

国際宇宙ステーションからの観測のための 広視野大気光・オーロラ撮影装置の開発

Development of the airglow/aurora imager with wide field-of-view for observation from the International Space Station

(地球電磁気・地球惑星圏学会推薦)

代表研究者	京都大学	齊藤 昭則	Kyoto University	Akinori SAITO
協同研究者	東北大学	坂野井 健	Tohoku University	Takeshi SAKNOI
	宇宙航空研究開発機構	山崎 敦	Japan Aerospace Exploration Agency	Atsushi YAMAZAKI

The airglow/aurora imager with wide field-of-view was developed for the observation from the exposed facility of the International Space Station (ISS). From 2012 to 2015, ISS-IMAP (Ionosphere, Mesosphere, upper Atmosphere, and Plasmasphere mapping) carried out the observation of disturbances in the Earths' upper atmosphere from ISS, and found that the wider-field-of view and higher-resolution observation is necessary to elucidate the structures in this region. Based on these results, new mission plan was discussed and new observational instrument was developed to exploit the i-SEEP, a new platform on the exposed facility in the ISS Japanese Experiment Module. The instrument is designed to observe the airglow structures of plasma bubbles in the equatorial ionosphere to monitor the ionosphere, and forecast the outage of the radio communication between satellites and ground-based receivers. The multiple imagers can capture the three-dimensional structures of the Earth's upper atmosphere with high temporal and spatial resolution. An additional in-situ instrument of thermal plasma is proposed to complement the optical remote observation. The small and low-cost airglow/aurora imager can be utilized for the observation on CubeSats, sounding rockets, and autonomous ground-based station besides ISS. The research plan for the 18 months observation from ISS/i-SEEP was proposed.

研究目的

・経緯

代表研究者らは2012年から2015年にかけて国際宇宙ステーション(ISS)の日本実験棟「きぼう」の船外プラットフォームに設置されたポート共有実験装置内にVISIとEUVIという2台の撮影装置を設置して地球超高層大気からの発光現象を高感度・高分解能に捉える観測を実施した。この3年間の観測によって地球超高層大気に多くの波状構造が発生していることが新たに明らかになったが、VISIの観測視野が天底方向に限られているなどの制限から、現象の全体像を

十分に測定することができなかった。そこで、ISSからの新たな観測を実施することで、ISS-IMAPで得られた成果を発展させる必要性を認識し、そのための装置開発を行うために本研究を着想した。

・観測の意義

観測対象とするのは高度80kmから1,000kmにわたる地球超高層大気領域であるが、この領域は人工衛星による宇宙利用に影響を与える宇宙環境であり、この領域で起こる「宇宙天気現象」は宇宙利用システムに大きな影響を与えている。特に、近年は(1)人工衛星の

数の増加、(2) 宇宙利用の高精度化と社会インフラ化、の2点から、従来は問題とならなかった現象であっても、その影響の評価と軽減が必要とされてきている。これらの衛星システムに対して、超高層大気領域での宇宙天気現象は、(A)地上との通信電波への影響、(B)衛星の飛翔への影響、の2点から影響を及ぼしている。特に、(A)地上との通信電波への影響は(2) 宇宙利用の高精度化と社会インフラ化、と併せて影響が大きくなっている。

そして、そのような社会的な環境の変化は、超高層大気領域研究にも変化をもたらしている。従来は、どのような物理過程で現象が起こったのか、という現象の理解を目指していたものが、それに加えて、いつ、どのように起こり、どのように発達・移動・消滅するのか、という予報が必要とされてきている。ICAO(国際民間航空機関)の要請を受けて世界8機関(日本では情報通信研究機構が担当)で整備されているSpace Weather Information Serviceなどもそのような動きの一つであり、宇宙天気現象についても、「天気予報」のように、科学的知識の実社会への活用が求められる段階に入りつつあり、観測も気象観測で行われているように、地上観測に加えて複合的な宇宙空間からの観測が必要とされている。

これらの状況を受けて、本研究では、今後の継続性・発展性も考慮した宇宙空間からの地球超高層大気領域観測ミッションの立案とその核となる観測装置の開発を行った。

研究経過

・観測プロジェクト立案

高度50km以下の成層圏・対流圏領域に対しては、静止衛星・低地球軌道衛星・地上観測による複合的な観測と数値モデルを結合した予測が行われているが、高度80kmから1,000kmにわたる地球超高層大気領域においても、将来的にはこのような観測・研究体制が確立されると想定される。しかしながら現状では特に宇宙空間からの観測が非常に限られている状況である。しかし、米国NASAによって2018年から観測開始された静止軌道におけるGOLD(Global-scale Observations of the Limb and Disk)ミッションによる連続全球観測と、観

測開始が予定されている低地球軌道からのICON(Ionospheric Connection Explorer)衛星による同時観測はこのような複合的な宇宙空間からの観測の先駆けとなるものである。本研究における観測を立案する上では、これらの観測の達成を踏まえたものである必要があり、両ミッションの展開に注目しながら検討が行われた。GOLDミッションは静止軌道からの紫外線による地球全面の撮像であり、夜間の電離圏のプラズマ密度構造と、昼間の下部熱圏の酸素原子・窒素分子密度構造の測定を行うものであり、2018年10月から定常的な観測を行なっている。ICON衛星は高度600kmの低地球高度衛星であり、GOLDと同様の紫外線による狭視野撮像に加えて、電離圏の電場、中間圏の大気温度と風の計測を行うものである。当初は2017年の打ち上げが予定されていたが、打ち上げ装置の不具合により延期され、現在、まだ観測は開始されていないが、準備中である。

これらの先進的かつ大規模な衛星からの超高層大気観測に対して、独自性のある観測を実施するための観測方針の検討が行われ、(1)可視光の撮像、(2)広視野・高解像度(3)赤道域プラズマ・バブルに注力、の3つの方向性がまとめられた。また、撮像観測の欠点を補うために、プラズマのその場計測も組み合わせる事とした。

(1)の理由としては、GOLD/ICONでは紫外線が撮像に用いられているが、これは紫外線撮像では、衛星が日照領域においても観測できるためである。しかし、ICON衛星よりもさらに低高度を飛翔する国際宇宙ステーション(ISS)では、ISSが地球の影に入る時間は十分に長く、その領域では可視光での撮像観測も可能である。可視光撮像の利点としては主に、(1)大気光の発行輝度が紫外線よりも高い事、(2)複数の発光層があることから、高度ごとの変化を捉えることができ、3次元的な構造の測定が可能であること、の2点が挙げられ、ICON/GOLDでは捉えられない現象の測定が期待できる。(2)の理由としては、低高度であるため、視野は限られているが、180度を超える広視野の撮像をすることで広範囲の測定が可能になり、さらに高解像度の撮像とすることで、空間分解能を高めることができる。いずれも、近年急速に高感度化・多画素数化・小型化が進んでい

る民生品の可視光撮像素子を使うことで軽量・小型に実現が可能である。(3)の理由としては、プラズマ・バブルは赤道域において出現頻度が高く、擾乱度が強い電離圏宇宙天気現象であり、GPSなどのGNSS(全地球測位衛星システム)の障害として問題視されており、観測から予測へつなげる必要性が高い現象であるからである。また軌道傾斜角が51度であるISSからの観測に適している現象でもある。

・国際宇宙ステーション船外プラットフォーム

本研究の観測装置は、宇宙航空研究開発機構が日本実験棟「きぼう」の船外プラットフォームで運用している中型曝露実験アダプタ i-SEEP を用いることを想定した。i-SEEP における搭載環境、必要事項、利用可能時期などについて、2017年11月と2018年5月にJAXA 担当者と打ち合わせを行い、調整を行った。i-SEEP への機器搭載料は重量と回収の有無によって定められているが、運用方法によって地上運用費などは異なるため低コストでの実現のための運用方式の検討を進めた [http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/i-seep/]。

これらの情報を受けて、搭載条件、データ転送レートなどの検討を進めた。利用できるISSからのデータ通信帯域は広視野・高分解能の撮像観測に関しては十分ではないため、データ転送レートが観測の視野と分解能を制限することが明らかになった。そこで、i-SEEP では地上への機器の回収が可能であることに着目し、一部のクイックな速報データのみを速時に転送する以外は、撮像観測データは記録装置に保存し、一定期間の観測後に記録装置のみを地上へ回収することで、これまでない広視野・高空間分解能・高時間分解能の超大容量データの観測を実施することとした。これにより、従来の小規模な観測では不可能だった大容量観測データの取得が可能となり、それを生かした、高画素数の撮像素子を用いた小型の撮像観測装置を複数台用いて多波長の観測を行う撮像装置の開発を行った。観測制御装置はISSの与圧環境に搭載し、撮像観測装置の制御とデータ転送を行うと同時にデータ保存装置にデータを保存する。地上—観測制御装置間と観測制御装

置—観測装置間はネットワークが利用可能であるため、従来の衛星観測に使われているような制御システムではなく、地上の無人観測点での観測で使用している汎用的なシステムが可能である。記録メディアとしてはHDDもしくはSSDを用い、半年ごとに観測データ記録ずみのメディア(40Tバイト)を地上に持ち帰ることで大容量データを取得する。

・広視野大気光・オーロラ撮影装置の開発

(1)可視光の撮像、(2)広視野・高解像度(3)赤道域プラズマ・バブルに注力、の3つの方針により、当初想定していた赤外域で高感度であるInGaAsカメラではなく、可視光域での高い感度をもつソニー社製の高感度・高画素数CMOSセンサーを利用する事とした。軽量小型化が可能であり、可動部による機構の複雑化と不具合を避けるために、フィルターを固定し、単波長を測定するカメラを複数使用することによって多波長観測を行う事とした。Fig. 1に見られるように、可視光観測の利点として発光高度の異なる多波長での大気光・オーロラ観測を行うことで現象の3次元構造の観測が可能となることがあるが、地上観測ではフィルター・ターレットを用いて1台のカメラで複数波長の測定を行っている。本装置では、単波長カメラを複数用いることで、装置の機構を単純化できるとともに、それぞれが独立に高時間分解能での撮像が可能となる。宇宙空間の観測では高時間分解能データはデータ転送の制限を受け、測定データが限られるが、本装置では、データを記録装置に保存し、地上へ物理的に回収することでこのような観測形態が可能となる。

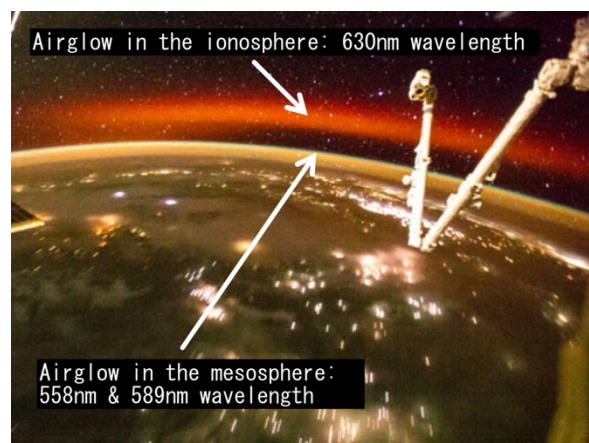


Fig. 1. Airglow imaging from ISS by Nikon D3s

ソニー社製の CMOS センサーとしてはデジタルカメラ α 7S がすでに i-SEEP に設置されて用いられた例があるため検討を行った。同じくソニー社製の CMOS センサーを用いた天体観測用のカメラはさらに小型化が可能であり、それらとバンドパスフィルター、魚眼レンズからなり、180 度の視野で大気光・オーロラの撮像観測が可能な装置を開発した。複数台のカメラによる同時観測を行うことで、高度 250km, 95km, 85km の 3 つの高度の同時測定が可能である。データ呼び出し、観測制御などは与圧環境内の Linux ベースの PC から行い、地上からの運用は最小限にした観測が可能である。小型・低コストでありながら高感度・高解像度かつ運用の容易な装置が開発され、本研究が目的とする ISS/i-SEEP への設置だけではなく、CubeSat クラスの超小型衛星や、観測ロケット、地上無人観測点などでの観測にも応用することができる装置である。

考察

これらの結果を踏まえて、幅広い研究者から意見・提案・批判を受けるために、「宇宙空間からの地球超高層大気観測に関する研究会」という研究会を 2018 年 9 月 12 日に情報通信研究機構 小金井本部にて開催した（参加者 54 名）。ここでの議論も受けて、2021 年 12 月から 2023 年 5 月までの 18 ヶ月間にわたり ISS からの観測を実施する観測プロジェクト案を作成し、2018 年 11 月には日本学術振興会科学研究費補助金基盤(S)として研究プロジェクトの提案を行った。残念ながら不採択であったが引き続き、他の予算も含めて、提案を行ってい

く予定である。観測の実現にはより深い検討と、多くの支援を集めることが必要であると認識している。

参考文献

- ・宇宙航空研究開発機構, 宇宙ステーション・希望広報・情報センター「中型曝露実験アダプター」, <http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/i-seep/>

研究の発表

口頭発表

1. 齊藤 昭則, 宇宙空間からの地球超高層大気観測の国内外の現状, 宇宙空間からの地球超高層大気観測に関する研究会, 小金井, 2018/09/12.
2. 齊藤 昭則, 国際宇宙ステーション(ISS)からの超高層大気観測の可能性, 宇宙空間からの地球超高層大気観測に関する研究会, 小金井, 2018/09/12.

誌上発表

1. Hozumi, Y., Saito, A., Sakanoi, T., Yamazaki, A., and Hosokawa, K., Mesospheric bores at southern midlatitudes observed by ISS-IMAP/VISI: a first report of an undulating wave front, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2018-383, 2018.
2. Nakata, H., A. Takahashi, T. Takano, A. Saito and T. Sakanoi, Observation of equatorial plasma bubbles by the airglow imager on ISS-IMAP, *Progress in Earth and Planetary Science*, Vol. 5, 66-78, doi:10.1186/s40645-018-0227-0, 2018.