

南極におけるライダー観測の計画

藤原玄夫*・北村泰一*

A Plan for Lidar Observation in the Antarctic

Motowo FUJIWARA* and Tai-Ichi KITAMURA*

Abstract: Lidar observations of the middle atmosphere in the Antarctic are proposed. Vertical profiles and their time variabilities of air molecules and minor constituents of the atmosphere, such as aerosols and ozone in the stratosphere and alkali metal atoms and aerosols in the mesosphere and the lower thermosphere, will be measured accurately by using a lidar system, the transmitter of which consists of a YAG laser and a dye laser pumped by the YAG laser.

The lidar observations in the Antarctic are very significant in knowing the global structure of atmospheric constituents and dynamics in the middle atmosphere. Moreover, they will provide important information about the response of the middle atmosphere to the electromagnetic disturbance such as aurora in the polar region ionosphere.

要旨: ライダーによる南極の中層大気圏の探査を提案する。これは YAG レーザーおよび YAG レーザー励起色素レーザーをライダー送信系に用いて、成層圏のエアロゾル、オゾンや中間圏、下部熱圏のアルカリ金属原子、エアロゾル等の微量成分と、大気分子個数密度の高度分布およびその時間的変動を精密に測定しようとするものである。南極のライダー観測は、中層大気圏の組成的、力学的構造のグローバルな理解のためにきわめて重要であり、また、オーロラなどの極域電離圏における電磁氣的じょう乱に対する中層大気の応答を調べる上できわめて有意義である。

1. 序 論

成層圏から下部熱圏に至る中層大気圏の特徴は、大気の運動、組成、放射という3つの要素が相互にからみ合う複雑性にあるとされるほどだから、この高度領域を地球物理学的にきちんと理解するためには、いまだ定量化されていないものをも含めて数多くの物理・化学量とその変動の過程を、汎世界的な規模で測定して行くという過程を通らなければならないだろう。しかしその中で特に極域の中層大気圏は、極間大循環とか、各種大気組成や日射量の緯度変化とか、上記3要素のどの一部を考えても、際立った特徴を持つ領域であることが予

* 九州大学理学部物理学教室. Department of Physics, Kyushu University, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812.

想されるから、この領域の綿密な調査は、中層大気圏のグローバルな理解のための鍵であるともいえる。

さらに極域での粒子降下や磁気圏電場の浸透によるジュール加熱が、熱圏全体のエネルギー収支にまできわめて重要な役割を果たしていることを考えると、極域中層大気圏の上部では当然、このような電磁氣的じょう乱に対する中性大気の力学的応答や組成の面での応答など、現象的に興味深い問題がいくつも提出されるであろう。

そこで我々は、この極域中層大気圏の探査のために、南極でのライダー観測を提案する。ライダーは、強力なレーザー光パルスを打ち上げて、大気中の散乱物質からの後方散乱光を、高度の関数として測定する遠隔探査システムで、中層大気圏を定常的に観測し得るきわめて数少ない手段の1つである。最近のレーザー技術の進歩によって、この高度領域の大気分子や数種の大気微量成分の分布が、非常に良い時間・高度分解能で測定できるようになった。現在のところは、ドップラースhiftを測定して大気の運動を直接捕えようとする試みは、対流圏内に限定されているが、大気中の各成分は、その寿命時間内では大気運動のトレーサーと考えられるから、その高精度の測定からは運動に関する情報をも得ることができる。

南極でのライダーによる中層大気圏観測に関してはこの計画が初めてなので、南極観測用ライダーシステムの構想を述べる前に、ライダーによる中層大気圏観測の現況を簡単に概観しておきたい。

2. ライダーによる中層大気圏観測の現況

ライダーによる中層大気圏の観測は、原理的には非常に多くの可能性を有するが、現在までに相当の高精度で測定が可能になったものは、次の4種の物質である。それぞれについて観測の現況を述べる。

2.1. 中間圏、下部熱圏の大気分子

Rayley 散乱を利用して、大気分子の個数密度高度相対値とその時間的変化を測定することができる。散乱体個数は多いが断面積が小さいために、相当の大出力レーザーと大受信鏡を必要とする。KENT *et al.* (1972), KENT and KEENLISIDE (1975) は、パルスあたり 7 J のルビーレーザー (0.6943 μm) を約 0.1 pps で発射し、15 m^2 の受信鏡を用いて高度 60–100 km の大気潮汐波を検出した (図 1)。このライダーでは観測時間 2 時間で、高度分解能 2 km、最高高度での測定誤差数%以内で1つの大気分子個数密度高度プロファイルが得られる。他にこのような大受信鏡を持つところがなく、またルビーレーザーではこれ以上の出力を実現

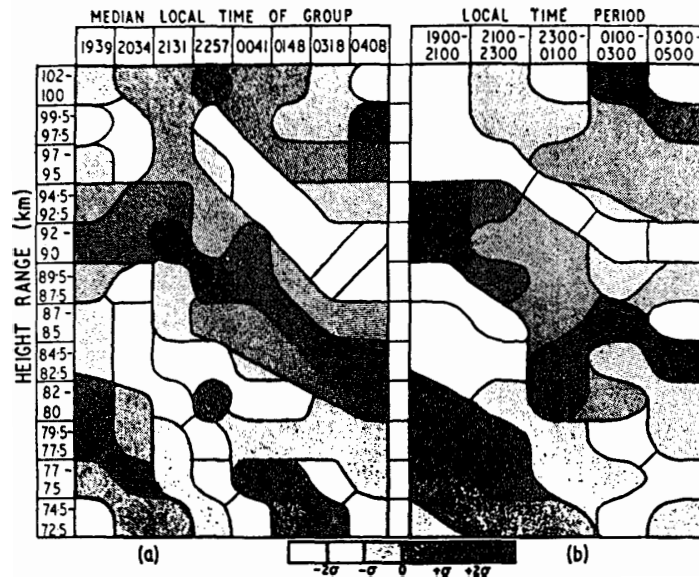


図1 ライダーによる大気潮汐波の観測例. 大気密度平均値からの偏差 (σ) の contour. KENT *et al.* (1972) より

Fig. 1. Atmospheric tides observed by lidar. Contours show the fluctuation of atmospheric density in unit of the standard error σ . After KENT *et al.* (1972).

するのが難しいので、この種の観測は他にはない。観測高度領域の下限は、大気潮汐波に伴う密度変動をほとんど無視し得るこの高度を基準高度に選んだということ、それより下のプロファイルを描くことができないということではむろんない。

2.2. 成層圏下部および夜光雲高度のエアロゾル

直径が光の波長と比較し得る程度の小粒子からの Mie 散乱を利用して、これまでは主としてルビーレーザーを用いて観測されてきた。成層圏下部エアロゾルについては、現在世界の数カ所で定常的な観測が行われている。1963年 Agung 火山, 1974年 Fuego 火山の噴火後数年間は多量に存在していたが (GRAMS and FIOCCO, 1967; FUJIWARA *et al.*, 1975), 最近は非常に少なく, エアロゾルからのエコーは大気分子からのその 1/10 以下である。火山静穏期のエアロゾルの定量的な生成論の研究が端緒についたばかりなので, それに必要な精度の良いデータを得るため, 各所で測定精度の向上のための努力が行われている。粒径分布に関する情報を得るために, YAG レーザー (基本波長 $1.06 \mu\text{m}$) や色素レーザー ($0.59 \mu\text{m}$ 付近) が補助的に用いられた例もあるが, 多波長による系統的, 汎世界的な観測はこれからの問題である (IWASAKA and ISONO, 1977; RUSSEL *et al.*, 1973)。高緯度では夜光雲高度のエアロゾルも確認されたが (FIOCCO and GRAMS, 1966), 恒常的な観測は現在行われていない。

2.3. 下部熱圏アルカリ金属原子

非常に大きい散乱断面積を持つ Na, K, Li などの原子の共鳴散乱を利用して、波長可変の色素レーザーを用いて観測される。特に Na は個数も多く、その共鳴波長 ($0.5890 \mu\text{m}$) 付近でレーザー出力も大きいので (色素は Rhodamine 6G), 夜間だけでなく昼間の観測にも成功している (GIBSON and SANDFORD, 1972). 夜間は非常に精度良く測定できるので, Na をトレーサーとして, 周期数分, 鉛直波長数 km 以上の大気波動の検出も行われている (THOMAS *et al.*, 1976; ROWLETT *et al.*, 1978) (図 2). Na は冬季に増加するが, 特に高緯度ではその傾向が顕著で, しかも増加の仕方が急激であることが知られている (GIBSON and SANDFORD, 1971). MEGIE *et al.* (1978) は Na と同時に, K をルビーレーザー励起色素レーザー (DOTC, $0.7699 \mu\text{m}$) を用いて観測したが, その結果は, 冬季の Na 増加分が海水起源であることを示唆している (図 3). このグループは最近, 流星雨時に Li も検出することに成功している (CHANIN, 1978; private communication). Na の観測は, 現在北半球では緯度

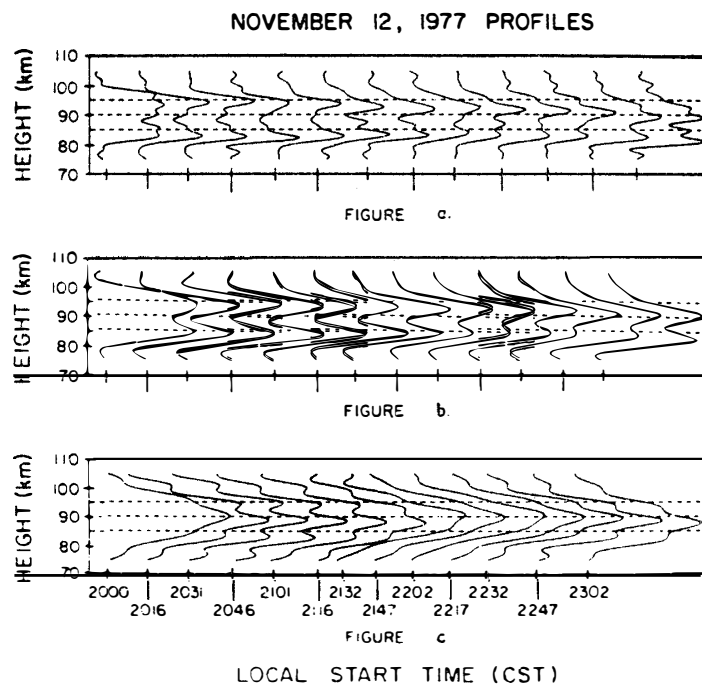


図 2 ライダーによる短周期大気波動の観測例。ナトリウム層の約15分毎のプロファイルに (a) low pass ($< 3.5 \text{ km}^{-1}$), (b) low pass ($< 7.3 \text{ km}^{-1}$), (c) band pass ($0-15.4 \text{ km}^{-1}$, $7.3-5.5 \text{ km}^{-1}$) のフィルターで処理したもの。ROWLETT *et al.* (1978) より。

Fig. 2. Atmospheric waves of short period observed by lidar. Profiles of sodium obtained in successive time intervals of about 15 minutes, using (a) low pass ($< 3.5 \text{ km}^{-1}$), (b) low pass ($< 7.3 \text{ km}^{-1}$) and (c) band pass ($0-15.4 \text{ km}^{-1}$, $7.3-5.5 \text{ km}^{-1}$) filters. After ROWLETT *et al.* (1978).

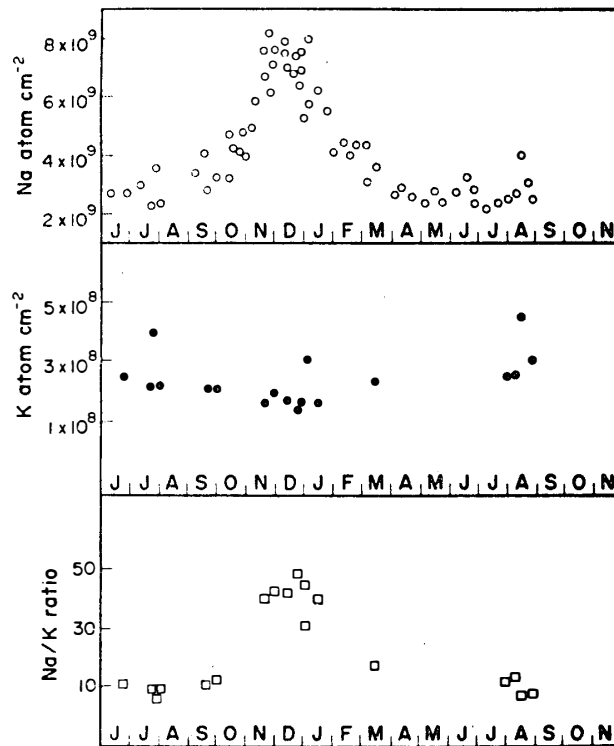


図 3 ライダーによるナトリウム層およびカリウム層の観測例。Na と K のコラム密度および両者の比の季節変動。MEGIE *et al.* (1978) より。

Fig. 3. Atmospheric sodium and potassium observed by lidar. Seasonal variation of column densities of sodium and potassium and of their ratio. After MEGIE *et al.* (1978).

30°–80° の間の数カ所で開始されているが、南半球では 23°S のただ 1 カ所である。

2.4. 成層圏下部オゾン

ハートレー帯の吸収を利用して、GIBSON and THOMAS (1975), MEGIE *et al.* (1977) は色素レーザー (Rohdamine 6G, 第 2 高調波, 0.3 μm 付近) を用いて、また UCHINO *et al.* (1978) は、エキシマーレーザー (XeCl, 0.308 μm) を用いて、高度 20–30 km までのオゾン濃度を測定することに成功した。現在、観測高度領域の拡張と定常観測実施のための努力が行われている。

3. 南極観測用ライダーシステム

最近 YAG レーザーの進歩が目覚ましく、高出力でモードの良いレーザー光が得られるよ

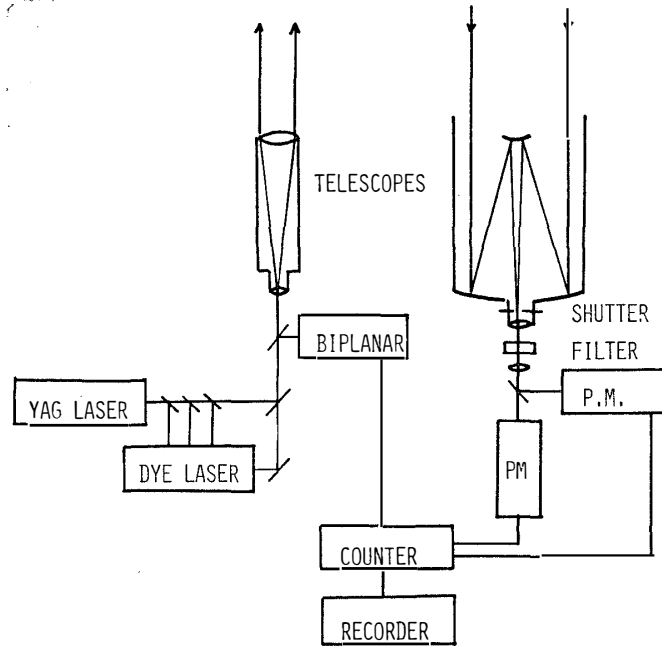


図 4 YAG-色素ライダーのブロック図
 Fig. 4. Block diagram of YAG-Dye lidar system proposed.

表 1 ライダーの諸元
 Table 1. Characteristics of laser radar

Transmitter	Lasers	YAG, Dye		
		Pulse repetition rate	10 /s	
		Pulse duration	15 ns	
		Band width	0.003 nm	
		Telescope refractive	10 cm	
		Beam width	0.3 mrad	
Receiver	Telescope cassegrain	1 m		
	Photomultipliers			
	Filters			
	Photon counter	2 chl 100 gate		30 MHz
	Lasers	Wavelength	Output	EFF. PM
	YAG-I	1064 nm	1500 mj	3%
	II	532	500	15
	III	355	150	22
	Dye-I RHGG	555-570	110	15
	I RHB	580-600	85	15
	I RH101	605-620	90	13
	Dye II RHB	290-300	17	25
	II RH101	303-310	18	25

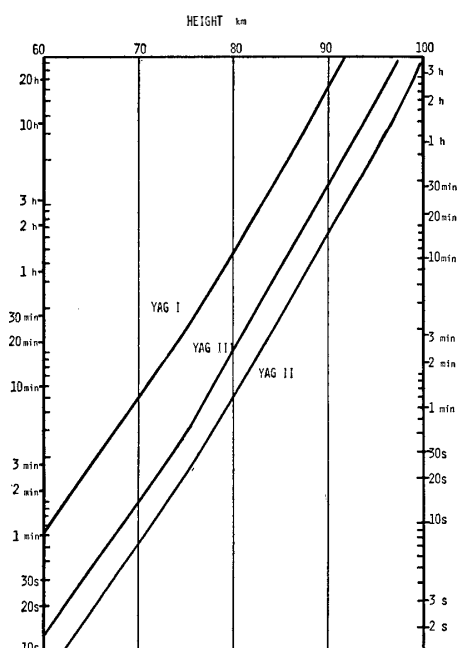


図5 大気分子個数密度を精度3% (左側の目盛り) および5% (右側) で測定するに要する時間

Fig. 5. Time required for the measurement of atmospheric density with relative errors 3% (left-hand ordinate) and 5% (right-hand ordinate).

うになったので、その第2, 第3高調波を用いて色素レーザーを効率よく励起することが可能になった。さらにこのレーザー励起色素レーザーは、ビーム発散角, パルス時間幅が小さく、その高調波を非常に良い効率で得ることができる。このYAGおよび色素レーザーを用いると、上述の各種大気成分をすべて測定できるような1つのライダーシステムを設計することができる。あとで述べるように南極では、多種の観測を並行して行うことが望ましいので、これを採用することにする。計画されるライダーのブロック図を図4に、その諸元を表1に掲げる。YAGレーザー励起の色素レーザーは、出力の点では従来のフラッシュランプ励起のもの比べて若干見劣りはするが、装置がコンパクトでしかも観測時における操作、保守が容易であるというメリットがある。

このライダーを用いると何が、どの程度まで測定できるかを、ライダー方程式を用いて検討した結果が、図5と表2に示してある。図5は大気分子に関するもので、たとえばYAGの第2高調波を用いると、高度90 kmまでの大気分子個数密度プロファイル (高度相対値) を、誤差3%以内ならば1時間半で、5%以内ならば十数分で得ることができる。この波長は、オゾンの吸収やエアロゾルの散乱の影響を受けることが少ないので、中層大気圏のほぼ全域にわたって測定をすることができるが、成層圏下部に対しては、さらにエアロゾルの影響が少ない第3高調波を用いるのが望ましい。なおこの計算には背景雑音光を考慮に入れていないので、実際には特に高度が100 kmに近くなると、図示されている時間より数倍長い観測時間を要することになる。

表 2 各高度の微量成分を測定するに要する時間
 Table 2. Time required for the measurement of minor constituents.

	Height	Time		Error (%)
Aerosols HR=1 km	20 km	30 s (YAG-I)		3
		30 m (YAG-II)		3
Alkali metals HR=1 km	80 km	Na	Li	3
		40 s	10 m	
		10 s	3 m	
	100 km	2 m	30 m	3
Ozone HR=2 km	10 km	10 s		20
	15 km	10 s		12
	20 km	10 s		10
	25 km	3 m		10
	30 km	40 m		10

HR: 距離分解能

他の各種組成については表 2 にまとめてある。エアロゾルの高度分解能 1 km での観測にはピーク付近で、YAG レーザー基本波ではわずか 30 秒を要するだけである。粒径分布の調査のために多波長を用いたいときには、時間はかかるが YAG 第 2 高調波や色素レーザーを用いることができる。ナトリウムやリチウムは色素レーザーで、オゾンは色素レーザー高調波を用いて測定をする。カリウムの共鳴波長を YAG レーザー励起で得ることは残念ながら困難である。

まだ若干の技術的検討は残されているが、上述のようにこのシステムは、これまでライダー観測の対象となった中層大気圏の成分をほとんどすべて、観測時間や精度の点でもそんなく測定でき、しかもシステムとしてはかなり単純なので、簡便な取り扱いで観測を行うことができよう。

4. 南極におけるライダー観測の重要性と期待される成果

始めに述べたように、ライダーによる南極の中層大気圏観測の意義は次の 2 点にあると考える。第 1 点は中層大気圏のグローバルな姿を理解するために観測されるべき重要な地点であること、第 2 点は磁気圏に対して開かれているから、電磁氣的じょう乱に対する中性大気の応答という点で興味深い地点であることである。第 1 の点に付け加えれば、この高度領域の様々な現象をひきおこすエネルギーの相当部分は、力学的機構によって下方からもたらさ

れるものであるから、地表の海陸分布に起因する南北両半球の非対称性の効果をも調査することも重要である。この様な観点で計画される南極のライダー観測を、現象的には次のように2つの側面に大別して、その重要性や期待される成果について簡単に述べておく。

4.1. 中層大気圏上部と下部の微量成分の高度分布とその時間的変動

それぞれの微量成分は、そのふるまいをきちんと測定してその生成機構や変動の要因などを調べる、という独自の問題があることはいうまでもない。特にエアロゾル層の汎世界的なふるまいや、生成維持の機構については未知の部分がきわめて多く、また Na 層の起源についてもいまだ確定されていないから、南半球の高緯度でしかも長期にわたって観測を行うということ自体が非常に大きな意義を持つであろう。しかし我々は、特に中層大気圏の上部と下部の微量成分を並行して精密に測定することにより、冬季に高緯度で卓越すると考えられる、下方から上方への物質輸送に関する情報をも得たいと考えている。これは大気大循環や渦動拡散等と密接な関連を持つから、この観測は次に述べる大気波動現象の観測と共に、中層大気圏の力学的構造の解明のための一助ともなり得るであろう。

4.2. 大気波動現象

Na 原子をトレーサーとして、高度範囲は限定されるが (75-95 km)、周期数分以上、鉛直波長数 km 以上の大気波動が検出される。より広い高度範囲では、大気分子の観測 (95 km 以下) によって捕えられるが、これは中間圏以上の高度領域では周期が数時間以上のものに限定される。Na 個数密度は大気中の O, O₃ の量に大きく影響されるので、大気の組成変化を伴うような長周期の変動に対しては、良いトレーサーではないが、このことは逆に、大気分子の観測結果などと比較すれば、組成変動に対する情報をも与えることになる。南極で特に興味深いのは、磁気嵐時の大気密度変動、ことに粒子降下に伴って励起される大気重力波である。オーロラ観測や、HF ドップラーによる観測結果などとの比較が重要になってくるが、これによって通常は太陽エネルギーのうちでは電磁波放射に支配されている中層大気圏に、粒子放射がどこまで影響し得るかを明らかにすることができよう。

5. 結 語

以上簡単に南極におけるライダー観測の計画について述べたが、中層大気圏を定常的に観測する手だては乏しく、しかもその数少ない手段の1つであるライダー観測は、観測地点が北半球に偏っており、南半球高緯度には皆無である。我々は MAP の一環としての南極中

層大気圏観測のために、さらに徹底した技術的検討を続行している。

文 献

- FIOTTO, G. and GRAMS, G. (1966): Observations of the upper atmosphere by optical radar in Alaska and Sweden during the summer 1964. *Tellus*, **18**, 34–38.
- FUJIWARA, M., ITABE, T. and HIRONO, M. (1975): Sudden increase of stratospheric aerosol content after the eruption of Fuego volcano; lidar observations in Fukuoka. *Rep. Ionos. Space Res. Jpn.*, **29**, 74–78.
- GIBSON, A. J. and SANDFORD, M. C. W. (1971): The seasonal variation of the night-time sodium layer. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, 1675–1684.
- GIBSON, A. J. and SANDFORD, M. C. W. (1972): Daytime laser radar measurements of the atmospheric sodium layer. *Nature*, **239**, 509–511.
- GIBSON, A. J. and THOMAS, L. (1975): Ultraviolet laser sounding of the troposphere and lower stratosphere. *Nature*, **256**, 561–563.
- GRAMS, G. and FIOTTO, G. (1967): Stratospheric aerosol layer during 1964 and 1965. *J. Geophys. Res.*, **72**, 3523–3542.
- IWASAKA, Y. and ISONO, K. (1977): Lidar observation of the stratospheric aerosols at two different wavelength, 0.6943 m and 1.06 m. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**, 117–120.
- KENT, G. S. and KEENLISIDE, W. (1975). Laser radar observations of the $\theta_3^{\omega,1}$ diurnal atmospheric tidal mode above Kingston, Jamaica. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 1663–1666.
- KENT, G. S., KEENLISIDE, W., SANDFORD, M. C. W. and WRIGHT, R. W. H. (1972): Laser radar observations of atmospheric tides in the 70–100 km height region. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **34**, 373–386.
- MEGIE, G., ALLAIN, J. Y., CHANIN, M. L. and BLAMONT, J. E. (1977): Vertical profile of stratospheric ozone by lidar sounding from the ground. *Nature*, **270**, 329–331.
- MEGIE, G., BOS, F., BLAMONT, J. E. and CHANIN, M. L. (1978): Simultaneous nighttime lidar measurements of atmospheric sodium and potassium. *Planet. Space Sci.*, **26**, 27–35.
- ROWLETT, J. R., GARDNER, C. S., RICHTER, E. S. and SECHRIST, C. F., Jr. (1978): Lidar observations of wave-like structure in the atmospheric sodium layer. *Geophys. Res. Lett.* **5**, 683–686.
- RUSSEL, P. B., VIEZEE, W. and HAKE, R. D. (1973): Lidar measurements of the variability of stratospheric particulates. First Semiannual Report 2217, Contract NAS2-7261, Stanford Research Institute, Menlo Park, California.
- THOMAS, L., GIBSON, A. J. and BHATTACHARYYA, S. K. (1976): Spatial and temporal variations of the atmospheric sodium layer observed with a steerable laser radar. *Nature*, **263**, 115–116.
- UCHINO, O., MAEDA, M., KOHNO, J., SHIBATA, T., NAGASAWA, C. and HIRONO, M. (1978): Observation of stratospheric ozone layer by a XeCl laser radar. *Appl. Phys. Lett.*, **33**, 807–809.

(1979年5月31日受理)