

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340147

研究課題名(和文) ジオスペースにおけるトリガード・エミッションと高エネルギー粒子輸送の研究

研究課題名(英文) Study of Triggered Emissions and Associated High Energy Transport in Geospace

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) 15,400,000円、(間接経費) 4,620,000円

研究成果の概要(和文)：ホイッスラーモード波・コーラス放射および電磁イオンサイクロトロン(EMIC)波トリガード放射の発生機構について、衛星観測に基づいて物理モデルを作り、第一原理に基づく計算機シミュレーションを実行し、エミッションの再現することに成功した。さらに、その理論解析を通じて、内在する非線形波動粒子相互作用の素過程を解明することができた。特に、これまでの研究では、わかっていなかった周波数上昇を伴う非線形成長の飽和過程とサブパケット構造を持つコーラス放射の形成機構に関する理解において大きな進展があった。

研究成果の概要(英文)：Computer simulations have successfully been conducted, reproducing whistler-mode chorus emissions and electromagnetic ion cyclotron (EMIC) triggered emissions with physical models based on spacecraft observations. The nonlinear wave growth theory for rising-tone emissions has been developed, clarifying the generation mechanism of these emissions. Significant progress has been made in our understanding of the saturation mechanism of the nonlinear wave growth and resulting formation of chorus elements comprising sub-packets structures.

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 計算機シミュレーション 放射線帯 相対論的電子 非線形波動 非線形ダイナミック  
不安定性 内部磁気圏

### 1. 研究開始当初の背景

周波数変動を伴う電子ホイッスラーモード波および電磁イオンサイクロトロン波が観測されている。ホイッスラーモード波については、これまで非常に多くの観測がなされてきているが、その厳密な発生機構については長年にわたる謎として不明であった。しかし、最近、我々の研究グループは共鳴電子の運動方程式とマックスウェル方程式を解くという第一原理に基づく計算機シミュレーションにより、周波数が大幅に変動するコーラス放射を再現することに成功した。この結果、コーラス放射の原因となる不安定性は、従来考えられていた線形成長率とは本質的に異なる原理によって引き起こされていることが判明した。線形理論では、一定の周波数の波の安定・不安定性を解析しているが、周波数が変動するコーヒーレントな波が存在すると、線形理論では安定な波であっても不安定になることを示すことができたのである。さらに、この不安定性の成長率は、線形成長率よりも大きくなり、まさに爆発的に成長し、非常に大きな振幅の波が励起されることが分かってきた。しかし、この線形過程から非線形過程に移行する詳細な物理については、まだ十分に理解できていない。一方、最近、この波の周波数変動による非線形成長が、周波数が全く異なる数 Hz の ULF 波動の観測においても発見され、コーラス放射と同じ非線形過程が作用していることが判明した。この波は電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波である。高エネルギーイオンとサイクロトロン共鳴してイオンのピッチ角散乱を引き起こし、内部磁気圏のイオンダイナミクスにおいて重要な役割を果たしていると考えられる。この EMIC 波は、放射線帯の MeV 電子とも異常サイクロトロン共鳴することが知られている。EMIC 波とのサイクロトロン共鳴により、放射線帯を含む赤道域に捕捉された電子およびイオンはピッチ角散乱を受けて、磁力線に沿って降下し、極域においてオーロラを発生させていることも観測や準線形理論から推定されており、さらに定量的な研究が求められる。また、これらの共鳴粒子はピッチ角散乱を受けて運動エネルギーを失うだけでなく、一部の粒子は、非常に効率良く加速されて、放射線帯を形成するような相対論的なエネルギーにまで加速されることが分かってきた。これらの非線形過程は、ジオスペースにおいてその放射線環境の変動に影響を与えるものとして非常に重要であり、さらに今後のジオスペースにおける衛星観測等によって検証してゆく必要がある。

### 2. 研究の目的

地球をとりまく宇宙空間ジオスペースでは様々なプラズマ波動が発生しているが、その中でも周波数が大幅に変動するホイッスラーモード・コーラス放射は放射線帯の相対論

的電子加速に關与するなど、ジオスペースの高エネルギー粒子輸送に大きな役割を果たしていると考えられる。コーラス放射は自然発生する波動によるトリガード・エミッションであると見なすことができる。一方、周波数帯の全く異なる電磁イオンサイクロトロン波においてもコーラス放射同様のエミッションが発生していることが発見された。本研究では、計算機シミュレーションと衛星観測データの解析にもとづいてトリガード・エミッションの励起過程と粒子輸送過程を定量的に解明し、2012 年から始まる国際的なジオスペース観測衛星計画に理論面から貢献するものである。

### 3. 研究の方法

電磁粒子コード、電子ハイブリッドコード、イオン・ハイブリッドコードおよびプラズマ・ハイブリッド・シミュレーション (VHS) コードの 4 種類の計算機シミュレーションコードを用いて、ホイッスラーモード波および電磁サイクロトロン波に関わる非線形現象を再現し、理論構築する。コーラス放射の位相変化の情報が重要であり、プラズマ波動の波形捕捉機を搭載した GEOTAIL 衛星のデータからコーラス放射の事例を選びだし、それらの位相および振幅変化の解析を行う。周波数変化率等、理論的に予測できる物理量と観測データとの比較を行い、理論の妥当性を検証するとともに、これまでの理論では十分に説明できなかった非線形成長の飽和過程等を、新たな理論と計算機シミュレーションから得られる新たな知見を手掛かりとして解明してゆく。2012 年から始まる放射線帯の衛星観測に対して、理論との比較を意識した観測モードの提案を行ってゆく。

### 4. 研究成果

ホイッスラーモード波・コーラス放射および電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波トリガード放射の発生機構について、観測に基づくモデルに基づいて計算機シミュレーションを実行し、エミッションの再現することに成功した。さらに、その理論解析を通じて、内在する非線形波動粒子相互作用の素過程を解明することができた。特に、これまでの研究では、わかっていなかった周波数上昇を伴う非線形成長の飽和過程とコーラス放射のサブパケットの形成機構に関する理解において大きな進展があった。非線形成長はその閾値以上のトリガー波が存在すれば、絶対不安定として開始され、コーラス方程式に従って、周波数が上昇し振幅が増大する。振幅が最適振幅 (optimum amplitude) 以上になると成長は飽和する。これは非線形成長の原因である非一様性パラメータがゼロに近づくからである。しばらくの間成長は止まるが、生成された波束は赤道から離れる方向に伝搬し、そこにやってくる共鳴粒子と相互作用してホールを形成する。反対方向に進行する共

鳴粒子が波束を離れるとそこで位相変調を受けた電子と共鳴する新たな波が発生し、それがトリガー波となって再度、非線形成長が開始される。このプロセスを繰り返すことにより、トリガー領域は次第に上流側に移動してゆく。定点観測の波動スペクトルとしては階段状のスペクトルが形成される。この周波数上昇過程により、共鳴速度は次第に低下する一方、共鳴電子の垂直速度の範囲が広がり、位相空間において、低い垂直速度ではホールが形成される一方高い垂直速度ではヒルができて、波を減衰させる効果が現れる。このため、非線形成長とサブパケット形成によるコーラスエレメントの形成は終了する。

#### 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 29 件)

T. Habagishi, S. Yagitani, and Y. Omura, Nonlinear damping of chorus emissions at local half cyclotron frequencies observed by Geotail at  $L > 9$ , *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/2013JA019696, 2014.

S. Yagitani, T. Habagishi, and Y. Omura, Geotail observation of upper-band and lower-band chorus elements in the outer magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/2013JA019678, 2014.

M. Shoji and Y. Omura, Spectrum characteristics of electromagnetic ion cyclotron triggered emissions and associated energetic proton dynamics, *J. Geophys. Res.*, 119, doi: 10.1002/2013JA019695, 2014.

Y. Katoh, M. Hikishima, H. Kojima, Y. Omura, S. Kasahara, M. Hirahara, Y. Miyoshi, K. Seki, K. Asamura, T. Takeshima, T. Ono, Direct Measurement of Nonlinear Wave-Particle Interactions in the Earth's Magnetosphere, Wave-Particle Interaction Analyzer (WPIA) for ERG Mission, *JPS Conf. Proc.*, 015100, 2014.

S. Nakamura, Y. Omura, S. Machida, M. Shoji, M. Nose, V. Angelopoulos, Electromagnetic ion cyclotron rising tone emissions observed by THEMIS probes outside the plasmopause, *J. Geophys. Res.*, 119, doi: 10.1002/2013JA019146, 2014.

K. Sakaguchi, Y. Kasahara, M. Shoji, Y. Omura, Y. Miyoshi, T. Nagatsuma, A. Kumamoto and A. Matsuoka, Akebono observations of EMIC waves in the slot region of the radiation belts,

*Geophys. Res. Lett.*, 40, doi: 10.1002/2013GL058258, 2013.

K. H. Lee, Y. Omura, and L. C. Lee, Electron acceleration by Z-mode and whistler-mode waves, *Phys. Plasmas*, 20, 112901; doi: 10.1063/1.4829439, 2013.

M. Shoji and Y. Omura, Triggering process of electromagnetic ion cyclotron rising tone emissions in the inner magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 118, 5553–5561, doi:10.1002/jgra.50523, 2013.

Y. Omura and Q. Zhao, Relativistic electron microbursts due to nonlinear pitch-angle scattering by EMIC triggered emissions, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/jgra.50477, 2013.

D. Summers, R. Tang, Y. Omura, and D. H. Lee, Parameter spaces for linear and nonlinear whistler-mode waves, *Phys. Plasmas*, 20, 072110; doi: 10.1063/1.4816022, 2013.

Y. Katoh and Y. Omura, Effect of the background magnetic field inhomogeneity on generation processes of whistler-mode chorus and broadband hiss-like emissions, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/jgra.50395, 2013.

K. Yamaguchi, T. Matsumuro, Y. Omura, and D. Nunn, Ray tracing of whistler-mode chorus elements: implications for generation mechanisms of rising and falling tone emissions, *Ann. Geophys.*, 31, 665–673, 2013.

Y. Katoh, 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.*, 31, 503–512, 2013.

Grison, B., O. Santolik, N. Cornilleau-Wehrin, A. Masson, M. J. Engebretson, J. S. Pickett, Y. Omura, P. Robert, R. Nomura, EMIC triggered chorus emissions in Cluster data, *J. Geophys. Res.*, 118, doi:10.1002/jgra.50178, 2013.

Y. Miyoshi, 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, T. Mitani, H. Matsumoto, N. Higashio, A. Kumamoto, Yagitani, Y. Kasahara, K. Ishisaka, L. Blomberg, A. Fujimoto, Y.

- Katoh, Y. Ebihara, Y. Omura, M. Nosé, T. Hori, Y. Miyashita, Y.-M. Tanaka and T. T. Segawa, The Energization and Radiation in Geospace (ERG) Project, AGU Monograph "Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere", The Energization and Radiation in Geospace (ERG) Project, DOI: 10.1029/2012GM001304, 2012.
- D. Summers, R. Tang, and Y. Omura, Linear and Nonlinear Growth of Magnetospheric Whistler Mode Waves, AGU Monograph "Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere", DOI: 10.1029/2012GM001298, 2012.
- Omura Y., D. Nunn, and D. Summers, Generation processes of whistler-mode chorus emissions: Current status of nonlinear wave growth theory, AGU Monograph "Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere", doi: 10.1029/2012GM001347, 2012.
- S. Kurita, 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., VOL. 117, A11223, doi:10.1029/2012JA018076, 2012.
- Shoji, M., and Y. Omura, Precipitation of highly energetic protons by helium branch electromagnetic ion cyclotron triggered emissions, J. Geophys. Res., VOL. 117, A12210, doi:10.1029/2012JA017933, 2012
- Summers, D., Y. Omura, Y. Miyashita, and D.-H. Lee, Nonlinear spatio-temporal evolution of whistler mode chorus waves in Earth's inner magnetosphere, J. Geophys. Res., 117, A09206, doi:10.1029/2012JA017842, 2012.
- 21 Nunn, D., and Y. Omura, A computational and theoretical analysis of falling frequency VLF emissions, J. Geophys. Res., 117, A08228, doi:10.1029/2012JA017557, 2012.
- 22 Omura Y., and Q. Zhao, Nonlinear pitch-angle scattering of relativistic electrons by EMIC waves in the inner magnetosphere, J. Geophys. Res., 117, A08227, doi:10.1029/2012JA017943, 2012.
- 23 Shoji, M., Y. Omura, and L.-C. Lee, Multidimensional nonlinear mirror-mode structures in the Earth's magnetosheath, J. Geophys. Res., 117, doi:10.1029/2011JA017420, 2012.
- 24 Hikishima, M., and Y. Omura, Particle simulations of whistler-mode rising-tone emissions triggered by waves with different amplitudes, J. Geophys. Res., 117, A04226, doi:10.1029/2011JA017428, 2012.
- 25 Summers, D., R. Tang, and Y. Omura, Effects of nonlinear wave growth on extreme radiation belt electron fluxes, J. Geophys. Res., 116, A10226, doi:10.1029/2011JA016602, 2011.
- 26 Shoji, M., Y. Omura, B. Grison, J. Pickett, I. Dandouras, and M. Engebretson, Electromagnetic ion cyclotron waves in the helium branch induced by multiple electromagnetic ion cyclotron triggered emissions, Geophys. Res. Lett., 38, L17102, doi:10.1029/2011GL048427, 2011.
- 27 Katoh, Y., and Y. Omura, Amplitude dependence of frequency sweep rates of whistler mode chorus emissions, J. Geophys. Res., 116, A07201, doi:10.1029/2011JA016496, 2011.
- 28 Shoji, M., and Y. Omura, Simulation of electromagnetic ion cyclotron triggered emissions in the Earth's inner magnetosphere, J. Geophys. Res., 116, A05212, doi:10.1029/2010JA016351, 2011.
- 29 Omura, Y., and D. Nunn, Triggering process of whistler mode chorus emissions in the magnetosphere, J. Geophys. Res., 116, A05205, doi:10.1029/2010JA016280, 2011.
- [学会発表](計 23 件)  
(代表的招待講演のみ記載)
- Y. Omura, Generation mechanism of whistler-mode chorus emissions, VERSIM 2014, Dunedin, New Zealand, 20 January, 2014.
- Y. Omura, Generation of EMIC triggered emissions and associated precipitations of energetic protons and relativistic electrons in the Earth's inner magnetosphere, Naval Research Laboratory, Plasma Physics Division Colloquium, Washington DC, USA, 17 December 2013.
- Y. Omura, Generation mechanism of whistler-mode chorus emissions, 39th COSPAR, Mysore, India, 19-July, 2012.
- Y. Omura, Nonlinear processes of whistler-mode wave-particle

interactions RBSP SWG Meeting, APL, U.S.A, 16-17, May, 2012.

M. Shoji, Y. Omura, L.-C. Lee, NONLINEAR MIRROR MODE STRUCTURES IN MULTIDIMENSIONAL MODELS, URSI XXX General Assembly Istanbul, Turkey, 15-Aug-11, 2011.

Y. Omura, Particle Simulations of Whistler-mode Chorus and Electromagnetic Ion Cyclotron Waves, 10th International School for Space Simulations (ISSS-10), Banff, Canada. 2011 July 25-30, 2011.

Y. Omura, Formation process of relativistic electron flux through interaction with chorus emissions in the Earth's inner magnetosphere, AGU Chapman Conference on Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere, St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada, 17-22, July, 2011

〔図書〕(計 3 件)

Omura Y., D. Nunn, and D. Summers, Generation processes of whistler-mode chorus emissions: Current status of nonlinear wave growth theory, AGU Monograph "Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere", 10.1029/2012GM001347, 2012.

D. Summers, R. Tang, and Y. Omura, Linear and Nonlinear Growth of Magnetospheric Whistler Mode Waves, AGU Monograph "Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere", DOI: 10.1029/2012GM001298, 2012.

Y. Miyoshi, 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, T. Mitani, H. Matsumoto, N. Higashio, A. Kumamoto, S. Yagitani, Y. Kasahara, K. Ishisaka, L. Blomberg, A. Fujimoto, Y. Katoh, Y. Ebihara, Y. Omura, M. Nosé, T. Hori, Y. Miyashita, Y.-M. Tanaka and T. T. Segawa, The Energization and Radiation in Geospace (ERG) Project, AGU Monograph "Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere", The Energization and Radiation in Geospace (ERG) Project, DOI: 10.1029/2012GM001304, 2012

〔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

八木谷 聡 (YAGITANI, Satoshi)  
金沢大学・理工研究領域・教授  
研究者番号：30251937

(3) 連携研究者

加藤 雄人 (KATOH, Yuto)  
東北大学・理学研究科・教授  
研究者番号：60378982