

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：56401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740371

研究課題名(和文) 磁気圏プラズマ環境に起因したオーロラの複雑・多様性の検証

研究課題名(英文) Complexity and diversity of the aurora caused by the plasma environment in the magnetosphere

研究代表者

高田 拓 (TAKADA, Taku)

高知工業高等専門学校・電気情報工学科・准教授

研究者番号：80455469

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、オーロラの複雑・多様性の原因を探ることを主目的とした。特に、オーロラの波動構造と、波動構造の動きの俊敏さは、オーロラを神秘的なものにしている。れいめい衛星で観測された電子と、オーロラ撮像データから、このオーロラ波動構造のドリフト速度を導出し、統計的な比較を行った。得られたドリフト速度比を用いて、オーロラの動画データから、加速領域の電場構造の時間発展を初めて議論することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigate the cause of the complexity and the diversity of the aurora, which is mysterious due to its wavy structures and its quick motion. We statistically compare the two drift velocities of the auroral fine structures, deduced from the electron data and auroral image observed by Reimei satellite. Then it can be possible to discuss the time evolution of the electric field structures in the acceleration region, using the observed drift velocity ratio and the time variation of the auroral images.

研究分野：数物系科学

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：オーロラ プラズマ サブストーム 加速領域

### 1. 研究開始当初の背景

オーロラは電離層高度 (~100 km 以上) での発光現象であるが、発光に必要なエネルギー源は宇宙空間から大気圏に飛び込んできたプラズマ粒子である。それらの粒子は、地球の夜側磁気圏の赤道面上に形成されるプラズマシートと呼ばれる熱いプラズマの集まる領域からやってくる。オーロラの魅力はその複雑な形状と運動にあるが、その複雑性が何に由来しているのかは明らかにされていない。粒子の源である磁気圏プラズマシートと電離層の構造を結び付けようとする研究はあるが、十分な観測点がないため明瞭な証拠はない。

オーロラ現象と地球磁気圏での爆発現象 (サブストーム) を結び付ける過程では、関連した領域が広大であり、各々のプラズマ環境が大きく異なるため、複雑な過程を経てエネルギーやプラズマのやり取りが行われている。そのため、特に遠く離れた他領域を結合する電流系や、瞬時にエネルギーを運ぶことが可能な波動の役割が指摘されている。実際、オーロラの空間構造には波動構造がよく観測されているが、波動の役割に関する定量的な議論には至っていない。

一方、オーロラ粒子を加速する領域は高度 5000 km 程度に位置しており、そこではほぼ定常的なポテンシャル電場が形成されていることが知られている (Carlqvist and Boström, 1970)。ただし、それらのポテンシャル構造の形成に関しては、統一したモデルはない。ポテンシャル構造の形成を議論することが難しい理由は、加速領域と、その上流及び下流、3か所の同時観測が困難なことが挙げられる。加速領域の形成過程を明らかにできれば、加速されたオーロラ電子の振る舞いを予測しやすくなり、オーロラの複雑性・多様性の鍵に迫ることができる。

### 2. 研究の目的

れいめい衛星のオーロラ・プラズマ同時観測を活かして、オーロラの波動構造と加速領域より低高度でのプラズマ構造の関係性を明らかにする。加速領域で加速された電子がオーロラの発光を引き起こすため、オーロラと上空の加速電子の相関は良いはずである。オーロラ拡大時の空間構造が、加速領域まで持続するのかが焦点となる。

次に、れいめい衛星で観測している局所的な領域でのエネルギー輸送プロセスが、大規模なオーロラの発展にどのように影響しているのかを明らかにする。地磁気インデックス AU/AL の変動量ごとにデータを分類し、各領域間での電流やエネルギーの流れなどを比較する。最終的には、磁気圏赤道面でのプラズマ観測との比較から、加速領域形成に及ぼす磁気圏プラズマの状態を明らかにする。

### 3. 研究の方法

オーロラの複雑性・多様性を理解するためには、オーロラ発光領域から、加速領域を経て、磁気圏赤道面に至る各領域での物理過程を比較・調査しなければならない。本研究では、これらの3つの領域を繋ぐメカニズムを理解するために、次の3つの問いに答えることを目的としている。

高度 5000 km 程度で加速されたプラズマがオーロラの形を決めるのか？  
統計的にオーロラの波動構造と加速領域直下のプラズマの比較を行う。

磁気圏からの局所的な流入エネルギーは、大規模なオーロラ発展にどう寄与しているのか？

AU/AL の変動量に対して、プラズマ・波動などのエネルギー輸送量を比較する。

オーロラ加速領域の生成には、磁気圏尾部のプラズマ状態のうち何が最も寄与するのか？

降り込み粒子のエネルギーと、磁気圏赤道面でのプラズマの状態量を比較する。

### 4. 研究成果

(1) 先ず、オーロラ爆発のメカニズムを探る第一歩として、オーロラ爆発前のオーロラと降り込み粒子の特徴を調べた。オーロラ爆発の定義として、AL の時間変化でイベントを抽出し、オーロラ静穏時、拡大時に分類した。AU/AL の値に注目すると、静穏時のイベントは大きく3パターン (AL Low, AU High, AU/AL Quiet) に分けることができた。AL Low イベントは、電離層で強い西向き電流が定常的に流れている場合で、ディスクリートオーロラが見られる。AU High イベントは、東向き電流が流れており、ディフューズオーロラが見られる。AU/AL Quiet イベントは、電離層電流がほとんど流れていない状態で、オーロラもほとんど見られない。静穏時のイベントの解析結果から、電離層周辺のオーロラのメカニズムについてまとめる。

静穏時イベントの特徴について以下にまとめる。AL Low イベントでは、局所的に、フラックスは小さいがエネルギーの高い降り込み粒子があり、ディスクリートオーロラが見られる。上向きの沿磁力線電流が強くないことや、下向きの沿磁力線電流は強いことは電子のフラックスが小さいことや、イオンがほとんどないことと関係している。

AU High イベントでは、降り込み電子のエネルギーはそれほど高くないが、フラックスは大きい。下向きの沿磁力線電流が弱いことは、降り込み粒子のエネルギーが高くないことと関係している。上向きの沿磁力線電流が強くないことは、イオンの降り込みと、下向きの沿磁力線電流が弱いことと関係している。AU の値が高いことからプラズマの対流が強くと、ディフューズオーロラが作られると

考えられる。

AU Quiet イベントでは、オーロラが見られることがあまりない。粒子の降り込みのフラックスも小さく、エネルギーも低い。また沿磁力線電流も弱いことから、典型的な静穏時のイベントであると考えられる。

本研究で得られた、静穏時のイベントの特徴から考えられる、磁気圏と電離層の関係を以下に示す。オーロラ爆発前の定常状態（静穏時）においてオーロラと降り込み粒子の振る舞いは、3つのパターンに分かれる。以上のことから、静穏時においてオーロラが見えるには、(1) 降り込み電子のフラックスが多いか、(2) 加速領域での電場形成が必要であることが推測される。電離層電流の定常状態においては、(1) 或いは(2) のみによるメカニズムが働いて、オーロラが見られると思われる。(1) (2) 両方のメカニズムが働く場合は、定常状態ではありえず、オーロラ爆発へとつながっているのかもしれない。

(2) オーロラの波動構造は、成長に伴って活発に動き、やがて壊れていく。オーロラを光らせる電子は、高度数千 km に位置する電子加速領域で加速を受ける。そのため、加速領域内のポテンシャル構造は、波動構造の成長に何らかの影響を与えていると考えられる。しかしながら、加速領域や降り込み粒子の特徴と、オーロラの波動構造の成長過程の関連は明らかになっていない。本研究では、磁気圏が静穏で安定した状態で、オーロラ波動構造の成長過程を調べた。2007年1年間の降り込み電子とオーロラ波動構造の対応がある13個のイベントを対象とし、れいめい衛星に搭載されている多波長オーロラカメラ(MAC)と粒子観測機(ESA)の同時観測モードのデータを用いた。加速領域内の電位と電場の推定を行うため、粒子データの Inverted-V 型電子構造に着目し、Characteristic Energy を導出した。電子の分布関数のピークのエネルギー差から加速領域内の磁力線平行電位を求めた。また、ピークエネルギーの空間変化から磁力線に垂直な電場を導出した。電位や電場の値と、オーロラ波動構造の成長過程を調べた結果、加速領域内の電場や電位が強いほど、波動の時間変動が活発であることが分かった。

(3) 地磁気定常時のオーロライベントを対象として、ディスクリートオーロラがみられる Inverted-V 型構造中のドリフト速度を推定し、一方 MAC 観測器で観測されたオーロラ撮像画像からオーロラ粒子加速領域をドリフト速度を推定した。推定した2者のドリフト速度を比較する。解析を行うあたり、2006年の1年間分の観測データを確認した。地磁気定常時のディスクリートオーロライベントを抽出し ESA 観測器から導出した電場ドリフト速度と MAC 観測器で観測されたオーロラ

ラ微細構造のドリフト速度を比較しドリフト比を求めた結果、電場ドリフト速度と微細構造のドリフト速度には正相関(ドリフト比:1.28、相関係数:0.82)があることがわかった。

MAC 観測器で観測された微細構造ドリフト速度を  $E \times B$  にあてはめ、オーロラ粒子加速領域の電場構造の時間発展を求めた結果、領域 A、C の電場は最大 1.6V/m の変動を伴っており、また電場の時間発展に対応してオーロラ微細構造のドリフト速度が最大 26km/s、領域 B の電場では最大 1.1V/m、最大 18km/s の速度ドリフト運動する領域があった。電場の値が 0.2 秒から 0.6 秒付近で急激に増加していることがわかった。また、電場が増加した時間帯にオーロラアークの輝度が強くなっていること、領域 A、C ではオーロラアークが速く移動し、領域 B では領域 A、C と比べて遅く移動していることがわかった。この結果から加速領域の電場構造と、輝度の高いオーロラ構造の出現が対応すると考えられる。

(4) Dst 値から磁気嵐の条件を満たす期間を選定し、磁気嵐中にれいめい衛星で観測された間欠的なエネルギー電子の成因および特徴を調べた。間欠的な低エネルギー電子は磁気緯度 60~70 度付近の広範囲にわたって観測された。一般的に磁気嵐の進行は発生からの経過時間順に初相、主相、回復相の3相に分類されるが、降り込み電子のフラックスは初相・主相で高く、回復相で低い。また、ピッチ角分布を調べた結果、間欠的電子の多くは継続時間の短い Inverted-V (パターン A) および Alfvén 電子 (パターン C) が主であった。その中でも 1keV 付近の Inverted-V (パターン A+)、100eV 以下の Inverted-V (パターン A-)、Inverted-V の下に見える低エネルギー電子の降り込み (パターン B)、磁力線方向の電子 (パターン D) に分けられる。

全ての相で全てのパターンが観測されたが、各相に特徴的なパターンをまとめる。初相では 2~3 秒間隔のパターン A と 0.5 秒間隔のパターン B が、主相では 0.5 秒間隔のパターン B と 1 秒間隔のパターン C が、回復相では 4 秒間隔のパターン A-、5 秒間隔のパターン A+、0.2 秒間隔のパターン D が見られた。付録の各相における図を見ると、3 分間の観測では Inverted-V と判断できなかった電子は、5 秒間に拡大するとその実態は Inverted-V だと分かる。原因は Inverted-V の端の下がった形である。

オーロラオーバルは主相・回復相では広い緯度範囲に広がっており、主相では典型的な Inverted-V 構造が多く見られ、回復相ではほとんど見られない。回復相では加速領域で大きなポテンシャル構造が出来にくいいため、100eV 以下の Inverted-V 構造が多く見られたと考えられる。

## 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 2件)

Ogasawara, K., Y. Kasaba, Y. Nishimura, T. Hori, T. Takada, Y. Miyashita, V. Angelopoulos, S. B. Mende, and J. Bonnell, Azimuthal auroral expansion associated with fast flows in the near-Earth plasma sheet: Coordinated observations of the THEMIS all-sky imagers and multiple spacecraft, *J. Geophys. Res.*, 116, A06209, 2010JA016032, 2011. 査読有

Amm, O., R. Nakamura, T. Takada, K. Kauristie, H. U. Frey, C. J. Owen, A. Aikio, and R. Kuula, Observations of an auroral streamer in a double oval configuration, *Ann. Geophys.*, 29, 701-716, 2011. 査読有

[学会発表](計 12件)

小松功平、高田拓、坂野井健、浅村和史、山崎敦、れいめい衛星観測による静穏時におけるオーロラ微細構造の時間発展の調査、第134回SGEPSS総会、R006-P014、高知市、2011年13月(ポスター発表)

佃拓哉、高田拓、山崎敦、浅村和史、坂野井健、れいめい衛星観測による磁気嵐中の間欠的な低エネルギー電子の降り込み、第134回SGEPSS総会、R006-P009、高知市、2013年11月5日(ポスター発表)

杉本 将一、敷地 辰也、高田拓、浅村和史、坂野井健、山崎敦、れいめい衛星観測によるオーロラ波動構造と電子加速領域の関係、日本地球惑星科学連合2013年大会、PEM28-P02、千葉市、2013年5月23日(ポスター発表)

高田拓、浅村和史、山崎敦、坂野井健、れいめい衛星観測による2次元オーロラ構造と降り込み粒子の関係、地球電磁気・地球惑星圏学会、B006-P029、札幌市、2012年10月(ポスター発表)

岩井懸太郎、高田拓、浅村和史、坂野井健、山崎敦、れいめい衛星観測によるオーロラのカール・スパイラルと降り込み粒子の関係、日本地球惑星科学連合2012年大会、PEM031-P06、千葉市、2012年5月(ポスター発表)

平原聖文、福田陽子、高田拓、浅村和史、坂野井健、山崎敦、関華奈子、海老原祐輔、降下電子・電離圏加熱イオンと沿磁力線電流の相関：れいめい観測、日本地球惑星科学連合2012年大会、PEM031-02、千葉市、2012年5月(口頭発表)

高田拓、浅村和史、坂野井健、山崎敦、Field-aligned current estimation based on the direction of observed auroral electrojets: Reimei observations、第130回SGEPSS総会、B006-P010、神戸市、2011年11月(ポスター発表)

矢野貴久、高田拓、浅村和史、坂野井健、

山崎敦、れいめい衛星によるオーロラ爆発前のオーロラと振り込み粒子の関係、日本地球惑星科学連合2011年大会、PEM031-P06、千葉市、2011年5月(ポスター発表)

平原聖文、福田陽子、坂野井健、浅村和史、高田拓、山崎敦、関華奈子、海老原祐輔、れいめい観測によるオーロラ発光形態とオーロラ電子・電離圏加熱イオンの空間分布・エネルギーピッチ角分布・変動の相関研究、日本地球惑星科学連合2011年大会、PEM031-09、千葉市、2011年5月(口頭発表)

Sakanoi, T., Y. Miyoshi, Y. Ebihara, T. Takada, A. Demekhov, A. Yamazaki, K. Asamura, and M. Hirahara, Precise characteristics of black aurora obtained with Reimei image-particle data, IUGG, A092#3536, July, 2011. (ポスター発表)

Miyashita, Y., S. Machida, A. Ieda, T. Takada, K. Seki, M. Fujimoto, V. Angelopoulos, J. P. McFadden, D. Larson, and H. U. Auster, Energy release midway between the magnetic reconnection and initial depolarization regions in the near-Earth magnetotail and its role in the substorm, IUGG, A083#4448, July, 2011. (口頭発表)

Amm, O., R. Nakamura, T. Takada, K. Kauristie, H. U. Frey, C. J. Owen, A. Aikio, and R. Kuula, Modeling of ionospheric signatures of an auroral streamer during a double oval situation, EGU General Assembly, Vienna, April, 2011.

"

[図書](計 0件)

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

[その他]

特になし

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

高田 拓 (TAKADA, Taku)

高知工業高等専門学校電気情報工学科・准教授

研究者番号：80455469