

機関番号: 82645

研究種目: 基盤研究(B)

研究期間: 2008~2010

課題番号: 20403012

研究課題名(和文) 極域電離圏カusp領域におけるプラズマイレギュラリティの発生メカニズム解明

研究課題名(英文) Studies on generation mechanism of the electron density irregularity in the ionospheric cusp region

研究代表者

阿部 琢美 (ABE TAKUMI)

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号: 40255229

研究成果の概要 (和文): 電離圏カusp領域に発生する約 10 m の空間スケールの激しい電子密度擾乱については発生メカニズムが良く分かっていない。本研究では観測ロケットにより密度擾乱の直接観測を実施し発生メカニズム解明を目指す。

観測ロケットは 2008 年 12 月にノルウェーにて打ち上げられ電子密度擾乱域の直接観測に成功した。その結果、電子密度擾乱の空間分布とパワースペクトル、波長 630 nm のオーロラ発光領域との対応、約 100eV の降下電子との関連性について新しい知見が得られた。

研究成果の概要 (英文):

Strong coherent HF backscatter echoes are a well-known characteristic of the polar cusp, and are believed to result from field-aligned plasma irregularities with decameter scale length. However, the generation mechanism has not been understood.

In December 2008, we launched the sounding rocket to elucidate its generation mechanism, and succeeded the direct measurement of the electron density irregularity. The present study brought new insights of this event; 1) spatial distribution and power spectrum of the density irregularity, 2) spatial relationship with 630 nm auroral emission, and 3) relevance to 100 eV precipitating electrons as a possible energy source.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	8,900,000	2,670,000	11,570,000

研究分野: 超高層大気物理学

科研費の分科・細目: 地球惑星科学・超高層物理学

キーワード: 電離圏、カusp、観測ロケット、プラズマイレギュラリティ、電子密度擾乱

1. 研究開始当初の背景

(1) 極域電離圏プラズマの研究に広く用いられる HF レーダ観測において予想外の強い後方散乱波を受信することがある。この領域は降下電子で定義される極域カuspや光学観測によるカusp発光領域と一致することが報告された。

(2) 後方散乱波は約 10m の空間スケール長をもつ電子密度擾乱に起因すると考えられているが、密度擾乱の生成メカニズムはもとより鉛直方向の空間分布さえ理解されていない。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的はロケットに測定器を搭

載して密度擾乱域における直接観測を実行して空間構造を理解するとともに、地上に設置されたレーダや光学観測ネットワークによる取得データを組み合わせることで総合的な観測を実施し、電子密度擾乱の発生メカニズムを解明することにある。

(2) 電子密度の擾乱現象は長距離間の短波通信やGPS衛星からの電波受信に基づく位置推定にも大きな影響を与えると考えられる。本研究により得られる電子密度擾乱現象に関する理解の進展は、このような電離圏利用分野にも役立てられる。

3. 研究の方法

(1) 平成 20 年度

2つの測定器（固定バイアスプローブ、低エネルギー電子計測器）の開発を平成 20 年 5月上旬に完了し、その後ノルウェー国にて行われた機械系噛み合わせ（5月上旬）、第1次電気系噛み合わせ（6月中旬）、第2次総合噛み合わせおよび環境試験（8月下旬～9月上旬）に参加し、ロケットの打ち上げに向けて測定器の動作チェックや耐環境性の確認を行なった。また、最終的な搭載までに、測定器の校正試験を実施し、最終的な調整を行った。

11月中旬からはノルウェー・スバルバル島で行われたロケット打ち上げに向けたフライトオペレーションに参加し、測定器の最終動作確認を実施した。ロケットは12月5日に電離圏カスプ領域に向けて打ち上げられ、所期の目的通りにカスプ領域で成功裏にプラズマイレギュラリティの観測を行う事が出来た。データの取得後は、直ちに解析が開始された。

(2) 平成 21 年度以降

担当した測定器による観測データに加え、同じロケットに搭載された他の測定器、また地上からのレーダおよび光学観測による取得データも加えて総合的な解析を実施した。

本研究で対象としている現象については、極域電離圏カスプ領域への降下電子によりプラズマ不安定が発生し、それに伴って約 10 mの空間スケールをもつプラズマイレギュラリティ（密度不規則構造）が生じた、との説があった。これまでになされた研究結果をもとに問題解明のシナリオについては次のように考え、解析を進めた。

① まず、降下電子および電子密度擾乱の発生領域の同定を試み、それらとHFレーダで観測された散乱エコーの発生領域、ならびに 630nm に感度をもつ全天カメラ画像の比較から空間的な対応について議論を行った。また、過去になされた研究と整合的か否か

を確認する。

② 上記①で確認された領域において固定バイアスプローブにより観測された電子密度から、擾乱成分の比率 ($\Delta N/N$) を推定する。

③ 電子密度擾乱の発生に対する勾配ドリフト不安定の寄与を議論するために、密度擾乱の代表的空間スケール長を求め、②で計算した $\Delta N/N$ やプラズマの中性大気に対する移動速度等を参照して、勾配ドリフト不安定の成長率を推定する。

④ Basu et al. (1988)によれば、このような領域でプラズマ密度構造のイレギュラリティを発達させるのは勾配ドリフト不安定、または速度シア不安定だとされている。プラズマのイレギュラリティ発達にとって、どちらの不安定が支配的であるかについて検討する。また、推定したプラズマ不安定の成長率や、降下電子分布、630nm のオーロラ発光分布等のデータを比較して、電子密度擾乱がプラズマ不安定により説明しうる大きさかどうかについての議論を行なう。

4. 研究成果

本研究は極域電離圏カスプ領域に生起するプラズマイレギュラリティの生成メカニズム解明を目的としている。このために我々は ICI-2(Investigation of Cusp Irregularities-2) キャンペーンと称する観測計画を 2008 年冬期にノルウェーのスバルバル島にて実行し、科学観測機器を搭載したロケットを 12 月 5 日の 10:35:10 UT にニューオルスンロケット射場からカスプ領域に向けて打ち上げた。このロケットには我々の開発した固定バイアスプローブ、低エネルギー電子計測器を初め、計 5 つの測定器が搭載されたが、全ての機器が正常に動作し、当初の目的通り電子密度擾乱域での観測データ取得に成功した。同時に EISCAT レーダ、HF レーダ、波長 630nm および 557.7nm の全天カメラ等の地上設備が運用され、極域カスプ領域をターゲットにした総合観測が実施された。

図 1 右に固定バイアスプローブがロケット上昇時に取得した電流値、左に電流値の周波数解析により求めたダイナミックスペクトルを示す。微小スケールの電子密度変動検出を主目的としたこの測定器は、+4V の固定バイアスを印加した直径 2cm の球をプローブとし、スピンの影響を避けるようロケット先端部の機軸の延長線上を球プローブの中心が通るように搭載された。このプローブにより測定された電流値はほぼ電子密度に比例するが、打上げ後 120~140 秒には電流値が上昇するとともに周波数 10Hz~300Hz のパワ

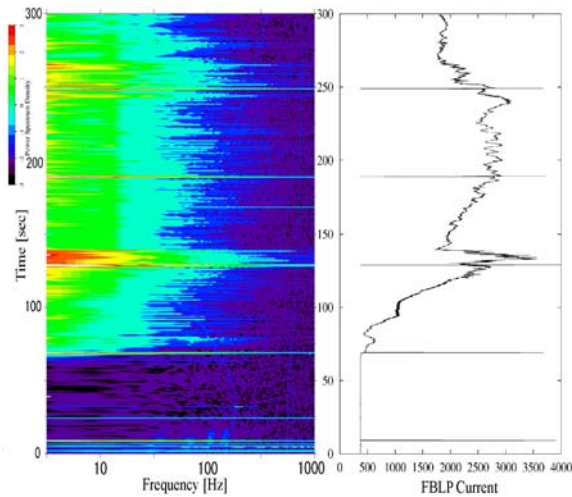


図1. 固定バイアスプローブが観測した電流値とそのダイナミックスペクトル

ースペクトル密度が増大していた。ロケットの飛行速度を考慮すると、この周波数は空間スケールにして数10m程度であり、HFレーダの後方散乱波を生み出す電子密度擾乱の空間スケールと一致し、目的のひとつであったプラズマイレギュラリティ領域の直接観測に成功したことがわかる。

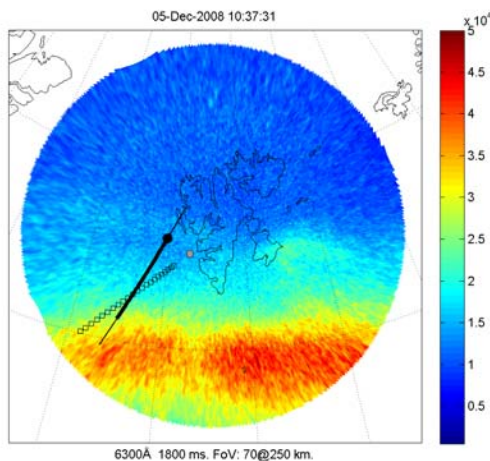


図2. 波長630nmの全天カメラによるオーロラ発光分布（ロケット打ち上げから141秒後）。黒丸と実線はロケット位置と軌道を表す。

図2はロケット打ち上げ時に撮影された波長630nmのオーロラ発光領域を表す全天カメラ画像のデータである。これら地上観測データと固定バイアスプローブのデータを比較解析した結果、次のような事実が明らかになった。

- ① ロケットにより観測された電子密度擾乱域は波長630nmの全天カメラ観測デー

タで見えた極側へ移動する発光領域の高緯度側境界に近いこと。

- ② 擾乱域では電子密度の絶対値も周囲に比較して大きいこと。
- ③ 擾乱域での密度擾乱の程度は内部よりも両端すなわち高・低緯度側境界で最も大きいこと。
- ④ 密度擾乱はロケット飛行中に3度、異なる高度で観測されたことから、電子密度擾乱は狭い高度範囲にのみ存在するのではなく、高度方向に広がりをもつであろうこと。

次に我々は、ロケットが観測した電子密度擾乱域と波長630nmの発光領域との空間的な対応付け、電子密度擾乱の空間スペクトル、についてさらに詳細な解析を行った。解析の結果は次の通りである。

- ⑤ 30秒毎に取得される波長630nmの全天カメラ画像からロケット位置での発光強度を抽出し（時間については前後の数値から補間）、ロケット上で測定された電子密度の時系列データのFFT解析から得られたスペクトル強度との比較を行った。その結果、強い電子密度擾乱が観測された3例中の2例において、両データに関して局所的な増加が観測された領域がほぼ対応していることから、密度擾乱と発光がほぼ同一空間で発生している事が確かめられた。
- ⑥ 電子密度測定データのスペクトル解析データをロケットの飛行速度を考慮して空間スケールに換算した時の時間的变化と、⑤で求めたロケット位置での発光強度の変化との比較から最も相関の良い空間波長を求めた。ロケット下降時の観測データについては数十mスケールのスペクトル強度の上昇が630nmの発光と良い相関があるという結果が得られたが、前者はロケット軌道上で得られたものであるため磁力線方向との関係を考慮して議論する必要がある。

カサブ領域にプラズマイレギュラリティを作り出す生成メカニズムとして、勾配ドリフト不安定が重要な役割を果たしているという研究結果が報告された。しかし、その後の研究により、予想されるプラズマ密度勾配では勾配ドリフト不安定の成長率が遅く観測された密度擾乱振幅を説明できないとの研究結果が示され、近年ではまず高緯度側に向かう流れにより速度シア不安定が急速に成長して大振幅の密度イレギュラリティを発達させ、その後に勾配ドリフト不安定がさらにエネルギーを与えるという2ステップのプロセスが有力になっている。このよう

に本現象において勾配ドリフト不安定の果たす役割が重要であると考えられることから、観測データから勾配ドリフト不安定の成長率を検討することにした。

Tsunoda(1988)によれば勾配ドリフト不安定の線形成長率 γ_0 は次の式により与えられる。

$$\gamma_0 = \frac{V_0}{L}$$

ここで V_0 は中性大気に対するプラズマの移動速度、 $L (=N_0 \Delta x / \Delta N)$ 、但し N_0 は背景電子密度、 Δx と ΔN は密度勾配の空間スケールと密度変化量は密度勾配の特性スケール長である。観測データの中で 10m スケールの電子密度擾乱が卓越していた時間帯について、各パラメータの値を求め、成長率を推定するとほとんどの場合において 1 より大きく勾配ドリフト不安定が成長する条件にあったことが確かめられた。

また、電子密度時間変化の詳細な解析において、密度勾配の大きな領域と約 10m のスペクトル振幅極大の領域がほぼ一致した事は勾配ドリフト不安定が擾乱の発達に重要な役割を果たしていた事を裏付けている。

いっぽうで、低エネルギー電子計測器は密度擾乱域において約 100eV の比較的低いエネルギーをもつ降下電子を観測した。詳細な比較によれば、降下電子存在の有無が電子密度の多寡を支配し、それが電子密度勾配を作り出している可能性が高い事がわかった。これは降下電子が電子密度擾乱を引き起こすエネルギー供給源となっている可能性を示唆しており、現象解明に向けた貴重な情報が得られたことになる。また、レーダ観測からは密度擾乱域近辺に Reversal Flow Event (RFE) が存在していたことが確認されているが、この現象が擾乱の発生に大きな役割を果たしているであろうことは他の研究でも最近報告されており、プラズマイレギュラリティの生成のみならず、極域電離圏に顕著な様々な現象との関連性についての新たな研究の展開を引き起こしている。

本研究が実施されたキャンペーンにおいて取得されたロケット搭載機器や地上観測設備によるデータはプラズマイレギュラリティに関する研究以外にも、Poleward Moving Auroral Forms (PMAF) と呼ばれる高緯度方向に移動する小さなオーロラ発光領域と Polar Cap Patches (極冠域に存在する密度が高いパッチ状の領域) との相互関係に関する研究等にも重要なデータをもたらした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① D. A. Lorentzen, J. Moen, K. Oksavik, F. Sigernes, Y. Saito and M. G. Johnsen, In-situ measurement of a newly created polar cap patch, Journal of Geophysical Research, 査読有, 115, A12, 10.1029/2010JA015710, 2010.

[学会発表] (計 8 件)

- ① 阿部琢美、斉藤義文、横田勝一郎、入江敏弘, Moen Joran, 観測ロケットを用いた極域電離圏カスプのプラズマイレギュラリティ総合研究, 第 11 回宇宙科学シンポジウム, 2011 年 1 月 6 日, 宇宙科学研究所 (相模原市)
- ② T. Abe, J. Moen, On the characteristic feature of the electron density irregularities in the cusp, American Geophysical Union fall meeting, 2010 年 12 月 13 日, Moscone Convention Center (米国サンフランシスコ市)
- ③ J. Moen, K. Oksavik, T. Abe, M. Lester, Y. Saito, J. K. Bekkeng, K. S. Jacobsen, T. A. Bekkeng, The first in-situ observations of echoing HF radar backscatter targets, American Geophysical Union fall meeting, 2010 年 12 月 13 日, Moscone Convention Center (米国サンフランシスコ市)
- ④ 阿部琢美、Moen Joran, 極域電離圏カスプイレギュラリティ領域での電子密度擾乱の特徴について (2), 地球電磁気・地球惑星圏学会第 128 回講演会, 2010 年 11 月 1 日, 沖縄県市町村自治会館
- ⑤ 阿部琢美、小川泰信、Moen Joran, 極域電離圏カスプイレギュラリティ領域での電子密度擾乱の特徴について, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 126 回総会及び講演会 (2009 年秋学会), 2009 年 9 月 29 日, 金沢大学角間キャンパス (石川県金沢市)
- ⑥ 阿部琢美、下山学、Moen Joran, ICI-2 キャンペーンにおけるカスプイレギュラリティ領域での電子密度擾乱観測, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 2009 年 5 月 19 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉市)
- ⑦ 阿部琢美, ICI-2 キャンペーンで観測された電離圏カスプ領域の電子密度擾乱, 2008 年度 E I S C A T 研究集会, 2009 年 3 月 10 日, 極地研究所 (東京都板橋区)
- ⑧ 齋藤義文, 阿部琢美, 横田勝一郎, 下山学, 原田昌朋, 観測ロケット ICI-2 による極域電離圏プラズマイレギュラリティ発生メカニズムの解明, 第 9 回宇宙科学シンポジウム, 2009 年 1 月 7 日, 宇宙科学研究所 (相模原市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 琢美 (ABE TAKUMI)

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：40255229

(2) 研究分担者

齋藤 義文 (SAITO YOSHIFUMI)

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：30260011

横田 勝一郎 (YOKOTA SHOICHIRO)

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：30260011

下山 学 (SHIMOYAMA MANABU)

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・研究員

研究者番号：30435804

(2008年度のみ)