

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K21900

研究課題名（和文）船舶搭載用の大気光・オーロラカメラ開発による電離圏における観測空白域の解消

研究課題名（英文）Development of ship-borne all-sky imager system for the airglow and aurora observations

研究代表者

齊藤 昭則（Saito, Akinori）

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10311739

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、船舶に搭載可能な大気光・オーロラカメラを開発し、観測の空白域である海洋上空の電離圏の観測を実施した。従来、大気光の観測には長時間の露光時間を必要とするため揺れがある船舶からの観測は不可能であったが、本研究では、小型CMOSカメラをジンバルに搭載することで揺れを打ち消し、船舶からの大気光とオーロラの観測を可能にする機器を開発した。このカメラを南極観測船「しらせ」に搭載し、2019年11月から2020年3月、2020年11月から2021年2月、2021年11月から2022年3月の3期間において、日本と南極昭和基地の往復の航路上から電離圏の撮像観測を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年GPSや「みちびき」などのGNSSによる衛星測位について高い精度と信頼性が求められており、GNSSの電波に対する電離圏構造が与える影響・障害が問題になっている。電離圏構造の移動する領域は5,000km以上に及ぶため、陸域上空の限られた観測ではその全体像の把握は不可能であり、海域上空の電離圏観測手段の開発が必要とされている。本研究では、比較的小型でありながら高精度・広範囲の電離圏撮像観測が可能な船舶搭載用の大気光・オーロラカメラの開発に成功し、日本と南極昭和基地の往復の航路上において観測を実施することでその実用性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：This study developed a set of all-sky imagers that can be installed on a ship to observe the ionosphere over the oceans, which is a void area for observation. Since the ionospheric structures spread over an area of more than 5,000 km, it is impossible to obtain a complete picture of the ionospheric phenomena by limited observations over land. Ionospheric observation techniques over ocean areas is needed. Because of the faint emission of the airglow, the airglow imagers for the ionospheric observations require long exposure time. In this system, the imagers were mounted on a gimbal to compensate for the movements and vibrations of the ship. The system was installed on the Antarctic research vessel, "Shirase", and carried out the observations during its cruises between Japan and the Syowa station, Antarctica for three periods: November 2019 to March 2020, November 2020 to February 2021, and November 2021 to March 2022.

研究分野：超高層大気物理学

キーワード：電離圏 中間圏 大気光 オーロラ 船上観測 南極観測船「しらせ」

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は電離圏の水平 2 次元の構造の解明に注目し、新しい観測技術を開発しながら研究を進めてきた。多数の GNSS 受信機データから電離圏全電子数の水平 2 次元分布を算出し、電離圏の擾乱構造を検出する手法は、研究代表者らが日本の GNSS 受信機網 GEONET のデータを用いて開発し、その後広く用いられている。現在では全世界の GNSS 受信機網データを用いて、地磁気嵐などを原因として発生する電離圏擾乱を観測し、その変動の物理過程の解明及び数値シミュレーションとの比較が行われている。しかし陸域上空は GNSS 受信機網の展開によって急速に観測範囲が広まりつつあるが、海洋上空は島嶼部周辺を除き広大な観測の空白域となっており、今後も観測が困難な領域となっている。

この観測空白域の問題に対するため、研究代表者らは 2012 年から 2015 年まで国際宇宙ステーションからの電離圏撮像観測 ISS-IMAP ミッションを実施した。これにより陸域上空・海域上空の区別なく全球的な電離圏の観測が行われたが、宇宙からの観測は期間も台数も限られており、継続的かつ広範囲な観測ができない点が課題として明らかになった。このような観測空白域となる海域上空の観測としては、これまでも船舶による大気光カメラによる海洋上空の撮像観測が検討されていたが、中低緯度域の大気光輝度が低いため、高感度な観測を行うためには 10 秒程度の露出時間を必要としていた。そのため高精度な観測のためには、露出時間以下の時間内での船舶の揺動を打ち消す機構が必要であるが、従来の観測カメラは長さ 1m 以上と比較的大きなものであるため、カメラと制振機構を含めると大規模な構造となり船舶からの大気光・オーロラの撮像観測は実施されてこなかった。

しかし民生用光学センサーは大きく発展しており、観測ロケット搭載用のオーロラカメラとして研究分担者が採用した最新のセンサーを用いたカメラは、感度、解像度共に十分でありながら十分に小型であり、ジンバルに搭載して、揺れを打ち消すことも容易であることから、船舶搭載用の大気光・オーロラカメラを着想し、本研究で実施した船舶搭載用の大気光・オーロラカメラの開発を実施した。

## 2. 研究の目的

本研究は、船舶に搭載可能な大気光・オーロラカメラを開発し、観測の空白域である海洋上空の電離圏の観測を実現することを目的とした。従来、大気光の観測には長時間の露光時間を必要とするため揺れがある船舶からの観測は不可能であったが、本研究では、近年発展が目覚ましい民生品の小型 CMOS カメラをジンバルに搭載することで揺れを打ち消し、船舶からの大気光とオーロラの観測を可能にする機器の開発と観測を実施した。

近年 GPS や「みちびき」などの GNSS による衛星測位に高い精度と信頼性が求められており、GNSS の電波に対する電離圏構造が与える影響・障害が問題になっている。電離圏構造の移動する領域は 5,000km 以上に及ぶため、陸域上空の限られた観測ではその全体像の把握は不可能であり、電離圏構造を観測し GNSS へ与える影響を把握し、障害発生の警報を出すためには海洋上空での広範囲な電離圏観測は意義が大きい。

### 3. 研究の方法

研究は(1)装置開発、(2)観測実施の2点からなり、(1)により開発したカメラを用いて(2)による船舶上での観測を実施し、そこで得られた知見をもとに(1)の開発に反映させる、という形で合計3回の装置開発と観測実施を繰り返し、船舶搭載用の電離圏観測システムを完成させた。

#### (1) 装置開発

高感度小型 CMOS カメラと 3 軸制御ジャイロ機構を組み合わせ、コンパクトで、揺れが激しい船舶で観測が可能な全天大気光・オーロラカメラ装置を開発した。装置開発の概要を以下のようにする。

(1-1) 光学カメラの開発：検出器には高感度・低雑音特性の CMOS センサーを使用し、冷却することで長時間露光を可能とした。大気光の光量は微弱なため、20 秒程度の露光時間を必要とする。これに魚眼レンズと干渉フィルターを取り付けることで、小型軽量でありながら、電離圏の酸素イオンに発光量が比例する波長 630nm 大気光とオーロラや水酸基大気光を撮像することができる光学カメラとした。

(1-2) 3 軸制御ジンバル機構：長時間露光時に船舶の揺動による「ブレ」をなくすために、このカメラに 3 軸制御ジンバル機構を取り付けた。これはジャイロと駆動モータによる 3 軸制御ジンバル機構で、ドローン観測や、車・バイク搭載カメラ用の市販品を用いた。本カメラは軽量であるため、民生品でも十分な精度で姿勢安定制御することが達成された。この組み合わせにより、船舶の揺れを除去し、20 秒間程度の露光時の詳細画像分解能を可能となった。

(1-3) 信号処理・制御・観測データ保存部の開発：カメラ及びジンバルの制御については、甲板上に設置した耐候カメラケース内に設置した小型 PC と、船舶室内に設置した PC との連携によって行なった。船舶室内に設置した PC のみによる制御とすると、PC の動作環境が安定していることと比較的大型の PC が使用できるため、動作は安定するが、カメラとの USB ケーブルによる接続が不安定になることがあった。一方、耐候カメラケース内に設置した PC での処理量を増やすと、容量の限られているケース内のため小型なものしか使用できず、温度環境の変化が激しいため動作が不安定になることがあった。船舶室内に設置した PC は、観測データの保存と、そこから抽出した速報(Quick Look)データの作成とメールによる観測報告も行なった。これらにより、研究代表者らは船舶に搭乗することなく観測状況の確認が行えた。

(1-4) 耐候カメラケースの開発：これらのカメラユニット、3 軸制御ジンバル機構、小型 PC は、アクリルドームをもつ耐候ケースに収納された。ケースは、温度調整制御のための温度計・ヒーターとファンを持ち、内部の装置の安定動作を可能とした。

#### (2) 観測実施

観測の実施は、国立極地研究所の南極観測船「しらせ」に搭載して行なった。2019 年 11 月 12 日から 2020 年 3 月 21 日までは第 61 次南極地域観測隊、2020 年 11 月 20 日から 2021 年 2 月 21 日までは第 62 次南極地域観測隊、2021 年 11 月 10 日から 2022 年 3 月 26 日までは第 63 次南極地域観測隊の協力を得て、日本と南極昭和基地の往復の航路上において観測が実施された。また、これらの日本と南極間の航海の前には、日本周辺海上においても試験観測を行なった。観測実施としては自動での運用を目指したが、不具合時などには南極地域観測隊による協力を得て、対応を行なった。また、GNSS 受信機による電離圏観測も同時に行い、全天大気光・オーロラカメラ装置による電離圏観測の補助データとした。

#### 4. 研究成果

開発された船舶搭載用大気光・カメラは南極観測船「しらせ」の甲板上に設置され、日本と南極昭和基地間の航海において海上からの電離圏撮像観測を実施した。その設置の様子を図1に示した。これは第62次南極地域観測隊による航海で使用されたものであり、視野角180度の魚眼レンズと、波長630nmと670nmを中心波長とするフィルターを装着した2台のカメラがジンバルに搭載され、耐候カメラケースに収納されている。船舶の揺動を打ち消すジンバルの可動域を考えケース及び上部のアクリルドームは大きめのものとなっている。空調用ダクトが取り付けられ、耐候カメラケース内が、赤道域の高気温領域でも稼働可能な温度となるようにされている。電源ケーブル及びネットワークケーブルが船内の観測室内に接続されている。第63次南極地域観測隊による航海では、同様に2台のカメラ（波長630nmと760nm）による観測が行われたが、第61次南極地域観測隊による航海では、1台のカメラ（波長630nm）のみによる試験観測であった。

船舶搭載用大気光・カメラによる観測例を図2に示した。これは波長630nmカメラの観測であり、右上部に見られる発光はオーロラによるものである。下部に線状に見られる発光は船舶の照明によるものであり19秒間の露光時間の間の船の揺動により、画像内では実際の光源の大きさよりも広がって見えている。カメラが船舶に固定されている場合には、このような船舶の構造物の「ぶれ」は画像内に生じないため、ジンバルによって揺動の軽減が行われ、カメラは船舶の揺動から切り離されていることがわかる。このことは、画像内で見られる星の「ぶれ」が、船舶の構造物の「ぶれ」よりも十分に小さいことから判別でき、カメラは船の揺動に関わらず露光時間内にほぼ同一方向の観測ができている。また、カメラ視野は船舶の移動とジンバルによる姿勢制御のため撮像毎に変化しており、そのため、各撮像データ毎にカメラ観測方向の決定が必要である。そのため、画像内の船舶構造物を自動認識することで、船舶に対するカメラの姿勢を決定し、船舶の姿勢情報を加えることで撮像視野方向を決定した。観測された画像データを輝度データに変換するためには、国立極地研究所内の光学校正室を用いて周辺減光などのレンズ感度やフィルター透過率を考慮したカメラ感度などの測定を観測実施の前後において行った。

3回にわたる観測の実施とその結果を受けたシステムの改善によって、低緯度域から高緯度域までの広い範囲での自動観測が可能な船舶搭載用大気光・カメラシステムを作り上げ、海上からの電離圏観測を実施することができた。今後は、他の船舶に搭載し、他の海域における観測を実施するなどの展開を進めていく予定である。

**謝辞：**本研究の開発及び観測は、第61次南極地域観測隊、第62次南極地域観測隊、第63次南極地域観測隊、国立極地研究所南極観測センター、国立極地研究所（江尻省氏、西山尚典氏）、電気通信大学（津田卓雄氏、穂積裕太氏、青木猛氏）、情報通信研究機構（直井隆浩氏、永原政人氏）の協力を得て実施された。

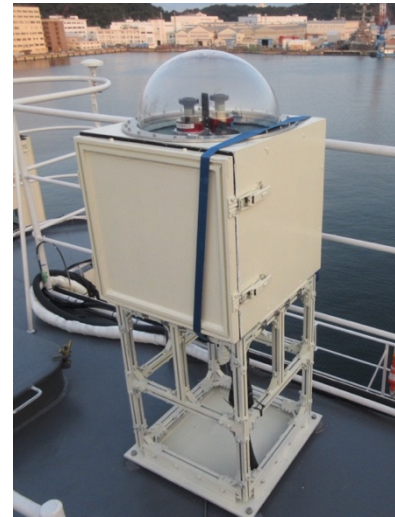


図1:「しらせ」甲板上に設置された船舶搭載用大気光・オーロラカメラ

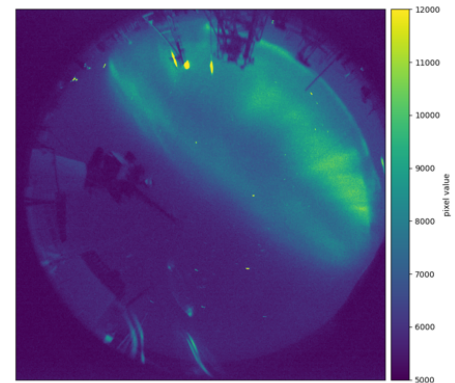


図2: 船舶搭載用大気光・オーロラカメラによる観測例: 2021年11月29日16:00UT

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yamashina, Saki, Akinori Saito, Takeshi Sakanoi, Yuta Hozumi, Takuo T. Tsuda, Takeshi Aoki, Takahiro Naoi, Masato Nagahara, Mitsumu K. Ejiri, Takanori Nishiyama
2. 発表標題 Development of image correction system for the all-sky imager onboard Antarctic Research Vessel "Shirase"
3. 学会等名 The 12th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sakanoi, Takeshi, Yamashina, Saki, Yuta Hozumi, Takuo T. Tsuda, Takeshi Aoki, Takahiro Naoi, Masato Nagahara, Akinori Saito, Mitsumu K. Ejiri, Takanori Nishiyama
2. 発表標題 Multi-wavelength auroral imaging observation with attitude-stabilized all-sky imagers on Shirase
3. 学会等名 The 12th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山科佐紀、齊藤昭則、坂野井健、津田卓雄、青木猛、江尻省、西山尚典、直井隆浩、永原政人、穂積裕太
2. 発表標題 南極観測船「しらせ」における大気光・全電子数観測
3. 学会等名 第150回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山科佐紀、齊藤昭則、坂野井健、津田卓雄、穂積裕太、青木猛、江尻省、西山尚典、直井隆浩、永原政人
2. 発表標題 南極観測船「しらせ」搭載イメージャーによる大気光・オーロラ観測
3. 学会等名 中間圏熱圏電離圏研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂野井健、津田卓雄、穂積裕太、齊藤昭則、山科佐紀、直井隆浩、永原政人、江尻省、西山尚典
2. 発表標題 しらせ搭載の姿勢安定全天二波長同時イメージャーによるオーロラ・大気光の2019-2021年の観測成果
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山科佐紀、齊藤昭則、坂野井健、津田卓雄、穂積裕太、青木猛、江尻省、西山尚典、直井隆浩、永原政人
2. 発表標題 しらせ搭載姿勢安定高精度イメージャーのイメージ処理システムの開発と精度評価
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂野井 健、八木 直志、穂積 裕太、津田 卓雄、青木 猛、齊藤 昭則、直井 隆浩、西山 尚典、江尻 省
2. 発表標題 しらせ搭載全天630nmイメージャーによるオーロラ・大気光観測の初期結果
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Sakanoi, Takuo T. Tsuda, Yuta Hozumi, Takeshi Aoki, Akinori Saito, Takahiro Naoi, Masato Nagahara (NICT), Mitsumu K. Ejiri, Takanori Nishiyama
2. 発表標題 Aurora and airglow observations with the multi-wavelength all-sky attitude-stabilized imagers and GNSS receiver on Shirase
3. 学会等名 The 11th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂野井 健、津田 卓雄、穂積 裕太、青木 猛、齊藤 昭則、直井 隆浩、永原 政人、江尻 省、西山 尚典
2. 発表標題 しらせ搭載の全天多波長姿勢安定イメージャーによるオーロラ・大気光観測
3. 学会等名 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 八木直志、坂野井健、穂積裕太、津田卓雄、齊藤昭則、江尻省、西山尚典、解良拓海
2. 発表標題 しらせ船舶搭載オーロラ・大気光の観測全天イメージャーの開発
3. 学会等名 第146回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会
4. 発表年 2019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	坂野井 健  (Sakanoi Takeshi)  (80271857)	東北大学・理学研究科・准教授   (11301)	

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
---------	---------