(海外特別研究員事業)令和 3年 4月 29日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 2019年度 受付番号 201960510 氏 名 高橋 透

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。 なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

- 1. 用務地(派遣先国名) 用務地: オスロ (国名: ノルウェー王国 )
- 研究課題名(和文)<u>※研究課題名は申請時のものと違わないように記載すること。</u>
  多数ロケットと地上観測に基づいた電離圏擾乱生成メカニズムの研究
- 3. 派遣期間: 平成 31 年 4月 1日 ~ 令和 3年 3月 31日
- 4. 受入機関名及び部局名

受入機関名: University of Oslo

<u>部局名: Department of Physics</u>

5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6.研究発表」以降については様式10-別紙1~4に記入の上、併せて提出すること。

### 所期の目的

高度 60 km以上に広がる電離圏は、太陽からの極端紫外線によって中性大気が部分的に電離された領域で、衛星通信を行う上での経路としての役割を果たす。この電離圏内で、時として電子密度の粗密構造が発達する電離圏擾乱と呼ばれる現象が、数mから数 kmの様々なスケールで発生する。特に、100 mスケールの電離圏擾乱は測位衛星(GPS 衛星など)の電波を大きく屈折・回折させ、測位誤差を生じさせることが知られている。従って、電離圏擾乱の発生メカニズムを解明することで、その発生予測が可能になり、自動運転・航法などに必要な高精度な位置情報を提供できるようになる。

電離圏擾乱は全地球的に発生する現象ではあるが、カスプ領域と呼ばれる昼間付近の高緯度領 域で特に多く発生する。これまで、このカスプ領域においてレーダーや高感度カメラを用いたリ モートセンシングによる電離圏擾乱の観測研究が進められてきた。リモートセンシングは定常的 な観測が可能であるという一方で、観測することができる電離圏擾乱のスケールが限られている ことや、観測精度の制約により、電離圏擾乱の生成及び成長メカニズムの調査に限界があった。

ロケット観測は長期の準備期間と膨大な予算が必要な観測ではあるが、電離圏内を直接飛翔す ることにより、高精度な電離圏擾乱のデータを取得することができる。本研究では、オスロ大学 が実施したロケット観測に参加すると共に、過去に実施されたロケット観測データから電離圏擾 乱の生成・成長メカニズムを明らかにすることを目的とした。

## 研究方法

カスプ領域は太陽風が直接流入する特異な領域で、流入したエネルギーは地球大気を電離し、 カスプオーロラとして可視化される。この局所的な電離やエネルギー流入に起因して、電離圏擾 乱が発生する。カスプオーロラ内部で電離圏擾乱が生成されていた場合、地球磁力線に沿ってロ ケット高度まで電離圏擾乱が伝搬するため、ロケットで観測された電離圏擾乱成分と、高感度カ メラによって観測されたカスプオーロラの発光強度を比較することで、電離圏擾乱の発生メカニ ズムの調査を行った。

#### 研究成果

### 1. Decay of ionospheric irregularity due to auroral particle impact

2018 年 12 月 7 日に Visualizing Ion Outflow via Neutral Atom Sensing-2 (VISIONS-2: 35039)がスピッツベ ルゲン島ニーオーレスン (Ny-Ålesund) から南西方向に打 ち上げられた (図1)。このロケットは高度 806 km まで到 達し、カスプオーロラの上空を飛翔した。

VISIONS-2: 35039 には Multi Needle Langmuir Probe (m-NLP) と Double Probe が搭載されており、6250 Hz で電子密 度と電場をそれぞれ観測することができる。これらの高速 で観測された電子密度、電場データから 10 m から 1000 m スケールの電子密度及び電場変動を導出した(図 2a, b, c)。また、ロケットの位置から同一地球磁力線で発光して いた 557.7 nm と 630.0 nm のオーロラの発光強度を図 2g に 示す。電子密度、電場の時間変動共に、400 s 及び 600 s で 増大しており、これは電離圏擾乱を観測していたものと考 えられる。この時間帯は 630.0 nm のオーロラの発光強度の 増大した時間とほぼ一致していた。その一方で、557.7 nm のオーロラとの顕著な相関は見られなかったが、370-400 s で見られた発光強度が増大した時間帯には電離圏擾乱の振 幅に減少が見られた。



図 1. VISIONS-2: 35039 の発射からの 時間(Time of Flight)(赤点)とロケ ットの飛跡(赤線)。内側の黒線が 557.7 nm、外側の黒線が630.0 nmの 好感度カメラの視野である。

オーロラの発光強度と電離圏擾乱の振幅の比較を図3に示す。図3(a)は557.7 nmとの比較、 図3(b)は630.0 nmとの比較を示す。前述のように図3(a)から557.7 nmとのオーロラの発光には 顕著な相関が見られないものの、発光強度が小さい(4.5 kR以下)では電離圏擾乱の振幅の幅広 いレンジで観測されていたが、発光強度が大きくなると電離圏擾乱の振幅と557.7 nmのオーロラ の発光強度との関係はフラットまたは、減少傾向が見られた。



図 2. ロケット観測データ。(a)10 m、(b)100 m, (c)1000 m スケールの電場(赤)、電子密度(黒) の変動成分。(d)電子密度と(e)電場の Integrated Power(本文章では取り扱わない)の時間変化。 (f)オーロラ降下粒子のフラックス(本文章では取り扱わない)。(g)ロケットと同一磁力線上で発光 する 557.7 nm と 630.0 nm のオーロラ発光強度の時間変化。

図 3b から、630.0 nm の発光強度と電離圏擾乱の振幅の間には良い相関が見られ、630.0 nm の オーロラの発光強度の増大に伴って、電離圏擾乱の振幅が大きくなっている。本実験のデータの みでは断定することはできないが、630.0 nm のオーロラは高度 250 km 付近で発光するため、こ の高度領域付近で電離圏擾乱は生成されていたと本研究では考えている。



図 3. 電離圏擾乱の振幅と(a)557.7 nm、 (b)630.0 nm のオーロラ発光強度との比較。赤点 は電離圏擾乱の振幅。青点はパワースペクトルか ら導出された電離圏擾乱の振幅(本文章では取り 扱わない)。

557.7 nmのオーロラの発光強度が低い時と高い<sup>n+</sup> た電離圏擾乱の電子密度成分と電場成分の比(1250 km は557.7 nmのオーロラの発光強度が増大した際 る。1000 m スケールの電子密度成分以外は557. 圏擾乱が減衰することを示した。また、電子密 く減衰することが示されており、これは小さい た先行研究と整合的である。



図 4. 電離圏擾乱減衰メカニズム。(a)557.7 nm のオーロ ラの発光強度が低い時、(b)557.7 nm のオーロラの発光強 度が高い時。 J<sub>1</sub>は沿磁力線電流を示す。

上記の観測データ中で興味深い点は、電離圏擾 乱の振幅は 630.0 nm のオーロラの発光と相関し ていたものの、557.7 nm の発光強度が増大する と、電離圏擾乱の振幅に減少又は増加しないとい う傾向が見える点である。

表 1. 557.7 nmn の発光強度が 4.5 kR 以下と以上の時 に観測された電離圏擾乱の電子密度成分(ΔNe/Ne)と 電場成分(ΔE)の振幅の比較。

	Ratio $(A/B)$	
Scale	$\Delta N_e/N_e$	$\Delta E$
10 m	1.29	1.74
$100 \mathrm{m}$	1.09	1.72
$1000~{\rm m}$	0.91	1.74



緑に沿った電流によって、より高高度に 伝搬する。この場合、低高度は中性大気 と電離大気の衝突頻度が上昇することか ら伝導度が低くいため、低高度には電離 圏擾乱は伝搬しにくい。高高度に伝搬し た電離圏擾乱はロケットによって観測さ れたと考えられる。

557.7 nmのオーロラの発光強度が増大した場合(図4b)、150 km付近の中性大気は電離される。この電離によって高度150 km付近では電気伝導度が上昇する。地球磁力線は電気伝導度が極めて高いので、図4bで示される150 km付近の電気伝導度が上昇した場合、150 kmと250 kmの 電離圏を繋ぐ回路が生成されると考えられる。この回路は250 kmで生成された電離圏擾乱を成長 させる分極電場を弱める働きをする。最終的にはロケット高度で観測された電離圏擾乱に減衰が 見られたと考えられる。以上の様に、本研究では地上観測とロケット観測を併せ用いることで、 電離圏擾乱の発生メカニズムだけでなく減衰メカニズムを示した。本研究はJournal of geophysical research に投稿済みで現在査読中である。

#### 2. Formation of Irregularity in Cusp Aurora



因う.001キャント、シモリカルにロックト突厥の水動。因者ではロケットの飛翔高度を示し、b, c, dではロケット飛跡を高感度カメラで観測されたカスプオーロラに重ね合わせて示した。

前述の研究で 630.0 nm のオーロラを作り出すエネルギー流入が電離圏擾乱の生成に大きな寄与 をしており、557.7 nm のオーロラによる電離が電離圏擾乱の減衰に寄与をしているのではない か、ということを示した。この研究は1回のロケット実験の観測データに基づいており、示した 物理メカニズムが普遍的に働いていることを示す必要がある。VISIONS-2 ロケット実験は Grand Challenge Initiative (GCI)キャンペーンの一環として行われており、2018 年 12 月から 2019 年 1月にかけて合計5発のロケット実験が行われている。この内、4発のロケットにはm-NLP が搭載 されており、VISIONS-2 と同様な解析を行うことが可能である。

図5にGCIキャンペーンで2018年12月から2019年1月に発射されたロケットの飛跡を示す。 2018年12月7日にVISIONS-2:35039、2018年12月8日にTRICE-2:52003及び52004、2019年1 月4日にCAPER-2が打ち上げられた。これら全てのロケットはカスプオーロラの上空を飛翔し、 地上では高感度カメラによる観測が実施されていた。図6に557.7 nm(図6a, b, c)と630.0 nm(図6d, e, f)と電離圏擾乱の電子密度成分の比較を示す。35039ロケット観測時とは異なり、 他のロケット観測の時は557.7 nmのオーロラの発光強度の変動が大きくなかったため、557.7 nm の発光強度と電離圏擾乱の振幅には優位な相関は見られなかった。一方、630.0 nmのオーロラと は先述の研究の結果と同様に発光強度の増大に伴って、電離圏擾乱の振幅の増大が見られたが、 52003ロケットで観測された電離圏擾乱だけはそのような描像を示さなかった。

52003 ロケットで観測された電離圏擾乱が 630.0 nm のオーロラの発光強度と相関を示さなかっ た原因を探るために、それぞれのロケットがカスプオーロラに侵入した状況を詳細に調べた。そ の結果、52003 ロケット以外のロケットはカスプオーロラが生成された後にカスプオーロラ上空 を飛翔しており、カスプオーロラの中心部で電離圏擾乱の振幅が増大していた。その一方、52003 ロケットはカスプオーロラが拡大(流入するエネルギーが急激に増大する)した直後にカスプオ ーロラの上空を飛翔し、カスプオーロラの外縁付近で電離圏擾乱の振幅の増大が見られた。

これらの解析結果に基づいて、カスプ領域における電離圏擾乱の生成メカニズムについて以下 のように考察した。カスプオーロラが拡大した直後はカスプオーロラの外縁付近で電子密度勾配 が急峻になるか、強い電場が印加されることにより、外縁付近でプラズマの速度差が生じていた ものと考えられる。急峻な密度勾配やプラズマの速度差はプラズマ不安定を励起する。この不安 定によって電子密度の疎密構造が成長し、電離圏擾乱が発生したと考えられる。その後、不安定 による電子密度の攪拌によって密度勾配は解消され、電離圏擾乱は減衰していったものと推測し た。また、その後、カスプオーロラの中心部ではエネルギー流入による電離によって直接的に電 離圏擾乱が生成されたものと考えられる。外縁部で電離圏擾乱を観測した 52003 の 2 分後に 52004 ロケットがカスプオーロラの上空を飛翔したことから、電離圏擾乱の生成メカニズムは 2 分以内の時間スケールで変化したものと考えられる。この結果は現在、論文としてまとめてお り、近日中に Geophysical Research Letter に投稿予定である。



図 6. 557.7 nm(a, b, c)と 630.0 nm(d, e, f)のオーロラの発光強度と電離圏擾乱の電子密度成分の振幅の比較。それぞれ、10, 100, 1000 m スケールの電離圏擾乱と比較した。

以上のように、成果1では単発のロケット観測データを使って、電離圏擾乱が630.0 nmのオーロ ラによって生成され、557.7 nmのオーロラによって減衰させられていた可能性を示した。成果2 では複数のロケットデータを用いて、その描像の普遍性を調査し、カスプオーロラが生成された 直後は成果1で示したような電離圏擾乱の生成メカニズムは卓越せず、カスプオーロラの外縁部 でプラズマ不安定に起因すると思われるメカニズムによって生成していた可能性が高いことを示 した。また、2分以内の時間スケールで電離圏擾乱を生成するメカニズムが変化し、成果1で示 したメカニズムが卓越していったのではないか、という結果を得た。

# 3. ICI-5 ロケット実験への参加



図 7. (右図)射出された Daughter Payload による面観測と(左図) ロケットに格納さ れた Daughter Payload と射出方法(Moen et al., 2018)。

本研究では過去のロケットデータ解析だけでなく、海外特別研究員としてオスロ大学に滞 在した間に新しいロケット実験にも参加した。既存のロケット実験ではロケットに取り付け た機器で観測することが多く、ロケットの飛跡に沿った線での観測に限られる場合が多かっ た。Investigation of Cusp Irregularities-5 (ICI-5)ではロケットの側面から Daughter Payload と呼 ばれる観測器を射出し、個々の Daughter Payload により、電離圏パラメータの観測を行った。 この観測では元来の線での観測に加えて、面での観測が可能となる。ICI-5 のロケット実験 を 2019 年 11 月 26 日に実施し、自身もロケット観測の実施可否の重要な要素となる大型大 気レーダーの観測者として参加した。現在、データは解析中である。