

Dual-spacecraft observation of large-scale magnetic flux ropes in the Martian ionosphere

Morgan et al., [2011, JGR]

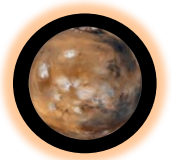


名古屋大学 太陽地球環境研究所 (STEL)

D1 原 拓也 (Takuya Hara)

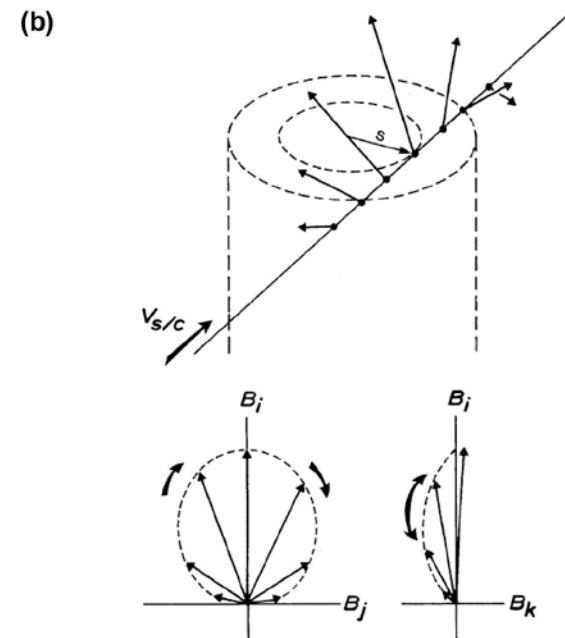
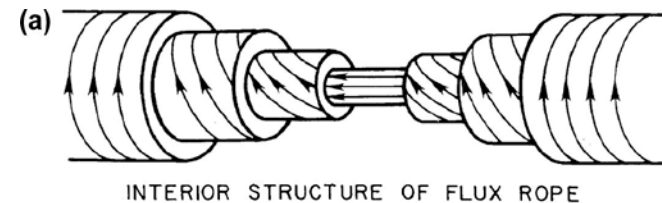
要旨

- Mars Global Surveyor (MGS)衛星とMars Express (MEX)衛星に搭載された複数のプラズマ観測器を総合的に用いることで、火星電離圏で観測されたflux ropeの特徴を調べた.
- その結果、先行研究ではほとんど観測されなかった火星磁気異常帯の近傍でlarge scaleのflux ropeを発見した.
- このlarge scaleのflux rope中に火星電離圏プラズマが存在し、宇宙空間に流出していれば、重要な大気流出機構の1つになるかもしれない.

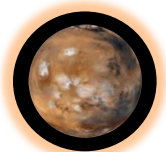


Introduction: flux rope

- flux ropeとはsolar systemの中で普遍的に見られるらせん状をした特徴的な磁場構造である.
- 非磁化惑星では, 境界層において誘導磁気圏側のプラズマと電離圏プラズマとがflux ropeを介して混合する.
- 惑星からdetachしたflux rope (いわゆるcloud)は, coldな電離圏イオンを流出させられる候補の1つであるが, その大気流出機構の実態はよくわかっていない.
- 地球以外の惑星では, PVO観測によって金星で観測されたのが初めてである[Russell and Elphic, 1979].



Russell and Elphic [1979]
Wei et al., [2010]



Introduction:

これまで火星で観測されたflux rope

- MGS衛星観測によって、火星でもflux ropeが発見された。
[Cloutier et al., 1999]
- 火星で発見されたflux ropeの特徴は、従来金星で観測されたものとはほとんど変わらなかった [Vignes et al., 2004].
 - 大きさ: 数10 km.
 - 最大磁場強度: 数10 nT (金星: 60 nT/火星: 20 nT).
- ただし、観測頻度は金星の方が多い(PVO観測の全パスに対して70%に対して、Pre-mapping orbitのMGS観測の全パスに対して5%).
[Elphic and Russell, 1983; Vignes et al., 2004].
- 火星で発見されたflux ropeのほとんどが北半球に分布しており、磁気異常帯のある南半球では、ほとんど観測されなかった。
→ 磁気異常帯がflux rope形成を妨げている?
 - × Pre-mapping orbitの期間中、MGS衛星が低高度を通過していた場所は主に北半球である.

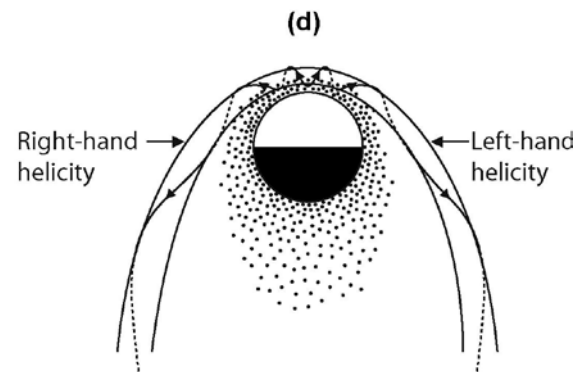
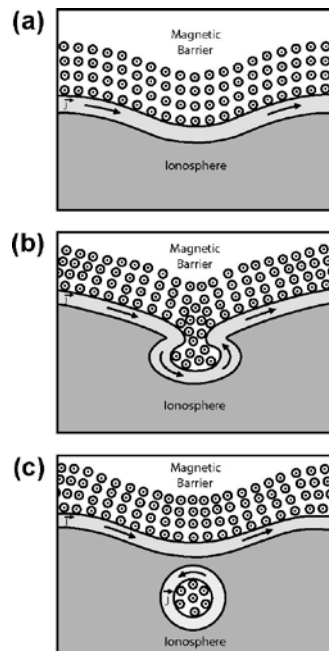
Introduction:

非磁化惑星におけるflux ropeの形成メカニズム

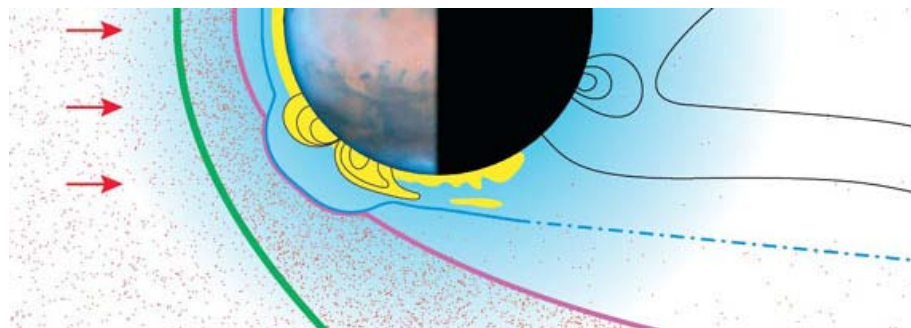
- 太陽風プラズマと電離圏イオンとの間に生じる速度シア, シア磁場に伴う不安定性によって誘起される.
- 火星・金星に共通した形成メカニズムである.
- *Vignes et al.*, [2004]が発見したflux ropeはこのタイプ.



- 火星の残留磁荷が太陽風によって引き延ばされて形成する(下図). いわゆる地球のtail側で観測されるようなタイプ.
- 火星特有の形成メカニズムである.

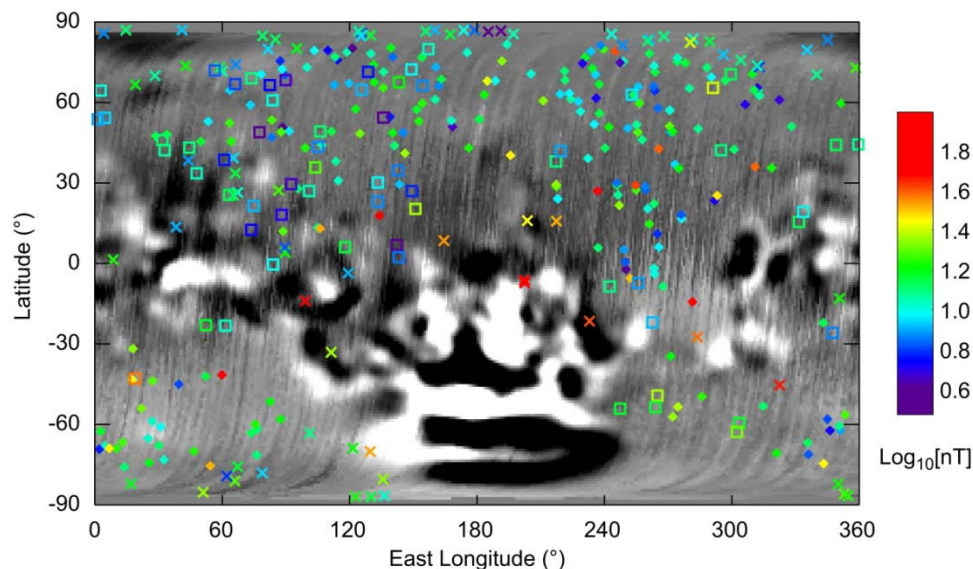


Russell [1990]
Wei et al., [2010]



先行研究(1)

Mapping orbitのMGS衛星が観測したflux rope *Briggs et al.*, [2011, PSS]



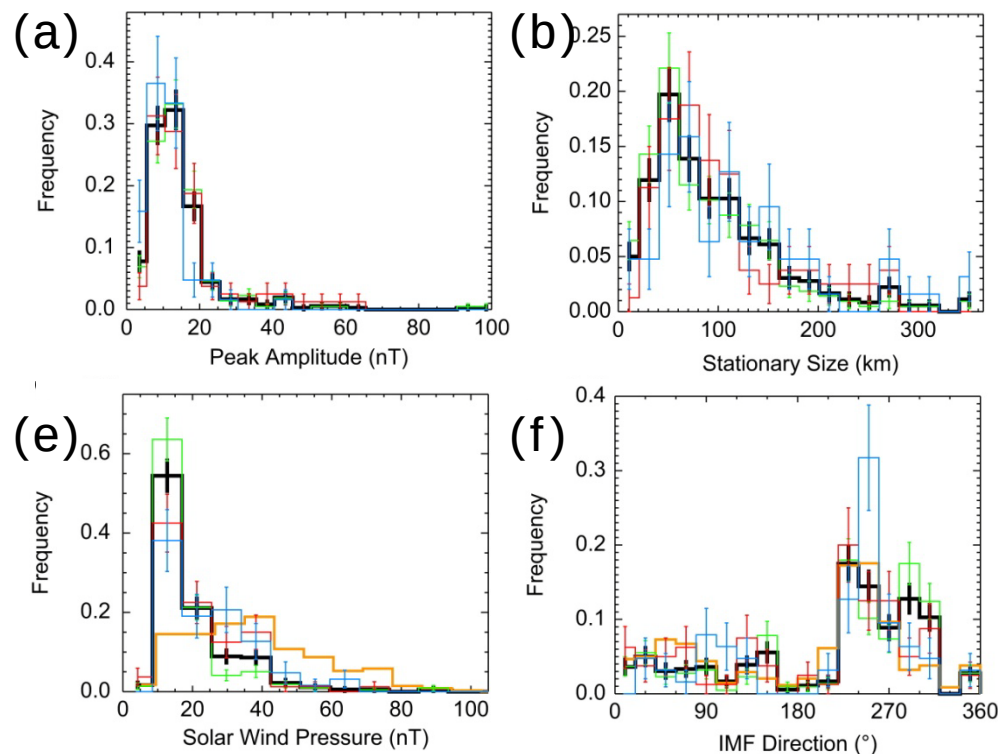
◆: 磁気異常帯から離れた昼側
×: 磁気異常帯近傍の昼側
□: 夜側

で観測されたflux ropeの空間分布.

- MGS衛星がMapping orbit期間中のうち、ある独立した4週間のデータを用いたflux ropeの準統計解析結果.
- *Vignes et al.*, [2004]では観測例がほとんどなかった南半球でも、flux ropeが観測されている.
- 磁気異常帯近傍でもflux ropeは観測されるが、磁気異常帯上空(MGSの飛行高度~400km)では、flux ropeは観測されていない.

先行研究(1)

Mapping orbitのMGS衛星が観測したflux rope *Briggs et al.*, [2011, PSS]



緑: 磁気異常帯から離れた昼側
赤: 磁気異常帯近傍の昼側
青: 夜側
黒: 解析期間全体
オレンジ: MGS全期間(e.f)

(a,b) flux ropeの特徴:

- どの領域で観測されたflux ropeも典型的な物理パラメータは従来の特徴と同じ.

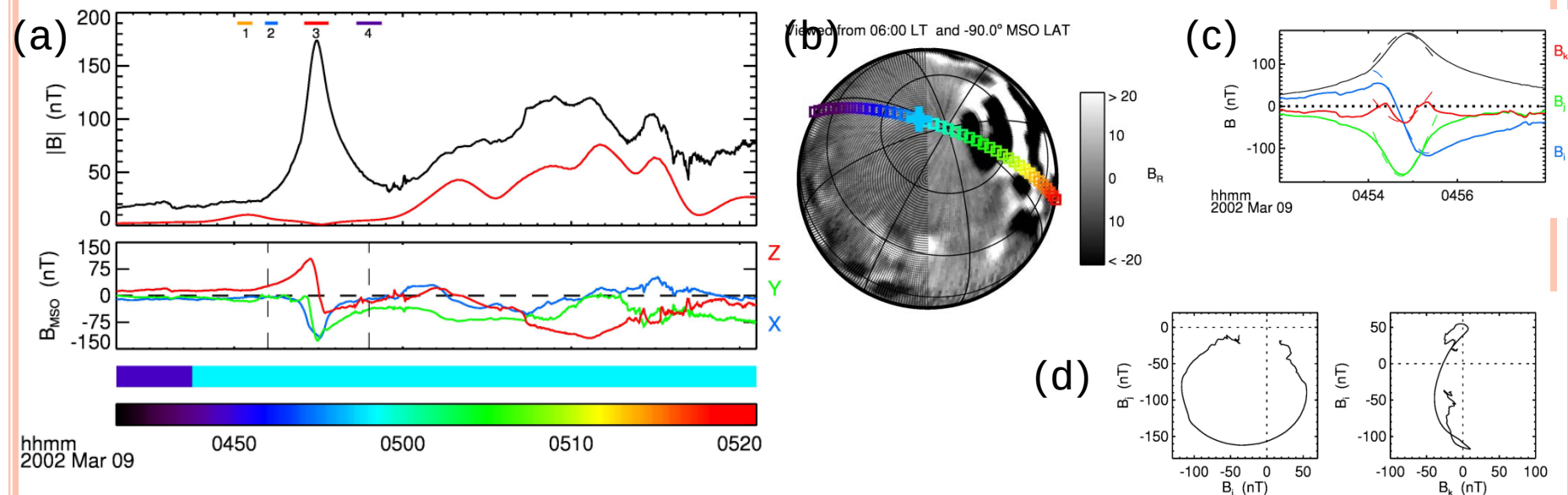
(e,f) 太陽風依存性:

- 低動圧のときほどflux ropeは観測されやすい(e).
- IMF clock angleとの依存性はほとんどない(f).
- ※ solar wind proxyはMGS衛星データから推定している.

動圧はCrider et al., [2003],
IMF clock angleはBrain et al., [2005]を参照の事.

先行研究(2)

MGS衛星が観測したlarge scale flux rope *Brain et al.*, [2010, GRL]

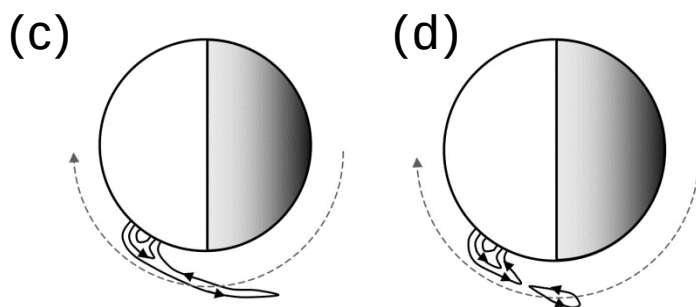
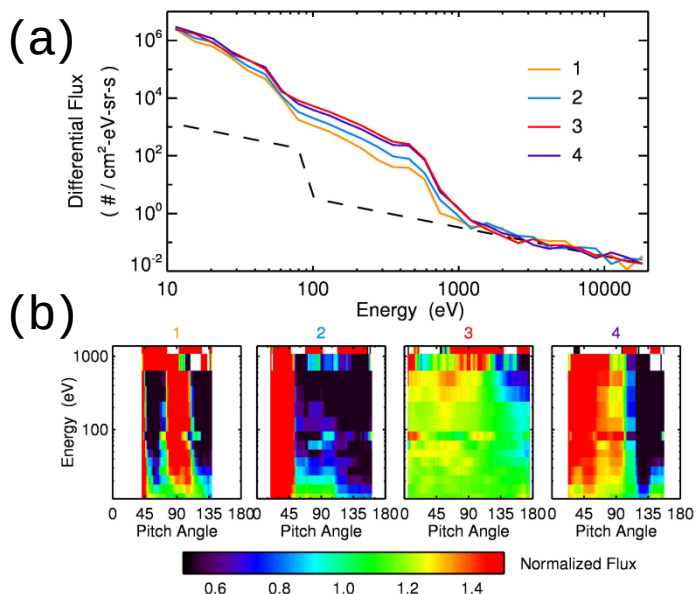


- 磁気異常帯下流でCain et al., [2003]に基づく火星磁場モデル(以下, Cainモデル)では磁場強度の小さな領域で, 200nT近くに達するような磁場強度の増大を観測した(a).
- Minimum Variance Analysis(MVA)法を磁場強度が増大した時の磁場ベクトルデータに適用したところ, Hodogram(d)の特徴から, この磁場強度の増大はflux ropeである.

先行研究(2)

MGS衛星が観測したlarge scale flux rope *Brain et al.*, [2010, GRL]

※ 3.がflux ropeの中.



- 前スライドのflux rope通過前後の電子のエネルギー分布(a)とピッチ角分布(b).
- エネルギー分布(a)では, 20--60eV帯にCO₂のphotoelectron peakがあるので, 電離圏プラズマがflux rope中に存在.
- ピッチ角分布(b)では, flux rope通過前後(3以外)は, 非対称な分布だが, flux rope中(3)では等方的な分布になっている.
- ピッチ角分布の変化から, このflux ropeは太陽風によって引き延ばされ, detachしたflux ropeであることが予想される(c,d).
- MVA法から予想されるflux ropeの軸の向きと衛星の進む方向とを考慮すると, flux ropeの大きさは,
~140 km(静止),
350--1300 km (5--15 km/sで運動).

先行研究(2)

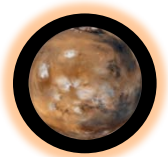
MGS衛星が観測したlarge scale flux rope *Brain et al.*, [2010, GRL]

- 本研究によって見出されたflux ropeが観測されたときの太陽風条件は、**動圧が通常よりも4倍高く、IMFが180 deg回転**していた。*Briggs et al.*, [2011]による統計解析結果とは相反する結果である。
- 前スライド(c,d)にあるような磁気リコネクションを伴うflux ropeを形成しやすい環境が整っていたかもしれない。
- flux rope中で観測された電子密度、衛星がflux ropeを通過した時間、衛星速度、flux ropeの軸の向き等を考慮して、flux rope中に含まれる電離圏イオンの流出量を大雑把に見積もると，
$$\sim 7.9 \cdot 10^{22} \text{ -- } 1.6 \cdot 10^{24} \text{ ions/s}$$
- 太陽活動極小期にMEX衛星が観測された大気流出量と同程度にまで達する[*Barabash et al.*, 2007; *Lundin et al.*, 2008].
- 推定された流出量は、求めるための仮定が多すぎるので、どこまで妥当性のある値なのかは不明である。

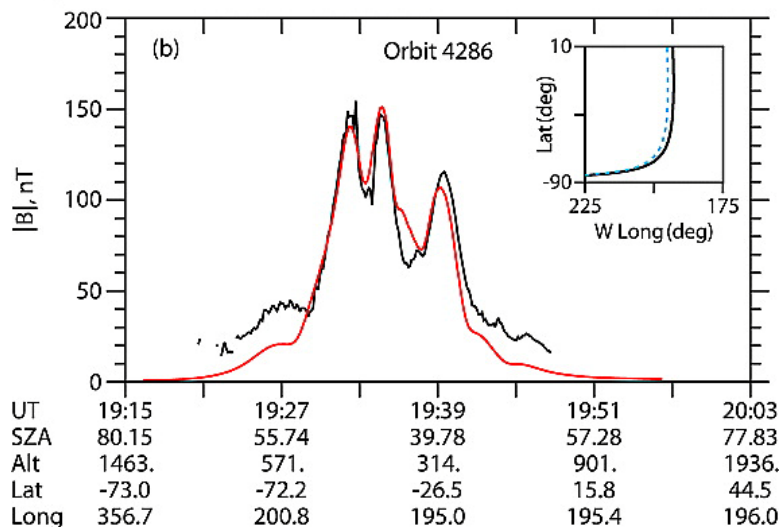
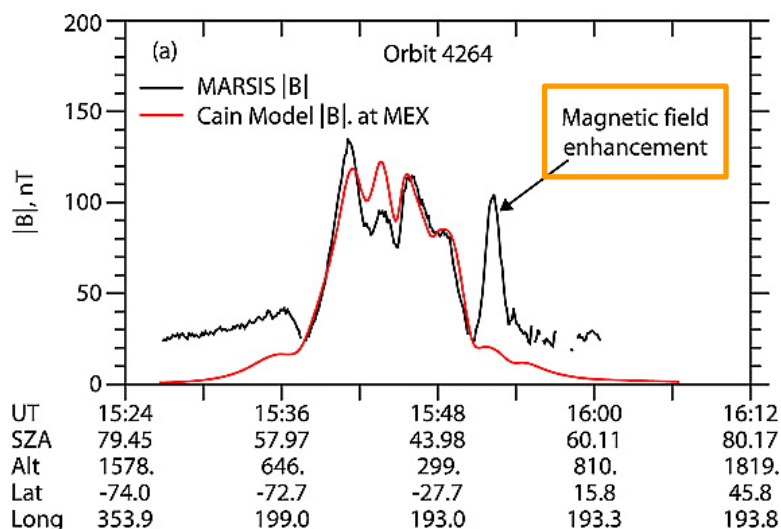
Morgan et al., [2011]

使用したデータセット

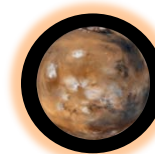
- Mars Global Surveyor (MGS) 衛星:
 - 磁力計(MAG)
 - 電子観測器(ER): 2次元 } 電子のピッチ角分布を求めることができる.
 - Mars Express (MEX) 衛星:
 - ASPERA-3 (プラズマ観測器)
 - イオン質量分析器 (IMA): 3次元 ← 本研究では使用しない.
 - 電子観測器 (ELS): 2次元
 - MARSIS (サウンダー)
 - 電子プラズマ周波数から, localな電子密度 [e.g., Duru et al., 2008]
 - サイクロトロン周波数から, localな磁場強度
が推定可能である. [e.g., Gurnett et al., 2005]
 - 火星磁場モデル (Cainモデル)
 - MGS観測データに基づく[Cain et al., 2003].
- ※ 観測器の詳細は, 過去の勉強会資料を参照のこと.



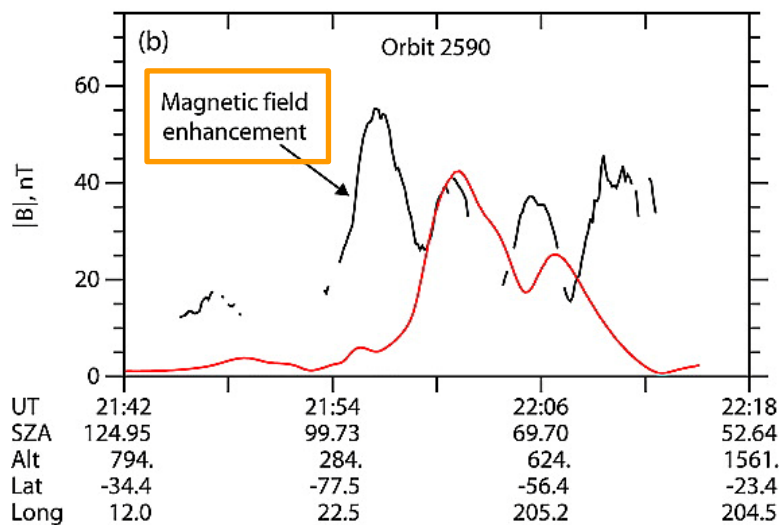
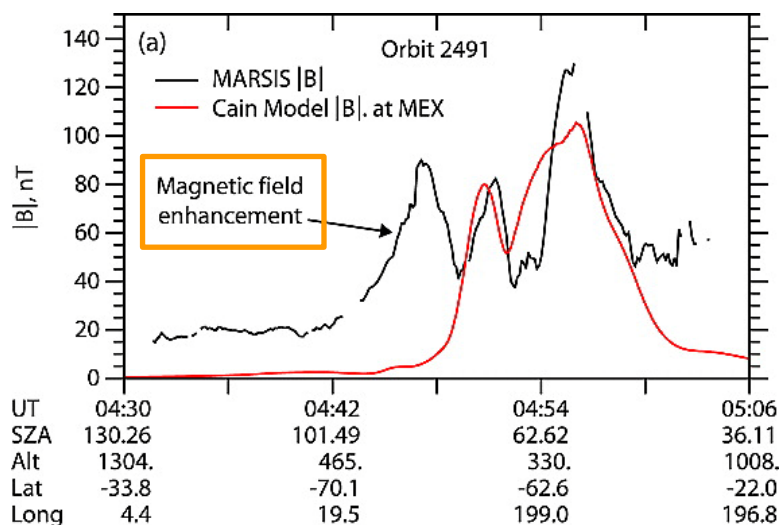
磁場観測データ 1.



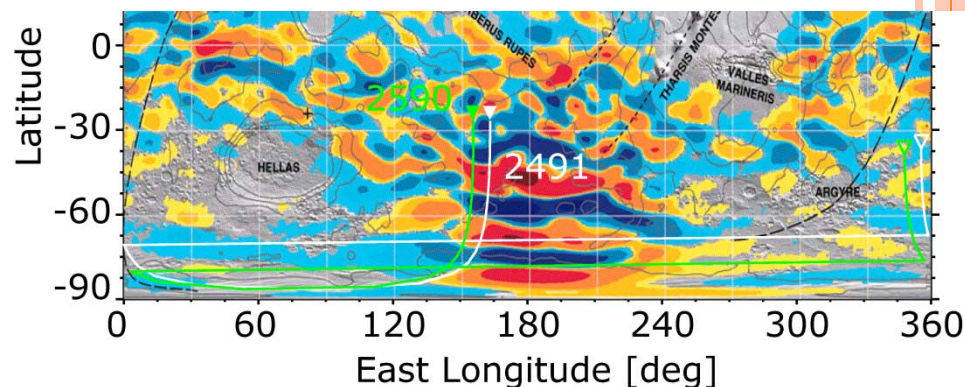
- Cainモデルでは、火星残留磁荷の寄与が小さい領域で磁場強度の増強がMEX/MARSISによって観測された(a).
- 衛星がおよそ6日後にほぼ同じ場所を通過したときには、そのような磁場強度の増強は観測されなかった(b).
- 観測された2007年5月には、MGS衛星の運用は既に終了していたため、これ以上の解析は出来なかった.



磁場観測データ 2.1.



- Cainモデルで磁場強度が小さな領域において、異なる期間に磁場強度の増強がMEX/MARSISによって観測された.
- (a, b)はどちらも似た衛星軌道をとっている(下図参照).
- 2005年12月--2006年1月のイベントであるため, MGS衛星との同時観測が実現し, なおかつMEX衛星と近い所を通過していた(次スライド).

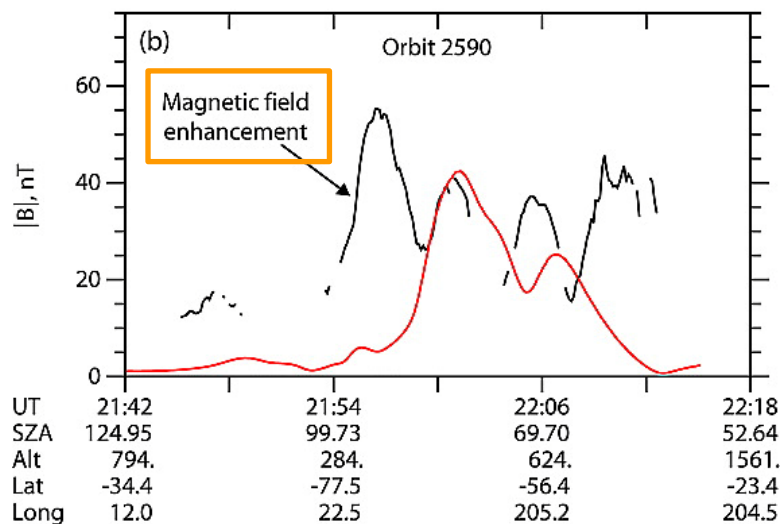
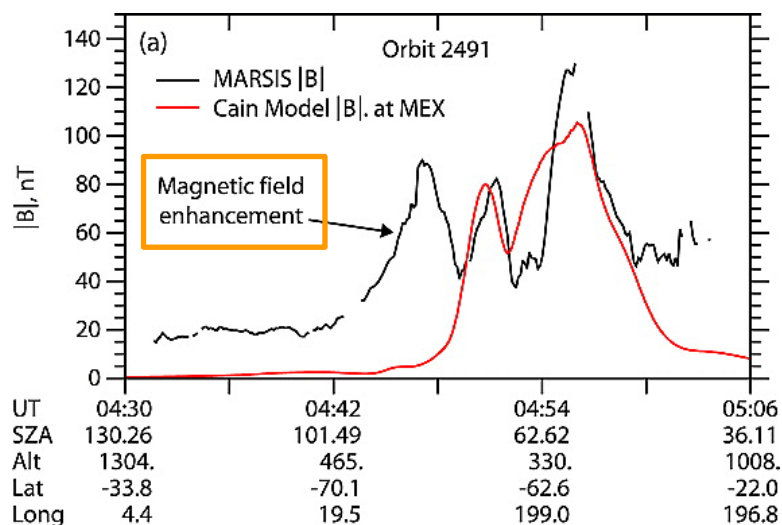


磁気異常MapはConnerney et al., [2005]に基づく.

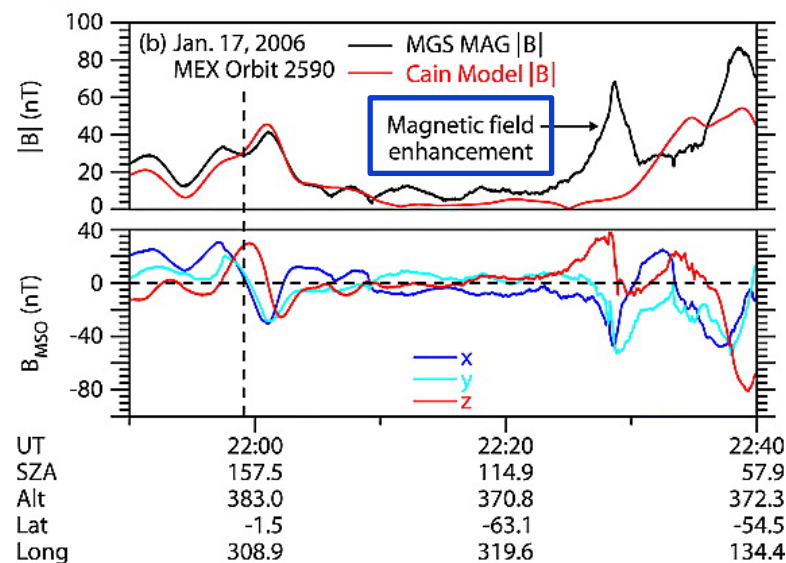
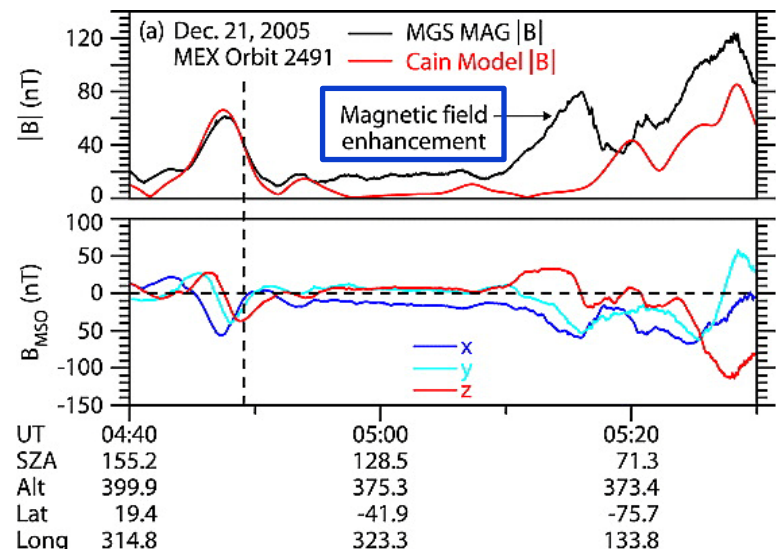
磁場観測データ 2.2.

MGS衛星も同じ場所で磁場強度の増強を観測した(論文fig4). **少なくとも30分**はこの磁場強度の増強は同じ場所に存在していた.

MEX

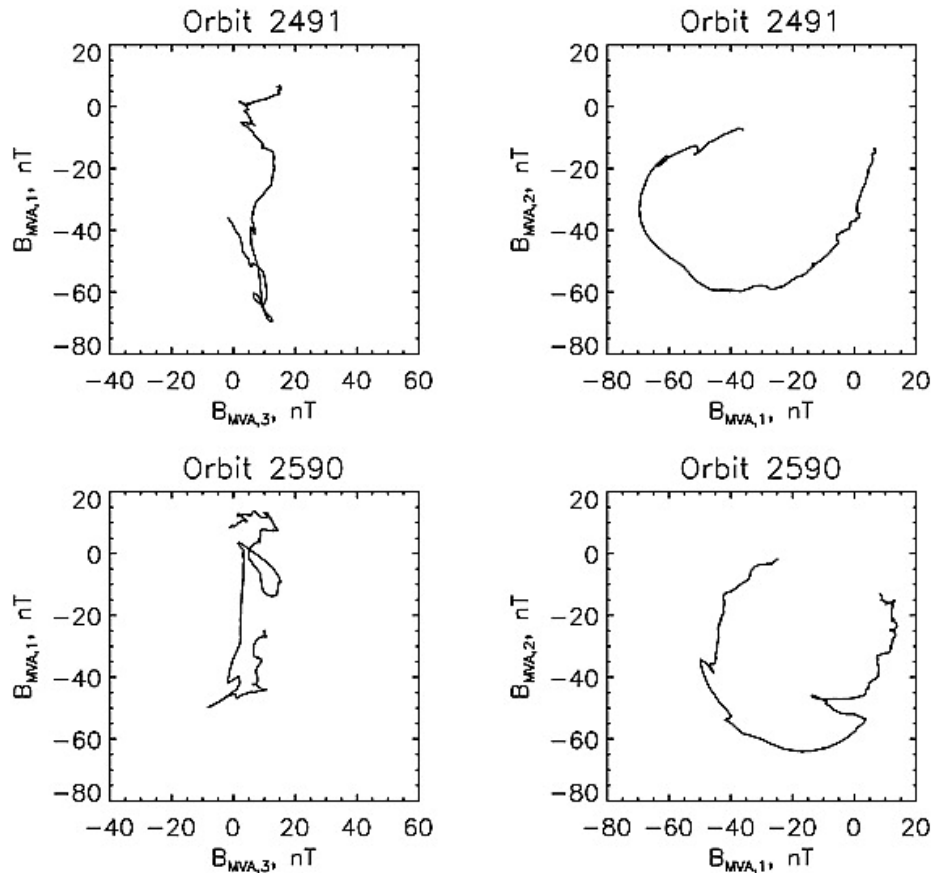


MGS



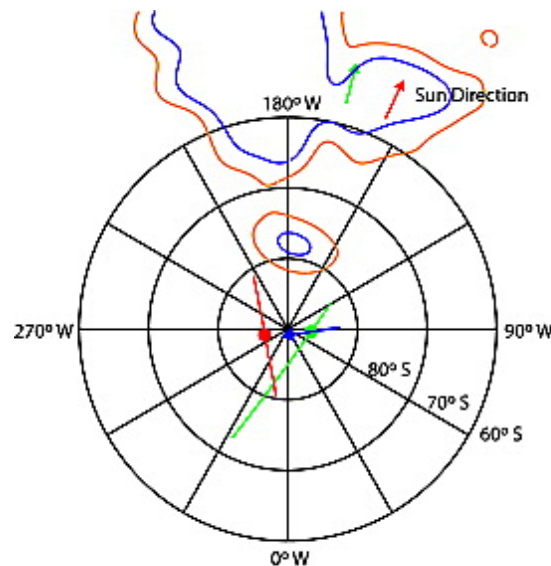
磁場観測データ 2.3.

MGs衛星が観測した
磁場ベクトルのHodogram

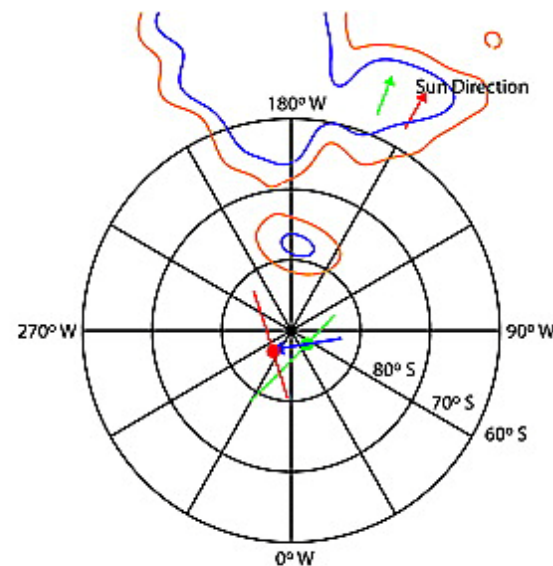


- MVA法をイベント時のMGs衛星が観測した磁場ベクトルデータに適用した.
- flux rope中を衛星が通過したときにおける磁場ベクトルの変化の特徴に一致している.
- この磁場強度の増強の正体は, flux ropeである.
- flux ropeの軸の向きは, intermediate variance vectorを採用する.
[Lepping et al., 1990]

磁場観測データ 2.4.



(a) Orbit 2491

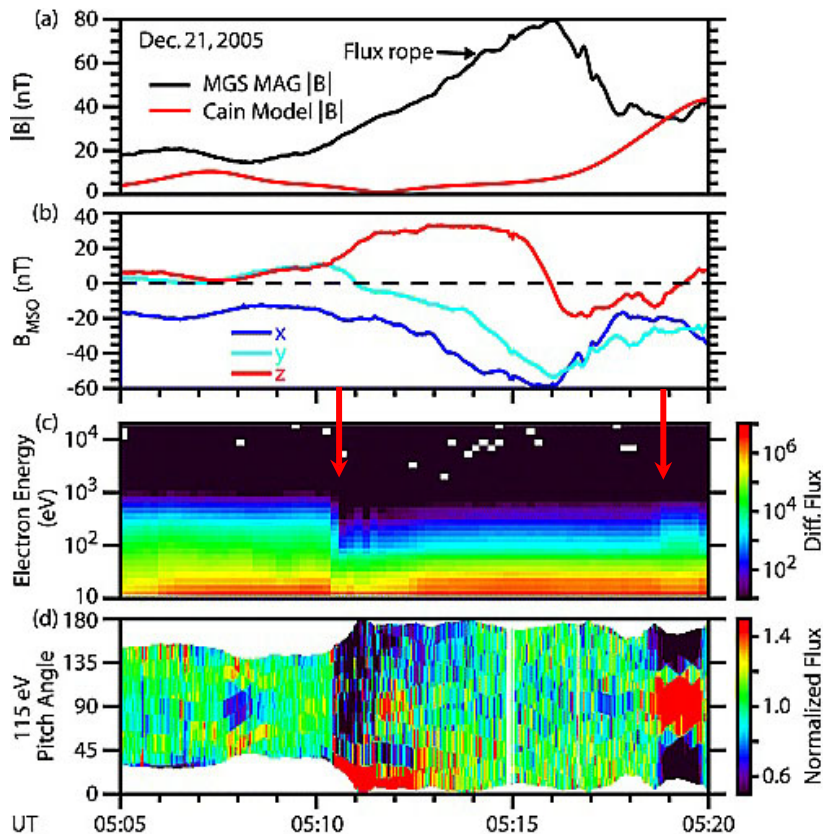


(a) Orbit 2590

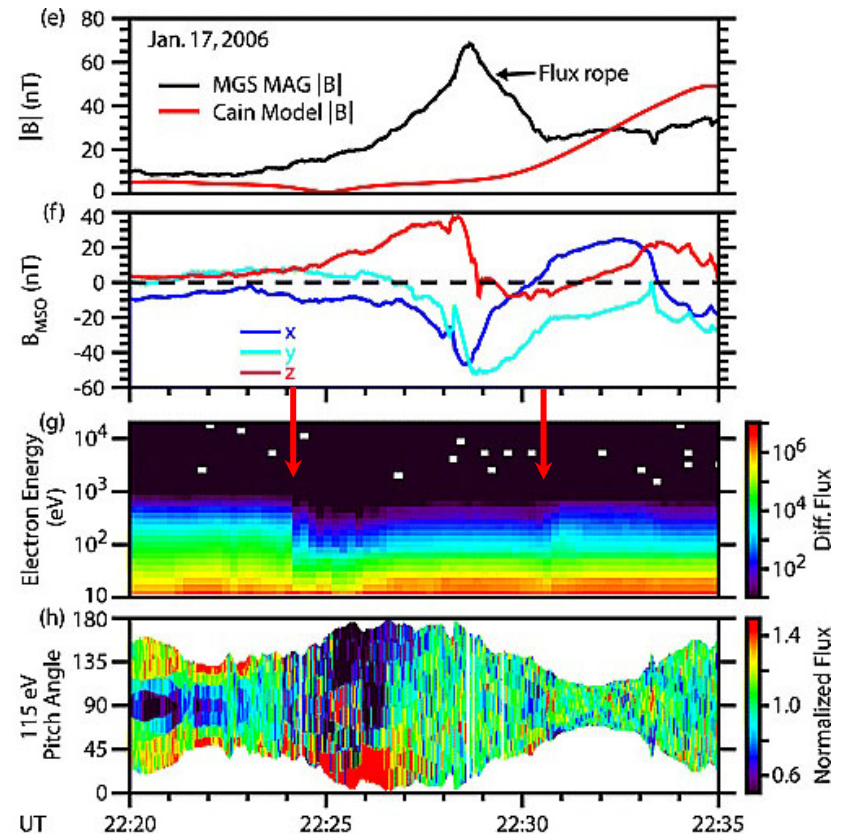
- 太陽風が吹く向きを考えると, これらのflux ropeは磁気異常帯の下流で観測されている.
- 両衛星が磁場強度が最大となったときの位置は, MVA法から推定されたflux ropeの軸方向に沿っている.flux rope中を衛星が通過したときにおける磁場ベクトルの変化の特徴に一致している.
- flux ropeの軸とMEXの軌道がほぼ垂直であるため, flux ropeの直径を求めることが可能で, およそ650--700kmである.

プラズマ観測データ: MGS衛星

2005/12/21 (MEX #2491)



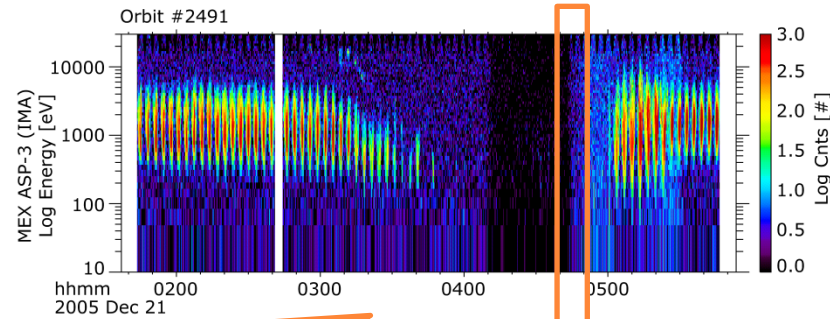
2006/01/17 (MEX #2590)



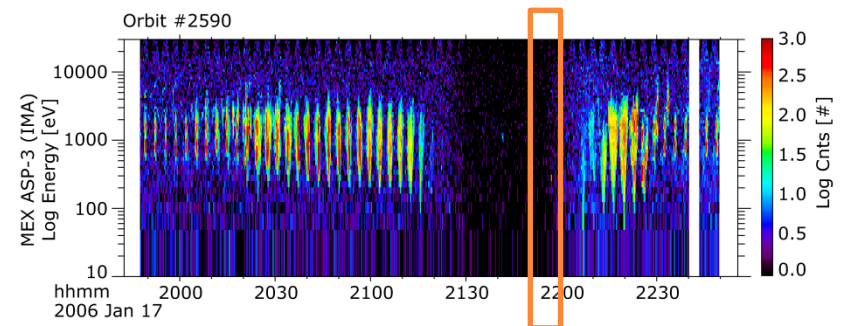
- flux ropeに衛星が入る前後で, MGS/ERが観測した電子フラックスは一時的に減少する(図中 ↓)が, flux rope中では元のフラックスレベルに戻る.
- 衛星がflux ropeを通過するとき, ピッチ角分布はfield-aligned beam + loss coneからisotropicに変化している.

プラズマ観測データ: MEX衛星

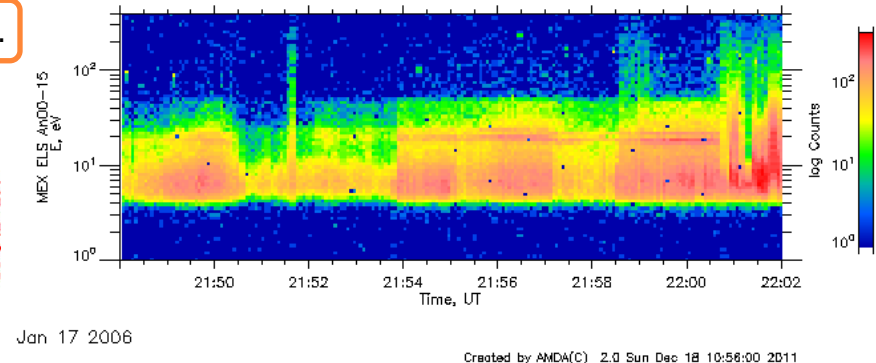
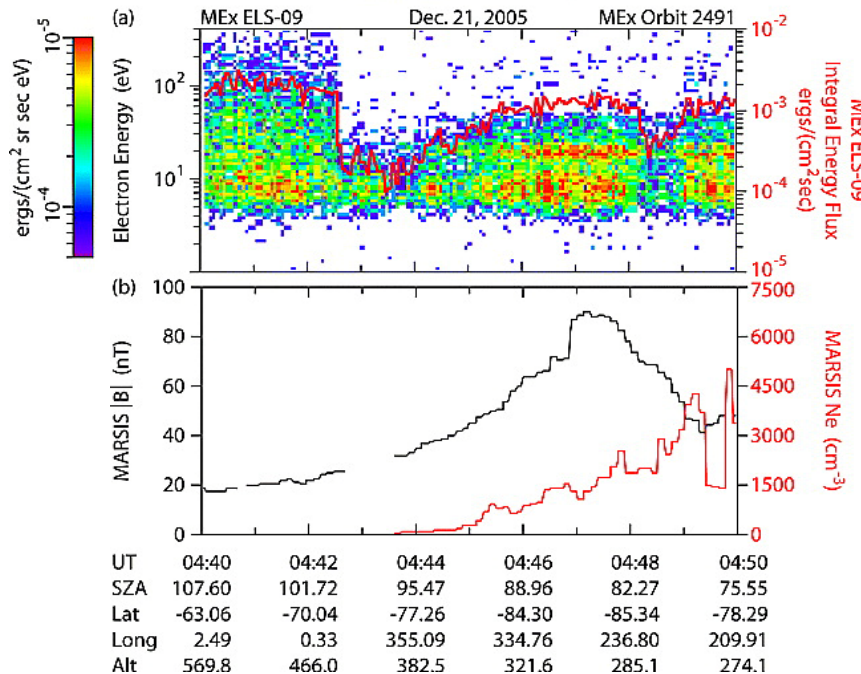
2005/12/21 (MEX #2491)



2006/01/17 (MEX #2590)



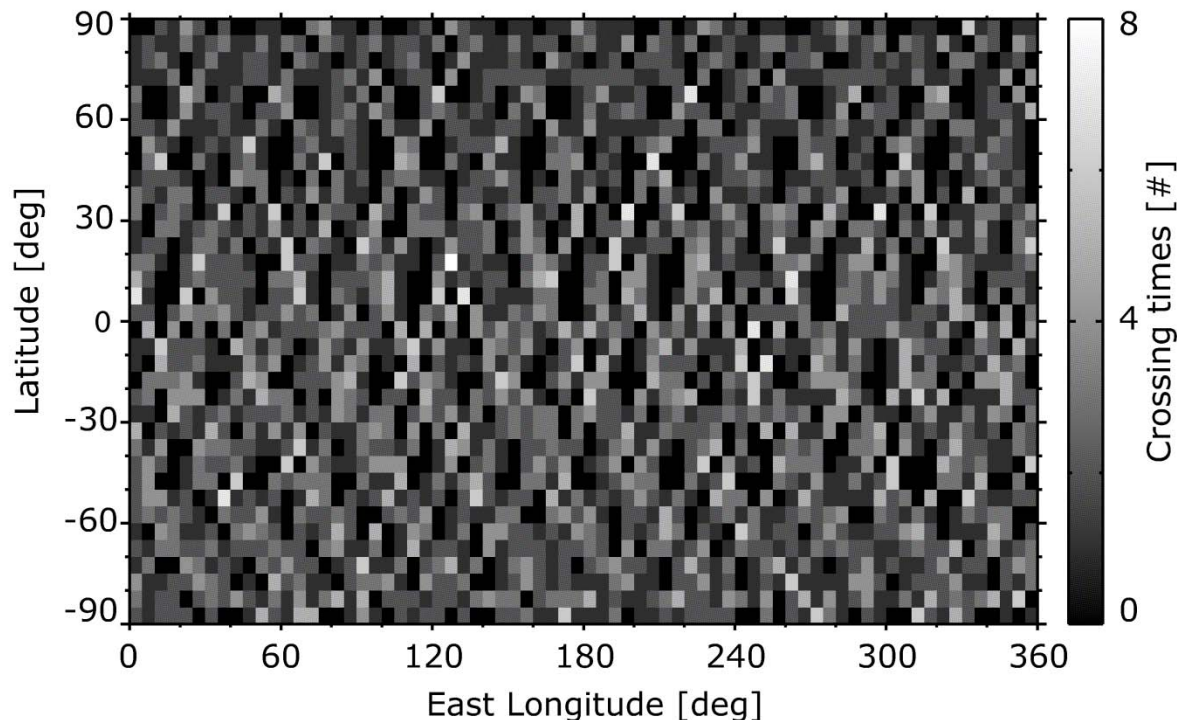
※ Ionに特別な変動はないが、太陽風擾乱時のイベントである。



- MEXでも同様にflux ropeに衛星が入る際、電子フラックスのレベルが一時的に減少する。
- 磁力線沿いに非対称な分布を示す電離圏電子観測を反映しているか?
- 当該期間, MEXのイオン観測は低エネルギー帯を観測しないモードである。

統計解析

- Orbit #1830--6689(2005/01/19--2009/03/22)のうち, 1939軌道の中から, MEX/MARSISが観測した磁場強度のデータとCainモデルを基に, 磁気異常帯とは関係のない39個の磁場のenhancement(flux ropeだと予想される)イベントを同定した.
- その後, もっともらしい15イベントを抽出する.
- イベント時におけるMEX/MARSISが観測した電子密度の時間的変化を, イベントが観測されたときの衛星高度で分類して表示した(fig10:次スライド).



(左図)
当該期間における
MEXの近火点位置
の空間分布.

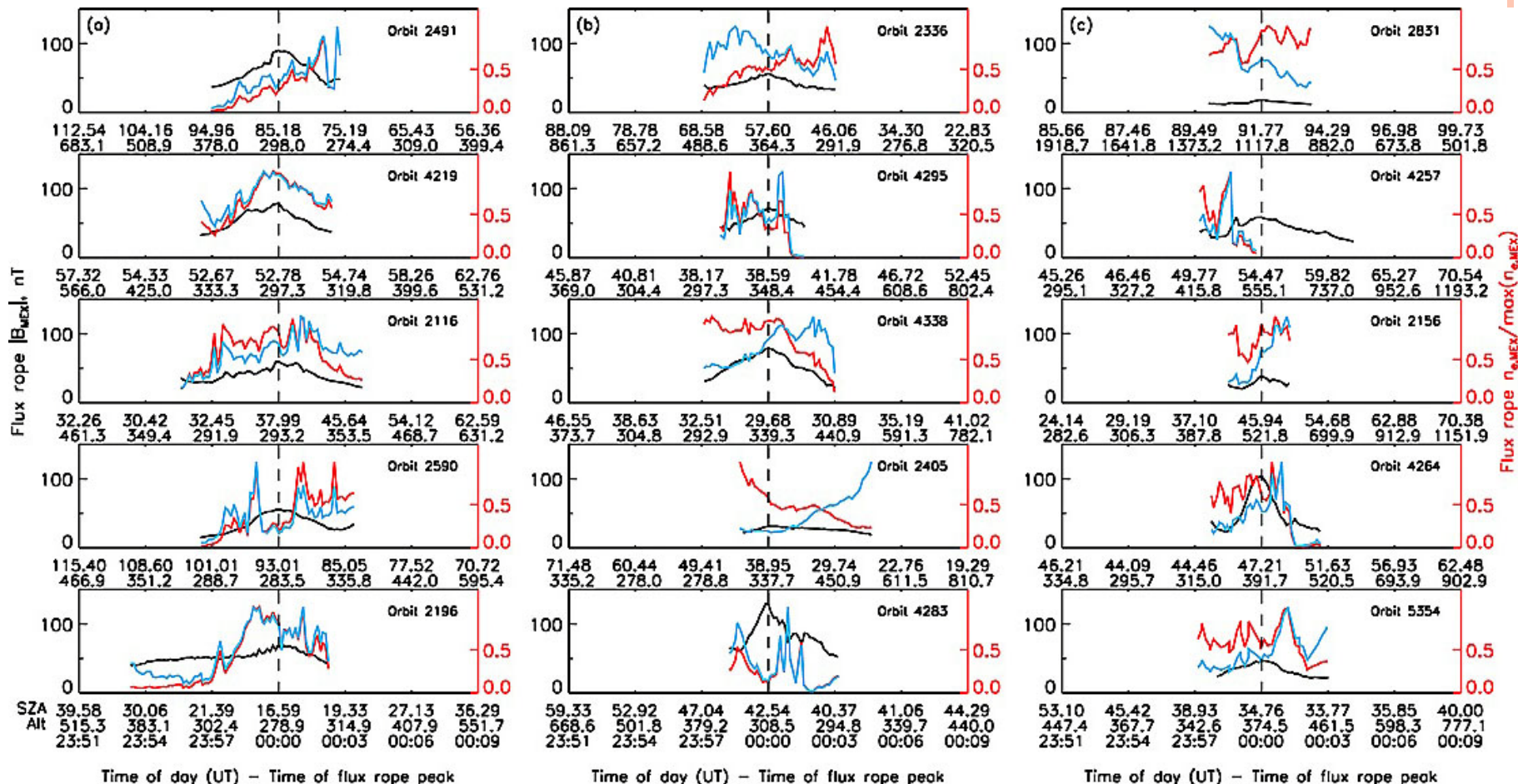
どの位置もまんべん
なく調べている.

統計解析結果：MEX/MARSIS

観測高度： 低

中

高

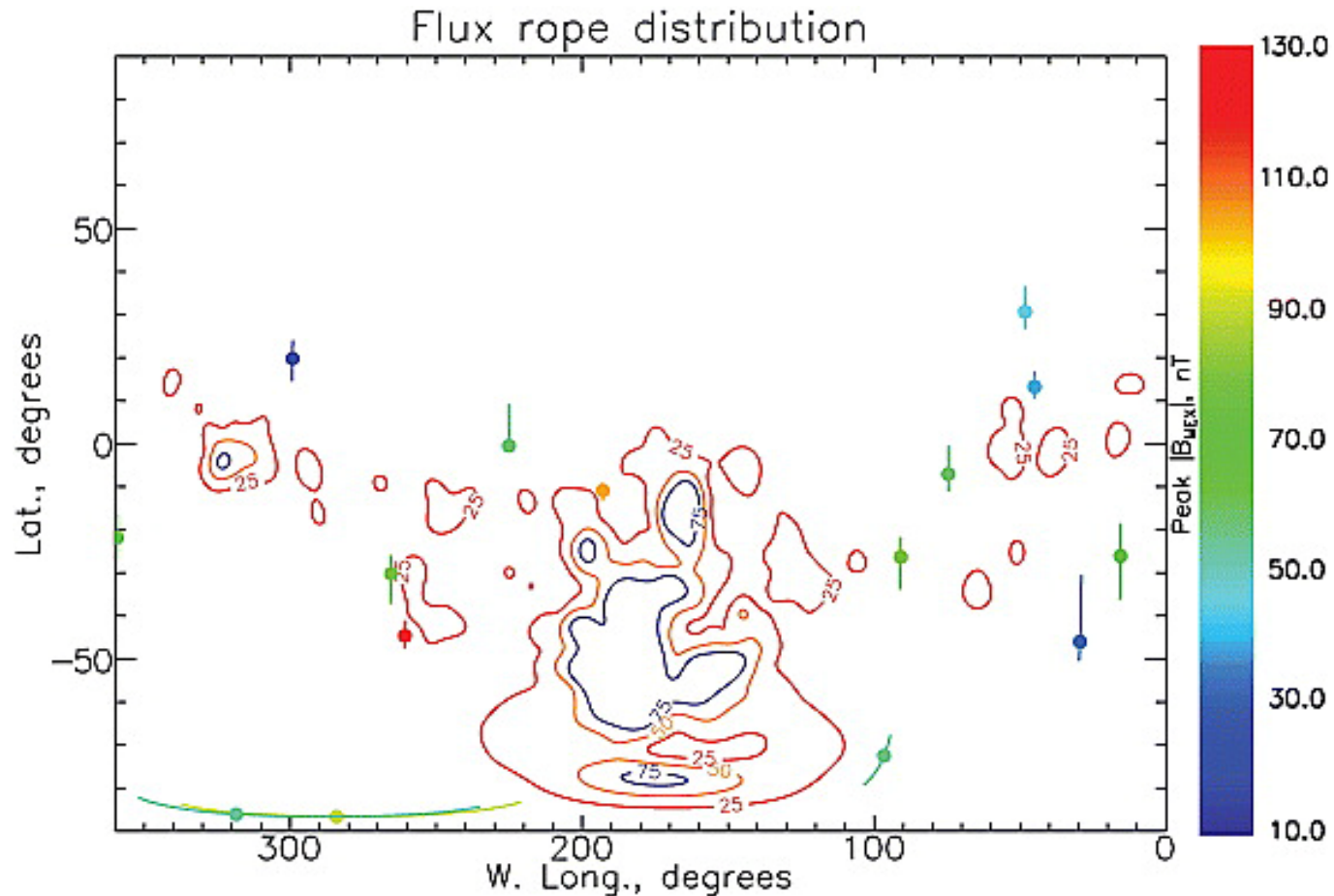


- 観測された高度にかかわらず，磁場強度が最大となったとき，電子密度が減少する傾向がある。

統計解析結果：flux ropeの特徴

- Orbit #1830--6689(2005/01/19--2009/03/22)のうち, 1939軌道の中から, MEX/MARSISが観測した磁場強度のデータとCainの火星磁場モデルを基に, 磁気異常帯とは関係のない39個の磁場の enhancement(flux ropeだと予想される)イベントを同定した.
- その後, もっともらしい15イベントを抽出する.
- イベント時におけるMEX/MARSISが観測した電子密度の時間的变化を, イベントが観測されたときの衛星高度で分類して表示した(fig10:前スライド).
- 観測された高度にかかわらず, 磁場強度が最大となったとき, 電子密度が減少する傾向がある.
- 最大磁場強度: 18--129 nT (60 nT).
- 観測高度: 279--1120 km (338 km) ※MEXの近火点が275km.
- 太陽天頂角: 8--93 deg (40 deg).
- flux ropeの水平距離: 272--1267 km (694 km).
 - ※ 近火点での衛星速度を4 km/sと仮定する.
 - ※ MARSISの時間分解能が原因で, flux ropeの観測限界は120 km.
- 金星で見られるflux ropeとは異なり, **スケールが大きい**.

統計解析結果：flux ropeの空間分布



- 観測されたlarge scaleのflux ropeは、いずれも磁気異常帯の近傍の分布している(fig11).

Morgan et al., [2011]のSummary

- MEX・MGS衛星によって得られた観測データをもとに、これまでの観測とは異なるlarge scaleのflux ropeを同定し、その特徴を統計的に調べた。
 1. 先行研究で発見されたsmall scaleのflux ropeの典型的なサイズは数10kmであるが、本研究で発見されたflux ropeの典型的なサイズは数100kmから、1000kmを超えるものも存在する。
 2. small scaleのflux ropeの最大磁場強度はせいぜい20nTであるが、本研究で発見されたlarge scaleのflux ropeは、200nTに達する。
 3. small scaleのflux ropeは磁気異常帯から離れた地域でしばしば観測されるが、本研究で発見されたlarge scaleのflux ropeは磁気異常帯近傍で観測されやすい。
- Large scaleのflux ropeを形成するためには、太陽風と火星磁気異常帯との相互作用による影響が重要である。

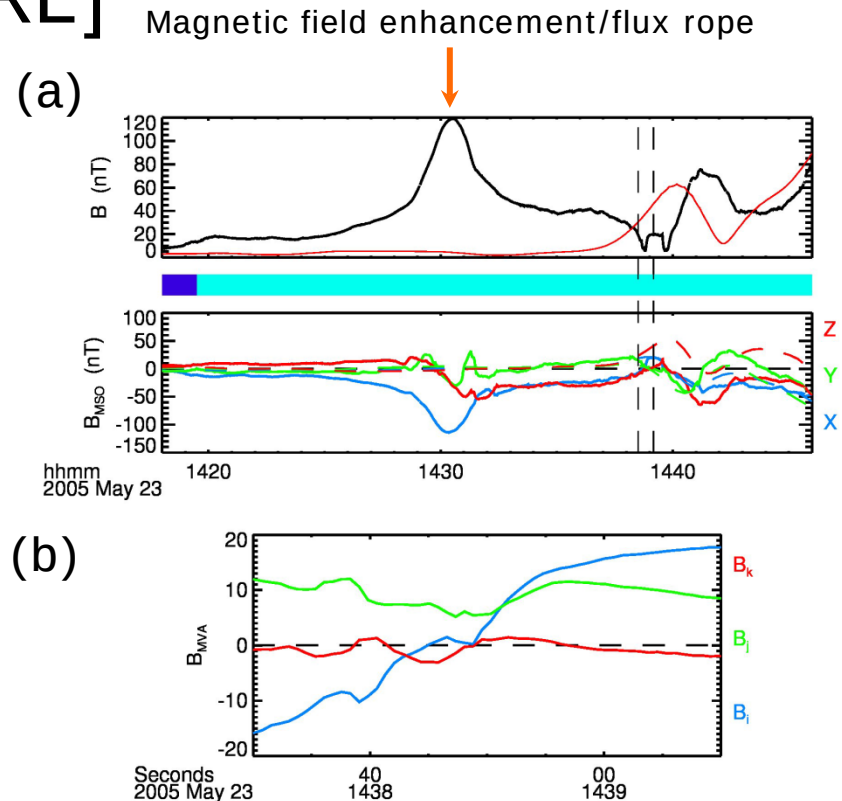
Discussions (1)

Flux rope is attached or detached ?

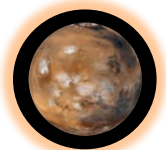
Brain et al., [2010, GRL]

(右図)

- 磁気異常帯の下流でMGS衛星が観測したflux ropeイベント.
- 点線で囲まれた時間帯において, Cainモデル(赤線)では, 衛星は磁気異常帯上空を通過したことが考えられるが, 観測(黒線)では, 短期間に磁場強度がほとんどゼロになっている(a).
- 点線で囲まれた時間帯に対してMVA法を用いると, maximum variance vector(B_i)が反転している(b) → **current sheetの形成**.
- 磁気異常帯とflux ropeの間にcurrent sheetが形成されているならば, そのflux ropeはdetachしているだろう.
[*Brain et al.*, 2010].



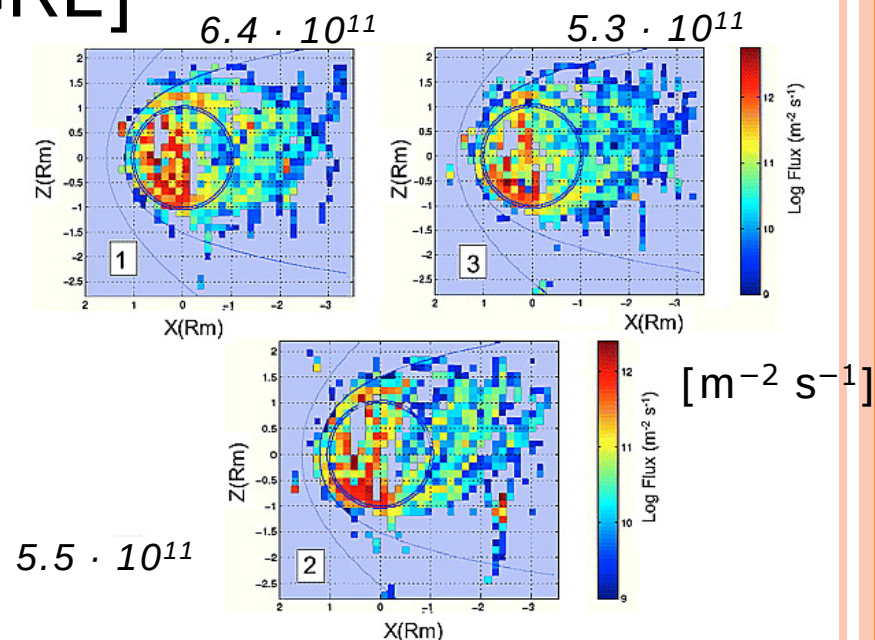
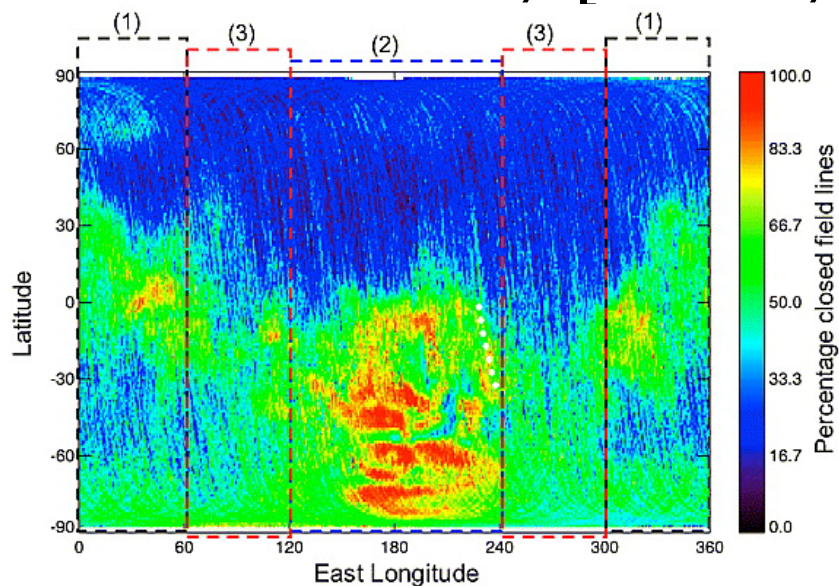
[*Brain et al.*, 2010]



Discussions (2)

磁気異常帯が火星大気流出に果たす役割:

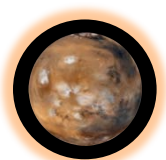
Lundin et al., [2011, GRL]



- 2007年7月--2009年10月の太陽活動極小期におけるMEX/ASPERA-3/IMAが観測した低エネルギーイオン(< 200 eV)の統計解析結果.
- 磁気異常帯が含まれる領域における大気流出フラックスは, 他とほとんど違いはない. →「ミニ磁気圏」の可能性.
- 太陽活動極小期の典型的な描像としては, 基本的に磁気異常帯の影響は顕著ではないが, 時々*Brain et al.*, [2010]や*Morgan et al.*, [2011]が指摘したlarge scaleのflux ropeが形成され, 大気を流出させている.
→ 極大期はどうか?

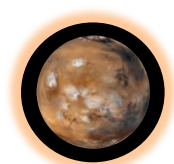


End





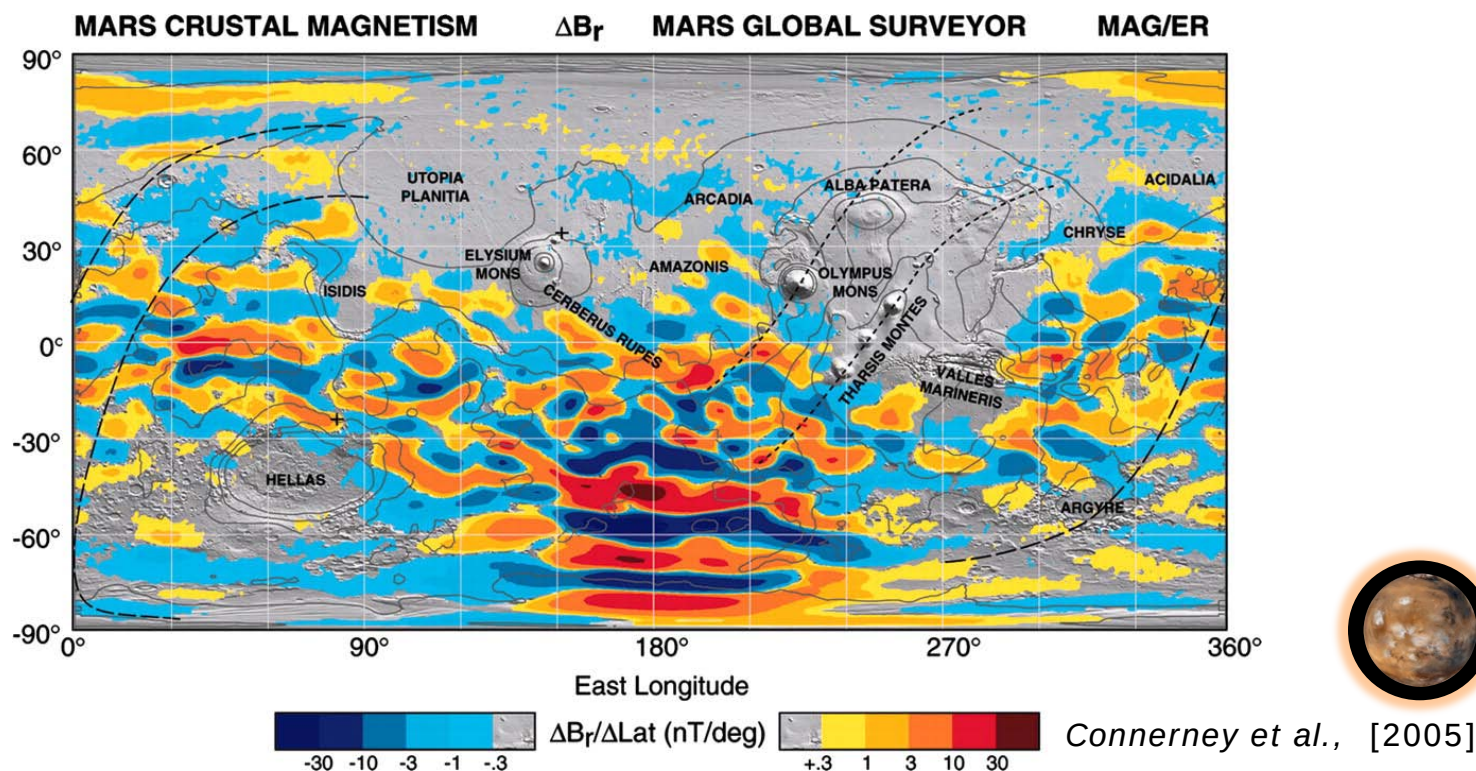
Back up & Appendix



Introduction: 火星の磁気異常帯

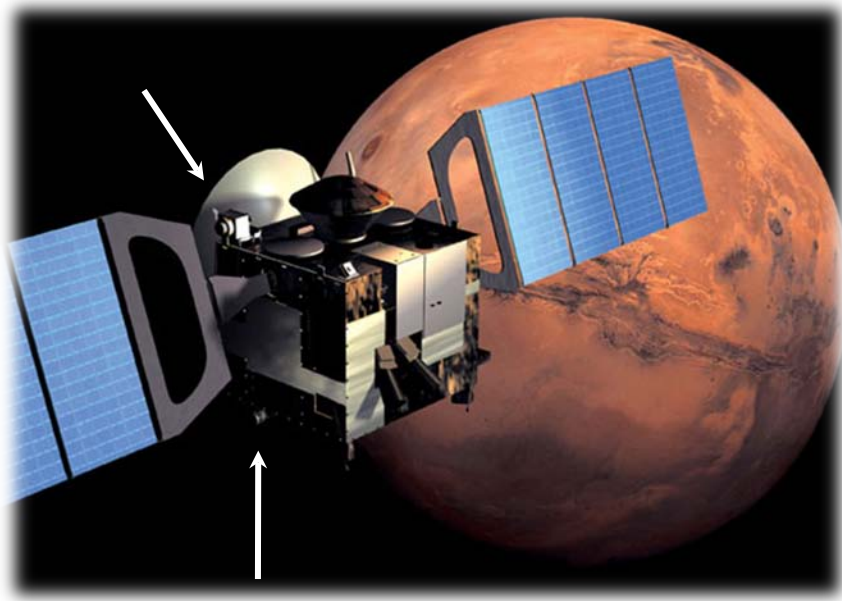
- 南半球の一部の領域に、バンド状をした地殻起源磁場が存在していることがMGS衛星によって発見された [e.g., Acuna et al., 1998].
- 磁場強度は上空400kmで約100nT. 地表では1000nTを超える (c.f. 地球地表: $O(10^4)$, IMF: $O(1) \sim O(10)$ nT).

火星プラズマ環境, 大気流出にlocal/globalな影響を与える可能性がある.



Satellite - Mars Express (MEX)

- 打ち上げ日 : 2003/06/02
- 3軸固定衛星
- 極軌道 (inclination: 86°)
- End of mission : 2009/12/31 $\longrightarrow$ 2012 $\rightarrow$ 2014?



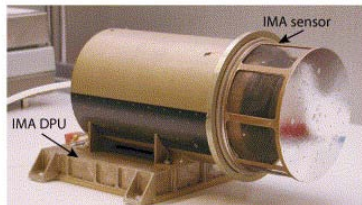
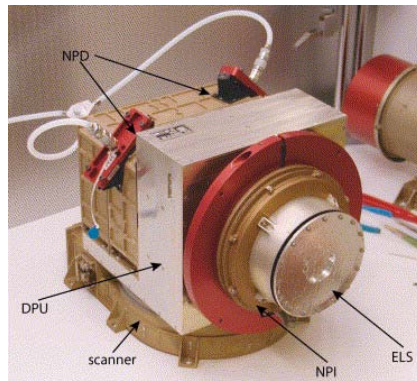
- 近火点 : ~ 250 [km]
- 遠火点 : $\sim 10,000$ [km]
- 軌道周期 : ~ 6 時間40分
- イオン, 電子, 高速中性粒子を計測するプラズマ観測器群 (ASPERA-3)を搭載.
- 磁場観測器なし.

Analyzer of Space Plasma and Energetic Atoms (ASPERA-3)

Instrumentation :

プラズマ観測器群 ASPERA-3

- Analyzer of Space Plasma and Energetic Atoms
- イオン, 電子と2種類の高速中性粒子(Energetic Neutral Atoms; ENA)観測器で構成されている.
- 火星でENAを観測するのはMEX衛星が世界初である.

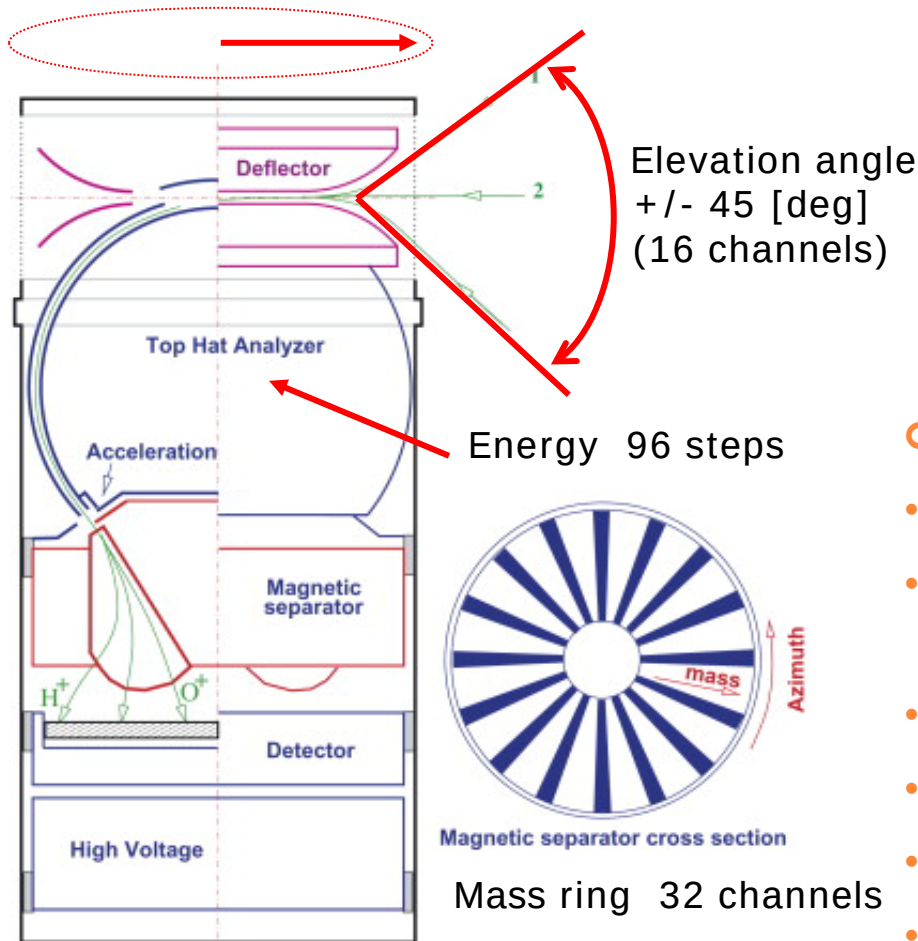


Parameter	NPI	NPD	ELS	IMA
Particles to be measured	ENA	ENA	Electrons	Ions
Energy range, keV per charge	$\approx 0.1\text{--}60^a$	0.1–10	0.01–20	0.01–30
Energy resolution, $\Delta E/E$	No	0.5	0.08	0.07
Resolved masses, amu/q	No	1, 16	N/A	1, 2, 4, 8, (16, 32, 44) ^b
Intrinsic field of view	$9^\circ \times 344^\circ$	$9^\circ \times 180^\circ$	$4^\circ \times 360^\circ$	$90^\circ \times 360^\circ$
Angular resolution (FWHM)	$4.6^\circ \times 11.5^\circ$	$5^\circ \times 40^\circ$	$2^\circ \times 22.5^\circ$	$4.5^\circ \times 22.5^\circ$
G-factor/pixel or sector $\text{cm}^2 \text{ sr}$ (NPI, NPD) $\text{cm}^2 \text{ sr eV/eV}$ (ELS, IMA)	2.5×10^{-3} (ϵ not incl.)	6.2×10^{-3} (ϵ not incl.)	7×10^{-5}	1.6×10^{-6}
Efficiency, ϵ , %	~ 1	1–15	Inc. in G	Inc. in G
Time resolution (one scan), s	32	32	32	196 ^c
Mass, kg	0.7	1.3	0.3	2.2
Power, W	0.8	1.5	0.6	3.5

Instrumentation :

イオン質量分析器 (IMA)

Azimuth angle 360 [deg]
(16 sectors)



IMA Cross Section ; Barabash et al. [2007]



- IMA performance table:
- 10 eV ~ 30 keV
- 1, 2, 4, 16, 32, 44, ..., 80 [a.m.u.]
- FOV : 90×360 [deg]
- resolution : 5.6×22.5 [deg]
- 192 [sec] in full 3D scan
- $32 \times 16 \times 96 \times 16$ data

