

SMS で観測された極域イオンフロー

佐川 永一¹⁾・巖本 巖¹⁾・渡辺 成昭¹⁾
B.A. Whalen²⁾・A.W. Yau²⁾

AKEBONO Observations of Polar Ion Outflow

By

E. SAGAWA, I. IWAMOTO, S. WATANABE
B.A. WHALEN, A.W. YAU

Abstract: The Suprathermal Ion Mass Spectrometer (SMS) on board the AKEBONO satellite (EXOS-D) is designed to observe the composition and energy distribution of ions ranging from thermal (0–25 eV) to suprathermal (25–4 keV) energy. The instrument is the r.f. type mass spectrometer combined with the electro-static energy analyzer. To cover the wide range of ion flux, the instrument is equipped with three entrance apertures of different sizes. Its characteristics include a wide dynamic range in ion flux measurements and a wide mass range from 1 to 70 amu/q. Since the start of its observations in April 1989, many low energy ion outflow events have been observed in the aurora magnetosphere. In this paper we report two examples of ion outflow events observed near the satellite apogee over Antarctica, one has a conical pitch angle distribution, and another has the BEAM type of distribution. Both events involve mostly low energy (up to several hundred eV) ions only. SMS observations of the ion outflow events may be characterized as small scale or as rapid changes of the ion outflow signature such as pitch angle distribution and flux.

概 要

「あけぼの」衛星に搭載された低エネルギーイオン質量分析器 (SMS) は極域電離圏・磁気圏内の熱的なエネルギーから数 keV までのイオンの

¹⁾ 郵政省通信総合研究所

²⁾ カナダ国立研究院ヘルツベルグ天体物理学研究所

組成とエネルギー分布を計測するように設計されている。SMS は高周波電圧を用いた質量分析器と静電型のエネルギー分析器で構成されており、熱的エネルギーのイオン (<25 eV) の測定には RPA を用いている。電離層の主成分である熱的なイオンから低エネルギー領域のイオンに及ぶ広範囲のイオンフラックスを測定するために SMS は面積の異なる 3 つの入射口を持ち、静電的に切り替えている。

1989 年 4 月の観測開始以来、SMS の観測データには極域での電離層から磁気圏へのイオンフロー現象がたびたび現れている。この報告ではアポジー付近での SMS の観測から 2 例のイオンフロー現象を紹介する。一例は lon CONICS, 他は lon BEAM の例であるが、両例ともに数 100 eV までのエネルギーのイオンでのみ観測された現象である。これまでの観測はおもに南極上空でデータレコーダーに記録されたデータのみであるためにきわめて限定されているが、SMS で観測されるイオンフロー現象の特徴として以下のような点が挙げられる。a). イオンフロー現象は短時間に大きな変動を示す, b). 数 keV のエネルギーまで広がるような例はきわめて少ない。

1. はじめに

これまでの S3-3, DE-1, VIKING 衛星等でのイオン組成・エネルギー分布の観測によって、低高度の電離層で生成された熱的なイオンが加熱され、磁気圏に供給されていることが明らかになってきた。それまでは、磁気圏のプラズマ太陽風から供給されると考えられていたが、これらの観測結果からアクティビティの高い状態では磁気圏プラズマ中のイオンはかなりの部分が地球の電離層から供給されることがわかってきた。また、イオン加熱の現象は多彩で、磁力線沿い (lon BEAM), 磁力線に直角方向 (TAI, CONICS), あるいは等方的な加熱現象が観測されている。イオン加熱のエネルギー源に関しては、大きくいえば、オーロラを光らせる磁気圏からのエネルギーの一部であるが、詳細については未知の要素が多い。

磁気圏での人工衛星によるイオン組成・エネルギー分布の観測目的としては、イオン組成から磁気圏プラズマの起源を推定することと、個別のイオン加熱現象の解明が挙げられる。「あけぼの」衛星に搭載された SMS は磁気圏での低エネルギーイオンの現象を観測することを目的に設計され、衛星の打ち上げ後、順調に観測を続けている。本報告では SMS の機器の概要と初期の観測データから、電離層のイオンが加熱され、磁気圏へ流れていくイオンフロー現象の例を示す。

2. SMS

SMS は Suprathermal Ion Mass Spectrometer の略で、磁気圏でのイオン組成とエネルギー分布を測定する機能を持っている。「あけぼの」に搭載されているもう一つのイオン質量分析器 IMS と同じ観測項目であるが、IMS に比べると低いエネルギーレンジに測定の重

点をおいている。これまでの衛星で SMS と同じような低エネルギー領域でイオン測定を行ったものとしては DE-1 に搭載された RIMS が代表的であるが、「あけぼの」とは観測高度が違い、主にオーロラ加速領域より高い高度での観測を中心に行っていた。「あけぼの」の観測高度ではこれまで SMS がカバーするような低エネルギー範囲は十分に観測されていなかった。観測エネルギー範囲のほかに、SMS の特徴は表 1 に示されているように高い質量分解能と広いダイナミックレンジを持っている点にある。また、SMS は空間的な分布を得るためにスピン軸と直交する方向をスピンによって掃印するのが基本的な観測モードであるが、限られた範囲ではイオンのスピン軸方向の分布を一時に測定することも可能である。

イオン質量・エネルギー分析器は、一般に、エネルギー分析器と質量分析器を直列につないで構成されている。これまでよく用いられてきたのは静電型のエネルギー分析器（円筒、半球等）に磁場/電場による質量分析器を組み合わせた型である。質量分析器は広いエネルギー範囲で一定の分解能を維持することが困難であるために特定のエネルギー範囲を中心に設計されなければならない。低いエネルギー領域の測定精度を維持することは難しかった。SMS は静電場によるエネルギー分析器と高周波電圧を利用した質量分析器を組み合わせで構成されているが、やはり同様の問題を持っている。この点を解決するために低エネルギー領域の測定の目的で RPA を付加している。このような設計はこれまでも行われてるが、SMS のように RPA による測定に重点をおいた例は余りない。図 1 に SMS の内部構造とイオンのパスを示す。図中の電極の番号で 1-7 がエネルギー分析器を構成し、8-11 は質量分析部、また 12-14 はイオン検出部である。エネルギー分析器は RPA と静電ミラーで構成され、RPA 部は互いに 100 の面積比を持つ三つの入射口を持っている。最大の開口は主に 100 eV 以上のイオンの測定に使用され、低エネルギー領域の測定の時には 50 V の電圧でバイアスされる。他の 2 つの開口はおもにフラックスの大きい熱的粒子から 100 eV までの範囲を測定するために RPA (0-25 V) 用の電極を持っている。

図 2 は SMS の感度を測定エネルギーを横軸にプロットしたもので、感度が測定エネルギーに逆比例することを示している。これはエネルギー分析器が ΔE （エネルギーバンド幅）一定であるためで、この点は従来の静電型の分析器が $\Delta E/E$ が一定であるのと若干異

Table 1 SMS INSTRUMENT CHARACTERISTICS

Energy/unit charge (E/Q) range	$0 < E/Q < 4 \text{ kV}$
Mass/unit charge (m/Q) range	$0.8 < m/Q < 60 \text{ AMU/Q}$
Energy resolution (ΔE)	$0.05 < \Delta E < 0.2 \text{ kV}$, programmable
Mass resolution ($\Delta m/m$)	$0.05 < \Delta m/m < 0.2$, programmable
Geometric factor ($A \cdot d\Omega \cdot \epsilon$)	$4 \times 10^{-8} < A \cdot d\Omega \cdot \epsilon < 2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ sr}$, programmable ($\epsilon = \text{duty cycle}$)
Angular resolution:	
a) In plane to S/C spin axis ($\Delta\theta$)	$3^\circ < \Delta\theta < 90^\circ$ (FWHM) programmable and dependent on energy and geometric factor
b) In plane to the scan ($\Delta\theta$)	$3^\circ < \Delta\theta < 90^\circ$ (FWHM) programmable and only available for low energy $E/Q < 0.1 \text{ kV}$ ions

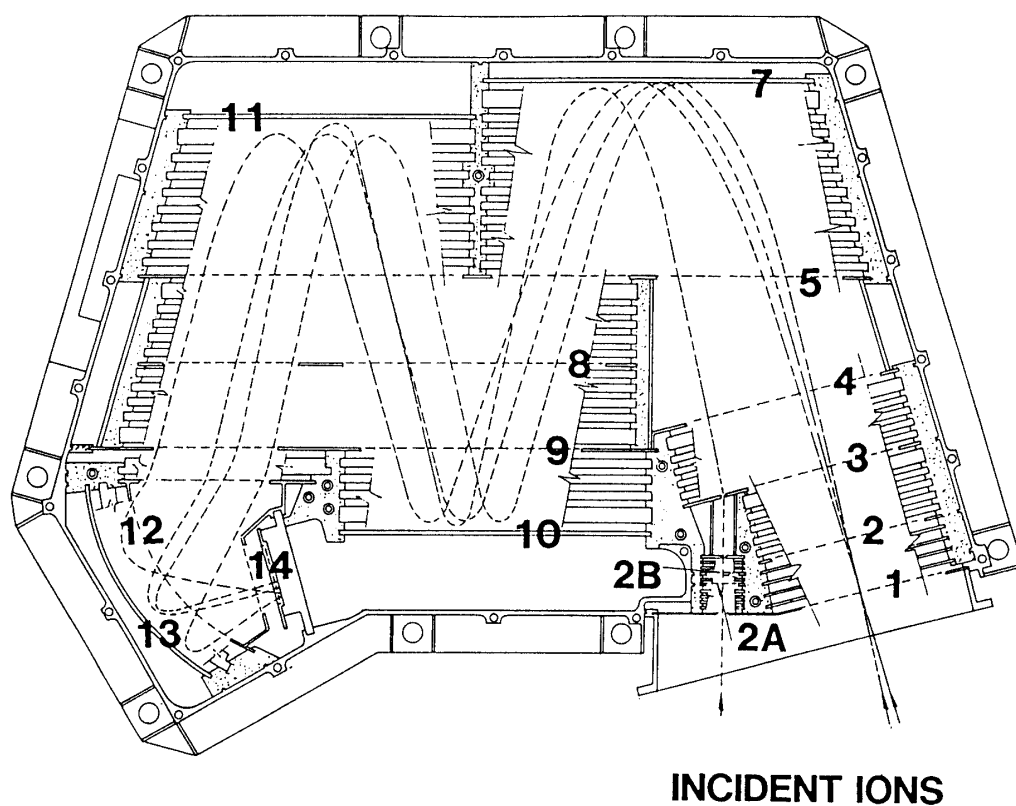


図1 SMSの内部構造とイオンのパス

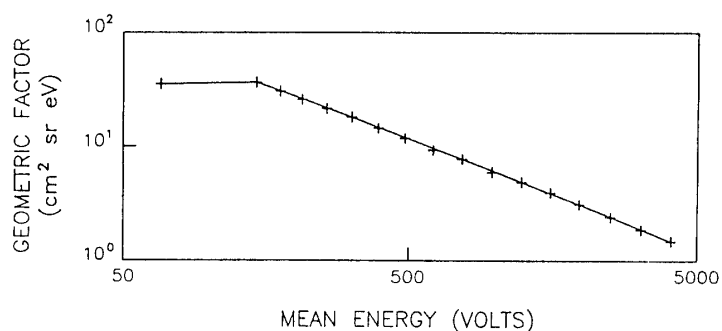


図2 感度のエネルギー依存性. 縦軸は感度(ジオメトリックファクター), 横軸はエネルギー(eV)を表す.

なり, 低エネルギー領域で相対的に高い感度を持っていることを示している. SMS はこれまでの磁気圏探査用の質量分析器に比べると高い質量分解能をもつことが特徴である. 図3は実験室内での質量分析器の性能を示している. この例では真空チャンバーにアルゴンガスを導入し, 質量分析した結果で, 残留ガス(質量数 32, 28, 18 等)とともに質量数 40 にメインのピークが見える.

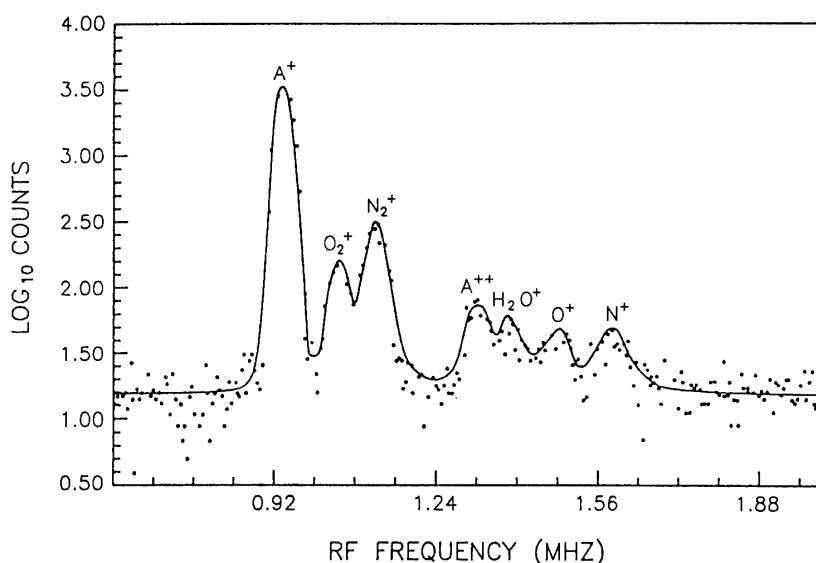


図3 実験室内で得られた質量スペクトル。横軸は高周波電圧の周波数 (MHz) で質量数の2乗に逆比例する。縦軸は対数のカウント数。

3. SMS による観測

SMS は4月に高圧を投入してから順調に動作を続けている。図4は高度約7,500 km で観測された熱的なイオンの質量スペクトルを例として示したもので、二種類の主成分イオンである H^+ と O^+ が十分な S/N 比で観測されており、その他のイオンはメインピークである H^+ の $1/200$ 以下であることがわかる。図に示されているように SMS は打ち上げ後も図3 とほぼ同じ質量分解能を持っており、予定された性能を持っていることが理解される。

SMS 完全にソフトウェア制御で動作しているために、多様な観測モードをもつことが可能である。打ち上げ時にインストールされていたモードは20種類であった。この中で機器の動作診断用の5種を除いた15種が実際の観測で用いられている。動作モードは質量掃印とエネルギー掃印のどちらを優先するか、また時間分解能とエネルギー/質量分解能のどちらを優先するか等で決められている。たとえば以下で紹介する例では角度分解能を上げるために4種類の質量数のみをサンプルしている。動作モードの選択は受信地上局と軌道条件によって一週間のスケジュールを作成し、一日単位で運用モードを変更している。

4. データ処理

SMS のデータ解析では宇宙研の大型計算機による QL とミニコンによる処理を並行して行っているが、主力はミニコンによる処理である。カナダ側の SMS グループでのデータ処理/解析を可能にするためにすべての SMS データは軌道データ・姿勢データとともにシリウスデータベースからコピー・編集され、送付されて、双方が同一のデータベースを持っている。カナダ側と日本側は同一の計算機システムを保有し、ソフトウェアの共同開発が簡単に進むように配慮している。

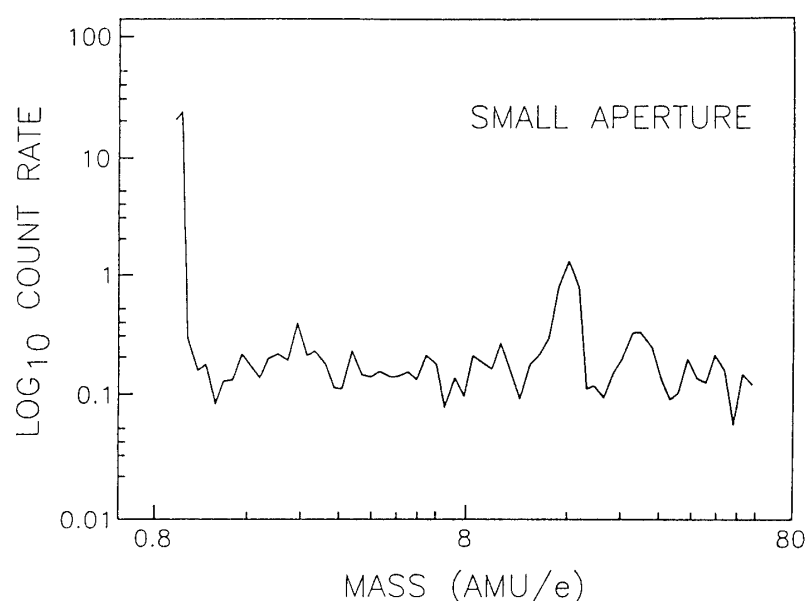


図4 軌道上で得られた熱的イオンの質量スペクトル. 横軸は対数の質量数(AMU/q), 縦軸はカウント値の対数. 観測は1989年7月3日 2339UT に高度約7500km, 74.7° inlat で行われた.

5. 極域イオンフローの観測例

a) ION CONICS

図5はSMSで観測された極域のイオンフロー現象の例を示している. この観測が行われた時のSMSの運用モードは5スピン単位(約40秒)で, 4スピンは熱的エネルギーイオンのエネルギー分布と角度分布の測定のために各スピンの間測定質量数を固定して32回のエネルギー掃印を行っている. そして H^+ , He^{++} , He^+ , O^+ のイオンの測定をおこなってから >100 eVの O^+ と H^+ を1スピンの測定する. 図では横軸を時間にとり, 5スピンのデータを1単位として上の3つのパネルに H^+ , O^+ , He^{++}/He^+ の熱的エネルギーイオンの角度分布を, また5番目のパネルが各質量数での全フラックスの値, そして最下段のパネルはエネルギー分布をグレイスケールで示している. 角度分布のパネルの縦軸は衛星のスピンプーズで相対的な値である. 磁力線との関係を示すために2本の実線を同時に示す. これらの線は各々SMSがピッチ角の最小値と最大値で観測していることを示している. 「あけぼの」は太陽指向の姿勢制御を行っているためにピッチ角の観測範囲は軌道条件によって変わる. 図の4番目のパネルの実線は観測された最小のピッチ角の値を0-90度のスケールで示している.

この観測例では図の右下にプロットされているように衛星は朝方(03 MLT)のオーロラゾーンを低緯度側から高緯度に向かって移動しながら観測している. 観測データの最初の部分では放射線帯の高エネルギー粒子によるバックグラウンドが徐々に弱くなりながら, 0603 UT頃まで見えている. 放射線帯粒子の影響は比較的大きく, 現状では放射線帯での測定は

非常に困難である。0609 UT 頃から各イオンの角度分布に磁力線の上側方向を中心とした 2 つのフラックスのピークが観測され始め、0614 UT 頃まで継続している。このときのピッチ角分布をプロットすると磁力線方向から離れたところにピークを持つ形となるが、この形を持つ分布は CONICS と呼ばれており、衛星より下の高度で磁力線に対して 90 度方向のイオン加速が起こり、その後、イオンがミラー運動で上昇してくるとともにピッチ角が小さくなるため（磁場強度が弱くなるため）にこのような分布となる。同時に観測していた低エネルギー電子（LEP）および磁場（MGF）のデータから CONICS の領域は朝方のオーロラゾーンに一致していることが確かめられており、オーロラの活動とイオンフローの関連が深いことを示している。CONICS などの極域でのイオンフローの観測はこれまでの衛星でも数多く報告されているが、「あけぼの」による観測の特徴は低エネルギーの現象が多いことと各イベントで早い時間/空間変動が観測されている点にある。図の観測例でも約 40 秒の SMS のサンプルごとに CONICS の強度とピッチ角分布は変化している。とくに 0612 UT 付近では CONICS から磁力線方向にむいた ION BEAM の形に変わり次のサンプルでは再び CONICS となっている。このような早い変化が他の観測パラメータとどのように対応しているかはこれからの研究課題であるが、MGF データとの比較で興味深い点は CONICS の領域では磁場も変動を示している点である。また、もう一つの特徴として、図の 3 番目のパネルからわかるように He^+ のフラックスが H^+/O^+ とほぼ同程度の値があることで、これまでの観測から言われてきた He^+ の量に比べるとかなり多い、このことは電離層レベル

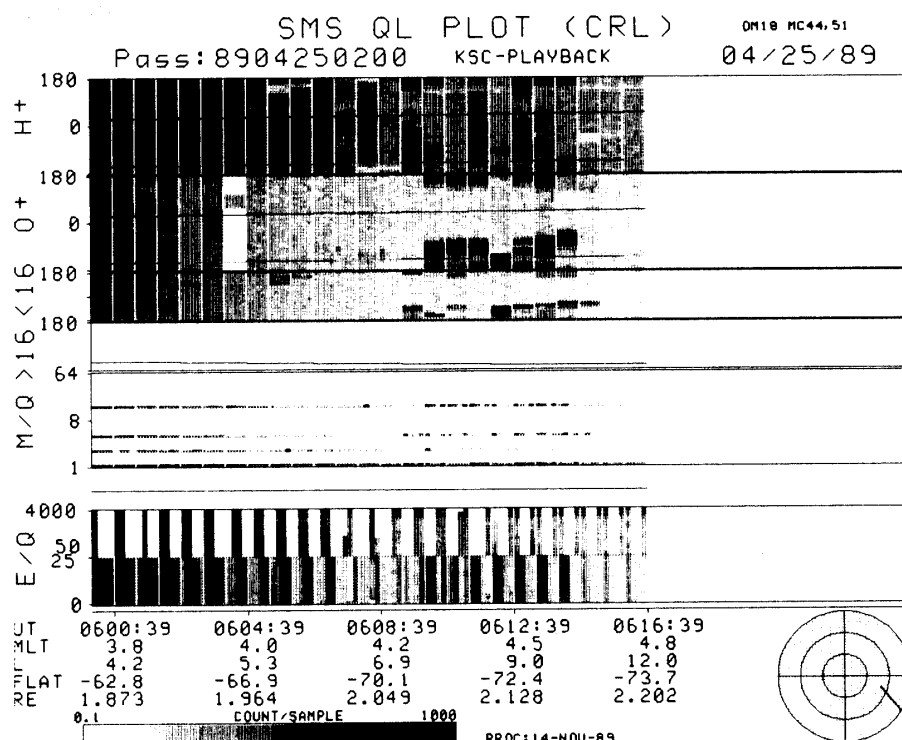


図5 SMSで観測された Ion CONICS の例。カウントの対数をグレイスケールで表している。

でのイオン組成の季節変化/太陽活動度依存性と関連していると予想されるが、さらに統計的な解析が必要とされる。

b) 低エネルギーイオンビーム

図6は低エネルギーのイオンビームを観測した例である。観測は10 MLT, 70度の近傍で行われた。観測高度は図5の例と同じくアポジー付近である。図では上側の2枚のパネルに H^+ のEnergetic ($4\text{ Kev} > E > 100\text{ eV}$) と Thermal ($E < 70\text{ eV}$) のデータを図5と同じフォーマットでプロットしている。このときのSMSの観測モードは図5と同じで、約40秒で1サイクルを終える。図の横軸は時間であるが、Energeticのデータについては40秒間のデータに対して横軸方向に4分割してエネルギー分布を同時に表示している。エネルギーの分割は100-200 eV, 200-500 eV, 500-1 keV, >1 keVである。中の2枚のパネルは O^+ について同じ表示をしたもので、最下段は He^+ のThermal データを示している(このモードでは He^+ のEnergeticの測定は行っていない)。また各パネルの右横につけた矢印は磁力線方向(上向き)を示す。

この例ではここに示された3種類のイオンは磁力線方向のイオンビームの形をとっているが図5のCONICSの例とおなじように早い時間的/空間的変動を示し、 He^+ が比較的大き

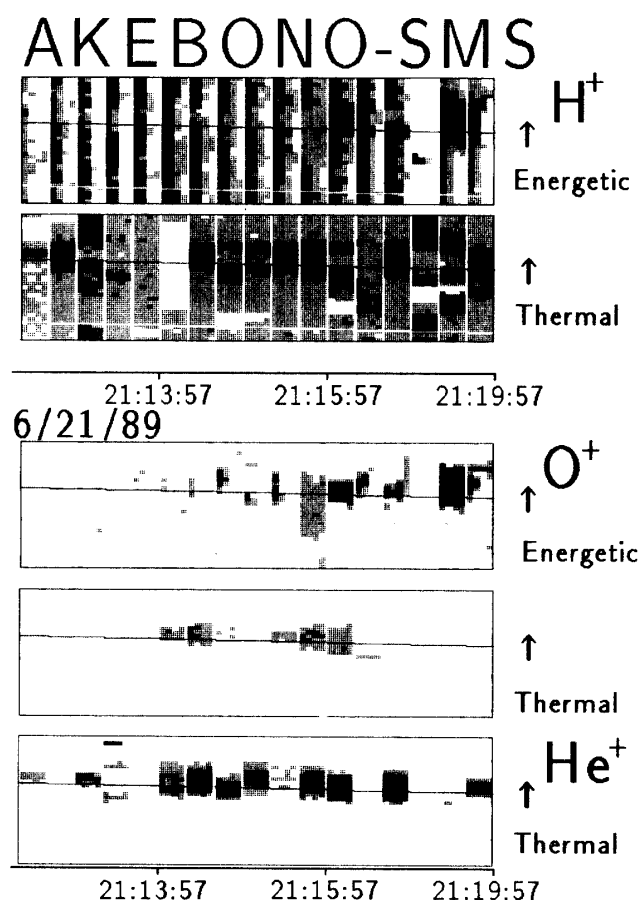


図6 SMSで観測された低エネルギーイオンビームの例。

な割合を占めている。Energetic のデータを見ることによってほとんどの時間でイオンフローのエネルギー分布は 200 eV 以下に限定されていることがわかる。図 5 との違いはピッチ角分布の形であるが、2113 UT 頃に He^+ が顕著な CONICS の形となっていることがわかる。また、MGF データはこの例でもやはり大きな変動を示している。この様に二つの例は見かけ以上に共通点を多く持っているといえる。

ここでイオンビームという言葉を使ったが、これまでの衛星観測ではイオンビームという言葉はオーロラ帯、特に夕方から真夜中のディスクリートオーロラ帯での数 keV 程度の磁力線沿い電場で加速されてビーム状になった場合に使われることが多く、この例のように低エネルギーの場合は余り議論されていなかった。むしろ低エネルギーでの現象としては DE-1 の RIMS で観測された Ion Fountain 現象に近いといえる。Ion Fountain では昼間側の電離層からイオンが加熱されて磁気圏に供給されるが、その過程でイオンは磁力線沿い、あるいは磁力線に直角な加速を受け、さまざまなピッチ角分布を持つようになると考えられている。また、イオンは速度が遅いために高高度に達するまでに電場の影響で磁力線に直角方向にドリフトしていくことが予想される。このため昼間側の電離層からのイオンは高高度ではポーラーキャップの広い領域に広がる可能性がある。ここで示した 2 例からではイオンの起源などの詳しい議論はできないが、100 eV 以下のイオンがきわめて変化に富んだ観測事実を提供することを示唆している。

6. まとめ

SMS の観測データを南極上空でデータレコーダに記録された 16 分間のデータを中心に見てきたが、低エネルギーイオンに関する現象は変化に富んでおりきわめて興味深いものであることがわかった。これからはアポジーが北半球に移り、さらに多量の観測データがえられることが期待される。これらのデータを使うことによってさらに興味深い現象が見いだされる可能性があるとともに、イオンフロー現象についてある程度統計的な処理が行えるようになると考えている。

またデータ解析の面でも正確な姿勢データから RPA データを解析しイオン温度やイオンドリフトなどの情報がどの程度の精度で得られるかの検討を進めて行きたいと考えている。

謝 辞

「あけぼの」の制作と打ち上げに関係された方々に感謝します。また、SMS プロジェクトを進める上でさまざまな援助をしていただいた通信総合研究所とカナダ NRC の関係者にも感謝します。