

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2014～2017

課題番号：26302005

研究課題名(和文) 偏光分光イメージング観測によるオーロラ偏光過程の解明

研究課題名(英文) Elucidation of auroral polarization by spectral polarization imaging observation

研究代表者

坂野井 健 (Sakanoi, Takeshi)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：80271857

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、世界で初めてオーロラの発光スペクトルの広視野偏光分布を観測する偏光分光イメージャーと機器偏光を定量的に校正可能な光源を開発した。この装置を2015年に北米アラスカに設置し、厳密な校正データ取得とオーロラの連続観測を行った。この結果、630nmオーロラの直線偏光度が $1.6 \pm 0.9\%$ であることを明かにした。また、偏光度は天頂付近で小さく、低い仰角で大きいことがわかった。このようにオーロラ偏光を天頂から低い仰角まで一度に測定されたのは世界初である。また、この計画では北欧EISCATレーダーと光学観測等でも国際貢献した。本研究を通じて4名の修士、2名の学士がうまれており、高い教育効果があった。

研究成果の概要(英文)：We aim to reveal the elevation distribution of auroral polarization along the magnetic meridian by using a newly developed wide field auroral polarization imaging spectrometer. We also developed a calibration light system to validate apparent polarization caused by atmospheric scattering and instrument. We installed the instrument at Pokar Flat Research Range, Alaska in November of 2015 and took many calibration data for various field-of-views. Using the calibration data, we evaluated polarization degree with an accuracy better than 0.2 percent. We obtained the linear polarization degree of 630 nm aurora as  $1.6 \pm 0.9$  percent. For most cases, polarization degree showed a tendency that maximized at the low elevation angle, and decreases as the elevation angle increases. In addition, we contributed the international collaboration with Norway by coordinated EISCAT-radar and optical observations. 4 master students and 2 undergraduate students were graduated based on this study.

研究分野：惑星電離圏磁気圏物理学

キーワード：オーロラ 偏光 電離圏 磁気圏 装置開発

### 1. 研究開始当初の背景

オーロラ発光のリモートセンシングから、太陽～惑星間空間～磁気圏～電離圏・熱圏に至る宇宙プラズマの相互作用を調べることが出来る。これまでの研究においては、オーロラ光学リモートセンシングは、イメージングもしくは分光観測によっていた。オーロラ偏光からオーロラ発光を引き起こす電子ビーム-大気衝突過程が理解されることは示唆されてきたものの、オーロラが発光過程は完全衝突大気と無衝突大気との中間的な状況であり、これを理論化して偏光度を定量的に見積もることは困難であった。このため、オーロラが偏光するかどうかについて、理論的には分子発光については勿論、原子発光でも確立されていない状況だった。一方、近年の観測からは、Lilensten et al. [GRL, 2008] がフォトメータ観測による狭域ポインティング観測ながら、酸素原子 630nm 発光中に数%の直線偏光が含まれることを示した。しかしながら、これはインテグレーション観測であり時空間分離ができていないことなどの問題があり、観測事実としても確立していない状況だった。

### 2. 研究の目的

理論から、オーロラの偏光は視線方向と磁力線の角度に依存すると予想される。従って、本研究では、磁気天頂から磁気垂直までの広視野を一度にカバーし、偏光すると予想される酸素原子 630nm 発光と、偏光しないと予想される酸素原子 557.7nm 発光を同時に捉え、分光偏光イメージングすることが可能な観測装置を、世界で初めて開発する。この新たな装置により、磁気天頂から磁気水平までの空間の同時測定と、異なる波長のオーロラ偏光測定を達成し、高い計測精度と信頼性を達成する。

### 3. 研究の方法

本研究では、磁気子午線に沿った偏光の空間分布を捉えることを目的とし、広視野偏光分光イメージャーを開発した。これを図1に示す。本装置は、魚眼レンズ、回転するステージに装着したワイヤーグリッド型直線偏光子、VPH 透過型回折格子ならびに EMCCD 検出器から成り、450nm から 710nm の波長範囲で波長分解能 2.0nm で分光し、視野角 130 度を有する。偏光子を 45 度ずつ回転させたときに



図1. 広視野偏光分光イメージャーの光学ユニット。

EMCCD カメラで検出される強度変化から入射光の偏光状態を測定する。

数%と予想される微弱なオーロラ偏光を捉えるためには、大気散乱によるみかけの偏光や、光学系を格納する観測箱のアクリルドーム、魚眼レンズ、回折格子などの機器偏光を校正することが鍵となる。本研究では、機器偏光の厳密な校正のために、既知の偏光状態を持つ光を入射し、偏光子を回転させながら強度変化を測定可能な校正光源装置を新たに開発した。この校正光源をもちいて 130 度の全ての視野方向から入射する光線に対して、機器偏光を厳密に校正する解析方法を開発した。開発された

この広視野偏光分光イメージャーを 2015 年 11 月にアラスカ州ポーカーフラット観測所に設置し、滞在中にこの校正光源装置を用いた厳密な機器偏光の校正データ取得を繰り返し行った。その後、自動運転にて翌 2016 年 3 月までオーロラ偏光の連続観測を達成した。図2にポーカーフラットに設置された広視野偏光分光イメージャーを示す。

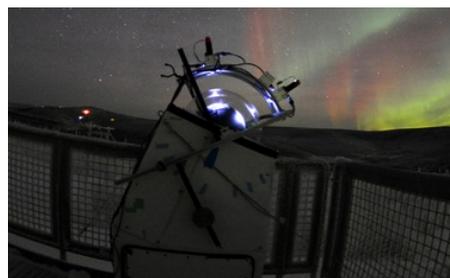


図2. ポーカーフラットに設置された広視野偏光分光イメージャー。

### 4. 研究成果

校正データの解析の結果、機器偏光パラメータ(ストークスペクトル)の視野全体の特性を明かにし、偏光度の計測誤差として 0.2% 程度の十分な精度を達成した。この校正データを用いて、2015 年 11 月 19 日に観測されたオーロラの偏光解析を行った。この結果の 630nm 発光強度(ケオグラム)ならびに直線偏光度(DoLP)の時系列を図3に、一晩分の平均と標準偏差の仰角分布を図4に示す。これから、630nm オーロラの直線偏光度は  $1.6 \pm 0.9\%$  であることが分かった。また、偏光度は低い仰角方向で大きく(約 2%)、仰角が上がるにつれて小さな値(約 1%)となることが明らかになった。このようなオーロラ偏光が天頂から低い仰角まで連続的に一度に取得されたのは世界で初めてである。また、オーロラ活動度が上昇し発光領域が広がる際に、偏光度が大きくなるといった傾向もみられた。

一方、北欧の EISCAT レーダー観測と光学観測の連携観測のために、2016 年 11 月-12 月、

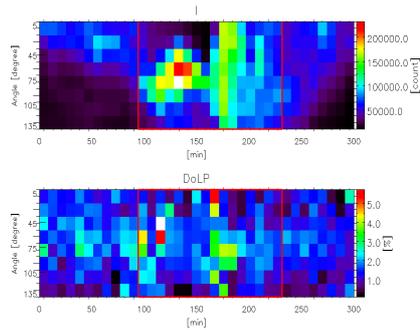


図3. 2015年11月19日の630nmオーロラ南北方向ケogram (上) と直線偏光度 DoLP (下) の時系列データ。

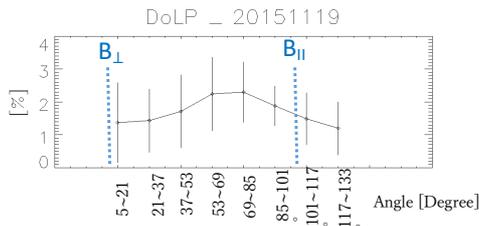


図4. 2015年11月19日一晩の直線偏光度の仰角分布。磁気天頂 ( $B_{||}$ ) と磁気垂直 ( $B_{\perp}$ ) も示した。

1月、3月に特別実験を行った。とくに3月には磁気嵐が発生し、活発なオーロラ活動の条件下で良好なデータを取得した。

研究代表者の坂野井が2016年に別プロジェクト(惑星観測)のために米国ハワイ大学天文学研究施設に長期滞在したため、本研究の遅延が発生し1年間(2017年度)繰り越しを行った。2018年3月に機器のアラスカから国内への撤収を行い、研究計画を完了させた。

なお、本研究を通じて4名の修士号、2名の学士号取得者が輩出し、高い教育効果があった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計18件) うち国際学会11件

1. Sakanoi, T., M. Hirahara, Y. Saito, K. Asamura, Y. Miyoshi, S-I. Oyama, T. Tsuda, M. Yamauchi, FACTORS: a space exploration mission with polar formation flight observations for elucidation of magnetosphere - ionosphere - thermosphere coupling mechanisms, and its visible and ultra-violet imaging, SRS (Svenska Rymdforskarens Samarbetsgrupp) annual

meeting, IRF, Kiruna, Sweden, 15-16 March 2018.

2. Dandouras, I., M. Yamauchi, H. Rème, J. De Keyser, O. Marghitu, A. Fazakerley, B. Grison, L. Kistler, A. Milillo, R. Nakamura, N. Paschalidis, A. Paschalis, J.-L. Pinçon, T. Sakanoi, M. Wieser, P. Wurz, I. Yoshikawa, I. Häggström, M. Liemohn, and F. Tian and the ESCAPE Team, European Spacecraft for the study of Atmospheric Particle Escape (ESCAPE): a planetary mission to Earth, proposed in response to the ESA M5-call, European Planetary Science Congress 2017, Riga, Latvia, Sep. 17-22, 2017.
3. Endo, Y., T. Sakanoi, and Y. Ogawa,  $N_2^+$  resonant scattering light observation in the sunlit topside ionosphere with the auroral spectrograph, the 18th EISCAT international symposium, NIPR, Tachikawa, May 26-31, 2017.
4. Fukizawa, M., T. Sakanoi, Y. Ogawa, Y. Tanaka, K. Hosokawa, S. Taguchi, and E. Thomas, Relationship between electron density height profile and convection flow speed in the polar cap patches and blobs, the 18th EISCAT international symposium, NIPR, Tachikawa, May 26-31, 2017.
5. Ogawa, Y., K. Hosokawa, S-I. Oyama, Y. Miyoshi, H. Miyaoka, Y. Tanaka, S. Nozawa, S. Kurita, K. Shiokawa, T. Sakanoi, and R. Fujii, Estimating the energy of pulsating aurora electrons: simultaneous observations with multi-wavelength all-sky imagers and EISCAT, the 18th EISCAT international symposium, NIPR, Tachikawa, May 26-31, 2017.
6. Hosokawa, K. S-I. Oyama, Y. Ogawa, Y. Miyoshi, S. Kurita, H. Miyaoka, Y. Tanaka, S. Nozawa, M. Teramoto, K. Shiokawa, T. Sakanoi, and R. Fujii, Coordinated observations of pulsating aurora with multi-point high-speed optical measurements, EISCAT and ARASE/ERG satellite, the 18th EISCAT international symposium, NIPR, Tachikawa, May 26-31, 2017.
7. Sakanoi, T. H. Kondo, Y. Ogawa, Y. Tanaka, K. Kauristie, U. Braendstroem, B. Gustavsson, T. Sergienko, and M. Kagitani, Coordinated EISCAT and

- optical imaging observations of the omega-band aurora and electron density enhancement in the D-region ionosphere, the 18th EISCAT international symposium, NIPR, Tachikawa, May 26-31, 2017.
8. Shiokawa, K., Y. Miyoshi, S-I, M. Nishitani, K. Seki, Y. Otsuka, M. Ozaki, R. Kataoka, T. Nagatsuma, T. Tanaka, I. Shinohara, M. Nose, T. Sakanoi, F. Tsuchiya, Y. Obana, S. Suzuki, A. Shinbori, T. Hori, A. Kadokura, K. Hosokawa, Y. Ogawa, Connors Martin, Ruohoniemi J. Michael, Sterne Kevin, Engebretson Mark, Steinmetz Erik, Murr David, Turunen Esa, Manninen Jyrki, Kero Antti, Raita Tero, Ulich Thomas, Kozlovsky Alexander, Oksanen Arto, Back Marko, Kauristie Kirsti, Watkins Brenton, Bristow William, Fallen Christopher, Karjala Marty, Begley Tyler, Lessard Marc, Shevtsov Boris, Poddelsky Igor, Baishev Dimitry, Kurkin Vladimir, Oinats Alexey, Pashinin Alexander, Preliminary results of the first ERG-ground campaign observation of the inner magnetosphere using the PWING ground network, Intern. session of JPGU 2017, Makuhari, May 20-25, 2017.
  9. Kondo, H., T. Sakanoi, Y. Ogawa, Y. Tanaka, Kauristie Kirsti, Urban Brändström, Gustavsson Björn, M. Kagitani, Coordinated EISCAT and optical network imaging observations of the omega-band type pulsating aurora and electron density enhancement in the D-region ionosphere, Intern. session of JPGU 2017, Makuhari, May 20-25, 2017.
  10. Oono, R., T. Sakanoi, M. Kagitani, Observation of auroral polarization using a polarization imaging spectrometer in Alaska, Intern. session of JPGU 2017, Makuhari, May 20-25, 2017.
  11. Dandouras, I. M. Yamauchi, H. Rème, J. De Keyser, O. Marghitu, A. Fazakerley, B. Grison, L. Kistler, A. Milillo, R. Nakamura, N. Paschalidis, A. Paschalis, J.-L. Pinçon, T. Sakanoi, M. Wieser, P. Wurz, I. Yoshikawa, I. Häggström, M. Liemohn, F. Tian, and the ESCAPE Team, European SpaceCraft for the study of Atmospheric Particle Escape (ESCAPE): a mission proposed in response to the ESA M5-call, European Geosciences Union General Assembly 2017, Vienna, Austria, Apr. 23-28, 2017.
  12. 吹澤 瑞貴, 坂野井 健, 土屋 史紀, 塩川 和夫, 門倉 昭, 田中 良昌, 三好 由純, 笠原 禎也, 尾崎 光紀, 松岡 彩子, 松田 昇也, 疋島 充, コーラス波強度変動とアイスランドにおいて観測された脈動オーロラの明滅周期の比較, 第142回 SGEPS 総会および講演会, 京都大学, 宇治, Oct. 15-19, 2017.
  13. Hirai, A., F. Tsuchiya, T. Obara, H. Misawa, T. Sakanoi, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, M. Connors, D. Hampton, Energetic electron precipitation associated with Pc1/EMIC waves: Six-month LF-wave observations over North America, 第142回 SGEPS 総会および講演会, 京都大学, 宇治, Oct. 15-19, 2017.
  14. 塩川 和夫, 堀 智昭, 片岡 龍峰, 栗田 怜, 三好 由純, 長妻 努, 西谷 望, 能勢 正仁, 尾花 由紀, 大塚 雄一, 大山 伸一郎, 尾崎 光紀, 坂野井 健, 関 華奈子, 新堀 淳樹, 篠原 育, 鈴木 臣, 高木 佑基, 高橋 直子, 竹下 祐平, 田中 良昌, 土屋 史紀, PWING プロジェクトによるサブオーロラ帯における内部磁気圏プラズマ・波動計測の現状, 第142回 SGEPS 総会および講演会, 京都大学, 宇治, Oct. 15-19, 2017.
  15. Ogawa, Y. Y. Miyoshi, K. Shiokawa, K. Hosokawa, S-I. Oyama, A. Kero, S. Nozawa, K. Seki, Y. Tanaka, T. Sakanoi, I. Shinohara, Y. Miyashita, R. Fujii, H. Miyaoka, A. Kadokura, K. Asamura, Y. Katoh, T. Kasahara, H. Kojima, A. Matsuoka, S. Kurita, S. Matsuda, Coordinated Arase (ERG) satellite and EISCAT radar observations, 第142回 SGEPS 総会および講演会, 京都大学, 宇治, Oct. 15-19, 2017.
  16. 遠藤 友, 坂野井 健, 小川 泰信, 鍵谷 将人, オーロラスペクトログラフによる上部電離圏 N2+の共鳴散乱光観測, 第142回 SGEPS 総会および講演会, 京都大学, 宇治, Oct. 15-19, 2017.
  17. 吹澤 瑞貴, 坂野井 健, 小川 泰信, 田中 良昌, 細川 敬祐, 田口 聡, Thomas Evan, ポーラーパッチならびにプロブの電子密度分布と極冠イオン対流速度の関係, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 幕張, May 20-25, 2017.

18. 遠藤 友, 坂野井 健, 小川 泰信, 鍵谷 将人, オーロラスペクトログラフによる上部電離圏 N2+ の共鳴散乱光観測, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 幕張, May 20-25, 2017.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://pparc.gp.tohoku.ac.jp/research02.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坂野井 健 (SAKANOI, Takeshi)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号 : 80271857

### (2) 研究分担者

鍵谷 将人 (KAGITANI, Masato)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号 : 30436076

### (3) 連携研究者

塩川 和夫 (SHIOKAWA, Kazuo)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授

研究者番号 : 80226092

大山 伸一郎 (OYAMA, Shin-ichiro)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・講師

研究者番号 : 20444424

### (4) 研究協力者

なし