

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)（海外学術調査）

研究期間：2014～2019

課題番号：26302006

研究課題名（和文）3地点からの全天大気光撮像による極冠域電離圏広域イメージング観測

研究課題名（英文）Imaging of polar cap ionosphere with three all-sky airglow imagers

研究代表者

細川 敬祐（Hosokawa, Keisuke）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：80361830

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,300,000円

研究成果の概要（和文）：カナダ北極域のイウレカに全天大気光イメージャを設置することによって、ノルウェーのスバルバル、カナダのレゾリュートベイに既設のイメージャと組み合わせた極冠域電離圏の広域撮像を可能にした。得られた大気光データを用いて、1) 極冠パッチの空間構造がプラズマ不安定によって形作られていること、2) 極冠パッチが昼間側カスプ領域で発生する極方向に伝搬するオーロラと密接に関連して生成されていること、3) 極冠パッチの発生頻度に見られる日変化、季節変化が地理極と地磁気極の間のオフセットによって決定されていること、4) 安価な大気光イメージャでポーラーキャップパッチの撮像が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

緯度が80度を超える極冠域の電離圏に見られる擾乱現象の一つである「ポーラーキャップパッチ」の空間構造や時間変動を決定している要因を明らかにした。これは、電離圏密度の乱れが衛星測位システムに与える影響を評価するための基盤情報として活用することができる。また、ポーラーキャップパッチの発生頻度の日変化や季節変化も統計的に明らかにした。この情報を用いることで、ポーラーキャップパッチの発生が測位に与える影響を予測することが可能になっている。

研究成果の概要（英文）：We have constructed a network of ground-based airglow measurements by installing a new airglow imager in Eureka, Canada. This network observation enables us to visualize the electron density variations at the polar cap latitudes, for example, those produced by polar cap patches. By using airglow data from this network we have shown 1) that the spatial structure of polar cap patches is characterized through plasma instability such as gradient-drift instability, 2) that some patches are generated directly from the transient poleward moving aurora in the dayside cusp, 3) that UT and seasonal variations of polar cap patch occurrence are determined by the offset between the geographic and geomagnetic poles, and 4) cheap and small airglow imager is able to detect weak airglow enhancement during the passage of polar cap patches.

研究分野：超高層大気物理学

キーワード：電離圏 夜間大気光 北極域 ポーラーキャップパッチ

1. 研究開始当初の背景

冬季の極域電離圏、特に日照のない極冠域において、高密度プラズマが局所的な塊となって現れる現象がしばしば観測される。この現象は、ポーラーキャップパッチと呼ばれている。ポーラーキャップパッチは昼間側の電離圏で日照域高密度プラズマをソースとして生成され、極域プラズマ対流によって夜側へと輸送される。ポーラーキャップパッチに伴う電子密度の乱れは、衛星通信電波に変調をもたらす、GPSなどの全球衛星測位システムにおいて精度の低下を招くこともある。2000年代に入り、ポーラーキャップパッチの高時空間分解能撮像を目的として、カナダのレズリュートベイ(磁気緯度83度)やノルウェーのスバルバル島(同75度)において、全天大気光イメージャによる観測が実施されてきた。これらの地上からの大気光観測によってポーラーキャップパッチの2次元的な空間構造を可視化することが可能になったが、その形状は複雑で、ポーラーキャップパッチが極冠を移動する間にその空間構造を動的に変化させていることが明らかになってきた。我々のグループでも、ポーラーキャップパッチの移動速度を自動推定する手法を開発し、約1000個のパッチに適用することでその特性を統計的に調べたり、各種レーダーと地上光学機器による同時観測を行うことで、ポーラーキャップパッチの全域もしくは外縁部において細かい電子密度の擾乱が存在することを明らかにしてきていた。また、磁気嵐時に現れる巨大なポーラーキャップパッチを世界で初めて光学観測によってとらえることにも成功し、その生成過程を明らかにしつつあった。この頃、ポーラーキャップパッチの研究は、その出現が衛星測位環境に与える影響を評価・予測する段階に入りつつあった。高精度の予測を実現するためには、ポーラーキャップパッチの生成過程を詳細に理解するだけでなく、輸送経路を把握したうえで、輸送中にポーラーキャップパッチの空間構造がどのように変化するかを明らかにすることが求められていた。これらの課題を解決するためには、ポーラーキャップパッチの動態を極冠全域に渡って同時に観測する必要がある。しかし、観測に用いられる全天大気光イメージャの視野は半径500km程度であり、単一のカメラによる観測では、ポーラーキャップパッチの伝搬に伴ってダイナミックに変化する極冠電離圏電子密度構造を広域に撮像することができない。このため、北米域で行われている観測とヨーロッパ域で行われている観測をシームレスにつなぐような、磁気北極近くでの光学観測を新たに始めることが求められていた。

2. 研究の目的

カナダ北部のイウレカ(磁気緯度89度)に新たに全天大気光イメージャを設置し、申請者らのグループがカナダのレズリュートベイおよびノルウェーのスバルバルで運用してきた全天イメージャのデータと組み合わせることで、ポーラーキャップパッチの広域同時撮像観測を実現する。広域撮像によって得られたデータを、非干渉散乱レーダー、大型短波レーダー、GPS測位信号受信システムによる観測データと相互補完的に組み合わせることで、以下の3つの課題を達成する:

課題1: 生成過程の理解: 生成領域の空間分布、および生成に寄与する物理過程の解明

課題2: 輸送経路の把握: 輸送経路の動的な追跡、背景プラズマ対流との関連性の理解

課題3: 特性変化の把握: 輸送過程における特性(密度・空間構造)の時間変化の理解

これらの課題を解決することによって、ポーラーキャップパッチの発生・輸送過程を予測し、極冠の電子密度擾乱が衛星測位環境に与える影響を評価していく際の基盤となる情報を得ることを目指す。また、ポーラーキャップパッチだけでなく、極冠域に現れる「極冠オーロラ」についても観測的研究を行い、その生成メカニズムを明らかにする。

3. 研究の方法

高感度全天イメージャを、カナダ北極域のイウレカに新たに設置し、630.0nm大気光撮像を実施する。得られたデータを、極冠域において稼働している他の2台の大気光イメージャ(レズリュートベイ、ロングイヤービイエン)のデータと組み合わせ、極冠域を伝搬するポーラーキャップパッチの広域イメージングを実現する。これにより、その生成過程、輸送経路、輸送過程における空間構造の変化を明らかにする。また、イウレカに設置された大気光イメージャのデータを用いて、ポーラーキャップパッチだけでなく、極冠域に現れる「極冠オーロラ」についても観測的研究を行うことが期待できる。これらの目的の達成に向けて、(1)現地調査、(2)観測装置の製作、(3)観測装置の設置とデータの取得、(4)極冠域広域大気光データベースの作成、(5)広域撮像に基づくデータ解析、に順次取り組んでいく。最終的に、ここで得られた広域撮像データに基づいて、昼側で生成された後、ポーラーキャップパッチが「どのような経路」で「どのように空間構造を変化させながら」伝搬するのかを実証的に明らかにする。

4. 研究成果

カナダのイウレカに1台の全天大気光イメージャを設置し、冬季に630.0 nm大気光を用いた電離圏観測が行える体制を構築した。全天大気光イメージャシステムは、光学系、筐体、冷却 CCDカメラ、光学フィルター、コントロール PC によって構成されており、国立極地研究所での光学較正実験を経て、カナダに空輸された。2015年10月に研究代表者の細川がチャーター機でイウレカに渡航し、イメージャの設置から観測データの確認までの全てを完了した(図1参照)。この観測システムに対しては、日本から衛星インターネット回線を用いた接続が行えるような設定を行っており、必要に応じて観測状況の確認が行える環境が維持できている。観測はPCによる自動制御で行われており10月下旬から3月上旬までの期間について、データが自動的に蓄積され、時間遅れはあるものの、ネットワーク経由で日本まで転送されている。転送された生データから光学校正時のデータを用いて絶対発光強度を算出し、全天画像のムービーや南北断面の時系列プロットをウェブで公開している(図2)。これまでに、約4.5シーズンぶりの良好なデータを取得できており、既設の2台の全天イメージャ(カナダレブリュートベイ、ノルウェーロングイヤービイエン)のデータと組み合わせて、極冠域電離圏環境の広域イメージングを行い、極冠パッチや極冠オーロラなどの広域構造を可視化する研究を実施することができた。



図1: 設置された全天イメージャ

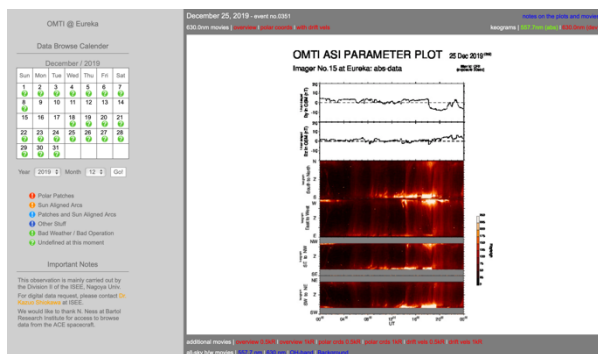


図2: データのウェブ閲覧システム

これらのイメージャのデータを用いて、1) 極冠パッチの空間構造を決定する要因が Gradient-Drift Instability (GDI) と呼ばれるプラズマ不安定によって形作られていること、2) 極冠パッチが昼間側カスプ領域で発生する極方向に伝搬するオーロラと密接に関連して生成されていること、3) 極冠パッチの発生頻度に見られる日変化、季節変化が地理極と地磁気極の間のオフセットによって決定されていること、4) 安価な大気光イメージャでポーラーキャップパッチの撮像が可能であること、を示してきた。以下では、これらの成果について、その詳細を述べる。

(1) ロングイヤービイエンの高時間分解能大気光観測によって得られたデータを用いて、極冠パッチの後縁部に、指状構造が形成されていることを明らかにした(引用文献①)。この指状構造は、図3に示すように50-100 kmの空間スケールを持ち、その形状から交換型のプラズマ不安定(Gradient-drift Instability)によって形成されていることが考えられる。この成果は、ポーラーキャップパッチの内部に形成される電子密度の微細構造が、プラズマ不安定によって形成されていることを強く示唆する。この知見は、極冠域における電離圏擾乱に伴う衛星測位誤差の評価をする際の基盤情報となる。

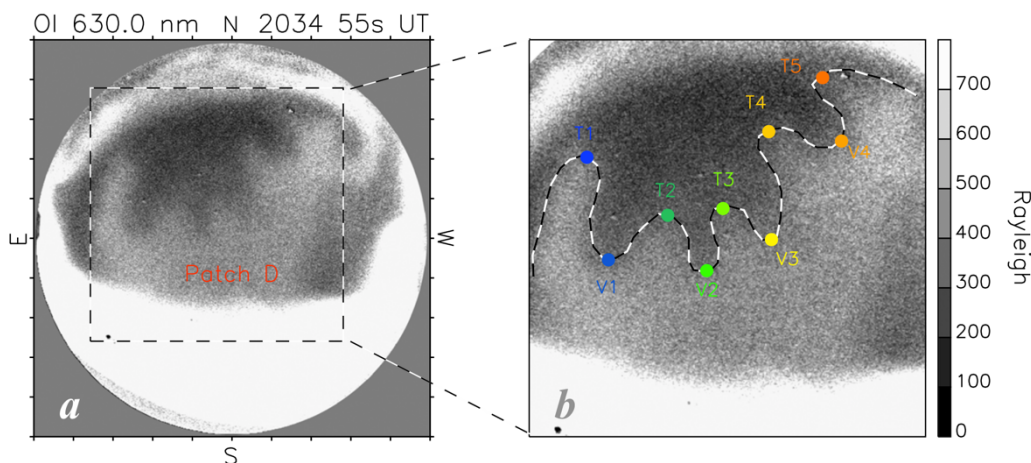


図3: 大気光観測で可視化されたポーラーキャップパッチ外縁部に見られる指状構造

(2) ロングイヤービイエンのデータを用いて、ポーラーパッチが、昼間側カusp領域において極方向に伝搬するオーロラ (Poleward Moving Auroral Forms: PMAFs) によって生成されていることを示した (図 4, 引用文献 ②). ポーラーキャップパッチは、10 分程度の周期性を持って出現することが知られているが、この周期性が昼間側カusp域に見られるオーロラの周期性を引き継いで決定されていることを示している。また、この他にも、ロングイヤービイエンにおいて得られた観測データを用いて、昼間側カusp域のオーロラのダイナミクスを明らかにした論文を 2 篇出版している (引用文献 ③, ⑥).

(3) イウレカにおいて取得された数年分のデータを統計的に解析することによって、ポーラーキャップパッチの発生頻度の日変化、季節変化を明らかにした (引用文献 ⑧). この統計解析結果をベースに、低高度衛星による電子密度計測を組み合わせることで、ポーラーキャップパッチの発生頻度に見られる日変化、季節変化が地理極と地磁気極の間のオフセットによって決定されていることを示した (引用文献 ⑨). この成果は、本研究によってイウレカという磁気極に近接する場所でのポーラーキャップパッチの観測が初めて可能になったことによって得られたものである。

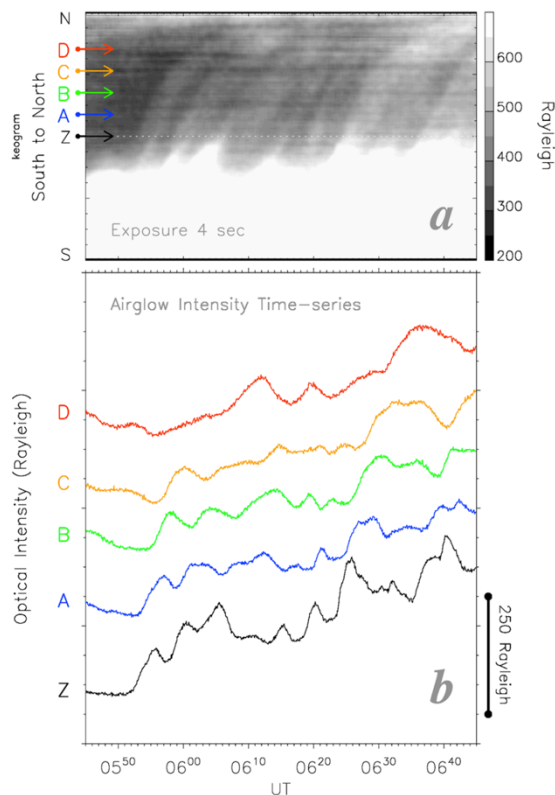


図 4: 昼間側のパッチ生成過程の観測

(4) ロングイヤービイエンで運用されているイメージャと同じ観測サイトに、小型で安価な大気光イメージャを設置し、ポーラーキャップパッチの観測を行った。大型の大気光イメージャのデータと比較することによって、安価なカメラでもポーラーキャップパッチに伴う微弱な大気光変動を捉えることが可能であることを示した (引用文献 ④).

これらの成果に加え、本研究によって整備を行った広域光学観測によって得られたデータを用いた極冠パッチの研究、極冠オーロラに関する研究のそれぞれについてレビュー論文を執筆し、Space Science Review に 2 篇の論文が採択されるに至っている (引用文献 ⑤, ⑦). これらの論文は、International Space Science Institute (ISSI) で取りまとめが行われている「Auroral Physics」というレビュー書籍として出版される予定である。

<引用文献>

■ 査読付き学術論文

- ① Hosokawa, K., S. Taguchi, and Y. Ogawa, Edge of polar cap patches, Journal of Geophysical Research, 121, doi:10.1002/2015JA021960, 2016
- ② Hosokawa, K., S. Taguchi, and Y. Ogawa, Periodic creation of polar cap patches from auroral transients in the cusp, Journal of Geophysical Research, 121, doi:10.1002/2015JA022221, 2016
- ③ Taguchi, S., Y. Chiba, K. Hosokawa, and Y. Ogawa, Horizontal profile of a moving red line cusp aurora, Journal of Geophysical Research, 122, doi:10.1002/2016JA023115, 2017
- ④ Hosokawa, K., Y. Ogawa and S. Taguchi, Imaging of polar cap patches with a low-cost airglow camera: pilot observations in Svalbard, Norway, Earth, Planets and Space, 71, 115, doi:10.1186/s40623-019-1094-7, 2019
- ⑤ Hosokawa, K., Y. Zou and Y. Nishimura, Airglow Patches in the Polar Cap Region: A Review, Space Science Review, 215, 53, doi:10.1007/s11214-019-0616-8, 2019
- ⑥ Taguchi, S., K. Hosokawa, and Y. Ogawa, Plasma flow in the north-south aligned discrete aurora equatorward of the cusp. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 124, 10778-10793, doi:10.1029/2019JA026895, 2019
- ⑦ Hosokawa, K., A. Kullen, S. Milan, J. Reidy, Y. Zou, H. Frey, R. Maggiolo and R. Fear, Aurora in the Polar Cap: A Review, Space Science Review, 216, 15,

■ 国際会議発表

- ⑧ Hosokawa, K., M. Nagata, K. Shiokawa, Y. Otsuka, IMF By dependence of polar cap patch occurrence: statistics using airglow data from Eureka, Canada in comparison with SuperDARN convection patterns, SuperDARN Workshop, Fuji, Jun 6, 2019
- ⑨ Hosokawa, K., K. Shiokawa, Y. Otsuka and S. Taguchi, What controls the luminosity of polar cap airglow patches? : implication from airglow measurement in Eureka, Canada, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, Dec 13, 2019

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hosokawa, K., S. Taguchi, and Y. Ogawa	4. 巻 122
2. 論文標題 Periodic creation of polar cap patches from auroral transients	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research	6. 最初と最後の頁 5639-5652
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/2015JA022221	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Taguchi, S., Y. Chiba, K. Hosokawa, and Y. Ogawa	4. 巻 123
2. 論文標題 Horizontal profile of a moving red line cusp aurora	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research	6. 最初と最後の頁 3509-3525
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/2016JA023115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Taguchi, S., K. Hosokawa, and Y. Ogawa	4. 巻 121
2. 論文標題 Edge of polar cap patches	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/2015JA021960	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hosokawa Keisuke, Ogawa Yasunobu, Taguchi Satoshi	4. 巻 71
2. 論文標題 Imaging of polar cap patches with a low-cost airglow camera: pilot observations in Svalbard, Norway	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1-1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-019-1094-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hosokawa Keisuke, Zou Ying, Nishimura Yukitoshi	4. 巻 215
2. 論文標題 Airglow Patches in the Polar Cap Region: A Review	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	6. 最初と最後の頁 1-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11214-019-0616-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Taguchi S., Hosokawa K., Ogawa Y.	4. 巻 124
2. 論文標題 Plasma Flow in the North South Aligned Discrete Aurora Equatorward of the Cusp	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 10778 ~ 10793
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JA026895	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hosokawa Keisuke, Kullen Anita, Milan Steve, Reidy Jade, Zou Ying, Frey Harald U., Maggiolo Romain, Fear Robert	4. 巻 216
2. 論文標題 Aurora in the Polar Cap: A Review	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	6. 最初と最後の頁 1-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11214-020-0637-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 香川亜希子, 細川敬祐, 小川泰信, 門倉昭, 海老原祐輔, 陣英克, 塩川和夫, 大塚雄一
2. 発表標題 Investigation of inter hemispheric asymmetry of polar cap patch occurrence
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永田倫太郎, 細川敬祐, 塩川和夫, 大塚雄一
2. 発表標題 Relationship between the By component of Interplanetary Magnetic Field and occurrence of polar cap patches
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kagawa A., K. Hosokawa, Y. Ogawa, A. Kadokura, Y. Ebihara, H. Jin, K. Shiokawa and Y. Otsuka
2. 発表標題 Interhemispheric asymmetry of polar cap patches: Effect of offset between the geographic and magnetic poles
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡村紀, 細川敬祐, 塩川和夫, 田口聡, 大塚雄一, 小川泰信
2. 発表標題 磁気北極付近における大気光観測を用いた CME, CIR 発生時に伴う極冠パッチの性質
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山内淑寛, 細川敬祐, 大谷晋一, 塩川和夫, 大塚雄一
2. 発表標題 全天大気光イメージャとSwarm 衛星を用いた極冠オーロラ近傍の電流系に関する研究
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 永田倫太郎, 細川敬祐, 塩川和夫, 大塚雄一
2. 発表標題 カナダのイウレカで観測される極冠パッチの統計的性質: UT, 季節, IMF By 依存性
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡村紀, 細川敬祐, 塩川和夫, 田口聡, 大塚雄一, 小川泰信
2. 発表標題 磁気北極付近における極冠パッチの光学観測: 発光強度の UT, IMF By 依存性について
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 木村洋太, 細川敬祐, 塩川和夫, 田口聡, 大塚雄一, 小川泰信
2. 発表標題 Sun-aligned arc の運動メカニズム再考: 3 台の全天カメラと短波レーダーによる観測
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hosokawa, K., S. Taguchi, K. Shiokawa, Y. Ogawa and Y. Otsuka
2. 発表標題 Responses of Polar Cap Ionosphere to Successive CMEs in December 2014: 5 days Continuous Monitoring with Two All-sky Imagers
3. 学会等名 Asia-Oceania Geoscience Society (AOGS) 12th Annual General Meeting (国際学会)
4. 発表年 2015年

1 . 発表者名 Hosokawa, K., J. I. Moen, J.-P. St-Maurice, K. Shiokawa, and Y. Otsuka
2 . 発表標題 Stagnation of a polar cap patch and decay of the accompanying plasma irregularities
3 . 学会等名 SuperDARN Workshop and Annual Meeting 2015 (国際学会)
4 . 発表年 2015年

1 . 発表者名 Hosokawa, K., S. Taguchi, K. Shiokawa, Y. Otsuka and Y. Ogawa
2 . 発表標題 Global imaging of polar cap patches
3 . 学会等名 Asia-Oceania Geoscience Society (AOGS) 11th Annual General Meeting
4 . 発表年 2014年

1 . 発表者名 Hosokawa, K., R. Maggiolo, Y. Zhang, R. Fear, D. Fontaine, J. Cumnock, A. Kullen, S. E. Milan, A. Kozlovsky, M. Echim and K. Shiokawa
2 . 発表標題 Ground and satellite observations of multiple auroral arcs in the duskside polar cap region
3 . 学会等名 AGU Fall Meeting
4 . 発表年 2014年

1 . 発表者名 Hosokawa, K., S. Taguchi and Y. Ogawa
2 . 発表標題 Creation of polar cap patches
3 . 学会等名 AGU Fall Meeting (招待講演)
4 . 発表年 2014年

1. 発表者名 Hosokawa, K., M. Nagata, K. Shiokawa, Y. Otsuka
2. 発表標題 IMF By dependence of polar cap patch occurrence: statistics using airglow data from Eureka, Canada in comparison with SuperDARN convection patterns
3. 学会等名 SuperDARN Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hosokawa, K., K. Shiokawa, Y. Otsuka and S. Taguchi
2. 発表標題 What controls the luminosity of polar cap airglow patches? : implication from airglow measurement in Eureka, Canada
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 細川敬祐 (分担執筆)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 日本極地研究振興会	5. 総ページ数 5
3. 書名 極地: 特集「オーロラの謎と魅力」	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	田口 聡 (Taguchi Satoshi) (80251718)	京都大学・理学研究科・教授 (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	塩川 和夫 (Shiokawa Kazuo) (80226092)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授 (13901)	
連携研究者	大塚 雄一 (Otsuka Yuichi) (40314025)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授 (13901)	