

氏 名 内田 ヘルベルト陽仁

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2237 号

学位授与の日付 2021年3月 24日

学位授与の要件 複合科学研究科 極域科学  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Study of auroral breakup and pulsating aurora by high-speed  
imaging at north-south magnetic conjugate stations

論文審査委員 主 査 片岡 龍峰  
極域科学専攻 准教授  
西村 耕司  
極域科学専攻 准教授  
門倉 昭  
極域科学専攻 教授  
細川 敬祐  
電気通信大学 大学院情報理工学研究科 教授  
三好 由純  
名古屋大学 宇宙地球環境研究所 教授

## 博士論文の要旨

氏 名 内田 ヘルベルト陽仁

論文題目 Study of auroral breakup and pulsating aurora by high-speed imaging at north-south magnetic conjugate stations

Auroral substorm is one of the most important phenomena to understand the magnetospheric and ionospheric plasma dynamics. This thesis is dedicated to observationally constrain the mechanism of the energy release in the ionosphere associated with the substorm, using ground-based high-speed imagers. The ground-based high-speed imaging system was newly developed by the author. As a unique point, the frame rate is selected to be 100 fps, which is high-speed enough to be able to capture the new auroral phenomena beyond human eyes and the classical video rate at  $\sim 30$  fps. Optical filter and optical system were omitted, and standard C-mount lenses were directly attached to the EMCCD camera, so that we can simply replace the fish-eye lens to telescope lens to change the field-of-view. The newly developed imaging systems were installed by the author at both northern and southern magnetic conjugate stations at Tjörnes station in Iceland (magnetic latitude of  $66.27^\circ$ ) and at Syowa Station in Antarctica (magnetic latitude of  $-66.33^\circ$ ). The author attended the JARE overwinter expedition, to realize both all-sky and narrow field-of-view high-speed imaging at Syowa Station. A total of more than 200 TB images were recorded in HDDs. The most notable scientific results were then obtained from the successful campaign observation among those conjugate ground-based stations and the Arase satellite on September 22, 2018, which is the main scientific content discussed in very detail in this thesis.

The first finding is pertaining to the asymmetric development of the poleward expansion at the auroral breakup as identified at the north-south conjugate points. The initial brightening auroras were longitudinally shifted for 1.7–2.3 magnetic local time (MLT) from the nominal conjugate points, which is consistent with the empirical relationship dependent to the Y component of interplanetary magnetic field. Interestingly, the subsequently observed propagating auroras directed in opposite directions at northern and southern conjugate points, i.e. eastward propagation in the northern hemisphere and westward propagation in the southern hemisphere. Since the propagating directions correspond to the direction of the asymmetric ionospheric equivalent currents at the northern and southern conjugate points, it is suggested that the ambient ionospheric Hall current plays the essential role to cause the asymmetric development, as was theoretically expected from the global simulations by Ebihara and Tanaka (2015b; 2018). The result explained above was published in Geophysical

Research Letters (Uchida et al., 2020).

The high-speed imaging makes it possible to further examine the expected shear motion of auroras which should appear at the leading edge of propagating auroras. As an additional material from the published paper of Uchida et al. (2020), it is found that the identified shear motions are in opposite directions to the expected directions from the simulation works by Ebihara and Tanaka in both hemispheres. The discrepancy may contribute to the improvement of future global simulations. It is also needed to observationally examine that similar shear motions can be identified in many other events of poleward expansion in our data set of high-speed imaging.

The second finding was made during the early recovery phase of the same substorm, by using the ground-based high-speed imaging and the in-situ burst-mode observation of plasma waves at the Arase satellite. Against to the standard knowledge of pulsating auroras which contain an intensity variation at a few or several seconds with  $3\pm 1$  Hz modulation, a rapid pulsating aurora at  $\sim 20$  Hz was identified by our narrow field-of-view imager at Syowa station. The  $\sim 20$  Hz pulsating aurora was not detected by our all-sky imager. The Arase satellite simultaneously observed  $\sim 20$  Hz intensity variations of whistler mode waves, providing the first evidence that whistler mode waves can cause the pulsating auroras in the fastest regime well beyond the well-known 3 Hz modulation.

This thesis therefore successfully demonstrates that the high-speed imaging observation of auroras beyond human eyes is essentially important to newly identify and to understand the fine-scale auroral dynamics and to visualize the wave-particle interactions occurred in the magnetosphere. Future works must include a development of maintenance-free observation system to continue the high-speed observations. Also, a new development of the browsing system is needed to quickly look into the huge data to find further interesting events, other than the substorm event on September 22, 2018. This thesis provides some basic ideas to those new developments, based on the experience obtained throughout our research activities.



## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏 名 内田 ヘルベルト陽仁

論文題目 Study of auroral breakup and pulsating aurora by high-speed imaging at north-south magnetic conjugate stations

地球の磁気圏が太陽風から受けるエネルギーは電離圏に流入し、地球の極域に様々なオーロラ現象を引き起こしている。そのエネルギー解放の代表例がオーロラ爆発である。爆発的なオーロラ活動がピークに達した後は、淡いオーロラとともに準周期的に明滅を繰り返す脈動オーロラが現れ、やがて静穏な状態へと遷移することで、電離圏でのエネルギー解放が完結する。この一連のサイクルはサブストーム現象として知られており、その発見から半世紀以上経った今も、その全容のメカニズム解明は磁気圏物理学の中心的な課題となっている。

申請者は、審査論文において、このオーロラ爆発と脈動オーロラの双方について、独自に開発した高速撮像カメラの観測データを取得し、それらの発生メカニズムについて検証した。より具体的には、磁力線のつながった地球上の南北半球 2 地点（昭和基地とアイスランド。磁気共役点と呼ばれる）で同時に、同一の撮像システムによってオーロラ観測を実施し、さらにその磁力線上に、オーロラ発生の原因となるプラズマ環境を直接測定する「あらせ」衛星が位置していたという、極めて独自性の高い南北地上・衛星同時共役点観測データセットを取得することに成功し、その詳細な解析を行うことにより実証的に考察した。申請者が見出した知見は、今後の数値モデルによる比較・検証などを経て、サブストーム現象の全容解明に大いに貢献するものと期待される。

第 1 章は、オーロラサブストームの基本的な説明と、オーロラ爆発や脈動オーロラの先行研究の概要をまとめたものである。第 2 章は、高速オーロラ撮像システムの開発に関する詳細が述べられている。第 3 章では、南北共役点におけるオーロラ観測の結果、特に 2018 年 9 月 22 日における、あらせ衛星とのキャンペーン観測結果にフォーカスした理由が説明されている。

第 4 章は、Uchida et al. (2020, Geophysical Research Letters) に掲載された結果を中心に、オーロラ爆発が南北共役点において東西非対称に発達した例を示している。あらせ衛星のデータや地上のネットワーク観測データを組み合わせることで、オーロラ爆発の東西発展に太陽風磁場の東西成分の変動とそれによる電離圏対流の南北非対称性が重要な役割を果たしているという仮説と整合的であったことを示す重要な知見である。また、高速撮像を活かした解析として、東西伝播するオーロラ中の渦度を評価した結果、上記仮説とは整合しない渦度が観測されていることを明らかにしており、今後の磁気圏シミュレーション研究に大きな示唆を与える結果となっている。

第 5 章は、第 4 章で示したオーロラ爆発後に発生した脈動オーロラに関する研究成果である。南北磁気共役点で観測される脈動オーロラに関して、まずは数秒単位の主脈動につ

いて、あらせ衛星で観測されるコーラス波動の強度変動と一対一対応が見られたことを示したのちに、独自の高速撮像ならではの解析結果を示している。特筆すべきは、あらせ衛星がバーストモードすなわち一時的に最高時間分解能の観測を行った時間帯のデータ中に見られた 20 Hz 程度のコーラス波動の強度変動と同時に、地上でも 20 Hz 程度の高速な脈動オーロラが発生していたことを観測的に初めて同定したことである。先端的な先行研究では、脈動オーロラ中の数 Hz の強度変動に関してコーラス波動との一対一対応が発見されているが、さらに一桁速い高速変動においても対応を見出した重要な成果と言える。

第 6 章では今後の関連研究の課題や展望、第 7 章は結論が述べられている。オーロラ爆発と脈動オーロラに関して、いずれも単一のイベント解析による限界が認められ、今後のより包括的な研究が必要であることは、将来的な課題として明白である。

観測機器の設計・設置・観測を自ら行い、南極昭和基地の越冬隊員として取得した独自の地上観測データと、先端的な人工衛星の観測データを組み合わせるという複雑な解析を通して、査読付き国際誌論文を発表した、という一連の研究過程を遂行したことは、自立した研究活動を行う能力を示したものとして高く評価すべきである。中でも独自の手法で時刻精度を高め、難度の高い観測を成功させた技術力と研究遂行能力は顕著であり、今後の活躍への期待も大きい。以上の理由から、博士の学位論文の内容としては十分であると認められる。よって、審査委員会は、審査論文が博士（理学）の学位を授与するのにふさわしいと全員一致で認めた。