

# 太陽活動下降期における静止軌道 MeV 電子の長期変動

小原 隆博（東北大），松本 晴久（JAXA），古賀 清一（JAXA）

## 概要

JAXA 静止軌道衛星による MeV 電子の観測から、静止軌道 MeV 電子の増加は春季においては toward セクターで、秋季では away セクターで顕著であった。これは、Russell-McPherron 効果として知られている事実と符合する。さらに、前太陽活動サイクルに於いて、静止軌道 MeV 電子フラックスは、2009 年 12 月に最低値を（ほぼゼロ）を示した。この時、磁気活動の大きさを示す aa 指数は最小値を示した。以上の 2 点は、静止軌道 MeV 電子増加が、サブストームの発生と強い関係がある事を示している。

## 1. はじめに

静止軌道衛星にとっては、高エネルギー(MeV)電子は、衛星内部帯電を引き起こし、衛星故障に至らせる危険な対象である（小原, 2011）。本論文では、MeV 電子の異常な増加について JAXA 衛星の観測を基に、これまでの研究結果を確認する。

太陽活動が下降する時期(declining phase)の特徴として、太陽風速度の増加がある。1970 年代の終わりに、Paulikas and Blake(1979)は、静止軌道の MeV 電子フラックスが、高速太陽風の到来によって増加することを見出した。さらに、Paulikas and Blake(1979)は、電子の増加が、太陽風磁場のセクター構造と良い対応があることも見出し、Russell-McPherron 効果(Russell and McPherron, 1973) が作用していると推測した。この予測を実証したのが Nagai(1988) で、MeV 電子フラックスは、春には toward sector で、秋には away sector で有意に増加することを示した。

この事から考えると、MeV 電子の増加は、サブストーム活動と密接にかかわっていると思われるが、McPherron et al. (2009)は、1989 年から 2000 年代初頭までの 10 年以上の観測データを用いて、この推測を実証した。

本論文の目的は、MeV 電子の異常な増加について JAXA 衛星の観測を基に、これまでの研究結果を確認することであるが、サブストームとの対応があるとすれば、静止軌道 MeV 電子フラックスは、aa インデックスに追従する筈である。磁気活動度極小と MeV 電子を比較することで、上記の説を確認する。

## 2. ETS-V 観測に静止軌道 MeV 電子観測

最初に、JAXA が 1989 年に打ち上げて、1997 年まで運用した技術試験衛星 ETS-V (きく 5 号) に搭載された放射線計測器による MeV 電子観測について述べる。

衛星が打ち上げられた 1989 年は、太陽活動が最も活発な年で、北海道でもオーロラが観測された。その後、太陽活動は低下を続け、黒点数や F10.7 の値は、1996 年末には最低値になっている。地磁気活動の最低は、1997 年になってからで、黒点など太陽表面活動の最低から約 1 年の遅れが識別された。

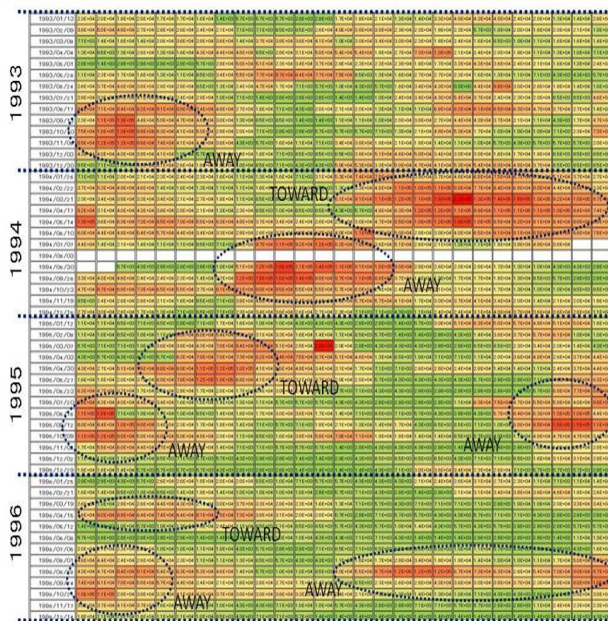


図 1: ETS-V が観測した MeV 電子フラックス。図中、red>10<sup>6</sup> (cm<sup>-2</sup>sr<sup>-1</sup>sec<sup>-1</sup>), 10<sup>6</sup>> yellow>4x10<sup>5</sup>, 4x10<sup>5</sup>> green の表示になっている。

図 1 は、MeV 電子の時間変化を示す。横軸は日にちで、27 日分を左から右へ、プロットしている。27 日で折り返して、下の行に、左から右へ 27 日分、同じようにプロットしている。縦軸は上から下へ、月が進む。年ごとに囲んでいるが、各年の左上隅が 1 月 1 日、右下隅が 12 月 31 日である。フラックスが高い時期

を red でしめすが、季節的は、春と秋にフラックスが高い事が、図 1 から判明する。

この図の red の時間の太陽風磁場の polarity を調べた結果を、図中に書き加えている。MeV 電子の増加は、例外なく、春は toward, 秋は away であった。これは、Mcpheeron et al. (2009) に代表される過去の結果と一致する。

### 3. DRTS 観測による静止軌道 MeV 電子観測

次に、JAXA が、2002 年に静止軌道に打ち上げた DRST 衛星に搭載された放射線計測器による MeV 電子観測について述べる。

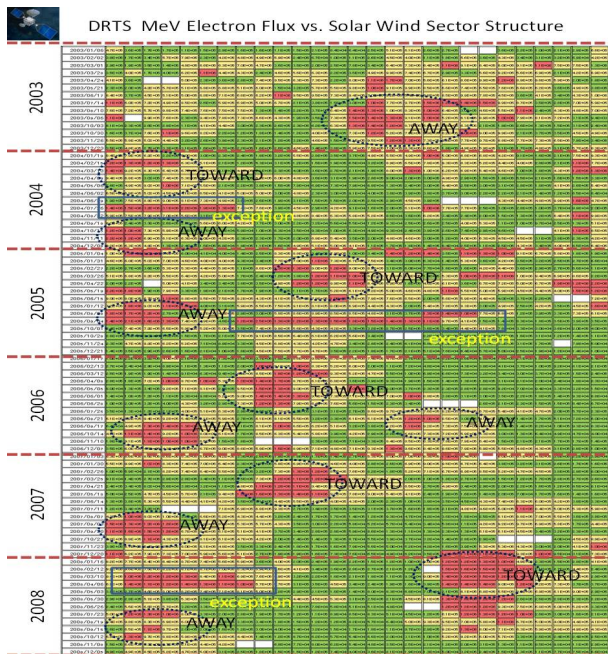


図 2: DRTS が観測した MeV 電子フラックス。図中、red $>10^6$  (cm $^{-2}$ sr $^{-1}$ sec $^{-1}$ ),  $10^6 > \text{yellow} > 4 \times 10^5$ ,  $4 \times 10^5 > \text{green}$  の表示になっている。

DRTS 衛星が打ち上げられた 2002 年は、太陽活動が徐々に低下していく下降期であった。この下降傾向は、2009 年までの非常に長期間に亘り続いたが、図 2 には、太陽活動が極小になった 2008 年までの DRTS 衛星の観測データを示している。

ETS-V 衛星と同じく、春と秋の時期に、MeV 電子フラックスが高い事が、図 2 からわかる。この図の中に、red の期間の太陽風磁場の polarity を書き加えている。MeV 電子の増加は、春は toward, 秋は away であった。これも、ETS-V の結果と同じである。

### 4. 静止軌道 MeV 電子フラックスの季節変化

ETS-V, DRTS 衛星の観測した MeV 電子フラックスの季節変化を、図 3,4 にしめす。ETS-V, DRTS とともに、日本上空の静止軌道において観測を行っているが、その磁気緯度は、南緯 9 度~10 度である。



図 3: ETS-V が観測した MeV 電子フラックスの季節変化。3月と8月に MeV 電子のピークが確認される。

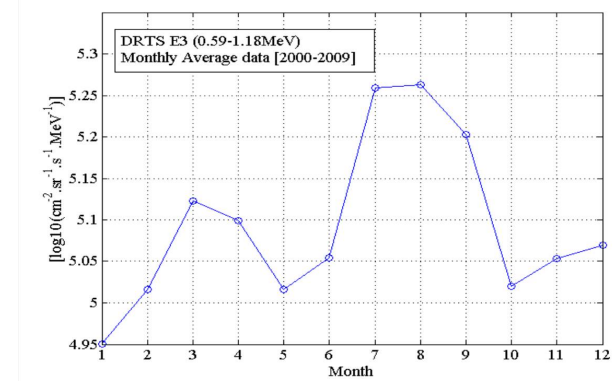
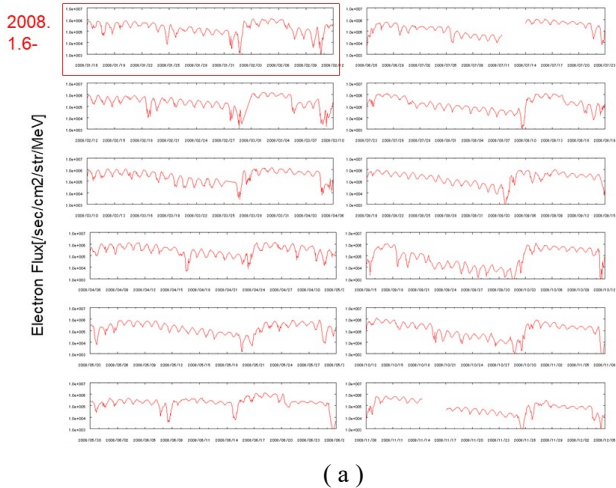


図 4: DRST が観測した MeV 電子フラックスの季節変化。3月と8月に MeV 電子のピークが確認される。

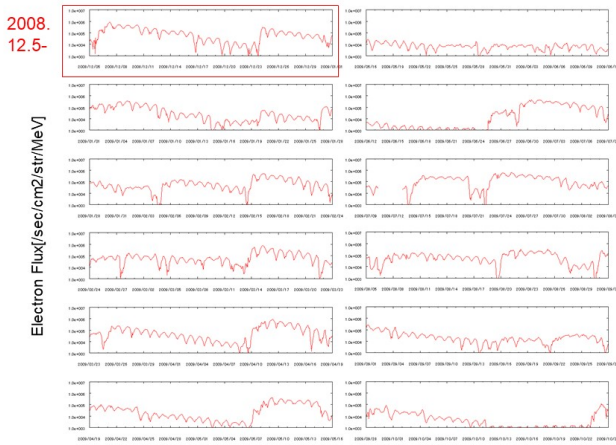
図 3,4 から、MeV 電子フラックスが、3月と8月月に多いことが分かる。Mcpheeron et al. (2009) によれば、太陽風磁場はアルキメデススパイラル構造を持っているので、地球の磁極の傾きを Z 軸とした時に、太陽風磁場のアルキメデススパイラル方向を向いた成分が、Z 軸に最も大きな投影成分を持つのは、2 月頃と 8 月頃になる。よって、図 3,4 の結果は、Russell-McPherron 効果を反映するものである。

### 5. 前太陽周期における静止軌道 MeV 電子フラックスの最小時期

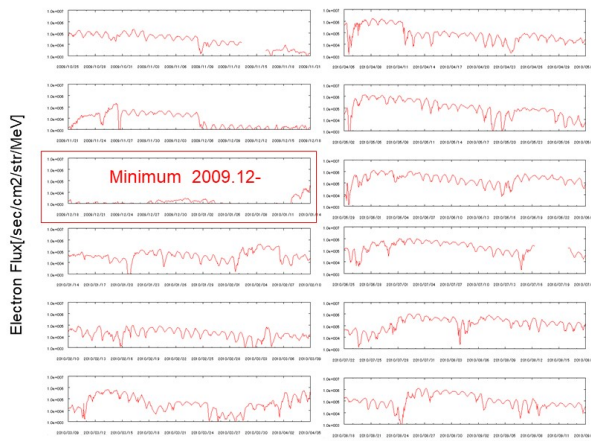
DRTS 衛星による MeV 電子観測の結果を、2008 年から 2010 年について、時系列で見ていく。図 5 (a), (b), (c) に結果を示す。



(a)



(b)



(c)

図 5: (a) 2008.1.6- 2008.12.4, (b) 2008.12.5-2009.10.24, (c) 2009.10.25- 2010.9.24 期間の DRTS による MeV 電子フラックスの変化

図 5 (a), (b), (c) は共に、左上から下に時間が進み、右上に戻って、さらに下に時間が進んでいく。それぞれのパネルの横軸は時間で、27 日をカバーしている。MeV 電子フラックスの高い時期が、27 日の中に、1 回

もしくは 2 回見出される。高速太陽風が到来した時期に対応している。

注目したい事は、(b) の後半から MeV 電子フラックスの低下が顕著で、(c) の左、上から 3 つ目のパネルにあるように、2009 年 12 月は、ほとんど MeV 電子フラックスが存在していない。よって、2009 年 12 月が、MeV 電子フラックスの極小だったと言える。

### 6. 地磁気活動指数の最小時期

2009 年 12 月が、DRTS 衛星による MeV 電子フラックスの極小時期であったことから、地磁気活動との対応を調べた。aa 指数を図 6 に示す。

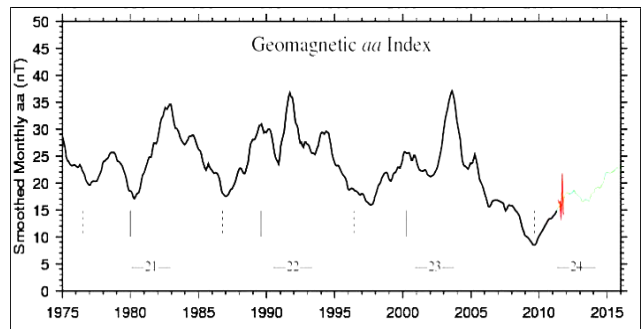


図 6: 地磁気活動を示す aa 指数の過去 30 数年の推移。2009 年 12 月がこの期間の最小であることがわかる。

図 6 から、2009 年 12 月がこの期間の最小であることがわかる。2009 年は、<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>によれば、太陽風速は極端に遅く(~300km/sec)太陽風磁場強度も極端に小さい(~3nT)ことが特徴であった。このような太陽風状況であったので、aa 指数も、非常に小さな値をとったと思われる。

### 7. まとめと考察

静止軌道 MeV 電子の増加が春と秋に大きい事は、Russel-McPherron 効果によって発生したサブストームによって、種の電子が加速されたとする 2 段加速説(Obara et al., 2000, 2001) と矛盾しない。これは、サブストームで尾部から注入された~30keV の種電子が、同じく注入された数 keV の電子が発生させた VLF 波動によって MeV まで加速されることを主張する説である。VLF 波動の同時観測は、ETS-V, DRTS では行われておらず、GOES 衛星でもなされていない。しかし、Akebono 衛星などによる波動観測の結果は、イベント解析ではあるが、VLF 波動の発生と MeV 電子の生成を示している(Kasahara et al., 2009)。よって、ETS-V,

DRTS 衛星による観測結果を、他の衛星による VLF 観測結果と統計的に比べる作業を、今後行っていく。

サブストーム活動が全く起こらない状況では、MeV 電子増加が発生しないことを示す目的で、MeV 電子フラックスの極小を調べたところ、2009 年 12 月が、その候補月となった。さらに、この月が太陽活動極小期にある事から、太陽風状況を見たところ、太陽風速は極端に遅く(~300km/sec)太陽風磁場強度も極端に小さい(~3nT)ことがわかった。当然のことではあるが、サブストーム活動も顕著なものは無かった。この観測事実も、サブストームによって発生した VLF 波動が原因となって、MeV 電子を生成させるシナリオと矛盾しない。

なぜ、aa 指数の最小が、太陽黒点数および F10.7 フラックスの最小から 1 年程度遅れるかについては、適切な説明は、まだ無い。上記の傾向は、前太陽周期、前々太陽周期でも顕著であり、広く認められる傾向のようである。

以上、太陽活動下降期における静止軌道 MeV 電子変動の特徴を述べたが、MeV 電子発生 of 物理にとどまらず、太陽風磁場強度の変化にも話が及んだ。今後、総合的に追加研究を行っていく。

#### 【参考文献】

Kasahara, Y., Y.Miyoshi, Y.Omura, O.P. Verkhoglyadova, I.Nagano, I.Kimura, and B.T. Tsurutani, Simultaneous Satellite Observations of VLF Chorus, Hot and Relativistic Electrons in a Magnetic Storm “Recovery” Phase, *Geophys. Res. Lett.*, 36(L01106), doi:10.1029/2008GL03, 2009

McPherron, R.L., D.N.Baker, N.U.Crooker, Role of the Russell–McPherron effect in the acceleration of relativistic electrons, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 71, 1032–1044, 2009

Nagai, T., “Space weather forecast”: prediction of relativistic electron intensity at synchronous orbit. *Geophys. Res. Lett.* 15 (5), 425–428, 1988

Obara, T., T.Nagatsuma, M.Den, Y.Miyoshi and A.Morioka, Main-phase Creation of “Seed” Electrons in the Outer Radiation Belt, *Earth Planets Space*, 52, 41, 2000

Obara, T., Y. Miyoshi and A. Morioka, Large Enhancement of the Outer Belt Electrons during Magnetic Storm, *Earth Planets Space*, 53, 1163, 2001

Russell, C.T. and R.L. McPherron, Semiannual variation of geomagnetic activity, *JGR-Space Physics*, Vol.78, 1, 92-108, doi.org/10.1029/JA078i001p00092, 1973

Paulikas, G. A., and J. B. Blake, Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: Energetic electrons at the synchronous orbit, in *Quantitative Modeling of Magnetospheric Processes*, AGU Geophys. Monogr. Ser., vol. 21, pp. 180–202, 1979

小原隆博, 第 1 章 宇宙環境被害と宇宙天気, 総説宇宙天気, 京都大学出版会, p.1-28, 2011