

## 極域磁気圏における粒子降下および加速機構の研究

向井 利典・賀谷 信幸\*・他「あけぼの」LEP チーム

### Studies on Charged Particle Precipitation and Acceleration Mechanisms in the Polar Magnetosphere

By

TOSHIFUMI MUKAI, NOBUYUKI KAYA, AND AKEBONO-LEP TEAM

**Abstract:** Auroral particle acceleration due to quasi-electrostatic potential drops along the magnetic field lines at altitudes of  $\sim 1R_c$  is one of the most important topics in auroral and magnetospheric physics. With existence of such potential drops, the precipitating electrons observed below the acceleration region have an peak in the energy spectrum, while above the region the ionospheric ions are accelerated upward as Upward Flowing Ions (UFI), and the electron distribution functions have an energy-dependent loss cone. Previous observations have only qualitatively supported such a view. In this paper we present a quantitative result that the detailed distribution functions of electrons and ions observed from Akebono have revealed existence of the  $E_{\parallel}$  acceleration both above and below the spacecraft altitude.

#### 概 要

極域上空の数千 km に存在していると考えられている沿磁力線電場は、オーロラ・アークを光らせる降下電子の加速機構として最も有力なものである。もしその電場が存在するとしたら、a) その下の高度では降下電子のエネルギー分布が加速電圧に相当するピークを持ち、その上部では、b) 逆に上方に加速されたイオン（電離層起源の UFI）が存在し、c) 電子のロスコーンにエネルギー依存性がでる。しかし、b) と c) の結果は、従来、精度の問題もあって定量的には必ずしも合致していなかった。本論文で示した例に於いては、衛星は正に加速域のまっただ中にいたこと、即

---

\* 神戸大学工学部

ち、a)、b)、c)の全てが同時に観測された。a)は衛星上方の加速、b)とc)はともに下方の沿磁力線電場加速を示唆するものである。テスト粒子シミュレーションを用いて検討した結果、b)とc)から求められた加速電圧は定量的にも良い一致を示した。

## 1. 緒言

オーロラ帯や極冠域の電離層は遠方の磁気圏と磁力線を通じて結ばれていて、そこで生起している様々な現象は磁気圏からの粒子降下機構と密接な関係がある。太陽風と地球磁場の相互作用によって生ずるダイナモ作用のため磁気圏の dawn-dusk の間には数十 kV の電位差が発生している。磁力線方向の電気電導度は通常は良いと考えられるので、第0近似としては、その磁気圏内の電場は極域の電離層まで投影され、磁気圏～極域電離層のプラズマの運動(対流)はこの電場によって決められている。しかし、その磁気圏・電離圏結合は完全ではない。その一つは、プラズマ・シートの境界に相当する領域では、高度数千 km に沿磁力線電場(数 kV の電位差)が存在している可能性である。降下電子はこの電場で加速されてオーロラ・アークを光らせていると考えられている。実際に、オーロラ・アークの上方から降り込んでくる電子のエネルギー・スペクトルには数 keV に鋭いピークがあるという観測、また、高度数千 km から上では沿磁力線の上方向に加速されたイオン(UFI)の観測が報告されており、沿磁力電場説を裏付けるものである、例えば[1]。また、もしその電場が存在するとしたら、その上方では電子のロスコーン角は電子エネルギーと下方に存在している電位差に応じて広がるはずで、これも実際に観測されている。しかし、これらの傍証は必ずしも必要十分条件ではない。例えば、降下電子エネルギー分布のピークやUFIはそれぞれ別の機構でも説明可能である。また、ロスコーンの広がりエネルギー依存性から求めた電位差とUFIのエネルギーから求めたものとは一致しないという Reiff et al. の報告もある[2]。その原因の一つとして、彼らの観測の高度が高かった(即ち、加速域の遙か上方)ための観測精度の問題もある。「あけぼの」の軌道はこの問題に決着を付けるためには過去の衛星よりも好ましい。実際にそのような例が発見されたので、本論文ではその解析結果を中心に報告する。

## 2. 観測例

1989年8月28日16:38~16:44にかけて上向きのイオンが観測された。図1にこの時の衛星軌道を示す。この図は、磁気緯度(不変量緯度)を同心円で表し、MLT(Magnetic Local Time)を反時計回りに表示した座標系で、磁気緯度が50°以上の軌道を表示したものである。図中の太線部分はUFIが観測された時の位置である。このとき、衛星は南半球上空を昼側から夜側へ通過した。LEP[3]は、磁気緯度74°~78°、MLT16:00~16:34にかけて観測を行った。

次に、電子・イオンエネルギー分析器(EIS)の観測データを示す。現在、電子、イオンのエネルギー測定範囲は、それぞれ、10eV~16KeV、13eV~20keVに設定している。図2にE-tダイアグラムを示す。このデータは、質量分析器と比較するため、質量分析器と同一

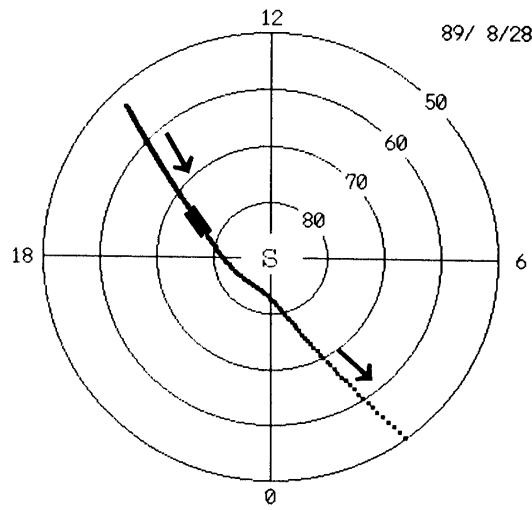


図1. UFIが観測された位置

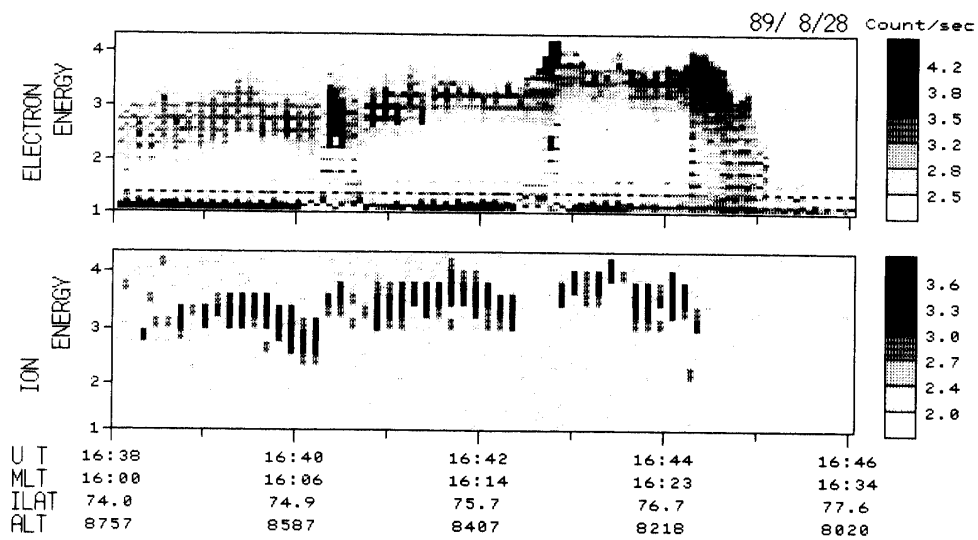


図2. EISで観測されたE-tダイアグラム

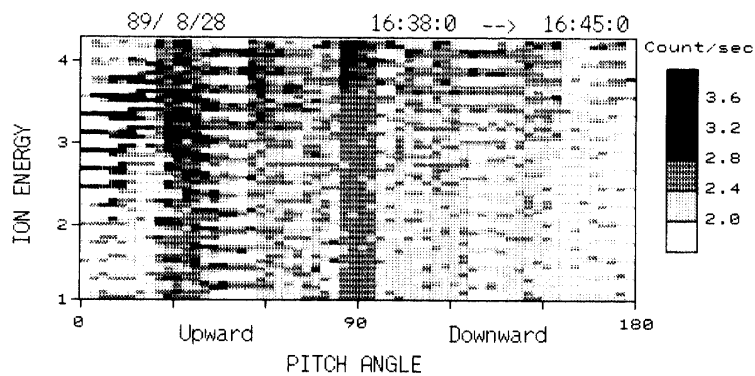


図3. 17分間で観測されたイオンのピッチ角分布

方向を向いている EIS センサによって観測された電子、イオンのデータである。横軸に時間 (UT)、衛星の位置を示す MLT, 不変磁気緯度, 衛星高度を示している。縦軸はエネルギーを対数で表示し、各目盛りの数字は、エネルギー  $10\text{eV} \sim 10^4\text{eV}$  の指数である。各エネルギーステップ毎のカウント数の対数を7段階に区分し濃淡表示している。イオンのピッチ角分布を図3に示す。この図はイオン用の EIS センサーすべて (10個) のチャンネルで観測されたデータを表示したものである。横軸はピッチ角で、南半球で  $0^\circ \sim 90^\circ$  が上向きの粒子、 $90^\circ \sim 180^\circ$  が downward の粒子を示す。縦軸は、エネルギーを対数で表示し、各エネルギーステップ毎のカウント数の対数を6段階に区分し、濃淡表示している。なお、無色の領域は、その時間帯は観測を行わなかったことを示している。図2, 3より16:38~16:44にかけて一部の時間帯を除き、上向きのイオンが観測されており、それらのイオンのピッチ角分布は  $20^\circ$  以下にピークがあることがわかる。この観測結果は、この時間に UFI が発生していることを示している。なお E-t ダイアグラムで上向きのイオンが等間隔の縞模様になっているのは、測定ピッチ角によるもので測定ピッチ角が上向きするときだけイオンを観測しているからである。また、E-t ダイアグラムの電子のエネルギースペクトルでは、16:41~16:44にかけて逆V型降下現象が観測された。このことは、衛星高度上方にV型の電位分布をした粒子加速域が存在することを示唆している。また、UFIの観測時は、衛星高度下方にイオンを加速する上向きの電場が存在していることを示している。故に、衛星高度の上方、下方に粒子加速域が存在し、加速域のポテンシャルはイオンと電子のエネルギーの和で表されると考えられる。次に、この時のイオン質量分析器 (IMS) の観測結果を示す。現在、IMSのエネルギー測定範囲は  $300\text{eV} \sim 25\text{keV}$  である。図4は、IMSの観測データの E-t ダイアグラムである。表示方法は EIS と同様であり、上段が  $\text{H}^+$ 、中段が  $\text{He}^+$ 、下段が  $\text{O}^+$  の E-t ダイアグラムである。観測されたイオンは、 $\text{O}^+$  が最も多く、 $\text{H}^+$  が最も少ない。また、 $\text{He}^+$  は  $\text{O}^+$  とほぼ同程度の量が観測されている。他の衛星での観測結果では、 $\text{He}^+$  は非常に少な

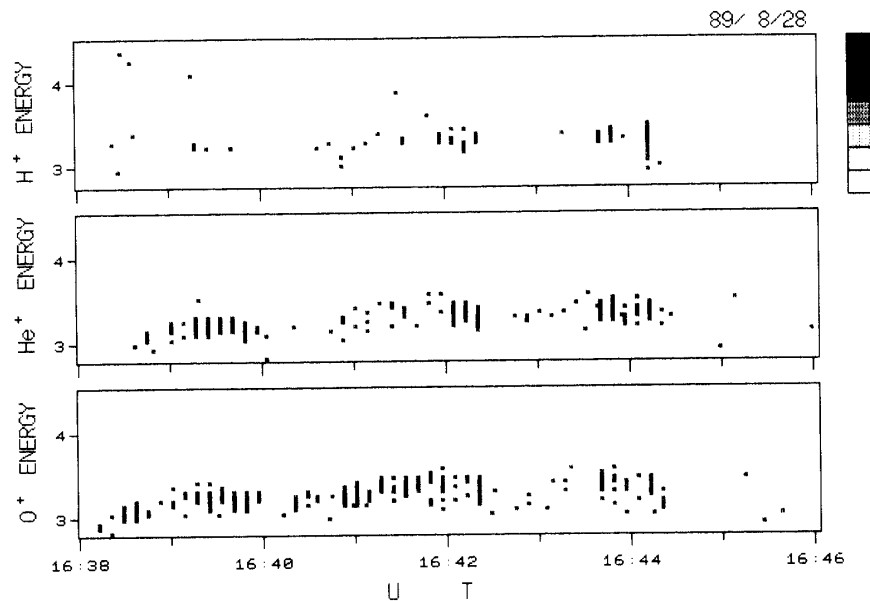


図4. IMSで観測されたイオンのE-tダイアグラム

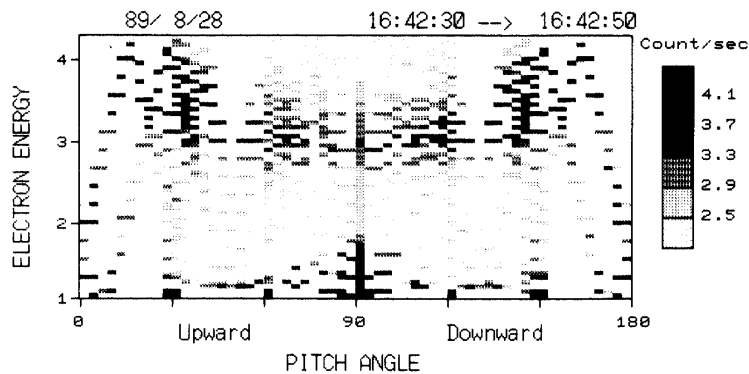


図5. UFIが観測されていないときの電子のピッチ角分布

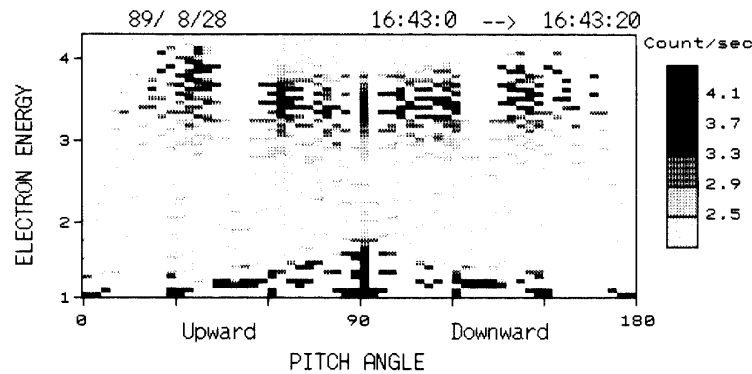


図6. UFIが観測されているときの電子のピッチ角分布

いことが報告されており[4], 上向きの $\text{He}^+$ が多く観測されたことは興味深い現象の一つである. EISのピッチ角分布(図3)より, 上向きのイオンのエネルギー約500eV~約2keVであることがわかる. これは, IMSで観測された $\text{O}^+$ ,  $\text{He}^+$ のエネルギーと一致している. この結果より, UFIはおもに $\text{O}^+$ と $\text{He}^+$ で構成されていると判断される.

次に, UFIに伴う電子のピッチ角分布を検討する. まず, UFIが観測されなかった16:42:30~16:42:50の電子のピッチ角分布を図5に示す. この時間帯は, おもにエネルギー1~10keV, ピッチ角 $20^\circ\sim 40^\circ$ ,  $140^\circ\sim 160^\circ$ の電子が観測されており, ピッチ角分布は対称的になっている. UFIが観測されなかったことは, この時間には衛星高度より下方には加速領域がなかったことを示している. このピッチ角分布は, 平行電場がないためほとんどの電子がミラーモーションし, このような対称的な分布になったと考えられる. しかし, ピッチ角が約 $15^\circ$ 以下では電子のカウント数が降下電子に比べ減少していることがわかる. これは電子のピッチ角が小さいため, ミラー高度が地上約100km以下となり, 上層大気と衝突しエネルギーを失いミラーモーションしなかったと考えられる. 一方, UFIが観測された16:43:0~16:43:20にかけての電子のピッチ角分布を図6に示す. イオンの最高エネルギーは6keV前後ある. このピッチ角分布ではピッチ角約 $30^\circ$ の上向きの電子は, ピッチ角約 $150^\circ$ のdownwardの電子と比べて少ない. もし, 加速電場がないならば当然, 図5と同様に対称的なピッチ角分布となるはずである. この非対称なピッチ角分布は, 磁力線に平行

な電場により電子が磁力線方向下方に加速され、そのピッチ角がロスコーンとなり消滅し、上向きの電子が少なくなったと考えられる。

### 3. シミュレーションによる分布

前節の降下電子のピッチ角分布、特にロスコーン分布の観測結果に着目し、加速電場とUFIのエネルギー関係をテスト粒子シミュレーションを用いて検討する。

#### 1) 方法

地球磁場はダイポール磁場で近似する。テスト粒子の初期位置は、観測されたときの衛星の高度、磁気緯度により求める。初期位置での粒子のもつエネルギー、ピッチ角は、観測された降下電子のエネルギー、ピッチ角をそれぞれの初期値とする。Buneman-Boris法により粒子の軌道を計算し、ダイポール磁場内でミラーモーションし、衛星高度まで戻ってきたときの粒子のエネルギーとピッチ角を計算する。ただし、ミラー高度が100km以下のときは、上層大気分子や原子と衝突し、エネルギーを失うものと仮定する。UFI観測時は衛星高度より下方に平行電場が存在していると考え、シミュレーションでは、磁力線に平行な電場を与える。そのため電場の方向は、各高度での磁場方向と平行になるように決定する。電場の強さの高度分布はシミュレーションの1つのパラメータとなる。

#### 2) UFI非観測時の電子の特性

1989年8月28日のデータの中で14:42:30~16:42:50では、UFIがほとんど観測されなかった。この時間帯には、衛星高度下方には粒子加速域が、すなわち平行電場が存在しなかったと考えられる。ここでまず平行電場がなかったときの電子の軌道を計算し、ミラー高度とピッチ角分布の関係を求める。テスト粒子のピッチ角を $0^\circ$ から $90^\circ$ までに変化させたときのミラー高度の変化を図7に示す。このときの粒子の初期位置は、高度8300km、磁気緯度 $76^\circ$ とした。ミラー高度は、初期高度でのピッチ角が小さくなるほど低くなり、ピッチ角が約 $18^\circ$ 以下のとき、ミラー高度100km以下となることがわかる。平行電場がないとき、粒子は初期位置でのピッチ角を $\alpha$ 、磁場の強さを $B_0$ 、ミラーポイントでの磁場の強さを $B$ とす

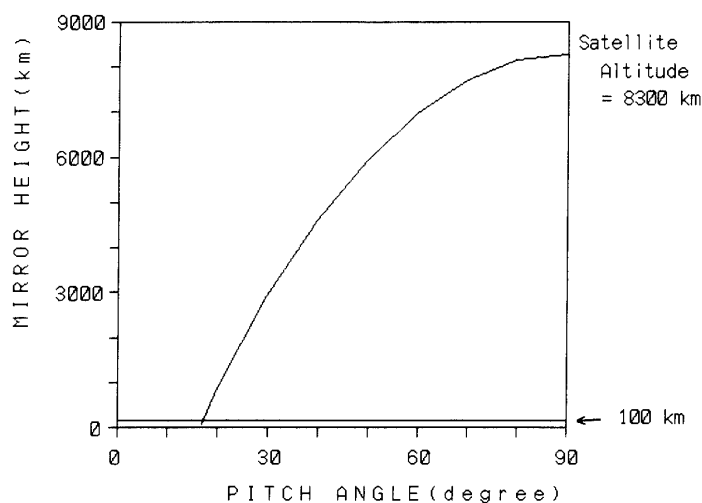


図7. 高度8300kmでのピッチ角によるミラー高度

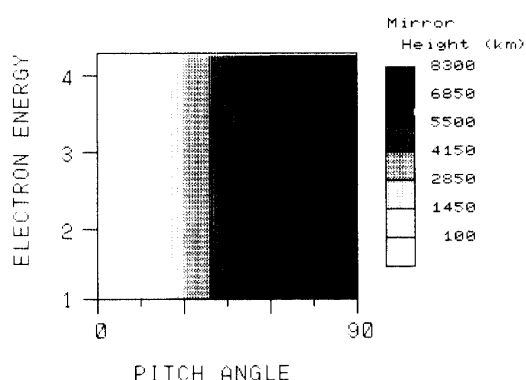


図8. 加速電場が無い時のミラー高度

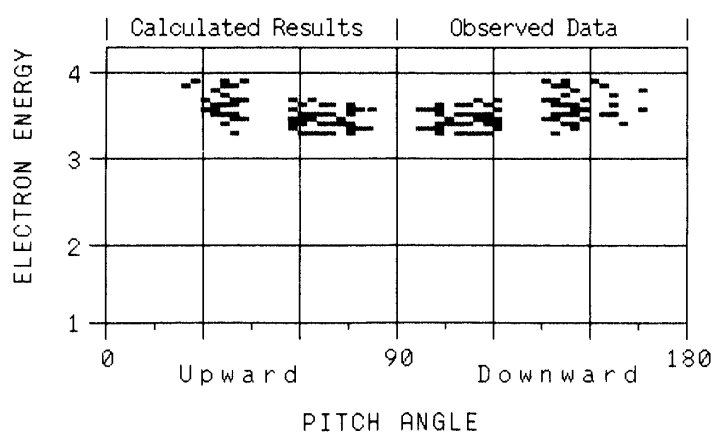


図9. 加速電場が無い時のシミュレーション結果

ると、 $B = B_0 / \sin^2 \alpha$  の関係式が成り立つ。この式からも粒子はピッチ角が小さいほど、磁場の強い領域、すなわち低い高度まで侵入できることがわかる。シミュレーション結果もこの式を満足することが確認されている。UFIが観測されなかったときのピッチ角分布（図5）では、ピッチ角 $18^\circ$ 以下の電子が降下電子に比べて減少している。これらの電子は上層大気と衝突してエネルギーを失ったと考えられる。

次に、電子のエネルギーの違いによるミラー高度の変化を調べた。エネルギー $10\text{eV} \sim 16\text{keV}$ 、ピッチ角 $0^\circ \sim 90^\circ$ の電子について計算した結果を図8に示す。図の縦軸はエネルギーを対数で表示し、横軸はピッチ角を表示している。ミラー高度は、衛星高度 $8300\text{km}$ から $100\text{km}$ までを6段階に区分し濃淡表示した。100km以下は無色で表した。この図より平行電場の無いとき、粒子のミラー高度は、エネルギーに関係なく、ピッチ角によって決まることがわかる。また、ピッチ角が $18^\circ$ 以下はロスコーンである。

テスト粒子シミュレーションにより求めたピッチ角分布をUFIが観測されなかったときのピッチ角分布と比較する。初期位置でのピッチ角とエネルギーは、図5の降下電子（ピッチ角 $90^\circ \sim 180^\circ$ ）の中で、カウント数が $10^{3.3}$ 以上（図の上位3レベル）の各点のピッチ角、エネルギーを与える。シミュレーション結果を図9に示す。図の電子の降下成分は観測データであり、上向き成分はシミュレーションにより求めたピッチ角分布である。シミュレーシ

オン結果は、ほぼ対称的なピッチ角分布となっており、観測結果とよく一致している。このことにより、16:42:30~16:42:50には平行電場は存在せず、ほとんどの電子は地球磁場内を磁力線に沿ってミラーモーションし、衛星高度まで戻ってきたため対称的なピッチ角分布となったと結論づけられる。シミュレーション結果でピッチ角 $18^\circ$ 以下の粒子が消滅しているのは、ミラー高度が100km以下になり、ミラーモーションしなかったためである。観測結果もピッチ角 $18^\circ$ 以下の電子は減少しており、観測結果とシミュレーション結果はよく対応している。

### 3) UFI 観測時の電子の特性

UFIが観測されたときの電子のピッチ角分布は、上向きの電子が減少し、非対称となっている。また、各時刻の上向きのイオンのエネルギーと電子のピッチ角分布を調べると、上向きのイオンのエネルギーは変動し、それに合わせてロスコーンの範囲も変化することがわかる。これは、衛星高度下方に存在していると考えられる粒子加速域のポテンシャル（電位差）、電場や加速域の距離が絶えず変化していることを示している。最初に、平行電場があるときのピッチ角分布を調べる。加速域に適切なポテンシャルを与えたときのロスコーンとなる粒子のピッチ角とエネルギーの関係について検討した。その結果を図10に示す、この図は、加速域のポテンシャル $\phi$ を10kVにした時のロスコーンの範囲を示している。平行電場がないときは、前節で示したようにピッチ角 $18^\circ$ 以下がスコーンとなり、加速域に数kVのポテンシャルがあるとき、ロスコーンの範囲は、図のように右下がりの曲線となる。その曲線より上の範囲のピッチ角、エネルギーをもつ粒子はミラーモーションし、その曲線より下の範囲のピッチ角、エネルギーをもつ粒子はミラーモーションせず、そのピッチ角はロスコーンであることを示している。すなわち、低エネルギーの粒子ほど加速電場により大きくピッチ角が偏向し、ロスコーンに入って消滅するためである。図より加速域のポテンシャルが変化すると、ロスコーンの範囲が大きく変化する、つまり電子のピッチ角分布が変化することがわかる。この結果より、逆に電子のピッチ角分布がわかれば、加速域のポテンシャルが推定できることになる。

次に、加速域のポテンシャルを一定とし、電場と加速域の距離を変化させたときのミラー高度の変化調べた。ポテンシャル $\phi$  (KV) は、電場を $E$  (V/m)、加速域の距離を $r$  (m) とすると $\phi=Er$ で表され、ポテンシャルが一定のとき、電場と加速域の距離は反比例

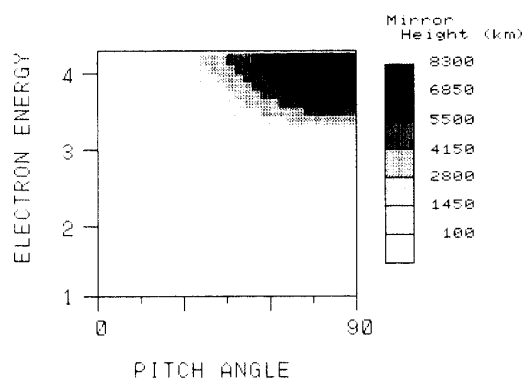


図10. 10keVの加速電場がある時のミラー高度



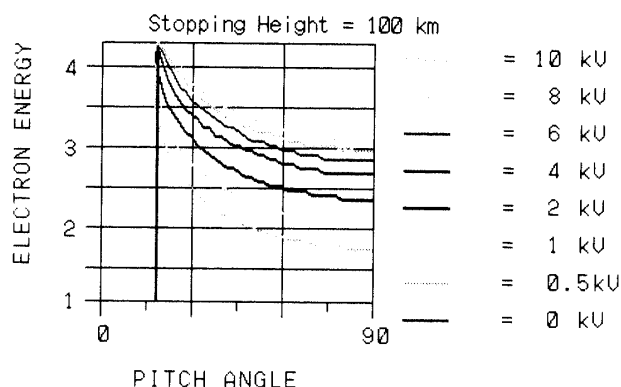


図11. 加速電位をパラメータとした時のロスコーン変化

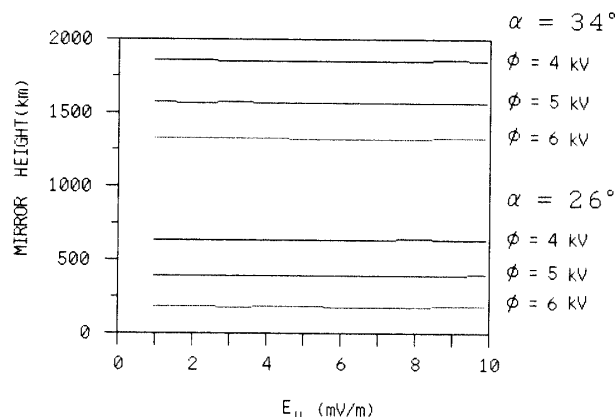


図12. 電場の強さをパラメータとした時のミラー高度の変化

する。図11に示すようにポテンシャルを一定として、電場、加速域の距離を変えたときのミラー高度を求めることにより、その高度はどのパラメータにより決まるかを検討する。図12に計算結果を示す。ピッチ角は $34^\circ$ と $26^\circ$ 、エネルギーは共に $5\text{ keV}$ の粒子の軌道を計算した。加速域のポテンシャルは、 $4\text{ kV}$ 、 $5\text{ kV}$ 、 $6\text{ kV}$ の各場合について行った。平行電場を $1\text{ mV/m}$ ～ $10\text{ mV/m}$ に変化させ、そして加速域の距離を電場に反比例させ変化させたときのミラーポイントの高度を示す。この結果より、電場、加速域の距離が変化してもミラー高度は変化しないことがわかる。これは、ミラー高度が平行電場の大きさ、加速域の距離で決まるのではなく、加速域のポテンシャルによって決まることを示している。

各時間帯ピッチ角分布についてシュミレーション結果と観測結果を比較する。 $16:43:0$ ～ $16:43:20$ 、 $16:39:15$ ～ $16:39:45$ 、 $16:41:30$ ～ $16:42:0$ の各時間帯について調べた。今回のシミュレーションでは、衛星高度下方に平行電場を与える。加速域のポテンシャルは、EISで観測された上向きのイオンの最高エネルギーと考える。最初に、 $16:43:0$ ～ $16:43:20$ ピッチ角分布について検討した。この時刻の観測結果はすでに図6に示した。観測結果では、ピッチ角約 $30^\circ$ の電子はピッチ角約 $150^\circ$ の電子と比べて減少している。これは、

衛星高度下方に磁力線に平行な電場があるため、降下電子のピッチ角が変化しロスコーンとなり、このような非対称なピッチ角分布になったと推測される。そのときの加速域のポテンシャルは、上向きのイオンのエネルギーより約6kVと仮定した。シミュレーション結果を図13に示す。シミュレーション結果でも、ピッチ角30°付近の粒子はピッチ角150°付近の粒子に比べ少なく、非対称のピッチ角分布となっており、観測結果とよく一致している。このことより衛星高度下方に平行電場が存在し、その加速域のポテンシャルは、約6kVであると考えられる。次に、16:39:15~16:39:45の観測結果を図14に示す、この観測結果では、ピッチ角30°以下の電子はほとんど消滅し、ピッチ角30°から45°にかけてはピッチ角が小さいほど高エネルギーの粒子が減少していることがわかる。このときの上向きのイオンエネルギーは約1.5keVである。加速域のポテンシャルを1.5kVと仮定し、計算した結果を図15に示す。観測結果とシミュレーション結果はほぼ一致している。特に、ピッチ角30°~45°の粒子の分布は非常によく一致している。この結果より、衛星高度下方にはポテンシャル約1.5kVの加速域が存在していると推定できる。3番目に、16:41:30~16:42:0の観測結果を図16に示す。この場合も、約30°以下の電子はほとんど消滅している。この時間の加速域のポテンシャルは約3kVと仮定し、ピッチ角分布を計算した。シミュレーション結果を図17に示す。

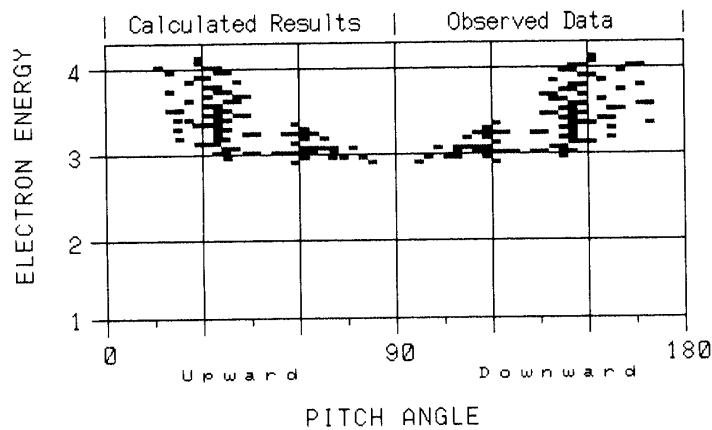


図13. 16:43:00から16:43:20の観測データを基にしたシミュレーション結果

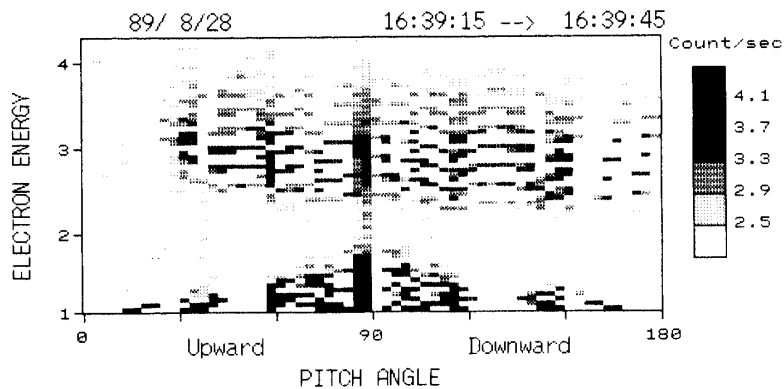


図14. 16:39:15から16:39:45の電子のピッチ角分布

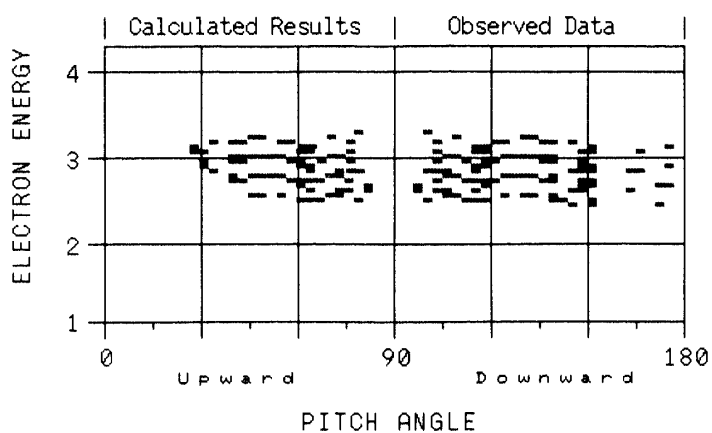


図15. 16:39:15から16:39:45の観測データを基にしたシミュレーション結果

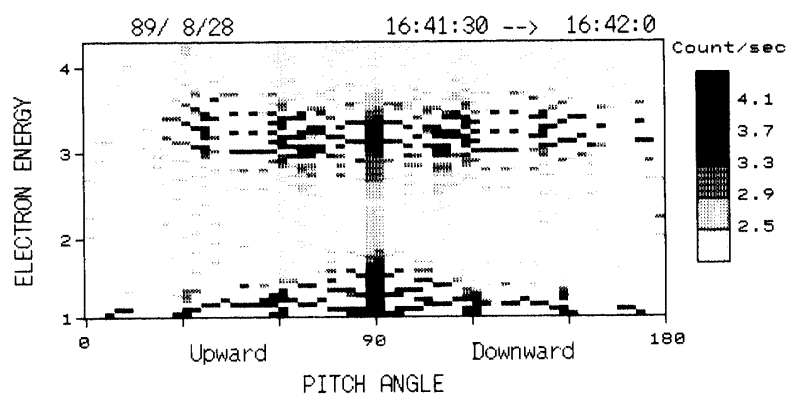


図16. 16:41:30から16:42:00の電子のピッチ角分布

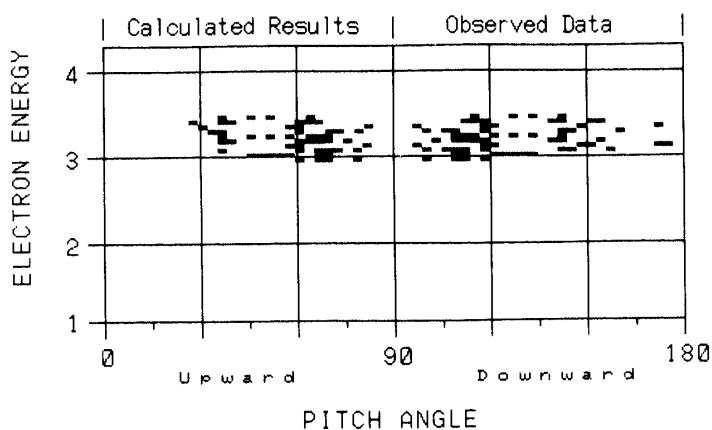


図17. 16:41:30から16:42:00の観測データを基にしたシミュレーション結果

す。シミュレーション結果を観測結果と比較するとよく一致していることがわかる。以上の3カ所の時間帯について調べた。その結果、上向きのイオンのロスコーン分布から推定される加速域のポテンシャルは UFI のエネルギーと一致することが確認された。

#### 4. 結 言

沿磁力電場の存在は磁気圏プラズマの運動や組成（UFI は磁気圏プラズマに電離層起源の粒子を持ち込むことになる）にも影響を及ぼすので、磁気圏物理学の中心課題の一つである。「あけぼの」で観測された粒子の分布関数に対する詳細な検討結果として、その存在は確認されたと結論できる。しかし、問題がまだないわけではない。もし、「あけぼの」高度では電子のロスコーンの広がりや UFI のエネルギーに矛盾がないとして、もっと高度が高くなったときには何故違いがでるのか？ これは単に精度の問題だけでなく、物理として違いを起こす未知のプロセスがあるのだろうか？ 「あけぼの」は10,000km までの高度域に於いてここで示したものと同様な例が多数観測されており、解析例を増やすことにより決着が付けられるものと期待される。沿磁力線電場の生成条件やメカニズムの解明が一つの大きな目標であり、その鍵を握る同時観測の電場、沿磁力線電流、プラズマ波動のデータとの相関解析を進めていく必要がある。部分的には既に始められており、近い将来その結果がでるものと期待したい。

#### 参 考 文 献

- [1] Mozer, F. S., C. A. Catell, M. K. Hudson, M. Temrin, and R. B. Torbert, Satellite measurements and theories of low altitude auroral particle acceleration, *Space Sci. Rev.*, 27, 155, 1980.
- [2] Reiff, P. H., H. L. Collin, J. D. Craven, J. L. Burch, J. D. Winningham, E. G. Shelly, L. A. Frank, and M. A. Friedman, Determination of auroral electrostatic potentials using high-and low-altitude particle distributions, *J. Geophys. Res.*, 93, 7441, 1988.
- [3] Mukai, T., N. Kaya, E. Sagawa, M. Hirahara, W. Miyake, t. Obara, H. Miyaoka, S. Machida, H. Yamagishi, M. Ejiri, H. Matsumoto, and T. Itoh. Low energy charged particle observation in the auroral magnetosphere: first results from the Akebono EXOS-D satellite, *J. Geophys. Res.*, 42, 479, 1990.
- [4] Collin, H. L., R. D. Sharp, and E. G. shelly, The Magnitude and composition of the outflow of energetic ions from the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 89, 2185, 1984.