

機関番号：14301

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340135

研究課題名 (和文) ホイッスラーモード相対論加速による放射線帯形成過程の研究

研究課題名 (英文) Study on formation process of radiation belts through relativistic acceleration of electrons by whistler-mode waves

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

研究成果の概要 (和文)：

地球磁気圏のコーラス放射は、周波数が上昇しつつ成長する電磁波動で、磁気赤道付近の高エネルギー電子とサイクロトロン共鳴して、大振幅の波動となる。その共鳴電子はピッチ角散乱を受けてエネルギーを失い大気圏へと降下する一方、一部の共鳴粒子は繰り返し発生するコーラス放射によって捕捉されて、効率よく相対論的エネルギーまで加速され、数時間のスケールで放射線帯を形成する過程が計算機実験により明らかになった。

研究成果の概要 (英文)：

Chorus emissions are electromagnetic waves with rising-tone frequencies observed in the Earth's magnetosphere. Computer simulations of the wave-particle interaction show that waves grow to form coherent large amplitude waves, causing electron precipitation to the atmosphere. A fraction of the resonant electrons are accelerated to relativistic energy in a short time scale of a few hours. Generation of chorus emissions is a key process of radiation belt formation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2009年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2010年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

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：プラズマ波動

## 1. 研究開始当初の背景

我々の研究グループでは長年にわたって地球磁気圏の中で最も頻繁に観測される電波であるホイッスラーモード波の研究を行ってきた。その周波数は時間的にダイナミックに変動し、その特徴ある周波数特性からコーラス、ヒス、ライザー、フォーラー等と呼ばれている。40年近くにもなるVLF波動の研究の歴史においても、これらの周波数変動は

長年の謎として残されてきた。しかし、我々は最近、スーパーコンピュータの能力を生かして電磁界の基礎方程式をそのまま解き進める方法で、コーラス放射の発生過程を計算機シミュレーションで再現することに成功した。

一方、我々は、大規模計算機シミュレーションとは別に、波の振幅と周波数の変動を仮定して、その波と共鳴する電子の非線形軌道

の計算を行っている。磁気赤道で励起されたホイッスラーモード波が高緯度に向かって伝播する際に、それと共鳴する数百 keV のエネルギーを持つ波と反対方向に進んでいた電子が走行する方向を変化させて1秒以内に数 MeV のエネルギーにまで加速される過程が存在することを発見し、我々はこれを Relativistic Turning Acceleration (RTA) と名づけた。

## 2. 研究の目的

日本が 1989 年に打ち上げた「あけぼの」衛星には VLF 波動の受信機と 2.5MeV の放射線モニター装置が搭載されており、コーラス放射と相対論的 (2.5MeV) 電子のフラックスとの相関関係を示すデータが多く蓄積されている。本研究では、先ず「あけぼの」衛星の観測データを統計的に解析して、RTA 過程による電子加速の理論の検証を行う。また、コーラス放射が高緯度に伝播する過程で伝播ベクトルの方向が平行方向から垂直方向へと変化することから、斜め伝播ホイッスラーモード波と相対論的電子との共鳴条件について理論とシミュレーションの両方から解析する。過去の研究においても、この斜め伝播の波に関する理論解析は殆ど手が付けられていないのが現状である。斜め伝播のホイッスラーモード波は、粒子の散乱、拡散に効果的に働き、平行伝播のコーラス放射で加速された電子を速度空間でピッチ角散乱させて、一部の粒子を磁気圏に捕捉された状態から開放する役目を演じているものと予想されるが、これを定量的に検証する

## 3. 研究の方法

本研究では、大規模電磁界計算機シミュレーション、テスト粒子シミュレーション、理論解析、衛星データ解析、拡散方程式の数値解法、衛星データ解析、レイトレーシング等、様々な研究手法を用いて、多角的に相対論的加速機構による放射線帯形成過程の研究に取り組む。

先ず、本研究の基礎となる最近の一連の研究成果を生み出すブレイクスルーとなったのはスーパーコンピュータによる超大規模な計算機シミュレーションである。このコーラス放射 (図 1) を再現した計算機シミュレーションは、京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータシステムの約半分の計算資源 ([1 2 8 CPU + 5 1 2 GB メモリ] × 4 ノード) を 1 週間占有して実行したものである。しかしこのシミュレーション・コードでは十分な並列化効率が得られていない。より多くのケースについてパラメータを実行するために並列化効率を上げるのが研究を遂行するための技術的な課題の一つである。これに関連して、京都大学学術

情報メディアセンターの中島浩教授によって粒子コードの新しい並列計算アルゴリズムが提案されており、本研究では、そのアルゴリズムにしたがって、先ずこのシミュレーション・コードの並列化効率を改善することに取り組み、パラメータを変更して出来る限り多くのジョブを効率よく実行出来るようにする。

電子加速を引き起こしているコーラス放射が発生する磁気圏のパラメータについて、「あけぼの」衛星のデータ解析から推定する。それを手がかりとして、実パラメータを定め、コーラス発生 of 計算機シミュレーションを実行する。コーラスの周波数範囲、継続時間等のパラメータ依存性を解明する。

さらに粒子のエネルギー分布としてデルタ関数を与えて、コーラス放射との共鳴によって加速・散乱される割合をテスト粒子シミュレーションで計算して、数値的にグリーン関数を求める。この数値グリーン関数との畳み込み積分を繰り返すことによって電子のエネルギー分布の時間発展を評価する。

## 4. 研究成果

放射線帯電子の時間変動について解析するために、大規模な電磁粒子シミュレーションを実行し、ホイッスラーモード・コーラス放射は、磁気圏の高エネルギー粒子との電子サイクロトロン共鳴によりピッチ各散乱を受けて、極めて有効に電子が極域に降下してオーロラを光らせていることが判明した。特に、コーラス放射の周波数変動により共鳴速度が大幅に変化するため、非常に幅広いエネルギーとピッチ角範囲の高エネルギー電子とサイクロトロン共鳴が起こり、周波数の上昇と共に異なるエネルギーの電子との非線形相互作用し、大部分の電子はピッチ角が下がりエネルギーを失う方向に散乱を受ける。これらの粒子の一部は極域に降下するロスコーンに入って、極域大気の中に失われることが分かった。これにより、従来の観測で極域におけるマイクロバーストと呼ばれていた粒子の降下現象が、コーラス放射の一つ一つの放射エレメントに対応していることを解明することができた。一方、新しい研究の展開として、クラスター衛星群のプラズマ波動観測データの解析からホイッスラーモード・コーラス放射によって電子が加速されているのと同じ放射線帯の領域において、低周波イオンモードの電磁イオンサイクロトロン波が、プロトンとの相互作用を通じて、コーラス放射と同じ非線形波動粒子相互作用により励起されていることを発見した。この励起に関わる非線形物理過程の理論を構築し、それにより観測されている周波数変動が説明できることを示した。この数ヘルツの低周波の波動は放射線帯の相対論的なエネル

ギーの電子とも相互作用して、相対論的電子のエネルギーを奪い極域大気への電子を効果させることができると考えられており、今後、ハイブリッドコード等のシミュレーションを通じて深い解析をしてゆくことが求められる。

#### 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 27 件)

- ① 竹中 悟, 笠原 禎也, 小嶋 浩嗣, 井町 智彦, 編隊飛行衛星による連携観測模擬実験システムの開発, 電子情報通信学会論文誌, J94-B(7), (印刷中), 2011 年 3 月採録決定, 査読有
- ② Y. Katoh and Y. Omura, Amplitude dependence of frequency sweep rates of whistler-mode chorus emissions, Journal of Geophysical Research, 査読有, in press.
- ③ M. Shoji, and Y. Omura, Simulation of Electromagnetic Ion Cyclotron Triggered Emissions in the Earth's Inner Magnetosphere, Journal of Geophysical Research, 査読有, in press.
- ④ Y. Omura, and D. Nunn, Triggering process of whistler-mode chorus emissions in the magnetosphere, Journal of Geophysical Research, 査読有, in press.
- ⑤ M. Ozaki, S. Yagitani, I. Nagano, Y. Kasahara, H. Yamagishi, N. Sato, A. Kadokura, Simultaneous ground-based and satellite observations of natural VLF waves in Antarctica: A case study of downward ionospheric penetration of whistler-mode waves, Polar Science, doi:10.1016/j.polar.2010.04.008, 431-441, 4(3), 2010 年, 査読有
- ⑥ M. Hikishima, Y. Omura, and D. Summers, Self-consistent particle simulation of whistler mode triggered emissions, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 査読有, 2010, VOL. 115, A12246, doi:10.1029/2010JA015860
- ⑦ Y. Omura, J. Pickett, B. Grison, O. Santolik, I. Dandouras, M. Engebretson, P. M. E. Decreau, and A. Masson, Theory and observation of electromagnetic ion cyclotron triggered emissions in the magnetosphere, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 査読有, VOL. 115, 2010, A07234, doi:10.1029/2010JA015300
- ⑧ J. S. Pickett, B. Grison, Y. Omura, M. J. Engebretson, I. Dandouras, A. Masson, M. L. Adrian, O. Santolik, P. M. E. Decreau, N. Cornilleau-Wehrin, and D. Constantinescu, Cluster observations of

EMIC triggered emissions in association with Pc1 waves near Earth's plasmapause, Geophysical Research Letters, 査読有, VOL. 37, 2010, L09104, doi:10.1029/2010GL042648

- ⑨ Y. Kasahara, A. Hirano and Y. Takata, Similar Data Retrieval from Enormous Datasets on ELF/VLF Wave Spectrum Observed by Akebono, Data Science Journal, doi:10.2481/dsj.SS\_IGY-002, IGY66-IGY75, Vol. 8, 2010 年, 査読有
- ⑩ M. Hikishima, Y. Omura, and Danny Summers, Microburst precipitation of energetic electrons associated with choruswave generation, Geophysical Research Letters, 査読有, VOL. 37, L07103, 2010, doi:10.1029/2010GL042678
- ⑪ M. Hikishima, S. Yagitani, Y. Omura, and I. Nagano, Coherent nonlinear scattering of energetic electrons in the process of whistler-mode chorus generation, Journal of Geophysical Research, 査読有, 2009, doi:10.1029/2009JA014371
- ⑫ Y. Omura, M. Hikishima, Y. Katoh, D. Summers, and S. Yagitani, Nonlinear mechanisms of lower band and upper band VLF chorus emissions in the magnetosphere, Journal Geophysical Research, 査読有, 2009, doi:10.1029/2009JA014206
- ⑬ O. P. Verkhoglyadova, B. T. Tsurutani, Y. Omura, and S. Yagitani, Properties of dayside nonlinear rising tone emissions at large Lobserved by GEOTAIL, Earth Planets Space, 査読有, 61, 2009, 625-628
- ⑭ Y. Kasahara, 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, Geophysical Research Letters, 査読有, 36, L01106, 2009, doi:10.1029/2008GL036454
- ⑮ M. Hikishima, S. Yagitani, Y. Omura, and I. Nagano, Full particle simulation of whistler-mode rising 1 chorus emissions in the magnetosphere, Journal of Geophysical Research, 査読有, 114, A01203, 2009, doi:10.1029/2008JA013625
- ⑯ Y. Katoh, Y. Omura, D. Summers, Rapid energization of radiation belt electrons by nonlinear wave trapping, Ann. Geophys. 査読有, 26, 2008, 3451-3456
- ⑰ N. Furuya, Y. Omura, and D. Summer, Relativistic turning acceleration of radiation belt electrons by whistler mode chorus, 査読有, Journal of Geophysical Research, 113, A04224, 2008,

doi:10.1029/2007JA012478

⑱ Y. Omura, Y. Katoh, and D. Summers, Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 113, A04223, 2008, doi:10.1029/2007JA012622  
〔学会発表〕(計 68 件)

① Y. Omura, Theory and Simulations on Whistler-mode and EMIC Triggered Emissions, AGU Fall Meeting 2010, 2010/12/13-17, San Francisco, USA

② Y. Omura, J. Pickett, B. Grison, O. Santolik, I. Dandouras, M. Engebretson, P. M. E. Decreau, Theory and Observation of Electromagnetic Ion Cyclotron Triggered Emissions in the Magnetosphere, AP-RASC'10, 2010/9/22-26, Toyama, Japan

③ Y. Omura, Plasma Waves and High Energy Particles in the Earth's Radiation Belts, AP-RASC'10, 2010/9/22-26, Toyama, Japan

④ Y. Omura, M. Hikishima, D. Summers, Theory and Simulations of VLF Triggered Emissions, 4th VERSIM Workshop, 2010/9/13-17, Prague, Czech

⑤ Y. Omura, Theory and Simulations of Whistler-Mode Chorus Emissions in the Magnetosphere (Session H), ISRSSP 2010, 2010/8/25-27, Sofia, Bulgaria

⑥ Y. Omura, Theory and Simulations of VLF Chorus Emissions, 7th AOGS Meeting, 2010/7/5-9, Hyderabad, India

⑦ Yoshiharu Omura, Jolene Pickett, Benjamin Grison, et al., Theory and Observation of Electromagnetic Ion Cyclotron Triggered Emissions in the Magnetosphere, 7th AOGS Meeting, 2010/7/5-9, Hyderabad, India

⑧ Omura, Y., Pickett, J., Grison, B., Santolik, O., Dandouras, I., Engebretson, M., Decreau, P. M., Masson, A., Theory and observation of electromagnetic ion cyclotron chorus emissions in the magnetosphere, Western Pacific Geophysics Meeting 2010, 2010/6/22-25, 台北 (台湾)

⑨ 大村 善治, 磁気圏におけるホイッスラーモード波およびEMIC波のコーラス放射の非線形理論 P-EM021(宇宙天気), 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010/5/25, 幕張メッセ国際会議場

⑩ 大村 善治, ホイッスラーモード・コーラス放射による相対論的電子加速 P-EM028(3 学会合同プラズマ宇宙物理-1), 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010/5/23, 幕張メッセ国際会議場

⑪ Y. Omura, M. Hikishima, and Y. Katoh, Electromagnetic particle

simulations of whistler-mode chorus emissions, 2009 Conference on Computational Physics (CCP 2009), 2009/12/15-19, Kaohsiung, Taiwan

⑫ Y. Omura, Theory and simulations of nonlinear whistler-mode chorus waves in the radiation belts, WCU International Workshop, 2009/10/26-28, Jeju, Korea

⑬ 大村善治, 疋島充, 加藤雄人, Summers Danny, 八木谷聡, 磁気赤道域における上側周波数帯コーラス放射の発生機構, 第 126 回地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会 (2009 年 秋学会), 2009/9/27-30, 金沢大学

⑭ Y. Omura, M. Hikishima, Y. Katoh, D. Summers, S. Yagitani, Nonlinear Mechanisms of lower band and upper band VLF, 11th Scientific Assembly of International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 2009/8/23-30, Sopron, Hungary

⑮ Y. Omura, Nonlinear Wave-Particle Interactions in the Magnetosphere (基調講演), Asia Oceania Geosciences Society, 2009/8/12, Singapore

⑯ Y. OMURA, M. HIKISHIMA, Y. KATOH, D. SUMMERS, S. YAGITANI, Nonlinear Mechanisms of Lower Band and Upper Band VLF Chorus Emissions in the Magnetosphere, Asia Oceania Geosciences Society, Asia Oceania Geosciences Society, 2009/8/11-15, Singapore

⑰ Y. Omura, Theory and simulations of nonlinear whistler-mode chorus waves in the magnetosphere, Modern Challenges in Nonlinear Plasma Physics, A Conference honoring the Career of Dennis Papadopoulos, 2009/6/15-19, Sani Resort, Halkidiki, Macedonia, Greece

⑱ Y. Omura, Nonlinear particle dynamics associated with electrostatic solitary waves and whistler-mode chorus emissions in the magnetosphere, 17th Cluster Workshop, 2009/5/12-15, Uppsala, Sweden

⑲ Y. Omura, M. Hikishima, Y. Katoh, D. Summers, S. Yagitani, A nonlinear kinetic theory of self-sustaining whistler-mode wave emissions in the inner magnetosphere, American Geophysical Union (AGU) 2008 Fall Meeting, 2008/12/15-21, San Francisco, USA

⑳ 大村善治, 疋島充, 加藤雄人, Summers Danny, 八木谷聡, 磁気圏におけるホイッスラーモード・コーラス放射の励起機構, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 124 回総会・講演会, 2008/10/9-12, Sendai, Japan

21 Y. Omura, Relativistic electron

acceleration by whistler-mode chorus emissions, 3rd VERSIM Workshop 2008, 2008/9/15-20, Tihany, Hungary

22 Y. Omura, Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus emissions, 3rd VERSIM Workshop 2008, 2008/9/15-20, Tihany, Hungary

23 Y. Omura, D. Summers, Relativistic electron acceleration by whistlermode chorus emissions in radiation belts, URSI XXIXth General Assembly, 2008/8/7-16, Chicago, USA

24 Y. Omura, Y. Katoh, D. Summers, Nonlinear wave growth theory of whistler-mode chorus emissions, URSI XXIXth General Assembly, 2008/8/7-16, Chicago, USA

25 Y. Katoh, Y. Omura, D. Summers, Rapid energization of relativistic electrons by nonlinear wave trapping, 2008/7/13-20, Montreal, Canada

26 Y. Omura, Relativistic electron acceleration by whistler-mode chorus emissions associated with substorms, 2008/7/13-20, Montreal, Canada

27 Y. Omura, Nonlinear wave growth theory of whistler-mode chorus emissions induced by substorms "37th Committee on Space Research(COSPAR) Scientific Assembly", 2008/7/13-20, Montreal, Canada

28 Y. Omura and D. Summers, Relativistic Electron Acceleration by Whistler-mode Chorus Emissions Associated with Substorms, "Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2008", 2008/6/16-20, Busan, Korea

29 Y. Omura, Y. Kato, D. Summers, Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus, Japan Geoscience Union Meeting 2008, 2008/5/25-30, Makuhari, Japan

30 Y. Omura, Theory and simulation of the generation of whistler mode chorus, The Seventh International Workshop on Nonlinear Waves and Turbulence in Space Plasmas (NLW-7), 2008/4/21-25, Beaulieu, FRANCE

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

## 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

笠原 禎也 (KASAHARA YOSHIYA)

金沢大学・総合メディア基盤センター・准教授

研究者番号 : 50243051

### (3) 連携研究者

白井 英之 (USUI HIDEYUKI)

神戸大学大学院システム情報学研究所・教授

研究者番号 : 10243081