

A. オゾン層の破壊

A-3. 新型レーザーレーダー計測技術の開発に関する研究

(1) 衛星利用レーザーレーダー長光路吸収計測技術の開発に関する研究

① 分光計測法の開発

研究代表者

国立環境研究所

杉本 伸夫

環境庁 国立環境研究所

地球環境研究グループ

衛星観測研究チーム

笹野 泰弘

大気圏環境部

高層大気研究室

杉本 伸夫・松井 一郎・湊 淳

平成2-6年度合計予算額 133,391千円

(6年度当初予算額 28,775千円)

〔要旨〕大気微量分子の高感度の計測手法である衛星利用レーザー長光路吸収法に基づく分光計測システム技術を確立することを目的として、衛星搭載リフレクターの開発、分光計測手法の開発、分光計測用狭帯域炭酸ガスレーザー技術の開発、分光計測用レーザー送受信システムの開発、データ解析アルゴリズムの開発、衛星追尾システムのインターフェイス技術の開発を行った。本研究により、1996年に打ち上げ予定のADEOS衛星搭載リフレクター(RIS)による大気微量分子の分光計測のための技術を確立した。これに基づいてRISおよび地上システムが設計製作が行われた。

〔キーワード〕大気微量分子、レーザー長光路吸収法、衛星搭載リフレクター、RIS、ADEOS衛星

1. 序

人工衛星を利用した地上衛星間のレーザー長光路測定は、成層圏オゾンおよびオゾン破壊に関連する大気微量成分や炭酸ガス、メタンなどの温室効果気体の測定手法として期待される。この手法は、従来の太陽光を光源とした分光観測手法と比べて感度が高く、昼夜ともに同じ方法で観測が可能である点に大きな特長がある。環境庁では、1996年春打ち上げのADEOS衛星にリトロリフレクター(RIS)を搭載し、地上から送信したレーザー光を反射させ、地上と衛星との往復の光路で長光路吸収法により大気微量分子の観測を行う計画である。本研究はRISを用いた観測のための分光計測手法および基礎技術を確立することを目的とする。平成4年度までの前期3年間では、分光計測のための要素技術の研究を行い、平成5-6年度の後期2年間ではこれらの技術に基づく分光計測技術と、衛星追尾技術を合わせて計測システムとして完成させるための研究を行った。この研究により、同位体炭酸ガス( $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ,  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ )を用いたTEA炭酸ガスレーザーを光源として、衛星の進行に伴う反射光のドップラーシフトを利用して波長掃引を行う分光計測手法を開発し、オゾン、フロン12、 $\text{HNO}_3$ 、炭酸ガス、 $\text{CO}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、メタンなどを測定するシステムの基礎技術を確立した。また、オゾン、メタンについては吸収線幅の気圧依存性を利用した反転法により高度プロファイルを、その他の分子については気柱全量を

求めるデータ解析アルゴリズムを確立した。

## 2. 研究目的および研究方法

衛星利用レーザー長光路吸収法では、図2-1 に示すように地上局から衛星搭載リフレクターにレーザーを発射し、反射されたレーザー光を地上局で受信する。往復の光路でレーザー光が受ける大気による吸収を測定し、そのスペクトルから大気中の微量分子の濃度を求める。計測システムは、衛星搭載リフレクターと地上システムで構成される。さらに、地上システムは図2-1 に示すように分光計測用のレーザー送受信装置と衛星光学追尾装置から構成される。衛星利用レーザー長光路吸収測定では、衛星リフレクターを精度良く連続して追尾することが必要であるためレーザーの反射光を用いた能動追尾が必要である。この能動追尾に関する研究は課題A-3(1)②で通信総合研究所が担当した。本研究課題では衛星搭載リフレクター技術、分光計測システム技術、データ解析手法を対象として研究を進め、さらに分光計測システムと追尾システムのインターフェイス技術の研究を行い、計測システム全体としての技術の確立を目指した。

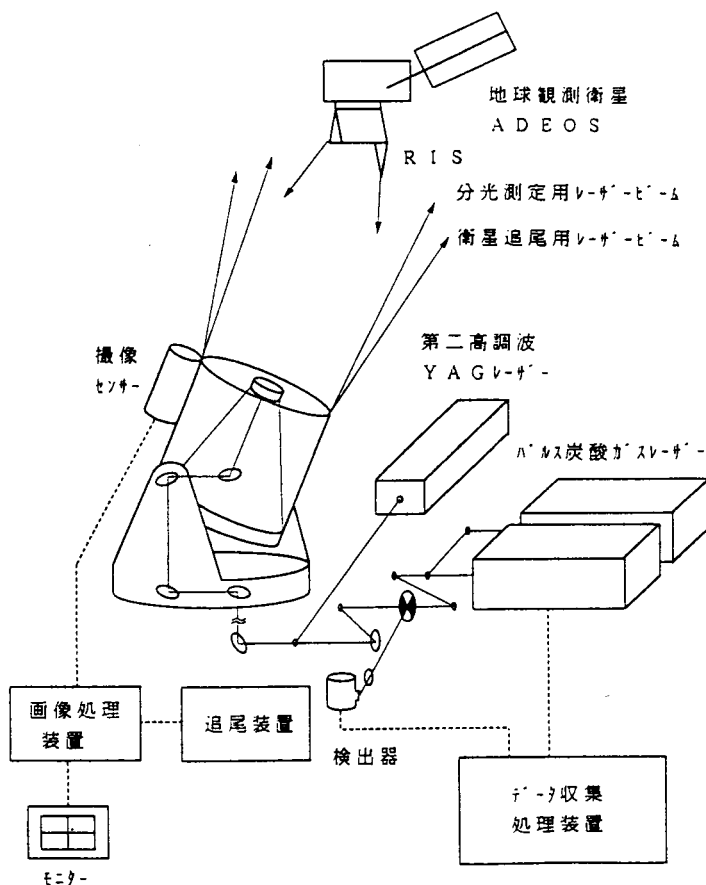


図 2-1 衛星利用レーザー長光路吸収システム

## 3. 研究成果

### 3. 1 衛星搭載リフレクターの開発

分光計測に用いる衛星搭載リフレクターは、単一素子で口径が大きいことが必要である。衛星

レーザー測距では通常、多数の小型のリフレクタープリズムを組み合わせたリフレクターアレイが用いられるが、分光計測ではアレイの素子間の干渉がスペクトルの雑音をもたらすので単一素子であることが重要である。また、赤外光で分光計測を行うために、リフレクターはコーナプリズムではなく、3枚の平面鏡を直角に組み合わせた空洞型のものであることが要求される。また、回折拡がり considering リフレクターの口径は大きくする必要がある。

3枚の平面鏡を直角に貼り合わせたリフレクターはどの方向から入射した光も正確に逆方向に反射する性質を持つ。しかし、リフレクターを搭載した衛星が高速で進行する場合、相対論的効果によって反射光の方向が入射光の方向とずれる光行差と呼ばれる現象が生じる。そこで、3枚の鏡の一枚にわずかな曲面を導入し、また、鏡面間の角度も直角からわずかにずらせる手法を開発し、地上局に効率良く反射光が戻るように設計した。図3.1-1 にこの手法を用いて設計されたADEOS搭載RISの構造を示す。鏡面の一辺の長さは約35cmである。1面のみが曲率半径13,900 mの球面である。表3.1-1 にRISの諸元を示す。表に掲げた反射効率 $\eta$ は、次式によって受信光強度 $P$ が算出されるように定義される。表の値はRISに正面から光が入射する場合の $\eta$ である。

$$P = (16/\pi^2) (P_0/\theta_t^2) T^2 \eta_{RIS} A_r \eta_{sys} \eta \quad (3.1-1)$$

ここに、 $P_0$ 、 $\theta_t$ 、 $T$ 、 $\eta_{RIS}$ 、 $A_r$ 、 $\eta_{sys}$  はそれぞれ送信光の強度、ビーム拡がり、大気の透過率、RISの反射率、受信望遠鏡の口径、受信システムの効率である。RISの反射光の強度を波長532nmにおいて既存の測地衛星と比較すると、最も明るいAjisaiとくらべてもRISが10倍以上明るい。さらに、RISは赤外領域でも高い反射率を持つ。

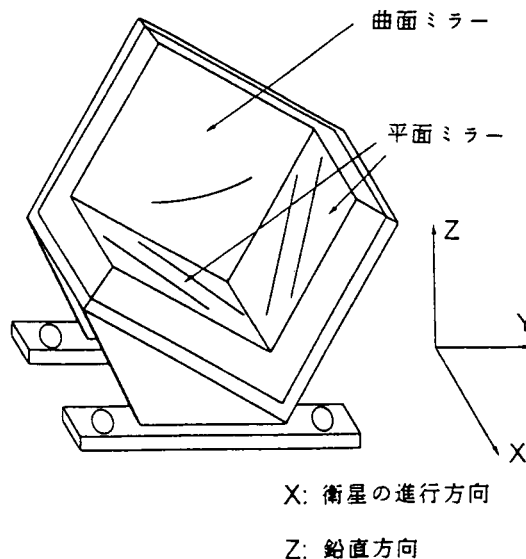


図 3.1-1 RISの構造

RISの曲面の曲率等のパラメータは、理論的な反射波面から地上における反射ビームのパタ

ンを計算し、さらに、地上局における受信強度を衛星の位置の関数として求め、観測可能な領域ができる限り広くとれるようにパラメータを最適化した。R I Sは、A D E O S衛星の座標で光軸の方向余弦が(0.508, -0.279, 0.815)となるように設置される。地上局からレーザーを送受信するときのR I Sの効率を、地上局に対する衛星の相対位置の関数として図3.1-2に示す。ここに表示されている量は3.1-1式で定義された $\eta$ である。R I Sを用いた観測はA D E O S衛星が、図3.1-2に示す領域を通過するときに行われる。

表3.1-1 A D E O S搭載R I Sの諸元

有効口径	50 cm
反射率	0.8 以上
波長範囲	0.35-14 $\mu\text{m}$
反射光の有効拡がり	80 $\mu\text{rad}$ (全角)
反射効率	$5 \times 10^{-17}$ (532 nm)
	$3 \times 10^{-17}$ (10 $\mu\text{m}$ )
重量	44 kg

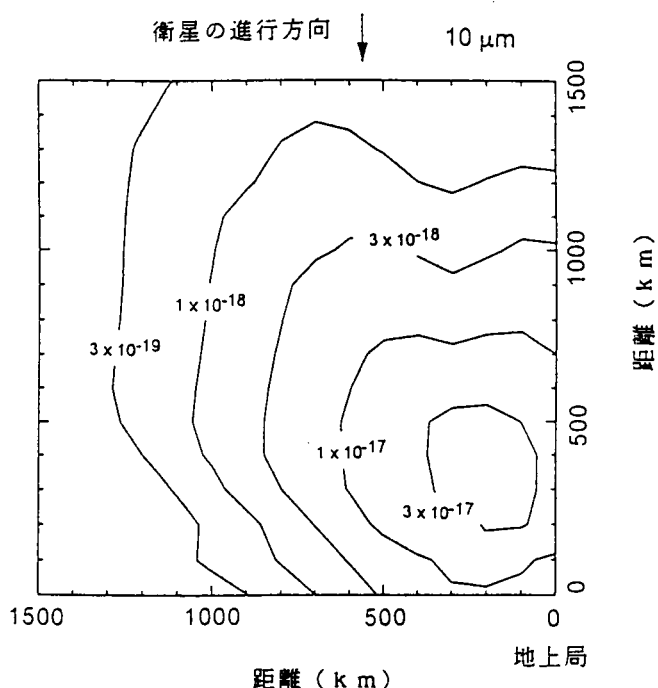


図 3.1-2 R I Sの反射効率

本研究ではさらに、製作されたリフレクターの反射波面の測定方法および測定された波面から鏡面の貼り合わせの精度を評価する手法を開発した。衛星リフレクターが用いられる衛星軌道上では無重力状態であるので無重力状態におけるリフレクターの反射特性を測定する必要があるが、

地上における測定では重力による歪みが避けられない。小さな口径のリフレクターの場合、リフレクターを上に向けた場合と下に向けた場合の干渉縞を測定して、それらを平均することによって無重力状態の反射波面を推定することができる。しかし、口径が大きい場合この方法は適用困難である。そこで、リフレクターを光軸のまわりに回転できるように水平に設置し、6つの回転方向で干渉縞を測定し、測定された6つの干渉縞から鏡面の形状に依存する成分（リフレクターの回転とともに回転する）と歪みの成分（回転しない）を分離することによって無重力状態のリフレクターの反射波面を求める方法を開発した。また、この方法によって重力による歪の大きさも評価できる。この手法は、ADEOS搭載RISの光学試験に応用された。

### 3. 2 分光計測用レーザー送受信システム

衛星搭載リフレクターを用いたレーザー長光路吸収観測のための地上システムは、既に図2-2に示したように、高精度の光学追尾装置と分光計測用のレーザー送受信装置から構成される。分光計測の手法には、光源とするレーザーの種類に応じて色々な方法が考えられるが、本研究では、衛星の進行に伴う反射光のドップラーシフトを利用する手法を開発した。ADEOS衛星搭載RISによる観測の場合、観測時にはADEOS衛星は地上局に向かって進行するのでRISによる反射光は送信したレーザー波長よりも短波長側にシフトする。また、この波長シフトの大きさは衛星の位置に依存する。従って、レーザー波長を測定対象の吸収線の近傍の適当な波長に設定しておけば反射波長の変化を利用して高分解の吸収スペクトルが測定される。分光計測用レーザー送受信システムでは2台のパルス炭酸ガスレーザーを使用する。1台は測定対象の吸収線に近い発振線に同調し、ドップラーシフトを利用して大気吸収スペクトルを測定する。もう1台は吸収の少ない発振線に固定して大気効果やRISの反射率の変化などの影響を取り除くための参照信号を測定する。さらに、適当な吸収線がある場合、一回の測定の中で吸収測定用のレーザーをいくつかの発振線の間で切り替えることによって、広い範囲のスペクトル情報を得ることができる。炭酸ガスの同位体 ( $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ 、 $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ) を用いたパルス炭酸ガスレーザーとその第二、第三高調波を用いる場合、この手法で測定可能な分子とレーザー波長を表3.2-1に掲げる。

このような測定を実現するためには、狭帯域でかつ発振線をすばやく切り替えることが可能な炭酸ガスレーザーが必要である。また、炭酸ガスレーザーの第二、第三高調波の発生技術が必要である。そこで、本研究では、時間ゲートゲインセル法という新しい手法を開発し、単一縦モード動作による狭帯域化と発振線の急速な切り替えを両立させた。一方、非線形光学結晶 $\text{AgGaSe}_2$ を用いて第二、第三高調波の発生を行った。

開発した手法を用いた炭酸ガスレーザー2台を光源としてレーザー送受信システムを設計製作した。システムのブロック図を図3.2-1に示す。システムは光源の他、検出システム、追尾システムとのインターフェイスのための光学系、検出システム、データ収集システムから構成される。観測では、信号用、参照用の2台のレーザーから送信されるパルスの波形とそれぞれの受信信号波形の合計4つの波形を記録する。レーザーの繰返しは50Hzと高速とした。そこで、メモリー長の長いディジタイザを2台切り替えて、レーザーの1ショット毎に4つの波形を記録する。受信信号の検出は直接検波で行う。基本波(10 $\mu\text{m}$ 帯)ではHgCdTe、第二高調波(5 $\mu\text{m}$ 帯)、第三高調波(3 $\mu\text{m}$ 帯)ではInSbを用い、冷却した光学バンドパスフィルターを用いることによって雑音を低減した。

表3.2-1 測定対象分子と炭酸ガスレーザー発振線

測定対象 分子	レーザー 発振線	CO <sub>2</sub> 同位体	波数 (cm <sup>-1</sup> )
O <sub>3</sub>	P(18)	636	1002.4778
	P(20)	636	1000.6473
CO <sub>2</sub>	P(26)	626	938.6883
	R(36)	636	938.7776
HNO <sub>3</sub>	P(8)	636	907.0528
CFC12	R(6)-	636	918.74-
	R(12)	636	923.11
CO	R(28) SH*	626	2166.96
	R(30) SH	626	2169.27
N <sub>2</sub> O	R(38) SH	626	2178.002
CH <sub>4</sub>	R(14) TH*	626	2915.79
	R(16) TH	626	2919.87
参照用	R(34)	636	937.5844
	R(8) SH	626	2140.925
	R(26) TH	626	2939.12

\*SH, 第二高調波; TH, 第三高調波.

衛星からの反射光の受信ではレーザーパルスが地上に戻るまでの時間遅れを考慮してデータ収集システムにトリガ信号を与える必要がある。そこで、衛星の軌道情報に基づいてタイミングを発生するシステムを開発した。このシステムでは測定の前にはあらかじめ時刻と衛星までの距離に相当する時間遅れの早見表を計算機内に作成しておき、この早見表に従って遅延信号を発生する。なお、衛星軌道予測値の誤差が衛星の進行方向に大きいことを考慮し、早見表の時刻軸を実測の時間遅れに基づいて補正する機能を持たせた。

分光計測用レーザー光は追尾用レーザー光とともに追尾システムを通して衛星に送信され、反射光も追尾システムを通して検出器に導かれる。そこで、それぞれのビームの口径や、形状、ビームウエストの位置などを最適化する必要がある。図3.2-2 に通信総合研究所の追尾装置の光学系を示す。分光計測用レーザー送受信システムからの赤外光は口径 1.5m の主望遠鏡から送受信する。赤外光のビーム拡がりには 0.1 mrad であるが、受信の視野を確保するために、送信ビームは約 10km の距離に絞るように送信するよう設計した。このときビームウエストでのビーム径は 10cm 程度で安全上の問題はない。10kmより先ではビームは 0.1mradで拡がる。ビームを絞って送信するように副鏡の位置を調整することによって、受信光が追尾システム内の光学パス（クーデパス）の中で絞られることによるため、受信の視野を広く取ることができる。一方、追尾用レーザーはクーデパスの中で拡げ、主望遠鏡から送信するよう設計した。

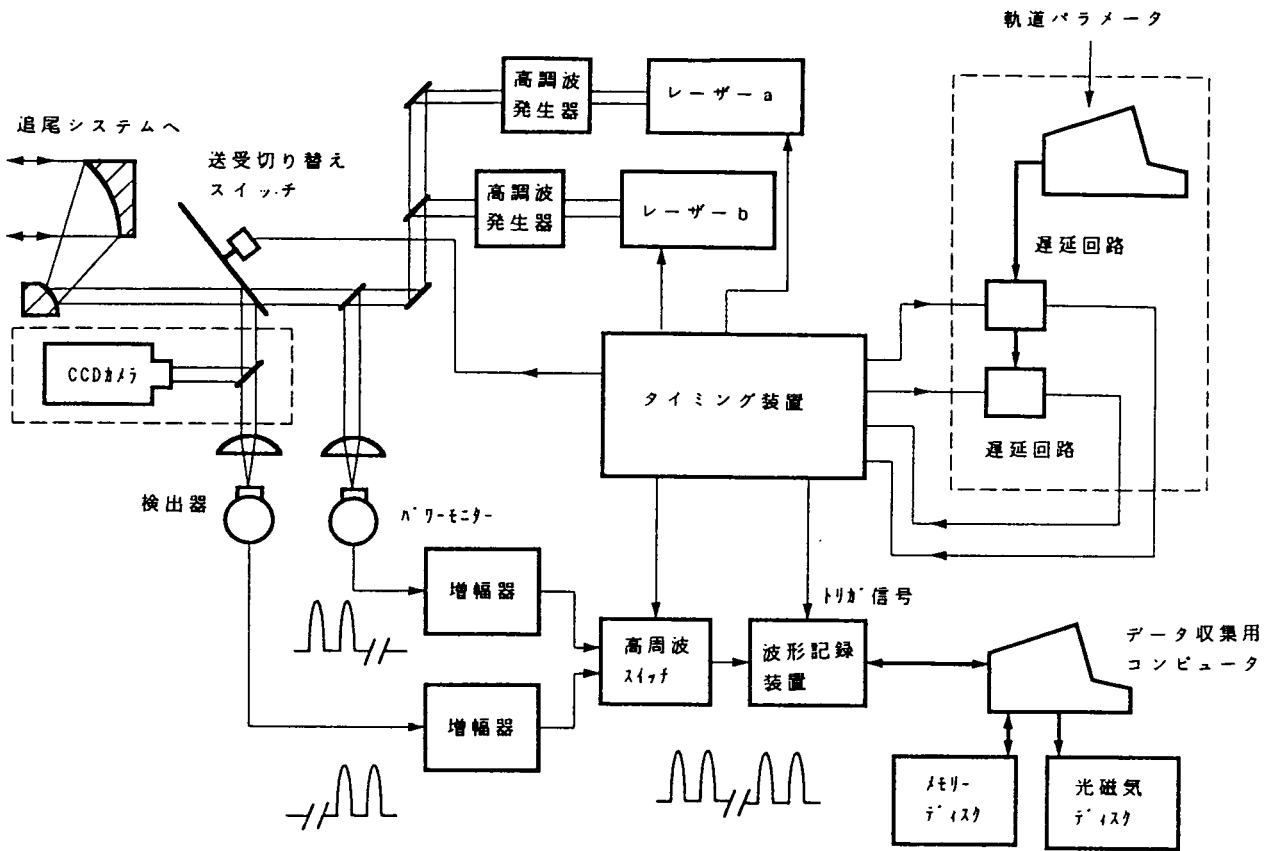


図3.2-1 レーザー送受信システムのブロック図

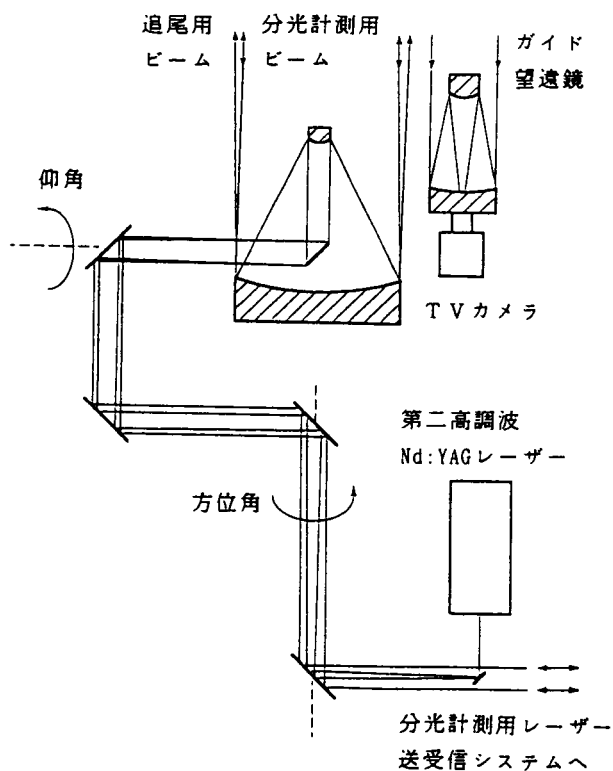


図3.2-2 衛星追尾システムの光学系

図3.2-2 中のカメラは素追尾用のカメラ（視野約1 mrad）である。これとは別に精追尾用のカメラを図3.2-1 に示すレーザー送受信システムの検出器の前に設けた。このカメラの視野角は約 0.2mradである。表3.2-2 に主な諸元をまとめて示す。

表3.2-2 レーザー送受信システムの諸元

レーザーパルスエネルギー (mJ)	100 (10 μm)
	10 (5 μm)
	5 (3 μm)
	100 (532nm)
ビーム拡がり角 (mrad)	0.1 (3-10 μm)
	3 (532nm)
パルス繰り返し数 (Hz)	50 (10, 5, 3 μm)
	16.7 (532nm)
受信望遠鏡口径 (m)	1.5
光学系の効率	0.01
検出器の検出能 $D^*$ (cmHz <sup>1/2</sup> /W)	$7 \times 10^{10}$ (10 μm)
	$1 \times 10^{11}$ (5 μm)
	$6 \times 10^{10}$ (3 μm)
検出器面積 (cm <sup>2</sup> )	0.001
検出器量子効率	0.6
信号処理時定数 (μs)	1

### (3) データ解析手法

衛星搭載リフレクターを用いた測定は原理的には地上から衛星までの大気の高分解能の吸収スペクトルの測定である。データ処理では、往路と復路のレーザー波長が異なること、光路長が測定の間に変化することなどを考慮する必要があるが、基本的には反転法または最小自乗法を適用することができる。本研究で開発した分光測定手法では炭酸ガスレーザーを光源とし、リフレクターを搭載した衛星が動くことによる反射光のドップラーシフトを利用してスペクトル測定を行う。炭酸ガスレーザーは2台用い、基本的には1台を吸収スペクトル測定に、1台を参照用に用いる。

いま、それぞれのレーザー波長を  $\lambda_s$ 、 $\lambda_r$  とする。測定ではそれぞれのレーザーについて、送信されたレーザーパルスの強度とリフレクターで反射され受信されたレーザーパルスの強度の合計4つの信号をそれぞれのレーザーショットについて記録する。これらを、 $P_{s10}$ 、 $P_{r10}$ 、 $P_{s1}$ 、 $P_{r1}$  と表わす。ここに  $i$  はショット番号を表わすものとする。求めるべき測定対象分子の高度分布を  $q(z)$ 、測定対象分子の高度毎の吸収断面積を  $\sigma(\lambda, z)$  と書くと、測定量との間に次式の関係がある。

$$\ln\{(P_{s1}P_{r10})/(P_{r1}P_{s10})\} \quad (3.3-1)$$



$$= \ln(C_s/C_r) + \int (q(z) \{-\sigma(\lambda_s, z) - \sigma(\lambda_{s,i}, z) + \sigma(\lambda_r, z) + \sigma(\lambda_{r,i}, z)\} / \sin \theta_i) dz$$

$$+ \tau / \sin \theta_i$$

ここに、 $C_s$ 、 $C_r$  は2台のレーザーに関するシステム定数、 $\theta$  は地上局から衛星を見た時の仰角である。 $\tau$  はエアロゾル散乱や連続帯吸収による $\lambda_s$ と $\lambda_r$ における光学的厚さの差を表わす。右辺の積分の項の括弧の中の第1、第3項が送信光に対する吸収を、第2、4項が反射光の吸収を表す。反射光の波長はドップラーシフトにより変化する。

いま、

$$y_i = \ln\{(P_{s,i}P_{r,i0})/(P_{r,i}P_{s,i0})\} \quad (3.3-2)$$

と定義し、ベクトル $Y$ 、行列 $A$ 、ベクトル $X$ を以下のように書くと上の関係式は、

$$Y = AX \quad (3.3-3)$$

と表わされる。ここに、

$$Y = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{vmatrix} \quad (3.3-4)$$

$$A = \begin{vmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n}k_{11} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n}k_{21} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m1} & w_{m2} & \cdots & w_{mn}k_{n1} \end{vmatrix} \quad (3.3-5)$$

$$w_{ij} = \{-\sigma(\lambda_s, z_j) - \sigma(\lambda_{s,i}, z_j) + \sigma(\lambda_r, z_j) + \sigma(\lambda_{r,i}, z_j)\} \Delta z_j k_i \quad (3.3-6)$$

$$k_i = 1/\sin \theta_i \quad (3.3-7)$$

$$X = \begin{vmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \\ \tau \\ \ln[C_s/C_r] \end{vmatrix} \quad (3.3-8)$$

である。すなわち、観測量  $Y$  が既知の行列と求めるべき  $X$  の積で表されている。従って、一般的な反転法が適用できる。

実際の測定では、それぞれのレーザーの発振波長を複数の発振線にわたって順次切り替えることも想定しているが、この場合、 $A$  をそれぞれの発振線毎に次式のように分けて書くことによって同様に扱うことができる。

$$A = \begin{array}{|c|} \hline A_1 \\ \hline A_2 \\ \hline \cdot \\ \hline A_k \\ \hline \end{array} \quad (3.3-9)$$

高度分布を求めるための反転法のアルゴリズムについては特異値分解法、最ゆう法などを検討した結果、特異値分解法が良好であることがわかった。

オゾンの測定に対するシミュレーションの結果を以下に紹介する。図3.3-1 は標準的なオゾンプロファイルを仮定して計算したシミュレーションデータである。横軸は測定時間すなわちレーザーのショット番号に相当する。縦軸は受信信号のショット当たりの光子数である。P(18) と P(20) が吸収線測定用のレーザー（レーザー a）の発振線で、この測定では2つの発振線を1秒（50ショット）毎に切り替えている。P(34) は参照用レーザーの発振線である。ドップラーシフトを受けた反射光の波長は時間とともに変化するので、図3.3-1 はそれぞれの発振線の近傍の吸収スペクトルを表している。P(18) と P(20) の信号に見られる窪みがオゾンの吸収である。このシミュレーションデータに上に述べたアルゴリズムを適用して高度プロファイルを導出し、仮定したプロファイルと比較したものを図3.3-2 に示す。

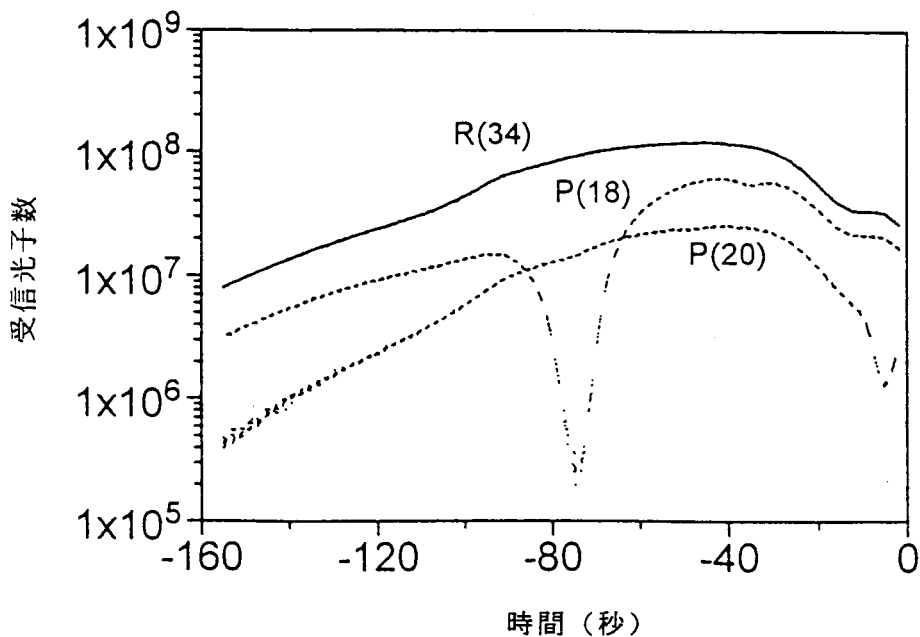


図 3.3-1 受信信号のシミュレーション結果

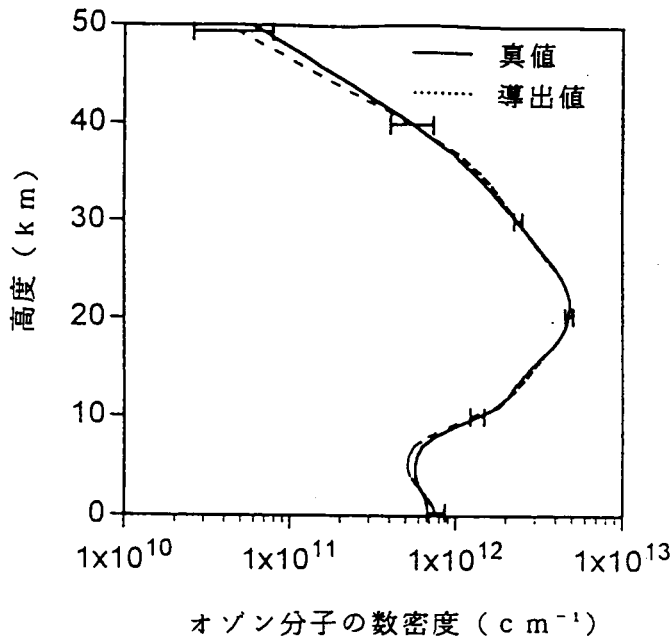


図 3.3-2 シミュレーションデータから導出したオゾン高度分布

メタンについても同様の方法で高度分布が導出される。測定データの誤差を含めたシミュレーションによって評価した濃度誤差を表3.3-1 と表3.3-2 に示す。なお、解析アルゴリズムについては現在も改良を進めているので測定誤差は今後さらに低減される可能性がある。

カラム全量の導出についても (3.3-3)式は同じであるが、この場合は相対的な高度分布の形を仮定し比例係数に相当するひとつのパラメータを最小自乗法で決定する。フロン12の場合も式の上では同様であるが、吸収が連続的であるためドップラーシフトを用いた高分解のスペクトルはほとんど意味を持たない。そこで、レーザー a を吸収断面積が十分に異なる 4 本の発振線にわたって切り替える。カラム濃度の測定における誤差の評価の結果を表 3.3-3 に掲げる。さらに、オゾンとフロン12などを一度の観測で同時に測定する場合についても誤差の検討を行った結果、ひとつの分子を測定する場合と比べて測定感度が大きく低下することはないことが示された。

#### 4. まとめ

本研究では、衛星利用レーザー長光路吸収法による大気微量分子の測定のための基礎技術を確立した。本研究の主な成果は、曲面を含むリトロリフレクターの光学設計と光学試験方法の確立、衛星の進行に伴うドップラーシフトを利用した大気分光観測手法の開発、この手法のための単一縦モードでかつ急速にライン切り替え可能な炭酸ガスレーザー技術の開発、データ解析アルゴリズムの確立、衛星追尾システムと組み合わせた観測システムの構築のためのインターフェイス技術の開発などである。本研究の成果にもとづいて、ADEOS搭載リトロリフレクターRISの光学設計が行われ、また、地上レーザー送受信システムの設計、製作が行われた。

表 3.3-1 オゾン高度分布測定誤差

高度 (km)	不規則誤差 (%)	系統的誤差 (%)
0	1.2	29
10	1.0	-11
20	0.6	0.1
30	0.4	1.2
40	0.6	-2.1
50	2.6	13

表 3.3-2 メタン高度分布測定誤差

高度 (km)	不規則誤差 (%)	系統的誤差 (%)
0	0.9	2.2
10	1.0	-0.2
20	2.9	0.6
30	4.6	-0.6
40	8.0	-5.8
50	5.6	-11

表 3.3-3 カラム全量の測定誤差

分子	不規則誤差 (%)	系統的誤差 (%)
CFC12	0.6	1.4
HNO <sub>3</sub>	6.3	1.3
CO <sub>2</sub>	0.2	-0.2
N <sub>2</sub> O	0.2	1.8
CO	1.8	-

## 5. 国際共同研究等の状況

本研究課題と関連するA D E O S計画において、宇宙開発事業団、環境庁、通産省の共同でリサーチ・アナウンスメント(J R A)が発出された。これに対する海外からの提案課題のうちR I Sについては次の4課題が採択され、国際共同研究の体制を調整中である。

1. Laser Ranging and Atmospheric Measurement Using RIS from the UK,  
(Principal Investigator) M. J. T. Milton (NPL, U. K.)
2. Dual color Satellite Laser Ranging Measurements Using RIS,  
(P. I.) U. Schreiber (Tech. Univ. Munchen)
3. Retrieval of Vertical Profiles and Column Amounts of Atmospheric Constituents  
from High Resolution Spectra Taken by RIS Experiment  
(P. I.) F. J. Murcray (Univ. Denver)
4. Elaboration of Information Retrieval System for Analysis of the CO<sub>2</sub>-Laser  
Radiation Extinction by the Atmospheric Gases  
(P. I.) O. K. Voitsekhovskaya (Tomsk State Univ.)

## 6. 研究発表の状況

### (1) 誌上発表 (○は査読誌)

- 1) A. Minato, N. Sugimoto, and Y. Sasano: Retroreflector in Space (RIS) for Japanese satellite ADEOS: Measurement of Atmospheric Trace Species Based on Earth-Space-Earth Laser Long-Path Absorption, EOS Trans. Am. Geophys. Union **71** (1990) 930.
- 2)○ 湊 淳, 杉本伸夫, 笹野泰弘: ADEOS搭載リトロリフレクター(RIS)の設計, 日本リモートセンシング学会誌, **11** (1991) 225-234.
- 3)○ 湊 淳, 杉本伸夫, 笹野泰弘: 衛星搭載リトロリフレクター(RIS)を用いた大気微量分子の分光測定法, レーザー研究, **19** (1991) 1153-1163.
- 4)○ A. Minato, N. Sugimoto, and Y. Sasano: Optical Design of Cube-Corner Retroreflectors Having Curved Mirror Surfaces, Appl. Opt: **31** (1992) 6015-6020.
- 5)○ R. J. Nordstrom, L. J. Berg, A. F. DeSimone, and N. Sugimoto, Time-Gated Gain Cell for Frequency-Stable, Single-Longitudinal-Mode Operation of a TEA CO<sub>2</sub> Laser, Rev. Sci. Instr. **64** (1993) 1663-1664.
- 6) N. Sugimoto, A. Minato, and Y. Sasano: Laser Long-Path Absorption Experiment with the Retroreflector in Space(RIS) for the ADEOS Satellite, in Optics for Protection of Man and Environment Against Natural and Technological Disasters, Elsevier Science Publishers, (1993) pp.39-42.
- 7)○ 杉本伸夫, 地上衛星間レーザー長光路吸収測定用リトロリフレクター(RIS), 日本リモートセンシング学会誌 **13**, (1994) 376-380.
- 8)○ R. J. Nordstrom, L. J. Berg, A. F. DeSimone, and N. Sugimoto: Single-Longitudinal-Mode Operation of a TEA CO<sub>2</sub> Laser Using a Time-Gated Gain Cell, Rev. Laser Engineering **22** (1994) 54-61.
- 9)○ N. Sugimoto and A. Minato: Method for Measuring Dihedral Angles of a Cube-Corner Retroreflector Having Curved Mirror Surfaces, Optical Engineering **33** (1993) 1187-1192.
- 10)○ N. Sugimoto, A. Minato, K. Ozawa, Y. Saito, and A. Nomura: Theoretical Evaluation of Earth-to-Satellite Laser Long-Path Absorption Measurement of Atmospheric Trace Species in the Infrared Region, Jpn. J. Appl. Phys. (1995). (in press)
- 11)○ A. Minato, N. Sugimoto, Z. Bleier, G. C. Hunter, and J. Paul: Measurement of Dihedral Angle Errors of a Large-Aperture Space Retroreflector: Separation of the Effect of Sag Due to Gravity, Optical Rev. (1995). (in press)
- 12)○ N. Sugimoto, A. Minato, T. Itabe: Plan for the Laser Long-Path Absorption Experiment Using the Retroreflector in Space (RIS) for the Advanced Earth Observing Satellite (ADEOS), submitted to IEICE Trans. Commun. (1995).

(2) 学会、国際会議等

- 1) N. Sugimoto: Development of Retroreflector in Space (RIS), 2nd ADEOS Symp., Tokyo, 1990.
- 2) N. Sugimoto, A. Minato, and Y. Sasano: Retroreflector in Space (RIS) for Japanese Satellite ADEOS: Measurement of Laser Long-Path Absorption between Ground Station and Satellite, 15th Int. Laser Radar Conf, Tomsk, 1990.
- 3) A. Minato, N. Sugimoto, and Y. Sasano: Retroreflector in Space (RIS) for Japanese satellite ADEOS: Measurement of Atmospheric Trace Species Based on Earth-Space-Earth Laser Long-Path Absorption, Int. Geophys. Union Kanazawa Conf. Kanazawa, 1990.
- 4) 杉本伸夫, 湊 淳, 笹野泰弘: 地上衛星間レーザー長光路吸収測定用リトロリフレクター (ADEOS搭載RIS) の設計, 応用物理学会, 盛岡, 1990.
- 5) 杉本伸夫, 湊 淳, 笹野泰弘: ADEOS衛星搭載リトロリフレクター (RIS) を用いた大気微量分子のレーザー長光路吸収測定, リモートセンシングシンポジウム, 東京, 1990.
- 6) 湊 淳, 杉本伸夫, 板部敏和, 笹野泰弘: 大気微量分子のレーザー長光路吸収測定を目的とする人工衛星ADEOS搭載リトロリフレクター (RIS), 地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 東京, 1990.
- 7) 湊 淳, 杉本伸夫, 笹野泰弘: ADEOS衛星搭載RIS (リトロリフレクター) を用いた分光測定手法の検討, 応用物理学会, 盛岡, 1990.
- 8) N. Sugimoto, A. Minato, and Y. Sasano: Retroreflector in Space for the ADEOS Satellite, Conf. Lasers & Electro-Optics (CLEO'91), Baltimore, 1991.
- 9) 杉本伸夫, 湊 淳, 笹野泰弘: ADEOS衛星搭載リトロリフレクター (RIS) を用いる大気微量分子のレーザー長光路吸収測定, 第14回レーザーセンシングシンポジウム, 仙台, 1991.
- 10) 杉本伸夫, 湊 淳, 笹野泰弘, 大島裕之: ADEOS搭載RISを用いる大気微量分子の分光測定手法の開発, リモートセンシングシンポジウム, 東京, 1991.
- 11) 湊 淳, 杉本伸夫, 笹野泰弘: 人工衛星搭載リトロリフレクター (RIS) を用いた大気微量分子測定手法の検討, 応用物理学会, 平塚, 1991.
- 12) 湊 淳, 杉本伸夫, 笹野泰弘: ADEOS衛星搭載リトロリフレクター (RIS) を用いたレーザー長光路吸収法による大気微量分子測定, 環境科学会, 東京, 1991.
- 12) N. Sugimoto, A. Minato, and Y. Sasano: Spectroscopic Method and Data Reduction Algorithm for Laser Long-Path Absorption Measurements Using RIS, Asia-Pacific ISY Conference, NASDA CM-199-2 (1992) 59-62.
- 14) N. Sugimoto, A. Minato, and Y. Sasano: Spectroscopic Method for Laser Long-Path Absorption Measurements Using Retroreflector in Space (RIS), 16th Int. Laser Radar Conf., Cambridge, MA, 1992.  
Asia-Pacific ISY Conference, NASDA CM-199-2 (1992) 59-62.

- 15) N. Sugimoto, A. Minato, and Y. Sasano: Laser Long-Path Absorption Experiment with the Retroreflector in Space(RIS) for the ADEOS Satellite, 2nd Intl. Conf. Optics within Life Sciences, Munster, 1992.
- 16) 杉本伸夫, 湊 淳, 笹野泰弘: ADEOS搭載RISを用いるレーザー長光路吸収測定手法の開発, 第15回レーザーセンシングシンポジウム, 熱海, 1992.
- 17) 杉本伸夫, 湊 淳, 笹野泰弘, 板部敏和, 廣本宣久, 高部政雄: ADEOS搭載RISを用いるレーザー長光路吸収による大気微量分子測定計画, 応用物理学会, 大阪, 1992.
- 18) 杉本伸夫, 大島裕之, 板部敏和, 廣本宣久, 高部政雄: ADEOS搭載RISを用いた大気微量分子の分光計測手法の開発, リモートセンシングシンポジウム, 東京, 1992.
- 19) 杉本伸夫, 湊 淳, 笹野泰弘, 板部敏和, 廣本宣久, 高部政雄: RIS/ADEOSによる大気微量分子の測定, 大気化学シンポジウム, 名古屋, 1992.
- 20) N. Sugimoto, A. Minato, Y. Sasano, T. Itabe, N. Hiromoto, and M. Takabe, Earth-Satellite-Earth Laser Long-Path Absorption Experiments Using the Retroreflector in Space, Proc. of COMEAS'93, Albuquerque, NM, 1993, PP.104-106.
- 21) A. Minato, Y. Sasano, and N. Sugimoto, Development of Data Reduction Method for the RIS Experiment, Proc. Symp. Rem. Sens. Environ. Sci., Niigata, 1993, pp.71-75.
- 22) N. Sugimoto, A. Minato, Y. Sasano, T. Itabe, N. Hirimoto, and M. Takabe, Laser Long-Path Absorption Measurements with the Retroreflector in Space for the ADEOS Satellite, Proc. Opt. Remote Sens. Atmosphere, Salt Lake, 1993.
- 23) N. Sugimoto, A. Minato, Y. Sasano, T. Itabe, N. Hirimoto, and M. Takabe, Laser Long-Path Absorption Measurements of Atmospheric Trace Species Using the Retroreflector in Space, Proc. IGARSS, Tokyo, 1993, pp.2141-2143.
- 24) 杉本伸夫, 湊 淳, 笹野泰弘, 板部敏和, 廣本宣久, 高部政雄: ADEOS衛星搭載リトロフレクター(RIS)を用いた大気微量分子のレーザー長光路吸収測定, レーザー学会学術講演会, 大阪, 1993.
- 25) 湊 淳, 杉本伸夫, 笹野泰弘, 板部敏和, 廣本宣久, 高部政雄: RISを用いた地上-衛星間レーザー長光路吸収による大気微量分子の分光測定手法, 第16回レーザーセンシングシンポジウム, 石和, 1993.
- 26) 湊 淳, 大島裕之, 笹野泰弘, 杉本伸夫: RISを用いた地上-衛星間レーザー長光路吸収法のデータ解析アルゴリズムの開発, リモートセンシングシンポジウム, 東京, 1993.
- 27) N. Sugimoto, Development of Laser Long-Path Absorption Systems for Open-Air Measurements of Atmospheric Trace Species, Proc. Int. Symp. Global Cycles of Atmospheric Greenhouse Gases, Sendai, pp.158-164, 1994.
- 28) N. Sugimoto: The Retroreflector In Space (RIS) experiment, 17th Int. Laser Radar Conf., Sendai, ICLAS/NASDA/NIES 1994, pp.181-184.
- 29) A. Minato, H. Ohshima, Y. Sasano, and N. Sugimoto: Data Reduction Algorithm for Earth-Satellite Laser Long-Path Absorption Measurement Using RIS, 17th Int. Laser Radar Conf., Sendai, ICLAS/NASDA/NIES 1994, pp.559-560.

- 30) R. Nordstrom, L. Berg, A. DeSimone: Wavelength-Agile and Single-Longitudinal-Mode CO<sub>2</sub> Lasers for the Retroreflector in Space (RIS) Experiment, 17th Int. Laser Radar Conf., Sendai, ICLAS/NASDA/NIES 1994, pp.502-506.
- 31) N. Sugimoto and A. Minato: The retroreflector in Space (RIS) - A New Facility for SLR, 9th Int. Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Canberra, 1994.
- 32) N. Sugimoto: RIS Development Status, 1st ADEOS Symposium/Workshop, Kyoto, 1994.
- 33) 杉本伸夫, 板部敏和, 湊 淳: 衛星利用レーザー長光路吸収法による大気微量分子の計測, レーザー学会学術講演会, 千葉, 1994.
- 34) 湊 淳, 大島裕之, 笹野泰弘, 杉本伸夫: 衛星利用レーザー長光路吸収法のデータ処理アルゴリズムの開発, レーザー学会学術講演会, 千葉, 1994.
- 35) 杉本伸夫, R. J. Nordstrom: 大気分光計測用高速ライン切り替え単一縦モードTEACO<sub>2</sub> レーザー, 電気学会, 光・量子デバイス研究会, 東京, 1994.