

南極域での大気硬 X 線の強度変動

内田正美¹・平島洋⁵・伊藤宗博²・鎌江稔員²・小玉正弘⁶
森本幸司⁶・村上浩之⁵・中川道夫²・西村純⁴・高橋保²
田中誠²・鈴木裕武⁵・山上隆正³・山極巖⁶・山内誠⁷

Variation of The Atmospheric Hard X-Rays in Antarctica

By

Masami UCHIDA¹, Yo HIRASHIMA⁵, Munehiro ITO², Toshikazu KAMAE², Masahiro KODAMA⁶,
Kouji MORIMOTO⁶, Hiroyuki MURAKAMI⁵, Michio NAKAGAWA², Jun NISHIMURA⁴,
Tamotsu TAKAHASHI², Makoto TANAKA², Hiromu SUZUKI⁵, Takamasa YAMAGAMI³,
Isao YAMAGIWA⁶ and Makoto YAMAUCHI⁷

Abstract: The Polar Patrol Balloon (PPB#6) was launched from Syowa Station, Antarctica by the 34th Japanese Antarctic Research Expedition on 5th January 1993. The detection system for hard X-rays and Protons were carried with the purpose of research for the elemental and composition of cosmic rays, solar energetic particles, cosmic gamma ray bursts and auroral x-rays. The PPB#6 moved westward by 1.5 circumpolar rounds over Antarctica. This paper presents the variation of atmospheric hard x-rays with the balloon altitudes in the whole Antarctica.

要 旨

硬 X 線検出器及びプロトン検出器等を搭載してオーロラ X 線やガンマ線バーストとその他の現象を観測することを目的とした PPB6 号気球は、1993 年 1 月 5 日に南極大陸の昭和基地から放球され、南極大陸を西回りに 1.5 周し 1 月 31 日までの約 25 日間の観測を行った。オーロラ現象以外の硬 X 線の背景輻射、特に宇宙成分を除いた大気成分について、その強度変動を纏めることが出来た。

重要語: 南極大陸, 極域周回大気球, 大気硬 X 線

1. はじめに

大気硬 X 線成分とは、気球高度で得られた硬 X 線の強度から検出器の視野内の X 線源と等方成分の和すなわち宇宙からの X 線を差し引いた残りの硬 X 線である。大気硬 X 線成分は主に宇宙線荷電粒子に起源しており、高度

¹大阪信愛女学院, ²大阪市立大学理学部, ³宇宙科学研究所, ⁴山形工科アカデミー短期大学校, ⁵立教大学理学部,
⁶理化学研究所, ⁷宮崎大学工学部

及び不変磁気緯度に依存性があるとされている [1, 2, 3].

昭和基地より放球されたPPB6号機は、高度6~13g/cm²を保ちながら西回りに約一周半の極域周回飛行を行い、その間、40以上のオーロラX線イベントの観測を行うと共に、長時間にわたるX線バックグラウンドの観測も行った。その観測をもとに鈴木は、一定の大气深度におけるデータを抽出し、不変磁気緯度とX線バックグラウンド強度との関係を調べた。その結果、X線バックグラウンド強度のkneeは54度付近にあり、それ以上の高緯度では、ほぼ平坦になっており、宇宙線電離成分の観測結果と一致することを示した [4].

ここでは、大気硬X線成分のX線強度の高度依存性について調べた結果を報告する。

2. 気球 飛 翔

PPB6号気球は、南極の昭和基地（南緯69.0度，東経39.6度）より1993年1月5日0855（UT）に放球された。体積約59,000m³，重量約189kgの気球に，重量約95kgの観測器と，150kgのパラスト等を搭載したゴンドラがつかがれている。図1の中央に示すように，放球後の気球の航跡は昭和基地より南極大陸を反時計回りに約1.5周して1月31日に南緯70.6度，東経176.7度付近に降下した。飛行時間は27日間，有効観測時間は584時間であった。図2は気球の高度変動と，ゴンドラ水平面に対する太陽高度角の変化を示している。約25日間，オートパラストによる制御（プリセット値を30.7kmとしてこの値以下に高度が下がらないようにパラストを投下する）の効果により高度は，図2に示すように約31km以上を維持し続けた。しかし，150kgのパラストはその全量を1月29日には使いきり以後の高度制御は出来なくなった。なお，目標の高度は35kmに設定されていた [5].

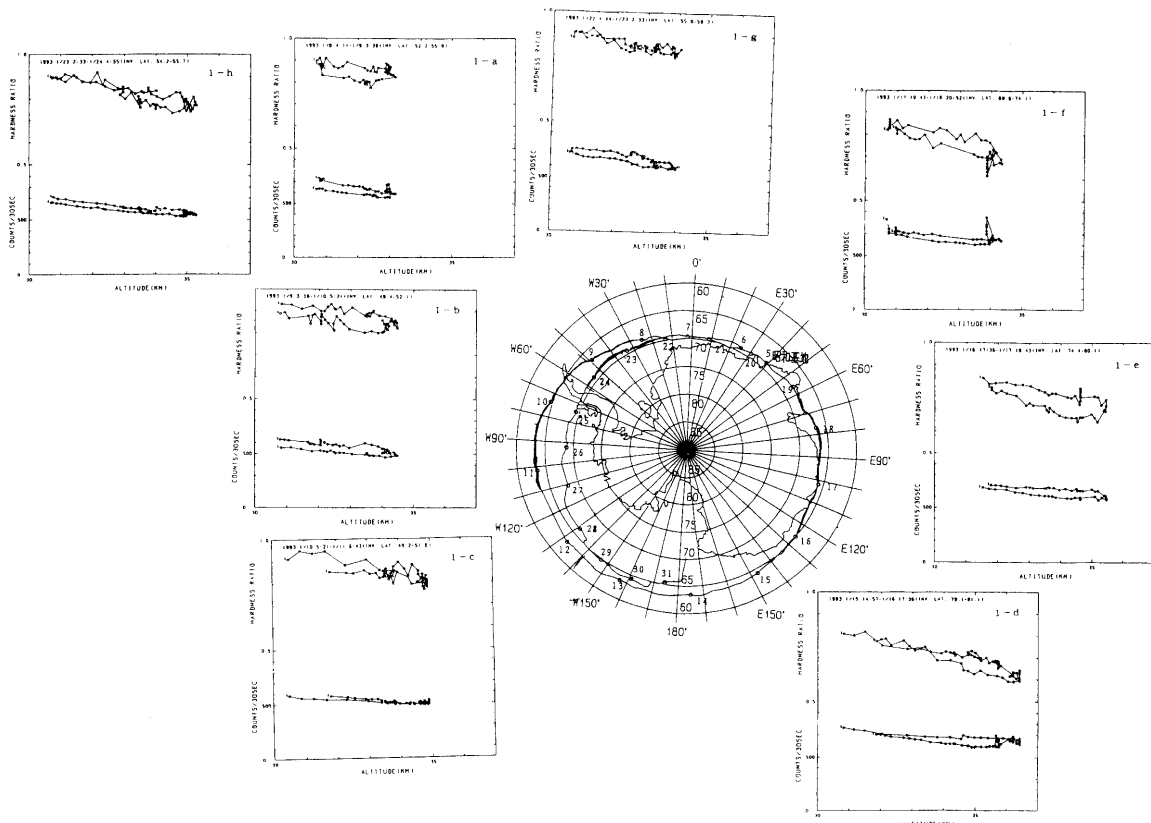


図1 PPB6号気球の航跡図とX線強度の高度変化図

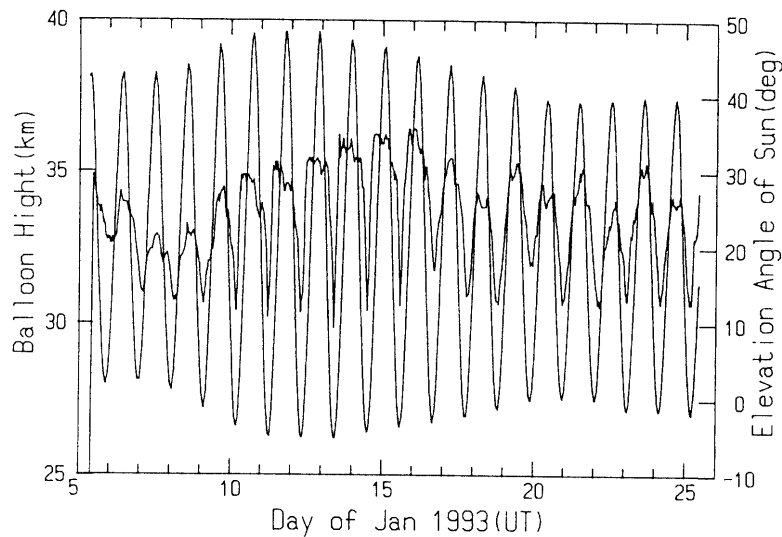


図2 PPB6号機の気球高度と太陽高度角

3. 観測装置

PPB6号気球には、3種類の検出器が搭載されていた。ここでは、今回の解析に用いられた2種類の検出器について述べる。

3.1 硬X線観測装置

X線検出器の概略図を図3に示す。口径2インチ厚さ5mmのNaI (Tl) シンチレータ (図3の上方の斜線部) と口径2インチの光子電増幅管をシリコン樹脂で接着して光学的に一体化している。そして、入射面を除いた周囲を磁気シールド材で囲み、厚さ2mmのアルミニウム製の円筒形容器に入れている。さらに、その外側を2mm厚のスズと、1mm厚の鉛で覆っている。ケース及び遮蔽材はシリンダー型のコリメータを兼ねている。広い範囲で、オーロラX線や突発的に発生する γ 線バーストを検出するために、開口角は 165° と広くなっており、その有効 $S\Omega$ は $52.7\text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$ である。測定エネルギー領域は30～120 keVで、 $E_1 \rightarrow 30 \sim 50\text{ keV}$ 、 $E_2 \rightarrow 50 \sim 70\text{ keV}$ 、 $E_3 \rightarrow 70 \sim 90\text{ keV}$ 、 $E_4 \rightarrow 90 \sim 120\text{ keV}$ と4つのエネルギー・チャンネルに分けられ、各チャンネルごとに30秒間集積されたカウント数がARGOSシステムにより伝送された [5, 6]。オーロラX線観測時に、計数値はバックグラウンドの1000倍程度になる可能性があるため、X線データは各チャンネルとも、上位4bitを指数部に、下位4bitを仮数部に割り当てた8bit構成で、計数値を圧縮して送信された。なお、シンチレータのエネルギー分解能は60 keVで約13%であった。

3.2 プロトン検出器

プロトン検出器の概略図を図4に示す。口径2インチ厚さ10cmのCsI (Tl) シンチレータ (図4上部) と口径2インチの光電子増倍管とをX線検出器と同様にシリコン樹脂で接着し、周辺の物質層によるコンタミを避けるためにアクリル製容器に入れている。また図のように広い視野となっている。検出器の有効 $S\Omega$ は $127.5\text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$ である。測定エネルギー領域は、大気頂上換算で、100 MeVからはじまり50 MeVのエネルギー幅で $E_1 \rightarrow 100 \sim 150\text{ MeV}$ 、 $E_2 \rightarrow 150 \sim 200\text{ MeV}$ 、 $E_3 \rightarrow 200 \sim 250\text{ MeV}$ 、 $E_4 \rightarrow 250 \sim 300\text{ MeV}$ 、 $E_5 \rightarrow 300 \sim 500\text{ MeV}$ と5つのチャンネルに分けられている。各チャンネルの計測率は60秒間集積され、集積されたカウント数がARGOSにより送信された [4, 5]。検出器のエネルギー較正は理研のリングサイクロトロンを用いて80 MeV、135 MeVのプロトンビームにより行われた。また、CsI (Tl) シンチレータは直径に対し縦方向が長いので、縦方向に関して、発光場所

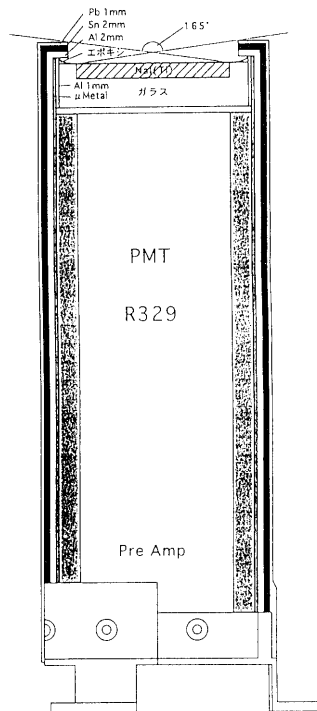


図3 硬X線観測装置の概略図

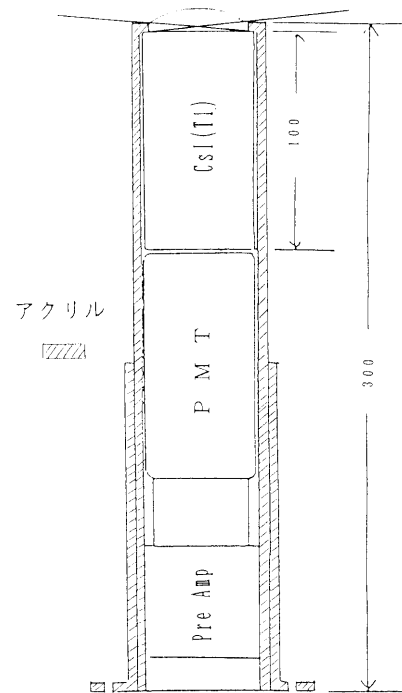


図4 プロトン検出器の概略図

によるパルス波高値の違いについて測定したが、ほぼ差異の無い結果を得た [7]。

なお、環境試験は、飛翔時に近い環境として、室温、6 Torr 以下で25日間、さらに、 -20 度、大気圧で25日間の連続測定を行ったが、検出器は安定した状態を保っていた。

データは人工衛星 NOAA を経由して伝送する、ARGOS システムを用いた。送信方式はマルチ ID-ARGOS と REGULAR-ARGOS の2システムを用いた。マルチ ID-ARGOS は41 ID チャンネルで、1 ID チャンネルは32ワードで構成されており、各 ID チャンネルのデータは30秒間サンプリングされて伝送された。41 ID チャンネルは #0-39 と #40 の2グループに分けられており、#0-39 を用いて観測データが送られた。精密気圧計、温度センサーなどの HK データは、#40 と REGULAR-ARGOS により送られた。大気球と NOAA 衛星が接近会合する度にデータは衛星に受信されるが、大気球オンボードメモリーの容量の関係で、会合間隔が長くなるとデータ欠損がおこる。したがって、全観測時間のうち約20%のデータが失われた。

4. 観測結果

図5に全フライト期間におけるX線の強度変動、気球の場所における Inv. latt. の変化を示す。X線強度がスパイク状に変化しているところがオーロラが発生したところで、41個のオーロラ・イベントが観測された [6]。オーロラを観測していないX線強度の静かな部分を Phase 1, Phase 2 および Phase 3 と名付ける。各 Phase の観測期間は以下のように決めた。Phase 1 ('93 1/8 4:11 ~ 1/11 6:43), Phase 2 ('93 1/15 14:57 ~ 1/18 20:52), Phase 3 ('93 1/22 4:44 ~ 1/24 2:33)。これらの観測期間毎に、気球高度と太陽角とを図2の中から取り出し、図6にそれぞれの Phase 毎にまとめて図示した。この図によると、Phase 1 では太陽角が -5° から 50° 近くまで変化しているが Phase 2 では -1° から 45° 近く、そして Phase 3 ではほぼ 0° から 40° 回りまでと、太陽角の変化が狭くなり最大値も小さくなっている。この事は、1日の最大太陽角が大きければ気球の最高高度も大きくなる事を示し、さらに太陽の状態が同じなら太陽からの粒子も多くなる事が期待できる。そして、各区間毎に、1日の気球高度の変動

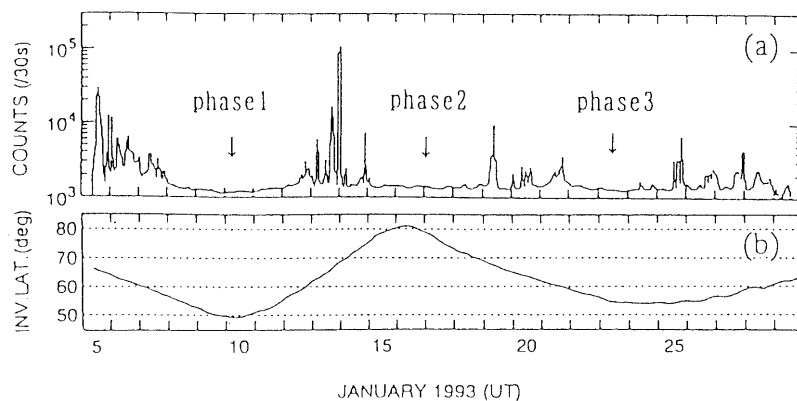


図5 全フライト中のX線強度と気球位置における Inv. latt.

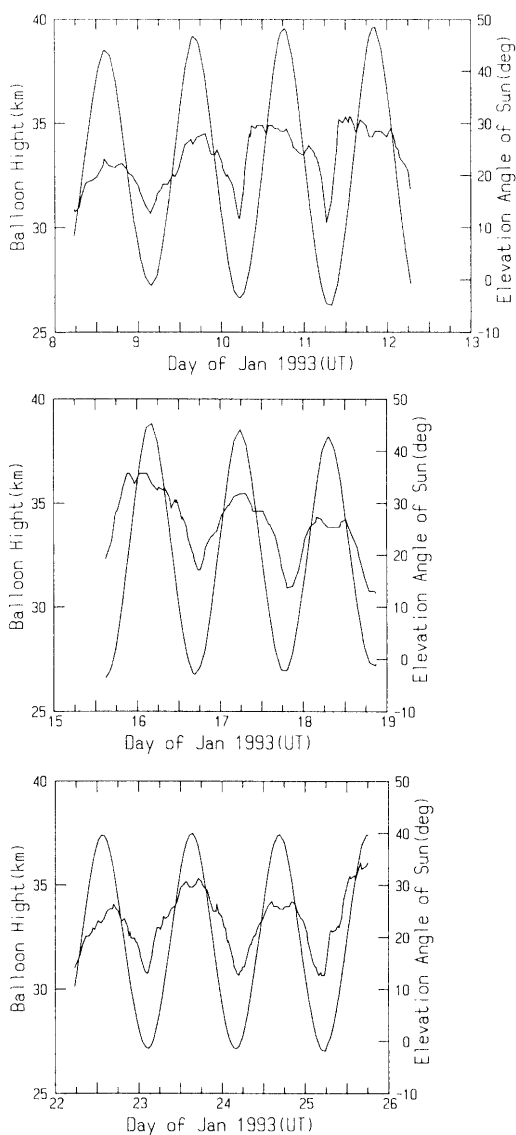


図6 Phase 1, 2, 3における気球高度と太陽高度角

に対して大気硬 X 線成分の ($E_1 + E_2$) チャンネルの X 線強度 (COUNTS/30SEC) とハードネス・レイシヨ HR (E_2/E_1) を 20 分間集積して、この間の気球高度での平均値として求めた。Phase 1, Phase 2 および Phase 3 の観測期間において、気球が最低高度から上昇を始め最高高度に達した後、下降状態に移行して最低高度に達するまでを 1 日として、気球高度を横軸にとり、縦軸に X 線強度 ($E_1 + E_2$) と HR (E_2/E_1) の変動を示す図を八枚作った。そこで、Phase 1 では 1 月 8 日, 9 日, 10 日を、Phase 2 では 1 月 15 日, 16 日, 17 日を、Phase 3 では 1 月 22 日, 23 日での変動を求めた。これら八枚の図を、南極大陸を周回した PPB6 号気球の航跡図中の相当する日付けの近くに分散して置いた図を図 1 とする。この航跡図の周りには、それぞれ 1-a, -b, -c, -d, -e, -f, -g, -h と名付ける。なお、対応する日付けはそれぞれ 1 月 8 日, 9 日, 10 日, 15 日, 16 日, 17 日, 22 日, 23 日である。

1-a 図では、気球高度が上がるにつれて一定の割合で減少し、下がるにつれて一定の割合で増加している。なお、気球が上昇を始める地点と下降し終わった地点の Inv. latt. はおのおの 55.9° , 52.2° であった。この Inv. latt. の違いにより X 線強度に差があるために低高度側で差が生じている。1-b 図, 1-c 図, 1-g 図, 1-h 図についても高度の上昇と下降とで X 線強度の減少と増加とが見られた。さらに最下点における Inv. latt. の違いによる X 線強度の違いが見られる。次に Phase 2 を見てみると、1-f 図の X 線強度は、Phase 1 と同じような高度変動が見られる。さらに、この観測期間 (1-f) では Inv. latt. の違いによる強度の違いがあまり生じていない [4] ので、基準としてこの期間での気球が上昇中の X 線強度の変化を図 7 に示す。X 線の平均高度変化率は、約 -26 [(COUNTS/30SEC)/km] であった。しかし、1-d 図に示されているように、15 日は X 線強度は高度が上がるにつれ減少してゆく。そして、気球高度が下がって行く場合には約 35.0 km (6.7 hpa) あたりまで X 線強度が減少してゆく。そして、 35.0 km (6.7 hpa) から最低高度まで、強度は Phase 1 とほぼ同じ割合で増加している。また、1-e 図でも同じように、16 日は気球高度の上昇とともに X 線強度は減少していた。そして、気球高度が下がって行く場合には約 34.4 km (7.2 hpa) あたりまで X 線強度が減少してゆく。そして、 34.4 km (7.2 hpa) から最低高度まで強度は Phase 1 とほぼ同じ割合で増加している。このように、15 日と 16 日には 1-d 図, 1-e 図に見られるような特異な高度変動が示された。なお、この期間の Inv. latt. は 81.1° から 74.4° まで変化をした。M.L.T. は共に、だいたい 0 h 頃からはじまり 9 h 頃に終わっている。

次にプロトンでは、Phase 1 (図 8) の場合、高度が上がるにつれ強度は減り、高度が下がるにつれ強度が増えている。X 線と同じように Inv. latt. の違いにより高度の上がり下がり度でカウント数に違いが見られた。Phase 2

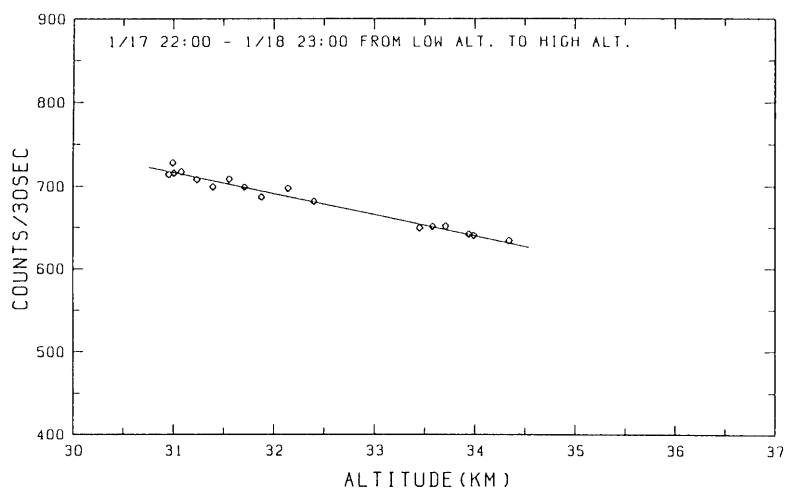


図 7 気球上昇中の標準の X 線強度の高度変化図

(図9)では、気球の上昇時の変動曲線と下降時のものが一致している。Phase 3 (図10) の場合は、他の場合と同じ変化を示している。全体として、高度が上がるにつれ、カウント数が減り、その高度による平均の高度変化率は約 -833 [(COUNTS/60SEC)/km]であった。

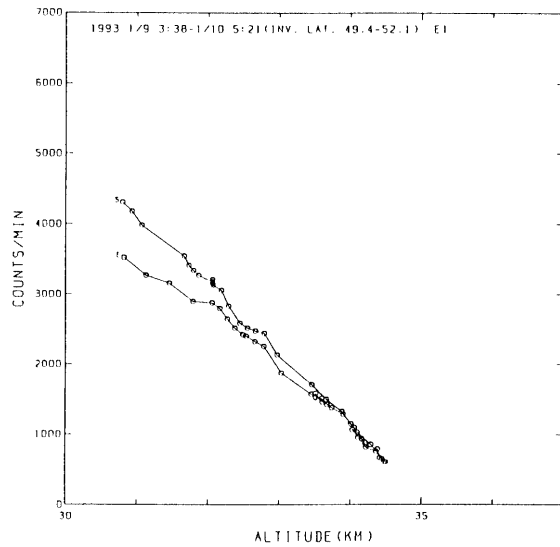


図8 Phase 1におけるプロトンの強度変動

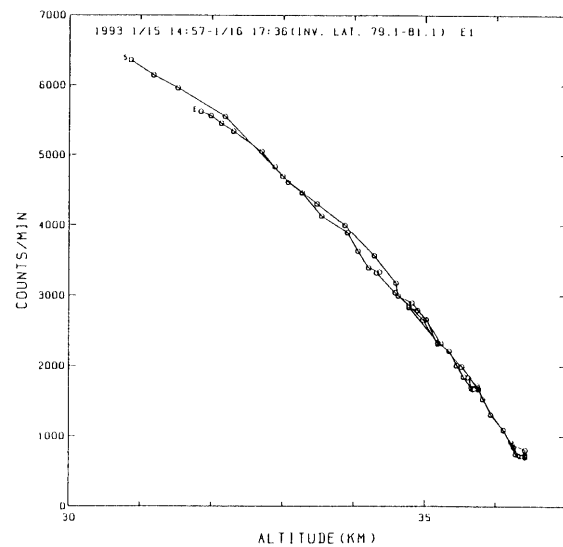


図9 Phase 2におけるプロトンの強度変動

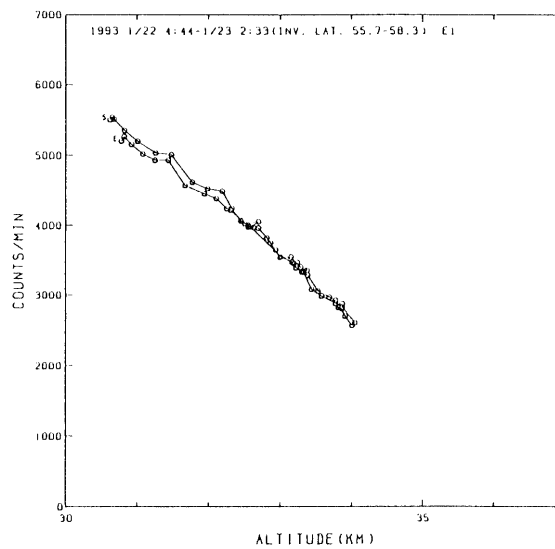


図10 Phase 3におけるプロトンの強度変動

5. ま と め

1月15日と16日に、気球が下降する場合の高度変動を図11と図12にそれぞれを示す。強度変動はともに34kmから35kmあたりで変動率が逆転していることが見られる。15日の高度35.8kmから35.0kmまでの下降時の変化率は $+46.4 \pm 6.6$ [(COUNTS/30SEC)/km]となり、高度35.0kmから32.0kmまでの下降時の変化率は -35.8 ± 1.0 [(COUNTS/30SEC)/km]を得た。また、16日には、高度35.4kmから34.4kmまでの下降時の変化率は $+18.6 \pm 1.9$ [(COUNTS/30SEC)/km]を得、高度34.4kmから31.4kmまでの下降時の変化率は -35.7 ± 1.3 [(COUNTS/30SEC)/km]を得た。

観測期間がPhase 1とPhase 3では、Inv. latt.が 49° から 58° まで変化しておりX線強度の補正を行う必要がある。しかし、Phase 2の内1月17日の場合は 72° 前後であるためにこちらのデータを基準にした。1月17日の大気硬X線の高度変化率は、約 -26 [(COUNTS/30SEC)/km]であった。

ハードネス・レイシヨ HR (E_2/E_1) も、X線強度 ($E_1 + E_2$) と同じように気球高度が低いところから高いところへの移動によりHRの値が減少していることが示された。その変化率までは今回得ることが出来なかったが、より高エネルギー領域ほど高度依存が高いことが判明した。

プロトンの高度変化率は、約 -833 [(COUNTS/60SEC)/km]であった。X線で見られたような特異な高度変動はプロトンでは見られなかった。

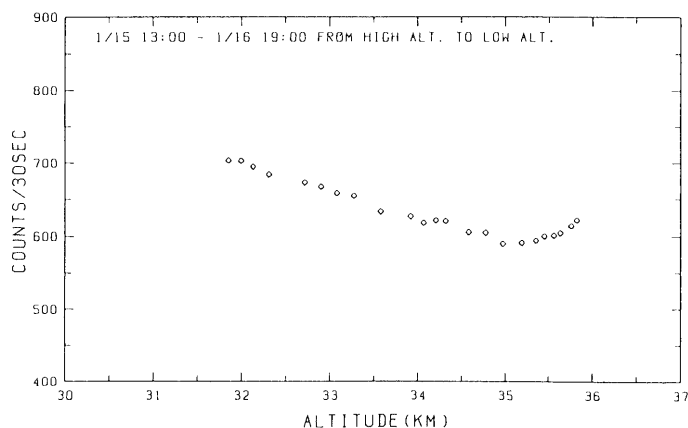


図11 1月15日の下降時のX線強度変動

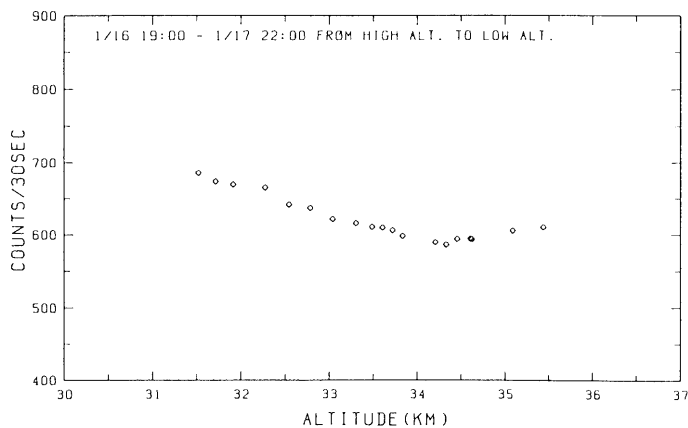


図12 1月16日の下降時のX線強度変動

6. 謝 辞

ゴンドラの製作から南極における放球まで協力いただきました，極地研の超高層グループの方々，宇宙研の矢島信之氏と気球工学グループの方々，佐藤夏雄氏と34次隊の方々に深く感謝いたします。

7. 参 考 文 献

- [1] K.A.Anderson: Secondary Cosmic-ray Photons below Cascade Energy, Phys. Rev., **123** (1961) 1435-1439
- [2] J.I.Vette: Low-energy Gamma rays produced in Air and in Lead by Cosmic rays, J. Geophys. Res., **67** (1962) 1731-1739
- [3] H.V.Neher and H.R.Anderson: Cosmic Rays at Balloon Altitudes and The Solar Cycle, J. Geophys. Res., **67** (1962) 1309-1315
- [4] 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線の広域空間分布及びエネルギースペクトル特性」，立教大学学位論文（1996）
- [5] 宇宙科学研究所，大阪市立大学，立教大学：「第34次南極観測隊 Polar Patrol Balloon (PPB) 6号機最終観測要項」(1992)
- [6] 鈴木裕武，平島洋，村上浩之，下林央，山上隆正，並木道義，利根川豊，江尻全機，佐藤夏雄，中川道夫，西村純，小玉正弘：「南極周回大気球（PPB）によるオーロラX線観測結果」，平成5年度大気球シンポジウム報告（1993）41-44
- [7] 村上 聡，中川道夫，高木 弘，高橋 保，西村 純，山上隆正，小玉正弘，河野 毅，山内 誠，平島 洋，村上浩之，森本幸司，山極 巖：「PPB6号機による宇宙線の観測計画」，平成4年度大気球シンポジウム報告（1992）227-232.