

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540458

研究課題名（和文） 地球放射線帯の相対論的エネルギー電子の加速メカニズムの観測とモデルからの解明

研究課題名（英文） Studies on acceleration mechanisms of relativistic electrons in the Earth's outer radiation belt with observations and simulations

研究代表者

長井 嗣信（NAGAI TSUGUNOBU）

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60260527

研究成果の概要（和文）：

人工衛星「あけぼの」の放射線モニター観測により、内部磁気圏に存在する高エネルギー電子放射線帯外帯では、数時間という短時間で高エネルギー電子強度が増大することを確認した。放射線帯モデルを使った計算機シミュレーションをおこない、磁気嵐の大規模サブストームによる磁場変動が引き起こす誘導電場による電子の輸送と加速が、観測と一致する時間スケールで、放射線帯を再構築できることを検証した。

研究成果の概要（英文）：

The spacecraft Akebono has made observations of relativistic electrons in the Earth's radiation belts with the radiation monitor (RDM). The observations by Akebono have revealed rapid rebuilding of the core part (around L = 4) of the electron outer belt with a time scale of less than a few hours during the Dst minimum period for several storms. Simulations for formation of the outer radiation belt are attempted. A simulation in which the magnetic field and electric field are deduced from the global MHD model under realistic solar wind conditions is carried out. This model can successfully simulate a rapid rebuilding of the outer radiation belt with the observed time scale.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			0
年度			0
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：太陽地球システム・宇宙天気・放射線帯・サブストーム

## 1. 研究開始当初の背景

地球近傍の宇宙空間には、地球半径の6倍程

度までの領域に地球を取り巻くように高エネルギー電子や陽子からなる放射線帯が存在している。この宇宙空間は、人工衛星の航

行などに活発に利用されているので、放射線帯の強度の正確な情報は重要であり、宇宙天気予報の大きなターゲットとなっている。この宇宙天気予報が可能であることは、20年前にすでに示した(Nagai, 1988)。しかし、放射線帯の高エネルギー電子が、どのように加速されて相対論的エネルギーを獲得するのかは、依然完全には解明されていない。過去10年ほどの間に、理論的研究から「波動による粒子の加速」(Summers et al., 1998; Horne and Thorne, 1998)により電子が加速されているということがパラダイムとなりつつある。この理論によれば、加速にかかる時間は半日から1日ということになる。申請者は、以前から1時間程度の時間スケールで、放射線帯中心部の相対論的エネルギーの電子強度が際立って増加する現象を見つけてきた(Nagai et al., 2006)。これは、現在のパラダイムにはない新しい加速機構が存在することを示唆している。人工衛星「あけぼの」での放射線帯の観測は1989年3月以来継続しており、これまでに十分なデータが蓄積されてきたように考えられるが、どのような条件で、この加速機構が有効に働いているかの観測的な検証は、他の人工衛星の観測網が発達した現在において、初めて可能となってきた。さらに、従来ではできなかった電子の軌道を正確に計算できる放射線帯モデルの活用により、加速機構がどれだけ有効に働くかについて、理論的な検証が可能になっている。

## 2. 研究の目的

「地球の放射線帯の相対論的エネルギー電子の加速メカニズムの観測とモデルからの解明」では、放射線帯外帯の中で、1時間程度の時間スケールで相対論的エネルギーまで電子が加速される現象を、人工衛星「あけぼの」による観測を基礎に、内部磁気圏の電磁環境の中での電子軌道計算するモデルを利用して解明することを目指す。従来から提唱されている「半日から1日かかる波動による加速」とは、どのように異なる条件でこの電子加速が有効に起こりうるかを観測とモデルを使って調べ、放射線帯での各種の電子の加速機構の役割を明確にし、放射線帯の宇宙天気予報モデルが含むべきすべての物理過程を解明する。

## 3. 研究の方法

現時点で解明すべき点は、大きくわけて、次の3点である。①加速の時間スケールの決定。②どのような条件でこの加速が働くか(加速機構の同定のため)。③従来の「波と粒子の相互作用」による加速との関係。したがって、次のように研究を進めた。人工衛星「あけぼ

の」の放射線モニターのデータベースの作成(宇宙航空研究開発機構のテレメトリーデータから、物理量へ変換、軌道要素の付加など)を継続し、早期にデータの一般公開できる体制をつくる。加速過程を捉えたイベントについて、他の衛星データや地上の観測との比較解析をおこない、現象の一般性を確認する。計算機シミュレーションをおこなえるように、最近の磁気嵐の2008年9月のイベントと2009年7月のイベントについては、データを整備する。

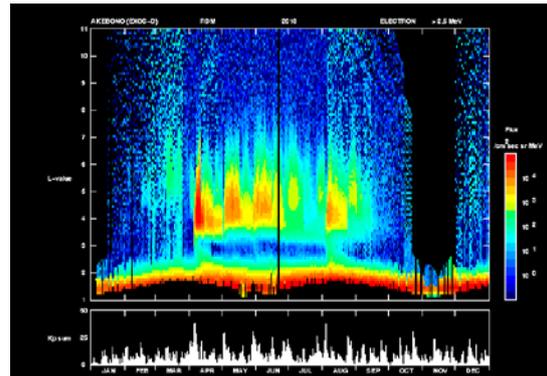


図1 2010年の電子強度

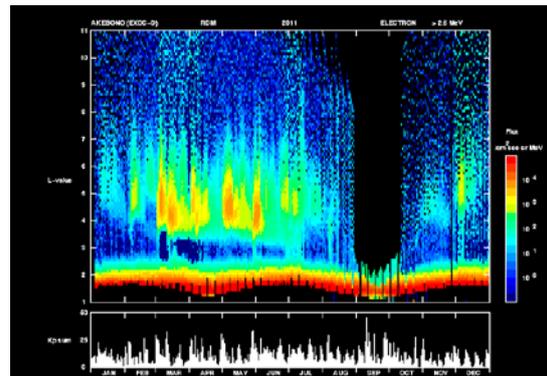


図2 2011年の電子強度

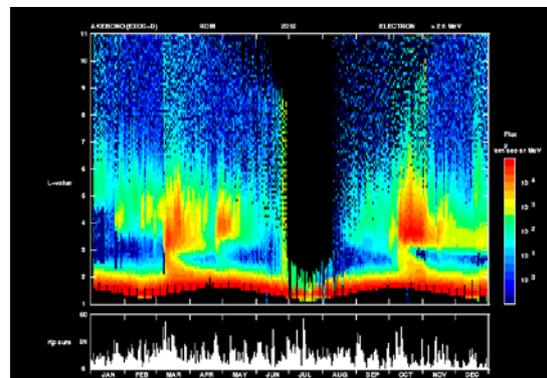


図3 2012年の電子強度

#### 4. 研究の成果

「地球の放射線帯の相対論的エネルギー電子の加速メカニズムの観測とモデルからの解明」では、3つの項目について重点的に研究を進めてきた。

(1) 人工衛星「あけぼの」による放射線帯粒子観測の継続とデータ整備  
人工衛星「あけぼの」搭載の放射線モニターは、3つのエネルギーチャンネルのプロトン、3つのエネルギーチャンネルの電子、1つのエネルギーチャンネルのアルファ粒子の観測を継続している。観測データは、現在日本とスウェーデンの2か所でデータを伝送できる時のみに限られているが、北半球に遠地点があるときは1日に6軌道程度データを取得できるので、放射線帯外帯の変動についての研究が可能である。したがって、3つのエネルギーレンジの電子を中心としたデータの整備の体制を確立した。伝送されたデータは、1週間単位で1次処理として放射線モニターのデータのみとする。2次処理において、各チャンネルについて時間分解能0.5秒のデータとする。3次処理として、電子のデータのみ時間分解能16秒のデータとして、1週間ごとに決定される確定軌道情報を付加して、使いやすいデータ形式としている。検出器のキャリブレーションとして、GIANT4を使った計算機シミュレーションおこなった。高エネルギーの電子チャンネルについては、ほぼ設計に合う粒子検出効率があることを確認したが、低いエネルギーの電子チャンネルについては、粒子検出効率が低いことがわかった。さらに、電子の中間エネルギーのチャンネルのデータでは、ノイズが大きくなっていることがわかる。したがって、一般ユーザーに公開できるように、4次処理として、いちばん高いエネルギー(> 2.5 MeV)電子のみのデータベースを作成している。電子フラックスをL-value (地球中心からの距離)の関数として表した Quick-Look プロットとして、ほぼ1週間ごとに宇宙科学研究所のデータベースシステムのDARTSで、更新し公開している。さらに、1年分をまとめる形式で長期間データや分布図を公開している。さらに、研究者所属の研究機関においても、公開している。

(2) 放射線帯外帯の電子強度の短時間(2-3時間以内)での急激な増加現象の研究

人工衛星「あけぼの」の高いエネルギー(> 2.5 MeV)の電子の強度が、磁気嵐の時に急激に増加する現象について解析を進めた。2010年以後太陽活動が活発になり多くの現象を集めることができると当初期待したが、太陽活動があまり活発にならなかったために、観測条

件が良かった2010年の現象を中心として、解析を進めた。放射線帯外帯の内側(地球半径の4倍程度)を中心とする領域では、磁気嵐の最中に、時間スケールが2-5時間程度で、急激な電子強度の増大(フラックスが10-100倍)が確認された。この時間スケールは、「粒子と波の相互作用」により加速にかかる半日から1日の時間スケールに比較して、十分に短いことが確認できる。この長い時間スケールは、放射線帯外帯外側(地球半径の6倍以上)領域で電子強度の増加に対応するが、この領域では、電子の外側への輸送により消滅する効果があるので、時間スケールだけでは、「粒子と波の相互作用」により加速が有効に働いているかは、証明したことはない。放射線帯外帯の内側を中心とする領域での電子強度の増加は、磁気嵐中に起きる大きなサブストームとほぼ同期していることがわかる。この研究が行われた時点での観測衛星の配置からは、それ以上の検証はできなかった。

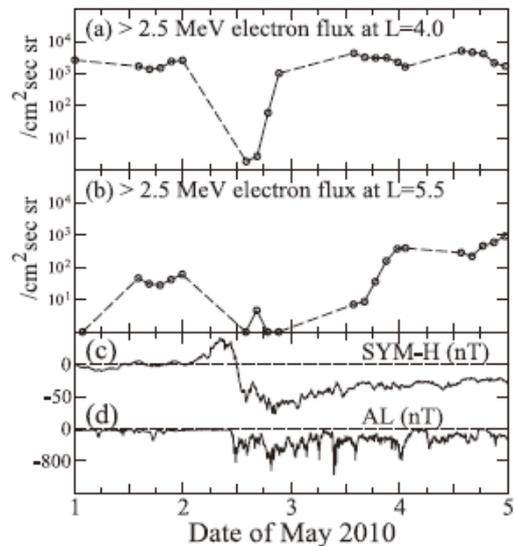


図4 2010年5月1-4日の電子強度の変動。放射線帯外帯の中心部(上段パネル)では、電子強度が10から1000まで6時間程度で急激に増加している。一方、放射線帯外帯の外側部(2番目のパネル)では、電子強度の増加は、1日程度遅れて起きている。この例は、ここで議論している、急激な電子強度の増加の典型的な例である。

(3) 放射線帯モデルによるシミュレーションでの短時間での電子強度増加の検証  
電子の放射線帯のモデルでは、すべてのエネルギーレンジの電子について、ボルツマン方程式を時間積分することにより、輸送加速の現象を調べていく。「拡散」と「波と粒子の相互作用」の効果についても、理論的に求め

られた物理過程をパラメータとして組み込んでいる。磁気圏の電場と磁場については、太陽風の変動に応じた電場磁場モデルを使う静的な方法と、太陽風を入力として大規模磁気圏磁気流体モデルによる電場磁場を場として使う動的な方法とに、大別される。後者の磁気圏モデルからの電場磁場の場では、サブストームによる磁場変動の効果などが、取り込めることになる。静的な場を使ったシミュレーションにおいては、短時間に電子強度を観測に対応した程度に増加させることはできない。一方、動的な場を使ったシミュレーションでは、「波と粒子の相互作用」の効果のための物理過程を入れなくても、観測に対応する電子強度の増加が再現できることを示すことができた。

以上の3項目の研究を同時に進めることにより、Nagai et al. (2006)により提案された放射線帯外帯の再構築モデル「磁気嵐中の大規模サブストームが作る磁場変動によって引き起こされる誘導電場による電子の加速」が、有効に働いている可能性があることを示すことができた。2012年秋以後、米国では新しい衛星による観測がスタートし、放射線帯電子の変動の研究は、新しい時代にはいって来た。その中で、今までの観測により得られた種々の問題について、いろいろな側面から検討を加えることができた本研究は、今後の研究の進展に資することができるものであり、さらに実証的な研究への足掛かりとなるものになった。

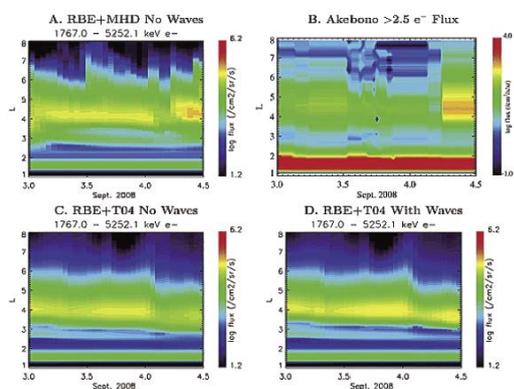


図5 2008年9月のイベントの計算機シミュレーション。A. 磁気圏モデルの電場磁場を採用し、電子強度の増加を再現できたモデル。B. 「あけぼの」による観測結果。C. 時間変化する磁場電場モデルを採用したもので、電子の強度変化は再現されない。D. 「波動と粒子の相互作用」モデルを入れても、電子の強度変化は再現できない。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

Nagai, T., Rebuilding process of the outer electron radiation belt: The spacecraft Akebono observations, Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere, edited by D. Summers, I. R. Mann, D. N. Baker, and M. Schulz, Geophysical Monograph Series, 199, 177-187, doi: 10.1029/2012GM0012817, 2012. (査読あり)

Fok, M.-C., A. Gloer, Q. Zheng, R.B. Horne, N.P. Meredith, J.M. Albert and T. Nagai, Recent developments in the radiation belt environment model, J. Atmos Solar-Terr. Phys, 73, 1435-1443, doi:10.1016/j.jastp.2010.09.033, 2011. (査読あり)

Gloer, A., M.-C. Fok, T. Nagai, G. Tóth, T. Guild, and J. Blake, Rapid rebuilding of the outer radiation belt, J. Geophys. Res., 116, A09213-1-21, doi:10.1029/2011JA016516, 2011. (査読あり)

[学会発表] (計4件)

T. Nagai, Structure of magnetic reconnection in the Earth's magnetotail: Geotail observations, AGU Chapman Conference, 2013. 3. 12, Reykjavik, Iceland.

T. Nagai, Construction of magnetic reconnection in the Earth's magnetotail with Geotail observations, IUGG, 2011. 7. 5, Melbourne, Australia.

T. Nagai, and O. Amm, Linkage of magnetic reconnection in the magnetotail to substorm onset on the ground, AGU Chapman Conference, 2011. 3. 4 Fairbanks, U. SA.

長井嗣信・浅井佳子, 太陽活動2周期にわたる放射線帯の変動 あけぼのの22周年記念シンポジウム 2010. 11. 22 東京工業大学 キャンパスイノベーションセンター.

[その他]

ホームページ

<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/nagai/nagai/RDM2010, RDM2011, RDM2012, RDM2013>  
<http://www.stp.isas.jaxa.jp/akebono/RDM/rdm.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

長井 嗣信 (NAGAI TSUGUNOBU)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号：60260527