

## 5. ライダーによる大気観測\*

内野 修\*\*

### 1. はじめに

ライダー (light detection and ranging, レーザーレーダーとも言う) は、レーザー光の短いパルスを、大気中に発射し、大気中の分子、エアロゾル、雲、地表面等からの散乱光を受信することにより、遠方にある物質の濃度、組成、速度、温度等の情報を距離分解をもって遠隔的に測定する装置で、高い距離分解能と連続観測が可能であることから、地球物理学、気象学、環境等の計測手段として広く使用されている (これらの解説はレーザー研究17巻4号のレーザーレーダー特集号に詳しいので参照されたい)。多くは地上設置のライダーであるが、航空機搭載ライダーの場合広域の立体観測が可能である。さらに衛星搭載の場合グローバルな観測が可能であり、ここ2~3年のうちにはスペースシャトルによる実験観測が行われる予定である。ここでは主に最近の日本におけるライダーを用いた大気観測について述べることにする。

### 2. ピナトゥボ火山噴火雲のライダー観測

ライダーによる火山噴火後の成層圏エアロゾルの観測は、1963年のアグン火山爆発後 MIT のグループによりルビーレーザーを用いたライダー観測が行われて以来 (Fiocco and Grams, 1964), 1974年のフエゴ, 1980年のセントヘレンズ, 1982年のエルチチオン等の観測が日本, 米国, ドイツ等で行われてきた。ピナトゥボはこれらの火山爆発を凌ぐ今世紀最大級のものであり、今後の気候、大気環境に及ぼす影響を調べるためにもグローバルな緊急観測が望まれている。

最近の固体レーザーの小型化と安全性及びエレクトロニクスの急速な進展による計測系の高速化と信頼性によりレーザー、小型の受信望遠鏡、検出部、フォト

ンカウンター等のコンポーネントの組合せにより、成層圏エアロゾル緊急観測用の小型のライダーを数カ月以内で製作できるようになった。

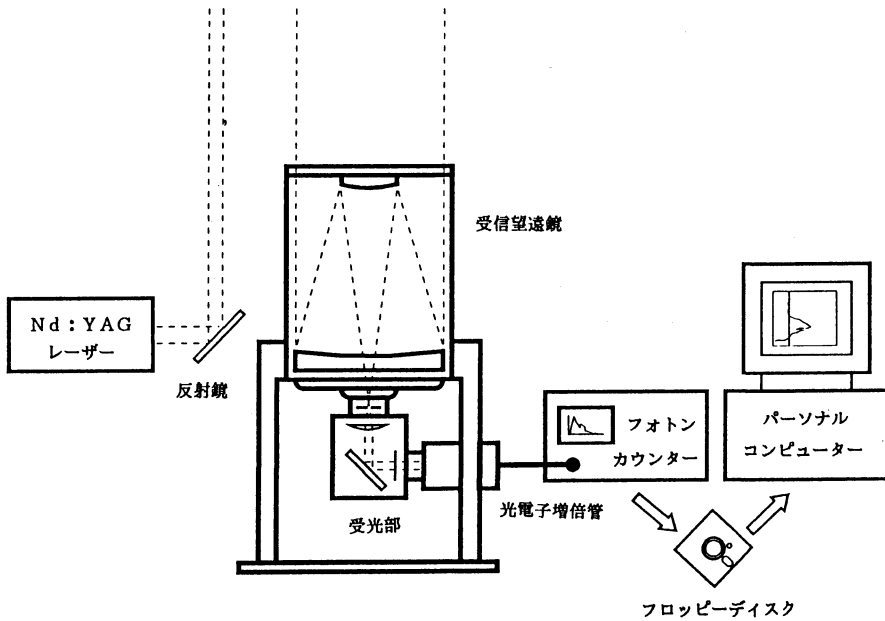
第1図に気象研究所 (MRI) で製作し沖繩气象台で1992年9月から使用中のライダーのブロックダイアグラムを示す。また第1表にその特性をまとめた。第2図にこれまで観測した成層圏エアロゾルの高度分布の時間変化を示す (Nagai *et al.*, 1992)。散乱比は大気分子からの後方散乱に対して何倍多く散乱されたかを示す量である。

このような小型のライダーは、通信総合研究所 (CRL) や名古屋大学太陽地球環境研究所 (STE) と福岡大学でも開発され、現在稚内、アラスカなどで観測が続けられている。また既存のライダーを用いた観測も国立環境研究所 (NIES), 信州大学, 都立大学などで行われており、これらを総合した初期のデータ解析やデータベース化を進め、放射収支、オゾン層、気候等への影響評価の研究に利用できるように我々は考えている。

さらに MRI や CRL ではカナダの大気環境庁 (AES) やヨーク大学の宇宙地球科学研究所 (ISTS) との共同で、ユーレカ (80°N, 86.3°W) でも科学技術庁等の支援のもとに観測を1993年1月から開始する予定である。これらを含めたライダー観測網を第3図に示す。なおユーレカは NDSC (Network for the Detection of Stratospheric Change) の一つの観測点として決定されており、極成層圏雲 (PSC) ライダー、オゾンライダー (AES & ISTS), フーリエ変換型赤外分光器 (MRI) 等によるオゾン層に関連した成層圏大気の観測が行われる予定である。オゾンライダーの開発に関しては日本やフランス等の寄与が大きく (Uchino *et al.*, 1978, Megie *et al.*, 1985), 最近では MRI, NIES など大きなオゾンライダーが開発され、オゾン観測と同時に中層大気の温度の観測も行われている。PSC に関しては南極での日本のライダー観測が

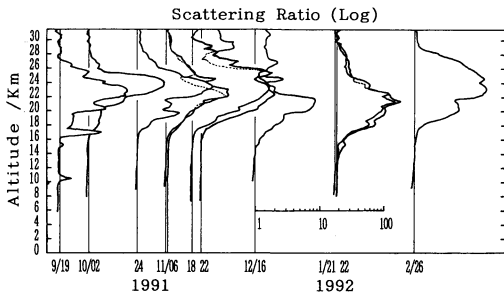
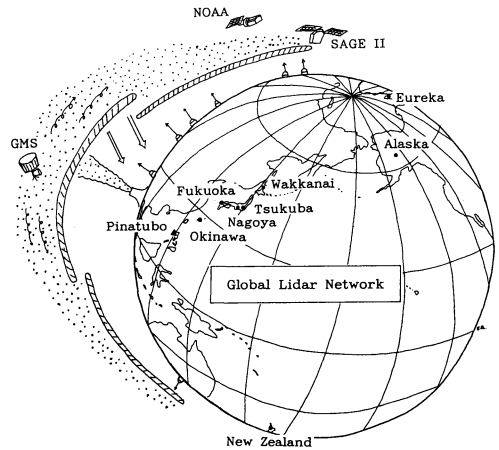
\* Lidar Observations of the Atmosphere.

\*\* Osamu Uchino, 気象研究所気象衛星・観測システム研究部.



第1表 ライダーの特性

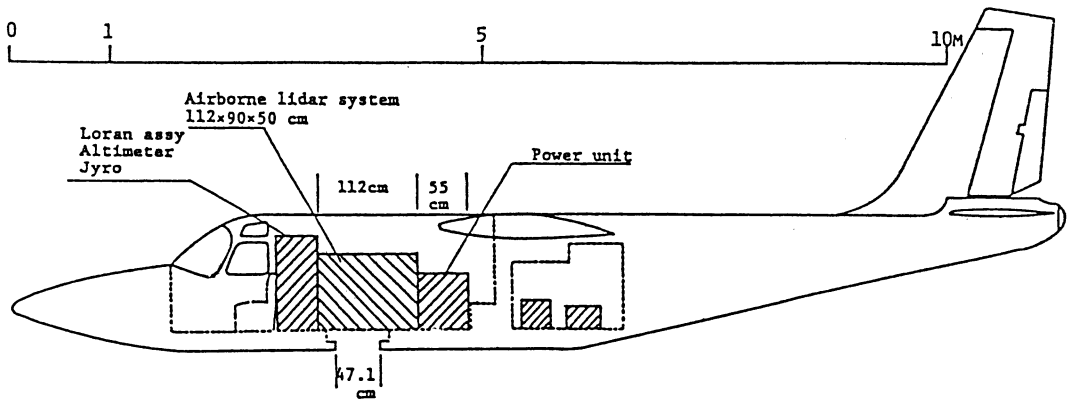
|        |         |    |                    |
|--------|---------|----|--------------------|
| レーザー装置 | 方波出力    | 式長 | Nd:YAG             |
|        | パルス継続時間 | 力  | 532 nm (第2高調波)     |
|        | パルス繰り返し |    | 約 100 mJ           |
|        | ビーム拡がり  |    | 6 ns               |
| 望遠鏡    | 口径      | 径  | 35.5 cm            |
|        | 視野      | 式角 | シュミットカセグレン         |
| 受信部    | 受信素子    |    | 光電子増倍管             |
|        | 受信方式    |    | フォトンカウンティング        |
|        | カウンタ    |    | スタンフォードリサーチ SR 430 |



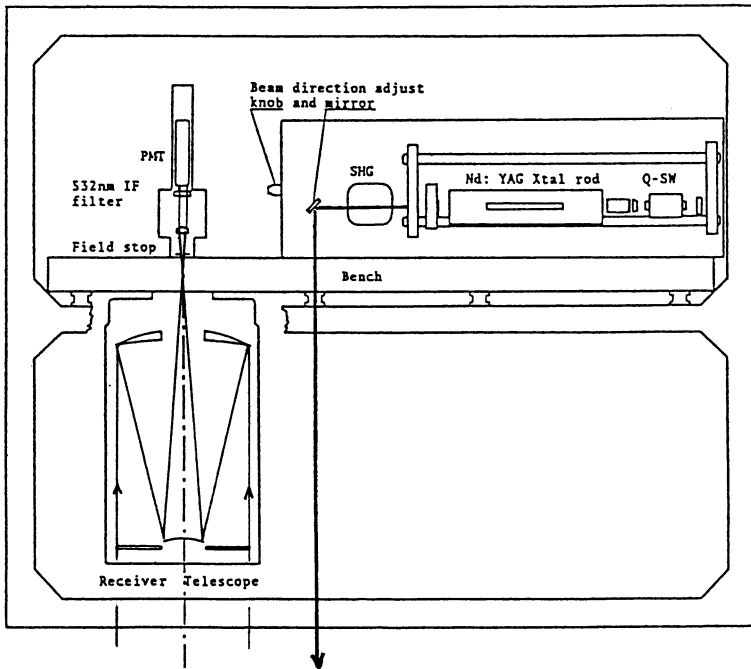
最初である (Iwasaka, 1985).

### 3. 航空機搭載ライダーの開発

一地点の観測では長期のモニタリングには適しているが、短時間に広域のエロゾルやオゾン等の分布を得るには、航空機搭載のライダーが必要である。日本では上向きに穴の開いた航空機がないため成層圏の観測が現在のところ無理であるが、下向きには可能であり境界層のエロゾルの観測を中心にした航空機搭載



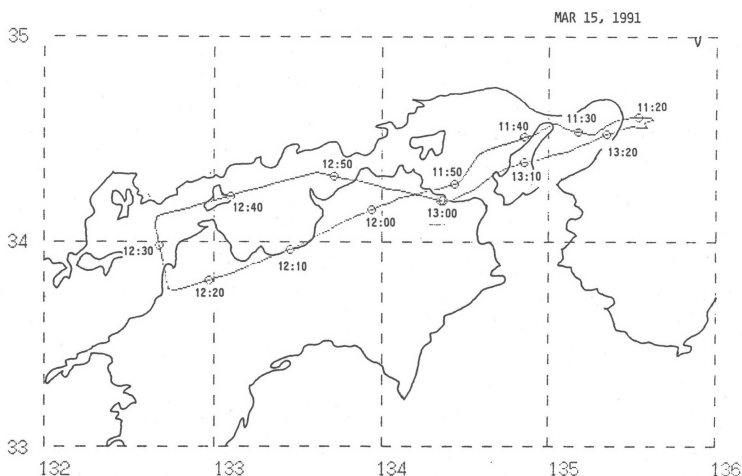
第4図 エアロコマンダー搭載ライダー



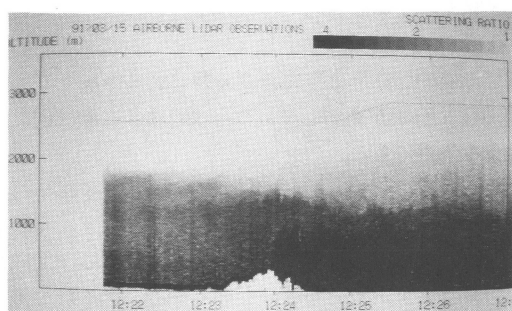
第5図 航空機搭載ライダーの構造

ライダーを開発している。第4図と第5図にMRIで開発している航空機搭載型ライダーを示す。レーザーは航空機搭載用に開発された小型のフラッシュランプ励起 Nd:YAG レーザーで、出力は波長 532 nm で 100 mJ である。レーザーの繰り返しは、双発のエアロコマンダーから供給される電力に制限はあるが 10 Hz が可能である。一方レーザー出力は高度 3 km から観測する場合は、目の安全性を考慮して 532 nm で 25 mJ 以下に制限される。この小型の航空機搭載ライ

ダーにより、1991年3月大阪の八尾空港を基点に、若狭湾や瀬戸内海の上空や徳島、和歌山の山岳上空の下部対流圏エロゾルの観測を行った。第6図に一つのフライトコースを示す。第7図にこのフライトコースで松山市上空から瀬戸内海に向かう時に得られたエロゾル分布を示す。松山市上空に濃いエロゾルの分布が見られる。また他のコースでは海上と陸上でのエロゾルの高度分布の違い等の興味深いデータが得られている (Uchino *et al.*, 1991)。



第6図 1991年3月15日のライダー観測の航路図



第7図 航空機搭載ライダーによる1991年3月15日松山市上空のエロゾル観測。エロゾルの散乱比の大きさを濃淡で示してある。図の下の白い部分は山頂の分布を示す。また図の中の高度3 km付近の点線の部分は飛行高度を表す。

#### 4. 今後の航空機搭載ライダーの展望

さらに繰り返しを上げて高い空間分解能でエアロゾルを測定し、エアロゾルの境界層から自由対流圏への輸送過程や都市域からの拡散過程等の実態把握のためには、航空機から供給できる電力には制限があるので、電気エネルギーからレーザーエネルギーへの変換効率 $\eta$ を上げる必要がある。現在のフラッシュランプ励起のNd:YAGレーザーの場合は $\eta=1\%$ 以下であるが、最近開発が進んでいる半導体レーザー励起(LD)のNd:YAGレーザーの場合 $\eta=7\sim 10\%$ と高い効率が得られている(Koehler, 1991)ので、今後はこのLD励起のレーザーを基本にした開発が必要となる。

エアロゾルが少ない場合、測定感度を上げるために

は、なるべく長い波長を利用した方がよい。さらに目への安全を考慮した場合波長 $1.5\mu\text{m}$ 以上の近赤外のレーザーを利用したライダーの開発も望まれる。これにはLD励起のNd:YAGレーザーを利用したラマンレーザー(水素や重水素の高圧気体セル使用)などが考えられる。将来的にはこれらに目へ安全なレーザーを利用したスキャン型の航空機搭載ライダーの開発により広域のエロゾル三次元立体分布の観測が考えられる。さらにこれらの航空機搭載ライダーの経験を基にして衛星搭載ライダー(スペースライダー)による短時間内でのグローバルなエアロゾル、雲等の観測が強く望まれる。

#### 5. 水蒸気や風観測用ライダーの見通し

この分野に関しては数年前から日本でも基礎研究が行われるようになり、水蒸気に関してはラマン散乱による予備観測や、オゾンと同じように差分吸収法(DIAL)による予備観測が九大、都立大、MRI等で行われつつある。ラマン散乱による方法は、夜間の観測に限られているが、装置が比較的簡単になるところに利点がある。DIALによる方法は狭帯域レーザーの周波数の安定性、水蒸気への自動同調等の問題が残されているが、近いうちにこの問題は解決されるものと思われる。その一つの方法として、単一モード(スペクトル幅 $\sim 1\text{pm}$ )で発振する半導体レーザーを、吸収セルやオプトガルパニック法を用いて、水蒸気の吸収線の1本にロックし、そのレーザーをNd:YAGレーザーの第2高調波励起チタンサファイヤレーザーへ注

入同期する方法が考えられる。DIALは昼間の観測や航空機、衛星等からの観測が可能になることから、今後のさらなる開発が期待される。

風の観測に関しては、炭酸ガスレーザーを用いたコヒーレントライダーによる基礎技術の開発がCRLや東北工大等で行われているが(Shibata *et al.*, 1991)、NASAでは衛星搭載のグローバルな風観測計画(LAWS)があり開発を進めている。衛星からの3年以上の長期間にわたる風観測には炭酸ガスレーザーはガス寿命の点などから問題がでてくると思われるので、波長1.5  $\mu\text{m}$ ~2.1  $\mu\text{m}$ の目の安全性を考慮したLD励起固体レーザーを用いたものを今後日本等で積極的に開発していくのが望まれる。

ここではライダーの詳しい原理や、地上の環境計測についての紹介はできなかったため、その点についてはHinkley (1976)や杉本(1992)の解説を参照されたい。

#### 参考文献

- Fiocco, G. and G. Grams, 1964 : Observations of the aerosol layer at 20 km by optical radar. *J. Atmos. Sci.*, 21, 323-324.
- Hinkley, E. D., 1976 : Laser monitoring of the atmosphere. *Topics in Appl. Phys.* vol. 14, Springer-Verlag.
- Iwasaka, Y., 1985 : Lidar measurement of the stratospheric aerosol layer at Syowa station (69.00°N, 39.35°E), Antarctica. *J. Meteor. Soc. Japan*, 63, 283-287.
- Koehner, W., 1991 : High energy diode-pumped solid state lasers. レーザー研究, 19, 619-626.
- レーザーライダー特集, 1989 : レーザー研究, 17 : 1-336.
- Megie, G. J., G. Ancellet and J. Pelon, 1985 : Lidar measurements of ozone vertical profiles. *Appl. Opt.*, 24, 3454-3463.
- Nagai, T., O. Uchino and T. Fujimoto, 1992 : Lidar observation of stratospheric aerosol layer after the Mt. Pinatubo volcanic eruption. 16th ILRC, July 20-24, Boston.
- Shibata, T, M. Ishizu and T. Itabe, 1991 : Coherent doppler lidar using a hybrid CO<sub>2</sub> laser with a low pressure gain section below the threshold. *J. Meteor. Soc. Japan*, 69, 413-418.
- 杉本伸夫, 1992 : 気象学への手引, リモートセンシング II. レーザー遠隔計測. *天気*, 39, 169-179,
- Uchino, O., M. Maeda, J. Kohono, T. Shibata, C. Nagasawa and M. Hirono 1978 : Observation of

stratospheric ozone by a XeCl laser radar. *Appl. Phys. Lett.*, 33, 807-809.

———, Y. Mizuno, H. Takashima, T. Fujimoto, T. Nagai and Y. Nikaidou, 1991 : Ground-based and airborne lidar measurements of atmospheric aerosols. *Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, November 18-21, Williamsburg, VA, 215-217.

#### コメント

中根英昭(環境研)

大気観測、特に成層圏大気観測におけるライダーの役割の一端を、現在準備が進められているNDSC (Network for the Detection of Stratospheric Change) との関係において述べたい。

オゾン層のモニタリングはWMOによるドブソン分光光度計を中心としてネットワーク観測、TOMSやSAGEのような衛星観測によって行われてきた。これらと相補的な、地上遠隔計測装置によるネットワーク(NDSC)計画が進行しており、1993年中に順次観測が始まる予定である。

NDSCにおいて測定される物質と使用される測器を第1表に示す。このネットワークの特徴は、①メジャーな大気成分は鉛直分布を精度よく測る、②成層圏の種々の大気成分を可能な限り測る、③それを長期間続ける、ところにある。これらの測器を備えたステーションを、北極域、北半球中緯度、熱帯、南半球中緯度、南極域に原則として1地点づつ展開する(primary

第1表 NDSCにおいて観測される物質と測定方法

| 微量成分 (高度)                  | 測器         |
|----------------------------|------------|
| オゾン気柱全量                    | ドブソン分光光度計  |
| オゾン (0~20 km)              | ライダー       |
| オゾン (15~45 km)             | ライダー       |
| オゾン (25~75 km)             | マイクロ波      |
| 気温 (30~80 km)              | ライダー       |
| ClO (25~45 km)             | マイクロ波      |
| 水蒸気 (0~30 km)              | 気球搭載湿度計    |
| 水蒸気 (>20 km)               | マイクロ波      |
| エロゾル (0~30 km)             | ライダー       |
| 二酸化窒素 (成層圏全量)              | 可視/紫外分光計   |
| 塩化水素 (成層圏全量)               | 赤外分光計      |
| メタン (成層圏全量)                | 赤外分光計      |
| 一酸化二窒素 (20~50 km)          | マイクロ波      |
| 硝酸 (成層圏全量)                 | 赤外分光計      |
| ClONO <sub>2</sub> (成層圏全量) | 赤外分光計      |
| OH (40~60 km)              | 紫外蛍光, ライダー |
| HO <sub>2</sub>            | マイクロ波      |