

# 宇宙科学研究所報告

第127号

「あけぼの」で観測された放射線帯粒子の長期変動

高木俊治・鈴木大晋・中村尚司

2003年9月

宇宙科学研究所

この報告書は宇宙科学研究所が、研究成果を公表するために発行する  
不定期継続刊行物です。

本報告についてのお問い合わせは下記にご連絡下さい。

宇宙科学研究所 管理部庶務課法規・出版係

## 「あけぼの」で観測された放射線帯粒子の長期変動

高木 俊治<sup>†</sup>・鈴木 大晋<sup>\*</sup>・中村 尚司<sup>‡</sup>

### Long-Term Modulation of Radiation Belt Particles Observed with AKEBONO

By

Shunji Takagi<sup>†</sup>, Hiroyuki Suzuki<sup>\*</sup>, Takashi Nakamura<sup>‡</sup>

**Abstract:** Geomagnetically trapped particles (proton, electron, alpha particle) in a wide area were measured for 12 years from 1989 to 2000, which span one solar cycle including two solar maxima and one solar minimum by using the radiation monitor on board AKEBONO. Based on the data from this monitor, the spatial distributions of trapped particles and the flux modulation for different L-values and geomagnetic latitudes were estimated. It was clarified that the trapped electrons, protons and alpha particles in the inner belt were stable, while the observed energy spectra differ from those of the NASA's models. Such long-term measurements during about 12 years will give us very useful information for mission planning in the future for space physics.

#### 要 旨

本研究では1989年から2000年にわたって「あけぼの」に搭載されたRDM(放射線モニター)により観測された放射線帯粒子の変動についてまとめた。この12年間で、2度の太陽活動極大期と、その間の極小期を含め、太陽活動周期1周期分の長期間の変動を確認できた。

衛星の軌道の範囲の空間分布やL値毎、磁気緯度毎にデータをまとめ、電子、陽子、 $\alpha$ 粒子とも高エネルギーの粒子ほど内側の磁場に安定して捕捉されていること以外は各粒子とも12年間の間にそれぞれに特徴的な変動を示していることがわかった。

内帯の磁気赤道上についてNASAのモデルと比較を行ったが、電子、陽子ともNASAのモデルほど各粒子エネルギー毎にフラックスの差は見られず、陽子についてはモデルでは見られなかった太陽活動に伴った変動が確認できた。

12年間という長期間の宇宙環境放射線の単一の連続的な測定結果は、宇宙空間物理学のみならず、今後の宇宙における様々なミッションに有益な情報を提供するものと思われる。

**keyword:** 「あけぼの」、放射線帯、電子、陽子、 $\alpha$ 粒子、長期変動

AKEBONO, the radiation belt, electron, proton, alpha particle, long term modulation

---

<sup>†</sup> (株)三菱総合研究所

<sup>\*</sup> 東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻 (現 三菱商事株式会社)

<sup>‡</sup> 東北大学サイクロン・ラジオアイソトープセンター

## 1 はじめに

宇宙空間における放射線環境は、放射線帯粒子や太陽フレア粒子、ならびに銀河宇宙線に含まれる HZE 粒子 (High Z and High Energy Particles) などがあるが、この中で地球近傍の宇宙環境放射線として定常的に存在し、重要なのが地球磁場に捕捉された放射線帯粒子である。これらの高エネルギーの荷電粒子は、宇宙機器や宇宙飛行士の被曝に多大な影響を及ぼすので、その被曝線量を評価するために宇宙環境の放射線の分布変動を把握する必要がある。

「あけぼの」は、放射線帯の中に軌道があり、荷電粒子強度が高くなるため、放射線モニタ (Radiation Monitor, RDM) が搭載された [1]。エネルギーの高い荷電粒子を測定するこのうち高エネルギー粒子モニタ (High Energy Particles Monitor, HPM) の測定結果から放射線帯の概要を求め、電子、陽子のエネルギースペクトルが NASA の放射線帯モデル (陽子は AP8 [2], 電子は AE8 [3]) と異なることを見出した [4, 5]。

その後、1989年から1991年の3年間にわたる観測から、さらに詳しく宇宙環境放射線の空間分布について NASA の放射線帯モデルと比較し、新しいモデルを提唱し、放射線帯のダイナミクスを粒子強度分布の時間変動の観点から見ていった [6]。

本研究では、その後、「あけぼの」が観測した1989年から2000年までの太陽活動1周期分の観測データをまとめて解析する事により放射線帯粒子の太陽活動に伴う長期変化を明らかにした。

## 2 観測結果

衛星あけぼのは1989年2月22日の打ち上げ以降、今日までの約14年間の長期にわたり観測を続けている。ここでは1989年から2000年までに得られた観測結果について述べる。

### 2.1 放射線帯の空間分布

放射線帯粒子の空間分布を観測チャンネル毎に、1989年から2000年までの12年分を補遺の図 A.1 から図 A.14 に示す。これらの図は、磁気緯度  $\lambda$  と地球中心を原点とした地心距離  $r$  (地球半径単位) をパラメータとしたものである。メッシュは縦、横 0.1 (地球半径単位) にとり、その中で算術平均を取っている。粒子強度の単位は  $[\text{count} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}]$  で、値は1年間の平均値をとった。「あけぼの」の軌道での地球磁場は、高緯度領域を除いてダイポール磁場に近似できる。

これらの図では、粒子フラックスが  $0.1 [\text{count} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}]$  以下のデータは切り捨てにし、衛星の軌道外もしくは観測データが無い領域は、背景色 (黒色) で示している。太陽活動は、1990年頃と2001年頃に極大、1996年頃に極小であった。

図から、緯度  $60^\circ$  以上の放射線帯以外の空間でも荷電粒子が  $10 [\text{count} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}]$  程度の強度で地球の周りに存在している事が分かる。

#### 2.1.1 電子の分布変動

補遺の図 A.1 から図 A.6 は、電子のエネルギー別 (2.5MeV 以上, 0.95 ~ 2.5MeV, 0.3 ~ 0.95MeV) の空間強度分布の年単位での変動を示したものである。太陽活動の極大期である1991年頃が最もフラックスが高く、その後極小期に向かうにつれて徐々にその強度が減少し、極小期を過ぎた頃から再び増加しだす傾向が見え、太陽活動との相関が見られた。また、特に1996年の太陽活動の極小期を前後に顕著に放射線帯の内帯と外帯を区別することができる。

粒子フラックスが最大の領域は磁気赤道上の  $r=1.5$  付近で、一般的に内帯と呼ばれているところである。この

ピーク付近におけるフラックスは太陽活動周期の変動に対してかなり安定していた。

内帯の電子フラックスは、電子のエネルギーが2.5MeV以上の場合で $2 \times 10^6$  [count $\cdot$ cm $^{-2}$  $\cdot$ sec $^{-1}$ ]程度、0.95MeVから2.5MeVの電子はそれよりも僅かに低く $1 \times 10^6$  [count $\cdot$ cm $^{-2}$  $\cdot$ sec $^{-1}$ ]程度、最もエネルギーの低い0.3MeVから0.95MeVが、最もフラックスが高く $3 \times 10^6$  [count $\cdot$ cm $^{-2}$  $\cdot$ sec $^{-1}$ ]程度である。更に45°度付近から衛星の軌道よりも外側にある外帯から回り込んでいると思われる粒子群が確認できるが、内帯に比べフラックスは1/10～1/100程度で分布している。外帯では、太陽活動の極大期(90～91年)と極小期(96～97年)とでは明らかに粒子強度分布に変化が見られる。これは、高エネルギーの電子ほど特に顕著に見られる。また、外側の外帯と内帯を隔てている、フラックスが少ない領域はslot領域と呼ばれている。

### 2.1.2 陽子の分布変動

補遺の図A.7から図A.12は、陽子のエネルギー別(29～62MeV, 15～29MeV, 6.3～15MeV)の空間強度分布の年単位での変動を示したものである。内帯の陽子フラックスの最大値は、29MeVから62MeVの陽子は $3 \times 10^6$  [count $\cdot$ cm $^{-2}$  $\cdot$ sec $^{-1}$ ]程度、15MeVから29MeVの陽子は $1 \times 10^6$  [count $\cdot$ cm $^{-2}$  $\cdot$ sec $^{-1}$ ]程度、最もエネルギーの低い6.3MeVから15MeVの場合で $6 \times 10^6$  [count $\cdot$ cm $^{-2}$  $\cdot$ sec $^{-1}$ ]程度である。内帯のピーク部分はほとんど電子と同じ位置にあるが、陽子の場合には電子に比べ太陽活動に伴う変動が大きく極大期と極小期でピーク部分のフラックスが約1/10程度変化し内帯であっても電子ほど安定していない。また、陽子分布にも電子と同様に外帯のようなものが見られるが、電子による信号の陽子チャンネルへの漏れ込みの可能性も考えられるため、今回得られた陽子の結果については、今後さらに他の測定結果等と比較検討することでその真偽を確かめる必要がある。

### 2.1.3 $\alpha$ 粒子の分布変動

補遺の図A.13と図A.14は、 $\alpha$ 粒子(16～52MeV)の空間強度分布の年単位での変動を示したものである。 $\alpha$ 粒子に関しては、比較的安定した強度で地球に近い低緯度の領域に分布している。 $\alpha$ 粒子のフラックスの最大値は、 $2 \times 10^4$  [count $\cdot$ cm $^{-2}$  $\cdot$ sec $^{-1}$ ]程度である。全体的なフラックスの変動を12年間で見ると太陽活動の極大期に最大となった後、2000年まで下がりつづけており、電子、陽子と挙動に差が見られた。この変動について、今後さらに他の測定結果等と比較検討する必要がある。

## 2.2 L値ごとの各粒子に対するフラックスの経時変化

補遺の図B.1から図B.14に各チャンネルの粒子について、様々なL値での粒子強度変化を図示した。横軸に年代(1日刻み)、縦軸に1日平均フラックスを取り、L=1.8, 2.2, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0での各チャンネルでのフラックスを順次示した。放射線帯粒子のフラックスは太陽フレアやそれに伴う地磁気の変動により大きく強度が変動することが知られている為、フラックスの変動と地磁気の変動を表す $K_p$ 値や $D_{st}$ 値も同時に示した。

大きなフレア(1989年10月19日と1991年3月23日など)が起きた時の各L値における粒子フラックスの変動に注目すると、フラックスが元のレベルまでもどる減衰時間は内帯が一番長く、外帯が最も早く減衰するという差がみられた。ただ、フレア発生後フラックスが完全に元に戻る前に次のフレアが起きる場合や、フレアの大きさが毎回異なるために、外帯、内帯で減衰時間がどれくらいなのかを算出するのは難しいが、例えば2.5MeV以上の電子のslot領域では1991年3月のフレア後が最大で $10^7$  [cm $^{-2}$ sec $^{-1}$ ]から元のレベル $10^2$  [cm $^{-2}$ sec $^{-1}$ ]程度へ戻るのに推定で6ヶ月程度、内帯では更に数年程度の多くの時間を要する。またフラックスの変動を見てもと全体的にL値の小さい内帯が最も安定しており、それよりも外側の磁気シェルになるにつれて不安定になっている。

電子について見てみると、フラックスの経時変化は、電子のエネルギーが2.5MeV以上の場合と、0.95-2.5MeV

の場合については、ほとんど同様な経時変化を示している。0.3-0.95MeVの電子は、他の電子に比べ内帯およびslot領域で5割増し、外帯で1桁から最大で2桁近いフラックスの差があった。全体的に太陽活動の極大期にフラックスが高くなっているが、衛星軌道の関係で定点観測では無い為に、増減を定量的に評価するのは難しい。

しかし、外帯（特にL=6.0）では、観測データの欠損はあるが極小期における顕著なフラックスの減少は無いと言ってよい。例えば0.3-0.95MeV、0.95-2.5MeVの電子では、L=6.0において94年、95年の方がむしろフレアの多い時期よりもフラックスが増加している。これは太陽活動の極小期には太陽からのプラズマ流が弱くなり、外帯の分布（外帯のピーク位置はL=5.0付近）が外側に広がることによりL=6.0のフラックスが相対的に増加したためと考えられる。このような電子のL値毎のフレア発生後のフラックスの減衰時間と、12年間の線量の変化を見ると、放射線帯の起源とされる太陽プラズマ粒子の放射線帯への侵入および輸送の概括的なイメージを垣間見ることが出来る。フレア発生による放射線帯への粒子の侵入の後、内帯のフラックスの減衰時間が長いのはそれより外側の磁気シェルからの粒子の輸送により内帯への粒子の補給があることによるものなのかもしれない。

陽子については、電子ほどL値の大きな磁場に捕捉されておらずそのフラックスも電子に比べ弱く、さらにL値の大きなところではフラックスがかなり少なくなっている。また陽子は全体的に電子によく似た変動をしているが、電子に比べてフレア発生によりフラックスが増加した後の減衰時間が短くシャープなピークが多い。「あけぼの」の観測範囲内の放射線帯においては陽子の捕捉の限界が見られる。陽子29-62MeV、15-29MeV程度のエネルギーになるとフレアなどの突発的な粒子の補給を無視すると、L=6ではかなりフラックスが少なく、このあたりの磁場には完全に捕捉されていないことがわかる。6.3-15MeVの陽子はL=2.2付近では、フレア発生後のフラックスこその他の2つのエネルギーの陽子と変わらないが、通常レベルにおいては、フラックスが1桁から2桁高いことが（例として1991年最初のフレア発生前のフラックスなど）分かる。

$\alpha$ 粒子には外帯が存在せず、Lが3.0以上ではほとんど存在していないが、 $\alpha$ 粒子の12年間のフラックス変動を見るとL=2.2, 2.6で僅かだが太陽活動の極小期の方が極大期よりもフラックスが大きくなっている。また1991年の巨大フレアを例外として、電子や陽子の時の様に太陽フレア発生時に急激なフラックスの上昇が見られない。このことから、電子や陽子とは異なり、放射線帯に存在する $\alpha$ 粒子の静穏時の主な起源が太陽フレアでは無く、銀河宇宙線にあるのかもしれない。

なお太陽フレアの少ない時期のL値の小さな領域で明らかに周期的な変動が見られるが、これは衛星周期によるもので衛星軌道の遠地点、近地点が極付近にある時には、同じL値でも磁気赤道付近のフラックスの高い領域を通過するために1日平均のフラックスが増加することとなる。高L値では軌道変化による周期変動は見られず、軌道から考えて高L値を取るのは高緯度付近のフラックスの差の無い狭く限られた領域のみであるためである。また年の経過とともに高L値のデータに欠落が見られるが、これは衛星の飛行高度が年々落ちてきている事によるものである。

### 2.3 磁気緯度( $\lambda$ )ごとの各粒子に対するフラックスの経時変化

様々な磁気緯度ごとの12年間のフラックス変動の様子を補遺の図C.1から図C.5に示す。これらは磁気緯度一定の領域で算術平均をとっており、様々な磁気シェル(L値)をまたいで平均されている。

図1から、磁気緯度 $0^\circ$ は主に内帯を通るが、電子については1991年の大きなフレアで多少変化がある以外は日々の変動はかなり安定しており、長期的な目でみると1996年前後の太陽活動極小期でフラックスの減少が見られる。それに比べ陽子の分布は太陽フレアの発生の活発な時期(1994年頃まで)は、電子に比べ比較的大きな変動が見られた後、1995、96年に向かって緩やかに減少し、2000年に向かって徐々に増加するが、変動は小さい。 $\alpha$ 粒子に対しては1991年前後の大きなフレアの影響が見られるが、全体として1992年以降からフラックスの緩やかな減少傾向がみられる。これは、太陽フレアにより放射線帯への $\alpha$ 粒子の侵入のため一時的にそのフラックスが増加するが、 $\alpha$ 粒子の起源が銀河宇宙線に拠る所が大きい為に太陽活動の極小期から2000年までフ

ラックスが減少していくものと考えられる。

これらの図においても各粒子とも約250～200日の短い周期での変動が見られるが、これは「あけぼの」が磁気緯度 $0^\circ$ を通る時の高度によって強度の違いがあるためである。

磁気緯度 $15^\circ$ での各粒子の変動の傾向は $0^\circ$ とよく似ている。特に短い周期でのフラックス変動のピークの値はほぼ $0^\circ$ と同じ値をとるが、谷の部分でのピーク値に違いが見られる。これは磁気緯度 $15^\circ$ の領域では高度が高いところでは内帯から外れ、フラックスの少ないslot領域を通過するため、1日の平均値に影響を与えたためと考えられる。

磁気緯度 $30^\circ$ 以上の領域でも同様の考察が可能であり、 $\alpha$ 粒子、陽子、電子の順で捕捉されている領域が限られてくる。また高緯度になるに連れて様々なL値をまたぐ積分になるため、フラックスの変動も激しい。また高緯度になるにつれて太陽活動とフラックスの増減の関係が無くなる傾向にある。

## 2.4 NASAのモデルとの比較

図1と図2に、「あけぼの」の観測結果の解析から得られた磁気赤道上的でのL値の関数としての粒子フラックスの分布をNASAのモデルと比較した。12年間の変動を極大期周辺(1989年～1991年)、極小期周辺(1995年～1997年)、その中間の時期を含む期間(1992年～1994年、1998年から2000年)の4つに分け、電子についてはAE8モデル、陽子はAP8モデルと比較した。なお他の領域ではデータの欠落などの問題があるため、ある程度データが完全な時期赤道(上)( $B/B_0=1$ )のみで比較を行った。

電子については、NASAのモデル、「あけぼの」の観測結果ともエネルギーの高い粒子ほど磁場の内側にあることが確認できる。高エネルギー領域(2.5MeV以上)ではモデルに対して測定値の方がフラックスは1桁以上高いが、逆に0.3～0.95MeVの電子に対してはモデルの方が1桁近く高いフラックスを示した。また0.95～2.5MeVの電子の場合は形状、フラックスとも測定値とモデルが比較的良く一致している。次に年ごとに比較すると、2.5MeV以上、0.95～2.5MeVにおけるAE8MIN、AE8MAXのモデルでは、 $L=2.3$ 、 $2.4$ 付近まで太陽活動の極大、極小に関わらずほぼ同じフラックスになっているが、同様に「あけぼの」による測定結果においても少なくともL値が2付近までは、12年間でほとんど差は無い。1989-1991年のフラックス変動ではAE8MAXに見られる $L=2.4$ 付近からのフラックスの上昇も同じように確認できる。また0.3～0.95MeVの低エネルギーの電子の場合には、AE8MAXとAE8MINで顕著なフラックスの差があるが、観測結果では極大期、極小期で、モデル程ではないが、フラックスの差がある。全体的な傾向として電子は測定値とモデルは形状は似ているが絶対値が異なっている。

次に陽子については、NASAのAP8MAXとAP8MINの場合、「あけぼの」の観測しているエネルギー範囲の陽子については極大期と極小期で分布、フラックスともに差はほとんどないものとなっている。しかしながら観測では3つのエネルギー範囲に於いて凡そ極大期に陽子のフラックスが最大、極小期に最小といったように、 $10 [\text{counts}\cdot\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}]$ 程度の幅で変動を示した。観測ではモデルほどエネルギーの違いによるフラックスの変化は無く、29-62MeVの陽子でも6.3-15MeVの陽子に比べ $1/2$ 程度の差しかなく、実際には観測したエネルギー範囲の陽子は時期赤道(上)ではエネルギーによらず同じようなフラックスでよく似た分布を持つ事が分かった。

$\alpha$ 粒子については観測データが少なく、放射線帯モデルが存在しない。そこで図\ref{fig:model\_a}に4つの期間における1年毎の $\alpha$ 粒子の磁気赤道上的でのフラックスの変遷を詳しく調べてみた。太陽活動の極大期付近(1989～1991年)において、特にLが1.7以上で大きな変化を示しているが、それよりも内側の磁場においては安定していることが分かり、他の年においても内側の磁場では太陽活動に伴った大きな変動は見られない。興味深いのは、1992年以降のLが1.7以上での変動である。1992年に現れた $L=1.9$ 付近のピークが年々減少し、綺麗な減衰を示している事である(図4)。またかなり大きなフレアの生じた1989年、1991年においてLが2.0以上で大きな $\alpha$ 粒子のフラックスの増加が見られる。

この現象に関して考えられる原因は、まず極大期の太陽フレアにより比較的低エネルギーの $\alpha$ 粒子がLが2.0

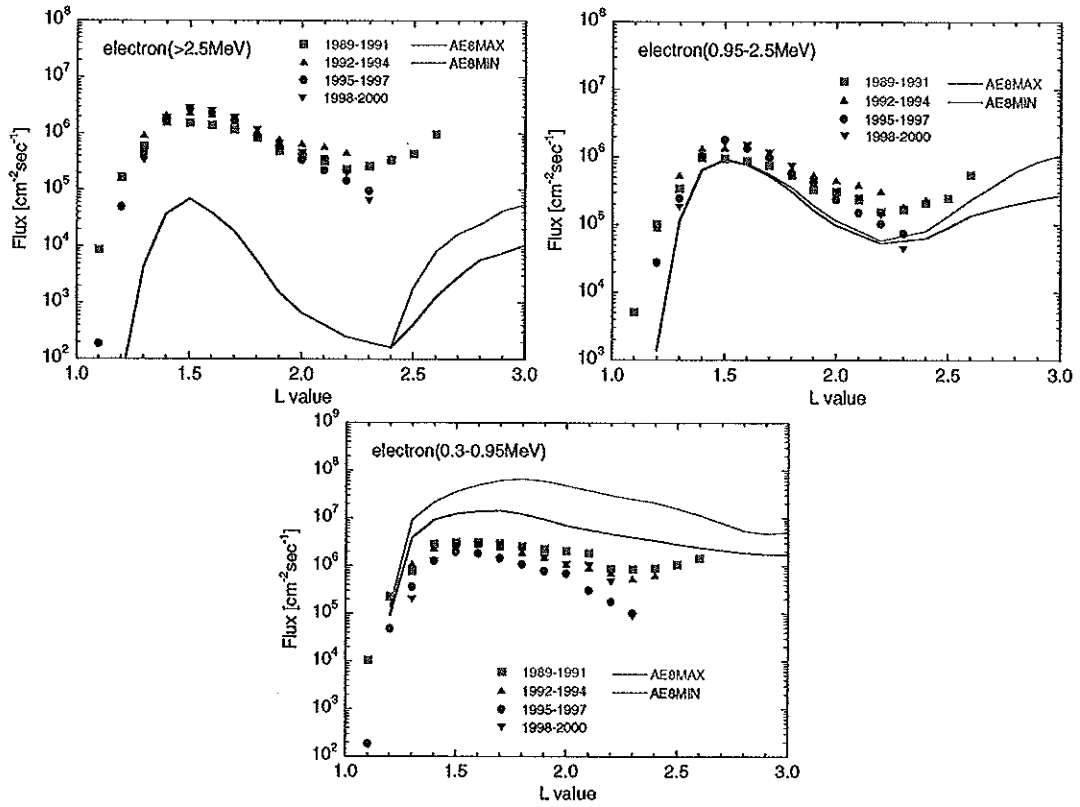


図1 磁気赤道上の電子の分布と放射線帯モデルとの比較

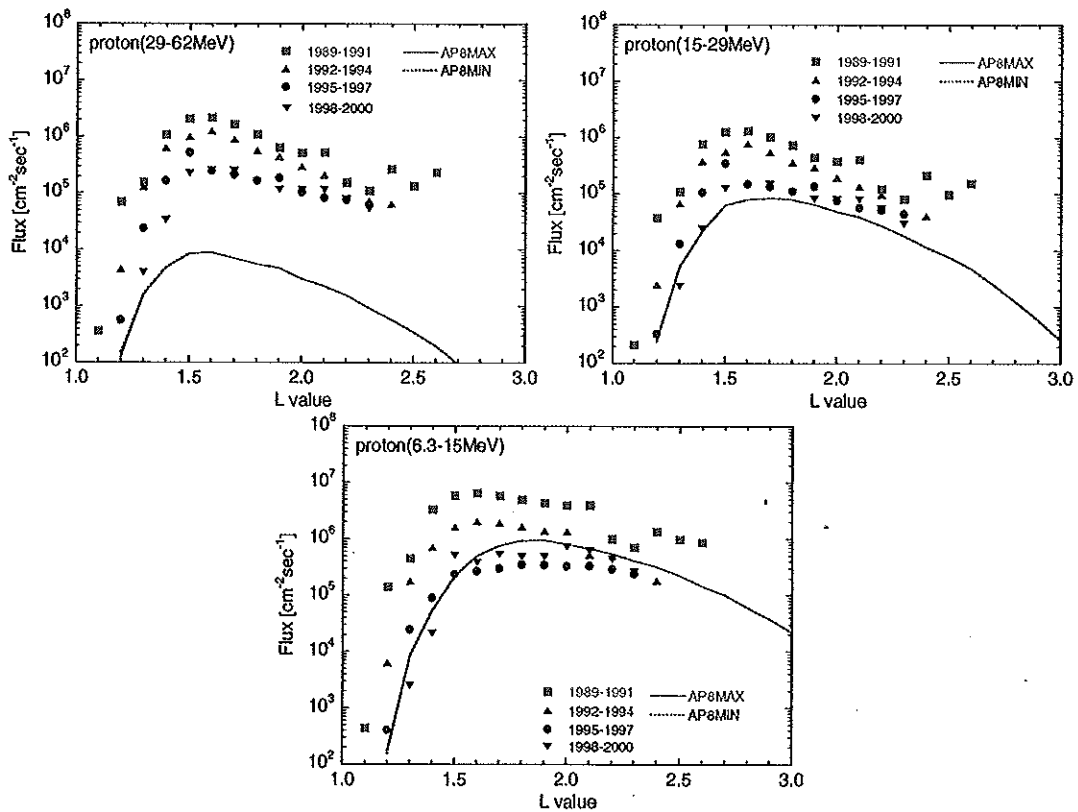


図2 磁気赤道上の陽子の分布と放射線帯モデルとの比較



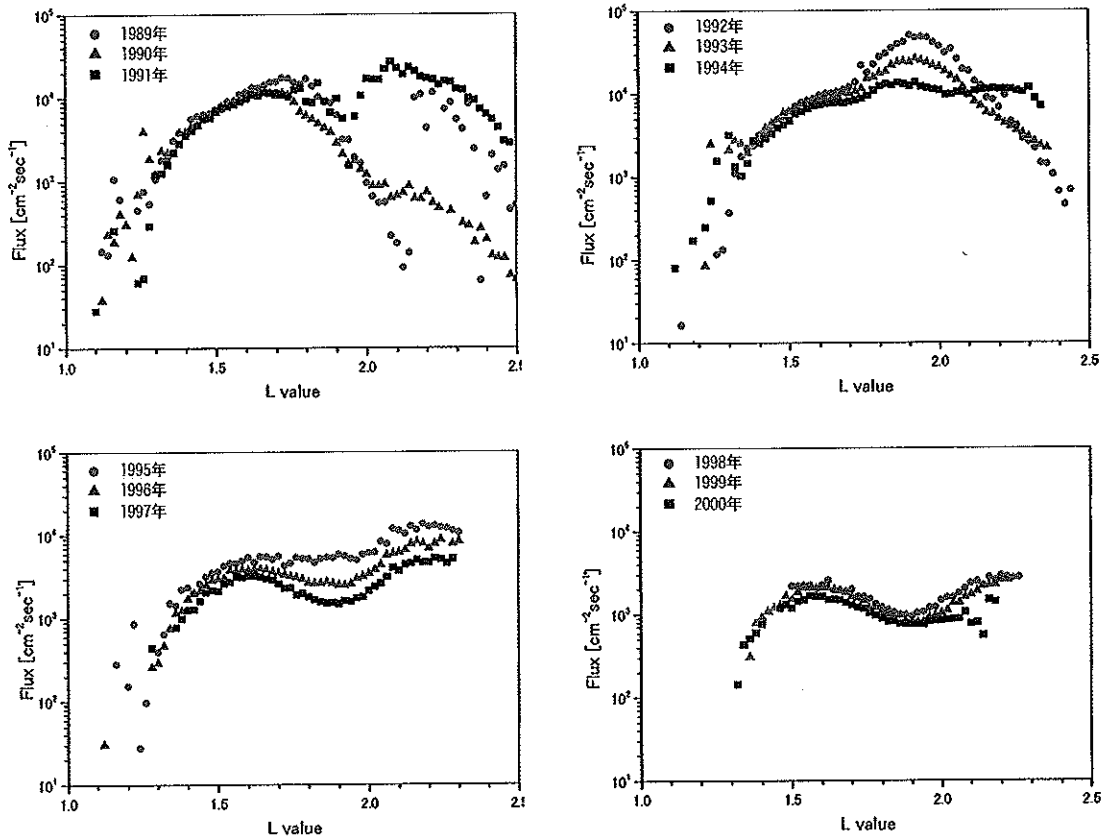


図3 磁気赤道上のα粒子の分布の変遷

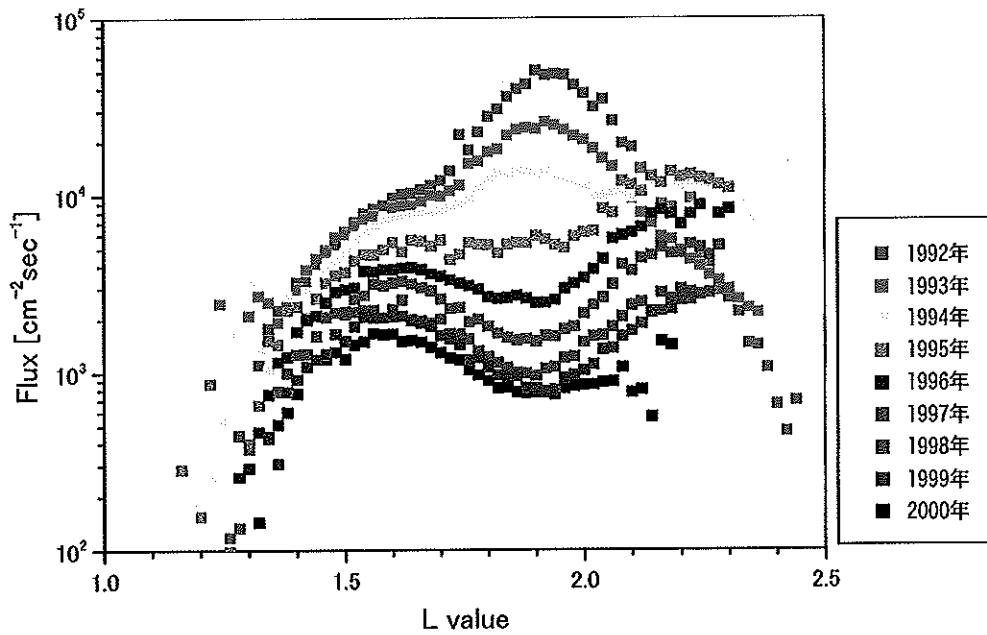


図4 磁気赤道上のα粒子の1992年から2000年までの分布の変遷

以上での磁場に捕捉され、それらが何らかの機構（電磁場の乱れなど）で内側のシェル（ $L=1.9$  付近）へ輸送、加速されエネルギーを増しその後フレアなどによる放射線帯への粒子の補給がなされず、消滅、落下するという一連の放射線帯の粒子の移動である。このような放射線帯粒子の一連の挙動は長期間放射線帯を観測することで初めて明らかになるのではなく、非常に意義のあるデータだと思われる。

### 3 結論

本研究では、1989年から2000年にわたって「あけぼの」に搭載されたRDM（放射線モニター）により観測された宇宙環境放射線、とくに放射線帯粒子に対して解析を行った。この12年間で2度の太陽活動の極大期、その間の極小期を含めた太陽周期1周期分の長期間の変動を確認出来た。

衛星の軌道から空間分布やL値毎、磁気緯度毎の解析では限られた領域のみについて解析を行ったが、電子、陽子、 $\alpha$ 粒子とも高エネルギーの粒子ほど内側の磁場に安定して捕獲されていること以外は、各粒子とも12年間の間にそれぞれが様々な変動を示していた。L値毎に各粒子の時系列変化を見てみたが、各L値で太陽フレア発生に伴う地磁気擾乱の直後、急激なフラックスの増加が確認され、その後の減衰時間にL値ごとに変化が見られた。特に内側の磁気シェルほど通常のフラックスに戻るのに多くの時間を要したが、この理由として、外側の磁場に捕獲された荷電粒子が内側の磁場に輸送、加速され少しずつ内側へエネルギーを増しながら移動する事で、少しずつ低L値の領域に対する粒子の補給が行われるために、フラックスが戻るのに時間を要すると考えられる。

「あけぼの」の軌道上の制限などから、主に内帯の磁気赤道上についてのみNASAのモデルと比較を行ったが、全体的によく一致したのは0.95～2.5MeVの電子であり、電子、陽子ともNASAのモデルほど各粒子エネルギー毎にフラックスの差は見られなかった。陽子については、観測しているエネルギーに相当するモデルでは見られなかった太陽活動に伴った変動が確認出来た（特に6.3～15MeV）。さらに $\alpha$ 粒子の磁気赤道上での分布の変遷で、太陽フレア後の特定のL値におけるフラックスのゆるやかな時間的変動が確認出来た。恐らくこれも $\alpha$ 粒子の拡散の様子を表わしたもので、このような長期間に渡る緩やかな挙動は、長期間にわたる衛星の観測により始めて観測されるものであり、非常に興味深い現象である。

これらの現象を全て説明するには放射線帯粒子の挙動について、地磁気のみならず、放射線帯の起源から輸送、加速、拡散、消滅などの諸現象の解明と理解が必要であり、本研究中ではその原因を推測するのみであった。しかしながら12年間という当初の衛星の寿命を超えた長期間の宇宙環境放射線の連続的な測定とその解析結果は、宇宙空間物理学のみならず、今後の宇宙における様々なミッションにおいて大きな意味を持つものと思われる。今後ともこの様な観測と、そこから得られたデータをもとに、世界中で積極的に議論を続けることで、放射線帯の複雑なメカニズムの解明がすすむことが望まれる。

### 謝辞

「あけぼの」RDMのデータを提供していただいた東京工業大学大学院理学研究科地球惑星科学学科の長井嗣信教授にお礼申し上げます。

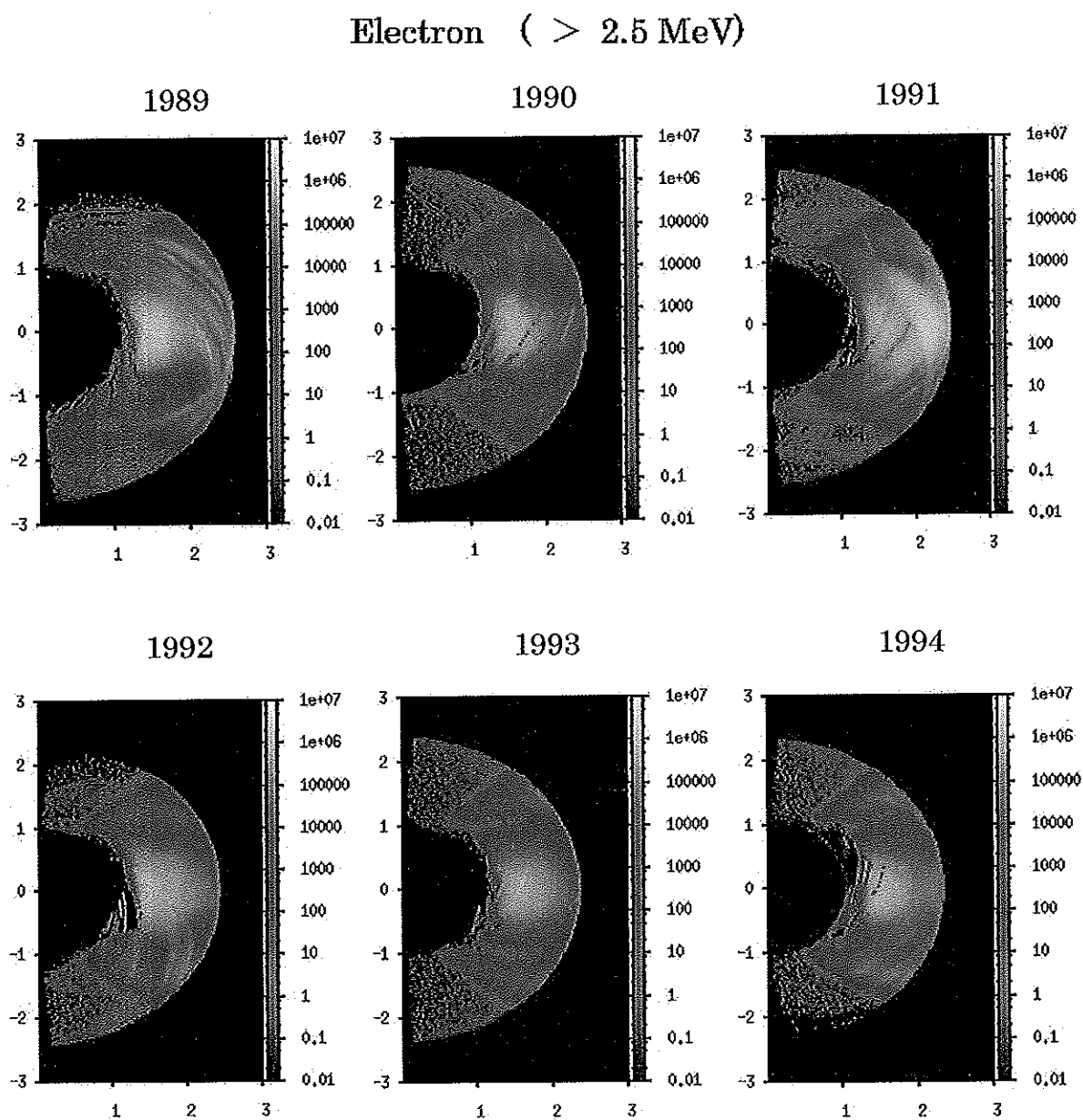
### 参考文献

- [1] EXOS-D 中間報告書, 文部省宇宙科学研究所, 1988
- [2] D. M. Sawyer, J. I. Vette. AP-8 Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Solar Minimum. NSSDC/WDC-A-R&S 76-06, NASA/Goddard Space Flight Center, 1976

- [3] G. W. Singley, J. I. Vette. The AE-8 Trapped Electron Model Environment. NSSDC/WDC-A-R&S 91-24, NASA/Goddard Space Flight Center, 1991
- [4] 高木俊治, 中村尚司, 河野毅, 塩野登, 林克己, 槇野文命. 「あけぼの」衛星による放射線帯粒子と半導体素子の損傷の測定. 宇宙科学研究所報告, Vol. 35, 宇宙科学研究所, 1992
- [5] S. Takagi, T. Nakamura, T. Kohno, N. Shiono, and F. Makino. Observation of Space Radiation Environment with EXOS-D. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. NS - 40, No. 6, 1993
- [6] 高木俊治, 中村尚司, 河野毅, 槇野文命. 「あけぼの」衛星で観測された放射線帯粒子の分布と変動. 宇宙科学研究所報告, Vol. 80, 宇宙科学研究所, 1995

## 補遺 「あけぼの」 による観測データ

(A) 放射線帯粒子の空間分布

図 A.1 r- 入座標での電子 ( $> 2.5 \text{ MeV}$ ) の空間分布の変遷 (1989-1994)

Electron ( $> 2.5 \text{ MeV}$ )

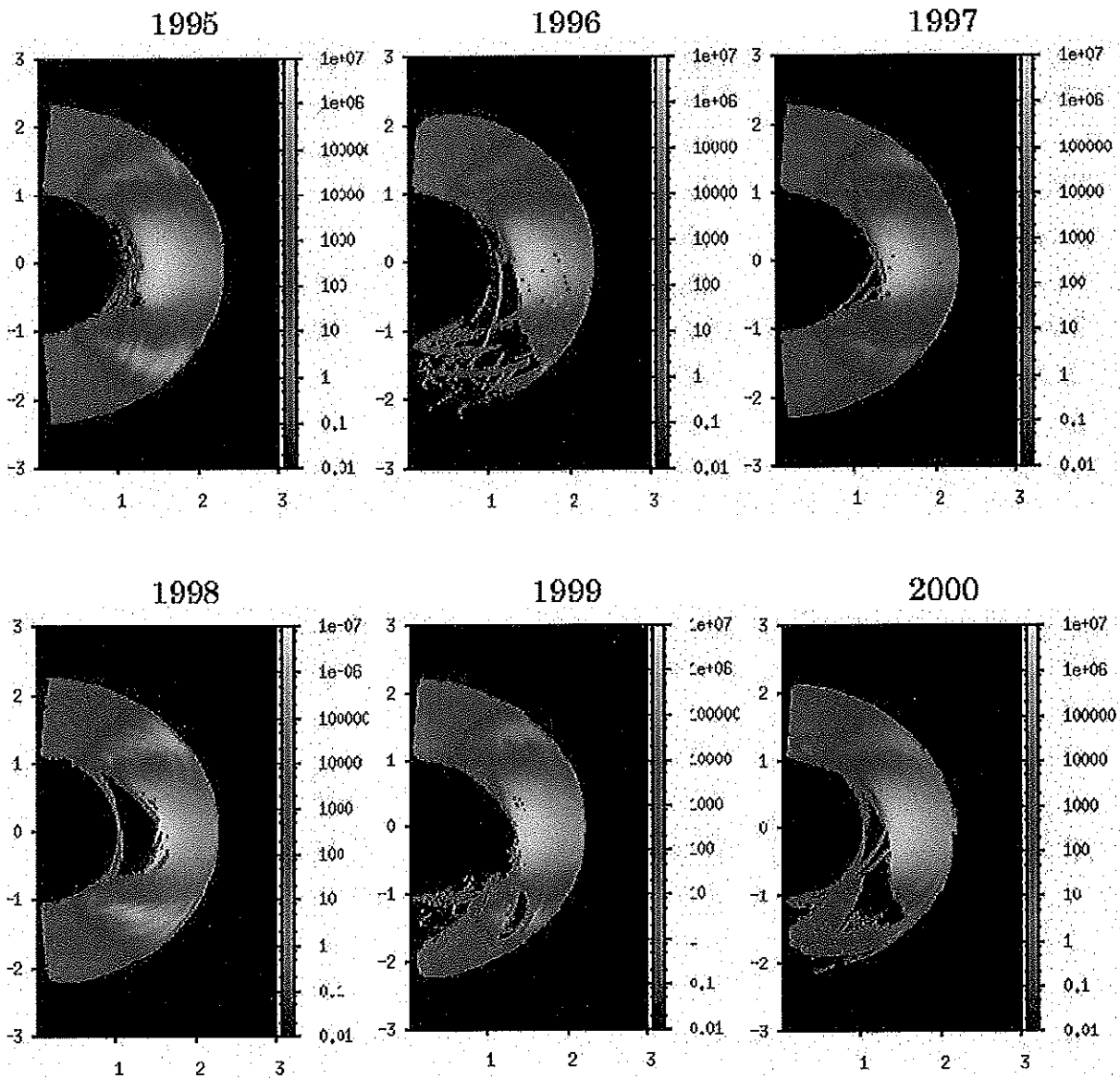


図 A.2 r- $l$ 座標での電子 ( $> 2.5 \text{ MeV}$ ) の空間分布の変遷 (1995-2000)

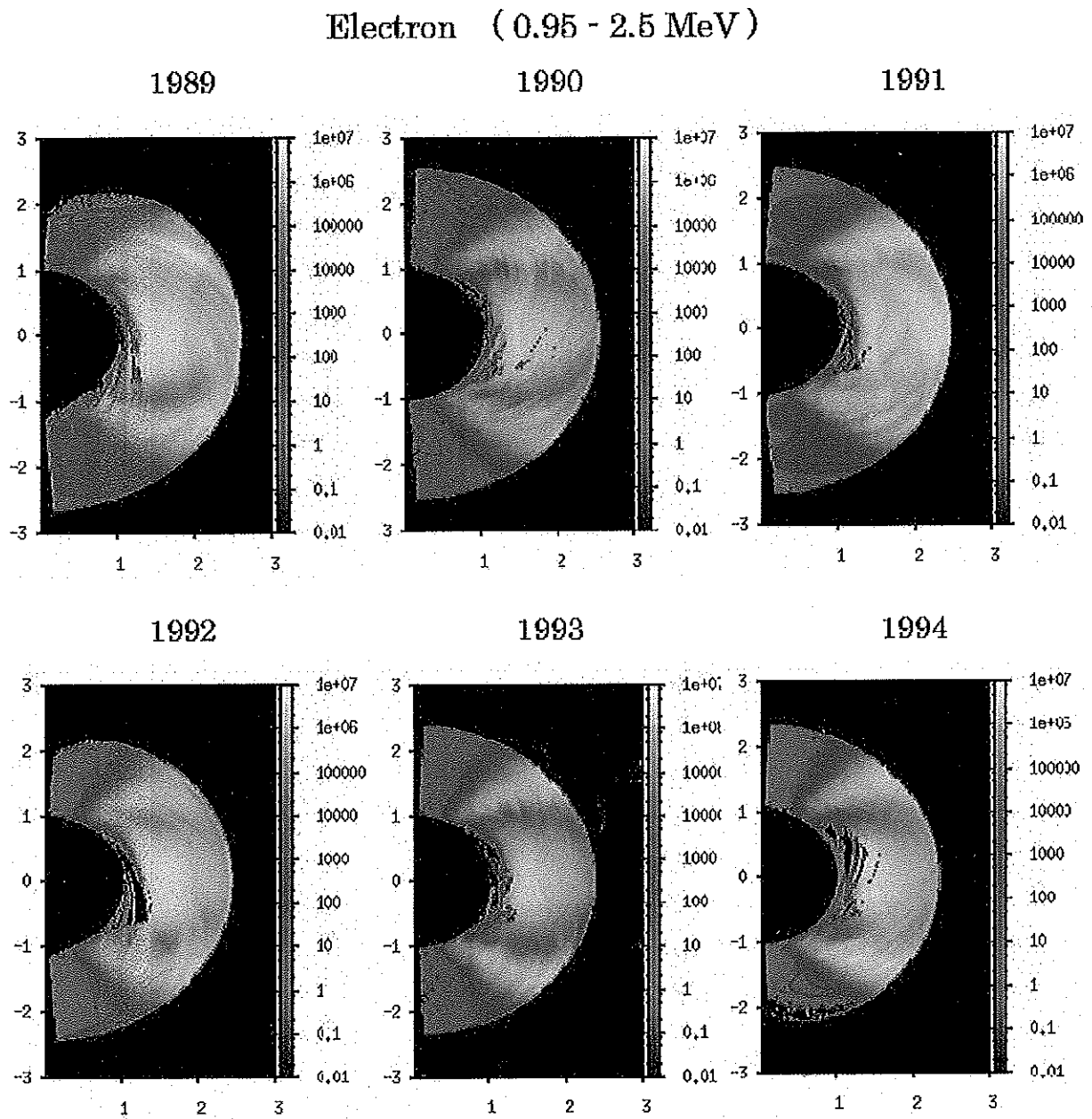
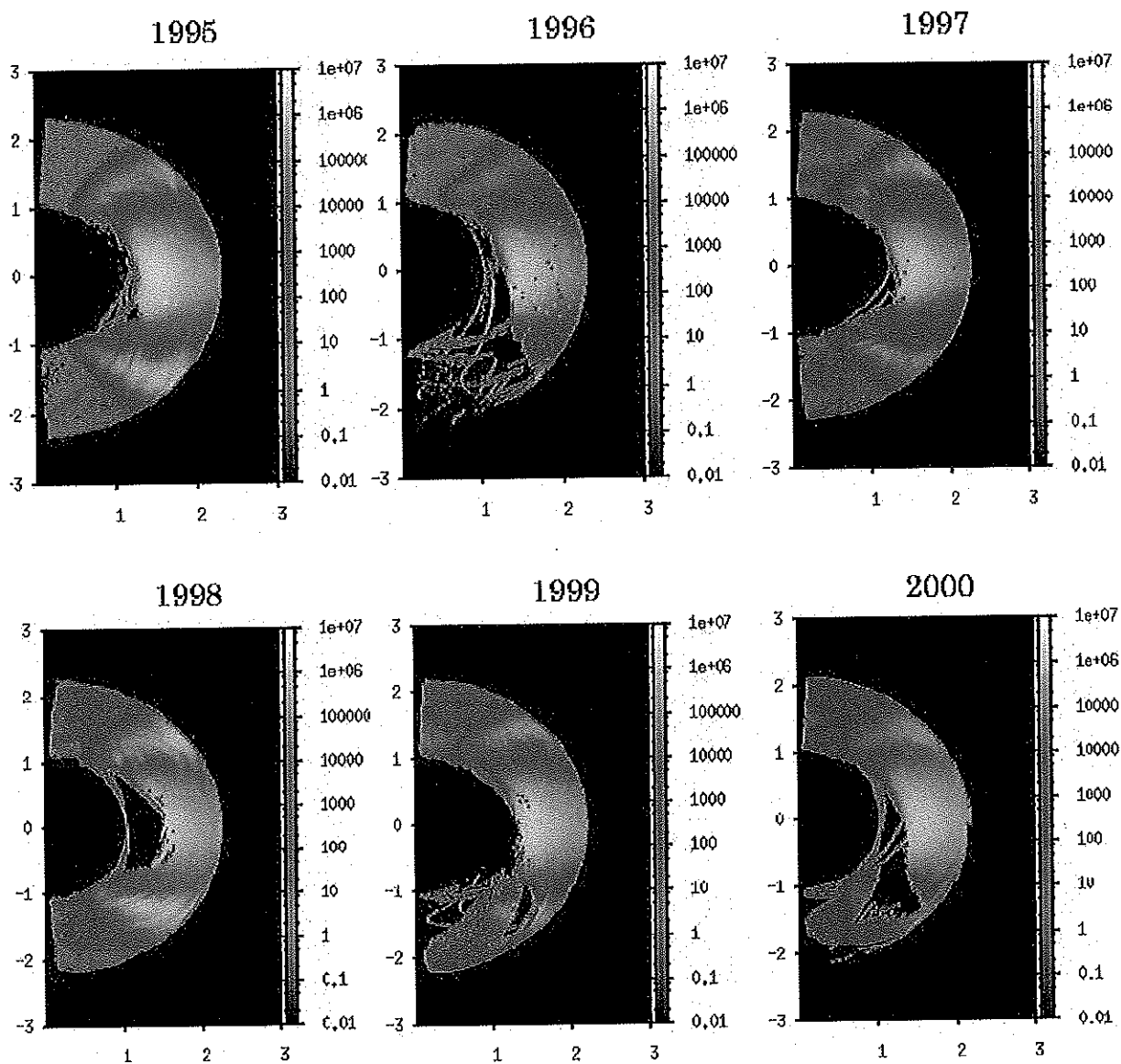


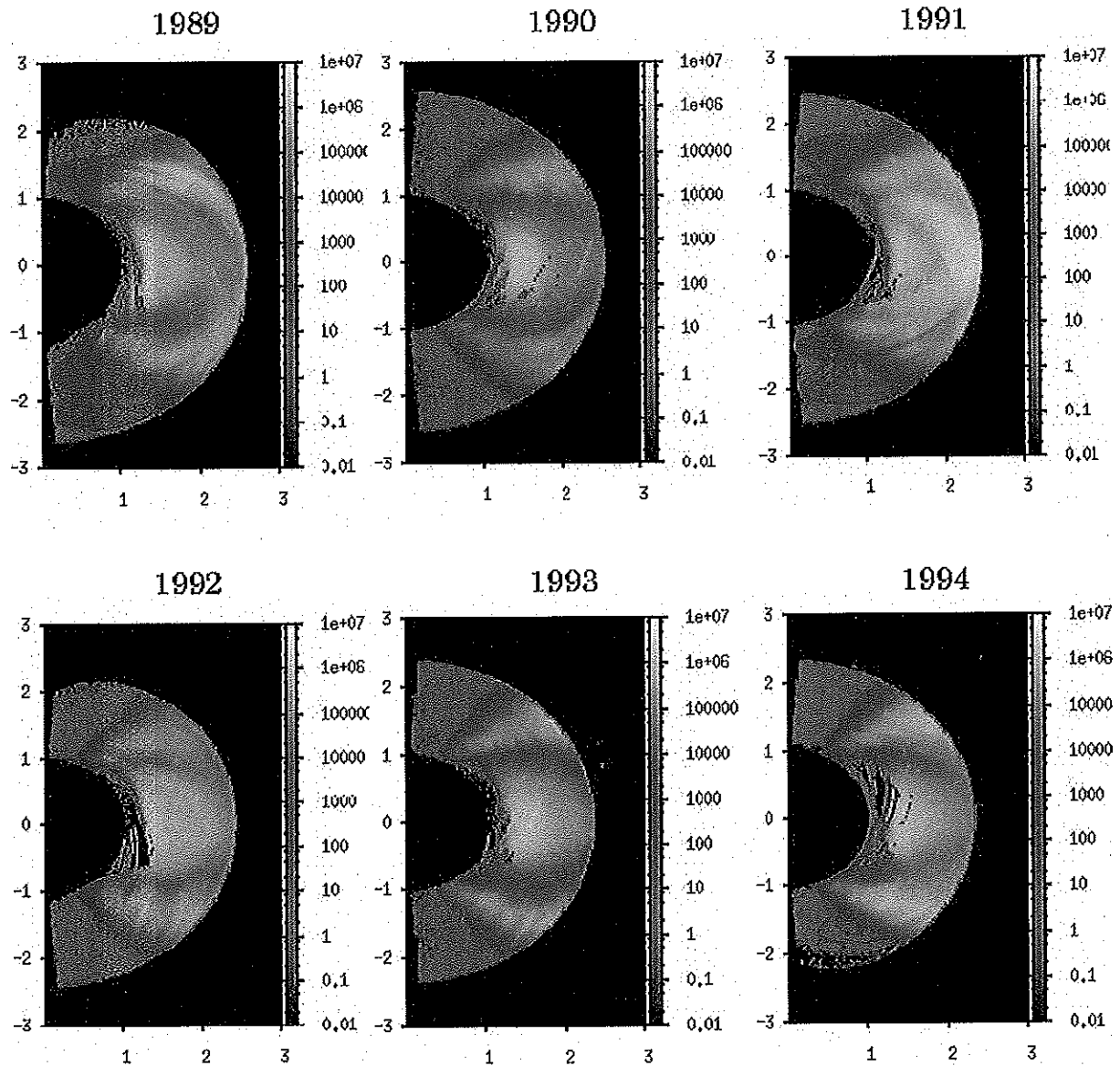
図 A.3 r- $\lambda$ 座標での電子 (0.95-2.5MeV) の空間分布の変遷 (1989-1994)

Electron (0.95 - 2.5 MeV)



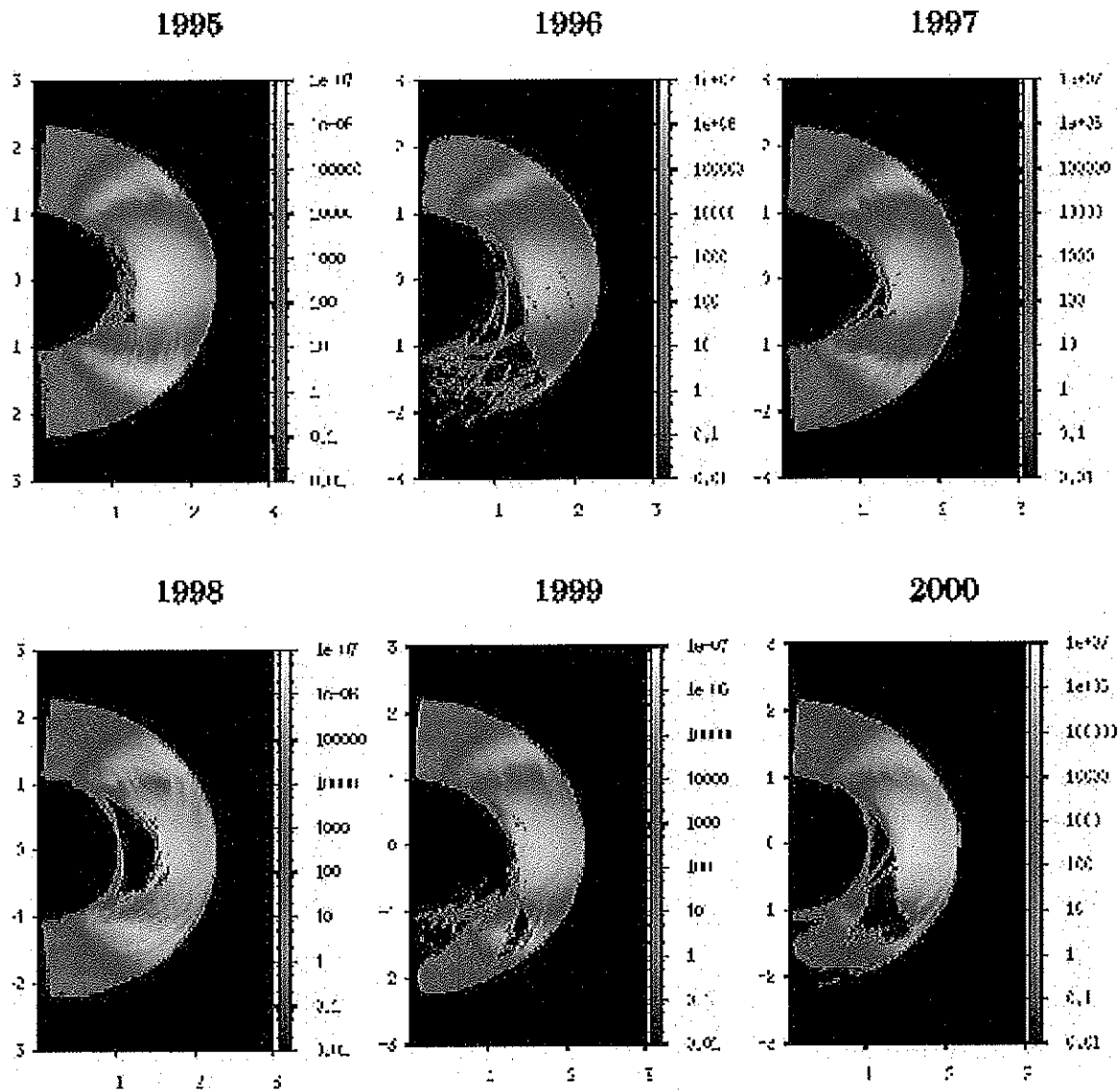
図A.4 r- l座標での電子 (0.95-2.5MeV) の空間分布の変遷 (1995-2000)

## Electron (0.3 - 0.95 MeV)

図 A.5  $r$ - $\lambda$ 座標での電子 (0.3-0.95MeV) の空間分布の変遷 (1989-1994)



Electron (0.3 - 0.95 MeV)



図A.6 r-l座標での電子 (0.3-0.95MeV) の空間分布の変遷 (1995-2000)

## Proton (29 - 62 MeV)

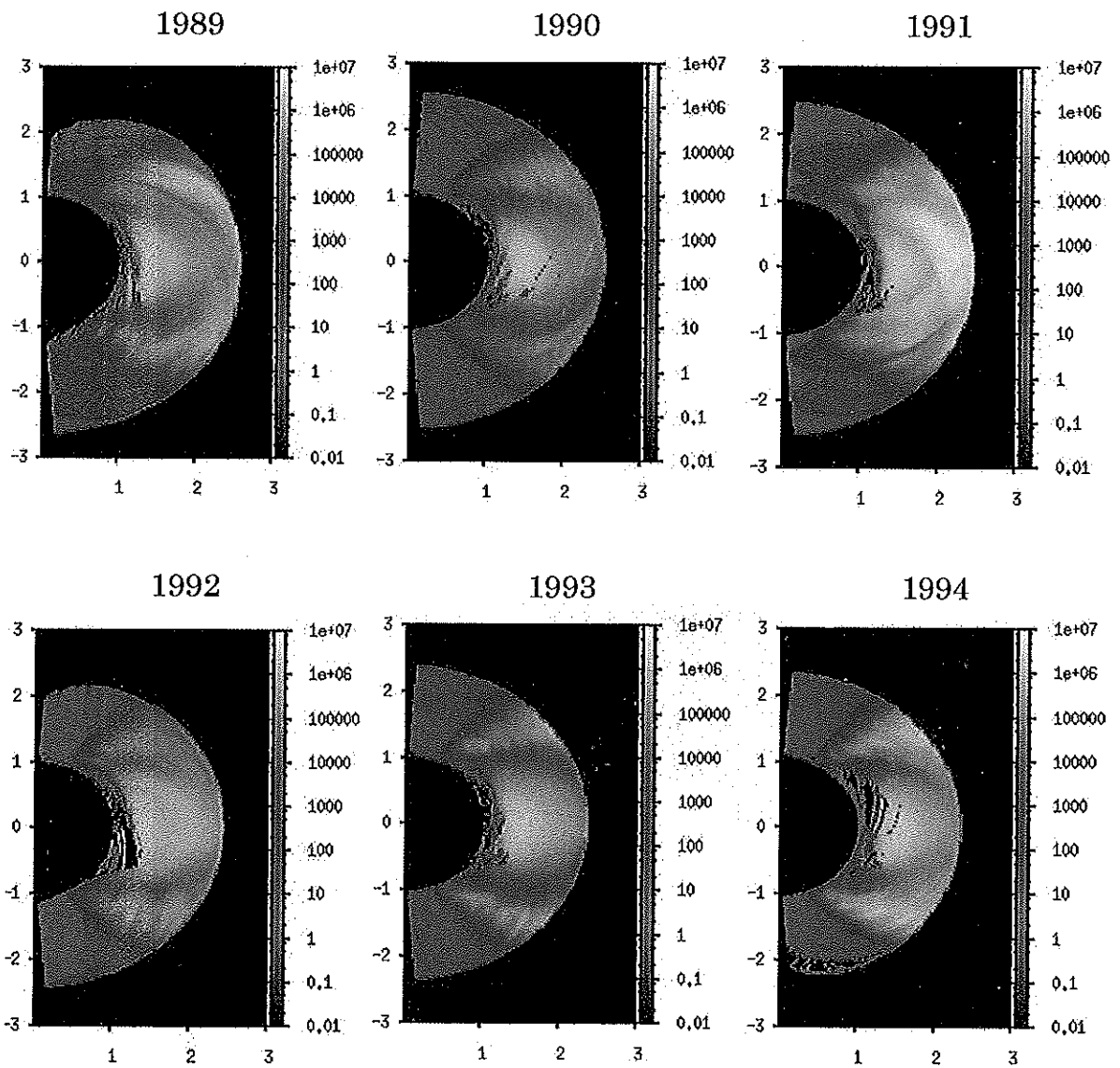
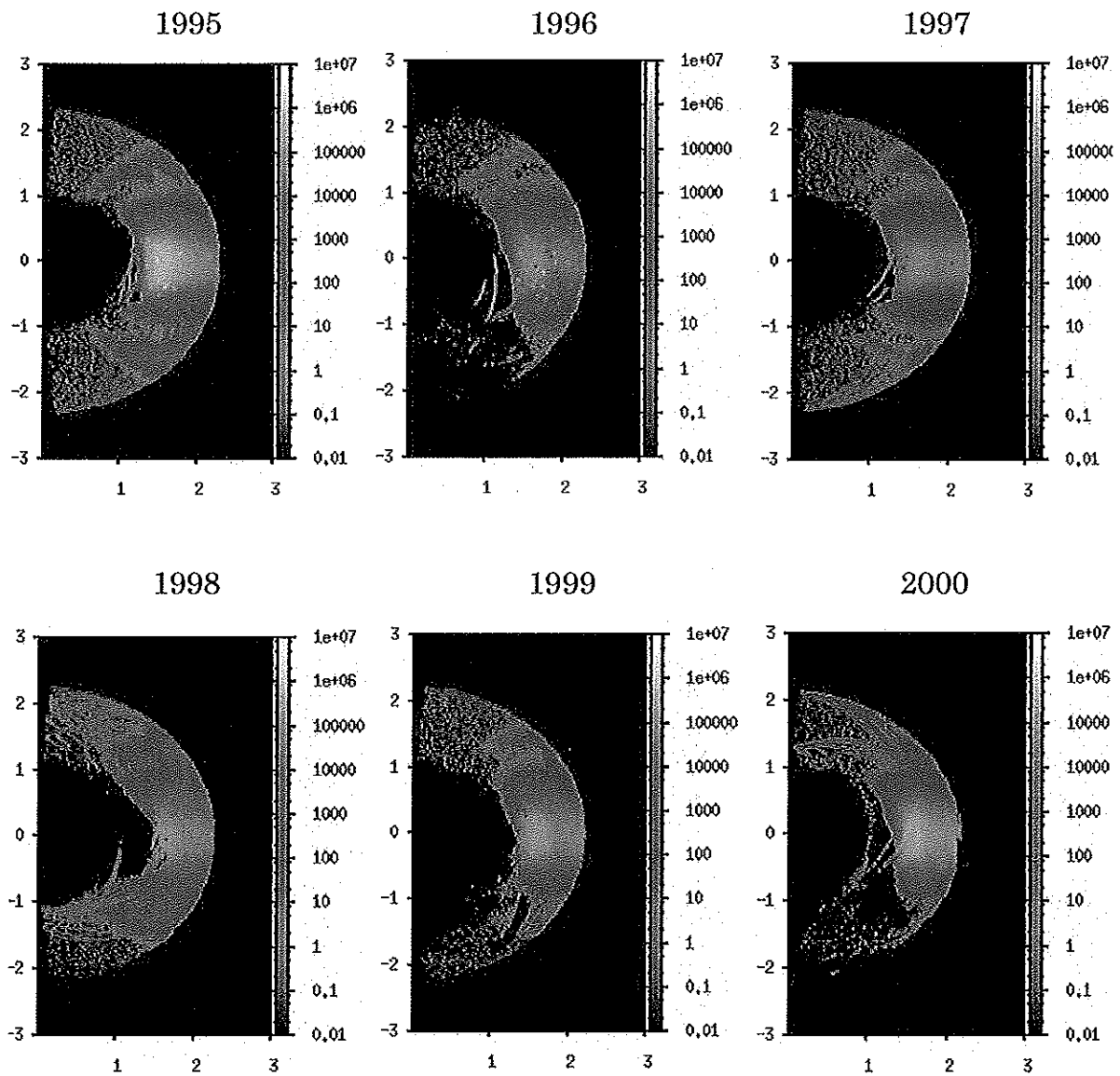
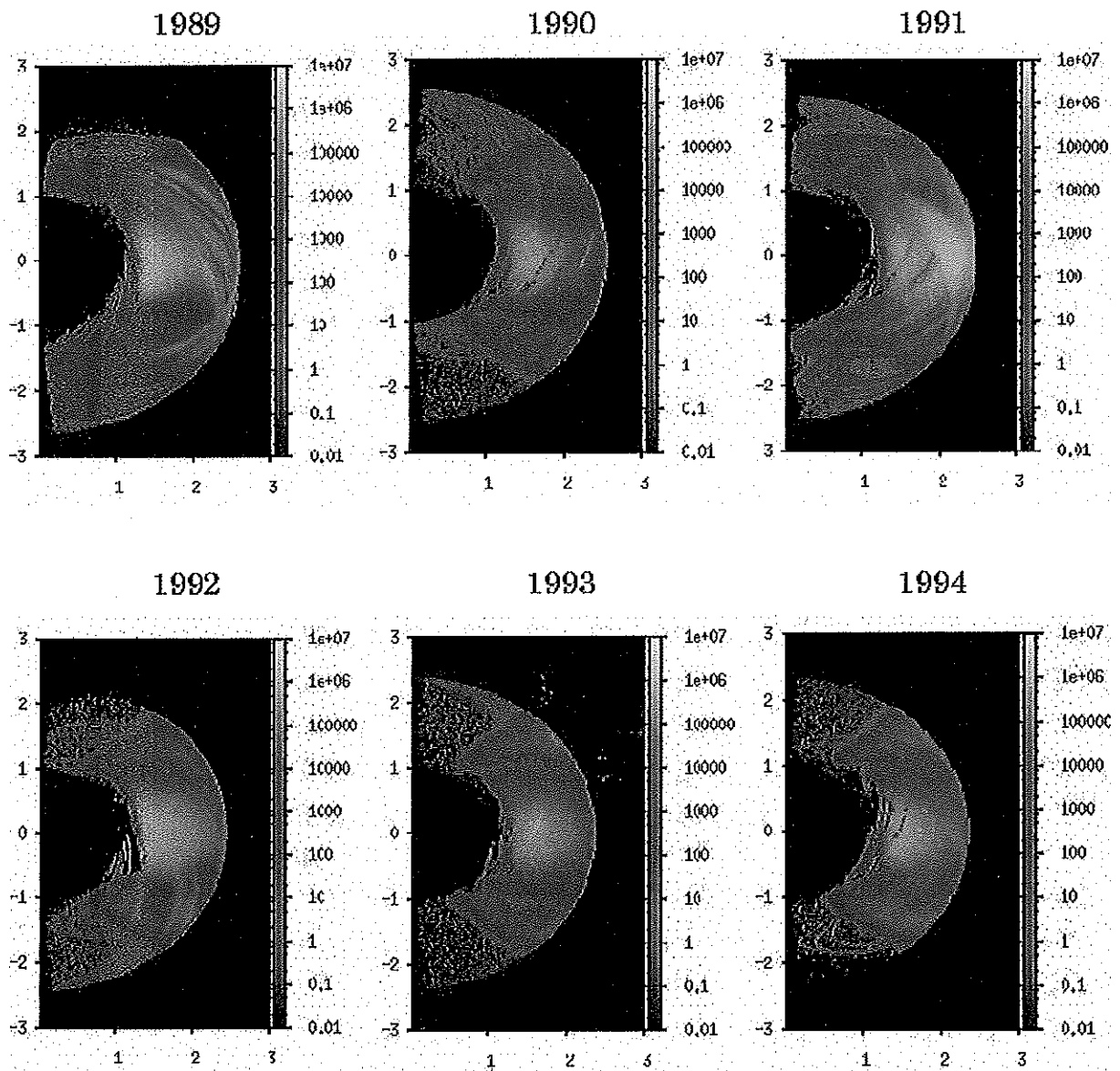


図 A.7  $r$ - $\lambda$ 座標での電子 (29-62MeV) の空間分布の変遷 (1989-1994)

## Proton (29 - 62 MeV)

図 A.8  $r$ - $\lambda$ 座標での電子 (29-62MeV) の空間分布の変遷 (1995-2000)

## Proton (15 - 29 MeV)

図 A.9  $r$ - $\lambda$ 座標での電子 (15-29MeV) の空間分布の変遷 (1989-1994)

Proton (15 - 29 MeV)

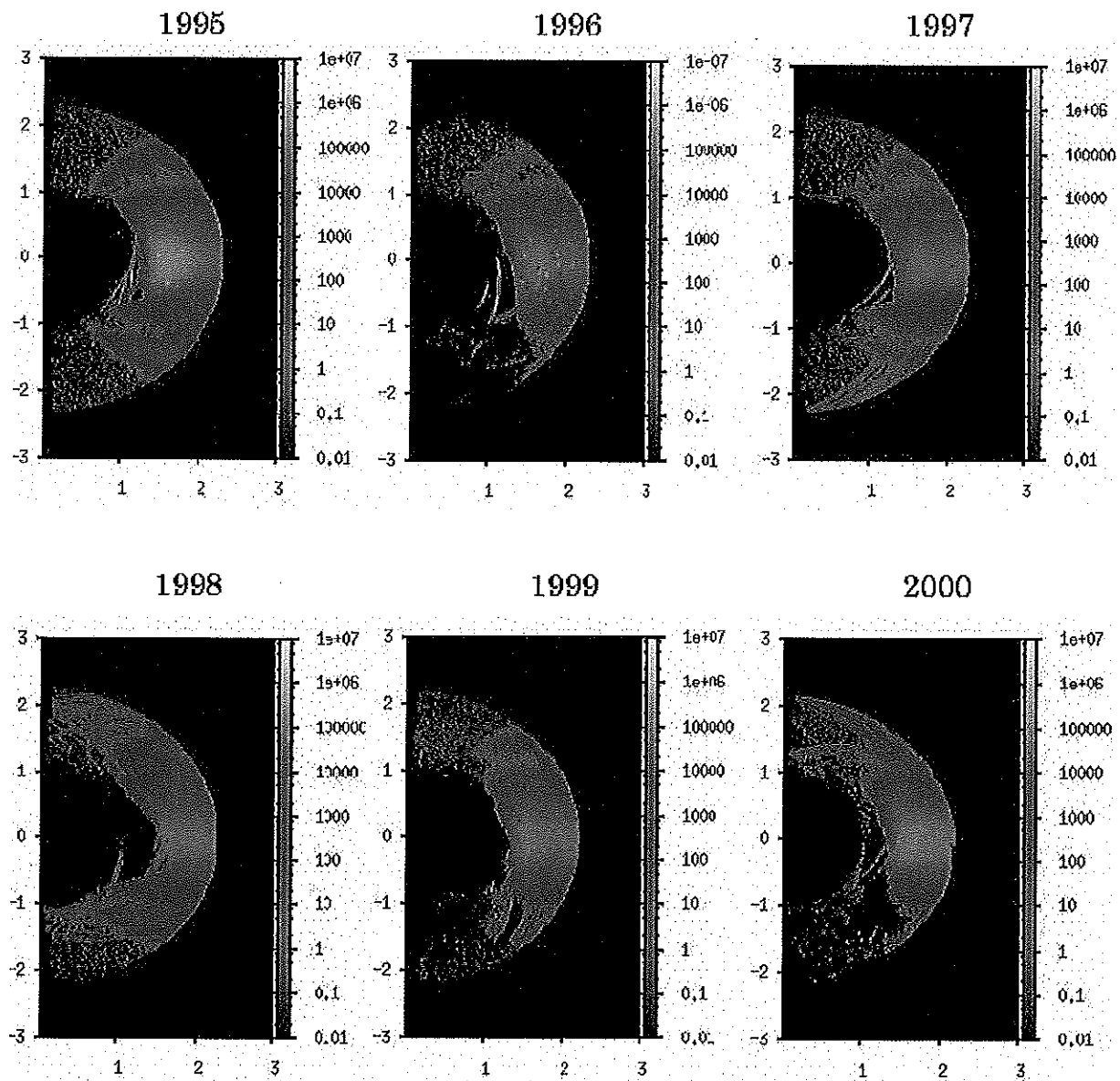


図 A.10 r- $\lambda$ 座標での電子 (15-29MeV) の空間分布の変遷 (1995-2000)

## Proton (6.3 - 15 MeV)

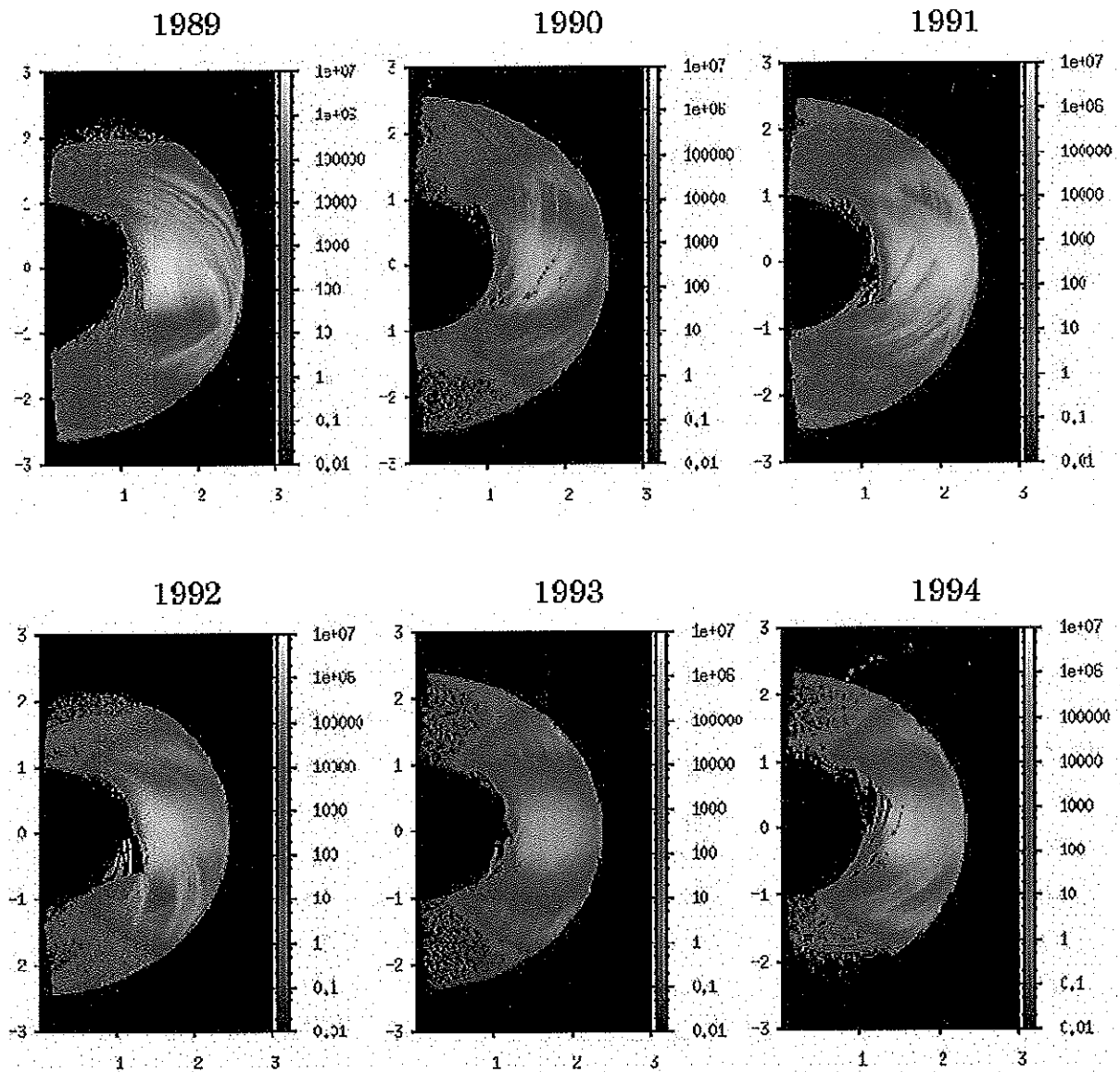
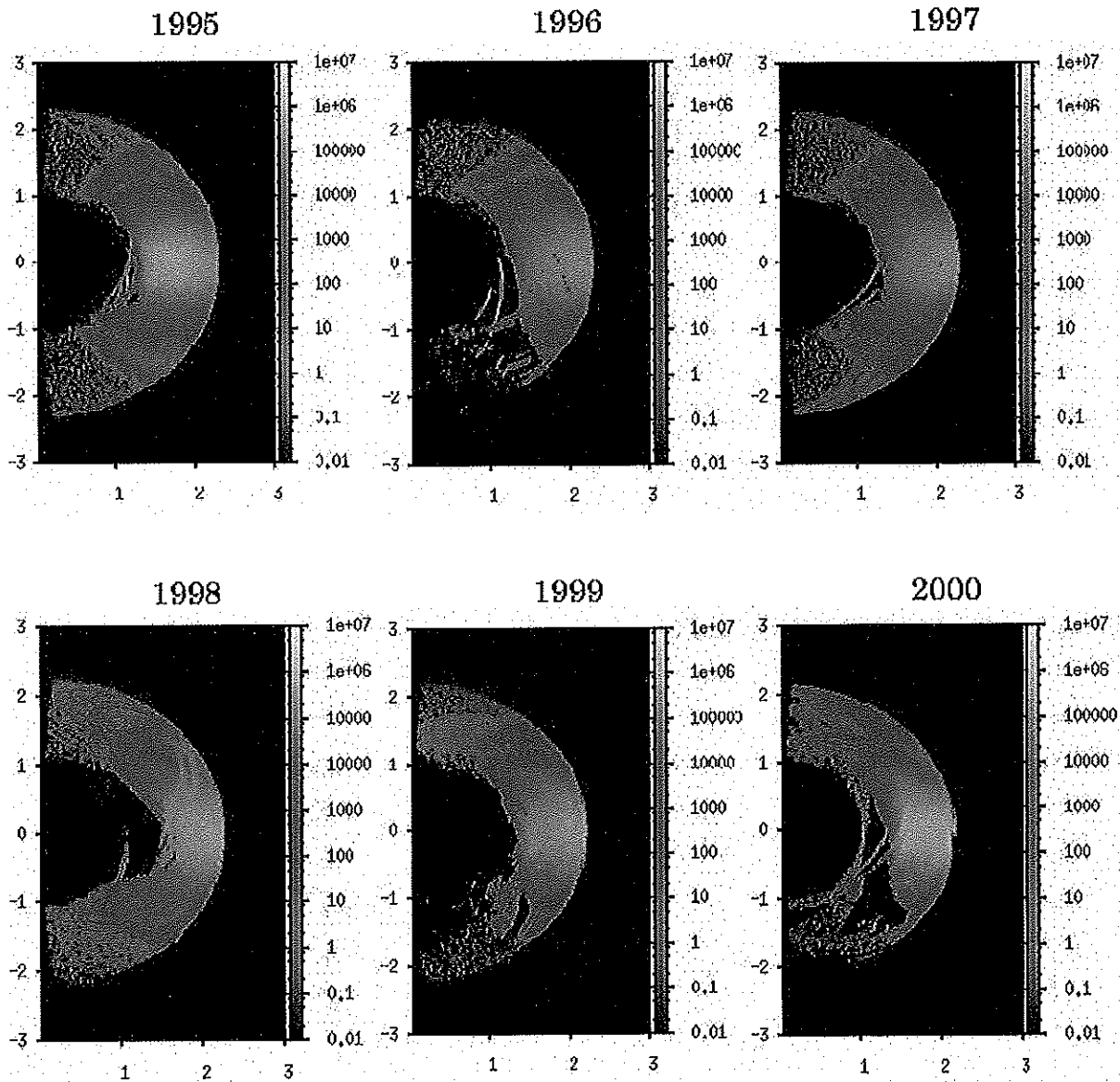
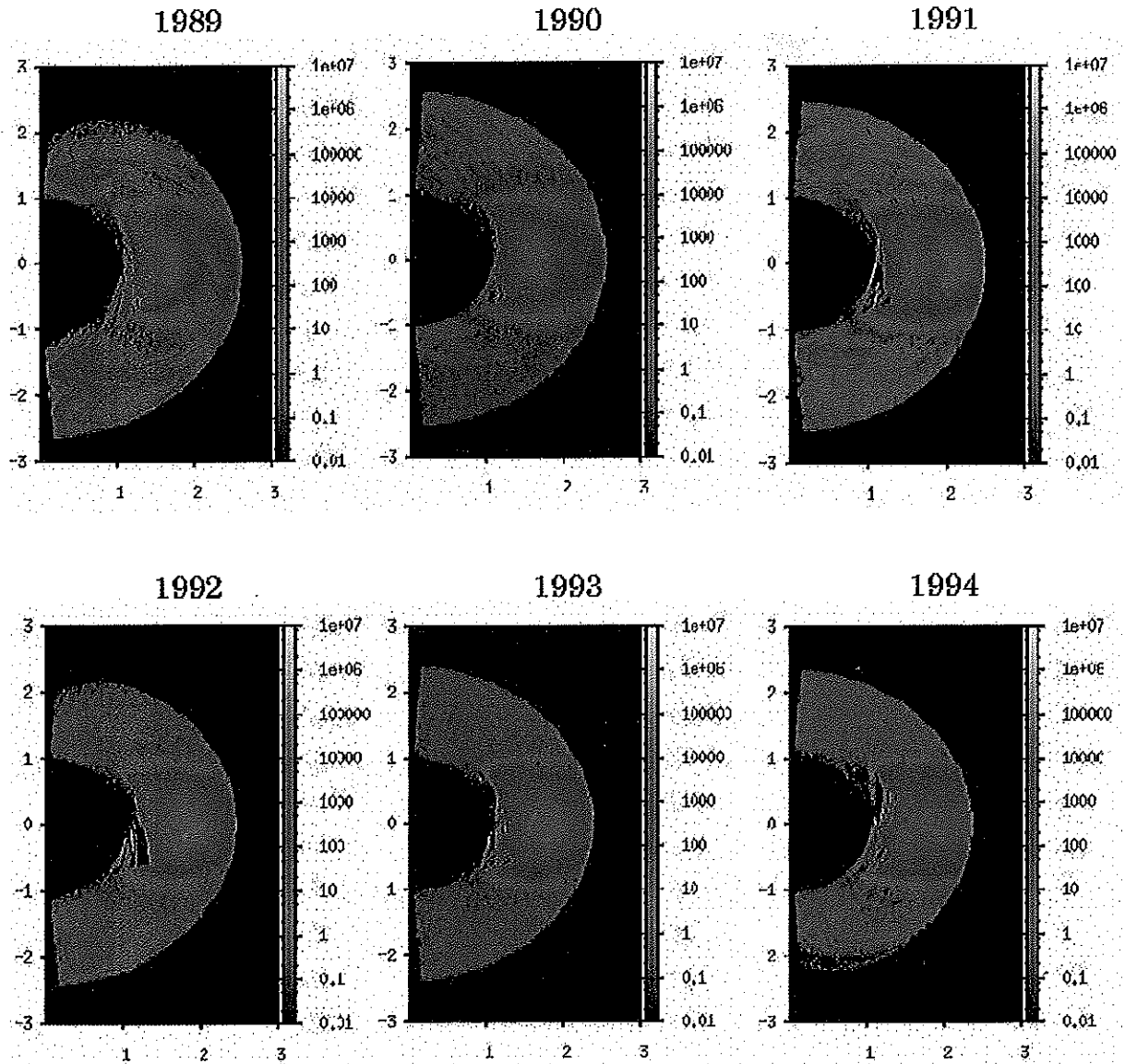


図 A.11  $r$ - $\lambda$ 座標での電子 (6.3-15MeV) の空間分布の変遷 (1989-1994)

## Proton (6.3 - 15 MeV)

図 A.12  $r$ - $\lambda$ 座標での電子 (6.3-15MeV) の空間分布の変遷 (1995-2000)

## Alpha Particle (15 - 62 MeV)

図 A.13  $r$ - $\lambda$ 座標での $\alpha$ 粒子の空間分布の変遷 (1989-1994)



### Alpha Particle (15 - 62 MeV)

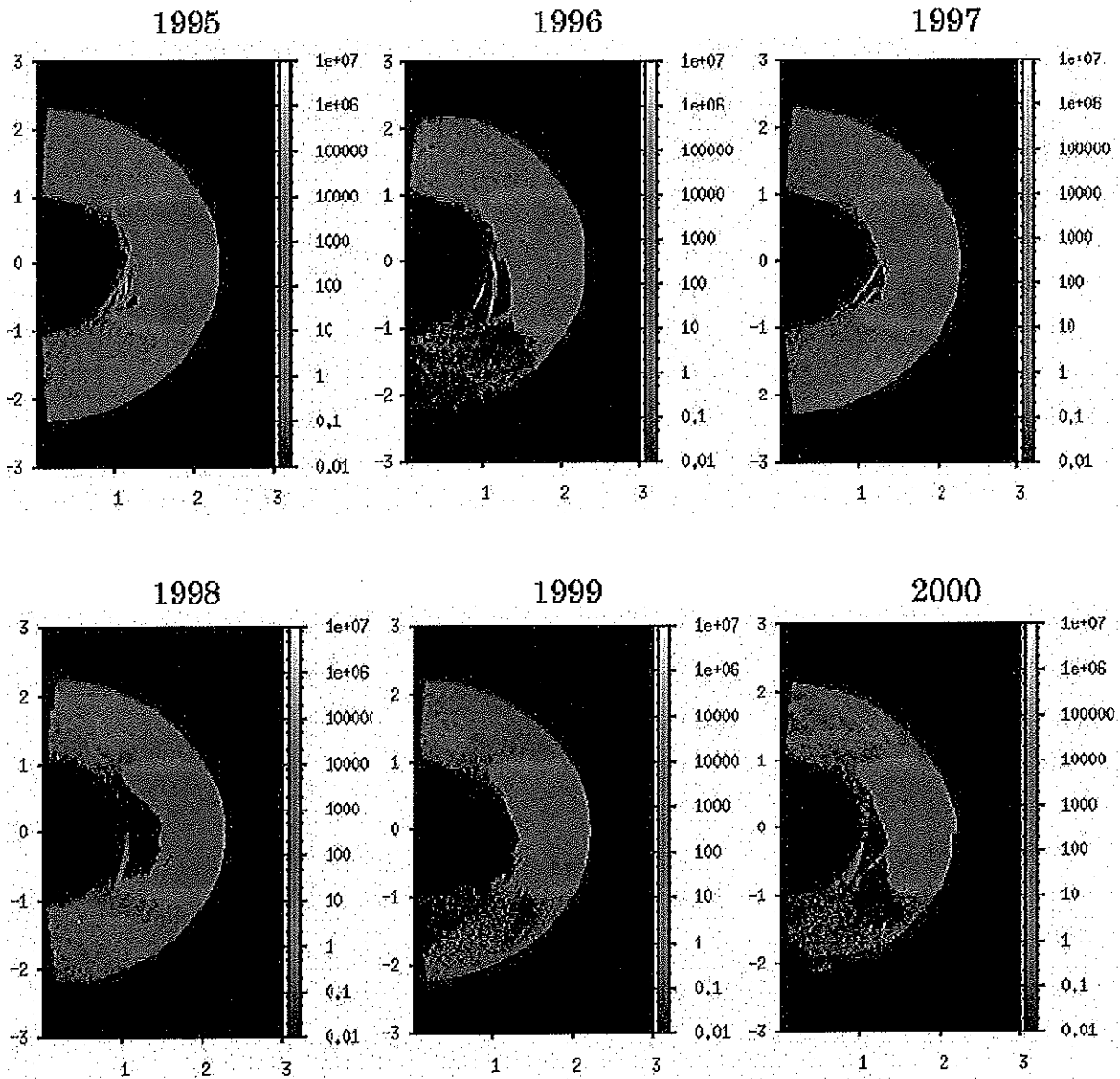
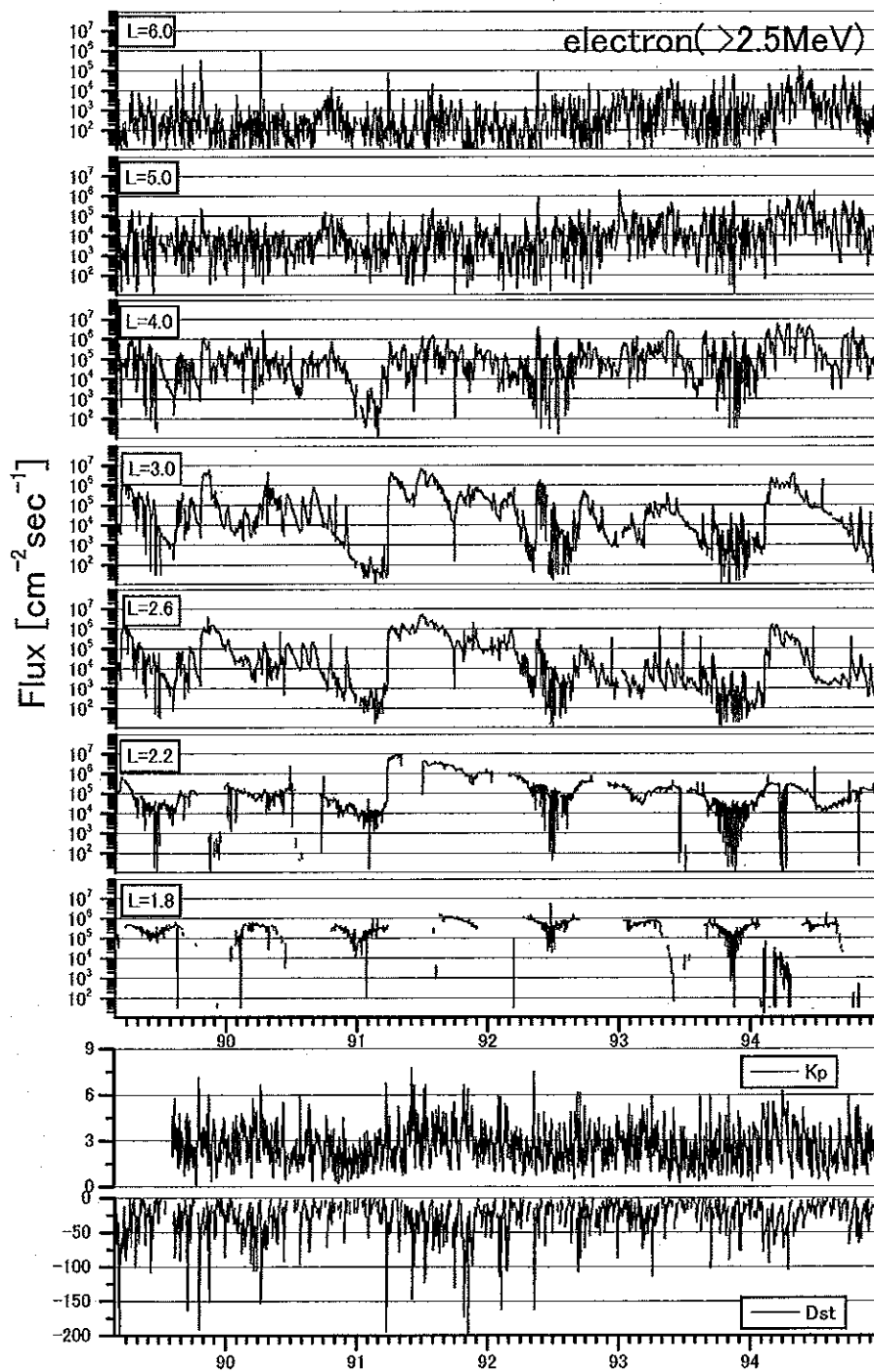


図 A.14  $r$ - $\lambda$ 座標での $\alpha$ 粒子の空間分布の変遷 (1995-2000)

## (B) 放射線帯粒子のL値毎のフラックス変動

図 B.1 電子 ( $>2.5$ MeV) の L 値毎のフラックス変動 (1989-1994)

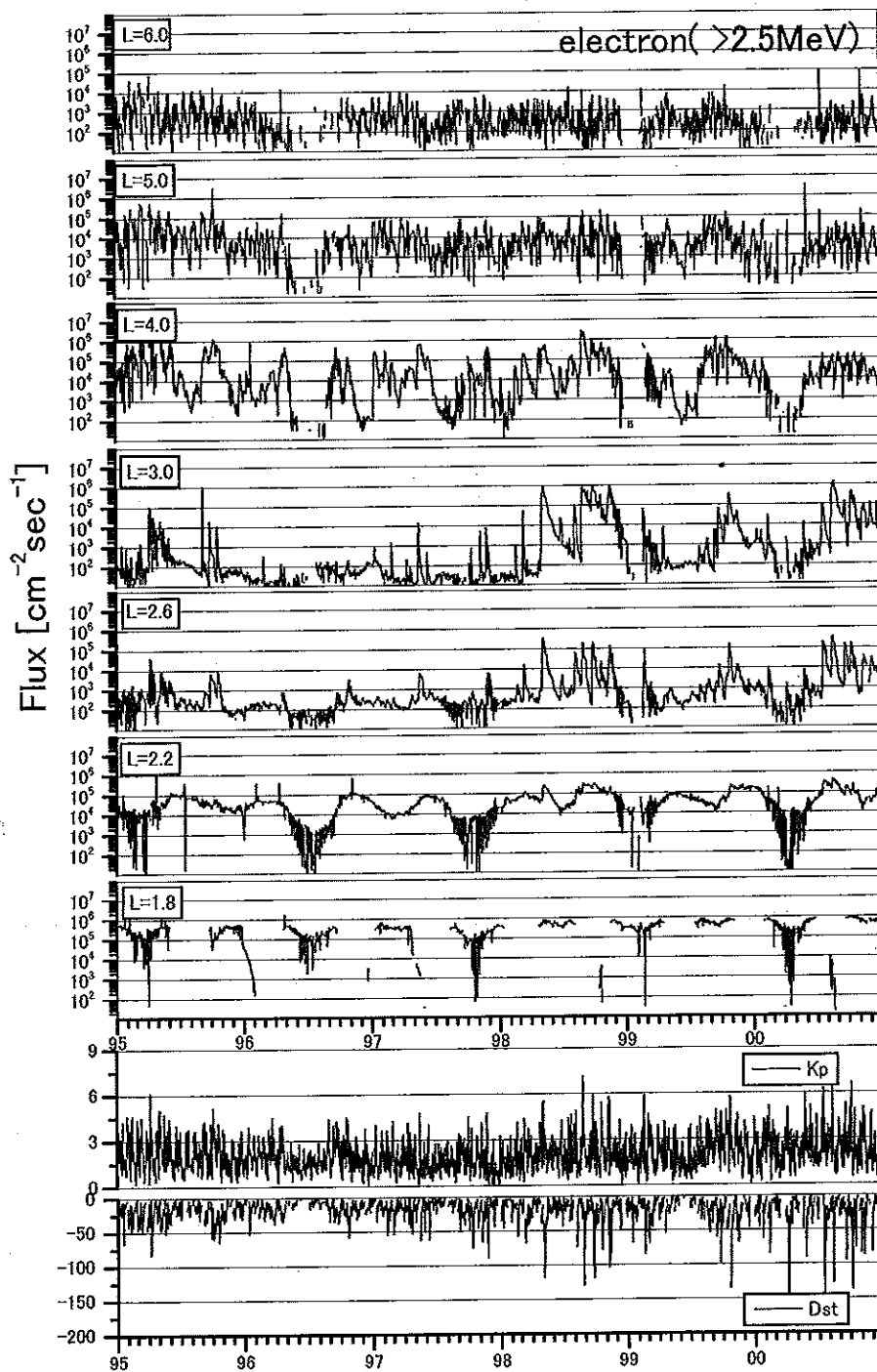


図 B.2 電子 (> 2.5MeV) の L 値毎のフラックス変動 (1995-2000)

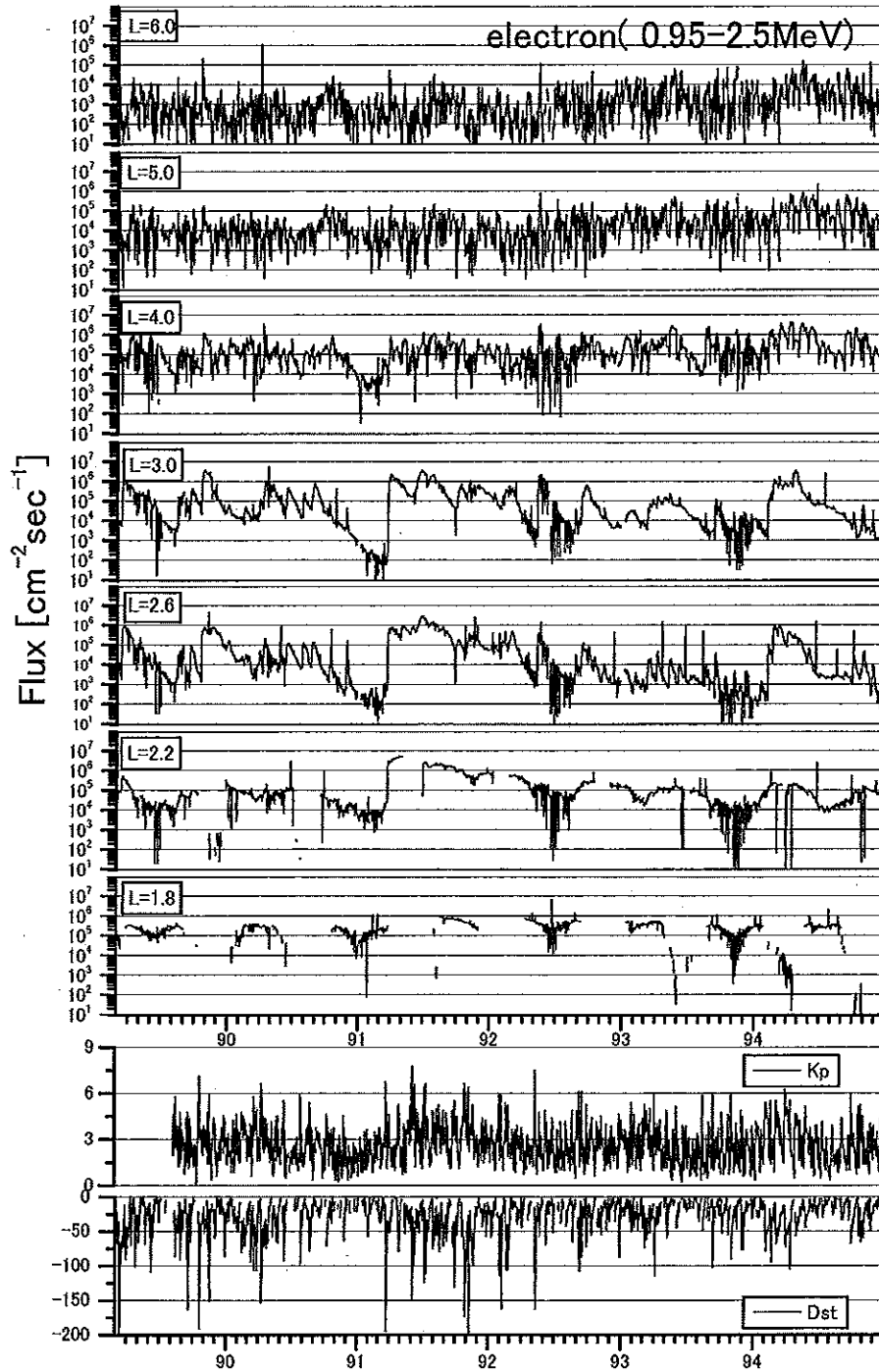
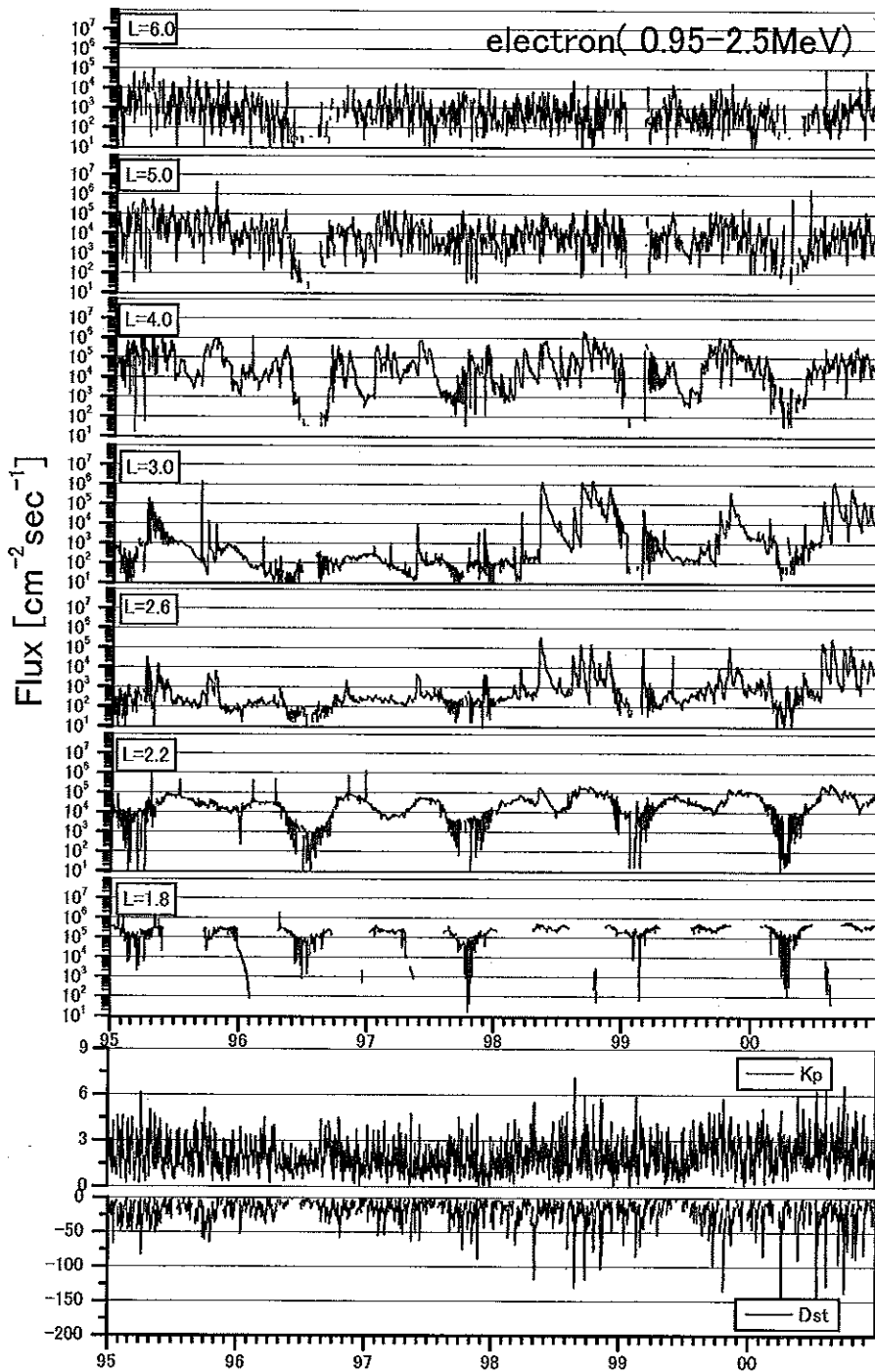


図 B.3 電子 (0.95-2.5MeV) の L 値毎のフラックス変動 (1989-1994)



図B.4 電子 (0.95-2.5MeV) のL値毎のフラックス変動 (1995-2000)

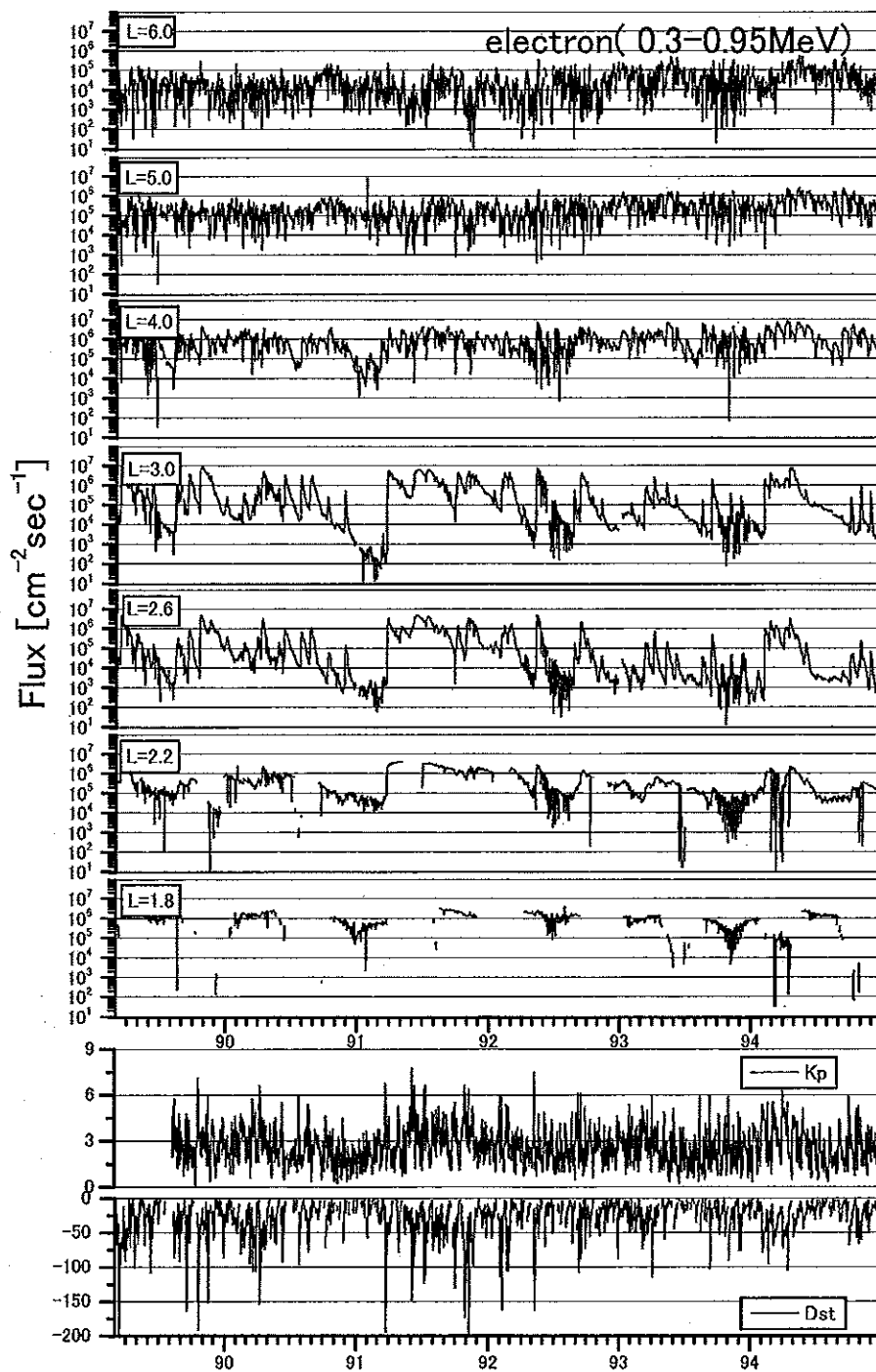


図 B.5 電子 (0.3-0.95MeV) の L 値毎のフラックス変動 (1989-1994)

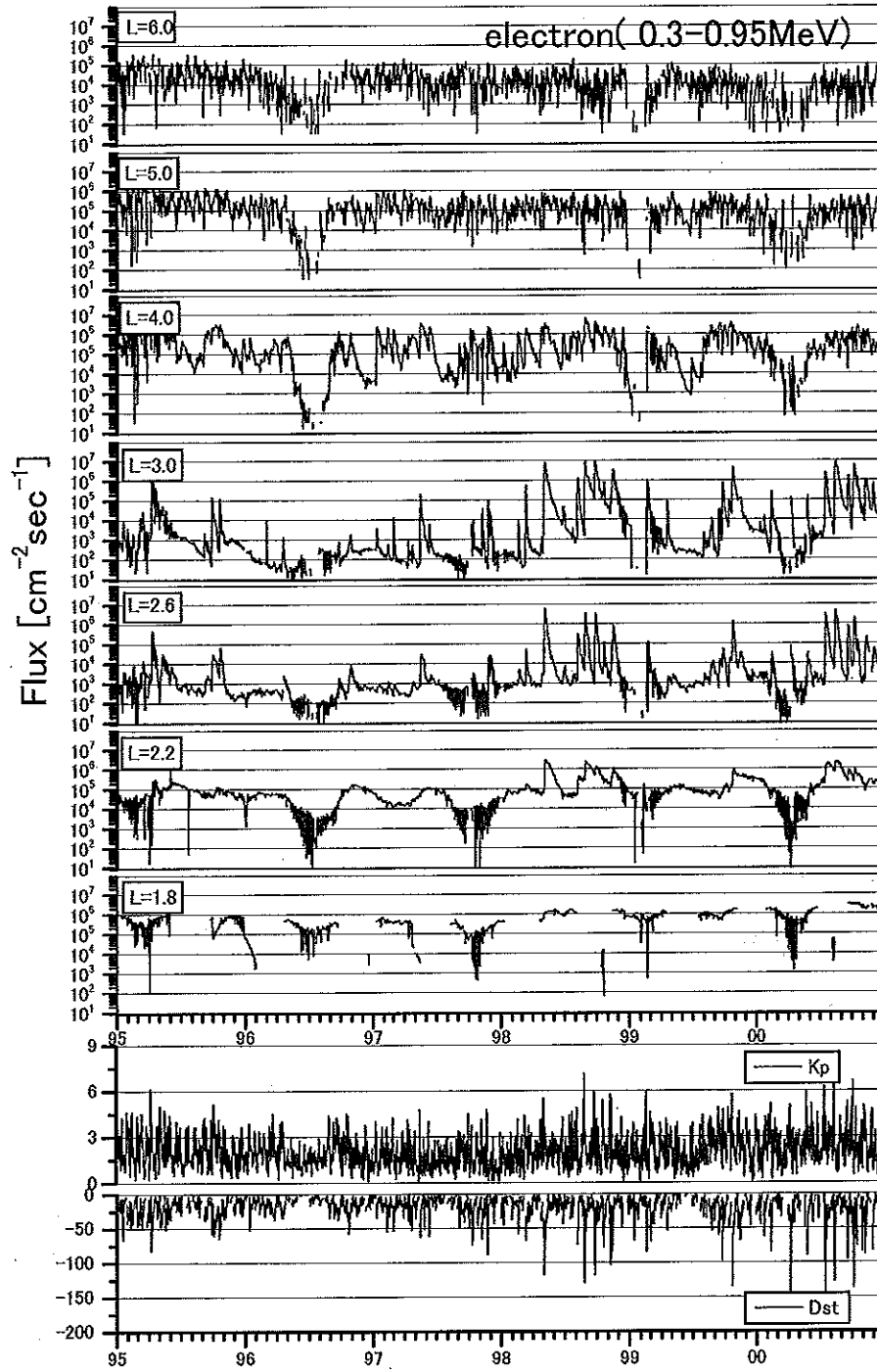


図 B.6 電子 (0.3-0.95MeV) の L 値毎のフラックス変動 (1995-2000)

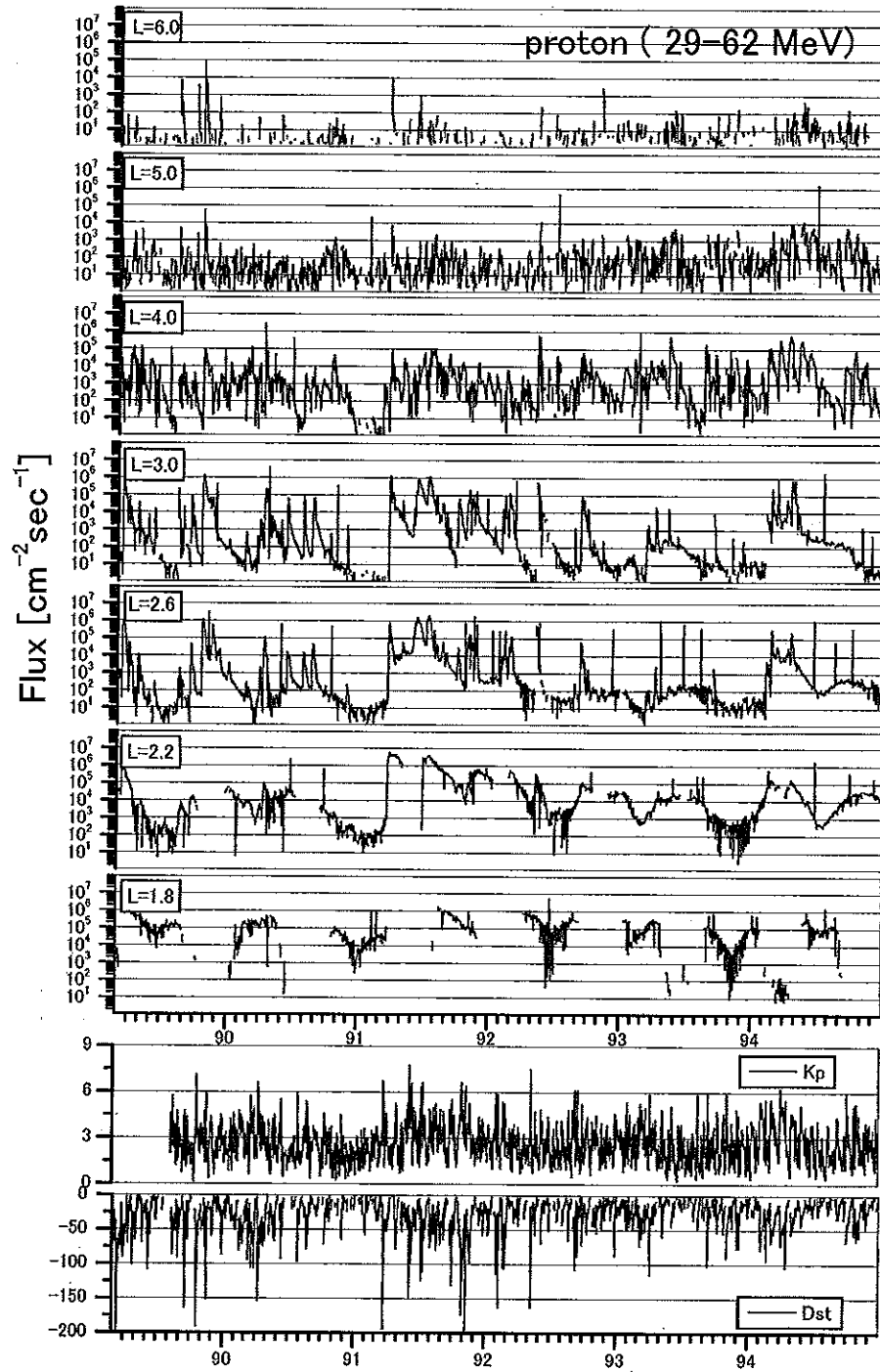


図 B.7 陽子 (29-62MeV) の L 値毎のフラックス変動 (1989-1994)



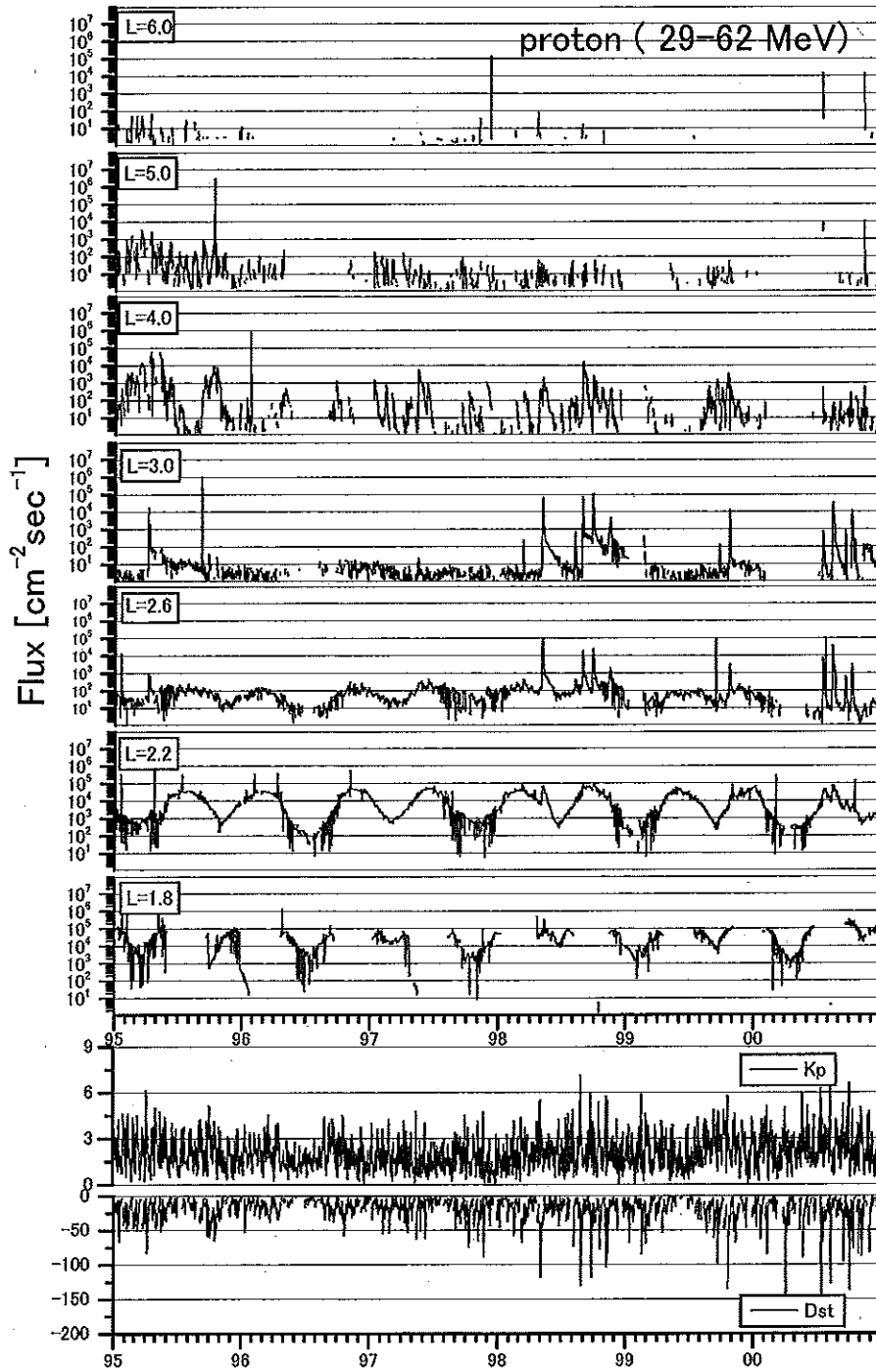


図 B.8 陽子 (29-62MeV) の L 値毎のフラックス変動 (1995-2000)

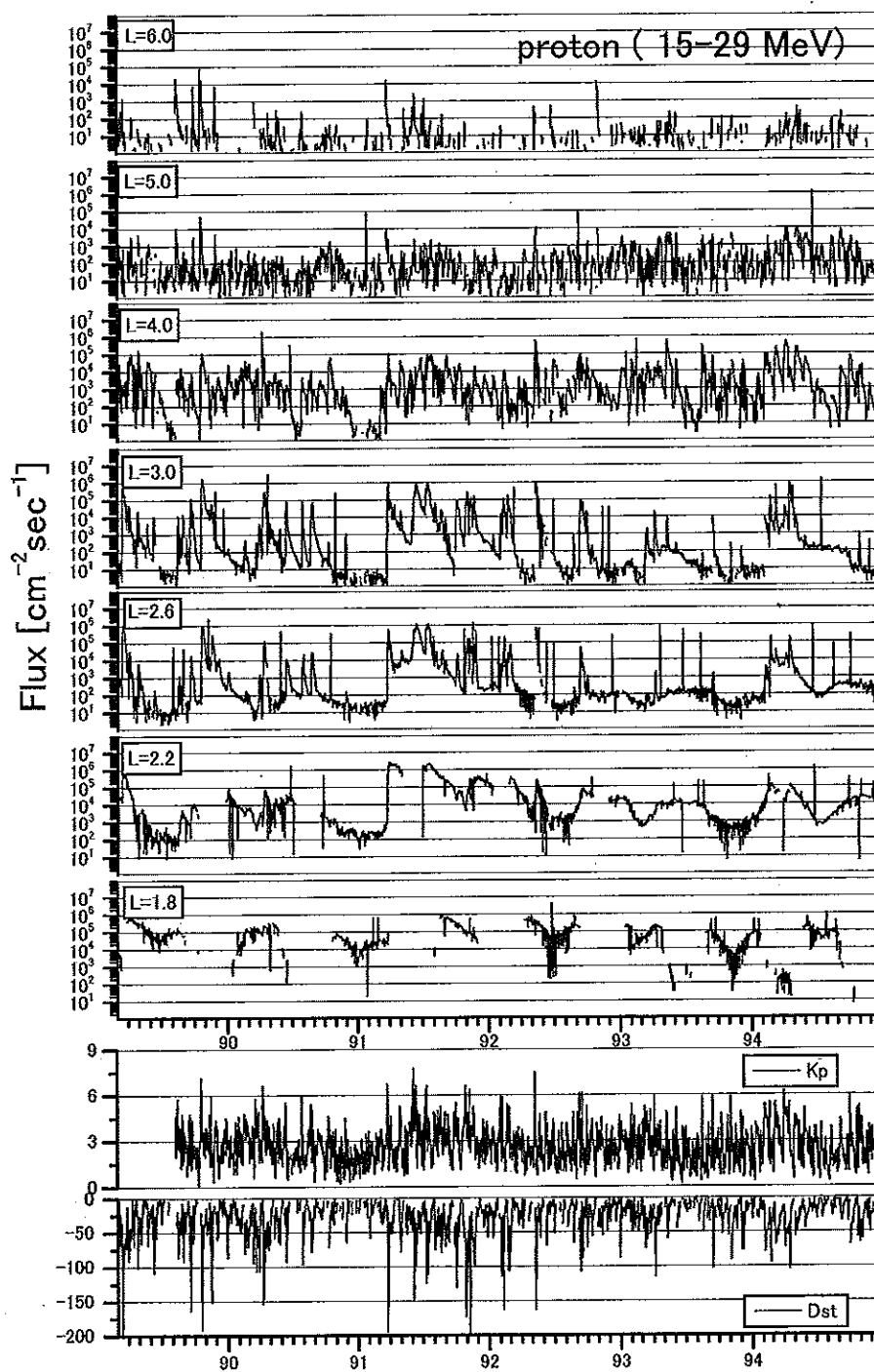


図 B.9 陽子 (15-29MeV) の L 値毎のフラックス変動 (1989-1994)

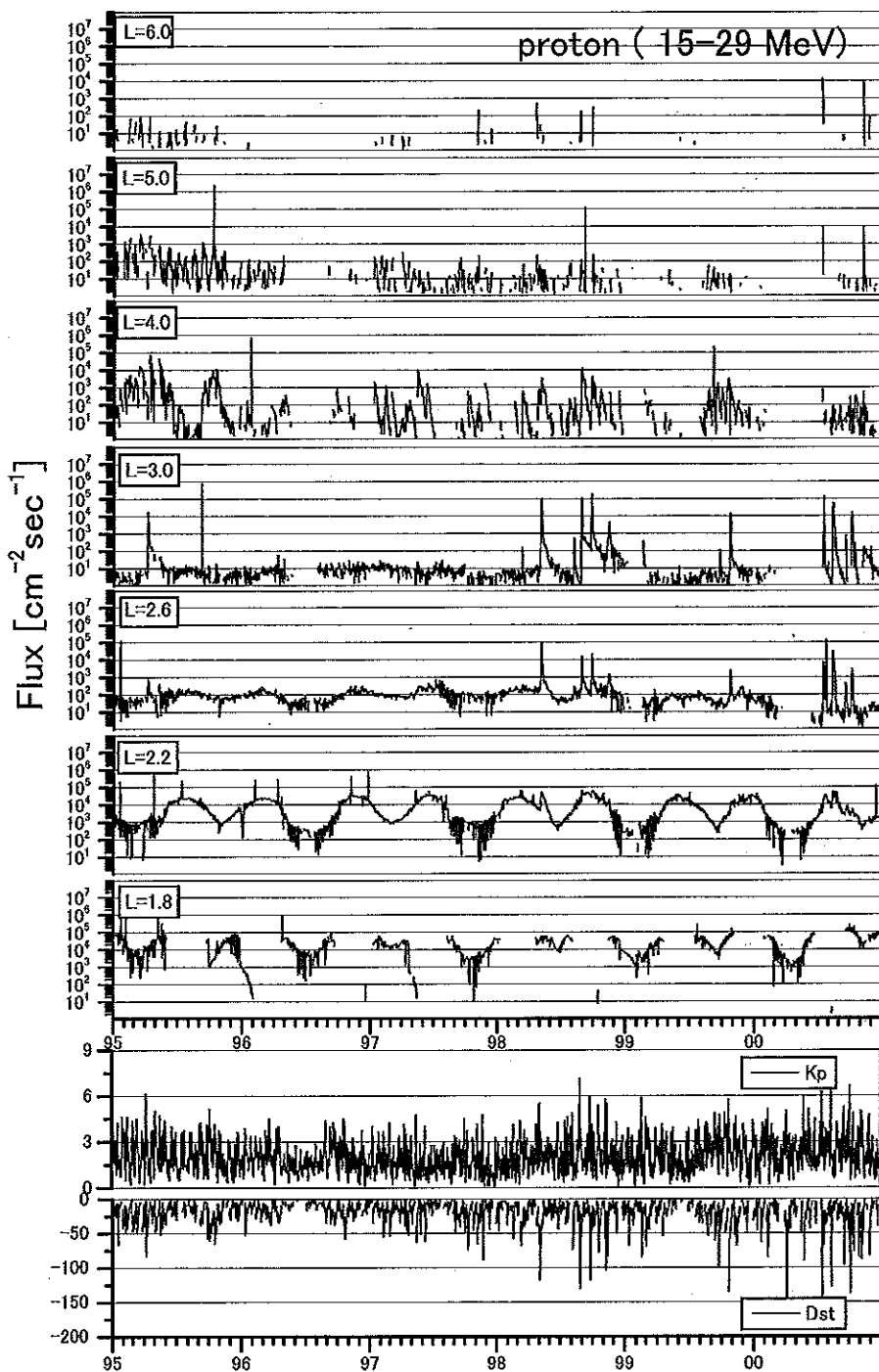


図 B.10 陽子 (15-29MeV) の L 値毎のフラックス変動 (1995-2000)

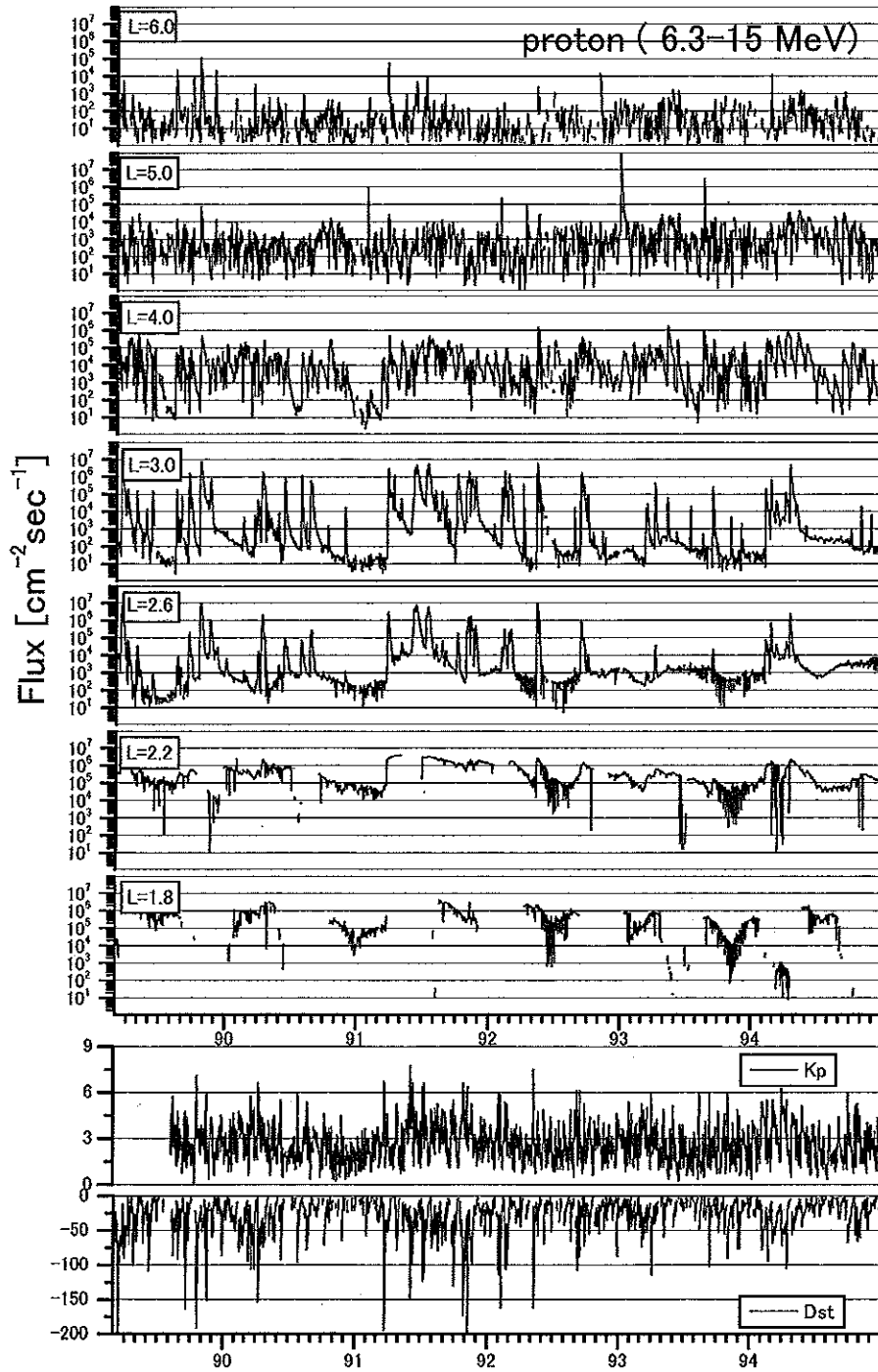


図 B.11 陽子 (6.3-15MeV) の L 値毎のフラックス変動 (1989-1994)

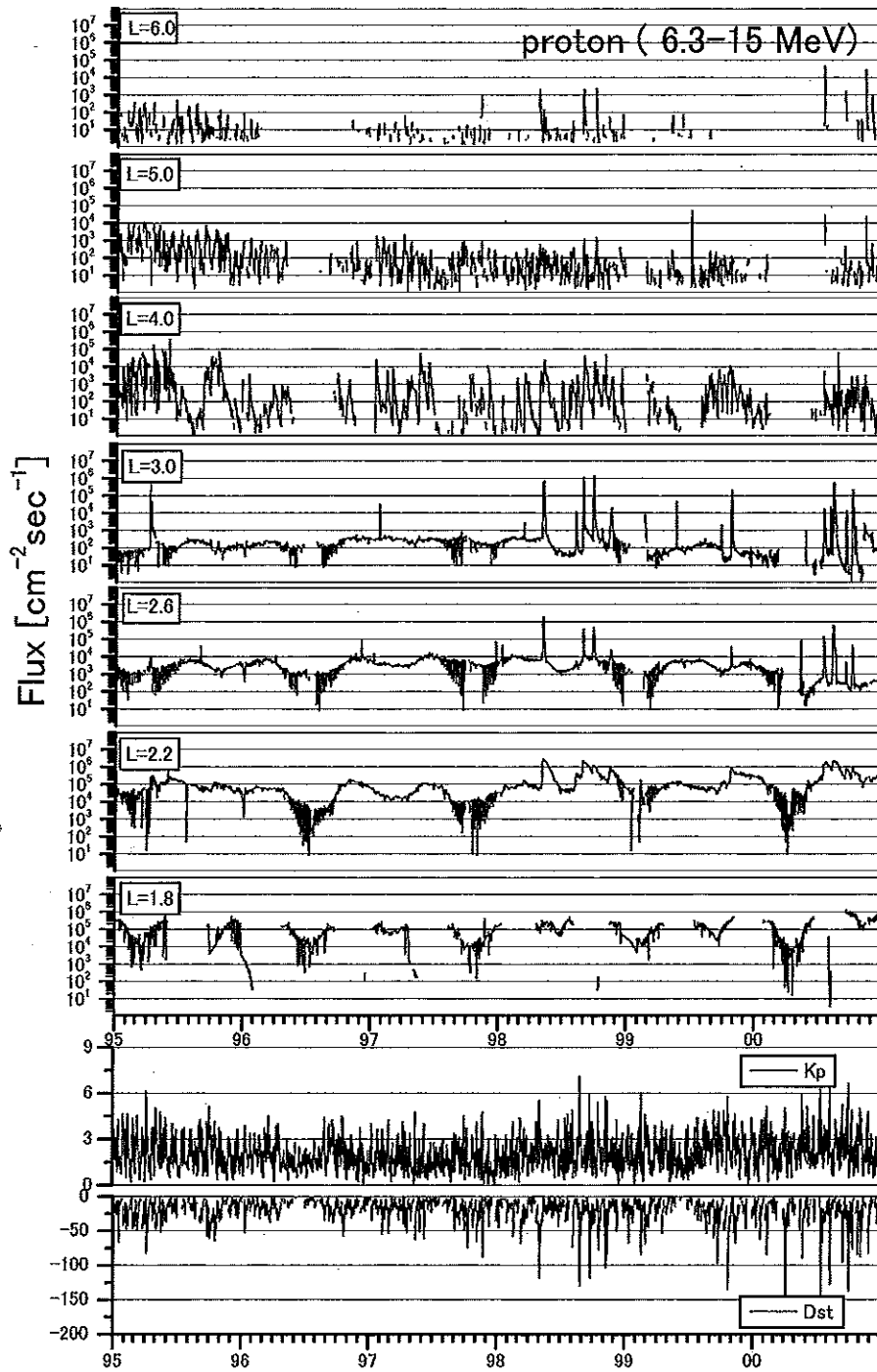


図 B.12 陽子 (6.3-15MeV) の L 値毎のフラックス変動 (1995-2000)

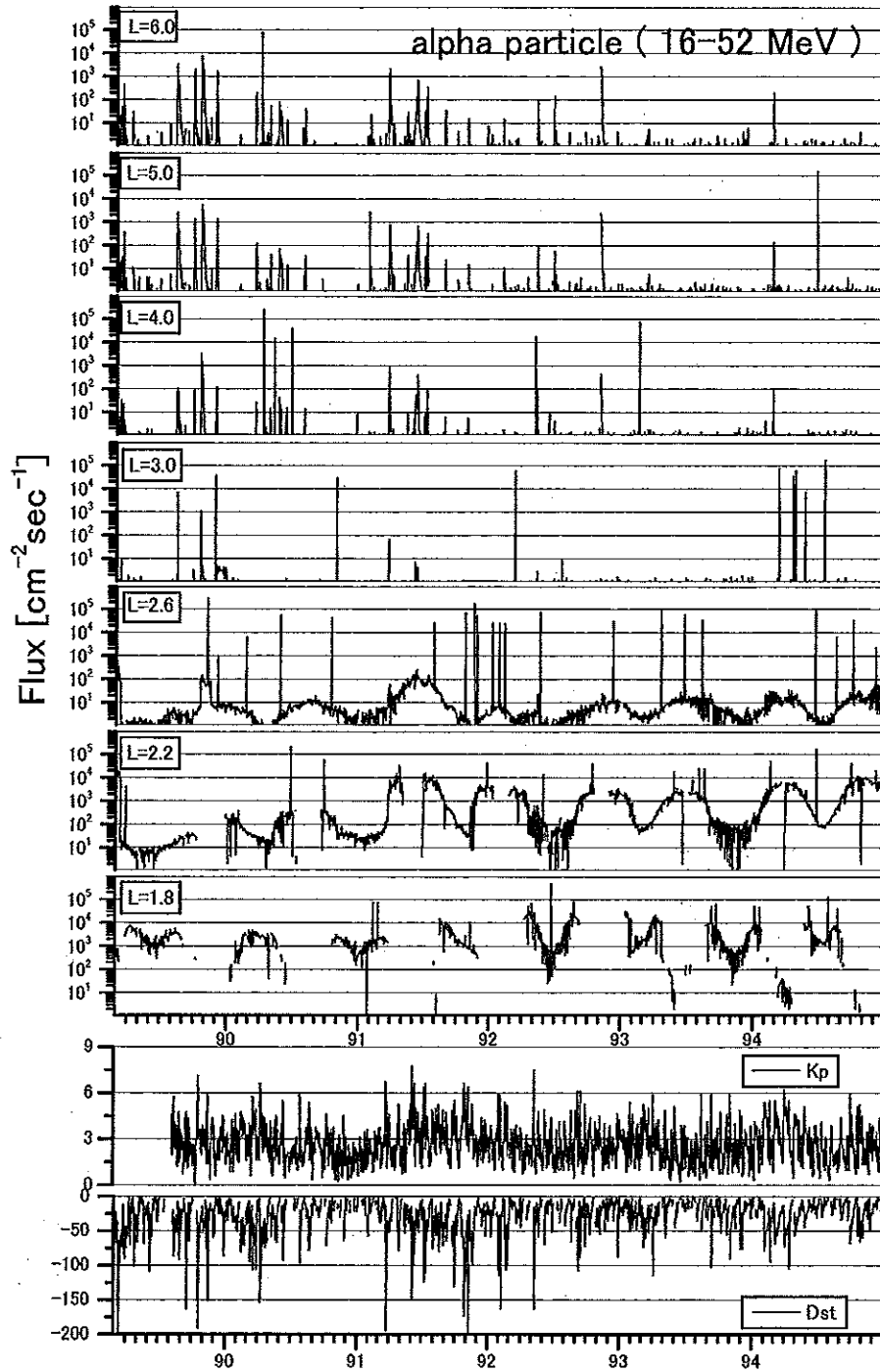


図 B.13  $\alpha$  粒子 (16-52MeV) の L 値毎のフラックス変動 (1989-1994)

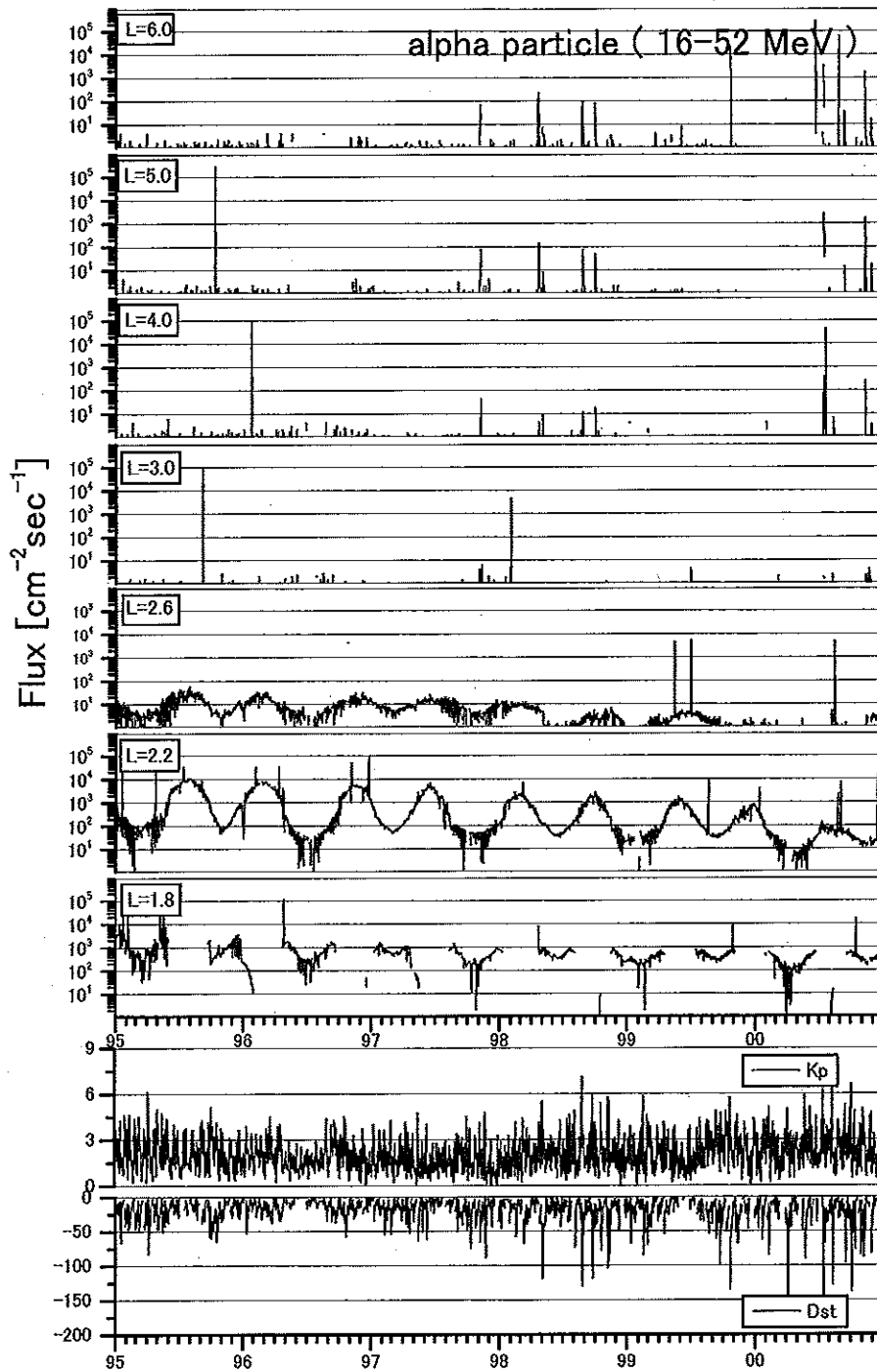


図 B.14  $\alpha$ 粒子 (16-52MeV) の L 値毎のフラックス変動 (1995-2000)

## (C) 放射線帯粒子の磁気緯度毎のフラックス変動

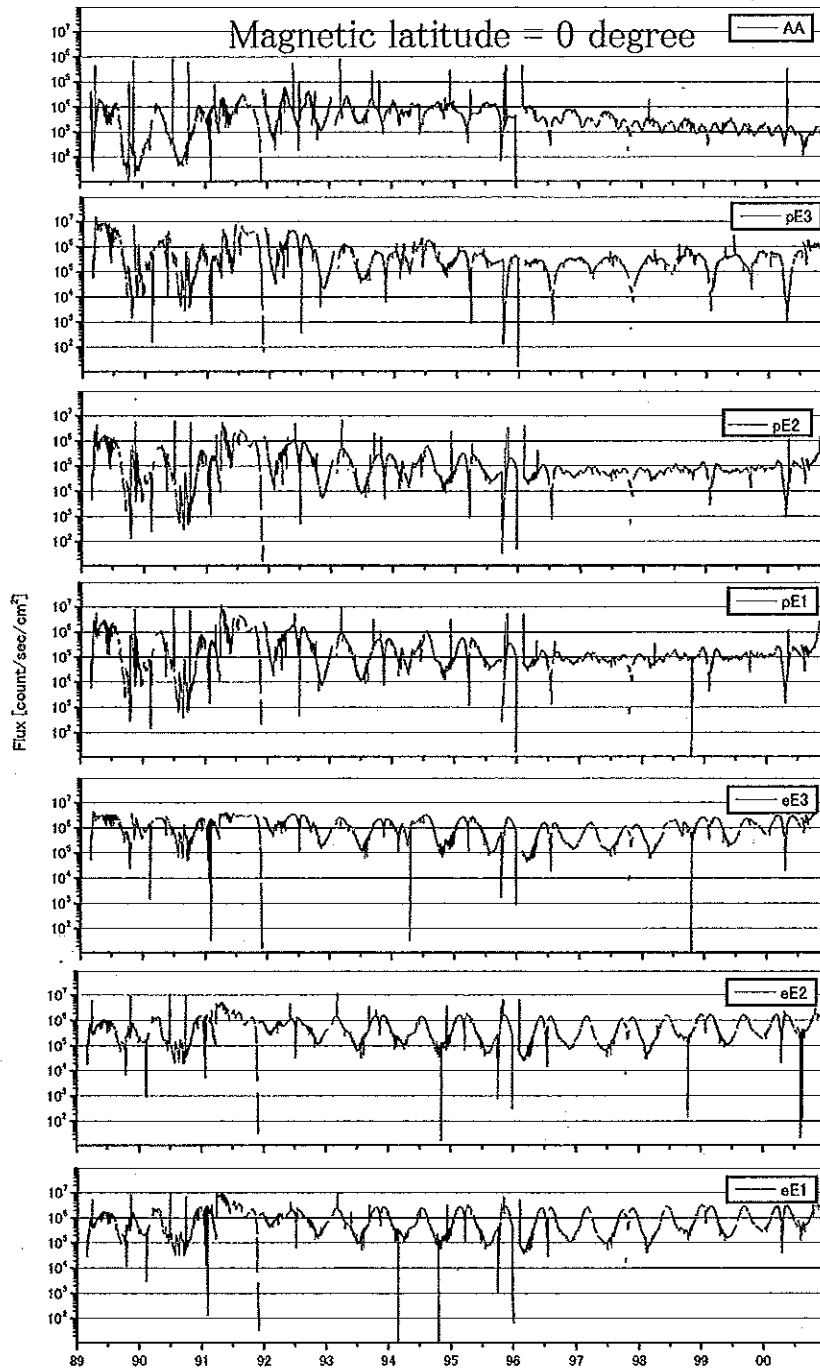


図 C.1 磁気緯度0度における各粒子のフラックス変動



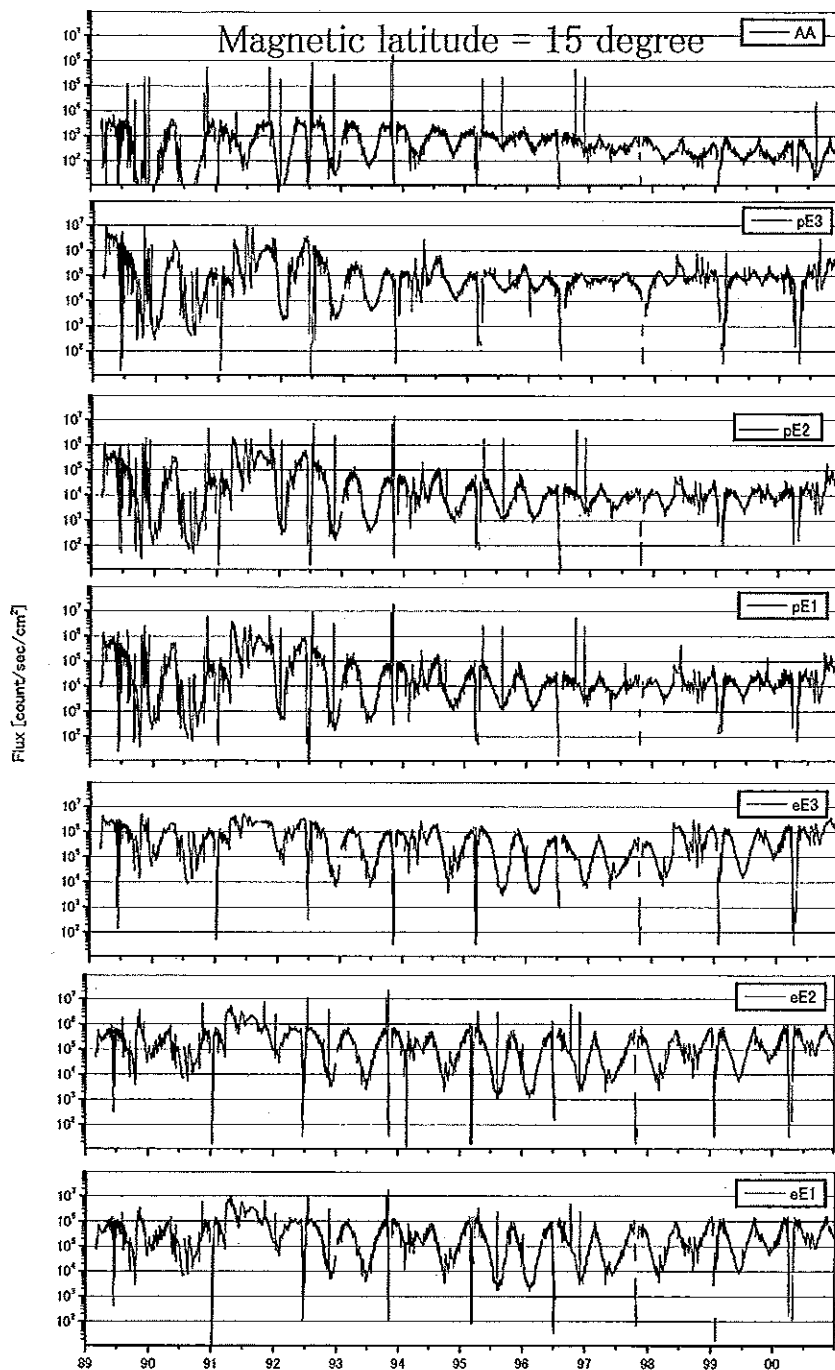


図 C.2 磁気緯度 15 度における各粒子のフラックス変動

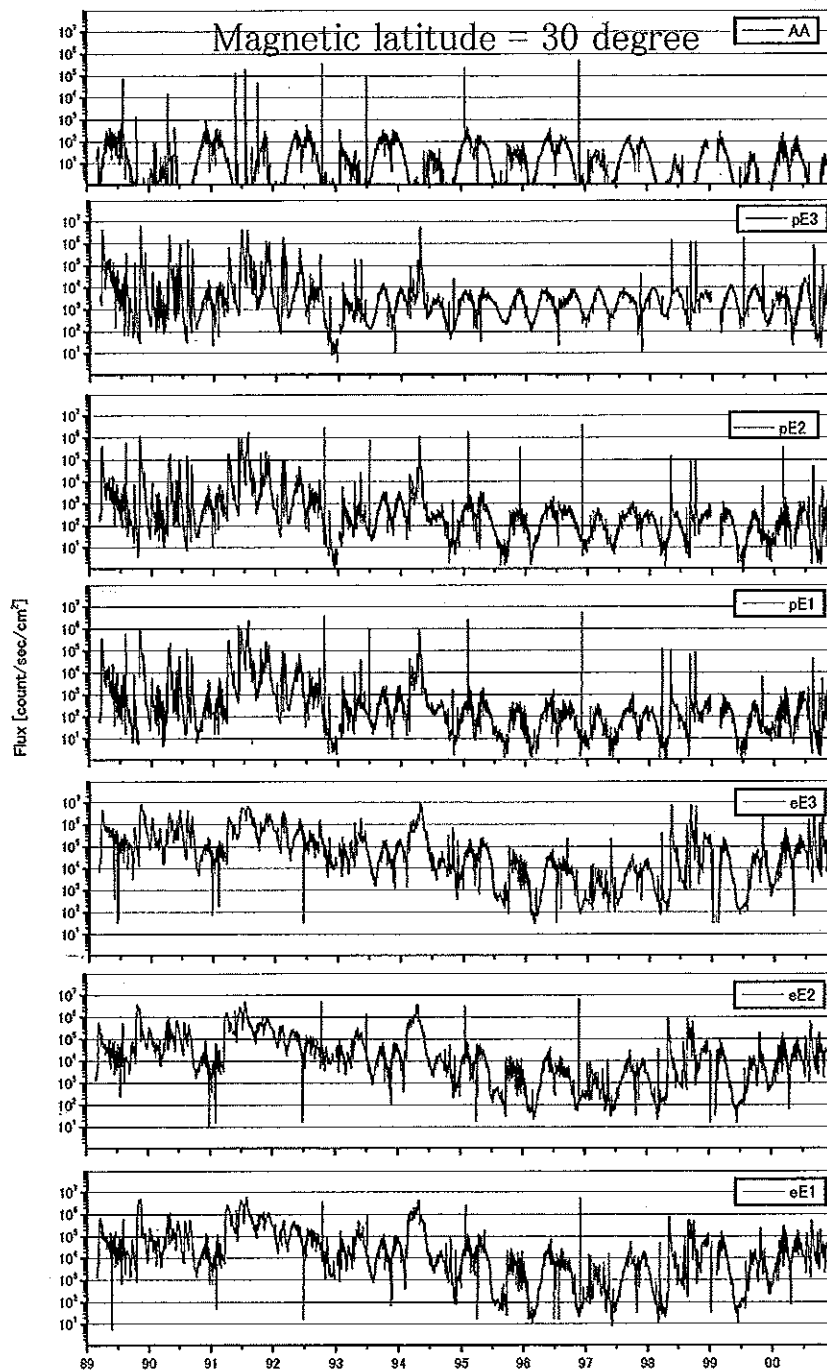


図 C.3 磁気緯度 30 度における各粒子のフラックス変動

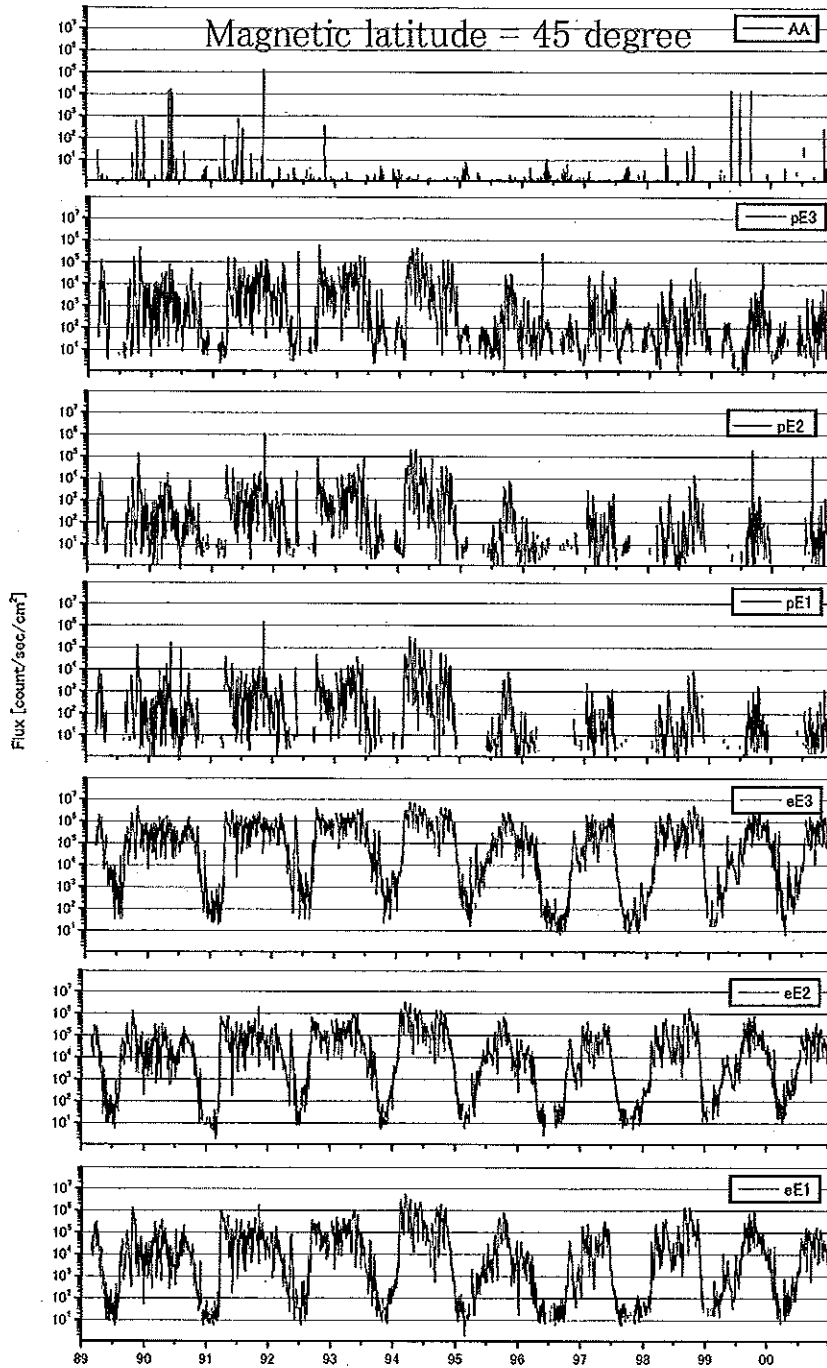


図 C.4 磁気緯度 45 度における各粒子のフラックス変動

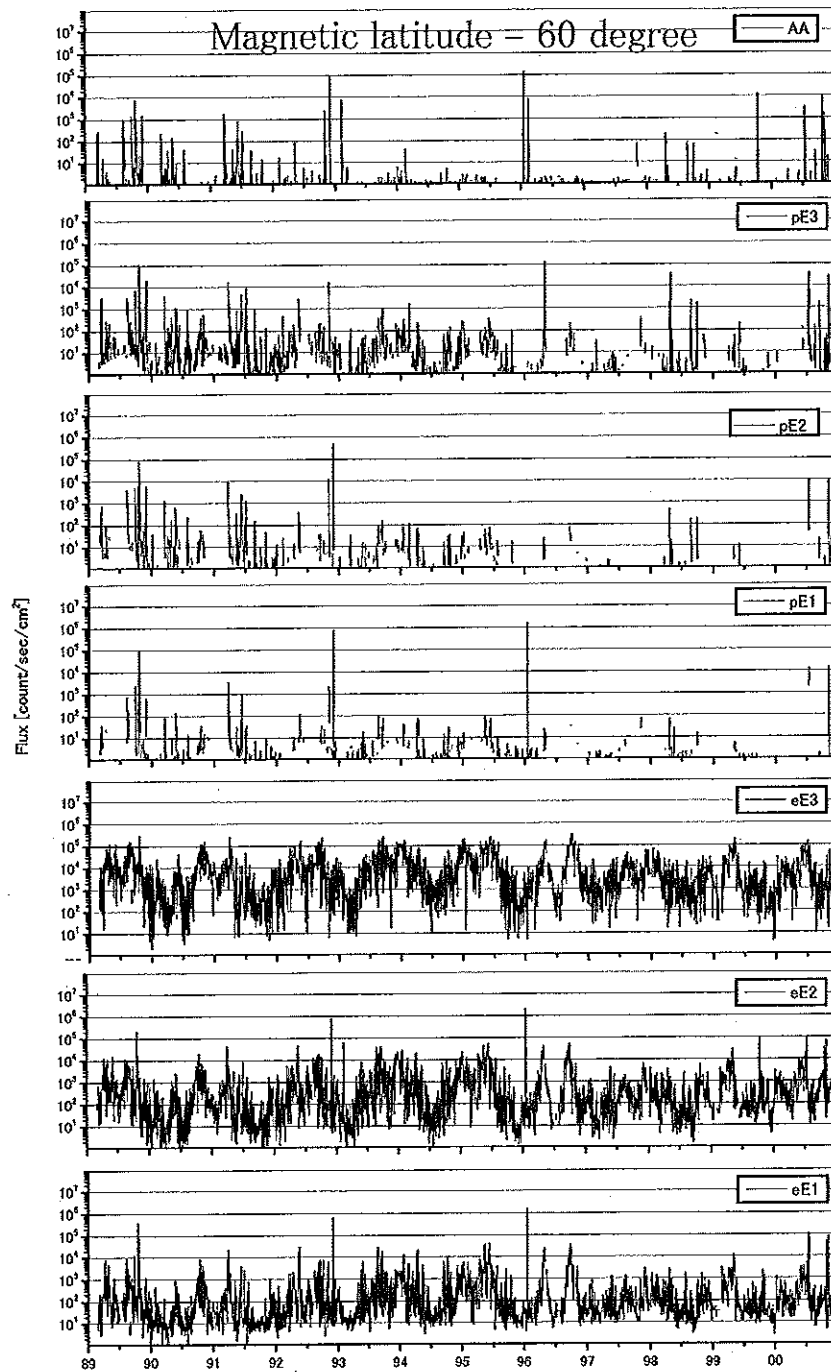


図 C.5 磁気緯度 60 度における各粒子のフラックス変動

## 既 刊 行 物

- 第 105 号 (1999 年 10 月) S-310-27 号機による中層大気水蒸気密度の測定  
第 106 号 (1999 年 12 月) S-310-27 号機による DC プロブ測定  
—E S 層中の電子温度について—  
第 107 号 (2000 年 2 月) SEPAC プロジェクトのエンジニアリングとマネジメント  
第 108 号 (2000 年 2 月) 飛行時間法を用いた中性ガス質量分析器の開発  
第 109 号 (2000 年 3 月) 金星ホールの生成機構に関する一考察  
第 110 号 (2000 年 8 月) 臼田宇宙空間観測所水素メーザ標準周波数時刻システム  
第 111 号 (2000 年 10 月) 臼田宇宙空間観測所用 X バンド冷却低雑音増幅器  
第 112 号 (2000 年 10 月) 探査機異常監視・診断システム (ISACS-DOC)  
第 113 号 (2000 年 12 月) 宇宙用熱制御材料の太陽光吸収率の入射角依存性と全  
半球放射率の温度依存性に関する測定データ  
第 114 号 (2001 年 3 月) 科学衛星「はるか」の位相基準信号伝送システム  
—臼田地上局システムを中心にして—  
第 115 号 (2001 年 3 月) 成層圏大気中の多種の微量成分観測を目的とした気球  
搭載用大気採取装置の研究  
第 116 号 (2001 年 9 月) 科学衛星「はるか」における位相基準信号伝送のため  
の衛星搭載システム  
第 117 号 (2001 年 10 月) 電磁飛翔体加速装置開発の歩み—(I)—  
第 118 号 (2001 年 12 月) リングコア磁力計センサの衝撃実験  
—ペネトレータ型磁力計開発の基礎実験—  
第 119 号 (2002 年 8 月) 窒素振動温度測定器の室内実験による較正と解析方法  
の改良  
第 120 号 (2002 年 11 月) Bepi Colombo / MMO 搭載カメラ用光学ガラスの放射  
線耐性試験  
第 121 号 (2003 年 3 月) X 線天文観測科学衛星「あすか」および「ASTRO-E」  
の姿勢制御系  
第 122 号 (2003 年 3 月) 新精測レーダ  
第 123 号 (2003 年 3 月) 鹿児島宇宙空間観測所 34m アンテナ科学衛星追跡局  
第 124 号 (2003 年 9 月) 多層膜回析格子の開発  
第 125 号 (2003 年 9 月) 統計的推測手法を用いた惑星雲移動ベクトルの誤差評  
価法  
第 126 号 (2003 年 9 月) グラファイト素材の全没水浸型超音波自動探傷法によ  
る全方位欠陥の体積検査方法

---

## 宇 宙 科 学 研 究 所 報 告

第 127 号

2003 年 9 月

発行者 宇 宙 科 学 研 究 所  
〒 229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1  
電話 (042) 759-8009  
印刷者 藤原印刷 株式会社  
〒 186-0003 東京都国立市富士見台 3-6-4  
電話 (042) 573-3090

---

