

Effects of the 10 September 2017 Solar Flare on the Density and Composition of the Thermosphere of Mars

Cramer, A. G., Withers, P., Elrod, M. K., Benna, M., & Mahaffy, P. R. (2020), doi:10.1029/2020JA028518

東北大 D2 中村勇貴

概要

- 2017年9月の太陽フレアが、大気加熱・光化学プロセスを通して火星熱圏の密度・組成に与えた影響を、MAVEN/NGIMS観測を用いて評価。
- 高度固定で見ると、He以外の化学種の密度が増大し、O/CO₂比が減少しており、フレアによる熱膨張を示している。
- 大気密度固定で見ると、CO₂とAr密度が減少し、O/CO₂比が3倍まで増大した。
- CO₂の光解離・Oの生成はこの変動をもたらす光化学プロセスの1つと考えられる。
- 本研究の成果は、太陽フレアによる火星熱圏組成の変化を明らかにし、フレアが火星気候の進化に与える影響の理解とモデリングに貢献する。

イントロ

火星の熱圏

- 熱圏のenergy収支は、UV, soft X-ray (SXR)の吸収と、中間圏への熱伝導によって決まる。中間圏に伝わった熱は宇宙空間に放射される(Chamberlain & Hunten, 1989)。
- 熱圏の化学組成は、分子拡散と光化学反応によって決まる。

分子拡散

- 均質圏界面より低い高度では、大気化学種はよく混合されているが、均質面高度より高い高度では、化学種はそれぞれのスケールハイトにしたがって分布する。

光化学反応

- 高高度(だいたい200km以上)になると、CO₂の光解離またはO₂⁺と電子の解離再結合により生成したOがdominantになる。
- ✓ O/CO₂比は、熱圏の鉛直構造や組成を特徴付けるparameterといえる。
- ✓ また、熱圏は大気散逸のreservoirであるため、その組成は火星から散逸する大気フラックスと散逸化学種組成に影響を与える。

イントロ

熱圏に対する太陽フレアの影響

- 太陽フレア：太陽から放射されるSXR, EUV, FUV強度が数分かけて急激に増大し、数十分から数時間かけてdeclineする。
- 大気加熱、電離・解離率の上昇により、熱圏の膨張、電離圏密度の上昇、O生成の増加が起こる(Elrod et al., 2018; Gurnett et al., 2005; Mendillo et al., 2006; Thiemann et al., 2018)

先行研究(2017年9月の太陽フレアの火星熱圏への影響)

- Elrod et al. (2018) : CO₂, Ar, N₂, CO, Oの密度がフレア時に2.5-5倍に増加し、増加率は高高度ほど大きく、平均分子量が大きい種ほど顕著。O/CO₂比は高度固定で見ると減少。
- ➔ フレアによって中性化学種の温度が100K上昇し大気が膨張。
- Thiemann et al. (2018) : ion密度が増加。圧力固定で見ると、フレア中にO₂⁺, CO₂⁺密度が10⁻⁷Pa未満では減少、O⁺は増加。O/CO₂比は圧力固定で見ると増加。
- ➔ 組成変化は光化学プロセスによる。

目的

- 熱圏の密度・組成が、熱圏の膨張と光化学の2つのプロセスによってどのように変化したかを明らかにすること。

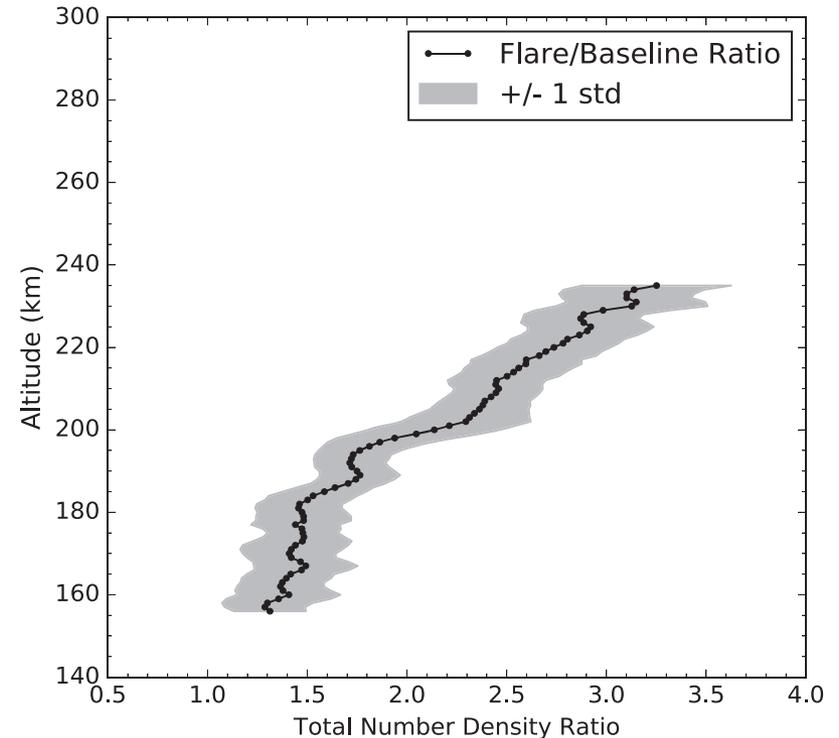
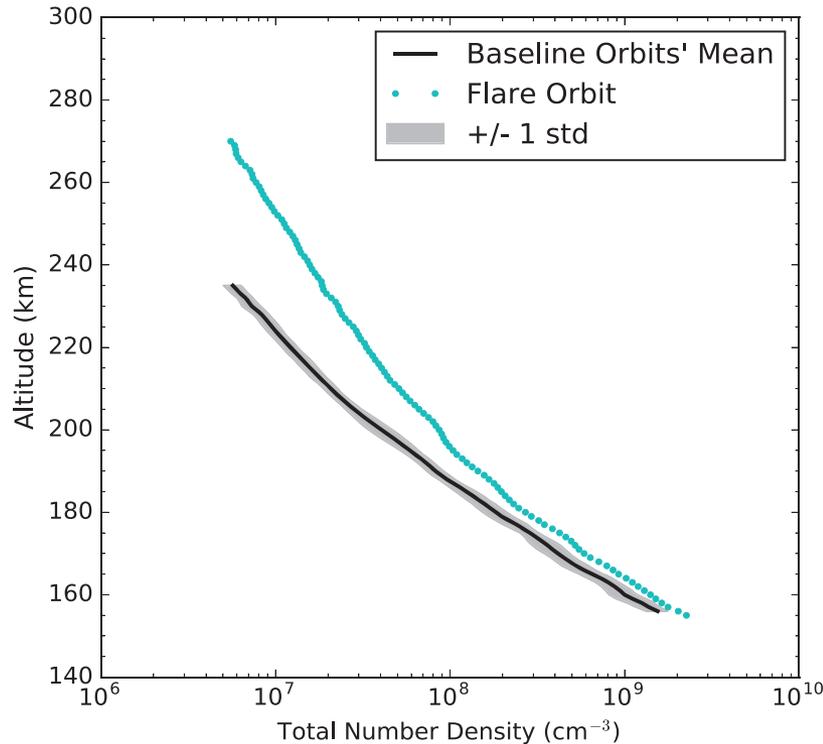
データセット

Neutral Gas and Ion Mass Spectrometer (NGIMS)

- 高度範囲：Periapsis altitude (150 km) ~ upper boundary (240-300 km)
- 時間分解能は2 sec, 1 orbit(4.5 h)につき20分間計測
- Inboundのみ使用 (outboundは0密度が信頼できないため)
- 対象化学種：He, O, N₂, CO, Ar, CO₂
- 対象期間：2017年9月10-11日 orbit 5715-5720 (6 orbits)
- Orbit 5718では、フレアpeakの90分後の密度を観測 (=flare orbit)
： EUV強度はpeakの25%まで減少していたtiming
- フレアの影響はorbit 5718のみにみられた
- Orbit 5718を除く5 orbits(フレアの影響・CMEやSEPのコンタミやダストストームの影響もなし)の平均を取って、"baseline atmospheric conditions"を生成し、orbit 5718と比較することで、フレアの影響を評価
- Inbound passのSZA, LTはそれぞれ65-70 deg, 16.7-17.6 hであり、太陽フラックスはフレア時以外一定であった

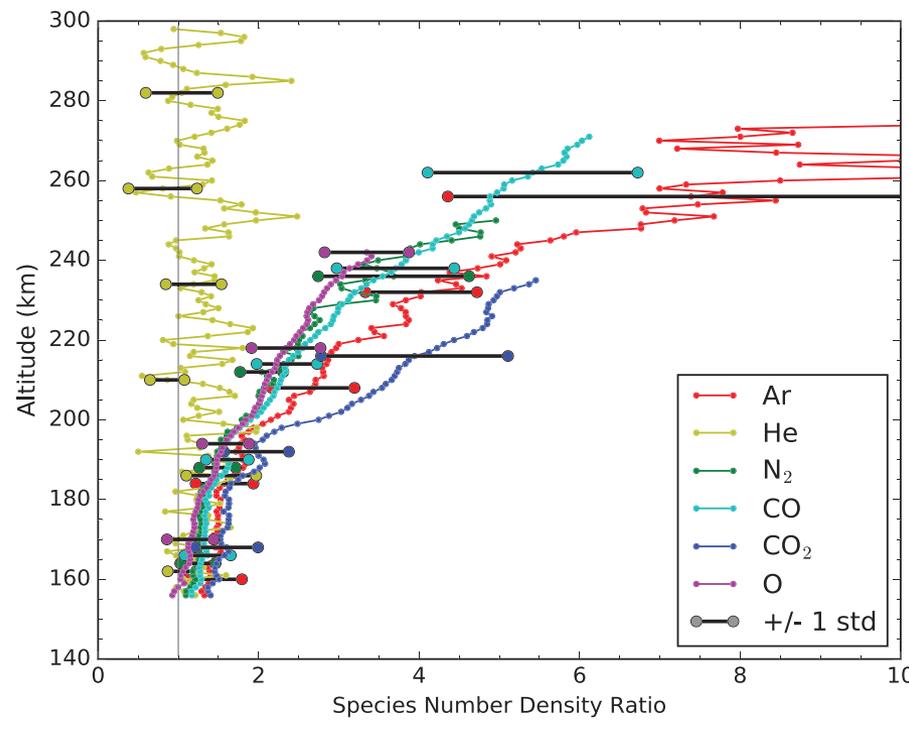
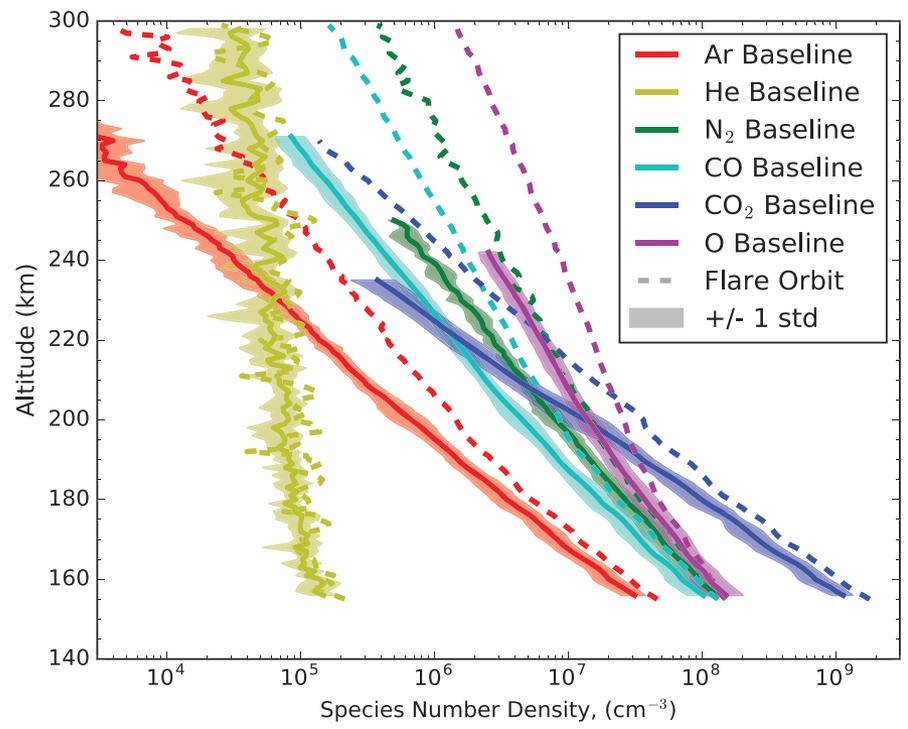
結果：total number density

- Total number density (6 speciesの密度の合計)はフレア時に顕著に増大
- 高度235 kmでは3倍に
- 増加率は高度ごとに一定ではない。190 km以下ではほぼ一定だが、190 km以上では高高度ほど増加率が大きい。



結果：化学種ごとの密度変動 (高度固定：大気膨張)

- CO₂, CO, O, N₂の密度は、フレア時に増大し、増加率は高高度ほど大きい
- フレア時のScale heightの変化は、He以外の化学種については1.4倍であった
- Heのみ、フレア時に変動がみられなかった
- Non-flare時のHeのscale heightは100km。もしフレア時に他の化学種と同様にscale heightが1.4倍になるとすると、高度298kmにおけるHe密度は $3.44 \times 10^4 \text{ cm}^{-3} \rightarrow 5.22 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ に増加すると見積もられる。しかしこれはHe密度分散の範囲内である。(He変動がみられない原因についての考察)



(この議論を簡単な数式で)

高度150km以下の密度はフレア時にも変化なしと仮定

高度150kmでの密度を n_0 とし、高度150+h kmでの密度 n_1 を求める。

Non-flare時は n_1 , flare時は n_1' とする

温度がnon-flare時は T , flare時は bT とする (Tは高度によらず一定とする)

Speciesのmassを m とする

- $n_1 = n_0 \times \exp(-mgh/kT)$ (non-flare)
- $n_1' = n_0 \times \exp(-mgh/bkT)$ (flare)
- $\frac{n_1'}{n_1} = \exp\left[\frac{mgh}{kT}\left(\frac{b-1}{b}\right)\right] = \alpha^{mh}$ $\alpha = \exp\left[\frac{g}{kT}\left(\frac{b-1}{b}\right)\right]$ 当然、比は $b>1$ で1より大きい

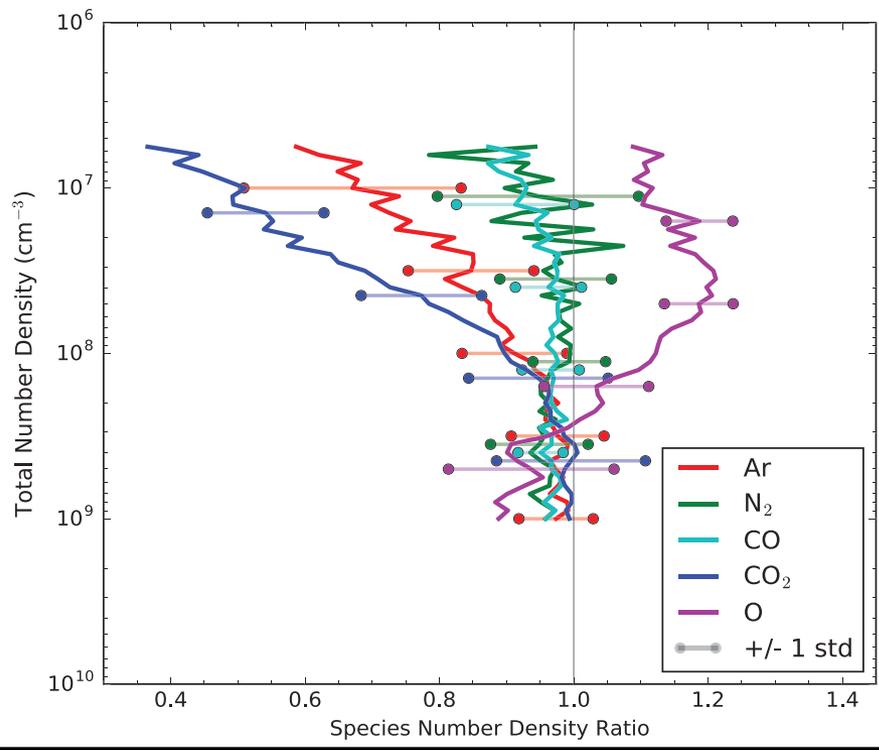
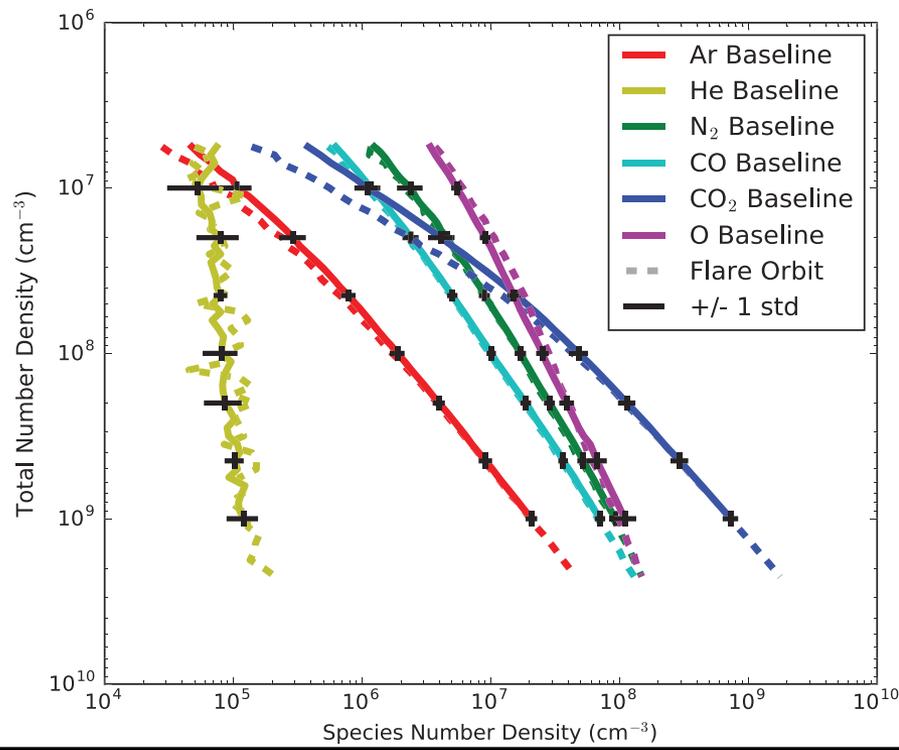
この比は同じ高度ではexponential m に比例

CO₂の密度は230kmで約5倍。これを用いてHeの300kmにおける増加率は、

- $\alpha^{44 \times 80} = 5$ $\alpha = 5^{1/(44 \times 80)}$
- $\alpha^{4 \times 150} = 5^{4 \times 150 / (44 \times 80)} = 5^{0.17} = \text{約}1.3\text{倍と見積もられる}$

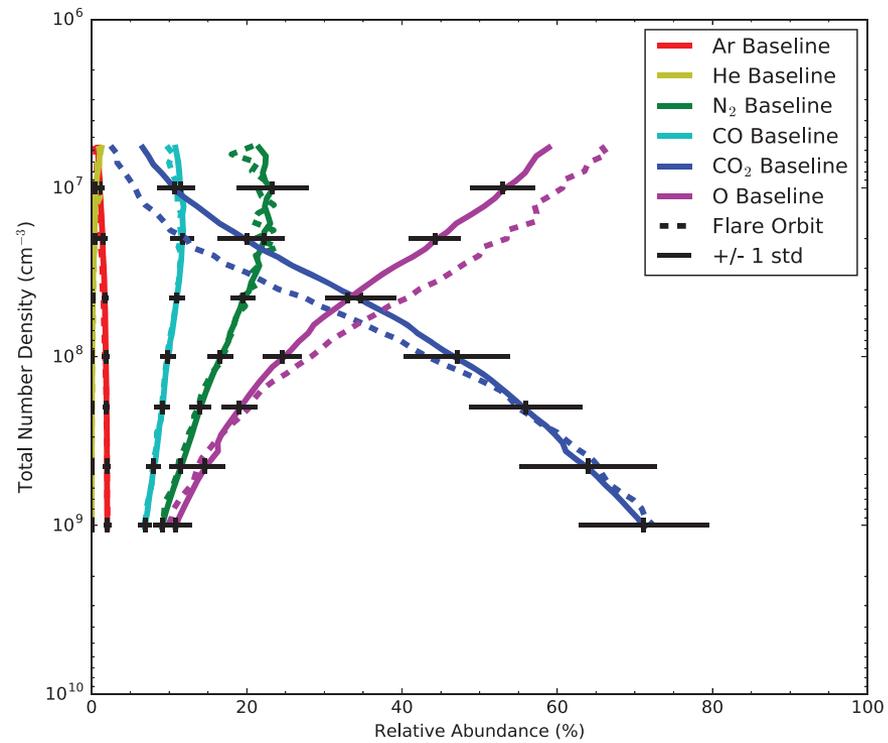
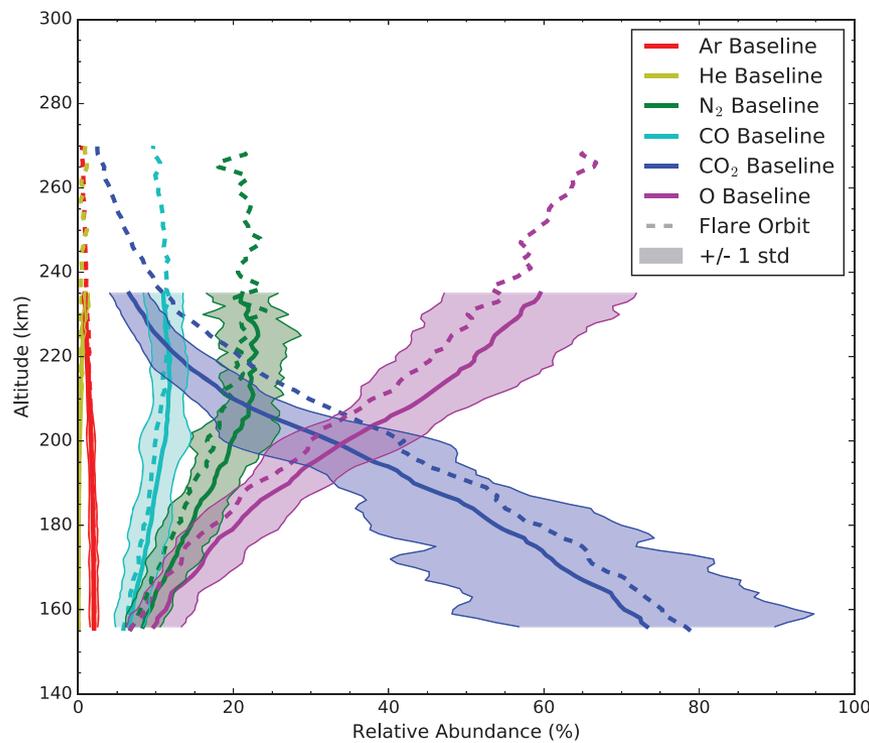
結果：化学種ごとの密度変動 (大気密度固定：組成変化)

- 高度固定でみると、大気の熱膨張と化学組成変化の和となって現れる。
- 大気密度を固定にすると、大気膨張の効果を切り離して組成変化をみることができる。
- Total number density $> 10^8 \text{ cm}^{-3}$ では、フレア時の化学組成変化がない。
- これより低密度では、 CO_2 とArが減少、Oが増加している。 N_2 とCOは変化なし
- Arは不活性のため、Arの減少は予期されていなかった



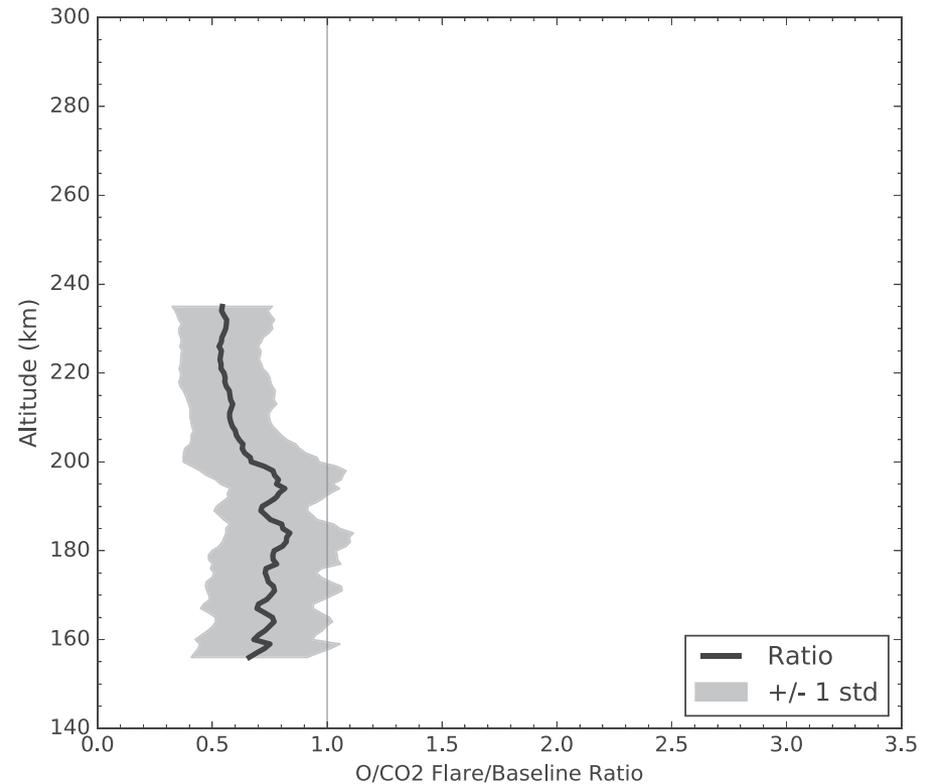
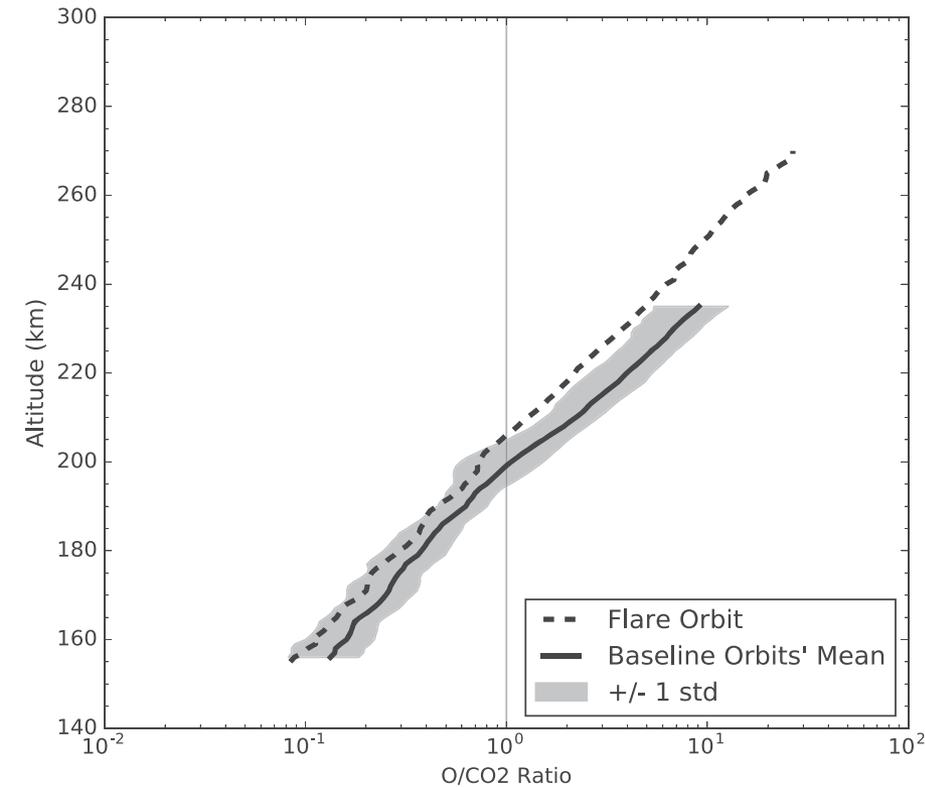
結果：化学組成変化

- 高度固定で見ると、フレアの影響は1std以内でminor
- 大気密度固定で見ると、total number density $>10^8 \text{ cm}^{-3}$ の高密度領域ではフレアの影響なし。これより低密度領域ではO混合比が増大し、 CO_2 , Ar混合比が減少している。 N_2 , CO, Heは変化なし。
- 太陽フレアによる化学的影響が密度に与える影響は小さいが、大気組成に与える影響は大きいことを示唆。



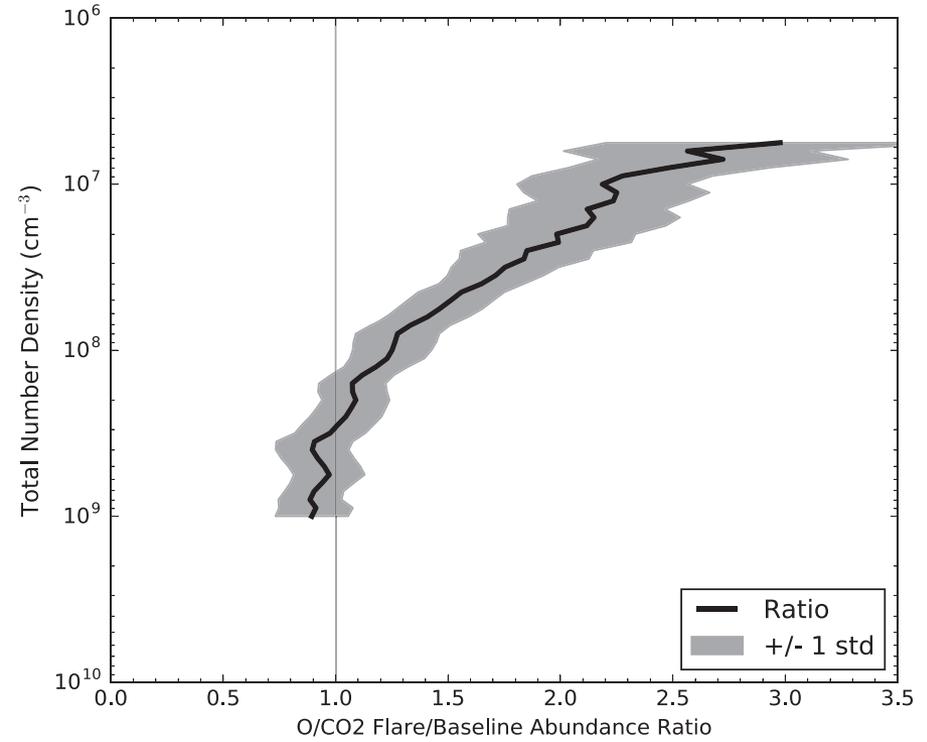
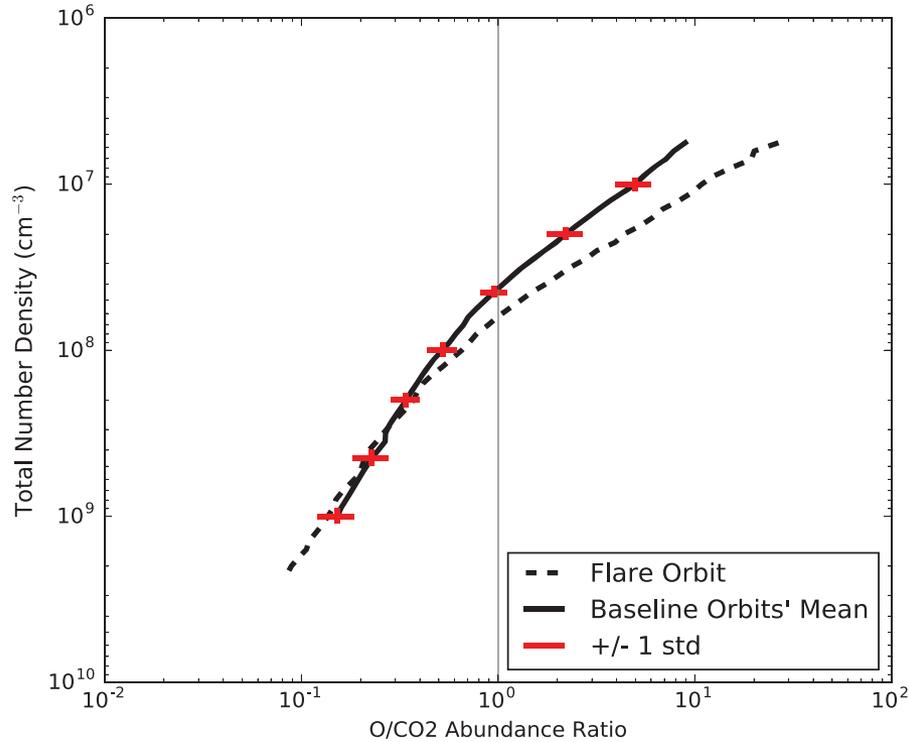
結果：O/CO₂ (高度固定：大気膨張)

- 高度固定で見ると、O/CO₂比はフレア時に減少。
- フレアによる加熱で大気が膨張し、あるO/CO₂比をとる高度が上昇するため。



結果：O/CO₂ (大気密度固定：化学的影響)

- 大気密度 < 10⁸ cm⁻³では、フレア時にO/CO₂比が増加
- 大気膨張の影響を取り除いたO/CO₂比に対するフレアの影響は、密度が高い低高度では小さく、密度が低い高高度ほど顕著になる。
- CO₂の光解離がこれを説明する光化学プロセスの1つ。



考察：フレアの影響 vs solar cycleの影響

- Krasnopolsky (2002)と、Bougher et al. (2015)のモデルで見積もられた solar cycleによる密度変動と比較
- どちらのモデルも、フレア時の密度変動よりも、太陽極小期から太陽極大期にかけての変動のほうが大きい。

Table 1
Perturbed/Baseline Number Density Ratios

| Event | 170 km | | 220 km | | Source |
|------------------------|--------|-----------------|--------|-----------------|-----------------------------------|
| | O | CO ₂ | O | CO ₂ | |
| Flare | 1.15 | 1.52 | 2.44 | 4.43 | This study |
| Solar cycle | 2.4 | 2.8 | 3.8 | 16.6 | Krasnopolsky (2002) |
| | 1.6 | 2.3 | 2.7 | 13.2 | Bougher, Pawlowski, et al. (2015) |
| Dust storms (regional) | ~1.2 | 1.3 | >2.0 | >3.4 | Liu et al. (2018) (nightside) |
| | 1.1 | 1.3 | 1.1 | 1.6 | Liu et al. (2018) (dayside) |
| | 1.3 | 1.8 | 1.8 | 2.8 | Y. Lee et al. (2020) |
| Dust storms (global) | 0.6 | 5.0 | 0.7 | 5.2 | Y. Lee et al. (2020) |
| | 0.7 | 1.5 | n/a | n/a | Elrod et al. (2020) ^a |

^aDensities calculated for SZA ~ 67°.

考察：フレアの影響 vs ダストストームの影響

Regional dust storm (Liu et al., 2018; Lee et al., 2020)

- 190km以下ではフレア時の変動のほうが小さく、190km以上ではフレア時の変動の方が大きい

Global dust storm (Lee et al., 2020; Elrod et al., 2020)

- O原子はregional と異なり、減少傾向。
- 同様に、190km以上ではフレア時の変動の方が大きい

Table 1

Perturbed/Baseline Number Density Ratios

| Event | 170 km | | 220 km | | Source |
|------------------------|--------|-----------------|--------|-----------------|---|
| | O | CO ₂ | O | CO ₂ | |
| Flare | 1.15 | 1.52 | 2.44 | 4.43 | This study |
| Solar cycle | 2.4 | 2.8 | 3.8 | 16.6 | Krasnopolsky (2002) Bougher, Pawlowski, et al. (2015) |
| | 1.6 | 2.3 | 2.7 | 13.2 | |
| Dust storms (regional) | ~1.2 | 1.3 | >2.0 | >3.4 | Liu et al. (2018) (nightside) |
| | 1.1 | 1.3 | 1.1 | 1.6 | Liu et al. (2018) (dayside) |
| | 1.3 | 1.8 | 1.8 | 2.8 | Y. Lee et al. (2020) |
| Dust storms (global) | 0.6 | 5.0 | 0.7 | 5.2 | Y. Lee et al. (2020) |
| | 0.7 | 1.5 | n/a | n/a | Elrod et al. (2020) ^a |

^aDensities calculated for SZA ~ 67°.

昼夜対流の影響

- 酸素原子の夜側への移流は、O/CO₂比を変化させ、熱圏の密度と組成両方に影響を与える。
- 水平風は、受けた太陽放射量の増大・その結果の酸素原子増加によって影響を受ける(Bougher et al., 2015)
- フレア時の太陽放射増加・大気加熱・光化学反応により駆動される対流が、今回観測された密度や組成の変化が影響を与えた可能性がある。
- 予期せぬArの変化やO/CO₂比の大気密度が小さい領域での振る舞いは、こうしたダイナミクスを考慮に入れることで解決する可能性がある。

まとめ

- 2017年9月の太陽フレアが火星熱圏の密度と組成に与えた影響を調べた。
- O/CO₂比が観測上端の最も大気密度が低い領域では、フレアの影響を受けた領域で26.6となり、フレアの前後のorbitを平均した 9 ± 2 よりも3倍程度、有意に増加した。このことから、太陽フレアによる化学組成変化の影響が大きいことが示唆された。
- 太陽フレアが火星上層大気に与える影響をより包括的に理解するためには、
 1. 電離圏の組成変化との比較：CO₂・Oは電離圏組成を決める上で重要な中性種
 2. 他のフレアの影響を調べる：MAVENの4.5時間orbitでは、複数の連続するorbitでフレアの影響が現れることはないと考えられる。複数のフレアを解析することで、冷却などの時定数を明らかにできる
 3. 数値モデルでの評価：加熱・光化学・輸送の相対的な寄与を評価することができる。
- 初期火星では、キャリントン規模のCMEが1日に1回程度の頻度で発生していた可能性がある。継続的な太陽フレアは、初期火星大気の散逸に大きな影響を与えていたと考えられる。