

# PPB8 号機と PPB10 号機によるオーロラ X 線の同時観測

中川 道夫<sup>1</sup>, 海老原 祐輔<sup>2</sup>, 江尻 全機<sup>3</sup>, 福田 真実<sup>1</sup>, 平田 憲司<sup>1</sup>, 門倉 昭<sup>3</sup>,  
籠谷 正則<sup>1</sup>, 松坂 幸彦<sup>4</sup>, 村上 浩之<sup>5</sup>, 中村 智一<sup>6</sup>, 中村 康範<sup>1</sup>, 並木 道義<sup>4</sup>,  
小野 孝<sup>1</sup>, 斎藤 芳隆<sup>4</sup>, 佐藤 夏雄<sup>3</sup>, 鈴木 裕武<sup>5</sup>, 友淵 義人<sup>1</sup>, 綱脇 恵章<sup>1</sup>,  
内田 正美<sup>7</sup>, 山上 隆正<sup>4</sup>, 山岸 久雄<sup>3</sup>, 山本 幹生<sup>8</sup>, 山内 誠<sup>8</sup>

## The Concurrent Auroral X-Ray Observations

with

PPB#8 and PPB#10

By

Michio NAKAGAWA<sup>1</sup>, Yusuke EBIHARA<sup>2</sup>, Masaki EJIRI<sup>3</sup>, Makoto FUKUDA<sup>1</sup>,  
Kenji HIRATA<sup>1</sup>, Akira KADOKURA<sup>3</sup>, Masanori KAGOTANI<sup>1</sup>, Yukihiro MATUZAKA<sup>4</sup>,  
Hiroyuki MURAKAMI<sup>5</sup>, Tomokazu NAKAMURA<sup>6</sup>, Yasunori NAKAMURA<sup>1</sup>,  
Michiyoshi NAMIKI<sup>4</sup>, Takashi ONO<sup>1</sup>, Yoshitaka SAITO<sup>4</sup>, Natsuo SATO<sup>3</sup>,  
Hiromu SUZUKI<sup>5</sup>, Yoshihito TOMOBUCHI<sup>1</sup>, Yoshiaki TUNAWAKI<sup>1</sup>,  
Masami UCHIDA<sup>7</sup>, Takamasa YAMAGAMI<sup>4</sup>, Hisao YAMAGISHI<sup>3</sup>,  
Mikio YAMAMOTO<sup>8</sup> and Makoto YAMANOUCHI<sup>8</sup>

**Abstract:** In order to make the two-dimensional image for auroral X-rays and to obtain the energy spectrum of aurora with energy range from 30keV to 778keV, the Polar Patrol Balloons No8 and No10 (PPB#8 and PPB#10) were launched in rapid succession to form a cluster of balloons during their flight on Jan. 13, 2003 from Syowa Station. They drifted westward 0.5 circumpolar rounds over Antarctica, covering 9–12 g / cm<sup>2</sup> atmospheric depth and 55°.5–66°.4 geomagnetic latitude. From Jan. 22 to 25, 2003, several auroral events were detected by PPB#8 and PPB#10 at the same time. On Jan.23, 2003, PPB#10 and PPB#8 observed auroral X-ray events in succession. PPB#8 which was located about 650km west from PPB#10 observed auroral X-ray event after PPB#10 with delay time 218sec. It is suggested that the auroral X-ray source region moved from east to west with speed of about 3.0km/s. In this paper, we present the feature of these concurrently observed auroral X-ray events.

---

<sup>1</sup> 大阪産業大学工学部 (Faculty of Engineering, Osaka Sangyo University)

<sup>2</sup> 名古屋大学高等研究院 (Nagoya University)

<sup>3</sup> 極地研究所 (National Institute of Polar Research)

<sup>4</sup> 宇宙科学研究本部 (Institute of Space and Astronautical Science)

<sup>5</sup> 立教大学理学部 (Faculty of Science, Rikkyo University)

<sup>6</sup> 名古屋大学理学部 (Faculty of Science, Nagoya University)

<sup>7</sup> 大阪信愛女学院 (Osaka Shinnai Jyogakuin)

<sup>8</sup> 宮崎大学工学部 (Faculty of Engineering, Miyazaki University)

## 要 旨

オーロラ X 線イベントの 2 次元イメージを得ることと、30keV から 778keV の領域でエネルギースペクトルを得ることを目的として、大気球を編隊飛行させ観測を行うバルーンクラスター計画の下に、2003 年 1 月 13 日に PPB8 号機と PPB10 号機の 2 機が南極の昭和基地より放球された。両機は大気深さ  $9-12 \text{ g/cm}^2$  を保ち、磁気緯度  $55.5-66.4$  の範囲を飛行し南極大陸を半周した。両機はフライト中に多くのオーロラ X 線イベントを観測した。特に、1 月 22 日から 1 月 25 日には、数例のイベントが両機で同じ時間帯に観測されている。2003 年 1 月 23 日には、始めに 10 号機、218sec. の間隔をあけて 8 号機でイベントが観測された。このとき 8 号機は 10 号機の西 650km に位置していた。このことはオーロラ X 線源が速さ約  $3.0 \text{ km/sec}$  で西に向かって移動していたことを示唆している。本論文では同じ時間帯に観測された、オーロラ X 線イベントについてその描像を述べる。

## 1. はじめに

1957 年に WINCKLER and PETERSON により発見されたオーロラ X 線は [1], 数十 keV 以上の高いエネルギーを持つ電子が大気中に降下して制動放射により発生するといわれている。大気球高度で観測されるオーロラ X 線の微分エネルギースペクトルは指数関数で近似され、観測により得られるエネルギースペクトルはそのパラメーターである  $e$ -folding energy (以下  $E_0$  と記述する。) で特徴づけられる。オーロラ X 線の広域空間分布やその時間変動、 $E_0$  に関するさまざまな知見を得ることは、高エネルギー電子の流入機構や降下原因、さらには地球磁気圏内の高エネルギー現象の解明につながるであろう。しかし、オーロラ X 線の広域空間分布やその時間変動を調べるには、オーロラ帯全域を長期間にわたって観測する必要がある。

南極域の成層圏には南極大陸に沿うように冬期には偏西風が、夏期には偏東風が安定して吹く。南極周回大気球 (Polar Patrol Balloon) 実験は、この風を利用して大気球を南極大陸に沿うように周回させ、長期間の観測を行うことを目的として計画された。

国立極地研究所 (NIPR) と宇宙科学研究所 (ISAS) が中心となって 1984 年から予備実験が行われ [2][3], その結果をもとに 1990 年から 1991 年、および 1992 年から 1993 年にかけて、第 33 次および第 34 次南極地域観測隊により第 1 次 PPB 実験が行われ、合計 6 機の PPB が南極昭和基地より放球された [4]。

1993 年 1 月 5 日に放球された、オーロラ X 線と宇宙線粒子の観測を目的とした PPB6 号機は、高度  $6-13 \text{ gcm}^{-2}$  を保ちながら西回りに 27 日間の飛行を続け、約 1 周半の周回飛行を行った。飛行した磁気緯度は  $49^\circ-81^\circ$  の広範囲に及び、さまざまな磁気地方時 (MLT)、磁気緯度においてオーロラ X 線の観測を行った。鈴木は観測された 48 例のオーロラ X 線イベントをもとにして、地磁気極座標上にオーロラ X 線の強度分布を調べて X 線オーロラ帯に相当する領域を示し、可視光オーロラの分布と大きく異なっていることを見出した。また、オーロラ X 線スペクトルの  $E_0$  の不変磁気緯度に対する依存性などから、高エネルギー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た [5]。

PPB6 号機による観測はさまざまな知見を得たが、全方向に近い視野を持つ X 線観測装置を用いたため X 線の到来方向を知ることができず、また単機の観測であるため、一つのオーロラ X 線イベントをある磁気地方時と磁気緯度で捉えているが、全体像は求められなかった。

オーロラ X 線イベントの全体像を捉えるためには、狭い視野角を持った複数の X 線観測装置を搭載した複数の PPB を用いて、異なる磁気地方時と磁気緯度で観測する必要がある。

2002 年から 2003 年にかけて実施された第 2 次 PPB 実験では、「宇宙物理観測」と「地球物理観測」の 2 つのテーマのもとに、それぞれ 1 機と 3 機の大気球が準備された。「地球物理観測」の主な目的は、3 機の大気球が数百 km の距離を保ってバルーンクラスターを組み、プラズマ圏からカスプまでの領域が磁力線にそって電離圏に射影されている領域、磁気緯度で  $50^\circ-80^\circ$  の広い範囲を飛行し、磁気圏境界領域現象の時間的、空間的变化を観測することである [6]。

2003 年 1 月から 2 月にかけて行われた第 44 次日本南極地域観測隊による PPB 実験で、地球物理観測用として 3 機

の大気球 (PPB#8, PPB#9, PPB#10: 以下 8 号機, 9 号機, 10 号機と称す.) が放球された. それぞれの大気球には 5 種類の観測器, 電場観測器 (EFD), 3 軸フラックス磁場検出器 (MGF), オーロラ X 線撮像装置 (AXI), 電磁波動観測器 (EMW), 電離層全電子密度観測器 (TEC) が搭載された. 各観測器の概要を以下に記す.

EFD は, 3 対の球プローブを用いて, 水平電場 2 成分, 垂直電場 1 成分の電場観測をサンプリング時間 1 秒で行う. 分解能は水平成分 0.2mV/m, 垂直成分 0.8mV/m である. MGF は, フラックスゲート磁力計, 傾斜計, 太陽パルスセンサーからなり, 分解能 0.25nT で 1 秒毎に地磁気のベクトル計測を行う.

EMW は, V L F 帯から L F 帯の電磁波動の観測を次の 3 モードで行う.

- 1) 0.2–0.4Hz の範囲の波形観測を, 10Hz のサンプリングレートで行う.
- 2) 300Hz, 600Hz, 1.2kHz, および 2.4kHz で強度観測を時間分解能 0.5sec. で行う.
- 3) 5kHz, 0kHz, 20kHz, および 36kHz の高周波数での掃引観測を時間分解能 0.5sec. で行う.

TEC は, GPS 衛星から送出される 2 種類の異なる周波数の電波を受信し, それらの伝播遅延, 位相のずれの情報から, 伝播経路に沿った電離層の全電子数の測定を行う.

AXI による観測は以下の 3 点を目的として行われた.

1. オーロラを硬 X 線領域 (30~180keV) で 2 次元的に撮像して, その強度の空間分布および空間分布の時間変化を求めること.
2. オーロラの硬 X 線および  $\gamma$  線領域 (30~約 800keV) のスペクトルとその特徴, および強度変動を得ること.
3. 離れた位置にいる 3 機の気球のデータから, 広域空間におけるオーロラ X 線の空間分布および強度変動を得ること.

2003 年 1 月 13 日に放球された 8 号機と 10 号機は約 2 週間の編隊飛行を続けて観測を行った. 本稿では, 約 2 週間編隊飛行を行った 8 号機と 10 号機が, オーロラ X 線撮像装置によりほぼ同時にオーロラ X 線イベントを観測した時間帯の事象についてのべる.

## 2. オーロラ X 線撮像装置とデータ伝送

オーロラ X 線撮像装置 (Auroral X-ray Imager) は, 同一性能を有する 3 組が準備され, 3 機の PPB にそれぞれ 1 組搭載された. この AXI は, オーロラ X 線の撮像とそのエネルギースペクトルを得る事を目的とする 16 台の NaI(Tl) 検出器群と, オーロラ X 線の高エネルギー側のスペクトルを得る事を目的とする 1 台の BGO 検出器とで構成されている [7].

一本の NaI(Tl) 検出器の概略を図 1(a) に示す. その外形は細長い円筒状になっており, コリメーターと NaI(Tl) シンチレーター, および光電子倍增管と高電圧分配器で構成されている. NaI(Tl) シンチレーターは直径 12.7mm, 厚さ 5mm で, 光電子倍增管と光学的に一体化されており, その外側は磁気シールド材で覆われている. さらに外側から内側へ, コリメーターを兼ねた厚さが 1mm の鉛と 2mm の錫が巻かれている. コリメーターの視野角は, 直径で 30° (15° FWHM) で, 検出器の口径を考慮した幾何学的因子 ( $S\Omega$ ) は 0.07cm<sup>2</sup>sr である.

BGO 検出器の概略を図 1(b) に示す. BGO シンチレーターは直径 38mm, 厚さ 10mm で, 光電子倍增管と光学的に一体化されている. これらは, 磁気シールド材で覆われ, NaI(Tl) 検出器と同様に厚さそれぞれ 2mm と 1mm の錫と鉛からなるコリメーターを兼ねたシールドで覆われている. 視野は 155° (B to B) と広く設定して, できるだけ多くのオーロラ X 線イベントを検出できるようにした.  $S\Omega$  は 23.66cm<sup>2</sup>sr である.

16 台の NaI(Tl) 検出器は, 4 台を 1 組にして方位角 90° 毎に設置された. 各方位に設置された NaI(Tl) 検出器の模式図を図 2(a) に示す. 4 台の NaI(Tl) 検出器は図の左から順に視野中心が天頂から 10°, 20°, 30°, 40° になるよう傾けられている. 図 2(b) は NaI(Tl) 検出器と BGO 検出器を配置したゴンドラの模式図で, 4 台 1 組の NaI(Tl) 検出器が各辺の中央部に設置され, ゴンドラの一辺に天頂を視野中心とした BGO 検出器が設置されている.

図 3 は AXI の視野分布で, その中心はゴンドラの天頂をあらわす. AXI はエネルギー領域 30~180keV, 時間分解能 2 秒で, ゴンドラの天頂を中心として半径 40° の円内を撮像することができる. 以下の「4. 考察」では, MGF データを用いてゴンドラの方位を決定し 2 次元イメージを得た.

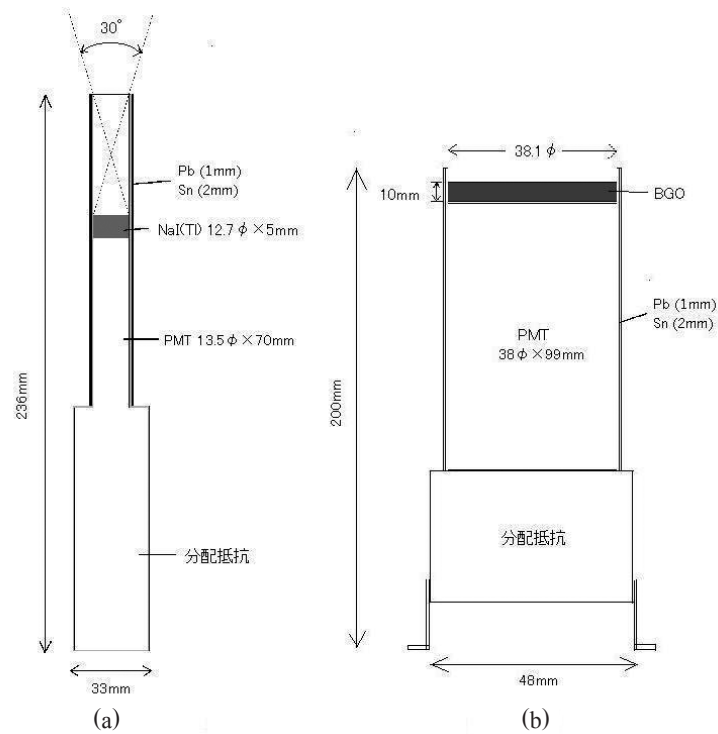


図1 検出器の概略図

- (a) NaI(Tl) 検出器. 視野角は  $15^\circ$  (FWHM),  $S\Omega$  は  $0.07\text{cm}^2\text{sr}$  である.  
 (b) BGO 検出器. 視野角は  $155^\circ$  (B to B),  $S\Omega$  は  $23.66\text{cm}^2\text{sr}$  である.

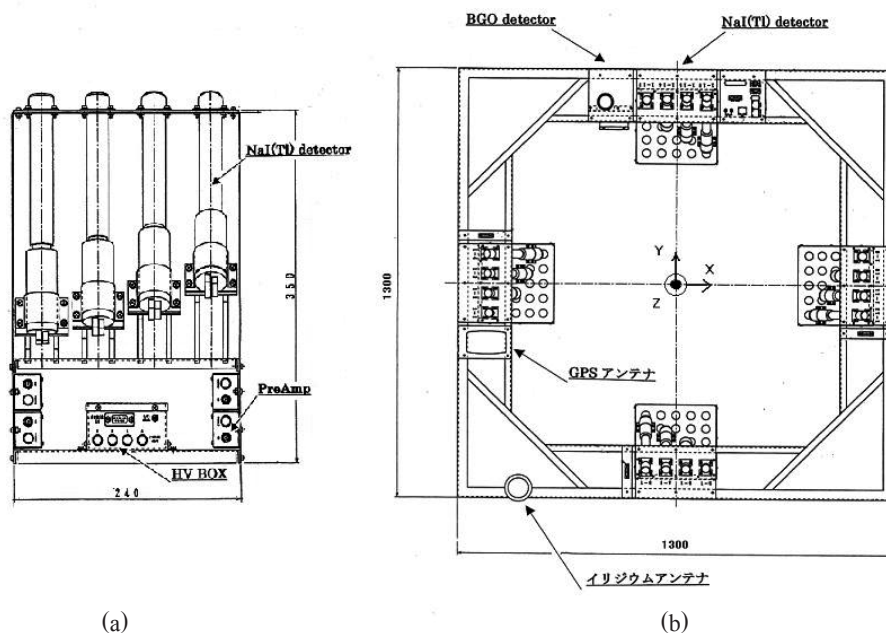


図2 NaI(Tl) 検出器と BGO 検出器の配置

- (a) NaI(Tl) 検出器配置. 4 台の NaI(Tl) 検出器は図の左から順に視野中心が天頂から  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  になるよう傾けられている.  
 (b) NaI(Tl) 検出器と BGO 検出器を配置したゴンドラの模式図

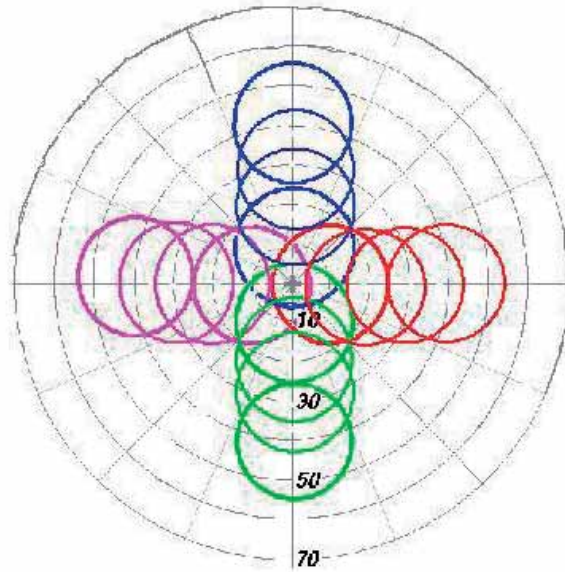


図3 オーロラX線撮像装置の視野分布

視野分布の中心はゴンドラの天頂で、円は視野角30°の各コリメーターの視野を示す。

色別に表示する各方位に設置された4台のNaI(Tl)検出器の視野中心は天頂から10°、20°、30°、40°傾いている。

表1 NaI(Tl)検出器のエネルギー帯

1ch	30～40keV
2ch	40～70keV
3ch	70～110keV
4ch	110～140keV
5ch	140～180keV

表2 BGO検出器のエネルギー帯

1ch	100～150keV
2ch	150～227keV
3ch	227～340keV
4ch	340～518keV
5ch	518～778keV

天頂角10°の4台のNaI(Tl)検出器から、表1に示すように30～180keVの領域を5チャンネルに分割したカウント数を20秒毎に得て、X線イメージのエネルギースペクトルを測定できるようにした。BGO検出器は2秒毎のカウント数と、オーロラX線の高エネルギー側のスペクトルを測定するために、表2に示すように100～778keVの領域を5チャンネルに分割したカウント数を20秒毎に得た。

3機のPPBは、体積が5万m<sup>3</sup>、気球を含む総重量は588kgである。その内AXIの重量は133kgである。バラストは200kg搭載されており、オートレベルコントローラによって気球高度が30～35kmを保つように制御されて、20日以上 の飛翔期間が期待された。[6]。

今回の観測では、電源供給とデータ転送に新しいシステムを初めて用いた。PPB観測は長期にわたるため、従来から用いられているリチウム一次電池では電池重量が大きくなり不都合である。今回の観測では、気球の制御にかかわ

る部分はリチウム一次電池を、PI システムにかかわる部分は太陽電池とニッケル金属水素二次電池を併用する電源供給システムを用いた[8][9].

データ転送には商業通信衛星であるイリジウム衛星を初めて用いた. 南極大陸を周回中の各気球に搭載されたイリジウム携帯端末は、毎時0分、及び30分に極地研の専用電話を呼び出し、機上に蓄積された未送信ファイルをイリジウム衛星を経由して順次地上に伝送した. データ転送の途中で回線切断が生じた場合には、再度回線を接続して途中で途切れたデータを最初から再び伝送した. 長期間飛翔した8号機、10号機は、それぞれ全通信で約1割の回線切断があったが、再送機能により、観測された全データの取得に成功した. なお、通信手段の二重化を確保するため、テレメーターによるデータ転送も行った[8][9].

イリジウム衛星によるデータ伝送ではEFD, MGF, AXI, EMW, TECの5種類の観測器から得られる10分間のデータと、ハウスキーピング(HK)データをあわせて1ファイルにし、3ファイル分すなわち30分間のデータを1回の回線接続で送信した.

AXIの10分間のデータ列には、20秒間分のデータ列を1ブロックとして30個のブロックが入っている. 1ブロックは、16台のNaI(Tl)検出器とBGO検出器の2秒あたりのカウント数がそれぞれの検出器について10個ずつ計170個と、20秒間集積したエネルギースペクトルデータとしてNaI(Tl)検出器5ch分のカウント数とBGO検出器5ch分のカウント数計10個などが入っている[10].

### 3. PPBの飛翔と観測の概略

3機のPPBは気象条件の良好な1月初旬に、南極の昭和基地(南緯69°, 東経39.6°)より9号機、8号機、10号機の順番に、短い時間間隔を置いて連続して放球される予定であった.

2003年1月6日7時35分(UT)に9号機が放球された. しかし、高度15kmで切り離しカッターが誤作動してゴンドラが切り離され、昭和基地の近くに着氷したため、この日の8号機、10号機の放球は中止された. 後日ゴンドラは回収されて、各機器は正常に動作していることが確認された.

2003年1月13日6時49分(UT)に8号機が、天候晴れ、風速1.5m/sの気象条件の下、続いて約6時間後の12時15分(UT)に10号機が、天候晴れ、風速1.2m/sの気象条件の下に放球された. 両機とも約2時間後にフライトレベルに達した後、南緯70°付近の南極周回軌道を飛翔して南極大陸を西回りにはほぼ半周した. その後風向が変わったため、1月25日頃から10号機が、1月31日頃から8号機が周回軌道を外れて北東に飛翔し、1月31日に10号機が、2月7日に8号機がそれぞれ通信を終えて本実験は終了した. この間、約2週間にわたって10号機が8号機の東側に位置する編隊飛行をしながら観測を行うことができた[11]. 周回軌道から外れるまでに飛翔した地理的緯度と磁気緯度の範囲を表3に示す. 両機はプラズマ圏が磁力線にそって電離圏に射影されている領域からオーロラ帯にかけての領域[6]を飛翔していた.

表3 8号機、10号機の飛翔した緯度の範囲

	8号機	10号機
地理的緯度	-69°.0 ~ -74°.7	-69°.0 ~ -75°.1
磁気緯度	-55°.5 ~ -65°.9	-57°.4 ~ -66°.4

図4に航跡図を示す. 赤の丸印は8号機、青の丸印は10号機である. また、それぞれ同じ色の矢印で1月24日の位置を示す.

図5に1月13日から1月31日の間の両機のNaI(Tl)検出器の計数率、HKデータ及びKp指数[12]を示す. (a)が8号機、(b)が10号機で、上から、一分毎のカウント数、気球高度、磁気緯度、MLT、Kp指数である. フライトレベルに達した後は、両機ともオートレベルコントローラによって高度31km以上を保ちながら飛行したが、8号機は1月23日、10号機は1月22日にバラストが尽きたため、その後徐々に高度が下がり、太陽仰角の変化による高度変化も

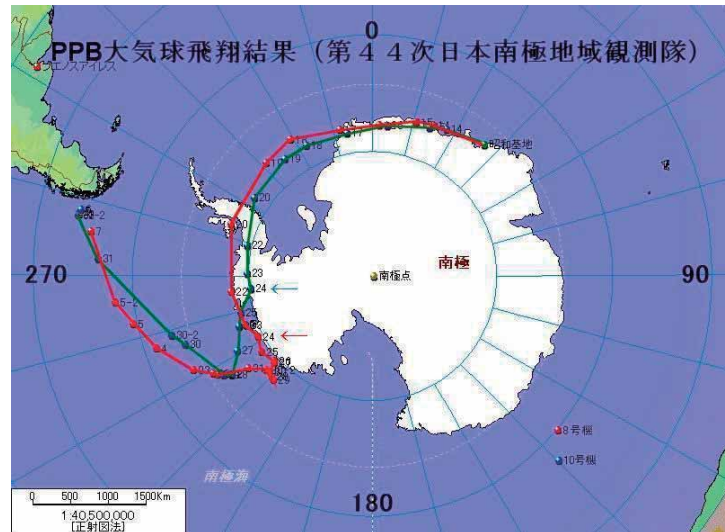


図4 全飛行期間中の航跡図

各観測日の位置を8号機は赤, 10号機は青の丸印で, また1月24日の両機の位置を8号機は赤, 10号機は青の矢印で示す。

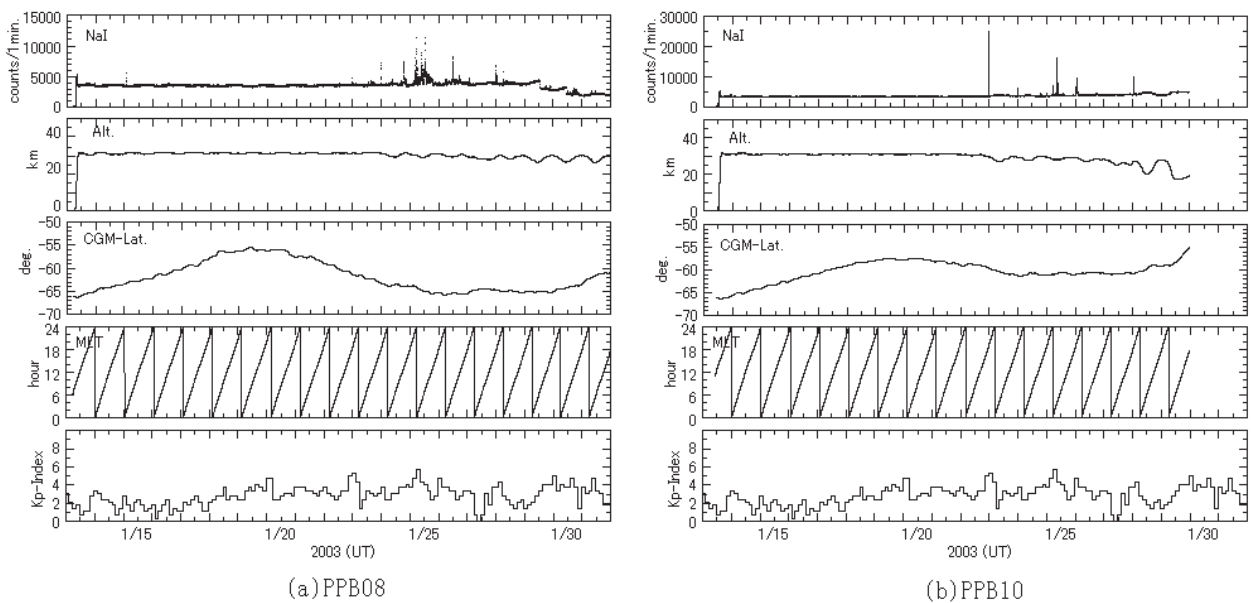


図5 1月13日から1月31日の間の1分毎のNaI(Tl)検出器のカウント数とHKデータおよびKp指数

(a)は8号機, (b)は10号機である。(a), (b)とも上から順に, 1分毎のカウント数, 気球高度, 磁気緯度, MLT, およびKp指数を示す。

次第に大きくなっていった。また, 10号機では1月24日12時30分頃にMGFデータに異常が発生し, それ以降のゴンドラの方位は不明となった[13]。

今回のPPB実験では, 両機合わせて30数例のオーロラX線イベントが観測された。図5に見られるように, 8号機ではオーロラX線イベントは, 1月15日1時40分頃に一例が観測されている。その後1月22日23時30分頃, 1月23日23時30分頃に各1例のイベントが観測され, 1月24日から1月28日にかけて断続的に数時間継続するイベントが観測されている。1月15日, 1月22日, 1月23日に観測された独立したイベントの磁気緯度はそれぞれ $63^\circ$ ,  $61^\circ$ ,  $63^\circ$ であり, 1月24日から1月28日にかけて観測された数時間継続するイベントでは,  $64^\circ$ から $66^\circ$ の範囲であった。

10号機では1月22日23時30分頃、1月23日23時30分頃に各1例のイベントが観測されているが、これらは8号機とはほぼ同時に観測されたイベントである。8号機と同様に1月24日から1月26日にかけて断続的に数時間継続するイベントが観測され、1月28日の0時から2時半にかけて30分ほど継続するイベントが2例観測されている。1月22日、1月23日に観測された独立したイベントの磁気緯度はそれぞれ $60^\circ$ 、 $61^\circ$ であり、1月24日から1月26日にかけて観測された数時間継続するイベントおよび1月28日のイベントでは $61^\circ$ 前後であった。2機のPPBが飛翔した磁気緯度の範囲は $55^\circ \sim 66^\circ$ であるが、イベントが観測されたのは $60^\circ \sim 66^\circ$ の範囲で、これはPPB6号機で求められたオーロラX線の広域空間分布の低磁気緯度側にあたっている[5]。

Kp指数は1月17日頃まで平均値は2程度で地磁気の活動度は低くかったが、その後は一日の平均が3-から4-と活動度は少し高くなっている。オーロラX線イベントが観測された時間帯では、1月22日、1月23日がそれぞれ5+、4-であった。1月24日は4-から4+、8号機で見られる最も活発にイベントが発生した1月25日は、5-から6-であった。1月26日以降は大きく下がっている時間もあるが、3+から4+程度であった。1月13日から1月31日の間のDst指数の変化は $-66\text{nT}$ から $23\text{nT}$ であった[14]。Kp指数及びDst指数から、1月13日から1月31日の間の平均的な地磁気活動度は低から中程度といえる。

AE指数は1月18日頃から変動が大きくなり始めていた。図6は、考察を行っている1月22日から1月25日の間のAE指数（暫定値）である[15]。1月22日以降も、AE指数は、1時間から数時間の幅を持つ最大値が $500\text{nT} \sim 800\text{nT}$ 程度の変動を繰り返し、1月25日には最大値が約 $1800\text{nT}$ の非常に激しい変動がみられた。これらは、この期間に活発なオーロラ活動が起きていたことを示している。しかし、8号機では1月24日以降に、10号機では1月25日以降に活発に活動するオーロラX線が観測されている。これは、2機のPPBが飛翔した磁気緯度がオーロラX線の広域空間分布の低磁気緯度側であること、またそれまでのオーロラ活動領域が高磁気緯度であったためであると思われる。

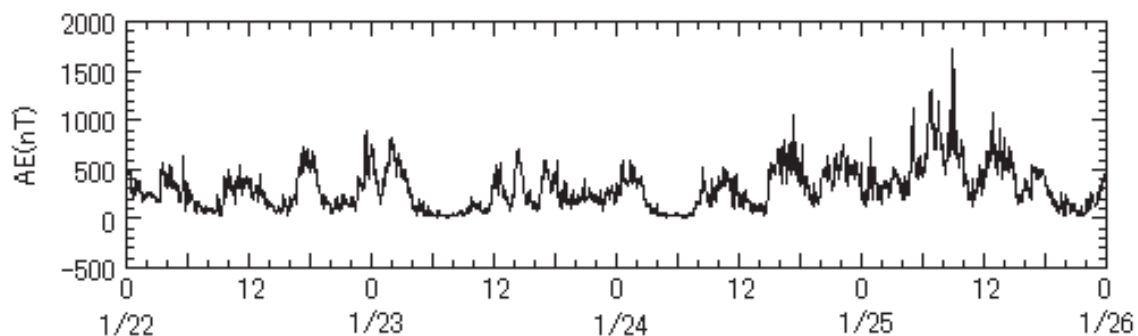


図6 1月22日から1月25日のAE指数

#### 4. 考察

前述したように、今回のPPB実験では、両機合わせて30数例のオーロラX線イベントが観測された。ここでは、オーロラX線イベントが両機ではほぼ同時に観測されている時間帯を取り上げ、その時間帯に観測されたオーロラX線イベントについて述べる。

##### (1) 1月22日23時35分から23時45分

図7は1月22日23時30分から23時50分のNaI(Tl)検出器の20秒毎のカウント数で、(a)が8号機、(b)が10号機である。MLTと磁気緯度は8号機がそれぞれ $17.7\text{h}$ と $64^\circ$ 、10号機がそれぞれ $18.5\text{h}$ と $61^\circ$ である。

10号機では23時35分頃から23時37分にかけてブロードなオーロラX線イベントが、それに続いて非常に強いイベントが23時39分頃から23時45分にかけて観測されている。このイベントとほぼ同じ時刻の23時38分から23時41分にかけて、8号機で弱いイベントが観測されている。 $E_0$ は8号機が $55.5 \pm 12.1\text{keV}$ 、10号機はブロードなイベントが $65.6 \pm 11.4\text{keV}$ 、強いイベントが $67.0 \pm 8.1\text{keV}$ である。

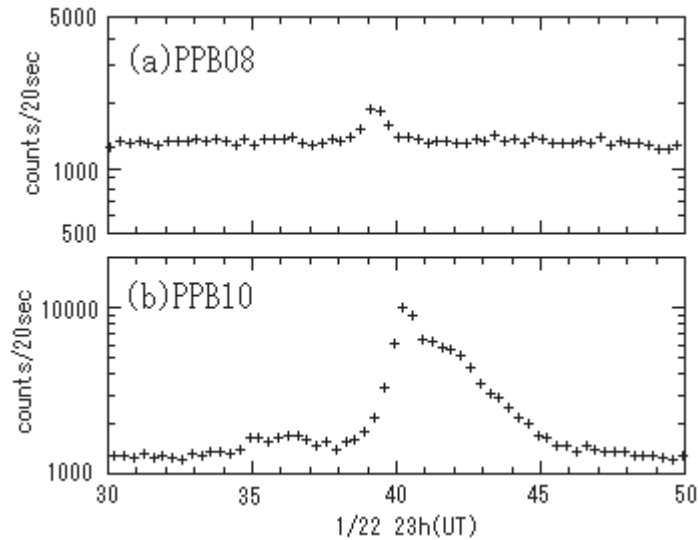


図7 1月22日23時30分から23時50分のNaI(Tl)検出器の20秒毎のカウント数.  
(a)は8号機, (b)は10号機である.

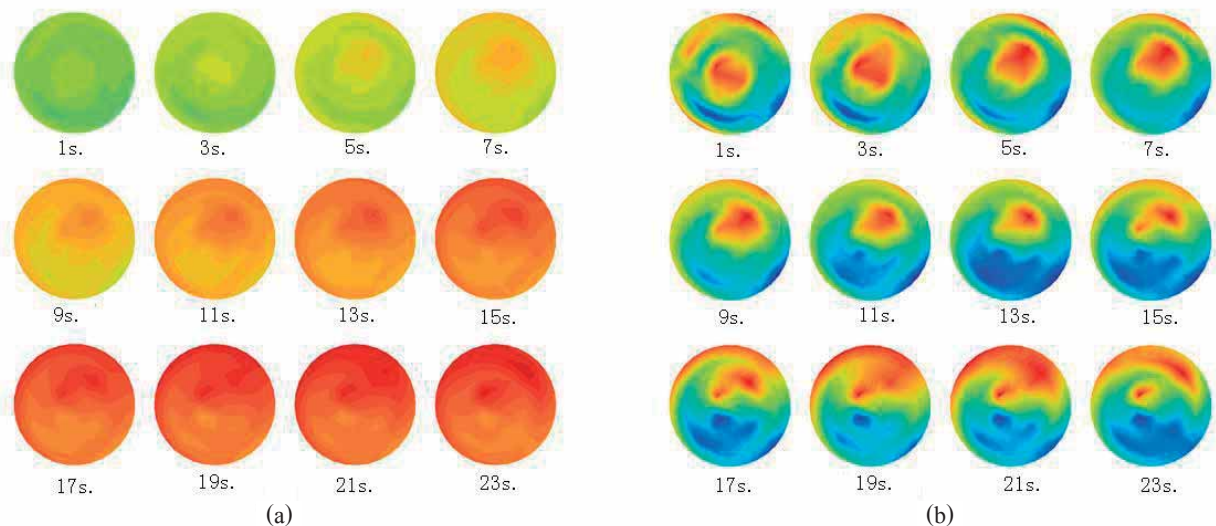


図8 1月22日23時40分01秒から23時40分23秒間の、2秒毎のオーロラX線のイメージ.

図の上は北を指しており、その中心はゴンドラの天頂で、半径は $40^\circ$ である。各イメージの下は時刻(秒)である。

(a) 描画強度範囲を同一にして各イメージを描画。

(b) 描画強度範囲をイメージ毎に変えて描画。

図8は10号機の強いイベントが立ち上がった、1月22日23時40分01秒から23時40分23秒間の、2秒毎のオーロラX線の2次元イメージである。図の上は北を指しており、その中心はゴンドラの天頂で、半径は $40^\circ$ である。図中(a)は描画するカウント数の範囲(描画強度範囲)を同一にして各イメージを描画して、X線強度の時間変化を強調しており、(b)は描画強度範囲をイメージ毎に変えて、X線強度の大きい所を強調して描画している。各イメージの下は時刻(秒)である。オーロラX線が視野全域で強度を増しながら、明るい領域が、天頂方向から北東に向かって移動していくようすが見られる。

24秒間の10号機の地理的な位置は、緯度は南緯 $74.187^\circ$ で一定であり、一方経度は西経 $80.304^\circ$ から西経 $80.306^\circ$ に変化している。これから求められる10号機の位置の変化は西に向かって約76mであることより、AXIの視野を考えると10号機の位置の変化は考慮に入れなくてよい。また、この時間帯のゴンドラの平均回転角は $0.61(^\circ/\text{sec})$ であった。

NaI(Tl) 検出器の視野と比較すると、イメージを撮像している 2 秒間の視野の回転も考慮に入れなくてよい。したがって、イメージ上の明るい領域が移動していくようすは、実際の動きを写しているといえる。

明るい領域の、移動前後の天頂角および方位角は、23 時 40 分 01 秒では  $10^\circ$  と  $149^\circ$ 、23 時 40 分 23 秒では  $30^\circ$  と  $45^\circ$  であった。10 号機の高度は 29.7km であり、イメージを高度 100km に投影したときの移動速度は 130km/min. である。

オーロラ X 線源の明るい領域が低緯度側に向かって低速で移動する現象は、以前にも報告されている [16]。

Hirasima et al. は半導体検出器を用いた X 線撮像装置と、一直線に並べた NaI(Tl) 検出器を用いた X 線撮像装置を使って北極のオーロラ帯で観測を行なった。その結果、高度 100km に投影したオーロラ X 線の空間分布のスケールは小さく (10km)、オーロラ X 線源の領域は時間とともに現れたり、消えたりしていること、および、オーロラ X 線源の領域が速さ 50km/min. で南東に向かって移動したことを報告している。そして、局所的で、間歇的な高エネルギー電子の降下がオーロラサブストームの拡大していく中で起きていることを示唆している。

図 6 で、1 月 22 日 23 時から 1 月 23 日 1 時にかけて AE 指数が大きく変動しており、このことは今回観測された事象がオーロラサブストームの中で起きていることを示唆している。

## (2) 1 月 23 日 23 時 30 分から 1 月 23 日 23 時 40 分

図 9 は 1 月 23 日 23 時から 24 時まで 1 時間の NaI(Tl) 検出器の 20 秒毎のカウント数を示す。(a) が 8 号機、(b) が 10 号機である。23 時 32 分頃に 10 号機が、数分後の 23 時 36 分頃に 8 号機がオーロラ X 線イベントを観測している。MLT と磁気緯度は 8 号機が 17.4h と  $63^\circ$ 、10 号機が 18.1h と  $61^\circ$  である。

図 10 は、23 時 36 分の両機の位置とオーロラ X 線のイメージである。図中の円は高度 100km に投影したオーロラ X 線撮像装置の視野である。このとき、8 号機は西経  $117^\circ$ 、南緯  $74^\circ$ 、10 号機は西経  $96^\circ$ 、南緯  $75^\circ$  にあり、8 号機は、10 号機の西約 650km 離れた所に位置していた。高度は 8 号機が 31.6km、10 号機は 29.5km であった。

23 時 20 分から 23 時 50 分の、1 分毎のイメージを図 11 に示す。10 号機は、まず視野の東側が明るくなり次に西側が明るくなっている。8 号機は数分遅れて東側が明るくなり次に中央付近が明るくなっている。最も明るくなった時刻のイメージ内で最も明るい所の天頂角と、東から反時計回りに取った方位角は、8 号機で  $10^\circ$  と  $322^\circ$ 、10 号機は  $40^\circ$  と  $353^\circ$  であった。オーロラ X 線源の高度を 100km と仮定し、これらの値を用いて磁気緯度を推定したところ 8 号機が  $63.4^\circ$ 、10 号機が  $63.1^\circ$  であった。したがって、両機で観測されたオーロラ X 線イベントは、同じ磁気緯度帯で発生しているといえる。

図 11 によると、10 号機が 8 号機より数分早くオーロラ X 線イベントを観測し始めている。23 時 20 分から 23 時 45 分間の NaI(Tl) 検出器の 2 秒毎の合計カウント数を平滑化して求めた両機の相互相関係数が図 12 である。この図によ

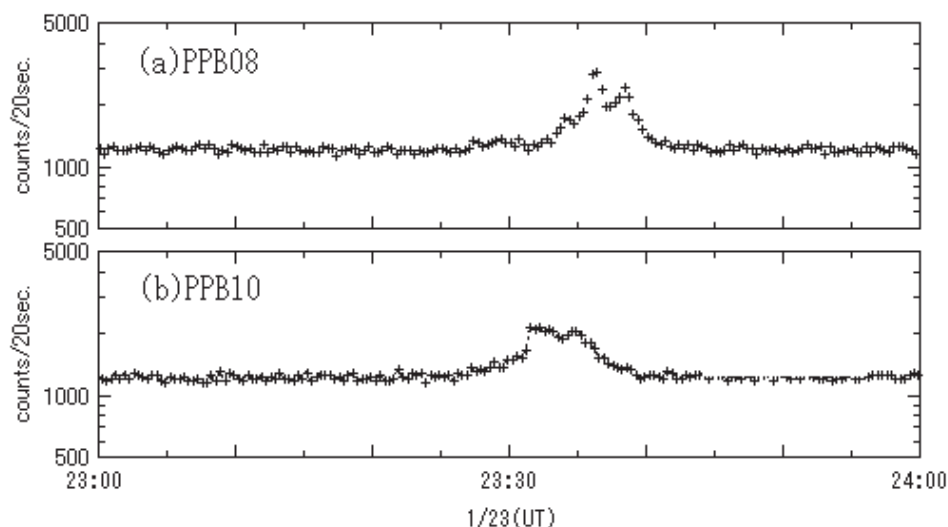


図 9 1 月 23 日 23 時から 24 時の検出器の 20 秒毎のカウント数、(a) は 8 号機、(b) は 10 号機である。

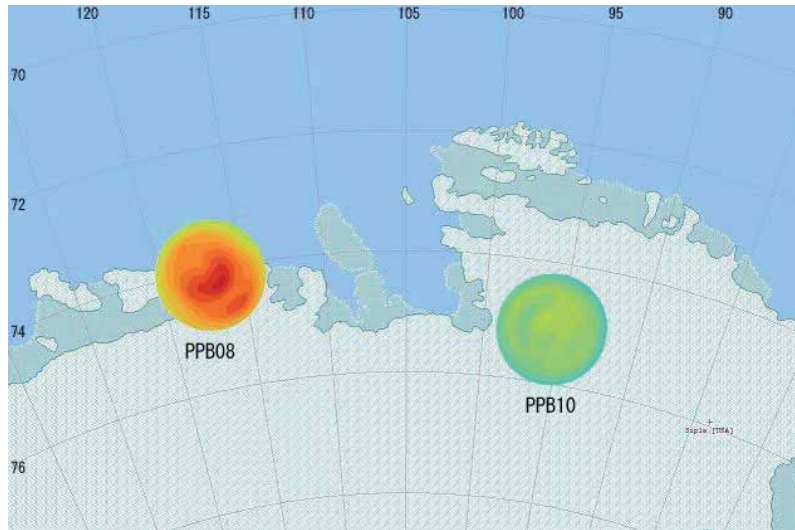


図10 1月23日23時36分の両機の位置と、高度100kmに投影したオーロラX線のイメージ  
左側が8号機、右側が10号機である。両機は約650km離れている。

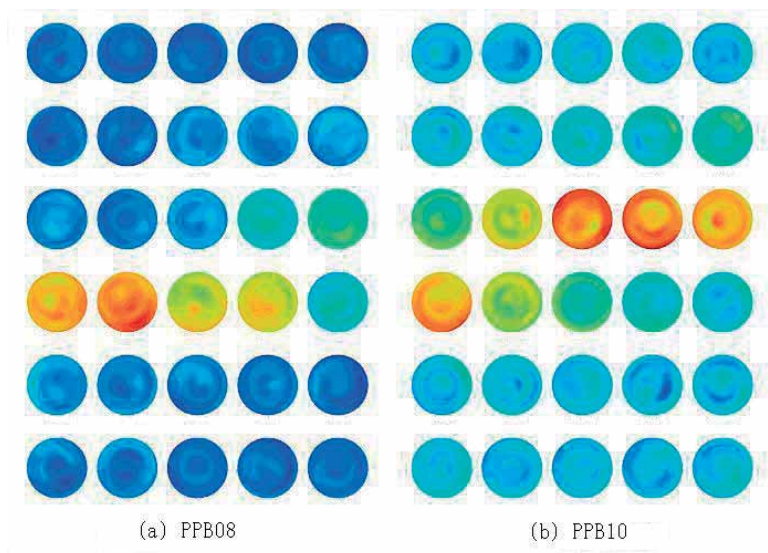


図11 1月23日23時20分から23時50分の1分毎のイメージ  
(a)は8号機、(b)は10号機である。

ると両機で観測されたイベントの時間差は218sec.である。

また、 $E_0$ は8号機が $80.5 \pm 2.8 \text{ keV}$ 、10号機が $80.0 \pm 7.9 \text{ keV}$ でよく一致していた。これらの $E_0$ で特徴づけられるエネルギースペクトルを持つオーロラX線が、空気の吸収を受けながらそれぞれの気球高度に達したときに計測されるカウント数の比を求めると、8号機は10号機の1.78倍であった。図13(b)はこの比を用いて10号機の2秒毎のカウント数を8号機の高度に補正し、さらに218sec.遅延させたものである。比較のため、8号機の光度曲線を図13(a)に示す。両パネルの光度曲線はよく似ているが、半値幅はそれぞれ180sec.と288sec.で10号機のほうが広い。しかし、750点のデータを用いて求めた相関係数は0.90で、両機の光度曲線に強い相関があることを示している。

以上の結果は、オーロラX線源の明るい領域が西に向かって速さ $180 \text{ km/min.}$ で移動したことを示唆している。図6によると、1月23日12時頃から24日4時頃にかけてAE指数は激しく変動しておりオーロラ活動も活発化していると考えられる。速さもオーダー的には一致していることから、オーロラサブストームにともなうWestward Traveling Surgeの低緯度側の動きを観測した可能性がある。

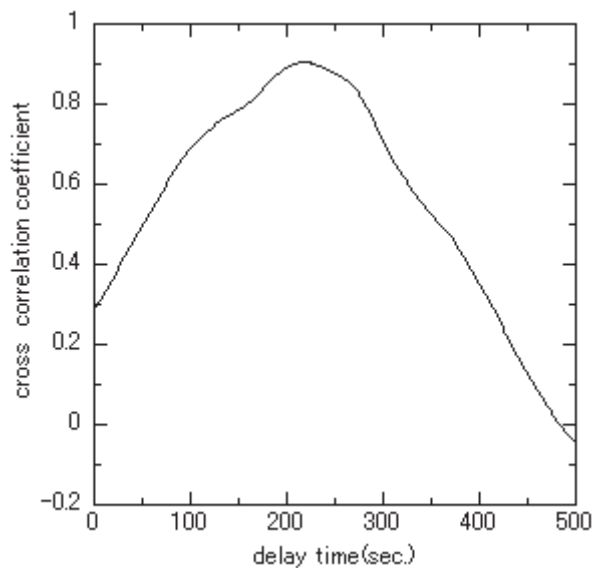


図 12 両機の AXI データの相互相関係数

23 時 20 分から 23 時 45 分の、16 台の検出器の 2 秒毎の合計カウント数を平滑化して求めている。

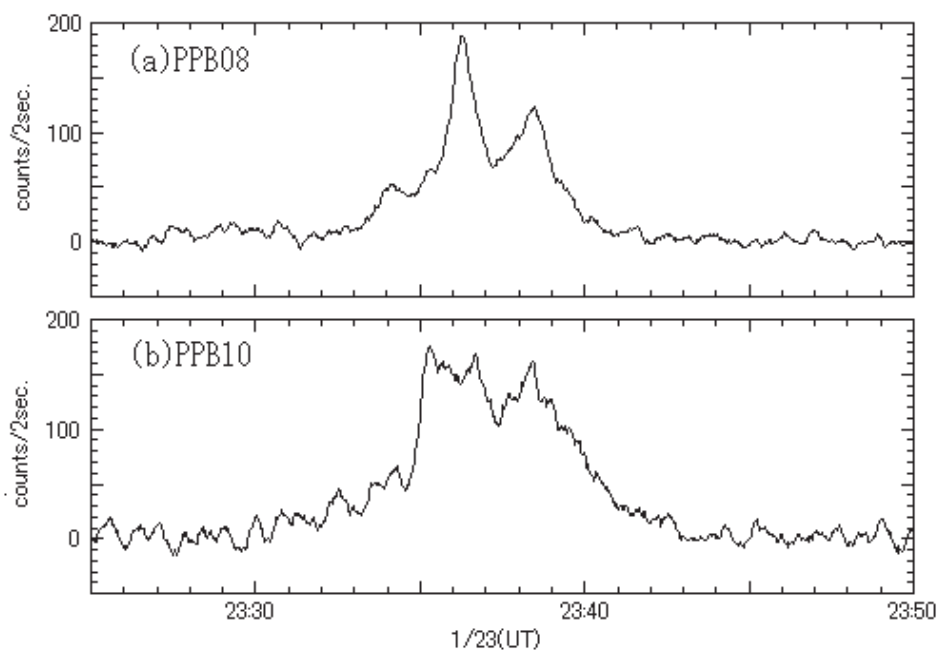


図 13 10 号機のデータを補正した後の検出器の 2 秒毎のカウント数

(a) 8 号機

(b) 10 号機のデータを 8 号機の高度に補正し、218 秒遅延させている。

### (3) 1 月 24 日 18 時 00 分から 20 時 00 分

図 14 は、1 月 24 日 18 時 00 分から 20 時 00 分の NaI(Tl) 検出器の 20 秒毎のカウント数で、(a) が 8 号機、(b) が 10 号機である。磁気緯度および MLT は 8 号機が  $64^\circ$  と 12.4h ~ 13.3h、10 号機が  $61^\circ$  と 13.0h ~ 13.9h である。8 号機では 18 時 30 分頃にカウント数が増加し、18 時 35 分頃までは 2000counts / 20sec 前後でほぼ一定値である。その後バースト状のイベントが重なるように発生している。それに対し、10 号機ではなだらかに変化するイベントが見られた。イベントの継続時間の半値幅は 8 号機が約 40 分、10 号機が約 20 分である。また、 $E_0$  の平均値は 8 号機で  $35.3 \pm 6.9\text{keV}$ 、10 号機で  $42.2 \pm 3.9\text{keV}$  であり誤差の範囲内で一致している。

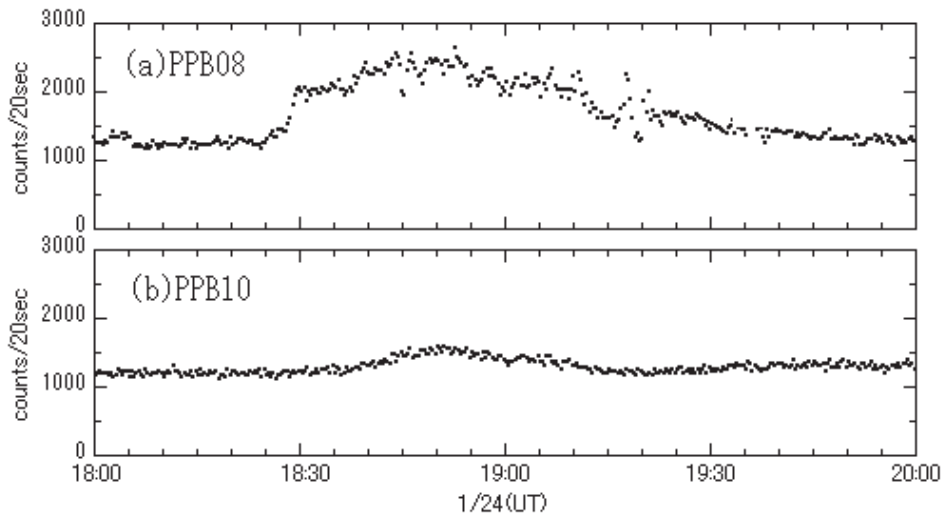


図 14 1 月 24 日 18 時 00 分から 20 時 00 分の検出器の 20 秒毎のカウント数.  
(a) は 8 号機, (b) は 10 号機である.

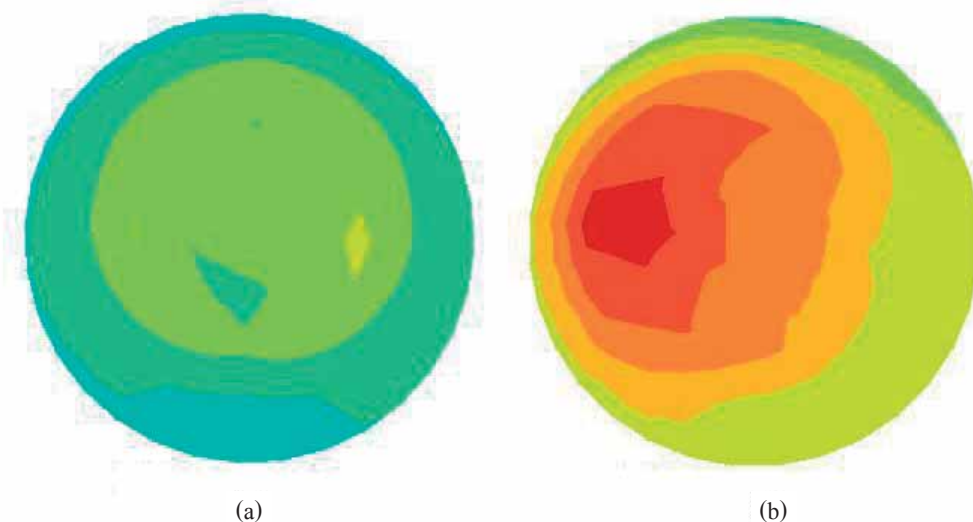


図 15 1 月 24 日 18 時 30 分から 19 時 30 分に 8 号機で観測された典型的なイメージ.  
(a) は 18 時 32 分 42 秒のイメージで, ほぼ一定値になっている時間帯.  
(b) は 18 時 44 分 14 秒でバースト状のイベントが起きているとき.

8 号機の, この間の典型的なイメージを図 15 に示す. (a) は 18 時 32 分 42 秒のイメージで一定値を取っている時間帯である. 視野全体が明るくなっており,  $E_0$  は  $34.8 \pm 3.2 \text{ keV}$  である. (b) は 18 時 44 分 14 秒でバースト状のイベントが起きているときである. 視野の西側の狭い範囲が明るくなっており,  $E_0$  は  $29.5 \pm 1.2 \text{ keV}$  である.

#### (4) 1 月 25 日 4 時 45 分から 5 時 25 分

図 16 は 1 月 25 日 4 時 45 分から 5 時 25 分の, NaI(Tl) 検出器の 20 秒毎のカウント数で, (a) が 8 号機, (b) が 10 号機である. 磁気緯度と MLT は, 8 号機がそれぞれ  $64.0^\circ$  と  $22.6 \text{ h} \sim 23.3 \text{ h}$ , 10 号機がそれぞれ  $60.9^\circ$  と  $23.3 \text{ h} \sim 24.0 \text{ h}$  である. Kp 指数は 5- から 6- で地磁気活動度は中程度であった.

AE 指数は前日の 1 月 24 日昼頃から変動が激しくなっており, オーロラ活動が活発化していることを示していた.

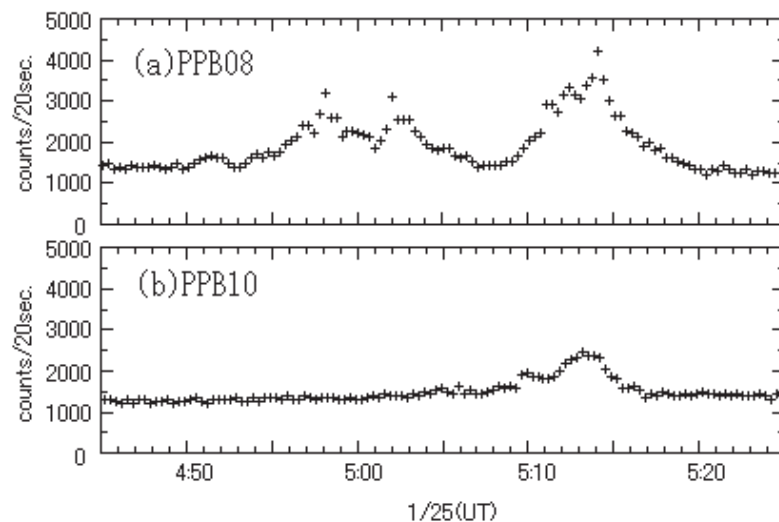


図 16 1 月 25 日 4 時 45 分から 5 時 25 分の検出器の 20 秒毎のカウント数.  
(a) は 8 号機, (b) は 10 号機である.

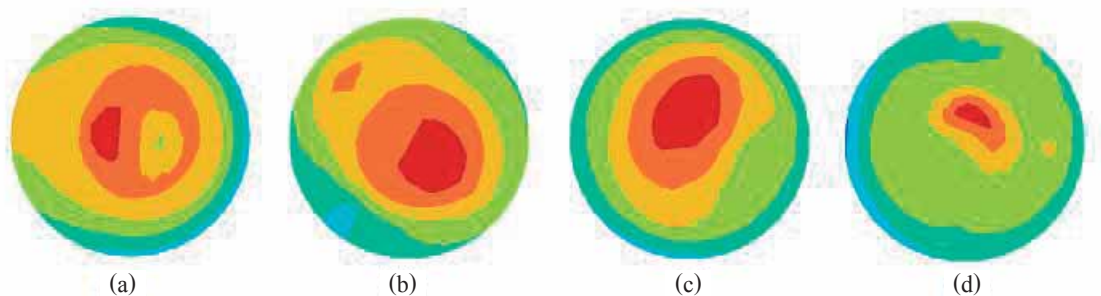


図 17 1 月 25 日 5 時前後に観測されたバースト状のイベント.  
(a) 4 時 58 分に 8 号機で観測されたイベント.  
(b) 5 時 2 分に 8 号機で観測されたイベント.  
(c) 5 時 14 分に 8 号機で観測されたイベント.  
(d) 5 時 13 分に 10 号機で観測されたイベント.

表 3 8 号機, 10 号機の飛翔した緯度の範囲

	4 時 58 分	5 時 02 分	5 時 14 分
天頂角 (deg)	10	10	10
方位角 (deg)	169.1	319.3	71.7
気球緯度 (deg)	73.621	73.629	73.658
気球経度 (deg)	124.789	124.859	125.056

8 号機では 4 時 58 分, 5 時 2 分, 5 時 14 分に連続した 3 個のバースト状のイベントが見られる. 半値幅は, それぞれ 74sec., 110sec., 180sec. である. 半値幅内で求めた,  $E_0$  の平均値は, それぞれ  $24.1 \pm 0.4\text{keV}$ ,  $25.2 \pm 1.2\text{keV}$  と  $22.2 \pm 1.3\text{keV}$  で誤差の範囲内で一致していた. 2 秒間毎のカウント数を平滑化して求めた, これらのバースト状イベントの最も明るい時刻のイメージを図 17(a) ~ (c) に示す. 表 4 はこれらのイベントの天頂角と方位角および気球の地理的な緯度と経度である. イベントの天頂角と方位角を用いさらに気球の移動を補正して求めた, 高度 100km に投影したバースト状イベント間の距離は 1 番目と 2 番目が 24.9km, 1 番目と 3 番目が 31.7km, 2 番目と 3 番目が 17.0km であ

る。AXI の視野半径は約 58km であるので、3 個とも同じ視野内で捉えられているといえる。したがって、8 号機で観測されたイベントは、天頂方向の領域で生じている一連のバースト状の X 線イベントであると言える。

この時間帯に 8 号機は 3 例のバースト状のイベントを観測しているが、10 号機で観測されたイベントは 5 時 13 分に見られる半値幅 210sec. のイベント 1 例のみである。半値幅内で求めた、 $E_0$  の平均値は  $28.9 \pm 1.9 \text{ keV}$  である。最も明るい時刻のイメージを図 17(d) に示す。天頂角  $10^\circ$  の付近が最も明るくなっている。このイベントも、8 号機と同様に天頂方向の領域で生じているバースト状の X 線イベントであると言える。時間的にも 8 号機の 3 番目のバースト状イベントと同時に発生しており、半値幅も似た値となっている。この時間帯の AE 指数は変動が激しくなっており、オーロラ活動が活発化していることより、8 号機で 2 番目のバースト状イベントが発生した後に、オーロラの活動領域が低磁気緯度側まで広がって 10 号機でもバースト状イベントが観測された可能性も考えられる。しかし、 $E_0$  に  $6.7 \text{ keV}$  の差があり、両イベントの関連は明確でない。

## 5. まとめ

2003 年 1 月に行われた南極周回気球実験で、8 号機と 10 号機でオーロラ X 線イベントがほぼ同時に観測されている時間帯を取り上げ、その時間帯に観測されたオーロラ X 線イベントについて調べた。

1 月 22 日 23 時 40 分に、10 号機で、オーロラ X 線が視野全域で明るさを増しながら、オーロラ X 線源の明るい領域が、速さ  $130 \text{ km/min.}$  で天頂方向から北東に向かって移動していくようすが観測された。

1 月 23 日 23 時 30 分から 23 時 40 分にかけて両機で観測されたイベントでは、 $E_0$  は 8 号機が  $80.5 \pm 2.8 \text{ keV}$ 、10 号機が  $80.0 \pm 7.9 \text{ keV}$  であり、発生していると推定される磁気緯度帯も約  $63^\circ$  で一致していた。また 8 号機の X 線強度変動と高度補正した 10 号機の X 線強度変動は強い相関を持っていた。これらは、オーロラ X 線の発光領域が速さ  $180 \text{ km/min.}$  で、西に向かって 218 秒間に約  $650 \text{ km}$  移動したことを示唆している。

1 月 24 日のイベントでは、8 号機の観測から、空間的にほぼ一様に発光している領域で、よりソフトなバースト状イベントが発生していた。また、10 号機ではなだらかに変化するイベントが見られ、 $E_0$  は 8 号機と誤差の範囲内で一致していた。

また、1 月 25 日 4 時 58 分から 5 時 14 分にかけて 8 号機で連続して 3 個のバースト状オーロラ X 線イベントが見られた。それらは天頂方向の領域で生じており、 $E_0$  が誤差の範囲内で一致していることより一連のバースト状 X 線イベントであると言える。また、10 号機でも、8 号機と同様な天頂方向の領域で生じているバースト状の X 線イベントが見られた。時間的にも 8 号機の 3 番目のピークと同時に発生しており半値幅も似た値となっているが、両イベントの関連は明確でない。

## 謝 辞

2003 年 1 月から 2 月の PPB 実験を実施された第 43 次及び第 44 次日本南極観測隊の方々に深く感謝します。

## 参考文献

- [1] Winckler J.R. and Peterson L. Large auroral effect on cosmic-ray detectors observed at  $8 \text{ g/cm}^2$  atmospheric depth, Phys. Rev., **108**, 903, 1957
- [2] Nagata T., Fukunishi H., Nishimura J., Kodana M. and co-members of PPB working group, Polar patrol Balloon project in Antarctica, Men. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue, **38**, 156, 1985
- [3] Nishimura J., Kodama M., Tsuruda K., Fukunishi H. and co-members of PPB working group, Feasibility studies of Polar Patrol Balloon, Adv. Space Res., **5**, 87, 1985
- [4] Nishimura J., Yajima N., Akiyama H., Ejiri M., Fujii R. and Kokubun S., Polar Patrol Balloon, J. Aircraft, **31**, 1264, 1994
- [5] 鈴木裕武, 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, 平成5年度立教大学学位論文, 1995

- [6] Kadokura A., Yamagishi H., Sato N., Ejiri M., Hirose H., Yamagami T., Torii S., Tohyama F., Nakagawa M., Okada T. and Bering E. A., Polar Patrol Balloon experiment in Antarctica during 2002-2003, *Adv. Polar Upper Atmos. Res.*, **16**, 157, 2002
- [7] 中村 智一, PPB8, 10号機によるオーロラX線イメージ観測, 大阪市立大学理学研究科数物系専攻2003年度修士論文, 2004
- [8] 藤井森, 笠原克昌, 齊藤芳隆, 松坂幸彦, 並木道義, 太田茂雄, 鳥海道彦, 山上隆正, 山岸久雄, 村上浩之, 内山貞幸, 紺野祐司, 南極周回気球で用いたイリジウム通信システムと電源供給システムの評価と改良, 平成15年度大気球シンポジウム集録, **59**, 2003
- [9] 藤井 森, 南極周回気球で用いられた新しいHKシステムの評価と改良, 芝浦工業大学大学院工学研究科電気工学専攻2003年度修士論文, 2004
- [10] Nakamura T., Ebihara Y., Ejiri M., Kadokura A., Matsumoto N., Matsuzaka Y., Mukai K., Murakami H., Nakagawa M., Namiki M., Oshima N., Saito Y., Sato N., Suzuki H., Takahashi W., Uchida M., Yamagami T., Yamagishi H., Yamamoto M., and Yamauchi M., Observations of hard X-rays of auroral origin with PPB No.8 and 10, *Adv. Polar Upper Atmos. Res.*, **18**, 10, 2004.
- [11] 齊藤芳隆, 松坂幸彦, 並木道義, 鳥海道彦, 太田茂雄, 山上隆正, 山岸久雄, 江尻全機, 佐藤夏雄, 海老原祐輔, 門倉昭, 片寄祐作, 富田裕基, 藤井森, 笠原克昌, 村上浩之, 内山貞幸, 紺野祐司, 南極周回気球のハウスキーピングシステムの評価, 平成15年度大気球シンポジウム集録, p55, 2003
- [12] <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index-j.html>
- [13] 西尾泰穂, 東山文雄, 山岸久雄, 佐藤夏雄, 門倉昭, 山上隆正, 並木道義, 松坂幸彦, 齊藤芳隆, 南極周回気球(PPB)による高精度磁場観測, 平成15年度大気球シンポジウム集録, p83, 2003
- [14] <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index-j.html>
- [15] <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/index-j.html>
- [16] Hirasima Y., Murakami H., Nakamoto A., Okudaira K., Suzuki H., Yamagami T., Ohta S., Namiki M., Nishimura J., Miyaoka H., Sato N., Fujii R. and Kodama M., A Balloon Observation of Auroral X-Ray Images in the Northern Auroral Zone, *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **47**, 44, 1987