

氏 名 石田 哲朗

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1757 号

学位授与の日付 平成27年3月 24 日

学位授与の要件 複合科学研究科 極域科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Study on multi-timescale characteristics of ionospheric
trough in subauroral/auroral region

論文審査委員 主 査 准教授 小川 泰信
教授 門倉 昭
教授 山岸 久雄
教授 藤原 均 成蹊大学
准教授 細川 敬祐 電気通信大学大学院

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

論文題目 : Study on multi-timescale characteristics of ionospheric trough in subauroral/auroral region

The F-region ionospheric trough is a band of depleted electron density that extends longitudinally around the nightside subauroral/auroral region of Earth. It is well known that the averaged electron density structure of the trough, but the physical and/or chemical processes associated with its structural variation are still unclear over several time and spatial scales. Hence, a detailed and unified investigation within the trough region is highly desirable. To understand the fundamental characteristics of the trough region, we conducted a multi-part investigation that consisted of the following two steps.

For the first step, we investigated seasonal variation and solar activity dependence of the quiet-time ionospheric trough using plasma parameter data obtained via Common Program 3 (CP-3) observations performed by the European Incoherent Scatter (EISCAT) radar between 1982 and 2011. These statistical studies are based upon geomagnetically quiet to moderate conditions because we needed to understand the pure response of seasonal variation and solar activity dependence as the first step. The statistical results show that frictional heating plays an important role in trough formation in terms of seasonal variation and solar activity dependence. Since frictional heating decreases electron density through dissociative recombination process, the trough can be preserved even during summer which has a relatively higher ionization rate than in the other seasons. We also found that such frictional heating becomes more intense under high solar activity, and thus the troughs with frictional heating tend to be deeper. Additionally, we propose the possibility that the occurrence rate of the trough was influenced by field-aligned currents (FACs). Some of the case studies previously reported that the downward FACs could produce the trough structure, but its statistical characteristic is still unclear. Thus, this is the first statistical study which mentioned the relationship between the trough and FACs. Especially during equinox, the occurrence rate of the trough varies with solar activity, which is possibly caused by solar activity dependence of the FACs intensity. The details are summarized as follows.

1. During geomagnetic quiet to moderate conditions, frictional heating caused by plasma flow is active in the auroral region located in the high-latitude side of the EISCAT field of view (65° – 72° MLat), and thus, the occurrence rate of the trough is relatively higher in the auroral region. Especially, during summer, the ratio of frictional heating is ~47% higher on the high-latitude side. Based on comparisons of the occurrence rate with the ratio of frictional heating, we conclude that dissociative recombination accompanied by frictional heating is the main cause of trough formation in sunlit regions.

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

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 the neutral atmosphere in summer.
3. In the winter, the occurrence rate of the trough decreases down to ~20% within the pre-midnight region, while it increases up to ~80% in the post-midnight region on the high-latitude side. In contrast, the occurrence rate increases up to ~80% within the pre-midnight region, while it decreases down to ~20% in the post-midnight region on the low-latitude side. These variations in the occurrence rate are supposedly influenced by the region 2 current in the pre-midnight region and the region 1 current in the post-midnight region, respectively. Similar behaviors were observed in the equinox under high solar activity. Accordingly, the effects of FACs become dominant with increasing F10.7 during the equinox.
4. Trough depth and frictional heating were found to increase with F10.7 within the post-midnight to morning and dayside to duskside regions during the equinox, and the midnight to morning regions 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.

The statistical studies above were based upon geomagnetically quiet to moderate conditions, and thus, for the second step, analyses under geomagnetically active conditions were performed to further understand the basic characteristics of the trough. Specifically, we focused on the trough region during a substorm event and investigated the small-structure called an ionospheric blob (a few hundreds of kilometers in scale), which is considered to be the main source of the irregularities. As such small-scale structures vary over relatively short-term durations, and we conducted new EISCAT radar observations with high-speed meridional scans (60–80 s) during October and December 2013. The temporal evolution of a blob was observed during a substorm event on December 4, 2013. This is the first report regarding direct observations of blob deformation in the trough region during a substorm. The observational results indicated that the enhanced plasma flow was associated with the deformation process of the blob within the trough region. The detail is summarized as follow.

5. The blob deformation observed by high-speed meridional scans was possibly caused by the following two-step process: the initial “seed” density structures are created by the Kelvin–Helmholtz instability and dissociative recombination, and then the smaller scale irregularities are secondarily created by the localized gradient-drift instability.

In summary, the obtained results indicated that enhancement of plasma convection plays an important role in trough structuring over both long-term and short-term durations. In regards to the long-term duration, enhancement of plasma convection forms the trough through dissociative recombination and preserves its structure from the effect of ionization. Such trough structuring is more intense under high solar activity. In regards to short-term periods, enhancement of plasma convection also contributes to trough structuring in the form of blob deformation through dissociative recombination and some of the plasma instabilities. Besides, the result also indicated

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

the possibility that solar activity dependence of the FACs intensity influences the occurrence rate of the trough during equinox.

(別紙様式 3)
(Separate Form 3)

博士論文の審査結果の要旨
Summary of the results of the doctoral thesis screening

論文題目 : Study on multi-timescale characteristics of ionospheric trough in subauroral/auroral region

本論文では、電離圏のサブオーロラ帯/オーロラ帯トラフの様々な時間スケールにおける空間構造の変動を明らかにすることで、トラフの基本構造をその生成プロセスを踏まえて理解することを目的としている。

電離圏トラフは、経度方向に広がる馬蹄状の構造を持つ電子密度の減少領域を指し、日照量の日変化だけでは説明できない急峻な電子密度空間構造を持つ。トラフの電子密度構造や発生頻度が顕著な季節変化/太陽活動度依存性を有することや、トラフ内部の電子密度の微細な構造が地磁気擾乱時に大きく変化することが知られている。しかし、トラフの空間構造の決定には様々な物理的・化学的なプロセスが寄与しているため、その基本構造の理解はこれまで不十分であった。そこで本論文では、北欧の欧州非干渉散乱 (EISCAT) レーダーで得られた過去30年間のデータと、新規に取得したEISCAT特別実験データを主として用いたデータ解析を進めることにより、数年から数ヶ月スケールのトラフの長期変動の成因やトラフ内部の微細構造変動に関する研究を実施した。

本論文の研究内容は二部構成となっており、それぞれ (1) トラフ構造の太陽活動度依存性及び季節変化の研究と (2) トラフ内部の速い時間変化の研究、をテーマとしている。それぞれの研究内容を以下に記述する。

(1) トラフ構造の太陽活動度依存性及び季節変化の研究

太陽活動度の上昇に伴う極域電離圏の変化には、夜側沿磁力線電流の電流量の変化が大きく影響することが報告されており、この沿磁力線電流がトラフ形成に寄与する可能性が示唆されている。しかし、沿磁力線電流の太陽活動度依存性がトラフに対してどのような寄与をするかについては観測的に明らかにされていなかった。そこで沿磁力線電流のトラフへの影響やその構造変化に関わる物理的・化学的プロセスを理解することに重点を置いた、トラフの太陽活動度依存性の調査を、EISCAT長期観測データを用いて実施した。その結果、沿磁力線電流の方向の違いに応じたトラフの発生頻度の変化 (具体的には、電流が流入する領域ではトラフの発生頻度が太陽活動度の上昇に伴って上昇するのに対し、電流が流出する領域ではトラフの発生頻度が減少する傾向) が明らかになった。このことから、沿磁力線電流の電流量が太陽活動度に伴って増加する効果により、太陽活動度と連動する形でトラフの発生頻度が変化している可能性を指摘した。

また、季節に伴いトラフの電子密度構造の特徴が変わることは、先行研究により知られてきた。しかし、トラフの季節変化を作り出す物理的・化学的プロセスは未だに明らかにされていなかった。そこで、EISCAT長期観測データを用いてトラフの温度構造を中心とした統計的な性質を調査することにより、(i) 真夜中過ぎ (00-06 磁気地方時) の時間帯の領域では、摩擦加熱に伴う解離再結合反応が特に促進されることによって、季節に依らずトラフが作られること、(ii) この領域は夏季でも日照の効果が弱いためトラフ構造が保たれること、を本論文で明らかにした。

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

(2) トラフ内部の速い時間変化の研究

電離圏トラフの内部を数分程度の速い時間スケールでスキャン観測した例は過去に無いため、特にサブストームや磁気嵐の発生に伴って電離圏の対流が急激に変化するときに、トラフ内部で発生する構造変化については十分な理解が得られていない。そこで、EISCATレーダーを用いた高速スキャン観測を2013年10月から12月にかけて合計9回実施し、得られたデータを用いてサブストーム発生時の対流の急激な成長に伴うトラフ内の電子密度構造 (Blob) の時間発展を精査した。その結果、サブストームの開始に伴って観測されたBlobの分裂は、低高度 (180 km 以下) における摩擦加熱に伴う解離再結合反応の寄与に加え、電離圏対流のシア構造の発展に起因するケルビン-ヘルムホルツ (K-H) 不安定性によって生じていた可能性を指摘した。サブストーム時のトラフ内部の Blob の構造変化の様子を観測及び解析した研究は本論文が初めてであり、今後のトラフ構造変化の研究に対して貢献する内容と言える。

以上の結果から、幅広い時間スケールにおける電離圏トラフの基本構造とその成因に関する新たな知見が得られたと共に、トラフの定義そのものの再考を促す研究成果が本論文により得られたと判断された。特に、電離圏トラフと沿磁力線電流との対応関係を統計的に明確に示した研究成果は、電離圏-磁気圏結合を中心とした領域間結合過程の理解に大きく貢献する内容であると、高く評価された。以上のことから、本論文は総合研究大学院大学 複合科学研究科 極域科学専攻の学位論文に値するものと認められた。