南極高層大気観測のためのナトリウム温度ライダーの開発

北原 司, 川原 琢也, 小林 史利, 堤 雅基*, 斉藤 保典, 野村 彰夫

信州大学工学部 (〒380-8553 長野市若里4-17-1)

*国立極地研究所 (〒173-8515 東京都板橋区加賀1丁目)

Sodium Temperature Lidar for Probing the Upper Atmosphere over Antarctica

Tsukasa KITAHARA, Takuya D. KAWAHARA, Fumitoshi KOBAYASHI, Masaki TSUTSUMI*,
Yasunori SAITO, and Akio NOMURA

Faculty of Engineering, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano 380-8553

*National Institute of Polar Research, Kaga, 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515

(Received September 11, 2002)

We describe the development of a new sodium temperature lidar for probing the upper atmosphere over Antarctica. The laser transmitter consists of two injection-seeded Nd:YAG lasers with wavelengths of 1064 nm and 1319 nm. A narrow-band pulsed laser tuned to the sodium D₂ line (589 nm) is created by sum frequency generation of 1064 nm and 1319 nm laser pulses. The resulting laser pulse has a line width of less than 100 MHz. The two-frequency technique for measuring the temperature profile in the mesospheric sodium layer is evaluated by comparison with the Doppler profile-fitting technique and results show good agreement. Moreover, based on lidar data obtained at Syowa station, Antarctica in 2000, it is shown that the sodium temperature lidar is a powerful tool for probing the temperature profile in the mesosphere and lower thermosphere region as well as the stratosphere.

Key Words: Sodium layer, Sodium lidar, Temperature lidar, Antarctica, Mesopause

1. はじめに

ライダーは中間圏金属原子層の極めて有効な観測手法としてレーザーの発達とともに進歩してきた。1963年, Fioccoらによって初めてのライダー観測¹⁾が行われ, 1969年には色素レーザーを光源にもちいたライダーにより, ナトリウム原子のD₂線(589 nm)に同調し, 原子の共鳴散乱を利用して初めての中間圏ナトリウム原子密度の高度分布観測がBowmanらによって行われた²⁾。ナトリウムライダー観測では, ナトリウム原子をトレーサーとして温度および原子密度の高度分布や気柱密度の時間的変化さらに空間的变化を調べることができる。その後, 観測装置の発達とともに観測時間が飛躍的に長くなり時間分解能, 高度分解能も向上し, 測定精度が大幅に改善された^{3,4)}。1985年には, ドイツのグループにより温度観測が成功し⁵⁾, その後, アメリカ⁶⁻¹⁰⁾, ブラジル¹¹⁾さらには北極圏¹²⁾においても温度観測が行われている。

一方, 南極での観測は1985年に初めて昭和基地(69°S, 39°E)でナトリウム原子密度観測¹³⁾が行われているが, 温度観測ではRothera(68°S, 68°W)でのロケット観測¹⁴⁾などのような例があるだけで近年まで長期に渡る定常的な観測は行われてこなかった。このため, きわめて情報が少なく基本的な温度場やその季節変化が明らかにされていない。後に, 2001~2002年には南極点における鉄ライ

ダーによる温度観測がイリノイ大学のグループにより行われている¹⁵⁾。

ナトリウム原子層が存在する中間圏界面付近(MLT: Mesosphere and Lower Thermosphere)は, 中間圏と熱圏を結合する重要な領域として研究が活発に進められているが¹⁶⁻¹⁸⁾, この領域の力学的, 光化学的な過程は未知の部分が多い。MLT領域は, 下層大気から大気波動によるエネルギーの流入, 極域ではオーロラ活動による磁気圏からの中間圏界面への高エネルギーの粒子の降り込みが起る。この現象が極域の中間圏界面を介して地球のエネルギー収支や中間圏, 成層圏大気にどのような影響を与えているかを調べることは, MLT領域を挟んで超高層大気と中層大気の結びつきを考える上で重要である。

このような背景のもと, 現在昭和基地において南極観測第V期5か年計画の一つとして「南極域熱圏・中間圏へのエネルギー流入と大気変質の研究」(1997~2002)が地上からの3つのリモートセンシングにより進められている。我々がナトリウム温度ライダーで鉛直温度構造を観測し, MFレーダが風系の鉛直構造, Fabry-Perot Doppler Imager(FPDI)が温度と風の水平構造を観測する。これらの機器で同時観測を行いMLT領域の気象要素(温度と風系)の三次元的な解明を目指している。

本論文では, 南極高層大気観測用ナトリウム温度観測ライダーシステムの開発について述べた後, 2種類の温度

観測手法について検討を行う。また、2000年2月から開始した昭和基地での観測データを基にライダーシステムの評価を行う。

2. ライダーシステム

これまでのナトリウムライダーは、ナトリウムの共鳴散乱波長589 nmを得るための送信レーザーが、フラッシュランプ励起もしくは、YAGレーザー励起の色素レーザーが主であり、システムは複雑かつ大がかりであった。多くの研究グループが空調、防振性や設置場所の広さが考慮された施設の中に設置しているが、我々の観測ではこれらの観測環境に必ずしも恵まれていない南極昭和基地に設置する必要がある。そこで、信頼性が高く安定に動作して、シンプルな構成をしている固体レーザーをベースとした送信系を用いたナトリウム温度ライダーシステムを構築した。このシステムでは温度観測を行うなかで、ナトリウム密度の観測も行う。ライダーシステムのブロック図をFig. 1に、仕様をTable 1に示す。

2.1 送信系

1989年、JeysらによってYAGレーザーをもとにした固体素子からなる589 nm光の発振可能なレーザーが提案され¹⁹⁾、それを用いて、Chiuらはナトリウム共鳴散乱波長の発振可能なライダー送信システムを開発した²⁰⁾。我々はこの方法を応用し、新たに南極で運用可能かつ温度観測可能なナトリウムライダーの送信系を開発した。

この送信系の特徴は2台のinjection-seeded型QスイッチNd:YAGレーザー(HOYAコンテニウム)を用い、1064

Table 1 Specifications of the sodium temperature lidar system.

Transmitter			
Wavelength	589 nm	532 nm	1064 nm
Pulse energy	40 mJ	50 mJ	50 mJ
Line width	<100 MHz	<100 MHz	<100 MHz
Pulse width	30 ns	30 ns	30 ns
Repetition rate	10 Hz	10 Hz	10 Hz
Divergence	< 0.2 mrad	< 0.2 mrad	< 0.2 mrad
Receiver			
Telescope type	Dall-Kirkham Cassegrain		
Telescope area	0.20m ²		
Field of view	1.0-2.0 mrad		
Optical bandwidth	1.0 nm		
Detection	3 ch. for Range-gated photon counts		
Height resolution	96 m		
Time resolution	3 min		

nm光と1319 nm光を同期して発振させ、2波長の出力を非線形結晶BBO (β -BaB₂O₄)に入射することで和周波の589 nm光を得ていることにある。また、1064 nm光レーザーと1319 nm光レーザーの発振時間幅を両者の間で等しくするため、前者の共振器長を2.10 mとし、後者を0.96 mとした。さらに1319 nm光レーザーの出力を高めるために共振器内に2台のレーザーヘッドを直列に配置し、共振器後の光路にアンプ用のレーザーヘッドを1台設けている。こうすることで、両レーザーの発振時間幅を30 ns、出力を1.5 W、1.0 Wとすることができた。また、両レーザーの発振スペクトルの狭帯化にはそれぞれの共振器内に1064 nm光、1319 nm光のシーダーレーザー(Lightwave, S100-02)光を入射して行った。シーダー光を入射時、589 nmにおける発振スペクトル線幅は100 MHz ($\Delta\lambda < 0.1$ pm)以下に狭帯域化がなされている。両共振器のリアミラーにはビエズ素子を取り付けられ、出力の一部をモニターしてフィードバックをかけ共振器長を微調整することにより、常に出力が安定するように保たれている。以上のレーザー本体については我々の基本設計、仕様をもとに589 nm光レーザー(YG440-10SE)としてHOYAコンテニウム社が製作を行った。

両レーザーの波長モニターにはWavemeter(Burleigh, WA-1500NIR)(波長測定精度 ± 0.1 pm)を用い、2つのシーダー光の一部を常に一定間隔で交互に入射することでモニターしている。Wavemeterの測定値を基に2つのシーダーレーザーの温度制御をすることによりフィードバックをかけ安定した波長同調を行っている。

さらにこの送信系は、1064 nm出力を分岐してSHG(Second Harmonic Generator)に入射し532 nmの出力も得ることができる。これらの波長はレイリーライダー、ミールライダーとして成層圏の温度観測、極域成層圏雲(PSCs: Polar Stratospheric Clouds)の観測にも利用される。

2.2 受信系

受信系は、望遠鏡、PMT(Photo Multiplier Tube)、フォトンカウンタからなる。散乱光は、直径0.5 mのDall-Kirkham型カセグレン望遠鏡(清原光学)で集光し、ダイク

Fig. 1 Diagram of the sodium temperature lidar system.

ロイックミラーで532 nm, 589 nm, 1064 nmの波長に分離し, 冷却型PMT(浜松ホトニクス, R943-02 (532 nm, 589 nm) / R3238 (1064 nm))で受信する. 受信信号はアンプ(Stanford Research Systems, SR445)で増幅された後, 3台のMulti Channel Scaler(MCS: Stanford Research Systems, SR430)で各波長ごと光子計数され, コンピュータに転送され解析処理がなされる. また, 射出レーザー光と望遠鏡は3 m離して設置してある. 近距離からの強い散乱光を入力させた場合, 信号がアナログになり光子計数ができないことと, アフターパルスの影響を強く受けるため, PMTにはゲート機能付きのものを採用し低高度での信号に対して計数効率を減少させている.

2.3 システムの制御とデータ処理

送信系, 受信系の制御およびデータの処理はパーソナルコンピュータ(PC)で行っている. PCはMCSおよびWavemeterとGPIBによって, 2台のシーダーレーザーコントローラおよびWavemeterへの入射光選択のためのシャッターとRS-232Cによって接続され, システムの制御および観測を自動で行うことができる.

解析処理の流れをFig. 2に示す. PCでは取得された光子数の生データを保存する. 生データである受信カウント数を1次データベースとし, 解析処理によって導出したナトリウム密度, 温度を2次データベースとしている. 観測時はリアルタイムモニタとしてA-scope及び温度の時系列表示がなされる. 2次データベースを蓄積し, 密度・温度それぞれについて1晩・月・季節ごとの変化を導く. これらは3次データベースとなる.

Fig. 2 Data processing flow chart.

3. ナトリウム原子温度導出法

90年代になりナトリウムライダーによって中間圏界面付近のナトリウム層の温度を計測するためにtwo-frequency法を用いた方法が提案され, 観測に用いられてきた. 詳細はBillsら²¹⁾の論文に述べられている. Two-frequency法は現在最も有力な手法となっており, 我々はこの手法を採用しているが, ここではその手法を用いた観測結果とフィッティング法を用いた観測結果の比較検討を行った.

Fig. 3はドップラー拡がりを持ったナトリウムのD₂散乱断面積スペクトルの温度依存性を示したものである. また, ナトリウムの共鳴散乱断面積 $\sigma_{eff}(f)$ は, 次式で与えられる²¹⁾.

$$\sigma_{eff}(f) = \frac{C}{\sqrt{2\pi}\sigma_e} \left\{ S_a \exp\left[-\frac{(f-f_a)^2}{2\sigma_e^2}\right] + S_b \exp\left[-\frac{(f-f_b)^2}{2\sigma_e^2}\right] \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_D^2} \quad (2)$$

$$\sigma_D^2 = \frac{k}{m\lambda^2} T \quad (3)$$

ここで, f : レーザーの周波数, f_a, f_b : ナトリウムD_{2a}, D_{2b}線の各遷移グループの中心周波数, S_a, S_b : D_{2a}, D_{2b}線の各遷移グループの平均重み, C : 比例定数, σ_e : ライダーによる有効吸収線幅(rms), σ_L : レーザーの発振線幅(rms), σ_D : ナトリウムD₂線のドップラー拡がり幅(rms), k : ボルツマン定数, m : ナトリウム原子の質量, λ : ナトリウムD₂線の波長, T : 温度(K)である. D_{2a}のピーク周波数(f_a)とD_{2a}, D_{2b}間の極小の周波数(f_c)での散乱断面積は他の周波数に対して相対的に温度変化に敏感である. (1)式を用いて, この2周波数について散乱断面積比 $R_T (= \sigma_{eff}(f_c)/\sigma_{eff}(f_a))$ 求めると次式のように近似され

Fig. 3 Sodium D₂ Doppler-broadened absorption spectra for different temperatures.

る²¹⁾。

$$R_T \approx \frac{(f_a - f_b)}{(f_c - f_b)} \exp \left[\frac{-(f_c - f_a)^2}{2\sigma_e^2} \right] \quad (4)$$

さらに(4)式は、近似を用いて T について解くと次式となる²¹⁾。

$$T \approx \frac{-(f_c - f_a)^2}{2 \frac{k}{m\lambda^2} \left[\frac{(f_c - f_b)}{(f_a - f_b)} R_T \right]} - \frac{\sigma_e^2 m \lambda^2}{k} \quad (5)$$

一方、観測的な散乱断面積比は、この2周波数に送信レーザーを同調したときのナトリウムからの散乱信号強度比から得られる。この際、大気透過率やレーザー出力のばらつきを補正するため、ナトリウムからのフォトンカウント値をレイリー散乱でのフォトンカウント数で除した後に比をとっている。観測での散乱断面積比 R'_T は次式で表される。

$$R'_T = \frac{N_S(f_c, z) N_R(f_a)}{N_R(f_c) N_S(f_a, z)} \quad (6)$$

$N_S(f, z)$ ：周波数 f 、高度 z のときのナトリウムからのフォトンカウント数、 $N_R(f)$ ：周波数 f のときの30～35 kmからのレイリー散乱によるフォトンカウント数である。観測で得られた散乱断面積比は理論での散乱断面積比と等値なため、 $R'_T = R_T$ として(5)式に代入し温度が求められる。また、このとき温度誤差は次式で表される²¹⁾。

$$\Delta T \approx \frac{\partial T}{\partial R_T} \Delta R_T \approx \frac{-T}{\ln \left[\frac{(f_c - f_b)}{(f_a - f_b)} R_T \right]} \frac{\Delta R_T}{R_T} \quad (7)$$

ここでは、最も支配的な誤差の要因である2周波数への同調精度およびフォトンノイズによる温度誤差を考慮する。 f_a , f_b , f_c の数値を入れて求めると f_a , f_c への同調誤差(Δf_a , Δf_c)による温度誤差 ΔT_f 、フォトンノイズによる温度誤差 ΔT_p は次の2式で近似される。

$$\Delta T_f \approx T \sqrt{\left[0.25 \left(\frac{\Delta f_a}{\sigma_e} \right)^2 \right]^2 + \left(0.15 \frac{\Delta f_c}{\sigma_e} \right)^2} \quad (8)$$

$$\Delta T_p \approx \frac{T}{\sqrt{N_S(f_a, z)}} \quad (9)$$

このようにしてTwo-frequency法では交互に2周波数での観測を行い、隣り合った散乱信号強度の高度プロファイルから各高度での R'_T を求めることで鉛直方向の温度プロファイルを時系列で計測する。

実際の送信系では1064 nm, 1319 nmそれぞれのシーダー光を交互にモニターしており、ここから和周波の589 nm出力の波長を求めた。観測では1064 nm シーダーレーザーを1064.6221 nmと1064.6187 nmへ交互に同調し、1319 nm シーダーレーザーの波長は1319.2012 nmと固定した。これより589.1589 nm(- 518.2 MHz, f_a), 589.1580 nm(+

345.5 MHz, f_c)の2波長を使用してtwo-frequency法により温度観測を行った。周波数値は、ナトリウムD₂線の中心周波数($= c/589.1583$ nm, c :真空中での光速)を基準としている。

定常的観測の前に、two-frequency法での温度観測評価を行うため、受信散乱信号から得られたナトリウムスペクトルのドップラー拡がりを観測し、最小二乗法によるフィッティングによって得られた温度との比較を行った。観測は、2000年2月23日の夜間25:34～26:30LTに行われた。ナトリウムのD₂スペクトルを取るため589.1555 nmから589.1604 nmまでを0.3 pmステップで波長掃引(17波長)し、レーザーを各波長100秒(1000レーザーショット積算)、高度分解能96 mでそれぞれの散乱信号プロファイルを観測した。さらに、高度方向10データ分を積算し、84.8～102 kmの範囲を0.96 kmごとのナトリウムスペクトルを得た。Fig. 4にこの波長掃引観測によって得られたナトリウムスペクトルを示す。図中では表示を明瞭にするため、そのデータの中から1.9 kmごとに表示している。これらのナトリウムスペクトルは最小二乗法により理論値へのフィッティングを各高度ごとに行い温度を導出した。一方、two-frequency法はこの17波長の同調箇所のうち、D_{2a}のピーク f_a (589.1589 nm)とD_{2a}, D_{2b}間の極小の f_c (589.1580 nm)での散乱信号プロファイルを取りだして温度を求めた。Fig. 5に2つの手法によって求められた温度を示す。両者の時間分解能はフィッティング法が56分、two-frequency法が7分であり、高度分解能はフィッティング法が0.96 kmのため、これと同等とするためtwo-frequency法では移動平均を行い1.1 km(96 m×11データ)とした。Two-frequency法での温度誤差は、2.5 kmごとにエラーバーで表しており、84～96 kmの範囲でいずれも±9～14 K、100 kmでは±45 Kであった。この2つの温度プロファイルを比べるとほとんどの部分でフィッティング法による温度が、two-frequency法の誤差の中に入っており、良い一致をしていると考えられる。Two-frequency法は今回のフィッティング法と比べて約8倍の時間分解能を持っており、時間的な観測精度の優位性が示された。また、two-frequency法の温度プロファイルの誤差はレーザーの f_a , f_c への同調精度およびフォトンカウントのフォトンノイズによるものが多い

Fig. 4 Measured sodium D₂ spectra at 1.9 km altitude intervals. The two arrows indicate the wavelengths used for the two-frequency method.

くを占めている。特にフォトンノイズは受信カウント数が上がればさらに小さくなるため観測時間が誤差の大きさを左右する。例えば、オーロラ現象が引き起こす変化の早い大気変動に着目して観測するときは、距離分解能より、時間分解能が優先される。本システムでtwo-frequency法を用いて時間分解能3分、距離分解能96 mで観測したとき、温度誤差はFig. 5の結果の約2倍(ナトリウム密度のピーク高度では約20 K)で観測が可能である。一方、季節変化や1晩平均、1月平均などの長期的な観測をしたときは観測時間が長く取ることができるため、温度の精度は向上する。15時間の観測を行い1晩の平均温度を導出した場合、Fig. 5の結果より温度誤差は1桁減少した(ナトリウム密度のピーク高度では3 K以下)観測が可能となる。

4. 観測結果と考察

4.1 生データ

システムは1999年に南極昭和基地へ搬入され、設置、調整が行われ2000年2月下旬より稼働を開始した。それ以後、夜間の晴れた期間に観測を行っている。

2000年5月28~29日に観測された生データ(リアルタイムモニター)の例をFig. 6に示す。150秒積算(1500レーザーショット積算)、高度分解能96 m(ゲート時間幅640 ns)の条件で、Fig. 6 (a)はレーザー波長を D_{2a} のピーク f_a (589.1589 nm)に同調したとき、Fig. 6 (b)は D_{2a} 、 D_{2b} 間の極小 f_c (589.1580 nm)に同調したときに得られたA-scopeである。両A-scopeとも、地上から約50 kmまでのカウント値が大気分子からのレイリー散乱信号、約80~105 kmでのカウント値がナトリウム原子からの散乱信号である。当日は快晴のためミー散乱によるカウントはない。高度15 kmまではPMTの計数効率を落としているため、約1/5000のカウント値となっている。レイリー散乱高度では、約5 kmで視野重なりを持つピークを持ち、それ以後高度が上がるにつれ大気密度の減少とともにカウント値も落ちていき、波長による受信信号の違いは見られない。一方

Fig. 5 Temperature structures in the upper mesosphere mesopause region. The solid line and dots(●) denote the temperature obtained by the two-frequency method and by the sodium D_2 fitting procedure, respectively. The standard deviation is shown by bars.

Fig. 6 A-scopes tuned at (a) 589.1589 nm near the sodium D_{2a} peak (f_a) and (b) 589.1580 nm near the minimum between the D_{2a} and D_{2b} (f_c).

ナトリウム層高度では波長によって受信信号強度は変化しており、ピークでのカウント数はFig. 6 (a)で約1000、Fig. 6 (b)で約300を得ている。

4.2 温度観測と密度観測

2000年3月以降、南極昭和基地においてtwo-frequency法での観測は継続的に行われた。一日の大部分を夜間がしめるようになる5月下旬には観測時間が15時間以上のデータが複数取得できた。このうち、5月28~29日に観測された温度プロファイルの時間変化および夜間平均値からの偏差をFig. 7 (a), (b)に示す。それぞれの波長での積算時間は150秒(1500レーザーショット)、距離分解能96 m(ゲート時間幅640 ns)である。データ処理の過程で、移動平均を行い高度分解能1 km、時間分解能30分である。Fig. 7 (a)では、一晩の温度プロファイルの変化の様子が良くとらえられており、大気波動による温度の下方への伝搬が周期的に観測された。鉛直方向の周期は約15 km、下方への伝搬速度は約7 km/hであった。また、同晩のナトリウム密度プロファイルの、時間変化および夜間平均値からの偏差をFig. 8 (a), (b)に示す。温度と同様に移動平均を行い高度分解能1 km、時間分解能30分である。Fig. 8 (a)では、約90 kmに密度のピークを持つナトリウム原子層が観測された。密度値では変化がよく見えないが、密度の一晩の平均値からの偏差(Fig. 8 (b))を見るとこちらも、同

Fig. 7 Nocturnal variation of (a) temperature and (b) deviation from nocturnal averaged temperature profile at Syowa station on May 28-29, 2000.

Fig. 8 Nocturnal variation of (a) sodium density and (b) deviation from nocturnal averaged sodium density profile at Syowa station on May 28-29, 2000.

様な下方向への周期的な伝搬が観測されている。温度偏差Fig. 7 (b)とナトリウム密度偏差 Fig. 8 (b)に示された大気変動の動きを比べると、密度のピーク (90 km) の上部では逆位相、下部では同位相となっていることが分かる。すなわち、大気変動を温度で観測すると密度のピークの上下での位相は変化しないが、密度でみるとピークを境にして位相が反転していることが分かる。

4.3 気象ゾンデ、レイリーライダー、ナトリウムライダーによる低層から中間圏までの温度観測
このシステムは、ナトリウム層温度観測と同時に532

nmレーザーを用いてレイリーライダー観測も行っており、大気からの散乱信号から大気密度の高度分布を求め、成層圏の温度を導出できる²²⁾。また、昭和基地では1日2回(2:30LT, 14:30LT)気象ゾンデを飛揚、地上から対流圏および下部成層圏の気象要素を観測している。Fig. 9は、2000年5月28～29日のナトリウム層の1晩平均温度プロファイル、同期間のレイリーライダーによる成層圏温度観測の1晩平均、29日2:30LT打ち上げの気象ゾンデ温度データ(気象庁提供データを基に作成)を一つにまとめたものである。地上からナトリウム高度までの温度(60～80 kmを除く)が示されており、高度24 kmに対流圏界面、高度51 kmに成層圏界面、高度101 kmに中間圏界面の各温度がそれぞれ観測された。ナトリウムライダー、レイリーライダー、気象ゾンデのデータを組み合わせることで、地上から高度60 km、高度80～100 kmの領域で日平均温度を得ることができることを示した。

5. まとめ

我々が開発したナトリウム温度ライダーに関して述べた。このシステムがこれまでのレーザーに比べ相対的に優れている点は、コンパクトであること、これまでの実績により最も信頼性のあるYAGレーザーを用いた固体レーザーであることから安定性が高いこと、メンテナンスが容易であることがあげられる。

観測が開始された2000年のナトリウム層観測データを基に、観測された温度の妥当性をドップラー拡がりをもつナトリウムスペクトルのフィッティング法による結果とtwo-frequency法による結果を比べることで確認した。また、南極における80～100 kmの温度場、大気波動による温度の変動の観測結果を示し、有用性を明らかにした。最後に、気象ゾンデとライダーの観測データを組み合わせ、昭和基地での地上から高度100 kmまでの日平均温度を示し、温度の鉛直構造を良好な時間的、空間的分解能で観測できる可能性を示した。また、このシステムはそ

Fig. 9 Temperature profiles derived from the sodium lidar, a Rayleigh lidar and a balloon sonde on May 28, 2000.

の後の観測において、ナトリウム層温度の月変化をアンダーヤ(69°N)での観測結果と比較し、温度が15~20度も低いことを明らかにするなどの成果²³⁾も出している。

南極におけるナトリウム温度ライダー観測は、日本南極地域観測隊の観測の一環として1999年(第40次隊)が持ち込み2000年(第41次隊)から観測が開始された。2002年(第43次隊)の末まで、計3年間の観測がなされる予定である。

6. 謝 辞

本研究を行うにあたり、ご指導、ご支援を頂いた国立極地研究所超高層部門およびHOYAコンテニウム株式会社の関係者の方々に深く感謝する。

参考文献

- 1) G. Fiocco and L. D. Smullin: *Nature* **199** (1963) 1275.
- 2) M. R. Bowman, A. J. Gibson, and M. C. W. Stanford: *Nature* **221** (1969) 456.
- 3) G. Megie, F. Bos, J. E. Blamont, and M. L. Chanin: *Planet. Space Sci.* **26** (1978) 27.
- 4) P. P. Batista, B. R. Clemesha, D. M. Simonich, and V. W. J. H. Kirchhoff: *J. Geophys. Res.* **90** (1985) 3881.
- 5) K. H. Fricke and Von Zahn: *J. Atmos. Terr. Phys.* **47** (1985) 499.
- 6) R. E. Bills and C. S. Gardner: *J. Geophys. Res.* **98** (1993) 1011.
- 7) C. Y. She, H. Latifi, J. R. Yu, R. J. AlvarezII, R. E. Bills, and C. S. Gardner: *Geophys. Res. Lett.* **17** (1990) 929.
- 8) C. Y. She, J. R. Yu, H. Latifi, and R. E. Bills: *Appl. Opt.* **31** (1992) 2095.
- 9) C. Y. She, J. R. Yu, and H. Chen: *Geophys. Res. Lett.* **20** (1993) 567.
- 10) J. R. Yu and C. Y. She: *J. Geophys. Res.* **100** (1995) 7441.
- 11) B. R. Clemesha, I. Veselovskii, P. Batista, M. P. P. M. Jorge, and D. M. Simonich: *Geophys. Res. Lett.* **26** (1999) 1681.
- 12) F. -J. Lubken and U. Von Zahn: *Geophys. J. Geophys. Res.* **96** (1991) 20841.
- 13) A. Nomura, T. Kano, Y. Iwasaka, H. Fukunishi, T. Hirasawa, and S. Kawaguchi: *Geophys. Res. Lett.* **14** (1987) 700.
- 14) F. -J. Lubken, M. J. Jarvis, and G. O. L. Jones: *Geophys. Res. Lett.* **26** (1999) 3581.
- 15) C. S. Gardner, G. Papen, X. Z. Chu, and W. Pan: *Geophys. Res. Lett.* **28** (2001) 1199.
- 16) M. J. Taylor, M. B. Bishop, and V. Taylor: *Geophys. Res. Lett.* **22** (1995) 2833.
- 17) T. Nakamura, T. Tsuda, S. Fukao, A. H. Manson, C. E. Meek, R. A. Vincent, and I. M. Reid: *J. Geophys. Res.* **101** (1996) 7005.
- 18) T. Tsuda, T. Nakamura, A. Nomura, T. D. Kawahara, C. Nagasawa, M. Abo, S. Okano, M. Taguchi, and M. Ejiri: *Adv. Space Res.* **26** (2000) 907.
- 19) T. H. Jeys, A. A. Brailove, and A. Mooradian: *Appl. Opt.* **28** (1989) 2588.
- 20) P. H. Chu, A. Magana, and J. Davis: *Adv. Solid-State lasers* **20** (1994) 367.
- 21) R. E. Bills, C. S. Gardner, and C. Y. She: *Opt. Eng.* **30** (1991) 13.
- 22) A. Hauchecorne and M. -L. Chanin: *Geophys. Res. Lett.* **7** (1980) 565.
- 23) T. D. Kawahara, T. Kitahara, F. Kobayashi, Y. Saito, A. Nomura, M. Tsutsumi, C. -Y. She, and David. A. Krueger: to be published in *Geophys. Res. Lett.* **29** (2002) 1709.