

## 4 地上における地球環境計測技術

### 4 *Ground-based Measurement Technologies*

#### 4-1 アラスカ・プロジェクト

#### — アラスカにおける北極域大気環境観測の国際共同研究 —

##### 4-1 *CRL Alaska Project*

##### — *International Collaborations for observing Arctic atmosphere environment in Alaska* —

村山泰啓 森 弘隆 石井 守 久保田実 大山伸一郎 山本真行  
 関 浩二 水谷耕平 落合 啓 菊池 崇 野崎憲朗 五十嵐喜良  
 増子治信 板部敏和 ロジャー W. スミス マーク・コンデ  
 ブレントン J. ワトキンス リチャード L. コリンズ ハンス C. ニールセン  
 ウィリアム R. シンプソン バージニア・ベッドフォード ジェフ・ハリスン  
 フランク・ウィリアムズ 赤祖父俊一

MURAYAMA Yasuhiro, MORI Hirotaka, ISHII Mamoru, KUBOTA Minoru,  
 OYAMA Shin-ichiro, YAMAMOTO Masa-yuki, SEKI Kouji, MIZUTANI Kohei, OCHIAI Satoshi,  
 KIKUCHI Takashi, NOZAKI Kenro, IGARASHI Kiyoshi, MASUKO Harunobu,  
 ITABE Toshikazu, Roger W. Smith, Mark Conde, Brenton J. Watkins, Richard L. Collins,  
 Hans C. Stenbaek-Nielsen, William R. Simpson, Virginia Bedford, Jeff Harrison,  
 Frank Williams, and AKASOFU Syun-ichi

##### 要旨

本研究は、電波と光による先端的な計測技術を応用して中層大気の総合リモートセンシング・システムを開発し、これをアラスカに設置してアラスカ大学等と共同で、太陽活動の影響などを含め、地球環境に重要なかわりを持つ極域大気の総合的な観測・研究を行うものである。個別の計測機器の開発は順調に進み、その幾つかは既に観測を開始している。またアラスカでの観測データを、高速国際ネットワーク実験 APAN・TransPAC 等を利用してリアルタイムで自動処理・自動表示するデータ・ネットワーク・システムの開発も併せて進めている。

In this paper we briefly overview the CRL Alaska Project, which is to develop advanced radio/optical remote-sensing technologies and to construct a comprehensive observation system of Arctic middle atmosphere, in cooperation with US and Japanese institutions including the most major partner of Geophysical Institute of University of Alaska. The observation system is to demonstrate the technologies and also to study Arctic atmosphere changes and variations in relation to Global Change and solar activity effects. Eight instruments out of nine, which are components of the observation system, have started experiments in Alaska in recent years. A data network system named SALMON (system for Alaska middle atmosphere observation data network) is also being developed to automatically transfer and process the observed data employing broadband international network experiments APAN and TransPAC, from Alaska through Japan for WEB displays open to the world.

##### [キーワード]

アラスカ, 地球環境, 中層大気, 北極, 地上観測

Alaska, Global environment, Middle atmosphere, Arctic region, Ground-based observation

## 1 はじめに

地球大気のうち高度10 - 100kmの大気層は中層大気と呼ばれ、地球環境問題の舞台として社会的にも注目されているが、中層大気の状態は地球環境そのものと密接にかかわるとともに、地球環境変動によって中層大気の状態が敏感に反応して変化すると考えられている。また、いまだ解明されていないメカニズムであるが、太陽活動の変化が中層大気に少なからず影響を及ぼすなど、地球環境の変化や気候変動に影響を与えている可能性も古くから指摘されているが、いまだに解明の手掛かりがつかめていない。こうした大気環境の変動は特に極域で大きくクローズアップされ、あるいは強調されて現れる傾向がある。北極は、大きな工業地帯や都市圏を多く抱えるユーラシア・北米大陸から近く、人為起源の環境変動との関連や、北極オゾンホールが発生など、注意すべき点が多い。

環境変動や関連する個々のメカニズムの解明はいまだ途上であるが、地球環境をトータルシステムとして理解して将来の地球環境対策に役立てていくためには、多面的で総合的な環境の計測が重要となる。オゾンホールを例にとると、極回りの強い気流(極渦)、極渦内部の低温、極渦内での塩素・臭素化合物の存在、空気中の特殊な微粒子(エアロゾル)など多くの条件がそのメカニズムに関与する。極域の大気環境研究の一部を調べるためにも多面的な同時総合観測が重要であることが分かる。

本プロジェクトでは、電波と光による先端的な計測技術を応用して総合観測システムを開発・構築し、多様な中層大気及びその上下層のリモートセンシングを可能にしていく。アラスカに設置された観測システムはアラスカ大学フェアバンクス校地球物理研究所(UAF/GI)等と共同で、太陽活動の影響などを含め、地球環境に重要なかわりを持つ極域大気の総合的な観測・研究を行う。観測システムの要素となる個々の計測機器(コンポーネント)の開発は順調に進み、その幾つかは既にアラスカに設置され観測を開始している。成層圏、あるいはオゾンホール関連研究の観点からは、アラスカ、特にUAFの位置する内陸部はしばしば極渦の外部・

境界領域に位置し、極渦内外の物質混合などの研究への寄与が期待される。また、アラスカは、オーロラの最も出現しやすい地域の一つと言われ、オーロラをはじめとする太陽活動に伴う地球大気圏への影響を調べるためには適した条件を備えている。本稿では、1993年に開始して以来のアラスカプロジェクトとして行われてきた研究・開発の経緯と、これまでに得られた成果の一部を簡単に紹介する。研究・開発された観測装置は9種類に及ぶが、個々の装置の幾つかについては装置の詳しい記述や成果を本特集の他の論文で紹介している。

## 2 これまでの経緯とアラスカ実験

本プロジェクトの核となる国際共同研究の政策的枠組みは、1992年に日米科学技術協力協定に基づくアラスカ大学地球物理研究所(Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks)との共同研究として開始された。

1で述べたよう地球環境や大気環境の状態を調べるには、大気の物理量・物質分布の多くの側面について調べる必要があるため、本プロジェクトでは、アラスカを拠点とした大気環境の総合観測システムを開発してきた。このシステムは、具体的には9種類の観測装置を通信総合研究所(CRL)独自、あるいは国内外の共同研究に基づいて開発し、さらにこれを統合してアラスカで総合観測システムとして機能させるための技術開発を行っているものである。現在では9種類のうち8種類が既にアラスカなど北極域で実験を開始している。

この共同研究において、日本側はCRLが中心となって大気環境の総合観測システムを開発する一方、米国側では、共同観測の中心であるアラスカ大学付属ポーカーフラット実験場(Poker Flat Research Range)内の観測ロケット発射施設の拡充、CRLの機器や制御計算機類も収容する新観測棟「T. Nail Davisサイエンス・オペレーションズ・センター」や国際ライダー観測棟、高出力電波発射施設等の新設及び実験場内の電力、通信などの基盤施設の拡充整備など数々の大規模な施設整備計画を進めてきている。

図1は、CRLが開発した観測システム及び米国

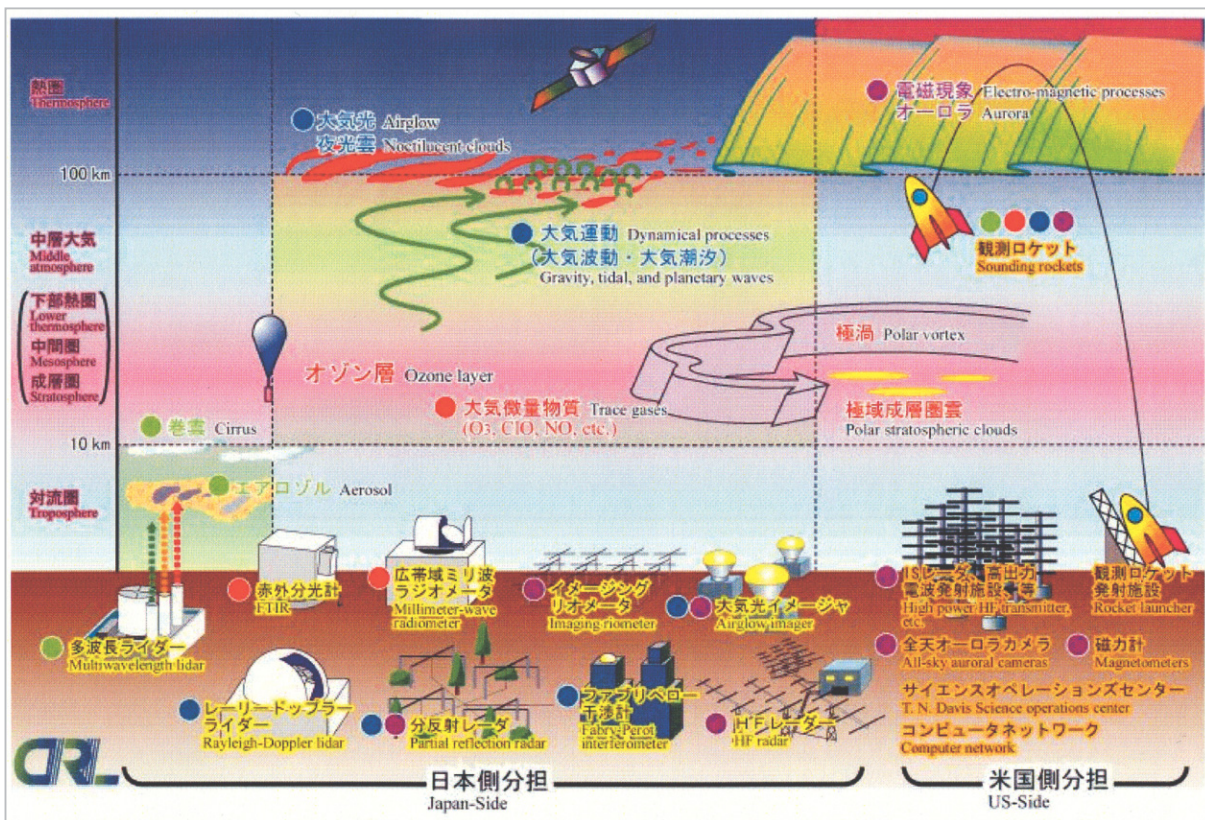


図1 アラスカプロジェクトの全体概念図

開発・整備される観測装置・実験装置と、観測対象となる代表的な北極域の大気や地球環境現象の例を概念的に示している。図中、装置名に付した赤丸は大気化学過程、青丸は大気力学過程、緑色の丸はエアロゾル（大気中の浮遊微粒子）、紫色の丸はオーロラなど電磁氣的現象をそれぞれ観測対象とした装置であることを示す。

側の整備している設備群を示す。表1にも示されているように、本プロジェクトでは観測システムの要素として、9種類の大気観測装置を開発している。中心となるのは中層大気の観測装置であるが、そのほかに中層大気の上部・下部に位置して中層大気と密接に関連する熱圏・対流圏の観測装置も整備されてきている。

### 3 これまでに得られた成果の例

2で述べたように、本プロジェクトの一環としてCRLが開発してきたのは、極域中層大気の総合観測システムであり、その統合実験が重要となる。しかし、システムの要素となるべき観測装置は、個々に技術的・科学的な困難な点があり、それぞれに技術開発・研究が行われてきた。9種類の装置が統合されて観測システムとして機能するための開発はいまだ途上であるが、各装置の予備実験・試験データなどから、既に技術

的・科学的な成果が得られ始めている。以下に8種類の装置のうちの2例についての成果を示す。以下の観測例は成層圏オゾン分布やオーロラに関する、一見別の分野の独立した観測データであるが、これらは総合観測システムの一環として機能することで、例えばオーロラ活動に伴うオゾン層変動や風速（気流）の変動など、新規性・学術的価値の高い成果が期待されている。

#### 3.1 赤外分光計による対流圏・成層圏物質分布の観測

本プロジェクトでは総合観測システムの機能のうち、対流圏・成層圏物質分布の観測のために、ポーカーフラットFTIR（フーリエ変換型赤外分光計）を整備して、研究開発を行ってきている。同FTIRは、1999年7月に実験を開始し、太陽光を光源として大気中の微量成分による赤外吸収スペクトルを測定している。FTIRによる観測の利点は、一度の測定で広い波長範囲を測定

表1 アラスカプロジェクトにおいてCRLが開発した装置

観測装置	観測項目	観測高度	観測形態
ミリ波ラジオメータ	大気微量成分濃度	成層圏、下部中間圏 (20-70km)	高度分布、昼夜連続
FTIR 分光計	大気微量成分濃度	対流圏・下部成層圏(高度 10-30km)	高度分布、昼間
多波長ライダー	大気中浮遊粒子	対流圏上部・下部成層圏 (5-40km)	高度分布、夜間
レーラー・ドップラー・ライダー	風向・風速、気温	成層圏、下部中間圏 (30-80km)	高度分布、夜間
分反射レーダー	風向・風速	上部中間圏、下部熱圏(高度 60-100km)	高度分布、昼夜
ファブリ・ペロー干渉計	大気発光層高度の水平・鉛直風速、中性大気温度	上部中間圏、下部熱圏(静穏時:85,95,250km / オーロラ擾乱時: 85,120,250km)	水平分布、夜間(新月期間)
イメージング・リオメータ	下部電離層による銀河電波輻射の吸収(CNA)	下部熱圏 (~高度 80-90km)	水平分布、昼夜
SuperDARN HF レーダー	風向・風速	下部熱圏 (80--110km)	高度分布、昼夜
	プラズマ運動、電場	中部熱圏 (~250km)	水平分布、昼夜
大気光イメージャ	大気発光層の発光強度、大気波動撮像	上部中間圏、下部熱圏(静穏時:85,95,250km / オーロラ擾乱時: 85,120,250km)	水平分布、夜間(新月期間)

できるためO<sub>3</sub>、HNO<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O、NO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CFC、HCl、H<sub>2</sub>O、ClONO<sub>2</sub>、HFなど多種の分子を同時観測できる点である。さらに、本実験では夜間の放射スペクトル観測も試みている。また、曇天時は雲の放射スペクトルを観測し、赤外カメラでの雲量、雲の光学的厚みの観測と合わせて極域の雲の研究に役立つことが期待される。

FTIRの観測からはこれまで多くの場合、大気微量成分の気柱全量(地表の単位面積の領域の上に存在する気体の量)が求められてきたが、本実験ではニュージーランド水文大気研究所(National Institute of Water and Atmosphere; NIWA)と米航空宇宙局ラングレー研究所(National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center; NASA Langley)が共同開発したSFIT2プログラムを利用して[1][2]、リトリバルを行いオゾンの存在量について対流圏から成層圏中部程度までの鉛直分布の導出を行っている。さらに、これまでの1本のスペク

トルに対するフィットにとどまらず、多数ラインのフィットにも成功し、より安定した推定を目指している。図2に赤外吸収スペクトルフィットと、導出されたオゾンの高度分布の例を示す。図3はこの手法で2001年2月から9月にかけて得られたオゾンの時間・高度断面図を示しており、春から夏にかけてのオゾンの減少傾向がみられる。

### 3.2 ファブリ・ペロー干渉計による熱圏力学現象とオーロラの影響

ファブリペロー干渉計は、オーロラ及び大気光を高波長分解能で分光することにより、中間圏・熱圏の風速及び温度を推定することができる。通総研ファブリペロー干渉計(以下CRLFPI)は1998年10月よりアラスカ・ポーカークラット及びイーグルにて観測を開始した。通常は557.7nm(発光高度約110km)、630.0nm(発光高度約240km)の2波長をそれぞれの装置で同時観測

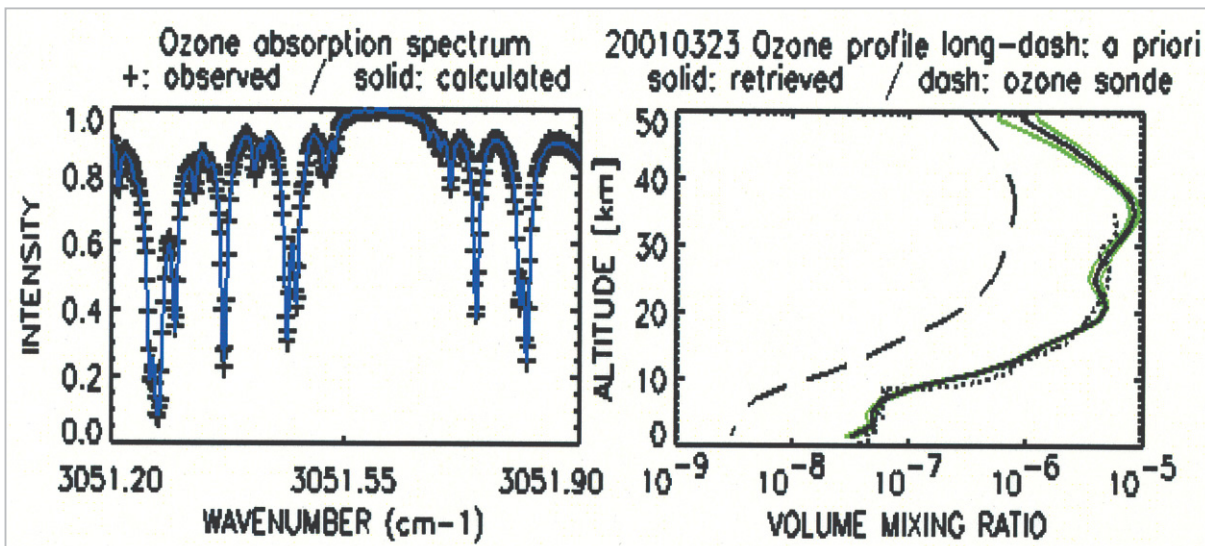


図2 (左)2001年3月23日のUT18時にポーカーフラットFTIRで観測されたオゾンの赤外吸収スペクトルの観測値(+), リトリーブ結果(実線)。多数のスペクトルラインについてフィットを行った。(右)スペクトルから導出されたオゾン混合比の鉛直分布。先験情報(a priori)を破線、観測値を実線、オゾンゾンデを点線で示す

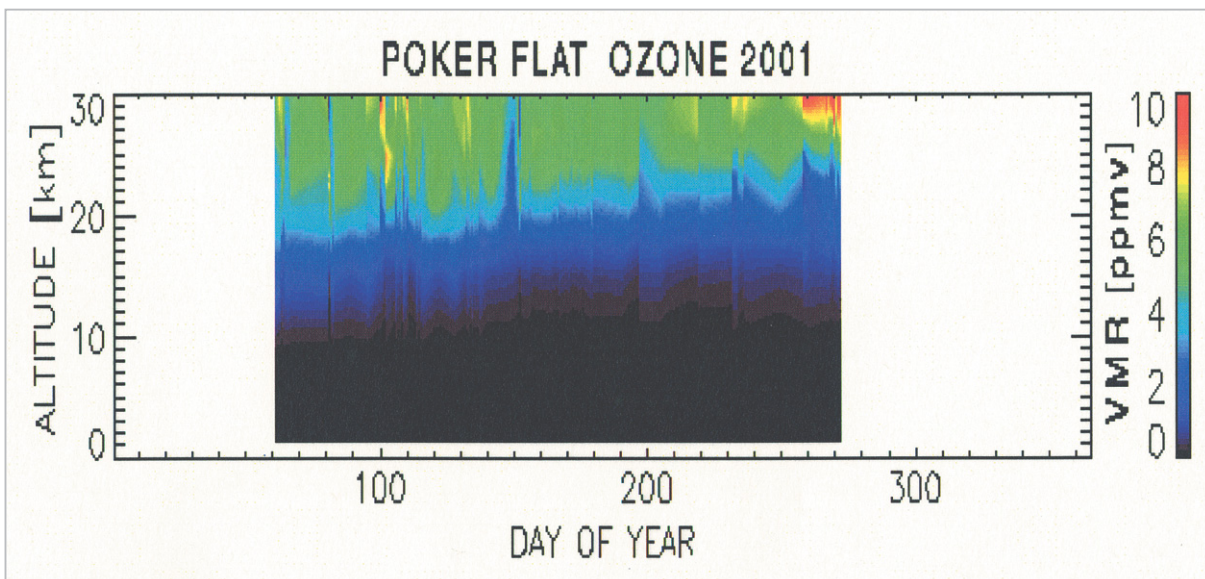


図3 2001年2月から9月にかけてのオゾン存在量の時間高度分布

春から夏にかけて北極域での下部成層圏中のオゾンの減少傾向が観測されている。

している。これにより、上部及び下部熱圏の風速・温度変動を同時に推定することができる。時間分解能は2分で、同型の装置の中では最高感度の部類に属する。これにより、非常に短い時間で変動するオーロラ観測で特に威力を発揮する[3][4]。

オーロラ降下粒子による電離圏・熱圏間のエネルギー輸送は、太陽光(紫外線・可視・赤外)放射とは別の形で太陽から地球にもたらされるエネルギーである。上記電磁放射と比べれば全

体量は相対的に小さいものの、極域の狭い領域に集中するためにこの高度のダイナミクスに与える影響は大きいと考えられている。CRLFPIを用いた研究は主にこの熱圏中性ダイナミクスを観測する。以下に、現在までに得られている研究成果を箇条書にする。

- (1) オーロラと鉛直風風速変動の関連について：これまで熱圏鉛直風は水平風に比べて無視できる大きさと考えられてきたが、時に100m/sを超える鉛直風が報告されて以来[5]、

その重要性が再認識されている。CRLFPIを用いてポーカフラットで行われた観測では、多くの場合オーロラの北側(南側)で強い上昇(下降)風が観測された[6]。観測例を図4に示す。これは過去の研究結果[7]~[10]に一致する。

- (2) 地上磁場変動から推定した電離層電流と鉛直風との関係：幾つかの例で地上磁場の水平変動成分と鉛直風との間に相関がある例が見つかった。これは鉛直風が電離層電流によるJoule加熱の影響を受けていることと関連する可能性を示唆する。また、磁場観測チェーンから推測された電流系の位置と鉛直風との比較では(1)の関係が水平電流の方向に依存している可能性を示唆した。
- (3) HFレーダーで推定された電離圏対流と中性ダイナミクスの比較：イーグルの全天型CRLFPIを用いて推定した水平風と、Kodiak、Prince George HFレーダから推定されたイオンドリフトの比較からイオン・熱圏大気間のエネルギー輸送を推定した。その結果、比較的強い(500m/s以上)プラズマ流が2時間程度続くと中性風がプラズマ流と同じ方向に加速される例が観測された。

#### 4 まとめ、データ利用、今後の計画

以上、1993年に開始したアラスカ大学等との国際共同研究、「アラスカプロジェクト」の概要と、成果の例を紹介した。米国側分担の基地・装置整備なども進んでいるが、やはり中心となるのはCRLの開発する北極域大気環境の総合観測システムの開発である。このシステムは、9種類の個別(要素)観測装置から構成されるが、既に8種類の装置がアラスカで実験を開始している。今後は、全体を統合して総合システムとして機能させるための統合化技術開発研究が行われ、プロジェクトとしての成果が得られると期待される。一方、個々の装置についても技術開発・研究が行われてきており、これまでも予備実験・試験データから評価される学術成果が得られている。

一方、人工衛星による地球環境や大気科学の観測ミッションが日・米・欧・カナダなどで提案され順次実現されてきているが、これに伴い、こうした衛星観測との共同実験、衛星観測の地上検証実験などの要望が多く寄せられ、国内外のミッションからの期待が大きくなっている。国際的な責任を果たすためにも、本プロジェクト

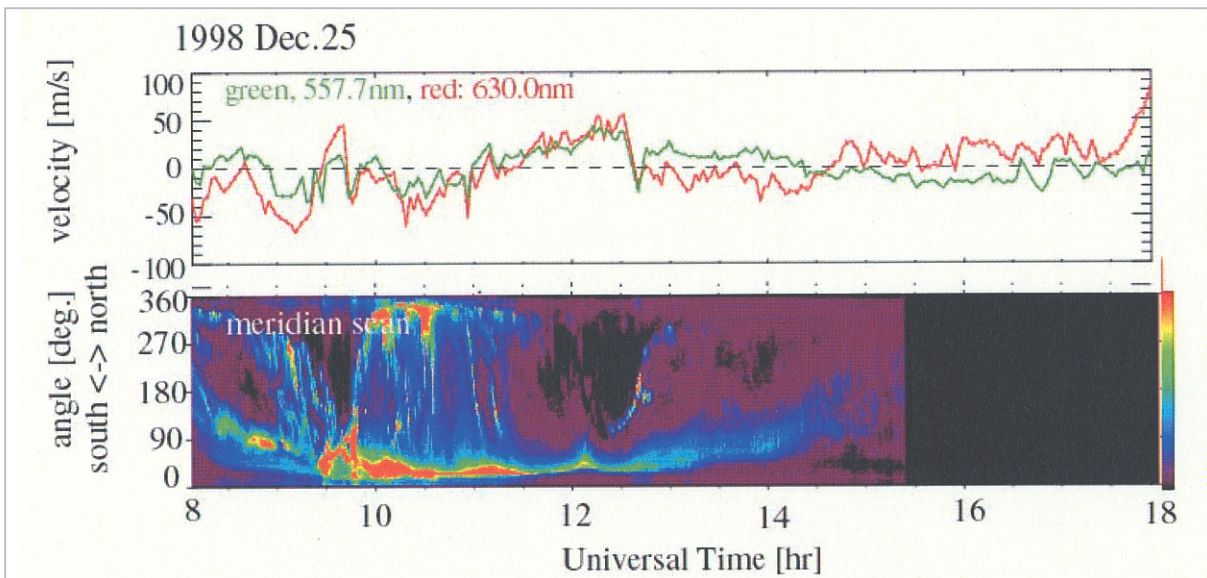


図4 アラスカのCRL ファブリペロー干渉計で観測された熱圏鉛直風(上)と、アラスカ大学による南北走査型フォトメータ(下)で観測されたオーロラ(波長557.7nm・630.0nmのそれぞれ原子酸素緑色・赤色発光)の時間変動の比較例

下図は縦軸が南北走査角で、180度が天頂方向を示す。オーロラ構造が上空を通過する際に鉛直風速が鋭敏に反応して、最大50m/sの上下方向風速が吹いており、オーロラ活動に伴う地球大気の変動が上層では強大になっていることが観測された。

トで開発された技術、得られた観測データを他のミッションで役立てていきたいと考えている。これにより有効活用して共同研究、国際的な共同科学・技術成果の拡大が期待される。

一方、このシステムから得られる観測データは、観測装置ごとに程度の差はあるが、原則的には公開、あるいは共同研究ベースでの他機関での研究利用に供することを旨とする。これを目的の一つとして、データネットワークシステム「SALMON (System for Alaska Middle atmosphere Observation data Network)」の開発・運用を行っている。自動連続観測などでは大量のデータが蓄積してしまう傾向があり、データを確実に有効利用する手段の一環として、データの自動転送・自動処理・自動表示など、特別の負担なしに観測データが手元で閲覧できる手順を確立することも重要と考えられる。SALMONは、本プロジェクトのデータ利用推進の一環として、

計算機ネットワークを利用した準リアルタイム・自動データ転送・処理・表示ネットワークシステムとして開発している。

また、このシステムは同時にネットワーク応用実験の側面を持ち、国際共同ネットワーク研究 APAN (Asia Pacific Advanced Network ; 事務局 KDDI、国内参加機関 KDDI、慶応大、電総研(現産総研)、科技庁(現文部科学省)、農水省、CRL など) に参加、米国側は次世代インターネット実験 TransPAC/vBNS や Abiline との接続を行い、多種実験の相互接続での長距離・高速伝送という、実験テストベッドでのアプリケーション研究といえる。北極域環境の実計測データを、情報技術を活用したシステムを用いて有効利用を図り、さらには次のステップとしてはオンライン・データ配布により迅速に他機関での利用も可能になるようにしていきたいと考えている。

#### 参考文献

- 1 Pougatchev, N. S., B. J. Connor, and C. P. Rinsland, *J. Geophys. Res.*, 100, 16689-16697, 1995.
- 2 Rinsland, C. P., N. B. Jones, B. J. Connor, J. A. Logan, N. S. Pougatchev, A. Goldman, F. J. Murcray, T. M. Stephen, A. S. Pine, R. Zander, E. Mahieu, and P. Demoulin, *J. Geophys. Res.*, 103, 28197-28217, 1998.
- 3 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 sympo.*, 10, 97, 1997.
- 4 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, in press 2001.
- 5 Rees, D., 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, 1984.
- 6 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, 2001.
- 7 Crickmore R. I., J. R. Dudeney, and A. S. Rodger, "Vertical thermospheric winds at the equatorward edge of the auroral oval", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 53, 485, 1991.
- 8 Price, G. D., R. W. Smith and G. Hernandez, "Simultaneous measurements of large vertical winds in the upper and lower thermosphere", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 57, 631, 1995.
- 9 Innis J. L., P. A. Greet, and P. L. Dyson, "Fabry-Perot spectrometer observations of the auroral oval/polar cap boundary above Mawson, Antarctica", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 58, 1973, 1996.
- 10 Innis, J. L., P. L. Dyson, and P. A. Greet, "Further observations of the thermospheric vertical wind at the auroral oval/polar cap boundary above Mawson station, Antarctica", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 59, 2009, 1997.

村山泰啓

電磁波計測部門北極域国際共同研究グループリーダー 博士(工学)  
中層大気環境の観測的研究

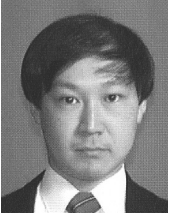


森 弘隆

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)  
超高層大気物理学

岩井 尊

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 理学博士  
大気物理学



久保田実

電磁波計測部門北極域国際共同研究グループ研究員 博士(理学)  
大気物理学、光学システム、画像処理



大山伸一郎

電磁波計測部門北極域国際共同研究グループ専攻研究員 博士(理学)  
大気物理学、情報工学



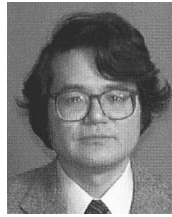
山本真行

電磁波計測部門北極域国際共同研究グループ専攻研究員 博士(理学)  
超高層大気物理学



関 浩二

電磁波計測部門北極域国際共同研究グループ専攻研究員 博士(学術)  
大気リモートセンシング、分子分光学



水谷耕平

電磁波計測部門ライダーグループリーダー 理学博士  
レーザーリモートセンシング

落合 啓

電磁波計測部門 SMILES グループ主任研究員  
成層圏の観測的研究

菊池 崇

電磁波計測部門研究主幹 理学博士  
磁気圏電離圏結合、宇宙天気研究

野崎憲朗

電磁波計測部門電離圏・超高層グループ主任研究員  
電離圏電波観測 低緯度電離圏ダイナミクス



五十嵐喜良

企画部研究連携室長  
電離圏・超高層大気電波観測

増子治信

電磁波計測部門長 理学博士  
マイクロ波リモートセンシング



板部敏和

基礎先端部門長 理学博士  
レーザーリモートセンシング



**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

**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

**Brenton J. Watkins, Ph. D.**

アラスカ大学フェアバンクス校地球物理研究所教授  
電離圏、対流圏及び成層圏のレーダー観測



**Richard L. Collins, Ph. D.**

アラスカ大学フェアバンクス校レーザーリモートセンシング



**Hans C. Stenbaek-Nielsen, Ph. D.**

アラスカ大学フェアバンクス校地球物理研究所教授  
オーロラ物理学

**William R. Simpson, Ph. D.**

アラスカ大学フェアバンクス校助教授  
大気物理学

**Virginia Bedford**

アラスカ大学北極域スーパーコンピューティングセンター技術担当部長

**Jeff Harrison**

アラスカ大学北極域スーパーコンピューティングセンターネットワーク主任

**Frank Williams, Ph. D.**

アラスカ大学北極域スーパーコンピューティングセンター所長

あかそ みしゅんいち  
**赤祖父俊一**

アラスカ大学国際北極圏研究センター所長 博士  
オーロラ、磁気圏及び北極環境変動