

氏 名 村田 洋三

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 856 号

学位授与の日付 平成 17 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 高緯度昼間側オーロラの出現特性に関する研究－中山基地可視オーロラと昭和基地 HF レーダーエコーの比較解析

論文審査員	主査	教授	佐藤 夏雄
		教授	江尻 全機
		教授	麻生 武彦
		助教授	宮岡 宏
		教授	小川 忠彦（名古屋大学）
		教授	巻田 和男（拓殖大学）

論文内容の要旨

オーロラは、太陽を源とする荷電粒子が磁力線に沿って極域の電離圏に降り込み、超高層大気と衝突して発光する自然現象である。その姿は、太陽-地球磁気圏-電離圏の電磁気的な結合過程を反映して様々に変化することが知られている。とりわけ、高緯度昼間側で観測されるオーロラは、両端が地球に繋がる閉じた磁力線と、一端が宇宙空間と繋がる開いた磁力線との境界 (OCFLB:Open/Closed Field Line Boundary) 域に出現する為、その様相は複雑であり、発生領域・発生条件や発生機構は未だ未解決の問題として残されている。

本論文では、高緯度昼間側で観測されるオーロラの分類とその出現特性を詳しく調べた後、異なるタイプの2イベントに注目し、オーロラの動形態・発生条件・発生領域に関する観測事実を明らかにし、発生機構のモデル提案を行った。主に用いたデータは、高緯度昼間側の OCFLB 境界付近に位置する南極の中山基地で観測された可視オーロラと、中山基地の上空を含む広い視野で電離圏電場が測定できる昭和基地 HF レーダーや衛星との同時観測データである。本研究の特にユニークな点は、(1) 中山基地で観測された1年分の可視オーロラの2次元画像である全天TVカメラと多色 (557.7nm 輝線、630.0nm 輝線) 掃天フォトメータを用いていること、(2) 電離圏電場が測定できる HF レーダーの利点を最大限利用し、可視オーロラ観測だけでは同定が不可能な、磁気圏構造やグローバル電離圏対流との関係に注目したこと、(3) 中山基地の地理的特性を活かし、磁気地方時の真昼 (12MLT: 磁気地方時) から夕方側 (18MLT) にかけての高緯度昼間側オーロラに焦点を絞ったこと、等である。

本論文では、主に2つの成果が得られ、それぞれ第2章と第3章を構成している。第2章では、真昼から夕方側にかけて出現する高緯度昼間側オーロラを、「コロナ型」・「反太陽方向伝搬型」・「準周期変動型」・「極方向伝搬型」・「赤道方向伝搬型」の5つの型に分類し、その出現頻度の磁気地方時依存性や惑星間空間磁場 (IMF: Interplanetary Magnetic Field) との関係について統計的特性を明らかにした。第3章では、昼間側オーロラで特徴的な Poleward Moving Auroral Form 1s (PMAFs) と呼ばれるオーロラには、「極方向伝搬型」と「反太陽方向伝搬型」と名付けた別の出現特性を有するオーロラがあることを見出し、それぞれについて事例解析を行い、その発生領域や発生条件などの違いを明らかにした。

オーロラを生成する粒子の起源や電離圏に到達するまでの過程は様々である。一般に、地球磁気圏の前方では、太陽からの荷電粒子が超音速プラズマ流 (太陽風) となって磁気圏前面を圧縮し、衝撃波面を形成している。ここで熱化された荷電粒子の一部は極域のカスプ領域や磁気圏側部の低緯度側境界 (LLBL: Low Latitude Boundary Layer や BPS: Boundary Plasma Sheet) から磁気圏内部に侵入する。また、磁気圏の前面においては、IMF の向きによって地球磁場との相互作用により磁気再結合 (リコネクション) が起こり、開いた磁力線の領域にあるプラズマが磁力線に沿って電離圏へ流入する。これまでのオーロラ研究から、630.0nm 輝線の強度が 557.7nm 輝線よりも強いオーロラは、高い高度でエネルギーを失う低エネルギー電子 (1Kev 以下) の降り込みによる効果が強く、レイ構造を伴って現れることが分かっている。一方、アークの構造をもつオ

オーロラは 557.7nm 輝線が強く、加速された高エネルギー電子の降り込みによって低い高度で光る。本論文では、全天カメラと多色掃天フォトメータで観測された 1 年間分のオーロラの特徴を解析することにより、高緯度昼間側オーロラを以下の 5 つの型に分類した。

1) 「コロナ型」オーロラはレイ構造をもつオーロラであり、630.0nm 輝線が強い特徴を持つ。昼間側のカस्प域ではこのタイプのオーロラがもっともよく観測される。15MLT より昼間側にかけて出現頻度が高く、IMF Bz が北向きのとき出現する。2) 「反太陽方向伝搬型」オーロラはレイ構造をもつオーロラであり、西側からと東側から来るオーロラが交わる場所で渦を形成し、反太陽方向に繰り返し伝搬するオーロラである。IMF Bz が南向きで特に IMF By の東向き成分が強く太陽風プラズマ密度が大きいときに出現する。3) 「準周期変動型」オーロラは 557.7nm 輝線の強いアークであり、準周期的に光の強度が変動し、その繰り返し周期は 2 分～10 分程度である。午後側の広い範囲で観測される。4) 「極方向伝搬型」オーロラは複数のアークが極方向へ繰り返し伝搬する特徴をもつ。15MLT より夕方側で出現頻度が高く、IMF By が東向きのときに出現する。5) 「赤道方向伝搬型」オーロラは複数のアークが赤道方向へ繰り返し伝搬するタイプである。16MLT 以降で出現頻度が高く、IMF の過渡的な変動の後に 10 分～20 分程度で繰り返し出現する。

HF レーダーの反射ターゲットは磁力線に沿って形成される電子密度不規則構造であり、その生成過程は電場や電子密度の勾配によるプラズマの不安定性の成長率に依存している。HF レーダーの最大の利点は、ドップラ-速度から電離圏対流速度（電場）が導かれ、また、スペクトル幅から各種の磁気圏境界領域を推定できることである。そのため、可視オーロラと HF レーダーとの同時観測はカस्प・極冠域のダイナミクスを時間・空間的に調べる強力な手法となっている。本論文では、可視オーロラと HF レーダーエコーを 1 年間にわたって比較解析した。具体的には、磁気圏の OCFLB 境界を表すと考えられている電離圏のプラズマ対流の境界 (FRB:Flow Reversal Boundary) やスペクトル幅の特徴的な境界 (SWB:Spectral Width Boundary) が、オーロラの発生領域とどのような関係にあるか調べた。その結果、グローバルプラズマ対流とオーロラの動形態との関係から、5 つの型に分類したオーロラの中でも特に興味深い「極方向伝搬型」オーロラと「反太陽方向伝搬型」オーロラに注目して詳細な事例解析を行った。過去の報告では、この両方のオーロラとも PMAFs と呼ばれる同じタイプに分類されていたが、本論文では、別の出現特性を有するオーロラであることを見出した。「極方向伝搬型」オーロラ的事例解析では、オーロラアークの内部の構造は夜側からの流れを示すことや、オーロラの発生領域は FRB 付近の閉じた磁力線と開いた磁力線の間の領域に位置していることを明らかにした。繰り返しの様子は、低緯度側にアークが出現し、そのアーク全体が高緯度側へ移動する。その後、新たなオーロラが低緯度側に出現し、高緯度側への移動を繰り返すことを明らかにした。また、オーロラ粒子は数 keV にピークを持つ逆 V 型構造を伴っており沿磁力線方向の加速を受けていることや、発生条件としては IMF Bz が南向きよりも IMF By の東向き成分が重要な役割をしていることなどが新たに分かった。本論文では、上記の観測結果を参照して「極方向伝搬型」オーロラの発生領域と発生機構の議論とモデル提案を行なった。

「反太陽方向伝搬型」オーロラの事例解析では、オーロラの渦構造(時計回り)に対応してHFレーダーのドップラー速度にも反対方向に回転する1対の渦構造(RTVs: Radar Twin Vortices)があることを明らかにした。これらの位置関係は、開いた磁力線の領域にオーロラとRTVsの高緯度側の一つ(時計回り)が存在し、低緯度側の朝側寄りで磁力線の閉じた領域にRTVsのもう一方(反時計回り)が隣接して、それらが共に反太陽方向へドリフトしていることがわかった。また、オーロラ粒子はカस्पもしくはLLBL的なブロードなエネルギー分布をもつことや、発生条件としてはIMF B_y の東向き成分が特別に強く、かつ高い太陽風プラズマ密度でインパルス的に変動するときに出現することがわかった。本論文では、上記の観測結果を参照して「反太陽方向伝搬型」オーロラとRTVsの発生領域と発生機構について議論とモデル提案を行った。

論文の審査結果の要旨

本学位論文では、高緯度昼間側で観測されるオーロラの出現特性と発生条件・発生領域・発生機構を研究した。

主に用いたデータは、カस्प域に位置する南極の中山基地で観測された可視オーロラを基本とし、中山基地の上空を視野とする昭和基地 HF レーダーや衛星での同時観測データなどを用いている。特にユニークな点は、HF レーダーデータの利点を最大限利用し、可視オーロラ観測だけでは同定が不可能な、磁気圏構造やグローバル電離圏対流との関係に注目したことである。

本論文の研究の進め方としては、中山基地で 1 年間観測された昼間側可視オーロラの分類とその特性を詳しく調べた後、異なるタイプの 2 イベントに注目し、昭和基地 HF レーダーや衛星での同時観測データとの比較解析を行ない、可視オーロラの動形態や発生条件・発生領域などに関する観測事実を明らかにし、その観測結果をもとにオーロラの発生機構の議論とモデル提案をおこなった。

昼間側可視オーロラの分類は、中山基地で 1 年間観測されたオーロラを従来の 1 次元データである掃天フォトメータだけでなく 2 次元画像である全天カメラを加えることにより詳しく解析した。その結果、コロナ型、極方向伝搬型、反太陽方向伝搬型、準周期変動型、赤道方向伝搬型、の 5 つの型に分類し、その出現頻度の磁気地方時依存性や惑星空間磁場との関係などの統計的特性を明らかにした。特に興味深い点は、過去の報告では極方向伝搬型と反太陽方向伝搬型は Poleward Moving Auroral Form's (PMAFs) と呼ばれる同じタイプに分類されていたが、本論文では別の特性を有するオーロラであることを見出した。多量のデータを詳細に注意深く解析し、新たなタイプのオーロラを見出した研究成果は高く評価できる。

極方向伝搬型オーロラの事例解析では、発生領域、発生条件に関する重要な観測事実を見出すことができた。特に、オーロラが発生している領域は電離圏プラズマ対流の Flow reversal boundary (FRB) 付近の磁気圏構造では閉じた磁力線と開いた磁力線の境界域付近に位置していることを明らかにした。また、オーロラ粒子は沿磁力線方向の加速を受けていることや、このタイプが発生するのに惑星空間磁場 (IMF) の東西成分が重要な役割を演じていることなど、多くの新たな観測事実を見出したことは高く評価できる。さらに、この観測事実を説明するモデルの提案ができたことは、この現象を深い洞察力で理解しているものと評価した。

また、反太陽方向伝搬型オーロラのイベントも同様なデータを用いて解析を行った。その結果、このオーロラは HF レーダーで見ると反対方向に回転する 1 対の渦構造のプラズマ対流（本論文では Radar Twin Vortices (RTVs) と名付けた）を伴っていた。高緯度側 RTVs の発生領域は FRB の高緯度側の反太陽方向に対流する開いた磁力線に位置する。一方、低緯度側 RTVs は太陽方向に向く電離圏対流に乗った閉じた磁力線の領域に位置していることを明らかにした。また、発生は IMF の東西成分が特別に強い条件下で、太陽風密度がインパルス的に変動する時に同期し、この種のオーロラが引き起こされているとのモデルを提案した。

前述のように、過去の研究ではこの 2 つのタイプが同じものとして研究・議論が行

われていた。しかし、本学位論文で、上記のように全く異なる発生領域や発生条件・発生機構であることを明らかにしたことは、当該研究分野に大きな進歩をもたらすものと評価できる。

まとめとして、本申請の学位論文は、研究目的に焦点を絞った観測データの詳しい解析とその現象の物理的解釈を行い、現象モデルの提案にまで及んだ。得られた結果は、太陽風と地球磁気圏との相互作用を理解する上で重要な知見でありこの分野の新たな展開を促すものと言える。以上の理由により、審査委員会では、本論文が学位授与に相応しい十分な内容を持っていると認めるものである。