

1-3 オーロラ・電離大気-中性大気相互作用の観測実証

1-3 Observations of Aurora and Atmosphere-Plasma Interaction

アラスカ・プロジェクトにおけるオーロラ分光技術とオーロラ・大気環境科学の成果

Optical Interferometry Techniques and Scientific Results of Dynamics of Upper Atmosphere in Alaska Project

石井 守 久保田 実 村山泰啓 マーク コンデ ロジャー W. スミス
 岡野章一 坂野井和代

ISHII Mamoru, KUBOTA Minoru, MURAYAMA Yasuhiro, Mark Conde,
 Roger W. Smith, OKANO Shoichi, and SAKANOI Kazuyo

要旨

アラスカ・プロジェクトにおいて開発された NICT-FPI は国内・国外の様々な観測拠点による試験観測を実施し、自動観測システムをはじめとする開発を続けてきた。1998 年よりアラスカ州ポーカーフラット観測所及びイーグル観測所に設置され、中性大気・電離大気相互作用やオーロラに伴う熱圏鉛直風などの極域特有の現象における新たな知見を深めることに成功した。この開発で培われた技術は超高層大気観測という領域にとどまらず、広く光学研究開発に貢献可能なポテンシャルを有する。

We developed Fabry-Perot interferometer named NICT-FPI in Alaska project and have observed in several observatories in domestic and overseas. We deployed the instruments at Poker Flat research range and Eagle observatory, Alaska on 1998 and started the observation of aurora optics for deducing the neutral-ion coupling and vertical winds with active aurora. We can expect the technique to be widely applied in many fields, e.g., laser technology.

[キーワード]

ファブリペロー干渉計, 熱圏, ジュール加熱, 電離圏対流, 鉛直風
 Fabry-Perot Interferometer, Thermosphere, Joule heating, Ionospheric convection, Vertical wind

1 ファブリペロー干渉計の概要と観測の原理

ファブリペロー干渉計(以下、「FPI」という。)の原理については、文献[1]に詳細な記述をしたので、ここでは本編を理解するのに必要と思われる概要に触れる程度とする。

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り特定の波長(あるいは周波数)の光のみを取り出す装置である。その用途はレーザー発信をはじめ広範である。

この装置の波長分解能は 1 pm のオーダーを達成することが可能であり、発光する物質が秒速 10 m 程度で移動する場合にはそのドップラー速度から発光体の速度をリモートセンシングすることができる。また、その発光体が気体であり熱振

オーロラ・電離大気-中性大気相互作用の観測実証 / アラスカ・プロジェクトにおけるオーロラ分光技術とオーロラ・大気環境科学の成果

動している場合には、ドップラー広がりからその温度を推定することができる。

我々はこの装置を用いて、高度 85~250 km における地球大気の発光を観測し、それぞれの高度の風向風速及び温度を推定する技術開発と観測を行ってきた。大気の発光現象としては極域におけるオーロラが知られているが、発光強度は弱いながらも汎地球的に大気の発光現象は見られ、FPIを用いた超高層大気の気象観測は中低緯度でも可能である。

中層大気(高度 10~80 km)を含む高度 300 km 程度までの大気は、気球や人工衛星等を用いた定常的な直接観測が難しい高度であり、リモートセンシングによる観測が重要となっている。極域の中層・超高層大気は重力波の碎波などによる地表付近の気象の影響に加え、オーロラに代表される太陽活動の影響を受け複雑なダイナミクスを呈している。オーロラによる太陽エネルギーのインプットは太陽光放射によるものに比べれば微々たる物ではあるが、入力される領域が限定されていることから大気モデルの計算などでは無視できない量となる。また、極域ダイナミクスに密接に関連する大気組成の変化も重要であり、極域の O/N₂ 比の変化は中低緯度を含む電離圏嵐の原因と考えられている。

2 装置概要

アラスカ・プロジェクトにおける FPI 開発(以後 NICT-FPI)として我々は掃天型と全天型の 2 種類の装置を開発した。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。図 1 に、NICT-FPI の光学系の概念図をあげる(機器の詳細については[1]-[3]を参照のこと)。

NICT-FPI 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あげられる。これは大気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。

NICT-FPI は光学素子レベルの開発よりも、それぞれの素子を組み上げ、一体のものとして安定的に動作させるという視点の開発に重点をおいて

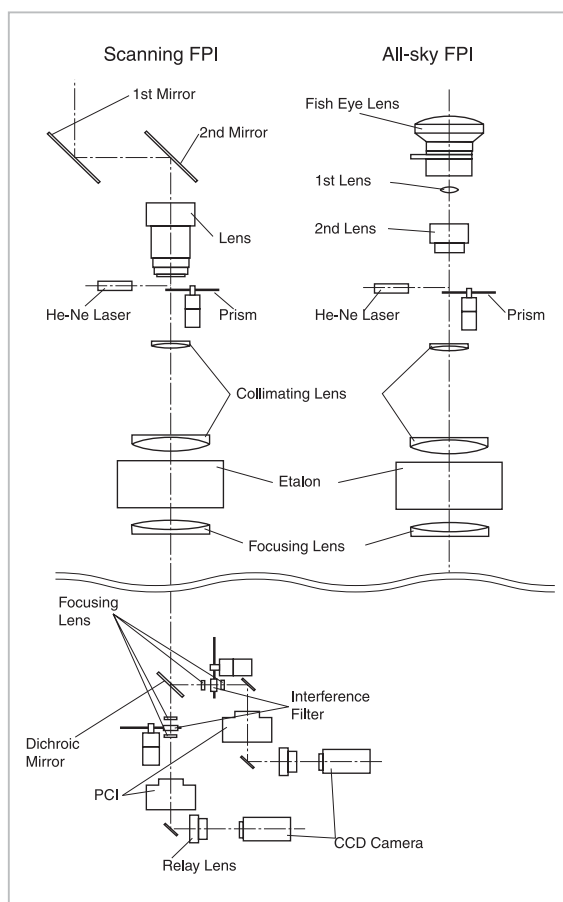


図 1 NICT-FPI の光学系概念図

きた。特に、周辺温度の影響を受けやすいエタロンの温度管理、エタロンギャップドリフトのモニターのためのレーザーキャリブレーション(2 波長対応)及び水冷式のフォトンカウンティングイメージャの冷却等を遠隔・自動で行うシステム開発に重点が置かれた。

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 557.7 nm, 630.0 nm 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 843.0 nm)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 557.7 nm (ピーク高度 約 95 km (大気光の場合)、約 110 km (オーロラの場合)), 843.0 nm (同 約 86 km)、更に高い電離圏 F 層領域では 630.0 nm (同 約 250 km) の測定が有効である。

3 観測履歴

NICT-FPIは 1993 年に開発を開始し、国内及び



図2 各観測所概観(上：EISCAT、中：ポーカーフラット実験場、下：イーグル観測所)

海外での試験観測を経て、1998年からアラスカ州ポーカーフラット実験場(掃天型)、イーグル観測所(全天型)に設置され観測を続けてきた。

試験観測の履歴は以下のとおりである。

1993年11～12月に東北大学蔵王観測所において、動作確認と初観測を行い大気光観測に成功した。1994年には、京都大学信楽MU観測所において、MUレーダーとの同時観測と観測値の比較による観測の確認を行った。続いて1996年3～9月には通信総合研究所(当時)山川観測所に移設し、宇宙科学研究所鹿児島宇宙センター(内之浦)から打ち上げられたロケット観測(SEEKキャンペー

ン)に参加した。

1997年1～2月には、ノルウェー欧州非干渉散乱レーダーEISCAT Ramfjordmoenサイトにおいて、EISCATレーダーとの同時観測を行い、最初のオーロラ光観測を行うとともに、中性大気・電離大気相互作用についての観測データを取得した[4]。1998年には再度京都大学信楽MU観測所に移設、MUレーダーとの同時観測を進めるとともに、自動観測システムの試験運用を進めた。その後、1998年9月にアラスカへ移設した。

4 主な観測成果

ここではNICT-FPIを用いた観測によって得られた成果のうち、主な二つについて紹介する。

4.1 引きずられる大気

極域の高度100 km以上では、電離大気と中性大気が衝突による運動量の交換を行っている。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250 kmで約1%、高度100 km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動き出す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)[5]。

これまで、人工衛星による電離大気・中性大気相互作用の観測例が知られているが[6]、衛星ではスナップショットとしての観測に限られる難点があった。NICT-FPIはSuperDARNレーダーとの協同観測により、地上から中性・電離大気を同時に観測し、両者の運動の変化を推定することに成功した。

図3に、2000年11月24日にNICT-FPIとアラスカ大学・サスカチュワン大学のHFレーダを用いて同時観測された中性大気・電離大気の実速度ベクトルを示す。06:34 UT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、07:00 UTごろ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

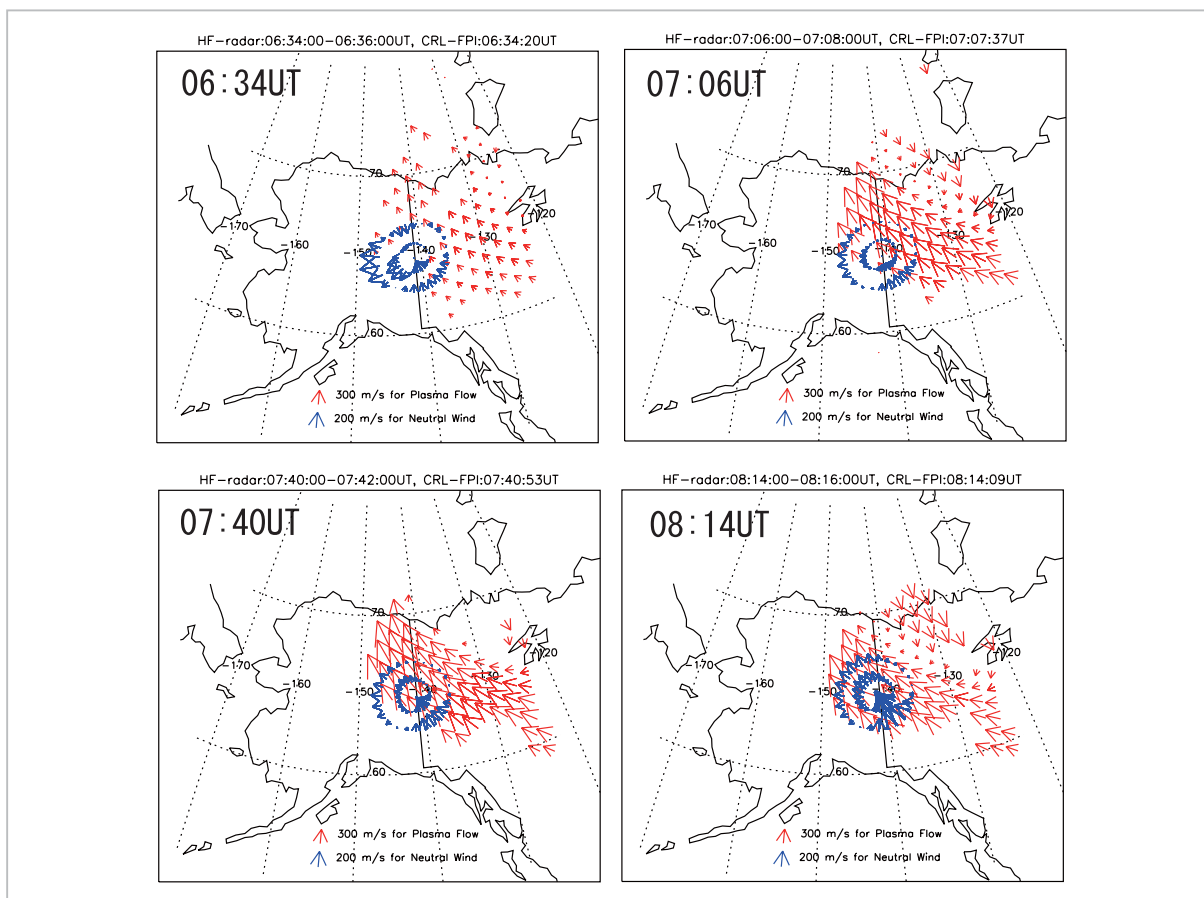


図3 2000年11月24日に観測された電離大気と中性大気の変動

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。08:46 UTにはプラズマ流 300 m/s に対して、中性風 180 m/s 程度まで達した。

4.2 オーロラ活動に伴う熱圏鉛直風

研究者の長年の常識として、熱圏では秒速数 cm を超える鉛直風は存在しないと考えられてきた。このため FPI による鉛直方向の観測は、他の方法では難しい風速 0 の指標として使われてきた歴史もある。しかし、1984年に Rees et al. [7] がオーロラ帯において 100 m/s を超える熱圏での鉛直風を観測して以来、その成因や影響について多くの検討が始まった。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を大きく変える可能性がある。

Crickmore et al. [8] は南極 Halley 観測所において、観測所がオーロラオーバルの赤道境界にあるときに下向き 50 m/s 程度の強い風をしばしば観測した。Price et al. [9] はアラスカ・ポーカーフ

ラット観測所において 557.7 nm (発光高度約 110 km)、630.0 nm (同 240 km) の観測を行い、その両方の高度において、オーロラオーバルの極側境界で強い上向きの鉛直風を観測した。また、Innis and Conde [10] では、人工衛星 DE-2 の WATS と呼ばれる衛星近傍の風を測る装置を用いて、広域にわたる極域鉛直風の統計的な解析を行った。その結果、南北両半球とも特に午前側のポーラーキャップにおいて強い鉛直風の活動が見られることが分かった。この研究は大気モデルへの寄与などに非常に有用となる。一方で、個々のイベントについての検討が難しく、発生メカニズムの解明の議論に用いることは難しい。いずれにしても、異なる観測方法でそれぞれ首尾一貫した結果を得ていることから、極域熱圏鉛直風の存在についてはほぼ立証されたと考えてよい。

こうした研究を背景に、我々はアラスカ・ポーカーフラット観測所において NICT-FPI を用いた熱圏鉛直風の観測を行った。我々の観測の特色は、557.7 nm と 630.0 nm を高時間分解能(約 2 分)で

同時に、また長期間にわたって観測した点であり、高度 110 km と 240 km の 2 領域の鉛直風の振る舞いを統計的に解析することができた。その一例を示す。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 NICT-FPI を用いて観測された。熱圏酸素原子の可視域発光 (557.7 nm, 630.0 nm) 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 4 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 557.7 nm のオーロラ輝度分布を示す。NICT-FPI 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

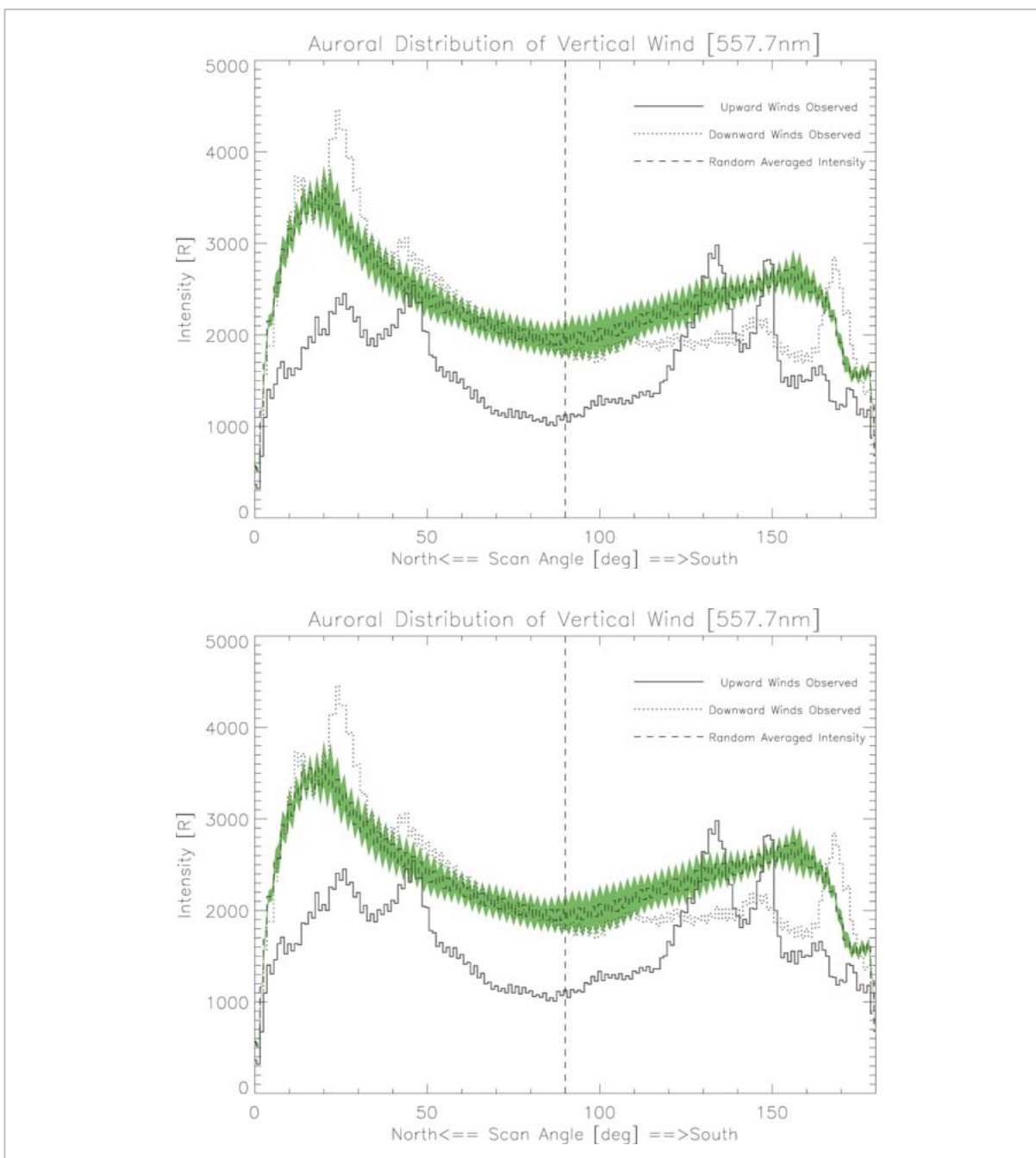


図4 鉛直風が観測された時の磁気南北方向のオーロラの輝度分布

実線：上向き鉛直風観測時、破線：下向き鉛直風観測時、
点線：観測期間全体の平均。

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[11]。

FPI による鉛直風観測は、観測できる領域が装置の真上の小さな領域に制限されるという欠点がある。これを補うために、約 300 km 離れた 2 台の NICT-FPI を用いて同時に鉛直風を観測するキャンペーンを行った。これはもともと、熱圏鉛

直風をロケットによって観測する試み (HEX キャンペーン) の地上サポートとして実行されたものであり、複数の FPI による鉛直風の同時観測は世界初の試みである。イーグル観測所に設置された全天型の FPI については、2003 年 2~3 月にわたるこのキャンペーンの期間のみ鉛直風を観測するため特別に望遠レンズに交換した。

図 5 は 2003 年 3 月 21 日に観測された例である。(a), (b) はそれぞれ 630.0 nm, 557.7 nm で

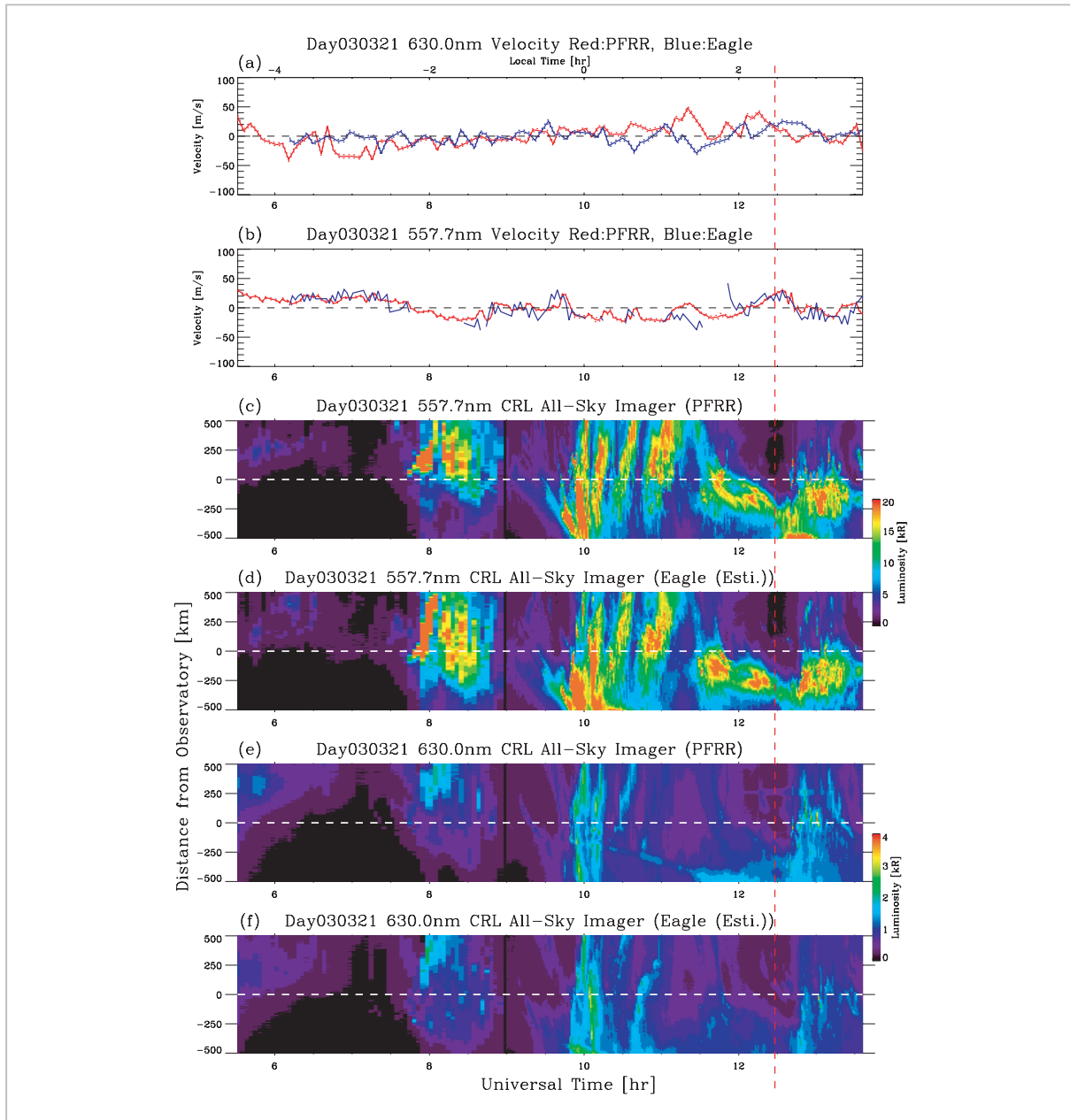


図5 2003年3月21日に観測された例

(a), (b) はそれぞれ 630.0 nm, 557.7 nm で観測された鉛直風。赤：ポーカーフラット, 青：イーグルでの観測結果。(c), (e) : ポーカーフラットで観測したオーロラの南北分布 (c : 557.7 nm, e : 630.0nm), (d), (f) : ポーカーフラットの全天イメージャから推測されたイーグル上空のオーロラの南北分布 (d : 557.7 nm, f : 630.0 nm)。

観測された鉛直風であり、二つの観測点(赤：ポーカーフラット、青：イーグル)の結果を重ねてある。(c), (e)はポーカーフラットで観測したオーロラの南北分布、(d), (f)はポーカーフラットの全天イメージャから推測されたイーグル上空のオーロラの南北分布を示している。

630.0 nm では、二つの観測結果に有意な違いが見られる一方で、557.7 nm では 300 km は慣れているにもかかわらず両者の風の変動が非常に近いことが分かる。

表 1 に、キャンペーン中の各晩における二つの波長(557.7 nm, 630.0 nm)で観測された風速の 2 観測所間の相関係数を示す。557.7 nm (推定発光高度 110~140 km)では、PFRR 及び Eagle の鉛直風は全体に高い相関を持ち、相関係数 0.6 を超える例が 6 例あった。

557.7 nm (推定発光高度 110 km)の風速変動に高い相関があるのはオーロラアークに沿った風系が同様であり、両観測所のオーロラに対する位置関係が近いことを示している。一方 630.0 nm (推定発光高度 240 km)で相関が低い理由としては、630.0 nm ではオーロラに対する位置関係が二つの観測地点でずれている場合があった。また、もしジュール加熱によってこの鉛直風が発生すると仮定すると、その加熱源は Pedersen 電流の卓越する 110 km 近傍となり、加熱源から遠くなる領域

では他の効果の影響が大きくなるために相関が悪くなっている可能性がある[12]。

5 むすび

アラスカ・プロジェクトは平成 17 年度に終了したが、ここで培った技術はその後のプロジェクトに受け継がれている。NICT-FPI については、NICT 第 2 期中期計画の「電波伝搬障害研究プロジェクト」において重要な位置づけを担うと期待される。

電波伝搬障害研究プロジェクトにおいては、GPS 等衛星測位や通信・放送に障害となる電離圏の不規則構造をターゲットとする。電離圏不規則構造の一つプラズマバブルは、夕方の赤道域で発生後急速に低緯度側に成長し、東向きに伝搬する。このため、日本に影響を及ぼすプラズマバブルは東南アジア域で発生する。

プラズマバブルの発生メカニズムについては、理論的理解は進んでいる反面、その発生予測については日々の変動が大きく未知の部分が多い[13]。この未知の部分として必要とされているパラメータの一つに F 領域の中性風があり、その観測に FPI の利用が期待される。ただし、プラズマバブルの発生は夕方であり、その前後の中性風を知るためには、太陽光が強い状況での大気光観測を行う必要があり、強い背景光を除く技術が求められる。この実現のためには例えばエタロンを複数用いるタンデムエタロンファブリペロー干渉計[14]の開発が有効である。この開発は米国等で進められているが、日本での開発事例はまだない。この開発が成功すれば大気観測のみならず、レーザー工学などで超狭帯域の分光が可能になるなど光学利用の広範な分野での利用が期待できることから技術イノベーションのテーマとしても有用と考えられる。

謝辞

装置の開発においては、佐川永一、神田和勝、金子幸男、田村敬明、上村文彦、坂本大、竹内伊能、矢島浩一、薄井克子の各氏に多大な協力を得たことを感謝する。観測においては、東北大学蔵王観測所、京都大学信楽 MU 観測所、情報通信研究

表 1 二つの観測所で観測された各 1 晩の風速変動の相関係数

Date	Cor. (630.0nm)	Cor. (557.7nm)
Feb. 26	0.147	0.600
Mar. 01	0.345	0.598
Mar. 06	0.069	0.420
Mar. 08	0.121	0.768
Mar. 21	0.198	0.677
Mar. 24	0.336	0.529
Mar. 25	-0.466	-0.01
Mar. 27	0.164	0.104
Mar. 28	0.085	-0.01
Mar. 29	0.100	0.625
Apr. 01	-0.281	0.768
Apr. 02	-0.101	0.233
Apr. 03	-0.119	0.769

機構山川電波観測所、ノルウェー EISCAT Ramfjordmoen サイト、アラスカ大学ポーカークラット実験場の各スタッフ及びイーグル観測所の維持に努めた村の方々に感謝する。研究において

は、中村卓司、塩川和夫、田口真、坂野井健ほか多くの諸先生から貴重なご助言を得ることができたことに感謝する。

参考文献

- 1 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 "CRLファブリペロー干渉計の開発と熱圏観測", 通信総合研究所季報Vol.48, No.2, 155-164, 2002.
- 2 M. Ishii, 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.
- 3 M. Ishii, 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.
- 4 M. Ishii, S. Oyama, S. Nozawa, R. Fujii, E. Sagawa, 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.
- 5 L. R. Lyons, T. L. Killeen, and R. L. Walterscheid, "The neutral wind "flywheel" as a source of quiet-time, polar-cap currents", Geophys. Res. Lett., 101-104, 1985.
- 6 T. L. Killeen, P. B. Hays, G. R. Carignan, R. A. Heelis, W. B. Hanson, N. W. Spencer, and L. H. Brace, "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.
- 7 D. Rees, R. W. Smith, P. J. Charleton, F. G. McCormac, N. Lloyd, and A. Steen, "The generation of vertical winds and gravity waves at auroral latitudes - I. Observations of vertical winds", Planet Space Sci., 38, 667-684, 1984.
- 8 R. I. Crickmore, J. R. Dudeney, and A. S. Rodger, "Vertical thermospheric winds at the equatorward edge of the auroral oval", J. Atmos. Terr. Phys., 53, 485-492, 1991.
- 9 G. D. Price, R. W. Smith, and G. Hernandez, "Simultaneous measurements of large vertical winds in the upper and lower thermosphere", J. Atmos. Terr. Phys., 57, 631-643, 1995.
- 10 J. Innis and M. Conde, "High-latitude thermospheric vertical wind activity derived from Dynamics Explorer 2 WATS observations: Indications of a source region for polar cap gravity waves", J. Geophys. Res., 107, 1172, 10.1029/2001JA009130, 2002.
- 11 M. Ishii, 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, 10,537-10,551, 2001.
- 12 M. Ishii, M. Kubota, M. Conde, R.W. Smith, and M. Krynicki, "Vertical wind distribution in the polar thermosphere during Horizontal E region Experiment (HEX) campaign", J. Geophys. Res., 109, doi: 10.1029/2004JA010657, 2004.
- 13 M. A. Abdu, "Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere electrodynamics relevant to spread F", J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 63, 869-884, 2001.

- 14 J. T. Emmert, M. L. Faivre, G. Hernandez, M. J. Jarvis, J. W. Meriwether, R. J. Niciejewski, D. P. Sipler, and C. A. Tepley, "Climatologies of nighttime upper thermospheric winds measured by ground-based Fabry-Perot interferometers during geomagnetically quiet conditions: 1. Local time, latitudinal, seasonal, and solar cycle dependence", J. Geophys. Res., 111, doi: 10.1029/2006JA011948, 2006.

いし い まちる
石井 守

電磁波計測研究センター宇宙環境計測
グループ研究マネージャー
博士(理学)
電離圏・熱圏ダイナミクス

くぼ た みゆる
久保田 実

情報通信研究機構(総務省情報通信政
策局技術開発政策課研究推進室出向
中)
電離圏・熱圏ダイナミクス

むら やま やす ひろ
村山泰啓

総合企画部企画戦略室プランニングマ
ネージャー(前電磁波計測研究センタ
ー環境情報センシング・ネットワーク
グループ研究マネージャー)
博士(工学)
大気リモートセンシング、中層大気力
学

Mark Conde

アラスカ大学フェアバンクス校講師
Ph.D.
熱圏・中間圏ダイナミクス

Roger W. Smith

アラスカ大学フェアバンクス校地球物
理研究所長教授 Ph.D.
熱圏・中間圏ダイナミクス

おか の しやういち
岡野章一

東北大学理学研究科教授
博士(理学)
熱圏・中間圏ダイナミクス

さかの い かず よ
坂野井和代

駒澤大学総合教育研究部専任講師
博士(理学)
熱圏・中間圏ダイナミクス