第29回 火星勉強会 (2012/11/20) Nightside ionosphere of Mars studied with local electron densities: A general overview and electron density depressions *Duru et al.*, [2011, JGR]

名古屋大学太陽地球環境研究所 (STEL) 原 拓也 (Takuya Hara)

要旨

- ESAが打ち上げたMars Express(MEX)衛星に搭載された MARSIS(Mars Advanced Radar for Subsurface and Lonospheric Sounding)というサウンダーから得られた電子密度 のデータをもとに、特に夜側の火星電離圏の特徴を調べた。
- MARSISの観測結果によると、以下に挙げる特徴を見出すことができた.
 - 変動に富む.
 - 金星で観測された電離圏界面を示唆するような電子密度の急峻 な変化が観測されたが、観測頻度は稀である。
 - 電子密度の一時的な(数分--10分程度のスケール)減少が見られる.
 - ASPERA-3というプラズマ観測器群に搭載されたイオン・電子観測器から得られた結果もあわせて調べることで,この電子密度が一時的に減少する物理機構の解明を目指す.

1. Introduction :

- これまでの火星電離圏の研究はMars 4 & 5, Viking 1 & 2の電波掩蔽
 法を用いた観測や数値実験によるものが主流であった.
- 近年, Mars Express (MEX)衛星に搭載されたMARSISというサウン ダーを使ったその場・リモートセンシング観測によって、火星(上部) 電離圏の特徴が徐々に明らかになってきた。
- MARSISによって明らかになった火星の昼側電離圏の特徴:



2. Instrumentation: MARSISについて

- 電磁場パルスを照射することで、
 周波数・エコーが返ってくるまでの時間を観測し、電子プラズマ振動数から、その場の電子密度と高度プロファイルを、サイクロトロン振動数から、その場の磁場強度を推定することができる.
- 観測期間は衛星が近火点を通過する20分前後で、高度としては近火点の275km--1,300kmの範囲に対応する.



- 以下の場合, MARSISで電子プラズマ振動を観測することができない.
 - 1. 電子密度が10cm⁻³より小さい.
 - 2. 観測している場所の温度が8.5ne Kより大きい.

(neは電子密度)

- 3. その場のプラズマの運動速度が160km/sを超えている.
- → 太陽風領域では観測することができない [Duru et al., 2008].

- General Overview
 J. Data coverage
- 本論文での解析期間は、2010年 2月16日--4月19日の2ヶ月あま りの66 orbits.
- MEX衛星の軌道の関係で,観測 できた領域は等方的でない.夜側 では,太陽天頂角 (<u>S</u>olar <u>Z</u>enith <u>A</u>ngle: SZA)の大きな領域は, 350 km以上の高度でしか MARSISは観測していない.

Figure 1. 1500 (Altitude) [km] 0 100 50 150 \cap SZA (Solar Zenith Angle) [deg] 2010/04/19





3. General Overview 3.2. Electron Density Profiles: MARSISの観測例

- 衛星高度が低くなるにつれて, MARSISが観測した電子プラズマ 振動数から求めた電子密度は増加 する.
- MARSISが観測した電子密度の特 徴は衛星の1軌道ごとに大きく異 なる.
- 頻繁に観測されるのは、右図(b)
 のような電子密度の変動が大きな
 ケースである.
- このような特徴は,昼側電離圏に おいてもMARSISによって観測さ れている[Duru et al., 2008].



Figure 2.



3. General Overview 3.2. Electron Density Profiles: 電子密度のSZA依存性

- 各高度範囲ごとの電子密度のSZA依存性を 示す. 観測高度のcoverageが一様ではな いため, MARSISの観測が実現したSZAの 範囲が高度によって異なる.
- 200-400km高度では、SZAが大きくなる につれて(110°まで)、電子密度は徐々に 減少する.この特徴は、プラズマの昼側か らの輸送によって説明することができる.
- この特徴は, MARSISのリモートセンジン グによる電子密度観測の結果と一致してい る[Němec et al., 2010].
- 600kmより高くなると、電子密度は 100cm⁻³より小さくなり、誤差幅が大き な値を示す、120°--160°の夜側電離圏の 電子密度はSZAの変化にほとんど依存せず、 一定の値を示す。



4. Nightside Steep Density Gradients: 夜側での電離圏界面観測の例

- 衛星は南半球の夜側を通り、北半球の 昼側に向かうような軌道をとる。
- MARSISによって電子密度の一時的な 減少が2回観測される.
- 2回目の電子密度の一時的な減少の後, 09:12UT頃に衛星が日陰境界を通過 したときに, MARSISが観測した電子 密度に急峻な増大が観測される.

→ 電離圏界面を観測する.

- 2回目の電子密度の一時的な減少時, ASPERA-3が観測したイオン・電子は, どちらも観測されていない(観測限界 以下になっている).
- 衛星が昼側に出れば,20eV前後のエ ネルギー帯に電離圏起源の光電子が ELSによって観測される.



Figure 6.

4. Nightside Steep Density Gradients: 夜側での電離圏界面観測の頻度

- 本研究の結果としては、
 MARSISが電離圏界面を観測 するのは、夜側でおよそ15% である.昼側での観測頻度がお よそ18%であった[Duru et al., 2009]ので、昼夜にかかわらず、
 火星での電離圏界面の観測は 過渡的な現象である.
- これは電離圏界面が恒常的に 存在するとされる金星の特徴 とは異なる.



- 電離圏界面が観測される高度は、SZAが大きくなるにつれて高くなる.
- これは光電子が支配的になる高度がSZAが大きくなるにつれて高くなる 特徴と一致するが、data coverageによる影響かもしれない。

5. Nightside Ionospheric Density Depressions5.1. Observations :

- 12:54--13:06UTの間, MARSIS が観測した電子密度が一時的に減 少している. これは当該期間中の 電子密度がMARSISが観測できる 10 cm⁻³未満になっていることを 意味する.
- MARSISによって電子密度の減少 が観測されている期間, ASPERA-3による電子観測では, 電子フラックスがいくぶん減少し た一方で,イオンでは100eVに達 するアーチ型をしたsignatureを 検出した.
- 電子密度が減少が約12分間継続したため、ASPERA-3のイオン観測結果は、電離圏起源イオンが流出しているものと考えられる.



Figure 8.

5. Nightside Ionospheric Density Depressions5.1. Observations :

- 20:58--20:59UTの間, MARSIS が電子密度の一時的な減少を観測 した.
- 前イベントと同様にASPERA-3の イオンからはアーチ型をした signatureが観測されたが、継続 時間が短いので、衛星電位の変化 が原因であると予想される.
- 電子密度が減少中にcoldな電離圏 イオンフラックスの増加が見られ る確率が10/23である.
- 電子密度が減少の後, ASPERA-3 の電子観測では, 一部のsectorだ けに光電子が受かった. ローカル の磁場配位を反映した分布を示し た可能性がある.



Figure 9.

5. Nightside Ionospheric Density Depressions5.1. Observations :

- 15:46--15:49UTの間, MARSIS が電子密度の一時的な減少を観測 した.
- 電子密度が一時的に減少している 期間において、ASPERA-3のイオ ン・電子観測両方で有意なカウン トが観測されなかった。

(Figure 11.も似た特徴をもつ)

- 電子密度の一時的な減少が終了した
 た直後に, ASPERA-3の電子に光電子が観測されるようになる.
- そのような特徴が全体の半分程度 で見られる.



5. Nightside Ionospheric Density Depressions5.2. Size and Location :

- 金星においても電子密度ホールと呼ばれる, MARSISで観測されたような電子密度の一時的 な減少がPVOによって観測されている [Brace et al., 1983].
- MARSISが観測した電子密度が一時的に減少の 典型的な空間スケールは340--3,280km (平均 950km).
- 金星では東西方向のスケールが約1,800kmで あったので,火星の方が小さい.
- 火星の電離圏の電子密度の分布が、金 星よりも変動に富むため、このような 電子密度の疎密構造はより複雑な形状 をしているかもしれない。
- Data coverageの影響で,観測位置の 分布の依存性を議論することは困難で ある.

Figure 12.







5. Nightside Ionospheric Density Depressions 5.3. Discussion on Nightside Electron Density Depressions: MEX衛星観測のまとめ

○ 解析期間 2010年02月16日--04月19日 全66パスのうち:

- MARSISによって電子密度の減少が認められたのが、 21パス(32%) 27イベント.
- そのうち19パスでASPERA-3との同時観測が実現した.
 イオン:

◦ Coldな電離圏起源イオンの増加が観測されたのが12イベント.

○イオンフラックスの減少 or 消失したのが9イベント.

- 電子:

∘電子フラックスの減少が観測されたのが19イベント.

- ◎ 電子フラックスが変わらなかったのが4イベント.
- ●半分以上の割合で、20eV前後のエネルギー帯に見られる 光電子が支配的になる領域と一致する.
- このようなMARSISの電子密度の一時的な減少は,昼側よりも夜側で頻繁 に観測されている.

5. Nightside Ionospheric Density Depressions 5.3. Discussion on Nightside Electron Density Depressions: 電子密度の減少を引き起こす要因の候補

- 強いradial方向の磁力線が原因で、周りのイオンや電子が侵入することができない(金星の電子密度ホールを説明するために提案されたシナリオである).
- 太陽風磁場とドレープ磁場(+残留磁場)とが相互作用した結果,閉じた磁力線を形成する.
- 電磁気的なプラズマ波動・不安定性を介して、電離圏のプラズマを流 出させる。
- 解離再結合反応を通して,電離圏プラズマを中性化させる.
- o Terminator or Penumbraでの太陽放射・EUVの寄与.
- 残留磁場によるミニ磁気圏の寄与.

• • •

◦ 上述のような物理機構が、MARSISが観測した電子密度の減少時に観測されたASPERA-3のイオン・電子観測の特徴を反映しているだろう。

6. Summary: 本論文のまとめ

- MEX衛星に搭載されたMARSISが観測した電子プラズマ周波数から求めた電子密度から、火星夜側電離圏の特徴を調べた。
- 明らかになった特徴:
 - 電子密度の大きさは昼側に比べた低い.
 (400 kmで300 cm⁻³, 1200 kmで20 cm⁻³).
 - 昼側電離圏と同様に変動に富み, SZA依存性は小さい.
 - 電離圏界面の観測確率は15%程度である.
 - 電子密度の数分--10分スケールの減少が発生する.
 - 空間スケールは340km--3,280km程度.
 - このような電子密度の一時的な減少を説明する物理機構は色々考えられるが、決定的な結論を出すことは現状では困難である。





End

