

令和元年5月7日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03732

研究課題名(和文)非線形波動粒子相互作用・非拡散的粒子輸送に基づく地球放射線帯グローバル変動の研究

研究課題名(英文) Study on global changes in radiation belt on the basis of nonlinear wave-particle interaction and nondiffusive particle transport

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：電磁流体シミュレーションとドリフト移流シミュレーションを組み合わせ、地球放射線帯変動を調べた。惑星間空間衝撃波が到来すると内部磁気圏は強い圧縮を受け、放射線帯電子はドリフト位相集団を起こし、単純な動径拡散過程とは異なる様相を見せた。電子の温度異方性は上昇したが、ホイッスラー波の線形成長率が大きく上昇することは認められなかった。惑星間空間磁場が南を向くと対流が強まり、サブストームが頻発する。内部磁気圏に注入された熱い電子によってホイッスラー波が線形的に成長し、非線形成長に移行できることを示した。これらの結果は非線形的な波動粒子相互作用ならびに非拡散過程の重要性を示すものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球放射線帯は地球を取り囲む高エネルギー粒子の集合で、その消長を理解することは人類の宇宙活動を進める上で不可欠である。これまで線形的な波動粒子相互作用および拡散的な粒子輸送によって放射線帯変動が理解されていたが、大規模な数値シミュレーションによって非線形的な波動粒子相互作用および非拡散的な粒子輸送の重要性を陽に示すことができた。また、従来のように放射線帯を孤立した系として見做すのではなく、磁気圏システムとして理解することの重要性も示した。

研究成果の概要(英文)：We investigated global dynamics of the radiation belt by coupling the global magnetohydrodynamics simulation and drift advection simulation. An interplanetary shock results in compression in the inner magnetosphere, resulting in drift phase bunching. Linear growth rate of whistler waves did not increase largely. When the interplanetary magnetic field turns southward, the convection electric field increases and substorms takes place frequently. We showed that injected hot electrons result in an increase in the whistler mode waves due to linear mechanisms first, followed by nonlinear growth. These results indicate the importance of nonlinear wave-particle interaction and nondiffusive particle transport.

研究分野：宇宙空間物理学

キーワード：地球放射線帯 サブストーム 磁気嵐 シミュレーション 内部磁気圏

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

相対論的な速さを持つ荷電粒子が地球磁場に捕捉されている。これを放射線帯と呼ぶ。放射線帯は磁気嵐の主相で一旦減少し磁気嵐の回復相で再生するという傾向があり、断熱的加速(Dst効果)、準線形的加速理論、拡散的輸送理論によって説明がなされてきた。しかし、放射線帯が数時間以内で急速に消失し、数時間以内で急速に再生するという観測が報告されるようになり、従来の理論の限界が示されるようになった。非線形的に成長したコーラス放射が電子を相対論的エネルギー(MeV帯)まで効率よく加速することが連携研究者の大村らによって発見され(Omura et al., 2007, JGR)、放射線帯変動の主要な担い手として期待されるようになった。しかし磁気圏システムは複雑であり、いつ、どこで非線形的な加速が起こるのかについては良くわかっていなかった。

### 2. 研究の目的

電磁流体シミュレーションとドリフト移流シミュレーションを組み合わせたスケール横断型の包括的な放射線帯シミュレーション・システムを開発し、太陽風を起点とした地球放射線帯の変動過程を明らかにする。放射線帯変動の基盤としての磁気圏システム、非線形的な波動粒子相互作用が起こりうる時空間領域と磁気圏構造、粒子の非拡散的輸送過程と磁気圏擾乱の対応を明確化し、広く支持されている準線形理論及び拡散輸送モデルと対比する。

### 3. 研究の方法

本研究では電磁流体シミュレーションとドリフト移流シミュレーションを組み合わせる。この電磁流体シミュレーションは地球磁場と太陽風相互作用を直接解くことができ、サブストームの詳細な変動を再現することが可能なものである。電磁流体シミュレーションの妥当性を検証するため、シミュレーションで再現したサブストームを観測と比較し、発生機構を詳細に調べる。計算結果の妥当性が担保された電磁流体シミュレーションで得られる電場と磁場をドリフト移流シミュレーションに与え、地球磁場に捕捉された電子の位相空間密度の時間発展を解き、電磁波動が成長することが可能な時空間領域を明らかにする。

### 4. 研究成果

(1) 惑星間空間磁場が南を向くと磁気圏では対流電場が強まり、サブストームが頻発するようになる。磁気圏尾部に起源を持つ熱い電子は内部磁気圏に注入され、その先端付近で電子の温度異方性が高まった。ホイッスラー波の線形成長率は真夜中から明け方付近にかけて上昇した。ホイッスラー波の線形成長率が最も高くなる波の周波数においてホイッスラーモード・コーラス波の非線形成長率を計算すると線形成長率と比べて1~3桁も高くなることがわかった。非線形成長に関わる様々なパラメータを検討した結果、線形成長から非線形成長に移行し、コーラス波が効率良く放射される可能性があることを陽に示すことができた。太陽風のパラメータを様々に変えた数値実験により、ホイッスラー波の線形成長率および非線形成長率が上昇する領域は太陽風の速度に依存することも明らかになった。太陽風の速度があがると磁気圏対流が強まり、サブストームが頻発し熱い電子が注入されるためである。これらはコーラス波の非線形成長が放射線帯変動に積極的に関わっていることを示す結果であり、放射線帯変動が太陽風速度とよく対応するという観測結果と調和的である。

(2) 惑星間空間衝撃波が到来すると内部磁気圏はただちに圧縮される。その結果、全エネルギー帯域で電子フラックスが上昇するが、その影響は特に高エネルギー(MeV)帯に現れる。初期状態において経度方向に均一に分布していた高エネルギー帯の電子は惑星間空間衝撃波に伴って発生した電磁流体速達波に内包される強い電場の影響でドリフト位相集群を起こし、経度方向に非一様の分布を示した。これは従来の拡散的な動径輸送では説明することができない。電磁流体速達波に帯する相対論的電子のドリフト共鳴についての非線形効果を検証したが、明確な非線形効果は認められなかった。今後の詳細な検証が必要である。

(3) サブストームが起こると熱い電子が内部磁気圏に注入され、電磁波動を介してエネルギーを獲得し、放射線帯再生を促進する。また、サブストーム性の電場と磁場変動によって既存の放射線帯は大きく変わる。このようにサブストームを理解することは放射線帯変動を理解する上で不可欠である。電磁流体シミュレーションの結果を詳細に解析し、サブストームを象徴するオーロラ・ブレイクアップ現象の発生機構を磁気圏システム観点で明らかにした。太陽風から内部磁気圏を経て電離圏に至るエネルギーの流れも明らかにした。実際に惑星間空間で観測された太陽風変動を電磁流体シミュレーションに境界条件として与え、電離圏ジュール加熱率を求めた。計算したジュール加熱率はレーダー及び衛星観測によって求められたジュール加熱率とよく一致した。これにより電磁流体シミュレーションの妥当性と現実性を担保することができた。これまで内部磁気圏は孤立した系として理解されていたが、内部磁気圏では電磁エネルギー・熱エネルギー・運動エネルギーの相互変換が積極的に行われており、磁気圏システム全体として放射線帯を捉えることの重要性を示す結果も得ることができた。

(4) オーロラの発光強度シミュレーションを行い古文獻にある過去のオーロラ記録の再現を試みた。内部磁気圏の電子が $L=1.39$ まで近づいたこと、通常の電子群とは異なる温度が極めて低い成分が選択的に存在していた可能性を示唆する結果が得られた。対流による内部磁気圏電子の輸送モードの極限を示す結果であり、極端な放射線帯環境を考える上で基盤となる知見を得

ることができた。

(5) 電磁イオンサイクロトロン波動は放射線帯電子を効率よく散乱することが知られている。電磁イオンサイクロトロン波動を励起することができる keV 帯のエネルギーを持つイオンは惑星間空間衝撃波到来するとバウンス位相集群を起こし、特徴的なエネルギー分散構造が現れることを示した。惑星間空間衝撃波が到来すると電磁イオンサイクロトロン波動が発生すると考えられていたが、これまで理解されていたように単純な過程ではないことが示された。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 49 件)

Ebihara, Y., Simulation study of near-Earth space disturbances: 2. Auroral substorms, Progress in Earth and Planetary Science, 査読有, Vol. 6:24, 2019.

doi:10.1186/s40645-019-0273-2.

Ebihara, Y., Simulation study of near-Earth space disturbances: 1. Magnetic storms, Progress in Earth and Planetary Science, 査読有, Vol. 6:16, 2019.

doi:10.1186/s40645-019-0264-3.

Ebihara, Y., T. Tanaka, and N. Kamiyoshikawa, New diagnosis for energy flow from solar wind to ionosphere during substorm: Global MHD simulation, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 査読有, Vol. 124, 2019, 360–378

doi:10.1029/2018JA026177

Ebihara, Y., and T. Tanaka, Why does substorm-associated auroral surge travel westward?, Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有, Vol. 60, 2018, 014024

doi:10.1088/1361-6587/aa89fd

Ebihara, Y., and T. Tanaka, Energy flow exciting field-aligned current at substorm expansion onset, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 査読有, Vol. 122, 2017, 12,288–12,309

doi:10.1002/2017JA024294

Ebihara, Y., H. Hayakawa, K. Iwahashi, H. Tamazawa, A. D. Kawamura., H. Isobe, Possible cause of extremely bright aurora witnessed in East Asia on 17 September 1770, Space Weather, 査読有, Vol. 15, 2017, 1373–1382.

doi:10.1002/2017SW001693

Ebihara, Y., and T. Tanaka, Substorm simulation: Quiet and N-S arcs preceding auroral breakup, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 査読有, Vol. 121, 2016 1201–1218

doi:10.1002/2015JA021831

Ebihara, Y., and T. Tanaka, Substorm simulation: Formation of westward traveling surge, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 査読有, Vol. 120, 2015, 10,466–10,484.

doi:10.1002/2015JA021697

Ebihara, Y., and T. Tanaka, Substorm simulation: Insight into the mechanisms of initial brightening, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 査読有, Vol. 120, 2015, 7270–7288

doi:10.1002/2015JA021516

ほか 40 件

[学会発表](計 20 件)

Ebihara, Y., and T. Tanaka, What is the role of the magnetotail dipolarization in substorm expansion onset?, AGU Fall Meeting, ワシントン DC, 2018 年

Ebihara, Y., and T. Tanaka, Energy transfer from solar wind to ionosphere: Global MHD simulation results, Association of Asia Pacific Physical Societies, Division of Plasma Physics (AAPPS-DPP), 金沢, 2018 年 (招待)

Ebihara, Y., and T. Tanaka, Pathway and conversion of solar wind energy to ionosphere: Global MHD simulation, Japan Geophysical Union, 千葉, 2018 年

Ebihara, Y., T. Ikeda, M.-C. Fok, and T. Tanaka, Reconfiguration of electron phase space density in response to interplanetary shock, prolonged southward IMF and substorm, Japan Geophysical Union, 千葉, 2018 年

Ebihara, Y., and T. Tanaka, Pathway and conversion of solar wind energy to ionosphere: Global MHD simulation, AGU Fall, Meeting, ニューオリンズ, 2017 年

Ebihara, Y., and T. Tanaka, Global MHD simulation study on the evolution of substorms, 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, 台湾, 2017 年 (招待)

Ebihara, Y., and T. Tanaka, Global MHD simulation study on the evolution of substorms, European Physical Society Conference, ベルファスト, 2017 年 (招待)

Ebihara, Y., Perspective of the study on the ring current - past, present and future, AGU Fall Meeting, サンフランシスコ, 2016 年 (招待)

Ebihara, Y., M.-C. Fok, T. Tanaka, and H. Tsuji, Simulation study on impact of interplanetary shock on trapped particles in the inner magnetosphere, AGU Fall Meeting, サンフランシスコ, 2015 年 (招待)

ほか 11 件

[ 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 :

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 :

国内外の別 :

[ その他 ]

ホームページ等

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/~ebihara/>

## 6 . 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名 : 田中高史

ローマ字氏名 : (TANAKA, takashi)

所属研究機関名 : 九州大学

部局名 : 国際宇宙天気科学・教育センター

職名 : 研究員

研究者番号 ( 8 桁 ) : 70346766

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 大村善治

ローマ字氏名 : (OMURA, yoshiharu)

研究協力者氏名 : Mei-Ching Fok

ローマ字氏名 : (Fok, mei-ching)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。