

極限的短周期変動を持つオーロラの探索

Searching for auroral periodic variations of extremely short duration

(地球電磁気・地球惑星圏学会推薦)

代表研究者	国立極地研究所	片岡 龍峰	National Institute of Polar Research	Ryuhō KATAOKA
協同研究者	京都大学	海老原祐輔	Kyoto University	Yusuke EBIHARA
	名古屋大学	三好 由純	Nagoya University	Yoshizumi MIYOSHI
	東京大学	福田 陽子	Tokyo University	Yoko FUKUDA

Auroral microphysics still remains unexplored. Cutting-edge ground-based optical observations using scientific complementary metal-oxide semiconductor (sCMOS) cameras recently enabled us to observe the fine-scale morphology of bright aurora at magnetic zenith for a variety of rapidly varying features for long uninterrupted periods. Several interesting examples of combinations of fine-scale rapidly varying auroral features are observed by the sCMOS camera installed at Poker Flat Research Range (PFRR), Alaska, since February 2014. In Kataoka et al. (2015), the first example shows that flickering rays and pulsating modulation simultaneously appeared at the middle of a surge in the pre-midnight sector. The second example shows localized flickering aurora associated with growing eddies at the poleward edge of an arc in the midnight sector. We further developed a new observations system, applying standard Support Vector Machine technique to automatically judge the existence of aurora to turn on and off the burst mode imaging observations of sCMOS camera. The new observation system reduces the total data size down to 25%, and the statistical analysis of the whole data set is still ongoing. The fastest flickering aurora so far observed is 45 Hz, and the fastest pulsating aurora is 23 Hz. Leakage of energy is the united hypothesis to explain the generation mechanisms of the rapidly varying aurora, and further analysis and simulation works are needed to test the hypothesis.

研究目的

オーロラは準周期的に変動することがあり、周期 2-20 秒の脈動オーロラと、周期 0.1-1 秒のフリッカリングオーロラが古くから知られている。さらに周期の短いオーロラ（周期 0.02-0.03 秒）が存在することが我々の観測 (Kataoka et al., 2012) によって明らかになり、「極限的短周期変動を持つオーロラは何か」という新しい問いが生まれた。本研究の目的は、0.002 秒の周期変動まで検出可能な最先端の sCMOS カメラを用いて、オーロラの極限的な短周期変動を発見し、その発生パターンを観測的に明らかにすることである。

研究経過

研究期間の 2013 年度と 2014 年度は、磁気嵐が頻発しやすい太陽活動極大期であったため、磁気嵐で

激しく変化する明るいオーロラの中に、どのような超高速変動が埋め込まれているか、という未知の領域を探索する上では最適の時期であった。実際に、磁気嵐の指標とされる Dst 指数で -50 nT を超える規模の磁気嵐は、2013 年度の観測期間中に 6 回、2014 年度の観測期間中には 9 回発生した。

取得された総データ量は、2013 年度が 6 TB、2014 年度が 27 TB となり、従来の光学観測に比べて桁違いのデータ量を取得している。最速サンプリングレートをできる限り連続的に行うカメラ制御や効率的なデータストレージといった技術的な面でも挑戦があり、本研究で得られた観測経験は、今後の新しいオーロラの光学観測手法の基盤づくりとしても重要である。

2013 年度は、最速の変動周期 0.01 秒までのオーロラの時間変動を、最も微細なオーロラの空間構造ま

で観測できる撮像システムをデザインした。より具体的には、発光の特定数の長い緑 (557.7 nm) と赤 (630.0 nm) のオーロラ輝線を消す RG665 ガラスフィルタと、焦点距離 50 mm F1.2 カメラレンズを利用した sCMOS カメラシステムを構築し、アラスカ大学のポーカーフラット実験場に設置した。2014 年 2 月 4 日～2014 年 4 月 5 日の約 2 か月間の無人プログラム観測を実施した。絶対時刻の基準として GPS 衛星からの PPS に同期して発光する LED を視野内で毎秒光らせる方式を採用した。また、毎分 0-10 秒のみのデータを記録することでストレージを節約し、シーズンを通じた連続観測を実現した。差分ムービーによる目視観察の結果、複数の磁気嵐において発生した新種の「混在型」の短周期変動を発見し、速報として論文にまとめた。(Kataoka et al., 2015)

まず、最も顕著な傾向として、発光強度の時間変化とは異なり、速い空間変化を伴うオーロラの変動が多く見出されてきた。オーロラの微細な模様が、まるで流体のように東西へ流れシアを伴う動きや、渦巻く動きを見せるものである (Figure 1)。

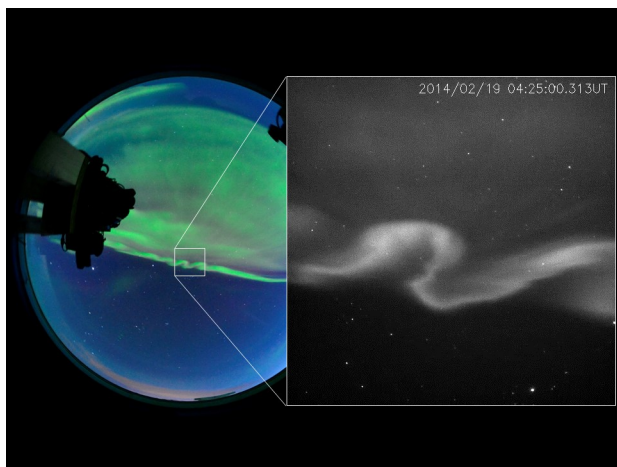


Figure 1: Example of obtained images of aurora.

本研究では、非常に明るいオーロラの淵にあたる明暗境界に周期的なコブが発生して崩れていく様子と、そのオーロラ中の東西シアの流れの中に短周期の明るさの時間変動が埋め込まれているという「混在型」を発見した。この混在型のオーロラの意味としては、シアが生み出す磁気流体波動が明るさの短周期変動の原因と解釈できる。そして、次に顕著な発見は、同じ短周期変動といっても矩形波型の脈動変動と、サイン波型のフリッカリング・レイという、メカニズムのまったく異なると考えられてきた 2 種類の変動が近接して同時発生していた、という混在

型であった。この混在型の意味としては、両者の原因となる異なる種類のプラズマ波動が、磁気圏内で局在化した共通の領域から発せられたと解釈できる。

2014 年度からは、東京大学大学院博士後期課程の福田陽子氏が本研究メンバーに加わった。観測システムに幾つかの変更を加え、再びポーカーフラット実験場において、2014 年 11 月末から 2015 年 4 月中旬まで観測を実施した。システム上変更した点は主に 2 点ある。

まず、GPS 時計を用いたトリガーシステムの採用により、LED 発光による絶対時刻スタンプを廃止した。これにより、データ解析する上でのコンタミが消え、研究が加速するというメリットが生じた。

第 2 点として、オーロラの有無の自動判定を、機械学習によって実現した。これは、sCMOS カメラの他に、監視カメラとして魚眼レンズを付けた一眼レフカメラを連動させた新システム (Figure 2) で、監視カメラから得られた画像の色情報を用いて、ほぼリアルタイムでオーロラの有無の自動判定を行い、判定結果に応じて sCMOS カメラを自動制御するものである (福田ほか, 2015)。このシステムにより、最長で毎秒 0-50 秒の連続観測が可能となり、脈動オーロラの長周期及び短周期変動の階層的な解析を行うことができるようになった。また、得られたデータの大部分が解析に用いることのできるデータであり、天候やオーロラの有無によるデータサーベイに要する時間を大きく省くことも可能となった。本観測システムにより、オーロラの自動判定を用いない観測システムに比べて、データ量を 1/4 に抑えることができしており、将来観測への応用も期待できるものである。



Figure 2: Automatic of burst-mode aurora imaging system assisted by all-sky DSLR camera.

考察

2015年5月の現時点で、アラスカで観測したデータの回収作業を終えたばかりであり、現在は高速オーロラの発生頻度などに関する統計的な解析を進めている段階である。

極限的な短周期変動に関する初期的な統計解析結果としては、タイプによらず、極めて明るいオーロラ中に最速の高速変動が見られる、というのが最も顕著な傾向であった。これは限られた空間スケールを持つオーロラへの電磁・粒子エネルギー集中の限度、つまりエネルギー漏れを可視化しているように思える結果でもあり、今後はシミュレーションによる再現実験も組み合わせる研究を進める予定である。

本研究で取得したデータ中に発見した最速のフリッカリングオーロラは45 Hzであり、従来の研究で考えられてきた酸素イオンのジャイロ周波数の限界である20 Hzよりも2倍以上速いイベントが多数存在することが明らかになっている。また、そのような高速フリッカリングオーロラの出現タイミングと、地上の数分周期の磁場変動との対応関係から、高速のフリッカリングオーロラを生み出すために必要な電流強度がラフに推定できることがわかっている。そして、高速のフリッカリングオーロラの形成メカニズムとして、局在化した電流ループの水平移動が重要な役割を果たすことが明らかになっている。

脈動オーロラに関して本研究で見出された最速の変調は23 Hzで、明るい脈動オーロラほど速い変調を伴うことが分かっている。脈動オーロラの変調は、発光領域の形を保って明るさのみが時間変化すると考えられてきたが、本研究の高精細かつ高速な撮像により、発光領域の空間変調が明瞭に捉えられるようになった。脈動オーロラは磁気圏におけるプラズマ波動と電子の相互作用によって形成されると考えられてきたおり、この高速撮像で明らかになった空間変調は、プラズマ波動を可視化している可能性が高い。

参考文献

1. Kataoka, R., Y. Miyoshi, D. Hampton, T. Ishii, and H. Kozako (2012), Pulsating aurora beyond the ultra-low-frequency range, *J. Geophys. Res.*, 117, A08336, doi:10.1029/2012JA017987. (査読有り)
2. 福田陽子, 片岡龍峰, 田中正行, 山下淳, 三好

由純, 塩川和夫, 海老原祐輔, Donald Hampton, 西村耕司, 鈴木理紗, 岩上直幹 (2015), 機械学習に基づく自動判定を応用したオーロラ高速撮像システム, 第21回画像センシングシンポジウム. (査読有り)

研究の発表

口頭発表

1. Kataoka, R., Yoko Fukuda, Yoshizumi Miyoshi, Hiroko Miyahara, Satoru Itoya, Yusuke Ebihara, Donald Hampton, Hanna Dahlgren, Daniel Whiter, and Nickolay Ivchenko, Compound auroral micromorphology: Ground-based high-speed imaging, 第5回極域科学シンポジウム, 2014年12月.
2. Kataoka, R., Y. Fukuda, Y. Miyoshi, N. Sunagawa, H. Miyahara, Y. Ebihara, and D. Hampton, Compound microphysics of rapidly varying aurora, 第136回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会, 松本, 2014年11月.
3. Kataoka, R., and Y. Fukuda, Compound auroral micromorphology: Ground-based high-speed imaging, Fourth International Symposium on the Arctic Research (ISAR4), Toyama, 27-30 April 2015.
4. Kataoka, R., Y. Fukuda, Y. Miyoshi, K. Shiokawa, M. Ozaki, Y. Kato, and Y. Ebihara, Visualization of wave-particle interactions by high-speed imaging of aurora, JpGU 2015, Makuhari, May, 2015.
5. 福田陽子, 片岡龍峰, 三好由純, 砂川尚貴, 塩川和夫, 橋本あゆみ, 海老原祐輔, Hampton Donald, 岩上直幹 『微細オーロラの地上高速撮像観測』国立極地研究所研究集会「非ダンジェー磁気圏物理学研究会」, 国立極地研究所, 2014年9月.
6. 福田陽子, 片岡龍峰, 三好由純, 砂川尚貴, 塩川和夫, 橋本あゆみ, 海老原祐輔, Hampton Donald, 岩上直幹 『Extremely fast auroral morphology beyond the ULF range: new ground-based experiment using sCMOS cameras』地球電磁気・地球惑星圏学会 第136回総会及び講演会 (2014年秋学会), R006-31, キッセイ文化ホール, 2014年11月.
7. 福田陽子, 片岡龍峰, 三好由純, 砂川尚貴, 塩

川和夫, 橋本あゆみ, 海老原祐輔, Hampton Donald, 岩上直幹『Extremely fast auroral morphology beyond the ULF range: new ground-based experiment using sCMOS cameras』第5回極域科学シンポジウム, 国立極地研究所, 2014年12月.

8. 福田陽子, 片岡龍峰, 三好由純, 砂川尚貴, 塩川和夫, 橋本あゆみ, 海老原祐輔, Hampton Donald, 岩上直幹『地上高速撮像による脈動オーロラ変調周期の統計解析』名古屋大学太陽地球環境研究所共同研究集会「脈動オーロラ研究集会」, 名古屋大学, 2015年1月.
9. 福田陽子, 片岡龍峰, 田中正行, 山下淳, 三好由純, 塩川和夫, 海老原祐輔, Donald Hampton, 西村耕司, 鈴木理紗, 岩上直幹『機械学習によるオーロラ自動判定とオーロラ高速撮像への応

用』第12回 Image Processing Tokyo, 東京工業大学, 2015年5月. (招待講演)

10. 福田陽子, 片岡龍峰, 三好由純, 加藤雄人, 西山尚典, 塩川和夫, 海老原祐輔, Donald Hampton, 岩上直幹『脈動オーロラの準周期的空間変調』日本地球惑星科学連合2015年大会, PEM28-10, 幕張メッセ国際会議場, 2015年5月.

誌上発表

1. Kataoka, R., Y. Fukuda, Y. Miyoshi, H. Miyahara, S. Itoya, Y. Ebihara, D. Hampton, H. Dahlgren, D. Whiter, and N. Ivchenko (2015), Compound auroral micromorphology: Ground-based high-speed imaging, *Earth, Planets and Space*, 67, 23, doi:10.1186/s40623-015-0190-6.