

多地点からの大気光観測を用いたプラズマバブルの広域撮像

高見 晃平 [1]; 細川 敬祐 [2]; 斎藤 享 [3]; 小川 泰信 [4]; 陳 佳宏 [5]; 穂積 裕太 [2]; 齊藤 昭則 [6]; 塩川 和夫 [7]; 大塚 雄一 [7]

[1] 電通大; [2] 電通大; [3] 電子航法研・航法システム; [4] 極地研; [5] 成大・地科; [6] 京都大・理・地球物理; [7] 名大宇地研

Simultaneous optical observations of plasma bubbles from multiple stations

Kohei Takami[1]; Keisuke Hosokawa[2]; Susumu Saito[3]; Yasunobu Ogawa[4]; Chia-Hung Chen[5]; Yuta Hozumi[2]; Akinori Saito[6]; Kazuo Shiokawa[7]; Yuichi Otsuka[7]

[1] none; [2] UEC; [3] NAV Department, ENRI; [4] NIPR; [5] Earth Science, NCKU; [6] Dept. of Geophysics, Kyoto Univ.; [7] ISEE, Nagoya Univ.

Plasma bubbles are regions in the nighttime equatorial F-region ionosphere where the electron density is significantly depleted. Plasma bubbles are known to affect the accuracy/stability of GNSS (Global Navigation Satellite Systems) because the steep gradient and small-scale irregularities within or in the vicinity of bubbles can disturb GNSS signals propagating through the ionosphere. The 630.0 nm airglow observations with ground-based all-sky imagers have been used for imaging the two-dimensional structures of plasma bubbles in the last two decades. However, such systems are typically large and expensive; thus, it has been difficult to carry out large-scale imaging of plasma bubbles from multiple stations. If we could use small and low-cost cameras distributed in multiple stations, it would be possible to visualize the large-scale structure of plasma bubbles.

In this study, we evaluate the feasibility of multi-point observations of plasma bubbles by small and low-cost all-sky airglow cameras. For this purpose, a low-cost airglow camera has been tested at Ishigaki (24 N, 124 E) in Japan since August 2014. This system consists of a small camera (WAT-910HX), a fisheye lens and an optical filter for the 630.0 nm airglow. Both the exposure time and temporal resolution of the measurement is 4 s. One of the problems of the low-cost airglow camera is its low S/N ratio due to thermal noises because the CCD of the camera is not cooled. On this point, we confirmed that such thermal noises significantly decrease by integrating raw images for a few minutes. At the same time, however, the integrated images can be blurred because plasma bubbles move with a speed of approximately 100 m/s. By taking the trade-off between the improvement of S/N ratio and blurring effect by the image integration into account, an integration of 30 images (~120 s integration time) was found to be appropriate for observations of bubbles with the low-cost camera. In this case, the estimated S/N ratio was about 15 dB. We also derived the S/N ratio of a cooled-CCD imager of OMTIs operative at the same site and it was approximately 37 dB. This means that the performance of the low-cost airglow camera cannot exceed that of conventional cooled-CCD imagers. However, the spatial structure of plasma bubbles seen in the OMTIs images are well identified even in the low-cost camera data. In addition, by subtracting 1-h averaged background image from the current image, we succeeded in imaging the detailed structure of plasma bubbles by the low-cost airglow cameras.

We also tried to observe large-scale structures of plasma bubbles by combining the low-cost camera in Ishigaki, another all-sky imager in Tainan, and the VISI instrument of ISS-IMAP. We simply combine 630.0 nm airglow data from these instruments. In the presentation, we introduce two examples of simultaneous observations of plasma bubbles. On February 14, 2015, a plasma bubble was observed at the same time with the low-cost camera in Ishigaki and VISI. On March 13, 2015, same traces of plasma bubbles were imaged simultaneously from Ishigaki and Tainan for a few hours. By investigating these two events, we clarify how the imaged spatial structure of plasma bubbles is dependent on the viewing geometry and discuss the feasibility of large-scale optical imaging of plasma bubbles from multiple stations on the ground and space.

赤道電離圏において、F領域の電子密度が局所的に大きく減少した領域が観測されることがある。この領域のことをプラズマバブルと呼ぶ。プラズマバブルは、周囲との間に極端に大きな電離圏全電子数の勾配と小規模不規則構造を作り出すためGPS測位の精度や安定性に影響を及ぼすことが知られている。従来、プラズマバブルの空間構造を観測する際には、大型の大気光イメージャによる630.0 nm大気光のイメージングが用いられてきた。しかし、観測システムが高価で観測点が少ないため、複数点からの広域撮像は行われてこなかった。安価で簡易な観測システムによってプラズマバブルを観測することができれば、観測点の増加につながり、広域イメージングが可能になると考えられる。

本研究では、安価で可搬性の高い大気光カメラを用いてプラズマバブルの広域ネットワーク観測が行えるかどうかについて、実際の観測に基づいた検証を行った。小型大気光カメラによる観測は、2014年8月26日から石垣（北緯24度、東経124度）にある電子航法研究所の観測施設において実施している。観測機器はカメラ（Watec WAT-910HX）、魚眼レンズ（Fujinon YV2.2*1.4A-2）、中心波長632 nm、半値幅10 nmの光学フィルターによって構成されている。カメラは約4秒の露光時間（時間分解能も同じ）を持ち、毎晩18 JSTから06 JSTまで連続的に観測を行っている。

小型カメラで撮像された大気光画像にはノイズが多く含まれ、プラズマバブルを観測する際の障害となる。これは非冷却CCDカメラを用いているために生じる熱雑音が原因であると考えられる。そこで4秒の原画像を数分にわたって積分しノイズを削減した。また、積分する画像の枚数毎にS/N比（ $S/N=10\log_{10} \sigma_s^2/\sigma_n^2$ ）を見積もった結果、原画像では8.04 dB、10枚積分（40秒）では13.8 dB、20枚積分（80秒）では14.1 dB、30枚積分（120秒）では14.4 dBとなり、積分する時間を長く確保すれば十分なS/N比を確保できることが分かった。但し、プラズマバブルは約100 m/sで移動するため、積分時間を長くすると画像がぼやけ詳細構造の判別が難しくなるという問題が発生する。積分によるS/N比

の向上と処理画像におけるプラズマバブルの見え方を比較検討した結果、30枚積分（120秒）がプラズマバブルの撮像に関しては適切な選択であると判断した。また、同じ観測地点に設置されている大型の冷却 CCD イメージャ（OMTIs）で撮像された画像についても S/N 比を算出した結果、37.3 dB となり、小型カメラで撮像された画像をどれだけ積分しても、冷却 CCD イメージャのパフォーマンスを超えられないことが分かった。しかし、冷却 CCD イメージャで撮像されたプラズマバブルの空間構造は小型カメラでも十分に視認できることから、小型カメラによるプラズマバブルの観測は可能であると考えている。これに加え、連続画像から大気光の背景値を推定し、30枚積分した画像との差分を取ることで、小型カメラによっても、枝分かれ構造などのバブルの詳細な空間分布を可視化することができることが分かった。

以上に加えて、石垣の小型大気光カメラと台湾に設置されている冷却 CCD カメラによる地上観測、ISS-IMAP の VISI による衛星からの光学観測を組み合わせ、バブルの広域イメージングがどの程度可能かについても検証を行っている。観測機器はそれぞれ 4 秒、185 秒、1 秒の露光時間を持っており、今回は波長 630.0 nm の大気光画像を用いた。2015 年 2 月 14 日に石垣の小型カメラと ISS-IMAP VISI によって、2015 年 3 月 13 日には石垣と台湾のイメージャによって、プラズマバブルが同時に観測されている。発表ではそれぞれの事例について、プラズマバブルの形状、速度を解析した結果を報告し、複数地点からの広域イメージングのフィジビリティを検証する。地上の複数地点、もしくは地上と宇宙からプラズマバブルを撮像する場合、視線の方向によって見え方が異なることが予想されるが、異なる 2 地点からの見え方の違いからプラズマバブルの空間構造に関してどのような情報が引き出せるかについて検討した結果も報告する予定である。