

「あけぼの」衛星で観測された放射線帯粒子の分布と変動

高木 俊治*・中村 尚司†・河野 毅‡・槇野 文命

(1994年11月14日受理)

Flux Distribution and Modulation of Charged Particles in the Radiation
Belt Observed with AKEBONO

By

SHUNJI TAKAGI, TAKASHI NAKAMURA, TSUYOSHI KOHNO AND

FUMIYOSHI MAKINO

Abstract: Geomagnetically trapped charged particles (proton, electron, alpha particle) in a wide area were measured by using the monitor boarding on the AKEBONO satellite. From the data with this monitor, the energy spectra and the spatial distributions of charged particles were estimated. These results indicate that the spatial distributions of observed particle intensities are different from the NASA radiation belt models, especially protons are distributed closer to the earth than the NASA model. The life times of trapped particles after various magnetic storms are also obtained.

既 要

「あけぼの」衛星に搭載された検出器により地球のまわりの宇宙環境放射線（電子、陽子、 α 粒子）の測定が行われてきた。この衛星は準極軌道なので、様々な磁力線を横切り、広範囲の空間の放射線を観測することができる。その観測結果から、放射線帯の粒子強度分布、エネルギースペクトルを求め、NASAの放射線帯モデルと比較した。その結果、特に陽子の分布に違いが見られ、観測値はモデルと比較して全体的に地球に近いところに分布していることがわかった。また、磁気嵐後の粒子強度の変動から、捕捉粒子の生存時間を求め、 L 値に対する依存性を得た。

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、

* 東北大学サイクロトン・ラジオアイソトープセンター (現在 (株) 三菱総合研究所)

† 東北大学サイクロトン・ラジオアイソトープセンター

‡ 理化学研究所

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。

1958年に Van Allen らによる放射線帯の発見以来、ロケットや人工衛星により数多くの放射線帯粒子の観測が行われてきた。アメリカの航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) においてそれらの観測結果をまとめ、放射線帯のモデル化を行い、現在多くの宇宙用ミッションで NASA の放射線帯モデル (陽子は AP8¹⁾, 電子は AE8²⁾) を用いて、線量評価がなされている。しかし、これらのモデルは1960, 1970年代の測定をもとにつくられており、モデルと最近の実際の観測値との食い違いが指摘されている^{3), 4)}。それに対応して、NASA においても放射線帯モデルの見直しが考えられている。

また、放射線帯の成因については今だ定量的な議論はされておらず、そのダイナミクスに関してさまざまな見解がなされている。1991年の3月には大きなイベントがあり、新たな放射線帯が生成されたと報告された⁵⁾。このようなイベントを通じて放射線帯のメカニズムが詳しく解明されることが期待されている。

宇宙科学研究所の第12号科学衛星「あけぼの」(EXOS-D) は、放射線帯中の荷電粒子強度の高いところを通るため、衛星の放射線環境を観測するのに放射線モニタ (Radiation Monitor, RDM) が搭載された⁶⁾。このモニタのうち、高エネルギー粒子モニタ (High Energy Particles Monitor, HPM) はエネルギーの高い荷電粒子を測定しており、著者らはその測定結果から放射線帯の既要求め、上述したように電子、陽子のエネルギースペクトルが NASA の放射線帯モデルと異なることを見出した^{7), 8)}。

本報告では、さらに詳しく宇宙環境放射線の空間粒子強度分布について NASA の放射線帯モデルと比較しながら、観測結果をまとめて新しくモデルを提唱し、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。

2 HPM 検出器の測定エネルギー範囲

HPM (高エネルギー粒子モニタ) は以前に詳しく述べている⁷⁾ので省略するが、4個の Si 表面障壁型半導体 (SSD) の dE/dx 検出器と吸収板から構成され、この検出器の測定粒子、エネルギー範囲は入射荷電粒子が SSD で吸収されるエネルギーから決められる。図1は電子、陽子、 α 粒子の三種類の入射粒子エネルギーの関数としての SSD の中で吸収エネルギーを計算し、図示したものである。この図に見られるように、電子、陽

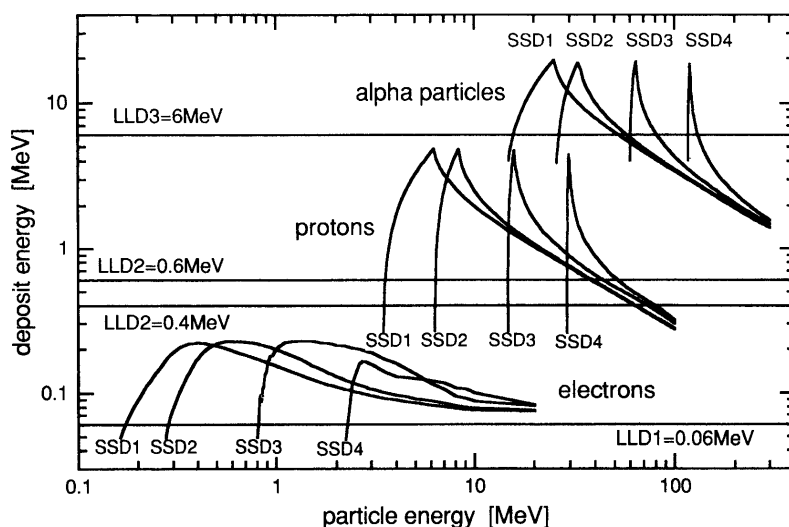


図1 HPM 検出器の各 SSD で吸収するエネルギー

表1 測定粒子とエネルギー範囲

CHANNEL NAME	PARTICLE	ENERGY RANGE [MeV]
eE1	electron	>2.5
eE2	electron	0.95-2.5
eE3	electron	0.3-0.95
pE1	proton	29-62
pE2	proton	15-29
pE3	proton	6.3-15
AA	alpha particle	16-52

子、 α 粒子を完全に区別するのは不可能で、電子には高いエネルギーの陽子が、陽子には高いエネルギーの α 粒子が混入するが、荷電粒子のエネルギースペクトルはエネルギーが高いほどフラックスが小さくなることから、混入する粒子数は測定する粒子の数と比較して無視できるほど小さいと考えられる。

陽子と電子を弁別するためのディスクリレベル LLD2 は前報告書では 600keV としていたが、実際には図 1 に示すように 400keV であることが判った。その結果、陽子の測定エネルギー範囲が変わり、陽子の高いエネルギーの領域 (channel 名が pE1) の上限だけが 25MeV ほど高くなり、62MeV までの陽子が測定されていることになった。

この修正を考慮して最終的な HPM 検出器の測定粒子とエネルギー範囲は表 1 に示すようになった。

3 放射線帯粒子のエネルギースペクトル

HPM 検出器は電子と陽子についてはそれぞれ 3 つのエネルギー範囲を測定しているので、図 2、図 3 にそれぞれ電子、陽子について「あけぼの」衛星で観測されたエネルギースペクトルと、NASA の放射線帯モデルから計算したエネルギースペクトルを比較した。放射線帯モデルからスペクトルの計算をするために、まず「あけぼの」衛星の軌道が 30sec 毎に求められているので、これらの値から IGRF 1985⁹⁾ の地球磁場モデルを用いて各軌道上の位置での B 、 L を求めた。この B と L を用いて NASA の放射線帯モデルから軌道に沿ってフラックスを求め、一ヶ月にわたって積分して平均をとったものが図中の各実線である。1989年から1990年にかけて太陽活

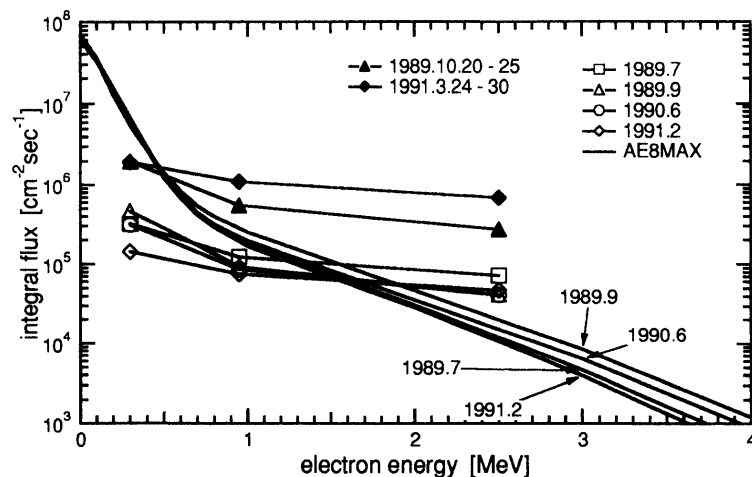


図2 電子の一ヶ月平均の測定エネルギースペクトルと NASA のモデルから求めたスペクトルとの比較

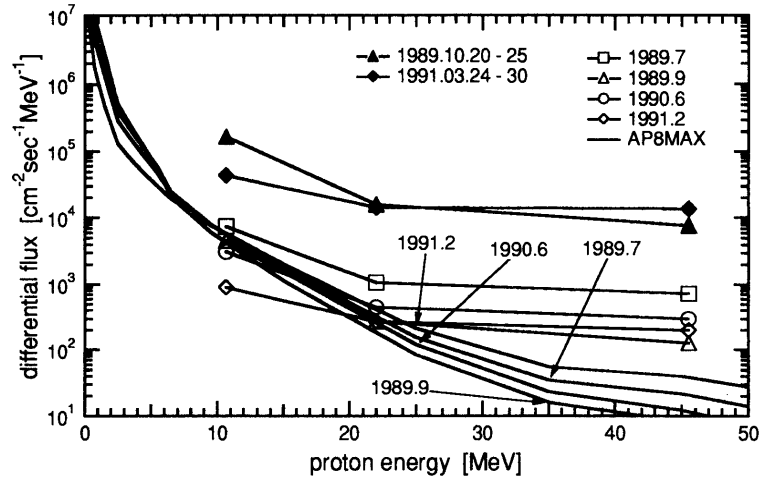


図3 陽子の一ヶ月平均の測定エネルギースペクトルとNASAのモデルから求めたスペクトルとの比較

動が極大になるので、放射線帯モデルは太陽活動が極大期における分布を表わすモデル、電子に関してはAE8MAX²⁾、陽子に関してはAP8MAX¹⁾を用いて計算した。モデルからの計算値が何本もの曲線になっているのは、衛星の近地点が時間を追うごとに変遷していき、スペクトルの形も絶対値も変化しているからである。特に電子に比べて陽子の高エネルギー領域のモデルから計算したフラックスの変化が大きく最大と最小で約1桁違っている。これは陽子の粒子強度分布は電子に比較して広がりがないからである。

図3から陽子のスペクトルは29MeV以下のエネルギー領域は測定したスペクトルとモデルから求めたスペクトルとかなりよい一致を示しているが、29MeV以上のエネルギー領域は1989年7月のとき最大で、測定値のほうが2桁大きい。一方で、図2の電子のスペクトルは0.95MeV以下のエネルギー領域で、測定値がモデルからの計算値の約1/80しかないにもかかわらず、0.95から2.5MeVのエネルギー領域では約1/2、2.5MeV以上のエネルギー領域では逆に測定値がモデルからの計算値の約2倍になっている。

これらの比較から、電子、陽子ともにスペクトルの形はモデル値に比べて観測値の方が傾きが緩やかになっていて、高エネルギー成分が多くなっていることが分かる。特に、29MeV以上の陽子フラックスがモデルより一桁以上も大きいことは、衛星搭載素子の損傷が主に高エネルギー陽子によってもたらされることから、非常に注目すべき結果である。また、1989年10月と1991年3月の太陽フレアによる陽子や電子の増加は、それ以外の静穏な時と比較して全体的に1桁から2桁ほど多くなり、太陽フレアにより高エネルギー粒子による線量が大きく違ってくることを表わしている。

4 放射線帯粒子の粒子フラックスの空間分布

HPM検出器の測定結果から放射線帯粒子の粒子フラックスの空間分布を求めた。このフラックス分布には太陽フレア等により地球磁場が擾乱した時のデータは含めず、地磁気が比較的静穏な時の分布を求めた。これは、衛星は一度に全空間の放射線の測定ができず、全体の分布を得るためには長期間の測定が必要になり、擾乱磁場により放射線帯粒子の分布が一時的に大きく変動することで、全体の分布に影響が及ぶからである。

1989年2月27日から1991年12月31日までのHPM検出器の観測粒子の一日平均フラックスの時間変動を図4に示す。上からAA、pE3、pE2、pE1、eE3、eE2、eE1の各チャンネルに相当する。また、下段に衛星が赤道を通過するときの高度を示し、衛星の軌道と平均粒子フラックスとの関係を、さらにその下の段に、 K_p と D_{st} の地磁気の指標を示し、地磁気と粒子フラックスの対応を見ている。この図においてフラックスは一日で得られた全データの平均であるので、様々な位置でのフラックスが含まれることになるが、衛星の軌道は比較的ゆっくり

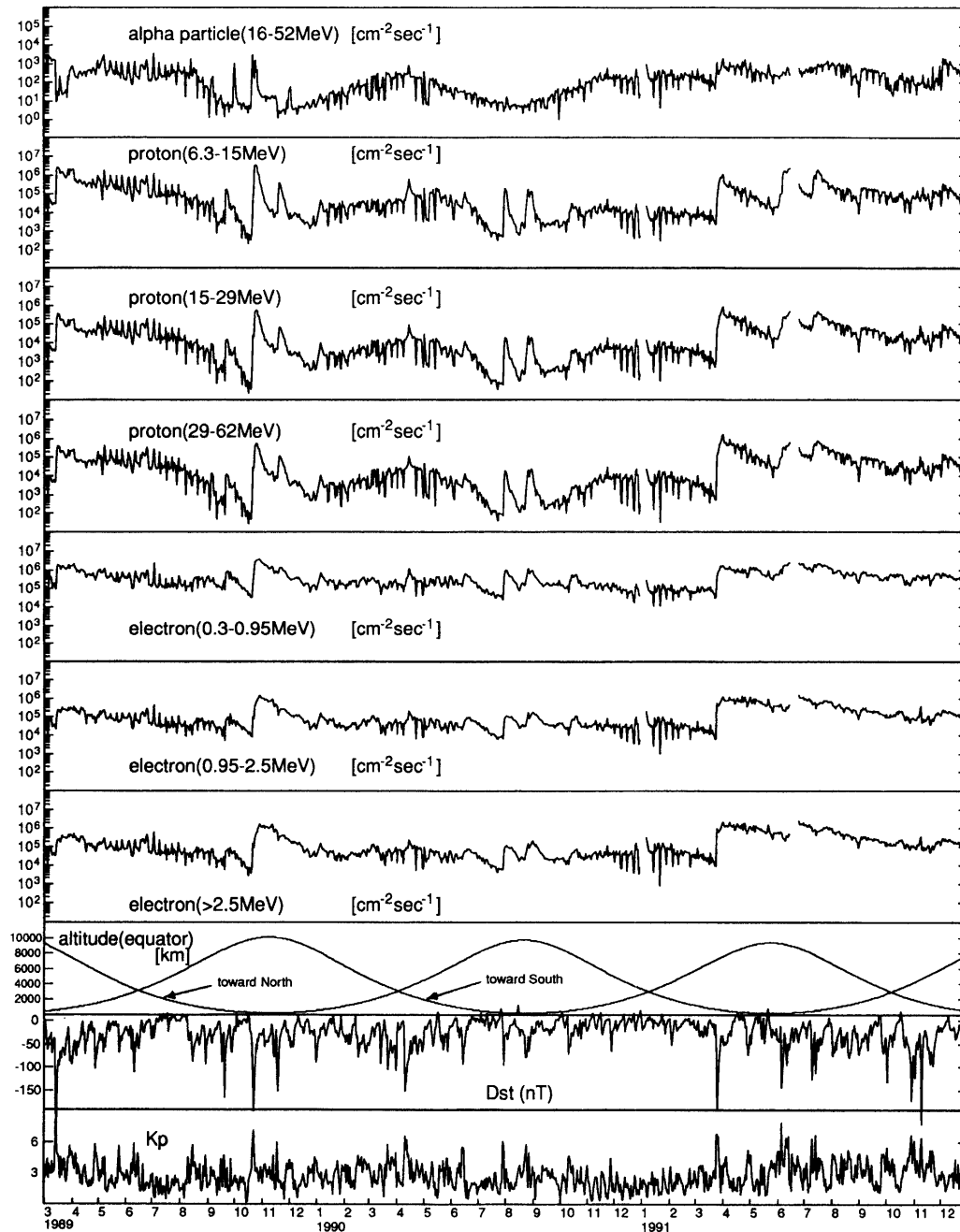


図4 「あけぼの」衛星で観測された一日平均粒子フラックスの時間変動

と変化していくので、数日の間は空間的に近いところの平均フラックスを見ることができる。また、フラックスが所々で一時的に減少して見えるのは、日曜や祝日などで観測が休止してデータ数が少なく、赤道付近のフラックスが大きいところでのデータがないからである。この図において陽子、 α 粒子は1989年7月ごろ、1990年4月ごろ、1991年1月ごろにゆるやかなピークが見えるが、これらのピークは衛星の赤道を通過するときの高度が約4000kmで、放射線帯のフラックスの最も高いところを通過していることから、軌道変化による変動である。また、表2に示した日時に急激にフラックスの増加がみられる。これらの時は K_p 、 D_{st} を大きく変動しており、地球磁場が大きく擾乱した時と一致している。

表2 図4中の急激なフラックスの増加がみられる日時とその前後で K_p 指標が大きく変化した日時

	date	date for K_p	sum of K_p
(a)	1989.03.13	1989.03.13	65 ₀
(b)	1989.08.14	1989.08.14	39 ₀
(c)	1989.09.20	1989.09.18	36 ₊
(d)	1989.10.20	1989.10.20	47 ₀
(e)	1989.11.17	1989.11.17	48 ₋
(f)	1990.04.10	1990.04.10	53 ₋
(g)	1990.06.15	1990.06.12	44 ₀
(h)	1990.07.28	1990.07.28	48 ₊
(i)	1990.08.23	1990.08.21	33 ₀
(j)	1991.03.24	1991.03.24	54 ₀
(k)	1991.06.01	1991.05.31	38 ₋
(l)	1991.07.10	1991.07.09	51 ₋

表3 放射線帯粒子の粒子フラックスの空間分布を求めるのに除いた、粒子強度が擾乱磁場により増加した期間

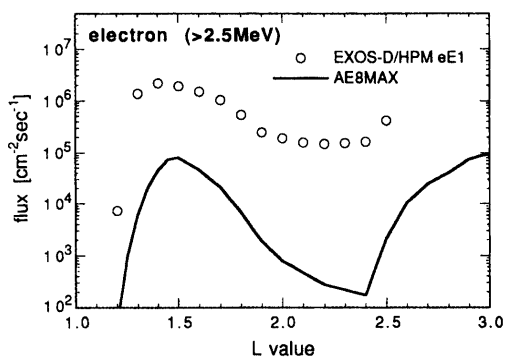
start date	end date	start date	end date
1989.03.13	— 1989.04.14	1990.03.20	— 1990.05.15
1989.04.26	— 1989.05.06	1990.06.12	— 1990.06.24
1989.05.23	— 1989.05.29	1990.07.28	— 1990.08.14
1989.06.09	— 1989.06.17	1990.08.23	— 1990.09.17
1989.08.14	— 1989.09.02	1990.11.27	— 1990.12.02
1989.09.18	— 1989.11.29	1991.03.23	— 1991.12.31
1990.02.14	— 1990.02.22		

この結果から、 K_p 指標が 6+ 以上になった日から平均フラックスが元のレベルに戻るまでの期間は、粒子フラックスの空間分布を求める時は除くことにし、表3にその期間を示した。

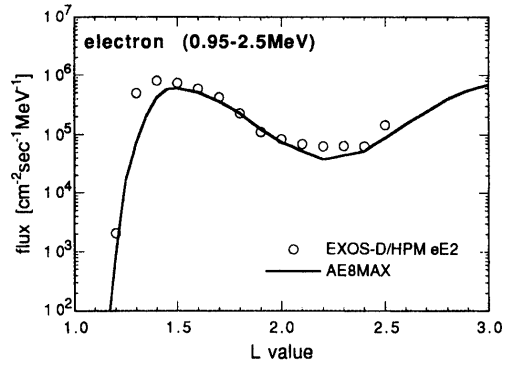
図5と図6にそれぞれ電子と陽子の磁気赤道 ($B/B_0=1.0$) での L を関数とした粒子フラックス分布を示す。また、「あけぼの」衛星による観測時期が太陽活動が極大のときなので、NASAの放射線帯モデル、電子は AE8MAX²⁾、陽子は AP8MAX¹⁾ も図示し、測定値と比較した。電子、陽子ともにエネルギーが高くなるに従い、分布のピーク部が L 値の小さいほうに移る傾向があり、NASAの放射線帯モデルにおいてもその傾向にある。

電子については、図2のエネルギースペクトルの比較結果からも見られるが、低いエネルギー領域 (0.3-0.95MeV) ではモデル値と比較すると測定値の方が全体的にフラックスが一桁以上低いが、中間エネルギー領域 (0.95-2.5MeV) では両者はよく一致し、高いエネルギー領域 (>2.5MeV) では逆に測定値の方が高くなっている。

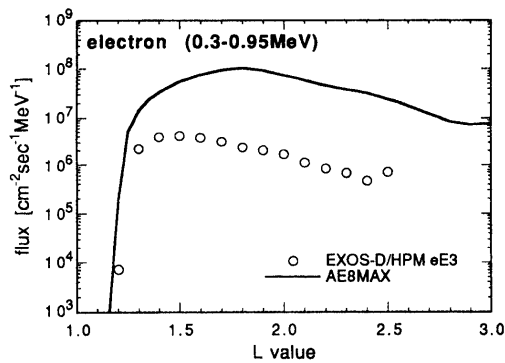
表4に電子の磁気赤道での粒子強度分布の最大になる位置とその時のフラックスを、NASAのモデルと「あけぼの」衛星による測定値を比較したものを載せる。エネルギー領域が 0.95-2.5MeV の電子は、粒子フラックスの絶対値が測定値とモデル値とではほぼ一致しているものの、内帯のピーク部が測定値の方がわずかに L 値の小さい方にある。一方、0.3-0.95MeV の電子では測定値と比較してモデル値は約170倍の過大評価になる上、



(a) > 2.5MeV の電子

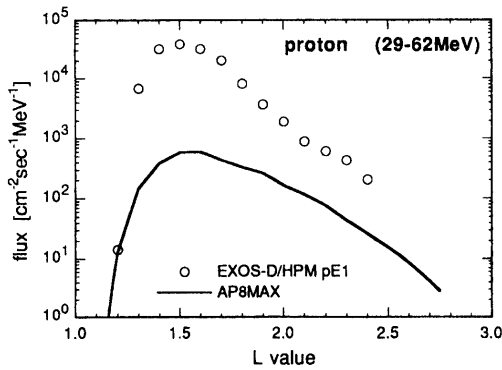


(b) 0.95 - 2.5MeV の電子

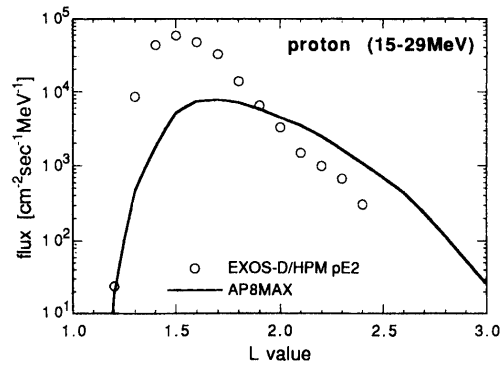


(c) 0.3 - 0.95MeV の電子

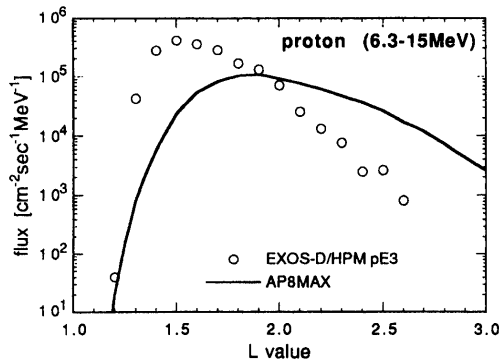
図5 磁気赤道上 ($B/B_0=1.0$) の電子フラックスの L 分布



(a) 29 - 62MeV の陽子



(b) 15 - 29MeV の陽子



(c) 6.3 - 15MeV の陽子

図6 磁気赤道上 ($B/B_0=1.0$) の陽子フラックスの L 分布

表4 磁気赤道上の電子フラックスの L 分布の NASA モデルと「あけぼの」衛星による測定値との比較

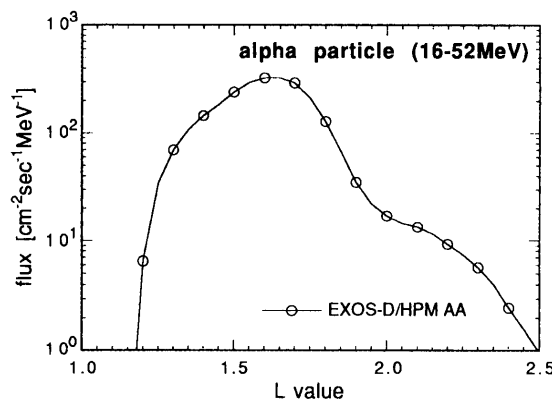
channel name	energy range	NASA model		EXOS-D/HPM	
		L	counts [$\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$]	L	counts [$\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$]
eE1	> 2.5	1.5	8.0×10^4	1.4	2.2×10^6
eE2	0.95 – 2.5	1.5	9.2×10^5	1.4	1.3×10^6
eE3	0.3 – 0.95	1.8	6.7×10^7	1.5	2.7×10^6

表5 磁気赤道上の陽子フラックスの L 分布の NASA モデルと「あけぼの」衛星による測定値との比較

channel name	energy range	NASA model		EXOS-D/HPM	
		L	counts [$\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$]	L	counts [$\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$]
pE1	29 – 62	1.6	1.9×10^4	1.5	1.3×10^6
pE2	15 – 29	1.7	1.1×10^5	1.5	8.2×10^5
pE3	6.3 – 15	1.9	9.6×10^5	1.5	3.6×10^6

ピークの位置も L 値の小さい方になっている。しかし逆に $>2.5\text{MeV}$ の電子はフラックスのピークの位置は「あけぼの」衛星による測定値とモデルではほぼ一致しているものの、そこでのモデルによるフラックスの絶対値は測定値の約1/30しかない。また、図5(a)より 2.5MeV 以上のエネルギーの電子は L が2.4付近に内帯と外帯の間のフラックスが少なくなっている slot と呼ばれる領域があり、測定値とモデルはともに傾向としては似た分布になっているが、測定値はこの位置のフラックスが内帯のピークでのフラックスの約1/15になっていて、モデルでは約1/500になっているのに比べて、モデルほど内帯と外帯の区別がはっきりしていないことが分かる。

陽子については、分布、絶対値ともに測定値とモデルとでは大きな食い違いが見られる。図6から、測定値はモデル値に比べて L の小さい方に分布があり、ピーク値が大きくなっていることがわかる。表5に磁気赤道上の陽子の分布の最大になる位置とフラックスをモデルと測定値で比較したものを示す。ピーク部で比較すると測定値はモデル値より1桁近く多くなっており、エネルギーが高くなるにしたがいその差が大きくなっている。さらに、ピークでの L 値はモデルではエネルギーにより違いがあるが、測定値の方はあまり差は見られない。また、測定されたフラックスは L が2.5あたりでピークでのフラックスと比較して3桁ほど減少しており、モデル値と比較して陽子は L が大きいところまで分布していないことがわかる。

図7 磁気赤道上 ($B/B_0=1.0$) の α 粒子フラックスの L 分布

また、図7に α 粒子(16-52MeV)の磁気赤道上で分布を示す。 α 粒子はフラックスのピークが L で1.6付近のところにあり、そこでのフラックスは $3.2 \times 10^2 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ MeV}^{-1}$ と測定され、15-62MeVの陽子では $7.7 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ MeV}^{-1}$ なので、陽子のおよそ1/250の量である。また、同じエネルギー領域の陽子と比べると、 α 粒子の分布は L 値が高い方にあり、前に述べたように電子、陽子ともエネルギーの高い成分ほどフラックスのピークが L 値の小さい位置にあるのと食い違っている。しかし、核子当りのエネルギーで考えると、1/4のエネルギーの陽子と等価と考えられ、ピークが L の高いほうにあると説明できる。

α 粒子は L が1.7以上では、 L の増加にともないフラックスが減衰しているが、 L が2.0の前後ではその減衰に違いがみられる。これは、この位置ではフラックス自体が小さい上、衛星の位置での B と L を求めるのにIGRF-85⁹⁾を用いているため、実際の地磁気とモデルの少しのずれが大きく効いて分布が変化したように見えていると考えられる。

つぎに、いくつかの L 値(磁力線)での磁場の強さ B をその磁力線の磁気赤道上で磁場の強さ B_0 で規格化した B/B_0 をパラメータにしたフラックスの分布とNASAの放射線帯モデルとを比較した図を図8から図13に示す。図8が電子(>2.5MeV)、図9が電子(0.95-2.5MeV)、図10が電子(0.3-0.95MeV)、図11が陽子(29-62MeV)、図12が陽子(15-29MeV)、図13が陽子(6.3-15MeV)についてで、それぞれ、 L が1.4、1.6、2.0、2.4での分布を図示している。これらの図において測定フラックスは、 L と B/B_0 それぞれに特定の幅をもった領域内での平均をとっている。これらの幅は L に対しては ± 0.01 、 B/B_0 に対しては ± 0.05 から ± 0.5 の間で L に応じて変えている。図14は α 粒子のフラックス分布を示すが、この場合はNASAのモデルが存在しないので観測値だけである。

フラックスの絶対値は、前に述べたようにNASAモデルと大きな違いがあるものの、各 L 値での B/B_0 分布

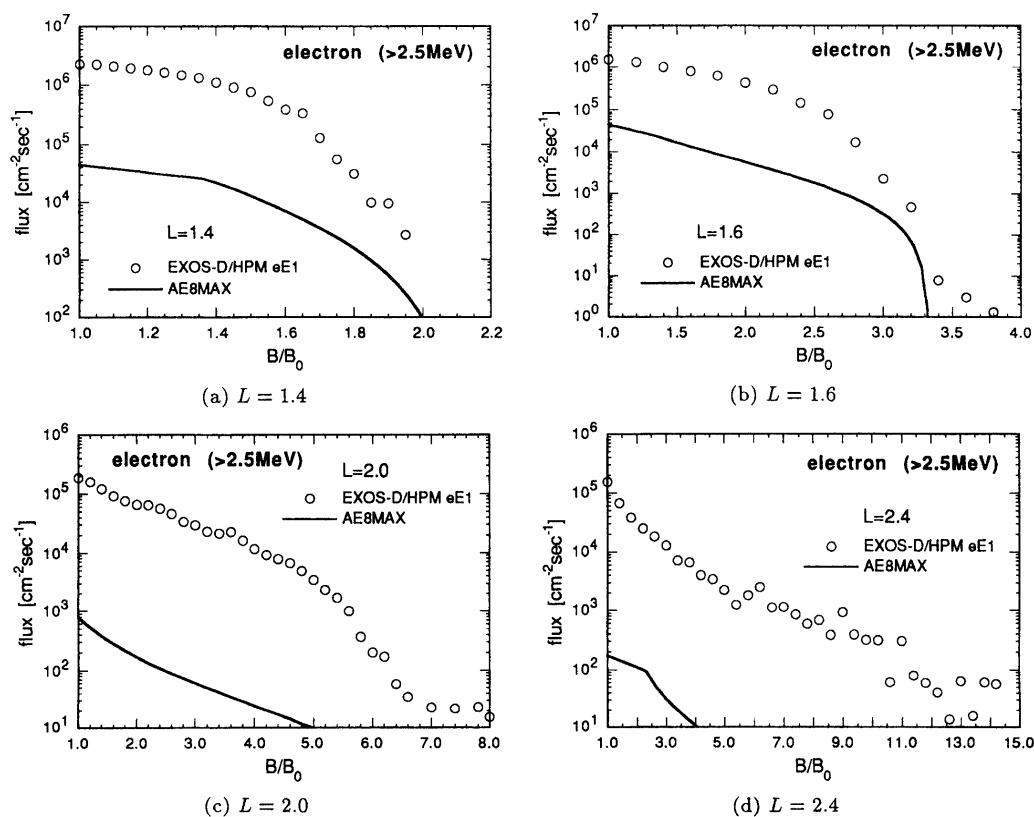


図8 電子(>2.5MeV)の L 値を一定にしたときのフラックス分布

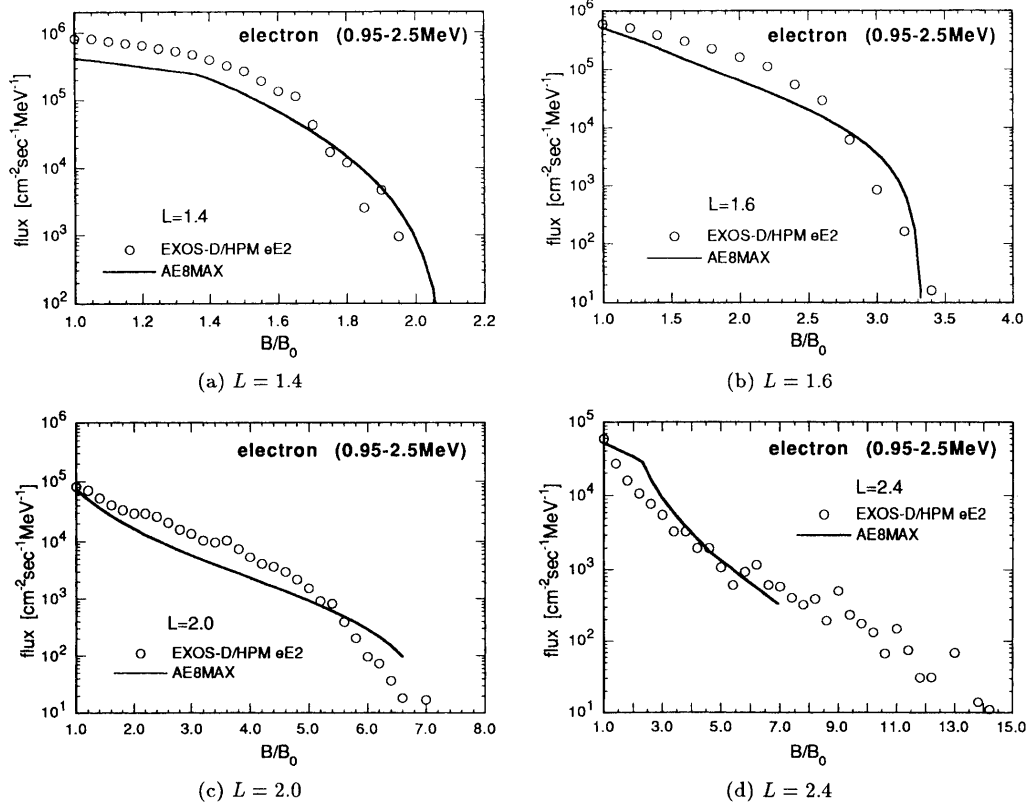


図9 電子 (0.95-2.5MeV) の L 値を一定にしたときのフラックス分布

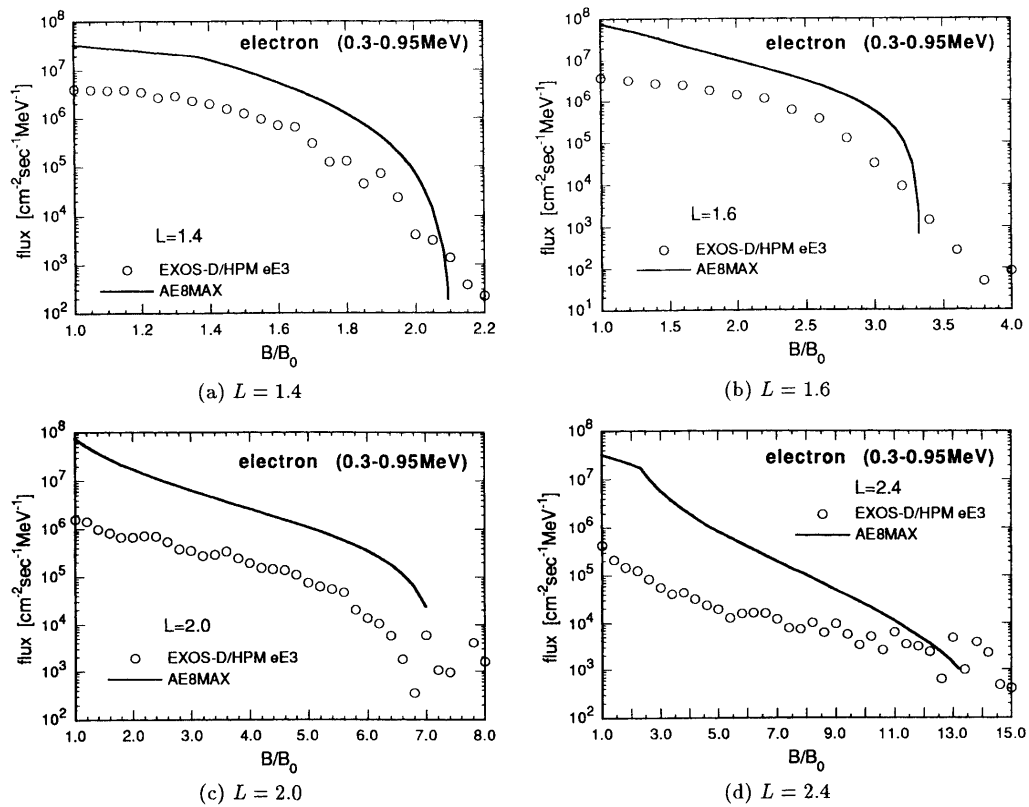


図10 電子 (0.3-0.95MeV) の L 値を一定にしたときのフラックスの B/B_0 分布

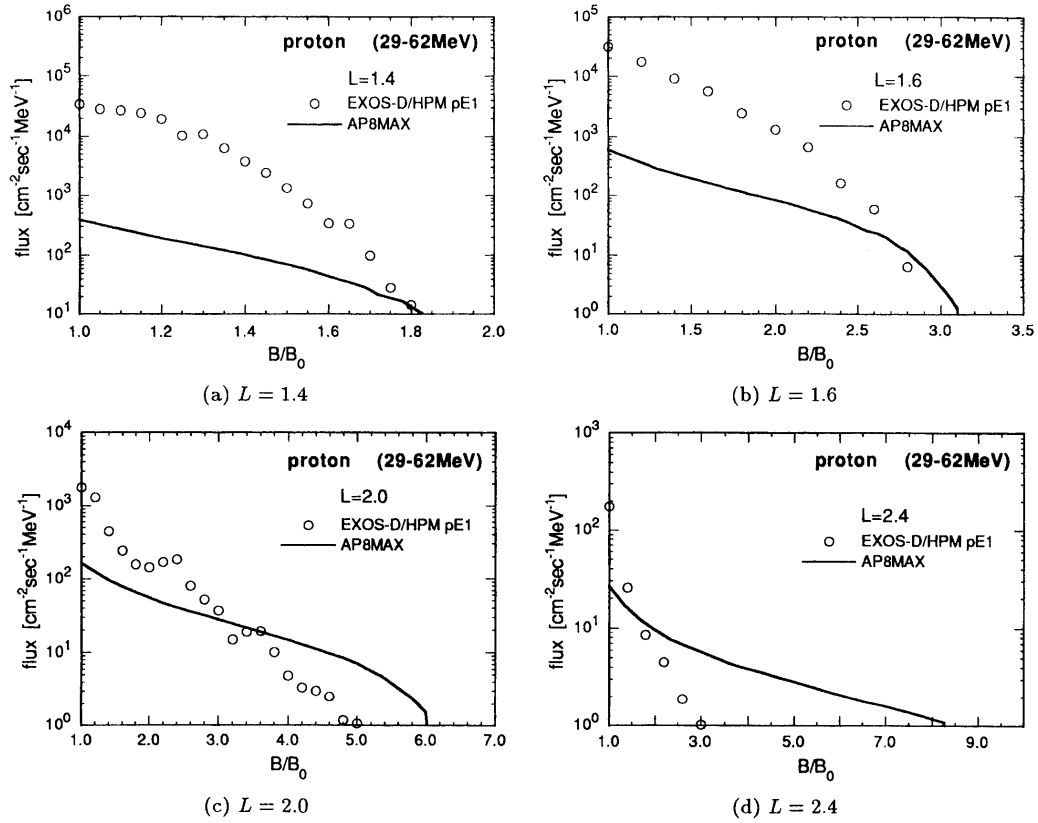


図11 陽子 (29-62MeV) の L 値を一定にしたときのフラックスの B/B_0 分布

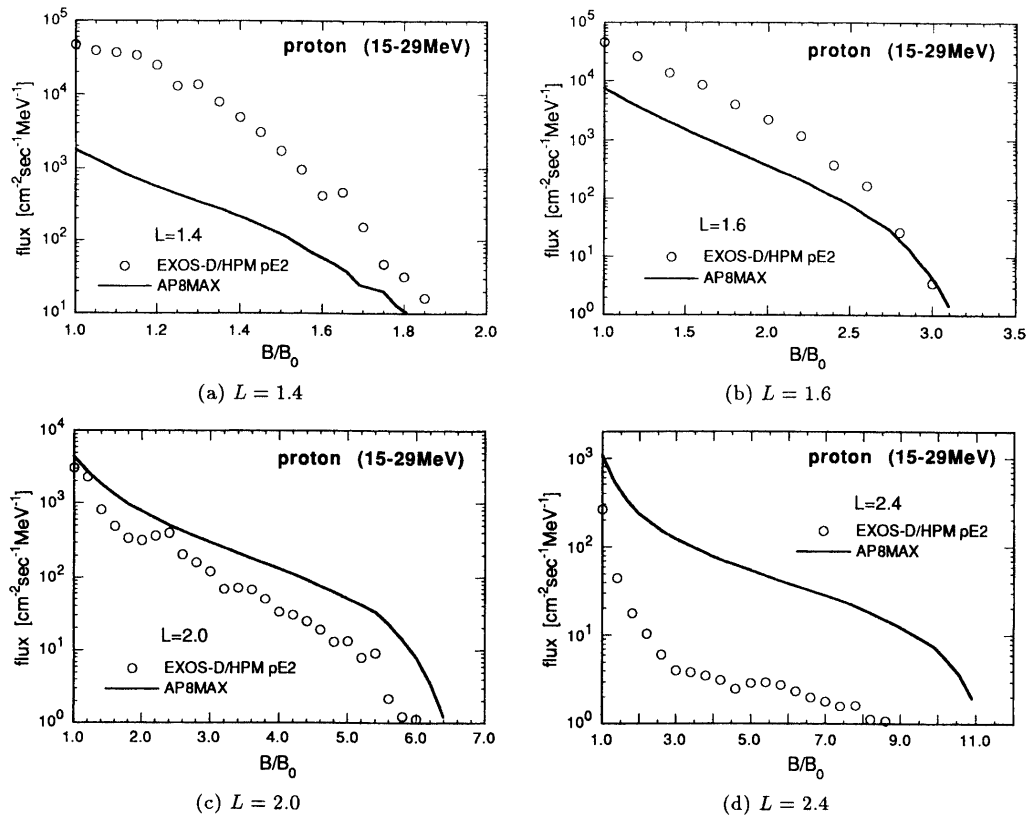
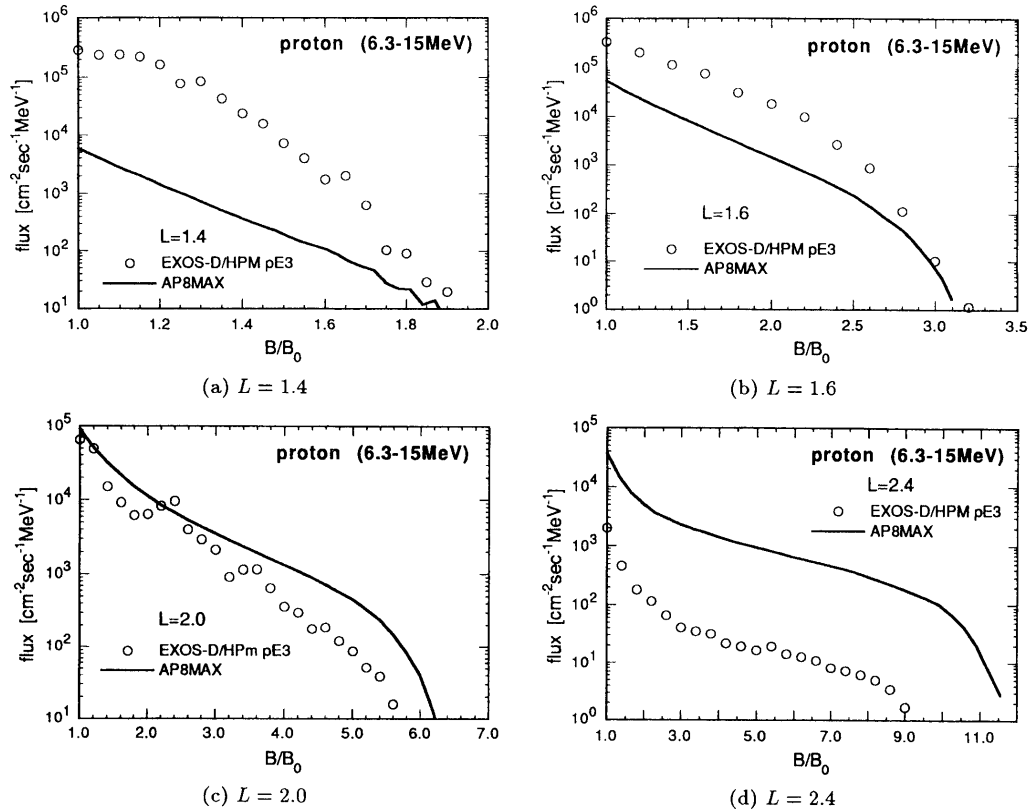
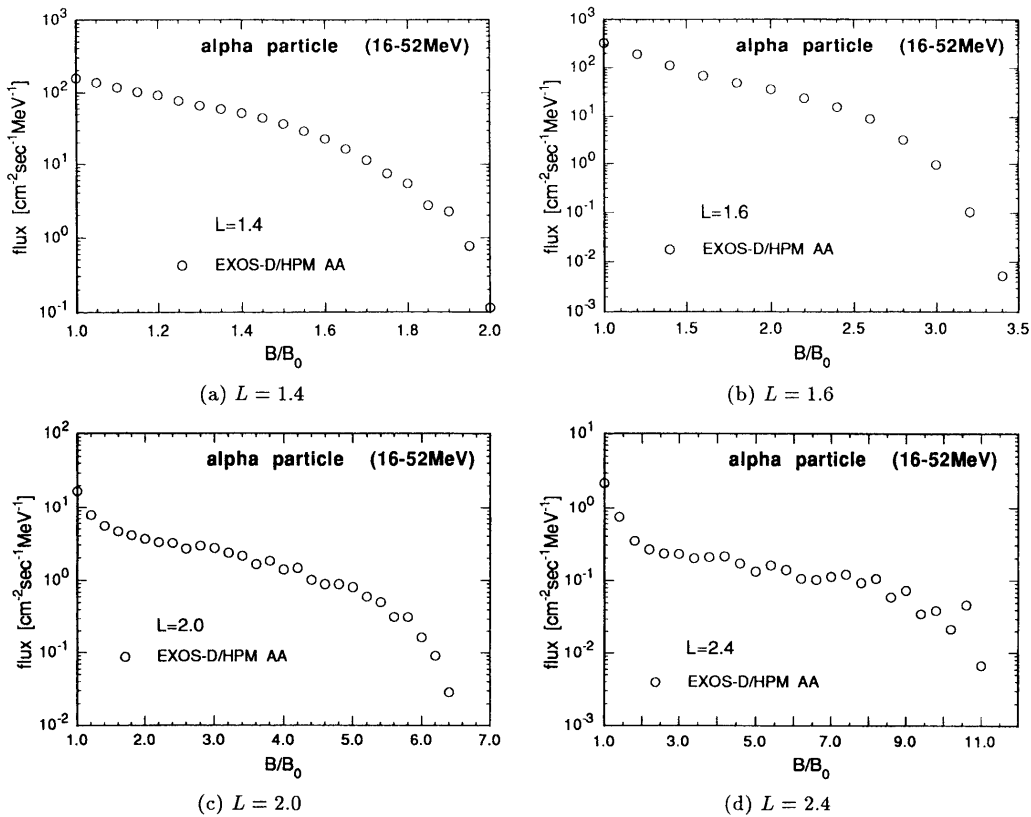


図12 陽子 (15-29MeV) の L 値を一定にしたときのフラックスの B/B_0 分布

図13 陽子 (6.3-15MeV) の L 値を一定にしたときのフラックスの B/B_0 分布図14 α 粒子 (16-52MeV) の L 値を一定にしたときのフラックスの B/B_0 分布

の傾向は似たものになっていて、 B/B_0 の増加とともに減少している。

エネルギー領域が0.95-2.5MeVの電子の観測値はフラックスの分布ならびに絶対値ともにNASAの放射線帯モデルAE8MAXと非常によく一致している。2.5MeV以上のエネルギーの電子は「あけぼの」衛星による観測値がモデル値より高め、0.3-0.95MeVのエネルギー領域の電子は逆に低めになっており、この差は L の増加とともに大きくなる傾向がある。特に L が2.4における2.5MeV以上のエネルギーの電子は、図8からモデル値は、「あけぼの」衛星の観測値より約3桁も過小評価になっている。この付近は放射線帯の内帯と外帯の境界領域であり、モデルの精度はあまりよくない領域でもある。

陽子の方はモデル値と比較して「あけぼの」衛星による観測値のほうが B/B_0 の増加に伴うフラックスの減少の割合が大きい傾向がみられ、陽子の空間分布がモデルよりも狭くなっていることが確認された。この傾向は L 値が大きいほど、また陽子エネルギーが高いほど顕著にみられる。 L が2.0における測定フラックスに B/B_0 が2.4付近と3.6付近に小さなピークが見られるが、これはこの領域の陽子フラックスのばらつきが大きいいため、測定フラックスを平均して求めていることによるものであると考えられる。

5 放射線帯モデル

放射線帯粒子の空間分布が得られたのでこれらのデータをもとに放射線帯粒子のモデルを作成した。HPM検出器の検出限界を、カウントの測定誤差、及び地磁気の状態による変動を考慮して電子、陽子については $10^2\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ 、 α 粒子については $10\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ とした。

得られた空間分布から L 値の範囲は1.2から2.6に限定した。これは、「あけぼの」衛星が磁気赤道を横切るときの L 値の範囲である。また、 L 値が高いところでは太陽活動の影響を受けやすくフラックスの変動が激しいうえに、「あけぼの」衛星が2.6以上の L を通過するときの B/B_0 が大きいために、フラックスが少なく、観測データ数を多くしなければ精度の良い結果が得られない。しかし、解析に用いた約3年間のデータでは観測点が少ないので、精度の悪い結果しか得られず、モデルには含ませないことにした。

粒子の運動は磁力線に深く結びついているので、磁力線(L 値)ごとにフラックスを扱うほうが便利であり、NASAのモデルでも同じ方法で構成されている。そこで、各 L 値は0.1間隔で、幅 ± 0.01 で平均をとった。これは前節の赤道上での空間分布を求めた時の結果から、滑らかな線で結ぶのに十分な間隔であることによる。

各 L 値における観測フラックスを求めるとき、前節図8から図14を求めたときと同様に B/B_0 値を L 値に応じて ± 0.01 から0.1の幅で平均をとった。しかし、このままでは太陽フレアや磁気嵐等により観測時期の違いからフラックスの値のばらつきがみられる。そこで、測定されたフラックスがどの L 値においてもその分布がよく表現できるものとして、

$$F = \exp(K_0 + K_1L + K_2L^2 + K_3L^3) \quad (1)$$

の関数に、測定されたフラックスの平均値をフィットさせて、滑らかな曲線で分布を表現することにした。

さらに、フラックスを与える点での B/B_0 値は次のように決定した。各 L ごとに(1)式の関数から、前述した検出器の検出限界になるときの B/B_0 の値をきめ、その値までの分点数が15から25になるような均等に B/B_0 を分割した。

図15から図21に各測定粒子について、いくつかの L 値での新しく得られたモデルによる分布を図示する。

L が大きいほど、 B/B_0 は大きな値をとることができるので、粒子は B/B_0 の値が大きいところまで分布している。しかし、陽子や α 粒子は L が大きいところでは B/B_0 が小さいところにしか分布していないようにみえるが、これはこの領域でのフラックスが少なく、十分な精度のデータを得るのにまだ解析データ数が少なかつたからである。

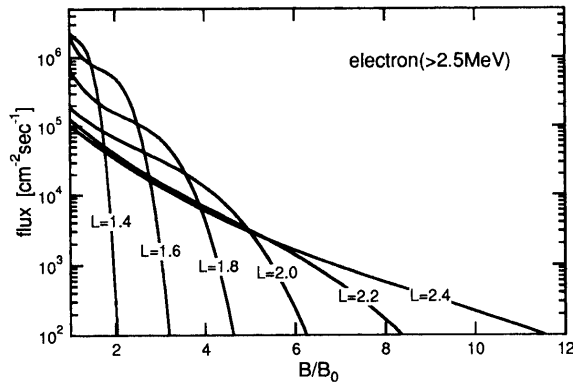


図15 電子 (>2.5MeV) のモデル

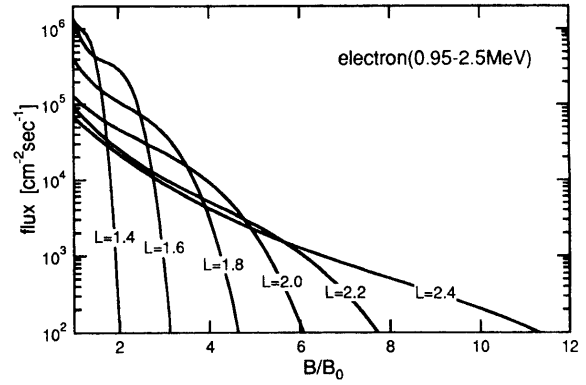


図16 電子 (0.95-2.5MeV) のモデル

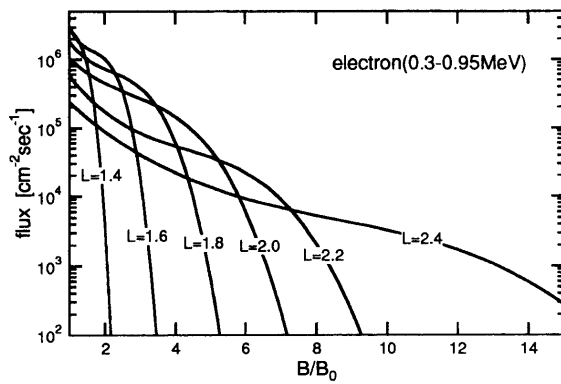


図17 電子 (0.3-0.95MeV) のモデル

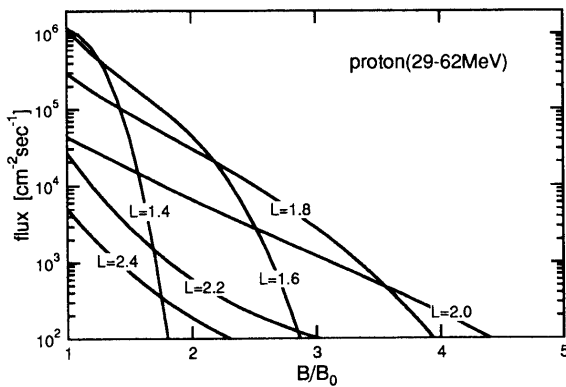


図18 陽子 (29-62MeV) のモデル

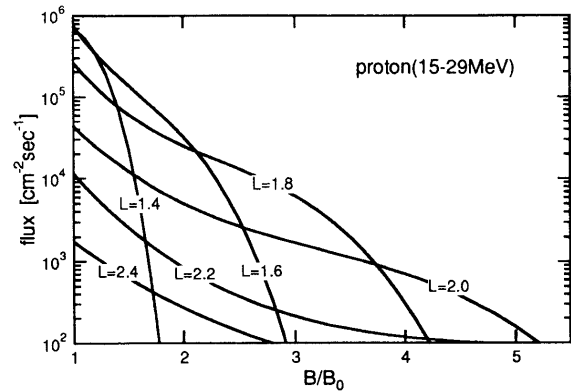


図19 陽子 (15-29MeV) のモデル

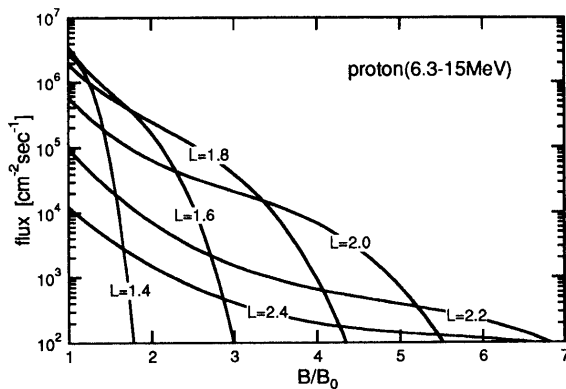


図20 陽子 (6.3-15MeV) のモデル

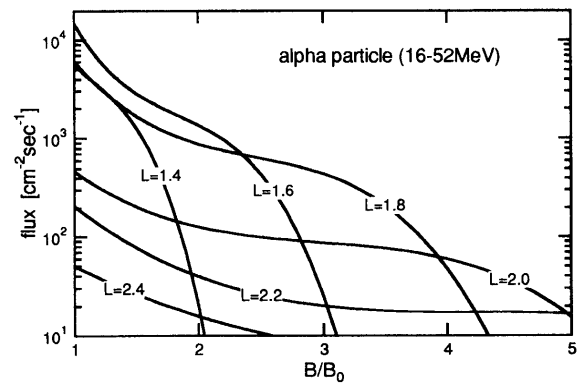


図21 α粒子 (16-52MeV) のモデル

6 放射線帯粒子の時間変動

地磁気の静穏時における放射線帯粒子の粒子フラックスの空間分布 (B - L 分布) を与える新しいモデルが得られたので、次に磁気嵐の起った後の放射線帯粒子の分布の時間変動について考える。図22から図28に各チャンネルの粒子について、様々な L 値での粒子強度変動を図示する。表3に示す磁場の擾乱時に粒子フラックスの増加が観測され、特に1989年3月、10月、1991年3月の太陽フレア発生時には1~3桁に及ぶ大きなフラックス増加が見られる。これらのフレアに伴って侵入した粒子は L が大きいところでは L が小さいところに比べて早く

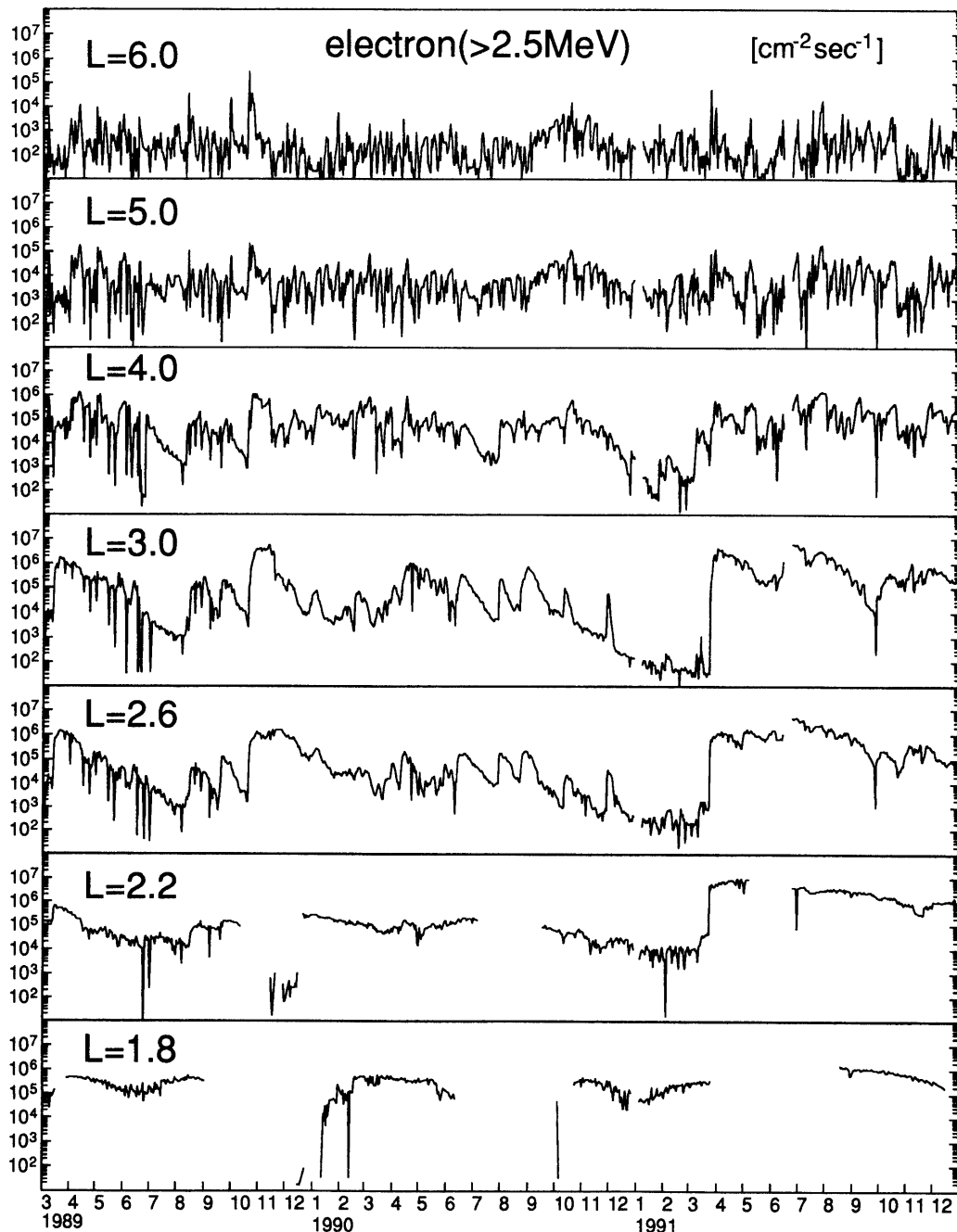


図22 電子 (>2.5MeV) の L 値毎の変動の様子

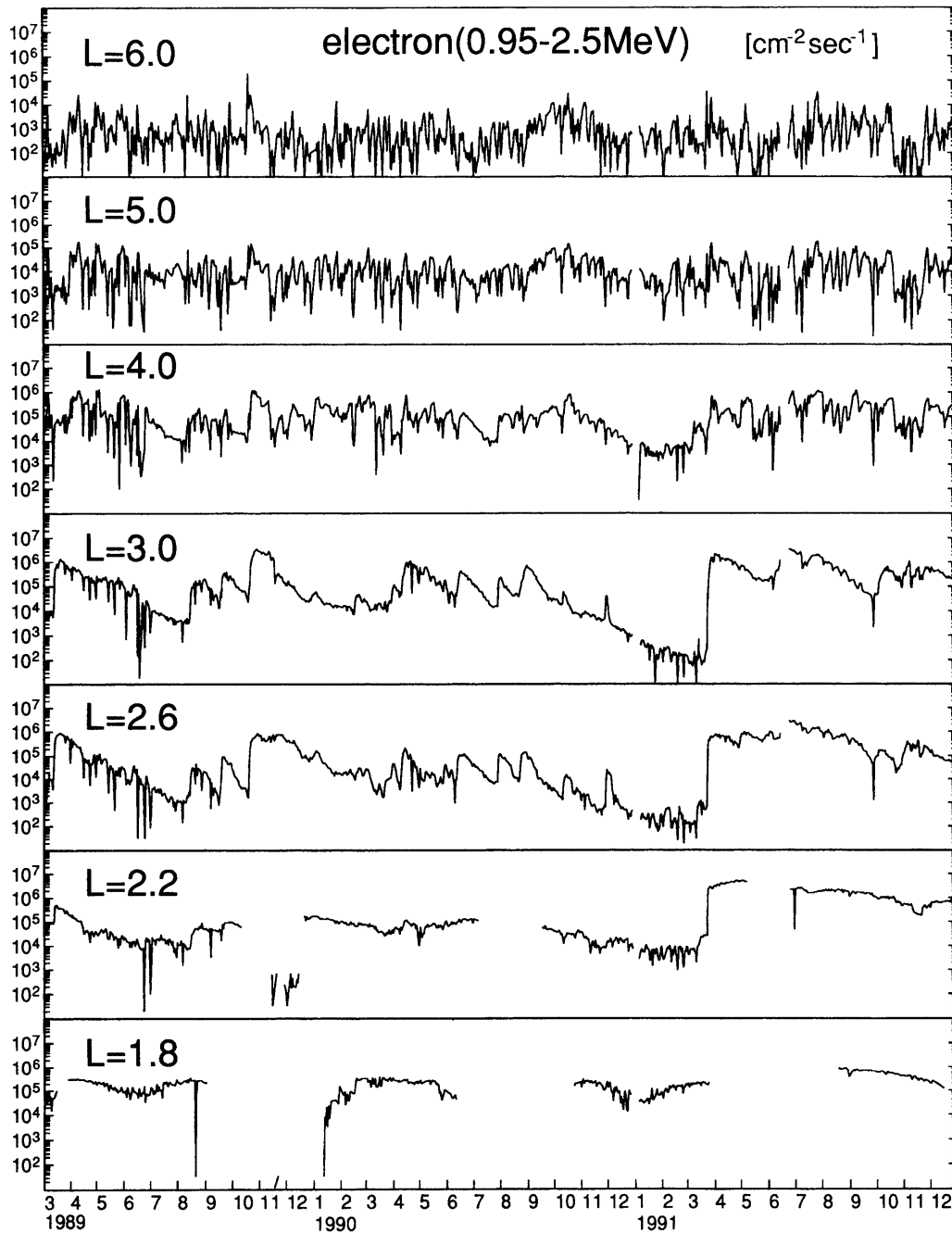


図23 電子 (0.95-2.5MeV) の L 値毎の変動の様子

フラックスが減衰している。

陽子と α 粒子においては、 L 値が4.0以上のところではフラックスの変動がほとんど同じような傾向にあり、普段はほとんどフラックスがないが、 K_p 、 D_{st} が大きく変動した時に即時に増加し、またすぐに以前のレベルにもどる。すなわち、これは捕捉された粒子ではなく、極域で磁力線が外に開いているので、そこから侵入した高エネルギー粒子であると考えられる。陽子、電子は内側の L になるに従い、増加したフラックスが減衰する時間が長くなり、放射線帯に捕捉されている様子が明らかである。この結果から電子と陽子の生存時間 (life time) を求めた。

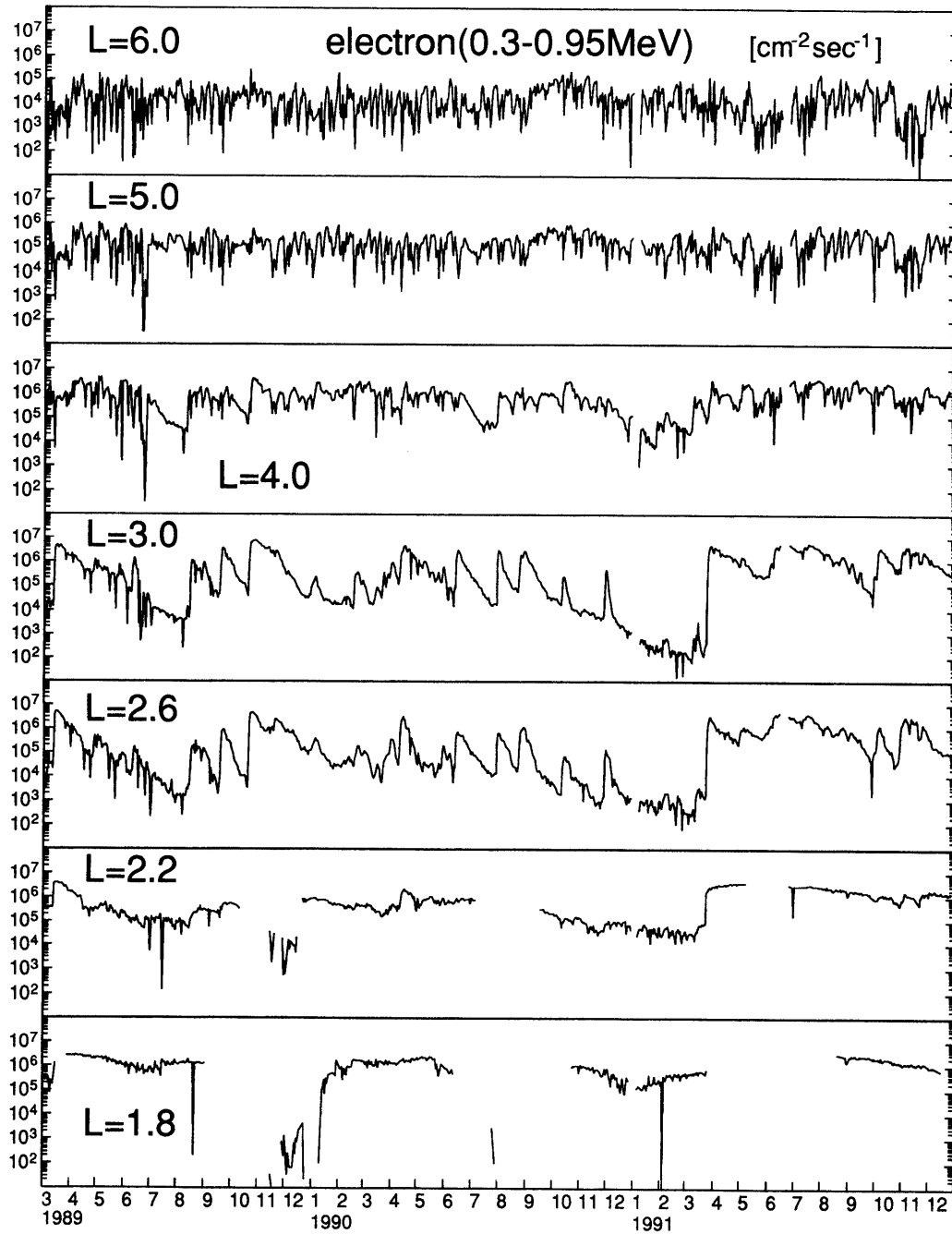
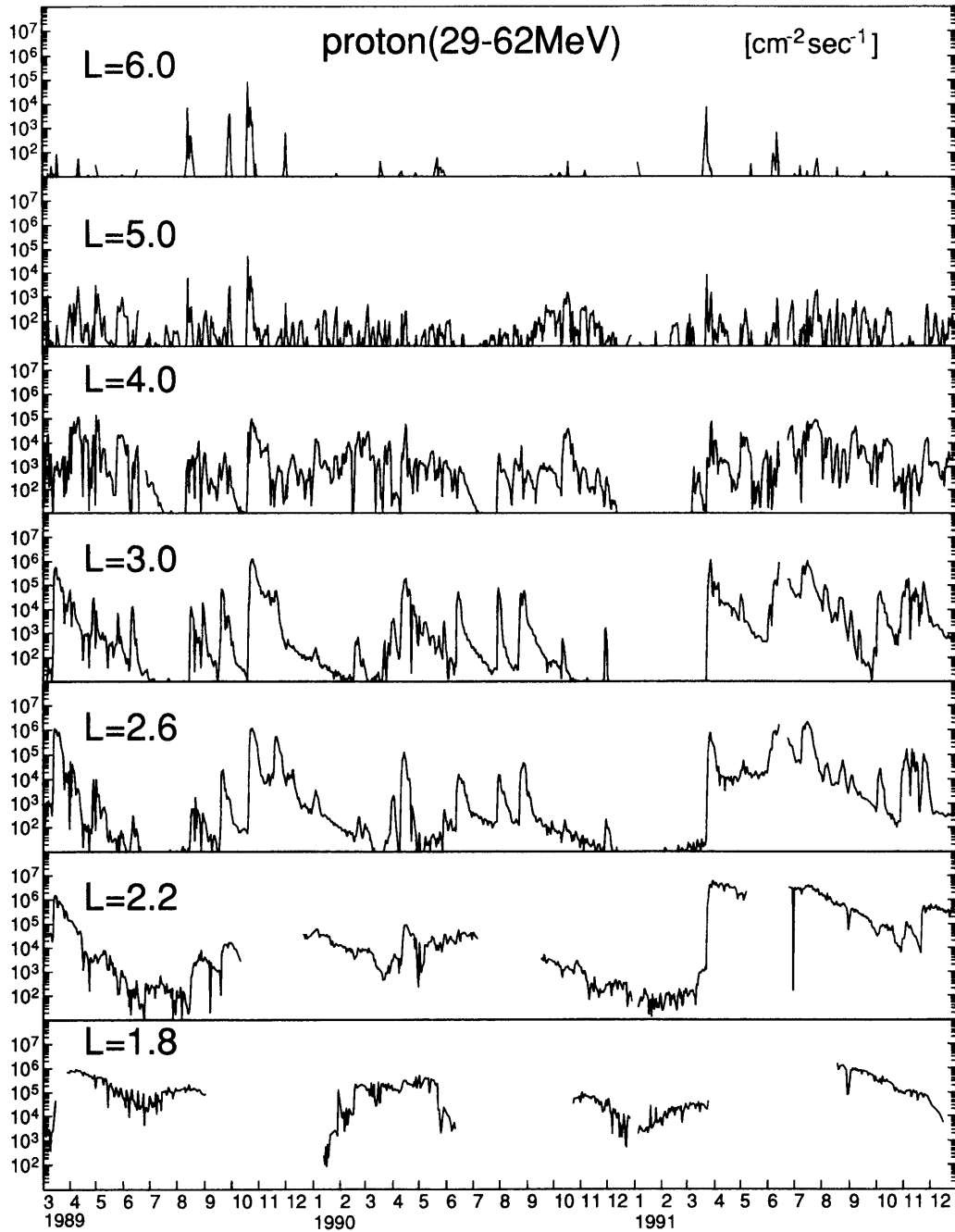


図24 電子 (0.3-0.95MeV) の L 値毎の変動の様子

ここで、生存時間とは荷電粒子のフラックスが半分に減少すると時間と定義した。地磁気座標 (B, L) において、エネルギー E の荷電粒子が一旦増加した後に減少していくときのフラックスの変動を

$$F(E, B, L, t) = k_0 + k_1 \exp[-k_2(t-t_0)] \quad (2)$$

で表される式にフィットさせ、ここに現われる係数 k_2 から、

図25 陽子 (29-62MeV) の L 値毎の変動の様子

$$T_{life} = \frac{\ln 2}{k_2} \quad (3)$$

で生存時間 T_{life} を求めた。ただし、 t_0 はフラックスが最大になった時刻である。

解析に用いたデータの開始日時とその日の K_p 指標の総計を表6に示す。

図29と図30に電子と陽子について生存時間を求めたものを示す。電子 (0.3-0.95MeV) については Roberts がさまざまな衛星のデータから得た生存時間 (電子のエネルギーは 500keV 以上)¹⁰⁾ も示し、「あけぼの」衛星

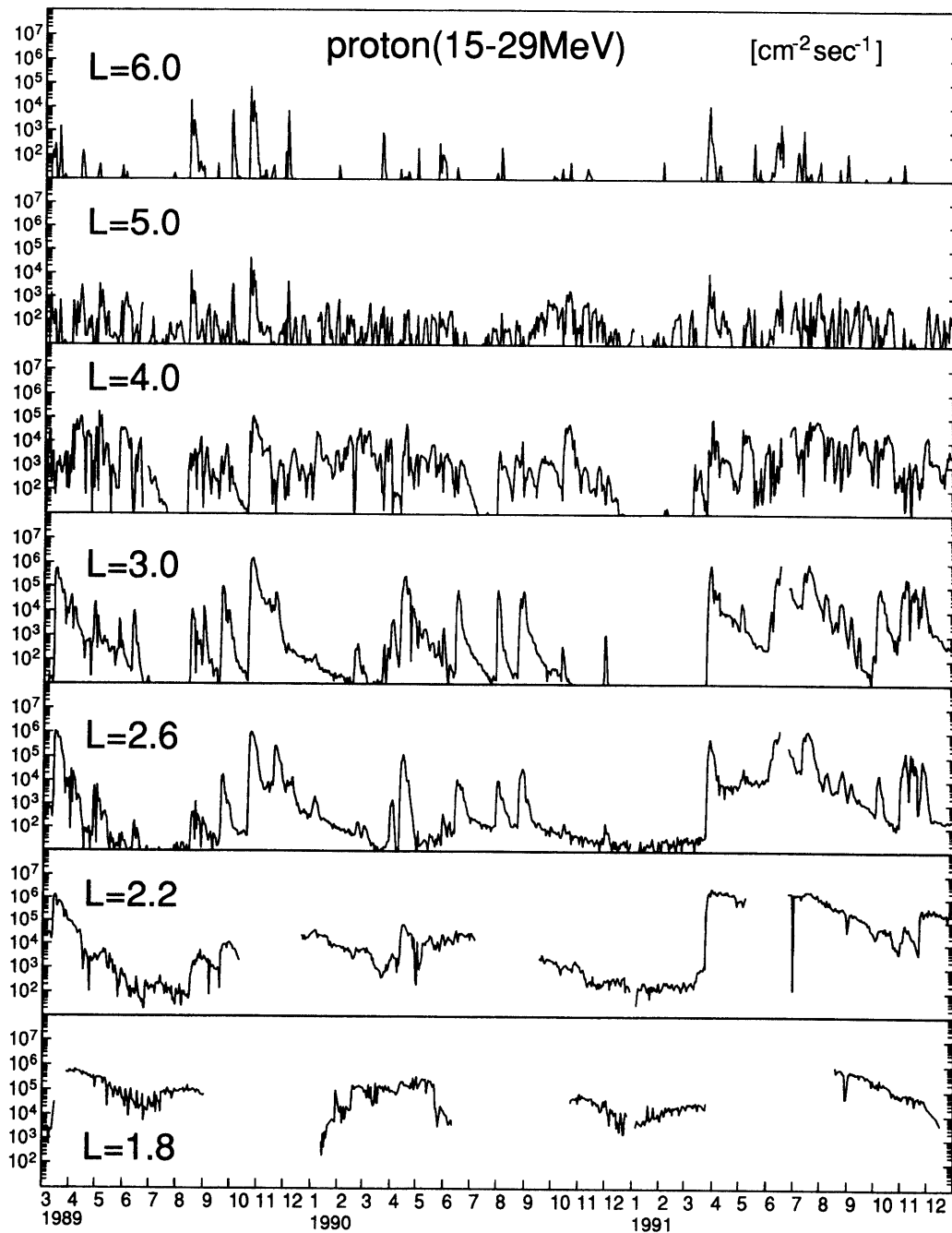


図26 陽子 (15-29MeV) の L 値毎の変動の様子

で得られたものと比較している。

これらの結果から、観測時期の違いにより放射線帯粒子の生存時間はばらつきが大きいですが、全体的な傾向として L 値が小さいほうが生存時間が長くなっている。特に、電子の生存時間のばらつきは大きく、2.5MeV 以上のエネルギーの電子は 1 桁近く生存時間が違うところもある。とりわけ、1991年3月23日のフレア発生時と、1989年10月19日のフレア発生時の生存時間はそれら以外のフレア発生時と比べて2倍近く長くなっている。エネルギー領域が0.95-2.5MeVの電子は2.5MeV以上のエネルギーの電子と比較して、生存時間のばらつきが少く、L 値による依存性もなく10日前後とほぼ一定である。0.3-0.95MeVのエネルギーの電子は Roberts のデータと

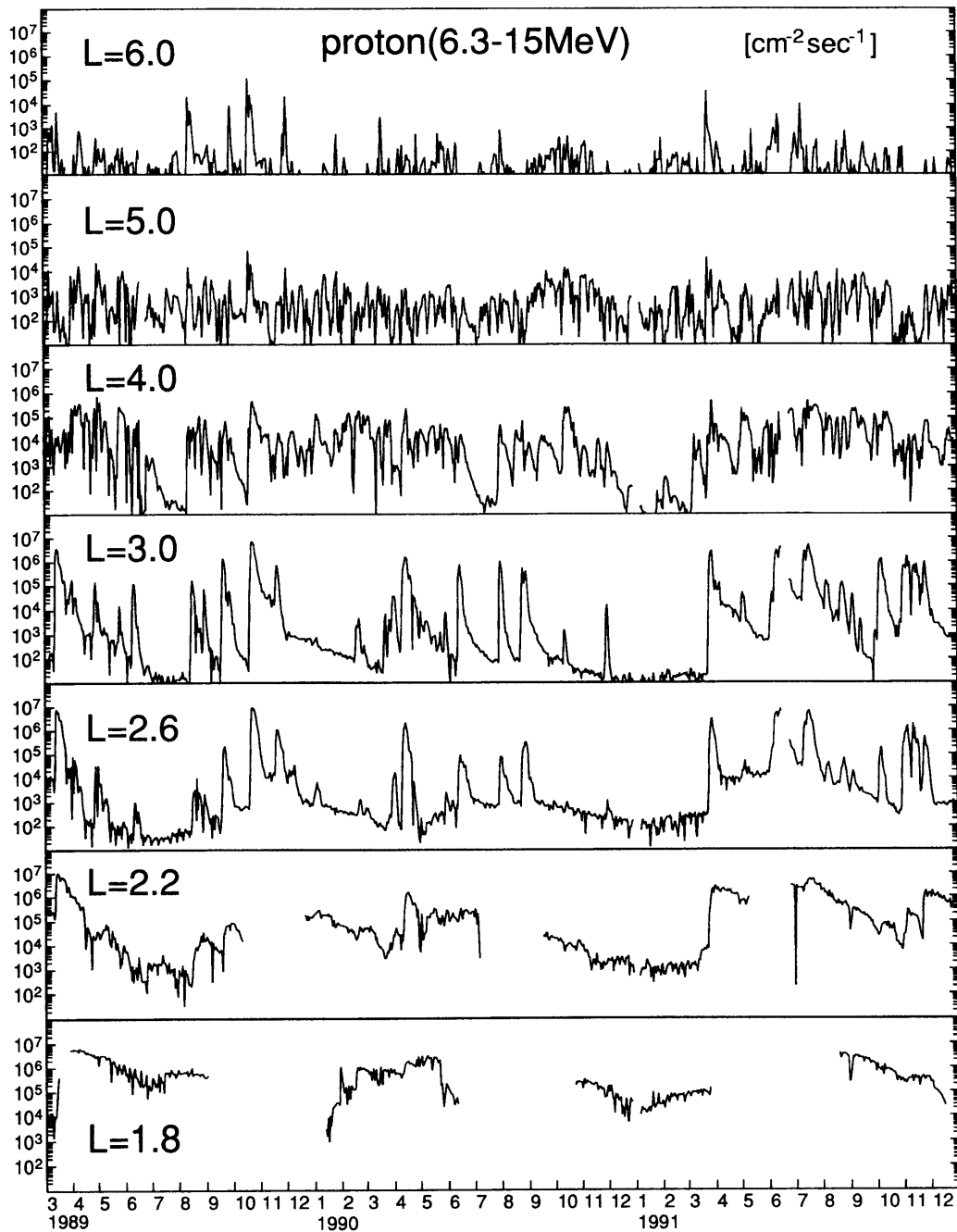
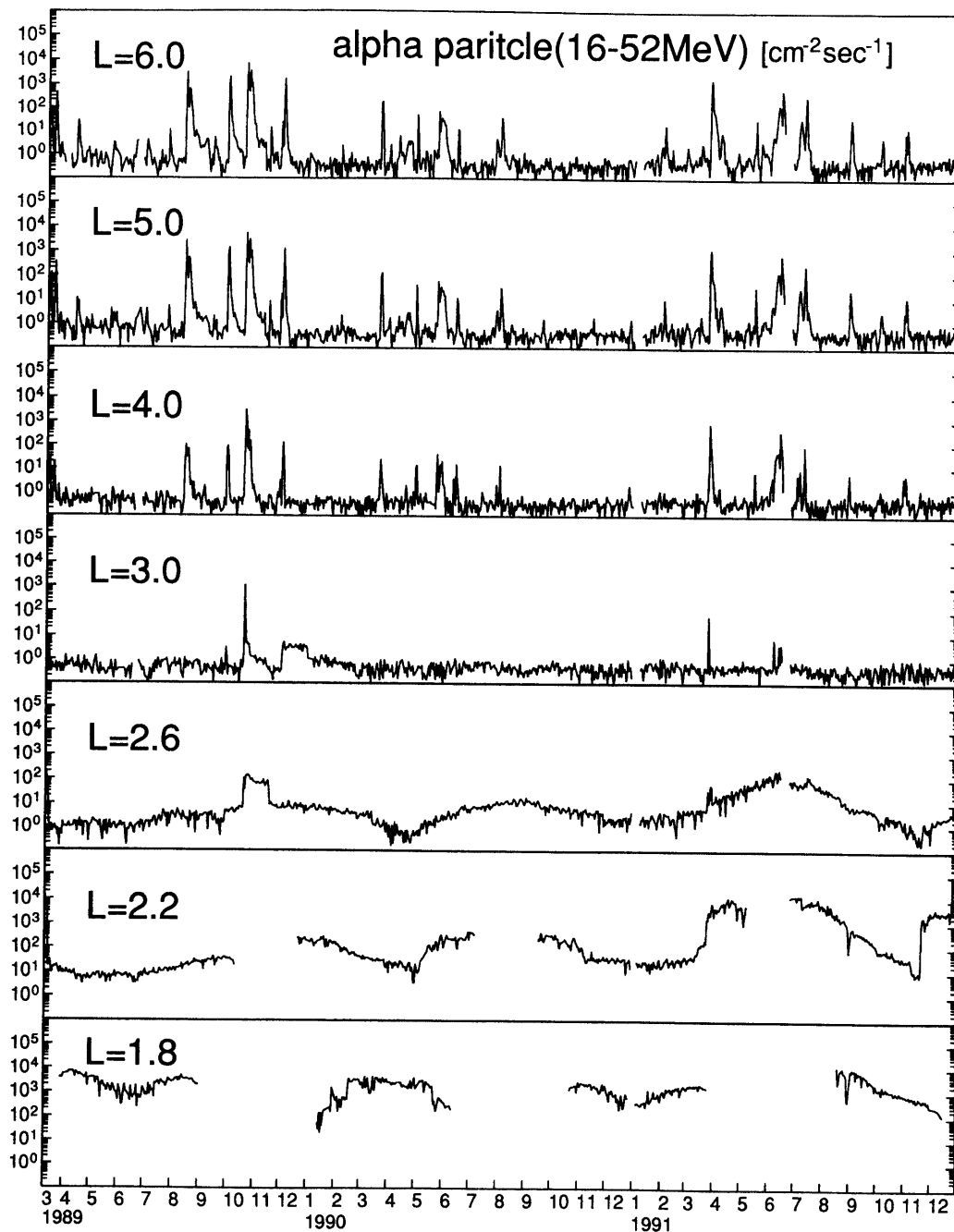


図27 陽子 (6.3-15MeV) の L 値毎の変動の様子

同じく、 L とともに生存時間が徐々に減少する傾向があり、絶対値で比較してもよい一致が得られている。

一方、陽子は電子と比べると生存時間のばらつきは少なく、各エネルギー領域とも同じような傾向がみられ、 L が2.2のところで、生存時間は10日前後であるが、 L 値が増加するに従い生存時間は減少していき、 L が2.8近くで生存時間は極小になり、それ以上の L 値では1~2日とほぼ一定となる。陽子の空間強度分布から考えると、 L が3以上では観測したエネルギー領域の陽子は放射線帯に捕捉されるものは少なく、ほとんどがフレアによる陽子が侵入してきたもので、 L が3以上では生存時間は一定になると考えられる。

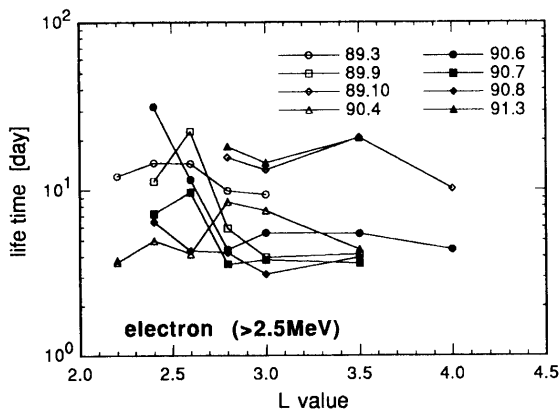
α 粒子は図28で示したように電子や陽子と比較して、 L が3.0以下ではフラックスは安定しており、長い期間

図28 α 粒子 (16-52MeV) の L 値毎の変動の様子

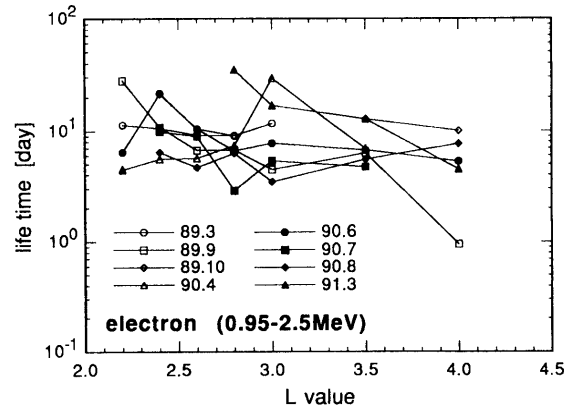
でのフラックスの増減しかみられないが、これは「あけぼの」衛星の軌道の変動に伴ったものである。しかし L が2.6において、1991年3月以降ではそれ以前のフラックスの変動と異なり、変動のピークでフラックスは $10^2 \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ に達し、1991年3月以前と比較して10倍近く大きくなっている。このことは L が2.6付近の α 粒子の分布が以前より増加したことを示している。一方、 L が2.2でフラックスは1991年3月の時点で急激に増加し、その後1991年7月までそのままほとんど変動していない。すなわち、 L が2.6以下のところでは1991年3月23日のフレアにより放射線帯の α 粒子が短時間で増加し、4ヶ月近く減衰しなかったことになる。さらに、 L が3のところではほとんど α 粒子がないうえに、フラックスの増減も1989年10月19日と1991年3月23日のフレアの

表6 解析に用いたデータの開始日時とその日の K_p 指標の1日の総計

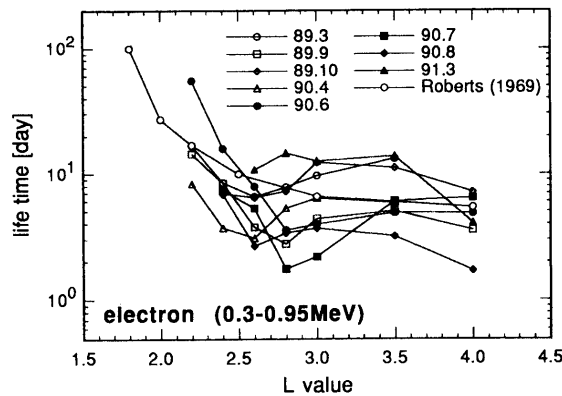
No.	date	sum of K_p
1	1989. 3.13	65 ₀
2	1989. 9.18	36 ₊
3	1989.10.20	47 ₀
4	1990. 4.10	53 ₋
5	1990. 6.12	44 ₀
6	1990. 7.28	48 ₊
7	1990. 8.21	33 ₀
8	1991. 3.24	54 ₀



(a) 電子 (> 2.5MeV)



(b) 電子 (0.95 - 2.5MeV)



(c) 電子 (0.3 - 0.95MeV)

図29 EXOS-D/HPMにより観測された電子の放射線帯中の生存時間

ときに増加したのがみられただけである。これらのフレアの際のフラックスの増加も L が4以上でのフラックスの増加と比較して、生存時間が非常に短く、ほぼ1日でもとのフラックスにもどる。

これらのことから、 α 粒子は L が4より外側では比較的良好に粒子の流入があるが、 L が3付近では非常に早い時間で粒子が通過し、内側 ($L < 2.6$) に侵入して長い時間捕捉されると考えられる。

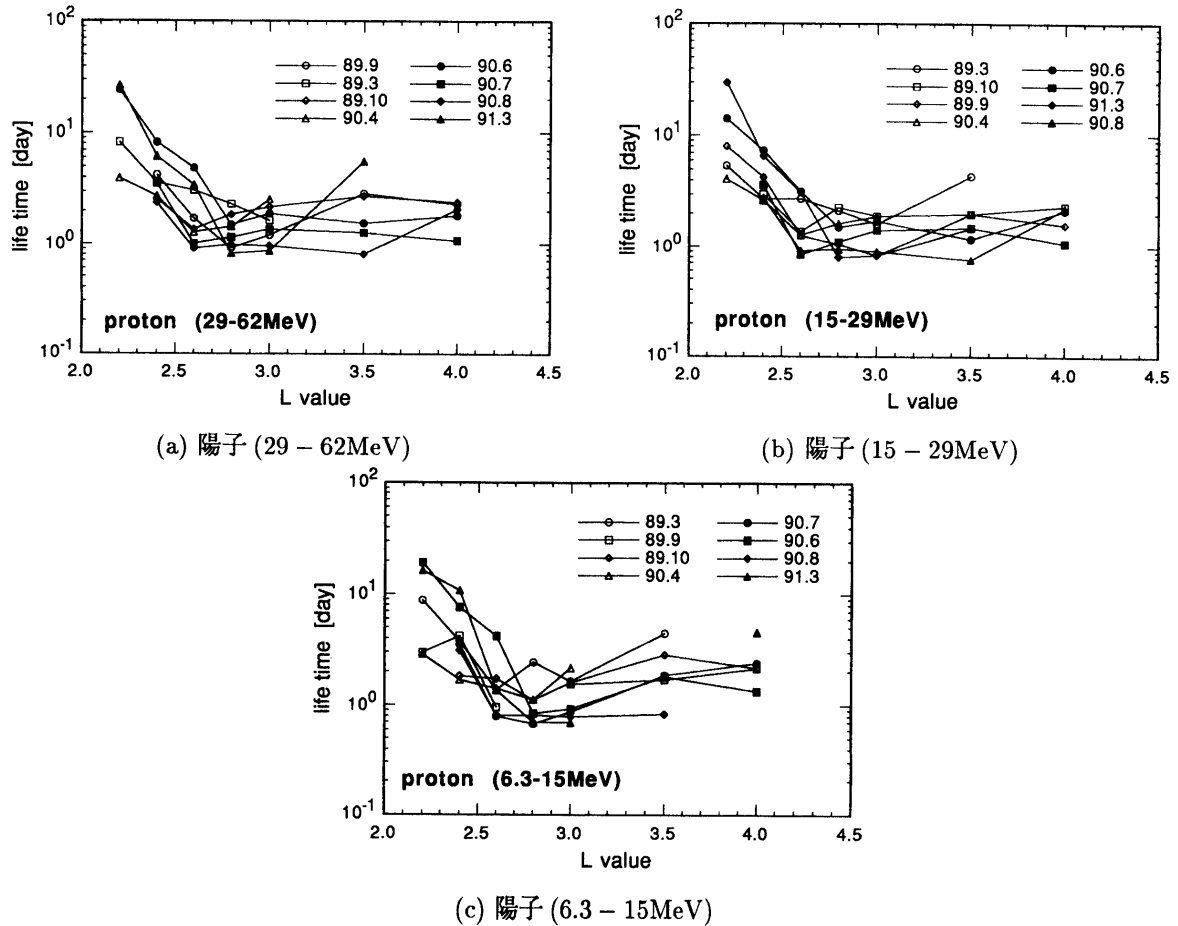


図30 EXOS-D/HPMにより観測された陽子の放射線帯中の生存時間

7 結 論

「あけぼの」衛星 (EXOS-D) に搭載された荷電粒子検出器により宇宙環境放射線の測定が1989年3月から1991年12月までの長期にわたり行われ、次の事が得られた。

1989年4月から1991年3月の solar cycle XXII の太陽活動が極大時で、地磁気嵐のない (地磁気が安定している) ときの放射線帯粒子の平均フラックスの空間分布が得られた。この空間分布をもとに、 L が2.5以下のところでの放射線帯モデルを作成した。NASAの放射線帯モデル AE8MAX, AP8MAX と比べると、観測フラックスのピーク部は L が1.5付近のところでは AE8MAX, AP8MAX よりやや内側にある。電子、陽子のエネルギースペクトルでみると、「あけぼの」衛星での測定値がNASAの放射線帯モデルから得られたスペクトルと比較して硬くなっている。このことは現時点での実際の宇宙環境ではNASAの放射線帯モデルより高エネルギー成分の粒子が多いことを意味し、被曝評価や半導体素子への影響を評価するときに考慮する必要がある。

α 粒子は陽子、電子と比較してフラックスが少ないため、あまり積極的な研究がなされていなかったが、電離電荷を考えると銀河宇宙線の重イオンと同様に十分考慮すべきである。本報告による α 粒子の放射線帯モデルが作成され、今後、さまざまな分野で利用されることが期待できる。

いくつかの磁気嵐のときの放射線帯粒子のフラックスの変動について考察を行った。それにより、放射線帯粒子の生存時間についてデータが得られた。ここで得られたデータは、今後、放射線帯粒子のダイナミクスを含め、考察していく必要がある。

謝 辞

本報告書を書くにあたり、多くのご助言を頂きました東京工業大学の長井嗣信助教授と国立極地研究所の行松彰氏に感謝いたします。また、「あけぼの」衛星に関係されているその他数多くの方々のお力添えがありましたことを、ここにお礼申し上げます。

参考文献

- [1] D.M. Sawyer and 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.
- [2] G.W. Singley and J.I. Vette. The AE-8 Trapped Electron Model Environment. NSSDC/WDC-A-R&S 91-24, NASA/Goddard Space Flight Center, 1991.
- [3] K. Nagata, T. Kohno, et al. OHZORA High Energy Particle Observations. *J. Geomag. Geoelectr.*, Vol. 37, pp. 329–345, 1985.
- [4] M.S. Gussenhoven, E.G. Mullen, K. Ray, M. Violet, C. Hein, J. Bass, D. Madden, and A. Korth. CRRES Proton Flux Maps. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. NS-40, No. 6, pp. 1450–1457, 1993.
- [5] E.G. Mullen, M.S. Gussenhoven, K. Ray, and M. Violet. A Double-peaked Inner Radiation Belt: Cause and Effect as Seen on CRRES. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. NS-38, No. 6, pp. 1713–1717, 1991.
- [6] EXOS-D 中間報告書. SWS-TD-87-013, 宇宙科学研究所, 1988.
- [7] 高木俊治, 中村尚司, 河野毅, 塩野登, 林克己, 楨野文命. 「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.
- [8] 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.
- [9] IAGA Division I Working Group 1. International Geomagnetic Reference Field Revision 1987. *J. Geomag. Geoelectr.*, Vol. 39, pp. 773–779, 1987.
- [10] C.S. Roberts. Pitch-Angle Diffusion of Electrons in the Magnetosphere. *Rev. Geophys.*, Vol. 7, No. 2, pp. 305–337, 1969.