

第90回火星勉強会
2023年9月7日

Glocer, A., & S. Daldorff, L. K. (2022).

Connecting Energy Input With Ionospheric Upflow and Outflow.

Journal of Geophysical Research: Space Physics, 127(9),
e2022JA030635. <https://doi.org/10.1029/2022JA030635>

東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻
坂田遼弥

Abstract

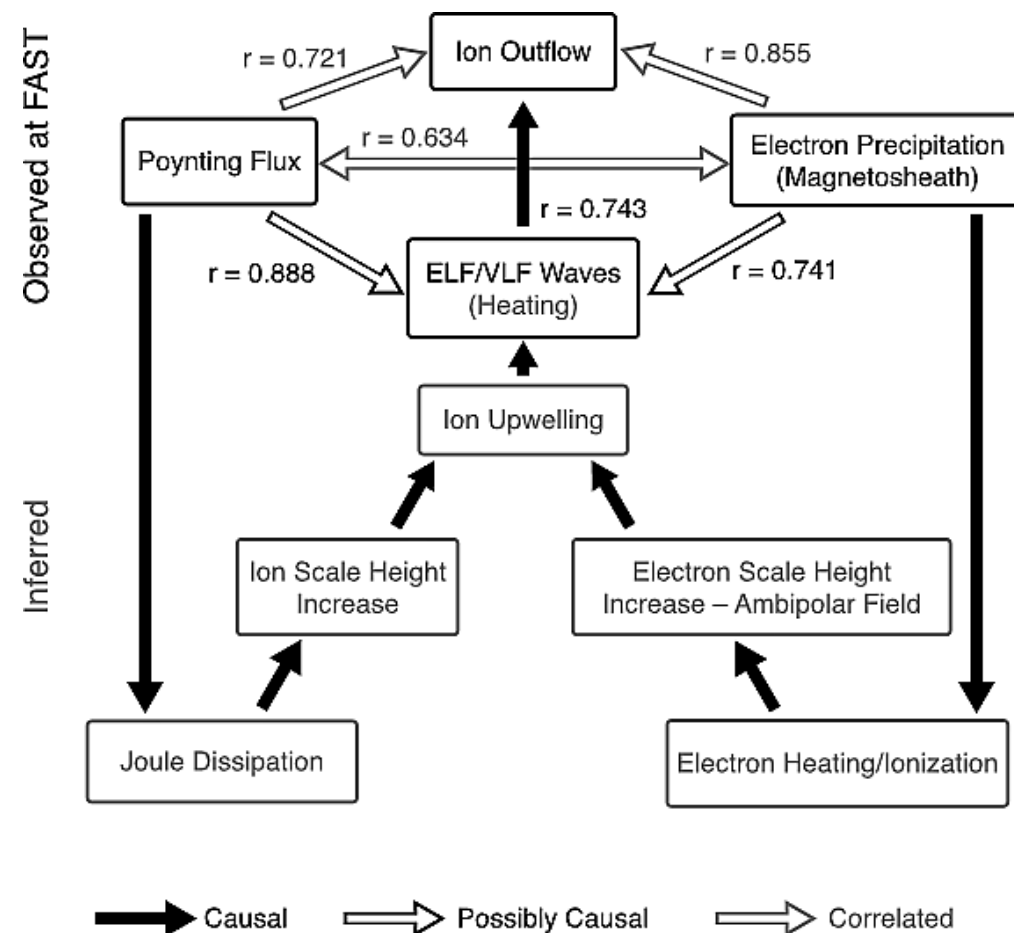
- エネルギーのインプットとイオン流出の関係は重要な科学トピックとして（衛星観測に基づく）実証研究が行われてきた
- イオン種ごとの応答の違い、流出フラックスの上限や下限、日照の果たす役割はよくわかっていない
- 低高度や高高度でのエネルギーインプットに対してイオンの流出フラックスがどう応答するかを数値シミュレーションで検証した
さらに、応答が太陽活動（極大期・極小期）や日照（昼側・夜側）によって変化するかも検証した
- H^+ と比べて O^+ のフラックスはエネルギーインプットにより敏感に応答する
より低いエネルギーで流出の増加がはじまり、フラックスのダイナミックレンジも大きい
- 高度4000 kmでのフラックスの下限は H^+ polar windで決まっているが、非常に強いエネルギーインプット（イオンの摩擦加熱・電子降り込み）があると O^+ が卓越する
- 強い電子降り込みと波動粒子間相互作用が同時に存在するような場合では、常に O^+ が卓越するようになる
- 瞬間的な最大フラックスの応答は、定常状態での応答と異なる

- | | |
|--------------------|-----------------|
| Polar Wind: | Less than 3 eV |
| Plasmasphere: | Less than 3 eV |
| Lobal Wind: | 10 - 300 eV |
| Warm Plasma Cloak: | 10 eV - 3 keV |
| Plasma Sheet: | 0.5 keV - 5 keV |
| Ring Current: | 3 - 30 keV |
-
- The diagram illustrates the structure of Earth's magnetosphere, showing the flow of plasma and the distribution of different energy levels. The regions are color-coded and labeled as follows:
- Polar Wind:** Less than 3 eV (Blue region near the poles)
 - Plasmasphere:** Less than 3 eV (Light blue region near the equator)
 - Lobal Wind:** 10 - 300 eV (Teal region in the lobes)
 - Warm Plasma Cloak:** 10 eV - 3 keV (Yellow region near the equator)
 - Plasma Sheet:** 0.5 keV - 5 keV (Red region in the tail)
 - Ring Current:** 3 - 30 keV (Red region in the inner magnetosphere)
- The diagram also shows the **Magnetosheath** (grey region) and the **Tail Lobe** (teal region). White arrows indicate the flow of plasma from the Sun (Solar Wind) into the magnetosphere and out into the tail. The **Ring Current** is shown as a red ring around the Earth.

イントロダクション

アウトフローとエネルギーインプットの関係

- イオンのアウトフローを駆動しているのはどの物理過程（たち）か？
- 電離圏イオンのアウトフローの駆動源
 - 超熱的電子の降り込み（光電子、オーロラ電子、二次電子）
 - 電子の加熱による両極性電場の発達
 - 電磁場エネルギー（Poynting flux）
 - ジュール加熱によるスケールハイトの増大
- 持ち上げられたイオンはさらに波動粒子間相互作用で加熱
 - Ion cyclotron resonant heating [Chang+, 1986; Crew+, 1990]
 - 磁場に鉛直方向に加熱され磁気ミラー力で加速される
 - Lower hybrid waves [Chang & Coppi, 1981]
 - Dispersive Alfvén waves [Chaston+, 2004]

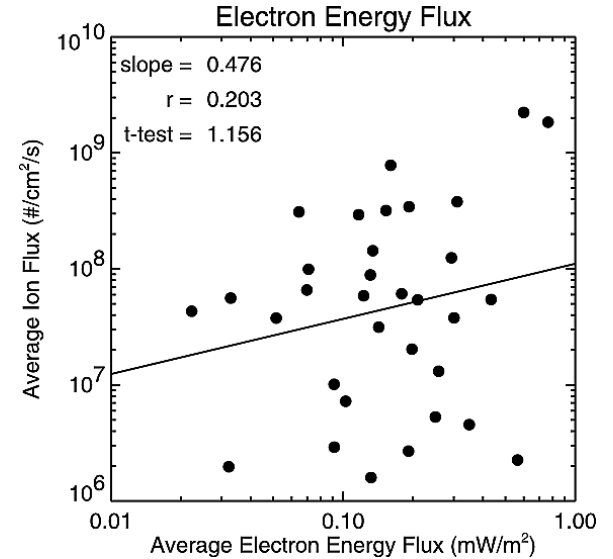
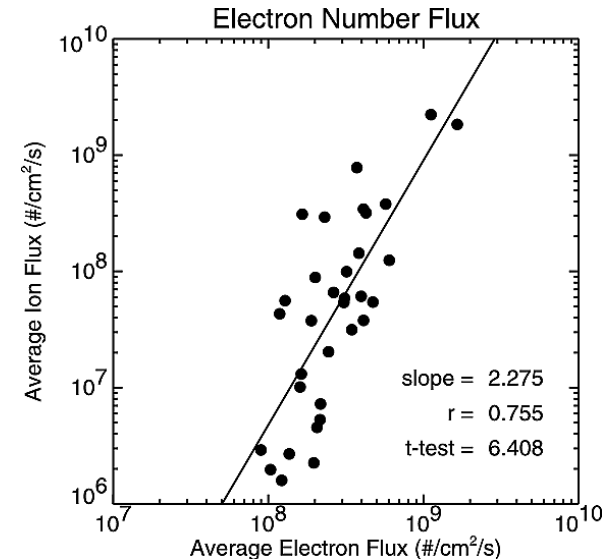
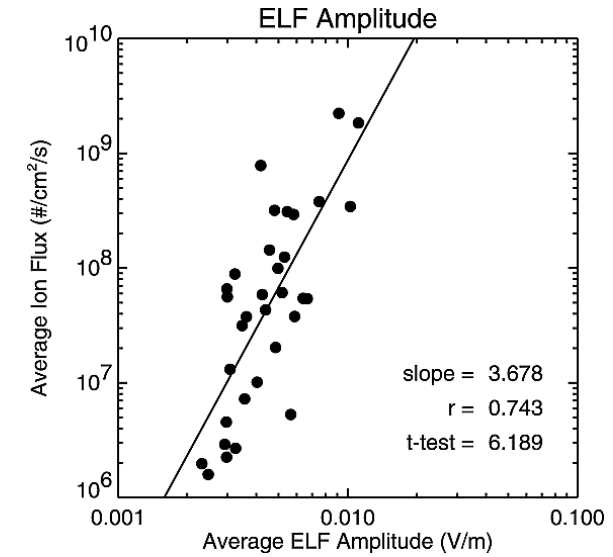
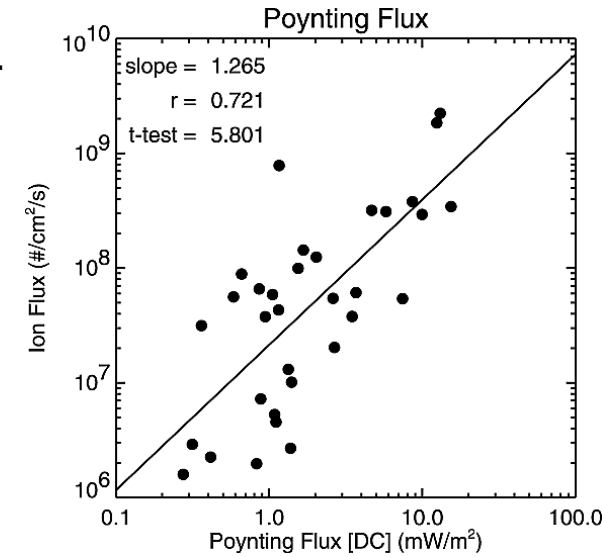


アウトフローとエネルギーインプットの関係

- FASTの観測からエネルギーインプットとアウトフローの関係がスケーリング則で表せることを指摘 [Strangeway+, 2005]
 - POLARによる観測 [Zheng+, 2005]
 - Alfvenic Poynting fluxとの相関 [Brambles+, 2011]
 - O⁺とH⁺を独立に検証 [Zhao+, 2020]
 - 日照による影響 [Kitamura+, 2021]
- 電離圏からのアウトフローは地球磁気圏グローバルMHDシミュレーションでの内側境界条件に使用
 - Polar windモデルとの結合 [Glocer+, 2009]
 - Strangeway+ (2005)のスケーリング則を使用 [Brambles+, 2010]

これらは観測に基づく経験則

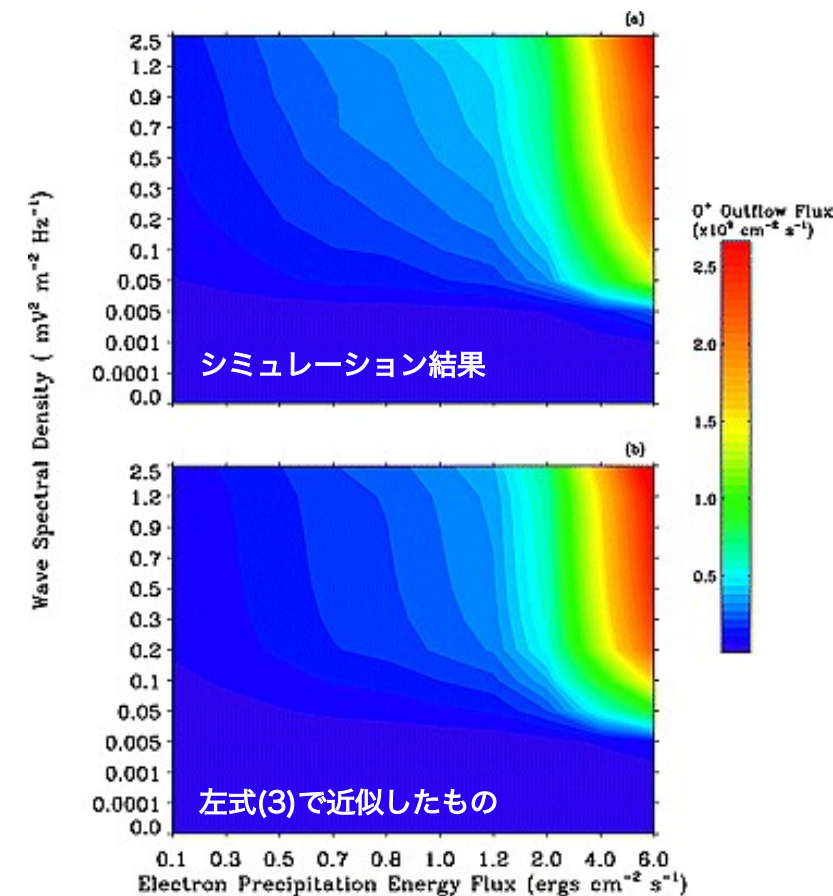
→ 数値シミュレーションでは？



数値シミュレーションによる検証

- Su+ (1999)
 - Field Line Interhemispheric Plasma (FLIP) model
 - 光電子の輸送方程式 + イオンの流体方程式を磁力線上で解く
 - Soft electron precipitationとイオンの流出速度・電子温度に相関
 - 降り込み電子のエネルギーフラックスが同じならば、エネルギーが低い電子の方がよりイオンの流出を促進する
- Zeng & Horwitz (2007)
 - Dynamic Fluid-Kinetic model
 - 低高度では流体方程式を解き、高高度では粒子の旋回中心を追う
 - O^+ のフラックスを電子降り込みと波動の強度で表現できることを示す
$$Flux_{O^+} = 8.8(3.0 \times 10^5 + 2f_e^{1.4} \times 10^7)(\tanh(8D_{wave}) + 0.2D_{wave}^{0.6}) \quad (3)$$
 - 単純なスケーリング則ではない
 - 電子降り込みがなくても一定量のフラックスが存在
 - “valve effect”: ある閾値を超えるとフラックスが増加しはじめる
 - 波動の強度が十分強くなるとフラックスは飽和する

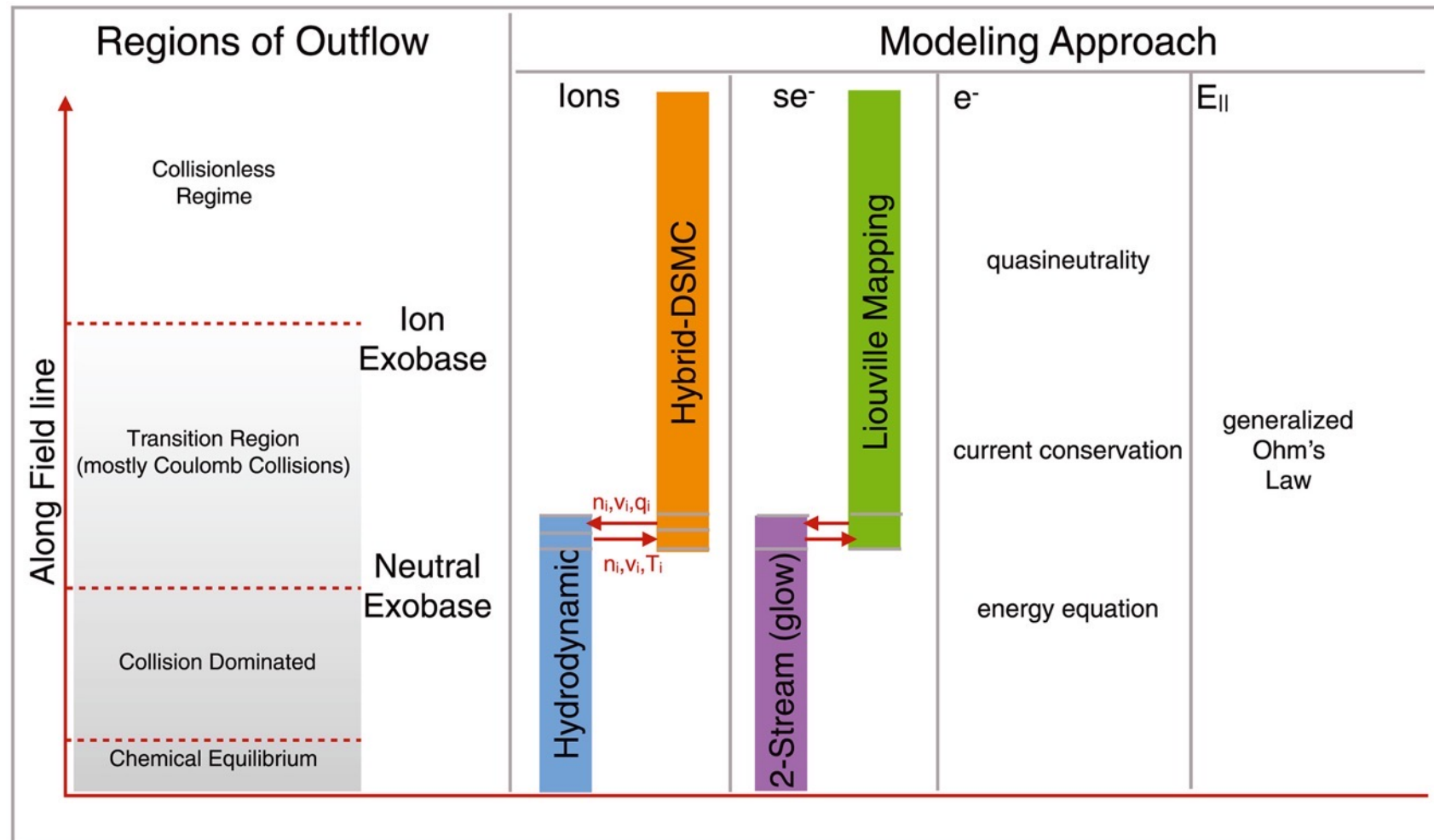
→ 本研究ではより詳細にエネルギーインプットとの関係を検証
(太陽活動度、日照、 O^+ と H^+ の区別、摩擦加熱)



Zeng & Horwitz (2007)

Polar Wind Outflow Model (PWOM)

- 電離圏からのアウトフローをシミュレートするモデル
- MHDモデル(BATS-R-US)とのモデルカップリングも行っている [Glocer+, 2009]



シミュレーション設定

エネルギーインプット

- 波動粒子間相互作用: V_{perp} の擾乱 (拡散) として拡散係数 D_{\perp} を用いて表現 [Crew+, 1990]

$$D_{\perp} = \left(\pi q^2 / 2m_i^2 \right) |E_L|^2(\Omega(s)) \xrightarrow{|E_L|^2(\omega) \propto \omega^{-\alpha}} D_{\perp} = \left(\eta q^2 / 4m_i^2 \right) |E_o|^2 \left(\frac{r}{r_o} \right)^{3\alpha}$$

- 電子の降り込み: 上端境界での降り込みエネルギーフラックスを指定

$$\Phi_b(E) = AE e^{-E/E_o} \quad (E_o: \text{characteristic energy})$$

- 摩擦加熱: 磁場に鉛直な方向のイオンと中性の速度差 (= V_c) をパラメータとして使用

$$\frac{\delta E_i}{\delta t} = \sum_n \frac{\rho_i V_{in}}{m_i + m_n} [m_n(u_{i\perp} - u_{n\perp})^2]$$

初期条件

- 昼側磁力線: 磁気緯度70度の磁力線に太陽EUVのみを与えて定常状態まで計算したもの
 - EUVフラックスは2通り: 太陽極大期 ($F_{10.7} = 180$) or 太陽極小期 ($F_{10.7} = 80$)
- 夜側磁力線: 昼側の初期条件から、さらに夜側の同磁気緯度に磁力線を置いて一定時間計算したもの

計算設定

- エネルギーのインプットから20分間計算 (太陽EUVはそのまま)
- 注目しているパラメータが異なる20ケースを計算し、イオンの流出フラックスとの相関をみる

Frictional heating

- パラメータ：Perp方向のイオン・中性速度差 V_c
- 1200 km (exobase)と4000 km (FAST satellite)でのpeak fluxを検証
- フラックスの増加を引き起こす V_c に閾値が存在
(ある V_c 以下ではフラックスに影響なし)
- 応答は O^+ の方が大きい (閾値、冪指数、フラックスの最大値)
- O^+ は一部のフラックスのみ4000 kmまで到達し、冪指数も大きくなる
一方で H^+ は大部分が4000kmまで到達
- O^+ が磁気圏まで流出するにはさらなる加熱・加速が必要？ (特に $V_c < 1\text{km/s}$ のとき)
- 太陽極大期の方がより大きいフラックスを示す速度差に対する応答は似通っている (閾値、1200 kmでの冪指数など)

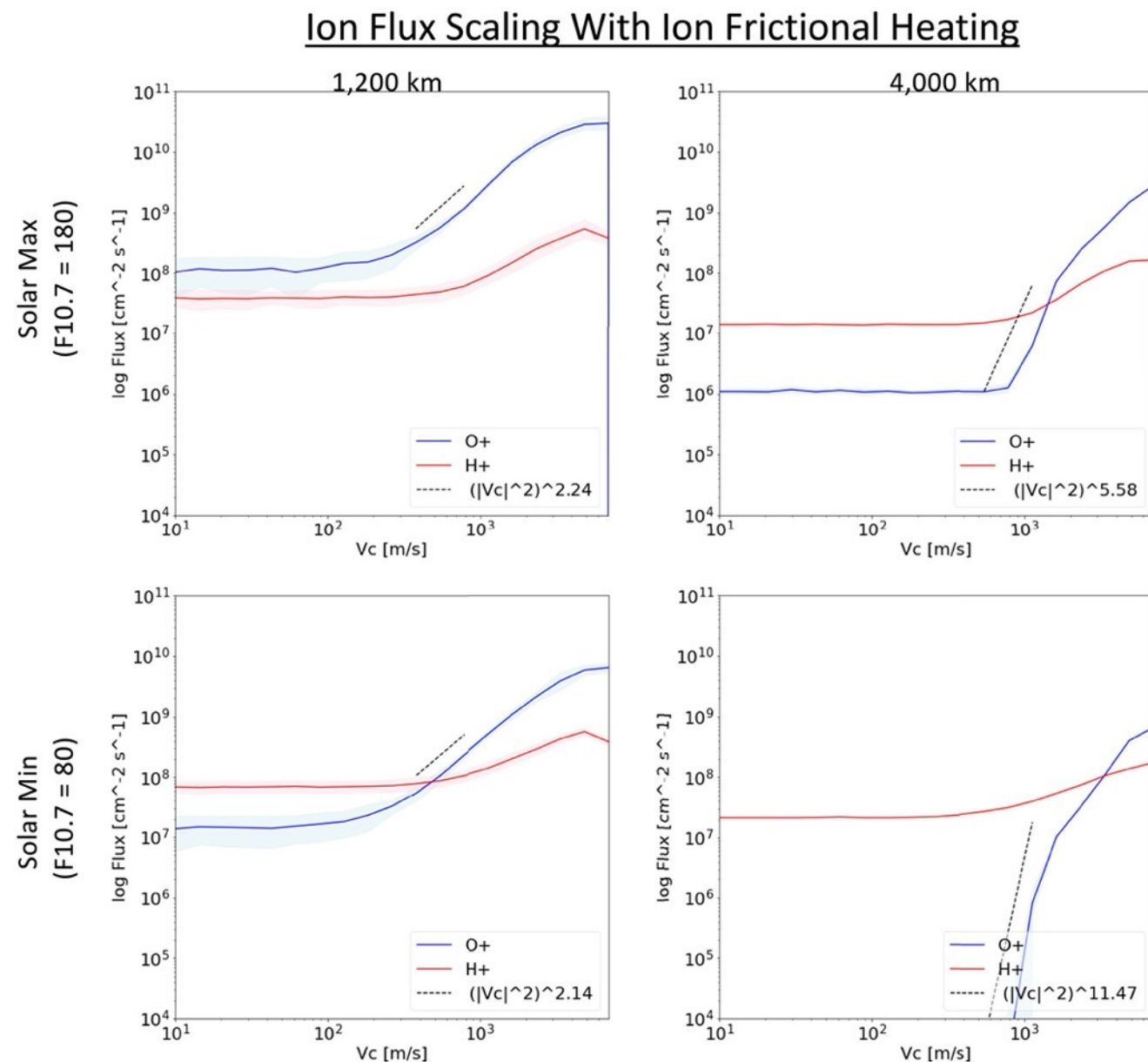


Figure 1

Electron precipitation (1/2)

- パラメータ：電子 ($E_0 = 400$ eV)の降り込みエネルギーフラックス
- 1200 km (exobase)と4000 km (FAST satellite)でのpeak fluxを検証
- O^+ の方がより大きい応答を示す
- 特に O^+ では一部のフラックスしか4000 kmに到達せず、冪指数も大きい
- 1200kmでは閾値がなく滑らかに増加
4000kmでは特に O^+ に明確な閾値
- 太陽活動はフラックスの強度に影響

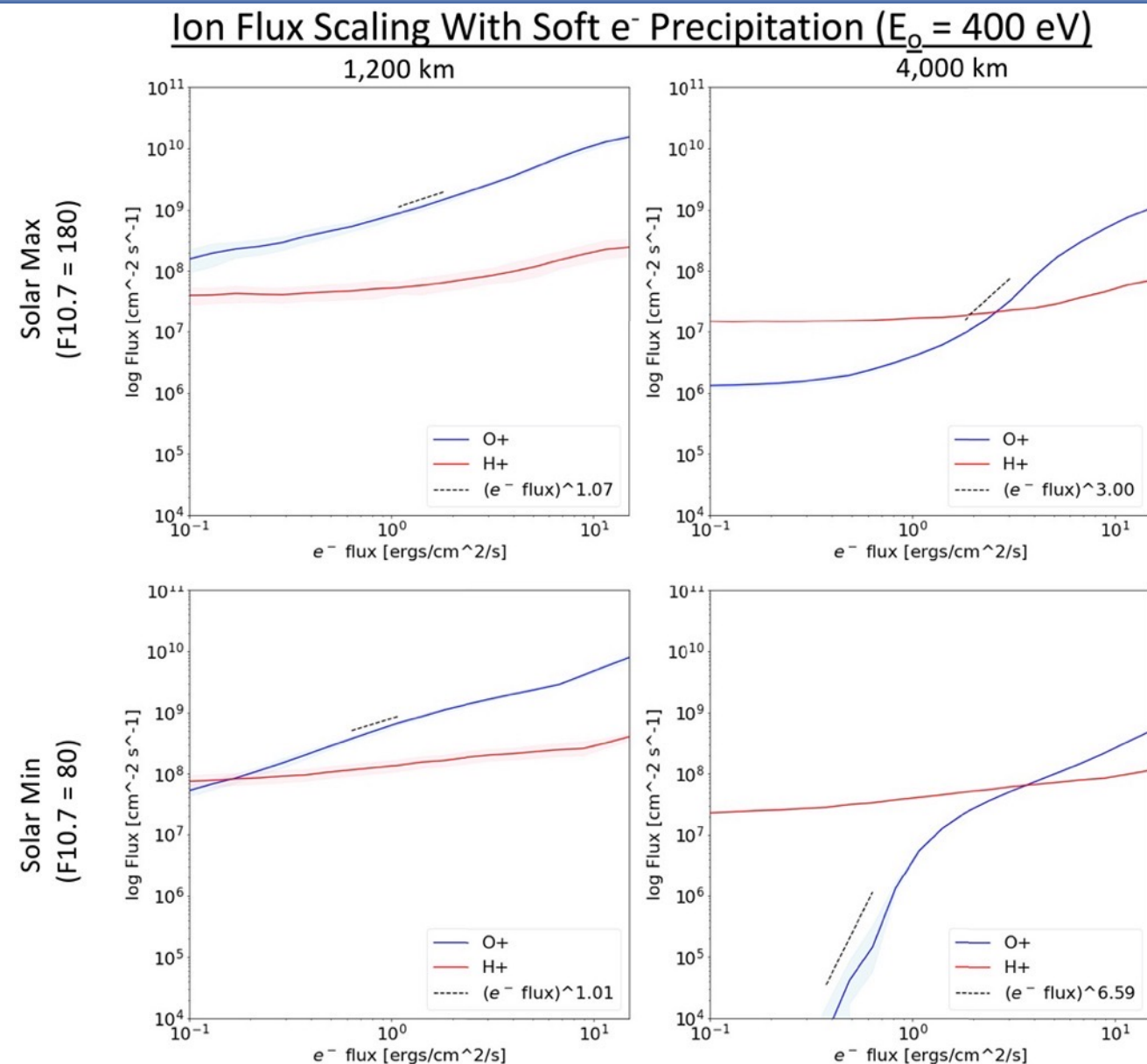


Figure 2

Electron precipitation (2/2)

- パラメータ：電子 ($E_0 = 100$ eV)の降り込みエネルギーフラックス
- 1200 km (exobase)と4000 km (FAST satellite)でのpeak fluxを検証
- O^+ の方がより大きい応答を示す
- 特に O^+ では一部のフラックスしか4000 kmに到達せず、冪指数も大きい
- 1200kmでは閾値がなく滑らかに増加
4000kmでは特に O^+ に明確な閾値
- 太陽活動はフラックスの強度に影響
- 電子のcharacteristic energyが小さいほどフラックスは大きい

$$\Phi_b(E) = AEe^{-E/E_0}$$

- エネルギーフラックスが一定ならば降り込み電子の平均エネルギーが低いほどアウトフローが大きくなる (Su+, 1999)

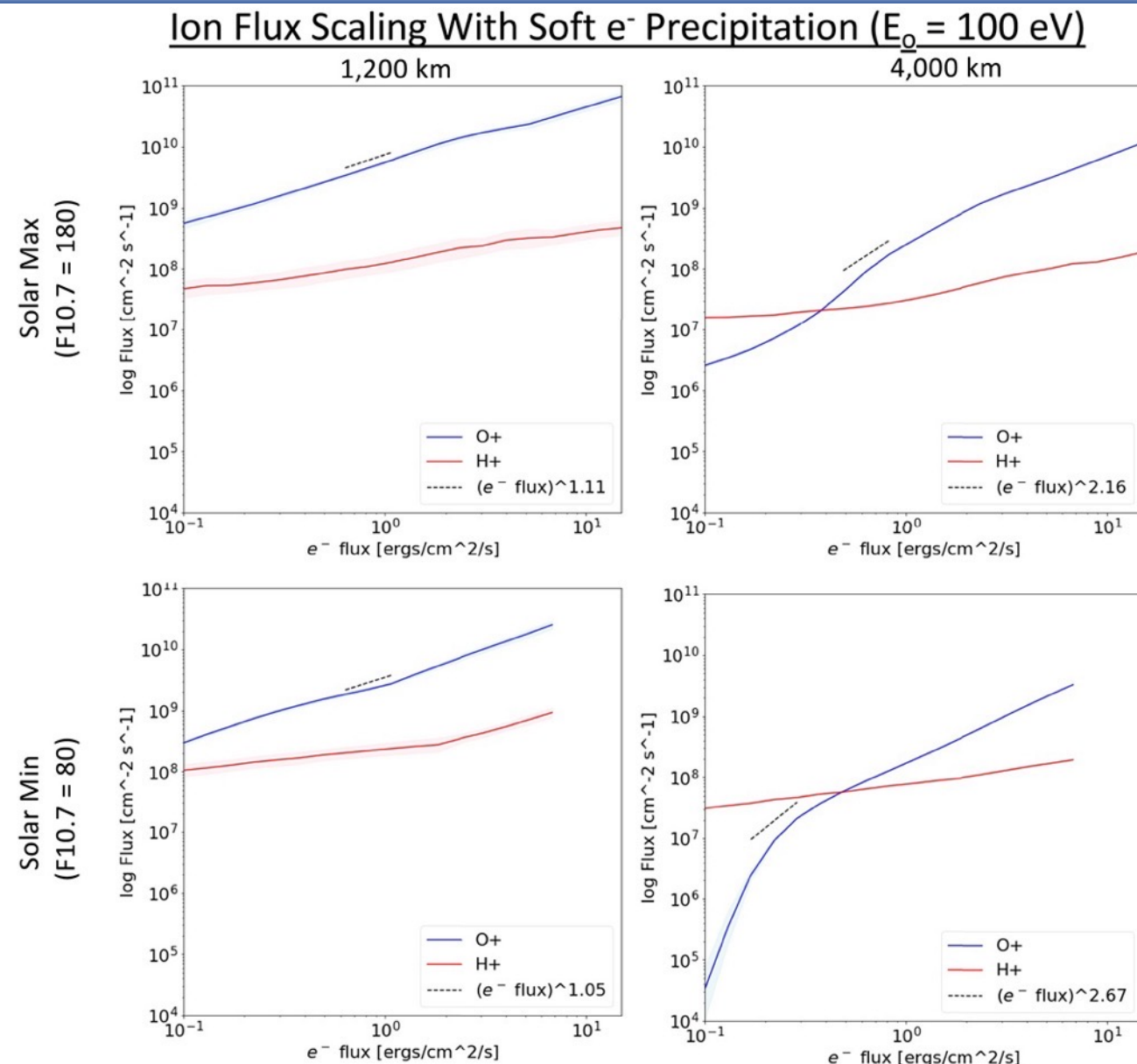


Figure 3

Wave power (1/2)

- パラメータ：波動のパワースペクトル密度
- 4000 km (FAST satellite)でのフラックスを検証
t = 20min: ほぼ定常状態でのフラックス
max for t < 20min: 計算内での最大フラックス
- 電離圏から供給されるイオンフラックスの理論的な上限 (limiting flux)を計算している
 - H⁺: HとO⁺の電荷交換
 - O⁺: 光電離、電子衝突電離
- Flux tubeに沿った連続の式をもとにlimiting fluxを導出 [Richards and Torr, 1985]

$$\phi(s) = \phi_o B(s)/B_o + B_o \int_{s_o}^s \left(P - L - \frac{\partial n}{\partial t} \right) ds / B(s)$$

$$\longrightarrow \phi_L = \int_{s_o}^{\infty} P(s) \frac{B_o}{B(s)} ds$$

- 図中の“prod”は上式をもとに計算
図中の“max”はよりラフな推定
(peak production rate × scale height)

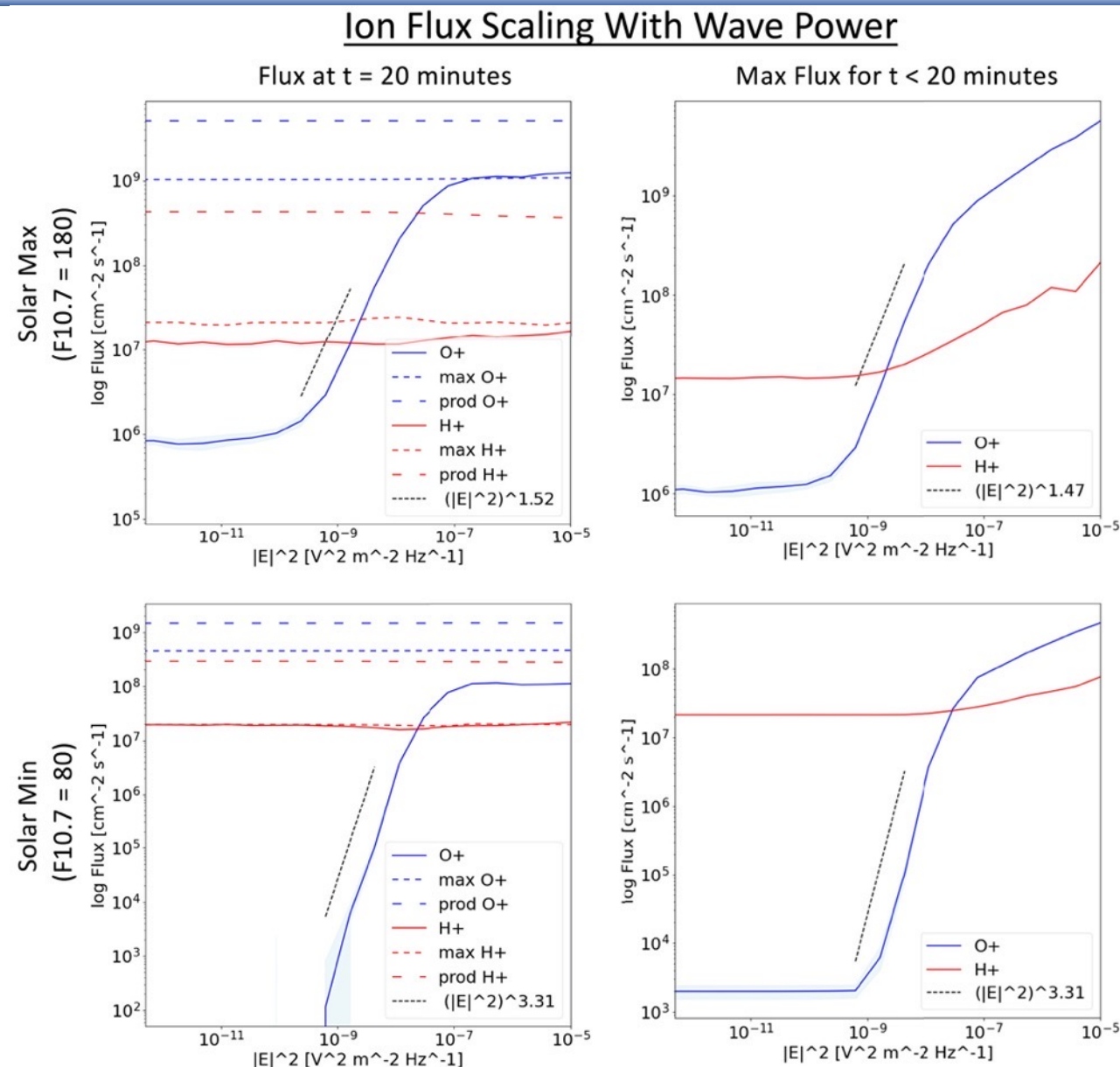


Figure 4

Wave power (2/2)

火星勉強会
2023年9月7日

- パラメータ：波動のパワースペクトル密度
 - 4000 km (FAST satellite)でのフラックスを検証
t = 20min: ほぼ定常状態でのフラックス
max for t < 20min: 計算内での最大フラックス
 - 定常状態でのフラックス
 - O⁺: 波動強度が閾値を超えると冪乗で増加するが、フラックスはlimiting flux付近で飽和
 - H⁺: 波動の強度によらずlimiting flux付近でほぼ一定
 - 計算内での最大フラックス
 - 波動強度が小さい場合では定常状態とほぼ同じ（フラックス強度、閾値、冪指数）
 - 波動強度が大きい場合ではフラックスは飽和せず増え続ける
- あらかじめ存在していたイオンも流出するため、瞬間的にはlimiting fluxを超えた大量の流出がありうる

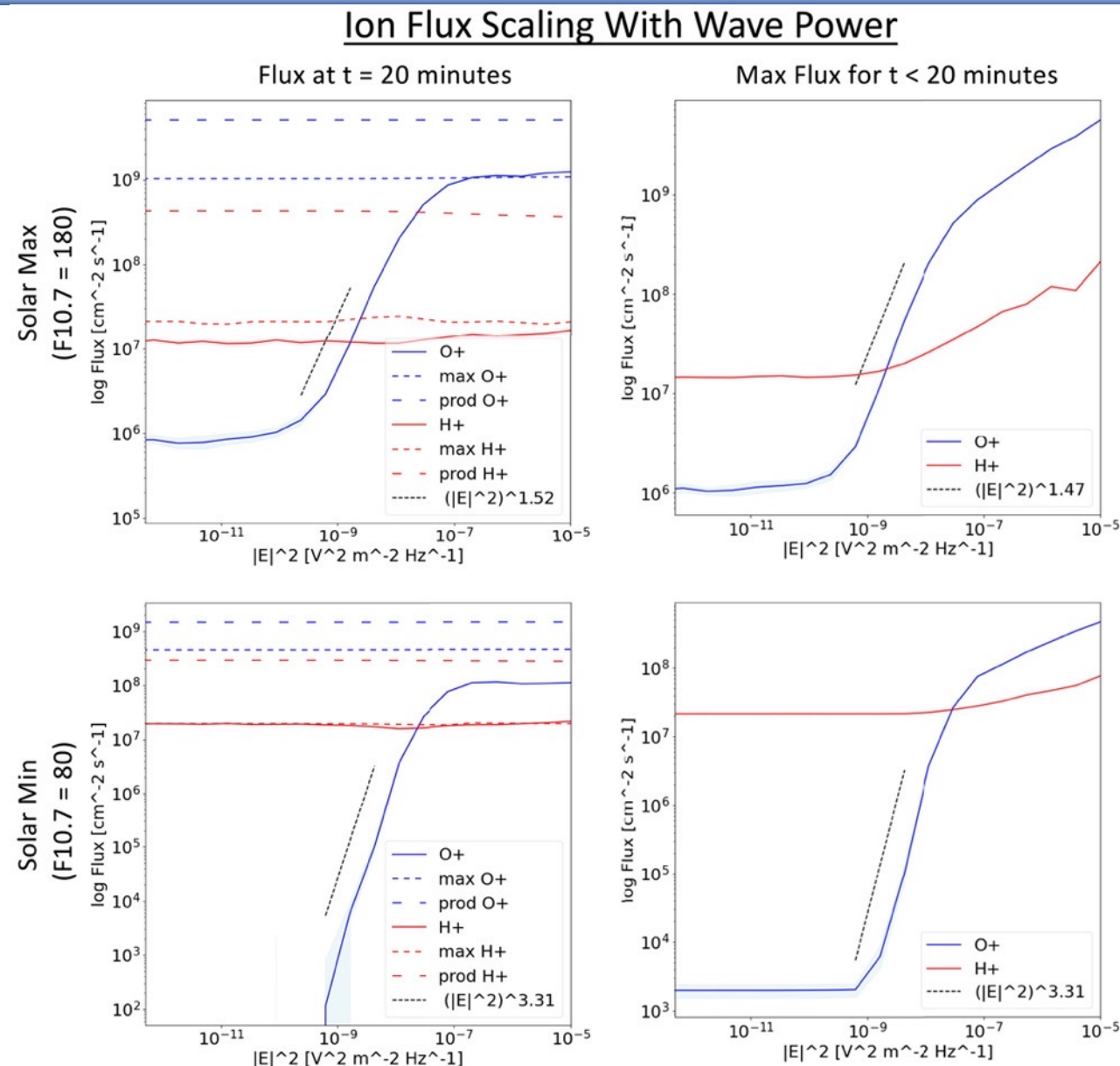


Figure 4

Wave power on nightside

火星勉強会
2023年9月7日

- パラメータ：波動のパワースペクトル密度
- 4000 km (FAST satellite)での最大フラックスを検証
- 対流の速度は2通り
 - Fast convection: 834秒 (対流速度2.0 km/s)
 - Slow convection: 3336秒 (対流速度0.5 km/s)
- Fast convectionの方が冪指数やフラックス強度が大きい

→より多くのイオンがflux tubeに残っているため

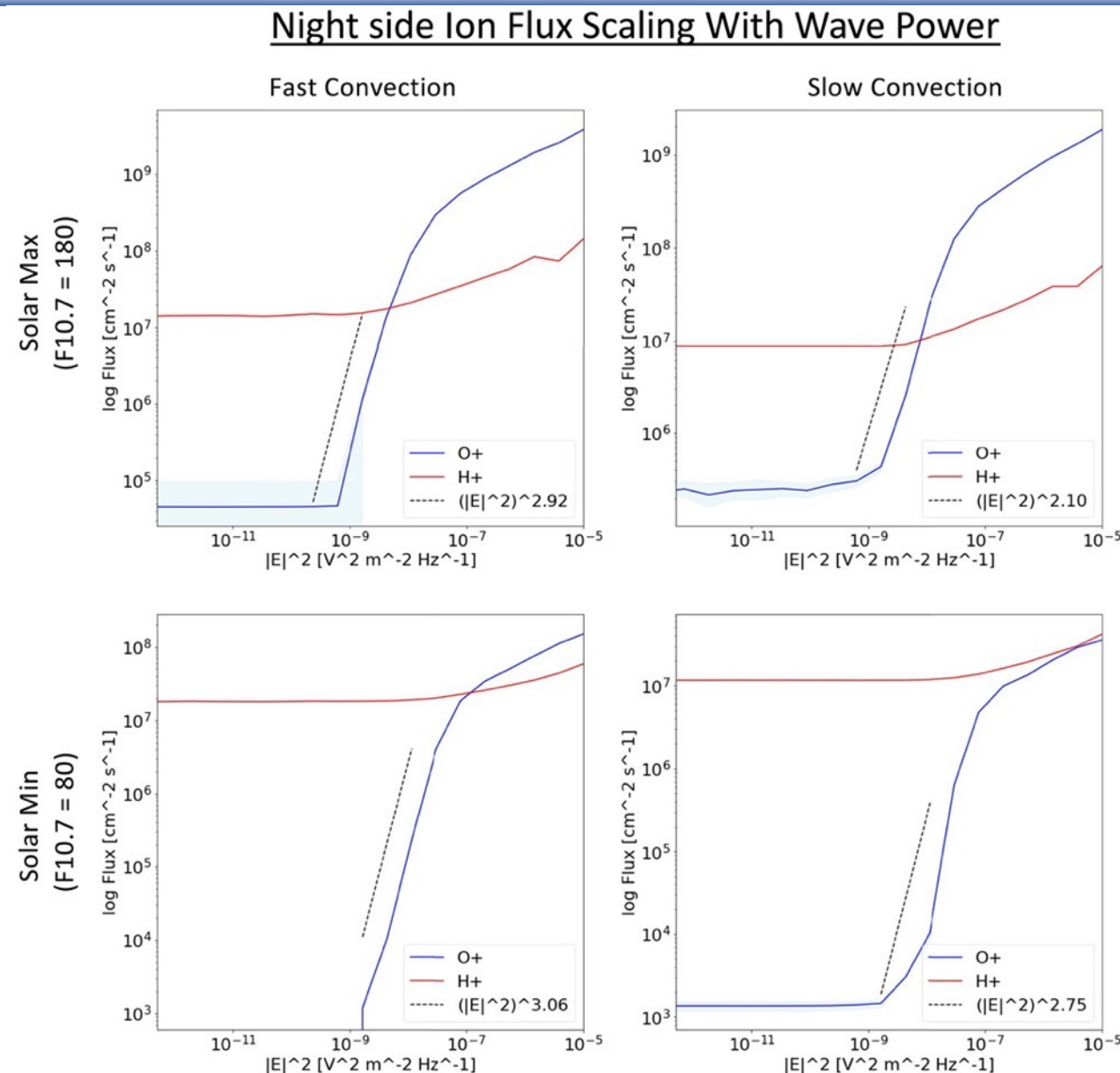


Figure 5

Wave power & electron precipitation

火星勉強会
2023年9月7日

- パラメータ：波動のパワースペクトル密度
- 4000 km (FAST satellite)での最大フラックスを検証
- 電子の降り込みフラックスも2通りを検証
- 電子の降り込みフラックスが増えるとO⁺フラックスが大きく増加
- 冪指数やアウトフローの組成 (O⁺とH⁺の割合) も変化
- 太陽EUVの寄与が相対的に小さい極小期で特に電子降り込みの影響が顕著

→ 複数のエネルギー注入が起きると、イオンの流出フラックスとのスケール則は大きく変わる

Ion Flux Scaling With Wave Power and Soft Electron Precipitation

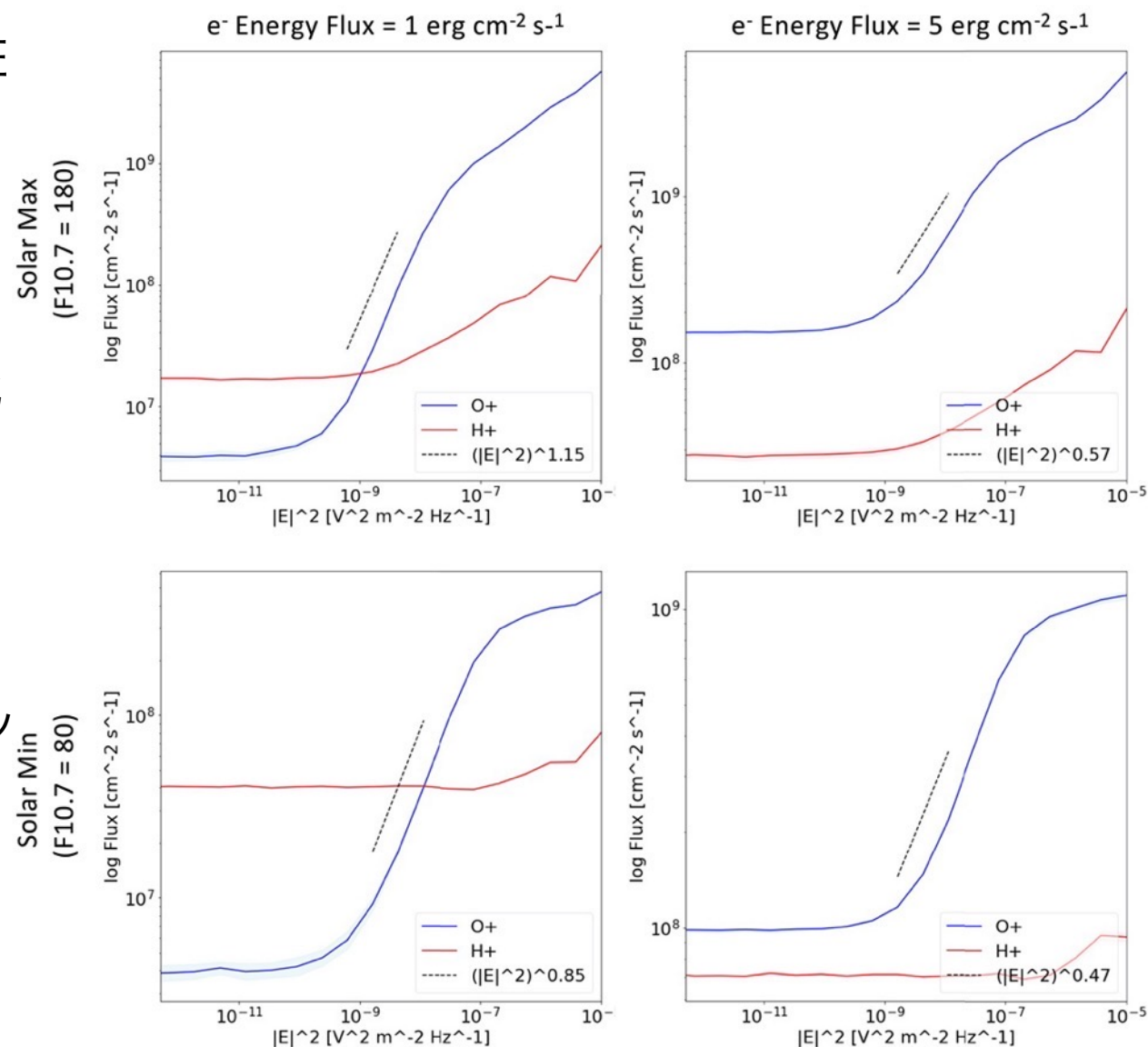


Figure 6

エネルギーインプットとイオンの最大流出フラックスとの大まかな関係

- エネルギーインプットがある閾値(“activation point”)を超えると、フラックスは冪乗則で増加しはじめる
- フラックスが定常状態での理論的上限(“critical flux”)に近づくと増加は緩やかになる
- H^+ フラックスは理論的上限付近ではほぼ一定なのに対し、 O^+ フラックスはエネルギーインプットに敏感に応答
結果、注入が弱い場合は H^+ 主体の、注入が強い場合は O^+ 主体のアウトフローとなる

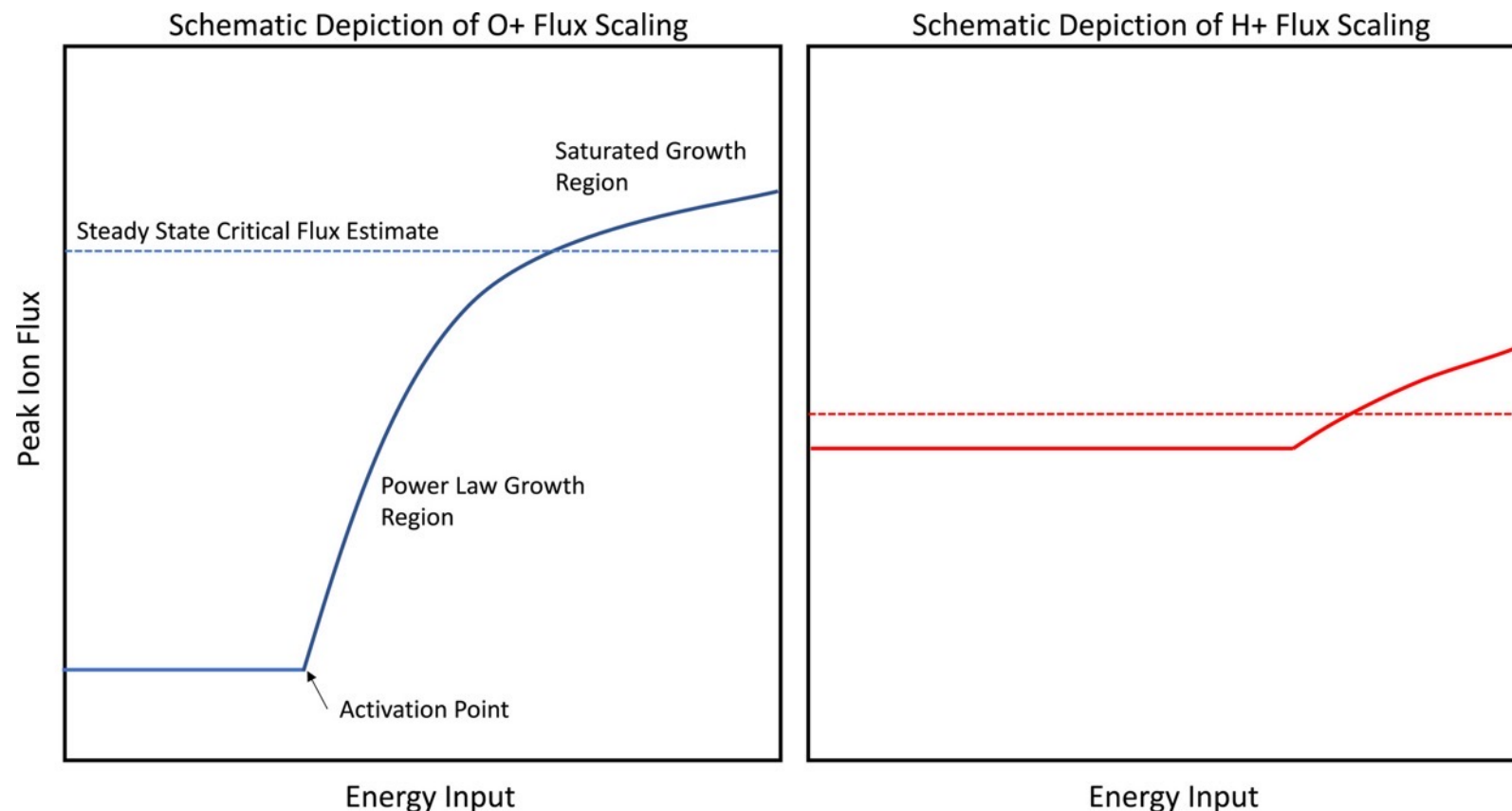


Figure 7

- 低高度での加熱プロセス
 - 摩擦加熱 (~ DC Poynting flux): イオン種ごとに異なるactivation pointが存在 (O^+ の方が低い)
 - 電子降り込み: 低高度ではactivation pointがない (滑らかに増加する) が、高高度では存在
 - O^+ の方がより強くエネルギーインプットの影響を受ける (Zhao+ (2020)と整合的)
- 波動粒子間相互作用
 - 強度に依存しない形で H^+ polar windによる下限フラックスが存在
ただし、強い電子降り込みが波動と同時に存在していると O^+ が卓越
 - 定常状態では理論的な上限付近でフラックスが飽和 (Zeng & Horwitz (2007)と整合的)
 - 最大フラックスは飽和せず増加しつづける (ただし冪指数は小さくなる)
現実はこちらの状況に近い (時間発展する系)
- 太陽活動度はフラックスの強度や組成に影響
 - 極大期ではエネルギーインプットの種類によらずフラックスが強くなる
 - さらに、より低いエネルギーインプットで O^+ 主体のアウトフローになる
- 日照も影響
 - Kitamura+ (2021): 昼側でより強いフラックス、スケーリング則自体はSZAには依存しない
- 中性大気も影響を受ける可能性がある (特に摩擦加熱が起きている場合)
 - 加熱による中性大気の持ち上げ
- 複数のインプットが入るとフラックスの様相は大きく変化
 - 観測でのばらつきはこれに起因?

まとめ&個人的感想

まとめ

- 衛星観測で示されてきたイオンの流出フラックスとエネルギーインプットの相関関係（スケーリング則）を数値シミュレーションを用いて先行研究と比べてより網羅的に検証した
- エネルギーインプットへの影響は、単純なスケーリング則ではなくいくつかの段階がある
 - Activation point, power law growth, saturated growth
- H^+ と比べ O^+ はエネルギーインプットにより敏感に応答し、フラックスのダイナミックレンジも大きい
- エネルギーインプットの種類や組み合わせによっても異なる傾向を示す
 - 摩擦加熱 (Poynting flux)、電子降り込み、波動粒子間相互作用
- 太陽活動度はフラックスの強度や組成に影響を与える
日照条件（昼側のカスプ・夜側のオーロラ帯）によっても異なる傾向を示す

個人的感想

- 大気散逸シミュレーションにおけるエネルギーインプットの重要性を認識
 - 特に電子降り込みや波動の影響（MHDモデルでどう表現するか？）
 - 強い固有磁場が存在する場合は顕著（地球、太古火星）
 - 現在火星では？（残留磁場）