

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

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†

†東京大学 ‡国立極地研究所 *東京工業大学 **名古屋大学

***京都大学 **アラスカ大学 #日本科学技術振興財団

E-mail: yoko.f@eps.s.u-tokyo.ac.jp

Abstract

オーロラの高速度撮像は短時間に膨大なデータを取得するため、連続観測は困難であった。本研究では、一眼レフカメラで取得した全天画像の色情報を機械学習に用いることで、オーロラの有無をリアルタイムで判定し、判定結果に応じて高速撮像を自動制御するシステムを確立した。このシステムを用いた観測を約 4 ヶ月間行った結果、オーロラ自動判定は目で判断した場合の約 2 倍の画像をオーロラと判定したことが分かった。自動制御によって取得された高速カメラのデータ量は、従来の連続観測の 1/4 に減らすことができ、統計解析に有益なデータのみを数多く取得することに成功した。

1 序論

オーロラ現象は、数ミリ秒から数時間、数 10 m から数 1000 km にわたる様々な時間空間スケールを持つ。近年の撮像素子の進歩により、従来のビデオレート観測（毎秒 30 フレーム）では捉えきれない程速く、細かな構造を伴うオーロラが報告されている[1,2,3]。この速いオーロラは、宇宙空間での電磁波と電子の相互作用を可視化したものと考えられており、その発生メカニズムを解明することによって、プラズマ物理学への重要な貢献が期待されている。しかし、シーズンを通した連続高速撮像では、取得したデータ量が膨大となるため、データの保存に工夫が必要である。これまでは、人の手によって観測後に不要なデータを削除する方法や、オーロラの有無にかかわらず毎分 10 秒間のみ観測を行う方法が用いられてきた。このような間欠的な観測データでは、出現特性などの統計的な研究が困難であるため、連続的なデータを人手を減らして取得する観測システムが必要である。本研究の目的は、高速微細オーロラの発生メカニズムを解明するために、機械学習を用いた画像処理によりオーロラの有無を判定し、オーロラが出現している時だけ高速カメラを自動稼働させることで、解析に有益なオーロラデータを取得する観測基盤技術を

確立することである。

2 原理

2.1 観測機材

観測機材はオーロラ帯の真下に位置するアラスカ・ポーカークラット実験場に設置した。本研究では、図 1 のように、円周魚眼レンズを装着したデジタル一眼レフカメラ（以下、監視カメラ）と狭視野レンズを装着した高速撮像用 sCMOS カメラ（以下、高速カメラ）の 2 種類を用いた。高速カメラはオーロラを真下から捉えるように仰角 77 度の上方（磁気天頂方向）に向けた。また、高速カメラは視野 $15^\circ \times 15^\circ$ 、1 秒当たり 50 枚で撮像を行うものと、視野の幅を 1/4 にすることで 4 倍の速さで観測を行うカメラ（視野 $15^\circ \times 3.8^\circ$ 、1 秒当たり 200 枚）の 2 台を設置した。高速カメラ 2 には、高速変動しやすい波長のみを透過するガラスフィルタ（RG665）を付けた。



図 1 監視カメラと高速カメラ

図 2 は、ほぼ同時刻に撮影された監視カメラの全天画像と高速カメラの狭視野画像である。また、それぞれのレンズとカメラの設定、撮像条件は表 1 の通りである。

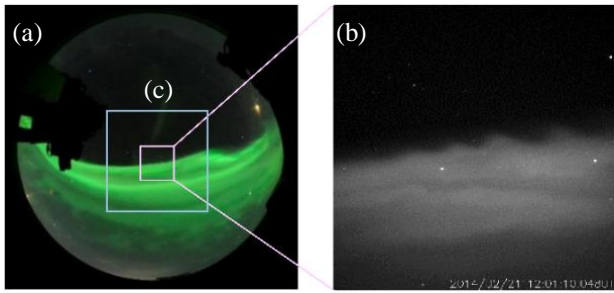


図 2 (a)監視カメラの全天画像, (b)高速カメラ画像,
(c)オーロラ判定領域

表 1 各カメラ・レンズのパラメータ

	高速 カメラ 1	高速 カメラ 2	監視 カメラ
カメラ	Hamamatsu sCMOS (モノクロ)	Hamamatsu sCMOS (モノクロ)	Nikon D5300 (カラー)
レンズ	NIKKOR 50mm/F1.2	NIKKOR 50mm/F1.2 RG665 装着	SIGMA 4.5mm/F2.8
1 秒間の 撮像枚数	50	200	1/20 (20 秒間隔)
視野角	15° x 15°	15° x 3.8°	180° x 180°
観測時間	毎分 0~10 秒間	毎分 0~50 秒間	0, 20, 40 秒

2.2 機械学習によるオーロラ自動判定

機械学習を用いたオーロラ自動判定システムは、毎秒 200 枚で撮像を行う高速カメラ 2 を自動制御するために開発された。図 3 に高速カメラ 2 と監視カメラを連動させた観測システムの概要を示す。監視カメラは、高速カメラで把握できないオーロラの全体像を把握するためだけでなく、オーロラの有無を機械学習で判定する際の色情報を与える。監視カメラの観測間隔は 20 秒と設定し、撮影の間のオーロラの移動を考慮して、高速カメラ 1 の視野の 9 倍の領域をオーロラ判定に用いた(図 2c)。

オーロラ自動判定には、パターン識別手法の 1 つであるサポートベクターマシン(SVM)のライブラリである LIBSVM [4]を用いた。監視カメラの画像は、過去のデータではなく、現地で取得したデータを用いて学習を行った。観測開始直後は典型的な緑色のオーロラや、オーロラのない快晴時の空のデータしか学習できなかったが、観測日数が増えるにつれて、朝方に出現する発光強度の弱い脈動オーロラや曇り空、アクリルドームに積もった雪、月明かりなどの色味の違うデータで学習することができた。最終的に用いたデータ数は、観測開始

から約 2 週間で得られた 194 枚の全天画像中の 582 点となった。雲越しのオーロラはオーロラ無しとして学習させたが、発光強度の弱いオーロラを撮り損ねることが多かったため、オーロラ有りとして学習をし直した。また、当初は全天画像の判定領域内の RGB 値のそれぞれの平均値を用いて判定を行っていたが、明るい星の影響を避けるために中間値へと変更した。

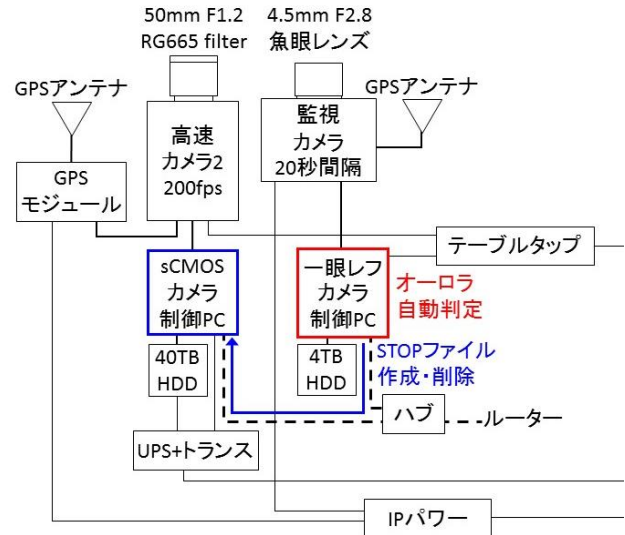


図 3 オーロラ自動判定観測システムの概略図

機械学習によるオーロラ判定を 20 秒毎に出力し、オーロラのない場合には、ネットワークを介して高速カメラ 2 の制御 PC に STOP ファイルを作成する。高速カメラの制御 PC は 10 秒毎に STOP ファイルの有無を確認し、STOP ファイルが消えたタイミングで自動的に高速撮像を開始する。高速カメラ 1 は従来通り、毎分 0 秒から 10 秒間のみ常に観測、高速カメラ 2 は毎分 0 秒から 50 秒間、自動判定に応じて観測を行う。高速撮像の例として、約 15 Hz で発光強度が明滅することが知られているフリッカリングオーロラの動画を以下にアップした(https://dl.dropboxusercontent.com/u/28864417/flickering_aurora.avi)。この動画は 1 秒間に 100 枚撮像を行った例で、FFT 解析の結果、45 Hz の明滅周期を伴った従来よりも高速のフリッカリングオーロラの撮像に成功した例である。

また高速撮像を行うにあたり、観測データの正確な時刻付与が重要となってくる。これは地上で観測される 3Hz~3kHz 帯の ELF 波動や、3kHz~30kHz 帯の VLF 波動などの短いタイムスケールで変化する現象とオーロラの変化の比較研究を行うためである。本研究では、GPS 時計の PPS 信号と正分信号の AND を取ることにより高精度な毎分 0 秒のパルスを生成し、高速カメラの外部トリガー信号とした。トリガー信号により高速撮像を開始し、

1分毎にRAWデータを保存し、10秒毎にクイックルックのためのTIF画像を作成する。また、1フレーム毎の絶対時刻は、NTPサーバーにより定期的に時刻同期を行っているPCの時間を記録する。なお、毎分0秒の時点でSTOPファイルがある場合には高速撮像は行わない。図4にGPS時計の本体と、PPS信号と正分信号を用いた外部トリガー信号の出力回路を示す。

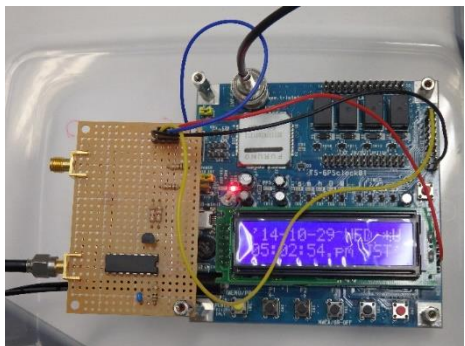


図4 GPS時計(右)とトリガー信号の出力回路(左)

3 オーロラ自動判定の性能評価

オーロラ自動判定を実装した観測システムは、2014年11月末～2015年3月末の4ヶ月間運用された。本手法を用いずに50秒間の高速連続撮像を行った場合、4ヶ月のデータ量は118TBとなるが、この観測システムを用いたことで、データ量は約1/4に抑えられた(約27TB)。しかし、自動判定領域の設定を誤っており、図5のように、自動判定領域と高速カメラの視野が東西に異なる場所にしたまま、観測期間の大半を運用してしまった。観測期間の終盤まで設定ミスに気づかなかった理由は、オーロラが東西に長く広がる傾向があるため、オーロラの判定結果に大きな影響がなかったためと考えられる。雲や雪による影響のない全天画像を約5000枚用いて、誤った判定領域と正しい判定領域での判定結果を比較してみたところ、全画像の約9割の判定結果が互いに一致していた。この結果からも、判定領域の設定ミスによる影響はそれほど大きなものではなかったことが分かる。

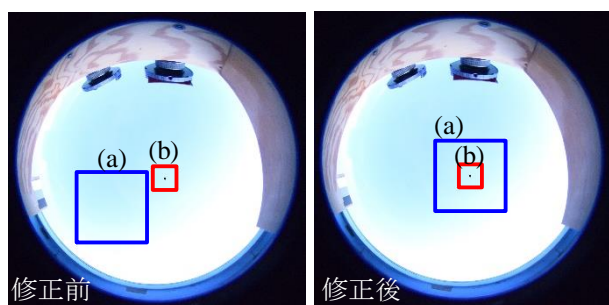


図5 修正前後の(a)オーロラ判定領域、(b)磁気天頂を中心とした高速カメラの視野

また、オーロラ自動判定の性能評価を行うために、オーロラ活動が静穏・活発だった日、月や雲、雪などの様々な影響を含んでいる画像をランダムに取り上げ、実際の自動判定の結果と、目で判断したオーロラの有無の結果を比較した。表2は画像16153枚の自動判定結果と目で判断した結果をまとめたものである。自動判定によってオーロラ有りと判定された画像は全画像に対して約39% (6257枚)、また、目で判断した場合は約21% (3375枚)となった。自動判定でオーロラ有りとされた画像の中には、非常に暗いオーロラが多く、目で見た場合にオーロラ無しと判断した画像が多かった。これは、自動判定のモデルを撮りこぼしのない様に過剰にデータを取得するように学習させた結果と総合的である。

表2 オーロラの有無の判定結果(画像数)

		目で判断	
		有り	無し
自動判定	有り	3236	3021
	無し	139	9757

オーロラの活動度は、太陽フレアに伴うコロナ質量放出で発生する地磁気擾乱(磁気嵐)によって、大きく変動を受ける。観測期間中には目立った磁気嵐は発生しておらず、全天画像が白飛びするような明るいオーロラを学習させることができなかった。観測期間を通して、明るすぎるオーロラを正しく自動判定できるかが懸念事項であったが、2015年3月17日に発生した磁気嵐では、数秒の間にオーロラが全天に広がるようなオーロラ爆発の瞬間を正しく判定でき、連続高速撮像を行うことができた。

4 結論

機械学習を用いたオーロラ自動判定システムを用いることで、これまで困難であった高速微細オーロラ撮像の全自動連続観測を可能にし、4ヶ月間の連続観測を初めて実現した。このシステムにより従来よりもデータ量が1/4に減少し、この大部分が研究に有用なデータであることから、2015年4月のデータ回収後の分析を加速する効果も期待できる。例えば、雲や雪、オーロラのない日時などのリストアップを、あらかじめ省略できる。また、毎分50秒間の連続高速撮像を可能にしたことで、脈動オーロラの数10秒周期の明滅の中の、数10Hzの変調といった、変調周期の階層性を初めて統計的に調べることが可能となる。

謝辞

本研究の一部は、科研費挑戦的萌芽研究 25540114 および、科研費基盤研究 19403010, 25302006 の援助を受けた。

参考文献

- [1] Kataoka et al. (2012), Pulsating aurora beyond the ultra-low-frequency range, *J. Geophys. Res.*, *117*, A08336, doi:10.1029/2012JA017987.
- [2] Yaegashi et al. (2011), Spatial-temporal characteristics of flickering aurora as seen by high-speed EMCCD imaging observations, *J. Geophys. Res.*, *116*, A00K04, doi:10.1029/2010JA016333.
- [3] Dahlgren et al. (2013), The optical manifestation of dispersive field-aligned bursts in auroral breakup arcs, *J. Geophys. Res.*, *118*, 4572–4582, doi:10.1002/jgra.50415
- [4] Chih-Chung Chang and Chih-Jen Lin (2011), LIBSVM : a library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2:27:1--27:27