

Ion-neutral coupling in the upper atmosphere of Mars: A dominant driver of topside ionospheric structure

M. Mayyasi, C. Narvaez, M. Benna, M. Elrod, and P. Mahaffy (2019)
JGR: Planets
<https://doi.org/10.1029/2019JA026481>.

2020/9/15 火星勉強会
東北大学 D1
吉田 奈央

Abstract

- これまで、プラズマの数密度プロファイルが、理論的な指数関数のプロファイルからばらつくことが観測されてきたが、大多数の理由はよくわかっていない。また、先行研究における観測はプラズマ観測のみであった。
- 本研究では、MAVENに搭載されたNGIMSを使用して、火星の上層大気におけるイオン・(電子)・中性大気を昼間側で解析した。
- 高度160-200 kmで観測された中性大気は、バルク大気と同じ振る舞いをしていた。
- 同じ高度帯で電離大気が中性大気と同じ構造を示した割合は全体の70%だった。
- 残りの30%では、電離大気に限って特徴的な形状が見られた。特に、残留磁場領域や明け方の観測で見つかりやすかった。
- 1次元電離大気モデルを使用して、中性大気の数密度の構造によって直接的に引き起こされる電離圏の数密度構造を再現した。この結果は、火星大気において電離大気と中性大気が強く結合していることを表している。

Introduction

- 火星の電離圏(~80 - ~400 km)は**物理的な作用**によって変動しやすいことがわかっている。電離大気の特徴から、**太陽放射**(宇宙天気的なイベントや太陽活動度)、**季節**(ダストストーム、大気波動)、**磁場**のトポロジーの変動が確認されてきた。(Haider+01; Nagy+04; Withers+09)
- 火星電離圏は高度で2つの領域に分類される
 - ▶ 電離圏下部 (< ~150 km), 光化学反応が支配的
Main layerは極端紫外線の吸収・X線光子・隕石のablationで作られる。
光化学平衡を仮定することで観測された様子を再現可能。(e.g., Fox+96など)
 - ▶ 電離圏上部 (> ~150 km), プラズマの拡散や輸送が支配的
プラズマが電場や磁場環境に応答しやすくなる。
さらに上層大気ではプラズマは太陽風に影響を受けて散逸の影響を受けやすい。
(e.g., Dubinin+18; Ma+04)
- MAVENによって、中性大気と電離大気を同時にその場観測することが可能になった。
本研究では、**火星大気における ion-neutral coupling の程度を明らかにし、電離大気の変動性として提案された駆動源の違いを明らかにする。**

Analysis (Instrument)

- Neutral Gas and Ion Mass Spectrometer (NGIMS) を使用
- 観測できる質量範囲; 2 - 150 amu (atomic mass unit)
分解能; 1 amu
観測高度; ~150 - 500 km
- 昼間側で中性大気とイオン大気を同時観測したorbitのみ解析 (Fig. 1)
(SZA < 90°)
- inboundのみ使用
- 観測期間; 2014/10 - 2018/4
計1724プロファイル

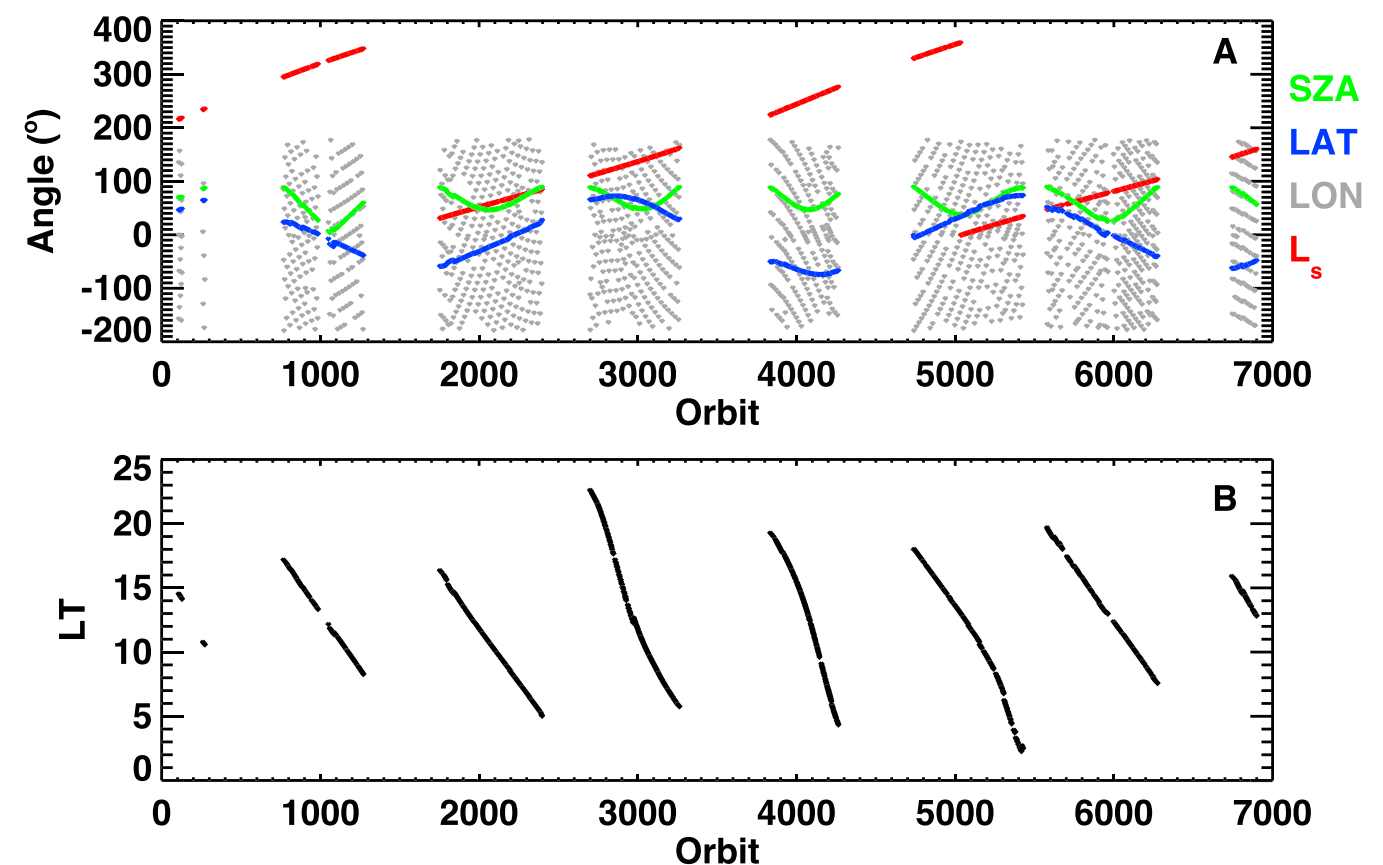


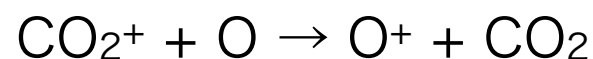
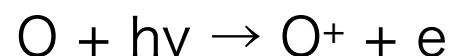
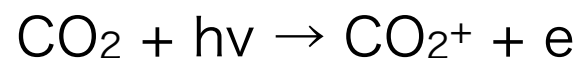
Fig. 1

Analysis (Simulation tools)

- Boston University Mars Ionosphere Model (BUMIM) を観測結果の解釈のために使用。
- BUMIMとは
1次元流体モデル。中性大気と太陽放射を入力とし、電離圏のプラズマの環境をシミュレーションする。光化学反応式を含む。(Martinis+03; Matta+13; Mayyasi & Mendillo, 15)
 - 電離圏下部; 光化学平衡が成り立つ。
電離圏上部; 圧力勾配や重力によるプラズマの鉛直輸送が徐々に卓越。
 - 250 km以下の範囲でシミュレーションした。
 - 電流や残留磁場、誘導磁場、水平風などは考慮されていない。
 - 鉛直解像度; 1 km
(NGIMSのデータも高度1 kmごとに平均された)

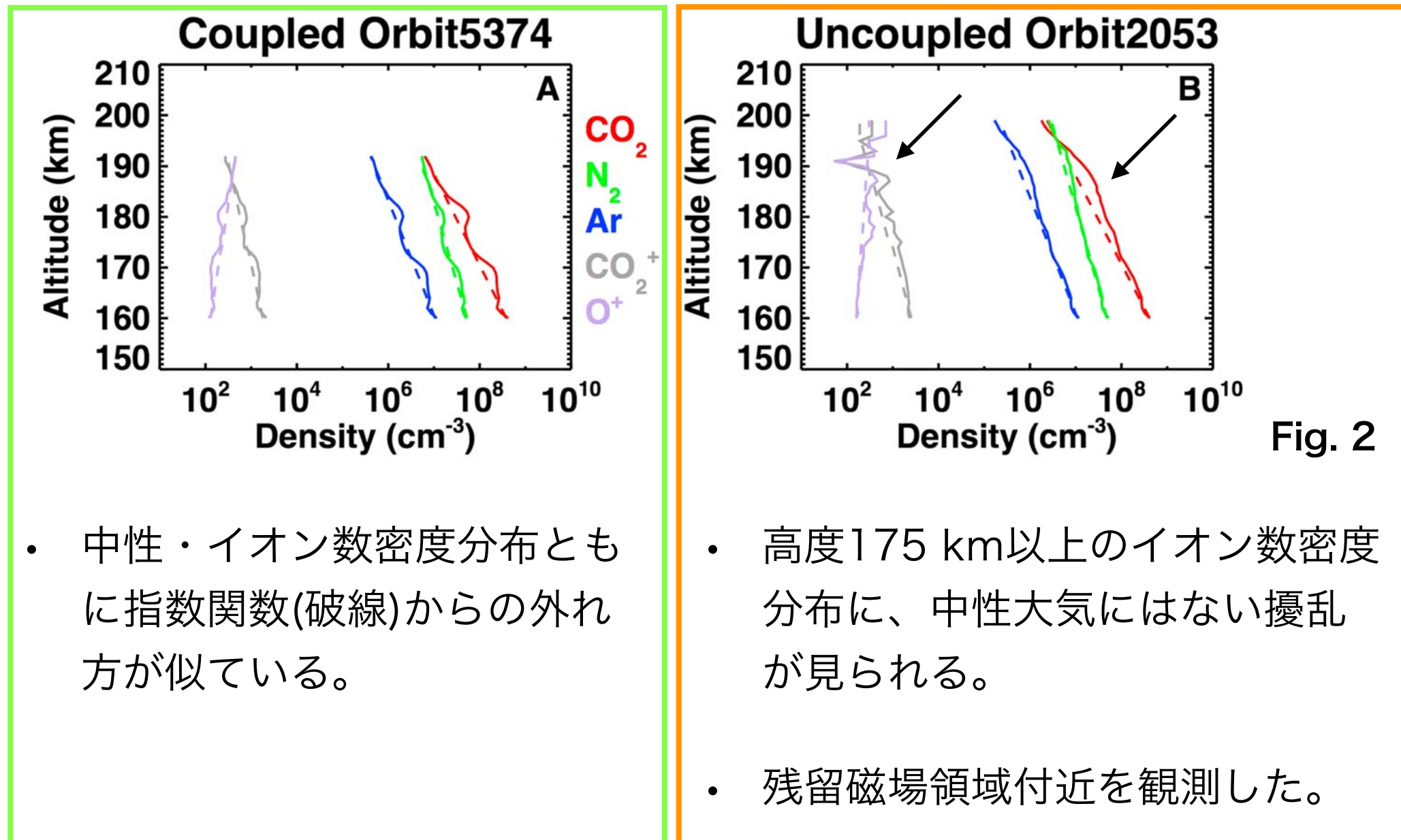
Analysis (Methodology)

- 理論的には、擾乱のない中性大気の数密度分布は、高度が増加するにつれて指数関数的に減少する。実際の大気は、理論的なプロファイルからの局所的な増大/減少が見られる。
[Grebowsky+17; Withers+12; Yigit+15]
- この研究では、指数関数的なプロファイルから外れた中性大気のプロファイルを調べ、同様に電離大気の相当する高度における数密度プロファイルの外れ具合を調べる。
- 計測範囲; 衛星の近火点から40 km上空まで (平均で~160 - 200 km)
- 分子種ごとのプロファイルのばらつきの相関は、中性-中性, プラズマ-プラズマ, 中性-プラズマの組み合わせで調べた。
 中性-プラズマの相関が85%以上のもの → “coupled”
 中性-プラズマの相関が低いもの → “uncoupled”
- 特に、 $\text{CO}_2 - \text{CO}_2^+$, $\text{CO}_2 - \text{O}^+$, $\text{CO}_2^+ - \text{O}^+$ の組み合わせを調べた。
 光化学反応の理論に従えば、 $\text{CO}_2 - \text{CO}_2^+ \rightarrow$ 一緒に動く, $\text{O}^+ - \text{CO}_2 \cdot \text{CO}_2^+ \rightarrow$ 反対に動く



Results

- Coupled と Non-coupled profileの例 (Fig. 2)



- 全プロファイル(1724個)のうち1223個(**70%**)がcoupled, 504個(**29%**)がuncoupledなプロファイルであった。Uncoupledのプロファイルについては後述。

Results (モデルによる再現)

- Input (中性大気, 気温, **Fig. 3**)

観測が行われた高度はNGIMSのデータを用い、その他の高度では指数関数に従うと仮定した。

H₂, Hについては先行研究から引用。(Matta+13)

H₂, H関連の光化学反応式 (一例)

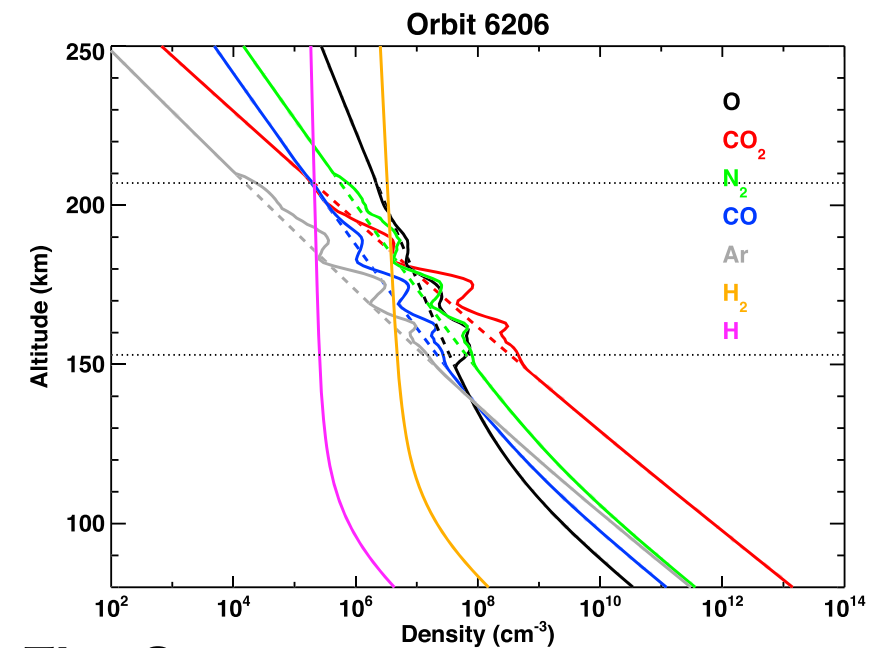
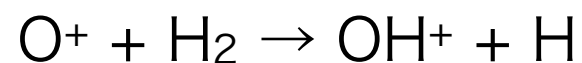
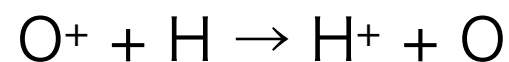
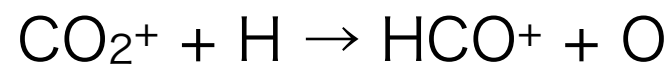


Fig. 3

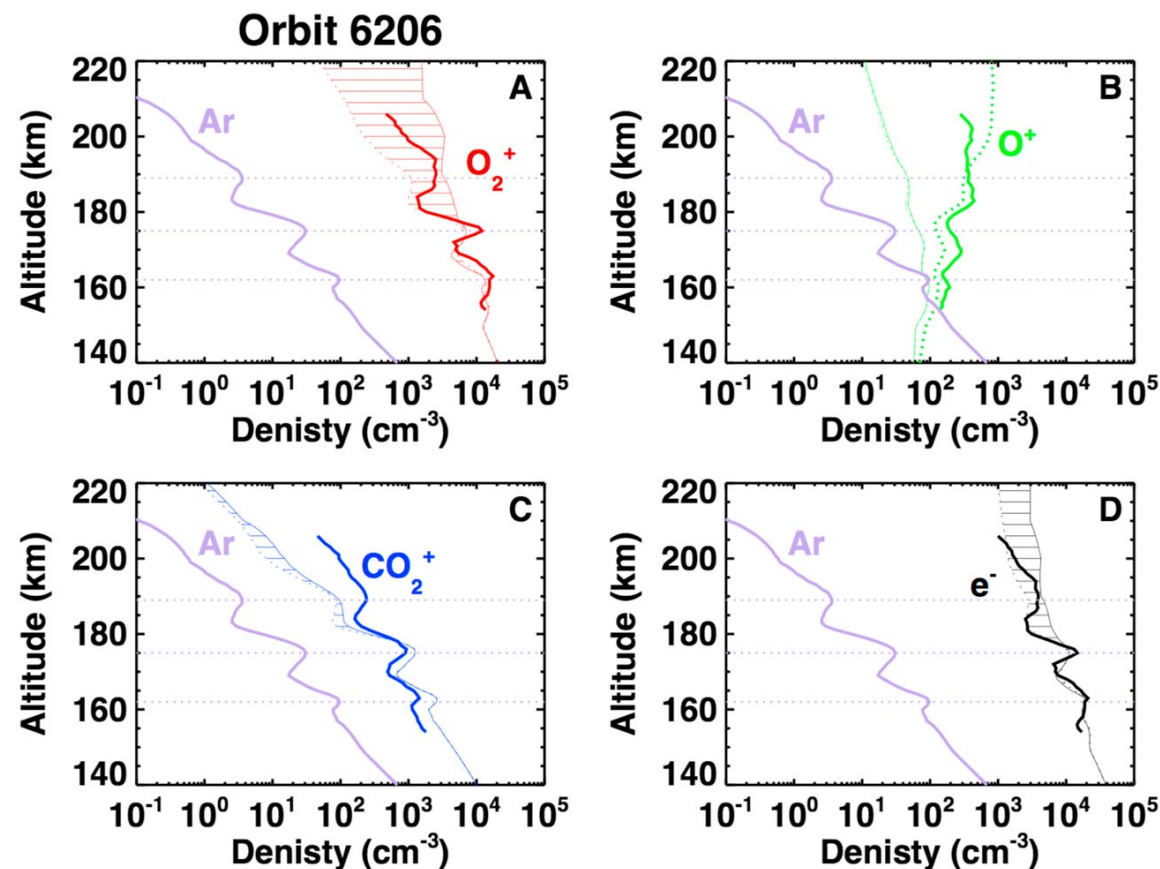


Fig. 4

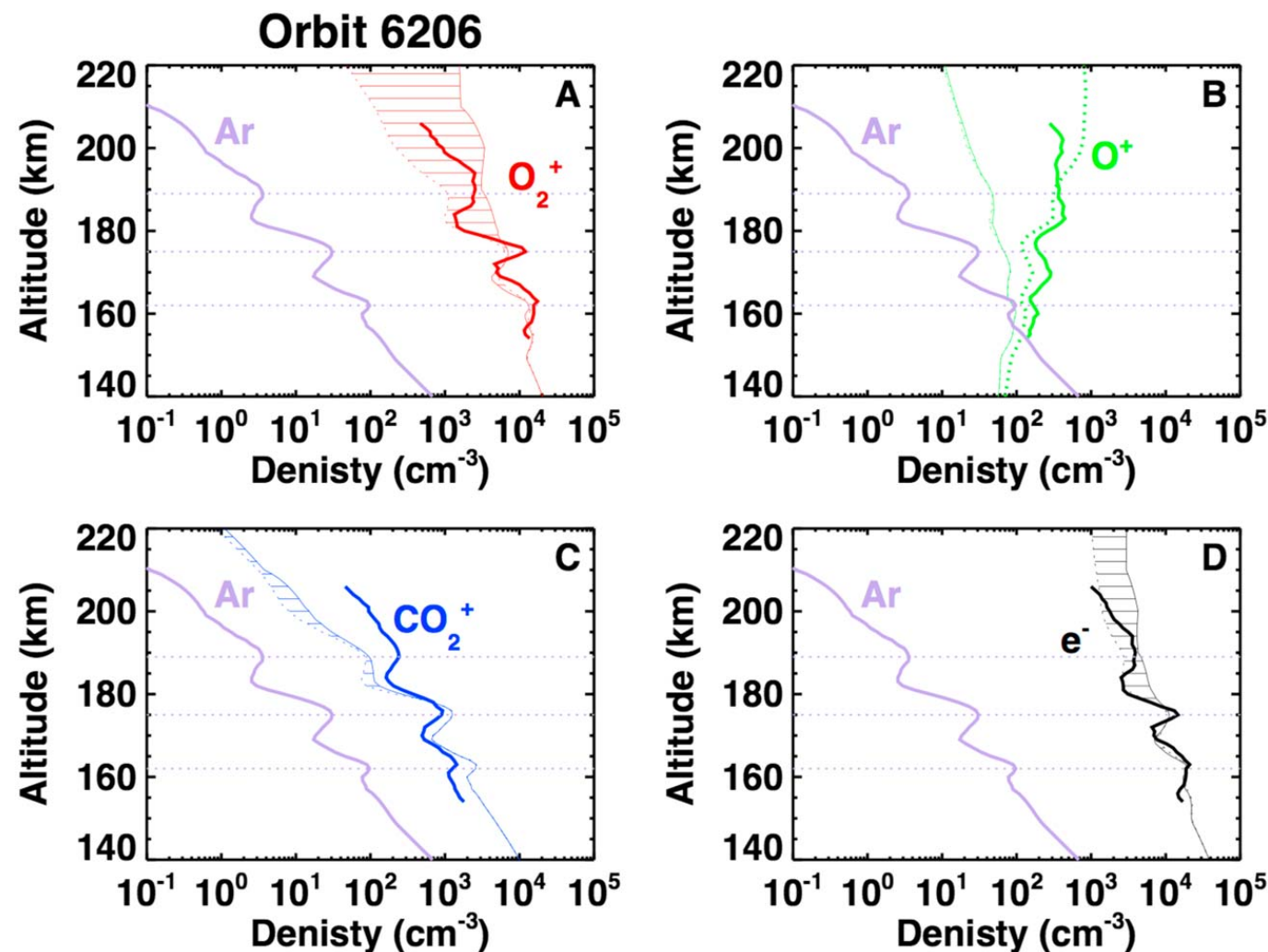
- 結果は2通りで表示 (**Fig. 4**)

- (1) 光化学反応のみ
- (2) 光化学反応 + 輸送

- 図の表示方法

- (1) 点線
- (2) 薄い実線
- 実際の観測; 太い実線

Results (電離圏分布再現結果, 1)



(1, 点線) 光化学反応のみ
(2, 薄い実線) 光化学反応 + 輸送

Arプロファイル
高度162, 175,
189 kmで
数密度の増大

Fig. 4

モデルによる O_2^+ の分布

高度155, 162, 175 kmで数密度の増大

(1, 光化学反応式のみ)では189 kmにも増大

(2, 輸送を含む)では189 kmではなく200 kmに増大が見える。

(1)と(2)は180 km以下で合致 → 180 km以上で輸送の効果が卓越し始める。

CO_2^+ , e^- も同様

Results (電離圏分布再現結果, 2)

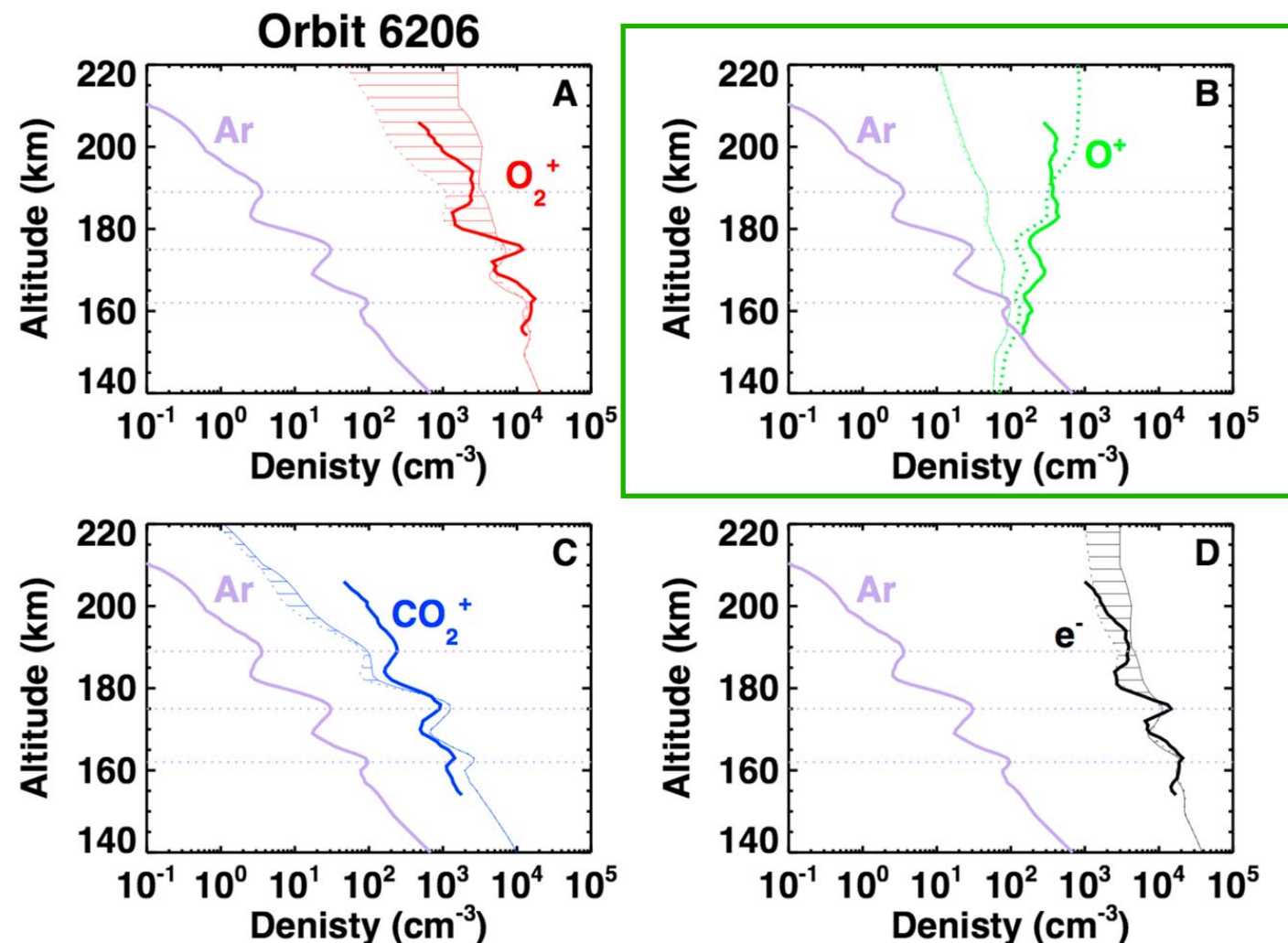


Fig. 4

- O^+ , シミュレーション結果と観測結果の数密度が合わない。
 O^+ については、この高度帯では輸送の影響を受けにくい。
改善する一つの可能性として、 H_2 と H の数密度の調整が挙げられる。
- O^+ の生成は CO_2 , O^+ の消失は H , H_2 , O の量によって決まる。
 H , H_2 を減少させることで、 O^+ の量が正味で増加する可能性がある。

Results (Non-coupling profiles, 1)

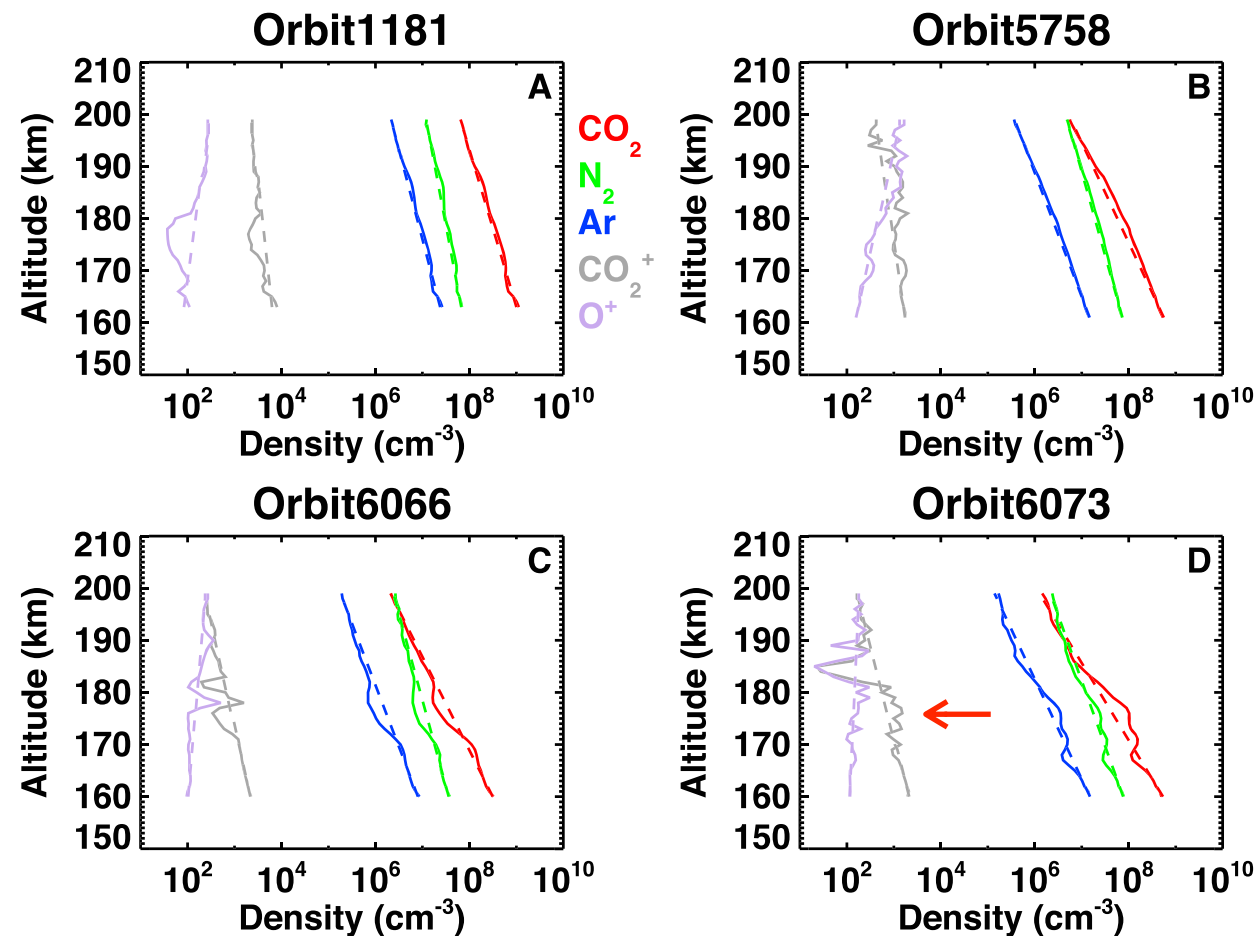


Fig. 5

- 電離大気の擾乱の鉛直スケール; 2~10 kmの範囲
多くの電離大気は急激に増大/減少する。
一方で、Bの170 km付近のように滑らかに変動する例もある。
- CO_2^+ , O^+ の傾向は、光化学反応の理論に反して、似た分布を見せた。(ただし、Dの172 kmを除く)
=> ion - neutralの衝突時間に相当、またはそれより早いタイムスケールで、外的要因によって、プラズマが影響を受けていることを示唆する。

Results (Non-coupling profiles, 2)

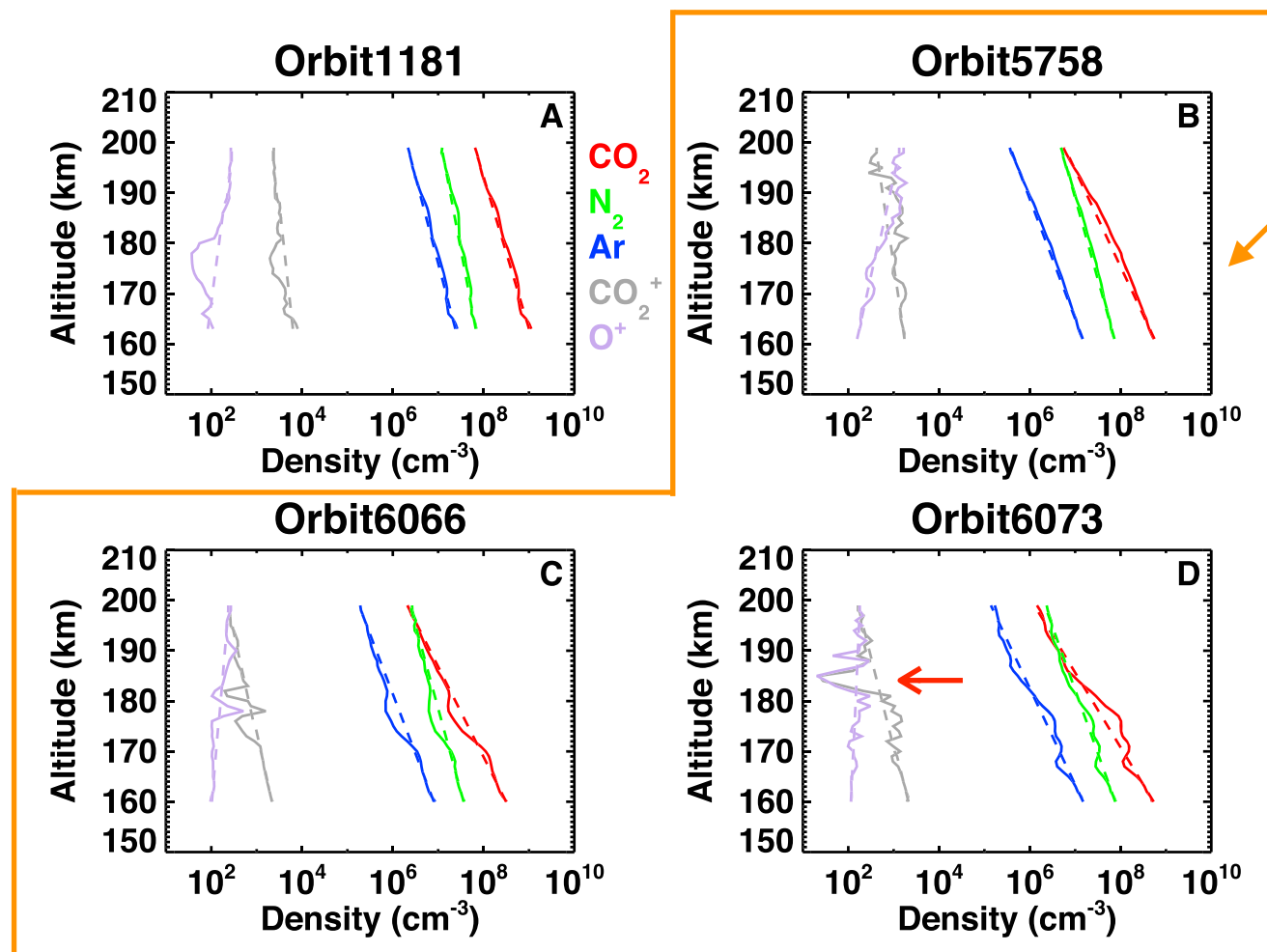


Fig. 5

- 残留磁場領域で観測されたプロファイル(表1. 赤線)には、急激なプロファイルの変動が共通していた。
沿磁力線電流、電子降り込み、太陽風との相互作用、プラズマ不安定、などが原因として考えられるかもしれない。

5A (残留磁場領域以外を観測していた)

- 磁場の影響ではなく**重力波**かもしれない。
- 重力波の伝搬時間が ion - neutral の衝突時間より短ければ、中性大気と電離大気の分布にずれが生じる可能性がある。

MAVEN orbit	Figure	SAZ range (°)	Latitude range (°N)	Longitude range (°E)	LST range (hr)
5374	2A	82–89	72to74	–66 to –29	2.6–5.1
2053 ^a	2B	44–51	–28 to –19	–35 to –33	10.8–11.0
6206	3 & 4	67–76	–35 to –26	175 to 178	8.7–8.9
1181	5A	30–39	–32 to –19	163 to 166	9.7–10
5758 ^a	5B	59–62	28 to 41	–168 to –163	16.4–16.7
6066 ^a	5C	31–42	–15 to –4	125 to 128	11.2–11.4
6073 ^a	5D	33–44	–16 to –6	38 to 40	9.7–11

Note. MAVEN = Mars Atmosphere and Volatile Evolution; LST = local standard time; SAZ = solar zenith angle.

^aOrbits taken near region of strong crustal magnetic fields.

Table 1

Results (ヒストグラム表示)

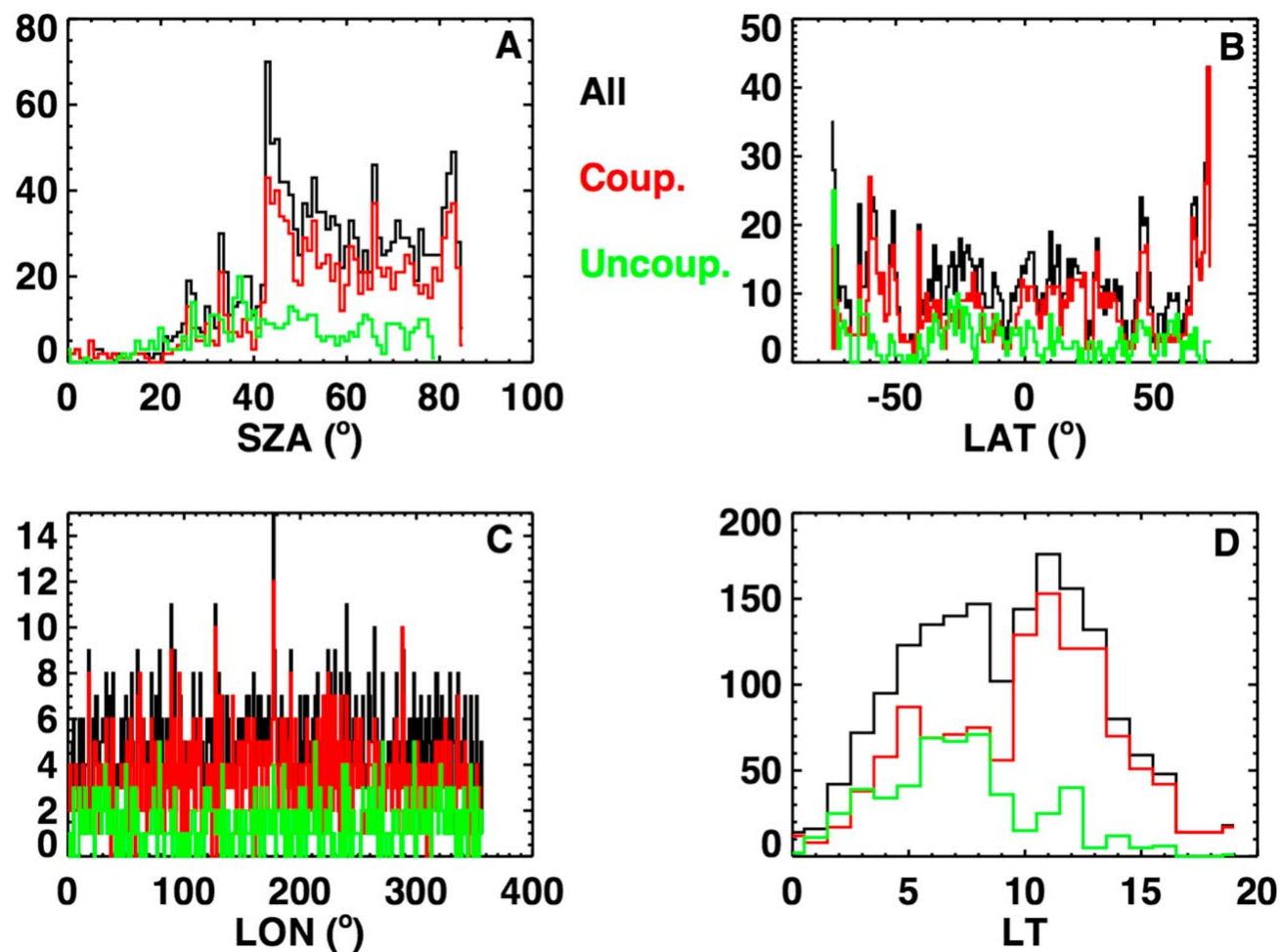


Fig. 6

SZA

特に傾向なし

Latitude

南半球でuncoupledの傾向が強くなる = 残留磁場領域で電離大気の擾乱が起こりやすいことを示唆する。**Field-aligned dynamicsが原因**と考えられる。(Dieval+15, 18; Dubinin+16; Matta+15; Modolo+05; Shinagawa & Cravens, 89)

Longitude

わずかに80°E~280°Eにおいてuncoupledのプロファイルが増えている。

Results (ヒストグラムで表示)

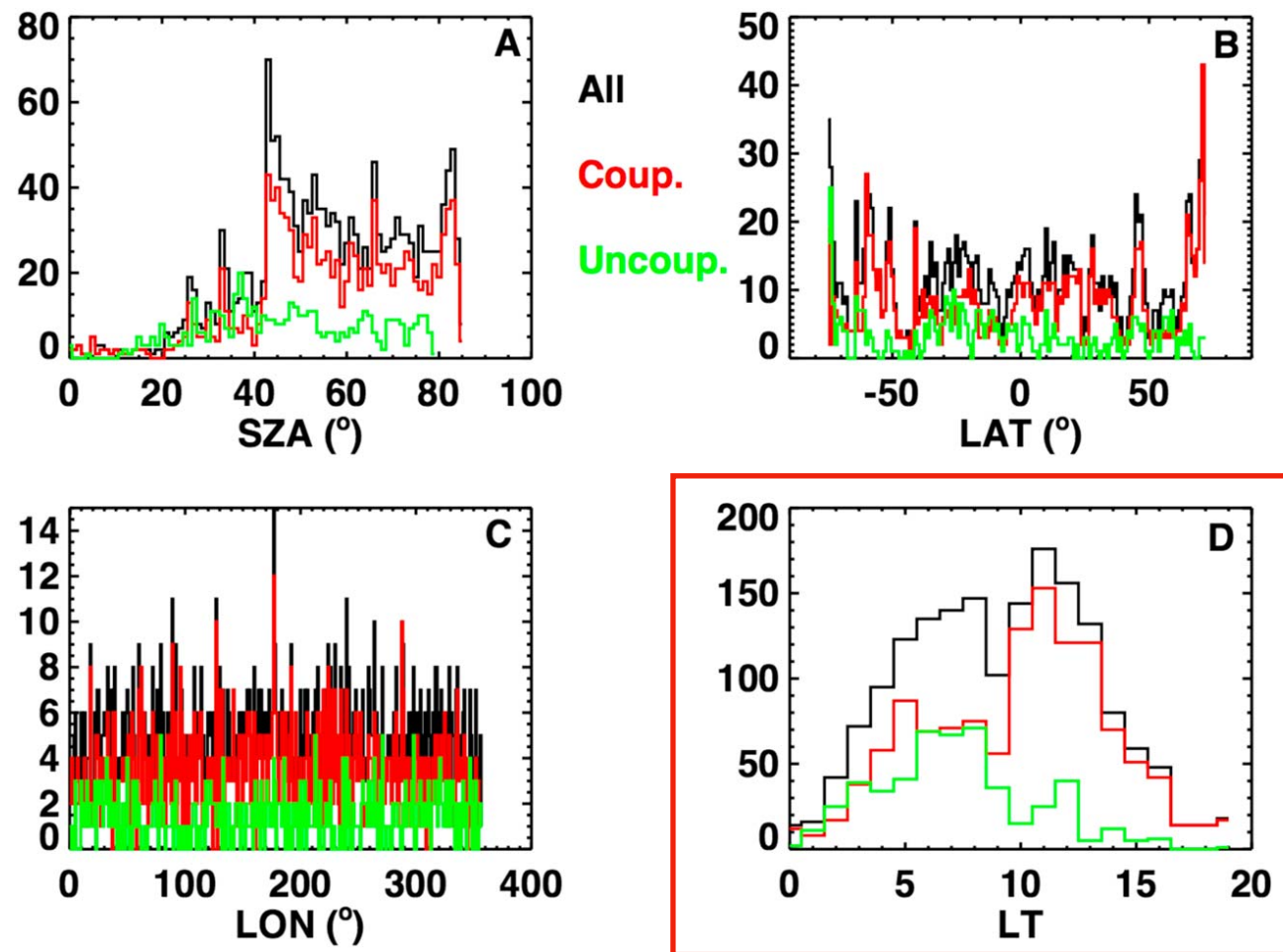


Fig. 6

- ・ 中性大気の**重力波による擾乱**も dawn-dusk の非対称性があり、明け方に多い。(Terada+17)
- ▶ 高度 180 km 以上では ion-neutral の衝突のタイムスケールに重力波の伝搬時間が匹敵する。ただし、重力波の鉛直スケールは数十~数百 km (高度 200 km 付近で碎波) なのに対して、観測された電離大気の擾乱は数 km 程度。= 重力波の影響があると言いきるのは難しい。

LT

電離大気の擾乱構造は明け方に起こりやすい。一時的なプラズマ相互作用か、又は Mornig overshoot (明け方に電子温度が急上昇する現象。地球で観測: Stolle+11) (Andersson+16; Fowler+15; Matta+14) に関連した電離大気的不安定の可能性。

Interpretations

- 中性大気はバルク大気全てに渡って傾向が一致していた。数密度の指数関数プロファイルからのばらつきは1%~94%で、これは重力波や中性風による変動量と一致していた。(England+17; Grebousky+17; Benna+18など)
- 電離大気上層(160-200 km)の擾乱がHarada+18で全球的に計測され、さらに重力波と強い相関があることがわかった。擾乱の分布は太陽風の条件とは無条件であった。熱圏の温度が低いところで発生しやすい → 今回の観測とも整合的。
- Uncoupledプロファイル = プラズマ特有の分布 + 中性大気とのcoupling
MARSISの観測(Monhanamayasa+18)でも、磁場に支配された電子密度の構造に、磁場だけでなく中性大気の潮汐や波動からの影響が含まれていること、さらに昼夜どちらでも見られることがわかっている。→ 今回の観測とも一致。

Conclusions

- 火星上層大気の昼間側で、NGIMSによって同時観測されたイオンと中性大気のプロファイルは強い相関を見せた。
重力波、潮汐波、風などが原因の中性大気プロファイルの擾乱は、電離大気の数密度プロファイルにも同様に現れる。中性大気の擾乱が電離大気の擾乱を駆動することを示しており、これは光化学平衡の理論でも予測される。
- 解析された全データの30%には、電離大気のプロファイルに中性大気には見られない擾乱構造が見つかった。特に、残留磁場領域や明け方において見つかりやすかった。磁場のトポロジーや太陽風との相互作用が可能性の高い要因だと考えられる。
- 電離大気に特徴的な構造と、中性大気とcouplingした構造、または上層大気のダイナミクスによる影響を分離するには、今後、プラズマの作用(磁場・熱・太陽風など)を調べる必要がある。