

放射線帯電子の消失過程に関する研究

○ 千葉 貴司(1), 小原 隆博(1), 栗田 怜(2), 三好 由純(2)

E-mail: taka.c@pparc.gp.tohoku.ac.jp

(1) 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

(2) 名古屋大学大学院 太陽地球環境研究所

◇Abstract

磁気嵐の際に大きく変動を起こす地球の電子放射線帯外帯の電子の変動過程について THEMIS 衛星のデータを用いて研究を行った。放射線帯外帯電子の変動過程については、現在までに多くの研究がなされており、いくつかの物理過程が提唱され、さらには観測的にも明らかにされている。しかしながら未だ定性的な理解にとどまっているのが現状である。外帯の変動を定性的に理解するためには、外帯変動を引き起こしている、粒子の移送・消失・加速過程をそれぞれしっかりと理解していくことが必要である。そこで今回の研究では、特に粒子の消失過程に注目し、解析を行った。粒子の消失過程については、波動粒子相互作用の結果による粒子の大気中への落下消失、断熱効果による見かけ上の消失(Dst-effect)、磁気圏界面からの直接的な消失(Magnetopause Shadowing) が考えられている。Turner et al., [2012] ではこれらの消失過程について複数衛星の観測データの解析を用いて評価し、磁気嵐の主相での急激な外帯の消失は、磁気圏が圧縮された際の磁気圏界面からの消失とそれに続く Outward Diffusion によるものだと結論づけている。磁気圏界面からの流失については、Matsumura et al., [2011]や Ohtani et al., [2009]で示唆されているが、実際に放射線帯のどこの領域までその影響が及んでいるかについては、まだ議論の余地がある。

そこで今回は、Drift Shell Splitting の理論[Roeder and Schulz,1971] を用いて電子の磁気圏界面からの流失について評価を行った。地球の磁気圏は非対称的な構造となっており、この中をドリフトする粒子はピッチ角が違えば、ドリフトシェル異なる。そして、ピッチ角が 90 度に近い粒子ほど磁気圏界面に近いドリフト軌道となることから、磁気圏界面からの粒子の消失の影響として夜側ではピッチ角分布がバタフライ型に変化することが期待される。そしてピッチ角分布の変化から磁気圏界面からの電子の消失が評価できると考え、THEMIS 衛星の Solid State Telescope(SST) を用いてピッチ角分布の変化に注目し解析を行った。

解析の結果から磁気圏界面モデルで計算した磁気圏界面の位置の内側へのシフトに応答してバタフライ分布の見られる位置もより地球側にシフトする傾向が見られた。そして、2009 年から 2013 年の 5 年間のイベントを統計的に解析することで、磁気圏界面の位置と電子のフラックスの減少する Loss 領域や磁気圏界面からの電子の消失の結果バタフライ分布が見られていると考えられる Shadowing 領域には関係性が見られることが示された。しかしながら私たちの結果からは、電子の消失は磁気圏界面からの消失だけでは説明できないこともわかった。この点については今後さらなる解析を行う予定である。

1. Introduction

地球の固有地場には、エネルギーが高い粒子が補足されている領域があり、地球を取り巻くドーナツ状の放射線帯と呼ばれる領域を形成している。放射線帯は、電子による電子放射線帯とプロトンによるプロトン放射線帯に分けられるが、今回研究対象としているのは電子の放射線帯である。電子放射線帯の特徴は、スロット領域とよばれる比較的フラックスの少ない領域を境に、内側の内帯と外側の外帯との2重構造に分かれていることである。そして現在までの研究で、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。[e.g., Millan and Thorne, 2007]

この変動は、基本的には電子の(i)消失過程・(ii)加速過程・(iii)移送過程の兼ね合いで決まる。[Reeves et al., 2003] そして、それぞれの変動過程については、EMIC波動(i)やWhistlar-mode chorus波動(ii)との波動粒子相互作用[e.g., Miyoshi et al., 2008; Summers et al., 1998]やPc-5帯のグローバルULF波動(ii, iii)との共鳴作用[e.g., Ukhorsky et al., 2009]、磁気圏界面からの直接的な消失(Magnetopause Shadowing : MPS) (i) [e.g., Ohtani et al., 2007]、断熱効果による見かけ上の消失(Dst-effect)(i)[Dessler and Karplus, 1961]が考えられている。しかしながら、正味の変動としては、これらの変動過程が複雑に重なり合っているため理解が難しく、未だ定量的には理解がされていないというのが現状である。

この複雑な放射線帯の物理を理解するためには、それぞれの変動過程について一つひとつを確実に理解していくことが重要である。そこで私たちの研究では、特に消失過程に注目し理解することから、変動する電子放射線帯外帯の変

動過程の全体の理解を目指している。

放射線帯電子の消失過程については、前述のような物理過程が考えられているが、今回の私たちの解析では、特に磁気圏界面からの消失に注目して解析を行った。

MPSの先行研究として、観測的にMPSを示唆しているものとしては、Ohtani et al., [2009]によるGOESのデータ解析やMatsumura et al., [2011]によるTHEMIS衛星での解析、そしてTurner et al., 2012による複数衛星での解析結果が挙げられる。中でもTurner et al., 2012では、複数衛星の解析から磁気圏界面からの消失とそれに続くOutward Diffusionが主相での主な消失過程であると結論している。しかしながら、MPSによって電子が流失していく様子は観測的には示されていない。また、磁気圏界面からの消失はどの領域まで影響するのかについても現状ではわかっていない。そこで今回は磁気圏界面からの消失の影響範囲の評価ためにDrift Shell Splitting [Roederer and Schulz, 1971]の理論を用いた。

Drift Shell Splittingとは、磁気圏の非対称性により同じ地点からドリフトし始めた粒子でも違ったピッチ角を持っていれば断熱不変量の保存のために違ったドリフトパスを持つものである。図1は夜側で、ある磁力線でパウンズしている粒子がピッチ角の違いで昼側までドリフトした際にドルフシェルにどういった違いが出るかを示したものである。図1から見て取れるようにピッチ角が90度に近い粒子ほど昼側で地球から遠いパスとなる。したがって時期圏界面の影響を受けやすく、磁気圏界面からの粒子の消失が起これば、それに対応したピッチ角分布の変化として夜側でバタフライ分布が見られることが示唆される。

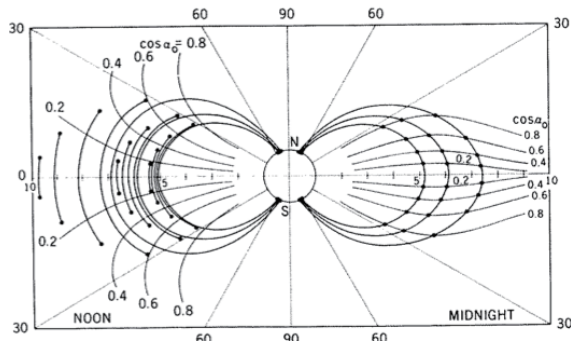


図1 : Drift Shell Splitting [Roeder and Schulz, 1973]

このようなシナリオは、シミュレーション研究においてはすでに示唆されている。[Saito et al., 2010] しかしながら観測的に示した例はまだない。そこで今回は、主に THEMIS 衛星の粒子計測器のフラックスデータとピッチ角データを用いて、放射線帯外帯の高エネルギー電子の消失と磁気圏界面の影響の評価を目標に解析を行った。

2. Instrumentation

◇ THEMIS 衛星

The Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms (THEMIS 衛星) は 2007 年 2 月 17 日に打ち上げられたアメリカの衛星である。[Angelopoulos, 2008]

近地点は約 470.0km, 遠地点は約 87330.0km と地球の放射線帯が存在している内部磁気圏の領域をカバーしており、さらに軌道傾斜角が 16.0 度であることからピッチ角分布についても多くの情報を得ることができる。また Probe-A, B, C, D, E の 5 機の衛星があり、編隊飛行をしていることも特徴の 1 つである。

衛星に搭載されている観測機器については以下の通りである。

- Electric Field Instrument (EFI)
- Search-Coil Magnetometer (SCM)

- Flux Gate Magnetometer (FGM)
- Electro-Static Analyzer (ESA)
- Solid State Telescope (SST)

電磁場と粒子に関しての一通りの観測機器は搭載されている。なお、今回の解析で主に用いているのは Solid State Telescope (SST) の電子チャンネルのデータである。SST は 30.0keV-1.0MeV のエネルギーの電子のデータをカバーする。しかしながら 300.0keV 以上の電子のデータについては、高エネルギー電子のコンタミネーションの影響があるために、今回は、293keV のエネルギーチャンネルを使用した。

使用データは 2009 年から 2013 年までの 4 年間で、衛星は THEMIS-E のデータを用いて解析を行った。

◇ Model

- TS-05 Tsyganenko Magnetic Field Model [Tsyganenko and Sitnov, 2005]

地球周辺の磁場が大きく乱れる磁気嵐の際には、地球の周りをドリフトしている粒子は断熱不変量を保存するために、ドリフト軌道が変化することが知られている。したがって、この断熱効果を考慮するために今回は TS-05 の磁場モデル [Tsyganenko and Sitnov, 2005] を用いて衛星の地点の L^* [Roederer, 1970] を計算し解析を行った。

- Shue et al. Magnetopause Model [Shue et al., 1997]

磁気圏界面からの消失の過程においては、磁気圏界面の地球からの距離が関係してくることが予想される。しかしながら常に観測的に磁気圏

界面の位置を把握することは、現在できないことから今回は磁気圏界面モデル[Shue et al, 1997]を用いて磁気圏界面の位置の評価を行った。

3. Analysis

今回の解析フローを以下に示す。

- (I): イベントリストの作成
- (II): 各イベントについて、関数(i) の Fitting からピッチ角分布の評価をおこなう
- (III): イベントの前後におけるピッチ角分布の変化とフラックスの消失領域や磁気圏界面の関係を調べる

それぞれの過程に関して詳しく述べると以下の通りである。

(I)については、時期圏界面の位置の影響と磁気嵐の影響を評価するために2つのイベントリストを作成した。

- (a) : 磁気嵐イベント
- (b) : 高太陽風動圧イベント

(a)の磁気嵐の定義については、Dst 指数が -40.0[nT]を下回るものとした。[Turner et al., 2013] さらに大きな磁気嵐では磁気圏内が極端に乱れ、現象が複雑になることから Dst 指数の下限も-100.0nT とした。

(b)のイベントとしては、太陽風動圧(Pdyn)が、5.0 [nPa] < Pdyn < 30.0 [nPa]かつ Dst 指数が -20.0 [nT]を下回らないものを採用した。Dst 指太陽風動圧に対して上限値を設定したのも、極端なイベントを避けるためである。

これらの条件に加えてさらに各々には、イベント前後3日間に他のイベントが起こっていないこととイベントが単発であることという条件

を加えた。その結果抽出されたイベントは、(a): 34 イベント、(b): 36 イベントである。

(II)について、ピッチ角データについては次式の Fitting を行った。

$$F(\theta) = f_{90} \sin^N(\theta) \quad \dots (i)$$

F は粒子のフラックス、 f_{90} はピッチ角 90 度での粒子のフラックス、シータはピッチ角である。この式の N でピッチ角データに関して Fitting を行うと次のように N の値によってピッチ角分布の評価ができる。 [e.g., Morioka et al., 2003]

- N > 0 … Pancake 分布
- N = 0 … Flattop 分布
- N < 0 … Butterfly 分布

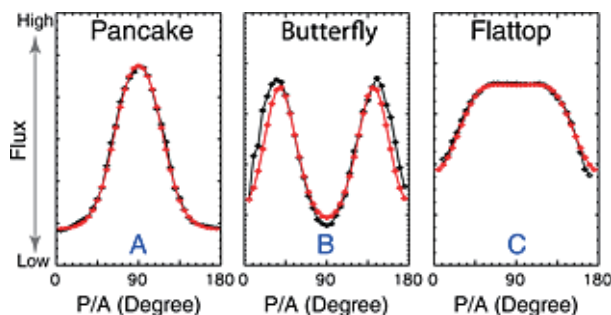


図2 : ピッチ角分布の例 (Chen et al., 2014)

よって、解析では N 値がマイナスに振れる Butterfly 分布の領域に注目した。図3に実際の Fitting の例を示す。

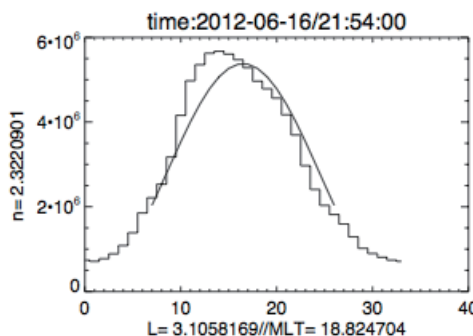


図3：解析での Fitting の例。N=2.311 で Pancake 分布であることがわかる。なお横軸はビンナンバーであり 34 が 180 度に対応する。縦軸はフラックスである。

(III)では、(II)で求めたピッチ角分布が実際に太陽風等の外部パラメータに応じてどのような変動を示すか解析を行った。図4は 2011 年 4 月 16 日から 20 日までの期間に起こった高太陽風動圧イベントの例である。上から POES-SEM 2 の捕捉成分, THEMIS-SST の 293keV 電子チャンネル, POES-SEM2 の落下成分, 以下から 4 つは OMNI データベースの sym-H, 太陽風動圧, AE-index, 太陽風磁場の Z 成分, 最後に THEMIS 衛星の地球からの距離となっている。

このイベントでは 2014 年 4 月 18 日から太陽風動圧が上昇し, 10nPa 近くまで上昇した。また, 磁気圏界面の地球からの距離を Shue et al., [1997]の時期圏界面モデルで計算したものを一番上の POES の補足成分とともに, 赤線でプロットしたが, これに注目すると時期圏界面が L 値で 8.0 近くまで地球に近づいたことがわかる。

このイベントで磁気圏内の電子がどのように変動しているかを考えるためにそれぞれのパスについて 293keV の電子の Flux, N 値を L*について分けてプロットを行った。その結果は図5に示す通りでありそれぞれの色は図4に対応している。

図5では, 上の2つの図でまず THEMIS 衛星の軌道を示している。この図からこの時 THEMIS はおおよそ夜側のセクターにいたことがわかる。そしてそのパスでの N 値の観測, Flux の観測値を以下2段の図で, 各 Outbound(左), Inbound(右)に分けて表示している。

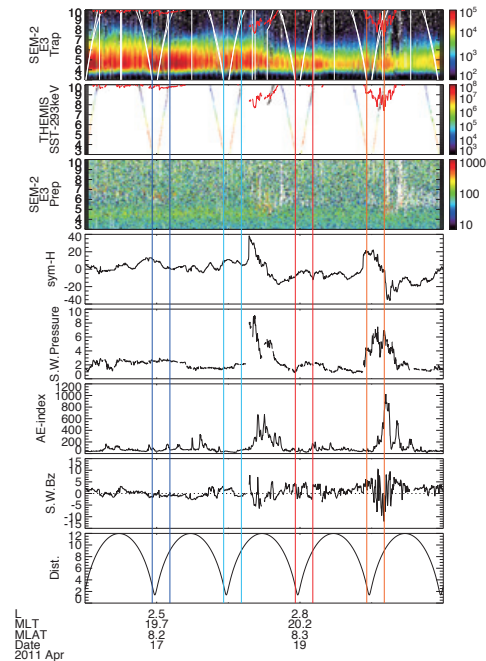


図4：2014年4月18日の高太陽風動圧イベント。上から POES-SEM2-E3 の補足成分と Su model での磁気圏界面の位置, THEMIS-SST-293keV チャンネル, POES-SEM2-E3 の落下成分, sym-H 指数, 太陽風動圧, AE 指数, 太陽風磁場 Z 成分, THEMIS の地球との距離である。また4色の垂線はそれぞれ図5, 6のカラーと対応している。

ここで, 太陽風動圧の上昇, 磁気圏界面の地球側へのシフトのイベント前後に注目すると, イベント前(青・水色)では Flux の変化がほとんど見られないがイベントの前後, 特に水色と赤のプロットに注目すると $L^* > 5.0$ 以上の領域において Flux が減少していることが見て取れる。

さらに N 値についてもイベントの前後で N 値がマイナスに大きく振れる位置が内側にシフトしていることがわかる。

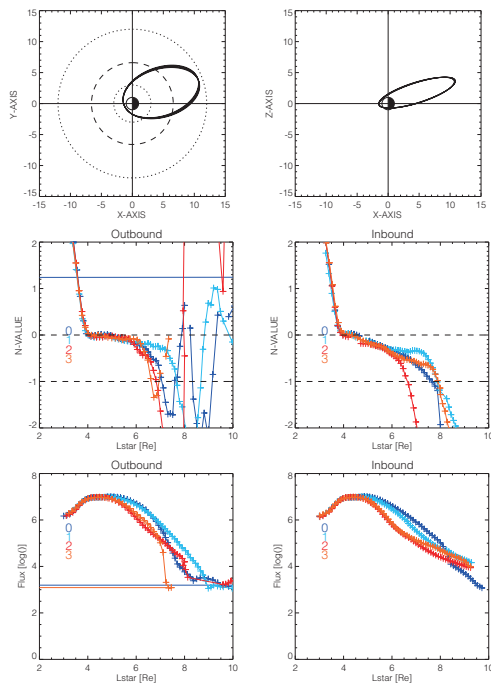


図5：THEMIS 衛星の軌道（上段）と各パスでの N 値、Flux の変化の様子（中・下段）。各色のプロットの観測時は図3のそれぞれの色の垂線に対応している。

このイベント前後の変化を詳しく見るために前後のパスでの観測値のみを抽出したのが図6である。また、図6では、Flux の変化をわかりやすくするために、N 値と Flux の各パスでのプロットに加えてイベント後の Flux をイベント前のもので割った割合をプロットしている。

この図6からイベントの結果、電子の Flux はおおよそ $L^* > 5.0$ の領域で減少していること、さらには N 値の変化から Drift Shell Splitting の結果として見られるバタフライ分布の領域が地球に近い領域まで達していることがわかる。

従って、これらの結果よりこのイベントでは、太陽風動圧の上昇による磁気圏界面の地球側へのシフトの結果、 L^* が大きい領域において電子のドリフトパスが開いたために流失し、さらに

はバタフライ分布が見られる領域も地球に近い領域まで広がったと解釈することができる。

ここまではあるイベントでの N 値と Flux の変化に注目してきたが、さらにこういったイベントでの全体の傾向を理解するために統計的な解析を行った。解析においては、N の値が大きくマイナスに振れる領域を Shadowing 領域とし、 $N = -1.0$ となる地点として定義した。さらに消失についても前のパスでの Flux に比べて Flux が 30% まで減る領域を Loss 領域と定義した。そして先ほど示した (a) 磁気嵐イベント、(b) 高太陽風動圧イベントの各イベント各領域がどのように変動するか注目し解析を行った。

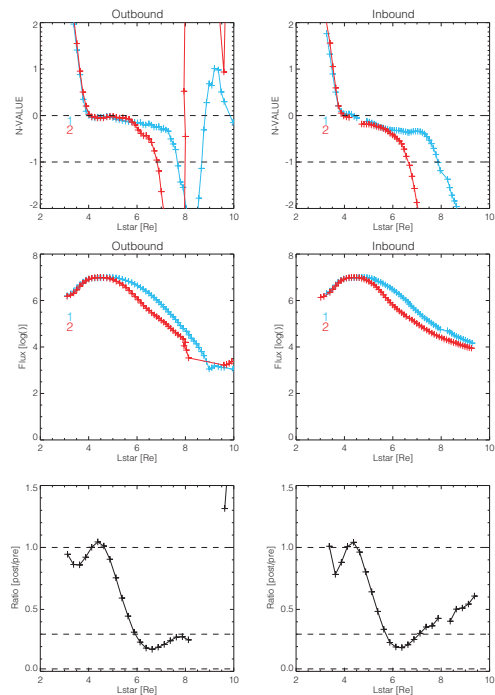


図6：イベント前後（前：水色、後：赤）の各パスでの N 値と Flux の変化（上・中段）と Flux の変動の割合（イベント後の値/イベント前の値）。

4. Result

図7から図9には、3章で示した解析方法から得た各イベントでの Shadowing 領域 (黒), Loss 領域 (赤) の関係を示した。それぞれ図7は高太陽風動圧イベント, 図8は磁気嵐イベント, 図9は2つのイベントを足し合わせたものである。

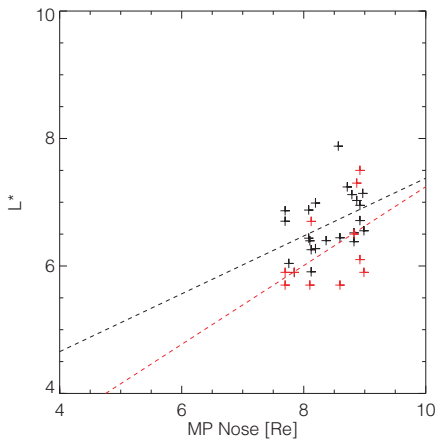


図7：高太陽風動圧での Shadowing 領域 (黒), Loss 領域 (赤) と磁気圏界面の位置の関係。

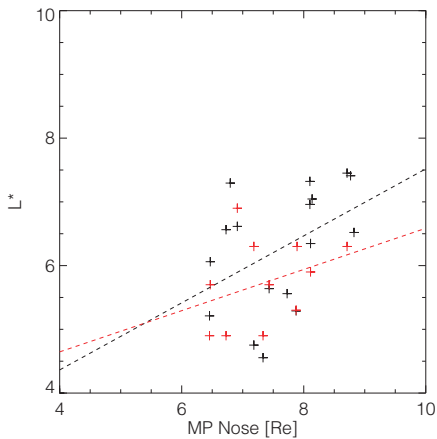


図8：磁気嵐イベントでの Shadowing 領域 (黒), Loss 領域 (赤) と磁気圏界面の位置の関係。

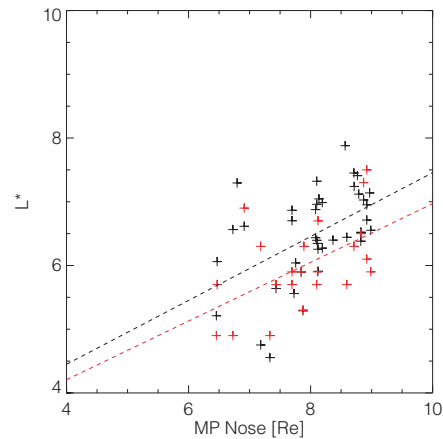


図9：高太陽風動圧, 磁気嵐の両イベントでの Shadowing 領域 (黒), Loss 領域 (赤) と磁気圏界面の位置の関係

これらの結果に共通して見られる傾向としては、磁気圏界面が地球側に近づくにつれて Shadowing 領域も Loss 領域も地球に近づいてくるといふこと、さらに Shadowing 領域と Loss 領域には差があり、Loss 領域は Shadowing 領域より内側まで及んでくるといふことである。これについては、5章で議論する。

5. Discussion

図7から図9より、Shadowing 領域と Loss 領域には差があるという結果が得られた。もし仮に磁気圏内の高エネルギー電子の消失現象が磁気圏界面からの消失だけに担われていれば、Shadowing 領域と Loss 領域がおおよそ一致することが期待される (図10-b)。しかしながら、今回得られた結果は Loss 領域が Shadowing 領域に比べてより地球側まで及んでいるといふものであった (図10-a)。

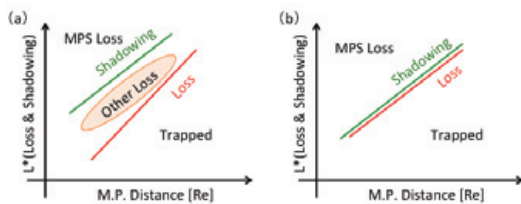


図 10 : Loss 領域と Shadowing 領域の関係について

この場合、Loss 領域より内側の領域は安定的に補足されている領域であり、Shadowing 領域より外側は MPS の影響で消失したと解釈することができる。しかし、Shadowing 領域と Loss 領域に挟まれた領域は MPS だけでは説明がつかない。したがって、MPS に加えてさらに他の消失過程が働き、その結果として全体の消失が起こっているということが示唆される。

磁気圏内の高エネルギー電子の消失過程については、1 章で述べた通り MPS の他にも MPS に続く Outward Diffusion や chorus や EMIC といった波動との波濤粒子相互作用の結果による粒子の大気中への落下消失が考えられている。そのため、今回は THEMIS 衛星での電子のピッチ角、Drift Shell Splitting に注目した解析を行ったが、今回の解析に加え、その他複数の衛星データとの解析を組み合わせることによって粒子の落下消失や Outward Diffusion の評価を行えば消失現象の全体の理解につながることを期待される。

6. Conclusion

- THEMIS-SST のデータと Drift Shell Splitting の理論から磁気圏内の高エネルギー電子の消失現象における時期圏界面からの消失の影響の評価を行った。
- 解析結果から Loss の影響は Shadowing の影響領域に比べ、より内側であることがわか

った。

- したがって MPS 単独では高エネルギー電子全体の説明はできず、やはり複数の消失過程の組み合わせで全体の消失が引き起こされていることが示された。
- MPS に組み合わさり、さらに高エネルギー電子を消失させているその過程については今後さらなる解析を行い明らかにしていく予定である。

7. Reference

- Angelopoulos, V. (2008), The THEMIS mission, *Space Sci. Rev.*, 141(1–4), 5–34, doi:10.1007/s11214-008-9336-1.
- Chen, Y., R. H. W. Friedel, M. G. Henderson, S. G. Claudepierre, S. K. Morley, and H. Spence (2014), REPAD: An empirical model of pitch angle distributions for energetic electrons in the Earth's outer radiation belt, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 1693–1708, doi:10.1002/2013JA019431.
- Dessler, A. J., and R. Karplus (1961), Some effects of diamagnetic ring currents on Van Allen radiation, *J. Geophys. Res.*, 66, 2289–2295, doi:10.1029/JZ066i008p02289.
- Millan, R. M., and R. M. Thorne (2007), Review of radiation belt relativistic electron losses, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 69, 362–377. CrossRef, Web of Science® Times Cited: 87, ADS
- Miyoshi, Y., K. Sakaguchi, K. Shiokawa, D. Evans, J. Albert, M. Connors, and V. Jordanova (2008), Precipitation of

- radiation belt electrons by EMIC waves, observed from ground and space, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L23101, doi:10.1029/2008GL035727.
- Morioka, A., H. Misawa, Y. Miyoshi, H. Oya, M. Iizima, and T. Nagai (2001), Pitch angle distribution of relativistic electrons in the inner radiation belt and its relation to equatorial plasma wave turbulence phenomena, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 931–934.
 - Ohtani, S., Y. Miyoshi, H. J. Singer, and J. M. Weygand (2009), On the loss of relativistic electrons at geosynchronous altitude: Its dependence on magnetic configurations and external conditions, *J. Geophys. Res.*, 114, A01202, doi:10.1029/2008JA013391.
 - Reeves, G. D., K. L. McAdams, R. H. W. Friedel, and T. P. O'Brien (2003), Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms, *Geophys. Res. Lett.*, 30(10), 1529, doi:10.1029/2002GL016513.
 - Roederer, J., and M. Schulz (1971), Splitting of drift shells by the magnetospheric electric field, *J. Geophys. Res.*, 76(4), 1055–1059.
 - Roederer, J. G. (1970), *Dynamics of Geomagnetically Trapped Radiation*, Springer, Berlin.
 - Saito, S., Y. Miyoshi, and K. Seki (2010), A split in the outer radiation belt by magnetopause shadowing: Test particle simulations, *J. Geophys. Res.*, 115, A08210, doi:10.1029/2009JA014738.
 - Summers, R. M., D. J. Roederer, R. M. Thorne, and F. Xiao (1998), Relativistic theory of wave-particle resonant diffusion with application to electron acceleration in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 103(A9), 20,487–20,500, doi:10.1029/98JA01740.
 - Shue, J.-H., J. K. Chao, H. C. Fu, C. T. Russell, P. Song, K. K. Khurana, and H. J. Singer (1997), A new function form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape, *J. Geophys. Res.*, 102, 9497–9511.
 - Tsyganenko, N. A., and M. I. Sitnov (2005), Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 110, A03208, doi:10.1029/2004JA010798.
 - D. L. Turner, S. K. Morley, Y. Miyoshi, B. Ni, C.-L. Huang, *Outer Radiation Belt Flux Dropouts: Current Understanding and Unresolved Questions*,
 - Turner, D. L., Y. Shprits, M. Hartinger, and V. Angelopoulos (2012), Explaining sudden losses of outer radiation belt electrons during geomagnetic storms, *Nat. Phys.*, 8, 208–212, doi:10.1038/nphys2185.
 - Ukhorskiy, A. Y., M. I. Sitnov, K. Takahashi, and B. J. Anderson (2009), Radial transport of radiation belt electrons due to stormtime Pc5 waves, *Ann. Geophys.*, 27(5), 2173.