

# 静止軌道磁場の変化に伴う 10MeV プロトンの異常増加

小原 隆博（東北大），新田 就亮（ロッキード），八代 誠司（カトリック大）  
岡 光夫（UC バークレー），塩田 大幸（情通機構），一本 潔（京都大）

## 概要

静止軌道での磁場の引き伸ばし(thinning)に伴い、10MeV プロトンのフラックスが急激に増加した例が見つかった。磁気圏外・太陽風中では対応する 10MeV プロトンの更なる増大が見られなかったことから、10MeV プロトンの増加は、磁気圏内部のダイナミクスが関与した事になる。10MeV プロトンを観測した GOES13/15 衛星の地方時は夕方で、プロトンの増加は、磁場引き伸ばし(thinning)の開始から始まった。同じく GOES 衛星で計測している 2MeV 電子のフラックスは、磁場引き伸ばし(thinning)の開始で減少し、その後の双極子化(depolarization)で増加したが、10MeV プロトンは、双極子化(depolarization)では減少せずに、フラックスを維持した。一方、朝側の地方時に位置していた DRTS 衛星でも、同じタイミングで 10MeV プロトンの増加を観測した。

GOES13/15 及び DRTS 衛星位置での 10MeV プロトン増加に先立つこと 3 時間前、太陽風衝撃波が地球磁気圏に到達した。この時、DRTS 衛星は 1~5MeV の太陽プロトンの増加を観測した。これらの 1~5MeV プロトンは、その後、半日に亘って静止軌道位置に存在していた。10MeV プロトンも、衝撃波の到来によって磁気圏に侵入したと考えられるが、エネルギーが大きいことから、静止軌道位置には達せずに周辺に存在していた。そして、磁場の引き伸ばし(thinning) が起きたことによって、10MeV プロトンが静止軌道位置まで到達できたと考えると、現象の説明は出来そうである。

## 1. はじめに

太陽起源の放射線粒子である太陽プロトンは、現在では、かなりの割合で CME（コロナ質量放出）に伴う衝撃波で生成され则认为られている(Shimazu and Tanaka, 2005 and references therein)。これらのプロトンは、非常にしばしば地球の静止軌道衛星位置まで到達し、衛星異常を引き起こすなど、宇宙の安全な活動維持に支障を起こしている（小原, 2010, 2011）。

太陽プロトンの地球磁気圏への侵入を考えると、50MeV 以上のプロトンはサイクロトロン半径が大きいので、磁気圏の影響を受けない。一方、100keV から 10MeV のプロトンは、磁気圏の影響を受ける(Shimazu and Takana, 2005)。よって、CME 到来やサブストーム発生など、磁気圏の磁場形状が大きく変化するとき、1~10MeV プロトンの挙動を調べる事は、磁気圏磁場変化とプロトンダイナミクスの関係を調べる上で、意義ある取り組みである。

本研究は、2011 年 6 月 4~5 日のイベントを題材に、静止軌道での 10MeV プロトンの増加について解析したものである。このイベントの発生は、磁気嵐主相(main phase)にあたり、10MeV プロトンの増加は、サブストームの発生と密接な関係があった。こうした例を、最近の GOES データで探したが、同様の例は見出せなかった。非常に稀有ではあるが興味深いイベントなので、以下に報告する。

## 2. 2011 年 6 月 4 - 5 日イベントの背景

下図 1 に、2011 年 6 月 4 日から 6 日にかけての宇宙環境の状況を示す。

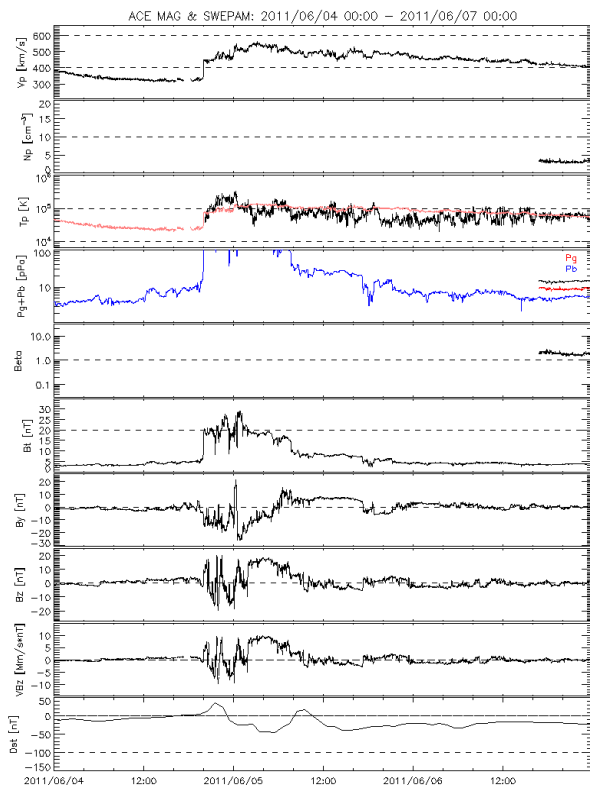


図 1: 2011 年 6 月 4 日から 6 日にかけての宇宙環境の状況

2011年6月4日20時UTに、L1位置にいたACE衛星は、太陽風衝撃波を観測した。この衝撃波が21時UTに地球に到達し、磁気嵐の初相が始まった。図1の最下のパネルにDst指数が示されているが、ダブルピークを持つ磁気嵐で、嵐は6日まで続いた。

この磁気嵐を起こしたCMEを図2に縦線で示した。CMEは、6月4日6時48分に発生した。発生位置がN16W144、CMEのスピードは1400km/sと識別された。STEREO-Aは、W94に位置していたので、時間遅れ少なく、10MeVプロトンを観測した。STEREO-Bは、E93にいたので、10MeVプロトンの増加は、1日以上先で、しかも増加は些少であった。地球の静止軌道上のGOES衛星は、翌6月5日に入って、プロトンの

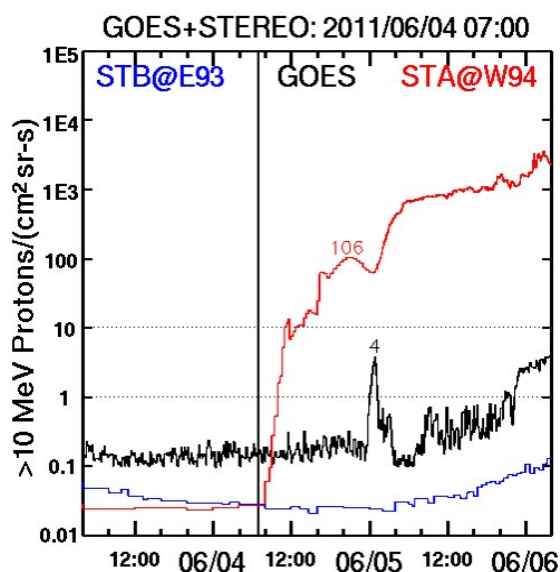


図2: 2011年6月4～5日の10MeVプロトンの状況

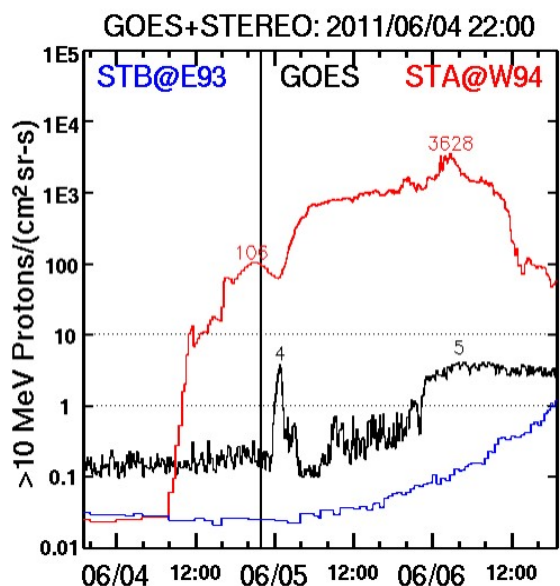


図3: 2011年6月4～5日の10MeVプロトンの状況

増加を観測した。GOES衛星が観測したプロトンフラックスの値は、 $4/(\text{cm}^2\text{sec sr})$ であった。このプロトンの増加が本論文で主題である。

引き続き、CMEが6月4日22時05分に発生した。その様子を図3に示す。CME発生位置はN16W153、CMEスピードは2425km/sと識別された。STEREO-AはW94に位置していたので、時間遅れ少なく更なる10MeVプロトンの増加を観測した。STEREO-Bは、特段の影響を受けなかった。

### 3. 10MeVプロトン増加イベント (GOES 観測)

本論文で扱うイベントを図4に示す。GOES衛星での10MeVプロトンの増加が、6月5日0UTに確認されている。同じ時間、L1地点にいたSOHO衛星は、SEPは観測したものの特段大きな値ではなかった。このことから、GOES衛星が観測した10MeVプロトンの異常増加は、磁気圏由来のプロトンのものであると思われる。

更に、GOES, SOHO衛星が共に、6月5日8時UTからプロトンの増加を観測している。図3に示した6月4日22時05分発生したCMEがもたらしたプロトンを、8時UTからGOES, SOHOが観測したと思われる。

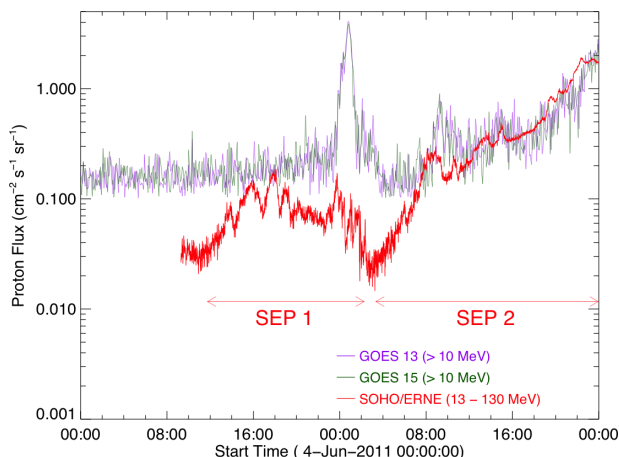


図4: GOES と SOHO の 10MeV プロトンの観測結果

図5にGOES衛星の観測データを示す。図は上から、10MeVプロトンのフラックス、磁場の地球向き成分、そして磁場の東向き成分である。6月5日0時UTから、磁場の西向き成分と地球向き成分が増大している。GOES衛星は、この時、夕方の地方時にいたことから、磁場の夜側への引き伸ばし(thinning)が始まったことが分かる。磁場のこの大きな変化に伴って、10MeVプロトンフラックスの増大が確認されている。

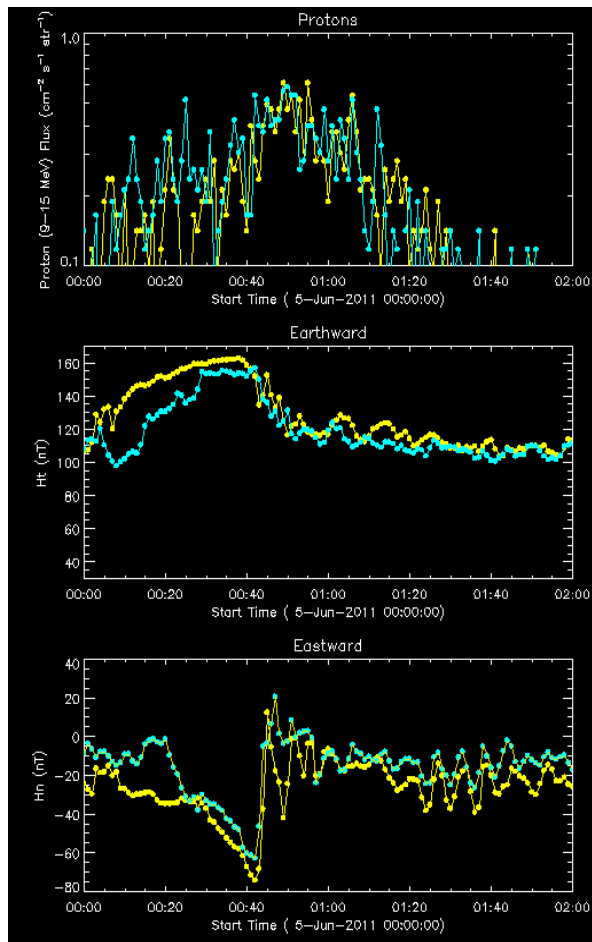


図5: GOES 衛星が観測した 10MeV プロトンフラックスと磁場の変動

伸ばされて磁場は、0 時 40 分過ぎに元の状態に戻った。双極子化(depolarization)が起こったのである。注目したい事は、10MeV プロトンフラックスの増大が、その後、1 時 30 分ごろまで継続している事である。

比較する目的で、2MeV 電子フラックス観測データを図 6 に示す。電子フラックスの減少は、磁場の引き伸ばし(thinning) から始まっていた。図中、黄色のプロットが GOES13 (75W)を、水色のプロットが GOES15 (135W)を示す。GOES13 の地方時は 6 時頃、GOES15 の地方時は 10 時ごろである。電子フラックスの減少が 6 時から 10 時へと伝わっていったことが分かる。これは、磁場の thinning が GOES13 の方が先行していたことと符合する。

図 6 の 0 時 40 分を注目すると、2MeV 電子のフラックスが GOES13, GOES15 とともに元のレベルに戻っていた。10MeV プロトンが thinning の開始で増加したと対照的に、2MeV 電子は減少した。プロトンと電子の挙動のこのような違いが、物理メカニズムを考える際、重要なヒントになるので注目したい。

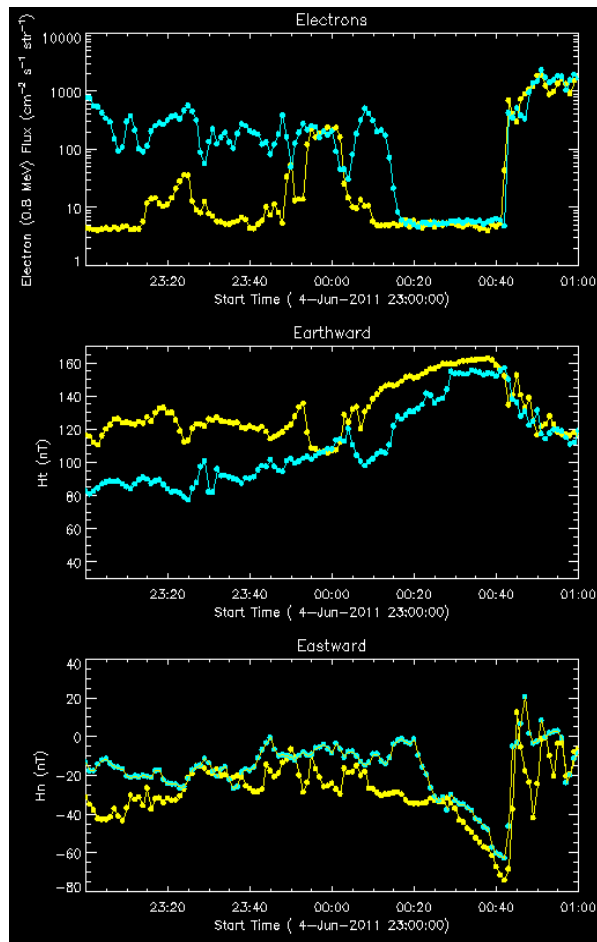


図6: GOES 衛星が観測した 2MeV 電子フラックスと磁場の変動

#### 4. 10MeV プロトン増加イベント (DRTS 観測)

GOES 衛星が 10MeV プロトン増加を観測していた時、JAXA の DRTS 衛星は日本上空でプロトンの観測を行っていた。その結果を、図 7 と図 8 に示す。図中、CH4 (赤色) は 1.42-1.96MeV の、CH8 (青色) は 3.7-4.93MeV の、CH11 (緑色) は 8.02-18.34MeV の、そして、CH13 (水色) は 22.29-45.39MeV のエネルギー範囲を示す。

図 8 において 6 月 5 日 0 時過ぎから、CH11 (緑色) のプロトンフラックスが増加した。DRTS でのプロトンの増加は、GOES と同じく 1 時 30 分過ぎまで継続した。DRTS は朝側の地方時に位置していたが、10MeV プロトンの増加のタイミングは、GOES と同じであった。DRTS データのプロトンフラックスの単位は微分フラックスであるので、GOES の観測値と比べてるためには、CH11(8.02-18.34MeV)の値に 10.32 を乗ずる必要がある。この操作を行なうと、GOES と同じく  $4 \text{ cm}^2 \text{ sr}^{-1} \text{ sec}^{-1}$  となる。よって、同じ大きさの現象を、異なった地方時で観測した事になる。

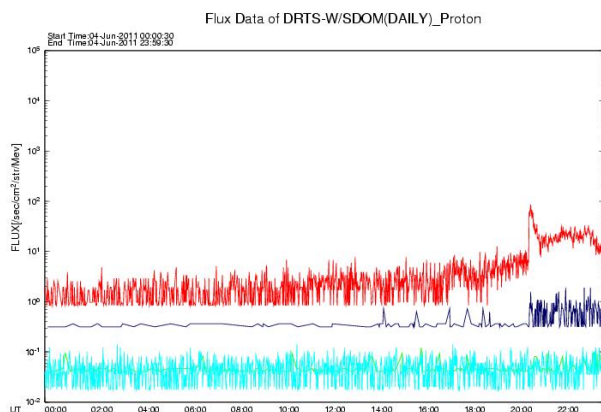


図 7: DRTS が観測した 2011 年 6 月 4 日のプロトンの変動

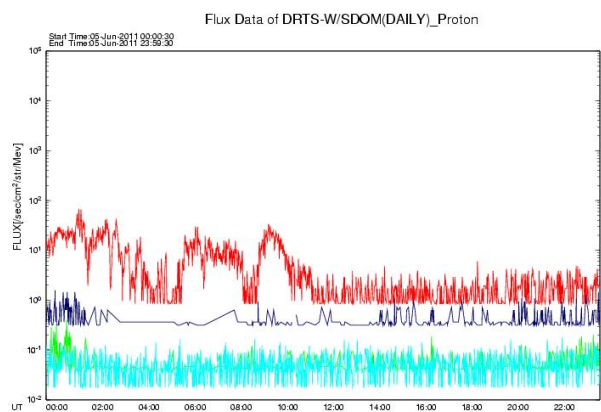


図 8: DRTS が観測した 2011 年 6 月 5 日のプロトンの変動

GOES13/15 衛星及び DRTS 衛星位置での 10MeV プロトン増加に先立つこと 3 時間前 (6 月 4 日 21 時頃), 太陽風衝撃波が地球磁気圏に到達した。この時, DRTS 衛星は, 図 7 に示すように, 1~5MeV のプロトンの増加を観測した。さらに, 図 8 に示すように, 3.7-4.93MeV のプロトンは, 6 月 5 日 1 時ごろに値を下げたが, 1.42-1.96MeV のプロトンは, 6 月 5 日 11 時頃まで高い値を維持した。

## 5. 考察

2011 年 6 月 4 日 21 時に地球を襲った CME 衝撃波は, DRTS 衛星の観測 (図 7, 8) から明らかなように, 地球磁気圏に 1~数 MeV のプロトンを注入した。一方, 10MeV プロトンについては, SOHO での増加が認められなかったことから, CME が地球磁気圏に衝突したタイミングで, 磁気圏界面で発生したものと考えている。事実, CME の磁場強度は ACE 衛星位置 (L1) で, 20nT を超えており, このような非常に磁場の強い CME が地球磁気圏に衝突した場合, ショックドリ

フト加速を起こす可能性を Shimazu and Tanaka (2005) が指摘している。この説明によれば, 生成した 10MeV プロトンは地球磁場の影響を受けながら磁気圏中に侵入できることになる。

電子とプロトンのフラックスの変化を説明するモデルを考えた。

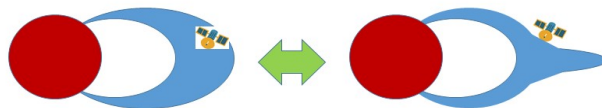


図 9: 磁場の通常状態 (左) と thinning が起きている状態 (右) の模式的図

図 9 中に放射線外帯を青いハッチで示している。放射線帯外帯には, MeV 電子が多く存在している。GOES 衛星及び DRTS 衛星は, 通常の状態では放射線帯の外縁を飛翔している。

磁場の引き伸ばし(thinning)が発生すると, GOES 及び DRTS 衛星は, 放射線帯外帯から相対的に押し出された形になり (図 9 右), そこでの 2MeV 電子のフラックスが激減する。この過程が, 6 月 5 日 0 時 10 分から 0 時 40 分にかけて起こっている。

0 時 40 分に, 磁場の双極子化 (depolarization) が起こると, 図 9 (左) の状態になる。この時, 衛星近傍の 2MeV 電子のフラックスが元の状態に戻る。電子の変化は, 図 9 に示したシナリオで理解され, これは, これまでの指摘と符合する (Friedel, Reeves and Obara, 2002)。

次にプロトンについて考える。10MeV プロトンも, 衝撃波の到来によって, 磁気圏に侵入したと考えられるが, エネルギーが大きいことから, 静止軌道位置には達せずに, 静止軌道以遠に存在していた。そこに, 磁場の引き伸ばし(thinning) が起きたことで, GOES 衛星, DRTS 衛星は, それまで静止軌道以遠にあったプロトンを観測できる事になった。言い換えれば, 磁場 thinning によって, 10MeV プロトンが静止軌道位置まで到達できたと言える。

## 6. まとめ

静止軌道での磁場の引き伸ばし(thinning) に伴い, 10MeV プロトンのフラックスが急激に増加した例が GOES 衛星及び DRTS 衛星で見つかった。GOES 衛星が観測した MeV 電子及び磁場の変化を総合して考えると, 磁場の引き伸ばし(thinning)によって, それまで静止軌道位置以遠にあった 10MeV プロトンが静止軌道位置まで到達したと考えらる。

GOES 及び DRTS が観測した 10MeV プロトンの起源としては、10MeV プロトンの更なる増加が太陽風中では無かったことから、CME 衝撃波が磁気圏境界面で 10MeV プロトンを生成した可能性がある。このことを確認するために、静止軌道以遠の衛星データを調査する必要があるので、今後、進めていく。

一方、解析を行なった 2011 年 6 月 5 日の例は、静止軌道の磁場強度は非常に大きい事が特筆されると共に、発生したサブストームも大規模であった。磁気嵐主相中に発生したサブストームでもあることから、磁気圏尾部での 10MeV プロトンのその場加速も考えられる。他の衛星のデータを詳しく解析する事で、この特異な現象の解明へと繋げていく予定である。

### 【謝辞】

本研究は、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)」研究事業の一環で 2018 年 8 月に開催された SEP に関する共同解析ワークショップ(PSTEP SEP CDAW)にて、第 2 グループのイベント解析として研究が開始された。PSTEP の代表の草野教授並びに PSTEP SEP CDAW 関係各位に感謝いたします。

2011 年 6 月の DRTS 衛星データは、JAXA 松本主幹、古賀主任から見せて頂いた。感謝いたします。

### 【参考文献】

Friedel, R.H.W, G.D.Reeves, and T.Obara, Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere - a review, JASTP, 64, 265-282, 2002

Shimazu, H., and T.Tanaka, Simulation of entry of shock-drift-accelerated solar energetic protons into the Magnetosphere, JGR, Vol.110, A10105, doi:10.1029/2004JA010997, 2005

小原隆博, 第 9 章 宇宙空間と人間, 太陽地球系科学, 京都大学出版会, p.193-209, 2010

小原隆博, 第 1 章 宇宙環境被害と宇宙天気, 総説 宇宙天気, 京都大学出版会, p.1-28, 2011