

Magnetic variability at the Martian surface based on the InSight observations

Review on

“The origin of observed magnetic variability for a sol on Mars
from InSight

Mittelholz, A., et al. (2020). JGR Planets, 125, e2020JE00605”

Presented by S. Sakai (Tohoku U.)

Abstract

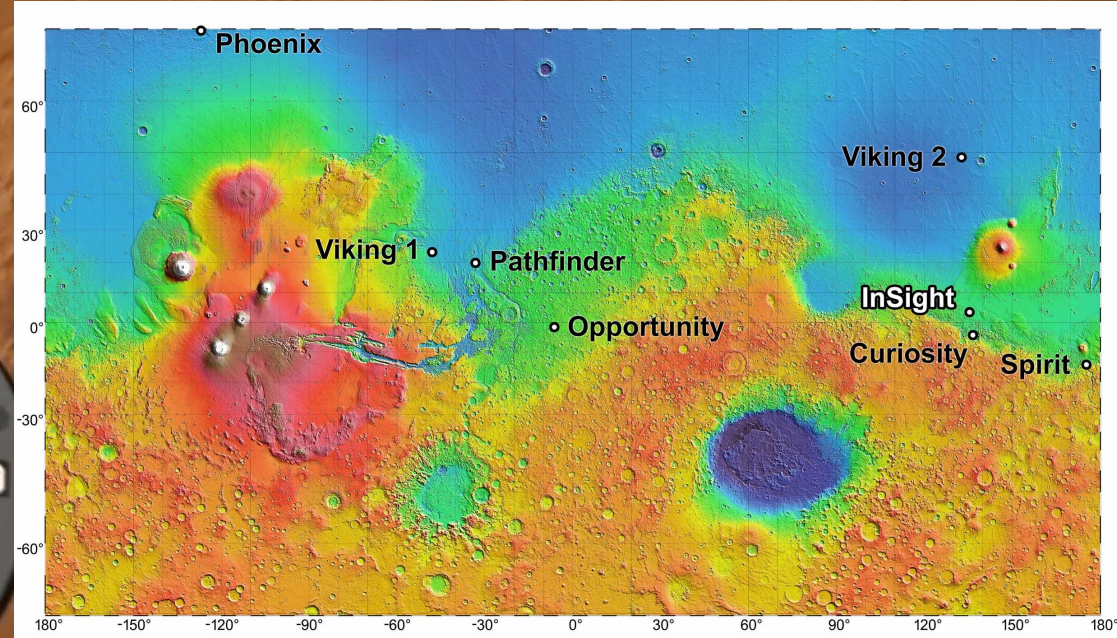
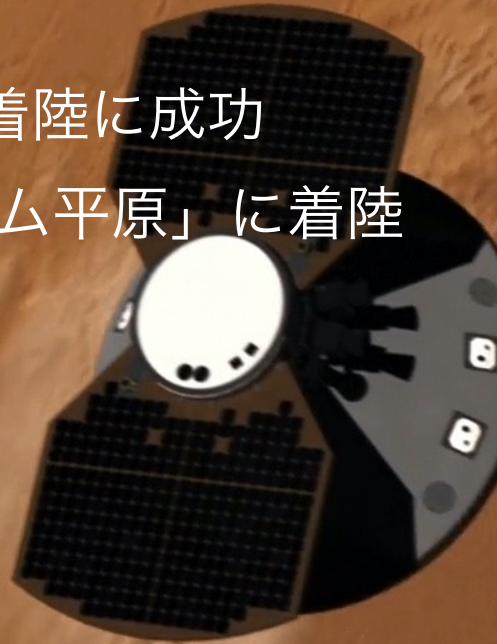
- InSight の磁力計 (IGF) が火星表面で磁場の日変動等を観測
- 5:00-10:00LTに変動のピークを持つ (20 – 40 nT)
- 磁力計の温度変化、太陽電池パネルに流れる電流が、磁場の日変化トレンド与える影響は小さい
- 火星周回衛星の磁場データと火星GCMを用いて中性風が電離圏ダイナモ領域で駆動する (Wind-driven) 磁場変化を推定
 - 季節変動やダイナモ領域の高度変化が影響
- 火星表面での磁場変動の振幅や季節変動は、中性風によって駆動される電流から予測される量と一致
- ダストストームは磁場変動の振幅を増大させる

- NASA火星内部探査ミッション
- 2018年5月6日：打ち上げ
- 2018年11月26日：火星への着陸に成功
 - 赤道付近にある「エリシウム平原」に着陸

• 機器例

- 磁力計 (IGF)
- 火星地震計
- 熱流量測定装置
- ドリルによる掘削

→ 火星内部を調査し、地球や月を含めた岩石天体の形成過程の謎に迫る



主な成果

- 地震計 → 「火震」を観測！！
- ドリル → 思ったより堅かった！！

Introduction (Johnson+, 2020)

- InSightによる磁場観測

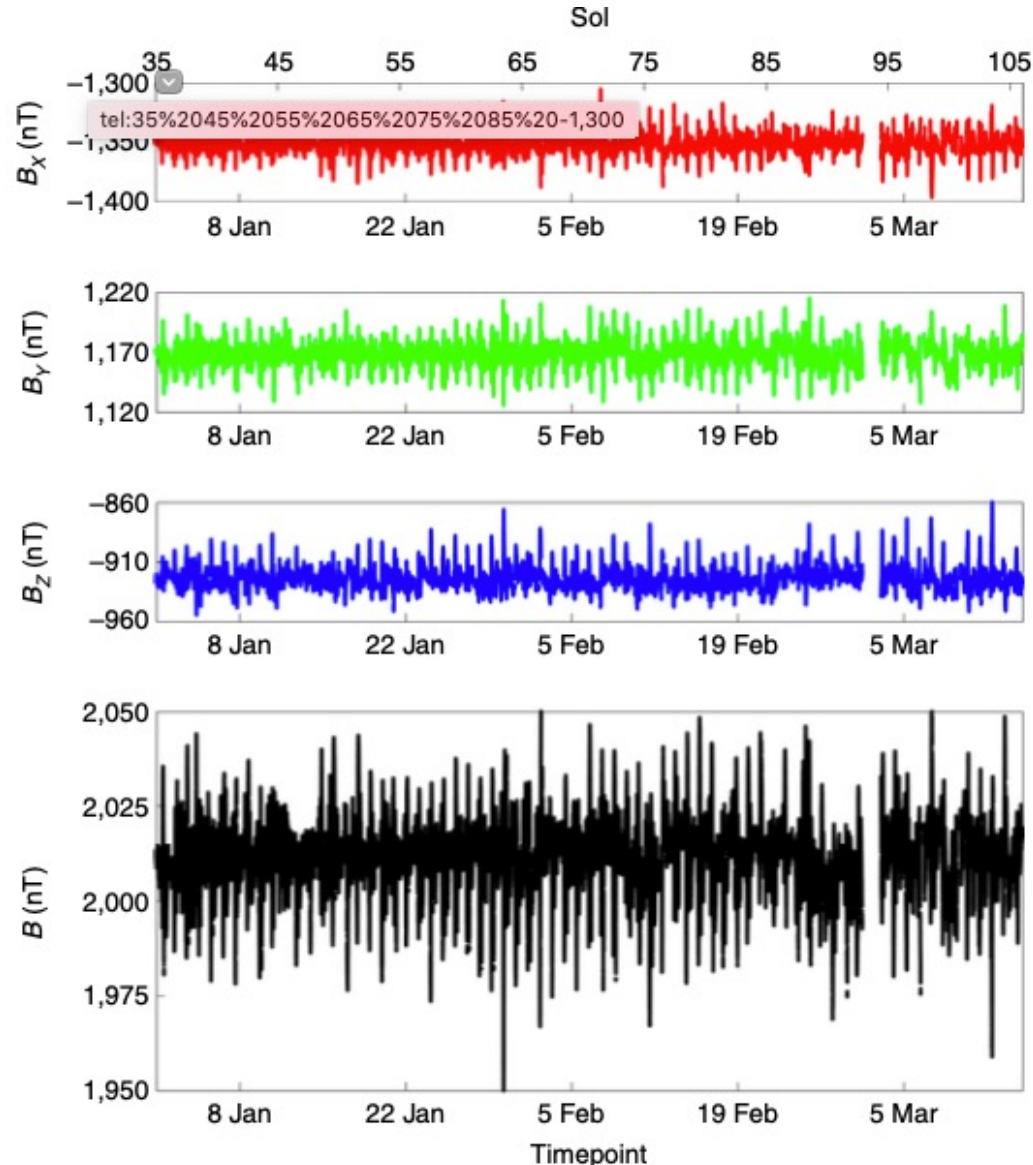


Table 1 | Martian surface magnetic field in the LL frame

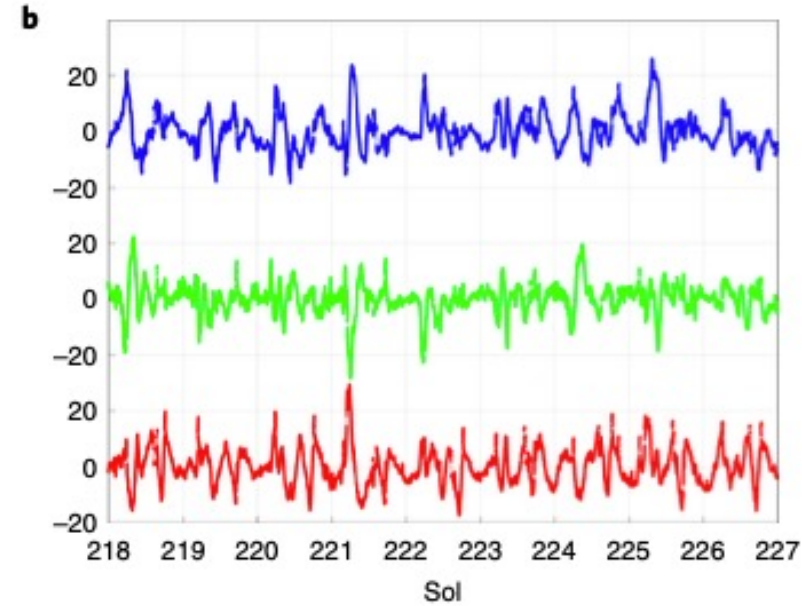
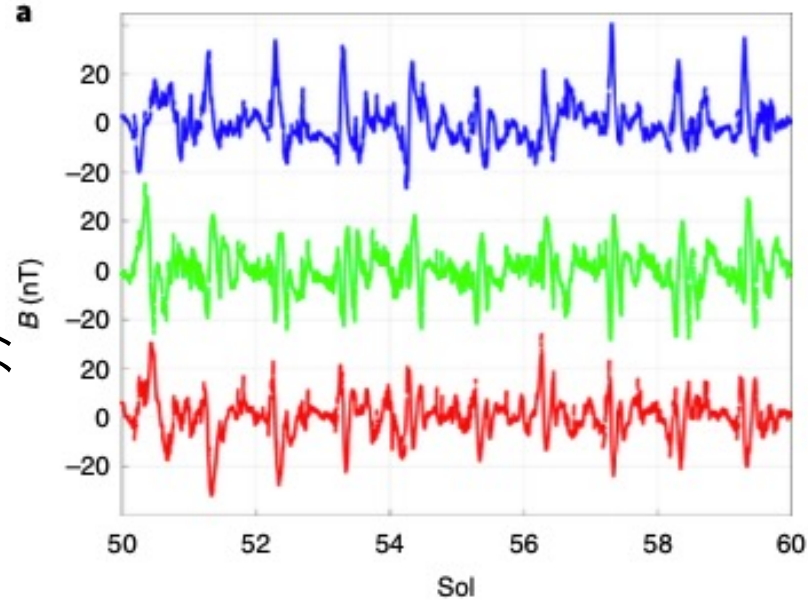
	B_x (nT)	B_y (nT)	B_z (nT)	B (nT)	D ($^\circ$)	I ($^\circ$)
Spacecraft magnetic field measured pre-launch						
Average	552	-430	-22	700	n/a	n/a
Uncertainty	18	83	40	53	n/a	n/a
InSight surface field measurements						
Average	-1,353	1,168	-925	2,013	139	-27
s.d.	6	5	6	n/a	n/a	n/a
Combined error	19	83	40	53	n/a	n/a
Surface magnetic field predicted from recent satellite-based models						
Regional model ⁸	-62	77	-205	227	129	-64
Global model ⁹	-64	63	-296	309	136	-73

The average spacecraft field and its error are described in Methods. The mean surface field and its standard deviation from sols 14-299 (Extended Data Fig. 2) using LT 20:00-04:00 to minimize external field contributions. The combined error includes the uncertainties in the spacecraft field and the surface measurements. Declination, $D = \tan^{-1}(B_y, B_x)$, and inclination, $I = \tan^{-1}(B_z / (B_x^2 + B_y^2)^{1/2})$, give the azimuth clockwise from north and the dip of the field; 'n/a' values not used.

Introduction (Johnson+, 2020)

- InSightによる磁場観測

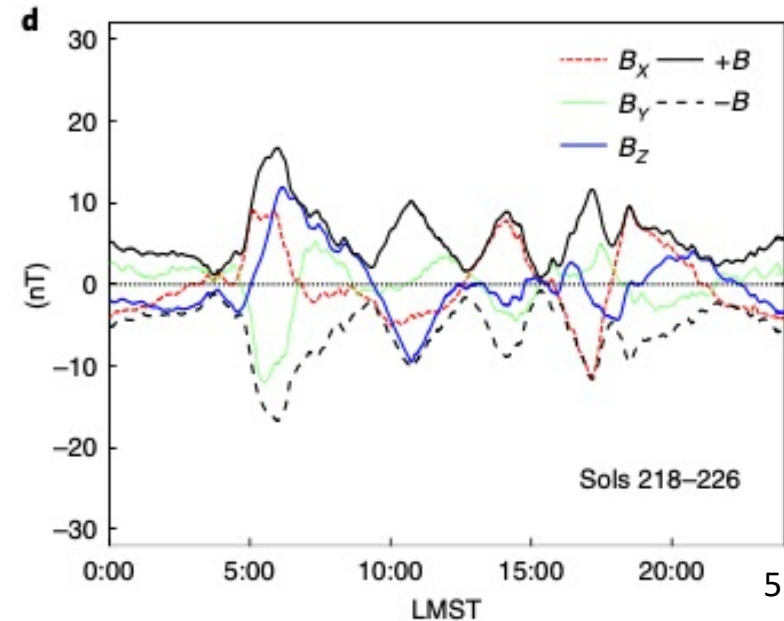
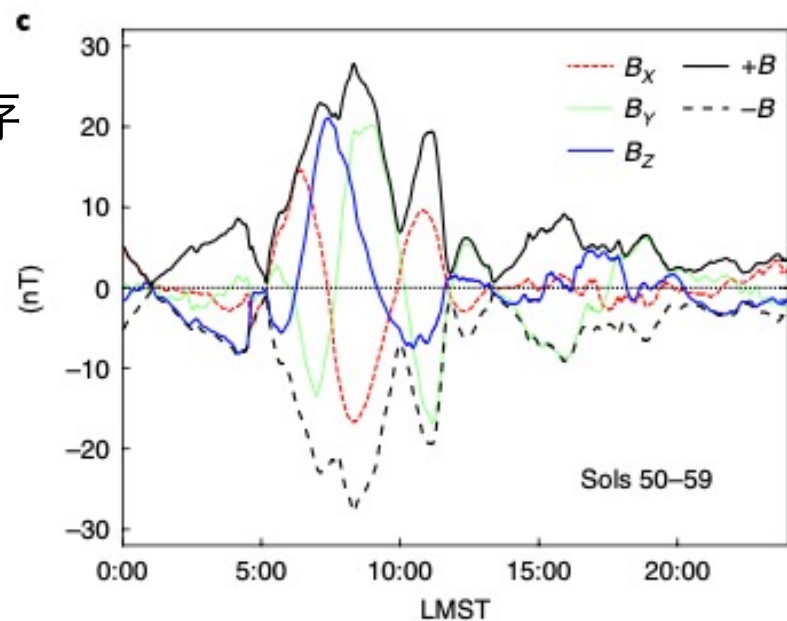
- < 30nT程度の日変化
- 午前中に振幅が大きい
- Solが大きいと振幅が小さくなる



- 電離圏電流の影響？

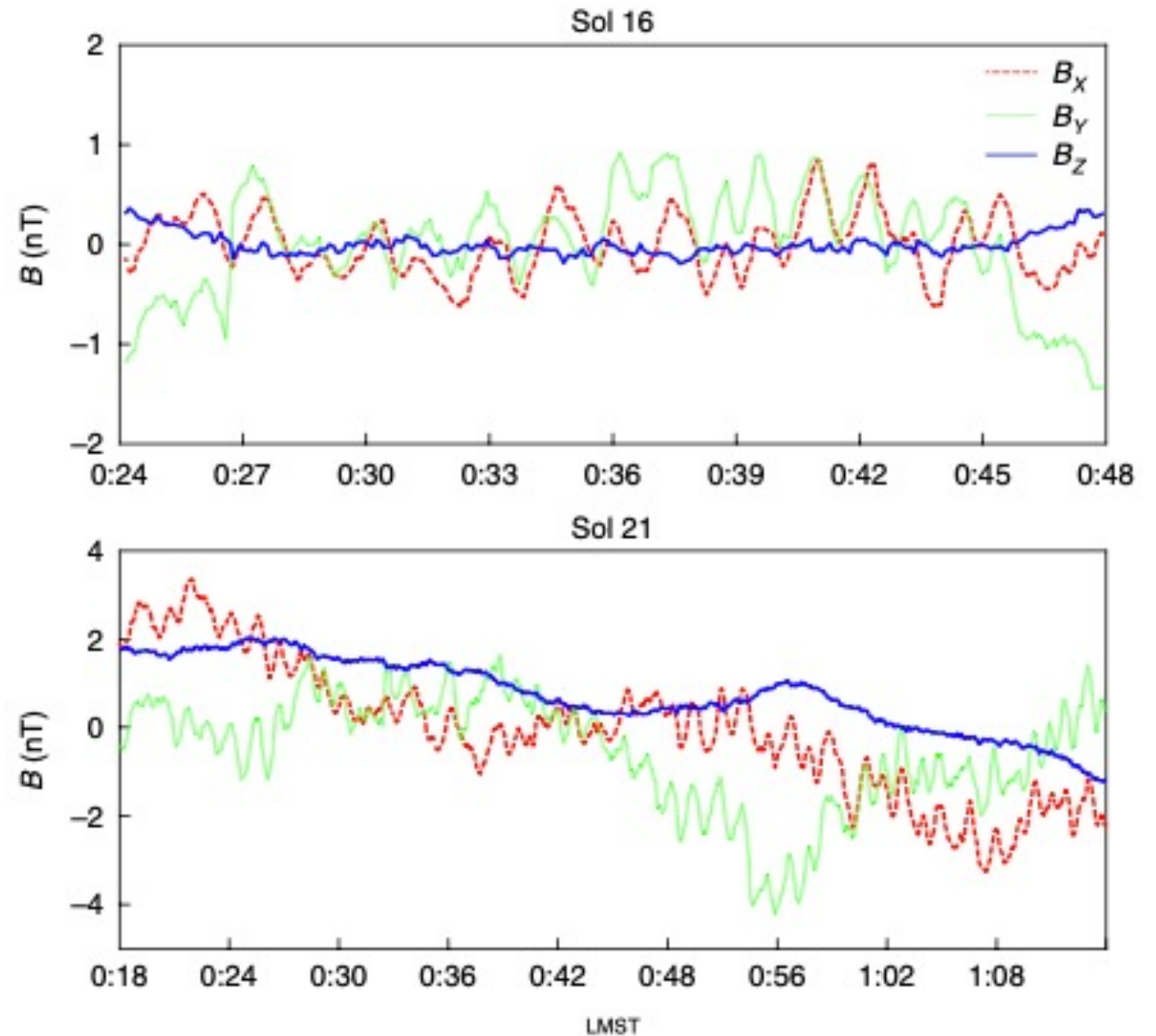
- 電離圏電流は中性風に依存
- 中性風は季節変動する

→ Mittelholz+ (2020) で詳細を議論



Introduction (Johnson+, 2020)

- InSightによる磁場観測
 - 秒-分単位での変動
 - (induced)磁気圏尾部にある電流シートとの振動に関連？
 - 正弦関数的な変動
 - 前者と同じ or (induced)磁気圏のフランク領域の振動に関連？



Introduction

- Mittelholz+ (2020) では
 1. 磁場の日変化の発展を 376 sols で検証
 2. センサーの温度変化や太陽電池パネルの IFG データへの影響の検証
 3. MGCMから中性大気密度・電子密度・中性風速度を、高度・LT・季節の関数として予測 (電離圏ダイナモ領域で適用)
 4. ダストシーズンにこれらのパラメーターが影響するか調査
 5. ダイナモ領域での電流密度を計算し、電離圏高度での磁場への影響から、火星表面での磁場強度を推定
 6. モデルベースによる Wind-driven 磁場とIFGによる予測を比較

The Evolution of the Magnetic Field Over Time

- IGF data
 - Sol 14 – 389
 - 0.2 Hz or 2 Hz
- Magnetic field observations: Diurnal variations
 - 背景磁場を除去し、振幅を取り出す (b-i)
 - 26-sol time scale (太陽の自転周期)
 - 5 – 10 LTSTで振幅が増大
 - Sol が大きくなるにつれて減衰
 - 10 LTST過ぎにピーク (c, d only)

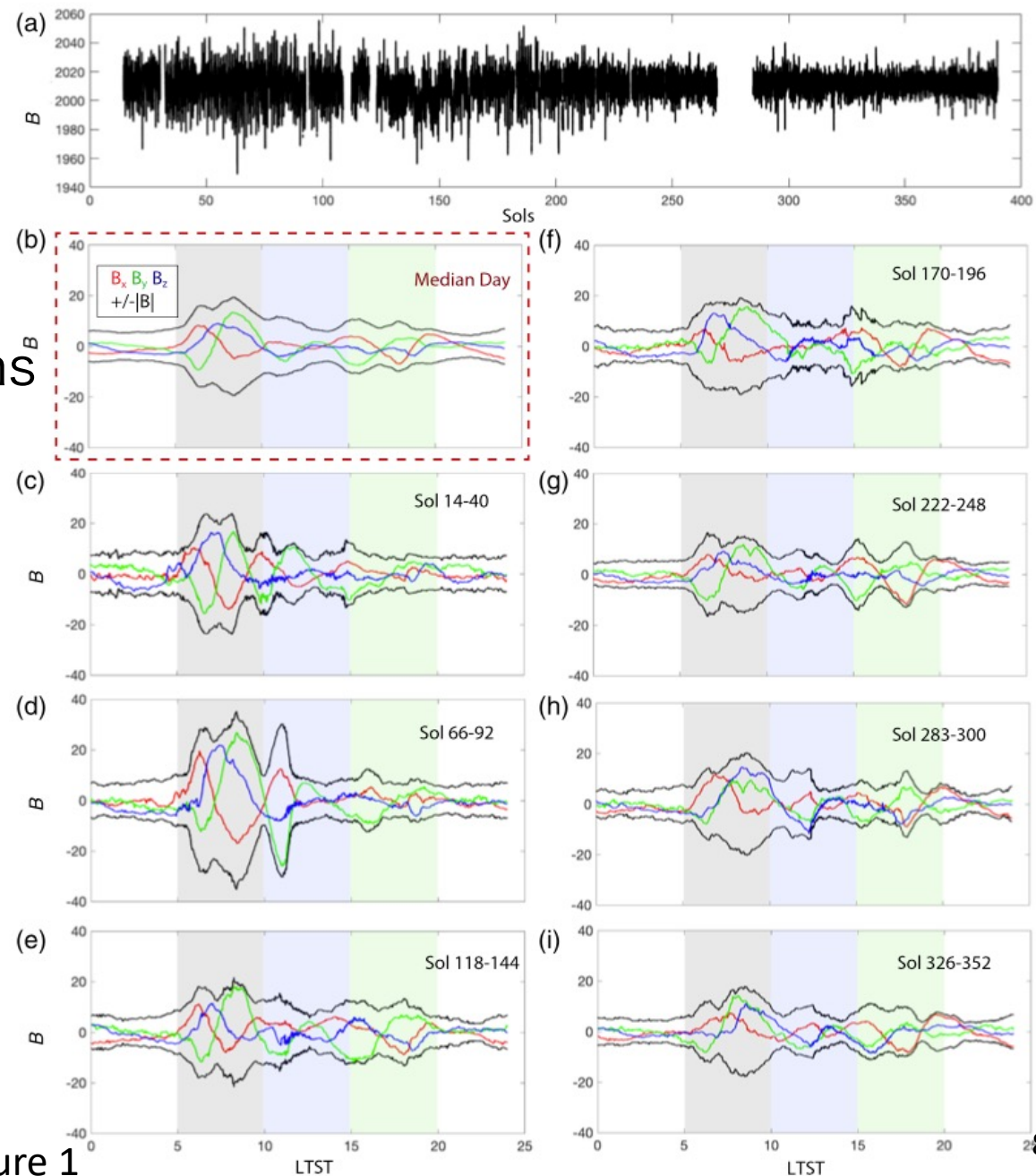


Figure 1

The Evolution of the Magnetic Field Over Time

- Sol to sol variability
 - 平均値 (a) & 最大値 (b)
 - ピーク値 が 20 – 80 nT で変動
 - 5 – 10 hr で発生
 - 日平均は振幅 ~10 nT 程度

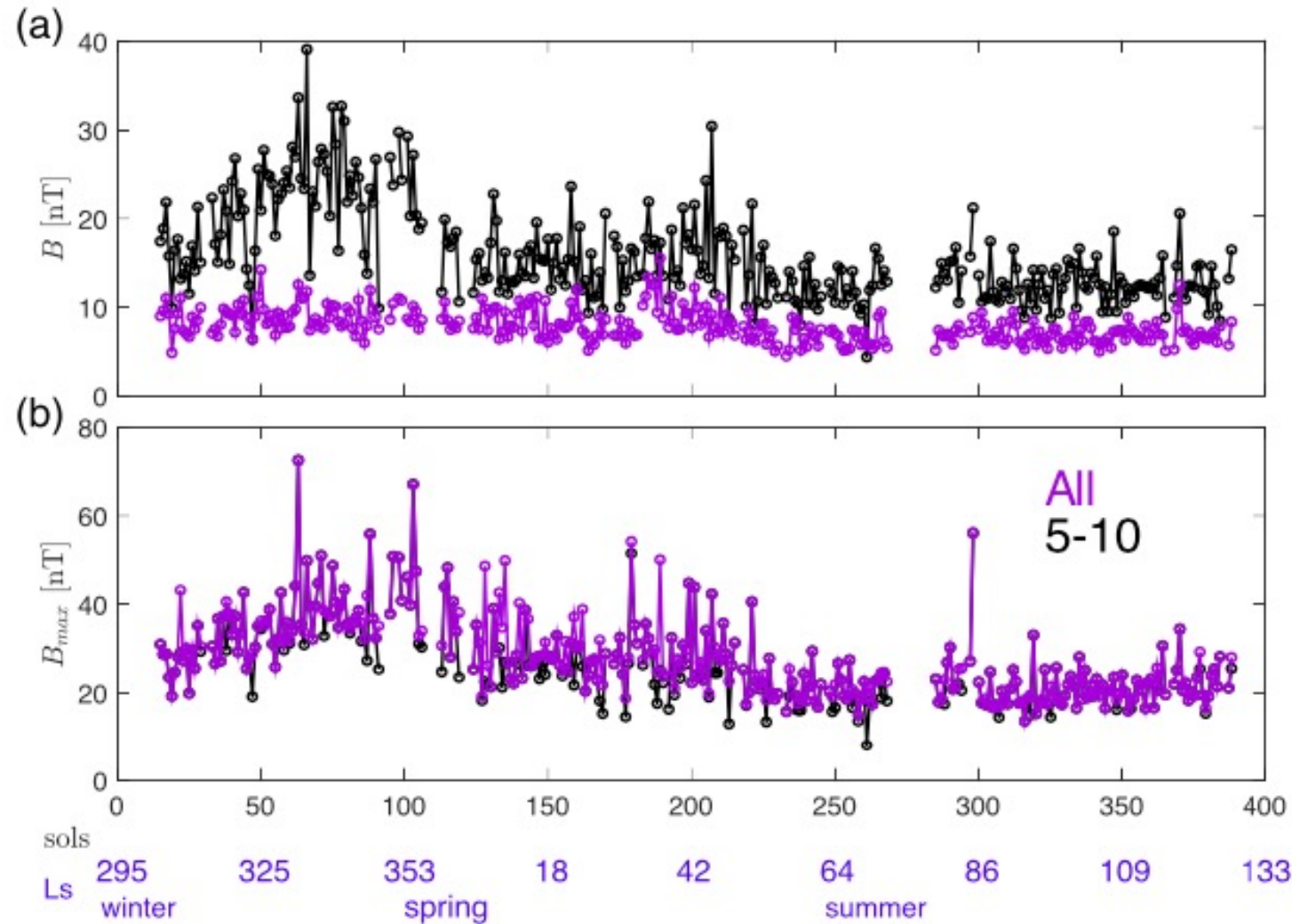


Figure 2

The Evolution of the Magnetic Field Over Time

- 26-sol windows
 - 長周期変動を調査可能
 - Sol 100 以降で急激に振幅が低下
 - Fig.1 で見られた Sol が大きくなるにつれて 5 – 10 hr の振幅低下に起因
 - 1日平均での平均振幅の変化は数 nT
 - 5 – 10 hr に着目すると 10 – 25 nT

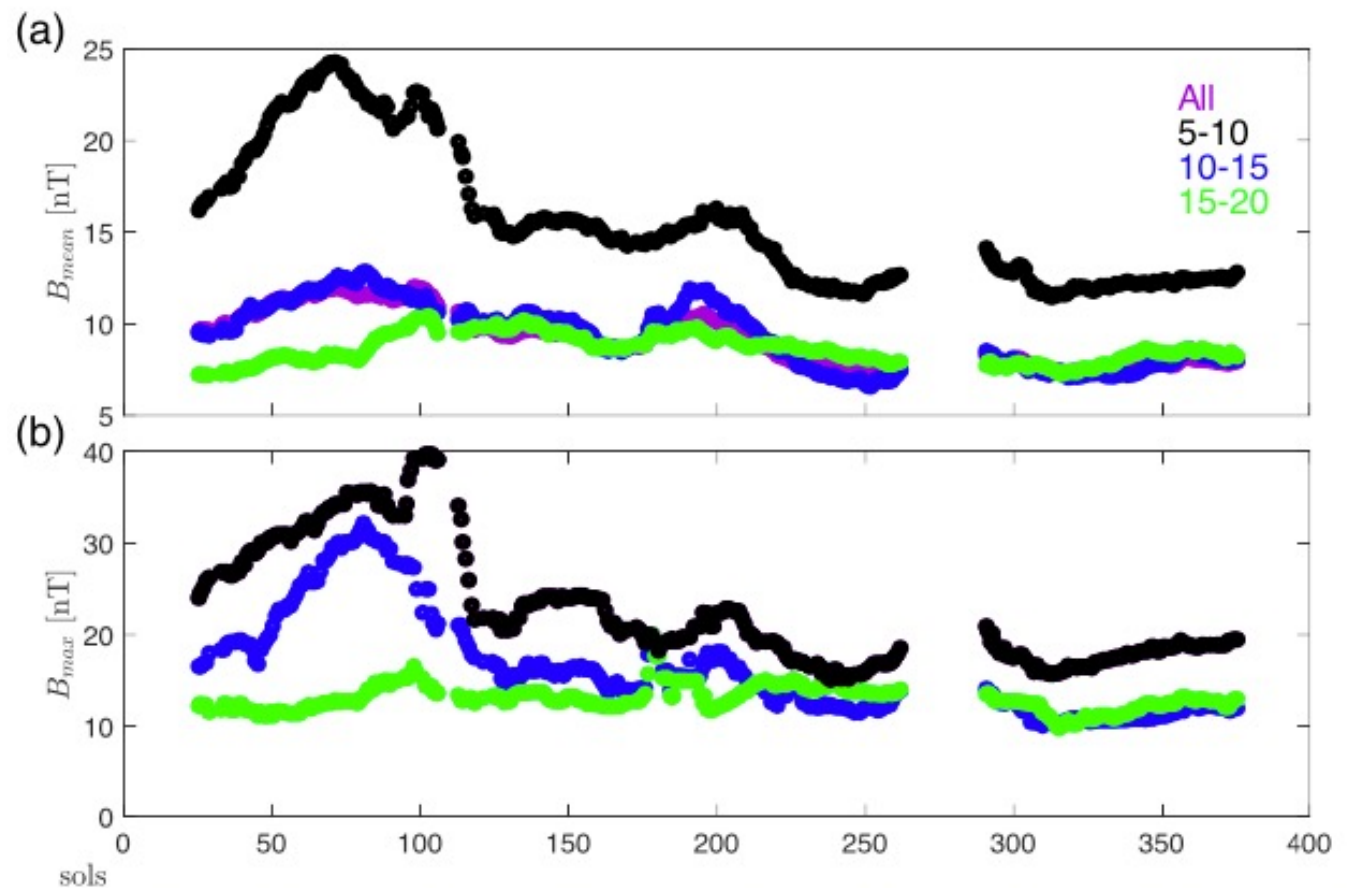


Figure 3

- InSight 着陸地点では、電離圏磁場が地殻に誘導する磁化はほとんど寄与しない (Johnson+, 2020)

→ 磁場の時間変化を見る際に影響を無視できる

Artificial Drivers of Variations

- Calibration procedure
 1. センサー/エレクトロニクス温度のIFG依存性を打ち上げ前試験データより校正
 2. 打ち上げ前試験で判明している宇宙船磁場を考慮
 3. 温度や太陽電池パネル電流を Step 2 後に補正
 - 打ち上げ前温度補正では特に着陸場所での夜側温度に非対応
 - $\text{dB}_{\text{fit}} = c_0 + c_1 \text{ST} + c_2 \text{ET} + c_3 \text{SAC} + c_4 \text{SACT}$
 - ST: sensor temperature
 - ET: electronics temperature
 - SAC: fixed solar array currents
 - SACT: “total” solar array current
- Figures 1 – 3: Step 3 の影響は小さい

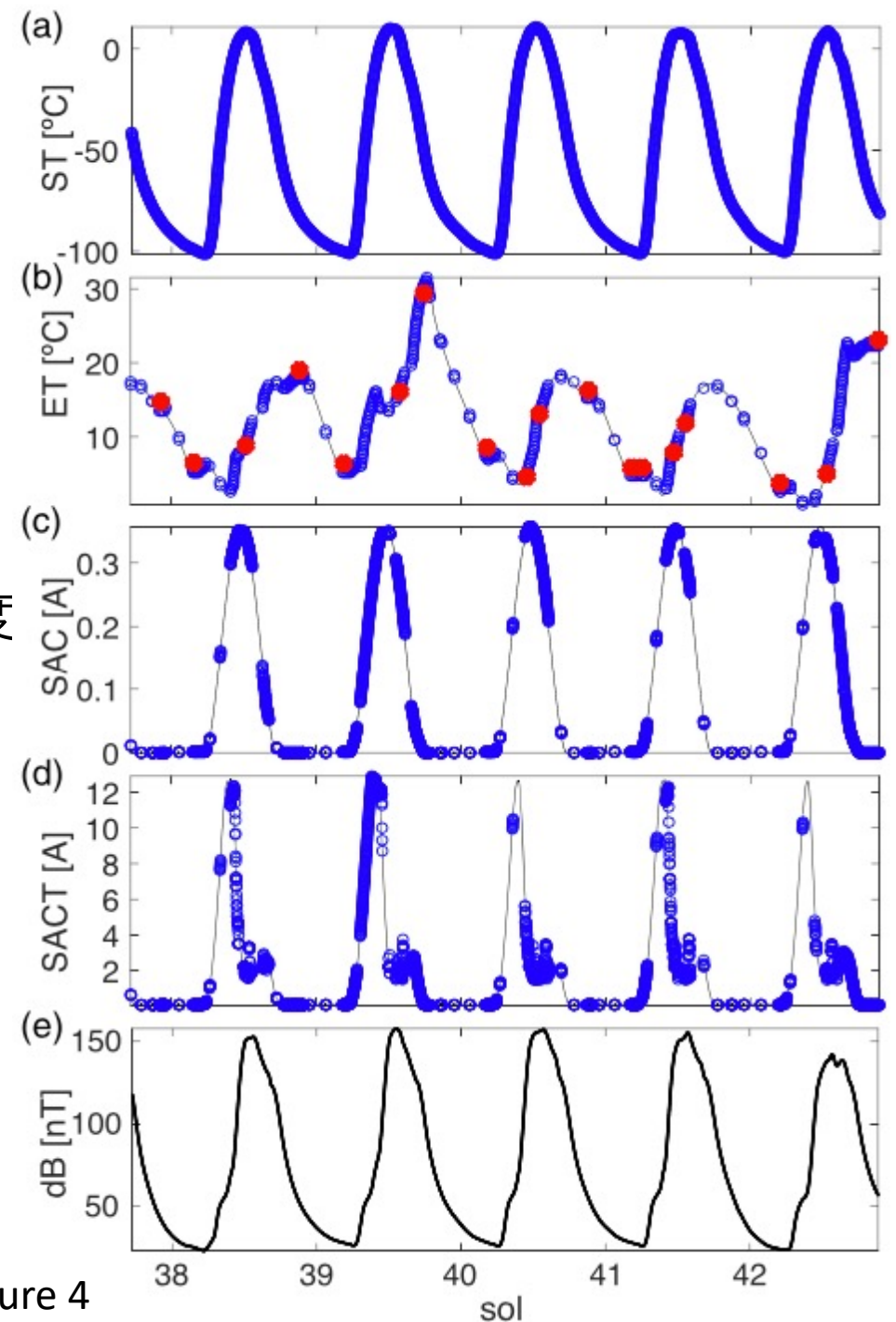


Figure 4

Wind-Driven Ionospheric Currents

- Magnetic field at ionospheric altitudes
 - 残留磁場モデル
 - Mo14: Morschhauser+, 2014
 - L19: Langlais+, 2019
 - Mi19: updated from Mittelholz+, 2018
 - ダイナモ領域では 40 – 70 nT (L19, Mi19)
 - Mo14 では 20 – 30 nT
 - MGS データに基づく

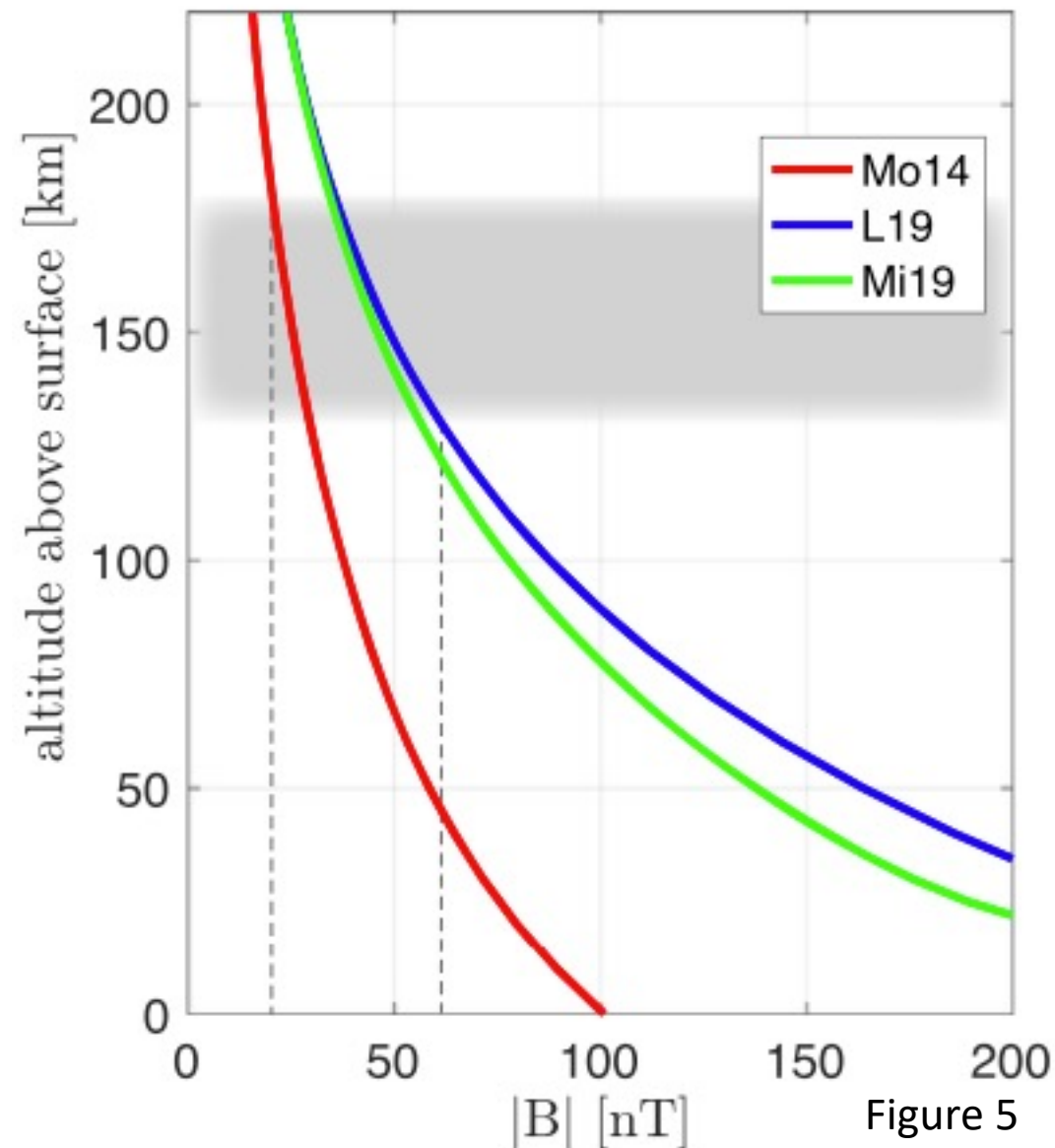


Figure 5

Wind-Driven Ionospheric Currents

- Magnetic field at ionospheric altitudes

- 残留磁場を引いた後の残りの磁場 (外部起因磁場) by MAVEN
- 強磁場領域は外部磁場の影響を受けやすく、電離圏下部まで入り込んでくる
- InSight 着陸地点は南半球の強磁場領域ほどではない残留磁場
- 夜側では外部磁場の影響が小さい

- IMFと電離圏電流の磁場に対する影響を切り分けられない

→ 以下では単純にダイナモ領域の背景磁場強度として残留磁場を用いる

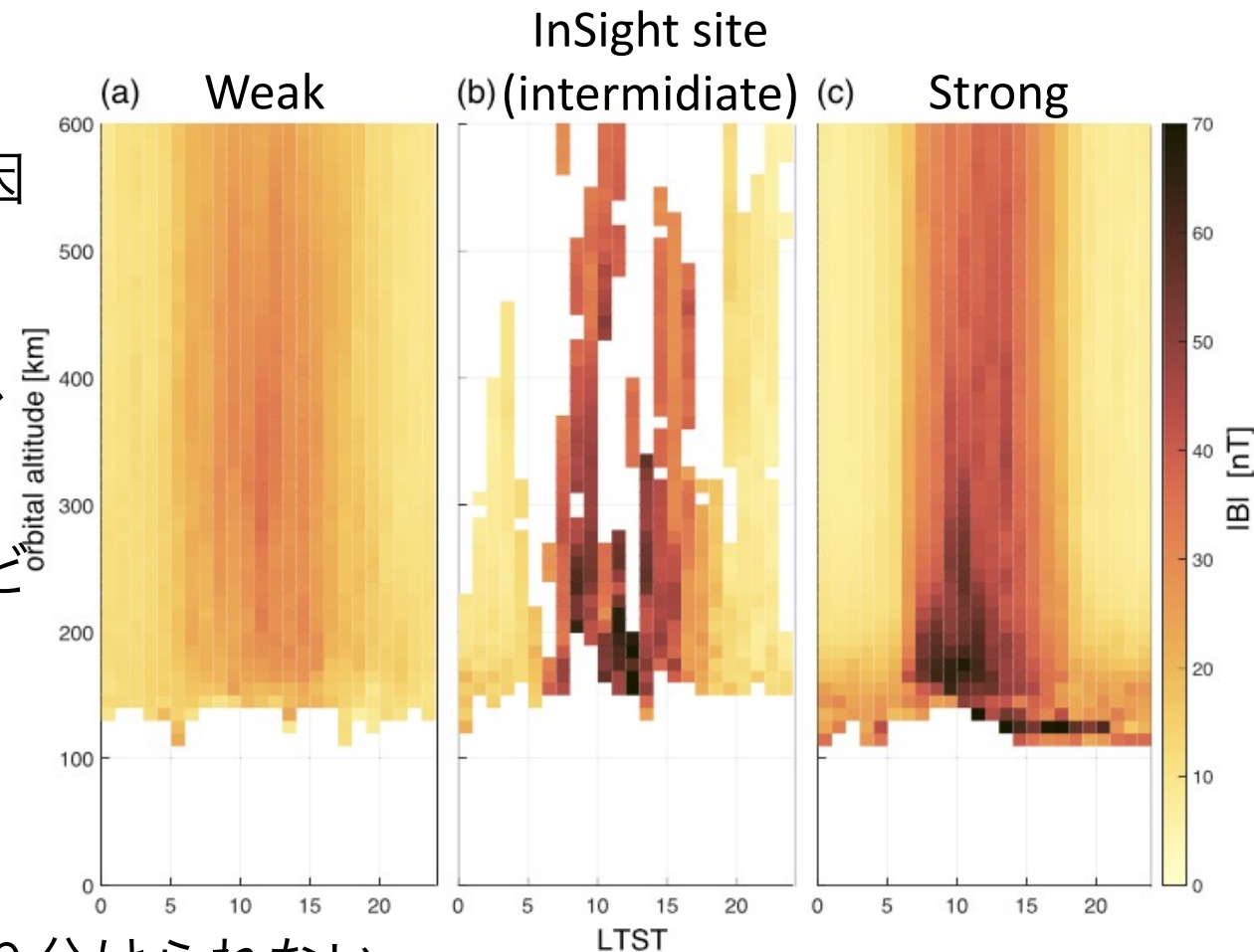


Figure 6

Wind-Driven Ionospheric Currents

- Atmosphere at ionospheric altitudes
 - MGCM (Forget+, 1999) から電子密度 (n_e), 中性風速度 (水平方向, v_h) を算出 (a, b)
 - n_e は真昼でほぼ対称で、1火星年で 25% 変動
 - v_h は午前中にピークを持ち、1火星年で 3倍程度変動

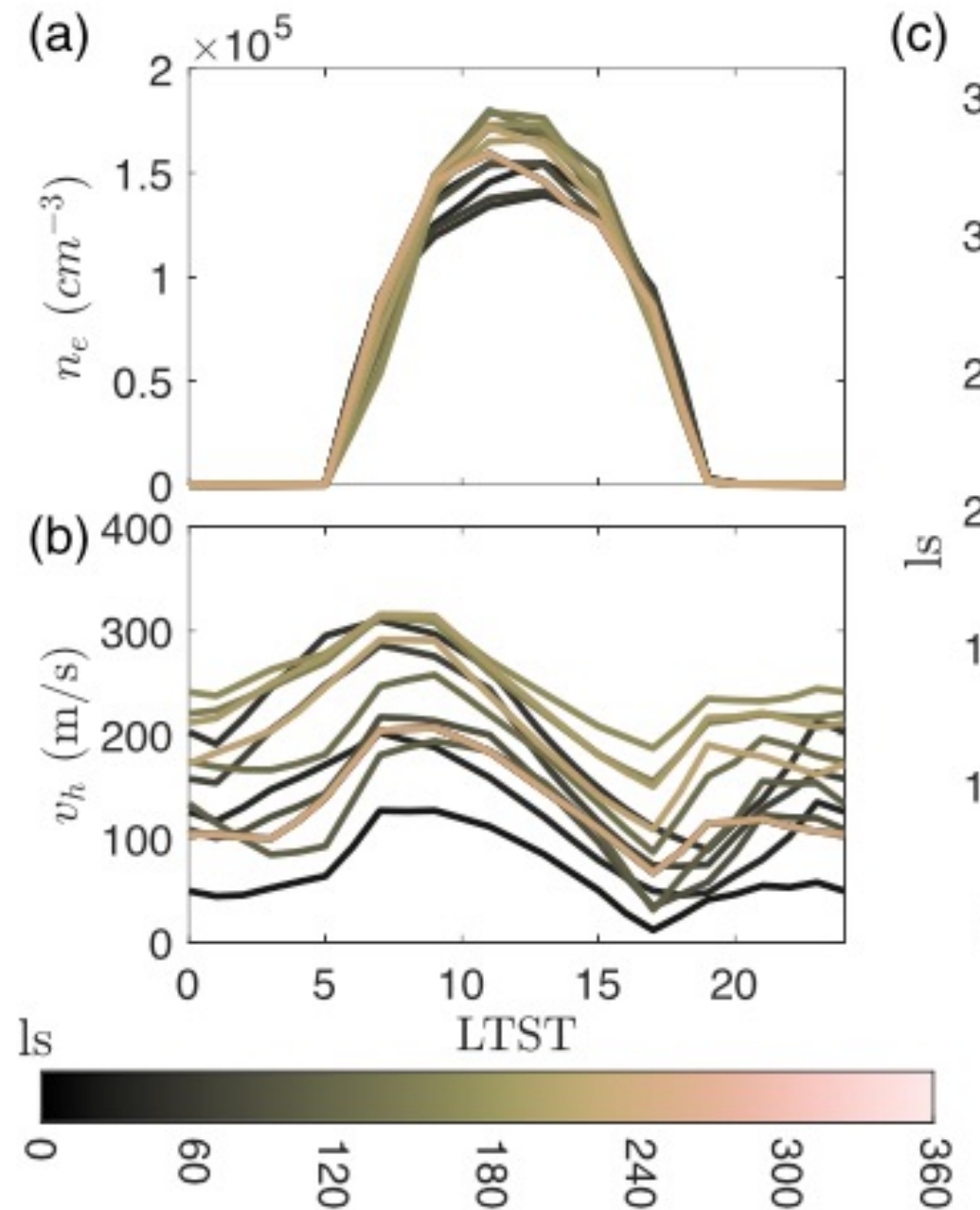
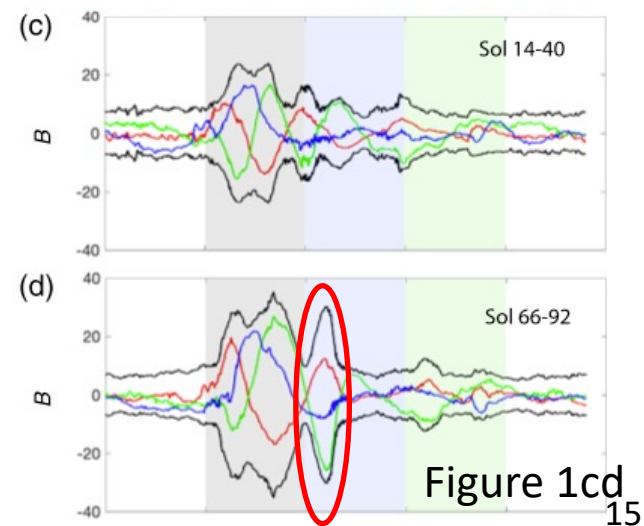
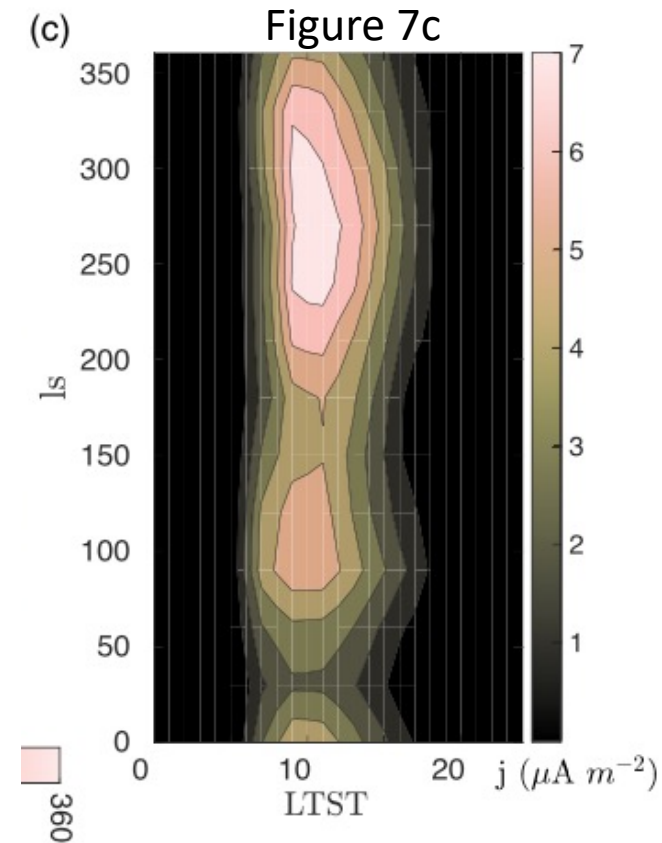
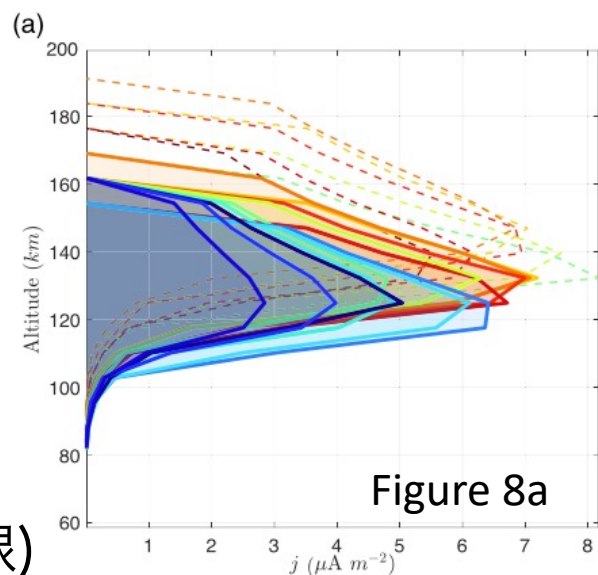


Figure 7ab

Wind-Driven Ionospheric Currents

- Atmosphere at ionospheric altitudes
 - 電流密度 (7c) $j = n_e q(v_i - v_e) \approx n_e q v_i \approx n_e q v_h$
 - ダイナモ領域では電子はほぼ磁力線方向に動く (鉛直方向)
 - イオンは中性大気とほぼ一緒に (水平方向に) 動く
 - 9 – 11 hr に電流密度のピークを持つ
 - 大気中にダストを加味するとピークが2時間程度遅れる
→ (1c) & (1d) の 10 hr 過ぎのピークはダストの影響？

- 合計の電離圏電流密度はダイナモ領域での電流密度の高度方向積分 (8a)
 - $2.8 < j_{\text{total}} < 7.2 \mu\text{A m}^{-2}$
 - ダスト期間 (Ls = 180 – 360°) はピーク高度とピーク値が上昇 (破線)



Wind-Driven Ionospheric Currents

- Estimating the lower boundary of the dynamo region
 - 電流密度の高度積分値が重要
 - Upper boundary: ~180 km
 - Lower boundary: $\omega_e = \nu_{en}$ (8b & 8c); ~130 km

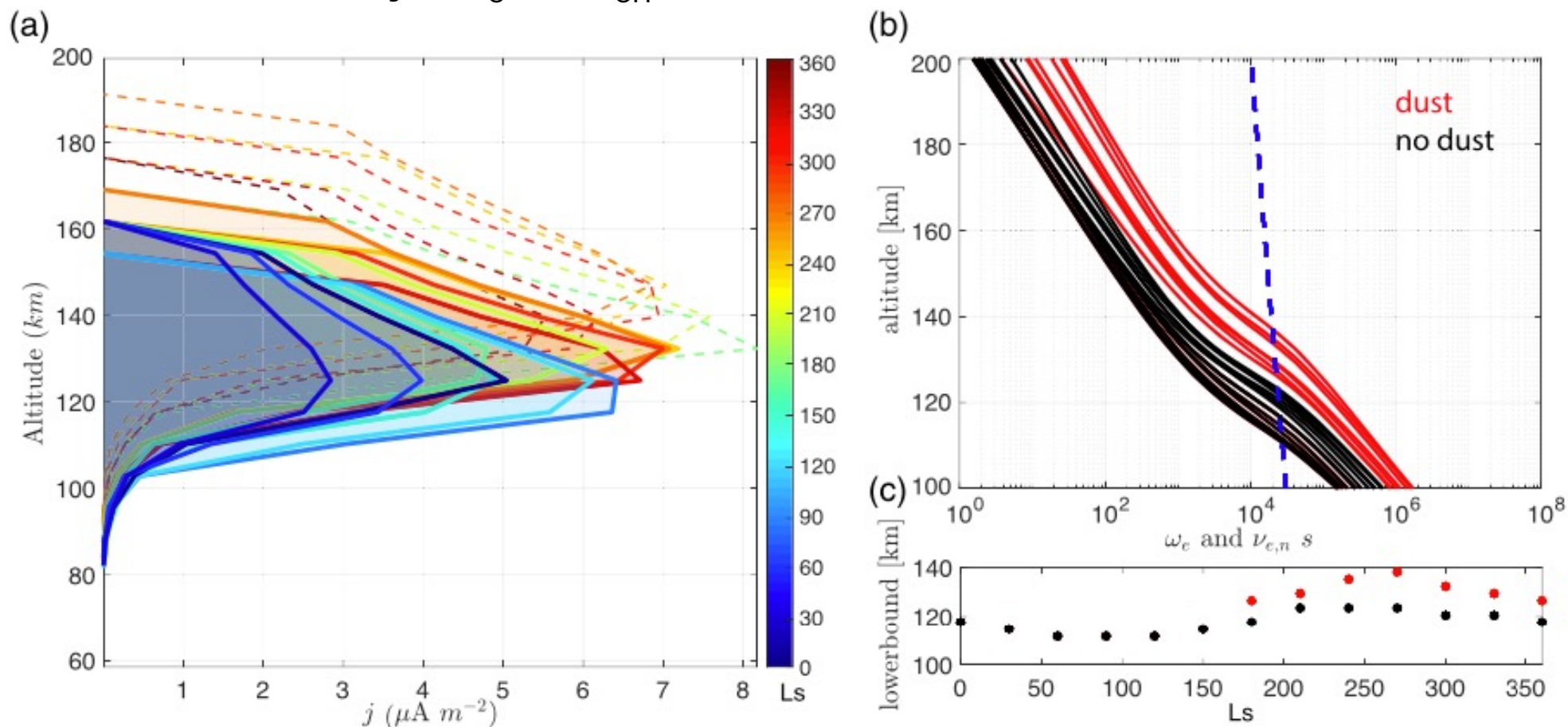


Figure 8

Wind-Driven Ionospheric Currents

- Magnetic fields due to ionospheric currents

- ダイナモ領域磁場から火星表面磁場への変換

- 2 stories

- 1. 下部境界に電流シートを仮定

- 2. 下部境界に線電流を仮定

- 電流シートを仮定 (磁場強度は電流シートからの位置に依存しない)

- $B_{\text{surface}} = B_{\text{dynamo}} = \mu_0 \sum j(z) \cdot 1/2$

- 線電流を仮定

- $B_{\text{dynamo}} = \mu_0 \sum j(z) \cdot 1/\pi$

- $B_{\text{surface}} / B_{\text{dynamo}} = L/(2H\pi)$

- L: 空間の広がり (~55 km), H: ダイナモ領域中間点の高度 (~150 km)

Wind-Driven Ionospheric Currents

- Magnetic fields due to ionospheric currents
 - 電流シートを仮定
 - $B_{\text{surface}} = B_{\text{dynamo}} = 83 \pm 15 \text{ nT}, 105 \pm 22 \text{ nT}$ in a dust scenario
 - 線電流を仮定
 - $B_{\text{surface}} = 9.5 \pm 1.8 \text{ nT}, 12.1 \pm 2.5 \text{ nT}$ in a dust scenario

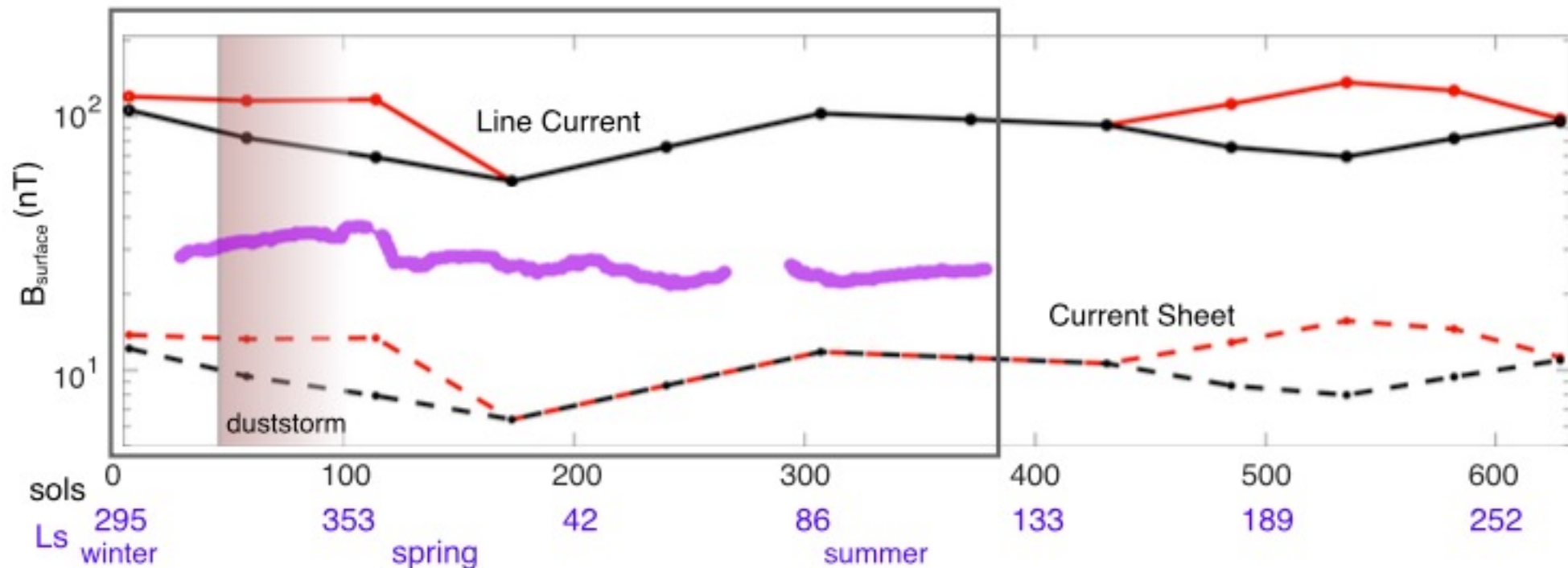


Figure 9

Wind-Driven Ionospheric Currents

- Magnetic fields due to ionospheric currents
 - 表面磁場の推定は MHD シミュレーションと一致 (Lillis+, 2019)
 - 注意点
 - ピーク電流密度があるダイナモ領域でのデータが少なく観測との直接的な比較ができない
 - InSight 着陸地点から 10° 以内でも MAVEN の観測データが 100 点以下と少ない
 - この地点の残留磁場構造が不均一で、高度 130 km で 2 倍程度変動するため、ダイナモ領域で駆動される磁場に影響を与え得る

Wind-Driven Ionospheric Currents

- Magnetic fields due to ionospheric currents
 - IFGと観測との比較 (purple, from Figure 3b, 最大振幅)
 - 観測は 20 – 40 nT で、電流シートケースと線電流ケースの間
 - 最大振幅の増大は regional dust storm に起因
 - Wind-driven 磁場 (Sol 180 – 300) の上昇が観測で見られない
 - Figure 2b で見られた短い変動は、電離圏電流の局所的な変化を反映
 - 電流密度の高度積分値は下部電離圏ダイナモ境界の高度に強く依存

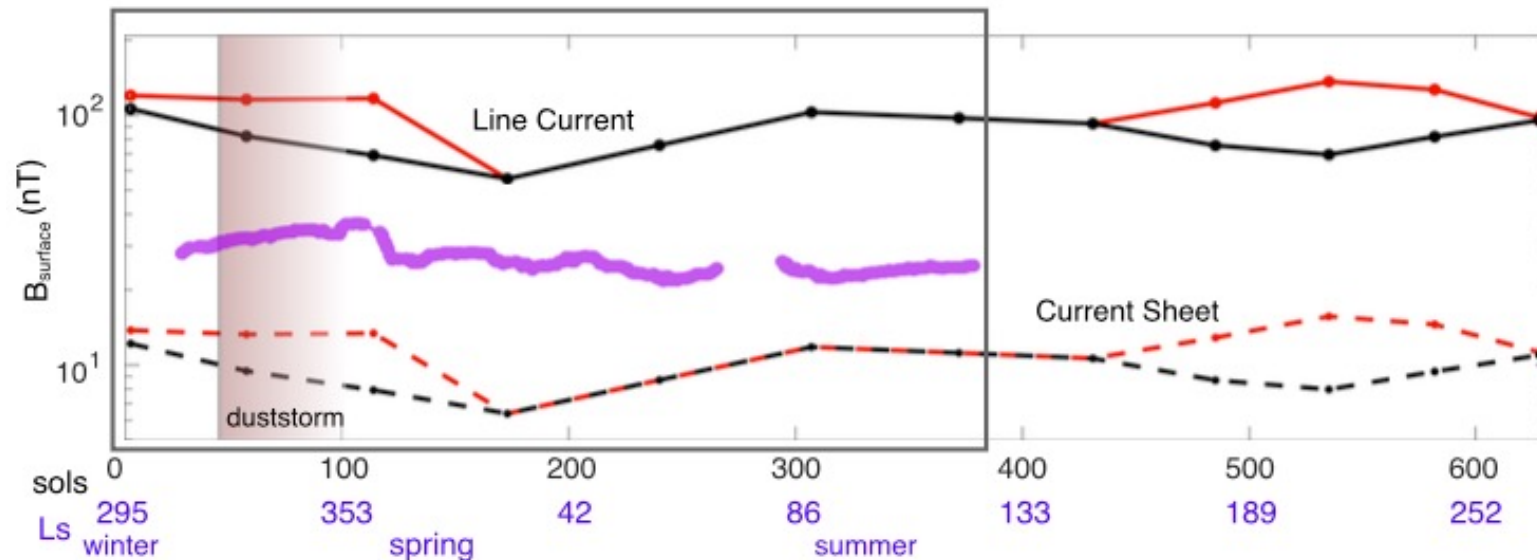


Figure 9

Conclusions

- InSight IFG データを389 sols 解析から、磁場振幅のピークが20 – 40 nT
 - ピークは 5 – 10 hr に出現するが、100 sols 後から減衰する
 - 秒–分程度の短周期変動も大きく、ピークが 80 nT に達する
- 温度や太陽電池パネル電流が与える IFG 観測への影響は大きい
- Wind-driven 電離圏電流は誘導磁場を生成する
 - 電流算出のために、MGCMを用いて電子密度と水平速度を計算
- Wind-driven 磁場とIFG観測との比較では振幅のピークが1桁以内、ダストストーム期間では2倍以内
- Wind-driven 電流は火星表面で見られる日変動に重要
 - 日変動のソースは火星マンツルの電気伝導度を調査するために使われ得る

Conclusions

- この研究は0.58 Mars years でのみ行われたため、継続的な観測が重要
 - 季節変動
 - regional vs. global dust storm
 - 26日周期の modulation
- 時間変化する磁場の調査は、火星表面の電磁気環境を理解することにつながる
 - 特に Solar cycle 24, 25
 - Solar cycle 25 の活動上昇期における表面磁場の変化は、InSight と MAVEN との連携観測によって、より理解が深まる

References

- Forget, F., et al. (1999). Improved general circulation models of the Martian atmosphere from the surface to above 80 km. *J. Geophys. Res.*, *104(E10)*, 24,155-24,175.
- Johnson, C. L., et al. (2020). Crustal and time-varying magnetic fields at the InSight landing site on Mars. *Nature Geoscience*, *13(3)*, 199-204.
- Langlais, B., et al. (2019). A new model of the crustal magnetic field of Mars using MGS and MAVEN. *J. Geophys. Res. Planets*, *124*, 1542-1569.
- Lillis, R. J., et al. (2019). Modeling wind-driven ionospheric dynamo currents at Mars: Expectations for InSight magnetic field measurements. *Geophys. Res. Lett.*, *46*, 5083-5091.
- Mittelholz, A., et al. (2018). A new magnetic field activity proxy for Mars from MAVEN data. *Geophys. Res. Lett.*, *45*, 5899-5907.
- Morschhauser, A., et al. (2014). A spherical harmonic model of the lithospheric magnetic field of Mars. *J. Geophys. Res. Planets*, *119*, 1162-1188.