

巨大磁気嵐時の放射線帯外帯 MeV 電子の変動

-特に主相に於ける MeV 電子の消失について-

小 原 隆 博

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

宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 第1研究ユニット(招聘)

[概要]

巨大磁気嵐時の、放射線帯外帯 MeV 電子の変動について、以下の2点を報告する。

- 1) 巨大磁気嵐主相では、外帯 MeV 電子の消失が顕著に起こるが、物理過程には複数ある。従来の断熱過程による減少、磁気圏境界面への流出に加えて、ベータトロンドリフト効果が重要である。本論文では、これらを、数量的に比較・検討したが、上記のプロセスを統合する事で、外帯 MeV 電子の消失が理解出来た。
- 2) 巨大磁気嵐時に、スロットを超えて内帯に侵入する MeV 電子が識別出来た。これは、内帯 MeV 電子のソースになる点でも重要である。

1. はじめに

地球の放射線帯は、内帯と外帯の2つの領域からなっているが[1]、90年代以降の研究で、外帯は激しく変動している事が明らかになっている[2]。これらの変動の多くは、磁気嵐の発生と密接に関係していて、磁気嵐の主相では外帯 MeV 電子が消失し、磁気嵐の回復相にて、再生される。回復相における MeV 電子の増加は、時に、磁気嵐前のレベルを大きく上回り異常に増加する事も多い[3]。このような時、放射線帯の領域を飛翔する人工衛星は、しばしば故障する事がある[4]。JAXA（宇宙航空研究開発機構）では、スペースステーションに搭乗している宇宙飛行士の健康を護るため、日本実験棟「きぼう」暴露部に、宇宙放射線環境を計測する装置を搭載し、リアルタイムで宇宙放射線量をモニターしている[5]。また、各種の人工衛星に宇宙放射線や地球磁場の計測装置を搭載し、それらの変動を観測している[6]。

本稿では、表題にあるように磁気嵐主相で発生する外帯 MeV 電子の消失について検討する。図1は、JAXAの遷移軌道衛星つばさ(MDS-1)に搭載された放射線粒子計測装置(SDOM)による MeV 電子の観測結果である[7]。縦軸は、電子フラックス、横軸は L 値である。磁気嵐前のフラックスを黒の実線で、磁気嵐ピーク時のフラックスを緑で示している。 $L = 3.5 \sim 4.0$ に若干 MeV 電子が残っているが、大半は消失している。その後、30時間経て、外帯は大きく回復しているが、この異常増加については、別の機会にまとめたい。

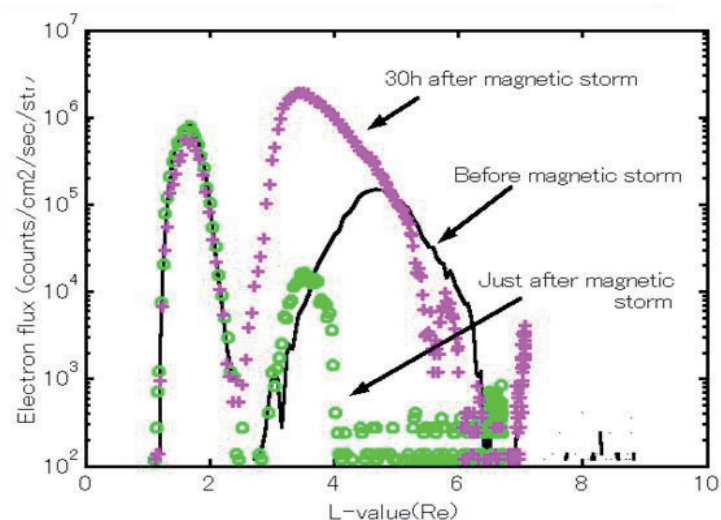


図 1. つばさ衛星によって観測された放射線 MeV 電子の変動 (after Obara et al.[7])

これまでの研究[8]で、外帯 MeV 電子消失の原因は、1) *Dst* effect、2) Convection out、3) Betatron drift effect、4) Precipitation が指摘されている。1) は、磁場強度減少による断熱的減速、2)は、磁気圏対流増大に伴う磁気圏昼側境界面への流出、3)は、磁場減少に生じた誘導電場による地球外向きへのドリフト、そして4) は、地球大気への降下である。以上の各プロセスについて検討した結果を、以下に報告する。

2. 放射線帯外帯 MeV 電子の消失

2-1. *Dst* effect

磁気嵐は、地上に設置されている磁力計にて識別出来るが、図 1 に示すように、磁気圏の赤道領域にて磁場減少は確認されている。

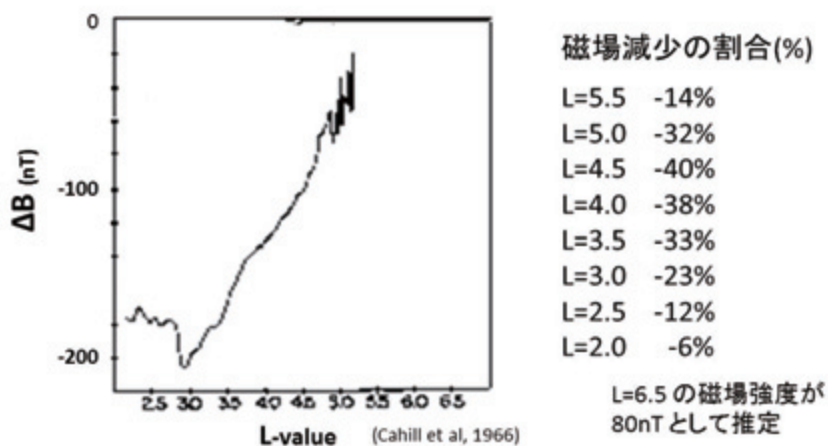


図 2. エクスプローラ 23 号によって観測された磁場減少。縦軸は磁場減少量、横軸は *L* 値を示す

エクスポーラ 23 号による観測では、減少は $L=3$ 付近で最大で、 $L>5.5$ の領域では僅かである。こうした減少は、その後の磁場観測でも確認されていて、最近の磁場モデルも、磁気嵐に対応している。

ヨーロッパのグループが、磁気圏が静かな状況が続いた状態では、放射線帯の外帯 MeV 電子は、熱的に安定な分布を示す事を示唆しているが、まだ検証はされていない。もし、マクスウェル分布をしていると仮定すると、磁場強度の減少によって MeV といった高いエネルギー電子のフラックスは有意に減少する。

まず、(1)式のように分布を仮定する。ここで E は電子のエネルギーで、 E_0 を 200~400keV 程度とする。次に磁場が ΔB だけ減った後のフラックスを、磁場減少の前のフラックスで規格化した式を求めると(2)式ようになる。ここで、 B はその場の磁場強度である。

$$F = F_0 \exp(-E/E_0) \text{ ----- (1)}$$

$$F_{\text{after}}/F_{\text{before}} = \exp(-(\Delta B/B)(E/E_0)) \text{ ---- (2)}$$

今、 $E_0 = 300 \text{ keV}$ として、 $E = 2 \text{ MeV}$ の外帯電子がどの程度フラックスが低下するかを計算した。結果を図3に示すが、 $L=3\sim6$ の広い範囲で有意なフラックスの減少が得られた。

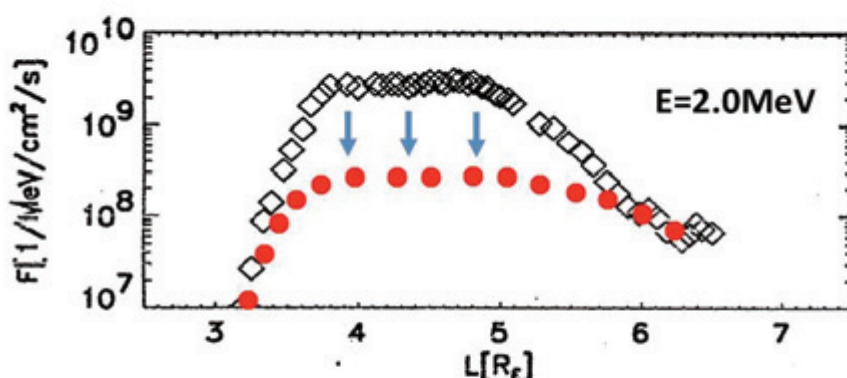


図3. $Dst = -200 \text{ nT}$ 程度の磁気嵐における 2MeV 電子の減少の様子。白丸と赤丸は、磁気嵐前と後の 2 MeV 電子のフラックスを示す

2-2. Convection Out

図3で示したように、 Dst effect では、十分に MeV 電子が除去出来ない事が分かった。次に、Convection Out について考える。Desorgher et al.[9] が計算しているように、磁気圏対流が促進すると、放射線帯外帯電子は、それまでの地球周回軌道から外れて、昼側磁気圏へ向かい始める。磁気嵐の大きさにも依存するが、 $Dst = -200 \text{ nT}$ 程度の磁気嵐では、 $L > 4.3$ 程度の領域の MeV 電子が除去される可能性がある。この様子を先の、 Dst 効果と重ねて図4に示しているが、図中②と示した範囲が、Convection Out のカバーできる範囲であろう。ここで、①は Dst 効果による減少である。

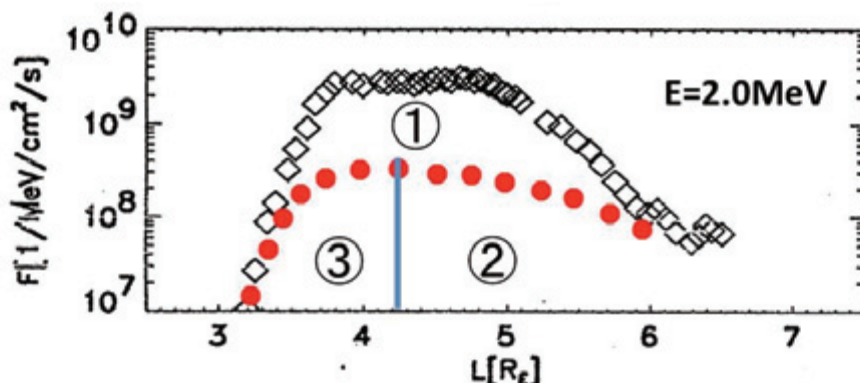


図 4. *Dst* 効果により期待される減少範囲を①、Convection Out により期待できる減少範囲を②で示す。③で示した範囲が除去されずに残っている

Desorgher et al.[9]は粒子の軌道計算であったが、千葉他[10]は電子のピッチ角分布を磁気嵐の前後にて調べた。その結果、夜側では遠方から $L=5$ 付近まで、ピッチ角 90 度の電子数が減少している事を見出した。これは、マグネトポーズシャドーイングとして知られている現象であるが、磁気嵐中では、 $L > 5$ の領域の電子は昼側磁気圏境界面に流出していく事を、千葉他[10]は確認した事になる。

2 - 3 . Betatron drift effect

図 4 で示したように *Dst* effect、Convection Out 効果では、外帯 MeV 電子を完全に消失させる事は出来ない。他の効果が必要になる。

急速に発達する磁気嵐では、 $\partial B / \partial t$ により、誘導電流が発生する。例として、2015 年 3 月 17 日の磁気嵐を取り上げる。この磁気嵐の主相では、1 時間に 30nT の磁場減少が見られている。そして、減少は十数時間に渡り継続した。 $L=4$ の位置で、発生する角度方向の誘導電場は、

$$E_{\theta} = -(r/2) \partial B_z / \partial t = 0.1 \text{ mV/m} \text{ ---- (3)}$$

となり、背景磁場強度を 300 nT 程度であるので、外向きのドリフト速度は 330 m/sec となる。これは、数時間で 1Re (Re:地球半径)、電子が移動するのに十分な速度である。

上記の誘導電場により生じる外向きドリフトは、図 4 の③領域の MeV 電子を②の領域へ輸送する。もし、背景磁場強度が更に小さい場合はドリフト速度は大きくなり、より短い時間で MeV 電子は領域③から領域②領域へと移動できる事になる。

誘導電場の生成については、既に Oya [11] が、その発生を議論している。Oya [11] は、リングカレントの構造モデルを導入し計算を進めた。得られた結果は、 $L=4$ の領域で、ドリフト速度は数百 m/sec であった。我々の計算の結果も、Oya [11] に極めて近いと言える。

3. 内帯への侵入

大きな規模の磁気嵐 (Dst が -150nT 以下) では、非常にしばしば外帯の放射線電子がスロットを超えて内帯へと侵入する事がある。図5 (上) は、JAXA のつばさ衛星(MDS-1) が観測した放射線帯高エネルギー電子の L - t ダイアグラムであるが、同図 (下) には磁気活動指数(Kp)と磁場変動量(Dst)を示している。スロットを超えて内帯に高エネルギー電子が侵入しているが、注意して見ると Dst が -150nT 以下の大きな磁気嵐時に対応している。

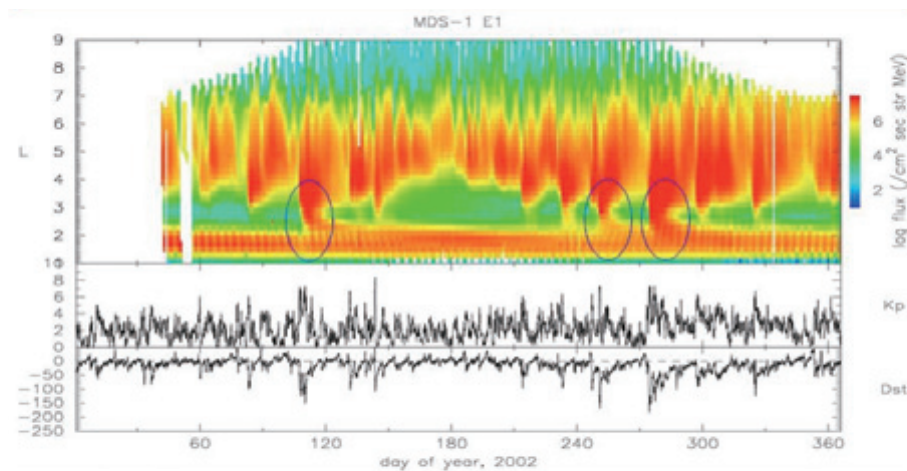


図5. つばさ衛星が観測した放射線帯高エネルギー電子と磁気擾乱を示す指数 (Kp, Dst)
(after Obara and Matsumoto [12])

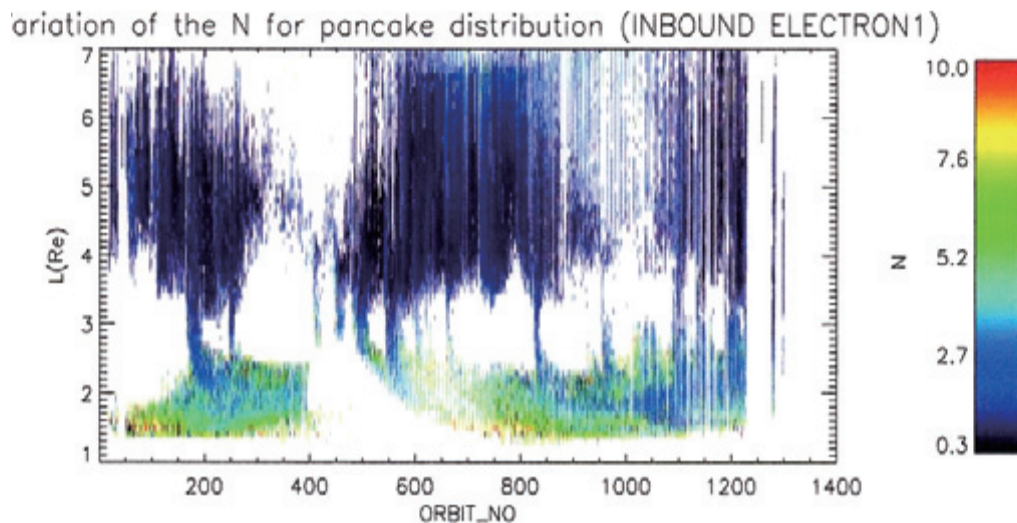


図6. 電子のピッチ角分布を $\sin^N \theta$ で近似したときの、 N の時間・空間分布
(after Obara and Matsumoto [12])

図 6 に示されている電子のピッチ角分布の特徴として、外帯電子は $N \sim 0.3$ 程度で極めて等方分布に近いが、内帯電子では $N > 5$ となり、90 度に集中する分布が確認される。図 5 で示したスロット越えの高エネルギー電子のピッチ角分布は、外帯電子の特徴を示している。この事は、Obara and Matsumoto[12] が報告しているが、大規模の磁気嵐では、磁気圏電場の非常な増大により外帯電子がスロット領域に押し込まれ、そのまま、内帯へと拡散的に侵入していくものと理解されている。

4. むすび

今回は、巨大磁気嵐時の放射線帯外帯 MeV 電子の変動について、1) 主相で見られる外帯 MeV 電子の消失と、2) スロットを超えて内帯に侵入過程について紹介した。1) の MeV 電子消失については、従来から指摘されていた諸点；即ち、断熱過程による減少、磁気圏境界面への流出、ベータトロンドリフト効果について、評価した。今回、特に触れていないが、大気への降下も消失過程の一つである。本論文では、これらを数量的に比較・検討し、上記のプロセスを統合する事で、外帯 MeV 電子の消失が理解出来るとした。また、2) のスロットを超えて内帯に侵入する MeV 電子については、大磁気嵐時に多くが見られていた。これら MeV 電子は、内帯 MeV 電子のソースになる点でも重要である。

本報告は、しかしながら、粒子の観測と理論的扱いからのみの指摘である。今後は、電場観測、磁場観測、そしてプラズマ波動観測と粒子の同時観測が重要である。JAXA 宇宙科学研究所が、2016 年夏に打ち上げる ERG 衛星は、放射線帯領域で上記の項目について、同時観測を実施する。ERG 観測データから、放射線帯外帯 MeV 電子変動の物理が判明すると期待される。

参考文献：

- [1] 小原隆博, 第 5 章 磁気圏, 第 6 章 磁気圏の粒子環境, 宇宙環境科学, オーム社, 2000
- [2] 小原隆博, 放射線粒子環境, P251-258, 日本航空宇宙学会誌, 2003
- [3] 小原隆博, 第 9 章 宇宙空間と人間, 太陽地球系科学, 地球電磁気・地球惑星圏学会編, 京大出版会, 2010
- [4] 小原隆博, 第 1 章 序, 総説宇宙天気, 柴田・上出編, 京大出版会, 2011
- [5] 小原隆博, 「きぼう」暴露部搭載・宇宙環境計測ミッション装置 (SEDA-AP), 電気学会誌 A, Vol.131, No.12, 965-970, 2011
- [6] Obara, T., H. Matsumoto, K. Koga, Space Environment Measurements by JAXA satellites and ISS, Acta Astronautica, Vol.7, 1-10, 2012
- [7] Obara, T., H. Matsumoto, K. Koga, H. Koshiishi, and T. Goka, MDS-1 Observations of Highly Energetic Electron Environment in the Inner Magnetosphere, Trans. JSASS Space Tech. Japan, Vol.7, No.26, 11-14, 2009

- [8] Friedel, R., G. Reeves and T.Obara, Relativistic Electron Dynamics in the Inner Magnetosphere: Review, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol.64, 265, 2002
- [9] Desorgher, L., P. Buhler, A. Zehnder, E.O. Fluckiger, Simulation of the outer radiation belt electron flux decrease during the March 26, 1995, magnetic storm, JGR, A9, 105, 21211-21223, 2000
- [10] 千葉貴司, 小原隆博, 栗田 怜, 三好由純, 放射線帯電子の消失に関する研究, 第 11 回宇宙環境シンポジウム論文集, 宇宙航空研究開発機構特別資料, JAXA-SP14-012, ISSN 1349-113X, 221-229, 2015
- [11] Oya Hiroshi, Effect of Betatron Drift on Plasmasphere and Plasmopause Verified by the Akebono (EXOS-D) Satellite Observations, Advances in Solar-Terrestrial Physics, edited by H.Oya, 145-174, 2004
- [12] Obara, T., and H. Matsumoto, Large enhancement of highly energetic electrons in the outer radiation belt and its transport into the inner radiation belt inferred from MDS-1 satellite observations, Sun and Geosphere, in press