

# 大気球によるオーロラ X 線発生領域の移動および エネルギー依存性空間分布の観測

鈴木裕武\*・山岸久雄\*\*・小島年春\*\*\*・平島 洋\*・村上浩之\*  
佐藤夏雄\*\*・山上隆正・小玉正弘†・福西 浩††

(1987 年 7 月 20 日受理)

## A Balloon Observation of Energy Dependent Spatial Distributions and Drift Motions of Auroral X-ray Generation Regions

By

Hiromu SUZUKI, Hisao YAMAGISHI, Toshiharu KOJIMA,  
Yo HIRASIMA, Hiroyuki MURAKAMI, Natsuo SATO,  
Takamasa YAMAGAMI, Masahiro  
KODAMA and Hiroshi FUKUNISHI

**Abstract:** A balloon observation of auroral X-ray images was carried out over Syowa Station in Antarctica on December, 1985, as a part of JARE 26 ballon experiment. The energy-dependent spatial structures of auroral X-rays with energies greater than 22keV were measured by using a set of three inclined NaI(Tl) scintillation counter telescopes. In a case of studying an X-ray event, an X-ray source region moved toward lower latitudes with a speed of about 1km/s and high energy X-ray region moved before low energy one moved. Also, in the other X-ray event, which was correlated with VLF pulsation, X-ray source region

---

\* 立教大学理学部

\*\* 国立極地研究所

\*\*\* 電気通信大学工学部(現在三菱電機株)

† 山梨医科大学物理学教室

†† 東北大学理学部

moved toward higher latitudes. The experimental result of the former case was confirmed by a simulation calculation for auroral X-ray sources. The moving direction of X-ray source regions were found to be consistent with the north-south dependence of 30MHz cosmic noise absorption(CNA) observed by a scanning-beam riometer at Syowa Station.

## 概 要

1985年12月に南極昭和基地において、第26次南極観測隊によるオーロラ X 線空間分布の大気球観測が行なわれた。3本の NaI (Tl) 検出器からなる X 線撮像装置を用いて、22 keV 以上のエネルギーのオーロラ X 線を測定した。解析の結果、1つの X 線イベントでは X 線空間分布にエネルギー差があり、高エネルギー成分が低エネルギー成分に先行して低緯度方向に移動したことが判明した。VLF 脈動と相関した X 線脈動イベントでは、X 線発生領域が高緯度方向へ移動したことが判った。前者における低エネルギー成分(22-35 keV)に関しては、シミュレーション計算を用いて発生域の大きさおよび移動速度を求めた。また、昭和基地に設置されている掃天ビームリオメーターの CNA 観測結果と X 線観測結果との比較から求められた X 線発生領域の移動方向は、X 線撮像観測から得られた移動方向に一致したものであった。

## 1. は じ め に

オーロラ現象に伴う電磁波は ELF, VLF 帯の電波から、所謂オーロラとして知られている可視光線および数十 keV 以上のエネルギーの制動輻射 X 線(オーロラ X 線)に至るまでの幅広い周波数・エネルギー領域にわたっている。これらの電磁波のうち可視光線や制動輻射 X 線は数 keV から百数十 keV のエネルギーの荷電粒子(主に電子)が極域の超高層大気(電離層高度)に降下する際に放射される。従ってこれらの電磁波の空間分布は降下粒子の空間分布を反映したものとなる。可視光オーロラの研究は、形態学的には良く知られており、現在では親である降下粒子の加速機構およびその領域も明らかになりつつある(参考文献[1], [2]参照)。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 X 線の空間分布観測は、これまでに観測例も少なくまだ現象の形態の一部をとらえているにすぎない。

オーロラ X 線の空間分布を観測するには、大気球、ロケットおよび人工衛星等の飛翔体に観測装置を搭載し測定する必要がある。オーロラ X 線の空間変化および時間変化を同時に観測するためには、移動速度の遅い大気球からの観測が一番すぐれた方法である。

大気球を用いたオーロラ X 線空間分布観測には、次に示すような2つの型の X 線空間

分布観測装置(撮像装置)が用いられてきた。1つは狭視野の NaI(Tl)検出器を数本組み合わせた撮像装置(文献[3], [4], [5], [6]参照)であり, もう1つはピンホールカメラの原理を応用し, 1次元および2次元に X 線検出器を配列した X 線カメラ(文献[7], [8], [9]参照)である。

ロケットを用いた観測では, 数本の NaI(Tl)検出器を用いてロケットのスピンにより天空を走査撮像する方法(文献[10], [11]参照), また, 人工衛星観測の場合は衛星自体のスピンや移動を利用して走査撮像する方法(文献[12], [13], [14], [15]参照)が用いられてきた。今回我々が用いたオーロラ X 線撮像装置は3本の NaI(Tl)検出器を天頂から傾けて配置し, 装置全体を回転( $80 \text{ sec/round} = 0.75 \text{ rpm}$ )させることによってオーロラ X 線の空間分布を観測するものであった。

現在までの幾つかの観測によって得られたオーロラ X 線空間像の特徴の1つは「比較的小さな領域」にあるといえよう。Yamagami et al.[4]は強度がバックグラウンドの  $10^4$  倍もの増大を見せた X 線イベントの X 線発生領域の直径が 20 km 程度の大きさであり, 2 km/sec の速さで移動したと報告している。Mauk et al.[7]は高エネルギー電子降下イベントの特徴は小さな空間構造( $\leq 15 \text{ km}$ )にあると述べている。また, 平島他[8], Hira-shima et al.[9]は SSD X 線撮像装置を用いてオーロラ X 線強度が小さな領域で変化する様子をとらえた。以上の実験は大気球による観測であり 20 keV 以上の X 線についての測定である。しかし, これらの観測のほとんどがオーロラ X 線のみの観測結果であり, 可視光オーロラ, VLF, CNA および地磁気変化等との比較が行なわれていないため, これらの X 線観測結果を可視光オーロラからの類推で物理的に説明することは困難である。一方, Imhof et al.[14], [15]は人工衛星から 4-40 keV の X 線を観測して 200 km (FWHM)程度の X 線パッチが存在することを報告している。また, Mizera et al.[13]は DMSP-F 6 衛星によってオーロラ X 線像(2-78 keV)と可視光オーロラとの同時観測を行ない双方の像に良い一致があることを示した。ただし, これらの衛星を用いた観測の X 線検出には比例計数管が用いられており, 比較的低エネルギーの X 線像を見ていることに注意すべきである。

オーロラ X 線(高エネルギー電子降下と同義)の観測方法としては, 直接 X 線を検出する方法と CNA(Cosmic noise absorption)観測という間接的方法がある。CNA とは高エネルギー電子降下およびそれに伴う X 線入射により電離層 D 層 E 層の電離度が増大し, 宇宙電波雑音が吸収され地上での強度が低下する現象である。昭和基地においては 26 次隊より掃天ビームリオメーターおよび固定ビームリオメーター(マルチビーム)によって CNA 空間分布観測が行なわれている(参考文献[16], [17]参照)。冬期中はこれらのリオメーターとフォトメーターとの同時観測が行われており, CNA と可視光オーロラとの比較研究のためのデータが得られ始めた。初期運用の解析の結果, CNA 空間分布(高エネルギー電子降下)と可視光オーロラ(数 keV の低エネルギー電子降下)の分布との間に差異が見られるデータが得られている(山岸私信)。

本論文で用いた X 線データは第 26 次南極観測隊によるオーロラ X 線観測大気球実験によるものである。観測された 2 回の X 線イベントは 1985 年 12 月 14 日 0145 UT 頃およ

び 0200 UT 頃(昭和基地では世界標準時(UT)はほぼ磁気地方時(MLT)に一致している)に発生した。これら 2 回のイベントから興味あるオーロラ X 線空間分布とその移動とを求めることができた。また、X 線と CNA との比較解析を行った結果、両解析結果間に矛盾がないことが明らかになった。X 線発生領域の形状および移動速度に関しては、シミュレーション結果と観測結果との比較を行いそれらを求めた。本論文では以上のような解析に基づいたオーロラ X 線空間分布の観測結果を記す。

## 2. 観測装置および大気球飛翔について

本観測で用いたオーロラ X 線撮像装置は NaI(Tl)シンチレーター検出器に円筒状コリメーターを取り付けた 3 本の X 線検出器で構成されたものであった。使用した NaI(Tl)結晶は直径 1.5 インチ厚さ 3 mm のものである。各々の検出器は厚さ 1 mm の Pb および厚さ 2 mm の Sn の円筒状コリメーターに包まれており、その視野は  $35^\circ$  であった。ただし、コリメーターと NaI(Tl)結晶との幾何学的配置から各検出器の有効検出効率視野中心から  $5.75^\circ$  に位置する X 線線源に対して 50% であった。3 本の検出器は天頂より  $17.5^\circ$  傾け、方位角方向に視野中心を  $120^\circ$  づつずらして配置され X 線撮像装置を構成した。オーロラ X 線は高度約 100 km で発生するとされているが、その高度における本撮像装置の視野を図 1 に示した。

本撮像装置で観測したエネルギーは 22-35 keV, 35-55 keV, 55-88 keV, 88 keV 以上の 4 チャンネルであり、VLF および H. K. のデータとともに 16 分の 1 秒のサンプリングレートで PCM を用いて送信された。

また、地上の昭和基地に設置された掃天ビームリオメーターにより CNA 空間分布観測が同時に行われた。この掃天ビームリオメーターは開口ビーム巾が  $13^\circ$  角の狭角ビームであり、磁南北方向に 11 ステップ、1 ステップ 1.5 秒で 33 秒周期で CNA 空間分布を走査観測するものである。このリオメーターの詳細については参考文献[16], [17]を参照されたい。掃天ビームリオメーターを用いることにより観測点が 2 点となり、CNA 観測結果とオーロラ X 線観測結果とを比較することにより X 線発生領域の移動方向および速度につ

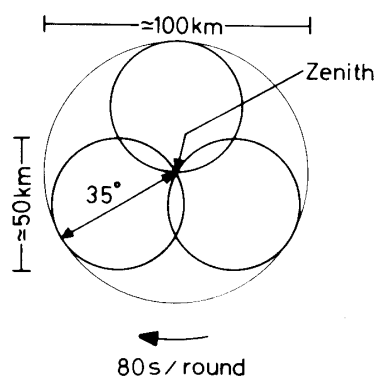


図1 高度 100 km の X 線発生層に投射した X 線撮像装置の視野

いての詳細な検証ができる。図 2 に掃天ビームリオメーターの電離層(高度 100 km)における磁南北および天頂視野と通常のリオメーターの視野(視野角  $60^\circ$ )を示した。

図 2 にはまた大気球飛翔航路も示されている。大気球は 1985 年 12 月 13 日 2109 UT に南極昭和基地( $69.0^\circ\text{S}$ ,  $39.58^\circ\text{E}$ ;  $L \approx 6.1$ )より放球された。大気球は 2230 UT に高度 33 km で水平浮遊に入った。大気球は水平浮遊に入ってから低緯度側(磁北側)に進行し、昭和基地のほぼ磁北方向にあった 14 日 0145 UT 頃と 0200 UT 頃との 2 回 X 線計数値の増加を観測した。0145 UT 頃の X 線イベント観測地点を図 2 中に三角印で示した。0200 UT 頃の X 線イベント観測地点( $L \approx 5.5$ )は大気球航路上の 0200 UT を示す白丸で示される。

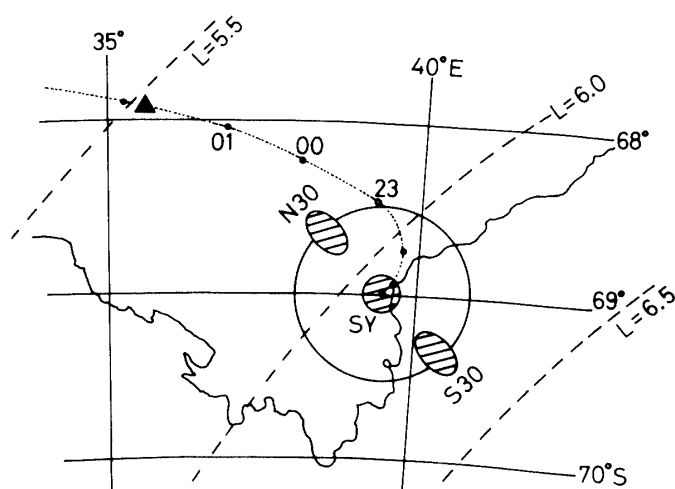


図 2 大気球航路図。斜線部は掃天ビームリオメーターの視野を表わす

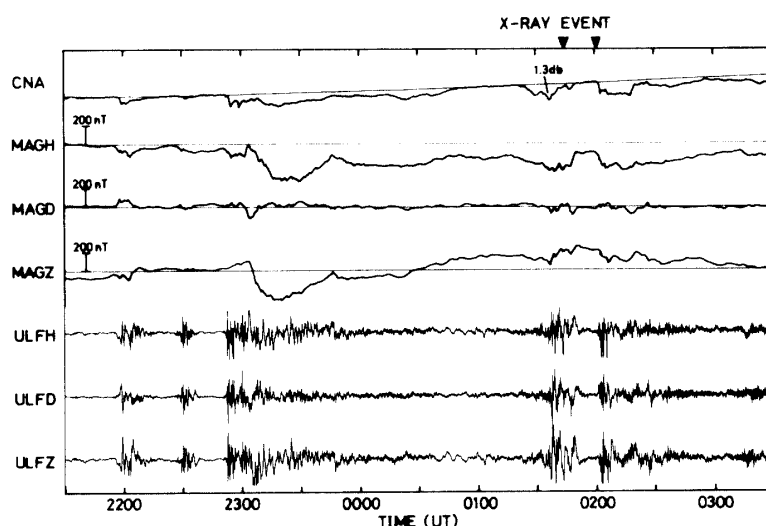


図 3 昭和基地で観測された, CNA, 地磁気および ULF 時間変化

### 3. 観測結果

昭和基地で観測された CNA, 地磁気および ULF の時間変化を図 3 に示した。図中の CNA 時間変化に対する細線は平均的な日変化を示し, 地磁気時間変化に対する細線は定常レベルを示している。サブストームの発生時刻を特定することはできないが, 電離層電流の増大に起因する地磁気の大きな変化が 13 日の 2300 UT 頃に起きている。X 線イベントは 0145 UT 頃と 0200 UT 頃とに CNA, 地磁気および ULF の変動を伴って発生した。図 14 によると, アイスランドの CNA データは 0145 UT 頃には何も変化を示していないが, 0200 UT 頃には顕著な変化を示している。これは 0145 UT のイベントは南半球に限った現象であったが, 0200 UT のイベントは共役性をもち両半球で同時に発生したことを示している。

図 4, 図 5 はそれぞれ 0145-0151 UT, 0200-0215 UT に発生した X 線イベントの X 線計数率の時間変化(counts/sec)である。ここで先の X 線イベントをイベント 1, 後のイベントをイベント 2 と呼ぶことにする。

#### 3.1 イベント 1

図 4 よりこのイベントの大きな特徴として次の 2 点があげられる。第 1 にそれぞれの検出器が全く異なった計数率時間変化を示していることである。このことはオーロラ X 線の空間分布が一様でないことを示している。第 2 に 1 つの検出器でも異なったエネルギーチャンネルの計数率時間変化は異なった変化を示していることである。これはエネルギーによって X 線発生領域すなわち電子降下領域が異なっていたことを示している。

#### 3.2 イベント 2

図 5 よりこの X 線イベントの最大の特徴は X 線計数率変化の脈動である。この X 線イベントの発生時, 同じゴンドラに搭載した VLF 受信機では VLF 脈動を受信していた。図 6 に VLF 検波強度変化(750 Hz, 1.2 kHz)と X 線計数率時間変化(22-35 keV)とを示した。また, VLF 広帯域受信データのダイナミックスpekトルをとってみると, この VLF エミッションが磁気圏赤道面付近に起源をもつ準周期的な VLF コーラスエミッションであることが判った。これらの脈動の周期は約 90 秒であった。

図 6 の X 線脈動の最初のピークに着目すると, 点線で示してあるようにピーク時間に多少のずれがある。このことは「空のある部分にある時間一定して光っていた X 線発生領域を 3 本の X 線検出器が回転することによって次々とらえていった」と考えることができる。次に X 線脈動の第 2, 第 3 のピークに目を向けると, 全検出器の X 線計数率は一樣な変化を見せている。つまり, イベント発生時に空のある部分にあった X 線発生領域が約 90 秒後には検出器視野全体に拡がった(移動した)と考えることができる。

### 4. X 線空間像

X 線空間像の図を構成するドットパターンの最小単位である 1 ピクセルは天空上の 10 km×10 km の空間を示している。この最小単位の大きさは使用した検出器の最小空間分解能ではなく, 作図のために便宜上その大きさを表わしたものである。使用した検出器が

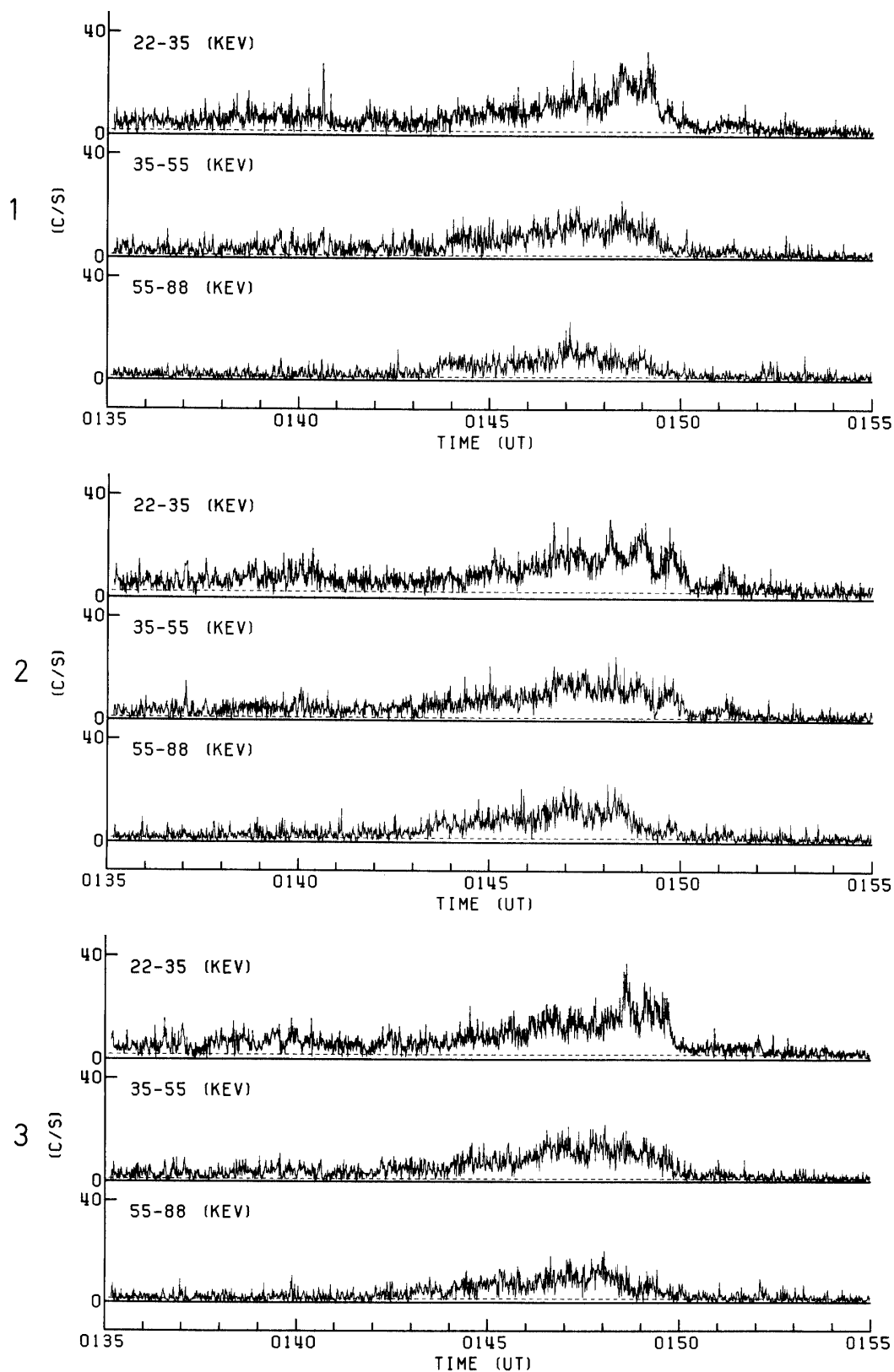


図4 イベント1のX線計数率時間変化。左側の数字はX線検出器の番号を表わす。点線はバックグラウンドである。

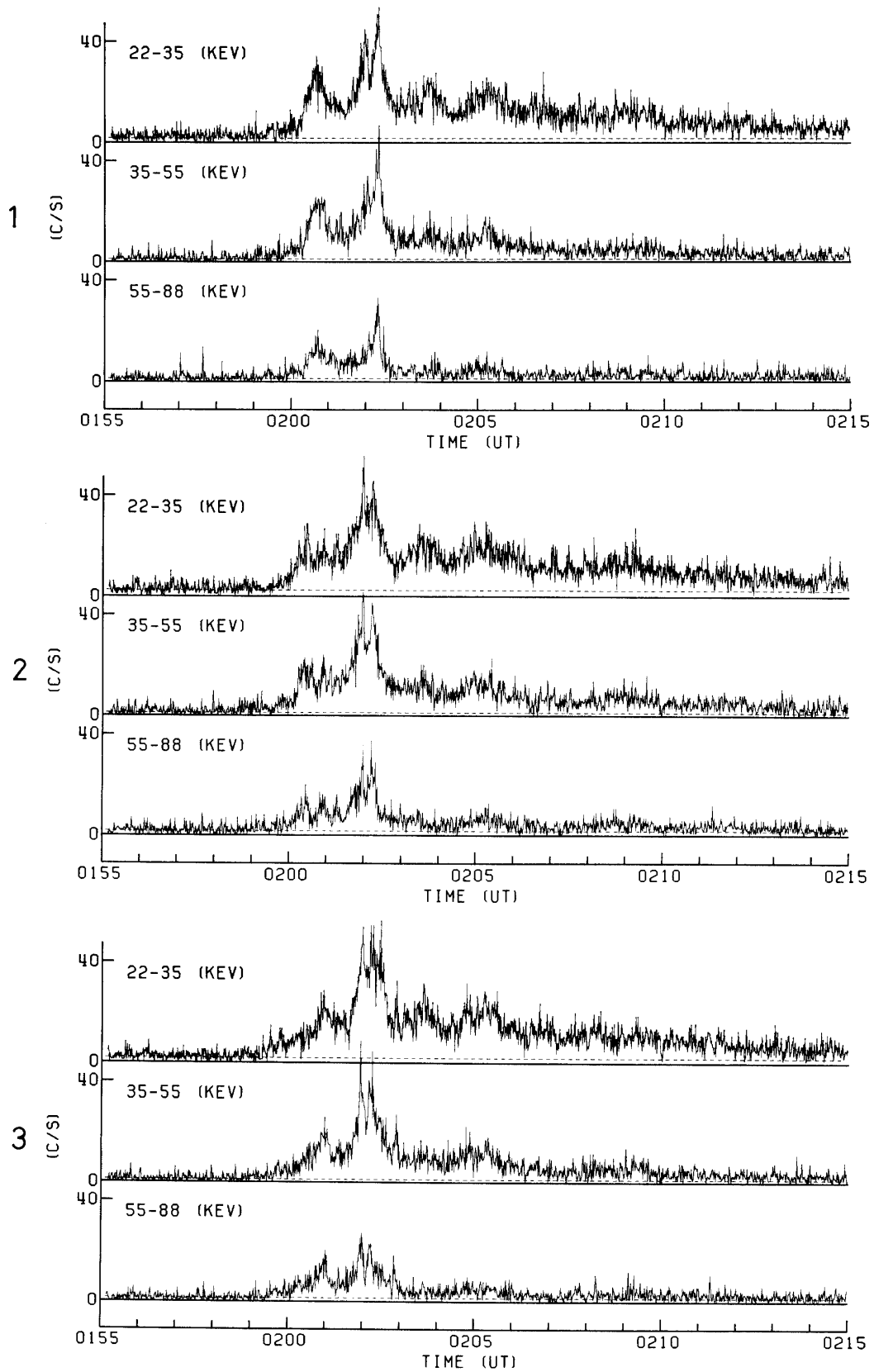


図5 イベント2のX線計数率時間変化。左側の数字はX線検出器の番号を表わす。点線はバックグラウンドである。



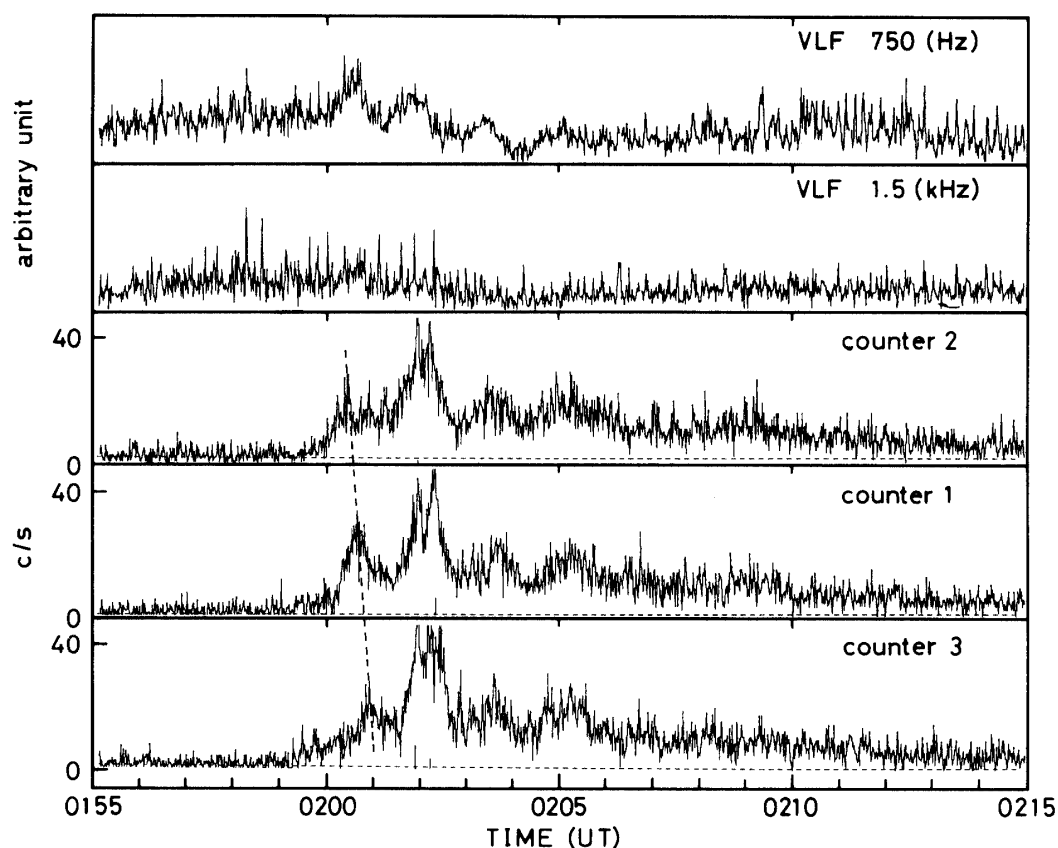


図 6 イベント 2 の VLF 検波強度時間変化

3本であるので、詳細な空間分解能に関しては議論できず、図7、8はX線到来方向を表わしているにすぎない。つまり検出器視野内のどのあたりで光っているのかを示しているにすぎないものである。しかし、X線発生領域の移動方向およびその速度を推察することは可能である。ここに示した図は27秒間で1つの画面を描いている。これはX線撮像装置が3分の1周する時間であり、3本の検出器の視野を合わせると空白部分(不感部分)がなくなり全天図を描くことができる。また、これらの図は宇宙空間より地球方向を見た形で描かれている。

オーロラX線は大気球高度に至るまでに大気による散乱を受ける。そのため撮像観測の場合には撮像ボケが問題となる。本観測については上述のように詳細な空間分解能を有するものではないので撮像ボケは解析結果に影響を与えることはない。撮像ボケについては参考文献[18]を参照されたい。

#### 4.1 イベント 1

図7にこのX線イベントで0148:23-0149:43 UTの時間帯に観測されたオーロラX線像を示した。22-35 keVのエネルギー領域のX線像はX線発生領域が視野内磁南西側から磁北東側に移動した様子を示している。これに対して55-88 keVのX線像では、X線発生領域は初めから磁北東側にあって次第に消えていったように見える。35-55 keVのX

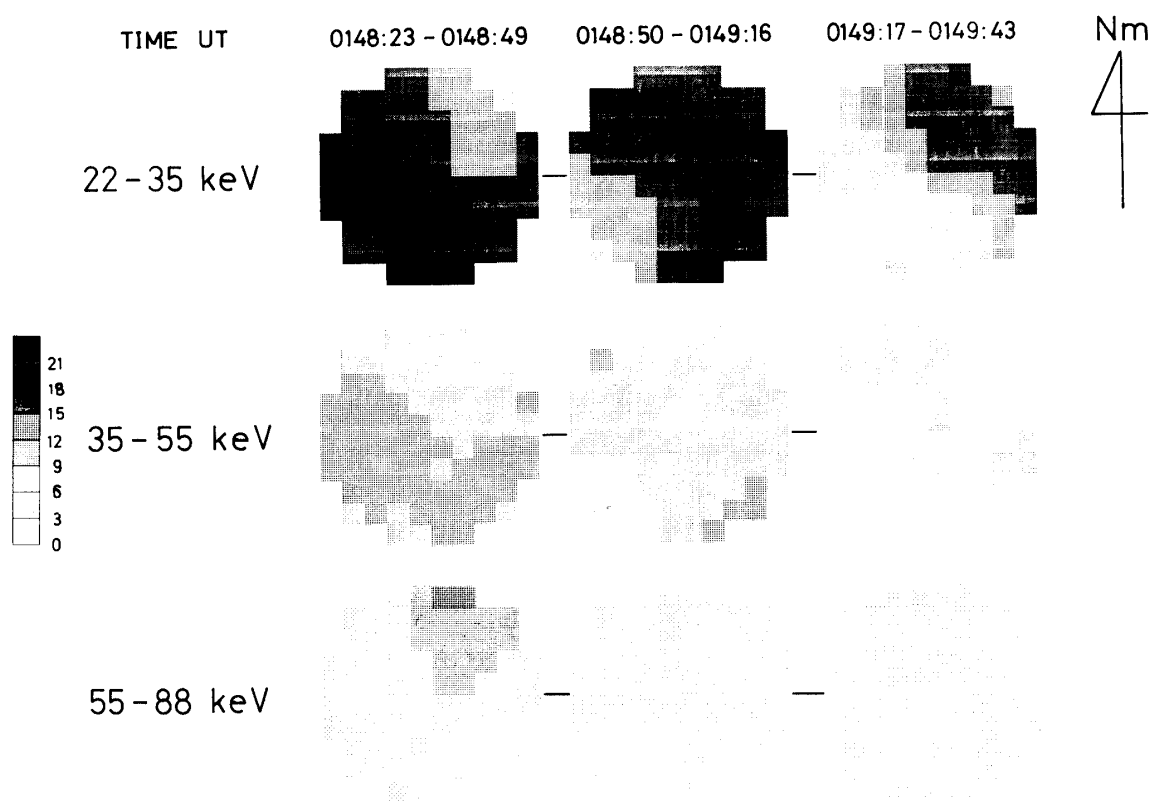


図7 イベント1におけるX線空間分布図。濃淡表示によって27秒間の平均計数率(counts/sec)を表わしている。図の上方が低緯度側である。

線像は22-35 keVのイメージに近いが、両者の変化の中間的な様相を呈している。以上の結果を総合しX線空間変化を親電子の振る舞いに変換して考えると、図7は「降下電子の高エネルギー成分が低エネルギー成分に先行して高緯度側から低緯度側に移動し、低エネルギー成分はそれにつづいて移動した」ことを示しているといえる。

X線発生領域の移動に着目すると上述のような結論を得るが、分布に重点をおくと、図7は「降下電子の低エネルギー成分は高緯度側に降下し、高エネルギー成分は低緯度側に降下した」つまり「低緯度側ほど降下電子のエネルギーが高い」ことを示している。

図7のX線像の時間変化から移動速度を一意的に決定することが不可能なことに注意しなくてはならない。これはX線撮像装置の空間分解能および視野が限られていることに起因しており、ある大きさのX線発生領域がある速度で移動した場合とその倍の大きさの領域が倍の速度で移動した場合とでは区別がつけられない。この事はシミュレーションによって確認されている。

#### 4.2 イベント2

図8にイベント2におけるX線脈動の最初の計数率増大に対応するX線像を示した。X

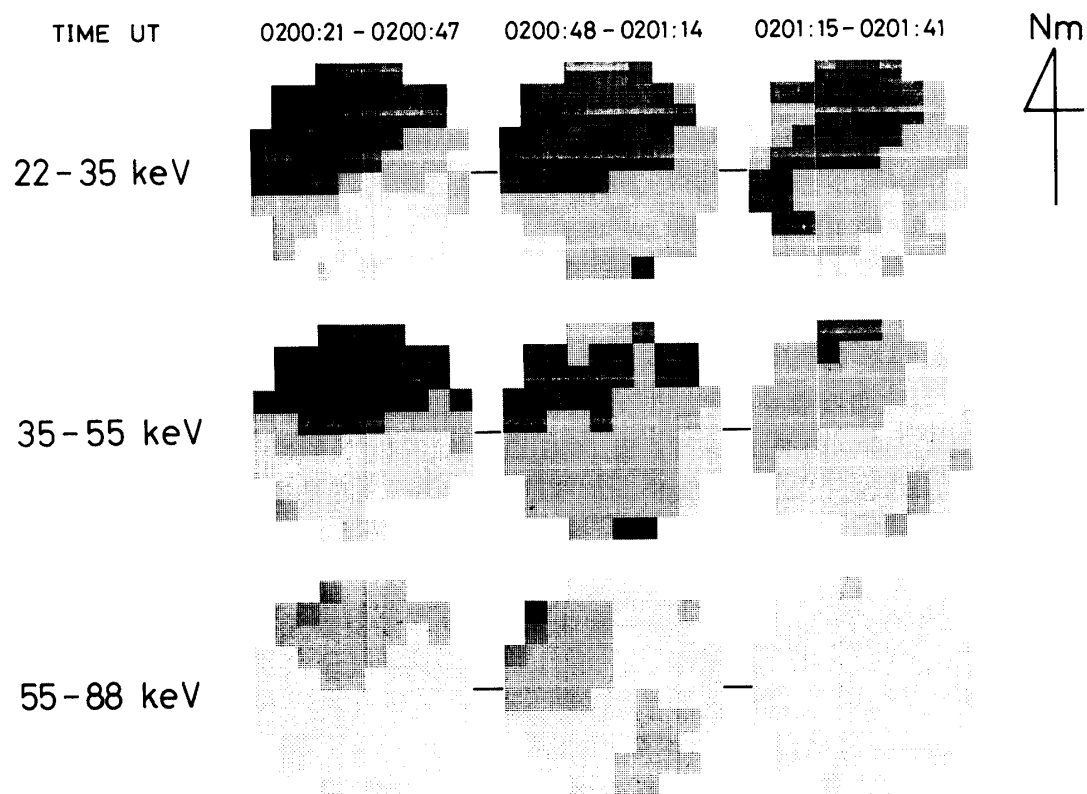


図 8 イベント 2 における X 線空間分布図。表示法は図 7 と同じである。

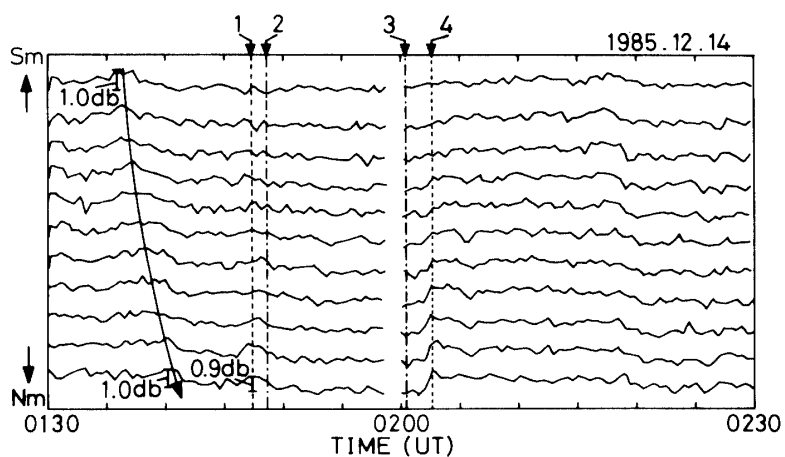


図 9 昭和基地の掃天ビームリオメーターを用い観測した CNA 時間変化。吸収は上向きに表示されている。図上部の 1 はイベント 1 の CNA ピークを 2 は X 線計数率ピークを、また、3 はイベント 2 の X 線計数率ピークを 4 は CNA ピークを表わしている。

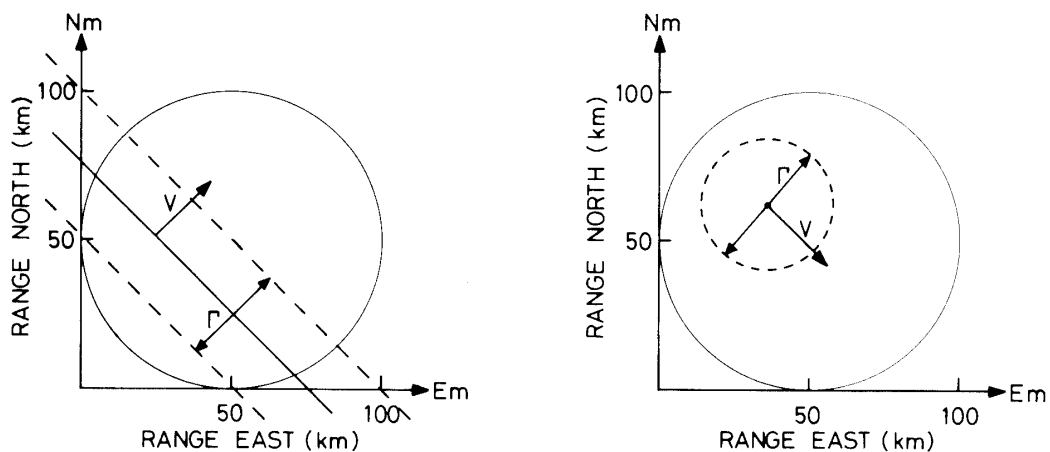
線のエネルギー領域の違いにより空間分布に多少の相異はあるが、どのエネルギー領域でも X 線強度分布の中心は磁北側に存在している。また、22-35 keV の X 線像ではこの 81 秒間に X 線発生領域の移動はなかった。これは 3 章で述べた図 6 中の点線の意味するものである。ここでは図示しないが、X 線脈動の第 2、第 3 の計数率増大時の X 線像では視野全体に X 線発生領域が広がっていたことから、初め磁北(低緯度)側にあった X 線発生領域が磁南(高緯度)方向に移動したためと考えられる。

### 5. オーロラ X 線観測結果と CNA 観測結果との比較

昭和基地において掃天ビームリオメーターを用い観測した CNA 時間変化を図 9 に示した。この図においては吸収を上向きに示してある。0150-0200 UT 間の上下変動がノイズレベルに相当する。図中 0136-0141 UT 間にある実線矢印は CNA ピークをつなげたものであり、矢印の方向は吸収領域の移動方向を表わしている。ここでは磁南から磁北向きに吸収領域が移動した事が示されている。図 9 上方にある数字は X 線イベントの計数率ピーク時間および CNA ピーク時間を示している。

イベント 1 に対応する CNA ピーク時間は「1」で、X 線計数率ピーク時間は「2」で示されている。1-2 の時間差は掃天ビームリオメーター視野北端〔高緯度側〕から大気球地点〔低緯度側〕まで X 線発生領域(電子降下領域)が移動したために生じたと考えられる。これは 4 章で述べたイベント 1 の X 線発生領域の移動方向と一致している。

イベント 2 における最初の X 線計数率ピークを「3」で、それに対応する CNA ピークを「4」で示した。3-4 の時間差は X 線発生領域が大気球地点から掃天ビームリオメーター視野北端まで移動するのに要した時間である。4 章で述べたように X 線像からも X 線発生領域が高緯度方向に移動したと推察されており、上述の事実と一致している。



(a) はアークタイプ、

(b) はディスクタイプである。

図 10 シミュレーション計算で仮定した X 線発生領域の形状。実線の円は X 線撮像装置の全視野を表わす。(a) はアークタイプ、(b) はディスクタイプである。

## 6. X 線発生領域の形状および移動速度決定のためのシミュレーション

4 章および 5 章で示したようにイベント 1 では 0148:23-0149:43 UT の時間帯に 22-35 keV のエネルギーの X 線発生領域が高緯度側から低緯度側へ移動したことが判った。しかし、4 章で述べたように図 7 から X 線発生領域の移動速度を求めることは困難である。そこで形状および移動速度を仮定した X 線発生領域が実際に X 線発生高度にあった場合、今回用いた X 線撮像装置ではどのように観測されるかをシミュレートしてみた。シミュレーションの結果を観測結果と比較し形状および移動速度を決定した。

図 10 に仮定した X 線発生領域の形状を示した。図中の (a) は無限直線状の領域(アークタイプ)であり (b) は円形の領域(ディスクタイプ)である。いずれについても中心線もしくは中心点を最大強度とするガウス型強度分布を仮定した。図 4 の X 線計数率時間変化には短時間のバースト( $\leq 10$  秒)が含まれており、X 線空間分布を反映した変化に重畳している。このバーストの影響を排除するために、図 7 の 1 枚の X 線像を描くために要した時間(27 秒)内におけるシミュレーションの X 線計数値を観測値によって規格化した。シミュレーション計算では X 線検出器の有効面積を X 線入射角の関数として与え計算を行った。

パラメーターとしては、X 線発生領域の大きさ、移動速度、方向、初期位置、また、アークタイプを仮定した場合は傾きを仮定しなければならない。移動方向およびアークの傾きについては、予備的なシミュレーション計算から観測結果より判断可能であることが判ったので、図 7 より移動方向は磁南西から磁北東方向、アークの傾きは図 10 上の磁東西軸から  $135^\circ$  とした。大きさに対応する値はガウス型強度分布の半値巾  $\Gamma$  とし、移動速度を  $V$  とし、それぞれの値を変化させ計算を繰り返し、観測結果に最も適合する条件を求めた。X 線像から最適なパラメーターを特定することは不可能なので、観測結果との比較には短時間バーストの影響をさけるため 3 秒間の移動平均を 3 回繰り返しスムージングした X 線計数率時間変化の曲線の形を基準とした。

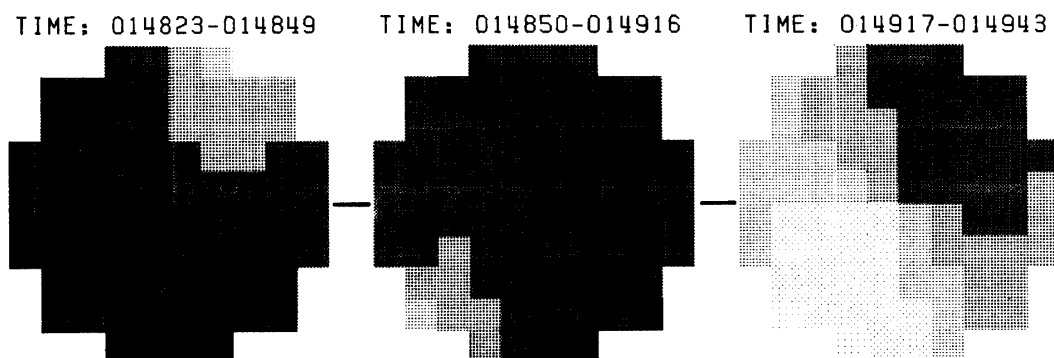


図 11 観測結果に最も良く適合する場合(MFC)のシミュレーション計算から得られた X 線空間分布図。表示法は図 7 と同じである。

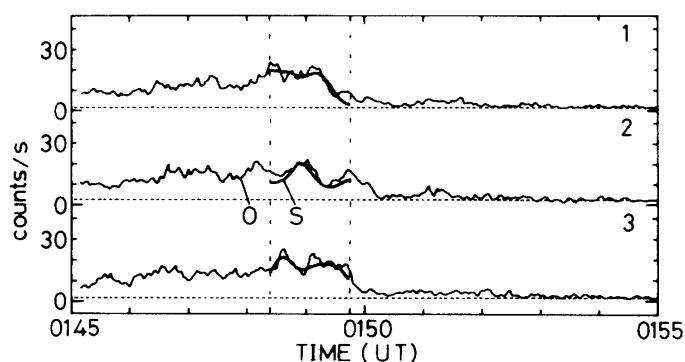


図12 MFCにおける計数率時間変化。Oは観測値を、Sは計算値を表わす。

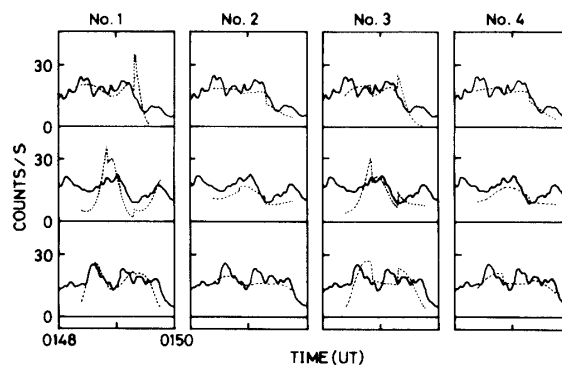


図13 適合しない場合の計数率時間変化。実線は観測値を点線は計算値を表わす。

表1 図11, 12のMFCおよび図13の場合において仮定された $\Gamma$ および $V$ の値。  
No.1~No.4は図13のNo.に対応する。

	$\Gamma$ (km)	$V$ (km/s)	形 状
M F C	66.7	1.0	アーケ
No. 1	33.3	1.0	アーケ
No. 2	100.0	1.0	アーケ
No. 3	66.7	2.0	アーケ
No. 4	133.3	2.0	アーケ

シミュレーション計算の結果として得られた最も観測値に適合する場合(MFC: most fitting case)のX線像と計数率時間変化をそれぞれ図11と図12に示した。MFCの $\Gamma$ は約70 km,  $V$ は約1 km/sである。この場合、形状としてはアーケタイプであるが、形状をディスクタイプとし、その中心が視野中央を通過する場合でも同様な結果が得られる。し

かし、ディスク状の X 線発生領域が X 線撮像装置の視野中央を通過する確率はアーク状のものが視野を横切る確率より小さいであろう。図 13 に不適切な数例を示した。図 12 と比較すると不適切であることは明らかである。表 1 に上述のシミュレーションで仮定したパラメータ値( $\Gamma$  および  $V$  と形状)を示した。

計算値と観測値との比較を定量的に取り扱うために、両者の計数率時間変化曲線に対して  $\chi^2$  テストを行った。その結果、最適な場合(MFC, 図 12)では 65% の信頼性確度を得た。

以上の事項およびアークタイプとディスクタイプとの差異を考慮して、「0148:23-0149 UT 間に 22-35 keV のエネルギー領域の X 線発生領域は 1 本の X 線検出器視野より大きな  $\Gamma \simeq 70$  km 程度の半値巾をもち、約 1 km/s の速さで磁南西から磁北東方向に移動した」と判断することができる。

## 7. 結 び

本観測により得られたオーロラ X 線データの解析結果は下記に示す通りである。

(1) 0148:23-0149:43 UT 間(イベント 1)に 1 本の検出器視野( $\leq 50$ km)より大きな( $\Gamma \simeq 70$ km)22-35 keV のエネルギーの X 線発生領域が約 1 km/s の速度で X 線撮像装置視野内を磁南西(高緯度)側から磁北東(低緯度)方向に移動した。

(2) 上記時間の X 線発生領域の移動では高エネルギー成分が低エネルギー成分に先行しており、低緯度側に高エネルギー成分が分布していた。

(3) イベント 2 は VLF 脈動を相関した X 線脈動イベントであり、イベントの初期に X 線撮像装置視野の磁北(低緯度)側に分布していた X 線発生領域は次第に視野全体に拡大した。(これは高緯度方向への伝播を示唆する)。

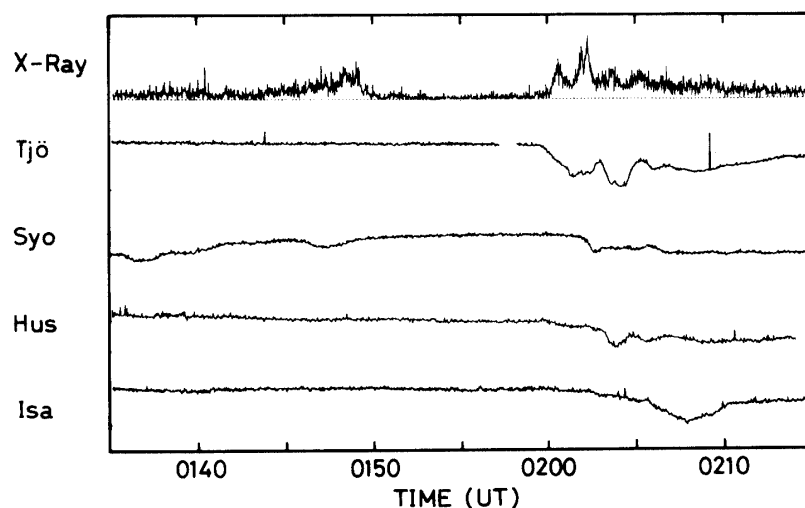


図 14 アイスランドにおける CNA 時間変化。Tjö, Syo, Hus, Isa はそれぞれ Tjörnes, Syowa, Husafell, Isafjördur を表す。X-Ray は counter 1 の 22-35 keV の X 線計数率時間変化である。

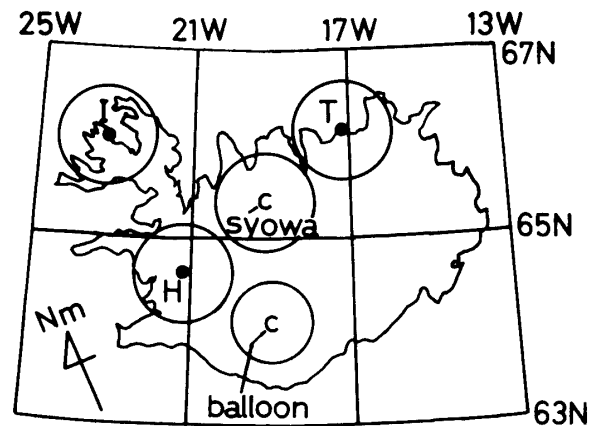


図15 アイスランドの3観測点およびIGRFモデルから計算された昭和基地と大気球(イベント2観測地点)の地磁気共役点の位置. H, T, Iはそれぞれ Husafell, Tjörnes, Isafjördur を表わす. 実線円はリオメーターおよびX線撮像装置の視野を示す.

(4) (1), (3)で示されたX線発生領域の移動方向については掃天ビームリオメーターで観測されたCNA解析結果と良く一致した.

本観測により南極域で得られたデータは上述のような結論を得た. 一方, 北極域では昭和基地の地磁気共役点にあたるアイスランドにおいて, CNA, 地磁気等の観測が行なわれており, 本観測結果と比較することにより2つのX線イベントの南北共役性を調べることができる. アイスランド観測データのうちX線イベント対応するものはCNAデータである. 図14にアイスランドの3つの観測点 Husafell ( $L \approx 6.0$ ), Tjörnes ( $L \approx 6.5$ ), Isafjördur ( $L \approx 7.0$ )および昭和基地 ( $L \approx 6.1$ )で観測されたCNA時間変化とX線計数率時間変化とを示した. 3章でも述べたように, 図14からイベント1は南半球に限られた現象であり, イベント2は南北共役性がある現象であることが判る. ここではイベント2に関して考察する.

図15に各観測点の位置を示した. 図15のC-syowaおよびC-balloonはIGRFモデルを用いて計算した, 昭和基地および大気球(イベント2観測地点,  $L \approx 5.5$ )の地磁気共役点を示している(参考文献[19]参照). また, 実線の円はリオメーターおよびX線撮像装置の視野を表わす. 南極域ではX線発生領域は磁北(低緯度)側から磁南(高緯度)側へ伝播した. 北極域では, HusafellおよびIsafjördurのCNA時間変化は, 粒子降下領域が高緯度方向へ移動した事を示唆しており, 南極域での伝播方向に一致している. TjörnesのCNA時間変化は粒子降下領域が磁西方向に移動した事を示唆している. 図14が示すイベント発生時刻の時間差は, Tjörnesと大気球共役点とを結ぶ線に一致する境界を有する粒子降下領域が基本的には西方向に伝播していったと考えないと説明ができる.

以上のように南北両極域での観測結果は矛盾がないものであり, イベント2に関する理解はより深いものになった. また, X線脈動イベントのX線空間分布および移動方向をX



線撮像観測によって求めたことは、X 線脈動イベントの物理的機構解明のための重要な情報となろう。

イベント 1 は南極域に限った現象であったが、X 線空間分布にエネルギー差があるイベントであった。(2)で示した解析結果のうち、低緯度側に高エネルギー成分が分布していた(即ち高緯度側ほどエネルギースペクトルはソフトになる)事に関しては他にも観測例がある。掃天ビームリオメーターによる CNA 空間分布観測では低緯度側ほどエネルギースペクトルがハードである現象を観測している。(山岸私信)。また、Imhof et al.[15]は 4-40 keV の X 線パッチのエネルギースペクトルが、高緯度に存在するパッチほどソフトになる傾向があると報告している。ただしこれらの観測の対称は CNA もしくは低エネルギー X 線(2-40 keV)であり、本観測の対称(22-35 keV の X 線)と厳密に一致したものではない。従って同様な空間分布特性を示したとはいえ、その原因が同一の物理的過程に因るものとは限らない。しかし、この空間分布特性は、内部磁場領域注入後、ドリフトしてきた粒子のエネルギー別空間分布に一致している。

今回の観測では、X 線発生高度(100 km)で有効視野 100 km という狭い領域でのオーロラ X 線の観測であり、この観測の結果はオーロラ X 線現象の形態のほんの一部をとらえているにすぎないであろう。しかし見方を換えればこの観測により局所的に降下する高エネルギー電子の振る舞いの一側面が明らかにされたわけである。オーロラ現象の物理学の進歩の歴史から明らかなように、このような観測の積み重ねが新たな局面を切り開いていくための糸口となるのである。

地球磁気圏内における高エネルギー現象は先ず荷電粒子加速に反映されるが、粒子の直接観測から空間的分布を知ることは困難であろう。オーロラ X 線は 2 次的現象であり、超高層大気に降下した電子にのみ対応するものであるが、リモートセンシングが可能であり、空間像をとらえられることから重要な情報を我々に与えてくれる観測対象である。X 線オーロラの形態学確立のためには、高分解能・高効率の X 線撮像観測が必要であり、その研究がなされることによって、磁気圏深部の高エネルギー現象と電離圏とを結ぶ物理的機構および高エネルギー現象の物理的過程が明らかになるであろう。

## 謝 辞

本観測は、立教大学(理)、宇宙科学研究所、山梨医科大学、国立極地研究所、東北大学(理)の協同実験であり、気球放球および受信にあたって、第 26 次南極観測隊の皆様たいへんお世話になり、心より感謝いたします。この論文をまとめるにあたって、有益な議論、助言等をしていただいた、立教大学助教授奥平清昭先生に感謝します。データ解析には極地研究所の HITAC M-180 および M-260 コンピューターを使用しました。同研究所の桜井治男氏にはコンピューター使用にあたり御助力をいただきました。記して厚く謝意を表します。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Mozer et al. ; Phys. Rev. Lett., **38**, 292(1977)
- [ 2 ] Burch et al. ; J. Geophys. Res., **84**, 5863(1979)
- [ 3 ] Parks, G. K. ; J. Geophys. Res., **72**, 215(1967)
- [ 4 ] Yamagami et al. ; J. Geomagn. Geoelectr., **30**, 663(1978)
- [ 5 ] Kodama et al. ; Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys., **1**, 56(1988)
- [ 6 ] Suzuki et al. ; Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys., **1**, 46(1988)
- [ 7 ] Mauk et al. ; J. Geophys. Res., **86**, 6827(1981)
- [ 8 ] 平島他 ; 宇宙科学研究所報告, 特集第 17 号, 115(1986)
- [ 9 ] Hirasima et al ; Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **47**, (1987)
- [10] Kodama and Oguti ; Mem Natl Inst. Polar Res., Ser. A(Aeronomy), **14**, 1(1976)
- [11] Goldberg et al. ; J. Geophys. Res., **87**, 2509(1982)
- [12] Imhof et al. ; J. Geophys. Res., **85**, 3347(1980)
- [13] Mizera et al. ; Geophys. Res. Lett., **11**, 255(1984)
- [14] Imhof et al. ; J. Geophys. Res., **90**, 6515(1985)
- [15] Imhof et al. ; J. Geophys. Res., **93**, 2649(1988)
- [16] Yamagishi et al. ; Proc. Chapman Conference on Plasma Waves and Instabilities in Magnetospheres and at Comets, ed. by H. Oya and B. T. Tsurutani. Sendai, Committee on Sendai Chapman Conference, 230
- [17] Kikuchi et al. ; Geophys. Res. Lett., **15**, 168(1988)
- [18] 小玉, 小倉 ; 山梨医大紀要, 第 4 卷, 62(1987)
- [19] Ono T. ; Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **48**, 46(1987)