

---

# あけぼの衛星/SMSを用いた極域電離圏・磁気圏における イオン加熱・流出現象について

---

北大・理・地球惑星 山田 学

平成 14 年 6 月 23 日

## 概要

極域電離圏のイオン流出現象は地球磁気圏に存在するイオンの供給源を議論する上で重要である。あけぼの衛星に搭載されたイオン質量分析器 (SMS) は十年以上にわたりこのイオン流出現象を観測しており、どこで、どれだけの量が流出しているのかという基本的な問題を調べる上で最良のデータセットを提供する。一方、SMS のデータは扱い/見方が難しいとの声が多く (??) なかなか利用されていないのが現状である。本発表は SMS データ利用の普及を促すために SMS の観測器概要および SMS を用いたイオン流出現象に関する統計解析結果を中心に紹介する。

## 目次

1 Introduction	1
2 SMS について	3
2.1 計測器概要	3
2.2 プラズマパラメータの見積もり方	4
2.3 観測例	5
3 統計解析結果	8
3.1 Kp 依存性	8
3.2 季節変動	8
3.3 太陽周期による変動	8
4 最近注目している現象	10
A SMS サマリープロット図	10

## 1 Introduction

イオン流出現象に関してのイントロ.

散逸する地球大気

地球磁気圏を構成するプラズマの起源は?太陽風起源だけでなく地球起源も重要である. [Shelly et al. (1972) 磁気圏にて酸素イオンを発見]

地球からどのようにイオンは流出するのか? ポーラーウィンド理論: 水素・ヘリウムイオンは超音速流となるが, 酸素イオンは流出しないはずだった.

イオンコニクス, イオンビーム, Auroral bulk upflow など特に磁力線に垂直方向のイオン加速・加熱が重要

イオン加速・加熱はどのように起きるのか? プラズマ波動との共鳴による加熱された荷電粒子が注目されている.

磁気圏プラズマの起源を知るために, イオン加熱・流出がいつ, どこで発生し, どれくらいの量が流出しているのか?を明らかにする.

太陽活動 (EUV) との関係 Young et al. (1982): 磁気圏中の水素, 酸素イオンが太陽活動が活発になると増加する. (低エネルギーのイオンについて長期間のデータはいままでなかった.) 地磁気活動との関係磁気圏プラズマを説明できるか?

## 2 SMS について

### 2.1 計測器概要

あけぼの衛星に搭載されたサブラサーマルイオン質量分析機 (Suprathermal Ion Mass Spectrometer:SMS) は高周波電圧を用いる質量分析機で、観測するプラズマ中にあるイオンの質量数とエネルギー、ピッチ角分布を測定する装置である。SMS の性能諸元を表 1 に、外観を図??に示す (詳細は *Whalen et al.*[1990] 参照)。

これは電離層に起源を持つイオンから、磁気圏の主成分となるイオンまでをカバーしている。

質量分析にはイオンの飛行時間の違いを利用する“速度フィルター”を採用しており、イオンの入射角の測定は基本的に衛星のスピンの利用することでスピン軸に直行する方向における  $360^\circ$  の角度分布を得る。

**fast scan mode** fast scan mode は観測領域のプラズマを構成する主要なイオンの熱的 ( $<15$  eV) エネルギー領域での速度分布と非熱的 ( $>100$  eV) エネルギー領域での速度分布を衛星 1 スピン毎に交互に測定するモードである。したがって 1 観測サイクルは 16 秒となる。このモードでは 1 スピン (8 sec) 内に 4 つのイオン ( $H^+$ ,  $He^+$ ,  $O^+$  と  $He^{++}$  あるいは  $O^{++}$ ) を 8 ステップのエネルギーレンジで測定し速度空間の 2 次元分布関数を計測する。角度方向の分解能は約  $12^\circ$  (1/32 スピン) である。

計測できるイオンの種類は 4 種類と少ないが短時間 (16 sec) で高い分解能の速度分布関数を得ることができるのが利点である。イオンのバルク速度や温度の見積りに利用できる。

SDB で公開されている SMS データは fast scan mode のデータを角度、エネルギーステップに関して一部平均したデータである。

**mass scan mode** mass scan mode は観測領域に存在するプラズマの成分に注目するモードである。測定するイオンは  $1 \sim 64$  amu/q と広範囲に及ぶが、角度方向の分解能は約  $45^\circ$  (1/8 スピン) と粗い。

エネルギー方向のスキャンに時間がかかるため角度方向の分解能が低く、得られるデータからプラズマパラメータを導くことは困難である。しかし、ほとんど研究がされていない分子イオンの上昇流を調べる上で貴重な情報が得られる。

ちなみに、Mass scan mode の summary plot は [ftp://jspace.ep.sci.hokudai.ac.jp/SMS\\_PUB/MSP\\_PG/](ftp://jspace.ep.sci.hokudai.ac.jp/SMS_PUB/MSP_PG/) 以下にこっそり公開中。

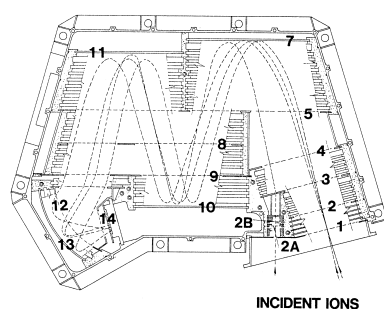
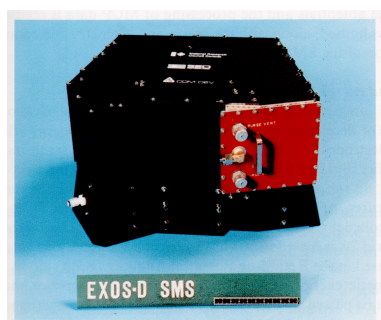


図 1: SMS センサー部 (左) および SMS 外観図 (右)[Whalen et al., 1990]

表 1: SMS の性能

エネルギー / 単位電荷 ( $E/Q$ ) 範囲	$0 \leq E/Q \leq 5\text{keV}$
質量/単位電荷 ( $m/Q$ ) 範囲	$0.8 \leq m/Q \leq 60\text{AMU}/Q$
エネルギー分解能 ( $\Delta E$ )	$0.05 \leq \Delta E \leq 0.2\text{KV}$ , :再プログラム可能
質量分解能 ( $\Delta m/m$ )	$0.05 \leq \Delta m/m \leq 0.2$ :再プログラム可能
Geometric factor ( $Ad\Lambda \cdot \varepsilon$ )	$4 \times 10^{-8} \leq Ad\Lambda \cdot \varepsilon \leq 2 \times 10^{-2}\text{cm}^2\text{sr}$ :再プログラム可能
角度分解能	
スピンの軸と垂直平面内 ( $\Delta\theta$ )	$3^\circ \leq \Delta\theta \leq 90^\circ$ :再プログラム可能, エネルギー・G-factor に依存
スピンの軸方向 ( $\Delta\phi$ )	$3^\circ \leq \Delta\phi \leq 90^\circ$ :再プログラム可能, 低エネルギー $E/Q \leq 0.1\text{eV}$ のみ

## 2.2 プラズマパラメータの見積もり方

SMS ファーストスキャンモードで測定したイオン速度分布関数 ( $f_i(V, \phi)$ ) からイオンの磁力線平行方向速度 ( $V_{i\parallel}$ ), 磁力線垂直方向速度 ( $V_{i\perp}$ ), 密度 ( $N_i$ ), 温度 ( $T_i$ ) といったプラズマパラメータを見積もる方法は Watanabe et al. [1992] の方法を改良したものである. イオンのサイクロトロン運動を考慮することで SMS が観測するイオンの 2 次元速度空間分布関数を 3 次元速度空間で積分し, プラズマパラメータを求めた. また, 10 年を超える長期の観測結果を比較できるように MCP の感度の補正を行った. なお本論文では,  $V_{i\parallel}$ ,  $V_{i\perp}$ ,  $N_i$ ,  $T_i$  をプラズマパラメータと表現する.

$i$  種類目のイオンのプラズマパラメータは速度分布関数を以下のように積分することで求めることができる.

$$N_i = \int f_i(V, \phi) V dV d\phi d\theta \quad (1)$$

$$V_{i\parallel} = \frac{1}{N} \int \mathbf{V} \cdot (\mathbf{s} \times \mathbf{t}) f_i(V, \phi) dV d\phi d\theta \quad (2)$$

$$V_{i\perp} = \frac{1}{N} \int \mathbf{V} \cdot \mathbf{t} f_i(V, \phi) dV d\phi d\theta \quad (3)$$

$$T_i = \frac{m_i}{2kN} \int (\mathbf{V} - \mathbf{V}_0)^2 f_i(V, \phi) dV d\phi d\theta \quad (4)$$

$$\mathbf{V}_0 = \mathbf{V}_{i\parallel} + \mathbf{V}_{i\perp} \quad (5)$$

ここで  $\mathbf{s}$ ,  $\mathbf{t}$  はそれぞれ磁力線平行方向と磁力線垂直方向の単位ベクトル,  $k$  はボルツマン定数,  $m_i$  は  $i$  種類目のイオン質量,  $V$  はそれぞれ衛星自転面内のイオン速度,  $\phi, \theta$  は磁力線方向からの角度 (ピッチ角) と磁力線周りの方位角である. 見積もられたイオン密度  $N$ , イオン温度  $T$  はそれぞれ, 実際のイオン密度の下限とイオン温度の上限を与えるものとなる. また  $V_{0\parallel}$  は衛星自転面に磁力線を投影した方向であり, 完全な磁力線方向ではない. しかし, SMS が不変磁気緯度  $60^\circ$  以上で観測を行っていることと, あけぼの衛星のスピンの軸は  $1^\circ$  以内で太陽方向を指していることを考慮すると, 磁力線方向  $\mathbf{s}$  と  $V_{0\parallel}$  の間の角は十分小さい.

衛星電位を見積もる方法として  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  によるドリフト速度が質量に依存しないことを利用している. 測定対象のイオンの質量 ( $q_i/m_i$ ) とドリフト速度の値から衛星電位を求めることができる. しかし, 衛星が大きく帯電している場合, イオンに  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  以外の外力が働いている場合や測定対象のイオン密度が小さい場合は衛星電位のフィッティング計算が収束せず, プラズマパラメータを見積もることができない場合がある. このような場合のデータは使用しない.

### 2.3 観測例

あけぼの衛星軌道に沿って SMS が観測したイオン速度分布関数と?? 節に述べた手法で見積もったイオンパラメータを示す。昼間側のカスプ領域付近を通過した軌道と、夜側のオーロラ領域付近を通過した軌道で得たデータを示す。

図?? は 1990 年 2 月 20 日の観測である。上から 3 つのパネルはそれぞれ  $H^+$ ,  $He^+$ ,  $O^+$  の速度分布関数を時系列として並べてある。速度分布関数は横軸にエネルギー ( $0 - 25$  eV)、縦軸に磁力線からの角度 ( $-180^\circ - 180^\circ$ ) を取った短冊状に描かれている。北半球では磁力線からの角度  $0$  度が下向きを表す。図の最下部に観測時刻 (UT) と対応する観測高度 (km), 不変磁気緯度 (MLAT), 磁気地方時 (MLT) が表示してある。この期間は地方時 11 付近から地方時 17 時付近へと高度を上げながら通過する軌道であり。下 3 つのパネルは上から順に磁力線に垂直なドリフト速度  $v_\perp$  (km/s), 沿磁力線速度  $v_\parallel$  (km/s), イオン温度  $T$  (K) を式 (2) - (4) を用いて見積もった値を縦軸にとっている。ドリフト速度は衛星電位の効果を見積もって差し引いた値であり、イオンの種類によらない。沿磁力線速度のパネルに書かれた "H", "4", "0" はそれぞれ  $H^+$ ,  $He^+$ ,  $O^+$  を表しており、正の値は電離圏から磁気圏へ向かう速度を意味している。

1638-1643 UT 頃にあけぼの衛星がカスプ領域と考えられる領域を通過した。このとき  $H^+$ ,  $He^+$ ,  $O^+$  の全てが磁力線垂直方向に加熱され、コニクスの分布となっている。見積もったイオン速度と温度はカスプ領域付近で他の領域に比べ大きな値であった。極冠領域 ( $> 1655$  UT) ではポーラーウィンド的なイオン上昇流が観測された。途中でイオンパラメータが見積もれていない時間帯がある。これは ?? 節で述べた様に条件によってプラズマパラメータの見積もりが破綻してしまうためである。特に磁力線方向に激しく加熱されている領域で見積もりがうまくできない場合が多い。

図?? は 1993 年 3 月 16 日 17UT 頃の SMS 観測とプラズマパラメータを示している。図のフォーマットは図?? と同様である。このときのあけぼの衛星は MLT 19 時付近から真夜中へ向かい、高度と緯度を上げながらオーロラ領域付近の上空を通過したのち MLT 3 時の低緯度へと抜けていく軌道であった。1735-1814 UT にあけぼの衛星がオーロラ領域付近と考えられる領域を通過した際、イオンの速度空間分布はイオンビームやイオンコニクスといった形になっている。見積もられた  $H^+$ ,  $He^+$ ,  $O^+$  の上向き速度と温度は大きな値であった。

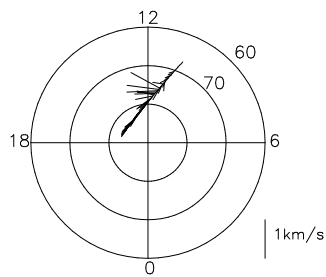
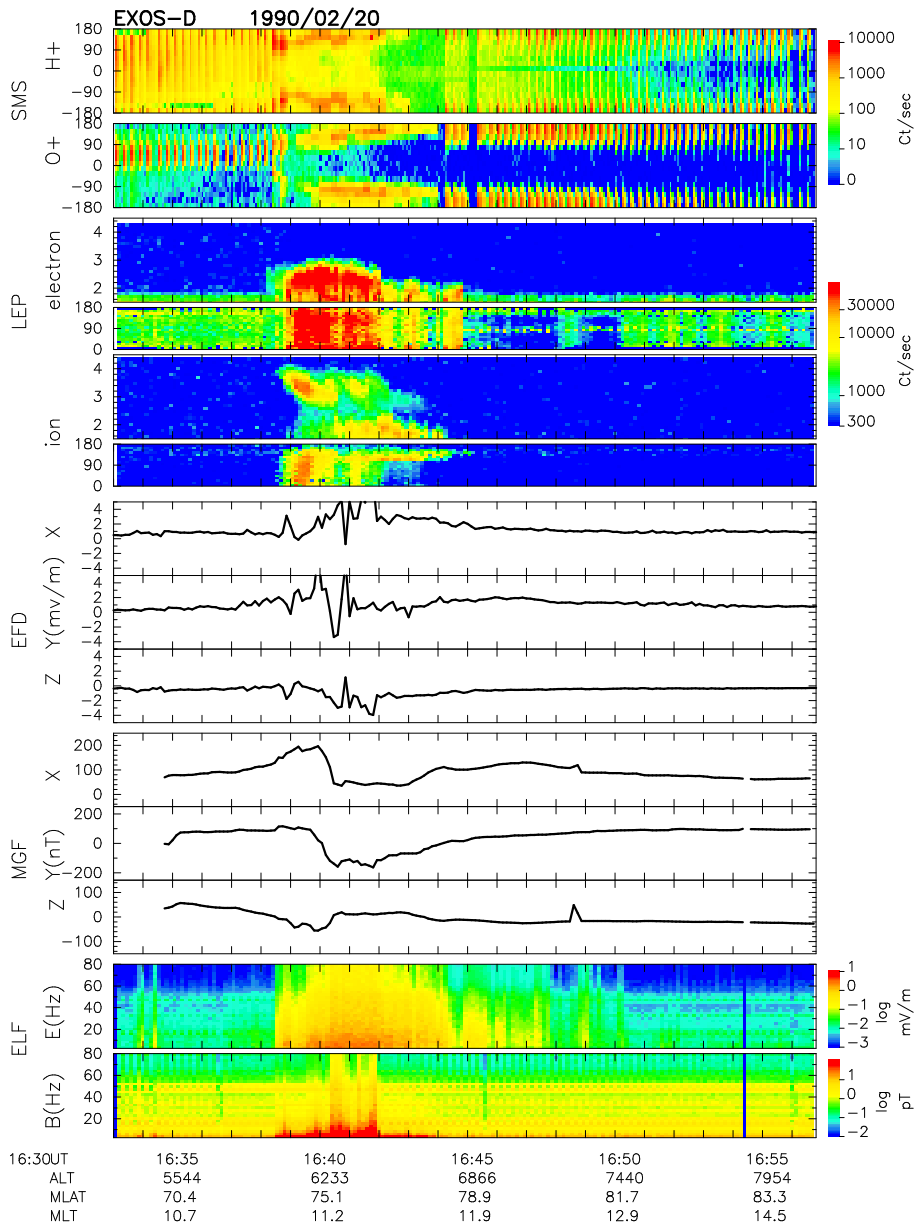


図 2:

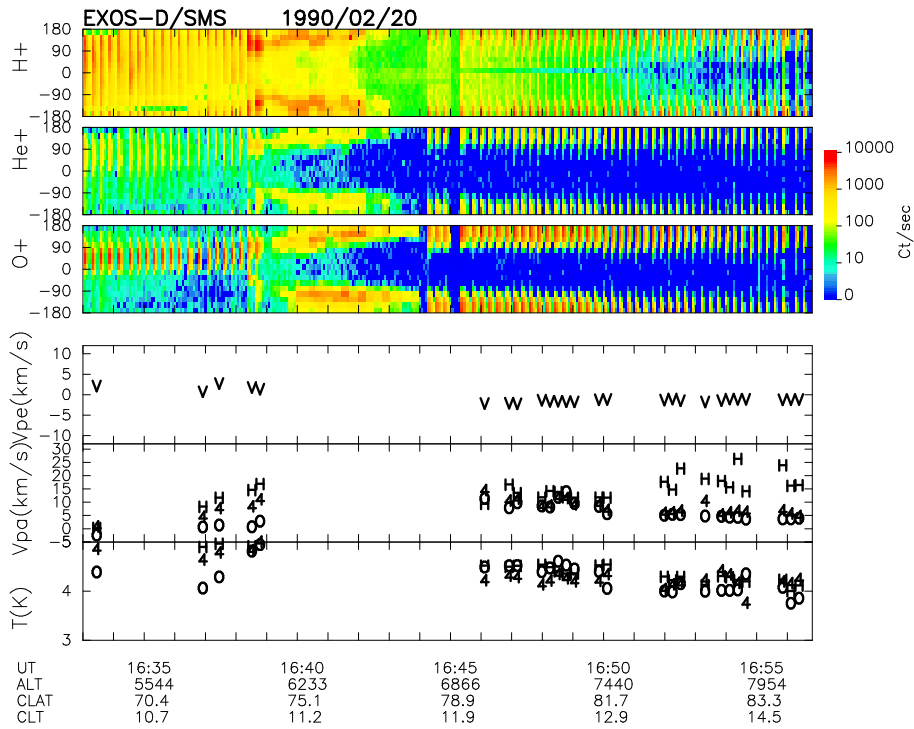


図 3:

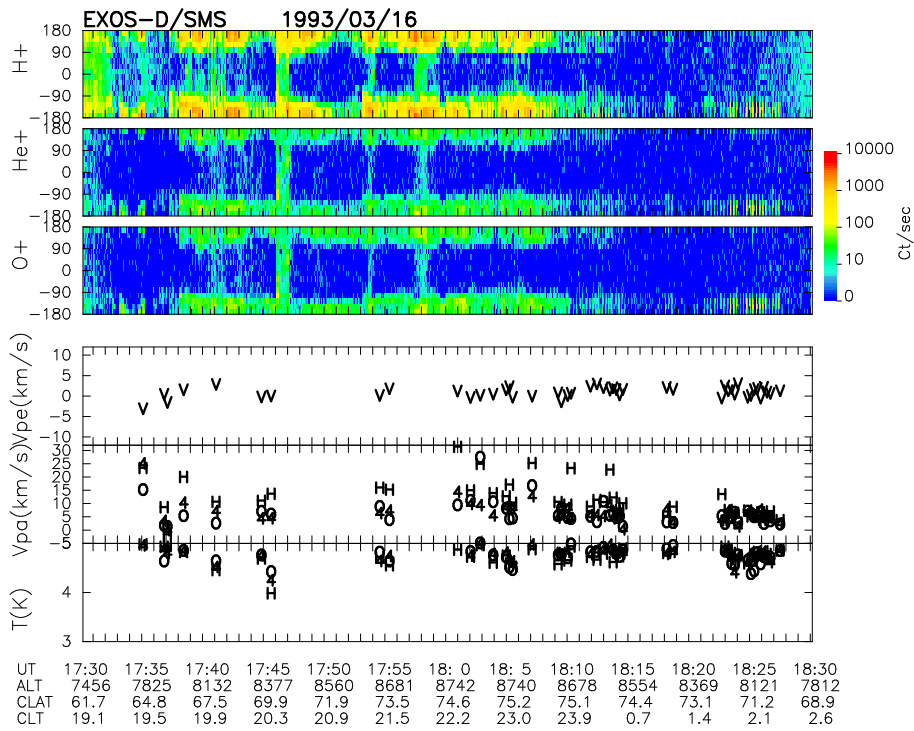
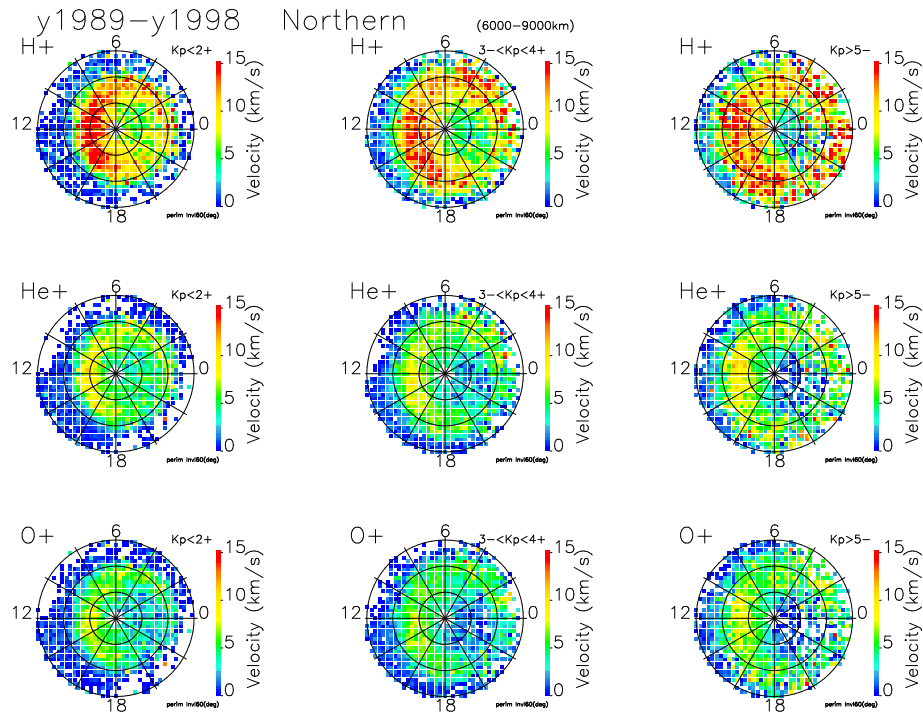


図 4:

### 3 統計解析結果

#### 3.1 Kp 依存性



#### 3.2 季節変動

イオン種	1991年		1994年	
	北(夏)半球	南(冬)半球	北(冬)半球	南(夏)半球
H <sup>+</sup>	$10^{10.72}$	$10^{10.51}$	$10^{10.41}$	$10^{10.35}$
He <sup>+</sup>	$10^{9.86}$	$10^{9.65}$	$10^{9.52}$	$10^{9.66}$
O <sup>+</sup>	$10^{10.23}$	$10^{10.19}$	$10^{10.01}$	$10^{9.99}$

表 2: 1991年5月と1994年11月のイオン上昇流フラックス量の比較. 単位は  $\text{ions} \cdot \text{m}^{-1} \text{s}^{-2}$  である. フラックス量の見積もり方は図??と同様の方法を用いた.

#### 3.3 太陽周期による変動

= $i$  相関, 磁気圏の 1-10%?



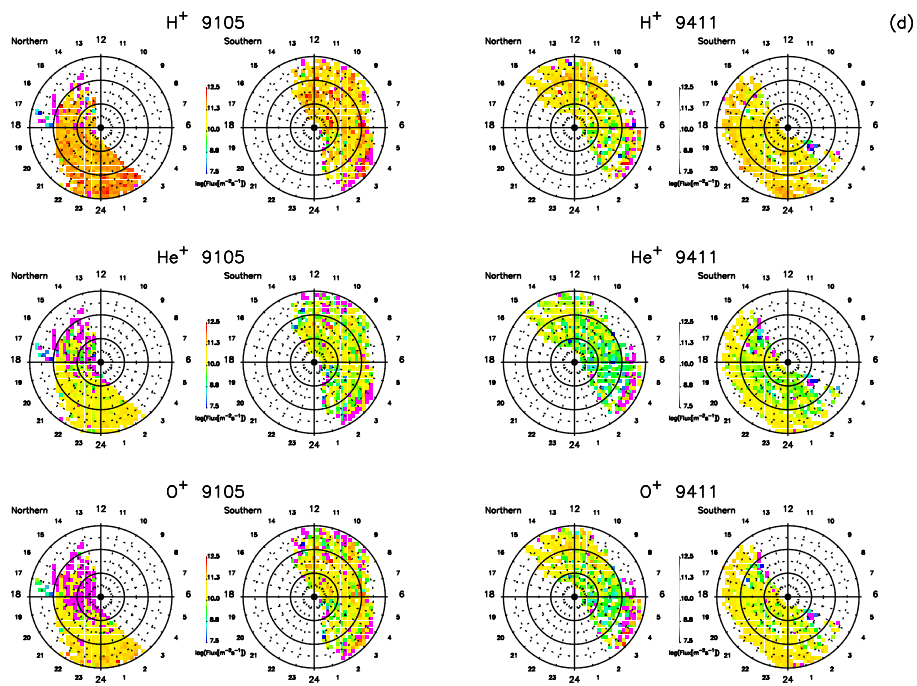
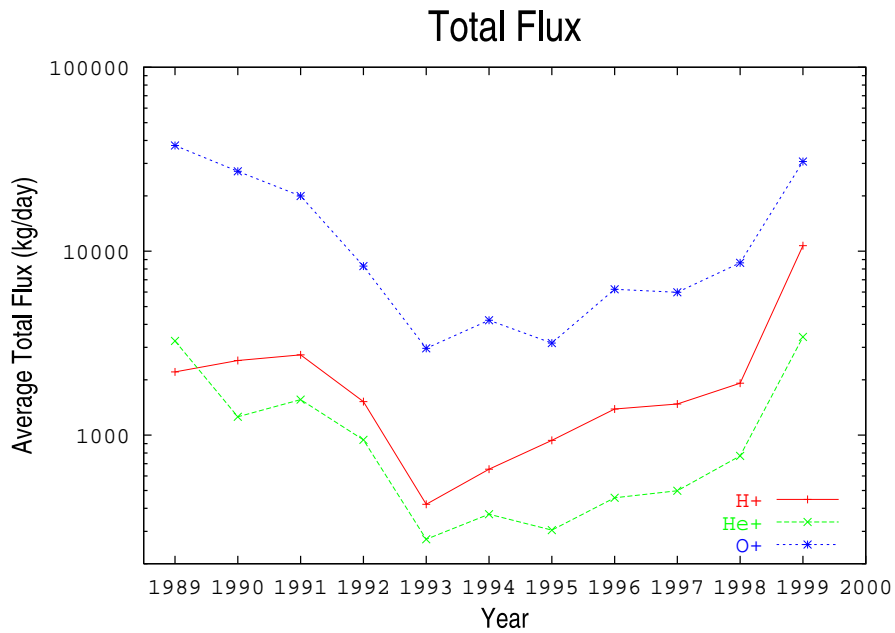


図 5: あけぼの衛星の遠地点が赤道面付近にあった 1991 年 5 月, 1994 年 11 月の観測. 1000 km 高度での値を見積もった  $H^+$ ,  $He^+$ ,  $O^+$  のフラックスの平均値を南北半球で比較した.



領域	体積 (m <sup>3</sup> )	滞在時間 (s)	SMS 観測結果	見積もり	Young et al. 1982 等 観測密度 (/m <sup>3</sup> )
			Total Flux(ions/s)	密度 (/m <sup>3</sup> )	
Tail lobe	$1.4 \times 10^{25}$	$6.5 \times 10^3$	$1.6 \times 10^{25}$	$7.4 \times 10^3$	$10^3 \sim 10^5$
Plasma sheet	$3.75 \times 10^{24}$	$1.2 \times 10^4$	$1.6 \times 10^{25}$	$5.1 \times 10^2$	$10^5 \sim 10^6$

## 4 最近注目している現象

- molecular ion upflow.

どこが供給源か?

N<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sup>+</sup> などで光学観測できないか?

N<sub>2</sub><sup>+</sup> が放射線帯に存在することもある (激しいオーロラ時?)

Non-Storm substorm と Storm time substorm でのプラズマコンポーネントの違いが指摘されている (Storm time に O<sup>+</sup> の energy density 大)[Daglis et al., 1998].

## A SMS サマリープロット図

## 参考文献

- [1] Daglis, I. A., Y. Kamide, G. Kasotakis, C. Mouikis, B. Wilken, E. T. Sarris, and R. Nakamura, Ion Composition in The Inner Magnetosphere: Its Importance and Its Potential Role as A Discriminator between Storm-time Substorms and Non-storm Substorms, *SUBSTROMS-4*, 767–772, 1998.
- [2] Watanabe, S., B. A. Whalen, and A. W. Yau, Thermal Ion Observations of Depletion and Refilling in the Plasmaspheric Trough, *J. Geophys. Res.*, **97**, 1081–1096, 1992.
- [3] Whalen, B. A., A. W. Yau, E. E. Budzinski, A. M. Pilon, I. Iwamoto, K. Marubashi, S. Watanabe, H. Mori, and E. Sagawa, The Suprathermal Ion Mass Spectrometer (SMS) onboard the Akebono (EXOS-D) Satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, **42**, 511–536, 1990.
- [4] Young, D. T., H. Balsiger, and J. Geiss, Correlation of Magnetospheric Ion Composition With Geomagnetic and Solar Activity, *J. Geophys. Res.*, **87**, 9077–9096, 1982.