

2-3-5 太陽プロトン現象と地球磁気圏内での伝播

2-3-5 *Solar Proton Event and Proton Propagation in the Earth's Magnetosphere*

島津浩哲

SHIMAZU Hironori

要旨

太陽プロトン現象とは、太陽フレアなどともなって発生した高エネルギーのプロトン(エネルギーが MeV ~ GeV 帯)が地球近傍で観測されることをいう。太陽プロトン現象は古いテーマであり、本誌においてもこれまでに何度か取り上げられている[1]~[3]。本稿では太陽プロトン現象についてレビューをしたのち、昨今の観測や計算機技術の進歩などに伴う、太陽プロトンに関する研究の進展について、地球近傍における伝播過程を中心にして述べる。

Solar proton event is the manifestation of the high-energy protons (Their energy ranges from MeV to GeV.) generated by the solar flare or interplanetary shocks. Researches on the solar protons have a long history, and they have been discussed in this journal several times. In this paper, we review general topics about the solar proton event first. Then, we focus on the recent progress of the solar proton research, especially the propagation in the earth's magnetosphere.

[キーワード]

太陽プロトン現象, 伝播過程, カットオフ緯度, バウショック, MHD シミュレーション
Solar proton event, Propagation, Cutoff latitude, Bow shock, MHD simulation

1 概観

太陽プロトン現象はもともと、太陽の活動領域で生じたフレア(太陽面での爆発)によるプロトンの加速が原因であると考えられていたが、コロナ質量放出(CME)の発見以降、CME にもなる惑星間衝撃波による加速が起源のものもあることが知られるようになった(図1)[4]。地球近傍で観測した太陽プロトンのフラックスの上昇率の違いから、gradual event と impulsive event に分けられ(図2)、それぞれ、プロトンの加速がフレア起源と CME に伴う衝撃波起源であるとされる。gradual event では、相対的にゆっくりとフラックスが上昇し、その後、衝撃波の後ろ側に捕捉された粒子が観測されるのが特徴である。組成は、プロトンが 80 ~ 90 %、 α 粒子が 10 ~ 20 %、重粒子が 1 %程度といわれる。impulsive event は gradual event と比較して、フラックスが急激に上昇し、ヘリウム同位体比 $^3\text{He}/^4\text{He}$ や重イオンの

割合が高い。

太陽から地球へのプロトンの伝播は、フレアの発生場所や惑星間空間磁場に依存する。図3は太陽面でのフレアの発生位置と地球との位置関係によって、地球でどのように太陽プロトンのフラックスが観測されるかを示したものである。フレアが太陽面の西側で生じた場合、フラックスの急な上昇が見られるが、それに対して、東側で生じた場合、相対的にゆるやかな上昇が見られる。また、特に、impulsive event の場合には、西側で生じたフレアによって生じたプロトンが地球に伝播する傾向がある(図4)。この原因は、惑星間空間磁場がパーカースパイラルの方向に向いていることと、プロトンが磁場に平行方向に進みやすく、垂直方向の拡散が相対的に小さいことによる。

太陽プロトン現象は人間生活にも影響を与える。フレアに伴い発生した高エネルギープロトンは、30分から数時間で地球に到達する。一部は磁気圏に入り込み、宇宙飛行士の被曝につながる最

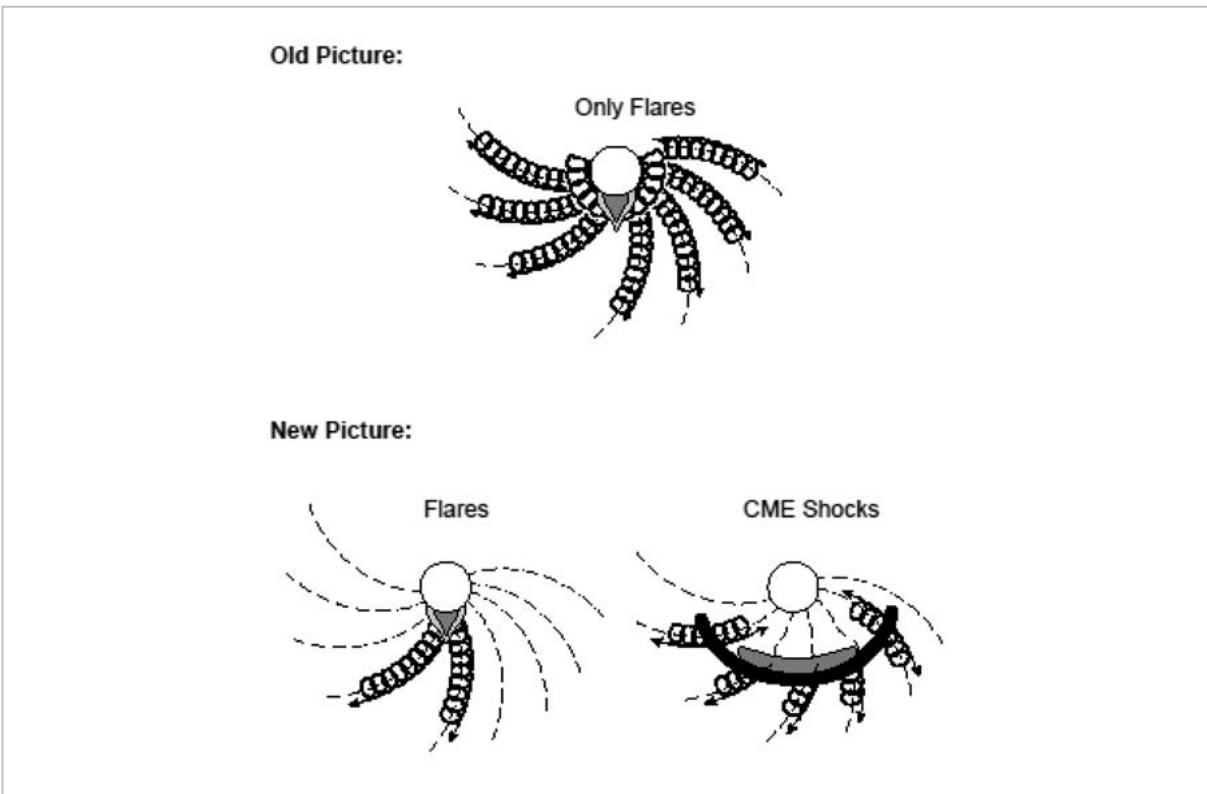


図1 太陽プロトンの加速源の模式図(出典[4])

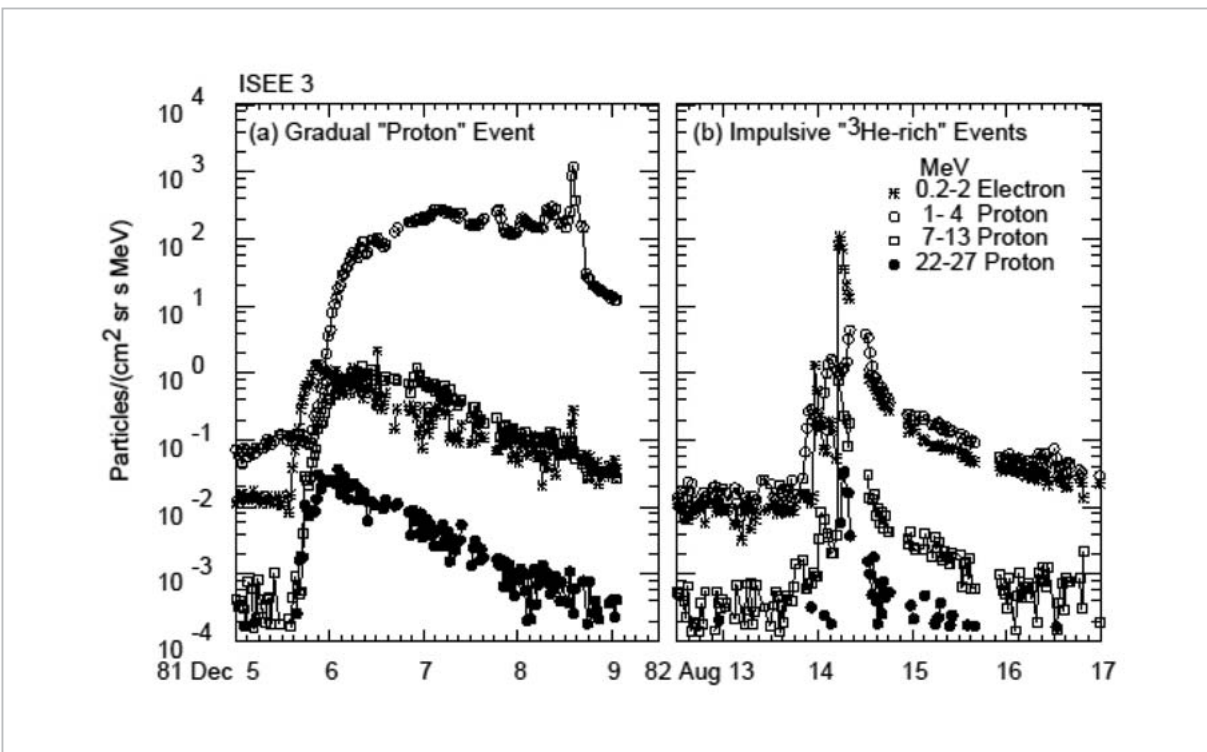


図2 (a) gradual event、(b) impulsive event の強度対時間のプロフィール(出典[4])

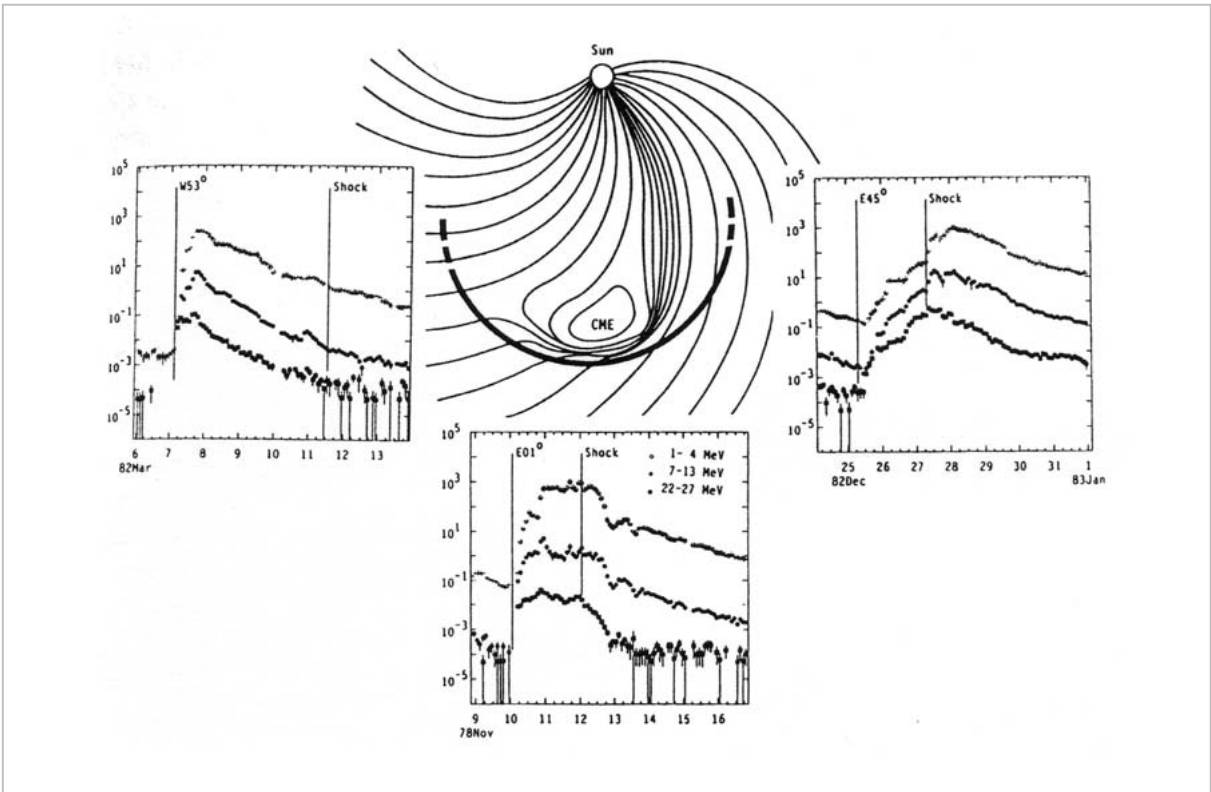


図3 CMEと惑星間衝撃波に対して、太陽の異なる経度から見た、典型的な3つのイベントの強度対時間のプロファイル(出典[4])

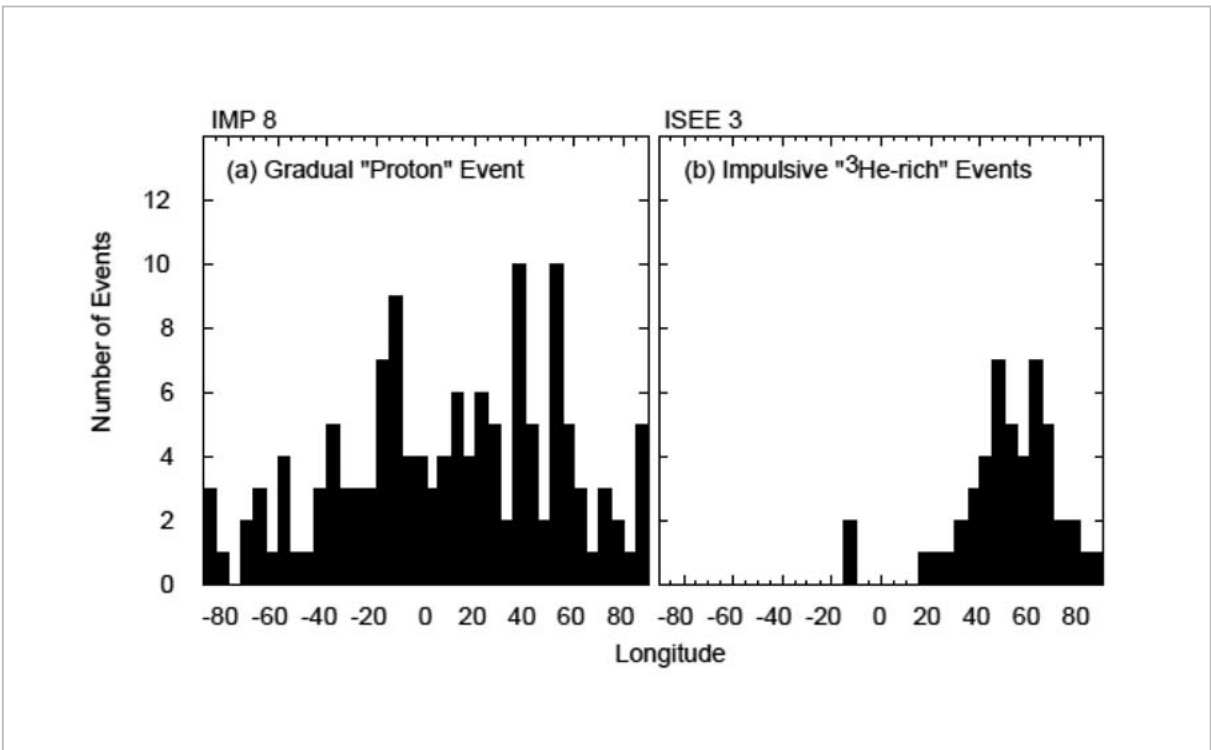


図4 太陽プロトン現象の発生源の、太陽面における経度分布。(a) gradual event、(b) impulsive event(出典[4])

も大きな脅威となる。また、赤道面の静止衛星軌道に達したプロトンは、衛星機器の半導体にエラーを発生させたり、太陽電池パネルを劣化させたりするなどの障害を引き起こすことがある。実際、1989年に頻発した太陽プロトン現象のため気象衛星や放送衛星の太陽電池が著しく劣化し、1回のプロトン現象で数年分の劣化が生じたこともある。

一方、太陽プロトンは中低緯度の電離圏に達することはできないが、地球の磁力線沿いに極域の電離圏には入り込むことができる。その結果、極軌道の周回衛星や二次的に放射されたX線によって極周りの航空機に影響を及ぼすこともあるといわれている。極域電離圏に達した太陽プロトンによって、電離圏は強く電離され、極域を伝播する短波通信が影響を受ける極冠帯異常吸収が発生することがある。極域を航行する航空機は短波を通信手段として使うこともあり、大きく影響を受けることになる。

太陽プロトンがどの緯度まで到達できるかを示したものが、カットオフ緯度と呼ばれるものである。これについては、古くはStörmerの理論に始まり、旧電波研究所においても、磁気嵐時のカットオフ緯度の変化の研究がおこなわれた[5]。昨今ではスペースシャトル等に搭載された機器により、カットオフ緯度に関する、より精密なモデルが作られている[6]。

2 本研究の目的

太陽プロトンの地球磁気圏への入り込みについては、これまで理論からも観測からも多くの研究がなされているが、これまでの理論研究の多くは、磁気圏の電磁場に静的なモデルが使われていた。より現実に近い磁気圏の電磁場構造が、昨今のグローバルMHDシミュレーションによって再現されるようになってきたので、シミュレーションデータを用いれば、現実の磁気圏のトポロジーを正確に考慮した研究ができるはずである。近年このような観点から、MHDシミュレーションのデータを用いて、太陽プロトンの地球磁気圏内の伝播について再検討が行われている[7]–[9]。

太陽プロトンと地球磁気圏との相互作用は、プロトンのサイクロトロン半径と地球の磁気圏のス

ケールの大小により分類できる。まず、50 MeV程度以上のプロトンは、惑星間でのサイクロトロン半径が磁気圏より大きいので、磁気圏にほとんど影響されない。次に、100 keV程度以下のプロトンは、太陽風の熱的粒子であり、磁気圏の磁場により運動を制限される上に、電流を担うので磁場を変化させる。ただし、エネルギーが低いので、被曝や搭載機器の放射線問題にはつながらにくい。一方、それらの間である、100 keVから50 MeV程度のプロトンは、磁気圏の磁場に影響を受ける。しかし、数が少ないため、磁場をほとんど変化させない。したがって、このエネルギー帯のプロトンをシミュレーションする際には、電磁場を与えてテスト粒子として追跡して扱うことができる。すなわち、MHDシミュレーションで電磁場を与え、加えて、テスト粒子シミュレーションをおこなうことにより、このエネルギー帯のプロトンを取り扱うことができる。この扱いにより、これまでNICTにおいて取り組んできた「リアルタイム磁気圏シミュレーション」を生かしながら、さらに、有人飛行や搭載機器の放射線問題にかかわる宇宙天気の実用的課題に取り組むことができる。

本研究では、グローバルMHDシミュレーションから得られた電磁場の中で、太陽プロトンの地球磁気圏への入り込みのシミュレーションをおこなう。太陽風の上流側から100 keVから10 MeVの範囲のプロトンの軌道を追跡した。このエネルギー帯のプロトンは、上述の類型で言えば、磁気圏の電磁場をほとんど変化させないと考えられるが、サイクロトロン半径が磁気圏のスケール以下か同程度なので、磁気圏の電磁場に軌道が影響を受ける。

3 方法

グローバルMHDシミュレーション[10]から電磁場のデータを得て、プロトンの軌道追跡の計算をおこなった。MHDモデルにおいては、太陽風の密度を10.0/cc、速度を350 km/sとし、惑星間磁場はGSM座標系において、各成分を、 $B_x=0$ 、 $B_y=-2.5$ nT、 $B_z=4.2$ nT、あるいは、 -4.2 nTと設定した。格子数は、変形球座標[10]において、 $56 \times 58 \times 40$ とし、南北対称(双極子の傾きはなし)とした。

粒子の注入位置は、太陽風の上流側で磁気圏を取り囲む、(1) $0 < x < 30, 0 < y < 30, 28 < |z| < 30$, (2) $0 < x < 30, 28 < |y| < 30, 0 < z < 30$, (3) $28 < x < 30, -30 < y < 30, -30 < z < 30$ の各領域とした。与えたエネルギーはラン1回あたりでは単一(温度0)で、ピッチ角分布は等方的とし、粒子注入は期間中一定とした。相対論効果を含む運動方程式を、4 から 70 Re (地球半径) の領域で数値的に解いて、プロトンの軌道を追跡した。

4 結果

MHD シミュレーションのデータを用いれば、特に、電磁場の時間変化に伴う粒子加速を扱うことができる。これまで、地球近傍で太陽プロトンの加速があるかどうか理論的にはあまり注目されてこなかったが、本研究では、太陽風の密度が急増したとき、バウショックにおける太陽プロトンの加速に注目する [11]。バウショックとは超音速の太陽風中にある地球の太陽側に生じる衝撃波である。

太陽風の密度は $10.0/\text{cm}^{-3}$ から $30.0/\text{cm}^{-3}$ (動圧では、2 nPa から 6 nPa) に増加させた。Bz の符号は正とした。先にプロトン現象が起こっていて、あとから惑星間衝撃波が到達する場合を想定している。

密度急増後、電離圏側へのプロトン到達量の増加と到達緯度の低下が見られた。特に、図5に示すように、注入時のエネルギーが 100 keV のプロトンに顕著な加速があり、一部には 300 keV にまで達するものが見られた。

図6は、ある 100 keV のプロトンの軌道を白線で表したものである。このプロトンは 200 keV 以上まで加速されていた。加速されたのは、バウショックにほぼ沿って運動しているときで、軌道やプロトンの受ける電磁場を解析するとバウショックを何度も横切っていることがわかった。この場合のバウショックは準垂直衝撃波であり、ショックドリフト加速を受けたと考えられる。バウショック領域で加速された後は、カスプの上空から地球磁場に捕捉され、朝側から夜側へ地球磁気圏内をドリフト運動している。

ショックドリフト加速は、下流側のほうが上流側より磁場が強くなるため、衝撃波面が入射粒子

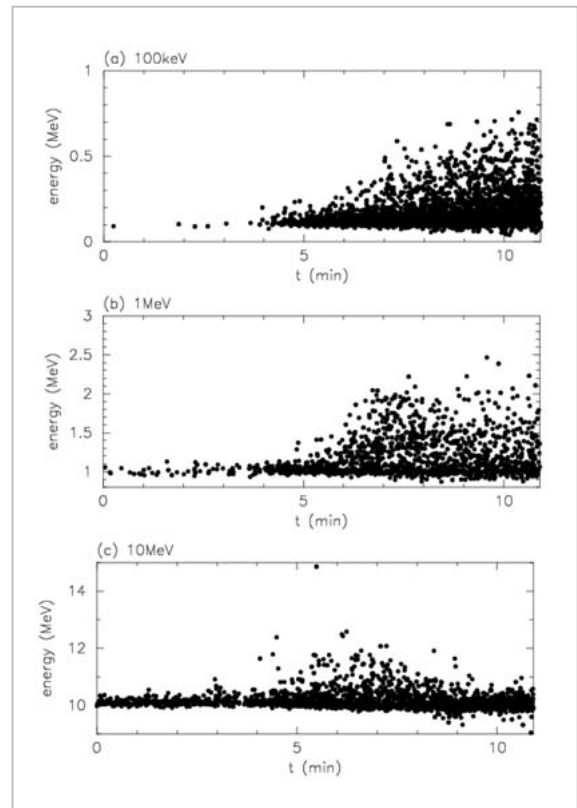


図5 惑星間衝撃波が到達前後の太陽プロトンのエネルギー分布の計算結果(出典 [11])

初期エネルギーが (a) 100 keV、(b) 1 MeV、(c) 10 MeV のものを表す。時刻4分前後に惑星間衝撃波が地球磁気圏に到達している。

に対して反射面の役割をはたすことによって生じる。反射粒子は衝撃波面に沿って勾配ドリフトをしながら進み、衝撃波の静止系における電場により加速を受ける。反射粒子のサイクロトロン半径が衝撃波の曲率半径や構造の大きさよりも小さい場合、この粒子はサイクロトロン運動に伴い何回も衝撃波面を横切ることができ、大きな加速を得ることができる [12] - [16]。

衝撃波の下流側に達する、100 keV 程度のエネルギーをもつプロトンのピッチ角分布についても、曲がった衝撃波におけるショックドリフト加速を扱った研究 [15] と同様、45 度付近にピークが見られた。したがって、この事実もショックドリフト加速が起こっていることを示している。

人工衛星による観測においても、地球のバウショックでショックドリフト加速を受けていると考えられるプロトンが存在することが知られている [17][18]。IMP8、IMP7 衛星により、準垂直衝撃

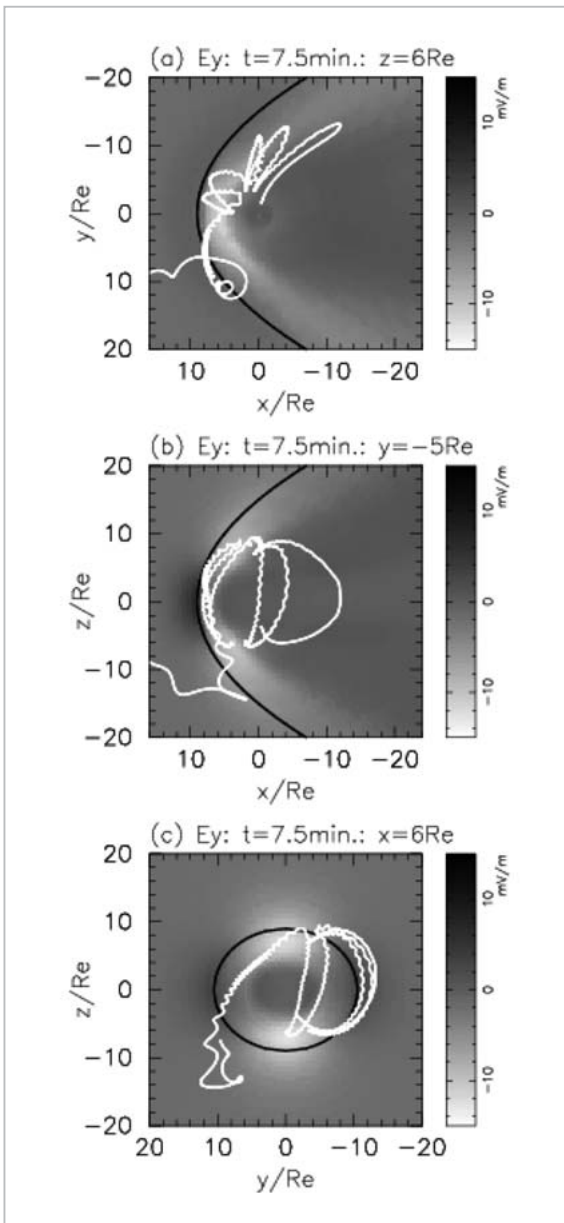


図6 太陽プロトンの軌道例(白線)
 背景の濃淡は電場の東西成分を表す。黒い曲線はバウショックの位置である。3つのパネルは、それぞれ一つの現象を3つの断面から見たものである(出典[11])。

波の近傍でプロトンが加速されているのが観測されている。このことを、比較的近い条件のもとシミュレーションで初めて示すことができた。

静穏な条件の下でのシミュレーションの結果では、100 keV のプロトンは内側境界 (4 Re) まで到達できなかった。しかし、太陽風の密度が急増したときには、このエネルギー帯のプロトンはショックドリフト加速を受け、エネルギーが高くなり、地球近傍まで到達できることがわかった。

カットオフ緯度に関しては、太陽風の密度の急増にともなう、プロトンの加速と、磁気圏の圧縮の両方の効果で下がるのがわかった。

惑星間空間磁場の南北成分を北向きから南向きにした場合の計算もおこなった。一般に、惑星間空間磁場が南向きの場合、地球磁気圏の擾乱が生じることがよく知られている。計算の結果、1 MeV 程度以下のプロトンは、惑星間磁場に南向き成分があるときのほうがより多く、より低緯度まで進入できる(カットオフ緯度が低くなる)。しかし、プロトンのエネルギーの大きな変化(加速)は見られなかった[19]。この点が、密度を急増させた場合との大きな違いである。

5 まとめ

本研究では、グローバル MHD シミュレーションから得られた電磁場の中で、太陽プロトンの地球磁気圏への入り込みのシミュレーションをおこなった。太陽風の上流側から 100 keV から 10 MeV の範囲のプロトンの軌道を追跡した。太陽風の密度が急増した後は、プロトンの到達量が増加しカットオフ緯度の低下がみられた。

プロトンがバウショックでショックドリフト加速を受けるのが見られたが、ショックドリフト加速を受けるのは、バウショックの静止系から見た下流側での電場の大きさから、1 MeV 程度以下のエネルギーのプロトンである。それに対して、地球の低高度まで入りやすいのは、100 keV 程度以上のエネルギーのプロトンである。したがって、この間の 100 keV から 1 MeV 程度のエネルギー帯では、地球の低高度まで達したプロトンがバウショックでショックドリフト加速を受けている可能性がある。

本研究では、MHD シミュレーション結果を利用した高エネルギー粒子追跡の手法が、太陽プロトンなどの加速現象の解明に大きく役立つことを示した。特に、現実の磁気圏に近い電磁場を使って粒子の軌道を正確に追跡できるので、太陽プロトンの到来予測の実現に大きく寄与できるものである。

なお、太陽プロトン現象自体の強度や組成の予報モデルをつくることは重要であるが、現状ではたいへん困難である。また、実用面では、有人飛

行や搭載機器の放射線問題について、むしろ巨大プロトン現象(1サイクルに1回あるかないかの規模)に一度でも遭遇するかどうかのほうの問題であるといわれている。今後は、このような方向性の研究も進めていく必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、田中高史先生(九州大学大学院理学研究院)をはじめ、NICTの関係者の皆様や、議論をしてくださった多くの方々のお世話になりました。

参考文献

- 1 羽倉幸雄, "太陽高エネルギー粒子現象の諸問題", 電波研究所季報, Vol.20, pp.365-376, 1974.
- 2 鰻目信三, "太陽フレア予報-特にプロトンフレアの予報", 電波研究所季報, Vol.25, pp.171-172, 1979.
- 3 河野毅, "太陽プロトン現象", 通信総合研究所季報, Vol.35, No.特7, pp.99-102, 1989.
- 4 D. V. Reames, "Particle acceleration at the sun and in the heliosphere", Space Sci. Rev., Vol.90, pp.413-491, 1999.
- 5 T. Obayashi, "Geomagnetic storm effects on charged particles", J. Geomagn. Geoelectr., Vol.13, pp.26-32, 1961.
- 6 D. F. Smart, M. A. Shea, M. J. Golightly, M. Weyl, and A. S. Johnson, "Evaluation of the dynamic cutoff rigidity model using dosimetry data from the STS-28 flight", Adv. Space Res., Vol.31(4), pp.841-846, 2003.
- 7 R. L. Richard, M. El-Alaoui, M. Ashour-Abdalla, and R. J. Walker, "Interplanetary magnetic field control of the entry of solar energetic particles into the magnetosphere", J. Geophys. Res., Vol.107, doi:10.1029/2001JA000099, 2002.
- 8 B. T. Kress, M. K. Hudson, K. L. Perry, and P. L. Slocum, "Dynamic modeling of geomagnetic cutoff for the 23-24 November 2001 solar energetic particle event", Geophys. Res. Lett., Vol.31, doi:10.1029/2003GL018599, 2004.
- 9 J. M. Weygand, and J. Raeder, "Cosmic ray cutoff prediction using magnetic field from global magnetosphere MHD simulations", Ann. Geophys., Vol.23, pp.1441-1453, 2005.
- 10 T. Tanaka, "The state transition model of the substorm onset", J. Geophys. Res., Vol.105, pp.21081-21096, 2000.
- 11 H. Shimazu, and T. Tanaka, "Simulation of entry of shock-drift-accelerated solar energetic protons into the magnetosphere", J. Geophys. Res., Vol.110, A10105, doi:10.1029/2004JA010997, 2005.
- 12 B. U. Ö. Sonnerup, "Acceleration of particles reflected at a shock front", J. Geophys. Res., Vol.74, pp.1301-1304, 1969.
- 13 T. Terasawa, "Energy spectrum and pitch angle distribution of particles reflected by MHD shock waves of fast mode", Planet. Space Sci., Vol.27, pp.193-201, 1979.
- 14 R. B. Decker, "Computer modeling of test particle acceleration at oblique shocks", Space Sci. Rev., Vol.48, pp.195-262, 1988.
- 15 J. Giacalone, "Shock drift acceleration of energetic protons at a planetary bow shock", J. Geophys. Res., Vol.97, pp.8307-8318, 1992.
- 16 M. Vandas, "Shock drift acceleration of electrons: A parametric study", J. Geophys. Res., Vol.106, pp.1859-1871, 2001.
- 17 G. C. Anagnostopoulos, and G. D. Kaliabetsos, "Shock drift acceleration of energetic ($E > 50$ keV) protons and ($E > 37$ keV/n) alpha particles at the Earth's bow shock as a source of the magnetosheath energetic ion events", J. Geophys. Res., Vol.99, pp.2335-2349, 1994.

- 18 G. C. Anagnostopoulos, and E. T. Sarris, "Dominant acceleration processes of ambient energetic protons ($E > 50$ keV) at the bow shock: Conditions and limitations", Planet. Space Sci., Vol.31, pp.689-699, 1983.
- 19 H. Shimazu, T. Tanaka, T. Obara, and M. Den, "Dependence of the cutoff latitude of solar energetic protons on the southward component of the IMF", Adv. Space Res., Vol.38(3), pp.503-506, 2006.



しま ひろし
島津浩哲

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 博士(理学)
宇宙空間物理学