

第58回火星勉強会

2019年9月25日

1. Ma, Y., et al. (2018). The impact and solar wind proxy of the 2017 September ICME event at Mars. *Geophysical Research Letters*, 45, 7248–7256. <https://doi.org/10.1029/2018GL077707>

2. Romanelli, N., et al. (2018). Responses of the Martian magnetosphere to an interplanetary coronal mass ejection: MAVEN observations and LatHyS results. *Geophysical Research Letters*, 45, 7891–7900. <https://doi.org/10.1029/2018GL077714>

東京大学地球惑星科学専攻

M2 坂田遼弥

- どちらも2017年9月のICMEイベント時のMAVENによる観測を数値計算で再現して火星磁気圏の応答を調べた研究
- Ma et al., 2018. The impact and solar wind proxy of the 2017 September ICME event at Mars.
 - 多成分MHDモデルを用いた研究
 - ICMEイベントを3つの時間帯でケース分けし、それぞれについて数値計算から定常状態を求めたところ、MAVENによる観測を再現できた
 - シース領域での観測と数値計算の比較から太陽風パラメータの時間発展を推定し、定常ではなく時間発展する数値計算を行うことで、観測の再現性を改善することに成功した
 - ICMEイベント時にプラズマ境界が変動することや、イオン散逸率が1桁以上増加することを明らかにした
- Romanelli et al. 2018. Responses of the Martian magnetosphere to an interplanetary coronal mass ejection: MAVEN observations and LatHyS results.
 - ハイブリッドモデルを用いた研究
 - Ma et al. (2018)と同様のパラメータを用いて定常状態を求め、観測を再現した
 - ICMEイベント時にバウショックが内側に移動すること、flank領域においてMPBが圧縮することを明らかにした
 - H^+ , O^+ の散逸率はそれぞれ10倍, 2.4倍に増加した

- 太陽風と火星の磁気圏・大気との相互作用を知るうえで、ICME (Interplanetary Coronal Mass Ejection) イベントに対する応答は重要な研究対象となってきた
 - Crider et al. (2005): Halloween 2003
 - Morgan et al. (2014): 2011年6月イベント
- 衛星による観測には限界がある（観測機器の制約，一点観測）
 - 観測を再現できるようなモデル計算を用いてシステム全体の応答を検証する
 - multi-species MHD simulation: Jakosky et al. (2015), Curry et al. (2015), Ma et al. (2017)
 - multi-fluid MHD simulation: Dong et al. (2015)
 - Grad-Shafranov reconstruction: Hara et al. (2016)
 - **hybrid simulation: Romanelli et al. (2018)**
- モデル計算には，様々なインプットが必要 (e.g. 太陽風密度・速度，残留磁場)だが，太陽風パラメータの時間発展を完全に観測することは難しい
 - いくつかの期間に分け，それぞれの期間で一定の値（平均的な値）を用いる
e.g. Jakosky et al. (2015), Curry et al. (2015), Dong et al. (2015)
 - 太陽風を直接観測している時間帯はその値を，それ以外の時間帯では前後で線形補間した値を用いる
e.g. Ma et al. (2017)
- **太陽風パラメータの時間発展を観測とモデル計算から推定 Ma et al. (2018)**

The impact and solar wind proxy of the 2017 September ICME event at Mars.

Ma, Y., et al. (2018)
Geophysical Research Letters, 45, 7248–7256.
<https://doi.org/10.1029/2018GL077707>

手法

- 多成分MHDモデル（ミシガン大のBATS-R-USコード）
 - イオン種: H^+ , O^+ , O_2^+ , CO_2^+
 - $\text{Ls} = 60^\circ$
 - 残留磁場, イオン-中性衝突, 主要な化学反応を考慮
 - steady-stateモードとtime-dependentモードの両方を用いる
- MAVENによる観測
 - SWIA, MAG, STATIC
 - 2017-09-13 00:01–10:00を3つの期間 (quiet, early phase, later phase) に分ける
 - 密度と速度は近火点付近でのpenetrating proton fluxから推定
 - IMF強度とclock angleはシース領域でのMAGによる測定から推定

Table 1 <i>Solar Wind Conditions Used for the Three Steady State Cases and Corresponding Ion Loss Rates With Applicable Time Periods</i>			
Case no.	Case 1 (quiet)	Case 2 (early phase)	Case 3 (later phase)
Time period ^a	00:01–02:52 UT	02:52–05:10 UT	05:10–10:00 UT
N_{SW} [cm^{-3}]	1.9	4.0	12.0
U_{SW} [km/s]	426	824	824
B_{IMF} [nT]	(0.0, –3.0, 0.0)	(0.0, –10.0, 0.0)	(0.0, 10.0, 5.0)
O^+ loss rate [s^{-1}]	6.8×10^{23}	2.6×10^{24}	1.0×10^{25}
O_2^+ loss rate [s^{-1}]	1.0×10^{24}	5.3×10^{24}	1.0×10^{25}
CO_2^+ loss rate [s^{-1}]	9.0×10^{22}	6.5×10^{23}	1.4×10^{24}
Total loss rate [s^{-1}]	1.8×10^{24}	8.5×10^{24}	2.2×10^{25}

^aTime period corresponding to 13 September 2017.

定常状態のケース

- 全体的な特徴は捉えている
 - T1における太陽風動圧やIMFの強化
 - T2におけるIMFの反転 (By成分)
- イオン流出率は4.7倍 (Case 2), 12.2倍 (Case 3) に増加
- 一部で観測を再現しきれていない (赤矢印)

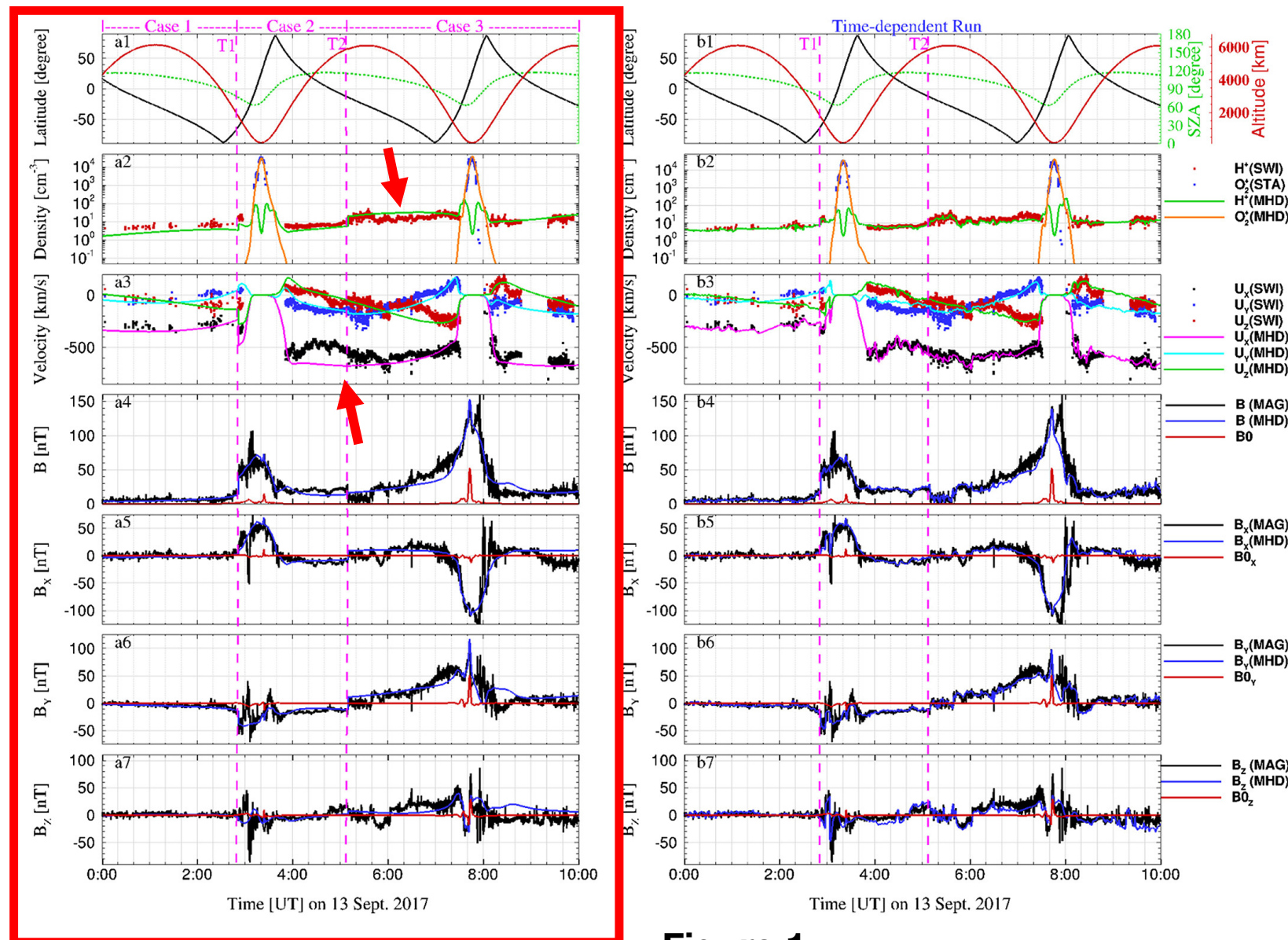


Figure 1

上流パラメータの推定

- ・ シース領域のパラメータは太陽風領域の値と相関しているとして推定する
- ・ 定常状態のモデル計算における太陽風・シース領域の値とMAVENの観測値を使う

$$\left. \begin{array}{l} \text{MAVENによるシースでの観測値} \\ \text{求めたい推定値} \end{array} \right\} \frac{n_{obs}(H^+)}{n_{SW}} = \frac{n_{model}(H^+)}{n_{SW0}} \left. \begin{array}{l} \text{シース領域} \\ \text{太陽風} \end{array} \right\} \text{定常状態のモデル計算}$$

- ・ 仮定
 - 実際の太陽風とモデル計算で用いた太陽風が大きく乖離していない
 - fast magnetosonic Mach numberが大きく変化しない
 - 誘導磁気圏ではない $\rightarrow U_{X,model(H^+)}/U_{X,SW} > 0.7$ かつ高度1600 km以上に制限
 - IMFは $B_x = 0$, clock angleがBow Shock前後で変わらない（誤差は最大20度）
 - $U_y = U_z = 0$
 - 衛星の位置と上流境界での時間のズレを考慮（ただしシースでの原則は無視）

$$\Delta t = \frac{X_0 - X_{SC}}{U_{X,SW}} \quad X_0, X_{SC}: \text{上流境界および衛星の位置}$$

黒線: MAVENによる観測

青丸: 観測から推定した太陽風パラメータ

赤線: MHDモデルへのインプット

- Bow shock前後での密度・磁場の増加と速度の低下を補正する形になっている
- $n_{SW} = 1.7 - 16 \text{ cm}^{-3}$, $U_{X,SW} = 300 - 880 \text{ km s}^{-1}$, $B_{IMF} = 1.1 - 18.5 \text{ nT}$
- SWIAのFOVが太陽方向の時間は省いた
(シース領域のプラズマを見逃している可能性があるため)
- SEPによって最大で密度を $\sim 1 \text{ cm}^{-3}$ 過大に, 速度を $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$ 過小に評価している可能性有

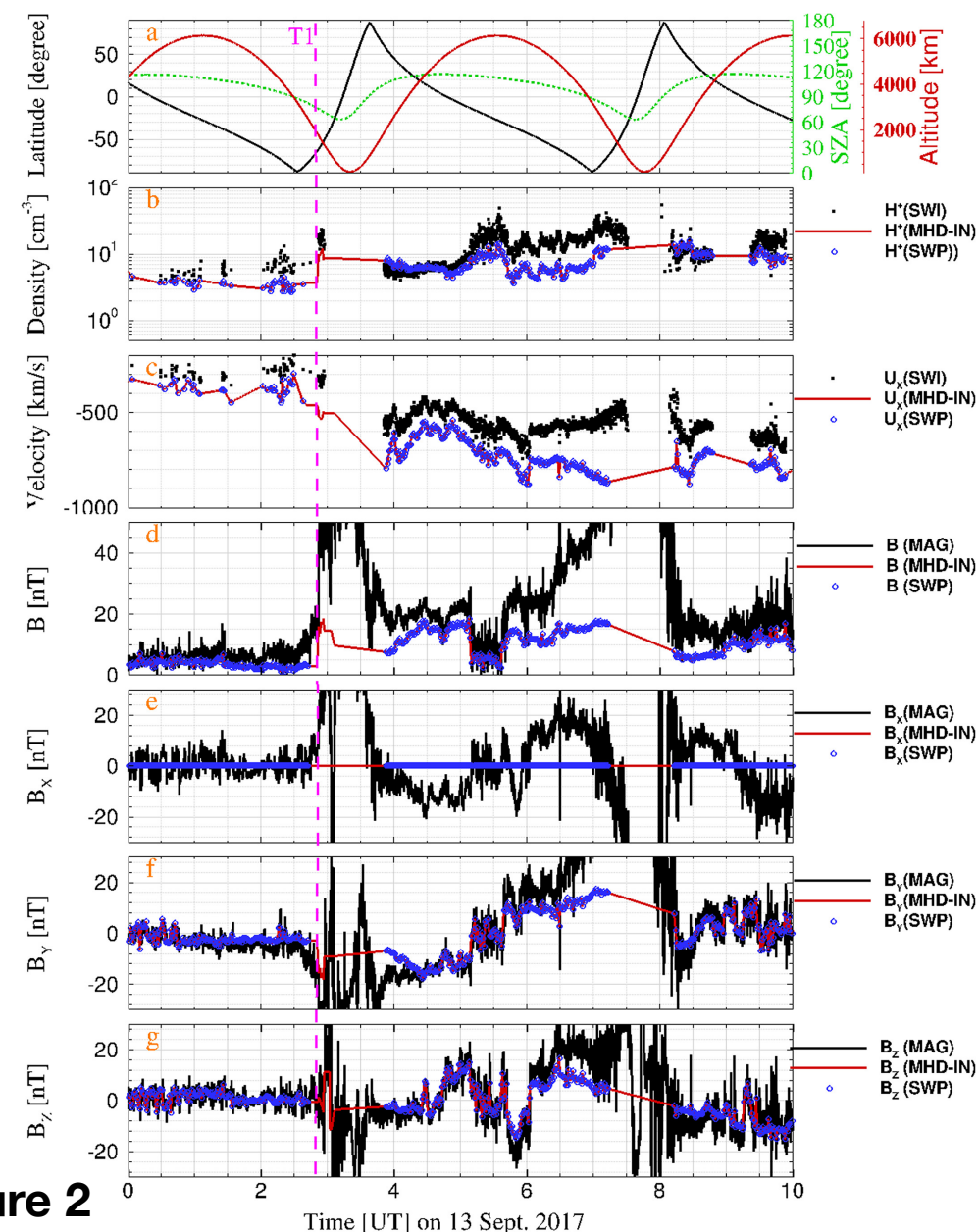
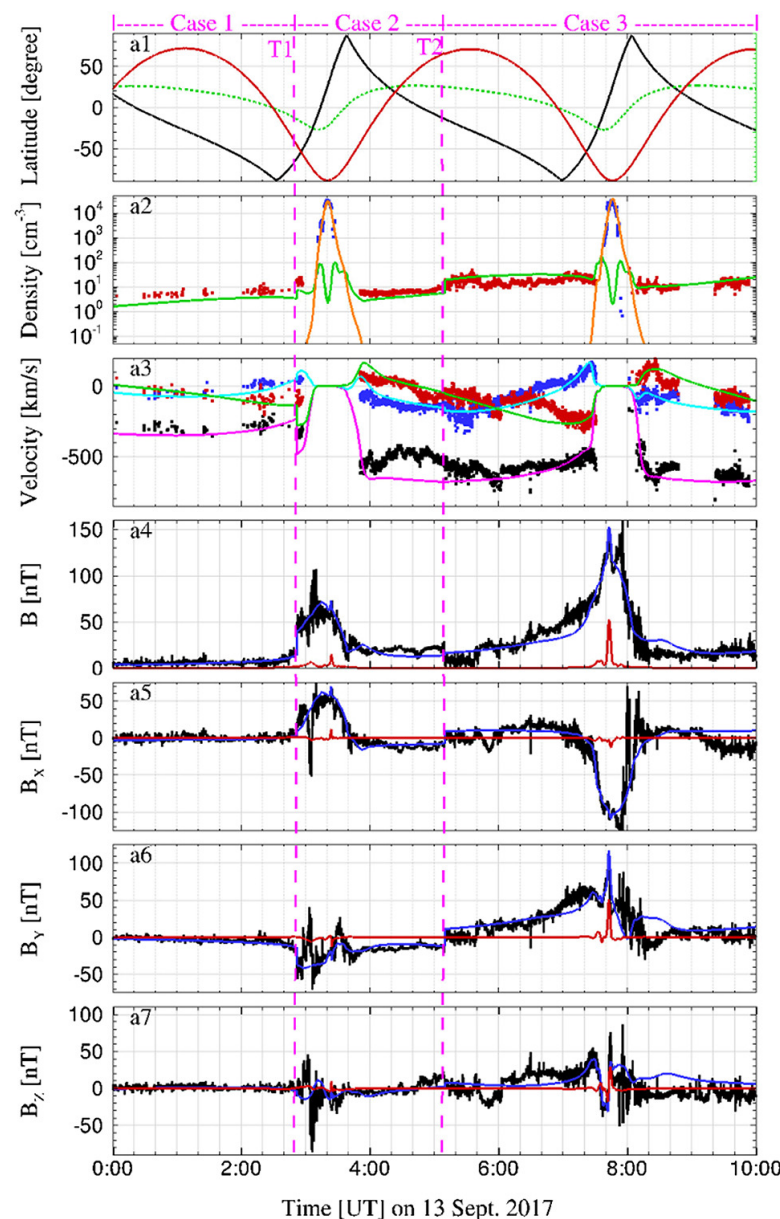


Figure 2

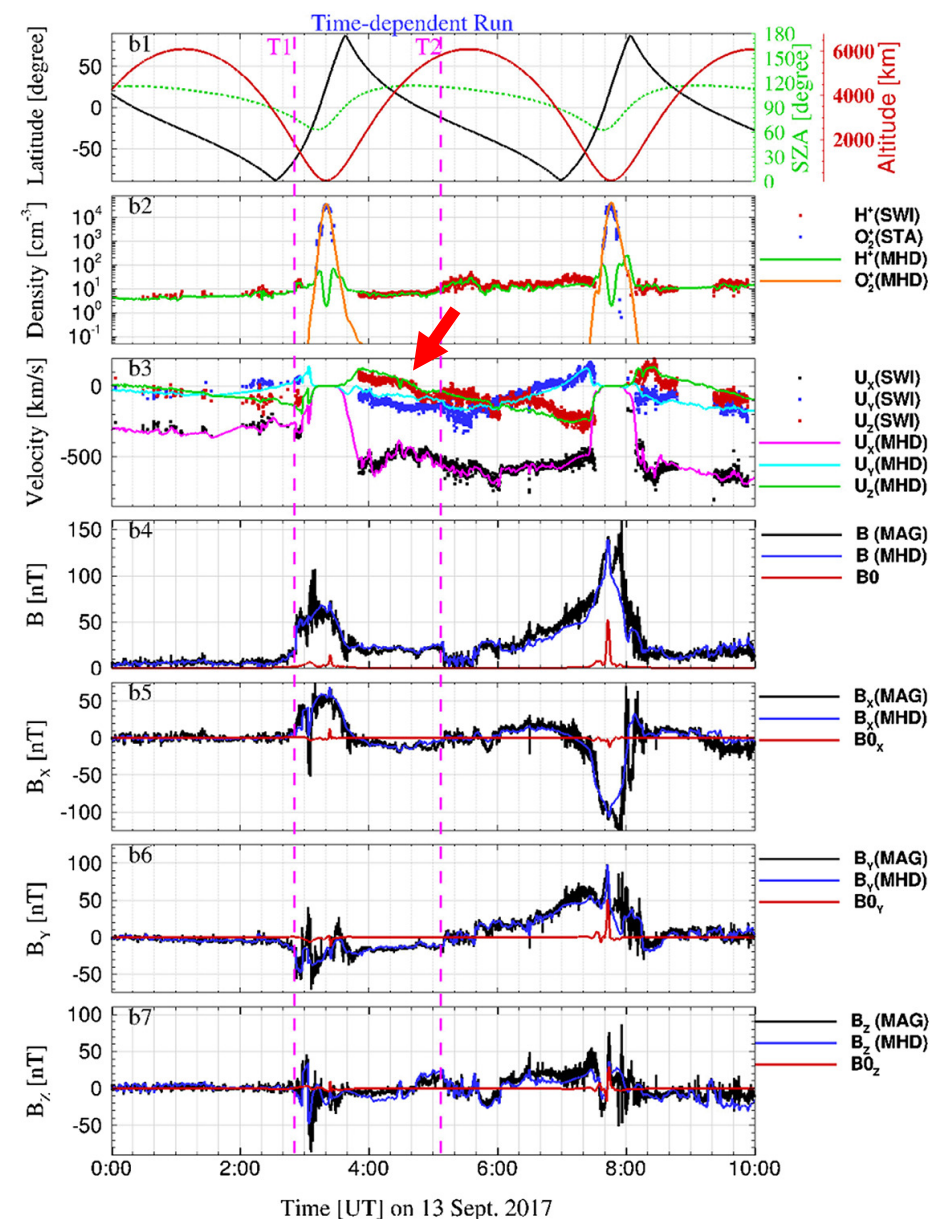
時間発展するケース

- 観測の再現性が改善した
- U_Y , U_Z に観測とのズレ
 - 太陽風が U_X 成分しか持たないと仮定したため
- B_X はよく再現している
→ IMFのdrapingが支配的

定常状態のケース

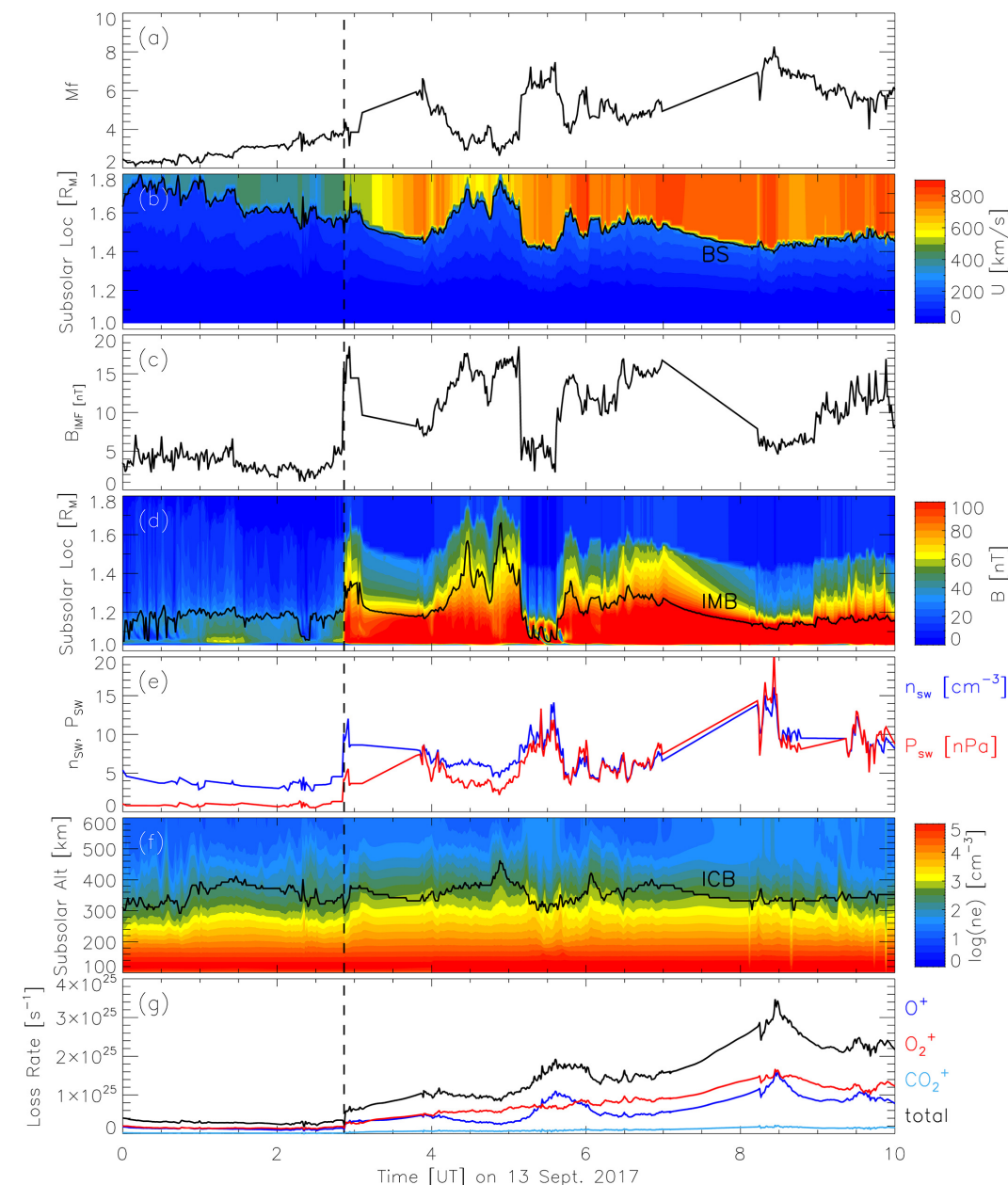


時間発展するケース



時間発展するケース

- BS (Bow Shock):
速度がfast magnetosonic speedを下回る境界
→ **fast Mach number (Mf)と逆相関**
- IMB (Induced Magnetosphere Boundary):
磁気圧が支配的となる境界
→ **IMF強度と相関**
- ICB (Ion Composition Boundary):
惑星起源のイオンが支配的となる境界
→ **太陽風の密度・動圧に弱い逆相関**
- イオン散逸率: $1.7 \times 10^{24} \text{ s}^{-1} \rightarrow 3.5 \times 10^{25} \text{ s}^{-1}$
 - O_2^+ が主な流出イオン
 - Case 3での値($2.2 \times 10^{25} \text{ s}^{-1}$)より60%ほど高い
- 2015年3月のイベントよりも動圧のピークは高く、それに連動するように散逸率の増加率もおおきい
動圧: 20 nPa vs. 15 nPa
散逸率: 21倍 vs. 10倍
(Ma et al., 2017)



- 2017年9月のICMEイベントを3つの定常ケース (pre-, early-, late-ICME phases)に分け, それぞれにおいて多成分MHDモデルによる計算を行った結果, MAVENによる観測を概ね再現できた
- シース領域での観測とモデル計算の比較から太陽風パラメータの時間発展を推定し, それを基にモデル計算を行ったところ, より良い観測の再現が可能になった
 - 直接観測されていない時間帯での太陽風パラメータを推定することが可能である
 - 時間発展する太陽風を与えることで, 火星磁気圏の応答をより正確に捉えることができる
- 改善点
 - 今回は無視した B_x , U_y , U_z 成分の推定 (例: 誘導磁気圏での磁場のピークと太陽風動圧の関係)
 - シース領域でのプラズマの減速による到達時間のズレ
- ICMEイベントによるプラズマ境界 (BS, IMB, ICB)の変動やイオン散逸率の増加を確認できた

Responses of the Martian magnetosphere to an interplanetary coronal mass ejection: MAVEN observations and LatHyS results.

Romanelli, N., et al. (2018).
Geophysical Research Letters, 45, 7891–7900.
<https://doi.org/10.1029/2018GL077714>

手法

- ハイブリッドモデル LatHyS: イオンを粒子, 電子を流体として扱う
 - SW: H^+ , He^+ , electron planetary: H^+ , O^+ , O_2^+ , CO_2^+ , electron
 - 残留磁場, イオン化反応, 化学反応, 衝突などを含む
 - 熱圏, 電離圏: 3D LMD-GCM (Laboratoire de Meteorologie Dynamique General Circulation Model)
 - 外圏: 3D EGM (Exospheric General Model)
 - $\text{Ls} = 90^\circ$, mean solar activity
- MAVENによる観測
 - SWIA, MAG, STATIC
 - Ma et al. (2018)と同様にケース分け
(開始と終了時刻は異なる)
 - 太陽風パラメータも同じ値

Table 1

Solar Wind Properties, IMF, Magnetosonic Mach Number, and SW Dynamic Pressure Considered for Each of Three Simulations During the Corresponding Time Interval

	Simulation 1	Simulation 2	Simulation 3
Time interval	2017-9-12 22:00 UT to 2017-9-13 02:52 UT	2017-9-13 02:52 UT to 2017-9-13 05:10 UT	2017-9-13 05:10 UT to 2017-9-13 08:20 UT
n_{SW} (cm^{-3})	1.9	4	12
$\mathbf{u}_{\text{SW}}$ (km/s)	(-426,0,0)	(-824,0,0)	(-824,0,0)
B_{IMF} (nT)	(0,-3,0)	(0,-10,0)	(0,10,5)
M_{MS}	5.15	6.40	8.40
P_{dyn} (nPa)	0.58	4.54	13.61
Bow shock parameters: ϵ , L (R_M), x_F (R_M)	0.983, 2.195, 0.53	0.915, 1.801, 0.58	0.907, 1.810, 0.55
R^2	0.995	0.998	0.997
Bow shock standoff distance (R_M)	1.64	1.52	1.50
Bow shock terminator distance (R_M)	2.66	2.26	2.24
O^+ escape (10^{24} ions/s)	1.3	1.9	3.1
O^+ escape along the convective electric field (10^{23} ions/s)	1.1	1.9	4.4
H^+ escape (10^{25} ions/s)	2.1	8.2	21.9

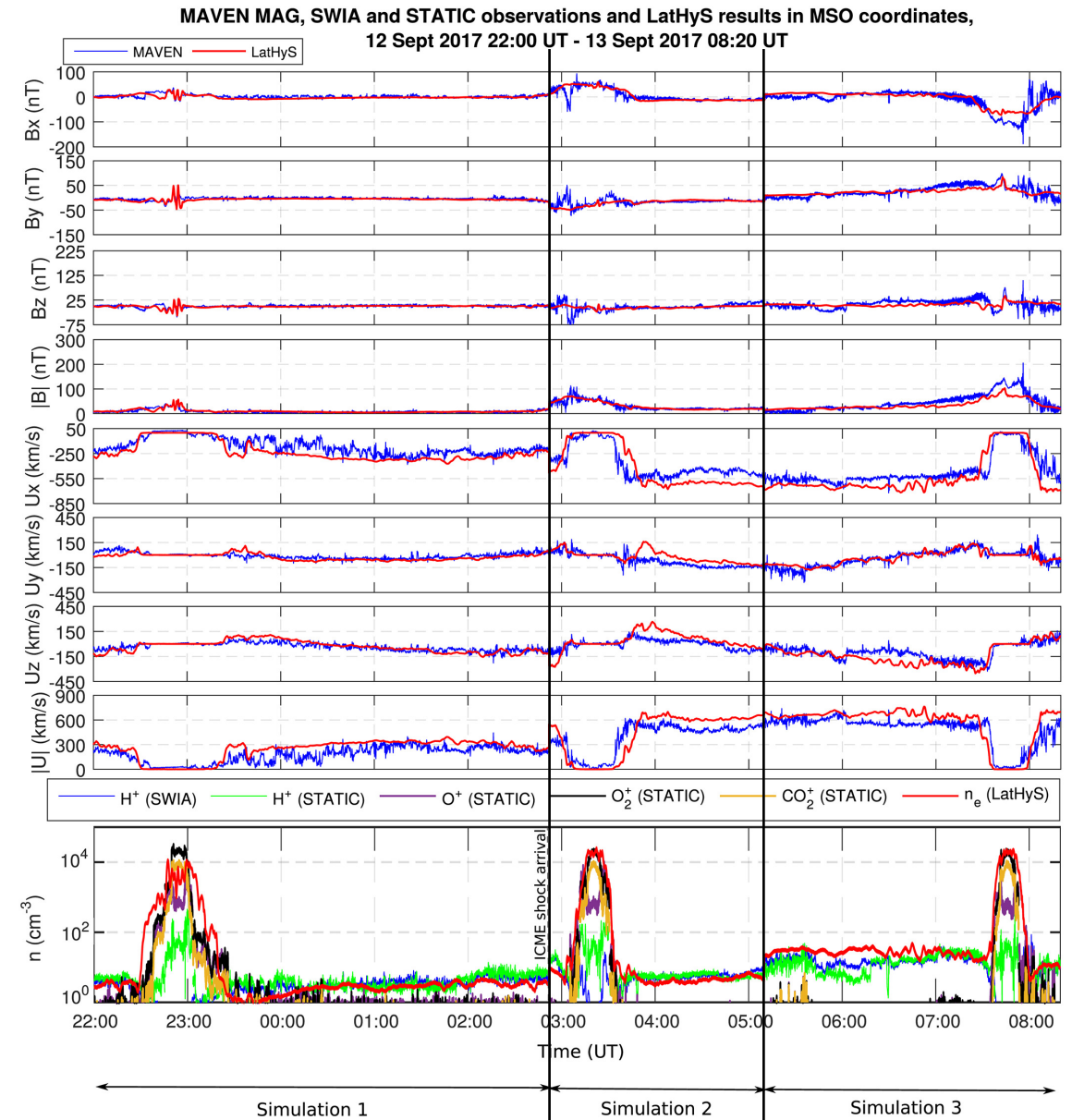
Note. Bow shock properties derived from fits to Laboratoire Atmosphères, Milieux et Observations Spatiales Hybrid Simulation results and estimated planetary O^+ and H^+ escape rates are also presented. IMF = interplanetary magnetic field; SW = solar wind.

赤: モデル計算の結果

それ以外: MAVENによる観測結果

概ね観測を再現できているが……

- Simulation 1: シース領域の細かな変動は捉えられていない
- Simulation 2: パラメータ変動直後など状態が遷移しているときにズレ (02:57-03:08 UT, 03:35-04:00 UTなど)
→ 時間発展するパラメータによる計算が必要 (Ma et al., 2018)
- シース領域で速度が高めに出ているのはSEPの影響? (Ma et al.で述べられていたのと同じ要因)



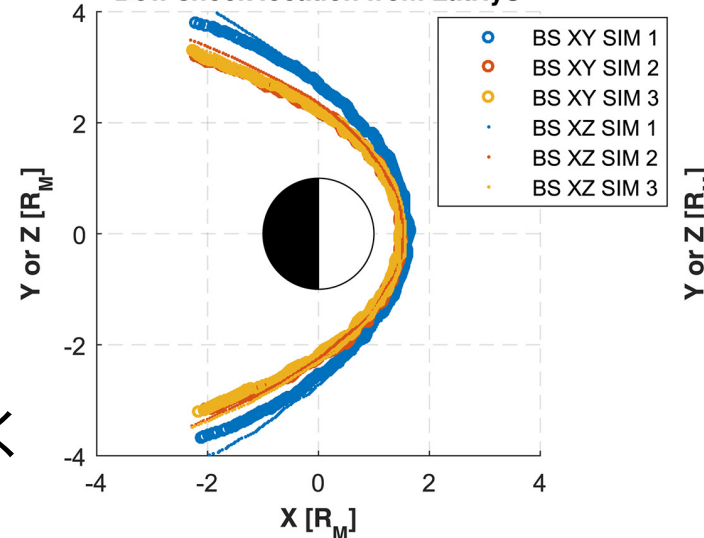
モデル計算の結果

BS: $B/B_{IMF} > 2$ となる地点

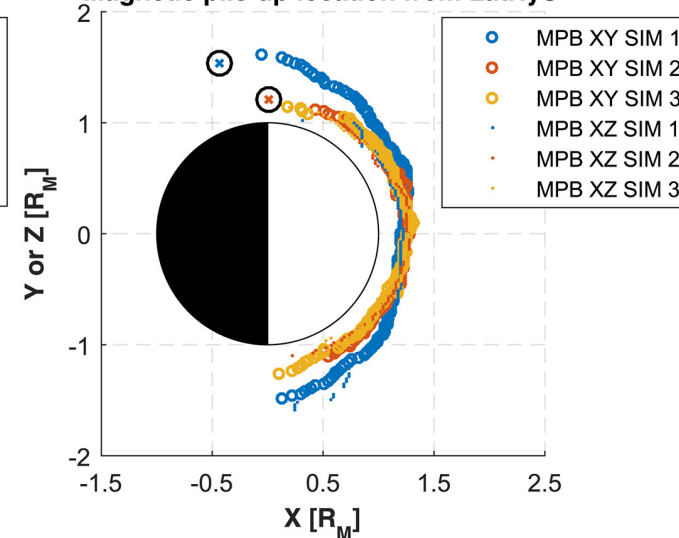
MPB: $B/B_{IMF} > 6$ かつ $U/U_{SW} < 0.5$ となる地点
(圧力バランスによる判定はflankやtailでは使えない)

- flank領域においてMPBが圧縮されている
– 観測から求めた位置 (黒丸) とも整合的
- BSに円錐曲線フィッティング
→ BSの位置はSim 1からSim 2にかけて大きく変化し, Sim 2からSim 3では変化しない
cf. 一定以上の太陽風動圧では, BSの応答 (内側への移動) が鈍くなる
(Edberg et al., 2009)
- H^+ , O^+ の散逸率はそれぞれ10倍, 2.4倍に増加
- IMFが電離圏のより深くまで侵入することで, +E半球における O^+ plumeの寄与が増えた (8.5% → 14.2%)
- 先行研究との値のズレは電離圏モデルの違いに起因?

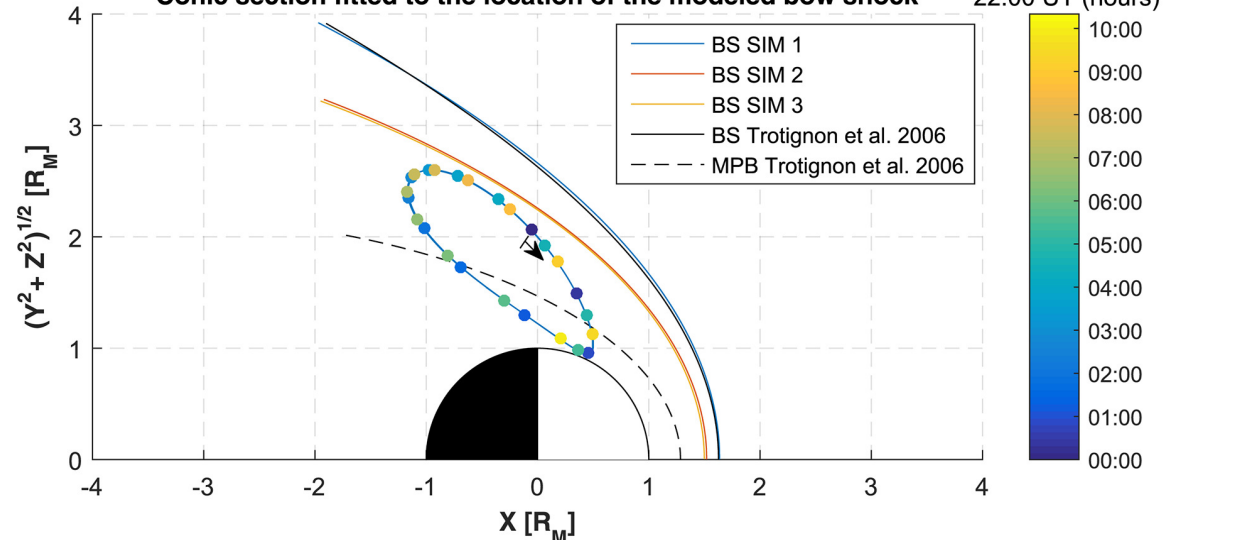
Bow shock location from LatHyS



Magnetic pile-up location from LatHyS



Conic section fitted to the location of the modeled bow shock



- 2017年9月のICMEイベントをMa, et al. (2018)と同様に3つの定常ケース (pre-, early-, late-ICME phases)に分けてハイブリッドモデルによる計算を行った結果, MAVENによる観測を概ね再現することができた
- ICME時に太陽風動圧やfast magnetosonic Mach numberが増加することで, Bow shockが内側に移動することを示した
また, Bow Shockほどの変動ではないものの, flank領域においてMPBが圧縮されることを明らかにした
- H^+ , O^+ の散逸率はそれぞれ10倍, 2.4倍に増加した. また, IMFが電離圏深くまで侵入することで O^+ plumeの寄与が増加した

- Edberg, et al. (2009) Figure. 6
- 太陽風動圧の増加とともにBSは内側へ移動するが、動圧が強くなるほど変動は小さくなり、ある値へ漸近する形になっている

