

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05300

研究課題名(和文) 電離圏プラズマ高速フローチャンネルとそのインターフェースにおける時間空間発展

研究課題名(英文) Spatial and temporal evolution of the plasma flow channel including its interface

研究代表者

田口 聡 (TAGUCHI, Satoshi)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：80251718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：地球の高緯度電離圏に存在する大規模なプラズマの流れの中には、局所的に狭いチャンネルとなって高速の流れが生じている領域、プラズマフローチャンネルが数多く存在している。本研究では、まず、複数の観測装置からの貴重な同時観測のデータをもとに、フローチャンネルの時間変動と空間構造に関する性質を明らかにした。次いで、シミュレーションを通して、フローチャンネル領域にしばしば見られる中性大気質量密度異常の現象について、速いイオンの流れに伴うジュール加熱の上昇よりむしろ、速い流れの領域に磁気圏から降下している 100 eV 程度の低いエネルギーの電子による加熱過程が重要な役割を果たしていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高緯度電離圏のフローチャンネル領域にほぼ一致するように中性大気の質量密度の異常な上昇が観測されている。そのような領域を人工衛星が飛ぶと、質量密度上昇に応じて抗力を受けるため、時として軌道を著しく変えられ、衛星寿命が縮むことさえある。このような重要な現象ではあるが、これまでどのような物理過程がどの程度効いているのかは明らかになっていなかった。フローチャンネル領域に磁気圏から降り注いでいる比較的低いエネルギーの電子による加熱過程が重要な役割を果たしていることを示したことに意義がある。

研究成果の概要(英文)：Plasma flow channels, i.e., narrow channels of high-speed plasma flow, are embedded in the large-scale plasma circulation in the high-latitude ionosphere. In this study we showed the spatial and temporal characteristics of the plasma flow channel by using data obtained simultaneously from multi-instruments. By means of numerical simulation, we showed that neutral mass density anomalies, which are often seen in the plasma flow channel, are mostly caused by the particle heating from the low-energy (~100 eV) electron precipitation rather than the enhanced Joule heating directly associated with the high-speed plasma flow.

研究分野：太陽地球系物理学

キーワード：電離圏 極域 プラズマフロー 中性大気質量密度異常 オーロラ カスプ

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

### 1. 研究開始当初の背景

高緯度電離圏における高速フローチャンネルは、プラズマの流れが幅の狭い領域で強められている現象である。昼側の電離圏のカस्प域、夜側電離圏極冠域からオーロラオーバルにつながる領域、夜側のオーロラオーバルの中の領域、さらには、その低度側のサブオーロラ帯において顕著なチャンネルが形成されることが知られている。チャンネルの内部では、高速で水平方向に動くイオンにより中性大気が大きく引きずられると同時に、摩擦熱によって双方とも温度を上げていくことがわかっているが、こういった領域には、それぞれの領域に特徴的なエネルギーの電子が磁気圏から降下しており、磁気圏からの電子の降下と電離圏の高速のイオンの流れ、周囲の中性の大気の振る舞いの定量的な関係について、詳細が明らかになっていない状況であった。

### 2. 研究の目的

まず、すでに得られている観測データの解析を通して、電離圏での高速フローチャンネルの時間変動と空間構造に関する性質を明らかにし、次いで、数値シミュレーションをもとに、イオンが高速で水平方向に流れているフローチャンネルに磁気圏から電子が降下している状況を設定し、その場に存在している中性の大気が、高さ方向を含めた空間において、どのような時間空間発展を示すのかを明らかにする。

### 3. 研究の方法

フローチャンネルの時間変動と空間構造に関する性質を明らかにするために、複数の観測装置からの同時観測のデータを用いた。前者の時間変動については、3機で編隊飛行をする米国の ST-5 衛星の磁場データと複数機が連続して飛行する米国の DMSP 衛星のプラズマデータ、さらにグリーンランドの多地点で取得された地上磁場データを解析した。それぞれのデータの取得に携わった NASA ゴダードスペースフライトセンターの研究者とテキサス大学の研究者、デンマーク工科大学の研究者の協力を得た。後者の空間構造に関する性質については、北極域スバル諸島ロングイヤービーエンで得られた赤色オーロラの全天画像データとヨーロッパ非干渉散乱レーダーのデータをもとにモデル計算を行った。これらのデータの取得については電気通信大学と国立極地研究所の研究者の協力を受けた。

シミュレーションにおいては、フローチャンネルとその周辺を含む3次元の空間領域を設定し、その中でイオンと中性粒子の時間発展を求めた。直接的に時間発展を求める変数は、酸素原子イオン、酸素分子イオン、窒素分子イオン、NO プラスイオンの数密度、中性としては、窒素分子、酸素分子、酸素原子、ヘリウム原子の数密度、中性全体としての速度の3成分、中性の温度の合計12変数である。Shinagawa and Oyama, Earth Planets Space 2006 (<https://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/pdf/2006/5809/58091173.pdf>) のモデルを基礎とした。また、以下の4つのモデル、磁気圏からの電子降下の特性エネルギーの関数として与えられる電離率モデル、電子降下による大気加熱効率の高さ分布モデル、イオンの高速流の速さと領域の幅を柔軟に設定できるイオン速度分布モデル、降下電子のエネルギーフラックスの大きさと領域の幅を柔軟に設定できる降下電子エネルギーフラックスモデルを独自に構築して組み込んだ。

### 4. 研究成果

#### (1) フローチャンネルの性質

##### 時間変動特性

プラズマフローの性質を明らかにするためには、プラズマのフローそのものを調べることもみならず、磁力線に沿って流れる沿磁力線電流の構造変化や地磁気の変動を調べることも非常に有効である。図1は編隊飛行する3機の ST-5 衛星によって2006年4月22日の14:30頃(世界標準時)に取得された磁場変動データと地上の磁場変動データを示している。衛星軌道に沿って示した緑色の磁場変動データが、赤色または紫色で示した磁場変動データの様子と大きく異なっている。これは、沿磁力線電流の構造が短い時間に大きく変化したことを表している。

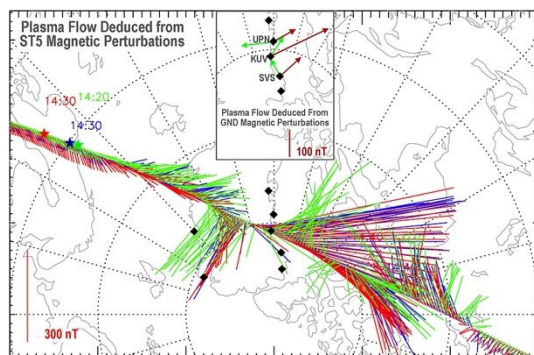


図1. ST-5 衛星が観測した磁場変動と地上磁場変動。

この現象に注目してデータを解析した結果、惑星間空間磁場が鋭く変化する構造を伴う太陽風が到来する時、カस्प域で生じるフローチャンネルは、10分から15分の遷移状態を示すことが明らかになった。また、この遷移状態では、惑星間空間磁場の変化後に対応する新たなプラズマ流が、自らの流れよりも遅い速さで古いプラズマ流を押しつけていくこともわかった。なお、このフローチャンネルの高緯度に広がる領域で循環するような流れを形成している部分では、太陽風変化に対する初期応答は1分以内という極めて短い時間で起きていることもわかった。

### 空間構造特性

水平方向に速く流れるイオンは、中性大気との衝突によってその温度を上げる．従ってイオンの温度上昇の空間分布を調べることで、イオンの流れの空間構造がわかる．図2は、2013年

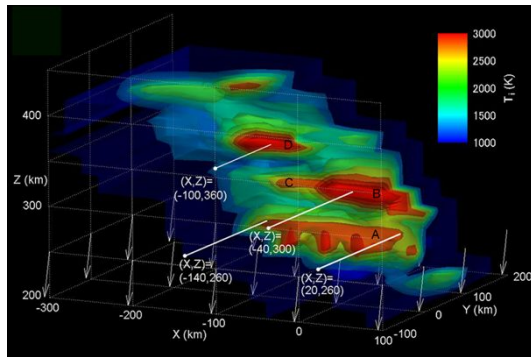
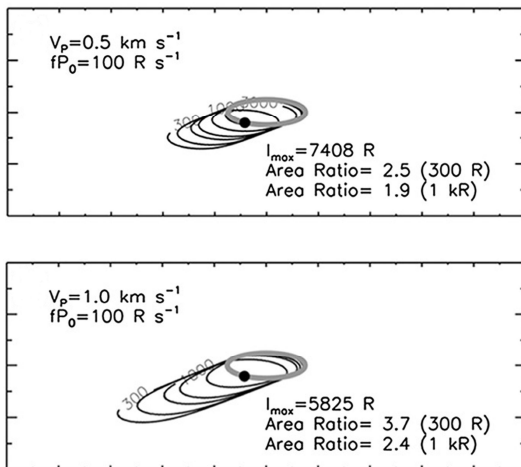


図2. カस्प域のメソスケールオーロラに伴うイオン温度上昇の3次元分布．

1月13日9:30頃(世界標準時)にカस्प域のフローチャンネルの中を移動する赤色オーロラに伴うイオン温度の上昇の3次元分布である．磁気圏から降下する電子が作る電子密度増加の3次元分布との比較から、フローチャンネルの中に局所的に流れが強くなる領域があり、その領域の動きは磁気圏からの電子の降下領域の動きとは完全に一致せず、むしろ前方にずれた場所で起きていることが明らかになった．さらに、図2の領域Aに見られる下向きの3つの突起状構造が示唆するように、細かい規則的な速度上昇構造が存在していることもわかった．

### (2) フローチャンネルに伴う電子降下領域の移動と赤色オーロラの引き延ばし現象

カस्प域のフローチャンネル領域の中では、メソスケールの電子の降下領域が高速で移動していく現象がしばしば見られる．図3は、そのような際に生じる赤色オーロラの引き延ばし現象をモデル化した結果である．図では、電離圏高度で見られる電子の降下領域を長径150 km、短



径50 kmの楕円領域(灰色の部分)と仮定している．その領域が秒速0.5 km/sで移動した場合の結果を上側に、下側には、1 km/sで移動した場合の結果を示している．電子の降下領域が0.5 km/sで移動すると、実際には電子の降下が無い後方の広い領域を含めて、電子降下領域の1.9倍から2.5倍の領域にわたって赤いオーロラを観測することになる．また、より速い移動速度(1.0 km/s)になると、その領域はさらに後方に延びていくことがわかる．磁気圏からの電子の降下に伴って赤いオーロラが水平方向にどのように広がるのかについては、磁気圏側で決まる電子降下の領域だけでなく、その領域が電離圏の高度でどのような速度で動いているのかも重要であることが明らかになった．

図3. 赤色のオーロラが水平後方に広がる計算結果の例

### (3) フローチャンネルに伴う中性大気質量密度異常

これまでの研究から、カस्प域のフローチャンネル領域や夜側電離圏極冠域からオーロラオーバルにつながるフローチャンネル領域に一致するように中性大気の異常な上昇が起こることが知られている．高度約400 kmの人工衛星観測から、大気質量密度が倍を超える大きさになることもわかっている．これらの現象には、電離圏を流れる電流によるジュール加熱や降下してくる電子による加熱が関わっていることが定性的には理解されているものの、どのような時にどの物理過程がどの程度効いているのかははっきりしていなかった．本研究のシミュレーションにおいては、磁気圏からの電子降下について、その特性エネルギーの関数として与えることができるモデルを構築して、その物理過程を取り込んだ．これにより、大気の電離率を計算できることになる．さらに、降下電子が中性大気に与える加熱効率の高さ分布も計算できることになる．前者の電離率は、電離圏での電流の流れやすさを決める電気伝導度分布に直接関わる量である．このため、ジュール加熱について、考えている系に矛盾のない形で与えることができる．また、降下する電子が与える熱についても、後者の加熱効率の高さ分布モデルを通して、系に矛盾のない形で取り込んでいる．

擾乱のない平衡状態のもとで、時刻  $t=0$  にステップ関数的にイオンの流れと電子降下を与えて、その直後に発生する大気重力波が収まった後の分布を調べることで、以下のような結果を得た．鉛直風速度の上昇と質量密度の増加は共に、降下電子のエネルギーが相対的に低い時に大きくなる．100 eV程度の特徴エネルギーが最も効果的に作用する．これは、このようなエネルギーの電子降下が電離圏の比較的高高度である300 km付近の大気を加熱する効果が大きいためであることがわかった．一方、電子の降下エネルギーを数 keVに上げると、電子降下が背景密

度の大きい低高度部分に作用することになり、その部分の鉛直風や質量密度にほとんど影響を及ぼさない。100 eV 程度の特徴エネルギーをもつ降下電子のエネルギーフラックスを上げると、高度 300 km 付近での鉛直風速度の上昇と質量密度の増加は一層顕著になる。フローチャネルの最大速度を大きくした場合も同様に作用する。一方、フローチャネルの幅の効き方は、鉛直風速度の上昇と質量密度の増加に対して異なっており、フローチャネルの幅が狭いときには前者の上昇が顕著になり、後者の増加は幅が広いときに大きくなることが明らかになった。

#### (4) 今後の展望

本シミュレーションでは、基本的な物理過程の切り分けを目的としてイオンが一方向に流れるフローチャネルのみを設定した。今後は、フローチャネルが構造をもつ場合、例えば、反対方向に動くイオン流の領域が接して、より大きな速度シアを形成している場合についても検討する。また、イオンの速度を定常的な電場分布をもとに与えてきた点についてもさらに検討が必要である。これまでの観測に基づく研究からは、定常的な電場に加えて、アルフベン波に伴って電場が激しく時間変化していることが示唆されてきている。このような電場をシミュレーションに取り込むことで、電場の波動成分がどの程度まで大気質量密度上昇に効いているのかを考える必要がある。

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文](計3件)

Taguchi, S., Y. Chiba, K. Hosokawa, and Y. Ogawa, Horizontal profile of a moving red line cusp aurora, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 3509-3525, 2017 (査読有)

<https://doi.org/10.1002/2016JA023115>

Taguchi, S., A. Tawara, M. R. Hairston, J. A. Slavin, G. Le, J. Matzka, and C. Stolle, Response of reverse convection to fast IMF transitions, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 120, 4020-4037, 2015 (査読有)

<https://doi.org/10.1002/2015JA021002>

Taguchi, S., K. Hosokawa, and Y. Ogawa, Three-dimensional imaging of the plasma parameters of a moving cusp aurora, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 133, 98-110, 2015 (査読有)

<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.08.012>

##### [学会発表](計35件)

大井川 智一, 品川 裕之, 田口 聡, オーロラ領域における中性大気質量密度メソスケール変動特性, 2018 年度 EISCAT 研究集会, 2019.

田口 聡, 高須 浩平, 細川 敬祐, 小川 泰信, Electron precipitation spots in the cusp and equatorward expansion of aurora beyond the cusp, 第 144 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2018.

横山 佳弘, 田口 聡, 家森 俊彦, 細川 敬祐, Highly structured FACs near the poleward boundary of the duskside Region 1 during quiet conditions, 第 144 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2018.

小瀬 智史, 田口 聡, 細川 敬祐, カスプの赤道側境界に沿うオーロラ増光スポット間の特性距離, 第 144 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2018.

長房 勇之介, 田口 聡, 小川 泰信, 細川 敬祐, 動くメソスケールカスプオーロラに伴うプラズマ速度プロファイル, 第 144 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2018.

大井川 智一, 品川 裕之, 田口 聡, オーロラ加熱領域における熱圏中性大気変動数値モデリング, 平成 30 年度中間圏・熱圏・電離圏研究集会, 2018.

Taguchi, S., Y. Oda, K. Hosokawa, Red line aurora in the dayside cusp for northward IMF, *Japan Geoscience Union Meeting 2018*, 2018.

Kose, S. S. Taguchi, K. Hosokawa, Characteristic distance between mesoscale auroral brightenings along the equatorward boundary of the cusp, *Japan Geoscience Union Meeting 2018*, 2018.

Nagafusa, Y., S. Taguchi, Y. Ogawa, K. Hosokawa, Plasma flow enhancements preceding a large-scale moving cusp aurora, Japan Geoscience Union Meeting 2018, 2018.

Takasu, K., S. Taguchi, Y. Oda, K. Hosokawa, Spatial structures of polar rain during the period of poleward moving cusp auroras, Japan Geoscience Union Meeting 2018, 2018.

大井川 智一, 品川 裕之, 田口 聡, 極域熱圏-電離圏ダイナミクスの局所モデリング, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.

田口 聡, 織田優心, 細川敬祐, 北向き IMF 時のカスプ電子オーロラの太陽風速度依存性, 磁気圏ダイナミクス研究会 2018.

田口 聡, 低高度カスプにおけるプラズマのダイナミクスの最近の進展, ISEE 研究集会: 極域電離圏における電離大気流出現象のメカニズム解明に向けた戦略的観測計画, 2018.

長房 勇之介, 田口 聡, 小川 泰信, 細川 敬祐, 大規模な動くカスプオーロラに先行するプラズマの流れの増速: EISCAT 特別観測の結果, 2017 年度 EISCAT 研究集会, 2018.

Taguchi, S., K. Hosokawa, Y. Ogawa, Plasma Flow in the North-South Aligned Auroral Region Equatorward of the Dayside Auroral Oval, American Geophysical Union Fall Meeting 2017, 2017.

田口 聡, 細川 敬祐, 小川 泰信, リコネクションした磁力線に沿うカスプ電子降下の成長と減衰, 第 142 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2017.

織田 優心, 田口 聡, 細川 敬祐, Imbalance between the electron and ion precipitations in the cusp for northward IMF, 第 142 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2017.

大井川 智一, 田口 聡, プラズマ対流に直交する方向に伝搬する沿磁力線加速領域, 第 142 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2017.

Taguchi, S., K. Hosokawa, Y. Ogawa, Spatiotemporal variations of the electron precipitation producing moving cusp aurora, Japan Geoscience Union Meeting 2017, 2017.

Oda, Y., S. Taguchi, K. Hosokawa, Simultaneous existence of the cusp aurora and polar cap arcs during northward IMF, Japan Geoscience Union Meeting 2017, 2017.

⑳ 田口 聡, 細川 敬祐, 小川 泰信, 巨大な動くカスプオーロラの EISCAT 観測, 2016 年度 EISCAT 研究集会, 2017.

㉑ 田口 聡, 細川 敬祐, 小川 泰信, 動く red line カスプオーロラの水平プロファイル, 第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2016.

㉒ 宮本 正輝, 田口 聡, オーロラオーバルの分岐現象の空間分布特性, 第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2016.

㉓ 田口 聡, カスプ領域のサイエンス, 平成 28 年度磁気圏・電離圏シンポジウム(招待講演), 2016.

㉔ Taguchi, S., K. Hosokawa, and Y. Ogawa, Stable sun-aligned arcs equatorward of the cusp, Japan Geoscience Union Meeting 2016, 2016.

㉕ 田口 聡, 細川 敬祐, 小川 泰信, カスプの赤道側の安定した Sun-aligned オーロラアーク: 全天イメージャーと EISCAT の同時観測, 2015 年度 EISCAT 研究集会, 2016.

㉖ 辻本 洋平, 田口 聡, 細川 敬祐, 小川 泰信, 真昼過ぎオーロラスポットと極向きにドリフトする複数のアーク, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015.

㉗ Taguchi, S., Y. Chiba, K. Hosokawa, Y. Ogawa, Cusp aurora as a backward-elongated image of the moving region of electron precipitation, Japan Geoscience Union Meeting 2015, 2015.

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。