

宇宙天気と宇宙飛翔体環境

小原隆博

通信総合研究所(CRL)・電磁波計測部門

宇宙航空研究開発機構(JAXA)・総合技術研究本部

宇宙天気プロジェクト

通信総合研究所（CRL）で進めている宇宙天気プロジェクトは、太陽から地球までの広い宇宙空間に生起する種々のじょう乱現象の予報を目的にしている。図1は、宇宙環境のじょう乱から障害までをまとめたものである。

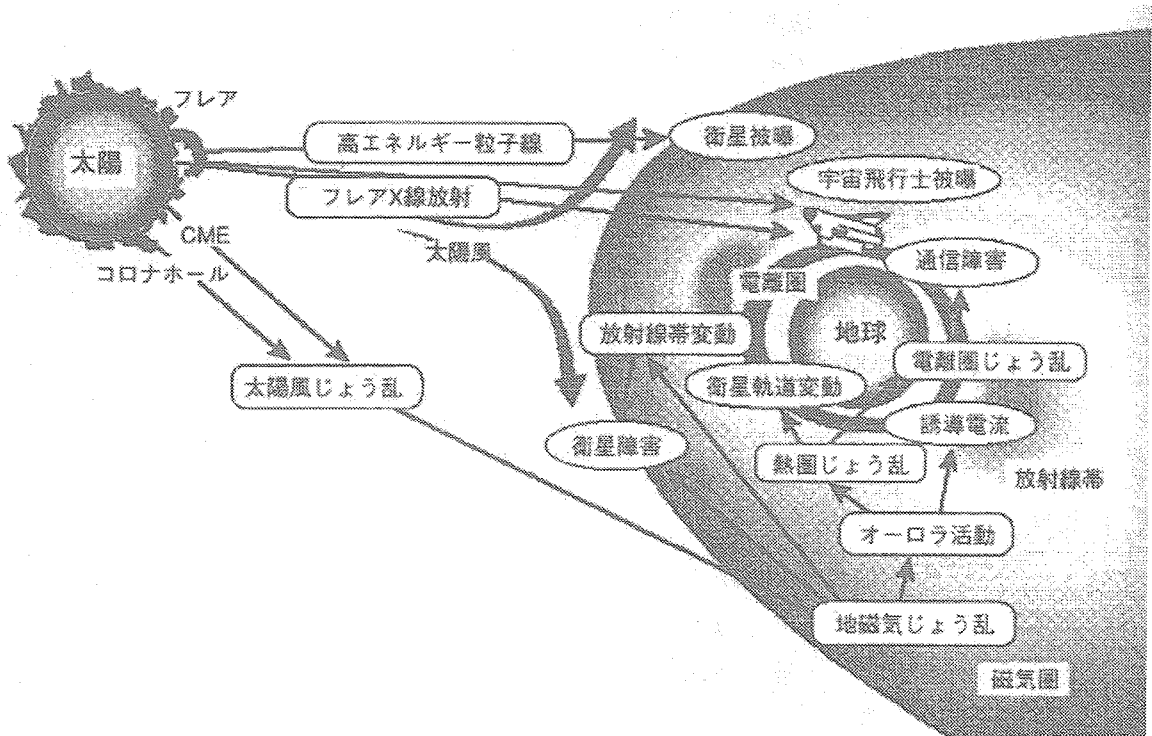


図1、宇宙環境じょう乱から障害までのサマリー

宇宙環境の激しい変動の原因は、太陽にある。太陽面の活動領域で、大規模な爆発現象（太陽フレア）が発生すると、周囲に向かって大量のガス（プラズマ）を放出する。CMEとして知られているのがそれで、放出されたガスの塊は、2～3日で地球に到達して磁気嵐を発生させる。その影響は、放射線帯外帯の活性化や大気膨張となって現れる。表1には、障害を種類毎に、主たる原因とともに示している。人工衛星や宇宙ステーションといった宇宙機のみならず、衛星-地上通信、衛星からの電波利用、さらに地上のインフラに対する悪影響を、宇宙のじょう乱は引き起こしている事に注意したい。

発生箇所	障害	主な原因
宇宙機本体	表面帯電 深部帯電 論理素子の反転、破壊 (SEU,SEL) 材料劣化 軌道変化	高温プラズマ 放射線粒子 放射線粒子 太陽フレア粒子、放射線粒子 大気膨張
電波利用	測位誤差 (GPS 等) シンチレーション (通信)	電離層全電子数 電離圏不規則構造
有人宇宙活動	放射線被曝	太陽フレア粒子、放射線粒子
地上施設	送電システムへの誘導電流 短波(HF)通信障害	地磁気嵐 電離圏嵐、太陽フレア X 線

表 1、宇宙じょう乱による障害

静止軌道衛星など人工衛星が飛翔する宇宙空間は、地球の磁場が支配する領域で、磁気圏と呼ばれている。磁気嵐は磁気圏で発生する最大規模のエネルギー現象で、このときオーロラ現象も活発になる。活発化したオーロラ爆発によって、静止軌道衛星は、大量の高温プラズマを浴びることになり、異常に高い電圧に衛星本体が帯電する。本研究会のテーマである衛星帯電は、このような時に発生する。衛星帯電に関しては、他の論文に譲ることにして、以下では、放射線環境に焦点を当てて、この分野の研究の最新の動向をまとめる。

衛星故障と放射線粒子

今日の社会生活において、放送衛星、通信衛星、気象衛星は、必要不可欠な存在になっており、それらから得られるメリットは、実に大きい。さらに、高精度測位衛星や、情報収集衛星、国際宇宙ステーションなど、今後の宇宙開発計画も発展が期待出来るなかで、宇宙機を取り巻く懸念材料に、宇宙放射線による被害がある。高エネルギー放射線粒子が人工衛星に及ぼす影響に、半導体素子、太陽電池パネルなど、各種搭載機器への悪影響がある。放射線電子が、衛星の深部にまで侵入し帯電破壊を引き起こし、永久故障にいたった事例も数多く報告されている。放射線陽子は、太陽電池パネルの出力低下を招き、衛星寿命を短縮する。いずれも、マイナスの経済効果を生む。一方、宇宙飛行士にとって、放射線被曝は深刻である。地球磁気圏は、その磁場により、外来宇宙放射線の侵入を、ある程度防いでいるが、静止軌道位置では、磁場による遮蔽はほとんどなく、太陽フレア粒子などの直撃を受ける。低高度を飛翔する国際宇宙ステーションやスペースシャトルにおいても、高緯度域では、降下して来る放射線粒子に直撃される。船外活動を行う時は、とくに宇宙放射線については、注意を払う必要がある。

宇宙機器が受ける放射線障害は、シングルイベントに代表される陽子からの影響と、深部帯電に代表される電子からの影響に大別される。最初に、シングルイベントについて説明する。衛星には数多くの半導体素子が搭載されており、昨今は、その集中回路化が著しい状況である。そうした集中回路に放射線粒子が飛び込むと、電離作用により発生した電荷が、集中回路に疑似パルスが発生させる。これをシングルイベント（単発現象）とよび、その結果生じる論理反転をシングルイベントアップセット(SEU)と呼んでいる。この現象は、放射線帯内帯において、非常に頻繁に見られるが、静止軌道衛星においても、発生する。前者は、放射線帯内帯を構成する高エネルギー陽子（プロトン）が、主たる原因である事に対して、静止軌道では、フレアによって発生した太陽プロトンが、SEUの原因である。シングルイベントは、これまで多くのテスト用衛星で、メカニズムの解明や対処法の発見を目指して、実験が行われて来ている。代表的な衛星に、米国が1990年に打ち上げたCRESS衛星があるが、同衛星は、1990年から1991年にかけて、複数の半導体素子を用いて、SEUに関する実験を実施し詳細なデータを取得した。最近では、宇宙開発事業団が、2002年2月に、実験用衛星MDS-1（つばさと命名）の打ち上げに成功し、翌年の9月まで運用した。シングルイベントの防止には、半導体素子を十分にシールドし、プロトンの侵入を防ぐ手段がとられている。しかし、シールド厚を増す事は、衛星の重量増に直接に影響するので、部品レベルでの対策が、極めて重要になっている。もちろん、放射線プロトンの異常増加を予知する事により、危険な状況から回避する事もできるが、その時は、通電オフなどによる動作の停止（インターラプト）は免れない。

1990年代に入ると、高エネルギー電子の異常増加に起因する衛星障害（satellite anomaly）が頻発したが、この背景には、素子の高度集積化があげられる。MeVのエネルギーを持つ高エネルギー電子は、衛星の深部にまで侵入出来る。侵入したMeV電子は、集積回路路上に帯電する。帯電は誘電的に起こるので、リークは非常にゆっくりで、MeV電子の侵入量が多い場合、帯電電圧は非常に大きくなる。絶縁限界を越えると放電が発生し、異常電流パルスの発生や、最悪の場合、素子の破壊が起こる。このような時、衛星は故障を起こす事になる。MeV電子の侵入に対処する為に、基板やケーブルのアース設計に工夫をこらす努力や、実効的なシールド厚を増やす試みが行われているが、まだ有効な方策が見出されていない。放射線の影響を受けにくい新素材の開発や、帯電を極力小さくする新しい集積技術など、今後の開発に期待する面が極めて大きい。

放射線帯の構造

1958年に打ち上げられたエクスプローラ3号が、放射線帯の2重構造を明らかにした。地球に近い領域は内帯と呼ばれ、高エネルギー（ >50 MeV）のプロトンが主成分である（電子もある）。これに対して遠方の外帯は1 MeV以上の電子が主成分となっている。

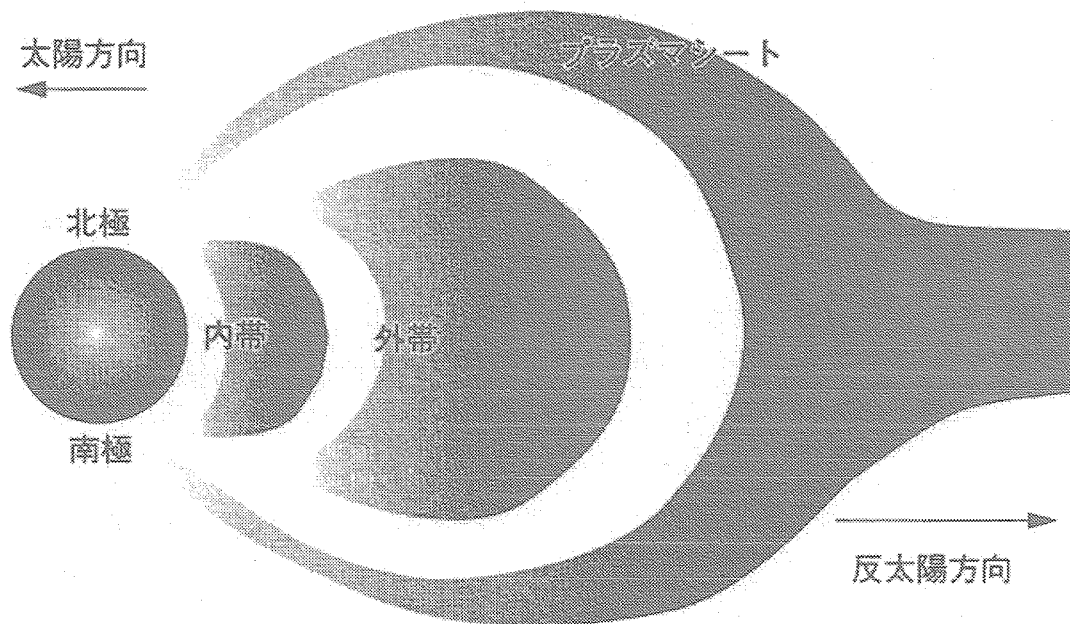


図2、放射線帯とプラズマシート（夜側の断面図）

L が 2 から 3 の領域は、高エネルギー電子が極端に少なくなっていて、谷間（スロット）と呼ばれている。成因の一つとして、内帯粒子が $L=2$ 以上の領域では、そこを飛び交う電磁波（ホイッスラーモードと呼ばれる波）と激しく相互作用を起こし、ピッチ角が散乱されて電子が大気に降下してロスする事があげられている。ホイッスラーモードの電磁波は、赤道付近の宇宙空間で、比較的エネルギーの低い電子により生成されている。対流圏で発生する雷放電や電送線からの放射も無視出来ない。これらの人工・自然電波の影響で、スロットが形成されることになる。

放射線帯外帯の主成分は、高エネルギー電子である。数 10keV から 10MeV の広いエネルギー範囲に及ぶが、共通して地球半径 3 倍程度から静止軌道位置（地球半径の 6.6 倍）を越える領域まで存在している。数 MeV の電子を例にとると、フラックスのピーク位置は $L=4$ 程度の領域にある。放射線帯の高エネルギー電子の起原として、磁気圏尾部プラズマシートから、エネルギーの高い電子が地球に向かって拡散してくるという説明が 80 年代の半ばまでなされていた。地球に近づくにつれて、磁場強度が増加する。電子は断熱不変量保つ性質があるので、電子のエネルギーは、磁場強度の増大、磁力線の長さの減少とともに増加する。いわゆる β トロン加速によって、エネルギーの増大が説明されていた。

静止軌道における MeV 電子の変動は、60 年代から判明していた。磁気嵐が起これると、 MeV 電子のフラックスは減少する。この状態が 1 日程度継続した後、磁気嵐が回復相に入ると、フラックスは増加する。60 年代の頃は、こうした変動は、リングカレントが作る磁場減少により

引き起こされた断熱変化として説明されていた。いくつかの論文は、外帯中心部においても、同様な変動が起こっている事を指摘したが、断熱変化による説明が多くなされていた。いくつかの磁気嵐においては、外帯 MeV 電子フラックスは、磁気嵐以前のレベルを遥かに凌ぐ事が見出されたが 90 年代まで、放射線帯は比較的静かな領域という認識が、宇宙空間の研究者にはあった。

発見された新変動

激しい時間変動が外帯で発見されたのは、1990 年代初頭といってよい。前述の CRESS 衛星、そして日本のあけぼの衛星が、外帯の非常に激しい変動を詳しく観測した。これは磁気嵐がおこると外帯の MeV 電子は消失し、その後、磁気嵐の回復相で増加するという変化であった。増加は 1-2 日でおこり、その後 2 週間程度のゆっくりした時定数で MeV 電子フラックスは減少していった。

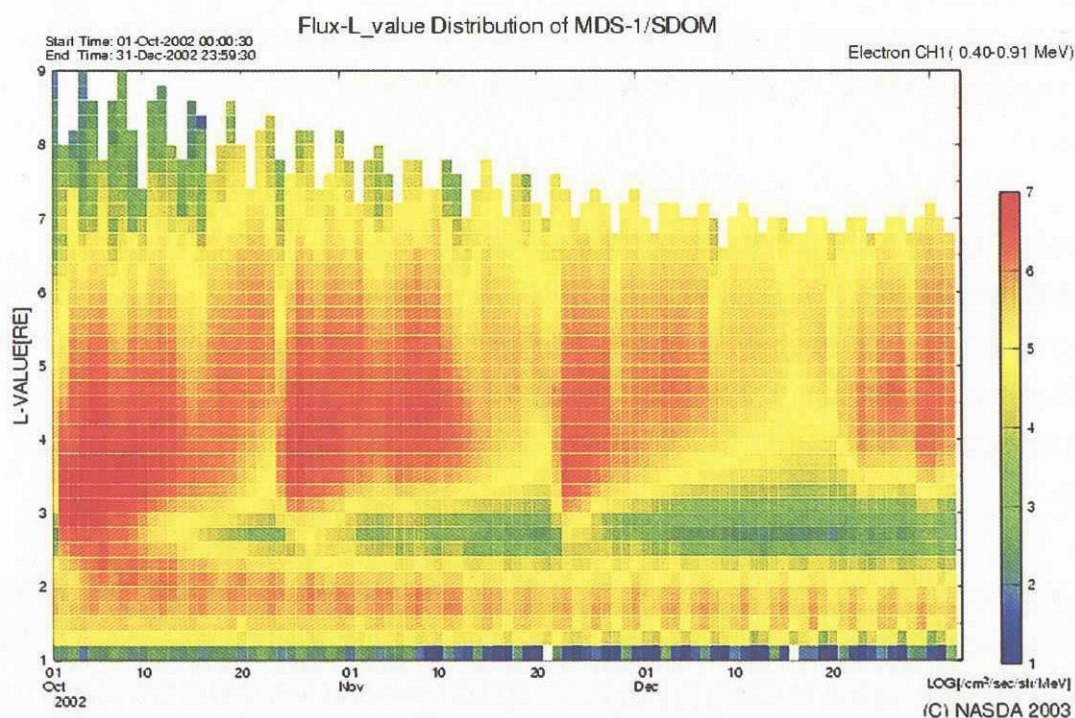


図 3、つばさが観測した放射線帯の変動

図 3 は、MDS-1(つばさ)衛星が観測した、放射線帯電子(0.4-0.9MeV)分布の時間変化である。横軸は時間で、縦軸は L 値で、その場の電子フラックスを、カラーコードで示している。先に述べたように、L=1.8 付近に内帯が観測され、その外側にスロットが存在している。図に示された 2002 年 10 月 1 日から 12 月 31 日までの間に数回、磁気嵐が発生し、その度毎に、外帯電子が増加している。つばさの 1 年半に渡る観測の結果から、大きな磁気嵐ほど、地球に近いところに外帯が再生される事が分かった。増加は、1-3 日の比較的長い時間、継続し、その後、

ゆっくりと減少していく事が、つばさの観測から分かる。図の最初にある 10 月 1 日に発生した磁気嵐では、高エネルギー電子がスロットの領域を越えて内帯にまで侵入している姿が見えるが、これは赤道域で観測した、つばさならでの貴重な結果である。

放射線帯外帯の再出現については、大きく 2 つの立場がある(Friedel et al., 2002)。一つは、外部供給説とも呼ぶべき説明で、プラズマシートから、高いエネルギー (~ 100 keV 程度) の電子が拡散によって外帯領域まで達するという考え方で、この場合、 β トロン加速 (磁場強度増加による加速) によって MeV 電子が生成されるというものである。外部供給説として提案されているものに、

- * 木星放射線帯粒子の地球磁気圏・放射線帯への進入 (Baker et al., 1979, 1986)
 - * 磁気嵐回復相時、Dst の復帰に伴う、電子の断熱的加速 (Kim and Chan, 1997; McAdams and Reeves, 2001)
 - * $X = -10$ Re から、サブストームに伴う粒子の直接注入 (Ingraham et al., 1996, 2000)
 - * 異常に促進された内向き拡散 (Hilmer et al., 2000; McAdams et al., 2001)
 - * ULF 波動との共鳴による内向き拡散の増大 (Elkington et al., 1999)
- がある。

これに対して、内部加速が本質とする立場をとる論文は、

- # 大規模な再循環モデル (Nishida 1976; Fujimoto and Nishida, 1990)
 - # プラズマポーズ領域における、小規模再循環モデル Boscher et al., 2000; Liu et al., 1999)
 - # ホイッスラー波によるサイクロトロン加速 (Summers et al., 1998)
 - # ULF 波動による加速 (Hudson et al., 1997; Summers and Ma, 2000)
- である。

内部加速が本当に起こっているかを判断する為には、位相空間密度を調べれば良い。放射線帯外帯において MeV 程度のエネルギーを持つ電子の第 1 断熱不変量 μ は 1000 MeV/G 程度である。Obara et al. (2001) による解析の結果、磁気嵐回復期に $L \sim 4$ 付近から位相空間密度の増加が起こっている事が見いだされた。明らかに内部で加速が起こった事実を示す結果が得られた。こうした事実は、他の衛星観測からも、部分的にはあるが指摘されている。

Fujimoto and Nishida (1990) は、再循環モデルを地球放射線帯に適用し、内部加速が地球放射線帯でも重要である事をシミュレートした。再循環説の問題点であった時間がかかり過ぎる事を克服する目的で、Boscher et al. (2000), Liu et al. (1999) は、より小さなスケールに再循環モデルを適用した。上記のそれぞれの論文の違いは、拡散やピッチ角拡散を起こす物理プロセスの違いである。しかしそれぞれが指摘したプロセスは排他的ではない。もっと直接的に波動に

より電子加速を起こそうという考えがある(Horne and Thorne, 1998; Summers et al., 1998)。ピッチ角がロスコーンから十分離れている電子を系統的に加速する波動としては、VLF/ELF ホイッスラー波が主であると考えられる。この波動は、磁気嵐の回復相に、夜から朝にかけて発生しているが、波動を起こす数 keV のホットが電子がこの領域に侵入して強い波動を発生させている。加速される種の電子（シード電子）が必要で、これは 30–100keV 程度の電子群である。いずれも磁気嵐の最中に発生するサブストームにより L=4 付近まで注入される(Obara et al., 2000b, 2001)。これらの種の電子がその場で加速・加熱を受けて、相対論的電子が生成されることがシミュレートされた(Miyoshi et al., 2003)。加速効率は、波動の強度に依存する。磁気嵐回復相でサブストームが頻発すれば、波動を起こすホットな粒子が補給されて、強い波動は持続する。外帯電子の増加の程度は、磁気嵐回復相の磁気活動度によって制御されている。再生放射線帯の位置は、リングカレントの位置と同じであるとの結果があり、波動による内部加速は、信ぴょう性が高いと思われる。

放射線帯の変動予測に向けて

放射線帯電子の変動は、まだ完全には理解出来てはいないが、全てが判明しても、さらに大きな課題がある。それは MeV 電子の異常増加を予報する事である。どのような頻度で、どの程度、MeV 電子は異常増加を起こすかを知る事は、個々の衛星設計に非常に役立つ。また、衛星運用の現場でも、増加予報は有効である。事実、MeV 電子が異常に増加すると、衛星搭載の各種センサーは正しい値を示さない事が多い。危険なオペレーションは出来るだけ控える必要があるが、逆にいつになれば放射線量が低いレベルに復帰するかも予報されなければならない。安全な宇宙機の運用の為に宇宙放射線予報と放射線モデル開発がなされる必要がある。

放射線帯外帯 MeV 電子の増加は、磁気嵐回復相における地磁気活動によっていることが、我々の研究から示唆されたので、早速、人工知能ネットワークによって検証を試みた。用いたデータは CRL 平磯宇宙環境センターで 1999 年まで取得されていた「ひまわり」衛星による静止軌道における MeV 電子フラックスのデータである。オーロラ活動指数を入力として、静止軌道における MeV 電子フラックスを予想したが、非常に良い精度で予測が出来た(Fukata et al., 2002)。その後、スイスのグループと $4 < L < 6$ の範囲の総 MeV 電子量を、AL インデックスから求める試みを行ったが、静止軌道と同様に予測精度は高い。地磁気活動と相関が高い事を物理的に解釈するとき、放射線帯外帯領域における、内部的な加速を示唆していると思われる。これまで、我々は、一貫して内部加速説を主張して来た(Obara et al., 2000a, 2000b, 2001; Miyoshi et al., 2003)。この考えが本当に妥当なものなのかを判断する手段のひとつが、予報アルゴリズムの評価であろう。AL インデックスを用いた予測が良好な結果を示す事は、内部加速のひとつの支持となるとと思われる。

最後に、我々がこれから取り組もうとしている「放射線予測モデル」について、まとめる。

- 1 ソース電子モデル：リングカレント電子（数10–100KeV）
 - 2 波動モデル：熱電子（1–2eV）分布の変化、注入電子（数keV）時間空間変化
 - 3 粒子加速モデル：相対論的粒子加速理論の精密化
-

多種類の電子群の空間分布を求めながら、相互作用系（複合系）として、それらの時間・空間発展を解いていく予定である。予報の期間は、どこまで先の太陽風の変化が予測出来るかにかかっている、と同時に、どのような磁気圏じょう乱が、今後起こるかが重要である。放射線帯予報はひとり MeV 電子にとどまらず、太陽風予報、磁気圏予報の集大成としての意味を持つ宇宙天気予報項目である。

謝辞

本研究は、CRL 宇宙天気予報プロジェクトの一つとして行われている。共同研究をしていただいている東北大学の森岡教授、三好博士に感謝致します。

参考文献

Baker, D. N., P. R. Higbie, R. D. Belian, E. W. Hones, Do Jovian electrons influence the terrestrial outer radiation zone ?, Geophys. Res.Lett., 6, 531, 1979.

Baker, D. N., J. B. Blake, R. W. Klebesadel, P. R. Higbie, Highly relativistic electrons in the earth's outer magnetosphere: 1. Lifetimes and temporal history 1979–1984, J. Geophys. Res., 91, 4265, 1986.

Boscher, D., S.Bourdarie, R.M.Thone, B.Abel, Influence of the wave characteristics on the electron radiation belt distribution, Adv.Space Res., 26, 163, 2000.

Elkington, S.R., M.K.Hudson, A.A.Chan, Acceleration of relativistic electrons via drift-resonant interaction with toroidal-mode Pc-5 ULF oscillation, Geophys.Res.Lett., 26, 3253–3276, 1999.

Friedel, R.H.W., G.D.Reeves, T.Obara, Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere --- a review, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 64, 265–282,

2002.

Fujimoto, M., and A. Nishida, Energization and anisotropization of energetic electrons in the Earth's radiation belt by the recirculation process, J. Geophys. Res., 95, 4265-4270, 1990.

Fukata, M, S. Taguchi, T. Okuzawa, T. Obara, Neural Network Prediction of Relativistic Electrons at Geosynchronous Orbit During the Storm Recovery Phase, Ann. Geophys., (20), 947-951, 2002

Hilmer, R.V., G.P. Ginet, T.E. Cayton, Enhancement of equatorial energetic electron fluxes near L=4.2 as a result of high speed solar wind streams, J. Geophys. Res., 105, 23311-23322, 2000.

Horne, R.B., and R.M. Thorne, Potential waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms, Geophys. Res. Lett., 25, 3011-3014, 1998.

Hudson, M.K., S.R. Elington, J.G. Lyon, V.A. Marchenko, I. Roth, M. Temerin, J.B. Blake, M.S. Gussenhoven, J.R. Wygant, Simulations of radiation belt formation during storm sudden commencements, J. Geophys. Res., 102, 14087-14102, 1997.

Ingraham, J. C., T. E. Cayton, R. D. Belian, R. A. Guyker, M. M. Meier, G. D. Reeves, Multi-satellite characterization of the large energetic electron increase at L=4-7, in the five-day periods following the March 24, 1991, solar energetic particle event, AIP conference proceeding, Vol.383, Woodbury, NY, p.103, 1996.

Ingraham, J. C., T. E. Cayton, R. D. Belian, R. Christensen, R. H. W. Friedel, M. M. Meier, G. D. Reeves, M. Tuszewski, Substorm injection of relativistic electrons to geosynchronous orbit during magnetic storm: a comparison of March 24, 1999 and March 10, 1998 storms, EOS Transactions, AGU (Suppl. 81), S382, 2000

Kim, H. -J., A.A. Chan, Fully-adiabatic changes in storm-time relativistic electron fluxes, J. Geophys. Res., 102, 22107, 1997.

Liu, W. W., G. Rostoker, D. N. Baker, Internal acceleration of relativistic electrons by large-amplitude ULF pulsations, J. Geophys. Res., 104, 17391, 1999.

McAdams, K.L., G.D. Reeves, R.H.W. Friedel, T.E. Cayton, Multi-satellite comparison of the radiation belt response to the GEM magnetic storms, J. Geophys. Res., 106, 10869-10882, 2001.

Miyoshi, Y., A. Morioka, T. Obara, et al., Rebuilding Process of the Outer Belt During November 3, 1993 Magnetic Storm, J. Geophys. Res., 108, 1004, 2003

Nishida, A., Outward diffusion of energetic particles from the Jovian radiation belt, J. Geophys. Res., 81, 1771, 1976.

Obara, T., T. Nagatsuma, M. Den, Y. Miyoshi, A. Morioka, Main-phase creation of "seed" electrons in the outer radiation belt, Earth Planets Space, 52, 41-47, 2000a.

Obara, T., M. Den, Y. Miyoshi, A. Morioka, Energetic electron variation in the outer radiation zone during early May 1998 magnetic storm, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 62, 1405, 2000b.

Obara, T., Y. Miyoshi, A. Morioka, Large enhancement of outer belt electrons during magnetic storms, Earth Planets Space, (53) 1163-1170, 2001

Summers, D., R.M. Thorne, and F. Xiao, Relativistic theory of wave-particle resonant diffusion with application to electron acceleration in the magnetosphere, J. Geophys. Res., 103, 20487-20500, 1998.

Summers, D. and C. Ma, Rapid acceleration of electrons in the magnetosphere by fast-mode MHD waves, J. Geophys. Res., 105, 15887, 2000