

Discrete Aurora on the Nightside of Mars: Occurrence Location and Probability

Xiaohua Fang, Yingjuan Ma, Nick Schneider, Zach Girazian, Janet
Luhmann, Zachariah Milby, Sonal Jain, Yaxue Dong,
Shannon Curry, and Bruce Jakosky
(2022)

<https://doi.org/10.1029/2021JA029716>

東京大学 D2 沖山 太心

1. Introduction

- 火星には固有双極子磁場はないが、一部の領域に地殻磁場がある。
- 火星にはディスクリートオーロラ、ディフューズオーロラ(夜側全球)、プロトンオーロラ(昼側)の3種類のオーロラが見られている。
- ディスクリートオーロラは地殻磁場の強い南半球でMars Express (MEX)で観測された不定期に起こるオーロラである。地殻磁場の強い場所全域ではなく、地殻磁場が閉じている確率が最小の場所で発生しやすい。
- 昼側の非オーロラ現象の干渉を防ぐためにデータは夜側に限られている。

1. Introduction

ディスクリートオーロラ

- MEXのSpectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars (SPICAM) 装置の観測ではCO Cameron bands (190–270 nm) が高度~130 km で発光している(Soret et al., 2016)。
- 数十~ 300 eVの電子で発生する(Leblanc et al., 2008)。MEXのAnalyzer of Space Plasma and Energetic Atomsでもオーロラ発光と電子フラックスの増加がほとんど同時に見られる。
- 問題点は、MEXデータのオーロラ発光輝度と降り込み電子明確な相関がはっきりしていない。電子観測できるMEXの地点はオーロラ発光が起こる電離圏より高高度であるから。
- MAVEN搭載のthe Imaging UltraViolet Spectrograph (IUVS)でもディスクリートオーロラは観測されている。全球の発生率は~1 %程度である。夕方側でIMFのクロックアングルがマイナスの時に起きやすい。
- ディスクリートオーロラの発生方法はまだはっきりしていない。
昼側から磁力線で夜側に運ばれる？ (Dubinin et al., 2008; Winningham et al., 2005)
しかし、オーロラ発生時の磁力線は開いている様だ。(Liemohn et al., 2007; Bertaux et al., 2005)昼側の光電子ではなさそう。
現在の見方は、太陽風由来の電子がカスプの様に開いた磁力線に降り込んでくる。
- ディスクリートオーロラがどこでどの様な条件で発生するかはまだ明らかでない。
この研究では、上記を調べるために特に現実的な磁場モデルを用いた磁場構造の影響を調べる。

2. Model and Data

2.1. Global Time-Dependent, Multispecies MHD Model

- The 3-D multispecies, single-fluid magnetohydrodynamic (MHD) model of Ma et al. (2014)
- MSO座標系： $-24R_M \leq X \leq 8R_M$, $-16R_M \leq Y, Z \leq 16R_M$, $R_M = 3,396 \text{ km}$
- 質量密度を解く粒子種：プロトン(太陽風と火星由来どちらも)、電離圏イオン(O_2^+ , O^+ , CO_2^+)
- 速度と温度も解く。速度はイオンと電子で同じ値を使う。温度はイオンと電子でプラズマの熱圧を2分割する。
- 磁場は(a)地殻磁場と(b)誘導磁場の二つの部分から構成されている。
- 磁場は太陽風状態が変化しない場合でも、自転の影響で時間変化する。今回の研究では、1つの例外を除いて、太陽風プラズマパラメータやIMFの強さや向きを変化させず、火星の自転や季節変化を考える。
- 磁場はthe standard fourth-order Runge-Kutta algorithm でMHD計算結果から外挿した。範囲は高度 100 km から火星中心から 5 R_M までである。
- 6種類のカテゴリー分けがある。
 - (a) draped field lines with both ends connected to the solar wind,
 - (b) open field lines with one end connected with the dayside ionosphere and the other end is open,
 - (c) open field lines with the ionosphere-connected end on the nightside,
 - (d) closed field lines with both ends in the dayside ionosphere,
 - (e) closed field lines with both ends connected to the nightside ionosphere, and
 - (f) closed field lines straddling the terminator with one end on the dayside and the other end on the nightside.

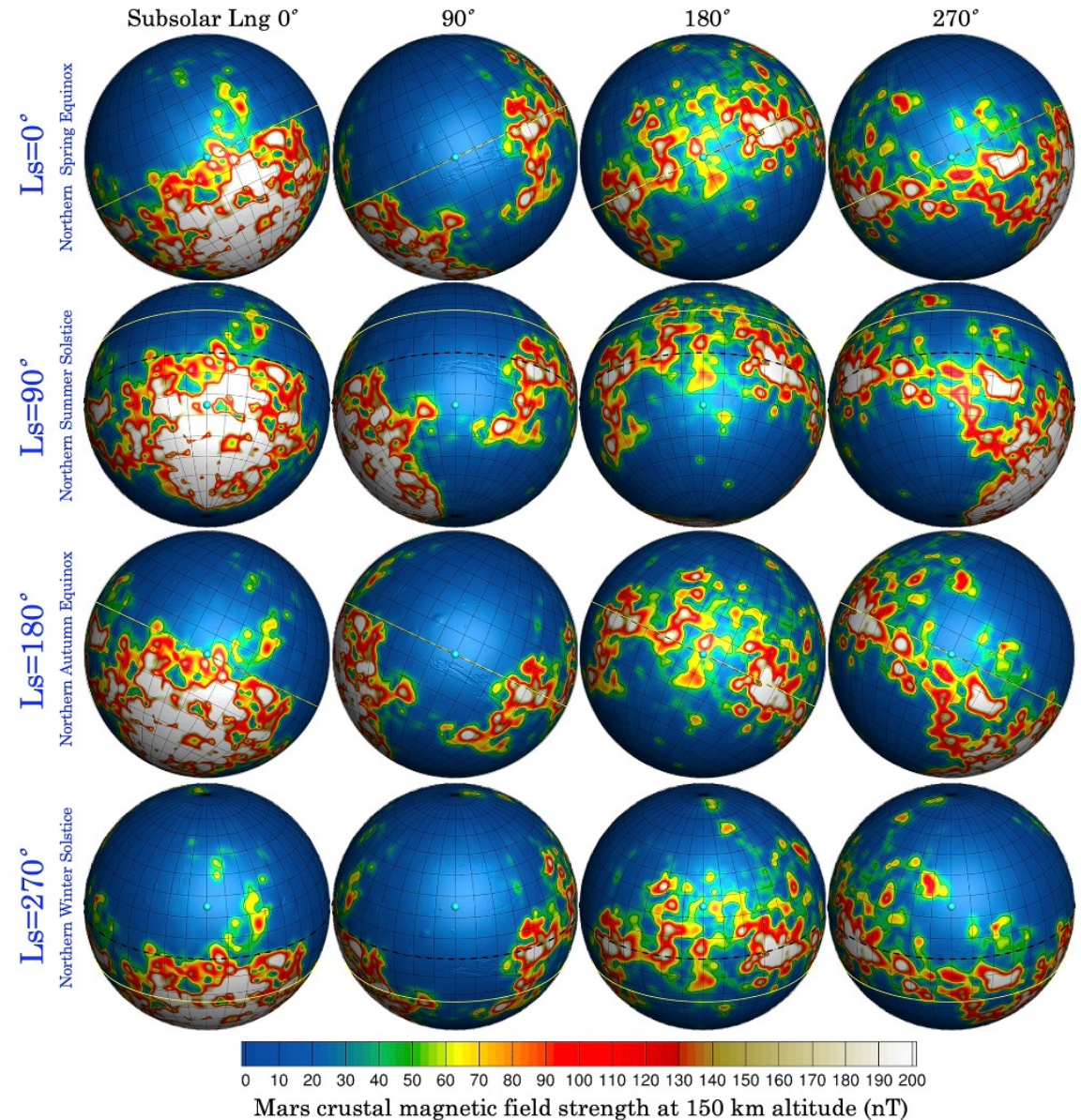
2.2. Numerical Simulation Cases

地殻磁場

- 高度150 kmの地殻磁場強度
- MSO座標、火星磁気圏尾部からの図
- 縦は季節変化、横は自転変化を表す。
- Morschhauser et al. (2014) のモデルを使用した。

外部条件(静的)

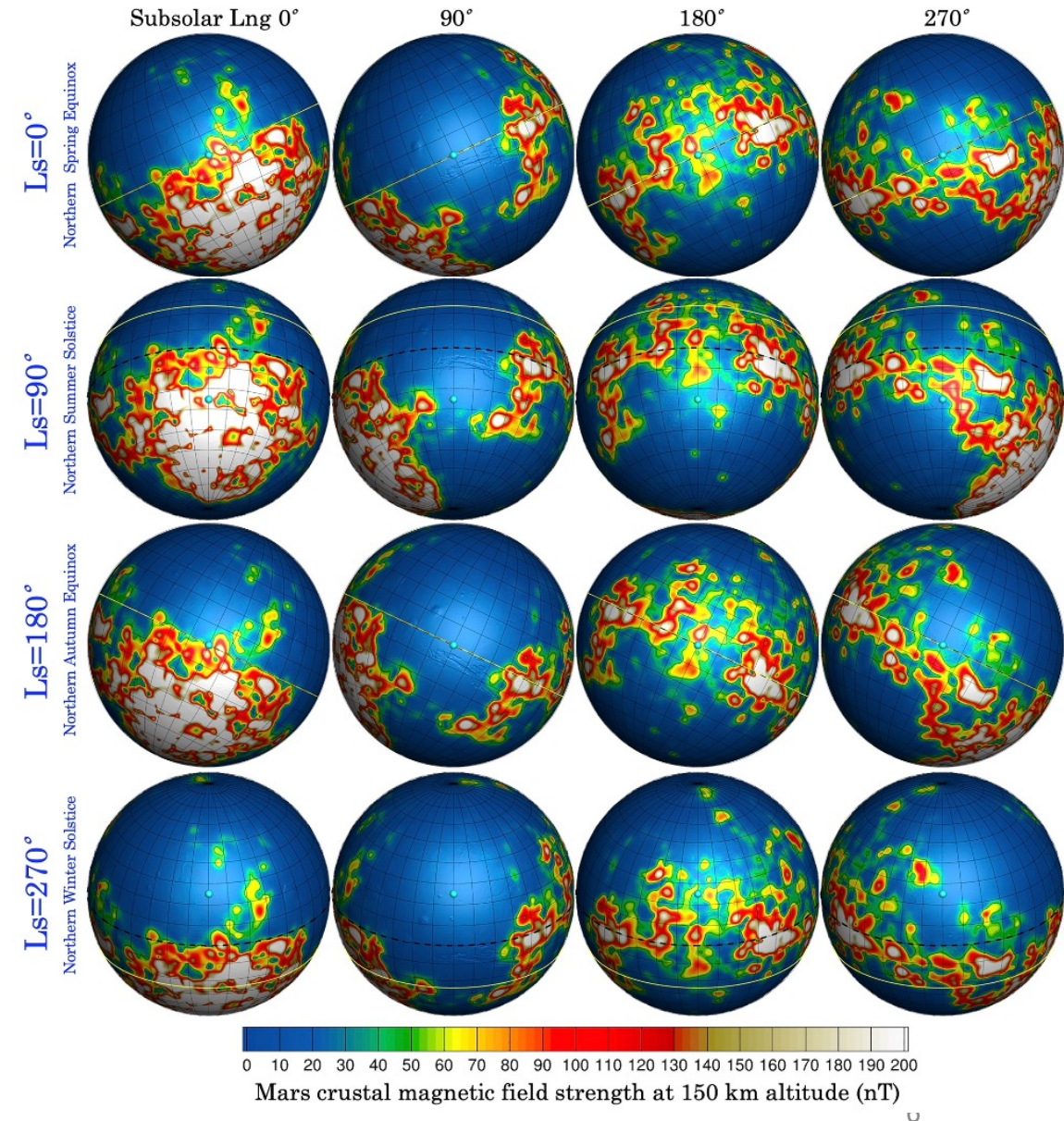
- 太陽風密度、速度 : 4 cm^{-3} , 400 km/s
- 惑星間空間磁場(IMF) : パークースパイラル、 3 nT 、IMFは黄道面上でコーン角(IMFと火星-太陽を結ぶ線との角度)は 56° である。
- $(B_x, B_y, B_z) =$
 $(1.634, -2.516, 0) \text{ nT}$ [火星から離れる向き]
もしくは
 $(-1.634, 2.516, 0) \text{ nT}$ [火星に向かう向き]
- IMF 2ケース x 季節 4ケース = 8 ケース計算する。
- 光電子発生率は太陽極小の1 AUの値を火星-太陽の距離の二乗の逆数で補正した。
- 出力は20 分間隔



2.2. Numerical Simulation Cases

ICME の場合

- 2017/9/13 ($L_s \approx 60^\circ$) のイベントに合わせた。
- これは一番大きいイベントのうちのひとつ
- 解析時間はSeptember 12, 22:00 UT (ICME shock到達の~5 hr 前) から September 13, 10:55 UT
- 出力は5 分間隔



2.3. MAVEN IUVS Discrete Auroral Observations

- Schneider et al. (2021)で示されたMAVEN IUVSのデータを使用した。
- データの期間は1 December 2014 (orbit 335) から 7 May 2020 (orbit 11,484)
- 高度100 km以下のデータは視線積分の効果で観測した点の前や後ろの発光が含まれるため除外した。

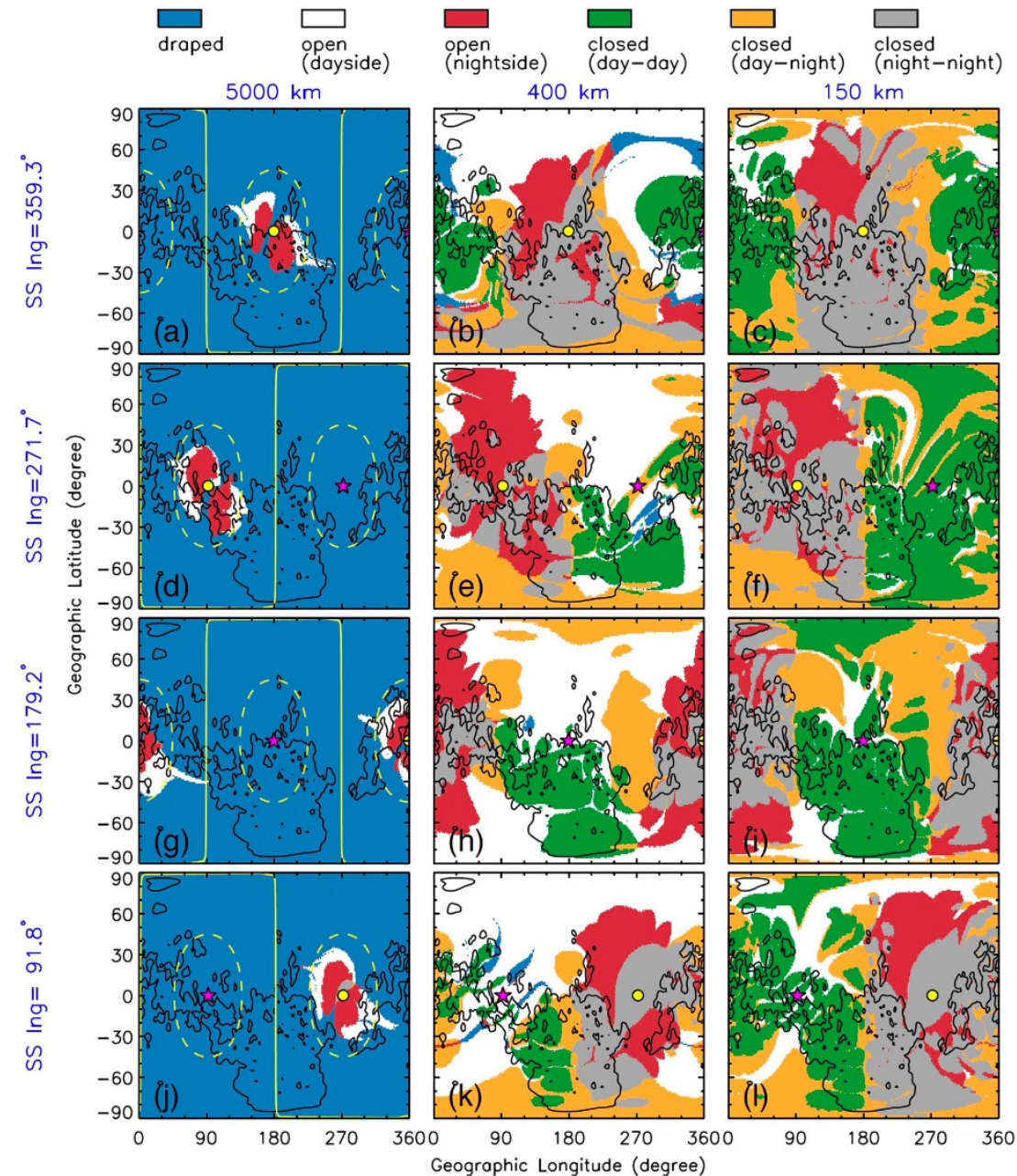
3. Model Results

3.1. A Case Study for $L_s = 0^\circ$, IMF BY < 0

3.1.1. Magnetic Field Topology

右図について

- 色: 磁場の形状
- SS lng: subsolar longitude
- 等高線: 高度150 kmで地殻磁場が50 nTの場所
- 赤星: 太陽直下点、黄色点: 反太陽直下点
- 左列の黄色線: SZA 90° 、黄色点線: SZA 45° or 135°
- 高度 150 kmでは閉じた磁力線が多い。
- 緯度 50° S (地殻磁場が強い)ではパッチ上にオープンな磁力線がある。これらは閉じた磁力線の周りにある。また、これら開いた磁力線は惑星の時点による時間変化で変動したり、閉じた構造に変わったりする。

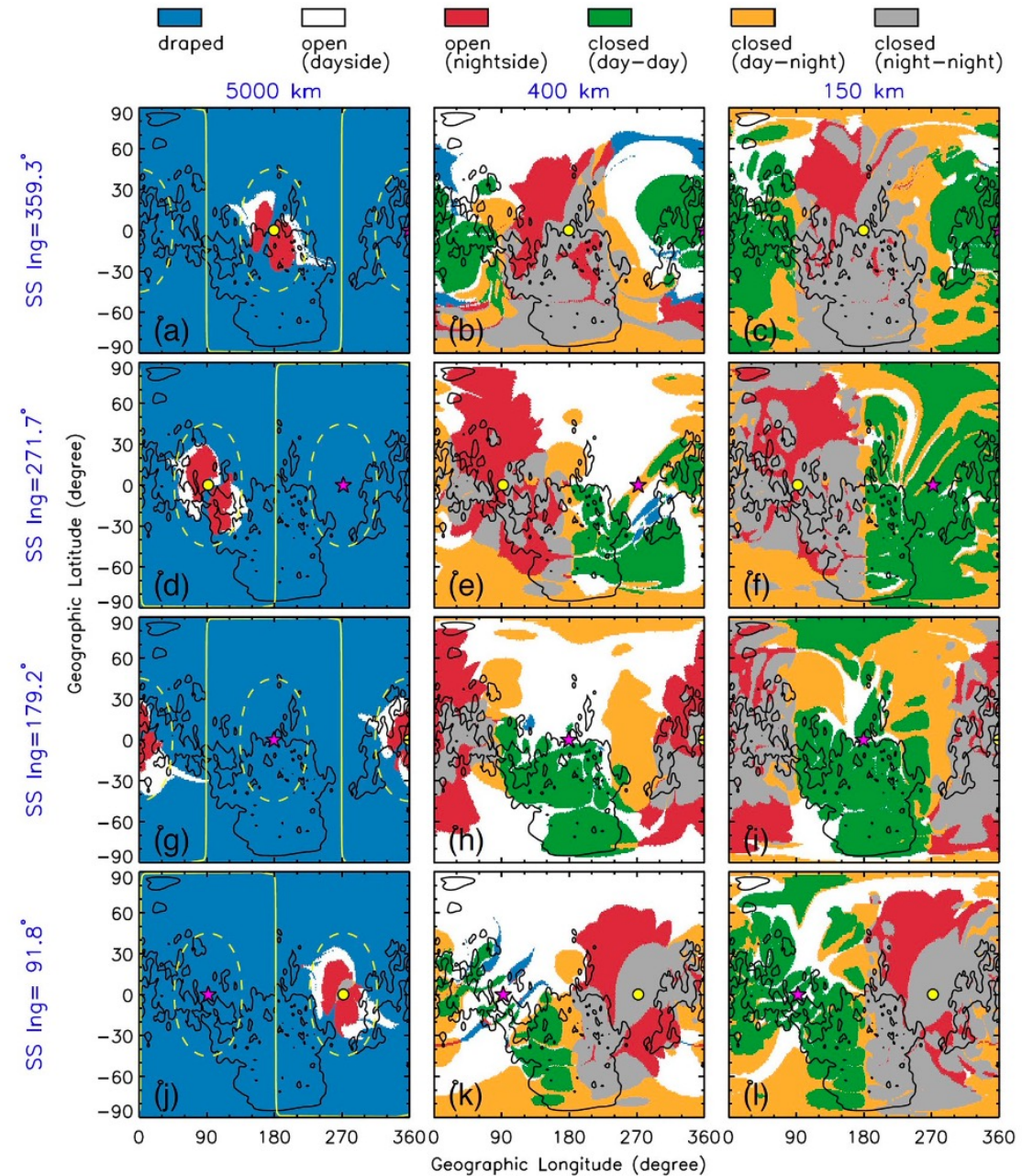


3. Model Results

3.1. A Case Study for $L_s = 0^\circ$, IMF BY < 0

3.1.1. Magnetic Field Topology

- 高度400 kmでは主に地殻磁場の弱い北半球で開いた磁力線が支配的になる。
- 高度5000 kmではdraped な磁力線が支配的になる。ただし、夜側のwake領域中心部($SZA > 135^\circ$ のあたり)では、夜側につながる開いた磁力線が昼側に繋がる開いた磁力線に囲まれている構造がある。

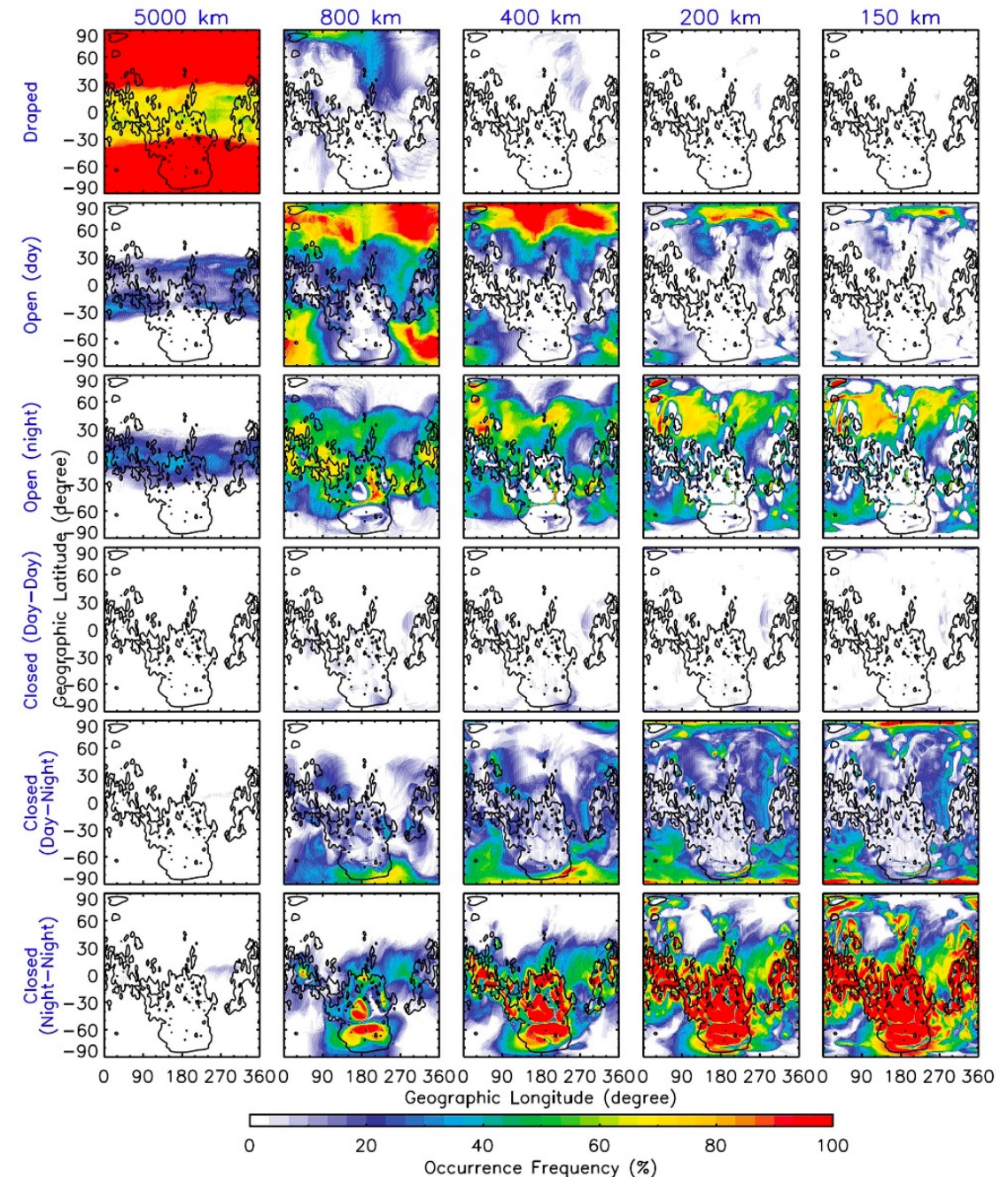


3. Model Results

3.1. A Case Study for $L_s = 0^\circ$, IMF BY < 0

3.1.1. Magnetic Field Topology

- 右図3は夜側($SZA > 90^\circ$)での各磁力線構造の発生確率を示す。
- 地殻磁場の強い場所では両端が夜側につながる磁場構造が高度800 kmまで支配的である。
- 昼夜をまた磁力線は極域に起きやすい。
- 両端が昼側に繋がる磁力線は、時に明暗協会を超えて夜側で見える。
- 開いた磁力線は、高度800 km以下で地殻磁場の弱い場所で支配的で、また、地殻磁場の強い領域でパッチ上に発生する。ディスクリートオーロラも地殻磁場の強い場所に囲まれた開いた磁力線周りで起きやすい。
- 800 kmより上では、drapedな磁力線が支配的になる。



3.1.2. Electron Precipitation

- 開いた磁力線に沿って電子は火星電離圏に降り込める。
- MHD計算で磁場とプラズマ分布をself-consistentに解いているため、電子の密度と温度を用いて降り込み電子を計算する。(Bulk speed より運動エネルギーのほうが大きいいため電子は等方分布とする。)
- 電子の微分数密度フラックス

$$\phi(E) = (2\pi m)^{-1/2} n_e (kT_e)^{-3/2} E \exp\left(-\frac{E}{kT_e}\right), \quad (1)$$

k: ボルツマン定数, m: 電子質量,
n_e and T_e: 電子生成場所の高度5000 kmでのMHDで計算した電子の数密度と温度

3.1.2. Electron Precipitation

- ディスクリートーロラを起こすには電子にある程度エネルギー(40–200 eV, Soret et al., 2016)が必要である。この研究では最低値を 30 eVに設定した。
- エネルギーフラックスの計算は以下の式(2)で示す。

$$\begin{aligned} J(E > E_T) &= \int_{E_T}^{\infty} E \phi(E) dE \\ &= (2\pi m)^{-1/2} n_e (kT_e)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_T}{kT_e}\right) \left(\left(\frac{E_T}{kT_e}\right)^2 + 2\frac{E_T}{kT_e} + 2 \right), \end{aligned} \quad (2)$$

ET: 境界エネルギーの 30 eV

- 数フラックスでなくエネルギーフラックスを使う理由は、オーロラ発光輝度はエネルギーフラックスに比例するから。

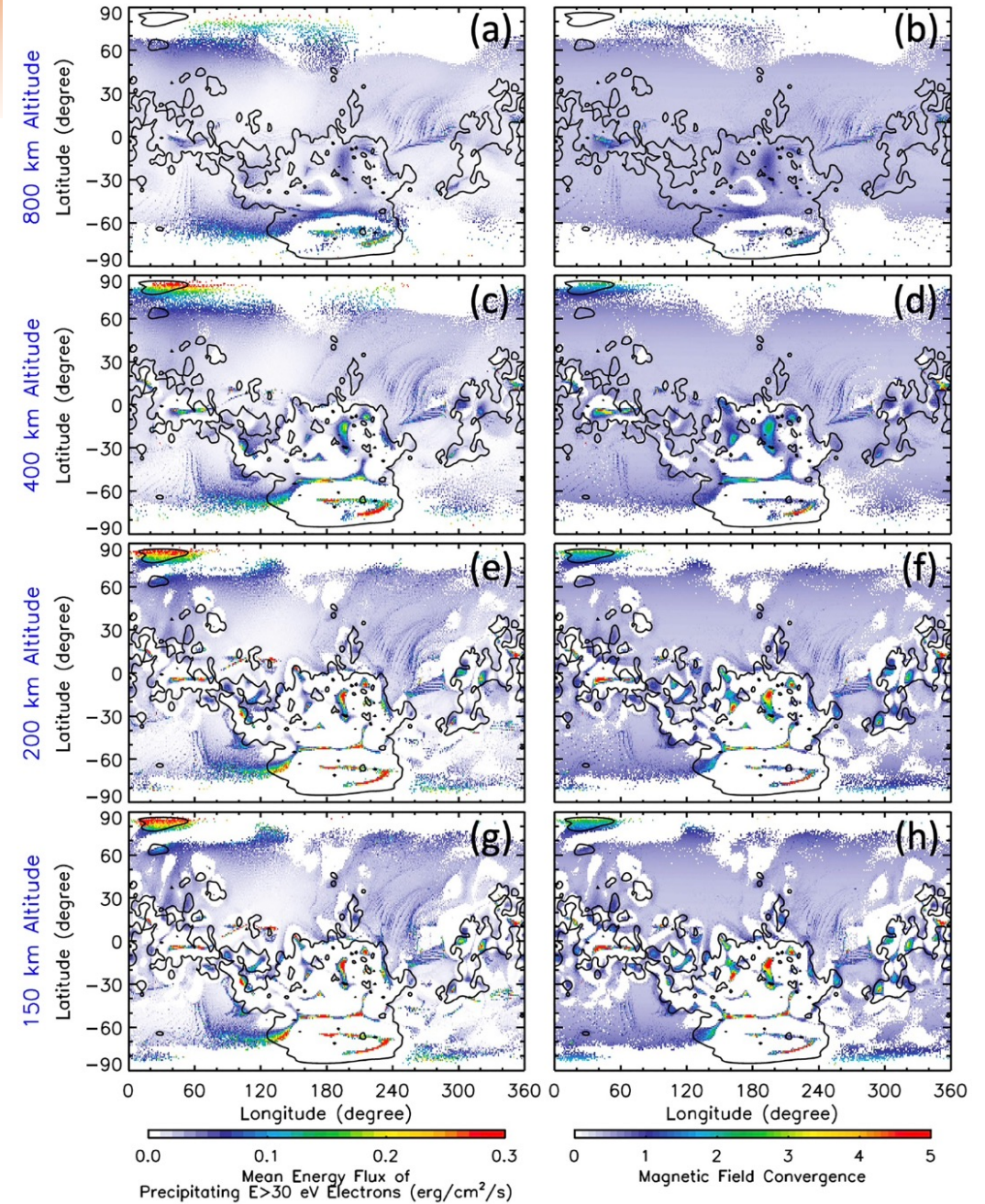
3.1.2. Electron Precipitation

- 高度5000 kmで火星夜側に繋がる開いた磁力線の球形の空間ビン上にいる電子は降り込むとして、その地点の面積微分エネルギーフラックスとビンの面積をかけて降り込み電子エネルギーフラックスとした。
- 電子降り込みの判定が出た高度5000 kmのビンに繋がる高度150 kmのビンを見つけ、150 kmのビンに電子エネルギーフラックスを足す。これを、5000 kmの判定の出たビン全てで繰り返す。
- これを各時間の磁場構造のスナップショットに対して繰り返す。
- 全球の電子降り込みデータができる。
- このモデルでは、MEXやMAVENで観測されている電子の磁力線に沿った電場による加速は考慮されていない。

3.1.2. Electron Precipitation

左図(電子の降り込み)

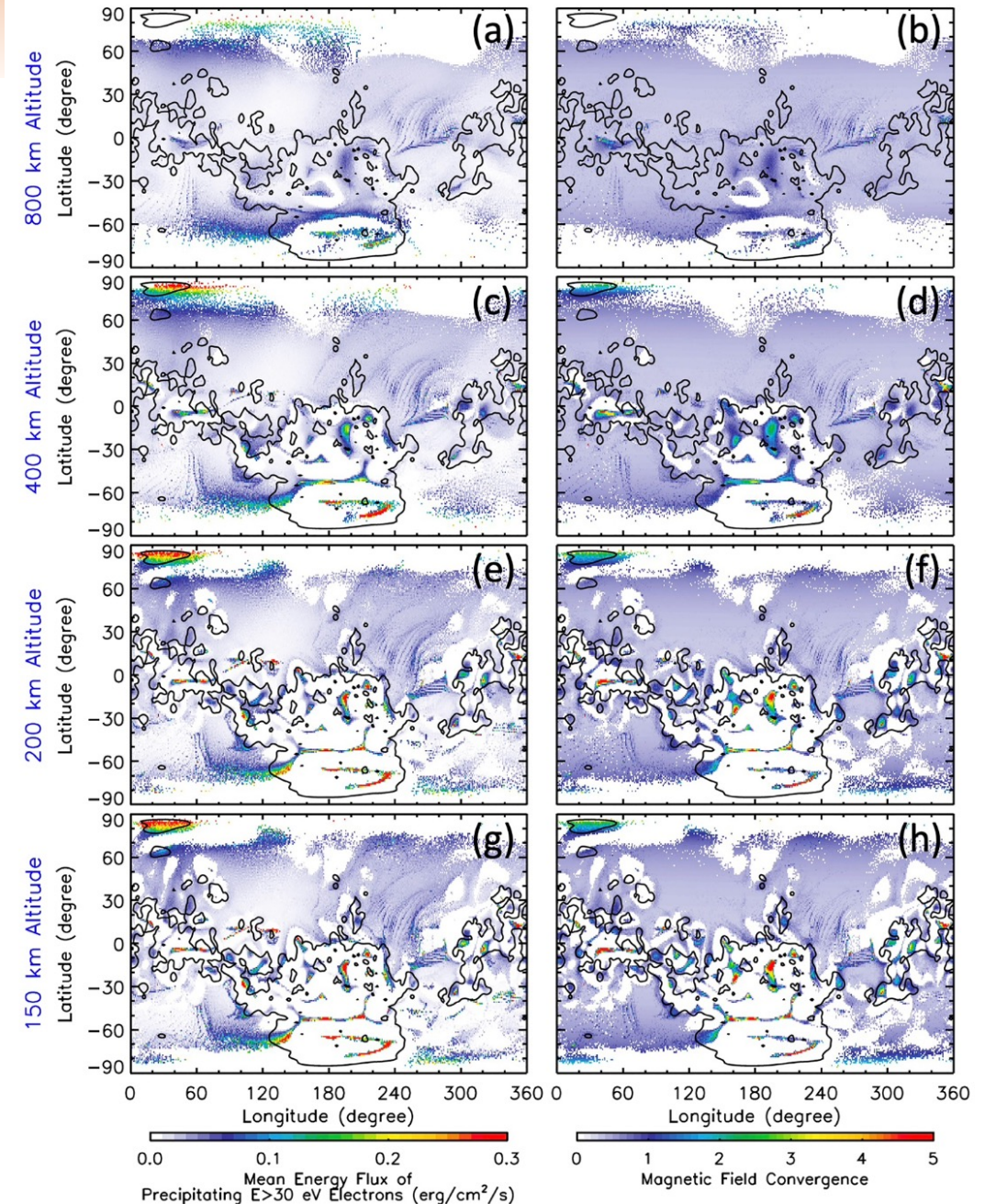
- 地殻磁場の強い場所にパッチ上に電子が降り込みやすい。これは、夜側に繋がるの開いた磁力線ができやすい場所に対応する。
(高緯度の地殻磁場の弱い地域も一部磁場が強く同様の傾向が見られる。)
- 地殻磁場の弱い場所も開いた磁力線を作りやすかったが、電子の降り込みは最大で桁で小さくなる。



3.1.2. Electron Precipitation

右図(磁場の収束度合い)

- Magnetic field convergence factor:
夜側につながる開いた磁力線の判定をされた高度5000 kmの領域の立体角と、降り込む地点の立体角の比を計算した値である。磁力線の収束がないと値は1になる。
- 地殻磁場の強い場所でconvergence factorは1を大きく超えて、弱い場所では1に近いもしくは1を下回る。
- 地殻磁場の強い場所は800 kmから高度が下がると磁場収束が強くなっていくが、地殻磁場の弱い場所は高度依存性がない。
- 左右の図の対応から、電子の夜側の降り込みが増える原因は、磁力線の収束であると示唆される。

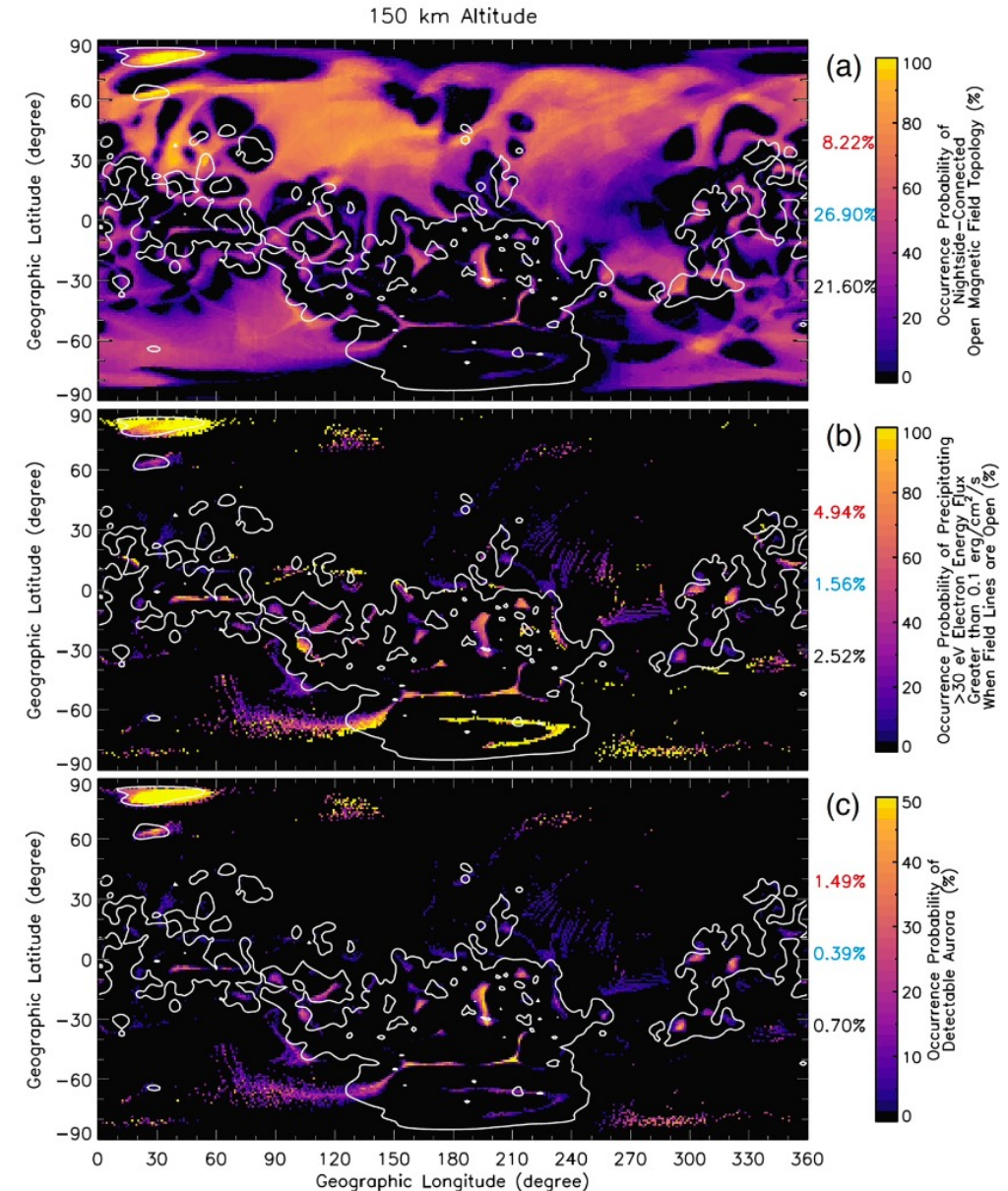


3.1.3. Discrete Electron Aurora

- 観測できるほど十分明るいディスクリートオーロラを起こせる境界エネルギーフラックスを $J_T = 0.1 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$ とした。これは、MEXの高度~400-950 kmでの観測値~0.02 erg/cm²/s (Leblanc et al., 2008)より数倍大きいが、抵抗はフラックスが増えるはずなので妥当な値である。
- 惑星が自転する中で、ディスクリートオーロラの発生確率を計算する。
- ステップ1 (右図a): 電子の降り込み確率P1を計算する。(夜側の開いた磁力線ができる確率)
- ステップ2 (右図b): 電子のエネルギーフラックスが J_T を越す確率P2を計算する。
- ステップ3 (右図c): 観測できるディスクリートオーロラの発生確率 $P = P1 \times P2$ を計算する。
- 極座標のビンごとの面積差を式(3)で補正する。

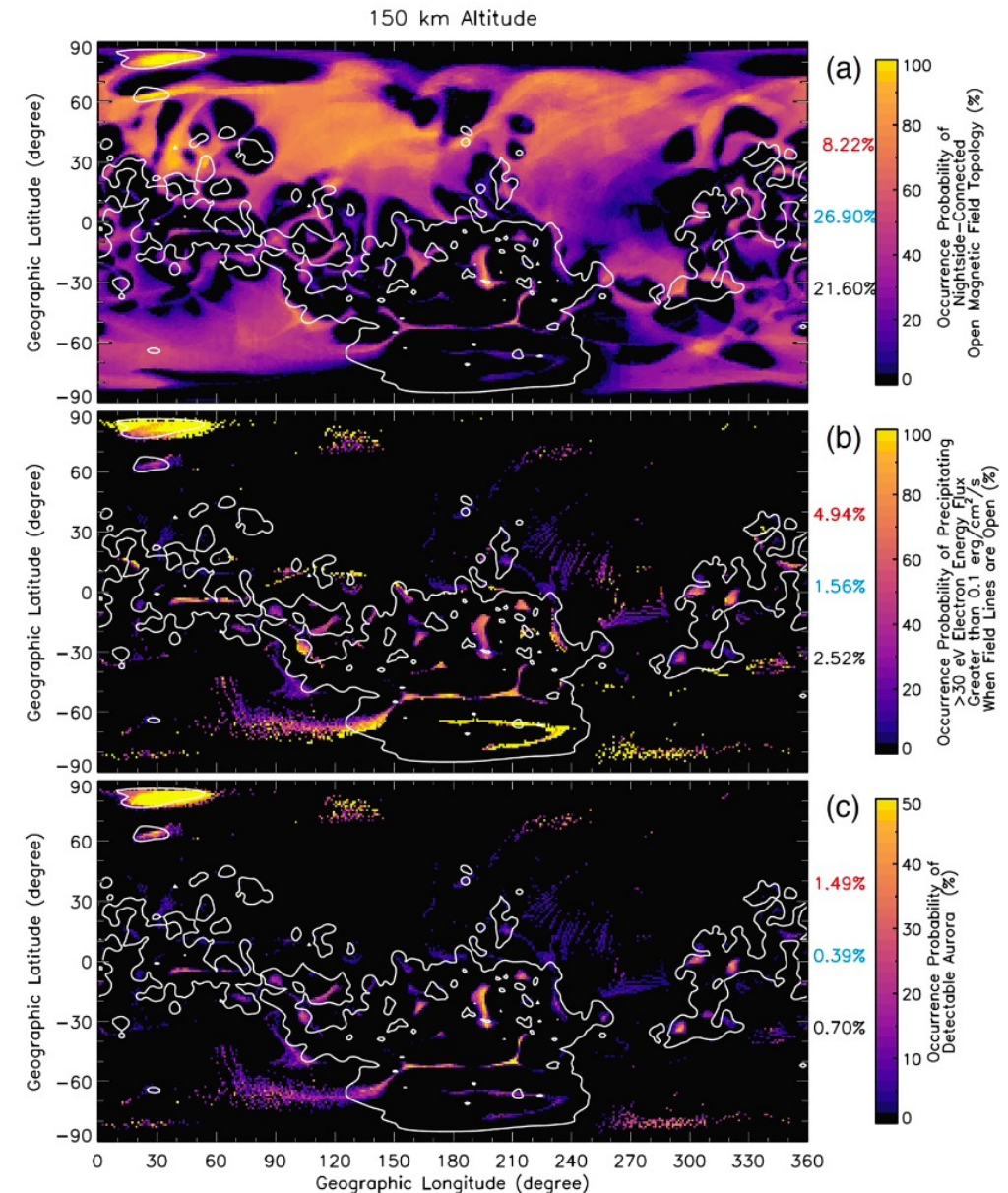
$$\langle P_i \rangle = \frac{\iint P_i(\theta, \phi) \cos\theta \, d\theta \, d\phi}{\iint \cos\theta \, d\theta \, d\phi}, \quad (3)$$

where ϕ and θ are longitude and latitude. P_i in the equation can be $P1$, $P2$, or P



3.1.3. Discrete Electron Aurora

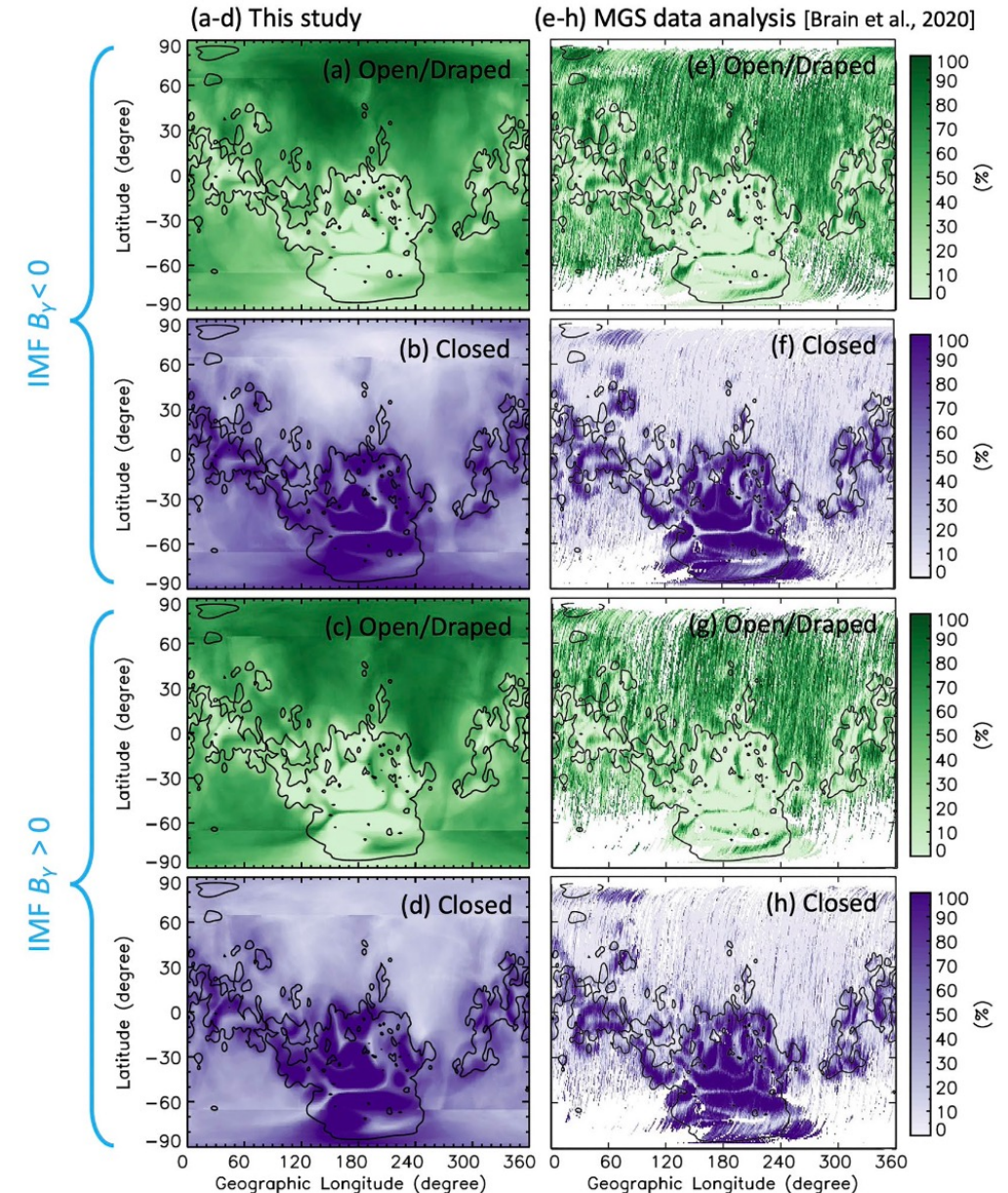
- 図右の数字は発生率を場所ごとで積分した値を示す。
赤：地殻磁場の強い場所、青：地殻磁場の弱い場所、黒：全球
- 地殻磁場の強い場所は、開いた磁力線ができる確率は弱い場所の1/3程度だが、電子のエネルギーフラックスが強くなりやすいことがわかる。
- 境界エネルギーETや境界エネルギーフラックスJTを変化させても、基本的な結果の傾向は変わらない。しかし、ETやJTを増やすと発生確率は減少する。



3.2. Comparison Among MHD Cases and With Satellite Ultraviolet Observations

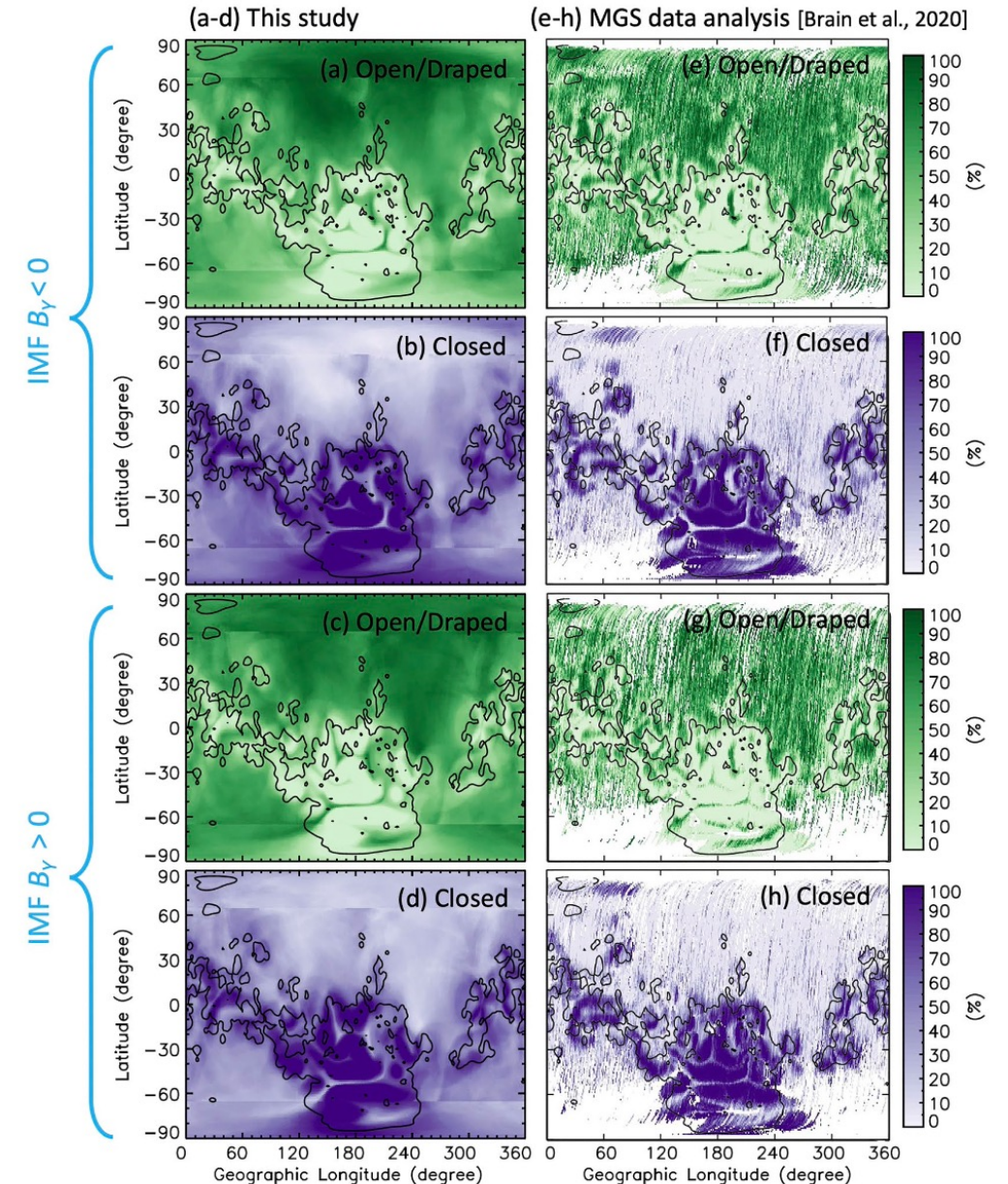
3.2では火星の季節やIMFの極性やICMEを考慮する。

- 右図6について
- 左列: MHD計算(自転、4季節の平均)、
- 右列: MGSの観測データ(~7年間のデータを使用)
- Open/Draped: Open と Draped 磁力線の発生確率
- Closed: Closed磁力線の発生確率
- IMF $B_y < 0$ or > 0 : MSO座標系でのIMFの向き
- 準静的な太陽活動を仮定している。
- モデルと観測データがかなり一致しており、モデルの検証になった。
- 図の黒線は地殻磁場が50 nTの場所の等高線だが、Closedの場所と一致しており、この分類方法で良かった。



3.2. Comparison Among MHD Cases and With Satellite Ultraviolet Observations

- 図3との比較から、季節変化の影響は大きい。
- IMFの向きの影響も存在するが、大きな違いはない。
- MEXのデータはモデル研究と違う太陽風やIMF条件のデータも含まれるため、両者の一致は、外部条件に磁場構造発生確率は大きく作用されないことを示している。



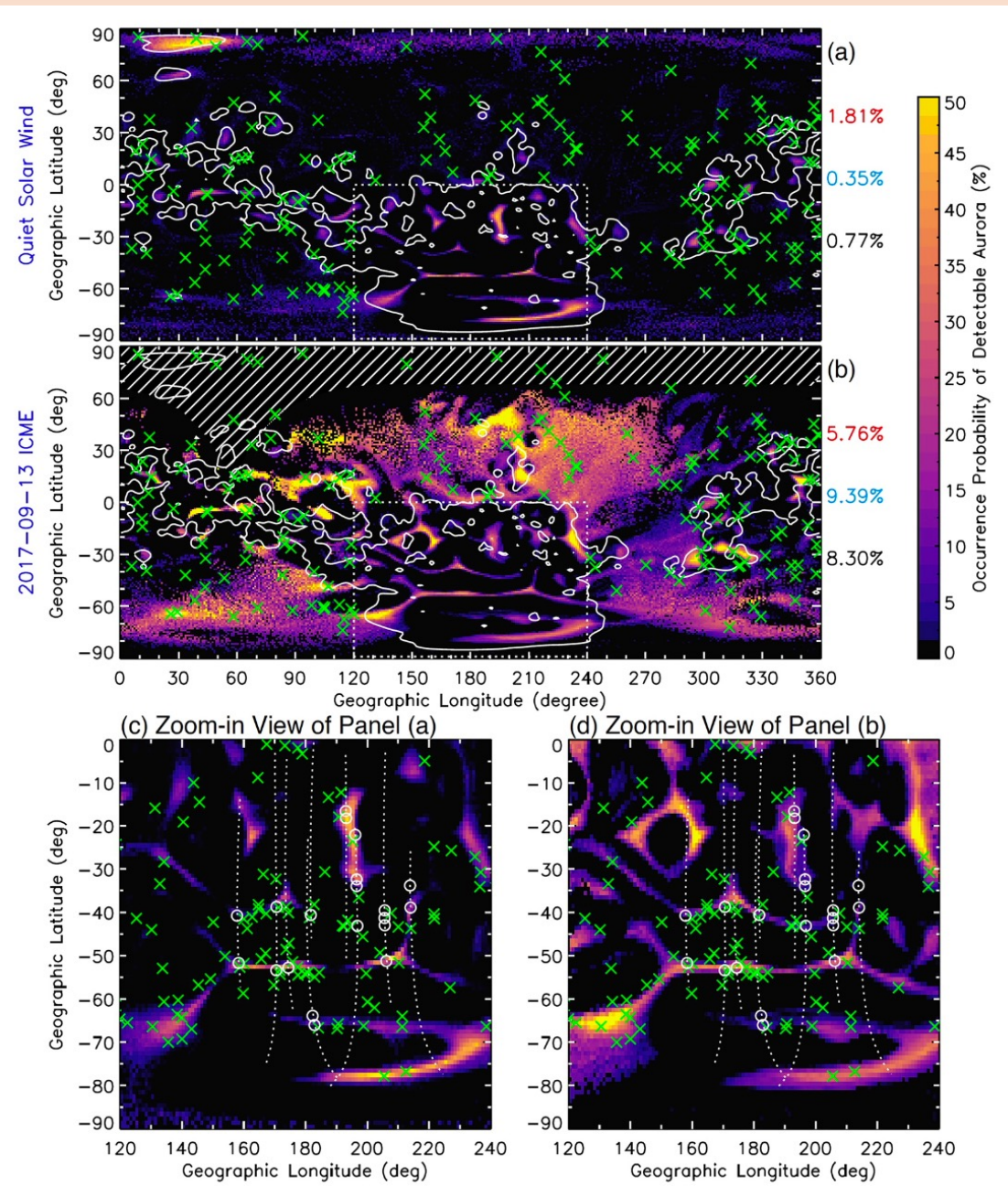
3.2. Comparison Among MHD Cases and With Satellite Ultraviolet Observations

右図7の説明

- MHD計算のオーロラ発生率を示す。
(a)静的太陽風状態、(b)ICME到達時
(c)aの地殻磁場の強い領域((aの灰色の四角)の拡大図
(d)bの地殻磁場の強い領域の拡大図
- 緑点: ディスクリートオーロラのMAVEN IUVSによる観測点
- (c)(d)の白破線と白丸: MEXの軌道とMEXによるオーロラ観測点
- 図の右側の数字: オーロラ発生確率の平均値
赤: 地殻磁場の強い場所、青: 地殻磁場の弱い場所、黒: 全球

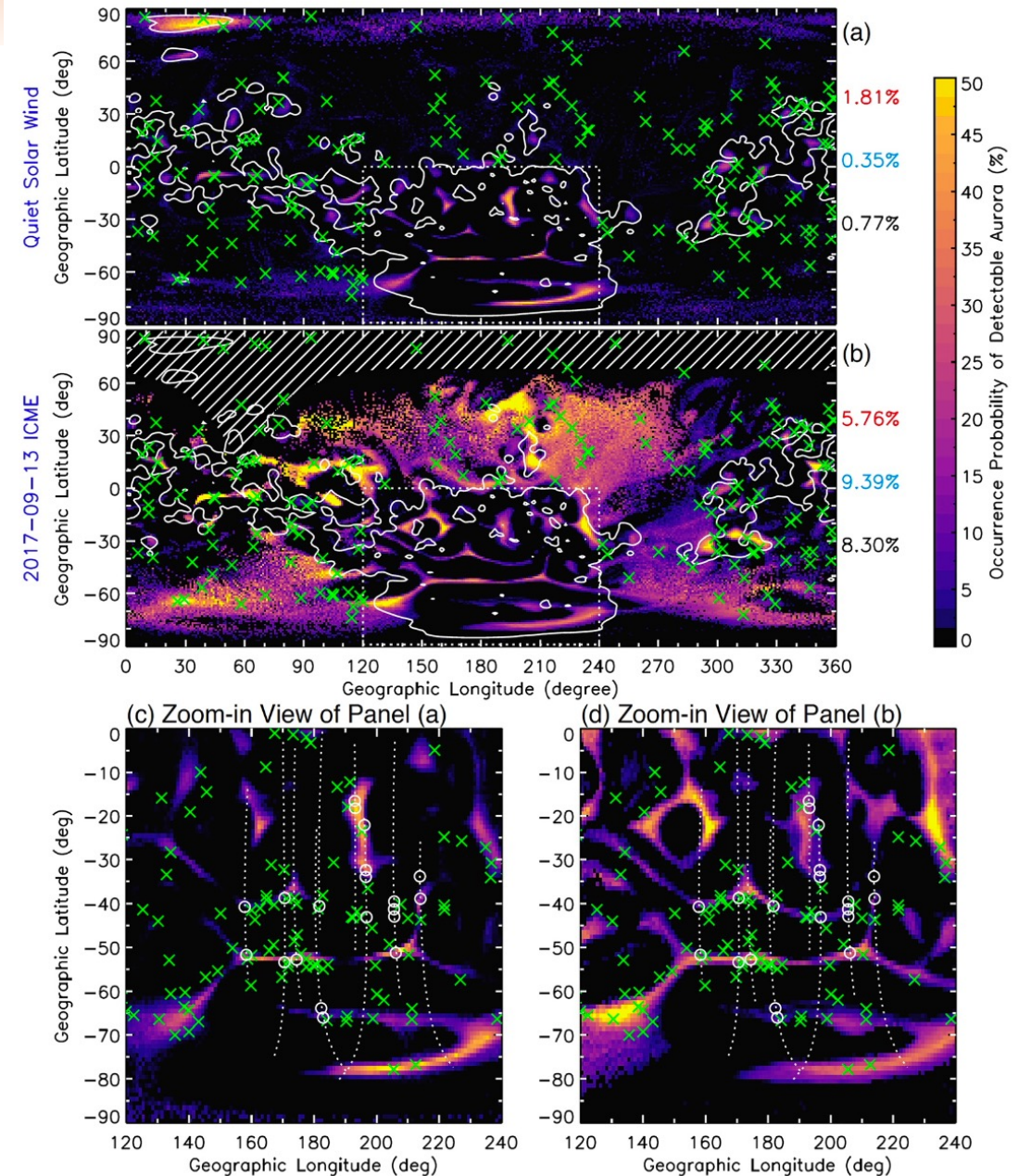
結果について

- 静的な太陽活動では地殻磁場の強い場所がオーロラが発生しやすい。特に、モデルと観測両方で~60-75 °Sの地殻磁場のもっとの強い場所の西側でディスクリートオーロラの発生率が高い。



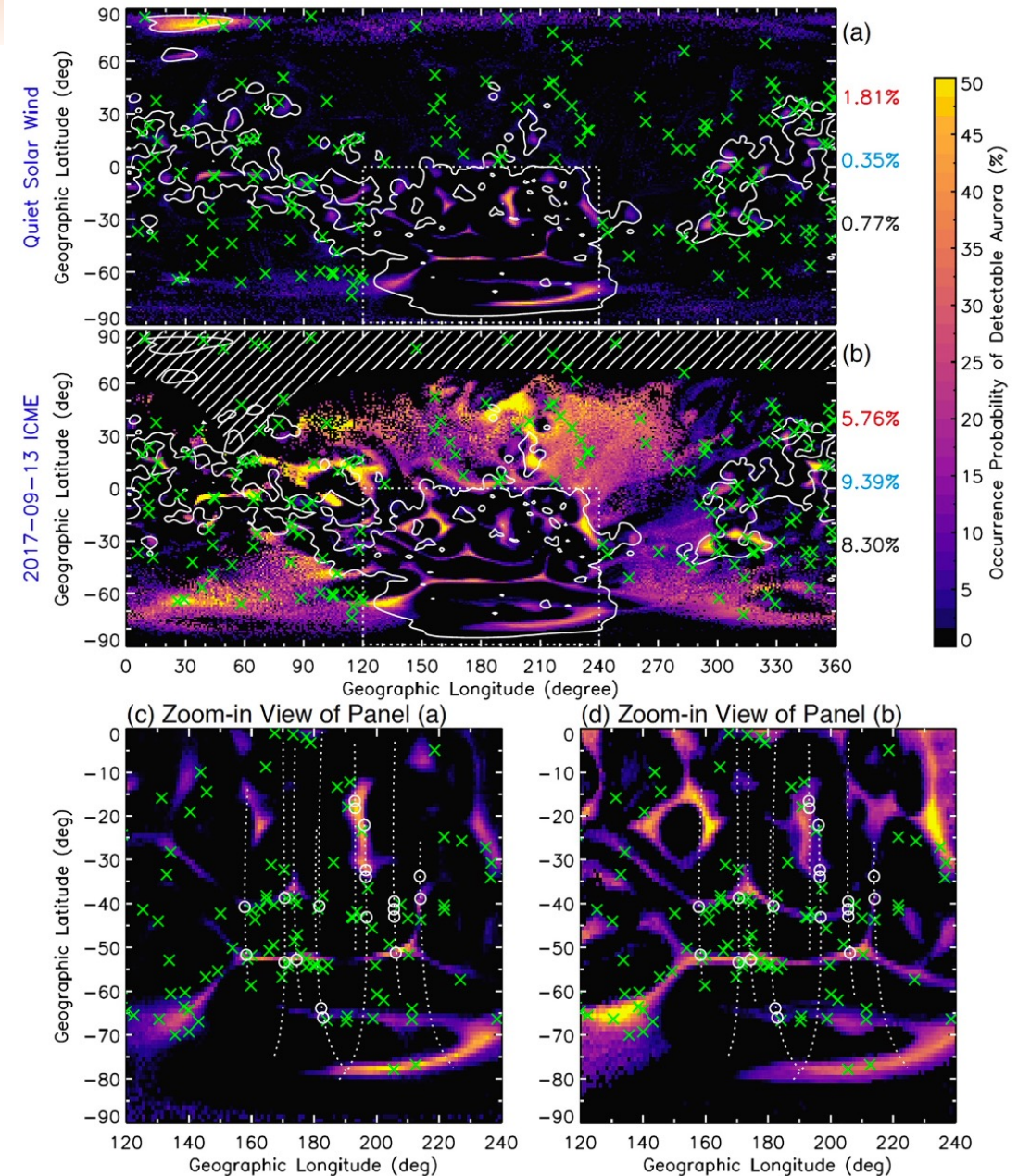
3.2. Comparison Among MHD Cases and With Satellite Ultraviolet Observations

- 地殻磁場の強い場所でもオーロラ発生率が増加するが、特に地殻磁場の弱い場所でもオーロラ発生率が増加する。地殻磁場の弱い場所の発生確率の増加率は27倍に達する。(右図の青色の数字)
この理由は、 > 30 eVのエネルギーで $0.1 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$ のエネルギーフラックスを持つ電子が降り込む確率が劇的に増加するから。
- 地殻磁場の弱い領域では、夜側につながる開いた磁力線は大きく減り、昼側に繋がる開いた磁力線は増える。



3.2. Comparison Among MHD Cases and With Satellite Ultraviolet Observations

- (c)(d)について
- 観測とモデルのオーロラ発生確率が整合している。(特にMEXのデータ)
- 緯度 $35^{\circ}\text{S} - 45^{\circ}\text{S}$ 、経度 $180^{\circ} - 225^{\circ}$ で(c)で予測していないオーロラが発生している。この場所は(d)でオーロラが発生している。この場所で観測されたオーロラは、極端イベント時か、上流IMFの向きがパーカースパイラルから大きく異なっている時の観測ではないかと予測される。



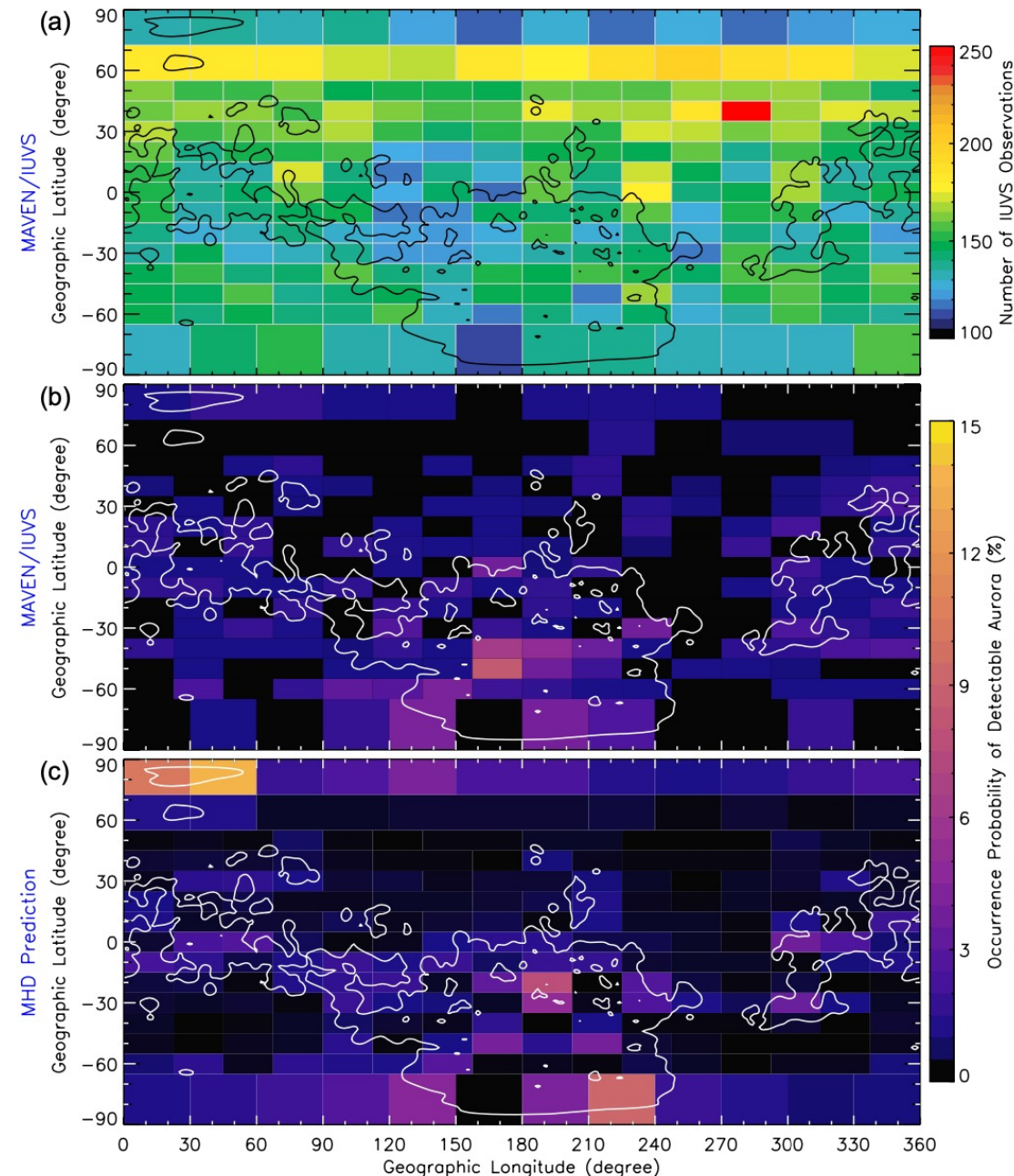
3.2. Comparison Among MHD Cases and With Satellite Ultraviolet Observations

右図8について

- (a)MEVEN/IUVSのディスクリットオーロラ観測回数
(検出・非検出を含む)
- (b)MAVEN/IUVSのディスクリットオーロラ発生率
- (c)MHDモデル計算のディスクリットオーロラ発生率
- 高緯度で粗くなる特殊なグリッドを使用した。

結果について

- 観測とモデルでおおよそ発生率が一致した。
- 両者間で異なる場所(北半球の地殻磁場の弱い場所でIUVSのデータはわずかにオーロラ発生率が増えている)は、観測とデータで条件が異なる(宇宙天気の影響)ため発生したと思われる。



4. Discussion

4.1. Local Magnetic Field Direction

- オーロラ発生と磁場の強さの関係は結果までで議論した。磁場の向きはどのように影響するかを調べる。
- 先行研究:
- 地殻磁場が垂直に近いと、全電子量が増加する(Safaeinili et al., 2007)。
- MEXの観測では、地殻磁場が垂直に近い場所を通過する時何度もオーロラが観測されず、時々磁場が平行に近い場所でオーロラが観測された(Gérard et al., 2015)。
- 地殻磁場の向きがオーロラ発生に与える影響はまだよくわからない。

4. Discussion

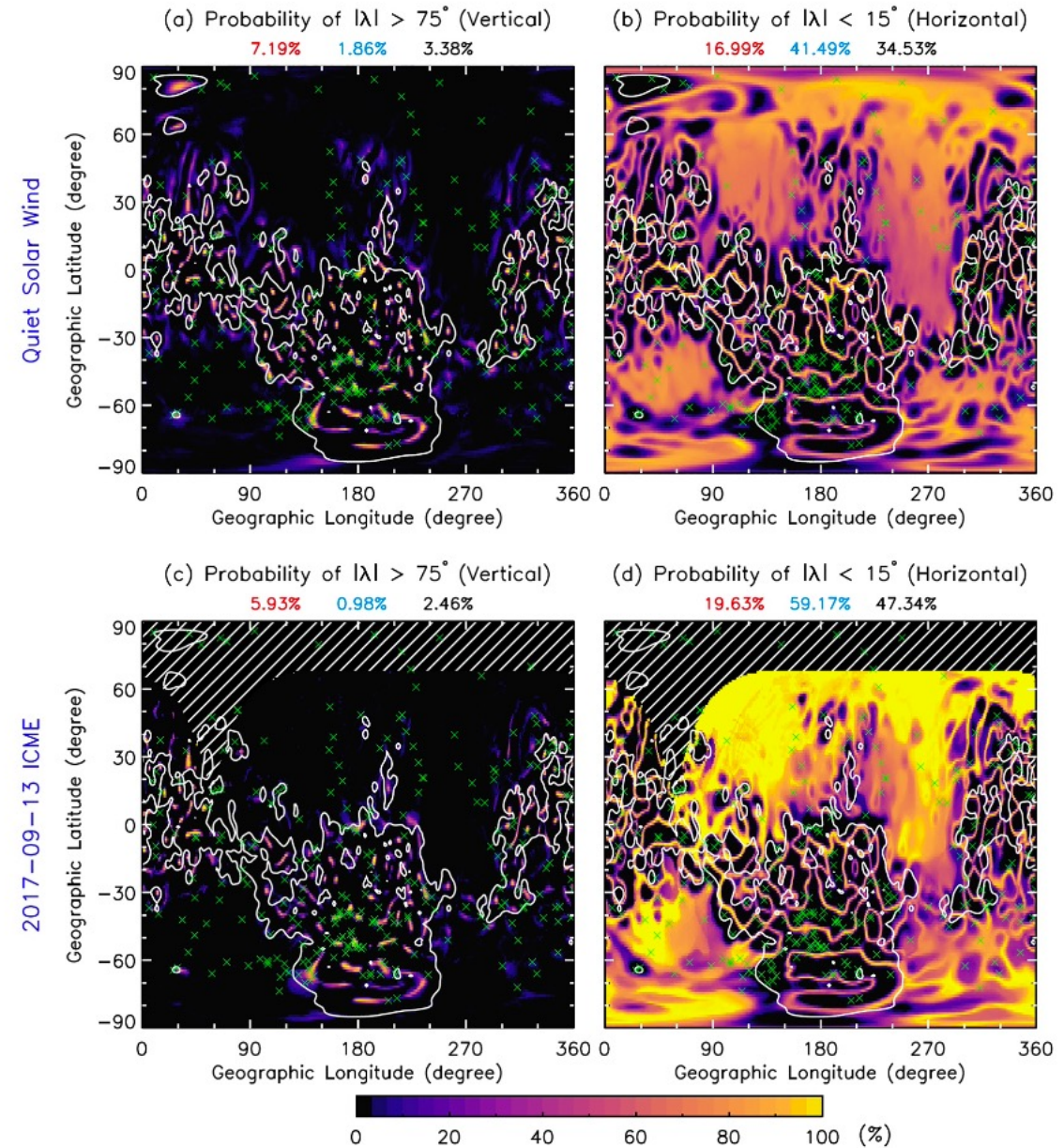
4.1. Local Magnetic Field Direction

右図9について

- λ : 伏角(磁力線の水平面からの角度、正が火星から離れる向き、負が火星に向かう向き)
- 左列: 磁場が垂直に近い時の確率
- 右列: 磁場が水平に近い時の確率
- 各図の上の数字は、平均確率
赤: 地殻磁場が強い、青: 地殻磁場が弱い、黒: 全球
- 緑x: 高度100 km良い上でのIUVSによるオーロラ観測地点

結果

- 地殻磁場の弱い場所では、磁場は水平方向に向きやすい(特にICMEイベント時)。
- 地殻磁場の強い場所では、磁場が垂直方向に向きやすい。



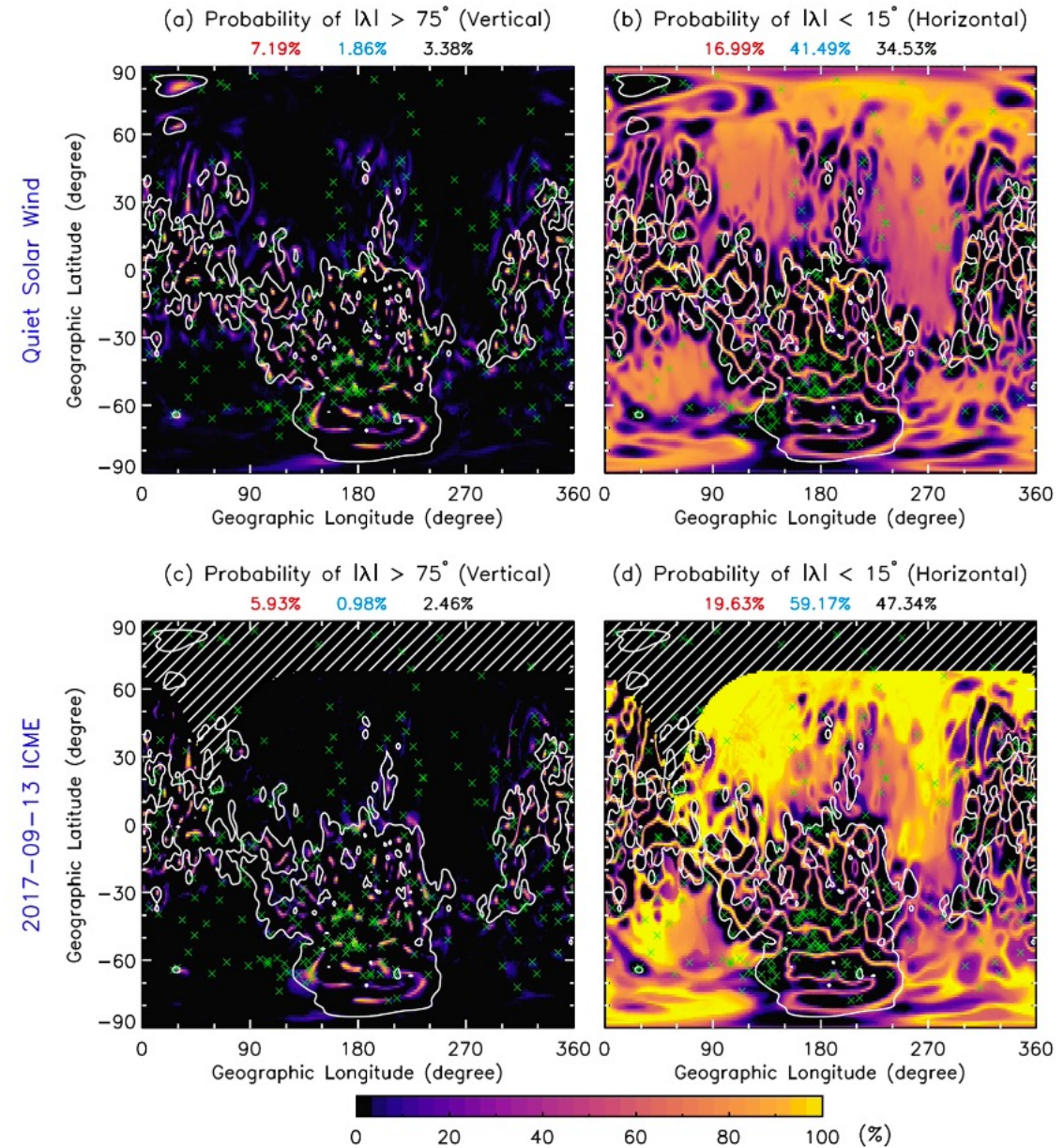
4. Discussion

4.1. Local Magnetic Field Direction

磁場の方向はオーロラ発生決定因子ではない。

理由

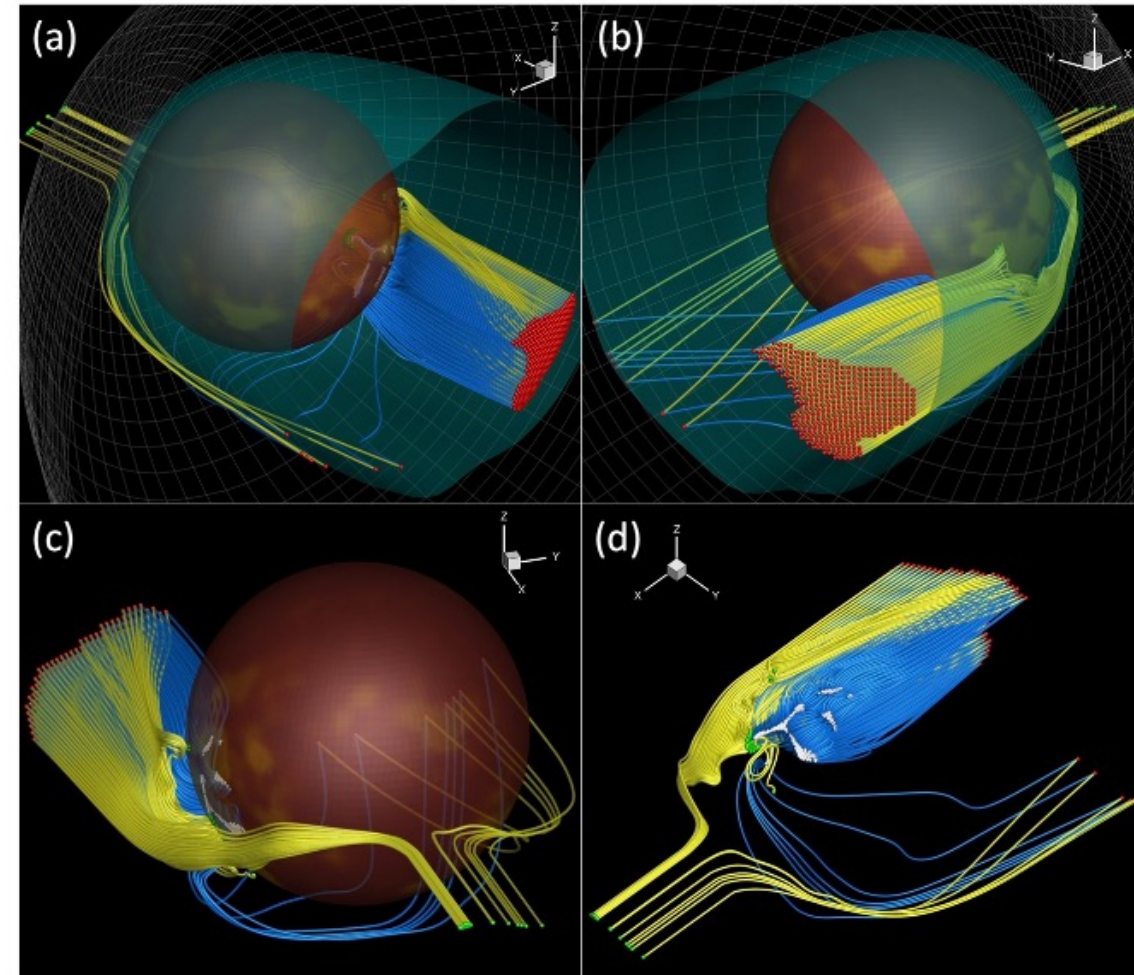
- (a)(c)では、地殻磁場の強い場所で磁場がいつも垂直に近い場所でオーロラが発生していない。
- それに対し、地殻磁場が弱く磁場が水平に近い場所で頻繁にオーロラが観測されている。
- 磁場が垂直に近い確率(7.19%(地殻磁場強), 1.86%(地殻磁場弱), and 3.38%(全球))と、オーロラが観測される確率(1.55%, 0.51%, and 0.78%)に~4倍の差がある。
- 太陽活動が活発な時、磁場は水平に向きやすくなる。観測的には、そのような時はオーロラが観測されやすくなる。



4.2. Discrete Auroral Sources

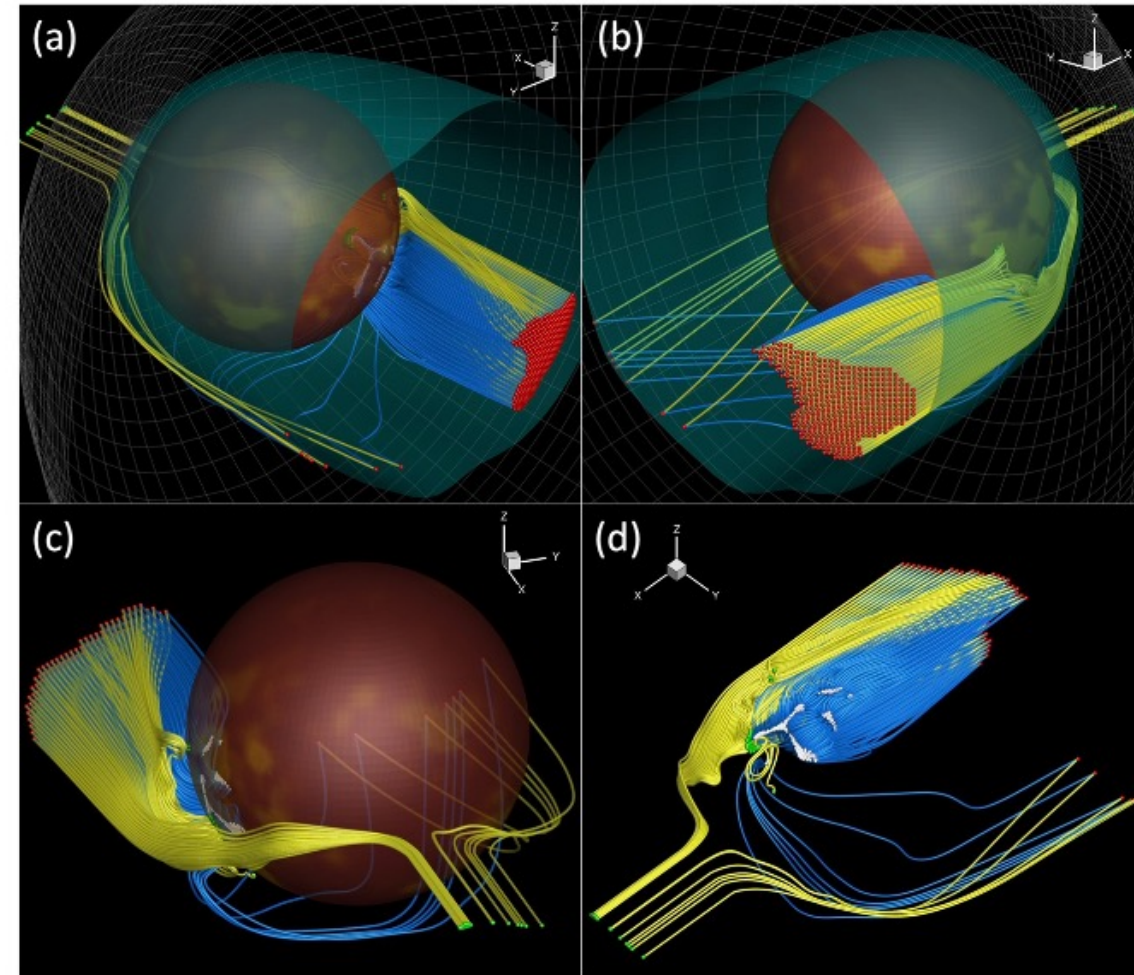
右図10について(電子の起源を調べた図)

- 青線: 高度150 kmの経度 120° – 180° 、緯度 30° S – 70° S の夜側に繋がる開いた磁力線
- 白点: 高度150 kmの磁力線が繋がる点
- 赤点: 高度5000 kmの磁力線が繋がる点
- 黄線: 赤点を通るプラズマの流線
- 緑点: プラズマ流の始点(高度100 km もしくは $r=5 R_m$)
- 灰グリッド: バウショック
- シアンの面: 誘導磁気圏界面
- $L_s = 0^{\circ}$
- $BY < 0$
- 太陽直下点の経度= 271.7°
- 4つの図は全て同じ結果の図で、視点の向きのみが異なる。



4.2. Discrete Auroral Sources

- ほとんどの電子は明け方の磁気圏尾部から高高度に降り込み、ごく少数が夕方側の磁気シースの内側境界から降り込む。
- これまでの仮説と異なり、降り込み電子の起源は主に太陽風起源で(この例だと76 %)、残りが電離圏起源である。
(これまでの仮説は磁気シースからカスプ状の場所に直接降り込むと考えられていた。)
- 電子は昼側でシースを超えて磁気圏に侵入し、磁気圏尾部に運ばれ、そこで火星のよる側に繋がる磁力線に沿って降り込む。
- MHDの観点では、カスプ状で電子が直接降り込める磁場構造はできない。
- MAVENで導出した磁場構造(Xu et al., 2020)もこの研究の磁場構造と整合的である。



4.3. Model Limitation

- 運動論の効果が入っていない。
衝撃波の影響を受けた太陽風で構成された高温電子や、高エネルギー光電子の影響を考慮できない。
電子とイオンのポテンシャル差でできる磁力線に沿った電場による降り込み電子の加速を考慮できない。
- 磁気ミラーを考慮していない。
磁気ミラーを考慮すると、 $\sin^2(\alpha_{LC})$ の補正が必要になる。 α_{LC} は、反射ロスコーンの開いた角度

$$\sin^2(\alpha_{LC}) = \frac{B_1}{B_2} \left(1 + \frac{e\Delta V}{E} \right), \quad (4)$$

ここで、 B_1 、 B_2 は5000 kmまたは降り込み地点の磁場の強さ、 E は電子の初期エネルギー、 ΔV は平行電場の落ち込みを表す。今回は $\Delta V=0$ なので B_1/B_2 を考える。また、 $L_s=0^\circ$ 、IMF $B_y<0$ の場合では、地殻磁場の強い場所では弱い場所より~3から~8倍程度比が小さくなった。

しかし、磁力線に沿ったポテンシャルドロップは~4倍程度地殻磁場が強い場所の方が弱い場所より強い(Poppe et al., 2021)。これはロスコーン角を広げるため、この効果と磁気ミラーの効果が相殺されることが示唆される。

- これらの効果が入っていないが観測をモデルでよく再現できたため、磁力線形状と、磁力線の収束がオーロラ形状の決定に決定的な役割を果たしている。

5. Summary and Conclusions

- 本研究は全級規模でディスクリートオーロラの発生場所と発生確率を予測しようとした最初の研究である。
- 重要な前提条件
 1. 電離圏にフットポイントのある開いた磁力線を通して、マクスウェル分布をした電子の > 30 eV以上の高エネルギー部分のみが降り込むとした。
 2. 現在の技術で観測できるディスクリートオーロラ強度にするために、 $0.1 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$ 以上の電子エネルギーフラックスを要求した。

主要な結果

1. 地殻磁場の強い場所は大部分が閉じた磁力線で、例外として、強い磁力線に囲まれた小さなパッチ状の場所は開いた磁力線が生じやすかった。地殻磁場の弱い場所は開いたもしくはドレープした磁力線が主だった。また、モデルで導いた400 kmの磁場形状の確率分布はMGSのデータ解析結果とよく一致した。
2. 観測できるオーロラ発生確率は強い地殻磁場に囲まれた小さなパッチ状の領域に集まりやすかった。弱い地殻磁場の場所では、極域、もしくは地殻磁場の最も強い場所の西側(経度 0° – 130° , 緯度 60°S – 75°S)で発生しやすかった。地殻磁場の強い場所、弱い場所、全球でのオーロラ発生率は、それぞれ1.81%, 0.35%, 0.77% (モデル)、 1.55%, 0.51%, 0.78% (MAVEN IUVS)だった。

5. Summary and Conclusions

主要な結果

3. 地殻磁場の強い場所でオーロラが発生しやすい理由は、磁場の収束により電子のエネルギーフラックスが増加するためだった。
4. オーロラ発生率は宇宙天気イベント時に増加することがわかった。増加は、特に地殻磁場の弱い場所で顕著だった。2017年9月13日のICMEイベントでは、オーロラ発生率は地殻磁場の強い場所、弱い場所、全球でそれぞれ5.76%, 9.39%, 8.30% だった。
5. この研究では、磁気圏に開いた磁力線を通して磁氣的に繋がっている電離圏でどこでもオーロラが起きると予測している。オーロラ発生確率は全球平均で~20 %程度ある。しかし、装置の感度を考慮すると、オーロラ発生確率は全球平均で0.77% にまで落ちる。
6. この研究のモデルのオーロラ発生予測と、MAVENとMEXの観測データは概ねよく一致した。
7. 本研究の結果は、磁力線が垂直に近いことがオーロラの発生を決める要因だという説明を支持しない。
8. ディスクリート電子オーロラは、以前考えられていたようにカスプのような過程で夜側シースの電子が火星に直接降り込んでくることで発生するのではなさそう。MHDモデル的視点では、昼側の磁気圏から運ばれてきた夜側磁気圏の電子の離サイクリングがオーロラ発生に関係している。x