

## トーチ極側境界と内部で発生する非伝播型・極方向伝播型脈動オーロラの時空間変動

#吹澤 瑞貴<sup>1)</sup>, 小川 泰信<sup>1)</sup>, 田中 良昌<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 国立極地研究所

### Spatio-temporal variability of non-propagating and poleward propagating pulsating aurora in the torch

#Mizuki Fukizawa<sup>1)</sup>, Yasunobu Ogawa<sup>1)</sup>, Yoshimasa Tanaka<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> National Institute of Polar Research

Pulsating auroras are quasi-periodic blinking auroras with intervals of a few seconds to a few tens of seconds and occur over a wide area from just after auroral break-up to the day side. Recently, they have been the focus of interest as it has been suggested that relativistic electrons precipitating in the pulsating aurora contribute to the destruction of the mesospheric ozone. Magnetospheric satellites have revealed that the precipitating electrons that generate the pulsating aurora are driven by pitch-angle scattering due to wave-particle interactions near the magnetic equatorial plane. However, satellite observations are unable to separate spatio-temporal variations, and it has not been clarified what produces the difference between pulsating auroras that pulsate with and without propagation. In this study, we aim to identify the type of pulsating auroras and their spatio-temporal variability through cooperative observations by an all-sky camera and the European Incoherent Scattering (EISCAT) radar in the northern part of the Scandinavian Peninsula.

We conducted cooperative observations with the EISCAT VHF radar at Tromsø (69.58 degrees N, 19.23 degrees E) and all-sky cameras at Tromsø, Skibotn (69.35 degrees N, 18.82 degrees E) and Kilpisjärvi (69.05 degrees N, 20.36 degrees E) on 25-26 March 2023. A non-propagating pulsating aurora was observed when the polar boundary of the torch passed over the EISCAT radar observation point from 01:00-01:10 UT on 26 March 2023. The torch structure then moved to the north, and the interior of the torch passed over the EISCAT radar observation point from 01:30-01:40 UT, and a poleward propagating pulsating aurora was detected. The peak height of the observed electron density was 94-102 km for the non-propagating pulsating aurora and 101-105 km for the propagating pulsating aurora. This suggests that the non-propagating pulsating aurora at the polar boundary of the torch has a higher mean energy of precipitating electrons than the poleward propagating pulsating aurora inside the torch.

The precipitating electrons that cause the pulsating aurora precipitate into the ionosphere due to pitch angle scattering caused by cyclotron resonance with the chorus waves generated near the magnetic equatorial plane. The resonance energy increases as the chorus waves propagate along the magnetic field lines from the magnetic equatorial plane. It has been proposed that a duct structure is necessary for the high magnetic latitude propagation of the chorus wave. In other words, the existence of a duct structure at the polar boundary of the torch is thought to allow chorus waves to propagate along the magnetic field lines and generate non-propagating pulsating auroras in the ionosphere. On the other hand, inside the torch, there is no duct structure, and the chorus waves propagate off the magnetic field lines to the outer L-shell. This results in causing electrons to precipitate into the ionosphere from the inner to the outer L-shell in turn, which may generate a poleward propagating pulsating aurora in the ionosphere. To confirm this hypothesis, we compared the propagation time of the pulsating aurora in the ionosphere with the propagation time of the chorus wave in the magnetosphere and the electron precipitating time. All-sky images showed that it took about 10 seconds for the pulsating aurora to propagate from 67.0 degrees magnetic latitude to 68.3 degrees magnetic latitude. On the other hand, using the Tsyganenko magnetic field model TS05, the time taken for an electron to precipitate from the magnetosphere to the ionosphere was calculated to be  $t_1 = 0.79$  s for a 30 keV electron from the magnetic equatorial plane at  $L = 6.6$  to an altitude of 100 km. The time taken for the chorus wave to propagate obliquely from the magnetic equatorial plane at  $L = 6.6$  to  $L = 7.3$ , corresponding to a magnetic latitude of 68.3 degrees, was  $t_2 = 0.2$  s. The time taken for the electron to precipitate from that point to an altitude of 100 km was  $t_3 = 1.3$  s. Therefore, it is difficult to explain the poleward propagation of the pulsating aurora by the oblique propagation of chorus waves since the time difference between the electrons' precipitation at magnetic latitude 67.0 degrees and their precipitation at magnetic latitude 68.3 degrees is  $t_2 + t_3 - t_1 = 0.64$  s, which is much shorter than the propagation time of the pulsating aurora of about 10 s.

Another possible mechanism for the poleward propagation of pulsating auroras is the radial outward propagation of chorus wave excitation regions in the magnetospheric equatorial plane. The geomagnetic data observed by the magnetometer at Tromsø with a time resolution of 10 s confirmed geomagnetic pulsations with a period of about 60 s and 100 s. As the period of the geomagnetic pulsation is longer than the propagation period of the pulsating aurora, geomagnetic data with a higher temporal resolution will be analysed to discuss the relationship between the geomagnetic pulsation and the outward propagation of the chorus wave excitation region.

Generalized-Auroral Computer Tomography will also be conducted using auroral images at wavelengths of 427.8 nm and 557.7 nm observed by all-sky cameras at Tromsø, Skibotn and Kilpisjärvi to investigate spatiotemporal variations in the 3D

emission intensity and mean energy of the precipitating electrons of the poleward propagating pulsating aurora.

脈動オーロラは数秒から数十秒の間隔で準周期的に点滅するオーロラであり、オーロラブレイクアップ直後から昼間側にかけて広い範囲で発生する。近年、脈動オーロラ中に降下する相対論的電子が中間圏オゾンの破壊に寄与していることが示唆されており注目を集めている。脈動オーロラを発生させる降下電子は磁気赤道面付近の波動-粒子相互作用によるピッチ角散乱によって駆動されることが磁気圏観測衛星により解明されている。しかし、衛星観測では時空間変動の分離が不可能であり、その場で点滅する脈動オーロラと伝搬を繰り返す脈動オーロラの違いが何によって生み出されるかについては解明されていない。そこで本研究では、スカンジナビア半島北部に設置された全天カメラと欧州非干渉散乱 (EISCAT) レーダーの協同観測によって脈動オーロラの種類を同定しながらその時空間変動を明らかにすることを目的とする。

我々は、2023年3月25 - 26日に Tromsø (69.58° N, 19.23° E) に設置された EISCAT VHF レーダーと Tromsø、Skibotn (69.35° N, 18.82° E)、Kilpisjärvi (69.05° N, 20.36° E) の3地点に設置された全天カメラの協同観測を実施した。そして、2023年3月26日 01:00 - 01:10 UT に EISCAT レーダー観測点上をトーチの極側境界が通過し、非伝搬型の脈動オーロラが観測された。その後トーチ構造が北側に移動し、01:30 - 01:40 UT には EISCAT レーダー観測点上をトーチの内部が通過し、極方向伝搬型の脈動オーロラが観測された。このときに観測された電子密度のピーク高度は非伝播型脈動オーロラが 94 - 102 km、伝播型脈動オーロラが 101 - 105 km であった。これはトーチの極側境界の非伝搬型脈動オーロラの方が、トーチの内部の極方向伝搬型脈動オーロラよりも降下電子の平均エネルギーが高いことを示唆する。

脈動オーロラを引き起こす降下電子は磁気赤道面付近で発生したコーラス波とのサイクロトロン共鳴によるピッチ角散乱により電離圏に降下する。そしてその共鳴エネルギーはコーラス波が磁気赤道面から磁力線に沿って伝搬するに従って増加する。コーラス波の高磁気緯度伝搬にはダクト構造が必要であると提案されている。すなわち、トーチの極側境界ではダクト構造が存在してコーラス波が磁力線に沿って伝搬することで電離圏で非伝搬型の脈動オーロラが発生すると考えられる。一方で、トーチの内部ではダクト構造が存在せず、コーラス波が磁力線を外れて外側の L シェルに伝搬することで、電子が内側から外側の L シェルに向かって順番に電離圏に降下することで、電離圏では極方向伝搬する脈動オーロラが発生するのではないかと考えられる。この仮説を確かめるために電離圏における脈動オーロラの伝搬時間と磁気圏でのコーラス波の伝搬時間と電子の降下時間を比較した。全天画像を確認したところ脈動オーロラが磁気緯度 67.0 度から 68.3 度まで伝搬するのにかかる時間は約 10 秒であった。一方で Tsyganenko 磁場モデル TS05 を使用して磁気圏から電離圏までの電子の降下時間を計算したところ、 $L = 6.6$  の磁気赤道面から 30 keV の電子が高度 100 km まで降下するのにかかる時間は  $t_1 = 0.79$  秒であった。また、コーラス波が  $L = 6.6$  の磁気赤道面から磁気緯度 68.3 度に対応する  $L = 7.3$  まで斜め伝搬するのにかかる時間は  $t_2 = 0.2$  秒であり、その地点から高度 100 km まで電子が降下するのにかかる時間は  $t_3 = 1.3$  秒であった。そのため、磁気緯度 67.0 度に電子が降下してから磁気緯度 68.3 度に電子が降下するまでの時間差は  $t_2 + t_3 - t_1 =$  約 0.6 秒であり、脈動オーロラの伝搬時間約 10 秒に比べて非常に短いため、コーラス波の斜め伝搬で脈動オーロラの極方向伝搬を説明するのは難しい。

その他の脈動オーロラの極方向伝搬メカニズムとして磁気圏赤道面内でのコーラス波励起領域の動径方向外向きの伝搬が考えられる。Tromsø に設置された磁力計により観測された時間分解能 10 秒の地磁気データを確認したところ、約 60 秒周期と約 100 秒周期の地磁気脈動が確認された。この地磁気脈動の周期は脈動オーロラの伝搬周期と比べて長いいため、さらに時間分解能の高い地磁気データを解析し、地磁気脈動とコーラス波励起領域の外向き伝搬との関係について議論する予定である。

また、Tromsø、Skibotn、Kilpisjärvi に設置された全天カメラによって観測された波長 427.8 nm、557.7 nm のオーロラ画像を用いて一般化オーロラコンピュータグラフィを実行し、極方向伝播型脈動オーロラの 3 次元発光強度や降下電子の平均エネルギーの時空間変動についても調査する予定である。