

モザイク型 Si(Li) 半導体検出器によるオーロラ X 線撮像観測計画¹

中本 淳²・村上浩之²・奥平清昭²・平島 洋²
 山上隆正³・太田茂雄³・並木道義³・西村 純³
 小玉正弘⁴・宮岡 宏⁵・佐藤夏雄⁵・藤井良一⁵

Project of Auroral X-Ray Image Observations Using
 Two-Dimensional Array of Si (Li) Semiconductor
 Detectors¹

Atsushi NAKAMOTO², Hiroyuki MURAKAMI², Kiyooki OKUDAIRA², Yo HIRASIMA²,
 Takamasa YAMAGAMI³, Shigeo OHTA³, Michiyoshi NAMIKI³, Jun NISHIMURA³,
 Masahiro KODAMA⁴, Hiroshi MIYAOKA⁵, Natsuo SATO⁵ and Ryoichi FUJII⁵

Abstract: To observe auroral X-ray images, the horizontal two-dimensional array of the Lithium-drifted Silicon Si(Li) detectors has been developed. The auroral X-ray imager has 5×5 pixels. The sensor element of one pixel is the 18×18 mm area and 5 mm thick Si(Li) detector. The Si(Li) detectors have such large noises at room temperature as to be unsuitable for X-ray measurements, but the noises become much smaller at -20°C . Then, X-ray measurements are fully possible at this low temperature. In observations by a stratospheric balloon, cooling of the semiconductor detectors is made by dissipating of heat to low temperature environment. The heat pipe has been used to cool the chamber containing the Si(Li) detectors. The energy range of auroral X-rays to be observed is from 37 to 200 keV. The horizontal two-dimensional array of Si(Li) detectors is placed in a pinhole collimator. The angular resolution of the auroral X-ray imager is 15° at the center pixel. The full field of view of the imager is 62° . In July 1985, the balloon flight with this auroral X-ray imager has been performed in the northern auroral region.

要旨: オーロラ X 線撮像検出器として厚型のリチウム・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、1985 年 7 月に行う北極域オーロラ帯での気球観測に使用することを計画した。従来、市販されている小型の Si 表面障壁型検出器では、空乏層の厚さが数 $100 \mu\text{m}$ で、X 線領域の検出効率が著しく悪く、使用することができない。また、面積が数 cm^2 で厚い Si 検出器では低雑音のものを製

¹ This paper was presented at "The Eighth Symposium on Coordinated Observations of the Ionosphere and the Magnetosphere in the Polar Regions" (February 19–21, 1985).

² 立教大学理学部物理学教室。Department of Physics, Rikkyo University, 34-1, Nishi-ikebukuro 3-chome, Toshima-ku, Tokyo 171.

³ 宇宙科学研究所。The Institute of Space and Astronautical Science, 6-1, Komaba 4-chome, Meguro-ku, Tokyo 153.

⁴ 山梨医科大学物理学教室。Department of Physics, Yamanashi Medical College, Tamaho, Nakakoma, Yamanashi 409-38.

⁵ 国立極地研究所。National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

作することはかなり難しいとされている。低雑音で厚さ 5 mm, 面積 400 mm² のリチウム・ドリフト型 Si(Li) 検出器の開発を行い, オーロラ X 線撮像用検出器として応用した。製作した検出器は 0°C に冷却することによって, 35 keV 以上の X 線を十分測定できるものである。この 2 次元撮像装置は有効面積 18×18 mm の Si(Li) 半導体検出器を 5×5 画素に配列し, ピンホール型コリメータで囲まれている。角分解能は中心画素で 15 度であり, 全視野角は 62 度である。本論文では, この Si(Li) 半導体撮像装置および観測計画について述べる。

1. はじめに

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われ, その metamorphology もかなり進んでいる。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ある。特に空間分布と時間変動とを独立に観測する目的で, オーロラ硬 X 線 2 次元像を観測したものはまだ少ない (CALVERT *et al.*, 1985; HIRASIMA *et al.*, 1983; IMHOF *et al.*, 1985; MAUK *et al.*, 1981)。オーロラ X 線の撮像は人工衛星や大気球の飛翔体を用いて行われてきた。上記の 2 種類の飛翔体を用いてオーロラ X 線の撮像を行うと, それぞれ長所, 短所がある。人工衛星の観測では, 汎世界的な観測が可能であるが, 人工衛星の速い移動, スピンのために微細構造の観測が困難であると同時に周回のためにより観測時間が中断される。大気球の観測では, 汎世界的な同時観測はできないが, 微細構造の観測に適すると同時に時間的に連続した観測が可能である。

我々は, 大気球によるオーロラ X 線の撮像観測を行うために, モザイク型 2 次元 Si(Li) 半導体検出器の製作を行った。半導体検出器は飛翔体搭載用検出器としてコンパクトであり, よりよい空間分解能でオーロラ X 線を観測するための将来性のある検出器である。

1985 年 7 月の北極域オーロラ X 線観測に用い, クイック・ルックの結果によると, オーロラ X 線の撮像に成功した。

2. リチウム・ドリフト型 Si(Li) 半導体の製作と性能

シリコン半導体検出器は, 低エネルギー原子核物理学, 宇宙線, 保健物理などの分野で用いられてきた。特に, 宇宙線などの分野では荷電粒子の測定に用いられてきた。薄い表面障壁型のシリコン半導体検出器では低エネルギー荷電粒子測定用に使用できるが, 硬 X 線測定用としては検出効率が小さく適さない。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用され, この場合, 検出器内でのエネルギー損失が大きく, オーダーとして 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 (例えば, 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 のオーダーの領域に下げる必要がある。そのため, 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。

2.1. リチウム・ドリフト型 Si(Li) 半導体検出器の製作

オーロラ X 線の撮像を目的とし、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であり、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った。

使用したシリコン単結晶の素材は、P 型タイプで比抵抗が $10^3 \Omega\text{m}$ 以上、キャリアーの素材中で活動できる平均寿命が $500 \mu\text{s}$ – 1ms 、転位密度が $\sim 10^2/\text{cm}^2$ のものである。

有効空乏層厚 5 mm の Si(Li) 半導体検出器を製作するためのドリフト時間は、逆バイアス電圧 150 V、温度 120°C で約 1 カ月かかり、現在のところ実験室で製作する Si(Li) 半導体検出器として、厚さ 5 mm 程度が限度である。

半導体検出器の雑音の最大の原因は漏洩電流である。この漏洩電流には、検出器内部を流れる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。このことから、製作室の環境、素材の取り扱いには十分な注意が必要であり、特に梅雨時期から夏場にかけての製作には大変苦勞した。

2.2. 製作したリチウム・ドリフト型 Si(Li) 半導体検出器の室温性能

製作したリチウム・ドリフト型 Si(Li) 半導体検出器は面積 20×20 mm、厚さ 5 mm のものである。この検出器の静電容量 C は

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d} \quad (1)$$

ここで、

ϵ_0 : 真空の誘電率 ($8.854 \times 10^{-14} \text{F/cm}$)

ϵ : シリコンの比誘電率 (11.7)

S : 検出器の全体の面積 (4cm^2)

d : 検出器の空乏層厚 (0.5 cm)

で与えられる。

式 (1) より、製作した検出器の静電容量を計算すると、8.3 pF となる。また、実際に製作した検出器の静電容量を測定した結果を図 1 に示した。この図よりわかるように、測定した静電容量は 8.4 pF であり理論計算と完全に一致し、有効空乏層厚 5 mm の Si(Li) 半導体検出器ができたことを示している。また、低バイアス電圧領域では静電容量が大きくなっているが、これは素材表面付近に蓄積された電荷によるものであり、高バイアスを印加することによって、消滅するものである。有効空乏層厚 5 mm の Si(Li) 半導体検出器を用いると、エネルギー 40 keV の X 線の検出効率は、 $1 - e^{-\mu x}$ の関係式より 54% である。ここで、 μ : シリコンの全吸収係数、 x : 検出器の有効空乏層の厚さである。

室温で線源 Bi からの電子線 (976 keV) を用いて、この検出器の飽和特性を測定した結果を示したのが図 2 である。この図より、バイアス電圧を増加させていくと、200 V 以上で波

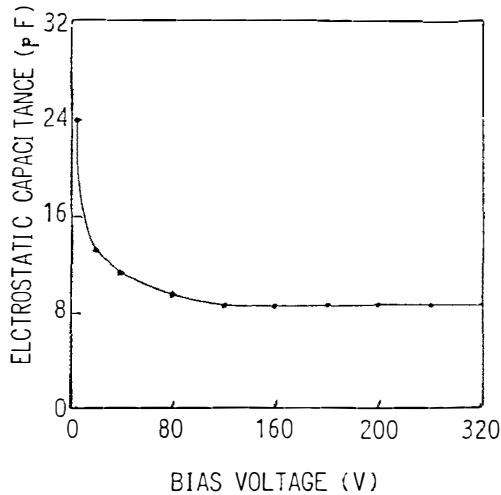


図 1 製作した Si(Li) 半導体検出器の C-V 特性. 検出器の印加電圧を変化させたときの静電容量の特性の測定結果を示した
 Fig. 1. C-V characteristics of the fabricated Si(Li) semiconductor detector. The measured results of the electrostatic capacitances depending on the inverse bias voltages are shown.

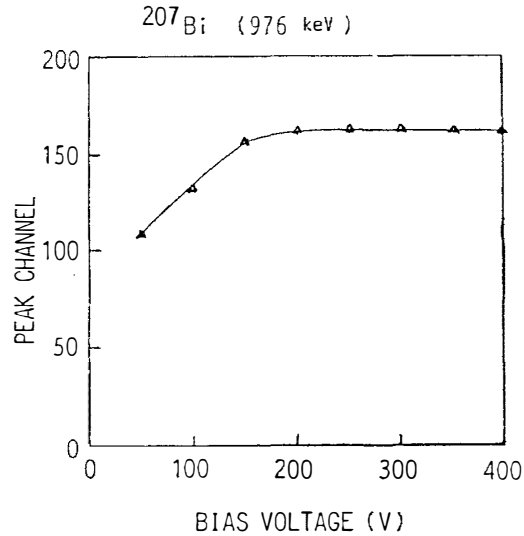


図 2 製作した Si(Li) 半導体検出器の飽和特性. 室温で線源 Bi からの電子線 (976 keV) を用いて飽和特性を測定した結果を示した
 Fig. 2. Saturation characteristics of the fabricated Si(Li) semiconductor detector. The measured results at room temperature by using the internal conversion electrons (976 keV) from ^{207}Bi are shown.

高が飽和する. このことは, 検出器中で発生したキャリアがバイアス電圧として 200 V 以上印加すれば完全に集められることを示している.

製作した Si(Li) 半導体検出器の室温におけるエネルギー分解能は ^{241}Am の 59.5 keV γ 線を用いて測定した. その結果を図 3 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計算することができ, 波形整形回路の波形が三角波形の場合, 下記に示す式で表される.

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

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/g_m)

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_o : 入力漏洩電流, R_p : 並列雑音抵抗

上式の入力漏洩電流 I_o 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, 表面漏洩電流は表面汚染などにより大きく変動するものであり, エネルギー分解能を算出する場合は体積漏洩電流のみで行う. 体積漏洩電流は

$$I_o = n_i q_e V / 2\tau, \quad (3)$$

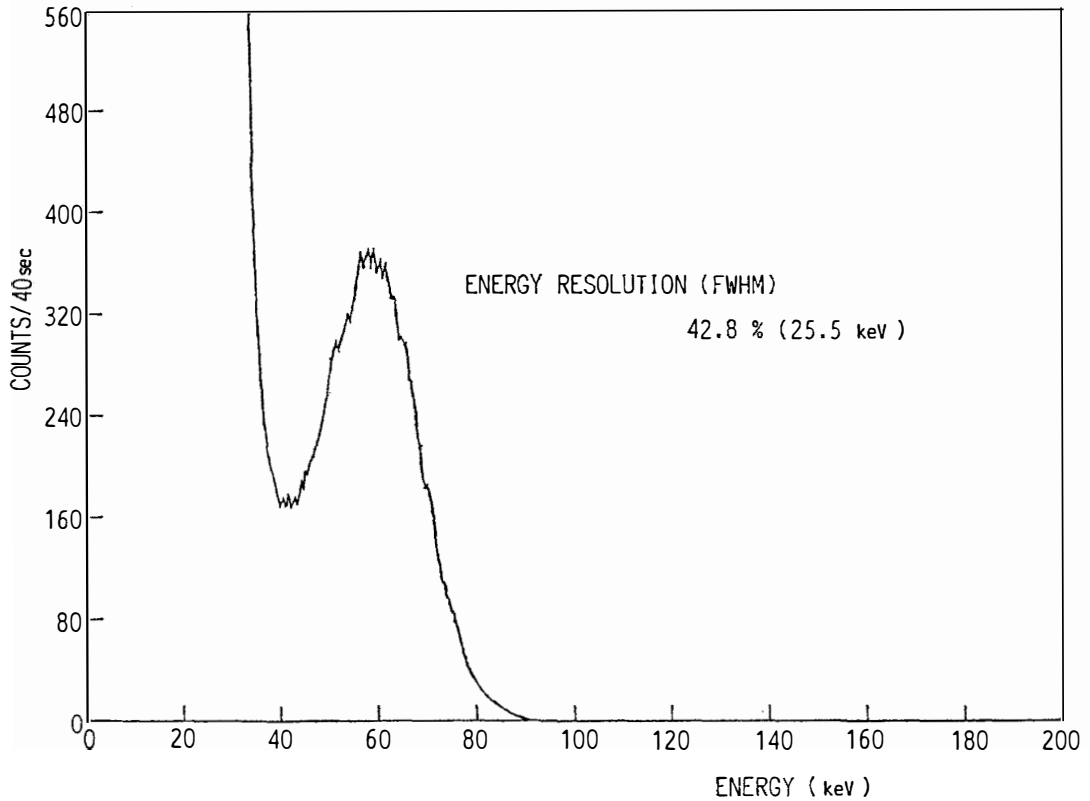


図3 室温 (22°C) において、線源 ^{241}Am を用いた場合の Si(Li) 半導体検出器のパルス波高分析

Fig. 3. Pulse height spectrum of the Si(Li) semiconductor detector at room temperature (22°C) irradiated by the γ -rays from ^{241}Am .

$$n_i = 3.88 \times 10^{16} T^{3/2} \exp(-7000/T) \quad (4)$$

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、
 τ : キャリアー平均寿命 (5000 μs -1 ms)

である。

$T=295\text{ K}$, $\tau=1\text{ ms}$, $V=2\text{ cm}^3$ の体積漏洩電流 I_0 は

$$I_0 = 1.6\ \mu\text{A}/\text{cm}^3 \quad (5)$$

となる。

製作した Si(Li) 半導体検出器の限界エネルギー分解能は、各パラメータが、 $R_p=10^9\ \Omega$, $I_0=1.6\ \mu\text{A}/\text{cm}^3$, $t_m=1\ \mu\text{s}$, $C_{in}=C_D+C_A=25\ \text{pF}$, $R_s=70\ \Omega$ を使用したので、式(2)を用いて計算すると、

$$\Delta E = 4.15 \times 10^{-16} (\text{クーロン}) = 21.9 (\text{keV}) \quad (6)$$

となる。

理論式から求めた限界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%以内で一致しており、分解能の点からも満足できる検出器が製作できた。

また、図3で40 keV以下が急激に増加を示しているが、この原因は、エネルギー分解能の一致から考えて、漏洩電流の内の表面漏洩電流によるものと思われる。このことは、表面処理法や表面汚染などの改善を行えば、室温でも22 keV以上のX線が測定できることを示している。漏洩電流は、式(4)より温度の関数になっていることから、検出器を冷却することによって著しく減少する。

2.3. Si(Li) 半導体検出器の低温性能

製作したリチウム・ドリフト型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4に示した。この図より、検出器を0°Cに冷却すれば雑音は急激に減少し35 keV以上のX線の測定が可能になることがわかる。また、雑音による計数率が1 count/s程度以下にな

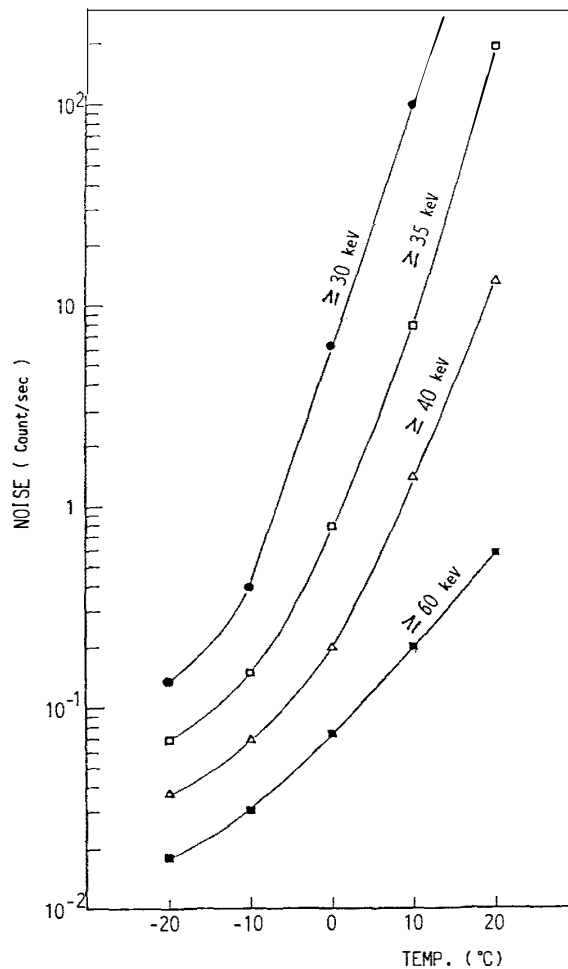


図4 製作したSi(Li)半導体検出器の雑音による計数率の温度依存性。曲線に付したエネルギー以上の雑音の計数率を表す。エネルギーは ^{241}Am 線源(59.5 keV)を用いて校正した

Fig. 4. Temperature dependences of the noise counting rates of the fabricated Si(Li) semiconductor detector. The noise counting rates with the higher energy than the values attached to the curves are shown. The energy was calibrated by using the γ -rays (59.5 keV) from ^{241}Am .

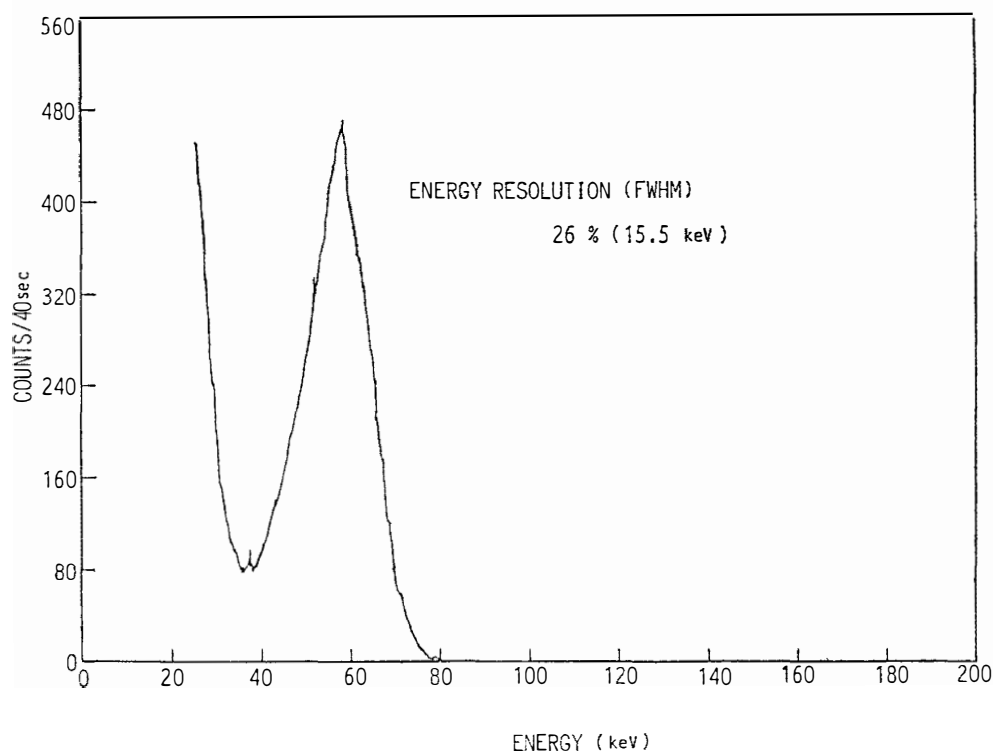


図 5 Si(Li) 半導体検出器を 5°C に冷却し, ^{241}Am 線源を照射した場合の脉冲波高分布

Fig. 5. Pulse height spectrum of the Si(Li) semiconductor detector at the temperature of 5°C irradiated by the γ -rays from ^{241}Am .

ると、オーロラ X 線撮像用検出器として実用になることから、 -10°C 以下に検出器を冷却できれば、今回製作した検出器は 30 keV 以上のエネルギーの X 線撮像検出器として使用できる。

5°C に Si(Li) 半導体検出器を冷却した場合の線源 ^{241}Am を用いた脉冲波高分布を図 5 に示した。 ^{241}Am の線源から出る 59.5 keV の γ 線に対する波高分布は室温 (22°C) に比べて、鋭くなり、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 (2) より求めた限界エネルギー分解能 (10.5 keV) より多少悪いが、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 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。

実際の気球観測の場合、大気球が水平浮遊している状態では、ゴンドラ周囲の環境は -30°C 程度の低温状態であり、この環境を利用しヒート・パイプを用いて Si(Li) 半導体検出器を冷却することにした。性能の同じ Si(Li) 半導体検出器 25 個を製作するために、実験室で製作したため、同じ環境を保つことが大変難しく、製作上の歩止りが悪く、約 4 倍の個数の検出器を製作した。

3. オーロラ X 線撮像用 Si(Li) 半導体検出器

1 素子の有効面積が 18×18 mm, 厚さ 5 mm の Si(Li) 半導体検出器 25 個を 5×5 のマトリックス状に 2 次元配列し, オーロラ X 線撮像用観測装置とした. 個々の素子の Si(Li) 半導体検出器の間は, マウント枠, 電極のため 7 mm 間隔があいている. X 線に対するコリメーターは, 中心の Si(Li) 半導体検出器の表面から高さ 15.5 cm の所に直径 2 cm ϕ のピンホールをもつ, 厚さ 1 mm の鉛と厚さ 2 mm の錫が検出器全体を包む構造になっている. オーロラ X 線撮像用装置の全体の構成図を図 6 に示した. 角分解能は中心の Si(Li) 半導体検出器で 15° であり, オーロラ X 線発生層で 19 km に対応する. 全視野角は 62° である. 1 画素に対応する Si(Li) 半導体検出器の有効面積は, X 線の種々の入射方向によって, 検出器とピンホールの幾何学的位置関係により変化する. 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 θ と方位角 ϕ の関数で表すことができ, その結果を図 7 に示した. この図は検出器が縦に 5 個, 横に 5 個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, この点から真上のコリメーター中心の方向を天頂角 $\theta=0^\circ$ としてある. 横軸は方位角 $\phi=0^\circ$ の方向の天頂角を表す. 1 個の Si(Li) 半導体検出器について 5 本の等高

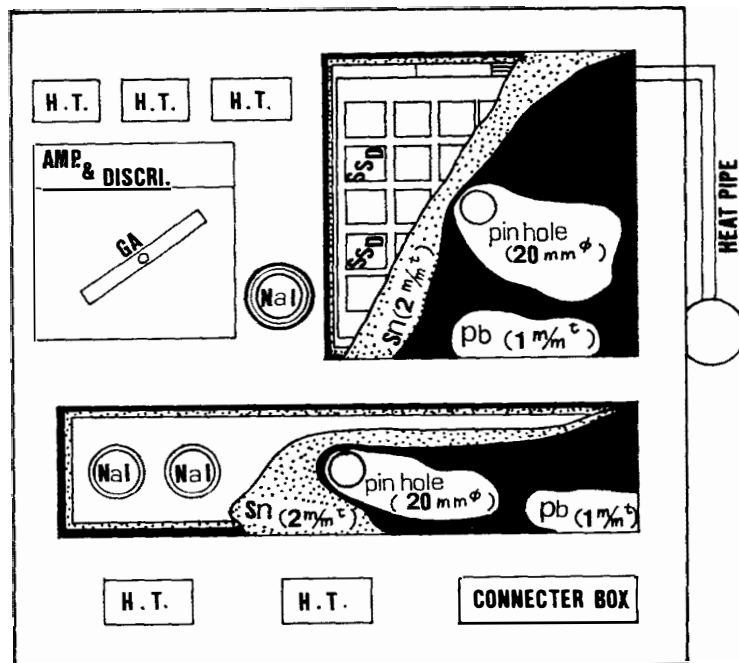


図 6 オーロラ X 線撮像装置の全体構成図. Si(Li) 半導体検出器の撮像装置は 5×5 pixels から構成されている. NaI(Tl) 検出器撮像装置は 8 個の NaI(Tl) シンチレータから構成されている

Fig. 6. Configuration of auroral X-ray image detectors. The auroral X-ray SSD imager has 5×5 pixels. The auroral X-ray NaI (Tl) imager has 8 NaI (Tl) scintillators.

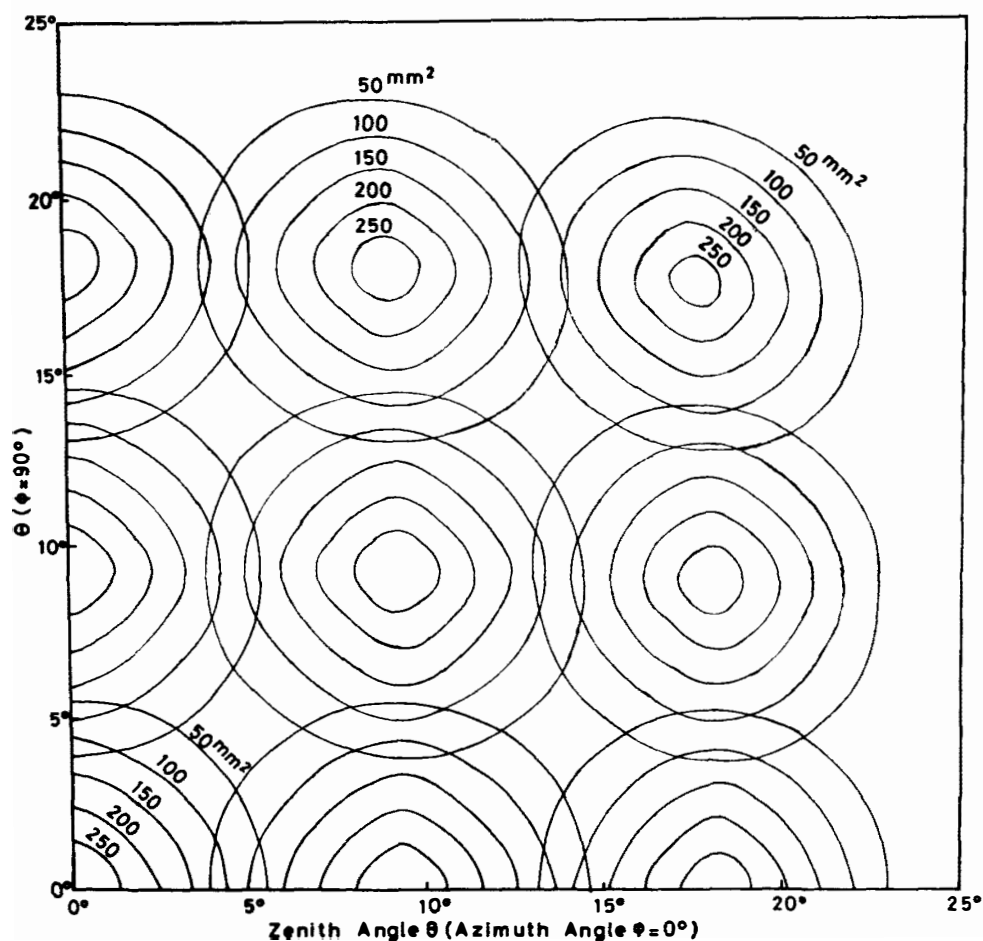


図 7 オーロラ X 線撮像装置を構成する各 Si(Li) 半導体検出器の有効面積 $S_{\text{eff}}(\theta, \phi)$ の入射 X 線方向依存性の等高線マップ

Fig. 7. Contour map of the effective areas $S_{\text{eff}}(\theta, \phi)$'s of the Si(Li) semiconductor detectors constructing the auroral X-ray imager. The effective areas $S_{\text{eff}}(\theta, \phi)$'s are dependent on the incident X-ray directions: θ is the zenith angle and ϕ is the azimuthal angle of the incident X-ray direction.

線を用い、内側からそれぞれ 250, 200, 150, 100, 50 mm² の有効面積に対応する入射 X 線方向の天頂角 θ と方位角 ϕ の値を示した。等高線が円でないのは、ピンホールが円形で Si(Li) 半導体検出器が正方形であるためである。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 線がコリメーターによって遮断される割合が大きくなることを示している。また、この図で明らかのように、隣接する Si(Li) 半導体検出器の有効面積が重なることは少ない。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。

5×5 個の Si(Li) 半導体検出器と前置増幅器は 1 気圧の耐圧容器中に入れ、内部に 1 気圧の乾燥空気を封入してある。これは、Si(Li) 半導体検出器のバイアス電圧として、250 V を印加するため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よくするためである。耐圧容器は厚さ 5 mm のアルミニウム製であり、上面のみ X 線の吸収

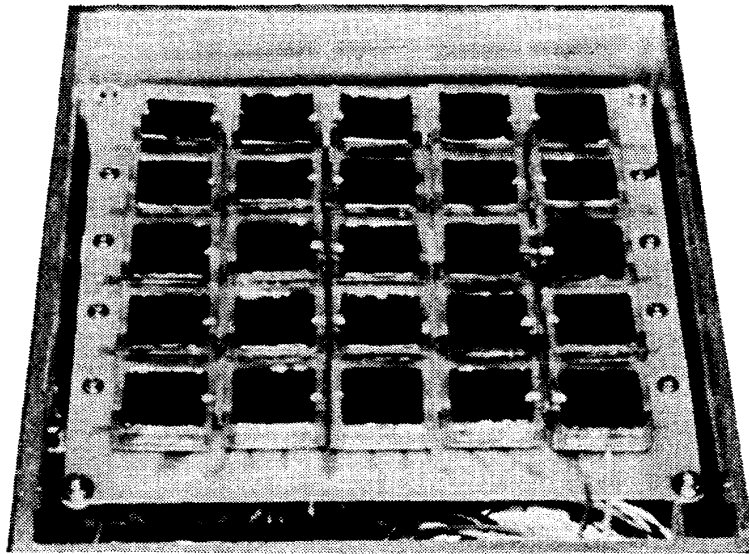


図 8 オーロラ X 線撮像用 SSD 装置のセンサー部. すなわち, 5×5 個のマトリックス状に 2 次元配列した Si(Li) 半導体検出器

Fig. 8. Photograph of the sensors of the auroral X-ray imager, i.e. the Si(Li) semiconductor detectors arranged in the two-dimensional matrix array of the 5×5 sensors.

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 gcm^{-3}) のものを用いた. 耐圧容器にオーロラ X 線撮像用の Si(Li) 検出器 25 個を納めた写真を図 8 に示した. また, 前置増幅器はクリアパルス社製の CS 507 型ハイブリッド IC 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, ヒート・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°C 以下の低温環境にさらすことにより, 検出器を冷却する方法を用いた. ヒート・パイプの冷却部は内壁がメッシュウイック型銅パイプでできており, 太さ $1.9 \text{ cm}\phi$, 長さ 86 cm であり, 内部に作動液フロン 12 が封入したタイプのものである. 冷却部には $6 \text{ cm}\phi$ のアルミニウム製放熱用円板フィンが 33 枚付けられている. このヒート・パイプの熱抵抗は $0.24 \text{ h}^\circ\text{C/kcal}$ である.

検出器の温度変化は

$$C \frac{dT}{dt} = -\alpha(T - T_1) - \beta(T_1 - T_2) + \Delta Q. \quad (7)$$

ここで, C は熱容量 ($\text{J}/^\circ\text{C}$), T は検出器の温度 ($^\circ\text{C}$), T_1 はアルミ耐圧容器温度 ($^\circ\text{C}$), T_2 は外気温度 ($^\circ\text{C}$), α, β は熱伝達係数 ($\text{J}/\text{cm}\cdot\text{s}$)

で与えられる.

式 (7) より, 外気温度とアルミ耐圧容器温度とが等しくなる時定数は

$$\tau_{Al} = C_{Al} / \beta \quad (8)$$

であり、 $C_{Al}=2.5 \times 10^8$ (J/°C)、 β はヒート・パイプの熱伝達係数で 4.9 (J/s °C) であることから、 $\tau_{Al}=51$ s となる。すなわち、ヒート・パイプの伝導性が非常によいため、約 1 分間程度でヒート・パイプとアルミ容器温度とは等しくなる。

一方、アルミ耐圧容器と検出器の熱交換の時定数は

$$\tau_{Si}=(C_{Si}+C_{エレキ})/\alpha \quad (9)$$

であり、 $C_{Si}+C_{エレキ}=372$ (J/°C)、 α は空気の熱伝達係数で 300K、1 気圧のとき $\alpha=3.1 \times 10^{-2}$ (J/s °C) となり、 $\tau_{Si}=1.2 \times 10^4$ s となる。アルミ耐圧容器と検出器との間は伝導性が悪く、検出器がアルミ耐圧容器の温度になるためには、約 3 時間程度かかることになる。実際に実験室でのシミュレーションの結果、この計算値とほぼよい一致を示した。

また、北極域の 7 月は太陽が地平線下に沈まない時期である。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つけたが、この冷却部の環境温度がはっきりわからないため、日本の気球実験において、同様な構造の観測器の昼間の温度データ、耐圧容器内の発熱量およびヒート・パイプの熱交換率を考慮して検出器部が最悪の場合でも 0°C 位になることを想定し、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。実際の飛翔中のクイック・ルックの結果によると、検出器部の温度は 2°C 位であった。

4. オーロラ X 線撮像観測計画

前節で述べた 2 次元型 Si(Li) 半導体検出器を用いて、オーロラ X 線の撮像観測を行う。

撮像した場合、隣接する画素に対応する Si(Li) 半導体検出器による計算の差が統計的ゆらぎによる 2σ より大きく、濃淡の判定が可能なのは、隣接する i 番目、 j 番目のそれぞれの計数 R_i 、 R_j について

$$R_j - \sqrt{R_j} \geq R_i + \sqrt{R_i} \quad (10)$$

$$R_j - R_i \geq \sqrt{R_j} + \sqrt{R_i} \quad (11)$$

従って、

$$\sqrt{R_j} \geq \sqrt{R_i} + 1 \quad (12)$$

が成立する場合である (ここで i と j は可換である)。

今、1 画素に対応する検出器の有効面積を S 、検出効率を ϵ 、視野立体角を Ω 、X 線のバックグラウンド・フラックスを F_i 、オーロラ X 線バーストの規模がバックグラウンドの M 倍、計数集積時間を T とすると、 i 番目の Si(Li) 半導体検出器の計数は

$$R_i = F_i S \Omega \epsilon M T \quad (13)$$

で与えられる。

実際の観測器で行った場合、濃淡の判定可能な条件を算出した結果を図 9 に示した。この図の実線は、角分解能 15° (角分解能半角 $\alpha_{1/2}=7.5^\circ$)、検出効率は X 線エネルギー 37-200

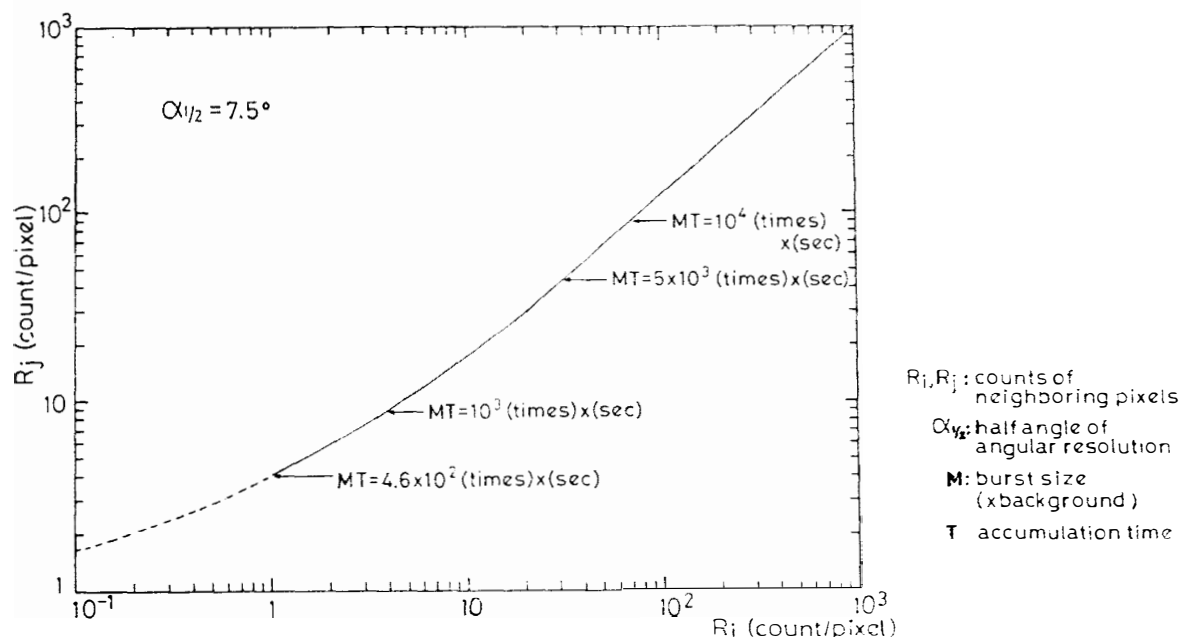


図9 オーロラX線像の濃淡の判定可能な条件. オーロラX線バースト規模と計数集積時間の積の値を曲線上に示してある

Fig. 9. Conditions for auroral X-ray image constructions by identifying contrasts of neighboring pixels. Products of the auroral X-ray burst sizes and the count accumulation times are shown in the curve.

keV の加重平均効率として 0.3 (予想されるオーロラ X 線のエネルギー・スペクトルを考慮して加重平均), バックグラウンド・フラックスについては 1982 年の Esrange における観測値 $0.6 \text{ X-rays/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$ を用いて算出した結果である. この曲線より上部が濃淡の判定可能領域であり, 曲線は MT の値をパラメータとして示している. なお, MT の値を図中に矢印で示した.

例えば, バックグラウンドの 100 倍の規模のオーロラ X 線が観測された場合, 4.6 秒間計数を集積すれば濃淡判定が可能であることを示している.

今回のオーロラX線観測の計画では, 上記の 2 次元 Si(Li) 半導体撮像用検出器のほかに, NaI(Tl) シンチレータを用いた 8 管式撮像装置, エネルギー・スペクトル測定用 NaI(Tl) 検出器などを同時搭載する. 8 管式オーロラ X 線撮像装置は直径 1.5 インチ, 厚さ 3 mm の NaI(Tl) 検出器を 8 個水平方向に直列に並べ, ピンホール型コリメータを付け, Gondola 全体を方位角方向に 0.3 rpm の速度で回転させ, 天空をスキャンし撮像を行うものである. 観測するエネルギー領域は 22–200 keV で, 角分解能は中心で 15° であり, 全視野角は 116° である. また, エネルギー・スペクトル測定用検出器も同じ直径 1.5 インチ, 厚さ 3 mm の NaI(Tl) シンチレータを用いた. 測定するエネルギーは 22–30, 30–40, 40–55, 55–88, 88–150 keV, 150 keV 以上の 6 チャンネルに分け, 全視野角は 80° である.

上記の 3 種類のオーロラ X 線観測装置によるデータ, 同時搭載の VLF 観測データ, 温

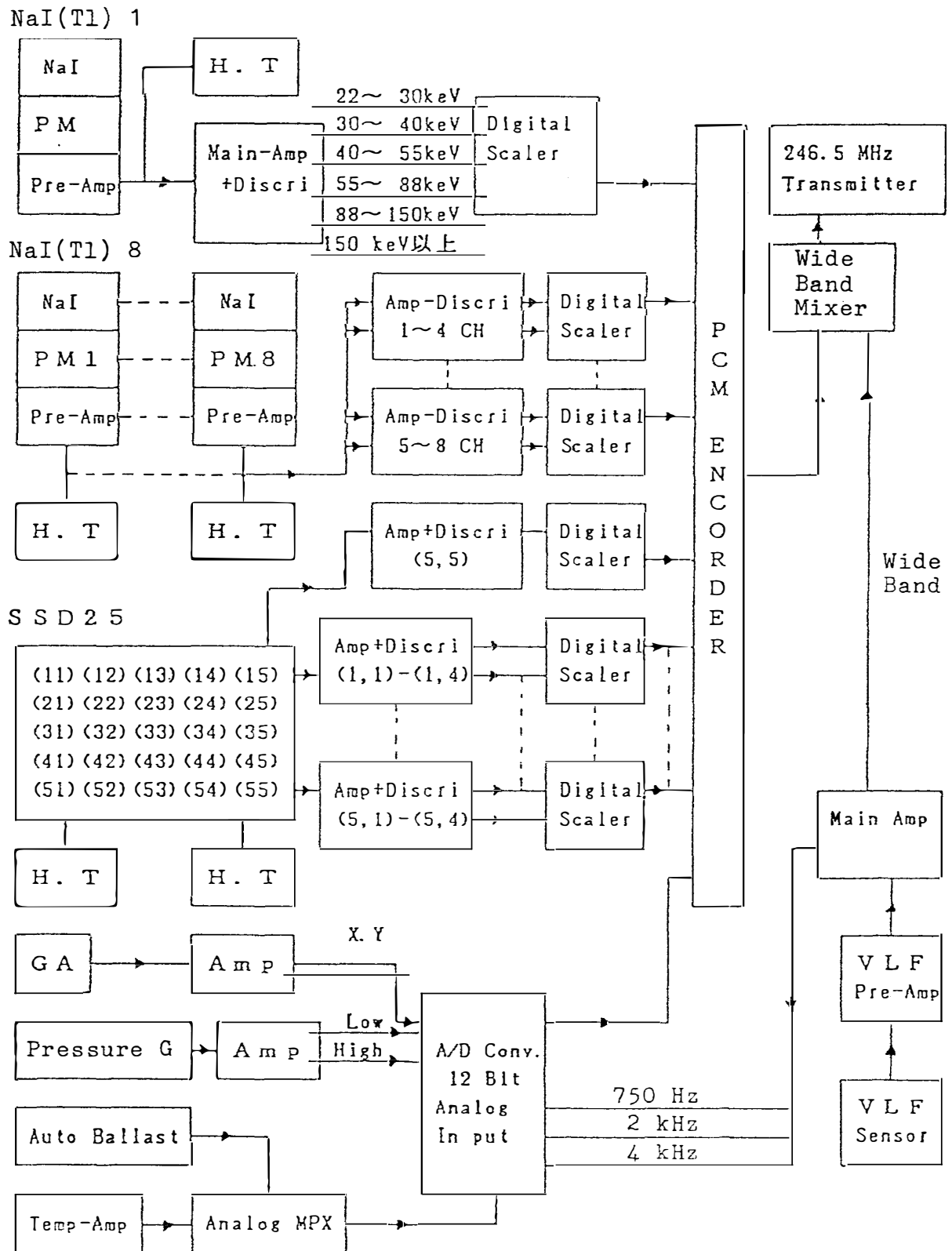


図 10 1985 年 7 月北極域オーロラ観測に用いた気球搭載用電子回路のブロックダイアグラム

Fig. 10. Block diagram of the balloon-borne electronics used in the auroral X-ray observations in July 1985, in the northern auroral region.

度、気圧、姿勢計 GA などのデータはPCM で地上に伝送される。気球搭載電子回路のブロックダイアグラムを図 10 に示した。PCM は、1 メジャー・フレームが 2 マイナ・フレームからなり、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。従って、最小時間分解能は 1/8 秒である。

上記のオーロラ X 線観測装置を用い、1985 年 7 月に北極域オーロラ帯で大気球によるオーロラ X 線撮像観測を行った。大気球はノルウェーの Abilver から放球され、西方に飛行し、アイスランド上空を通過した。テレメータ受信は Abilver のほかに、アイスランドの Husavik でも行われ、この 2 カ所によるテレメータ受信で、気球浮遊時間の約 70 時間にわたってデータ取得が行われた。クイック・ルックの結果では、Si(Li) 半導体検出器および NaI(Tl) シンチレータ検出器とも飛翔中オーロラ X 線の撮像に成功した。詳細な解析はこれから行う予定である。

謝 辞

本観測計画は当初から国立極地研究所の多数の方々によるご尽力とご協力をいただいたことを深く感謝致します。

文 献

- CALVERT, W., VOSS, H. D. and SANDERS, T. C. (1985): A satellite imager for atmospheric X-rays. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-32**, 112-118.
- HIRASIMA, Y., MURAKAMI, H., OKUDAIRA, K., FUJII, M., NISHIMURA, J., YAMAGAMI, T. and KODAMA, M. (1983): Image-forming detectors to observe fine spatial distributions of auroral X-rays. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **26**, 169-179.
- IMHOF, W. L., KILNER, J. R. and REAGAN, J. B. (1985): Morphological study of Energetic electron precipitation events using the satellite bremsstrahlung X ray technique. *J. Geophys. Res.*, **90**, 1543-1552.
- MAUK, B. H., CHIN, J. and PARKS, G. (1981): Auroral X-ray images. *J. Geophys. Res.*, **86**, 6827-6835.
- NAGATA, K., KOHNO, T., MURAKAMI, H., NAKAMOTO, A., HASEBE, N., TAKENAKA, T., KIKUCHI, J. and DOKE, T. (1985): OHZORA high energy particle observations. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **37**, 329-345.
- NAKAMOTO, A., MURAKAMI, H., NAGATA, K., NISHIMURA, J., YAMAGAMI, T., DOKE, T. and KIKUCHI, J. (1980): A silicon-emulsion shower counter for cosmic ray high energy electron observation. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-27**, 74-78.

((1985 年 9 月 4 日受理; 1985 年 10 月 11 日改訂稿受理))