

A-1 オゾン層変動の総合的観測及び解析に関する研究

(1) 地上からの総合的観測手法の開発とその評価に関する研究

① レーザーレーダーによる下部成層圏オゾン測定手法の高度化に関する研究

研究代表者

国立環境研究所

中根 英昭

環境庁 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

中根 英昭

大気圏環境部

高層大気研究室

杉本 伸夫・松井 一郎

(委託先)

文部省宇宙科学研究所

広澤 春任・矢島 信之

平成5-7年度合計予算額 66,980千円

(7年度当初予算額 13,905千円)

[要旨] 成層圏下部から対流圏上部のオゾンに関して信頼できるデータが少ない現状を打開するために、オゾンレーザーレーダーによる測定手法の高度化に関する研究を実施した。オゾン測定精度を上げるためには、エアロゾルのレーザーレーダー測定への影響を小さくする、または補正をすることが必要である。本研究では、①エアロゾル鉛直分布を求め、エアロゾルの光学的性質を仮定して補正する方法、②差分吸収測定に用いるレーザーの波長差を小さくする方法、③空気中の窒素のラマン散乱信号を用いたレーザーレーダー観測を行うことによってエアロゾルによる後方散乱の効果をなくする方法の3つの手法について検討し、それぞれ良好な結果を得た。また、オゾンレーザーレーダー観測の検証を目的とする、気球を利用した観測手法のためのGPSを用いた気球追尾技術の開発を行った。

[キーワード] オゾン、レーザーレーダー、下部成層圏、成層圏エアロゾル、気球、GPS

1. 序

下部成層圏は現在最も大きなオゾンの減少が観測されている領域である。また、対流圏上部と共に、オゾン層変動が温暖化に最も大きな影響を及ぼす領域でもある。この高度領域におけるオゾントレンドは、オゾンゾンデまたは衛星 SAGE/SAGE II のデータから評価されているが、両者間には大きな差がある。この高度領域のオゾン濃度を精度良く観測する手法の一つとしてレーザーレーダーが注目されているが、成層圏エアロゾル層がオゾンの観測自身に影響を与えるという問題があり、高精度の観測が最もむずかしい領域でもある。

レーザーレーダーによる下部成層圏オゾンの測定におけるこのような問題点を解決するために、次の3つの手法による研究を行ってきた。ひとつはエアロゾルの高度分布を求め、エアロゾルの光学的性質に関連するパラメータを仮定してエアロゾルの影響を補正する方法、2番目は、差分吸収測定に近接した2波長を用いることによってエアロゾルの影響を受けにくくする方法、3番目は空気中の窒素のラマン散乱信号を用いることによってエアロゾルの後方散乱の波長依存性の影響を受けずに差分吸収測定を行う方法である。本研究のねらいは、これらの手法を実際にテスト

トし、下部成層圏のオゾンを高精度かつ高分解能で観測するための手法を確立することである。一方、ライダーによるオゾン濃度測定を検証するためには気球を用いた直接測定や地上-気球間長光路吸収法による測定との比較が有効である。気球を用いた観測では気球の位置を時事刻々知ることが必要であるため、本研究ではGPSを用いた気球追尾方式について研究を行った。以下、それぞれの成果について報告する。

2. 研究目的および研究方法

(1) レーザーレーダー手法の高度化

エアロゾルの影響を受けずに精度良く下部成層圏のオゾンを測定するためのレーザーレーダー手法を確立するために、エアロゾル鉛直分布を求めてエアロゾルの影響を補正する方法、差分吸収測定に用いるレーザーの波長差を小さくする方法、③ラマン散乱信号を用いて差分吸収測定を行う方法の3つについて以下の方法で研究を行った。

①エアロゾルの影響の補正

下部成層圏において精度の高い測定が困難な原因は、この高度領域にエアロゾル層があるためである。エアロゾルの散乱は波長依存性を持ち、その波長依存性が知られていないため、差分吸収法に基づくオゾンレーザーレーダー測定に誤差をもたらす。この誤差を取り除く手法のひとつは、エアロゾルの高度分布と光学的性質からエアロゾルの影響を推定して補正することである。

本研究では、3波長のレーザーレーダー信号を用いてエアロゾルの高度分布、光学特性とオゾン分布を同時に求める方法と、エアロゾルの光学特性をあらかじめ仮定して、オフラインの信号からエアロゾル高度分布とオゾン測定への影響を推定する方法について検討を行った。さらに、火山噴火後のエアロゾルの光学特性が高度に依存することが知られているため、そのような場合にエアロゾルの光学特性の高度依存性を求めるレーザーレーダー手法のひとつである高スペクトル分解レーザーレーダーの研究を行った。

②差分吸収レーザーレーダーの波長差の最適化

エアロゾルの影響をできるだけ受けずに差分吸収測定を行う方法のひとつは、測定に用いる波長間隔を狭くすることである。波長幅を狭くすると、オゾンの吸収係数の差も小さくなるため、波長の設定には最適値がある。このような検討に基づいてNd:YAGレーザーの4倍波と誘導ラマン散乱を用いて289 nmと299 nmの2波長を得るための光源を開発し、これと従来のKrFの誘導ラマン散乱の292 nmを組み合わせてオゾンの高度分布を測定した。

③ラマン散乱を用いた差分吸収レーザーレーダー

エアロゾルの影響をできるだけ受けずに差分吸収測定を行うためのもうひとつの方法は、ラマン散乱信号を用いることである。通常、差分吸収レーザーレーダーでは、散乱光のうちのレイリー散乱、ミー散乱成分を用いて測定を行っている。このため、エアロゾル層のある高度ではエアロゾルによるミー散乱の寄与が大きい。散乱光のうちの大気分子によるラマン散乱成分は波長がシフトするため分離して測定が可能で、この信号を利用して差分吸収測定を行えば、エアロゾルの後方散乱の影響を受けずにオゾン測定が可能である。ここでは、XeClレーザーの308 nmのラマン散乱信号を受信し、この手法の実験的な検討を行った。

(2) 気球を利用した新しいオゾン観測手法の基礎研究

気球に取り付けたリフレクターを用いたレーザー長光路吸収法は、オゾンやオゾン層破壊に関

連する大気微量分子の高度分布の新しい測定手法として大きな可能性を持つものであるが、気球追尾がその鍵を握っている。本研究では、最新技術による気球位置測方式であるGPSの機能を実際に気球フライト実験で検証し、反射方式レーザーレーダーへの適用可能性を評価した。

3. 研究内容および成果

(1) レーザーレーダー手法の高度化

① エアロゾルの影響の補正

3波長のレーザーレーダー信号からエアロゾルの高度分布、光学特性とオゾン分布を同時に求める方法¹⁾を国立環境研オゾンレーザーレーダー²⁾に適用することを検討した。誤差の解析を行った結果、オゾンレーザーレーダーの308 nm、339 nm、351 nmに適用する場合、エアロゾルの光学的パラメータの決定精度が必ずしも十分でないことがわかった。この手法よりもむしろ、消散係数と後方散乱係数の比を仮定してオフラインの信号からエアロゾルの高度分布を求め、消散係数と後方散乱係数それぞれの波長依存性を仮定して濃度の補正を行う方法が現実的で、信頼性も高いことがわかった³⁾。この場合、エアロゾルの光学的パラメータは高度に依存せず一定であると仮定した。

この補正手法を用いてオゾンの高度分布を求めた結果を図1に示す。ここでは、各高度におけるオゾン数密度の時間変化として表示している。ピナツボ火山噴火後のうちエアロゾル濃度が極めて高い場合は、上の補正手法を用いても補正が困難な例もあった。その場合は、エアロゾル層の上からのプロファイルを求めた。このため、図1で高度20 kmのデータ数が少なくなっている。

一方、Nd:YAG レーザーレーダーの1.06 μm 、532 nm、355 nmの3波長を用いたピナツボ噴火後の成層圏エアロゾルの解析結果では、エアロゾルの光学的性質がエアロゾル層の中で一様ではないことを示す結果も得られた。従って、火山噴火後のエアロゾルの極めて高い状況では、さらに高度な補正手法が要求される。普通レーザーレーダーデータからエアロゾル高度分布を求める際、消散係数と後方散乱係数の比を仮定するが、この仮定が成り立たない場合が考えられる。そこで、高スペクトル分解レーザーレーダー手法を用いて、高度毎に消散係数対後方散乱係数比を求める研究を行った。

従来のレーザーレーダーで受信される後方散乱信号には2つの強い散乱光成分が含まれている。一つはエアロゾルによるミー(Mie)散乱、もう一つは大気構成分子によるレイリー(Rayleigh)散乱である。レーザーレーダー信号を表す方程式には、後方散乱係数と消散係数の二つが未知数として含まれ、それぞれにエアロゾルと分子の寄与がある。分子のレイリー散乱は理論的に記述されるが、エアロゾルについては後方散乱係数と消散係数の関係が一般にわからない。このためレーザーレーダー方程式を厳密に解くことは一般にはできない。そこで、後方散乱係数と消散係数の関係を仮定し、それが空間的に一定であるという仮定をしてライダー方程式を解くことが行われる。高スペクトル分解レーザーレーダーでは、スペクトル幅の狭いレーザーを光源とし、受信信号光を高分解で分光することによって、ミー散乱とレイリー散乱を分離して測定する。これによって、後方散乱係数と消散係数の比例関係を仮定することなくレーザーレーダー方程式を解くことが可能となり、エアロゾルの定量測定が可能となる。ここでは、受信信号を分光するための素子としてヨウ素分子の吸収線を利用したフィルターを用いる方法を研究した⁴⁾。

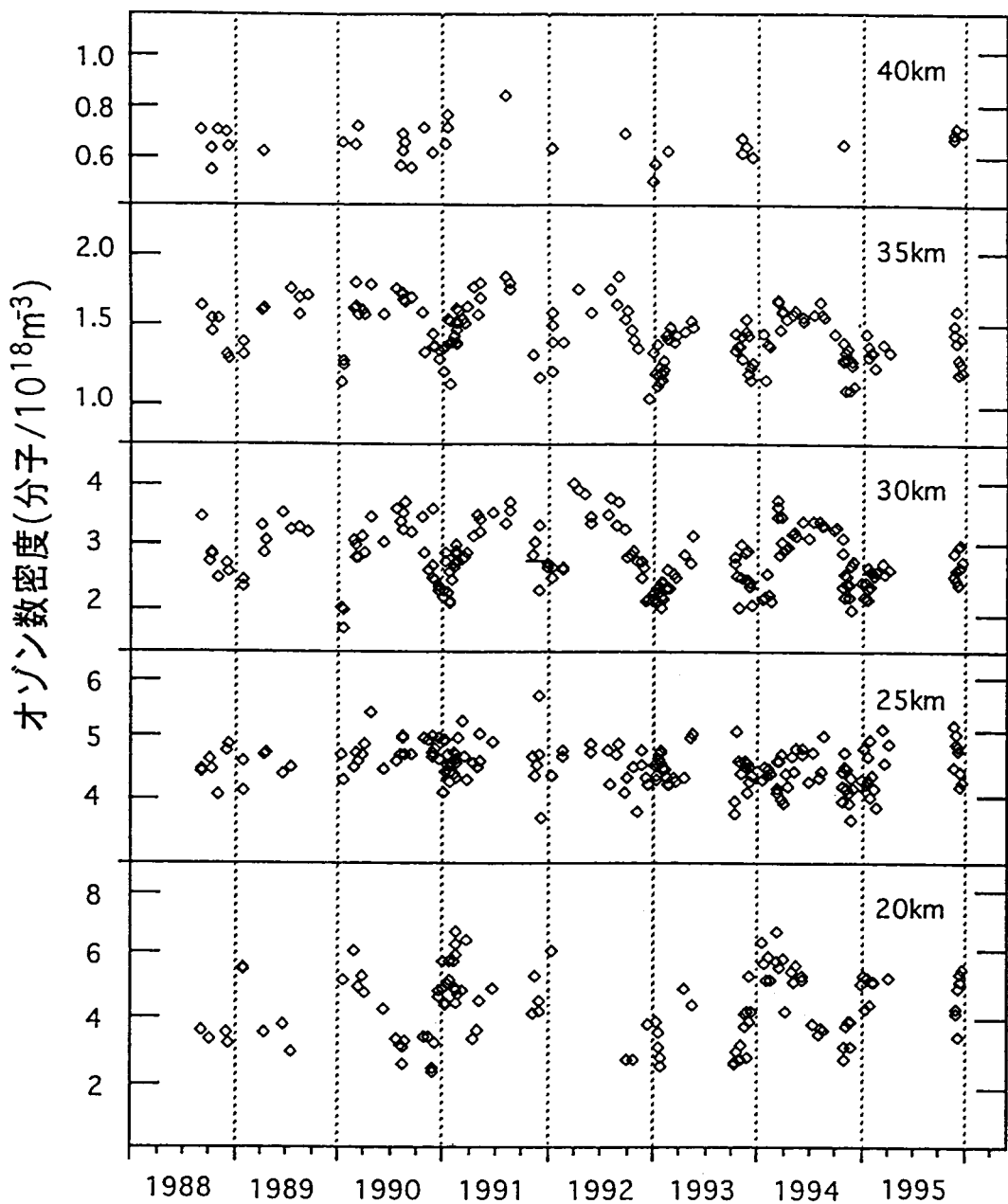


図1 高度毎のオゾン数密度の時間変化

図2 に試作した高スペクトル分解レーザーレーダーシステムの構成を示す。レーザーは、Nd:YAGレーザーの第二高調波 (532nm) で、スペクトル幅は約 300 MHz である。ライダー信号光は、受信望遠鏡で集光した後、干渉フィルターにより背景光をカットし、一部を光電子増倍管 (PMT1) によって検出する。残りの受信光はヨウ素セル a を通過しミー散乱をブロックした後、PMT2 で検出する。すなわち、PMT1では受信信号のうちのミー散乱およびレイリー散乱の両方を検出する。また、PMT2 ではレイリー散乱成分のみを検出する。ヨウ素フィルターは長さ 20 cm, 内径 5 cm

のバイレックス製のセルを真空に引き、固体のヨウ素を封入したもので、要素の蒸気圧は室温（30° C）で 0.47 Torrである。レーザーを掃引してヨウ素セルの吸収を測定した結果、ヨウ素は鋭く強い吸収線を持ち、線幅は約 1 GHz (0.03 cm⁻¹) で、ミー散乱をブロックしてレイリー散乱成分を取り出すためのフィルターとして適当な特性を持つことが確認された。

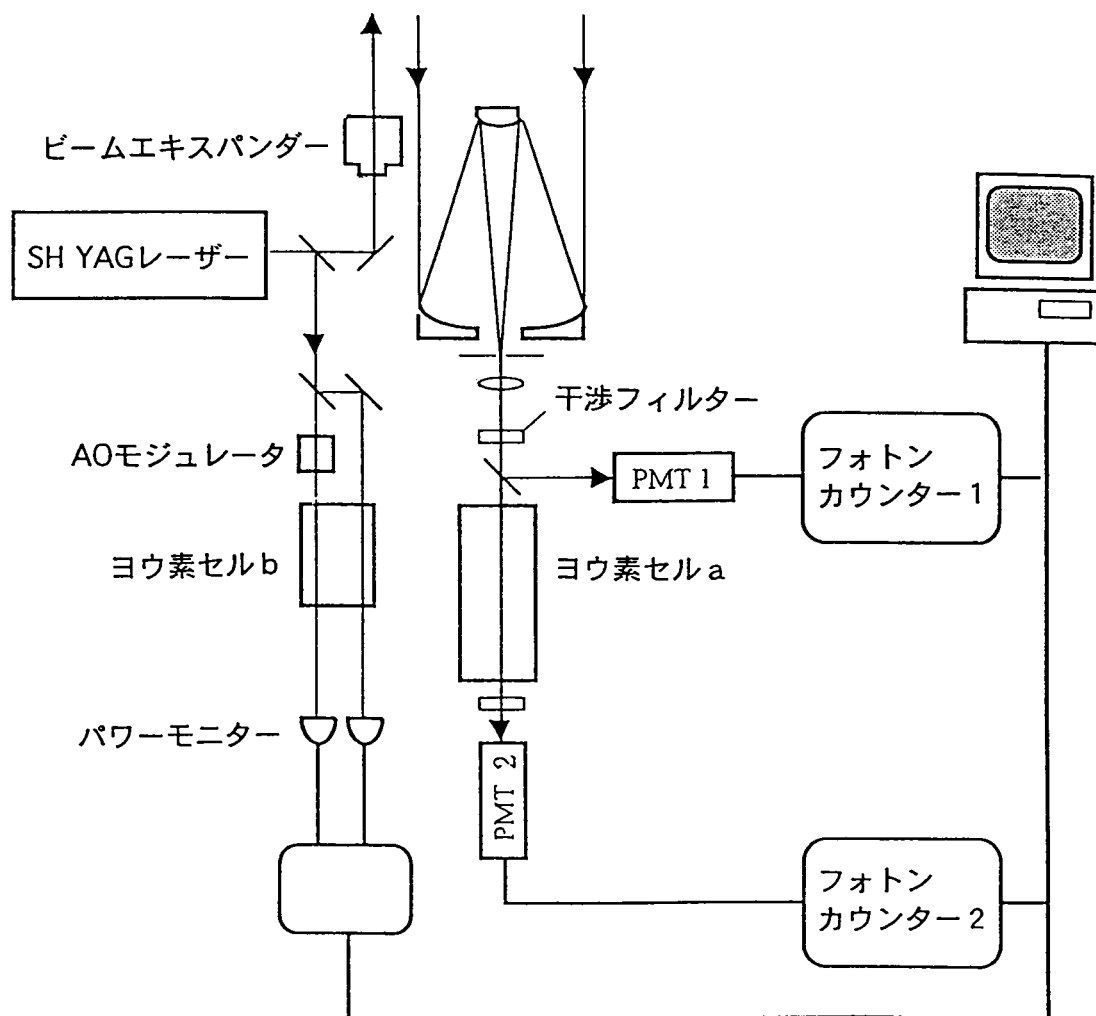


図2 高分解レーザーレーダーの構成

高分解レーザーレーダーの PMT1、PMT2 で得られる信号は、それぞれ、次の(1)、(2)式で表される。

$$P_1(Z) = c_1 (\beta_1(Z) + \beta_2(Z)) / Z^2 \exp[-2 \int (\alpha_1(Z) + \alpha_2(Z)) dz] \quad (1)$$

$$P_2(Z) = c_2 \beta_2(Z)/Z^2 \exp[-2 \int (\alpha_1(Z) + \alpha_2(Z)) dz] \quad (2)$$

ここに、 c_1 、 c_2 は装置定数である。 $\beta_1(Z)$ 、 $\beta_2(Z)$ 、 $\alpha_1(Z)$ 、 $\alpha_2(Z)$ はそれぞれ体積後方散乱係数、消散係数のミー散乱成分（添字1）とレイリー散乱成分（添字2）である。

$$\beta(Z) = \beta_1(Z) + \beta_2(Z), \quad \alpha(Z) = \alpha_1(Z) + \alpha_2(Z) \quad (3)$$

PMT2で得られる信号(1)式は、レイリー散乱、ミー散乱の両方の寄与を含み通常のレーザーレーダー方程式と同じである。PMT1の信号はレイリー散乱による後方散乱の寄与のみを含む。今、ゾンデ観測や大気モデルにより、大気分子のプロファイルがわかっているものと仮定すれば、 $\alpha_2(Z)$ 、 $\beta_2(Z)$ は既知である。この場合、従来のレーザーレーダーのように、(1)式のみでは $\alpha_1(Z)$ 、 $\beta_1(Z)$ の二つの未知数があるため $\alpha_1(Z)$ と $\beta_1(Z)$ の間に関係を仮定しなければ解くことができない。しかし、高分解レーザーレーダーでは、(2)式より得られる次式によって $\alpha_1(Z)$ が独立に求められる。

$$\alpha_1(Z) = -(1/2) d/dZ [\ln(P_2(Z)Z^2/\beta_2(Z))] - \alpha_2(Z) \quad (4)$$

一方、(1)式と(2)式の比をとることによって次式が得られる。

$$P_1(Z)/P_2(Z) = (c_1/c_2) \{(\beta_2(Z) + \beta_1(Z))/\beta_2(Z)\}, \quad (5)$$

これより、

$$\beta_1(Z) = (c_2/c_1) \beta_2(Z) [P_1(Z)/P_2(Z) - 1] \quad (6)$$

が得られる。係数 (c_2/c_1) はエアロゾルの無い、すなわち $\beta_1(Z)=0$ である高度の信号から決定される。

以上によって、高度毎に消散係数対後方散乱係数比を求めることが可能となる。オゾン測定 of 補正ではさらに波長依存性の情報が必要であるが、この手法によってエアロゾルの高度分布導出の精度が向上するため補正の精度が改善される。現在、試作したレーザーレーダーシステムを用いて引き続き観測試験を実施している。

②差分吸収レーザーレーダーの波長差の最適化

差分吸収測定 of 波長間隔を狭くする方法について、Nd:YAGレーザーの4倍波の重水素と水素の誘導ラマン散乱光 (289 nm、299 nm) と KrF の水素の誘導ラマン散乱光 (292 nm) を用いて観測実験を行った。図3に装置の概要を示す。具体的には、国立環境研オゾンレーザーレーダーの低高度システムの光学テーブル上に光学ブレッドボードを増設し、その上に小型の Nd:YAGレーザーを設置して観測を行った。レーザー波長が全て近いため、ひとつの受信チャンネルを用いてレーザーレーダー信号を記録した。

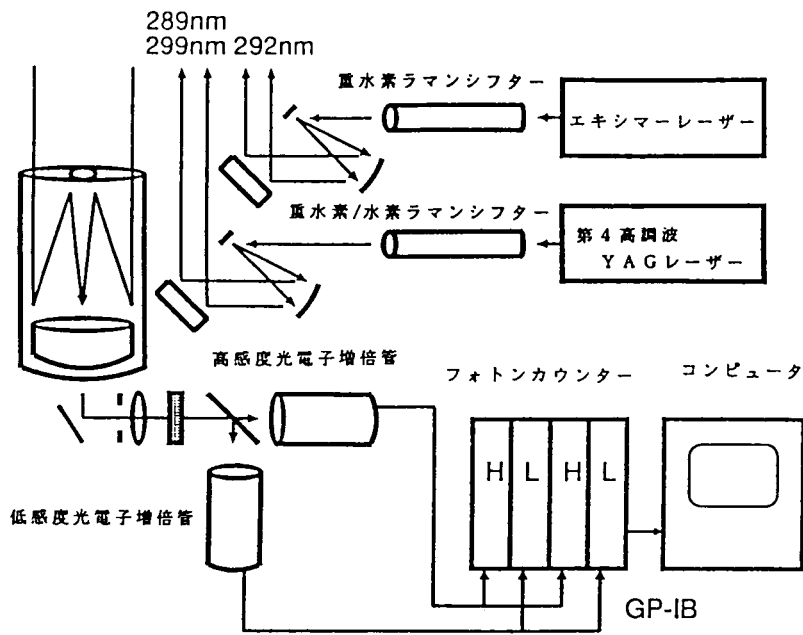


図3 差分吸収レーザーレーダーの構成

図4はそれぞれの波長におけるレーザーレーダー信号である。

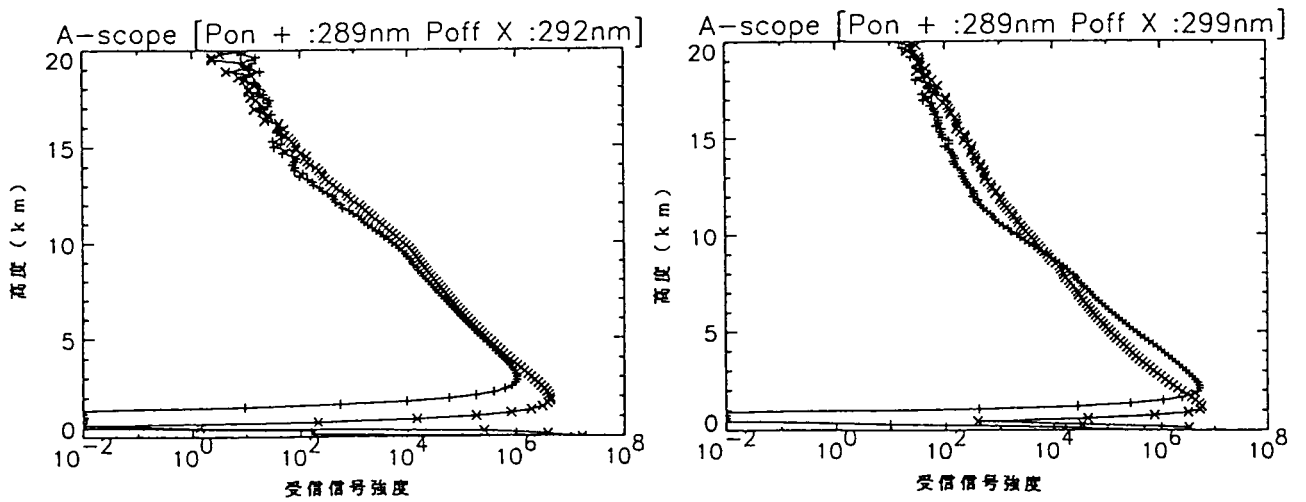


図4 各波長におけるレーザーレーダー信号

図5は、2種類の波長の組合せを用いて測定したオゾンの高度分布である。2つのプロファイルは異なる日に測定したもので直接比較できないが、いずれも妥当なプロファイルが得られている。火山噴火後など特にエアロゾルの大きい状況以外では、この手法によって精度の高いオゾン観測が可能である。

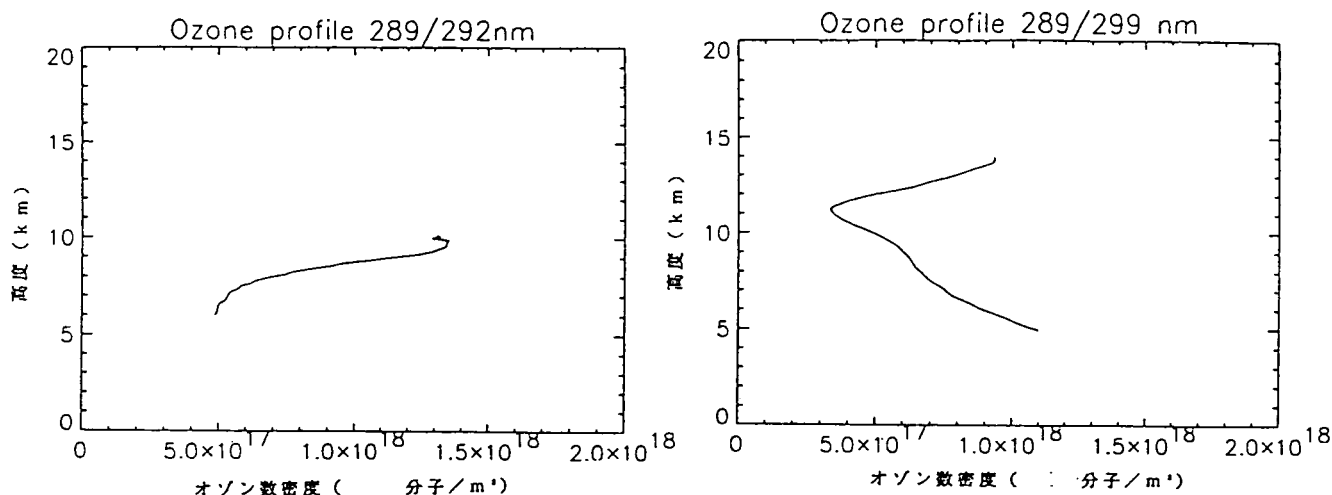


図5 2種類の波長の組合せで求めたオゾン高度分布

③ラマン散乱を用いた差分吸収レーザーレーダー

通常の差分吸収レーザーレーダーでは、散乱光のうちのレイリー散乱、ミー散乱成分を用いて測定を行っている。これに対して、大気分子によるラマン散乱成分を用いて差分吸収測定を行えば、エアロゾルの後方散乱の影響を受けずオゾン測定が可能である。この手法のむつかしい点は、ラマン散乱の断面積がレイリー、ミー散乱に比べて数桁小さく高い信号対雑音比を得ることが困難なことである。本研究では、XeClレーザーの 308 nm を用いてラマン散乱信号を受信し、この測定手法の評価を行った。

図6は 308 nm における受信信号、すなわちレイリー、ミー散乱成分である。図7は同じ観測における 332 nm すなわちラマン散乱信号である。ラマン散乱信号は小さく、高高度では雑音が大きくなっている。

ラマン散乱差分吸収方式ではオフラインすなわちオゾンの吸収の無い波長でもラマン散乱の観測を行い、両者からオゾン濃度を導出する。しかし、ここでは、308 nm の信号と 332 nm のラマン散乱信号を用いてオゾン濃度の導出を試みた。308 nm では往復でオゾンの吸収を受けるのに対して 332 nm では片道のみ吸収を受けるので、その違いよりオゾン濃度を求めることができる。なお、これによって、ラマン散乱チャンネルにレイリー散乱成分が混ざっていないことを確認することができる。結果を図8に示すように高度 20 km 付近のオゾン濃度は妥当な値である。エアロゾルの影響を受けないためには、351 nm などオフラインのレーザーを用いて、両者ともラマン散乱信号を受信する必要があるが、本実験によって雑音等の特性を評価することができた。

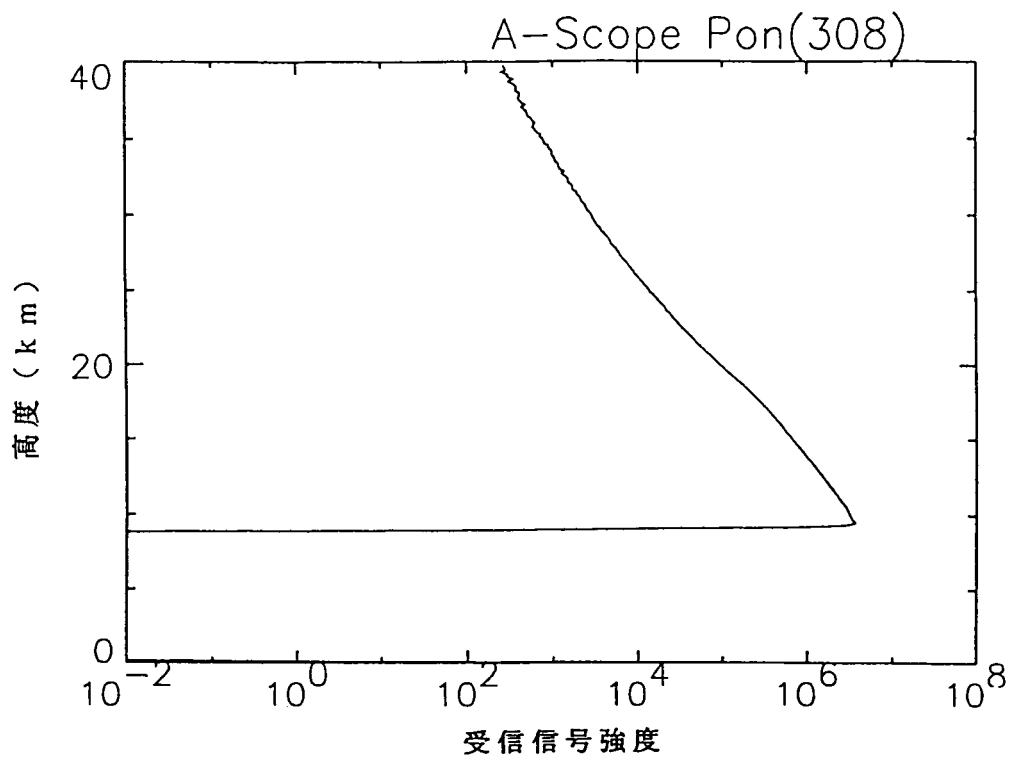


図6 レイリー、ミー散乱信号 (308 nm)

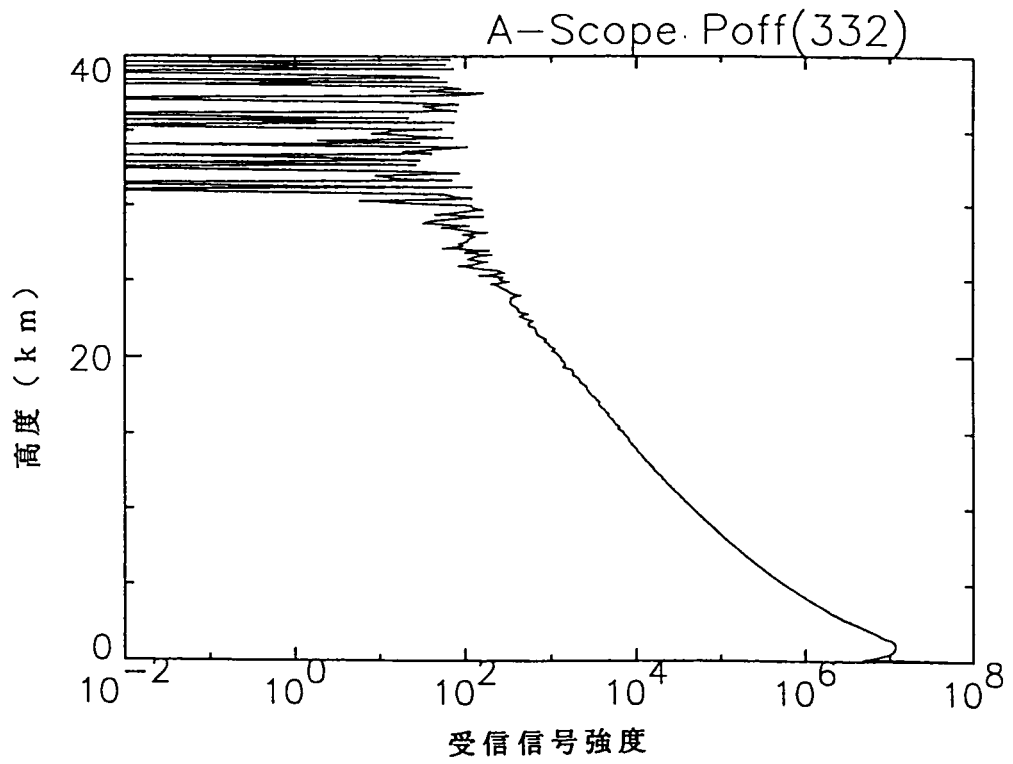


図7 ラマン散乱信号 (332 nm)

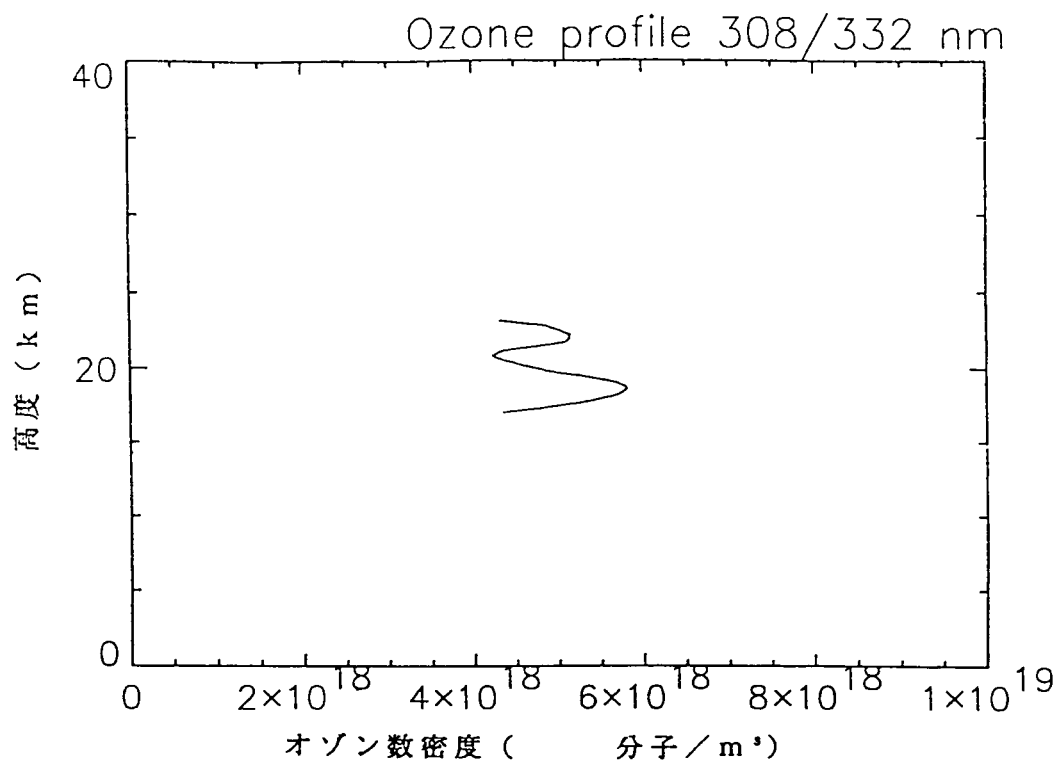


図8 308 nm と 332 nm の受信信号から求めたオゾンプロファイル

(2) 気球を利用した新しいオゾン観測手法の基礎研究

科学観測に用いられる本格的な大型気球は、厚さ約 20 ミクロンのポリエチレンフィルムで作られ、1 トンを越える大重量ペイロードをつり下げて高度 30-40 km まで飛翔することが可能になる。(我国では安全性に配慮し上限を 500 kg としている。) 現在実用化している最大容積は 20,000 m³ である。上記大型気球以外のシリーズとして、被膜フィルムの厚さが約 1/4 の 5.7 ミクロンを用いた気球が開発されている。搭載機器の重量は 10 kg 程度に制約を受けるが、気球の自重が軽いため 5,000 m³ の容積で高度 42 km に達することができる。30,000 m³ まで実用化されており、50 km 近い高度まで到達可能である。

超高層大気物理を研究する立場からは、気球は正にその中を飛翔するため、観測器を搭載して直接観測ができる有効な手段である。このため、地球環境問題で注目される以前の早い段階から各種の大気観測が行われている。例えば、東京大学の等松等によりすでに 1973 年に微量大気成分実験が行われている⁵⁾。最近では、名古屋大学の近藤等による NO_x 観測実験が CNES との共同実験としてフランス、北欧で実施されており、宇宙科学研究所の伊藤等によって 1983 年より始められた成層圏大気の採取・回収実験は、採取装置を液体 He を用いるクライオサンプリングに発展され、1986 年以来ほぼ毎年実施され成果を上げている。高高度気球を用いた観測としては、オゾンの生成領域である高度 40 km までのオゾン濃度の観測が 1993 年以来福西等により行われている。

本研究では気球を反射体とする大気観測の可能性を検討した。地上からレーザー光を放射し上

層大気の微量成分を観測する方法に差分レーザーレーダーがある。これは、後方散乱を利用して大気層を通過した反射光を検知してオゾン濃度等の測定を行うものである。しかし、後方散乱量は微弱であるため、測定には大出力のレーザーと大口径の光学集光システムが必要となる。気球に反射体を取付けることにより、より強いレーザー反射光を得て、長光路吸収実験が可能になれば、赤外領域においても上層大気の高感度・高精度分光が可能になると考えられる。

こうした方法を実現するには、放射される細いレーザービームを正確に気球に照射するための気球飛翔位置の測位と気球追尾技術の高精度化が必要になる。ここでは、そうした技術的可能性を明かにするための基礎的研究を進めた。

気球本体、またはリトロリフレクターにより反射されるレーザー光の強度が大気測定に十分な強度があるか否かの検討結果を図9に示す⁶⁾。受信望遠鏡の口径を 20 cm、送信ビームの広がりを 1 mrad、気球直径を 5 m、リトロリフレクタの有効口径を 5 cm としている。この結果、小型のリトロリフレクタであっても、気球本体を反射体とするよりも 5 桁以上も大きな信号が得られる。出力 10 mJ の小出力レーザーを用いても、直線距離 35 km 以上まで十分測定が可能な強度があることがわかる。したがって、小型のリフレクタにレーザービームを正確に照射することができれば大気観測が可能である。

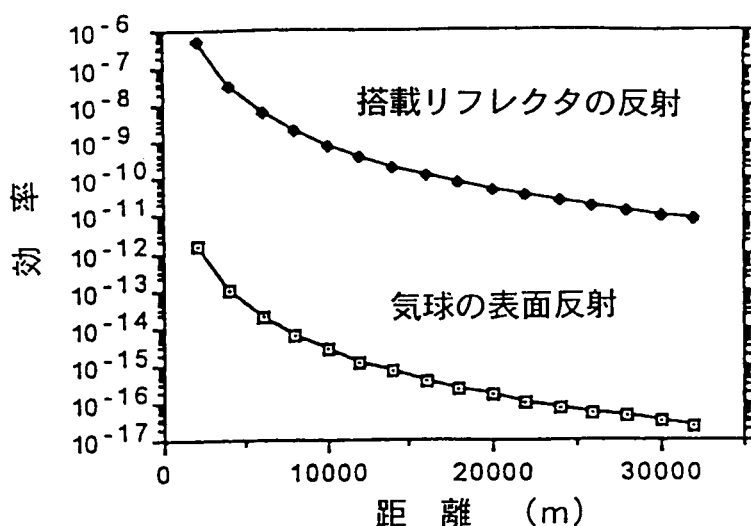


図9 気球から反射されるレーザー光の強度

レーザービーム幅の広がりが 1 mrad (0.05度、約 3 分角) とすると、レーザー光を放射する駆動台座の指向精度が同等の精度でなければならないことになる。

現用の方式では電波による追尾を行っている。気球からの電波を追尾するアンテナのビーム幅は 5~10 度である。そのビーム中心からのずれ角を求め、サーボ機構によりたえず中心を指向するようアンテナの方向を制御する。ビーム幅の 1/1000 まで駆動できるとすると追尾分解能は 0.005~0.01 度であり、絶対精度はその 10 倍の 0.05~0.1 度程度である。また直線距離測定の絶対精度は 300 m 程度である。気球上の送信機とリトロリフレクタとは接近して取付けられるので問題ないが、地上側はアンテナビームとレーザービームとのアライメントを確保しなければならない。レーザーはアンテナとは別の駆動台座上に取付けなければならないため、アライメント

を数分角の精度で確保することは必ずしも容易ではない。このように、既存の気球追尾では、上記大気観測の要求精度にかろうじて入っているが、安定した観測には必ずしも十分な精度ではない。そこで、なんらかの手段によって不足する精度を補う必要がある。以下にその方策であるGPS方式について述べる。

GPSは軌道上の4個以上の衛星からの電波を受信して3次元測位を行い、地図座標上の絶対位置と高度を得るものである。平成6年度にはGPS受信機をB30-65気球に搭載し、その機能確認を行った。GPSに人為的に加えられている誤差要因であるSA (Selectable Availability)の影響が顕著に現われ、誤差は100 m程度であった。レーザービームの1 mradの広がり、10 kmでは10 mであるので、SAの入ったGPS測位では、精度が不足する。そこでこれを改善する方法を考察した。

ア) Differential GPS方式

GPS電波を位置が正確にわかっている基地局で受信すれば、前項で述べた人為的誤差要因であるSAにより発生した測位誤差量を知ることができる。この情報を他のGPS受信機に伝えることが出来ればSAによる誤差量を相殺し本来の精度で測位が可能である。ただし、測位に用いている衛星の組み合わせが異なれば、SAの誤差も異なるので、基地局はその時点で可能なすべての衛星の組み合わせについて補正量を求め伝送する必要がある。

このSA情報の伝送は種々検討されており、すでに海上保安庁により、三浦半島の剣崎から試験的な運用が開始されている。やがては国内全域をカバーする計画である。その場合の海上到達距離は100から200 km程度と想定される。

イ) 逆 Differential GPS

上記Differential GPSを用いるには、従来のGPS受信機に加え、GPS情報を受信する新たな受信機を使用せねばならない。しかし気球実験の場合、GPS受信機は無人で動作しており、そこで正しい位置が出力される必要は必ずしもない。むしろ、GPS受信機のデータをテレメータで受信する基地局でSAの補正が行われ、正しい位置が得られればよい。位置がわかっている基地局では、テレメータで気球からのGPS測位結果を受信すると同時に、基地内にもGPS受信機を置きSAの情報を得て気球からのGPSの測位結果を修正する。こうした方法は、逆Differential GPSと呼ばれる。搭載装置側の負担が少なく、地上局で様々な補正演算を行える利点がある。この場合もDifferential GPSと同様に、気球側のGPSが受信している衛星と同一の衛星を用いて測位せねばならない。また、比較するデータは同一時刻のものでなければならない。地上局側のGPS受信システムはこうした機能を備える必要がある。

平成6年6月にB5-134気球において、この方式によるGPS測位の基礎実験を行った。その実験システムの構成を図10に示す。地上局側には3台のGPS受信機が置かれ、その通信ターミナルを通じてPCと接続され、データの読み取りとGPS受信機の動作モードが制御される。また、PCには気球からのテレメータデータも入力され、搭載GPSのデータを読み取る。

地上受信機の一機は通常を受信を行い、2台目は気球搭載GPS受信機から送られるデータの中に含まれる受信衛星と同一の衛星を利用するようにPCを通じ動作モードを制御し、3台目は気球上のGPS受信機が受信する衛星の予測演算を行なって受信した。実験結果の一例を図11に示す。搭載GPSの出力にはフィルタ処理が加えられているため、同一時間データの比較が十分できず、今後なお改良が必要であるが、図に示すように高度情報でも20 m程度の精度が実現できている。

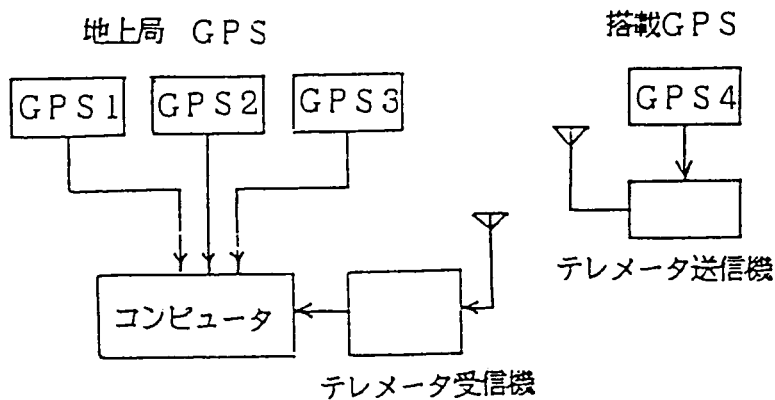


図10 逆 Differential GPS 測位実験システムの構成

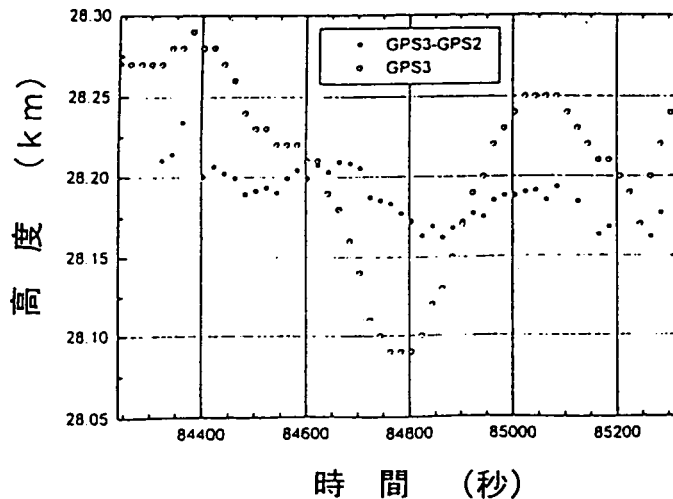


図11 逆 Differential GPS による補正例

ウ) 光学的直接追尾

レーザー光を気球に照射する際、その反射光を検知し直接追尾できれば最も確実な方法となる。そのためには高感度の2次元位置検出センサが必要となる。ここでは、取り扱いが容易な、1画面の走査時間を可変にできる機能を備えたCCDカメラを用いることにする。1画面走査終了後、休止時間を挿入することで光電素子による積分効果で検出感度の増大を図る。

こうしたカメラの適用可能性を検証するため、まず、リトロリフレクタで反射されたレーザー光の強度を星の強度に換算する。放射されるレーザー光と反射光の比率は30km離れて 10^{-11} であるとされる。レーザーの出力を100 mJ とすると 10^{-12} J となる。リトロリフレクタの有効口径を5 cm (面積 20 cm^2) とすれば、反射光のエネルギー密度は、 $5 \times 10^{-14} \text{ J/cm}^2$ となる。他方、星の強度は、0等星で 10^{-12} W/cm^2 であり、1等星毎に1/2となる。前記リトロリフレクタからの反射光を星の強度に換算すると、等級をNとすれば、 $10^{-12} \times 2^{-N} = 5 \times 10^{-14}$ より、 $N = 6.6$ となる。

平成7年8月に放球した B5-134 気球に上記高感度カメラを搭載し、その検出感度の検証実験を行なった。図12 にその構成図を示す。1画面走引が終了した後に休止時間を挿入する。その時間幅は地上からのコマンド信号で変更可能である。1画面走査したデータはデジタルデータとしてメモリに取り込まれた後、標準の走査速度で読み出され、ビデオ信号に変換される。この出力をテレメータで地上に伝送し、動作の確認を行なった。集光レンズは口径 50 mm 焦点距離 85 mm であるので、画角は約5度×5度である。

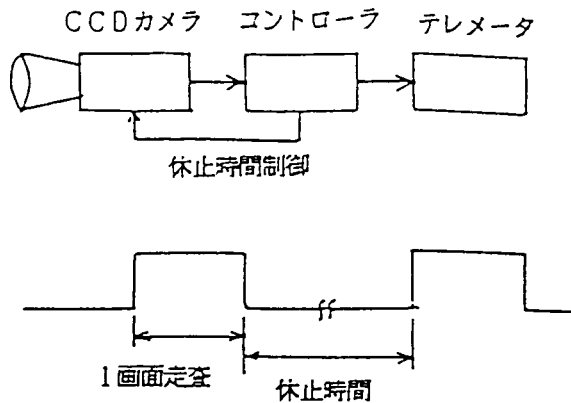


図12 気球搭載高感度カメラの構成

画像出力例を図13に示す。この場合休止時間（積分時間）は4秒であり、より長い積分時間はCCDのピクセル間の暗電流の差による出力が現われてくる。

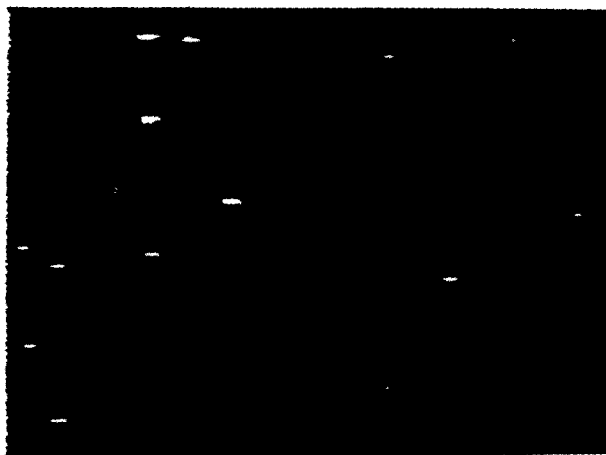


図13 気球搭載カメラによる星像

図のように、1画面に写る星の個数は15 から 20 個程である。全天球上の星の数と明るさの関係

から、画角内に入る星の平均個数を求めると、7等星で15個、8等星で41個であるので検出感度はその間である。気球が30 km離れた場合のレーザー光の強度は6等星と7等星の間であるから、十分その位置を確認できる。気球の飛行中、画面内に反射光の位置を検出できれば、その像を中央に合わせるようにレーザー放射台座を自動的に駆動すれば、正確な測定が可能となる。

4. まとめ

本研究では、下部成層圏を中心とした高度領域における高精度オゾンレーザーレーダー観測の問題点である、エアロゾルの影響の補正に関して、①エアロゾルの影響の補正、②差分吸収レーザーレーダーの波長及び波長差の補正、③ラマン散乱を用いた差分吸収レーザーレーダー、を試みた。その結果、①では、エアロゾル濃度及びその高度方向の勾配が小さい場合には、エアロゾルの光学的性質を前もって与えることで十分補正ができることを明らかにした。また、エアロゾル濃度の大きな場合にエアロゾルの光学的性質及び高精度のエアロゾル鉛直分布を得るための方法としてヨウ素分子の吸収線を利用したフィルターが有用であることを、実験的に明らかにした。また、②については、YAGレーザーの4倍波の重水素誘導ラマン光(289 nm)と水素ラマン光(299 nm)の組み合わせにより高度~15 kmの測定を可能にした。③に関しては、308 nmのXeClエキシマーレーザー光を用いて、高度23 km付近まで観測することを可能にした。

一方、気球の追尾にGPSを用いる可能性について、実験を通じて検討した。その結果、長光路吸収測定用の反射体追尾にも十分適用可能であることを実験的にも明らかにできた。また、レーザー光を用いた光学追尾についても十分な感度があることが示された。

引用文献

- 1) Y. Sasano, H. Nakane, S. Hayashida-Amano, N. Sugimoto and I. Matsui: Multiple-wavelength DIAL and a new analysis technique to deduce the ozone profile without systematic errors due to aerosol effects. Proceedings of the Quadrennial ozone symposium and tropospheric ozone workshop, 743-746 (1989).
- 2) 杉本伸夫, 笹野泰弘, 中根英昭, 林田佐智子, 松井一郎, 湊 淳, 成層圏および対流圏オゾン鉛直分布の測定を目的とする多波長オゾンレーザーレーダーの製作, 応用物理 58, pp.1385-1397, 1989.
- 3) H. Nakane, N. Sugimoto, Y. Sasano and I. Matsui: Ozone Lidar Monitoring, Monitoring Report on Global Environment -1994-, CGER, NIES, CGER-M004-'93.
- 4) P. Piironen, and E.W. Eloranta, Demonstration of a High Spectral Resolution Lidar Based on an Iodine Absorption Filter, Optics Letters, vol.19, No.3, 234-236 (1994).
- 5) 等松他, 東大宇宙研報告 10-1(B) (1974).
- 6) 杉本 他, 宇宙研大気球シンポジウム集録 (1993).

国際共同研究等の状況

共同研究名 NDSCカウンターパート NDSC運営委員会（米国、英国、フランス、ニュージーランド等の研究者により構成）

参加・進捗状況 1993年9月20-21日に米国ジェット推進研究所で開催された運営委員会に参加。国立環境研究所オゾンレーザーレーダー観測が正式にコンプリメンタリー観測として受理される。NDSC運営委員会メンバー。

1994年10月18-20日にニュージーランドで開催された運営委員会に参加。

1994年8月につくばにおいてNDSCライダーワークショップを開催した。

1995年10月11-13日にベルギーのルーバンで開催された運営委員会に参加。

成果発表の状況

杉本伸夫, 中根英昭, レーザーレーダーによる成層圏オゾン層の観測, 環境と測定技術 20, pp. 6-13 (1993).

杉本伸夫, 湊 淳, 地上気球間レーザー長光路吸収法による大気微量分子の高度分布測定の検討, 大気球シンポジウム (平成5年度), 宇宙科学研究所 pp. 60-63 (1993).

H. Nakane, N. Sugimoto, S. Hayashida, Y. Sasano, and I. Matsui, Five Years Lidar Observation of Vertical Profiles of Stratospheric Ozone at NIES, TSUKUBA (36°N, 140°E), 17th Int. Laser. Radar Conf., Sendai, (1994).

松井一郎, 杉本伸夫, 差分吸収ライダーによる対流圏オゾンの観測, 第17回レーザーセンシングシンポジウム, 蒲郡, pp. 83-84 (1995).

松井一郎, 杉本伸夫, 対流圏オゾンライダーの開発, 第3回大気ライダーシンポジウム, 名古屋 (1995).