

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H02967

研究課題名(和文) 多地点からの地上大気光観測を用いたプラズマバブル成長過程の解明

研究課題名(英文) Studies of the growth of plasma bubbles with multiple ground-based 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) 10,300,000円

研究成果の概要(和文)：低緯度域、赤道域においてプラズマバブルの観測を行うために、小型大気光イメージャを用いた観測を様々な緯度帯で実施し、電離圏現象の観測に関するフィージビリティを確認した。また、沖縄県石垣島、沖縄県大宜見村、長野県上田市菅平、台湾の台南市、タイのチュンボン、フィリピンのイロイロに小型大気光イメージャを設置し、プラズマバブルの観測を実施した。小型大気光イメージャによって観測されたプラズマバブルの事例について、GNSS電離圏全電子数観測や短波ドップラー観測、VHF帯航空用航法電波観測システムによって得られたデータとの比較を行い、小型大気光イメージャを軸とするプラズマバブル広域観測の可能性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低緯度および赤道付近のアジア諸国に小型大気光イメージャを展開し、短波ドップラー観測などの様々な電波観測システムと組み合わせることによって、プラズマバブルの発生が衛星測位システムに与える影響を監視するためのネットワークを構築することが可能であることが示された。このようなプラズマバブルの広域モニタリングが実現できたことは、プラズマバブルの宇宙天気への影響(例：全球衛星測位システムへの影響)を評価、予測できるようになったという点において社会的意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：We conducted observations using a low-cost small airglow imager at various latitudes to study the feasibility of observing plasma bubbles with the imager in the low-latitude and equatorial regions. The imager was installed in different locations, including Ishigaki Island in Okinawa, Ogimi in Okinawa, Sugadaira in Nagano, Tainan City in Taiwan, Chumphon in Thailand, and Iloilo in the Philippines, to carry out observations of plasma bubbles. We compared the data obtained from the low-cost small airglow imager with data from GNSS ionospheric total electron content observations, High Frequency (HF) Doppler observations, and VHF aeronautical navigation radio wave observation systems for the observed cases of plasma bubbles. Through this comparison, we evaluated the potential of wide-area observations of plasma bubbles based on the low-cost small airglow imager.

研究分野：超高層大気物理学

キーワード：プラズマバブル 大気光観測 赤道域電離圏

## 1. 研究開始当初の背景

2000年代以降の冷却 CCD カメラの普及により、微弱な夜間大気光を用いた電離圏プラズマの地上光学観測が広く行われるようになった。特に、低緯度域・赤道域では、全天大気光イメージャを用いたプラズマバブルと呼ばれる電子密度減少領域の 2 次元観測が精力的に行われてきている。しかし、観測視野の制限のために多くの研究は近視眼的にならざるを得ず、衛星からの紫外光計測によって行われたようなプラズマバブルの広域撮像を、地上観測によって実現することは困難であった。このため、プラズマバブルの大規模空間構造の成長過程の理解、特に、緯度方向、経度方向の時間発展を支配するダイナミクスの把握に限界があった。また、プラズマバブルに伴う微細な電子密度擾乱の成長過程の理解も不十分であり、プラズマ不安定の寄与の理解と、衛星通信電波への影響の評価に制限がかかっていた。プラズマバブルは衛星測位精度に影響を与えることから、地上からの広域撮像によって上記の問題を解決することは、宇宙天気予報の高精度化に直結する。この問題を解決するためには、地上大気光イメージャによる広域観測を行う必要がある。このようなニーズに応えるため、従来よりも安価で小型のイメージャを開発し、安いコストと可搬性を生かして多地点からの地上光学観測を行うことが求められていた。

## 2. 研究の目的

小型カメラと魚眼レンズ、光学フィルターを組み合わせ「安価で」「小型で」「簡易な」大気光イメージャを開発する。この小型大気光イメージャを国内外の複数点に新規設置し、プラズマバブルの広域観測を行う。多地点からの観測によって、プラズマバブルの広域空間構造（水平分布、三次元構造、空間スケール、発生間隔）および、その時間発展（緯度方向伸展速度、経度方向伝搬速度、枝分かれ構造の発達）を可視化する。また、電波を用いた観測と組み合わせることで、プラズマバブルの広域観測を行うスキームを確立する。

## 3. 研究の方法

低緯度域もしくは赤道域においてプラズマバブルの観測を行うために、小型大気光イメージャを用いた観測を様々な緯度帯において実施し、様々な電離圏現象の観測に関するフィージビリティを確認した。具体的には、緯度が 75 度を超える極冠域に位置するノルウェースバルバル諸島において、小型大気光イメージャを用いたパイロット観測を実施し、同じ場所に設置されている大型の EMCCD 大気光イメージャによって取得されたデータとの比較を行うことで、小型大気光イメージャの性能評価を行った。これに続く形で、沖縄県石垣島、沖縄県大宜見村、長野県上田市菅平、台湾の台南市、タイのチュンポン、フィリピンのイロイロに小型大気光イメージャを設置し、プラズマバブルの観測を実施した。小型大気光イメージャによって観測されたプラズマバブルの事例について、GNSS 電離圏全電子数観測や短波ドップラー観測、VHF 帯航空用航法電波観測システムによって得られたデータとの比較を行うことで、小型大気光イメージャを軸とするプラズマバブル広域観測の可能性を評価した。

## 4. 研究成果

緯度帯は異なるものの、プラズマバブルと同程度の微弱な大気の発光を伴うポーラーキャップパッチと呼ばれる現象について、ノルウェーのスバルバル諸島ロングイェールビエンで運用されている小型大気光イメージャの観測データを解析することで、その性能を評価した（引用文献 ①）。この小型大気光イメージャは、Watec 社の小型 CCD カメラ、Fujinon 社の魚眼レンズ、および中心波長が 632.0 nm、半値全幅 (FWHM) が 10 nm の光学フィルタから構成されている。ロングイェールビエンでは、ポーラーキャップパッチの観測のために冷却電子増倍型 CCD カメラ (EMCCD カメラ) を搭載した EMCCD 大型大気光イメージャも運用されており、両システムによって得られた画像を比較することで、小型大気光イメージャの性能を評価した。極夜の夜間に EMCCD 大型大気光イメージャによって一連の極冠パッチが観測された事例について解析を行ったところ、小型大気光イメージャのデータにも、視野を通過する 630.0 nm の大気光増光領域を見いだすことができた。小型大気光イメージャによって 4 秒の露光時間で撮像された生画像の S/N 比は、EMCCD 大気光イメージャに大きく劣るものであった。しかし、7-15 枚の連続した画像を積分することでランダムノイズを低減することによって、ポーラーキャップパッチの時間発展や空間構造、例えば反太陽方向への伝播や後方エッジに沿った指状の構造などを捉えることが可能であることを確認した (図 1)。また、小型大気光イメージャによって得られた絶対光学強度の値は、EMCCD 大気光イメージャによって得られたものと一致しており、その差異は 100 レイリー未満であることも確認することができた。このオフセットは、小型大気光イメージャの画像に背景の連続的光の寄与があることに起因し、小型大気光イメージャで使用されている光学

フィルタの帯域幅が EMCCD 大気光イメージャで使用されるものよりも約3倍広いためであると考えられる。ここで得られた成果は、小型大気光イメージャを用いた大気光観測が、ポーラーキャップパッチなどの電離圏現象の定量的な研究においても活用可能であることを示しており、低緯度域、赤道域におけるプラズマバブルの観測にも用いることができることを示している。また、南極域における小型大気光イメージャによって得られたデータを用いることで、ポーラーキャップパッチの発生頻度の統計的性質についても明らかにすることができた（引用文献 ②）。

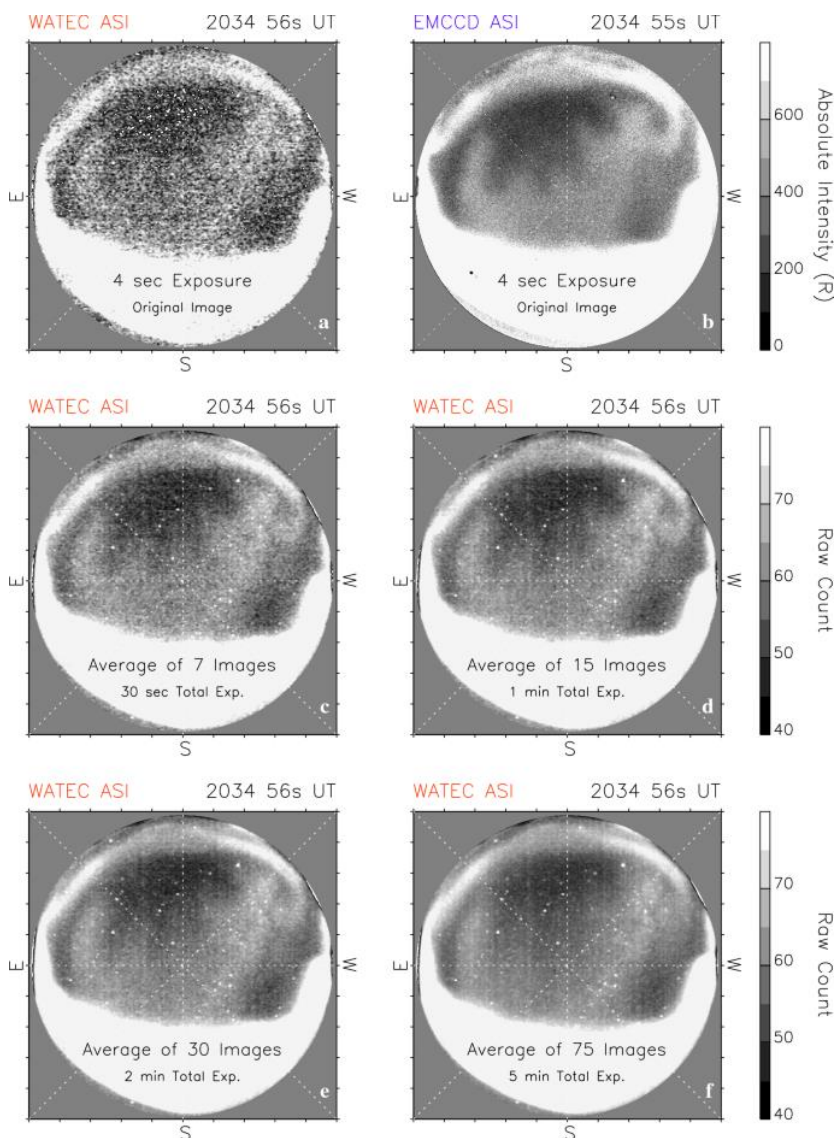


図1： 小型大気光イメージャによって得られた画像と EMCCD 大型大気光イメージャによって得られたデータの比較。2分程度の時間幅で画像を足し合わせることで EMCCD 大型大気光イメージャのデータと同等の S/N 比で観測が行えることを示している（Hosokawa et al., 2019）

(2) 小型大気光イメージャシステムを用いたパイロット観測を沖縄県石垣島、および台湾の台南において実施し、プラズマバブル観測の実現可能性を評価した。観測に用いられたシステムは、小型カメラ、魚眼レンズ、光学フィルタから構成されており、全天の生画像を4秒ごとにキャプチャすることができる。この小型大気光イメージャの課題の一つは、非冷却 CCD カメラであるために発生するショットノイズによる低い S/N 比（生画像で約 0.5）である。しかし、2分間の生画像を平均化し、平均画像から1時間平均の背景画像を抽出することで、水平スケールサイズが 30-100 km に及ぶ枝分かれ構造を含むプラズマバブルの詳細な空間構造を可視化することに成功した（図2）。また、GNSS の電波を用いた電離圏振幅シンチレーション観測と小型大気光イメージャによる撮像結果を比較することで、電離圏振幅シンチレーションのレベルが、衛星からの信号の伝搬経路がプラズマバブルを通過する際に顕著に増大することを示した。これにより、小型大気光イメージャによる大気光観測を、GNSS シンチレーションに対するプラズマバブルの影響を監視するために活用できることが明らかになった。この成果は、低緯度および赤道付近のアジア諸国に小型大気光イメージャを展開することで、プラズマバブルの発生が衛星測位システムに与える影響を監視するためのネットワークを構築することができることを示している（引用文献 ③）。

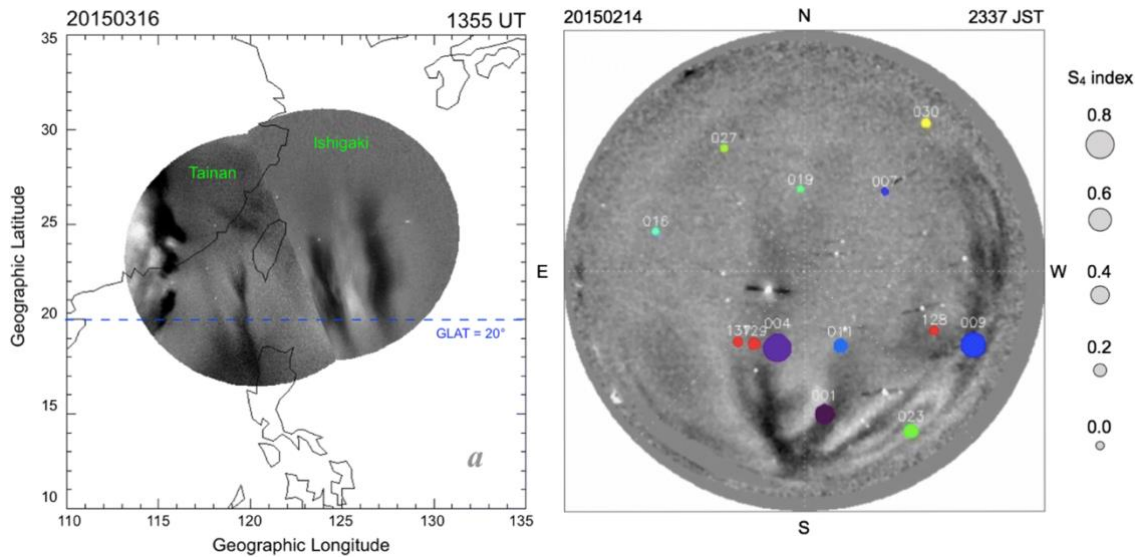


図 2：(左) 沖縄県石垣島と台湾の台南に設置された小型大気光イメージャによって可視化されたプラズマバブルの広域空間構造 (右) 石垣島における GNSS 電離圏振幅シンチレーションとの比較、プラズマバブルの領域において、シンチレーションが増大していることが示されている (Hosokawa et al., 2020)

(3) 低緯度域に設置されている短波ドップラーサウンダーによって得られる周波数スペクトログラムの中に、特徴的な傾斜拡散型ドップラートレースが見られることがある。この現象を Oblique Spread Structure (OSS) と呼ぶ。OSS は、プラズマバブルによる電波反射の分散によって生成されると予想されているものの、プラズマバブルと OSS を同時に観測することによって OSS が確かにプラズマバブルの兆候であるかどうかを確認する研究は行われてこなかった。また、プラズマバブルのどのような特性が OSS の微細構造に反映されるのかも明確にされていなかった。本研究では、台湾において、短波ドップラーサウンディングシステムと小型大気光イメージャによって同時に観測された 3 つの OSS とプラズマバブルの事例を解析した。その結果、短波ドップラー観測データに見られる OSS 発生のタイミングは、大気光データにおけるプラズマバブルの出現とよく一致していることが分かった。この結果は、OSS がプラズマバブルに伴う電離圏 F 領域高度での電子密度の変動によって形成されることを強く示しており、OSS が短波ドップラー観測におけるプラズマバブルの現れであると結論づけることができた。さらに、複数のプラズマバブルの枝分かれ構造が、短波ドップラー観測の中間反射点に到達したとき、OSS にも微細構造が生じていることが明らかになった。これらの成果は、小型大気光イメージャと短波ドップラー観測データを組み合わせることによってプラズマバブルのモニタリングが可能になり、プラズマバブルの宇宙天気への影響 (例：GNSS ナビゲーションへの影響) を広域に監視することができることを示唆している (引用文献 ④)。

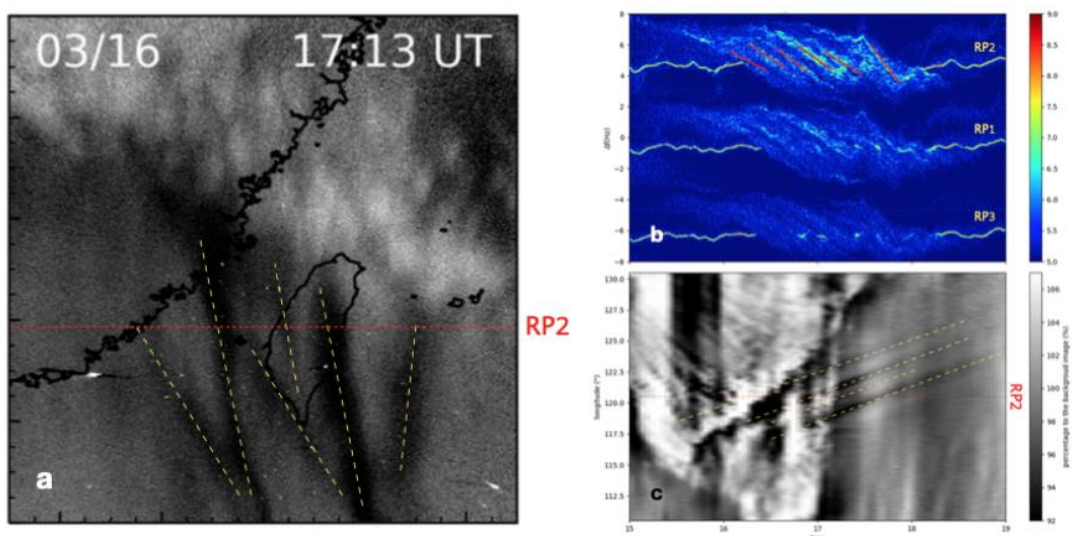


図 3：(左) 台湾の台南に設置された大気光イメージャによって観測されたプラズマバブルの広域構造 (右) 短波ドップラー観測によって同時にとらえられた OSS、プラズマバブルの発生と同期して OSS が観測されていることが見て取れる (Sejima et al., submitted)

(4) 長年、プラズマバブル内のプラズマ密度不規則構造が、TV 放送などに用いられる VHF 帯電波の長距離異常伝播を引き起こすことが報告されてきた。しかし、VHF 帯電波の異常伝播をプラズマバブルの広域モニタリングに利用する試みは行われて来なかった。本研究では、航空航法に用いられる VHF 電波と小型大気光イメージャのデータを組み合わせて、プラズマバブルの広域モニタリングが可能かを検討した。2021 年以降に実施した沖縄でのテスト観測では、沖縄でプラズマバブルに関連する異常伝播の兆候が確認され (図 4)、提案方式による観測システムによるプラズマバブルの広域観測が可能であることが示唆された (引用文献 ⑤)。

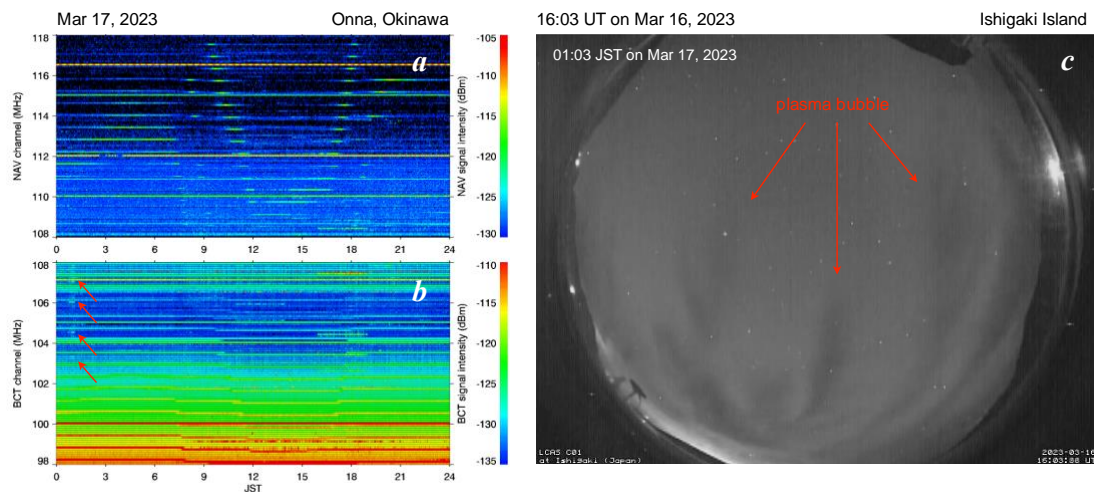


図 4：(左) 沖縄における VHF 帯電波の異常伝播観測、赤い矢印で示された部分で VHF 帯電波の異常伝播が観測されている (右) 同時刻の石垣島におけるプラズマバブルの観測、異常伝播と同期してプラズマバブルが観測されていることが分かる (Hosokawa et al., submitted)

#### <引用文献>

- ① 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, 2019
- ② Kagawa, A., K. Hosokawa, Y. Ogawa, Y. Ebihara, and A. Kadokura, Occurrence distribution of polar cap patches: dependences on UT, season and hemisphere, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 125, e2020JA028538, 2021
- ③ Hosokawa, K., K. Takami, S. Saito, Y. Ogawa, Y. Otsuka, K. Shiokawa, C.-H. Chen and C.-H. Lin, Observations of equatorial plasma bubbles using a low-cost 630.0-nm all-sky imager in Ishigaki Island, Japan, Earth, Planets and Space, 72, 2020
- ④ Sejima, H., K. Hosokawa, H. Nakata, J. Chum, C.-H. Lin, J.-T. Lin, Simultaneous observations of equatorial plasma bubbles with an all-sky airglow imager and a HF Doppler sounding system in Taiwan, Earth Planets and Space, submitted
- ⑤ Hosokawa, K., S. Saito, H. Nakata, C.-H. Lin, J.-T. Lin, S. Pornchai, I. Tomizawa, J. Sakai, T. Takahashi, T. Tsugawa, M. Nishioka, and M. Ishii, Monitoring of Equatorial Plasma Bubbles Using Aeronautical Navigation System: A Feasibility Study, Earth Planets and Space, submitted

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Keisuke, Takami Kohei, Saito Susumu, Ogawa Yasunobu, Otsuka Yuichi, Shiokawa Kazuo, Chen Chia-Hung, Lin Chien-Hung	4. 巻 72
2. 論文標題 Observations of equatorial plasma bubbles using a low-cost 630.0-nm all-sky imager in Ishigaki Island, Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-020-01187-1	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
1. 著者名 Kagawa A., Hosokawa K., Ogawa Y., Ebihara Y., Kadokura A.	4. 巻 126
2. 論文標題 Occurrence Distribution of Polar Cap Patches: Dependences on UT, Season and Hemisphere	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JA028538	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 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 0
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 Ogawa Y., Tanaka Y., Kadokura A., Hosokawa K., Ebihara Y., Motoba T., Gustavsson B., Brandstrom U., Sato Y., Oyama S., Ozaki M., Raita T., Sigernes F., Nozawa S., Shiokawa K., Kosch M., Kauristie K., Hall C., Suzuki S., Miyoshi Y., Gerrard A., Miyaoka H., Fujii R.	4. 巻 23
2. 論文標題 Development of low-cost multi-wavelength imager system for studies of aurora and airglow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 100501 ~ 100501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polar.2019.100501	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 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 Hosokawa, K., N. Kusuyama, Y. Hozumi, K. Takami, S. Saito, Y. Ogawa, M. Ishii, Y. Otsuka, and T. Tsugawa
2. 発表標題 Observations of ionospheric and mesospheric wave structures by a low-cost airglow imaging system
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Annual Meeting
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高見晃平, 細川敬祐, 斎藤享, 小川泰信, 塩川和夫, 大塚雄一
2. 発表標題 石垣島で取得された 630.0 nm 大気光観測データを用いたプラズマバブルの形状解析
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 Hosokawa, K., K. Takami, S. Saito, Y. Ogawa, Y. Otsuka, and K. Shiokawa
2. 発表標題 Simultaneous observations of plasma bubbles by a low-cost airglow imager and GNSS receivers in Ishigaki, Japan
3. 学会等名 Asia Oceania Geoscience Society
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高見 晃平, 細川 敬祐, 斎藤 享, 小川 泰信, Koichi Chen, 穂積 裕太, 塩川 和夫, 大塚 雄一
2. 発表標題 多地点からの大気光観測によるプラズマバブルの広域撮像
3. 学会等名 中間圏・熱圏・電離圏 (MTI) 研究集会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tatami K., K. Hosokawa, S. Saito, Y. Ogawa, C. Chen, Y. Hozumi, A. Saito, K. Shiokawa, Y. Otsuka
2. 発表標題 Simultaneous optical observations of plasma bubbles from multiple stations
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔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	齋藤 享  (Saito Susumu)  (40392716)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・電子航法研 究所・上席研究員    (82627)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
台湾	国立成功大学			
タイ	KMITL			