

# 地磁気静穏時における電離圏トラフの季節変化と太陽活動度依存性

石田哲朗<sup>1,2</sup>、小川泰信<sup>1,2</sup>、門倉昭<sup>1,2</sup>、平木康隆<sup>1</sup>、Ingemar Häggström<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所

<sup>2</sup> 総合研究大学院大学

<sup>3</sup> EISCAT 本部、キルナ

## Seasonal variation and solar activity dependence of the quiet-time ionospheric trough

T. Ishida<sup>1,2</sup>, Y. Ogawa<sup>1,2</sup>, A. Kadokura<sup>1,2</sup>, Y. Hiraki<sup>1</sup> and I. Häggström<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Graduate University for Advanced Studies

<sup>3</sup> EISCAT Headquarters, Kiruna, Sweden

We have conducted a statistical analysis of the ionospheric F region trough, focusing on its seasonal variation and solar activity dependence under geomagnetically quiet and moderate conditions, using plasma parameter obtained via Common Program 3 observations performed by the European Incoherent Scatter (EISCAT) Tromsø UHF radar between 1982 and 2011.

The ionospheric trough is characterized by a band of depleted electron density that extends longitudinally around the nightside auroral/subauroral region of the Earth. Under geomagnetically quiet and moderate conditions, the overall trough structure is mainly composed of a high-latitude domain and a midlatitude domain. The high-latitude trough is usually accompanied by an increase in ion temperature ( $T_i$ ) caused by high-speed convection flow [e.g., Williams and Jain, 1986; Collis and Häggström, 1988], such that the trough is commonly regarded to form by dissociative recombination accompanied by frictional heating. On the other hand, the midlatitude trough is present in the subauroral region and is generally considered to form by ordinary loss processes involving recombination in darkened regions of stagnated plasma flow [e.g., Spiro et al., 1978]. Consequently, the midlatitude trough is not accompanied by a similar increase in  $T_i$ , as no frictional heating occurs.

Although there are many studies made on statistical analysis of the ionospheric trough, little is known about physical and chemical processes associated with long-term variation. Therefore, we have focused on the seasonal variation and solar activity dependence and investigated its physical and chemical processes. (Note that the high-latitude side of the EISCAT FOV ( $65^\circ$ – $72^\circ$  MLAT) is written “high-latitude side”, and the low-latitude side of the EISCAT FOV ( $61^\circ$ – $65^\circ$  MLAT) is written “low-latitude side” for short in the following results.)

The main results obtained regarding the seasonal variation of the trough characteristics and the dependence on solar activity are summarized as follows.

1. On the high-latitude side, the ratio of increased  $T_i$  due to frictional heating ( $\Delta T_i \geq 200$  K) is larger than  $\sim 85\%$  in the postmidnight region (00:00–06:00 MLT) owing to eastward return flow in all seasons. Moreover, there is a major difference in the ratio of frictional heating between the high- and low-latitude side during summer, with frictional heating  $\sim 47\%$  higher on the high-latitude side. Based on comparison of the occurrence rate with the ratio of frictional heating, we conclude that dissociative recombination accompanied by frictional heating is a main cause of trough formation in sunlit regions.

2. The increase in  $T_i$  is suppressed from winter to summer, most likely owing to frictional heating being suppressed by increased ion drag force on neutral upper atmosphere in summer.

3. In the winter, the occurrence rate decreases down to  $\sim 20\%$  within the premidnight region (18:00–00:00 MLT), while it increases up to  $\sim 80\%$  in the postmidnight region (00:00–06:00 MLT) on the high-latitude side. In contrast, the occurrence rate increases up to  $\sim 80\%$  within the premidnight region, while it decreases down to  $\sim 20\%$  in the postmidnight region on the low-latitude side. These variations in the occurrence rate are supposedly influenced by region 2 current in the premidnight region, and region 1 current in the postmidnight region, respectively. Similar behaviors were shown in the equinox under high solar activity. Accordingly, the effects of FACs become dominant with increasing F10.7 during equinox. During summer, however, we could not confirm any solar activity dependence on the occurrence rate.

4. Trough depth and frictional heating were found to increase with F10.7 within the postmidnight to morning (01:00–09:00 MLT) and dayside to duskside (12:00–16:00 MLT) regions during equinox and the midnight to morning region (00:00–09:00 MLT) during summer. These data indicate that the trough becomes deeper via dissociative recombination caused by increased  $T_i$  with increasing F10.7, at least during the equinox and summer seasons (but not winter).

本研究では、国立極地研究所に整備された30年間（1982年~2011年）のEuropean Incoherent Scatter (EISCAT) 磁気子午面スキャンデータベースを利用して、磁気静穏時における電離圏トラフ（以降、トラフと略称する）の季節変化と太陽活動度依存性を統計的に調査した。

トラフは電離圏の電子密度が急激に減少する領域を指し、昼側から夜側にかけて経度方向に沿った馬蹄状の空間構造を有する。磁気静穏時においては、トラフは高緯度域と中緯度域にて異なるプロセスを経て形成されることが知られている。前者は高緯度トラフと呼ばれ、主に電離圏対流が強まる場所で発生する摩擦加熱により、解離再結合反応を介して電子密度が減少し形成される [e.g., Williams and Jain, 1986; Collis and Häggström, 1988]。一方で、後者は中緯度トラフと呼ばれ、自転に伴う対流（共回転対流）と電離圏対流との重ね合わせにより夜側で対流が滞留し過剰に再結合して形成すると考えられている [e.g., Spiro et al., 1978]。そのため、中緯度トラフは高緯度トラフとは異なり、摩擦加熱を伴わないことが知られている。

これまでのトラフの統計的研究では、電子密度構造に着目されていたため、長期変化に関わる物理的・化学的なプロセスは明らかになっていない。そこで、本研究ではトラフの季節変化と太陽活動度依存性に関わる背景の物理に焦点を当て、その物理的・化学的なプロセスを調査した。（以下では、EISCAT 視野の高緯度側（65°–72° MLAT）を単に“高緯度側”と記述し、EISCAT 視野の低緯度側（61°–65° MLAT）を“低緯度側”と略して記述している点に注意されたい。）

本研究で明らかになった季節変化及び太陽活動度依存性の結果及び考察は以下のとおりである。

1. 高緯度側では、東向きのリターンフローが強まる postmidnight 領域（00:00–06:00 MLT）にて、季節を問わず摩擦加熱（ $\Delta T_i \geq 200$  K）を伴うトラフの割合が85%以上となる。さらに夏季には、高緯度側では低緯度側に比べて摩擦加熱を伴うトラフの割合が47%も高いことが分かった。トラフの発生頻度もまた高緯度側で顕著に高くなることから、特に夏季のように日照の効果が強まる環境においては、摩擦加熱に伴う解離再結合反応がトラフの形成に重要な役割を果たすと考えられる。

2. 冬季から夏季にかけて中性大気のイオンドラッグが増えるため、トラフ内部のイオン温度上昇（摩擦加熱）が抑制される。

3. 冬季の低緯度側では、premidnight 領域（18:00–00:00 MLT）にてトラフの発生頻度が20%にまで減少するのに対して、postmidnight 領域（00:00–06:00 MLT）では発生頻度80%を高い値を保持することが分かった。一方で、冬季の高緯度側では、premidnight 領域でトラフの発生頻度が80%もあるのに対して、postmidnight 領域では20%にまで減少することが分かった。前述した premidnight 領域と postmidnight 領域に見られる発生頻度の変化は、それぞれ region 2 電流と region 1 電流の影響を受けていると考えられる。同様の特徴は、春季・秋季の太陽活動度が高い時期にも確認された。とりわけ、春季・秋季では太陽活動度が高くなるにつれて、沿磁力線電流の影響が強くなることが分かった。しかしながら、夏季には発生頻度の変化の特徴が確認できなかった。

4. トラフの溝の深さと摩擦加熱は、太陽活動度が上がると大きくなることが分かった。トラフの溝が深くなった原因は、摩擦加熱の増加に伴う解離再結合反応の促進と考えられる。このような特徴は、春季・秋季では 01:00–09:00 MLT と 12:00–16:00 MLT に、夏季では 00:00–09:00 MLT に確認されたが、冬季には確認できなかった。