

第39回 火星勉強会

In situ observations of reconnection Hall magnetic fields at Mars: Evidence for ion diffusion region encounters [Halekas et al., 2009, JGR]

- 1.Introduction
- 2.Data Sources
- 3.Case Studies
- 4.Event Distribution
- 5.Implications and Conclusions

阪本 仁（東北大学）

Abstract

- ・火星の誘導磁気圏において、電流シート中の磁場の四重極構造(Hall磁場)がMGSにより26イベント観測された。
- ・磁場の四重極構造は無衝突リコネクション(RX)によるものと考えられ、MGSはイオン拡散領域を通過したと考えられる。
- ・イベントの統計解析によれば
Hall磁場とmain磁場の比の平均は 0.51 ± 0.13 。
normal磁場とmain磁場の比の平均(RXレート)は 0.16 ± 0.09 。
これらの値は地球における観測とおよそ一致。
- ・IMFが巻きつくだけでも、RXが起こる電流シートが形成されることが示唆された。
(各々のイベントと残留磁場、IMFの向きの変化に一貫した関連は見られなかった。)
- ・一部のイベントでは、Hall電流の一部となる電子の沿磁力線方向の運動が観測された。
- ・衛星がX-lineより太陽側を通過した時、電流シート中で、電子フラックスの極小が見られた。
(これは、磁力線が閉じていて、火星の熱圏とつながっていることに起因。)
- ・衛星がX-lineより反太陽側を通過した時、電子フラックスの極小は見られなかった。
(これは、磁力線が開いていて、太陽風とつながっていることに起因。)

1.Introduction

○先行研究から

- ・IMFと残留磁場のRXを観測
[Brain et al., 2007] [Krymskii et al., 2002]
- ・残留磁場下流にある尾部領域内の電流シートでRXを観測
[Eastwood et al., 2008]

○火星でRXが起こると・・・

- ・大気散逸
- ・降り込み電子の加速 [Halekas et al., 2008] [Ulisen et al., 2008]

○本論文では

- ・Eastwood et al. [2008]は、1イベントについて磁場に重きをおいて研究がなされた。
本論文では、磁場に加え、電子フラックス、ピッチ角分布も調査し、Case studyと統計解析を行う。

○火星におけるリコネクションのシナリオ

a. IMFの巻きつき

- ・尾部や磁極付近に反転構造

b. IMFと残留磁場

- ・IMFが残留磁場の向きが逆

c. IMFの向きの変化(電離圏)

- ・電離圏の近くで太陽風の磁場の不連続面が圧縮

d. IMFの巻きつき (残留磁場の影響あり)

- ・残留磁場がIMFのひっかかりを抑制

e. 残留磁場の引き伸ばし

- ・太陽風による引き伸ばし

f. IMFの向きの変化(残留磁場)

- ・残留磁場の近くで太陽風の磁場の不連続面が圧縮

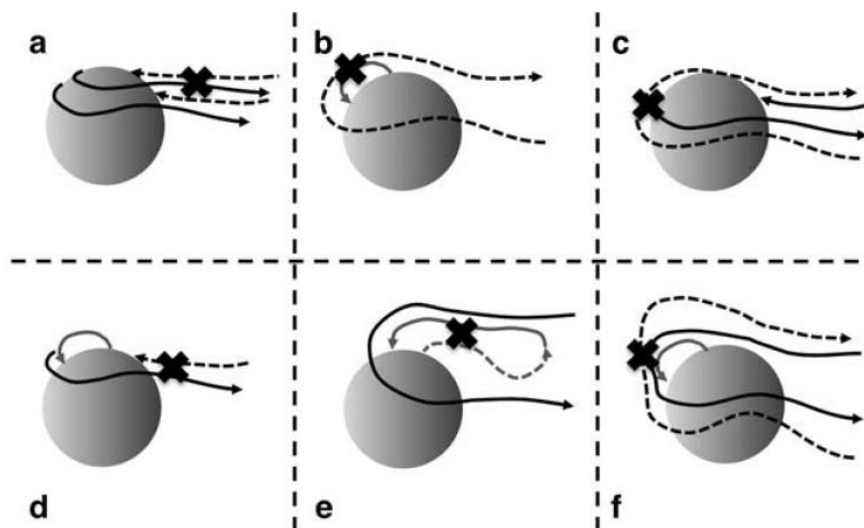
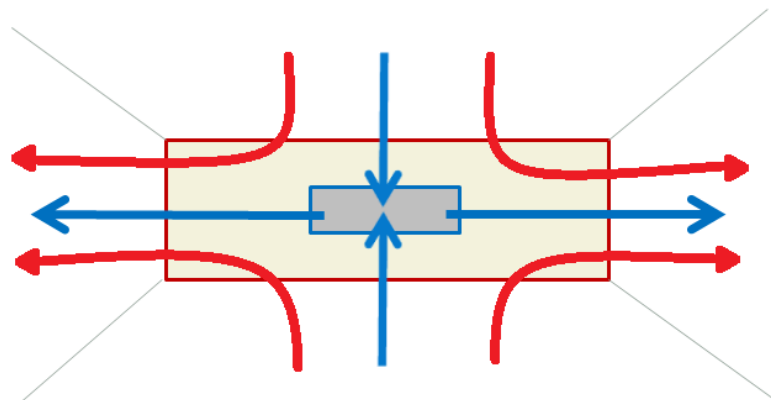
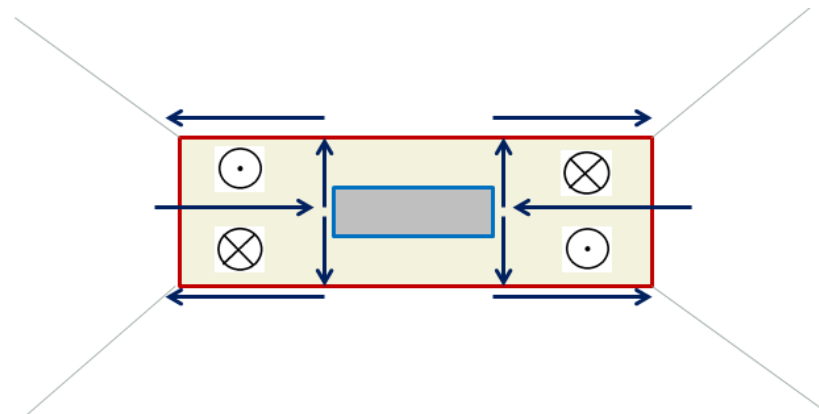


Fig.1

○無衝突磁気リコネクション



- 電子
- イオン
- 磁場
- セパトリクス
- イオン拡散領域 $\sim c/\omega_{pi}$
- 電子拡散領域 $\sim c/\omega_{pe}$



- Hall電流
- ⊗ Hall磁場

X-line

...磁力線が繋ぎ変わる点

セパトリクス

...上流と下流の磁力線トポロジー境界

- ・無衝突磁気RXでは、Hall電流を形成して、
電流シート内に磁場の四重極構造(Hall磁場)が生じる。

※RXについては、以下のwebページが参考になる。

http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/pcans/em2d_mrx.html

2.Data Sources

○観測機器

- Magnetometer (MAG)
(精度: ~0.5nT in shadow ~1.0nT elsewhere)
- Electron Reflectometer (ER)
(レンジ: 10eV-20keV, 視野: $360^{\circ} \times 14^{\circ}$)

○データ

- 磁場・電子エネルギーフラックス・電子ピッチ角分布
- Local time : ~2am/2pm
- 高度 : ~400km

※ERの視野の関係で、電子ピッチ角分布のレンジは、一定ではない

3. Case Studies

3.1 Expected Magnetic Field Signatures

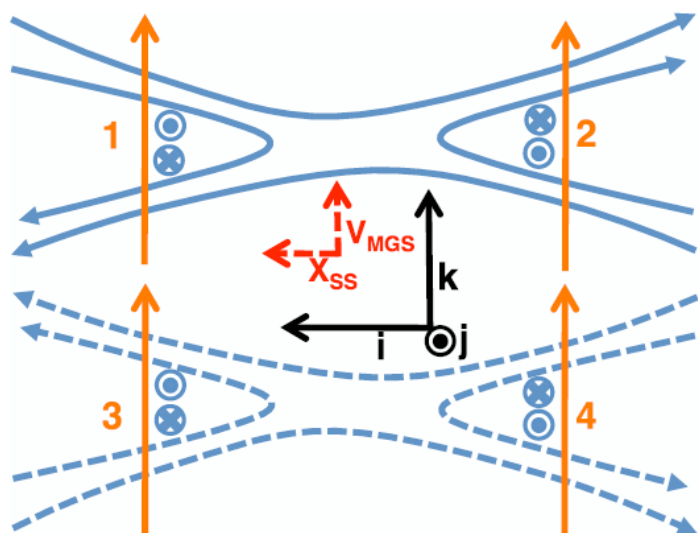


Fig.2

グラフ化

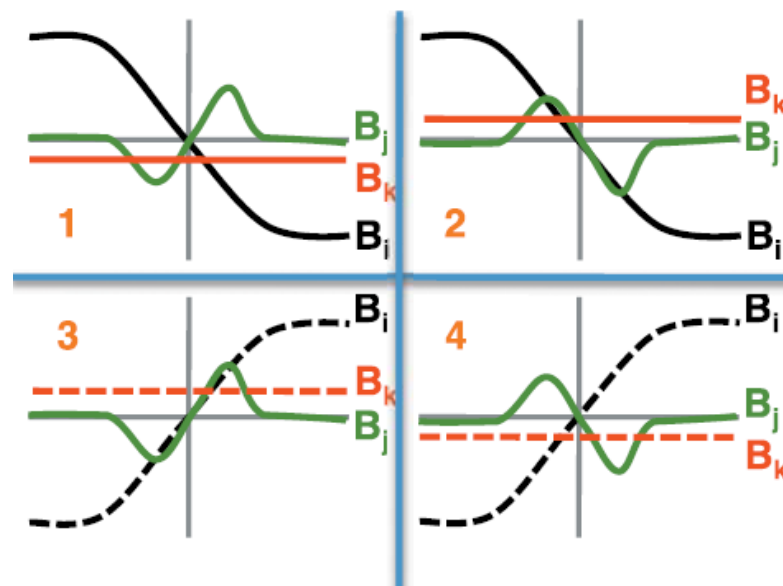


Fig.3

MSO座標

X:太陽方向

Y:公転と逆向き方向

Z:黄道に垂直な方向

Minimum variance座標

i :分散が最大である磁場成分の方向 $\Rightarrow$ main field

j :分散が中間である磁場成分の方向 $\Rightarrow$ Hall field

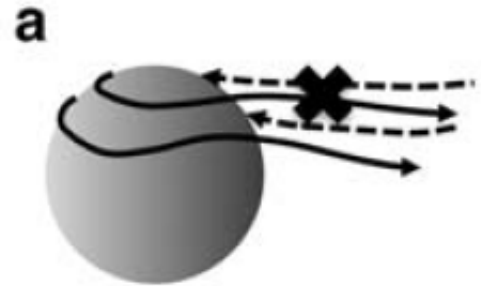
k :分散が最小である磁場成分の方向 $\Rightarrow$ normal field

3.2 Case Study 1: On 21 November 2003

磁場の四重極構造、電子のピッチ角分布ともに無衝突RXで説明がつくケース

イベントの基本情報

- local time: 2am
- 太陽天長角: 138°
- 地理緯度・傾度: 268° E 57° N
(※残留磁場が強い領域から遠い)
- IMF clock angleの変化: 16°
(※ IMF clock angleほとんど一定と考えてよい。)



このケースの電流シートはFig.1のaのパターンで形成されたと考えられる。

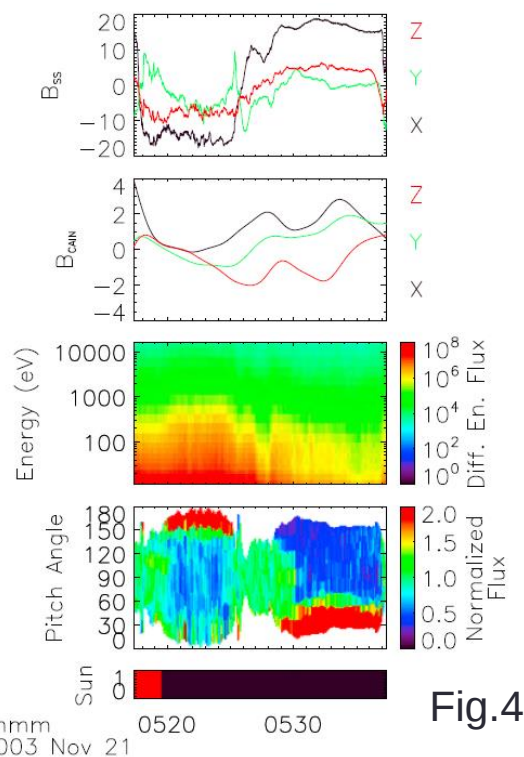


Fig.4

電流シート
内に注目

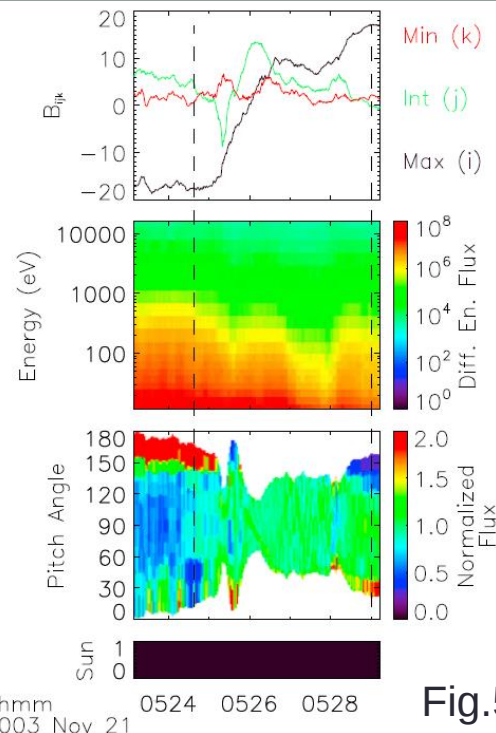
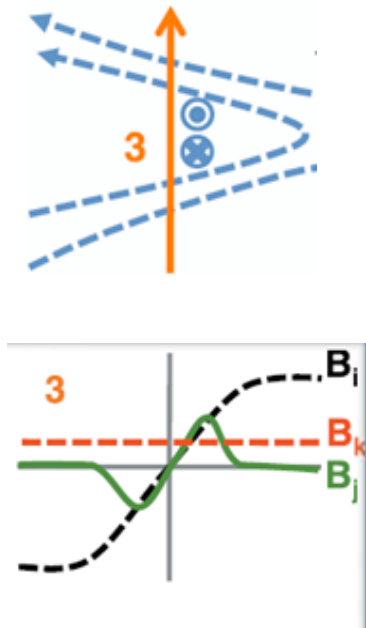


Fig.5



・X方向(i方向)に対称な磁場の反転 ~ 20nT、Y方向(j方向)にHall磁場 ~ 10nT

・Hall磁場の様子は定量的・定性的にも 地球の尾部・マグネットポーズ・シースの観測と似ている。[Øieroset et al., 2001] [Mozar et al., 2002] [Phan et al., 2007]・・・・

・minimum variance座標での磁場変化からX-lineから太陽側の領域を横切ったと考えられる。(Fig.2、Fig.3におけるタイプ3)

・電流シート内に電子フラックスの極小点が2か所見える。
(セパトリクス付近での電子の減少 or 電流シート中の磁力線が惑星・外圈を通っている。)

- ・電流シートの厚みTは以下のように見積もることができる。

main fieldの反転構造の時間幅は~70s、衛星の速度は~3.4km/s
normal方向と衛星の速度方向、それぞれの方向の単位ベクトルの内積 ~ 0.36



$$T \sim 70[\text{s}] \times 3.4[\text{km/s}] \times 0.36 = 85\text{km}$$

- ・電流シート・衛星の交差点とX-lineの距離dは、以下のように見積もれる。

$$d = \frac{T}{2} \div \frac{\langle B_k \rangle}{\langle B_i \rangle} \sim 400\text{km}$$

- ・尾部でのジャイロ半径、慣性長を見積もることは難しいので
MEXの観測結果に基づきシースのジャイロ半径、慣性長を見積もり、T、dと比べる。

ジャイロ半径: ~50km (プロトン) ~0.5km(電子)

慣性長: ~230km(プロトン) ~5km(電子)

(※尾部ではジャイロ半径はもう少し小さく、慣性長は、もう少し大きい)

**Tはイオンの慣性長と同程度(少し小さい)状況であり、激しいリコネクションが
起こりうるような厚みであることがいえる。**

**イオン拡散領域の長さが慣性長の数倍とすると、dはそれより少し小さく、衛星は、
イオンの拡散領域を通過したと考えられる。**

(電流シート通過前のピッチ角分布)

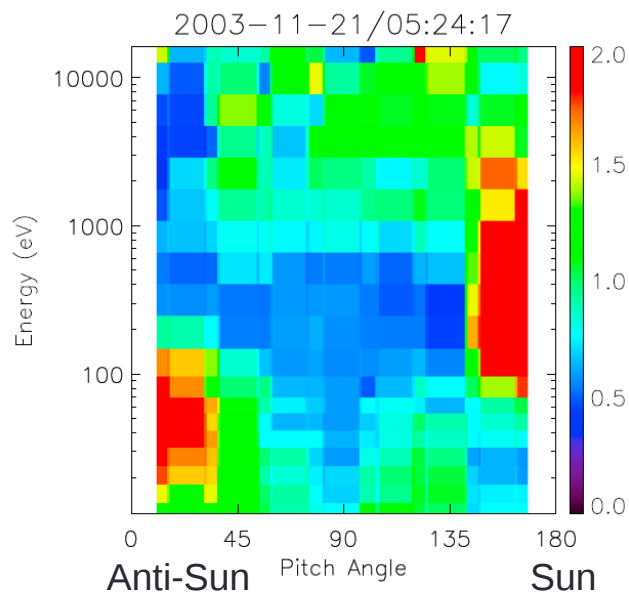


Fig.7

(電流シート通過後のピッチ角分布)

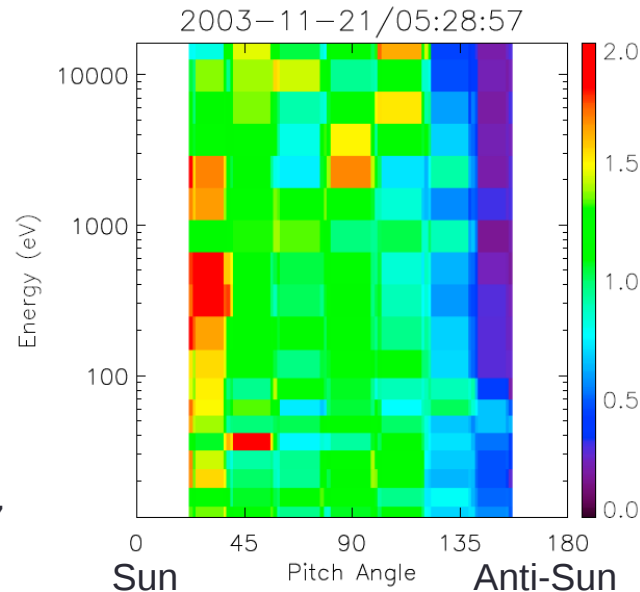
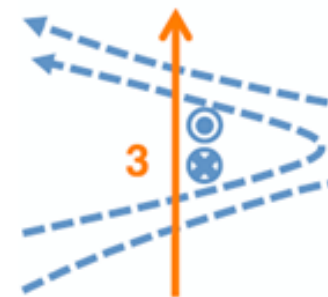


Fig.8



・通過前と通過後で分布は異なる。⇒非対称なリコネクションの可能性(main-fieldは対称だった。)

・通過前

100-1000eVで太陽方向(X-lineから遠ざかる)の運動、

0-100eVで反太陽方向(X-lineに近づく)の運動

⇒これらの描像は地球の尾部の観測[Manapat et al., 2006]と似ており、
Hall電流の一部をとらえたものと考えられる。

・通過後

0-1000eVで太陽方向の運動、180° 付近でロスコーン分布

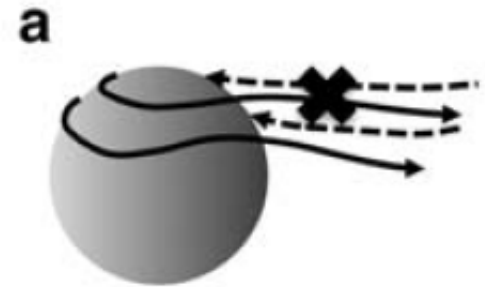
⇒磁力線が衝突のある熱圏を通っていることを示唆

3.3 Case Study 2: On 30 March 2001

磁場の四重極構造は無衝突RXで説明がつくが、
電子のピッチ角分布は説明できないケース

イベントの基本情報

- ・local time: 2am
- ・太陽天長角: 140°
- ・地理緯度・傾度: 358° E 42° N
(※残留磁場が強い領域からそれなりに遠い)
- ・IMF clock angleの変化: 22°
(※ IMF clock angleほとんど一定と考えてよい。)



このケースの電流シートもFig.1のaのパターンで形成されたと考えられる。

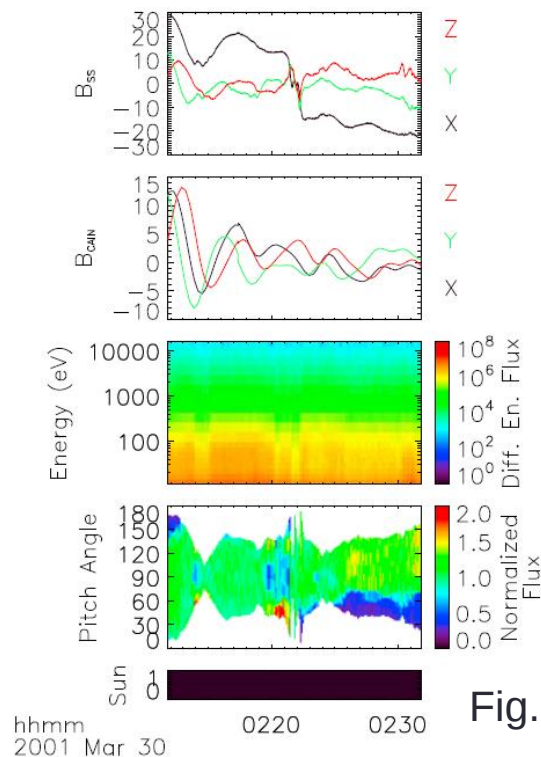


Fig.9

電流シート
内に注目

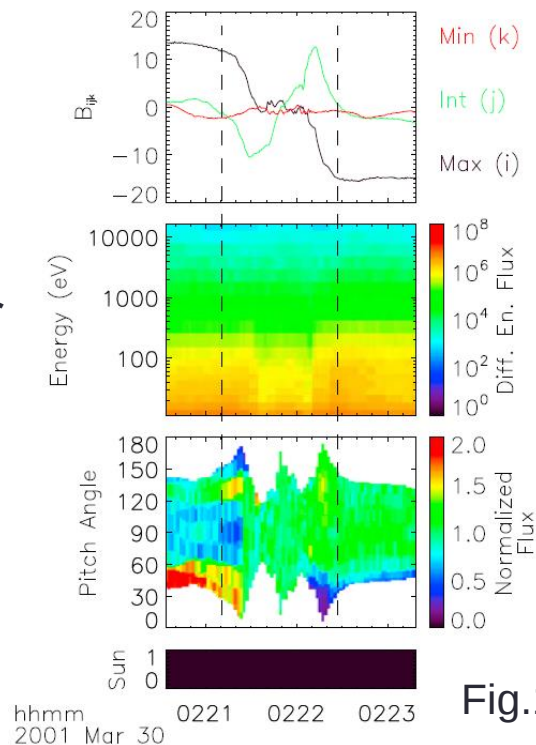
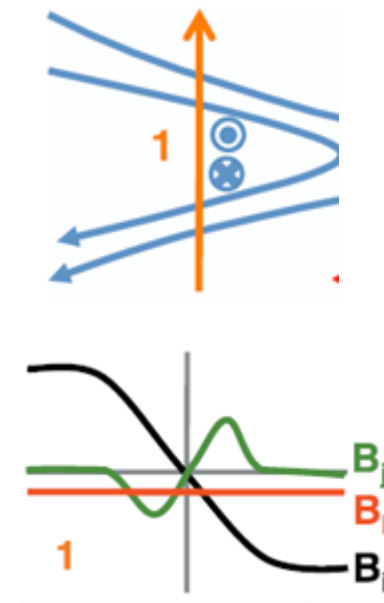


Fig.10



- Hall磁場がY方向、Z方向に両方に含まれている。(Case study 1ではY方向のみ)
- Main-fieldとHall-fieldが中心付近で、階段化。(bifurcated current sheetを示唆)
- minimum variance座標での磁場変化からX-lineから太陽側の領域を横切ったと考えられる。(Fig.2、Fig.3におけるタイプ1)
- 電流シート内にはっきりとした電子フラックスの極小点が2か所見える。
- $T \sim 185\text{km}$ 、 $d \sim 900\text{km}$ と推論される。(二つの値は、Case study 1の2倍)

(電流シート通過前のピッチ角分布)

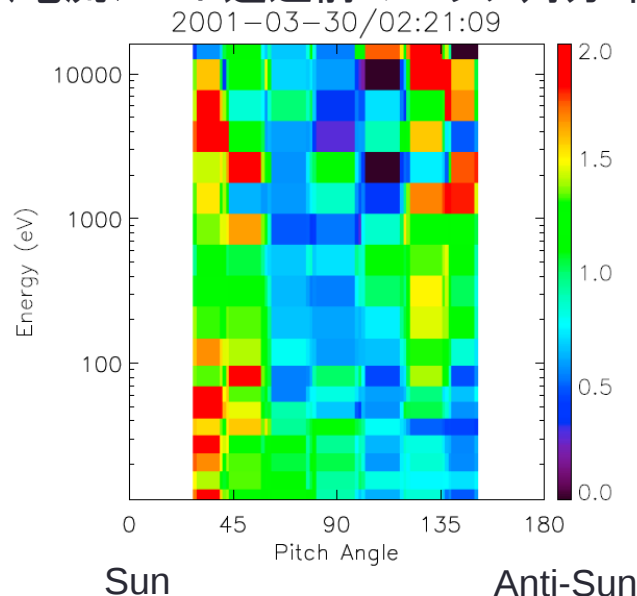


Fig.12

(電流シート通過後のピッチ角分布)

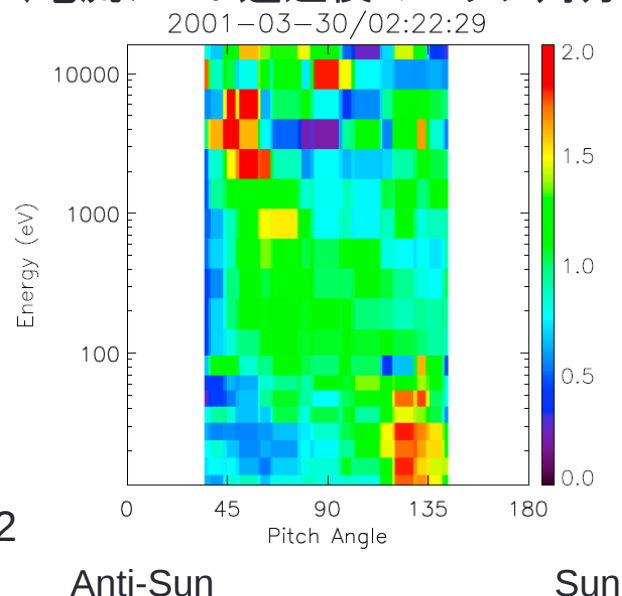
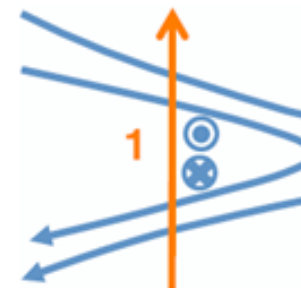


Fig.13



・通過前

0-100eVで太陽方向(X-lineから遠ざかる)の運動

1000eV-10000eVで反太陽方向(X-lineに近づく)の運動



低エネルギーが反太陽方向、高エネルギーが太陽方向のCase study 1とは逆、地球で観測されるようなHall電流の構造とも逆、原因は不明。

・通過後

0-100eVで太陽方向(X-lineから遠ざかる)の運動

45° 付近でロスコーン分布

⇒磁力線が衝突のある熱圏を通っていることを示唆。

4.Event Statistics

4.1Event Selection

データ数

10000 (観測された電流シート)



56 (四重極構造持ち電流シート)



38 (ノイズが少ないもの)



28 (下記のcriteriaを課して残ったもの)



26 (RXの四重極と極性が合う電流シート)

Criteria: 以下を満たすものは除外

- normal-fieldが0.5nT以下
- normal-fieldが1nT以下 かつ 変動による不確定性が30%以上
- $\frac{\langle |B_k| \rangle}{\langle |B_j| \rangle}$ が0.3以上

※この基準によって、相対的に激しいRXが残る。

- 26イベント中、12イベントが夜側、13イベントがterminator/極領域、1イベントが昼側に分布 (Fig.14)

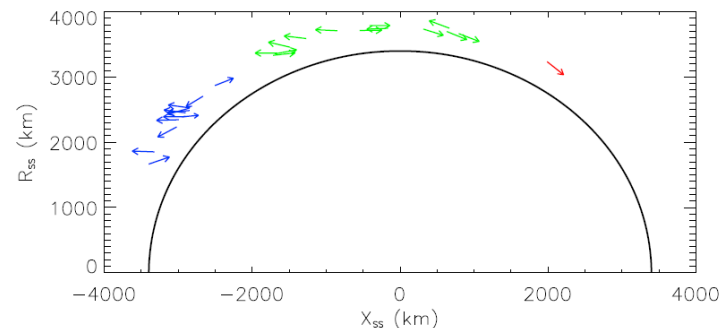


Fig.14

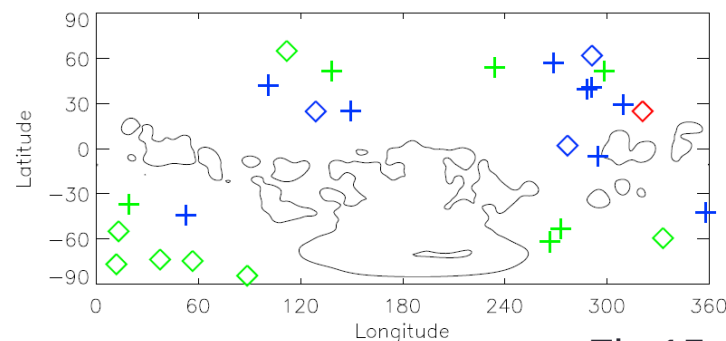


Fig.15

Table 1. Event List

Date and Time ^a	SZA	Longitude and Latitude	Subsolar Longitude and Latitude	Position Relative to X Line by B (Electron)	115 eV Electron Before/After	115 eV Electron During	Peak $ B_i / B_j $	$\langle B_k \rangle / \langle B_l \rangle$
2005-06-26/03:50:38	58	321, 25	284, -21	Antisunward (Sunward)	Mixed/Noisy	Isotropic/Noisy	0.60	0.072
2001-11-23/09:47:40	78	12, -77	179, -25	Antisunward (Sunward)	Antisunward FA/ Isotropic	Isotropic	0.47	0.175
2001-11-04/20:19:51	80	37, -74	199, -25	Antisunward	Anti-Sun FA/Isotropic	Isotropic	0.69	0.060
2003-11-30/00:08:37	85	56, -75	225, -20	Antisunward	Loss Cone/Isotropic	Isotropic	0.60	0.107
2005-02-04/11:20:42	96	112, 65	243, 10	Antisunward (Sunward)	Isotropic	Isotropic	0.65	0.201
2005-05-31/22:37:08	98	333, -60	116, -16	Antisunward	Isotropic	Isotropic	0.53	0.087
2001-06-21/06:39:55	117	13, -55	157, -1	Antisunward (Antisunward)	Isotropic/ Loss Cone	Isotropic	0.34	0.136
2003-01-06/01:41:19	117	89, -85	266, 22	Antisunward	Isotropic	Isotropic	0.52	0.106
2005-07-09/00:05:57	80	138, 52	106, -23	Sunward (Sunward)	Noisy Isotropic/ Sunward FA	Isotropic	0.46	0.086
2004-11-12/06:56:55	92	267, -62	221, 23	Sunward (Sunward)	Bidirectional/Isotropic	Trapped	0.49	0.335
2001-03-29/06:13:25	103	298, 51	77, 17	Sunward (Sunward)	Loss Cone	Isotropic, Flux Decrease	0.32	0.094
2001-05-20/20:18:43	109	234, 54	10, 6	Sunward (Sunward)	Bidirectional/ Loss Cone	Isotropic, Flux Decrease	0.64	0.132
2001-11-12/02:46:47	113	19, -37	174, -25	Sunward	Loss Cone/ Isotropic	Isotropic/ Flux Increase	0.38	0.136
2003-05-12/00:25:53	116	273, -54	54, -1	Sunward	Sunward FA	Trapped/ Flux Decrease	0.38	0.30
2001-09-25/02:19:23	131	291, 62	70, -22	Antisunward (Antisunward)	Isotropic/Loss Cone	Isotropic	0.29	0.31
2003-07-24/09:32:01	141	129, 25	267, -18	Antisunward (Antisunward)	Noisy Loss Cone/ Isotropic	Mixed/ Flux Increase	0.38	0.196
2004-03-19/09:09:14	154	277, 2	71, 3	Antisunward (Antisunward)	Loss Cone	Isotropic/ Flux Increase	0.43	0.074
2006-03-17/04:58:19	135	149, 25	301, 11	Sunward	Mixed/Loss Cone	Mixed/ Flux Decrease	0.63	0.081
2003-11-21/05:27:20	138	268, 57	60, -21	Sunward (Sunward)	Sunward FA	Isotropic/ Flux Decrease	0.63	0.326
2006-01-02/20:42:48	138	288, 40	84, -4	Sunward	Sunward FA	Isotropic	0.36	0.097
2001-11-03/02:45:07	139	295, -5	86, -25	Sunward (Antisunward)	Isotropic/ Loss Cone	Trapped/ Flux Decrease	0.59	0.264
2001-03-30/02:21:47	140	358, -42	143, 17	Sunward (Antisunward)	Sunward FA/ Loss Cone	Isotropic, Flux Decrease	0.76	0.090
2003-07-20/19:11:49	140	310, 29	87, -18	Sunward	Sunward FA	Isotropic	0.50	0.084
2005-07-08/14:45:45	142	101, 42	241, -23	Sunward	Sunward FA	Isotropic/ Flux Decrease	0.58	0.229
2004-11-03/02:45:13	143	53, -45	196, 24	Sunward (Antisunward)	Isotropic	Mixed	0.61	0.227
2005-10-11/15:04:44	151	289, 41	86, -21	Sunward	Loss Cone/ Sunward FA	Isotropic	0.38	0.140

^aDate and time format is year-month-day/time and time is in UT.

4.2 Basic Event Properties

統計解析によると

- Hall磁場のmain磁場の比の平均値 : $\text{peak} \frac{|B_j|}{\langle |B_i| \rangle} \sim 0.51 \pm 0.13$

⇒ **地球の観測値[Øieroset et al., 2001] [Mozer et al., 2002] [Phan et al., 2007]と同程度。**

- normal磁場とmain磁場の比(RXレート)の平均値 : $\frac{\langle |B_j| \rangle}{\langle |B_i| \rangle} \sim 0.16 \pm 0.09$

⇒ **速いリコネクションを示唆。地球の観測値に比べて少し大きい。**

(criteriaによって相対的に激しいRXのみが抜き出されたため。)

4.3 Event Distribution

- Fig.14のベクトルの向きは、current sheet に沿ったX-lineの位置を指し示す。
ベクトルの向きは、平均的なdraping patternと一致している。

⇒ **RXが起きるような電流シートの形成に特別な太陽風の磁場や、
特別な磁気圏の形状は必要ではない。**

- Fig.15から、残留磁場との関連性は見られない。しかしいくつかのイベントは、南半球の高緯度側に位置しており、これらのイベントでは残留磁場が関わっている可能性もある。

4.4 Event Type Examples

夜、
X-lineは反太陽側

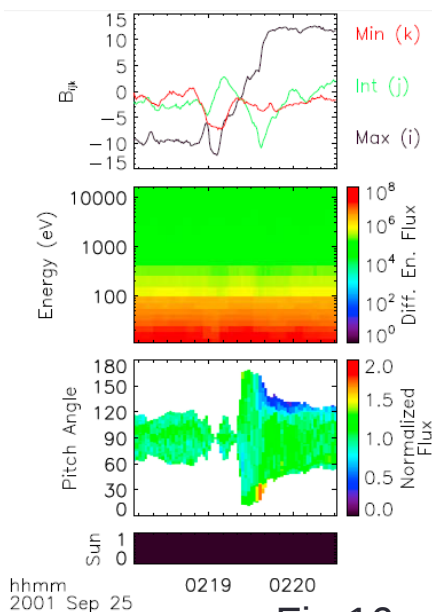


Fig.16

- ・通過前、等方的な
ピッチ角分布
- ・通過後、
ロスコーン分布

Terminator/極、
X-lineは太陽側

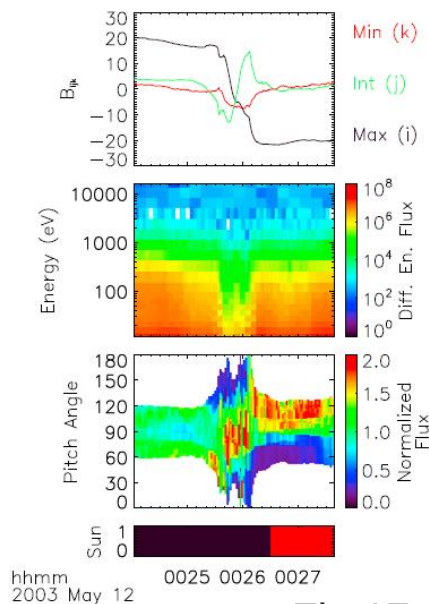


Fig.17

- ・シート内に
電子フラックスの
2つの極小
- ・シート内に
trapped distribution
↓
熱圏とのつながり

Terminator/極、
X-lineは反太陽側

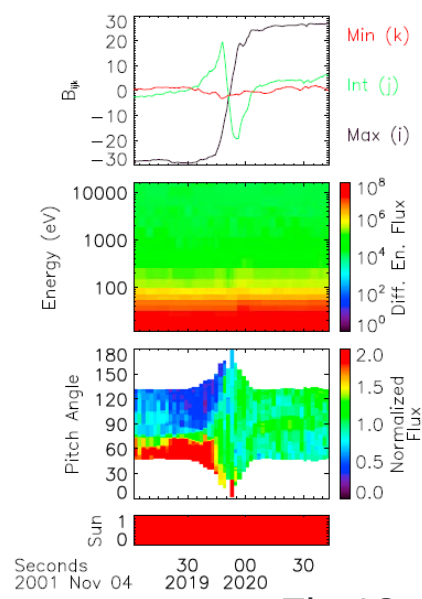


Fig.18

- ・通過前、磁力線
平行方向の電子
の運動
(Hall電流 の一部)

昼

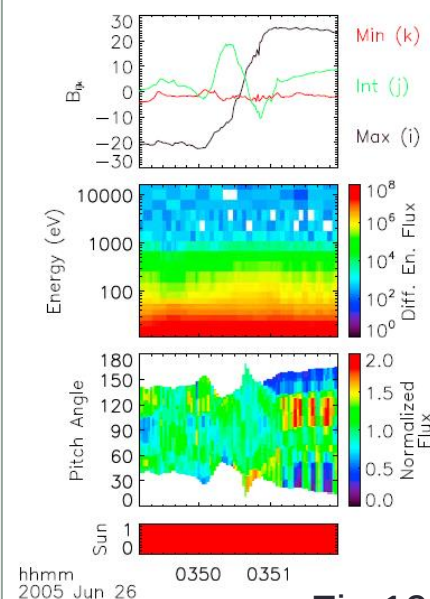


Fig.19

- ・電子フラックスに
激しい変動
↓
境界層での
不安定性か？

4.5 Electron Characteristics

26イベントのピッチ角分布には以下の傾向がある

[A] 衛星がX-lineより太陽方向を通過する場合

- ・電流シート中で、ピッチ角分布は等方的に分布もしくは、trapped distribution (Fig.5、10、17で見られたようなフラックスの減少を含んでいる。)
- ・通過前、通過後で、ピッチ角分布はロスコーン分布、もしくは(かつ)太陽方向の磁場にそった電子の運動が存在。

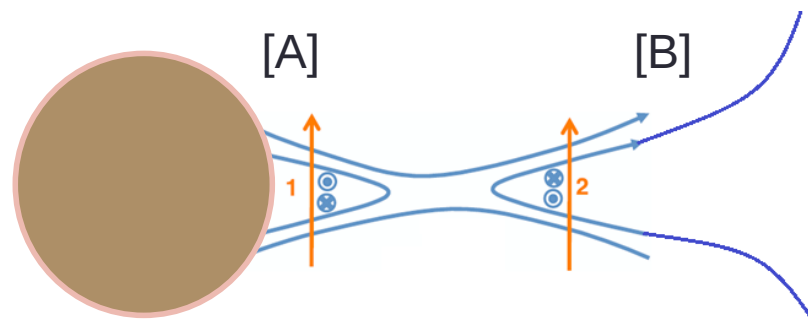
⇒ **磁力線が衝突のある外圈につながっていて、プラズマが失われている**

[B] 衛星がX-lineより反太陽方向を通過する場合

- ・電流シート中で、ピッチ角分布は等方的に分布
- ・通過前、通過後で、ピッチ角分布は等方的な分布かつ(もしくは)ロスコーン分布

⇒ **磁力線が太陽風につながっていて、プラズマが太陽風からアクセスできる。**

(ロスコーン分布はやはり、磁力線の外圈とのつながりで説明できる。)



- 火星において、薄い電流シートの方がRXが起こりやすい。
(理論・モデルで予想される描像と一致)

4.7 External Drivers

- 太陽風動圧が大きいときの方が、RXが起きるような電流シートが形成されやすい。

- IMFの不連続面によるRXより、巻きつきで形成される電流シート内のRXの方が起こりやすい。**

5.Implications and Conclusions

Conclusions

- ・火星の誘導磁気圏内で、電流シート中に磁場の四重極構造がMGSにより観測された。
(磁場の四重極構造は無衝突RXによるもの、MGSはイオン拡散領域を通過。)
- ・イベントの統計解析によって得られた、Hall磁場とmain磁場の比の平均値とnormal磁場とmain磁場の比の平均値(RXレート)は、地球における観測とおよそ一致。
- ・IMFが巻きつくだけでも、RXが起こる電流シートが形成される。
(各々のイベントと残留磁場、IMFの向きの変化に一貫した関連は見られなかった。)

Implications

- ・火星でのRXの観測結果を普遍たらしめるようなグローバルシミュレーションとローカルシミュレーションが必要。
- ・火星のイオン拡散領域は地球尾部に比べ、変動がおだやか
(磁場があまり乱流的でない or 電流シートがゆっくり動いている。)
⇒火星がRXの微視的物理を研究するのに打ってつけの環境かもしれない。
- ・火星でのRXが一般的な現象だとすれば、大気散逸につながる可能性あり。
- ・RXの重要性を調べるには、もっと包括的な観測装置が必要。⇒MAVEN