

オーロラとエレクトロニクス

② 0.01秒周期の変化も見逃さない! 超高速オーロラ撮像機 片岡 龍峰 (Ryuho Kataoka)

● 0.02 ~ 0.03 秒の短周期で明滅する光を記録する

オーロラは準周期的に変動することがあります。周期 2 ~ 20 秒で脈を打つパルスセーティング・オーロラや、周期 0.1 ~ 1 秒でチカチカ点滅するフリッカリング・オーロラが古くから知られています。筆者らの研究グループでは 2012 年、さらに周期の短いオーロラ（なんと周期 0.02 ~ 0.03 秒！）を発見しました。

そこで現在は、科学観測用 CMOS (Scientific CMOS : sCMOS) イメージ・センサを搭載したカメラ (写真 1) を使って、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研究を進めています。

sCMOS カメラは、目では見えないほど暗いものでも鮮明な画像を撮影できます。また、高速での連続撮影が可能で、ハード・ディスクの容量がある限り何時間でも連続撮影できます。このシステムでは、浜松ホ

トニクスの「ORCA-Flash」という sCMOS カメラを使用していますが、フル解像度 (2048 ピクセル × 2048 ピクセル) で 100fps (フレーム / 秒)、垂直方向画素数を半分の 1024 ピクセルにすると 200fps で撮影が可能です。垂直方向画素数を減らせば、1000fps 以上での撮影もできます。

1000fps で撮ると、目では追えないほどに動きの激しいオーロラを、凍りつかせたかのようにぶれずに撮影できます。ただし、薄暗い空をシャッタ速度 1/1000 秒で撮影するわけなので、sCMOS カメラと言っても、じゅうぶんに明るい写真を撮るのはなかなか難しくもあります。

● 開発した観測システムの詳細

現在は、周期 0.01 秒までのオーロラの時間変動について、オーロラの細かい空間構造まで調べられる観



写真1 アラスカのボーカフラット実験場に設置した魚眼カメラとsCMOSカメラ
魚眼レンズを付けたデジタル一眼レフ・カメラで空にオーロラが出ているかどうかを監視し、オーロラがあるとだけsCMOSカメラで高速撮像を開始する。RG665フィルタを通すと、オーロラ発光のうち特定数の長い緑色（波長は557.7nm、特定数は0.7秒）と赤色（波長は630.0nm、特定数は110秒）のオーロラ輝線を消すことができ、速い変化だけを強調した画像を得られる。BG3フィルタは、RG665と同様に緑色と赤色をカットするが、RG665と違って青色（波長は427.8nm）も通す

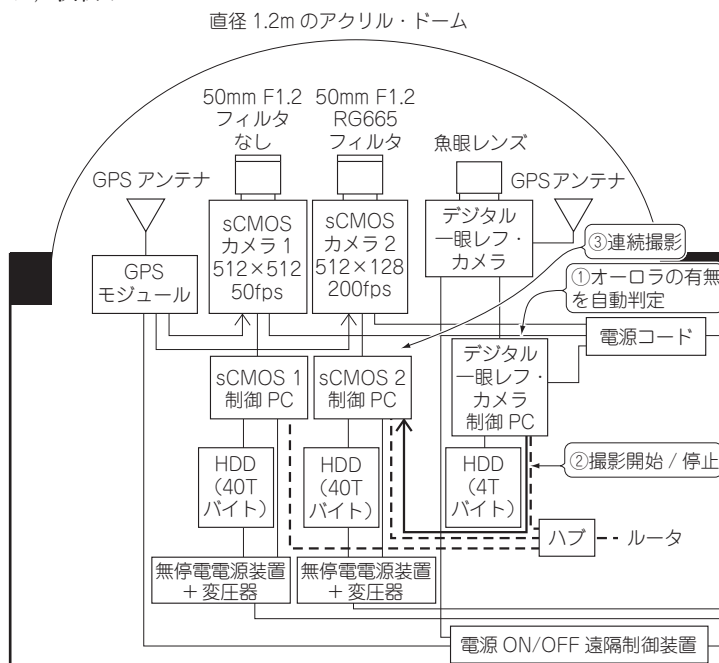


図1 全自動のオーロラ撮像システムの構成

魚眼レンズを付けたデジタル一眼レフ・カメラで20秒間隔で撮影し、得られた色情報からオーロラが出ているかどうかを自動判定する。この自動判定は、機械学習で用いられる手法と同じ

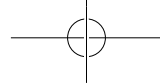


写真2 ポーカーフラット実験場(米国アラスカ州)
北緯 65 度, フェアバンクスから北東に 30 マイル (約 48km) ほど離れた山奥にあるロケット発射場

測システムを作り, 観測を行っています。

具体的には, 発光の定数数の長い緑色 (557.7 nm) と赤色 (630.0 nm) のオーロラ輝線を消してしまう光学フィルタ・ガラスを焦点距離 50mm F1.2 カメラ・レンズの前に取り付けて, sCMOS カメラで 1 秒あたり 200 枚の写真を撮影しています (図 1)。観測場所は, アラスカ大学のポーカーフラット実験場 (写真 2) です。

- 2 カ月間, 毎分 10 秒間の連続撮影に成功
自動観測システムを作ったのは 2013 年度です。日

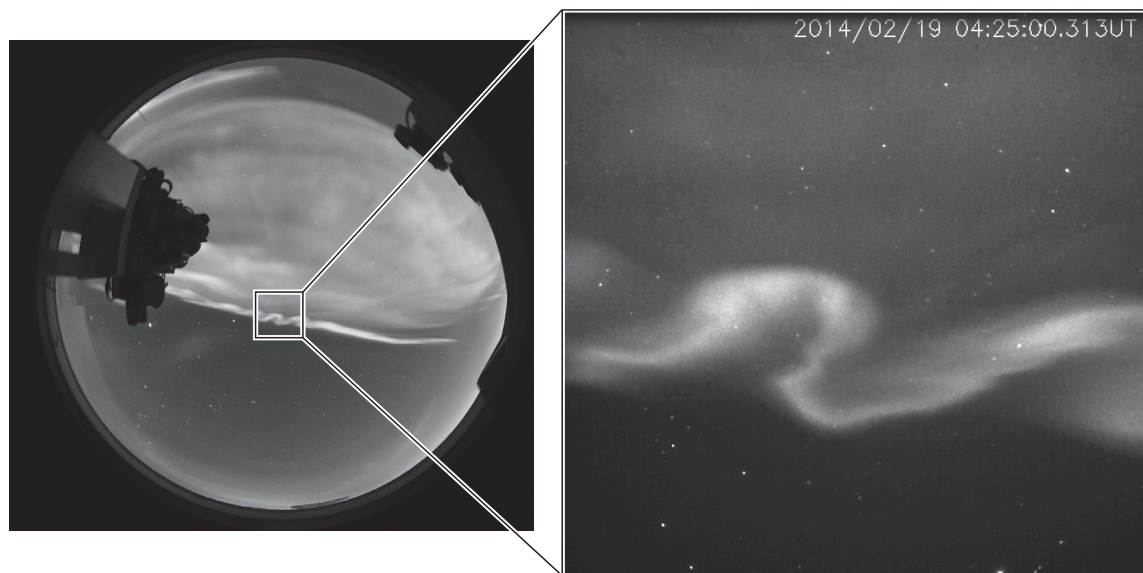


写真3 撮影したオーロラ画像の例
左が魚眼レンズによる全天画像, 右が sCMOS カメラ (RG655 フィルタつき) の画像。渦がきれいに見えている

本国内で作った観測システムをポーカーフラット実験場に持ち込み, 2014 年 2 月上旬から約 2 カ月間の無人プログラム観測を実施しました。このときは, 撮影画像の絶対時刻の基準として, GPS 衛星からの PPS (Pulse Per Second) 信号に同期して光る LED を用意し, 視野内で毎秒光らせて, sCMOS カメラの撮影時刻の確認に使うことにしました。また, 毎分 0 ~ 10 秒のデータのみを記録することでストレージを節約し, 2 カ月間にわたる連続観測を実現しました。

この観測によって, 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ており, 速度の違う流れが隣り合って動いたり, 複雑に渦巻いたりするようすを鮮明に捉えることができました (写真 3)。また, 新たなタイプの動きと思われるような映像も数多く得られるようになってきました。

- 機械学習でオーロラを自動検出できるようになった
2014 年度からは, 観測システムに二つの変更を加えました。一つ目は, LED 発光による毎秒の時刻スタンプを廃止して, GPS 時計から毎分 0 秒ごとに信号を出してトリガをかけ, sCMOS カメラで撮影する方式を採用したことです (写真 4, 図 2)。これにより, これまで解析の邪魔になっていた LED 発光がデータから消え, 画像を解析しやすくなりました。

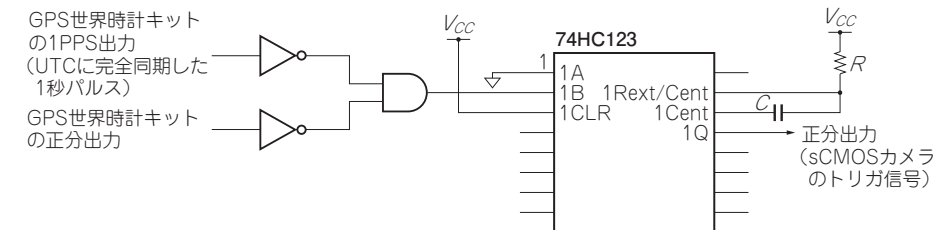
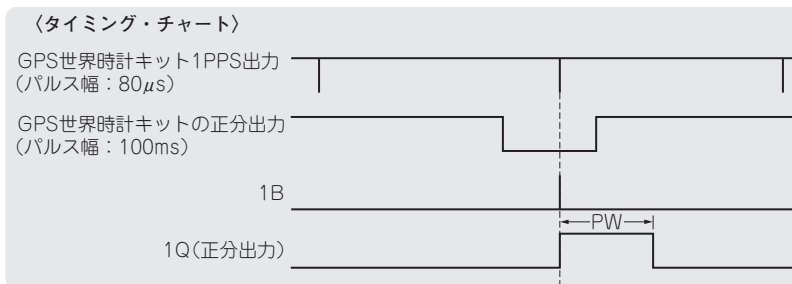


図2
GPS 世界時計キットから正分を取り出す回路例
GPS 世界時計キットの 1PPS 出力と正分出力の両方が "L" になったタイミングで 1B に "H" が入力され, 同時に 1Q から "H" が出力される。1Q のパルス幅は C と R の定数で決まる ($PW = C \times R$)



二つ目の変更点は, いま空にオーロラが出ているかどうかの自動判定を, 機械学習によって実現したことです。

判定は空の色で行っています。あらかじめ「これはオーロラだ」、「これはオーロラではない」、という教師データを制御用パソコンに与えておいて, 監視カメラ (魚眼レンズを付けた一眼レフ・カメラ) で取得した画像について, 色 (RGB) を基に, オーロラの有無を自動判定するものです。オーロラが「出ている」と判定したら, sCMOS カメラをリアルタイムで制御し, 撮影を開始します。

この新しい制御システムにより, 今までではオーロラが出ていても出ていなくても毎分 0 ~ 10 秒のデータを記録していた状況から, オーロラが出ているときだけ毎分 0 ~ 50 秒まで連続的に観測できるようになりました。

余談ですが, 人間が空を見て「これはオーロラ? 雲?」と迷ったときにも, 同じ方法で判定できます。筆者の場合はデジカメで撮ってみて, 雲と違う色 (緑色や赤色) が出ていたら, オーロラだと判定します。

- 極地のビッグ・データ!

筆者らのグループで取得した総データ量は, 2013 年度には 6T (テラ) バイト, 2014 年度には 27T バイトとなり, これまでのオーロラ観測に比べてけた違いのデータ量になっています。

ゆっくりと脈を打つパルセーティング・オーロラの

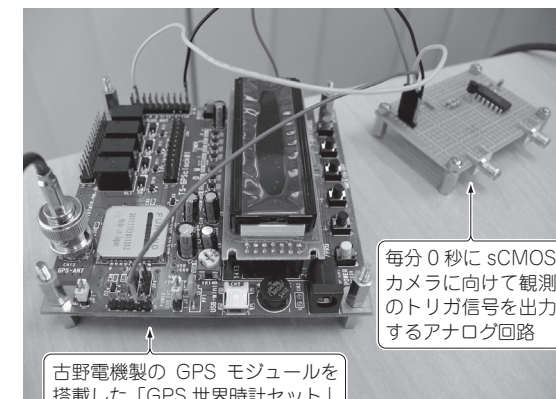


写真4 市販の GPS 時計キットを改造して毎分 0 秒のトリガを作った
写真左は, 秋月電子通商で販売している「GPS 世界時計キット」 (<http://akizukidenshi.com/catalog/g/gK-04705/>)。写真右は, GPS 世界時計キットから毎分 0 秒の信号を取り出して sCMOS カメラ観測のトリガ信号 (3V の矩形波) を出力するアナログ回路

中に, 一段速く脈を打つオーロラが見え, さらにその速い脈の中にも脈が見えます。このような時間的な階層性がなぜ生まれるのか? という謎も, そう遠くないうちに明らかになるでしょう。

オーロラのカーテンは理論的な限界にまで薄くなっています。それはなぜなのか? という答えも, 画像でとらえることにより, わかるようになるかもしれません。