

修士論文

EMCCD カメラによる高速撮像観測で得られた
フリッカリングオーロラの時間空間変動

Spatiotemporal variations of flickering aurora obtained from
imaging observations with a high-speed EMCCD camera

東北大学大学院理学研究科
地球物理学専攻

八重樫 あゆみ
(指導教員 岡野 章一 教授)
平成 22 年

フリッカリングオーロラは、数 Hz 以上の周期的な発光強度変動と数 km の微細なパッチ形状で特徴付けられる[e.g., *Beach et al.*, 1968]。過去の研究では、1000 km 以上の高度領域の衛星やロケットによる粒子観測と地上光学観測との同時観測によって、周波数 10 Hz 前後の電子フラックス振動が得られた同時刻において、地上で同程度の明滅周波数のフリッカリングオーロラが観測されたという報告がある[e.g., *McFadden et al.*, 1987; *Lund et al.*, 1995]。このような同時観測結果から、電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波によって沿磁力線降下電子フラックスが高周波で変調を受け、また EMIC 波の干渉によって微細な明滅構造が生成されるというモデルが提唱されている[*Temerin et al.*, 1986; *Sakanoi et al.*, 2005]。近年の研究では、過去に観測された典型的なフリッカリングオーロラの特徴は、上記のモデルで説明が可能であると言われてきた[*Gustavsson et al.*, 2008; *Whiter et al.*, 2008, 2010]。しかしこれまで報告されてきた光学イメージング観測結果は、ビデオフレームレートのナイキスト周波数である 16 Hz 以下に限られたものが多く、それ以上の高周波域におけるモデルの成立は定かではない。したがって、本研究では高時間空間分解能を有する EMCCD カメラを用いることによって、機器性能の制約によりこれまで捉えきれなかったフリッカリングオーロラの高周波明滅成分を捉えると同時に、広い周波数帯において、フリッカリングオーロラが複数の EMIC 波の干渉論で説明可能か否かを再検証することを目的とする。

2009 年 12 月から 2010 年 4 月にかけて、アラスカで Electron Multiplying Charge Coupled Device (EMCCD) カメラと 2 台の CCD カメラを用いた光学観測を行った。EMCCD カメラの性能は時間分解能 100 Hz、100 km 高度で視野約 16 x 16 km、空間分解能約 260 x 260 m という高時間空間分解能を持つ。同時に ELF 帯磁場センサーを用いて、400 Hz サンプリングによる水平二成分の磁場観測を行った。観測の結果、明滅周波数約 15 Hz 以下、空間スケール数 km 程度の特徴を持つ典型的なフリッカリングオーロラのほか、水平ドリフトや回転構造を伴うイベントも取得した。加えて、20 Hz 以上の高周波成分や、過去に例のない線状構造を持つフリッカリングオーロラをイメージング観測で初めて捉えることができた。一方で、フリッカリングオーロラの発生と ELF 帯磁

場変動の対応関係は確認できなかった。

本研究では、フリッカリング領域に内在する波動を画像解析から導出するため、空間二次元 FFT の時系列解析と、複数波の干渉論を仮定した時間 FFT 解析の応用であるコヒーレンス/フェーズ解析を導入した。FFT 解析によって典型周波数および波数を導出した統計解析の結果、フリッカリングオーロラは、狭い周波数スペクトル幅を持つ 4~20 Hz 程度の低周波イベントと、広い周波数スペクトル幅を持つ約 15 Hz から最大 50 Hz 付近までの高周波イベントの 2 種類に分類できた。

FFT 解析を用いて 1 秒間の観測点ごとに典型周波数 ω および波数 k を導出した統計解析結果と、 O^+ EMIC 波の分散曲線との比較を行ったところ、高度 1000~20000 km、プラズマ密度 $n=10^1\sim 10^3/cc$ の範囲内で、いかなるパラメータにおいても高周波イベントの生成は O^+ EMIC 波で説明できないことが明らかとなった。したがって、同高度領域で数十~数百 Hz 程度のイオンサイクロトロン周波数を持つ、 He^+ あるいは H^+ イオンによる EMIC 波の寄与が示唆された。本研究で用いた EMIC 波の分散関係式は、単一種のイオン組成の仮定のもとに定義されている。 He^+/H^+ EMIC 波による分散関係式を正確に定義し、フリッカリングオーロラの生成可能性を定量的に議論するため、多種イオン組成プラズマを仮定した EMIC 波の分散曲線との比較が今後の課題として残された。

また、コヒーレンス/フェーズ解析の結果、ほぼすべてのイベントについて画像内の複数のフリッカリング領域間で互いに高い相関があった。さらに、コヒーレンス/フェーズ解析によって得られた ω - k 関係と、統計解析によって得られた ω - k 関係が一致したことから、フリッカリングオーロラの明滅機構と微細構造の生成は、低周波/高周波イベントともに複数波の干渉で矛盾なく説明できることが示された。これにより、複数波が平行に干渉すると線状構造を形成、角度を持って干渉すると過去の観測例のようなパッチ状構造を形成することが示唆された。

低周波イベントはオーロラブレイクアップの開始前に発生し、高周波イベントはブレイクアップの最中に発生する傾向にあった。そのため、低周波/高周波イベントの生成条件は、沿磁力線降下電子の加速機構が発生する高度に依存している可能性が示唆された。高周波イベントの生成過程を含む上記の議論を結論付けるためには、地上光学観測と、1000 km~10000 km 程度の高度領域における粒子観測および電磁波動観測との同時観測が有効である。

一方で、フリッカリングオーロラ発生時に地上での ELF 帯の磁場変動の対応関係はみられなかった。これは、EMIC 波が地上まで伝搬できないことを示唆する結果である。ただし、観測や解析時における何らかの不具合が生じた可能性も否めないため、現在も磁場観測を継続している。

EMCCD 観測から、フリッカリングオーロラのほか、同じく周期的な変動で特徴付けられるパルセイティングオーロラや、微細構造や高速変動で特徴付けられるオーロラを数多く取得した。最大周波数が明確に得られていないため、今回の観測で定量的に議論できる 50 Hz よりも高い明滅周波数を持つオーロラが存在する可能性がある。磁気圏電離圏結合領域に発生するプラズマ現象のさらなる理解のため、今後オーロラの最高明滅周波数を同定するにあたって、数百 Hz の時間分解能による高速撮像観測は大きな意義を持つことが示唆された。現在、同研究グループの新たな観測システムのもとに行っている、最大 250 Hz 撮像観測の結果を期待する。