

放射線帯の宇宙天気予報

片岡龍峰, 三好由純

〈名古屋大学太陽地球環境研究所 〒464-8601 名古屋市千種区不老町〉

e-mail: ryuho@stelab.nagoya-u.ac.jp, miyoshi@stelab.nagoya-u.ac.jp

磁気嵐が発生してから数日間の放射線帯の変化は多種多様であり、これまで予測が困難とされてきました。しかしながら、私たちは過去 10 年間にわたる太陽、太陽風、放射線帯、地磁気の観測データを分析し、コロナホールと関連する磁気嵐では放射線帯が通常よりも静止軌道衛星にとって危険な状態になりやすく、コロナガス噴出と関連する磁気嵐では通常よりもむしろ安全な状態になりやすい、という規則性を明らかにしました。本稿では、新たに得られた知見とともに、人工衛星の安全運用のための放射線帯の宇宙天気予報という実用的な側面についても紹介します。

1. 宇宙の天気

宇宙にも良い天気と悪い天気があります。例えば、オーロラが普通に光っているときは「良い天気」で、いつもより明るく輝くときは「悪い天気」です。では、なぜオーロラが明るく輝くときが悪い天気なのでしょうか。オーロラは電気で光っていますので、明るく輝いているときには、オーロラそのものを含む地球周辺の宇宙空間に、百万アンペアを超える膨大な電流が流れています。そして、ときには、地上の電力送電線ネットワークなどにも数十アンペアを超える誘導電流を引き起こします¹⁾。この誘導電流が原因となり、1989年3月にカナダで10時間に及ぶ大停電が発生したこともあるのです。

宇宙空間の悪い天気といえば、宇宙放射線による人体への影響も考えられます。スペースシャトル、月面着陸、有人火星探査計画などの宇宙活動時の放射線被曝の問題は、宇宙飛行士にとって生死にかかわる問題です。今後は民間人の宇宙旅行も盛んになることが予想されるので、私たちにとっても少しずつ身近な問題になるかもしれません。

また、宇宙まで行かなくても、成田-ニューヨーク間などの北極航路を飛ぶ旅客機に乗れば、地上の100倍くらいの宇宙放射線を浴びてしまいます。強烈な太陽フレアがいったん発生すれば、通常とは桁違いに大量の放射線が何時間も太陽系に吹き荒れるので、そういった放射線に満ちた宇宙環境も、悪い天気と言えるでしょう。

意外に身近なところでも、宇宙の天気の影響が見られます。例えば、天気予報、カーナビ、衛星放送は、人工衛星を用いた宇宙からの撮像、測地、通信技術の恩恵を受けていますが、人工衛星は宇宙空間を飛び回っているわけですから、宇宙の天気の悪影響（この場合は宇宙放射線の増大）を直接受けて、ひどいときには故障してしまいます。本稿では、これらの人工衛星が故障するほど宇宙の天気が悪くなる状況は、数日前の時点で、おおまかには予測できるだろう、という研究結果を紹介しします。

2. 放射線帯とは？

地球の強い固有磁場に覆われた磁気圏と呼ばれる地球周辺の宇宙空間の中でも、最もエネルギー

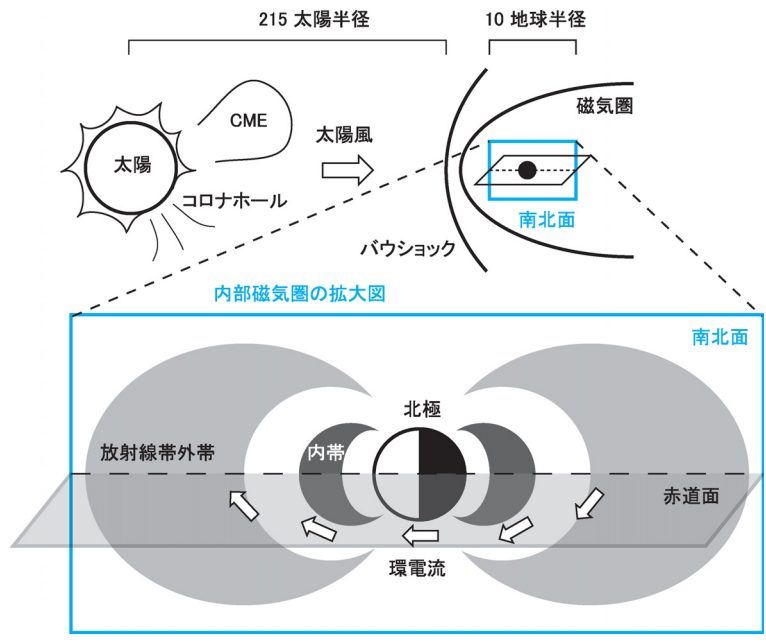


図1 太陽，太陽風，磁気圏の模式図（上）と放射線帯，環電流の模式図（下）．太陽風は地球の固有磁場と相互作用することで磁気圏を形成している．高速太陽風は通常，太陽のコロナホールから流れ出しているが，太陽活動が活発な場合は，コロナガスが突発的に噴出するCMEが高速太陽風の源となる．放射線帯の電子は，外帯と内帯に分かれて分布しており，環電流が急激に強まる磁気嵐に伴って，それぞれダイナミックに変化する．

の高い荷電粒子*1が集まっている領域は，放射線帯と呼ばれます．放射線帯は，発見者の名前をとってヴァン・アレン帯とも呼ばれます．通常，放射線帯は，気象衛星「ひまわり」などが滞在する静止軌道*2の周辺と，その内側に分布しています．放射線帯の存在する領域は，内部磁気圏とも呼ばれたりします．放射線帯の電子の分布は，図1のように二重構造をしており，地球に近い側を内帯，遠い側を外帯と呼びます．つまり，静止軌道衛星が直接影響を受けるのは，この外帯になります．

放射線帯の電子が増えると，人工衛星の故障が起りやすくなります．したがって，放射線帯の電子が増えている状態は，人工衛星にとって悪い

天気である，とすることができます．実際に，2004年2月に放射線帯電子が異常に増加したときはBS放送が中断し，2006年4月の放射線帯電子の異常増加のときには，気象衛星「ひまわり」が長時間にわたって機能停止の状態に陥りました．このような人工衛星の被害を最小限に抑えるためには，放射線帯の電子がいつ，どのように，どれくらい増えるかを知る必要があります．

放射線帯は，磁気嵐と連動して激しく変化します．磁気嵐とは，磁気圏に流れる電流によって地磁気が大きく変化する現象です．磁気嵐の強さの指標であるDst指数*3は，内部磁気圏に流れる西向きの環電流（図1参照）によって，地表の磁場強度がどの程度弱まるかを表しています．磁気嵐

*1 電子のエネルギー範囲は，数百 keV（キロ電子ボルト）から数十 MeV（メガ電子ボルト）．
 *2 赤道面内における地球中心からの距離にして地球半径の 6.6 倍の位置．
 *3 <http://swdcdh.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>

が発達する段階（主相）では、オーロラ活動も活発化します。このとき放射線帯外帯の電子は、どこかへ消え去ります。その後、磁気嵐が弱まり始めると（回復相）、オーロラ活動も弱まりますが、このとき同時に放射線帯外帯が再生していきます。外帯電子が主相でなぜ消え去るのか、回復相でなぜ再生するのかについては、メカニズムがいくつか提唱されていますが、決定的な観測的証拠がないこともあり、いまだに決着していない問題です²⁾。

特に、強い磁気嵐^{*4)}の回復相では、磁気嵐が発生する前と比べて外帯電子が増えるときもあれば減るときもあり³⁾、これまでは、その多様性の原因がはっきりとわからなかったために、その変化を予測することは困難だと思われてきました。この謎を解くために、私たちは、以下に説明する「太陽風の構造」に注目し、観測データを分析しました。

3. 太陽風の構造

磁気嵐や放射線帯の活動のエネルギーの源となっているのは、太陽コロナから超音速で流れ出しているプラズマの風、太陽風⁴⁾です。太陽風は磁気圏と相互作用することで発電し、磁気圏の中に膨大な電流を流し続けています。強い磁気嵐を引き起こすほどの大電力を発電するためには、通常よりも強い磁場^{*5)}をもった太陽風を、何時間も続けて磁気圏に吹き付けなければならないのですが、太陽風の中に、そのような強い磁場を作る方法は限られており、図2に示すように、おおまかに2通りに分類することができます。

一つは、突発的な太陽コロナプラズマの噴出、いわゆるCME⁵⁾です。これは、太陽の強い磁場が、コロナのプラズマとともにひきちぎられて飛び出す現象です。宇宙天文台SOHOは、宇宙空間で人工的な皆既日食を起こすコロナグラフによ

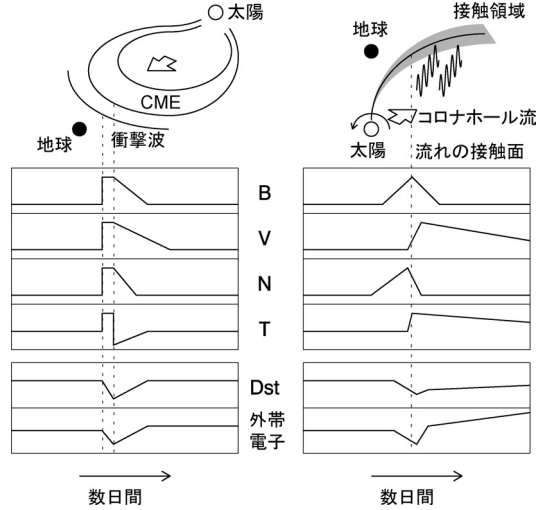


図2 CME（左）とコロナホール（右）に起因する太陽風の模式図と典型的な太陽風パラメーターの変化。上から太陽風の磁場強度 B 、太陽風速度 V 、密度 N 、温度 T 、 Dst 指数、放射線帯外帯電子フラックス。

て、1996年から現在までCMEをモニターし続けています。この磁場の強いプラズマは、太陽を飛び出してから、速いものだと2日程度で地球に到達します。過去に発生した巨大磁気嵐は、ほとんどすべて、そのような速いCMEが原因で発生しています。速いCMEは大抵、その前方の地球側に衝撃波を形成しています。

もう一つは、コロナホールに関連した構造です。軟X線カメラや極端紫外線カメラなどで撮像できる太陽コロナの中に、ぽっかりと穴が開いているかのように見えることから、コロナホールと呼ばれています。コロナホールから流れ出す高速で密度の低い太陽風と、それに隣接する低速で密度の高い太陽風が長時間接触している領域では、プラズマが圧縮されて磁場も強くなっています。この接触領域が地球を通過することでも磁気嵐が引き起こされます。その磁気嵐の規模はCME起源の磁気嵐に比べて弱いものがほとんど

*4 磁気嵐の間の最小 $Dst \leq -100$ nT。 Dst 指数の値が小さいほうが、磁気嵐の規模が大きい。

*5 太陽風磁場の平均は 5 nT 程度だが、強い磁気嵐を引き起こすときは大抵 20 nT 以上に強まる。

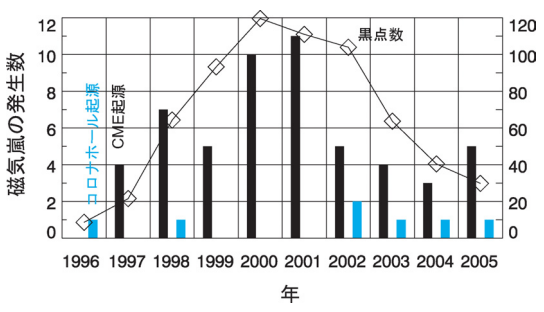


図3 CME 起源の磁気嵐（黒）とコロナホール起源の磁気嵐（青）の頻度分布と太陽黒点数.

ですが、まれに強い磁気嵐を引き起こします⁶⁾。また、地球公転軌道付近での接触領域では、大抵の場合、衝撃波は形成されず、流れの接触面と呼ばれる特徴的な不連続構造が観測されます。地上の天気にとえて、CME は台風のようなもので、コロナホールによる接触領域は寒冷前線のような

ものと考え、違いがよりはっきりするでしょう。

太陽風の強い磁場が磁気嵐を起こすことは、数十年前からよく知られていた事実ですが、その強い磁場の起源を太陽と太陽風の構造で分類し、かつ磁気嵐に伴う放射線帯の変動の違いを論じた研究は、これまでほとんど報告例がありません。その理由の一つは、太陽と太陽風の連続した観測データの不足です。CME なのかコロナホールなのか、強い磁場の原因を正確に見極めるには、太陽と太陽風の連続した観測データの詳細な分析が必要です。また、前述のとおり、コロナホール起源の磁気嵐が、CME 起源の磁気嵐と比べて規模が小さいため、同じレベルで両者を比較することが困難だったことも、理由の一つです。

私たちは、第 23 太陽活動周期（1996 年から 2005 年まで）に発生した強い磁気嵐、88 例の原因

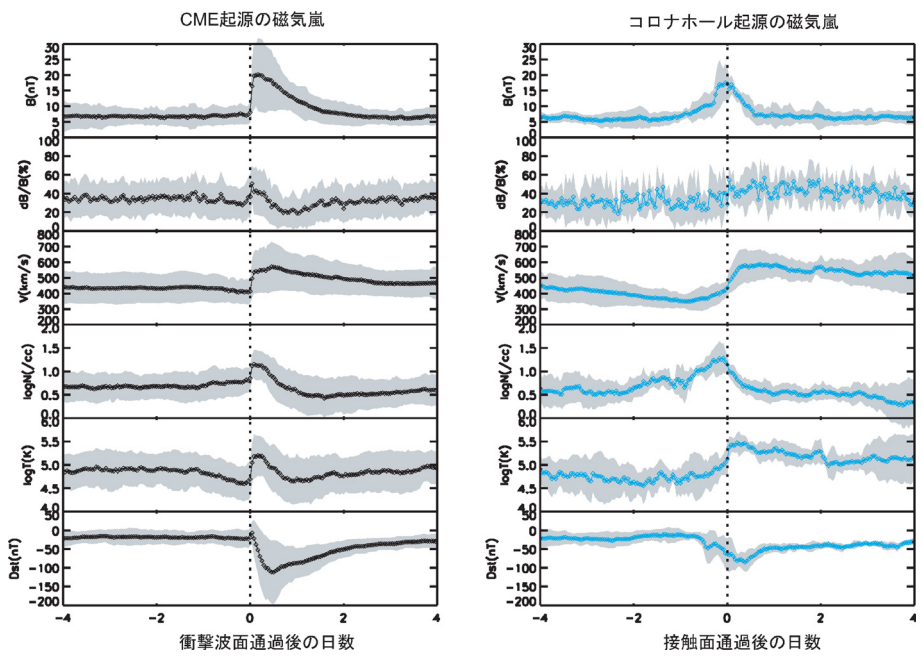


図4 強い磁気嵐を引き起こした CME に伴う衝撃波（左）と、強い磁気嵐を引き起こしたコロナホールに関連する流れの接触面（右）の前後 4 日間における太陽風パラメーターの平均値（太線）と標準偏差（灰）。時間分解能は 1 時間。上から、太陽風の磁場強度 B 、磁場の擾乱レベル dB/B 、太陽風の速さ V 、密度 N 、温度 T 、と Dst 指数.

となった太陽風の構造をすべて分類しました。この分類には、宇宙天文台 SOHO による太陽観測データと、WIND 衛星と ACE 衛星による太陽風の直接観測データを用いています。強い磁気嵐の頻度分布と太陽黒点数を図 3 に示します。前後 4 日間に他の磁気嵐が発生していないような孤立した磁気嵐 61 例のみに絞り、(A) CME と衝撃波が観測されたもの 54 例と、(B) コロナホールと流れの接触面が観測されたもの 7 例に分類しました。A は黒点数の多い太陽極大期付近で多く発生しており、B は太陽極大期付近では発生しないことがわかります。これは、CME が太陽極大期で多く発生し⁶⁾、コロナホールは太陽活動下降期で多く発生するという事実を反映しています。

A について、CME に伴う衝撃波を基準に、前後 4 日間の太陽風の平均的な変化を表したグラフが図 4 の左のパネルです。太線が平均値で、灰色は磁気嵐ごとのばらつきを標準偏差として表しています。太陽風の磁場強度、速度、密度、温度がすべて急激に上昇する衝撃波が、はっきりと中心に現れています。そして、その後数日間は、CME 本体の特徴として知られている、平均と比べて磁場の擾乱レベル⁶⁾と温度が低くなった高速太陽風が観測されています。

B について、流れの接触面を基準に、同様のデータ処理をしたものが、図 4 の右のパネルです。磁場強度が最大となり、速度と温度が上昇し、密度が減少する接触面が、はっきりと中心に現れています。接触面通過後は、CME とは違い温度と磁場擾乱レベルが高い、コロナホールに起源をもつ高速太陽風が観測されています。このように、強い磁気嵐の原因となる太陽風では、太陽での発生原因が異なることによって、地球に到達する平均的な太陽風構造の様相が、はっきりと違ったものになっていることが、太陽風の直接観測か

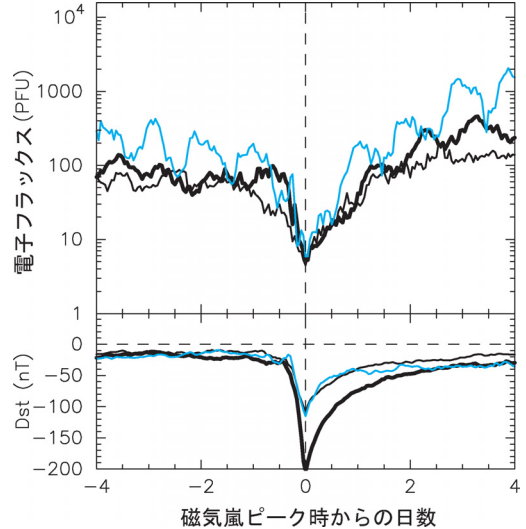


図 5 磁気嵐の際の静止軌道 2 MeV 電子フラックスの平均変化パターン。CME 起源で比較的弱いレベルの磁気嵐 A1 (黒)、CME 起源で比較的強いレベルの磁気嵐 A2 (黒太)、コロナホール起源の磁気嵐 B (青)。

ら明らかになりました。

4. 明日の放射線帯の天気は？

それでは次に、実際の放射線帯の変動を見てみましょう。具体的には、静止軌道に滞在するアメリカの気象衛星 GOES で観測された 2 MeV 以上のエネルギーをもつ電子フラックスについて調べます。磁気嵐が最も発達した時間を基準に、多くの磁気嵐を重ね合わせて平均値を示したグラフが図 5 です。横軸は時間、縦軸が電子のフラックスです。ここで、磁気嵐のレベルを A と B で合わせるために、A の中でも B と同じくらいの比較的弱いレベルの磁気嵐⁷⁾を A1、それよりも強い磁気嵐⁸⁾を A2 として、分けて表しています。

A1 (黒) と B (青) を比較してみると、同じレベルの磁気嵐が発生しているにもかかわらず、電

*6 ある 1 時間における磁場 3 成分の標準偏差の和の平方根を磁場強度で規格化した値。

*7 $-130 \text{ nT} < \text{最小 } Dst \leq -100 \text{ nT}$ 。

*8 $\text{最小 } Dst \leq -130 \text{ nT}$ 。

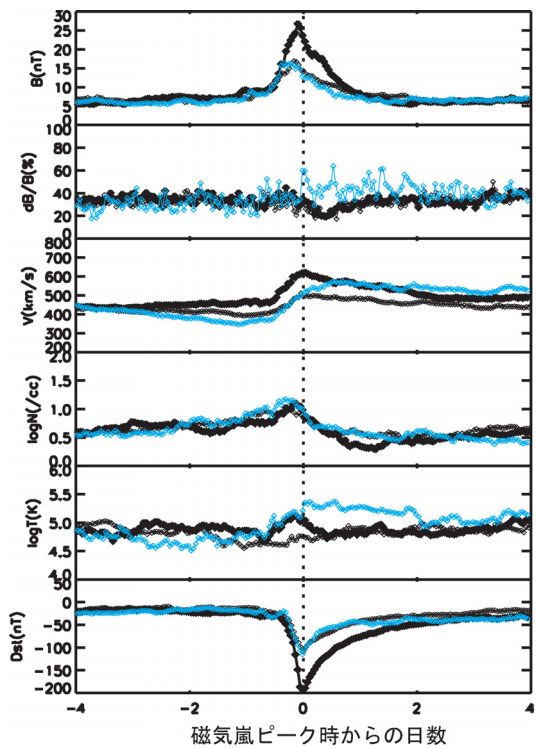


図6 磁気嵐が最も発達した時間の前後4日間における太陽風パラメーターの平均値。CME起源で比較的弱いレベルの磁気嵐 A1 (黒), CME起源で比較的強いレベルの磁気嵐 A2 (黒太), コロナホール起源の磁気嵐 B (青)。書式は図4と同じ。

子フラックスは、A1と比べてBで約2倍速く増加し、最終的にA1の約10倍になっていることがわかります。また、磁気嵐の規模がより大きいA2(黒太)でも、A1と同程度の電子フラックス増加しか見られないこともわかります。つまり、単純に磁気嵐の規模に比例して外帯電子が増えるわけではないことがわかります。磁気嵐と放射線帯外帯は、違った仕組みで発達するのです。

それでは、なぜコロナホール起源の磁気嵐では、放射線帯の外帯が危険な状態になりやすいのでしょうか。この原因を探るため、A1, A2, Bに対応する平均的な太陽風の変動を、図5と同様

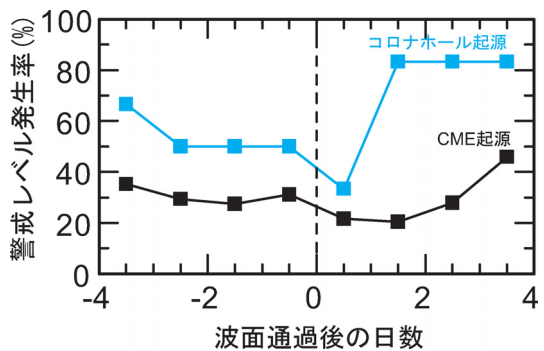


図7 CME起源の磁気嵐(黒)とコロナホール起源の磁気嵐(青)における、衝撃波と接触面通過後の警戒レベル発生確率の日変化。

に、磁気嵐が最も発達した時間を基準に表示しました(図6)。最も顕著な違いは、太陽風速度と太陽風磁場の擾乱レベルに見られます。A1(黒)とB(青)の比較から、高速流と高い磁場擾乱レベルが、外帯電子フラックス増加に有利であることがわかります。また、A2(黒太)とB(青)を比較すると、CMEとコロナホールに関連する太陽風の速度が大きく変わらない場合でも、高い磁場擾乱レベルが外帯電子フラックス増加に有利であることがわかります。

高速風と外帯の電子フラックスの相関が高いことは、過去の研究でも報告例が多く⁷⁾、その関係性を用いた予報ツール⁹⁾も作成されています。しかしながら、私たちの研究結果から、太陽風速度だけではなく、太陽風磁場の擾乱レベルも重要なパラメーターであることが新たにわかりました^{8), 9)}。そして、そのパラメーターの違いは、CMEとコロナホールという、太陽と太陽風の大規模構造に起因していることが明らかになったのです。

アメリカの海洋大気局NOAAに設置されている宇宙天気予報センターでは、GOES衛星で観測される1,000 PFU (1 PFU = 1/cm² sec str) を超え

*9) <http://www.sec.noaa.gov/refm>

る 2 MeV 以上の電子フラックスを標準警戒レベルに設定しています。私たちは、この基準を用いて、CME 起源の磁気嵐の前兆となる衝撃波と、コロナホール起源の磁気嵐の前兆となる流れの接触面通過後の警戒レベル発生確率を調べました(図7)。これは天気予報で例えれば、降水確率になります。コロナホール性の磁気嵐では、放射線帯外帯が通常よりも危険な状態になりやすく、CME と関連する磁気嵐では、磁気嵐自体の規模は大きくなりやすいものの、外帯は通常よりもむしろ安全な状態になりやすいことが、はっきりとわかります。

5. 最後に

以上の結果は、強い磁気嵐のときのみの統計結果なので、実際に適用できる範囲は限られています。磁気嵐ではない期間の放射線帯の変化も含めて確率的な予測を可能とするため、私たちは現在、これまでに観測されたすべての衝撃波と流れの接触面について、警戒レベル発生確率の日変化を調べています。このように、宇宙天気予報の実用面にも貢献すると同時に、新たに明らかになってきた太陽風構造に対する放射線帯変動の依存性を踏まえ、国内外で提案されている次期太陽活動極大期の内部磁気圏探査計画の実施に向けて、より素朴な疑問である「外帯電子が主相でなぜ消えるのか、回復相でなぜ再生するのか」という謎の解明に取り組みたいと考えています。

謝 辞

片岡は、本研究を遂行するにあたり、日本学術振興会から特別研究員 PD として援助を受けています。また、2005 年 3 月にジョージ・メイソン大学で行われた LWS CDAW Meeting の参加者とは、磁気嵐の原因となった太陽風構造に関して有意義な議論をさせていただきました。

参考文献

- 1) Pulkkinen A., Kataoka R., 2006, Geophys. Res. Lett. 33, L12108
- 2) 三好由純, 2006, ISAS ニュース 302, 1
- 3) Reeves G. D., et al., 2003, Geophys. Res. Lett. 30(10), 1529
- 4) 鈴木 健, 2006, 天文月報 99 ,205
- 5) 八代誠司, 2005, 天文月報 98, 409
- 6) Richardson I. G., et al., 2006, J. Geophys. Res. 111, A 07S09
- 7) Baker D. N., et al., 1990, J. Geophys. Res. 95, 15133
- 8) Miyoshi Y., Kataoka R., 2005, Geophys. Res. Lett. 32, L21105
- 9) Kataoka R., Miyoshi Y., 2006, Space Weather, 4, SO9004

Space Weather Forecast of Radiation Belt Electrons

Ryuho KATAOKA and Yoshizumi MIYOSHI

Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Abstract: Radiation belts show various patterns of evolution during a few days after a magnetic storm onset, and the prediction has been a difficult problem. Using a 10 year data set of the sun, solar wind, radiation belts, and geomagnetic field, we show that the outer radiation belt tends to be more dangerous for geosynchronous satellites than usual during storms associated with coronal holes, and that the outer radiation belt tends to be rather safe during storms associated with coronal mass ejections. In this paper, we report our new findings and introduce a practical aspect of space weather forecasting of radiation belts for secure satellite operations.