

放射線帯粒子のダイナミクス

長井 嗣 信*

DYNAMICS OF MAGNETOSPHERIC ENERGETIC PARTICLES

By

Tsugunobu NAGAI

This paper discusses modeling efforts for energetic particles in the Earth's radiation belts. The flux of these particles varies greatly in association with geomagnetic activity. Modeling the dynamics of these particles is one of the major subjects in the magnetospheric physics. The most pertinent features of the numerical modeling for the steady-state equilibrium electrons and protons are outlined. Several features of the quasi-empirical modeling and the self-consistent treatment of fields and particles are described to reveal remaining problems in this field.

1. はじめに

地球磁場は太陽風との相互作用によって、地球磁気圏という空間を形成している。この地球磁気圏は、太陽方向にはほぼ $11 R_E$ ($1 R_E$ 地球半径) まで広がり、太陽と反対方向には $1000 R_E$ 以上に広がっているとされる。このうち、太陽方向の境界程度までの距離の地球磁気圏には、地球の磁場に捕捉されて地球のまわりをドリフト運動している大量の荷電粒子が存在している。これらの粒子を、放射線帯 (the Earth's radiation belts) 粒子と呼ぶ。放射線帯粒子は、電子とプロトン、さらにヘリウム・酸素・炭素などのイオンであり、そのエネルギー範囲は、keV 以下から数百 MeV までにわたっている。これらの荷電粒子は、磁力線のまわりを回るサイクロトロン運動と磁力線に沿って南北のミラー点間の往復運動をおこないながら、地球磁場の曲率 (curvature) と勾配 (gradient) によるドリフトをする。これらの粒子は、太陽風起源のものと地球電離層起源のものがあり、ほとんどは磁気圏のじょう乱に伴って、非定常的にこの領域に供給されている。これらの粒子は、電場や磁場の変動による動径方向の拡散による輸送を受け、さらに、粒子間および粒子波動間の相互作用によってピッチ角分布が変化し大気にとび込んで消滅するピッチ角拡散を受ける。このような諸要因により、放射線帯の粒子フラックスは、ほぼ常に変動しているとしてよい。

放射線帯の粒子のうち、比較的エネルギーの低いものは人工衛星の異常帯電 (spacecraft charging) をひきおこし、比較的エネルギーの高いものは人工衛星の物質との直接的な反応をする。これらのことは、検出器等の誤動作や劣化、電子機器の誤動作、さらに記憶システムの内容の変化につながりやすい。従って、人工衛星などのシステムを正常に制御するためには、放射線帯の粒子のダイナミクスを正確に把握しておくことが重要である。またさらに、人間が宇宙空間で活動する場合には、放射線帯の粒子の量を十分に考慮する必要がある。

この論文では、放射線帯の粒子のダイナミクスのモデル化についてのいくつかのトピックスを検討してみる。放射線帯の粒子一般については、多くのレビューがあるので、最近のものを以下にあげておく。

Schulz and Lanzerotti⁽¹⁾, Schulz⁽²⁾, Lyons⁽³⁾, Sagalyn et al.⁽⁴⁾, Spjeldvik⁽⁵⁾, Schulz⁽⁶⁾, Young⁽⁷⁾, Williams⁽⁸⁾, Lyons and Williams⁽⁹⁾, Spjeldvik and Rothwell⁽¹⁰⁾, Williams⁽¹¹⁾.

2. 放射線帯粒子の定常状態のモデル化

数 10 keV 以上のエネルギーをもつ粒子については、地球磁場の曲率と勾配による周回運動が電場による $E \times B$ ドリフトより卓越するために、基本的には、いつまでも地球のまわりを回っていることになる。従って、各 L (McIlwain の L パラメータ) の値に対応する粒子フラックス $f(L)$ について、この運動からのズレをおこさせる輸送の過程と生成消滅を入れた拡散方程式を、境界条

* 気象庁気象研究所 気候研究部
Meteorological Research Institute

件を設定して、時間変化なし ($\frac{\partial f}{\partial t}=0$) として解を求めれば、定常状態のフラックスを得ることができる。

2.1 動径方向の拡散 (radial diffusion)

粒子がある L の値の地点からほかの L の値の地点への輸送をうける原因は、電場および磁場のゆらぎによる拡散 (cross-L diffusion 又は radial diffusion) がある。これを定式化するには、拡散係数を求める必要がある。観測的に広い L の領域にわたって、電場のゆらぎと磁場のゆらぎを求めることはむずかしい。静止衛星軌道については、磁場のゆらぎのスペクトルが求められている⁽¹²⁾。一般には、経験的に求められたものを使う場合が多く、たとえば次のようなものがある。

$$D_{LL} = D_{om}L^{10} + D_{oe} \frac{L^{10}}{L^4 + \left(\frac{\mu}{\mu_0 Z}\right)^2}$$

ここで第1項は磁場による拡散係数であり、第2項は電場による拡散係数であり、 L への依存性が異なっている。 μ は第一次断熱不変量、 Z は電荷、 μ_0 は 1 MeV/G である。プロトンに対しては、 D_{om} としては 2×10^{-10} /day、 D_{oe} としては 10^{-5} /day という値をとることができる⁽¹³⁾。

2.2 粒子の損失

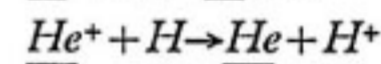
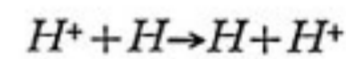
粒子の主要な損失の一つとしては、粒子が磁力線に沿って往復運動しているうちにそのピッチ角が変化して、ミラー点で地球大気中にはいってしまい、粒子が失われていく過程 (pitch angle diffusion) がある。これは、粒子と波動との相互作用が考えられ、次の条件を満たす波動が存在する必要がある。

$$\omega - k_{\parallel} \cdot v_{\parallel} = n\Omega, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

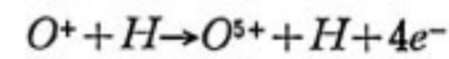
ここで、 ω は波の周波数、 k_{\parallel} 、 v_{\parallel} は磁力線方向の波数ベクトルと速度ベクトル、 Ω は粒子のジャイロ周波数である。電子については、放射線帯に存在するすべてのエネルギーにわたって上の条件を満たすホイッスラー波が存在しており、ピッチ角拡散が定量的に求められている⁽¹⁴⁾。ホイッスラー波はその成長の速度が電子のフラックスによって決められているために、電子フラックスが増大しても、ピッチ角拡散による損失のために⁽¹⁵⁾、ある一定値以上に電子フラックスがなることがない。最近の観測によっても、安定に捕捉される電子のフラックスに上限があることが示されている⁽¹⁶⁾。このことは、電子にとって、波との相互作用が重要な損失メカニズムであることを示している。

イオンについては、イオンサイクロトロン波によってピッチ角散乱をうける可能性がある。しかしながら、イオンサイクロトロン波は観測にかかりにくく、この方面での定量的な検討はすすんでいない。

地球のまわりには中性水素でできているジオコロナ (geocorona) が存在する。さらに、冷たいプラズマのあつまりであるプラズマ圏 (plasmasphere) が存在している。これらの粒子との衝突も、重要な損失メカニズムである。中性水素の分布は観測的にかなり確立したものとはいえないが、Tinsley⁽¹⁷⁾ によって得られた分布が一般的に使われている。冷たいプラズマの密度は、地磁気活動によって大きく変化することが知られているが、経験的に求められた値を使うことが多い。これらのエネルギーの低い粒子と放射線帯の粒子とのクーロン衝突によって、放射線帯の粒子のエネルギー損失の割合が定式化されている。またイオンについては、電荷交換 (charge exchange) が重要な損失のメカニズムとなる。



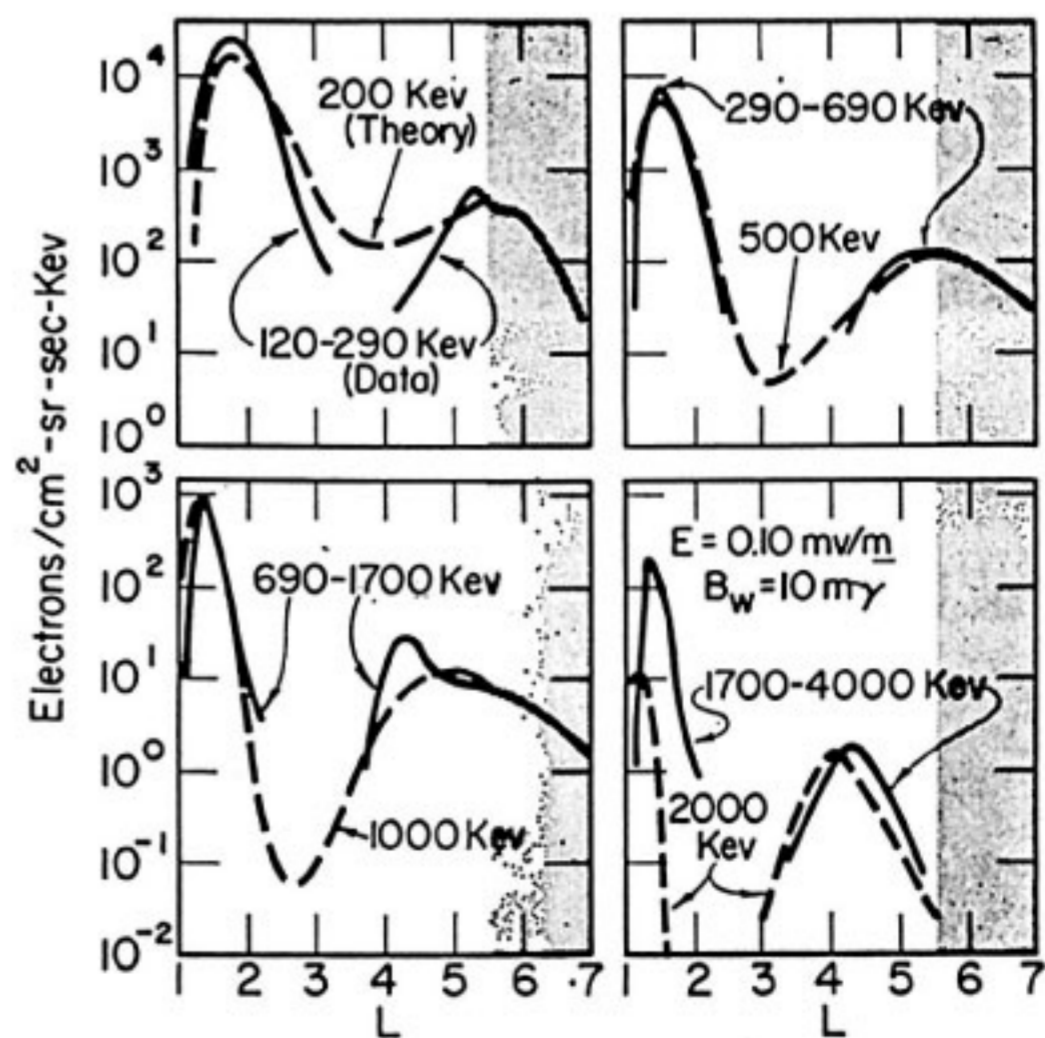
以上のような反応では、高速の中性水素や中性ヘリウムができ、これらのほとんどは地球からでていくものと考えられ、低速の水素イオンが残る。



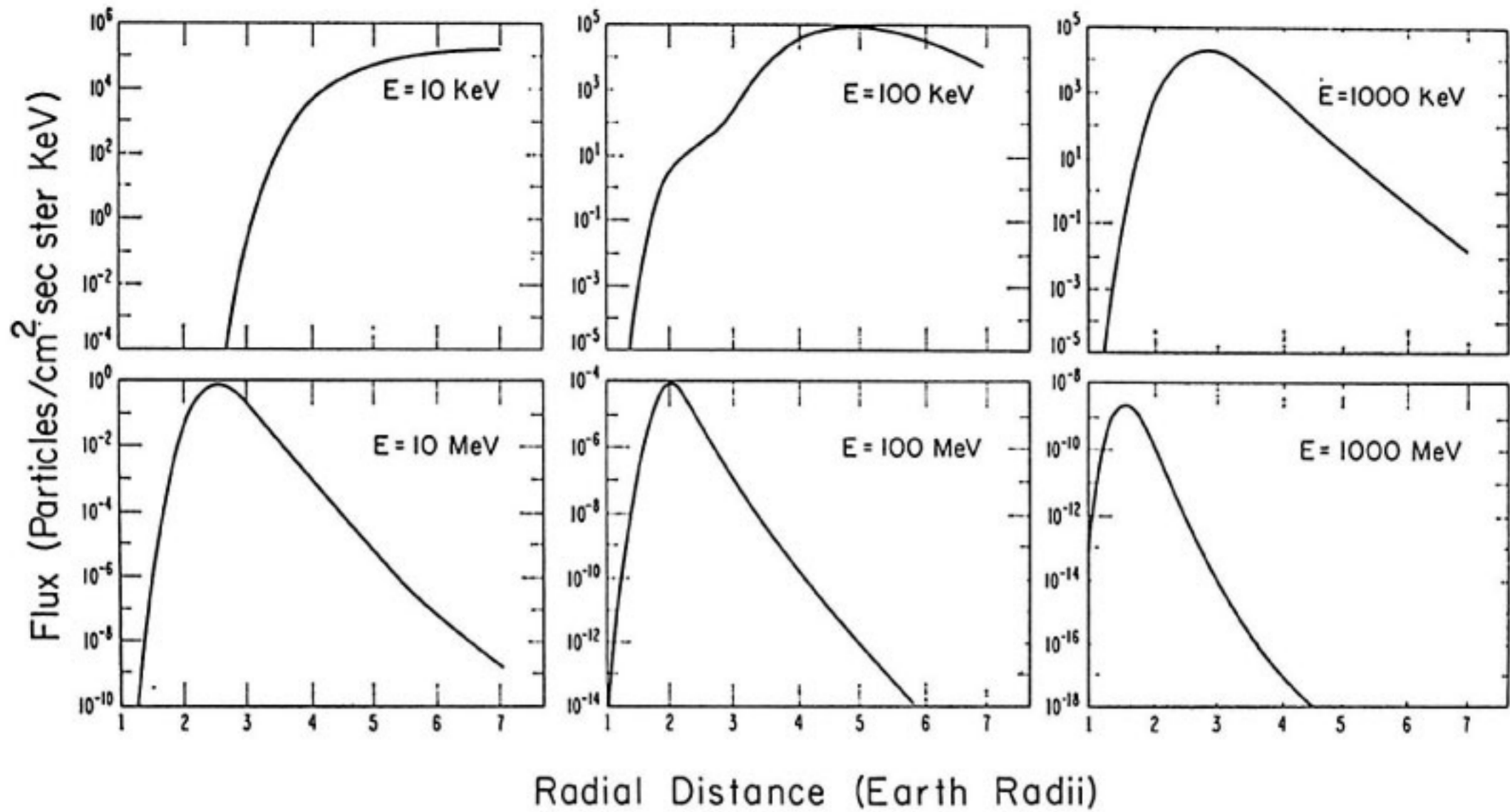
このような反応では、イオンの電荷状態が変わるので、イオンの損失と同時に生成の役割もはたす。ここで重要なことは、各イオンに対して、電荷交換 (charge exchange) の衝突断面積が大きく違うため、イオンによって放射線帯での寿命に差がでてくることである。

2.3 電子モデル⁽¹⁸⁾

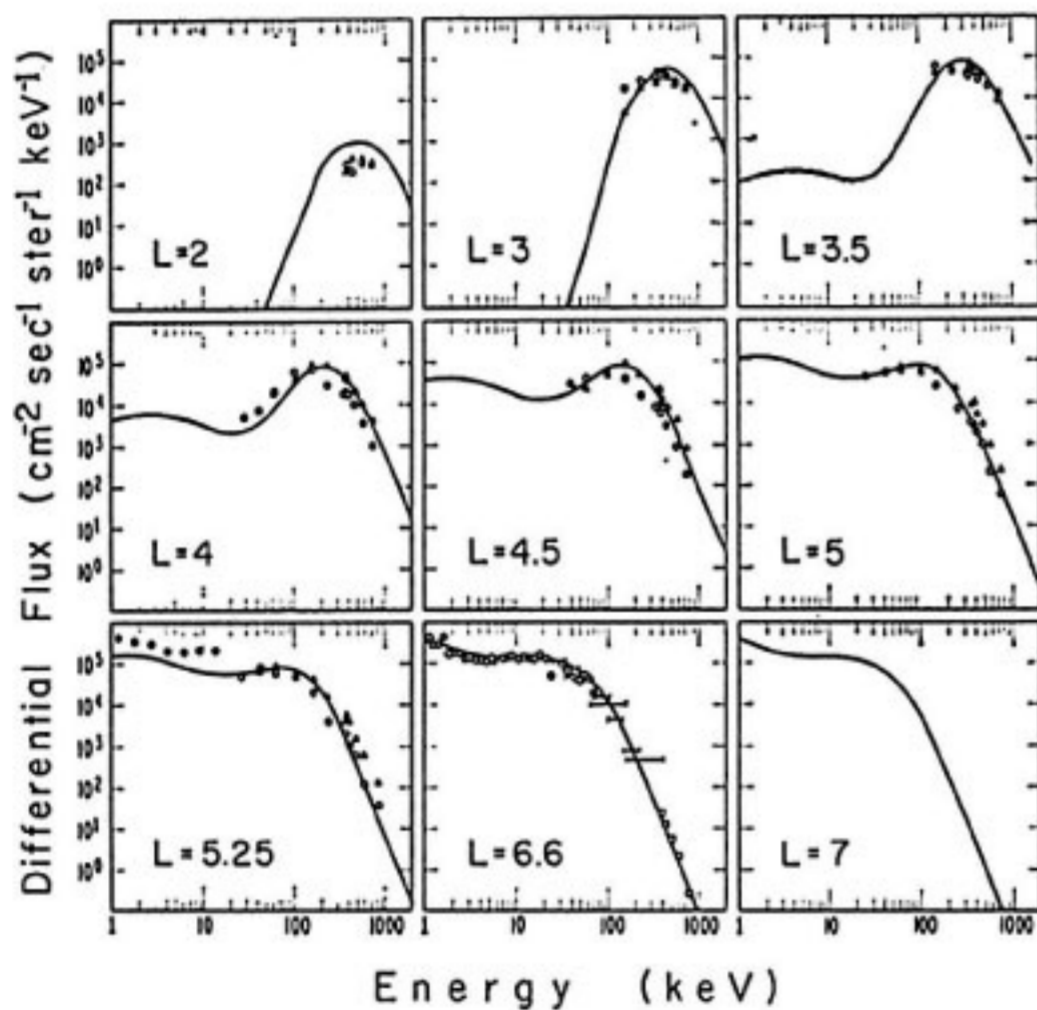
放射線帯の電子については、プラズマ圏に存在するホ



第1図 計算によって得られた電子フラックスの分布 (破線) と観測によって得られたものとの比較 (実線)。L=5.5 で両者の値は合わせてある。



第2図 計算によって得られたプロトンのフラックス分布.



第3図 計算によって得られたプロトンの各Lでのエネルギースペクトル(実線)と観測値(丸印)の比較.

イッスラー波による散乱によってピッチ角拡散をおこし、大気に降り込んで消滅していくことに対する寿命を、計算しておく。この寿命は、波の性質とともに、電子のエネルギーと L-shell に依存する。電場のゆらぎによっておこる動径方向の拡散と、上記にある波による損失とクーロン衝突による損失を組み合わせ、拡散方程式を作る。

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(D^{eLL} \frac{1}{L^2} \frac{\partial f_e}{\partial L} \right) - \frac{f_e}{\tau_w} - \frac{f_e}{\tau_c}$$

ここで f_e は電子の分布関数、 D^{eLL} は動径方向の拡散係数、 τ_w は波動との相互作用に対する寿命、 τ_c はクーロン衝突に対する寿命である。電子の生成は考えず、外側 $L=5.5$ のところに境界をおき、定常的に外側から電子は供給されているとして解を求める。

第1図に、理論的に得た各エネルギーの電子の動径方向のフラックス分布と、人工衛星 OGO-5 によって観測されたものを示している。ここで、 $L=5.5$ で両者の値をあわせている。この理論は、放射線の電子が内帯と外帯の2つに分かれており、スロットと呼ばれるフラックスの少ない領域が形成されていることを、みごとに再現している。さらに、スロットの位置は、電子のエネルギーが上がるに従って、地球側へ近づくことも再現している。さらに、内帯外帯ともに、電子のエネルギーが上がるに従って、フラックスのピークがやはり地球側へ近づくことも示している。

2.4 プロトンモデル⁽¹⁹⁾

プロトンについても、外側に境界条件を設定して、定常状態のフラックス分布を求めることができる。動径方向の拡散に対して、クーロン衝突と電荷交換 ($H^+ + H \rightarrow H + H^+$) による損失を考え、拡散方程式を作る。ここでクーロン衝突は単純な損失というよりは、高エネルギー状態から低エネルギー状態への遷移をうながす。高エネルギーのプロトン (数+MeV 以上) については、地球に近いところで宇宙線アルベド中性子崩壊 (Cosmic Ray Albedo Neutron Decay) による生成があるが、ここでは考えない。

$$\frac{\partial f_p}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left[D^{pLL} \frac{1}{L^2} \frac{\partial f_p}{\partial L} \right] - A f_p + G \frac{1}{\mu^{\frac{1}{2}}} \frac{\partial f_p}{\partial \mu}$$

ここで f_p はプロトンの分布関数, D^{pLL} は動径方向の拡散係数, A は charge exchange による損失の割合, G はクーロン衝突による遷移の割合, μ は磁気モーメントである.

第2図に静止衛星 ATS-6 ($L=6.6$) の観測値を外側境界条件として, 各エネルギーのプロトンのフラックスの動径方向の分布を示している. プロトンについては, 電子のようなスロットに対応するものは観測されていない. 第3図に各 L -shell でのプロトンのエネルギースペクトルと人工衛星 Explorer 45 による観測値が示してある. 観測は小さい L -shell ではエネルギーの範囲が小さいが, 観測されているものについては, 良い一致を示していることがわかる.

プロトンのモデルについては, 波との相互作用がはいっていない. さらに, エネルギーの低いものについては, 磁気圏対流の電場による輸送の効果が大きいことも, 注意すべきである.

プロトンのモデルを拡張し, 電荷交換の過程を単にイオンの中性化だけでなく, 異なった電荷状態への遷移も考慮に入れれば, ヘリウムや酸素のイオンについても, 同様なモデルを作ることができる⁽²⁰⁾.

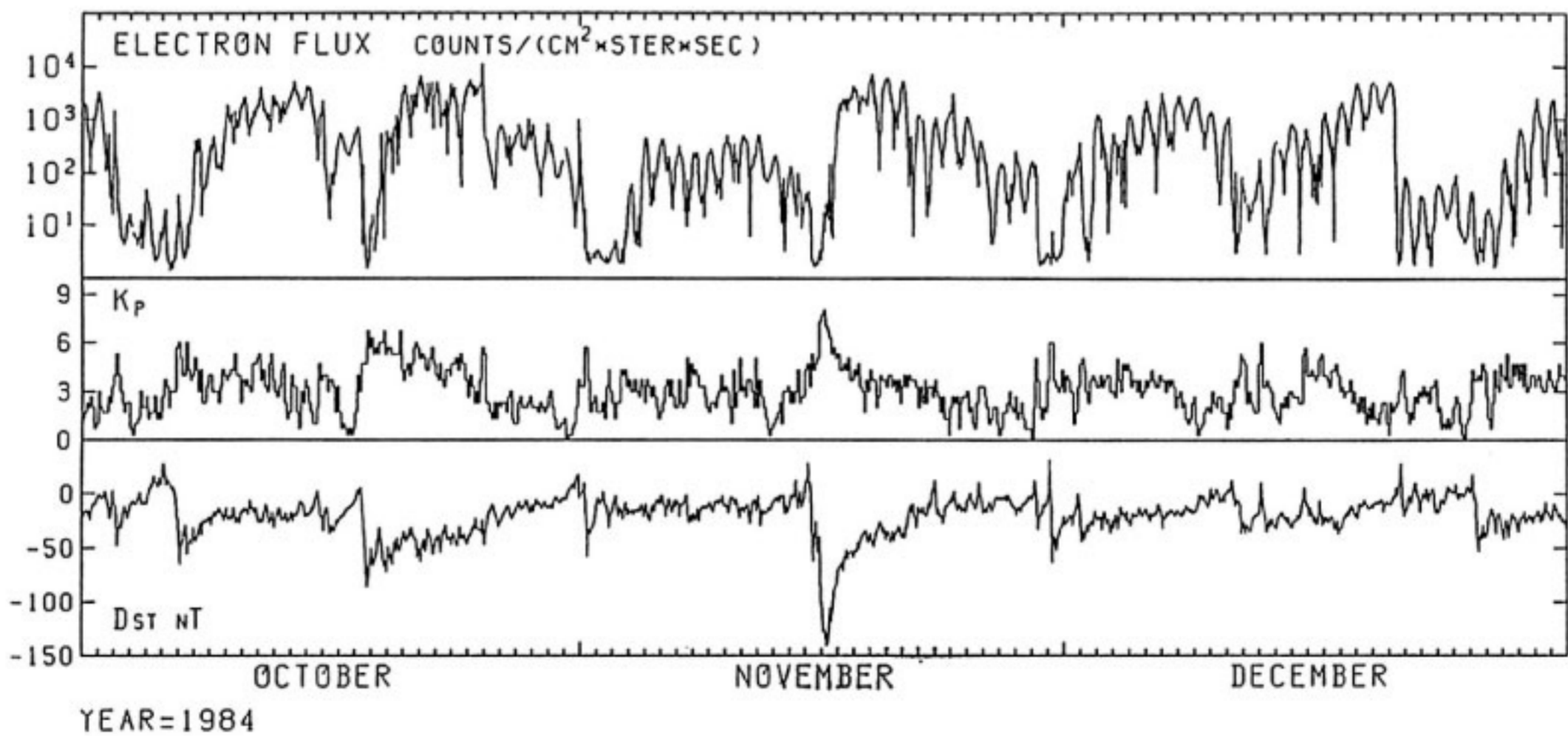
3. 放射線帯粒子のダイナミクスのモデル化

前節のモデルは本質的には定常状態を扱うものであるが, ダイナミクスについても, 次のような応用がある. 磁気嵐 (magnetic storm) 中には, 大量の keV 程度

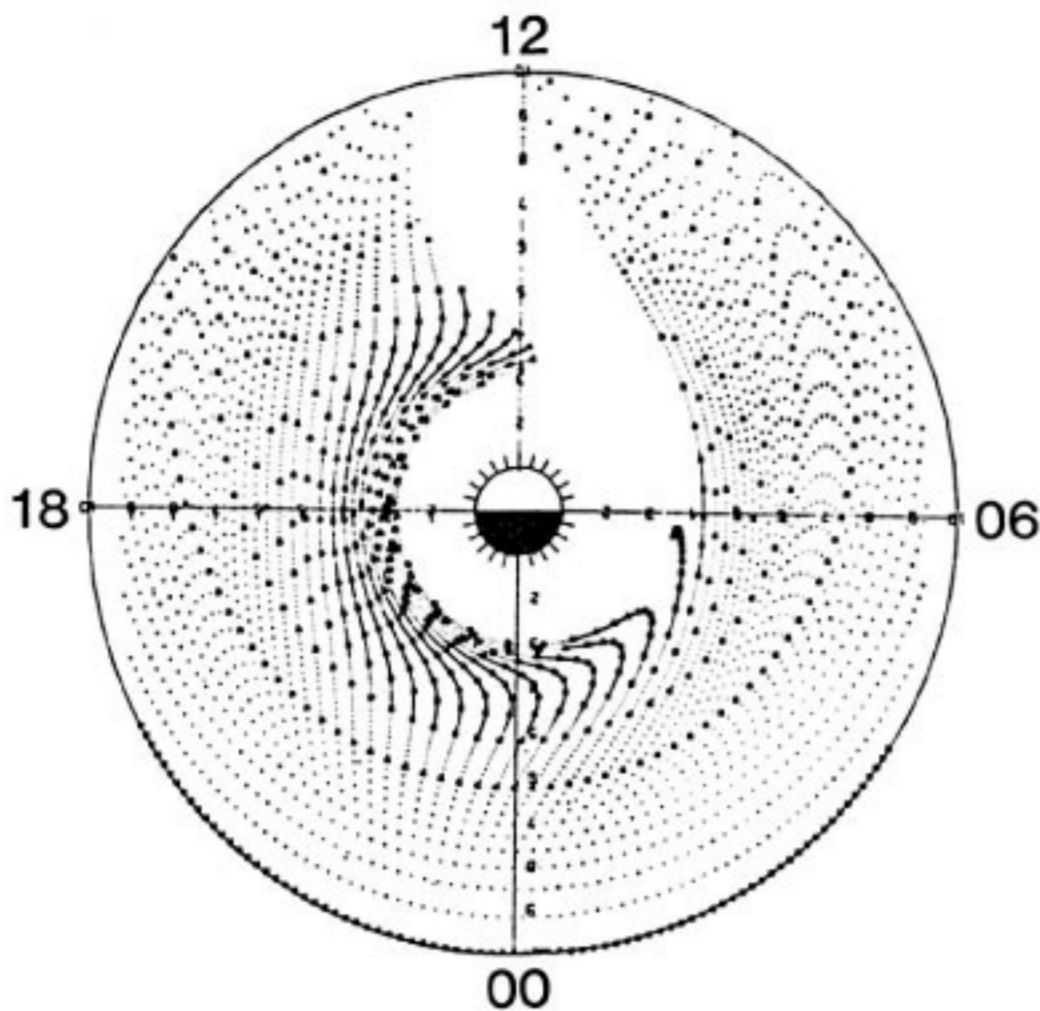
の電子が $L=4$ 程度のところに注入されるが, 磁気嵐の回復期には, この電子のフラックスが徐々に減少していく. この電子フラックスの減少過程は, 上記の電子モデルを使って, 良く記述できることがわかっている⁽²¹⁾. また, 時間的に変化する外側境界条件を設定して, 磁気嵐時に, どのようなエネルギー粒子が, 時間発展とともにどの領域 (L) まで進入できるかを求めることができる⁽¹³⁾.

第4図には, 静止軌道での 2 MeV 以上のエネルギーをもつ電子フラックスの変動の様子を, 地磁気活動度を示す K_p と D_{st} とともに示している. 電子フラックスの値は1時間平均値であり, 個々の磁気圏嵐 (sub-storm) に伴う変動までは表していない. 電子フラックスに見える日変化は, 静止軌道での磁場の強さが昼と夜で違うことによっている. この図から, 電子フラックスの変動が激しいことがわかる. 短時間のうちに, 10^3 程度の変動幅を示すこともまれではない. これらの変動のうち, あるものは磁場強度の変化に伴う断熱的 (adiabatic) なものであるが, かなりの非断熱的な変動があることがわかっている. 前節のモデルでは, 本来このように変動の激しいものを境界条件として, モデルの外へおしやっていることになる.

また, 前節のモデルでは比較的エネルギーの高い粒子を扱っているが, エネルギーが低くなるほど, 電場による $E \times B$ ドリフトの輸送効果が大きくなる. また, これらの粒子, とくにイオンについては, 環電流 (ring current) を形成し, これは放射線帯付近の磁場の構造を変えることになり, 粒子と場との相互作用もとり入れな



第4図 静止軌道での高エネルギー (>2 MeV) 電子フラックスの変動と地磁気活動指数 K_p と D_{st} .



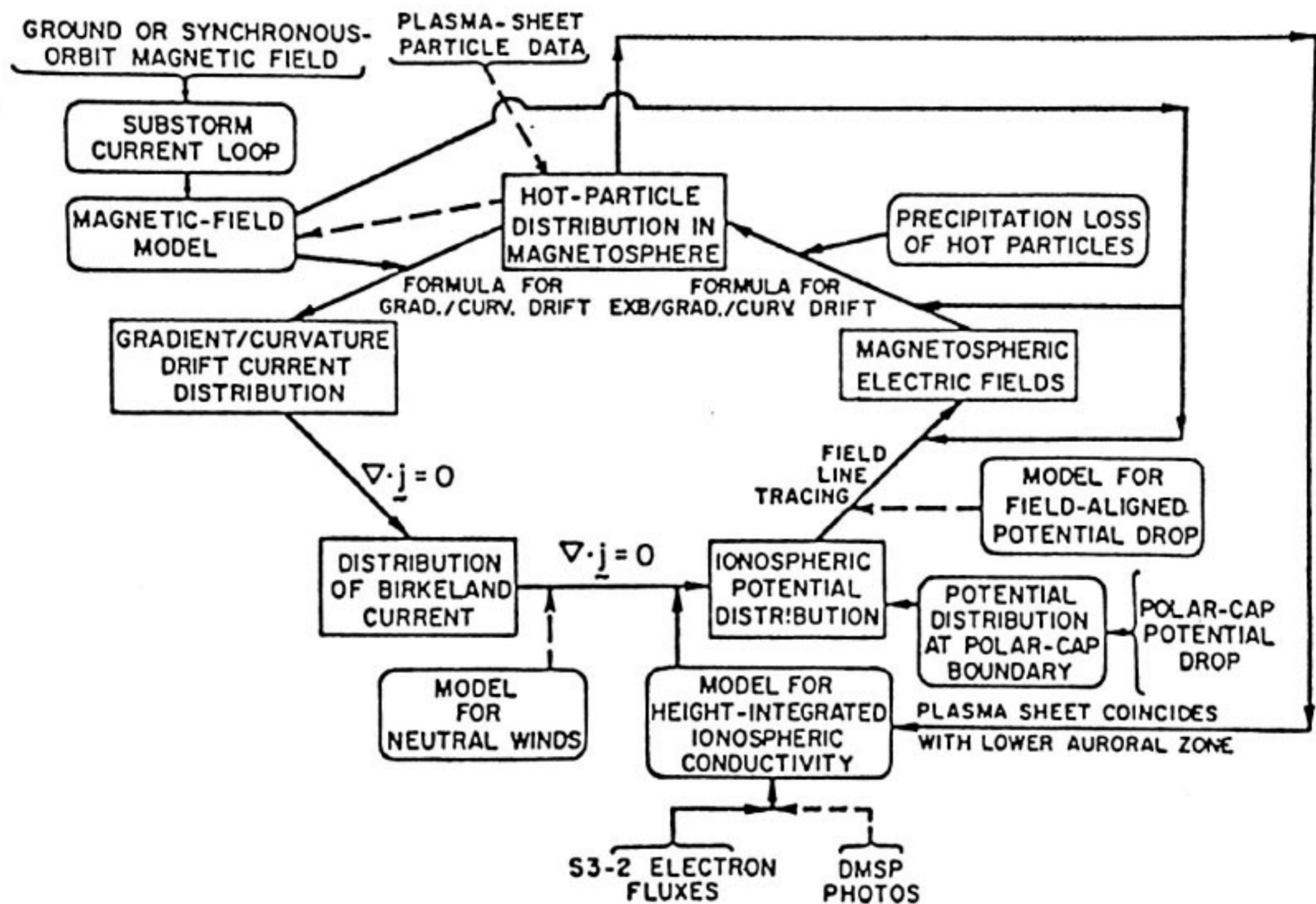
第5図 L=10において0.556 keVでピッチ角90°の粒子の地球磁気圏での運動。

算したものはいくつもあるが, Ejiri⁽²²⁾によって得られたものが, 代表的なものと考えられる. このモデルでは, Volland-Sternの電場モデルを使い, 夜側のL=10にあった粒子の運動を追跡している. 結果の一例を第5図に示す. この仕事によって, 私達は地球に近い地球磁気圏での荷電粒子の振舞いを基本的に理解できたと考えられる. たとえば, プラズマポーズ (plasmopause) の型やあるエネルギーのプロトンが午後側でひじょうに地球の近くまで進入してくるノーズイベント (nose event) などが良く説明されている⁽²³⁾. さらに, 電場の強さを変えることや電場の遮蔽効果 (shielding) を電場分布の型を変えることによって表すことにより, 磁気嵐の再現も試みられている^{(24), (25)}.

このモデルでは, 場の量 (磁場と電場) は外から与えられているが, これらは本来, 粒子の分布によって決められる部分がある. このことをより積極的にとり入れたより矛盾のないモデルがライス大学の Wolf らによって^{(26), (27), (28), (29)} 作られている. このモデルの基本的な原理だけを第6図に示す. このモデルでは, polar capにおける電場の強さを外から与えるパラメータとしている. この電場の強さは, 極軌道衛星による観測値を使っているために, 一時間おき程度しかない. 従って, 磁気圏嵐の発達のような時間スケールのものについては, 適

ればならなくなる. まず, 電場による輸送の効果を考えてみる.

地球磁場をダイポール磁場で近似し, 朝側から夕方側への (dawn-dusk) 一様な電場または経験的に与えられた電場分布を与えて, 単一の荷電粒子の運動の軌跡を計



第6図 Rice University のモデルに使われている基本的な論理構造のブロックダイアグラム。

用することには無理がある。また、電離層の電気伝導度も外部から与えているが、これは電場の分布を決定するのに、直接的に関与してしまう。しかし、磁気圏嵐⁽²⁶⁾、⁽²⁷⁾、⁽²⁸⁾ や磁気嵐⁽²⁹⁾ についてモデルによる再現実験がおこなわれている。モデルの結果の正否を問うことはむずかしいが、かなり良い結果を与えているというべきであろう。

さて、このモデルでは、基本的にはプラズマシートにあるプロトンと電子の運動のみを記述している。最近の観測によれば、環電流領域には大量の電離層起源の酸素イオン (O^+) が存在していることが知られている⁽³⁰⁾、⁽³¹⁾。電離層起源のイオンはオーロラとともに発生する沿磁力線方向の電場によって数 keV のエネルギーを得て plasma sheet にはいって行く。もしこれだけで、環電流領域の電離層起源のイオンをすべて説明できれば、モデルの中でプロトンのみとしたかわりに、プロトンと他のイオンとの混合物に置き換えれば良いだけである。しかしながら、磁気嵐の初期にすでに、昼間側磁気圏に大量の O^+ が存在していることから、単純に環電流に O^+ をつけ加えるだけで良いわけではなさそうである。また、このモデルでは、粒子の損失の過程ははいっていない。もし損失の過程を入れた場合には、 H^+ と O^+ とでは電荷交換に対する寿命が大きく異なるので、 O^+ の振舞いをいかに記述するかが重要な問題となる。

4. 結 語

放射線帯にある粒子のモデルとして、粒子の輸送・生成・消滅を拡散方程式を使って統計的に表し定常状態を記述するもの、与えられた電場と磁場との中での運動の軌道を記述するもの、さらに、粒子の作りだす電場・磁場をとり入れて粒子の振舞いを論じるものについて、以上にまとめてきた。これらはもっと付け加えるべき物理過程はいくつもあるとしても、モデルとしてかなり完成してきていると考えられる。

それでは放射線帯の粒子のダイナミクスをモデル化するうえで、物理過程の理解は完成しているであろうか。たとえば、先に述べた電離層起源のイオンについては、人工衛星 DE-1, DE-2, Viking, AMPTE/CCE などの観測によって、かなりわかっていくと考えられる。また、電離層の電気伝導度についても、人工衛星やレーダーの観測によって、かなりわかっていくと考えられる。物理過程のなかで、一番問題が残るとすれば、磁気圏の中でいかに粒子が加速されているか、いかに注入されるか、ということではなかろうか。これは、放射線帯の粒子だけの問題ではなく、磁気圏の中で働く物理過程を理解することを意味している。いままでの限られた軌道の

人工衛星による観測が、はたして粒子の加速機構を解くカギになるものをもたらしているか疑問がある。PROMIS (Polar Regions Magnetosphere International Study)⁽³²⁾ 期間中にはいくつかの静止衛星、ISEE-1 & 2, SCATHA, AMPTE/CCE, AMPTE/IRM などによる同時観測があるので、粒子の加速についての問題について、いくらかでも解明されることが期待される。

参 考 文 献

- (1) Schulz, M., and L. J. Lanzerotti, "Particle Diffusion in the Radiation Belts", Springer-Verlag, New York, 1974.
- (2) Schulz, M., "Geomagnetically trapped radiation", Space Sci. Rev., 17, pp. 481-536, 1975.
- (3) Lyons, L. R., "Plasma processes in the Earth's radiation belts", in Solar System Plasma Physics, edited by C. F. Kennel, L. J. Lanzerotti, and E. N. Parker, North Holland, Amsterdam, 1979.
- (4) Sagalyn, R. C., Spjeldvik, W. N., and W. J. Burke, edited, "Proceedings of the Air Force Geophysics Laboratory Workshop on the Earth's radiation belts: January 26-27, 1981", AFGL-TR-81-0311, 1981.
- (5) Spjeldvik, W. N., "Transport, charge exchange and loss of energetic heavy ions in the Earth's radiation belts: Applicability and limitations of theory", Planet. Space Sci., 29, pp. 1215-1226, 1981.
- (6) Schulz, M., "Earth's radiation belts", Rev. Geophys., 20, pp. 613-621, 1982.
- (7) Young, D. T., "Near-equatorial magnetospheric particles from 1 eV to 1 MeV", Rev. Geophys., 21, pp. 402-418, 1983.
- (8) Williams, D. J., "The Earth's ring currents: Cause generation and decay", Space Sci. Rev., 34, pp. 223-234, 1983.
- (9) Lyons, R. L., and D. J. Williams, "Quantitative Aspects of Magnetospheric Physics", D. Reidel, Dordrecht/Boston/Lancaster, 1984.
- (10) Spjeldvik, W. N., and P. L. Rothwell, "The radiation belts", in Handbook of Geophysics and the Space Environment, edited by A. S. Jursa, United States Air Force, 1985.
- (11) Williams, D. J., "Ring current and radiation belts", Rev. Geophys., 25, pp. 570-578, 1987.
- (12) Lanzerotti, L. J., D. C. Webb, and C. W. Ar-

- thur, "Geomagnetic field fluctuations at synchronous orbit 2. Radial diffusion", *J. Geophys. Res.*, 83, pp. 3866-3870, 1978.
- (13) Spjeldvik, W. N., "Consequences of the duration of solar energetic particle-associated magnetic storms on the intensity of geomagnetically trapped protons", in *Modeling Magnetospheric Plasma*, edited by T. E. Moore and J. H. Waite, Jr., AGU, 1988.
- (14) Lyons, L. R., R. M. Thorne, and C. F. Kennel, "Pitch-angle diffusion of radiation belt electrons within the plasmasphere", *J. Geophys. Res.*, 77, pp. 3455-3474, 1972.
- (15) Kennel, C. F., and H. E. Petschek, "Limit on stably trapped particle fluxes", *J. Geophys. Res.*, 71, pp. 1-28, 1966.
- (16) Davidson, G. T., P. C. Filbert, R. W. Nightingale, R. W. Imhof, J. B. Reagan, and E. C. Whipple, "Observations of intense trapped electron fluxes at synchronous altitudes", *J. Geophys. Res.*, 93, pp. 77-95, 1988.
- (17) Tinsley, B. A., "Evidence that the recovery phase ring current consists of helium ions", *J. Geophys. Res.*, 81, pp. 6193-6196, 1976.
- (18) Lyons, L. R., and R. M. Thorne, "Equilibrium structure of radiation belts electrons", *J. Geophys. Res.*, 78, pp. 242-2149, 1973.
- (19) Spjeldvik, W. N., "Equilibrium structure of equatorially mirroring radiation belt protons", *J. Geophys. Res.*, 82, 2801-2808, 1977.
- (20) Spjeldvik, W. N., and T. A. Fritz, "Energetic ionized helium in the quiet-time radiation belts: Theory and comparison with observations", *J. Geophys. Res.*, 83, pp. 654-662, 1978.
- (21) Lyons, L. R., and D. J. Williams, "The storm and post-storm evolution of energetic (35-569 keV) radiation belt electrons", *J. Geophys. Res.*, 80, pp. 3985-3994, 1975.
- (22) Ejiri, M., "Trajectory traces of charged particles in the magnetosphere", *J. Geophys. Res.*, 83, pp. 4798-4810, 1978.
- (23) Ejiri, M., R. A. Hoffman, and P. H. Smith, "Energetic proton penetration into the inner magnetosphere", *J. Geophys. Res.*, 85, pp. 653-663, 1980.
- (24) Smith, P. H., N. K. Bewtra, and R. A. Hoffman, "Motions of charged particles in the magnetosphere under the influence of a time-varying large scale convection electric field", in *Quantitative Modeling of Magnetospheric Processes*, edited by W. P. Olson, AGU, 1979.
- (25) Baker, D. N., T. A. Fritz, B. Wilken, P. R. Higbie, S. M. Kaye, M. G. Kivelson, T. E. Moore, E. Studemann, A. J. Masley, P. H. Smith, and A. L. Vampola, "Observation and modeling of energetic particles at synchronous orbit on July 29, 1977", *J. Geophys. Res.*, 87, pp. 5917-5932, 1982.
- (26) Harel, M., R. A. Wolf, P. H. Reiff, R. W. Spiro, W. J. Burke, F. J. Rich, and M. Smiddy, "Quantitative simulation of a magnetospheric substorm, 1, Model logic and overview", *J. Geophys. Res.*, 86, pp. 2217-2241, 1981.
- (27) Harel, M., R. A. Wolf, R. W. Spiro, P. H. Reiff, C.-K. Chen, W. J. Burke, F. J. Rich, and M. Smiddy, "Quantitative simulation of a magnetospheric substorm, 2, Comparison with observations", *J. Geophys. Res.*, 86, pp. 2242-2260, 1981.
- (28) Spiro, R. W., M. Harel, R. A. Wolf, and P. H. Reiff, "Quantitative simulation of a magnetospheric substorm, 3, Plasmaspheric electric fields and evolution of the plasmapause", *J. Geophys. Res.*, 86, pp. 2261-2272, 1981.
- (29) Wolf, R. A., M. Harel, R. W. Spiro, G.-H. Voigt, P. H. Reiff, and C.-K. Chen, "Computer simulation of inner magnetospheric dynamics for the magnetic storm of July 29, 1977", *J. Geophys. Res.*, 87, pp. 5949-5962, 1982.
- (30) McEntire, R. W., A. T. Y. Lui, S. M. Krimigis, and E. P. Keath, "AMPTE/CCE energetic particle composition measurements during the September 4, 1984 magnetic storm", *Geophys. Res. Lett.*, 12, pp. 317-320, 1985.
- (31) Hamilton, D. C., G. Gloeckler, F. M. Ipavich, W. Studemann, B. Wilken, and G. Kremser, "Ring current development during the great geomagnetic storm of February 1986", *J. Geophys. Res.*, 93, pp. 14343-14355, 1988.
- (32) Hones, E. W., Jr., "Project PROMIS to coordinate satellites", *EOS*, 66, p. 1369, 1985.