

宇宙花火実験で用いる光学フィルタ・観測システムの 開発と検証

柿並 義宏 渡邊 太郎 佐藤 隆雄
嘉賀 雄一 嘉賀多賀子 山本 真行
北海道情報大学

Development of Optical Filters and Observation System for
Space Fireworks

Yoshihiro KAKINAMI , Taro WATANABE , Takao M. SATO
Yuuichi KAGA , Takako KAGA and Masa-yuki YAMAMOTO
Hokkaido Information University

2020年12月

北海道情報大学紀要 第32巻 第1号別刷

〈論文〉

宇宙花火実験で用いる光学フィルタ・観測システムの 開発と検証

柿並 義宏* 渡邊 太郎† 佐藤 隆雄‡ 嘉賀 雄一§ 嘉賀 多賀子¶

山本 真行//

Development of Optical Filters and Observation System for Space Fireworks

Yoshihiro Kakinami* Taro Watanabe† Takao M. Sato‡ Yuuichi Kaga§ Takako Kaga¶

Masa-yuki Yamamoto//

* 北海道情報大学情報メディア学部准教授， Associate Professor, Department of Information Media, HIU

† 高知工科大学システム工学群大学院生， Master course student, School of Systems Engineering, Kochi University of Technology

‡ 北海道情報大学経営情報学部講師， Lecturer, Department of Systems and Informatics, HIU

§ ドリーム・オンライン， Dreamonline

¶ ドリーム・オンライン， Dreamonline

// 高知工科大学システム工学群教授， Professor, School of Systems Engineering, Kochi University of Technology

要旨

衛星観測によりカusp領域熱圏高度 400 km に,局所的な中性大気密度上昇が見つかった。この成因は明らかになっていないが,小さな電場揺らぎによるジュール加熱によりこの密度上昇が形成されるという有力な仮説がある。この仮説を検証するためには小さな電場揺らぎと中性大気風を観測する必要がある。これらを観測する最適な手法は観測ロケットから太陽光を共鳴散乱するバリウムとストロンチウムのガスを放出し,それらを地上から観測することである。これらを利用した,電場と中性大気風を観測する2つのロケット実験, The Cusp Region Experiment 2 (CREX-2) および The Joint Japan-U.S. Cusp Heating Investigation (CHI) が2019年11月に計画され,実験実施条件が満たされたCHIのみが実施された。本研究では,これらの実験で用いる光学フィルタの開発・校正し, Global Navigation Satellite System (GNSS) 時刻で撮影できる観測システムを構築・検証を目的とする。光学フィルタの校正は国立極地研究所の積分球を用いて実施し,撮影画像から放射輝度を測定できるようになった。また,GNSS時刻を用いた撮影システムを構築し,極寒地での運用に耐えうることを確認した。

Abstract

Local enhancement of neutral atmospheric density was found at 400 km altitude of the thermosphere in the cusp region. The cause of the enhancement is still an open question; however, there is a leading hypothesis that Joule heating due to small fluctuations in the electric field can cause the enhancement in density. In order to verify the hypothesis, it is necessary to observe the small fluctuations in the electric field and neutral wind. The best way to observe them is to release barium and strontium gases, which scatter sunlight resonantly, from sounding rockets and observe these gases from the ground. Two rocket experiments to observe the electric field and neutral wind, the Cusp Region Experiment 2 (CREX-2) and the Joint Japan-U.S. Cusp Heating Investigation (CHI), were planned for November 2019. CHI, which satisfied the condition for conducting the experiment, was successfully conducted. The purpose of this study is to develop optical filters for use in these experiments, calibrate them, and develop the system to observe the gases using Global Navigation Satellite System (GNSS) time. We calibrated the optical filters using an integrating sphere at the National Institute of Polar Research, and consequently measured the radiance from the photographed images. Further, we have established an accurate imaging system using GNSS time and have demonstrated that the system can withstand operations in extremely cold regions.

キーワード

宇宙花火 (space firework) 観測ロケット(sounding rocket) カusp(cusp)
熱圏中性大気密度(neutral density in the thermosphere)

1. はじめに

近年、宇宙利用が盛んになり、ロケットを用いて人工衛星が数多く打ち上げられるようになった。これまでは多額の資金が必要なことから国主導でロケット開発が行われてきたが、徐々に民間企業が参入するようになり、2020年5月、米国SpaceX社による有人ロケット打ち上げが成功するまでに至った。北海道でもロケット開発が盛んに行われている。2005年から植松電機が北海道大学と共同でロケット開発を開始したことを始めとし、2019年にはインターステラテクノロジズ社のロケットが日本で初めて高度100 kmに到達するなど、欧米のみならず日本でも民間による宇宙開発が広がってきている。宇宙利用の拡大により、人工衛星の増加に伴って、宇宙ゴミの増加が大きな問題となってきた（外務省, 2020）。2009年には米国通信衛星イリジウム33号とロシア軍用通信衛星コスモス2251号の衝突が起これ、大量の宇宙ゴミが発生した。2000年には、熱圏中性大気密度の予期せぬ変化によりX線天文衛星「あすか」の姿勢が乱され、制御不能に陥る事故が発生している。安全な宇宙利用を推進するためには人工衛星・宇宙ゴミの軌道を正確に予測し、人工衛星同士の衝突や宇宙ゴミと人工衛星の衝突による人工衛星の破損を防ぐ必要がある。人工衛星や宇宙ゴミはその場の大気から抵抗を受け、姿勢や軌道を変化させるため、それらを制御するためには飛翔高度の大気密度を正確に予測することが不可欠である。

しかしながら予測できない中性大気密度の上昇が高度400 km熱圏カスプ領域で衛星観測により見つかった（Lühr et al., 2004）。カスプとは宇宙に対して地球磁場が開いた領域で、容易に太陽風のエネルギーが地球超高層大気に流入できる特殊な領域である。この密度上昇は、現在、衛星軌道計算に考慮されていないため、安全な衛星運用に影響を与える可能

性がある。

中性大気密度上昇と同時に磁場変動が観測され、その推定から磁力線方向に電流が流れていることが分かっている。そのため電流によるジュール加熱によって中性大気密度上昇がもたらされると考えられている。下層の高度200 km付近では中性大気密度の低下が見つかっている（Clemmons et al., 2008）ことから、加熱自体はF層（高度300 km付近）ではなく、オーロラ発生時に最も強いジュール加熱が起こるE層（高度100 km付近）で起こっていると予想される。

この中性大気密度上昇の原因を確かめるための数値実験が行われてきた。主な要因として考えられているのが降下電子によるジュール加熱、カスプからのイオン流出によるジュール加熱、粒子による直接加熱とジュール加熱の組み合わせであるが、地球全球モデルではいずれも十分な上昇流が得られていない（Schlegel et al., 2005）。領域を限ったモデルでは再現されるものの、通常観測されるものより大きな電場が要求される（Deng et al., 2013）。一方、水平解像度20 kmの高解像度領域モデルにおいて、100 km以下の小さなスケールの電場揺らぎを再現すると、観測に合致するような中性大気密度上昇が再現されることが示された（Brinkman et al., 2016）。Hurd and Larsen（2016）は観測ロケットから放出したバリウムを用いて、小さなスケールの電場によるジュール加熱を見積もり、上昇流を生み出すのに十分大きな加熱を得られる可能性を指摘した。しかし、この研究は1980年代にフィルムカメラを用いて撮影したデータを用いているため、精度が十分でなく、小さなスケールの電場は十分な議論ができていない。これらの論争に決着をつけるため100 km以下の小さなスケールの電場揺らぎを計測することが鍵である。ジュール加熱は電場の2乗に比例するため、たとえ平均電場がゼロであっても、変動成分が大きな役割を果たす。レーダーなどの地上観測では決まった場所を計測するオ

イラー的な観測しかできないため、小さなスケールの電場揺らぎの計測は難しい。小さなスケールの電場を計測するためには、流れに乗ったラグランジュ的な観測が必須である。

理論的な予測に対し、観測的な裏付けを与えるためのロケット実験が2014年にノルウェー領スヴァールバル諸島で行われた (the Cusp Region Experiment, 以下 CREX-1)。この実験ではバリウム (Ba) とストロンチウム (Sr) を気化させ、観測ロケットから放出した。Ba は太陽極端紫外光 (EUV) を受け、すぐにイオン化する (Ba^+) が、Sr は中性のままである。Sr, Ba, Ba^+ ともに太陽光を受け、特定の波長の光で共鳴散乱する。Ba は 553.5 nm, Ba^+ は 455.4 nm および 614.2 nm, Sr は 460.7 nm である。このようなガス放出実験は放出ガスが太陽光を散乱し、あたかも宇宙に花火を上げたように見えることから宇宙花火実験と呼ばれる。地上複数地点から発光雲を観測し、それらの位置を決定する。その時間変化から中性大気風速およびイオンドリフト速度を得ることができる。CREX-1 ではロケットの打ち上げ自体は成功し、Sr および Ba^+ の発光雲の計測には成功したが、目的のカusp領域にガスを放出できず、中性大気密度上昇の解明には至らなかった。

熱圏中性大気密度上昇を含め、カusp領域での様々なスケールでの加熱、荷電降下粒子による熱圏・電離圏変動を解明するための大型国際共同研究プロジェクト The Grand Challenge Initiative Cusp Project (GCI) が企画された (GCI website, 2020)。この一連のロケット実験の中で CREX-1 を補うプロジェクトとして2019年に2つのロケット実験が計画された。米国アラスカ大 Conde が研究責任者とし実施する実験 (the Cusp Region Experiment 2, 以下 CREX-2) および米国クレムソン大 Larsen が研究責任者とし実施する日米共同実験 (The Joint Japan-U.S. Cusp Heating Investigation, 以下 CHI) である。CREX-1 での失敗を踏まえて、CREX-2 ではノルウェー・アンドーヤから、

CHI ではスヴァールバル諸島ニーオルスンからロケットを同時に発射し、カusp領域広範囲にガスを放出することで確実にカuspを捉え、カuspでの中性大気風、電場の計測を行う (図1)。

本研究ではこれらの実験に用いる光学フィルタを開発・検証するとともに観測システムを構築・検証することを目的とする。

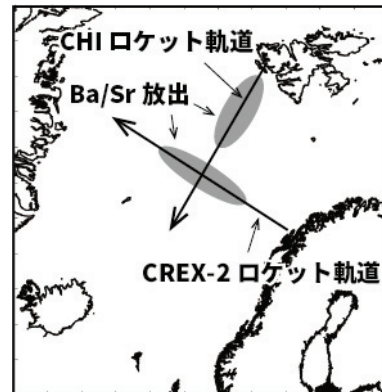


図1 ロケットの軌道と Ba/Sr 放出位置。矢印がロケットの軌道、グレーハッチが Ba/Sr 放出予定域を示す。

2. カメラ露光時間の検証

これまでの宇宙花火実験で開発した特殊なテレセントリックレンズ (写真1) が EF マウントであること、発光雲が暗いことから高い ISO 感度を有すること、比較的安価なモデルであること、後述する観測システムで用いるソフトウェアから認識できるなどの条件から、Canon EOS Kiss X9i を観測用カメラとして選定した。市販カメラに利用される撮像素子は赤外線領域にも感度があり、そのまま撮影すると赤みが強い画像になってしまうため、赤外線カットフィルタが装着されている。本実験では赤色領域の観測を行うことから、既製品から赤外線カットフィルタを除去する改造を施した。

発光雲が暗いため高い ISO 感度で観測したとしても露光時間が 30 秒程度まで必要になる場合がある。また、観測の時間分解能を高

めるために撮影の時間間隔は可能な限り狭めたいという要求がある。最適な撮影間隔を見つけ出す過程で、カメラの設定上の露光時間と実際の露光時間のずれが顕著に生じることが判明した。メモリへの書き込み時間等を考慮しつつ、時間分解能を上げるには正確な実露光時間を用いて撮影間隔を決定する必要がある。これに加え、後述する感度特性を考慮するうえでも正確な露光時間を調べる必要がある。



写真1 実験に用いたテレセントリックレンズとカメラ。

まず、カメラの露光動作を確認するためにレンズを外した状態でビデオ撮影を行った。写真2はカメラのシャッターの開閉の様子を示したものである。同時にカメラ動作音を記録した。動画解析から露光を行っているタイミングが判明した(写真2c)。

カメラ動作音データ(図2)を見ると、いくつかの動作音が記録されている。動画と音のタイミングを比較することで、露光の開始・終了の音が一番大きい音であることが分かった。そこで、動作音データのピーク間を露光時間とし、その時間を100分の1秒単位で計測した。計測は各露光時間に対し8回行い、100分の1秒未満の誤差しか生じていないことが確かめられた。計測された、平均露光時間(以下、計測露光時間)を表1に示す。露光時間が4秒まではカメラ設定表示の露光時間(以下、表示露光時間)と計測露光時間に違いは見られないが、それ以上の表示露光時間の設定では表示露光時間と計測露光時間

に差があることが分かった。差は露光時間が大きくなるほど大きくなる傾向にある。メーカーが問い合わせに応じていないため、これらの差が生じる理由は定かではない。

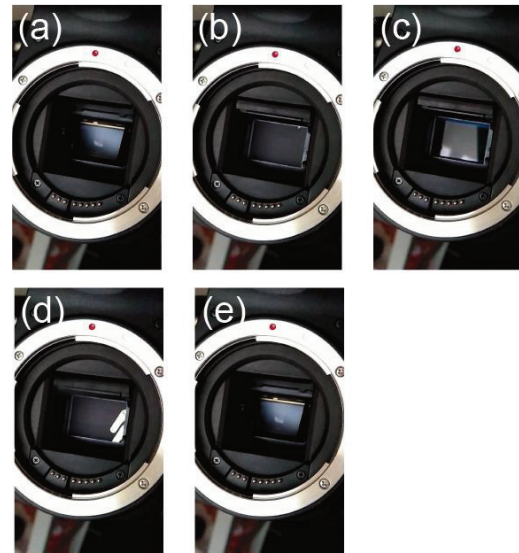


写真2 カメラシャッター開閉の様子。(a) ミラーアップ、(b) シャッター幕アップ、(c) 露光、(d) シャッター幕ダウン、(e) ミラーダウン。

表1 設定表示露光時間と計測された露光時間。計測露光時間は8回の計測の平均。

表示露光時間 (秒)	計測露光時間 (秒)
1	1.00
2	2.00
4	4.00
6	6.36
8	8.01
10	10.09
13	12.71
15	16.02
20	20.18
30	32.04

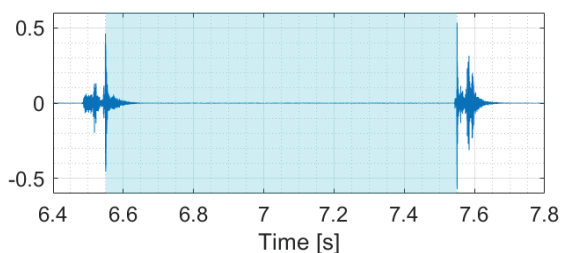


図2 カメラ動作音の波形例。青ハッチ部分を実露光時間とした。

3. 光学フィルタの開発と検証

CHI および CREX-2 での観測対象はカスプ領域である。カスプおよびその周辺ではオーロラが発生する。弱いオーロラが発生することが実験実施の条件の一つでもあるため、発光雲以外の映り込みが必ず発生する。また、CHI および CREX-2 の同時打ち上げが成功した場合、多くの発光雲が重なる可能性がある。Sr および Ba⁺を確実に分離し、中性大気風とイオンドリフトを計測するためにはフィルタを用いて両者を見分ける必要がある。なお、Ba も発光するが、すぐにイオン化して見えなくなるため、今回は計測しない。

Ba⁺は 455.4 nm および 614.2 nm で発光する。一番明るい発光は 455.4 nm であるが、Sr の 460.7 nm と非常に近い。両者を分離するためには Sr, Ba⁺ともに半値幅が 4 nm 程度の非常に狭いフィルタを要求される。一方、Ba⁺ 614.2 nm の発光は 2 番目の明るさとは言え、455.4 nm に近い明るさがあることが CREX-1 の分光観測で確認されている。半値幅を狭くすると開発費用が高額となることから、予算との兼ね合いで、半値幅を比較的広くとれる波長として、Sr 用として 460.7 nm, Ba⁺用として 614.2 nm を選び、半値幅 6 nm のフィルタを開発した。

光学フィルタは光の入射角によって透過特性が変わり、フィルタに対して垂直方向から外れるほど短い波長の光を通すようになる。入射光を並行にするテレセントリックレンズを用いているが、視野周辺部は 11 度ほどの角

度が設計上生じる。その角度を考慮して、目的の波長が計測できる必要がある。開発した Sr フィルタの波長特性を図 3, Ba⁺フィルタの波長特性を図 4 に示す。どちらのフィルタも入射角が 0~11 度の範囲で目的の波長の光の透過率が 95%を超えており、実験に支障ない性能であることが確認できた。

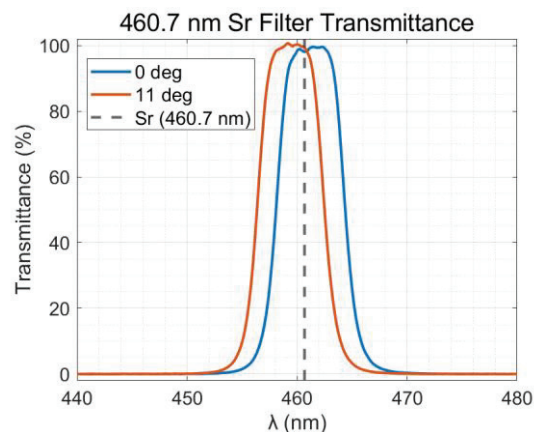


図3 Sr用フィルタの波長透過特性。青が入射角0度の場合、赤が入射角11度の場合の結果を示す。

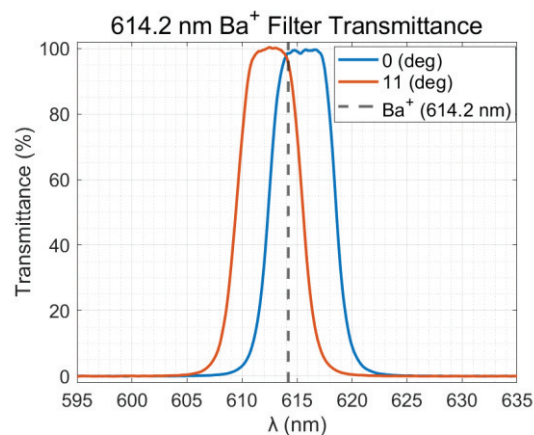


図4 Ba⁺用フィルタの波長透過特性。青が入射角0度の場合、赤が入射角11度の場合の結果を示す。

4. 光学フィルタとカメラの感度特性

カメラ画像からのみでは発光の輝度値を知ることにはできない。そのため、異なる ISO 感

度・露光時間での発光強度の相対比較さえ容易ではなくなる。観測画像から輝度の絶対値を計測できるようにすることで、物理量への変換が容易になる。また、カメラ、レンズ等が更新された場合にも容易に適切な観測条件を設定することが可能となる。

発光の強度を正しく計測するために国立極地研究所が所有する積分球を用いた。積分球では球面内部に反射率と拡散性に優れた素材をコーティングすることで、空間的に均一な強度の光を発生させることができる(写真3)。カメラを光学台や三脚にセットし、積分球内を撮影し、明るさに対するカメラ画像の輝度値を計測する。

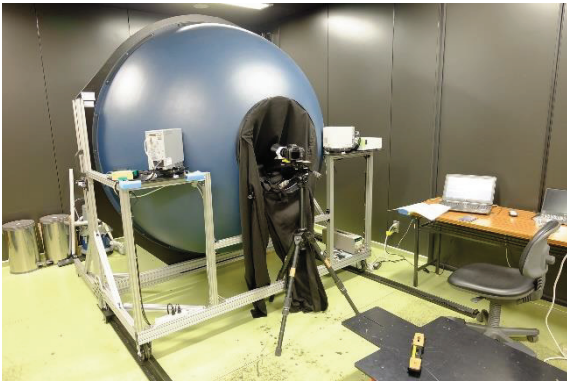


写真3 国立極地研究所の積分球。カメラを三脚で固定し、暗幕で覆って実験した。

実験実施条件は以下の通りである。

- ・光源の明るさ [$\mu\text{W}/\text{Sr}/\text{m}^2/\text{nm}$]
0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2
- ・ISO 感度
200, 400, 800, 1600, 3200, 6400, 12800, 25600
- ・表示露光時間 [s]
1, 2, 4, 6, 8, 10, 13, 15, 20, 30

すべての条件の組み合わせごとに3枚ずつ撮影を行った。値は各 Raw 画像データ (jpeg 画像に変換する前の生画像データ) の Black Level (黒を示す Raw 画像の値) と White Level (白を示す Raw 画像の値) の差で規格化した

輝度値を用いた。周辺減光があるので、画像中心から半径 600 ピクセル内のデータを選び、平均した。

光源の明るさを $0.5 \mu\text{W}/\text{Sr}/\text{m}^2/\text{nm}$ とした場合での、計測露光時間に対する画像の輝度値の変化を調べた。図4は Sr 用フィルタ、図5は Ba^+ フィルタを取り付けたカメラでの計測結果である。Sr 用では Raw 画像の青の輝度値である B 値、 Ba^+ 用では赤の輝度値である R 値を用いた。どちらの結果とも計測露光時間が長いほど、ISO 感度が高いほど輝度値が高くなり、計測露光時間に対して線形の関係にあることが分かった。この測定結果を用いて観測された発光雲の放射輝度を求めることができる。

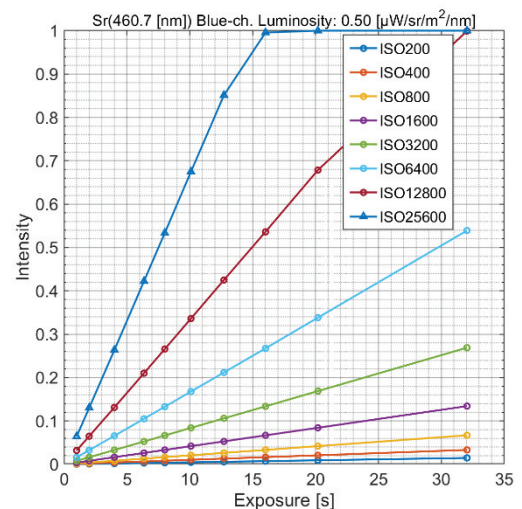


図4 Sr 用フィルタを取り付けたカメラの計測露光時間に対する感度特性。規格化した B 値を利用。

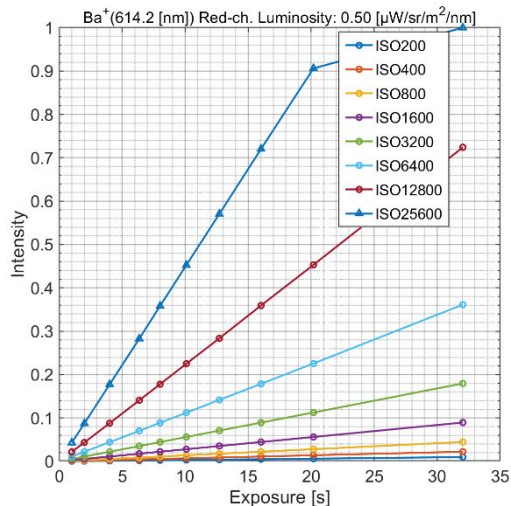


図 5 Ba⁺用フィルタを取り付けたカメラの計測露光時間に対する感度特性。規格化した R 値を利用。

5. 観測システム

発光雲を複数地点から追跡することで上空の風を測る実験であるため、写真の撮影時刻がすべての観測点で一致している必要がある。宇宙花火実験を実施し始めた 2007 年当時は GNSS (Global Navigation Satellite System) による計時は一般的になりつつあったが、その時刻を使ってカメラをコントロール、撮影する技術はなかった。発光雲は時間とともに明る

さが変化するという特性があるため、ISO 感度や露光時間を時間とともに変更しなければならないという難しさもある。実験開始当時は、ISO、露光時間の設定を手動で変えながら、GNSS 時刻を見て、人の手でシャッターを押すという古典的な方法がとられていた。人の手が介在することで人由来の癖、押し忘れ、押し間違いがあり、しばしばデータ欠損が生じることがあった。

これらの問題点を解消する手段としてソフトウェア Solar Eclipse Maestro (Solar Eclipse Maestro Website, 2020) を導入した。Solar Eclipse Maestro では観測スクリプトに観測時間、ISO 感度、露光時間を記述することで、スクリプト通りの観測を実施できる。1 台の PC で複数台のカメラを別々の観測条件で観測することが可能である。GNSS アンテナを取り付けることで正確な時刻で撮影することができる。

Solar Eclipse Maestro をインストールした PC とカメラ・GNSS アンテナは USB で接続する。発光雲の観測を行うスヴァールバル諸島ニューオルスンとロングヤービンは北極圏に位置する場所であるため、観測を行う 11 月、12 月は降雪があり、氷点下になる。そのため PC

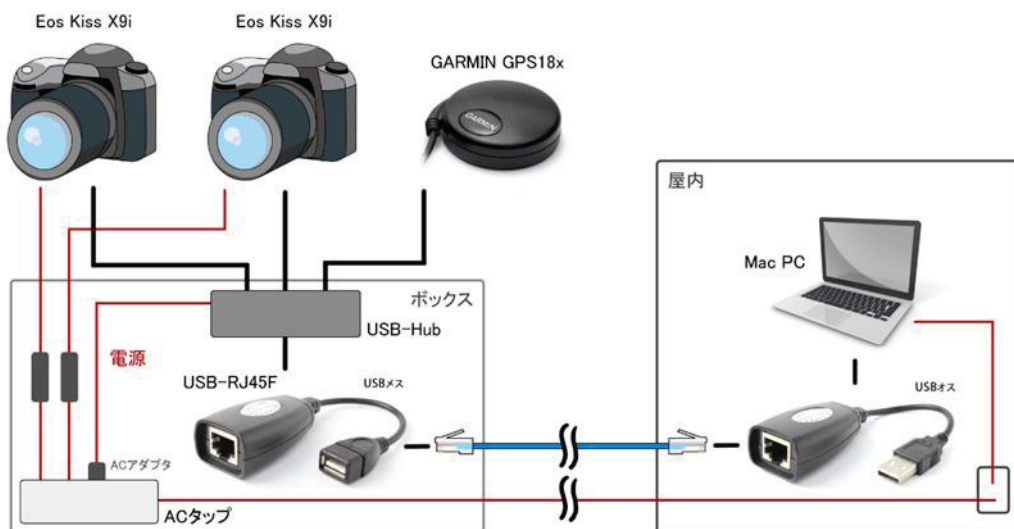


図 6 観測システム概要。USB を Ether ケーブルに変換することで必要な長さを確保した。

は屋内、観測用カメラは屋外に設置する必要がある。USB の規格上の最大距離が 5 m であるため、それらを直接つなげることはできない。USB ケーブルを延長するには USB ハブを用い、USB ケーブルを多段でつなげる、USB リピーターケーブルを使う、などの方法がある。しかし、電源の確保、ケーブルの取り回しの容易さを考慮し、USB を Ethernet ケーブルに変換、延長し、再度 USB に戻し、USB ハブを介してカメラ 2 台と GNSS アンテナに接続する方法を採用した (図 6)。

ニーオルスンの観測地点では Ethernet ケーブルと電源ケーブルを通気口から屋外へ引出し、カメラと PC を接続した (写真 4)。ロングヤービンの観測地点では車庫内に PC を設置し、シャッターの隙間から Ethernet ケーブル、電源ケーブルを屋外へ引き出した。



写真 4 ニーオルスン・ラッペン観測所での設置の様子。

屋外に設置される USB ハブ、USB-Ethernet 変換コネクタ、OA タップは防水目的ですべてケースに収めた。カメラは観測時のみ屋外へ設置した。

通常、寒冷地での写真撮影ではカメラを保温することで結露を防ぐ。しかしカイロを用いて保温したところ、レンズ以外のところに大量の結露が発生することが分かった。結露はカメラ・レンズの温度が大きく変わると発生することからなるべく外気温に近い場所で保管し、温度差をなくしたところ、結露の問題が生じないことが分かった。

発光雲観測は成功し、これらのシステムは

寒冷地で問題なく動作することが確認できた。

6. まとめ

本研究ではノルウェー領スヴァールバル諸島で実施された 2 つの宇宙花火実験に必要なカメラ、光学フィルタ、観測システムの開発及び検証を行った。光学フィルタは必要な性能を備えていることが確認された。また、光学系の感度校正を行い、宇宙花火の放射輝度を算出できるようになった。また、正確な時刻で撮影できるシステムを構築し、寒冷地で性能を発揮できることを確認した。

観測ロケットは CHI のみ 2019 年 12 月 10 日に打ち上がり、観測に成功した。実験条件が合わなかった CREX-2 は 2021 年 11 月に延期されることとなった。

本研究で得られた感度特性を利用し、CHI で得られたデータを解析し、延期された CREX-2 に備える予定である。

謝辞

本研究は北海道情報大学学内共同研究費および科研費 (19K03954) の助成を受けたものである。また、国立極地研究所の協力を得てカメラ・フィルタ校正実験および宇宙花火の観測が実施された。ここに謝意を示したい。

参考文献

- Brinkman, D. G., R. L. Walterscheid, J. H. Clemmons, J. H. Hecht (2016), High - resolution modeling of the cusp density anomaly: Response to particle and Joule heating under typical conditions, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1002/2015JA021658.
- Clemmons, J. H., J. H. Hecht, D. R. Salem, and D. J. Strickland (2008), Thermospheric density in the Earth's magnetic cusp as observed by the Streak mission, *Geophysical Research*

Letter, doi:10.1029/2008GL035972.

Deng, Y., T. J. Fuller-Rowell, A. J. Ridley, D. Knipp, and R. E. Lopez (2013), Theoretical study: Influence of different energy sources on the cusp neutral density enhancement, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1002/jgra.50197.

外務省「宇宙ゴミを減らせ！～国際的な宇宙空間の利用とルール作り」
<https://www.mofa.go.jp/mofaj/press/pr/wakaru/topics/vol85/index.html> (2020年6月12日アクセス)

Grand Challenge Initiative,
<https://www.andoyaspace.no/the-grand-challenge-initiative/> (2020年6月12日アクセス)

Hurd, L. D and M. F. Learsen (2016), Small-scale fluctuations in barium drifts at high latitudes and associated Joule heating effects, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1002/2015JA021868.

Lühr, H., M. Rother, W. Köhler, P. Ritter, and L. Grunwaldt (2004), Thermospheric up-welling in the cusp region: Evidence from CHAMP observations, *Geophysical Research Letter*, 31, L06805, doi:10.1029/2003GL019314.

Schlegel, K., H. Lühr, J.-P. St.-Maurice, G. Crowley, and C. Hackert (2005), Thermospheric density structures over the polar regions observed with CHAMP, *Annales Geophysicae*, 23, 1659–1672, doi:10.5194/angeo-23-1659-2005, 2005.

Solar Eclipse Maestro
http://xjubier.free.fr/en/site_pages/solar_eclipses/Solar_Eclipse_Maestro_Photography_Software.html (2020年6月17日アクセス)