

## 飛翔体搭載型ライダー

Airborne and Spaceborne Lidar

内野修<sup>1</sup> 水野芳成<sup>1</sup> 藤本敏文<sup>1</sup> 板部敏和<sup>2</sup> 浅井和弘<sup>3</sup>

O.Uchino, Y. Mizuno, T. Hujimoto, T. Itabe, K. Asai

<sup>1</sup>気象研究所 <sup>2</sup>郵政省通信研究所 <sup>3</sup>東北工業大学<sup>1</sup>Meteorological Research Institute (MRI)<sup>2</sup>Communication Research Laboratory (CRL)<sup>3</sup>Tohoku Institute of Technology (TIT)

**Abstract** In order to obtain vertical profiles of aerosols in the lower troposphere and to understand transport processes of aerosols, an airborne lidar was developed at MRI. An Airborne ozone lidar using a Laser diode pumped Nd:YAG laser and Stimulated Raman Scattering (SRS) is simulated. Future plans of spaceborne lidars on Japanese Polar Platform (JPOP) will be described.

## 1. はじめに

これまでに地上のライダーによりエアロゾル、黄砂、雲等のミー散乱粒子や、レーリー散乱による大気密度や気温等が他の観測手法では得られない高い距離分解能で観測が行われるようになった。さらに広域のエアロゾル等の観測を短時間に行い、輸送過程や水平方向のスケールなどのデータを取得するには飛行機搭載ライダーの開発が必要となる。ここではMRIで開発したエアロゾル観測用飛行機搭載ライダーをまず紹介する。次にLD励起Nd:YAGレーザーの第4高調波とSRSをもとにした飛行機搭載オゾン観測用ライダーのシミュレーションについて述べる。最後に1990年代後半打ち上げ予定の日本の極軌道衛星(JPOP)と関連して検討されているスペースライダー計画について述べる。

## 2. 対流圏エアロゾル観測用飛行機搭載ライダー

Fig.1にMRIで開発している小型の飛行機搭載型ライダーを示す。この場合レーザーはフラッシュランプ励起のYAGレーザーで、出力としては1064nmで300mJ、532nmで100mJで、繰り返しとしては10Hzの能力を有しているが双発のエアロコマンダーから供給される電力の制限から繰り返しは現在5Hzに制限されている。また出力は高度3kmから観測する場合は、目の安全性を考慮して532nmで10mJに制限される。この小型の飛行機搭載ライダーにより境界層を含めた下部対流圏エアロゾルの観測を本年3月に行い現在そのデータを解析中である。

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、飛行機からの電力が制限されているので、電力からレーザーへの変換効率 $\eta$ を上げる必要がある。現在のフラッシュランプ励起のYAGレーザーの場合は $\eta=1\%$ 以下であるが、最近急速に開発されてきている半導体レーザー励起(LD)のYAGレーザーの場合は $\eta=7-10\%$ と高い効率を得られるので今後はこのレーザーを基本にした開発が必要である。

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。さらに目へ安全を考慮した場合1500nm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)や光パラメトリック発振(OPO)、LD励起Ho:Tm:YAGレーザー(2100nm)などが考えられる。将来的にはこれらの目に安全なレーザーを利用したスキャン型の飛行機搭載ライダーの開発により広域のエアロゾル三次元立体分布の観測が望まれる。

### 3. 飛行機搭載オゾンライダーシミュレーション

現在エキシマーレーザーやYAGレーザーを利用した地上設置の差分吸収ライダー(DIAL)により成層圏や対流圏のオゾン観測が行われている。またYAGレーザー励起の色素レーザーを利用した飛行機(NASA DC-8)搭載ライダーにより対流圏オゾンや極域のオゾンホール観測がなされている。CRLではこれまで炭酸ガスレーザーを利用して、都市域境界層のオゾンの観測を行った。

エアロゾルの観測に比較してオゾンDIAL観測の場合は、レーザー光が少なくとも同時二波長必要であり、電力をさらに多く要求するとともに装置全体が大きくなることから、レーザーとしては々の大きいものが必要である。そのため温室気体としての対流圏オゾンやオゾン破壊に関連する成層圏オゾン観測の飛行機搭載ライダーとしてはエキシマーレーザーを基本にしたものと、LD励起のヤグレーザーを基本にしたものが考えられる。ここでは先に述べたエアロゾル観測との互換性を考えてLD励起のYAGレーザーを基本したものをFig.2に示す。

エアロゾル観測には1064,532,355nm等のレーザー波長を用いる。オゾン観測にはヤグレーザーの第4高調波266nmと水素、重水素の高圧ラマンセルを利用して波長289,299,316,342nm等を発生させ、適当な波長の組合せにより対流圏、成層圏のオゾン観測を行う。また1064nmとラマンセルを利用すると先に述べたeye safetyのレーザーを発生できる。

Fig.3にシミュレーションに用いた二つのオゾン分布を示す。一つはMid-latitude Ozone Model (MLOM)、もう一つはTatano November Ozone Model(TNOM)で、二つの違いは対流圏界面付近ではMLOMがTNOMよりオゾン密度が大きく、逆に8km以下ではTNOMの方がMLOより大きい。

Fig.4に波長289nmに於ける消散係数(Extinction coefficient)の高度分布を示す。この場合はオゾンモデルとしてはMLOMを用いた。高度6km以上ではオゾンによる消散係数 $\alpha_3$ がエアロゾル及びレイリー散乱の消散係数 $\alpha_A$ 、 $\alpha_R$ より大きくなる。高度6kmより以下では $\alpha_3$ 、 $\alpha_R$ がほぼ同じ程度であるが2km以下では $\alpha_A$ が一番大きくなるので、境界層内でのオゾン観測にはさらに $\alpha_3$ が約6倍大きくなる波長266nmを利用しなければならない。

Fig.5に波長266nmと289nm, 289nmと299nmのレーザー光の組合せによるDIALシミュレーションを示す。ライダーパラメーター(レーザー出力、ショット数、受信鏡の半径RM、光学効率O.E、量子効率Q.E)は同じ図の中に示した。また背景光としてここでは、Papayannis et al.(1990)の文献を参考にした。

飛行高度ZS=10kmした場合、288nmと289nmにより高度1.5kmから8.5kmまで高度分解能1kmで誤差15%以内で観測可能である。ショット数NS=1000のとき、ヤグレーザーの繰り返しを50Hzとすれば、20秒で一つのオゾン分布が観測できる。飛行速度を秒速100-300mとすれば水平分解能は2-6kmとなる。

境界層を含めたオゾン観測を行うには266nm、289nmのDIALが必要であるが、この場合にはZS=10kmでは266nmのレーザー光のオゾンによる吸収が大きくなるので、ZS=5kmで計算を行った。シミュレーションは1kmごとに行っているため、ここでは1.5km以下の測定誤差の計算はされていないが、境界層やエアロゾルによる影響をみるためには、さらに細かい高度分解能のシミュレーションが必要である。

Fig.6に下部成層圏のオゾンDIALシミュレーション結果を示す。289nmと299nmの組合せの場合ZS=5kmで昼間15kmまで10%以内の観測が可能である。299nmと316nmの組合せでは夜間20kmまで、299nmと342nmでは夜間24kmまで10%以内で観測可能である。以上のシミュレーションから飛行機搭載のヤグレーザーの第4高調波266nm励起のラマンレーザーにより高度0-25kmのオゾン観測が可能である。

### 4. JPOPで検討されているスペースライダー計画とその意義

1990年代後半に打ち上げ予定の日本の極軌道衛星(JPOP)で現在いろいろな地球観測センサーが検討されているが、そのうちの一つに、E-LIDAR(Experimental Lidar、仮称)が重要なセンサーと

して位置づけられている。 E-LIDARとして

- 1)ATL (Atmospheric Lidar)
- 2)Laser Altimeter
- 3)DIAL(Differential Absorption Lidar)

の3つの機能を、出来れば同時に備えられるようなライダーを考える。

ATLは波長532nmから2100nm間の最適なレーザを用いて、大気からのレーリ散乱及びミー散乱を利用して、雲頂高度、雲厚、雲の光学的厚さ、エアロゾル分布、黄砂、サハラ砂漠のダスト、火山灰、極成層圏雲等の観測を行う。

雲は水蒸気が凝結または昇華によってできるものであるから、雲は大気中の水循環と大きな関わりを持っている。またエアロゾルは雲が出来るときの凝結核としての役割を担っている。炭酸ガス、メタン、一酸化二窒素等の温室効果気体の増加に伴う地球温暖化問題は社会的にも科学的にも大きな問題であるが、これらの成分は水蒸気や雲、エアロゾルに比べれば、空間的にも時間的にも変動はそれほど大きくない。

地球の温暖化に伴い水蒸気や雲がどの高度にどのように分布するかは今の気候モデルの中の主要課題の一つである。雲の放射収支効果は太陽放射に対するアルベド効果と、赤外放射に対する温室効果の兼合で決まり、これらは雲の高度分布や雲粒子の構成要素（水滴であるか氷晶であるか）によって変化する。例えば薄い巻雲などの場合は、太陽光に対しては透明であるが、赤外放射に対しては半透明であり、地球からの暖かい赤外放射が宇宙に逃げるのを妨げる作用をしている。従ってもし温室効果気体の増加に伴い、薄い巻雲の出現が現在に比べて多くなるとますます地球の温暖化を加速することになる。

火山大爆発に伴い成層圏に大量の火山灰が入った場合地上の気温が下がることが知られ、これは数年にわたり影響を及ぼす。またエアロゾルの増加は可視赤外の衛星パッシブセンサーの精度に大きな影響を及ぼす（特に1982年のメキシコのエルチヨン火山爆発直後は海面水温）。最近炭酸ガスなどの増加に伴い地球温暖化が予想よりも小さいことが米国のハンセン博士によって指摘されていることが新聞報道されているが、この原因としてエアロゾル（硫酸粒子）による効果と考えられ、さらに詳しいエアロゾルの地球放射に対する調査が必要だとされている。

エアロゾルはまたトレーサーとして大気大循環、長距離輸送、拡散などを調べることに大いに利用されるとともに、酸性雨、北極ヘイズ等の大気化学の問題とも深く関わっている。

このような雲、エアロゾル、オゾンホールと密接に関係するPSC(Polar Stratospheric Cloud)などの高度分布や時間変化を地球規模で短時間に測定できるものとしてE-LIDARのATLが大いに期待される場所である。

最近、全球エネルギー及び水循環実験計画（GEWEX）が世界気候研究計画（WCRP）の中で最も重要な課題として浮上してきている。これは、大気、雲、地表、植物などが含む水とそれに係わるエネルギー輸送が気候のモデル化にとって最も重要なパラメーターであるにもかかわらず、その実態の把握があまりにも不十分なことによるものである。水蒸気は、炭酸ガス等他の気体に比べてはるかに強い温室効果をもつ気体であり、そのわずかな変化も非常に大きい影響を及ぼす。また、蒸発・降水等を通して地表とのエネルギー交換に強く係わっている。

水床の高度を測定するLaser Altimeterや水蒸気の分布を測定するDIAL が、このような水循環ひいては地球温暖化等の問題を研究していくうえで、貴重なデータを提供出来るものと期待される。

このようにNASDA等で検討されているE-LIDARや、宇宙科学研究所地球大気観測ワーキンググループ等で検討されているNa観測用スペースライダー等の実現に向けた高効率長寿命のLD励起YAGレーザーやそれを励起源とした高安定自動チュウナブルレーザー及び軽量且つ口径の大きな受信望遠鏡等の研究及び開発を今後早急に進めていく必要がある。

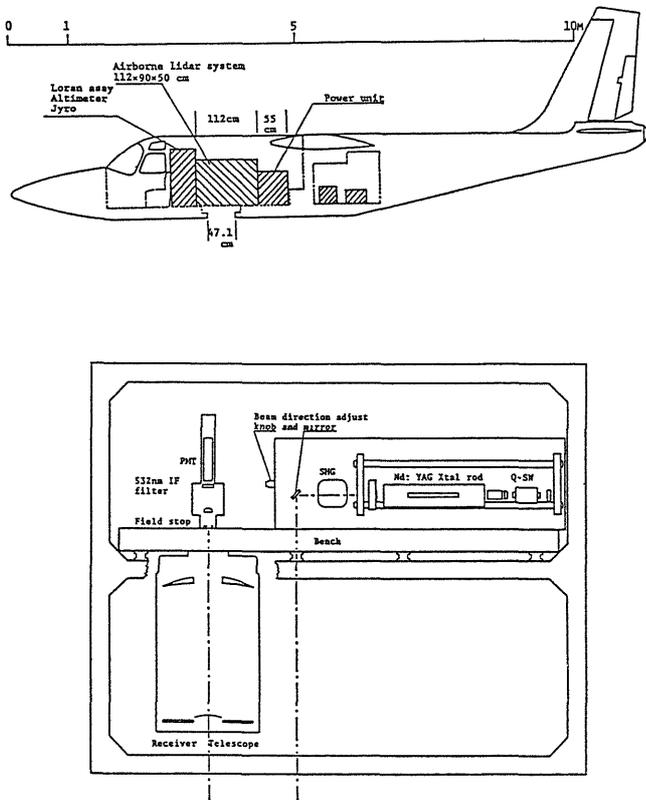


Fig.1 MRI airborne lidar for aerosol measurements.

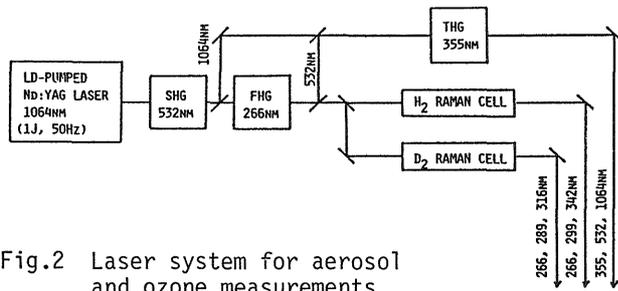


Fig.2 Laser system for aerosol and ozone measurements.

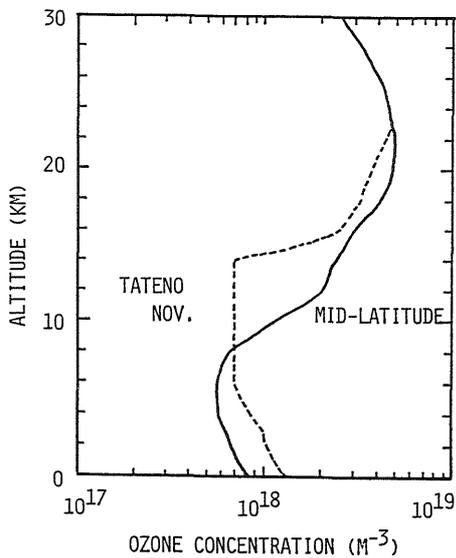


Fig.3 Ozone models for DIAL simulations.

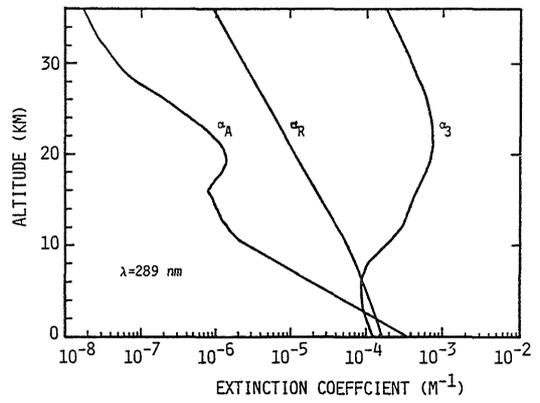


Fig.4 Extinction coefficients at 289 nm.

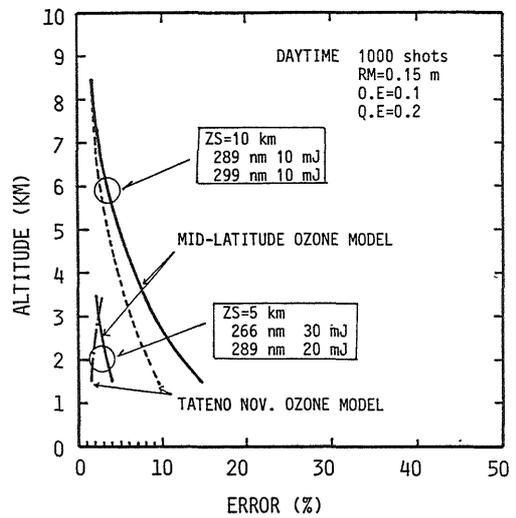


Fig.5 Airborne ozone DIAL simulation.

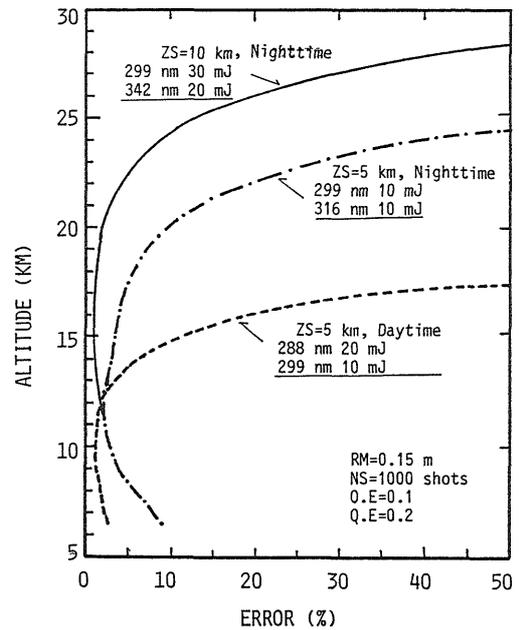


Fig.6 Airborne ozone DIAL simulation.