

地球放射線帯電子の消失過程

○ 千葉貴司, 小原隆博, 栗田怜

taka.c@pparc.gp.tohoku.ac.jp

東北大学大学院理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター

Abstract

磁気圏にはエネルギーが MeV にも及ぶ相対論的電子が捕捉されていて、放射線帯とよばれる領域を形成している。電子放射線帯の特徴としては、スロット領域といわれるフラックスの低い領域を境に内側を内帯、外側を外帯と2重構造となっており、特に外帯は磁気嵐の際に大きく変動することが知られている。

地球の周辺には現在多くの人工衛星が飛翔しており、それらの衛星は少なからずこの放射線帯電子の影響を受けている。高エネルギー電子の影響で帯電し、太陽光パネルの劣化、装置の誤作動といったことが起こり、人工衛星にとっては非常に厳しい環境となっていることから、最近では変動する地球放射線帯の予測・モデリングが宇宙天気分野のからも大きな課題となっている。

本研究では、その電子放射線帯の変動をアメリカ海洋大気庁(NOAA)の POES 衛星に搭載されている Space Environmental Module-2 (SEM-2) の粒子データを用いて観測した。放射線帯の変動過程としては、加速・消失・移送過程の兼ね合いによって決まるが、特に消失過程に注目した。消失過程としては、波動・粒子相互作用による大気中への落下消失、Dst 効果、磁気圏界面からの流失が考えられているが、今回の POES 衛星での観測では、大気中への落下消失では全体の消失を説明できないため、その他の消失過程での説明が必要である。Dst 効果での見かけ上の消失も効果的ではあるが、太陽風動圧の急激な上昇で磁気圏界面が地球側に大きく押し込まれた際に外対電子の急な消失も見られることから磁気圏界面からの消失の効果も大きいことが予想される。

今回は主として POES 衛星による観測であったが、放射線帯の全体の理解には、磁気赤道面での観測や地上観測も生かした解析が必要であり、今後は、それらのデータのクロスキャリブレーションによって消失現象の理解を目指す予定である。

1. Introduction

地球電子放射線帯には、エネルギーが高い相対論的電子が捕捉されており、放射線帯を形成している。電子放射線帯は、フラックスの少ないスロット領域を境に内側が内帯、外側が外帯と2重構造になっており、特に外帯は地球半径の3倍から静止軌道にも及ぶ領域で、磁気嵐の際に大きく変動することが知られている。

その変動過程は、(i)加速・(ii)消失・(iii)移送過程の兼ね合いであり、それぞれの過程が複雑に作用している。それぞれの変動過程を担っている現象としては、(a)波動粒子相互作用-(i)(ii)、(b)Pc-5帯のULF地磁気脈動-(i)(iii)、(c)Dst効果-(ii)(iii)、(d)磁気圏界面からの流出(Magnetopause Shadowing)-(ii)が考えられている。

本研究では特に消失過程に着目し、アメリカの海洋大気庁(NOAA)のPolar Operational Environmental Satellite (POES)衛星に搭載されているSpace Environmental Module-2 (SEM-2)の粒子データを用いて放射線帯の消失の解析をおこなった。

2. Instrument & Data Set

観測に用いた衛星はアメリカ海洋大気庁のPOES衛星であり、現在NOAA-15, 16, 17, 18, 19の5機が運用中である。POES衛星には粒子計測器Space Environmental Module-2 (SEM-2)が搭載されており、そのデータを用いて解析をおこなった。衛星の軌道、計測器については以下に示す通りである。

表1, POES衛星の仕様

	Altitude [km]	Inclination [deg]	Period [min]
NOAA-15	807	98.5	101.1
NOAA-16	849	99	102.1
NOAA-17	810	98.7	101.2
NOAA-18	854	98.74	102.12
NOAA-19	870	98.7	102.14

また、太陽風のデータはACE衛星の観測によるOMNIのデータベースを用いた。観測期間は2011-2012年の2年間でこの期間における磁気嵐で特にDst指数が $-100[\text{nT}] < \text{Dst} < -30[\text{nT}]$ のイベントについて解析をおこなった。今回用いた極軌道の低高度衛星の利点としては、短い時間で広い範囲のL-Shellを通過することがあげられる。しかしながら地球磁場の非対称性の影響をうけるという弱点もある。実際、ブラジル周辺は南アメリカ磁気異常帯(SAA)といわれる領域がありその周辺では地球磁場が弱くなっており、粒子計測器もその他の領域に比べ高い観測値を示しやすい。そういった領域の影響をさける為に、今回の解析では、違う軌道の衛星2機を用いて、さらにおおよそその衛星の周回周期100分でデータを平均化して処理した。また、L値方向には $0.2[\text{Re}]$ の分解能で処理している。

図1は2011年7月30日に起こった磁気嵐時の観測例である。上からE3チャンネルの捕捉成分、落下成分、P6チャンネルの捕捉成分、落下成分、Dst指数、太陽風動圧、速度、プロトンの密度、磁場の南北成分である。磁気嵐の開始からDst最少時にかけて各捕捉成

分の減少し、回復相で回復していく様子が分かる。また落下成分においては E3 チャンネルで主相から回復相でフラックスの上昇が見られる。今回は磁気嵐での全体の傾向をみるために、Superposed Epoch Analysis をおこなった。

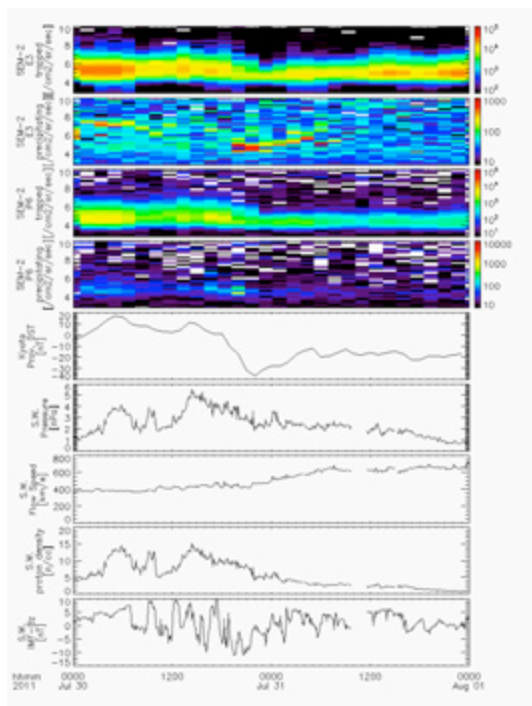


図1, 2011年7月30日に起こった磁気嵐での観測例。上より E3 チャンネルの捕捉成分, 落下成分. P6 チャンネルの捕捉成分, 落下成分. Dst 指数, 太陽風動圧, 速度, プロトンの密度, 磁場の Bz 成分である

3. Superposed Epoch Analysis (SEA)

今回対象としている期間において磁気嵐のイベント数は18件。基準時間を Dst 最小時として前後1日のデータを Superposed Epoch Analysis をおこなった。

図1は上より, E3 チャンネルの捕捉成分, 落下成分. P6 チャンネルの捕捉成分, 落下成

分. Dst 指数, GOES13 によって観測された, 静止軌道の 300-800keV の電子のフラックスである。両捕捉成分見ると, Dst 指数の減少と共にフラックスも減少し, Dst 最小時に最も減少し, その後回復相で回復していく様子が分かる。GOES 衛星の観測でも同じような傾向が見られることから, フラックスの減少はピッチ角全体的なものであることが分かる。

落下成分(上から2つ目, 4つ目)に注目すると, E3 チャンネルでは磁気嵐の主相から回復相にかけてフラックスの上昇が見られる。このことから 300-1100keV の電子は磁気嵐の際に大気中へ落下消失していることがわかる。P6 チャンネルでは E3 チャンネルとは違い, 磁気嵐の際の上昇は E3 チャンネルほど顕著なものではなかった。

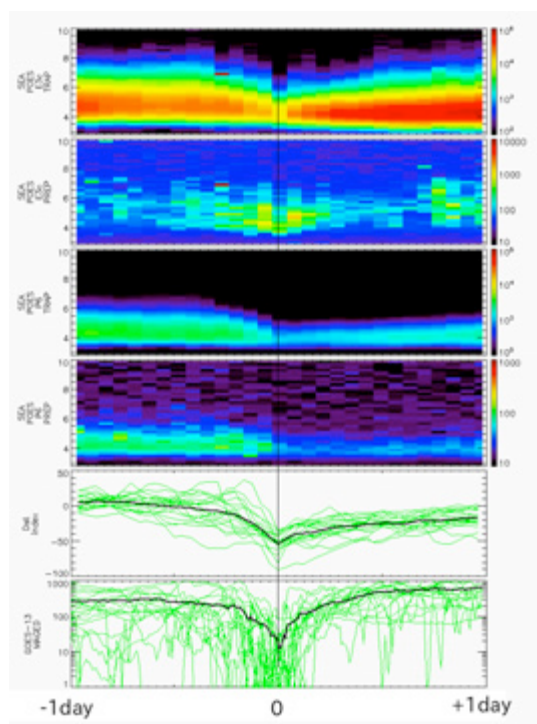


図2, 2011-12年の磁気嵐18イベントにおけるSEAの結果。上より POES 衛星の E3 チャ

ンネルの捕捉成分, 落下成分. P6 チャンネルの捕捉成分, 落下成分. Dst 指数. GOES 衛星の静止軌道でのカウント値.

この結果より放射線帯電子の消失に関して, 大気中への落下消失があることが分かるが, フラックスを考えると外帯電子の全体の消失を説明できるほど十分な量とは言えない.

続いて, 外帯消失における磁気圏界面からの流失を考える為に太陽風の動圧が高いものと低いものに分けて同様の解析を行った. 太陽風動圧が高くなると地球の磁気圏界面はより地球側に押し込まれることになるため, 放射線帯電子が流出しやすい環境になることが期待される. 解析結果は以下の通りである.

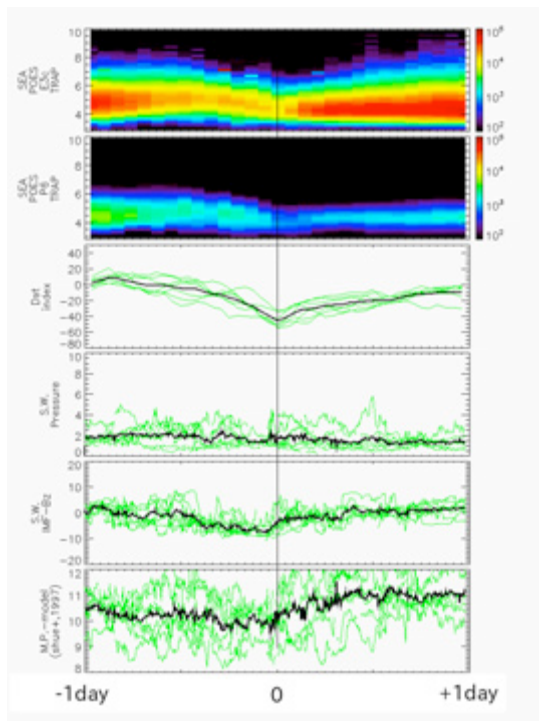


図3, 磁気嵐のイベントの中で太陽風動圧の最大が 5nPa 以下のもの7イベントを SEA した結果. 上より E3 チャンネル捕捉成分, P6

チャンネル捕捉成分, Dst 指数, 太陽風動圧, 太陽風磁場の Bz 成分, 磁気圏界面モデルで計算した磁気圏界面の位置(Shue et al., 1997)

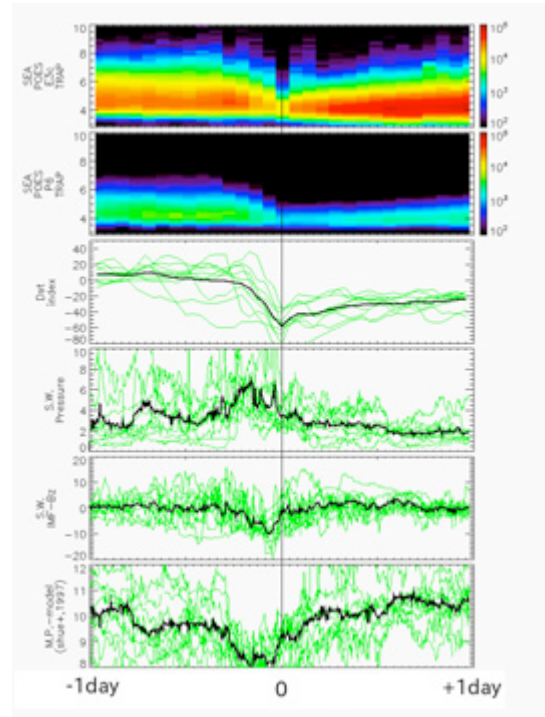


図4, 磁気嵐のイベントにおいて太陽風動圧の最大が 5nPa 以上のもの10イベントで SEA を行った結果. 詳細は図3と同じ.

この解析では磁気嵐18イベントから太陽風動圧が 5nPa 以下のもの7イベント, 5nPa 以上のもの10イベントと分けて SEA を行っている. また今回は磁気圏界面の影響を考慮する為に磁気圏界面のモデル(Shue et al., 1997)での磁気圏界面の距離を計算している. 図3では太陽風動圧はほとんど一定で磁気圏界面の位置もほとんど変化はない. 対して太陽風動圧が高い場合では磁気嵐の主相にかけて磁気圏界面の地球側へのシフトが見られる. フラックスに注目してみると, 太陽風動圧が

低い場合では Dst 指数に対応したゆっくりとした減少が見られ、太陽風動圧が高い場合ではより地球側まで大きく減少しているような傾向が見られる。

しかしながら今回の解析では解析したイベント数が共に 10 件程度と少ないため、外帯の消失における磁気圏界面の影響を議論するのは難しい。全体の傾向としては図 4 の解析結果となるが、個々のイベントについて注目していくと太陽風動圧が上昇した際に外帯が剥ぎ取られるように消失しているイベントが見られた。

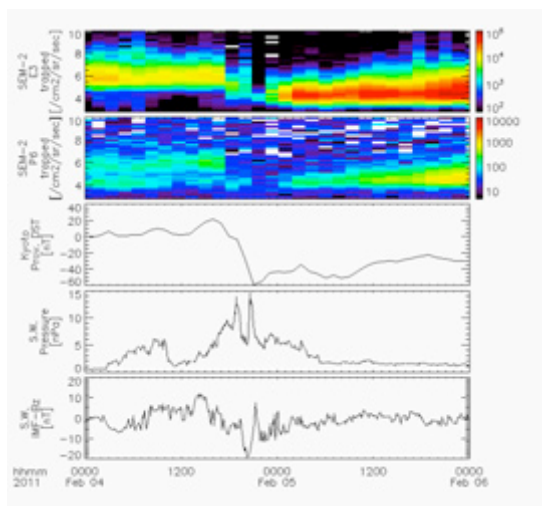


図 5, 2011 年 2 月 4 日に起こった磁気嵐の解析. 上より E3, P6 チャンネルの捕捉成分, Dst 指数, 太陽風動圧, 太陽風磁場の Bz 成分.

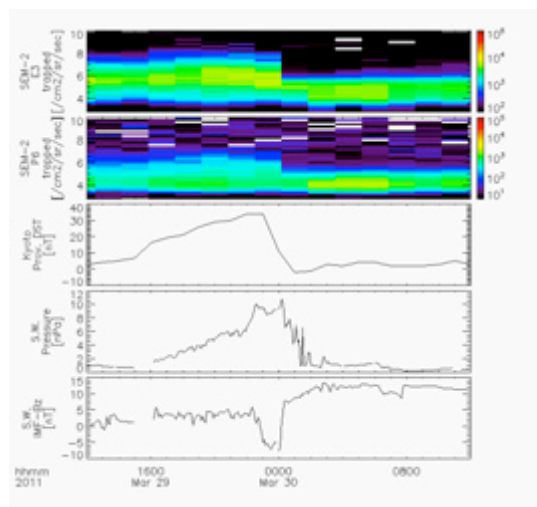


図 6, 2011 年 3 月 29 日の外帯の減少したイベント. 詳細は図 5 と同じ.

こういった例から、磁気圏界面からの消失が示唆され、外帯消失については、大気中への落下消失、Dst 効果に加え、磁気圏界面からの消失も考慮していかなければならないことが分かる。

4. Discussion

- ・ 大気中への落下消失について

今回の解析では外帯の全体の消失に対して十分な量ではないことが考えられたが、Microbursts と呼んだ MeV の電子の降込み現象も報告されており(e.g. O'Brien et al., 2004) 外帯消失に寄与していることが指摘されている。

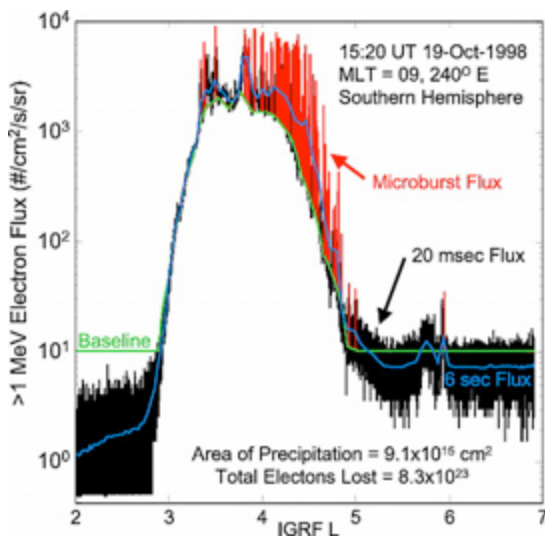


図7, SAMPEX 衛星によって観測された MeV の電子の降込み現象. (O'Brien et al., 2004)

継続時間は1秒以下で磁気嵐の主相から回復相で観測されている現象であるが、衛星のその場観測のみではうまく捕まえるのが難しいことから今後の解析の課題である。地上観測等も活用して評価していきたいと考えている。

- ・ 磁気圏界面からの消失について

図3, 5, 6の外帯消失の特徴より, Dst 効果によるものは Dst 指数の減少に伴って徐々に減少し, 対して磁気圏界面からの消失については急な減少が起こっていることが示唆される。これらの特徴より磁気圏界面の影響範囲を特定できないか試みたが, Dst 効果の影響が重なってしまう為にうまく評価することができなかった。また,十分に動圧が上昇してもフラックスに影響がでないこともあり, これらは観測している粒子のピッチ角の影響ではないかと考えられる。今回 POES 衛星で観測しているのはロスコーン付近の電子であ

り, 対して磁気圏界面からの消失の影響を受けやすいのはピッチ角が 90° に近い電子であることが考えられるため, 太陽風動圧の上昇に対応した外帯の変化がきれいに見られなかったのではないかと考えている。

このような原因のため今回の POES 衛星での観測では磁気圏界面の影響を評価することができなかった。これらについては今後の課題であるが, 磁気赤道でピッチ角情報も含めて観測している衛星のデータ解析を早急に進めたい。

5. まとめ

今回主に POES 衛星の粒子データを用いて磁気嵐における放射線帯電子の消失に注目し解析を行った。磁気嵐全体の傾向としては, 磁気嵐のオンセットから主相にかけて全体のフラックスが減少し, 回復相で回復していくというものであった。また大気中への落下成分に注目してみると主相から回復相にかけてのフラックスの上昇が見られた。しかしながら落下成分のフラックスのみでは全体の消失を説明できないことからその他の消失過程が考えられ, 磁気圏界面からの消失に着目し更なる解析を行った。行った解析は, 磁気嵐において太陽風動圧が強いものと, 弱いものに分けて行った解析であったが, 2つを比べると太陽風動圧が強いものの方がより速い減少で地球に近い領域まで減っている傾向が見られた。しかしながら全体としてイベント数が少ないため優位な結果とは言えない。だが, 個々のイベントに注目していくと太陽風動圧の上昇と共に外帯が急激に減少している様子

も見られることから、磁気圏界面からの消失も外帯の消失として寄与していることが示唆される。今回は磁気圏界面からの影響がどの程度の範囲に及んでいるかと言うところまでは言及できなかったが、今後はその他の衛星を含めてのデータを解析し、磁気圏界面からの消失の影響を明らかにしていく予定である。

○ 謝辞

今回のデータ解析においてはアメリカ海洋大気庁の Polar Operational Environmental Satellite (POES) 衛星の粒子計測器のデータと OMNI データベースより太陽風のデータを使わせていただきました。

Reference

- C. Matsumura, Y. Miyoshi, K. Seki, S. Saito, V. Angelopoulos, and J. Koller, Outer radiation belt boundary location relative to the magnetopause: Implications for magnetopause shadowing, *J. Geophys. Res.*, 116, A06212, 2011
- J. H. Shue, J. K. Chao, H. C. Fu, C. T. Russell, P. Song, K. K. Khurana, and H. J. Singer, A new function form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape, *J. Geophys. Res.*, 102, A5, 9497-9511, 1997
- Richard B. Horne, Nigel P. Meredith, Richard M. Thorne, Daniel Heynderickx, Roger H. A. Iles, and Roger R. Anderson, Evolution of energetic electron pitch angle distributions during storm time electron acceleration to megaelectronvolt energies, *J. Geophys. Res.*, 108, A1, 1016, 2003
- R. M. Millan, and R. M. Thorne, Review of radiation belt relativistic electron losses, *J. Atmos. and Solar-Terres. Phys.*, 69, 3, 362-377, 2007
- T. P. O'Brien, M. D. Looper, and J. B. Blake, Quantification of relativistic electron microburst losses during the GEM storms, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L04802, 2004
- Y. Miyoshi, K. Sakaguchi, K. Shiokawa, D. Evans, J. Alvert, M. Connors, V. Jordanova, Precipitation of radiation belt electrons by EMIC waves, observed from ground and space, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L23101, 2008