

平成 30 年 5 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287120

研究課題名(和文)非線形プラズマ波動粒子相互作用による地球放射線帯の形成・消失過程の研究

研究課題名(英文) Study on formation and depletion processes of Earth's radiation belts through nonlinear wave-particle interactions

研究代表者

大村 善治 (Omura, Yoshiharu)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：50177002

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：内部磁気圏に注入される高エネルギー電子の一部は、ホイッスラーモード・コーラス波による非線形波動捕過程によって効率的に相対論的エネルギー(MeV)にまで加速されて地球放射線外帯を形成し、また放射線外帯のMeV電子は電磁イオンサイクロトロン波による非線形波動ピッチ角散乱によって極域大気へと降下し、数分の短時間で放射線帯の一部を消失させることが可能であることを計算機シミュレーションにより検証した。

研究成果の概要(英文)：Some of energetic electrons injected into the inner magnetosphere are accelerated effective to a few MeV energy ranges by whistler mode chorus waves, resulting in rapid formation of the outer radiation belt. The MeV electrons of the outer radiation belt can be scattered into the loss cone by electromagnetic ion cyclotron wave. The formation and loss processes of the outer radiation belt are successfully reproduced by computer simulations.

研究分野：超高層物理学

キーワード：波動粒子相互作用 コーラス波 サイクロトロン波 放射線帯 非線形過程 計算機シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

地球をとりまくジオスペースは様々なプラズマ波動で満たされているが、その中でもホイッスラーモード・コーラス放射は特徴のある周波数変動を示し、地球磁場で捕捉された高エネルギー粒子との相互作用によって発生する。1952年に発表された Storey の論文以来、その発生機構の解明に多くの研究者の関心が向けられてきた。2007年に我々の研究グループがスーパーコンピュータを駆使してマックスウェル方程式を直接解き進める第一原理のシミュレーションによりコーラス放射を再現することに成功してから、その発生機構とその波動による粒子加速機構について大きな研究進展があった。コーラス放射と高エネルギー電子の時間・空間の変動から、周波数が大幅に上昇するコーラス放射は、サイクロトロン共鳴する高エネルギー電子の位相空間に形成される電子ホールによって引き起こされる非線形成長過程によって発生していることが判明した。時を同じくして、コーラス放射の波動ポテンシャルに捕捉された共鳴電子が赤道付近で軌道を大きく変動させながら数 100keV 程度のエネルギーから 1-2MeV の相対論的なエネルギーまで一挙に加速されるという非常に効率の良い加速過程が存在することが判明した。放射線帯の電子の加速過程については、磁気圏尾部から内部磁気圏に輸送される電子が磁気圏電場で加速される外部加速と波動粒子相互作用による内部加速の二説があるが、最近の Van Allen Probes の観測では内部の波動による加速であることが決定的になったと報告されている。内部磁気圏で頻繁に発生するコーラス放射による RTA+URA の効率の良い加速機構によって放射線帯が形成されている可能性が高まっている。

一方、放射線帯の相対論的電子は、磁気圏の磁場で捕捉された高エネルギープロトンによって励起される電磁イオンサイクロトロン(EMIC)波によってピッチ角散乱を受けて極域大気へと降下することが知られている。この EMIC 波はこれまで主として地上観測を中心として研究されてきたが、右上図の下パネルに示すように Cluster 衛星観測においてコーラス放射と同様に周波数が上昇する特徴あるエミッションが発見され、新たに注目されている。我々の研究グループは、この低周波の波動を EMIC トリガード放射と呼び、コーラス放射の理論を適応することでその特性を説明することに成功した。

2. 研究の目的

地球周辺のジオスペースでは地球磁場に捕捉された相対論的な速度をもつ高エネルギー電子からなる放射線帯が形成されており、太陽活動により大きく変動するが、未だそのメカニズムは十分に理解されておらず、謎として残っている。最近の衛星観測により、この地球放射線帯の形成・消失過程には、ホイッスラーモード・コーラス放射および電磁イオンサイクロトロン(EMIC)トリガード放射という周波数が変動する電磁波動が大きく関与していることが分ってきた。従来の放射線帯モデルでは波動粒子相互作用の効果は準線形拡散モデルで評価されてきたが、これらの波動では非線形過程が本質的に重要な働きをしていることから、本研究では、数値グリーン関数法という新しいモデリングの手法を開発し、放射線帯変動の非線形物理の解明と定量的評価を目指す。

ホイッスラーモード・コーラス放射および電磁イオンサイクロトロン(EMIC)トリガード放射という周波数が変動する電磁波動が大きく関与していることが分ってきた。従来の放射線帯モデルでは波動粒子相互作用の効果は準線形拡散モデルで評価されてきたが、これらの波動では非線形過程が本質的に重要な働きをしていることから、本研究では、数値グリーン関数法という新しいモデリングの手法を開発し、放射線帯変動の非線形物理の解明と定量的評価を目指す。

3. 研究の方法

電磁粒子コードによってホイッスラーモード・コーラス放射、電磁ハイブリッドコードによって EMIC トリガード放射の時間空間発展を再現し、それぞれの波動について電磁界のモデルを構築する。その電磁界モデルを用いて 10keV から 6MeV までの高エネルギー電子の軌道を計算するテスト粒子シミュレーションを行う。地球の磁力線に沿って南北両半球でバウンス運動する電子の分布を、断熱運動を想定した赤道面でのエネルギーおよびピッチ角の分布関数として定義し、各エネルギーと各赤道ピッチ角においてデルタ関数を考える。一つのデルタ関数を構成するのは磁力線に沿った異なる位置と波動との異なる位相を持った非常に多くの粒子であり、その軌道を追跡することにより、プラズマ波動放射一回との相互作用によってデルタ関数が如何に変動するかを求める。これはプラズマ波動放射との相互作用という微分方程式のグリーン関数に相当する解を数値的に求めていることと等価である。テスト粒子計算における各粒子の軌道は独立であり、その分布関数は線形演算ができることに注目すると非同次線形微分方程式の解をグリーン関数との畳み込み積分として求める手法を用いて、任意の初期分布関数と上記の数値グリーン関数との畳み込み数値積分を行うことにより、波動粒子相互作用による分布関数の変動を求めることができる。この操作をコーラス放射と EMIC トリガード放射の両方について何度も繰り返して行うことにより放射線帯電子フラックスの生成過程と消失過程を再現することができる。この手法で得られた放射線帯の長時間変動を Van Allen Probes の観測結果と比較し、数値モデルを検証する。

4. 研究成果

数値グリーン関数法に基づくテスト粒子シミュレーションの手法を開発し、これによってコーラス放射によって内部磁気圏に注入される数 10keV の電子が数 MeV の相対論的エネルギーまで数分の短い時間で効率よく加速されることを検証した。加速過程は、Relativistic Turning Acceleration(RTA)と Ultra Relativistic Acceleration (URA)によって説明できる。これらの加速過程によ

て相対論的電子のピッチ角分布がダンベル型(バタフライ分布)になることが判明した。

コーラス放射と同様に周波数が上昇する EMIC ライズingtーン放射が磁気圏に時折発生しているのを衛星観測で確認し、その周波数変動および振幅成長が非線形成長理論によって説明できることを示した。この波のパケットは、非線形成長が繰り返しながら徐々に周波数が上昇してゆくというサブパケット構造をもつことが観測データおよびハイブリッドコードによる計算機実験により判明した。この波は、0.5 - 6MeV の放射線帯電子を非線形トラッピングにより低いピッチ角へと効率良く散乱し、極域大気への降下させることを大規模なテスト粒子シミュレーションにより検証した。降下粒子のフラックスはサブパケット構造に対応して数秒オーダーの変調を受けつつ、2 分程度の時間スケールで、注入粒子の 50% が降下されることが分かった。さらに、EMIC ライズingtーン放射が緯度方向に局在している現実的なモデルを設定して、放射線帯の消失過程のシミュレーションを行い、EMIC 放射がプラズマポーズの外側と内側で発生した場合、および発生周波数がヘリウムサイクロトロン周波数の上か下かのそれぞれの場合において消失過程を再現し、そのエネルギー依存性を定量的に明らかにした。

プラズマポーズの外側と内側で発生するプラズマ波動の特性に大きな変化が現れる。コーラス放射はプラズマポーズの外側で多く発生するが、プラズマポーズの内側で背景電子密度の高い領域では、ヒスと呼ばれる広帯域のホイッスラーモード波が観測される。この波動に対して高時間分解能のスペクトル解析を行った結果、ヒスがコヒーレントな波動であり、スペクトルに周波数が変動する微細構造をもっていることが明らかになった。この微細構造を形成するコヒーレントな波動は、コーラス放射と同じ非線形波動粒子相互作用によって励起されていることが理論とデータ解析によって明らかになった。これらの波動は、プラズマ圏における放射線帯電子のピッチ角散乱に大きな影響を与えている可能性が示唆される。

赤道付近で励起されたコーラス放射は磁力線に平行な伝搬ベクトルをもっているが、高緯度に伝搬する過程で次第に斜め伝搬となってゆく。平行伝搬においてはサイクロトロン共鳴しか起こらないが、斜め伝搬においては、サイクロトロン共鳴に加えて波の位相速度と電子の平行速度とが一致するランダウ共鳴が発生し、共鳴電子の一部が波のポテンシャルにトラップされて、効率よく加速されることが分かった。斜め伝搬の波との波動粒子相互作用を記述することができる理論を構築し、さらにその理論式の有効性をテスト粒子シミュレーションによって検証した。

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 19 件)

Y. Omura, Y. Miyashita, M. Yoshikawa, D. Summers, M. Hikishima, Y. Ebihara, and Y. Kubota (2015), Formation process of relativistic electron flux through interaction with chorus emissions in the Earth's inner magnetosphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 9545–9562, doi:10.1002/2015JA021563, 2015.

D. Nunn, and Y. Omura, A computational and theoretical investigation of nonlinear wave-particle interactions in oblique whistlers, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 2890–2911, doi:10.1002/2014JA020898, 2015.

D. Summers, Y. Omura, S. Nakamura, C. A. Kletzing, Fine structure of plasmaspheric hiss, *J. Geophys. Res., Space Physics*, doi:10.1002/2014JA020437, 2014.

S. Nakamura, Y. Omura, M. Shoji, M. Nosé, D. Summers, and V. Angelopoulos, Subpacket structures in EMIC rising tone emissions observed by the THEMIS probes, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 7318–7330, doi:10.1002/2014JA020764, 2015.

Y. Kubota, Y. Omura, and D. Summers, Relativistic electron precipitation induced by EMIC-triggered emissions in a dipole magnetosphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 4384–4399, doi:10.1002/2015JA021017, 2015.

Y. Omura, S. Nakamura, C. A. Kletzing, D. Summers, and M. Hikishima, Nonlinear wave growth theory of coherent hiss emissions in the plasmasphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 7642–7657, doi:10.1002/2015JA021520, 2015.

S. Nakamura, Y. Omura, D. Summers, and C. A. Kletzing, Observational evidence of the nonlinear wave growth theory of plasmaspheric hiss, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 10,040–10,049, doi:10.1002/2016GL070333, 2016.

S. Nakamura, Y. Omura, and V. Angelopoulos, A statistical study of EMIC rising and falling tone emissions observed by THEMIS, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 8374–8391, doi:10.1002/2016JA022353, 2016.

Y. Katoh and Y. Omura, Electron hybrid code simulation of

whistler-mode chorus generation with real parameters in the Earth's inner magnetosphere, *Earth, Planets, and Space*, 68, 192, doi: 10.1186/s40623-016-0568-0, 2016.
Y. Hsieh and Y. Omura, Nonlinear dynamics of electrons interacting with oblique whistler-mode chorus in the magnetosphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 675-694, 10.1002/2016JA022891, 2017.
Y. Kubota and Y. Omura, Rapid precipitation of radiation belt electrons induced by EMIC rising-tone emissions localized in longitude inside and outside the plasmopause, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 293-309, doi: 10.1002/2016JA023267, 2017.

〔学会発表〕(計 43 件)

Y. Omura, Nonlinear wave-particle interactions in the radiation belts, Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC), 2016. (招待講演)

Y. Omura, Generation mechanism of whistler-mode chorus emissions, European Physical Society (plasma physics division), 2015. (基調講演)

Y. Omura, Theory and simulations of nonlinear wave-particle interactions in the planetary radiation belts, URSI GASS in Beijing, 2014. (基調講演)

Y. Omura, Generation mechanism of whistler-mode chorus emissions, 56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2014. (招待講演)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

大村 善治 (OMURA, Yoshiharu)
京都大学・生存圏研究所・教授
研究者番号：50177002

(2)研究分担者

小路 真史 (SHOJI, Masafumi)
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・助教
研究者番号：80722082

(3)連携研究者

加藤 勇人 (KATOH, Yuto)
東北大学・理学部・准教授
研究者番号：60378982

海老原 祐輔 (EBIHARA, Yusuke)
京都大学・生存圏研究所・准教授
研究者番号：80342616

(4)研究協力者

疋島 充 (HIKISHIMA, Mitsuru)

SUMMERS, Danny

KLETZING, Craig