

## 修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科学研究科 情報・ネットワーク工学 専攻 博士前期課程		
氏 名	岡村 紀	学籍番号	1631023
論 文 題 目	磁気北極付近における大気光観測を用いた CME, CIR 発生に伴う極冠パッチに関する研究		
要 旨	<p>極冠パッチは、極冠域で観測される高電子密度領域であり、極冠域のプラズマ対流によって日照域プラズマを反太陽方向へと輸送することで発生するといわれている。また、極冠パッチの内部において電子密度が増大しているため、光学観測では 630.0 nm 大気光が増大した領域として観測される。それに加え、極冠パッチに伴うプラズマ密度の増大が原因となり、GPS 衛星による測位に数 m 程度の誤差が生じることが知られている。本研究では定常的な太陽風データと、磁気北極に近接しており、極夜の時期では MLAT/MLT 極座標系においてほぼ定点と考えられる場所での 24 時間連続観測が可能なカナダ・イウレカでの光学観測を組み合わせ、大量のイベントの解析を通じて CME, CIR, 静穏時の 3 つの太陽風のパターンと極冠パッチの性質を比較することで極冠パッチの発生要因を解明することを目的としている。本研究では、CME, CIR, 静穏時の 3 つのパターンにおける極冠パッチの性質を比較するために、イウレカでの観測開始日である 2015 年 10 月から 2017 年 2 月の冬季に観測された長期間のデータを用いて解析を行う。解析方法は、イウレカで観測されたデータを用いて、動画と全天画像の南北断面の時系列データであるケオグラムを作成し、目視による極冠パッチ検出を行い、その後、それぞれのイベントが CME, CIR, 静穏時のどのパターンであるのかを判別し、最後に比較を行う。本研究では、合計で 202 日分のデータを用いて 335 時間分の極冠パッチの検出を行なった。その結果、CIR 発生に伴う極冠パッチが 70 % を超えていることが判明した。これは極冠パッチの発生要因の大半が CIR であることを示しており、これまでの研究では言及されていないことである。CIR は太陽の自転の周期である 27 日で回帰的に発生するため、その影響を事前に予測することが可能であることが知られている。よって、CIR 発生に伴う極冠パッチは予測することができると考えられる。また、CME、静穏時に伴う極冠パッチはそれに伴う IMF の変動が CIR 発生時とは異なるため、形状、流れ方が CIR 発生時とは異なることも明らかになった。以上より、これまでの研究では議論されていなかった CME, CIR, 静穏時における極冠パッチの性質を明らかにすることができ、多くの極冠パッチは発生予測が可能であることが判明した。</p>		

# 平成 29 年度修士論文

磁気北極付近における大気光観測を用いた  
CME, CIR 発生に伴う極冠パッチに関する研究

電気通信大学大学院 情報理工学研究科  
情報ネットワーク工学専攻

1631023

岡村 紀

指導教官 細川 敬祐 准教授

副指導教官 富澤 一郎 准教授

提出日 2018 年 1 月 29 日

## 概要

極冠パッチは、極冠域で観測される高電子密度領域であり、極冠域のプラズマ対流によって日照域プラズマを反太陽方向へと輸送することで発生するといわれている。また、極冠パッチの内部において電子密度が増大しているため、光学観測では 630.0 nm 大気光が増大した領域として観測される。それに加え、極冠パッチに伴うプラズマ密度の増大が原因となり、GPS 衛星による測位に数 m 程度の誤差が生じることが知られている。本研究では定常的な太陽風データと、磁気北極に近接しており、極夜の時期では MLAT/MLT 極座標系においてほぼ定点と考えられる場所での 24 時間連続観測が可能なカナダ・イウレカでの光学観測を組み合わせ、大量のイベントの解析を通じて CME, CIR, 静穏時の 3 つの太陽風のパターンと極冠パッチの性質を比較することで極冠パッチの発生要因を解明することを目的としている。

本研究では、CME, CIR, 静穏時の 3 つのパターンにおける極冠パッチの性質を比較するために、イウレカでの観測開始日である 2015 年 10 月から 2017 年 2 月の冬季に観測された長期間のデータを用いて解析を行う。解析方法は、イウレカで観測されたデータを用いて、動画と全天画像の南北断面の時系列データであるケオグラムを作成し、目視による極冠パッチ検出を行い、その後、それぞれのイベントが CME, CIR, 静穏時のどのパターンであるのかを判別し、最後に比較を行う。本研究では、合計で 202 日分のデータを用いて 335 時間分の極冠パッチの検出を行なった。その結果、CIR 発生に伴う極冠パッチが 70 % を超えていることが判明した。これは極冠パッチの発生要因の大半が CIR であることを示しており、これまでの研究では言及されていないことである。CIR は太陽の自転の周期である 27 日で回帰的に発生するため、その影響を事前に予測することが可能であることが知られている。よって、CIR 発生に伴う極冠パッチは予測することができると考えられる。また、CME、静穏時に伴う極冠パッチはそれに伴う IMF の変動が CIR 発生時とは異なるため、形状、流れ方が CIR 発生時とは異なることも明らかになった。

以上より、これまでの研究では議論されていなかった CME, CIR, 静穏時における極冠パッチの性質を明らかにすることができ、多くの極冠パッチは発生予測が可能であることが判明した。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>研究背景</b>	<b>3</b>
1.1	電離圏	3
1.2	惑星間空間磁場 (IMF : Interplanetary Magnetic Field)	4
1.3	太陽フレアと太陽活動期	4
1.4	コロナ質量放出 (CME: Coronal Mass Ejection)	5
1.5	共回転相互作用領域 (CIR: Co-rotating Interaction Region)	6
1.6	極冠域	8
1.7	極冠電離圏プラズマ対流	8
1.8	日照日陰境界線 (Terminator) とプラズマの輸送	10
1.9	電離舌 (TOI: Tongue Of Ionization)	11
1.10	極冠パッチ	12
1.11	先行研究	13
1.11.1	CME 発生に伴う極冠パッチ	13
1.12	研究目的	16
<b>第2章</b>	<b>観測機器</b>	<b>17</b>
2.1	高感度全天大気光イメージャ (OMTIs)	17
2.2	ACE 衛星	17
2.3	OMNI データ	19
2.4	SuperDARN	19
<b>第3章</b>	<b>解析手法</b>	<b>20</b>
3.1	極冠パッチの検出	20
<b>第4章</b>	<b>解析結果</b>	<b>22</b>
4.1	イウレカとレゾリュートベイの観測の差異	22
4.2	極冠パッチのリスト化	23
4.3	シーズン別の極冠パッチの性質	26
4.3.1	極冠パッチの長期間変動: 観測年度別の解析	26

	2
4.3.2 極冠パッチの短期的性質: 月別の解析 . . . . .	29
<b>第5章 考察</b>	<b>39</b>
5.1 極冠パッチの発生条件 . . . . .	39
5.1.1 CIR 発生に伴う極冠パッチの性質 . . . . .	39
5.1.2 静穏時における極冠パッチの性質 . . . . .	41
5.1.3 CME 発生に伴う極冠パッチの性質 . . . . .	42
5.1.4 極冠パッチの発生要因、発生予測に関するまとめ . . . . .	42
5.2 極冠パッチの形状・速度の決定要因 . . . . .	43
5.2.1 CIR 発生に伴う極冠パッチの性質 . . . . .	43
5.2.2 静穏時における極冠パッチの性質 . . . . .	48
5.2.3 CME 発生に伴う極冠パッチの性質 . . . . .	50
5.2.4 発生要因別の極冠パッチの形状、速度に関するまとめ . . . . .	52
<b>第6章 結論</b>	<b>53</b>
<b>謝辞</b>	<b>55</b>

# 第1章 研究背景

## 1.1 電離圏

電離圏とは太陽の極端紫外線の影響により中性大気が部分的に電離されてプラズマ状態になっている領域である。電離圏は特徴が異なる D 領域、E 領域、F 領域の 3 つの層に分かれており、D 領域は高度 70 - 85 km , E 領域は高度 85 - 160 km , F 領域は高度 160 - 500 km の範囲で層が形成されている。図 1.1 は電離圏の電子密度と中性大気の高度プロファイルである。白い点線は昼間の高度プロファイル、黒い線は夜間の高度プロファイルを示している。本研究の研究領域である電離圏 F 領域は太陽極端紫外線により酸素原子が電離してできたもので、イオンの主成分は酸素原子イオンである。電子密度は  $1 \text{ cm}^3$  当り  $10^5 - 10^6$  個程度で、高度 200 - 300 km の間で最大となる。F 層の高高度領域において夜間の電子密度減少は他の領域に比べて少なく、短波の長距離無線通信はこの領域の伝搬を利用する。F 領域の電子密度は太陽活動サイクルで大きく変わり、また磁気嵐に伴って発生する電離圏嵐のように、一時的な擾乱によっても大きく変化する。

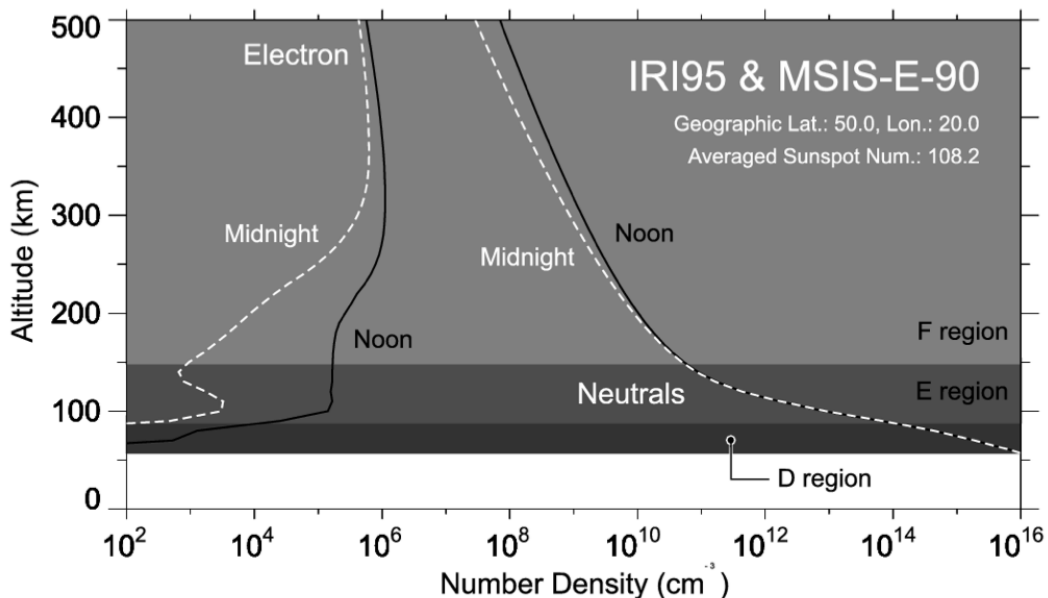


図 1.1: IRI95, MSIS-E-90 モデルによる電離圏の電子密度と中性大気の高高度プロファイル (白い点線: 昼間の高高度プロファイル, 黒い点線: 夜間の高高度プロファイル)。

## 1.2 惑星間空間磁場 (IMF : Interplanetary Magnetic Field)

太陽風とは太陽から磁場を伴ったプラズマが放出される現象である。太陽風の平均速度は 400 km/s で、速い時には 1000 km/s を超える場合もある。太陽風に伴って放出される磁場を惑星間空間磁場 (IMF : Interplanetary Magnetic Field) と呼ぶ。IMF は地球の固有磁場と相互作用し、オーロラなどの超高層大気現象を生じさせる。特に太陽活動が活発化したときに放出された強い IMF は地球近傍の宇宙環境を激しく乱し、より明るいオーロラや極冠パッチを引き起こす。IMF は太陽と地球の間にある ACE 衛星によって、Geocentric Solar Magnetospheric (GSM) 座標系における x 成分 ( $B_x$ ), y 成分 ( $B_y$ ), z 成分 ( $B_z$ ) の 3 つの成分に分けて観測される。(図 1.2 参照)

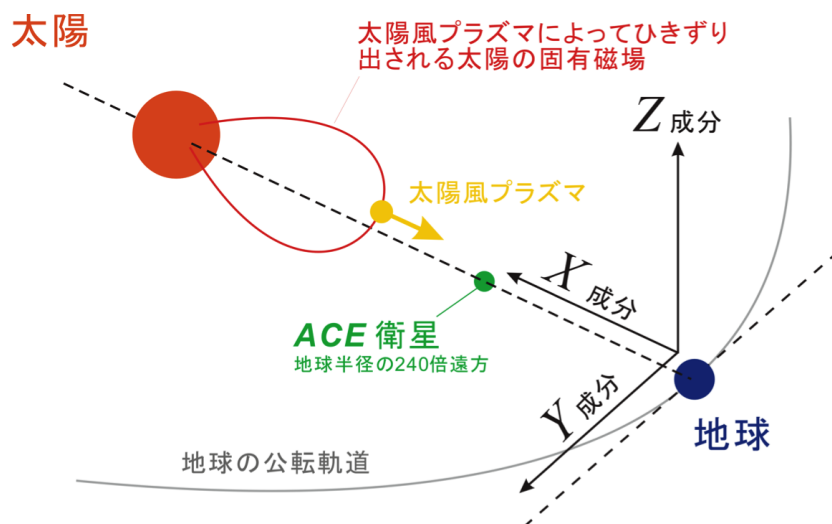


図 1.2: GSM 座標系と太陽、地球、ACE 衛星の位置関係.

## 1.3 太陽フレアと太陽活動期

太陽フレアとは、太陽表面の黒点付近で起こる爆発現象である。太陽フレアは太陽の黒点の活動と大きな関係があり、太陽活動の極大期には大黒点や黒点群の近くで毎日のようにフレアが起き、極小期には起きにくい。太陽フレアはコロナ磁場に蓄えられた磁気エネルギーが、磁気リコネクションにより熱エネルギーや運動エネルギーに変換されて起きると考えられている。磁気リコネクションとは逆向きの磁力線同士がぶつかり、磁力線のつなぎかえが起こる現象である (図 1.3 参照)。太陽フレアは放出される X 線の強度で大きい順に X, M, C, B, A の 5 つの等級に分類されている。例えば、C6 は C2 の 3 倍の強度であることを示し、X クラスは例外的に 10 以上の数値で表される。太陽フレアは日常的に発生しており、1 年間では C クラスが数 100 回、M クラスが数 10 回、X クラスは数回程度発生してい

る。太陽フレアが起きると電子や陽子などの電気をおびた荷電粒子や惑星間空間磁場が放出され、地球近くの宇宙空間に影響を与える。図 1.4 は、太陽の黒点数と太陽活動度の変化を示している。太陽黒点数は約 11 年周期で変化しており、それに伴い地球の磁場も周期的に変化している。

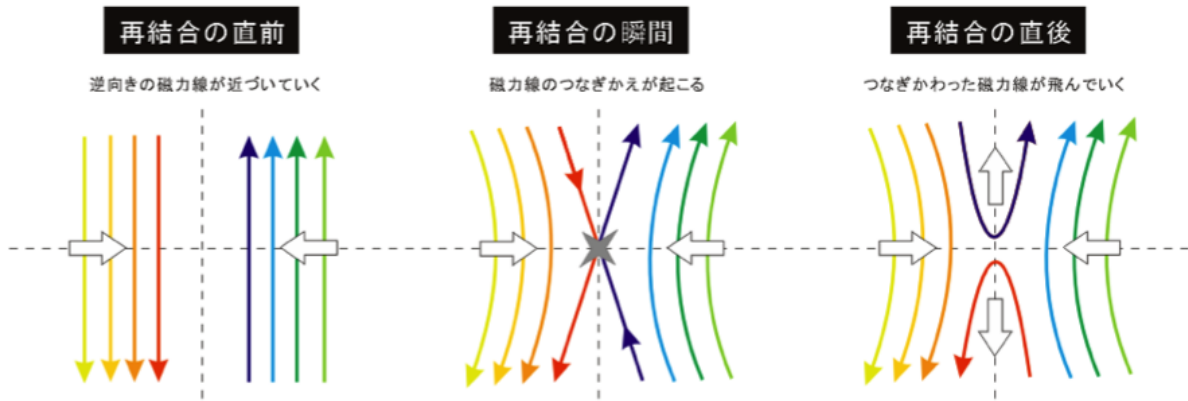


図 1.3: 磁気リコネクションのプロセスの模式図.

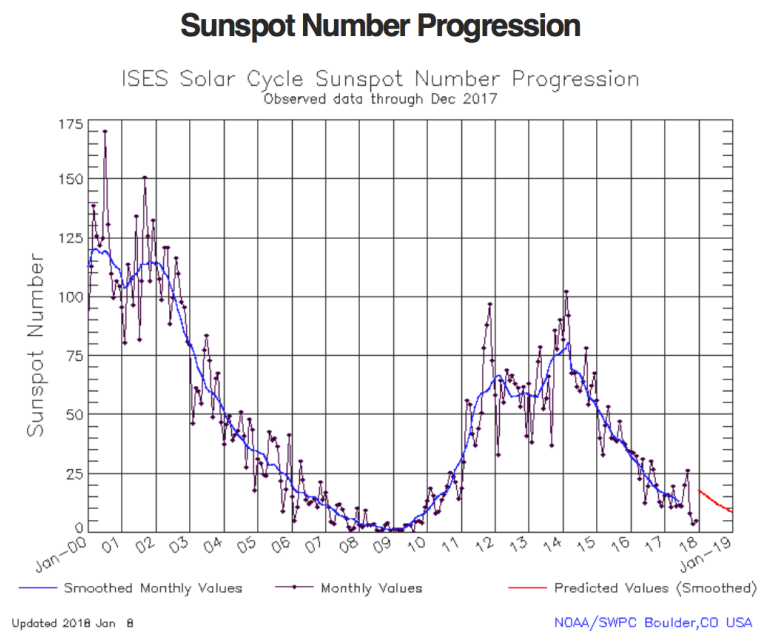


図 1.4: 太陽の黒点数と太陽活動度、縦軸: 太陽の黒点数、横軸: 2000 年から 2018 年 (<http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>).

## 1.4 コロナ質量放出 (CME: Coronal Mass Ejection)

コロナ質量放出 (CME : Coronal Mass Ejection) は太陽フレアに伴い太陽コロナのプラズマが大量に惑星間空間へと放出される現象である。図 1.5 の左側は CME の発生模式図



と、CME 発生に伴う太陽風パラメータの変動を表している。CME は巨大な磁気嵐の発生要因として知られている大規模な擾乱現象である。CME の発生要因は磁場が歪むことによる蓄積されたエネルギーの爆発的な解放であると考えられているが、発生メカニズムは解明されていない。CME の前面では衝撃波が形成され、この衝撃波のシース領域と CME 内部では、密度・速度・磁場強度が増加しており、地球近傍の超高層大気に擾乱を引き起こす。また、CME は内部に磁気ロープ構造 (磁気雲: Magnetic Cloud) を含んでいる場合が多く、Magnetic Cloud 内の磁場は値は大きいに変動は比較的小さいことが知られている (図 1.5 の  $B_i$  参照)。CME は瞬間的な現象であり、時間スケールは数分から数時間である。また、CME は突発的に発生するため発生頻度について未解明であることに加え、回帰性の擾乱とは関係ないと考えられている。しかし、太陽表面の特定の活動領域において CME が頻繁に発生する場合、CME 起源の擾乱が回帰的に発生することがある。

## 1.5 共回転相互作用領域 (CIR: Co-rotating Interaction Region)

CME の他に地球近傍の超高層大気に影響を及ぼす現象としてコロナホール起源の高速太陽風がある。コロナホールでは、太陽の磁場が他の太陽表面と比較して弱く、開いた磁場の構造をしている。この領域では周囲と比較してコロナのプラズマ密度が低いため、紫外線・X 線を用いた観測では暗く見える。このコロナホール起源の高速太陽風はそれに先行する低速太陽風と相互作用し、共回転相互作用領域 (CIR: Co-rotating Interaction Region) を形成する。CIR 内部では低速太陽風が高速太陽風に圧縮されることにより密度・温度・磁場強度が増加しているため、地球近傍の超高層大気に擾乱を引き起こす要因となる。また、CIR は太陽自転周期である約 27 日周期で同じ領域に存在するコロナホールが地球の方向へ向けることにより、回帰性の擾乱を引き起こす。図 1.5 の右側は CIR の発生模式図と CIR 発生に伴う太陽風パラメータの変動を表している。CIR は低速太陽風と高速太陽風の相互作用によって発生するため、先行する低速太陽風の部分が圧縮され密度が高くなり、ときには  $100 \text{ cc}^{-1}$  を超えることもあるが、圧縮された低速太陽風の後方でドロップする (図 1.5 N)。磁場強度は CME の時ほど増加はせず、20 nT 程度であることに加え、緩やかに変化していくことがわかる (図 1.5  $B_i$ )。また、図 1.5 中の  $B_i$  で示されている磁場の成分に着目すると、CME 発生時には見られない激しい変動があることがわかる。この激しい磁場成分の変動が CME の時には見られないような影響を超高層大気に及ぼすと考えられている。

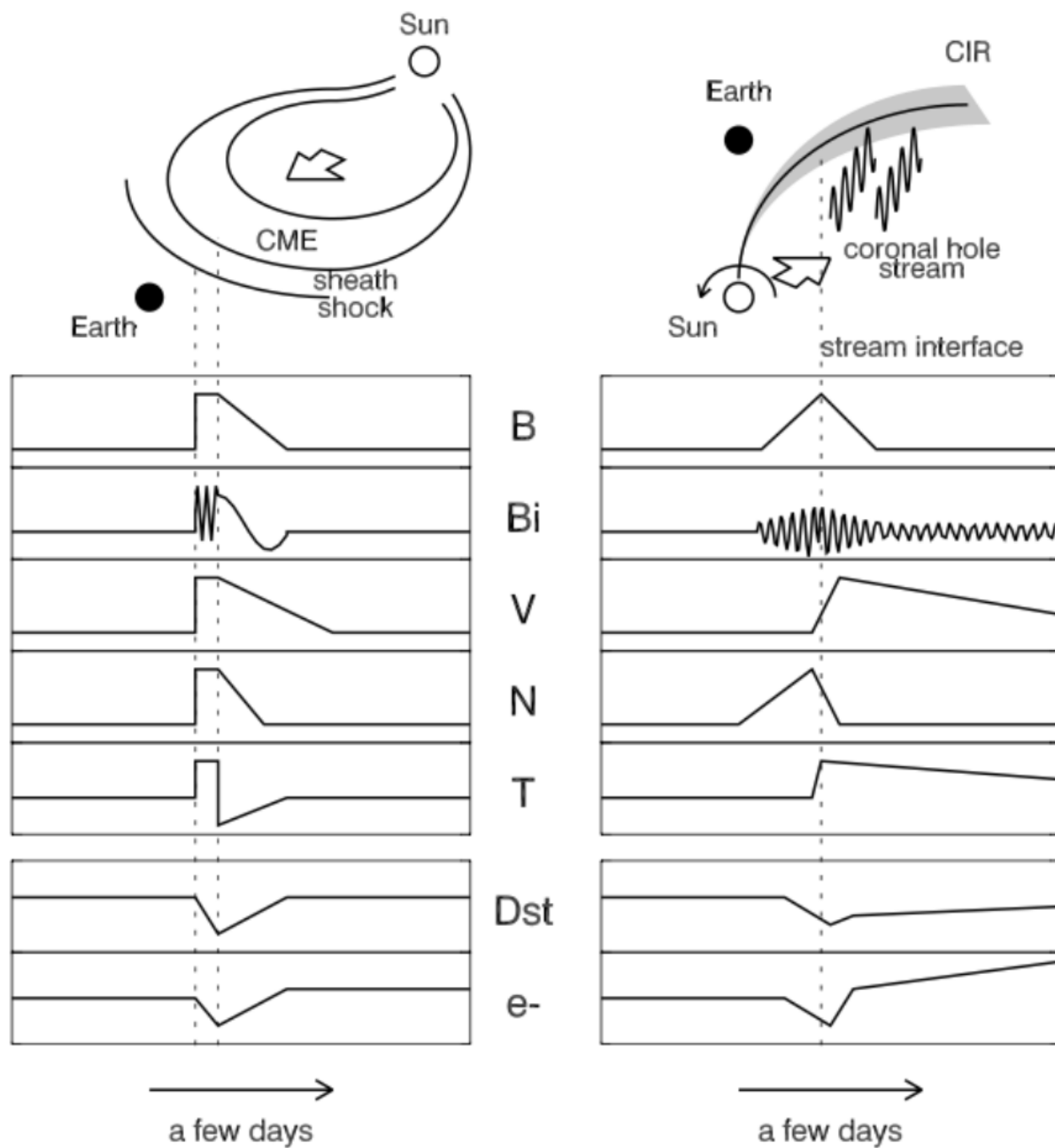


図 1.5: CME, CIR 発生の模式図とそれに伴うパラメータの変動 (左側: CME, 右側: CIR), 上から磁場強度, 磁場成分, 太陽風の数密度, 太陽風の速度, 太陽風の温度, DST 指数, 電子束 [1].

## 1.6 極冠域

図 1.6 において Polar Cap と示されている領域が極冠域である。磁気緯度で表すと、北半球では磁気緯度 75 度以上の高緯度領域である。冬季には、高緯度であるため日照が届かず、日照によるプラズマ生成が行えないため、極冠域の電子密度が非常に低いことが知られている。図中の Aurora Oval で示される領域が一般的に肉眼で見えるオーロラが現れる領域である。極域では、オーロラ以外にも様々な超高層大気現象が発生している。その一つに本研究の対象である極冠パッチがある。

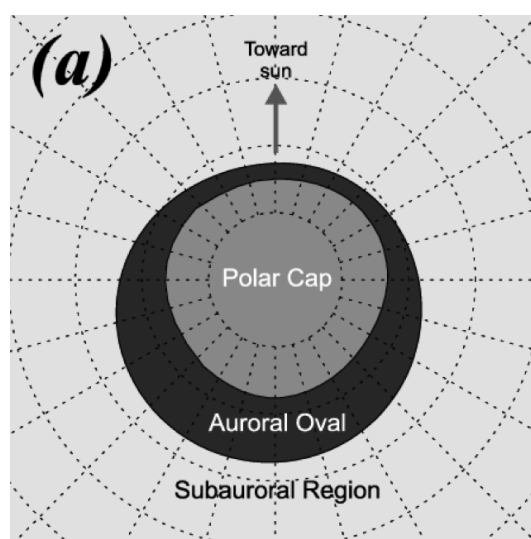


図 1.6: 極冠域を宇宙から見下ろした模式図, 中心に磁気緯度 90 度であり、図中の点線は 10 度毎の緯度を示している。

## 1.7 極冠電離圏プラズマ対流

極域電離圏では低・中緯度よりも速いプラズマの対流が存在し、これを極冠電離圏プラズマ対流と呼ぶ。この対流の向きは電子とイオンの動きで、速度は磁場と電場の強さで決まる。イオン速度  $\mathbf{v}$  は次の式で導ける。

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} \quad (1.1)$$

電場と磁場の外積、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  によって対流の向きが決定され、この運動を  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフトと呼ぶ。下の図 1.7 は北極を上空から見た図であり、上が昼側、下が夜側を示している。この図では、中央に分布する電場と、紙面を貫く向きに生じている地球磁場により、対流の向きは紙面下向きの反太陽方向になる。また、プラズマ対流は夜側において太陽方向へと向きを変え、朝夕の低緯度側を通過し、昼側に戻るような流れとなっている。この流れにより、日

照域で生成された高密度プラズマは極冠域を横断しながら夜側へと輸送される。このように電離圏プラズマ対流の向きは地球磁場と地球の磁気圏から電離圏に投影される電場によって決定される。

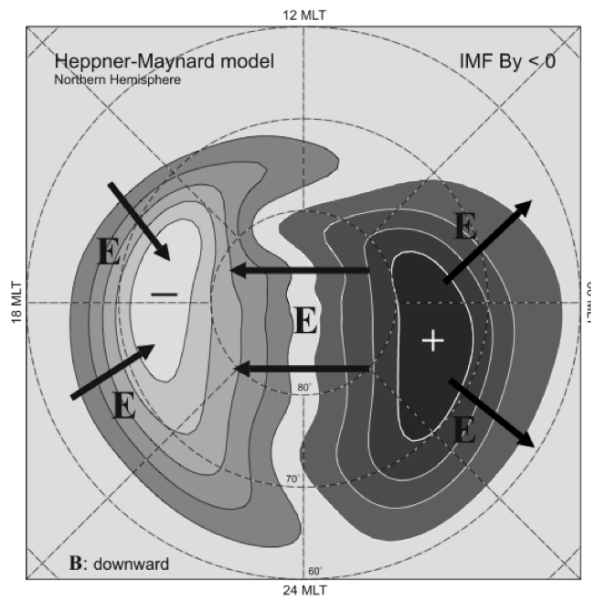


図 1.7: 極冠電離圏プラズマ対流のモデル [2].

また、電離圏プラズマ対流は IMF と関係しており、IMF の変化が磁気圏を介して電離圏に伝わることでプラズマ対流が変化する。プラズマ対流の速さは IMF  $B_z$  成分に影響を受け、 $B_z$  成分が南向きに強くなるほどプラズマ対流の速度は速くなると考えられている。また、プラズマ対流の形状は IMF  $B_y$  成分に影響を受け、 $B_y$  成分の正負に応じてそれぞれ図 1.8 の (a), (b) のように形状が変化すると考えられている。この形状の変化により、プラズマ対流が日照域高密度プラズマを極冠域に取り込む経路が大きく変化する。

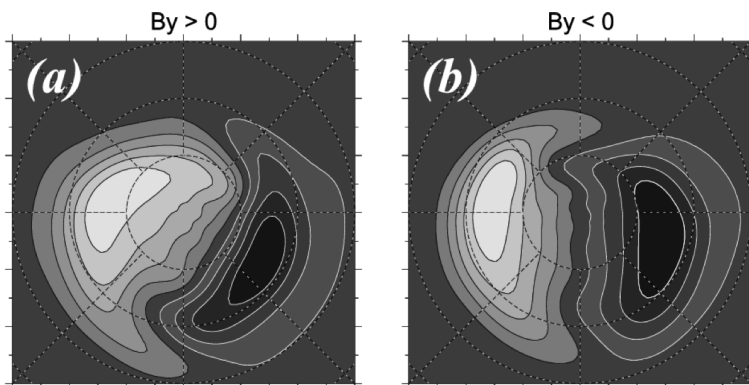


図 1.8:  $B_y$  の正負より変化する電離圏プラズマ対流モデル。黒い部分が正のポテンシャル、白い部分が負のポテンシャルを示す。(a) IMF  $B_y > 0$  時の電離圏プラズマ対流モデル。(b) IMF  $B_y < 0$  時の電離圏プラズマ対流モデル [2].

## 1.8 日照日陰境界線 (Terminator) とプラズマの輸送

地球の双極子磁場は地球の自転軸に対して約 11.2 度傾いているため、地理極と磁極の位置にはオフセットが存在している。そのため、極付近では世界時 (Universal Time) によって決まる Terminator (日照域と日陰域の境界線) と磁極の位置関係が時刻によって大きく変化する。また、電離圏プラズマ対流と Terminator との位置関係により日照域プラズマを反太陽方向へと輸送することが出来る。図 1.9 は電離圏プラズマ対流のセルの大きさと、Terminator との位置関係を場合分けしたものである。例えば、Terminator が磁極に近い場合、電離圏プラズマ対流のセルがある程度の大きさであれば、日照域のプラズマを夜側へ輸送することができる。しかし、Terminator が磁極から遠い場合、電離圏プラズマ対流のセルがいかに大きくとも、日照域のプラズマを夜側へ輸送できない。よって、図 1.9 においては A の場合が最も日照域プラズマを取り込みやすい状態であり、D の場合が最も日照域プラズマを取り込みにくい状態である。

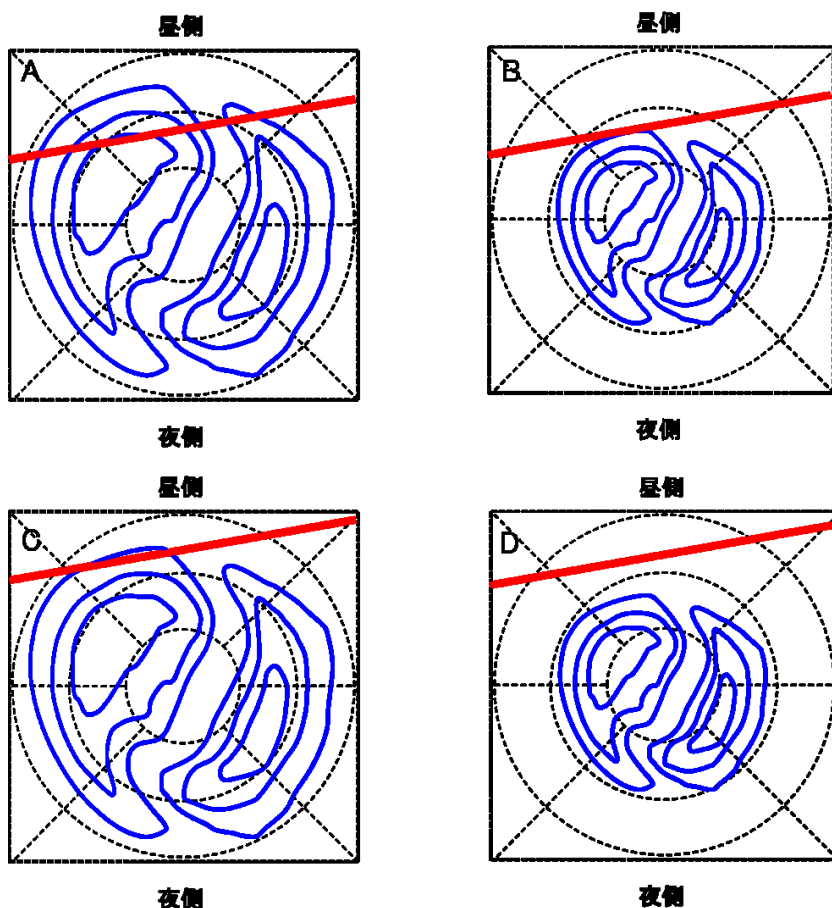


図 1.9: 電離圏プラズマ対流のセルの大きさと Terminator との位置関係 (a: 対流セル大、Terminator 近, b: 対流セル大、Terminator 遠, c: 対流セル小、Terminator 近, d: 対流セル小、Terminator 遠).

## 1.9 電離舌 (TOI: Tongue Of Ionization)

電離舌とは、昼間側の高密度プラズマが極冠域上空を流れる極冠電離圏プラズマ対流によって極冠域へ輸送されることで発生する、舌のように細長い形状の高密度プラズマ領域である。前述のように、IMF が南向きの場合、極冠には2セルの対流構造が現れ、特に昼間側カスプ領域（磁気圏からの影響を受けやすい領域）近傍では、磁気圏界面で起こる磁気リコネクションの影響によって反太陽方向への対流が強まっている。この部分是对流の吸入口という意味でスロート領域と呼ばれている。スロートにおいて強まった反太陽方向プラズマ対流が、太陽からの極紫外線（EUV）放射により昼間側の中性大気が電離させられることで生成される日照域高密度プラズマを極冠域に輸送することで、電離舌が形成されている。電離舌の輝度は数百 Rayleigh 程度であり、波長 630.0 nm の赤色大気光を放出することから全天大気光イメージャにより観測が可能である。図 1.10 は全天大気光イメージャで観測した TOI の一例であり、白色で示される明るい領域が上の日照域から極冠域を通過し、反太陽方向へと伸びていることがわかる。図 1.11 は電波観測によって電離舌を観測した一例である。赤色で示される高密度プラズマ領域が、左上の日照領域から極冠を通過し、夜側まで伸びていることがわかる。

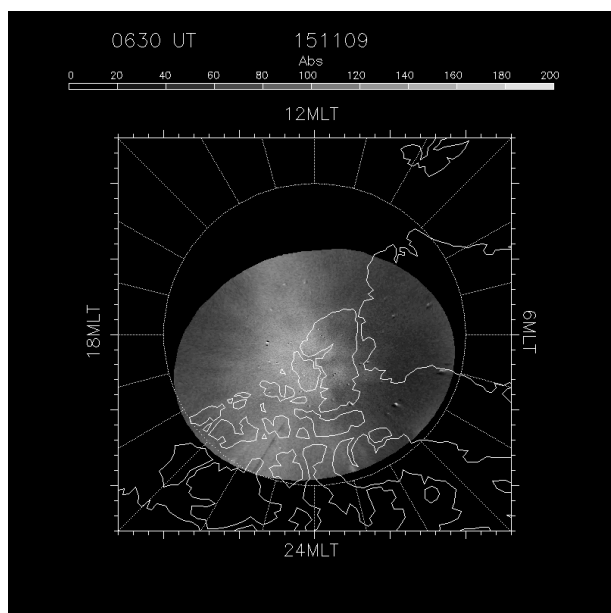


図 1.10: 全天大気光イメージャで観測された TOI.

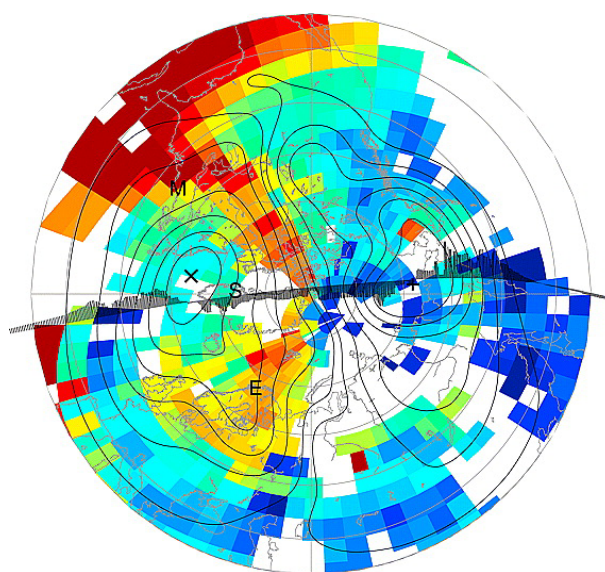


図 1.11: GPS やレーダーなどの電波観測に見られる TOI[3].

## 1.10 極冠パッチ

高度 200 km 以上の極冠域電離圏 F 領域で観測される局所的に電子密度が増大した領域を極冠パッチと呼ぶ [4]。極冠パッチは昼間側で太陽からの極端紫外線 (EUV) 放射により電離された日照域高密度プラズマが、極冠域上空を流れるプラズマ対流により、昼側から夜側へと輸送されることによって生じると考えられている。よって、極冠パッチはプラズマ対流が形成される南向き IMF の時間帯で発生することが知られている。そのため、極冠パッチの生成には日照域プラズマとプラズマ対流の双方が起因していると言われている [5]。また、極冠パッチ内部の電子密度は極冠電離圏の背景電子密度の約 2 - 10 倍に達すると考えられている。そのため、極冠域電離圏の背景電子密度が高くなる夏季には観測されず、冬季のみ観測される。極冠パッチ内部の電子密度の増大が顕著である場合、GPS 衛星による測位精度に数 m 程度の誤差を及ぼし、極冠域を通る飛行機の現在位置に誤差が生じることが知られている。また、極冠パッチは水平方向に数 100 - 1000 km 程度の空間スケールを持ち、高度方向にも数 100 km の空間スケールを持つ。図 1.12 はパッチの生成メカニズムの模式図であり、日照域で生成された高密度プラズマ (白い領域) が極冠域上空を流れるプラズマ対流に取り込まれ、反太陽方向へと伝搬している様子を表したものである。

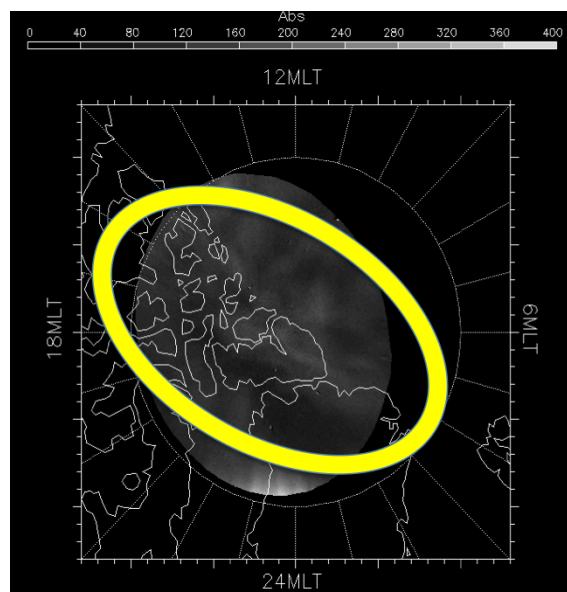
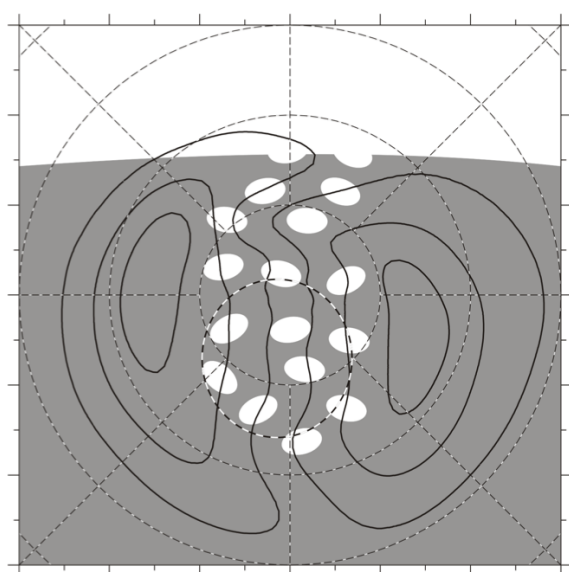
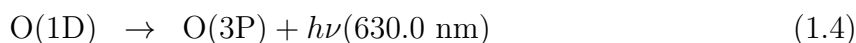
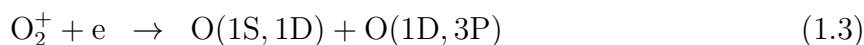


図 1.12: パッチの生成メカニズムの模式図. 図 1.13: 光学観測を用いた極冠パッチの観測例.

極冠パッチの発光は式 (1.2), (1.3) で示す  $O^+$  の解離再結合により生じた励起状態の酸素原子が式 (1.4) で示すエネルギーの低い状態に遷移する過程で余剰なエネルギーを光として放出することで生じる [6]。



これらの3つの式より 630.0 nm 赤色大気光は酸素イオンと酸素分子の双方が多く分布している高度で発光することが分かる。また、極冠パッチの大気光の発光強度は数 100 R 程度であり、肉眼では捉えられない程小さいため、高感度大気光イメージャを用いて観測する。図 1.13 は光学観測を用いた極冠パッチの観測例である。この図において黄色の丸に囲まれた境域で白い靄のようなものが極冠パッチである。

## 1.11 先行研究

### 1.11.1 CME 発生に伴う極冠パッチ

Hosokawa et al. [2009] は磁気嵐の影響が到来している 2006 年 12 月 14 - 16 日に発生した TOI に関して、レゾリュートベイの高時間分解能の全天大気光イメージャによる観測データを用いた 2 次元マップを作成し、DMSP 衛星で観測したデータと組み合わせることで、TOI の急激な時間変化と詳細な空間構造の解明を行った [7]。Hosokawa et al. [2010] はこれに、太陽風、GPS 全電子数、SuperDARN、NOAA POES 衛星の観測データを加えることで、「TOI は何に依存して出現するのか」、「TOI の動きは何によって制御されているのか」についての検証を行った [8]。図 1.14 は 2006 年 12 月 15 日に観測された TOI を表しており、白い領域が図中の上から下方向の反太陽方向へと伸びているのが確認できる。また、図 1.15 は 2006 年 12 月 14, 15 日の IMF のデータを表しており上から順に IMF の大きさ、IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$  である。縦軸がそれぞれのパラメータの大きさ、横軸が時間を表しており、灰色で囲まれた時間帯で TOI が観測されている。この研究では、TOI の出現には以下の 2 点が深く関与していることを示している。

1. 巨大な IMF  $B_z$  による高緯度プラズマ対流の拡大に伴う極冠域の拡大
2. 強い IMF  $B_z$  が継続することにより発生する電離圏正相嵐に伴う低緯度日照ソースプラズマの増大

これらの要素は大きな IMF  $B_z$  の維持により発生しているので、CME 発生に伴う安定的な強い IMF  $B_z$  の状態が TOI を形成する重要な要因であることを示している。図 1.16 は磁気嵐発生に伴うプラズマ対流の拡大を示しており、それに伴い赤い円で囲まれた極冠域が



拡大していることがわかる。このように、極冠域が拡大した場合、低緯度日照域ソースプラズマを極冠域に TOI として取り込むことが可能である。また、通常カスプ付近の IMF  $B_y$ ,  $B_z$  の変動に伴うプラズマ対流の急激な変化によって TOI は分断され、極冠パッチが発生する。しかし、TOI 発生期間中に IMF  $B_y$ , IMF  $B_z$  の双方が正負のいずれかで安定している場合、プラズマ対流の大きさ、形状が変化しない為、TOI が分断されず極冠パッチが発生しない。今回のイベントにおいて図 1.15 の b, c を参照すると、TOI 発生期間中は CME 発生に伴う安定的な IMF  $B_y, B_z$  であり、これが TOI を分断せず極冠パッチを発生させなかった要因であることが示唆されている。

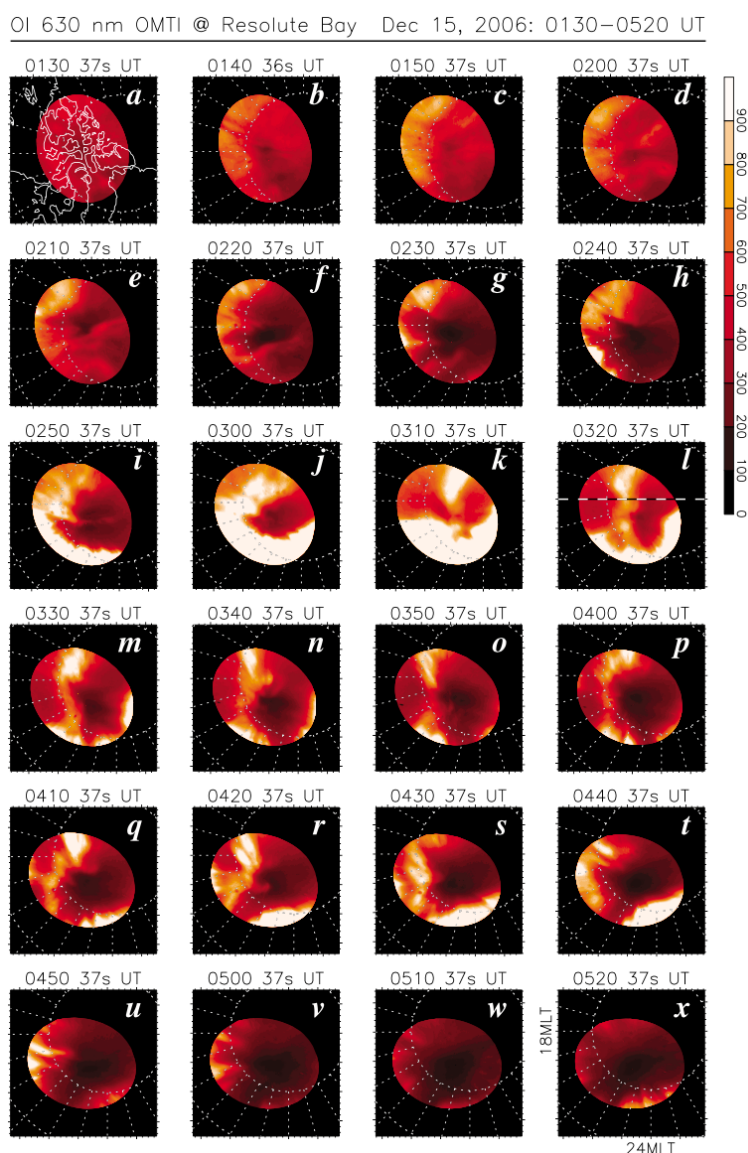


図 1.14: 2015 年 12 月 15 日 0130 - 0520 UT に観測された 630.0 nm 大気光の 10 分毎のデータ, カラースケールは Rayleigh 値を示している [8].

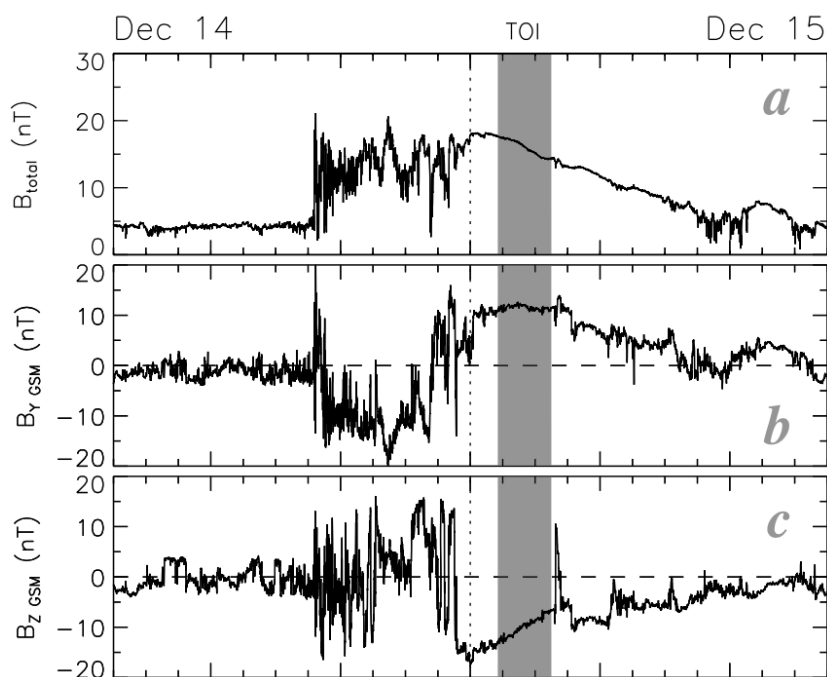


図 1.15: 2006 年 12 月 14 日, 15 日における IMF のパラメータ, 灰色で囲まれた領域は TOI が観測された時間, a: IMF の大きさ, b: IMF  $B_y$ , c: IMF  $B_z$  [8].

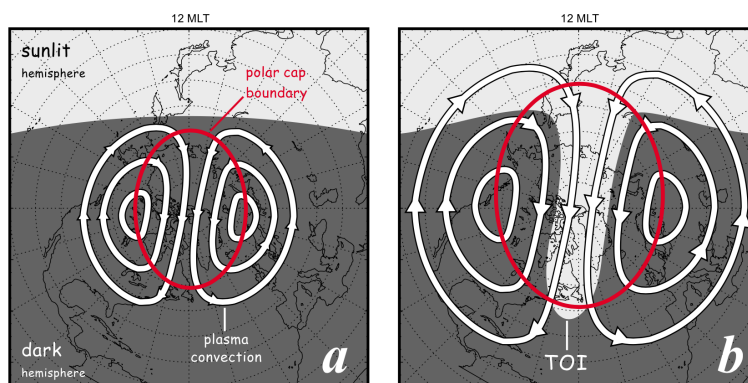


図 1.16: 磁気嵐発生に伴うプラズマ対流拡大の模式図 (a: 静穏時または適度な擾乱発生時, b: 磁気嵐発生), 赤い円で囲まれた領域は極冠域の境界線を示している [8].

## 1.12 研究目的

Hosokawa et al. [2010] では CME 発生に伴う TOI 研究であり [8]、過去に行われてきた極冠パッチの生成メカニズムに関する先行研究では CME, CIR との関係性については言及されていない [5]。それに加え、過去に CIR 発生に伴う極冠パッチの研究は行われていない。それは極冠パッチの生成メカニズムに関する研究が盛んにおこなわれていた 1990 年代以前では定常的な太陽風データが無く、CME, CIR の区別が出来なかったからである。このように、これまでの研究では CME や CIR といった強い太陽風の擾乱と極冠パッチの性質の関係性について十分に議論がされていなかった。また、光学観測による研究ではイベント解析は行われていたものの、大量のデータに基づいた統計解析は行われていなかった。それは従来の光学観測では、観測地点が磁気北極から 10 度近く低緯度側に位置していたため観測可能な時間帯が絞られることに加え、磁気北極を中心として見た場合、観測位置が移動し極冠パッチの観測頻度が低いことがあげられる。そこで、本研究は、定常的な太陽風データと、磁気北極に近接しており、極夜の時期には MLAT/MLT 極座標系においてほぼ定点と考えられる場所での 24 時間連続観測が可能なカナダ・イウレカでの光学観測を組み合わせ、大量のイベントの解析によって CME, CIR, 静穏時の 3 つの太陽風のパターンと極冠パッチの性質を比較することで、極冠パッチの発生要因を解明することを目的としている。

## 第2章 観測機器

### 2.1 高感度全天大気光イメージャ(OMTIs)

本研究では、2005年から継続しているカナダ・レゾリュートベイ (74.7°N, 265.0°E, 82.9°MLAT) における観測に加える形で、2015年の10月から磁気北極により近いイウレカ (80.5°N, 273.6°E, 88.5°MLAT) において、OMTIs (Optical Mesosphere Thermosphere Imagers) 全天大気光イメージャの観測を開始した。図2.1はレゾリュートベイ、イウレカの位置関係を示しており、図2.2は設置されたOMTIsを示したものである。2つのカメラは2分のサイクルで複数の分光フィルターを用いて異なる波長の光を別々に捉えることができる。本研究では赤い光 (波長 630.0 nm) の観測データを用いる。また、イウレカは磁気北極に近接しており、極夜の時期では MLAT/MLT 極座標系においてほぼ定点と考えられる場所での 24 時間連続観測が可能である。なお、用いた 630.0 nm の観測の露光時間は 30 秒である。

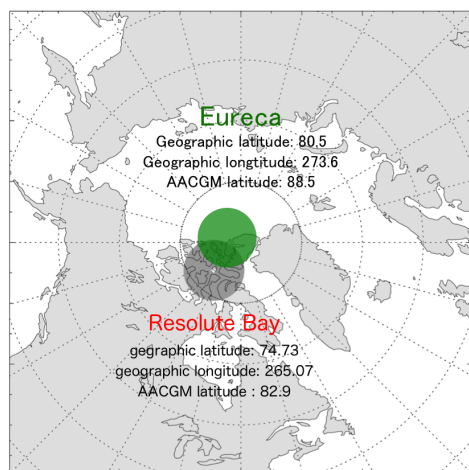


図 2.1: イウレカとレゾリュートベイの位置関係.

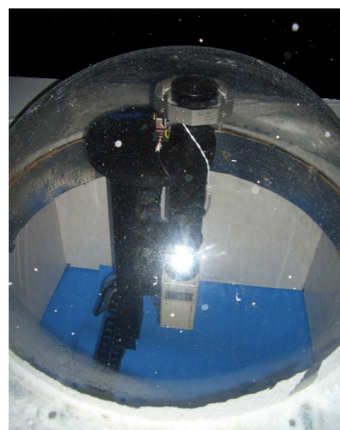


図 2.2: レゾリュートベイに設置された OMTIs 全天大気光撮像装置.

### 2.2 ACE 衛星

ACE (Advanced Composition Explorer) 衛星は太陽風や粒子の観測を目的として 1997 年 8 月 25 日に打ち上げられたアメリカ航空宇宙局 (NASA) の衛星である。ACE 衛星は太陽

と地球の引力が散り合うラグランジュ点付近のハロー軌道上で観測を行っている。ACE 衛星は地球から約 150 万 km 離れた場所に位置しているため、ラグランジュ点を通過した太陽風が地球に到達する 30 - 60 分前に太陽風のパラメータや太陽を起源とする高エネルギー粒子を観測する事が出来る。ACE 衛星は太陽風の速度、IMF の各成分の値、電子密度を観測しているが、本研究では太陽風の速度と IMF の各成分のデータを使用している。図 2.3 は ACE 衛星から得たデータをプロットしたものの一例となっている。

### ACE SOLAR WIND PARAMETER PLOT

06 Nov 2015

Original Parameters at Satellite Position

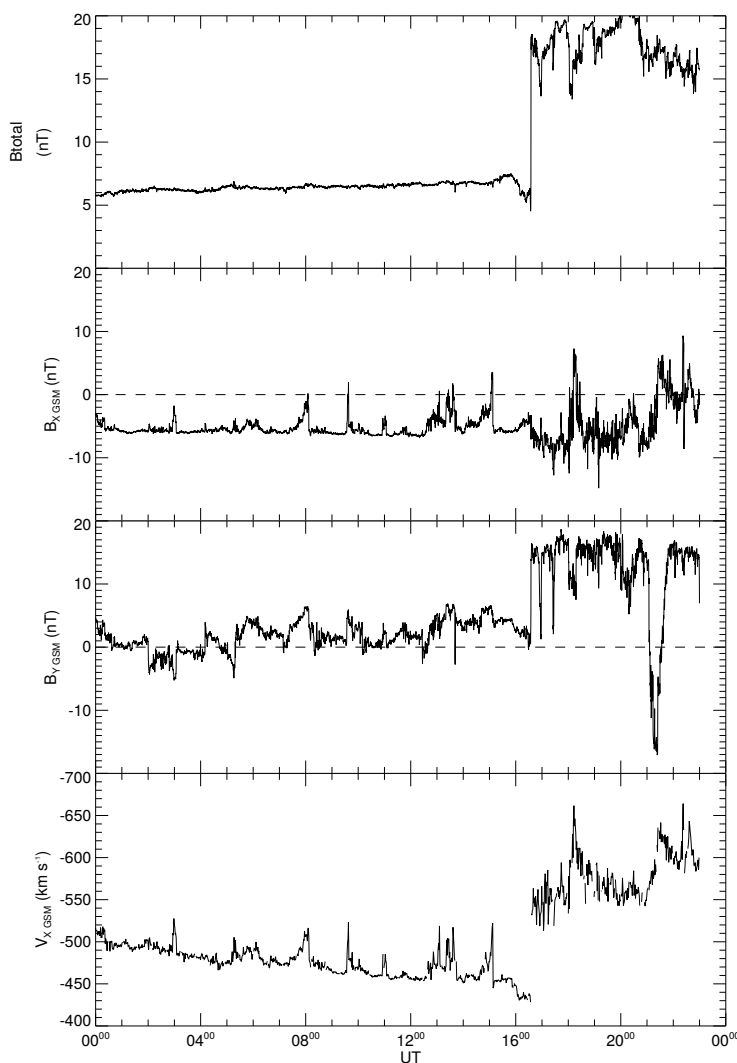


図 2.3: ACE 衛星から得られたデータプロットの例, 上から順に、IMF の大きさ、GSM 座標系における IMF の 2 つの成分 IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$ 、GSM 座標系の x 軸方向への太陽風の速度  $V_x$ 。

### 2.3 OMNI データ

太陽風の速度が 200 - 700 km/s であることから、ACE 衛星で観測した IMF が地球に到達するまでの時間は 30 分 - 60 分程度と予測できる。しかし、実際の到達時刻は太陽風の速度や波面の傾きによって変化するため、実到達時刻と予測到達時刻との誤差が生じる。OMNI データは ACE 衛星を含む複数の人工衛星の IMF のデータを基に太陽風波面の傾きを考慮し、地球の磁気圏先頭部である Bow shock で観測したデータとして時間補正したデータである。OMNI データを用いることで、実際の到達時間と計算した到達時間の誤差を小さくすることが可能になり、IMF と磁気圏・電離圏で起きている現象の応答時間をより正確に知ることができる。

### 2.4 SuperDARN

SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) は、両極域に電離圏・熱圏を観測できるレーダーを設置し、極域全体の電離圏の F 領域プラズマ対流を観測する国際共同プロジェクトである。下の図 2.4 は北極域の SuperDARN の観測視野を示した図である。HF 帯の電波を使用した干渉性レーダーネットワークによって、レーダーから射出した電波の散乱波を測定し、送信した電波に対する受信電波のパワースペクトル、ドップラーシフトの情報を得ることでプラズマ速度を観測している。各レーダーは、16 本の送信アンテナと 4 本の受信アンテナ、計 20 本のアンテナで構成され、16 の方向に電波を送信できる。ビームの幅は約 3.24 度で、観測レンジは 180 - 3555 km である。SuperDARN の観測データを用いて得られる極域電離圏プラズマ対流の例を図 2.5 に示す。カラスケールは赤いほどプラズマ対流の速度が速いことを表している。

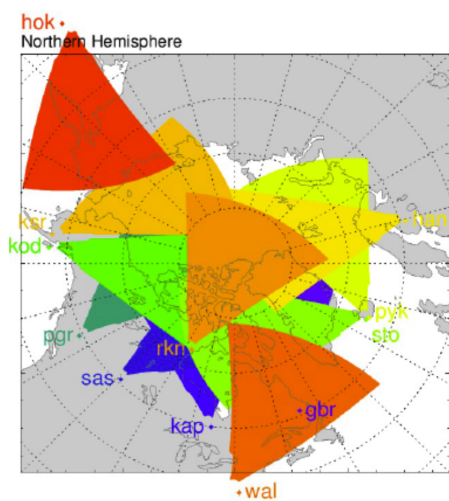


図 2.4: SuperDARN の観測視野。

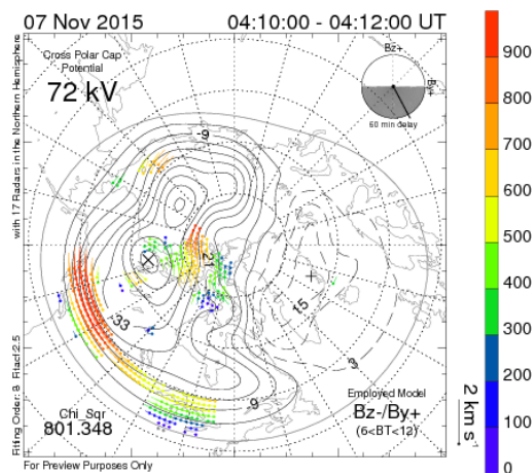


図 2.5: SuperDARN から得た極冠電離圏プラズマ対流のベクトル。

## 第3章 解析手法

本研究では CME, CIR, 静穏時の 3 つのパターンにおける極冠パッチの性質を比較するために、イウレカでの観測開始日である 2015 年 10 月から 2017 年 2 月の冬季に観測された長期間のデータを用いて解析を行う。

### 3.1 極冠パッチの検出

本研究では以下の手順で CME, CIR, 静穏時の極冠パッチの解析を行った。

1. イウレカで観測されたデータを用いて、動画と全天画像の南北断面の時系列データであるケオグラムを作成し、目視による極冠パッチ検出を行う。一例として、図 3.1 に実際に作成した 2015 年 12 月 8 日のケオグラムを示す。縦軸が南北断面、横軸が時間 (0000 - 2400 UT) となっており、カラーバーは白いほど発行強度が強いことを示している。また、図 3.1 は同日について作成した動画の一部となっており、宇宙から北極を見下ろすような座標系にイウレカから得たデータをプロットしたものである。この期間において、ケオグラム上の赤い四角で囲まれた領域において確認される白い筋が極冠パッチである。この構造は動画においても極冠パッチであることが確認できた (図 3.2 の左図参照)。また、青い四角で囲まれた領域において白い筋は確認できず、動画で確認しても極冠パッチは発生していなかった。(図 3.2 の右図参照)。このように、極冠パッチの検出はケオグラムと動画の双方で行う。この際、検出する項目は極冠パッチの発生日時、発生時間、形状、伝搬方向である。
2. 極冠パッチが検出された期間において OMNI データを解析することによって CME, CIR, 静穏時のいずれかを判別する。CIR と静穏時の判別については後程記述する。
3. CME, CIR, 静穏時に伴う極冠パッチの性質についての比較を行う。

以上の手順で目視による検出を行うことにより、正確に CME, CIR, 静穏時に伴う極冠パッチの検出を行うことが可能である。

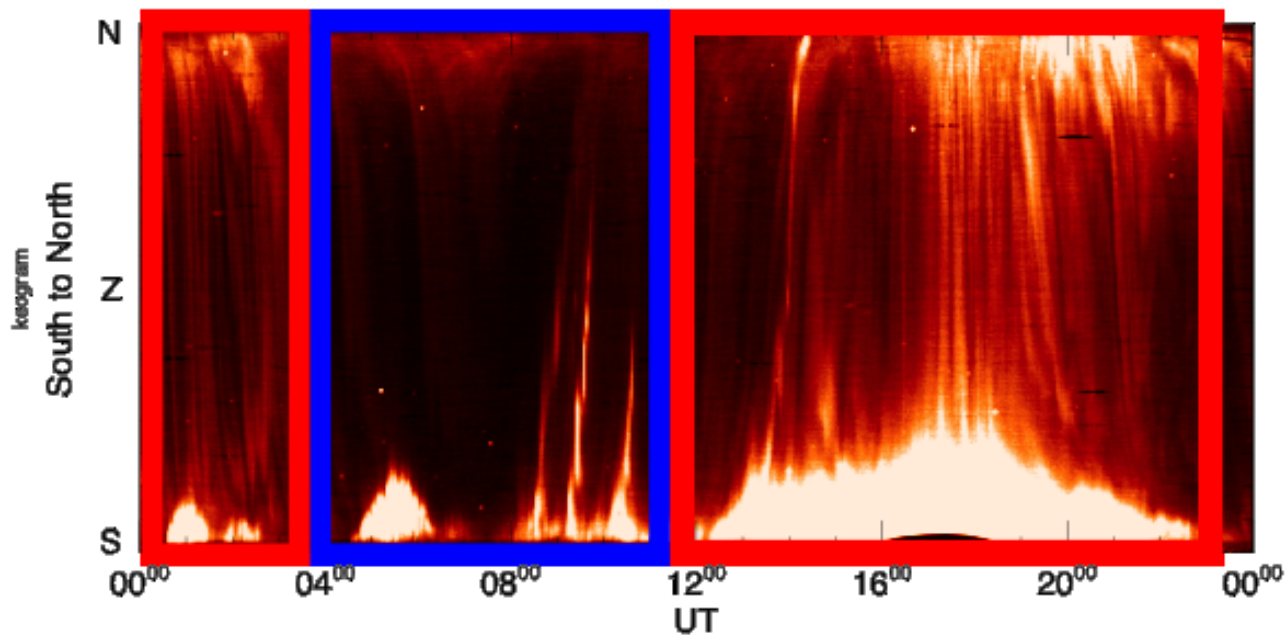


図 3.1: 2015 年 12 月 8 日 0000 - 2400 UT における南北断面のケオグラム, 赤枠: 極冠パッチが発生した時間帯 (白い筋が極冠パッチ), 青枠: 極冠パッチが発生していない時間帯.

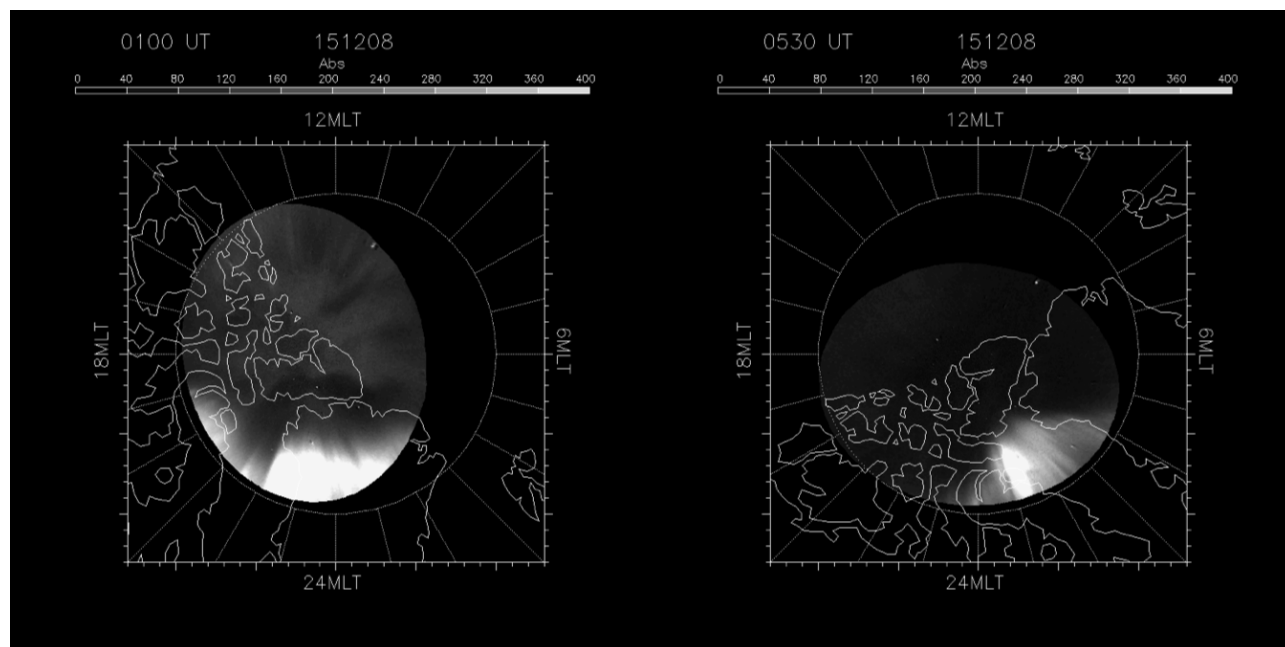


図 3.2: 宇宙から北極を見下ろすような座標系に 2015 年 12 月 8 日にイウレカで観測されたデータをオーバープロットしたもの, 左: 0100 UT, 右: 0530 UT .



## 第4章 解析結果

### 4.1 イウレカとレゾリュートベイの観測の差異

本研究では 2015 年 10 月から 2017 年 3 月までにイウレカで観測が行われていた 202 日分のデータを用いて目視により極冠パッチの検出を行なった。また、イウレカの方がレゾリュートベイよりも観測頻度が高いことを証明するために、同期間でレゾリュートベイでも極冠パッチの検出を行い、本研究の利点である観測頻度の比較を行なった。表 4.1 はイウレカとレゾリュートベイでの観測をまとめたものである。

表 4.1: 2015 年 10 月から 2017 年 3 月までのイウレカとレゾリュートベイの観測.

	極冠パッチの観測イベント数 (個)	極冠パッチの観測時間 (時間)
イウレカ	57	335
レゾリュートベイ	41	165

この表からイウレカでの観測とレゾリュートベイでの観測を比較すると、イウレカでの観測の方が極冠パッチの観測イベント数が約 1.3 倍多く、極冠パッチの観測時間は約 2 倍多いことがわかる。また、1 イベント当たりの極冠パッチの平均出現時間はイウレカは 5.9 時間、レゾリュートベイは 4.0 時間となっており、イウレカでの観測の方が長期間かつ長時間の極冠パッチの解析を行うことができる。この結果から、イウレカでの観測を用いることで従来の研究をはるかに上回る量の極冠パッチの検出を行うことが可能であることが示された。この差は、イウレカとレゾリュートベイの位置が原因であると考えられる。レゾリュートベイは 82.9° MLAT に位置し、オーロラが発生するオーロラオーバルに観測視野が含まれている。よってオーロラの発光が極冠パッチの検出の妨げになるため、極冠パッチの観測頻度は低くなる。それに加え、極冠パッチを観測できたとしても短時間のイベントが多い。一方、イウレカは 88.5° MLAT に位置しており、磁気北極を中心とする座標系では観測位置が固定されるため、極冠パッチの観測頻度が高くなると考えられる。それに加え、冬季においては 24 時間観測が可能な時間が存在するため、長時間のイベントもレゾリュートベイと比較して多く存在する。以上から、イウレカでの極冠パッチの観測は本研究を行う上で最も適したデータセットであると考えられることができる。

## 4.2 極冠パッチのリスト化

表 4.2, 4.3 は初年度観測期間 (2015 年 10 月 - 2016 年 2 月) と次年度観測期間 (2016 年 10 月 - 2017 年 2 月) にイウレカで検出した極冠パッチをまとめたものである。検出項目は極冠パッチの発生日、発生時間、CME, CIR, 静穏時の判別、極冠パッチの形状、流れ方である。形状は図 4.1 に基づいて行なった。図 4.1 は極冠パッチの形状のパターンの例を表しており、宇宙から北極域を見たマップにイウレカから得たデータをプロットしたものである。カラースケールは白いほど明るいことを示しており、(a) が棒状の極冠パッチ、(b) は TOI, (c) は不定形の極冠パッチの例を表している。「不定形」とは形がバラバラの状態を示す。また、CIR 発生期間中に発生した極冠パッチは以下の 2 つの基準のどちらかを満たしているなら CIR 発生に伴う極冠パッチ、満たしていないなら静穏時に発生する極冠パッチと判定した。

1. 太陽風の速度  $V_x > 450 \text{ km/s}$
2. IMF の大きさ IMF  $B_t > 7 \text{ nT}$

基準 1 は一般的にやや高速の太陽風と言われる値の境界であり、基準 2 は地球に影響を及ぼすほど強い IMF 値の境界となっている。以上の基準から作成した表 4.2 - 4.3 から 3 つことが判明した。1 つ目は、初年度解析期間と次年度解析期間のどちらにおいても CME 発生に伴う極冠パッチの検出例は少なく、最も多いのが CIR 発生に伴う極冠パッチだということである。地球に影響を与えるほどの M クラスの太陽フレアは年に数回しか発生せず、それに加え、イウレカでは日照の時間帯は観測を行なっておらず、天候が悪い状態の場合、極冠パッチを検出することができない。よって CME 発生に伴う極冠パッチは他の 2 つのパターンと比べて非常に検出例が少ないことが予想されていたが、この表でも同様の結果を得ることが出来た。CIR 発生に伴う極冠パッチが多いことについては次の章で議論を行う。2 つ目は、イベント数だけでみると、CIR と静穏時に差はないように見えるが、1 イベント当たりの静穏時に発生する極冠パッチの観測時間が、CIR 発生に伴う極冠パッチの観測時間の方よりも短い場合が多いことである。3 つ目は、初年度解析期間に検出した極冠パッチのイベント数は 40 例であり、次年度解析期間に検出した極冠パッチのイベント数は 17 例と、イベント数に大きな差が生じたことである。以上の 3 点についても次の章で議論を行う。

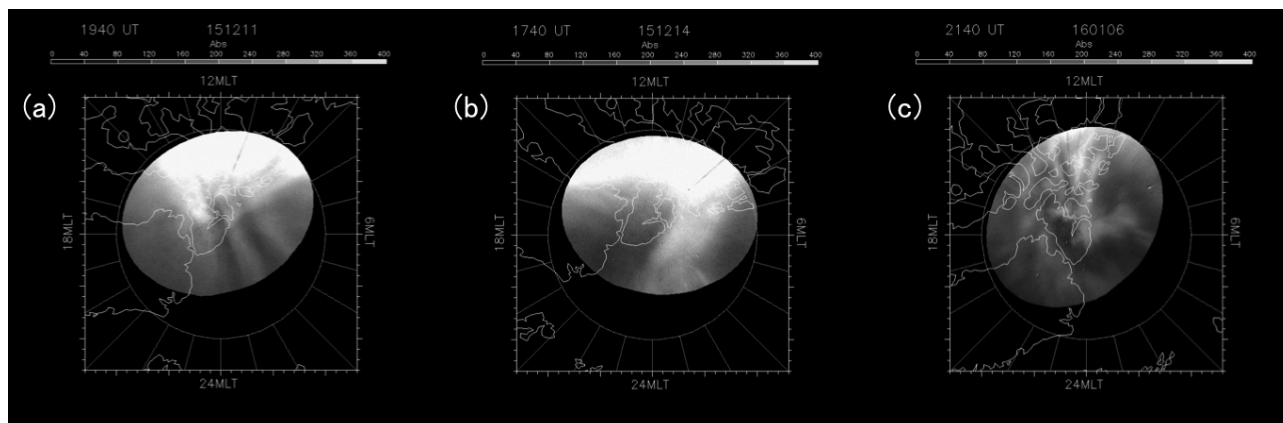


図 4.1: 極冠パッチの形状に関する検出例, (a): 棒状の極冠パッチ, (b): TOI, (c): 不定形の極冠パッチ.

表 4.2: 極冠パッチのリスト (2015 年 11 月 - 2015 年 12 月).

日付	観測時間	CME or CIR or 静穏時	形状	流れ方
11/6	0000 - 0600	CIR	不定形	速度変動
11/7	0000 - 0800	CME	太い棒状	速度一定
11/9	0000 - 1200	CIR	太い棒状、TOI	速度一定
11/10	0800 - 1100	CIR	不定形	速度変動
11/13	0000 - 0200	CIR	不定形	速度一定 (遅い)
11/13	2100 - 2400	静穏時	不定形	速度一定 (遅い)
11/14	0000 - 0800	CIR	棒状	速度変動
11/17	2100 - 2400	静穏時	不定形	速度一定
12/4	2200 - 2400	CIR	不定形	速度一定 (遅い)
12/5	2000 - 2400	CIR	棒状	速度一定
12/6	0000 - 1000	CIR	不定形	速度変動
12/7	1200 - 2000	CIR	棒状	速度変動 (漂っている)
12/8	0000 - 0400	CIR	棒状	速度変動
12/8	1200 - 2000	CIR	棒状	速度変動
12/9	0000 - 0400	CIR	不定形	速度変動
12/9	1400 - 2100	静穏時	TOI	速度一定
12/10	0000 - 2400	CIR	棒状	速度変動 (漂っている)
12/11	1200 - 2200	CIR	棒状	速度変動 (漂っている)
12/12	1600 - 2400	CIR	棒状	速度変動 (漂っている)
12/14	1400 - 2400	CIR	TOI	速度一定

表 4.3: 極冠パッチのリスト (2016 年 10 月 - 2017 年 2 月).

日付	観測時間	CME or CIR or 静穏時	形状	流れ方
1/6	0000 - 0400	CIR	不定形	速度変動 (漂っている)
1/6	2000 - 2400	CIR	不定形	速度変動 (漂っている)
1/7	0000 - 0500	CIR	不定形	速度変動 (漂っている)
1/7	1800 - 2100	CIR	不定形	速度変動 (漂っている)
1/10	2000 - 2300	静穏時	不定形	速度変動 (漂っている)
1/11	0400 - 0900	静穏時	不定形	速度一定 (遅い)
1/11	2200 - 2400	CIR	棒状	速度一定 (遅い)
1/12	0000 - 0200	CIR	棒状	速度一定
1/31	0000 - 1200	静穏時	棒状	速度一定 (遅い)
2/3	0000 - 0800	CIR	太い棒状、TOI	速度一定 (速い)
2/5	0300 - 0600	CIR	不定形	速度変動 (漂っている)
2/6	0300 - 0600	CIR	不定形	速度一定 (遅い)
2/6	2300 - 2400	CIR	不定形	速度一定 (遅い)
2/7	0000 - 0200	静穏時	TOI	速度変動
2/7	2300 - 2400	静穏時	TOI	速度変動
2/8	0000 - 1200	CME	棒状、TOI	速度一定
2/10	0000 - 0900	静穏時	棒状	速度一定 (遅い)
2/11	0200 - 1000	静穏時	TOI	速度一定
2/12	0900 - 1200	静穏時	棒状	速度一定 (遅い)
2/27	0400 - 0600	静穏時	棒状	速度一定 (遅い)
10/4	0300 - 0700	CIR	不定形	速度変動
10/9	0700 - 0900	静穏時	棒状	速度一定
10/10	0200 - 0900	静穏時	不定形	速度一定 (遅い)
10/13	0700 - 1000	CME	棒状	速度一定
10/27	0300 - 0600	CIR	棒状	速度一定
10/29	0000 - 1200	CIR	棒状	速度一定 (速い)
10/31	0000 - 1100	CIR	不定形	速度変動
11/1	0000 - 1200	CIR	不定形	速度変動
11/23	0000 - 0600	CIR	不定形	速度一定 (遅い)
12/22	1800 - 2200	CIR	棒状	速度一定 (速い)
12/23	2000 - 2300	CIR	不定形	速度変動
12/25	1600 - 2200	CIR	不定形	速度変動 (漂っている)
12/29	1500 - 1900	静穏時	棒状	速度一定
1/26	1300 - 1500	静穏時	TOI	速度一定
2/1	0200 - 0600	CIR	不定形	速度変動 (漂っている)
2/18	0000 - 0600	CIR	棒状	速度一定
2/22	0100 - 1100	静穏時	不定形	速度変動 (漂っている)

## 4.3 シーズン別の極冠パッチの性質

### 4.3.1 極冠パッチの長期間変動: 観測年度別の解析

図 4.2 は初年度観測期間 (2015 年 10 月 - 2016 年 2 月)、図 4.3 は次年度観測期間 (2016 年 10 月 - 2017 年 2 月) の太陽風データと Dst 指数のプロットを表したものである。上から順に太陽風の速度、IMF の大きさ、IMF  $B_z$ 、Dst 指数を示しておりデータの時間分解能は 1 日である。縦軸がそれぞれのパラメータの値、横軸がそれぞれの観測期間となっており、横軸に関しては月毎に縦の点線で区切られている。また、CIR と静穏時の判別をするために太陽風の速度のプロットには 450 km/s で点線が引かれており、IMF の大きさのプロットには 7 nT で点線が引かれている。それに加え、表 4.2, 4.3 にまとめられた極冠パッチの表を元に CME, CIR, 静穏時における極冠パッチの発生期間の色分けを行なった。それぞれの図中の赤色の領域は CME 発生に伴う極冠パッチが発生した時間、青色の領域は CIR 発生に伴う極冠パッチが発生した時間、緑色の領域は静穏時に極冠パッチが発生した時間を表している。また、灰色の領域の時間帯は観測が行えていない時間帯を表している。

図 4.2 の太陽風速度のプロットに着目すると、それぞれの月の初旬に CIR の影響が到来したと思われる似た形状の増大が回帰的に出現していることが分かる。また、それらの山に青い領域で囲まれた CIR 発生に伴う極冠パッチの検出が集中していることも分かる。特に、12 月の初旬に多くの CIR 発生に伴う極冠パッチが検出されている。しかし、2016 年 2 月に着目すると、CIR 発生に伴う極冠パッチの検出が少なく、逆に静穏時に発生する極冠パッチの検出が多い。これは回帰的に地球へ到達する CIR の影響が弱かったためだと考えられる。その現われとして、太陽風の速度が 450 km/s に達していないことがわかる。

一方、図 4.3 の太陽風速度のプロットに着目すると、月の中旬と下旬に CIR の影響が到来したと思われる増大が回帰的に出現していることが見れる。しかし、初年度観測期間と比較すると青色の領域で囲まれた CIR 発生期間に伴う極冠パッチの検出が少ないだけでなく、極冠パッチの発生自体が少ないことが見て取れる。これは初年度解析期間よりも全体的に天気の悪い日が多かったことが原因の 1 つであると考えられる。他の要因については次の章で議論をする。また、図 4.2 と図 4.3 の双方に共通していることは、CME, CIR 発生時には Dst 指数が下がっており、磁気嵐が発生していることが見て取れる。

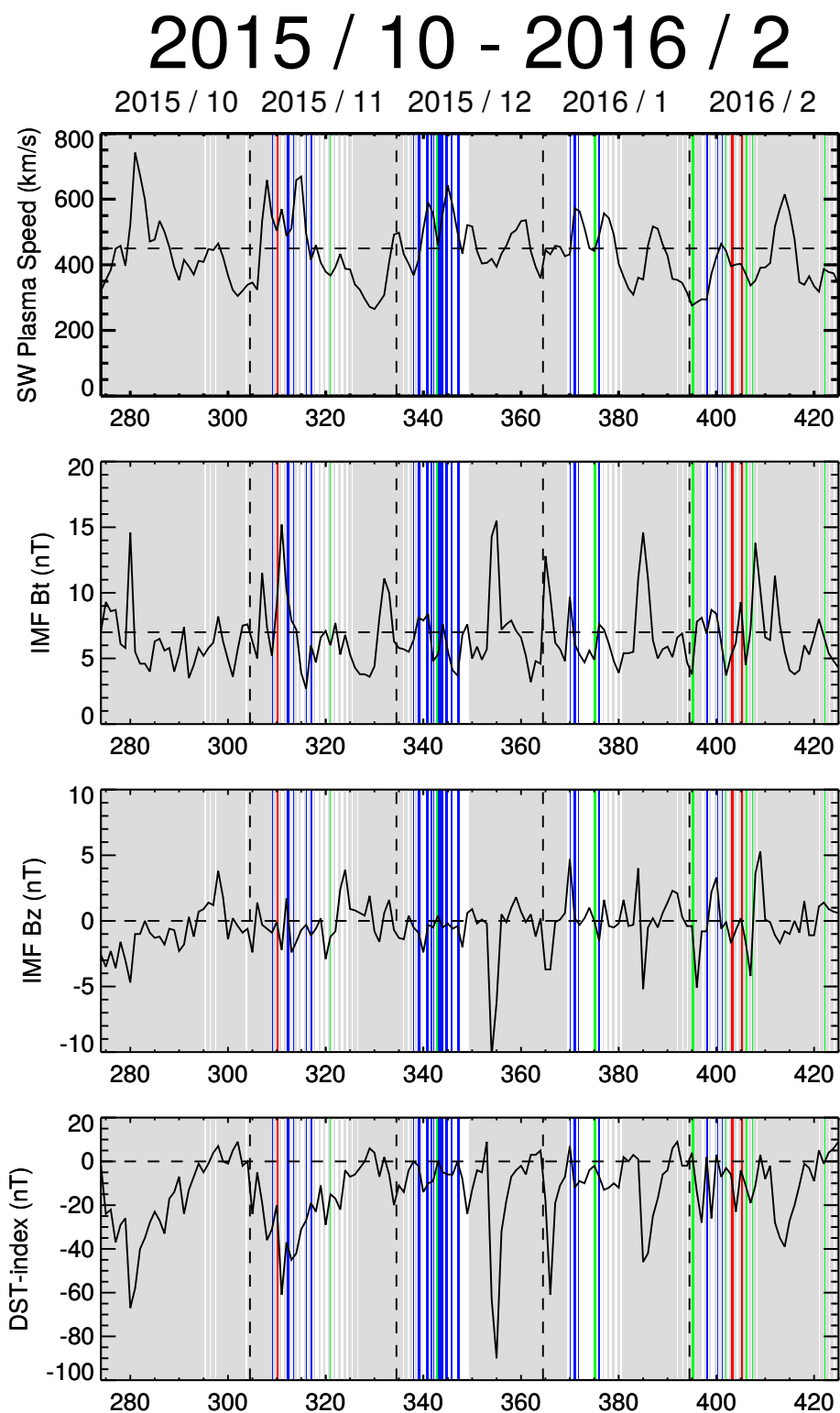


図 4.2: 2015 年 10 月から 2016 年 2 月までのデータプロット (赤線: CME 発生期間, 青線: CIR 発生期間, 緑線: 静穏時), 上から順に太陽風の速度、IMF の大きさ、IMF  $B_z$ 、DST 指数.

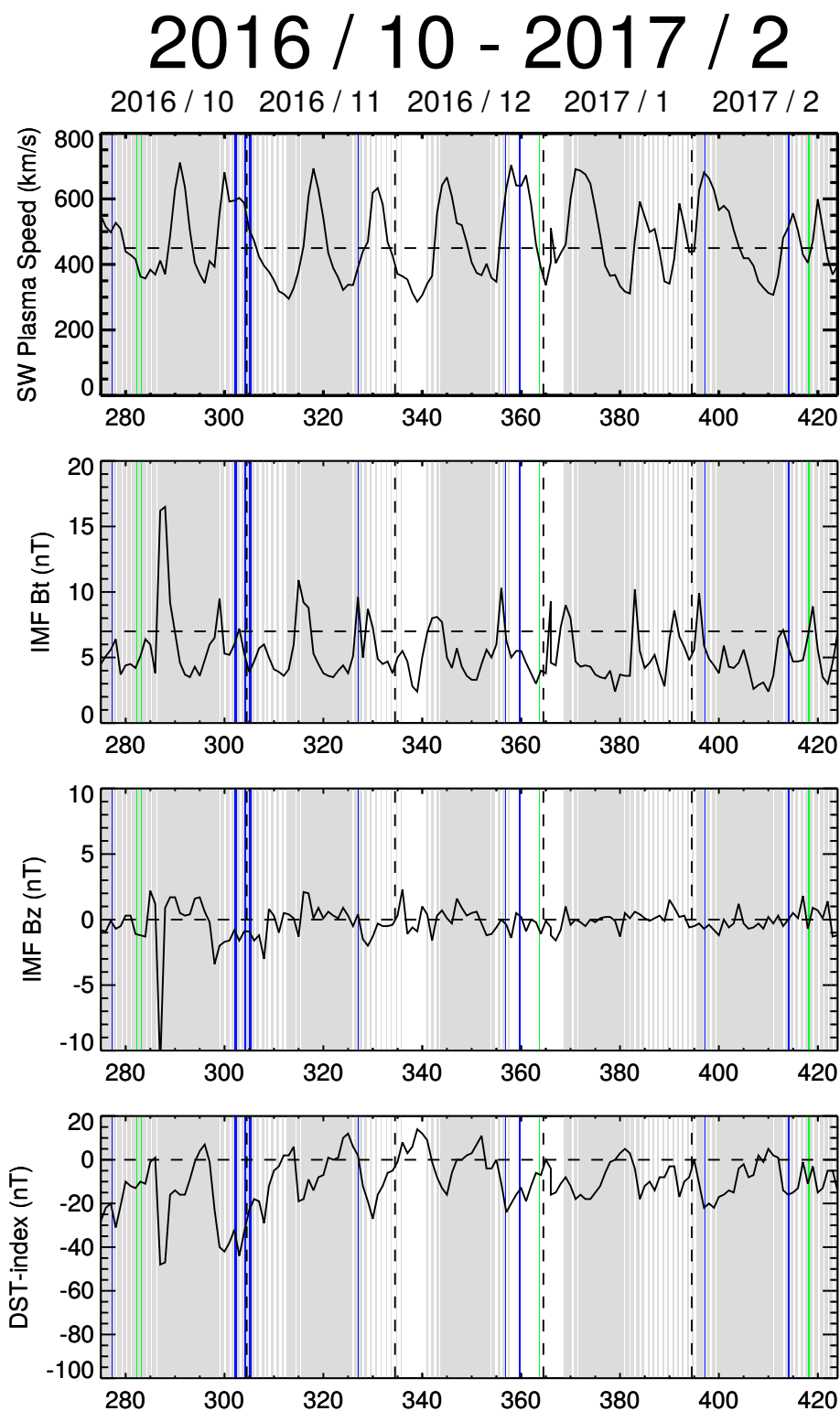


図 4.3: 2016 年 10 月から 2017 年 2 月までのデータプロット (赤線: CME 発生期間, 青線: CIR 発生期間, 緑線: 静穏時), 上から順に太陽風の速度、IMF の大きさ、IMF  $B_z$ 、DST 指数

### 4.3.2 極冠パッチの短期的性質：月別の解析

図 4.2, 4.3 を細かく見ていくために図 4.4 - 4.12 を作成した。図 4.4 - 4.7 は初年度観測期間、図 4.8 - 4.12 は次年度観測期間における月ごとの太陽風のデータとなっており、上から順に太陽風の速度、IMF の大きさ、IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$  となっている。縦軸がそれぞれのパラメータの値、横軸はそれぞれの月における通し日 (その年の 1 月 1 日からの日にち、例: 2015 年 11 月 1 日は通し日で 304 日) である。これらの図においても図 4.2, 図 4.3 と同様に CIR と静穏時の判別をするために太陽風の速度のプロットには 450 km/s で点線が引かれており、IMF の大きさのプロットには 7 nT で点線が引かれている。図中の赤、青、緑、灰色の領域についても図 4.2, 4.3 と同様に区別している。

初年度解析期間である図 4.4 - 4.7 それぞれに着目すると、太陽風の速度のプロットにおいてそれぞれの月の初旬にある大きな増大に CIR 発生に伴う極冠パッチが多く検出されており、回帰的に極冠パッチが発生していることが示唆される。また、静穏時の極冠パッチの発生については IMF  $B_z$  のグラフに着目すると、負の時間帯であることが見て取れる。これは極冠パッチの発生に必要な条件が満たされているため、静穏時にも発生したと考えられる。CME 発生に伴う極冠パッチは 2015 年 11 月 7 日と、2016 年 2 月 8 日であり、特に影響が強かった 2015 年 11 月 7 日は太陽風の速度、IMF の大きさ、IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$  の全てのパラメータが急激に変化していることが見て取れ、CME 発生に伴う特徴的なパラメータ変動を確認することができた。

次に、次年度解析期間である図 4.8 - 4.12 それぞれに着目すると、太陽風の速度のプロットにおいてそれぞれの月の中旬から下旬に CIR 発生に伴う回帰的な変化が確認できる。しかし、初年度解析期間とは異なり、灰色の領域である観測不可の時間帯ではないにもかかわらず CIR 発生に伴う極冠パッチが検出できていない。これは天候による影響があると考えられるが、詳しいことについては次の章で議論を行う。また、次年度観測期間での解析でも初年度解析期間と同様に、静穏時における極冠パッチの発生の際には IMF  $B_z$  が負の時間帯であることが見て取れる。



2015 / 11

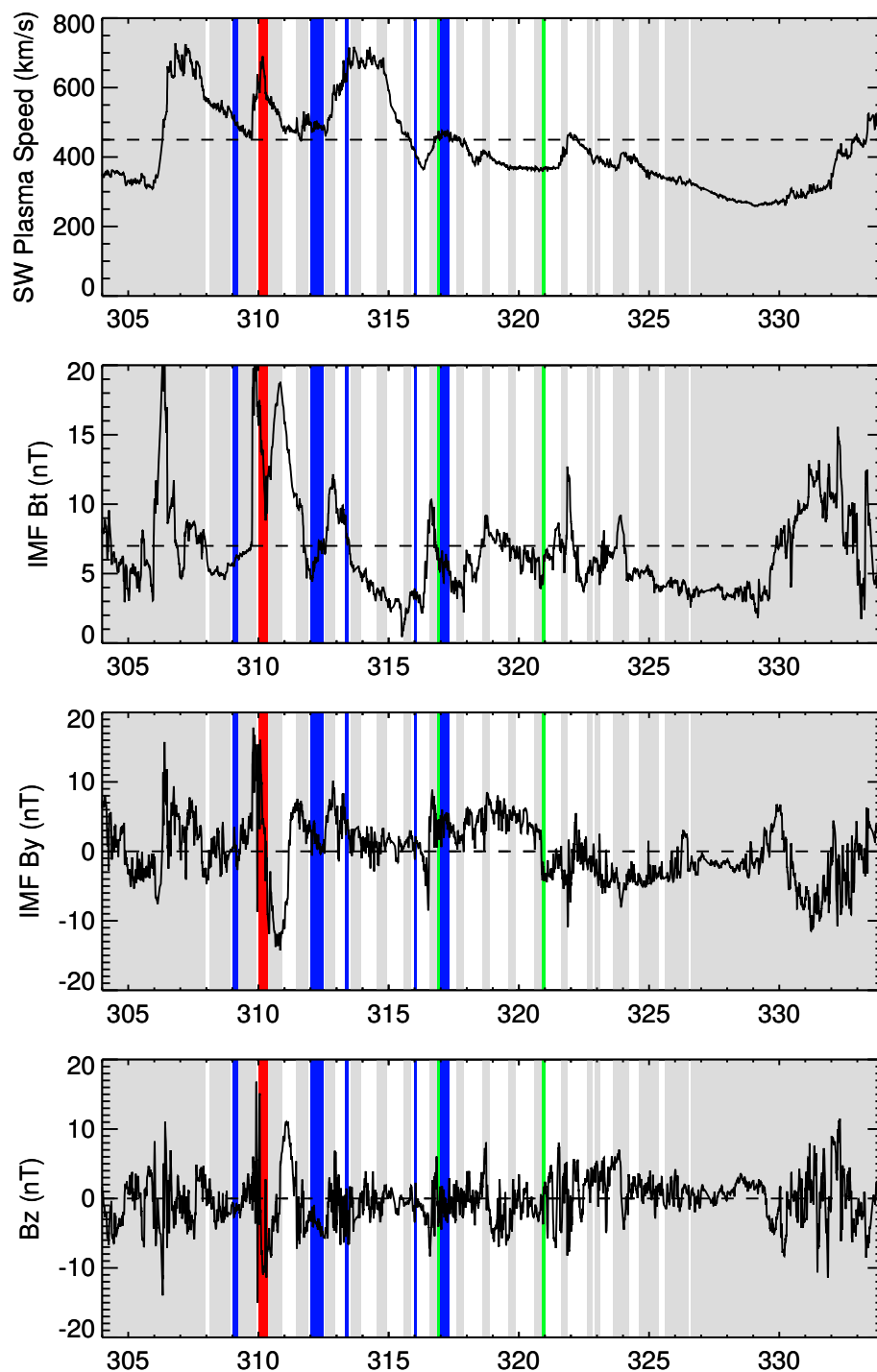


図 4.4: 2015 年 11 月のデータプロット (赤線: CME 発生期間, 青線: CIR 発生期間, 緑線: 静穏時), 上から順に太陽風の速度、IMF の大きさ、IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$ 。

2015 / 12

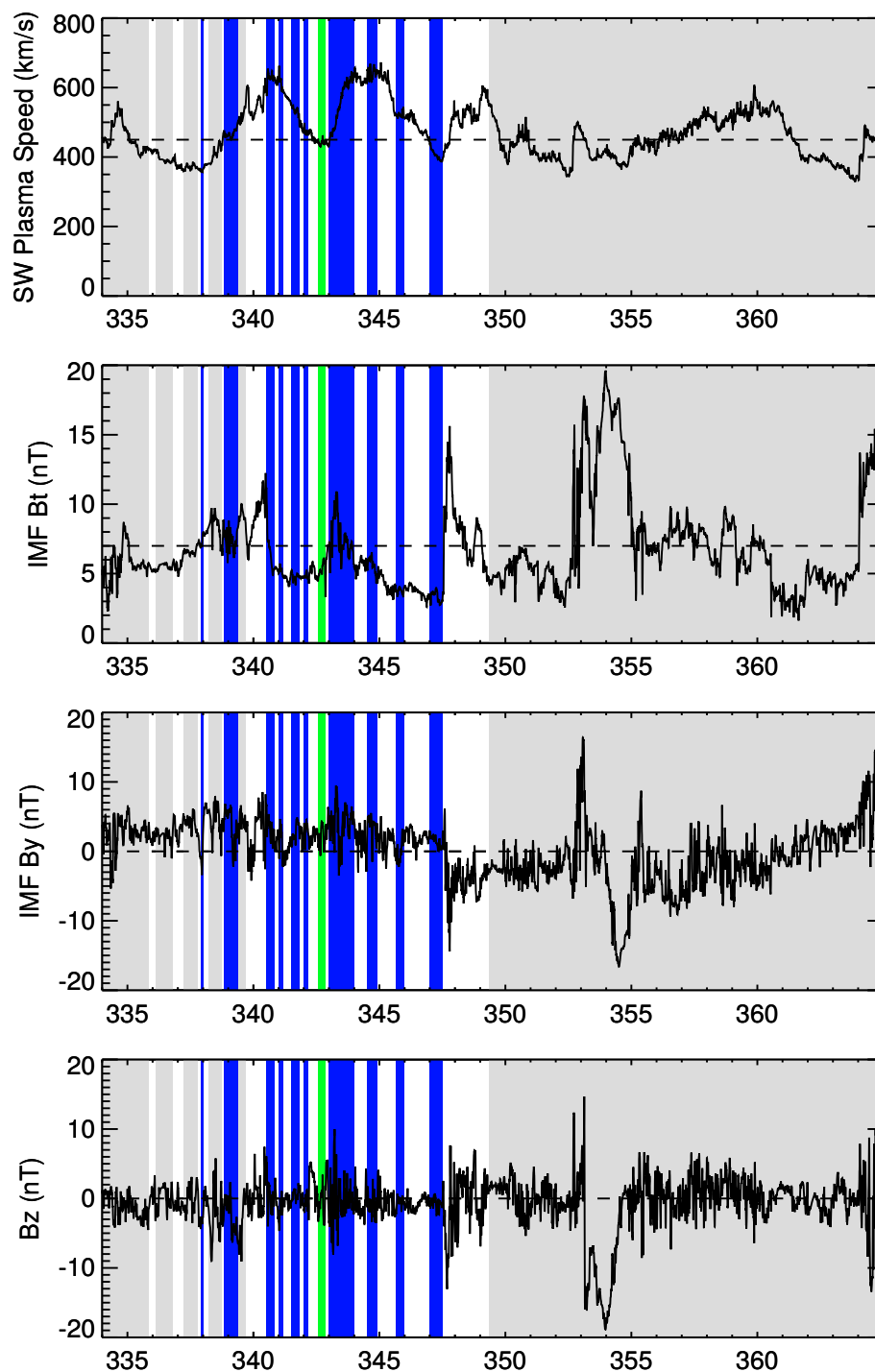


図 4.5: 2015 年 12 月のデータプロット (赤線: CME 発生期間, 青線: CIR 発生期間, 緑線: 静穏時), 上から順に太陽風の速度、IMF の大きさ、IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$ 。

2016 / 01

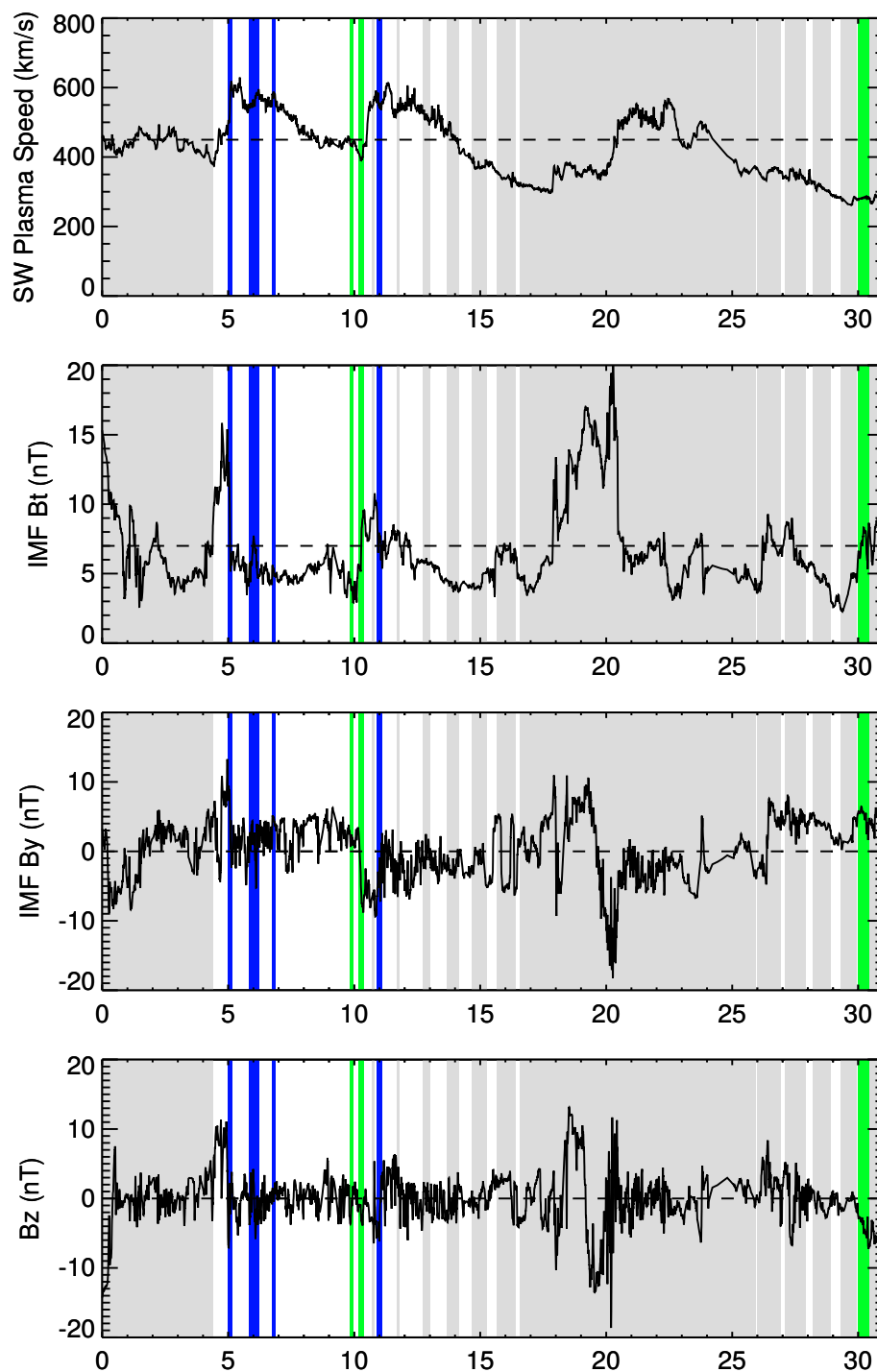


図 4.6: 2016 年 1 月のデータプロット (赤線: CME 発生期間, 青線: CIR 発生期間, 緑線: 静穏時), 上から順に太陽風の速度、IMF の大きさ、IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$ 。

2016 / 02

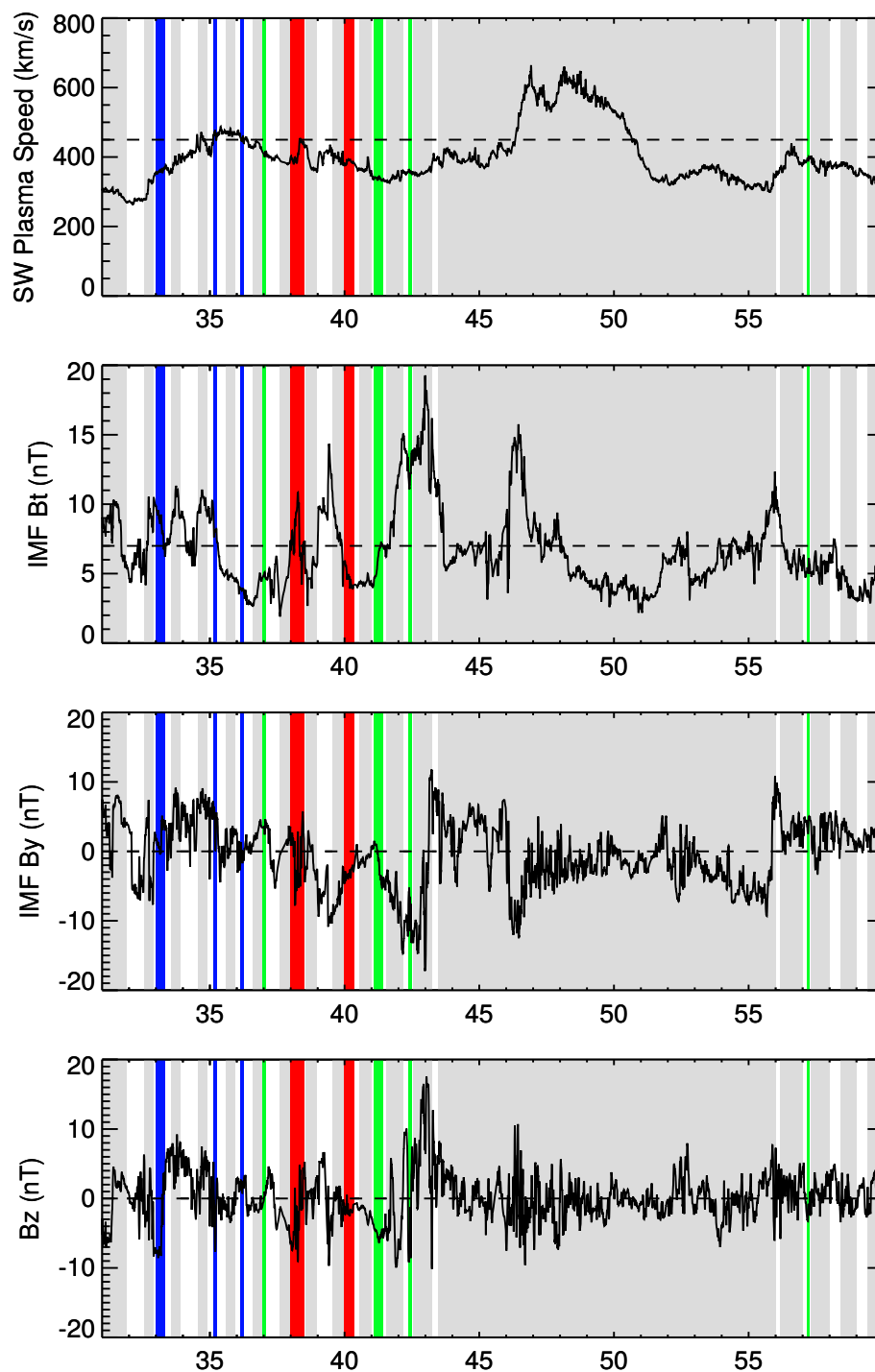


図 4.7: 2016 年 2 月のデータプロット (赤線: CME 発生期間, 青線: CIR 発生期間, 緑線: 静穏時), 上から順に太陽風の色度、IMF の大きさ、IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$ 。

# 2016 / 10

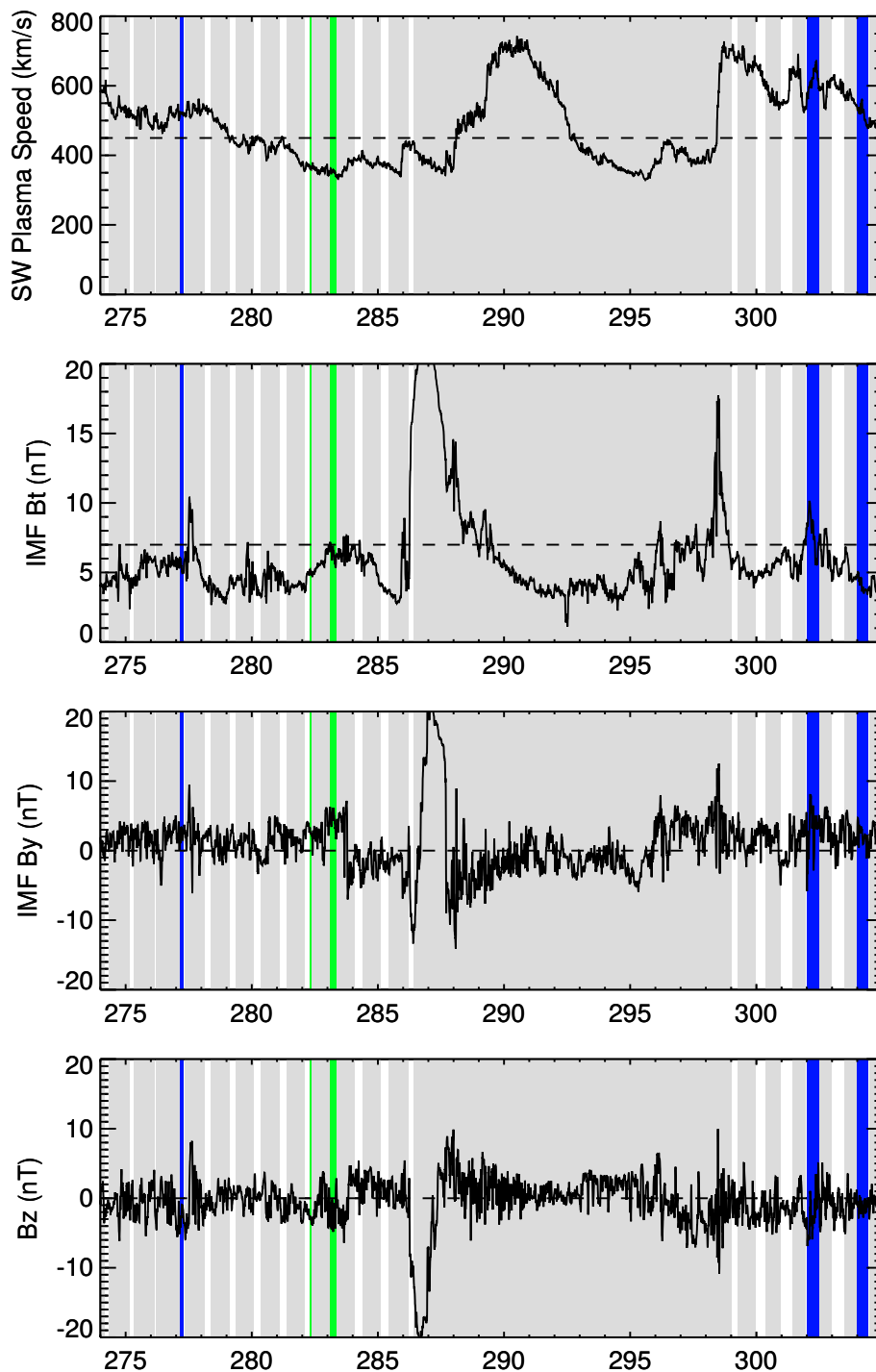


図 4.8: 2016 年 10 月のデータプロット (赤線: CME 発生期間, 青線: CIR 発生期間, 緑線: 静穏時), 上から順に太陽風の速度、IMF の大きさ、IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$ 。

# 2016 / 11

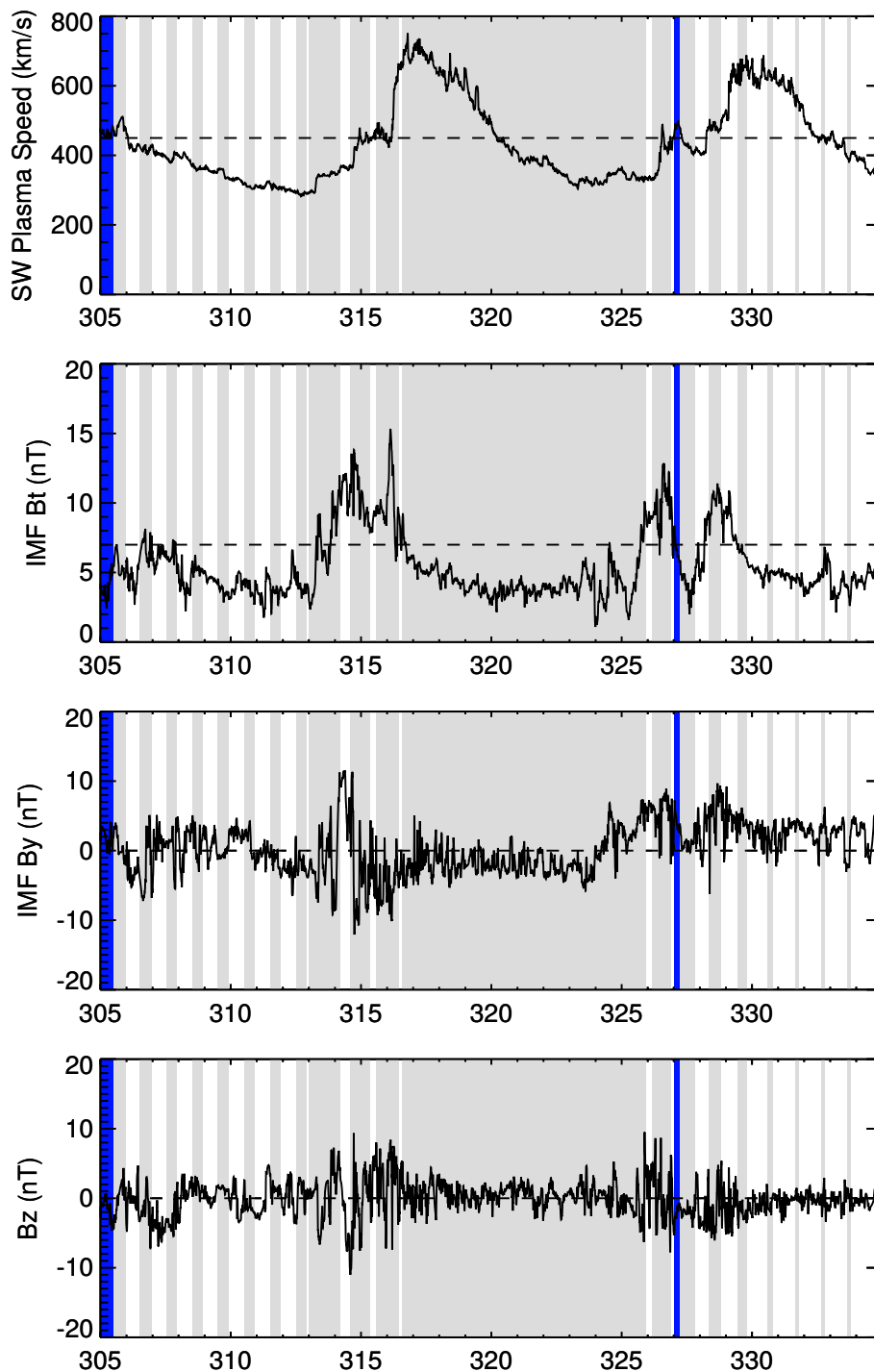


図 4.9: 2016 年 11 月のデータプロット (赤線: CME 発生期間, 青線: CIR 発生期間, 緑線: 静穏時), 上から順に太陽風の速度、IMF の大きさ、IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$ 。

# 2016 / 12

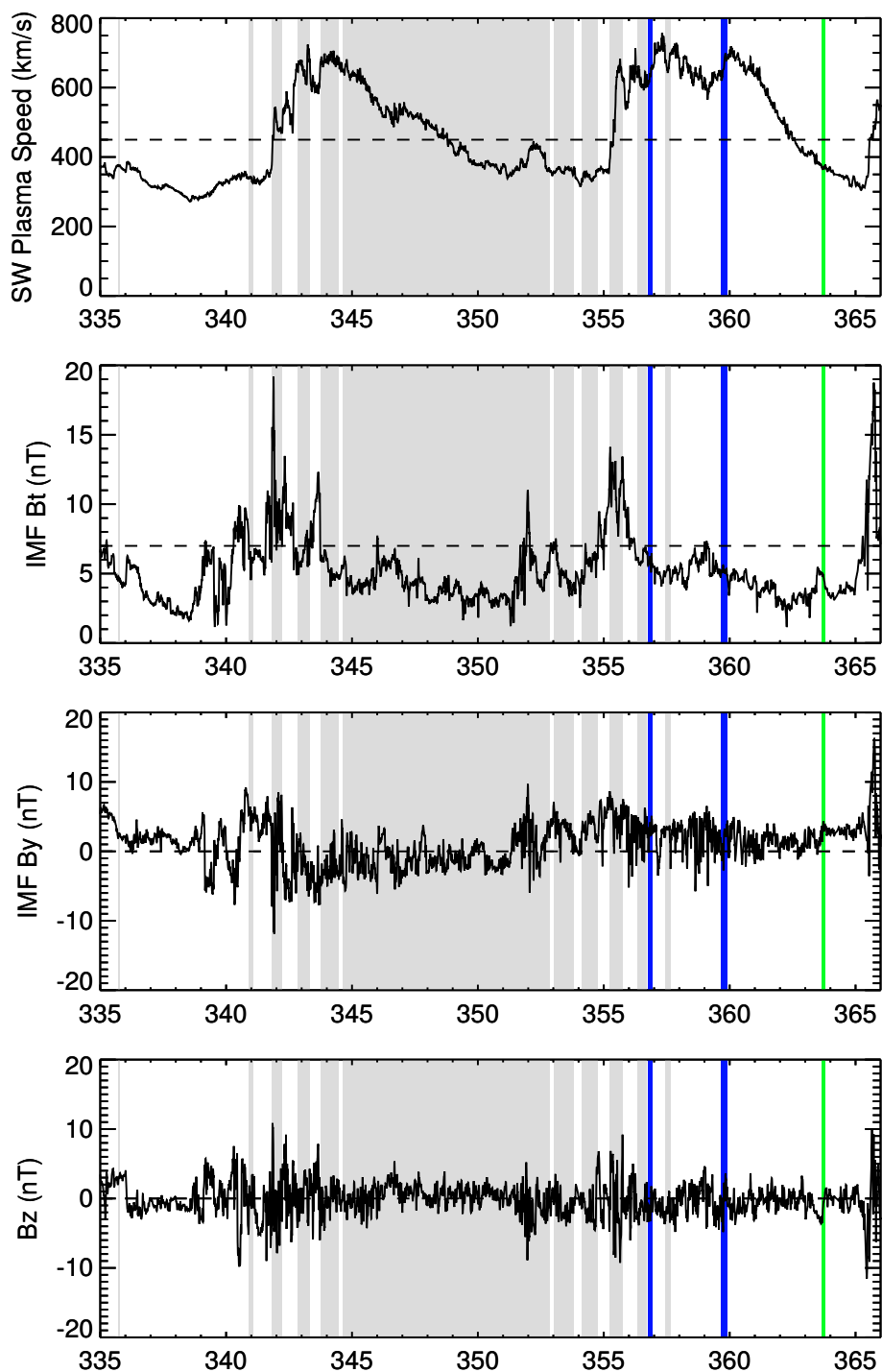


図 4.10: 2016 年 12 月のデータプロット (赤線: CME 発生期間, 青線: CIR 発生期間, 緑線: 静穏時), 上から順に太陽風の速度、IMF の大きさ、IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$ 。

2017 / 01

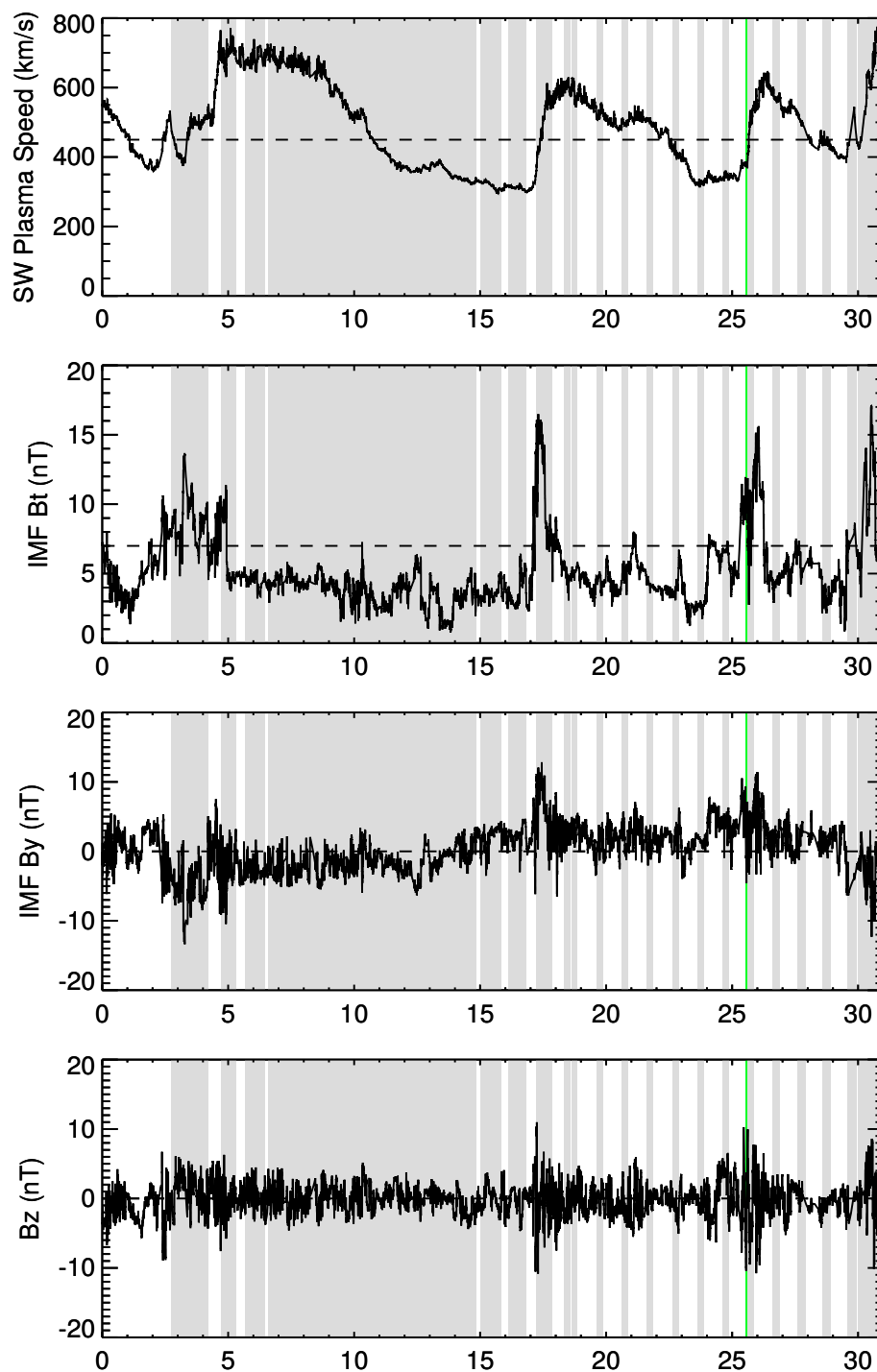


図 4.11: 2017 年 1 月のデータプロット (赤線: CME 発生期間, 青線: CIR 発生期間, 緑線: 静穏時), 上から順に太陽風の速度、IMF の大きさ、IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$ 。



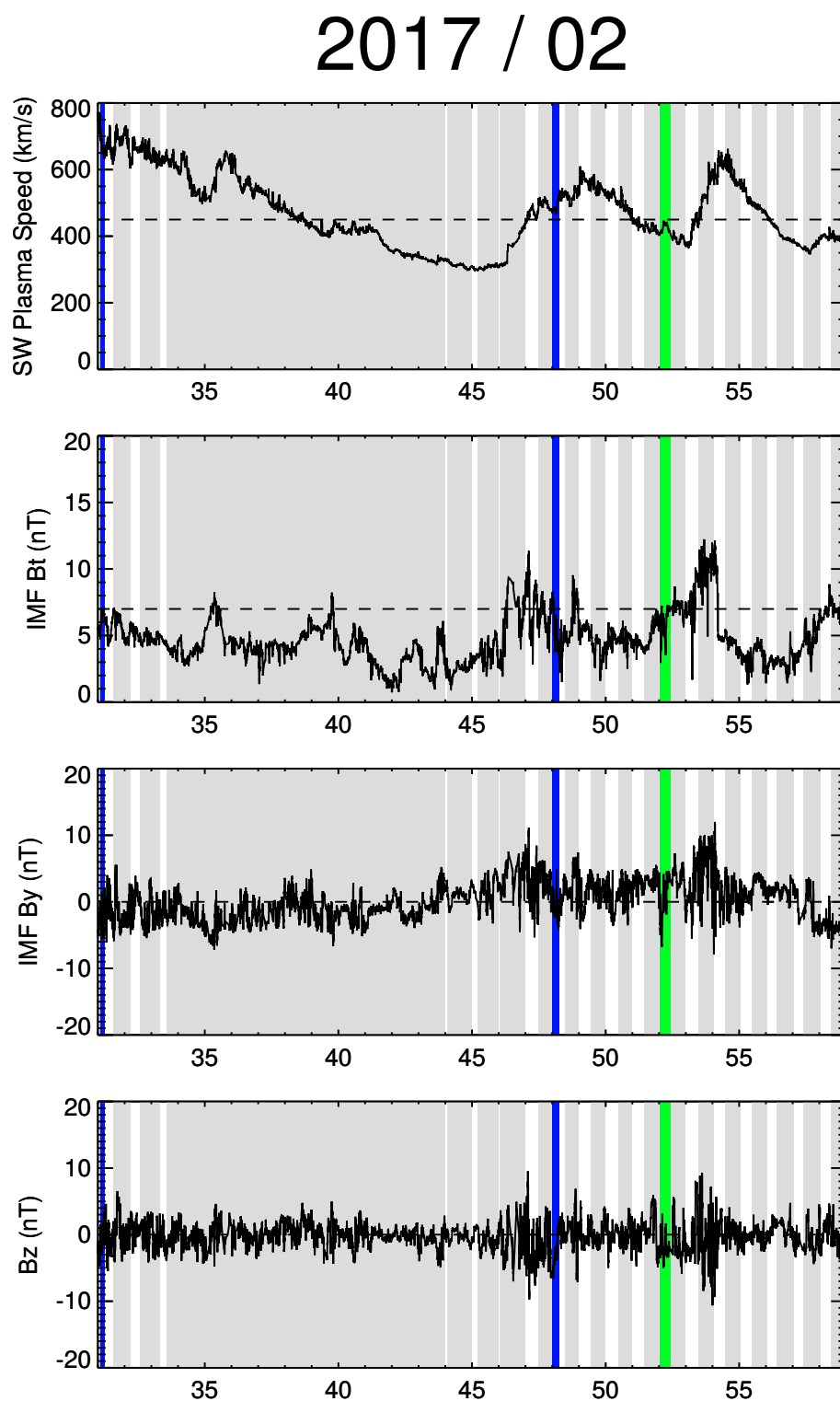


図 4.12: 2017 年 2 月のデータプロット (赤線: CME 発生期間, 青線: CIR 発生期間, 緑線: 静穏時), 上から順に太陽風の速度、IMF の大きさ、IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$ 。

## 第5章 考察

### 5.1 極冠パッチの発生条件

CME, CIR, 静穏時に伴う極冠パッチの発生頻度についての議論を行う。表 4.2, 4.3 から CME, CIR, 静穏時に発生した極冠パッチの時間をそれぞれ抽出し、3つのパターンのうちの状態が最も極冠パッチが発生しやすい状態であるのかを検証した。その結果を表 5.1 に示す。ここで発生割合は各発生要因に伴う極冠パッチの発生時間の合計を全ての発生要因に伴う極冠パッチの発生時間の合計で割ったものである。

表 5.1: CME, CIR, 静穏時に伴う極冠パッチの発生時間とその割合.

発生要因	極冠パッチの発生時間の合計 (時間)	極冠パッチの発生割合 (%)
CME	23	7
CIR	229	68
静穏時	83	25

#### 5.1.1 CIR 発生に伴う極冠パッチの性質

表 5.1 において最も注目すべき点は、CIR 期間中の極冠パッチの発生頻度が 70 % 近くに達するという点である。これは極冠パッチの発生要因の大半が CIR であることを示しており、これまでの研究では言及されていないことである。CIR は太陽の自転の周期である約 27 日で回帰的に発生するため、その影響というのを事前に予測することが可能であることが知られている。よって、CIR に伴う極冠パッチはその発生を事前に予測することができると思われる。以上より、本研究で示した「極冠パッチの発生要因の大半は CIR である」と「CIR 発生に伴う極冠パッチは事前に予測可能である」ことを組み合わせると「極冠パッチの大半は予測することが可能である」ということができる。しかし、CIR 発生に伴う極冠パッチは予測可能ではあるが、その特徴までは予測することができない。それは CIR は太陽活動に合わせて約 27 日周期で発生するが、毎回完全に同じ太陽風が同じ時間に地球に到達するわけではないため、UT に依存する極冠パッチの性質はその時々で変化してしまうからである。

また、CIR は太陽活動度に合わせて発生することが知られており、具体的には太陽活動極大期には CIR は頻繁に発生し、太陽活動極小期には CIR は発生しにくいことが知られている。今回の初年度解析期間である 2015 年度は太陽活動極大期であり、次年度解析期間である 2016 年度は太陽活動極小期である。本研究でも初年度解析期間中に発生した極冠パッチが次年度解析期間中に発生した極冠パッチより圧倒的に多いことがわかる。具体的な値は以下の表 5.2 にまとめてある。

表 5.2: 解析期間別の CIR に伴う極冠パッチの発生時間.

解析年度	極冠パッチの発生時間の合計 (時間)
初年度解析 (2015 年 10 月 - 2016 年 2 月)	158
次年度解析 (2016 年 10 月 - 2017 年 2 月)	71

この表から、初年度解析期間中の CIR 発生に伴う極冠パッチが次年度解析期間中よりも約 2 倍も多いことがわかる。これは太陽活動極大期と極小期の境目であったことが原因の一つであると考えられる。図 5.1 は 1976 年から 2017 年の IMF の大きさに関するプロットである。横軸が時間、縦軸が IMF の大きさとなっており、太陽活動周期に合わせて縦の点線を引いている。灰色で囲まれた領域は今回の解析期間を示している。この図を見てわかるように太陽活動は太陽周期を重ねる毎に徐々に低下してきていることがわかる。それに加え、2008 年 12 月以降から現在までの第 24 太陽周期は過去 100 年と比較して最も活動が弱い周期であると言われており [9]、2018 年以降も太陽活動が下がり続けると言われている。よって、今後 CIR は発生しにくい状態になると考えられるため、それに伴う極冠パッチの発生も低下していくということが予測できる。

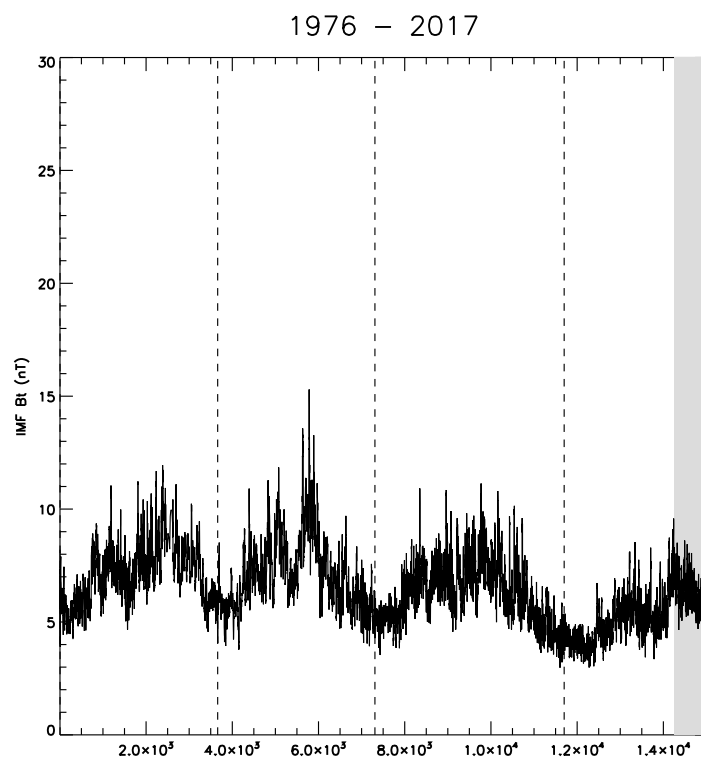


図 5.1: 1976 年から 2017 年の IMF の大きさのプロット (灰色の領域: 本研究の解析期間, 点線: 太陽活動期の境)

### 5.1.2 静穏時における極冠パッチの性質

表 5.1 で注目するべきもう 1 つの点は静穏時に発生する極冠パッチが全体の 20 % を占めているところである。静穏時に極冠パッチの発生が確認された全てのイベントの IMF  $B_z$  を図 4.4 - 4.12 と 1 日毎のデータで確認したところ、全てのイベントにおいて IMF  $B_z < 0$  の条件が満たされていたことが判明した。これは極冠パッチが発生するための条件であることが知られており、静穏時における極冠パッチ発生 of 要因であると考えられる。また、静穏時における極冠パッチの発生時間を 4 時間以下のイベントとそれ以外で分けたものが表 5.3 である。日付を越すイベントに関しては 2 つのイベントで 1 つとする (例: 2015 年 11 月 1 日の 2000 - 2400 UT と 2015 年 11 月 2 日の 0000 - 0400 UT のイベントは合わせて 1 イベントとしてカウントする)。

表 5.3 からわかるように、静穏時における極冠パッチは発生時間にばらつきがあり、かつ表 4.2, 4.3 と図 4.4 - 4.12 を参照して分かるとおり CIR のように回帰的に発生しているのではなく、CME のように突発的に発生していることがわかる。これは静穏時における極冠パッチは IMF  $B_z$  が宇宙空間の状態によって偶然負に振れたことによって発生したと考えられるので、CIR のように規則性は存在しない。それに加え、IMF  $B_z$  も負に大きくは振れ

表 5.3: 静穏時における極冠パッチの発生時間分け.

	イベント数 (個)	イベントの割合 (%)
極冠パッチの発生時間 (3 時間以下)	9	53
極冠パッチの発生時間 (4 時間以上)	8	47

ないため極冠パッチの発生時間は短いイベントが多くなったと考えられる。以上をまとめると、静穏時における極冠パッチは発生予測が困難であることが、継続時間が短いため宇宙天気へのインパクトは相対的に小さいことが結論付けられる。

### 5.1.3 CME 発生に伴う極冠パッチの性質

最後に表 5.1 の CME 発生に伴う極冠パッチについて着目すると、他の 2 つのパターンと比較して発生頻度が極端に低いことがわかる。これは地球に影響を与えるほどの M クラスの太陽フレアは年に数回しか発生しないことが原因であると考えられる。今回の解析期間においても M クラス以上のフレアに伴う太陽風擾乱は数回あったものの、イウレカでの日照時間、天候等の理由で観測が行えていなかった。また、CME は突発的に発生するため、予測も困難である。しかし、太陽フレアが発生してから地球に到達するのに 3 - 4 日かかるので、極冠パッチ出現予測を直前に行うことは可能であると考えられる。

### 5.1.4 極冠パッチの発生要因、発生予測に関するまとめ

以上の 3 つのパターンの比較から判明したことをまとめると以下のようなになる。

- 極冠パッチの発生要因は CIR が大半であり、予測可能である。
- 今後 CIR が発生しにくい状態になるため CIR が主な発生要因である極冠パッチはそれに伴い発生頻度が低くなる。
- 静穏時における極冠パッチの発生予測は困難である。
- CME 発生に伴う極冠パッチは発生頻度は低いが、発生予測はフレアの発生を検出することで直前に行える

## 5.2 極冠パッチの形状・速度の決定要因

CME, CIR, 静穏時における極冠パッチの形状と速度に差異があるのかを求めるために極冠パッチの形状別、速度別発生時間とそのイベント数について表 5.4、5.5 にまとめた。また、表 5.4、5.5 から CME, CIR, 静穏時において発生した極冠パッチの形状別発生割合と、極冠パッチの速度別発生割合を導出した。その結果は表 5.6、5.7 にまとめており、極冠パッチの発生時間とイベント数を分けて割合を導出した。ここからは極冠パッチの発生条件の際に着目した順番と同様に CIR 発生時、静穏時、CME 発生時の順番で考察を行う。

表 5.4: CME, CIR, 静穏時に発生した極冠パッチの形状別発生時間の合計とイベント数.

発生要因	棒状極冠パッチと TOI		不定形	
	発生時間 (時間)	イベント数 (個)	発生時間 (時間)	イベント数 (個)
CME	23	3	0	0
CIR	133	16	96	19
静穏時	52	11	31	6

表 5.5: CME, CIR, 静穏時に発生した極冠パッチの速度別発生時間の合計とイベント数.

発生要因	速度一定の極冠パッチ		速度変動の極冠パッチ	
	発生時間 (時間)	イベント数 (個)	発生時間 (時間)	イベント数 (個)
CME	23	3	0	0
CIR	77	15	154	21
静穏時	52	11	31	6

表 5.6: CME, CIR, 静穏時に発生した極冠パッチの形状別発生時間の合計、イベント数の割合.

発生要因	棒状極冠パッチと TOI		不定形	
	発生時間 (%)	イベント数 (%)	発生時間 (%)	イベント数 (%)
CME	100	100	0	0
CIR	58	46	42	54
静穏時	63	65	37	35

### 5.2.1 CIR 発生に伴う極冠パッチの性質

まず CIR 発生に伴う極冠パッチについて考察を行う。表 5.6、5.7 に着目すると、CIR 発生に伴う極冠パッチについて形状に関しては多少棒状の極冠パッチが多いが、はっきりとし

表 5.7: CME, CIR, 静穏時に発生した極冠パッチの速度別発生時間の合計、イベント数の割合.

発生要因	速度一定の極冠パッチ		速度変動の極冠パッチ	
	発生時間 (%)	イベント数 (%)	発生時間 (%)	イベント数 (%)
CME	100	100	0	0
CIR	33	42	67	58
静穏時	63	65	37	35

た差は出なかった。そこで、さらに細かく見ていくために形状別の極冠パッチのイベントに関して 3 時間以下のイベントと 4 時間以上のイベントに分類した。その結果が表 5.8 であり、各イベント数とその割合を導出した。

表 5.8: CIR 発生に伴う極冠パッチの形状毎の発生時間別のイベント数とその割合.

発生時間	棒状の極冠パッチ		不定形の極冠パッチ	
	3 時間以下	4 時間以上	3 時間以下	4 時間以上
イベント数 (個)	1	15	8	12
割合 (%)	7	93	40	60

表 5.8 を参照すると、不定形の極冠パッチは長時間発生するものが優勢であった。しかし、棒状の極冠パッチも長時間発生しているものがほとんどであることが判明した。これは、極冠パッチの発生時間によって形状が決定されないことを示している。そこで、IMF の変動の大きさに着目した。例として 2015 年 12 月 10 日の 0000 - 0400 UT と 2016 年 1 月 6 日の 0000 - 0400 UT の CIR 発生に伴う極冠パッチを取りあげる。図 5.2 は 2015 年 12 月 10 日の 0000 - 0400 のデータ、図 5.3 は 2016 年 1 月 6 日の 0000 - 0400 のデータであり、上から IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$ 、全天画像の南北断面のケオグラムである。横軸はそれぞれ時間を表しており、IMF のプロットの縦軸は大きさ、ケオグラムの縦軸は南北断面を表している。また、ケオグラムのカラースケールは白いほど明るいことを示している。図 5.2 は棒状の極冠パッチが発生している時間であり、IMF  $B_y$  が変化しているものの、正負に振れることはないのを見て取れる。一方、図 5.3 は不定形の極冠パッチが発生している時間であり、IMF  $B_y$  が正負に細かく変化しているのを見て取れる。このように IMF  $B_y$  が正負に変動する場合、プラズマ対流が形状が大きく変化するため、日照域プラズマを細かく分断することができる。よって不定形の極冠パッチのような細かい構造を生成すると考えられる。一方、IMF  $B_y$  が正負に変動しない場合は、プラズマ対流が形状が大きく変化しないため、日照域プラズマを細かく分断することができない。よって、棒状の極冠パッチや TOI といった巨大な構造を生成されると考えられる。以上より、CIR 発生に伴う極冠パッチの形状は IMF

$B_y$  の変動の大きさによって決定されることがわかった。

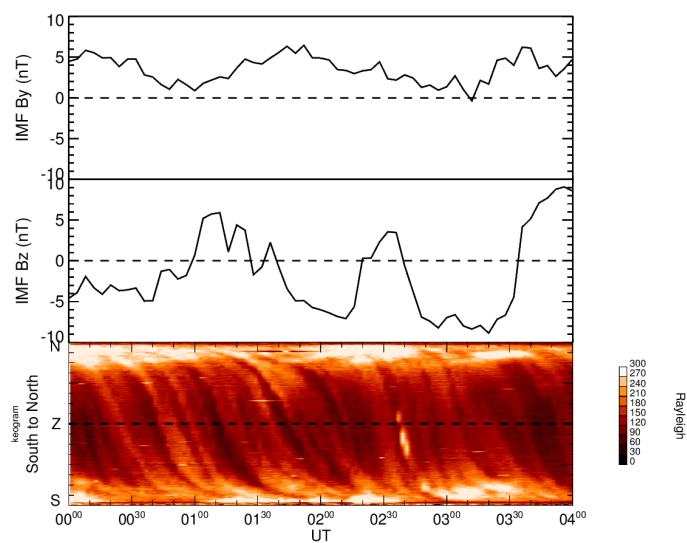


図 5.2: 2015 年 12 月 10 日の 0000 - 0400 に観測された IMF と全天画像の南北断面のケオグラム, 上から順に IMF  $B_y$ , IMF  $B_z$ , ケオグラムとなっている.

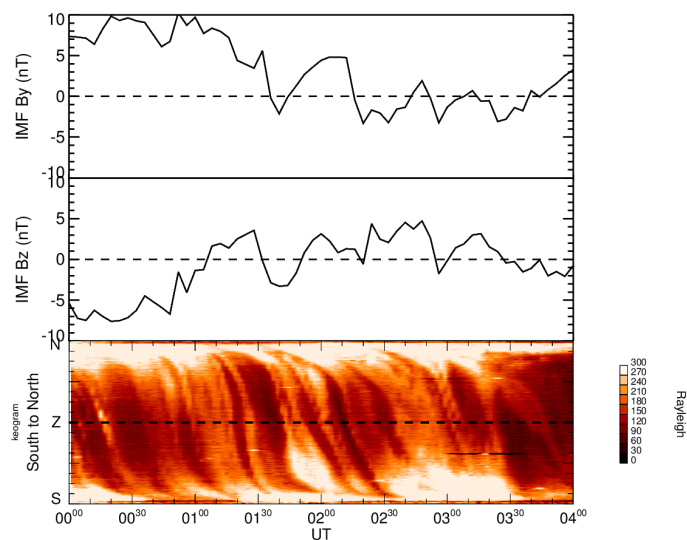


図 5.3: 2016 年 1 月 6 日の 0000 - 0400 に観測された IMF と全天画像の南北断面のケオグラム, 上から順に IMF  $B_y$ , IMF  $B_z$ , ケオグラムとなっている.



次に速度に関しては速度が変動する極冠パッチがやや多いことがわかった。形状の場合と同様に、速度別の極冠パッチのイベントに関して 3 時間以下のイベントと 4 時間以上のイベントに分類した。その結果が表 5.9 であり、各イベント数とその割合を導出した。

表 5.9: CIR 発生に伴う極冠パッチの速度毎の発生時間別のイベント数とその割合。

発生時間	速度一定の極冠パッチ		速度変動の極冠パッチ	
	3 時間以下	4 時間以上	3 時間以下	4 時間以上
イベント数 (個)	7	8	4	17
割合 (%)	47	53	19	81

表 5.9 の速度変動の極冠パッチから見ていくと、4 時間以上のイベントが 80 % を超え、大多数を占めていることが判明した。これは長時間極冠パッチが発生した場合、その期間の間で CIR 発生に伴い IMF  $B_z$  の成分が変動し、プラズマ対流の大きさを変化させることが要因であると考えられる。極冠パッチはプラズマ対流のスロート部分において日照域プラズマが取り込まれ、プラズマ対流の流れに沿って伝搬することが知られている。しかし、IMF  $B_z$  が負に大きく振れた後、急激に正に変化すると、2 セルのプラズマ対流の形が崩れてしまい、プラズマ対流は流れに沿って伝搬していた極冠パッチを伝搬させることができなくなってしまう。これにより、プラズマ対流に沿って一定速度で伝搬していくはずだった極冠パッチは低速度になってしまい、速度が変動したと考えられる。また、その後、IMF  $B_z$  が正から負に変動すると、極冠域上空を漂っていた極冠パッチは再び強化されたプラズマ対流によって反太陽方向へと伝搬していくと考えられる。例として 2015 年 12 月 10 日の 0000 - 2400 UT に発生した CIR 発生に伴う極冠パッチを取りあげる。図 5.4 は 2015 年 12 月 10 日の 1800 - 2200 のデータであり、上から IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$ 、全天画像の南北断面のケオグラムである。横軸はそれぞれ時間を表しており、IMF のプロットの縦軸は大きさ、ケオグラムの縦軸は南北断面を表している。また、ケオグラムのカラースケールは白いほど明るいことを示している。図 5.5 は 1936 - 2018 UT の 6 分ごとのデータマッピングであり、宇宙から地球を見下ろす座標系にイウレカから得たデータと SuperDARN から得た対流のデータと Terminator をプロットしたものである。全天画像のカラースケールは白いほど明るいことを示しており、SuperDARN のカラースケールは赤いほど対流の速度が速いことを示している。図 5.4 の 2000 UT 辺りに着目すると、IMF  $B_z$  が負から正に大きく変化しているのが見て取れる。それに伴い、図 5.5 においてプラズマ対流の形が変化していることが見て取れる。このように、IMF  $B_z$  の正負の変化によってプラズマ対流の形状が不安定なことが原因で、極冠パッチを一定速度で輸送することができない。以上より、CIR 発生に伴う極冠パッチが長期間発生している場合は速度が一定でないことが多く、短期間発生している場合はその期間中の IMF  $B_z$  の変動によって速度が決定されていると考えられる。それ

は CIR 発生に伴う IMF  $B_z$  の変動がプラズマ対流の形と大きさを変化させ、極冠パッチを一定速度で伝搬させることができないことが要因である。

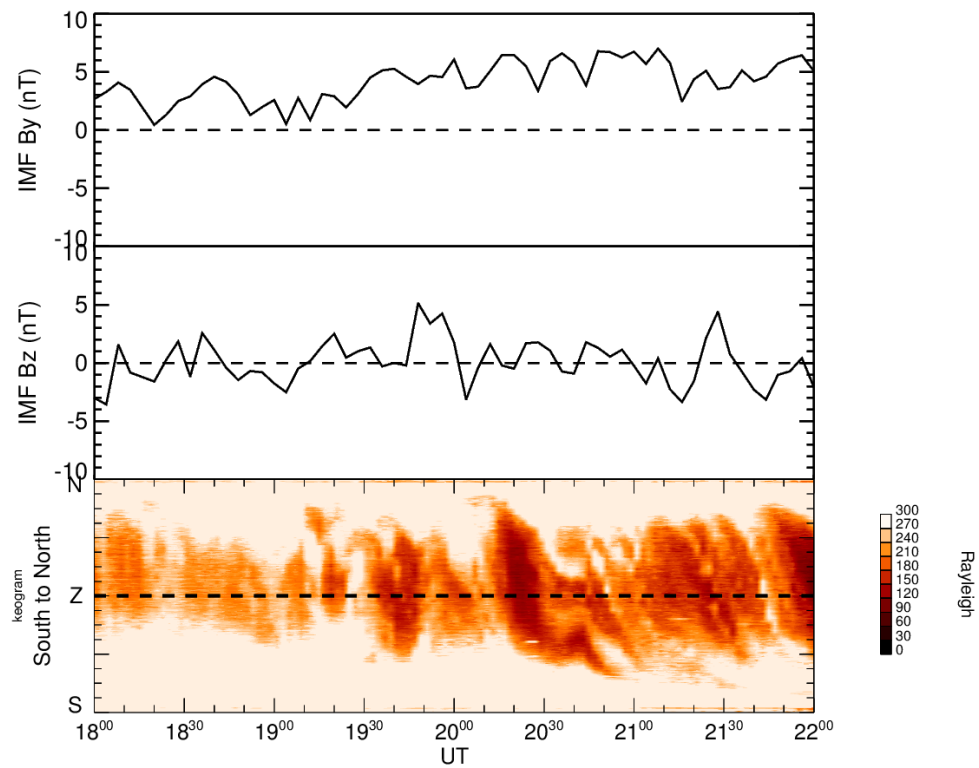


図 5.4: 2015 年 12 月 10 日の 1800 - 2200 に観測された IMF と全天画像の南北断面のケオグラム, 上から順に IMF  $B_y$ , IMF  $B_z$ , ケオグラムとなっている.

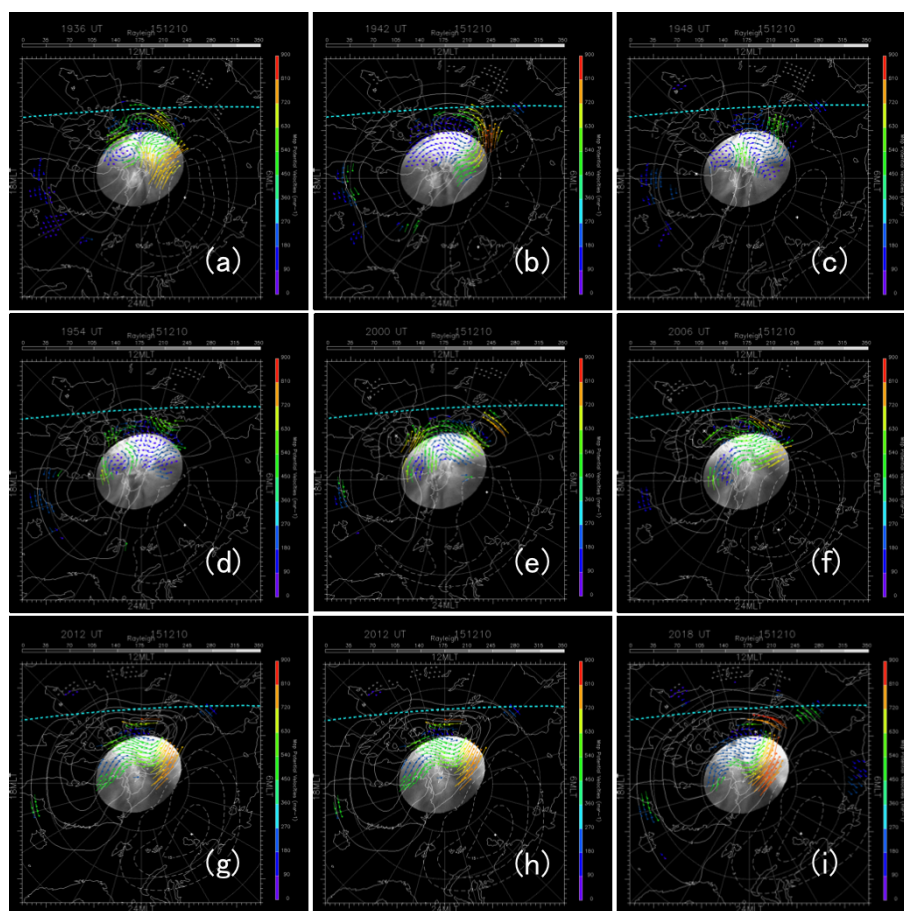


図 5.5: 2015 年 12 月 10 日 1936 - 2018 UT に観測された 630.0 nm 大気光の 10 分毎のデータ, (a) - (i) 順に 10 分毎になっている。

### 5.2.2 静穏時における極冠パッチの性質

次に静穏時に発生する極冠パッチについて考察を行う。表 5.6、5.7 に着目すると、静穏時において発生する極冠パッチは棒状極冠パッチと TOI が不定形の極冠パッチよりも発生頻度が高く、一定速度の極冠パッチが大多数を占めていることが見て取れる。不定形の極冠パッチは対流により極冠域に取り込まれた日照域プラズマを、IMF  $B_y$  による対流の形状と IMF  $B_z$  による対流の大きさの急激な時間変化により細かく分断されると考えられる。しかし、静穏時では多くの場合、IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$  の変動が小さいため、それに伴う極冠プラズマ対流の形状と大きさは大きくは変化しないと考えられる。よってプラズマ対流が日照域プラズマを分断しにくい状況であるため、棒状や TOI といった大きな構造かつ一定速度の極冠パッチが頻繁に観測されたと考えられる。例として 2016 年 1 月 31 日の 0000 - 1200 UT に発生した極冠パッチを取りあげる。図 5.6 は 2016 年 1 月 31 日のデータであり、上から IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$ 、全天画像の南北断面のケオグラムである。横軸はそれぞれ時間を

表しており、IMF のプロットの縦軸は大きさ、ケオグラムの縦軸は南北断面を表している。また、ケオグラムのカラースケールは白いほど明るいことを示している。図 5.7 は同期間の 10 分ごとのデータマッピングであり、宇宙から地球を見下ろす座標系にイウレカから得たデータと SuperDARN から得た対流のデータと Terminator をプロットしたものである。全天画像のカラースケールは白いほど明るいことを示しており、SuperDARN のカラースケールは赤いほど対流の速度が速いことを示している。図 5.6 から IMF  $B_y$  は正に一定であり、IMF  $B_z$  は負に一定であることがわかる。それに伴い、図 5.7 において対流の形状、大きさ共に変化していないことがわかる。以上より、静穏時に伴う極冠パッチは IMF の変動が小さいため、棒状や TOI といった大きな構造かつ速度の速い極冠パッチが発生することが判明した。

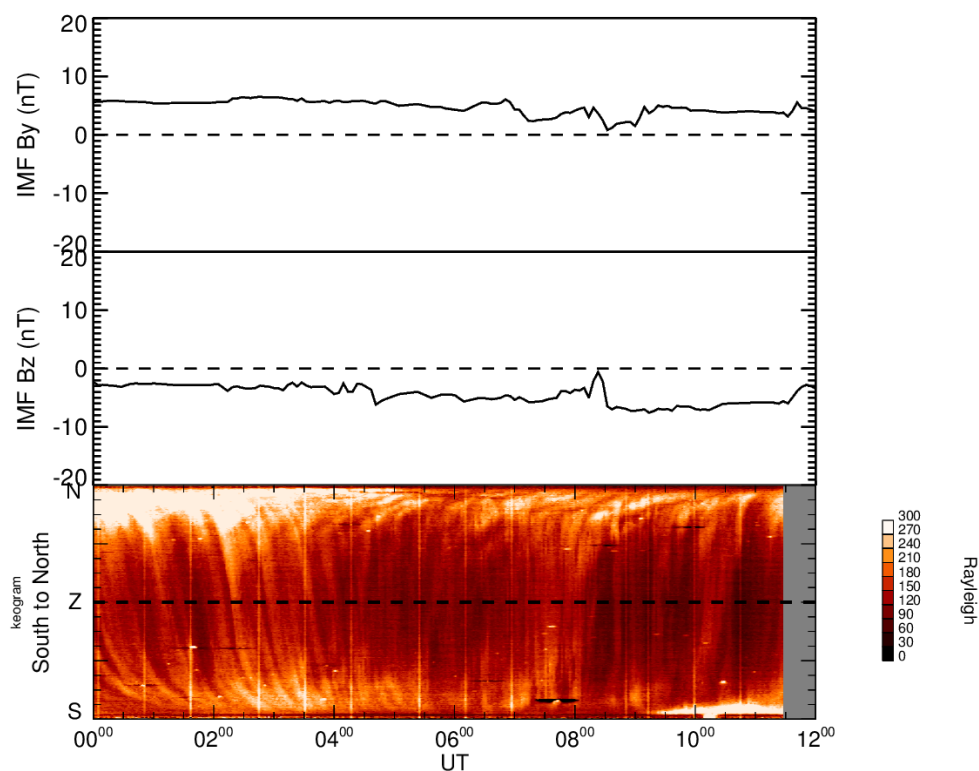


図 5.6: 2016 年 1 月 31 日の 0000 - 1200 に観測された IMF と全天画像の南北断面のケオグラム, 上から順に IMF  $B_y$ , IMF  $B_z$ , ケオグラムとなっている。

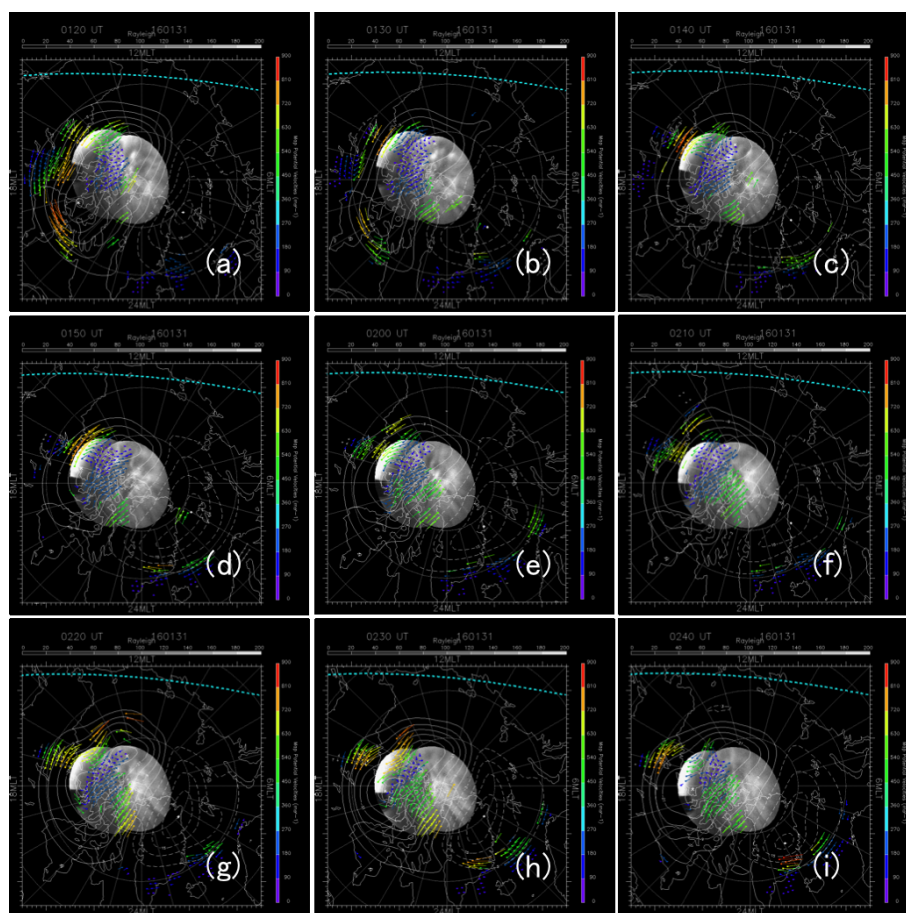


図 5.7: 2016 年 1 月 31 日 0120 - 0240 UT に観測された 630.0 nm 大気光の 10 分毎のデータ, (a) - (i) 順に 10 分毎になっている。

### 5.2.3 CME 発生に伴う極冠パッチの性質

最後に CME 発生に伴う極冠パッチについて考察を行う。表 5.6, 表 5.7 に着目すると、CME 発生に伴う極冠パッチは速度が一定かつ棒状の極冠パッチと TOI に限られることがわかる。これは CME 発生に伴う IMF の変動が原因であると考えられる。CME に伴う IMF  $B_z$  は一般的に長時間の間大きく南向きに触れることが知られている。今回観測された 3 つの CME 発生に伴う極冠パッチのイベントは全て IMF  $B_z$  が -10 nT で安定していた。例として 2015 年 11 月 7 日の 0000 - 0800 に発生した極冠パッチを取りあげる。図 5.8 は 2015 年 11 月 7 日のデータであり、上から IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$ 、全天画像の南北断面のケオグラムである。横軸はそれぞれ時間を表しており、IMF のプロットの縦軸は大きさ、ケオグラムの縦軸は南北断面を表している。また、ケオグラムのカラースケールは白いほど明るいことを示している。図 5.9 は同期間の 10 分ごとのデータマッピングであり、宇宙から地球を見下ろす座標系にイウレカから得たデータと SuperDARN から得た対流のデータと

Terminator をプロットしたものである。全天画像のカラースケールは白いほど明るいことを示しており、SuperDARN のカラースケールは赤いほど対流の速度が速いことを示している。図 5.9 から極冠パッチが発生している 0000 - 0800 UT では IMF  $B_z$  が -10 nT で一定であることがわかる。それに伴い、図 5.9 において対流は磁気緯度 70 度にまで達しており、また形状、大きさ共に変化していないことがわかる。他の 3 例でも同様の IMF  $B_z$  とプラズマ対流が確認された。以上より、CME 発生に伴う極冠パッチは一定速度かつ棒状の極冠パッチと TOI のように大きな構造に限られることが判明した。

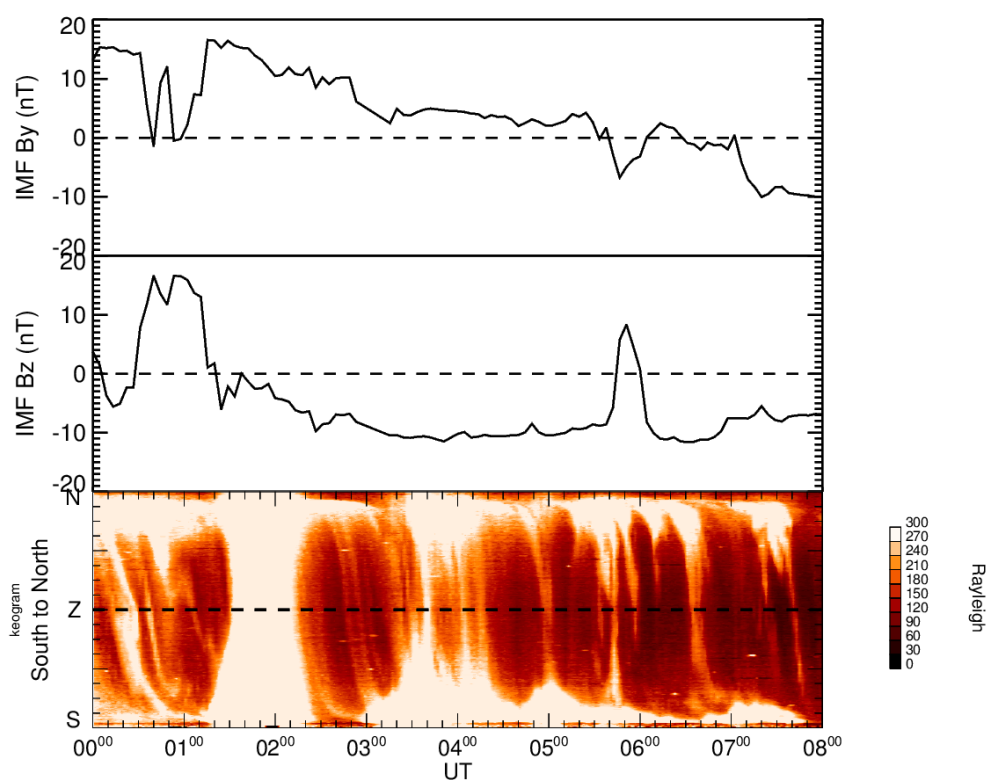


図 5.8: 2015 年 11 月 7 日の 0000 - 0800 に観測された IMF と全天画像の南北断面のケオグラム, 上から順に IMF  $B_y$ , IMF  $B_z$ , ケオグラムとなっている.

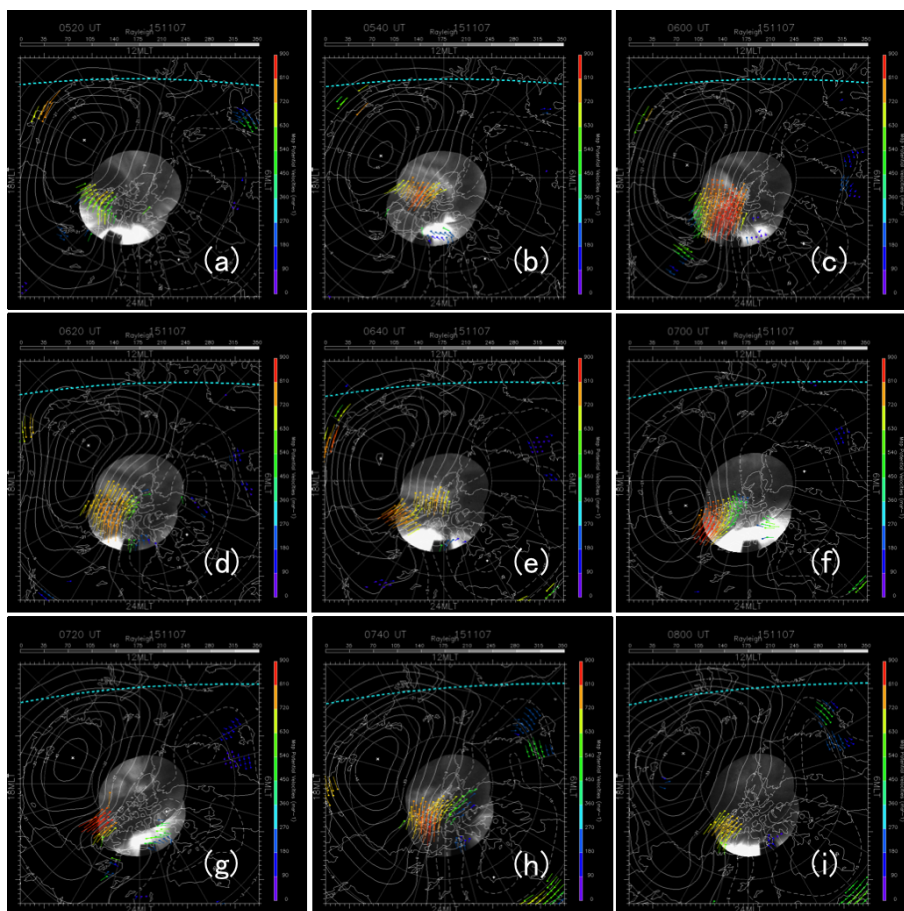


図 5.9: 2015 年 11 月 7 日 0520 - 0800 UT に観測された 630.0 nm 大気光の 10 分毎のデータ, (a) - (i) 順に 10 分毎になっている。

#### 5.2.4 発生要因別の極冠パッチの形状、速度に関するまとめ

以上の 3 つのパターンの比較から判明したことをまとめると以下ようになる。

- CIR 発生に伴う極冠パッチの形状は IMF  $B_y$  の変動の大きさによって決定される。
- CIR 発生に伴う極冠パッチは長期間発生している場合は速度が一定でないことが多く、短期間発生している場合はその期間中の IMF  $B_z$  の変動によって速度が決定する。
- 静穏時に伴う極冠パッチは IMF の変動が小さいため、棒状や TOI といった大きな構造かつ速度の速い極冠パッチが発生する
- CME 発生に伴う極冠パッチは一定速度かつ棒状の極冠パッチと TOI に限られる

以上の 4 つに共通していることから、CME、CIR、静穏時に限らず、極冠パッチの形状は IMF  $B_y$  に依存し、速度は IMF  $B_z$  に依存することが判明した。

## 第6章 結論

本研究では定常的な太陽風データと、磁気北極に近接しており、極夜の時期には MLAT/MLT 極座標系においてほぼ定点と考えられる場所での 24 時間連続観測が可能なカナダ・イウレカでの光学観測を組み合わせ、大量のイベントの解析を通じて CME, CIR, 静穏時の 3 つの太陽風のパターンと極冠パッチの性質を比較を行なった。その結果、これまでの研究では議論されていなかった CME, CIR, 静穏時における極冠パッチの性質を明らかにすることができた。CIR、CME、静穏時に伴う極冠パッチ性質について明らかになったことをそれぞれまとめる。

CIR 発生に伴う極冠パッチについて判明したことは以下の 4 点である。

- 目視による正確な極冠パッチの検出を行なった結果、CIR 発生に伴う極冠パッチの割合が 70 % を占めていたことから、極冠パッチの主な発生要因は CIR であると言える。
- CIR は太陽活動に合わせて約 27 日周期で回帰的に発生することに加え、極冠パッチの主な発生要因は CIR であるため、極冠パッチの予測は可能である。
- 今後太陽活動が低下していき、CIR が発生しにくい状態になるため CIR が主な発生要因である極冠パッチはそれに伴い発生頻度が低くなる。
- CIR 発生に伴う極冠パッチの形状は IMF  $B_y$  の変動の大きさによって決定され、速度は IMF  $B_z$  の変動によって決定される。

CME 発生に伴う極冠パッチについて判明したことは以下の 2 点である。

- 地球に影響を及ぼすほどの CME は年に数回しか発生せず、観測可能な時間帯に影響が到来した場合のみ極冠パッチを観測できるため、CME 発生に伴う極冠パッチは発生頻度は低いが、CME の影響は発生後 3-4 日で到来するので、発生予測は直前に行うことが可能である。
- CME 発生に伴う IMF の値は安定しており、それに伴いプラズマ対流の形状、大きさも変動しないため、CME 発生に伴う極冠パッチは一定速度かつ棒状の極冠パッチと TOI に限られる。



静穏時における極冠パッチについて判明したことは以下の2点である。

- 静穏時における極冠パッチは IMF  $B_z$  が宇宙空間の状態によって偶然負に振れたことによって発生したと考えられるので発生予測は困難である。
- 静穏時では多くの場合、IMF  $B_y$ 、IMF  $B_z$  の変動が小さく、それに伴う極冠プラズマ対流の形状と大きさは大きくは変化せず、プラズマ対流が日照域プラズマを分断しにくい状況であるため、棒状や TOI といった大きな構造かつ一定速度の極冠パッチが頻繁に発生する。

## 謝辞

本研究にあたり、多くのご指導、助言をいただきました細川 敬祐准教授に深く感謝いたします。また、分からないことを親切に教えて頂いた院生のみなさんに感謝致します。共に苦勞を分かち合い、研究に打ち込んだ細川研究室のみなさんにも御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] **Kataoka, R., Y. Miyoshi (2006)**, Flux enhancement of radiation belt electrons during geomagnetic storms driven by coronal mass ejections and corotating interaction regions, *Space Weather*, 4, S09004, doi: 10.1029/2005SW000211
- [2] **Heppner, J. P., and N. C. Maynard (1987)**, Empirical high-latitude electric field models, *J. Geophys. Res.*, 92, 4467
- [3] **Foster, J. C., A. J. Coster, P. J. Erickson, J. M. Holt, F. D. Lind, W. Rideout, M. McCready, A. van Eyken, R. J. Barnes, R. A. Greenwald, F. J. Rich (2005)**, Multiradar observations of the polar tongue of ionization, *J. Geophys. Res.*, 110, A09S31, doi:10.1029/2004JA010928
- [4] **Hosokawa, K. S. Taguchi, K. Shiokawa, Y. Otsuka, Y. Ogawa, and M. Nicolls (2013)**, Global imaging of polar cap patches with dual airglow imagers, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1-6, doi:10.1002/2013GL058748.
- [5] **Weber, E. J., J. Buchau, J. G. Moore, J. R. Sharber, R. C. Livingston, J. D. Winningham, and B. W. Reinisch (1984)**, F Layer Ionization Patches in the Polar Cap, *J. Geophys. Res.* 89, 1459
- [6] 細川敬祐, 電離圏・熱圏大気波動の低緯度伝搬 - 観測から見えるその描像 -, MTI-HandBook. 2006.
- [7] **Hosokawa K., T. Tsugawa, K. Shiokawa, Y. Otsuka, T. Ogawa and M. Hairston (2009)**, Unusually elongated, bright airglow plume in the polar cap F region: Is it a tongue of ionization?, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07103, doi: 10.1029/2009GL037512
- [8] **Hosokawa K., T. Tsugawa, K. Shiokawa, Y. Otsuka, N. Nishitani, T. Ogawa and M. Hairston (2010)**, Dynamic temporal evolution of polar cap tongue of ionization during magnetic storm, *J. Geophys. Res.*, 115, doi: 10.1029/2010JA015848

- [9] **Andres, M. J, L. A. Balmaceda and E. E. DeLuca (2013)**, Using the dipolar and quadrupolar moments to improve solar cycle predictions based on the polar magnetic fields, *Phys. Rev. Lett.*, 111, 041106