

氏名・（本籍）	くぼた　　みのる 久保田　　実
学位の種類	博士（理　学）
学位記番号	理博第1521号
学位授与年月日	平成9年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科，専攻	東北大学大学院理学研究科（博士課程）地球物理学専攻
学位論文題目	A Study on Middle-scale Variations of Thermospheric Neutral Winds Associated with Auroral Activity over Syowa Station, Antarctica（南極昭和基地におけるオーロラ活動に伴う熱圏中性風の中規模変動に関する研究）
論文審査委員	（主査）教授 福西　　浩 教授 大家　　寛, 教授 森岡　　昭 助教授 渡部　重十, 助教授 小野　高幸

論　文　目　次

Acknowledgment

Abstract

Chapter 1 Introduction

1. 1 The Earth's thermosphere
1. 2 Modeling and simulation of the thermosphere
 1. 2. 1 Thermospheric general circulation models
 1. 2. 2 Empirical models
 1. 2. 3 Other Modeling and simulations
1. 3 Satellite observations of the thermospheric neutral wind
1. 4 Ground-based observations of the high-latitude thermospheric neutral wind
 1. 4. 1 Upper thermosphere
 1. 4. 2 Lower thermosphere
 1. 4. 3 Vertical winds
1. 5 Purpose of this thesis

Chapter 2 Development of the Fabry-Perot Doppler Imaging System

2. 1 Basic principle of the Fabry-Perot interferometer
2. 2 Principle of the Fabry-Perot Doppler imaging
2. 3 Prototype of the Fabry-Perot Doppler Imaging System
 2. 3. 1 Optics
 2. 3. 2 Correction of the image distortion caused by the photon imaging head
 2. 3. 3 Problems in the image integration
2. 4 New version of the Fabry-Perot Doppler Imaging System

- 2. 4. 1 Optical system
- 2. 4. 2 Fabry-Perot etalon
- 2. 4. 3 Interference filters
- 2. 4. 4 Two-dimensional photon detecting system
- 2. 4. 5 Image data processor and recording system
- 2. 4. 6 Calibration laser

Chapter 3 Observations

- 3. 1 Installation of the FPDIS at Syowa station, Antarctica
- 3. 2 FPDIS observations at Syowa station

Chapter 4 Procedures of Data Analysis

- 4. 1 Determination of etalon parameters and fringe center using a calibration laser
 - 4. 1. 1 Determination of fringe center
 - 4. 1. 2 Conversion of image coordinates
 - 4. 1. 3 Correction of drifting etalon parameters
- 4. 2 Derivation of line-of-sight wind velocities from Doppler image data
- 4. 3 Error estimation in wind velocity measurement
 - 4. 3. 1 Photon noise
 - 4. 3. 2 Influence of non-uniform auroral emission intensity

Chapter 5 Thermospheric Neutral Winds over Syowa Station Derived from Doppler Imaging Data

- 5. 1 F- and E-region wind patterns on quiet and disturbed days
 - 5. 1. 1 F- and E-region wind patterns on quiet days
 - 5. 1. 2 F- and E-region wind patterns on disturbed days
- 5. 2 Strong outward flows from the auroral arc region
- 5. 3 Periodic enhancements of meridional winds on 3-4 June 1994
- 5. 4 Strong divergent winds observed simultaneously with an enhancement of auroral emission

Chapter 6 Discussions

- 6. 1 Nighttime variations of thermospheric winds on quiet and disturbed days
- 6. 2 Thermospheric neutral winds in the vicinity of auroral arcs
- 6. 3 Middle-scale atmospheric gravity waves generated by auroral energy injection
- 6. 4 Localized vertical winds associated with auroral activity

Chapter 7 Conclusions

References

Appendix A Sequential wind data in the F-region

Appendix B Sequential wind data in the E-region

論文内容要旨

高度約85km から約500km まで広がる熱圏と呼ばれる大気領域には中性大気と電離大気が混在しており、そこでは力学的・化学的作用のみならず電磁気的な作用が重要な役割を果たしている。特に高緯度熱圏領

域には磁気圏プラズマ対流の投影やオーロラ活動といった形で太陽風起源のエネルギーが注入されており、その量は磁気圏サブストーム時や磁気嵐時には太陽極紫外・紫外放射によって与えられるエネルギーを上回るほどになる。そこでオーロラ活動に伴い熱圏大気がどのように加熱され、どのような運動が引き起こされるかといったオーロラエネルギー注入に対する熱圏大気の応答を詳しく調べることは高緯度の熱圏ダイナミクスを理解する上で最も有効な手段となる。しかし、オーロラ活動は時間的にも空間的にも変化の激しい現象であり、それに伴う熱圏大気の変動を捉えるには高い時間・空間分解能が要求される。

我々はこのような熱圏大気の高時間・高空間分解能観測を実現するために、1989年に東北大学の光学観測グループによって開発されたファブリーペロードップラーイメージングシステム (FPDIS) に全面的な改良を施し、南極昭和基地において1994年3月から9月にかけて様々なオーロラ活動条件のもと、F層、E層領域における熱圏風速変動の観測を行った。本論文はその観測結果を用いてオーロラ活動に対する様々なタイプの熱圏中性大気の応答を明らかにする事を目的としている。

第1章では序論として、熱圏大気に関するモデルシミュレーションを用いた研究、衛星や地上からの過去の観測とその成果についてレビューをおこない、本論文の目的及び内容を紹介する。地上からの観測は衛星観測に比べて空間分解能が格段に高く、数100km以下のスケールの擾乱を観測するのに適しており、本研究においても特に個々のオーロラに対応した熱圏風速の中規模変動に着目し、詳細な解析を行った。

第2章ではFPDISの原型であるファブリーペロー干渉計 (FPI) の原理と、FPDISの概要、さらに今回実施した装置の改良について述べる。FPIは熱圏で発光するオーロラや大気光の輝線の干渉縞 (フリンジ) を用いてドップラーシフト及びドップラー幅を精密に測定し、その発光高度における風速と温度を求める装置で、これまで多くの観測者に用いられてきた。FPDISはFPIを2次元的に拡張した装置で、オーロラの酸素原子発光輝線 OI630.0nm 及び OI557.7nm のフリンジを全天にわたって (視野角165°) 一度に撮像し、それによりこの2つの輝線の発光高度であるF層領域の240km付近とE層領域の105km付近の風速と温度の2次元分布を高時間・高空間分解能で得ることができる。この性能は環状のフリンジを高精度で撮像できる高感度の2次元受光器の出現によって初めて達成されたものであるが、1989年に開発された初期型FPDISでは受光器中に用いられている電子レンズにより出力画像に歪みを生じるなど観測精度に影響を及ぼすと思われる欠点があった。今回用いた改良型FPDISではその問題点を解決するために画像歪みの全く無い近接型2次元光子検出器を採用した。さらに、露出オーバーを解消しS/N比を向上させるために高速読み出しのできるCCDカメラと高速画像処理装置を採用するなど全面的なシステムの見直しをはかった。その結果、改良型FPDISの最大時間分解能はOI557.7nm発光については1分、OI630.0nm発光については3分を達成し、また空間分解能はOI557.7nm発光で約50km、OI630.0nm発光で約100kmとなった。

第3章では実際に我々が南極昭和基地 (69.00°S, 39.58°E, 磁気緯度-66.23°, L=6.15) で行った観測の概要について述べる。観測は1994年3月から9月にかけて様々なオーロラ活動条件のもと、57晩行われた。観測対象は先に述べた2種類のオーロラ輝線であるが、フリンジデータの補正のために周波数安定化 He-Ne レーザー光の測定も随時行われた。

第4章では得られたフリンジデータから熱圏中性大気の視線風速を導出する手順、及び測定誤差について述べる。フリンジ画像は天頂を中心とした15°おきの24方位に分割される。その結果得られた1次元データ中の正確なフリンジピーク位置から、装置の温度ドリフト等を加味してドップラーシフト量を割り出し視線風速を得る。考えられる誤差としては、まず光電効果の統計的なばらつきによるものを検討し、これは1~3分の露出時間に対しては±35m/s以下に押さえられることがわかった。次にオーロラ光の全天分布が非一様な場合に生じるフリンジピークのズレによる風速の誤差についてシミュレーションを行い、その結果、場合によっては風速に100m/sを越える誤差が出ることもあり議論の際にはオーロラ全天画

像等との比較が必要であることが分かった。

第5章では観測から得られた様々な風速変動について詳しく述べ、また第6章ではその考察を行った。これらの章で明らかにされた主要な結果について以下にまとめる。

- 1) 数時間から1日の周期を持つ大規模な風の変動には地磁気活動度依存性があることがわかった。地磁気擾乱時には静穏時に比べて磁気南方向(極方向)への風速が増し、その傾向は磁気地方時の真夜中付近で最も強くなる。この特性は、地磁気擾乱が大きくなるとともにオーロラエネルギーの注入量が増大し、オーロラオーバルの位置が拡大する効果と考えられる。
- 2) オーロラ発光領域付近では、発光領域から外側に向かう強い風の吹き出しが観測される。この風はオーロラの近辺で起こる熱圏大気加熱やイオンドラッグによる力が引き起こすと考えられるが、*Walterscheid et al.* [1985]の数値計算による予測よりもかなり大きな風速が観測された。
- 3) 活発な地磁気活動があった1994年6月3-4日の晩、顕著な子午線風速の周期的な増大が見られた。その周期はF層、E層領域でそれぞれ1.3-2時間、1.2時間ほどであった。また、その位相は極へ向かって伝播しており位相速度はF層、E層領域でそれぞれ80m/s、110m/sほどであった。これらのパラメーターよりこの周期的変動は極方向へ伝播する中規模大気重力波(AGW)と考えられる。またこの時、昭和基地から数100km低緯度側で活発なオーロラ活動がみられ、AGWはその領域で発生していると考えられる。この観測は中規模AGWの発生と伝播を初めて2次元的に捉えたものである。
- 4) また同じ晩、熱圏中の強い上昇風を示唆する風系が観測された。オーロラオーバルの極側で0246UTと0302UTに見られたこの現象はこれまでに*Price et al.* [1995]などによって報告されている上昇風と同じタイプのものと思われる。しかし、0404-0413UTにおきた現象はF領域においてこれまでに報告されたことのない急激な上昇風の増大を示した。その継続時間は15分ほどで、上昇風の起きている領域の水平スケールは680km以上と見積もられた。これらの上昇風とAGWが同じ晩に観測されたことは、両者に密接な関係があることを示している。

第7章では本研究によって得られた成果をまとめた。本研究によって、FPDISがオーロラ活動に伴って起こる熱圏大気の急激な変動を捉えることができる極めて有効な手段であることが示され、これを用いた観測によってオーロラ活動に対応した様々なタイプ熱圏大気の応答が明らかになった。特に熱圏の高緯度域から他の緯度領域へのエネルギー伝搬に重要な役割を担っていると考えられる大気重力波の発生・伝播、そして強い上昇流の出現と大気重力波との密接な関係を示したことは極めて重要な結果である。

論文審査の結果の要旨

高緯度ではオーロラエネルギーが熱圏の中性大気や電離大気の運動の駆動源になっており、オーロラエネルギーの注入に対する応答過程を詳しく調べることが熱圏ダイナミクスを理解する上で最も有効な手段となる。しかし、オーロラ活動は時間的にも空間的にも変化の激しい現象であり、熱圏の応答過程をとらえるには高い時間・空間分解能が必要となる。

本研究は、熱圏風系の速い変化を2次元的にとらえることができるファブリーペロードップラーイメージングシステム（FPDIS）を開発し、これを用いた観測を南極昭和基地で1994年冬期の57夜実施し、オーロラ活動に対する様々なタイプの熱圏中性大気の応答を明らかにした。開発したFPDISは、1989年に東北大学光学グループによって製作されたプロトモデルを大幅に改良したもので、主な改良点は、画像歪みのない近接型2次元光子検出器と高速読み出しが可能なCCDカメラの採用および高速画像処理装置の採用である。観測対象はF層高度で発光する酸素原子630nm輝線とE層高度で発光する酸素原子557.7nm輝線である。得られたドップラーフリンジ像から中性大気の視線風速を高精度（誤差 $\pm 35\text{m/s}$ 以下）で導出するアルゴリズムを開発し、以下の重要な結果を得た。

まず、地磁気静穏時には観測から得られたF層風系はモデル計算の結果とよい一致を示すが、擾乱時には真夜中付近で極方向への風が強まりモデル計算の結果と大きな食い違いが起こることを見出し、その原因としてオーロラアーク領域から外側に向かう強い風の吹き出しがF層で起こることを明らかにした。さらに、激しいオーロラ活動に伴って強い上昇風が吹き、同時にその領域から周期1~2時間の極方向に伝搬する中規模大気重力波がF層高度でも、E層高度でも発生することを発見し、その発生機構を明らかにした。

このように、本研究により、熱圏風の速い変動を2次元的にとらえるファブリーペロードップラーイメージング観測の手法が確立し、オーロラ活動によって起こる熱圏風の変動の様子が初めて明らかになった。これは著者が自立して研究活動を行うのに必要な高度な研究能力と学識を有することを示している。したがって、久保田実提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。