

高空間分解能カメラを用いたディフューズオーロラ微細構造の観測: 二次的な不安定性による構造形成

#佐野 友祐¹⁾, 細川 敬祐¹⁾, Winn Wandal¹⁾, 大山 伸一郎²⁾, 三好 由純²⁾, 小川 泰信³⁾, 田中 良昌³⁾

⁽¹⁾ 電気通信大学, ⁽²⁾ 名古屋大学宇宙地球環境研究所, ⁽³⁾ 国立極地研究所

Observation of Fine Structures in Diffuse Aurora with a High-Spatial-Resolution Camera: Manifestation of Secondary Instabilities

#Yusuke SANO¹⁾, Keisuke HOSOKAWA¹⁾, Wandal WINN¹⁾, Shin-ichiro OYAMA²⁾, Yoshizumi MIYOSHI²⁾, Yasunobu OGAWA³⁾, Yoshimasa TANAKA³⁾

⁽¹⁾University of Electro-Communications, ⁽²⁾Institute for Space and Earth Environmental Research, Nagoya University,

⁽³⁾National Institute of Polar Research

Diffuse auroras including pulsating auroras are frequently observed in the morning sector during the recovery phase of auroral substorms. They are often distributed in a wide area and last for several hours. These auroras sometimes patchy spatial structures, but the processes responsible for their formation remain unclear. Electron Multiplying Charge Coupled Device (EMCCD) cameras have been widely used to study pulsating auroras. Their electron-multiplying mechanism enables high signal-to-noise ratio observations even for faint emissions at high temporal resolution. However, the limited number of pixels and narrow dynamic range of EMCCD cameras restrict detailed analyses of spatial brightness distributions, contrast, and small-scale features. To overcome these limitations, we used a quantitative Complementary Metal Oxide Semiconductor (qCMOS) camera with high spatial resolution and wide dynamic range. The qCMOS system provides a spatial resolution of 0.1 km near zenith and preserves brightness contrasts without saturation. This capability allows us to visualize fine structures inside diffuse auroras and along patch boundaries in detail. The images were calibrated using star maps and mapped onto the geographic coordinates, enabling us to combine multiple fields of view and quantify the spatial scale and drift velocity of auroral structures with high accuracy.

We analyzed patchy diffuse auroras observed by the qCMOS camera at Skibotn, Norway (69.35N, 20.36E), during 04 – 05 UT on February 2, 2025. During this interval, finger-like structures were identified along the outer boundary of diffuse auroras. A wavy boundary with a wavelength of 10 – 25 km appeared on the southwestern edge of an eastward-drifting patch (100 – 150 m/s). These undulations developed into finger-like forms with phase speeds of 120 – 250 m/s. The observed scales, drift velocity, and timing of appearance were consistent with the structures attributed to pressure-driven instability reported by Shiokawa et al. (2010), suggesting that instability was involved in their formation. In addition, we identified smaller-scale wavy patterns on the side of one finger-like structure, which had been difficult to resolve with the spatial resolution of previous observations. This feature had a wavelength of 3 – 5 km and appeared on the northwestern side of a bright finger. It propagated northeastward along the boundary as the finger developed. This behavior suggests that velocity shear associated with the nonlinear development of pressure-driven instability excited a secondary Kelvin – Helmholtz instability (KHI). Thus, observational evidence directly suggesting a transition from pressure-driven instability to KHI in diffuse auroras has been scarce, and this study provides one of the first cases that clearly captured this process. We will discuss the generation and evolution of these auroral fine structures as a possible transition from pressure-driven instability to KHI.

サブストームの回復相では、朝側のローカルタイムにおいて、脈動オーロラを含むディフューズオーロラが、広い範囲で、かつ長時間にわたって観測される。これらのディフューズオーロラはパッチ状の空間構造を示すことが知られているが、これらのパッチ構造がどのように形成されるのかについては、未だに統一的な理解が得られていない。パッチ状ディフューズオーロラの観測には、これまで様々な機器が用いられてきたが、中でも Electron Multiplying Charge Coupled Device (EMCCD) カメラは、電子増倍機構により微弱な発光の高時間分解能観測において高い S/N 比の観測を実現してきた。一方で、画素数やダイナミックレンジに制限があるため、オーロラの輝度空間分布やコントラストの保持、微細構造の抽出には限界があった。本研究では、そうした制約を乗り越え、従来では見逃されていた可能性のあるディフューズオーロラの微細構造を検出するために、高空間分解能かつ広ダイナミックレンジ性能を有する quantitative Complementary Metal Oxide Semiconductor (qCMOS) カメラを用いた観測を行った。これにより、解像度の大幅な向上(天頂付近で 0.1 km の空間分解能)に加え、輝度の差を潰すことなく明瞭なコントラストを保持することが可能となり、ディフューズオーロラ内部の微細構造やパッチの境界を詳細に可視化することが期待できる。また、観測データに対しては、スターマップを用いた視野較正および地理座標系へのマッピング処理を行い、複数地点の観測視野を統合することによって、オーロラの空間スケールや移動速度の高精度な定量化を可能にした。

本研究では、2025 年 2 月 2 日の 04 – 05 UT の時間帯に、ノルウェーの Skibotn (69.35N, 20.36E) に設置された qCMOS カメラによって観測されたパッチ状ディフューズオーロラに着目して解析を行った。この時間帯の複数のタイミングで、ディフューズオーロラの外縁部に指状の微細構造が形成されている様子が確認できた。東向きに 100 – 150 m/s でドリフトするパッチの南西側の外縁部に出現した波長 10 – 25 km の波状の境界が、120 – 250 m/s の速さで振幅を発

達させながら伝搬することで指状構造が形成された。この指状構造は、Shiokawa et al. (2010) によって報告された圧力駆動型不安定性 (Pressure Driven Instability) に起因して発生する微細構造と、現象の空間スケールやドリフト速度、出現したタイミングなどの条件が一致していたことから、その形成に圧力駆動型不安定性が関与している可能性が高いと考えられる。さらに、ある指状構造の側面には、従来の観測の空間分解能では捉えることが困難であった、より細かいスケールの波状パターンが形成されていることも明らかになった。明るい指状構造の北西側の側面に波長 3 – 5 km の空間スケールを持って現れたこの微細構造は、指状構造の発達に伴い、境界に沿うように北東方向に移動した。これは、圧力駆動型不安定性の非線形発展に伴いパッチの境界に速度シアが生じ、二次的なケルビンヘルムホルツ不安定性 (Kelvin – Helmholtz instability: KHI) による波状構造が励起されている可能性を示唆するものである。このように、ディフューズオーロラにおいて圧力駆動型不安定性から KHI への移行を直接示唆する観測例はこれまで報告が少なく、本研究がその過程を具体的に捉えた初めての事例の一つである。発表では、この移行過程を示唆するオーロラの微細構造に注目し、その形成過程や発展メカニズムについて議論する。