

氏名・(本籍)	なか 中	じま 島	ひで 英	あき 彰
学位の種類	博 士 (理 学)			
学位記番号	理博第1303号			
学位授与年月日	平成5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 Auroral-Zone Thermospheric Temperatures and Winds Using Fabry-Perot Doppler Imaging Observations at Syowa Station, Antarctica (南極昭和基地におけるファブリーペロドップラーイメージング観測によるオーロラ帯の熱圏温度と風に関する研究)			
論文審査委員	(主査) 教 授 福 西 浩			
			教 授 大 家 寛 教 授 斎 藤 尚 生 助 教 授 岡 野 章 一 助 教 授 森 岡 昭	

## 論 文 目 次

ABSTRACT

ACKNOWLEDGMENTS

Chapter 1. INTRODUCTION

1.1. The Earth's Thermosphere

1.2. Observations of the Earth's Thermosphere

1.2.1. Ground-based observations on the F-region thermosphere

1.2.2. Space-borne observations on the F-region thermosphere

1.2.3. Observations on the lower thermosphere

1.3. Purpose of This Thesis

## Chapter 2. INSTRUMENTATION

- 2.1. Introduction to a Fabry–Perot Interferometer
  - 2.1.1. Basic principle of the Fabry–Perot interferometer
  - 2.1.2. Transmittance of a F–P etalon
  - 2.1.3. Angular dispersion of a F–P etalon
  - 2.1.4. Order separation of interference fringes of a F–P etalon
  - 2.1.5. Free spectral range of a F–P etalon
  - 2.1.6. Theoretical resolving power of a F–P etalon
- 2.2. The Fabry–Perot Doppler Imaging System (FPDIS)
- 2.3. The Optical System
- 2.4. The Fabry–Perot Etalon
  - 2.4.1. The Fabry–Perot etalon used in this study
  - 2.4.2. The etalon stabilization system used in this study
  - 2.4.3. The etalon chamber
- 2.5. The Interference Filters
- 2.6. The Photon Imaging Head (PIH) Detector
- 2.7. The Charge Coupled Device (CCD) Detector
  - 2.7.1. The principle of a CCD image sensor
  - 2.7.2. The CCD image sensor used in this study
  - 2.7.3. The CCD data processor used in this study
- 2.8. The Image Data Recording System
- 2.9. Auxiliary Experimental Apparatus
  - 2.9.1 The calibration laser
  - 2.9.2 The air dryer apparatus

## Chapter 3. DATA CALIBRATION AND THE METHODS OF ANALYSIS

- 3.1. Image Data Processing
  - 3.1.1. Image data reproduction by the ARSAD system
  - 3.1.2. Image data reproduction by DEC–Station 5000/125
- 3.2. Correction of Image Distortion
- 3.3. The Geometrical Calibration Using Stars
- 3.4. The Spectroscopic Calibration Using a Stabilized 632.8 nm He–Ne Laser
  - 3.4.1. Determination of the optical center of the image data
  - 3.4.2. Conversion of the image coordinates from the real pixel coordinates (R–space) on the image plane into the radius–squared coordinates (X–space)
  - 3.4.3. Efficacy of the correction of distortion in the image data

- 3.5. The Method of Analysis of Doppler Image Data
- Chapter 4. OBSERVATIONS AT SYOWA STATION, ANTARCTICA
  - 4.1. Installation of the FPDIS at Syowa Station, Antarctica
  - 4.2. Summary of Observations at Syowa Station
  - 4.3. Observational Results on Thermospheric Neutral Temperatures and Wind Velocities on September 11/12, 1990
    - 4.3.1. Auroral activities on September 11/12, 1990
    - 4.3.2. Result on thermospheric neutral temperatures
    - 4.3.3. Summary plot of FPDIS results on September 11/12, 1990
- Chapter 5. DISCUSSIONS
  - 5.1. Estimation of Errors in Analysis by a Numerical Simulation
- Chapter 6. CONCLUSIONS
- Appendix A. TERMINOLOGY
  - A.1. Two Criteria of Wave Number Width for Defining the Resolving Power
- Appendix B. CALIBRATIONS
  - B.1. The Grid Calibration of the FPDIS Data
  - B.2. The Star Calibration of the FPDIS Data
- REFERENCES

## 論文内容要旨

地球の超高層大気は、その温度勾配によって慣習的に幾つかの領域に分けられてきた。すなわち、地表に近い方から、対流圏、成層圏、中間圏、そして熱圏である。熱圏は、高度約80~90kmのメソポーズから上の領域と定義され、そこでの温度は高度とともに急激に上昇し、やがて外気圏温度と呼ばれる値に漸近的に近づいていく。この外気圏温度の値は、熱圏の主な熱源である、おもに酸素分子による太陽紫外・極紫外線の吸収と、下部熱圏への熱伝導、及び赤外放射による冷却効果の間の熱平衡によって決まる。熱圏の上部境界は、高度約500~600kmの熱圏界面とされるが、これは、それ以上の高度の磁気圏との境界であり、そこでは大気分子・原子・イオン間の衝突がほとんど無視できるため、大気分子・原子・イオンの運動は純粋に力学的な力と電磁的な力によって規定される。熱圏大気の熱源としては、太陽からの紫外・極紫外線加熱の他に、特に高緯度帯で重要になるものとして、オーロラ粒子の降下に伴う粒子加熱、およびジュール加熱が挙げられる。その値は、時には太陽紫外・極紫外線による加熱をはるかに上回る程にもなるが、空間的・時間的に非常に変動の大きいものである。また、熱圏より下の中間圏から伝わってくる内部重力波や潮汐波の碎波による加熱も存在する。

熱圏大気の物理量（温度、運動、組成）の観測は、1950年代から始まるロケット及び人工衛星による直接・間接観測によって飛躍的に増加した。また、熱圏における大気発光の分光観測によって、その熱力学的温度、及び風速の値を地上からリモートセンシングする技術が開発されてきた。その結果、熱圏の温度は、メソポーズで平均的に約180K、熱圏界面では1000~2000Kにもなるが、これらの値は緯度、磁気地方時、季節、太陽周期、太陽活動、地磁気活動などによって大きく変化することが判っている。しかし、その変動の様子には、いまだ判っていない点も多く残されており、特にオーロラ帯など高緯度地域でのオーロラ活動に伴う熱圏の応答の様子は、最近まで定量的には解明されていなかった。

1970年代ころに始まる、ファブリーペロー干渉計を用いた地上からの熱圏温度、及び風速の本格的観測は、熱圏大気に関する数多くの情報をもたらしてきた。また、非干渉性散乱レーダーを用いた熱圏イオン・電子温度とドリフト速度の観測、及び人工衛星による直接・間接観測の結果を合せて、1970年代終わりには経験的な熱圏モデルが作られ、また、1980年代半ばには、時間変動の項を含む3次元熱圏大気大循環モデルが作られてきた。これらのモデルは、最近ではかなり成熟したものとなってきたが、依然オーロラ活動に伴う変化の様な、時間的・空間的に大きく変動する変化を調べるには不十分なものである。

1990年に始まり現在進行中のSTEP (Solar Terrestrial Energy Program) 計画では、太陽系内のエネルギーと物質の流れを定量的に捉えらるという目標のため、世界各国の研究者が連絡を取り合って様々な観測を行っている。その中でも太陽と熱圏大気との間のエネルギー輸送課程の解明は、中心課題の一つとなっている。本研究で行った、FPDIS (Fabry-Perot Doppler Imaging

System) による F 層, 及び E 層高度での熱圏中性温度, 及び風速の観測は, その解明のために貴重なデータセットを提供するものである。また, その解析結果からは, 今まで報告されていなかった興味深い現象も幾つか見つかっている。以下に, 本研究の内容について簡単に述べる。

第 1 章では, 序論として熱圏大気に関する過去の観測とその結果についてレビューを行った。また, 本論文の目的についても述べた。

第 2 章では, 最初に我々が新たに開発し本研究に用いた, ファブリーペロッドップラーイメージングシステム (FPDIS: Fabry-Perot Doppler Imaging System) の原理とその光学系の概要について述べた。FPDIS は, 熱圏中性温度と風速の地上からのリモートセンシング観測に伝統的に用いられてきたファブリーペロー干渉計 (FPI: Fabry-Perot Interferometer) を, 2 次元的に拡張したものであり, この種の観測は世界的に見てもまだ始まったばかりである。FPDIS や FPI は, 熱圏で発光する酸素原子の OI 630.0 nm または OI 557.7 nm 輝線のドップラーシフト量及びドップラー線幅をファブリーペロー干渉計を用いて測定することにより, 熱圏の風と温度を求めるものである。従来までの FPI は, 高分解能でかつ明るい分光計ではあるが, 本来視野が狭く, 天空上のごく限られた (約 1 度以下) 一方向の値を測定する装置であり, 風速や温度の 2 次元分布を得るためには視野をスキャンする必要があった。我々が新たに開発した FPDIS は, 超高感度 2 次元受光装置を用いることにより, 天空の広い範囲のこれらの物理量を同時に観測する装置である。その結果, 風速及び温度の空間的・時間的微小構造の解明が可能になる。この章ではさらに, 受光器として用いた最新の 2 次元受光器のペア (PIH: Photon Imaging Head detector 及び CCD: Charge Coupled Device detector) の概要についても述べ, またデータ記憶装置やその他の周辺装置についても述べた。

第 3 章では, この FPDIS から得られるデータの解析方法について述べた。まず最初に, FPDIS から得られる画像データの解析方法について述べた。片面 27000 枚の画像データを記録する光ディスクから再生されたデータは, 極地研オーロラデータセンターの画像解析装置を用いてデジタルデータへと変換される。この画像データは, 1 画像につき  $640 \times 480 \times 2 \text{ bytes} = 614400 \text{ bytes}$  の大きさを持っている。光ディスクは観測時は 1 秒おきにデータを記録しているが, ここではそれを 1 分間積算したものを最小のデータ単位とした。これらの画像データは, 8mm データカートリッジテープを介して東北大学理学部超高層物理学研究施設のワークステーション (DEC Station 5000/125) へと移され, 様々な画像処理が行われた。すなわち, まず, 1 分毎の画像データを 6 分間分足し合わせ, 3 分おきの移動平均を行った。次に受光器に見られた画像の歪みを補正するため, 補正用の光学格子データを用いて空間座標の補正を行った。これには, 2 次元スプライン補間の方法を用いた。さらに, 画像上の全天視野と実際の空間位置の関係を決めるため, 星を用いた座標決定を行った。最後に実際の解析に用いるため, 画像上の天頂を中心とした

30度おきの12方位について、画像の輪切りを行い、1次元データを作成した。これらの画像処理の結果作られた1次元データは、温度と風速に関する情報を含んだ干渉データである。またそこには、同時に干渉計の装置関数も含まれている。そこで、観測時に取られたキャリブレーション用の安定化He-Neレーザーデータからこの装置関数の値の決定を行い、それを実際に得られたオーロラの干渉データに適用することにより、温度と風速を決定することができる。本章では、これらの解析方法について詳しく述べた。

第4章では、実際に行った観測の概要とその結果について述べた。FPDISは、1989年夏に蔵王観測所で調整並びにテスト観測を行った後、1989年11月に南極観測船“しらせ”で南極へと輸送された。南極での観測は、第31次南極地域観測隊の越冬研究観測の一端として実施された。観測は1990年4月1日から9月21日までのべ46夜にわたって行われ、約900,000枚の画像データを取得し、計17枚の光ディスクに収録した。観測は、He-Neレーザー(632.8 nm)のキャリブレーションデータを随時取得し、オーロラ中のOI 557.7 nm及びOI 630.0 nm輝線によるドップラーフリンジ画像を適宜取得した。これらの観測日の中には、昭和基地のK-indexの値でK=0の地磁気静穏時から、K=6の擾乱時まで含まれる。今回は、1990年9月11/12日のOI 630.0 nm観測例について解析を行った。この観測時は、昭和基地のK-indexの値で3~4にあたり、21:38 UTごろより昭和基地の北側(低緯度側)からオーロラブレイクアップに伴うオーロラアークの急激な増光が始まった。この日のFPDISデータを解析することにより、幾つかの興味深い現象が見出された。すなわち、オーロラブレイクアップの前後で、F層熱圏中性温度の値は、200Kから500K、平均で約400K、画像上の各点で上昇することが認められた。これらの温度上昇は約5~10分の時間の間に起こった。この結果は、従来の観測結果とも一致する。また、風速の値は、オーロラの拡大に伴って、画像上の各点で次々と400~600 m/sにも達する風速の変化が捉えられたのは世界初である。また、これら風速と温度の変化の様子を2次元画像上にプロットした結果からは、より興味深い風速の変化の様子が明らかになった。即ち、オーロラブレイクアップの直後から画像上のほとんどの点で、周期7~10分、振幅300~600 m/sの周期的な風速変化が認められた。過去にも風速の周期的な変化が報告された例はあるが、これほど明らかに示された例はない。この現象は、オーロラブレイクアップに伴って、なんらかの大気波動現象が励起されることを示している。

第5章では、本研究に用いたデータ解析の手法を実際のオーロラデータに用いた時に予測される誤差についてシミュレーションを行い、その評価を行った。その結果、画像上のフリンジピークにおいて計数率が100とすると、風速の値の誤差はせいぜい40m/sだが、温度の誤差は100K以上になることが明らかになった。そこで、本研究ではピークカウントの値で150以上のフリンジデータのみを解析を行い、誤差の大きいそれ以下のフリンジデータは解析しないこととした。それにもかかわらず、6分間の積算データを用いることにより、ほとんどの場合画像上の解析点2

4点中7割以上の点でデータ解析が可能であった。

第6章ではこれら本研究の結論の要約を行った。すなわち、以下の通りである。

- 新たな2次元分光観測装置であるFPDIS (Fabry-Perot Doppler Imaging System) を開発した。この装置は、視野165度のオーロラ及び大気光中のOI 557.7 nm 及びOI 630.0 nm 輝線を分光することにより、熱圏の中性風速及び温度の値を観測するものである。

観測は1990年の南半球の冬に南極昭和基地で行われた。46夜の観測を行い、900,000枚のOI 557.7 nm 及びOI 630.0 nm 輝線のドップラーフリンジ画像データを得た。

- データ処理の結果、熱圏(F層, E層高度)中性温度, 及び風速の視線方向成分値が、画像上の12方位, 24点について、時間分解能3分で得られた。

- 解析の結果、1990年9月11日の21:38 UTにはじまるオーロラブレイクアップに伴い、F層中性温度の値が、10分以内の時間スケールで200~500 K上昇するのが捉えられた。また同時に、視線風速の値も400~600 m/s変化するのが捉えられた。

- また、このブレイクアップの後、画像上のほとんどの点で周期7~10分、振幅300~600 m/sの周期的な風速の変動が認められた。これは、オーロラブレイクアップに伴い、熱圏でなんらかの大気波動現象が励起されることを示している。

本研究で、熱圏のかなり広い範囲にわたる物理量の観測を地上から行うことが可能となったが、それでも地上からの視野の範囲はF層高度でせいぜい約1600 kmにすぎない。一方人工衛星観測では、グローバルな観測が可能だか、時間的な変動は見るができない。これら両観測側の長所を合わせることにより、より包括的に熱圏の物理を解明することができることと期待される。今後、本研究によって得られた熱圏ダイナミクスに関する新たなデータセットを、人工衛星など飛翔体による観測結果と比較することにより、より包括的な熱圏物理の理解を目指したいと考える。

## 論文審査の結果の要旨

本研究の目的は、熱圏の風と温度の空間分布を地上から高い時間分解能でとらえることができる新しい観測装置を開発し、それを用い、オーロラ活動に伴って熱圏の風系と温度場がどのように変化するかを明らかにすることである。

熱圏高度約 90–500 km の風と温度はこの高度領域で発光している大気光やオーロラ光のドップラースhiftとドップラー幅を高分解能の分光計によって測定することにより推定することができる。ファブリーペロー干渉計 (FPI) はこの目的に最も適した分光計であるが、従来の FPI は視野がきわめて狭く ( $1^\circ$  以下)、特定の方向のドップラー情報しか得ることができなかった。これに対し本研究で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) は、前光学系に魚眼レンズとコリメーションレンズ、干渉計としてピエゾ安定化エタロン、検出器として 2 次元フォトンカウンティングと CCD の組み合わせを使用することにより、広視野 ( $165^\circ$ ) 高時間分解能 (約 3 分) で熱圏風・温度の情報を得ることに成功した。

この FPDIS を用い著者は第 31 次南極観測隊員として 1990 年 4 月～9 月の冬期南極昭和基地で 46 夜にわたって観測を実施し、約 27,000 枚の画像データを光ディスクに収納した。この観測データより正確なドップラー量を取り出すために、画像ひずみ補正、レーザー光による波長校正、星を利用した位置補正などさまざまな補正用アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムを用い、オーロラ活動が活発な 1990 年 9 月 11 日および 9 月 13 日の観測データの詳細な解析を行った。その結果以下のことが明らかになった。

- 1) 1990 年 9 月 11 日のサブストーム現象ではオーロラブレイクアップ直後、熱圏の 250 km 高度で平均 400 K の急激な温度上昇と 400–600 m/s に達する風速の変化が起きた。風速の変化は周期 7–10 分、振幅 300–600 m/s の周期的変化を示し、サブストームに伴って大規模な大気重力波が発生したことを示唆する。
- 2) 1993 年 9 月 13 日のサブストーム現象ではオーロラサージの通過とともに風速と風向の急激な変化 (西向きの水平風が上向きの鉛直風に変化) が観測された。このことから、サージ領域に強い上昇風が起っていることが明らかになった。

このように本研究は、熱圏の風・温度を 2 次元的にとらえる FPDIS という新しい手法を開発し、これを用いた南極昭和基地での観測から、オーロラ現象に伴って起こる急激な熱圏風と温度の変動に対し新しい知見を与えた。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。よって中島英彰提出の論文は博士 (理学) の学位論文として合格と認める。