

ポーカーフラット実験場の NICT ライダー装置

NICT Lidar Systems at Poker Flat Research Range

水谷耕平 板部敏和 安井元昭 青木哲郎 石井昌憲 村山泰啓
 篠野雅彦 吉岡謙介 大谷佳子 リチャード L. コリンズ

MIZUTANI Kohei, ITABE Toshikazu, YASUI Motoaki, AOKI Tetsuo, ISHII Shoken,
 MURAYAMA Yasuhiro, SASANO Masahiko, YOSHIOKA Kensuke, OHTANI Yoshiko, and
 R. L. Collins

要旨

米国アラスカ州フェアバンクス近くのポーカーフラット実験所 (65.1 N, 147.5 W) における対流圏、成層圏、中間圏までの北極域大気観測のためのライダー装置 3 種を開発した。北極域対流圏と成層圏の雲とエアロゾル、更には水蒸気までを観測するための多波長ライダーは 2003 年 3 月から運用されている。成層圏と中間圏の温度分布の測定を行うレイリーライダーは 1997 年 11 月から観測を続けている。中層大気の風を観測するレイリードップラーライダーは 2005 年 8 月にポーカーフラット実験場に設置された。ここでは、アラスカにおける北極域大気観測のためのこれら多波長ライダー、レイリーライダー、レイリードップラーライダーの紹介を行う。

We have developed three lidar instruments for the observations of the arctic troposphere, stratosphere and mesosphere at Poker Flat Research Range near Fairbanks, Alaska (65.1 N, 147.5 W). A multi-wavelength lidar to observe clouds, aerosols and water vapor distribution in the arctic troposphere and stratosphere is operated from March 2003. A Rayleigh lidar system for temperature observations of the stratosphere and mesosphere is working after November 1997. A Rayleigh Doppler lidar for wind measurements of the middle atmosphere was installed at Poker Flat in August 2005. Here, we give descriptions of the multi-wavelength lidar, the Rayleigh lidar, and the Rayleigh Doppler lidar for the observations of the Arctic atmosphere in Alaska.

[キーワード]

ミーライダー, レイリーライダー, ドップラーライダー, 北極域大気
 Mie lidar, Rayleigh lidar, Doppler lidar, Arctic atmosphere

1 はじめに

北極域に総合的なライダー観測施設が整備されるようになったのは、極域でのオゾン層破壊が重要な問題になってからである。アラスカにはアラスカ大学地球物理研究所 (GI) と情報通信研究機構 (NICT) が協力し多様なライダー装置が整備された。ここでは GI と NICT の国際共同研究、いわゆるアラスカプロジェクトの中で NICT がアラスカ州フェアバンクス郊外のポーカーフラット実験場 (65.1 N, 147.5 W) に配備したライダー観測装置について紹介を行う。観測装置の一部は当初旧

ライダー棟に置かれたが、GI によって新ライダー実験棟が整備され (図 1)、NICT の開発したライダー観測装置はすべてこの新ライダー実験棟に設置された。このライダー実験施設には GI によって開発されたライダー装置と NICT の開発したライダー装置が収容されており、ALOMAR 観測所 (69 N, 16 E) [1], ASTRO observatory (80 N, 86 W) [2], ARCLITE facility (67 N, 50 W) [3] とともに北極域に設置された重要なライダー総合観測拠点の一つになった。

アラスカプロジェクトでは、北極域の中層大気を総合観測する種々の観測装置が整備された [4]。

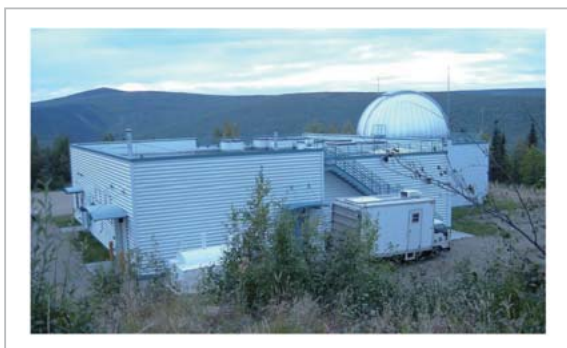


図1 新ライダー実験棟

NICT で開発したライダー装置は多波長ライダー、レイリーライダー、レイリードップラーライダーの3種である。大気総合観測の低高度側を受け持つ装置として、大気化学や輻射過程にかかわる対流圏と成層圏の雲やエアロゾルを観測するのが多波長ライダー(ミー散乱ライダー)である。成層圏から中間圏にかけての気温分布を観測するのがレイリーライダーで、中層大気の風を観測するのがレイリードップラーライダーである。

2 多波長ライダー

多波長ライダーは大気中のエアロゾル、雲の高度分布を観測し極域でのエアロゾル分布や雲分布の変動とその輻射過程解明のためのデータを提供するため、2003年3月にポーカーフラットに設置された。輻射への影響に関しては水蒸気分布も重

表1 多波長ライダー

Transmitter	
Laser	Nd:YAG Laser with SHG (20Hz)
Wavelength	1064nm 532nm
Energy	600mJ 550mJ
Receiver (Haze)	
Wavelength	532nm(1ch, PMT)
Receiver (Troposphere)	
Wavelength	532nm(P 2ch, S 1ch, PMT)
	607nm (N ₂ Raman 1ch, PMT)
	660nm (H ₂ O Raman 1ch, PMT)
Receiver (Stratosphere)	
Wavelength	532nm(P 2ch, S 1ch, PMT)
	1064nm (1ch, APD)
Photon Counter	SR430(10channel, 12m resolution)

要であり、同時に雲の形成に重要なパラメーターであることから、多波長ライダーに水蒸気分布を観測するためのラマンライダー機能も付加した。アラスカに設置した多波長ライダー装置の概要を表1に、配置を図2に示した。多波長ライダーでは Continuum の Nd:YAG レーザ(PL8020)により基本波(1064 nm)と2倍波(532 nm)を送信する(図3)。受信には対流圏用と成層圏用の二つの35 cm 口径望遠鏡と2 km 以下の高度を観測するための口径可変な Haze 望遠鏡を使う。Haze 望遠鏡は5 cm の1枚のレンズを使った望遠鏡であり、レンズの前に絞りと ND フィルター入れるためのホルダーが付いている。絞りと ND フィル

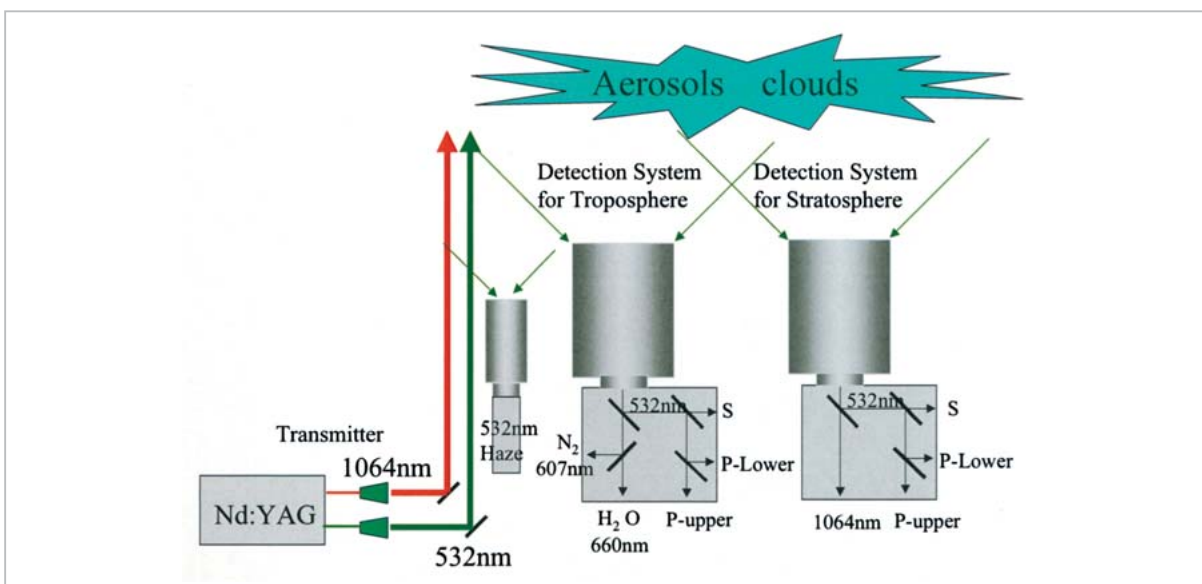


図2 多波長ライダーの配置

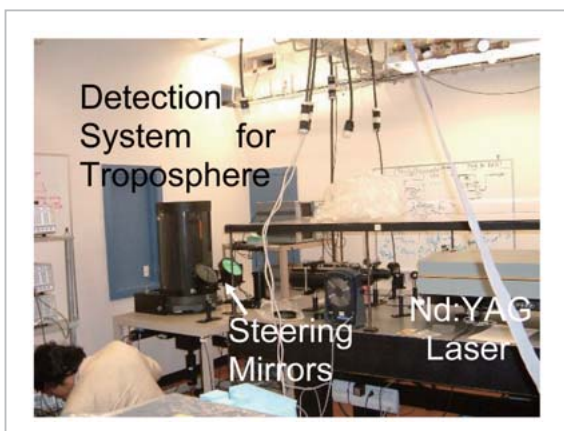


図3 レーザ送信器と対流圏用検出システム

ターにより低高度からの 532 nm の強い後方散乱光を減衰させて光電子増倍管 (PMT) により受信し、Haze [5] や境界層内のエアロゾル分布を観測する。対流圏用の受信システムでは 532 nm の後方散乱光以外にその N₂ ラマン (607 nm) と H₂O ラマン (660 nm) 散乱光も観測し、水蒸気密度と大気吸収の導出もできる [6]。また、532 nm ではレーザー光と同じ平行偏光成分と垂直偏光成分を測定する偏光観測を行い、散乱粒子の非球形度を測定する。偏光観測と水蒸気分布観測から対流圏エアロゾルと雲の分類や相状態の推定が可能となる。成層圏用には 1064 nm と 532 nm の 2 波長での観測を行い、成層圏エアロゾルの散乱強度の波長分布からその粒径分布を推定する。ダイナミックレンジを広げるため 532 nm では対流圏用、成層圏用

ともに平行偏光成分について 2 チャンネルで観測を行い、最下層を観測する Haze チャンネルと合わせて対流圏から成層圏のエアロゾルや雲分布を五つの観測チャンネルでカバーする。垂直偏光成分については対流圏用、成層圏用ともに 1 チャンネルである。また、532 nm 用の 7 チャンネル (Haze 1、平行偏光 4、垂直偏光 2) では浜松ホトニクスの PMT である R3234-01 を使い、N₂ ラマン (607 nm) と H₂O ラマン (660 nm) 用の 2 チャンネルにはより長い波長まで感度のある R3237-01 を、1064 nm 用には Licel の Si-APD モジュールを使い、全 10 チャンネルをそれぞれ Stanford の SR430 によりフォトンカウントで計測した。図 4 には地上から高度 40 km までの 10 チャンネル分の計測データの生信号を表示した。この図では高度 11 km あたりの雲が目立っている。低高度側ではビームオーバーラップや信号の飽和、高高度側では SN 比の問題など各々のチャンネルには有効な高度範囲があり、それをつなぎながら高度 300 m あたりから高度 40 km くらいまでを観測できるように全体の設計を行った。

図 5 は多波長ライダーで観測した成層圏エアロゾルの観測例である。圏界面 (点線) は両日とも 10 km 付近であり、10 km から 30 km にかけて散乱比 ([全散乱強度/大気分子による散乱] でありエアロゾルや雲が無いと 1 になる) が 1.07 程度まで大きくなり成層圏エアロゾルの分布を表している。また、成層圏エアロゾル分布がピークになる

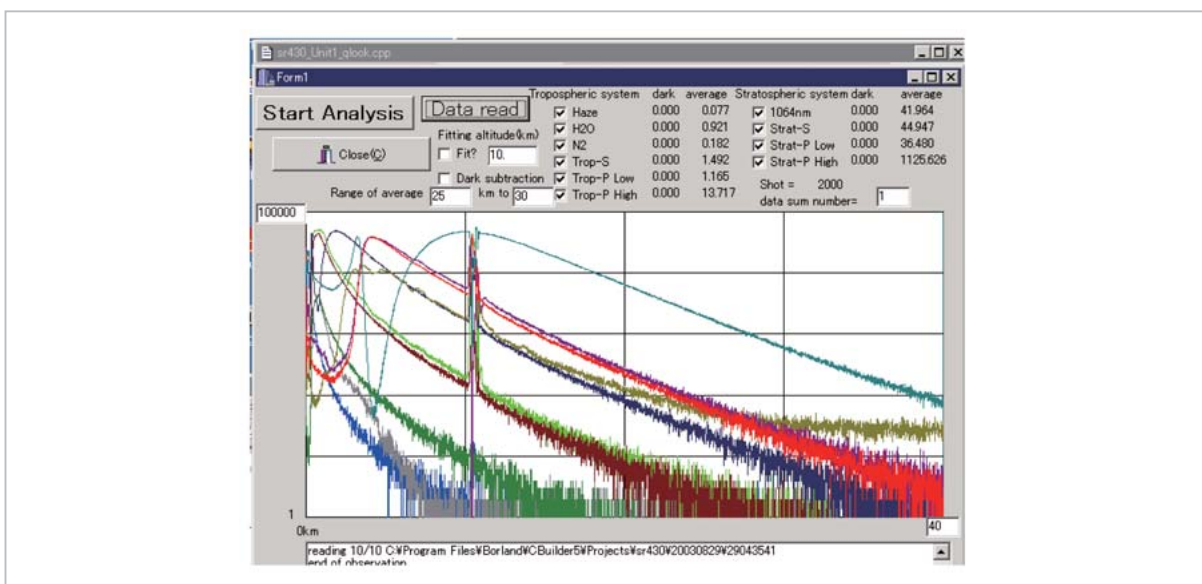


図4 多波長ライダーで計測された 10 チャンネル分の生データ

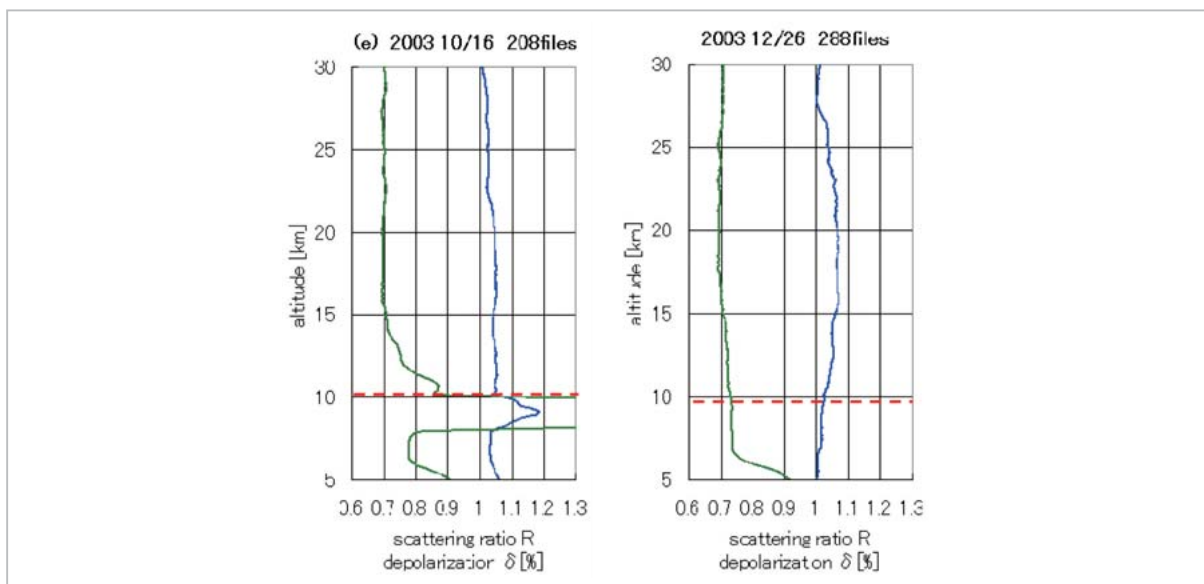


図5 多波長ライダーで観測した成層圏エアロゾル

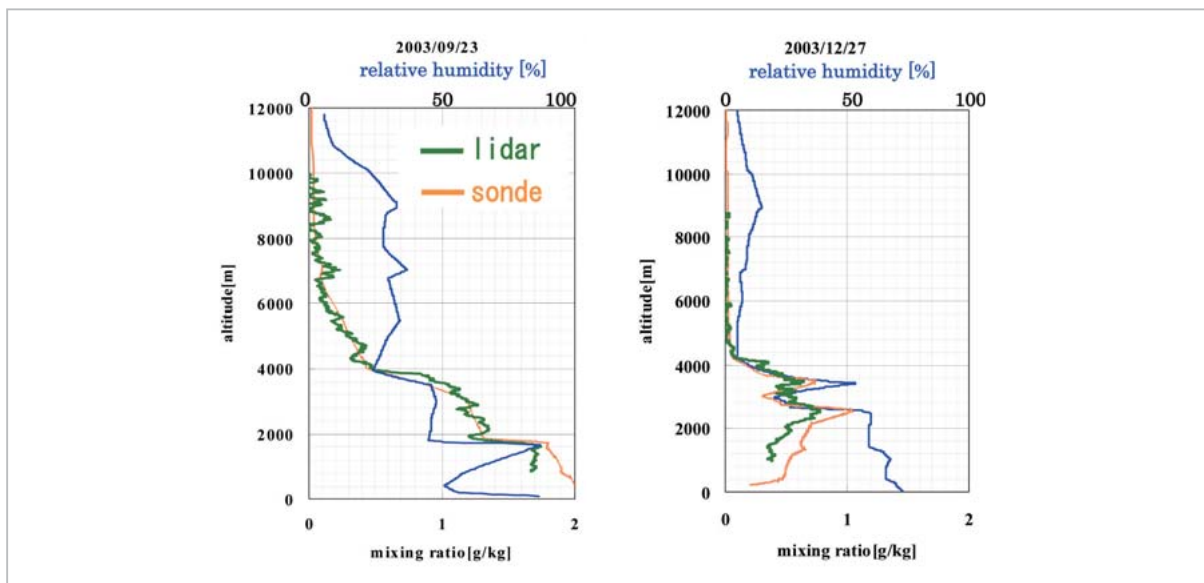


図6 多波長ライダーとゾンデによる水蒸気混合比観測

20 km あたりで偏光解消度が小さくなり、エアロゾルが液滴であることを示している。一方、10月16日のデータでは8 km から10 km にかけて巻雲による散乱比のピークが見られ、そこでの偏光解消度が氷雲のせいだ急激に大きくなっている。このように、多波長ライダーでは成層圏エアロゾルや巻雲の分布や特徴が良い空間分解能で観測されている。

図6では多波長ライダーで観測した N_2 ラマンと H_2O ラマン散乱光から導出した水蒸気混合比

をフェアバンクスで揚げられたゾンデ観測から導かれたものと比較してある。二つの水蒸気分布は非常に良い相関を示している。しかし、2 km より下層では分布に多少の違いが見られる。その原因の一つは観測場所が約 50 km 程度離れている点であろう。図7は水蒸気混合比高度分布の1時間ごとの時間推移を示しており、特に対流圏下部でその変動は激しい。場所の違いによる分布の変動も対流圏下部で大きいことが予想される。ライダーではこのような水蒸気分布の変動を連続的に

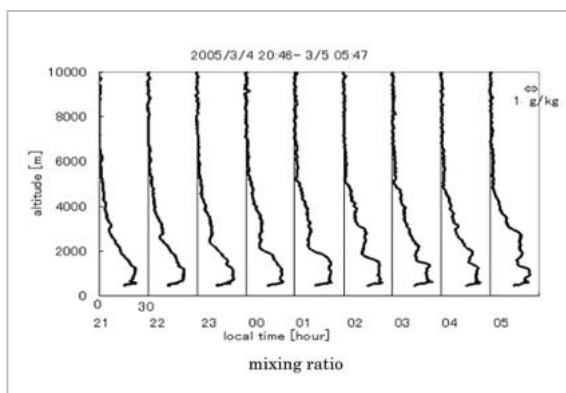


図7 水蒸気混合比高度分布の1時間ごとの時間推移

観測することができるのが特徴である。水蒸気は夏季の方が多く、夏季で高度 10 km 程度まで、冬季で高度 8 km 程度までの水蒸気分布の観測が可能である。

3 レイリーライダー

レイリーライダーは 1997 年 11 月に旧ライダー棟に設置され[7]、現在は新ライダー棟に移設されている。システムの仕様を表 2 に示す。送信レーザーは多波長ライダーと共用し、レーザー光の波長は Nd:YAG の 2 倍波 532 nm を使っている。大気分子からの後方散乱光は口径 61 cm のニュートン式望遠鏡で集められる。集光された光は一台の PMT (R3234-01) で検出され、SEIKO EG&G の Turbo-MCS によりフォトンカウントで計測される。レイリーライダーでは大気分子からの散乱光強度が観測され、静水圧平衡を仮定して気温分布を導き出すことができる [8]。その場合には観測した散乱光は大気分子による散乱だけでなければならない。したがって、気温観測の下限は成層圏エアロゾルが存在する上限高度である 30 km 程度になる。しかし、アラスカのレイリーライダーの場合は最大能力で観測する時には高度 40 km より下

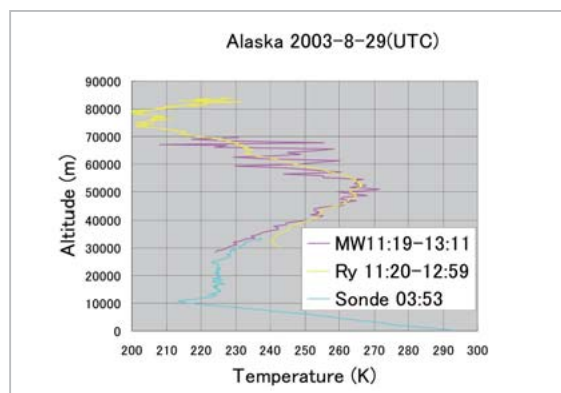


図8 ゾンデ、多波長ライダー、レイリーライダーによる気温分布測定と比較

層で計数が飽和してしまう。図 8 には 2003 年 8 月 29 日のゾンデ、レイリーライダー、さらには多波長ライダーによる観測から得られた気温分布を示した。レイリーライダーから求めた分布は 40 km より下において信号の飽和のせいで気温が高めに出てしまう。多波長ライダーデータから求めた気温分布は 50 km 以上では S/N が悪いが、40 km から 50 km においてレイリーライダーから求めたものによく一致している。ゾンデはポーカーフラットから 50 km ほど離れたフェアバンクスの GI 構内でライダー観測より 8 時間も前に飛ばしたデータしかないが、ライダーデータから求めた気温分布とは 3 K 程度高いだけで分布は比較的よく一致している。レイリーライダーと多波長ライダーから求めた気温分布は実際の気温分布をかなり良く再現していると推測できる。図 8 のレイリーライダーで観測された気温分布の中には幾つかの温度構造が見えている。このようなデータから大気潮汐や大気重力波等を調べる事が可能である [9][10]。このシステムは北極域を取り巻くレイリーライダー観測網の大きな空白領域を埋めると同時に、ポーカーフラットにおいて他の観測装置とともに中層大気の総合観測の一翼を担い、衛星搭載観測装置の検証実験等にも活躍している [11]。

表2 ポーカーフラットのレイリーライダーシステム

Transmitter		Receiver	
Laser	Nd:YAG laser with SHG	Telescope	61cmΦ F/3.1 Newtonian
wavelength	532 nm	Detector	PMT(R3234-01)
Output energy	550 mJ at 20 Hz	Photon counter	Turbo-MCS(75m resolution)

4 レイリドップラーライダー

レイリドップラーライダーは2005年8月に新ライダー実験棟に設置された。レイリドップラーライダーは大気分子によるレイリー散乱のドップラーシフト量を分光的方法により直接検出し、風の高度分布を観測する装置である。システムの構成を図9に、仕様を表3に示した。レーザーはContinuumのNd:YAGレーザー(PL9030)で、送信光にはその2倍波の532 nmを使う。レーザーパルスの繰り返しは30 Hz、エネルギーはおよそ600 mJである。ヨウ素セルでの吸収線を参照して波長を安定化した種レーザーを導入することで、レーザーは波長を固定したシングルモード発振をする。レーザー光は大口徑可動鏡で打ち上げられ、反射光は同じ可動鏡で80 cm ニュートン式望遠鏡に向けられマルチモード光ファイバー上に集光される。光ファイバーは光を隣室の分光器に導くとともに、光を一様にする役割を果たす。ファイバーから出た光は一度チョッパー上で像を結んだ後平行光になり、口径15 cm、間隔2.5 cmのファブリ・ペロ型エタロンで分光される。このエタロンは温度コントロールされた容器に入れられ、静電容量で安定化されている。光ファイバーの干渉縞像は24チャンネルの等面積リング検出器上に行ける。各チャンネルのカバーする周波数は約300 Mz (80 m/s)に設定されており、フリースペクトルレンジの6 GHzは十分検出器でカバーできる

ようになっている。

後方散乱光の周波数ドップラーシフトは $\Delta\nu = 2\nu(v/c)$ と表せる。ここで ν はレーザー光の周波数、 c は光速、 v は風の視線方向(LOS)成分である。観測方向を天頂から斜めにした場合、鉛直風は通常小さいので水平風の視線方向成分が観測される。例えば、可動鏡で天頂角 30° にセットすると視線方向成分は水平風のちょうど半分になる。5 m/sの水平風、つまり2.5 m/sの視線方向成分が9.3 MHzのドップラーシフトに対応する。

図10に小金井でテスト観測したときのデータの一部を示す。このとき視野は鉛直方向であり、3000ショットのレーザー発振(100秒)に対するデータである。左側にすべてのチャンネルの計測数を加算したものの高度分布を示しており、その分布は分子密度から計算されたモデルとよく合っている。右側にはすべての高度範囲のデータを足し合わせてそのスペクトルを示しており、大気からの反射の線幅が大気分子の熱運動で広がっている様子を示している。図11にはレイリドップラーライダー観測から得られた風分布を約70 km離れた立野でのゾンデによる観測と比較して示した。ライダーによる風観測は高度30 kmあたりまでの風分布を測定できているようである。東西、南北風の観測はそれぞれ20分程度の時間での観測であるが、当初の予定ではもっと高高度まで観測できる予定であった。高高度でのS/Nが予定より悪いのは受信系の効率が予定より悪いためであ

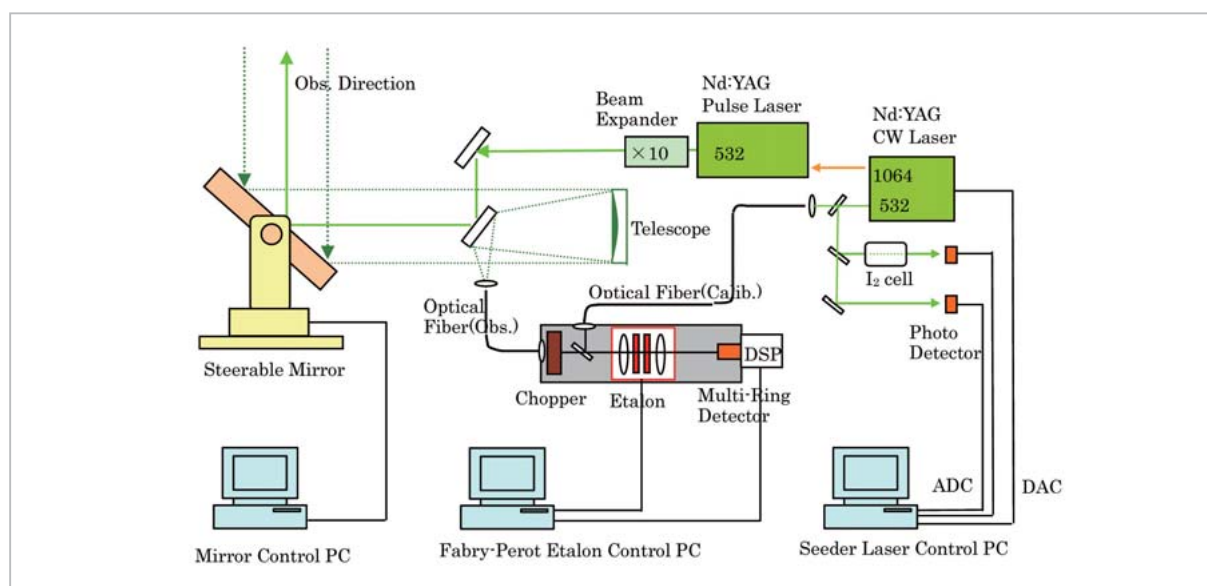


図9 レイリドップラーライダーの構成図

表3 レイリードップラーライダーの仕様

Transmitter		Fabry-Perot Spectrometer	
Laser	stabilized Nd:YAG with SHG	Type	Capacitance-stabilized Etalon
Wavelength	532 nm	Working aperture	15 cm
Pulse energy	600 mJ	Etalon gap	25 mm (6 GHz FSR)
Repetition	30 Hz	Reflectivity	90%
Beam div.	<0.1 mrad	Detector	24 equal area ring detectors
Receiver Telescope		type	(1channel ≒ 300MHz)
Diameter	80 cm	Height resolution	196m
Field of view	0.4 mrad		

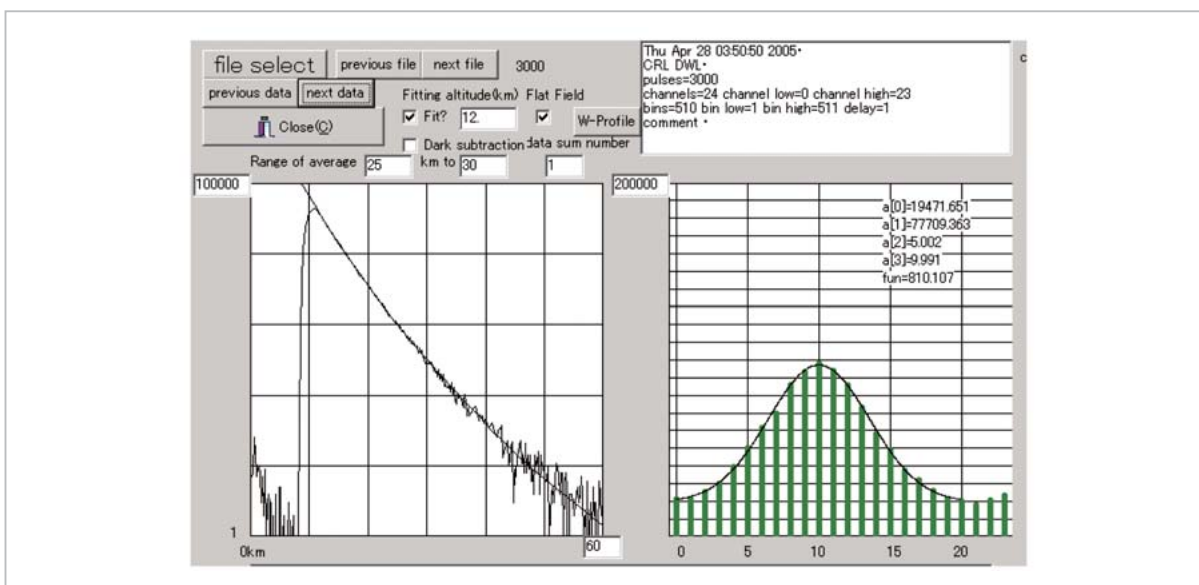


図10 小金井での鉛直方向に対するレイリードップラーライダー観測結果

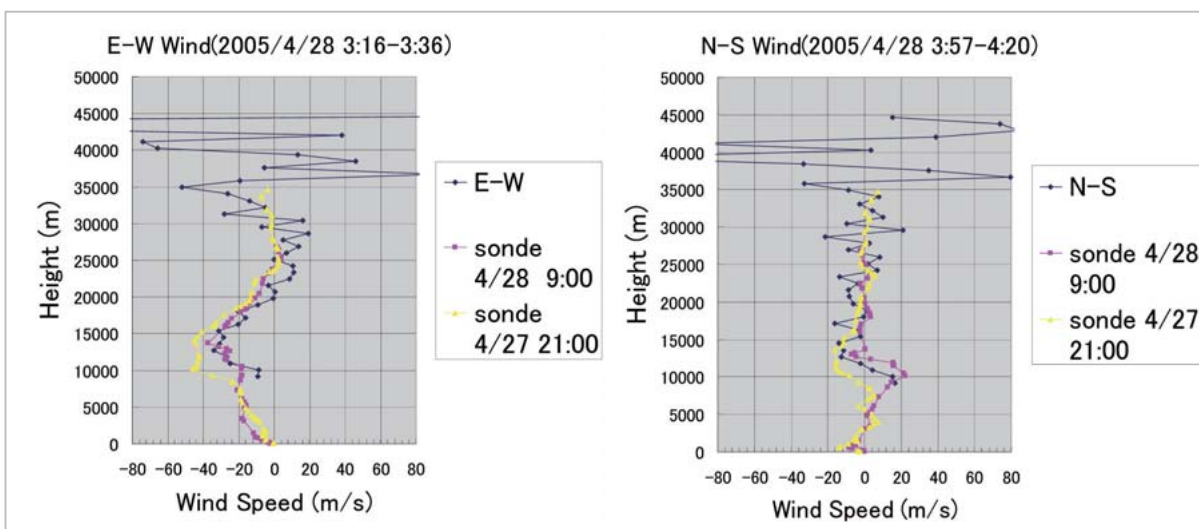


図11 ライダーによる風観測(小金井)とゾンデ観測(立野)の比較

り、その原因については調査中である。

図12はポーカーフラットに設置されたレイリードップラーライダーの様子を示している。ま

た、図13にポーカーフラットに設置直後のテスト観測でのデータの一部を示す。このときは上空に煙が充満した条件での観測であり、スペクトル

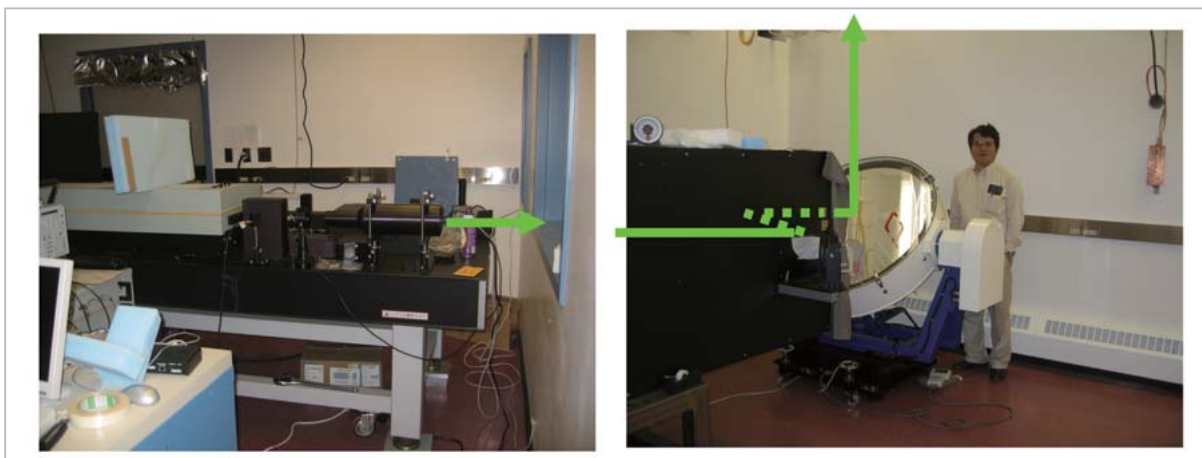


図12 ポーカーフラットに設置されたレイリードップラーライダー

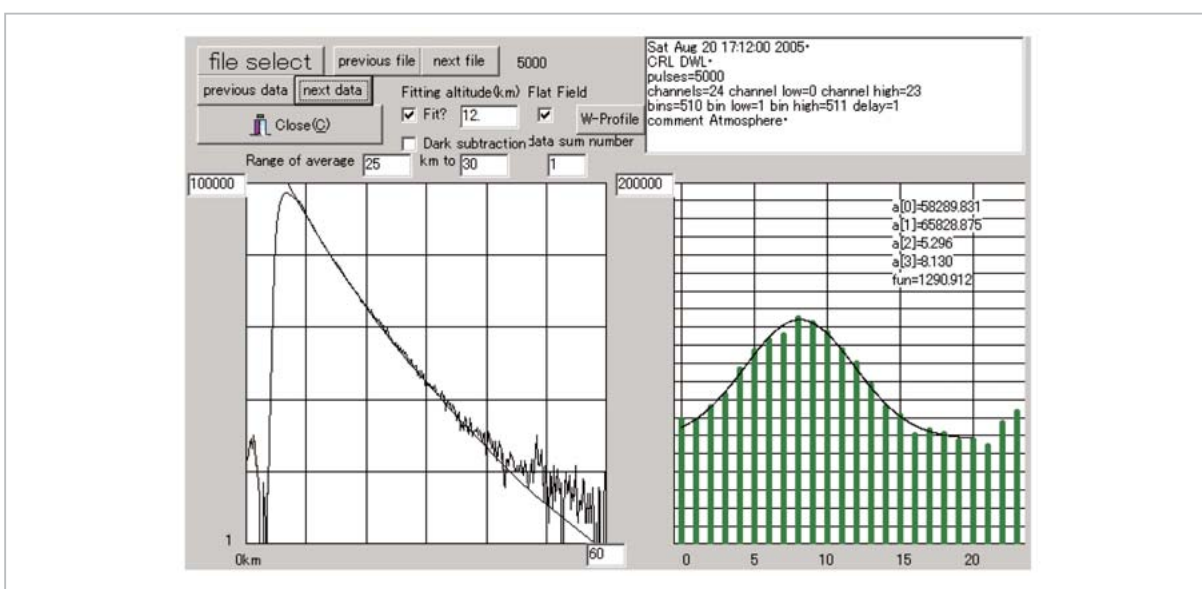


図13 ポーカーフラットでの鉛直方向に対するレイリードップラーライダー観測結果

にバイアスを与える影響が見られるが、大気反射光が分光され、装置としては機能していることが示されている。その後、レーザの不調などで装置は稼働できない時期もあったが、レーザの修理も終わり、装置は観測可能な状態になっている。効率が予定より良くないなどの問題はあがるが、北極域大気の流れ分布を少なくとも 30 km 程度の高度までは連続的に観測できる装置が設置され今後の活躍が期待される。

5 おわりに

対流圏や成層圏の雲、エアロゾルと水蒸気を観

測する多波長ライダーが開発され、2003年3月からポーカーフラットで観測を行っている。レイリーライダーは1997年以来北極域中層大気の流れ分布の観測を行い、中間圏の反転層の特徴や夜光雲を描き出すなどの活躍をしている。また、中層大気の流れを測るレイリードップラーライダーも2005年には設置され、効率が低い等の問題はあるながらも観測可能な状態になっている。これらの装置を使い大気重力波をはじめとする大気波動の研究、エアロゾルや雲などの放射収支や大気化学的な研究、長期的には温暖化の影響の現れやすい極域での大気構造の変化等の研究が行われるであろう。

謝辞

ライダー装置の設置と運用に協力していただいたアラスカ大学フェアバンクス校のスタッフに感

謝します。また、レイリドップラーライダーのファブリ・ペロ検出システムを製造したハブモア社の Dr. D. Rees に感謝します。

参考文献

- 1 U. von Zahn, E. V. Thrane, and R. Skatteboe, "The Alomar facility: status and outlook", in Proc. 12th ESA Symp. On Rocket and Balloon Programmes & Related Research, ESA SP-370, 379-385, Lillehammer, Norway, 1995.
- 2 J. A. Whiteway and A. I. Carswell, "Rayleigh lidar observations of thermal structure and gravity wave activities in the High Arctic during a stratospheric warming", J. Atmos. Sci., 44, 1404-1410, 1994.
- 3 J. P. Thayer, N. B. Nielsen, R. E. Warren, C. J. Heinselman, and J. Sohn, "Rayleigh lidar system for middle atmosphere research in the arctic", Opt.Eng., 36, 2045-2061, 1997.
- 4 Y. Murayama et al., "CRL Alaska Project. International collaborations for observing arctic atmosphere environment in Alaska", J. Commun. Res. Labo., 49(2), 143-152, 2002.
- 5 L. A. Barrie, "Arctic air pollution: an overview of current knowledge", Atmospheric Environment, 20, 643-663, 1986.
- 6 A. Ansmann et al., "Combined Raman elastic-backscatter LIDAR for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and LIDAR ratio", Appl. Phys. B55, 18-28, 1992.
- 7 K. Mizutani, T. Itabe, M. Yasui, T. Aoki, Y. Murayama, and R. Collins, "Rayleigh and Rayleigh Doppler lidars for the observations of the arctic middle atmosphere", Trans. IEICE, E83-B, 2004-2009, 2000.
- 8 A. Hauchecorne and M. L. Chanin, "Density and temperature profiles obtained by lidar between 35 and 70 km", Geophys. Res. Lett., 7, 565-568, 1980.
- 9 L. J. Cutler, R. L. Collins, K. Mizutani, and T. Itabe, "Rayleigh lidar observations of mesospheric inversion layers at Poker Flat, Alaska(65N, 147W)", Geophysical Res. Lett., 28, 1467-1470, 2001.
- 10 R. L. Collins, M. C. Kelley, M. J. Nicolls, C. Ramos, T. Hou, T. E. Stern, K. Mizutani, and T. Itabe, "Simultaneous lidar observations of a noctilucent cloud and an internal wave in the polar mesosphere", J. Geophysical Res., 108(D8), 8435, doi:10.1029/2002JD002427, 2003.
- 11 M. Yamamori, A. Kagawa, Y. Kasai, K. Mizutani, Y. Murayama, T. Sugita, H. Irie, and H. Nakajima, "Validation of ILAS-II version 1.4 O₃, HNO₃, and temperature data through comparison with ozonesonde, ground-based FTS, and lidar measurements in Alaska", J. Geophysical Res., 111, D11S08, doi:10.1029/2005JD006438, 2006.



みずたに こうへい
水谷耕平
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 理学博士
レーザーリモートセンシング



いたべ としかず
板部敏和
上席研究員 理学博士
レーザーリモートセンシング



やすい もとあき
安井元昭
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主任研
究員 博士(理学)
大気科学



あおき てつお
青木哲郎
電磁波計測研究センター推進室長
理学博士
レーザーリモートセンシング



いし いしゅうけん
石井昌憲
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主任研
究員 博士(理学)
レーザーリモートセンシング



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



たかの まさひこ
篠野雅彦
海上技術安全研究所運航・システム部
門センシング技術研究グループ研究員
博士(理学)
レーザーリモートセンシング



よしおき けんすけ
吉岡謙介
日揮株式会社(元東京都立科学技術大
学)
レーザーリモートセンシング



おたに よしこ
大谷佳子
株式会社オーディオテクニカ(元首都
大学東京)
レーザーリモートセンシング



Richard L. Collins
アラスカ大学 フェアバンクス校准教授
Ph.D.
超高層大気物理学、レーザーリモ
ートセンシング