

2-1-2 太陽放射線の予測・警報

2-1-2 Solar Energetic Particle Prediction and Alert

久保勇樹 長妻 努 秋岡真樹

KUBO Yûki, NAGATSUMA Tsutomu, and AKIOKA Maki

要旨

宇宙放射線が宇宙飛行士や人工衛星の放射線被曝を引き起こすことは良く知られている事実である。中でも、太陽放射線(太陽高エネルギー粒子)の強度が突然数桁のレベルで上昇する太陽高エネルギー粒子現象は最も危険度の高い現象のうちの一つである。本稿では太陽高エネルギー粒子現象の予測・警報のための統計的及びシミュレーションによる研究について紹介する。さらに太陽高エネルギー粒子現象等の発生をいち早く検出し情報発信するための宇宙環境イベント通報システムの開発についても紹介する。

It is well-known that the cosmic radiation can cause serious radiation hazard to astronauts and artificial satellites. The most hazardous event is the sudden increase in solar energetic particle intensity, which is called solar energetic particle event. In the article, we introduce the statistical and numerical research for solar energetic particle prediction and alert, and also the development of the space environment event reporting system.

[キーワード]

太陽高エネルギー粒子, 粒子輸送, 放射線被曝, イベント通報システム

Solar energetic particles, Particle transport, Radiation hazard, Event reporting system

1 はじめに

人類の活動が宇宙空間へと広がりつつある現在、宇宙環境の擾乱により我々人間生活の安心・安全が脅かされることも珍しいことではなくなってきた。そのため宇宙環境擾乱を正確に把握し的確な予報・警報を行うための技術である宇宙天気予報の重要性が非常に高まってきている。中でも、国際宇宙ステーション (ISS) などの宇宙空間に人間が長期間滞在する事が可能になってきて近い将来の宇宙旅行なども現実味が帯びてきている今、宇宙放射線による宇宙飛行士等の被曝の問題は避けては通れない極めて重要な問題となっている。

宇宙放射線とは宇宙空間に存在する電離放射線を指しその起源などにより銀河宇宙線、太陽放射線(太陽高エネルギー粒子とも言う)、放射線帯電子の3つに大別されるが、銀河宇宙線及び太陽高エネルギー粒子が宇宙飛行士被曝という観点からは特に重要である。銀河宇宙線は太陽系外から到

来するため、通常その強度は約11年といわれる太陽活動周期に比べて短い時間スケールでは概ね一定と考えて良く、ISS船内での被曝線量は1日当たり0.5ミリシーベルト程度と推定されている。これは「胸部CTスキャン検査を2週間毎に1回受ける」程度の被曝量である。一方、太陽フレアの発生などにより太陽高エネルギー粒子の強度が増加した場合、通常の数倍から数十倍の程度の線量の被曝が推定されている^[1]。したがって太陽高エネルギー粒子による被曝を避けることが宇宙放射線被曝防護には有効であると考えられる。以上のようにISSにおける長期滞在や月、火星等への有人宇宙飛行を行う際には、宇宙飛行士に太陽高エネルギー粒子現象の発生危険度を警告するため太陽高エネルギー粒子警報が必要とされている。

太陽高エネルギー粒子警報には大まかに分けて2つの考え方がある。1つは現象の発生そのものの警報、もう1つは現象発生から終了までの高エ

エネルギー粒子フラックスの時間変化の警報である。図1が示すように現象の発生直後に非常に大きな高エネルギー粒子フラックスが観測される例があり、このような場合は現象の発生そのものの警報が重要となる。しかしながら、太陽高エネルギー粒子の加速機構や加速の現場となる太陽フレア、CME(コロナ質量放出)の物理が未解明である現状では、現象の発生を物理的な根拠を持って予測することは極めて困難であり不可能と言わざるを得ない。そのため観測データに基づいた経験則を用いた手法が提案されている[2]-[7]。

一方で、現象発生後の高エネルギー粒子フラックスの時間変化、特に粒子フラックスのピーク値及び全粒子フラックス値の警報の重要性も指摘されている[8]。こちらは太陽風中での太陽高エネルギー粒子の伝播過程を考えることによりある程度物理的な根拠を持った予測が可能であると考えられ、そのような試みも行われつつある(例えば[9])。

またこれらの警報の試みと共に、現象が発生したという情報をいち早く知らせるための宇宙環境イベント通報システムの開発なども行われている。

本稿では、文献[2]による経験則に基づいた太陽高エネルギー粒子現象発生警報の試みについて2で、シミュレーションに基づいた太陽高エネルギー粒子フラックスの時間変化の予測の試みについて3で、宇宙環境イベント通報システムの開発について4で述べる。

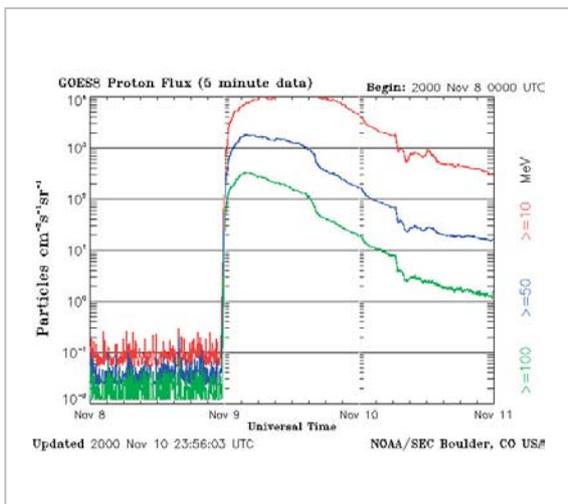


図1 太陽高エネルギー粒子現象 (Space Weather Prediction Center, NOAA ホームページより)

2 太陽高エネルギー粒子現象の発生

太陽高エネルギー粒子の加速機構や加速の現場となる太陽フレア、CMEの物理が未解明である現状では、太陽高エネルギー粒子現象の発生を物理的根拠の元に予測することは不可能と言わざるを得ない。そのため観測データの解析を通して現象の発生に対する経験則を導き出すことが太陽高エネルギー粒子現象発生警報を実現するための有力な方法となる。

そこで GOES (Geostationary Operational Environment Satellite) 衛星によって観測された X 線フレアデータを解析することにより、太陽高エネルギー粒子現象を発生させる X 線フレアの特徴を調べ、太陽高エネルギー粒子現象の発生に対する経験則を導くことを行った。

2.1 データ解析

太陽高エネルギー粒子警報を行うためには、リアルタイムで入手できる観測データを解析することが必要である。そのため、我々は GOES 衛星で観測された軟 X 線フラックス及び太陽高エネルギー粒子強度データを使用した。一口に太陽高エネルギー粒子現象といっても様々な規模のものが存在しており厳格な定義があるわけでないが、ここでは便宜上 GOES 衛星で観測される 10 MeV 以上のエネルギーを持った粒子の強度が $10 \text{ 個 cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ を超えたものと定義する。この定義は ISES (International Space Environment Service) によって宇宙天気予報の基準として使用されているものであり、物理学的な見地からの要求ではなく工学的見地からの要求である。この定義を満たす太陽高エネルギー粒子現象はプロトン現象と呼ばれている。宇宙天気予報という観点から、上記の定義を満たさない太陽高エネルギー粒子現象は本研究では考慮の対象外とする。解析期間は 1997 年 1 月から 2002 年 7 月中旬までである。

プロトン現象は通常大規模な太陽フレアに伴って発生すると考えられている。太陽フレアの規模は一般的には X 線フラックスの最大値 (M1.0 クラス等) で表されているが、フレアによって開放された全エネルギーと関連があると考えられる X 線フラックスの時間積分 (フルエンスと呼ばれることもある) のほうがより良い指標になると考え

られる。そこで本研究ではフレアの規模の指標としてフルエンスを使うことにする。フルエンスはバックグラウンドを差し引いた X 線フラックスの時間積分として以下のように定義される。

$$F_t = \int_{t_s}^{t_e} F(t) - F(t_s) dt$$

ここで、 F_t 、 $F(t)$ 、 t_s 、 t_e はそれぞれフルエンス、X 線フラックス、フレア開始時刻、フレア終了時刻である。バックグラウンドレベルは X 線フレアの開始時刻のフラックス値として与えられる。フレアの開始時刻は NOAA の SWPC (Space Weather Prediction Center) によって同定されている。フレアの終了時刻は、X 線フラックスが最大値の半分まで減少したときの時刻として定義される。

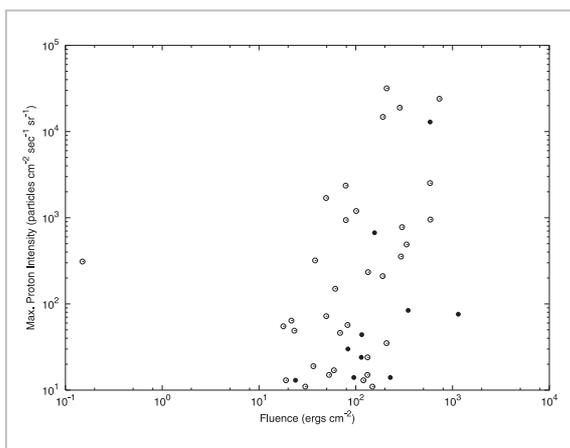


図2 最大プロトン強度とプロトンフレアのフルエンスの関係

図2は最大プロトン強度とプロトン現象を発生させたフレア(以後プロトンフレアと呼ぶ)のフルエンスの関係を表したものである。図中の最左点のフレア(C1.7クラス)は、いくつかの理由により以下の議論では無視できる。図2からは最大プロトン強度と X 線フレアのフルエンスの間に何らかの関係があるようにも見えるが、相関係数は 0.43 程度で相関があるとはいえない。一方、図2からプロトンフレアのフルエンスはおおよそ 20 ergs cm⁻² 以上であることがわかる。言い換えるとフレアのフルエンスが 20 ergs cm⁻² 以下であればプロトン現象は発生しないと言う事ができ、この結果は重要である。

ここでフレアの規模の指標として使用されてい

るフルエンスは式(1)で表されるようにフラックスの時間積分として定義されるが、既に述べたように一般的には最大 X 線フラックスがフレアの規模の指標として使用されている。したがって最大 X 線フラックスを用いて上述の結果を表現するほうが直感的に判りやすく、リアルタイム警報という観点からも有益である。今回用いているプロトンフレアのデータ解析から、フルエンス F_t と最大 X 線フラックス F_p の間には以下のような関係があることを示すことができる。

$$F_p \cdot D = 1.0076 F_t^{0.96633} \quad (1)$$

ここで D はフレア継続時間で $D = t_e - t_m$ によって定義され、 t_m は X 線フラックスが最大となる時間である。この式とプロトン現象発生の閾値 $F_t = 20 \text{ ergs cm}^{-2}$ を用いることにより、図3に示

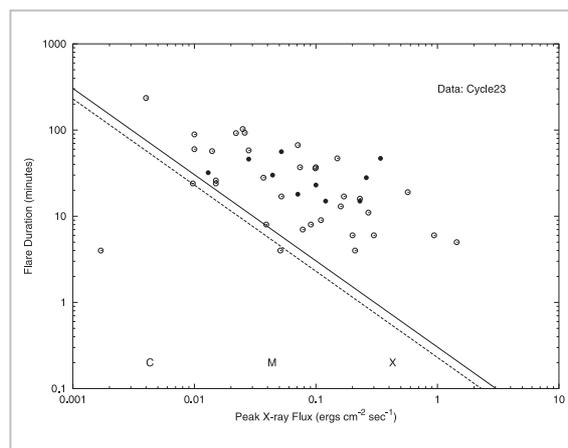


図3 第23太陽周期(解析期間中のみ)のプロトンフレアの最大X線フラックスと継続時間の関係と式(1)により求められた閾値線

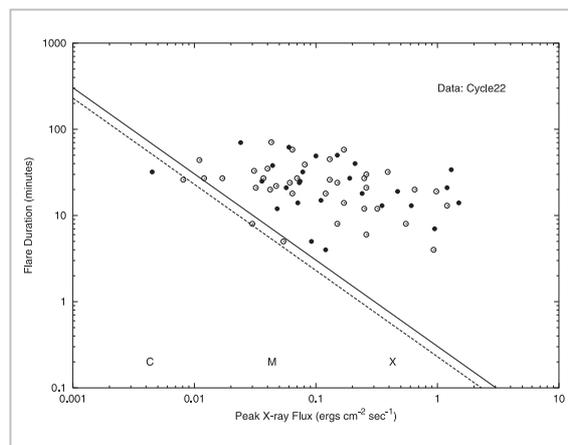


図4 図3と同じ、ただしデータ点は第22太陽周期のもの

されるように $F_p - D$ 面上に閾値線 ($D = 18.2 F_p^{-1}$) を引くことが出来る。

図3と図4はそれぞれ第23、22太陽周期のプロトンフレアの最大X線フラックスに対するフレア継続時間と閾値線をプロットしたものである。これらの図からわかるように、ほとんど全てのプロトンフレアが閾値線の上側に存在しており、最大X線フラックスに対してフレア継続時間に閾値が存在することを示している。例えば、M1.0クラスフレアに対してはおおよそ継続時間が30分以上のフレアのみプロトン現象を発生させることが出来ることがわかる。従来から継続時間の長いMクラス以上のフレアでプロトン現象が発生しやすいと経験的に言われていたが、これをきちんとデータに基づいて証明したことになる。

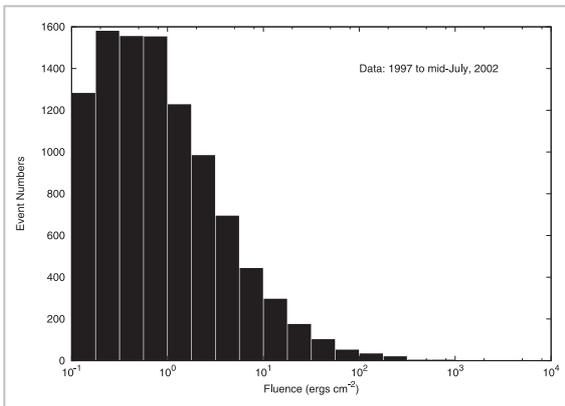


図5 解析期間中に発生したCクラス以上の全フレアのフルエンス分布

図5は解析期間中に発生したCクラス以上の全フレア(おおよそ10,000回程度)のフルエンスの分布である。これを見ると大部分のフレアのフルエンスは 20 ergs cm^{-2} 以下であり、プロトン現象を発生させるようなフレアは稀である事がわかる。解析期間中、プロトンフレアの条件を満たすフレアはおおよそ400回程度観測されているが、プロトン現象自身は60回程度しか観測されていない。すなわちフルエンスが 20 ergs cm^{-2} 以上という条件を満たす全てのフレアでプロトン現象が発生しているわけではない。この結果からはフレアのフルエンスが 20 ergs cm^{-2} 以上という条件を満たさない場合は、プロトン現象は発生しないと言えるのみで、フルエンスが 20 ergs cm^{-2} 以上とい

う条件はプロトン現象が発生するための必要条件でしかないことには注意が必要である。

とはいえ、プロトン現象が発生しないことがわかるということは、例えばスペースシャトルやISSなどで船外活動中の宇宙飛行士が活動を中止するかどうかの判断基準などのためには非常に重要な情報であると言える。

3 太陽高エネルギー粒子フラックスの時間変動

太陽高エネルギー粒子は太陽フレア領域と惑星間衝撃波の両方で加速されている。そのため一般的には地球近傍での粒子フラックスの時間変動を予測するためにはその両方を考慮しなければならない。大規模なプロトン現象の初期フェイズで観測されるのは 100 MeV 程度以上の高エネルギー粒子であるが、惑星間衝撃波で 100 MeV 程度の高エネルギーまで粒子を加速するのは困難であると考えられているため、このような高エネルギー粒子は太陽フレア領域や太陽近傍のコロナ領域で加速された粒子が太陽風中を伝播してきたものと考えられている。よってこのようなエネルギーの粒子フラックスの時間変動の予測に関しては惑星間衝撃波での加速粒子は考慮しなくても良いと考えられる。したがって、プロトン現象の初期フェイズを考える場合には太陽近傍で生成された高エネルギー粒子の太陽風中の伝播過程のみ考えればよいことになる。

太陽近傍で放出された高エネルギー粒子は太陽風磁場中をラーモア運動しながら地球近傍に到達する。太陽高エネルギー粒子のラーモア半径は太陽風のグローバルな磁場構造のスケールと比較して十分小さいため、粒子は太陽風中の磁力線に沿って地球近傍へ飛来する。一方、太陽風中には小さなスケールの磁場の乱れ(乱流磁場)がいたるところに存在しており、太陽風中を伝播する太陽高エネルギー粒子はこれらの乱流磁場による散乱を受ける。すなわち高エネルギー粒子は太陽風中を散乱を受けながらグローバルな磁場に沿って伝播してくることになる。このような伝播は、一般的にはフォッカー・プランク方程式を解く方法や確率微分方程式を用いたシミュレーション[9]によって数値的に取り扱われている。このような数

値シミュレーションにおいては、拡散係数やドリフト運動を与える拡散係数テンソル及び平均自由行程に関連したピッチ角拡散係数を定量的に規定することが本質的に重要である。一般的にこれらの係数は様々な近似の下で解析的に与えられるが、太陽風中の様々な条件下では観測から評価される値と大きく食い違う場合もあり必ずしも妥当な値を与えるとは限らない[10]。それにも関わらずこれらの計算手法が用いられるのは、これらの手法は粒子の運動を追跡する必要がないため計算量が少なく高速計算機や高速・並列計算技術を利用する必要が無いことが一つの理由である。

近年、高速計算機の発達や高速・並列計算技術の進歩により非常に高速に計算を行うことが可能になってきた。このような高速計算技術を用いると、高エネルギー粒子を直接乱流磁場中で追跡する計算を行うことにより拡散過程を含んだ粒子の太陽風中での伝播を再現することが出来る[11]。この手法は直接運動方程式を解いて粒子の運動を追跡しているので拡散やドリフト運動を記述する拡散係数テンソル等を定義する必要が無く、磁場の乱流度合いを与えれば高エネルギー粒子の伝播をシミュレーションできることが利点である。以後はこのような手法を用いた太陽高エネルギー粒子の太陽風中の伝播のシミュレーション手法について紹介する。

3.1 拡散過程のシミュレーション

3次元等方乱流磁場は一般的に多数の波の重ねあわせとして表現される。一つの波は三角関数として表され、波数ベクトルの方向に対して2つ、波の偏向と位相に対して1つずつの計4つの乱数によって決定される。これらの波の重ねあわせとして作られた乱流磁場を背景磁場 B_0 に加えることで一般的な磁場は以下のように決定される。

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \delta\vec{B}$$

$$\delta\vec{B} = \sum_{n=1}^N \vec{b}_n A(k_n) \exp[i(\vec{k}_n \cdot \vec{r} + \phi_n)]$$

$$A(k_n)^2 = \left(\frac{\delta B}{B_0}\right)^2 G(k_n) \left[\sum_{n=1}^N G(k_n)\right]^{-1}$$

$$G(k_n) = \frac{4\pi k_n^2 \Delta k_n}{1 + (k_n L_c)^2}$$

γ は、 k_n が大きいところで $G(k_n)$ がコルモゴロフの乱流スペクトルとなるように $\gamma = 11/3$ とする。 L_c は乱流の相関長、 \vec{b}_n は正弦波方向の単位ベクトルである。また、 $\vec{k}_n \cdot \vec{b}_n = 0$ とすることにより $\text{div}\vec{B} = 0$ を保障している。パラメータ $(\delta B/B_0)$ の値を変えることで乱流強度を変えることが出来る。このようにして作られた磁場中で高エネルギー粒子の運動方程式を直接解くことで粒子を追跡し拡散過程を再現する。

まず、背景磁場が一様である場合についてテスト計算を行い、拡散過程を再現していることを確認する。図6は乱流強度が0.1の磁場中での10 MeV粒子の追跡結果を表している。シミュレーションでは20,000個の粒子の軌道を追跡しているが、図にはサンプルとして8個の粒子の軌道を描いている。背景磁場は紙面の裏から表方向で紙面に垂直向きであり、粒子が背景の磁力線を横切って運動していることが分かる。これがきちんと拡散過程を再現していることを確かめるため、シミュレーション結果を用いてZ軸からの距離の2乗平均値 $\langle r^2 \rangle$ を計算してみると図7のようになる。図からわかるように2乗平均値はきれいに時間 t に比例して増加している。2乗平均値が時間に比例するというのは拡散過程の特徴であり、このシミュレーションがきちんと拡散過程を再現していることを示している。以上のことから、乱流磁場中での粒子運動追跡シミュレーションは拡散過程を再現していることが確認できる。

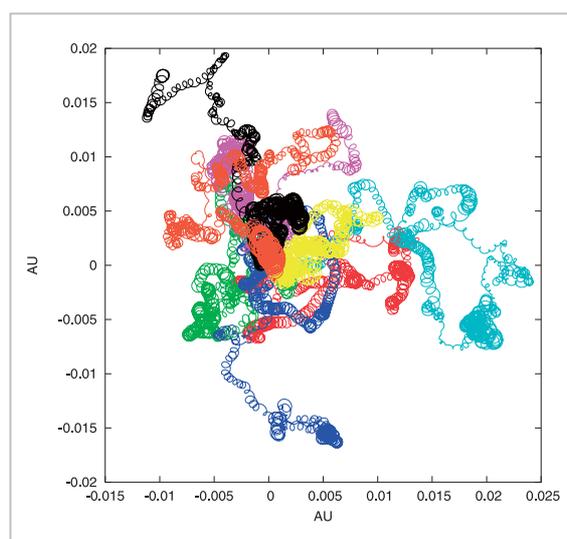


図6 シミュレーションによって得られた乱流磁場中での10 MeV粒子の運動

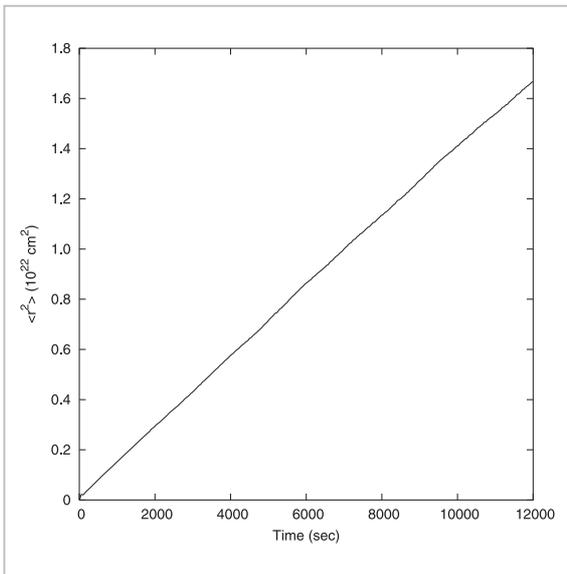


図7 20,000 個の粒子の原点からの距離の2乗平均値 $\langle r^2 \rangle$ の時間変化

3.2 太陽高エネルギー粒子の伝播

前節で行った拡散過程のシミュレーションを太陽風を模擬した磁場構造中で行うことで、太陽風中の太陽高エネルギー粒子の伝播を調べることが出来る。太陽風磁場はパーカー磁場に乱流磁場を重ね合わせたものとし、磁場中を太陽近傍で加速された高エネルギー粒子が伝播していくシミュレーションを行う。太陽風中の構造の例としてカ

レントシートの粒子伝播への影響を調べる。カレントシートとは、非常に薄い層状領域の両側で急激に磁場の方向が反転している構造である。

図8はシミュレーションにより得られた地球軌道に到達したエネルギー 100 MeV の太陽高エネルギー粒子をパーカー磁場に沿って太陽まで戻したときの位置のプロットである。パーカー磁場に沿って粒子を太陽まで戻すことによって、磁力線と平行な方向の運動によって起こる粒子の緯度、経度の変化を打ち消すことが出来る。したがって、この図はパーカー磁場を横切る運動による緯度、経度の変化のみを表していることになる。左図はカレントシートが無い場合、右図はカレントシート(黒線)がある場合である。粒子の注入位置は太陽面上における緯度 0 度、経度 -1 度の位置であるので乱流磁場が無い場合は図中の点 (0, -1) 付近に粒子が集中することになるが、図中では緯度、経度ともに広がった分布を示している。これは乱流磁場やカレントシートが存在することによって磁場を横切る方向に粒子が運動していることを示している。カレントシートが無い場合では乱流磁場による拡散によって 12 ~ 3 度程度の広がりを見せている。一方、カレントシートがある場合は拡散に加えてカレントシートの両側を粒子が行き来することによるドリフト運動が起こりカレント

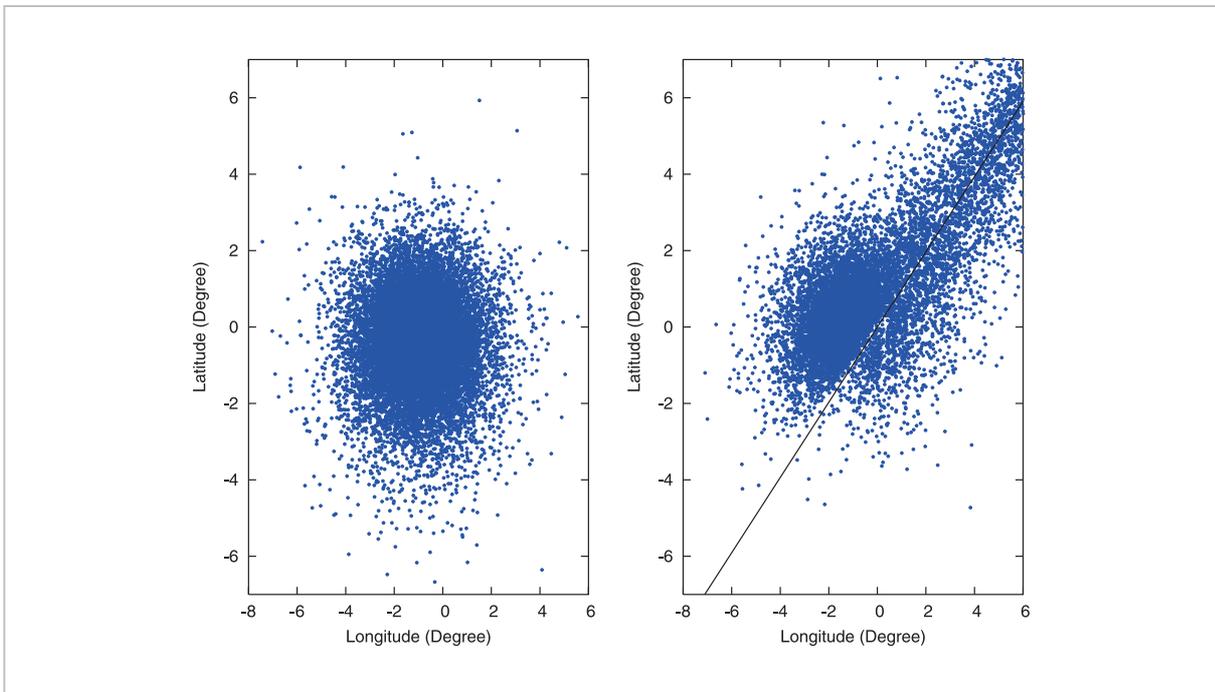


図8 地球軌道に到達した粒子をパーカー磁場に沿って太陽まで戻したときの粒子位置

シートに沿って粒子が移動していることがわかる。このシミュレーション結果は、活動領域がカレントシートの近くに存在している場合には観測地点(例えば地球)が活動領域と磁力線を介して繋がっていない場所においても、太陽近傍で加速された高エネルギー粒子が観測されることが可能であることを表している。これによって、例えば太陽面東側で起こったフレアにおいて加速された高エネルギー粒子が地球近傍で観測される現象を説明できる可能性がある。

図9は地球における粒子フラックスの時間変動を、シミュレーション結果を用いて計算したものである。左図はカレントシートが無い場合、右図はカレントシートがある場合である。図中の5本の線のうち+0 deg.と書いてあるものがフレア発生時にフレア領域(粒子注入点)が地球と磁力線を介して繋がっている場合、-1 deg.はフレア発生時に地球と繋がった磁力線の位置がフレア領域より1度東側、+1, +2, +3 deg.はそれぞれ1, 2, 3度西側にある場合である。また、図の見易さのためそれぞれの線をy軸方向に0.01ずつオフセットしている。両図とも+0 deg.のときがフラックスの立ち上がりが早く、フレア領域から離れるにつれて立ち上がりが遅くなっている。またフラッ

クスの大きさはカレントシートがある場合のほうが若干小さい。図10も地球における粒子フラックスの時間変動を、シミュレーション結果を用いて計算したものである。図中の青線はフレア発生時の地球の位置がカレントシートに対してフレア領域と同じ側(左図)と反対側(右図)にある場合(図11参照)の地球軌道でのフラックスの時間変化を書いたもので、赤線は同じ位置でのカレントシートが無い場合のフラックスである。左図から明らかなように、フレア領域と地球が同じ側にある場合はカレントシートの有無に関わらずフラックスは同じような変動を示すことが分かる。一方、地球がフレア領域と反対側にある場合はフラックスの時間変動に大きな違いが見られる。右図からカレントシートを挟んでいる場合は地球で観測されるフラックスはカレントシートが無い場合に比べて非常に小さくなっている。これは、カレントシートに沿って粒子が逃げていくためカレントシートを横切る粒子の数が減少し、結果としてフラックスが小さくなったと考えられる。以上のようにカレントシートなどの太陽風中のさまざまな構造の存在は太陽高エネルギー粒子の伝播過程や地球における太陽高エネルギー粒子フラックスの時間変動に大きな影響を与える可能性

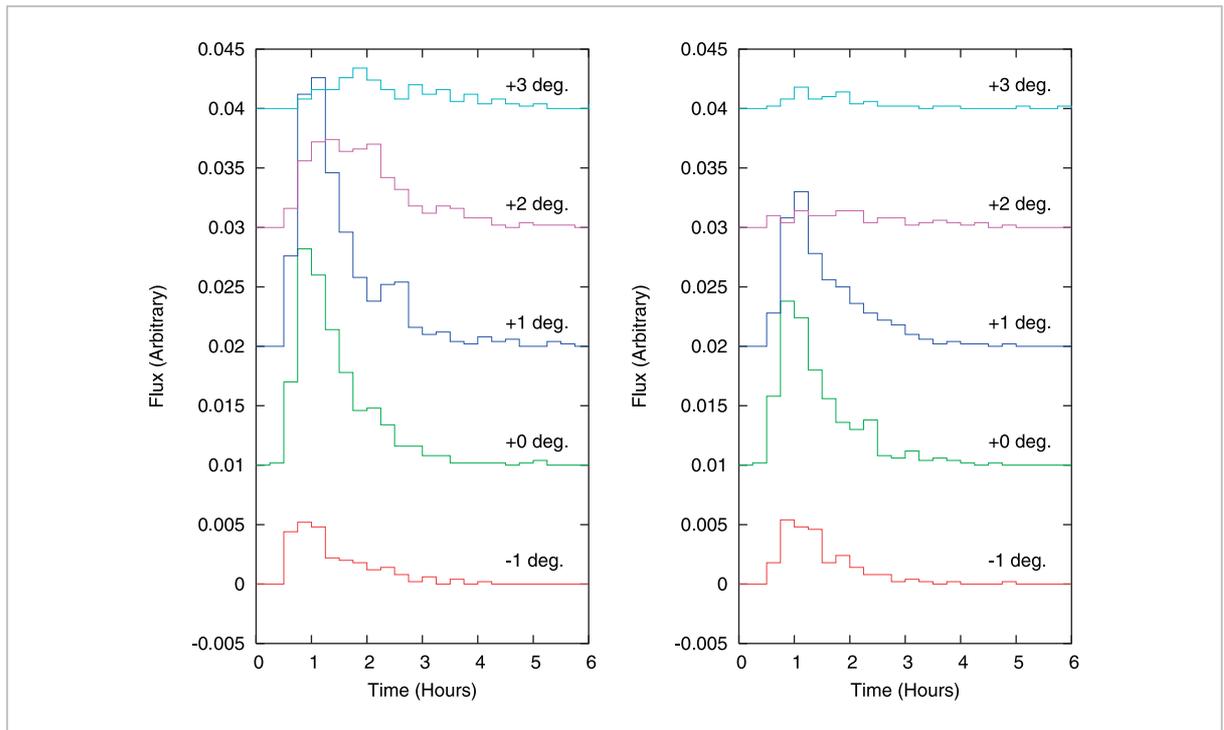


図9 地球における粒子フラックスの時間変動

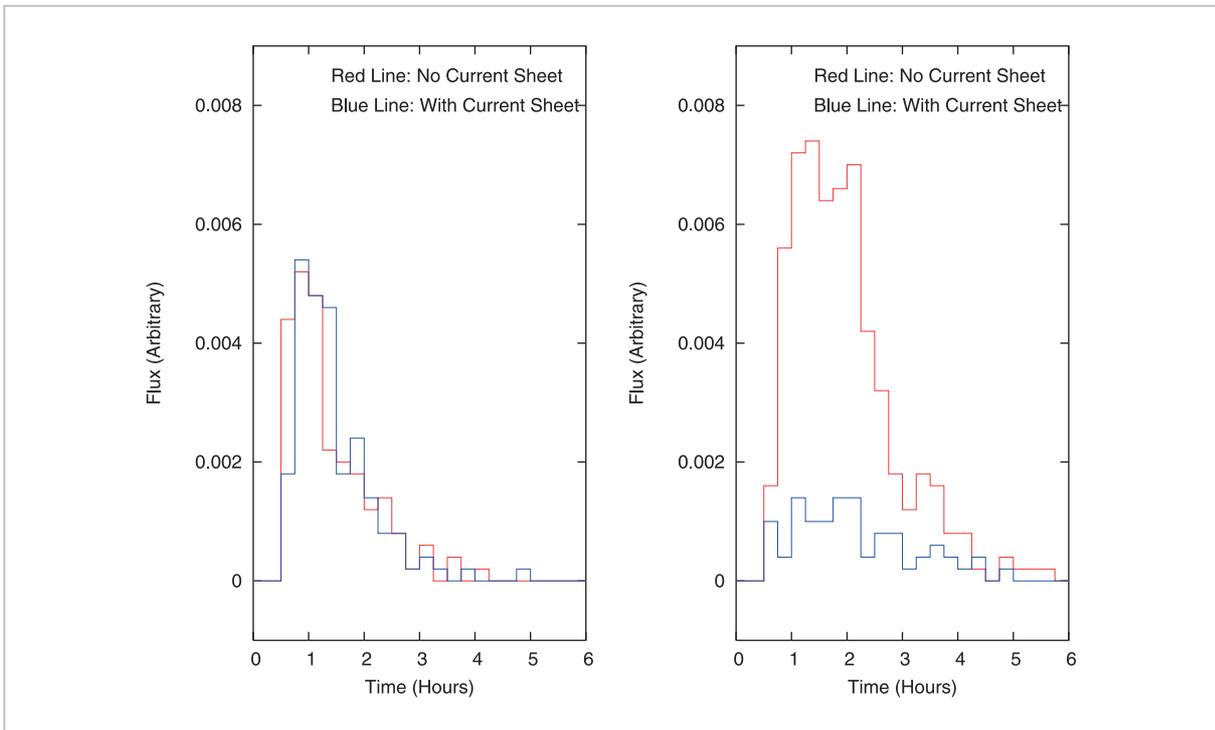


図10 地球における粒子フラックスの時間変動

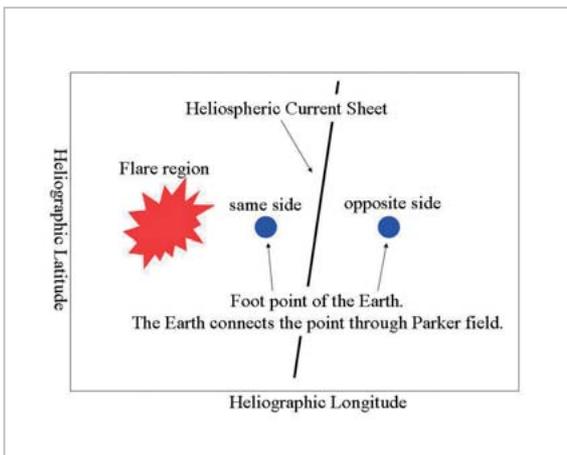


図11 フレア領域とカレントシート、地球の位置関係の図

があり、シミュレーションを用いた予測を行う際には太陽風の構造を詳細に再現できるモデルが必要となる。太陽風の構造を再現するシミュレーションについては文献[12][13]に述べられている。

4 宇宙環境イベント通報システム

太陽フレアやプロトン現象などの宇宙環境じょう乱を十分な先行時間の下で定量的に予測し、情報提供することは、宇宙天気予報の大きな目標の

一つである。しかし、現時点では太陽フレアの発生や太陽高エネルギー粒子の生成の物理過程に未知の部分や未解決の問題が多い上、これらの活動の起源となる太陽の内部の状態を観測する手段が極めて乏しいため、現時点では目標への道りは程遠いと言わざるを得ない。そのため、現時点での次善の情報提供の手段の一つとして、観測データをリアルタイムに収集し、宇宙環境イベントの検出処理を逐次行うことで、太陽フレアの発生及び太陽高エネルギー粒子の増大を同定し、警報レベルを超えたイベントについて即時的に通報し、利用者に注意喚起を促すことが考えられる。

10年ほど前から、情報通信ネットワークの発達が急速に進み、様々な宇宙環境データを準リアルタイムに入手・処理し、情報を配信できる環境が整ってきた。これによって、観測データから宇宙環境イベントの発生とその推移をリアルタイムに検知し、情報を迅速に通報することが現実的となった。リアルタイムの警報情報の配信は、人工衛星運用や放送・無線通信の安心・安全に役立つと期待される他、障害の要因分析を迅速に行う上でも参考となる。さらに、計算機上でのアルゴリズムを用いたイベントの検出及び通報判断は客観的であり、処理を自動・自律化することで宇宙環

境を24時間監視する体制を比較的容易に構築することができる。また、通報先アドレスを携帯電話に設定しておくことにより、インターネットが無くとも携帯電話の通話エリア内であれば、いつでも異常現象発生を知ることも可能となる。以上のことから、我々は宇宙環境イベント通報システムの開発を行い、現在情報サービスの一つとして運用している。

4.1 システムの構成

本システムは、太陽フレアやプロトン現象等、宇宙環境イベント毎のモジュール構成となっている。各モジュール内はイベント検出プロセスとイベント通報プロセスで構成される。システム構成の模式図を図12に示す。モジュール内をイベント検出とイベント通報の2つのプロセスに分割したのは、以下の理由による。

宇宙環境イベントの特性の理解と発生予測技術の向上には、規模の大小に関わらず、すべての宇宙環境イベントを抽出し、解析を行うことが重要である。しかしながら、宇宙環境イベントは一般に規模が小さくなるにつれて発生頻度がべき乗で増加することが知られている。このため、検出される宇宙環境イベントをすべて通報した場合、通報の数が膨大になると同時に、その大多数は小規模のイベントとなる。宇宙利用や社会インフラ等に影響を及ぼす可能性があるのは、比較的規模の大きな宇宙環境イベントに限られるため、イベント情報をすべて抽出すると同時に、所定のアラートレベルに達した情報のみを通報するための通報判断という別の処理プロセスが必要となる。イベ

ント抽出アルゴリズムや通報判断基準は、設定ファイルに記述されたパラメータを変更することでチューニングが可能である。

4.1.1 データの流れ

NOAAのGOES衛星には太陽X線、太陽高エネルギー粒子、放射線帯電子を計測する装置(Space Environment Monitor: SEM)が搭載されている。SEMのデータは、準リアルタイムにSWPCのデータサーバに蓄積される。我々は、5分毎にこのサーバにアクセスし、最新の宇宙環境データを取得している。

ACE(Advanced Composition Explorer)衛星はL1点において太陽風を計測している宇宙機である。ACEには太陽風プラズマ(SWEPAM)や磁場(MAG)、フレア粒子(EPAM, SIS)等を計測する装置が搭載されている。ACEは国際協力で24時間太陽風のモニターを行う観測ミッションを遂行している。情報通信研究機構もその国際協力の一翼を担い、データのリアルタイム受信に協力している[14]。ACEのデータもほぼリアルタイムで収集している。

4.1.2 イベント検出プロセス

イベント検出プロセスでは、最初にステータスファイルを読み込み、前回起動時の処理状況(どこまで処理したか、イベント中かどうかの判断)の情報を得る。その情報を元にして、今回のプロセスで、どの時刻からのデータを処理し、どの手順から検出アルゴリズムを動かすかを判断する。イベント検出の基本的な考え方は次の2種類に分類できる。

- 1) 物理量の変化量(ΔX)を閾値としてイベント開始を判断。
- 2) 物理量の大きさ($|X|$)を閾値としてイベント開始を判断。

太陽フレア(図13)のように、物理量の急激な変化を伴う現象に関しては、1)の方式が適しており、プロトン現象(図14)のように緩やかに変化する現象に関しては2)の方式が適している(太陽フレア検出アルゴリズムとプロトン現象検出アルゴリズムについては、Appendixを参照されたい)。

4.1.3 イベント通報プロセス

イベント検出プロセスによって抽出された宇宙環境イベント情報は、イベントリストとしてサーバ内に蓄積される。このリストの更新状況を監視

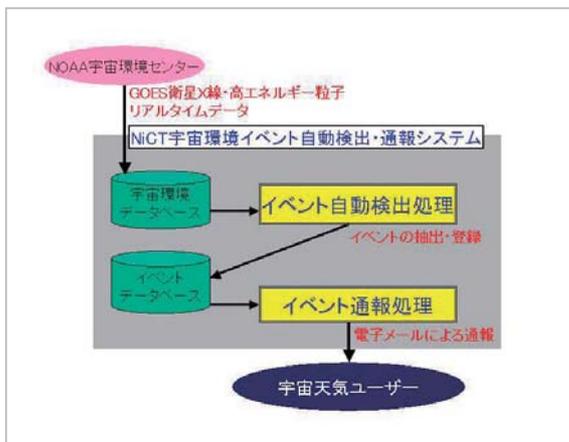


図12 宇宙環境通報システムの模式図

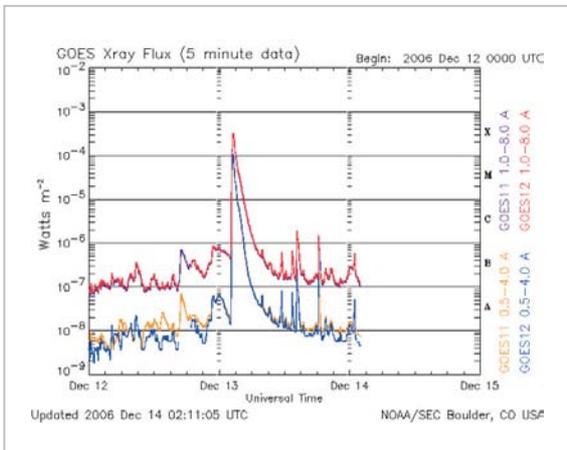


図13 2006年12月13日のX3.4クラスの太陽フレア (SWPCホームページより)

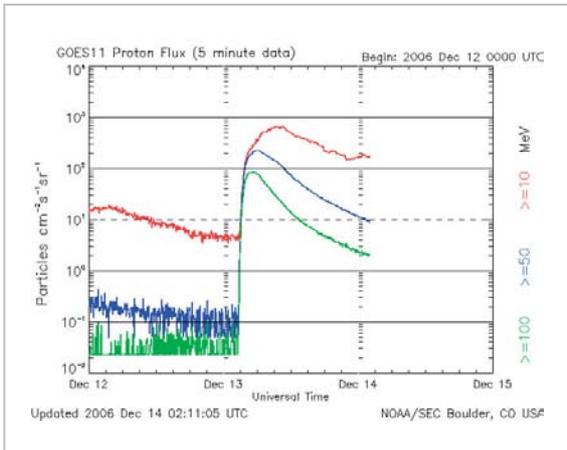


図14 2006年12月13日のプロトンイベント (最大700 PFU) (SWPCホームページより)

し、通報条件が満たされている場合に、イベント情報を速報として登録ユーザーに e-mail 配信するのがイベント通報プロセスの役割である。

イベントの通報条件は以下の2種類設定している。

- 1) イベントの規模が所定のアラートレベルに達した場合
- 2) イベントの継続時間が所定の期間を超えた場合

1)の条件はすべての宇宙環境イベントに共通であるが、2)については継続時間の長いプロトン現象や放射線帯電子変動といったものが対象となる。イベント継続中の状況を注意喚起することが目的である。

通報の閾値は下記の通りである。この情報は設定ファイルに記述されており、任意に変更が可能である。

[太陽フレア速報の通報条件]

Mクラス以上 (10^{-5} W m^{-2} 以上) のフレアが発生した時

[プロトン現象速報の通報条件]

10 MeV 以上のプロトンフラックスが 10 PFU を超えるイベントが開始した時

10 MeV 以上のプロトンフラックスが 100, 1000, 10000 PFU を超えた時

10 MeV 以上のプロトンフラックスが 100, 1000, 10000 PFU から下がった時

10 MeV 以上のプロトンフラックスが 10 PFU 以上の状態が1日以上継続している時

10 MeV 以上のプロトン現象の終了時

イベント情報は表1のようなフォーマットで配信される。利用者の利便性を考え、通報用フォーマットは字数の制約が少ないPC用と、表示できる字数が限られている携帯端末用の2種類準備した。いずれも定型文型のテンプレートファイルに時刻や物理量等イベント毎に異なる情報の部分を変数としてイベントリストから読み込む形式となっている。また、携帯端末用には、イベントのグラフを閲覧できる機能も実装した(図15、16)。

4.2 システムの運用状況

本システムは2000年3月にはプロトタイプのシステムが完成し、情報通信研究機構の内部で、予報担当者の業務補助のツールとして利用を重ねてきた。その後、2004年2月より、実環境におけるパフォーマンスの確認及び定常運用に向けての問題点抽出等を目的として、太陽フレア速報、プロトン現象速報に限定して、本システムの試験運用を開始した。試験運用の結果として、e-mail 配信時間の遅延の問題や、イベント開始時の通報のニーズが明らかとなった。そこで、システムの改良と新たなサービスを設定し、2005年4月からは本運用に移行している。現在の利用登録は700名弱である。

表1 太陽フレア通報(パソコン用)の例

```

Subject: Report of intense X-ray flare
Date: Sun, 03 Jun 2007 11:21:04 +0900
From: main@ml.nict.go.jp
To: ****@**. **. **

2007年06月03日11時21分JST 通報
GOES-11 衛星の観測から、以下の強い太陽フレアが検出されました。
開始時刻(UT)   強度最大時刻(UT)   終了時刻(UT)   最大強度
02:06           02:12                 02:16           M7.0
提供：情報通信研究機構(NICT) 電磁波計測研究センター

下記のリンク先でイベントのプロットが御覧になれます。
http://mobilep.nict.go.jp/flare-xray/flare-xray\_event.php
    
```



図15 イベントプロット先へのリンクページ(携帯用)

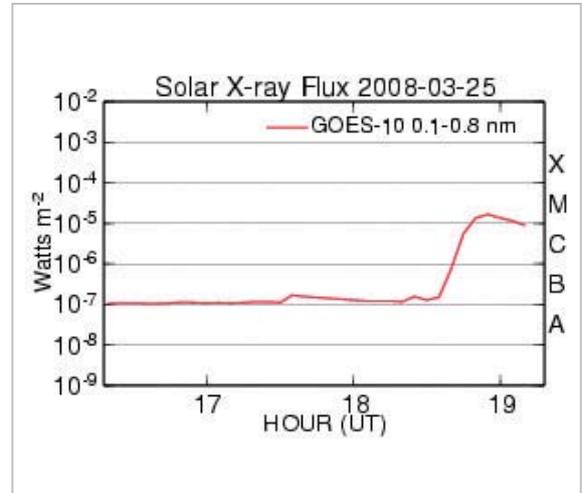


図16 イベントプロットの例(X線フレア)

5 まとめ

本稿では、太陽高エネルギー粒子の予測・警報について統計的手法及びシミュレーションによる手法の両面からその可能性について述べてきた。どちらの手法もまだまだ発展途上の段階であり今後の更なる研究が必要である。加えて、太陽高エネルギー粒子の発生源となる太陽フレアやコロナ質量放出(CME)の発生等についても予測・警報の研究が必要であるが、やはり発展途上の段階で

あり統計的手法を用いた確率予測の段階に留まっている(e.g., [15][16])。このような状況を補う手段として太陽フレアやプロトン現象の発生を自動的に検出して通報する宇宙環境イベント通報システムの開発が行われている。これはイベントが発生したことをいち早く検知し情報発信する手段として有効で、既に実用段階に入りつつある。このように太陽高エネルギー粒子の予測・警報の研究は様々な観点から精力的に進められており、今後の進展が期待されている。

Appendix

A.1 太陽X線フレア検出アルゴリズム

以下に太陽 X 線フレアの検出アルゴリズムを示す。扱う物理量 (X 線強度: $W m^{-2}$) と時刻情報の時系列 (1 分値) をそれぞれ $X(t), T(t)$ とする。

1) イベント検出状況の確認

イベントリストを用いて、太陽フレアイベントの検出状況 (イベント無し、イベント中 (イベント開始、最大値)) を確認する。検出状況に応じて、次の処理が変化する。

2) 「イベント開始」検出 (1)

1) において「イベント無し」の場合、

4 点の時系列データ [$X(k-3), X(k-2), X(k-1), X(k)$] が、次の 3 つの条件を最初にすべて満たす $T(k-3)$ を太陽フレア開始時刻とし、「イベント開始」検出と定義する。

A) $X(k-3), X(k-2), X(k-1), X(k) > 1.0 \times 10^{-7}$

B) $X(k-3) < X(k-2) < X(k-1) < X(k)$

C) $1.4 \times X(k-3) \leq X(k)$

3) 「イベント開始」検出 (2)

2) において「イベント開始」が検出されなかった場合、以下のアルゴリズムを用いて、「イベント開始」を検出する。

10 点の時系列データ [$X(k-9), X(k-8), X(k-7), \dots, X(k)$] が、次の 3 つの条件を最初にすべて満たす $T(k-9)$ を太陽フレア開始時刻とし、「イベント開始」検出と定義する。

A) $X(k-9), X(k-8), X(k-7), \dots, X(k) > 1.0 \times 10^{-7}$

B) $X(k-9) < X(k-8) < X(k-7) < \dots < X(k)$

C) $1.2 \times X(k-9) \leq X(k)$

4) 「最大値・最大時刻」検出

「イベント開始」後の時系列データから最大値 $X(k)$ 及びその時刻 (最大時刻) $T(k)$ を検出する。最大値が同じ値で複数時刻にまたがっている場合、先の時刻を最大時刻とする。

5) 「イベント終了」検出

「イベント開始」後の時系列データが、次の 2 つの条件を最初にすべて満たす $T(k)$ を太陽フレア終了時刻とし、「イベント終了」検出と定義する。

A) $X(k) < (X_{start} + X_{max}) / 2$ (X_{start} : 「イベント開始」時の値、 X_{max} : 「最大値」)

B) $T(k) > T_{max}$ (T_{max} : 「最大時刻」)

イベント開始検出 (1) のアルゴリズムは SWPC で用いられているものと同じである。但し、このアルゴリズムでは LDE (Long Duration Event) 等の緩やかに開始するイベントを検出することが出来ないため、LDE を検出するためにイベント開始検出 (2) のアルゴリズムを組み合わせることとした。

A.2 プロトン現象検出アルゴリズム

以下にプロトン現象を検出するアルゴリズムを示す。扱う物理量 (10 MeV 以上のプロトンフラックス: PFU) と時刻情報の時系列 (5 分値) をそれぞれ $X(t), T(t)$ とする。

1) イベント検出状況の確認

イベントリストを用いて検出状況を確認する。(イベント無し、イベント中 (イベント開始、レベル上昇、最大値、レベル下降))

2) 「イベント開始 (レベル 1 上昇)」検出

num 点の時系列データ ($X(0) \sim X(num)$) 中、以下の条件が始めて満たされる時刻 $T(k)$ をイベント開始時刻とし、「イベント開始」検出と定義する。
 $X(k) > x_{lim}$

なお、 $x_{lim} = 10$

3) 「レベル n 上昇」検出

「イベント開始」以降 (含開始時刻) の時系列データ中、以下の条件が始めて満たされる時刻 $T(k)$ をレベル n 上昇時刻とし、「レベル n 上昇」検出と定義する。なお、この時刻は、イベント開始と同時刻である場合も有り得る。

$X(k) > x_{lv}(n)$

なお、 $x_{lv}(2) = 10^2$ (レベル 2), $x_{lv}(3) = 10^3$ (レベル 3), $x_{lv}(4) = 10^4$ (レベル 4), $x_{lv}(5) = 10^5$ (レベル 5) とする。

4) 「最大値・最大時刻」検出

「イベント開始」以降の時系列データから最大値 $X(k)$ 及びその時刻 (最大時刻) $T(k)$ を検出する。

5) 「レベル下降」検出

レベル上昇以降の時系列データ中、以下の条件が始めて満たされる時刻 $T(k-2)$ をレベル下降時刻とし、「レベル下降」検出と定義する。

$X(k-2) < x_{lv} \ \& \ X(k-1) < x_{lv} \ \& \ X(k) < x_{lv}$
[但し $2 < k < num$]

6) 「イベント終了」検出

イベント開始以降の時系列データ中、以下の条件が始めて満たされる時刻 $T(k-2)$ をイベント終了

時刻とし、「イベント終了」検出と定義する。

$$X(k-2) < x_{lim} \ \& \ X(k-1) < x_{lim} \ \& \ X(k) < x_{lim} \quad [但し \ 2 < k < num]$$

参考文献

- 1 藤高和信, 福田俊, 保田浩志, “宇宙からヒトを眺めて－宇宙放射線の人体への影響－”, ISBN4-87639-407-5, 2004.
- 2 Kubo, Y., and Akioka, M., "Existence of thresholds in proton flares and application to solar energetic particle alerts", *Space Weather*, Vol.2, S01002, 2004.
- 3 Garcia, H. A., "Forecasting methods for occurrence and magnitude of proton storms with solar soft X rays", *Space Weather*, Vol.2, S02002, 2004a.
- 4 Garcia, H. A., "Forecasting methods for occurrence and magnitude of proton storms with solar hard X rays", *Space Weather*, Vol.2, S06003, 2004b.
- 5 Posner, A., "Up to 1-hour forecasting of radiation hazards from solar energetic ion events with relativistic electrons", *Space Weather*, Vol.5, S05001, 2007.
- 6 Balch, C. C., "Updated verification of the Space Weather Prediction Center's solar energetic particle prediction model", *Space Weather*, Vol.6, S01001, 2008.
- 7 Laurenza, M., Cliver, E. W., Hewitt, J., Storini, M., Ling, A. G., Balch, C. C., and Kaiser, M. L., "A technique for short-term warning of solar energetic particle events based on flare location, flare size, and evidence of particle escape", *Space Weather*, Vol.7, S04008, 2009.
- 8 Reames, D. V., "Solar energetic particles: Is there time to hide?", *Radiat. Meas.*, Vol.30, pp.297, 1999.
- 9 Zhang, M., Qin, G., and Rassoul, H., "Propagation of Solar Energetic Particles in Three-Dimensional Interplanetary Magnetic Fields", *Astrophys. J.*, Vol.692, pp.109, 2009.
- 10 Dröge, W., and Kartavykh, Y. Y., "Testing Transport Theories with Solar Energetic Particles ", *Astrophys. J.*, Vol. 693, pp. 69, 2009.
- 11 Qin, G., Zhang, M., Dwyer, J. R., and Rassoul, H. K., "Interplanetary Transport Mechanisms of Solar Energetic Particles ", *Astrophys. J.*, Vol.609, pp.1076, 2004.
- 12 Nakamizo, A., Tanaka, T., Kubo, Y., Kamei, S., Shimazu, H., and Shinagawa, H., "Development of the 3-D MHD model of the solar corona-solar wind combining system", *J. Geophys. Res.*, Vol.114, A07109, 2009.
- 13 中溝葵, 久保勇樹, 田中高史, “太陽－太陽風結合系 MHD シミュレーションモデル”, 情報通信研究機構季報, 本特集号, 2-3-2, 2009.
- 14 丸山隆, 渡辺成昭, 大高一弘, 島津浩哲, “ACE 衛星による太陽風モニター計画”, 通信総研季報, Vol.43, No.2, pp.285, 1997.
- 15 Wheatland, M. S., "A statistical solar flare forecast method", *Space Weather*, Vol.3, S07003, 2005.
- 16 Kubo, Y., "Statistical Models for the Solar Flare Interval Distribution in Individual Active Regions", *Sol. Phys.*, Vol.248, pp.85, 2008.



久保勇樹

電磁波計測研究センター宇宙環境計測
グループ主任研究員
太陽宇宙線物理学



長妻 努

電磁波計測研究センター宇宙環境計測
グループ研究マネージャー 博士(理
学) 太陽地球系物理学

秋岡真樹

新世代ワイヤレス研究センター推進室
主任研究員 博士(理学)
太陽物理、光学システム、宇宙天気