

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10日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22684025

研究課題名（和文） 放射線帯非線形波動粒子相互作用のシミュレーション研究

研究課題名（英文） Simulation study of nonlinear wave-particle interactions occurring in the terrestrial radiation belts

研究代表者

加藤 雄人 (KATO YUTO)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：60378982

研究成果の概要（和文）：放射線帯領域でのコヒーレントなホイッスラーモード波動と高エネルギー電子との非線形相互作用について、超並列計算に対応したシミュレーションコードを開発して計算機実験を行い、相互作用素過程を定量的に究明した。コーラス放射の発生過程における波動振幅の閾値や、背景磁場非一様性の影響、コーラス放射の波動スペクトルへの影響を定量的に明らかとした。さらに、放射線帯の実環境計算におけるコーラス放射の再現に成功した。

研究成果の概要（英文）：We quantitatively revealed properties of wave-particle interactions between whistle-mode chorus and energetic electrons in the terrestrial radiation belts. We clarified threshold amplitude and effect of background magnetic field inhomogeneity on the chorus generation process.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2011年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2012年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
年度			
年度			
総計	18,600,000	5,580,000	24,180,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：超高層物理学

キーワード：超高層物理学、計算物理、磁気圏・電離圏、宇宙科学

1. 研究開始当初の背景

人類の活動範囲が宇宙空間へと拡大するにつれて、地球周辺の宇宙環境の変動現象を理解する事を目的として、宇宙天気研究の重要性が広く認識されている。特に近年、放射線帯の相対論的電子の生成過程全容の解明が主要な研究課題の一つとして、精力的な研究が世界的に進められており、中でも磁気圏プラズマ中で自然発生するホイッスラーモード・コーラス放射との相互作用が重要な役

割を果たすとして注目されている [e.g., Summers and Ma, JGR 2000]。

宇宙プラズマ中で生起する現象は、本質的に非線形の物理プロセスが支配的である。コーラス放射の関わる電子加速過程も同様であり、従来の研究では十分に考慮されていなかった非線形効果が本質的に重要である事が指摘され、放射線帯の物理は新たな展開を見せつつある。このコーラス放射の励起メカニズムは50年来の謎とされてきたが、2006年

に我々はスーパーコンピュータの能力を最大限に利用した大規模な計算機実験により電磁界の基礎方程式と粒子の運動方程式を解き進めて、コーラス放射の生成過程に類似した物理プロセスで励起されると考えられているトリガードエミッションを再現することに成功した[Katoh and Omura, JGR 2006]。さらに2007年には、磁気赤道付近の熱雑音から自然に励起されてくるホイッスラーモードから同様のライジングトーンが発生すること、すなわちコーラス放射が自然発生する様相を、同様の計算機実験で再現することに成功した[Katoh and Omura, GRL 2007a]。また、その発生メカニズムについても、計算機実験結果の詳細な解析を通じて、これらのライジングトーンが粒子の速度位相空間に形成される電磁ホールによって引き起こされることを理論的に解明した[Omura, Katoh and Summers, JGR 2008]。さらにこのシミュレーション中では、励起されたコーラスにより相対論的高エネルギー電子が捕捉され、高効率に加速される様相も再現されている(Katoh et al., Ann Geophys 2008)。コーラス放射の生成過程を説明する非線形波動成長理論は同時に、トリガードエミッション発生の物理過程にも適用可能である。これら近年めざましい進展をみせる理論研究と、大規模計算機資源を活用したシミュレーション研究により、ホイッスラーモード波動と高エネルギー電子との非線形波動粒子相互作用素過程についての本質的理解が期待される状況にあった。

2. 研究の目的

本研究課題は、放射線帯領域で励起するコーラス放射と相対論的電子とのサイクロトロン共鳴に基づく相互作用過程を、超並列計算により計算機上に再現し、本質的に重要となる非線形波動粒子相互作用の物理素過程を定量的に理解することを目的として実施された。

3. 研究の方法

本研究は以下の3つの研究課題を柱にして行われた。

[A] 非線形波動成長理論に基づくトリガードエミッション励起過程の研究

[B] 実パラメータ計算によるコーラス放射励起過程の定量的解明

[C] 超並列計算に対応した放射線帯電子加速シミュレーションコードの開発

これらの研究課題の成果は、相互にフィードバックをかけあいながら研究活動は進められた。

課題[A]に関しては、これまで一つのパラメータセットでの結果のみが示されていた本コードによるトリガードエミッションの再

現実験を、人工的に印可する波動の強度や周波数、継続時間等を広範なパラメータレンジで変化させて実施した。コーラス放射発生過程と共通の発生過程により議論できるトリガードエミッションの再現実験により、非線形波動成長理論による予測との比較・検討を通じて、非線形相互作用発現の閾値や振幅依存性などの定量的解明が期待された。コーラス放射の計算に比較して計算コストの小さいトリガードエミッションの再現実験は、本理論の検証を目的としたパラメータサーベイには最適な研究課題であることから、課題[C]によるコード開発で課題[B]のコーラス放射再現実験が多数実行できる環境が構築できるまで、先行して実施した。

課題[B]は、コーラス放射の発生過程を再現する計算機実験を、高エネルギー電子の初期速度分布や背景磁場強度などのパラメータを変化させて実施する事により、コーラス放射発生過程の物理を定量的に明らかにする。波動特性のパラメータ依存性は相対論的電子の加速効率の定量評価においても重要な要素であり、放射線帯領域で実際に観測されるプラズマ環境を初期値とした実パラメータ計算を行う事で、衛星観測結果との定量的比較が実現できる。

実パラメータ計算には多大な計算コストが必要とされるため、並列計算の効率を最大限に高め、超並列環境下でも高い並列化効率を維持できるシミュレーションコードの開発が必須である。これを目的とする課題[C]は、シミュレーションコードの最適化と、近年粒子コードの最新の並列化技術を実装することで、研究目的の達成に必要な計算機実験の基盤を構築する。

4. 研究成果

本研究課題により得られた研究成果から代表的な成果を挙げる。

トリガードエミッションの再現実験では、人工的に印可する波動の振幅や周波数を様々なパラメータで実行し、磁気赤道における二次的な波動の発生の有無や、発生したトリガードエミッションの周波数変化率について解析を行い、波動振幅に応じて周波数変化率が変化する様相を再現した。この知見に基づいて行われたコーラス放射の再現実験では、まず背景磁場強度の空間分布は同一の条件で、磁気赤道における高エネルギー電子の初期条件を変化させた場合に、発生するコーラス放射の特徴への影響を議論した。シミュレーションの初期段階では高エネルギー電子の速度分布に与えた温度異方性に起因する線形のプラズマ不安定が、バンド状のホイッスラーモード波動を励起させるが、計算機実験では高エネルギー電子の速度分布関数を同一として、数密度のみを変化させる事

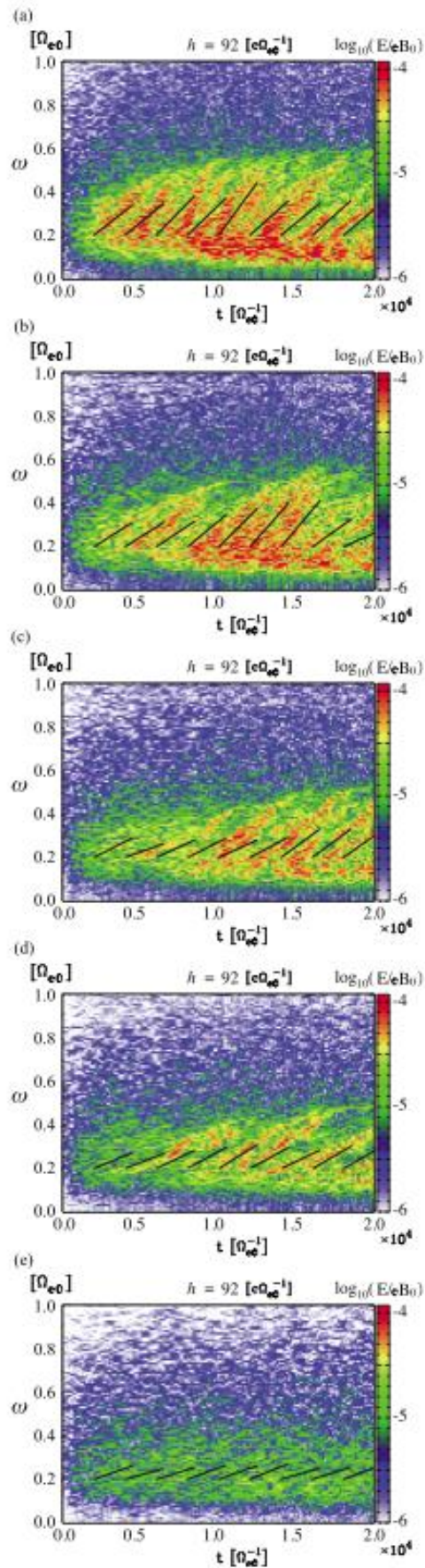


図 1: 再現されたコーラス放射の周波数スペクトル [Kato and Omura, JGR 2011]

により、線形成長段階での周波数プロファイルは同一で、成長率のみ異なる環境を実現し、線形段階での波動の振幅が、その後の非線形段階への遷移や、非線形相互作用にどのような影響を与えるかについて着目した。計算機実験の結果を図 1 に示す。この結果から、背景磁場の空間勾配が同じ条件でも、異なる周波数変化率を持つコーラス放射が発生し得ること、コーラス放射の周波数変化率が波動振幅に比例して増加する事が明らかとなった。また、非線形波動成長理論に基づいて見積もられた周波数変化率は、シミュレーション結果をよく説明する事が示された。更にこの計算機実験では、高エネルギー電子の数密度を小さくした時にコーラス放射が発生しない場合があることが示され、コーラス放射の発生過程に一定の閾値が存在する事を明らかとした。以上の成果は学術論文としてまとめられ、公表された[研究成果：雑誌論文⑬ Kato and Omura, JGR 2011]。

計算機実験の成果に基づいて、非線形波動成長理論と放射線帯領域でのコーラス放射の直接観測結果との比較を行った。その結果、理論に基づいて計算された周波数変化率やスペクトル形状が、観測されたコーラス放射の特徴と合致する事が示された (研究成果：雑誌論文⑭ Kurita et al., JGR 2012; 図 2)。

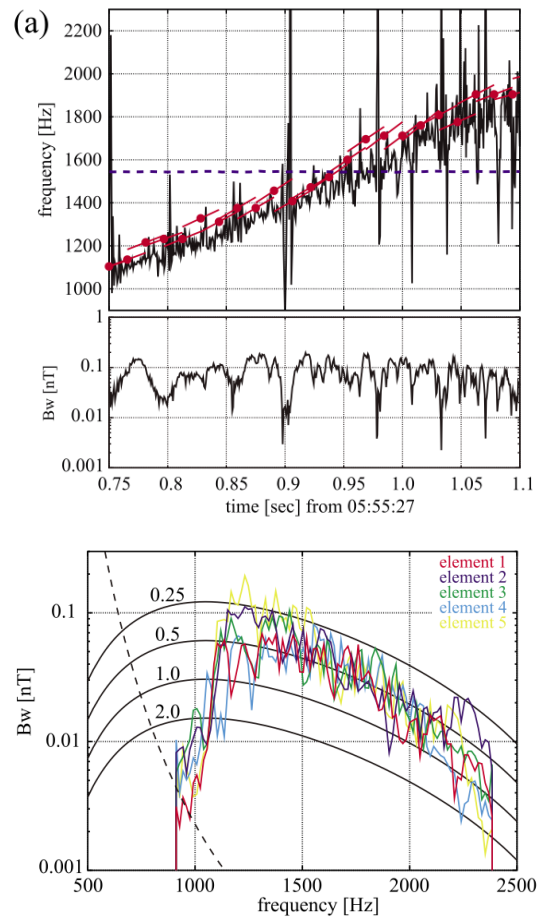


図 2: 観測結果との比較 [Kurita et al., JGR 2012]

また、課題[C]で取り組んだコードの最適化に関しては、電子ハイブリッドコードならびに新たに開発した空間2次元コードの演算性能を、京都大学のCray XE6ならびに九州大学のFUJITSU PRIMEHPC FX10を利用して4096並列まで評価した。その結果、weak scalingでは良好なスケーラビリティが得られた一方、strong scalingでは1024並列数以上で性能低下が見られたが、粒子および電磁場配列のマージなどの最適化を実施することで、性能向上を実現した。

以上の成果を始めとして本科研究費研究課題では、研究期間内に14編の雑誌論文および21件の学術講演論文として公表される大きな研究成果が得られた。加えて本研究により得られた特筆すべき成果として、本研究課題により放射線帯領域での非線形波動粒子相互作用の重要性が定量的に示されたことが、2015年に打ち上げを目指して我が国で進めている放射線帯探査衛星計画ERGにおいて、非線形波動粒子相互作用を直接計測する新たな計測装置の検討を大きく進展させる成果を生んだ事が挙げられる[研究成果：雑誌論文① Katoh et al., Ann. Geophys. 2013]。

さらに本研究課題により得られた成果として(1)磁気赤道における高エネルギー電子の初期速度分布が同じ条件でも、背景磁場非一様性の大きさに応じてコーラス放射のスペクトルが変化すること、(2)コーラス放射発生に必要とされる波動振幅の閾値が非常に小さい条件ではコーラス放射が断続的に励起される状況となり、ヒス状のスペクトルとなること、ならびに(3)放射線帯領域の実パラメータ計算でコーラス放射発生過程の再現に成功したことが挙げられる。以上の成果は国内外の学会・研究会で公表され、また、それぞれ学術論文としてまとめられ、学術誌へ投稿中および投稿準備中である。

今後充実する大規模計算機実験ならびに衛星・地上観測研究により、放射線帯物理の新展開が期待される中、その基盤となる研究成果が本研究課題により数多く挙げられた。計算機資源を共同研究を通じて提供くださった京都大学・名古屋大学・九州大学ならびに東北大学の各研究機関に感謝する。

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14件)

- ① Katoh, Y., M. Kitahara, H. Kojima, Y. Omura, S. Kasahara, M. Hirahara, Y. Miyoshi, K. Seki, K. Asamura, T. Takashima, and T. Ono, Significance of Wave-Particle Interaction Analyzer for direct measurements of

nonlinear wave-particle interactions, Ann. Geophys., 査読有, 31, 503-512, doi:10.5194/angeo-31-503-2013, 2013.

- ② Menietti, J. D., Y. Katoh, G. B. Hospodarsky, and D. A. Gurnett, Frequency drift of Saturn chorus emission compared to nonlinear theory, J. Geophys. Res., 査読有, 118, 982-990, doi:10.1002/jgra.50165, 2013.
- ③ Kalaee, M. J., Y. Katoh, and T. Ono, A study of the plasma wave enhancements in the Earth's equatorial plasmasphere, Earth Moon Planets, 査読有, doi:10.1007/s11038-013-9414-6, 2013.
- ④ Kurita, S., Y. Katoh, Y. Omura, V. Angelopoulos, C. M. Cully, O. Le Contel, and H. Misawa, THEMIS observation of chorus elements without a gap at half the gyrofrequency, J. Geophys. Res., 査読有, 117, A11223, doi:10.1029/2012JA018076, 2012.
- ⑤ Miyoshi, Y., T. Ono, T. Takashima, K. Asamura, M. Hirahara, Y. Kasaba, A. Matsuoka, H. Kojima, K. Shiokawa, K. Seki, M. Fujimoto, T. Nagatsuma, C. Z. Cheng, Y. Kazama, S. Kasahara, H. Matsumoto, N. Higashio, A. Kumamoto, S. Yagitani, Y. Kasahara, K. Ishisaka, Y. Katoh, Y. Ebihara, Y. Omura, M. Nose, T. Hori, Y. Miyashita, Y. Tanaka, T. Segawa, and ERG-working group, The Energization and Radiation in Geospace (ERG) Project, in "Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere", Geophys. Monogr. Ser., 査読有, vol. 199, edited by D. Summers, I. R. Mann, D. N. Baker, and M. Schulz, pp. 103-116, AGU, Washington, D. C. doi:10.1029/2012GM001304, 2012.
- ⑥ Tsugawa, Y., Y. Katoh, N. Terada, T. Ono, H. Tsunakawa, F. Takahashi, H. Shibuya, H. Shimizu, M. Matsushima, Y. Saito, S. Yokota, and M. N. Nishino, Statistical study of broadband whistler-mode waves detected by Kaguya near the Moon, Geophys. Res. Lett., 査読有, 39, L16101, doi:10.1029/2012GL052636, 2012.
- ⑦ Tadokoro, H., H. Misawa, F. Tsuchiya, Y. Katoh, A. Morioka, and M. Yoneda, Effect of the photo-dissociations on the spreading of OH and O cloud in

- Saturn's inner magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 117, A09226, doi:10.1029/2011JA017492, 2012.
- ⑧ Nishiyama, T., T. Sakanoi, Y. Miyoshi, R. Kataoka, D. Hampton, Y. Katoh, K. Asamura, and S. Okano, Fine scale structures of pulsating auroras in the early recovery phase of substorm using ground-based EMCCD camera, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 117, A10229, doi:10.1029/2012JA017921, 2012.
- ⑨ 加藤雄人, 土屋史紀, 三好由純, 三澤浩昭, 森岡昭, 木星内部磁気圏でのコーラス放射と放射線帯電子生成過程, *遊・星・人*, 査読有, 第20巻, 4号, 294-299, 2011.
- ⑩ Nishiyama, T., T. Sakanoi, Y. Miyoshi, Y. Katoh, K. Asamura, S. Okano, and M. Hirahara, The source region and its characteristics of pulsating aurora based on the Reimei observations, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 116, A03226, doi:10.1029/2010JA015507, 2011.
- ⑪ Tsugawa, Y., N. Terada, Y. Katoh, T. Ono, H. Tsunakawa, F. Takahashi, H. Shibuya, H. Shimizu, and M. Matsushima, Statistical analysis of monochromatic whistler waves near the Moon detected by Kaguya, *Ann. Geophys.*, 査読有, 29, 889-893, 2011.
- ⑫ Katoh, Y., F. Tsuchiya, Y. Miyoshi, A. Morioka, H. Misawa, R. Ujiie, W. S. Kurth, A. T. Tomas, and N. Krupp, Whistler mode chorus enhancements in association with energetic electron signatures in the Jovian magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 116, A02215, doi:10.1029/2010JA016183, 2011.
- ⑬ Katoh, Y. and Y. Omura, Amplitude dependence of frequency sweep rates of whistler mode chorus emissions, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 116, A07201, doi:10.1029/2011JA016496, 2011.
- ⑭ Miyoshi, Y., Y. Katoh, T. Nishiyama, T. Sakanoi, K. Asamura, and M. Hirahara, Time of flight analysis of the pulsating aurora electrons, considering the wave-particle interactions with the propagating whistler mode waves, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 115, A10312, doi:10.1029/2009JA015127, 2010.
- [学会発表] (計21件)
- ① 加藤雄人, 疋島充, 小嶋浩嗣, 大村善治, 笠原慧, 平原聖文, 三好由純, 関華奈子, 浅村和史, 高島健, 小野高幸, 地球磁気圏におけるホイッスラーモード・コーラス放射と高エネルギー電子との相互作用の直接観測に向けた検討: Wave-Particle Interaction Analyzer (WPIA), 日本物理学会第68回年次大会, 広島, 3月29日, 2013年.
- ② Katoh, Y., M. Kitahara, H. Kojima, Y. Omura, S. Kasahara, M. Hirahara, Y. Miyoshi, K. Seki, K. Asamura, T. Takashima, and T. Ono, Significance of Wave-Particle Interaction Analyzer for direct measurement of nonlinear wave-particle interactions, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, 5 December, 2012.
- ③ Katoh, Y. and Y. Omura, Electron hybrid simulation of nonlinear wave growth of whistler-mode chorus emissions in the equatorial region of the Earth's inner magnetosphere, AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly, Singapore, 17 August, 2012.
- ④ Katoh, Y., Comparative study of terrestrial and Jovian whistler-mode chorus emissions, AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly, Singapore, 17 August, 2012.
- ⑤ Katoh, Y., Y. Omura, Y. Miyoshi, M. Hikishima, and K. Seki, Numerical study of chorus wave generation in the inner magnetosphere during the storm-time condition, 第132回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 札幌, 10月23日, 2012年.
- ⑥ Katoh, Y., A two-dimensional simulation of whistler-mode waves propagating in the dipole magnetic field, 第132回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 札幌, 10月22日, 2012年.
- ⑦ Katoh, Y. and Y. Omura, Nonlinear wave growth of whistler-mode chorus emissions in the equatorial region of the Earth's inner magnetosphere, 日本地球惑星科学連合2012年大会, 千葉, 5月21日, 2012年.
- ⑧ Katoh, Y., Simulation study of whistler-mode wave propagation in the dipole coordinate, 日本地球惑星科学連合2012年大会, 千葉, 5月22日, 2012年.
- ⑨ Katoh, Y., S. Kurita, Y. Omura, H. Misawa, and V. Angelopoulos, THEMIS observation of whistler-mode chorus emissions without a gap at half the

- gyrofrequency, Inner Magnetosphere Coupling II (IMC-II), Los Angeles, USA, 21 March, 2012.
- ⑩ Katoh, Y. and Y. Omura, Amplitude dependence of the generation process of whistler-mode chorus emissions, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, 5 December, 2011.
- ⑪ Katoh, Y. and Y. Omura, Amplitude dependence of the generation process of whistler-mode chorus emissions, 第130回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 神戸, 11月4日, 2011年.
- ⑫ Katoh, Y. and Y. Omura, Electron hybrid simulation of nonlinear wave growth of whistler-mode chorus emissions, AGU Chapman Conference on the Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere, St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada, 20 July, 2011. (招待講演)
- ⑬ Katoh, Y., F. Tsuchiya, Y. Miyoshi, A. Morioka, H. Misawa, R. Ujiie, W. S. Kurth, A. T. Tomas, and N. Krupp, Whistler-Mode Chorus Enhancements and Anisotropic Electrons in the Jovian Inner Magnetosphere, Magnetospheres of Outer Planets 2011, Boston, USA, 11 July, 2011.
- ⑭ Katoh, Y., F. Tsuchiya, Y. Miyoshi, A. Morioka, H. Misawa, R. Ujiie, W. S. Kurth, A. T. Tomas, and N. Krupp, Whistler-mode chorus enhancements and anisotropic electrons in the Jovian inner magnetosphere, 日本地球惑星科学連合 2011年大会, 千葉, 5月27日, 2011年.
- ⑮ Katoh, Y., F. Tsuchiya, Y. Miyoshi, A. Morioka, H. Misawa, R. Ujiie, W. S. Kurth, A. T. Tomas, and N. Krupp, Relationship between whistler-mode chorus enhancements and anisotropic electrons in the Jovian inner magnetosphere, International Symposium on Planetary Science, Sendai, Japan, 9 March, 2011.
- ⑯ Katoh, Y. and Y. Omura, Frequency and amplitude characteristics of chorus reproduced by electron hybrid simulations, 第128回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 那覇, 11月1日, 2010年.
- ⑰ Katoh, Y. and Y. Omura, Electron Hybrid Simulation of Nonlinear Growth of Whistler-mode Waves in the Equatorial Region of the Inner Magnetosphere, AP-RASC 2010, Toyama, Japan, 26 September, 2010. (招待講演)
- ⑱ Katoh, Y. and Y. Omura, Cross-energy coupling in the process of whistler-mode wave-particle interactions in the Earth's inner magnetosphere, AP-RASC 2010, Toyama, Japan, 24 September, 2010.
- ⑲ Katoh, Y. and Y. Omura, Cross-energy coupling seen from whistler-mode wave-particle interactions in the inner magnetosphere, Western Pacific Geophysics Meeting 2010, Taipei, Taiwan, 23 June, 2010. (招待講演)
- ⑳ Katoh, Y. and Y. Omura, Simulation study of nonlinear wave growth of whistler-mode waves in an inhomogeneous magnetic field, Western Pacific Geophysics Meeting 2010, Taipei, Taiwan, 24 June, 2010.
- 21 加藤雄人, 大村善治, 電子ハイブリッドコードによる不均一磁場中でのホイッスラーモード波動非線形成長に関する計算機実験, 日本地球惑星科学連合 2010年大会, 千葉, 5月26日, 2010年

[その他]

ホームページ等

<http://stpp.gp.tohoku.ac.jp/~yuto/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 雄人 (KATOH YUTO)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：60378982