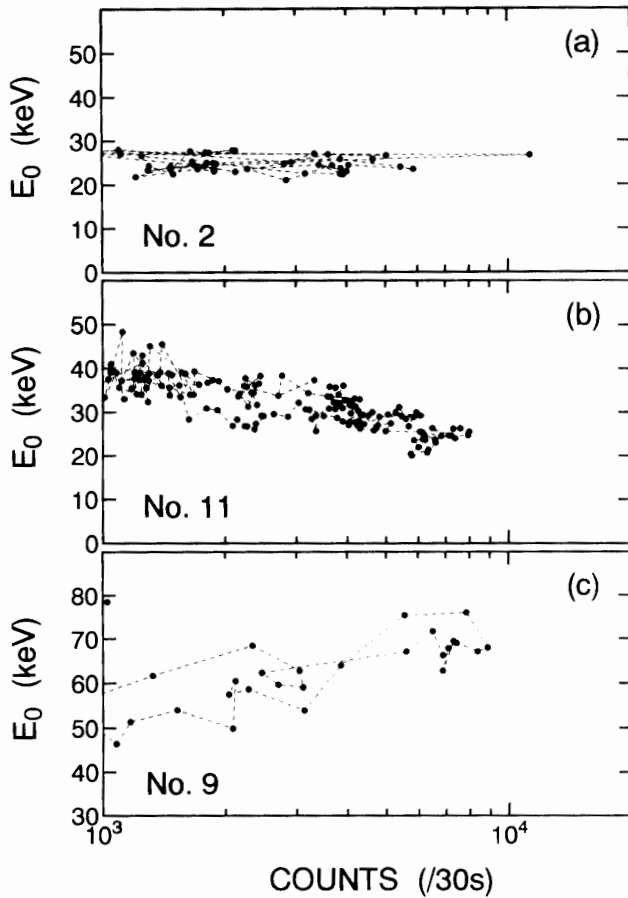


図 9 E_0 と X 線計数率との相関. 横軸は 50-120 keV の X 線計数率である. パネル (a): 計数率が変化しても E_0 は規則的に変化しないタイプ. パネル (b): 計数率の増加とともに E_0 が減少するタイプ. パネル (c): 計数率の増加とともに E_0 が増加するタイプ. 図中の No. は表 1 の Event No. に対応する.

Fig. 9. E_0 -flux relations for three typical pronounced events. Event Nos. (see Table 1) are denoted at the right-hand top of each panel. Panel (a): stable type of E_0 , (b): downward type of E_0 , (c): upward type of E_0 .

4.6. エネルギースペクトルの magnetic local time 依存性

図 10 は PPB#6 により観測されたオーロラ X 線の E_0 を MLT の関数として表示したものである. ここでは 5 分間の平均値で X 線総計数率が 3000 counts/30s 以上のときの E_0 のみを表示してある. また, E_0 の不変磁気緯度に関する依存性の影響を小さくするために, 不変磁気緯度 65° 以上のデータだけを表示してある. 破線は SPARMO バルーンキャンペーン (BEWERSDORFF *et al.*, 1966) による複数の気球により得られた観測結果である. 明らかに E_0 は 06-18 h MLT の範囲内 (昼間側) において時間とともに増加している. 昼間側における E_0 の MLT 依存性は, すなわち, 朝方から夕方にかけてのスペクトルのハード化の傾向は, SPARMO バルーンキャンペーンの観測結果と一致している. なお SPARMO バルーンキャンペーンは北半球の磁気緯度 65° 付近で行われ, E_0 の決定には GM カウンターが用いられた. 図 10 中の二本の破線は SPARMO による E_0 の上限値と下限値とを表している. 本観測によるデータポイントは SPARMO による下限値よりも一様に下方にシフトしており, 量的な点においては SPARMO の結果とは一致していないように見える. これは, SPARMO による E_0 は観測された X 線の「平均エネルギー」であり, 実際の E_0 ではないことによるものと思われる.

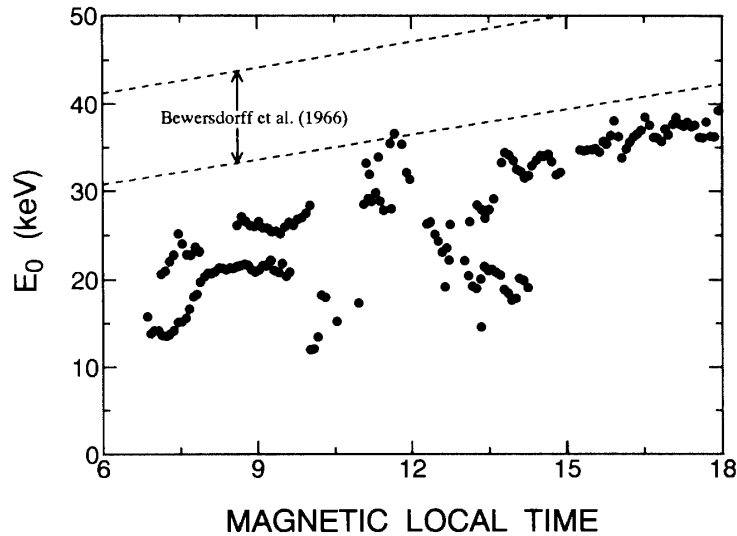


図 10 不変磁気緯度 65° 以上における E_0 の MLT 依存性. 破線は BEWERSDORFF *et al.* (1966) により得られた観測結果である.

Fig. 10. The e-folding energy E_0 versus MLT in $>65^\circ$ invariant latitudes. Two broken lines show the statistical summary by BEWERSDORFF *et al.* (1966).

4.7. 二重指数関数スペクトル

大気球高度での二重指数関数スペクトルの現れ方は、大気深度、 E_0 およびフラックスに依存するので単純には表現できないが、二つの指数関数型スペクトルが交差をしたようなスペクトルとなることが多い。このような二重指数関数スペクトルはハードなスペクトルを持つ降り込みの上によりソフトなスペクトルを持つ降り込みが重畳したものと考えられる。このとき片方の E_0 が 10 keV 以下の場合、この降り込みによる 50 keV 以上のエネルギーへの寄与は少なく、二つの指数関数の交差点は 50 keV 以下になることが多い。一般に大気球によるオーロラ X 線観測では低エネルギーチャンネルの範囲として $20\text{--}40\text{ keV}$ とか $30\text{--}50\text{ keV}$ などを採用することが多いので、このような二重指数関数スペクトルは低エネルギーチャンネルの計数率が高エネルギー側から直線で外挿した値より大きくなるように観測される。

典型的なオーロラ X 線のエネルギースペクトルとして、図 9 (パネル (a), (b), (c)) に示した X 線イベントの最大計数率時のスペクトルを図 11 (パネル (a), (b), (c)) に示す。図 11 パネル (b) は明らかに二重指数関数スペクトルを示している。

明らかに $E_0 < 10\text{ keV}$ の X 線の降り込みを伴うと判断される二重指数関数スペクトルを持つイベントは PPB#6 の全観測期間で 7 例見つかっている (表 1 参照)。これらのイベントはすべてが午前側 (00–12 h MLT) で発生していた。不変磁気緯度 60° 以下の低緯度ではこのような二重指数関数スペクトルを持つイベントは見られなかった。発生するオーロラ X 線が $E_0 < 10\text{ keV}$ のスペクトルになるような降下電子は、エネルギー的にはディスクリートオーロラを発生させる降下電子に相当する。上述の二重指数関数スペクトルを持つイベント、すな

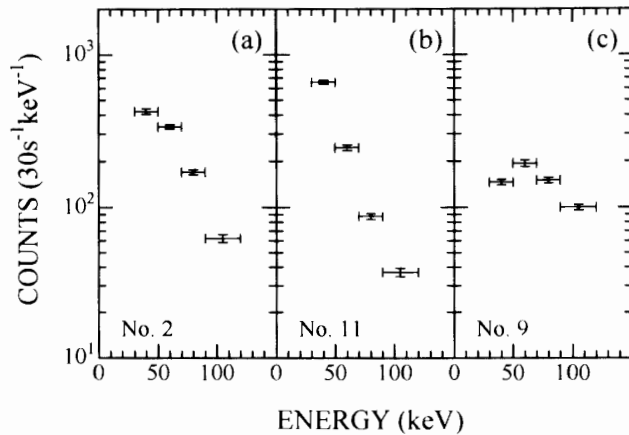


図 11 図 9 (パネル (a), (b), (c)) の最大計数率時のエネルギースペクトル. 図中の No. は表 1 の Event No. に対応する
Fig. 11. Energy spectra of each event at maximum counting rate in Fig. 9. Event Nos. (see Table 1) are denoted at the left-hand bottom of each panel.

わちソフトなスペクトルを有する電子降下イベントが 60° 以上の高緯度の朝側のみで観測されていることは, MLT が進むにつれスペクトルがハード化する事実との関連があると思われる.

5. 観測結果の考察

今回観測されたオーロラ X 線広域空間分布 (高エネルギー電子降下広域空間分布) の特徴は, 図 6a, b に見られるように昼間側において卓越し, 不変磁気緯度 54° ($L=2.9$) から 76° ($L=17.1$) までの広い範囲にわたることである. 特に, 昼間側での低緯度側への広がり特徴的である. 本章では PPB#6 によって観測されたオーロラ X 線の広域空間分布を, 特に昼間側での高エネルギー電子降下に焦点を当てて検討する. さらに, オーロラ X 線のエネルギースペクトルの特性についての考察を行う.

5.1. オーロラ X 線の広域空間分布および昼間側の高エネルギー電子降下

本節では, 主に観測結果の特徴である昼間側における高エネルギー電子降下現象に関連する他の観測との比較を行い, また, 電子降下の機構はどのようなものか検討する.

図 6a, b に示されているように, オーロラ X 線の広域空間分布とオーロラオーヴァルとは一致する点もあるが異なる点が多い. 60° 以下における観測時間は昼側夜側ともに 10 日以上あったが, 夜側ではオーロラ X 線イベントはほとんど観測されていない. 図 6a, b より, 夜側におけるオーロラ X 線現象は, 主に 60° – 70° で発生していると考えられる. これに対して, 昼間側では 75° 以上の高緯度および 55° 以下の低緯度でも X 線現象が観測され, イベントの総数も多かった. バックグラウンドの 5σ 程度の極めて弱い降り込みまで考えると, X 線の観測された緯度範囲は, 0 ± 2 h MLT で 58° – 71.6° , 12 ± 2 h MLT で 54° – 76° であり, この高緯度側境界はほぼオーロラオーヴァルの高緯度側境界に一致している.

地球周辺の高エネルギー電子の分布は人工衛星を用いれば直接観測できる. FRANK *et al.*

(1964) は Injun 3 衛星により $E \geq 40 \text{ keV}$ の捕捉電子強度と降下電子強度の日変化を観測し、それらの強度分布を地磁気極座標上に示した。彼らの観測によると、 $E \geq 40 \text{ keV}$ の捕捉電子および降下電子の高緯度側検出限界の不变磁気緯度は真昼 (12 h MLT) においては 77° ($L \cong 20$)、真夜中 (0 h MLT) においては 69° ($L \cong 8$) であった。彼らの示した $E \geq 40 \text{ keV}$ の電子の高緯度側検出限界はオーロラオーヴァルの高緯度側境界にほぼ一致している。これは本観測の X 線現象の高緯度側境界とほぼ一致している。彼らの示した降下電子の最大計数率は 11 h MLT 付近の $L=4-8$ に見られた。本観測でも昼間側で多くのイベントを観測しており、夜よりも昼間側で高エネルギー電子降下の頻度が高いという傾向は一致している。

高エネルギー電子降下は電離層境界領域の電離度を増大させる。KIKUCHI (1981) と KIKUCHI and EVANS (1983) は地上ステーションから発射された 10-20 kHz の VLF 電波がオーロラ帯付近の電離層で反射される際の位相変化の解析を行った。その解析結果はサブストームに関連して、VLF の位相異常が高エネルギー電子の降下により電離層が下方に厚みを増したために発生した可能性を示唆していた。この現象は真夜中前 (pre-midnight) に一番多く観測されたが、昼間側の 12 h MLT 前後を除く午前と午後にも多く観測された。KIKUCHI (1981) の示した地方時間に対する粒子降下の頻度分布図は図 6a, b とよい一致を示している。また、その電子降下は磁気圏尾部で加速されたものが東回りにドリフトしてのち昼間側の領域で降下したものであることを暗示するものであった (KIKUCHI, 1981)。本論文における観測と KIKUCHI (1981), KIKUCHI and EVANS (1983) の観測とでは地磁氣的活動度に若干の違いがあるものの、彼らの観測結果と本研究で明らかにされた昼間側で卓越する高エネルギー電子降下の様相とは矛盾するものではない。

本観測を含めて幾つかの観測は昼間側における高エネルギー電子降下を示唆している。このような昼間側における高エネルギー電子降下はどのような物理機構により発生しているのだろうか。地球磁場によって捕捉された電子が大気中に降下するためには、大気外にあるミラーポイントが大気内に下がってくる必要がある。ミラーポイントを下げるためには電子のピッチ角が小さくなることが必要であり、そのためにはピッチ角散乱もしくは磁力線方向への加速が要求される。昼間側における高エネルギー降下電子は、磁気圏尾部において加速されたプラズマシート起源の電子が地球側にインジェクトされ磁場勾配により地球磁場のクローズドシェル内をドリフトしてきたものか、放射線帯の高エネルギー電子が昼間側においてピッチ角散乱、もしくは、付加的な加速を受け降下したものと考えられる。ここでは昼間側において起こり得る電子降下の原因を考えてみる。

地球磁気圏の中には様々な電流系が存在しており、その変動は磁場の变化として観測されている。よって、サブストーム時に電離層より高高度の地球磁場が磁気圏内の電流により擾乱を受け、ドリフト電子もしくは放射線帯の高エネルギー電子がピッチ角散乱を受け降下する可能性がある。昼間側の沿磁力線電流は通常 75° 付近にあるため、それに関連した昼間側

での電子降下現象は上向きの沿磁力線電流の領域がサブストームの活動度が高くなるのにしたがって低緯度にまで伸びてくることに起因するものであろう (IJIMA and POTEIRA, 1976).

沿磁力線電流は主に数 keV の電子の流れであり、沿磁力線電場により駆動されていると考えられる。この電子流ではオーロラ X 線を発生させることはできないが、数十 keV の捕捉電子がこの電場の中にはいると、磁力線方向への加速を受けピッチ角が減少し大気内に降下する可能性がある (HIRASIMA, 1991)。沿磁力線電場の分布はオーロラオーヴァルに一致しており、昼間側では 75° を中心とした高緯度側に、夜側では 67° を中心とした領域に分布している (例えば LIN and HOFFMAN, 1982)。この分布は本観測によるオーロラ X 線広域空間分布の高緯度側境界に近く、したがって、沿磁力線電場によるピッチ角減少は高緯度側で発生したイベントの電子降下の原因の一つであろう。

電子のミラーポイントの降下は沿磁力線電場による磁力線方向への加速やピッチ角散乱の他に、ミラーポイント付近の磁場の減少によっても起きうる。ミラーポイント付近の磁場が減少する可能性の一つに磁気圏内への「プラズモイド (plasmoid)」の侵入が考えられる。プラズモイドとは密度分布が不均一なプラズマの集団である。LEMAIRE and ROTH (1991) は太陽風が非均一で流れが定常的でないとき、太陽風に運ばれてきたプラズモイドが昼間側の地球磁気圏深部に侵入することを示した。太陽風プラズマは磁場凍結の原理によりその中に磁場を持つ。すなわちプラズモイドの侵入は地球磁場を乱す原因となりうる。ミラーポイント付近の磁場の減少による電子降下の可能性を定量的に検討するために、磁場の減少に伴う降下電子フラックスを計算して観測された X 線フラックスから求められる降下電子フラックスと比較を行った。

通常、地球磁場に捕捉された電子の微分エネルギースペクトルは指数関数 $dN_e/dK = N_0 \exp(-K/K_0)$ で与えられる。ここで K は電子のエネルギーであり、 K_0 は電子の e -folding energy である。捕捉電子の K_0 は捕捉されている地磁気シエルの L 値および地磁気活動度に依存するが、20–200 keV の範囲にあると考えられる。高度 100 km 付近の一時的な磁場減少に起因する電子降下の増分フラックス $J_p(K_c)$ は

$$\begin{aligned} J_p(K_c) &= \int_{K_c}^{\infty} \int_{\cos \alpha_i}^{\cos \alpha_p} \frac{B_{100p}}{B_{eq}} \cos \alpha (-2\pi) d(\cos \alpha) N_0 \exp\left(-\frac{K}{K_0}\right) dK \\ &= \frac{B_{100} - B_{100p}}{B_{100}} \pi N_0 K_0 \exp\left(-\frac{K_c}{K_0}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここで、 B_{eq} , B_{100} , B_{100p} はそれぞれ磁気赤道面における磁場、通常時の高度 100 km における磁場、磁場の強さが減少した時の高度 100 km における磁場である。 α , α_i , α_p はそれぞれ電子のピッチ角、通常時のロスコーン角および磁場の強さが減少したときのロスコーン角である。 K_c は観測する最低エネルギーである。

降下電子は大気中で多重クーロン散乱を受けて方向を変え、また、制動放射 X 線は電子のエネルギーにより様々な方向に放射されるため、X 線は等方的に放射されると考えられる。よって、大気頂 (X 線発生層) での降下電子の単位立体角当たりの増加全フラックス $J_p(K_c)/4\pi$ と観測された X 線フラックスから推定される単位立体角当たりの降下電子フラックスとを比較すればよい。式 (2) から求められた磁場減少に伴う単位立体角当たりの降下電子フラックス (>50 keV) を電子の N_0 , e -folding energy (K_0) および磁場減少の割合 (%) の関数として図 12 に示す。ここでは、捕捉電子のピッチ角分布はロスコーン角外では等方的で、ロスコーン角内には分布していないとした。昼間側低緯度では $E_0=20\text{--}40$ keV ($K_0=30\text{--}100$ keV) で、チャンネル 2 (50–70 keV) の計数率が 1000–3000 counts/30s 程度のイベントが多く観測された。図 12 中にはチャンネル 2 の計数率が最大 3000 counts/30s の場合に推定される単位立体角当たりの降下電子フラックス (>50 keV) を電子の e -folding energy (K_0) の関数として示してある。

N_0 の値は電子が捕捉されている地磁気シェルの L 値および地磁気活動度に依存し 100 倍以上の変化をする (例えば LYONS and WILLIAMS, 1975) が、磁気赤道面においては $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ str}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ であると考えられる (HIRASIMA, 1991)。極域の高度 100 km 付近

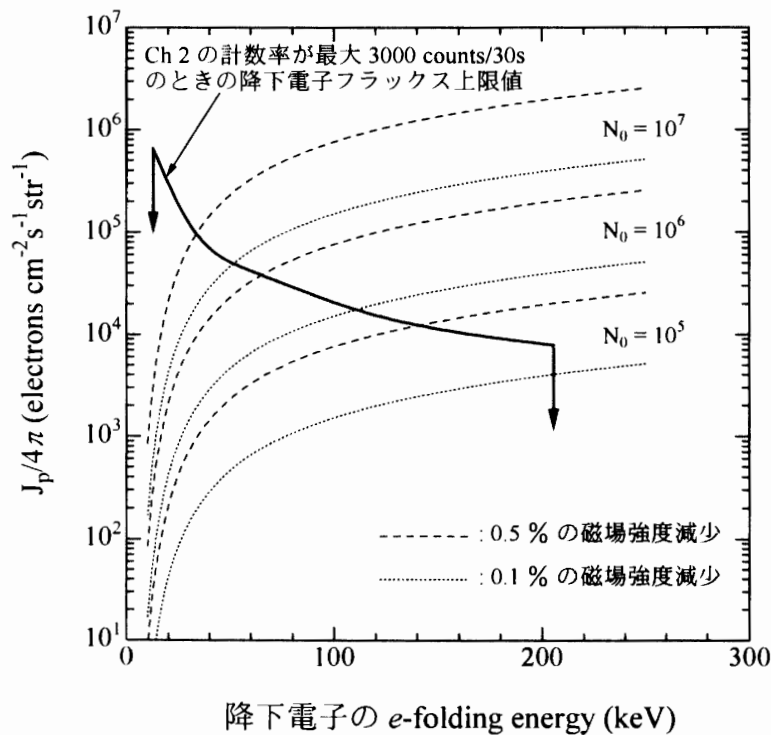


図 12 X 線観測値から推定した降下電子フラックス (実線) と磁場強度の減少に伴う降下電子フラックス (点線と破線) との降下電子の e -folding energy 依存性

Fig. 12. E -folding energy dependence of precipitated electron flux estimated from observed X-ray flux (solid line). Also precipitated electron flux with magnetic field decreases are shown (dotted line and broken line).

の磁場強度は $L=3-15$ ($54.7^\circ-75.0^\circ$) の範囲で $0.52-0.58$ gauss ($52000-58000$ nT) とした。図 12 によると $N_0=1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ str}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ のときでも 0.1% の磁場減少が起これば観測結果を説明できることがわかる。0.1% (~ 50 nT) 程度の磁場減少は頻繁に起こり得るのでこれに伴い電子降下が起こる可能性は十分にある。

VLF や ELF と電子との間に起きるサイクロトロン共鳴波動粒子相互作用は電子降下の重要な機構の一つと考えられている。ROSENGERG *et al.* (1971) は VLF エミッションと時間的相関が非常に良いオーロラ X 線の増加現象を見だし、この電子降下現象の原因はサイクロトロン共鳴によるピッチ角減少で説明されるとした。現在では VLF, ELF エミッションは粒子とのサイクロトロン共鳴により発生されると考えられており、VLF や ELF のエミッションが観測される場所では電子降下現象が起きている可能性が非常に強い。

THORNE *et al.* (1974, 1977) は人工衛星 OSO-6 の観測データから ELF, VLF の日変化に関して興味ある結果を示した。彼らは、正午付近から夕方早々の時間帯では、100-1000 Hz の ELF エミッションと地磁気活動度との間に負の相関があるのに対して、朝方では正の相関が見られることを見だした。地磁気擾乱時に強くなる朝方のエミッションは高緯度側 ($L > 4$) で特に強く、エミッションの特徴からコーラスエミッションと認められた。地磁気活動度が比較的低いときには、エミッションは正午から夕方にかけての低緯度側に発生しており、エミッションのダイナミックスペクトルの特徴からプラズマ圏ヒスであることがわかった。以上の観測結果を説明するために、THORNE *et al.* (1974) は次のような電子のドリフトモデルを提案した。

地磁気活動度が比較的低いとき、10-100 keV の電子は地球を周回するドリフト軌道をとる。彼らの説明によると、このときのドリフト電子は夕方側のプラズマ圏に侵入してサイクロトロン共鳴により ELF ヒス (プラズマ圏ヒス) を発生させる。一方、地磁気擾乱時には朝側から夕方側に向かう convection electric field により電子の軌道は変化を受け、地球を周回することなく外部磁気圏に逃げてゆきプラズマ圏に侵入することはない。このときのドリフト電子は朝側において ELF, VLF のコーラスエミッションを発生させる。

いずれの場合でも ELF を発生させたドリフト電子はピッチ角散乱を受け大気中に降下するはずである。サイクロトロン共鳴を起こす降下電子のエネルギーはプラズマ密度や磁場の強さに依存するが、プラズマ圏の中では 1 kHz 以下の ELF に対しておおよそ 30 keV 以上の電子が共鳴を起こす。プラズマポーズの外側の比較的地球に近いところではそれ以上のエネルギーの電子が共鳴を起こす。この電子のエネルギーは気球高度で観測されるオーロラ X 線を発生させることができるものである。彼らの観測では、地磁気活動度が比較的低いときに ELF エミッションは昼間側低緯度において卓越しており、プラズマ圏ヒスとのサイクロトロン共鳴に因る電子降下は昼間側低緯度 ($< 60^\circ$) で起きていることになる。本観測では地磁気活動が中程度のとき昼間側低緯度において多くの X 線イベントを観測しており、

THORNE *et al.* (1974) の観測事実と矛盾しない。

CNA は電子降下現象そのものに対応しているため、本観測との比較を行う上で都合が良い。VLF エミッション日変化と CNA の日変化とを直接比較した観測に次のものがある。ROSENBERG and DUDENEY (1986) は南極の $L \approx 4$ にある基地において 1975 年 1 年間に観測された CNA データの解析を行い、CNA の日変化の平均像を示した。それによると、地磁気活動度が比較的低いとき ($AE \leq 140$ nT) は 12–20 h MLT に CNA の増加が起きていた。彼らは、また、2–4 kHz の VLF 強度の日変化を求め、前述の CNA 日変化との比較を行った。彼らの解析によると、地磁気活動度が比較的低いときの VLF は顕著な日変化を示しておらず、CNA との相関は特に見られない。ただしこの VLF データは地上にある基地で得られたものである。彼らは THORNE *et al.* (1974) の提唱した電子のドリフトモデルを用いて彼らの観測結果の説明をしている。地磁気活動度が比較的低いときの 12–20 h MLT における CNA の増加は、同程度の地磁気活動度と思われる THORNE *et al.* (1974, 1977) の ELF エミッションの日変化と一致している。一方、VLF の日変化については顕著な変化はなく THORNE *et al.* (1974, 1977) とは異なっている。地磁気活動度が比較的低いときに THORNE *et al.* (1974, 1977) が正午から夕方にかけて観測した ELF エミッションはプラズマ圏ヒスであり、地上ではほとんど観測できない。よって両観測結果の間には本質的矛盾はなく、ROSENBERG and DUDENEY (1986) が地磁気活動度が比較的低いときに観測した昼間側の CNA の増大を引き起こす粒子降下の原因は、THORNE *et al.* (1974) の提唱した電子のドリフトモデルを考慮すると、プラズマ圏ヒスとドリフト電子とのサイクロトロン共鳴であると結論される。ROSENBERG and DUDENEY (1986) の観測はプラズマポーズに対応する $L \approx 4$ にある基地で行われており、オーロラ帯低緯度側の電子降下を観測したものといえる。本観測により求められた X 線広域空間分布は、同程度の地磁気活動度における彼らの観測結果とほぼ一致しており、X 線広域空間分布が示す低緯度における高エネルギー電子降下の原因としてサイクロトロン共鳴が示唆される。

本観測において不変磁気緯度 $\sim 60^\circ$ 以下の低緯度で観測された X 線現象のほとんどは、図 7 に示したような計数率時間変化に顕著な時間的構造がなく時定数 20 分以上の緩やかな時間変化を示す「gradual」なイベントであった。これに対して、高緯度側のイベントは速い時間変化を示しており、ほとんどの時定数 3 分以下のイベントは不変磁気緯度 $\sim 65^\circ$ 以上で発生していた。不変磁気緯度による X 線計数率の時間変化特性の違いは電子降下の原因もしくは条件の違いからくるものと考えられる。プラズマ圏と磁力線でつながっている不変磁気緯度 $\sim 60^\circ$ 以下の低緯度で観測された X 線現象の時間特性はプラズマ圏ヒスの放射特性とよく似ている。これは不変磁気緯度 $\sim 60^\circ$ 以下の低緯度での電子降下の原因が、プラズマ圏における ELF ヒスと関連したサイクロトロン共鳴である可能性を示唆している。高緯度側で観測された速い時間変化を示す X 線イベントはコーラスエミッションに対応させられる

が、実際、PPB#6 放球直後の X 線時間変化は地上基地で観測されたコーラスエミッションとの対応がきわめてよく、サイクロトロン共鳴による電子降下現象と確認されている（下林, 1995）。

5.2. エネルギースペクトルの不変磁気緯度依存性

図 8a, b に示されるように、不変磁気緯度 $\sim 60^\circ$ 以上で観測されたオーロラ X 線の E_0 は不変磁気緯度が低いほど大きく、すなわちスペクトルがハードになっている。一方、 $\sim 60^\circ$ 以下では 54° 付近のデータが示すようにスペクトルはソフトになっている。平均的には図 8b に示されている曲線のような不変磁気緯度依存性があると考えられる。

KENNEL and PETSCHKE (1966) によると、角周波数 ω のホイッスラーモードウェーブとサイクロトロン共鳴を起こす電子の磁力線に平行な方向の運動エネルギー ($K_{\parallel, \text{res}}$) は次式で表現される (gauss 単位系)。

$$K_{\parallel, \text{res}} = \frac{B^2}{8\pi N} \frac{\Omega_e}{\omega} \left(1 - \frac{\omega}{\Omega_e}\right)^3, \quad (3)$$

ここで、 Ω_e は電子のサイクロトロン角周波数である。B は磁場の強度、N は電子密度である。 $B^2/8\pi N$ は共鳴エネルギーと呼ばれる。磁気赤道面における電子密度、共鳴エネルギーおよび周波数 500 Hz, 1, 1.5, 2 kHz のホイッスラーモードウェーブと共鳴する電子の $K_{\parallel, \text{res}}$ を不変磁気緯度の関数として図 13 に示す。ここではプラズマポーズの位置を $L=4$ ($\Lambda=60^\circ$) として、プラズマ圏内では $N=500(4/L)^4 \text{ cm}^{-3}$ 、プラズマ圏の外側では $N=1 \text{ cm}^{-3}$ とした (LYONS and WILLIAMS, 1984)。不変磁気緯度は $\Lambda = \arccos(L^{-1/2})$ で与えられる。図 13 によると、プラズマポーズより外側では不変磁気緯度の低下とともに共鳴エネルギーおよび $K_{\parallel, \text{res}}$ は高くなっていくが、プラズマポーズより内側では共鳴エネルギーおよび $K_{\parallel, \text{res}}$ が急激に低下していることがわかる。これは図 8b に示した E_0 の不変磁気緯度依存性とよく似た傾向であり、 E_0 の不変磁気緯度依存性がサイクロトロン共鳴と何らかの関係があることを示唆している。この関係は電子降下がサイクロトロン共鳴によるとすれば説明することができ、図 8a の主系列に属するイベントおよび 54° 付近のイベントの電子降下原因はサイクロトロン共鳴であると推測できる。また、図 8a の主系列から外れている 7 イベントは特異な E_0 と計数率との相関を示しており、電子の降下原因が主系列のそれと異なっている可能性を示唆している。

前節の終わりで述べたように、不変磁気緯度 $\sim 60^\circ$ 以下の低緯度で観測された X 線現象の時間特性はプラズマ圏ヒスの放射特性とよく似ており、 $\sim 60^\circ$ 以下の低緯度での電子降下の原因はプラズマ圏における ELF ヒスとのサイクロトロン共鳴であると推察された。また、エネルギースペクトルの不変磁気緯度依存性からも電子降下の原因がサイクロトロン共鳴である可能性が示された。これら二つの観測事実は、電子降下の原因が共に捕捉電子と VLF, ELF とのサイクロトロン共鳴であることを示唆しており、磁気圏内のダイナミカルプロセス

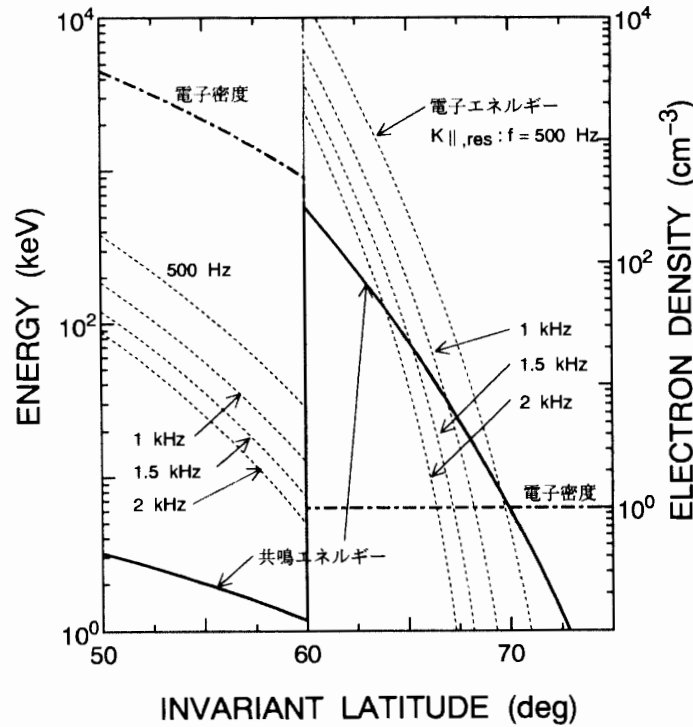


図 13 磁気赤道面における共鳴エネルギー $B^2/8\pi N$ の不変磁気緯度依存性
 Fig. 13. Resonance energy $B^2/8\pi N$ for cyclotron resonance versus invariant latitude at the magnetic equator.

を説明するための重要な情報になると思われる。

5.3. エネルギースペクトルの magnetic local time 依存性

図 10 に示したように、不変磁気緯度 65° 以上で観測されたオーロラ X 線のエネルギースペクトルは明確な日変化を示し、6-18 h MLT の時間帯ではしだいにハードになっている。人工衛星による電子の直接測定から降下電子のスペクトルの日変化を示唆する観測がある。

McDIARMID *et al.* (1975) は ISIS 2 衛星により観測されたデータから、150 eV 以上の降下電子と地球磁場による捕捉電子の平均強度を地磁気極座標上（不変磁気緯度-MLT）に示した。彼らによると、22 keV 以上の捕捉電子の強度分布は真夜中から午前中（朝側）にかけて強い領域が広がっており、不変磁気緯度 $\sim 65^\circ$ 、6 h MLT 付近に最大強度を示す領域がある。これに対して、210 keV 以上の捕捉電子の強度分布は磁極を中心としてほぼ同心円状の強度等高線が示されており、MLT に対する依存性はほとんどないように見える。すなわち、22-210 keV の範囲の中でエネルギーの低い電子の部分は主に午前側で降下してしまい、ドリフトをして午後側に到達するものは少なく、したがって、相対的にエネルギースペクトルはハードになると考えられる。これは本観測結果と矛盾するものではない。

ソフトなスペクトル ($E_0 < 10$ keV) を持つ二重指数関数イベントはすべて午前側で観測さ

れているが、これはエネルギーの低い電子は主に午前側で降下して失われてしまい午後側ではハードなスペクトルを持つ成分のみが観測されるためと考えられる。これは朝側から夕方側にかけてのスペクトルのハード化との整合性がある観測事実である。

低エネルギー電子が午前側で降下してしまう原因は MLT に依存したスペクトルのハード化の原因と同じものと考えられるが、理論的にはどのように説明されるだろうか。

LYONS *et al.* (1972) は、 $L \geq 5$ (不変磁気緯度で 63° 以上) ではサイクロトロン共鳴波動粒子相互作用による粒子降下のため、高エネルギー電子の軌道上の存続時間 (precipitation life time; ライフタイム) にエネルギー依存性が現れることを示した。このライフタイムはエネルギーの低い電子ほど短くなり、例えば、 $L=5$ における 200 keV の電子では約半日 (12 時間) であるが、 50 keV の電子では約 0.2 日 (4 時間 50 分) にすぎない。すなわち、地方時がすすむに従いエネルギーの低い電子は降下してしまい、相対的にエネルギーの高い電子の割合が増えるのでエネルギースペクトルはハードになると推察される。図 10 に示されている、朝方から夕方にかけてエネルギースペクトルがハードになる現象は、降下電子のライフタイムの差により起こるものと考えられる。

6. 結 論

PPB#6 は $6\text{--}13 \text{ g cm}^{-2}$ の高度を保ち 27 日間の飛行を続け約一周半の極域周回飛行に成功した。有効な観測時間は約 24 日間であり、この間に不変磁気緯度について 49° から 81° ($L=2.3\text{--}40.9$) の範囲でオーロラ X 線の観測を行った。PPB#6 のような極域における大気球観測の実現は世界に先駆けて行われ、特に同一の観測装置によるオーロラ X 線の広域かつ長時間の観測は本実験で初めて成功した。

PPB#6 によるオーロラ X 線観測から明らかにされた極域における高エネルギー電子降下の広域特性は次の 3 点に要約される。

- 1) オーロラ X 線の広域空間分布 (高エネルギー電子降下の広域空間分布) の特徴は、昼間側において卓越し、不変磁気緯度 54° ($L=2.9$) から 76° ($L=17.1$) にわたる広い範囲で起きているということである。特に、昼間側での低緯度側への広がり特徴的である。低緯度での電子降下の原因の一つとして、他の観測結果からプラズマ圏ヒスとのサイクロトロン共鳴が推察されるが、オーロラ X 線の計数率時間変化の特徴はプラズマ圏ヒスの放射特性と一致しており、この推察を裏づけるものであった。
- 2) オーロラ X 線のエネルギースペクトルは不変磁気緯度に対して依存性を持ち、不変磁気緯度 $\sim 60^\circ$ 以上では緯度の低下とともにスペクトルは明らかにハードになる傾向を示した。また、 60° 付近で極大になったのち、それ以下の緯度ではソフトになるという変化を示した。この変化は磁気圏内で VLF, ELF とサイクロトロン共鳴を起こす電子の共鳴エネルギーの不変磁気緯度依存性と一致し、電子降下の原因としてサイクロトロン共鳴を示唆す

るものであった。

- 3) オーロラ X 線のエネルギースペクトルは磁気地方時 (MLT) に対する依存性を示し、時間とともにスペクトルはハードになる傾向を示した。また、全 X 線イベントの内 7 つのイベントは二重指数関数スペクトルを持つイベントであったが、7 イベントとも午前側で観測された。これは、ソフトなスペクトルを持つ成分は午前側で降下してしまうためと考えられ、従って、午後側ではスペクトルは相対的にハードになり、MLT に依存したスペクトルのハード化に矛盾しないものである。さらに、MLT に依存したスペクトルのハード化は、電子が地球の周りをドリフト運動により回っていく間に、比較的低エネルギーの電子がサイクロトロン共鳴に起因する短いライフタイムのために減少することで説明できる。

以上の 3 点は共に高エネルギー電子の降下原因としてサイクロトロン共鳴を示唆している。狭い範囲の地球磁場シェル内でサイクロトロン共鳴が起こることは以前から指摘されてきたが、ほぼオーロラ帯全域にわたる広い不変磁気緯度の範囲で起こる高エネルギー電子降下が一貫して矛盾なくサイクロトロン共鳴で説明されうることを本観測結果は示唆しているものと考えられる。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、終始懇篤なるご指導をいただいた立教大学平島洋助教授に深く感謝の意を表します。また、種々有益なるご助言をいただいた山梨医科大学名誉教授小玉正弘博士、宇宙科学研究所山上隆正助教授に深く感謝致します。立教大学の牧野忠男教授、白土鈿二教授ならびに柴崎徳明助教授には、論文完成までに多くのご討論をいただきましたことにお礼申し上げます。

PPB 実験に計画から実施に至るまでご尽力された国立極地研究所江尻全機教授、神奈川大学西村純教授をはじめとする PPB ワーキンググループ、国立極地研究所および宇宙科学研究所気球工学研究室の皆様に対し深い謝意を表明します。南極昭和基地での放球オペレーションおよびデータ取得は、宇宙科学研究所並木道義氏、東海大学利根川豊助教授、国立極地研究所佐藤夏雄教授をはじめとする第 33 次、第 34 次南極地域観測隊の方々により行われました。ここに心よりのお礼を申し上げます。大気球システムを製作された山上隆正助教授、太田茂雄氏をはじめとする宇宙科学研究所気球工学研究室の方々に深く感謝致します。PPB-6 号機の X 線観測装置および宇宙線観測装置の製作にご尽力された大阪市立大学中川道夫助教授ならびに同大学の大学院生の方々および山極巖氏に深謝致します。気球搭載用の観測データ処理装置製作においてお世話になりました立教大学村上浩之氏に厚くお礼申し上げます。ARGOS データの初期段階の処理および地磁気座標の計算は国立極地研究所の大型計算機 (HITAC M-680) で行いました。国立極地研究所情報科学センターのスタッフの方々に深い謝意を表明します。データ編集に関する適確な助言をいただきました国立極地研究所門倉

昭氏に感謝いたします。

Dst 指数は京都大学地磁気世界資料解析センターより提供されました。同センターのご厚意に感謝致します。

国立極地研究所受託学生時に国立極地研究所のスタッフの皆様にご指導いただきましたことを感謝いたします。

最後に、立教大学宇宙線研究室のスタッフならびに大学院の皆様には、多くの有益なご助言をいただきましことに厚く感謝の意を表します。

文 献

- ANDERSON, K. A. (1961): Secondary cosmic-ray photons below cascade energy. *Phys. Rev.*, **123**, 1435–1439.
- BARCUS, J. R. and ROSENBERG, T. J. (1966): Energy spectrum for auroral-zone X rays. *J. Geophys. Res.*, **71**, 803–823.
- BERKEY, F. T., DRIATSKIY, V. M., HENRIKSEN, K., HULTQVIST, B., JELLY, D. H., SHCHUKA, T. I., THEANDER, A. and YLINIEMI, J. (1974): A synoptic investigation of particle precipitation dynamics for 60 substorms in IQSY (1964–1965) and IASY (1969). *Planet. Space Sci.*, **22**, 255–307.
- BEWERSDORFF, A., DION, J., KREMSE, G., KEPPE, E., LEGRAND, J. P. and RIEDLER, W. (1966): Diurnal energy variation of auroral X-rays. *Ann. Geophys.*, **22**, 23–30.
- COFFEY, H. E. (1993): Geomagnetic and solar data. *J. Geophys. Res.*, **98**, 7691.
- EJIRI, M., KADOKURA, A., HIRASAWA, T., SATO, N., FUJII, R., MIYAOKA, H., NISHIMURA, J., YAJIMA, N., YAMAGAMI, T., KOKUBUN, S., FUKUNISHI, H., YAMANAKA, M. and KODAMA, M. (1993): Polar patrol balloon experiment in Antarctica. *Adv. Space Res.*, **13**, 127–130.
- 藤井良一・小野一彦・太田茂雄 (1992): 南極周回気球 (PPB) におけるマルチ ID アルゴスシステムを用いたデータ伝送. *南極資料*, **36**, 350–362.
- FRANK, L. A., VAN ALLEN, J. A. and CRAVEN, J. D. (1964): Large diurnal variations of geomagnetically trapped and of precipitated electrons observed at low altitudes. *J. Geophys. Res.*, **69**, 3155–3167.
- HIRASAWA, T., EJIRI, M., SATO, N., FUJII, R., MIYAOKA, H., KADOKURA, A., NISHIMURA, J., YAJIMA, N., YAMAGAMI, T., KOKUBUN, S., FUKUNISHI, H., YAMANAKA, M. and KODAMA, M. (1990): Polar patrol balloon experiment during 1991–1993. *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Space Technology and Science*, ed. by NASDA. Tokyo, Agune, 1593–1597.
- HIRASIMA, Y. (1991): Quantitative study of a localized bremsstrahlung X-ray flux due to the field-aligned electric field. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **43**, 539–547.
- IJIMA, T. and POTES, T. A. (1976): Field-aligned currents in the dayside cusp observed by Triad. *J. Geophys. Res.*, **81**, 5971–5979.
- KADOKURA, A., EJIRI, M., OHTA, S. and AKIYAMA, H. (1991): Polar Patrol Balloon (PPB) experiment of the 30th Japanese Antarctic Research Expedition (1989–1990). *Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.)*, **35**, 143–154.
- KENNEL, C. F. and PETSCH, H. E. (1966): Limit on stably trapped particle fluxes. *J. Geophys. Res.*, **71**, 1–28.
- KIKUCHI, T. (1981): VLF phase anomalies associated with substorm. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **18**, 3–22.
- KIKUCHI, T. and EVANS, D. S. (1983): Quantitative study of substorm-associated VLF phase anomalies and precipitating energetic electrons on November 13, 1979. *J. Geophys. Res.*, **88**, 871–880.
- 小玉正弘 (1972): バルーン観測一問一答. *極地*, **8**, 2–5.
- KODAMA, M., SUZUKI, H., HIRASIMA, Y., YAMAGAMI, T., MURAKAMI, H. and NISHIMURA, J. (1995): Circumpolar observation of bremsstrahlung X-rays by a polar patrol balloon over Antarctica. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **47**, 253–266.
- KREMSE, G., WILHELM, K., RIEDLER, W., BRØNSTAD, K., TREFALL, H., ULLALAND, S. L., LEGRAND, J. P., KANAGS, J. and TANSKANEN, P. (1973): On the morphology of auroral-zone X-ray events-II. Events

- during the early morning hours. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **35**, 713–733.
- LAZUTIN, L. L. (1986): *X-Ray Emission of Auroral Electrons and Magnetospheric Dynamics*. Berlin, Springer, 220 p. (Physics and Chemistry in Space 14) (Nauka, Moscow, 1979 in Russian).
- LEMAIRE, J. and ROTH, M. (1991): Non-steady state solar wind-magnetosphere interaction. *Space Sci. Rev.*, **57**, 59–108.
- LIN, C. S. and HOFFMAN, R. A. (1982): Observations of inverted-V electron precipitation. *Space Sci. Rev.*, **33**, 415–457.
- LYONS, L. R. and WILLIAMS, D. J. (1975): The storm and poststorm evolution of energetic (35–560 keV) radiation belt electron distributions. *J. Geophys. Res.*, **80**, 3985–3994.
- LYONS, L. R. and WILLIAMS, D. J. (1984): *Quantitative Aspects of Magnetospheric Physics*. Dordrecht, D. Reidel, 231 p. (Geophysics and Astrophysics Monographs Vol. 23)
- LYONS, L. R., THORNE, R. M. and KENNEL, C. F. (1972): Pitch-angle diffusion of radiation belt electrons within the plasmasphere. *J. Geophys. Res.*, **77**, 3455–3474.
- MATTHEWS, D. L., ROSENBERG, T. J., BENBROOK, J. R. and BERING III, E. A. (1988): Dayside energetic electron precipitation over the South Pole ($\lambda = 75^\circ$). *J. Geophys. Res.*, **93**, 12941–12945.
- MAUK, B. H., CHIN, J. and PARKS, G. (1981): Auroral X-ray images. *J. Geophys. Res.*, **86**, 6827–6835.
- MCDIARMID, I. B., BURROWS, J. R. and BUDZINSKI, E. E. (1975): Average characteristics of magnetospheric electrons (150 eV to 200 keV) at 1400 km. *J. Geophys. Res.*, **80**, 73–79.
- 並木道義・利根川豊・佐藤夏雄・PPB ワーキンググループ (1995): 1992 年度南極周回気球実験, 宇宙科学研究所報告, 特集, **32**, 3–22.
- NEHER, H. V. (1961): Cosmic-ray knee in 1958. *J. Geophys. Res.*, **66**, 4007–4012.
- NEHER, H. V. and ANDERSON, H. R. (1962): Cosmic rays at balloon altitudes and the solar cycle. *J. Geophys. Res.*, **67**, 1309–1315.
- NISHIMURA, J., KODAMA, M., TSURUDA, K., FUKUNISHI, H. and Co-members of PPB Working Group (1985): Feasibility studies of “Polar Patrol Balloon”. *Adv. Space Res.*, **5**, 87–90.
- 太田茂雄・西村 純・広沢春任・山上隆正 (1985): アルゴシステムの気球利用試験. 宇宙科学研究所報告, 特集, **13**, 277–286.
- ROSENBERG, T. J. and DUDENEY, J. R. (1986): The local time, substorm, and seasonal dependence of electron precipitation at $L \approx 4$ inferred from riometer measurements. *J. Geophys. Res.*, **91**, 12032–12040.
- ROSENBERG, T. J., HELLIWELL, R. A. and KATSUFRAKIS, J. P. (1971): Electron precipitation associated with discrete very-low-frequency emissions. *J. Geophys. Res.*, **76**, 8445–8452.
- 下林 央 (1995): オーロラ X 線と地磁気脈動・VLF 電波との相関および高エネルギー電子降下機構. 立教大学修士論文.
- THORNE, R. M., SMITH, E. J., FISKE, K. J. and CHURCH, S. R. (1974): Intensity variation of ELF hiss and chorus during isolated substorms. *Geophys. Res. Lett.*, **1**, 193–196.
- THORNE, R. M., CHURCH, S. R., MALLOY, W. J. and TSURUTANI, B. T. (1977): The local time variation of ELF emissions during periods of substorm activity. *J. Geophys. Res.*, **82**, 1585–1590.
- YAMAGAMI, T., NAMIKI, M., OHTA, S., YAJIMA, N., SUZUKI, H., HIRASIMA, Y., MURAKAMI, H., MORIMOTO, K., YAMAGIWA, I., NAKAGAWA, M., TAKAHASHI, T., MURAKAMI, S., NISHIMURA, J., TONEGAWA, Y., EJIRI, M., SATO, N., KOHNO, T. and KODAMA, M. (1994): A polar patrol balloon observation of cosmic-ray protons and auroral X-rays in Antarctica. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **46**, 903–908.

(1996 年 4 月 30 日受付; 1996 年 5 月 23 日改訂稿受理)