

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740283

研究課題名(和文)

巨視的・微視的計算にもとづく内部磁気圏ホイッスラー波動の励起と粒子加速

研究課題名(英文)

Generation of whistler mode waves and particle accelerations based on macro-micro simulations

研究代表者：

三好 由純 (MIYOSHI YOSHIKUMI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教

研究者番号：10377781

研究成果の概要(和文)：内部磁気圏のホイッスラーの時空間分布の発達過程を巨視的および微視的シミュレーションにもとづいて調べ、人工衛星によるホイッスラー波動のデータとの比較を行った。シミュレーションから明らかになったホイッスラーの空間分布の地磁気活動依存性は、CRRES 衛星の統計結果とよい一致を示した。また、巨視的な計算によるホットな電子の分布や冷たい電子の密度などを用いて、微視的な計算を行ったところ、ホイッスラー波動の成長が観測された。また、磁気嵐時のシミュレーションからは、対流電場の増加にともなって、プラズマ圏が収縮し、そこにプラズマシートからホットな電子が連続して流入し、ホイッスラーが励起する様相が見られた。これらのシミュレーションから得られた描像を、放射線帯電子の増加が起こっているイベントについてのホットな電子やホイッスラー波動の統計解析と比較したところ、両者は調和的な結果であった。さらに、シミュレーションからは発生するホイッスラーの周波数スペクトルが磁気嵐の相や領域によって異なることが示された。この結果は、近年の Cluster 衛星によるホイッスラー波動の周波数分布に関する統計結果と整合するものである。

研究成果の概要(英文)：We have investigated temporal-spatial evolution of whistler mode waves in the inner magnetosphere using the global and microscopic simulations and have compared with the satellite observations. The average distributions of whistler mode waves taken from the simulations are consistent with the CRRES statistical survey results. The microscopic simulation, using the distribution function and f_p/f_c from the global simulation as an initial condition, showed significant evolution of whistler mode waves. From the simulation study on a magnetic storm, we observed shrinkage of the plasmasphere, continuous hot electron injections due to enhanced convection, and resultant whistler wave generations near the plamapause. These results are consistent with the statistical analysis of hot electron and whistler mode waves during the events in which large flux enhancement of the MeV electrons takes place. Moreover, we confirmed that the frequency with maximum growth depends on the region and the phase of a magnetic storm, which are consistent with the statistical survey from the Cluster satellite.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：磁気圏物理学

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：内部磁気圏、放射線帯、波動粒子相互作用、シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

内部磁気圏においては様々なプラズマ波動が生起し、粒子と相互作用することによって、加速や散乱、輸送を引き起こしている。近年、この内部磁気圏に存在する放射線帯の相対論的電子の起源として、ホイッスラー波動による加速過程が提案されている。したがって、電子加速メカニズムを明らかにするためには、ホイッスラーの動態を明らかにする必要がある。ホイッスラー波動の励起・成長には、数十 keV の電子の速度分布関数の不安定性、1eV 以下の冷たいプラズマの分布などによって規定されるため、内部磁気圏に存在する広いエネルギー範囲のプラズマ・粒子のダイナミクスを解きすすめる必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、申請者が研究協力者とともに開発してきた内部磁気圏における分布関数の時間発展を巨視的に解き進めるモデルを用い、分布関数の異方性からホイッスラー波動の成長率を計算することで、磁気嵐中のホイッスラー波動の時空間分布を明らかにすることを旨とする。また、この巨視的モデルが計算した分布関数およびプラズマパラメータを初期値とした PIC (粒子コード) 計算を行い、現実的な内部磁気圏のパラメータの中でホイッスラー波動がどのように励起するかの微視的な過程を調べる。さらに、内部磁気圏の衛星観測から導出された磁気嵐中の波動の分布と、モデルの計算結果との比較を行い、波動の分布や磁気嵐の依存性を明らかにする。

3. 研究の方法

巨視的な計算として、RAM モデル [Miyoshi and Jordanova, 2005, Miyoshi et al., 2006] が計算する分布関数データから、ホイッスラー波動の線形成長率を導出できるモジュールを新たに開発する。

微視的な計算については、あらたに PIC 計算にもとづく計算コードを開発し、巨視的モデルが計算する f_p/f_c (プラズマ周波数・サイクロトロン周波数比)、ホットプラズマ、コールドプラズマ密度比、温度異方性などを初期パラメータとした計算を行う。

衛星観測データとの比較については、CRRES 衛星の結果にもとづく L-MLT 分布の Kp 依存性との比較、およびあけぼの衛星の結果にもとづく高速太陽風通過時の内部磁気圏でのホイッスラーの解析データと比較する。

4. 研究成果

巨視的モデルを用いたホイッスラー波動の成長率の計算については、温度異方性による磁力線平行方向に伝搬するホイッスラー波動の線形成長率の計算モジュールを新たに開発した。

開発したコードを用いて、Kp 指数で分類した各地磁気活動度におけるホイッスラー波動、ホットな電子、熱的プラズマなどの空間分布を調べ、CRRES 衛星の統計結果と比較を行った (図 1, 2)。

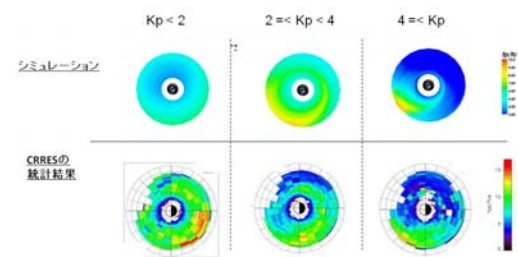


図 1: $K_p < 2$, $2 \leq K_p < 4$, $4 \leq K_p$ のプラズマ周波数とサイクロトロン周波数の比について、シミュレーション (上) と CRRES (下) の比較結果。

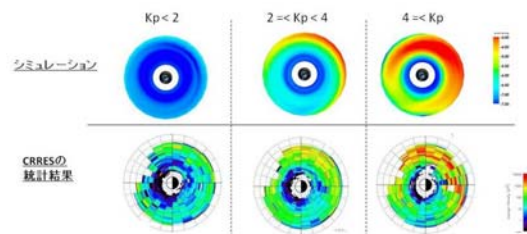


図 2: $K_p < 2$, $2 \leq K_p < 4$, $4 \leq K_p$ のシミュレーション (上) と CRRES (下) の比較結果。シミュレーションの色は線形成長率を、CRRES の観測結果は磁界強度を表わす。

シミュレーションの結果からは、地磁気活動度が上がるにつれ、夜側および朝側でプラズマ圏が収縮するとともに、昼側でブルームと呼ばれる高密度領域が形成され様子が見えているが、同様の密度分布が CRRES 衛星の統計結果においても観測されている (図 1)。また、ホイッスラー波動は、ホットな電子のフラックスが高く、かつプラズマ圏の外側で励起されているが、この結果についても CRRES 衛星の統計結果と調和的であった (図 2)。シミュレーションの結果からは、強いホイッスラー波動の成長が見られる領域の温度異方性は 1.5 から 3.0 程度であることも明

らかになった。

次に磁気嵐を対象として、磁気嵐全期間にわたる計算を実施し、ホイッスラー波動の分布を調べた。磁気嵐の主相では、強い対流電場によってプラズマ圏が収縮するとともに、プラズマシートから連続的にホットな電子が流入している。このとき、プラズマ圏の外側において強いホイッスラー波動が連続して励起している様子が観測された(図3)。

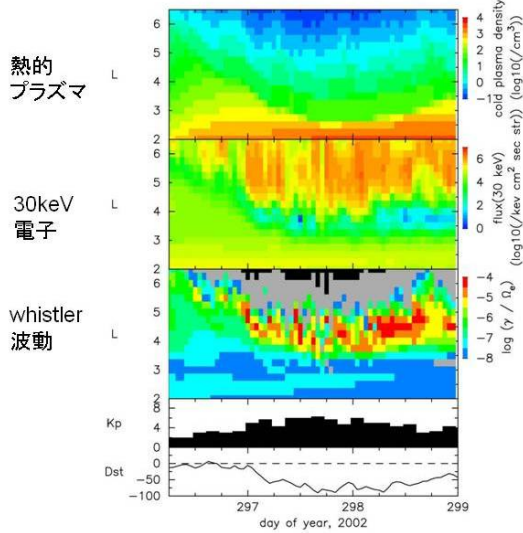


図3: 磁気嵐時の朝側における熱的プラズマ、30 keV 電子、whistler 波動の変化のシミュレーション。プラズマ圏が縮小し、プラズマシートから高温プラズマが連続して注入され、プラズマポーズの外側で強い波動が励起していることがわかる。

また、発生するホイッスラー波動の周波数依存性を調べたところ、磁気嵐初相では 0.5 サイクロトン周波数以下の低い成分が主だったのに対し、磁気嵐が進行するとともに、特にプラズマポーズのすぐ外側では 0.5 サイクロトン周波数以上の高い成分が観測されるようになることが明らかになった(図4)。この結果は、近年の Cluster 衛星による統計観測の結果(Santolik et al., 2005)によるコーラス波動の周波数分布とも整合的であると考えられる。

なお、図2および図3からもわかるように、シミュレーションからは強いホイッスラー波動が見られるのはプラズマ圏の外側であり、プラズマ圏の中では波動は見られなかった。これは、プラズマシートから流入してきたホットな電子がプラズマ圏の中に入れないことを意味しており、プラズマ圏の中で見られるホイッスラー波動であるヒスはプラズマシート電子を起源としない可能性が

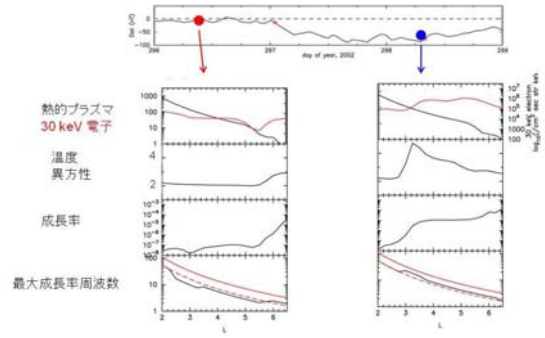


図4: 熱的プラズマ、30 keV 電子、温度異方性、成長率、および最大成長率を示す周波数のL依存性。左は磁気嵐前を、右側は磁気嵐回復相を表わす。成長率周波数のプロットで破線は0.5サイクロトン周波数。磁気嵐前には、0.5 サイクロトン周波数以下の成分が強いのに対し、回復相では0.5サイクロトン周波数以上の成分が強くなっており、特にプラズマポーズのすぐ外側で高い周波数成分の波動が表れている。

示唆された。プラズマ圏ヒスの起源を検討するために、計算されたホイッスラー波動をソース領域にした Ray-Tracing 解析を実施し、発生したホイッスラー波動がどのように磁気圏内を伝搬していくかを調べた。その結果、低い周波数のホイッスラー波動は、内側に伝搬していくにしたがってカットオフ周波数に対応するために地球に近い場所までは伝搬できないが、高い周波数については多重反射を繰り返しながらプラズマ圏の中に入っていくことが明らかになった(図5)。近年、プラズマ圏ヒスの起源は、プラズマ圏の外側で発生するホイッスラーコーラス波動がプラズマ圏内部に伝搬したものである結果がだされているが(Bortnick et al., 2008, 2009)、その結果と整合的なものであった。

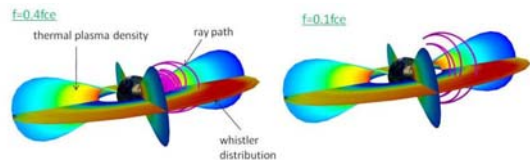


図5: Ray-tracing の結果。巨視的モデルの計算で強いホイッスラー波動の励起が観測された場所から出発し、ホイッスラーの伝搬を計算している。左は0.4サイクロトン周波数、右は0.1サイクロトン周波数の場合。周波数が高いほど、プラズマ圏の中に侵入していることがわかる。

次に巨視的モデルの計算結果を初期条件としたPIC計算を行った。巨視的計算で強い波動の励起が観測されている領域のパラメータを用いて計算を実施し、線形段階でのホイッスラー波動の励起と成長が確認された。本研究における微視的な計算は線形成長率が高い領域のみに注目して行っている。ホイッスラー波動の振幅は、 β 値や温度異方性、ホットプラズマとコールドプラズマの密度比などに依存するが、巨視的計算からは磁気嵐時の内部磁気圏においては、これらのパラメータが2ケタ以上の広い値で分布していることが明らかになっている。したがって、今後、巨視的計算の各グリッドのパラメータに対応したPIC計算を対応するためには、計算規模を大きくする必要がある。

また、計算の結果を人工衛星の観測結果と比較するために、内部磁気圏におけるホイッスラー波動の分布や励起に関わるパラメータの統計解析を行った。巨視的計算の結果、明らかにされたホイッスラー波動の空間分布については、研究協力者とともにCRRES衛星の統計結果との比較を行った(図1および2)。また、磁気嵐時のホイッスラー波動および関連するパラメータの時空間変化と比較するために、特に高速太陽風通過時に注目したホイッスラー波動、ホットな電子、コールドな電子、対流電場、および準相対論的、相対論的電子の統計解析を行った。その結果、南向きIMFを伴う高速太陽風が通過すると、プラズマシートからのホットな電子の連続した注入と、プラズマ圏の収縮がおり、強いホイッスラー波動が持続して励起することが明らかになり、巨視的計算で見られている描像とよく一致することが明らかになった。なお、このとき放射線帯の相対論的電子も大きく増加しており、ホイッスラー波動による内部加速によって増加した可能性を強く示唆する結果となっている。

また、低高度衛星のデータを解析し、降り込み電子の解析から赤道面でのホイッスラー波動の特性を明らかにする手法を新たに提唱した。この結果を用いた統計解析の結果、地球に近い場所では高周波数のホイッスラーが、遠ざかると低周波数のホイッスラーが励起している可能性が示され、図4で示した巨視的な計算から得られる周波数スペクトルと定性的には矛盾しない結果が得られた。

これらの結果については、国内外の学会で発表するとともに、いくつかの国際・国内学会において招待講演として報告を行った。また、査読付き論文において報告された。

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19件)

Miyoshi, Y., K. Sakaguchi, K. Shiokawa, D. Evans, J. Albert, M. Connors, and V. Jordanova, Precipitation of radiation belt electrons by EMIC waves, observed from ground and space, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L23101, doi:10.1029/2008GL035727, 2008.

Jordanova, V. K., J. Albert, and Y. Miyoshi, Relativistic electron precipitation by EMIC waves from self-consistent global simulations, *J. Geophys. Res.*, 113, A00A10, doi:10.1029/2008JA013239, 2008.

Kasahara, Y., Y. Miyoshi, Y. Omura, O. Verkhoglyadova, I. Nagano, I. Kimura, and B. Tsurutani, Simultaneous satellite observations of VLF chorus, hot and relativistic electrons in a magnetic storm "recovery phase", *Geophys. Res. Lett.*, 36, L01106, doi:10.1029/2008GL036454, 2009.

Miyoshi, Y., and V. K. Jordanova, Numerical simulation of energetic electrons in the inner magnetosphere during the October 2001 storm, *FUTURE PERSPECTIVES OF SPACE PLASMA AND PARTICLE INSTRUMENTATION AND INTERNATIONAL COLLABORATIONS*, edited by, M. Hirahara, I. Shinohara, Y. Miyoshi, N. Terada, and T. Mukai, AIP Press, 1144, 142-145, doi:10.1063/1.3169278, 2009.

Saito, S., Y. Miyoshi, and K. Seki, A split in the outer radiation belt by magnetopause shadowing: Test particle simulations, *J. Geophys. Res.*, 115, A08210, doi:10.1029/2009JA014738, 2010.

Jordanova, V. K., R. M. Thorne, W. Li, and Y. Miyoshi, Excitation of whistler-mode chorus from global ring current simulations, *J. Geophys. Res.*, 115, A00F10, doi:10.1029/2009JA014810, 2010.

Kataoka, R., and Y. Miyoshi, Why are relativistic electrons persistently quiet at geosynchronous orbit in 2009?, *Space Weather*, 8, S08002, doi:10.1029/2010SW000571, 2010.

Miyoshi, Y., Y. Katoh, T. Nishiyama, T. Sakanoi, K. Asamura, and M. Hirahara, Time of flight analysis of pulsating aurora electrons, considering wave-particle interactions with propagating whistler mode waves, *J. Geophys. Res.*, 115, A10312, doi:10.1029/2009JA015127, 2010.

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.

Kurita, S., Y. Miyoshi, F. Tsuchiya, T. Nishimura, T. Hori, Y. Miyashita, T. Takada, A. Morioka, V. Angelopoulos, J. McFadden, U. Auster, J. Albert, V. Jordanova, and H. Misawa, Transport and loss of the inner plasma sheet electrons: THEMIS observations, *J. Geophys. Res.*, 116, A03201, doi:10.1029/2010JA015975, 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.*, doi:10.1029/2011JA016575, in press.

[学会発表] (計 32 件)

Y. Miyoshi and R. Kataoka, Solar wind radiation belt interactions, Inner Magnetospheric Coupling Conference、2008年7月フィンランド

Y. Miyoshi, Effect of whistler mode waves for large flux enhancement of the outer belt, Inner Magnetospheric Coupling Conference、2008年7月フィンランド (招待講演)

Y. Miyoshi, V. Jordanova, N. Meredith, 磁気嵐時の内部磁気圏高エネルギー電子とホイッスラー波動、地球電磁気・地球惑星圏学会 第124回総会・講演会、2008年10月日本

Y. Miyoshi and R. Kataoka, Effective solar wind structures for large flux enhancement of the outer radiation belt, American Geophysical Union Fall Meeting, 2008年

12月 米国 (招待講演)

三好由純、片岡龍峰、第21-23太陽活動周期における放射線帯外帯の変動メカニズム、日本惑星科学連合大会2009年大会、2009年5月 日本 (招待講演)

三好由純、片岡龍峰、笠原禎也、太陽風流れの接触面通過時の内部磁気圏ホイッスラーモード波動の変化、地球電磁気・地球惑星圏学会 第125回総会・講演会、2009年9月 日本

三好由純、ジオスペースダイナミクスの中でのプラズマ波動、STEシミュレーション研究会および宇宙プラズマ波動研究会、日本

三好由純、ジオスペースにおける相対論的電子加速、日本地球惑星科学連合2010年大会、2010年5月、日本(招待講演)

Y. Miyoshi and R. Kataoka, Solar Wind-Radiation Belt Coupling, 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, 2010年6月、台湾(招待講演)

Y. Miyoshi, R. Kataoka, and Y. Kasahara, Flux enhancement of the outer radiation belt by whistler waves, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, 2010年9月、日本 (招待講演)

Y. Miyoshi, V. Jordanova, N. Meredith, and Y. Matsumoto, Simulation study on evolution of whistler waves during a storm time, Earth-Sun system exploration variability in space plasma phenomena, 2011年1月 米国 (招待講演)

[図書] (計 1 件)

総説宇宙天気「放射線帯」 (柴田一成、上出洋介編)、京都大学出版会、2011年

[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

三好由純 (MIYOSHI YOSHIZUMI)
名古屋大学太陽地球環境研究所・助教
研究者番号：10377781

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし