

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：62611

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25887050

研究課題名(和文)オーロラ爆発の解明に向けた電離圏駆動理論と観測データ解析の融合研究

研究課題名(英文)Cooperative studies of ionospheric-driven theory and observation data analysis for the solution of auroral breakup

研究代表者

平木 康隆 (Hiraki, Yasutaka)

国立極地研究所・研究教育系・特任研究員

研究者番号：80514843

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、オーロラ帯の磁気flux tubeを伝播するシアアルヴェン波の非線形発展を厳密に追跡するシミュレーションコードを開発した。初期条件としてアーク状構造の沿磁力線電流を与えた非線形シミュレーションを行った。臨界値(~ 25 mV/m)を超えたとき、シアアルヴェン波が対流駆動型不安定を起し、アークがスプリットし、オーロラ渦列が形成することを実証した。アルヴェン速度の電離圏・磁気圏キャビティを考慮した非線形シミュレーションを行った。シアアルヴェン波が電離圏キャビティ領域に捕捉されること、ハイブリッドアルヴェン共鳴モードが励起し、磁気赤道で強い流れ場の二次不安定を起すことを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a simulation code to correctly pursue the nonlinear evolution of shear Alfvén waves that move throughout the magnetic flux tube in the auroral region. First, we performed a nonlinear simulation where an arc-like structure in the field-aligned current is initially provided. We demonstrated that, when the convection electric field exceeds a critical value (~ 25 mV/m), a convection-driven instability of shear Alfvén wave occurs. We found that an initially placed arc splits, intensifies, and rapidly deforms into a vortex street. Secondly, we performed a nonlinear simulation considering ionospheric and magnetospheric cavities of Alfvén velocity. Various nonlinear features were found: i) trapping of the ionospheric Alfvén resonant modes facilitates deformation of field-aligned current structures, and ii) hybrid Alfvén resonant modes grow to cause strong flow shear instability around the magnetic equator.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：オーロラ アルヴェン波 オーロラ渦列 電離圏アルヴェン共鳴 ハイブリッドアルヴェン共鳴 磁気圏-電離圏結合

1. 研究開始当初の背景

極域で発生するオーロラは、太陽風により地球磁気圏が強く圧縮された時、衛星からも観測されるほど大規模に渦巻くことが知られている。このオーロラ爆発現象の始まりには、暗いアーク状構造から明るい渦列構造が形成され、やがて一つの大規模な渦への遷移が見られる。従って、その駆動メカニズムとして、極域の磁力線上で励起される磁気流体不安定性が関与することが指摘されている。

太陽風動圧の上昇に伴い、磁気圏のプラズマ対流が発達すること(Aとする)はほぼ自明だと言える。しかし、近年の複数衛星観測や磁気圏のグローバルシミュレーションでは、オーロラ帯での磁気流体不安定性を検出できるほど十分な時間・空間分解能がない。従って、Aから直接オーロラ爆発に至るといふ内因説とAから磁気圏尾部での磁気リコネクションを経てオーロラ爆発に至るといふ外因説とが対立する状態が長年続いている。解決すべき問題として、

i) 内因説の物理：Aの結果、オーロラ帯の磁気圏-電離圏結合系において発生する磁気流体不安定性によって、オーロラ爆発が起こるのか？

ii) 外部エネルギーの必要性：上記の磁気流体不安定性だけでオーロラ爆発を起こせるのか？

私は、これまで i) の磁気流体不安定性として重要視される「シアアルヴェン波の対流駆動型不安定性」に関する線形固有モード解析を行ってきた。スケール長 10-20 km の構造が 30 sec 程度で成長することを示し、一方で、磁気圏と電離圏の両側に波が捕捉された“ハイブリッドアルヴェン共鳴モード”を発見した。

2. 研究の目的

本研究では、オーロラ帯の磁気 flux tube 全体をダイナミックに伝播するシアアルヴェン波の非線形発展を厳密に追跡するシミュレーションコードを開発する。研究の目的は、シアアルヴェン波の数値シミュレーションにより、

(I) 背景の所で述べた「暗いアーク状構造から明るい渦列構造の形成」を再現し、オーロラ渦列の観測データと比較すること

(II) ハイブリッドアルヴェン共鳴モードとオーロラ渦列との関係、及び、磁気赤道面への影響について調べることである。

3. 研究の方法

シアアルヴェン波の運動を正確に記述するための数値シミュレーションの方法として、磁気圏部分には簡略化磁気流体モデルを用いる。一方、電離圏部分は、その厚みがア

ルヴェン波の波長より十分短いことから一層で近似し、二流体方程式を用いる。オーロラアークの発展を十分追跡できる水平スケール(70 km 四方)をとり、磁力線方向は電離圏から磁気赤道までをとる 3 次元座標系を設定する。

(I) のための計算では、磁力線方向のアルヴェン速度を一定とし、初期条件としてアーク状構造のポテンシャル(磁力線方向は正弦波)を与えた。背景対流電場は極向きで、その値は 20-80 mV/m の範囲で与えた。

(II) のための計算では、磁力線方向のアルヴェン速度の電離圏キャビティ + 磁気圏キャビティを考慮した。初期条件として、最も成長しやすいアルヴェン固有モードを揺らぎとして与えた。背景対流電場は極向きに 60 mV/m の値で与えた。

4. 研究成果

(I) 臨界値(~25 mV/m)を超えたとき、シアアルヴェン波が対流駆動型不安定性を起こし、その非線形発展の中で、オーロラ渦列が自然に形成することを証明した [Hiraki, 2015a]。図 1 に、シアアルヴェン波による沿磁力線電流の時間変化を示す。時刻は (a)-(d) でそれぞれ $t = 4.7$ s, 188 s, 272 s, 329 s である。はじめに与えたオーロラアーク(赤い部分に対応)がすぐに極側へ伝播しつつ、スプリットする様子が見られた。その後、下向き電流の部分で渦列が形成し(b)、2つのアークが変形して渦列に取り込まれた(c)。渦列は極側に拡大し、その先端部における電流値は、観測に匹敵する 1-10 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ にまで発達した(d)。

(II) 短波長のシアアルヴェン波が電離圏キャビティ領域(高度 6 千-1 万 km)に捕捉

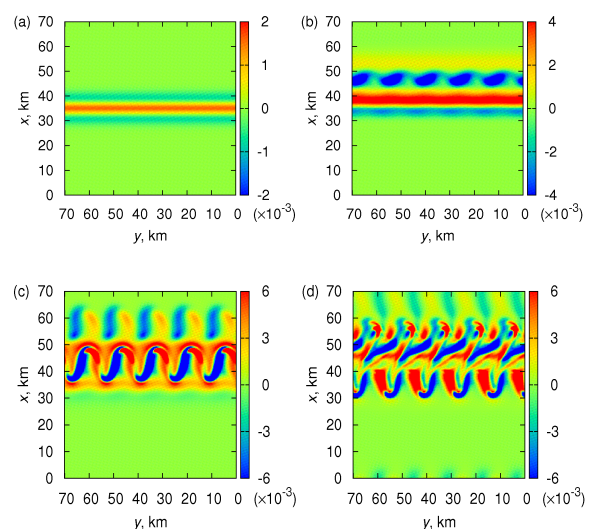


図 1: オーロラ渦列の形成シミュレーション。カラーバーは沿磁力線電流(上向き正、 $\mu\text{A}/\text{m}^2$)。Hiraki (2015a)参照。

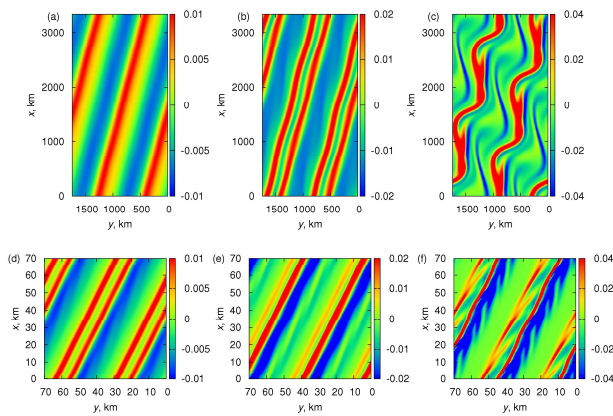


図2：ハイブリッドアルヴェンキャビティモードの非線形発展シミュレーション。カラーバーは渦度（ $21/s$ で規格化）。Hiraki (2015b)参照。

されること、また、その波のエネルギーが磁気赤道側に透過し、強い流れ場の二次的不安定性を起こすことを証明した [Hiraki, 2015b]。図2に、シアアルヴェン波による渦度の時間変化を示す。磁気赤道(a)-(c)と電離圏(d)-(f)での断面図を示す。時刻は(a)-(c)でそれぞれ $t = 94$ s, 164 s, 211 s である。電離圏アルヴェン共鳴モードが励起し、アークが細かい構造にスプリットする様子が見られた(d)。磁気赤道側に波の一部が伝わり、同様の構造を作った(b)。やがてハイブリッドアルヴェン共鳴モードが励起した。流れのシアがある臨界値（背景の対流速度）を超えたとき、磁気赤道で二次的不安定による渦構造が形成した(c)。この流れ場揺動の値は、 200 km/s に達した。

これらの知見は、サブストームに付随した電離圏・磁気圏現象（オーロラキロメートル電波放射やプラズマシート内側境界付近の流れ場揺動）の解明につながる成果である。

さらに、坂口歌織氏（NICT）、細川敬祐氏（電通大）との共同研究により、アイスランド設置の光学カメラ2台によるオーロラステレオ観測のデータ解析を行った。SuperDARN レーダーの同時観測によるプラズマ速度データをもとに、上記(I)と同様の数値計算を行った。オーロラアークがスプリットし、渦列が形成されるまでのタイミングが両者において驚異的な一致を示した。

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 3件)

Hiraki Y. (2015a) Auroral vortex street formed by the magnetosphere-ionosphere coupling instability, *Annales Geophysicae*, 33, 217-224, European Geosciences Union. (査読有)

Hiraki Y. (2015b) Vortices in the magnetic equator generated by hybrid Alfvén resonant waves, *Physics of Plasmas*, 22, 012903, American Institute of Physics. (査読有)

Hiraki Y. (2013) Stability of Alfvén eigenmodes in the vicinity of auroral arc, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118, 5277-5285, doi:10.1002/jgra.50483, American Geophysical Union. (査読有)

〔学会発表〕(計 14件)

Hiraki, Y., Auroral vortex street and Alfvén resonant modes related to the onset of substorm, 12th International Conference on Substorms, Ise, Japan, November, 2014.

平木康隆、電離圏アルヴェン共鳴波の伝播に伴う磁気赤道での渦形成、地球電磁気・地球惑星圏学会秋期大会、松本、2014年1月。

Hiraki, Y., イオトラスへのプラズマ注入・MI結合過程のモデル化の検討、地球電磁気・地球惑星圏学会秋季大会、松本、2014年10月。

平木康隆、MI結合系アルヴェン波による磁気圏速度擾乱の生成、サブストーム研究会、名大、2014年9月。

平木康隆、対流駆動型アルヴェン波のダイナミクスとそれに伴う渦構造の生成、非ダンジェー磁気圏物理学研究会、極地研、2014年9月。

Hiraki, Y., Auroral vortex street and cavity trapping of Alfvén waves in the M-I coupling system, 11th annual meeting of Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), Sapporo, Japan, July, 2014.

平木康隆、オーロラ渦列形成とアルヴェン波のキャビティ捕捉、地球惑星科学連合同

大会、パシフィコ横浜、2014年4月。

Hiraki, Y., Numerical studies of interchange instability in the Io plasma torus, 15th Symposium of Planetary Science 2014, Tohoku University, Sendai, Japan, February 2014.

Hiraki, Y., and Y. Ogawa, Conductivity anomaly and field line cavity related to auroral arc dynamics, The 4th Symposium of Polar Science, Tachikawa, Japan, November, 2013.

平木康隆、オーロラアーク構造化の非線型シミュレーション、地球電磁気・地球惑星圏学会秋期大会、高知大学、2013年11月。

Hiraki, Y., Magnetosphere-ionosphere coupling model for nonlinear evolution of auroral arcs, EISCAT Symposium 2013, Lancaster, England, August, 2013.

平木康隆、オーロラアークの構造化と非線型ダイナミクス、地球惑星科学連合同大会、幕張メッセ、2013年5月。

Hiraki, Y., A dynamical model approach to structuring of sprites, Japan Geoscience Union Meeting, Makuhari, Japan, May, 2013.

Hiraki, Y., Magnetosphere-ionosphere coupling model for evolution of auroral arcs, Japan Geoscience Union Meeting, Makuhari, Japan, May, 2013.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平木 康隆 (Hiraki, Yasutaka)

国立極地研究所・研究教育系・特任研究員

研究者番号：80514843

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：