

## あけぼの衛星による沿磁力線上昇粒子の観測

賀谷 信幸<sup>1)</sup>・向井 利典<sup>2)</sup>・佐川 永一<sup>3)</sup>

### Observation of Upstreaming Particles by AKEBONO Satellite

By

N. KAYA, T. MUKAI, E. SAGAWA

**Abstract:** The ion mass spectrometer (IMS) installed onboard the AKEBONO satellite was developed to achieve the simultaneous observation of distributions of both the composition and pitch angle of ions with very high time resolution. The IMS instrument is working satisfactorily, though it needs a further fine adjustment to measure low energy ions. In spite of the early phase of the observation, the IMS observed upflowing ions with both the field-aligned (UFI) and conical (Conics) pitch angle distributions. Helium fluxes in the observed upflowing ions were larger than expected and nearly equal to oxygen fluxes. A mass dispersion that ions with higher mass flow up at lower latitudes was observed in the conics event. Upstreaming electrons accompanying the upflowing ions were found at the edge of the inverted-V events. Electrons otherwise bouncing at the mirror point decreased in flux at the appearance of upward flowing ions. This suggests the existence of an electric field below the satellite altitude.

#### 概 要

「あけぼの」衛星に搭載されたイオン・エネルギー質量分析器 (IMS) は、新規に開発された分析器である。この分析器は質量とピッチ角分布を両方同時に観測できるため、今までの分析器にない高時間分解能でイオンの特性を観測することができる。IMSは打ち上げ約1ヶ月後高圧が印加され、無事観測が開始された。IMSは低エネルギー粒子を測定するため今少しの微調が必要ではあるが、すでに夜側では沿磁力線に上昇するイオン

---

<sup>1)</sup> 神戸大学工学部

<sup>2)</sup> 宇宙科学研究所

<sup>3)</sup> 郵政省通信総合研究所

(UFI) やコニックスを、昼間側ではカスプに降下するプロトンと  $\alpha$  粒子を分析している。これら観測されたイオンの主な特徴をまとめると：①夜側で観測されたヘリウムは予想以上に多く、ほとんど酸素と変わらないフラックスを示した。②コニックスでは重い粒子ほど低緯度側に分布する質量分散が観測された。③Inverted-V 構造の端で UFI と同時に上昇する電子が見いだされた。④降下電子のピッチ角分布は UFI と非常によい相関があり、衛星より低い高度に加速電場があることを示唆した。

## 1. まえがき

極域で電離層から上昇するイオンがしばしば観測されている [1,2,3,4,5]。これらの電離層イオンは磁気圏プラズマの主な供給源であると考えられている。一般に磁力線に沿って上昇するイオンを UFI (Upward Flowing Ions) と、円錐状のピッチ角分布をもつイオンをコニックスと名づけている。UFI はいわゆる磁力線に平行な電場により加速されたイオン流であると考えられているが、 $O^+$  のピーク・エネルギーがプロトンのエネルギーと異なっている。もし、イオンが平行電場のみで加速されるならば、酸素とプロトンは同じエネルギーに加速されねばならない。この電離層イオンの加熱・加速の質量依存性のメカニズムについて 1981 年 Collin らにより [2] 最初の提案がなされ、Lundin らも Viking 衛星の結果から平行電場に加え、磁場のポンピング作用によるものと報告している [6]。イオン・コニックスに伴う上昇電子の生成メカニズムは、イオン・コニックスのメカニズムと相入れないものである。Hultqvist (1988) らが電場の揺らぎでの説明を試みている [7]。一方、DE 衛星の観測からこの上昇電子と Birkeland 電流の関係を検討している [8]。

以上述べたように、イオンの質量の測定は電離層と磁気圏の結合メカニズムを解明するための重要な観測手段である。我々の開発した高時間分解能の分析器により、結合メカニズムの細かな構造や早い時間変化が明確になるものと期待される。ここでは、初期の観測結果について報告するものであるが、特に UFI 現象におけるイオンおよび電子の特性について報告する。

## 2. UFI における粒子の特性

1989 年 8 月 28 日に夕方側のオーロラ・オーバルで典型的な UFI が観測された。図 1 に電子とイオンのエネルギー分布 (E-t ダイアグラム) を示す。なお、この E-t ダイアグラムは LEP-S1 のチャンネル 4 のデータである (LEP-S1 は 1/4 球による粒子エネルギー分析器であり、詳細は [9] を参照)。なお、チャンネル 4 は IMS と同一の視野方向を持つセンサーである。図 1 のイオンの E-t ダイアグラムより、10 keV 周辺にエネルギー・ピークをもつイオンは等方的なピッチ角分布であることから、これらのイオンはプラズマシート起源であると考えられる。UFI は離散的に濃い点で表示されたイオンである。これらは LEP-S1 のエネルギー掃引とピッチ角掃引とのビートにより、このように飛び飛びに観測されたものである。実際のイオンビームは当然連続的に存在する。ピッチ角測定は衛星のスピン (衛星スピン周期は約 8 秒) に依存するため、ピッチ角  $0^\circ$  方向は 8 秒に 1 度の割合でしか測定する

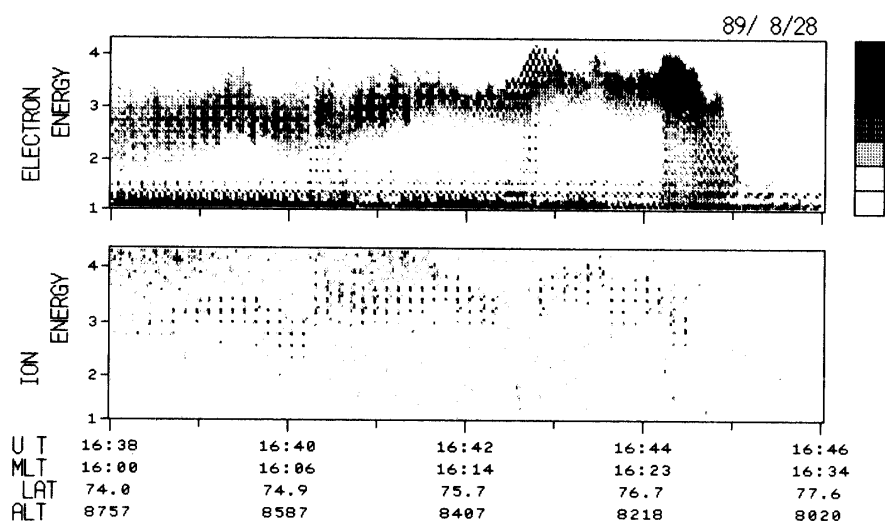


図1 LEP-S1のCh. 4によるE-tダイアグラム.

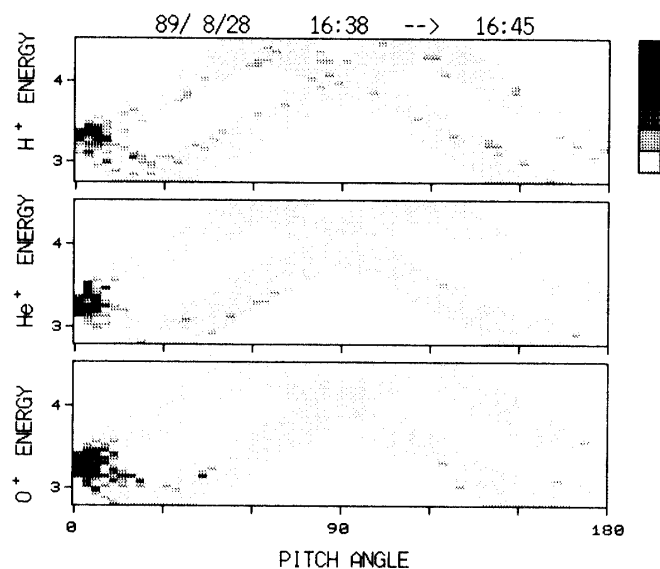


図2 IMSによるH<sup>+</sup>、He<sup>+</sup>とO<sup>+</sup>のピッチ角分布. 空白領域は観測がなかった領域, 濃淡表示の内もっとも淡い部分は観測されたが, カウントがなかった領域.

ことができないので, 8秒に1度だけUFIが観測されている. なお, エネルギーは三角波状に変則4ステップ飛ばしに測定されるため, 縦軸に対してもやはり飛び飛びなデータとなる.

電子のエネルギー分布はいわゆる Inverted-V 構造を示している. これは衛星より高い高度にも加速域があることを示している. 一方UFIから衛星より低い高度に数kVの加速電場があるものと思われる. 図1の電子とイオンのE-tダイアグラムで興味深い現象はイオ

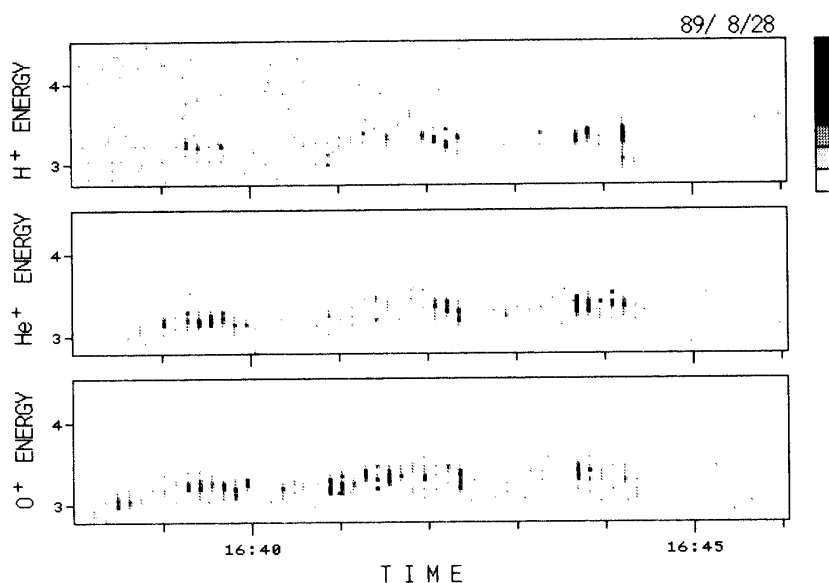


図3 IMSによる $H^+$ 、 $He^+$ と $O^+$ のE-tダイアグラム。

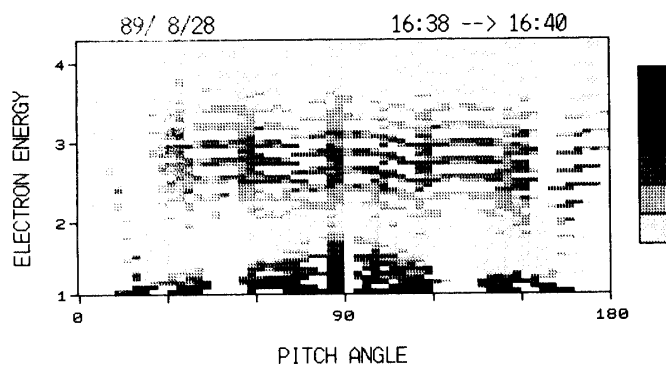


図4 UFI出現時のロス・コーン分布をしめす電子のピッチ角分布。

ンと電子のピーク・エネルギーの変化が同じ傾向にある。すなわち電子のエネルギーが高くなればイオンも同時に上昇する。これは、加速電場は局所的に変化するのではなく、全体的に均一に変化することを示唆するものと考えられる。

図2にIMSで観測されたプロトン、ヘリウムと酸素のピッチ角分布を示す。点で表示された領域が観測領域であり、空白の領域は観測データがない領域である。なお、濃淡表示でフラックスの大きさを示しているが、1番淡い表示はカウント数がなかったことを表わしている。このピッチ角分布から観測されたイオンはピッチ角 $20^\circ$ 以内で上昇しているイオンであることを示し、UFIであることが再確認された。

図3にIMSにより観測されたプロトン、ヘリウムと酸素のE-tダイアグラムを示す。Coillinらは酸素がいつもプロトンより少ないが、エネルギーは1.7倍高いと報告している[2]。しかしながら、今回観測されたデータでは酸素が一番多く、プロトンが一番少ないと

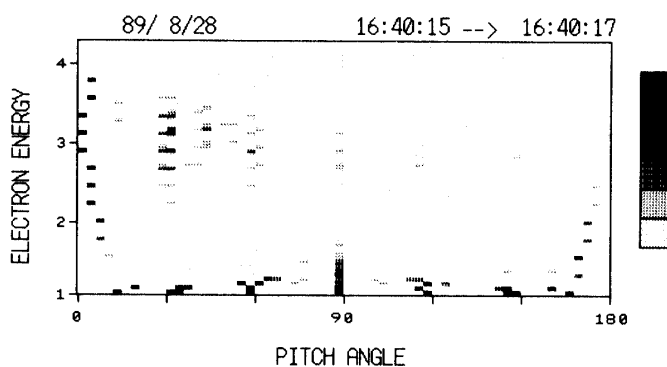


図5 磁力線沿いに上昇する電子流

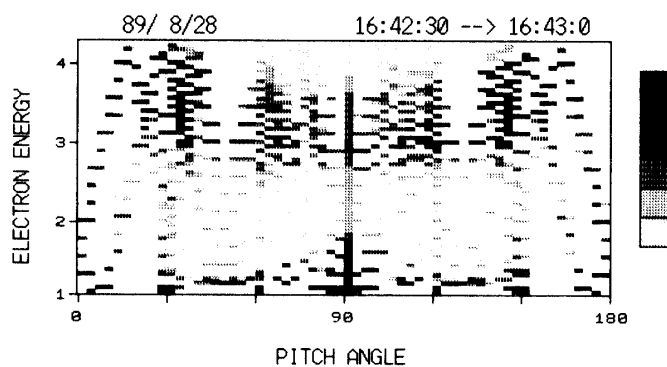


図6 UFIがないときのミラー運動の電子.

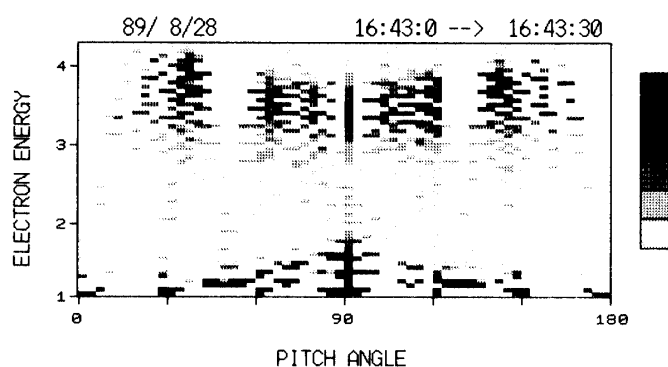


図7 UFI出現にともなう非対称な電子のピッチ角分布.

いう逆の関係にある。LEP-S1により観測されたイオンのピーク・エネルギーは約2 keVで、IMSのデータと同じである。図2のピッチ角分布から2 keV以下のプロトンは無いことがわかる。このことから今回観測されたUFIは酸素が主成分であると考えられる。

図3からわかるようにヘリウムが酸素と同じ位のフラックスで観測されたことが興味深い。S3-3衛星等の他の観測では、ヘリウムは微量成分(5%以下)と報告されている[10]。Raittの報告[11]にもあるように極域でのヘリウムは500から900 kmの高度に密度のピーク

がある。現在太陽活動が活発なため、ヘリウムが高高度まで上昇したためと考える。

UFIに伴って観測された電子は興味深い現象を示した。ここで4つの電子のピッチ分布を示す。最初の分布は図4に示すようにロス・コーン分布を示している。これは他の衛星の結果と同じである[5]。2番目のタイプは図5に示す16:40:15から16:40:30 UTの期間に現れたピッチ角 $5^\circ$ 以内の上昇電子である。この上昇電子は検出器が飽和するほどの電流であった。この時UFIのイオンはプロトンとヘリウムは消滅しているが、興味深いことに酸素の成分が少し残っている。もし電子が電場加速ならイオンが消滅するか、大きくピッチ角が偏向されなければならないからである。

3番目は16:42:30から16:42:50 UTの期間に見いだされた現象で、UFIが見られない時間帯では5 keV周辺の降下電子が同じエネルギー、ピッチ角の上昇電子と相関がとれている(図6)。すなわち降下した電子はミラー運動して、対称なピッチ角で上昇している。ところが、UFIが観測されている期間では(図7)非対称なピッチ角分布を示し、上昇電子が減少している。これはUFIを生み出す加速電場が降下した電子のピッチ角をロス・コーンまで変化させ、電離層に降下させてしまうためと考える。

### 3. 結論

あけぼの衛星に搭載したIMSは、イオンのエネルギー、ピッチ角と質量の3つのパラメータの内、ピッチ角と質量を二次元で測定することにより、2秒の高時間分解能を達成することができた。観測が開始されてから、まだ十分なデータは取得されていないが、沿磁力線と円錐型のピッチ角分布をもつ上昇イオンの観測が行なわれた。その結果、興味深い点として以下の項目が挙げられる。

- (1) あけぼの衛星で観測されたUFIやコニックで $\text{He}^+$ が他の衛星観測結果より多い。
- (2) 磁力線に沿って上昇する電子が観測された時、プロトンとヘリウムのUFIは消えたが、酸素は同時に観測された。
- (3) 電子のピッチ角分布とUFIとの相関がみられた。すなわち、UFIがないときはミラー運動による降下電子に対応する上昇電子が観測されたが、UFIが現れると、上昇電子が大幅に減少した。これは降下した電子が電場によりロス・コーンのピッチ角まで加速され、電離層に降下したものと考えられる。

### 謝辞

あけぼの衛星の計画を遂行するにあたり、プロジェクト・マネジャーの宇宙科学研究所の鶴田浩一郎教授および宇宙工学の先生方に感謝の意を表します。またLEPの較正実験、データ処理に関しご協力頂きました宇宙科学研究所の町田忍助手、小原隆博助手、平原聖文院生、国立極致研究所の山岸久雄助教授、宮岡宏助手、および通信総合研究所の三宅互博士に感謝いたします。また、貴重な議論、助言を頂きました京都大学の松本紘教授に感謝いたします。

## 参考文献

- [ 1 ] Shelley, E.G., R.D. Sharp, and R.G. Johnson, Satellite Observation of an Ionospheric Acceleration Mechanism, *Geophys. Res. Lett.*, 3, 654–656, 1976.
- [ 2 ] Collin, H.L. and R.D. Sharp, E.G. Shelley and R.G. Johnson, Some general characteristics of upflowing ion beams over the auroral zone and their relationship to auroral electrons. *J. Geophys. Res.*, 86, 6820–6826, 1981.
- [ 3 ] Gorney, D.J. A. Clarke, D. Croley, J. Fennell, J. Luhmann and P. Mizera, The distribution of ion beams and conics below 8000 km, *J. Geophys. Res.*, 86, 83–89, 1981.
- [ 4 ] Lundin, R., B. Hultqvist, E. Dubinin, A. Zackarov and N. Pissarenko, Observations of outflowing ion beams on auroral field lines at altitudes of many earth radii, *Planet. Space Sci.*, 30, 715–726, 1982.
- [ 5 ] Lunidin, R.L. Eliasson, B. Hultqvist and K. Stasiewicz, Plasma energization on auroral field lines as observed by the Viking spacecraft, *Geophys. Res. Lett.*, 14, 443–446, 1987.
- [ 6 ] Lundin, R. and B. Hultqvist, Ionospheric plasma escape by high-altitude electric fields: Magnetic moment “Pumping”, *J. Geophys. Res.*, 94, 6665–6668, 1989.
- [ 7 ] Hultqvist, B., On the acceleration of electrons and positive ions in the same direction along magnetic field lines by parallel electric fields, *J. Geophys. Res.*, 93, 9777–9784, 1988.
- [ 8 ] Marshall, J.A., J.L. Burch, J.R. Kan and J.A. Slavin, DE 1 observation of return current regions in the nightside auroral oval, *J. Geophys. Res.*, 93, 14542–14548, 1988.
- [ 9 ] Mukai, T., N. Kaya, E. Sagawa, M. Hirahara, W. Mitake, 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 Satellite, *J. Geoelectr.*, in press.
- [10] Collin, H.L., R.D. Sharp and E.G. Shelley, The magnitude and composition of the outflow of energetic ions from the Ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 89, 2185–2194, 1984.
- [11] Raitt, W.J., R.W. Schunk and P.M. Banks, Quantitative calculations of helium ion escape fluxes from the polar ionospheres, *J. Geophys. Res.*, 83, 5617, 1978.