## 4-4 CRLファブリペロー干渉計の開発と熱圏観測

# 4-4 Development of CRL Fabry-Perot interferometers and observation of the thermosphere

石井 守 岡野章一 佐川永一 村山泰啓 亘 慎一 マーク・コンデ ロジャー W. スミス

IISHII Mamoru, OKANO Syoichi, SAGAWA Eiichi, MURAYAMA Yasuhiro, WATARI Shin'ichi, Mark Conde, and Roger W. Smith

#### 要旨

ファブリペロー干渉計(FPI)は、エタロンと呼ばれる2枚のガラス板の間で光を多重反射・干渉させる ことによって特定の波長の光だけを取り出す装置である。光学的には非常に明るく、微弱な大気光の観 測に適している。この装置を用いて、他の方法では観測の難しい中間圏・熱圏の風・温度情報を計測す る手法が知られている。我々は、通信総合研究所とアラスカ大学が共同で進めているアラスカプロジェク トの一環として、全天型及び掃天型ファブリペロー干渉計を開発した。

この装置を用いて国内での試験観測を重ねた後、掃天型は米国アラスカ州フェアバンクス近郊のアラ スカ州立大学ポーカーフラット実験場に設置され、主に熱圏鉛直風の観測を行っている。また全天型は 同州イーグル観測所に設置され、HFレーダとの同時観測による電離圏・熱圏相互作用の研究や、オーロラ 近傍の鉛直風分布の研究に有用なデータを供給している。この観測を行うに当たって、観測装置の自動 化及びより精度の高いデータ解析ソフトウェアの開発を行った。

The Fabry-Perot Interferometer (FPI) has long been established as a remarkably versatile high-resolution system for a wide range of spectroscopic purposes. This system screen out rays with a specific wavelength by letting multiple reflections occur between two glass plates called etalon. It has been used for estimating wind velocity and temperature in the mesosphere and the thermosphere which is much difficult to deduce with other observational methods. We have developed two types of FPI, the all-sky FPI and the scanning FPI as a part of international cooperative research project between CRL and University of Alaska, Fairbanks.

After several operations in Japan for improving total systems, we installed these instruments in Alaska. The scanning FPI, installed in the Poker Flat Research Range, is used for vertical wind feature in the vicinity of aurora. The all-sky FPI, installed at the Eagle observatory, is used for ionosphere - thermosphere coupling study with cooperative observations with HF-radar.

We have developed an automatic observation system for operating the instrument and data analyzing software for retrieving parameters with high precisions.

[キーワード] 大気光,オーロラ,中性風,熱圏,鉛直風 Airglow, Aurora, Neutral wind, Thermosphere, Vertical wind

## 1 ファブリペロー干渉計を用いた 熱圏中性風・温度観測の意義

太陽起源の荷電粒子は、地球を取り巻く磁気 圏との複雑な相互作用の後に両極域の地球大気 と反応し、オーロラに代表される電磁力学的作

#### ●特集●地球環境計測特集

用をもたらす。これらの粒子の持つエネルギー は最終的には光・熱又は大気の運動エネルギー の形で熱圏・中間圏の中性粒子に供給される。 このシステムはモデルとして[1][2]、あるいは 個々のケース[3]としては知られているが、この メカニズムによって太陽起源のエネルギーがど の程度地球大気に供給されているかについての 観測的実証はまだ進んでいない。

一方、中間圏・下部熱圏には下方からのエネ ルギー供給も知られている。高度85km付近に位 置する中間圏と下部熱圏との境界層(中間圏界面) では水平風速がほぼ0となり、地表面とほぼ同期 して自転していることが知られている。地表と 中間圏界面の間では最大50m/s以上もの水平風 が定常的に存在することを考えるとこれは奇妙 な現象である。現在この現象は下方から伝搬し てきた重力波が砕波することで説明されている [4]。しかしこのメカニズムについても、定量的 かつ広範囲、長期間の観測による言及は現在の ところなされていない。

地球温暖化に代表されるような気候変動には、 このような中間圏・熱圏のエネルギーバランスも 関係していると考えられ、その重要性が注目さ れている。しかしながら、この領域は、人工衛 星やラジオゾンデによる直接観測が難しく、連 続観測を行うためには電波・光を用いたリモート センシングが有効である。

超高層大気は太陽光による光電離・光解離、 また粒子同士の衝突などによって昼夜を問わず わずかながら発光している。大気光と呼ばれる この発光は定まった波長スペクトルを持つ。よ って、この光を高い精度の波長分解能で測定す ると、予想される波長と観測波長とのズレから 発光する大気の視線方向の移動速度(風)を、ま た波長スペクトルの幅から温度を推定すること ができる。また、極域で見られるオーロラは太 陽風起源の高エネルギー粒子が地球の磁力線に 沿って降り込み、大気を励起させて発光する。 この点で大気光とは発光のメカニズムが異なる が大気そのものが定まった波長の光を発すると いう点で同様の分光測定が可能である。

通信総合研究所とアラスカ大学が共同で進め ているアラスカプロジェクトの一環として、 我々はファブリペロー干渉計の開発を進めてき た。この装置は、エタロンと呼ばれる2枚のガラ ス板の間で光を多重反射・干渉させることによ って特定の波長の光だけを非常に高い分解能で 取り出す装置である。アラスカプロジェクトの 目的の一つに、極域熱圏電離圏相互作用が上げ られるが、熱圏中性大気ダイナミクスを推定す る数少ない手法の一つとして、ファブリペロー 干渉計による光学観測は大きな期待を集めてい る。

本論では、ファブリペロー干渉計の観測原理、 通信総合研究所開発のファブリペロー干渉計 (CRLFPI)の概要を説明し、これまでの成果につ いても簡単に触れる。



## 2 ファブリペロー干渉計の観測原理

際に干渉を生じる。

図1はファブリペロー干渉計の中心部を成すエ タロンと呼ばれる光学デバイスの概念図である。 エタロンは表面を特殊コーティングして反射率 90%程度の鏡面にしたガラス板を2枚向かい合わ せにし、ピエゾ素子や精密ネジ等を用いて厳密 に平行に配置した装置である。今、図1のように 間隔dを置いて屈折率nの媒質中に平行に設置さ れたガラス板(屈折率n')をに角度ので光が入射 してきたとする。この図ではn'>nとしている。 この時の光路差はCD·n = AE·n'から、AB + BC =  $2ndcos \Theta$ で与えられる。波長 $\lambda$ の光の場合、 1次(0回反射)及び2次(1回反射)射出光の位相  $差\phi$ は

 $\phi = 2\pi/\lambda \cdot 2nd \cos\Theta = 4\pi nd \cos\Theta/\lambda$ (1)となる。入射光の振幅を1と規格化する。エタロ ン板の反射膜の振幅透過率をt、振幅反射率を  $r \cdot \exp(i \chi)$ 、反射の際の位相変化を $\chi$ とすると 干渉計から出る光の振幅τは  $\tau = t^2 + t^2 (\mathbf{r} \cdot \exp(i\alpha))^2 \cdot \exp(i\phi) + t^2 (\mathbf{r} \cdot \exp(i\alpha))^4 \cdot \exp(2i\phi) + \cdots$  $= t^{2}/(1 - r^{2} \exp(i(\phi + 2\chi)))$ (2)エタロン板の反射膜の強度透過率をT、強度反射 率をRとすると、T=t<sup>2</sup>、R=r<sup>2</sup>となる。  $\delta = \phi + 2\chi$  とすると  $\tau = T/(1 - R + \exp(i\delta))$ (3) エタロン全体の強度透過率Trpは振幅透過率の絶 対値の2乗、つまり T<sub>FP</sub> = ττ\*で表されるので  $T_{\rm FP} = T^2 / (1 + R^2 - 2R\cos\delta)$ (4) となる。各反射光の位相がそろうとき、つまり  $\delta = 2m \pi$  (但しm= 0、±1、±2…)の時に光の 強度透過率は最大  $(T_{FP} = 1)$  になる。また  $\delta =$ (2m+1) πの時最小になる。光源の面積が充分に

大きければ透過率最大で焦点面上で明るくなる 部分は図2のようにリング状になる。このリング をフリンジと呼ぶ。フリンジの強度断面は(4)式 で与えられる関数に従う。これをエアリ関数 (Airy function)と呼ぶ。

(4) 式は角度 $\delta$ の関数となっているので、実際



に CCD カメラ上に得られるフリンジの中心から の距離 a の関数に変換する。(1) 式をテーラー展開 すると

$$\phi = \frac{4\pi nd}{\lambda} \left( 1 - \frac{\Theta^2}{2!} + \frac{\Theta^4}{4!} - \dots \right)$$
(5)

フリンジの中心からの距離をa、フォーカスレン ズの焦点距離をfとする。

 $\Theta \cong 0$  のとき、 $\Theta \cong \tan \Theta = a/f$  と表される。 この関係を用いると

$$\phi = \frac{4\pi nd}{\lambda} \left( 1 - \frac{a^2}{2f^2} + \frac{a^4}{24f^4} - \dots \right)$$
(6)

a << fなので第3項以降を無視する。これを(4) 式に代入して

$$T_{FF} = \frac{T^2}{1 + R^2 - 2R\cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda}\left(1 - \frac{a^2}{2f^2}\right) + 2\chi\right)}$$
(7)

観測する大気光を放出している大気が視線方 向に移動し、ドップラ効果で大気光の波長 λが 変化するとフリンジのピークの位置が変動する。 また温度が高くなると熱運動によりフリンジの 幅が広がる。これよりフリンジの位置及び幅が 基準からどれだけ変動したかを計算することに よって風と温度の情報を得ることができる。

図3は、入射光波長とフリンジピーク位置との 関係を示す。ただし、エタロンギャップd = 20.49mm、真空透磁率 $\mu = 4\pi \times 10^7$ 、f = 0.6mと した。また右縦軸は、入射光波長を557.7nmとし た時に、ドップラ変位から得られる発光体の移



横軸にフリンジ半径、縦軸に波長を示す。但 しエタロンギャップd = 20.49mm、真空透 磁率 $\mu$  = 4 $\pi$  × 10<sup>-7</sup>、f = 0.6m とした。ま た右縦軸は、入射光波長を557.7nm とした 時に、ドップラ変位から得られる発光体の移 動速度(この場合は風速)を示す。

**A** 157

#### ● 特集 ● 地球環境計測特集

動速度(この場合は風速)を示す。このようにa をパラメータとして用いる表現をR-spaceと呼 ぶ。ただし、これは線型関係にない(つまり、フ リンジ半径が大きくなるにつれて、同じ風速で も変動量が小さくなる)。この問題はa<sup>2</sup>をパラメ ータとすることで解決される。このように、a<sup>2</sup>を 用いる表現をX-spaceと呼ぶ。図4に、X-space における入射光波長とフリンジピーク位置との 関係を示す。各パラメータ及び縦軸は図3と同じ である。



温度を検出する際には、レーザーのフリンジ 断面を装置関数として用いる。レーザー光の波 長が完全に単一であると仮定すると、これは温 度広がりを持たない、つまり温度OKの大気から 発せられる大気光と考えてよい。これにより形 成されるフリンジ形状は装置パラメータのみに 依存する(7)式で表現される。一方、実際の大気 光を観測した場合には波長に温度広がりを持つ ため、そのフリンジ形状は温度広がりを持つ ため、そのフリンジ形状は温度広がりと装置関 数の重ね合わせ(convolution)の形になる。これ より大気温度は、大気光フリンジを装置関数で 畳み込み(deconvolution)することで得られる。

(7)式は理想的なエタロンの装置関数であるが、 現実にはエタロンの微視的な面の粗さ、平面からのズレ、エタロンの直径が有限であること、 などの装置固有の問題を考慮する必要がある。 また、検出器の空間分解能も検出精度の重要な 要素になってくる。

ファブリペロー干渉計の理論については、[5][6] に詳しい。

## 3 CRLFPIの概要

#### 3.1 光学系

ファブリペロー干渉計には、その前光学系(エ タロンより前にある部分)の違いから現在掃天型 と全天型の二つのタイプがある。掃天型は古く から使われているタイプで、鏡等を使って空の 比較的狭い任意の領域の観測を行う。全天型は 魚眼レンズを用いて全天を一度に観測できるタ イプである。CRLFPIは主に時間的変動の大きな オーロラ近傍の熱圏ダイナミクスを計測する目 的から掃天型及び全天型を1台ずつ開発した。図 5に、CRLFPIの光学系の概念図をあげる(機器 の詳細については[7] [8]を参照のこと)。

大気光は光量が非常に小さいため、電気的に 増倍する必要がある。一方オーロラは光量は比 較的大きいが時間的変動が大きいため高い時間 分解能が要求され,結果としてやはり増倍の必要 がある。このため、CRLFPIではPCI(Photon



左側:掃天型、右側:全天型。後光学系(エタ ロンより後ろの光学系)は共通。 Counting Imager, 浜松ホトニクス)を用いた増倍 を行っている。

CRLFPIの特徴の一つに、ハーフミラーを使っ て二つの異なる波長を同時に観測できる点が挙 げられる。これは大気光発光領域に対応したそ れぞれの高度の風速・温度が同時に観測できる ことを意味する。

ファブリペロー干渉計で観測される大気光と して一般的なものは、酸素原子の発光である波 長557.7nm、630.0nmである。近年、検出器の感 度の向上に伴い更に弱いOHの発光(例えば 843.0nm)も観測に用いられるようになってきた。 下部熱圏・中間圏の風速・温度推定には557.7nm (ピーク高度約95km(大気光の場合)、約110km (オーロラの場合))、843.0nm(同約86km)、更 に高い電離圏F層領域では630.0nm(同約250km) の測定が有効である。

CRLFPIは後に挙げる様々な制御系と共に1998 年9月に米国アラスカ州へ移動され、掃天型はア ラスカ大学ポーカーフラット実験場(65.12N、 147.43W)へ、全天型はイーグル観測所(64.78N、 141.16W)へ設置された。

## 3.2 データ取得系

図6は、光学系以外のCRLFPIシステム概念図 を示す。この中にはフリンジ画像を取得しデジ タルデータとしてワークステーション上に格納 するデータ処理系、モータを制御する駆動系、 観測に必要な環境を維持する観測環境維持系及 び無人で長期間(数か月間)観測し続ける自動観 測系とがある。

データ取得系はCCDカメラ(浜松ホトニクス、 VH5200)、画像処理装置(Image systems Co. Ltd.)、 画像取得制御及びデータ格納用ワークステーシ ョン(Sun Microsystems)からなる。CCDカメラ は1秒間30枚のビデオレートで画像を取得し、 画像処理装置に送る。画像処理装置では画像の A/D変換、積算を行う。A/D変換のための閾値、 積算画像数はワークステーションで設定する。 積算されたデジタル画像はワークステーション に送られ格納される。1チャンネル当たりのデー タサイズは512×480pixelで16bit/pixelのバイナ リイメージ及びヘッダ128byteより約492kbyte である。通常2チャンネルの観測を行うが、この 場合にはヘッダを共通とするので約983kbyteと なる。計測時間は対象となる大気光の明るさと 光学系の性能に依存するが、オーロラでは2分積 算で解析に十分なS/Nを得られることが経験か ら確かめられている。また、輝度が十分に得ら れなかった場合には複数の画像のデジタル和に よってS/Nを向上させることが可能である。

アラスカプロジェクトでは、観測地から通総 研小金井キャンパスへのデータ転送、解析及び 公開を自動で行うデータアーカイブシステムが 開発されている (SALMON システム) [9]。CRLF-PIの観測データの転送は、現在この SALMON シ ステムを用いて行っている。

## 3.3 駆動系及び観測環境維持系

掃天型CRLFPIのミラー、キャリブレーション 用レーザー導入のためのプリズムターレット、 それぞれのチャンネルでの取得波長フィルター ターレット、CCDカメラのフォーカス等の調整 にはステップモータ(Mellec Co. Ltd)が使われて いる。これらのパラメータ及びシークエンスは 画像取得系と同様のワークステーションで管理 している。

観測環境維持系としては(1) エタロンギャップ の時間変動を抑えるための温度制御、(2) PCIを 冷却するための冷却水循環装置及び PCI ヘッド 結露防止のための乾燥空気循環装置がある。(1) に関しては常時40度に設定し、ヒータによる加 熱とサーモスタットによる制御を行っている。(2) に関してはこの後に述べる自動観測装置によっ て制御を行う。

## 3.4 自動観測系

自動観測系の基本的概念としては、PCによっ て時刻を管理し、開始時刻に上に挙げた観測環 境維持系及びキャリブレーションレーザを決め られた順番で立ち上げ、また終了時刻には停止 させることである。PCは観測環境が整った段階 でその情報をワークステーションに送信、ワー クステーション側では情報が来ると駆動系及び 画像取得系の制御プログラムが起動してデータ の取得を開始する。終了時刻にはPCからの情報 でこのプログラムは待機状態に入る。

このような複雑なシステムになっている背景

#### 🔹 特集 🔵 地球環境計測特集



赤、緑、黒、ピンクで示した装置及びルートはそれぞれデータ取得系、駆動系、観測環境維持系及び自動観測系を表す。

には、もともと手動観測を想定して作られたシ ステムに対し自動観測系を外付けしたためであ る。これをより簡略化しシステムとして強固な ものにする改良が現在行われている。新システ ムでは、データ取得系・駆動系・自動観測系す べての制御を1台のPCで行う。このシステムは 2003年春より導入の予定である。

#### 3.5 解析ソフトウェア

速度の決定は、掃天型の場合は視野全体で一様に速度が変化すると仮定してフリンジ半径の 変動から推定する。フリンジ円周に沿って1周積 分することでS/N比を向上することができる。 ただし、光学系の設置のわずかなずれ等からフ リンジの形は必ずしも真円でない場合がある。 この場合にはレーザーフリンジの形を参照して 補正した後に積分を行う。この操作は温度推定 に対しては、より重要な意味をもってくる。こ の操作を行わずに積分した場合にはフリンジの 形状は幅広になり、真の温度より高く見積もら れる危険が高い。

全天型の場合はフリンジの各パートが全天の 対応する位置の風・温度情報を持っている。我々 の場合は各フリンジを中心角15度ずつ24のセク タに分割し、風・温度の推定を行う。

掃天型・全天型いずれの場合にも、風の絶対速 度を計算する際には風速0の基準となる位置が必 要となる。これを決定する手段として、(1)大気 光が充分ミー散乱を受けていると考えられる曇 りの日のデータを用いる[10]、(2)一晩平均の値を 用いる[11][12]、(3)レーザーフリンジから次数変 換を行って決定する、等が知られている。それ ぞれ一長一短があり、決定的な方法がないのが 現状である。現在我々は(2)の方法を採用してい る。

図7に、解析ソフトウェアの概念を示す。この

ソフトウェア上では以上に挙げたポイントをす べて自動で処理する。現在このシステムは SALMONに組み込まれ、全自動解析を行うよう 設定されている。



## 4 観測例

## 4.1 極域熱圏鉛直風

オーロラ帯における熱圏での鉛直風は、時に これまでの予想を覆す100m/sを超えるものが観 測されるに連れて近年注目を集めている[13]。鉛 直風の存在は、大気運動量輸送及び組成構造の 変化をもたらすために、これまで考えられてい た熱圏構造の理解に大きな影響を与える可能性 がある[13][14]。

ここで示すデータは、1998年10月~1999年2 月の期間にアラスカ、ポーカーフラットに設置 された掃天型CRLFPIを用いて観測された。熱圏 酸素原子の可視域発光(557.7nm、630.0nm)を時 間分解能2分で観測した。同時観測データとして、 アラスカ大学の子午線掃天型フォトメータを用 いた磁気南北方向のオーロラの輝度データを用 いた。

図8にその結果の一部を示す。横軸に観測点か

らの天頂角、縦軸に557.7nmのオーロラ輝度分布 を示す。CRLFPIによって上昇及び下降流が観測 された時のオーロラ分布はデータセット全体の 平均から有意に異なり、上昇流では天頂及び極 側の輝度が下がる傾向がある。また、下降流で は極側が高くなり赤道側が低くなる。これはオ ーロラの位置によって風系が異なる可能性を示 唆する[12]。



1998年9月~99年2月のデータから晴天 の88晩を用いた。実線はCRLFPIが上昇流 を観測している時のオーロラの分布をアラス カ大学子午線掃天型フォトメータ(MSP)で観 測したもの。点線は下降流の時のものである。 破線及び影の領域は、同じデータセットで毎 正時のオーロラ分布を平均したものとその標 準偏差を示す。

### 4.2 イオン・中性粒子相互作用

極域の高度100km以上では、電離大気と中性 大気の複雑な運動量の交換が行われている。こ の領域では、太陽からやってくる高速のプラズ マ流が持つ運動量を起源とする電離大気の水平 循環が存在する。電離大気の占める割合は高度 250kmで約1%、高度100kmではおよそ0.01%と 小さいが、ある程度の時間安定した電離大気の 流れがある場合には中性大気が引きずられて(ion drag)駆動することが知られている。また、何ら かの原因(惑星間空間磁場の反転など)で電離大 気流が急激に変化した場合、中性大気の運動が すぐに反応せず、両者の衝突による加熱が生じ ると言われている(フライホイール効果)。[15]

図9に、2000年11月24日にCRLFPIとアラス カ大学・サスカチュワン大学のHFレーダを用い



青: CRLFPIで観測されたF領域の熱圏鉛直風。赤: アラスカ大学、サスカチュワン大学のHF-レーダ で観測された電離大気の運動。

て同時観測された中性大気・電離大気の速度ベ クトルを示す。06:34UTには中性風(青色)は西向 き、プラズマ流(赤色)は北西向きのベクトルを 持っていたが、07:00UT 頃からプラズマ流が安定 して北西方向に加速を始めた。それに伴い、中 性風速も徐々にその方向を北西方向に変え、風 速を増していった。08:46UT にはプラズマ流 300m/sに対して、中性風180m/s程度まで達した。

## 5 むすび

1993年に開発を開始したCRLFPIは数多くの 国内共同観測を行ったのち、1998年9月にアラス カ州へ設置、連続自動観測を開始した。

ファブリペロー干渉計は一般に非常に取扱い の難しい装置と言われる。その理由として、例 えばエタロンは周囲の温度変化に対し容易にそ の特性を変動させること、PCIは通常レベルの可 視光でも致命的ダメージを受けることが挙げら れる。加えて観測地は可能な限り人工光のない 場所が要求され、その結果種々の電子機器を扱 うには粉塵・結露等への対策も不可欠であった。 このような状況下で無人での長期自動観測を行 うシステム開発を行ってきたという点、また、 風や温度等の情報を取り出すソフトウェア開発 を行ってきたという点で我々の試みは今後の参 考になると考えている。特に1981年のDE-2をは じめとする人工衛星搭載型ファブリペロー干渉 計は数多くの成果を挙げ、近年ではUARS、 TIMEDなど更に進んだ装置が開発されている。 残念ながら日本ではまだ衛星搭載型FPIは開発 されていないが、気象学の研究が進み中間圏熱 圏のダイナミクスの重要性が認識されるにつれ 国内での開発の必要性が問われるだろう。我々 の開発はその際の基礎となるものと考えている。 国内観測においては、東北大学福西浩教授及 び蔵王観測所の方々、京都大学深尾昌一郎教授、 津田敏隆教授、中村卓司助教授、山本衛助教授 並びに信楽観測所の方々、通信総合研究所西牟 田一三所長(当時)及び山川電波観測所の方々に 感謝する。またアラスカでの観測においては June Perehowski, Brian Lawson, Jerry Nelsonに 厚く感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1 Roble, R. G., and M. H. Rees, "Time-dependent studies of the aurora: Effects of particle precipitation on the dynamic morphology of ionospheric and atmospheric properties", Planet. Space Sci., 25, 991-1010, 1977.
- **2** Rees, M. H., and J. C. G. Walker, "Ion and electron heating by auroral electric fields", Ann. Geophys., 24, 193-198, 1968.
- **3** Killeen, T. L., P. B. Hays, and G. R. Carignan, "Ion-neutral coupling in the high-latitude F region: evaluation of ion heating terms from Dynamics Explorer 2", J. Geophys. Res., 89, 7495-7508, 1984.
- 4 Lindzen, R. S., "Lower atmospheric energy sources for the upper atmosphere", Meteor. Monogr., 9, 37-46, 1968.
- **5** Hernandez, G., "Fabry-Perot Interferometers, Cambridge studies in modern optics 3", Cambridge Univ. Press, p343, 1986.
- 6 Vaughan, J. H., "The Fabry-Perot Interferometer, history, theory, practice and applications", Adam Hilger, p583, 1989.
- 7 Ishii, M., S. Okano, E. Sagawa, S. Watari, H. Mori, I. Iwamoto, and Y. Murayama, "Development of Fabry-Perot interferometers for airglow observations", Proc. NIPR. Symp. on Upper Atmos. Phys., 10, 97-108, 1997
- 8 Ishii, M., S. Okano, E. Sagawa, S. Watari, H. Mori, I. Iwamoto, K. Kanda, F. Kamimura, and D. Sakamoto, "Development of an automatic observation system for Fabry-Perot interferometers", Adv. Polar Upper Atmos. Res., 15, 178-192, 2001.
- 9 大山伸一郎,村山泰啓,石井 守,久保田 実, "SALMON システムの開発と環境計測データ伝送実験",本特集.
- 10 新原洋祐, "中緯度下部熱圏風のドップラーイメージング観測", 東北大学大学院理学研究科修士論文, 1995年.
- 11 Ishii, M., S. Oyama, S. Nozawa, R. Fujii, E. Sagaqwa, S. Watari, and H. Shinagawa, "Dynamics of neutral wind in the polar region observed with two Fabry-Perot interferometers", Earth Planet Space, 51, 833-844, 1999.
- 12 Ishii, M., M. Conde, R. W. Smith, M. Krynicki, E. Sagawa and S. Watari, "Vertical wind observations with two Fabry-Perot interferometers at Poker Flat, Alaska", J. Geophys. Res., 106, 10537-10551, 2001.
- 13 Rees, D., R. W. Smith, P. J. Charleton, F. G. McCormac, N. Lloyd and A. Steen, "The generation of vertical thermospheric winds and gravity waves at auroral latitudes --- I. Observations of vertical winds", Planet. Space Sci., 32, 667-684, 1984.
- 14 Conde, M., and R. W. Smith, "Spatial structure in the thermospheric horizontal wind above Poker Flat, Alaska, during solar minimum", J. Geophys. Res., 103, 9449-9471, 1998.
- 15 Lyons, L. R., T. L. Killeen, and R. L. Waltercheid, "The neutral wind "flywheel" as a source of quiet-time, polar-cap currents", Geophys. Res. Lett., 101-104, 1985.



七井 学 電磁波計測部門北極域国際共同研究グ ループ主任研究員 博士(理学) 大気物理学

\* 佐川永一 電磁波計測部門宇宙天気システムグル ープ主任研究員 理学博士 宇宙天気

Real Provide State

□ bub
 企画部企画室主任研究員 博士(理学)太陽地球結合系物理

前野章一 東北大学大学院理学研究科教授 理学 博士 惑星及び地球超高層大気の分光物理学

Mark Conde, Ph. D. アラスカ大学フェアバンクス校地球物 理研究所助教授 超高層大気物理学、宇宙物理学

Roger W. Smith, Ph. D. アラスカ大学フェアバンクス校地球物 理研究所長 超高層大気物理学、オーロラ物理学