

Electron densities and temperatures in the Martian ionosphere: MAVEN LPW observations of control by crustal fields

Andrews, D. J., Stergiopoulou, K., Andersson, L., Eriksson, A. I. E.,
Ergun, R. E., & Pilinski, M. (2023). JGR Space Physics, 128,
e2022JA031027.

Presented by S. Sakai (Tohoku U.)

Abstract

- MAVEN LPW の観測から，地殻残留磁場構造と電子密度・温度の相関関係を明らかに
 - 残留磁場領域での電子温度は昼側だけでなく夜側でも低くなり，電子密度は高くなる
- プラズマ密度・温度との残留磁場のカップリングがどの高度域まで起こっているのかを明らかにし，残留磁場が太陽風やIMFとのカップリングにどう影響するのかについて調査する
 - 太陽風動圧の変化は，残留磁場領域でのプラズマの密度変化により影響を与える
 - IMFの強度変化に対応して，残留磁場による電子密度と温度の制御にも影響を与える

Introduction

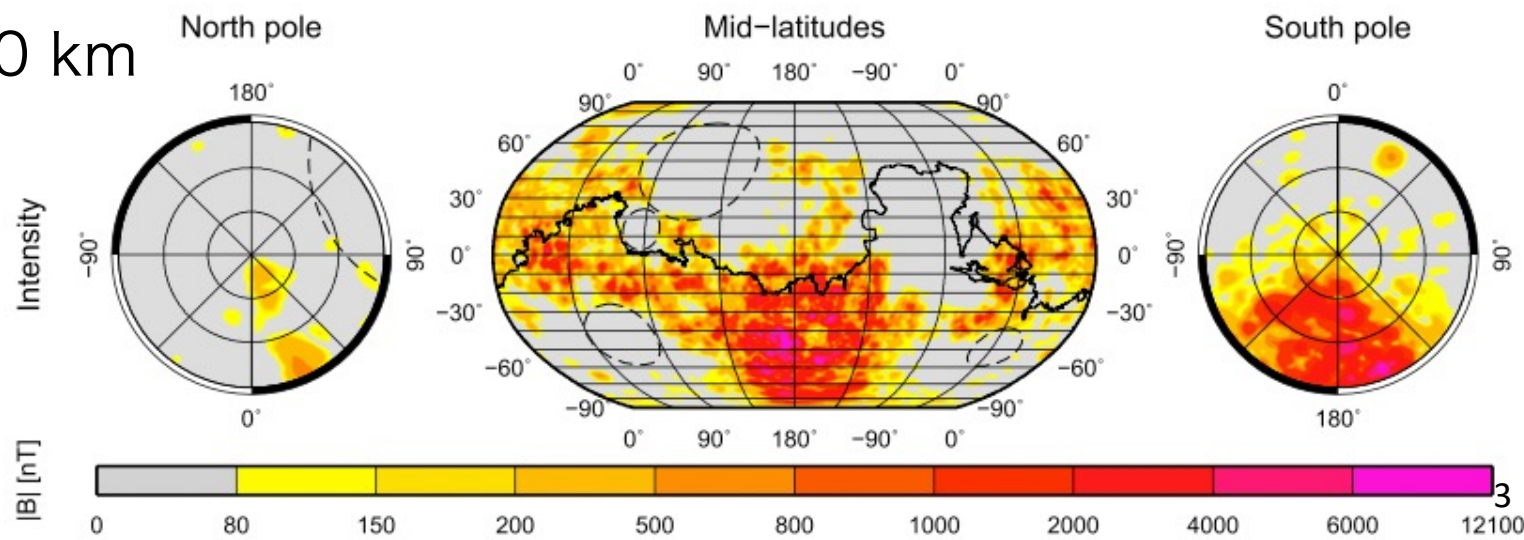
火星-太陽風相互作用は2つの要因で金星より複雑

1. 外圏が広範囲に渡っているため、ピックアップによるイオンプリュームが卓越し (Dong+, 2015), 更に, 太陽風と電離圏を区別する境界の範囲が狭いこと (Holmberg+, 2019)
2. 地殻残留磁場が場所によっては十分に強く, パイルアップしたIMFより支配的になること (e.g., Brain+, 2003)

地殻残留磁場

- 高高度電離圏ではイオン・電子共にサイクロトロン周波数が衝突周波数より大きいので, プラズマとして支配的
- イオンは高度~200 km, 電子は~130 km
以下で demagnetized
 - この高度域では残留磁場の影響は小さい

(Morschhauser+, 2014)



Introduction

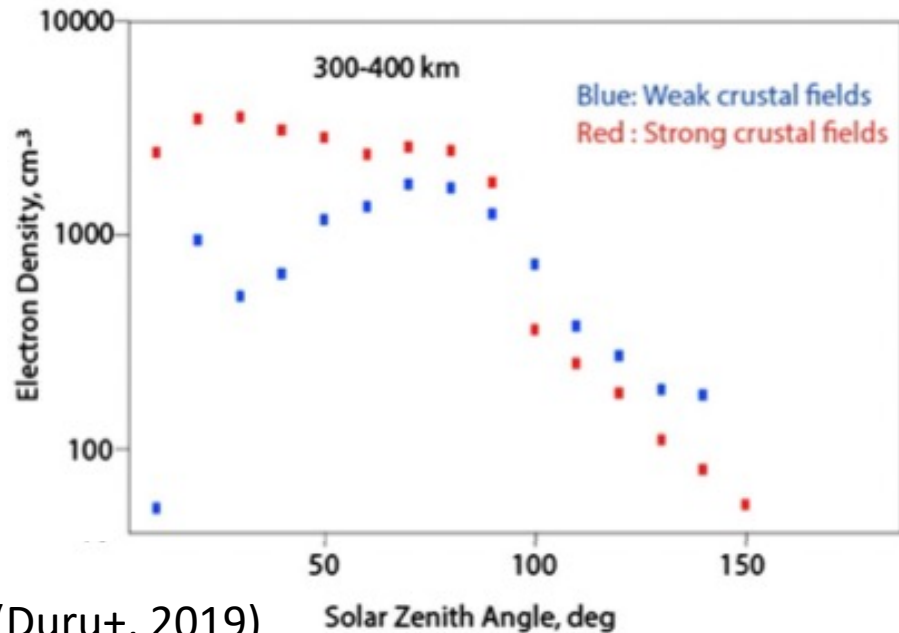
高度200 km以上の昼側電離圏プラズマ

- 残留磁場領域での電子密度の増大 (e.g., Andrews+, 2013, 2015; Dubinin+, 2012; Duru+, 2019; Flynn+, 2017)

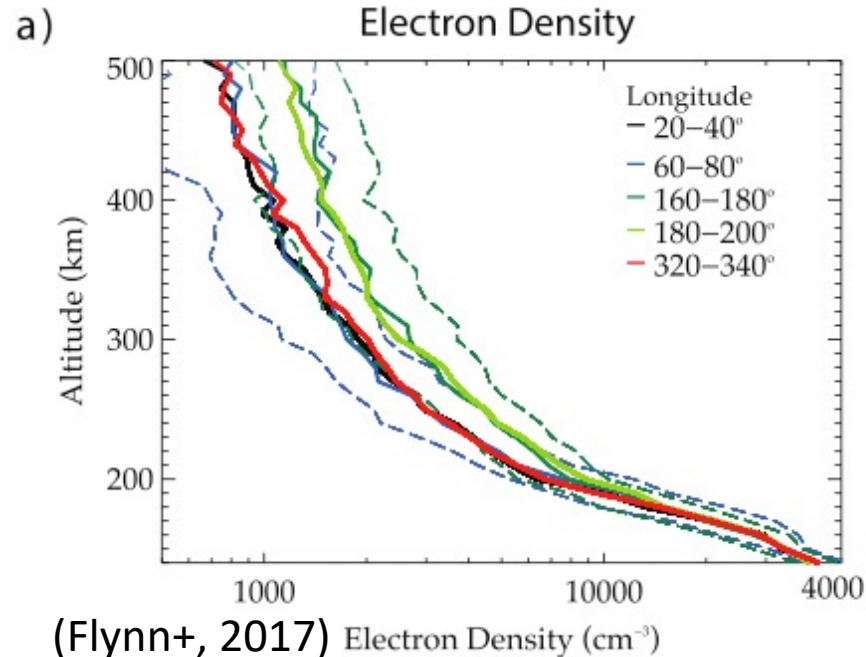
- 残留磁場領域での電子温度の減少 (Flynn+, 2017; Sakai+, 2019)

夜側電離圏プラズマ

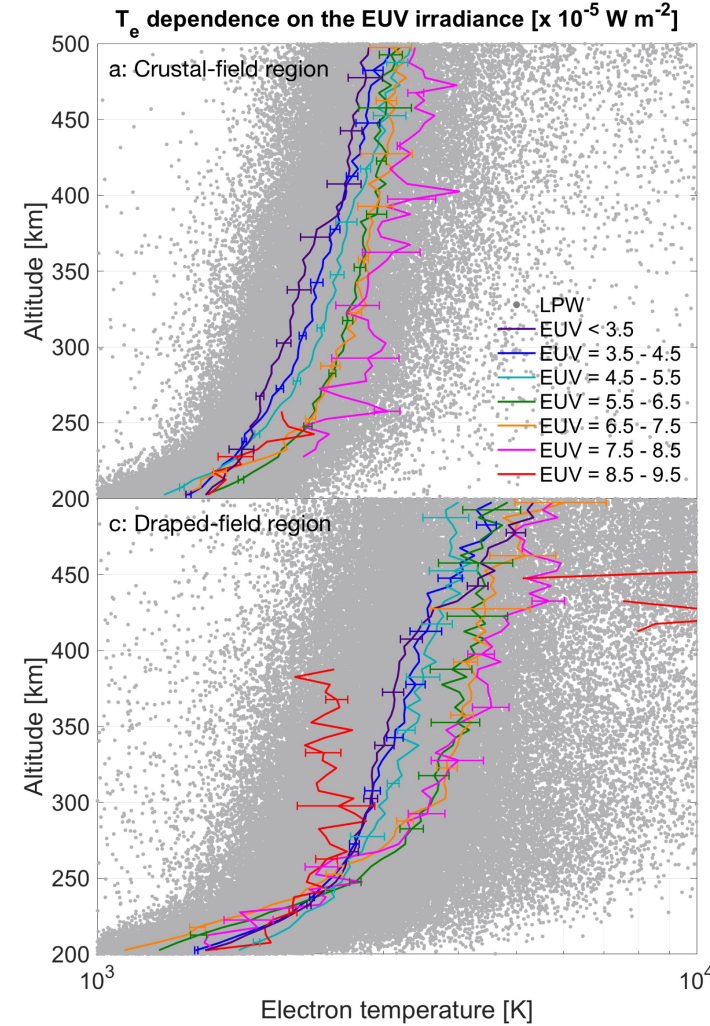
- 残留磁場領域で電子密度が減少 (Andrews+, 2013; Duru+, 2019)



(Duru+, 2019)



(Flynn+, 2017)

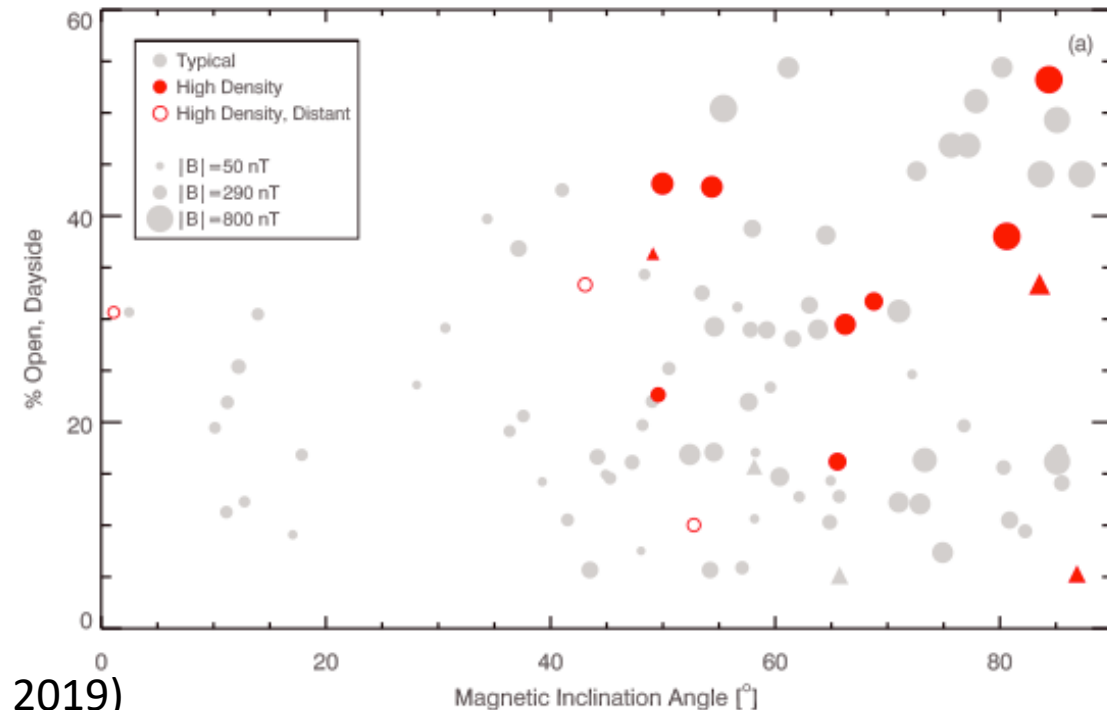


Introduction

残留磁場構造・強度と電離圏特性

- 強鉛直磁場領域で電子密度が増大 (Fallows+, 2019; Nielsen+, 2007)
 - Two-stream instability
 - 低高度 (150 km?) での上向き輸送が MARSIS によって観測 (e.g., Andrews+, 2014, 2018; Duru+, 2006; Gurnett+, 2005, Nemec+, 2019a, 2019b)
 - 残留磁場領域付近に多い

→ プラズマが demagnetize されている低高度でも
残留磁場の影響があり, 電離圏構造を決めるのに非常に重要



(Fallows+, 2019)

Introduction: Purpose

MAVEN LPW の観測により飛躍的に電子密度・温度データが増加したので、電離圏プラズマ描像の地殻残留磁場に対する影響について統計的に解析することで再考

1. LPW が観測した電離圏電子密度・温度の概観
2. 電子密度・温度の高度及び SZA 依存性について平均的な描像を得る
3. 密度・温度の平均的な描像を用いて、緯度・経度・高度に対する相対的な変化を統計的に調査
4. プラズマパラメターの残留磁場に対する依存性が太陽風変動によって影響される範囲を調査

Observations: LPW

Langmuir Probe method

1. プラズマ中にプローブを置く
2. 負から正に電圧を掃引する
3. I-V (電流-電圧) 特性が得られる (I-V 曲線)
4. I-V 曲線をフィッティングすることで密度・温度・S/Cポテンシャルが得られる

MAVEN LPW

- 2本の7mブームに設置された円柱形センサー
- $-5.4 < V < 5.4$ を1秒以内で掃引 (電離圏内)
- 電圧区間は128分割されている

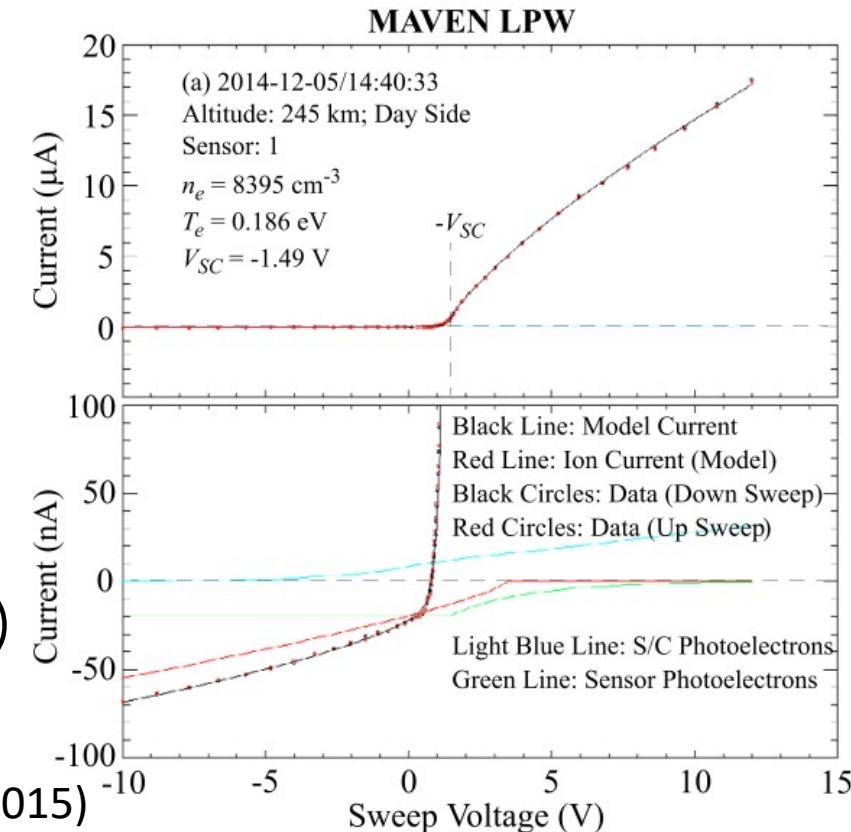
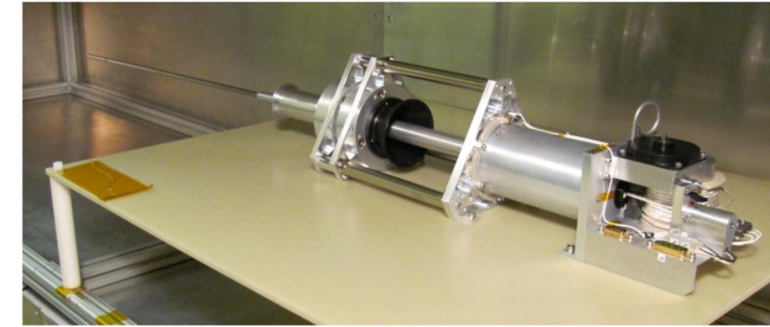
観測期間

- 2014-11-14 – 2019-02-01 (2.2×10^6 data, 8,116 軌道)
 - 2019年2月のAerobraking campaign は除く

MAVEN LPW
(Andersson+, 2015)

Sensor: 40 x 0.635 cm rod

Stub Guard
Preamplifier Enclosure



Observations: Ne & Te

Ne の 2 つの特徴的な分布 (境界)

1. 高高度で見られる 30 cm^{-3} 付近の低密度域
→ 磁気シースの電子を観測
2. 最下部で見られる広範囲に渡る高密度域
→ 電離圏のコールド電子を観測

Te も同様の分布

Fig. 1c: Ne vs. Te

- 電離圏：高 Ne 低 Te
- 磁気シース：低 Ne 高 Te
- 低高度の微細構造：Deep Dip のような特殊な軌道時のもの

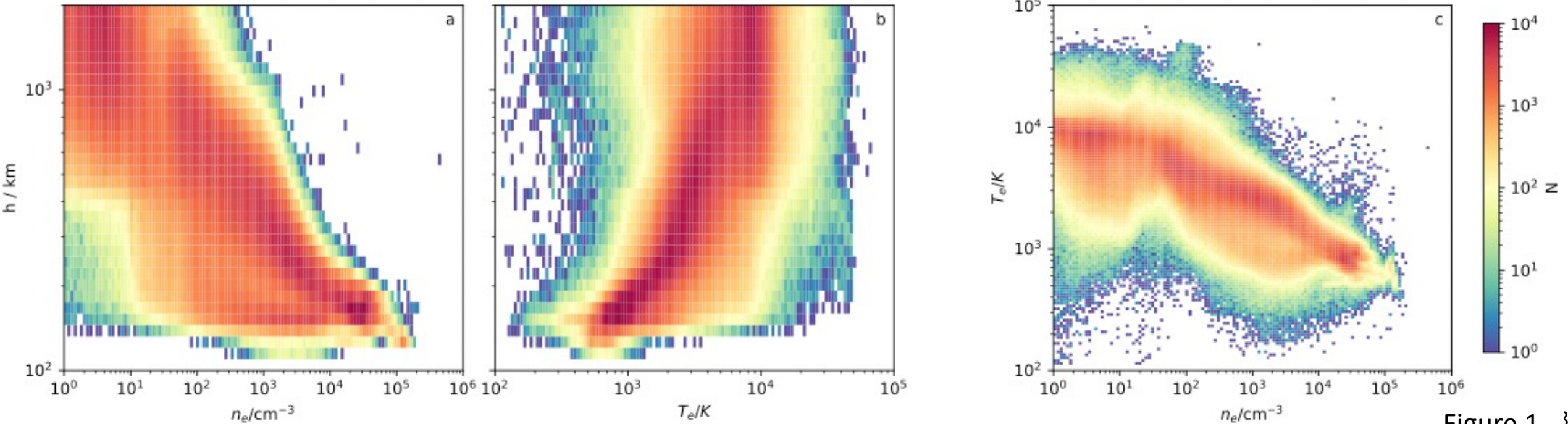
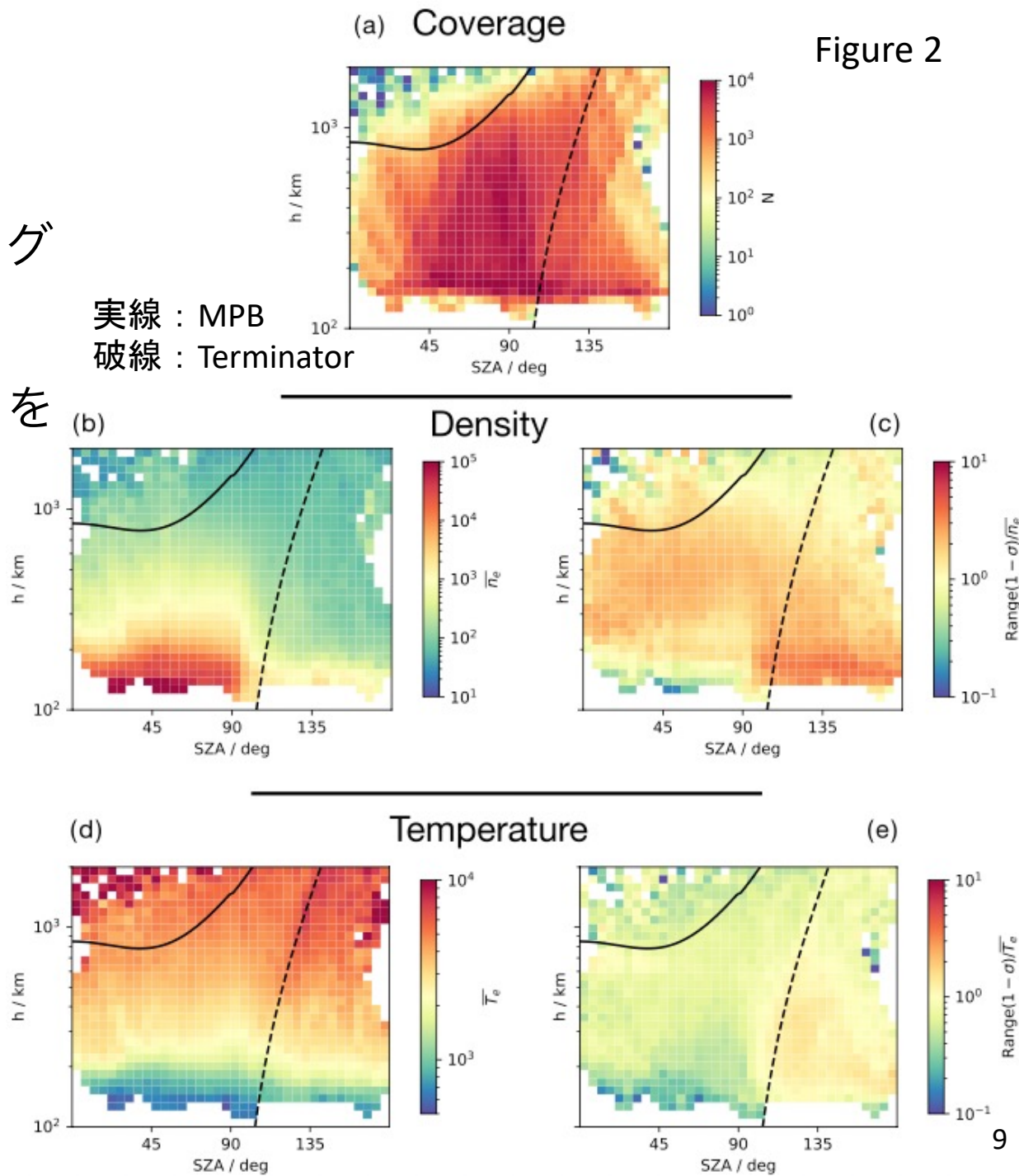


Figure 1 3

Observations: Altitude & SZA

Figure 2

- $\text{Ne} > 30 \text{ cm}^{-3}$ のみ (磁気シーズを取り除く)
- データは $45^\circ < \text{SZA} < 135^\circ$ で良くサンプリング
- Ne は昼側低高度で極大で高度と共に減少
 - ばらつきも小さいが 200 km を超えると 1 を超える
 - 昼側では MPB まではばらつきは単調増加
- Ne は夜側で顕著に小さい
 - ターミネータよりやや昼側で顕著に減少
→ 光化学平衡ではなく, 輸送過程が支配的
 - 200 km 以上ではほぼ一定
 - ばらつきは低高度で大きい
 - “patchy” nature

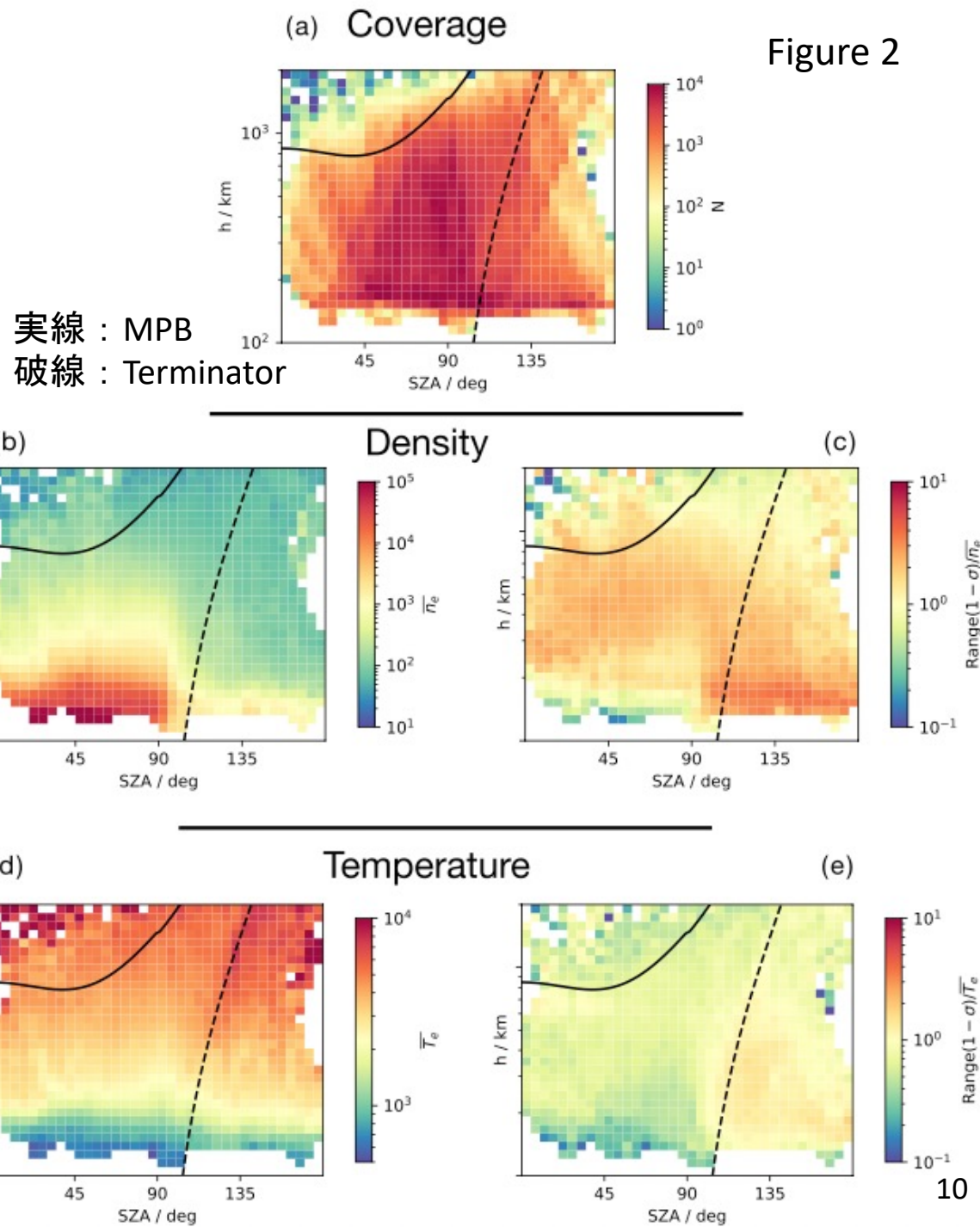


Observations: Altitude & SZA

Figure 2

- $N_e > 30 \text{ cm}^{-3}$ のみ
- T_e は低高度で極小で高度の増加に伴い全 SZA で上昇
- T_e は夜側の方が高い
- ばらつきはターミネーターからやや昼側で増加し夜側では大きい
 - N_e のばらつき変化と同様の理由
- 磁気シース電子の降り込みのような密度や温度の相対的な変化を大きくするプロセスがある
- MPB の上下で N_e , T_e 共に大きな変化がないことから, 電離圏電子のみを見ている

Fig. 2 の値を平均として用いる



Relative variations in Ne & Te

$$\Delta n_e^* = \frac{n_e - \bar{n}_e}{\bar{n}_e} \quad \Delta T_e^* = \frac{T_e - \bar{T}_e}{\bar{T}_e}$$

MAVEN geometry

- Weak fields → Strong fields → Weak fields → Deep ionosphere → Nightside

Ne, Te の変化

- Strong fields で相対的に Ne が増大, Te は減少
- Weak fields では相対的に Ne が減少, Te が増大
- Deep ionosphere では平均的
- これはあくまでも実例的である
 - 季節変化や太陽風条件等

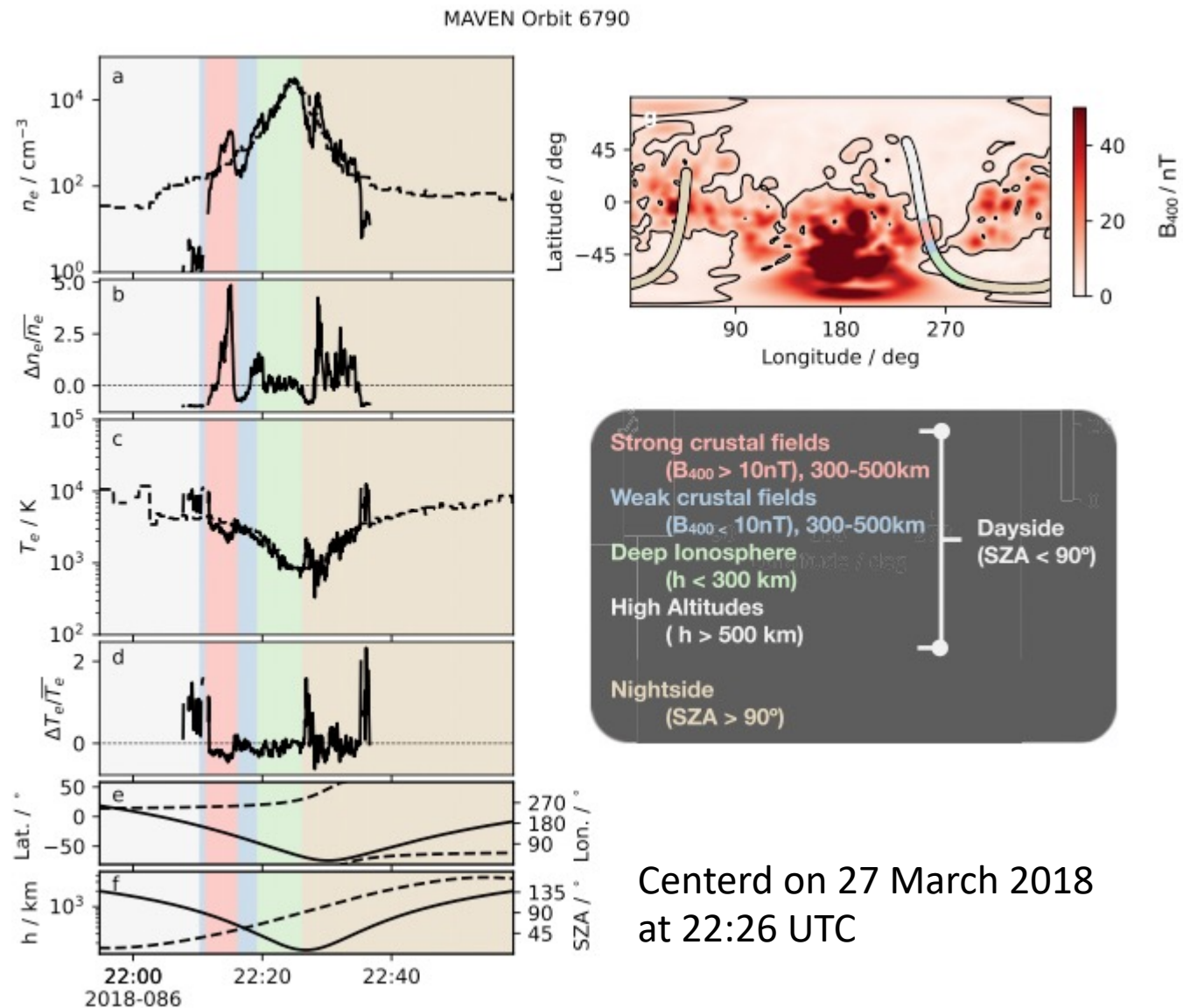


Figure 3

本論文はあくまでも、相対的な密度・温度変化の統計的傾向に着目

Statical correlations with crustal fields

Figure 4

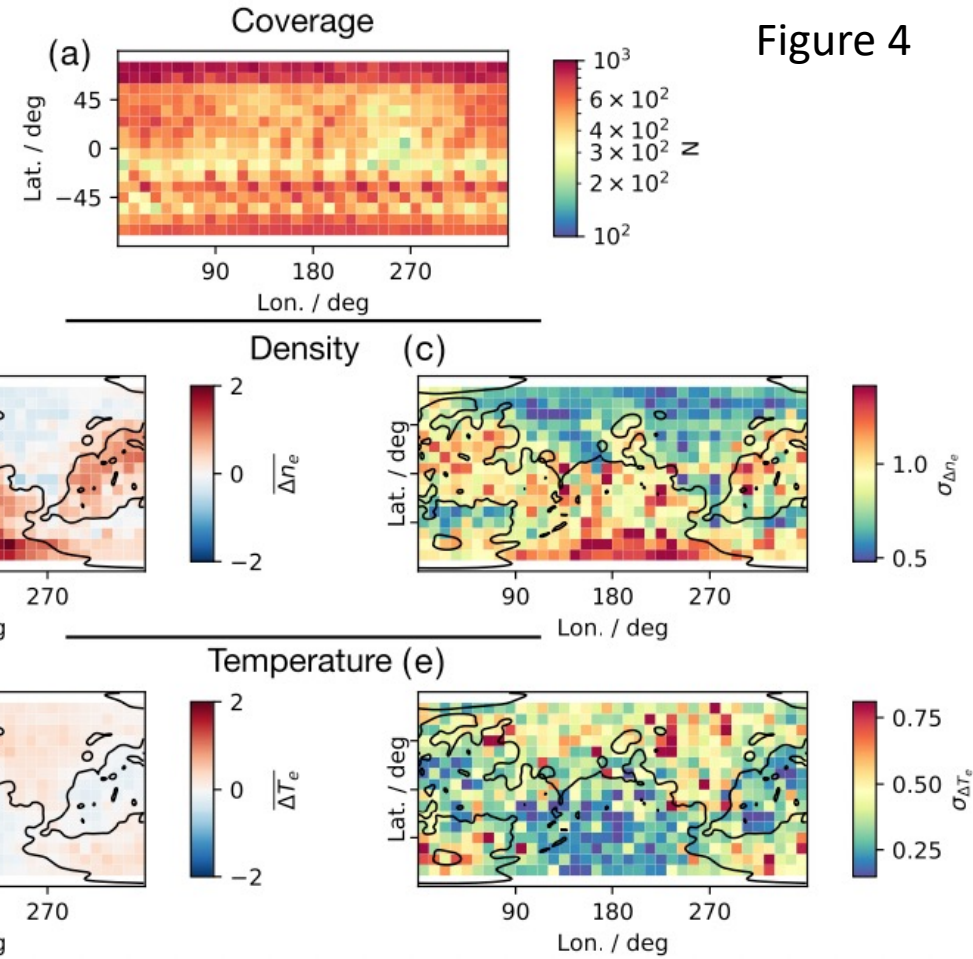
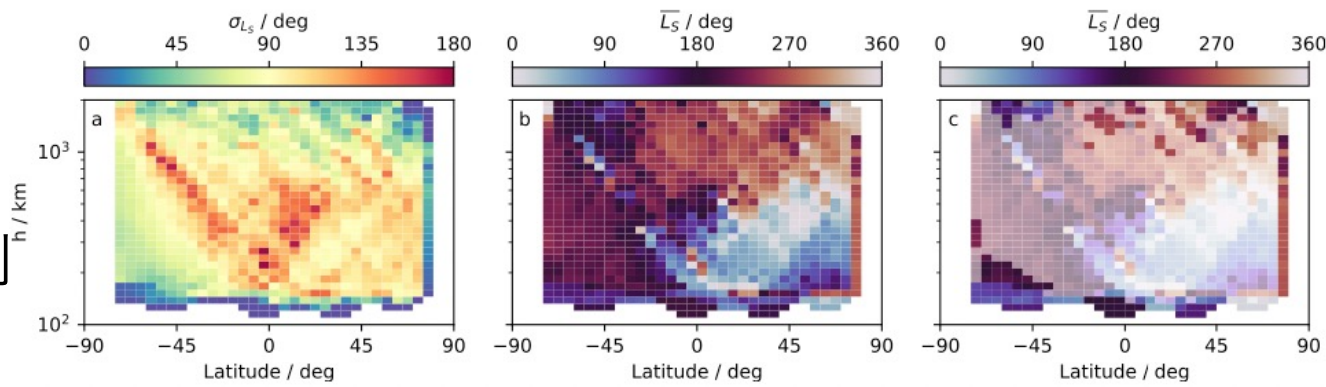


Figure 5



Ne

- 残留磁場領域で高密度で赤道付近まで広がっている
- 南緯70°を中心とした経度 bin 内に高 Δne バンド
 - 南夏半球のバイアスがかかった季節依存
 - 標準偏差も大きい

Te

- 残留磁場領域で低温度
- 高 Δne バンドの領域に低 ΔTe バンドは見られない

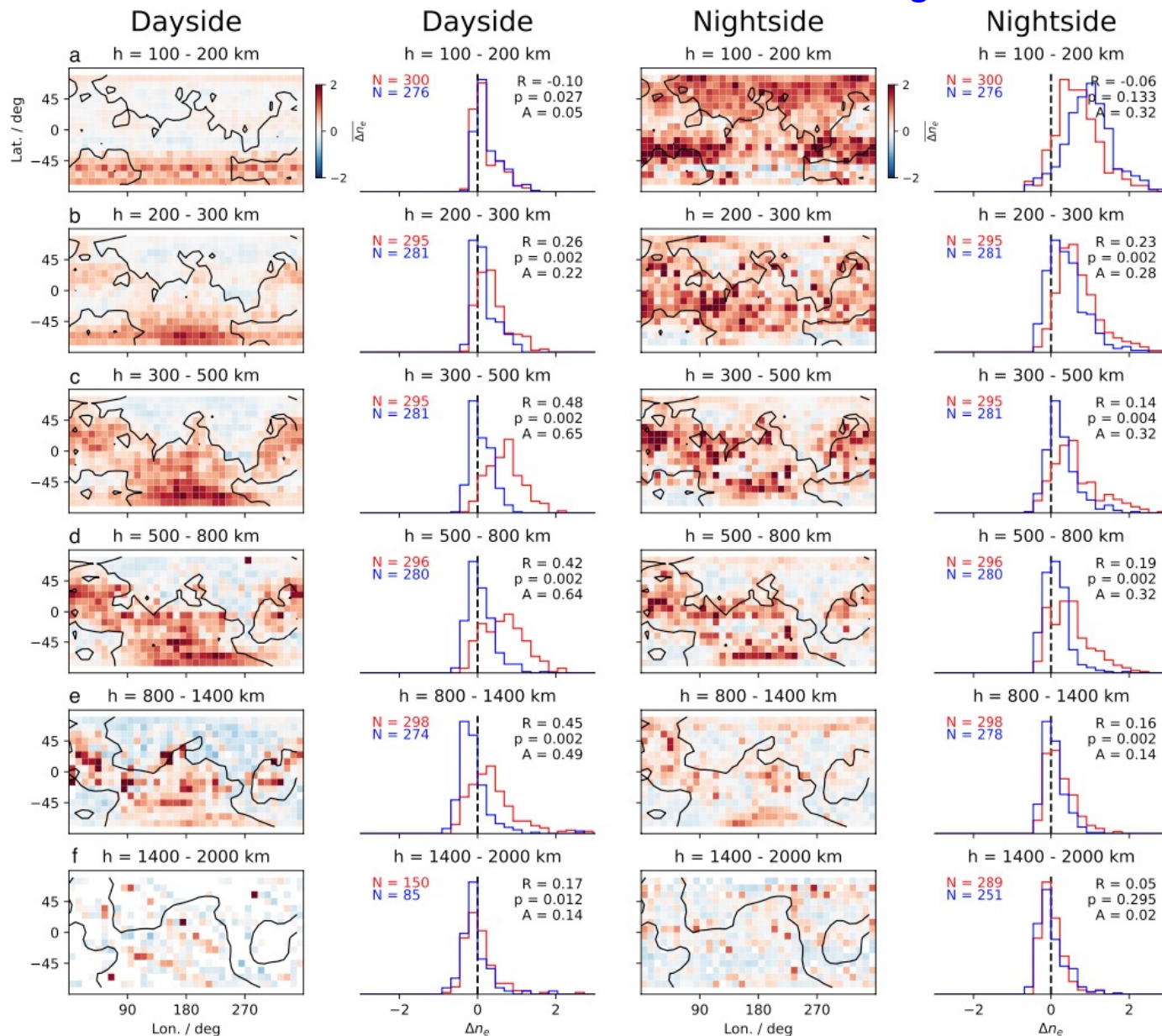
広範は L_s での観測だが、高度 300 km以下、1000 km 以上では限定的な季節のみでの観測が存在

Statical correlations with crustal fields: Ne

Red: Strong field region
Blue: Weak field region
Figure 6

100 – 200 km

- Δne と残留磁場領域の相関なし
- 経度方向に「正バンド」, 「負バンド」
 - 季節依存の効果 (南半球が冬)
- 残留磁場の影響よりも短いタイムスケールによる密度変動が卓越
 - LT, 太陽フラックス等



200 – 1400 km

- 昼側で Δne と残留磁場領域に正の相関
- 夜側は昼側ほど相関は強くない

1400 – 2000 km

- Δne と残留磁場領域に相関なし
- データカバレッジが少ない
- 季節依存の効果を含む

Statical correlations with crustal fields: Te

Red: Strong field region Figure 7
Blue: Weak field region

100 – 200 km

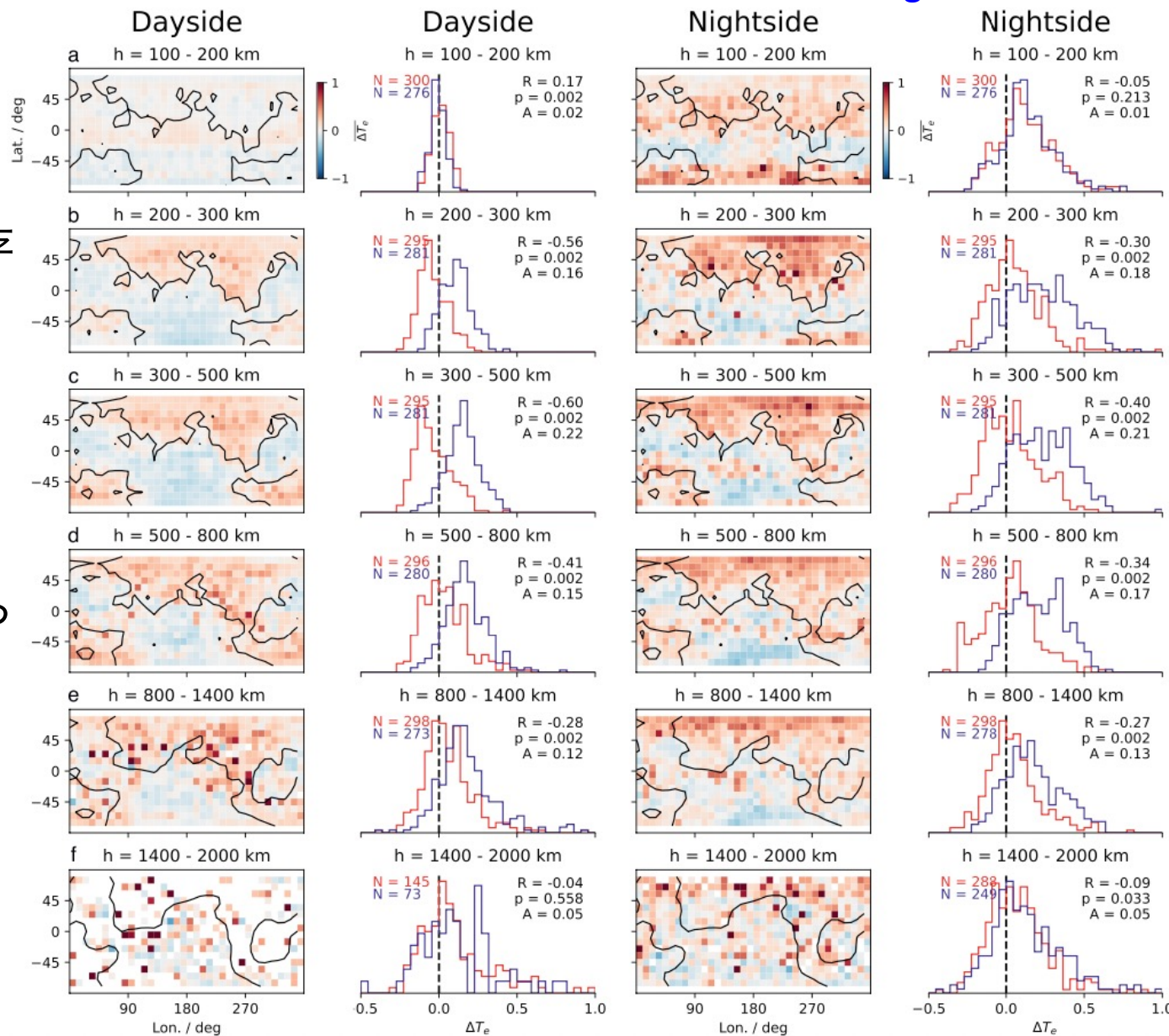
- ΔT_e と残留磁場領域の相関なし
- 季節依存の効果による「経度バンド」は存在

200 – 1400 km

- 昼側で ΔT_e と残留磁場領域に負の相関
- 夜側でも昼側程ではないが負の相関が見られる
- Weak field region ではやや正の相関
 - バンド構造も影響

1400 – 2000 km

- ΔT_e と残留磁場領域の相関なし



Dependence on upstream conditions

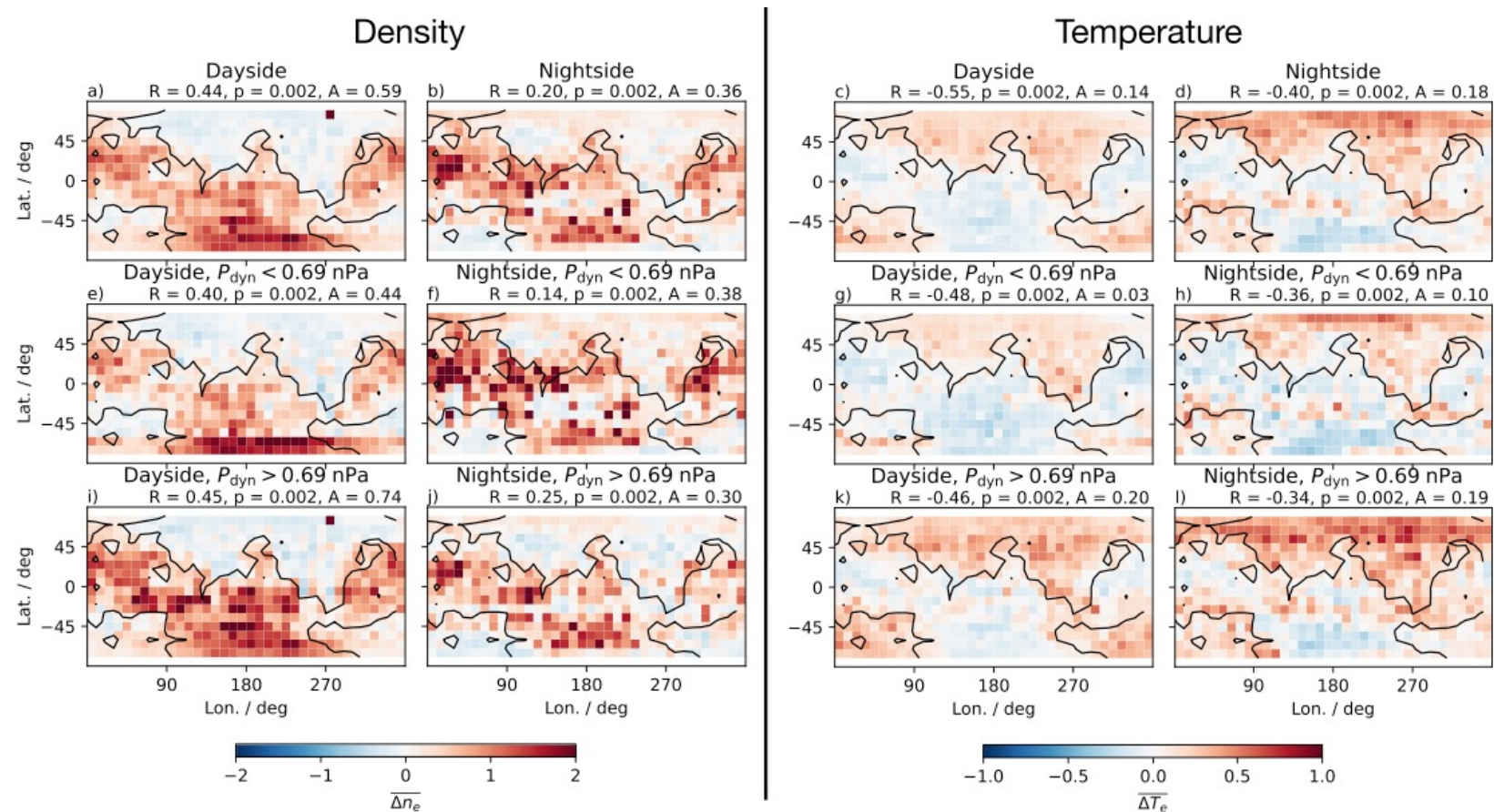
- Δn_e , ΔT_e と残留磁場領域の相関がある高度 300 – 800 km に限定
- MAVEN/SWIA, MAG データを太陽風パラメーターとして使用
 - MAVEN が近火点付近にいる時は太陽風観測ができないので、補間した値を使用
 - 1時間の running median でスムーズしたものを補間
 - 太陽風変動の影響を小さくするため
- 太陽風動圧, IMF強度, IMFコーン角, IMFクロック角, Alfvén マッハ数の変動による Δn_e , ΔT_e を調査

Dependence on upstream conditions: P_{dyn}

Figure 8

太陽風動圧の影響

- 0.69 nPa を境に調査
- ΔT_e は昼側・夜側共に動圧の影響がほとんどない
- Δn_e に関しても動圧による大きな影響はない
 - 昼側では高太陽風動圧で残留磁場の影響がやや強い傾向
 - 夜側では高動圧で相関がやや強い



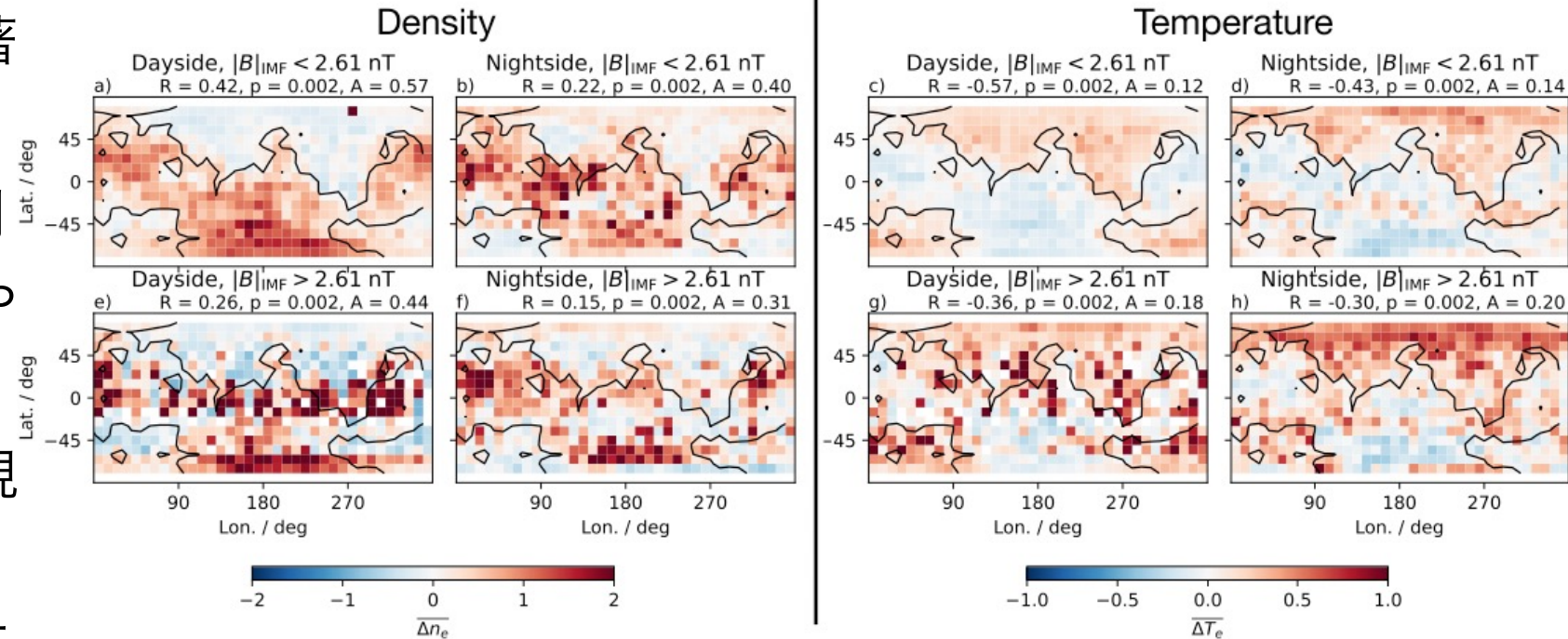
太陽風動圧の変動に関連する影響は小さいが Δn_e にのみ存在し、 ΔT_e にはその対応関係が明らかではない

Dependence on upstream conditions: $|B_{IMF}|$

IMF強度の影響

- Δn_e と残留磁場間の正の相関はIMF強度が大きくなると顕著に弱くなる
- ΔT_e と残留磁場間の負の相関はIMF強度が大きくなるとやや弱くなる
- 昼側では緯度 $\pm 45^\circ$ で顕著に現れる
 - ドレープ磁場間隔と高動圧及び太陽風の侵入を妨げる密度の高い電離圏に起因？

Figure 9

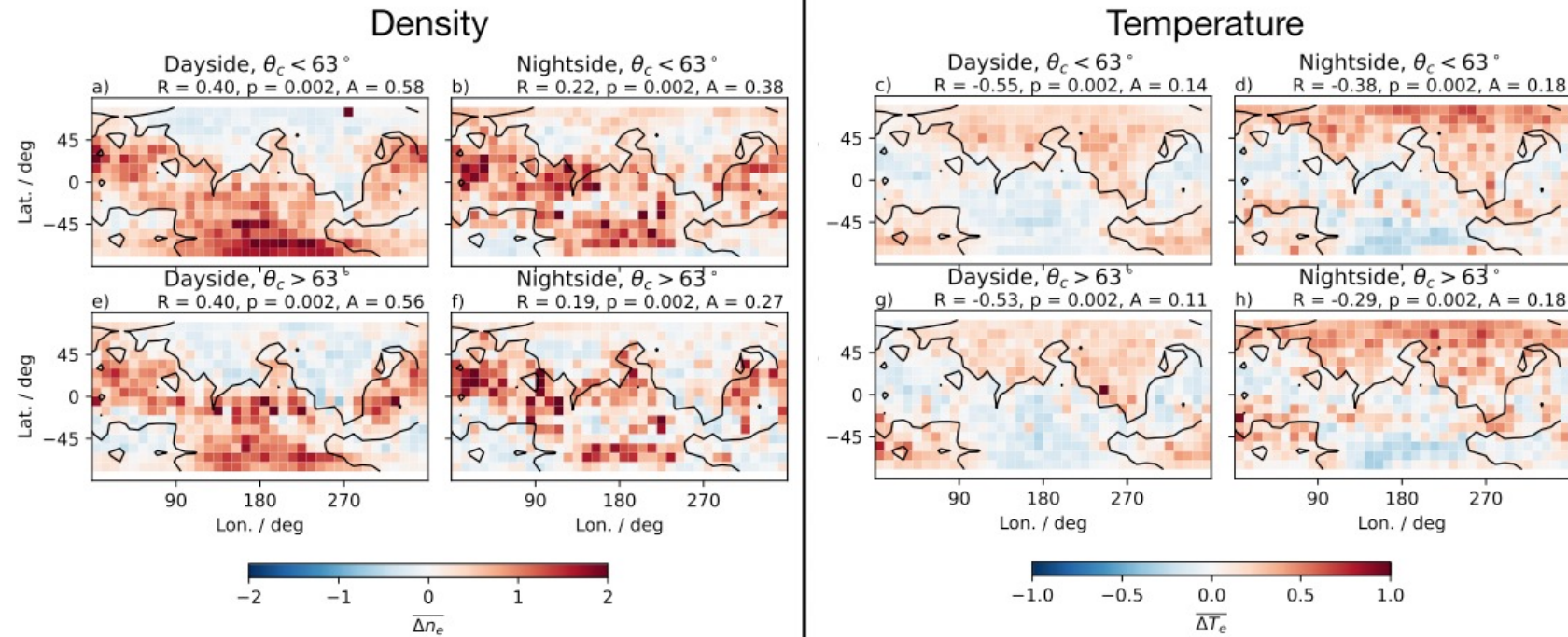


Dependence on upstream conditions: IMF cone angle

Figure 10

IMF コーン角の影響

- $\theta_c = 63^\circ$ を境に調査
- $\theta_c > 63^\circ$
- 夜側で Δn_e は残留磁場の影響がやや小さくなる
- 夜側で ΔT_e と残留磁場間の負の相関がやや弱くなる



- Fig. 8 – 10に示した各パラメータの影響はかなり小さいが、最も影響あるパラメーター
- マッハ数やクロック角の影響はほとんどない
 - しかし、動圧の増加によって見られるわずかな違いは、上流のマッハ数に関連した変化に対応しており、これらの上流パラメータ間に既存の相関がある

Discussion

- 有意な相関が見られた領域での相関係数 $|R|$ の大きさは約 0.2 – 0.6
 - 密度と温度の変動全体の約4% – 40%が残留磁場の影響に帰着
- 残留磁場がプラズマを制御していることが明らかになったが、電離圏プラズマ変動の全体的な要因としては決定的ではない
- MEX/MARSIS 観測とMAVEN/LPW 観測での残留磁場領域と密度変動間の相関
 - MARSIS: 正の相関
 - LPW: 昼側で正の相関, 夜側で負の相関 → 両者で不一致
- 利用できる夜側の MARSIS 観測が少なく、観測に誤差を含んでいる可能性
- 夜側のローカルな密度減少を伴わない温度上昇
- 電子降り込み等の局所的な加熱の可能性
- 高動圧時, 残留磁場と電子密度変化の相関は多少増大するが電子温度変化との相関は変化しない
- 系が圧縮されてドレープ磁場が相対的に弱くなると、プラズマは残留磁場によってより影響される

Discussion

- 高動圧時, 夜側で残留磁場と電子密度変化の相関が多少増大
 - Trans-terminator flow が増大するため
 - 昼側電離圏が圧縮され, それに伴いターミネーター付近の密度が増加することで, 圧力勾配が大きくなり夜側への流れが大きくなる
- IMF強度が増大時, 電子密度変化及び温度変化と残留磁場間の相関関係は弱くなる
 - コーン角依存に関しても同様
- 太陽風の変化よりも残留磁場が電離圏プラズマに与える影響の方が強い
- 残留磁場領域での電子密度増加と温度減少
 1. 強磁場によりジャイロ半径が小さくなり散逸しにくくなったため, 密度が増えた
 2. 残留磁場の影響で水平ドレープ磁場が歪められ, 鉛直輸送が卓越し, その結果下部電離圏にある冷たい電子が上層に輸送されたことで密度が増え, 温度が下がった
 - 先行研究では夜側にもこの理論を適応し, 昼から夜への輸送が減ったことで密度減少を説明 (Andrews+, 2013; Duru+, 2019)
 - LPW 観測では逆の結果となったため, 夜側ではこの効果はあまり重要でない可能性

Summary & Conclusions

- 200 km – 1,400 kmの高度範囲でプラズマ密度が顕著に上昇し、電子温度が低下
 - 昼側で最も顕著であり、夜側でも観測されるがその程度は低い。
 - 夜側での結果は先行研究と対立しており、MARSISによって得られた電離圏データの量が比較的少ないことで説明できる可能性
- MARSISとLPWの測定値の不一致は、大規模なデータセットに存在する比較的小さな季節バイアスが実際のデータ傾向に合わないことがあることを強調
- 高度200km以下では、プラズマ密度・温度ともに地殻残留磁場との明確な相関は見られず、低高度では密度、イオン・電子-中性大気衝突周波数が高くなることが予想されるため
- 1,400 km – 2,000 km の高度範囲では、昼側の測定値が少なく、昼側と夜側のいずれにも明確な相関は見られないが、高度の上限を設定したMPBの位置は残留磁場によって変わる
- 相関が最も顕著な高度範囲では、上流の動圧の変化はプラズマ密度変動にわずかな影響しか及ぼさないが、高動圧期間では残留磁場がより効果的に密度を制御する
- 電子密度や温度の変化は、IMF強度変化への対応として、残留磁場による密度や温度の制御を変化させる

References

- Andersson, L., Ergun, R. E., Delory, G. T., Eriksson, A. I., Westfall, J., Reed, H., et al. (2015). The Langmuir Probe and Waves instrument for MAVEN. *Space Science Reviews*.
- Andrews, D. J., Opgenoorth, H. J., Edberg, N. J. T., André, M., Fränz, M., Dubinin, E., et al. (2013). Determination of local plasma densities with the MARSIS radar: Asymmetries in the high-altitude Martian ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, *118*.
- Andrews, D. J., André, M., Opgenoorth, H. J., Edberg, N. J. T., Diéval, C., Duru, F., et al. (2014). Oblique reflections in the Mars Express MARSIS data set: Stable density structures in the Martian ionosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *119*.
- Andrews, D. J., Edberg, N. J. T., Eriksson, A. I., Gurnett, D. A., Morgan, D., Němec, F., & Opgenoorth, H. J. (2015). Control of the topside Martian ionosphere by crustal magnetic fields. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *120*(4), 3042–3058.
- Andrews, D. J., Opgenoorth, H. J., Leyser, T. B., Buchert, S., Edberg, N. J. T., Morgan, D. D., et al. (2018). MARSIS observations of field- aligned irregularities and ducted radio propagation in the Martian ionosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *123*(8), 6251–6263.
- Brain, D. A., Bagenal, F., Acuña, M. H., & Connerney, J. E. P. (2003). Martian magnetic morphology: Contributions from the solar wind and crust. *Journal of Geophysical Research*, *108*, 1424.
- Dong, C., Bougher, S. W., Ma, Y., Toth, G., Lee, Y., Nagy, A. F., et al. (2015). Solar wind interaction with the Martian upper atmosphere: Crustal field orientation, solar cycle, and seasonal variations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *120*, 7857–7872.
- Dubinin, E., Fränz, M., Woch, J., Chanteur, G., Duru, F., Gurnett, D. A., et al. (2012). Upper atmosphere of Mars is not axially symmetrical. *Earth Planets and Space*, *64*, 113–120.
- Duru, F., Gurnett, D. A., Averkamp, T. F., Kirchner, D. L., Huff, R. L., Persoon, A. M., et al. (2006). Magnetically controlled structures in the ionosphere of Mars. *Journal of Geophysical Research*, *111*(A10).
- Duru, F., Brain, B., Gurnett, D. A., Halekas, J., Morgan, D. D., & Wilkinson, C. J. (2019). Electron density profiles in the upper ionosphere of Mars from 11 yr of MARSIS data: Variability due to seasons, solar cycle, and crustal magnetic fields. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *124*, 3057–3066.
- Fallows, K., Withers, P., Morgan, D., & Kopf, A. (2019). Extremely high plasma densities in the Mars ionosphere associated with Cusp-like magnetic fields. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *124*(7), 6029–6046.
- Flynn, C. L., Vogt, M. F., Withers, P., Andersson, L., England, S., & Liu, G. (2017). MAVEN observations of the effects of crustal magnetic fields on electron density and temperature in the Martian dayside ionosphere. *Geophysical Research Letters*, *44*(21), 10812–10821.
- Gurnett, D. A., Kirchner, D. L., Huff, R. L., Morgan, D. D., Persoon, A. M., Averkamp, T. F., et al. (2005). Radar soundings of the ionosphere of Mars. *Science*, *310*, 1929–1933.
- Holmberg, M. K. G., André, N., Garnier, P., Modolo, R., Andersson, L., Halekas, J., et al. (2019). MAVEN and MEX multi-instrument study of the dayside of the Martian induced magnetospheric structure revealed by pressure analyses. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *124*(11), 8564–8589.
- Morschhauser, A., Lesur, V., & Grott, M. (2014). A spherical harmonic model of the lithospheric magnetic field of Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, *119*, 1162–1188.
- Němec, F., Andrews, D. J., Morgan, D. D., Kopf, A. J., & Gurnett, D. A. (2019a). Oblique reflections of Mars express MARSIS radar signals from ionospheric density structures: Raytracing analysis. *Journal of Geophysical Research: Planets*, *124*(5), 1177–1187.
- Němec, F., Morgan, D. D., Kopf, A. J., Gurnett, D. A., PitoÁák, D., Fowler, C. M., et al. (2019b). Characterizing average electron densities in the Martian dayside upper ionosphere. *Journal of Geophysical Research: Planets*, *124*, 76–93.
- Nielsen, E., Wang, X.-D., Gurnett, D. A., Kirchner, D. L., Huff, R., Orosei, R., et al. (2007). Vertical sheets of dense plasma in the topside Martian ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, *112*(E11), 2003.
- Sakai, S., Cravens, T. E., Andersson, L., Fowler, C. M., Mitchell, D. L., Mazelle, C., et al. (2019). Low electron temperatures observed at Mars by MAVEN on dayside crustal magnetic field lines. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *124*(9), 7629–7637.