

## ノルウェーにおけるオーロラ X 線の観測(1985 年)

平島 洋\*・奥平 清昭\*・中本 淳\*・村上 浩之\*・鈴木 裕武\*  
山上 隆正・西村 純・太田 茂雄・並木 道義  
宮岡 宏\*\*・佐藤 夏雄\*\*・藤井 良一\*\*・小玉 正弘\*\*\*

(1986 年 7 月 25 日受理)

## A Balloon Observation of Auroral X-ray Images in Norway

By

Y. HIRASHIMA, K. OKUDAIRA, A. NAKAMOTO, H. MURAKAMI,  
H. SUZUKI, T. YAMAGAMI, J. NISHIMURA, S. OHTA,  
M. NAMIKI, H. MIYAOKA, N. SATO, R. FUJII and M. KODAMA

**Abstract:** An equipped stratospheric balloon was launched from Abellver, Norway on 2117 UT 5 July 1985 in order to search the precipitating mechanisms of auroral particles through observations of the bremsstrahlung X rays in relation to the conjugacy of Syowa station, Antarctica. Observations of the X-ray images were carried out by using a horizontal two-dimensional array of Si(Li) semiconductor detectors and a one-dimensional array of eight NaI(Tl) scintillation counters. The Si(Li) detector imager has  $5 \times 5$  pixels of which the central one has an angular resolution of  $15^\circ$ , and its total view is  $62^\circ$ . The NaI(Tl) imager has pixels of which the central one has a resolution of  $15^\circ$ , and its total view is  $95^\circ$ . All of them were self-rotated at a spin rate of 0.3 rpm to obtain the X-ray images. During the flight an auroral X-ray burst was observed on 2325 UT 6 July. This burst appeared in the northwest sky and its region was drifted to the southwest of the balloon. From the data analyses, the drift speed of this event is estimated as about 50 km/min.

---

\* 立教大学理学部物理学教室

\*\* 国立極地研究所

\*\*\* 山梨医科大学物理学教室

## 要 旨

1985年7月に、南極昭和基地の共役点であるノルウェーにおいてオーロラ観測の国際共同観測を実施した。

日本側の大気球観測は、地上から直接観測することが難しい降下電子、自然電波および電離層電場等の時間および空間変動の観測が目的であった。気球搭載観測器としては、オーロラ X 線撮像装置と VLF 受信機であった。日本側の気球は 1985 年 7 月 2 日と 7 月 5 日の 2 回放球した。本論文では、7 月 5 日に放球され、観測されたオーロラ X 線現象について述べる。オーロラ X 線撮像装置として、従来から用いていた無機シンチレータを 1 次元に配置したものと、厚型のリチウム・ドリフト型 Si(Li) 半導体検出器の 2 次元撮像装置を用いた。解析の結果、このオーロラ X 線現象は、7 月 6 日 23 時 25 分 (U. T.) 頃に始まり、数分間継続し、約 50 km/min の速度で北西から南東の方向に移動していたことが明らかになった。

## 1. は じ め に

気球の放球は、1985 年 7 月 5 日 21 時 17 分に北緯 64°44′、東経 11°11′ に位置するノルウェー中部のアベルバで行なった。この時期、上空の風は高度 20 km 以上で偏東風となっており、平均風速は約 40 km/hr である。アベルバから放球された気球はほぼ真西に進行し、約 50 時間でアイスランド上空に達することになる。

テレメータ受信はアベルバとアイスランドのフサビークで行なわれ、飛行中ほぼ切れ目なく受信できた。気球位置の決定には、アルゴスシステムおよび一次レーダを用いて行なった。

地上での地磁気観測は、ノルウェーではアベルバ、アンドイヤ、アイスランドではフサビーク、フサフェルおよびイサフィヨルズル等で行なった。

この国際共同観測は、地上観測、気球観測およびロケット観測等を用い総合的にオーロラ現象を観測することを目的とした。

オーロラの可視光領域の撮像については、オーロラ研究初期の頃から盛んに行なわれ、その現象の解析法もかなり進んできている。しかし、磁気圏深部の高エネルギー現象を反映しているオーロラ硬 X 線の撮像はまだ始まったばかりで、オーロラ硬 X 線の 2 次元像を観測したものはまだ少い (Calvert et al., 1985; Hirasima et al., 1983; Imhof et al., 1985; Mauk et al., 1981; Yamagami et al., 1975)。

今回のオーロラ X 線撮像検出器としては、NaI (Tl) シンチレータを用いたものと、厚型のリチウム・ドリフト型 Si(Li) 半導体検出器の 2 次元撮像装置を製作し、気球観測に使用した。従来、市販されている小型のシリコン表面障壁型検出器では、空乏層の厚さが数 100  $\mu\text{m}$  位であり、硬 X 線領域の検出効率が著しく悪く、硬 X 線領域では使用することができなかった。また、面積が数  $\text{cm}^2$  で厚い Si (Li) 半導体検出器では低雑音のものを製

作することはかなり難しいとされてきた。低雑音で厚さ 5 mm, 面積  $4\text{cm}^2$  のリチウム・ドリフト型 Si (Li) 半導体検出器を開発し、オーロラ X 線撮像に応用し、空間分布と時間変動とを独立に観測した。

VLF 受信機は、100 Hz から 10 kHz の周波数帯域を持ったものを用いた。

本論文では、1987 年 5 月 6 日 23 時 30 分 (U. T.) 頃に起きたオーロラ現象を硬 X 線領域で観測した結果の解析を中心に、また、VLF 観測および地上磁気観測の結果との比較検討した結果について述べる。

## 2. オーロラ硬 X 線検出器

### 2.1 無機シンチレータを用いた撮像装置

無機シンチレータ撮像装置は、厚さ 3 mm, 直径 1.5 インチの NaI (Tl) シンチレータを用いた検出器を 8 個水平方向に直列に配置し、厚さ 1 mm の鉛と厚さ 2 mm の錫から構成されるピンホール型コリメータを付け、ゴンドラ全体を 0.3 rpm で方位方向に回転させ、天空をスキャンすることによって撮像を行うものである。測定するエネルギー領域は 22 keV 以上であり、角分解能は中心で  $15^\circ$  であり、全視野角は  $95^\circ$  であった。オーロラ X 線発生層である高度 100 km では、この撮像装置を用いると、およそ 150 km の天空を中心で 19 km の空間分解能、1 分 30 秒の時間分解能で、オーロラ X 線撮像図の全天図ができる。

### 2.2 Si (Li) 半導体検出器を用いた撮像装置

リチウム・ドリフト型 Si (Li) 半導体検出器の製造方法および性能に関しては、南極資料第 87 号に詳細に述べてあるので、ここでは簡単に記すことにする。

厚いリチウム・ドリフト型 Si (Li) 半導体検出器は、比較的高いエネルギーの測定に使

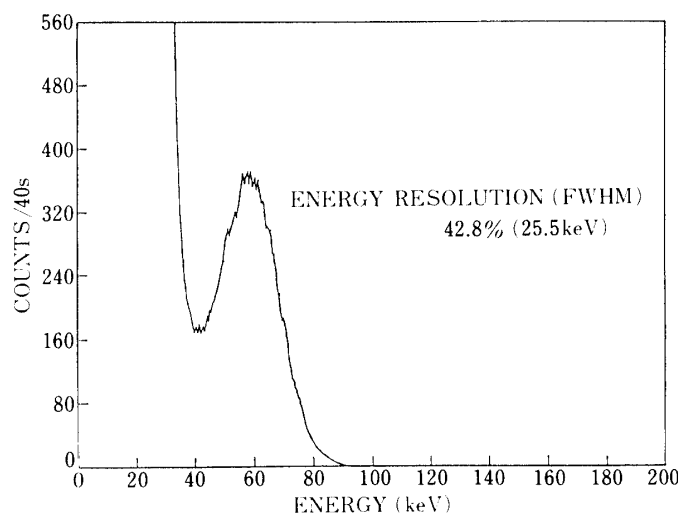


図 1 室温 ( $22^\circ\text{C}$ ) において、線源  $^{241}\text{Am}$  を用いた場合の Si (Li) 半導体検出器のパルス波高分布

用され、この場合、検出器内でのエネルギー損失が大きく、1 MeV 程度のエネルギー損失をする測定に使用されてきた。(Nagata et al., 1985; Nakamoto et al., 1980).

オーロラ X 線の撮像用検出器として使用するシリコン半導体検出器を製作する場合は、測定エネルギーを 10 keV の領域に下げる必要がある。このため、製作する検出器は、漏洩電流をできるだけ減少させることが重要となる。この漏洩電流には、検出器固有の体積漏洩電流と検出器表面に沿って流れる表面漏洩電流がある。前者は製作する検出器の体積に比例するもので、後者は検出器製作工程における表面処理法、あるいは表面汚染などにより大きく変動するものである。

オーロラ現象にともなう硬 X 線の撮像を目的として、硬 X 線を効率よく測定するためには、ある程度の面積と厚さが必要となる。今回、厚さ 5 mm、面積 20×20 mm のリチウム・ドリフト型 Si (Li) 半導体検出器の製作を行なった。

製作した Si (Li) 半導体検出器の室温 (22°C) におけるエネルギー分解能は  $^{241}\text{Am}$  の 59.5 keV  $\gamma$  線の線源を用いて測定した結果を図 1 に示した。製作した検出器のエネルギー分解能は、FWHM で 42.8 % (26.5 keV) であった。半導体検出器の固有エネルギー分解能すなわち原理的に限界のエネルギー分解能は理論的に下記のように書くことができる。この式は波形整形回路の波形が三角波形の場合である。

$$\Delta E = \left\{ 4kTR_s C_{in}^2 \frac{1}{t_m} + \frac{1}{3} \left( 2q_e I_0 + 4kT \frac{1}{R_p} \right) t_m \right\}^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 $k$ : ボルツマン定数、 $T$ : 温度 (K),

$R_s$ : 直列等価雑音抵抗 (初段素子が FET の場合 0.7/gm),

$C_{in}$ : 入力静電容量,  $t_m$ : 三角波のピークになる時間,

$q_e$ : 電子の電荷,  $I_0$ : 入力漏洩電流,  $R_p$ : 並列雑音抵抗。

入力漏洩電流  $I_0$  は、体積漏洩電流と表面漏洩電流とが加わったものであるが、固有エネルギー分解能を議論する場合は、表面汚染によって大きく変動する表面漏洩電流を無視して体積漏洩電流のみで計算する。体積漏洩電流は、

$$I_0 = n_i q_e V / 2\tau \quad (2)$$

で与えられる。

ここで、 $n_i$ : 真性半導体キャリアー濃度、 $V$ : 検出器体積、 $\tau$ : キャリアー平均寿命 (500  $\mu\text{s}$  ~ 1 ms)

真性半導体キャリアーは

$$n_i = 3.88 \times 10^{16} T^{3/2} \exp(-7000/T) \quad (3)$$

で与えられる。

製作した Si (Li) 半導体検出器の固有エネルギー分解能は、各パラメータとして、 $T = 295 \text{ K}$ ,  $\tau = 1 \text{ ms}$ ,  $V = 2 \text{ cm}^3$ ,  $R_p = 10^9 \Omega$ ,  $I_0 = 1.6 \mu\text{A}$ ,  $t_m = 1 \mu\text{s}$ ,  $C_{in} = C_D + C_A = 25 \text{ pF}$ ,  $R_s = 70 \Omega$  を使用すると、

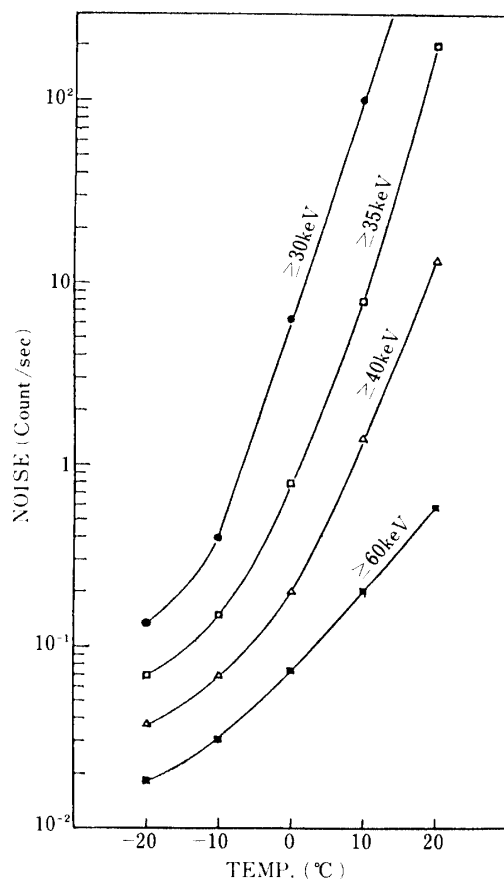


図 2 製作した Si (Li) 半導体検出器の雑音による計数率の温度依存性. 曲線に付したエネルギー以上の雑音の計数率を表す. エネルギーは  $^{241}\text{Am}$  線源 (59.5 keV) を用いて校正した

$$\Delta E = 4.15 \times 10^{-16} \text{ (クーロン)} = 21.9 \text{ (keV)}$$

となる.

理論式より求めた固有エネルギー分解能と実際に測定したエネルギー分解能とは 6 % 以内で一致している. この違いは表面漏洩電流によるものと考えられる. また, この固有エネルギー分解能を決定する漏洩電流は, (3) 式より明らかなように温度の関数になっており, 冷却することによって著しく減少することがわかる.

製作した Si (Li) 半導体検出器の雑音による計数率の温度依存性を図 2 に示した. この図からわかるように, 温度が 10°C 減少すると, 雑音は約 1 桁減少する. この図より, オーロラ硬 X 線観測用検出器としては, 測定エネルギー領域を 35 keV 以上とすると, 検出器を 0°C まで冷却すれば充分であることがわかる.

製作した Si (Li) 半導体検出器を 5°C に冷却し,  $\gamma$  線線源  $^{241}\text{Am}$  を用いたパルス波高分布を示したのが図 3 である.  $^{241}\text{Am}$  線源から出る 59.5 keV の  $\gamma$  線の波高分布は図 1 に示

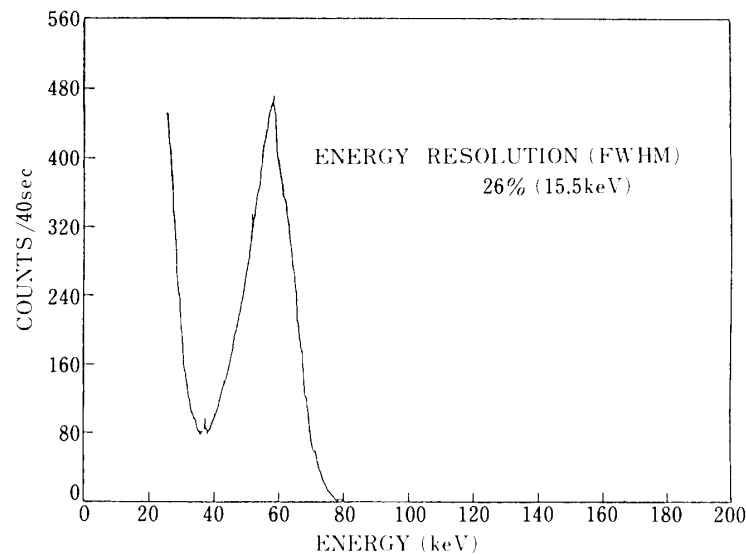


図 3 Si (Li) 半導体検出器を 5°C に冷却し,  $^{241}\text{Am}$  線源を照射した場合のパルス波高分布

した 22°C に比べて、鋭くなっており、エネルギー分解能は FWHM で 15.5 keV であった。この値は、体積漏洩電流のみを用いて、式(1)より求めた検出器固有のエネルギー分解能 (10.5 keV) より多少悪い。この原因としては、まだ表面漏洩電流の影響が残っているためと考えられる。大気球を用いたオーロラ硬 X 線撮像用検出器として、環境温度 5°C で上記の分解能があれば十分である。また、実際の気球観測の場合、検出器の環境温度を減少する方法として、ゴンドラ周囲の -30°C の環境を利用するヒート・パイプ方式を採用した。

### 3. オーロラ硬 X 線撮像装置

製作したオーロラ硬 X 線撮像装置は、2 節で述べたように、NaI (Tl) シンチレーション検出器を 8 個直列に並べたものと 1 素子の有効面積が  $18 \times 18$  mm、厚さ 5 mm の Si(Li) 半導体検出器 25 個を  $5 \times 5$  のマトリック状に 2 次元に配列したものの 2 種類の撮像装置を図 4 に示すように配置した。前者の時間分解能は 1 分 30 秒、後者の時間分解能は 1/8 sec であった。後者の空間分解能は、前者の空間分解能とほぼ同じになるように、硬 X 線に対するコリメータとして、厚さ 1 mm の鉛と厚さ 2 mm の錫で撮像装置全体を包む構造になっており、Si (Li) 半導体検出器の中央の表面から高さ 15.5 cm の所に 20 mm  $\phi$  のピンホールの穴をもち、最小空間分解能は  $15^\circ$  であり、全視野角は  $62^\circ$  であった。オーロラ硬 X 線が発生すると考えられている高度 100 km の天空を、前者は約 22 mm の間隔で並べられているため直径 150 km の天空を撮像することになり、後者はマウント枠、電極のため 7 mm 間隔があるため直径 80 km の天空を撮像する。また、両者の高圧電源は放電等を考慮して完全に独立にした。

両者のそれぞれの検出器の 1 画素に対応する有効面積は、X 線の種々の入射方向によっ

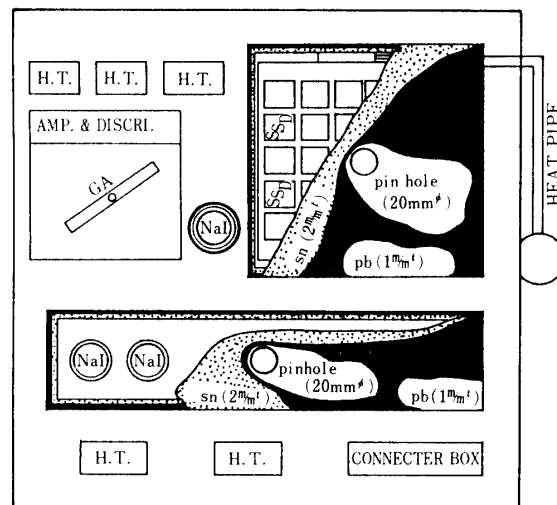


図 4 オーロラ X 線撮像装置の全体構成図。Si(Li) 半導体検出器の撮像装置は  $5 \times 5$  pixels から構成されている。NaI (Tl) 検出器撮像装置は 8 個の NaI (Tl) シンチレータから構成されている

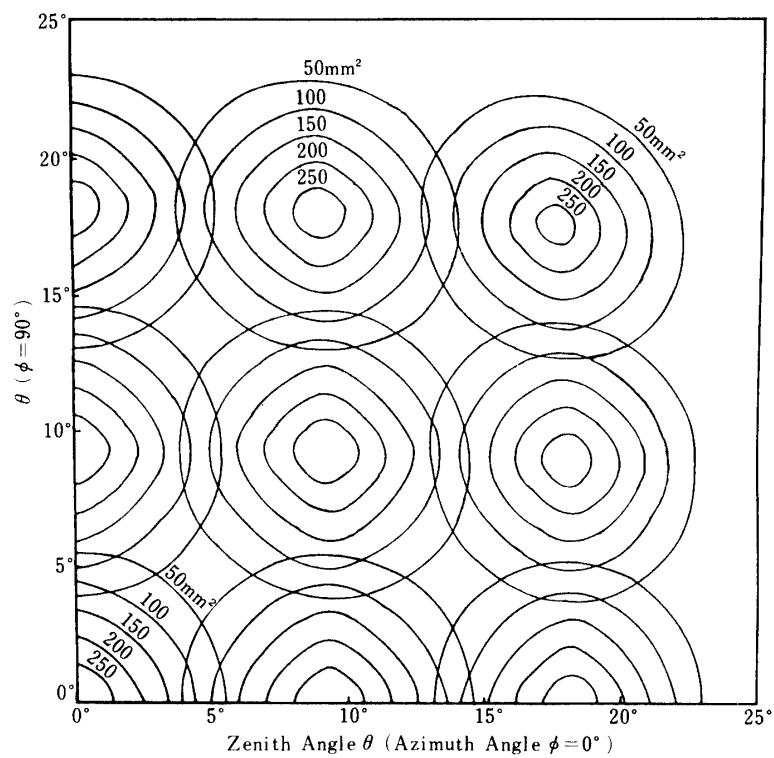


図 5 Zenith Angle  $\theta$  (Azimuth Angle  $\phi=0^\circ$ )

て、検出器とピンホールの幾何学的位置関係によって変化する。入射 X 線を平行ビームとした Si(Li) 半導体検出器の有効面積  $S_{\text{eff}}(\theta, \phi)$  は、入射 X 線方向を示す天頂角  $\theta$  と方位角  $\phi$  の関数として表すことができ、その結果を図 5 に示した。この図は、検出器が  $5 \times 5$  の正方マトリックス状に配置してあるので、対称性から中心を原点とした第 1 象限についてのみ示した。すなわち、原点は中央の検出器の中心であり、中心から真上のコリメーター中心の方向を天頂角  $\theta = 0^\circ$  とし、横軸は方位角  $\phi = 0^\circ$  の方向の天頂角を表した。1 個の Si(Li) 半導体検出器に対して 5 本の等高線を用い、内側からそれぞれ 250, 200, 150, 100, 50  $\text{mm}^2$  の有効面積に対応する入射 X 線方向の天頂角  $\theta$  と方位角  $\phi$  の値を示した。各検出器についての 5 本の等高線で外側の有効面積が小さくなるのは、1 つの検出器に入射する X 線がコリメータによって遮断される割合が大きくなることを表わしている。また、この図より明らかなように、隣接する Si(Li) 半導体検出器の有効面積の重なるところが少ない。すなわち、このことは隣接する画素の重なり効果は小さいことを示している。また、有効立体角を考慮した NaI(Tl) シンチレーション検出器と Si(Li) 半導体検出器との 1 pixel のそれぞれの相対的有效  $S\Omega$  を図 6 に示した。

シリコン半導体検出器を用いた  $5 \times 5$  素子のオーロラ X 線撮像装置と前置増幅器は 1 気圧の耐圧容器に入れ、内部に 1 気圧の乾燥空気を封入した。これは、Si(Li) 半導体検出器に印加するバイアス電圧 250V が観測高度で放電を起こさないためと、Si(Li) 半導体検出器自身の冷却効果を良くするためである。耐圧容器は厚さ 5 mm のアルミニウム製であ

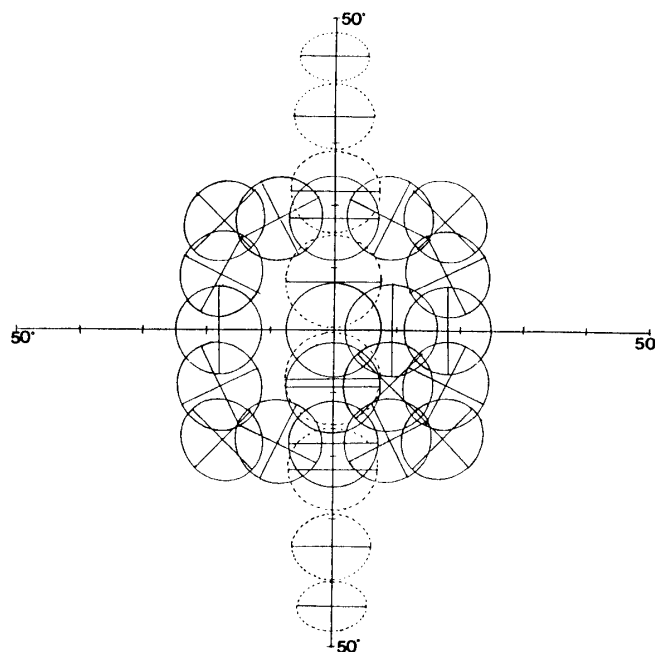


図 6 有効立体角を考慮した NaI(Tl) シンチレーション検出器と Si(Li) 半導体検出器の各 pixel の相対的有效  $S\Omega$   
点線は NaI(Tl) 検出器、実線は Si(Li) 半導体検出器



NaI(Tl) 1

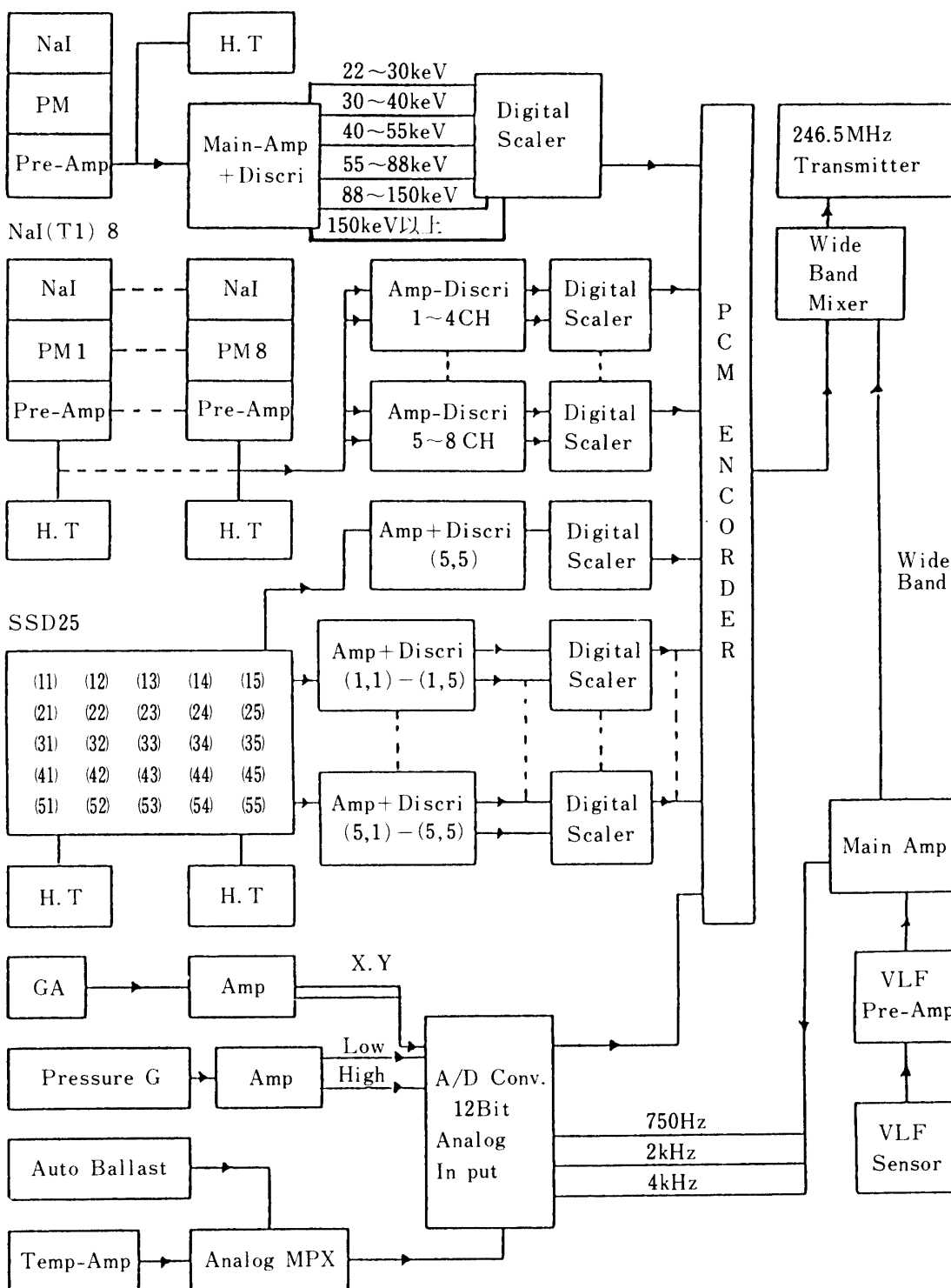


図 7 1985年7月北極域オーロラ観測に用いた気球搭載用電子回路のブロックダイアグラム

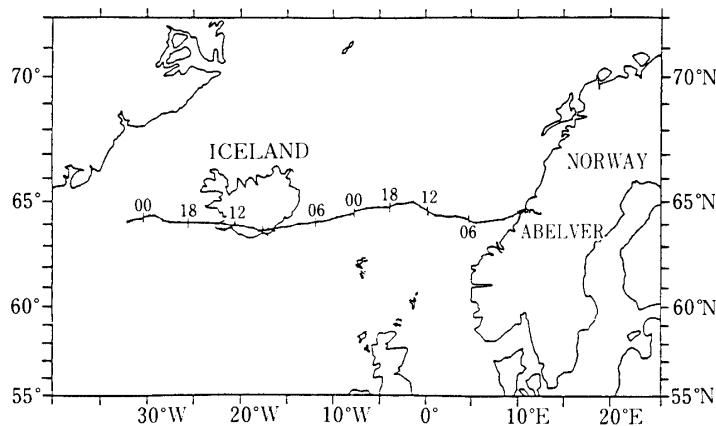


図 8 1985 年 7 月 5 日にノルウェー・アベルバより放球した気球の航跡図

り、上面のみ X 線の吸収を小さくするために平均原子番号が空気よりやや低い硬質アクリルで 1 cm の厚さ ( $1.1 \text{ g/cm}^2$ ) のものを用いた。

Si (Li) 半導体検出器を冷却する方法として、耐圧容器の側面に直接ヒート・パイプを取り付け、シート・パイプの冷却部をゴンドラの外部に出し、気球浮遊高度の  $-30^\circ\text{C}$  以下の低温環境を利用し、検出器を冷却する方法を用いた。ヒート・パイプの冷却器は内壁がメッシュウイックス型銅パイプでできており、太さ 1.9 cm  $\phi$ 、長さ 86 cm であり、内部に作動液フロン 12 が封入されている。冷却部には 6 cm  $\phi$  のアルミニウム製放熱用円板フィン 33 枚が付けられている。このヒート・パイプの熱抵抗は  $0.24 \text{ h}^\circ\text{C/kcal}$  である。

北極域の 7 月の時期は、太陽が地平線下に沈まない時期であり、一応ヒート・パイプ冷却部に直接日射が当たらぬように日除けを付った。また、日本の気球実験において、同様な構造の観測器の昼間のデータ、耐圧容器内の発熱量およびヒート・パイプの熱交換率を用いて、シュミレーション計算を行い、実験室で実際シュミレーション実験を行った結果よく一致した。その結果については南極資料第 87 号に詳しく記した。上記の結果、検出器部が  $0^\circ\text{C}$  になると推定でき、今回製作した Si(Li) 半導体撮像用検出器は 37 KeV 以上のエネルギー領域の X 線を観測することにした。

今回のオーロラ X 線観測器としては、上記の 2 次元 Si (Li) 半導体検出器撮像装置、8 個の NaI(Tl) シンチレーション検出器撮像装置、エネルギー・スペクトル測定用 NaI(Tl) シンチレーション検出器および VLF 受信器を 1 つのゴンドラに搭載した。ゴンドラ全体を方位角方向に 0.3 rpm の速度で回転させ、天空をスキャン撮像することにした。

上記の 3 種類のオーロラ X 線観測装置によるデータ、VLF 観測データ、温度、気圧および姿勢計 GA などのデータは PCM 方式で地上に伝送した。気球搭載電子回路のブロックダイアグラムを図 7 に示した。PCM は 1 メジャー・フレームが 2 マイナ・フレームより構成され、1 マイナ・フレームは 32 ワードで構成され、1 ワードが 16 ビットから構成されている。使用したクロック周波数は 8.192 kHz であり、1 秒間に 8 メジャー・フレームを

伝送することができる。従って、最小時間分解能は 1/8 秒であった。

#### 4. 気 球 観 測

気球の放球はノルウェー中部の小村落アベルバ(北緯 64°44', 東経 11°11') で行なった。この時期、上空の風は高度 20 km 以上で東風となっており、平均風速は毎時約 45 km である。このため、テレメータ受信点はアベルバとアイスランドのフサビークに設け、気球飛翔中ほぼ切れ目なく受信できるようになっていた。気球位置はアルゴス・システムおよび一次レーダによって決定した。この気球実験では、コマンドを搭載していないため、長時間フライトを行なうために、気球高度を一定高度以上に保つため、オートバラスト装置を搭載した。オートバラストは、5 分間に 1 回半導体気圧計をサンプリングし、高度 30 km 以下になると自動的にバラストを 1 回に 500 g 投下するように設定した。気球は 1986 年 7 月 5 日 21 時 17 分 (U. T.) に放球され、51 時間 30 分で受信が終了した。その後、この気球は約 20 時間飛翔し、グリーンランドの東海岸に到達したとき、タイマーが正常に動作し観測器を気球から切離し、当東海岸に無事着地したことが、アルゴスによって確認された。この気球の航跡を図 8 に示した。約 50 時間の水中浮遊中、観測器はエネルギー・スペクトル測定用 NaI (TI) シンチレーション検出器以外、全て正常に動作した。気球の高度変化、バラスト応答、および各部の温度変化の様子を図 9 に示した。この図中の  $T_g$  はゴンドラ内の温度、 $T_c$  は Si (Li) 検出器の耐圧容器内部の温度、 $T_{si}$  は Si (Li) 半導体検出器の温度を示している。ゴンドラ内の温度 ( $T_g$ ) より耐圧容器内部温度 ( $T_c$ ) が約 20°C 低くなって

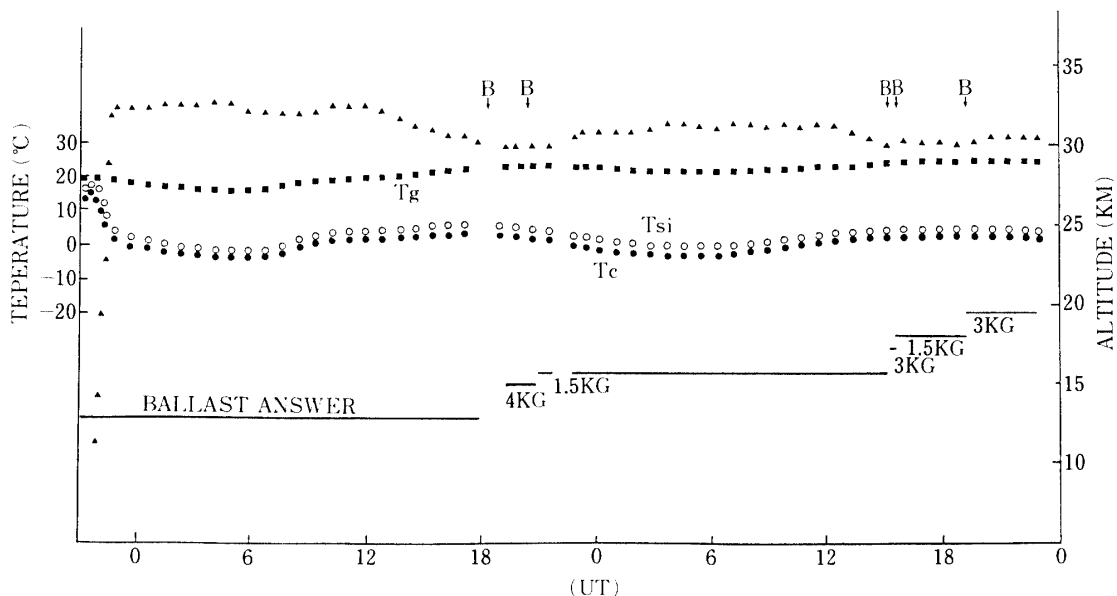


図 9 1985 年 7 月 5 日にノルウェーアベルバより放球した気球の高度曲線および各部の温度変化とオートバラスト応答の様子  
 $T_g$ : ゴンドラ内部温度,  $T_{si}$ : Si (Li) 半導体検出器温度  
 $T_c$ : 耐圧容器内部温度

いるのは、ヒートパイプを用いて外気温度との強性的熱交換を行ったためである。Si(Li)半導体検出器自身の温度は放球後2時間位で $5^{\circ}\text{C}$ に冷却され、その後 $0^{\circ}\text{C}$ から $4^{\circ}\text{C}$ 間に保たれていたことがわかる。この結果は、水平浮遊高度30 kmでの外気温 $-30^{\circ}\text{C}$ として行った実験室でのシュミレーションの結果とよく一致している。この気球実験では、コマンドを搭載しなかったため気球高度を一定に保つためにオートレベルコントロールシステムを用い気球高度コントロールを行った。図9より、7月16日18時(U. T.)頃と7月7日15時(UT)頃にオートレベルコントロールが正常に動作し、気球高度を30 km以上に保つことができた。2日間の水平浮遊中、高度30 kmを保つために、バラストの消費量は総重量の約6%にあたり、日本などの日没時以外の気球降下の原因としては、雲などによる地上からの輻射の減少および太陽高度の低下にともなう太陽光の大気による吸収量の増加等が考えられるが、前者の方が卓越している。

気球が水平浮遊中の7月6日23時30分(UT)頃にオーロラに伴うX線の増加が観測された。X線増加時の大気球の位置はアイスランド西方海上約280 kmであり、 $L$ 値が5.2の位置であった。

### 5. オーロラによるX線増加

気球が高度32 kmで水平浮遊中にオーロラにともなうX線の増加が観測された。オーロラX線の増加は1985年7月6日23時25分30秒(UT)から23時32分(UT)の約7分間に大きな増加を示し、その後も小さいX線の増加が観測された。前節で述べたように、オーロラX線撮像装置としては、Si(Li)半導体検出器を $5\times 5$ の2次元のマトリックス型に配置し、ピンホール型コリメータで囲んだ装置と8個のNaI(Tl)シンチレーション検出器を1次元に配列し、ピンホール型コリメータで囲んだ装置の2種類の装置が同じゴンドラに搭載した。また、8個のNaI(Tl)シンチレーション検出器が1次元に配列されているため、ゴンドラ全体を0.3 rpmの一定速度で回転させる予定であったが、このゴンドラの下に246.5 MHzのテレメータのアンテナを吊下げたため、一定速度でゴンドラが回

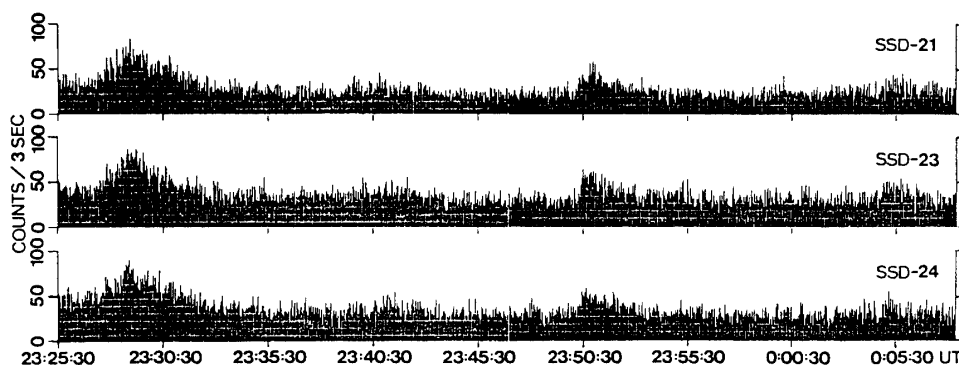


図10 オーロラX線バースト時の代表的Si(Li)半導体検出器の計数率の時間変化

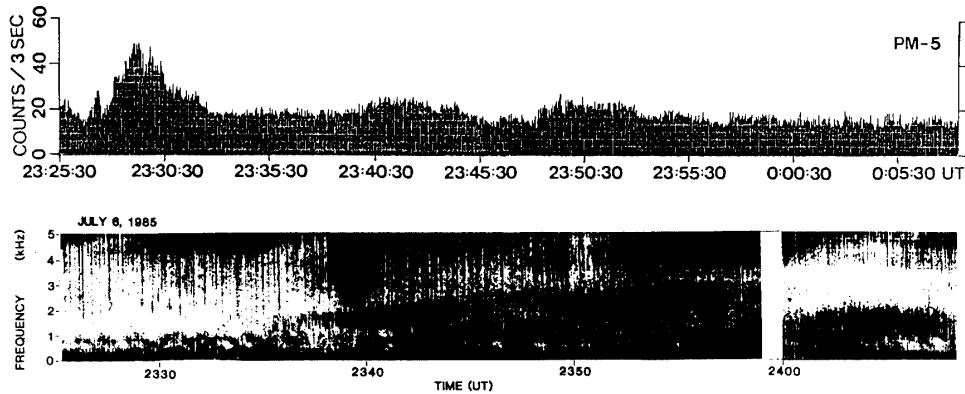
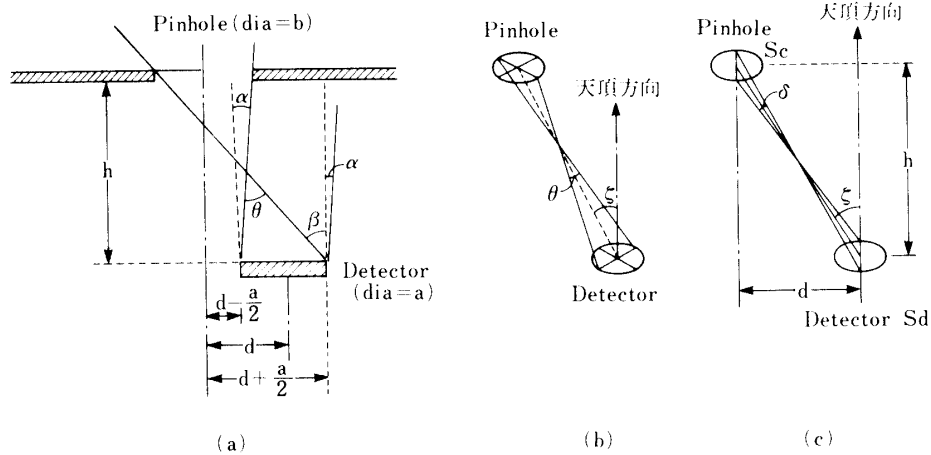


図 11 オーロラ X 線バースト時の代表的 NaI(Tl) シンチレーション検出器の計数率の時間変化と VLF 検出器の時間変化



転せず、オーロラによる X 線増加時は約 1 rpm の速度で回転していた。

オーロラ X 線増加時刻前後の代表的な Si (Li) 半導体検出器 3 個のカウント数の時間変化を図 10 に、NaI(Tl) シンチレーション検出器のカウント数の時間変化を図 11 に示した。図 10 および図 11 によると、オーロラによる X 線の増加の初めの時刻は、データレコーダのテープ交換のためデータが欠測しているが、23 時 25 分 30 秒 (UT) には既に X 線のカウント数の増加が始まっており、23 時 29 分 30 秒 (UT) 頃にカウント数が最大となり、23 時 32 分 (UT) には完全にバックグラウンドのカウント数に戻っている。その後もオーロラの活動は多少継続しており、23 時 40 分 30 秒 (UT) 頃と 23 時 50 分 30 秒 (UT) 頃にも、少ない X 線のカウント数の増加が観測されている。また、図 11 には同じゴンドラに搭載した VLF 検出器の時間変化を示した。図より、この時間帯にオーロラヒス (周波数 4 KHz 以上) ならびにコーラスエミッション (周波数 1~3 KHz) が観測されているが、オーロラ X

線の降下に伴う電離層の電子密度上昇に伴うシールド効果により、オーロラ X 線バーストに対応する VLF エミッションは顕著に観測されていない。

各検出器とピンホールコリメータとの幾何学的位置関係を図 12 に示した。ピンホールの直径を  $b$ 、個々の検出器の直径を  $a$ 、コリメータと検出器との距離を  $h$ 、ピンホールの中心から個々の検出器の中心までの距離を  $d$  とした場合、視線方向を検出器面に投影した直線に平行な方向の角分解能  $\theta$  は（図 12-a, 図 12-b 参照）

$$\tan \alpha = \frac{\frac{a+b}{2} - d}{h}, \quad \tan \beta = \frac{\frac{a+b}{2} + d}{h}$$

$$\therefore \theta = \alpha + \beta = \tan^{-1} \left( \frac{\frac{a+b}{2} - d}{h} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{\frac{a+b}{2} + d}{h} \right)$$

となる。すなわち、ピンホールの直下にある検出器の中心から視線方向を検出器面に投影した直線の動径方向に平行な方向は  $\theta$  がだ円底面のだ円錐の円錐角を与える。

次に、視線方向を検出器に投影した直線に垂直な方向の角分解能  $\delta$  は（図 12-c 参照）

$$\tan \frac{\delta}{2} = \frac{\frac{b}{2}}{\frac{h}{\cos \zeta} \frac{b}{a+b}} = \frac{a+b}{2h/\cos \zeta}$$

$$\therefore \delta = 2 \tan^{-1} \left( \frac{a+b}{2h/\cos \zeta} \right)$$

となる。

今、 $\delta$  が十分小さく、 $\delta \ll 1$  ならば

$$\tan \frac{\delta}{2} \doteq \frac{\delta}{2} = \frac{a+b}{2h/\cos \zeta}$$

となり、視線方向を検出器面に投影した直線に垂直な方向の角分解能  $\delta$  は

$$\delta = \frac{a+b}{h} \cos \zeta$$

となる。今回の撮像装置では、 $\delta$  は最大でも  $15^\circ$  であることから、上記の近似式の精度は

$$\tan \delta = \delta + \frac{\delta^3}{3} + \frac{2\delta^5}{15} + \cdots \quad (\delta = 0.262 \text{ rad})$$

$$\frac{\delta^3}{3} = 0.006 \rightarrow 0.3^\circ$$

であるので、2 項目以上を無視しても 98 % となる。

以上のことから、近似式を用いて、Si(Li) 半導体検出器および 8 個の NaI(Tl) シン

チレーション検出器の各 pixel の  $S\Omega$  が計算できる。

有効面積；  $S_{\text{eff}} = S_d \cos \zeta$

有効立体角；  $\Omega_{\text{eff}} = S_c \cos \zeta / (h^2 + d^2)$

各 pixel の  $S\Omega$  は

$$S\Omega = S_{\text{eff}} \cdot \Omega_{\text{eff}} = S_d S_c \cos^2 \zeta / (h^2 + d^2) \quad (4)$$

となる。ここで、 $S_d$  は検出器の面積、 $S_c$  はコリメータの面積である。

(4)式を用い、Si (Li) 半導体検出器と NaI (Tl) シンチレーション検出器の各 pixel の  $S\Omega$  を計算した結果を表 1 に示した。表 1 より、Si(Li)半導体検出器の各 pixel の  $S\Omega$  は、最大値と最小値では 1.46 倍位異なる。また、NaI (Tl) シンチレーション検出器では 3.53 倍異なっている。

以上のことから、Si(Li) 半導体検出器および NaI(Tl) シンチレーション検出器の各 pixel による  $S\Omega$  による補正を行い、オーロラによる X 線の増加の時間変化を模式的に示したのが図 13 と図 14 である。図 13 は Si (Li) 半導体検出器の各 pixel の時間変化を示した。この図は、各 Si(Li) 半導体検出器の 3 秒間のバックグラウンド・カウント数を  $B$ 、3 秒間のカウント数を  $N$  とし、 $N < B + 3\sqrt{B}$ ,  $B + 3\sqrt{B} \leq N < B + 6\sqrt{B}$ ,  $B + 6\sqrt{B} \leq N < B + 9\sqrt{B}$ ,  $N \geq B + 9\sqrt{B}$  の 4 段階に分け、濃淡を用いて示した、濃淡の濃い方がカウント数の大きな増加を示している。図 14 は、NaI(Tl) シンチレーション検出器の各 pixel の時間変化を示した、この図も図 13 と同様に、 $N < B + 3\sqrt{B}$ ,  $B + 3\sqrt{B} \leq N < B + 6\sqrt{B}$ ,  $B + 6\sqrt{B} \leq N < B + 9\sqrt{B}$ ,  $B + 9\sqrt{B} \leq N < B + 12\sqrt{B}$ ,  $N \geq B + 12\sqrt{B}$  の 5 段階に分け、濃淡で示した。これらの図より、各 pixel のオーロラ X 線の時間変化が良くわかる。

高エネルギー電子が precipitate してオーロラ X 線の発生する高度が 100 km と考え、気球高度を 32 km とすると Si (Li) 半導体検出器の撮像装置の天空上の視野は直径 80 km の円板となる。また、NaI(Tl) シンチレーション検出器の撮像装置の天空上の視野は、縦 150 km × 横 20 km の長方形であり、ゴンドラ全体が 180° 回転することによって、直径 150 km の円板となる。図 13 と図 14 と同じ基準を用い、各々の撮像装置によって測定されたオ

表1. 各 Pixel の  $S\Omega$  ( $\text{cm}^2 \cdot \text{str}$ )

Si (Li) Detector の No.	S Ω (cm <sup>2</sup> .str)	NaI (Tl) Detector の No.	S Ω (cm <sup>2</sup> .str)
SSD-11, SSD-15 SSD-51, SSD-55	2.90×10 <sup>-2</sup>	8 PM- 1, 8 PM- 8	2.02×10 <sup>-2</sup>
SSD-12, SSD-14, SSD-21, SSD-25	3.32×10 <sup>-2</sup>	8 PM- 2, 8 PM- 7	3.45×10 <sup>-2</sup>
SSD-41, SSD-45, SSD-52, SSD-54		8 PM- 3, 8 PM- 6	5.43×10 <sup>-2</sup>
SSD-13, SSD-31, SSD-35, SSD-53	3.47×10 <sup>-2</sup>	8 PM- 4, 8 PM- 5	7.13×10 <sup>-2</sup>
SSD-22, SSD-24, SSD-42, SSD-44	3.83×10 <sup>-2</sup>	<div><div><div>5141312111</div><div>5212</div><div>○</div><div>Si (Li) Detector</div><div>5545352515</div></div><div>8個のNaI (Tl)</div></div>	
SSD-23, SSD-32, SSD-34, SSD-43	4.02×10 <sup>-2</sup>		
SSD-33	4.24×10 <sup>-2</sup>		

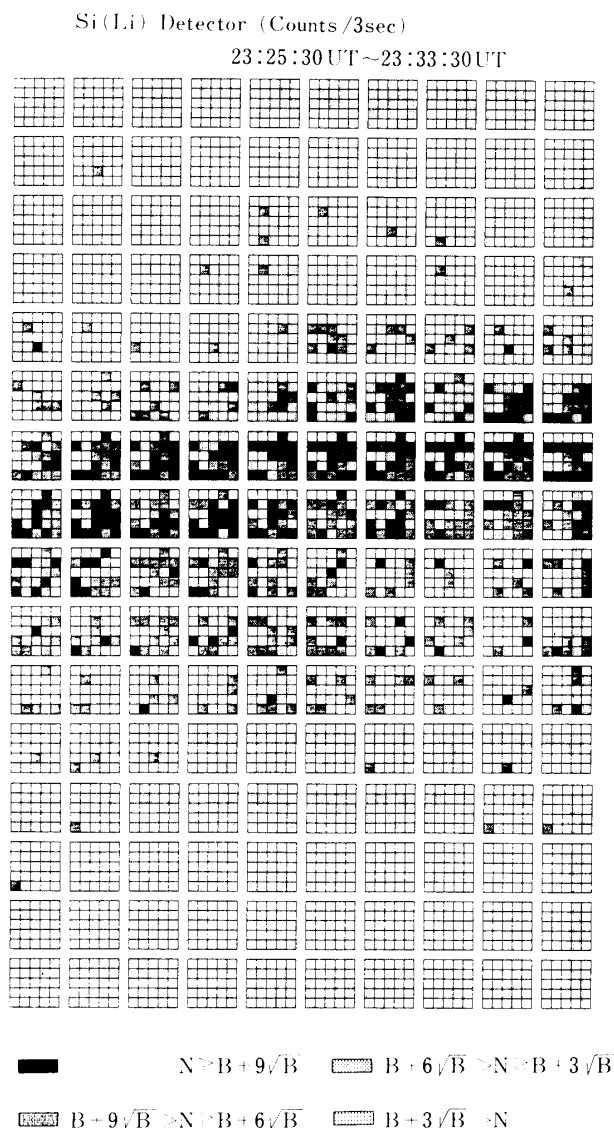


図 13 オーロラ X 線バースト時の Si (Li) 半導体検出器の各 pixel の計数率の時間変化

オーロラ X 線の天空上での計数率の時間的変化を図示したのが図 15 と図 16 である。図 15 の Si(Li) 半導体検出器の撮像装置で観測されたオーロラ X 線の天球上での時間変化は、23 時 27 分 45 秒 (UT) 頃に北西の空に発生したオーロラ X 線が 23 時 29 分 40 秒 (UT) 頃には南東の空に消え、23 時 29 分 05 秒 (UT) 頃に北西に発生したオーロラ X 線が 23 時 30 分 45 秒 (UT) 頃に南東の空に消えていった様子がわかる。また、図 16 の NaI(Tl) シンチレーション検出器撮像装置で観測されたオーロラ X 線の天球上の時間変化は、23 時 28 分 35 秒 (UT) 頃に天球上の北西に発生したオーロラ X 線が 23 時 30 分 50 秒 (UT) 頃に南東に移動し視野から消えていった様子がわかる。以上のことから、1985 年 7 月 6 日



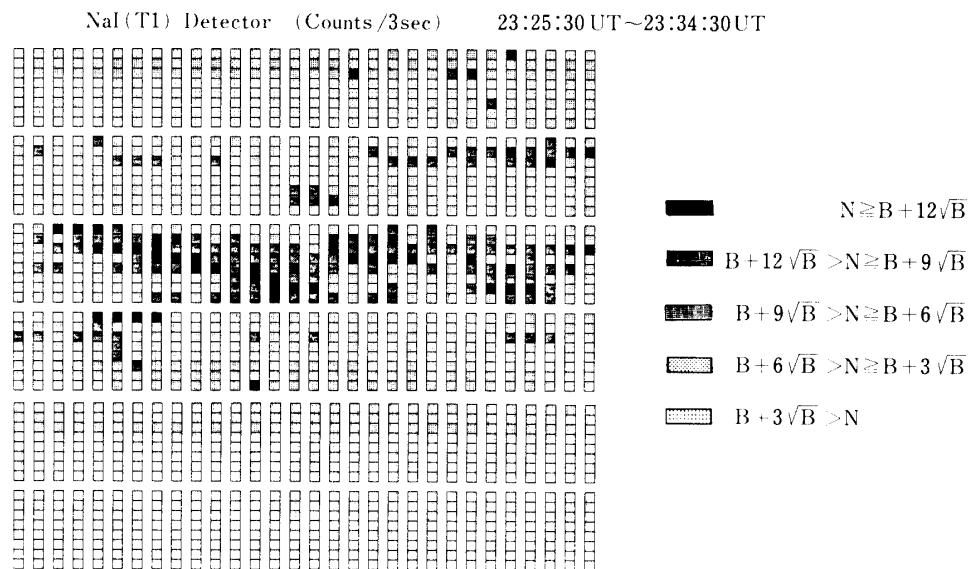


図 14 オーロラ X 線バースト時の NaI (Tl) シンチレーション検出器の各 pixel の計数率の時間変化

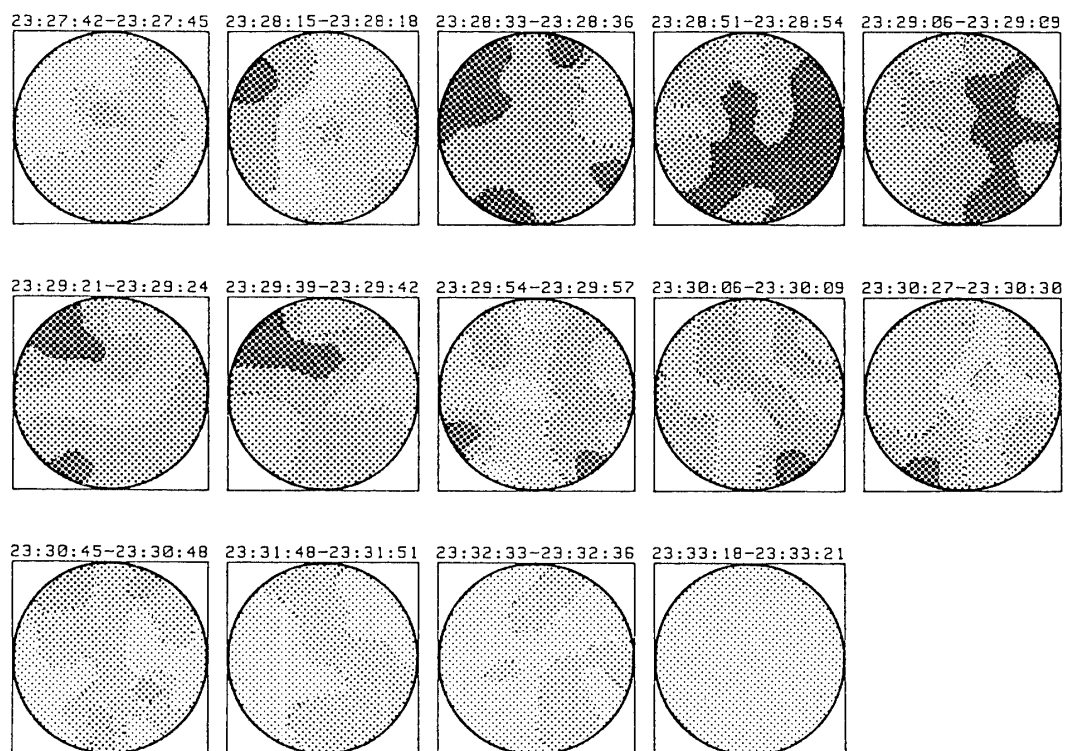


図 15 Si (Li) 半導体検出器撮像装置で観測したオーロラ X 線の天球上での時間変化

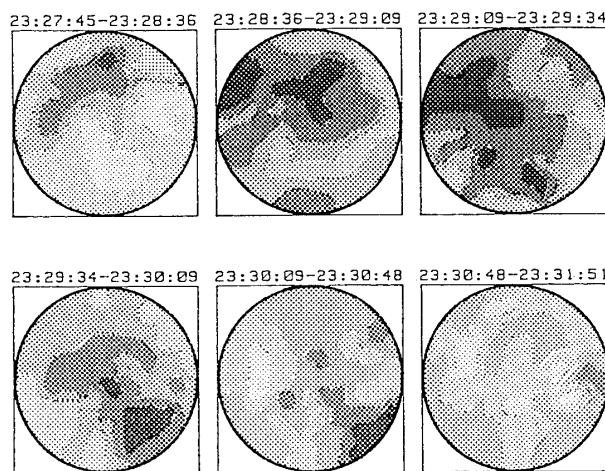


図 16 NaI (Tl) 検出器撮像装置で観測したオーロラ X 線の天球上での時間変化

のオーロラ X 線は、北西の空に発生し南西の方向に移動した、その移動速度は両撮像装置によると毎分約 50 km であった。

## 6. お わ り に

1985 年 7 月 6 日 23 時 25 分 (UT) から 23 時 50 分 (UT) にオーロラ X 線バーストを  $L=5.2$  の地点で観測した。今回使用した Si (Li) 半導体検出器による 2 次元撮像装置は実験室で手作りで製作されたものであり、硬 X 線用観測器として使用されたのは世界的にも初めてのことであった。1985 年 7 月 6 日は、地磁気の interplanetary 3-hourly index  $K_p$  が 21:00 (UT) から 24:00 (UT) にかけて 5 であり、地磁氣的に可成り擾乱の激しい時間帯でオーロラ X 線バーストが発生した。地上地磁気観測点である Iceland の Husafell ( $L=6.1$ ) と Greenland の Narssarssuaq ( $L=6.7$ ) の測定結果を図 17 に示した。Husafell の観測結果より、地磁気の水平成分 (H) は 23 時 (UT) 頃に 500 nT 位の激しい擾乱が始まり、23 時 30 分 (UT) 頃には、垂直成分 (Z) がプラスの擾乱の変化が観測されている。また、Narssarssuaq の観測結果では、地磁気の擾乱は 23 時 (UT) 頃に始まり、23 時 30 分頃に激しい変化を示し、垂直成分は Husafell と同じくプラス成分に変動していた。地磁気の観測結果より、このオーロラはマルチ・サブストームであることがわかる。また、Husafell, Narssarssuaq の両地上地磁気観測点でオーロラ X 線バースト時刻に水平成分がマイナス側に激しく擾乱し、垂直成分がプラス側に擾乱していることは、降下電子が高緯度側から低緯度側に変動したことを表わす。すなわち、地磁気の変動から、オーロラ X 線も北から南に移動したと考えるのが自然である。

気球でオーロラ X 線バーストを観測した地点で  $L=5.2$  の場所であり、地上での地磁気観測地点が  $L=6.1$  と  $L=6.7$  の場所であり、地磁気の擾乱の時刻と気球でのオーロラ X 線バーストとの時刻が多少異なっているが気球の観測地点が  $L$  が低い場所であったためと

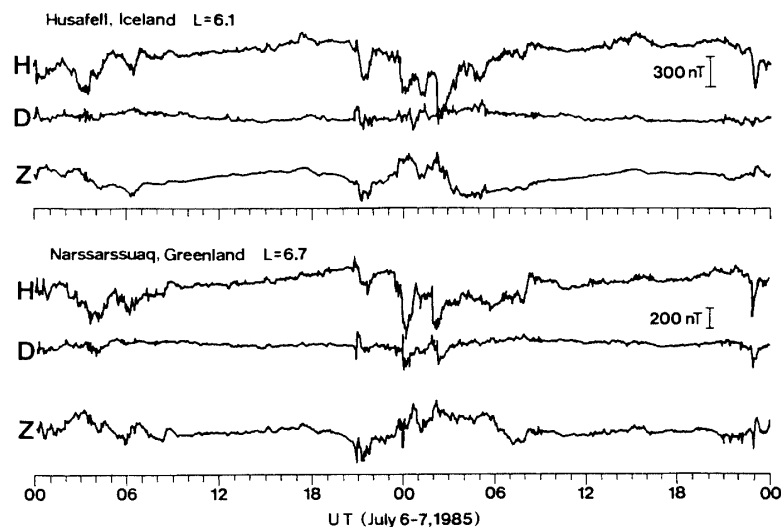


図 17 地上地磁気観測点における地磁気の時間変化  
 上段は Iceland の Husafell の地磁気 3 成分の時間変化  
 下段は Greenland の Narssarsuaq の地磁気 3 成分の時間変化

考えられる (G. Kremser et al. 1973, G. Marel et al 1973.).

オーロラ・サブストームの expansion phase には、ベール状やパッチ状のオーロラが明るさを点滅させながら低緯度方向にそして東向きに移動してゆく、その移動速度は平均的には毎分 20 km であると言われている (南極の科学を参照)。今回の観測結果では、オーロラ X 線の移動速度は毎分 50 km であり、factor 2 位速いがイベントによる差と考えられる。特にパルセーティング・オーロラとするとともにっと速いものも観測されている。パルセーティング・オーロラは比較的低緯度で観測され、非常に速い移動の可視光オーロラが観測されている (Yamamoto and Oguti 1983)。可視光オーロラとオーロラ X 線とは必ずしも完全に一致するとは限らないが、かなり相関があると考えるのが常識的であり、オーロラの morphology から判断すると、Si(Li) 半導体検出器および NaI (Tl) シンチレーション検出器の撮像装置で観測されたオーロラ X 線イメージの時間変動はパッチ状オーロラのように見える。パルセーティング・オーロラは 30 KeV から 60 KeV の高エネルギーの降下電子を反映していると考えられており、高エネルギー降下電子の制御輻射で発生すると考えられているオーロラ X 線はパルセーティング・オーロラとの関連が深いと考えるのは自然である。また、気球でのオーロラ X 線バーストが観測されたのが 23 時 30 分 (UT) 頃であり、位置が 8°W で Local Time にすると 23 時 (LT) 頃である。従来パルセーティング・オーロラが発生するのは、最夜中から朝方にかけての時間帯が多く、時間帯から多少問題があるが、パルセーティング・オーロラ現象に近いパッチ状オーロラを観測したことになる。また、観測されたオーロラ X 線撮像図はオーロラ嵐の発達過程の図 (大林辰蔵) とも矛盾してなく、よい一致を示している。

同時に観測されたオーロラ X 線バーストと VLF エミッション ( $f$ - $t$  スペクトル) の結果より、オーロラ X 線バースト時に、オーロラヒス (周波数 4 kHz 以上) ならびにコラス エミッション (周波数 1~3 kHz) が観測されているが、顕著な VLF エミッションは観測されていない。この現象はオーロラ粒子 (X 線) の降込みに伴う電離層の電子密度上昇に伴うシールド効果によるものと考えられる。

## 7. 謝 辞

本観測は計画当初から国立極地研究所の多数の方々による御尽力と御協力をいただき、気球放球および地上地磁気観測データに関してはベルゲン大学の Ullaland 教授およびそのスタッフに御尽力いただいたことを深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- Calvert, W., Voss, H. D. and Sanders, T. C.; IEEE Trans. Nuci Sci., **NS-32**, 112 (1985).  
Hirasima, Y., et al.; Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **26**, 169 (1983).  
Imhof, W. L., et al.; J. Geophys Res., **90**, 1543 (1985).  
Kremser, G., et al.; J. Atmosph. Terr. Phys., **35**, 713 (1973).  
Marel, G. et al.; J. Atmosph. Terr. Phys., **36**, 735 (1973).  
Mauk, B. H., et al.; J. Geophys. Res., **86**, 6827 (1981).  
Nogata, K., et al.; J. Geomagu. Geoelectr., **37**, 329 (1985).  
中本淳他; 南極資料, 第 87 号, 32(1985).  
Nakamoto, A., et al; IEEE. Trans. Nucl. Sci., **NS-27**, 74 (1980).  
大林辰蔵; 宇宙空間物理学, p. 335.  
南極の科学 2 p. 116 図 2, 53, p. 123 図 2, 68(1983).  
Yamamoto T. and Oguti T.; J. Geophys. Res., **87**, 7603 (1982).  
Yamagami T. et al.; J. Geomag. Geoelectr., **30**, 663 (1978).