

1. The Mars topside ionosphere response to the X8.2 solar flare of 10 September 2017

Thiemann, E. M. B., et al. (2018)

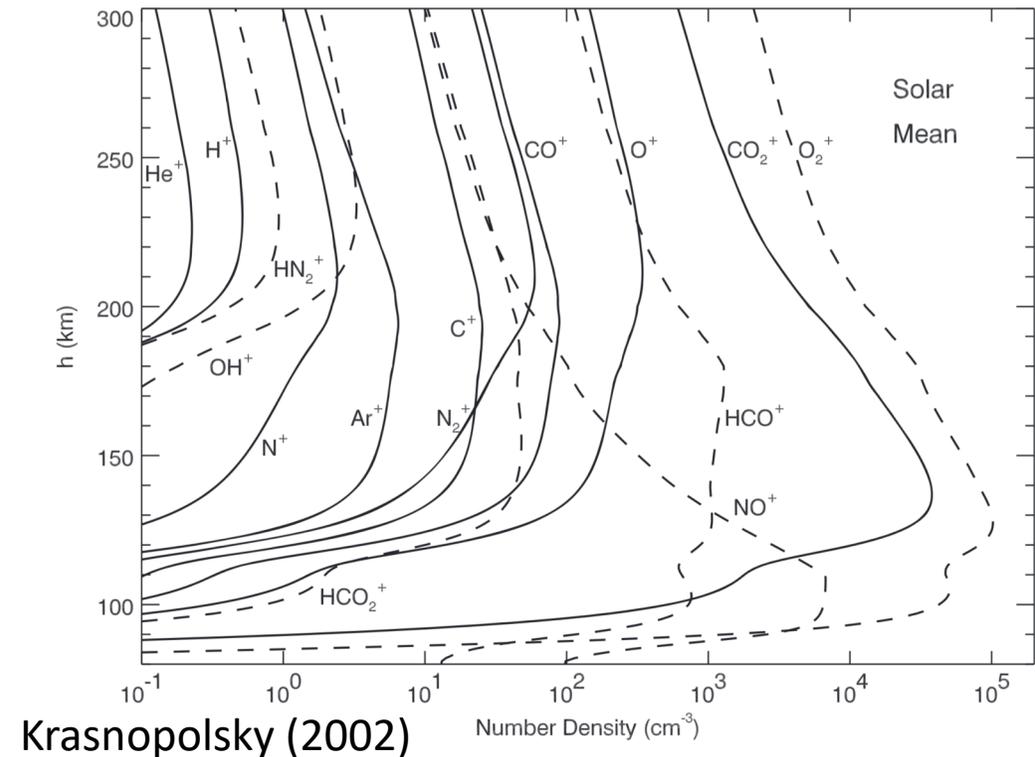
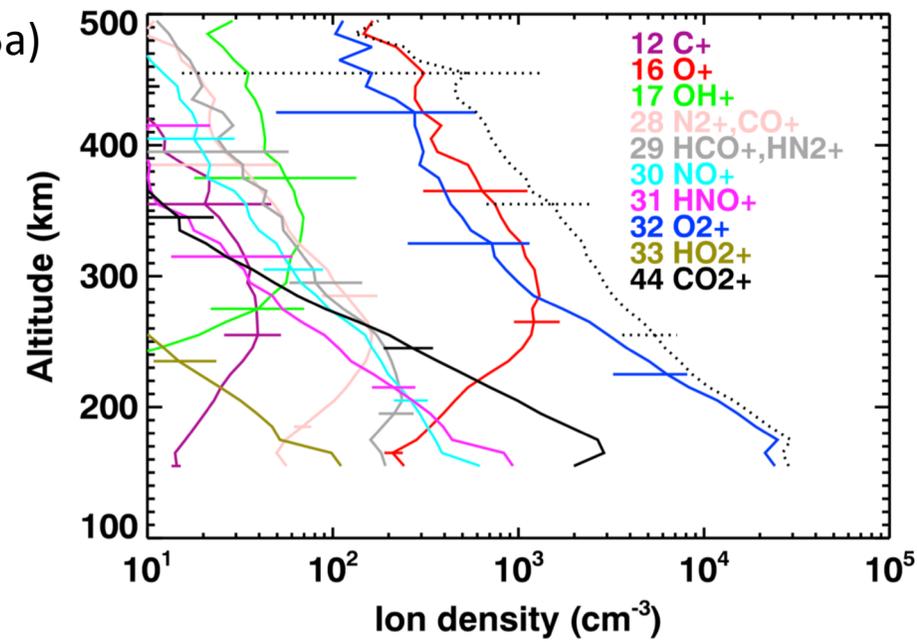
2. Observations and modeling of the Mars low-altitude ionospheric response to the 10 September 2017 X-class solar flare

Xu, S., et al. (2018)

General Introduction

Withers et al. (2015a)

- 基本的な電離圏構造
 - 高度125 km付近に電子密度ピーク
 - EUVの吸収ピーク高度
 - M2層 (地球電離圏のF1領域に相当)
 - 高度 100 km付近に緩やかな電子密度ピーク
 - 軟X線の吸収ピーク
 - M1層 (地球電離圏のE領域に相当)



General Introduction

- フレアが起こると…
 - 高層大気 (~100 km) の電離を促進
 - 光電離率を上昇
 - 光電離によって生じる高エネルギーの光電子による衝突電離を促進
 - 高層大気を加熱
 - フレアによってもたらされるエネルギーがプラズマから中性大気へ輸送
- X8.2 (2017/09/10)
 - MAVENが火星に到着以降, 最大のフレア
 - 11年周期の中でも2番目に大きいフレア

The Mars topside ionosphere response to the X8.2 solar flare of 10 September 2017

Thiemann, E. M. B., Andersson, L., Lillis, R., Withers, P.,
Xu, S., Elrod, M., et al. (2018).

Geophys. Res. Lett., 45, 8005-8013.

<https://doi.org/10.1029/2018GL077730>

Presented by S. Sakai (U. Tokyo)

Abstract

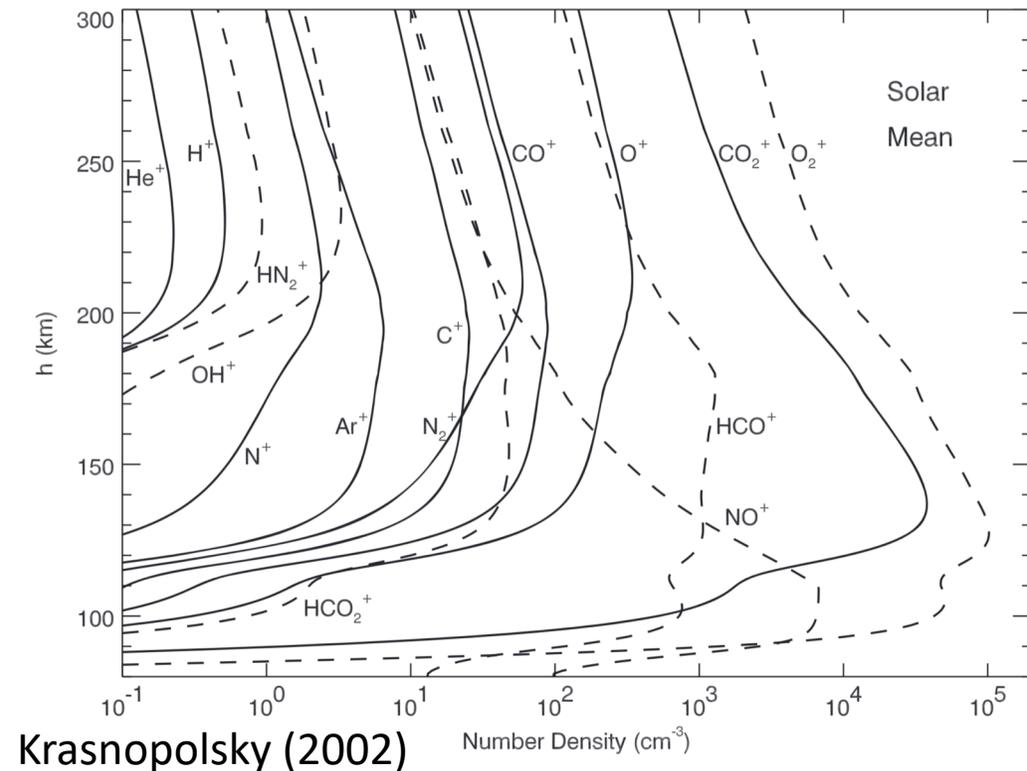
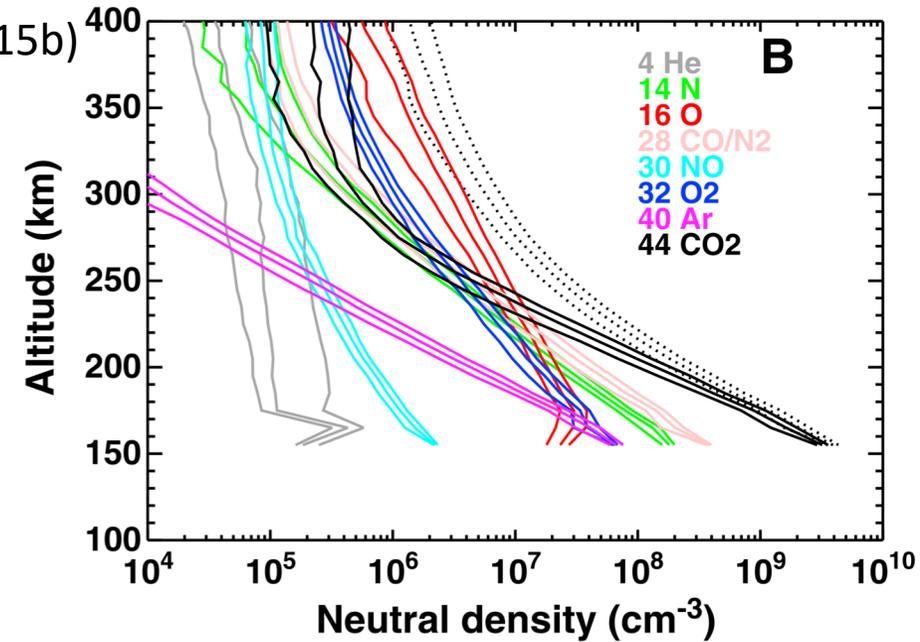
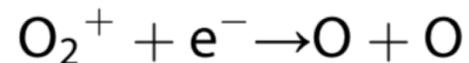
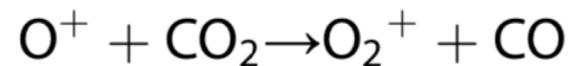
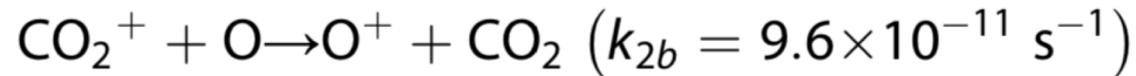
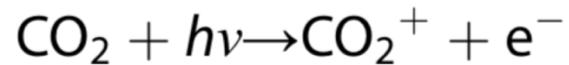
- 2017年9月イベント：軟X線がピークを迎えた後1.67時間、高度155 km以上の電離圏観測
 - 電離圏プラズマ密度が予想される電離率以上に増加
 - 電子温度は225 km以下で減少
 - 中性大気密度が増大したため
 - CO₂は電子のフレア起源の加熱を妨げる
 - イオン密度と組成がとある高度で顕著に変化
 - O:CO₂の密度比の変化によって説明
 - この密度比は電離圏構造を決めるのに重要

Introduction

Withers et al. (2015b)

- 電離圏イオン

- 中性大気はCO₂が支配的であるにも関わらずO₂⁺が主要イオン
 - O₂⁺は光電離
- OはO₂⁺の解離再結合、COとOはCO₂の光解離



Introduction

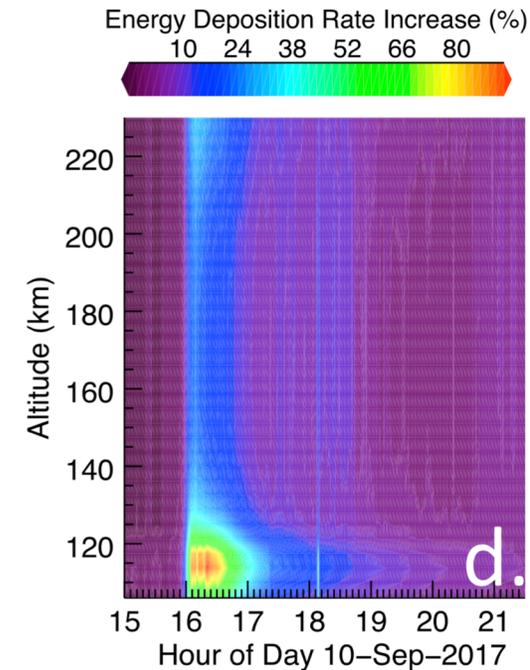
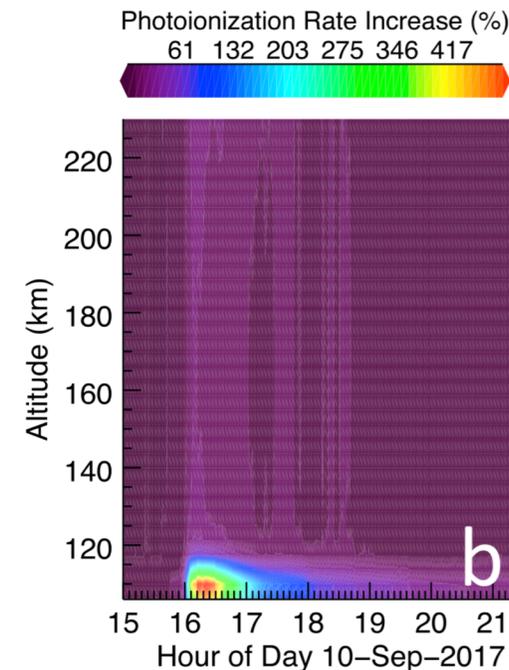
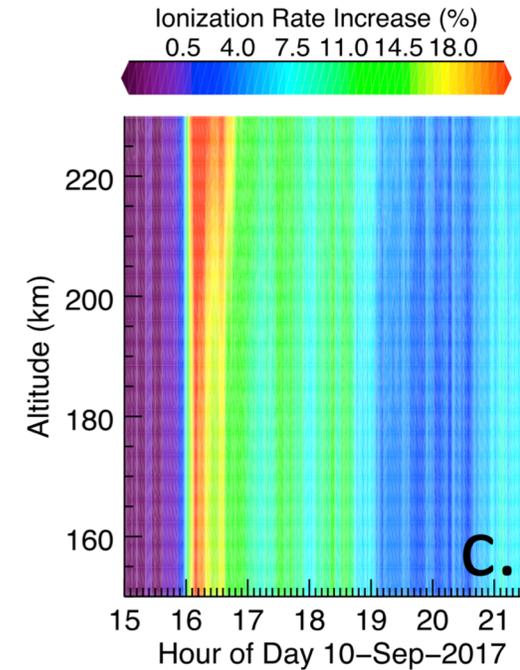
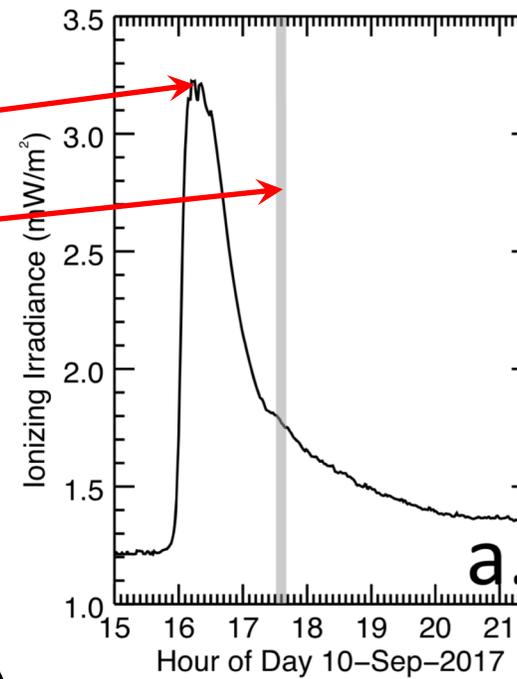
- 火星大気のフレアへの応答
 - 高層大気の化学, 熱的, 電荷構造を維持する過程の理解へ
 - 太陽活動が活発だった初期火星での大気進化を理解するのに重要
 - EUV変化は大気流出を支配するパラメターの一つ
- 太陽フレアに対する電離圏の応答に関する先行研究
 1. MGS電波掩蔽 (Fallows+, 2015; Mahajan+, 2010; Mendillo+, 2006)
 - M1層 (80 – 200 km) で N_e の増大
 2. MAVENその場観測 (Thiemann+, 2015)
 - 中性大気密度と温度の増大 (NGIMS観測)
 3. モデリング
 - Lollo+ (2012) : MGSの電波掩蔽観測を説明
 - Haider+ (2016) : 高度200 kmで n_e , $n_{O_2^+}$ が10-100倍程度増大

Introduction

- 本論文では…
 - X8.2クラスフレア (2017/09/10)に対する電離圏イオンの応答をMAVEN観測により明らかにする
 - CME及びSEP到達前の「純粋な」フレアへの応答を検証
- 使用機器
 - n_e & T_e : Langmuir Probe and Waves (LPW)
 - n_i & P_n : Neutral Gas and Ion Mass Spectrometer (NGIMS)
 - EUV monitor
 - 0.05 – 36 nm : Synthetic Reference spectra (SynRef) spectral model
 - 30.4 nm : MAVEN EUVM 121.6 nm measurements
 - 36.1 – 106 nm : EVE MEGS-B channel
 - > 106 nm : MAVEN EUVM Level 3

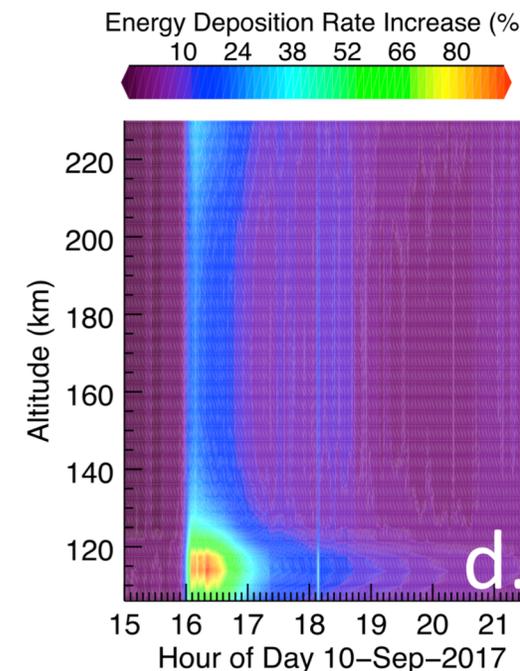
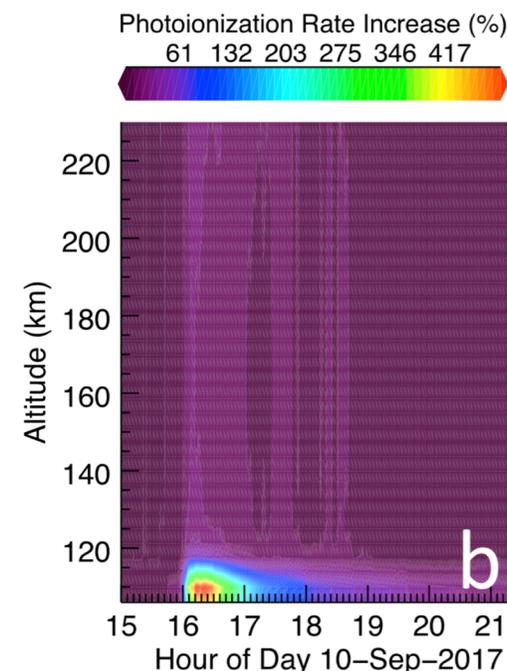
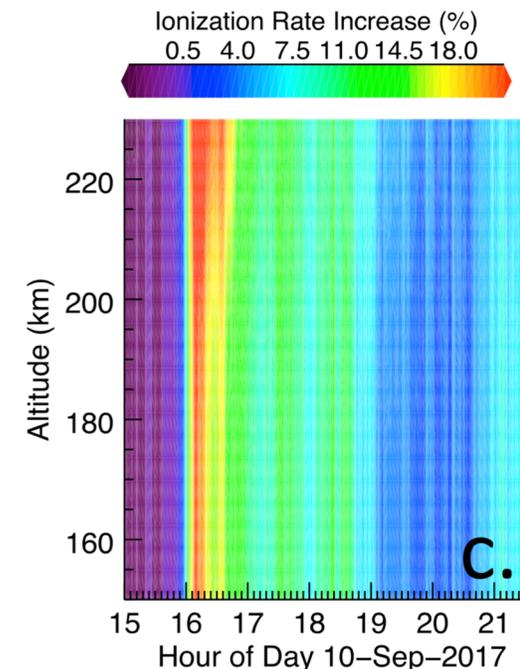
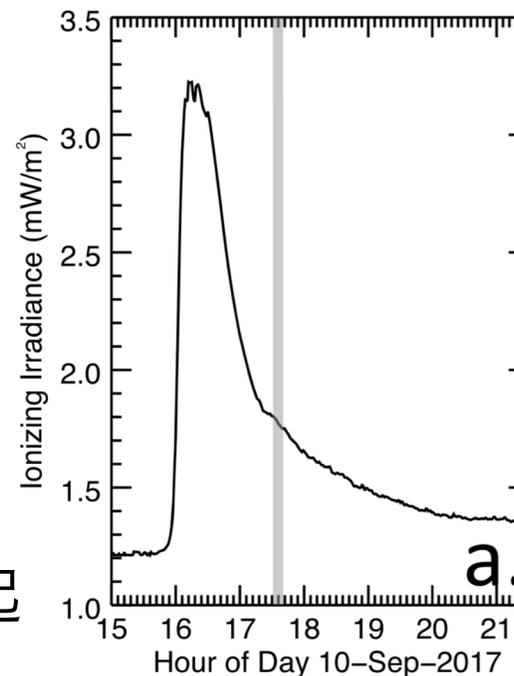
Results: EUV irradiances

- フレア : 16:24 UT頃
- 観測はフレア後の近火点付近
 - ~17:30-17:40 UT
 - $65.9^\circ \leq \text{SZA} \leq 68.5^\circ$
- EUV放射照度 (0-91 nm : E_{91})
 - 1.2 mW/m^2 から 3.2 mW/m^2 (16:00UT頃) に急増
 - 24 分程度続き, 1時間後には最大値の25%程度



Results: Ionization

- EUVの吸収 (シミュレーション)
 - Fig. 1b 光電離率：110 km 付近にピーク (500%)
 - Fig. 1c 合計電離率：全高度で増加
 - 光電子が高エネルギーで衝突電離を引き起こすため (Xu+, 2018)
 - 20%程度増加. その後10-15%増を decaying phase で維持
 - 電離率は高度と共に増加
 - 高高度でOが主要イオン
 - OはCO₂より短波長側に電離ピークを持つ (衝突断面積が短波長より)

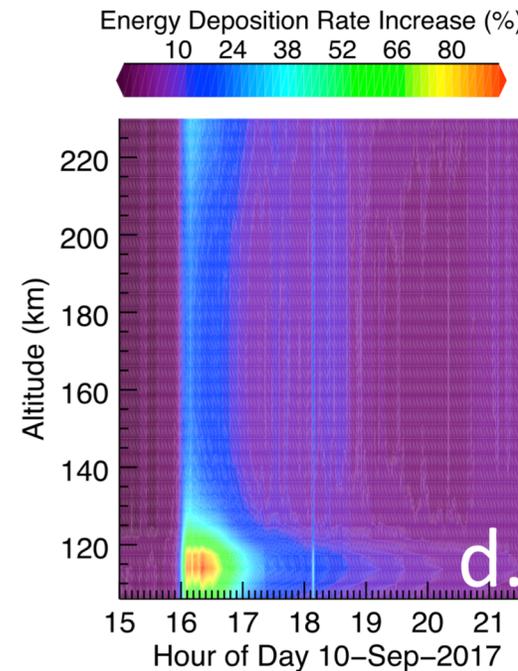
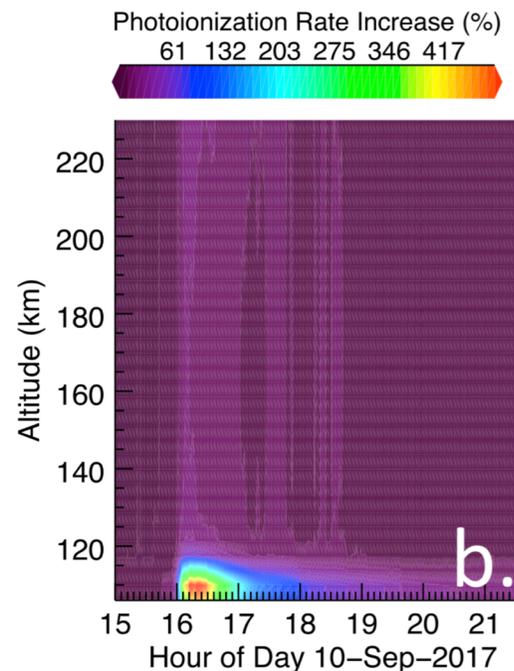
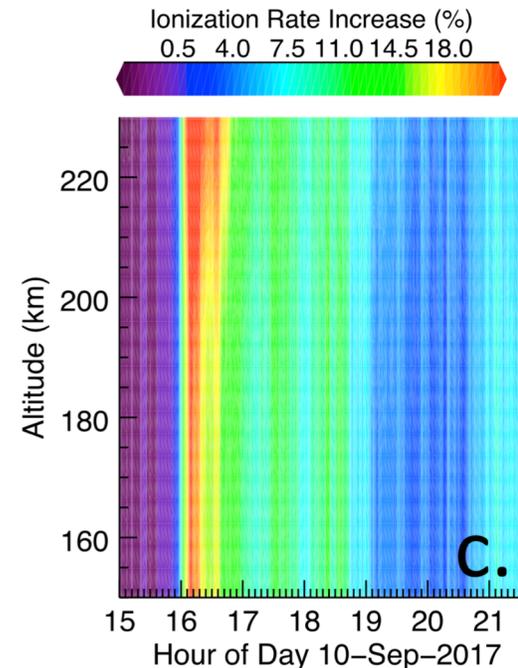
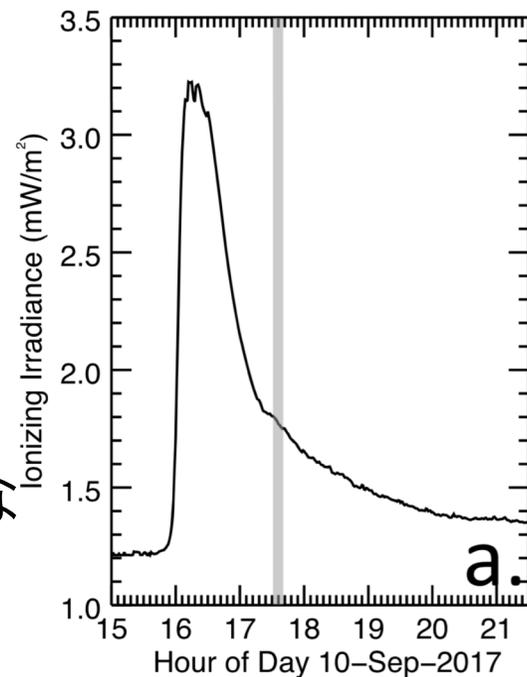


Results: Energy deposition

- EUVの吸収 (シミュレーション)

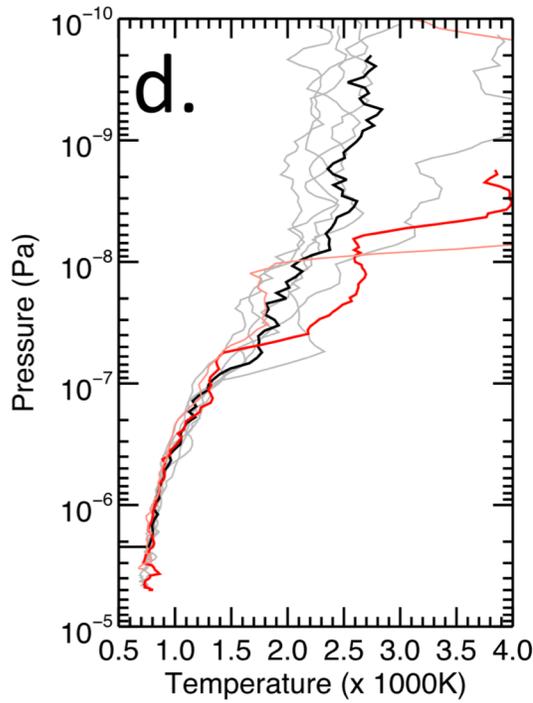
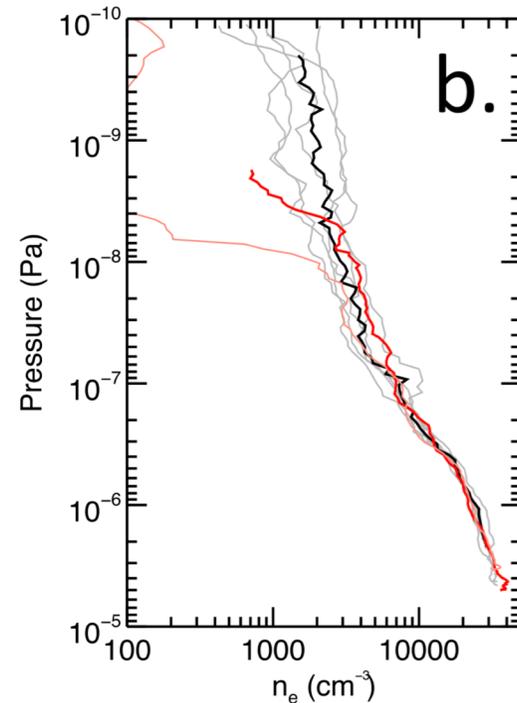
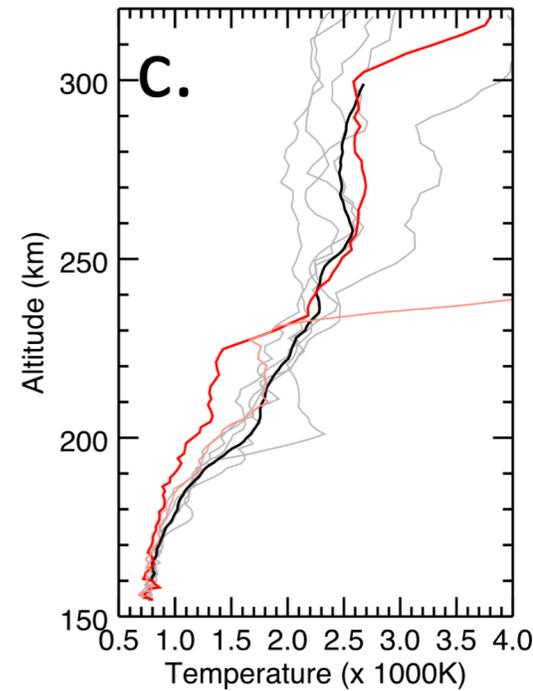
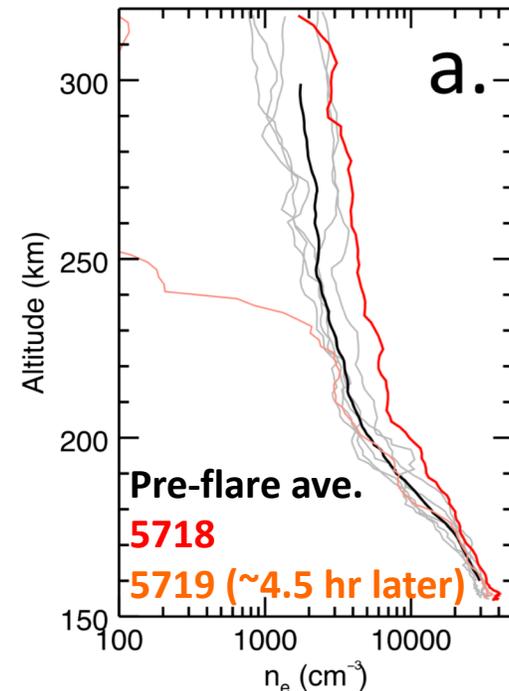
- Fig. 1d

- 高度115 kmでエネルギー付与が増大
- 鉛直方向に広がるが電離率増加ほどではない (~30%)
 - CO₂が光子 (FUVと整合的) を吸収
 - FUVはエネルギー付与に効く
 - 高高度ではCO₂が少ないので吸収されない



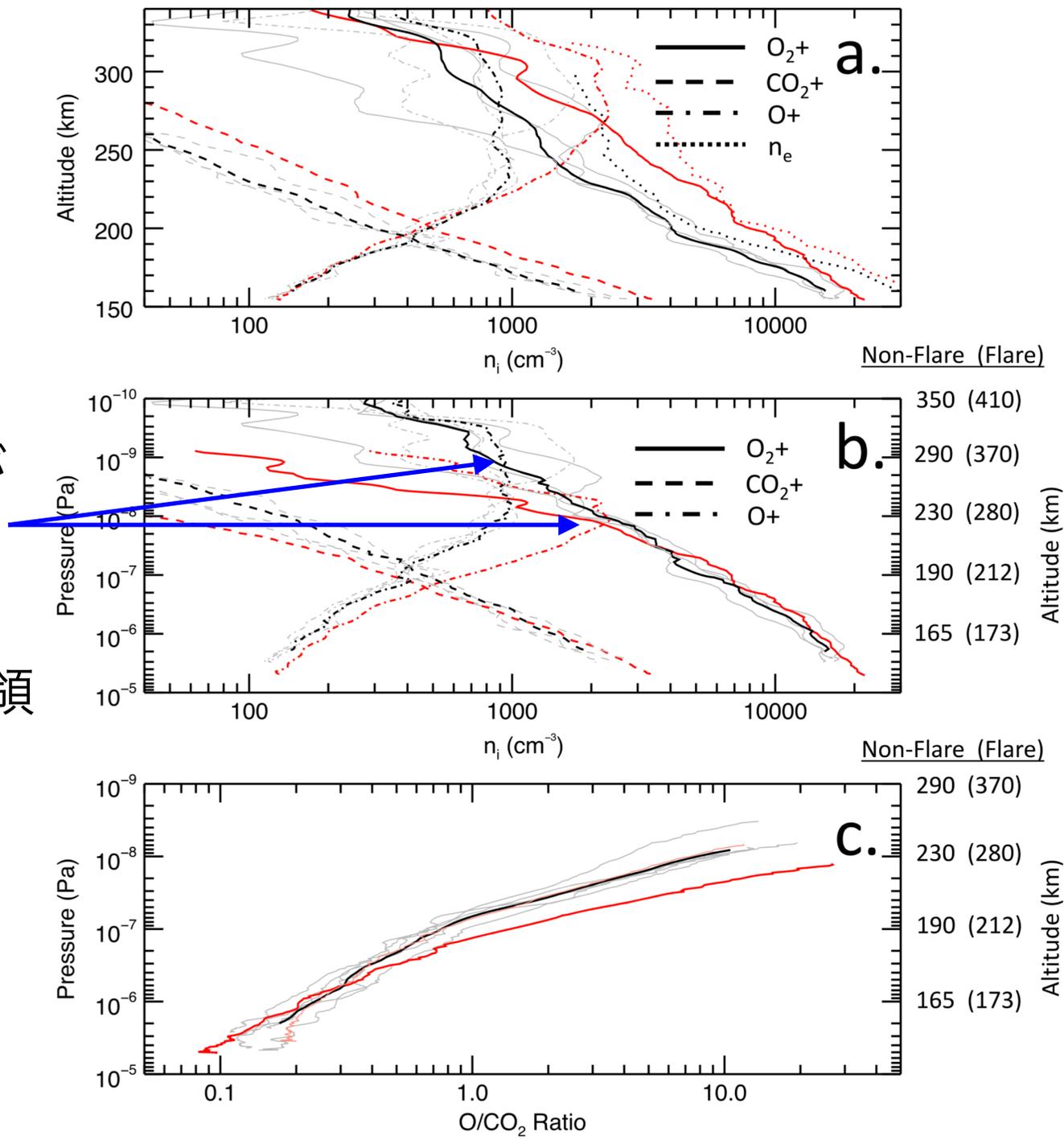
Results: n_e & T_e (LPW)

- n_e , T_e vs. **Altitude** (Fig. 2a, 2c)
 - フレア直後 $n_e \uparrow$
 - フレア直後 $T_e \downarrow$ ($h < 225$ km)
 - 4.5 hr 後, 両者とも平均に戻る
- n_e , T_e vs. **Pressure** (Fig. 2b, 2d)
 - n_e はほとんど変わらない
 - T_e は上昇 ($< 5 \times 10^{-8}$ Pa)



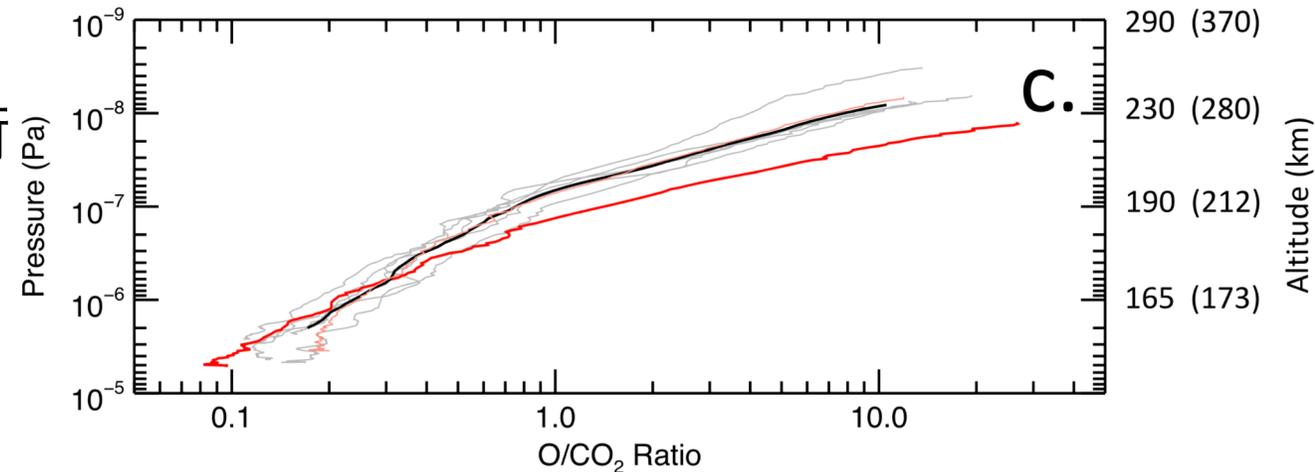
Results: N_i & $O:CO_2$ (NGIMS)

- n_i vs. **Altitude** (Fig. 3a)
 - 全密度, 100%以上↑
 - $h > 220$ km : O^+ ↑
- n_i vs. **Pressure** (Fig. 3b)
 - O_2^+ & O^+ : フレア時, 50倍程圧力が高い位置で密度が入れ替わる
 - O_2^+ : 高圧領域では平均密度程度 O^+ と密度が入れ替わる領域から低圧領域で急激に減少
 - CO_2^+ : ピーク値はそれ程変わらないが傾きが急峻
- Fig. 3c
 - $O:CO_2$ は $< 10^{-7}$ Pa で大きくなる



Discussion 1

- 圧力固定：各パラメーターはあまり変化しない
→ 中性大気がフレアによって増大するため
 - 高度固定：温度変化は，密度プロファイルが上方へ膨張した熱圏に対応
- T_e の急増 ($h \sim 225$ km)
→ Oが支配的になり， CO_2 coolingが効かず
- O: CO_2 が圧力の低下と共に増大する
→ 光解離，光電離，それに伴う電子衝突電離が増大するため

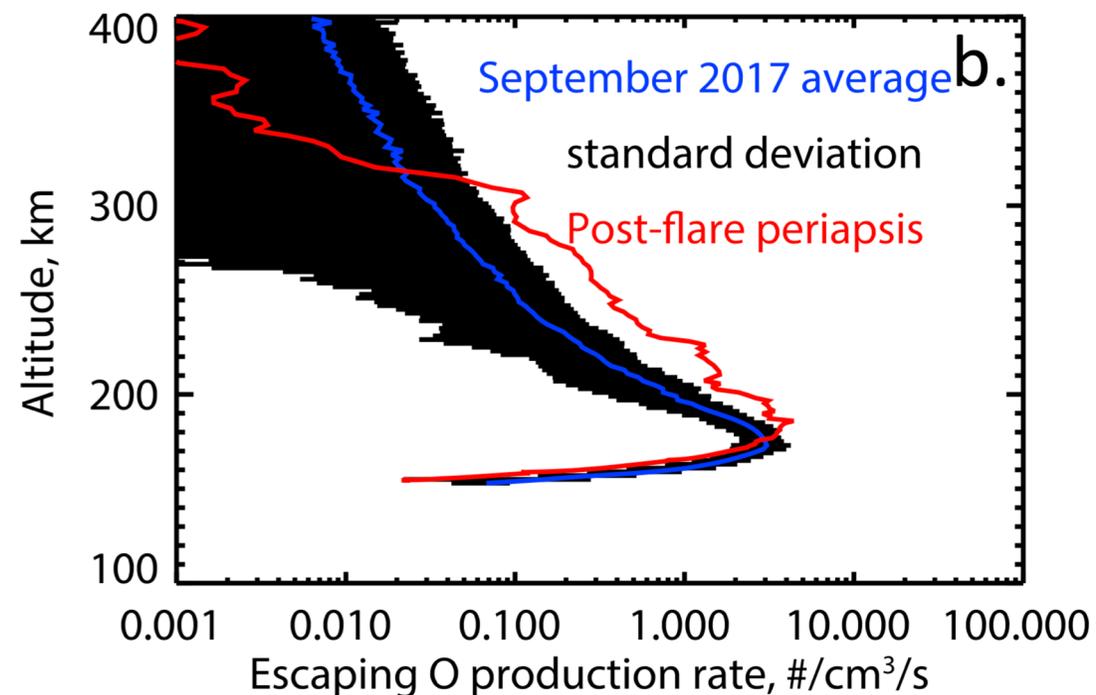
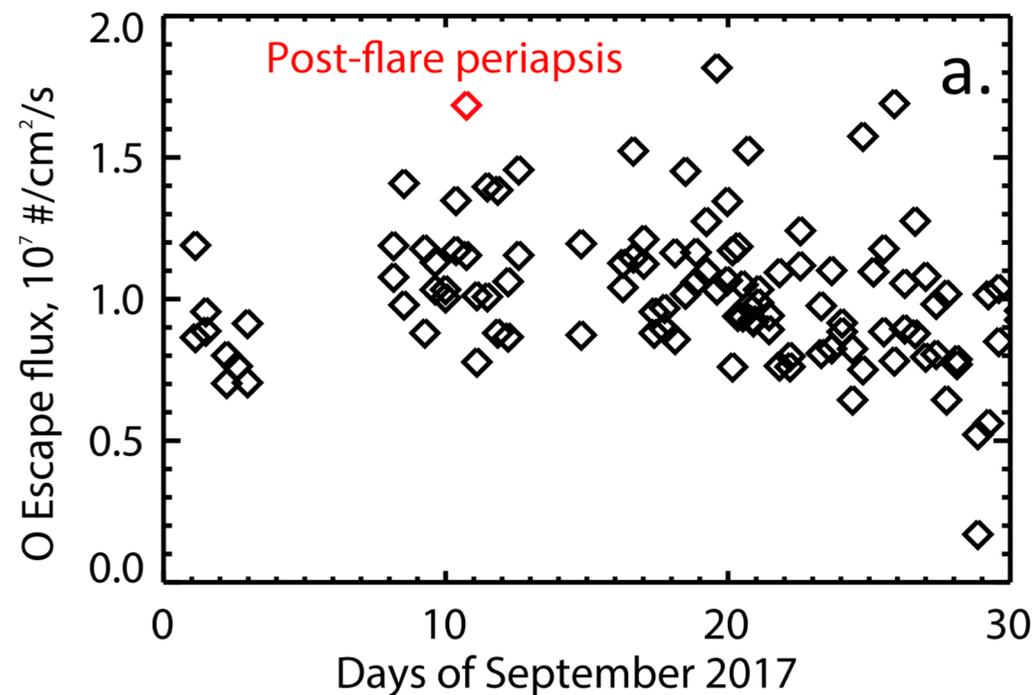


Discussion 2

- 式(1), (2)は[プロダクション=ロス]という仮定から成立
 - k_{2a}, k_{2b} の単位が間違っている → $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ が正しい
- $n_{\text{O}^+} \propto n_{\text{O}}/n_{\text{CO}_2}, n_{\text{CO}_2^+} \propto n_{\text{CO}_2}/n_{\text{O}}$
 - O:CO₂密度比が増加するとO⁺の生成を促進, CO₂⁺の増加を抑制
- Lollo+ (2012) の計算結果と一致するが, Haider+ (2016) の観測結果とは不一致
 - Haider+ (2016) : O₂⁺, CO₂⁺ 密度 10 – 100倍 ↑
- フレア後, 電離圏トップサイドの電離圏構造を決めるのに中性大気が重要
 - Xu+ (2018) が数値計算で示した

Discussion 3

- Photochemical escape of O
 - Lillis+ (2017) のモデルを使用
 - 流出フラックスは99パーセントイルを超える程度に増加
 - フレアは高高度領域でO*を生成し，流出率をやや増大させる
- SZA依存性
 - 昼側での Photochemical escape はあまりSZAに依存しない
 - フレアはSZAに顕著に依存 (Lee+, 2018; Qian+, 2011)
→ SZAを考慮するべき



Summary & Conclusions

- フレアによる電離圏への影響をMAVENを用いて調査
 - 光電離率が増大し，プラズマ密度が高度固定では増大するが，温度は低下する
 - O/CO₂の増大は電離圏上部でのイオン組成を変化させ， $> 10^{-8}$ PaでO⁺を増やすが $< 10^{-8}$ PaではO⁺，O₂⁺を減らす
 - 225 km以下ではCO₂ coolingによりT_eは下がるが，高高度ではOが支配的になるため，T_eは上昇する
- 1. 大きいフレアは電離圏上部の密度や組成に顕著に影響を与える
- 2. 固定された高度でのプラズマ密度増大は，大気の膨張によってフレア後1時間程度続く
- 3. O存在度の相対的な増加は電離圏上部の密度と組成を再構築する
 - O/CO₂
- 4. フレアは Photochemical escape をやや増大させる

Observations and modeling of the Mars low-altitude ionospheric response to the 10 September 2017 X-class solar flare

Xu, S., Thiemann, E., Mitchell, D., Eparvier, F., Pawlowski, D., Benna, M., et al. (2018).
Geophys. Res. Lett., 45, 7382-7390.

<https://doi.org/10.1029/2018GL078524>

Presented by S. Sakai (U. Tokyo)

Abstract

- 2017年9月イベント前, 途中, 後の電離圏応答を超熱的電子輸送モデルを用いて調査
- 光電子スペクトルはモデルと観測でよく一致
- 炭素のAuger電子を火星で初めて同定
- 太陽放射の増大と中性大気の膨張によるフレアイベント中のイオン密度の変化を議論

Introduction

- 先行研究例

- Peterson+ (2016)

- フレア前後 (別イベント) の光電子スペクトルの変化を3つのモデルとMAVEN観測で比較
- 太陽スペクトルの変化が電離圏光電子スペクトルに反映

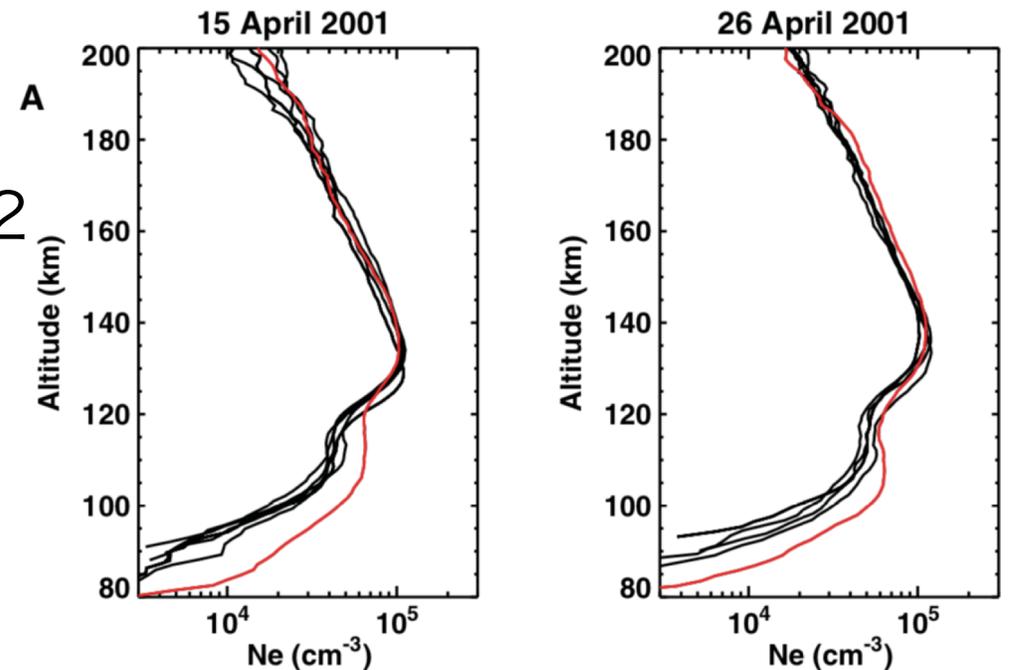
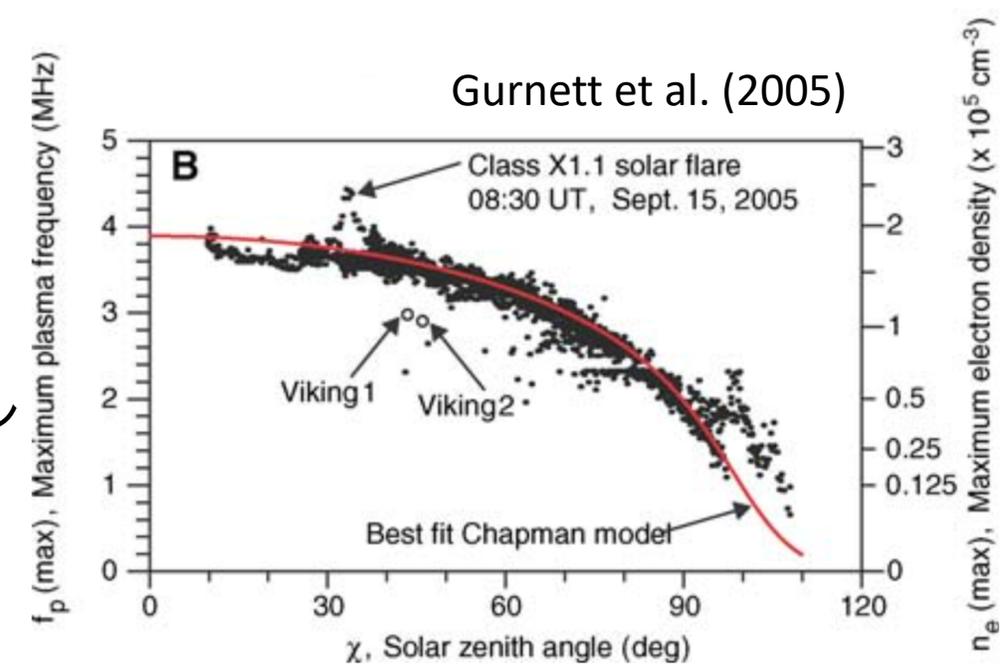
- Gurnett+ (2005)

- MEX/MARSISの観測からフレアによってM2層が増大

- Mendillo+ (2006)

- MEXの電波掩蔽観測からM1層もフレアによって増大

- その他, MEX・MGS観測やモデリングあり



Mendillo et al. (2006)

Introduction

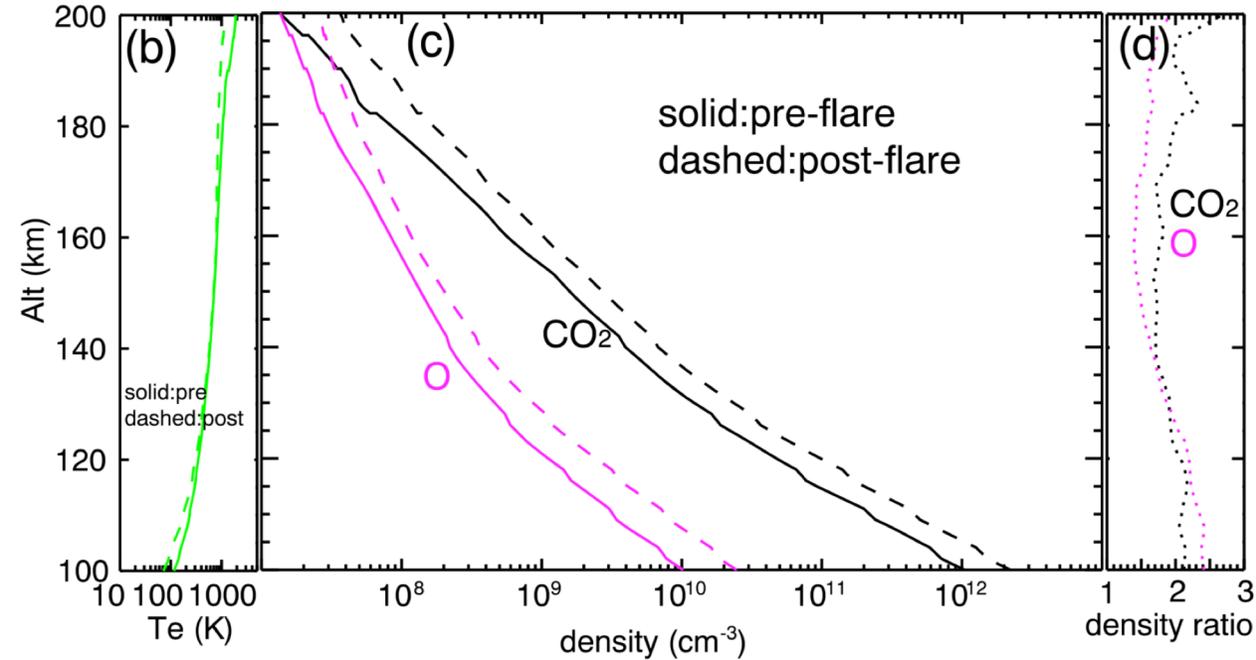
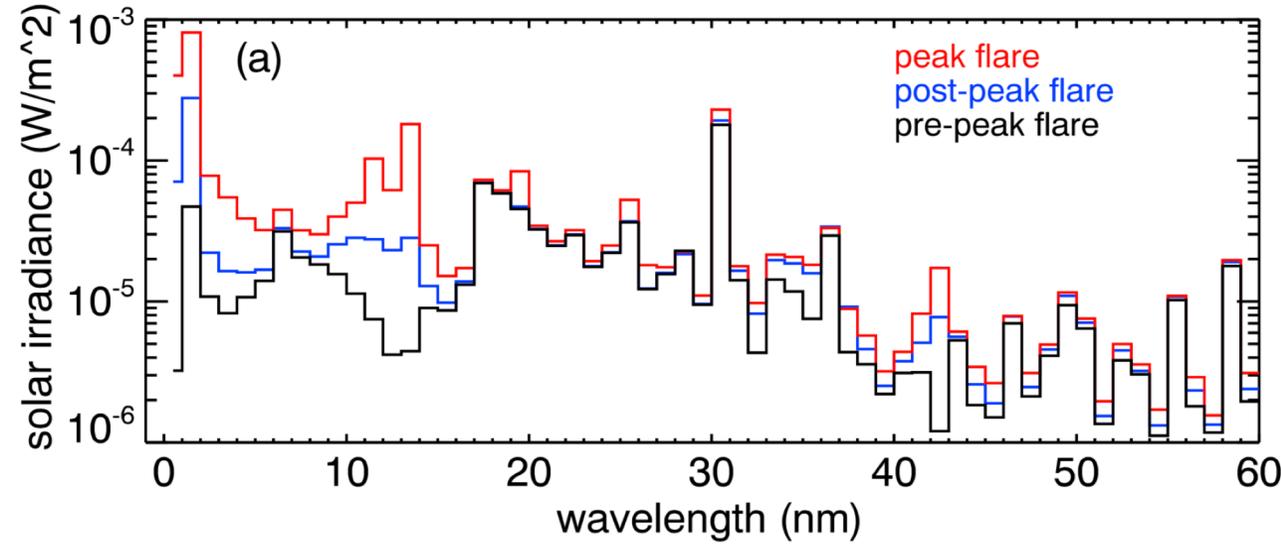
- フレアに対してEUVフラックスは~100%, X線フラックスは~1000%増加
- フレアの declining phase で NGIMS, LPW, SWEAが電離圏パラメーターを観測
- Thiemann+ (2018) は0.1 – 189.5 nmの太陽スペクトルモデルを様々な観測から作成
- 本論文では…
 - これらの包括的な観測を数値計算の入力値として利用
 - 低高度電離圏のフレアへの応答を調査
 - 火星環境がこのような宇宙天気イベントにどのように応答するかを理解する上で重要

Observations and Modeling of Photoelectrons

- 3つの期間を調査
 1. Prepeak flare (近火点パス), 2. Peak flare (遠火点付近), 3. Postpeak flare (近火点パス; declining phase)
 - 電離圏情報は近火点パスのみより
- The SuperThermal Electron Transport (STET) モデル
 - Gyroaveraged Boltzmann equation
 - 一本のフラックスチューブに沿って電子フラックスを計算
 - 入力パラメター
 - 中性大気密度, プラズマ密度, プラズマ温度
 - $h > 155$ km: フレア前後のMAVENの近火点パスで得られた観測値
 - $100 \text{ km} < h < 155 \text{ km}$: the Mars Global Ionosphere-Thermosphere Model (M-GITM)で補間

Inputs for STET Modeling

- 太陽照射 (Fig. 1a)
 - Thiemann+ (2018) より
 - $\lambda < 15$ nm で 1 – 2 桁増加
- CO₂, O (Fig. 1c, 1d)
 - NGIMS
 - 近火点以下は M-GITM で補間
 - 大気密度はフレア後増大
- 電子温度 (Fig. 1b)
 - LPW
 - $T_e = T_n$ at $h < 115$ km
 - 電子と中性大気の頻繁な衝突より
 - T_n は CO₂ の密度勾配から推定
- SZA = 70°, Peak flare を計算する際は Prepeak flare (密度・温度) のものを使用



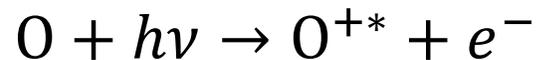
Data-Model Comparisons of Photoelectron Spectra

- 電子スペクトル

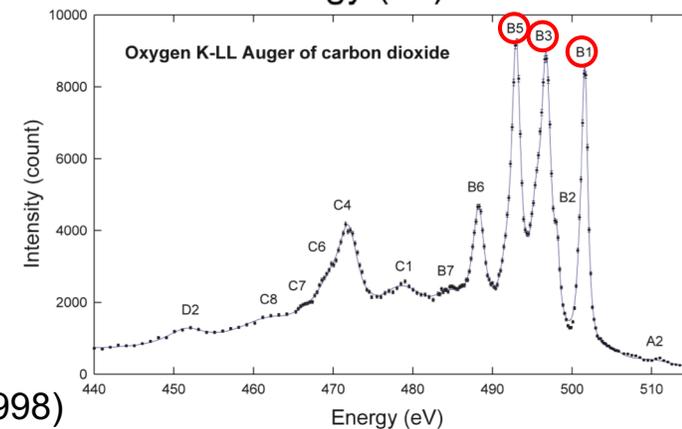
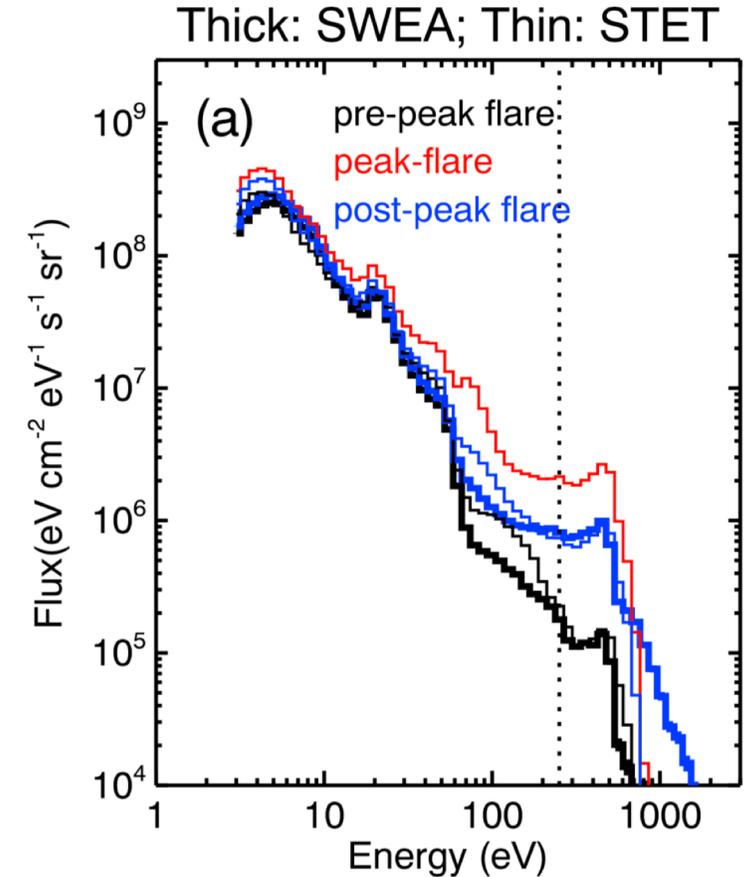
1. 22 – 27 eV ピーク : 30.4 nm He-II solar line
2. 60 – 70 eV での急激な低下 : $\lambda < 17$ nm での太陽放射照度の急激な減少
3. 500 eV 付近の酸素 Auger ピーク

- Auger 電子

- K殻からの電離がAuger電子を生成
- 酸素 Auger 電子



Oxygen Auger spectrum of CO₂ (Viktor et al., 1998)

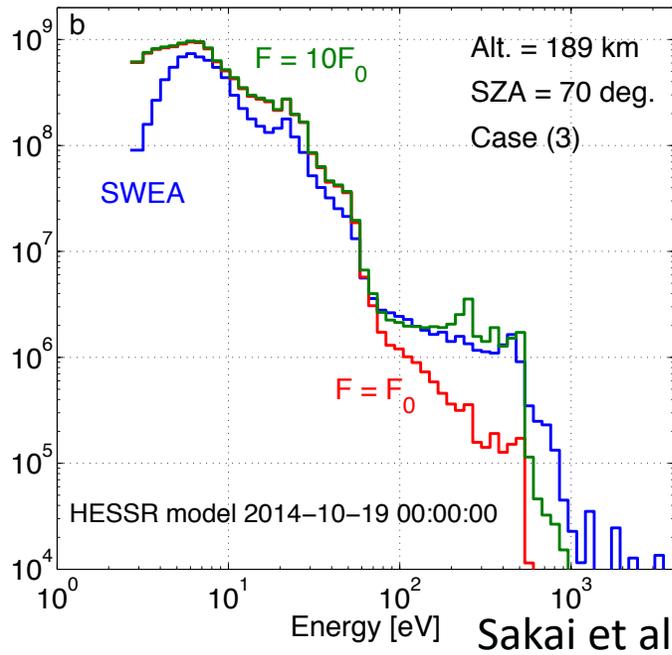


Data-Model Comparisons of Photoelectron Spectra

- C, N のAugerピーク
 - C: ~250 eV, N: ~360 eV (e.g., Sakai+, 2015)
 - NのAugerピークはN₂が少ないため同定が難しい
 - Cravens & Maurellis (2001) が予想したC, N, OのAuger X-rayは観測 (Dennerl, 2002)

→ C, N のAuger 過程存在

MAVEN/SWEA 2014-10-19 06:06:00



Sakai et al. (2015)

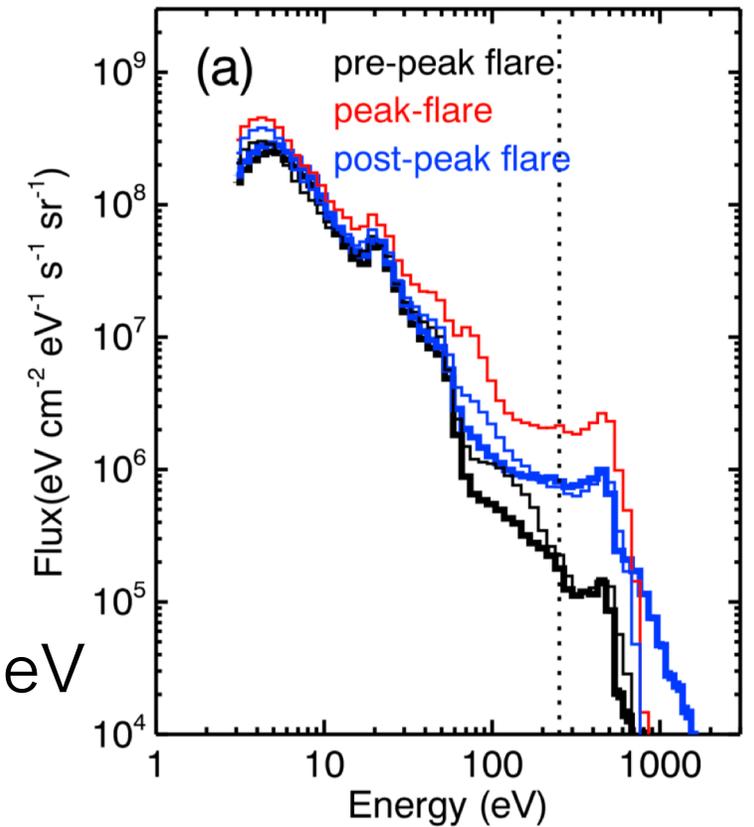
- Postpeak flare (青太線) の 250 eV 付近に凸凹 (Fig. 2a)

- 4分間以上観測

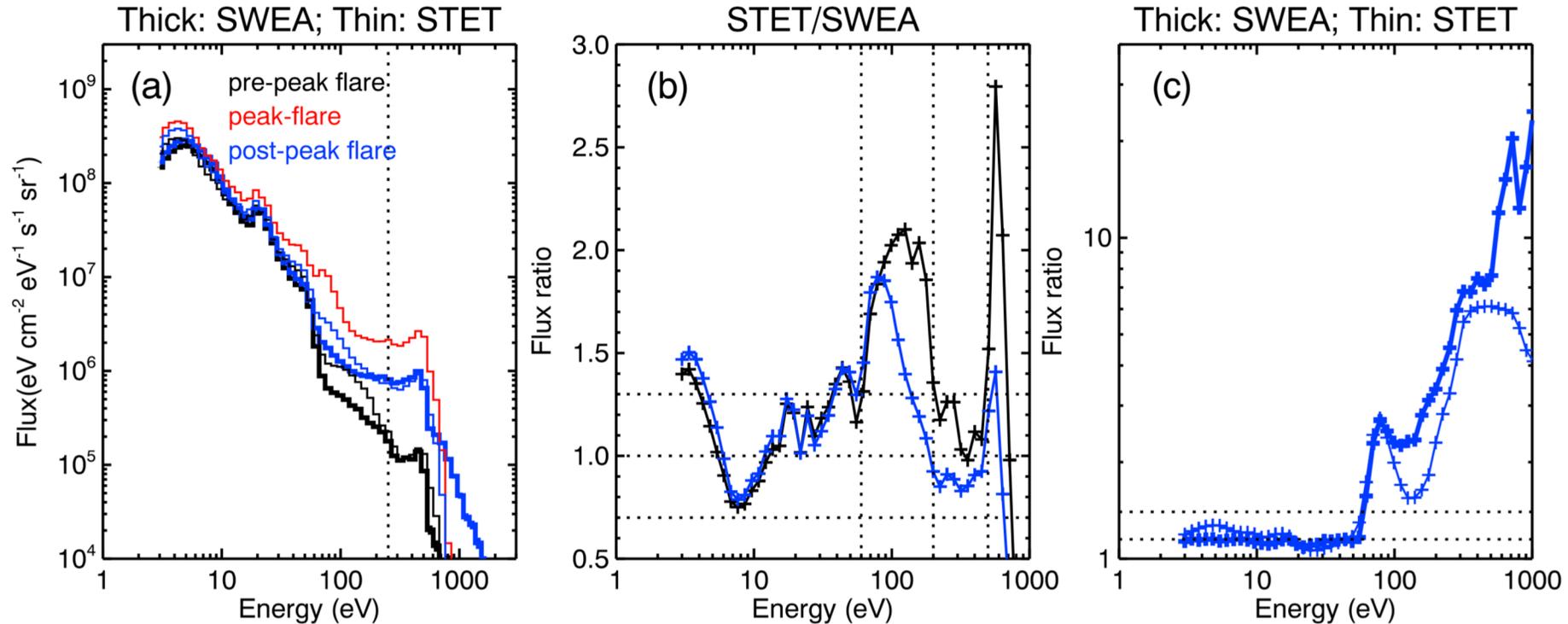
- Peak & Postpeak flare のモデルでも見られる

- 別の7フレアイベント中6つのイベントでC Augerピークが見られた

Thick: SWEA; Thin: STET



Data-Model Comparisons of Photoelectron Spectra



- STET(モデル)/SWEA(観測) (Fig. 2b)

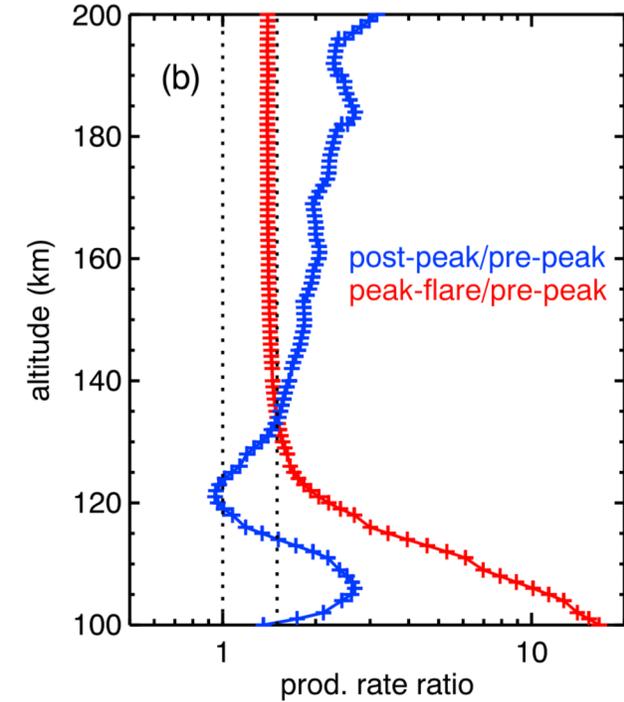
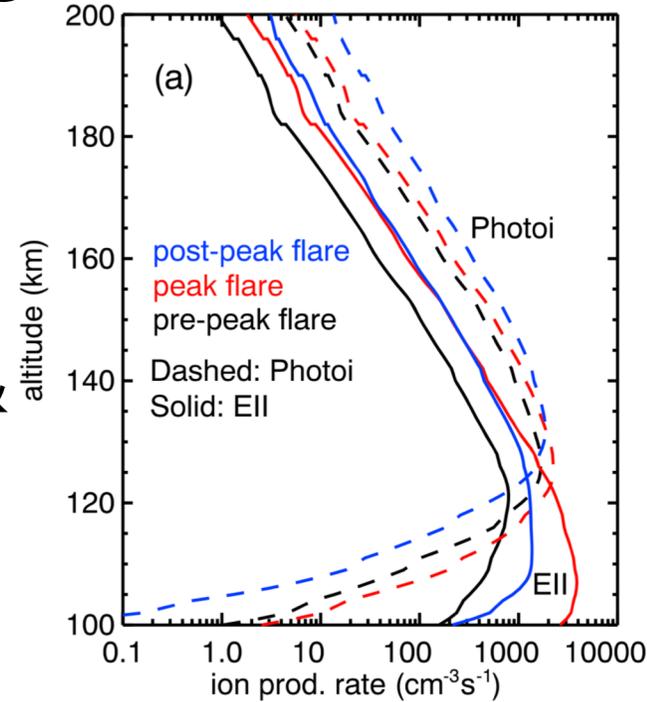
- $E < 60 \text{ eV}$, $200 < E < 550 \text{ eV}$:
30%以内で一致
- $60 < E < 200 \text{ eV}$: 観測と不一致
 - 光電離断面積, 太陽スペクトルの不確定性

- Postpeak/Prepeak (Fig. 2c)

- $E < 100 \text{ eV}$: 観測にほぼ一致
 - 11 – 60 nmの太陽スペクトルが Prepeak, Postpeakで正確に予想
- $60 < E < 500 \text{ eV}$: ファクター8↑
 - フレアによるEUV, 軟X線の増大

Observations and Modeling of Plasma Densities

- CO_2^+ 生成率 (Fig. 3a)
 - 光電離による生成率のピーク高度が Postpeak flareで上昇
 - 中性大気・電子温度はPrepeak & Peak flareで同じ値を使用
 - Postpeak flareで中性大気が膨張
 - EIIによる生成率のピーク高度は徐々に降下



- 合計生成率 Peak vs. Postpeak to Prepeak (Fig. 3b)

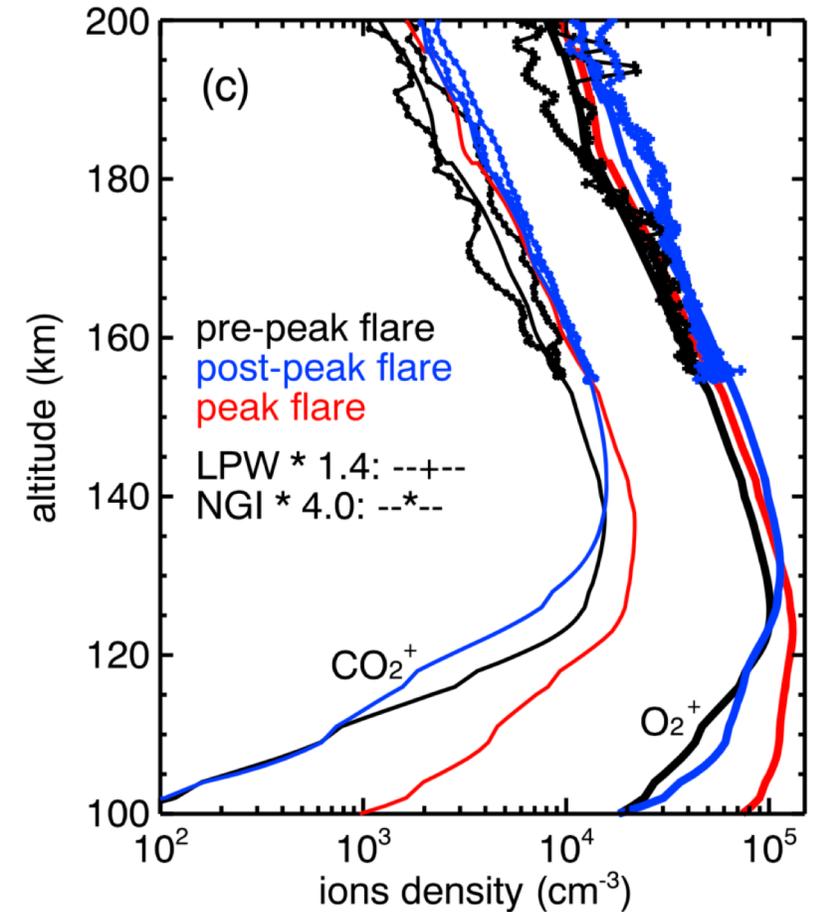
- Peak flare : $h > 120$ km 40% ↑
 $h < 120$ km 1500% ↑
- Postpeak : $h < 200$ km 200% ↑
 $h < 105$ kmでは増大は小さい
 - 中性大気の膨張によりX線が高高度で吸収

Observations and Modeling of Plasma Densities

- PCE仮定の下, R1 - R6と(1), (2)から密度を導出
- O_2^+ 密度 (Fig. 3c)
 - Postpeak flareで増大
 - $LPW * 1.4 \approx$ モデル O_2^+
 - 不確定性: モデル太陽照度, LPW観測, NGIMS観測, 断面積, 反応率
 - PCE仮定?: MAVENは高SZAで観測したため, 180 km以下での輸送が重要になる可能性

- CO_2^+ 密度 (Fig. 3c)

- $NGIMS * 4 \approx$ モデル CO_2^+
 - $LPW e^- / NGIMS O_2^+ \approx 2$
 - PCE仮定が問題?
 - 太陽放射照度等の不確定性?



- 密度の高度プロファイルや密度増大は観測, モデル間で同等
- フレアによる相対的な電離圏増大・膨張を特徴づける方法としては妥当

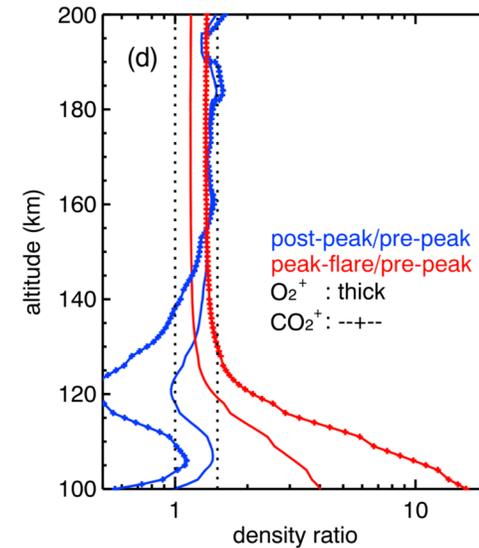
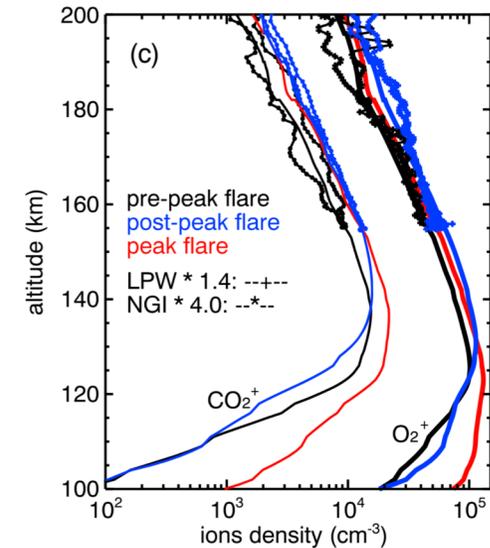
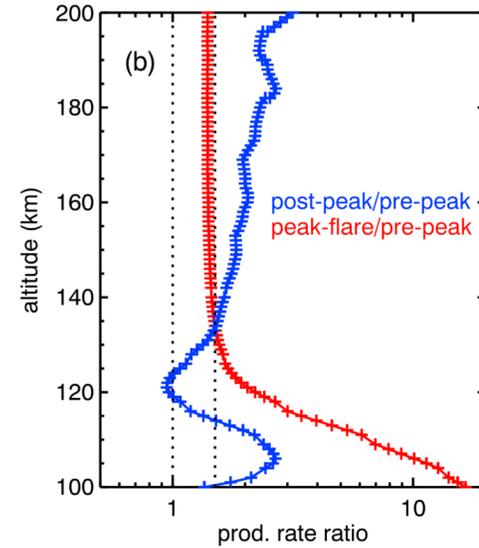
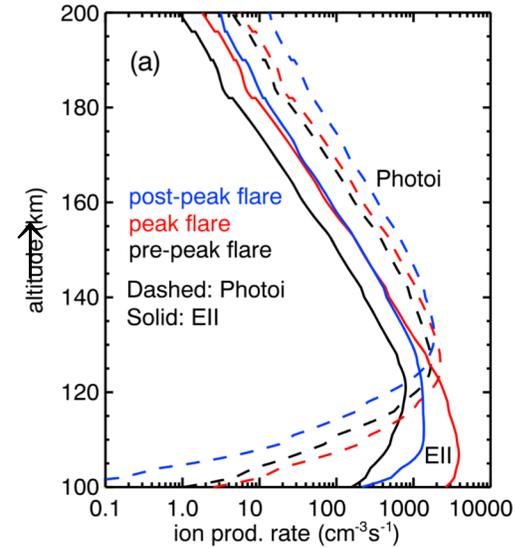
Observations and Modeling of Plasma Densities

- モデル密度 Peak/Prepeak (Fig. 3d 赤)
 - $h > M2$ ピーク: O_2^+ 15% ↑, CO_2^+ 35% ↑
 - $h < M2$ ピーク: O_2^+ 300% ↑, CO_2^+ ~1500% ↑
 - 中性大気と電子温度は同じ値を用いた
 - 太陽放射照度の違いのみ

$$\Delta n_{CO_2^+} \approx \Delta n_{O_2^+}^2$$

$$\because \Delta n_{CO_2^+} \propto \text{total } P, \Delta n_{O_2^+} \propto \sqrt{\text{total } P}$$

- モデル密度 Postpeak flare (Fig. 3b, 3c, 3d)
 - $h > 140$ km, $105 < h < 110$ km: O_2^+ 40% ↑
 - $h > 150$ km: CO_2^+ 40% ↑
 - $h < 140$ km: CO_2^+ $n_{\text{postpeak}} < n_{\text{prepeak}}$
 - $P_{\text{postpeak}}/P_{\text{prepeak}} < 2$
 - $n_{O_{\text{postpeak}}}/n_{O_{\text{prepeak}}} \approx 2$ (Fig. 1d)
 - CO_2^+ が減少 (R2, R3)



• M1ピークを同定

• 太陽スペクトルと中性大気分布に依存

Conclusions 1

- フレアに対する低高度電離圏の応答について，光電離スペクトルをPrepeak, Peak, Postpeak flareの3通り数値計算 (STETモデル) することで調査
- モデルスペクトルは観測と一致
 - モデルの信用性
- 炭素Auger電子の同定
- Prepeak flareとPeak flareの比較
 - 合計イオン生成率はM2層で40%， M1層で200%増加
 - X線強度増大によりEIIピークが降下
 - M2層： $n_{O_2^+}$ 15% ↑， $n_{CO_2^+}$ 35% ↑
 - M1層： $n_{O_2^+}$ 300% ↑， $n_{CO_2^+}$ 1500% ↑
- Postpeak flare (中性大気と電子温度の入力値変化が影響)
 - 合計イオン生成率はM2層より上層で40 – 200%， M1層で150%増加
 - M2ピーク高度が135 kmへ上昇

Conclusions 2

- Postpeak flare (中性大気と電子温度の入力値変化が影響)
 - 合計イオン生成率はM2層より上層で40 – 200%, M1層で150%増加
 - M2ピーク高度が135 kmへ上昇
 - O_2^+ 密度増大は50%以下
 - CO_2^+ ロスはO密度に顕著に依存
 - O密度はフレアにより増大
 - $h > 140$ km : $n_{CO_2^+}$ 50%以下程度 ↑
 - $h < 140$ km : $n_{CO_2^+}$ ↓
- 密度の高度プロファイルや密度増大は観測, モデル間で同等
 - フレアによる相対的な電離圏増大・膨張を特徴づける方法としては妥当
 - MAVEN近火点より高高度
 - MAVEN近火点より低高度ではM-GITMを入力値として使用
 - 生成率やイオン密度は観測と合わない
 - 重要なのは, 静かな太陽条件からフレア条件への相対的な変化について