

太陽風大規模構造に対する相対論的電子マイクロバーストの応答

栗田 怜¹⁾, 三好 由純¹⁾

¹⁾ 名古屋大学宇宙地球環境研究所

地球周辺の宇宙空間には、非常にエネルギーの高い電子が捕捉されている領域が存在し、放射線帯と呼ばれている。人工衛星の観測により、放射線帯電子が地球大気に降り込む「相対論的電子マイクロバースト」と呼ばれる現象が発見され、地磁気擾乱・高速太陽風到来時に頻繁に観測されていることが知られている。マイクロバーストは放射線帯電子の消失過程であるため、発生特性は放射線帯電子の変動を理解する上で重要であると考えられている。本研究では、地磁気擾乱を起こす太陽風の種類に応じて、マイクロバーストの発生頻度の違いを調査した。その結果、マイクロバーストは高速太陽風が地球磁気圏に到来し、太陽風磁場が南向き、かつ速度がより速い条件下で最も頻繁に観測され、2-3日にわたって発生することがわかった。一方で、コロナ質量放出(CME)による磁気嵐の際にもマイクロバーストが観測されるものの、継続時間は12-24時間程度で、高速太陽風時に比べてマイクロバーストによる消失量は小さいと考えられる。

1.はじめに

1.1 地球放射線帯

地球は固有磁場を有しており、太陽から吹き出す磁場とプラズマからなる太陽風と相互作用して、磁気圏を形成する。磁気圏の近地球領域には、非常に高いエネルギーを持つ電子とイオンが捕捉されている放射線帯と呼ばれる領域が存在する。放射線帯の電子は、地磁気じょう乱に伴ってその量の変動することが知られており、典型的には地磁気じょう乱開始時に大きく減少し、後半にはじょう乱時に比べて大きく増加する[e.g., Miyoshi et al., 2003]。こういった放射線帯電子の増加は、人工衛星の障害を引き起こすことが知られており[e.g., Baker et al., 1987]、衛星運用の面から放射線帯電子の増加過程の理解は重要である。

地磁気じょう乱後半の時期に発生する放射線帯電子増加の原因として、放射線帯の外側から電子を供給する外部供給説[Schultz and Lanzerotti, 1974]と、内部で放射線帯電子を作り出す内部供給説[Summers et al., 1998; Miyoshi et al., 2003]の仮説が考えられている。特に、内部供給説の場合、磁気圏に存在する電子によって励起されるコーラス波動とのサイクロトロン共鳴により電子が加速されると考えられている。

1.2 相対論的電子マイクロバースト

低高度・極軌道を周回する SAMPEX 衛星の観測により、1MeV を超えるエネルギーを持つ放射線帯電

子が、1秒以下の時間スケールで間欠的に大気に降り込んでいたことが発見された。この放射線帯電子の降り込みは「相対論的電子マイクロバースト」と呼ばれている[Blake et al., 1996]。相対論的電子マイクロバーストは、コーラス波動によるピッチ角散乱によって引き起こされ[Lorentzen et al., 2001]、地磁気じょう乱時・太陽風速度の大きいときに観測される傾向がある。SAMPEX 衛星の観測によって見積もられた消失量から、マイクロバーストは、放射線帯電子を1日程度の時間スケールで消失させることができると提案されている[O'Brien et al., 2004]。一方で、Van Allen Probes・SAMPEX の連携観測により、マイクロバーストと放射線帯電子加速が同期していることが見出され、マイクロバーストの消失は加速に比べて効率的ではなく、コーラス波動加速の副産物であることが提案されている[Kurita et al., 2016]。

1.3 太陽風大規模構造と放射線帯電子変動

地球磁気圏-太陽風相互作用の過程において、太陽風中に存在する大規模な構造が重要な役割を担っていることがわかっている。太陽面での爆発にともなうコロナ質量放出(Coronal Mass Ejection, CME)と、コロナホールから吹き出している高速太陽風(High speed Solar wind Stream, HSS)の二つが注目されている[e.g., Kataoka and Miyoshi, 2006]。

CME と HSS の典型的な太陽風のパラメータと、磁気圏の応答を図1に示す。CME の場合には、太陽風

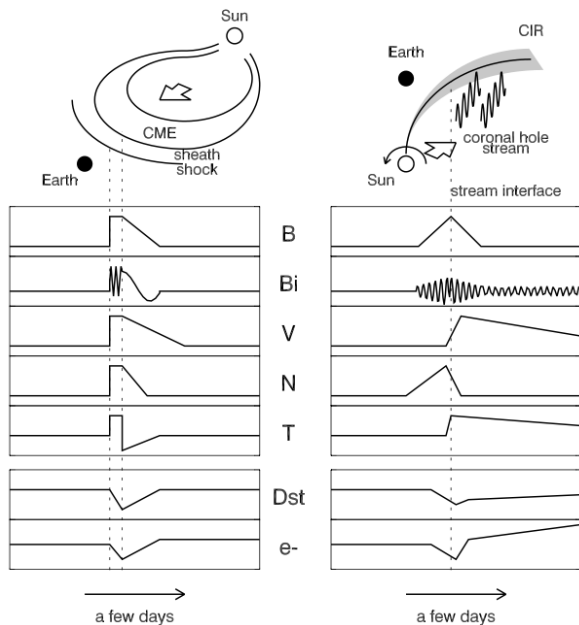


図 1. CME と HSS 到来時の太陽風基本パラメータの典型的パターンを示したもの [Kataoka and Miyoshi, 2006]

のパラメータが不連続に変化したのちに 惑星間空間磁場の南北成分(IMF Bz)の反転に伴い、地磁気じょう乱が進行していく。CME による地磁気じょう乱の場合、地磁気じょう乱は大きくなる傾向にあるが、2~3日程度で回復する。HSS の場合には、低速風と高速風の接触面付近での圧縮により磁場強度・プラズマ圧力の増大が起き、高速太陽風領域にさしかかると乱流的な磁場じょう乱が観測される。一般的に、HSS による地磁気じょう乱は CME に比べて小さい傾向にあるが、高速太陽風領域における磁場じょう乱に起因して地磁気じょう乱が1週間程度続くことが多い。

CME や HSS に対しての放射線帯電子のフラックス変動に関してはこれまで研究がなされてきている。太陽風速度と放射線帯電子フラックスの間の正の相関 [Paulikas and Blake, 1979]や、磁気嵐の大きさと放射線帯の位置の関係[e.g., O'Brien et al., 2003]が知られているが、CME と HSS の場合では、放射線帯のフラックス変動の様子が異なることが近年指摘されている[e.g., Miyoshi and Kataoka, 2005]。HSS 駆動の地磁気じょう乱は、CME 駆動の磁気嵐に比べて放射線帯電子のフラックスが大きく増加する傾向があり、中でも高速太陽風中の IMF Bz が南向きの場合に最も大きく電子フラックスが増大することが近年の研究によりわかっている[Miyoshi and Kataoka, 2008]。

1.4 研究の目的

放射線帯電子の捕捉成分に関しては、太陽風大規模構造への応答がこれまでに研究されてきており、理解が進んでいる。一方で、放射線帯電子の消失過程であるマイクロバーストに関してはこれまでに研究がなく、理解が進んでいない。本研究では、マイクロバーストの発生特性を太陽風大規模構造ごとに superposed epoch analysis を用いて調査し、マイクロバーストが放射線帯電子フラックス変動にどのように寄与しているかを議論する。

2. 使用データと解析手法

本研究では、SAMPEX 衛星に搭載されている Heavy Ion Large Telescope (HILT)[Klecker et al., 1993]のデータを用いて解析を行う。HILT は非常に大きな geometric factor(60cm² str)を持ち、>1MeV の電子を高時間分解能(20-100ms)で計測が可能である。今回の解析では、HILT が 20ms の時間分解能で運用されていた 1996 年から 2007 年までのデータを用いてマイクロバーストを自動判定アルゴリズム [O'Brien et al., 2003]によって同定し、発生頻度を算出した。

CME と HSS による地磁気じょう乱のイベントは、Kataoka and Miyoshi [2006]と Miyoshi et al. [2013]のリストを使用し、CME では Dst 指数の最小値、HSS では流れの接触面到達時の時間を基準として、-3 日から+5 日の間のマイクロバーストの発生頻度を導出する。CME イベントに関して、Dst index の最小値を基準として磁気嵐イベント(CME-driven storm)と大磁気嵐イベント(CME-driven great storm)に分割して解析を行う。HSS イベントに関しては、Miyoshi and Kataoka [2008]にならい、IMF Bz の南向き(SBZ)と北向き(NBZ)の分類と、SBZ 時には太陽風速度が 500km よりも速い場合(SBZ-fast)と遅い(SBZ-slow)場合の計4つのケースにおいて調査した。

3. 解析結果

3.1 高速太陽風に対する応答

SBZ-HSS と NBZ-HSS 時における マイクロバーストの発生特性を図 2 に示す。マイクロバーストは、SBZ-HSS と NBZ-HSS を比較すると、SBZ-HSS 時に頻繁に発生することがわかる。また、高速太陽風到来後、2~4日程度継続して発生することが示されている。

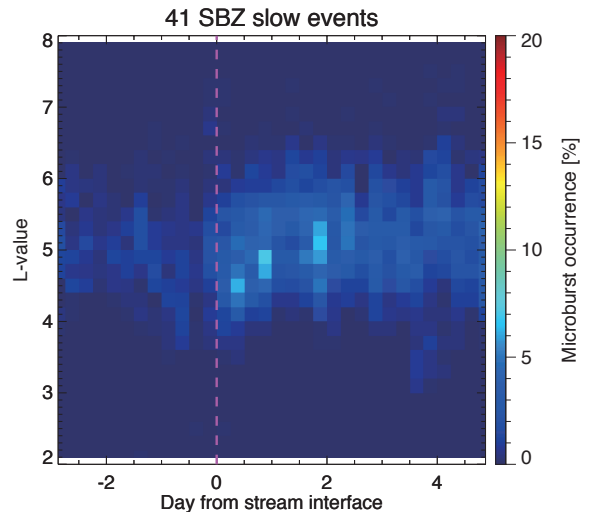
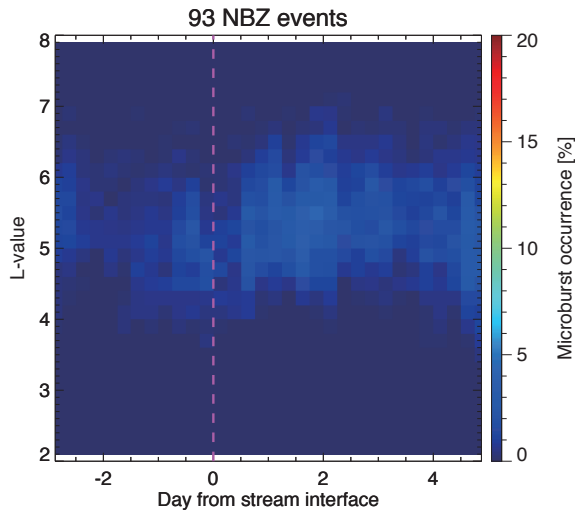
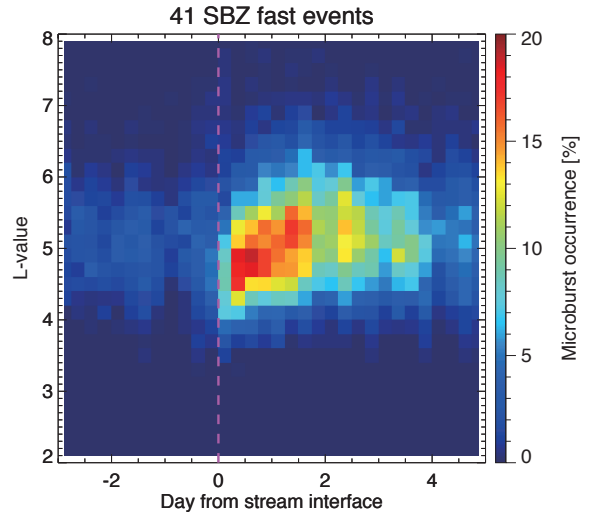
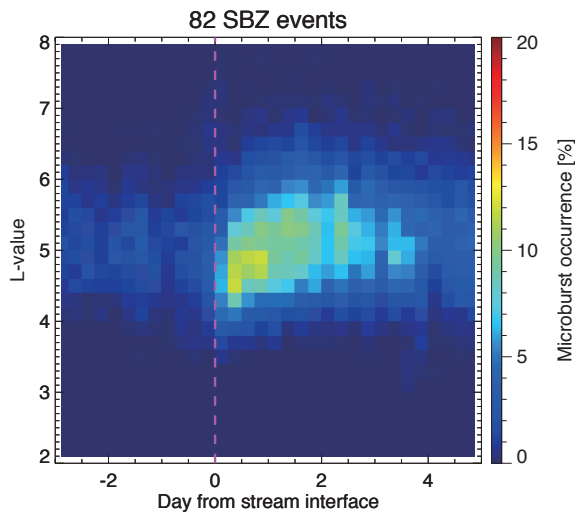


図 2. SBZ-HSS・NBZ-HSS 到来時のマイクロバースト発生頻度。L 値と流れの接触面到来時からの相対時間で示している。

図 3. SBZ-fast HSS・SBZ-slow HSS 到来時のマイクロバースト発生頻度。フォーマットは図 2 と同じ。

過去の研究では、高速太陽風時にマイクロバーストの発生頻度が増加することが示されていたが、今回の解析により、IMF Bz がマイクロバーストの発生頻度に重要なパラメータであることが示された。

今回の解析により、IMF Bz がマイクロバーストの発生に重要であることが示されたが、IMF Bz が同じ条件下において、太陽風速度依存性の有無については SBZ-fast・SBZ-slow HSS イベントを比較することで理解することができる。その結果を図 3 に示す。興味深いことに、IMF Bz が南向きの場合でも、太陽風速度が遅い場合にはほとんど発生せず、太陽風速度が速い場合に集中して発生していることがわかる。このこと

より、太陽風速度と IMF Bz の向きの両方がマイクロバーストの発生に重要な太陽風パラメータであることが示された。このことから、マイクロバーストによる消失は、HSS イベントの中でも、高速太陽風の速度が速く、IMF が南向きの際にもっとも大きくなると言える。

3.2 CME 型磁気嵐に対する応答

図 4 に CME により駆動される磁気嵐イベントにおける、マイクロバーストの発生特性を示す。マイクロバーストの発生頻度は Dst 指数が最小値付近で最も大きくなり、継続時間は、storm・great storm とも

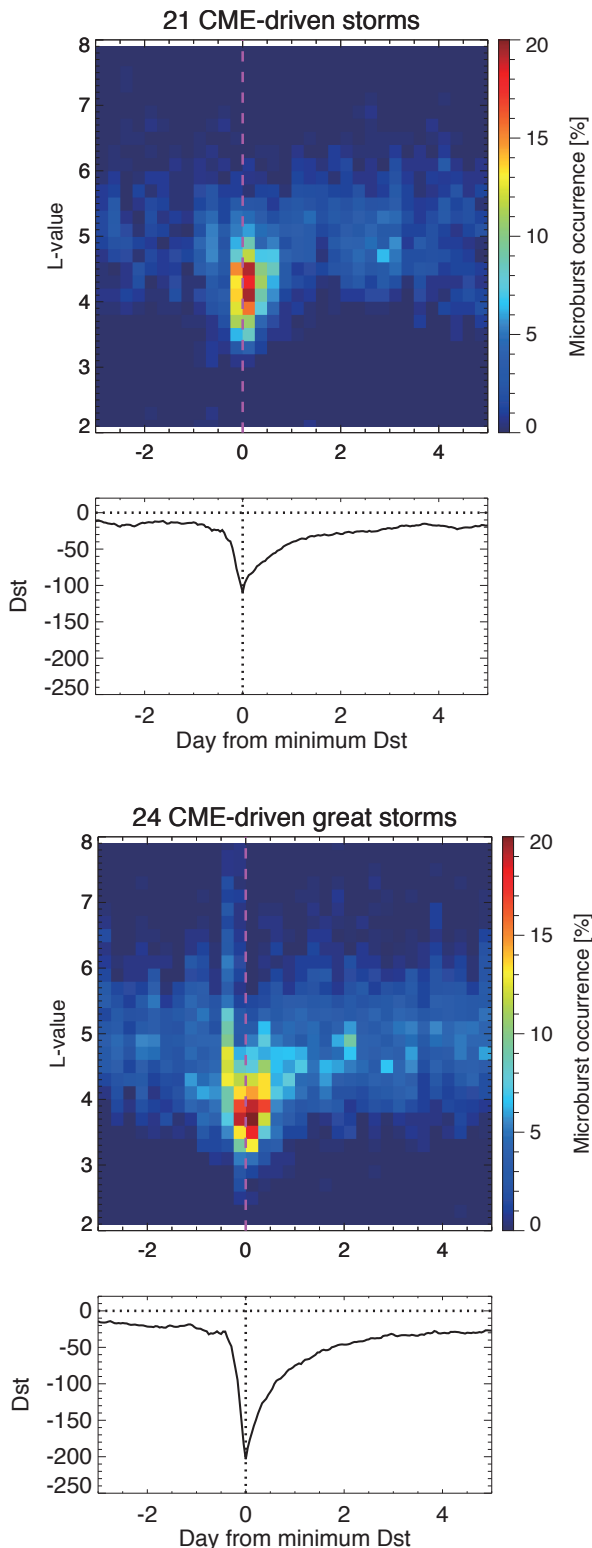


図4. CME-driven storm・CME-driven great storm 時のマイクロバースト発生頻度。

に1日以下であることがわかる。両者のイベントでの違いは発生頻度が大きくなるL値の範囲で、大きい磁気嵐ほど近地球領域でマイクロバーストが発生する傾向となる点である。

4. むすびにかえて

本研究では、マイクロバーストの発生頻度が太陽風の大規模構造であるCME・HSSの到来に伴いどのように変化するかを統計的手法により調査した。得られた結果のまとめとして、

1. HSS イベントの場合、IMF Bz が南向き、かつ太陽風速度が速い場合にマイクロバーストは頻繁に観測され、2-4日程度発生頻度が高い状態が継続する。
2. CME 駆動の磁気嵐の場合、Dst 指数の最小値付近でマイクロバーストの発生頻度が最大となり、継続時間は1日以下である。また、大きい磁気嵐ほど、近地球領域でマイクロバーストが発生する傾向にある。

上記の点から、マイクロバーストによる消失は、南向きの高速太陽風時に最も効果的に働くことが考えられる。過去の研究では、同じ条件が放射線帯電子フラックスの大きな増加を引き起こすことを考慮すると、マイクロバーストによる消失は、放射線帯電子の大きな減少を引き起こすことが難しいことが提案される。一方で、マイクロバーストと放射線帯電子フラックス増加の対応関係と、コーラス波動によってひきおこされていることから、放射線帯電子フラックスの増加が内部供給説によって引き起こされており、マイクロバーストは電子加速に伴う副産物であることが提案される。

参考文献

- [1] Baker, D. N., R. Belian, P. R. Higbie, R. W. Klebesadel, and J. B. Blake (1987), Deep dielectric charging effects due to high energy electrons in the Earth's outer magnetosphere, *J. Electrostat.*, 20, 3-19.
- [2] Blake, J. B., M. D. Looper, D. N. Baker, R. Nakamura, B. Klecker, and D. Hovestadt (1996), New high temporal and spatial resolution measurements by SAMPEX of the

- precipitation of relativistic electrons, *Adv. Space Res.*, 18, 171.
- [3] Kataoka, R., Y. Miyoshi, (2006). Flux enhancement of radiation belt electrons during geomagnetic storms driven by coronal mass ejections and corotating interaction regions. *Space Weather* 4, S09004. doi:10.1029/2005SW000211.
- [4] Kurita, S., Y. Miyoshi, J. B. Blake, G. D. Reeves, and C. A. Kletzing (2016), Relativistic electron microbursts and variations in trapped MeV electron fluxes during the 8–9 October 2012 storm: SAMPEX and Van Allen Probes observations, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 3017–3025, doi:10.1002/2016GL068260.
- [5] Lorentzen, K. R., J. B. Blake, U. S. Inan, and J. Bortnik (2001), Observations of relativistic electron microbursts in association with VLF chorus, *J. Geophys. Res.*, 106, 6017.
- [6] Miyoshi, Y., A. Morioka, T. Obara, H. Misawa, T. Nagai, and Y. Kasahara (2003), Rebuilding process of the outer radiation belt during the November 3, 1993 magnetic storm: NOAA and EXOS-D observations, *J. Geophys. Res.*, 108(A1), 1004, doi:10.1029/2001JA007542.
- [7] Miyoshi, Y., and R. Kataoka (2005), Ring current ions and radiation belt electrons during geomagnetic storms driven by coronal mass ejections and corotating interaction regions, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L21105, doi:10.1029/2005GL024590.
- [8] Miyoshi, Y., and R. Kataoka, (2008), Flux enhancement of the outer radiation belt electrons, after the arrival of stream interaction region. *J. Geophys. Res.* 113, A03S09. doi:10.1029/2007JA012506.
- [9] Miyoshi, Y., R. Kataoka, Y. Kasahara, A. Kumamoto, T. Nagai, and M. Thomsen (2013), High-speed solar wind with southward interplanetary magnetic field causes relativistic electron flux enhancement of the outer radiation belt via enhanced condition of whistler waves, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4520–4525, doi:10.1002/grl.50916.
- [10] O'Brien, T.P., et al., (2003). Energization of relativistic electrons in the presence of ULF power and MeV microbursts: evidence for dual ULF and VLF acceleration. *J. Geophys. Res.* 108, 1329. doi:10.1029/2002JA009784.
- [11] O'Brien, T. P., M. D. Looper, and J. B. Blake (2004), Quantification of relativistic electron microburst losses during the GEM storms, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L04802.
- [12] Paulikas, G. A., and J. B. Blake (1979), Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: Energetic electrons at the synchronous orbit, in *Quantitative Modeling of Magnetospheric Processes*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 21, edited by W. P. Olson, p. 180, AGU, Washington, D. C.
- [13] Schultz, M., and L. J. Lanzerotti (1974), Particle diffusion in the radiation belts, in *Physics and Chemistry in Space*, p. 151, Springer, Berlin.
- [14] Summers, D., Thorne, R., Xiao, F., (1998), Relativistic theory of wave-particle resonant diffusion with application to electron acceleration in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 103, 20487–20500.