

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 8 月 16 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2013～2016

課題番号：25302006

研究課題名(和文)北米域での高時間分解能オーロラ観測と電波観測を軸とした脈動オーロラ変調機構の研究

研究課題名(英文) Study on pulsating aurora based on high-speed aurora imaging and radio wave observations in US and Canada

研究代表者

三好 由純 (Miyoshi, Yoshizumi)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号：10377781

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：周期数秒で明滅する脈動オーロラの変調機構の解明を目指して、アラスカ・ポーカーフラット、カナダ・アサバスカに設置した高速撮像カメラ、およびVLF帯のループアンテナによる観測研究、および低高度人工衛星とシミュレーションの比較にもとづく研究を行った。高速撮像観測とVLF電波の比較から、脈動オーロラの主脈動および内部変調と、ホイッスラー・コーラスのバースト的出現、およびrising tone elementとの対応が明らかになった。人工衛星観測とシミュレーションとの比較によって、脈動オーロラの主脈動、内部変調、背景降りこみが、ホイッスラー・コーラス波動のスペクトル構造に対応することを解明した。

研究成果の概要(英文)：We investigate mechanisms to cause modulation of the pulsating aurora based on high-speed camera (EMCCD/s-CMOS) and ground-based loop antenna observations at Poker Flat Research Range at Alaska, US and Athabasca, Canada. The observation data showed that the main modulation and internal modulation of the pulsating aurora are caused by chorus bursts and rising tone elements, respectively. Moreover, we investigate comparative study between the precipitating electrons measured by low-altitude satellites and computer simulations. As a result, we identify relationship between energy spectrum of precipitating electrons and frequency spectrum of chorus waves.

研究分野：超高層物理学

キーワード：脈動オーロラ 宇宙空間プラズマ物理学 波動粒子相互作用 地上観測 高速イメージング

## 1. 研究開始当初の背景

脈動オーロラは、周期数秒-20秒程度で明滅するオーロラである。よく知られているように、脈動オーロラはサブストーム回復相時において、朝方側で観測されるが、それ以外にも午後側や昼側にも出現するきわめて一般的なオーロラの一つである。

脈動オーロラについては50年以上にわたる長い研究の歴史があり、その起源はプラズマシートの高エネルギー電子がピッチ角散乱を受けた結果であると考えられている。しかし、その変調を作り出す機構は未解明の問題である。研究開始当初において、THEMIS衛星の結果や、私たちの地上観測の結果から、ホイッスラー・コーラスの時間変化と脈動オーロラの数秒周期の明滅との対応関係が示されていた。さらに、私たちが進めてきたれいめい衛星による解析からも、ホイッスラー・コーラスとの相互作用によって、脈動オーロラの降下電子の変調が引き起こされていることが示されていた。一方、脈動オーロラの起源として、ホイッスラー・コーラスとは異なるプラズマ波動の可能性や、波動以外による変調の可能性、磁気圏-電離圏結合領域での変調の可能性も指摘されており、まだ統一的な描像は得られていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究計画では、脈動オーロラ発生機構の解明を目的として、サブオーロラ帯であるカナダおよびオーロラ帯であるアラスカにおいて、最先端のCMOSカメラによるオーロラ観測と、ループアンテナによるVLF帯電波の観測を行い、従来になかったオーロラの高時間空間分解能観測とプラズマ波動の高時間分解能観測の同時観測を実現する。さらに数値シミュレーションを組み合わせることで、脈動オーロラの内部変調構造として知られる数Hz-数十Hzの輝度変動と、ホイッスラー・コーラスの微細スペクトル構造との対応関係を同定する。これらの研究から、脈動オーロラの内部変調がホイッスラー・コーラスに起因するとの仮説を実証する。

## 3. 研究の方法

本研究では、以下の3つの方法にもとづいて、脈動オーロラの変調特性の解明とその起源に関する研究を進めてきた。

- 1) 地上からの高速光学撮像観測にもとづく脈動オーロラの変調特性、空間特性の研究
- 2) 地上からの高速光学撮像観測と電波観測によるコーラス波動と光学発光の変調機構との対応に関する研究
- 3) 低高度衛星による脈動オーロラ降下電子の解析と数値シミュレーションの比較にもとづく変調機構の起源に関する研究

## 4. 研究成果

### 1) 地上からの高速光学撮像観測による脈動オーロラの変調特性、空間特性に関する研究

本研究では、アラスカ・ポーカーフラットにおいて本研究で導入したs-CMOSカメラを設置し、平成25年度から4冬季シーズンにわたって観測を実施した。開発された装置は、インターネット経由で、日本から遠隔制御が可能であり、一冬にわたり約40TBの観測データを取得した。さらに、本研究では、研究代表者の所属する名古屋大学宇宙地球環境研究所がカナダ・アサバスカに設置しているEMCCDカメラのデータも用いた観測、解析も行った。なお、これらのデータは、データベースとして整備し、公開している。

得られた主な結果は、以下である。

- ・これまで知られていた脈動オーロラの主脈動およびそこに付随する高速の内部変調構造を観測した。さらに、主脈動を伴わない場合においても、内部変調的な高速の変調が存在することが明らかになった。

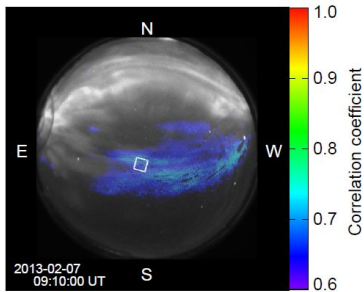
- ・主成分分析を用いた研究により、脈動オーロラの主脈動を起こすパッチ構造の中に、さらにサブパッチ構造が存在することが明らかになった。このサブパッチ構造の動態の変化は、ホイッスラーモードコーラス波動の伝播に伴う変調を反映していることが示唆された。

- ・複数地点からの光学観測により、脈動オーロラの発光層を求めたところ、高度約90km以下で発光層の厚みが数kmであることが明らかとなった。これは、ディスクリットオーロラに比べて、低い高度かつ薄い発光層で光っていることを意味しており、過去の研究と整合的である。

### 2) 地上からの高速光学撮像観測と電波観測によるコーラス波動と光学発光の変調機構との対応の研究

カナダ・アサバスカにおいて、平成25年度よりEMCCDカメラを用いた連続観測を開始した。アサバスカには、EMCCDカメラに加えて、研究代表者の所属している名古屋大学宇宙地球環境研究所が設置・運用しているVLFループアンテナがあり、コーラス波動の連続観測も行っている。この両者を用いた観測および解析研究を進め、以下の成果を得た。

EMCCDカメラによって取得された全天光学画像と、ループアンテナによって観測されたコーラス波動の時系列データの相関をとり、コーラス波動の変調と相関の強い領域を抽出した。次に、数Hz以上の高速の変調について、両者の相関解析を行い、脈動オーロラの内部変調が、Rising Toneと呼ばれる周波数が時間とともに上昇するコーラスの元素構造と対応していることを示した。また、このRising Toneはその出現間隔が変化



カナダ・アサバスカで観測された脈動オーロラの全天画像と、コーラス波動と相関の高い領域（着色された部分）

し、しばしばヒスと呼ばれるような時間的に継続したような放射を示すことがある。アサバスカで観測されたコーラスの詳細な解析から、アサバスカにつながる磁力線の磁気圏側での曲率の変化と、この Rising Tone の出現間隔が対応していることが判明した。非線形波動粒子相互作用に関する理論(Omura et al., 2009)によると、コーラス波動の発生は磁場の曲率に依存することが指摘されており、上記の結果は、この非線形波動粒子相互作用に関する理論と整合的と考えられる。

さらに、本研究では、アサバスカにおける観測により、脈動プロトンオーロラを新たに発見した。アサバスカの位置するサブオーロラ帯のプロトンオーロラは、電子脈動オーロラのカウンターパートとなるものであり、EMIC (電磁イオンサイクロトロン波動)によるプロトンのピッチ角散乱によって起こると考えられている。本研究によって、脈動プロトンオーロラは、その脈動が EMIC 波動の時間変化と高い相関を持つことが示された。また、電子脈動オーロラ同様に、脈動プロトンオーロラは内部変調を持ち、その内部変調は、EMIC の rising tone と呼ばれる周波数上昇を伴う内部構造とよく対応することも示された。

### 3) 低高度衛星による脈動オーロラ降下電子の解析と数値シミュレーションの比較にもとづく変調機構の起源に関する研究

脈動オーロラの変調機構の詳細を調べるため、低高度衛星「れいめい」が観測した降下電子の時間変動を詳細に調べた。その結果、脈動オーロラの発光を引き起こす数 keV 電子の降りこみ変調に加え、新たに 1 keV 付近に定常的な降りこみが見出された。

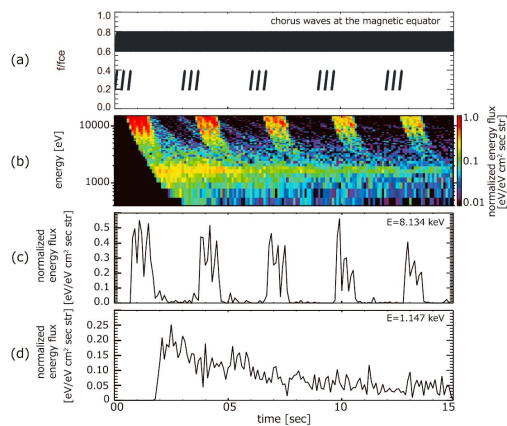
ホイッスラー・コーラスの周波数構造として、lower-band コーラス、upper-band コーラスが知られている。Lower-band コーラスは、1 秒間に数回発生する rising tone エLEMENT から形成され、数秒ごとにバーストと呼ばれるクラスター構造を持って出現する。一方、upper-band コーラスは、多数回の rising tone エLEMENT から形成されており、連続し

て放射されている。

本研究では lower-band、upper-band コーラスをモデル化して、ホイッスラー・コーラスと電子とのピッチ角散乱過程のシミュレーションを行ったところ、観測された降下電子スペクトルをよく再現した。

一連の研究により、電子脈動オーロラの変調機構として

- ・主脈動 --- 数秒ごとに発生する lower-band コーラスのバースト構造
  - ・内部変調 --- コーラスバーストを形成する rising tone エLEMENT
- であることが明らかになった。



計算機シミュレーションで再現された脈動オーロラ。上から、モデル化したホイッスラー・コーラス。電離圏高度での降下電子のエネルギースペクトル。8 keV、1 keV 電子のフラックス。横軸は 15 秒間に対応する。

また、本研究で新たに脈動プロトンオーロラが存在を見出した。この脈動プロトンオーロラにも内部変調があり、脈動電子オーロラと同様に、EMIC 波動のバースト的な発生と、バーストを構成する rising tone エLEMENT によって引き起こされていることがわかった。

また、観測から得られた脈動オーロラの発光領域の階層構造は、ホイッスラー・コーラスによる変調領域がメソスケールの構造を持っていることを示唆するものである。2016 年末に打ち上げられた「あらせ」衛星によって、この変調領域を直接観測することにより、このメソスケール構造の性質が明らかになることが期待される。

### 5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 28 件)

1. Fukuda, Y., R. Kataoka, Y. Miyoshi, Y. Katoh, T. Nishiyama, K. Shiokawa, Y. Ebihara, D. Hampton, and N. Iwagami, Quasi-periodic rapid motion of pulsating auroras, Polar Science, 査

- 読 有 , 10, 183-191, doi:10.1016/j.polar.2016.03.005, 2016.
2. Kataoka, R., Y. Fukuda, Y. Miyoshi, Y. Miyahara, S. Itoya, Y. Ebihara, D. Hampton, H. Dahlgren, D. Whiter, and N. Ivchenko, Compound auroral micromorphology: Ground-based high-speed imaging, *Earth, Planets and Space*, 査読有, 67, :23, doi:10.1186/s40623-015-0190-6, 2015.
  3. Martinez, C., K. Shiokawa, Y. Miyoshi, M. Ozaki, I. Schofield, and M. Connors, Polarization analysis of VLF/ELF waves observed at subauroral latitudes during the VLF-CHAIN campaign, *Earth, Planet and Space*, 査読有, 67:21, doi:10.1186/s40623-014-0178-7, 2015.
  4. Martinez, C., K. Shiokawa, Y. Miyoshi, M. Ozaki, I. Schofield, and M. Connors, Statistical study of ELF/VLF emissions at subauroral latitudes in Athabasca, Canada, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 120, doi:10.1002/2015JA021347, 2015.
  5. Miyoshi, Y., S. Oyama, S. Saito, H. Fujiwara, R. Kataoka, Y. Ebihara, C. Kletzing, G. Reeves, O. Santolik, M. Cliverd, C. Rodger, E. Turunen, and F. Tsuchiya, Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: EISCAT and Van Allen Probes observations, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 120, doi:10.1002/2014JA020690, 2015.
  6. Miyoshi, Y., S. Saito, K. Seki, T. Nishiyama, R. Kataoka, K. Asamura, Y. Katoh, Y. Ebihara, T. Sakanoi, M. Hirahara, S. Oyama, S. Kurita, and O. Santolik, Relation between energy spectra of pulsating aurora electrons and frequency spectra of whistler-mode chorus waves, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 120, 7728-7736, doi:10.1002/2015JA021562, 2015.
  7. Nishiyama, T., Y. Miyoshi, Y. Katoh, T. Sakanoi, R. Kataoka, and S. Okano, Sub-structures with luminosity modulation and horizontal oscillation in pulsating patch: Principal component analysis application to pulsating aurora, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 121, 2360-2373, doi:10.1029/2015JA022288, 2016.
  8. Nomura, R., K. Shiokawa, Y. Omura, Y. Ebihara, Y. Miyoshi, K. Sakaguchi, Y. Otsuka, and M. Connors, Pulsating proton aurora caused by rising tone Pc1 waves, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 121, 1608-1618, doi:10.1029/2015JA021681, 2016.
  9. Ozaki, M., S. Yagitani, K. Sawai, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, R. Kataoka, A. Ieda, Y. Ebihara, M. Connors, S. Ian, Y. Katoh, Y. Otsuka, N. Sunagawa, and V. Jordanova, A direct link between chorus emissions and pulsating aurora on timescales from milliseconds to minutes: A case study at subauroral latitudes, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 120, 9617-9631, doi:10.1029/2015JA021381, 2015.
  10. Ozaki, M., K. Shiokawa, Y. Miyoshi, R. Kataoka, S. Yagitani, T. Inoue, Y. Ebihara, C. Jun, R. Nomura, K. Sakaguchi, Y. Otsuka, M. Shoji, I. Schofield, M. Connors, and V. Jordanova, Fast modulations of pulsating proton aurora related to subpacket structures of Pc1 geomagnetic pulsations at subauroral latitudes, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 43, 7859-7866, doi:10.1002/2016GL070008, 43, 7859-7866, 2016.
  11. Saito, S., Y. Miyoshi and K. Seki, Rapid increase in relativistic electron flux controlled by nonlinear phase-trapping of whistler chorus elements, *J. Geophys. Res.*, 121, 査読有, 6573-6589, doi:10.1002/2016JA022696, 2016.
  12. Sakaguchi, K., K. Shiokawa, Y. Miyoshi, and M. Connors, Isolated proton aurora and Pc1/EMIC waves at subauroral latitudes, in *Auroral Dynamics and Space Weather*, Geophysical Monograph 215, First Edition. 査読有, Edited by Y. Zhang and L. J. Paxton. John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9781118978719.ch5, pp.59-70, 2016.
  13. Shiokawa, K., Y. Yokoyama, A. Ieda, Y. Miyoshi, R. Nomura, S. Lee, N. Sunagawa, Y. Miyashita, M. Ozaki, K. Ishizaka, S. Yagitani, R. Kataoka, F. Tsuchiya, I. Schofield, and M. Connors, Ground-based ELF/VLF chorus

observations at subauroral latitudes - VLF-CHAIN Campaign, J. Geophys. Res., 査読有, 119,doi:10.1029/2014JA020161, 2014.

他 15 件

〔学会発表〕(計 14 件)

1. Y. Miyoshi, S. Oyama, S. Saito, E. Turunen, S. Kurita, A. Kero, P. T. Verronen, R. Kataoka, Y. Ebihara, C. Kletzing, G. Reeves, O. Santolik, M. Clilverd, C. Rodger, and F. Tsuchiya, Wide energy electron precipitations and their impact on the middle atmosphere associated with the pulsating aurora, American Geophysical Union Fall Meeting(国際学会、招待講演)、2015 年 12 月 14-18 日、米国サンフランシスコ
2. 三好由純、齋藤慎司、関華奈子、西山尚典、片岡龍峰、浅村和史、加藤雄人、海老原祐輔、坂野井健、平原聖文、大山伸一郎、栗田怜、尾崎光紀、Ondrej Santolik、脈動オーロラの内部変調機構の起源、地球電磁気・地球惑星圏学会、2015 年 10 月 31 日-11 月 03 日、東京大学
3. 澤井薫、尾崎光紀、八木谷聡、塩川和夫、三好由純、片岡龍峰、海老原祐輔、家田章正、Connors, M.、サブオーロラ帯における地磁気脈動と対応した脈動オーロラとコーラス波動の地上観測、地球電磁気・地球惑星圏学会、2015 年 10 月 31 日-11 月 03 日、東京大学

他 11 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：

番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

三好由純 (MIYOSHI, Yoshizumi)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授  
研究者番号：10377781

(2)研究分担者

片岡龍峰 (KATAOKA, Ryuho)  
国立極地研究所・宙空圏研究グループ・  
准教授  
研究者番号：90462671

尾崎光紀 (OZAKI, Mitsunori)  
金沢大学・電子情報学系・准教授  
研究者番号：70422649

海老原裕輔 (EBIHARA, Yusuke)  
京都大学・生存圏研究所・准教授  
研究者番号：80342616

(3)連携研究者

塩川和夫 (SHIOKAWA, Kazuo)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授  
研究者番号:80226092

浅村和史 (ASAMURA, Kazushi)  
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機  
構・宇宙科学研究所・助教  
研究者番号:50321568

(4)研究協力者

( )