

博士学位論文

太陽活動第 23 周期と第 24 周期における
低緯度コロナホール面積と太陽風速度
および地磁気活動の相関について

令和元年 9 月

茨城大学理工学研究科博士後期課程
宇宙地球システム科学専攻

中川裕美

要旨

地球周辺の宇宙環境において、主に太陽からの高エネルギー粒子や電磁波によりじょう乱が発生することがある。これを宇宙天気と呼び、そのじょう乱の規模や継続時間を予報する試みがなされている。宇宙天気の観点から重要な太陽活動のひとつがコロナホール (Coronal hole: CH) である。CH は X 線や紫外線で太陽を観測すると周囲の太陽コロナより暗く見える領域である。CH は宇宙空間に向かって開いた磁場構造をしており、高速太陽風の吹き出し口になっている。CH から吹き出した高速太陽風が低速太陽風と相互作用すると共回転相互作用領域 (Corotating interaction region: CIR) と呼ばれる磁場構造が形成されることがある。CIR が地球近傍に到達すると地球磁気圏のじょう乱を引き起こす。CH は太陽極域に出現することが一般的だが、太陽活動が衰退する時期には低緯度にも現れることがある。このような低緯度 CH を起源とする高速太陽風の地球磁気圏・電離圏への影響は、極域 CH を起源とする高速風の影響に比べて十分に評価されていない。よって、本研究では赤道域 CH を起源とする高速太陽風が地球磁気圏・電離圏に与える影響を評価するため、太陽周期第 23 周期および第 24 周期 (1996 年から 2017 年) における CH 面積・太陽風パラメータ・惑星間空間磁場 (Interplanetary magnetic field: IMF) と、3 種類の地磁気指数 (AU・AL・SYM-H) および磁気圏対流電場と放射線帯電子フラックスの変動を統計的に解析した。また、IMF の空間変動によって 4 ケースに分け、各ケースについて CIR が地球磁気圏に到達した前後における太陽風・IMF・地磁気指数・対流電場・放射線帯電子フラックスの変動を調べた。結果として、太陽活動第 23 周期 (1996 年から 2008 年) では、南半球における CH 面積変動の方が北半球における変動よりも大きいという南北非対称性があることが分かった。一方、第 24 周期 (2009 年から 2017 年) では、第 23 周期と比較して緯度方向により広い範囲に CH が出現する傾向があった。また、CH 面積最大値と太陽風速度最大値には正の相関が見られ、CH 面積と太陽風速度の分布は第 23 周期の方が大きかった。太陽風パラメータ・地磁気指数については、太陽風速度と AU 指数の変動は、すべての

IMF 空間変動パターンにおいて両太陽活動周期で同程度もしくは第 23 周期における変動の方が大きい傾向にあった。一方、パラメータの種類によっては第 24 周期の変動の方がわずかに大きいものも見られた。太陽風パラメータ・地磁気指数および放射線帯電子フラックスの統計的な変動は、第 23 周期のほうが第 24 周期より大きい傾向があるが、その差は極端なものではなかった。また、磁気圏対流電場の太陽活動周期を通した変動は 23・24 両周期において顕著な差は見られなかった。これは地磁気活動の季節変化を考慮していないためであると考えられる。宇宙天気変動の観点から見ると、第 24 周期は太陽活動が地球に与える影響が比較的小さい穏やかな周期であったと結論づけることができる。本研究の解析結果全体を通して、太陽活動周期ごとの CH 面積・太陽風および地磁気活動の変動の違いを明らかにすることができた。第 23 太陽活動周期では CIR に関連する低緯度 CH が比較的多く出現する傾向があったため、より高速の太陽風が噴出し、地磁気指数や放射線帯電子フラックスの変動に影響した。一方で、第 24 太陽活動周期では第 23 と比較して低緯度に出現する CH が少なかったため、CIR に関連する高速太陽風の速度があまり増加せず、地磁気活動にあまり影響を与えなかった。今後の展望として、さらに過去の太陽活動周期についても太陽活動と地磁気活動の変動を統計的に解析し、太陽活動周期ごとの違いを比較する必要がある。

目次

1. イントロダクション	5
1.1 太陽および太陽圏の概要	5
1.2 地球磁気圏	8
1.3 宇宙天気	11
1.4 コロナホール (CH)	13
1.5 共回転相互作用領域 (CIR).....	15
1.6 太陽黒点数と太陽活動の関係.....	19
1.7 研究目的	20
2. 観測データ	22
3. 解析手法	24
3.1 解析手順の概要.....	24
3.2 CH 面積の同定.....	26
3.3 惑星間空間磁場の時間変動の分類.....	30
4. 解析結果.....	33
4.1 太陽活動第 23 周期と第 24 周期における CH 面積変動.....	33
4.2 CH 面積と太陽風速度の関係.....	35
4.3 太陽風と地磁気指数の変動.....	36
5. 考察.....	48
5.1 太陽活動第 23 および第 24 周期における CH の出現緯度.....	48
5.2 CH 面積と太陽風速度の関係.....	49
5.3 太陽風と地磁気活動の変動.....	51

6. 結論.....	58
謝辭.....	60
引用文献.....	62

1. イントロダクション

1.1 太陽および太陽圏の概要

太陽は我々の住む地球からもっとも近い恒星であり、地球すべての生命の源となる星である。太陽は古来より多くの地域で神として崇拝され、またその時々最新の科学技術によって常に研究の対象とされてきた、我々にとってもっとも身近な星である。

太陽は直径がおよそ 140 万 km (地球直径の約 109 倍)、質量が 2×10^{30} kg (地球の約 33 万倍) で、90% 以上が水素で占められているガスのかたまりである。中心部の温度はおよそ 1500 万 K、密度は 156 g/cm^3 で、太陽中心からおよそ 10 万 km までの中心核では、水素原子 4 つからヘリウム原子核 1 つが作られる核融合反応が起きている。生成されたエネルギーは放射層、対流層を通過して太陽表面に向かって輸送されていく。対流層より外側では、さまざまな特徴を持つ太陽大気が層をなしている。普段我々が空を見上げて見える太陽は、可視光で見ることのできる光球 (厚さ 300 km、温度 6000 K) である。光球ではすぐ下の対流運動が粒状斑として見えており、また黒点などの周囲より強い磁場を持つ領域が観測される。光球の上部には厚さ数千から 1 万 km、温度がおよそ 1 万 K の彩層が存在する。彩層は皆既日食のとき太陽の輪郭に沿って淡紅色に見える領域である。彩層のさらに上部には、遷移層と呼ばれる急激な温度勾配を持つ薄い層を隔てて、非常に高温で密度の希薄なコロナが存在している。コロナは彩層と同様に皆既日食のとき肉眼で確認することができ、太陽が完全に隠れると太陽のまわりに広がる真珠色に輝くコロナを見ることができる。また、山頂など標高の高い場所でコロナグラフと呼ばれる特殊な望遠鏡を用いて観測することもできる。コロナの温度は 100 万 K を超える高温で、これほどの温度になると、太陽の主成分である水素原子は原子核と電子に分かれてバラバラになっている。そのため、密度はコロナ下部で 10^{-13} g/cm^3 程度と非常に希薄である。コロナでは活動が活発な領域 (活動領域) と、周囲のコロナより密度・温度が低い領域 (コロナホール) が観測される。

1958年、Parkerによってコロナの高温プラズマは超音速の流れとして絶えず宇宙空間に流れ出しているという理論が提唱された。この超音速流を太陽風と呼ぶ。太陽風は平均速度が700–800 km/sの高速風と300–400 km/sの低速風に区分され、太陽活動が静穏な時期は緯度方向に急峻な速度勾配で隔てられている(図1)。太陽風の影響はおよそ100天文単位(1天文単位は約 1.5×10^8 km)まで及び、その範囲を太陽圏と呼ぶ。太陽風によって太陽磁場の磁力線は惑星間空間へ引き伸ばされる。これを惑星間空間磁場(Interplanetary magnetic field: IMF)と呼び、磁力線は太陽の自転の影響でアルキメデスの螺旋を描く(図2)。

太陽ではさまざまな現象が発生し、地球周辺の宇宙環境に影響を及ぼすことがある。たとえば、太陽フレアは太陽大気中における爆発的増光現象である。フレアが発生すると可視光だけでなくすべての波長域の電磁波強度が増加する。フレアの発生時間は数分から数時間程度で、1個のフレアで 10^{22} から 10^{25} J ものエネルギーが放出される。コロナ質量放出(Coronal Mass Ejection: CME)は、大量の質量を持った構造が突発的に宇宙空間に放出される現象である。典型的な質量は 10^{15} g、速度は100–2000 km/s、全運動エネルギーはフレアと同程度である。CME中の磁場はらせん状をしていることが多く、その軸は東西を向いていることが多い。つまりCME中には南向き磁場が含まれており、それが地球昼側磁気圏の北向き磁力線と再結合することで、CMEのエネルギーが地球磁気圏に侵入する。

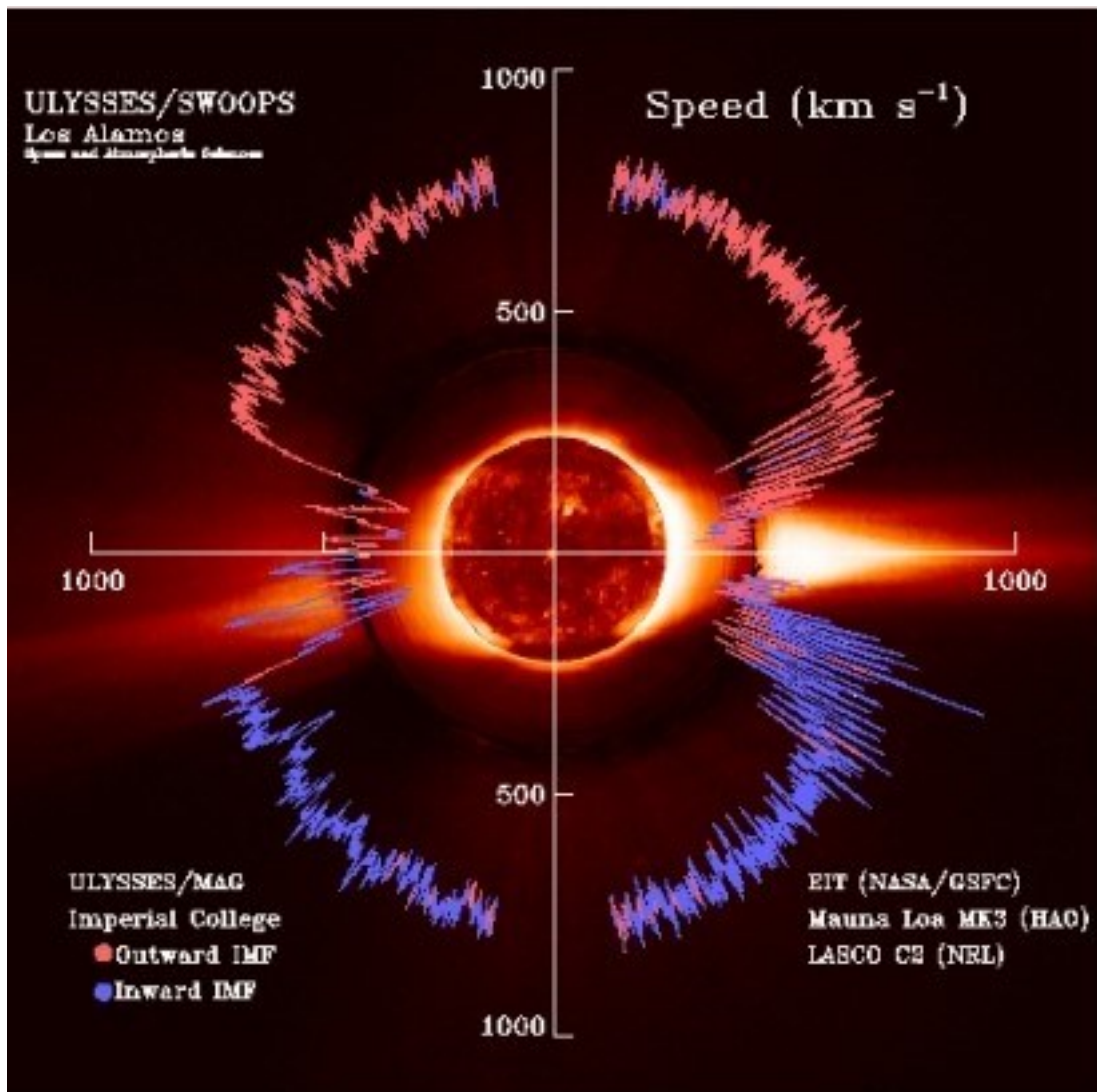


図 1: 探査機 Ulysses で観測された 1998 年 4 月 15 日の太陽風速度。十字の目盛りは速度を表す。赤線と青線はそれぞれ、太陽から離れる方向、太陽に向かう方向の惑星間空間磁場 (IMF) を表す。 <http://sci.esa.int/ulysses/12399-swoops-solar-wind-speed-data/> より。

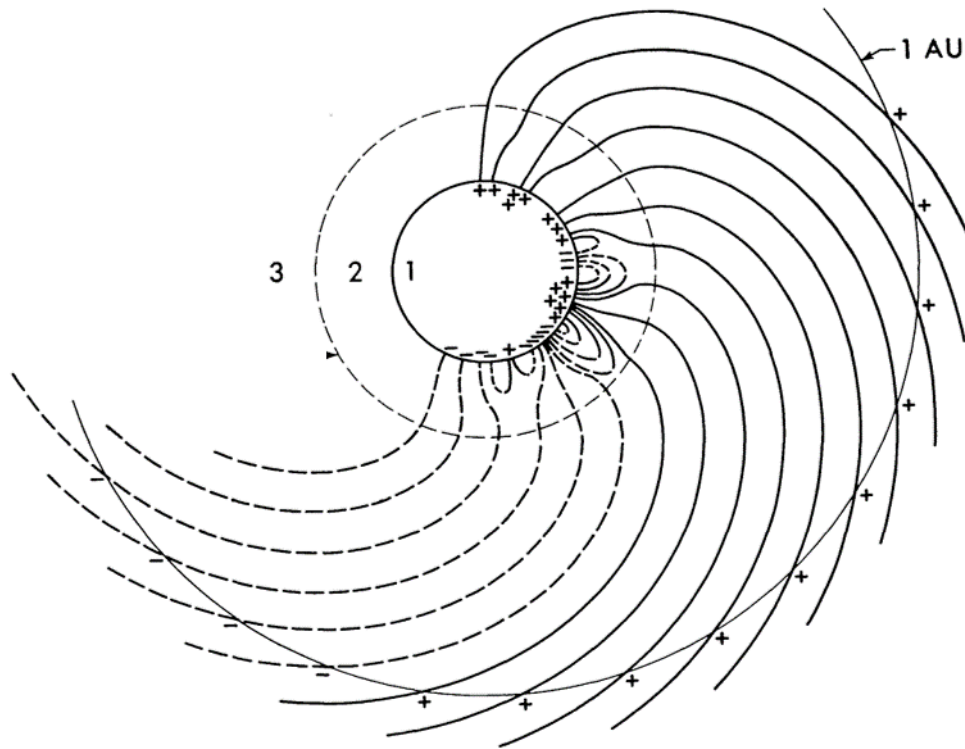


図 2: 太陽を北から見た IMF の模式図。実線と点線は磁力線を、+と-の符号は磁力線の極を表す。太陽の自転の向きに合わせて磁力線が螺旋状に渦巻く様子を示している。Schatten et al. (1969) より一部改変。

1.2 地球磁気圏

地球は固有の磁場を持ち、その磁場構造は双極子型に近似することができる。この地球磁場の影響化にある範囲を地球磁気圏と呼ぶ。地球磁気圏は太陽風プラズマの地球への直接の侵入を阻む遮蔽版の役割を果たしている (図 3)。地球磁気圏昼側 (太陽方向) では太陽風の動圧と磁力線の磁気圧が釣り合うところで境界が存在し、これを磁気圏境界面と呼ぶ。昼側の磁気圏境界面は地球半径の 10 倍付近に位置している。一方、夜側 (太陽と反対方向) の境界面は太陽風によって吹き流しのように長く引き伸ばされており、磁気圏尾部と呼ばれる。尾の長さは地球半径の数百倍にも引き伸ばされている。昼側境界面の外側には、太陽風が衝突することによりバウショックと呼ばれる衝撃波面が形成される。磁気圏

の夜側では地球半径の数倍程度の厚さのプラズマがシート状になった領域 (プラズマシート) が形成され、プラズマは太陽方向に対流運動をしている。その外側のローブ領域ではプラズマは太陽と反対方向に対流している。

地球半径の 6.6 倍の距離 (高度の場合 6.1 倍) は人工衛星の静止軌道にあたり、それより内側の地球に近い領域は内部磁気圏と呼ばれる。内部磁気圏では数十 keV のイオンや電子から構成される環電流 (リングカレント) が流れることがある。リングカレントは地球半径の 4–6 倍付近の赤道緯度で観測される西向き電流である。プラズマシートのプラズマは地球付近に輸送されてくると、地球磁場勾配によって正の電荷をもつイオンは西向きにドリフトし、負の電荷を持つ電子は東向きにドリフトする。その結果、西向き電流であるリングカレントが流れる。リングカレントが流れると南向きの磁場が新たに発生し、地球磁場の磁力線と作用し地磁気を弱める効果を生む。その結果、地球磁場がじょう乱することがある (図 4)。これを地磁気嵐と呼ぶ。地磁気嵐は中・低緯度の地磁気水平成分が数時間で大きく減少する現象として定義される。弱まった地磁気は数十時間程度かけて回復する。地磁気嵐の規模を示す指標としては Dst 指数や SYM-H 指数がよく用いられる。Dst 指数は低-中緯度磁気圏のじょう乱の指標として用いられ、低緯度で経度方向に等間隔の 4 観測点における磁場変動の北向き成分の平均値で示される。SYM-H 指数は中緯度で経度方向に等間隔の 6 観測点における磁場変動の北向き成分の平均値を赤道上での値に規格化したものである。SYM-H 指数の値はほぼ Dst 指数の値の 1 分値に相当する。地磁気の変動を表す指数は他に AU 指数や AL 指数がある。これらは電離圏 (地表から高度 60–1000 km 付近の領域) の高緯度で流れるオーロラエレクトロジェット電流と呼ばれる電流の強度を表すもので、AU 指数は東向き、AL 指数は西向きの電流の強さに対応する。AU 指数と AL 指数の差を取ったものは AE 指数と呼ばれる。

プラズマシート中の粒子は太陽方向に向かって移動し、磁気圏昼側で太陽と反対方向に戻る運動をしており、この運動は磁気圏対流と呼ばれる。プラズマシート中では朝側から夕方側に向かって対流電場が発生しており、この電場ののは

たらきによってプラズマは磁気圏対流をする。

また、内部磁気圏には放射線帯と呼ばれる領域が存在している。放射線帯は1958年に Van Allen らの観測によって発見された (Van Allen et al., 1958; Van Allen and Frank, 1959) もので、地球半径のおよそ 1.5 倍の領域に電子フラックスピークを持つ内帯と、4 – 5 倍程度の領域に電子フラックスピークがある外帯の二重構造になっている。地球半径の 2 – 3 倍程度の領域にはイオンのフラックスピークがある。太陽活動により放射線帯の高エネルギー粒子密度が上がると、人工衛星表面の帯電や内部回路の誤作動を引き起こすことがある。

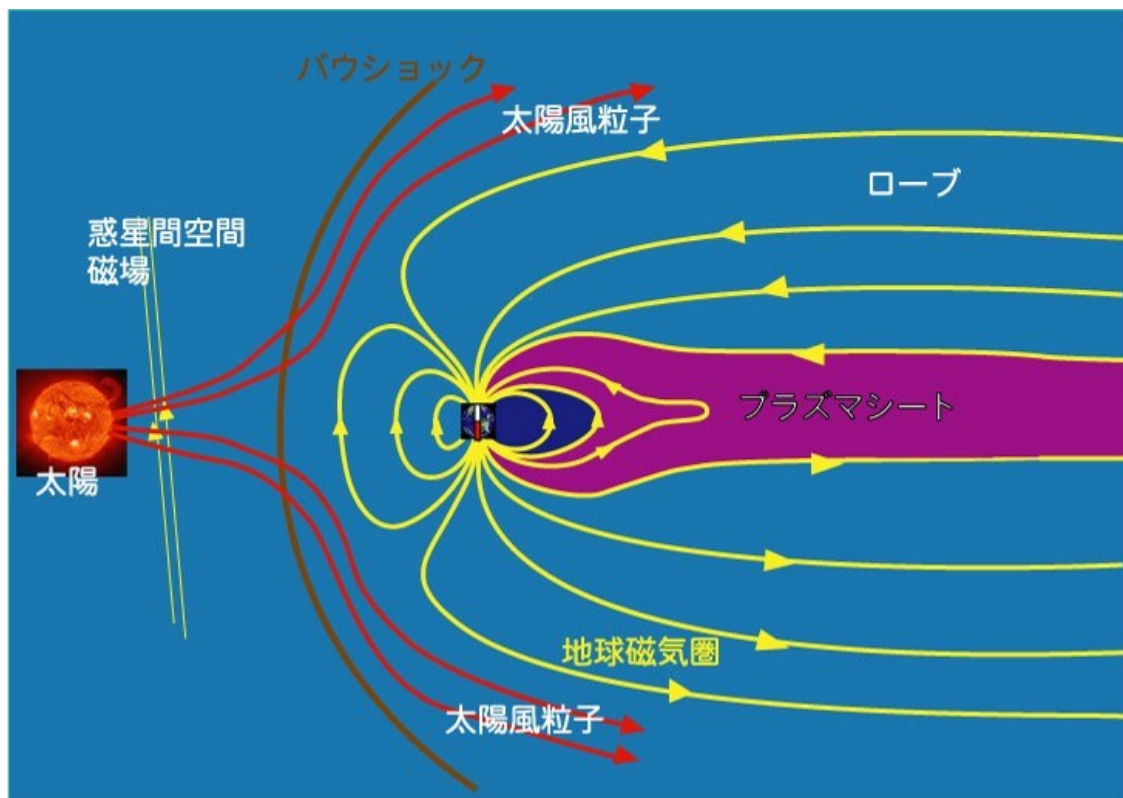


図 3: 地球磁気圏の模式図。地球磁場の磁力線によって太陽風の粒子が遮蔽される。磁気圏の夜側は太陽風によって長く引き伸ばされる。 http://www.museum.kyushu-u.ac.jp/publications/special_exhibitions/PLANET/06/06-2.html より。

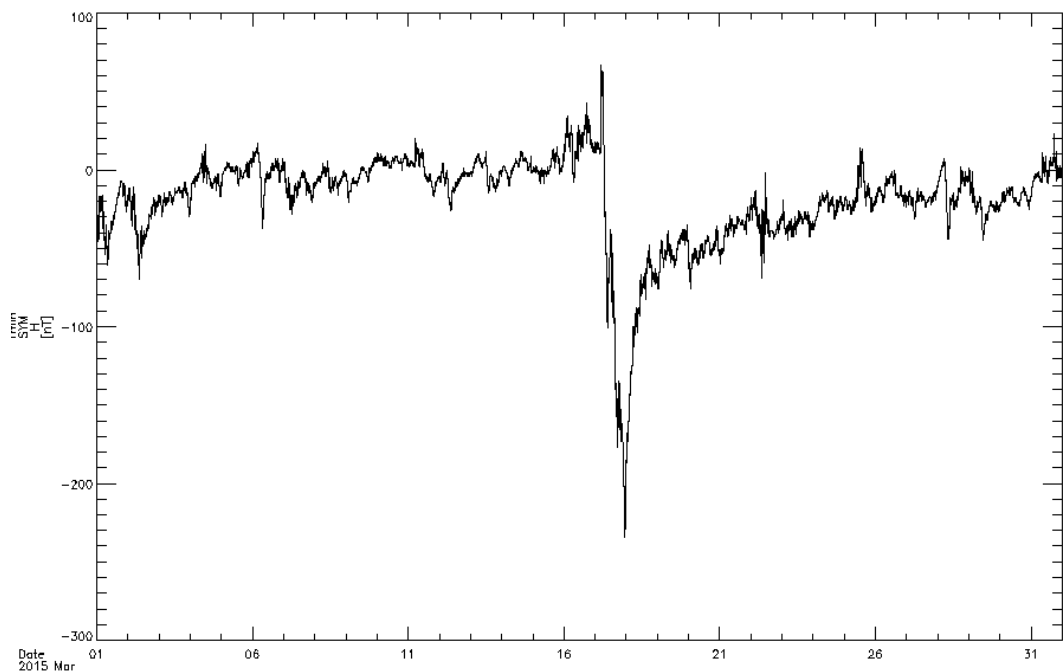


図 4: 2015 年 3 月 17 日の SYM-H 指数の変動。“St. Patrick's Day Event”と呼ばれる大規模な地磁気嵐が観測されている。

1.3 宇宙天気

近年、人類の社会的・経済的活動の場は地球を飛び出し宇宙まで及んでいる。地球の上空では通信・衛星放送・位置情報を知らせる GPS など、さまざまな目的で数多くの人工衛星が運用され、国際宇宙ステーションでは常に一定数の人間が活動している。また、最近では民間人初の月面旅行が発表されるなど、人間活動における宇宙への依存はさらに加速することが予想される。

そこで問題となるのが、地球近傍の宇宙空間（ジオスペース）の環境の変動である。ジオスペースは太陽から定常的・突発的に影響を受けており、地球磁気圏をはじめとする超高層大気のパラズマ環境は常に変化している。そのような変化は地上の天気になぞらえて「宇宙天気」と呼ばれる。Schwenn (2006) によると宇宙天気は”the conditions on the Sun and in the solar wind, magnetosphere, ionosphere,

and thermosphere that can affect the performance and reliability of space-borne and ground-based technological systems and that can affect human life and health (宇宙および地上の技術システムの性能および信頼性に影響を及ぼし、人間の生命および健康に影響を及ぼす可能性がある、太陽および太陽風、磁気圏、電離圏および熱圏における条件)”と定義されている。

これまでに、宇宙天気の変動によって社会生活が影響を受けた事例は数多く報告されている。1989年3月には地磁気嵐の発生に伴って、カナダのケベック州で大規模な停電が起こった。これは、地磁気嵐によって誘導電流が流れ、電力システムの変圧器が損傷したためであった (Boteler, 2001)。2003年にはスウェーデンで磁気嵐のため送電システム障害による停電が起こっている (Pulkkinen et al., 2005)。また、2017年9月に発生した大規模フレアによって地磁気嵐が発生した (Redmon et al., 2018)。この時は地球大気のじょう乱によってGPS測位データに誤差が生じた。さらに、フレアなどによって地球に降り注ぐ高エネルギー粒子が突発的に増加すると、航空機乗務員などの健康に悪影響を及ぼす危険性もある。フレアなどによって放出された太陽プロトン粒子が地球大気に降り注ぐと、航空機が飛行する高度の放射線量が増加し、乗務員の被ばく量が増える可能性がある。国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection: ICRP) の2015年の報告によると、1997年1月に高度17600 m で1時間当たり10 mSv の放射線量を観測し、エールフランスの航空機は高度を16000 m まで下げて航行することとなった。このときの総被ばく線量は通常の4倍で、当時は強い太陽イベントが観測されていた (ICRP, 2015)。

このように、宇宙天気のじょう乱は人間活動にさまざまな影響をおよぼすことから、その規模と期間を予測する必要がある。このような試みを「宇宙天気予報」と呼ぶ。日本では国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) の宇宙天気予報センターが最新の宇宙天気変動を発信している。センターのホームページでは、太陽フレアやプロトンイベントなどの太陽活動や地球磁気圏の変動を確認することができる。

本研究では太陽活動周期ごとの地球磁気圏の応答を比較しているが、過去において太陽活動がどのように変動し、宇宙天気変動にどのような影響を及ぼしたのかを明らかにすることは、宇宙天気分野の発展に寄与すると期待される。

1.4 コロナホール (CH)

1950年代、地上の太陽コロナ観測からコロナ強度が弱い領域が発見され、1960年代に観測ロケットによる極端紫外線・X線領域の撮像観測から、コロナホール (Coronal Hole: CH) の存在が確認された。図5は Solar Dynamics Observatory (SDO: Lemen et al. 2012) に搭載されている Atmospheric Imaging Assembly (AIA) で撮影された太陽全面画像である。太陽表面の北極域から赤道付近にかけて暗い領域が広範囲に出現しており、これが CH である。CH はコロナ領域の中でも強度が極端に小さい領域で、光球や彩層では輝度にあまり差は見られないが、極端紫外線や X 線で観測すると穴のように黒く見える。CH 領域の電子密度は周囲のコロナの 1/3 から 1/10 程度の低密度で、温度もおよそ 100 万 K と低温である。

太陽活動が極大期から極小期に移行していく衰退期には、CH が太陽表面の極域から低緯度にかけて伸びていくことがある。また、CH は太陽の自転速度に比べて剛体的な運動をするため、形状を維持したまま太陽の自転周期である約 27 日ごとに観測することができる。さらに、太陽の静穏領域の磁場は閉じた構造をしているが、CH の磁場は単極で宇宙空間に開いた構造をしている。その開いた磁力線に沿って比較的高速の太陽風 (800 km/s 程度) が吹き出している。Tokumaru et al. (2017) では 1995 年から 2011 年の CH 面積と太陽風速度の相関について調査され、CH 面積と速度の 2 乗に正相関があることが示された。

CH 起源の高速太陽風による地球磁気圏・電離圏のプラズマ環境の変動の特徴については、これまでさまざまな研究がされている [e.g., Harvey and Sheeley (1978), Sheeley and Harvey (1981), Verbanac et al., (2011a), Verbanac et al. (2011b)]。Harvey et al. (2000) や Harvey and Recely (2002) では太陽周期を通した高速太陽

風の地磁気活動への影響が解析されている。たとえば Harvey and Recely (2002) 1989年から2002年における極域CHを測定し、極域CHは極軸に対して非対称に出現すること、しばしば活動領域まで延びるローブを持つことが分かった。しかし、この研究では極域CHの長期間の変動に注目しているため、独立した赤道域のCHについても同様に評価するべきであると Tsurutani et al. (2006b) では言われている。Gopalswamy et al. (2015b) によると、極域CHは次の太陽活動周期における極域磁場の強さおよび活動度の指標になり (Gopalswamy et al. 2012; Selhorst et al. 2011; Shibasaki 2013; Mordvinov and Yazev 2014; Altrock 2014)、一方で赤道域CHは地球に到達する high-speed stream (HSS) と CIR のよい指標になる (Tsurutani et al. 1995, 2006a; Cranmer 2009; Verbanac et al. 2011a; Akiyama et al. 2013; Borovsky and Denton, 2013) とされている。最近では23・24太陽周期におけるCHの発生緯度について多くの研究がされている。McIntosh et al. (2015) は23太陽周期におけるCH面積の50日移動平均が、2004年から2005年を除いて南半球の変動の方が北半球よりも大きいことを示した。Abunina et al. (2015) は2002年から2013年に観測された300以上のCHを極性および出現緯度で分類し、「transequatorial」「北半球の負極性」「南半球の正極性」のCHがその他のCHより地磁気活動を強化することを示した。Lowder et al. (2016) は1996年5月から2014年10月においてSOHO/EIT195Å and SDO/AIA193Åで特定されたCH面積から、南半球のCH出現緯度分布は1996年から2008年間に北半球よりも大きく、2009年以降のCH分布は23太陽周期のCH分布よりも小さいことを示した。Bagashvili et al. (2017) では2013年1月から2015年4月において観測された3056のCHについて、面積が40000 Mm²のグループのCHが緯度-60度付近に集中していることが分かった。

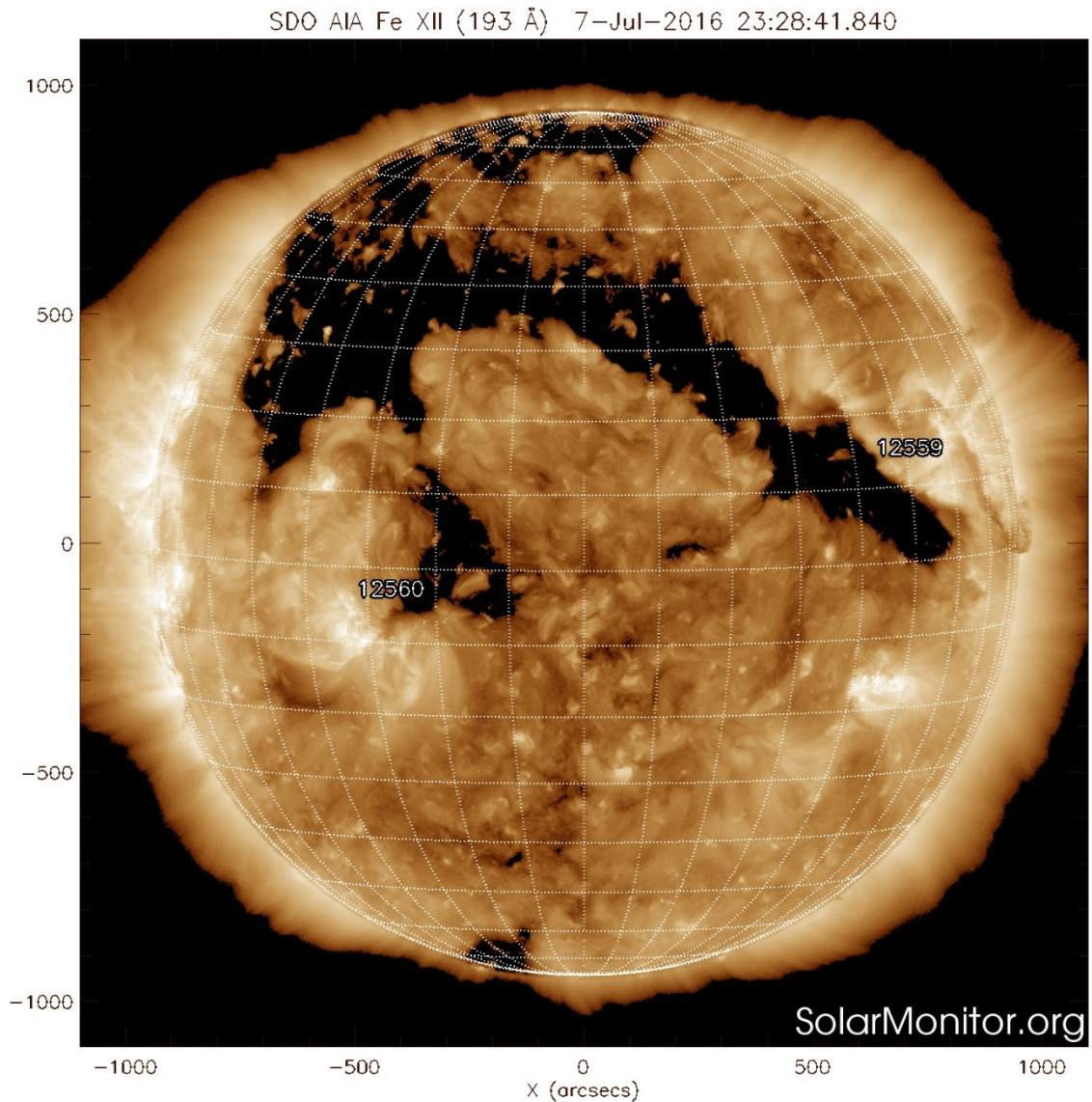


図 5: SDO/AIA 193 Å で撮像された 2016 年 7 月 7 日のコロナホール (CH)。北極域から出軌道付近にわたって CH が広範囲に出現しているのがわかる。<https://www.solarmonitor.org/> より。

1.5 共回転相互作用領域 (CIR)

高速太陽風が低速太陽風に追いつくと両者の境界面でプラズマ密度と磁場が圧縮され磁場強度が強化される。このような磁場構造は共回転相互作用領域 (Corotating interaction region: CIR) と呼ばれる (図 6)。CIR が地球近傍に到達する

と、太陽風や地磁気指数の変動は特徴的な構造を示す。CIRの境界面では、太陽風速度および温度の増加、かつ密度の減少が見られる(図7)。CIRが地球磁気圏に到達すると、磁気圏活動が上昇しプラズマ環境が変化することがある。CIRやコロナ質量放出(Coronal mass ejection: CME)はジオスペースのプラズマ環境を変化させる要因のひとつであるが、地球磁気圏に対するその影響はCIRとCMEで異なる。Borovsky and Denton (2006)はバウショック、マグネトシース、放射線帯、リングカレント、オーロラ、プラズマシート、対流電場、地磁気の脈動、人工衛星の帯電、極冠の飽和に対する応答がCIR起源の磁気嵐とCME起源の磁気嵐で異なることを示し、CME起源の磁気嵐は地球の電場システムに深刻な問題を引き起こし、CIR起源の磁気嵐は地球周辺の宇宙環境に影響を与えることを指摘した。一方で、CH面積・high-speed stream (HSS)またはCIRおよび地磁気指数の関係は太陽活動周期の中でCMEの活動が低い時期の地磁気活動を予測するのに用いることができる(Verbanac et al., 2011b)。Alves et al. (2006)は磁気嵐の大きさをDst指数の値に応じて3つのレベルに分類することで、1964年から2003年における727のCIRが磁気圏に与えた影響を調べた。結果、CIR全体の33%が中 - 大規模な磁気嵐(Dst < -50 nT)を引き起こしたことが分かった。Zhang et al. (2008)では23太陽周期(1996 - 2005)におけるCIRの太陽圏内(<1 AU)での地磁気活動に対する影響が調査され、CIRの50%が太陽活動衰退期に典型的な惑星間ショックを発生させ、89%が磁気嵐に関連していた。これらの結果から、CIRは磁気嵐の発生に必ずしも必要ではないものの、大部分のCIRは磁気嵐に関連することが示された。Verbanac et al. (2011a)は中央子午線から $\pm 10^\circ$ の範囲で観測されたCH面積・太陽風速度・IMFおよび地磁気指数の相互相関解析をおこない、Ap指数(地磁気指数の一種)とAE指数はCH面積および太陽風速度とよい相関があることを示した。

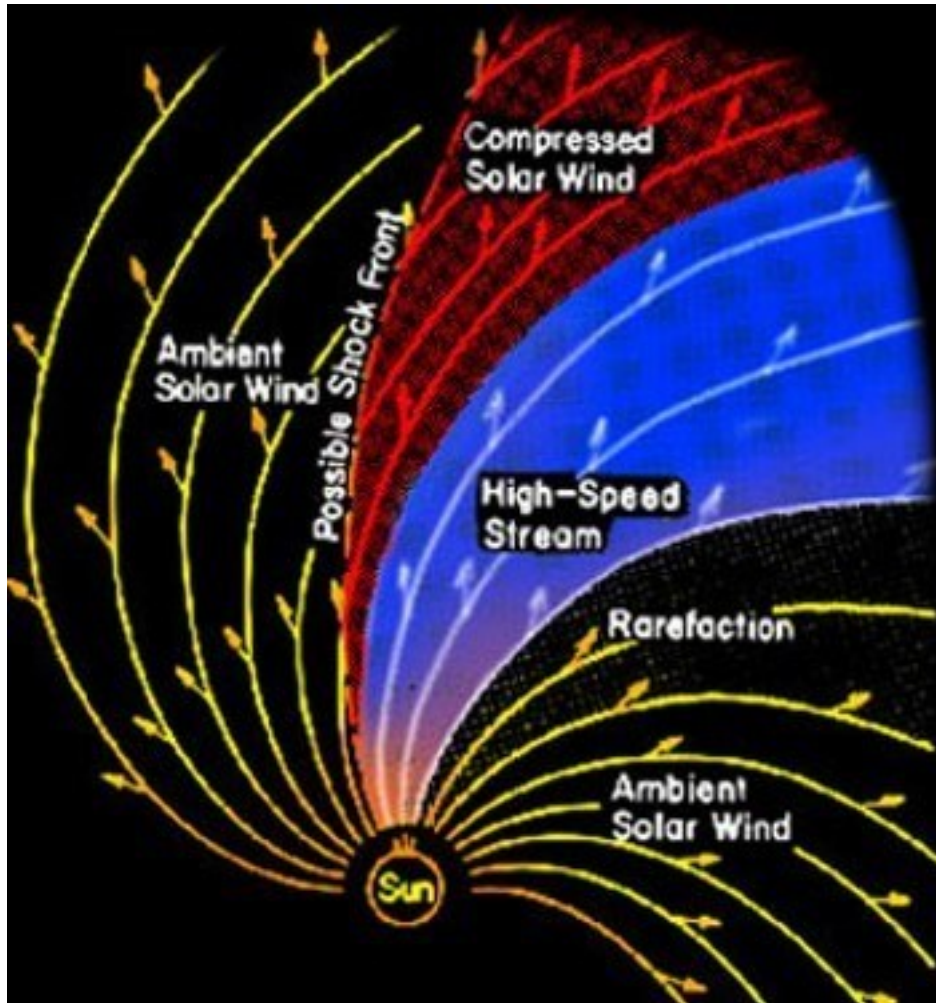


図 6: CIR を北極から見た模式図。黄色い線は磁力線を、青い部分は高速風領域を表す。赤い部分が速度の異なる太陽風の相互作用により圧縮された領域を表す。
http://spacephysics.ucr.edu/images/swq3_03.jpg より。

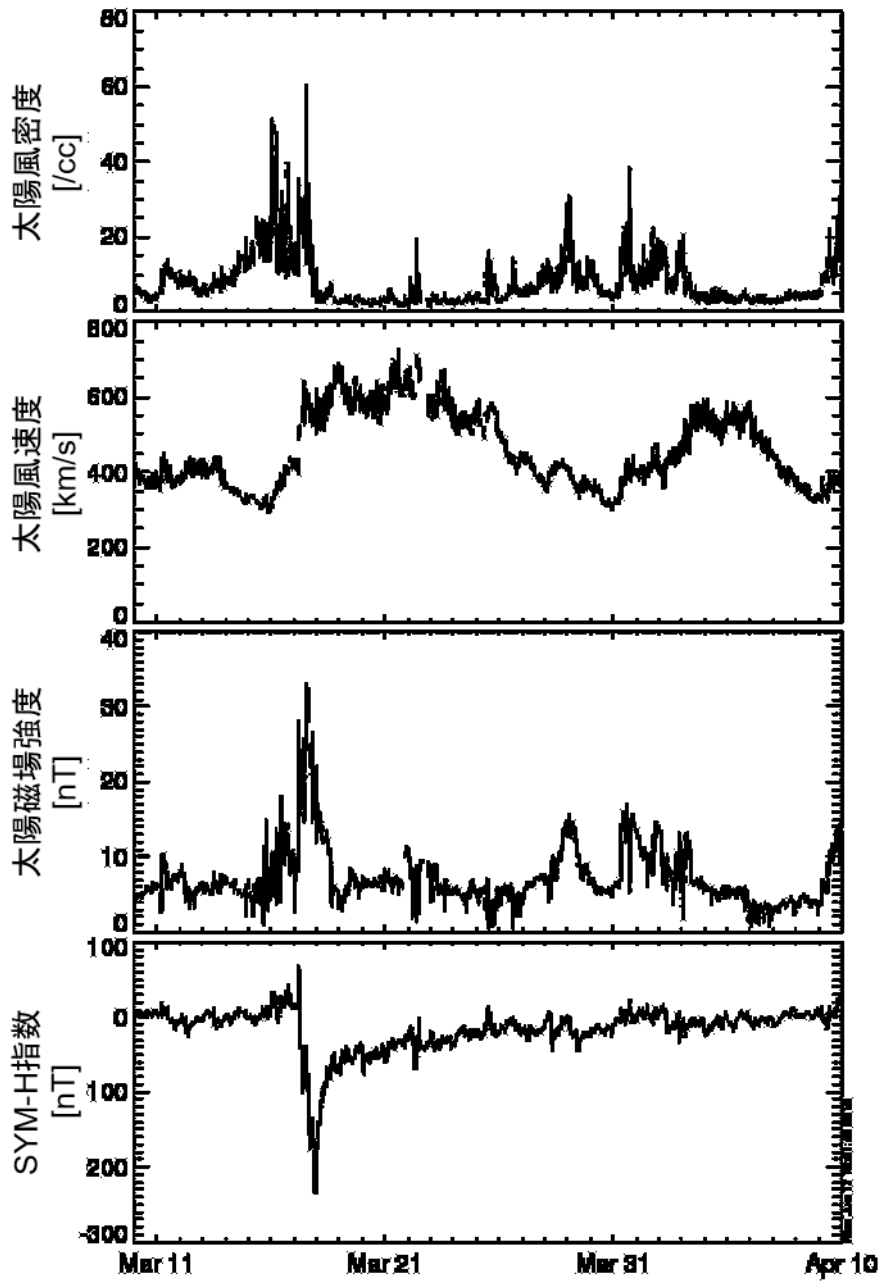


図 7: CIR の典型的な太陽風構造の概略図。上から太陽風密度・速度、太陽磁場強度、SYM-H 指数。一般的には密度と磁場強度が最大になる付近で速度が増加し始め、地磁気活動がじょう乱し始める。

1.6 太陽黒点数と太陽活動の関係

太陽活動の強さを推定する指標のひとつとしてもっとも多用されるのが黒点数の変動である。もっともよく使用されるのは「黒点相対数」と呼ばれる計数で、 $R=k(10g+f)$ という式で表すことができる (g: 黒点群数、f: 黒点数、k: 観測者に依存した補正係数)。黒点相対数は 1849 年から定常的に記録されるようになり、現在では 1749 年まで遡って見積もられた値が公表されている。図 8 は 1745 年からの黒点相対数の変動を示したグラフである。これを見ると黒点数はおよそ 11 年周期で増減していることがわかる。黒点が多い時期を極大期、少ない時期を極小期と呼ぶ。太陽活動周期は 1749 年を 0 周期目として順に番号がふられており、2019 年現在は第 24 周期目の終末期である。

多くの研究から 24 太陽周期における太陽活動は弱いことがわかっている [e.g. Jiang et al. (2007), Kamide and Kusano (2013), Watari et al. (2015)]。Svalgaard et al. (2005) では 24 周期の平均月黒点数は 75 ± 8 と予測され、過去 100 年でもっとも小さい周期であるとされている。その後、ブリュッセルの王立 Belgium 大学の World Data Center for Sunspot Index and Long-term Solar Observation (WDC-SILSO) で観測された最大黒点数は 116.4 に達し、これは 14 太陽周期の極大期以降もっとも小さい値であった (Watari, 2017)。Gopalswamy et al. (2015a) では 24 太陽周期の高エネルギー太陽粒子イベントは宇宙時代の夜明け以来最低と言われている。太陽活動周期ごとの太陽活動と地磁気活動の規模の違いを比較することは、宇宙天気研究の観点からも重要であるといえる。

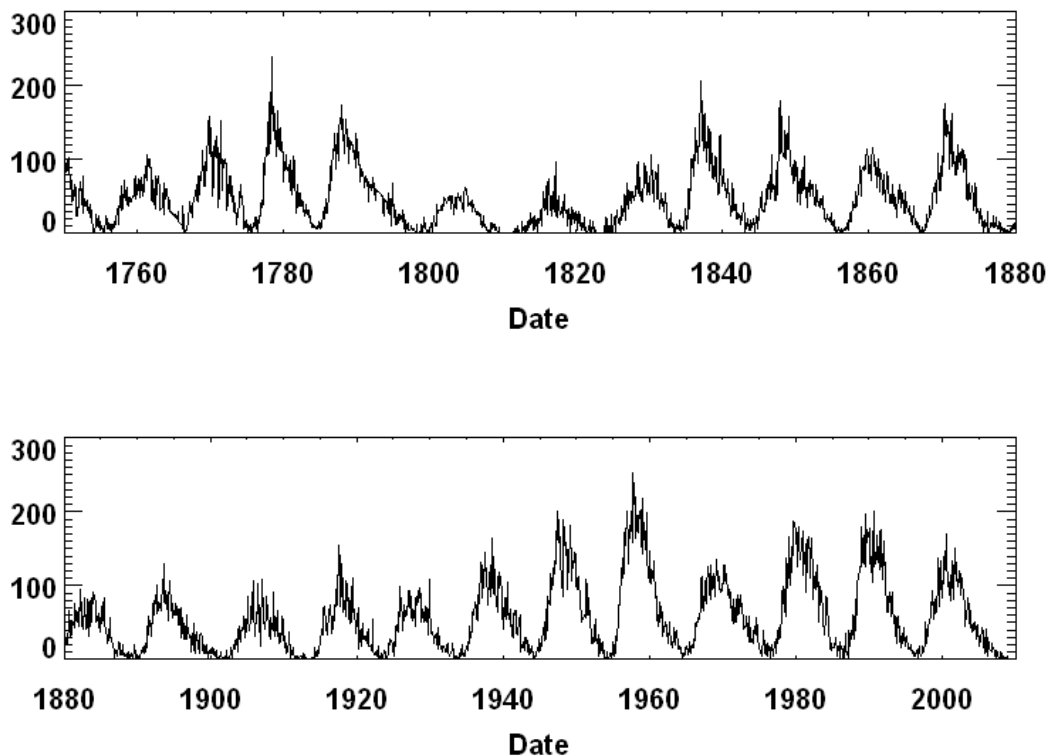


図 8: 1745 年からの黒点相対数の変動。およそ 11 年周期で増減していることがわかる。

<http://spaceweather.com/glossary/sunspotnumber.html> より。

1.7 研究目的

上記のように、高速太陽風の地磁気活動への影響や CH の出現緯度については多くの先行研究が存在する。しかしながら、高速太陽風と地磁気活動の大きさに対する CH 領域の緯度依存性は未知のままである。また、23・24 太陽活動周期における高速太陽風に対する地球磁気圏の応答の違いはまだ解明されていない。

本研究の目的は、太陽活動第 23 周期および第 24 周期 (1996 年から 2017 年) にかけて、低緯度 CH、太陽風速度、地磁気活動の関係を明らかにすることである。今回は SOHO/EIT 195 Å と SDO/AIA 193 Å の太陽 2 次元全面画像を用いて、

低 - 中緯度 CH の面積を同定し、CH 面積・太陽風パラメータ・地磁気指数の変動の相関を統計的に調べた。本論文では、2 章で解析に使用したデータについて、3 章で解析手法について説明したのち、4 章で解析結果の説明、5 章で結果について議論する。

なお、本研究の結果の一部は *Earth, Planets and Space* に投稿されている (Nakagawa et al., 2018)。この論文では 1996 年から 2016 年における CH 面積・太陽風パラメータおよび地磁気指数の変動を統計的に解析した結果を報告している。本論文ではさらに、2017 年における CH 面積・太陽風パラメータ・地磁気指数および 1996 年から 2017 年における放射線帯電子フラックスを追加し統計解析した結果について議論する。

2. 観測データ

本研究では、太陽 2 次元全面画像から独自の手法によって CH を同定し、その面積を計算した。CH 同定には 2 種類の観測衛星により極端紫外線で撮影された太陽 2 次元全面画像を使用した。本研究では、長期間にわたる同一の波長での太陽画像の変動を追うため、観測波長をそろえた。太陽活動第 23 周期の期間 (1996 年から 2008 年) においては、Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) に搭載されている Extreme ultraviolet Imaging Telescope (EIT: Delaboudinie`re et al. 1995) の太陽 2 次元画像を使用した。EIT は 4 種類の紫外線波長領域で太陽を撮像しており、本研究における CH 同定には 195 Å 太陽画像を使用した。画像データは Virtual Solar Observatory (<https://sdac.virtualsolar.org/cgi/search/>) から取得し、解像度は 1024×1024 である。太陽活動第 24 周期 (2009 年から 2018 年) においては、Solar Dynamics Observatory (SDO: Lemen et al. 2012) に搭載されている Atmospheric Imaging Assembly (AIA) の太陽 2 次元全面画像を使用した。AIA では数種類の紫外線波長領域で太陽撮像がおこなわれているが、本研究では 193 Å 太陽画像を用いた。データは AIA Cutoff Data (https://www.lmsal.com/get_aia_data/) から取得し、解像度は 4096×4096 である。

また、太陽風パラメータは太陽風プロトン密度・速度の太陽-地球方向成分・太陽磁気圏座標 (Geocentric solar magnetospheric: GSM) 単位系で測定された IMF を使用した。本研究では太陽風の地球磁気圏に対する応答を解析することが目的であることから、地球前面のバウショックの位置まで時間シフトさせた OMNI2 データ 1 分値を用いた。地球放射線帯の変動の解析には GOES 衛星 (Onsager et al., 1996) で測定された放射線帯電子フラックス (0.6 MeV、2.0 MeV および 4.0 MeV) データ 1 分値を用いた。太陽風・IMF および電子フラックスデータは Coordinated Data Analysis Web (CDAWeb: <https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/>) から取得した。地球磁気圏の応答は 3 種類の地磁気指数 (AU・AL・SYM-H) の 1 分値を用いて調べた。これらの地磁気指数データは World Data Center for Geomagnetism, Kyoto University (WDC, Kyoto: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) から取

得した。

最後に、本研究では the Interuniversity Upper atmosphere Global Observation NETwork (IUGONET) data analysis web service (<http://search.iugonet.org/list.jsp>) および、超高層大気の解析を目的として IUGONET プロジェクトで改良された解析ソフトウェア SPEDAS を使用している。

3. 解析手法

3.1 解析手順の概要

本研究では、解析対象となる CIR イベントを抽出するため、2 種類の CIR イベントリストを参照した。太陽活動第 23 周期 (1996 年から 2008 年) および 2009 年の期間においては、Advanced Composition Explorer (ACE) と WIND 衛星による太陽風観測結果を用いた、1995 年から 2009 年における CIR と stream interaction region (SIR) のイベントリスト (http://www-ssc.igpp.ucla.edu/~jlan/ACE/Level3/SIR_List_from_Lan_Jian.pdf) を参照した。SIR は CIR と同様の現象である ([Jian et al., 2011](#))。このリストは WIND に搭載の Solar Wind Experiment (SWE: Ogilvie et al., 1995) と Magnetic Field Investigation (MFI: Leppnig et al., 1995) の太陽風データおよび ACE に搭載の Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor (SWEPAM: McComas et al., 1998) と MAGnetic field experiment (MAG: Smith et al., 1998) の太陽風データを用いて total perpendicular pressure (Pt) を計算し (Jian et al., 2006)、Pt や太陽風パラメータの特徴から SIR と CIR の開始時刻と終了時刻を同定したものである。本研究では、まずこのリストから CIR イベントを抽出し、その中から太陽風速度が増加する日の 4 日前に EIT 太陽画像において太陽表面に低 - 中緯度 CH が確認できるものを解析対象のイベントとして選択した。一方、2010 年から 2016 年の期間においては、Solar TERrestrial RELations Observatory (STEREO: Kaiser et al., 2008) による太陽風観測の結果をもとにした SIR イベントリスト (http://wwwssc.igpp.ucla.edu/~jlan/STEREO/Level3/STEREO_Level3_SIR.pdf) を参照した。このリストでは SIR に関してのみ開始時刻と終了時刻が記述されているため、本研究ではリストおよび太陽風の OMNI データを参照し、太陽風密度・速度・圧力が再帰的に増加している期間を目視で探し、解析対象の CIR イベントとして選択した。その後、イベント 4 日前の AIA 太陽画像を確認し、低 - 中緯度 CH が見られるものを選択した。2017 年においては参照可能な CIR (SIR) イベントリストが存在しないため、太陽風の OMNI データを参照し、CIR と思わ

れる変動が開始している日付を抽出し、その4日目の AIA 太陽画像に低 - 中緯度 CH が見られるものを解析対象の CIR イベントとして選択した。本研究では、1996 年から 2017 年の間に 341 の CIR イベントを解析対象として選択した。表 1 に太陽活動周期全体および 2 年ごとの解析対象 CIR イベント数をまとめた。

その後、抽出した CIR イベント前後の CH 面積・太陽風・IMF パラメータおよび地磁気指数について、superposed epoch analysis (SEA) と呼ばれる手法を用いて統計的な変動を調べた。SEA は異なる時系列データを重ね合わせることで物理量の平均的な変動を調べる手法であり、多くの研究で用いられている (Miyashita et al., 2009; Kon et al., 2011 など)。本研究では、各 CIR イベントの期間について、中心を「太陽風速度が増加し始めた時刻を含む日」とし、その-7 日前から+6 日後の期間の CH 面積・太陽風・IMF および地磁気指数データをそれぞれ太陽活動周期の期間分重ね合わせて、平均的な変動を調べた。

表 1: 本研究で解析した CIR イベントの通年および 2 年ごとのイベント数。

太陽活動第 23 周期			太陽活動第 24 周期		
	参照リスト に記載され たイベン ト数	本研究で解 析したイベ ント数		参照リスト に記載され たイベン ト数	本研究で解 析したイベ ント数
1996 – 1997	57	23	2009 - 2010	74	27
1998 – 1999	41	14	2011 - 2012	75	21
2000 – 2001	36	20	2013 - 2014	59	28
2002 – 2003	45	33	2015 - 2016	65	36
2004 – 2005	52	34	2017	-	28
2006 – 2007	80	51		-	-
2008	35	26		-	-
合計	346	201	合計	273	140

3.2 CH 面積の同定

本研究では、CIR を形成する高速太陽風の吹き出し口となりうる低 – 中緯度 CH に着目し、その面積を本研究独自の方法で同定した。ここではその CH 面積の同定手法について説明する。

まず、太陽全面画像を太陽緯度経度によって 4 つの領域に分割する。各領域の範囲は

緯度

- (a) 30 度から 60 度
- (b) 0 度から 30 度
- (c) -30 度から 0 度
- (d) -60 度から -30 度

経度

4 領域とも共通して -30 度から 30 度

となっている。太陽表面を 4 分割したイメージ図が図 9 である。本研究では極域 (± 60 度より高緯度) の CH については面積の同定はおこなっていない。

次に、CH と周囲のコロナを区別するための閾値を設定した。本研究では Akiyama et al. (2013) を参考に「極紫外線における太陽全面輝度の中央値の半分」を閾値とした。最後に、上記の (a) から (d) の 4 つの各領域について「領域内のピクセル数」と「閾値より小さいピクセル数」の比を CH 面積と定義した。すなわち、CH 面積は割合として求められ、単位は % となる。図 10 は CH 面積同定の手順の概略図である。この例では 12 のピクセルがあり閾値は 4 に設定している。青く塗られているのは閾値より小さいピクセルである。青いピクセルは 6 つ存在するので、この例における CH 面積は $[\text{閾値より小さいピクセル数}] / [\text{領域内の全ピクセル数}] = 6/12 = 0.5 = 50\%$ となる。実際に上記の方法で EIT 太陽画像から CH を同定した様子が図 11 で示されている。この図において、黄色で囲まれた黒色部分が CH と同定された領域である。

なお、本研究では太陽表面における北・南半球の CH 面積の変動をより正確に調べるため、太陽全面画像の日面中央緯度と極軸は補正してある。

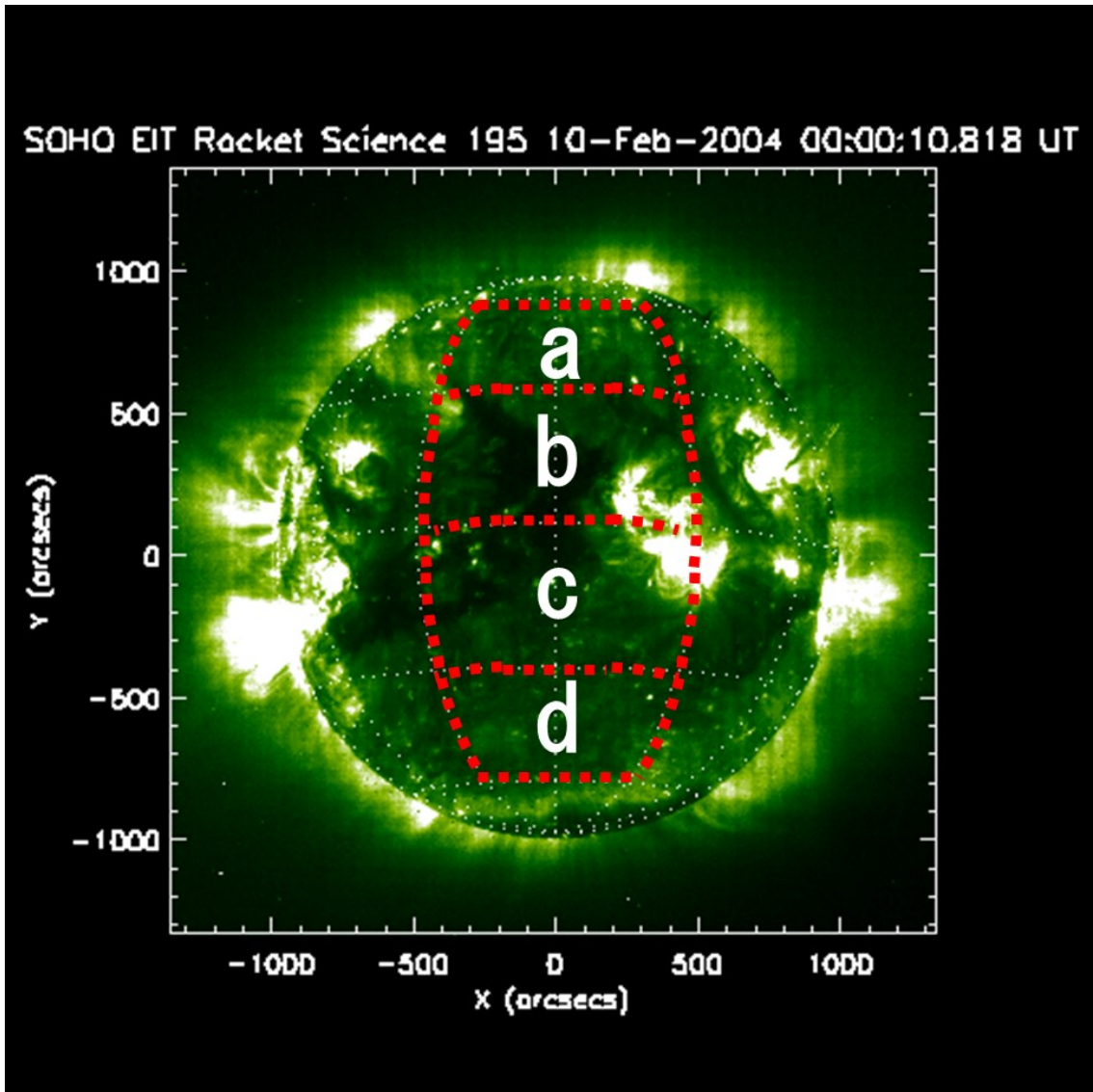


図9: 太陽表面を4つの領域に分割したイメージ。あくまでイメージ図のため、赤い点線は実際の緯度経度とは一致していないことに注意。

2	5	4	1
2	2	6	7
8	1	9	3

(例) 閾値が4の場合

CH面積は
 $6/12 = 0.5 \Rightarrow 50\%$

図 10: CH 面積同定の模式図。閾値 (この場合 4) より小さい値のピクセルが青く塗られている。

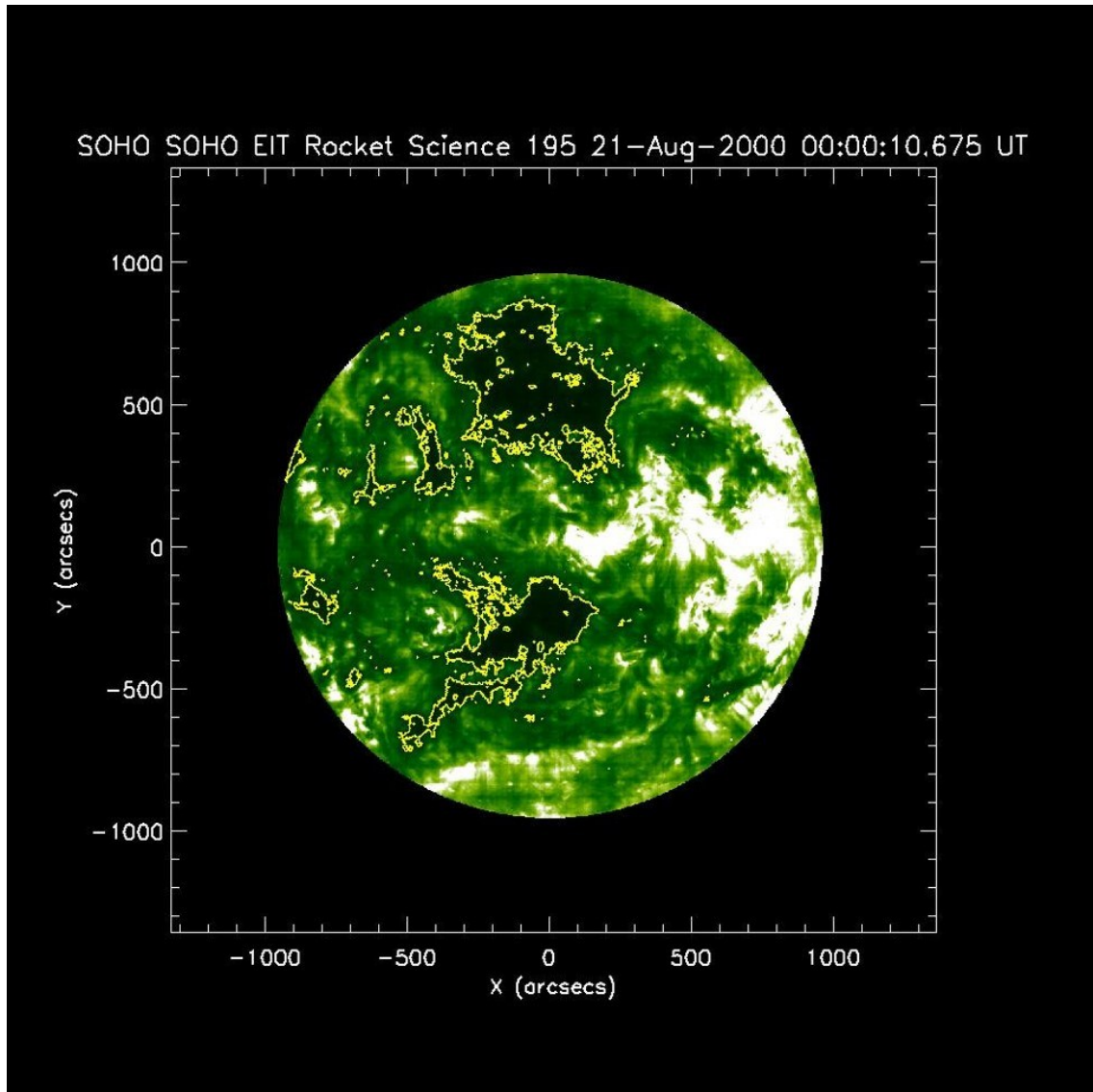


図 11: 2000 年 8 月 21 日の SOHO/EIT 画像。同定された CH 部分は黒く抜かれ黄色で囲われている。

3.3 惑星間空間磁場の時間変動の分類

惑星間空間磁場 (IMF) を表記する座標系にはいくつかの種類があるが、本研究では太陽磁気圏座標 (Geocentric solar magnetospheric: GSM) を用いる。図 12 は GSM 座標系を模式的に示した図である。GSM 座標は地球を中心として太陽方向を x 軸、x 軸と地球磁場の軸に対して垂直に y 軸、x - y 平面に垂直に z 軸を取

る。地球を北極側から見たとき、IMF は x 軸に対して 45 度の角度を持つ。

南向きの IMF と地球磁場の再結合により、太陽風のエネルギーが磁気圏に注入される。したがって、宇宙天気観測においては太陽風の速度と密度、惑星間磁場 (IMF) の強度と向きを考慮する必要がある (Russell, 2001)。そこで、本研究では、CIR に関連する IMF の空間変動をその方向によって 4 つのパターンに分類した。まず、GSM 単位系において、IMF Bx 成分 (太陽-地球方向) が正かつ By 成分 (朝-夕方方向) が負の場合を太陽に向かう方向という意味で「Toward」、Bx が負かつ By が正の場合を太陽から離れる方向という意味で「Away」と定義した。さらに IMF Bz (地球の磁軸方向) について

- Toward かつ IMF Bz が正 (北向き)
- Toward かつ IMF Bz が負 (南向き)
- Away かつ IMF Bz が正
- Away かつ IMF Bz が負

の 4 パターンに分類した。

このように IMF の空間変化によってパターンに分類する手法は Zhao and Zong (2012) でも用いられている。

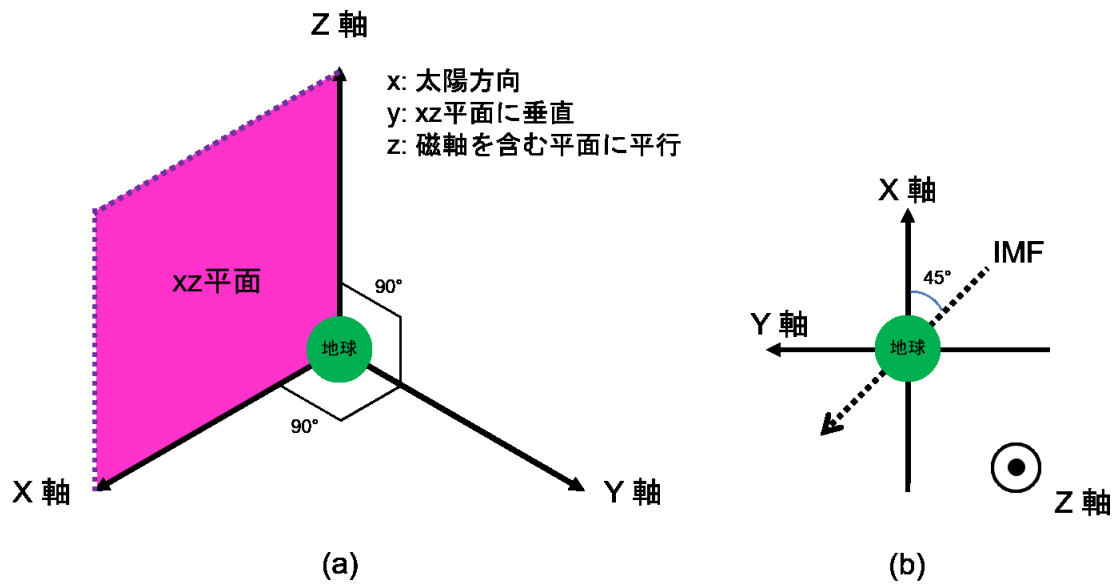


図 12: GSM 座標系の模式図。(a) 地球を中心として太陽方向を x 軸、x 軸と地球磁場の軸に対して垂直に y 軸、x-y 平面に垂直に z 軸を取る。(b) 地球を北極側から見たとき、IMF は x 軸に対して 45 度の角度を持つ。

4. 解析結果

4.1 太陽活動第 23 周期と第 24 周期における CH 面積変動

図 13 および 14 は、太陽活動第 23 周期 (1996 年から 2008 年)と第 24 周期 (2009 年から 2017 年) における低 - 中緯度 CH の空間面積変動である。両図とも、縦軸方向の青線は太陽風速度が増加し始める日を示し、横軸は太陽風速度増加日の-7 日前から 6 日後の時間間隔を表す。図 15 は第 23 周期 (黒線) と第 24 周期 (赤線) における低 - 中緯度 CH 面積変動の 12 時間平均である。エラーバーは中央絶対偏差 (median absolute deviation: MAD) を用いた 95 % 信頼区間を示す。MAD は、データセットの中央値からの絶対偏差の中央値として定義される。

図 13 の (c) より、南半球の低緯度における CH 面積は第 23・24 周期の両方で、太陽風速度が増加を始める前に変動し始めていることがわかる。(c) における CH 面積の最大値は第 23 周期ではおよそ 4.6 %、第 24 周期ではおよそ 2.8 % で、3 日以内に 1 % 程度まで減少している。一方で、(a)、(b) および (d) から、第 23 周期における中緯度の CH 面積変動は明確でないのに対して、第 24 周期においては最大でおよそ 3 % 程度の有意な変動が見られる。

図 14 は第 23・24 周期における 2 年ごとの CH 面積変動を示したグラフである。左図 (c) の結果から、第 23 周期の南半球の低緯度においてもっとも変動が大きいのは 2002 年から 2003 年で、最大値はおよそ 20.3 % である。領域 (c) の CH 面積は、太陽風の速度増加開始日のおよそ 4 日前に増加し始め、速度増加の半日前に最大を迎えている。この時間差は、太陽風のらせん構造と本研究における analysis window (太陽画像の解析に使用した部分) の幅が関係している。本研究の analysis window の横幅は太陽経度にして -30 度から 30 度にあたる。さらに、CH から伸びる磁力線は GSM 座標系の x 軸に対して 45 度の角度をなしている。したがって、CH から吹き出した高速太陽風 (と低速太陽風との相互作用で生じた CIR) が地球軌道付近に到達するには $360 [度]/75 [度/日] = 4.8$ 日のタイムラグが発生することになり、この差がグラフに現れているものと考えられる。そ

の後、面積は太陽風増加開始日の2日後に10.7%まで減少するが、速度増加開始日の4日後には16.5%まで再び増加している。図14左(b)と(c)より、第23周期における緯度-30度から0度の領域のCH面積変動は、緯度0度から30度の領域における面積変動よりも大きい傾向が見られた。第24周期においては(a)から(d)の各領域で変動が見られた。各領域でもっとも変動が大きい年は上から(a)および(b)が2017年、(c)が2015年から2016年、(d)が2013年から2014年であった。

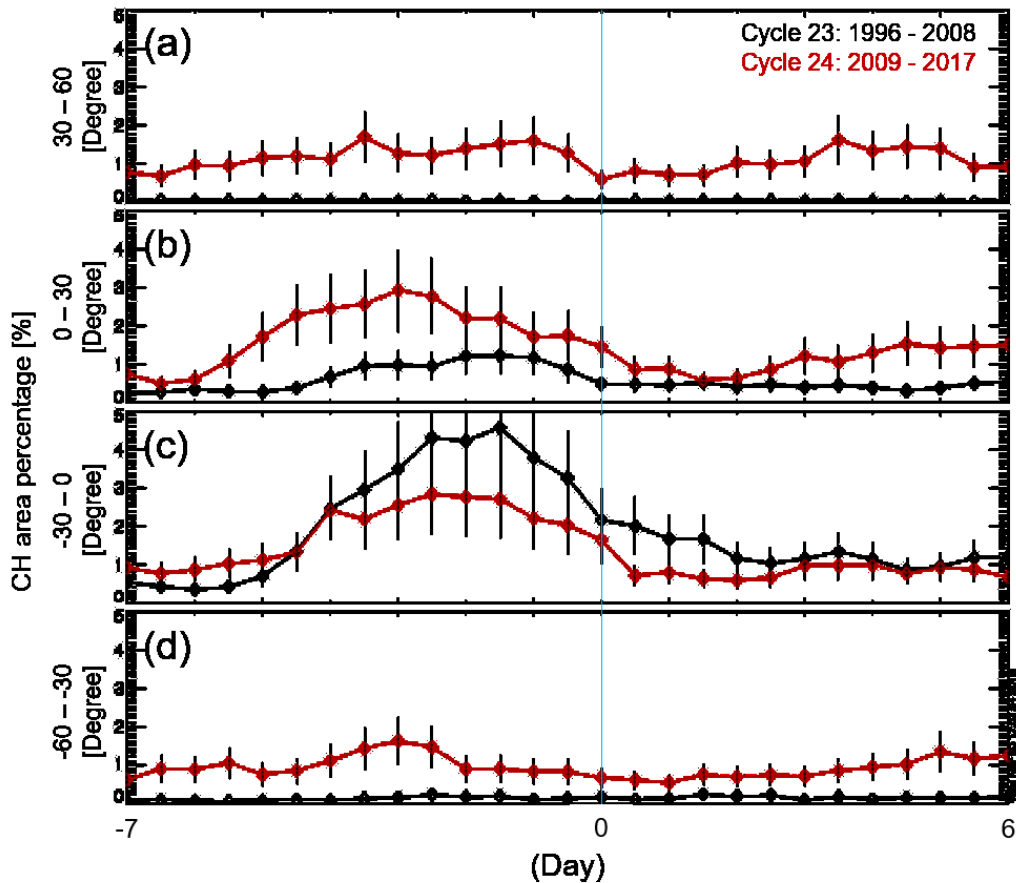


図13: 太陽活動第23周期(黒線)および第24周期(赤線)における平均CH面積変動。領域の緯度はそれぞれ(a)30度から60度、(b)0度から30度、(c)-30度から0度、(d)-60度から-30度。

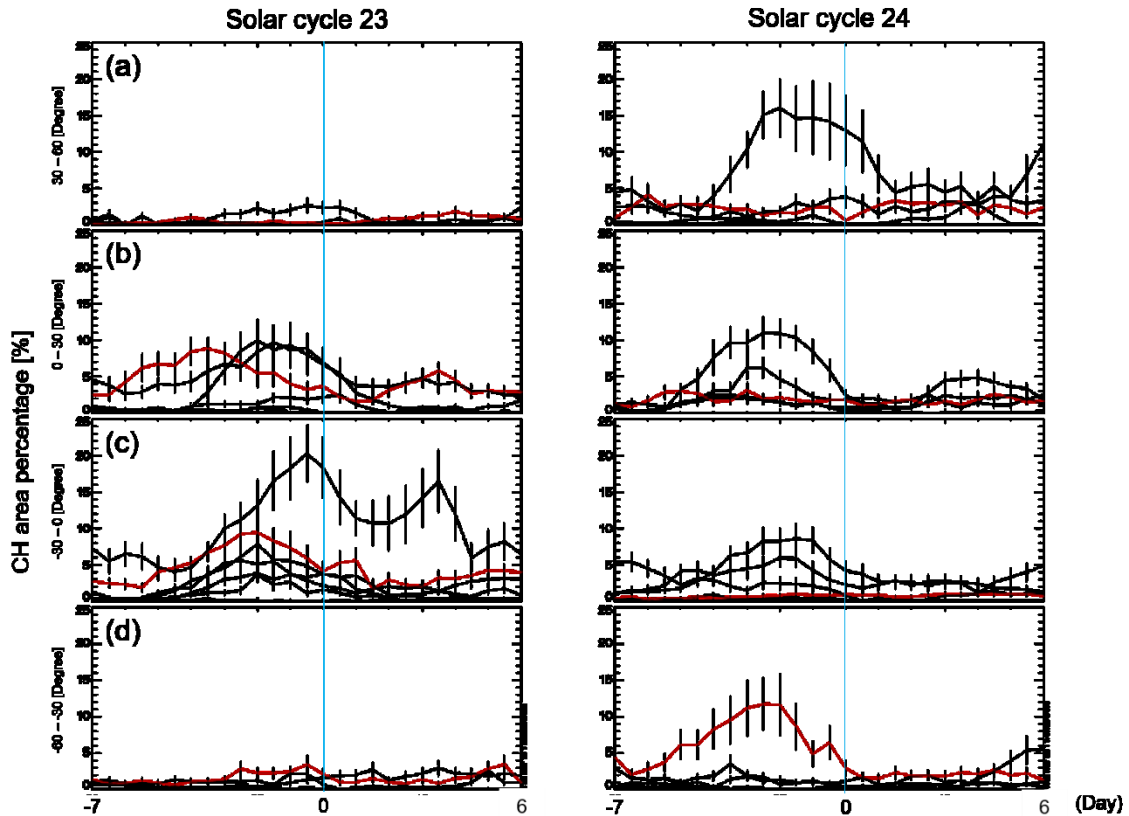


図 14: 太陽活動第 23 周期 (左) と第 24 周期 (右) における低 - 中緯度 CH 面積の 2 年ごと変動。両方のパネルとも、太陽活動極大期にあたる期間 (左: 2000 年から 2001 年、右: 2013 年から 2014 年) の変動を赤で示している。

4.2 CH 面積と太陽風速度の関係

図 15 は太陽活動第 23 周期と第 24 周期における CH 面積最大値と太陽風速度最大値の散布図である。横軸と縦軸はそれぞれ CH 面積と太陽風速度を表す。図中の直線は線形回帰直線を示す。この図における CH 面積最大値は、図 13 における領域(b)と(c)、つまり太陽緯度 0 度から 30 度および -30 度から 30 度の範囲の CH 面積の合計の半分である。言い換えれば、図 17 は緯度 -30 度から 30 度の範囲における CH 面積と太陽風の関係を示したグラフであることを意味する。

この図より、第 23 周期と第 24 周期の CH 面積の最大値はそれぞれ 68.27 % と 32.36 % であった。一方、太陽風速度の最大値は第 23 周期と第 24 周期でそれぞれ 915.35 km/s、817.43 km/s であった。両方の太陽活動周期において CH 面積最大値と太陽風速度の間に正の相関があり、その相関係数は第 23 周期と第 24 周期でそれぞれ 0.24 と 0.43 であった。一方、CH 面積最大値と太陽風速度の共分散は、第 23 周期では 246.32、第 24 周期では 219.02 であったことから、データ分布は、第 23 周期の方が第 24 周期より大きいことがわかる。

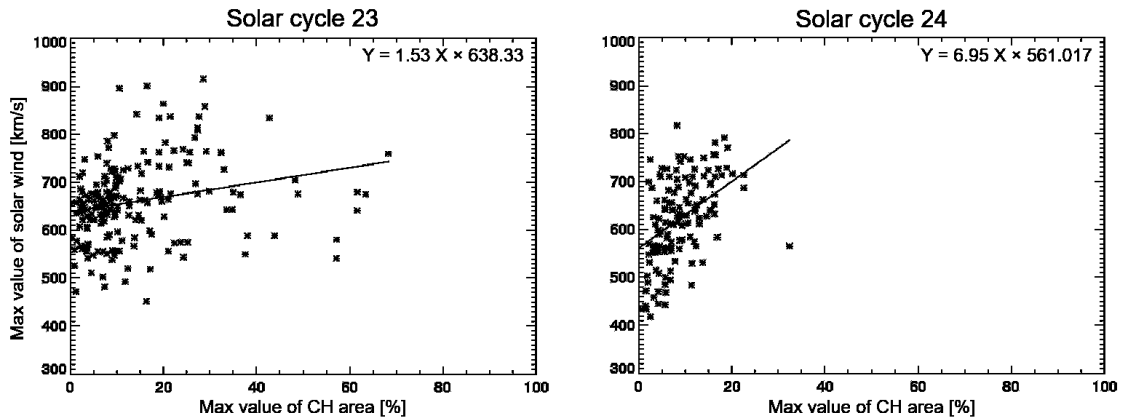


図 15: 太陽活動第 23 周期と第 24 周期における CH 面積最大値と太陽風速度最大値の散布図。横軸は CH 面積、縦軸は太陽風速度を示す。図中の直線は線形回帰直線を示す。

4.3 太陽風と地磁気指数の変動

第 23 周期と第 24 周期における太陽風パラメータおよび地磁気指数の 12 時間移動平均変動を図 16 と図 17 に示す。IMF の向きの組み合わせによって Toward (IMF Bx 正かつ By 負) または Away (IMF Bx 負かつ By 正) に分けられており、図 16 は Away の場合において、図 17 は Toward の場合において、IMF Bz が正の場合と負の場合で分けられている。縦軸・横軸および縦軸方向の垂直線の意味は図 15 と同様である。エラーバーは標準偏差を示す。

図 16 と 17 より、すべての IMF パターンにおいて太陽風の密度が最大になるおよそ半日前に、太陽風速度が増加し始めている。この特徴は Kataoka and Miyoshi (2006) に示されているような、CIR に特徴的な太陽風速度と密度の変動の傾向を示している。太陽密度は太陽風速度の増加開始日の周辺で最大になり、1 - 2 日後に減少する。太陽風速度はおよそ 2 日かけて最大になり、その後数日かけて徐々に減少する。ただし、第 24 周期におけるピークからの太陽風速の減少の度合いは、第 23 周期の場合よりも早い。IMF の符号は太陽風速度増加のおよそ 1 日前に反転している。ただし、Toward かつ IMF Bz が正の場合のみ、符号は速度増加の 2 日以上前から反転している。また、IMF Bz の日変動は、IMF Bx および By の日変動よりも大きい。さらに、地磁気指数の変動は IMF Bz が負の場合の方が、Bz が正の場合よりも大きい。AU 指数と AL 指数の変動は、おおむね IMF Bz の変動に対応している。

一方で、太陽風と各地磁気指数の変動の仕方がもっとも大きい IMF パターンは第 23 周期と第 24 周期で異なっている。太陽風密度の最大値は Away かつ IMF Bz が負のとき、わずかに第 24 周期の場合の方が第 23 周期の場合より大きく、他の IMF パターンではほぼ同程度である。太陽風速度の最大値はすべての IMF パターンにおいて第 23 周期の場合の方が第 24 周期の場合よりも大きい。AU 指数の最大値は両周期ともすべての IMF パターンにおいてほぼ同程度であるが、Away かつ IMF Bz が負のときわずかに第 23 周期の場合の方が第 24 周期の場合より大きい。AL 指数の変動は Away か Toward に関わらず IMF Bz が負のときの方が大きい。また、その最小値は Toward かつ IMF Bz が負のとき、わずかに第 23 周期の場合の方が第 24 周期の場合より小さい (第 23 周期における変動の方がわずかに大きい)。

さらに本研究では、地磁気活動の変動の IMF パターンごとの違いを比較するため、AE 指数と SYM-H 指数の変動については個別に解析した。

図 18 は第 23 周期 (黒線) と第 24 周期 (赤線) における AE 指数の変動を IMF のパターンごとに示したものである。この AE の値は観測値ではなく AU 値から

AL 値を引くことで算出された計算値である。縦軸と横軸および垂直線の意味は図 13 と同様である。この図より、AE の値は、第 23・24 太陽周期とも太陽風速度増加日に増加している。AE 指数の最大値は第 23 周期における Toward かつ IMF Bz が負の場合の 350.95 である。第 23 周期における AE の変動の大きさは、すべての IMF パターンで第 24 周期における変動の大きさよりもわずかに大きくなる傾向があった。その傾向は Away かつ IMF Bz が正の場合で最も顕著であり、変動が始まってから静穏値に戻るまでの間 (day=0 から 6 の期間) の AE 指数は第 23 周期の場合の値の方が第 24 周期の値より大きい。また、Away か Toward かに関わらず、IMF Bz が負の場合の方が Bz 正の場合より大きく変動する傾向があった。

次に、第 23 周期 (黒線) と第 24 周期 (赤線) における SYM-H 指数の IMF のパターンごとの変動を示したのが図 19 である。SYM-H 指数の値は第 23・24 どちらの周期についても太陽風の増加開始日から半日以内に減少を始めている。SYM-H 指数の最小値は第 23 周期の Away かつ IMF Bz 負の場合の -26.94 である。両周期における太陽風増加開始後の SYM-H の変動の大きさは、すべての IMF パターンにおいてほぼ同程度であるが、変動のピーク (最小値) は Toward かつ IMF Bz が負のとき、第 24 周期の場合の方が第 23 周期の場合よりもわずかに大きい (第 24 周期における変動の方が大きい)。また、Away かつ IMF Bz が正のとき、変動が始まってから静穏値に戻るまでの間 (day = 0 から 6 の期間) の値は、第 23 周期の場合の値の方が第 24 周期の値より大きい。これは AE 指数に見られたものと同じ傾向である。さらに、これも AE 指数でみられた傾向と同様であるが、SYM-H 指数は IMF Bz が負の場合の方が Bz 正の場合より大きく変動する傾向にあった。

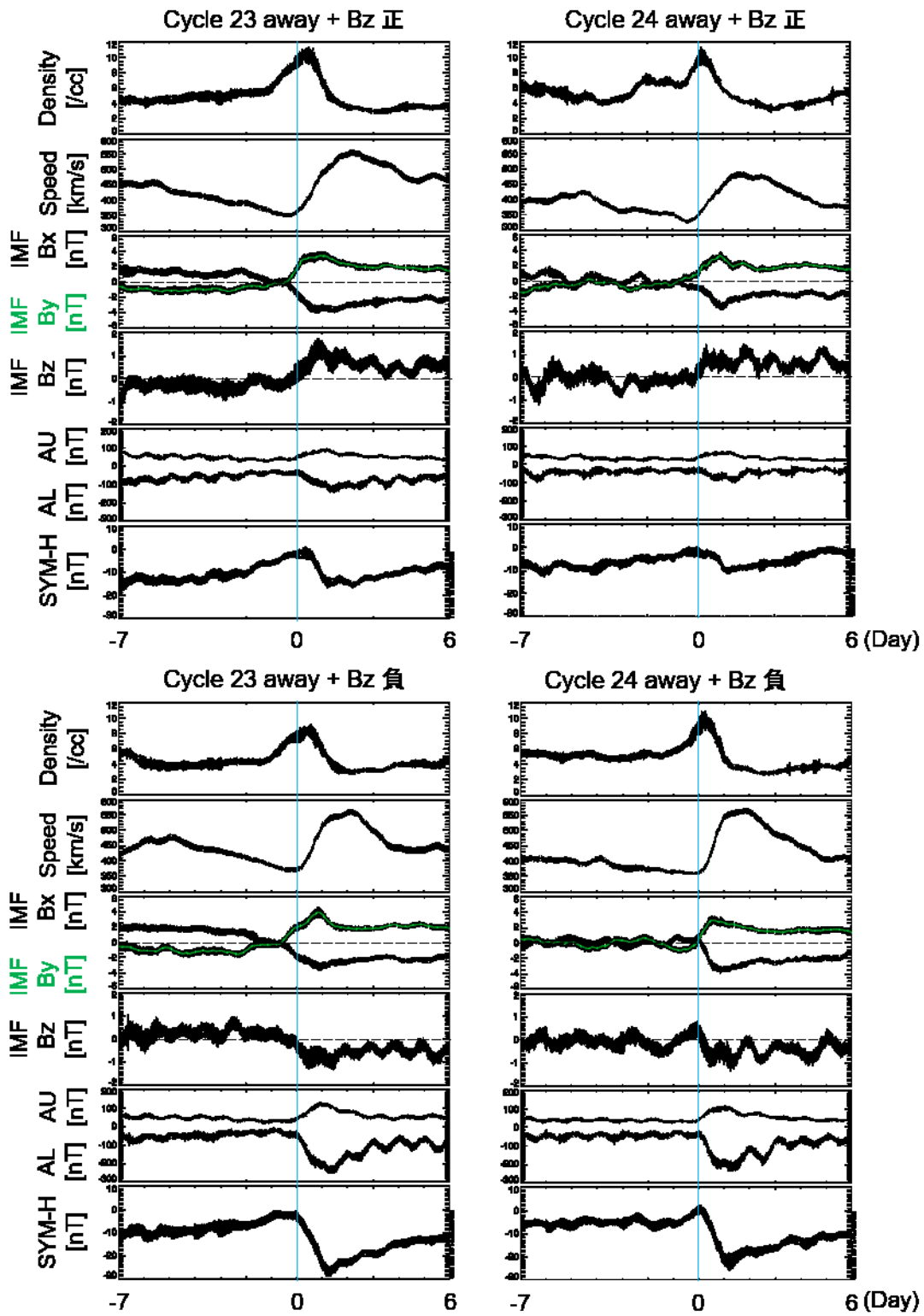


図 16: 太陽活動第 23 および 24 周期における、away (IMF Bx 負かつ By 正) の場合の太陽風密度、速度、IMF、地磁気指数の半日平均変動。

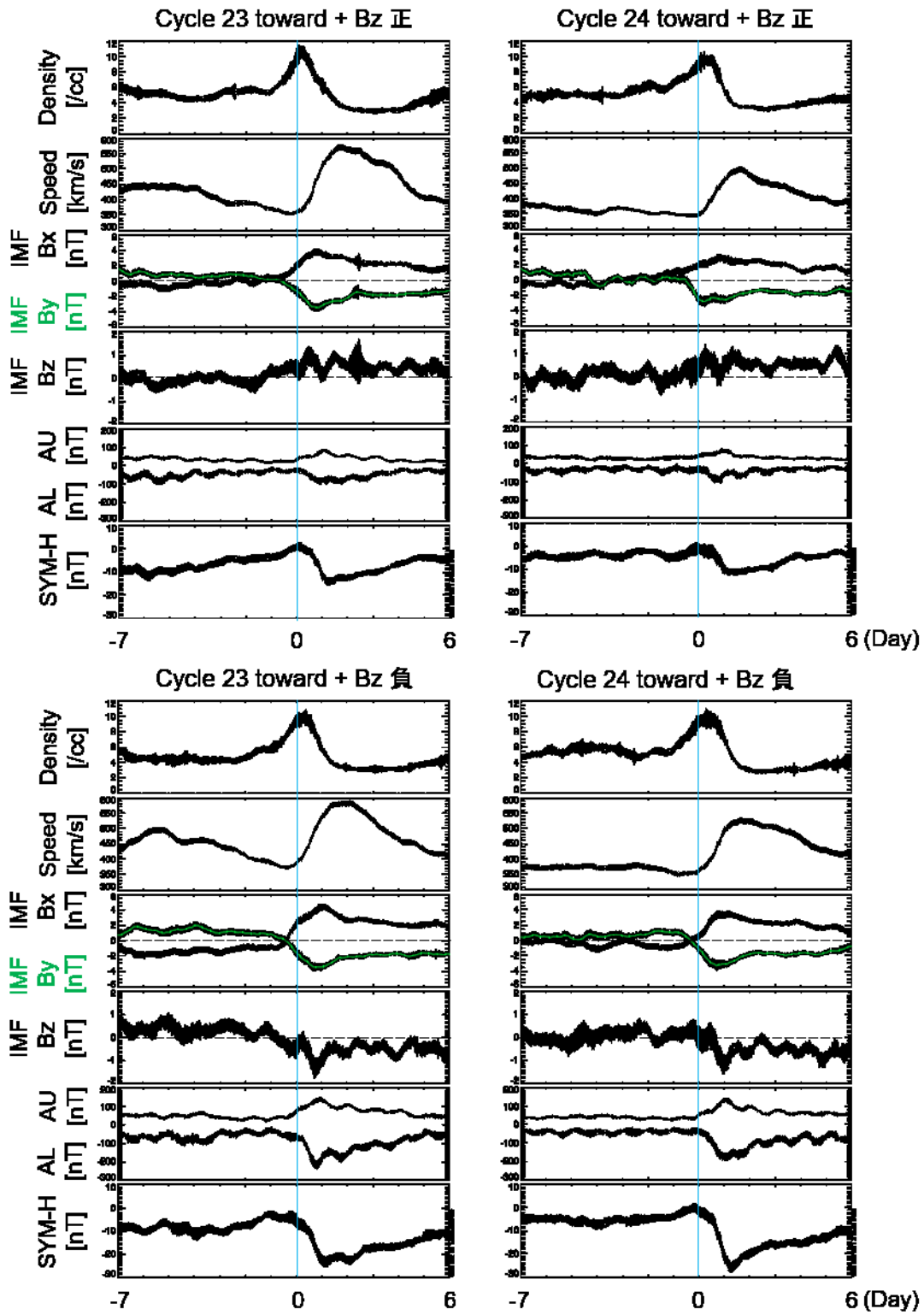


図 17: 太陽活動第 23 および 24 周期における、toward (IMF Bx 正かつ By 負) の場合の太陽

風密度、速度、IMF、地磁気指数の半日平均変動。

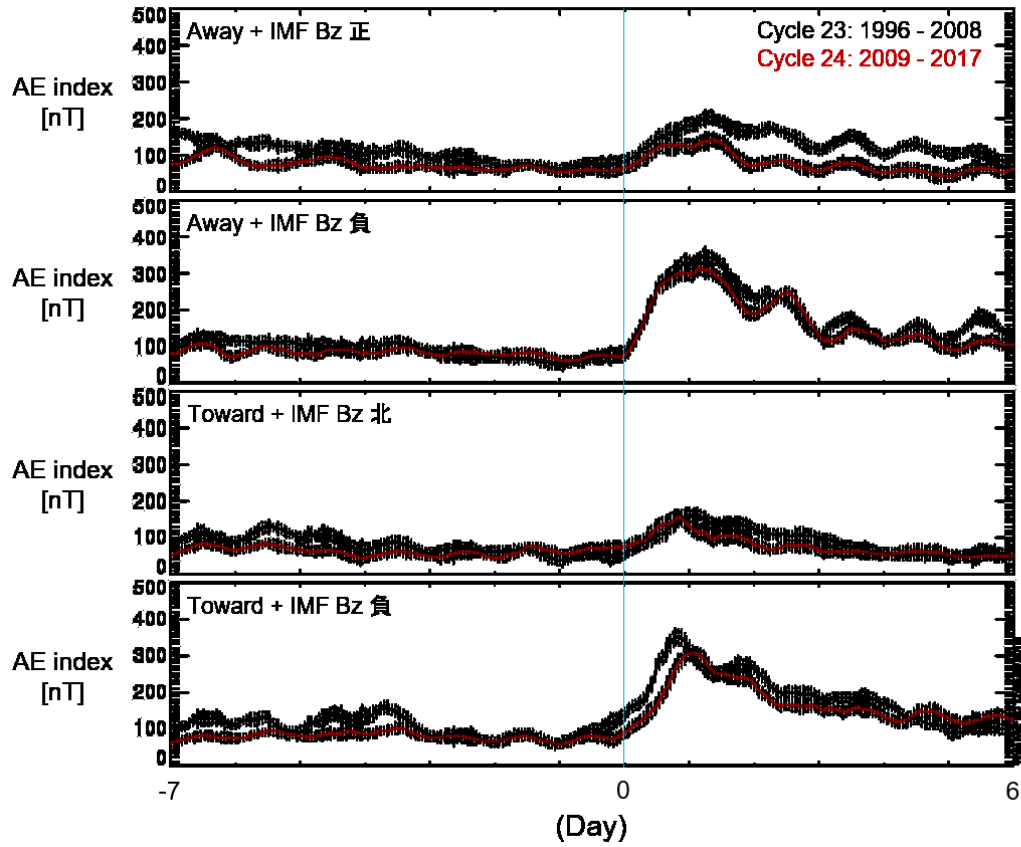


図 18: 23 太陽周期 (黒線) と 24 太陽周期 (赤線) における AE 指数の IMF パターンごとの変動。

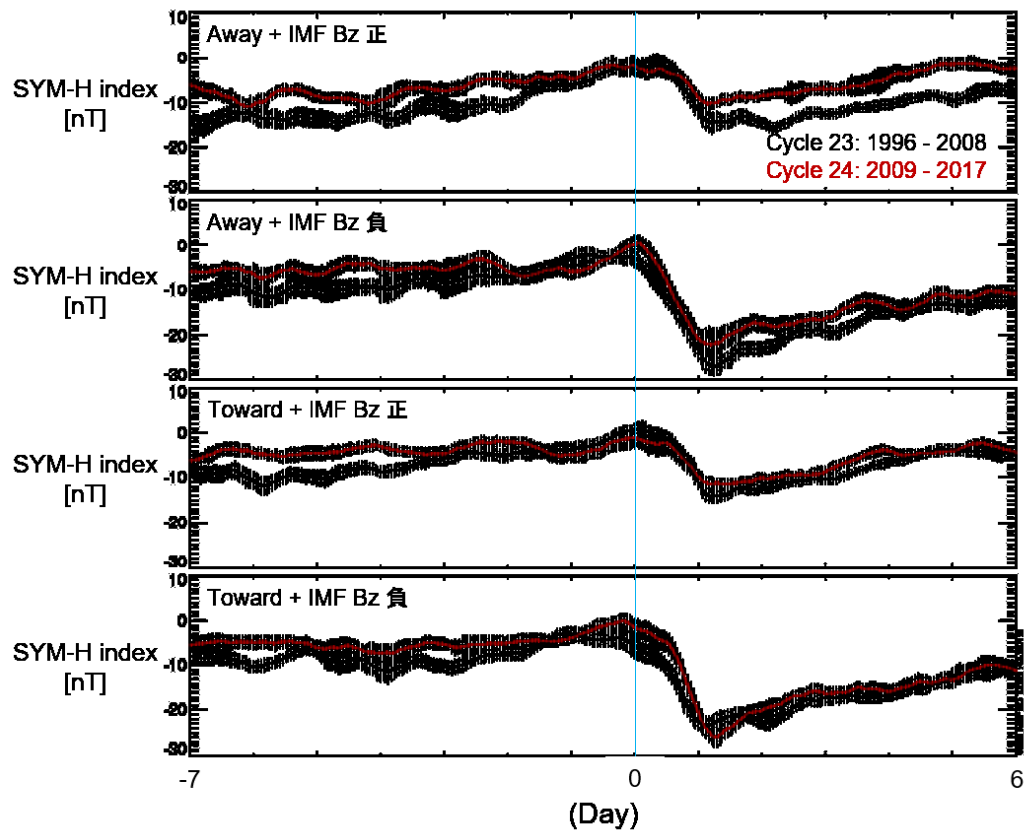


図 19: 23 太陽周期 (黒線) と 24 太陽周期 (赤線) における SYM-H 指数の IMF パターンごとの変動。

4.4 磁気圏対流電場および放射線帯電子フラックスの変動

図 20 は太陽活動第 23 周期と第 24 周期における磁気圏対流電場の半日平均変動を示したグラフである。対流電場は太陽風速度と IMF Bz の外積から求められた計算値である。縦軸・横軸および縦軸方向の垂直線の意味は図 13 と同様である。エラーバーは標準偏差を表す。この図より、IMF の全パターンにおいて対流電場は太陽風速度が増加する前までは比較的安定しているが、速度増加開始日以降は変動が見られる。その値は ± 800 mV/m の範囲で変動している。しかし、IMF の全パターンにおいて第 23 周期と第 24 周期で変動の大きさに顕著な違いは見られない。AE 指数と対流電場の変動を見ると、太陽風速度の増加開始日以

降の変動に周期的な変動が確認できる。周期はおよそ 1 日程度で、波の位相は AE 指数と対流電場でほぼ一致している。これは地球磁気圏に対する太陽放射の強弱によるものであると考えられる。

図 21 - 23 は太陽活動第 23 周期と第 24 周期における 0.6 MeV、2.0 MeV、4.0 MeV の放射線帯電子フラックスの半日平均変動を示したグラフである。縦軸・横軸および縦軸方向の垂直線の意味は図 13 と同様である。エラーバーは標準偏差を示す。また、プロットにおよそ 1 日周期の日変動が見られるが、これは放射線帯電子を観測している GOES 衛星と地球の位置関係に起因するものである。これらの図から、放射線帯電子フラックスの変動は、太陽風速度の増加開始の前後で、第 23 周期の方が第 24 周期より大きい傾向があることがわかる。これは特に 0.6 MeV で顕著であり、第 24 周期におけるフラックス (赤) は IMF の全パターンにおいて $10^5 / \text{cm}^2 \text{ s sr}$ を下回っているのに対して、第 23 周期におけるフラックス (黒) は最大で $5 \times 10^5 / \text{cm}^2 \text{ s sr}$ まで変動している。ただし、2.0 MeV の IMF Bz 負の場合のみ、太陽風速度増加後のフラックスは第 24 周期の方が第 23 周期よりも大きい。0.6 MeV の IMF の全パターンと 2.0 MeV の IMF Bz 負の場合において、太陽風速度が増加し始める日にフラックスが一度減少し、およそ 1 日後から再び増加し始めている。これは CIR が放射線帯付近に到達したことによって放射線帯電子数が減少し、CIR が通り過ぎた後に電子数が増加していることを示している。

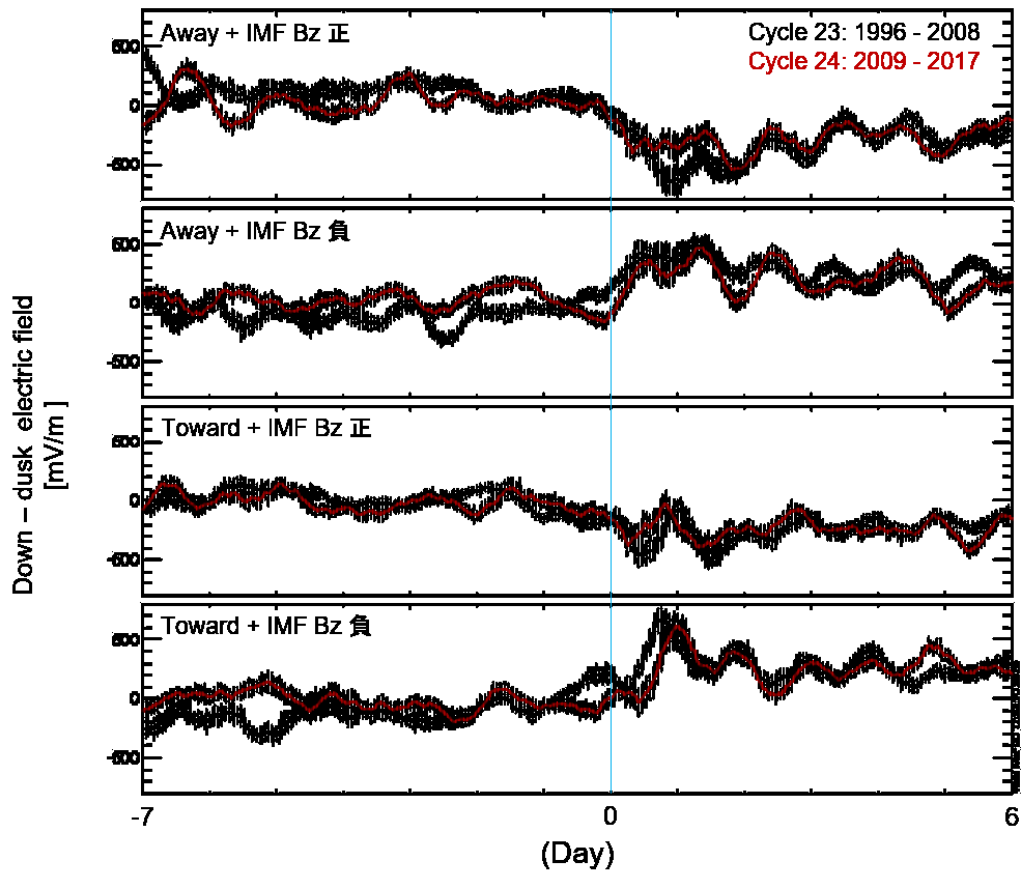


図 20: 23 太陽周期 (黒線) と 24 太陽周期 (赤線) における磁気圏対流電場の IMF パターンごとの変動。

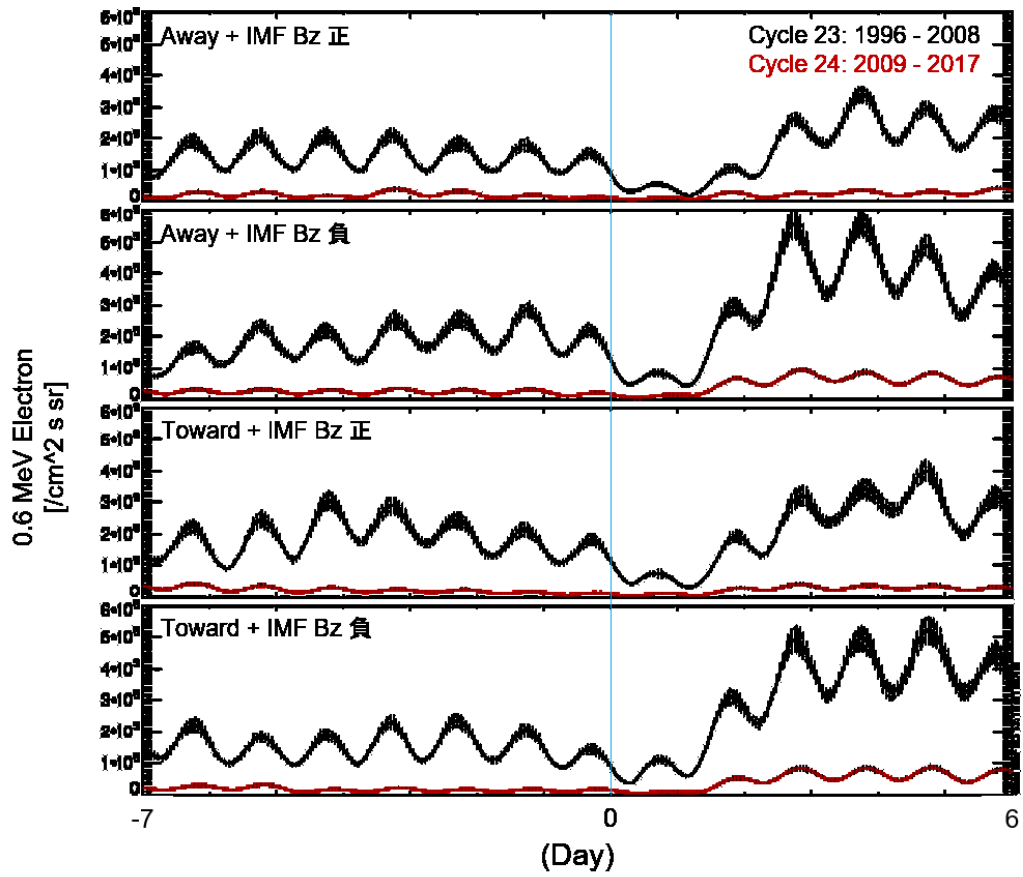


図 21: 23 太陽周期 (黒線) と 24 太陽周期 (赤線) における放射線帯電子フラックス (0.6 MeV) の IMF パターンごとの変動。

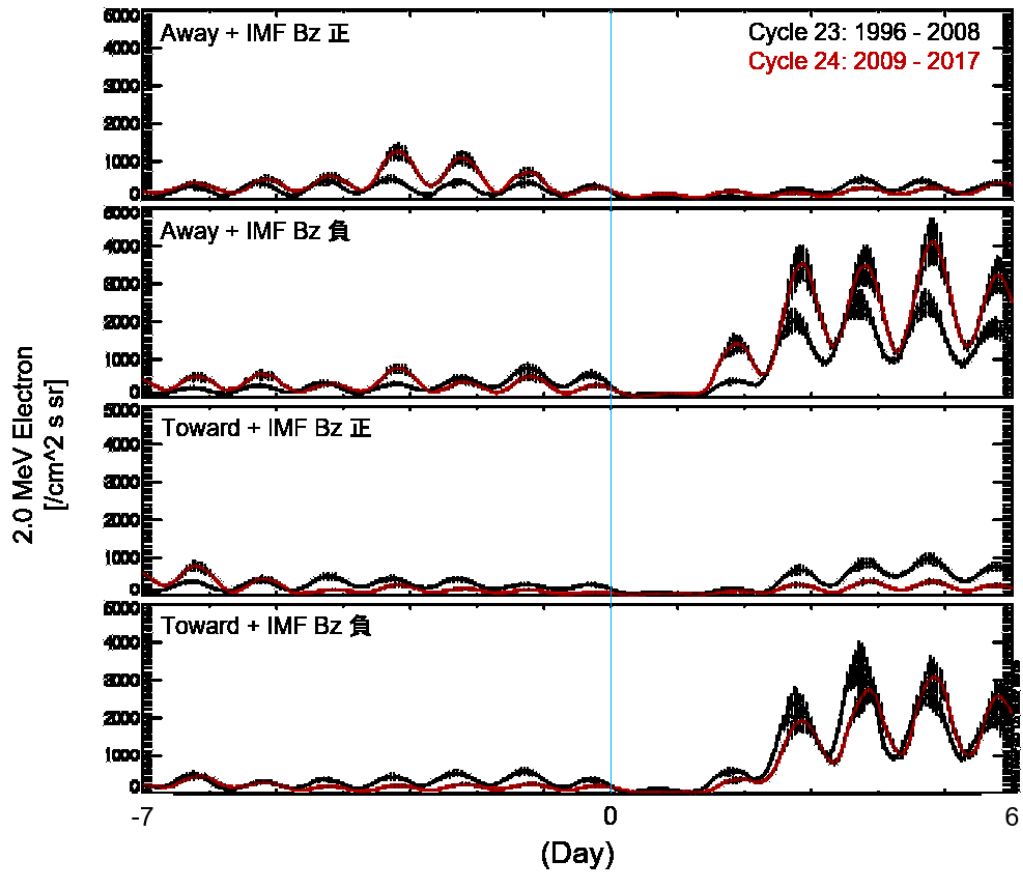


図 22: 23 太陽周期 (黒線) と 24 太陽周期 (赤線) における放射線帯電子フラックス (2.0 MeV) の IMF パターンごとの変動。

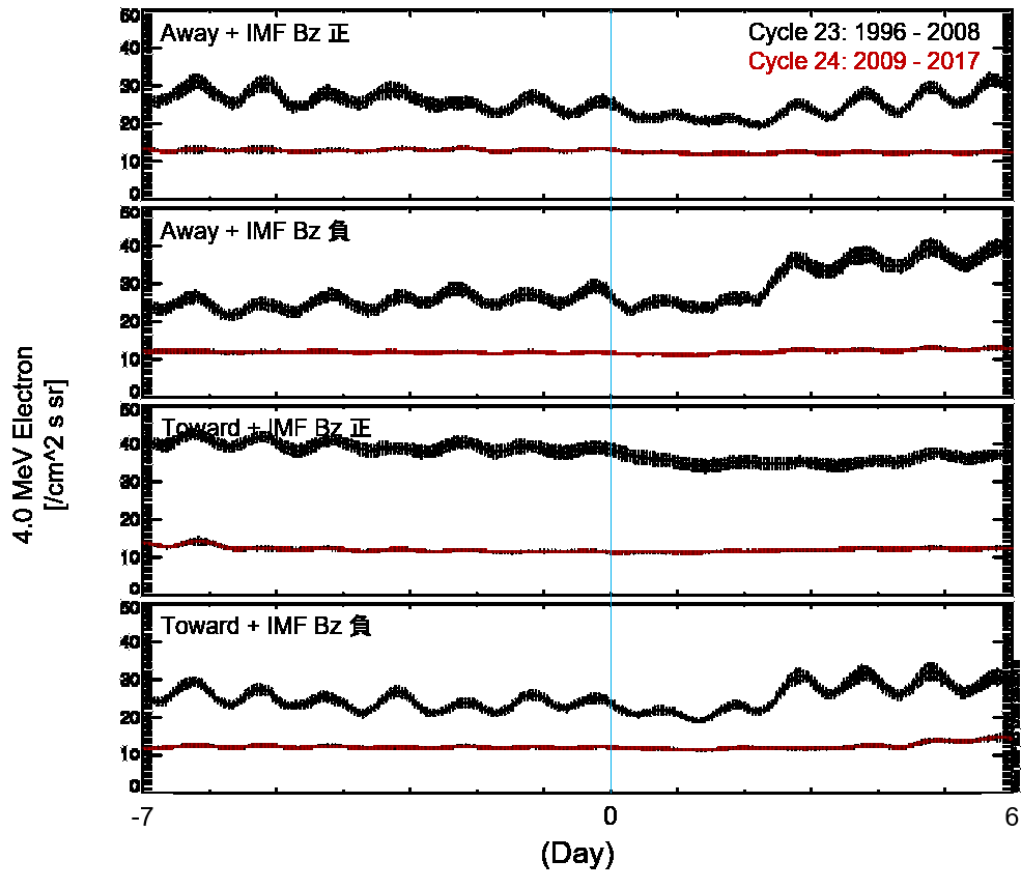


図 23: 23 太陽周期 (黒線) と 24 太陽周期 (赤線) における放射線帯電子フラックス (4.0 MeV) の IMF パターンごとの変動。

5. 考察

5.1 太陽活動第 23 および第 24 周期における CH の出現緯度

本研究では、太陽活動第 23 周期 (1996 年から 2008 年まで) と第 24 周期 (2009 年から 2016 年) を通じた CH 面積の変動を比較した。結果として、第 23 周期においては、南半球の低緯度にあたる緯度 0 度から 30 度の範囲で CH 面積変動が最大となることを示した。すなわち、第 23 周期の CH 面積の出現緯度には北半球と南半球で偏った傾向があったといえる。この CH 面積の南北非対称性は過去のいくつかの研究結果からも見て取ることができる。Lowder et al. (2016) では 1996 年 5 月から 2014 年 8 月における CH の緯度プロファイルが示されている (図 24)。それを見ると、1996 年から 2008 年 (第 23 周期) の CH 面積分布は南半球の方が北半球より多い傾向が見える。McIntosh et al. (2015) では、1996 年から 2014 年にかけての CH 面積が北半球と南半球に分けて示されているが、2000 年から 2004 年において CH 面積の変動は南半球の方が北半球より大きいことが分かる (図 25)。本研究の結果はこれらの先行研究の結果と一致していることに加えて、CH 面積の南北非対称性の傾向が 2002 年から 2003 年の間でもっとも顕著であることを示した。この傾向は Hamada et al. (2018) で示されている結果と矛盾しない。Hamada et al. (2018) では、1996 年から 2017 年における CH 面積を SOHO/EIT および SDO/AIA で同定し、その緯度分布マップを示している (図 26)。本研究で使用されたのと同じ波長である SOHO/EIT 195 Å で同定された CH 面積マップから、2003 年から 2004 年にかけて南半球の -40 度から 0 度の範囲で CH 面積が大きい傾向があることがわかる。さらに、第 23 周期の終わり頃である 2007 年頃にも緯度 -40 度から 0 度の範囲に CH が確認できる。

それに対して、第 24 周期においては第 23 周期において見られた CH 出現緯度の南北非対称性は不明瞭になり、CH は周期を通して緯度 -30° から 30° の広い範囲に出現する傾向があったことがわかった。第 24 周期における CH 面積の緯度分布の変動は Hamada et al. (2018) で示されている (図 26)。この図から本研究で使用されたのと同様の SOHO/EIT 195 Å および SDO/AIA 193 Å で同定された

2011年以降の低-中緯度 CH 面積の割合は第 23 周期よりも小さい傾向にあり、緯度-55 度から 55 度の広い範囲で CH が出現していることがわかる。また、図 16 より、本研究では 2017 年頃に北半球の CH 面積変動が顕著であることを示したが、Hamada et al. (2018) の図でも 2016 年頃に北半球で CH 面積が大きい傾向がある。一方、第 23 周期から第 24 周期に切り替わる時期における CH の出現緯度については、de Toma (2011) の中で 2006 年から 2009 年にかけての CH の推移が報告されている。それによると、第 23 周期の衰退期から 2008 年末にかけて低緯度 CH が存在し、その後消滅し始め、2009 年の始めには完全に消滅した。その頃は第 24 周期の太陽活動増加期であり、中緯度に CH を見ることができた。しかし、その中緯度 CH は急激に変化する一時的なものであった (Wang et al., 2010)。これらの先行研究の結果と本研究の結果を合わせて考察すると、第 23 周期のあいだ断続的に出現していた低緯度 CH は第 24 周期に切り替わると消滅し、CH の出現緯度は比較的中緯度に移動した。その後、第 24 周期を通して CH は第 23 周期より緯度方向に広い範囲で出現する傾向にあり、その面積も第 23 周期より小さくなったと考えられる。

本研究における新規性として、直近の 2 つの太陽活動周期において、地磁気活動に影響を及ぼす CH の緯度分布の傾向の違いを統計的に明らかにしたことが挙げられる。すなわち、CIR に関連する CH は、第 23 周期では南半球の緯度方向の限られた領域により多く現れる傾向があり、第 24 周期では緯度方向により広い範囲で CH が出現する傾向があったと結論づけられる。

5.2 CH 面積と太陽風速度の関係

本研究では、太陽活動第 23 周期と第 24 周期において CH 面積最大値と太陽風速度最大値の間に正の相関があることを示した。また、CH 面積と太陽風速度の最大値は第 23 周期の方が第 24 周期よりも大きいことも明らかになった。さらに、太陽風速度の分布は第 23 周期の方が第 24 周期よりも大きい傾向があることも分かった。本研究で示された CH 面積と太陽風速度の正相関は Tokumaru

et al. (2017) でも述べられている (ただしこちらでは本研究と異なり、CH 面積の平方根と太陽風速度の関係を示した)。

2 つの太陽周期における太陽風速度の傾向の違いについては de Toma (2011) や Watari (2018) でも報告されている。de Toma (2011) では第 23 周期が終了する直前 (2007 年および 2008 年) と第 24 周期の開始直後 (2009 年) の太陽風速度を比較している。それによると、2007 年と 2008 年において太陽風速度平均値の分布は 2 つのピークを持っており (図 27)、600 km/s 付近に見られるピークの方は、この頃太陽に出現していた低緯度 CH を起源とする再帰的高速風によるものである。その一方で、2009 年に入るとこれらの低緯度 CH が消滅していくことで、600 km/s 付近のピークは消えていく。さらに、2009 年の太陽風速度の時間平均を取ると、その 57% が 360 km/s 以下であったと述べられている。一方、Watari (2018) では、1974 年から 2016 年における年平均太陽風速度の変動が示されている (図 28)。これによると、第 24 周期の年平均太陽風速度のうち 500 km/s 以上の割合は第 23 周期 (および第 22 周期) より低かった。また、これらの結果と本研究の結果、および前章で述べた CH 面積の変動の違いから、第 23 周期と第 24 周期における、CIR に関連する CH 面積と太陽風速度の関係について考察することができる。本研究では特定の緯度で analysis window を設定しているが、第 23 周期の CIR に関連する CH は、この window のより多くの範囲を占めて出現する傾向があったため、より高速の太陽風が流れ出していたと考えられる。一方、第 24 周期は window を占める CH の面積が第 23 周期よりも小さい傾向にあったため、流れ出す太陽風の速度は第 23 周期と比べて低速になったと考えられる。

CH 面積と太陽風速度の関係を解析することは、太陽風の加速メカニズムを解明するために、また CH 画像観測から地球に到達する太陽風速度の予測を可能にするために重要である (Tokumaru et al., 2017)。両者の関係は宇宙天気予報の観点から、多くの観測機器を用いて研究されている [たとえば Vršnak, Temmer, and Veronig (2007); Rotter et al. (2012, 2015); Reiss et al. (2016)] (Tokumaru et al., 2017)。

このうち、Reiss et al. (2016) では SDO/AIA で観測された CH と地球付近の太陽風との経験的関係を用いたモデルと光球からコロナまでの開いた磁場と背景の太陽風の特徴との関係を確立するモデルの 2 種類のモデルを用いて、2011 年から 2014 年における high-speed stream の予測を評価した。

5.3 太陽風と地磁気活動の変動

本研究では、太陽活動第 23 周期と第 24 周期における太陽風および地磁気活動の変動の違いを IMF の向きのパターンごとに調べ、第 23 周期における変動の方が第 24 周期における変動より大きい傾向があることが明らかになった。特に AE 指数の変動においては、4 種類の IMF パターン全てにおいて第 23 周期の方が第 24 周期より大きい傾向が見られた。また、放射線帯電子フラックスの変動も第 23 周期の方が第 24 周期と比べて大きい傾向にあることが分かった。これらの結果から、第 24 周期を通して CIR に関連する太陽風に起因する地磁気活動は、第 23 周期の活動と比較して穏やかな傾向があったといえる。Gopalswamy et al. (2015a) や Watari (2017) でも第 24 周期の地磁気活動は第 23 周期のそれよりも低かったことが示されている。Gopalswamy et al. (2015a) では、第 23・24 周期における磁気嵐 (< -100 nT) と CME に関する統計的解析から、第 24 周期では太陽活動の低下によって太陽圏の圧力が小さく、それによって CME が拡大したことで磁場強度が弱くなり、結果的に地磁気活動が弱まったとしている。一方、本研究は CIR に関連する太陽風による地球磁気圏の応答を解析しており、第 24 周期の CIR のイベント数が第 23 周期よりも少ないことを示している。つまり、本研究の結果と合わせると、第 24 周期は地球磁気圏をじょう乱させる CME と CIR という 2 種類の太陽風構造の地球に与える影響が小さい傾向にあった太陽活動周期であったということもできる。一方、Watari (2017) は第 24 周期の地磁気活動の低さは、 > 5 mV/m の朝 - 夕方向き電場 (対流電場) の割合が 2013 年から 2014 年にかけて弱まったことによって引き起こされたと述べている。本研究でも両周期における対流電場の変動を解析したが、2 つの太陽活動周期で大きな差

は見られなかった。この両周期で変動の差が見られないという特徴は AE 指数や SYM-H 指数の変動でも見られる。この特徴の原因については地磁気活動の季節変化を考慮する必要がある。地磁気変化には半年周期の季節変化が見られる (Sabine, 1856)。Russell and McPherron (1973) において、地球の自転軸と磁軸が黄道面に対して傾いていることに起因して、4 月頃と 10 月頃に IMF Bz が最大になることから、春分と秋分の頃に地磁気活動が大きくなることが示された。これは一般に Russell – McPherron 効果と呼ばれる。さらに Zhao and Zong (2012) では、positive IMF polarity (本研究における away パターンに相当する) を伴う Russell – McPherron 効果は地磁気活動をより増加させることを示した。これらの結果から、本研究においても解析対象となるイベントを春季と秋季で分類する必要がある。ただし、本研究において解析対象のイベントを IMF のパターンごとに春季 (2、3、4 月) と秋季 (8、9、10 月) で分類してみると、イベント数に偏りが見られ、統計結果の信頼性が失われる可能性がある (表 2)。そのため、今後の課題として IMF のパターンだけでなく、季節ごとにも偏りなく、より多くのイベントを集めた後で、季節ごとの変動を解析する必要がある。

放射線帯電子フラックスの変動は Glauert et al. (2018) で報告されている。この研究は、静止軌道で測定された 2MeV より高い電子フラックスを異なるエネルギーフラックスに変換する手法を用いて、30 年間にわたって内部放射線帯の外側と静止軌道間の電子フラックスをシミュレーションした。図 29 は 1986 年から 2016 年までの放射線帯電子 (2 MeV) の drift-averaged 微分フラックスのシミュレーション結果である。縦軸の L^* は地球半径に比例するパラメータで、静止軌道は $L^* = 6.5$ に相当する。この図より、第 23 周期 (1996 年から 2008 年) と第 24 周期 (2009 年から 2016 年) で比較すると、静止軌道付近 ($L^* = 6.1$) の電子フラックスは第 24 周期の期間の方が小さい傾向が見られる。さらに、2009 年頃に静止軌道から外部放射線帯にわたってフラックスが減少しており、このような状況は 30 年間の中で他に類を見ないものである (Glauert et al., 2018)。この結果から、本研究で示された放射線帯電子フラックスの変動の周期ごとの違い

は妥当なものであると言える。さらに、本研究の CIR が地球に到達後の電子フラックスの変動を見ると、第 24 周期の方が第 23 周期よりも小さい傾向があることが分かる。第 24 周期は太陽活動が比較的小さかったため、形成される CIR も第 23 周期と比べて小さく、放射線帯に与える影響が小さい傾向になったと考えられる。この傾向は特に低エネルギー (0.6 MeV) で顕著であった。

なお、太陽活動第 25 周期は 2024 年にピークを迎えると予測されており、第 24 周期よりわずかに強い周期になると予想されている (Bhowmik and Nandy, 2018)。それに伴い、今後は大規模な宇宙天気変動イベントが発生する可能性が考えられる。個別の宇宙天気イベント解析と共に、長期的なデータ解析により周期全体の宇宙天気変動の特徴を捉える必要がある。

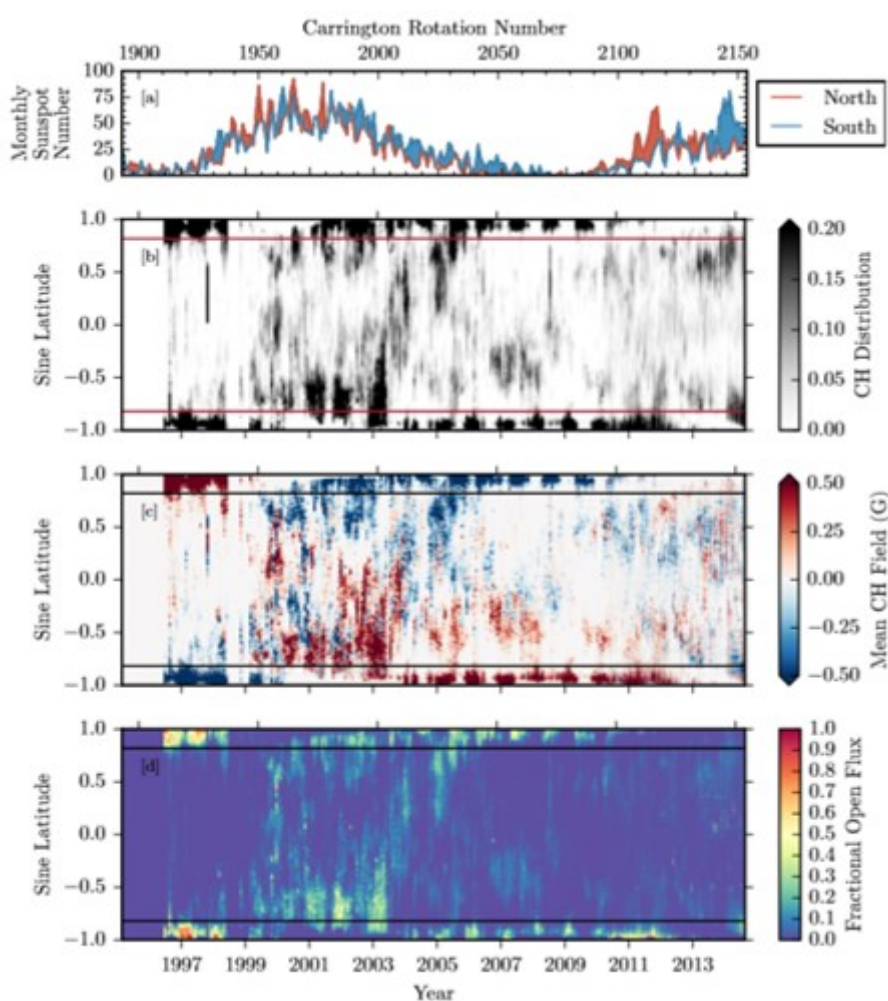


図 24: 1996 年 5 月 31 日から 2014 年 8 月 19 日までの [a] 北半球 (赤) と南半球 (青) の月黒点数。 [b] CH の緯度プロファイル。赤線は極域と低緯度の境である緯度 $\pm 55^\circ$ を示す。 [c] CH の極性プロファイル。 [d] CH 磁場の緯度プロファイル。 [b] から [d] は経度方向に積算されている。 Lowder et al. (2016) より。

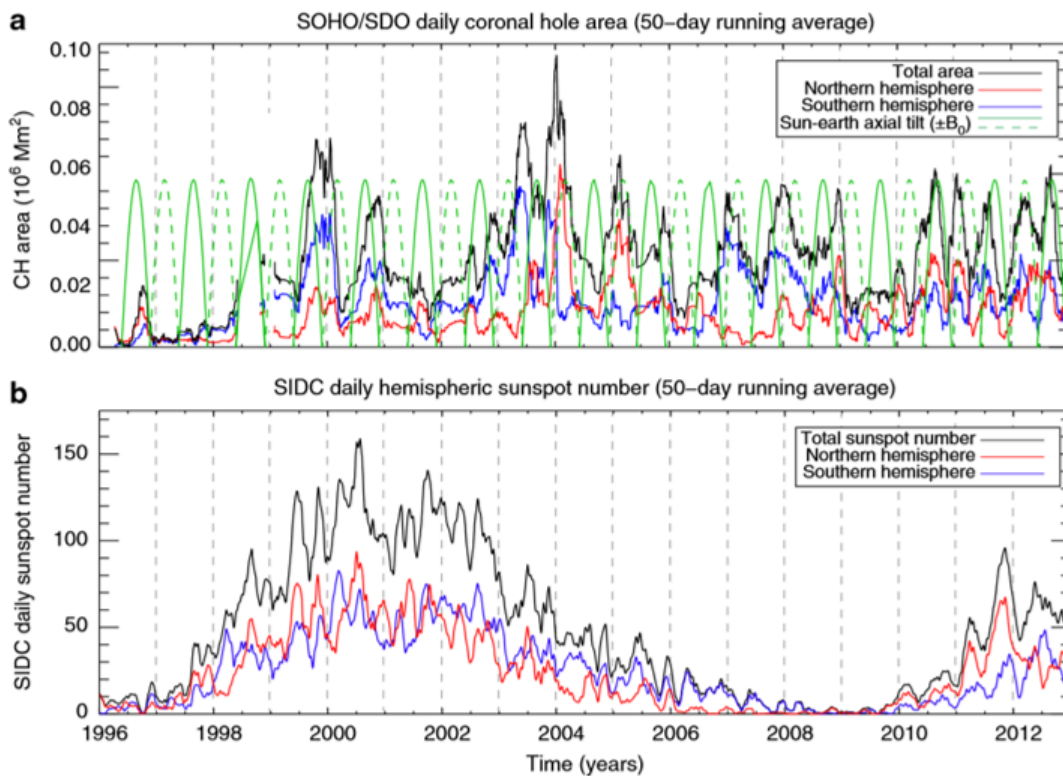


図 25: (a) CHARM 自動 SOHO/EIT および SDO/AIA の CH 検出アルゴリズムによる全球 (黒)、北半球 (赤)、南半球 (青) の緯度 55 度以下の領域における CH 面積の 50 日移動平均変動。参考のために、太陽 - 地球線に対する太陽の軸方向の傾きの季節的変動が示されている (破線はマイナスの傾きの振幅を示している)。 (b) 太陽影響データセンター (SIDC) による日太陽黒点数の 50 日移動平均。 McIntosh et al. (2015) より。

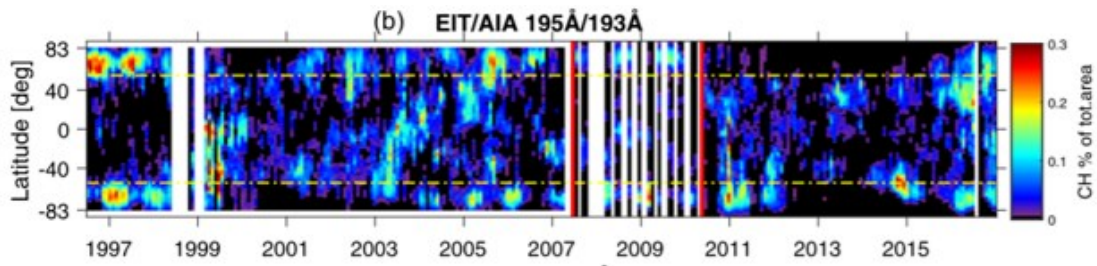


図 26: 1996 年から 2017 年における EIT および AIA で検出された CH 面積の割合。Hamada et al. (2018) より一部引用。

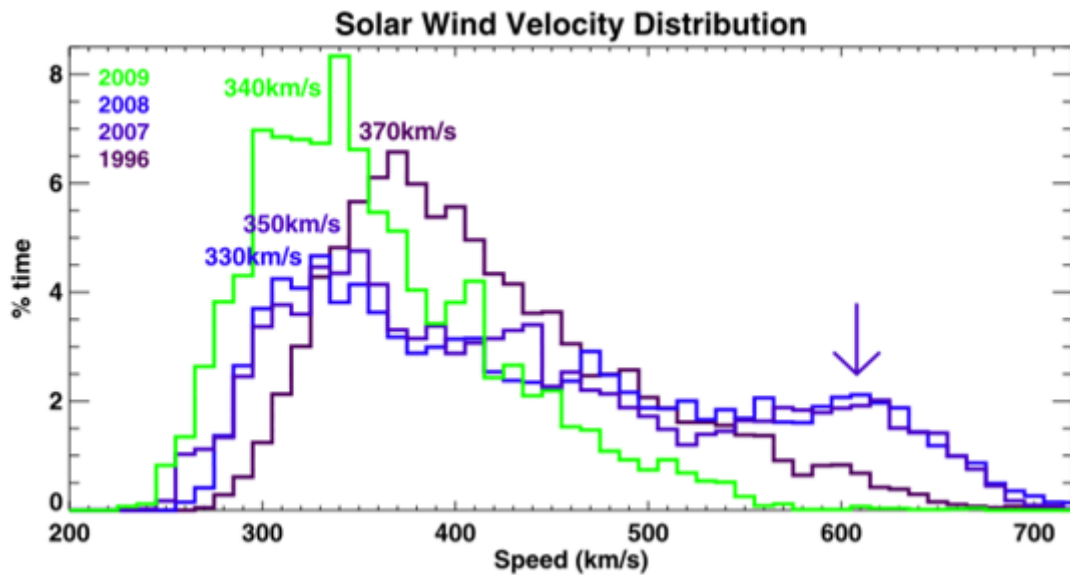


図 27: 1996 年 (紫)、2007 年と 2008 年 (青) および 2009 年 (緑) の太陽風速度分布ヒストグラム。それぞれ 370 km/s、350 km/s、330 km/s および 340 km/s にピークがある。2007 年と 2008 年には約 600 km/s に 2 つ目のピークがある。De Toma (2011) より。

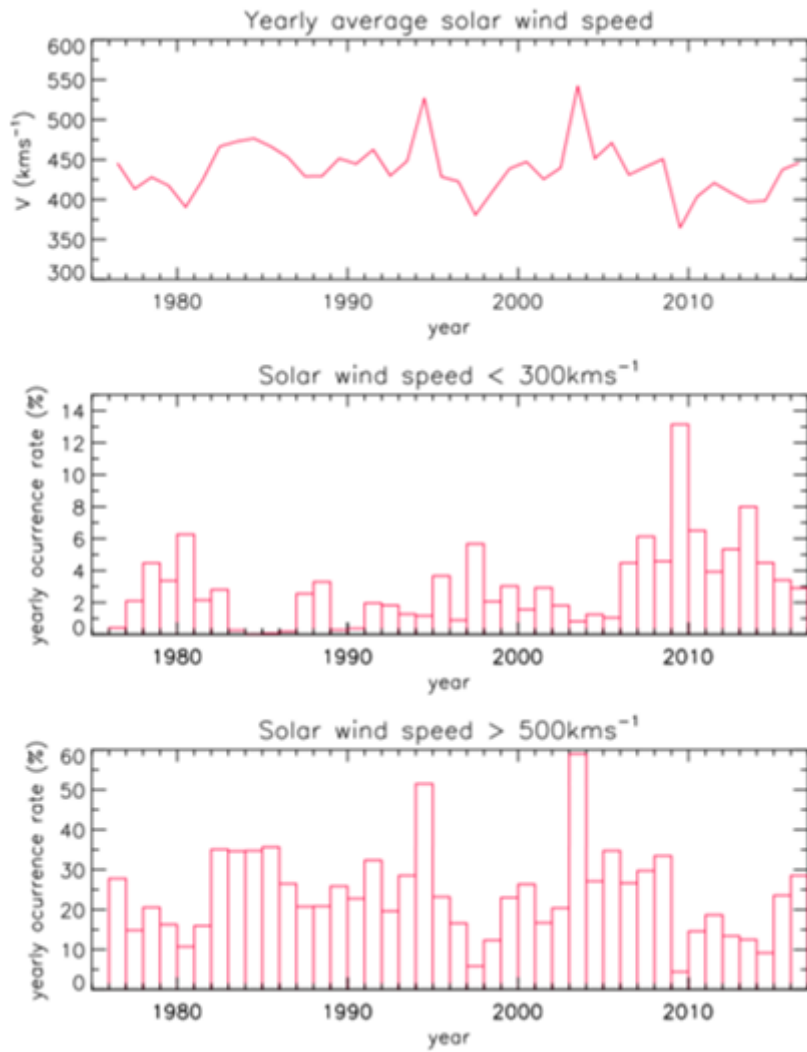


図 28: (上) 年平均太陽風速度。(中) 300 km/s より低速の年平均太陽風速度。(下) 500 km/s より高速の年平均太陽風速度。Watari (2018) より一部引用。

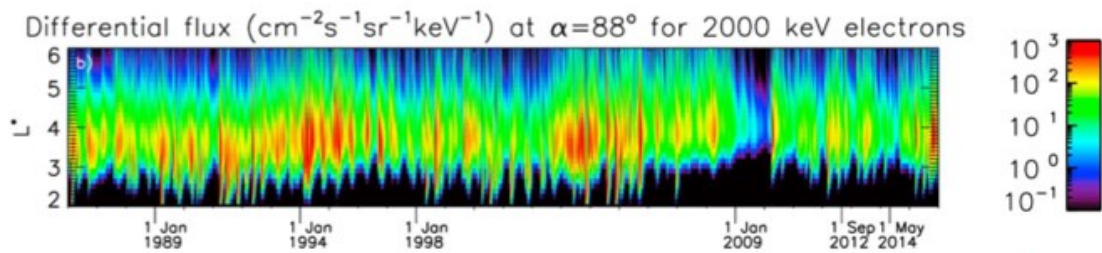


図 29: 1986 年から 2016 年にかけての赤道ピッチ角 88 度における 2 MeV 電子フラックス。

Glauert et al. (2018) より一部引用。

表 2: 本研究で解析した CIR イベントのうち春季 (2、3、4 月) および秋季 (8、9、10 月) のイベント数。

太陽活動第 23 周期			太陽活動第 24 周期		
	IMF パターン	イベント数		IMF パターン	イベント数
春季	Away かつ IMF Bz 正	22	春季	Away かつ IMF Bz 正	9
	Away かつ IMF Bz 負	3		Away かつ IMF Bz 負	1
	Toward かつ IMF Bz 正	0		Toward かつ IMF Bz 正	0
	Toward かつ IMF Bz 負	19		Toward かつ IMF Bz 負	16
秋季	Away かつ IMF Bz 正	2	秋季	Away かつ IMF Bz 正	1
	Away かつ IMF Bz 負	29		Away かつ IMF Bz 負	15
	Toward かつ IMF Bz 正	63		Toward かつ IMF Bz 正	17
	Toward かつ IMF Bz 負	2		Toward かつ IMF Bz 負	1

6. 結論

地球周辺の宇宙環境は主に太陽からの高エネルギー粒子や電磁波によりじょう乱することがある。これを宇宙天気と呼び、そのじょう乱の規模や継続時間を予報する試みがなされている。コロナホール (CH) から噴出する高速太陽風と低速太陽風の相互作用により形成される共回転相互作用領域 (CIR) が地球近傍に到達すると地球磁気圏のじょう乱を引き起こす。低緯度 CH を起源とする高速太陽風の地球磁気圏・電離圏への影響は、極域 CH を起源とする高速風の影響に比べて十分に評価されていないといわれている。本研究では、太陽活動第 23 周期および第 24 周期 (1996 年から 2017 年) における、CH 面積・太陽風パラメータ・惑星間空間磁場 (Interplanetary magnetic field: IMF) および 3 種類の地磁気指数 (AU・AL・SYM-H) の変動を統計的に解析した。また、IMF の空間変動によって 4 ケースに分け、各ケースについて CIR が地球磁気圏に到達した前後における太陽風・IMF・地磁気指数・磁気圏対流電場および放射線帯電子フラックスの変動を調べた。CH 面積の平均的な変動は第 23 周期と第 24 周期とで違いが見られた。第 23 周期では CH 面積の出現緯度に南北非対称性が見られた一方で、第 24 周期の CH は緯度方向により広範囲の領域で出現する傾向があった。CH 面積最大値と太陽風速度最大値には正の相関が見られ、CH 面積と太陽風速度の分布は第 23 周期の方が大きかった。太陽風速度はすべての IMF 空間変動パターンにおいて第 23 周期における変動の方が第 24 周期の場合よりも大きい傾向にあった。AE 指数と SYM-H 指数の変動の大きさは、IMF の空間変動パターンが Away か Toward かに関わらず、IMF Bz が負の場合の方が Bz 正の場合より大きい傾向があった。また、第 23 周期における太陽風増加開始後の AE 指数と SYM-H 指数の変動は、すべての IMF パターンにおいて第 24 周期の変動より大きい傾向があり、この傾向は Away かつ IMF Bz が正の場合が最も顕著であった。また、放射線帯の電子フラックスの変動も第 23 周期の方が大きい傾向にあった。

本研究の結果より、第 24 周期を通した平均的な地磁気活動は第 23 周期の地磁気活動より比較的小さい傾向があったと考えられる。それは第 24 周期の太陽

活動が第 23 周期より小さかったことに起因すると考えられる。一方で、磁気圏対流電場の変動は 2 つの太陽周期で顕著な違いは見られなかった。今後は地磁気活動の季節変化を考慮してさらなる解析をおこなう必要がある。また、放射線帯電子フラックス量は CIR の地球磁気圏への到達の前後を通して、第 23 周期の方が多かったことから、大局的な太陽-地球空間の変動は第 24 周期の方が小さい傾向にあったと考えられる。本研究の結果から、第 24 周期は太陽活動による地球への影響が比較的少なく、また周期全体を通して穏やかな周期であったと言える。

本研究の成果は、異なる 2 つの太陽活動周期全体における太陽活動と地磁気活動の変動を比較し、太陽活動の地球への影響の違いを評価したことである。本研究では、11 年という長い時間スケールにおける太陽活動の変動やそれに伴う地球への影響を解析することで、突発的な宇宙天気変動の影で大局的に変動している太陽-地球空間の変動の傾向を明らかにした。バックグラウンドとなる太陽-地球空間の変動の規模が大きければ、突発的な宇宙天気イベントの発生率も相対的に増加すると予想されることから、個別のイベント解析 (ケーススタディ) のみならず、太陽がジオスペースに与える変動の大局的な傾向を調査する統計的解析も重要である。

謝辞

本研究をおこなうにあたり、指導教員である野澤恵先生には大変丁寧なご指導を賜りました。また、野澤先生には学士卒業研究・修士卒業研究のご指導もしていただきました。名古屋大学宇宙地球環境研究所の新堀淳樹特任助教には、本研究内容について多くの貴重なご助言を賜り、本研究に用いた解析ツール SPEDAS の操作方法についてもご指導いただきました。さらに両先生方には、研究の解析の進め方、プログラミング、論文の書き方・読み方など、研究にかかわるさまざまな事を基礎から教えていただきました。心より御礼申し上げます。

野澤研究室の後輩のみなさんにもこの場を借りて御礼申し上げます。研究室にドクターの学生がいるなんて、最初はさぞかし緊張したことでしょう。ただ、私の適当な性格に触れるにつれてそういった感情も薄れていったのではないのでしょうか。一方で、自分の研究にかまけてあまり先輩らしい姿を見せられなかったことを申し訳なく思っています。しかし、そんな未熟な自分を先輩として慕ってくれ、支えてくれたみなさんのおかげでここまで頑張ることができました。

そして最後になりましたが、大学入学時から支えてくれた家族と、つらいときに励ましてくれた友人各位にも心から御礼申し上げます。研究生活が思うように進まず心が折れたときもありましたが、ここまでたどり着けたのは支えてくれた皆さんのおかげです。

その他、入学してから今日までの日々を支えてくれたすべての皆さまに心より御礼申し上げます。

本研究では、Virtual Solar Observatory (<https://sdac.virtualsolar.org/cgi/search/>) の SOHO/EIT 太陽 2 次元画像データおよび AIA Cutoff Data (https://www.lmsal.com/get_aia_data/) の SCO/AIA 太陽 2 次元画像データを使用しました。太陽風および GOES 衛星の電子フラックスデータは Coordinated Data Analysis Web (<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/>) の OMNI2 データを使用しました。地磁気指数データは京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター

(WDC, Kyoto: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) から取得しました。解析にはデータ分析用プログラム Interactive Data Language (IDL) および、太陽観測データ解析用パッケージ Solar SoftWare (SSW) を使用しました。また、本研究をおこなうにあたり、the Interuniversity Upper atmosphere Global Observation NETwork (IUGONET) data analysis web service (<http://search.iugonet.org/list.jsp>) および、超高層大気の解析を目的として IUGONET プロジェクトで改良された解析ソフトウェア SPEDAS を利用しました。

引用文献

Abunina, M., Abunin, A., Belov, A., Eroshenko, E., Gaidash, S., Oleneva, V., Yanke, V., and Kryakunova, O. (2015) On the influence of the coronal hole latitude and polarity on the geomagnetic activity and cosmic ray variations, *Proceeding of Science, The 34th International Cosmic Ray Conference*, 082.

Abunina, M., Abunin, A., Belov, A., Gaidash, S., Tassev, Y., Velinov, P., Mateev, L., and Tonev, P. (2013) Geoeffectivity of solar coronal holes with different magnetic field polarity, *Bulgarian Academy of Sciences. Space Research and Technology Institute. Aerospace Research in Bulgaria*, 25:70–77.

Akiyama, S., Gopalswamy, N., Yashiro, S., and Mäkelä, P. A Study of Coronal Holes Observed by SOHO/EIT and the Nobeyama Radioheliograph, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 65, S15, doi: 10.1093/pasj/65.sp1.S15.

Altrock, R. C. (2014) Forecasting the maxima of solar cycle 24 with coronal Fe xiv emission. *Solar Physics*, 289:623–629.

Alves, M. V., Echer, E., and Gonzalez, W. D. (2006) Geoeffectiveness of corotating interaction regions as measured by Dst index, *J. Geophys. Res.*, 111, A07S05, doi:10.1029/2005JA011379.

Angelopoulos, V., P. Cruce, A. Drozdov, E. W. Grimes, N. Hatzigeorgiu, D. A. King, D. Larson, J. W. Lewis, J. M. McTiernan, D. A. Roberts, C. L. Russell, T. Hori, Y. Kasahara, A. Kumamoto, A. Matsuoka, Y. Miyashita, Y. Miyoshi, I. Shinohara, M. Teramoto, J. B. Faden, A. J. Halford, M. McCarthy, R. M. Millan, J. G. Sample, D. M. Smith, L. A. Woodger, A. Masson, A. A. Narock, K. Asamura, T. F. Chang, C.-Y. Chiang, Y. Kazama,

K. Keika, S. Matsuda, T. Segawa, K. Seki, M. Shoji, S. W. Y. Tam, N. Umemura, B.-J. Wang, S.-Y. Wang, R. Redmon, J. V. Rodriguez, H. J. Singer, J. Vandegriff, S. Abe, M. Nose, A. Shinbori, Y.-M. Tanaka, S. UeNo, L. Andersson, P. Dunn, C. Fowler, J. S. Halekas, T. Hara, Y. Harada, C. O. Lee, R. Lillis, D. L. Mitchell, M. R. Argall, K. Bromund, J. L. Burch, I. J. Cohen, M. Galloy, B. Giles, A. N. Jaynes, O. Le Contel, M. Oka, T. D. Phan, B. M. Walsh, J. Westlake, F. D. Wilder, S. D. Bale, R. Livi, M. Pulupa, P. Whittlesey, A. DeWolfe, B. Harter, E. Lucas, U. Auster, J. W. Bonnell, C. M. Cully, E. Donovan, R. E. Ergun, H. U. Frey, B. Jackel, A. Keiling, H. Korth, J. P. McFadden, Y. Nishimura, F. Plaschke, P. Robert, D. L. Turner, J. M. Weygand, R. M. Candey, R. C. Johnson, T. Kovalick, M. H. Liu, R. E. McGuire, A. Breneman, K. Kersten, and P. Schroeder, The Space Physics Environment Data Analysis System (SPEDAS), (2019), *Space Sci. Rev.*, 215:9, doi:10.1007/s11214-018-0576-4.

Bagashvili, S. R., Shergelashvili, B. M., Japaridze, D. R., Chargeishvili, B. B., Kosovichev, A. G., Kukhianidze, V., Ramishvili, G., Zaqarashvili, T. V., Poedts, S., Khodachenko, M. L., and Causmaecker, P. De. (2017) Statistical properties of coronal hole rotation rates: Are they linked to the solar interior? *A&A* 603, A134. doi: 10.1051/0004-6361/201630377.

Bhowmik, P., and Nandy, D. (2018) Prediction of the strength and timing of sunspot cycle 25 reveal decadal-scale space environmental conditions, *Nature Communications*, 9:5209, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07690-0>.

Borovsky, J. E., and Denton, M. H. (2006) Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms, *J. Geophys. Res.*, 111, A07S08, doi:10.1029/2005JA011447.

Borovsky, J. E., and Denton, M. H. (2013) The differences between storms driven by helmet streamer CIRs and storms driven by pseudostreamer CIRs, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 5506–5521, doi:10.1002/jgra.50524.

Boteler, D. H., (2001) Space Weather Effects on Power Systems, in *Space Weather*, ed. P. Song, H. Singer, and G. Siscoe, AGU Geophys. Monogr. Ser., 125, 347-352, AGU, Washington D.C., ISBN0-87590-984-1.

Con, S., Nishihashi, M., and Hattori, K. (2011) Ionospheric anomalies possibly associated with MP6.0 earthquakes in the Japan area during 1998–2010: Case studies and statistical study, *Journal of Asian Earth Sciences* 41, 410-420.

Cranmer, S.R. (2009) Coronal Holes. *Living Reviews in Solar Physics*, 6:3.

Delaboudinière, J. P., et al. (1995) EIT: Extreme-ultraviolet Imaging Telescope for the SOHO mission, *Solar Physics*, 162,291–312.

Gopalswamy, N., Akiyama, S., Yashiro, S., Xie, H., Mäkelä, P., and Michalek, G. (2015a) The Mild Space Weather in Solar Cycle 24, *Solar and Stellar Astrophysics*, doi:arXiv:1508.01603.

Gopalswamy, N., Tsurutani, B., and Yan, Y. (2015b) Short-term variability of the Sun-Earth system: an overview of progress made during the CAWSES- II period, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2:13, doi:10.1186/s40645-015-0043-8.

Gopalswamy, N., Yashio, S., Mäkelä, P., Michalek, G., Shibasaki, K., and Hathaway, D. H. (2012) Behavior of solar cycles 23 and 24 revealed by microwave observations, *The Astrophysical Journal Letters*, 750:L42.

Harvey, J. W. and Sheeley, N. R. (1978) Coronal holes, solar wind streams, and geomagnetic activity during the new sunspot cycle, *Solar Physics*, 59:159–173.

Harvey, K. L., and Recely, F. (2002) Polar coronal holes during cycles 22 and 23, *Solar Physics*, 211:31-52.

Harvey, K., Suess, S., Aschwanden, M., Guhathakurta, M., Harvey, J., Hathaway, D., LaBonte, B., Sheeley, N., and Tsurutani, B. T. (2000) NASA white paper derived from Workshop on Coronal Holes Near Solar Maximum and Over the Solar Cycle. NASA, Washington, D. C.

Hayashi, H., Koyama, Y., Hori, T., Tanaka, Y., Abe, S., Shinbori, A., Kagitani, M., Kouno, T., Yoshida, D., Ueno, S., Kaneda, N., Yoneda, M., Umemura, N., Tadokoro, H., Motoba, T., and the IUGONET project team, (2013) Inter-university Upper Atmosphere Global Observation NETWORK (IUGONET), *Data Sci. J.*, 12, WDS179-WDS184, doi: 10.2481/dsj.WDS-030.

Jian, L. K., Russell, C. T., Luhmann, J. G., Galvin, A. B., and Simunac, K. D. C. Solar Wind Observations at STEREO: 2007–2011, *Amer. Inst. Phys. Proceedings of Solar Wind 13*, 1539, 191–194, doi: 10.1063/1.4811020.

Jian, L. K., Russell, C. T., and Luhmann, J. G. (2011) Comparing Solar Minimum 23/24 with Historical Solar Wind Records at 1 AU, *Solar Physics*, 274:321–344, doi:10.1007/s11207-011-9737-2.

Jian, L., Russell C. T., Luhmann, J. G., Skoug, R. M. (2006) Properties of stream interactions at one AU during 1995–2004, *Solar Physics*, 239:337–392, doi:10.1007/s11207-006-0132-3.

Jiang, J., Chatterjee, P., and Chouhuri, A. R. (2007), Solar Activity Fore-cast with a Dynamo Model, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 381, doi:10.1111/j.1365-2966.

Kamide, Y., and Kusano, K. (2013), Is Something Wrong With the Present Solar Maximum? *Space Weather*, 11, 140–141, doi:10.1002/swe.20045.

Kane, R. P. (2005), How good is the relationship of solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms? *J. Geophys. Res.*, 110, A02213, doi:10.1029/2004JA010799.

Kataoka, R., and Miyoshi, Y. (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.

Lanzerotti, L. J. (2001) Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Space Storms and Space Weather Hazards, held in Hersonissos, Crete, Greece, 19-29 June, 2000. Edited by I.A. Daglis. Published by Kluwer Academic Publishers, 2001., p.313.

Lemen, J. R., et al. (2012) The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO), *Solar Physics*, 275:17–40, doi:10.1007/s11207-011-9776-8.

Lowder, C., Qiu, J., and Leamon, R. (2016) Coronal Holes and Open Magnetic Flux over Cycles 23 and 24, *Solar Physics*, 292:18, doi: 10.1007/s11207-016-1041-8.

McIntosh, S. W., Leamon, R. J., Krista, L. D., Title, A. M., Hudson, H. S., Riley, P., Harder, J. W., Kopp, G., Snow, M., Woods, T. N., Kasper, J. C., Stevens, M. L., and Ulrich, R. K. (2015) The solar magnetic activity band interaction and instabilities that shape quasi-periodic variability, *Nature Communications*, 6, 6491, doi: 10.1038/ncomms7491.

Miyashita, Y., S. Machida, Y. Kamide, D. Nagata, K. Liou, M. Fujimoto, A. Ieda, M. H. Saito, C. T. Russell, S. P. Christon, M. Nosé, H. U. Frey, I. Shinohara, T. Mukai, Y. Saito, and H. Hayakawa. (2009) A state-of-the-art picture of substorm-associated evolution of the near-Earth magnetotail obtained from superposed epoch analysis, *Journal of Geophysical Research*, 114, A01211, doi:10.1029/2008JA013225.

Mordvinov, A. V., Yazev, S. A. (2014) Reversals of the Sun's polar magnetic fields in relation to activity complexes and coronal holes, *Solar Physics*, 289:1971–1981.

Nakagawa, Y., Nozawa, S., and Shinbori, A. (2019) Relationship between the low-latitude coronal hole area, solar wind velocity, and geomagnetic activity during solar cycles 23 and 24, *Earth, Planets and Space*, 71:24.

Onsager, T. G., Grubb, R., Kunches, J., Matheson, L., Speich, D., Zwickl, R., and Sauer, H. (1996) Operational uses of the GOES energetic particle detectors, in GOES-8 and beyond. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2812, 281–290.

Pulkkinen A., S. Lindahl, A. Viljanen, and Pirjola, R. (2005) Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system, *Space Weather*, 3, S08C03 (19pp), doi:10.1029/2004SW000123.

Qian, L., Wang, W., Burns, A. G., Chamberlin, P. C., Coster, A., Zhang, S.-R., and Solomon, S. C. (2019) Solar flare and geomagnetic storm effects on the thermosphere and ionosphere during 6–11 September 2017. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, <https://doi.org/10.1029/2018JA026175>.

Redmon, R.J., Seaton, D.B., Steenburgh, R., He, J., and Rodriguez, J.V. (2018) September 2017's geoeffective space weather and impacts to Caribbean radio communications during hurricane response. *Space Weather*, 16, 1190–1201, <https://doi.org/10.1029/2018SW001897>.

Reiss, M. A., Temmer, M., Veronig, A. M., Nikolic, L., Vennerstorm, S., Schöngassner, F., Hofmeister, S. (2016) Verification of high-speed solar wind stream forecasts using operational solar wind models, *Space Weather* 14, 495, doi: 10.1002/2016SW001390.

Rotter, T., Veronig, A. M., Temmer, M., and Vršnak, B. (2012) Relation Between Coronal Hole Areas on the Sun and the Solar Wind Parameters at 1 AU, *Solar Physics*, Vol. 281, 2, 793–813.

Rotter, T., Veronig, A. M., Temmer, M., and Vršnak, B. (2015) Real-Time Solar Wind Prediction Based on SDO/AIA Coronal Hole Data, *Solar Physics*, Vol. 290, 5, 1355–1370.

Russell, C. T. (2001) Solar Wind and Interplanetary Magnetic Field: A Tutorial, *Space Weather*, edited by Song, P., Singer, H. J., and Siscoe, G. L., 73–89, AGU, Washington, D. C., doi:10.1029/GM125p0073.

Sabine, E., On periodical laws discoverable in the mean effects of the larger magnetic disturbances, *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A*, 146, 357, 1856.

Schatten, K. H. (1969) The Magnetic Field Structure in the Active Solar Corona, *Solar Magnetic Fields*, 595-608.

Schwenn, R. (2006) Space Weather: The Solar Perspective, *Living Reviews in Solar Physics*, Vol. 3, 2, doi:10.12942/lrsp-2006-2.

Selhorst, C. L., Gimenez de Castro, C. G., Válio, A., Costa, J. E. R., and Shibasaki, K. (2011) The behavior of the 17 GHz solar radius and limb brightening in the spotless minimum XXIII/XXIV, *The Astrophysical Journal*, 734:64–66, doi:10.1088/0004-637X/734/1/64.

Sheeley, N. R. Jr., and Harvey, J. W. (1981) Coronal holes, solar wind streams, and geomagnetic disturbances during 1978 and 1979, *Solar Physics*, 70:237–249.

Shibasaki, K. (2013) Long-term global solar activity observed by the Nobeyama Radioheliograph, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 65, 17.

Svalgaard, L., Cliver, E. W., and Kamide, Y. (2005) Sunspot cycle 24: Smallest cycle in 100 years? *Geophysical Research Letters*, 32, L01104, doi:10.1029/2004GL021664.

Tanaka, Y., Shinbori, A., Hori, T., Koyama, Y., Abe, S., Umemura, N., Sato, Y., Yagi, M., Ueno, S., Yatagai, A., Ogawa, Y., and Miyoshi, Y. (2013) Analysis software for upper atmospheric data developed by the IUGONET project and its application to polar science, *Adv. Polar Sci.*, 24, 231–240, doi: 10.3724/SP.J.1085.2013.00231.

Tokumaru, M., Satonaka, D., Fujiki, K., Hayashi, and K., Hakamada. (2017) Relation Between Coronal Hole Areas and Solar Wind Speeds Derived from Interplanetary Scintillation Measurements, *Solar Physics*, 292:41, doi: 10.1007/s11207-017-1066-7.

Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Gonzalez, A. L. C., Tang, F., Arballo, J. K., and Okada, M. (1995) Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle, *Journal of Geophysical Research*, 100, 21,717–733.

Tsurutani, B. T., McPherron, R. L., Gonzalez, W. D., Lu, G., Sobral, J. H. A., and Gopalswamy, N. (2006a), Introduction to special section on corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity, *J. Geophys. Res.*, 111, A07S00, doi:10.1029/2006JA011745.

Tsurutani, B. T., et al. (2006b), Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review, *J. Geophys. Res.*, 111, A07S01, doi:10.1029/2005JA011273.

Van Allen, et al. (1958) *Jet Propul.*, 28, 588.

Van Allen, J. A., and Frank, L. A. (1959) *Nature*, 183, 430.

Verbanac, G., Vršnak, B., Veronig, A., and Temmer, M. (2011a) Equatorial coronal holes, solar wind high-speed streams, and their geoeffectiveness, *Astronomy & Astrophysics*, 526, A20, doi: 10.1051/0004-6361/201014617.

Verbanac, G., Vršnak, B., Živkovic, S., Hojsak, T., Veronig, A. M, and Temmer, M. (2011b) Solar wind high-speed streams and related geomagnetic activity in the declining phase of solar cycle 23, *Astronomy & Astrophysics*, 533, A49, doi: 10.1051/0004-6361/201116615.

Vršnak, B., Temmer, M., and Veronig, A, M. (2007) Coronal Holes and Solar Wind High-Speed Streams: I. Forecasting the Solar Wind Parameters, *Solar Physics*, Vol. 240, 2, 315–330.

Wang, Y.-M., E. Robbrecht, A. P. Rouillard, N. R. Sheeley Jr, and A. F. R. Thernisien. (2010) Formation and evolution of coronal holes following the emergence of active regions, *The Astrophysical Journal*, Volume 715, doi: 10.1088/0004-637X/715/1/39.

Watari S., Kato H., and Yamamoto K. (2015) Hit rate of space weather forecasts of the Japanese forecast center and analysis of problematic events on the forecasts between June 2014 and March 2015, *Sun and Geosphere*, 10(2):163–171.

Watari, S. (2017) Geomagnetic storms of cycle 24 and their solar sources, *Earth, Planets and Space*, 69:70, doi:10.1186/s40623-017-0653-z.

Watari, S. (2018) Intense Geomagnetic Storms Associated with Coronal Holes Under the Weak Solar-Wind Conditions of Cycle 24, *Solar Phys* (2018) 293:23, <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1248-y>.

Zhang, Y., Sun, W., Feng, X. S., Deehr, C. S., Fry, C. D., and Dryer, M. (2008) Statistical analysis of corotating interaction regions and their geoeffectiveness during solar cycle 23, *J. Geophys. Res.*, 113, A08106, doi:10.1029/2008JA013095.

Zhao, H., and Zong, Q.-G. (2012) Seasonal and diurnal variation of geomagnetic activity: Russell-McPherron effect during different IMF polarity and/or extreme solar wind conditions, *J. Geophys. Res.*, 117, A11222, doi:10.1029/2012JA017845.

桜井隆, 小島正宜, 小杉健郎, 柴田一成 (2009) シリーズ現代の天文学 10『太陽』, 日本論評社

柴田一成, 上出洋介 (2011) 総説宇宙天気, 京都大学学術出版会

小野高幸, 三好由純 (2012) 現代地球科学入門シリーズ 2『太陽地球圏』, 共立出版

国土地理院ホームページ『9月6日に発生した太陽フレアのGPS測位への影響(速報)』 <http://www.gsi.go.jp/denshi/denshi40001.html>