

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340146

研究課題名(和文)放射線帯マルチスケールシミュレーションによる相対論的電子の輸送加速過程の研究

研究課題名(英文) Study on transportation/acceleration process of relativistic electrons by multi-scale radiation belt simulations

研究代表者

三好 由純 (Yoshizumi, Miyoshi)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号：10377781

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,600,000円

研究成果の概要(和文)：放射線帯の高エネルギー電子のグローバルなダイナミクスを理解するため、新たなシミュレーションコードを開発し、MHD波動およびホイッスラーモード波動によって放射線帯電子がどのように変化するかを調べた。主な成果として、ホイッスラーモード波動によってバースト的な電子の降り込みが数keVからMeVまでの広いエネルギー帯で同時におこることが、シミュレーションと観測との比較研究から実証された。また、磁気圏を伝搬するMHD波動と電子との共鳴相互作用についての計算を行い、伝搬するMHD波動と特定の電子が選択的な共鳴を起こし、放射線帯電子の急速な加速を引き起こすことも明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We have newly developed simulation codes to investigate global variations of energetic electrons of the outer belt considering wave-particle interactions. As a result, we found that the whistler chorus waves can cause wide energy electron precipitations from a few keV to MeV simultaneously, which are confirmed by observations. Moreover, we found that the MHD mode waves can resonate with the drifting electrons and the prompt accelerations of MeV electrons are found associated with the solar wind pressure pulse.

研究分野：磁気圏物理学

キーワード：放射線帯 粒子輸送 粒子加速 シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

地球周辺の宇宙空間に存在する高エネルギー粒子捕捉帯である放射線帯電子の加速機構については、MHD 波動との共鳴相互作用による輸送過程(外部供給過程)と、ホイッスラーモード波動とのサイクロトロン共鳴による内部加速過程が提案されているが、各プロセスの素過程の詳細はわかっていない。本研究では、放射線帯外帯全体のマクロな動態と、プラズマ波動との共鳴相互作用によるミクロな素過程を同時に解き進める放射線帯マルチスケールシミュレーションを新たに開発し、各プロセスの非線形効果を解き進めながら、それらが放射線帯の粒子分布に及ぼす影響を評価することを目指している。また、2012 年に打ち上げられた米国の Van Allen Probes 衛星の最新のプラズマ波動データ、放射線帯電子データを用いて、観測とシミュレーションを比較することも目指している。

### 2. 研究の目的

本研究においては、(1)「放射線帯の電子輸送・加速素過程の要素研究」と(2)「科学衛星観測とシミュレーションにもとづく放射線帯変動メカニズムの研究」を行う。前者においては、外部供給過程および内部加速素過程それぞれについて、非線形波動粒子相互作用を組み込んだシミュレーションを行い、非線形波動粒子相互作用が輸送や加速に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。後者については、Van Allen Probes 衛星等が観測したイベントについて、シミュレーションを行い、シミュレーション結果と観測とを比較することにより、変動の支配要因を実証的に特定することを目的としている。

なお、当初、放射線帯増加の事象のみについて観測とシミュレーションを比較する予定であったが、Van Allen Probes、地上レーダー観測である EISCAT との同時観測イベントにおいて、数十 keV から数百 keV の電子が一斉に散乱される事象が観測され、このイベントとシミュレーションの比較も行い、非線形波動粒子相互作用が放射線帯の電子の散乱に及ぼす影響を実証的に究明した。

### 3. 研究の方法

本研究においては、本研究グループが開発したシミュレーションコードを用いて、外部供給および内部加速についてのシミュレーションを行った。

- 1) 外部供給：本研究グループが開発してきた GEMSIS-RB と呼ばれるテスト粒子コード[Saito et al., 2010]と、地球磁気圏のグローバル MHD コード[Matsumoto et al., 2010]の連成計算を行い、磁気圏の中を伝搬する MHD 波動によって、放射線帯の電子がどのように加速・減速されるかを調べた。

本研究では、特に太陽風中のショックが磁気圏界面を収縮させ、その結果とし

て生じる Fast mode 波動と電子との相互作用に注目した計算を実施した。

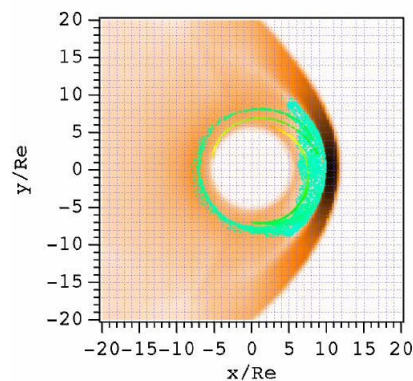
- 2) 内部加速：GEMSIS-RBW と呼ばれるホイッスラーモード波動と電子との相互作用を解き進めるコードを新たに開発した[Saito et al., 2012]。このコードは、ホイッスラー波動と電子とのサイクロトロン共鳴過程を、両者の位相関係を考慮して計算することが可能なものである。また、このコードは、実時間にして数時間以上の計算が可能であり、ホイッスラー波動による非線形波動粒子相互作用が、磁気嵐程度の時間スケールで、どのように電子のダイナミクスに影響を及ぼすかを明らかにすることができる。このコードを用いて、ホイッスラー波動による電子の散乱と加速についての計算を行った。

### 4. 研究成果

本研究で得られた成果は、以下である。

- 1) 放射線帯電子輸送・加速素過程の要素研究

1-1) 外部供給過程：GEMSIS-RB テストシミュレーションと GEMSIS-GM グローバル MHD シミュレーションとの連成計算を行った。太陽風中のショック到来に伴って、磁気圏には昼側から夜側に向かって Fast mode 波動が伝搬する。このとき、電子のドリフト速度と、Fast モードの伝搬速度が等しい場合に、電子が選択的に加速される様子が明らかになった。内部磁気圏における典型的な Fast モードの伝搬速度を考慮すると、およそ 3-4 MeV の電子が選択的に加速される。この加速の結果、電子の分布は、下図のようにスパイラル構造が形成され、分布のフィラメント化が起こることがあわせて明らかになった。



磁気圏赤道面における、電子の分布。動径方向に筋状の分布が見え、電子のスパイラル的な分布が確認される。

この加速は、従来指摘されていた m-number で規定されるドリフト共鳴とは異なるものであり、以下の共鳴条件を満たすときに引き起こされる。

$$v_d \sim v_{fast}$$

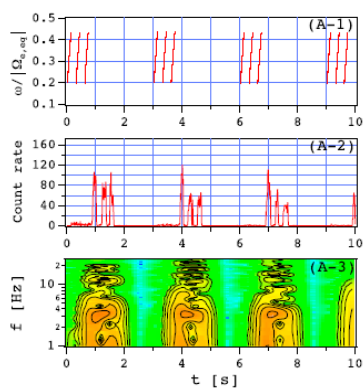
ここで、 $v_d$  は電子の経度方向のドリフト速

度、 $v_{fast}$  は朝側から夜側に向かう Fast mode の速度である。この結果は、複数の国際学会で招待講演として報告された。また、この加速機構は、Van Allen Probes 衛星によって観測されており[Foster et al., 2015]、本研究で提唱したプロセスが実際に引き起こされていることが明らかになった。

1-2) 内部加速過程：新たに開発した GEMSIS-RBW シミュレーションを用いて、ホイッスラー波動による電子の加速および散乱についてのシミュレーションを行った。

加速については、ホイッスラー波動と電子のサイクロトロン運動の間の位相関係を固定した場合、および準線形計算が仮定するように移送関係がランダムな場合の比較を行った。これまでの研究では、波動粒子相互作用の結果による分布関数の長時間時間発展は、準線形にもとづく Fokker-Planck 方程式の計算と同様の形状に収束することが予想されていた。しかし、本研究の結果からは、波動と電子の位相関係を固定した場合と、ランダムにした場合において、有限時間後のエネルギースペクトルの発展が異なることが明らかになった。

また、散乱については、放射線帯電子のマイクロバーストに焦点をあてた研究を進め、マイクロバーストに見られるスパイク的な降り込み、および過去に SAMPEX 衛星の観測から報告されていた数 Hz の変調についても再現した [Saito et al., 2012]。



GEMSIS-RBW による降下電子の計算。  
上) モデルに用いたホイッスラー波動の周波数スペクトル。中) 電離圏高度での降り込みカウントレート。下) 降り込みカウントレートのダイナミックスペクトル

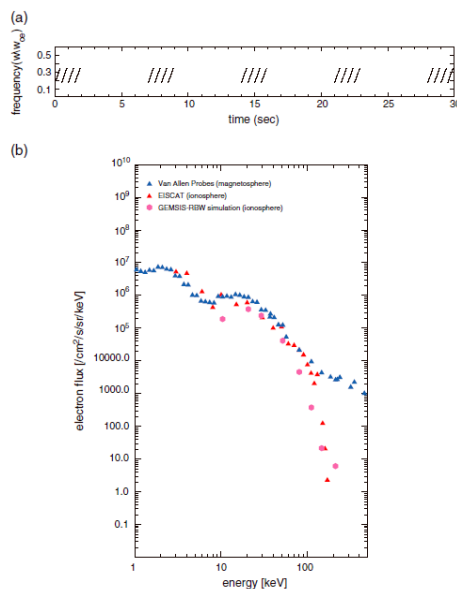
また、Miyoshi et al.[2010]が提唱していたホイッスラーモードのコーラス波動の元素が、脈動オーロラの内部変調構造を作り出すこと、さらに upper band chorus と lower band chorus の周波数スペクトル構造が、脈動オーロラ降下電子のエネルギースペクトルに対応することなどが、GEMSIS-RBW のシミュレーションから示された。

## 2) 科学衛星観測とシミュレーションにもとづく放射線帯変動メカニズムの研究開発

ここでは、Van Allen Probes 衛星、EISCAT(欧州非干渉散乱レーダー)および GEMSIS-RBW を用いて、脈動オーロラに伴って、数 keV から放射線帯の数百 keV までの電子が一斉に散乱される様子を究明した。

2012 年 11 月に発生したサブストーム時に、脈動オーロラに伴って 数百 keV の電子が散乱されている様子が EISCAT によって同定された。このとき、磁気圏側にいた Van Allen Probes 衛星によって、強いコーラス波動が観測されるとともに、放射線帯電子の分布も取得された。このコーラス波動および電子分布を初期値として GEMSIS-RBW に入力し、降下電子の計算を行ったところ、コーラス波動が磁気緯度 20 度まで伝搬する場合には、約 200 keV までの電子が降り込むことが示された。

下図に示すように、EISCAT の観測から取得された電子スペクトルと、GEMSIS-RBW が計算する電子スペクトルとはよい一致を示しており、磁力線方向に伝搬するホイッスラー波動が広いエネルギー帯での電子を散乱させるという Miyoshi et al.[2010]のモデルの妥当性が示された [Miyoshi et al., 2015]。



GEMSIS-RBW による降下電子スペクトルと Van Allen Probes および EISCAT から導出された降下電子スペクトルの比較。上) GEMSIS-RBW に入力したコーラスの周波数スペクトル。下) エネルギースペクトル。高エネルギー側まで延びている は、Van Allen Probes が観測した磁気圏側のエネルギースペクトル。200 keV 程度まで延びる

は EISCAT から導出された降下電子スペクトル。また、六角形の印は

GEMSIS-RBWから計算された降下電子スペクトル。EISCATから導出されたエネルギースペクトルと、GEMSIS-RBWから計算されたエネルギースペクトルがよい一致を示していることがわかる。

また、コーラス波動の伝搬する磁気緯度が、降下電子の最高エネルギーを制御していることが示され、ピッチ角散乱による放射線帯電子の消失において、磁力線方向のコーラス波動の分布が重要であることが示された。

さらに、データ解析研究から、放射線帯電子の加速の様子を調べ、論文として発表した[Miyoshi et al., 2013 など]。特に放射線帯電子フラックスの増加が起きている際に、コーラス波動が数日間にわたって連続的に活発になっている様子も実証的に明らかにするとともに、この過程をシミュレーションによって同定した。

一連の結果は、複数の国際会議において招待講演として報告されるとともに、新聞等でも報道された。

## 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14件)

- Miyoshi, Y., S. Oyama, S. Saito et al., Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: EISCAT and Van Allen Probes observations, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2014JA020690, 2015.
- Isono, Y., A. Mizuno, T. Nagahama, Y. Miyoshi et al., Variations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over Antarctica associated with a magnetic storm in April 2012, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2014GL059360, 2014.
- Kurita, S., Y. Miyoshi, C. Cully, V. Angelopoulos, O. Le Contel, M. Hikishima, and H. Misawa, Observational evidence of electron pitch angle scattering driven by ECH waves, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2014GL061927, 2014.
- Isono, Y., A. Mizuno, T. Nagahama, Y. Miyoshi et al., Ground-based observations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over Antarctica in 2012-2013, *J. Geophys. Res.*, 119, doi:10.1002/2014JA019881, 2014.
- Nishiyama, T., T. Sakanoi, Y. Miyoshi, et al., Multi-scale temporal variations of pulsating auroras: on-off pulsation and a few-Hz modulation, *J. Geophys. Res.*, 119, doi:10.1002/2014JA019818, 2014.
- Miyoshi, Y., R. Kataoka, et al., High-speed solar wind with southward interplanetary magnetic field causes relativistic electron flux enhancement of the outer radiation belt via enhanced condition of whistler waves, *Geophys. Res. Lett.*, 40, doi:10.1002/grl.50916, 2013.

Katoh, Y., M. Kitahara, H. Kojima, Y. Omura, S. Kasahara, M. Hirahara, Y. Miyoshi, K. Seki et al., Significance of wave-particle interaction analyzer for direct measurement of nonlinear wave-particle interactions, *Ann. Geophys.*, 31, doi:10.5194/angeo-31-503-2013, 2013.

Miyoshi, Y. et al., Study on the generation mechanism of relativistic electrons due to wave-particle interactions in the radiation belts via spacecraft observations, *J. Plasma Fusion Res.*, 89, 2013.

Miyoshi, Y., T. Ono, T. Takashima, K. Asamura, M. Hirahara, Y. Kasaba, A. Matsuoka, H. Kojima, K. Shiokawa, K. Seki, et al., The Energization and Radiation in Geospace (ERG) Project, in *Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol 199, edited by D. Summers, I.R. Mann, D.N. Baker, and M. Schulz, pp.103-116, AGU, Washington, D.C. doi:10.1029/2012BK001304, 2012.

Turner, D. L. S. K. Morley, Y. Miyoshi, B. Ni, and C.-L. Huang, Outer radiation belt flux dropouts: Current understanding and unresolved questions, in *Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol 199, edited by D. Summers, I.R. Mann, D.N. Baker, and M. Schulz, pp.195-212, AGU, Washington, D.C., AGU monograph, doi:10.1029/2012BK001310, 2012.

Saito, S., Y. Miyoshi, and K. Seki, Relativistic Electron Microbursts associated with Whistler Chorus Rising Tone Elements: GEMSIS-RBW Simulations, *J. Geophys. Res.*, 117, A10206, doi:10.1029/2012JA018020, 2012.

Ebihara, Y., and Y. Miyoshi, Dynamic inner magnetosphere: A tutorial and recent advances, in *The Dynamic Magnetosphere*, edited by W. Liu and M. Fujimoto, IAGA Special Sopron Book Series, doi:10.1007/978-94-007-0501-2\_9, Springer Science+Business Media B.V., 2011.

Matsumura, C., Y. Miyoshi, K. Seki, S. Saito, V. Angelopoulos, and J. Koller, Outer radiation belt boundary location relative to the magnetopause: Implications for magnetopause shadowing, *J. Geophys. Res.*, 116, A06212, doi:10.1029/2011JA016575, 2011.

Miyoshi, Y., and R. Kataoka, Solar cycle variations of outer radiation belt and its relationship to solar wind structure dependences, *J. Atm. Solar-Terr. Phys.*, 73, 77-87, 2011.

[学会発表](計14件)

- 齋藤慎司、三好由純、関華奈子、Relativistic electron acceleration by whistler chorus elements including de-trapping effect, 地球電磁気・地球惑星圏学会、2014年11月
- Saito, S. and Y. Miyoshi, Precipitation loss and nonlinear acceleration of broadband energetic

electrons by whistler chorus waves, AGU Joint assembly, 2015 年 5 月

Miyoshi, Y., S. Saito et al., Common characteristics of the pulsating aurora electrons and relativistic electron microbursts: Satellite observations and simulation, Inner Magnetosphere Conference III, 2015 年 3 月

Miyoshi, Y., and R. Kataoka, Radiation belt storms, AOGS 2014, 2014 年 7 月

Miyoshi, Y., S. Saito, Y. Matsumoto, K. Seki and T. Amano, Prompt acceleration of relativistic electrons of the outer belt associated with the dynamic pressure enhancement, AOGS 2013, 2013 年 6 月

Miyoshi, Y., and R. Kataoka, Long-term variations of the radiation belt electrons, 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference, 2013 年 9 月

Miyoshi, Y., S. Oyama, S. Saito, H. Fujiwara, and R. Kataoka, Broadband electron precipitations associated with the pulsating aurora: EISCAT observation and computer simulation, AGU fall meeting, 2013 年 12 月

Miyoshi, Y., Dynamics of the radiation belts, 11 th International school/symposium for space simulations, 2013 年 7 月

三好由純、大山伸一郎、齋藤慎司、オーロラ活動に伴う高エネルギー電子の降り込み: EISCATG 観測、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、2013 年 5 月

Miyoshi, Y., S. Saito, K. Seki, Y. Matsumoto, T. Amano, and M. Yagi, Simulation on the relativistic electron dynamics in the realistic time-dependent magnetic field by the GEMSIS geospace models, COSPAR 2012, 2012 年 7 月

三好由純、齋藤慎司、松本洋介、関華奈子、天野孝伸、太陽風動圧変化時の外帯電子加速に関するシミュレーション、地球電磁気・地球惑星圏学会、2012 年 10 月

齋藤慎司、三好由純、関華奈子、久保田康文、長妻努、村田健史、3 次元磁場中でのホイッスラーコーラスによる相対論的電子散乱: GEMSIS-RBW シミュレーション、地球電磁気・地球惑星圏学会、2012 年 10 月

Miyoshi, Y., V. Jordanova, R. Kataoka, Y. Katoh, and M. Thomsen, Simulation on the IMF Bz control of the chorus wave excitation during the high-speed coronal hole streams, THEMIS/ARTEMIS SWG, March 25-28, 2013, Fairbanks, Alaska, USA.

Miyoshi, Y., C. Matsumura, K. Seki, S. Saito, V. Angelopoulos, and J. Koller, Flux drop out of the outer belt electrons -THEMIS data analysis-, 2011 International Space Plasma Symposium (ISPS), August 14 - August 19, 2011, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan.

〔図書〕(計 1 件)  
小野高幸、三好由純、共立出版、太陽地球圏、2012

〔産業財産権〕  
○出願状況(計 0 件)  
○取得状況(計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

三好 由純 (MIYOSHI, Yoshizumi)  
名古屋大学太陽地球環境研究所・准教授  
研究者番号: 10377781

### (2)研究分担者

齋藤慎司 (SAITO, Shinji)  
名古屋大学大学院理学研究科・特任准教授  
研究者番号: 60528165

### (3)連携研究者

関華奈子 (SEKI, Kanako)  
名古屋大学太陽地球環境研究所・准教授  
研究者番号: 20345854

松本洋介 (MATSUMOTO, Yosuke)  
千葉大学大学院理学研究科・特任助教  
研究者番号: 20397475

天野孝信 (AMANO, Takanobu)  
東京大学大学院理学系研究科・助教  
研究者番号: 00514853