

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2014

課題番号：22340143

研究課題名(和文)極域電離圏プラズマメソスケール密度構造のカスケード過程の解明

研究課題名(英文)Study on the cascade process of the mesoscale plasma structure in the polar ionosphere

研究代表者

田口 聡 (TAGUCHI, Satoshi)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80251718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：極域電離圏のプラズマは、様々な物理過程によって水平方向に10 kmから100 kmのメソスケール構造を作ることが多い。本研究では、そのような構造と、さらにその構造の生成に関わるメソスケールのオーロラ構造を高い時間分解能で捉えることのできる全天イメージャーを構築して、その装置によって得られたデータを解析した。極冠域で生じている現象については、その出現特性と構造化の特徴を見出した。また、カスプ域については、磁気圏からの粒子降下が、これまでに同定されていない時間空間特性をもつことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The plasma in the polar ionosphere often forms a mesoscale structure through various processes. In this study we made an all-sky imager having an ability to observe the mesoscale plasma structure and the relevant auroral structure at high time resolution, and analyzed data that were obtained from the imager. We identified the occurrence characteristics of the high-density region in the polar cap, and the nature of its structuring. We also found unprecedented spatial and temporal characteristics of the particle precipitation in the cusp.

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 大気光 オーロラ カスプ 極冠 電子密度

### 1. 研究開始当初の背景

プラズマの大きな密度構造が次第に小さい姿へと形を変えていくカスケードは、電離圏物理学のみならず広く宇宙空間に存在するプラズマの動態にかかわる過程である。極域電離圏においては、10 km から 100 km のメソスケールの範囲で密度勾配や流れのシア、プラズマの不安定性が複雑に絡みあったカスケードが起こっていると考えられてきたが、その詳細は長い間謎のままであった。

本研究を開始する数年前に、微弱なシグナルをも捉えることのできる次世代の高感度デジタル冷却 CCD カメラが開発され、10 km のスケールの構造を高い時間分解能で撮像できる可能性が一気に開けてきた。このような背景のもとで、メソスケールのプラズマ密度構造とそれに関わるオーロラ構造の性質を明らかにしようとした。

### 2. 研究の目的

高感度の CCD カメラを中心として、従来型の装置と比べて時間分解能が一桁高い観測システムを作り、その観測システムを北極域のスヴァールバル諸島のロングイヤービエンに設置する。取得データの解析を通して、極域電離圏のメソスケールのプラズマ密度構造とそれに関わるオーロラ構造が時間とともにどのように変化するのかを明らかにする。

### 3. 研究の方法

過去の研究から、極域電離圏のメソスケールのプラズマ密度構造を理解する上で、極冠域と電離圏昼間側のカスプ域が重要な場所であることがわかっている。この両方の観測に適している場所が、スヴァールバル諸島である。本研究の具体的な方法は、(1) 現地調査 (2) 観測装置の製作 (3) データ解析環境の構築 (4) 観測装置の設置とデータの取得 (5) データ解析 (6) 共同観測の実施 (7) 理論的考察である。図 1 は、現地に設置した観測装置をドーム外側から見た様子である。



図 1 設置した観測装置のドーム外側からの様子。

### 4. 研究成果

#### (1) 極冠域プラズマ分布の特性

##### 極冠パッチ発生の時間スケール

全天イメージャーによる夜側極冠域での 4 時間にわたる連続観測を通して、プラズマ密度が周囲よりも高くなっている領域、いわゆる極冠パッチが、数 10 分の長い周期で発生する大きな構造と、5~12 分の短い周期で発生する小さい構造を共にもっていることを明らかにした。前者の長い周期は、高密度プラズマが流入してくる昼間側において、惑星間空間磁場の変化に伴ってプラズマ対流の構造が変わる時間スケールを反映している。後者の短い周期は、昼間側の磁気圏のマグネトポーズで生じている間欠的なリコネクションの発生間隔に対応していると考えられる。

##### プラズマ密度分布の構造化

極冠域を夜側へと流れる極冠パッチにおいて、その進行方向と反対側の後方の縁に沿ってプラズマの密度分布が波打っている現象を見出した(図 2)。緑の波打ち構造は、50 km から 100 km の波長をもち、ある一定の時間(約 5 分)で生成されることもわかった。レーダーによって同時に観測された電子密度の値をもとに、勾配型不安定性の線形成長率を見積もると、構造が生成される時間である 5 分と矛盾が無いこともわかった。この観測結果は、勾配型不安定性によってプラズマ密度分布の構造化が進んでいることを 2 次的に初めて示したものである。

213802 UT

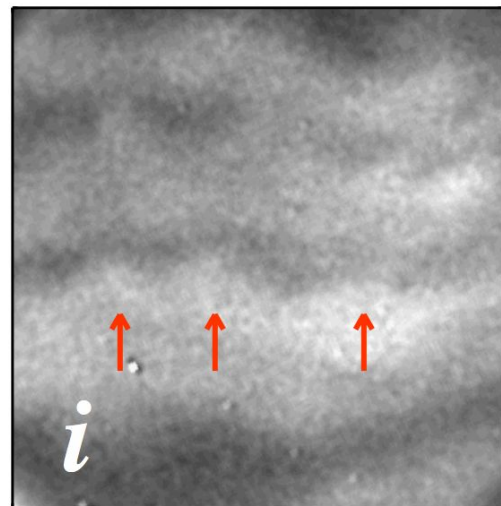


図 2 プラズマ密度分布の構造化を示す観測(3つの矢印の先)。白黒の色は 630 nm の光の強度を表す。2011 年 12 月 21 日 21:38:02 UT の観測。

### 非常に鋭い密度勾配の形成

極冠域におけるプラズマ密度の特徴的な空間分布は、のような極冠域の中での構造化プロセスだけでなく、様々な要因で決まる。極冠域における非常に鋭い密度変化現象に着目して、その成因を調べた。EISCAT レーダーによる過去の観測データから、極冠域において非常に鋭い密度変化（3分間に  $3 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$  から  $10^{11} \text{ m}^{-3}$  までの減少）を示すイベントを見出した。取り上げたイベントの電子密度の変化と、ほぼ同時に観測された惑星間空間磁場の变化との比較から、惑星間空間磁場の東西成分の鋭い変化の発生が電離圏極冠域のレーダー観測位置における低密度領域の出現と極めて良い対応を示していることがわかった。惑星間空間磁場の東西成分の変化に伴って極冠域に朝側から低密度プラズマが複数回流れ込み、夕方側起源の高密度プラズマの細長い舌状の領域の側面に切れ込みを入れたと考えられる。この構造が流れていくために、極冠域にあるレーダーで非常に鋭い密度変化が観測されることとなった。

### 朝夕方向に極度に広がる高密度領域

上で示したような経度方向に一定の幅をもつ高密度領域が極冠域に流入している際、その流入口であるカスプ域において、その幅全体に渡って流れが止められると、極冠域には後方を切られた高密度領域が出現する。また、直ちに流入が再開し、その後直ぐに止まるような過程が生じると、進行方向には短く、朝夕方向に極度に伸びた高密度領域が極冠域に現れることになる。

本研究でロングイヤープィエンに設置した観測装置と従来からカナダのリゾリウトベイに設置されている観測装置（主任研究者は本研究の連携研究者の塩川）との貴重な同時観測から、このような極度に朝夕方向に伸びた高密度領域が実際に極冠域に存在していることを明らかにした。朝夕方向と昼真夜中方向の広がり、それぞれ約 1500 km と 500 km 以下であった。この 1500 km の長さは、極冠域の反太陽方向のプラズマの流れの幅の少なくとも 60-70% に相当することもわかった。このような特徴的な形状をもつ極冠パッチがどの程度の一般性をもって存在しているのかは、今後の研究で明らかにしていく。

### (2) 電離圏カスプ域メソスケールオーロラ 2分間隔のダブルバースト

カスプ域は、その低緯度側からやってくる高密度プラズマの極冠域への流入を制御するゲートであると同時に、その場でプラズマ密度の分布を一層複雑化させる場所でもある。この原因となる電子の降り込み現象について、オーロラ発光分布をもとに調べた。図3に示されるように、連発する2つのバーストによって構成されているカスプオーロラがあることを見出した。また、それらが約2分の間隔で発生していることも示した。この

ような現象は、従来型の全天イメージャーでは長い一つのオーロラ構造に見えられる。電子の降り込みの原因となる間欠的なリコネクションは、2分程度の時間スケールで変調を起こす性質をもっていると考えられる。

### 降下電子の高いフラックスの持続性

全天イメージャーによる地上からの観測と人工衛星による上空での観測を通して、動くカスプオーロラが生まれて間もない段階と消滅前の段階における粒子降下の特性を調べた。約3分の間隔で真昼付近に発生した2つのカスプオーロラ構造に着目した。惑星間空間磁場が安定して南西方向を向いている期間に発生したこれらのオーロラ構造は、発生場所のわずかな違いと動く方向の違いのために、発生後のある段階で隣接して位置することとなった。その時、人工衛星(DMSP F18)がこれらのオーロラの上空領域を通過した。衛星が取得した降下粒子のデータと地上の全天イメージャーのオーロラデータを詳細に比較すると、生まれて間もない段階のカスプオーロラの中では、イオンの降下は非常に高いエネルギーフラックスを示し、消滅前の段階のカスプオーロラでは、イオンのエネルギーフラックスは低く落ち込んでいることがわかった。一方、オーロラの発光に関係している降下電子については、2つのオーロラ構造で極めて似た特徴をもっていた。具体的には、約 100 eV で降下してくる電子のエネルギーフラックスは両者で同じように非常に高い値であった。このことから、動くカスプオーロラを光らせている降下電子は、カスプオーロラの発生から消滅までの一定の時間幅にわたって高いフラックスレベルを維持していることがわかる。また、この電子の降下フラックスは、マグネトシースから同時に注入されるイオンの降下が関与しないメカニズムによって制御されていると考えられる。

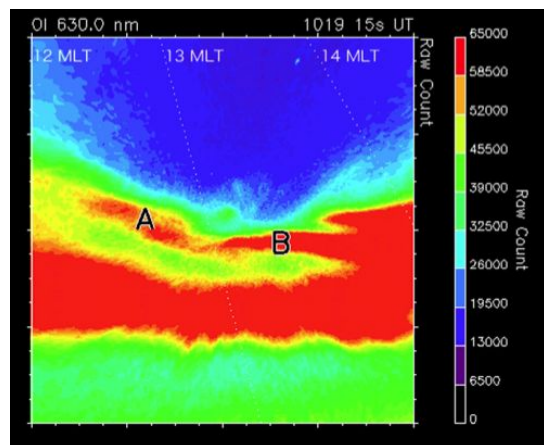


図3 二つのバースト(図のAとB)で作られているカスプの動くオーロラ。2011年12月29日10:19:15 UTの観測。

### (3) 磁気嵐時に見られる大気光の増大特性

極冠パッチのプラズマの密度が高くなると、より強い 630 nm の光が放射される。磁気嵐時の極冠域でしばしば見られる強い光の極冠パッチがプラズマの密度増加を表しているのか、あるいは、それ以外の効果が効いているのかについては、これまではっきりとしていなかった。磁気嵐時に全天イメージャーで捉えられた極冠パッチに対して、実際の観測を反映した発光強度のモデル計算を行い、実測値と比較した。

図3は、イメージャーと EISCAT レーダーによる観測結果とモデル計算結果を示している。電子温度が幾分上昇している期間(図3のパネルcで黄色になっている期間)で、モデル計算値が発光強度の観測値の半分程度になっていることから(パネル e)、電子温度の上昇に寄与する電子の降下(ここでは明確な構造をもたない低エネルギー電子の降下)も発光強度の増大に効いていることがわかる。一方、電子温度が低い期間においては、モデル計算値と観測値がよい一致を示した。この期間を詳細に調べることで、磁気嵐時の極冠パッチの発光強度増大については、体積放射率の高度分布におけるピーク値の高度の上昇と、主たる発光領域の高度方向の厚みの増加が重要であることがわかった。

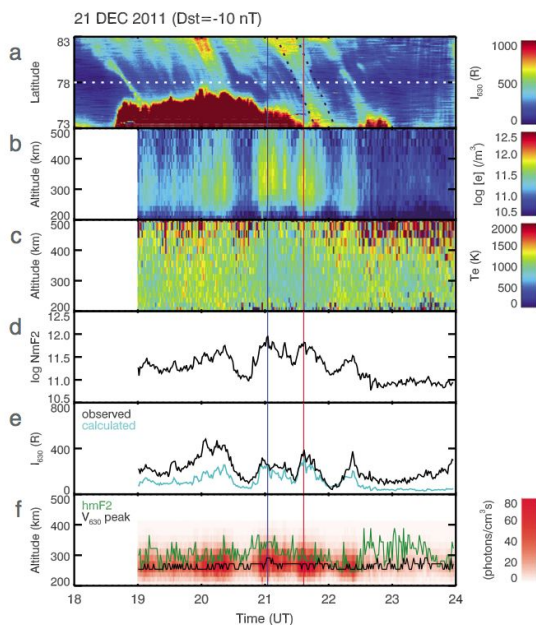


図4 2011年11月21日の磁気嵐時の極冠パッチ観測と発光強度のモデル計算。(a)全天イメージャーから得られる発光強度。南北ケオグラム形式で示している。白い点線はEISCAT レーダーの視線方向を表す。(b)レーダーで観測された電子密度と(c)電子温度。(d)レーダーで得られたF層の電子密度のピーク値。(e)大気光の実測値と計算値。(f)計算された体積放射率の高度分布と観測された電子密度のピーク値の高度。

### (4) 今後の展望

観測装置はこれまで非常に順調に作動しており、補助金の期間が終了した後も定常観測を続けてデータを取得していくこととした。これまでの4シーズンの観測を経て、良いデータが蓄積されてきたことから、今後は統計的な研究も進めていく。これまでの事例研究での結論の一般性あるいは特異性を明確にしていく。

本研究で得られた以下の2つの結果は、今後の発展性という意味においても、とりわけ価値があると考えられる。一つは、極冠域においてプラズマ密度分布が50 kmから100 kmのスケールにおいて構造化している証拠が得られた点であり、もう一つは、カスプ域での動くオーロラの観測と人工衛星による降下電子の観測が先例のない精度で同時にできたことにより、動くカスプオーロラの中の降下電子構造の時間発展特性が明らかになった点である。双方について、理論的な考察も進めていく。

### 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9件)

Taguchi, S., K. Hosokawa, and Y. Ogawa (2015) Investigating the particle precipitation of a moving cusp aurora using simultaneous observations from the ground and space, *Progress in Earth and Planetary Science*, 査読有, 2:11, doi: 10.1186/s40645-015-0044-7.

Sakai, J., K. Hosokawa, S. Taguchi, and Y. Ogawa (2014) Storm time enhancements of 630.0 nm airglow associated with polar cap patches, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 査読有, 119(3) 2214-2228, 10.1002/2013JA019197

Hosokawa, K., S. Taguchi, K. Shiokawa, Y. Otsuka, Y. Ogawa, and M. Nicolls (2013) Global imaging of polar cap patches with dual airglow imagers, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 41, 1-6, doi:10.1002/2013GL058748.

Hosokawa, K., S. Taguchi, Y. Ogawa, and J. Sakai (2013) Two-dimensional direct imaging of structuring of polar cap patches, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 118, 6536-6543, doi:10.1002/jgra.50577.

Sakai, J., S. Taguchi, K. Hosokawa, and Y. Ogawa (2013) Steep plasma depletion in dayside polar cap during a CME-driven magnetic storm, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 118, 462-471, doi:10.1029/2012JA018138.

Hosokawa, K., S. Taguchi, Y. Ogawa,

and T. Aoki (2013) Periodicities of polar cap patches, Journal of Geophysical Research, 査読有, 118, 447-453, doi:10.1029/2012JA018165.

Taguchi, S., K. Hosokawa, Y. Ogawa, T. Aoki, and M. Taguchi (2012), Double bursts inside a poleward-moving auroral form in the cusp, Journal of Geophysical Research, 査読有, 117, A12301, doi:10.1029/2012JA018150.

Abe M., S. Taguchi, M. R. Collier, and T. E. Moore (2011) Two azimuthally separated regions of cusp ion injection observed via energetic neutral atoms, Journal of Geophysical Research, 査読有, 116, A10225, doi:10.1029/2011JA016778.

Taguchi, S., K. Hosokawa, S. Suzuki, A. Tawara, H. U. Frey, J. Matzka, A. S. Yukimatu, and N. Sato (2010) Plasma flow during the brightening of proton aurora in the cusp, Journal of Geophysical Research, 査読有, 115, A10308, doi:10.1029/2010JA015535.

〔学会発表〕(計70件)

田口 聡, 高緯度電離圏に見られる磁気圏や熱圏との「縫い目」が残る現象, 日本地球惑星科学連合2015年大会, 2015年5月24日, 幕張メッセ(千葉・幕張), 招待講演

小川 泰信, 細川 敬祐, 田口 聡, 鈴木 臣, 門倉 昭, 宮岡 宏, 昼間側極域電離圏で見られた脈動オーロラの特異性, 名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会 脈動オーロラ研究集会, 2015年1月20日, 名古屋大学(愛知・名古屋)

Hosokawa, K., S. Taguchi, and Y. Ogawa, Creation of polar cap patches, American Geophysical Union Fall Meeting 2014, 2014年12月17日, San Francisco (United States), 招待講演

Hosokawa, K., S. Taguchi, K. Shiokawa, Y. Otsuka, and Y. Ogawa, Global imaging of polar cap patches, Asia-Oceania Geoscience Society, 11th Annual General Meeting, 2014年7月29日, Royton Sapporo (Hokkaido, Sapporo)

田口 聡, 細川 敬祐, 小川 泰信, カスプの動くオーロラに伴うイオン温度上昇の3次元イメージング, 第134回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2013年11月3日, 高知大学(高知・高知)

Hosokawa, K., S. Taguchi and Y. Ogawa, Plasma structuring in the polar cap ionosphere, Asia-Oceania Geoscience Society, 10th Annual General Meeting, 2013年6月28日, Brisbane (Australia), 招待講演

坂井 純, 細川 敬祐, 田口 聡, 小川 泰信, Storm-time characteristics of 630 nm airglow intensity associated with polar-cap patches, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 2013年5月23日, 幕張メッセ(千葉・幕張)

Taguchi, S., Y. Ogawa, K. Hosokawa, Mesoscale flow dynamics related to a southeastward-moving auroral transient in the cusp, 2013年5月24日, 幕張メッセ(千葉・幕張)

Hosokawa, K., S. Taguchi, and Y. Ogawa, Production of polar cap patches, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 2013年5月23日, 幕張メッセ(千葉・幕張)

田口 聡, 小川 泰信, 細川 敬祐, 昼間側レッドオーロラとF層プラズマパラメタの経度プロファイル: 全天イメージャーとESR equi-MLAT mode 観測, 第132回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2012年10月23日, 札幌コンベンションセンター(北海道・札幌)

細川 敬祐, 田口 聡, 小川 泰信, 極冠域電離圏プラズマの構造化: 高速大気光撮像で見えてきたもの, 第132回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2012年10月22日, 札幌コンベンションセンター(北海道・札幌)

田口 聡, 白川 拓也, 細川 敬祐, 小川 泰信, カスプの transient フローに伴うプラズマの温度上昇, 第130回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2011年11月3日, 神戸大学(兵庫・神戸)

〔その他〕

ホームページ等

<http://gwave.ice.uec.ac.jp/~hosokawa/sites/svalcam/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田口 聡 (TAGUCHI, Satoshi)  
京都大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 80251718

### (2) 研究分担者

細川 敬祐 (HOSOKAWA, Keisuke)  
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授  
研究者番号: 80361830

小川 泰信 (OGAWA, Yasunobu)  
国立極地研究所・教育研究系・准教授  
研究者番号: 00362210

### (3) 連携研究者

田口 真 (TAGUCHI, Makoto)  
立教大学・理学部・教授  
研究者番号: 70236404

塩川 和夫 (SHIOKAWA, Kazuo)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授  
研究者番号: 80226092

### (4) 研究協力者

青木 猛 (AOKI, Takeshi)  
鈴木 臣 (SUZUKI, Shin)  
田原 篤史 (TAWARA, Atsushi)