

ライダーによる最近の地上観測技術

長澤 親生

地球大気環境観測では、空間的分布と時間的変動を観測することが重要であり、また観測対象を擾乱しないことが求められる。その意味でリモートセンシング技術は重要な観測手段となっている。一般に高い空間分解能を得るためには、能動的リモートセンシング技術が用いられ、これまで送信源として光、電波、音波やそれらの複合体が利用されてきた。この中で近年、送信源としてレーザーを用いるライダー (light detection and ranging: LIDAR) が、大気環境観測分野において、多くの成果を上げている。

ライダーは、レーザーが発明されて間もない1963年に、イタリアのFioccoとSmullin¹⁾によって、いち早く提案されて以来、今日まで多くの理論的研究や実用化がなされてきた。最近では、高出力半導体レーザーと情報処理技術の進展により、小型のミー散乱ライダーやイメージングライダーなど、ユーティリティを追求したライダーが実用化される一方、高スペクトル分解能ライダーやドップラーライダーなどの高機能ライダーの開発も行われ、地上からの観測だけではなく航空機や衛星などに搭載されるものも開発されてきているが、本稿では、主に地上からの観測に関する最近のライダー技術について概説する。なお、ライダー技術の詳細や観測成果については、これまで種々の文献に紹介されているのでそちらを参照されたい^{2,3)}。

1. 小型ライダー

小型で消費電力の小さいライダーは、維持管理が容易なため雲粒子、都市域エアロゾル、黄砂、対流圏エアロゾル、成層圏エアロゾルなどの継続観測、多点ネットワーク観測用ミー散乱ライダーおよび船舶搭載・飛翔体搭載ライ

ダーなど、広範囲に利用されている。この種のライダーには、主に小型で高効率なNd:YAGレーザーや半導体レーザーと、軽量なシュミットカセグレン型の受信鏡が多用されている。

1.1 小型Nd:YAGレーザーを用いたライダー

近年、Nd:YAGレーザーの小型化・高性能化に伴いエアロゾル・ダストや雲粒子を観測する目的で小型のミー散乱ライダーが実用化されている。この種のライダーには、小型フラッシュランプ励起QスイッチNd:YAGレーザーおよび半導体レーザー励起QスイッチNd:YAGまたはNd:YLFレーザーの第二高調波が利用されている。前者は、パルスエネルギーが20 mJ/pulse (532 nm) 程度で1~20 ppsの繰り返し性能をもち、比較的価格が安く、全重量50 kg程度と軽量コンパクトである。著者らが使用しているこの種のライダーシステムの概要と諸元を、それぞれ図1、表1に示す。信号検出はアナログ方式であり、雲構造や大気境界層のエアロゾル・対流圏エアロゾルおよび偏光解消度の昼夜連続観測が可能である。観測例として距離補正した受信信号強度の時間変化を図2に示す。一方、後者は送信レーザーのパルスエネルギーが10 μJ程度と小さいが、1~10 kppsの高繰り返しにより比較的高い平均出力を得る。この種のライダーには、マイクロパルスライダーなどと呼ばれ市販されているものもある。小さいエネルギーにもかかわらず、昼間観測を可能にするために受信視野角を50 μrad程度に狭め、また送信鏡を送受信兼用にして送信ビーム径を大きくすることにより、eye safety(目に対する安全性)の向上にも配慮されている。受信光検出器にはアバランシフォトダイオード(APD)を用い、全重量が50 kg程度と軽量コンパクトで維持管理や操作が容易である。装置の諸元を表1に示す。

東京都立大学大学院工学研究科電気工学専攻(〒192-0397 八王子市南大沢1-1)

E-mail: nagasawa@eei.metro-u.ac.jp

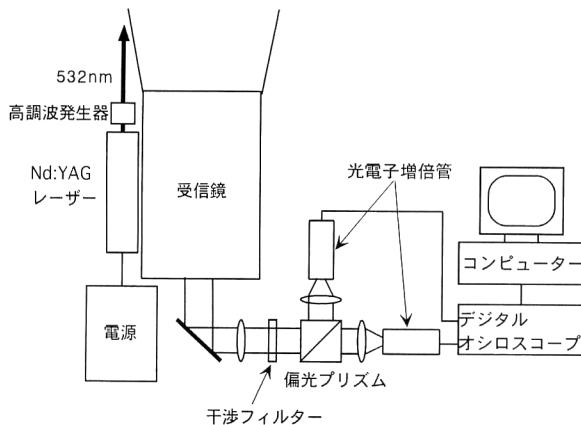


図1 小型フラッシュランプ励起 Nd:YAG レーザーを用いたミー散乱ライダーの構成図。同時に偏光解消度の観測も可能である。

表1 小型ミー散乱ライダーの諸元の比較。

	小型フラッシュ ランプ励起 Nd:YAG ライダー	マイクロパルス ライダー (SESI社)
送信		
レーザー	フラッシュランプ 励起 Nd: YAG	LD 励起 Nd: YLF
波長	532 nm	523 nm
出力	20 mJ/pulse	10 μ J/pulse
繰り返し	20 pps (Max.)	2500 pps
受信		
望遠鏡	200 mm ϕ シュミットカセグレン	200 mm ϕ シュミットカセグレン
視野角	1 mrad	50 μ rad
データ収集		
検出器	PMT(光電子増倍管)	APD(アバランシフォトダイオード)
検出方法	アナログ	フォトンカウント
距離分解能	15 m	30 m

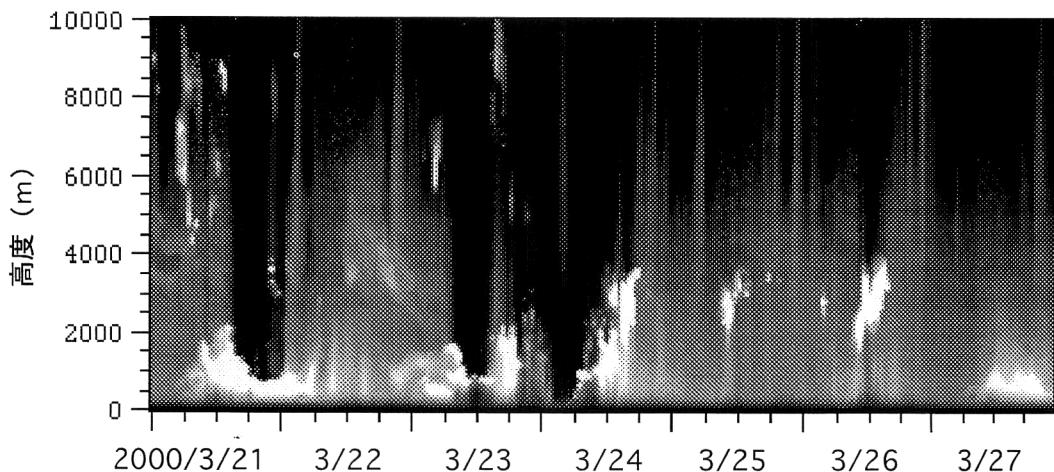


図2 小型ミー散乱ライダーによる雲構造やエアロゾルの昼夜連続観測例 (高度分解能: 15 m, 時間分解能: 10 分)。

1.2 半導体レーザーを用いたライダー

ライダーの小型化を図るために、半導体レーザーを直送信源として使用することは、きわめて魅力的な選択である。しかしながら、一般的な大気観測に求められるライダーの特性である 100 m 以内の距離分解能と良好な S/N の受信信号を得るために、10~100 ns 程度のパルス時間幅とできるだけ高出力のレーザーを必要とするため、現状ではパルス半導体レーザーを用いたライダーの構築は容易ではない。

半導体レーザーで、これを実現するためのひとつの方法として、連続発振の半導体レーザーをパルスまたは周波数変調することにより、距離分解能を得る方法が考えられる⁴⁾。図3は、著者らが試作した波長 820 nm 付近の水蒸気吸収線を利用した擬似ランダムパルス変調半導体レーザーによる水蒸気測定用の差分吸収ライダー (differential

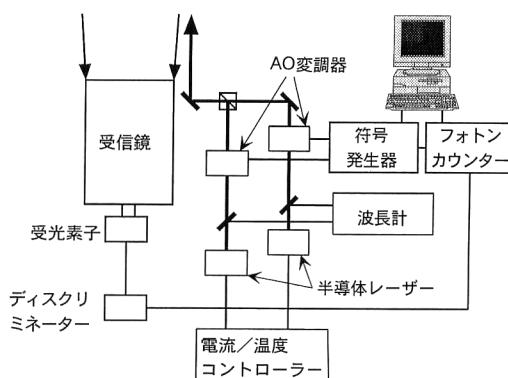


図3 同時2波長送受信方式の擬似ランダム変調半導体レーザーを用いた水蒸気 DIAL の構成図。

absorption lidar: DIAL) の構成図である⁵⁾。相互相関のない2種類の擬似ランダム変調符号を用いることによって、同時2波長の水蒸気 DIAL を実現している。得られ

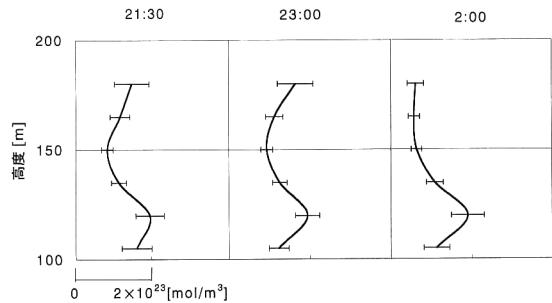


図4 擬似ランダム変調半導体レーザーを用いた水蒸気DIALによる水蒸気分布の観測例。

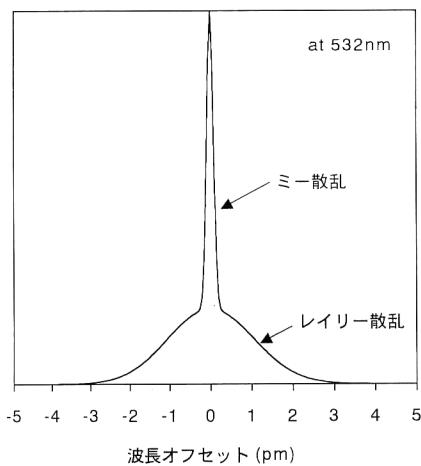


図5 送信光として狭帯域レーザーを用いた場合の、ミー散乱が卓越する大気からの受信光スペクトル（計算値）。

た水蒸気分布の観測例を図4に示す。このように、半導体レーザーによるライダーは、ミー散乱ライダーだけではなく、波長同調の必要なDIALにも適している。今後、より高出力で単一モードのCW半導体レーザーが実用化されると、この種のライダーの応用は大きく広がることが予想される。

2. イメージングライダー

ライダーにおいても送受信の光路を可動鏡などで掃引することにより観測対象の3次元画像を得ることができる。この種のライダーはスキャニングライダーあるいはイメージングライダー (volume imaging lidar: VIL) と呼ばれ、大気環境観測の上でも大変魅力的なライダーである。これによって、たとえば雲の時間的な移動を観測することにより、その領域の風速の推定も可能である⁶⁾。また、高感度CCDカメラを用いてレーザー光の散乱飛跡を捕らえることによる画像解析も行われている⁷⁾。

3. 高スペクトル分解能ライダー

ミー散乱が卓越する下層大気中において、ミー散乱とレ

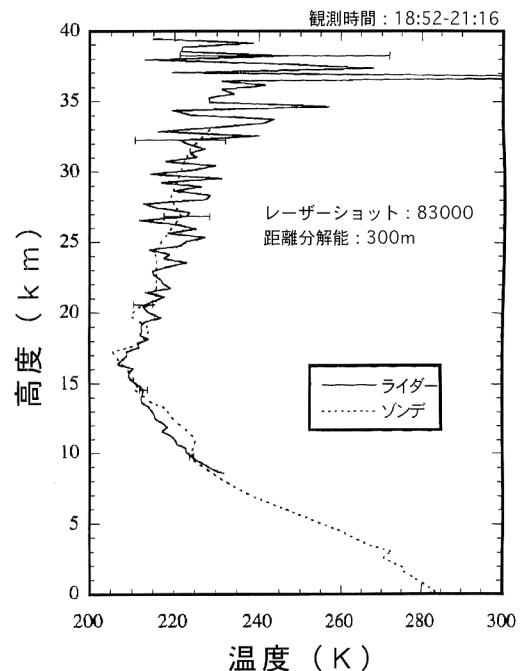


図6 高スペクトル分解能ライダー(HSRL)による気温分布観測例⁹⁾。

イリー散乱を分離した観測が可能であれば、散乱係数や気温の導出が容易となる。ミー散乱のスペクトル幅より狭いスペクトルをもつレーザーを、ミー散乱が卓越する大気中に放出すると、受信スペクトルは図5のような形状となる。スペクトル中央のミー散乱部分と、ウイング部分を分離して検出するものは、高スペクトル分解能ライダー (high spectral resolution lidar: HSRL) と呼ばれている。従来、エタロンやバリウム蒸気フィルターを用いて分離することが試みられてきたが、最近より容易な方法として、Nd:YAGレーザーの第二高調波(532 nm)付近に存在するヨウ素の吸収線を用いて分離する技術が開発されている^{8,9)}。これによりミー散乱の寄与が無視できない領域においても、大気分子密度やレイリー散乱とミー散乱の散乱比が観測可能となり、その結果、大気温度分布や散乱係数が求まることになる。図6は、国立環境研究所において、この方法により観測された気温分布の観測例である。

4. 気温測定ライダー

従来、成層圏から中間圏の高度においては、エアロゾルの寄与が無視できることから、レーザーや受信鏡の大型化によって、大気分子からのレイリー散乱を精度よく観測することにより大気密度の観測を行い、それから気温分布の導出が行われてきた¹⁰⁾。これが、いわゆるレイリーライダーである。しかしながら、下層大気中においては、エアロゾルの寄与を完全に無視することが困難であることから、

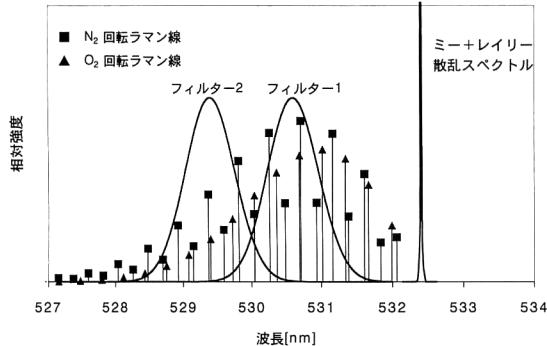


図7 ミー散乱・レイリー散乱スペクトルと大気構成分子(N_2 , O_2)の回転ラマン散乱スペクトルおよび2枚のバンドパスフィルターの透過関数の位置関係。

他のライダー手法の提案がなされている。一つは振動ラマンライダーである¹¹⁾。窒素分子の振動ラマン散乱を利用した窒素分子密度の観測から、レイリーライダーや HSRL と同じく、大気の静水圧平衡を仮定することにより気温の導出が可能であるが、この方法もエアロゾルによる減衰の効果が大きくなると、気温測定の精度向上が望めない。そのため、最近では、エアロゾルの影響や静水圧平衡の仮定をおくことなく、気温分布を導出する方法として回転ラマン散乱を利用した気温測定ライダーが成果を上げている^{12,13)}。この方式は、図7のように窒素および酸素分子による anti-Stokes 回転ラマン線群中に、2枚のバンドパスフィルターをおくことにより、回転ラマン散乱線の温度依存性を利用して、フィルターの透過光強度比から気温分布を導出するものである。

5. ドップラーライダー

5.1 コヒーレントドップラーライダー

大気中の風速分布の観測は、大気環境観測において重要な課題である。大気あるいは大気とともに移動する散乱体の移動に起因するドップラーシフト成分を検出することによって、風速の観測が可能である。検出方式において、電波ドップラーレーダーと同様にコヒーレント検波（あるいはヘテロダイイン検波）を行う方式が、コヒーレントドップラーライダー (coherent Doppler lidar) である。従来、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 帯の炭酸ガスレーザーを用いたコヒーレントドップラーライダーが開発されてきたが¹⁴⁾、最近では Nd: YAG レーザーを用いた $1.06\text{ }\mu\text{m}$ のコヒーレントドップラーライダーが実用化されており¹⁵⁾、衛星搭載を目指す半導体レーザー励起固体レーザーの Tm, Ho: YAG (YLF) レーザーなどを用いた小型で eye safe な $2\text{ }\mu\text{m}$ 帯赤外線レーザーを用いたコヒーレントドップラーライダーも開発されている^{16,17)}。コヒーレントドップラーライダーは、視

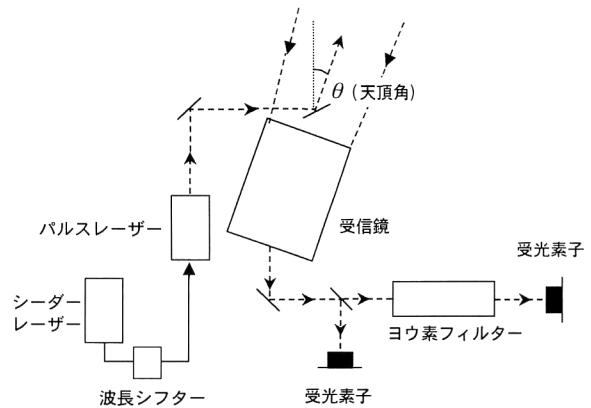


図8 ヨウ素フィルターを用いたインコヒーレントドップラーライダーの構成図。

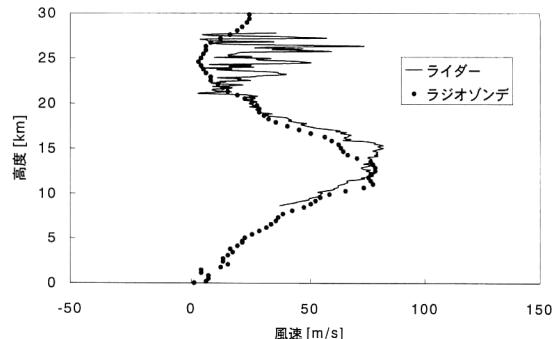


図9 ヨウ素フィルターを用いたインコヒーレントドップラーライダーによる観測例。東西方向と南北方向の風速成分を同時に観測したが、図では風速強度のみを示している。

線方向の風による周波数シフトを測定するものであり、たとえば 1 m/s の風速精度を得るために、波長 $1\text{ }\mu\text{m}$ において 0.5 MHz の精度で周波数シフトを検出する必要がある。したがって、レーザーのパルス長は、 200 ns 程度必要である。一般には、このためにインジェクションシーディング長共振器長リングレーザーが設計される。散乱スペクトルが狭いミー散乱領域において精度向上が望めるため、主に下層大気の観測に用いられている。

5.2 インコヒーレントドップラーライダー

スペクトルの狭いレーザー光を送信源とし、透過強度に強い波長依存性をもつ光学素子を、受信装置に附加することにより、透過強度の変化から波長シフトの測定が可能である。この種のドップラーライダーはインコヒーレントドップラーライダー (incoherent Doppler lidar) あるいは直接検出ドップラーライダー (direct detection Doppler lidar) と呼ばれている。波長依存性をもつ光学素子にエタロンや干渉フィルターを用いて、対流圏から成層圏までの気温測定に成功している¹⁸⁻²²⁾。最近では、波長依存性をもつ光学素子としてヨウ素などの蒸気フィルターを用い

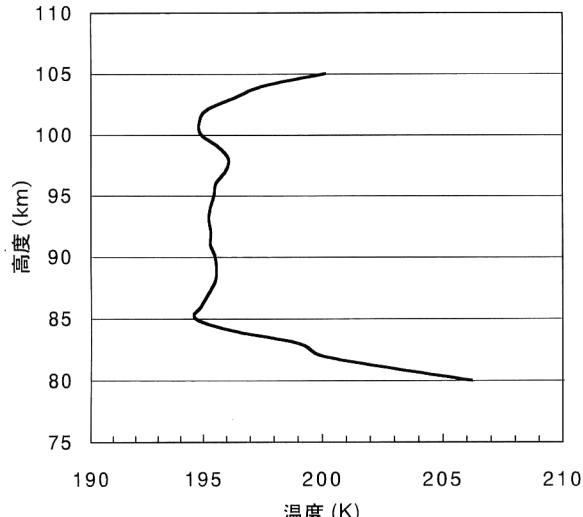


図 10 共鳴散乱ライダーによる中間圈 Na 温度分布の観測例。

る例もある^{23,24)}。著者らが開発したヨウ素フィルターと 2 波長レーザーを用いたインコヒーレントドップラーライダーの構成図と観測例を図 8 と図 9 に示す。

6. 大気微量成分の観測

NO₂, 水蒸気, オゾンなどの特定の大気微量成分の濃度の観測は, DIAL, ラマンライダー, 共鳴散乱ライダーなどを用いて行われる。測定精度の向上, 昼間観測, 微量成分と風速などの同時観測などに技術的進展がみられる。DIAL は分子の吸収線とその近傍で吸収が無視できる波長のレーザーを大気中に放出し, 得られた受信光強度の差分から分子濃度を導出する。最近では, 多波長のレーザーにより精度向上が図られている²⁵⁾。一方, ラマンライダーは, 分子特有の振動ラマン散乱を検出することにより, 特定の微量成分濃度の観測が可能である。最近では, ラマンライダーにより昼夜の対流圏水蒸気の観測も行われている²⁶⁾。DIAL とラマン散乱ライダーを混合したラマン DIAL の研究も行われている²⁷⁾。共鳴散乱ライダーによる中間圈金属原子層の観測技術の進歩により, 中間圈界面の気温や風の測定も可能となった²⁸⁾。さらに金属原子ファラデーフィルターの利用による中間圈 Na 原子層の昼間観測も実現している²⁹⁾。図 10 に著者らが観測している中間圏の温度観測例を示す。最近では, 中間圏 OH 分子の観測も報告されている³⁰⁾。

文 献

- 1) G. Fiocco and L. D. Smullin: "Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60–140 km) by optical radar," *Nature*, **199** (1963) 1275–1276.
- 2) 杉本伸夫, 竹内延夫: "レーザーレーダーによる大気計測", *応用物理*, **63** (1994) 444–454.
- 3) 田中豊顯, 小林隆久, 水野 量 編集: "気象測器—高層気象観測篇", *気象研究ノート*, 第 194 号 (1999) 113–168.
- 4) N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba and K. Sakurai: "Random modulation cw lidar," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 1382–1386.
- 5) C. Nagasawa, M. Abo, H. Yamamoto and O. Uchino: "Random modulation cw lidar using new random sequence," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 1466–1470.
- 6) A. K. Piironen and E. W. Eloranta: "An accuracy analysis of the wind profiles calculated from Volume Imaging Lidar data," *J. Geophys. Res.*, **100** (1995) 25559–25567.
- 7) 林 錦明, 三島英嗣, 久保田康裕, 小林史利, 川原琢也, 斎藤保典, 野村彰夫, 山口堅治, 森川公夫: "バイオスタティックイメージングライダーによる低層大気の観測", *レーザー研究*, **27** (1999) 827–834.
- 8) A. K. Piironen and E. W. Eloranta: "Demonstration of a high-spectral-resolution lidar based on an iodine absorption filter," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 234–236.
- 9) Z. Liu, I. Matsui and N. Sugimoto: "High-spectral-resolution lidar using an iodine absorption filter for atmospheric measurements," *Opt. Eng.*, **38** (1999) 1661–1670.
- 10) A. Hauchecorne, M.-L. Chanin and P. Keckhut: "Climatology and trends of the middle atmospheric temperature (33–87 KM) as seen by Rayleigh lidar over the south of France," *J. Geophys. Res.*, **96** (1991) 15297–15309.
- 11) P. Keckhut, M.-L. Chanin and A. Hauchecorne: "Stratosphere temperature measurement using Raman lidar," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 5182–5186.
- 12) D. Nedeljkovic, A. Hauchecorne and M.-L. Chanin: "Rotational Raman lidar to measure the atmospheric temperature from the ground to 30 km," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **31** (1993) 90–101.
- 13) A. Behrendt and J. Reichardt: "Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman lidar by use of an interference-filter-based polychromator," *Appl. Opt.*, **39** (2000) 1372–1378.
- 14) M. J. Post, R. A. Richter, R. M. Hardisty, T. R. Lawrence and F. F. Hall, Jr.: "NOAA's pulsed, coherent, infrared Doppler lidar: Characteristics and data," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instr. Eng.*, **300** (1981) pp. 60–65.
- 15) M. J. Kavaya, S. W. Henderson, J. R. Magee, C. P. Hale and R. M. Huffaker: "Remote wind profiling with a solid-state Nd-YAG coherent lidar system," *Opt. Lett.*, **14** (1989) 776–778.
- 16) 浅井和弘: "アイセイフ固体レーザー", *応用物理*, **63** (1994) 478–482.
- 17) U. N. Singh, J. Yu, M. Petros, N. P. Barnes and M. W. Phillips: "2-Micron diode-pumped laser transmitter for SPARCLE: A coherent wind lidar shuttle mission," *Abstr. 19th International Laser Radar Conference*, Annapolis, MD (1998) pp. 603–607.
- 18) C. A. Tepley: "Neutral winds of the middle atmosphere observed at Arecibo using a Doppler Rayleigh lidar," *J. Geophys. Res.*, **99** (1994) 25781–25790.
- 19) B. M. Gentry and C. L. Korb: "Edge technique for high-accuracy Doppler velocimetry," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 5770–5777.
- 20) K. W. Fischer, V. J. Abreu, W. R. Skinner, J. E. Barnes, M.

- J. McGill and T. D. Irgang: "Visible wavelength Doppler lidar for measurement of wind and aerosol profiles during day and night," *Opt. Eng.*, **34** (1995) 499-511.
- 21) C. Souprayen, A. Garnier, A. Hertzog, A. Hauchecorne and J. Porteneuve: "Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. 1. Instrumental setup, validation, and first climatological results," *Appl. Opt.*, **38** (1999) 2410-2421.
- 22) T. Kobayashi, D. Sun and A. Hironaka: "Development of UV aerosol and molecular scattering lidar for wind and temperature measurement," *Abstr. 20th Japanese Laser Sensing Symposium* (1999) pp. 165-168.
- 23) J. S. Freidman, C. A. Tepley, P. A. Catleberg and H. Roe: "Middle-atmospheric Doppler lidar using an iodine-vapor edge filter," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1648-1650.
- 24) Y. Shibata, C. Nagasawa, M. Abo, T. Nagai and O. Uchino: "Incoherent Doppler lidar controlling actively the laser wavelength," *Abstr. 20th Japanese Laser Sensing Symposium* (1999) pp. 169-172.
- 25) T. Fujii, T. Fukuchi, N. Goto, K. Nemoto and N. Takeuchi: "Dual-DIAL measurements of vertical concentration profiles of ppb-order atmospheric SO₂," *Abstr. 20th Japanese Laser Sensing Symposium* (1999) pp. 181-184.
- 26) S. E. Bisson, J. E. M. Goldsmith and M. G. Mitchell: "Narrow-band, narrow-field-of-view Raman lidar with combined day and night capability for tropospheric water-vapor profile measurements," *Appl. Opt.*, **38** (1999) 1841-1849.
- 27) V. Matthias and J. Bosenberg: "Daytime measurements of aerosol particle extinction and ozone profiles with a combined elastic DIAL/Raman DIAL," *Abstr. 19th International Laser Radar Conference*, Annapolis, MD (1998) pp. 277-280.
- 28) C. Y. She and J. R. Yu: "Simultaneous three-frequency Na lidar measurements of radial wind and temperature in the mesopause region," *Geophys. Res. Lett.*, **21** (1994) 1771-1774.
- 29) H. Chen, M. A. White, D. A. Krueger and C. Y. She: "Daytime mesopause temperature measurements using a sodium-vapor dispersive Faraday filter in lidar receiver," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 1093-1095.
- 30) E. Y. Brinksma, Y. J. Meijier, I. S. McDermid, R. P. Cageao, J. B. Bergwerff, D. P. J. Swart, W. A. Matthews, W. Hogervorst and J. W. Hovenier: "First lidar observation of mesospheric hydroxyl," *Geophys. Res. Lett.*, **25** (1998) 51-54.

(2000年6月8日受理)