

# 大気微量成分計測のための航空機・人工衛星 搭載レーザーレーダーに関する基礎調査報告

Feasibility study on air-borne and space-borne lidars  
for measuring atmospheric minor constituents

笹野泰弘<sup>1</sup>・野村彰夫<sup>2</sup> 編

Edited by Y. Sasano<sup>1</sup> and A. Nomura<sup>2</sup>

1: 国立環境研究所地球環境研究グループ

1: National Institute for Environmental Studies

2: 客員研究員 (信州大学工学部)

2: Guest Researcher from Shinshu University

NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

環境庁 国立環境研究所

## まえがき

環境問題を研究する上でまず重要なことは、対象となる現象を正確に把握することである。ところが、地球規模の大気環境問題となると、ことはそう簡単ではない。対象とすべき領域がきわめて大きく、高さ方向にも 20 km以上の成層圏までを考えなければならない。また、多くの大気微量成分が輸送、拡散される間にも太陽の光を受けて分解したり化学反応によって変質したりと、捉えなければならない対象物質の挙動が非常に複雑である。従来は飛行機や大気球等に計測機器を搭載して、各種の観測が行われてきた。しかし、広域を短時間に精度よく、計測するという観点からは限界があったと言わざるを得ない。

リモートセンシング（遠隔計測）は、光や電波を用いて対象から離れたところから対象物質の濃度や分布状態を計測する技術である。本研究所でも長年にわたり、レーザーレーダーと呼ばれるリモートセンサーの開発を行い、大気中に浮遊する微粒子や二酸化窒素等の大気汚染成分の計測や、最近では成層圏オゾン層の観測研究を始めている。これらのリモートセンサーを航空機や人工衛星に搭載して観測を行えば、広域を網羅的にしかも短時間のうちに計測することが出来、地球規模の大気環境問題研究にとって新しい地平を切り開くことになるだろう。もちろん、そこには精度的な限界もあろうし技術的な困難もあろう。その点を見きわめることは重要である。

本基礎調査報告はそのような観点から、レーザーレーダーを航空機や人工衛星に搭載することを想定して、技術的な現状をレビューし、開発のための問題点を明らかにしようとしたものである。本書が近い将来の飛行体搭載レーザーレーダーの実現に向けて、大いに役立つことを願うものである。

平成 3 年 4 月

地球環境研究グループ  
統括研究官 秋元 肇

## 調査の背景とねらい

地球規模の環境問題に関する世の中の関心はますます高まっており、問題の実態把握、発生の機構の解明、対策技術の開発等における国内外の研究機関に対する期待も同時に大きなものとなってきている。

地球規模の環境問題、とりわけ大気環境の研究・監視等においての最大の困難のひとつは、対象となる大気の3次元的な広がりにある。すなわち、地球温暖化、オゾン層の破壊、酸性雨といった環境問題の発生は、人工的に生成された各種の気体成分等が大気中に放出されることに端を発しており、大気中を輸送、拡散される間にも化学反応により変質し、あるものは温暖化気体として地球の温暖化に寄与し、あるものは成層圏まで昇って強い紫外線のもとで成層圏オゾンの破壊等をもたらす。

大気中に放出された気体の振舞いは、まさに地球規模である。そのため、実態の把握にはきわめて広域に亘る、あるいは全球的な観測が必要となる。また、高度範囲も地表付近だけに留まらず、高度 20 km以上の成層圏に至るまでの広い高度領域を対象としなければならない。従来、このような観測においては主として観測機器を搭載した航空機や大気球を用いてきた。しかし、いずれにせよ広域の観測を繰り返し行うにはきわめて不十分であった。

近年、電波や光波を利用した各種のリモートセンシング技術の発展が著しい。例えば国立環境研究所においても、エアロゾル観測用のレーザーレーダーや成層圏オゾン観測用のレーザーレーダーを開発し、研究観測やモニタリングに活用してきている。諸外国ではこれらのリモートセンシング機器を飛行機やスペースシャトル、あるいは衛星に搭載して広域の観測、地球全体の観測に用いようとの動きがある。これが実現すれば、これまでの地上からの点観測、航空機などによるサンプリング測定に頼っていた観測が一挙にその対象領域を広げることが出来る。

環境問題に対するわが国の先進的な取り組みとして、このような最先端の計測技術の開発研究に力を注ぐこともひとつの考え方ではないだろうか。本調査ではそのような観点から、地球規模大気環境問題の現状と計測上の問題点を整理するとともに、航空機あるいは衛星搭載用のレーザーレーダーの開発に係る現状の整理を行い、開発が望まれるレーザーレーダーシステムの基本構想を提案し、また今後解決すべき問題を明らかにしようとした。

調査の実施にあたり、(財)光産業技術振興協会に調査を委託し、同協会の下に専門家から成る調査委員会を設置し検討を進めた。調査委員会は信州大学工学部の野村彰夫教授を委員長とし、地球規模大気環境問題に関わる研究者、レーザーレーダー等のリモートセンシング研究者、メーカーの専門家等を擁するもので、短い調査期間ではあったが3回の調査委員会を開催し議論を深めた。

本書は、同調査委員会の検討結果を取りまとめたものである。

調査委員会の構成と、報告書の執筆分担一覧を次ページに記し、ここに委員の先生方並びに事務局として取りまとめにあられた(財)光産業技術振興協会に感謝の意を表する次第である。なお、本調査は平成2年度環境庁地球環境研究総合推進費による課題検討調査研究「地球環境問題に関連した大気微量成分計測手法の高度化に関する予備的研究」の一環として行った。

地球環境研究グループ

オゾン層研究チーム

笹野 泰弘

平成2年度 飛翔体搭載レーザーレーダー調査委員会名簿

(敬称略・順不同)

委員長	野村 彰夫	信州大学工学部 情報工学科 教授
委員	浅井 和弘	東北工業大学 通信工学科 助教授
〃	板部 敏和	郵政省通信総合研究所 電波応用部 光計測研究室 室長
〃	内野 修	気象庁気象研究所 気象衛星観測システム部 第3研究室 室長
〃	輿石 肇	(株)リモートセンシング 技術センター 参与
〃	小林 喬郎	福井大学工学部 電気工学科 教授
〃	杉本 伸夫	国立環境研究所 地球環境研究グループ オゾン層研究チーム 主任研究員
〃	初田洋司雄	日本電気 誘導光電事業部 レーザ技術部長
〃	藤森 康朝	(株)東芝 生産技術研究所 レーザ研究部 部長
〃	牧野 行雄	気象庁気象研究所 物理気象研究部 第3研究室 室長
〃	村野健太郎	国立環境研究所 地球環境研究グループ 酸性雨研究チーム 主任研究員
事務局	加藤 靖孝	(株)光産業技術振興協会 開発部

執筆分担一覧表

野村彰夫	5.1.3 項	5.2.3 項		
浅井和弘	5.2.1 項	5.2.2 項	5.2.4 項	
板部敏和	5.1.4 項			
内野 修	5.1.1 項	5.1.2 項		
輿石 肇	6 章			
小林喬郎	5.3 節			
杉本伸夫	4.1 節	4.2 節		
初田洋司雄	4.4 節			
藤森康朝	4.3 節			
牧野行雄	2.1 節	3.1 節		
村野健太郎	2.2 節	2.3 節	3.2 節	3.3 節
事務局	1 章	7 章		

# 大気微量成分計測のための航空機・人工衛星搭載 レーザーレーダーに関する基礎調査報告

## 目 次

・まえがき	
・調査の背景とねらい	
・平成2年度飛翔体搭載レーザーレーダー調査委員会名簿/執筆分担一覧表	
1. はじめに	1
2. 地球規模大気環境問題の現状	3
2.1 オゾン層破壊の問題	3
2.2 地球温暖化の問題	6
2.2.1 はじめに	6
2.2.2 メタンの濃度増加と正と負のフィードバック効果	7
2.2.3 メタンの発生源と除去過程	10
2.2.4 対流圏オゾン層	12
2.3 酸性雨の問題	13
2.3.1 はじめに	13
2.3.2 酸性雨の生成メカニズム	13
2.3.3 NO <sub>x</sub> 、SO <sub>2</sub> の気相反応	14
2.3.4 NO <sub>x</sub> 、SO <sub>2</sub> の液相反応	15
3. 地球規模大気環境計測における問題点と飛翔体搭載レーザーレーダーへの期待	17
3.1 オゾン層破壊	17
3.1.1 オゾンホール	17
3.1.2 オゾン層の全球的監視	18
3.1.3 対流圏オゾンの動向	19
3.1.4 その他の観測との共同観測の必要性	20
3.2 地球温暖化	20
3.3 酸性雨	21
4. レーザーレーダー技術の現状と展望	23
4.1 レーザーレーダーシステム	23
4.2 分光学的立場から見た観測可能分子	26
4.3 レーザーの現状と将来展望	33
4.4 光センサー技術の現状と将来展望	36
5. 飛翔体搭載レーザーレーダーの可能性と問題点	38
5.1 航空機搭載型レーザーレーダー	38
5.1.1 エアロゾル観測	38
5.1.2 オゾン観測	39
5.1.3 観測シミュレーション	40

5.1.4 航空機搭載型レーザーレーダーにおける技術的問題点	50
5.2 衛星搭載レーザーレーダー	58
5.2.1 エアロゾル観測システム用レーザー	58
5.2.2 オゾン観測用レーザー	61
5.2.3 観測シミュレーション	63
5.2.4 衛星搭載型レーザーレーダーの技術的問題点	70
5.3 微量成分計測技術の将来展望	72
5.3.1 微量成分の計測方法	72
5.3.2 観測シミュレーション	74
5.3.3 将来の展望	78
<b>6. 地球大気観測用航空機と衛星の現状・将来計画と問題点</b>	<b>79</b>
6.1 航空機	79
6.1.1 固定翼航空機	79
6.1.2 飛行艇	80
6.1.3 回転翼機	80
6.1.4 飛行船	81
6.1.5 諸外国との比較	81
6.1.6 大気観測用航空機に関する問題点	82
6.2 衛星	82
6.2.1 世界の衛星による大気観測計画	82
6.2.2 わが国の JPOP 計画	83
6.2.3 問題点	85
<b>7. おわりに</b>	<b>86</b>

# 1. はじめに

## 1.1 調査の目的

地球温暖化、オゾン層破壊、酸性雨問題等の地球規模大気環境問題の特質は、現象の時間的スケールが比較的長いということと同時に、その空間的な広がりが大ききことである。また、各種の大気微量成分が大気中を輸送される間に、互いに反応しあい、さらに太陽紫外線、赤外線などの吸収、散乱の過程が関与することから、地球大気環境の実態を把握し、その変動機構を解明することを非常に困難なものにしている。従来、こういった大気環境調査を実施する場合には、計測機器を搭載した航空機や大型のサンプリング気球を用いての直接観測（現場観測）を行ってきた。しかしながら、広域の同時観測や、成層圏以上の高高度の観測が困難であるなど、限界がある。

近年、遠隔計測技術の発展にはめざましいものがあり、地上設置型のレーザーレーダーを用いた成層圏・対流圏上部のオゾン・エアロゾル・気温の観測が実用化され、世界各地で観測が始められようとしている。また、これらのレーザーレーダー機器を航空機や衛星に搭載して、その機動性を活かして広域あるいは地球規模の観測に役立てようとする試みが、いくつかの外国の研究機関で進められている。

航空機搭載レーザーレーダーでは例えば、オゾン・エアロゾル等の広域に亘る3次元的な分布が短い観測時間で得られることから、酸性雨等に関連する対流圏オゾンの動態、成層圏・対流圏間のオゾン輸送メカニズム解明などに有効なデータが収集できる。また、雲、霧の挙動など広域の大気環境の把握が容易に、かつ実時間で出来ることから、酸性雨現象のフィールド観測の際などに観測エリアの決定などに極めて効果的であろうと考えられる。

一方、衛星搭載レーザーレーダーは世界的に見ても、米国航空宇宙局、ヨーロッパ宇宙機関等で計画が進行しているものの、まだ実現されたものはない。しかしながら、オゾン層のモニタリングや、地球温暖化・気候変動に係る水蒸気、エアロゾル、雲（雲高、雲量、層厚等）の分布のモニタリングにおいて、その有効性が期待されている。

航空機搭載レーザーレーダー、衛星搭載レーザーレーダーのいずれも、欧米の各国が積極的に取り上げようとしていることから分かるように、地球規模大気環境問題の実態解明の道具として、非常に有効と考えられる。我国においても、今後の環境問題への取り組みの一環として、その基礎的研究を開始する時期に来ていると言えよう。

そこで、本調査では地球規模大気環境問題の現状と研究観測における計測上の問題点を整理するとともに、航空機搭載レーザーレーダー、衛星搭載レーザーレーダーのそれぞれについて、開発の現状を調査し、実用化に向けて解決すべき課題を明らかにすることを目的とした。また、数値シミュレーション等に基づく性能評価をもとに、大気環境問題における有効利用の方策について検討した。

## 1.2 検討結果の概要

検討の結果、オゾン層破壊、地球温暖化、酸性雨の研究を一層推進することの必要性およびレーザーレーダー技術の成熟性の観点から現時点では、『対流圏および成層圏のオゾン、エアロゾルの測定用の航空機搭載

レーザーレーダー』に対する要請が最も大きいものと判断された。そして、これらに対する実現可能性を技術的観点から検討し、基本的には半導体レーザー励起の YAG レーザーを光源としたシステムが望ましいこと、観測用航空機の調達を考慮したシステム開発が必要であることなどが指摘された。

特に、航空機に関して日本の官庁には満足すべきものを所有しているところはなく、今後とも地球規模大気環境研究の推進にとって解決すべき大きな課題のひとつである。

今後さらに、衛星利用の地球大気観測の必要性は増して行くものと考えられ、その場合にも成層圏・対流圏のオゾン、エアロゾル観測はその優先度は高いと考えられる。最近のレーザー技術の発展に伴い、衛星搭載レーザーレーダーの実現性もいよいよ高まってきている。



## 2. 地球規模大気環境問題の現状

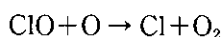
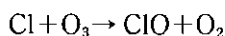
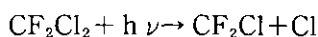
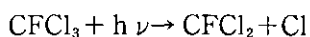
現在、地球規模大気環境問題として注目を浴びているのは、主にフロンによるオゾン層破壊、二酸化炭素等による地球温暖化、二酸化硫黄等から生ずる酸性雨の三つである。これらは、人間活動に基づく化学物質がそのまま、あるいは変質を受けて、大気環境を変化させることにより生起している。例えば、不燃で、人体に無害で、分解しないため夢の化学物質と呼ばれたフロンが対流圏では分解せず成層圏で光分解を受けて、生成した塩素原子がオゾン層を破壊する。二酸化炭素、メタン、フロン、対流圏オゾン、亜酸化窒素等の微量ガスが産業活動、食料確保のために放出され、赤外線を吸収して地球温暖化を起こす。二酸化硫黄、窒素酸化物等の燃焼により放出されたガスが変換を受けて酸性物質となり雨水にとけ込んで酸性雨となる。

以下個々の項目について詳しく述べる。

### 2.1 オゾン層破壊問題

オゾン層は、地球上の生物に有害な紫外線を遮蔽する一方、太陽光エネルギーの吸収によって上層の高温層(成層圏)の生成に寄与するなど気象学的に重要な層の一つであるが、上層大気中(10~50 km)にオゾン層が生成される点については、1930年にS. Chapmanによって純酸素大気モデルが提出された。これは酸素分子の光解離に始まり、酸素原子と分子の結合によるオゾンの生成やその光解離消滅等を基本とする。その後、1957-1958年のIGY(国際地球観測年)に始まる全球オゾン観測網の確立やオゾンゾンデの開発を経て、1970年代初めには $\text{HO}_x$ や $\text{NO}_x$ を含むオゾン層のより一般的な光化学理論が確立した。これにはSST(超音速旅客機)の排気ガスによる成層圏オゾン層破壊が、地球規模環境問題として取り上げられ、そのアセスメントをめぐる欧州と米国・カナダの研究者を中心に論争が巻き起こされたことが大きく貢献している。SST問題では、当初考えられたNOによるオゾン破壊は、飛行高度が成層圏下部である場合には、オゾン破壊サイクルを完結させる連鎖系で不可欠なO原子が少ないうえに、SSTより放出されたNOが $\text{HO}_2$ とそれまで考えられていたより速く反応し、その結果生じる $\text{NO}_2$ が光解離でOを放出するため結局オゾンの再生産に終ること、一方OHによるオゾンの破壊は、生じた $\text{HO}_2$ がNOと反応し、やはりオゾンを再生産するため深刻なものではなく、むしろ対流圏に関してはオゾンが増加するというのが結論であった(Shimazaki, T., Minor Constituents in the Middle Atmosphere, Terra Sci. Pub. Com., Tokyo, 1989)。

一方、1974年には、MolinaとRowlandによりフロンガス( $\text{CFCl}_3$ 、 $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ )が大気中で安定であること、そのため成層圏上部まで壊れずに運ばれること、その結果オゾン層上部で紫外線により破壊され塩素を放出すること、そして塩素を含む $\text{ClO}_x$ 系の反応によりオゾン層破壊が起こる可能性が指摘された。すなわち、



が通常いわれているオゾン層破壊問題である。このオゾン層破壊予測は、 $\text{ClO}_x$ 量を規定する気体反応(Homogeneous Reaction)が改訂される度に変遷したが、いずれにせよ事態が深刻化するのには21世紀半ばのはずであった(図2.1-1参照)。

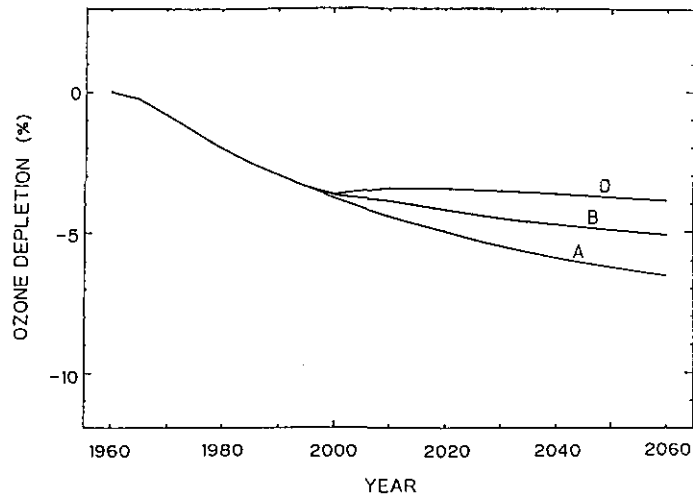


図 2.1-1 気象研究所 2 次元モデル(Homogeneous Reaction のみ) による将来予測 (佐々木、1989 私信)  
1986年レベルでフロンを使い続けた場合(A)、50%削減の場合(B)、95%削減の場合(D)。

ところが、1985年に英国の J. Farman らは、南極で 1970 年代半ばから上層のオゾンが顕著に減少してきたこと、その原因としてフロンガスが考えられることを提唱した(Farman, J. C. et al., Nature, 315, 207-210, 1985)。これが今日のオゾン層破壊問題に新たな局面をひらくもととなった。英国 Antarctic Survey は Halley Bay (7535'S, 2640'W) において、1957 年からオゾン全量を観測してきた。同基地の月平均値を 10 月(南極の春)についてみると、1970 年代半ばすぎから急速な減少を示していることが明かとなった(図 2.1-2 参照)。

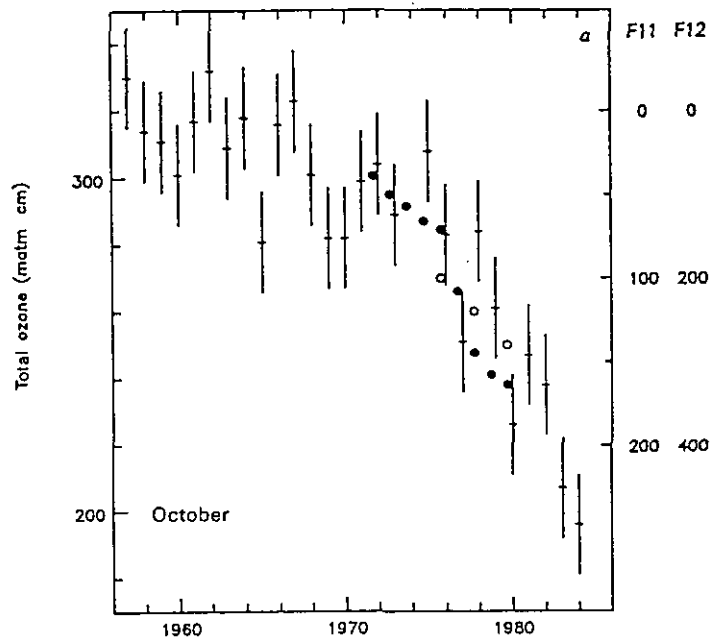


図 2.1-2 Halley Bay 基地のオゾン全量観測値の 10 月についての月平均値  
黒丸は南半球で観測されたフロン(F-11、12)濃度を逆さまにプロットしている (Farmanetal., 1985より)。

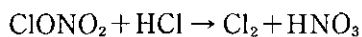
昭和基地では、英国より4年おくれの1961年と、そのあとの中断後1966年以来、現在にいたるまで質の良いオゾン観測が継続されている。特に、IGYから25年後の1982年にはMAP(中層大気国際共同観測)計画の一環としてオゾン特別観測が実施された。この時、月光を利用した極夜期の観測も行われたが、春に異常に低いオゾン量が観測された。これは忠鉢によってFarmanに先だって発表されている(Chubachi, S, Mem. Natl. Inst. Pol. Res., spec. iss., 34, 13-19, 1984)。

米国のNASAの地球観測衛星Nimbus-7は、オゾン全量観測装置(TOMS)を搭載していた。地上観測で得られたと同じオゾン全量の低い値が観測されていたことが確認され、しかも、南極大陸を覆う広い範囲で減少していることを明かにした。

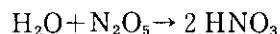
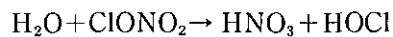
S. Solomonらは、観測事実からオゾンホールの特徴を次のようにまとめた(Solomon, S, et al., Nature, 321, 755-758, 1986)。

- (1) 南半球に限られている
- (2) 緯度と季節に強く依存する
- (3) 高さ15-20 kmで、オゾンの化学的寿命が数年から大体1カ月に縮まっている
- (4) 少なくとも最近10年間で加速されている

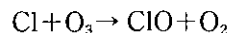
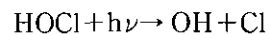
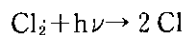
この事実をもとに、フロンガスの増加に伴い成層圏に供給される塩素酸化物( $\text{ClO}_x$ )と南極成層圏に特徴的なPSCs(極成層圏雲; Polar Stratospheric Clouds)による不均一系反応をふくむ光化学がオゾン破壊をもたらしたとした。通常、中低緯度の40 km以上の高高度では、 $\text{ClO}_x$ は触媒として有効に作用しオゾンを破壊するが、15-20 kmの下層では、 $\text{ClO}$ は $\text{NO}_2$ と反応して $\text{ClONO}_2$ になり、オゾンにたいし不活性となる。しかし、 $\text{ClONO}_2$ と同じく塩素化合物のReservoir(溜気体; 光解離等で分解し活性気体源となる)である $\text{HCl}$ が、PSCsの表面で知られている数値より速く反応し(Heterogeneous Reaction)、



あるいは



となり、ここで生成された $\text{HNO}_3$ は $-82^\circ\text{C}$ 以下の低温下でPSCsへ取り込まれ(脱室作用)、一方気体として残された塩素化合物は



とオゾン破壊をもたらすことが知られてきた。また、PSCsはタイプIとIIに分けられること、タイプIは、より高温( $-76^\circ\text{C}$ )でつくられ粒径 $1 \mu\text{m}$ のオーダーで気相の反応に寄与すること、これに対しタイプIIは、 $10-100 \mu\text{m}$ のオーダーの粒径をもち $\text{HNO}_3$ を固相に取り込む主役を演じること等が知られてきた。

オゾンホールの発見とその解明では、地上からの観測とともに、人工衛星Nimbus搭載のTOMSの観測や、SST問題以来培った高度な測定技術と発達した航空機観測が大きな役割を演じていることはよく知られている。南米チリのプンタ・アレナスから、U-2型を改造したER-2を用い高度17.5-19 kmのオゾンホール内外の観測に成功し、 $\text{ClO}$ と $\text{O}_3$ の逆相関(オゾンの減少と $\text{ClO}$ の増加)を見いだしたことなど、南極オゾンホールの機構解明に大きな武器となっている。

オゾン層破壊問題に関する国際的な動きの現状は以下の通りである。

1985年3月、UNEP（国連環境会議）の外交会議で「オゾン層の保護に関する条約」がウィーンで採択され、欧米諸国はこれに署名し多くは締約した。この条約では、オゾン層の変化が人の健康と環境に有害な影響を及ぼすこと、これについて各国の責任、開発途上国への配慮の必要があること、オゾン層の変化を防止するため、国際協力と科学的考慮に基づいた対策、研究と組織的観測が必要であることを強調している。1988年9月中旬に20カ国の締約で条約が発効した。この条約に基づく実際上の規制をする議定書は、採択2年後の1987年9月にモントリオール会議で採択され、具体的な規制フロン（フロン11、12、112、113、114）の係数を掛けた数値で規制し、最終的に1998年6月までに特定フロン（フロン11、12、112、113、114）を1986年の生産量・消費量の50%に削減することになった。しかし、その後、新たな観測データや将来予測によって不十分であるとの意見が提出され、1990年6月のロンドンで開かれた議定書締約国会議で、特定フロン及びその他のハロンや四塩化炭素等を含め、2000年以降全廃するよう規制が強化されている。ハロンは消化剤として、四塩化炭素はフロンの原料として用いられ、またメチルクロロホルムは洗浄剤として用いられているが、いずれも2005年以降には全廃ということになっている。ただし、ハロンのうち、代替が困難で安全上不可欠なものについては例外が認められ、1993年1月までにその内容が決定されることになっている。

いずれにしても、これらの国際的取り組みにあたり基礎となる科学的知見の集積と精密化のために、飛翔体レーザーレーダーや分光観測、現場測定技術の開発とそれらによる総合的観測体系の確立が急務である。

## 2.2 地球温暖化の問題

### 2.2.1 はじめに

太陽から入射してきた可視光が地表面で吸収されて、地表面が放出する赤外線を温室効果ガスが吸収するために温室効果は起こる。地球温暖化に最も寄与するガスは、全ての炭素を含む物質の完全燃焼により生成した二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）である。1980年代では地球温暖化への寄与としてCO<sub>2</sub>が最高で49%、続いてメタン（CH<sub>4</sub>）が18%である（西岡秀三：環境情報科学、18、(3)、2、1989）。他に寄与するものはクロロフルオロカーボン（フロン）、あるいは対流圏オゾン（O<sub>3</sub>）があり、次に寄与するものとして亜酸化窒素（N<sub>2</sub>O）がある。対流圏O<sub>3</sub>を除くこれらのガスはすべて近年急激な増加を示していることが、全世界で観測されている。CH<sub>4</sub>は約1%/年の増加を示し、フロンはこれより大きい増加を示している。CO<sub>2</sub>やN<sub>2</sub>Oの増加率は低い。温室効果ガスの1985年の平均濃度、10年間の増加傾向、21世紀半ばの予測濃度を表2.2-1に示した（V. Ramanathan: Science, 240, 293, 1988）。

表 2.2-1 温室効果ガスの平均濃度、増加傾向、予測濃度

温室効果 ガス	濃度		増加傾向 1975～ 1985年 (%)	予測濃度 21世紀半ば
	1850年以前	1985年		
CO <sub>2</sub>	275 ppmv	345 ppmv	4.6	400～600 ppmv
CH <sub>4</sub>	0.7 ppmv	1.7 ppmv	11.0	2.1～4 ppmv
N <sub>2</sub> O	0.285 ppmv	0.304 ppmv	3.5	0.35～0.45 ppmv
フロン CFC-11	0	0.22 ppbv	103.0	0.7～3.0 ppbv
フロン CFC-12	0	0.38 ppbv	101.0	2.0～4.8 ppbv

温室効果の大きさは各々の気体によって異なり、CO<sub>2</sub>と比較するとCH<sub>4</sub>で約20倍であり、その他の気体はもっと大きな値になっている(巻出義紘：化学と生物、26、50、1988)。地球の温暖化による影響は海水面の上昇や、気候変化による農作物の減収などに代表されるが、徐々に進行する過程であり、一旦生じた環境の変化の回復は、非常に困難である。そのため、現実には被害が確認されてから、対策を講じても手遅れになる。

### 2.2.2 メタンの濃度増加と正と負のフィードバック効果

CH<sub>4</sub>の全世界の平均対流圏濃度はRowlandらにより測定されているが、ここ10年間の測定値を図2.2-1に示した。

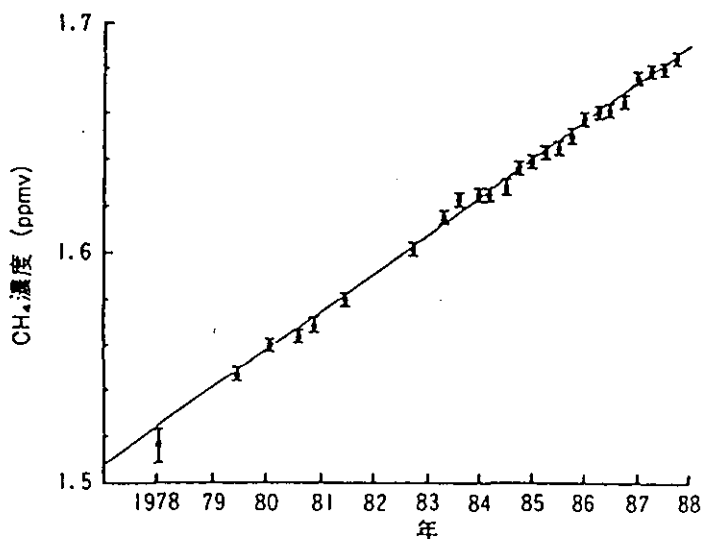


図 2.2-1 全世界平均の対流圏 CH<sub>4</sub>濃度の径年変化

1978年には約1.52 ppmvであったが1988年には1.68 ppmvに増加しており、平均して0.0165 ppmv/年(約1%/年)の増加を示している(D. R. Blake, F. S. Rowland: Science, 239, 1129, 1988)。北半球と南半球における緯度別の分布はSteeleらにより測定されている(図2.2-2参照)。

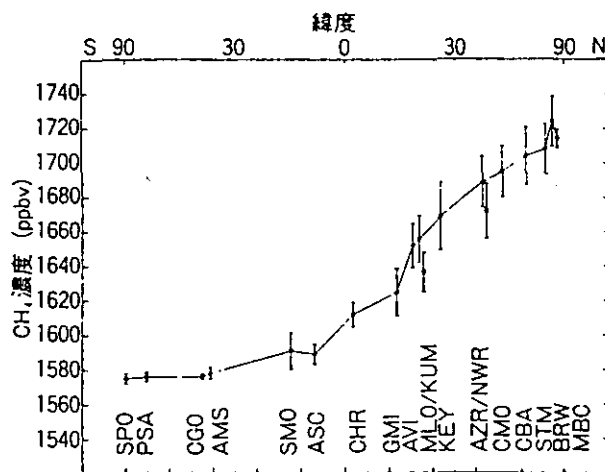


図 2.2-2 1984年のCH<sub>4</sub>濃度の緯度分布

1984年の年平均のデータによると、北半球では1.65~1.72 ppmvにほとんどが分布しているが、南半球では1.6 ppmv以下であり北半球と南半球での濃度差が明らかに見られ、差は約6%である(L. P. Steele, et al.: J. Atmos. Chem., 5, 125, 1987)。高度分布は図2.2-3に示したが、地上~15 kmまでは一定濃度であるが、高度が上昇するほど濃度は減少する。

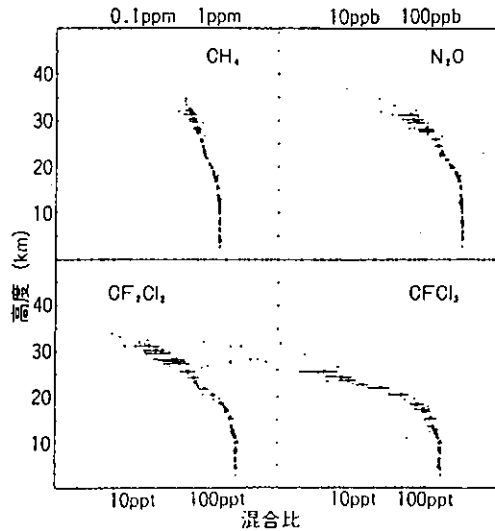


図 2.2-3 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>、CFCl<sub>3</sub>の高度分布

CH<sub>4</sub>は反応性に乏しく除去過程が少ないため、同じ図に示したCFCl<sub>3</sub>、CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>Oよりも濃度の減少率が低い(D. H. Ehhalt, E. P. Roth, U. Schmidt: J. Atmos. Chem., 1, 27, 1983)。季節分布に関しては、図2.2-4に示したような濃度増減が示されており、夏場(6~8月)に濃度が1~2%程度低くなっている(M. A. Khalil, R. A. Rasumussen: J. Geophys. Res., 88, 5131, 1983)。

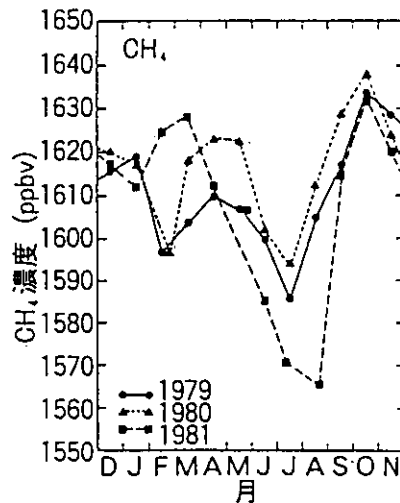


図 2.2-4 CH<sub>4</sub>濃度の経月変化

歴史的なCH<sub>4</sub>の濃度変動は南極や北極などの極域やグリーンランドの地下深くの氷中の気泡中のCH<sub>4</sub>濃度測定により得られている。図2.2-5に示したように産業革命(約200年前)以前は0.6~0.8 ppmvであったのが、ここ100年CO<sub>2</sub>を上回る急激な増加率を示しながら増加している(R. A. Rasumussen, M. A. Khalil: J. Geophys. Res., 89, 11599, 1984)。

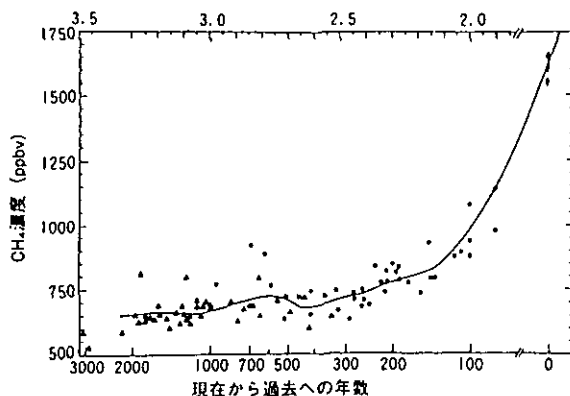


図 2.2-5 現在より 2000 年昔までの CH<sub>4</sub>濃度の変化

過去 200 年間の CH<sub>4</sub>濃度の増加は人口や工業化社会の増大と非常に強い相関があり、CH<sub>4</sub>放出量の増加は水田農業の拡大、家畜の増大、有機廃棄物の増加、鉱業、化石燃料の使用の結果であると考えられている。

極域は、酸素が欠乏し有機物の豊富な湿地帯である。湿地は微生物学的分解過程により CH<sub>4</sub>を放出するため、極域においては地表面の少し下の所に CH<sub>4</sub>が凍結された状態で多量に存在している。南極やグリーンランドの水床サンプルから、西暦紀元前約 20,000 年の氷河時代には CH<sub>4</sub>は低濃度 (350 ppbv) であったが、間氷期には濃度が増加 (650 ppbv) したことが明らかになった。極域の海や陸地が温まると、凍結されている CH<sub>4</sub>は解放され土壌を伝わって大気中へ放出される。氷河時代と間氷期の濃度変化は、氷河の後退による南極と北極での泥炭地の拡大によるものと考えられている。これらの極域の泥炭地は自然の湿地における約 60%の放出量を占めている。

地球の温暖化により CH<sub>4</sub>の発生量が増加すると正と負のフィードバックが起こり得る。有機物を多量に含んだ土壌や底質土壌においては、CH<sub>4</sub>の発生量は表面温度が増加すれば増加する。図 2.2-6 は北部ミネソタでの測定値で、土壌温度が上昇すると CH<sub>4</sub>発生量が増加している (R. C. Harris: Ozone Depletion, Green house Gases, and Climate Change, National Academy Press, 79, 1989)。

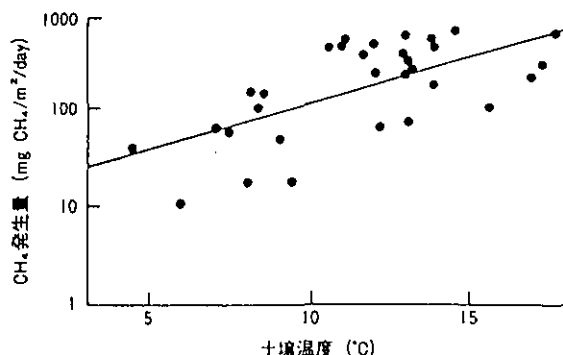


図 2.2-6 沼地における CH<sub>4</sub>発生量の土壌温度依存性

CH<sub>4</sub>濃度が増加すると温暖化が進みさらに CH<sub>4</sub>の放出が増加する。このような正のフィードバックは急激な気候変化をもたらす生態学的な崩壊をもたらす恐れがある。負のフィードバック効果としては、温暖化により水分の蒸発量が増え、大気中に雲が増えアルベドが高くなり、地球表面の冷却化が起こる。ま

た、大気中の水分の増加はOH ラジカルの増加をもたらし、分解により CH<sub>4</sub>濃度の増加が抑えられる。

### 2.2.3 メタンの発生源と除去過程

現在見られている CH<sub>4</sub>の濃度増加は、発生量が増加しているのか除去過程が少なくなっているのか何れかは明らかでない。表 2.2-2 に示した Crutzen らの見積によると、1.1%/年の CH<sub>4</sub>の増加は 50~60 Tg /年の大気中への残存量を示している (H. G. Bingemer, P. J. Crutzen: J. Geophys. Res., 92, 2181, 1987)。

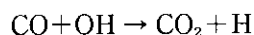
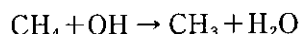
表 2.2-2 メタンの発生速度と収支

除去過程	
OH との対流圏での反応	290-350
OH との成層圏での反応	25-35
酸化性の土壌への吸収	10-30
年増加 (1.1%/年)	50-60
要求される発生源の総計	375-475
発生源	
家畜	70-80
天然ガスのリーク	35
炭鉱	35
埋立地	30-70
焼き畑	30-100
野生動物	2-6
他の動物群 (例えば昆虫)	30
動物の廃棄物	?
水田と湿地	44-228

除去量としては、対流圏での OH ラジカルとの反応によるものが 290~350 Tg /年、成層圏における OH ラジカルとの反応による除去量が 25~35 Tg /年、酸化性の土壌取り込みによる除去量が 10~30 Tg /年であり、これらが主な大気中の CH<sub>4</sub>の除去過程である。残存量と除去量の和と発生量を釣り合わせるために、水田と湿地からの発生量を 44~228 Tg /年としている。

日本政府は「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」での CH<sub>4</sub>対策検討作業に積極的に貢献するため、環境庁を中心に「CH<sub>4</sub>問題検討会」を設置した。検討会の算出では日本の年間発生量は 1 Tg で発生源別発生割合は水田 34%、廃棄物処理 30%、家畜 28%、天然ガス施設からの漏れや自動車などその他 8%となっている。

除去過程としては、次の反応式に示したように OH ラジカルとの反応が最も寄与が大きいといわれている。



さらに、CH<sub>4</sub>や CO の OH ラジカルとの反応に関連する反応を図 2.2-7 に示した (J. A. Logan, et al.: J. Geophys. Res., 86, 7210, 1981)。



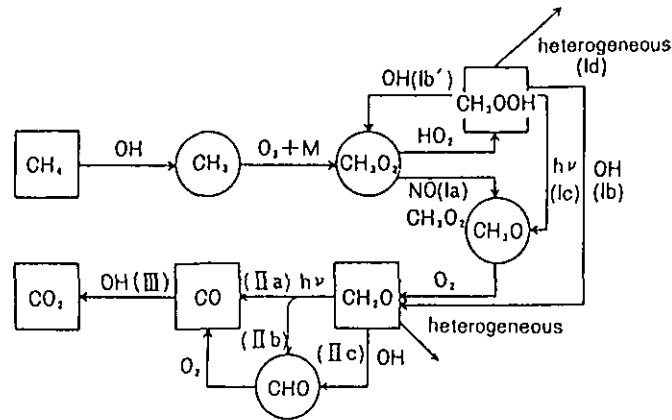


図 2.2-7 CH<sub>4</sub>と CO と OH ラジカルの関連する化学反応

この反応過程、反応速度においては明らかでない部分も多いが、メチルパーオキシラジカル(CH<sub>3</sub>OO)あるいはヒドロパーオキシラジカル(HO<sub>2</sub>)、それらの消長に影響を与える NO<sub>x</sub>の存在量、それらが複雑に絡み合って CH<sub>4</sub>や CO の除去速度を支配している。例えば、OH ラジカルと HO<sub>2</sub>ラジカルの大気中の存在量のシミュレーション計算では、高度 2～3 km の所に最高濃度を示すが、北半球、南半球のそれぞれの夏に高い濃度を示しており、夏に CH<sub>4</sub>や CO が大量に除去されることを示唆している。季節変化の所で述べた分布は上に述べた事実、または夏季に逆転層高度が高くなる事により説明される。

12 km までの高度による CH<sub>4</sub>と CO の OH ラジカルとの反応速度を図 2.2-8 に示したが、これによると下層では数倍の違いであるが、上層の 12 km に近くなると OH と CO との反応が 10 倍ほど速くなり、CO の濃度に CH<sub>4</sub>の除去が支配されることになる (J. A. Logan, et al.: J. Geophys. Res., 86, 7210, 1981)。

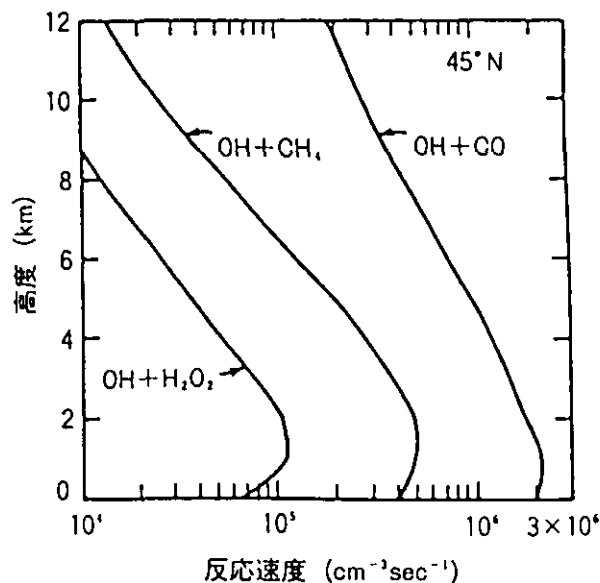


図 2.2-8 OH+CH<sub>4</sub>、OH+CO の反応速度の高度変化

このような反応の関係から考えても、CH<sub>4</sub>の発生量が増加して CH<sub>4</sub>の大気中濃度が増加しているのか、あるいは燃焼過程から発生し、CO<sub>2</sub>と同じく発生量が増加しているものと推定される CO の発生量がそれ

を上回る増加を示して OH ラジカルを急速に消費してしまうために CH<sub>4</sub>の除去過程が減少しているのか、それらの点はこれからの CH<sub>4</sub>発生量や CO 濃度の測定の研究によって明らかになるものと思われる。

現在の人間活動からの CH<sub>4</sub>の発生量を 250 Tg/年とし、人口の増加をパラメーターにした CH<sub>4</sub>濃度の変動のシミュレーションを行うとシミュレーション値と実測値はかなり良く一致する。また、ここ 200 年間の CH<sub>4</sub>の増加は発生量の増加が 70%であり、残りの 30%は OH ラジカル濃度の減少によるものとの計算結果が得られた (M. A. K. Khalil, R. A. Rasumussen: Atmos. Environ., 19,397, 1985)。以上、主に CH<sub>4</sub>に関して述べた。

#### 2.2.4 対流圏オゾン

最後に全球での測定が難しく、地球温暖化への寄与が明らかにされていない対流圏 O<sub>3</sub>について述べる。対流圏に存在する O<sub>3</sub>には低気圧の通過に伴う大気の上下混合により、成層圏から乾いた空気と共に注入される成層圏 O<sub>3</sub>と、対流圏で NO<sub>x</sub>と反応性炭化水素と光の共存下で生成する光化学反応による O<sub>3</sub>がある。これらの O<sub>3</sub>濃度は、成層圏からの注入がどの程度あるか、また NO<sub>x</sub>や反応性炭化水素の供給がどれほどあるかによって非常に変動し易いため (対流圏大気中には 0~100 ppb で存在する可能性がある)、緯度、経度、高度方向でかなり異なり、全球での平均濃度の測定は難しい。船舶を使用した緯度分布の測定例を図 2.2-9 に示した (P. Winkler: J. Atmos. Chem., 7, 73, 1988)。

北半球の方が南半球より 2~3 倍の高濃度を示している。

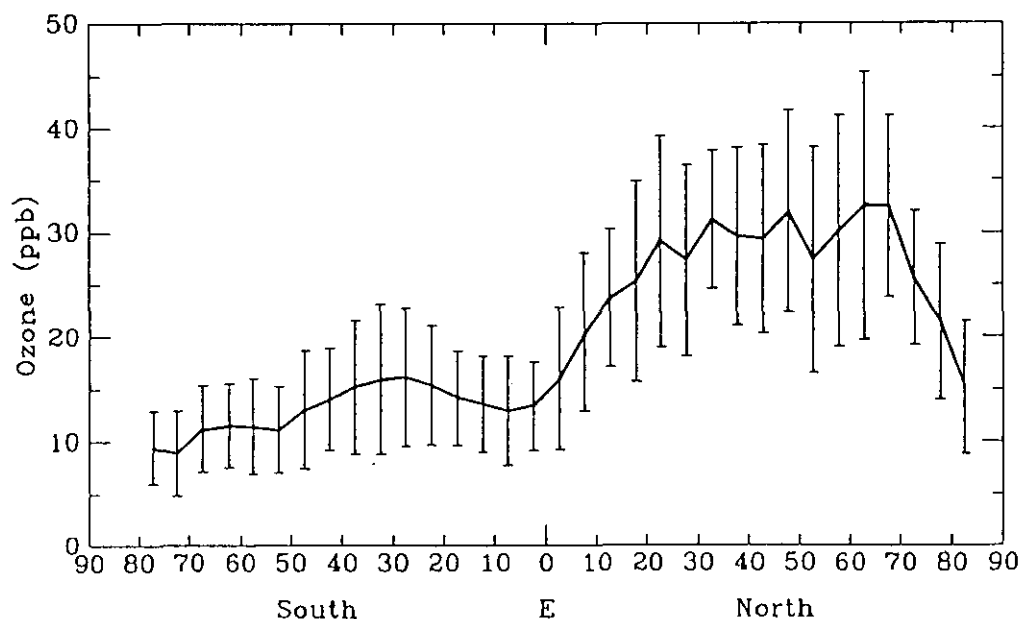


図 2.2-9 対流圏 O<sub>3</sub>の緯度分布

## 2.3 酸性雨の問題

### 2.3.1 はじめに

酸性雨は、化石燃料を主とする燃焼過程によって放出された硫黄酸化物 (SO<sub>2</sub>)、窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) が大気中で主に OH ラジカルにより酸化されて酸性物質となり、雲や雨に溶け込んだり、そのままの形、即ちガスや粒子として地表に降って来ることによって主に生じている。現在広範な被害の確認されている所は、早い時代に近代化を成し遂げ、エネルギー消費量の大きい地域である。北欧や北米でまず被害が顕在化したが、最近ではアジア諸国においても経済発展が著しく、エネルギー使用量が増加している。発展途上国では主たるエネルギー源は石油、天然ガス以外のものであり、酸性雨の原因となる、硫黄分含量が高い。

中国では石油は高価な物として主に車に使われ、発電所では石炭を使用している。1982年においては総エネルギーの74%を石炭が占めていた。このため粒子状物質と硫黄酸化物が代表的な大気汚染物質となっている。全国的な酸性雨調査は1982年より実施されているが、表2.3-1によると揚子江の南側の地域における降雨回数の半数以上においてはpHが5.6より低くなっている(坂本和彦：燃料協会紙、69、246-258、1990)。

表 2.3-1 中国の主要都市における雨水の pH 値

番号**	地域	都市	pH (測定期間)
1	北部	北京	6.74 (1982.2-7)
2		天津	6.26 (1981)
3		瀋陽	6.3~7.8 (1982.5, 8)
4		西安	6.12 (1982.1-1983.3)
5		蘭州	6.85 (1981.1-1982.8)
6	南部	広州	5.65 (1982.5, 6)
7		重慶	4.14 (1982-1984)
8		貴陽	4.07 (1982-1984)
9		上海	5.87 (1985)
10		南京	5.47 (1982)
11		杭州	5.10 (1982.9-11)
12		武漢	5.96 (1981.8-1983.3)
13		福州	4.49 (1982.5)
14		南寧	5.33 (1981.5-1983.3)
15		宜賓	4.87 (1982)
16		成都	~5.6 (1982-1984)

データによると北部では雨水はアルカリ性であるが、南部では酸性を呈し、重慶、貴陽では pH4 台の雨が観測されており、植物被害などが顕在化している。南部と北部とでは硫酸イオン (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 等の陰イオン濃度では差がなく、アンモニウムイオン (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) とカルシウムイオン Ca<sup>2+</sup>等の陽イオン濃度で差がある。北部では pH 7~8 のアルカリ性土壌が広がっているため中和作用が働いているものと考えられ、このため南部では酸性雨が降ることになる。

現在のところ北半球で被害が顕在化しているが、将来は低緯度地帯でも被害が起こる可能性がある。

### 2.3.2 酸性雨の生成メカニズム

大気中には自動車排ガス、工場排ガスを代表とした一次排出物質として、ガス状の汚染物質である SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、炭化水素 (HC)、アルデヒドなどが放出される。アンモニア (NH<sub>3</sub>) は汚染ガスではないが、酸性雨を考える場合には非常に重要なガスである。大気中での大気汚染物質の生成過程と除去過程を図 2.3-1 に示した(村野健太郎：環境技術、15、506、1986)。

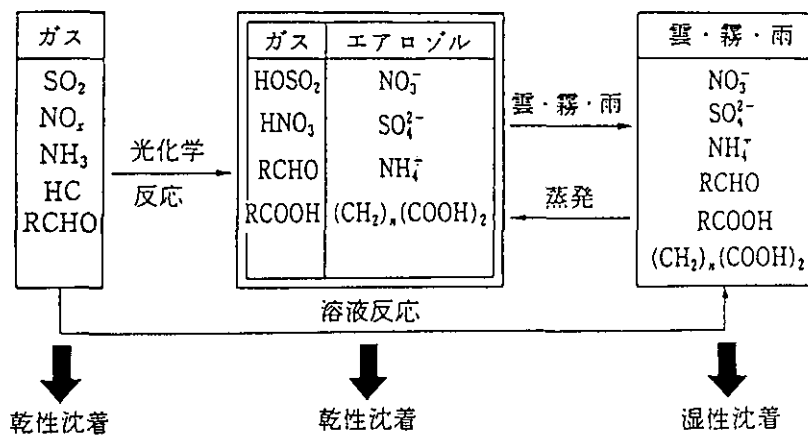


図 2.3-1 大気汚染物質の生成過程と除去過程

汚染ガスは光化学反応によりガス状の HOSO<sub>2</sub>、硝酸 (HNO<sub>3</sub>)、アルデヒド、カルボン酸等に変換される。粒子化して硝酸イオン (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、炭素系の粒子であるジカルボン酸のような蒸気圧の低い化学種になり、ガスやエアロゾルとして大気中に存在している。このガス、エアロゾルは、乾性沈着で大気中から地表や植物表面へ除かれる。雲、霧、雨が生成すると、液滴の中に溶け込み、雨水中の NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、アルデヒド、カルボン酸として湿性沈着で大気中から除かれる。反応の中間段階としてガスやエアロゾルを経ずに、直接液相の中へ溶け込んで、そこで溶液反応が起こる場合もある。この例は SO<sub>2</sub> と過酸化水素 (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) による SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> の生成である。

### 2.3.3 NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> の気相反応

光化学反応により、NO<sub>2</sub> が光分解して NO と O が生成する。O は酸素分子と反応して O<sub>3</sub> になる。二重結合を含む反応性の高い HC があると、そこで OH ラジカル、HO<sub>2</sub> ラジカル、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> という非常に酸化力の強い物質が生成する。以降ガス状の H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> を H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(g)、液相中の H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> を H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(l) と表わす。大気中の NO<sub>2</sub> は OH ラジカルと反応して HNO<sub>3</sub> に変換される。O<sub>3</sub> が NO<sub>2</sub> と反応して生成した NO<sub>3</sub> と NO<sub>2</sub> が平衡反応で N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> になり、この N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> が水分子と反応して HNO<sub>3</sub> を生成する。生成した HNO<sub>3</sub> は NH<sub>3</sub> や NaCl 等の化学種と反応して粒子状の NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>、あるいは NaNO<sub>3</sub> となり大気中に存在する (Calvert, J. G. and Stockwell, W. R.: Environ. Sci. Technol., 17, 428A, 1983)。大気中に放出された NO<sub>x</sub> (NO がほとんどである) がどのように反応し、除去されるかを図 2.3-2 に示した (Russell, et al.: Atmos. Environ., 19, 893, 1985)。

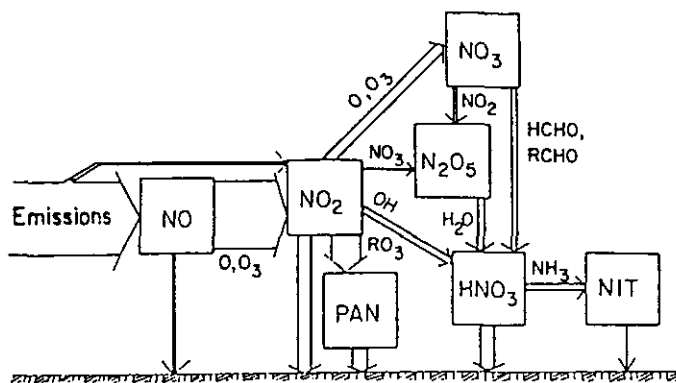


図 2.3-2 NO<sub>x</sub> の変換ルートと沈着量

下向きの矢印の太さが沈着量に対応している。NOとしての沈着は非常に小さくNOはほとんどNO<sub>2</sub>に変換される。NO<sub>2</sub>は表面に沈着したり、PAN（パーオキシアセチルナイトレート）、HNO<sub>3</sub>にも変換される。HNO<sub>3</sub>の沈着はPANやNO<sub>2</sub>と同様に大きい。HNO<sub>3</sub>は粒子状の硝酸塩(NIT)になり沈着する。雨の無い大気の場合にはこのようになる。雨が降る時は、HNO<sub>3</sub>、PAN、NITは直ちに雨水中に溶け込み大気中から除去される。

大気中の主な活性種とSO<sub>2</sub>との反応速度定数と酸化速度を表2.3-2に示した（福山力：環境技術、12、806、1983）。

表 2.3-2 大気中の主な活性種とSO<sub>2</sub>の反応速度定数k（1気圧、25°C）

反 応	k/cm <sup>3</sup> molec <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	活性種の推定濃度 / molec cm <sup>-3</sup>	酸化速度/%h <sup>-1</sup>
HO+SO <sub>2</sub> +M→HOSO <sub>2</sub> +M	1.14×10 <sup>-12</sup> (M=air)	(2~9)×10 <sup>6</sup>	0.8~3.7
RCHOO+SO <sub>2</sub> →RCHO+SO <sub>3</sub>	?	?	~0.03(R=H)
O( <sup>3</sup> P)+SO <sub>2</sub> +M→SO <sub>3</sub> +M	5.7×10 <sup>-14</sup> (M=air)	2×10 <sup>5</sup>	0.004
O <sub>3</sub> +SO <sub>2</sub> →O <sub>2</sub> +SO <sub>3</sub>	<8×10 <sup>-24</sup>	(1~5)×10 <sup>12</sup>	(0.3~1.5)×10 <sup>-5</sup>
HO <sub>2</sub> +SO <sub>2</sub> →HO+SO <sub>3</sub>	<1×10 <sup>-18</sup>	≤6×10 <sup>9</sup>	<0.002
HO <sub>2</sub> +SO <sub>2</sub> +M→HO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> +M			
CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> +SO <sub>2</sub> →CH <sub>3</sub> O+SO <sub>3</sub>	<1×10 <sup>-18</sup>	~10 <sup>9</sup>	<4×10 <sup>-4</sup>
CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> +SO <sub>2</sub> +M→CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> +M	~1.4×10 <sup>-14</sup>	?	~5.0 ?

OHラジカルがSO<sub>2</sub>と反応してHOSO<sub>2</sub>を生じ、最終的には硫酸になるが、速度定数と活性種であるOHラジカルの推定濃度(2~9×10<sup>6</sup>moleccm<sup>-3</sup>)により酸化速度は0.8~3.7%/hrである。その他にも光分解した化学種であるO(<sup>3</sup>P)やO<sub>3</sub>、HO<sub>2</sub>、RO<sub>2</sub>という酸化ポテンシャルを持った物質があるが、これらの化学種によるSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>生成の寄与は非常に小さい。CH<sub>3</sub>O<sub>2</sub>は大気中濃度が高いため、最下段の反応によるSO<sub>2</sub>の除去速度は大きいはずだが、不明な点も多く、さらに研究が必要である。RCHOOはクリーギー中間体であり、O<sub>3</sub>と二重結合を持つHCが反応して出来る化学種で、速度定数や活性種濃度の推定により酸化速度は約0.03%である。しかし湿度が高くなると、水分子との反応が速いため、クリーギー中間体の寄与は少なくなる。SO<sub>2</sub>の酸化に関しては気相反応はOHラジカルとクリーギー中間体が支配的である。

#### 2.3.4 SO<sub>x</sub>の液相反応

ガスそのものが先に液滴の中に溶け込んで、雲水の中で反応が起こり酸化が進むケースが液相反応である。大気中のSO<sub>2</sub>は液相に溶け込むとS(IV)となる。このS(IV)はSO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの複合体、SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、及びHSO<sub>3</sub><sup>-</sup>である。S(IV)はO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(l)により酸化されてS(VI)(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)になるが、その酸化速度はpH依存性がある。

非常に酸化力が強いH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(l)によるSO<sub>2</sub>の酸化について、そのpH依存性を図2.3-3に示した(The national acid precipitation assessment program, Interim Assessment, The Causes and Effects of Acidic Deposition, Volume III, Atmospheric Processes, 4-31)。

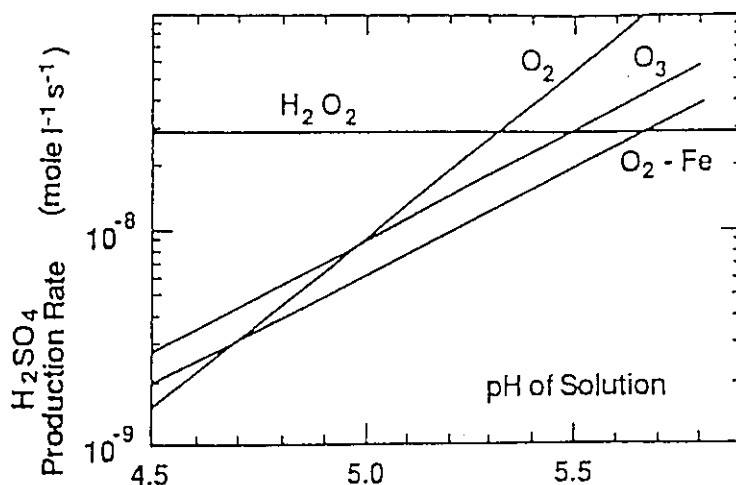


図 2.3-3  $\text{SO}_4^{2-}$  の生成速度の pH 依存性

$\text{SO}_4^{2-}$  の生成速度は速度定数、 $\text{H}_2\text{O}_2(\text{l})$  濃度、 $\text{S}(\text{IV})$  濃度の積になる。 $\text{O}_2$ 、 $\text{O}_2\text{-Fe}$ 、 $\text{O}_3$  による酸化の場合は pH が低下すれば低下するが、 $\text{H}_2\text{O}_2(\text{l})$  による酸化の場合は変化しない。すなわち、pH が下がるにつれて  $\text{H}_2\text{O}_2(\text{l})$  の酸化が相対的に効くので酸性雨化すればするほど  $\text{H}_2\text{O}_2(\text{l})$  の存在する分だけ  $\text{SO}_4^{2-}$  の生成が多くなる。

液相中での  $\text{NO}_3^-$  の生成速度は速度定数と水素イオン濃度、亜硝酸、 $\text{H}_2\text{O}_2(\text{l})$  濃度に一次依存する。速度定数は非常に小さく、 $\text{HNO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2(\text{g})$  が 3 ppb 程度あると仮定した場合には  $\text{NO}_3^-$  の生成速度は  $1 \times 10^{-6} \text{ M/hr}$  となり、液相反応での  $\text{H}_2\text{O}_2(\text{l})$  による  $\text{NO}_3^-$  の生成は重要でない。 $\text{NO}_x$  に関しては雲の中に溶け込み、酸性化する機構は見つかっていない (Lee, Y-N. Lind, J. A.: J. Geophys. Res., 91, 2793, 1986)。

気相反応、液相反応を総合的に見た場合  $\text{SO}_2$  の酸化に関しては、気相反応では OH ラジカルの寄与が一番大きい。液相の反応の場合は液相に存在する  $\text{O}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{O}_2$  の寄与が大きい。pH 依存性から見ると pH が下がれば下がる程  $\text{H}_2\text{O}_2(\text{l})$  の寄与が大きくなるので、pH 3 程度で  $\text{O}_3$  を追い越して  $\text{H}_2\text{O}_2(\text{l})$  が  $\text{S}(\text{IV})$  を  $\text{SO}_4^{2-}$  に酸化する。 $\text{NO}_x$  に関しては液相反応はほとんどない。気相反応では  $\text{NO}_2$  と OH ラジカルによる  $\text{HNO}_3$  生成反応と、 $\text{N}_2\text{O}_5$  と水との反応による  $\text{HNO}_3$  生成反応の二つが酸性雨化に大きく寄与している。

これらの三つの地球規模大気環境問題に関しては、化学物質の形態と存在量が大きく関係している。このため、世界各地で地球規模のモニタリングが行なわれている。しかしながら、限られた科学技術と予算の枠内では、化学物質の全球での存在量測定は難しく、新たな展開が待たれる。

### 3. 地球規模大気環境計測における問題点と 飛翔体搭載レーザーレーダーへの期待

#### 3.1 オゾン層破壊

南極オゾンホールが発見以後、航空機観測や実験室での Heterogeneous Reaction の研究・塩素系反応の研究などが進んだが、実際の PSCs がどのような組成でどういう構成となっているのかという疑問や、途中の詳しい光化学過程の測定・モデル化、中低緯度への影響、北極を含む北半球はどうかなど、依然未解決の課題が残されている。地球科学においては、一般の物理学などと異なり、たとえ特定の現象が解明されたとしても、観測の継続が重要なことはいままでもない。地球全体の様子をたえずモニター出来る人工衛星からのオゾン・エアロゾル観測体制の確立が望まれる。これらは、地上あるいは航空機・バルーンなどからのより精密な研究観測とあわせて、今後のオゾン層破壊問題の研究調査に不可欠なものである。この点で従来わが国の国際的貢献は、欧米諸国にくらべ十分とは言えない。

一方、レーザーレーダー観測については、わが国では東北大学、九州大学、名古屋大学、信州大学などの国立大学及び通信総合研究所、気象研究所、国立環境研究所などの研究機関において、国際的に先導的な仕事が行われてきており、客観的にみて今後の展開が十二分に期待できる。

オゾン層破壊問題では、今後つぎのような点について飛翔体ライダー観測の実現に期待がもたれる。

##### 3.1.1 オゾンホール

南極オゾンホールでは、PSCs 表面の heterogeneous 反応が重要であるが、PSCs は粒径の大きく異なるタイプ I、タイプ II の区別があることが航空機によるサンプリング等でわかっている。(表 3.1-1)

表 3.1-1 極成層圏雲の性質の分類

性質	Type I	Type II
粒径	1 $\mu\text{m}$	10-100 $\mu\text{m}$
気温スレッシュホールド	~195K	~186K
組成	$\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O} + \text{Trace}$ ( $\text{HCl}$ , $\text{HNO}_3$ , $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
相対頻度	~90%	~10%
落下速度	~100日	1時間~3日

航空機観測は局所的なケーススタディであるため、極域全体にひろがるオゾンホールを解明するためには、より全体的な情報が必要と考えられる。その際、粒径に関する情報のみならず固相・液相の区別等の

観測ができることが望ましい。

### 3.1.2 オゾン層の全球的監視

従来 Nimbus-7 搭載の TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) 及び SBUV (Solar Backscatter Ultra-violet Spectrometer), LIMS (Limb Infrared Monitor of the Stratosphere Spectrometer)、SAGE - I, II (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment)、SME (Solar Mesospheric Explorer) 等によるオゾン全量及び鉛直分布観測がなされているが、精度や高度分解能あるいは水平分解能が十分ではなく、どの高度でオゾンがどの程度変化しているか、それに対応するエアロゾルの濃度はどうかなどの情報が必要である (図 3.1-1 参照)。

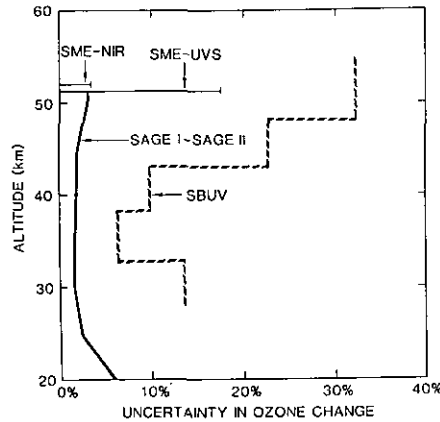


図 3.1-1 各種人工衛星から測定されたオゾン濃度変化の高度別不確定性の比較

(Report of the International Ozone Trends Panel 1988/WMO Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 18, 1990)

オゾン層トレンドパネル(WMO/UNEP 他:1988)によれば、南緯 60 以南の南極域上空だけでなく北半球を含む地球上でのオゾン全量の減少がみられる (図 3.1-2 及び図 3.1-3 参照)。

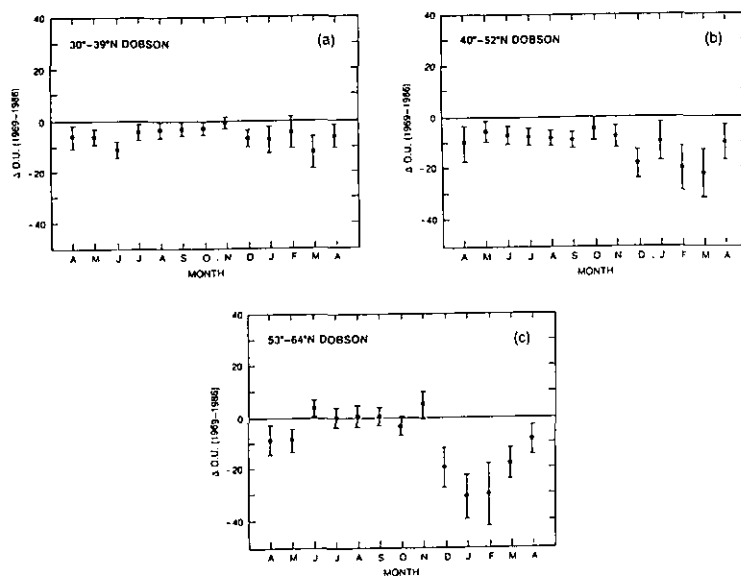


図 3.1-2 緯度別にみたドブソン分光観測によるオゾン全量の 1970 年から 1986 の間の変化。

(a) 30°-39°N、(b) 40°-52°N、(c) 53°-64°N



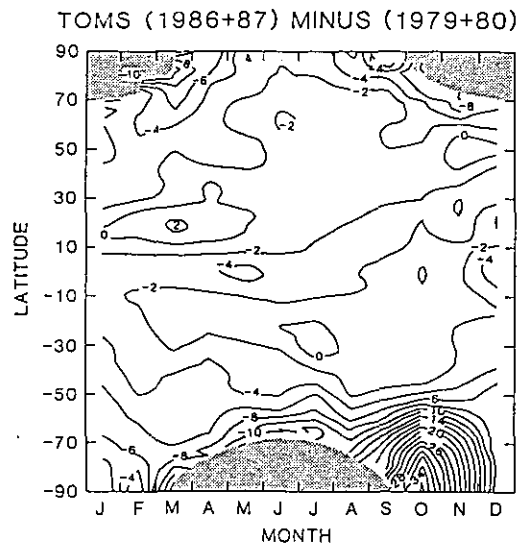


図 3.1-3 TOMS によって求められたオゾン全量値の(1986+1987)年と(1979+1980)年の間の変化。  
横軸は月、縦軸は緯度を示す。

特に、高緯度(53-64°N)の冬季に減少が著しいことが分かる。極域では、冬季のドブソン観測も TOMS 観測もデータ空白域となっており、アクティブセンサーであるレーザーレーダーによる観測が期待される。

これらの原因の解明は、従来の homogeneous chemistry のみのモデルでは説明が困難である。G. Brasseur (JGR, inpress) の最近の結果によれば、火山噴火等により成層圏に注入される硫酸エアロゾルが存在した場合、その表面での Heterogeneous 反応で脱 NO<sub>x</sub> が起き、極域以外も含めて ClO<sub>x</sub> によるオゾン破壊が加速されることが示されている。ここで重要なパラメーターは、単位体積あたりのエアロゾル表面積であるが、バックグランドが 0.1-1 μm<sup>2</sup>cm<sup>-3</sup>、火山噴火時には 10-100 μm<sup>2</sup>cm<sup>-3</sup> のオーダーまで仮定されている。一方、化学反応にはエアロゾル中の H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 濃度の存在比が大きく効くため、これらに関する情報をふくめエアロゾル観測の重要性が指摘される。

### 3.1.3 対流圏オゾンの動向

成層圏オゾンの減少と逆に、対流圏オゾンの増加も重要な問題である。フロンガスの増加に伴うオゾン層破壊は、高度 40 km 以上ではオゾンの顕著な減少をもたらす一方、成層圏下部から対流圏上部にかけては若干の増加をもたらす、全体としてオゾン全量の減少を抑制する効果を持っている。また、対流圏下層からもたらされる炭化水素や NO<sub>x</sub> の放出増加は、やはり対流圏オゾンの増加に寄与する。これらは、地表紫外線量を規定するばかりでなく温室効果の観点からも重要である (2.2 項参照)。

しかし、これらの定量的議論のためには成層圏・対流圏交換過程による成層圏オゾンの対流圏への流入量の正確な見積りが不可欠である。これまでに航空機等を用いて調査されたことがあるが、レーザーレーダーを用いることにより鉛直オゾン分布を瞬時にモニターできるため、情報が飛躍的に改善され得る。飛翔体からのレーザーレーダー観測が可能となれば、大気オゾンの 3 次元空間での把握が可能となり、光化学的效果と気象力学的効果の寄与を解明し得るであろう。

### 3.1.4 その他の観測との共同観測の必要性

成層圏の光化学過程の解明のために、各種の分光観測が実施・計画されているが、これらの観測とあわせてレーザーレーダーによるオゾンその他の微量成分及びエアロゾル観測ができることが重要である。他

の分光リモート観測は化学成分に関する情報に関しては今の所かなり進んでいるが、高度分解能に関する情報についてはレーザーレーダーに比べ劣っている。このため、一方で組成変化の情報を得つつオゾンを中心とした高度情報を得ることは成層圏光化学観測にとって極めて有用であると考えられる。

対流圏のエアロゾル、特に黄砂現象の解明等についてもレーザーレーダーによる2次元分布の把握は重要である。航空機等によるエアロゾル粒径分布や組成の現場測定に際し、その全体の中での位置づけが可能となるため、エアロゾルの長距離輸送中の変質過程の解明にとって有力な情報を与えてくれるものと期待される(2.3項参照)。

### 3.2 地球温暖化

地球温暖化に寄与するガスであるCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、フロン、対流圏O<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>Oの対流圏の濃度、あるいは経度、緯度分布の均一、不均一を表3.2-1に示した。

表 3.2-1 地球温暖化、酸性雨問題に関係した各種ガスの濃度範囲と経度、緯度分布の均一、不均一性

化学種	濃度	経度分布	緯度分布	カラム濃度
SO <sub>2</sub>	0~50 ppb	不均一		
NO	0~50 ppb	不均一		
NO <sub>2</sub>	0~50 ppb	不均一		
NH <sub>3</sub>	0~30 ppb	不均一		
CO	40~200 ppb	不均一		○
CO <sub>2</sub>	~370 ppm	均一	不均一	○
N <sub>2</sub> O	~300 ppb	均一	均一	○
CH <sub>4</sub>	~1.6 ppm	均一	不均一	○
O <sub>3</sub>	0~100 ppb	不均一		○
フロン	<1 ppb	不均一		
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	<4 ppb	不均一		○
HNO <sub>3</sub>	<5 ppb	不均一		○
OH	Trace	不均一		○
HO <sub>2</sub>	Trace	不均一		○
粒子状物質	0~200 μg/m <sup>3</sup>	不均一		
H <sub>2</sub> O (分子)		不均一		
雲		不均一		

COは特別に地球温暖化に寄与するガスとは言われていないが、OHラジカルとの反応においてCH<sub>4</sub>と競争し、COが10倍ほど速度定数が大きく、COの増加はCH<sub>4</sub>の除去を遅らせるためCOの測定値も必要である。表3.2-1に示した最低値と最高値の間の濃度測定が飛翔体搭載レーザーレーダーによって可能であれば、これらのガスの三次元方向での分布の実態を知ることが意味があり、発生源の同定を可能にする。カラム濃度でも充分であるが、ガスによっては経度、緯度、高度方向に分割して濃度が測定出来ることが望ましい。例えば、経度方向は50 Km、100 Km、500 Km程度、緯度方向は10 Km、50 Km、100 Km程度、高度に関しては500 m、1 Km、5 Km程度の測定が望ましい。しかし温室効果ガスはすべて酸性雨に関連した

物質よりも反応活性に乏しく分布の局所の変動が少ないため、酸性雨関連物質に比べれば経度、緯度、高度方向の分解能を上げる必要はない。

対流圏 O<sub>3</sub> に関しては濃度変動が大きいために、insitu な方法（例えば船舶を使用して緯度分布を求める）ではその他の温室効果ガスと比較しうる平均濃度が得られない。また船舶での観測は労力を要しカバーする領域も限られるため、航空機、衛星搭載レーザーレーダーによる対流圏濃度の測定は大きな意味がある。

### 3.3 酸性雨

酸性雨問題は地球規模の問題であると同時に地域の問題でもある。化石燃料の燃焼により汚染ガスとして出て来る NO<sub>x</sub> は、OH ラジカルとの反応が速いため酸化され易く、また酸化して生成した硝酸ガスは沈着し易いため地域的な問題となる。SO<sub>2</sub> に関しては OH ラジカルとの反応が NO<sub>x</sub> に比べて 10 倍程度遅いため、長距離輸送されることになる。そのため SO<sub>2</sub> を主原因とする酸性雨の場合には、地球規模の問題になってくる。例えばヨーロッパにおいては、中央ヨーロッパで放出された SO<sub>x</sub> から生成した酸性物質が北欧にまで飛来している。

酸性雨の場合、汚染物質の実態把握とシミュレーションにおけるデータベースが必要である。汚染物質の実態把握の場合にはカラム濃度でも充分であるが、シミュレーションをするためには経度、緯度、高度方向に分割して濃度が測定出来ることが望ましい。このような観点から、飛翔体搭載レーザーレーダーで大気中の汚染物質の実態を知る場合には、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> (=NO+NO<sub>2</sub>)、OH ラジカル、硝酸ガス、それから中和成分である NH<sub>3</sub> の測定が望まれる（表 3.2-1 参照）。大気中の光化学反応で OH などと同時期に生成する H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> は液相中で SO<sub>2</sub> を酸化し易いため、ガス相の H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> の測定も必要である。

OH ラジカルは、大気中で光化学反応により反応性の高い HC と O<sub>3</sub> が共存した場合に、HC から H を引き抜いて OH として生成する。OH ラジカルは種々の反応で再生するため、大気中では微量ではあるが、ほぼ一定の濃度で存在する。OH ラジカルは大気中で最も重要な酸化性物質であり、各種のガスと反応する。OH ラジカル濃度が 2 × 10<sup>6</sup> 分子 / cm<sup>3</sup> とした場合の、各種ガスの反応による寿命を表 3.3-1 に示した（H. Rohde, R. Herrera: SCOPE 36, Acidification in Tropical Countries 1988）。

表 3.3-1 OH ラジカルと各種ガスの反応による寿命

Reactions with OH	Species lifetime for reaction
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> S	15 hours
H <sub>2</sub> S	2.5 days
SO <sub>2</sub>	7.7 days
NH <sub>3</sub>	72 days
NO <sub>2</sub>	5.7 hours
CH <sub>4</sub>	4.1 years
CO	45 days
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	48 days
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	9.6 days
C <sub>1</sub> H <sub>6</sub>	1.7 hours
Reactions with O <sub>3</sub>	Species lifetime for reaction
NO	69 seconds

All reactions are at 298K and are daytime rates based on 12 hours of daylight each 24-hour day  
 The relevant concentrations of oxidants in the tropical atmosphere are assumed to be: [OH] = 2 × 10<sup>6</sup> molecules/cm<sup>3</sup> and [O<sub>3</sub>] = 8 × 10<sup>11</sup> molecules/cm<sup>3</sup>. The kinetic rate coefficients are taken from NASA, 1985

これによると  $C_5H_8$  が最も OH ラジカルにより分解され易く、 $CH_4$  が最も遅い。また酸性雨関連物質である  $SO_2$  と  $NO_2$  の場合には  $NO_2$  を速く変換させる。地球温暖化に関しては  $CH_4$  と  $CO$  を比較した場合に、 $CO$  との反応が速いためバイオマスバーニングなどで  $CO$  が大量に放出されれば  $CH_4$  の分解が遅れて、 $CH_4$  が大気中に増加することとなる。このため各種汚染ガスと同様に OH ラジカルの濃度分布も大きな意味を持つ。測定に関してはレーザー蛍光法で測定値が出されているが、大気中に多量に存在する水分子がレーザー光によって分解して OH ラジカルを生じることもあり、現在実大気中では測定値が得られていない。シミュレーションで高度分布や緯度分布が得られているが、その 1 例を図 3.3-1 に示した (J. A. Logan, et al.: J. Geophys. Res., 86, 7210, 1981)。

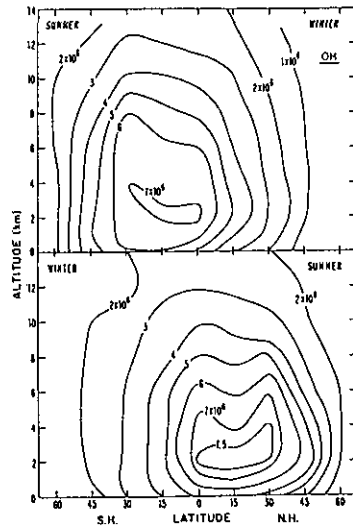


図 3.3-1 シミュレーションによる OH ラジカルの高度分布

中国、韓国は現在急速な経済発展を遂げており、エネルギー使用量は急激に増加し  $SO_x$  や  $NO_x$  が大量に放出されている。風のパターンを考えた場合、上空では偏西風が吹いており、偏西風の高さまで上昇した汚染物質は必ず西から東へ輸送される。このため中国や韓国からの汚染物質が日本に飛来する可能性は高いとは言えるが、証明はされていない。ヨーロッパにおいては、各国の協力により調査が行われ、お互いの国どうしの  $SO_2$  の授受に関しては表が作成されている。アジア諸国に関しては、共同調査も行われず汚染物質の授受の実態は明かでない。このため航空機搭載レーザーレーダーにより東シナ海、あるいは日本海を飛行して、その汚染物質分布の実態、あるいは汚染物質の移動の実態を探ることは非常に重要なことである。

たとえば国立環境研究所では今後、小型航空機マリンIVによる航空機調査を行うことを計画している。しかしこれらの観測では、測定器は全部 in situ な測定器であり、大気汚染物質の三次元分布を求めるためには非常に長いフライト時間が必要になる。そのため搭載可能なレーザーレーダーがあれば、ある高度のフライトで直ちに二次元の分布が求まるので、非常に有効である。沖縄から済州島まで東シナ海上を、続いて済州島から黄海を北方へフライトして、済州島へ戻り、済州島から対馬を経て、佐渡島まで日本海をフライトする予定であり、このような航空機観測のためにも飛翔体搭載レーザーレーダーの開発が待たれる。

これらの他に飛翔体搭載レーザーレーダーでの測定が可能であり、地球規模大気環境問題全体に関連するものとして、エアロゾル、水分子、雲、極成層圏雲 (PSCs) がある。これらも  $O_3$  層破壊、地球温暖化、酸性雨には密接に関連しており、濃度分布、個数分布、質量分布をある空間分解能、あるいはカラム濃度で求めることは有意義である。

## 4. レーザーレーダー技術の現状と展望

### 4.1 レーザーレーダーシステム

レーザーレーダー（ライダー）を用いた大気観測技術のうち飛翔体からの観測が有望であろうと考えられるおもな方式と応用分野を表 4.1-1 に示した。

表 4.1-1 レーザーレーダー方式と応用分野

レーザーレーダー方式	測定対象	応用分野
ミー散乱レーザーレーダー	エアロゾル、 雲	大気境界層構造 対流圏エアロゾル 成層圏エアロゾル
ドップラーレーザーレーダー	エアロゾル散乱の ドップラーシフト	対流圏の風向風速
差分吸収レーザーレーダー (DIAL)	微量分子	都市大気汚染 対流圏 水蒸気分布、気圧 成層圏オゾン

この他、共鳴散乱を用いた中間圏の原子層の観測や、レイリー散乱レーザーレーダーによる気温測定などもあるが、本調査の対象外であると思われるので省略した。また、ラマン散乱レーザーレーダーについては、測定距離が短いことから飛翔体搭載にはあまり有効でないと考えられるためここでは省略した。

ミー散乱レーザーレーダーは最もシンプルなレーザーレーダーであるが、得られる情報は非常に有効である。ミー散乱レーザーレーダーは排煙などの拡散実験、都市境界層の観測、対流圏大気の輸送現象の観測、雲の観測、成層圏エアロゾルの観測など幅広い分野で応用されている。航空機搭載のミー散乱レーザーレーダーシステムはこれまでも、米国、欧州などで数多く開発されており、各種の観測が行われている<sup>3-7)</sup>。

ドップラーレーザーレーダーは風向風速の立体分布の観測手法として米国を中心に開発されてきた。既に航空機からの観測例もある<sup>35)</sup>。また、人工衛星搭載レーザーレーダーによる地球規模の風向風速マッピングシステム(LAWS)を目指した開発が進行中である<sup>45)</sup>。

差分吸収レーザーレーダー(DIAL)はガス成分による吸収と粒子状物質による後方散乱の両方を利用する手法で大気微量分子や水蒸気の空間分布の遠隔計測手法として非常に有効である。DIAL は最初ルビーレーザーを用いた水蒸気分布の測定法として提案され、その後、色素レーザーを用いて NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、オゾンなどの大気汚染物質の測定システムが開発された<sup>8-14)</sup>。赤外領域の化学レーザーや炭酸ガスレーザーを用いた各種の汚染気体の測定法も数多く研究されている。赤外領域で大気散乱により距離分解能を持った DIAL 測定が行なわれているのは、炭酸ガスレーザーを用いたオゾンの測定<sup>19,20)</sup>、エチレンの測定<sup>15)</sup>、DF レーダーを用

いた HCl の測定<sup>16)</sup>などである。この他、建物などのターゲットを利用した長光路差分吸収測定も数多く試みられている。CO<sub>2</sub>レーザー<sup>29,31)</sup>、He-Ne レーザー<sup>32)</sup>を用いた研究の他、光パラメトリック発振器(OPO)<sup>30)</sup>や Co:MgF<sub>2</sub>レーザー<sup>33)</sup>などの波長可変レーザーを用いた研究が行われている。表 4.1-2 に差分吸収方式による大気微量分子の測定例をまとめて示す。

表 4.1-2 差分吸収レーザーレーダーによる測定例

システム 形態	測定対象 ガス	レーザー (波長, エネルギー 繰り返し, 受信鏡口径)	機 関	文 献
地上設置	NO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> +Dye 0.45 μm	Koln大学 (ドイツ)	8)
車載型	NO <sub>2</sub> /SO <sub>2</sub> / NO/Hg/Cl <sub>2</sub>	Nd:YAG+Dye 3-30mJ, 10pps, 40cm	Lund大学 (スウェーデン)	10-11)
車載型	NO/NO <sub>2</sub>	Excimer+Dye 0.23/0.45 μm 5mJ/30mJ, 80pps, 40cm	スイス	14)
車載型	NO <sub>2</sub> /SO <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Nd:YAG+Dye, 0.45/0.3/0.3 μm	SRI	12)
移動型	NO <sub>2</sub>	Nd:YAG+Dye, 0.45 μm 10mJ, 10pps, .05m	国立環境研究所	13)
船舶搭載	HCl	DFレーザー, 3.636/3.698 μm 30mJ, 1pps, 50cm	GKSS (ドイツ)	16)
航空機搭載	O <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O	Nd:YAG+Dye 0.286/0.3 μm 30mJ, 5pps, 35cm	NASA/Langley	17, 18)
地上設置	H <sub>2</sub> O	0.724 μm	NASA/Langley	36)
航空機搭載 (地上設置)	O <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub> レーザー 9.5 μm 0.3J, 2pps, 30cm	通信総合研究所	19, 20)
地上設置	成層圏オゾン	紫外領域	CNRS, Max Plank, JPL, NASA/Goddard, 国立環境研, 気象研など	22-26)
ハードターゲットを用いた DIAL				28)
	N <sub>2</sub> O/HCl/CH <sub>4</sub>	DFレーザー	SRI	29)
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /O <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub> レーザー	JPL	
	SO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O/CO <sub>2</sub> /NO	光パラメトリック発振器 1.7-4 μm	Stanford大学	30)
	CO	CO <sub>2</sub> レーザー(SH) 4.6 μm	MIT	31)
	CH <sub>4</sub>	He-Ne レーザー 3.39 μm	JPL	32)
		Co:MgF <sub>2</sub> レーザー	MIT	33)

表 4.1-2 の測定例のうちオゾン、水蒸気の測定以外のほとんどのものは比較的高濃度の大气汚染分子の計測を目的としたものである。オゾンについては米国の NASA など航空機搭載システムが開発され、対流圏および成層圏の各種の観測に応用されている。また、水蒸気についても NASA やドイツの DLR で航空機搭載システムによる観測が報告されている。これまでに世界各国で開発された航空機搭載レーザーレーダーシステムの例を表 4.1-3 に示す。

表 4.1-3 大気観測用航空機搭載レーザーレーダーシステム例

レーザーレーダー方式 (名称)	機関	レーザー, 波長, エネルギー 繰返し, 受信鏡口径	航空機	測定対象・観測計画 その他, 文献
ミー散乱 (ALFA-1,-2)	SRI, EPRI	Nd:YAG, 1.06/0.532 0.15J, 10pps, 37cm	Beachcraft/ Queen Air	エアロゾル, 5.34) 蛍光色素トレーサ実験 3)
ミー散乱	NASA/ Goddard	Nd:YAG + Raman (CH <sub>4</sub> ) NASA Global Aerosol Backscatter Experiment (GLOBE)	DC-8	エアロゾル
コヒーレント	NASA/JPL	CO <sub>2</sub> laser	DC-8	GLOBE 4)
ミー散乱	NASA/ Langley	Ruby, Nd:YAG 0.694, 1.5J, 1pps, 1.06/0.53, 0.2/0.18J, 10pp	Electra, P-3, DC-8	成層圏エアロゾル 7)
ミー散乱	AFSC, RSRE (UK)	CW CO <sub>2</sub>	Martin/ South Atlantic Backscatter B-57	Lidar Experiment 38)
ミー散乱 (LEANDR-1)	CNRS (仏), CNRS (仏)	Nd:YAG 1.06/0.53	Fokker F-27	Lidar Application to Meteorological Studies (LEANDRE) 38)
ミー散乱 (ALEX)	DLR (独)	Nd:YAG 1.06/0.53, 0.5/0.15J, 10pps, 35cm	Falcon-20 Dornier-228	Rolar Stratospheric Cloud (PSC) 38)
ミー散乱	(USSR)	Nd:YAG 1.06/0.53	Ilyushin/Il-18	PSC の観測 38)
ミー散乱	(USSR)	Ruby	Il-18, Yak-40	雲中の氷晶の観測 38)
オゾンDIAL	NASA/ Langley	Nd:YAG + Dye 286/300nm 30mJ, 5-10pps, 35cm	Electra, DC8	オゾン, エアロゾル 17, 18) NASA Global Tropospheric Research Program, Arctic Boundary Layer Experiment, NASA Airborne Arctic Stratosphere Expedition (AASE), etc.
オゾンDIAL	通信総合 研究所	CO <sub>2</sub> laser, 9.5/10.5 μm 0.3J, 2pps, 30cm	Beachcraft/ Grandcomander	大気境界層 20)
水蒸気DIAL	DLR	Nd:YAG + Dye 0.72 μm		対流圏の水蒸気分布 37)
SF <sub>6</sub> -DIAL (ALARM)	SRI	CO <sub>2</sub> laser, 10 μm .15, 10pps, 37cm	Beachcraft/ Queen Air	DIAL, SF <sub>6</sub> をトレーサー とした拡散実験 21)
ドップラー (ADLS)	NASA/ Marshall		CV-990	風向風速 35)

宇宙からの大気のレーザーレーダー観測は、1991年に計画されているソ連のミールを用いた実験が最初のものとなろう<sup>39)</sup>。このレーザーレーダーはYAGレーザーの第二高調波を用いるミー散乱方式である。米国のスペースシャトルを用いたLITEは1992年に計画されており、YAGレーザーの基本波、第二高調波、第三高調波の3波長を用いる<sup>40,41)</sup>。これらの実験は短期間のもので、スペースライダーの基礎データを得ることが目的である。衛星搭載レーザーレーダーとして現在開発段階にあるのはLAWSとGLRSである。これらはNASAのEOS(Earth Observing System)の一環として計画されている<sup>42-45)</sup>。

## 4.2 分光学的立場から見た観測可能分子

図 4.2-1 (a) に低分解能の大気透過スペクトルを示す<sup>1)</sup>。また、図 4.2-1 (b) は地上のバックグラウンド大気の高分解能のスペクトルで、AFGL (米国空軍地球物理研究所) で作成された大気モデル FASCODE を用いて計算したものである<sup>2)</sup>。光路長は 3 km (地上の光路)、分解能は  $0.5 \text{ cm}^{-1}$  とした。吸収線は水蒸気、二酸化炭素、オゾン、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  などの大気成分によるものである。

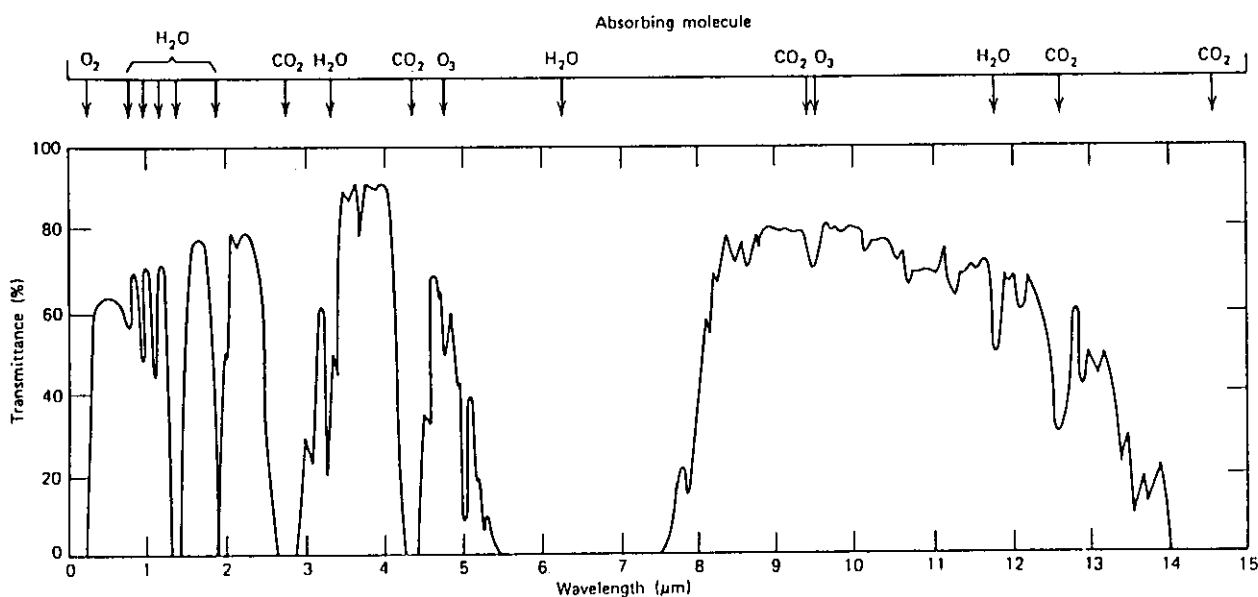


図 4.2-1 (a) 大気の高分解能透過スペクトル (Measures<sup>1)</sup>より引用)

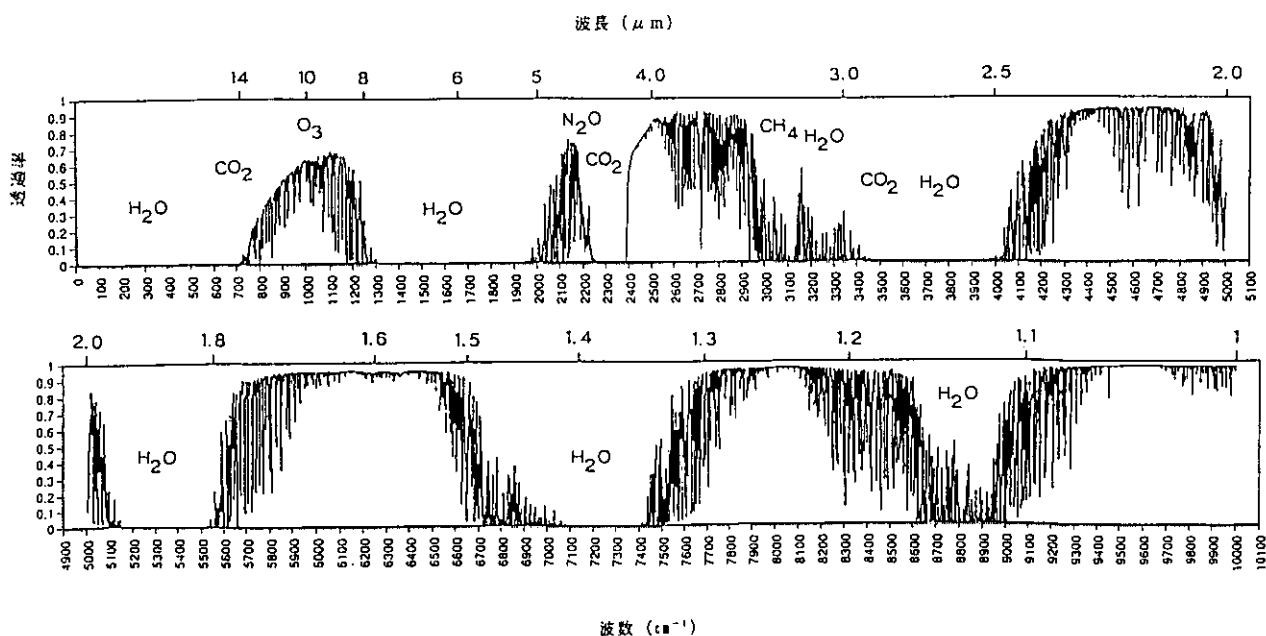


図 4.2-1 (b) 大気の高分解能透過スペクトル、中緯度夏モデル ( $\text{H}_2\text{O}$ : 14.3 Torr)  
光路長 3 km (地上の光路)、分解能  $0.5 \text{ cm}^{-1}$



レーザーレーダーによる大気の計測は通常大気の窓と呼ばれる透過率の高い波長領域で行われる。高分解スペクトルは多数の吸収線から形成されており、吸収法で大気成分の測定を行う場合、レーザー波長が自由に可変できるものとするとは非常に多くの測定の可能性が考えられる。

従来行われてきた大気微量分子の測定については前節で述べたが、航空機搭載システムによる観測が非常に有効であり既に観測例もあるのは、紫外領域を用いたオゾンの測定と 727 nm 付近を用いた水蒸気の測定である。これらについては、スペースシャトルや人工衛星からの測定も有望であり、その有効性の評価が多数行われている<sup>44,46-48)</sup>。

可視、近紫外領域に吸収を持つ  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  などの大気汚染分子については、発生源周辺や都市大気の観測には航空機搭載レーザーレーダーによる観測が有効であると思われるが、バックグラウンド大気ではこれらの分子の濃度が極めて小さいため距離分解能を持った測定は難しい。

赤外領域の測定については、これまでレーザーの制約から測定対象が限定されていた。最近、光パラメトリック発振器(OPO)や波長可変固体レーザーの技術が目ましく進歩し、また、炭酸ガスレーザーの第二、第三高調波発生用の  $\text{AgGaSe}_2$  などの高品質の結晶が得られるようになった状況を考えると、波長の制約をはずして測定の可能性を見直す必要があると考えられる。

図 4.2-2 (a)-(d) は赤外領域の大気の窓について大気スペクトルと測定の可能性のある微量分子のみの吸収スペクトルを示したものである。光路長は 3 km (地上の光路)、分解能は  $0.1 \text{ cm}^{-1}$  である。

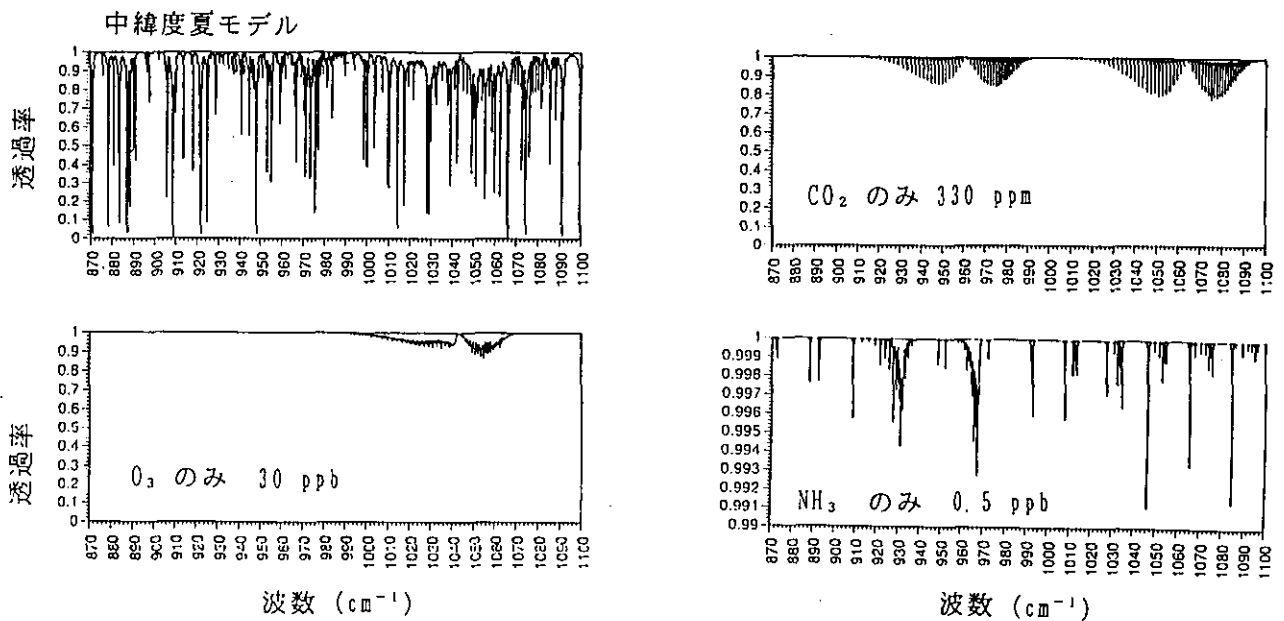


図 4.2-2 (a) 大気吸収モデル FASCODE により計算した大気透過スペクトルと  $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{NH}_3$  のスペクトル。光路長 3 km (地上の光路)、分解能  $0.1 \text{ cm}^{-1}$

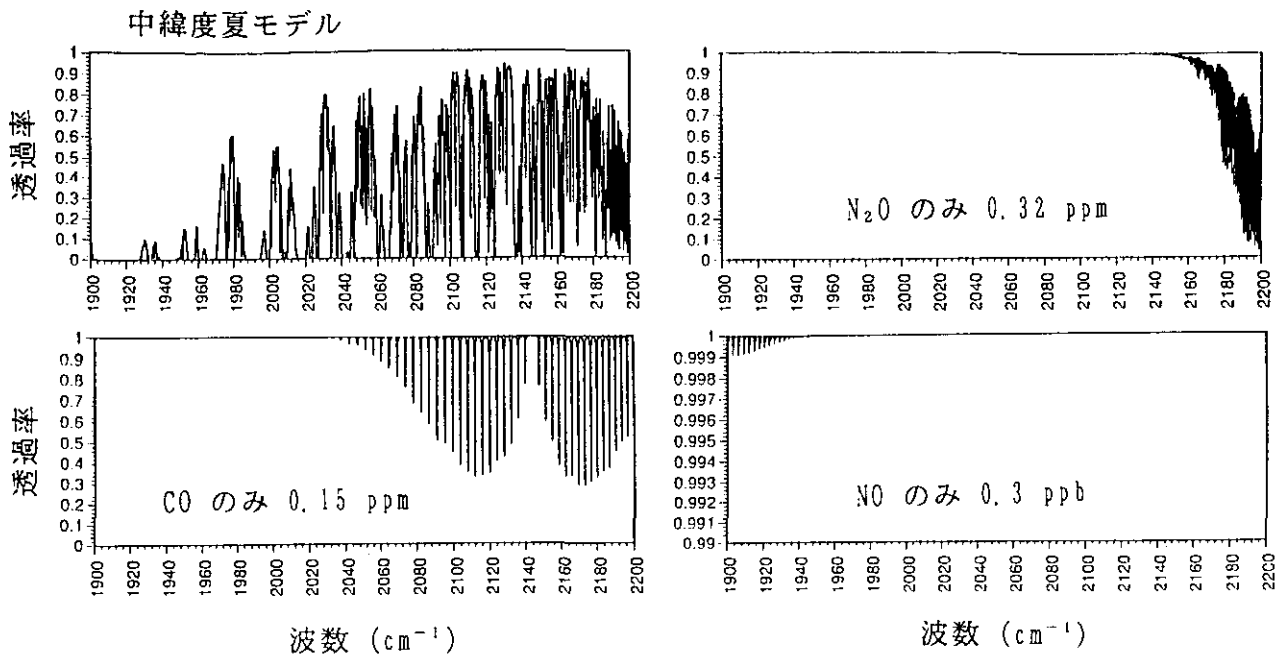


図 4.2-2 (b) 大気吸収モデル FASCODE により計算した大気透過スペクトルと  $N_2O$ 、 $CO$ 、 $NO$  のスペクトル。光路長 3 km (地上の光路)、分解能  $0.1 \text{ cm}^{-1}$

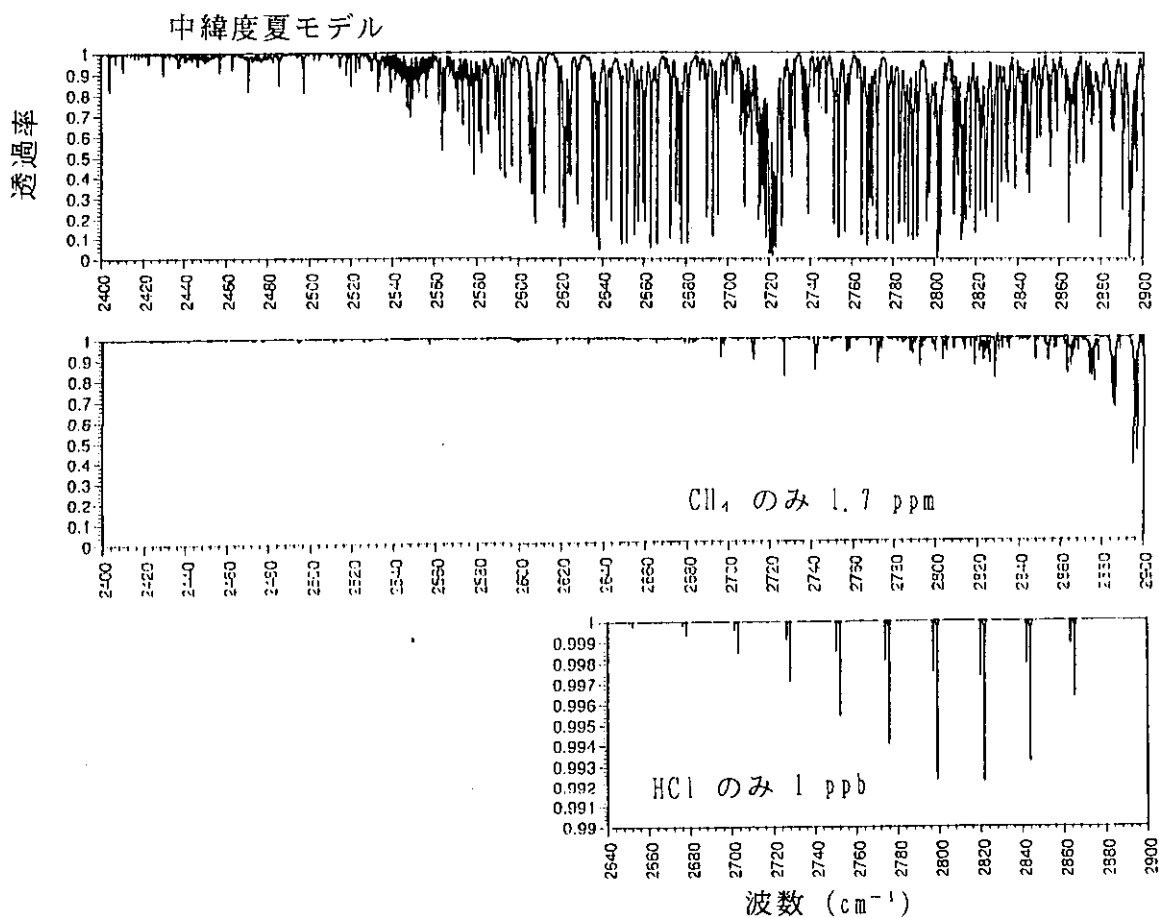


図 4.2-2 (c) 大気吸収モデル FASCODE により計算した大気透過スペクトル、と  $CH_4$ 、 $HCl$  のスペクトル。光路長 3 km (地上の光路)、分解能  $0.1 \text{ cm}^{-1}$

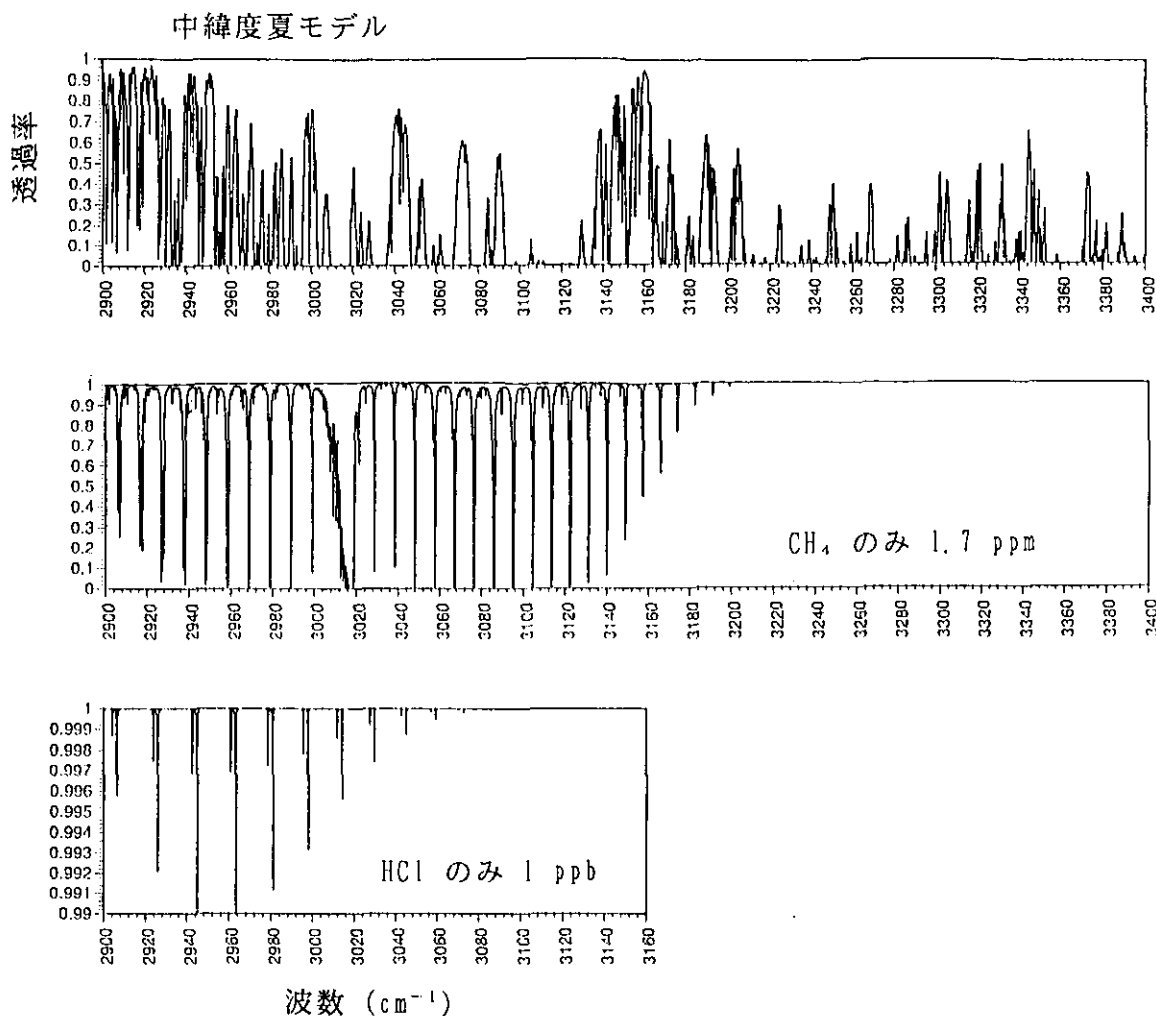


図 4.2-2 (d) 大気吸収モデル FASCODE により計算した大気透過スペクトル、と  $\text{CH}_4$ 、 $\text{HCl}$  のスペクトル。  
光路長 3 km (地上の光路)、分解能  $0.1 \text{ cm}^{-1}$

図 4.2-2 (a) に示した波長域で測定可能なのはオゾンであり、これまでも通信総合研究所などで炭酸ガスレーザーを用いた DIAL システムが開発されている。

$\text{CO}_2$  については吸収は大きい距離分解差分吸収レーザーレーダーでは必要な測定精度 (濃度 330 ppm に対して誤差 1 ppm 程度以下) を得ることは困難であると考えられる。 $\text{NH}_3$  はターゲットを用いた長光路差分吸収法では検出可能であるが精度については検討が必要である。

図 4.2-2 (b) に示す大気の窓領域には  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$  の強い吸収バンドがある。これらの分子の測定はこれまでも  $\text{CO}_2$  レーザーの第二高調波を用いてターゲットを用いた差分吸収測定が報告されているが、高出力のレーザー光源が得られれば距離分解能を持った測定が十分に可能であると考えられる。参考までに Killinger らによって行われた  $\text{CO}$  の長光路吸収測定で用いられたレーザーエネルギーは 0.2–1 mJ であった。最近の研究では高調波発生効率は 20 パーセント以上が得られているので、数十 mJ の出力は容易に得られる。また、同位体炭酸ガスレーザーの利用についても、測定対象の吸収線との一致の可能性が増えるので有望であり、検討すべきであろう。同位体炭酸ガスレーザーに関する技術は米国では LAWS などの光源用として既に技術の蓄積がある。

NOについてもこれまでにCO<sub>2</sub>レーザーの高調波を用いた研究が報告されているが、バンドが大気の透過率のわるい波長領域にあるため、測定距離が制限され、航空機搭載レーザーレーダーでは測定は困難であろう。また、バックグラウンド大気では吸収の大きさも十分ではない。

図4.2-2(c)、(d)に示す大気の窓領域にはメタン、HClなどの吸収がある。メタンの吸収は非常に大きく、適当な吸収線を選択すれば距離分解を持った差分吸収レーザーレーダー測定が可能であると考えられる。これまでも、3.39 μmのHe-Neレーザーを用いた長光路吸収測定などが報告されている。この波長帯は炭酸ガスレーザーの第三高調波で得られる。最近の報告では第三高調波の発生効率の数パーセント程度であるので、ラインが適当な吸収線と一致すればDIAL測定の可能性がある。HClについては、これまでに排煙中の濃度分布の距離分解DIAL測定が行われているが、バックグラウンド濃度では吸収は十分ではない。3 μmよりも短い赤外領域にもN<sub>2</sub>O、メタン等の吸収帯があるが、ここでは省略した。

赤外領域の測定の可能性について以上の考察をまとめると、メタン、CO、N<sub>2</sub>Oについてはレーザー光源が得られればバックグラウンド濃度の距離分解測定ができると考えられる。濃度分布の変化が大きく、飛翔体からの測定の特長を生かしたデータが得られる測定対象であるメタンなどのDIALシステムの開発は今後推進すべき課題のひとつであると考えられる。

最後に、これまでに開発されているものも含めて航空機搭載DIALによる測定の可能性をまとめて表4.2-1に示す。現在、技術的に確実で、また観測の意義が極めて大きいと考えられるのは紫外領域を用いたオゾンの観測である。H<sub>2</sub>Oの分布の観測は気象学的に非常に重要であるが、分光学的にはオゾンの場合と異なり狭帯域のレーザーを必要とするためより高度の技術を要する。NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>に関しては測定対象を限定すれば有効な観測が可能であろうと思われる。赤外領域のメタン、CO、N<sub>2</sub>Oについてはレーザー光源の開発が必要である。

表 4.2-1 航空機搭載 DIAL による観測の可能性

対象	波長	レーザー	備考
オゾン	300 nm	色素(SH)、 チタンサファイア(TH)	対流圏、成層圏
	10 μm	CO <sub>2</sub>	都市境界層
水蒸気	727 nm、近赤外	色素、アレキサンドライト チタンサファイア	対流圏、成層圏
NO <sub>2</sub>	450 nm	色素	都市境界層
SO <sub>2</sub>	300 nm	色素(SH)	都市境界層
メタン	3.4 μm	CO <sub>2</sub> レーザー(TH)? 100 mJ/pulse 程度必要	対流圏
CO	4.7 μm	CO <sub>2</sub> レーザー(SH)? 100 mJ/pulse 程度必要	対流圏
N <sub>2</sub> O	4.5 μm	CO <sub>2</sub> レーザー(SH)? 100 mJ/pulse 程度必要	対流圏

## 〔参考文献〕

### 〔大気の吸収スペクトル〕

- 1) R. M. Measures: Laser Remote Sensing, John Wiley & Sons, New York, 1984.
- 2) S. A. Clough, et al.: Atmospheric Spectral Transmittance and Radiance: FASCODE, Proc. SPIE 227, 1981.

### 〔航空機エアロゾル〕

- 3) J. D. Spinhirne, J. L. Bufton, J. F. Cavanaugh and S. Chudamani: 15th ILRC, Tomsk 34-34, 1990.
- 4) R. T. Menzies and D. M. Tratt: Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Incline Village, Nevada, Tuc-3, 1990.
- 5) E. E. Uthe, N. B. Nielsen, and W. L. Jimison: Bull. Am. Meteorol. Soc. 61, 1035, 1980.
- 6) Y. Sasano and E. V. Browell: Appl. Opt. 28, 1670-1679, 1989.
- 7) L. R. Poole, G. S. Kent and M. P. McCormick: 15th ILRC, Tomsk, 151, 1990.

### 〔差分吸収レーザーレーダー: DIAL〕

- 8) K. W. Rothe, U. Brinkmann, and H. Walter: Appl. Phys. 4 (1974) 181.
- 9) K. A. Fredriksson, B. Galle, K. Nystrom, and S. Svanberg: Appl. Opt. 20 4181, 1981.
- 10) H. Edner, K. Fredriksson, A. Sunesson, S. Svanberg, L. Uneus, and W. Wendt: Appl. Opt., 26, 9, 4330-4338, 1987.
- 11) H. Edner, K. Fredriksson, A. Sunesson, and W. Wendt: Appl. Opt. 26, 6, 3183-3184, 1987.
- 12) J. G. Hawley et al.: in Optical Remote Sensing, edited by D. K. Killinger and A. Mooradian, Springer-Verlag, 1983.
- 13) 杉本伸夫他: レーザー研究、15, 3, 39-49, 1987.
- 14) H. J. Kolsch, P. Rairoux, J. P. Wolf, and L. Woste: Appl. Opt. 28, 11, 2052-2056, 1989.
- 15) K. W. Rothe: Radio Electron. Eng. 50, 347, 1980.
- 16) C. Weitkamp: Wastes in Ocean, vol. 3, John Wiley and Sons, New York 1981.
- 17) E. V. Browell, A. F. Carter, S. T. Shipley, R. J. Allen, C. F. Butler, M. N. Mayo, J. H. Siviter, Jr., and W. M. Hall: Appl. Opt. 22, 522-534, 1983.
- 18) E. V. Browell, E. F. Danielsen, S. Ismail, G. L. Gregory, and S. M. Beck: J. Geophys. Res. 92, 2112-2120, 1987.
- 19) K. Asai, T. Itabe, and T. Igarashi: Appl. Phys. Lett. 35, 60, 1983.
- 20) T. Itabe, K. Asai, M. Ishizu, T. Aruga and T. Igarashi: Appl. Opt. 28 931-934, 1989.
- 21) E. E. Uthe: Appl. Opt. 25, 15, 2482-2498, 1986.

### 〔成層圏オゾン〕

- 22) S. Godin, G. Megie, J. Pelon: Geophys. Res. Lett. 16, 547-550, 1989.
- 23) J. Werner, K. W. Rothe and H. Walther: Monitoring of the Stratospheric Ozone Layer by Laser Radar, Appl. Phys. B32, 113-118, 1983.
- 24) I. S. McDermid: Surveys in Geophysics, 9, 107-122, 1987.
- 25) T. J. McGeet al.: 15th ILRC, Tomsk 125, 1990.

- 26) O. Uchino, M. Maeda, M. Hirono: IEEEJ. Quantum Electron. QE-15, 1091, 1981.
- 27) 杉本伸夫他: 応用物理 58, 1385-1397, 1989.  
[ハードターゲット DIAL]
- 28) E. R. Murray, J. E. Vander Laan, J. G. Hawley: Appl. Opt. 15 3140, 1976.
- 29) M. S. Shumate, W. B. Grant and R. T. Menzies: in Optical and Laser Remote Sensing, edited by D. K. Killinger and A. Mooradian, p. 31, Springer-Verlag, Berlin, 1983.
- 30) R. A. Baumgartner and R. L. Byer: Appl. Opt. 17, 3555, 1978.
- 31) D. K. Killinger, N. Menyuk and W. E. DeFeo: Appl. Phys. Lett. 36, 402, 1980.
- 32) W. B. Grant: Appl. Opt. 25, 709, 1986.
- 33) N. Menyuk and D. K. Killinger: Appl. Opt. 26, 3061, 1987.  
[航空機トレーサ実験]
- 34) E. E. Uthe, W. Viezee, B. M. Morley, and J. K. S. Ching: Bull. Am. Meteorol. Soc. 66, 10, 1255-1262, 1985.  
[航空機風向風速]
- 35) J. Bilbro, G. Fichtl, D. Fitzjarrald, M. Krause, and R. Lee: Bull. Am. Meteorol. Soc. 65, 348, 1984.  
[水蒸気]
- 36) E. V. Browell, T. D. Wilkerson, and T. J. McIlath: Appl. Opt. 18, 20, 3474-3483, 1979.
- 37) G. Ehret and W. Renger: 15th ILRC, Tomsk, 67-69, 1990.
- 38) 15th ILRC, Tomsk (1990).  
[スペースライダー]
- 39) Yu. S. Balin, V. V. Burkov, I. V. Znamenskii, V. E. Zuevetal.: 15th International Laser Radar Conference, Tomsk, 12-13, 1990.
- 40) M. P. McCormick: 15th ILRC, Tomsk, 2-4, 1990.
- 41) NASA (ed): Shuttle Atmospheric Lidar Research Program, NASASP-433, 1979.
- 42) NASA (ed): EOS, Science and Mission Requirements Working Group Report, NASA TM-86129, 1984.
- 43) NASA (ed): EOS, Background Information Package (BIP), Announcement of Opportunity (AO), No. OSSA-1-88, Part 4 & 5, 1988.
- 44) NASA (ed): LASA Instrument Panel Report, NASA EOS, Vol. IId, 1987.
- 45) NASA (ed): LAWS Instrument Panel Report, NASA EOS, Vol. IIg, 1987.
- 46) S. Ismail and E. V. Browell: Appl. Opt. 28, 17, 3603-3615, 1989.
- 47) O. Uchino, M. P. McCormick et al.: Appl. Opt. 25, 3946-3951, 1986.
- 48) 林田佐智子他: 天気 36, 7, 49-58, 1989.

### 4.3 レーザーの現状と将来展望

飛翔体搭載用として、適していると思われる各種固体レーザーについて検討する。前提条件として、装置寸法を1 m×1 m×1 m ぐらいより小さいもの、装置重量100kg までを想定した。一覧表として、表4.3-1 に示す。

表4.3-1 小型可能搬レーザー光源

#	レーザー媒質	発振方式	励起方法	波長 (μm)	出力	PRF	パルス幅	その他
1	Nd:YAG	パルスQ	ランプ	1.06	300mJ	10Hz	10ns	1m×1m×1m 想定
2	Nd:YAG	#1 SHG	ランプ	0.53	100mJ	10Hz	10ns	
3	Nd:YAG	CW Q	ランプ	1.06	3W	5kHz	50ns	
4	Nd:YAG	#3 SHG	ランプ	0.53	1.5W	5kHz	50ns	
5	Nd:YAG	パルスQ	LD side	1.06	1.0J	50Hz	20ns	Fibertek カタログ
6	Nd:YAG	#5 SHG	LD side	0.53	0.5J	50Hz	20ns	
7	Nd:YAG	CW Q	LD side	1.06	10W	20kHz	350ns	
8	Nd:YAG	#7 SHG	LD side	0.53	5W	20kHz	350ns	
9	Nd:YAG	mode lock	LD side	1.06	8W	160MHz	250ps	
10	Nd:YAG	#9 SHG	LD side	0.53	3W	60MHz	300ps	
11	Nd:YAG	CW Q	LD end	1.06	100mW	1kHz	10ns	産業用
12	Nd:YAG	CW Q	LD end	1.32	1mW	1kHz	100ns	以下想定値 (すべて)
13	Nd:YAG	CW Q	LD end	0.97	1mW	1kHz	100ns	
14	Nd:YLF	CW Q	LD end	1.05	10mW	1kHz	100ns	
15	Nd:YAP	CW Q	L D	1.08	10mW	1kHz	100ns	
16	Alexandrite	パルスQ	ランプ	0.73~0.78	10mJ	10Hz	100ns	1m×1m×1m 想定
17	Alexandrite	パルスQ	ランプ	0.7~0.73 0.78~0.81	1mJ	10Hz	200ns	
18	Ti:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	パルスQ	#6	0.7~1.0	100mJ	10Hz	20ns	
19	Ti:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CW Q	#8	0.7~1.0	1W	5kHz	350ns	
20	Cr <sup>3+</sup> :Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (Forsterite)	パルスQ	#5	1.2~1.3	10mJ	10Hz	20ns	
21	Cr <sup>3+</sup> :Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (Forsterite)	CW Q	#7	1.2~1.3	0.1W	5kHz	350ns	
22	Ho, Tm:YAG	CW Q	L D	2.1	1mW	5kHz	100ns	
23	Tm:YAG	CW Q	L D	2.0	1mW	5kHz	100ns?	
24	CO:MgF <sub>2</sub>	パルスQ	#5改造?	1.7~2.3	1mJ?	10Hz?	10ns?	#5を1.3μmで発振させて
25	Nd:YAG	OPO(パルスQ)	LDPYAG	1.4~4	1mJ?	30Hz?	100ns以下	(実現?)

表4.3-1では、#1から#4までと#16、#17のみがランプ励起で、その他は半導体レーザー励起もしくは、半導体励起のレーザーによる励起である。

#### 4.3.1 Nd: YAG 結晶、ランプ励起

#1から#4までがレーザー媒質としてNd:YAG結晶を使い、ランプで励起されるタイプの物である。#1は、パルス励起でEO-Qスイッチを使う場合であり、#2は#1のSHGの例である。同様に#3は連続励起でAO-Qスイッチを使う場合であり、#4は#3のSHGの例である。

#### 4.3.2 Nd: YAG 結晶、半導体レーザーによる側面励起

#5、6はパルス駆動の半導体レーザーで結晶の側面から励起しており、#7、8、9、10は連続出力の半導体レーザーで結晶の側面から励起している。#5、7、9は $1.06\mu\text{m}$ の基本波で#6、8、10はそれぞれSHGの場合である。前記の様に大きさを制限をした場合は、半導体レーザーによる励起を採用するとランプ励起の場合に比べ、パルス出力、平均出力ともそれぞれ3倍、5倍と大きな値が得られている。

#### 4.3.3 Nd: YAG 結晶、半導体レーザーによる端面励起

#11は産業用として低価格で販売されているものである。#12、13は発振波長が通常のYAGレーザーの場合と異なる場合であり、出力、パルス幅はそれぞれ低く、長くなっている。#11に対して#12、#13で行なった $1.06\mu\text{m}$ 以外の発振線へのスケーリングは、#7の場合にも適用できるものと考えられる。

#### 4.3.4 その他結晶、半導体レーザー励起

#14では、Nd:YLFを使った発振波長 $1.05\mu\text{m}$ の場合であり、#15ではNd:YAPを使った $1.08\mu\text{m}$ の発振波長の場合であるが、波長がNd:YAGの場合に近いことからあまり注目に値しないと思われる。

#### 4.3.5 アレキサンドライトレーザー

#16、17では、それぞれゲインの中心付近での発振特性と、周辺部での発振特性を示す。波長幅が100MHz程度の場合である。

#### 4.3.6 Ti: サファイヤ

#6のパルスSHG:YAGレーザーを励起光源として用いたものが#18で、#8を用いたものが#18である。実用的な波長可変範囲としては、 $0.7$ から $1.0\mu\text{m}$ である。光-光変換効率として20%を仮定した数値であるが、出力レベルは波長幅などを決めるシステムによる。表上の数値は波長幅100MHz固定を想定している。

#### 4.3.7 フォルステライト

#5のパルスYAGレーザーを励起光源として用いたものが#20で、#7を用いたものが#21である。発振可変範囲は、 $1.2$ から $1.3\mu\text{m}$ である。光-光変換効率として1%を仮定した数値である。この数値もシステムに依存する。

#### 4.3.8 その他結晶

#22から#24には、 $2.1\mu\text{m}$ で発振するHo、Tm:YAGレーザー、 $2.0\mu\text{m}$ で発振するTm:YAGレーザー、そして#5のハードウェアでの $1.3\mu\text{m}$ での発振を利用してCo:MgF<sub>2</sub>を励起して $1.7$ から $2.3\mu\text{m}$ で発振させるレーザーをあげる。

#### 4.3.9 まとめ

OPO(光パラメトリック発振)の例を#25に示したが、#5のような励起を前提としても、OPOデバイスの現状からmJオーダーしか得られないであろう。

以上のリストの内容から、いちばん可能性があると考えられる#5、6の場合のスペックの詳細を表4.3-2に記してまとめにかえる。



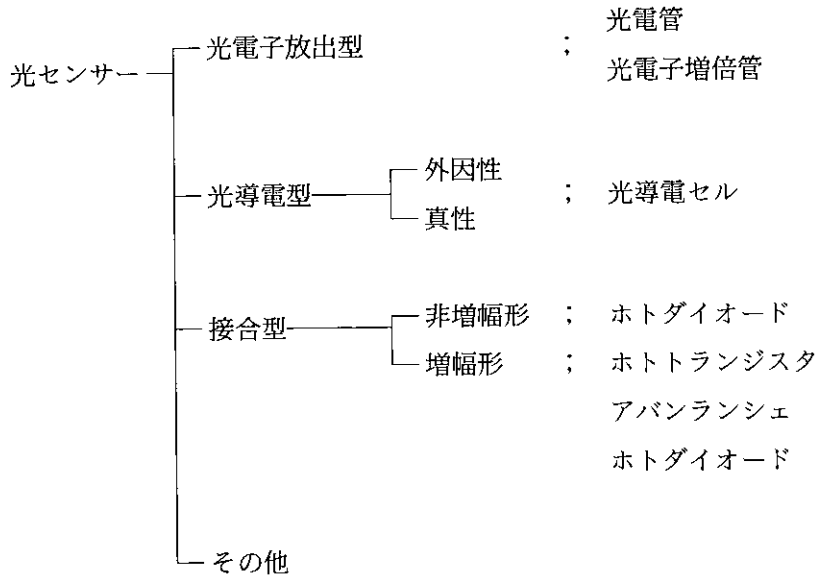
表4.3-2 #5、6のレーザスペックのまとめ

出力	1.5J	1.0J	0.5J
波長	1.06 $\mu\text{m}$	1.06 $\mu\text{m}$	0.53 $\mu\text{m}$
パルス幅	200 $\mu\text{s}$	18ns	18ns
繰り返し	1-50Hz		
寿命	>10 <sup>9</sup> ショット		
電気効率	7%	4%	2%
重量	約 60kg		
冷却	液体冷却		
エネルギー変動	P-Pで $\pm 3\%$		
ビーム形状	わずかに中央が平らなガウス形状 (ガウス形状への類似度0.95)		
ホットスポット	強度リップル $\pm 3\%$		
方向変動	$\pm 40 \mu\text{rad}$		
寸法	直径12インチ*長さ28インチの円筒 (レーザヘッドと電源を含む)		
環境 保存温度 動作温度 EMC/EMI	-40度Cから50度C 2度Cから40度C MIL461B, MIL462準拠		
電源容量	120/220V1kW もしくは 28VDC/35A		

## 4.4 光センサー技術の現状と将来展望

### 4.4.1 光センサーの分類

光センサーはその動作原理から下記の如く分類される。



### 4.4.2 レーザーレーダー用光センサー

レーザーレーダー用の光センサーとしては下記の性能が要求される。

- 1) 高感度
- 2) 低雑音
- 3) 時定数が小
- 4) 受光有効面積が大
- 5) 高信頼性 (寿命、出力安定性など)
- 6) 小型・軽量で扱いやすい

以上の条件の全部とは言えないまでも多くを満足するものとして、

- ・ 光電子増倍管
- ・ PIN フォトダイオード
- ・ アバランシェホトダイオード (APD)

がある。表4.4-1 光センサーの特性表においては $0.2\mu\sim 10\mu$  の波長における主な光センサーの特性を比較する。

#### 4.4-1 光センサーの特性表

光センサーの種類	分光感度	放射感度	応答速度	備 考
I 光電子放出型 1) 光電管	115~ 1,100nm	20~300 $\mu$ A/W	立上がり最小60ps程度 ( $\lambda$ フィルターで)	・ バイブラナー光電管は特に応答性に優れていて、レーザーの波形状計測に用いられる。
2) 光電子増倍管 (フォトマルチプライアー)	115~ 1,100nm	最大 10 <sup>6</sup> A/W	立上がり最小 150ps 通常は 1~10ns	・ 高利得、早い応答速度、ダイナミックレンジ大、低雑音、受光面が大きい等の特徴がある。 ・ 半導体光センサーと比較して受光面大 ・ レーザーレーダーにとって最も重要なセンサー
II 光導電型 1) CdS/CdSeセル	400~ 950nm	10 $\mu$ A/W	数十 $\mu$ s~数百 $\mu$ s	・ 応答が遅い。 ・ 人間の目の感度特性に近い。
2) Hg <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> Te	2,000~16,000nm (2~16 $\mu$ m)	液体窒素温度(-196℃)で $D_{\lambda P}^* > 2 \times 10^{18} \text{cm}^2 \text{V}^{-1}$ (10 $\mu$ m帯用) $D_{\lambda P}^* > 1 \times 10^{11} \text{cm}^2 \text{V}^{-1}$ (3 $\mu$ m帯用)	立上がり1 $\mu$ s以下 (-196℃)	・ 3~5 $\mu$ m帯および10 $\mu$ m帯で、液体窒素温度で理論的限界に近い感度が得られる検出器である。
III 接合型・非増幅型 1) シリコン ホトダイオード	190~ 1,100nm	最大 0.6A/W (at 900nm) $D_{\lambda P}^* > 2 \times 10^{14} \text{cm}^2 \text{V}^{-1}$ (at 900nm)	立上がり最小 0.8ns (PINダイオード)	・ レーザー発射モニターおよび波形状モニター用。
2) ゲルマニウム ホトダイオード	800~ 1,800nm	最大 0.7A/W(at 1,550nm) $D_{\lambda P}^* > 1 \times 10^{11} \text{cm}^2 \text{V}^{-1}$ $1 \times 10^{13}$ (at -196℃)	立上がり最小 0.5ns	
3) InGaAs ホトダイオード	900~ 1,700nm	10 <sup>8</sup> V/W (アンプ付)	立上がり最小 1ns	
4) Hg <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> Te ホトダイオード	2,000~16,000nm (2~16 $\mu$ m)	$D_{\lambda P}^* > 2 \times 10^{18} \text{cm}^2 \text{V}^{-1}$	高速では数GHzまで 応答	・ ヘテロダイン検波用として最適
5) InSb ホトダイオード	1,500~ 5,000nm	$D_{\lambda P}^* > 5 \times 10^{11} \text{cm}^2 \text{V}^{-1}$ (at -196℃)	10kHz以上	
IV 接合型・増幅形 1) ホトトランジスタ	500~ 1,100nm	(相対値しか記載なし)	立上がり最小 5 $\mu$ s	
2) アバランシェ ホトダイオード ・ Si-APD ・ Ge-APD	300~ 1,100nm 700~ 1,700nm	50~100 A/W 8 A/W程度	立上がり最小 0.2ns 立上がり最小 0.3ns	・ 小型軽量 ・ 雑音はまだ大
V その他 (非冷却) 1) ホトドラッグ	10 $\mu$ m	1.2A/kW	立上がり 1ns	・ CO <sub>2</sub> レーザー検知用
2) 焦電素子	1.5~ 20 $\mu$ m	900~4,000 V/W	立上がり 100ns	・ 波長特性が平坦

#### 4.4.3 将来展望

- ・ 今のところ近紫外~可視・近赤外の領域では光電子増倍管にまさる光センサーはない。
- ・ 2  $\mu$ m 程度までの赤外域においては化合物半導体を用いた光センサーの技術が光ファイバー用の検知素子として精力的な研究が行われていて、特性のすぐれた APD などが現れようとしている。
- ・ 3~5  $\mu$ m 帯および 8~14  $\mu$ m 帯においては赤外線撮像素子用として HgCdTe の研究が重点的に行われ、改良が続いている。

## 5. 飛翔体搭載レーザーレーダーの可能性と問題点

### 5.1 航空機搭載型レーザーレーダー

前に詳しく述べたように、オゾン層破壊、地球温暖化、酸性雨等に関連した種々の大気微量成分、エアロゾル、雲等の広域立体分布の観測が強く望まれている。これらの微量成分の観測については、これまで地上設置のレーザーレーダーにより

- (1) 十分な精度で測定されているもの  
エアロゾル、黄砂などのダスト、オゾン、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 等
- (2) 測定がある程度なされているが、航空機搭載型にするには、さらに十分な検討と地上実験が必要なものの $\text{SO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{CO}$ 等
- (3) まだ十分な精度で測定されておらず、今後新しいレーザーや測定手法の開発が必要なものフロン、 $\text{OH}$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 他

等に分類できる。

そこで早急に飛行機搭載型レーザーレーダーを開発して、地上設置では困難な広域立体分布の測定を行い、オゾン層破壊、地球温暖化、酸性雨等の地球環境問題解明に寄与するためには、まずエアロゾルやオゾン測定用の航空機搭載レーザーレーダーを開発する必要がある。

#### 5.1.1 エアロゾル観測

地上設置のレーザーレーダーによる対流圏や成層圏のエアロゾルの観測はルビーレーザーやYAGレーザーを利用して行われている。また飛行機搭載型レーザーレーダーとしては、同じくYAGレーザーや炭酸ガスレーザーを利用した観測が行われている。5.1.1-1図にヤグレーザーを利用した小型の飛行機搭載型レーザーレーダーを示す。

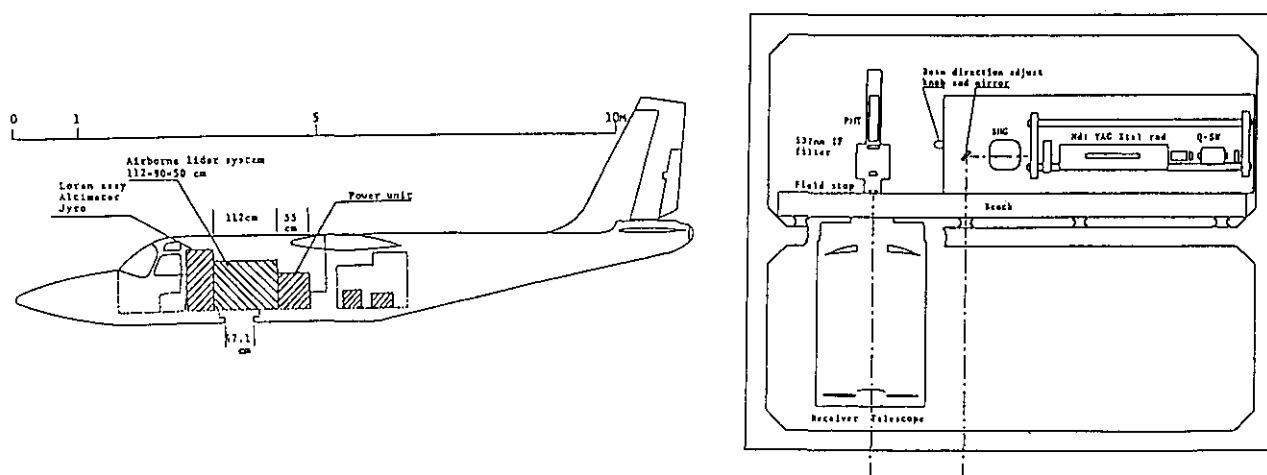


図 5.1.1-1 境界層のエアロゾル観測用小型飛行機搭載型レーザーレーダー

この場合レーザーはフラッシュランプ励起の中型のYAGレーザーで、出力としては1064 nmで300 mJ、532 nmで100 mJで、繰り返しとしては10 Hz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5 Hzに制限されている。また出力は高度3 kmから観測する場合は、目の安全性を考慮して、532 nmで10 mJに制限される。この小型の飛行機搭載レーザーレーダーにより境界層を含めたエアロゾルの分布が測定可能である。

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 $\eta=7-10\%$ 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、今後は1500 nm以上の近赤外のレーザーを利用したレーザーレーダーの開発が望まれる。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Tm:YAGレーザー(2100 nm)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レーザーレーダーの開発により広域のエアロゾル三次元立体分布が得られるようにすることが望まれる。

### 5.1.2 オゾン観測

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レーザーレーダー(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(NASADC-8)搭載レーザーレーダーにより対流圏オゾンや極域のオゾンホールの観測がなされている。日本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が行われた。

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 $\eta$ 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レーザーレー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現在のところ考えられる。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励起のヤグレーザーを基本にしたものを5.1.2-1図に示す。

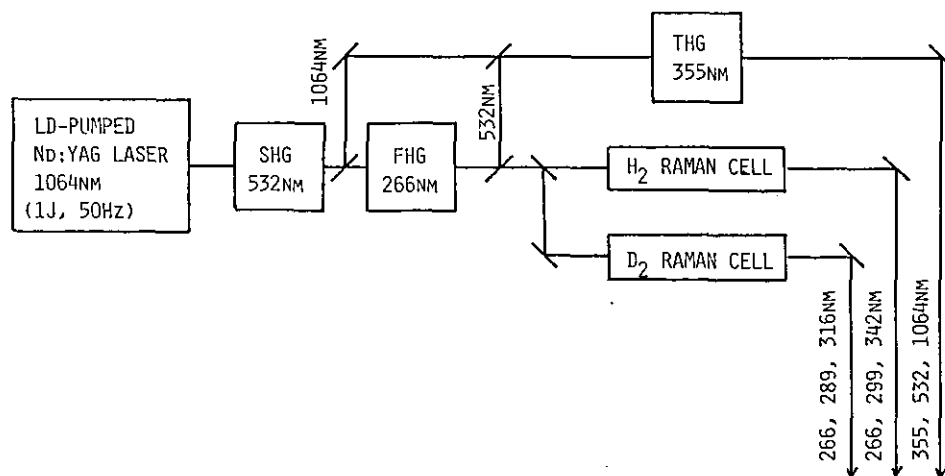


図 5.1.2-1 LD 励起ヤグレーザーを基本にしたエアロゾル、オゾン観測用レーザー構成

エアロゾル観測には 1064、532、355 nm 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四高調波 266 nm と水素、重水素の高圧ラマンセルを利用して波長 289、299、316、342 nm 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 1064 nm とラマンセルを利用すると 5.1.1 の項で述べた eyesafety のレーザーを発生できる。

### 5.1.3 観測シミュレーション

#### (1) エアロゾル観測

##### (a) レーザーレーダー方程式と SNR

航空機に搭載されたレーザーレーダーによって観測される受信光子数は、次に示すレーザーレーダー方程式によって与えられる。

$$n_r = N n_0 \frac{\eta K A Y T^2(h, z) \{ \beta_A(z) + \beta_M(z) \} \Delta z}{(z-h)^2} + n_b \quad (5.1.3-1)$$

$n_r$  : 受信光子数

$N$  : 積算回数

$n_0$  : 送信光子数

$\eta$  : PMT の量子効率

$K$  : 送受信系の光学効率

$A$  : 受信望遠鏡の開口面積

$Y$  : 視野重なり ( $Y = 1$ )

$T(h, z)$  : 透過率 (大気分子及びエアロゾルのみを考慮)

$$T(h, z) = \exp \left\{ - \int_h^z \left( \frac{8}{3} \pi \beta_M(z) + 50 \beta_A(z) \right) dz \right\}$$

$\beta_A(z)$  : エアロゾルの体積後方散乱係数

$\beta_M(z)$  : 大気分子の体積後方散乱係数

$\Delta z$  : 高度分解能

$h$  : 航空機の高度

$n_b$  : 背景光雑音

昼間の観測時に問題となる背景光雑音については次の式によって求められる。

下向き観測の時

$$n_b = N \cdot P_b \frac{F_v^2}{4} \pi \cdot \nabla F \cdot \eta K A \frac{2 \Delta z}{c} \frac{\lambda}{hc} \quad (5.3.1-2)$$

$P_b$  : 地表面よりの反射光

$$P_b = \text{Albedo} \cdot \frac{I_0}{\pi}$$

$I_0$  : 太陽からの放射エネルギー

$F_v$  : 受信望遠鏡の視野角 (radian)

$\nabla F$  : 干渉フィルター幅

上向き観測の時

$$n_b = N \frac{\lambda}{hc} \frac{I_0}{10^6} \nabla F \cdot \eta K A \frac{2 \Delta z}{c} \quad (5.3.1-3)$$

青空の背景光強度は、太陽からの放射エネルギーの  $1/10^6$  と仮定した。また、532 nm での  $I_0$  は Thekaekara (App. Opt., 13, 518–522, 1974) のデータをもとに  $1.842 \text{ W/m}^2/\text{nm}/\text{sr}$  とし、地表からの反射率アルベドは 20% とした。

SNR は次式によって与えられる。

$$\text{SNR} = \frac{n_r}{\sqrt{n_r}} \quad (\text{夜間の受信信号の SNR}) \quad (5.3.1-4)$$

$$\text{SND} = \frac{n_r}{\sqrt{n_r + 2 n_b}} \quad (\text{昼間の受信信号の SNR}) \quad (5.3.1-5)$$

$$\text{SNA} = \frac{n_a}{\sqrt{n_a + 2 n_b}} \quad (\text{夜間のエアロゾルについての SNR}) \quad (5.3.1-6)$$

$$\text{SNAD} = \frac{n_a}{\sqrt{n_a + 2(n_m + n_b)}} \quad (\text{昼間のエアロゾルの SNR}) \quad (5.3.1-7)$$

ここで、 $n_r$ 、 $n_b$ 、 $n_a$ 、 $n_m$  はそれぞれ全受信光子数、背景光光子数、エアロゾルからの受信光子数、大気分子からの受信光子数である。本シミュレーションにおいては、SNA と SNAD について着目して検討を行う。

#### (b) 大気モデル

航空機からのエアロゾル観測及び後で述べる衛星からのエアロゾル観測のシミュレーションに用いた大気モデルは、米国標準大気(1976)と NASA の EOS Report に示されたバックグランドエアロゾル (LASA Instrumental Panel Report, vol. 2d, pp. 17) を用いた。さらに、イベントとして火山噴火による成層圏エアロゾルのエンハンスメントや極域成層圏雲 (Polar Stratospheric Clouds, PSC) (散乱比 = 10) と対流圏における黄砂、サハラダスト、シーラス等を想定したエンハンスメント (散乱比 = 5) について検討を行った。

以下の解析においては、計算を容易にするためこれらの大気モデルから得られる体積後方散乱係数の高度変化にフィットする近似式を用いた。

大気分子による後方散乱係数は、スケールハイトが 7 km (一定) として、次式で与えた。

$$\beta_M = 2.5 \times 10^{25} \exp(-z/7 \text{ km}) \quad (5.3.1-8)$$

また、バックグランドエアロゾルとして次式を用いた。

$$\beta_A = 2.47 \times 10^{-6} \exp(-z/1.9 \text{ km}) + 5.13 \times 10^{-7} \exp(-(z-20 \text{ km})^2/(5.58 \text{ km})^2) \quad (5.3.1-9)$$

成層圏イベントとして、(5.3.1-9) 式の第 2 項の寄与を 100 倍 (散乱比 = 10) とした。また、対流圏イベントとしては、(5.3.1-9) 式に次式を加えた。

$$\beta_A' = 1.55 \times 10^{-6} \exp(-(z-8 \text{ km})^2/(1 \text{ km})^2) \quad (5.3.1-10)$$

これは、高度 8 km に厚さ 1 km で散乱比が 5 程度のエアロゾル層を仮定している。

以上の大気モデルによる後方散乱係数の高度変化を図 5.1.3-1 に示す。

また、本シミュレーションでは、消散係数と後方散乱係数の比は大気分子の場合  $\frac{8}{3}\pi$ 、エアロゾルの場合 50 とした。

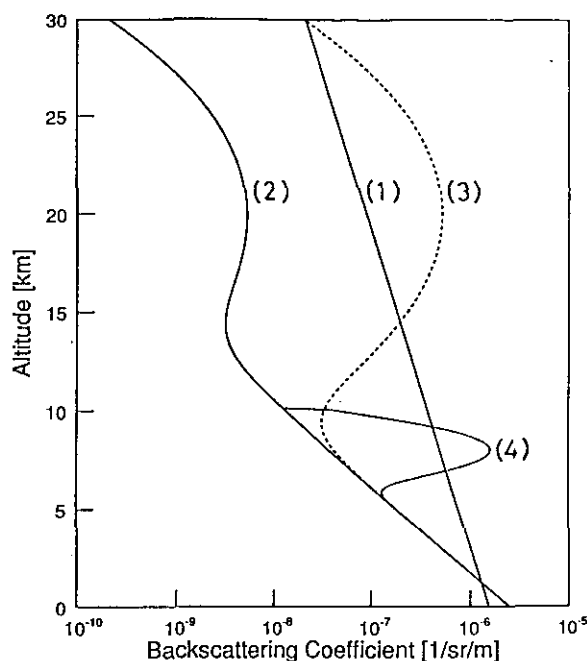


図 5.1.3-1 シミュレーションに用いた大気モデルの体積後方散乱係数の高度変化。(1)大気分子、(2)バックグラウンドエアロゾル、(3)成層圏エアロゾルイベント、(4)対流圏エアロゾルイベント

(c) 観測システムと航空機

想定したレーザーレーダーシステムの性能パラメータと観測条件を表 5.1.3-1 に示す。航空機は気密性を必要としない低高度を飛行する小型飛行機と高高度からの観測が可能な大型飛行機 (DC-8 クラス) を想定した。

表 5.1.3-1 航空機搭載型エアロゾル観測用レーザーレーダーの基本性能パラメーターと観測条件

送信系	
レーザー波長	532nm (Nd : YAG SHG)
出力	100mJ
発振繰り返し数	10pps
受信系	
受信望遠鏡	口径 50cm
視野角	1mrad
干渉フィルター幅	1nm (T=40%、夜間) 0.15nm (T=20%、昼間)
PMT の量子効率	10%
送受信系の光学効率	30% (夜間) 15% (昼間)
観測条件	
高度分解能	50m
積算回数	10回
飛行高度	3km                      10 km
飛行速度	80m/s                      150 m/s
水平分解能	80m                      150 m

(d) 結果と検討

シミュレーションはそれぞれの飛行高度から上下方向に昼夜観測した場合における受信信号強度とエアロゾルからの信号雑音比 (SNA、SNAD) を求め検討を行った。観測可能範囲の目安として SNR が 10 以上とした。



最初に高度 10 km から、観測した場合のシミュレーション結果を図 5.1.3-2 (夜間)と図 5.1.3-3 (昼間) に示す。

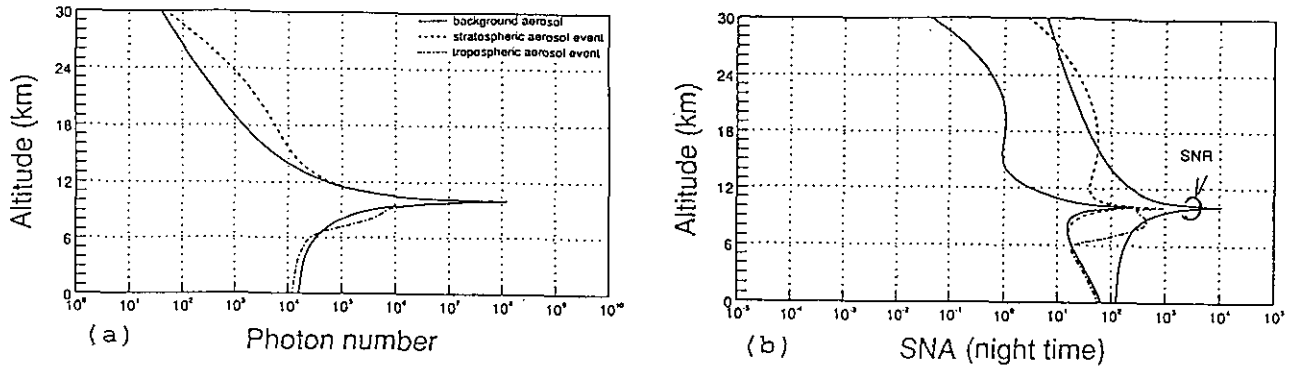


図 5.1.3-2 飛行高度 10 km から夜間に観測した場合の(a)受信信号強度と(b) SNA の高度変化. SNR は受信信号の信号雑音比を示す

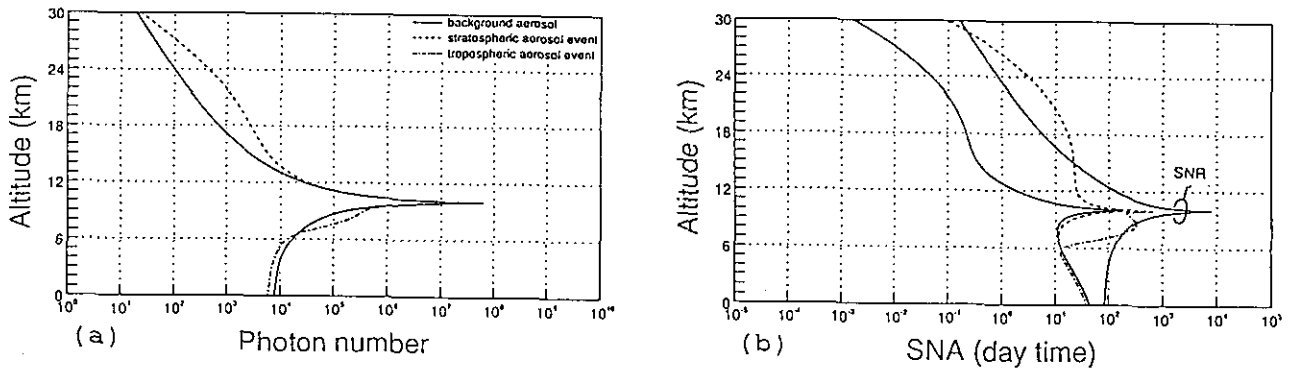


図 5.1.3-3 飛行高度 10 km から昼間に観測した場合の(a)受信信号強度と(b) SNA の高度変化. SNR は受信信号の信号雑音比を示す

受信信号の高度変化から夜間で 24 km 以下、昼間で 22 km 以下の高度範囲でアナログ計測が可能(受信光子数  $10^3$ 以上)である。

SNA に関しては航空機より下方に向けての観測の場合、昼夜とも地表までの高度範囲において対流圏イベントはもちろんのことバックグランドエアロゾルも十分な SNA で観測が可能である。上方の観測に関しては、夜間については、 $SNA > 10$  で成層圏イベントを捉えることが可能であるが、間観測においては 20 km が上限となって観測が難しくなる。しかし、成層圏イベントはグローバルなスケールで捉えれば良いので、高度分解能を 500 m、水平分解能を 1.5 km (積算回数 100 回) とすれば昼間でも十分な SNA で成層圏イベントを観測することが可能となる。

次に飛行高度 3 km から観測した場合のシミュレーション結果を図 5.1.3-4 (夜間)と図 5.1.3-5 (昼間)に示す。

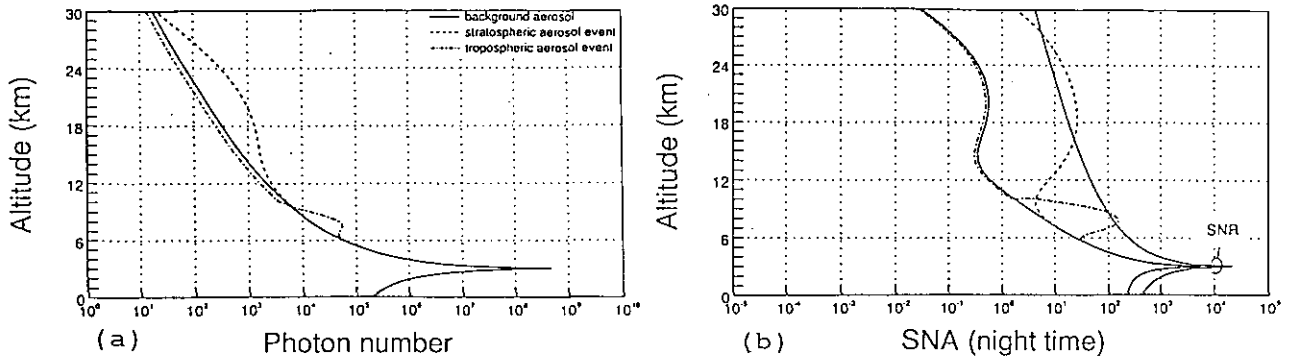


図 5.1.3-4 飛行高度 3 km から夜間に観測した場合の(a)受信信号強度と(b) SNA の高度変化. SNR は受信信号の信号雑音比を示す

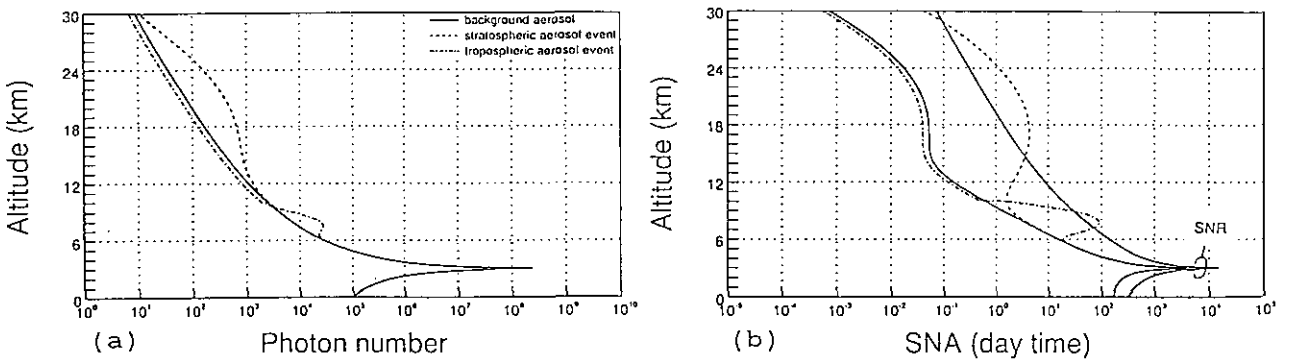


図 5.1.3-5 飛行高度 3 km から昼間に観測した場合の(a)受信信号強度と(b) SNA の高度変化. SNR は受信信号の信号雑音比を示す

アナログ観測が可能な高度範囲は、成層圏イベントが起きている場合、夜間で 20 km まで、昼間で 13 km までとなっている。このことは対流圏観測においてはアナログ計測法が可能であるが成層圏観測についてはアナログ計測法と光子計数法を併用する必要があることを示している。

SNA に関して、夜間観測においては対流圏、成層圏イベントを十分な SNA で捉えることが可能である。一方、昼間観測においては対流圏イベントは  $SNA > 10$  を満たしているが、成層圏イベントに対しては  $SNA < 10$  となり、この観測条件では良好な SNR は得られない。しかし、前述したように高度分解能 500 m、水平分解能 800 m (積算回数 100 回) にした場合、昼間でも十分な SNA で観測が可能となる。

以上の結果をまとめると次のようになる。

- 1) 対流圏バックグランドエアロゾル及び黄砂、サハラダスト、シーラス等のイベントに関しては高度分解能 50 m、水平分解能 80 m（飛行高度 3 km）、150 m（飛行高度 10 km）で昼夜観測が可能となる。
- 2) 成層圏イベントに関しては、高度分解能 500 m、水平分解能 800 m（飛行高度 3 km）、1.5 km（飛行高度 10 km）で昼夜観測が可能である。しかし、成層圏バックグランドエアロゾルの観測は難しい。
- 3) 観測方法に関しては、下方に向けての観測の場合にはアナログ法を用いることができるが、上方に向けての観測の場合にはアナログ法と光子計数法の併用が必要となる。

## (2) オゾン観測

### (a) 差分吸収レーザーレーダー方程式

高度  $h$  km の飛行機より大気中に射出されたレーザー光の受信光子数  $n_r$  は、レーザーレーダー方程式を用いて次式で表される。

$$n_r(z) = \frac{N \cdot n_0 \cdot \Delta z \cdot K \cdot \beta \cdot \eta \cdot A \cdot Y \cdot \exp(-2\tau)}{(z-h)^2}$$

$n_0$	: 送信光子数	
$\Delta z$	: 距離分解能	[m]
$K$	: 受信光学系の効率	
$\beta$	: 体積後方散乱係数	[m <sup>-1</sup> str <sup>-1</sup> ]
$\eta$	: PMT の量子効率	
$A$	: 受信望遠鏡の開口面積	[m <sup>2</sup> ]
$Y$	: 望遠鏡の視野重なり	
$\tau$	: 光学的厚み	
$z$	: 高度	[m]
$N$	: 積算回数	

さらに、 $\tau$  はオゾン濃度  $D$  [m<sup>-3</sup>]、オゾンの吸収断面積  $\sigma$  [m<sup>2</sup>]、消散係数  $\alpha$  [m<sup>-1</sup>] を用いて

$$\tau = \int_h^z (D(z)\sigma + \alpha(z)) dz$$

となる。

また、 $\alpha$ 、 $\beta$  はそれぞれ  $\alpha = \alpha_a + \alpha_m$ 、 $\beta = \beta_a + \beta_m$  である。（添え字 a はエアロゾル、m は空気分子の寄与を表す。）

オゾンに吸収されやすい波長を波長 1、吸収されにくい波長を波長 2 とする。距離  $z$  および  $z + \Delta z$  からの受信信号を求め、その比を  $f(z)$  とすると

$$f_i(z) = \frac{n_i(z + \Delta z)}{n_i(z)} \quad (i=1,2)$$

ここで、 $\sigma_a = \sigma_1 - \sigma_2$  とすると、 $z$  と  $z + \Delta z$  間の平均オゾン濃度は

$$D(z, \Delta z) = \frac{1}{2\sigma\Delta z} \{ \ln(f_2/f_1) + B + A_a + A_m \}$$

と表される。ここにおいて、 $B$ 、 $A_a$ 、 $A_m$  は

$$B = \ln \left[ \frac{\beta_1(z + \Delta z)\beta_2(z)}{\beta_2(z + \Delta z)\beta_1(z)} \right]$$

$$A_a = -2 \int_z^{z+\Delta z} (\alpha_{1,a} - \alpha_{2,a}) dz$$

$$A_m = -2 \int_z^{z+\Delta z} (\alpha_{1,m} - \alpha_{2,m}) dz$$

で与えられる。B項は、エアロゾルと大気分子の体積後方散乱係数の波長および空間分布への依存性を表し、 $A_a$ 項、 $A_m$ 項は、それぞれ、エアロゾルと大気分子の消散係数の波長依存性を表す項である。

受信信号からオゾン濃度を求める際の相対誤差  $\delta D / D$  は、B、 $A_a$ 、 $A_m$  を無視することによる系統誤差  $\epsilon_s$  とショットノイズに起因する不規則誤差  $\epsilon_r$  より成る。系統誤差を  $\epsilon_s$  とすると

$$\epsilon_s = \frac{1}{2 \sigma_d D(z, \Delta z) \Delta z} \{B + A_a + A_m\}$$

と表せる。

また、信号の不規則誤差は、フォトマルのショットノイズで決まり、次式で表される。

$$\epsilon_r = \frac{1}{2 \sigma_d D(z, \Delta z) \sqrt{N} \Delta z} \times \left[ \sum_{i=1,2} \frac{n_i(z) + 2 n_{bl}}{n_i(z)^2} + \frac{n_i(z + \Delta z) + 2 n_{bl}}{n_i(z + \Delta z)^2} \right]^{0.5}$$

ここで  $n_b$  は昼の背景光雑音であり、式等についてはエアロゾル観測の時と同一である。

### (b) 大気モデル

計算に用いた大気モデルは大気分子およびオゾン密度として、米国標準大気(1976)、エアロゾルの消散係数として Elterman のモデル(1968)を用い、消散係数と後方散乱係数の比は 50 とした。

図 5.1.3-6 に大気分子とオゾン密度を、図 5.1.3-7 に 299 nm でのオゾン、大気分子、エアロゾルの消散係数の高度分布を示す。

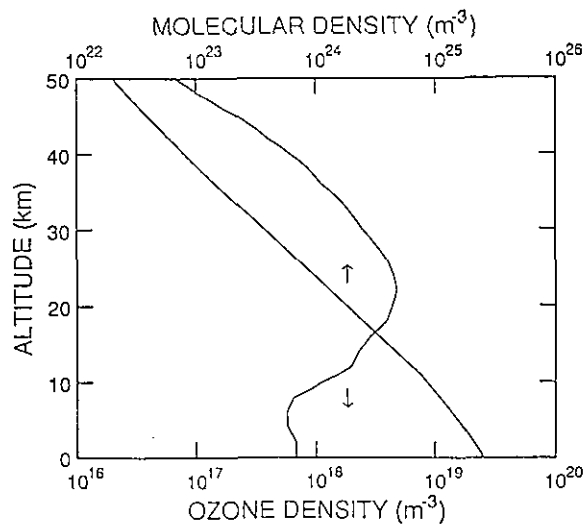


図 5.1.3-6 オゾンと大気分子の高度分布 (米国標準大気、1976)

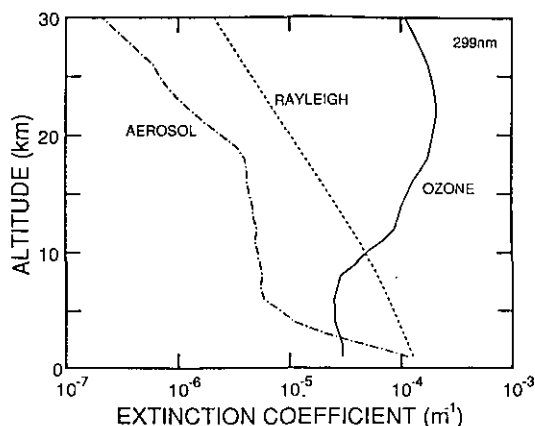


図 5.1.3-7 波長 299 nm に対するオゾン、大気分子及びエアロゾルの消散係数の高度変化  
(米国標準大気とElterman モデルを用いた)

(c) 観測システムと航空機

計算に用いたパラメータの値を表 5.1.3-2 に示す。フェイズ 2 はフェイズ 1 に比べレーザー出力、受信望遠鏡の直径が大きくなっている。また、高度分解能は 1 km、飛行機の高度は 10 km とした。

表 5-1.3-2 航空機搭載型オゾン観測用レーザーレーダーの基本性能パラメータと観測条件

上方観測システム	フェイズ 1				フェイズ 2			
	システム 1		システム 2		システム 1		システム 2	
波長 [nm]	299	316	299	355	299	316	299	355
出力 [mJ]	10	10	10	100	20	15	20	200
繰り返し [Hz]	10		10		20		20	
光学的効率	0.1				0.1			
望遠鏡直径 [m]	0.3				0.5			
望遠鏡視野角 [mrad]	1.0				1.0			
PMT 量子効率	0.25				0.25			
干渉フィルター幅 [nm]	2.0				2.0			

下方観測システム	フェイズ 1				フェイズ 2			
	システム 1		システム 2		システム 1		システム 2	
波長 [nm]	266	289	289	299	266	289	289	299
出力 [mJ]	10	10	10	10	20	20	20	20
繰り返し [Hz]	10		10		20		20	
光学的効率	0.1				0.1			
望遠鏡直径 [m]	0.3				0.5			
望遠鏡視野角 [mrad]	1.0				1.0			
PMT 量子効率	0.25				0.25			
干渉フィルター幅 [nm]	2.0				2.0			

観測条件	
高度分解能	1 km
積算回数	1000 回
飛行高度	10 km
飛行速度	150 m/s
水平分解能	15 km, 7.5 km

(d) 結果と検討

本シミュレーションでは、高度 10 km から上下方向にオゾン観測を行った場合における受信信号強度、不規則誤差について検討を行う。さらに、エアロゾルによる系統誤差についても検討を行う。

最初に高度 10 km から上下方向に観測した場合の各システムの受信信号の高度変化を図 5.1.3-8 に、不規則誤差の高度変化を図 5.1.3-9 に示す。アナログ計測が可能(受信光子数  $10^5$  以上)な範囲は、下方に関しては 266 nm の波長を除いて、地表付近までとなっている。上方に関しては波長に依存しており、17 km 以下 (299 nm) から 30 km 以下 (355 nm) となっている。不規則誤差に関して上方については夜間 21 km 以下 (フェイズ 1)、24 km 以下 (フェイズ 2)、昼間に関してはそれぞれ 17 km 以下、21 km 以下において誤差 10% 以下におさまっている。下方に関してはシステム 2 (299 nm、355 nm) は地表まで、システム 1 (299 nm、316 nm) は 3 km 以上が誤差 10% 以内におさまっている。

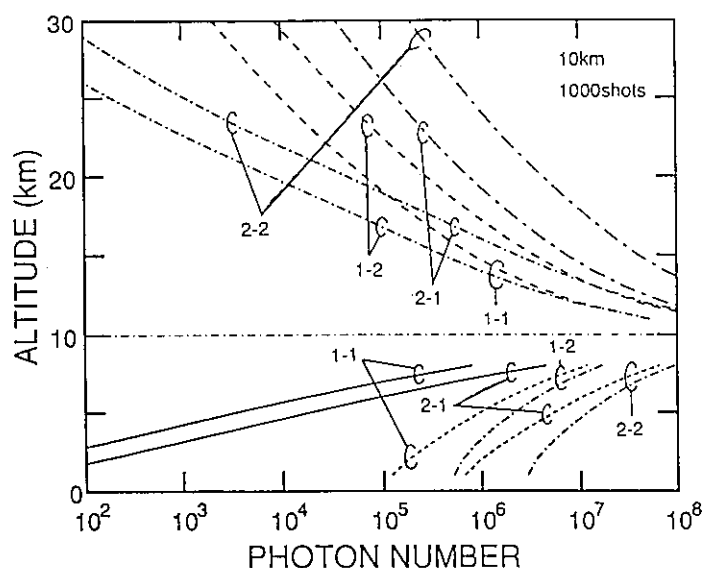


図 5.1.3-8 高度 10 km から上下方向に観測した場合の受信光電子数の高度変化

高度分解能 1 km、積算回数 1000 回。各数字の組合せはシステムを示す (前の数字がフェイズ、後ろの数字がシステム)

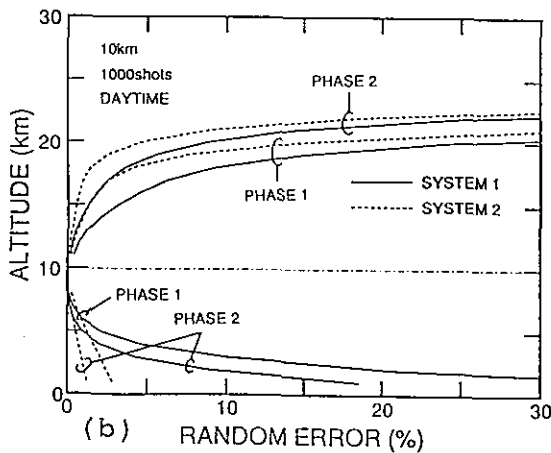
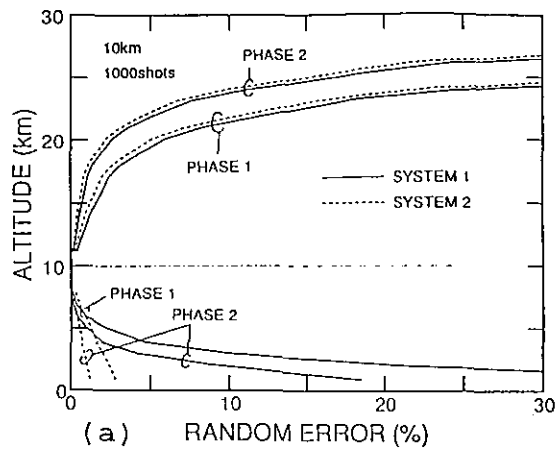


図 5.1.3-9 高度 10 km から上下方向にオゾン観測を行った場合の不規則誤差の高度変化。  
 (a)夜間観測、(b)昼間観測。高度分解能 1 km、積算回数 1000 回

次に系統誤差についての結果を図 5.1.3-10 に示す。この結果はエアロゾルのみを考慮した系統誤差である。この誤差は波長の組合せのみに依存して観測高度には無関係である。この結果から、266 nm+289 nm と 289 nm+299 nm の組合せは地表までの範囲で系統誤差を 10%以下に抑えることができるが、299 nm+316 nm と 299 nm+355 nm の組合せにおいては 2 km 以下で系統誤差が 10%を越えてしまう。

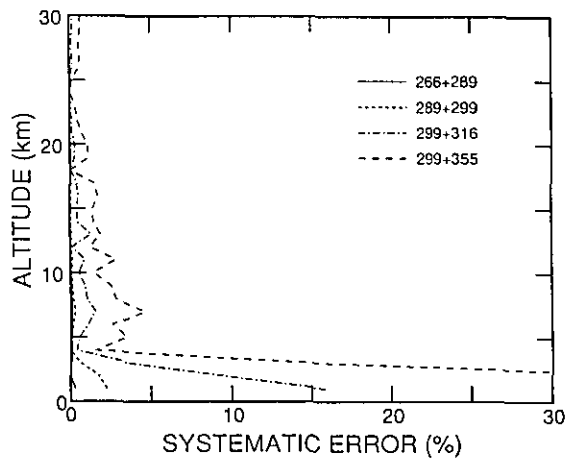


図 5.1.3-10 系統誤差の高度変化。パラメーターはシステムの波長の組合せを示す

以上の結果から高度 10 km から上下方向にオゾン観測を行った場合の検討結果をまとめると次のようになる。

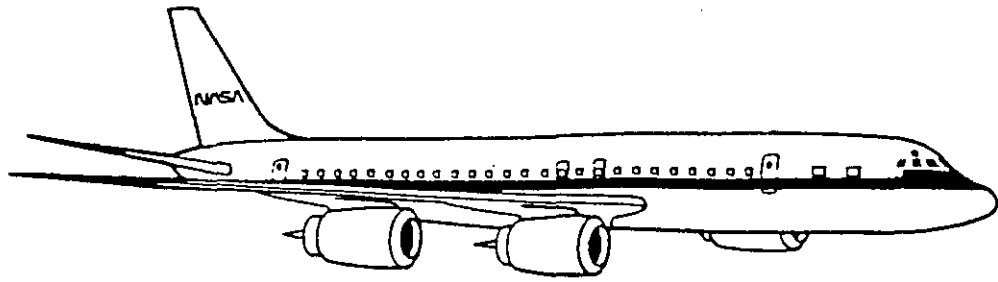
- 1) 上向きの観測では、299 nm (20 mJ)、355 nm (200 mJ) の組合せで夜間 24 km まで、昼間 21 km まで誤差 10%以下で観測可能である。
- 2) 下方の観測では、系統誤差を考慮すると、289 nm と 299 nm を組み合わせたシステムによりほぼ地表付近まで観測が可能となる。
- 3) 上方の観測においてはアナログ法と光子計数法の併用が必要となる。
- 4) これらの観測で期待される空間分解能は、高度方向に 1 km、水平方向に数 km から十数 km となる。

#### 5.1.4 航空機搭載型レーザーレーダーにおける技術的問題点

##### (1) 航空機搭載レーザーレーダーの観測的意義

航空機搭載レーザーレーダーや衛星搭載レーザーレーダーを技術的な側面から見れば、衛星搭載用のレーザーレーダーが最も進んだものと言うことができる。しかし、大気や海洋物理、さらに植生の観測などの科学的な側面から見ると、両者には大きな差がある。これは、両者において、観測できる領域の広さの差によるところが大きく、航空機搭載レーザーレーダーではその観測できる水平の領域は数 100 km の広さに限定されるが、一方衛星では、地球全体を見ることができ、その観測領域内での水平方向の分解能を航空機搭載レーザーレーダーでは大変高くすることができ、比較的広域を精密に測定できる利点がある。また、航空機搭載レーザーレーダーでは観測を希望するときはいつでも、使用する航空機の事情が許せば、希望する場所に行くことができ、集中観測や観測の機動性の面でも衛星搭載にない利点がある。このように、技術的側面からは、航空機搭載レーザーレーダーは衛星搭載レーザーレーダーを開発して行く上での技術的モデルと考えることができるが、科学的な側面からは、地上設置とも異なる新たな別個の観測手段と考えるべきである。特に機動性については、北極、南極でのオゾンホール観測キャンペーンが行われたが、その時の航空機搭載レーザーレーダーの活躍にも見ることができる<sup>1)</sup>。また、広域の観測例としては、現在、観測が困難であるが太平洋海洋上でのエアロゾル分布測定を目的として実施された GLOBE 計画があり、衛星からの観測実施に先立ち、既存のライダーを用いての機動性ある観測が実施された<sup>2)</sup>(図 5.1.4-1 参照)。この GLOBE 実験では、我国の地上設置ライダーとの比較観測が実施され、一点での長期観測が得意な地上のレーザーレーダーと、地上設置レーザーレーダーの間を補完するように航空機搭載レーザーレーダーとの共同観測が行われた。これに衛星からのレーザーレーダーのデータを加えることができれば、大気のエアロゾル分布を把握する上で、相補的な観測形態となる。このように、地上、航空機、衛星の、各々のレーザーレーダーは全体としてひとつのセットとなる観測手段としての意味が大変大きく、我国においても特に開発や整備が遅れている航空機レーザーレーダーと衛星レーザーレーダーの開発、観測の活発化を行うことが強く望まれる。





DC-8-72, McDonnell Douglas

GLOBE SURVEY FLIGHT INSTRUMENTATION

INSTITUTION	SCIENTIST	INSTRUMENT	MEASUREMENT	CALIBRATION
Ames Research Center (NASA)	D.Jaynes	DC-8 aircraft	sensor platform, meteorological, navigational	
Jet Propulsion Laboratory (NASA)	R.Menzies	pulsed CO2 lidar	9.25 micron backscatter	flame-sprayed aluminum plate
Goddard Space Flight Center (NASA)	J.Splnhirne	pulsed Nd:YAG lidar	0.53, 1.06, 1.54 micron backscatter	barium sulfate plate/hemisphere
Marshall Space Flight Center (NASA)	W.Jones	CW CO2 lidars	9.11, 10.6 micron backscatter	sandpaper disk silicone oil drops
Ames Research Center (NASA)	R.Pueschel	particle counters, wire impactors (ambient)	size distribution, concentration, composition	PSL microspheres
University of Hawaii	A.Clarke	optical particle counters, CN counter filters/impactors (aspirated, heated)	size distribution, concentration, size-distributed composition	PSL beads artificial sulfates
Georgia Institute of Technology	E.Patterson	particle counter; filter, impactor, He-Ne nephelometer (aspirated)	size distribution, concentration, composition, 0.69 micron scattering	
Geophysical Monitoring for Climatic Change (NOAA)	B.Bodhaine	nephelometer	0.45, 0.55, 0.70 micron scattering	pure gaseous standards
Goddard Space Flight Center (NASA)	R.Kakar	passive microwave radiometer	water vapor sea state	

図 5.1.4-1 NASA/DC-8 GLOBE 計画概要

(2) 航空機

航空機搭載型のレーザーレーダーの技術的な問題を考えるときまず最初に問題となるのは、航空機そのものである。しかし、現在でも我国における実験用航空機の状況は大変厳しく、このため航空機による地球環境の計測は、他の先進諸外国に比べても大変遅れている。これは航空機搭載レーザーレーダーの技術開発を行う上でも当然のことながら大きな制約となっている。実験用航空機に関しては、本報告でも別の章に記載されているが、数百人乗りのジャンボ機から1~2人乗りの小型機まで広い多様性があり、航空機搭載レーザーレーダーの装置もその大きさや測定感度等の特性も、当然のこととして使用できる航空機の種類によって異なってくる。レーザーレーダーを航空機に搭載しようとするとき航空機の種類

- (1) 機内の与圧
- (2) 電力
- (3) 積載重量
- (4) 機器占有面積
- (5) 機体開口部面積

を考慮すべきである。

百人乗り以上の大型の航空機は、大部分ジェット機であり高度は5000 m以上を飛行し、与圧を必要とする。このような、大型の航空機の場合は積載重量、電力ともに地上設置の場合と同じ程度に使うことができ、この場合は与圧を行うために送受信の透過用の窓の設置は必要であるが、地上設置のレーザーレーダーに若干の改良を行った後に航空機に搭載してただちに観測を実施することができる。しかし、この大型の航空機を利用する場合は航空機の運行費用も高くなるため、他の多くの観測機器も同時に搭載する総合的な観測計画が立てられることが多く、総合観測航空機として運用される。このような総合観測では、レーザーレーダーに限らず搭載される全ての観測機器に対して軽量化、小電力化の高度化等がより多くの観測項目を可能にするため勿論強く望まれてくる。このような大型の航空機の利用は、多種多様な多くの実験用航空機を所有している NASA においてのみ開発や観測が活発に実施されているだけである。我国においても大型の実験用航空機を所有し、観測を行うことは、世界的にも大きく期待されているが、残念ながら現在の我国実験用航空機の実状は、大型の航空機を用いて観測計画が立てられるような状況ではなく、20～30人乗り程度の航空機で実現可能な航空機搭載レーザーレーダーを考えることが現実的であるといえる。もちろん、小型機で開発した航空機搭載レーザーレーダーは大型機に搭載可能であるし、測定精度を上げるためにレーザーの種類を増やしたり、レーザーを大きくすることは大型機を用いる全体の観測計画の中で調整が可能である。一方、受信鏡の大きさは機体の開口部の口径によっており、その大きさは航空機の安全に係わるため、よほど大きな機体構造の改修を考えないかぎり、50 cm 程度であり、機体自身の大きさにはあまり依存しない。このため、小型機用に開発したシステムでも受信鏡口径の大型化で測定精度の改善を目指すことは困難である。

小型機の場合は、通常5000 m以下の高度を飛行するものであり、与圧はされない。このため、機体内の温度や気圧が高度によって変化し、光学軸特にレーザーの光軸の変化によってレーザー出力が低下する場合があります。衛星搭載ほどではなくても、温度や気圧の変化による変動を防ぐためにレーザーの共振器構造や光学部品のマウントに若干の工夫が必要である。また、レーザーでは高電圧を使うことが多いが、高度による気圧の低下によって高電圧のリークが生じる場合があります。高電圧部のシールは航空機用レーザーを開発する際に注意を払うべきである。また、レーザーや送受信の光軸はレーザーレーダーの航空機への搬入や離着陸等の振動によっても変動するため、航空機搭載レーザーレーダー全体の防振対策も必要である。このためには、

- (1) 送受信光学系とレーザーが乗る光学ベンチの剛性
- (2) 光学ベンチ全体の機体からの防振

を考慮すべきである。この際、防振には機体に強い衝撃が加わったときの強度を十分考慮して防振用の部品を選定する必要がある。

小型機の実験用航空機として興味ある例として、NASAのER-2と呼ばれる小型のジェット機がある。これは、成層圏を飛行用として開発されたもので、現在最も高々度を飛行できる航空機であり、この航空

機のノーズの部分、あるいは翼の部分にレーザーレーダーが搭載され、雲頂高度の観測等が実施されている(図5.1.4-2参照)。ER-2 搭載用のレーザーレーダーは、5000 m 以下を飛行する通常の航空機よりさらに厳しい完全自動化の仕様でレーザーレーダーが開発されており、衛星搭載を目指すプロトタイプに近いレーザーレーダーである。

LIDAR ATMOSPHERIC SENSING EXPERIMENT  
ER-2 INSTALLATION

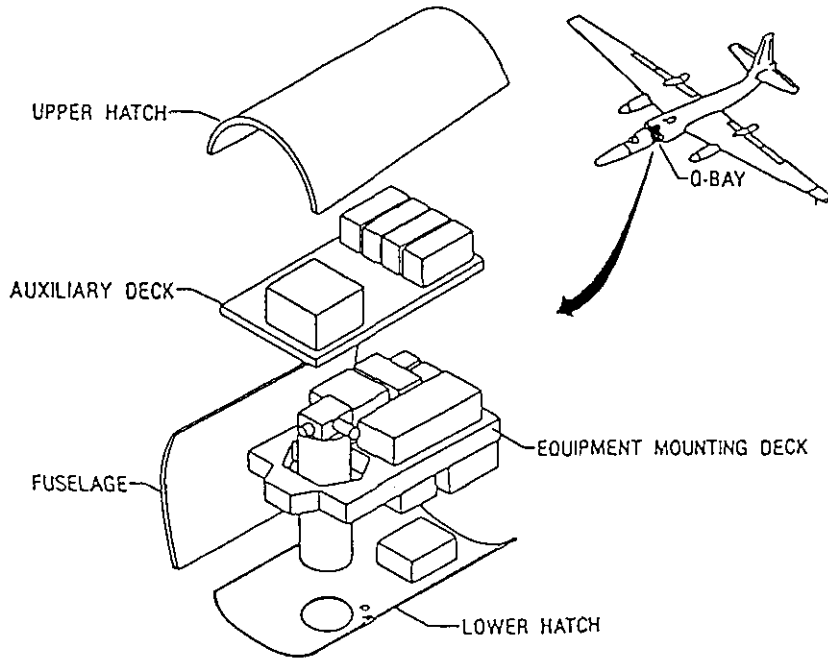


図 5.1.4-2 NASA/ER-2 搭載レーザーレーダー

航空機に搭載するレーザーレーダーを開発するにあたっては、

- (1) 何を観測するか
- (2) 上向き (zenith) か下向き (nadir) か

を検討する必要がある。(1)は、地球環境の上からの観測の必要性和現在の技術レベルとの兼ね合いで決ってくる。大気分子のレイリー散乱やエアロゾルのミー散乱を利用すると大気中微量成分を距離分解能をもって観測することができる。このような距離分解能を持つ方法で、現在の技術レベルですぐに航空機搭載用レーザーレーダーとして開発可能なものとしては、エアロゾルとオゾンである。特に、対流圏中でのオゾンやエアロゾルの広域分布は地球温暖化の正確な把握を行う上での広域観測の強化が望まれている。小型機を用いて高度 5000 m 以下での飛行による観測を考えると、航空機の開口部の条件が許せば上下方向の観測が望ましい。

(3) オゾン観測の技術的問題

オゾン観測では、差分吸収法で行うため、二波長が必要であり、波長域としては 300 nm 付近の紫外域と 9.5 μm 付近赤外域が利用される<sup>4),5)</sup>。紫外域での対流圏オゾン観測用の波長としては 270 nm~300 nm の波長域が適当であり対流圏オゾン観測用の航空機搭載レーザーレーダーに使用するレーザーとしては以下の3つの候補がある

- |                          |                               |
|--------------------------|-------------------------------|
| (1) Nd: YAG-4 次高調波       | - H 2、D 2 ラマン <sup>6)</sup>   |
| (2) KrF: Excimer         | - H 2、D 2 ラマン <sup>7)8)</sup> |
| (3) Nd: YAG-2 次高調波-色素(1) | - 2 次高調波 <sup>(1)</sup>       |
| - 色素(2)- 2 次高調波          |                               |

このうち、YAG レーザーはこれまでフラッシュランプ (FL) 励起であったが、最近は励起用半導体レーザーの研究が盛んであり、半導体レーザー (LD) 励起の YAG レーザーが軽量かつ高効率であり、航空機搭載に限らず広くレーザーレーダー用の光源として注目されてきている。FL 励起の YAG レーザーの効率は 1 程度で、LD 励起では現在 10 程度になるが、LD 励起ではさらに高効率が期待されており今後の重要な研究課題の 1 つである。(2) ではエキシマーレーザーの軽量化が技術的な問題となるがエキシマーレーザーは気体レーザーであるため、必要な出力を得るにはある程度の大きさが必要となり、軽量化は困難な場合が多い。

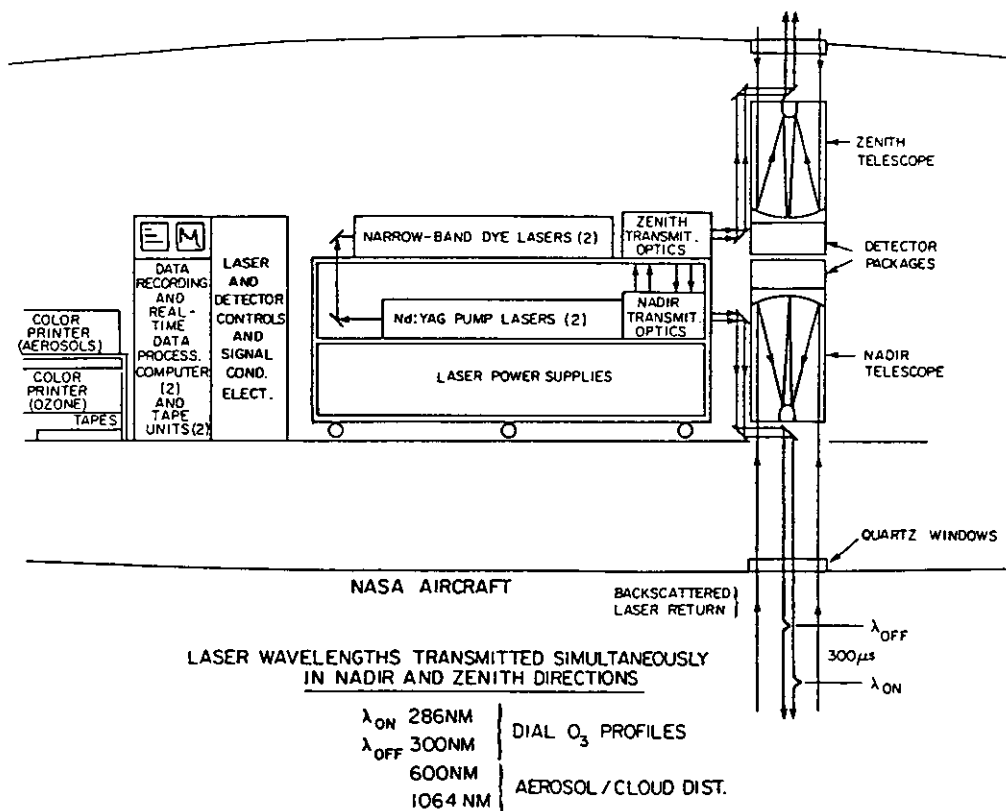


図 5.1.4-3 NASA オゾン観測用航空機搭載レーザーレーダー

上記レーザーの(3)は、NASA のオゾン観測用航空機搭載レーザーレーダーに使われている方式である(図 5.1.4-3 参照)。(3)を光源とする NASA のレーザーレーダーでは、YAG レーザーは FL 励起であるが、LD 励起の方がもちろん効率がよいため、今後は LD 励起に変わって行くものと思われる。(3)の方式は、色素レーザーを使っているため、オゾン観測に最適な波長を選択できる利点はあるが、逆に色素レーザーで波長同調を行い航空機上で安定に保持する技術が必要とする。(1)の波長の組合せで、エアロゾルの多い対流圏下層での測定誤差に最適な波長を選んだ場合と大きな差が生じないようであれば、(1)の方式のレーザーの組合せがシステムとして簡単であり、航空機搭載用として優れていると言える。

オゾンの観測では、二波長を用いるため航空機上で受信後この二波長の分離を行う必要がある。二波長

の分離は

(1) 2台のレーザーを使って、二波長をそれぞれのレーザーから作り、二長を数100  $\mu\text{sec}$ の時間差で大気中に発射し、この時間差で2波長を分離する

(2) 1台のレーザーを使い、同時に二波長を出し、受信光を分光的手法で二波長を分離する

方法がある(図5.1.4-4参照)。航空機搭載の場合は、(1)のように2台のレーザーを搭載するのは搭載重量にたいする影響が大きく、我国のように小型機を搭載用の航空機とするときは(1)は不適當である。また、二波長を同じ光電子倍增管で検出するため受信の干渉フィルター帯域が広くなり、昼間での観測にも不利な点が出てくるが、(1)の方がレーザーレーダーのシステムとしては簡単になる。(2)の2波長を分離する分光の方法としてはダイクロイック干渉フィルターの組合せが使われるが、受信の透過率はこの部分で大きく制限されており、この受信部の透過率の向上が強く望まれる。また、下向きの航空機搭載レーザーレーダーでは、大気の散乱光の後に地表面からの強い反射光が帰ってくるが、この強い反射光による光電子倍增管の影響の評価と対策も考えておく必要がある。

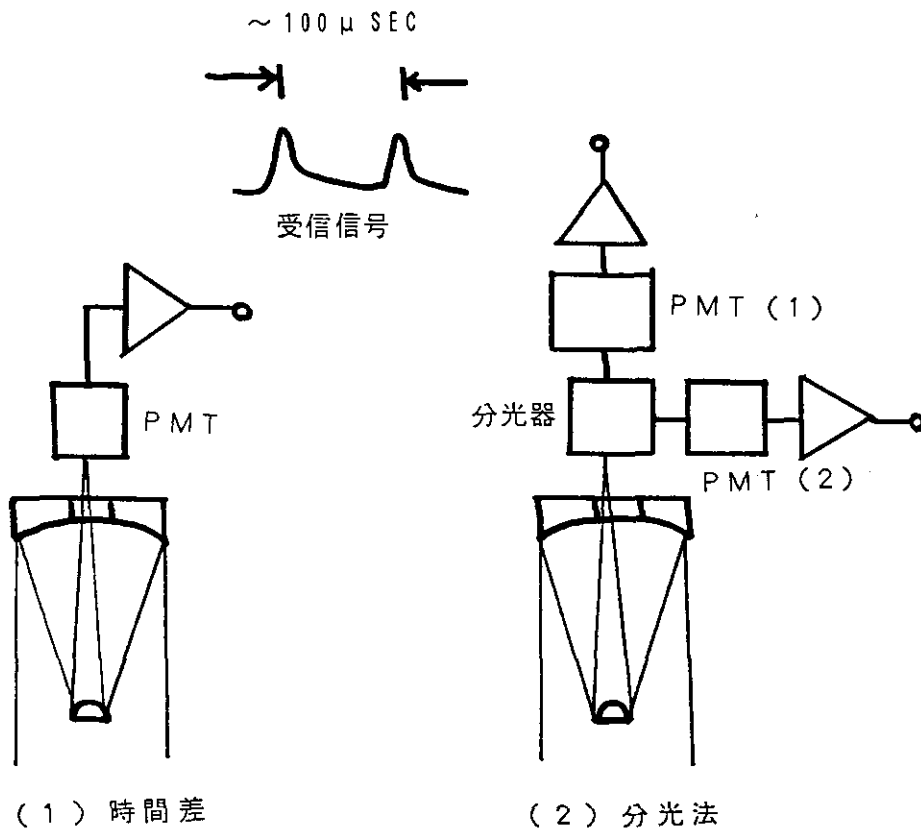


図 5.1.4-4 差分吸収での二波長分離

赤外域では、オゾン観測用として  $\text{CO}_2$  レーザーを使うことができる。しかし、赤外域でのレーザーレーダーの散乱ターゲットとしては粒径の比較的大きなエアロゾルであるため、受信が直接検波方式ではたいへん感度が悪くなり、都市部の光化学スモッグが発生している時に、航空機より下向きに測定する場合のオゾン観測にのみ使うことができる<sup>9)</sup>。 $\text{CO}_2$  レーザーの波長帯では光の検出感度を上げるために、ヘテロダイン検波方式を採用して、ターゲットとなる粒径の大きなエアロゾルの少ないより高い領域を観測するこ

とができるようにすることができる。しかし、ヘテロダイン検波を行うには、図 5.1.4-5 にあるように送信パルスレーザー発振周波数を安定化された局発 CO<sub>2</sub>レーザーとの間で制御を行って、受信光と局発レーザーの間でヘテロダイン検波を行う。CO<sub>2</sub>パルスレーザーの周波数制御、さらに受信光のヘテロダイン検波の方式はたいへん複雑であり、かつ光軸の制御も紫外域のレーザーレーダーに比べると格段に精度が要求され、オゾン観測用の航空機搭載用レーザーレーダーとして紫外域の方が優れている。

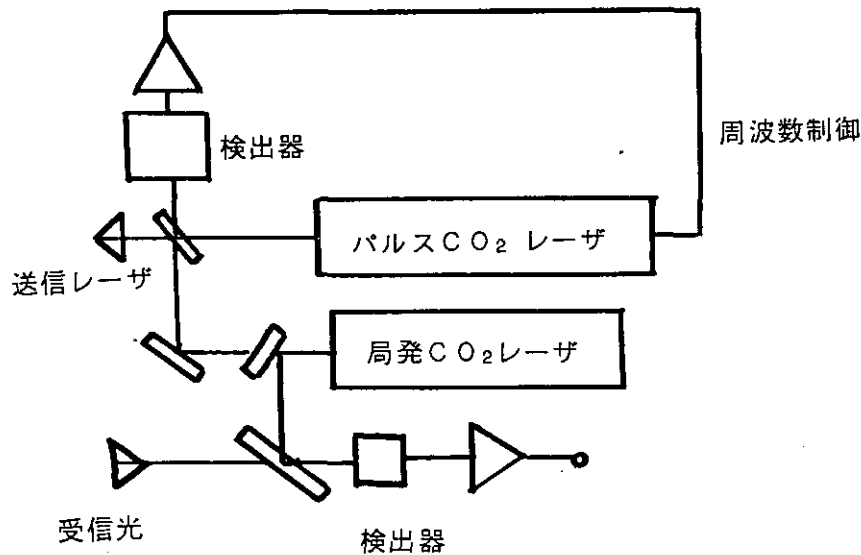


図 5.1.4-5・CO<sub>2</sub>レーザーヘテロダイン検波方式レーザーレーダー  
(差分吸収とするには 2 系列必要)

#### (4) エアロゾル観測用の技術的問題

エアロゾル観測用のレーザーとしては、Nd:YAG レーザーの基本波とその第 2 高調波が地上観測で最も多く使われている。オゾン観測用として用いるレーザーの方式の内(1)及び(3)はオゾン観測用の二波長を作るために Nd:YAG レーザーを用いており、エアロゾル観測の面からも適している。(1)及び(3)で、Nd:YAG レーザーから高調波に変換されない部分のレーザーの出力をエアロゾル観測に使うことができる。また、エアロゾル観測用の波長とオゾン観測用の波長は、ダイクロイック鏡で効率よく分離することができるため、航空機搭載用の装置としてはエアロゾル観測は YAG レーザーを持つオゾン観測用レーザーレーダーにエアロゾル観測用の光検出部をダイクロイック鏡を通して加えればよい。

エアロゾル観測の技術的な問題点としては、散乱強度のキャリブレーションがある。上向きの航空機搭載レーザーレーダーであれば、地上設置の場合と同じく、ある高度でエアロゾルが無いと仮定して、大気分子の散乱でキャリブレーションを行う方法が可能であるが、下向きの場合はキャリブレーション用の板を使って飛行前と後で校正を行う必要がある。しかし、キャリブレーション用の板を用いる方法は、キャリブレーション用の板自身の評価を含めて不確実な点が多く残るためグラントルースを含めてキャリブレーションの方法を開発すべきである。

#### (5) 将来の技術的課題

今後の衛星搭載用のレーザーとして 2 μm 帯のレーザーの重要性が、eye-safety の面から指摘されている。2 μm の波長は、エアロゾル観測用の波長としても Nd:YAG の二波長に加えるのに適切な波長であ

り、航空機搭載のエアロゾル観測用として2  $\mu\text{m}$  波長帯のレーザーレーダーの開発も重要な研究開発課題である。

オゾン以外の  $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 、PAN 等の大気中の微量分子の観測用航空機搭載レーザーレーダーの開発も重要な開発課題であるが、すぐに距離分解能を有するシステムの開発はこれらの微量分子は対流圏中でも大変数が少なく、より高感度なシステムを必要とする。このため、このような微量分子観測用航空機搭載レーザーレーダーとして、地表面をターゲットとして、航空機と地表間の長光路差分吸収を利用するレーザーレーダーの開発が重要である。この方式でも、地上から3～5000 m 間の微量分子の2次元分布をモニターできる。地表面の反射を利用する長光路差分吸収では、地表面の分光反射特性が微量分子の検出感度を決める要因となるため、差分吸収に用いるレーザーの2波長をできるだけ接近したレーザーレーダーの開発が技術開発課題である。

### 〔参考文献〕

- 1) E. V. Browell: Proc IEEE, 77, 419-432, 1989
- 2) GLOBE 2nd Survey Mission Flight Plan Document, NASA, 1990
- 3) J. D. Spinhirne, et. al.: Appl. Opt., 21, 1564, 1982
- 4) K. Asai, et. al.: Appl. Phy. Lett., 35, 60-62, 1979
- 5) O. Uchino, et. al.: Appl. Phy. Lett., 33, 807-809, 1978
- 6) 林田他: 天気, 36, 439-448, 1989
- 7) 柴田他: レーザー研究, 13, 276-283, 1985
- 8) O. Uchino: Appl. Opt., 25, 3946-3951, 1986
- 9) T. Itabe. et. al.: Appl. Opt., 28, 931-934, 1989
- 10) N. Sugimoto, et. al.: Opt. Lett., 15, 302-304, 1990

## 5.2 衛星搭載型レーザーレーダー

環境問題が一国の社会問題であった当時に比べ、現在の場合は、もはや各国の協力なしには成り立たなくなっている。その様な現状においては、地球規模での環境監視は重要な方法である。NASA は、1992年にスペースシャトルに初めてレーザーレーダーを搭載した実験を行なう。ここでは、宇宙からエアロゾルとオゾンの観測をする衛星搭載型レーザーレーダーの心臓部、“レーザー”について検討を行なう。

### 5.2.1 エアロゾル観測システム用レーザー

エアロゾルを観測対象とする場合、観測するべきエアロゾルの高度に応じ用いるレーザーの種類、出力を考慮してレーザーレーダーのシステム設計をおこなわねばならない。

#### (1) 境界層高度(Planetary Boundary Layer: PBL)

地表面と地表面から約1000 mの高さに発生する温度逆転との間の大気層を境界層と呼ぶが、この層内には地表面からの熱フラックス、下部対流圏内の水蒸気、微粒子、大気汚染ガスなどが閉じ込められてしまう。地球規模での境界層の高さ測定、特に海洋上や南半球などのデータは大気循環、嵐の発達過程、気象予報などの研究にとって有益な基礎資料を提供してくれる。

PBL 観測は、ごく基本的な YAG レーザーの第二高調波を光源としたミー散乱レーザーレーダーで可能である。図5.2.1-1は、PBL の上限高度を875 m、PBL の光学厚みを0.05とした場合の、水平分解能にたいする高さ誤差値である。ただし、図中のA曲線はレーザー出力が1 Jで受信望遠鏡口径が1 m $\phi$ の場合であり、Bは1 J、0.5 m $\phi$ 、Cは0.1 J、1 m $\phi$ 、Dは0.1 J、0.5 m $\phi$ にそれぞれ対応している。PBL 観測には、垂直分解能は50 m、水平分解能50 Kmを要求されており、図より、いちばん単純なDのシステムでも充分有効に働くことがわかる。

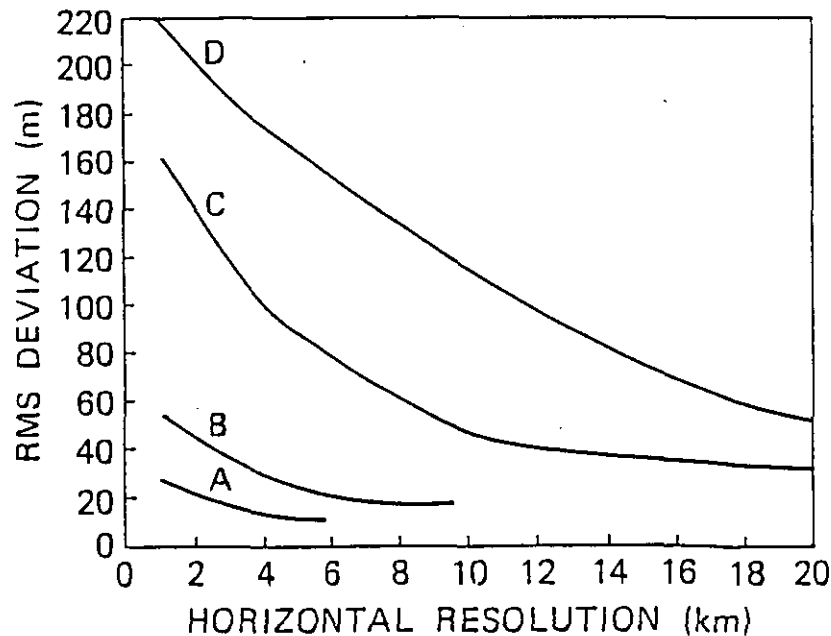


図5.2.1-1 水平分解に対する測定誤差値



### (2) 対流圏エアロゾル

対流圏エアロゾルの測定は、輻射の伝達過程、雲の生成そして大気化学を理解するのに非常に役立つ。また、エアロゾルの空間分布は、大気における水平、垂直伝達過程に密接に関連しているため、エアロゾルをトレーサにして観測すると境界層と自由対流圏間の大気の伝達などが解明できる。

図 5.2.1-2 は、高度 700 km の衛星から出力 1 J の光パルスを送地球に向けて発射した場合、衛星上の受信望遠鏡口径 1 mφ で集光できるエアロゾルからの散乱光光子数を計算した結果である。波長 500 nm の場合、高度 5 Km からの散乱光強度は、約 450 フォトン/パルス、太陽光の散乱にともなう背景雑音を考慮した信号対雑音比が 1 となる散乱光光子数は、バンドパスフィルタの波長幅 0.1 nm を仮定すると、約 130 フォトン ( $\lambda=532$  nm) である。したがって、対流圏エアロゾル観測システム用のレーザーは、出力 0.3-0.5 J の YAG レーザーの第二高調波を使えば良いことがわかる。

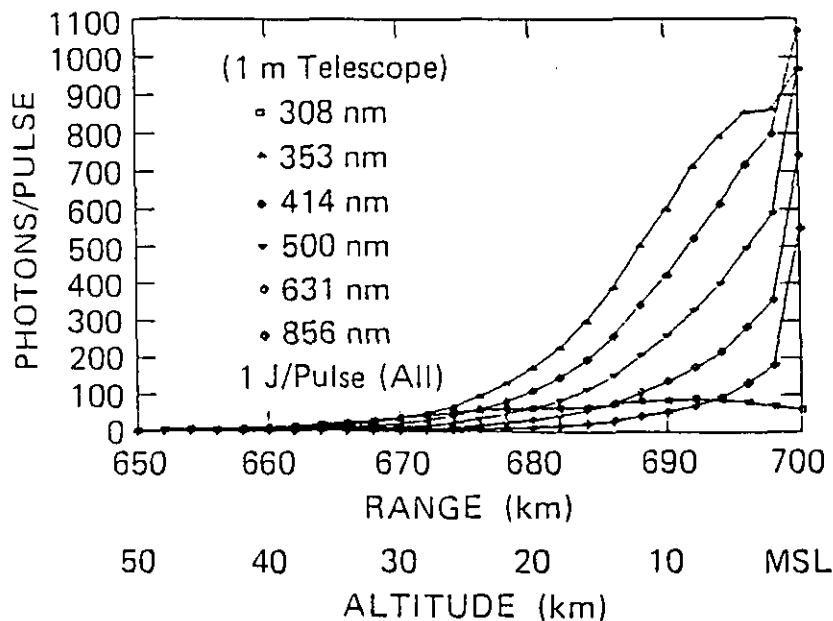


図 5.2.1-2 衛星高度 700 km で受信できる散乱光のフォント数

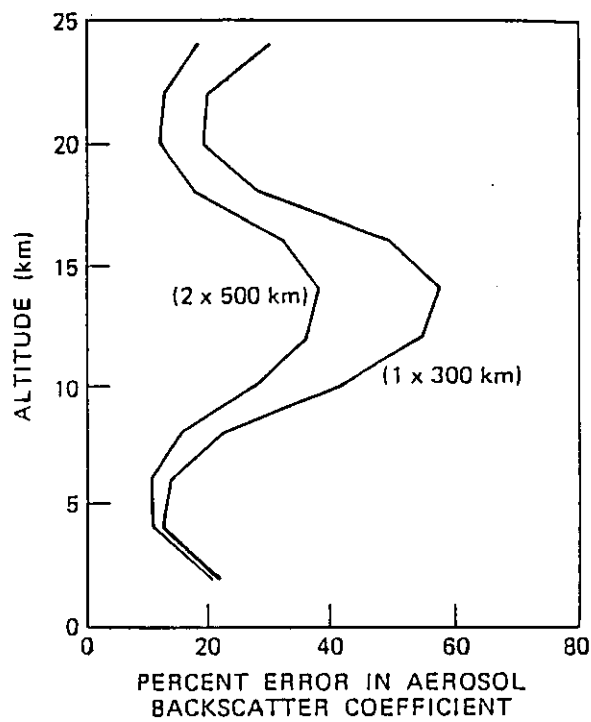
### (3) 成層圏エアロゾル

St. Helen や El Chichon 等の大きな火山活動は、爆発の際に多量のガスや灰を成層圏に注入する。そして、この多量の灰は地球全体を覆うため日射量と密接に関連し、気象や環境問題に重大な影響を及ぼす。したがって、成層圏エアロゾル分布の地球規模での詳細な観測は、成層圏内での大気変動や輻射モデルの解析に対する研究にとって役立つ。それに加え、近年オゾンホールとの関わりが問題となっている極成層圏雲 (Polar Stratospheric Cloud: PSC) もこの衛星搭載型エアロゾル観測用レーザーレーダーでモニターが可能となり得る。

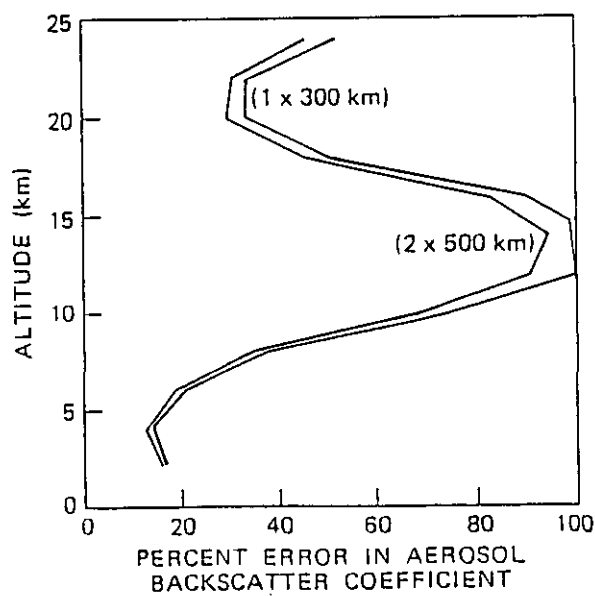
図 5.2.1-3 は、レーザーレーダーによる成層圏エアロゾル観測におけるエアロゾル後方散乱係数のパーセント測定誤差を各高度について計算した結果を示す。(a)は、観測波長が 1 波長 ( $\lambda=0.71 \mu\text{m}$ 、出力 1 J) のみの時で、この場合大気分子のレーリー散乱が測定誤差を引き起こすため、高度 10 Km では誤差が 100% になってしまう。一方、(b)はレーリー散乱からの影響を修正するために 2 波長 ( $\lambda=0.71 \mu\text{m}$ 、 $\lambda=0.355 \mu\text{m}$ ) を用いた場合に対するシミュレーションである。図中、かっこ内の数字は垂直分解能 x 水平分

解能を表わしている。2波長を使用することにより、測定誤差が半減することが図からも明かである。

以上、エアロゾル観測のレーザーレーダー用光源に適したレーザー案を表5.2.1-1にまとめて示す。



( a ) 1 波長 の み の 場 合



( b ) 2 波 長 使 用 し た 場 合

図 5.2.1-3 エアロゾル後方散乱係数の測定誤差に対する数値解析結果

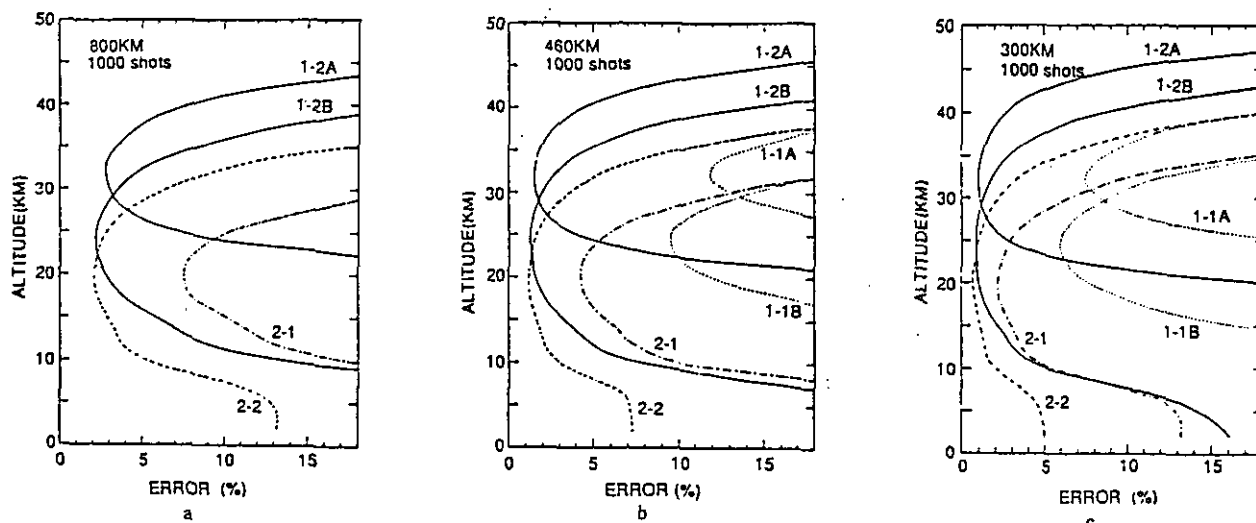
表 5.2.1-1 エアゾル観測システム用レーザー案

	境界層高度 測定用	対流圏 エアロゾル 測定用	成層圏エアロゾル 測定用	
レーザーの種類 励起光源	Nd:YAG レーザ Laser Diode	Nd:YAG レーザ Laser Diode	Ti:Sapphire Nd:YAG Laser pumped by LD	
観測波長 (nm)	532	532	355	710
出力 (mJ)	100	350	200	1000
繰り返し (Hz)	10	10	10	10
電気変換効率 (%)	7	7	1	2
消費電力 (Watt)	14	50	200	500
備考	1. 電気変換効率 = レーザ出力/電気入力 2. JPOP(Japanese POP)の場合、使用可能電力は約 2.2 Kw			

### 5.2.2 オゾン観測用レーザー

成層圏内で太陽からの紫外線と酸素との光化学反応によって生成されたオゾンは、地球に住むあらゆる生物にとっては有害な太陽からの紫外線をカットしてくれるバリアーとして、また、地球の熱収支と関連して気象学的にも非常に重要な気体である。このオゾンの濃度が極端に極域で減少（ホール）し始めている現象が発見されて以来、地球上で生活を営む我々にとっては常時、全地球的にオゾンを監視することが強く望まれている。

衛星搭載型オゾン DIAL は、この様な要求を満たす最前のセンサーと言える。これまでに、内野、林田等によって宇宙からオゾンを観測できる衛星搭載型レーザーレーダーの解析がなされている。図 5.2.2-1 は、高度 800 Km の極軌道上を周回している衛星上のレーザーレーダーからオゾンを観測した場合の測定誤差を、波長の組合せ、レーザー出力ならびに受信望遠鏡口径をパラメータにシミュレーションした林田等の結果である。表 5.2.2-1 は、この計算に用いた基本性能パラメータである。



- 1-1 システム 1, フェイズ 1
- A: 288nm + 355nm B: 299nm + 355nm
- 1-2 システム 1, フェイズ 2
- A: 288nm + 355nm B: 299nm + 355nm
- 2-1 システム 2, フェイズ 1
- 2-2 システム 2, フェイズ 2
- a: 極軌道衛星 (軌道高度 800km)
- b: 宇宙ステーション (軌道高度 460km)
- c: スペースシャトル (軌道高度 300km) について計算したもの。

図 5.2.2-1 衛星高度別に対する測定誤差

表 5.2.2-1 シュミレータ・パラメータ

	フェイズ 1					フェイズ 2				
	システム 1			システム 2		システム 1			システム 2	
波長 (nm)	288	299	355	308	353	288	299	355	308	353
出力 (mj)	10	10	100	100	100	100	100	200	200	200
光学的効率	0. 2					0. 2				
望遠鏡直径 (m)	0. 8					2. 0				
望遠鏡面積 (m <sup>2</sup> )	0. 5 0 3					3. 1 4				
望遠鏡視野角 (mrad)	0. 1					0. 1				
PMT * 量子効率	0. 2 5					0. 2 5				
干渉フィルター幅 (nm)	0. 1					0. 1				

\* PMT(Photo Multiplier Tube)

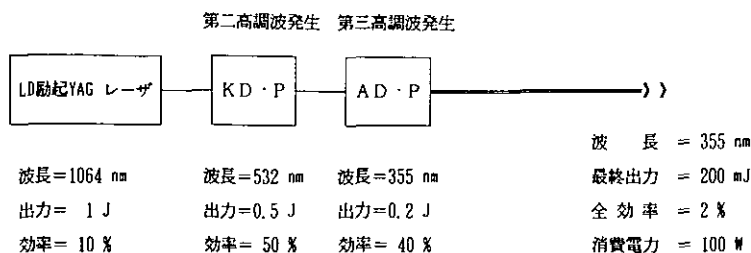
宇宙からオゾンを観測する大きな意義の一つは、人類が長年に渡って使い続けてきたクロロフルオロカーボンによるオゾン層破壊がはたして今後どの程度の割合で進むのかを監視することにある。一説によれば、このクロロフルカーボンによるオゾン破壊は全量でこの 20 年間に 1%程度進み、最も減少するのが高度 40 Km 付近で、年間 1%前後と推測されている。図から明らかなように、これらの減少率を測定しようとするならば、宇宙ステーションや低高度衛星からの観測の方が有利である。

宇宙ステーションの高度で、波長 288 nm(出力 100 mJ)、299 nm(出力 100 mJ)、355 nm(出力 200 mJ)の組合せの場合、最も注目すべき高度 40 Km 付近での測定誤差は 4%程度である。この程度の精度でも、数年間のデータ蓄積から充分クロロフルオロカーボンによるオゾン破壊を見出すことが可能であろう<sup>3)</sup>。

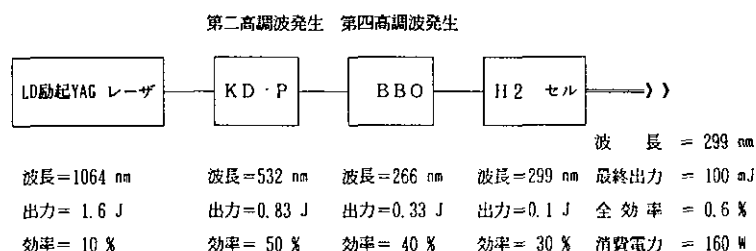
表 5.2.2-2 に、フェーズ 2、システム 1 に対応させたレーザー案を示す。このレーザー案は LD 励起 YAG レーザーをベースとし、YAG レーザーと非線形光学現象を利用した短波長発生法で組み立ててある。従来より、地上のオゾン観測用レーザーレーダーには、高出力、高繰り返し可能なエキシマレーザーが用いられてきた。しかし、形状が大きく、重量もあり、かつ高電圧放電を必要とするエキシマレーザーは、宇宙環境を考慮した場合適しているとは言い難い。現在の LD 励起 YAG レーザーの開発の進み方から、また良質な KD\*P、AD\*P、BBO など育成が可能となって来た現在では、表に示したレーザー案は実現不可能ではない。

表 5.2.2-2 YAG レーザを基本とした場合の組合せ

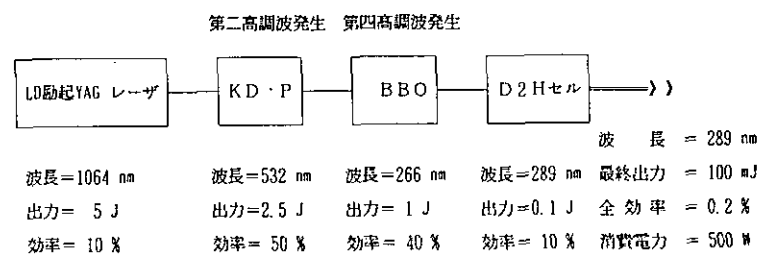
A) 355 nm 発生



B) 299 nm 発生



C) 289 nm 発生



### 5.2.3 観測シミュレーション

#### (1) エアゾール観測

衛星搭載型エアロゾル観測用レーザーレーダーのシステム構成は、受信望遠鏡(直径 0.5 m から 1 m)を除いてほぼ航空機搭載型システム(表 5.1.3-1)と同一のシステムとした。ただし、昼間観測におけるレーザー出力は 500 mJ(夜間は 100 mJ)とした。また観測条件については、高度分解能 500 m、積算回数 1000 とした。飛翔体としては、高度 460 km(速度 7.6 km/s)の宇宙ステーションと高度 800 km(速度 7.5 km/s)の極軌道衛星を想定した。シミュレーションに用いた大気モデルについても航空機観測シミュレーションに用いたモデル(図 5.1.3-1)をそのまま用いた。

最初に高度 460 km の宇宙ステーションからエアロゾルを観測した場合のシミュレーション結果を図 5.2.3-1(夜間)、図 5.2.3-2(昼間)に示す。

受信信号の高度変化から全ての高度範囲において光計数法での観測が可能であることがわかる。SNA に関して、夜間観測では成層圏及び対流圏イベントさらに 6 km 以下のバックグラウンドエアロゾルの観測が可能である。昼間観測においても多少 SNA が低下するが、成層圏及び対流圏イベントは十分に観測が可能であるとともに 4 km 以下のエアロゾルの観測も可能となっている。

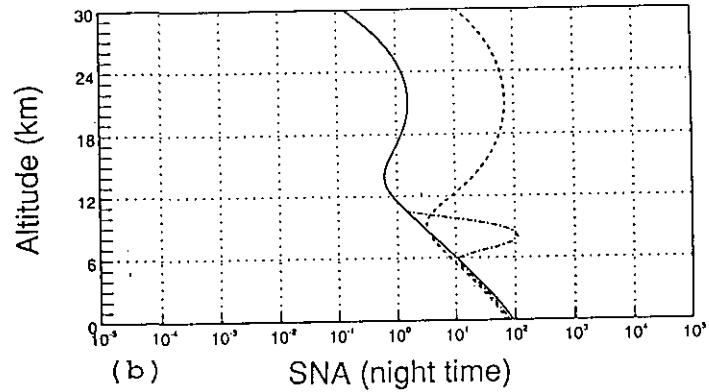
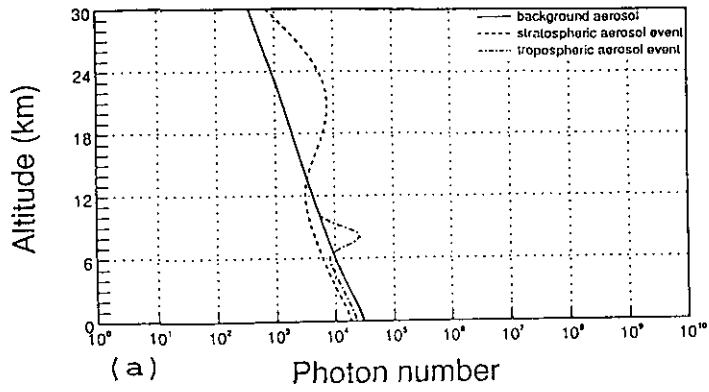


図 5.2.3-1 高度 460 km から夜間に観測した場合の(a)受信信号強度、(b) SNA の高度変化。高度分解能 500m、積算回数 1000、レーザー出力 100 mJ

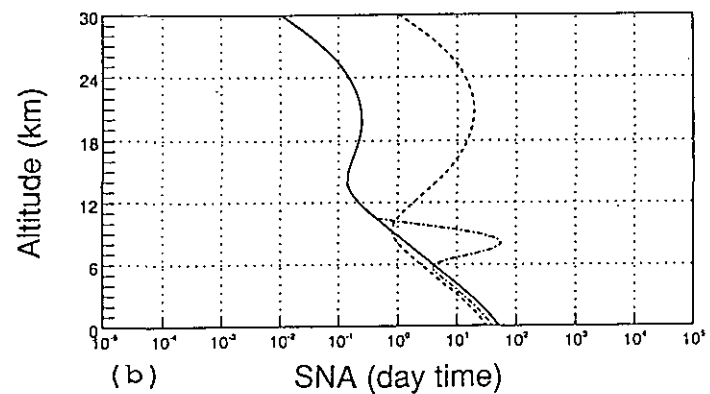
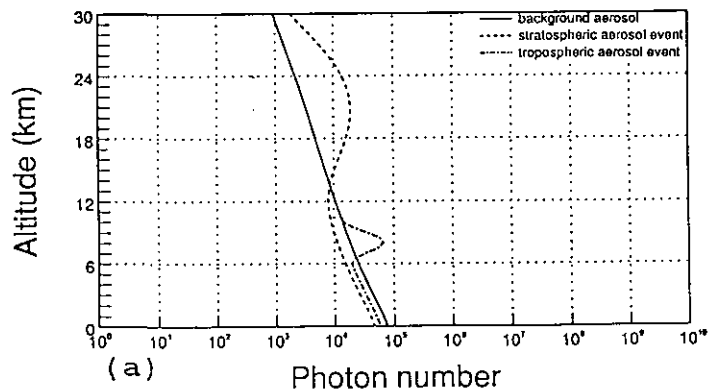


図 5.2.3-2 高度 460 km から昼間に観測した場合の(a)受信信号強度、(b) SNA の高度変化。高度分解能 500m、積算回数 1000、レーザー出力 500 mJ

次に高度 800 km の極軌道衛星からの観測シミュレーションの結果を図 5.2.3-3 (夜間)、図 5.2.3-4 (昼間) に示す。

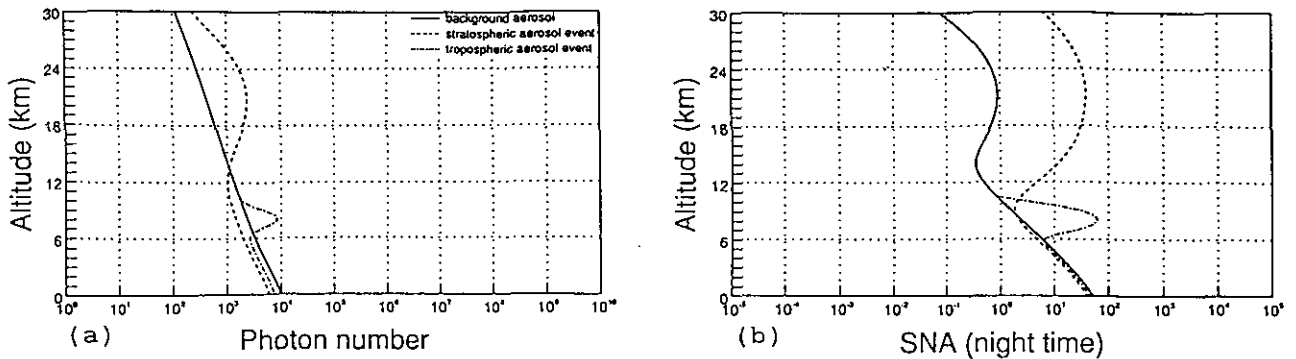


図 5.2.3-3

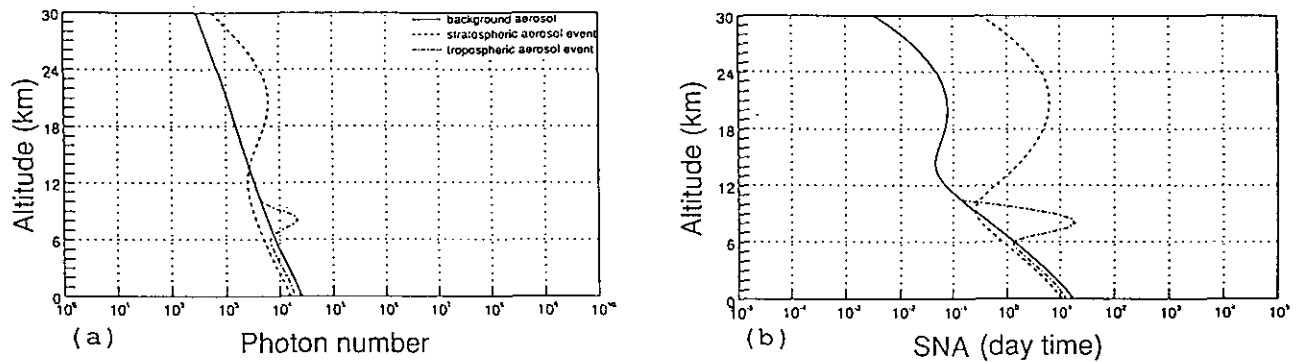


図 5.2.3-4

前述の宇宙ステーションからの観測に比べて、高度が約 2 倍になっていることから受信信号強度は  $1/4$ 、SNA は  $1/2$  に減少している。この為、夜間観測においてはまだ良好な SNA が得られているが、昼間観測においては対流圏イベントと地表から数 km までのエアロゾルの観測は可能であるが、成層圏イベントの観測は苦しくなる。しかし高度分解能か水平分解能を 2 倍にすれば昼間でも十分観測が可能となる。

次にこのシステムを用いた雲頂高度の観測について検討を行う。レーザーは出力 500 mJ (10 Hz) とし、観測条件として高度分解能 10 m、積算なし、雲のアルベド 70% と仮定した。これらの条件でシミュレーションした結果、高度 800 km からでも良好な SNR で観測が可能であることが明らかとなった。この場合の水平分解能は約 700 m となる。

以上の結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) 高度 460 km からの観測においては、成層圏イベント、対流圏イベント(黄砂、サハラダスト、シーラス等) および下部対流圏のエアロゾルの昼夜の観測が可能である。
- 2) 高度 800 km からは、夜間観測においてのみ 1) と同様な観測が可能である。しかし、高度分解能か水平分解能を犠牲にして 2 倍程度にすれば昼間観測も可能となる。
- 3) 対流圏上部から成層圏にかけてのバックグラウンドエアロゾルの観測は難しい。
- 4) 雲頂高度の観測は、高度分解能 10 m、水平分解能 700 m で昼夜観測が可能である。

(2) オゾン観測

(a) シミュレーションの方法

衛星からのレーザーレーダーによるオゾン観測のシミュレーションに関しては、国立環境研究所の林田らが詳しく検討を行った。(天気、36巻、7号、1989、pp.49-58) そこで、ここでは林田らのシミュレーションの結果に基づいて検討を行う。

差分吸収レーザーレーダーによるオゾン濃度分布と誤差を求める原理は5.1.3の(2)で既に述べられており、ここでは省略する。

シミュレーションに用いたレーザーレーダーシステムは、YAG レーザーの第4高調波(266 nm)とラマンシフト線を組み合わせたシステム1と XeCl エキシマレーザ(308 nm)とラマンシフト線を組み合わせたシステム2を想定した。また、それぞれのシステムについて、現時点の技術レベルで実現可能なシステム(フェイズ1)と10年後に期待されるシステム(フェイズ2)について検討を行った。以上のレーザーレーダーの基本性能パラメータを表5.2.3-1にまとめて示す。

レーザーレーダーを搭載する飛翔体については、極軌道衛星、宇宙ステーションおよびスペースシャトルを考えており、それぞれの軌道高度および速度を表5.2.3-2に示す。

表5.2.3-1 オゾン観測用差分吸収型レーザーレーダーの基本性能パラメータ

	フェイズ 1			フェイズ 2		
	システム 1		システム 2	システム 1		システム 2
	1-1A	1-1B	2-1	1-2	1-2B	2-2
波長(nm)	288 355	299 355	308 353	288 355	299 355	308 353
出力(mJ)	10 100	10 100	100 100	100 200	100 200	200 200
繰り返し(Hz)	20	20	50	20	20	50
望遠鏡直径(m)	0.8			2.0		
視野角(mrad)	0.1			0.1		
光学的効率	0.2			0.2		
PHI 量子効率	0.25			0.25		
フィルター幅(nm)	0.1			0.1		

表5.2.3-2 スペース飛翔体の種類、高度および速度

飛 翔 体	高 度	速 度	地表換算速度
極 軌 道 衛 星	800 km	7.5 km/s	6.7 km/s
宇宙ステーション	460 km	7.6 km/s	7.1 km/s
スペースシャトル	300 km	7.7 km/s	7.4 km/s



大気モデルは航空機からのオゾン観測シミュレーションに用いたモデルをそのまま用いた (図 5.1.3-6、5.1.3-7 参照)。以下のシミュレーションにおいては、不規則誤差と系統誤差 (エアロゾルのみを考慮) を別々に評価した。

(b) シミュレーション結果

最初にフェイズ 2 のシステム 1 および 2 により、高度 800 km から観測した場合の受信信号強度 (光電子数) の高度変化を求めた結果を図 5.2.3-5 に示す。ここでの高度分解能は 1 km で、積算回数は 1000 ショットとした。

ここで示された受信光子数の範囲では、上空から地表までの全ての範囲で光子計数法計測のダイナミックレンジに入っている。

フェイズ 1 のシステムで観測した場合には、レーザー出力が  $1/2 \sim 1/10$ 、受信望遠鏡面積が  $1/6$  になる為、プロファイルは変化しないが、フェイズ 2 の結果に比べて 288 nm、299 nm に対しては 1.6%、308 nm、353 nm、355 nm に対しては 8% と受信光子数が減少する。

ここで、図 5.2.3-5 に示した結果の中の 299 nm と 355 nm の組合せ (フェイズ 2、システム 1-2 B) により、オゾンの高度分布を求めた結果を図 5.2.3-6 に示す。

曲線 1 は系統誤差を無視、曲線 2 は大気分子による消散係数の補正 (Am)、曲線 3 は全ての系統誤差の補正を行ったものである。成層圏下部から対流圏にかけて、大気分子のレイリー散乱に起因した系統誤差が支配的であることがわかる。このことから、オゾン観測と同時に大気密度の高度分布を長波長側のレーザー光 (Off-resonance) を使うか、より正確にはオゾンにより吸収されない別の波長のレーザーレーダーにより観測を行い、大気分子による系統誤差の補正を正確に行う必要がある。

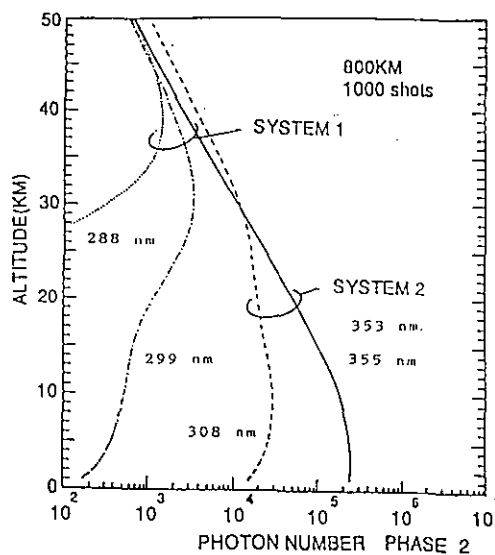


図 5.2.3-5 フェイズ 2 のそれぞれのシステムで高度 800 km から観測した場合の受信光子数の高度変化。高度分解能 1 km、積算回数 1000。

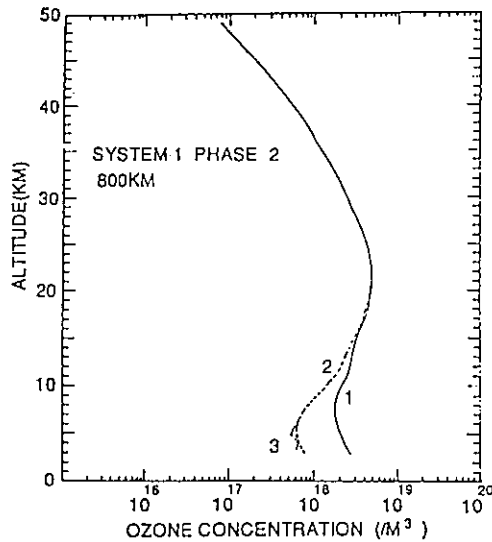


図 5.2.3-6 システム 1-2 B で高度 800 km から観測した場合のシミュレーションされた信号から求めたオゾン濃度プロファイル、曲線 1：系統誤差を考慮しない場合、曲線 2：大気分子消散係数による系統誤差を補正した場合、曲線 3：消散係数と後方散乱係数による全ての系統誤差を補正した場合

次にエアロゾルに起因する系統誤差について検討を行う。フェイズ 2 のシステム 1 および 2 についてシミュレートした結果を図 5.2.3-7 に示す。成層圏から対流圏の 7 km までは誤差 5% 以下におさまっているが、それ以下では急激に増加している。ここでは、バックグラウンドエアロゾルについて評価を行っているが、火山起源のエアロゾルや極域成層圏雲 (Polar Stratospheric Clouds: PSC) 等が存在した場合、散乱比が 10 程度になることから、これらの場合には下部成層圏における系統誤差は非常に大きくなると考えられる。エアロゾルによる系統誤差を補正するにはエアロゾル分布と消散係数の波長依存性を知らなければならぬことから、現実的には、上記の状態の場合あるいは 5 km 以下の対流圏のオゾン観測はかなり難しいと言える。

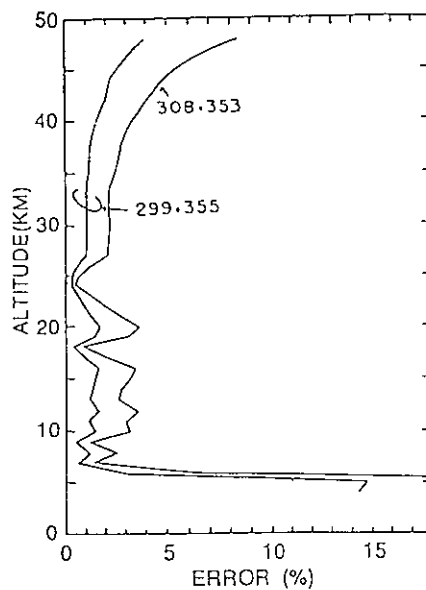


図 5.2.3-7 エアロゾルに起因する系統誤差のオゾン濃度に対する相対値の高度変化。図中の数字は波長の組合せを示す

次に、光電子増倍管のショット雑音に起因する不規則誤差について検討を行う。この誤差は、レーザー出力とデータ積算回数に依存する。高度 800 km、460 km、300 km から観測した場合のフェイズ 1、フェイズ 2 の全てのシステムについてシミュレートした結果を図 5.2.3-8(a)から(c)に示す。ここでは、高度分解能 3 km、積算回数 1000 ショットとした。ここで、不規則誤差の許容範囲を 10%以下として、それぞれのシステムによる観測可能高度範囲を表 5.2.3-3 に示す。

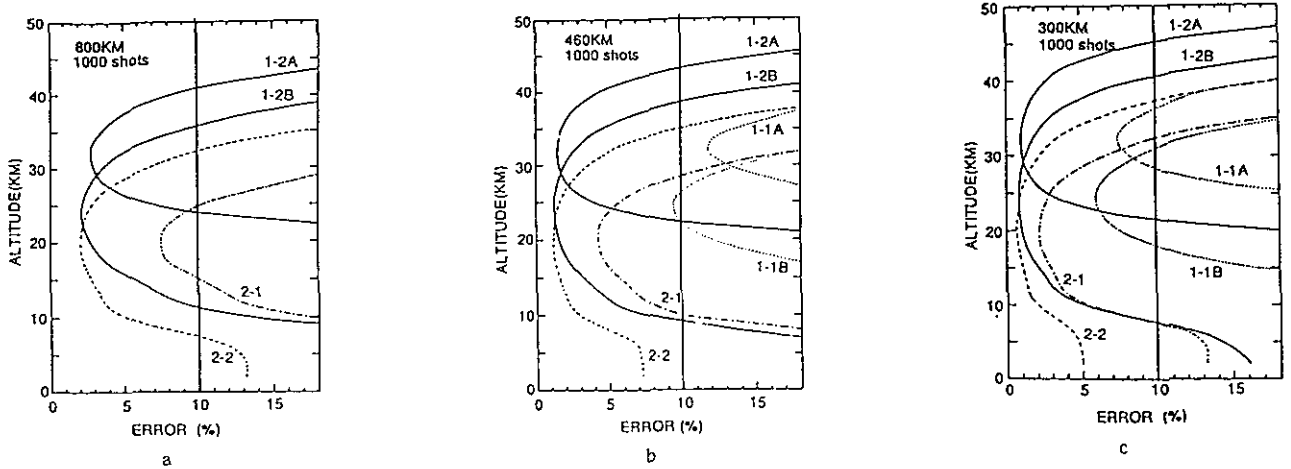


図 5.2.3-8 不規則誤差の高度変化. a : 観測高度 800 km、b : 460 km、c : 300 km  
 高度分解能 3 km、積算回数 1000 ショット

表 5.2.3-3 それぞれのシステムで不規則誤差が 10%以下で観測が可能となる高度範囲

フェイズ	システム	観 測 高 度			
		800 km (夜 間)	460 km (夜 間)	300 km (夜 間)	460 km (昼 間)
フェイズ 1	1-1A	なし	なし	28 - 36 km	なし
	1-1B	なし	23 - 26 km	18 - 31 km	なし
	2-1	15 - 25 km	10 - 28 km	8 - 32 km	12 - 25 km
フェイズ 2	1-2A	24 - 41 km	22 - 43 km	22 - 50 km	29 - 38 km
	1-2B	11 - 35 km	9 - 38 km	8 - 40 km	16 - 35 km
	2-2	8 - 32 km	0 - 35 km	0 - 37 km	2 - 32 km

これらの結果から、フェイズ 1 においては、軌道高度 800 km からの極軌道衛星からのオゾン観測は難しいと考えられるが、高度 460 km の宇宙ステーションあるいは高度 300 km のスペースシャトルからシステム 2 (XeCl エキシマレーザーレーダー(308 nm、353 nm)) を用いれば、対流圏上部から 30 km までのオゾン観測は可能と考えられる。しかも、昼間においても、多少、観測高度範囲は狭くなるが観測は可能となっている。

一方、フェイズ 2 においては、軌道高度 800 km からの衛星からも十分観測可能となる。

### (c) 検討

以上の結果から、実現可能なシステムと飛翔体との組合せの検討を行う。

フェイズ1においては、テスト観測という目的で、XeCl エキシマレーザーの基本波(308 nm)と、その水素ラマン線(353 nm)の二波長を用いたレーザーレーダーシステムをスペースシャトルに搭載してオゾン層を観測することがベストと考えられる。これにより、上部対流圏からオゾン層ピークを含む下部成層圏の広い高度範囲の分布が得られる。一方、気体レーザーである為、宇宙での使用における長期の信頼性に欠けることから、観測期間が短期となるスペースシャトルが良いと考えられる。この場合の空間分解能は、高度方向に3 km、水平方向に約150 km (50 Hz、1000 ショット積算)となる。

フェイズ2においては、本格的な長期の観測を想定していることから、信頼性の高い固体レーザーをベースとしたシステム1を軌道高度800 kmの衛星か460 km宇宙ステーションに搭載して観測を行うことが良いと考えられる。波長の組合せとしては、オゾン層ピークより上部を観測対象とする場合は288 nmと355 nmの組合せを、ピークを含めた下部を対象とする場合には299 nmと355 nmの組合せを選ぶと良い。

成層圏オゾン層の広い高度範囲について分布を調べたい場合には、後者の組合せが有用であると言える。これらの場合の空間分解能は、高度方向3 km、水平方向約350 km (20 Hz、1000 ショット積算)となる。

#### 5.2.4 衛星搭載型レーザーレーダーの技術的問題点

無人の宇宙空間でレーザーを長期にわたって安定に動作させるためには、次に示すようないくつかの解決せねばならない技術的な問題点がある。

寿命

信頼性

消費電力

放熱

##### (1) 寿命について

衛星の寿命を3年とすると、3年間はおよそ $1 \times 10^8$ 秒に対応する。したがってもし、「繰り返し10 pps」でレーザーを3年間打ち続けねばならないならば、ショット数にして $1 \times 10^9$ となる。YAGレーザーの励起光源となるLDの寿命は、最高記録で

半導体レーザー $< 1 \times 10^8$

が得られている。LDの場合は、今後も変わる事なく続く半導体工業界の進歩により、ここ5年以内には寿命が $1 \times 10^9$ ショット数に到達するといわれている。

##### (2) 信頼性について

打ち上げ時には、大きなg、衝撃、振動などがパルスレーザーの共振器に加えられる。また、宇宙空間を飛行中には短時間で昼と夜が入れ替わるが、そのとき生じる熱サイクルなども共振器に大きく影響を及ぼす。したがって、これらの要因によってレーザー出力が変化しないような共振器の設計法の確立、また、変化したならば正確に設定位置に戻すような制御技術の開発が必要であろう。

##### (3) 消費電力

これは、放熱との絡み合いからいっても重要な問題で、技術的に解決せねばならない点である。表5.2.1-1、表5.2.2-2で示したように、電気入力にたいするレーザー出力の比すなわち電氣的効率は、1%前後である。当然の事ながら、この効率が2倍良くなったならば消費される電力は半分ですみ、放熱も半

分になってしまう。したがって、材料科学の研究・開発の進捗状況によっては変換効率の良いレーザー結晶が発見されるかもしれない。それ故、この分野での技術発展はスペース・レーザーレーダーの実現に対し大きく関わっていると見えよう。

### 〔参考文献〕

- 1) O. chino, M. P. McCormick, T. J. Swissler, and L. R. McMaster, "Error analysis of DIAL measurements of ozone by a Shuttle excimer lidar", Applied Optics, 25, 3946 (1986)
- 2) NASA Instrument Panel Report, "LASA", Vol. IId
- 3) 林田、杉本、笹野、清水、"差分吸収レーザーレーダーを用いた宇宙からのオゾン観測の可能性について"、Vol. 36, 49(1989)
- 4) NASA Technical Memorandum, "Earth Observing System", No.86129,1984

### 5.3 微量成分計測技術の将来展望

前節では、測定対象物質をエアロゾル及びオゾンに限定して検討してきたが、本節では今後3～5年の中期的開発期間を設定した場合に実現可能性を持つ新しい計測技術について検討する。とくに、赤外域でのチューナブル光源を利用した大気微量成分のグローバル分布計測のための飛翔体レーザーレーダーのモデルとその条件を示し、実現可能性を展望する。

#### 5.3.1 微量成分の計測方式

まず、大気微量成分は波長1～15 μmの赤外域に分子の振動及び回転エネルギー遷移による極めて多数の特徴的な吸収スペクトルを持っている。衛星搭載などのパッシブ光センサーでは、この広い赤外波長域での吸収スペクトルを利用することにより多種類の分子の測定ができ、また数10～数1000 kmの極めて長光路での計測を行うため、高感度特性が実現されている。ところが、パッシブ法では空間分解能や高度分解能が限定されている。これに対してレーザーレーダーによるアクティブ法ではこの欠点を補うことが可能である。

最近に至り、赤外域での広帯域チューナブル光源として非線形光学効果を利用した光パラメトリック発振器 (Optical Parametric Oscillator、略してOPO) 及び差周波光混合発生法 (Difference Frequency Generation、略してDFG) の研究が進展してきた。<sup>1)~3)</sup>とくに、非線形光学結晶の品質が改良されてきたため、Nd:YAGレーザーをポンプ源としたOPOでは波長1～5 μmで、また、DFGでは波長5～15 μmで高出力動作の実現可能性が高くなっており、これらのチューナブル光源と直接検波法を併用することにより、大気微量分子計測のレーザーレーダーが実現できることになる。次に、その計測法として以下の3種類の吸収方式について詳しく検討を行う。

##### (a) 長光路吸収法 (Long-Path Absorption Spectrometer; LAS)

コーナーリフレクター等の反射鏡によりレーザー光を折り返して、2波長差分吸収法や微分吸収法によって光路中の平均分子濃度を求める構成である。

##### (b) 長光路レーザーレーダー (Long-Path Absorption Lidar; LPAL)

地表面や海面などの地形物ターゲット (Topographic target) を散乱体としてレーザー光を受信し、差分吸収法によって光路中の平均分子濃度を測定する方式である。

##### (c) 差分吸収レーザーレーダー (Differential Absorption Lidar; DIAL)

大気のエアロゾルを散乱体としてミー散乱を受信し、2波長差分吸収法を適用することによって分子の空間分布を測定する方式である。

次に、これらの方式の基本特性を与える関係式を求める。

#### 1. 信号対雑音比

リトロリフレクターまたは散乱体までの距離をR、レーザー出力をP<sub>0</sub>、光学系の全効率をK、大気の消散係数をα、測定対象分子の吸収断面積をσ、分子濃度をNとする。

##### (1) LAS方式の受信電力

$$P_r = P_0 K \exp[-2(\sigma N + \alpha)R] \quad (1)$$

##### (2) LPAL方式の受信電力

$$P_r = P_0 K A_r [r / \pi R^2] \exp[-2(\sigma N + \alpha)R] \quad (2)$$

ここで、 $A_r$ は受信鏡の有効面積、 $r$ は地形物散乱体で、ランバート散乱体（粗面体）を仮定している。

(3) DIAL方式の受信電力

$$P_r(R) = [(c/2)E_0K\beta A_r / R^2] \exp[-2(\sigma N + \alpha)R] \quad (3)$$

ここで、 $P_0$ はレーザーパルスのエネルギー、 $\beta$ は大気の大気体積後方散乱係数、 $c$ は光速である。

(4) 赤外検出器の信号対雑音比

赤外域での検出に利用される固体光検出器（Photo-voltaic or Photo-conductive型）を用いた直接検波法の信号対雑音比（出力電圧または電流比）として次式で与えられる。

$$(S/N)_v = P_r / NEP \quad (4)$$

$$NEP = NEP^0 \cdot B^{1/2} \quad (5)$$

ここで、 $NEP^0$ は受信帯域幅 $B = 1$  Hzのときの検出器の等価雑音入力（Noise Equivalent Power）、 $NEP$ は帯域幅 $B$ のときの値である。

表 5.3-1 に現状の赤外固体検出器の  $NEP$  ( $B = 10$  MHz) の値の比較を示す。

表 5.3-1 赤外域固体検出器の  $NEP$

検出器	温度 (K)	波長領域 ( $\mu\text{m}$ )	$NEP$ [ $B=10$ MHz] (W)
Si APD	300	0.6~1.1	$2.4 \times 10^{-10}$
InGaAsP	300	0.9~1.8	$7.5 \times 10^{-10}$
In As	300	1.5~3.8	$4 \times 10^{-11}$
In Sb	77	2.0~5.5	$3 \times 10^{-10}$
HgCdTe	77	7~13	$2 \times 10^{-10}$

この  $NEP$  値は、プリアンプ雑音制限値であり、受信立体角を小さくすることにより、背景光雑音制限 (BLIP) 値はさらに小さくすることができると仮定している。そのため赤外域レーザーレーダー動作では昼夜を問わず同じ検出感度が得られる。

(5) 体積後方散乱係数： $\beta$

DIAL方式では $\beta$ の値が重要となる。図 5.3-1 に大気分子のレイリー散乱の $\beta_m$ とエアロゾルによる $\beta_a$ の波長変化特性を示す。ここで、 $\beta_m$ は $(1/\lambda^4)$ 、 $\beta_a$ は $(1/\lambda)$ の波長依存性を仮定しているが、この関係はほぼ成り立つことが検証されている。また、 $\lambda = 1 \mu\text{m}$ での散乱比  $R_a(1 \mu\text{m})$  をパラメータにとってある。例えば、LAWS プロジェクトの GLOBE 観測データによれば、 $\lambda = 10 \mu\text{m}$ で清浄な高層大気では $\beta_a = 10^{-12}$ 、大気境界層では $10^{-8}$  ( $\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ) の間に分布している。図 5.3-1 から他の波長域での $\beta_a$ 値が推定できる。

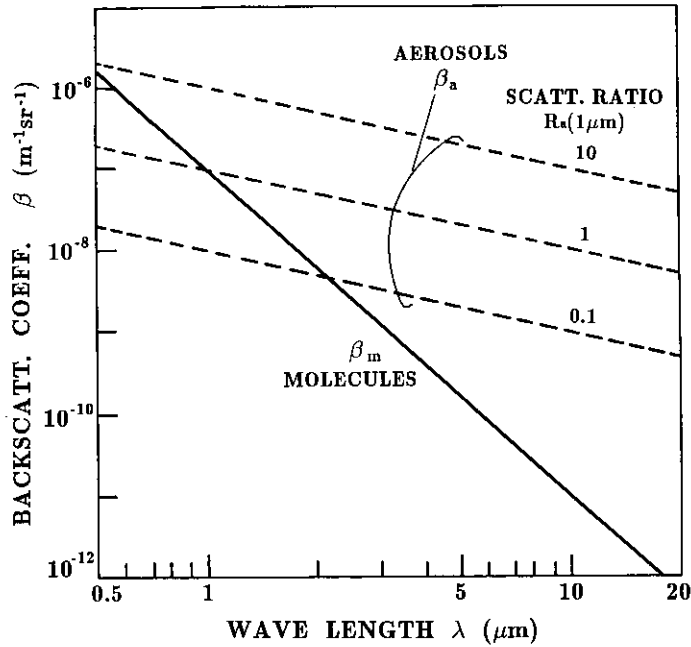


図 5.3-1 大気分子のレイリー散乱係数 $\beta_m$ とエアロゾルのミー散乱係数 $\beta_a$ の波長変化特性  
( $\lambda = 1 \mu\text{m}$ での散乱比 $R_a(1 \mu\text{m})$ をパラメーター)

(6) 最小検出可能濃度： $N_{\min}$

差分吸収計測法における最小検出可能分子濃度は一般に次式で与えられる。

$$N_{\min} = \epsilon / (2 \Delta \sigma R) \quad \text{-----} \quad (6)$$

ここで、DIAL方式では $R$ を空間分解能 $L$ と置き換えることが必要である。 $\epsilon$ は総合的な計測誤差(相対値)で

$$\epsilon = (\epsilon_d^2 + \epsilon_s^2 + \epsilon_i^2 + \epsilon_r^2)^{1/2} \quad \text{-----} \quad (7)$$

となる。ここで、 $\epsilon_d$ は受信光の検出誤差で

$$\epsilon_d = m^{1/2} / [k_d (S / N)_v] \quad \text{-----} \quad (8)$$

となり、 $m$ はパルス積算数であり、 $k_d$ は差分吸収測定のための測定誤差係数で、LPSとLPAL方式では $k_d = \sqrt{2}$ 、DIAL方式では $k_d = 2$ と仮定できる。

また、 $\epsilon_s$ は大気シンチレーションによる信号検出誤差、 $\epsilon_i$ は大気主要分子( $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ など)によりスペクトルに重なりが生じて発生する干渉誤差、 $\epsilon_r$ は散乱体の散乱係数(または反射率)の2波長での差や光路条件の変化により生ずる散乱係数誤差である。

以上の基本式を用いて、次にシステムの動作特性と分子の測定感度についてのシミュレーション結果を示す。

5.3.2 観測シミュレーション

赤外域での微量成分の計測可能性を具体的に探るため、先ず分子のスペクトルと吸収強度について調査した。

1. 大気微量分子のスペクトル

大気分子の吸収スペクトルのデータベースとして、AFGLの“HITRAN”を、また大気吸収モデルとして“FASCODE”を利用した。大気透過スペクトルの例として、図5.3-2に波数 $1060 \text{ cm}^{-1}$ (波長 $9.4 \mu\text{m}$ )付



近における大気の透過率を(a)に、 $O_3$ による成分を(b)に、また  $CO_2$ による成分を(c)に示す。光路長として高度 10 km から地表を見た場合とし、測定のスเปクトル分解能  $\Delta\nu=0.03\text{ cm}^{-1}$ を仮定している。

この図より大気透過スเปクトルには多数の分子が重畳しているが、この様なシュミレーションにより各スเปクトル線の同定が可能であることが分る。また、大気によるスเปクトル線の広がり幅は  $0.03\sim 0.1\text{ cm}^{-1}$ 程度であるため、用いるレーザーのスเปクトル幅もこれ以下にすれば大きい吸収係数が利用でき、また他の分子からの干渉も受け難いことが推定できる。

次に、表 5.3-2 に大気分子の吸収バンド波数と最大吸収係数を HITRAN より求めた結果を示す。ここで、スเปクトル幅  $\Delta\nu=0.1\text{ cm}^{-1}$ と仮定した。この結果より、微量分子の多くは大きな吸収係数を持っていることが分る。

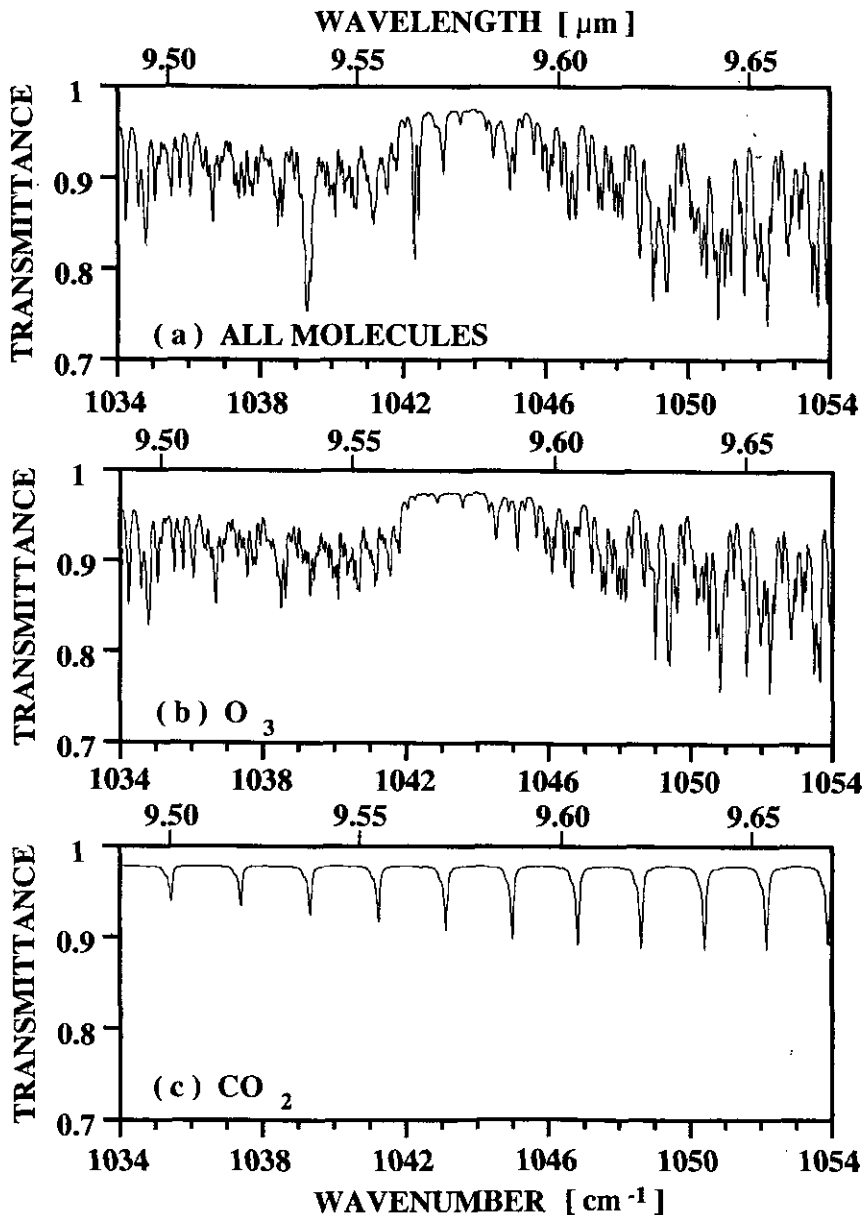


図 5.3-2 大気分子の吸収スเปクトル特性

(波数域  $1034\sim 1054\text{ cm}^{-1}$ 、光路：高度 0 ～ 10 km 区間、  
地上気温 294 K、気圧 1013 mb)

表 5.3-2 大気分子の吸収バンド中心波数と最大吸収係数  
(HITRAN データ)

分子	吸収バンド中心		最大吸収係数 <sup>(1)</sup>	分子	吸収バンド中心		最大吸収係数 <sup>(1)</sup>
	cm <sup>-1</sup>	μm	atm <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup>		cm <sup>-1</sup>	μm	atm <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup>
SO <sub>2</sub>	517.8	19.31	1.9	NH <sub>3</sub>	789.5	12.67	1.8
	1151.7	8.68	1.6		950.3	10.52	150
	1362.0	7.34	17		1630.2	6.13	18
NO <sub>2</sub>	1605.5	6.23	9.2×10 <sup>-1</sup>	CO	2096.1	4.77	1.2
	1616.9	6.19	36		2143.3	4.67	120
	2906.1	3.44	1.7		4260.1	2.35	9.3×10 <sup>-1</sup>
O <sub>3</sub>	1042.1	9.60	11	CFC -12	920	10.87	100
	1103.1	9.01	9.0×10 <sup>-1</sup>		1102.	9.07	6.9
	2110.8	4.74	9.3×10 <sup>-1</sup>		1161.1	8.61	28
CO <sub>2</sub>	667.4	14.98	80	CH <sub>4</sub>	1310.8	7.63	26
	2336.6	4.28	38		3018.9	3.31	58
	2349.1	4.26	1.0×10 <sup>3</sup>		6005.0	1.67	3.0×10 <sup>-1</sup>
N <sub>2</sub> O	1284.9	7.78	45	H <sub>2</sub> O	1594.7	6.27	78
	2209.5	4.53	15		3755.9	2.66	62
	2223.8	4.50	270		5331.3	1.88	7.5
NO	1842.9	5.43	6.9×10 <sup>-2</sup>				
	1876.0	5.33	18				
	3723.9	2.69	2.9×10 <sup>-1</sup>				

(1) スペクトル幅  $\Delta\nu = 0.1 \text{ cm}^{-1}$

## 2. 信号対雑音比と最小検出可能分子濃度

次に、図 5.3-3 に DIAL と LPAL 方式に対する信号対雑音比の測定距離依存性を計算した結果を示す。用いたパラメーターは、レーザーパルス出力エネルギー  $E_0 = 100 \text{ mJ}$ 、パルス幅 100 ns 以下、集光鏡面積  $A_r = 0.28 \text{ m}^2$  ( $0.6 \text{ m}\phi$ )、全効率  $K = 0.1$ 、検出器  $\text{NEP} = 4.0 \times 10^{-11} \text{ W}$ 、帯域幅  $B = 10 \text{ MHz}$ 、距離分解能は DIAL では  $L = 100 \text{ m}$ 、LPAL では  $50 \text{ m}$ 、大気吸収係数  $\alpha = 0.1 \text{ km}^{-1}$ 、LPAL でのターゲットの反射率  $r = 0.1$  を仮定している。ここで、ミー散乱の後方散乱係数  $\beta$  とパルスの積算回数  $m$  をパラメーターとしており、大気分子濃度が大きい場合のレーザー光の吸収の効果は考慮していない。

すなわち、この図より DIAL では  $\beta = 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$  以上である通常の対流圏下層では、数 km ~ 10 km まで (S/N) V が 100 程度得られることが分る。また、LPAL では 20 ~ 30 km の距離まで十分な SN 比が期待でき、長光路吸収測定ができることが推定できる。

さらに、図 5.3-4 に DIAL、LPAL、LPS の各方式での最小検出可能分子密度  $N_{\min}$  の測定距離 (または光路長) による変化の様子を示す。ここで、システムパラメーターは前の図 5.3-3 と同じであり、 $\beta = 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$  と仮定している。また、DIAL では大気分子の分布状態として空間にほぼ一様な分布と局所的な分布との比較を行っている。また、LPS 方式では他の方式と異なり極めて小出力のパルスレーザーや CW レーザー (出力 100 mW 程度) でも十分に高い S/N が得られて、光検出の誤差  $\epsilon_d$  が  $10^{-3}$  以下と小さくできる。そのため、総合誤差  $\epsilon$  をパラメーターとして選んで  $N_{\min}$  を示した。とくに、LPAL 方式では差分吸収測定における光路条件の変化により生ずる散乱係数の誤差  $\epsilon_r$  を小さくすることが必要となる。

図 5.3-4 の結果より次の様な結論が得られる。

(1) DIAL では、距離分解 100 m で  $m = 10^4$  のパルス積算により数 km まで 1 ~ 10 ppb の分子濃度の測定ができる。

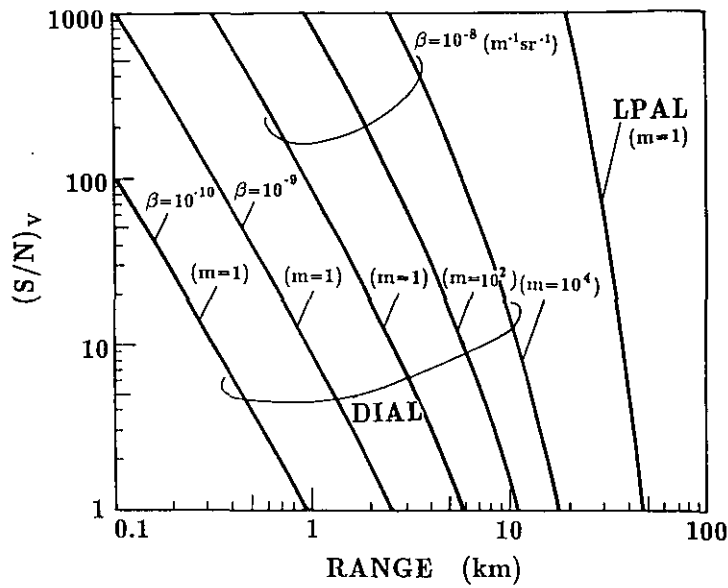


図 5.3-3 DIAL と LPAL 方式の SN 比の距離依存性

(システムパラメーター :  $E_0=0.1$  J、 $A_r=0.28$  m<sup>2</sup>、 $K=0.1$ 、  
 $NEP=4.0 \times 10^{-11}$  W、 $B=10$  MHz、 $L=100$  m、 $\alpha=0.1$  km<sup>-1</sup>  
 ミー散乱後方散乱係数  $\beta$ 、パルス積算数  $m$ )

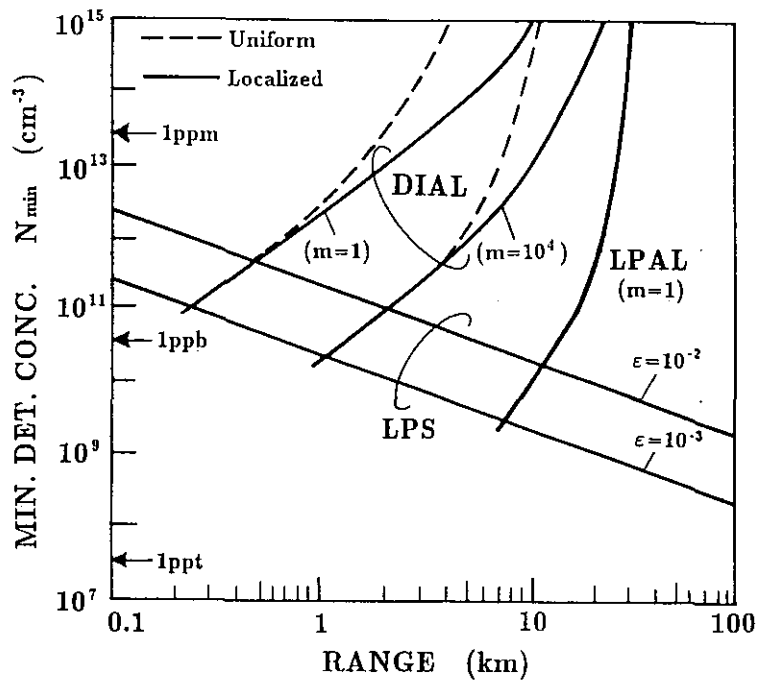


図 5.3-4 吸収方式の測定距離 (または光路長) に対する  
 最小検出可能分子濃度の関係  
 (システムパラメーターは図 5.3-3 と同じ、  
 $\beta=10^{-8}$  m<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup> を仮定、DIAL では大気分子の  
 一様分布と空間局所的分布の場合を比較)

- (2) LPAL では、 $m=1$  の単一パルス測定でも約 20 km までの地形物散乱体に対し、0.1~1 ppb の区間平均濃度の高感度測定ができる。
- (3) LPS では、光路長を数 10 km、総合誤差  $\varepsilon$  を  $10^{-3}$  以下にすれば 10 ppt 程度の極微量分子濃度の測定の可能性がある。

なお、測定対象分子としては表 5.3-2 に示したものの以外にも多数の種類が可能である。また、仮定した分子の吸収係数  $k=N\sigma=10 \text{ atm}^{-1}\text{cm}^{-1}$  であるため、さらに大きな  $k$  値を持っている分子の場合の  $N_{\min}$  は小さくなり高感度となることが(6)式より分る。また、これらの条件は用いるレーザー光の波長とスペクトル幅によっても、決定されるものである。

### 5.3.3 将来の展望

以上の吸収方式計測法を実現するための技術的な課題として次のものが挙げられる。

- (1) 固体チューナブル光源：1~15  $\mu\text{m}$  の波長域で出力 10~100 mJ のパルスエネルギーを発生し、スペクトル幅  $0.1 \text{ cm}^{-1}$  (3 GHz) 以下で安定動作が可能であること。
- (2) 赤外光検出器：帯域幅 10 MHz 以上で NEP が極めて小さく、直接検波法でショット雑音限界に近い高感度検出が可能なもの。

これらの技術開発は少しずつ進んでいるものの、他分野での特性とは異なるレーザーレーダーに特有な条件を満たすためには今後、活発な研究開発が必要である。それによって、先ず固定型のシステムが開発され、さらに飛翔体移動型のシステムが実現できよう。

衛星搭載型レーザーレーダーは赤外域の直接検波法の DIAL 方式では実現困難であるが、将来的にはヘテロダイン検波法での動作が期待できる<sup>4)</sup>。また、地表面をターゲットとする LPAL 方式では直接検波法でも、大気微量分子のコラム量のグローバル計測は十分な実現可能性がある。

### 〔参考文献〕

- 1) N. P. Barnes and K. E. Murray: Tech. Digest of Optical Remote Sensing of the Atmosphere, 56, Nevada (1992, 2).
- 2) K. Kato: IEEE J. Q. E., QE-18, (1982)451.
- 3) R. L. Byer et al.: Appl. Phys. Lett., 24, (1974)65.
- 4) T. Kobayashi and H. Inaba: Opt. Quant. Electr., 7, (1975)319-327.

## 6. 地球大気観測用航空機と衛星の現状・将来計画と問題点

地球大気観測には、サンプル採取のようなその場(in-situ)観測とレーザーレーダーを用いるようなリモートセンシングとがあるが、以下ではレーザーレーダーによる観測に主眼をおいて記述する。

### 6.1 航空機

航空機には重航空機（空気より重い航空機）と軽航空機（空気より軽い航空機）とがあり、重航空機は固定翼航空機と回転翼航空機に分けられる。一方、軽航空機には熱気球と飛行船がある。それぞれに特徴があり、使い方によっては面白いことが出来る。以下それぞれに就いて、現状と問題点を簡単に述べる。

#### 6.1.1 固定翼航空機

大気観測に使い得る、わが国の官が有する固定翼航空機の主なものを表 6.1.1-1 に示す。(ここには防衛庁の航空機は含まれていない) これらの内で、高度 10,000 m まで上昇できるのは、僅かにガルフストリームのみである。その他のものでも 9,000 m 位まで上がれるものもあるが、与圧されていないのでレーザーレーダーの実験には適さない。また、3,000 m 以上では酸素マスクを着けなければならないので作業性が悪く、実際にはそれ以上の高度では実用にならないだろう。YS-11/11A は与圧されているが、上昇限度は僅かに 6,000 m である。

表 6.1.1-1 官の所有する主な固定翼機

機種名	巡航速度	上昇限度	ペイロード	与圧	所有者
ガルフストリーム	878km/h	13,106m	1,447kg	○	運輸省
YS-11/11A	454km/h	6,096m	5,681kg	○	運輸省/海上保安庁
ドルニエ	324km/h	9,020m	1,783kg	×	航技研
ビーチ65	322km/h	8,626m	1,229kg	×	航技研
ビーチB99	369km/h	8,020m	2,324kg	×	船舶技研
ビーチ200T	496km/h	9,449m	2,606kg	×	海上保安庁
セスナU206C	254km/h	4,511m	764kg	×	海上保安庁

レーザーレーダーのような光学観測器を搭載するには、機体に観測用の穴が開いていることが必要である。この点まで考えると上記のガルフストリームも大気観測に使える可能性は非常に小さい。

航技研（航空宇宙技術研究所）のドルニエは与圧されていないので、高い高度での実験には適さないが、かなり大きい観測窓を有し、GPS(Global Positioning System)も装備されており非常に高い精度での自分の位置計測が可能なので、海洋のリモートセンシングには特に適している。民間の有する固定翼機を表 6.1.1-2 に示す。表から判る様に、与圧されていて且つ高度 10,000 m 以上に上昇し得るのは僅かに MU-300 のみである。しかしこの機体は直ちにレーザーレーダーを搭載できるようにはなっていない。その他に与圧されているのはマリーン IVA だけである。

表 6.1.1-2 民間の所有する主な固定翼機

機種名	巡航速度	上昇限度	ペイロード	与圧	所有者
MU-300	800km/h	12,500m	839kg	○	昭和航空
マーリンIVA	452km/h	9,449m	1,996kg	○	昭和航空
エアロコマンド500S	274km/h	5,913m	959kg	×	朝日航洋
エアロコマンド680E	364km/h	7,730m	1,351kg	×	アジア航測
エアロコマンド680F	393km/h	8,687m	1,780kg	×	朝日航洋 他
エアロコマンド680FL	386km/h	8,687m	1,562kg	×	共立航空撮影
エアロコマンド685	410km/h	7,620m	1,351kg	×	昭和航空 他
セスナT303	357km/h	7,620m	1,499kg	×	本田航空
セスナ402/402A, B	386km/h	7,980m	1,171kg	×	中日本航空 他
セスナ404	404km/h	7,925m	1,632kg	×	中日本航空 他

このように見てくると、わが国には官・民を通じて高度 5,000 m 以上の大気観測実験、特にレーザーレーダーの実験に供し得る航空機は一機も無いと言うことになる。

低高度・与圧なしとしても、これら全ての航空機が直ちにリモートセンシングに用い得るものとは言えない。多くの場合には観測器用の窓は開いていない。これを改めて開けるとなると、その大きさによっては構造計算をやり直し、風洞試験を行い、耐空性審査を受けるという厄介なことになる。これには大きな費用と長い時間を要することになる。

### 6.1.2 飛行艇

飛行艇は海面あるいは湖水面からの Take off や Landing が出来る。このためにリモートセンシングへの応用の面から考えると種々の使い方が出来る。空からの観測と殆ど同時に、着水してのサンプル採取のような in-situ 観測が出来る。また海洋観測においては観測船より速度が格段に速いので、リモートセンシング観測と同時にシートルースを採る必要がある場合には非常に有効な手段になる。機種によっては航続距離もかなり大きいので、幾つかの基地を用意することによって例えば太平洋全域をカバーすることが出来る。

わが国は飛行艇の技術においては世界最高のレベルにあり、高い性能のものを開発するとしたらわが国において他にはない。飛行艇は上述のように特に海洋における観測では非常に有用な観測プラットフォームである。将来の観測用航空機の必要欠くべからざる一機種として挙げておきたい。

### 6.1.3 回転翼機

回転翼機、所謂ヘリコプターは表 6.1.3-1～2 に示す様に、余り高い高度をとることも出来ず、もちろん与圧もされていないのでレーザーレーダー搭載には適さない。しかし、その他の光学観測やサンプル採取のような in-situ 観測にはその特徴を発揮する。即ち、停止(ホバリング)から殆ど垂直に近い上昇が可能なので、垂直プロファイルの観測が容易に出来る。これを固定翼機で行うには大きな半径を描いて螺旋状の飛行をしなければならない。回転翼機に予想される振動も機種を選べばそれ程大きくはない。わが国の官及び民間の有する回転翼機のうち、リモートセンシングの立場から見て主なものを表 6.1.3-1～2 に示す。

表 6.1.3-1 官の所有する主な回転翼機

機種名	巡航速度	上昇限度	ペイロード	所有者
アエロスバシヤル A S 332L-1	256km/h	4,600m	4,180kg	消防庁
ベル214ST	256km/h	6,000m		建設省
ベル212	230km/h	6,096m	1,895kg	海上保安庁
アエロスバシヤル SA365N	240km/h		1,910kg	消防庁
ベル206B	219km/h	6,096m	792kg	海上保安庁

表 6.1.3-2 民間の所有する主な回転翼機

機種名	巡航速度	上昇限度	ペイロード	所有者
ミル Mi-8PA	230km/h	4,500m	4,238kg	朝日航洋
アエロスバシヤル AS332L	280km/h	4,600m	4,085kg	中日本航空 他
ベル214B	241km/h	6,096m	2,876kg	朝日航洋 他
アエロスバシヤル AS350B	235km/h	5,000m	892kg	中日本航空 他
ベル206L-1	215km/h	6,096m	857kg	中日本航空 他

これらの回転翼機が全て直ちにリモートセンシングに用い得るものではない。多くの場合、人員や物の輸送、農薬散布等にも併用されており、リモートセンシング専用機は存在しないのが実状である。従って、大きな光学窓を開けるとかの改修を必要とする場合も生じてくる。この場合、固定翼機のところで述べたような厄介なことになることもある。

このようにみえてくると、回転翼機に就いてもリモートセンシングに便利に使える専用機は殆ど無いと言ってよい。

#### 6.1.4 飛行船

空気より軽い航空機としてここでは飛行船のみを取り上げる。飛行船は速度も遅く低高度しか飛べないが、逆にその点をリモートセンシングに活かす利用の仕方が考えられる。飛行船は振動も少なく、安定性もよく、乗り心地もよい。わが国では飛行船技術は余り発達していないが、米海軍は100~150人乗りの大型飛行船の開発を進めている。基礎研究としてはわが国にも20km高度に滞留し地球観測が出来るようなユニークな飛行船研究の試みもある。

わが国には現在三機種の飛行船が主として宣伝用に用いられているが、これらは現状では大気観測やリモートセンシングに用いることは出来ない。従って、ここでは飛行船というのは将来有望なリモートセンシング用のプラットフォームになることを記して、それ以上述べない。

#### 6.1.5 諸外国との比較

わが国の現状は上記に述べたように誠に貧乏たるものである。これに比べると米国、ヨーロッパはもとより、開発途上国でも地球観測に於ける航空機の重要性を正當に評価している。例えばインドはビーチクラフト2機を含む4機のリモートセンシング専用の航空機を所有している。また中国もリモートセンシング専用機として、リアジェット3機を含む100機に及ぶ航空機を有していると言う。(ASCA セミナー中国

代表の言) さらに韓国でも専用航空機システムの整備計画を持っている。これらの国では人工衛星搭載センサーの開発の前段階として、先ず航空機搭載のセンサーを開発し、これらの航空機によってその性能、仕様、信頼性等を十分に評価し、その上で衛星センサーの開発に進むと言う。当然ながらこれも航空機の重要な位置付けの一つであるが、わが国ではこれさえも十分に認識されているとは言えない。

#### 6.1.6 大気観測用航空機に関する問題点

以上述べた中に既に問題点に就いても言及しているが、以下レーザーレーダー実験を含む大気観測用航空機に関する問題点を列挙する。

- 1) 高度 5,000 m 以上の高高度レーザーレーダー実験に供し得る航空機は 1 機もない
- 2) 与圧された航空機で高高度での in-situ 実験やリモートセンシングに供し得る航空機は 1 機もない。
- 3) 航空法規、体制によって実験用に航空機の改修することが容易でなく、飛行実験の実施が困難である。
- 4) 実験用航空機がないこと、改修が困難で飛行実験がやり難いことにより、衛星と同期したシステムマティックな観測の実施がきわめて困難である。
- 5) 航空機搭載センサーの開発を経て衛星搭載センサーの開発に進むという、きちんとしたステップを踏んでのセンサー開発が出来ない。

これらの問題は、高高度大気観測用の各研究機関が共用し得る航空機が 1 機もないという一語に尽きる。

昨年、日本学術会議気象学研究連絡委員会が気象、大気、海洋、陸水、地球化学等の研究者に行ったアンケート調査でも、わが国の観測用航空機の欠如、その緊急の必要性が叫ばれている。一刻も早い観測用航空機の実現を望むものである。

## 6.2 衛星

以下世界とわが国の人工衛星による大気環境観測計画に就いて述べる。最初に世界の衛星計画に就いて述べるが、その中でわが国の計画についても簡単に触れ、その後で特にわが国の JPOP 計画に就いて述べる。

### 6.2.1 世界の衛星による大気観測計画

大気観測に関して今最も期待されているのは 1991 年に打ち上げが予定されている UARS(Upper Atmosphere Research Satellite)であろう。これは文字どおり上層大気の観測のみをミッションとする衛星である。その次にくるのが 1995 年に打ち上げ予定のわが国の ADEOS(Advanced Earth Observing Satellite)と 1996 年に米国との共同で打ち上げる TRMM(Tropical Rain Measurement Mission)である。ADEOS には 8 種類のセンサーの内、大気観測用のセンサーとして ILAS(Improved Limb Atmospher Spectrometer)、RIS(Retro-reflectorin Space)、TOMS(Total Ozone Mapping Spectrometer)及び IMG(Interferometric Monitor for Green house Gases)が搭載される。また TRMM には Rainradar の他にマイクロ波放射計と可視・赤外放射計が搭載される。

その後 2000 年前後における世界の地球観測衛星計画には次の様なものがある。(表 6.2.1-1 参照)。



表 6.2.1-1 2000 年前後における地球観測衛星計画

計画名	国名・機関	打ち上げ年次	軌道	ミッション
EPOP-M1	ESA	1997	790km 10:00 AM	大気・気候観測, 海洋 ・氷の観測, 環境汚染 の観測
EOS-A	NASA	1997 4Q	705km 1:30 PM	固体地球・資源の研究 グローバルな水循環・大気 循環・雲の研究, 放射収 支・表面温度のモニター, 植 生・生態系・表面資源の 観測
NOAA-O	NOAA	1998 1Q	824km 1:30 PM	実用気象観測・予報及び 警報のためのグローバル観 測
JPOP	日本	1998 1Q	800km	グローバルな水循環の観測, オゾン・温室効果ガスの 観測, 雪氷圏の観測, 水 文要素の観測
ATT/PL	NASA (Space station)	1998	400km	赤道地域雷観測, 低緯度 大気微量成分の観測
EOS/SAR	NASA	1999	659km 1:30 PM	グローバルな砂漠化現象とそ の温室効果ガスへの影響 の観測, グローバルな水循環 の観測, 海水とその極域 熱収支への影響の研究
EOS-B	NASA	1999 4Q	705km 1:30 PM	成層圏オゾンの研究, 対 流圏化学のグローバルモニター, 海洋・大気の相互作用の 観測, 氷床の成長・マサ テラの観測, 地震研究
EPOP-N1	ESA	2000		大気化学・エアロゾルの 分布, 植生・表面水のモニ ター, 雪氷分布の観測, 地質 ・資源観測

これらは全て大型の衛星で、ミッションとしては何れも大気化学、大気・海洋相互作用を含む地球環境観測の多くの分野の観測を同時に行う計画になっている。

### 6.2.2 わが国の JPOP 計画

宇宙開発事業団は地球観測ミッション調査委員会を組織し、大気圏化学反応、大気・海洋大循環、雪氷圏・気候変動、海洋生物過程、水文過程、植生環境および固体地球の7つの観測分野にわたって70名以上の研究者を結集し、今後わが国が打ち上げるべき極軌道プラットフォーム(JPOP)のミッションに就いて調査を行って来た。

その結果、大気圏観測に関係する大気圏化学反応と大気・海洋大循環の分野では主要な観測ミッションとして、次の表6.2.2-1に示す観測項目が設定された。更にそれらの観測にはどのようなセンサーが必要か、そしてその概略の仕様が設定された。

表 6.2.2-1 JPOP の主要観測項目と必要なセンサー

1. 大気圏化学

観測項目	センサーとそのミッション
対流圏微量気体の鉛直分布	TERSE(Tunable Etalon Remote Sounder):対流圏微量気体( $\text{CH}_4$ , $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{N}_2\text{O}$ , $\text{CO}_2$ )の高精度の鉛直分布測定
成層圏オゾン等微量気体の鉛直分布	TOMUIS(Three-Dimensional Ozone Mapping with Ultraviolet Imaging Spectrometer):成層圏オゾン高度分布の精密測定 FPITS(Fabry-Perot Inverse Transform Spectrometer):対流圏および成層圏の微量気体( $\text{O}_3$ , CFCs, HClなど)の鉛直分布の測定 HLAS(High Resolution Limb Infrared Absorption Spectrometer):多成分の微量成分ガスの同時測定 MILES(Millimeter-wave Limb Emission Spectrometer):大気のおゾン,微量成分ガス,気温,気圧,対流圏と成層圏の相互作用の観測
水蒸気・微量気体の鉛直分布	E-LIDAR(Experimental LIDAR):全球の水蒸気の鉛直分布,南極・グリーンランドの氷床高度の変化,海面高度の高精度測定
$\text{CO}_2$ 等温室効果気体の鉛直分布	SLIES(Stratospheric Limb Infrared Emission Spectrometer):成層圏微量気体鉛直分布の多成分同時測定 ISTG(Interferometric Spectrometer for Temperature and Greenhouse Gases):対流圏・成層圏中の大気微量気体成分及び気温の水平・鉛直分布の測定

2. 大気・海洋大循環

観測項目	センサーとそのミッション
降雨の3次元観測	(D)PR(Dual Frequency Precipitation Radar):降雨の3次元レーダー観測,海上風速の推定
海面水温、水蒸気鉛直分布	AMSR(Advanced Microwave Scanning Radiometer)水文要素(水蒸気量,降水量,雲水量,積雪量)の放射測定
水蒸気鉛直分布	E-LIDAR:上述
海上風ベクトル	SCAT(Scattrometer):海上風ベクトルの観測
海面高度	ADALT(Advanced Radar Altimeter):海面高度の精密測定によるジオイドの観測,海上風・波高の測定
海上風ベクトル・波浪ベクトル	MCSAR(Multimode C-band Synthetic Aperture Radar):海上風,波浪スペクトル,海洋フロント,渦等の観測
大気風ベクトル	JLAWS(Japanese Laser Atmospheric Wind Sounder): $2\mu\text{m}$ 台の短波長赤外線レーザーによる対流圏エアロゾルの運動の観測,風ベクトルの計測

7つの観測分野を含んでJPOPのミッションは、総合的に水圏、気圏、生物圏及びそれらの相互作用に関する地球環境の種々のパラメータの観測ということが出来る。

そしてその JPOP 計画は、

- ・ 太陽同期極軌道衛星によるグローバル、かつ継続的な観測
- ・ 気候システムのメカニズム解明のための太陽非同期傾斜軌道衛星による観測
- ・ 将来の総合的環境監視システムの構築に向けての、静止地球観測衛星技術の開発

の三つの柱を中心に立てられる。この始めの二つは現在 JPOP-I としてカテゴライズされている。即ち、JPOP-I は太陽同期極軌道プラットフォーム 1 機と太陽非同期傾斜軌道プラットフォーム 1 機からなる。

太陽同期極軌道プラットフォームはグローバルな観測を行うために極軌道を取り、軌道高度は 800 km が想定されている。LMT(Local Mean Time)は 10:30±15 分。(TBD: to be determined)搭載容量 1.4 t (TBD)、供給電力は 1 軌道平均 2 kw (TBD)、50 Vdc 非安定バス。姿勢制御精度：±0.1° (TBD)、姿勢安定度(低周波成分)：±0.0002° /sec(TBD)、姿勢推定精度：±0.03° (TBD)、軌道位置推定精度：±100 m(TBD)搭載センサーとしては表 6.2.2-1 に挙げられている AMSR, E-LIDAR, TERSE, TOMIUS, SLIES, PR, ADALT の他に、GLI(GLobal Imager:生物過程を中心とした炭素循環の解明、植生環境の変化、火山・洪水の高頻度モニタリング)および高解像度光学調査計(殆ど連続波長分解能を持つ Imaging spectrometer)が予定されている。打ち上げ年次は 1998 年が予定されている。

一方、太陽非同期傾斜軌道プラットフォームは軌道傾斜角 55°、高度 600 km の軌道を持ち、ダイアーナル・サイクルを含む気候要素の重点的観測を行う。搭載容量 1.6 t(TBD)、供給電力は 1 軌道平均 2.5 kw (TBD)、50 Vdc 非安定バス。その他姿勢制御精度等の仕様に就いては太陽同期極軌道プラットフォームと同じである。搭載センサーとしては表 6.2.2-1 に挙げられている LAWS, AMSR, DPR, SLIES, MILES の他に、IR サウンダー、ERBI(Earth Radiation Budget Instrument: 太陽を放射源とした地球の放射収支を測定する)、GLI、および粒子カウンターの搭載が想定されている。打ち上げ年次としては 2000 年が予定されている。

JPOP-II はやはり太陽同期極軌道プラットフォーム 1 機と太陽非同期傾斜軌道プラットフォーム 1 機から成り、2003 年以降の打ち上げが構想されている。J-LAWS はこの太陽非同期プラットフォームの主要センサーの一つとして想定されている。

### 6.2.3 問題点

以上述べたように今後の宇宙からの地球観測計画では、世界の計画においてもわが国の計画においても大気環境の観測が重要な観測ミッションの一つとして考えられている。しかし技術的には多くの問題点があり、特に衛星搭載レーザーレーダーに関しては、プラットフォームとのインターフェースの観点から以下のような問題点が考えられる。

- 1) 搭載容量：マルチセンサーによる多くのパラメータの同時観測のためには、限られた容量の中に多くのセンサーを搭載しなければならない。
- 2) 電源容量：搭載容量と同じ問題がある。軽量化、低電力化が必要。
- 3) 冷却：熱制御アセンブリを用意し、放熱やヒーターによりミッション機器毎に単体で温度制御しなければならない。
- 4) 姿勢：衛星の姿勢制御精度、推定精度共に益々高精度になっていくが、衛星の大型化に伴い構体が柔軟構造になっていく。そのため個々のセンサーの制御が必要になる場合もある。
- 5) インターフェース：センサー毎にユニット化し、専用のプレートと計装アセンブリを用意し、それらを通じて衛星本体と結合しなければならない。

## 7. おわりに

オゾン層破壊、地球温暖化、酸性雨等のいわゆる地球規模大気環境問題は、現象の広がりという観点からみると、従来の都市型あるいは地域規模の大気汚染問題とは格段の違いがある。現象を正しく理解しようとするれば、航空機観測や人工衛星による測定が不可欠のものとなってきている。さらに人工衛星の場合は当然のこととして、航空機観測においてもリモートセンシングの必要性が高いことが本調査でも示されている。特に大気微量成分の分布を高い空間分解能で得ようとするレーザーレーダーのようなアクティブなリモートセンシングが必要となる。

本調査では、オゾン層破壊、地球温暖化、酸性雨の研究推進の立場およびレーザーレーダー技術の成熟性の観点から現時点では、対流圏および成層圏のオゾン、エアロゾルの測定用の航空機搭載レーザーレーダーに対する要請が最も大きいものと判断し、これらに対する実現可能性を技術的観点から検討した。その結果、基本的には半導体レーザー励起のYAGレーザーを光源としたシステムが望ましいこと、観測用航空機の調達を考慮したシステム開発が必要であることなどが指摘された。

特に、航空機に関しては日本の官庁には満足すべきものを所有しているところはなく、今後とも地球規模大気環境研究の推進にとって解決すべき大きな課題のひとつである。

今後さらに、衛星利用の地球大気観測の必要性は増して行くものと考えられ、その場合にも成層圏・対流圏のオゾン、エアロゾル観測はその優先度は高いと考えられる。最近のレーザー技術の発展に伴い、衛星搭載レーザーレーダーの実現性もいよいよ高まってきている。

この他、長光路吸収法、長光路レーザーレーダー、差分吸収レーザーレーダー等の各種吸収方式計測法をさらに高度化することにより、オゾン、エアロゾル以外の多くの成分種の計測も可能になると考えられ、これらの基礎技術の研究の推進が望まれる。