火星電離圏の流速の観測 「Transteminator ion flow in the Martian ionosphere M.Franz et al., 2010の紹介」

金尾 美穂

火星・金星の夜側電離圏



・変動に富む夜側電離圏



昼側からのtransterminator flow

火星

- ORPAによる観測
 高度300kmにおいて1-2km/sの平均速度
 高度600kmにおいて4km/sec
- Venus Express

太陽天頂角とともに速度増加 Terminatorフローの散逸率では ASPERA-4の散逸率10²⁵を説明できない ※磁場圧 Phobosによる観測 TAUS(質量分析)30eVまで ASPERA

~夜向きフローによる散逸量

Mars Express MARSIS/ASPERA-3

- 太陽活動度極小期におけるイオンアウトフロー (3.3x10²⁴/s)とアウトフローの中の平均的な O₂⁺/O⁺比率(2/3)を決定(Lundin et al.,2009)
- しかしイオンの加速が電離圏の内側でおきているのか外側でできているのかはまだ示されていない。



Ion Mass Analyzer

- ・イオンの構成
 - エネルギー10eV/qから 30keV/q
 - □ 角度分布
- 低エネルギー(50eV以下)測定
 - elevationの掃引なし2D計測
 - 。時間分解能が12秒
 - ・ 視野は6° x360°
 - アジマスの角度分解は 22.5°

MARSIS(Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding)

- 100kHzから5.5MHzの160の周波 数のステップを踏む。受信機は送 信されたパルスの周波数を中心に 10.9kHz
- 電子密度→プラズマの振動 f_{pe}=(n_ee²/πm_e)^{1/2}
- 磁場強度→電子サイクロトロン波 (f_{ce}=eB/2πm_ec)

ELSのセンサーはエネルギー範囲が1eVから20keV

衛星電位

• 常にマイナスに帯電:ELS

十分に濃いプラズマ中の移動による電流>>太陽照射による光電子電流

O,O2CO2の密度が高く光電離→24eV 観測光電子のエネルギーは下がる:∠E~電子が衛星を横切っている間に 失ったエネルギー

IMAも同じ電圧に帯電していると仮定

観測ジオメトリ

- ・衛星は火星のterminator
 平面を移動
- イオンセンサーの平面が、
 この運動の方向に垂直



Fig. 1. Sketch of the observation geometry when IMA plane vector is parallel to the spacecraft ram direction in the terminator plane. The Mars Solar Orbital (MSO) coordinate frame is defined by its X-axis pointing from the center of Mars to the Sun and its Y-axis against the direction of orbital motion of Mars, the Z-axis completes the right handed system.





Fig. 2. Left: projection of the orbits (shaded) of Mars Express between 2007-10-10 and 2008-01-10 onto the MSO XZ-plane, data coverage of MARSIS density is overlayered in color. Right: projection of the orbit 5009 of Mars Express on 2007-11-26 06:00-07:00UT onto the terminator plane (MSO YZ) of Mars. Red arrows indicate the orientation of the vector which is perpendicular to the IMA anode plane (away from spacecraft). Nominal positions of photo-electron boundary (PEB, blue) and magnetic pile-up boundary (MPB, green). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

- 2007年10月10日(orbit4841)から2008年 (orbit5170)までのXZ平面に投影と MARSISの密度観測
- terminator平面に近い近い平面でMARSISの電子
 密度の観測が行なわれたのは7つの軌道である。

これらの軌道のひとつ5009 のMSO座標のYz平面への投 影である。





- 06:21と06:31の光電子のラインは12-20eVのエネルギー 範囲
 - Maxwell分布を光電子のスペクトルにフィッティング
- 明らかな光電子線が低エネルギーのイオンの中に見える
 時はいつでも、同様に低エネルギーイオン強度が強まる

06:21と06:30の間→ピークは3~10eV coldイオンの分布関数の平均エネルギーを観測

0+のイオンの分布関数

• 95%はひとつの アノード

> 熱的速度よりも 高いバルク速度 をもった冷たい 分布



Fig. 4. Phase space distribution of oxygen ions observed by the 2D plane of the IMA sensor on 2007-11-26 06:25:06–06:26:06UT. Blue curves show Maxwellian fits to the low energy part of the distribution. Temperature, density and mean energy derived from the low energy fit are shown. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

温度0.12~0.27eV Viking retarding potential analyzerの結果と一致





5±1km/sec

•IMAで観測された二次元の部分的な密度
•maxwellian fitting(シアン)
・積分カウント(緑)Franz et al.,2006
・赤線: Appendixにかいてある方法によって導出した3次元の全密度
•オフセットの角度

衛星電位が観測されている場所ではよくあっている Terminator flowが観測されている場所では夜側向きと速 度ベクトルを仮定して問題ない~10°の誤差

Terminator flowによる散逸量

• Terminatorflowは普遍的な特徴

0.9±0.3x10⁹/cm²sec 観測高度範囲は289-500km

 3.1 ± 0.5 x10²⁵/s

Table 1

Cross-terminator ion flow data for seven orbits between 2007-11-19 and 2007-12-03: Orbit number, Pericenter Time, Altitude range with flux > 3×10^8 /cm² s, total escape, mean O^*/O_2^* ratio.

Orbit	Peric, time date 2007	Altitudes (km)	Flux (10 ⁹ /cm ² s)	Escape (10 ²⁵ /s)	O^{+}/O_{2}^{+}
4985 4988 4989 5009 5010 5013 5035 Mean	11-19 12:53 11-20 09:04 11-20 15:47 11-26 06:23 11-26 13:08 11-27 09:25 12-03 07:22	290-450 290-400 290-500 290-460 290-450 290-380 290-360 290-430	$\begin{array}{c} 0.8 \pm 0.4 \\ 0.9 \pm 0.5 \\ 0.8 \pm 0.3 \\ 0.9 \pm 0.3 \\ 1.0 \pm 0.2 \\ 0.5 \pm 0.3 \\ 0.5 \pm 0.2 \\ 0.77 \pm 0.2 \end{array}$	$\begin{array}{c} 3.0 \pm 1.0 \\ 2.5 \pm 0.5 \\ 4.0 \pm 0.5 \\ 2.0 \pm 1.0 \\ 5.0 \pm 0.5 \\ 3.5 \pm 1.5 \\ 2.0 \pm 1.0 \\ 3.1 \pm 0.5 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.4 \pm 0.2 \\ 0.5 \pm 0.1 \\ 1.2 \pm 0.3 \\ 2.0 \pm 0.3 \\ 0.9 \pm 0.2 \\ 1.3 \pm 0.5 \\ 0.8 \pm 0.5 \\ 1.0 \pm 0.2 \end{array}$

Lundin et al., 2008b3.7x10²⁴/sである

プラズマ速度の見積もり

• 音速
$$G_s = \sqrt{\gamma Z k T_e/m_i}$$
 $\gamma \sim 3/2$ 断熱曲線
Z ~ 1 電荷状態
Mi ~ 16 平均的なイオン質量で
Te $\sim 0.6eV$ 平均的な電子温度

2.3km/s • アルフベン波 $v_A = B/\sqrt{4\pi n_i m_i}$, プラズマ密度 $n_i=2000/cc$ 質量16

4.8km/sec

Transterminator flowが超音速、アルフベン波を越えるかこえないかぐら いの範囲である

衛星電位による ionの方向の湾曲

- 電子スペクトル
 衛星電位
- ・イオンスペクトル
- ・導出された密度パラ メーター
- オフセット角度

MARSISによって導出され る密度よりもイオンセン サーで観測されるのがずっ と小さい





Hg. 7. Left: projection of the orbit 4985 (2007-11-19 12:30- E:10UT) of Mars Express onto the terminator plane (MSO VZ) of Mars Red arrows indicate the orientation of the MEX spacetait relevance V-sector which is perpendicular to the IMA anode plane. Nominal positions of photo-electron boundary (PER, blue) and magnitic pile-up boundary (MPR, green). Right: Location of the IMA ion sensor on the Mars Repress spacetaft and observed ion inflow direction on 2007-11-25 (green arrow) and 2007-11-19 (red arrow). (For interpretation of the references to color in this figure legend; the mader is referred to the web vention of this article.)



衛星帯電がイオン分 析器に与える影響 ・上より下のほうが大きな 角度で湾曲

 イオンの速度方向とIMAの 視野中心の角度で定義



Fig. 8. Sketch of the effect of a negative spacecraft potential on positive ions entering the IMA sensor when inflow is across edge of spacecraft. Red lines indicate ion paths, black lines ion flow direction at infinity, blue lines the nominal field of view of the IMA sensor, θ_1 and θ_2 respective deflection angles. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

衛星を一点の電荷としてみれば、球の電位における湾 曲のラザフォルドの式を適用することができて、

 $\cot\theta/2=2bE_{inf}/q_1q_2=2E_{inf}/E_{pot}$

•b~漸近線と湾曲の中心の間の垂直距離 • E_{inf} ~無限大におけるイオンのエネルギー • q_1q_2 はイオンとdeflectorにおける電荷 • b/q_2 はセンサに入ってくるときのイオンのポテンシャルエネ ルギーで、衛星電位は $E_{pot}=b/q_2$

- 解決
 - ・熱的イオンのセンサーが火星電離圏の冷たいイオンの成分を 観測
 - ・反太陽方向の速度をもつマックスウェリアンを仮定するとイ オンの密度を決定できて、MARSISによって観測された電子密 度と一致。フローベクトルを計算できる。
 - ・火星の上層電離圏のtransteminator流は超音速で、惑星の下流 で観測された太陽活動度極小期における散逸率を説明できる (Lundin et al., 2008)
 - ・transterminator流は下流で観測されたフラックスよりも一桁多い。
 - ・火星の脱出速度に匹敵する速度をもっていても磁力線にそって運動し、必ずしも散逸しない。テイルにいけば散逸。
- 未解決
 - ・フローの高度依存性
 - ・磁場との関連
 - ・昼間側

アルフベン速度までの加速

- 昼側と夜側の圧力勾配
- •太陽風運動量の上層電離圏への輸送
- 電離圏のカレント
- ・磁場圧の勾配

※カレントシート、地殻起源磁場

Appendix

- Tail方向と仮定した速度がIMAの観測平面に含まれていれば、温度は二次元と3次元で一緒
- IMAの平面とaberratedなバルクのフローベクトルの 間の角度オフセット→全密度と速度