



新学術領域「太陽地球圏環境予測」我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成

PSTEP Newsletter

No.9 Jun. 2018

INDEX

【研究報告】 表面磁束輸送モデルに基づく次期太陽活動度の予測	pp.1-2
平成 29 年度 活動報告 計画研究班	pp.3-4
公募研究 (第 1 期) 成果報告①	pp.5-8
公募研究 (第 2 期) を開始	p.8
【会議報告】 PSTEP・ISEE 研究集会「第 2 回太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」	p.9
NICT が宇宙天気予報による社会貢献で第 3 回宇宙開発利用大賞を受賞	p.9
研究室紹介⑧ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所「ひので」グループ	p.10
Q&A 宇宙と地球のなぜ? どうして?	p.10

Project for
Solar-Terrestrial
Environment Prediction

表面磁束輸送モデルに基づく次期太陽活動度の予測

太陽黒点は強大な磁気エネルギーを持っており、フレアやコロナ質量放出などの爆発現象を通して、太陽地球圏環境を変動させる源になっています。黒点は約 11 年周期で増減することが知られています (図 1)。現在の太陽周期であるサイクル 24 は、黒点の比較的少ない時期で、太陽周期の終わり、太陽活動の極小期、に近づいています。極小期をすぎると、太陽活動は再び活発になっていき、黒点数は 2025 年ごろに次のピークを迎えると考えられています。10 年程度の時間スケールで宇宙天気を予報しようと思うと、次の太陽周期でどのくらいの数の太陽黒点が生まれるのかを前もって知る必要があります。

そこで、PSTEP A04 周期活動班では、太陽表面の磁場観測と数値シミュレーションとを合わせて、2025 年ごろに最盛期を迎えると思われる次期太陽活動周期 (サイクル 25) における黒点数を予測しようと試みています。その成果として、次のサイクル 25 において、黒点の数がかなり少なくなるのではないかと、という結果を得たので、ここで紹介します。

太陽活動の正確な予測のためには、未だ多くの課題が残っています。なぜ太陽活動が 11 年周期になるのか、という物理的なメカニズムも未だ解明されていません。経験則から予測しようと思っても、少し変わったサイクルがあると簡単に予測が外れてしまいます。Pesnell (2016) では、現在の太陽活動周期であるサイクル 24 の黒点数について、予測研究を集めてメタ解析を行っています。それによると、数理的、統計学的、物理的な種々の手法の中で、ほぼ唯一、かなり正解に近い予測

ができていたのが、極磁場を利用するという方法です。

極磁場による予測手法は、より厳密に言えば、ある太陽活動周期の極小期における極磁場と、その約 5 年後にあたる次の周期の極大期の黒点数が、ほぼ比例関係にあるという経験則を利用しています。この経験則により、太陽黒点を 5 年程度前もって予測することが可能です。

なぜ極磁場を利用すると黒点数が予測できるのでしょうか。これは、おそらく太陽黒点を生み出すダイナモ過程が関わっていると考えられています。太陽ダイナモの標準的なモデルでは、黒点を形成する磁場は、太陽が持つ経度方向の流れ (差動回転) により作られます。太陽の北極から南極までを貫く磁場が、太陽プラズマの差動回転によって経度方向にぐっと引き伸ばされることで、黒点を形作る経度方向の磁場を作ります。この黒点のもととなる太陽の両極を貫く磁場が、太陽表面では極付近の磁場、極磁場として観測されるため、引き伸ばしの種である極磁場を使えば、引き伸ばした結果の黒点が予測できるということになります。

ここまで述べたように、極磁場を使うと約 5 年前から黒点数をかなりの確度で予測できるようです。では、10 年、20 年とより長く予測するにはどうすればよいのでしょうか。一つの方法は、極小期における極磁場を予測することです。

我々は、極小期における極磁場を予測するため、表面磁束輸送モデル (Surface Flux Transport Model; SFT モデル) を利用しています。SFT モデルは、太陽表面を貫く磁場が、太陽表面の対流運

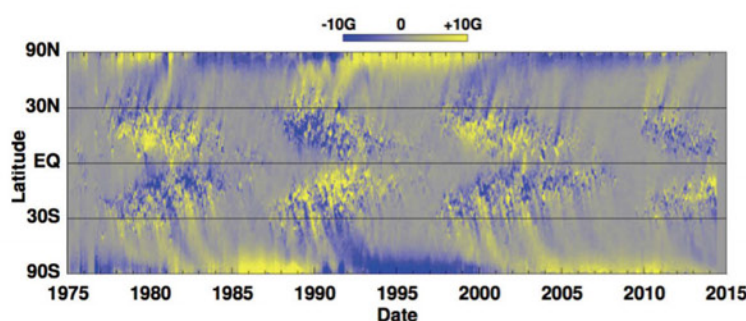


図 1:
磁気バタフライダイアグラム (Kitt Peak 観測所および SOHO 衛星による観測)。経度方向に平均化された動径成分磁場。低緯度における磁気活動と高緯度の極磁場の位相が、約 90 度ずれていることが分かる。Hathaway (2015, Living Review) より。

動によって流され、壊されていく様子を記述する物理モデルです。このモデルの大きな利点として、必要なパラメータの大部分が、観測から詳細に決定できるということがあります。太陽表面の磁場観測データとモデルを上手く合わせてやることで極磁場を精度よく予測して、そこから未来の黒点数を予測しようというのが、我々の戦略です。

SFT モデルは大部分のパラメータを観測から決定できるのですが、中にはそれが難しいものがあります。その最たるものが新たな黒点の出現に関わるパラメータです。黒点の出現位置、日時、大きさ、強度、極性、形状など、黒点に関わるパラメータは多岐にわたります。多くの SFT モデルでは、種々の経験則や仮定を用いて、それらのパラメータの自由度を減らして、扱いやすい形でモデル化しています。

我々は、太陽表面の磁場観測と SFT モデルを注意深く比較することで、各サイクルの極小期前の数年間において、新たな黒点の出現による極磁場への寄与を無視できる、という結果を得ました。図 2 は観測される極磁場（軸ダイポールモーメント）の時間変化が、新たな黒点が出現しない SFT モデルによって予測できるか検証したものです。太線は観測値、細線は各時刻からの SFT モデルに

よるシミュレーションで、各パネルにおける点線は極小期の日時を表します。極小期の 3~5 年程度前から、この SFT モデルにより観測される極磁場がよく再現されていることがわかります。これは実はかなり不思議な事で、この時期はまだまだ黒点が盛んに出現しており、極磁場への寄与は大きいと考えられていました。この原因については、今後の研究で解明していきたいと考えています。

この性質を使うことで、図 3 のように、極小期の 3 年前からなら極小期における極磁場、そして次のサイクルの最大黒点数が予測できるようになります。全体として約 8 年前から黒点数の予測が可能になりました。本研究では、次期太陽サイクル 25 の黒点数（図 3 の十字シンボル）は、現太陽周期より 10-20% 程度少ないと予測しています。

（飯島 陽久 / 名古屋大学）

この成果は、

H. Iijima, H. Hotta, S. Imada, K. Kusano, and D. Shiota, 2017,

Improvement of solar-cycle prediction: Plateau of solar axial dipole moment,

Astronomy & Astrophysics, 607, L2,

doi: 10.1051/0004-6361/201731813

として出版されました。

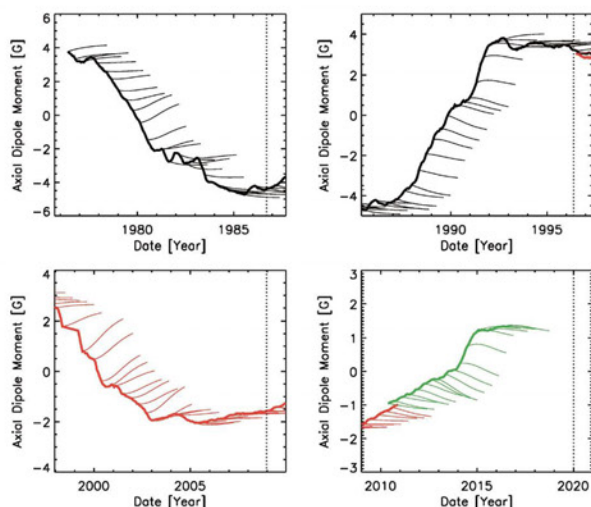


図 2:

太陽活動サイクル 21 から 24 における極磁場（軸ダイポールモーメント）および時間発展。太線が観測結果。細線が観測を初期値とした表面磁束輸送モデルによるシミュレーション。色は観測装置を表し、黒が Wilcox Solar Observatory、赤が Solar and Heliospheric Observatory の Michelson Doppler Imager、緑が Solar Dynamics Observatory の Helioseismic and Magnetic Imager である。極小期（各パネルにおける縦の点線）の数年前から、表面磁束輸送モデルが観測とよく一致していることが分かる。

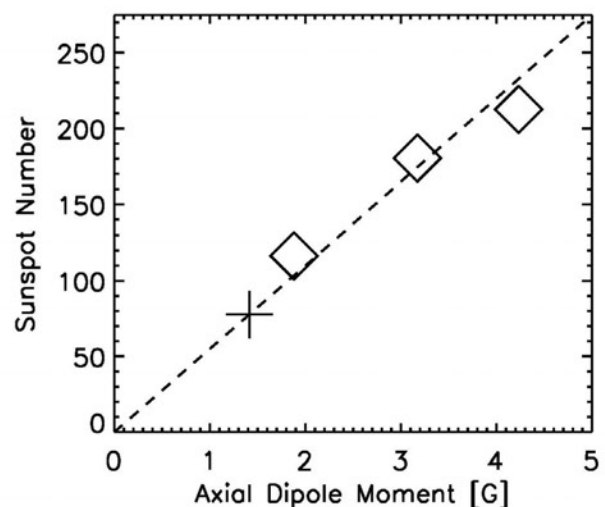


図 3:

太陽活動サイクル 21 から 24 における次期太陽周期の最大黒点数の予測結果。横軸はサイクル N の極小期における極磁場の表面磁束輸送モデルによる 3 年予測値、縦軸はサイクル N+1 における最大の黒点数。菱形が既に極大期を過ぎたサイクル (N = 22, 23, 24)、十字が 2025 年付近で極大期を迎えると予想される次期サイクル (N = 25)。

平成 29 年度 活動報告 計画研究班

A01 予報システム班

石井 守 (情報通信研究機構)

平成 29 年度は、A01 班が進める宇宙天気コンテンツの開発が研究段階から実利用に向けた大きな一歩を踏み出す年となりました。9 月 6 日・11 日に発生した太陽フレアは社会的に大きく報道されるなど注目を集めましたが、同時に多くの観測データを残していきました。このデータを用いて、航空機被ばく推定システム (WASAVIES) の改修を進めることができ、近日 Web 上で公開の予定となっております。また電波伝搬シミュレータについては、短波伝搬のモデルの基本設計が完了するとともに電離圏モデルとしてリアルタイムモデルを含む複数のものを用いることができるようになりました。衛星帯電推定システムについては特定の衛星について事例的に帯電を推定することに成功し、今後の道筋と達成に向けた課題が明らかになりました。

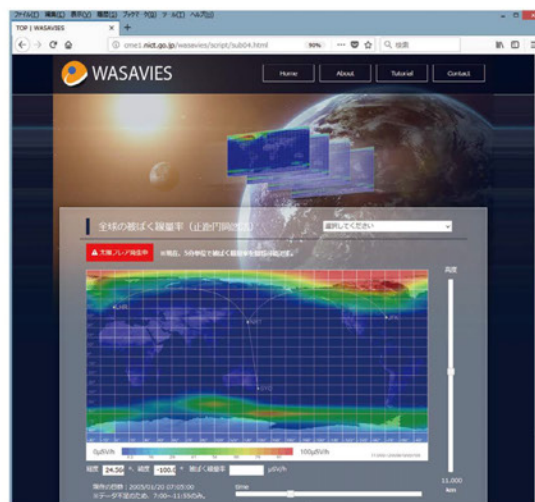
宇宙天気で用いられる領域間のモデル統合についての検討では、研究集会を開催し長期変動や放射線帯モデル、ハザードマップの議論等を行い今後の方向性を議論しました。また太陽風シミュレーションモデル "SUSANOO" が NICT 宇宙天気予報会議で定常的に使われるようになり、その評価も進められています。

ハザードマップについては、宇宙天気現象の定量的な社会インパクトについて検討課題を抽出したほか、経済損失の計算方法を検討し試算を行いました。

平成 30 年度には多くのコンテンツが形になってくると

次世代宇宙天気予報のための双方向システムの開発

もに、ハザードマップのドラフトも作成される見込みとなっており、いよいよその成果が表れてくると期待されます。特に宇宙天気現象の送電網や人工衛星への影響について、それぞれのユーザーとの定量的な議論が進むものと思います。また、海外連携の一環として続けている欧州宇宙天気週間 (European Space Weather Week 2018) においては航空機被ばくに関する議論を欧州の研究者とともに進めることとしており、更なる展開が期待されます。



図：Web 版 WASAVIES 試作ページ (近日公開予定)

A02 太陽嵐班

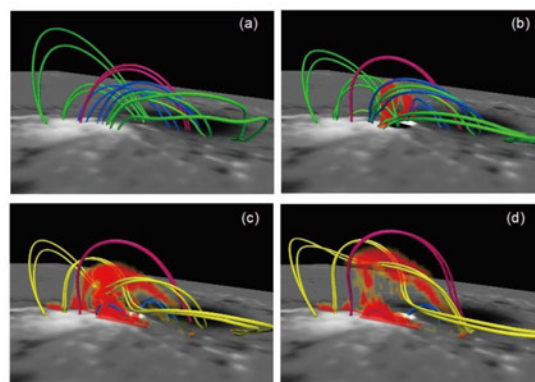
一本 潔 (京都大学/国立天文台)

太陽嵐の発生機構の解明と予測

A02 班では、爆発に至る太陽面磁場の発達過程から、噴出するプロミネンスの運動、およびそれに伴って発生するコロナ中の衝撃波と質量放出 (CME) を全国の関連機関が連携して観測し、電磁流体方程式に基づく数値モデルでこれらを再現することによって、地球を襲う太陽嵐を実時間予測する方法論と、確度の高いフレア発生予測スキームの開発を目指しています。H29 年度は、ひので衛星による光球磁場観測、国立天文台のフィラメント磁場観測、京大飛騨天文台のプロミネンス噴出速度観測、NICT 山川観測所の電波バースト観測、名大惑星間シンチレーション観測システムによる太陽風の観測を順調に実施しました。2017 年 9 月初めに出現した大黒点群は高い活動性を示し、テレビで報道されるなど世間の注目を集めました。地上観測にとっては、X クラスフレアがすべて日本の夜に発生する不運もありましたが、ひので衛星は急激に発達する光球磁場の詳細な構造と大規模フレアのコロナ観測に成功し、太陽活動が低下するなか、フレア研究にとって貴重なデータを得ることができました。

フレアや CME の発生予測につながる成果もあがりました。すなわち、フレア発生前の捻れたコロナ構造 (シグモイド) の存在や、フレアに関与する (フレアリボン) の磁束量とその上を覆う活動領域全体の磁束量の比が、フレアが発生したときに CME を伴う率に関連していることが観測的に見いだされ、また非線形フォースフリー磁場モデルからは、フレア

や CME の発生に深く関与する指標 (κ -パラメータ) が発見されました。また、太陽表面磁場の観測データに基づくデータ駆動型シミュレーション (図) によって、活動領域の磁気中性線上に現われる小規模の磁場変動がフレア発生のトリガとなることをより実証的に示すことができました。CME 伝搬数値モデルの高精度化もすすめられ、今後データベース化による CME 地球到来の実時間予測実験や高エネルギー粒子モデルを組み込んだシミュレーションを行う計画です。



図：太陽活動領域の観測磁場を境界条件とした太陽フレアのデータ駆動型シミュレーション：太陽表面磁場 (グレースケール)、磁力線と電流 (赤色) を示す。太陽表面に小規模磁場が現われた結果、不安定化して、磁力線の構造が変わり磁気再結合が開始する過程 (a→d) を表している。(Muhammad, et al. 2017 ApJ, Fig. 5 より転載)

A03 地球電磁気班

三好 由純 (名古屋大学宇宙地球環境研究所)

地球電磁気圏擾乱現象の発生機構の解明と予測

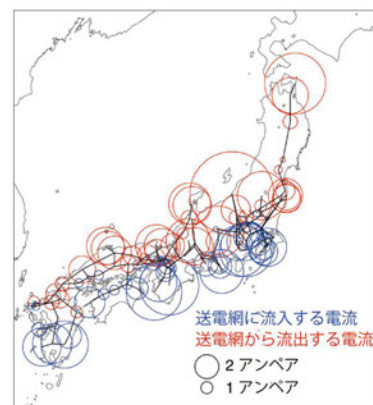
A03 班では、地球電磁気圏の変動の理解と予測を目指した研究を進めており、特に1) 宇宙放射線、2) 電離圏変動、3) 地磁気誘導電流 (GIC) についてサブグループを作り活動を行っています。以下、各サブグループについての活動について報告します。

宇宙放射線サブグループでは、非線形の波動励起、粒子加速のシミュレーションの開発を進め、実際の磁気圏パラメータでのコーラス波動の励起過程の再現に成功するとともに、電子の加速における非線形効果の特徴を明らかにしました。また、「あらせ」衛星の高エネルギー電子観測機器の較正と解析を進めるとともに、磁気嵐を中心とした期間のデータ解析を進めています。平成 29 年度は、特に波動粒子相互作用に伴うピッチ角散乱を磁気圏で初めて実証する成果を得、Nature に報告いたしました。

電離圏サブグループでは、大気圏 - 電離圏結合モデル GAIA (Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy) を用いて赤道域プラズマバブルの発生予測を行い、実際の観測と比較して予測精度の検証を行いました。また、太陽フレアによる電離圏応答を GAIA で再現し、日没時に電離圏電場が発達する原因を解明しました。さらに、GAIA で計算された熱圏温度を地上多点観測結果と比較し、モデルの精度を検証しました。地磁気観測からは、下層大気の大気活動が大気波動の励起源になっていること、赤道電離圏の電流がプラズマバブルの発生と関係していることを示す結果が得られ

ました。

GIC サブグループでは、2 カ所の変電所で地磁気誘導電流の測定を開始しました。既設を含め 4 カ所の変電所でデータを取得するとともに、時間領域で地磁気誘導電場と地磁気誘導電流を求めることができる物理シミュレーションを開発しました。この結果、地下比抵抗構造を考慮すると測定した地磁気誘導電流を概ね再現できることや、日本は島国であるばかりでなく送電網の密度に大きな地域差があるため、ほかの島国とは異なり地磁気誘導電流の分布は複雑であることが明らかにされました。



図：シミュレーションで得られた変電所と地面の間を流れる GIC の分布。円の大きさ・色が電流の強さ・向きを示す。

A04 周期活動班

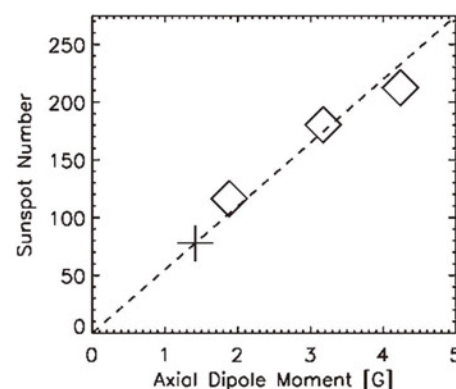
余田 成男 (京都大学)

太陽周期活動の予測とその地球環境影響の解明

A04 班では、太陽活動の精密な観測と新たな太陽ダイナモモデルにより次期太陽活動サイクルの予測を行うことを基本目標の一つとしています。太陽磁場精密観測グループは、衛星・地上の先端の観測データの高度処理を進めるとともに、ベルギー王立天文台による黒点相対数の大改訂を受けて、我が国のアーカイブデータとの比較検証を行い、日本天文学会で発表しました。また、太陽周期予測数値計算グループは、太陽周期活動と前サイクルの太陽極域磁場との非常に高い相関関係に基づいて、表面磁束輸送モデルで次期太陽極域磁場を推定し、次期太陽周期の活動予測をする手法を確立しました。そして次期サイクルの極大期の活動度が現在のサイクル 24 の 70% 程度の低さになるという予測結果を得ました (図、Iijima et al., 2017)。2017 年 11 月には、名古屋大で国際ワークショップを主催し、次期サイクル予測の国際相互比較を行うとともに、予測手法の精緻化に協働して取り組む方を議論しました。

もう一つの基本目標は、太陽物理学と気象学・気候学の連携による太陽活動の気候影響メカニズムの特定です。地球システムモデル計算グループは、気象研究所地球システムモデルの性能検証のため産業革命前と完新世中期の古気候再現実験を行い、ミランコビッチ・サイクルによる日射量変動に起因した気候の変化を定量的に調べました。成層圏オゾン化学過程の扱いに依存して、南極域の地上気温変化に最大 1.7 度

の差が生じることが分かり、成層圏化学過程の重要性を初めて指摘しました (Noda et al., 2017)。次期大気海洋結合モデル相互比較プロジェクト CMIP6 のための計算も順調に進んでいます。また、高エネルギー粒子降下による中層大気化学過程や雲微物理過程への影響についても素過程モデル開発と化学 - 気候モデルへの導入を進めています。さらに、発展目標として数百年スケールの太陽活動長期変動の影響とその機構の解明を掲げていますが、太陽放射変動と宇宙線変動の両グループを中心とした古気候学的解析により、小氷期の気候応答等についての成果が得られ始めております。



図：次期太陽周期の最大黒点数の予測結果 (Iijima et al., 2017, A&A, 607 L2)
◇: サイクル 22~24, +: サイクル 25 の予測

公募研究(第1期)成果報告①

>> PSTEP 公募研究(第1期:平成28~29年度)の
成果を本号と次号に分けて報告します。

齊藤 昭則 / 京都大学

電離圏擾乱が衛星搭載合成開口レーダー観測へ与える影響の評価と補正

高度 300km 付近に存在する電離圏のプラズマは、衛星と地上の間をつなぐ通信・放送などの電波に影響を与えています。特に電波を用いた距離の測定は、高い精度を必要とするために電離圏による影響は大きく、衛星と受信機間の距離を正確に測定する全球測位衛星システム(GPS など)やレーダーで衛星と地面の間の距離を2次元的に測定する合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar: SAR)への影響の評価と補正が課題となっています。本研究では、JAXAのALOS(だいち)衛星搭載の合成開口レーダー(PALSAR)の干渉 SAR(Interferometric SAR: InSAR)観測画像の位相差に見られる波長 200km 程度の構造が、地殻変動によるものではなく電離圏プラズマの中規模伝播性電離圏擾乱によって作られていることを明らかにしました。図は、2007 年 10 月 16 日と 2007 年 12 月 1 日の ALOS 衛星 PALSAR の 2 日間の観測から得られた(干渉 SAR)画像に見られる位相差を電離圏プラズマによるものとみなした時の全電子数(InSAR-TEC)と同じ時刻に国土地理院全球測位衛星システム受信機網 GEONET によって観測された全電子数の差(GPS-TEC)です。両者が同じだと、干渉 SAR 画像に見られる位相差は電離圏プラズマ擾乱によるものと見なせ、違う場合は、レーダー電波の反射点である地面の変動によると見なせます。この場合 1 TEC unit

(10^{16} 個 / m^2) の全電子数は約 27cm の地面の変動に対応します。両者を比べますと北東端で低い値をとり、南西側で高い値を取るなどの構造が一致しており、干渉 SAR 画像に見られる構造は地面の変動ではなく電離圏プラズマによるものであることがわかります。この両者の関係から GEONET による全電子数観測データを用いると干渉 SAR 観測の補正ができる可能性があることがわかりました。

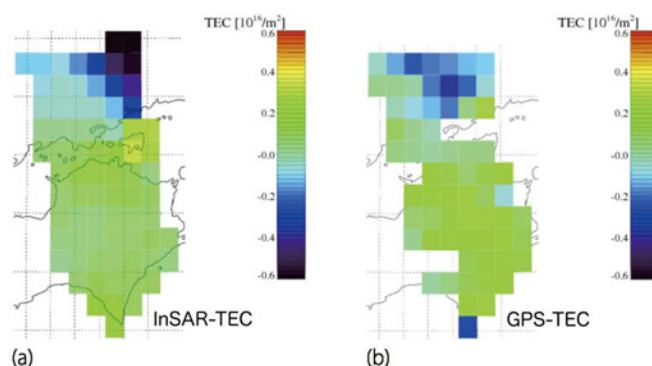


図: (a) 2007 年 10 月 16 日と 2007 年 12 月 1 日との 2 日間における ALOS 衛星 PALSAR の観測から得られた干渉 SAR 画像による全電子数(InSAR-TEC) (b) PALSAR 観測時に GEONET によって観測された全電子数の差(GPS-TEC)。

保田 浩志 / 広島大学

太陽地球圏における宇宙線被ばくに関するリアルタイムデータの提供

PSTEP では、太陽活動の変動が人間社会と地球環境に及ぼし得る問題を解決するための社会基盤の形成を推進することを目的としています。その解決すべき問題のひとつに、航空機や宇宙船の搭乗者の放射線による被ばくが太陽フレア粒子により急激に増加することがあります。これを防ぐためには、フレア粒子の到来を可能な限り早く検知し、航空機や宇宙船における被ばく線量を正確に推定して、迅速に適切な対応を採ること(飛行高度を下げることや遮への厚い場所へ移動するなど)が望まれます。

上記の目的を果たすため、本研究では、極域等における中性子モニタのデータおよび衛星高度における陽子フラックスのデータを5分刻みでリアルタイムに取得、被ばく線量を自動計算して、その結果を社会と共有するプログラム(図参照)を実用化すべく、2年間での研究開発に取り組みました。取得対象としたデータは、欧州の Neutron Monitoring Data Base 上で公開されている中性子モニタのデータならびに NOAA が公開している GOES 衛星の陽子フラックスのデータです。

初年度に作成したプログラムでは、2017 年 9 月の大規模な太陽フレアの発生時に、一部の中性子モニタのデータ提供が遅れたために多くの欠損値が生じてしまい、リアルタイム

には機能しませんでした。そこで、データ取得が不完全でも安定的に被ばく線量計算が行えるようにプロトコルを改良しました。今後は、本研究で開発したプログラムをベースに、PSTEP A01 予報システム班の活動の一環として、太陽フレア粒子による被ばく線量をリアルタイムかつ自動的に周知するシステムの社会実装に、関係者と協力して取り組んでいきます。

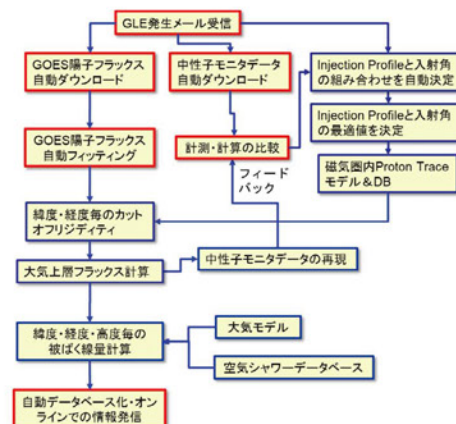


図: GLE 発生検知から被ばく線量情報提供までのワークフロー: 本研究では赤枠の部分を担当した。

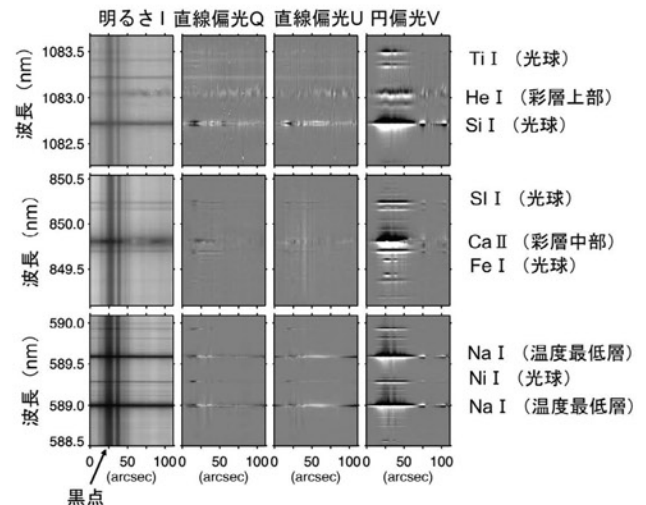
阿南 徹 / 京都大学
(現所属: National Solar Observatory)

コロナ磁場モデリングに最適なスペクトル線の選定

太陽地球圏環境を変動させる原因として太陽フレアやコロナ質量放出があります。これらは太陽コロナに蓄積された磁気エネルギーの解放として解釈されています。よって、太陽コロナの磁気エネルギー測定は太陽地球圏環境の研究において重要です。コロナの磁場測定は困難なため、現在は光球の磁場分布を用いてコロナ磁場を外挿（モデリング）しています。しかし、光球はガスの熱エネルギーが強く、磁気エネルギーに対してガスのエネルギーが小さいというコロナ磁場外挿の仮定に合いません。そこで、磁気エネルギーが優勢な彩層がコロナ磁場外挿の境界条件として近年注目されています。

コロナ磁場外挿における彩層磁場の有用性は数値モデルを用いた検討が主であり、これまで観測を用いた検討はありませんでした。そこで本公募研究では、「コロナ磁場モデリングにおける彩層磁場の有用性を観測的に検証する」、「コロナ磁場モデリングに最適なスペクトル線を選定する」ということを目的に、「複数波長帯を同時に偏光分光観測できるシステムの開発」を京都大学飛騨天文台で行いました。装置論文は査読論文雑誌「Publications of the Astronomical Society of Japan」に掲載が決定しました。図は本システムによって取得されたデータの一例です。この装置によって、太陽大気

光球、温度最低層、彩層中部、彩層上部で形成されるスペクトル線の偏光を同時に取得することが可能となりました。今後は、完成した偏光観測システムによって取得されたデータを用いて、コロナ磁場モデリングにおける彩層磁場の有用性を観測的に検証し、最適なスペクトル線の選定を行う予定です。



図：開発した装置で取得した偏光スペクトル。

渡邊 恭子 / 防衛大学校

太陽フレア多波長スペクトルモデルの構築

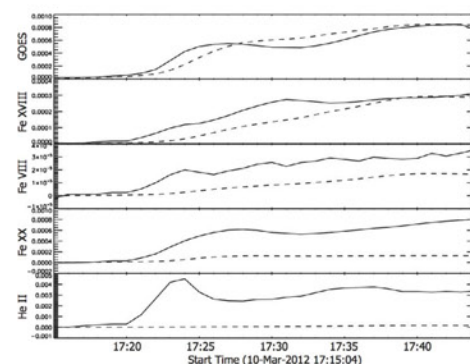
太陽フレアから放射される X 線や紫外線は地球電離圏に影響を与え、デリンジャー現象という通信障害を引き起こします。現在、デリンジャー現象の予報では軟 X 線強度（フレアクラス）が指標として用いられていますが、実際は軟 X 線強度と比例していないデリンジャー現象が多々見られます。

どのような特徴を持つ太陽フレア放射がデリンジャー現象を発生するのか、その特徴を見積もるために、本研究ではまず、太陽フレアの多波長スペクトル－特にデリンジャー現象に影響すると考えられている紫外線放射－を観測データから統計的に見積もりました。その結果、多くの紫外線放射は軟 X 線放射強度変化とほぼ同様の変動を見せましたが、その紫外線放射を生成しているプラズマの温度によって変動に時間差が見られました。また、軟 X 線放射とは全く異なる硬 X 線放射と似た時間変動をする紫外線放射もあることが分かりました。

太陽フレアやそれを発生した黒点の幾何学的な様相が太陽フレアスペクトル変動に与える影響についても統計的に解析しました。まず、フレアを発生した時の黒点の面積とその種類と太陽フレアの規模や発生率との関係を調べましたが、これらの間に明確な関係性は見られませんでした。次に、フレアリボンの長さとりボン間距離について調べたところ、ど

ちらも太陽フレア放射の継続時間に影響していることが分かりました。

以上の観測結果をもとに、太陽フレア放射を再現する数値計算モデルを構築しました。現在のところ、フレアループが長い（ループ半長：52,000km）フレアについて、観測された紫外線放射の強度と時間発展をおおむね再現することに成功しています（図参照）。今後は、個々のフレアの放射スペクトルを再現可能なパラメータの導出と、この放射の地球電離圏への影響を検証していきます。



図：2012 年 3 月 10 日に発生した太陽フレアの X 線放射（GOES）と SDO/EVE で観測された紫外線放射の光度曲線（実線）と、本研究の数値計算モデルで再現した計算値（点線）。

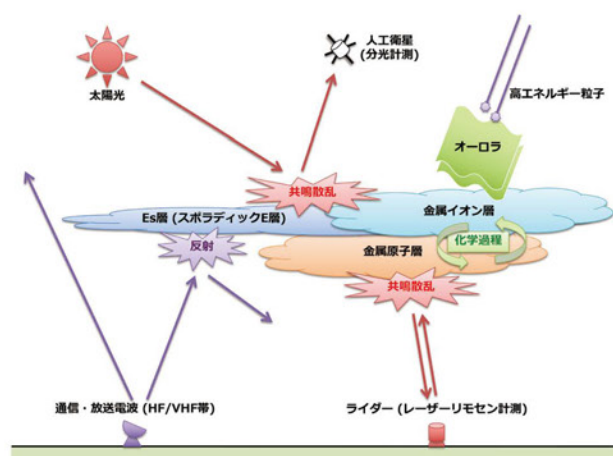
津田 卓雄 / 電気通信大学

電離圏擾乱予測に資する金属イオン・原子層の動態研究：高エネルギー粒子に対する応答

スボラディック E 層 (Es 層) は、HF/VHF 帯の通信電波・放送電波に影響を及ぼすことから社会貢献の観点においても重要度の高い電離圏擾乱現象であり、動態の解明や予測が求められています。本公募研究では、Es 層の主成分イオンを構成する金属イオンの動態、及び金属イオンの予備軍である金属原子の動態に焦点をあて、特に、オーロラ活動に伴う高エネルギー粒子に対する応答の調査を進めています。

太陽光の共鳴散乱を人工衛星から分光計測することで中性の金属原子の一種であるナトリウム原子 (Na 原子) のデータを取得し、高エネルギー粒子に対する Na 原子応答の緯度分布を観測的に調査しました。その結果、オーロラ活動の活発化に伴って極域オーロラ帯の Na 原子が顕著に減少する様子を捉えることに成功しました。また、極域オーロラ帯に位置する南極昭和基地での地上レーザーリモートセンシング (ライダー) 計測による Na 原子データの解析を実施したところ、人工衛星の観測結果と整合的な結果が得られました。一方で、シンプルな Na 化学モデルを開発し、オーロラ活動に伴う Na 原子の減少の要因について理論的な調査を進めました。モデル計算結果より、オーロラ活動の活発化に伴う高エネルギー粒子の効果によって Na の化学過程が駆動され、Na 原子のイオン化が促進される為に Na 原子が減少するこ

と、同時に Na⁺ イオンの生成が促進されていることが示唆されました。Na⁺ イオン (金属イオン) の生成・増加は Es 層の活発化に寄与する可能性があります、具体的にどのくらい寄与するのかなど、更なる調査が必要とされており、今後も PSTEP A03 地球電磁気班と連携しながら Es 層などの電離圏擾乱の動態解明や予測研究に資することを目指していきたいと考えています。



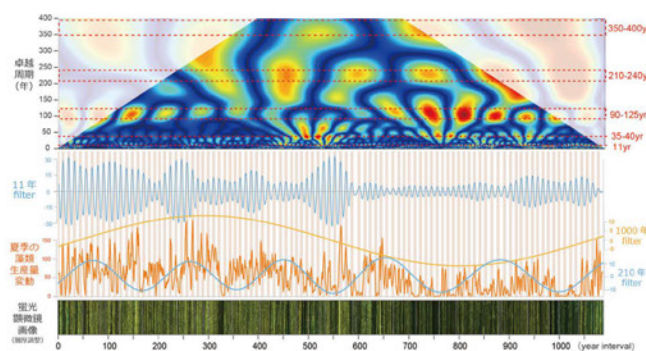
図：Es 層の素となる金属組成の動態を調査

長谷川 精 / 高知大学

湖成年縞から探る白亜紀の太陽活動周期と十年規模気候変動

地球の気候変動が太陽活動の変化に相関していることは広く知られていますが、その両者をつなぐメカニズムや、過去の地球においてもそれらがリンクしていたかどうかは良くわかっていません。本研究では、年縞の存在が確認されたモンゴルの湖成層を対象とし、白亜紀 (約 1 億 2 千万年前) における数年～千年スケールの気候変動の復元を試みてきました。白亜紀の湖成年縞は、春～夏に堆積する藻類起源有機物の層と秋～冬に堆積する碎屑物の層からなり、季節変動の情報も記録しています。そこで蛍光顕微鏡を用いた画像解析により、1090 年分の夏季の藻類生産量の変動を復元しました。藻類生産量は日照量を反映するため、気候変動を知る手がかりとなります。復元した藻類生産量の変動を周期解析した結果、約 3~5 年、11 年、35~40 年、90~125 年、210~240 年、そして 350~400 年の周期性が検出されました (図)。検出された周期のうち、約 11 年、90~125 年、210~240 年の周期性は、太陽黒点数の変動や宇宙線生成核種 (¹⁴C や ¹⁰Be) の変動に見られる太陽活動周期 (約 11 年のシュワーベ・サイクル、約 88~105 年のグライスバーク・サイクル、約 210 年のド・フリース・サイクル) と一致しています。また走査型 X 線分析顕微鏡を用いて 25000 年分の降水量指標 (Ca/Ti) の変

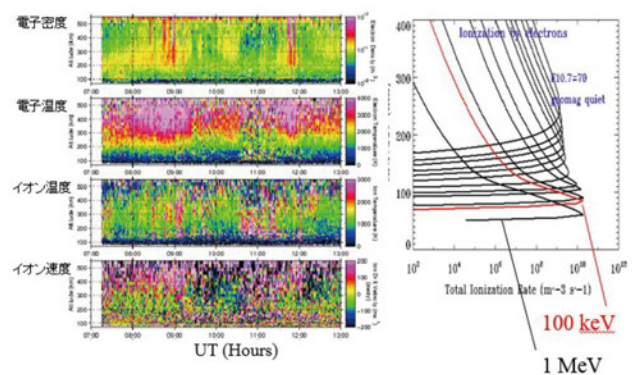
動を復元した結果、約 400~500 年、1000 年、1450 年、2000~2300 年、3500~4000 年の周期性で降水量が変動していました。この約 1000 年、2000~2300 年の周期性も太陽活動の長周期 (約 1000 年のエディー・サイクルや約 2300 年のハルシュタット・サイクル) と一致します。これらの結果から、太陽活動の変化が白亜紀の中央アジア地域における夏季の日照量や、降水量の変動に影響を及ぼしていたことが明らかにになりました。



図：白亜紀年縞に記録された太陽活動周期 (約 11 年、90~125 年、210~240 年) で変動する夏季の藻類生産量。

二酸化炭素の増大の結果、対流圏では温暖化が進行する一方で、上層大気領域（中間圏・熱圏）では寒冷化が起きています。中間圏の雲である夜光雲の増加は、この上層大気の寒冷化の証拠の一つと考えられています。夜光雲は、産業革命以降に極域中間圏で発生が確認され、近年、中緯度域でも観測例が多数報告されています。中間圏の H₂O は、夜光雲の発生に関わるとともに、酸化水素 (HOx) の供給源ともなっています。また、太陽プロトン現象などに代表される高エネルギー粒子の降り込みによっても、中間圏の HOx が大きく変動することが知られています。さらに、中間圏・下部熱圏では、下層大気起源の大気波動によって、風速の増減や乱流拡散による物質輸送が生じていると考えられ、中間圏・下部熱圏での H₂O や HOx は様々な時空間構造を持つものと推測されます。HOx は、中間圏・上部成層圏においてオゾン破壊に寄与する物質であることから、H₂O や HOx の変動のほか、熱圏・中間圏・成層圏大気におけるこれら微量成分の役割を理解する必要があります。本研究では、太陽活動変化や高エネルギー粒子の降り込みがあった際の H₂O、HOx や関連する大気微量成分の変動を調べることを目的として、3次元大気圏・電離圏モデルに組み込むための化学モデル (H₂O、HOx モデル) を開発しました。本研究の主な成果は以下のと

おりです。1) 100 keV-1 MeV のエネルギーをもつ降下電子・プロトンによる大気電離率の計算コードを作成し、様々なエネルギーを持つ降下粒子の侵入高度推定を可能としました。また、電離圏観測との比較を行い、昼側電離圏において数 100KeV ~ 1MeV 程度のエネルギーを持った降下電子が存在することを見出しました。2) 1次元モデルによる計算から、乱流拡散、降下粒子、太陽紫外線による大気微量成分の変動を推定しました。



図：レーダー観測 (左) と電離率の計算例 (右)

公募研究 (第 2 期) を開始

新学術領域「太陽地球圏環境予測」公募研究第 2 期 (平成 30 ~ 31 年度) が、以下の課題についてそれぞれ開始されました。

研究代表者	所 属	研究課題名
細川 敬祐	電気通信大学	スプラディック E 層が航空航法に与える影響を広域にモニタリングするシステムの構築
Liu Huixin	九州大学	熱圏直接観測による中規模大気重力波と電離圏プラズマバブルの発生関係の検証
込本 尚義	北海道大学	太陽風回収試料の直接原子分析による 2003 年ハロウィン太陽風の解析
岩井 一正	名古屋大学	電波観測を用いたデータ同化型太陽風到来予測モデルの構築
渡邊 恭子	防衛大学校	太陽フレア多波長スペクトルと地球環境への影響
古屋 正人	北海道大学	合成開口レーダー干渉法 InSAR で見る大気圏の極端現象
三好 勉信	九州大学	大気大循環モデルによる中間圏・熱圏下部 H ₂ O・HOx 変動の研究
富川 喜弘	国立極地研究所	高エネルギー荷電粒子降り込みに伴う影響の下方伝播・増幅メカニズムの解明
堀田 英之	千葉大学	世界最高解像度の計算で迫る太陽活動 11 年周期の物理機構
成行 泰裕	富山大学	ホイッスラーコーラス波動による放射線帯電子散乱過程の数値モデル
笠原 禎也	金沢大学	プラズマ波の伝搬パラメータの精密推定に基づく地球磁気圏環境解析システムの開発
木村 芳文	名古屋大学	太陽活動とその影響を明らかにする数値モデルの開発
政田 洋平	愛知教育大学	平均場理論に基づく 3 次元太陽全球ダイナモモデルの開発
三宅 洋平	神戸大学	宇宙プラズマ環境変動を考慮した衛星帯電現象の数値モデリング
島 伸一郎	兵庫県立大学	大気粒子の帯電が雲に及ぼす影響の原理的雲解像モデルによる評価
松本 倫明	法政大学	適合格子細分化法を用いた太陽圏の高解像モデルの構築と銀河宇宙線の変調
西塚 直人	情報通信研究機構	太陽衛星画像の機械学習による太陽風起因の宇宙風予測モデル開発

会議報告

PSTEP・ISEE 研究集会「第 2 回太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」

2018 年 2 月 26～27 日の日程で、名古屋大学環境総合館において表題の研究集会を開催いたしました。本研究集会は 2017 年 1 月に開催された第 1 回に引き続き、太陽・太陽圏・地球電磁気圏・大気圏からなる連続的で複雑なシステムである太陽地球圏を対象とするモデル研究の現状と課題及び予測へ向けた展望を、分野を超えて幅広く議論することを目的として、名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE) との共同主催として開催いたしました。

今回は、今回は時間の制約上取り上げることができなかった長期変動や放射線帯モデルの研究について集中した議論を行うとともに、全国ニュースで取り上げられました 2017 年 9 月初旬の活動領域 (AR12673) での太陽活動にともなう現象について様々な観点からの研究報告や議論を行いました。また PSTEP A01 予報システム班が中心となって編集を進めている宇宙天気ハザードマップについての紹介



ポスターセッションの様子

と研究者への協力要請や、PSTEP に深く関連する ISEE 国際ワークショップの開催報告も行われました。

PSTEP 内外から 46 名の研究者の参加が

あり、非常に実りのある議論が展開されました。

今後は、具体的なモデル間の連携について議論を進めていく第 3 回の開催を企画しています。

(塩田 大幸、中溝 葵、埴 千尋 / 情報通信研究機構)



ディスカッションの様子



研究集会参加者の集合写真



受賞式の様子

NICT が宇宙天気予報による社会貢献で第 3 回宇宙開発利用大賞を受賞

2018 年 3 月 20 日、東京都千代田区イイノホールにおいて第 3 回宇宙開発利用大賞表彰式が行われ、情報通信研究機構 (NICT) が総務大臣賞を受賞しました。本賞は、宇宙開発利用の推進において大きな成果を収める、先導的な取り組みを行う等、宇宙開発利用の推進に多大な貢献をした優れた成功事例に関し、その功績をたたえることにより、我が国の宇宙開発利用の更なる進展や宇宙開発利用に対する国民の認識と理解の醸成に寄与することを目的とした表彰制度です。

今回 NICT は、「宇宙天気予報システムの開発と運用を通じた社会への貢献」として、1958 年から電離圏の観測を行い、電波の伝わり方に関する予報・警報を発信してきたこと、また、1988 年からは、電離圏擾乱の原因となる宇宙天気の現況を把握し、予報情報

を 365 日提供するとともに、予報精度向上を目標とした研究開発活動にも積極的に取り組んでいる点が受賞理由となりました。特に、大規模な太陽面爆発 (太陽フレア) の発生時には、警報を発信し、衛星運用者・航空運用者等に対処を促すなど、宇宙の開発・利用に大きく貢献してきたことが評価されました。

今後、準天頂衛星による衛星精密測位の実現や ICAO での宇宙天気情報利用など、様々な社会利用が期待されており、その責務を果たすべく今後とも精進したいと思えます。

(石井 守 / 情報通信研究機構)



出席者の集合写真：式典には安倍内閣総理大臣 (写真中央) も参加され、宇宙ビジネスへの支援を表明されました。写真手前左が石井 守氏。

研究室紹介⑧

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
「ひので」グループ

新学術領域「太陽地球圏環境予測」には全国から数多くの研究室が参加しています。このコーナーではそれらの研究室を紹介していきます。

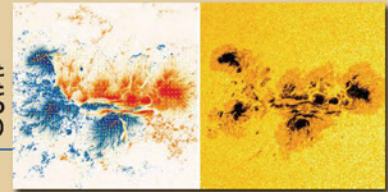
PSTEP A02 太陽嵐班が取り組む「太陽嵐の発生機構の解明と予測」に、太陽観測衛星「ひので」を用いた太陽表面やコロナの観測により貢献しているのが、当グループです。宇宙科学研究所 (ISAS) は神奈川県相模原市にあり、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の大学共同利用機関としての役割を担いながら、宇宙科学を推進しています。「ひので」は、ISAS が 2006 年 9 月に打ち上げました。搭載された最新鋭の望遠鏡は、国立天文台との協力や、さらには NASA 等欧米機関との国際協力のもとで開発され、現在も軌道上で運用されています。「ひので」の運用は、国内外の研究者や大学院生の参加のもと、ISAS にて実施されています。当グループはその運用で中心的な役割を果たし、太陽嵐の発生機構の研究に有用な太陽フレアの観測データの取得に尽力しています。研究は、「ひので」の観測データの解析を核としていますが、他の人工衛星



「ひので」と通信を行う ISAS 衛星管制室

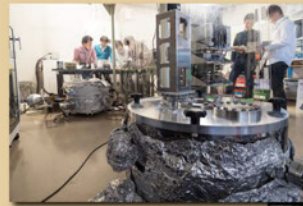
星や地上観測によるデータも積極的に利用して、太陽大気のダイナミクスの理解に取り組んでいます。その中でも、フレア発現に関わる物理機

「ひので」がとらえた
大規模フレアを起こした
黒点群 (右) の
ベクトル磁場 (左)



構の解明は重要な研究テーマです。ISAS には太陽物理学を専門とする常勤教員は 2 名しかおらず、当グループは、プロジェクト研究員や大学院生が主力で活躍する若いグループです。大学院生は、主に総合研究大学院大学宇宙科学専攻と東京大学大学院地球惑星科学専攻から受け入れています。当グループはまた、次世代の飛行体観測を実現させる搭載機器の開発も行っています。グループでは、2020 年代中盤に実現を目指す次世代太陽観測衛星を支える要素技術の開発を行うほか、CLASP や Sunrise-3 といった観測ロケット・大気球による飛行観測実験にも貢献しています。

(清水 敏文 / 宇宙科学研究所)



宇宙環境を模擬する
小型真空槽がある太陽実験室

「ひので」グループのメンバーら
ISAS 正門にて

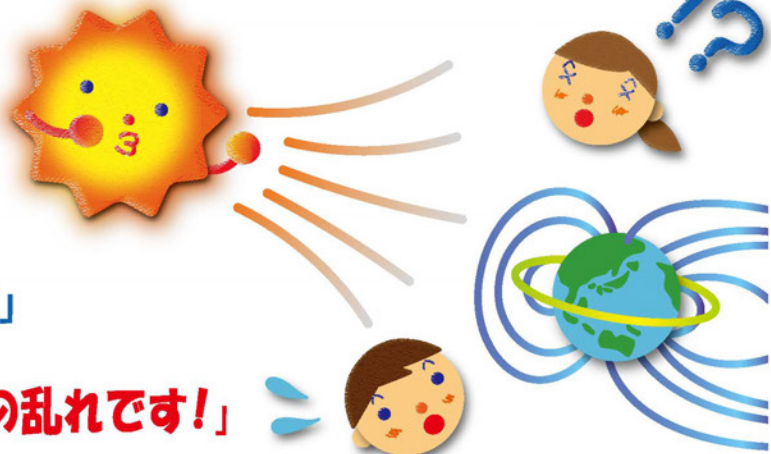


『宇宙と地球のなぜ? どうして?』



Q. 「磁気嵐って何?」

A. 「数日間続く地磁気の乱れです!」



磁気嵐は地球をぐるりと取り囲むように流れる巨大な電流「環電流」が発達するためにおこります。環電流は西向きに流れる成分が強いため、右ネジの法則により地上では南向きの地磁気変動として観測されるのです。環電流は数億度の温度を持つプラズマの運動によって作られ、その強さは前号で解説した太陽風の状態に強く依存します。太陽風は太陽コロナから吹き付けるプラズマの流れで、太陽の磁場を引っ張り出しています。その磁場が南を向くと太陽風のエネルギーが磁気圏に流入し、環電流が強まると考えられています。

1989 年 3 月や 2003 年 10 月に発生した巨大磁気嵐では地面に誘導された電流によって停電がおこりました。1859 年 9 月に発生した超巨大磁気嵐では当時の通信手段であった電信線から火花が散るなどの被害が報告されています。当時は今ほど電気が利用されていなかったため被害は限定的でしたが、もし同じ規模の超巨大磁気嵐がおけると現代社会はどのようなのでしょうか。被害を最小にとどめておくためには、磁気嵐発生のメカニズムを正しく理解し、磁気嵐の予測精度を向上させることが重要です。



PSTEP Newsletter

No.9 Jun. 2018

<http://www.pstep.jp/>

発行日：2018年 5月 31日

発行所：新学術領域「太陽地球圏環境予測」事務局

編集委員：草野 完也（領域代表・編集長）、成瀬 千恵代（副編集長・デザイン）、宮原 ひろ子・塩田 大幸・金子 岳史（校閲責任者）

〒464-8601 名古屋市千種区不老町

TEL 052-747-6333（名古屋大学 宇宙地球環境研究所） E-mail：inquiry@pstep.jp