

第100回 火星勉強会

1. Guo, Z. Z., et al. (2024)
Rapid response of Martian magnetotail to solar wind disturbance: Tianwen-1 and MAVEN joint observations. *GRL*, 51,
<https://doi.org/10.1029/2024GL112399>
2. Ma, X., et al. (2023)
Tianwen-1 and MAVEN observations of Martian oxygen ion plumes. *Icarus*, 406,
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115758>

Takuya Hara (UCB-SSL)

takuya.hara@berkeley.edu / hara@ssl.berkeley.edu

第100回 火星勉強会

1. Guo, Z. Z., et al. (2024)
Rapid response of Martian magnetotail to solar wind disturbance: Tianwen-1 and MAVEN joint observations. *GRL*, 51,
<https://doi.org/10.1029/2024GL112399>

Ma, X., et al. (2023)
Tianwen-1 and MAVEN observations of Martian oxygen ion plumes. *Icarus*, 406,
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115758>

Takuya Hara (UCB-SSL)
takuya.hara@berkeley.edu / hara@ssl.berkeley.edu

火星プラズマ・大気散逸科学に関する勉強会

各回担当者及びレジュメ

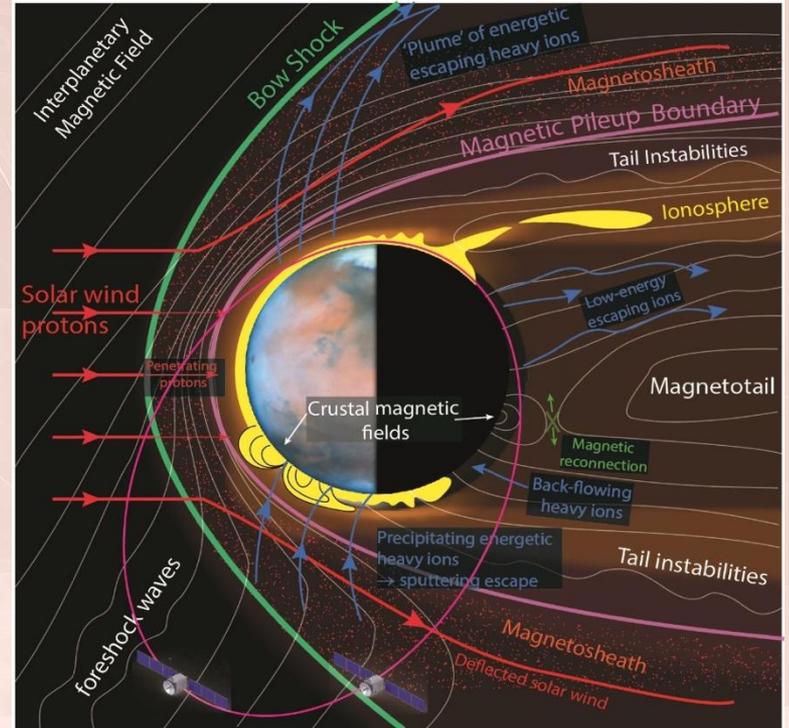
- 第1回勉強会 (レジュメ)
 日時：2010年6月22日(火)
 担当者：益永 圭 (東北大)
 取り扱い論文：Lundin et al., 2009, Atmospheric origin of cold ion escape from Mars, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 36, doi:10.1029/2009GL039341.
- 第2回勉強会 (レジュメ)
 日時：2010年7月13日(火)
 担当者：松本 洋介 (名大STE研)
 取り扱い論文：Gurnett et al., 2010, Large density fluctuations in the martian ionosphere as observed by the Mars Express, *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, doi:10.1016/j.icarus.2009.02.019.
- 第3回勉強会 (レジュメ)
 日時：2010年7月27日(火)
 担当者：久保田 康文 (ISAS/JAXA)
 取り扱い論文：Chaufray et al., 2007, Mars solar wind interaction: Formation of the Martian corona and atmosphere, *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, E09009, doi:10.1029/2007JE002915.
- 第4回勉強会 (レジュメ)
 日時：2010年8月24日(火)
 担当者：金尾 美穂 (ISAS/JAXA)
 取り扱い論文：Chassefiere et al., 2007, The combined effects of escape and magnetic field histories at Mars, *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, doi:10.1016/j.pss.2006.02.003.
- 第5回勉強会 (レジュメ)
 日時：2010年9月21日(火)
 担当者：原 拓也 (名大STE研)
 取り扱い論文：Edberg et al., 2009, Rosetta and Mars Express observations of the influence of high solar wind speed on the Martian atmosphere, *Ann. Geophys.*, Vol. 27, 4533-4545, doi:10.5194/angeo-27-4533-2009.
- 第6回勉強会 (レジュメ)
 日時：2010年10月12日(火)

論文概要 (Guo et al., 2024)

- 2022年5月22日頃に太陽風擾乱(CIR)が火星に到来した。
- 当該事例時に、米国のMAVENは上流太陽風領域にいた。一方で、中国のTianwen-1 (TW1)は下流の誘導磁気圏尾部を通過していた。
- 上流太陽風条件(動圧・IMF clock angle)の変化に呼応して、磁気圏尾部構造が変化した。応答時間は1分未満だと推定された。
- 動圧・IMF clock angleの変化が原因で、誘導磁気圏尾部の周期的変動を誘起した可能性がある。

Introduction: 火星誘導磁気圏尾部

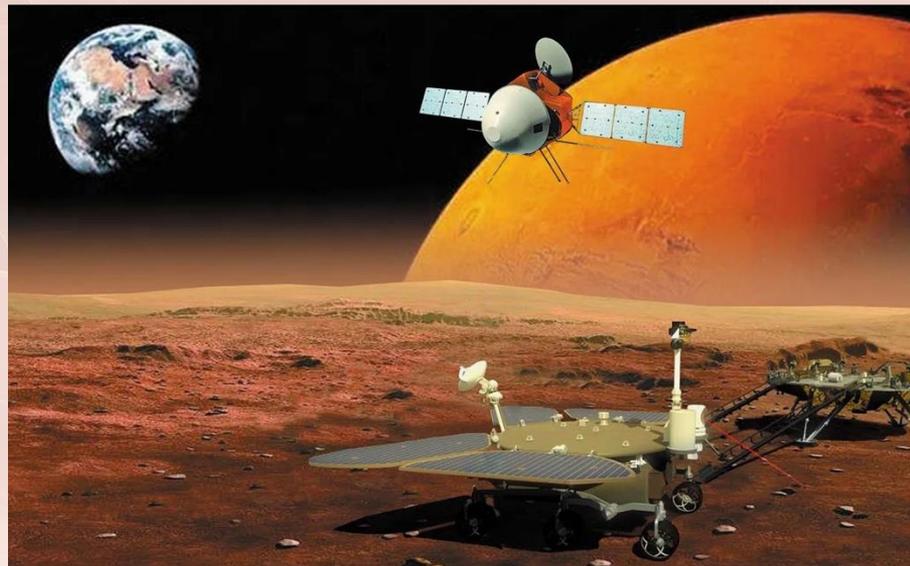
- 時空間的に変動に富む太陽風磁場と非対称な火星の残留磁場が相互作用した結果、複雑な誘導磁気圏が形成されている。
- 誘導磁気圏尾部からの宇宙空間へのイオン流出は、現在の火星大気流出機構にとって、主要な役割を果たす。
- これまで火星誘導磁気圏尾部における多様なダイナミクスが報告されている:
 - Twisted magnetotail (e.g., *DiBraccio+*, 2018)
 - 磁気張力によるイオン加速 (e.g., *Dubin+*, 2011; 2012),
 - カレントシートのフラッピング (e.g., *DiBraccio+*, 2017),
 - 磁気リコネクション (e.g., *Harada+*, 2015; 2017),
 - フラックスロープ (e.g., *Hara+*, 2017; 2022).



Courtesy of R. Lillis (UCB-SSL)

Introduction: 中国初の火星オービター-Tianwen-1(天問一号)

- 中国にとって初めて成功した火星探査計画で、2020年7月打ち上げ、2021年2月MOI、現在も運用中である。
- 近火点: ~265 km, 遠火点: ~12,000 km
- 軌道周期: ~7.8 h
- ※ (軌道構成はMEXに似ている)
- オービターには、荷電粒子計測器・磁力計を搭載している。
- 2021年以降、中国からのMAVENデータのダウンロードが急激に増加した。
- 中国は先んじて、MAVENとTianwen-1による火星プラズマ環境の多点同時観測を実現している。



[Wan et al. \(2020\)](#)

本研究で使用されたデータセット

MAVEN: 全てのデータはNASA/PDSから取得可能

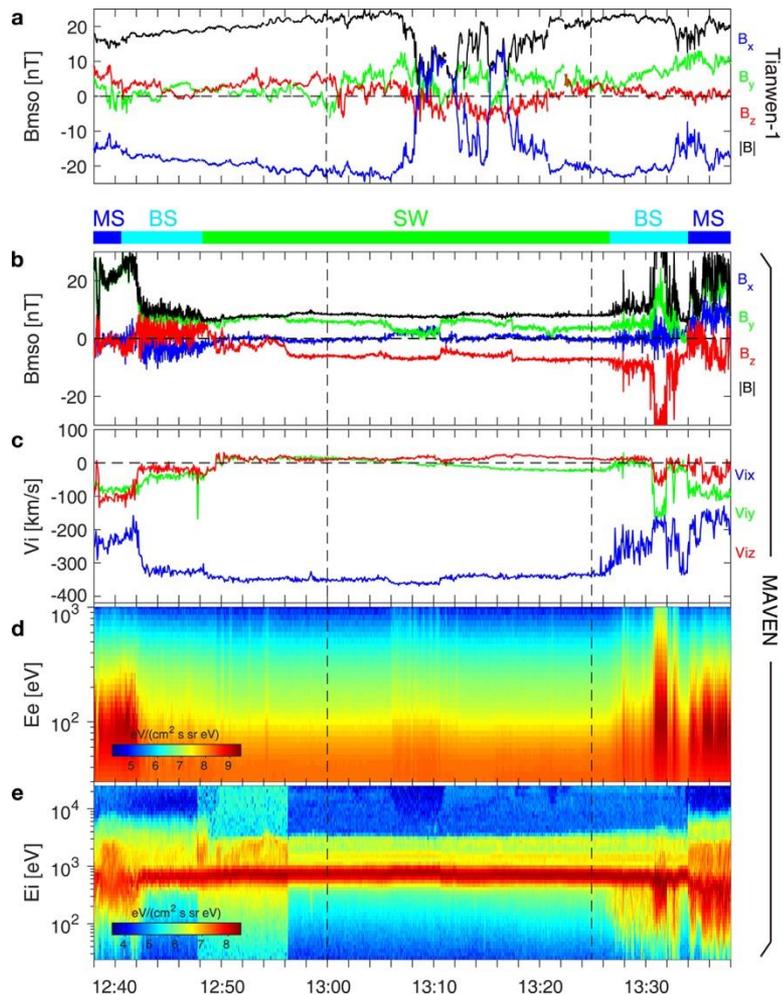
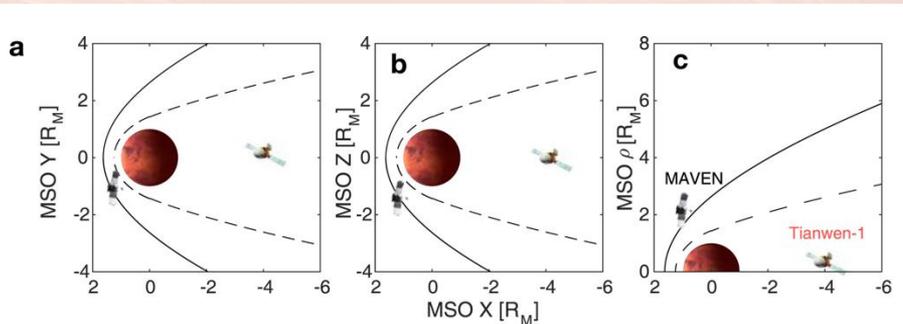
- 磁場: MAG – [Connerney et al. \(2015\)](#)
- イオン: SWIA – [Halekas et al. \(2015\)](#)
- 電子: SWEA – [Mitchell et al. \(2016\)](#)

Tianwen-1 (TW1):

- 磁場: MOMAG (32 Hz) – [Liu et al. \(2020\)](#)
 - 以下からデータ取得可能:
 - <https://moon.bao.ac.cn/web/enmanager/> (公式)
 - http://space.ustc.edu.cn/dreams/tw1_momag/ (PIサイト)
- ※ (↑IDL/SPEDASによるデータ取得に成功しているので、要望があれば私まで)

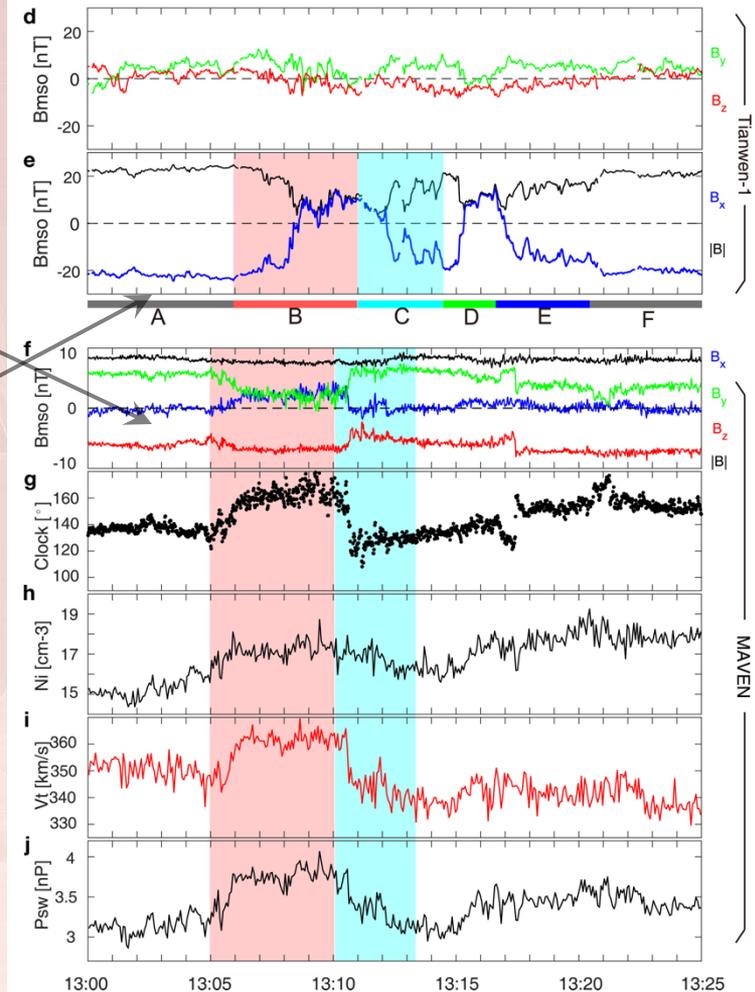
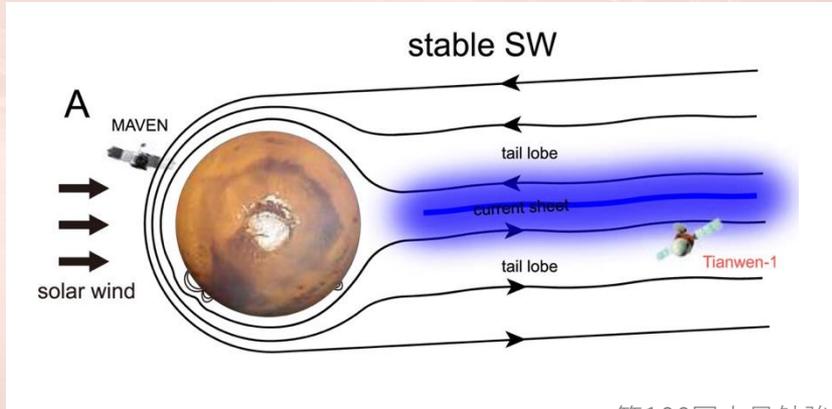
観測結果(1)

- MAVENは上流太陽風を、TW1は下流の誘導磁気圏尾部を通過している。
- TW1は当該期間中に、**Bx成分の反転**によって特徴づけられるカレントシートを複数回にわたって横切っている。



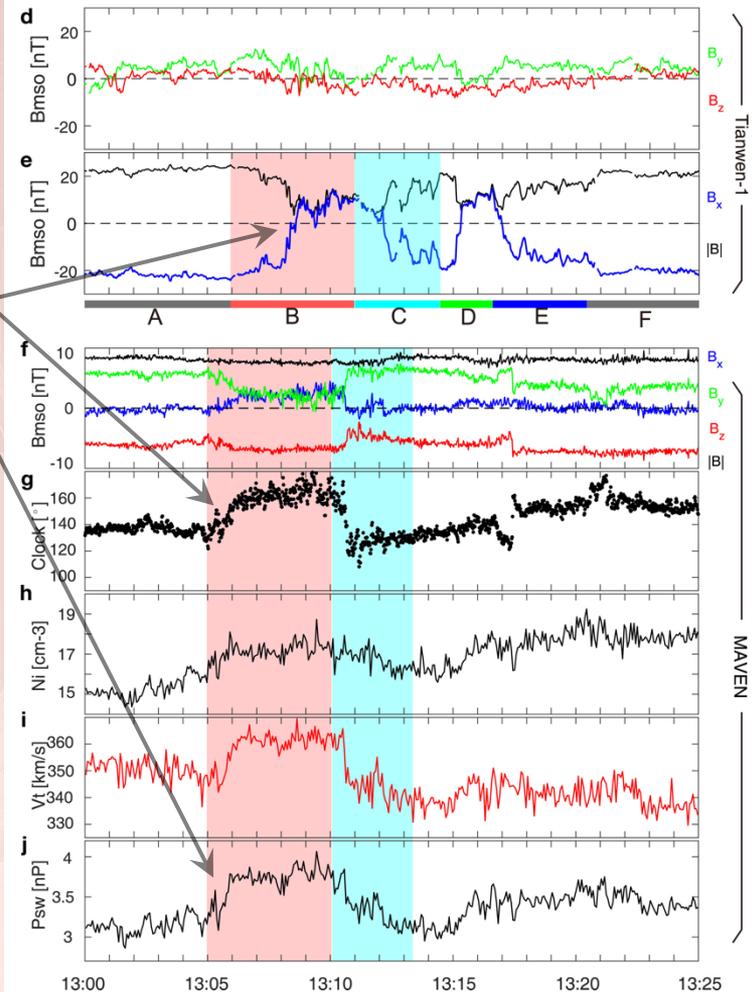
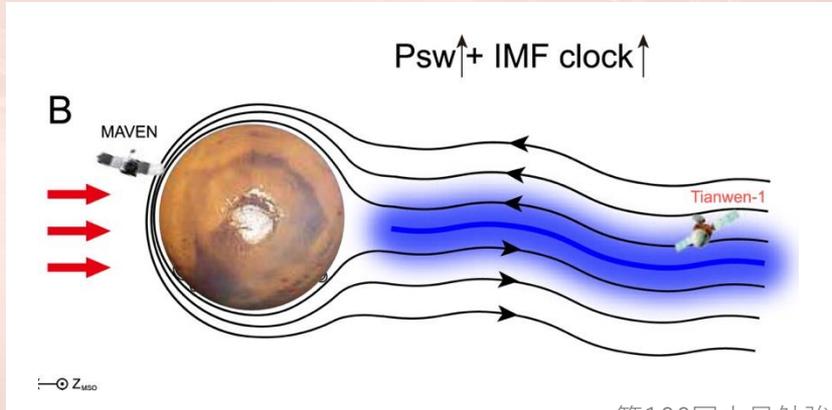
観測結果(2): Period A

- MAVENの上流IMFは+By/-Bz、|B|~20 nTで安定しているのですが、磁場のドレープを考えると、Bx成分はプラスの朝方側にいる。
- TW1について、Bx成分はマイナスなので、夕方側のTail lobeにいたろう(参照下図: Figure 3A)。



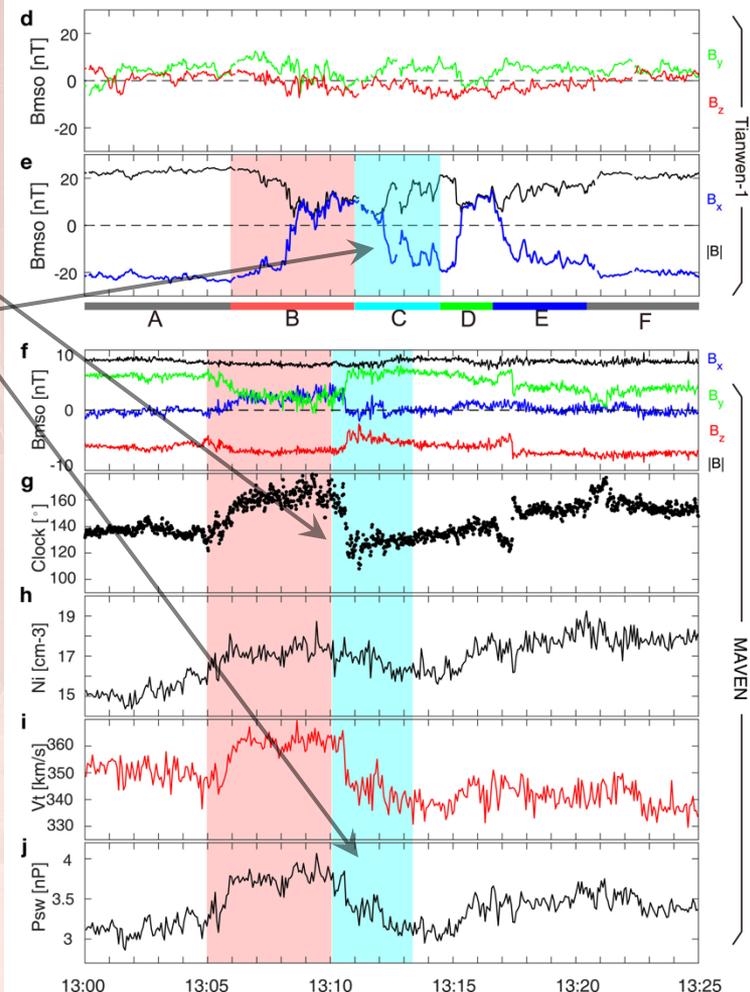
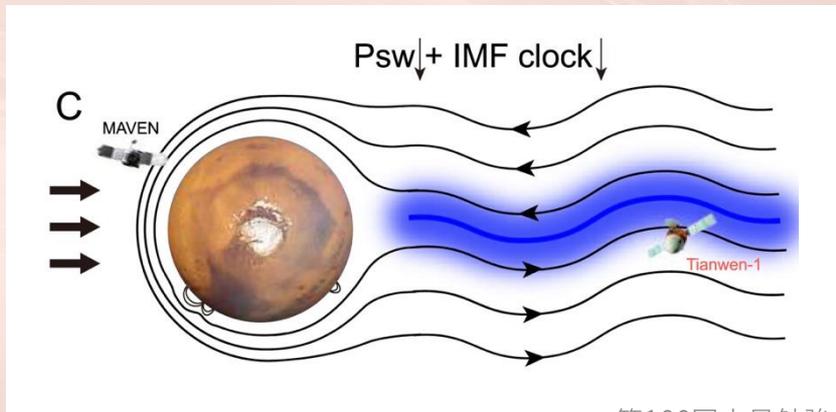
観測結果(2): Period B

- MAVENの上流太陽風は、動圧が上昇、IMF clock angleが 30° 変化した。
 - 当該時間帯において、TW1は、1回目のカレントシートを通過した。
- カレントシートフラッピングによって、TW1は夕方から朝方側に向けてカレントシートを横切った(下図: Figure 3B)。



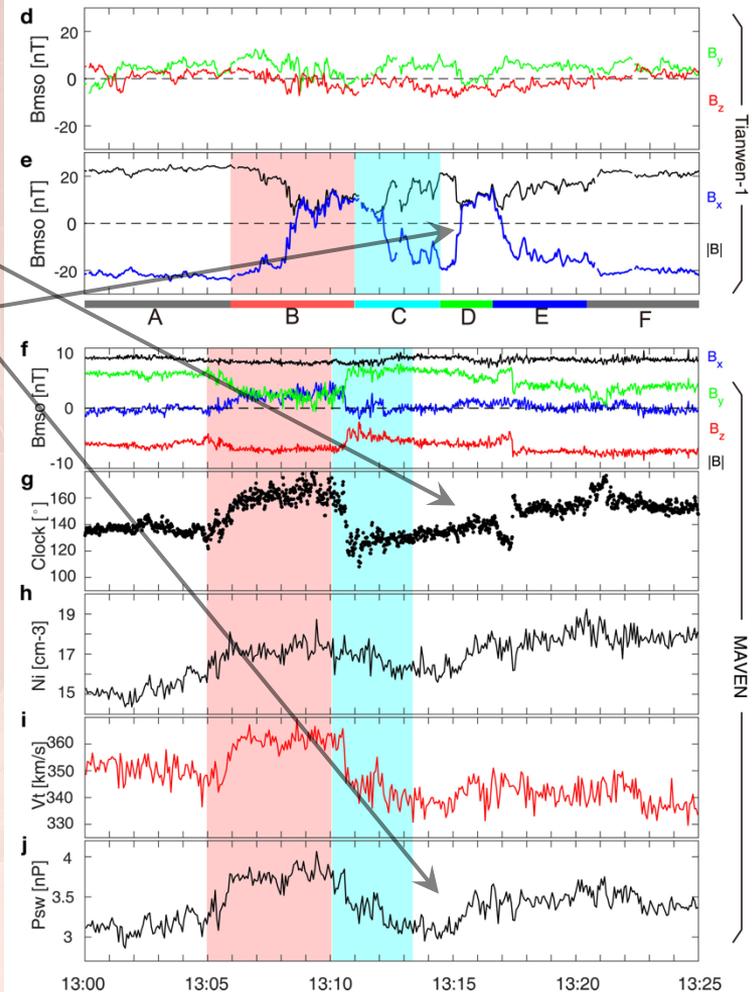
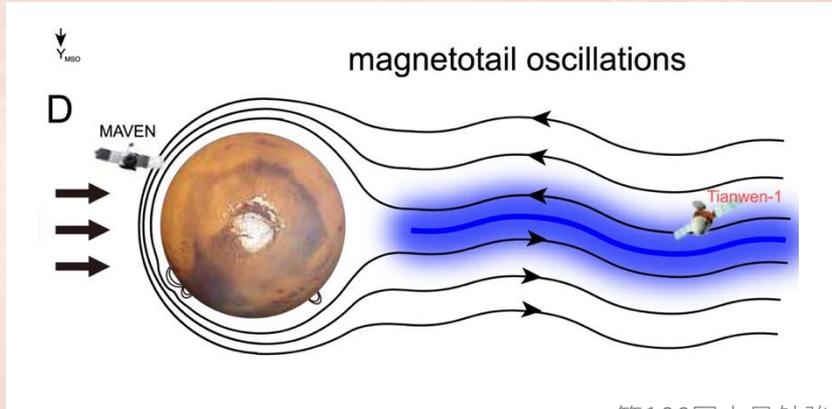
観測結果(2): Period C

- MAVENの上流太陽風は、動圧が低下、IMF clock angleが $\sim 50^\circ$ 変化した。
 - 当該時間帯において、TW1は、2回目のカレントシートを通過した。
- 尾部の向きが変化した結果、TW1は朝方から夕方方側に向けてカレントシートを再び横切った(下図: Figure 3C)。



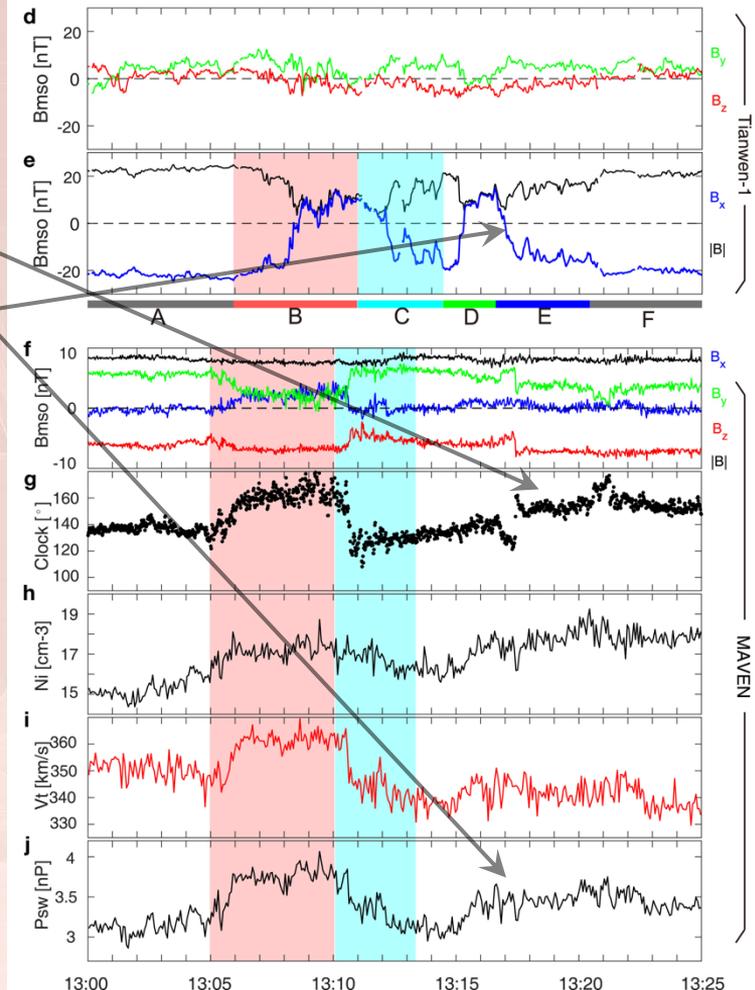
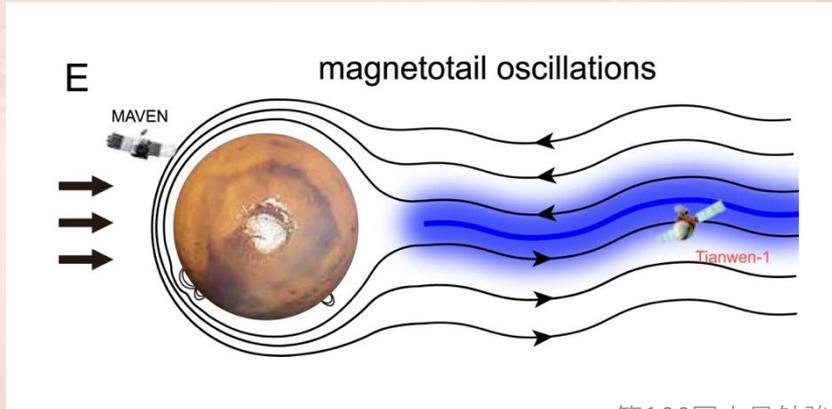
観測結果(2): Period D

- MAVENの上流太陽風は、前期間と比べてほぼ安定した状態を保つ。
 - 当該時間帯において、TW1は、3回目のカレントシートを通過した。
- 上述した2つの太陽風変動の影響が原因で、磁気圏尾部の周期変動している(下図: Figure 3D)。



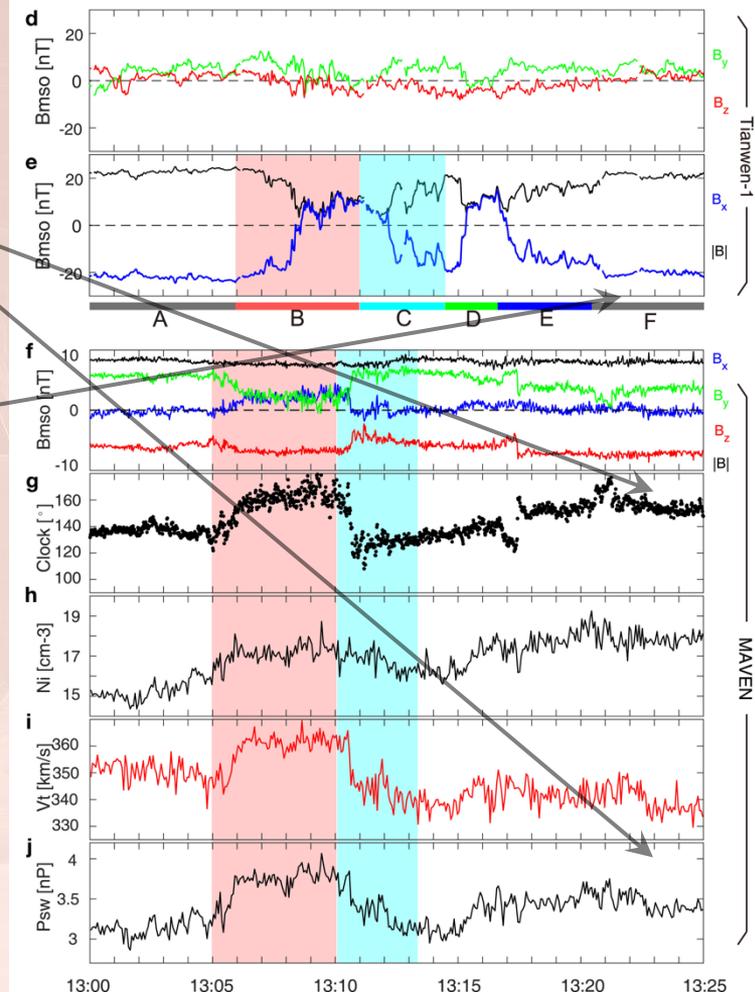
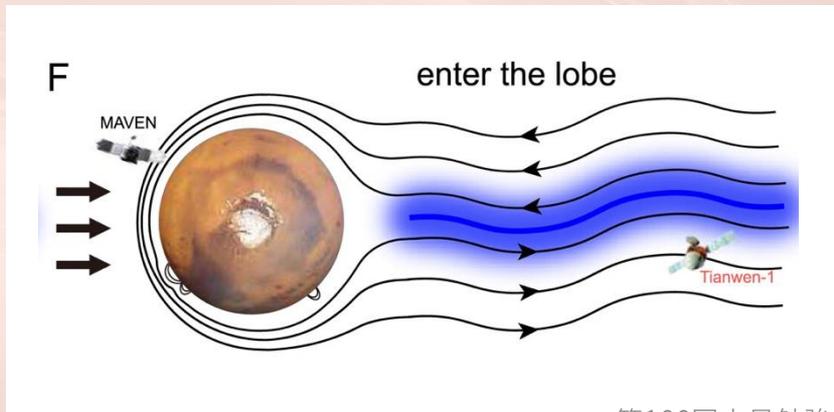
観測結果(2): Period E

- MAVENの上流太陽風は、動圧変化は不明瞭だがIMFは安定している。
 - 当該時間帯において、TW1は、4回目のカレントシートを通過した。
- 太陽風変動に伴う磁気圏尾部の周期変動が継続している(下図: Figure 3E)。



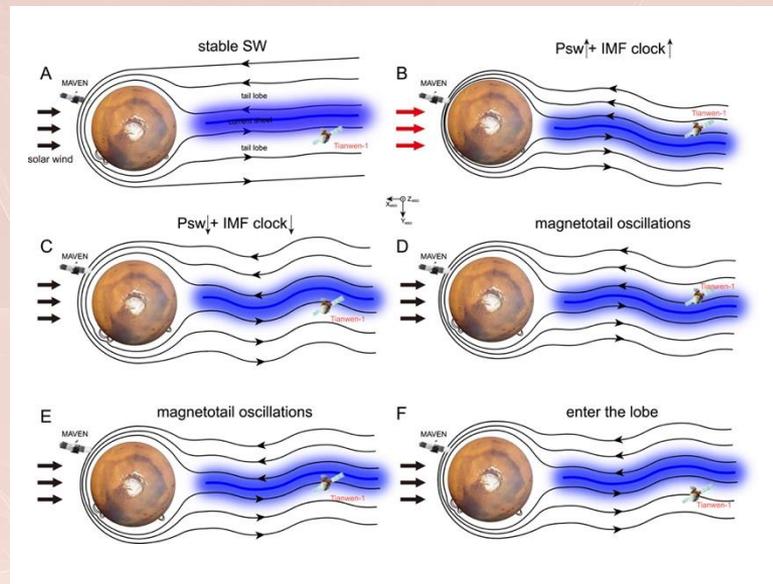
観測結果(2): Period F

- MAVENの上流太陽風は、引き続き動圧変動は不明瞭で、IMF clock angleは $\sim 150^\circ$ で安定している。
- TW1について、 B_x 成分はマイナスなので、再び夕方側のTail lobeに戻ったのだろう(下図: Figure 3F)。



本研究結果のまとめと考察(1)

- MAVENが観測した上流太陽風変動に呼応して、火星誘導磁気圏尾部が急峻に変動している。
 - 時間差は**Period B**で~56秒、**C**で~50秒。
 - 2衛星の距離(~5.2 R_M)と太陽風速度(~350 km/s)を考慮すると、到達時間差は~50秒と概算され、ほぼ一致する。
 - 最初の2回のCS通過は、太陽風変動が直接的な要因だろう。
- 一般的に、動圧パルスの伝播速度はAlfven速度 or 速進磁気音速で、到達には数分かかるが([Harada+, 2017](#))、本事例では動圧変動(~20%)が小さいため、動圧パルスの発生には不十分かもしれない。

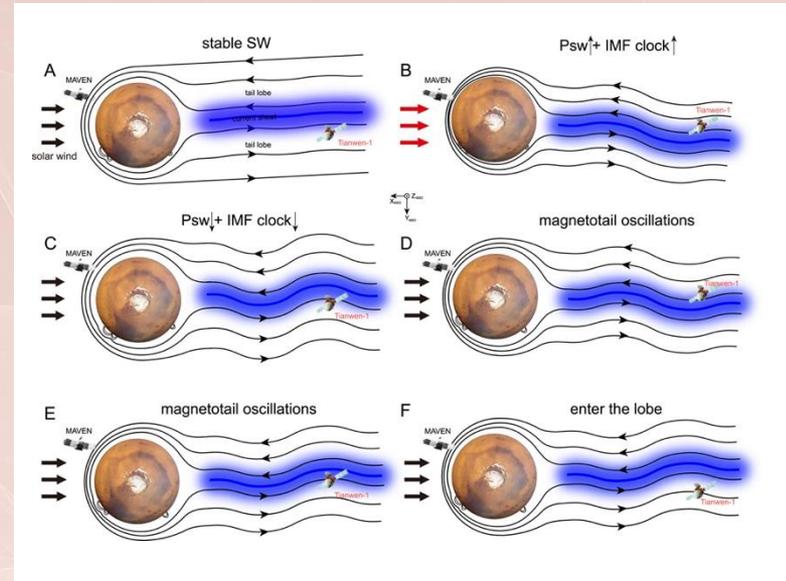


本研究結果のまとめと考察(2)

- CSフラッピングについて、MAVENとTW1のBx成分の相互相関解析すると、1回目が $\Delta t=205\text{s}$ ($cc=0.65$)で、2回目は $\Delta t=130\text{s}$ ($cc=0.73$)と算出される。
- TW1の軌跡をMAVENの上流太陽風観測に基づいてMSE系に変換すると、CSの厚みは、1回目が272km、2回目が340kmと推定できる。

↓

- 先行研究のCSの厚みに比べて、わずかに薄いため、通常のCS通過と考えるよりも、CSフラッピングによる複数回のCS通過と解釈すべきだろう。
- 動圧変動とIMF clock angleのどちらが主要な役割を果たしたかは現時点では不明。

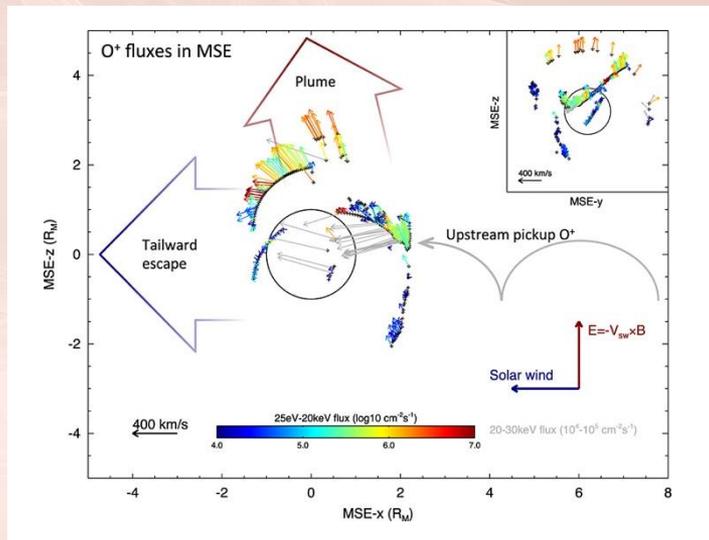


論文概要 (Ma et al., 2023)

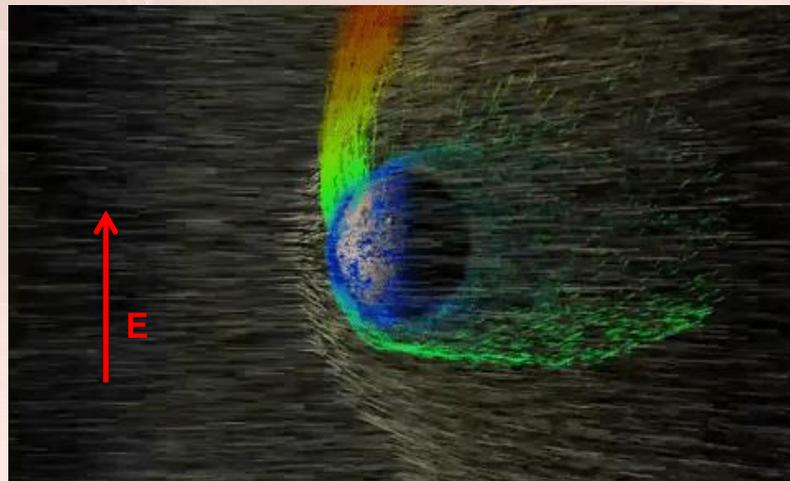
- 火星起源の O^+ , O_2^+ の重イオンが太陽風にピックアップされ、太陽風電場によって加速されて宇宙空間へと流出する、**Polar Plume**と呼ばれる大気流出現象について、**MAVEN**と**TW1**が2021年12月の1ヶ月に観測したデータを解析した。
- **TW1**の遠火点の方が**MAVEN**よりも高高度であるため、**TW1**の方がより高エネルギーまで加速された**Plume ions**を観測することができた。
- **Plume ions**は**MSE**系の**+E**半球の中低緯度から主にピックアップされたと推定でき、このような特徴は先行研究の結果と矛盾しない。

Introduction: 太陽風ピックアップ(Polar Plume)

- 現在の火星の主要なイオン流出の形態として、太陽風ピックアップ(Polar Plume)と Tailward Escape に大別できる ([Dong et al., 2015](#))。
- 一般的に、火星のピックアップイオン(PUI)の旋回半径は、惑星サイズよりも十分に大きいため、Polar Plumeは太陽風電場が惑星から離れる方向を向いた+E半球で観測される。



[Dong et al. \(2015\)](#)



本研究で使用されたデータセット

解析期間: 2021年12月の1ヶ月間

MAVEN: 全てのデータはNASA/PDSから取得可能

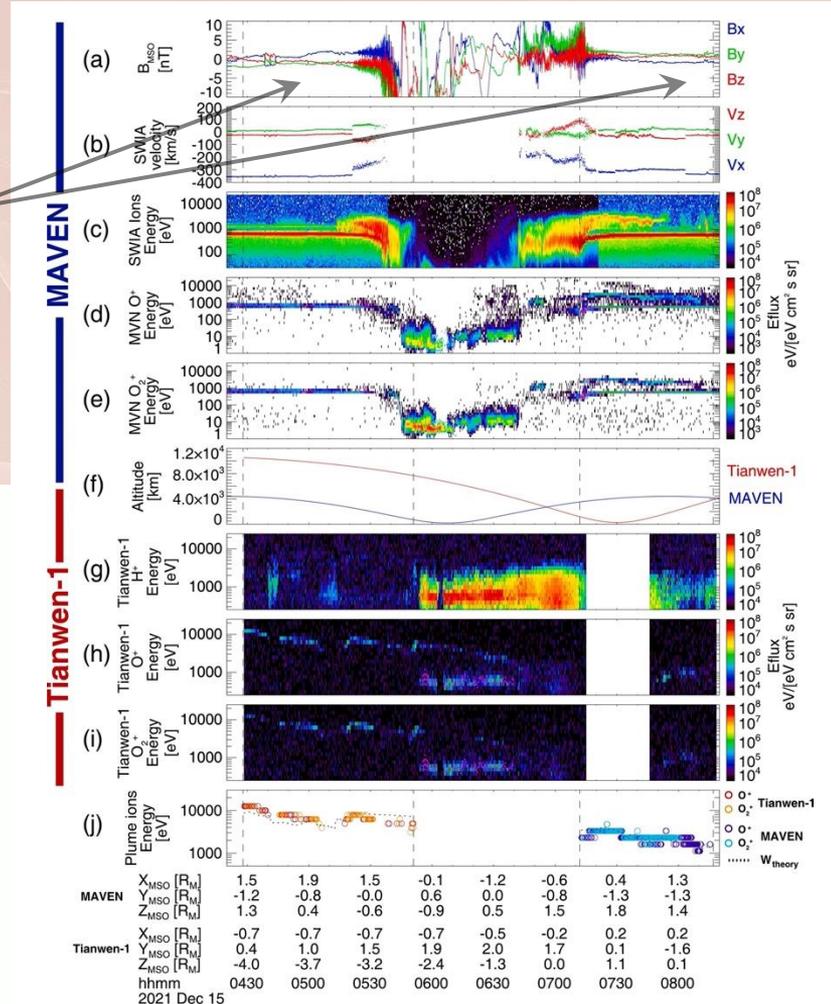
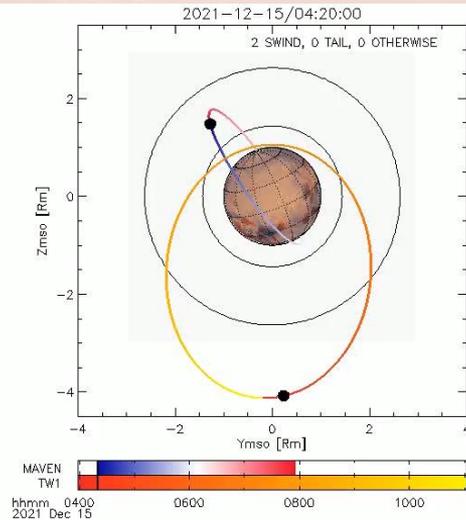
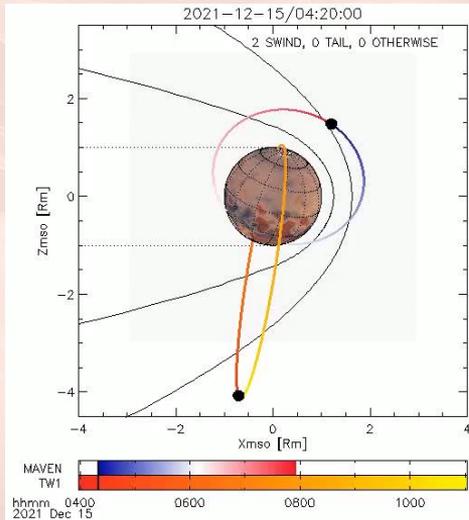
- 磁場: MAG – [Connerney et al. \(2015\)](#)
- イオン: SWIA – [Halekas et al. \(2015\)](#), STATIC – [McFadden et al. \(2015\)](#)

Tianwen-1 (TW1):

- MINPA (Mars Ion and Neutral Particle Analyzer) – [Kong et al. \(2020\)](#)
 - FOV: 360° azimuthal x 90° deflection
 - エネルギー範囲: ~3 eV to ~25 keV / 時間分解能 16秒
 - 2つのモード:
Default mode (8M x 16A x 4D x 40E), Ionosphere mode (32M x 48E)

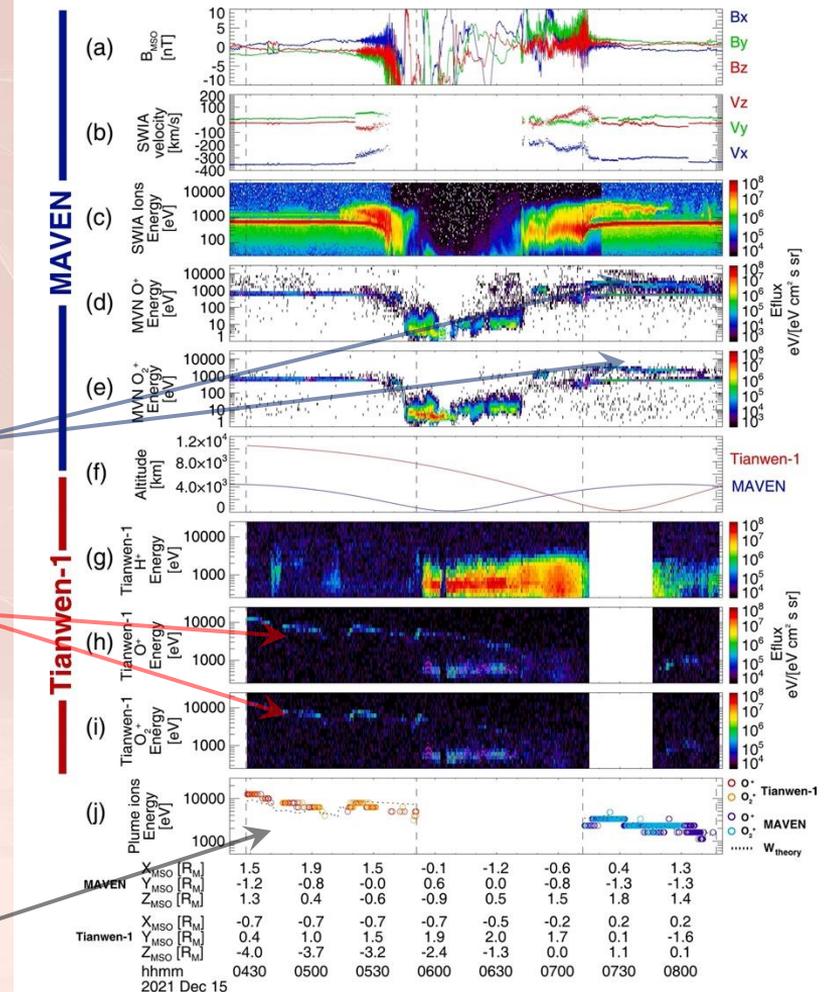
事例解析 (Dec 15, 2021)

- MAVENが観測した太陽風はノミナルだが、インバウンドとアウトバウンドでIMFの向きが反転している。
- 太陽風電場はインバウンドが $-Z_{MSO}$ で、アウトバウンドが $+Z_{MSO}$ を向いている。



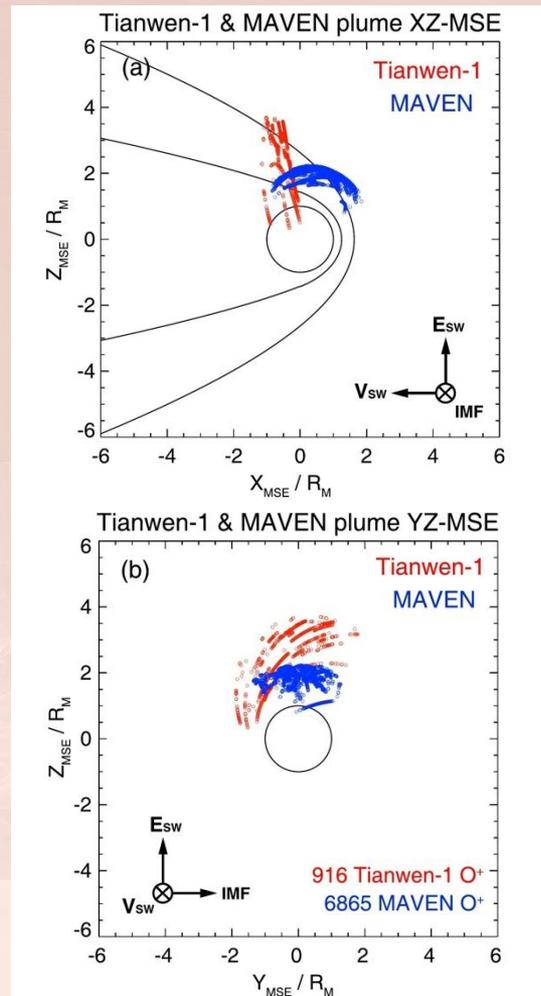
事例解析 (Dec 15, 2021)

- MAVENが観測した太陽風はノミナルだが、インバウンドとアウトバウンドでIMFの向きが反転している。
- 太陽風電場はインバウンドが $-Z_{MSO}$ で、アウトバウンドが $+Z_{MSO}$ を向いている。
- MAVENはアウトバウンド時に $+Z_{MSO}$ にいたため、 $\sim 1-4$ keVに加速された O^+ , O_2^+ を観測した。
- TW1はインバウンド時に $-Z_{MSO}$ にいたため、 $\sim 3-14$ keVにさらに加速された O^+ , O_2^+ を観測した。
- 観測されたPUIは最高到達エネルギーよりも十分に低いため、ピックアップされた場所を $+E$ 半球の 30° と仮定してエネルギー W_{theory} を計算すると観測結果と整合する。



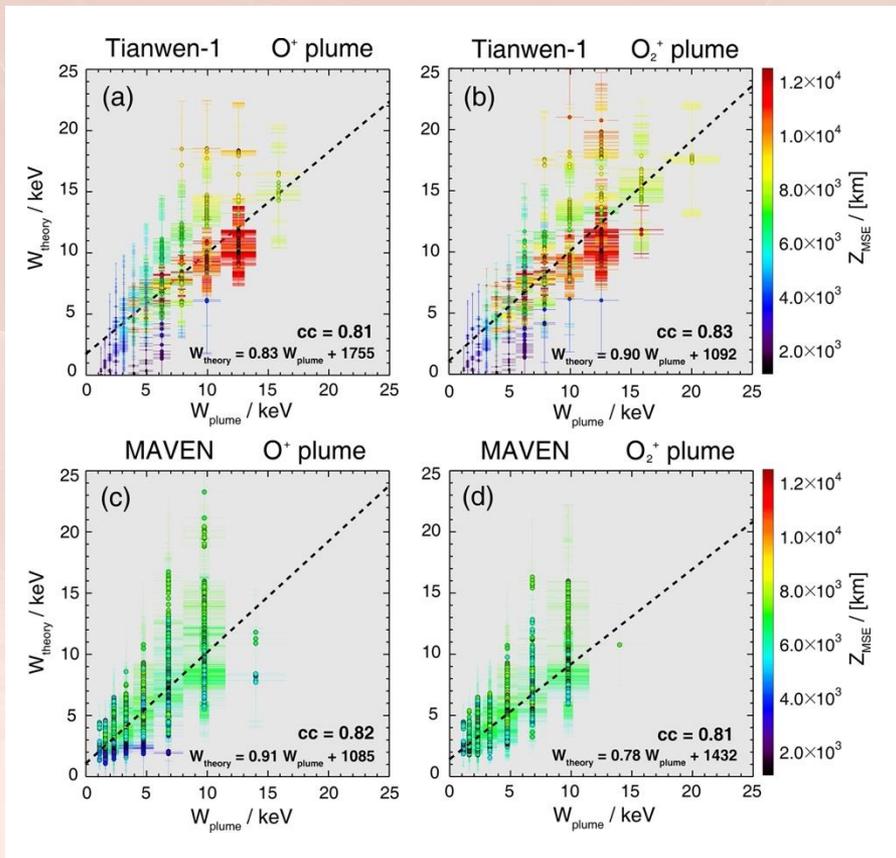
統計解析結果(1)

- 2021年12月の準統計解析を実施した。
- 対象は、+E半球の太陽風とシース領域に限定した。
- Radial IMFの期間は除外した。
- MAVEN (34 orbits):
 - 6,865 O⁺ plume data
 - 6,852 O₂⁺ plume data
- TW1 (31 orbits):
 - 916 O⁺ plume data
 - 1,012 O₂⁺ plume data
- 軌道の成約上、MAVENは $\sim 0.5-2.2R_M$ までしかカバーできないが、TW1は $\sim 0.5-4.0R_M$ までカバーすることができる。



統計解析結果(2)

- 観測したPUIのエネルギー W_{plume} と W_{theory} の相関を調べたところ、両方の粒子種について、相関係数が**0.8**を超える結果が両方の衛星から得られた。
→ **Plume ions**は対流電場によって加速
- TW1**の $Z_{MSE} < 1R_M$ の近傍の結果について、線形フィッティングの結果から外れているが、**+E**半球のより低緯度からピックアップされている可能性がある。
- TW1**の方が**MAVEN**よりも、**10 keV**を超えるPUIが観測されている。**TW1**の遠火点が**MAVEN**より高高度であるのが原因だと考えられる。

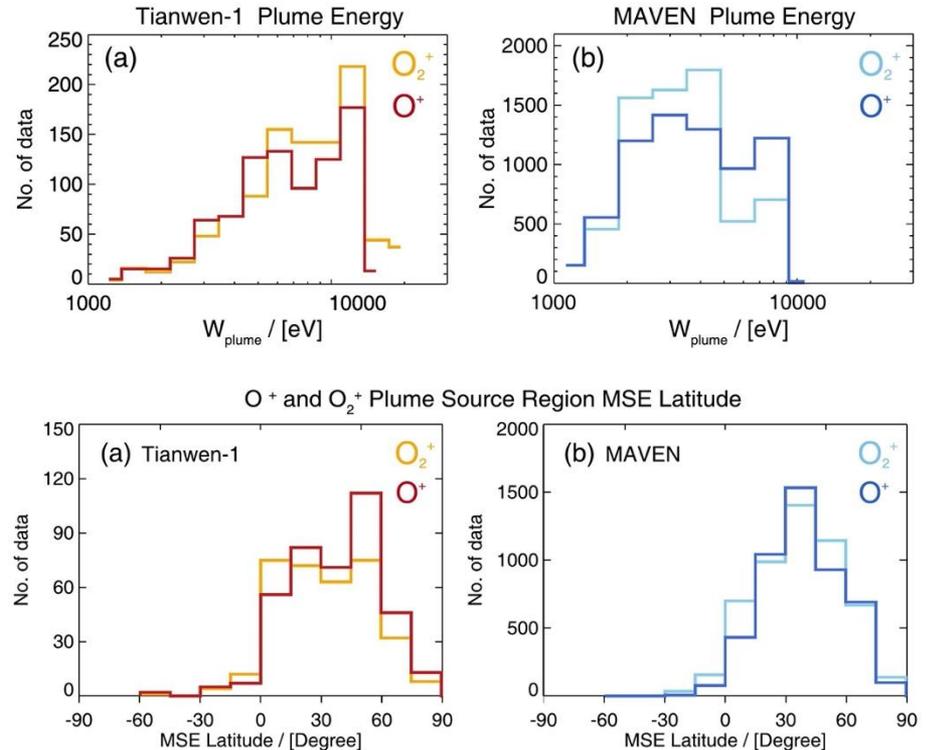


本研究結果のまとめと考察(1)

- これまでの衛星観測では、磁気シース・誘導磁気圏近傍でもkeV帯まで加速された火星の重イオンは観測されたことがある (*Dubinin et al., 2006; Liemohn et al., 2014*)。
- これまでの数値シミュレーションでは、磁気シース内の対流電場の分布は一様で、対流電場は、太陽風中の約2倍大きくなる (*Fang et al., 2008; Sakakura et al., 2022*)。
 - 本研究の W_{theory} は主に太陽風中の対流電場を用いているが、 $W_{plume} < W_{theory}$ になる原因か。
 - シースの対流電場は単純に $+Z_{MSE}$ ではないため、本研究の見積もりは不十分かも。
 - シースと太陽風の対流電場から求めたPUIのエネルギーの比は ~ 1.17 で、数値実験の推定である2倍より十分に小さいため、 W_{theory} の不確定性は15%程度になる。
- 従来のMSE系への座標変換には、1衛星の単独観測では1軌道で平均した太陽風情報を使わざるを得なかったが、事例解析でも分かるように、PUIの振る舞いは上流太陽風条件に強く依存するため、“リアルタイム”の太陽風データで対流電場を決めるべき。

本研究結果のまとめと考察(2)

- 観測されたPUIは主にジャイロフェイズの初期のものだと仮定して、PUIが観測された位置、エネルギー、対流電場から、MSE系におけるPUIのソース緯度を推定した結果、MAVENもTW1も粒子種にかかわらず、MSE系の+E半球の中低緯度に分布すると推定された。
- [Sakakura et al. \(2022\)](#)で提唱された、PUIがピックアップされた場所にホットスポットがあるとされた領域と合致する。
- ジャイロ半径は O^+ と O_2^+ で異なるが、観測されたPUIのエネルギーはおおむね同じであるため、ピックアップされた場所は O^+ と O_2^+ で非常に近い領域かも。



本論文に対する発表者の所感

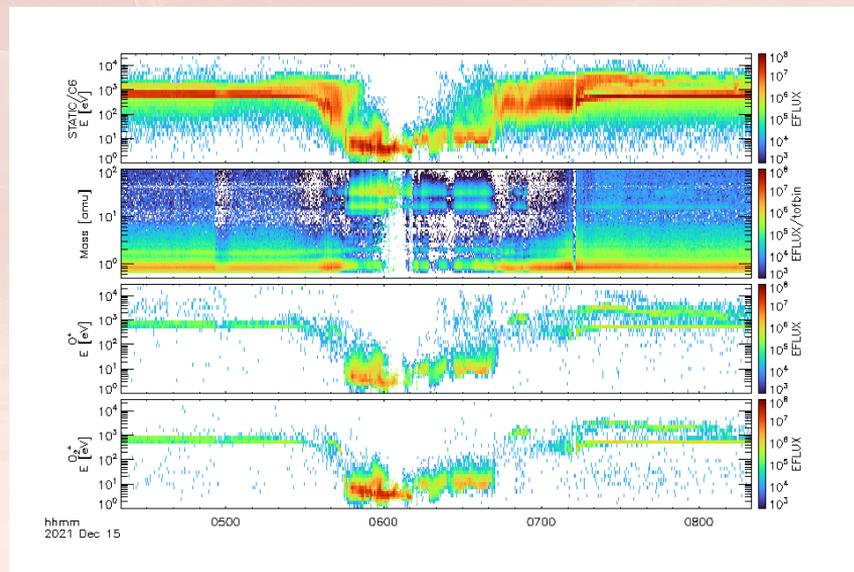
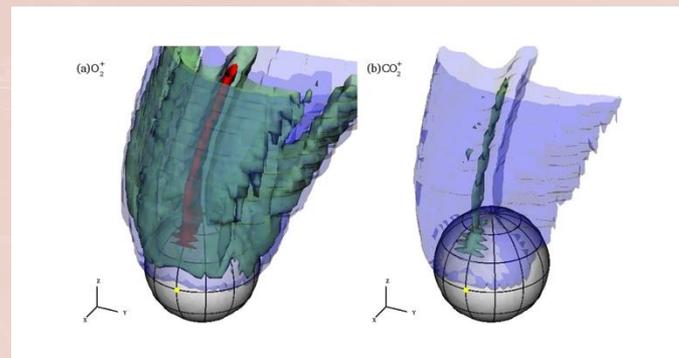
1. [Sakakura et al. \(2022\)](#)について:

本論文は、坂倉論文を頻繁に引用しているが、坂倉論文では、分子イオンのピックアップに対してホットスポットが存在することに言及しているのであって、 O^+ のピックアップについては、本論文結果と矛盾するのでは...?

2. O^+ と O_2^+ で観測されたPUIのエネルギーがおおむね同じ要因について:

本論文のFigure 1で、プロトンのコンタミがそのままの状態を描画されている。(少なくとも)STATICのコンタミ・ノイズ除去処理は十分だったのか? 計測器の視野も考慮に入れて解析したのか?

```
IDL> mvn_sta_l2_load, sta_apid='c6', $
      iv_level=4, /tplot
```



本論文に対する発表者の所感

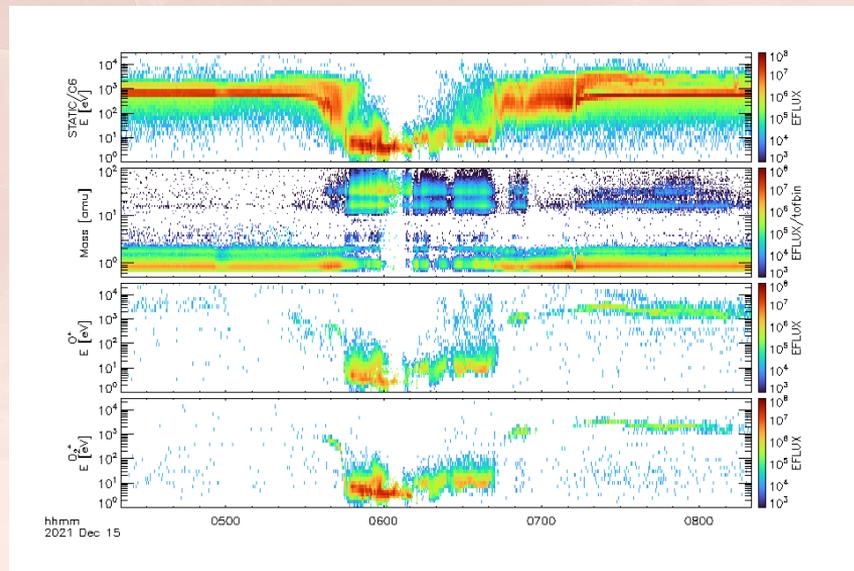
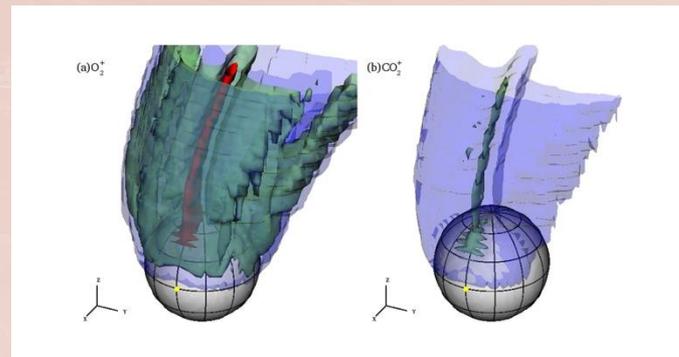
1. [Sakakura et al. \(2022\)](#)について:

本論文は、坂倉論文を頻繁に引用しているが、坂倉論文では、分子イオンのピックアップに対してホットスポットが存在することに言及しているのであって、 O^+ のピックアップについては、本論文結果と矛盾するのでは...?

2. O^+ と O_2^+ で観測されたPUIのエネルギーがおおむね同じ要因について:

本論文のFigure 1で、プロトンのコンタミがそのままの状態を描画されている。(少なくとも)STATICのコンタミ・ノイズ除去処理は十分だったのか? 計測器の視野も考慮に入れて解析したのか?

```
IDL> mvn_sta_l2_load, sta_apid='c6', $
      iv_level=4, /tplot
```



2020年代後半における火星電磁気圏の多点同時観測時代の到来

- *Entering a “Golden Era” of Mars Magnetospheric investigation*
- *Up to 7 SC w/ relevant instrumentation orbiting simultaneously.*

	<i>When</i>	<i>B-field</i>	<i>Electrons</i>	<i>Topology (e⁻ & B)</i>	<i>Ion fluxes</i>	<i>Thermal plasma</i>	<i>Aurora detection</i>	<i>Energetic particles</i>
<i>Mars Express</i>	<i>2004-</i>	Yellow	Green	Red	Green	Red	Yellow	Yellow
<i>MAVEN</i>	<i>2014-</i>	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
<i>Tianwen-1</i>	<i>2021-</i>	Green	Red	Red	Green	Red	Red	Green
<i>EMM</i>	<i>2021-</i>	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Yellow
<i>MMX</i>	<i>2027-30</i>	Green	Red	Red	Green	Red	Red	Green
<i>ESC Blue</i>	<i>2027-</i>	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow
<i>ESC Gold</i>	<i>2027-</i>	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow

Table 1.2: Overview of plasma observations of Mars (reproduced of *Barabash and Lundin* [2006])

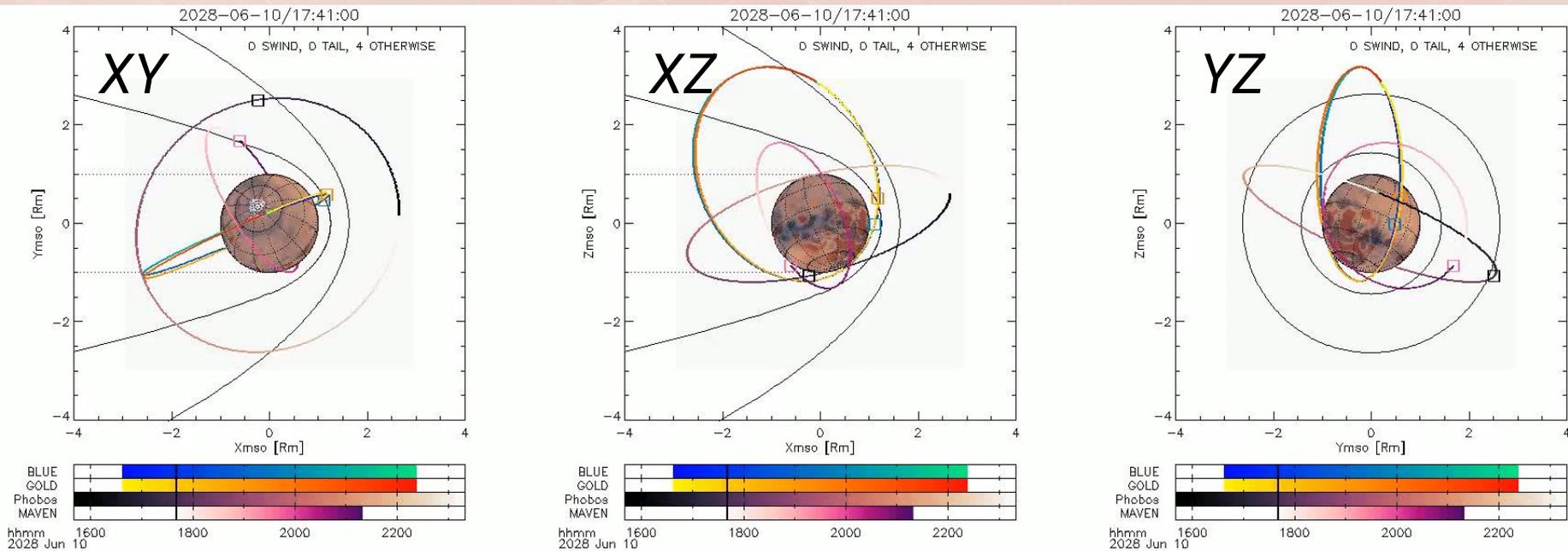
Mission (launch)	B field	E field Waves	e^-	Ion ^a	Ion species	Thermal plasma	Neutral atoms	Comment/results
Mariner 4 (1964)	○	×	×	○	×	×	×	Plasma probe failed
Mars probes (1971-1973)	○	×	○	○	×	×	×	Basic idea on the type of interaction
Viking 1/2 (1975)	×	×	×	×	×	○	×	Ionospheric profile during entry and descent
Phobos 1 (1988)	○	○	○	○	○	○	×	Mission was failed.
Phobos 2 (1988)	○	○ ^b	○	○	○	○	×	Limited (2 months) operation
Mars Observer 1 (1992)	○	×	○	×	×	×	×	Mission was failed.
Mars-96 (1996)	○	○	○	○	○	×	○	Mission was failed.
Nozomi (1998)	○	○	○	○	○	○	×	Mission was failed.
MGS (1996)	○	×	○	×	×	×	×	400 km circular orbit
Mars Express (2003)	×	△ ^c	○	○	○	×	○	Limited operation in the eclipse
Phobos-Grunt / Yinghuo 1 (2011)	○	×	○	○	○	×	×	First Chinese mission, but Mission was failed.
Mangalyaan (2013)	×	×	×	×	×	×	△	First Indian mission. Now cruising.
MAVEN (2013)	○	△	○	○	○	○	○	Comprehensive plasma & field instruments. Now cruising.

^a Hot plasma, solar wind, particle energy > a few eV.

^b Only E-component.

^c Mainly operated the sounding mode.

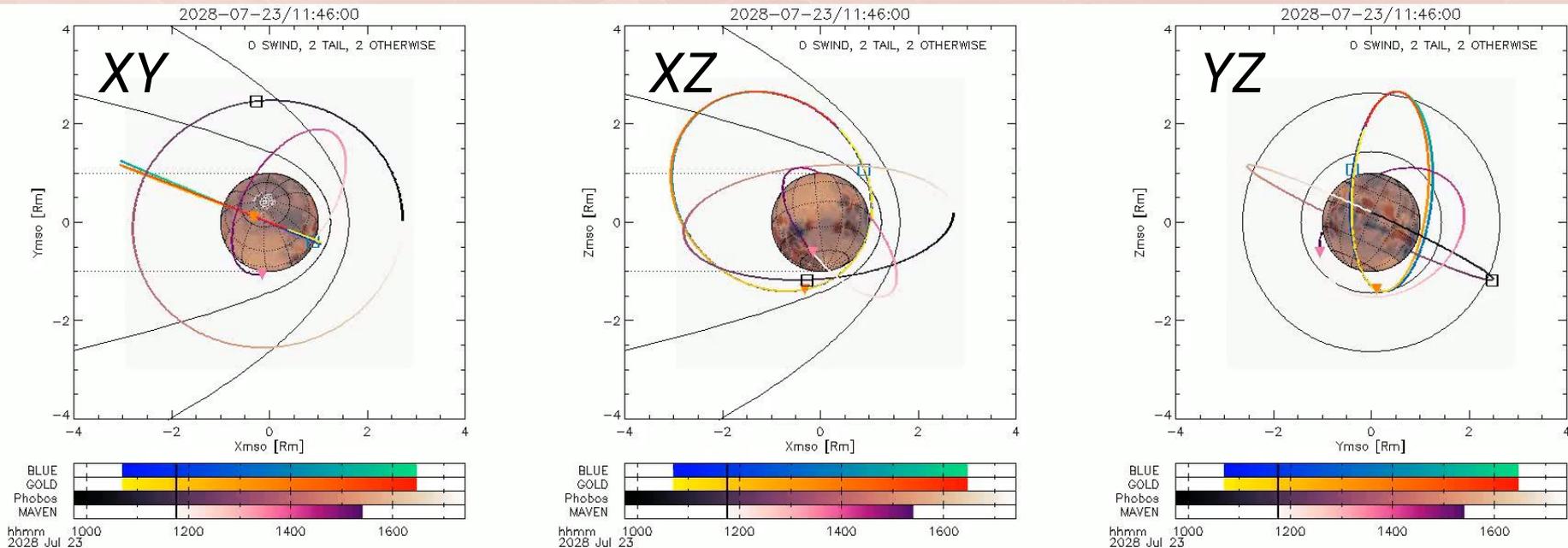
火星電磁気圏の多点同時観測例(1)



●: Upstream Solar Wind, ▼: Magnetotail, □: Otherwise

- All 4 spacecraft (**Blue**, **Gold**, **MAVEN**, and **MMX**) are simultaneously in the downstream magnetotail.

火星電磁気圏の多点同時観測例(2)



●: Upstream Solar Wind, ▼: Magnetotail, □: Otherwise

- At least **3** spacecraft (**Blue, Gold, and MMX**) are simultaneously in the downstream magnetotail, while **MAVEN** can monitor the upstream solar wind.



END