

A-3 オゾン層破壊関連大気微量物質の衛星利用遠隔計測に関する研究
(2) 地上衛星間レーザー長光路吸収法による大気微量分子の観測に関する研究
① 衛星搭載リフレクタを用いた大気微量分子の計測に関する研究

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・古閑 信彦・松井 一郎

平成7-9年度合計予算額 74,089千円
(9年度予算額 20,663千円)

[要旨] 衛星搭載リフレクタ (ADEOS 搭載 RIS) を用いて地上衛星間レーザー長光路吸収法によるオゾンの観測実験を行ない、測定誤差の評価、地上システムの改良等を行った。1997年6月30日にADEOSが運用停止となったため十分な観測データの蓄積が得られなかったが、測定手法を実証し、評価を行うことができた。RIS搭載システムの光学性能、分光測定手法、測定誤差等の評価を行ない、地上衛星間レーザー長光路吸収による大気微量分子測定の手法の考察を行った。

[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、炭酸ガスレーザー、RIS、ADEOS、オゾン、炭酸ガスレーザー

1. はじめに

地上衛星間レーザー長光路吸収法による観測の目的は、ADEOS衛星に搭載したRISを用いて、オゾン、 HNO_3 、 CFC_{12} の測定を行い、その変化等の解析を行うことにある。RISの計画は、手法の開発、地上システム的设计など初期の段階から地球環境総合推進費で研究に基づいて実施され、本研究は、その最終段階であった。しかし、ADEOS衛星の運用停止という予想されない事態によって、実際にRISを用いて計測手法の実証と評価を終えたという段階で実験観測を中断せざるを得なかった。このため、大気の観測研究としては成果が十分に得られず、その意味で残念な結果となった。しかし、RISの計測手法に関する概念や手法、技術はこの研究の前段階の研究のなかで開発され、それに基づいてRISが実現し、この研究課題の中でその計測手法を実証することができた。このことは大きな成果であるといえる。

RISプロジェクトの中で開発された新しい手法あるいは技術とは具体的には以下のようである。

- 1) 大口径の単一素子のコーナーキューブレトロリフレクターを用いて地上と衛星の光路で大気の吸収測定を行う手法
- 2) 衛星の進行に伴う反射光のビーム方向のシフト (光行差) を補正するためにレトロリフレクターのミラーの一枚に球面を用いてビームパターンを最適化する手法と技術
- 3) 衛星の進行に伴う反射光の周波数シフト (ドップラーシフト) を利用して分光測定を

行う手法

4) この測定のための狭帯域のパルス炭酸ガスレーザーに関する技術

5) RISからの反射光を画像としてとらえて、予測軌道要素による追尾の誤差を能動的に補正する技術

この他に、無重力状態で使用する大口径の宇宙用リフレクターを重力のある環境下で評価するための手法など、開発の途上ではさまざまな研究を行なってきた。これらの研究に基づいてADEOS搭載RISが製作され、地上レーザー送受信システムが製作された。

本報告書では、評価の観点からこれらの手法や技術にも触れながら、RISで得られた成果を報告し、その意義について考察する。

2. RISを用いた地上衛星間レーザー長光路吸収測定の概要

RIS測定を概念を図2-1に示す。RISを用いた実験では、地上からレーザーを発射し、反射光を受信することによって往復の光路の大気の吸収を測定する。これは、レーザー長光路吸収法と呼ばれる手法を地上と衛星の間で行うもので原理的に高感度の吸収分光測定が期待される。

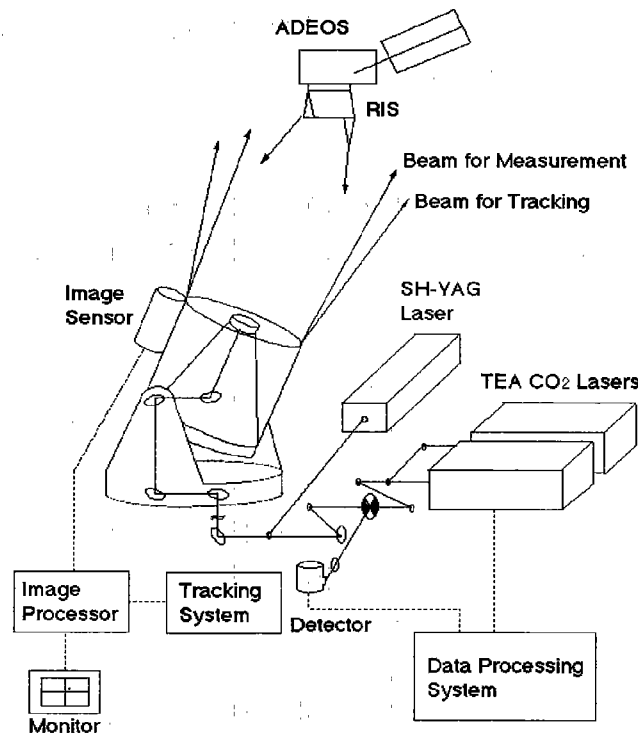


図2-1 RIS測定概念

地上衛星間レーザー長光路吸収測定のアイディアは1970年代の本 (Hinkley 1997) に既に記述があるがこれを実現するための具体的な検討はなされていなかった。これはひとつには衛星までの光路で十分な反射を得るためには大きなレトロリフレクターが必要であるという技術的な問題による。レトロリフレクターは3枚のミラーを直角に組み合わせた構造を持ち、入射光を必ず入射方向と逆方向に正確に反射させる性質を持つ。スペクトル測定を行うためには小さなリフレクターを並べたりリフレクターアレイでは、素子の間の干渉

がノイズとなるため、単一素子のレトロリフレクターが必要であった。さらに、大口径の単一素子のリフレクターの場合、口径が大きいため反射光の回折拡がり小さく、これが逆に問題となった。これは、衛星が高速で動く場合、光行差と呼ばれる反射光の方向のシフトを生じ、反射光が十分に広がらない場合、送信地点とずれた場所にスポットが戻り、反射光を効率よく受信できないという問題である。

そこで、RISでは3枚のミラーの1枚にわずかな曲面を入れた新しい光学設計を行った (Sgimoto et al. 1991, Minato et al. 1992)。曲面は最終設計では球面で曲率半径は約13kmという緩やかなものである。また、3枚のミラーの貼り合わせの角度を最適化した。レトロリフレクタの構造は、軽量化された石英ミラーを用いたホロー型のを米国メーカーが開発した。図2-2はRISの構造である。3枚のミラーは接着して一体化され、緩衝材を挟んでアルミニウム合金のハウジングに固定されている。ミラー表面は銀をベースとしたコーティングが施されている (Sugimoto et al. 1994b, Minato et al. 1995)。

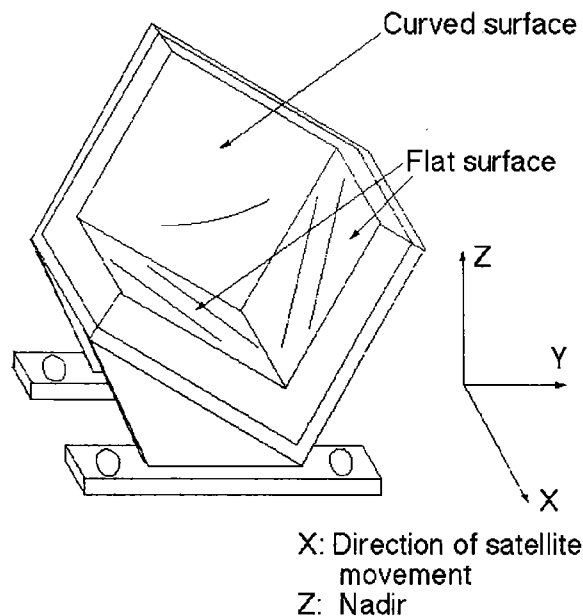


図2-2 RISの構造

RISは図2-3に示すようにADEOSの前方に搭載された。RISがリフレクターとして機能するのは、レーザー光が3面のミラー内に入射するときである。また、他のセンサーの形状等の理由により左右に20度程度光軸が傾けられていたため、地上局から見てADEOS衛星が左よりのパスを地上局に向かって飛来すときに観測が可能であった。観測可能なパスをADEOSが通過する頻度は昼夜合わせて1日に1度程度であった。ただし、測定は地上の天候に依存し、雲が全天を覆う場合は測定はできない。

地上衛星間レーザー長光路吸収法に用いる分光手法としては様々な方法が考えられた。また、光源として用いるレーザーにもいろいろな候補が検討された。地上衛星間レーザー長光路吸収法の場合は、測定の信号対雑音比の観点からパルスレーザーを用いる方が、連続光より有利であるのでパルスレーザーに絞られた。分光手法の最もオーソドックスな方法は連続波長可変レーザーを波長掃引してスペクトル測定する方法である。この場合は、

波長幅の狭い波長可変レーザーを必要とする。RIS計画スタート当時は光パラメトリック発振器の技術も成熟していなかったためこれは採用しなかった。もうひとつの方法としてスペクトル幅の広いパルスレーザーを用いてヘテロダイン分光を行い1パルスでスペクトルを測定する方法が検討された。このヘテロダイン分光についても検出器などに技術的な困難が予想されたため採用しなかった。

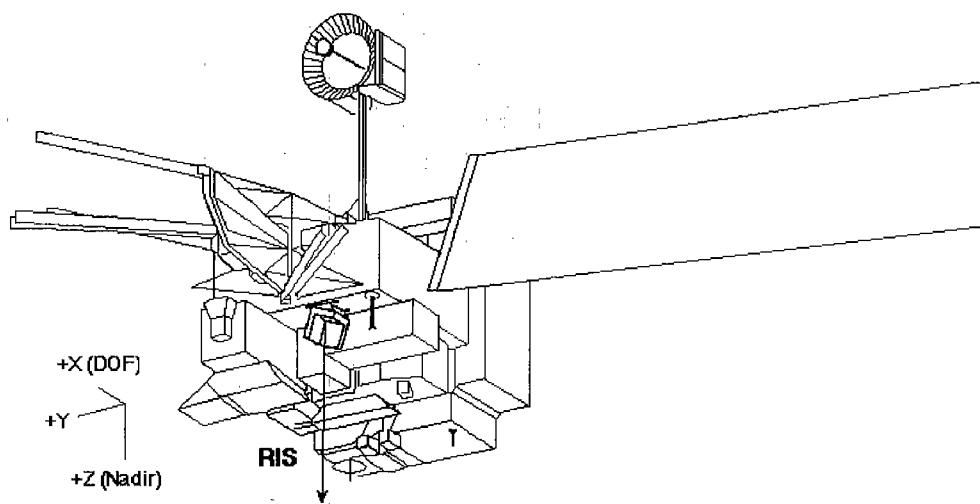


図 2 - 3 ADEOS上のRISの配置

RIS計画には、最も確実なパルス炭酸ガスレーザーを用いる方法を採用した。衛星リフレクターを用いる測定では、いずれの方法の場合も衛星が動くことによってドップラーシフトにより反射光の波長が変化することを考慮する必要がある。また、同時に光路長の変化も考慮する必要がある。パルス炭酸ガスレーザーは多くの発振波長を選択することはできるが連続的に掃引することはできない。そこで、ドップラーシフトにより反射光の波長が変化することを逆に利用してスペクトル測定を行う方法を考案した。この方法は、解析において大気の水方向の一様性を仮定する必要があるが、測定システムを非常に簡単化できる利点があった。この測定手法の場合もレーザーのスペクトル幅は分子の吸収線に比べて十分に狭いことが要求される。そこで、レーザー共振器の中に狭帯域のゲインセルを用いる炭酸ガスレーザーを新たに開発した (Nordstrom et al. 1993a, b)。

図 2 - 4 にRIS地上システムの概要を示す。地上システムは衛星光学追尾システムと分光計測用のレーザー送受信システムから構成される。衛星光学追尾システムは東京小金井市の通信総合研究所の口径 1.5 m のものを利用した。RIS測定ではADEOS衛星に正確にレーザーを送信することが必要であるため、軌道要素に基づくプログラム追尾と併せて、RISの反射光の画像を用いた能動追尾手法を用いた。能動追尾では可視の第二高調波Nd:YAGレーザー (波長 532 nm) を用いてRISの反射を画像として捉え、その位置が最適になるように追尾系を制御した。

分光計測用には狭帯域 (単一縦モード) パルス炭酸ガスレーザーを 2 台用いた。1 台のレーザーは測定対象分子の吸収を測定するため、もう 1 台は大気揺らぎや角度による反射強度の変化を打ち消すための参照信号を取得するために用いた。レーザー送受信システム

のブロック図を図2-5に示す。2台のレーザーからの出力はハーフミラーを用いて結合され、追尾光学系に送られる。受信信号は同じ光学系を通して、赤外検出器に導かれる。レーザーからはそれぞれ毎秒50個のパルスが送信され、1ショット毎に送信パルスとRISからの受信光の4つの波形を記録した。この信号から吸収を受けるレーザー波長における大気の吸収量を算出した。表2-1に地上システムの主な仕様を掲げる。RIS測定では、炭酸ガスレーザーの基本波(10 μ m帯)を用いてオゾン、硝酸、フロン12、第二高調波(5 μ m帯)で一酸化炭素とN₂O、第三高調波(3.3 μ m帯)でメタンの測定を行う計画であった(杉本 1994a, Sugimoto et al. 1995a)。

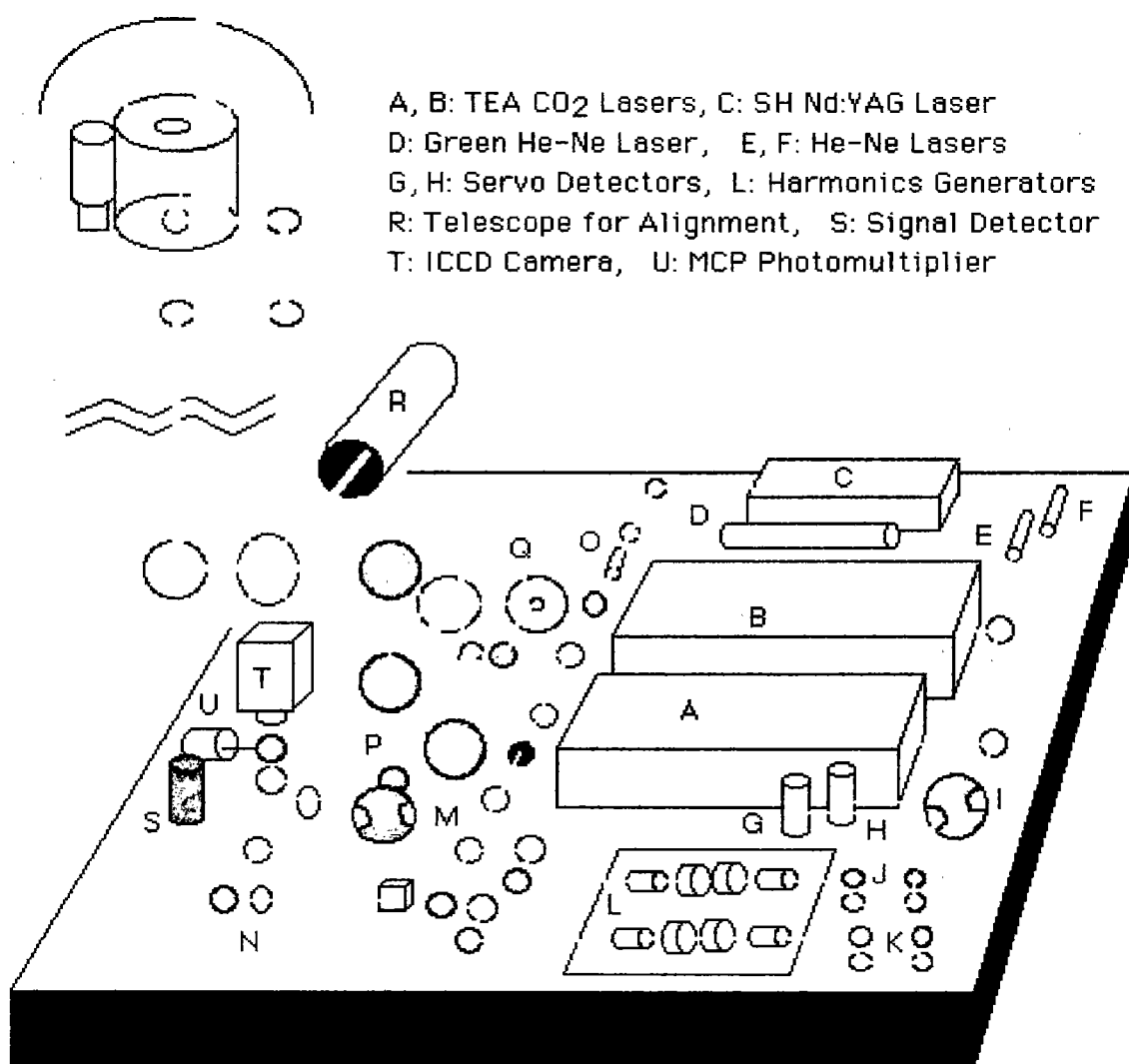


図2-4 RIS地上システムの構成

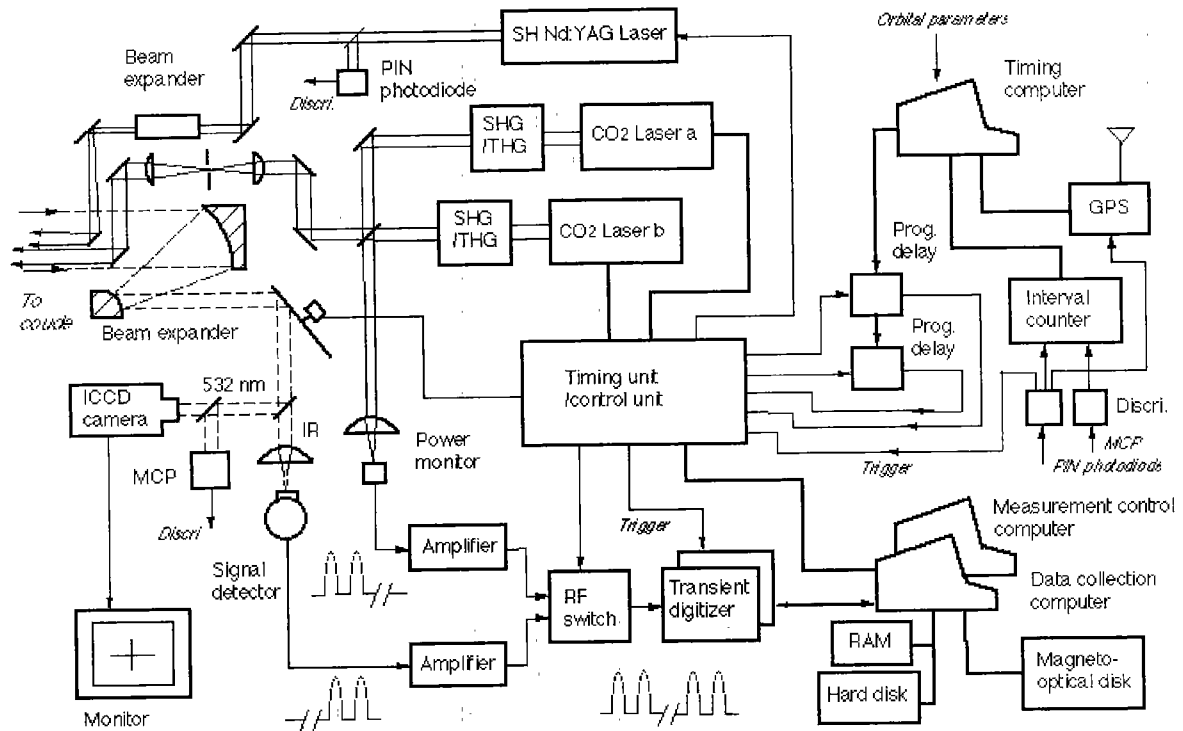


図 2-5 レーザー送受信システムのブロック図

表 2-1 地上システムの主な仕様

TEA炭酸ガスレーザー (分光計測用)	
出力 (送信) エネルギー	50 mJ (10 μ m)
パルス繰り返し数	50 Hz (10 μ m)
周波数再現性	< 10 MHz
送信ビーム拡がり角	0.1 mrad
第二高調波Nd:YAGレーザー (能動追尾用)	
出力 (送信) エネルギー	30 mJ (532 nm)
パルス繰り返し数	10 Hz
送信ビーム拡がり角	0.5 mrad
受信望遠鏡	
主鏡口径	1.5 m
ガイド鏡口径	0.2 m
赤外検出器	
Detectivity	7×10^{10} cmHz ^{1/2} W ⁻¹ (10 μ m)
検出器面積	0.001 cm ²
量子効率	0.6
波形記録装置	
サンプリング速度	100 MHz (最大)
精度	8 bits

3. 実験結果

3. 1 RISを用いた観測の状況

RISを搭載したADEOS衛星は1996年8月16日に打ち上げられた。打ち上げ後、まず、可視のレーザー（Nd:YAGレーザーの第二高調波、波長 532 nm）を用いて、軌道上のRISの光学特性の確認を行った。これによって、可視領域の反射効率と能動追尾手法を確認した後、赤外レーザー（炭酸ガスレーザー、波長 10 μ m）の反射の測定を行い、赤外の反射強度を評価した。その後、炭酸ガスレーザーをオゾン測定用波長に同調してオゾンの観測試験を行った。

初期チェックアウトから、運用停止までの全期間に試験および観測を行った衛星パスの総数は 52 である。そのうち、可視の反射効率の評価あるいは追尾系の試験に用いたパスが 19、炭酸ガスレーザーとYAGレーザーの両方を送信したパスが 33 であった。このうちの 13 例で炭酸ガスレーザーの反射を記録した。観測回数とその内容を表 3-1-1 に掲げる。

表 3-1-1 観測状況の一覧

追尾パス総数	52
YAGレーザー（532 nm のみを送信）	19
炭酸ガスレーザー（10 μ m）とYAGの両方を送信	33
試験観測	
炭酸ガスレーザー発振線	パス数
10P24 (C12) *	16
10P24 (C12), 10P26 (C12)	1
オゾン観測	
炭酸ガスレーザー発振線	パス数
9P24 (C12), 10R24 (C13)	16

*レーザー発振に伴うCO₂の遷移の下準位の回転状態を表す。9または10はそれぞれ、9 μ mバンド、10 μ mバンドを表す。(C12またはC13)はCO₂の同位体¹²CO₂または¹³CO₂を表す。

3. 2 能動追尾システムの評価

RISの補足と追尾には、視野角の大きいガイド鏡のICCDカメラと、視野角の小さいクーデ系のICCDカメラの両方を用いた。図 3-3-1 にそれぞれで捉えた RISの反射光を示す。ガイド鏡のICCDカメラの視野角は12 mrad で、このモニター画像でRISの反射を見ながらプログラム追尾のオフセットを手動で補正し初期補足を行い、視野角 0.2 mrad のクーデ系のICCDカメラに追い込んで精追尾を行った。追尾用レーザーはビーム拡がり は約 0.5mradで1.5m追尾望遠鏡の主鏡から送信した。

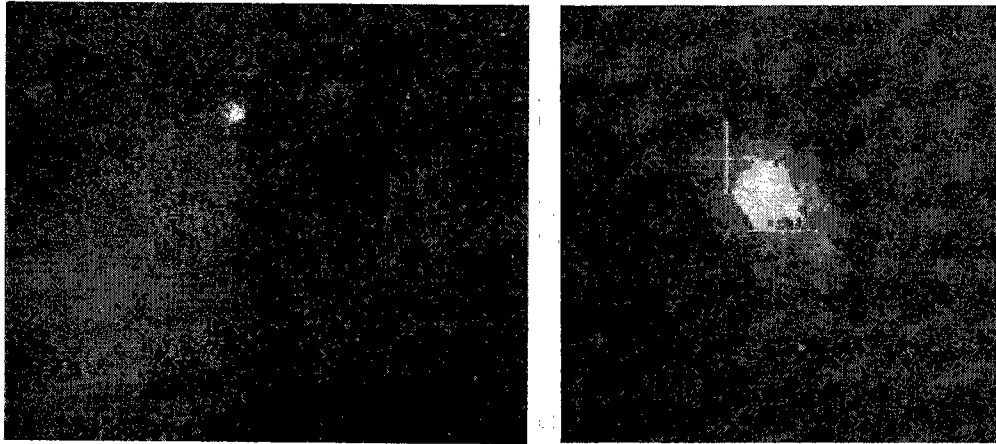


図3-3-1 ICCDカメラで捉えたRISの反射画像。(a)ガイド鏡、(b)クーデ系

衛星レーザー測距は測地学の分野で既に確立され、既に世界に衛星レーザー測距のネットワークが確立されている。RISでは、レーザー測距による高精度の軌道予報値を初期補足に利用するために世界の衛星レーザー測距局の協力を要請し、約15のレーザー測距局の協力を得ることができた。測距データの収集は通信総合研究所がデータ収集の窓口となり、軌道計算は宇宙開発事業団のつくば中央追跡管制センターが研究として行った。レーザー測距局のデータがある場合には週に2回、レーザー測距データに基づく軌道予報が行われた。ADEOSの運用ベースの軌道予報の誤差が約1 km程度であったのに対して、レーザー測距によるものは約1桁改善された。この軌道予報精度の改良はRISの初期補足において非常に有効であった。軌道予報値の精度は、初期補足の角度誤差の問題だけでなく、反射光の撮像およびデータ記録のための時間ゲートの設定にも影響し、軌道予報値の精度の問題で追尾を失敗したケースも何例もあった。

補足に成功し、精追尾用ICCDカメラに追い込んだ後は、約0.03 mrad程度の精度で追尾することができた。分光測定用の炭酸ガスレーザーのビーム0.1 mrad程度であった。

3.3 軌道上のRISの光学特性の評価

RISからの反射光の強度の評価は、まず追尾用の可視レーザー（波長532 nm）を用いて行った。可視光の反射光強度は、追尾望遠鏡の口径20 cmのガイド鏡に設置されたイメージンスンシファイアー付きCCDカメラ(ICCDカメラ)を用いて反射光の像を撮影し、恒星の明るさと比較することによって絶対値を求めた。RISからの可視レーザーの反射光は地上局からの送信パワーが0.3 Wでビーム拡がり角が0.5 mradのとき、星の等級で2～3等級に相当した。一方、打ち上げ前のRISの反射波面の実測データに基づいて反射光の強度のシミュレーションを行い、これと測定結果を比較した。図3-2-1は測定されたRISの反射効率である(Ozawa et al. 1997a)。(a)は昼のパス、(b)は夜のパスである。それぞれについて、パス毎に反射効率の時間（衛星の位置）に対する依存性を示す。一方、図3-2-2は反射波面を用いたシミュレーション計算である(Sugimoto et al. 1996)。

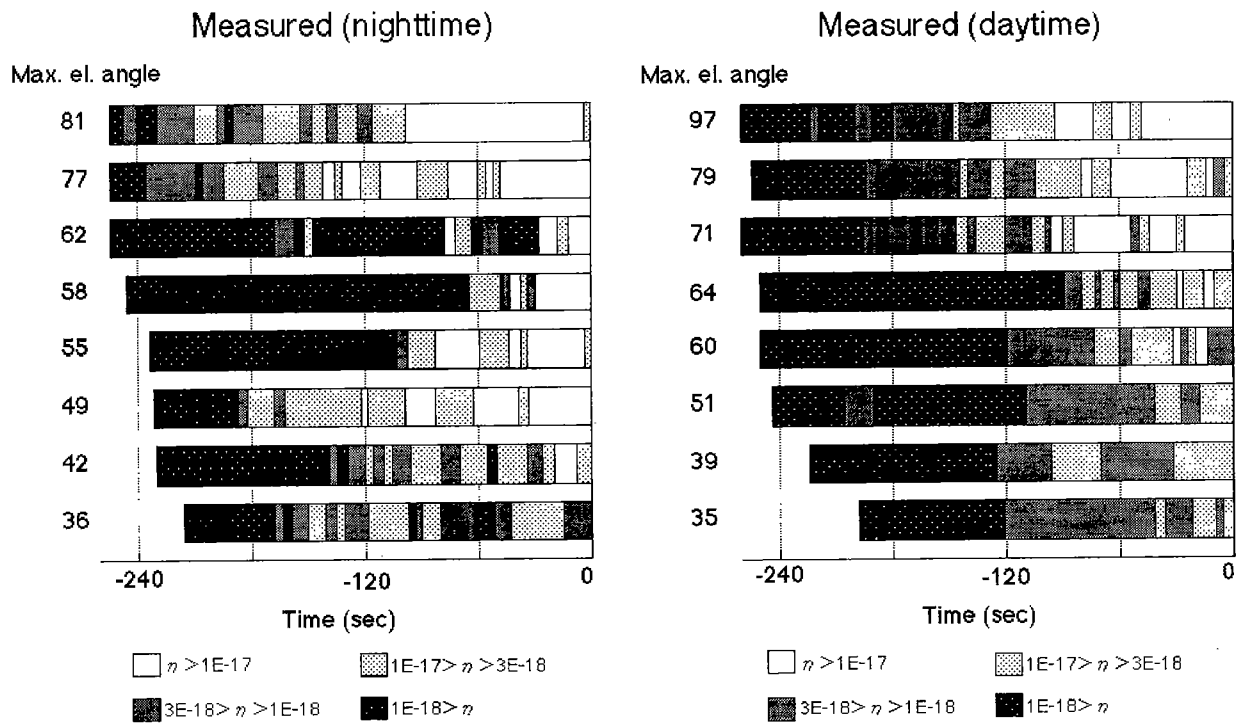


図 3 - 2 - 1 測定されたRISの反射効率

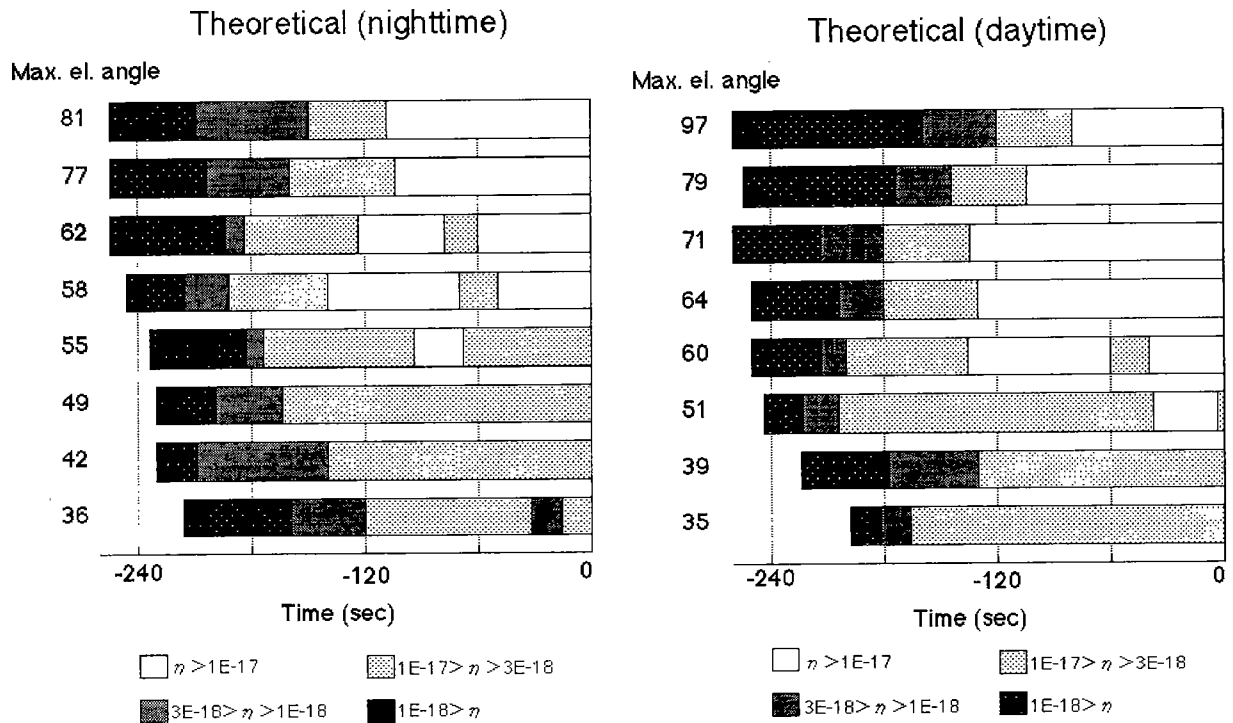


図 3 - 2 - 2 シミュレーション計算による反射効率

反射効率 η は次の式により受信レーザー強度が算出されるように定義した。

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

ここで、 P_0 : 送信ビームの強度、 θ_t : 送信ビームの拡がり、 T : 大気の間道の透過率、 η_{RIS} : RISのミラー自身の反射率 (3回の反射の積)、 A_r : 望遠鏡の面積、 η_{sys} : システムの光学的効率である。 $T = 0.7$ 、 $\eta_{RIS} = 0.8$ と仮定し、 η_{sys} を星像の明るさとの比較により求めた。測定値は大気の透過率の変化や追尾のトラッキングエラーのために理論に比べて変動が見られる。しかし、全般に反射率の大きさとその変化は理論と良く一致した。

赤外レーザー光の反射効率は、炭酸ガスレーザーの反射信号を地上局 (通信総合研究所、小金井市) から約 4 km 離れたタワーに設置した口径 3 cm のレトロリフレクターの信号と比較することによって評価した⁷⁾。図 3-2-3 に炭酸ガスレーザーの送信パルスとRISによる反射パルスの一例を示す。

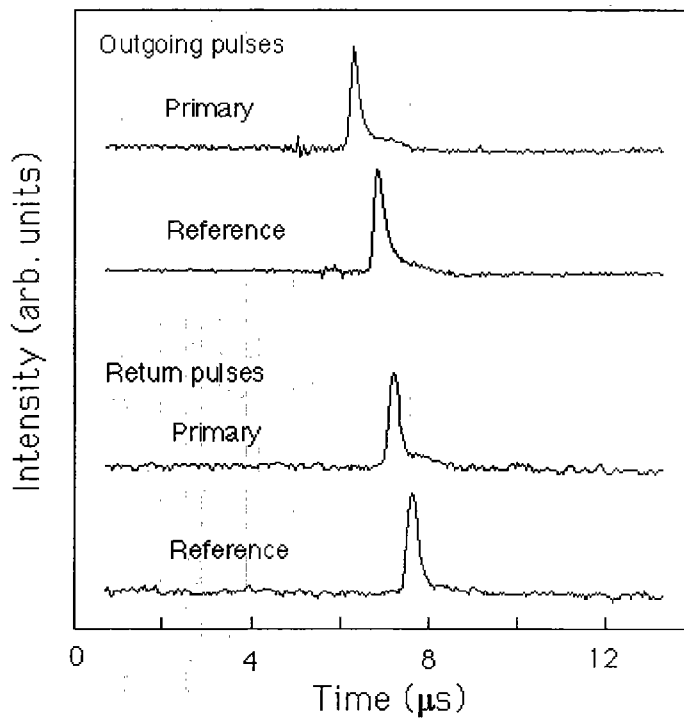


図 3-2-3 炭酸ガスレーザーの送受信パルス

図からわかるように信号対雑音比は非常に良い。タワーのレトロリフレクターの反射では減衰フィルターを用い、その減衰率と信号の強度からRISの反射光強度を見積もった。基準としたタワーの信号強度は使用したレトロリフレクターの効率から計算により求めた。この結果、RISの10 μm の反射率 η は、 $3.3 \times 10^{-7} (\text{m}^{-2})$ と評価された。一方、RISの光学特性の設計値は、 $4 \times 10^{-7} (\text{m}^{-2})$ で両者は良く一致した。

3. 4 RISを用いたスペクトル測定

スペクトル測定では2台の炭酸ガスレーザーを用いた。送信レーザー出力はパルス当たり約50 mJで、2台のレーザーからのパルスは200 μ s 間隔で送信した。繰り返し数50 Hzであった。送信した2つのパルス波形と受信したRISからのそれぞれ反射光のパルスの4つのパルス波形をショット毎に記録した。1回の測定は200秒で、10,000点のデータを記録した。

図3-4-1は2台のレーザーをそれぞれ $^{12}\text{CO}_2$ の9P(24)と $^{13}\text{CO}_2$ の10R(24)に同調して測定した大気のスเปクトル信号である。図の縦軸は2つのレーザーに対する信号強度の比の対数である。

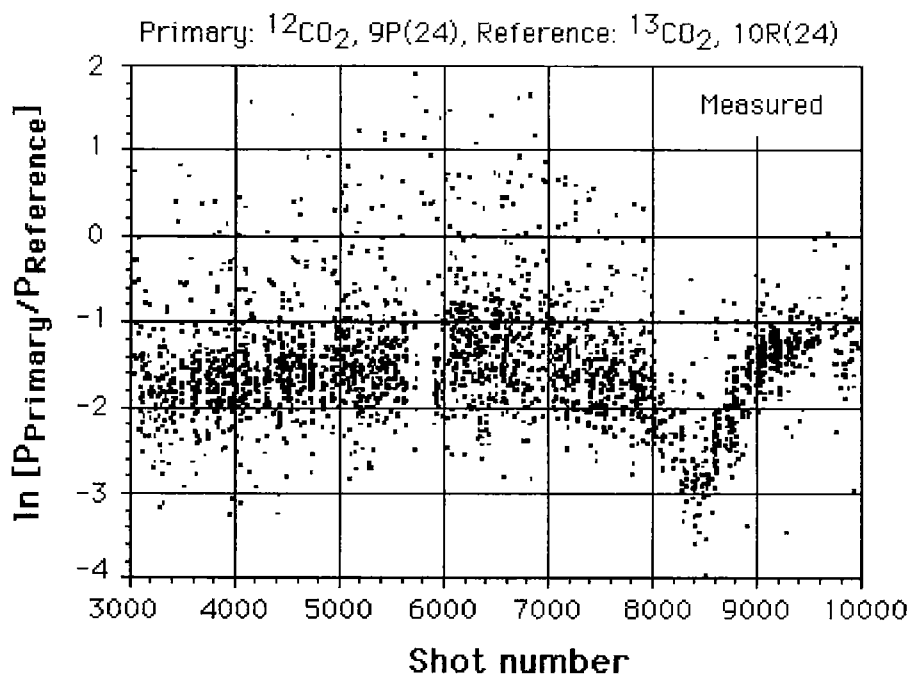


図 3-4-1 RISを使って測定されたスペクトル信号

図3-4-1の測定に用いた炭酸ガスレーザーの発振線の周りの大気吸収スペクトルを図3-4-2に示す。これは、HITRANデータベースを用いて計算した地上衛星間の片道の理論的スペクトルで、US標準大気による分子濃度を仮定している。また、ここでは水蒸気やエアロゾルによる連続吸収帯は考慮していない。図中にドップラーシフトによって受信光の波数が変化する範囲を示した。測定時にADEOSは地上局に向かって進行するので反射光の波数は大きい方から小さい方に変化する。 $^{12}\text{CO}_2$ の9P(24)は大気中の炭酸ガスの吸収を受けるが、その肩にオゾンの強い吸収線がある。炭酸ガスは地上付近に分布するためスペクトル幅が広いのに対してオゾンは成層圏に分布するためスペクトル幅が狭い。一方、 $^{13}\text{CO}_2$ の10R(24)では吸収は小さく、スペクトルはなだらかである。

この理論スペクトルを用いて、計算機シミュレーションによって求めたRIS測定のスเปクトル信号を図3-4-3に示す。

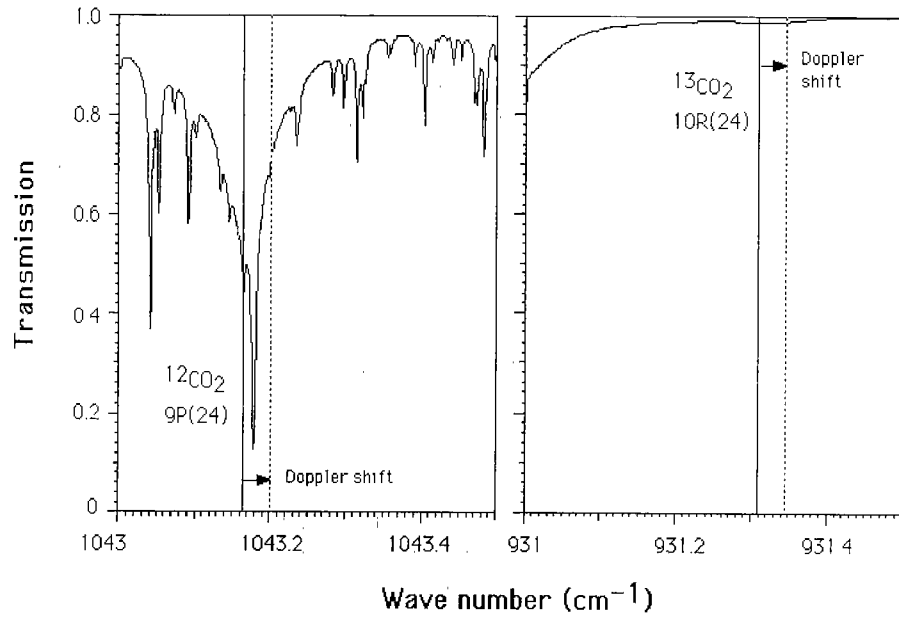


図 3-4-2 測定に用いたレーザー波長周辺の大気吸収スペクトル

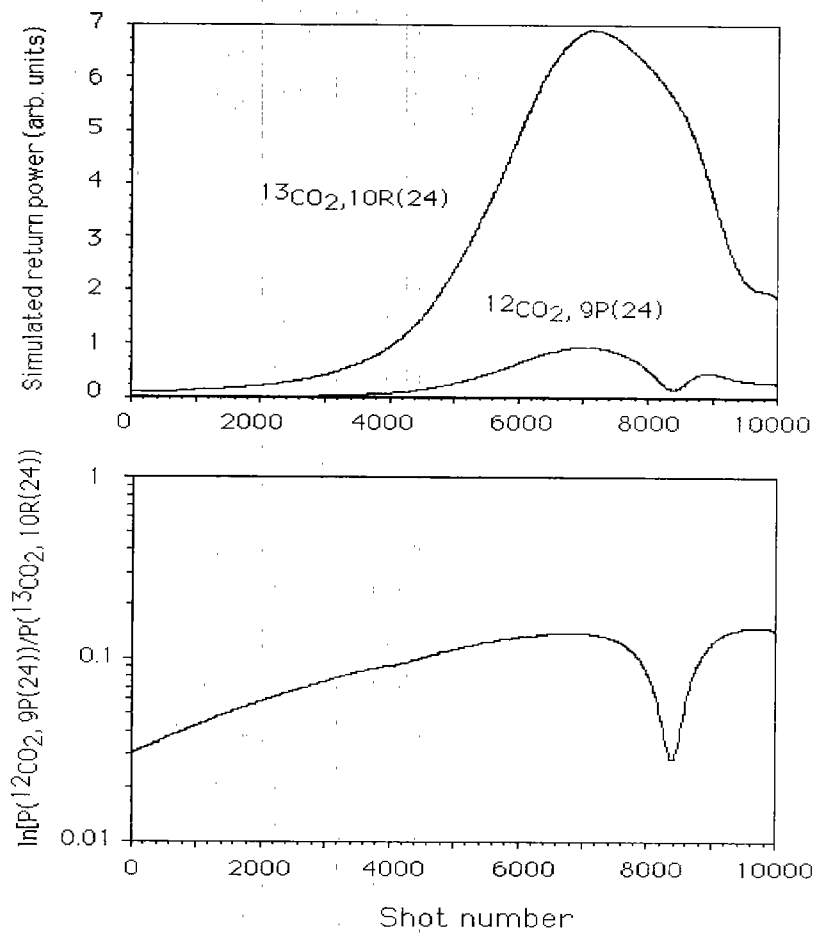


図 3-4-3 理論スペクトルを用いた計算機シミュレーションによる RIS 測定のスเปクトル信号

図 3-4-3 の上はそれぞれのレーザー波長の信号強度、下は2つのレーザーに対する信号強度の比の対数である。横軸は測定開始からのレーザーのショット数で、反射光の波長に相当する。 $^{13}\text{CO}_2$ の10R(24) の信号の変化は主にRIS の反射効率の変化による。

$^{12}\text{CO}_2$ の9P(24) では、これに炭酸ガス、オゾンの吸収の効果が加わる。RIS 測定の場合、衛星の進行に伴って光路長も変化する。

RIS を用いて測定された図 3-4-1 のスペクトル信号はシミュレーション信号、図 3-4-3 と良く一致する。図 3-4-1 に見られる吸収は、 $^{12}\text{CO}_2$ が受けたオゾンの吸収である。この信号からオゾンのカラム量を導出するために、オゾンのカラム量をパラメータとして、理論スペクトルを測定スペクトルに最小2乗フィッティングした。このとき、それぞれのレーザー波長に対する測定システムの効率の比も決定するパラメータとした。こうすることによって、連続吸収帯による透過率の違いもこれと含めて取り扱った。同じスペクトル領域に含まれる炭酸ガス等の濃度については US スタンドアードの分布を仮定し、HITRAN96 データベースの吸収線パラメータを仮定した。導出されたカラム量は、 $8.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ であった。

RISによる測定を検証するため東北大学理学部のレーザーヘテロダイン分光計 (Fukunishi et al. 1990) によるオゾンの同時測定を行った。測定は通信総合研究所においてRIS の測定と同じ時間帯に行った。レーザーヘテロダイン分光計から求めた、1996年12月23日のオゾンのカラム量は $8.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ でR I S によって求めたものとよく一致した。また、同日のADEOS搭載TOMSによるオゾンのカラム量は $8.63 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ であり、これともよく一致した。

3. 5 測定誤差の評価

以上のようにRISを用いて、衛星の進行に伴うドップラーシフトを利用してオゾンが測定された。しかし、測定誤差については当初の予想よりも大きいことが判明した。この原因を明らかにするための解析を行った。測定誤差要因として考えられるものは、検出器雑音、データ取得におけるAD変換器の量子化誤差、レーザービームパタンの変化、大気揺らぎなどがある。これらの誤差の大きさは受信信号強度に対して異なる依存性を持つ。検出器雑音と量子化誤差はその大きさが受信信号強度に依存しないが、ビームパタンの変化、大気揺らぎは受信信号強度に比例する。この性質を利用してそれぞれの誤差成分の大きさを評価した。

図 3-5-1 は同じ波長に同調した2つのレーザーに対する受信信号の比における誤差の大きさを、受信信号強度の逆数の2乗に対してプロットしたものである。いま、それぞれの受信信号を P_1 、 P_2 、それぞれの偏差を ΔP_1 、 ΔP_2 と表すと、 P_1/P_2 に対する偏差の2乗は次式で表される。

$$\{(\Delta(P_1/P_2)/(P_1/P_2))^2 = (\Delta P_1/P_1)^2 + (\Delta P_2/P_2)^2 - 2\{(\Delta P_1 \Delta P_2)/(P_1 P_2)\}$$

ここに、第3項は2つのパルスの相関の項で、相関が完全ならば誤差はうち消される。それぞれのレーザーに対する信号の偏差は以下の式のように表される。

$$(\Delta P)^2 = A + B P^2$$

ここで、第1項は受信信号強度に依存しない検出器雑音やAD変換器の量子化誤差など、第2項は信号強度に比例する大気揺らぎやレーザービームの揺らぎなどを表す。2台のレーザーの信号の比における誤差において、受信信号強度に依存しない雑音、信号強度に比例する雑音のいずれについても相関でうち消される成分とうち消されない成分があると考えられる。従って、信号の比の偏差についても以下のように表される。

$$\{\Delta(P_1/P_2)/(P_1/P_2)\}^2 = 2A'/P^2 + 2B'$$

ここに、2台のレーザーは同一の波長に同調されているので $P_1=P_2=P$ とした。以上のことから、受信信号の比における誤差の大きさを、受信信号強度の逆数の2乗に対してプロットしたときのグラフの傾きが信号強度に依存しない誤差を切辺が信号強度に比例する誤差を表す。

図3-5-1(a)では、信号強度が十分に大きい場合、すなわち、 $(1/P^2)$ が小さい場合も誤差が大きく、ほとんどの測定点で信号強度に比例する誤差が支配的であることがわかる。

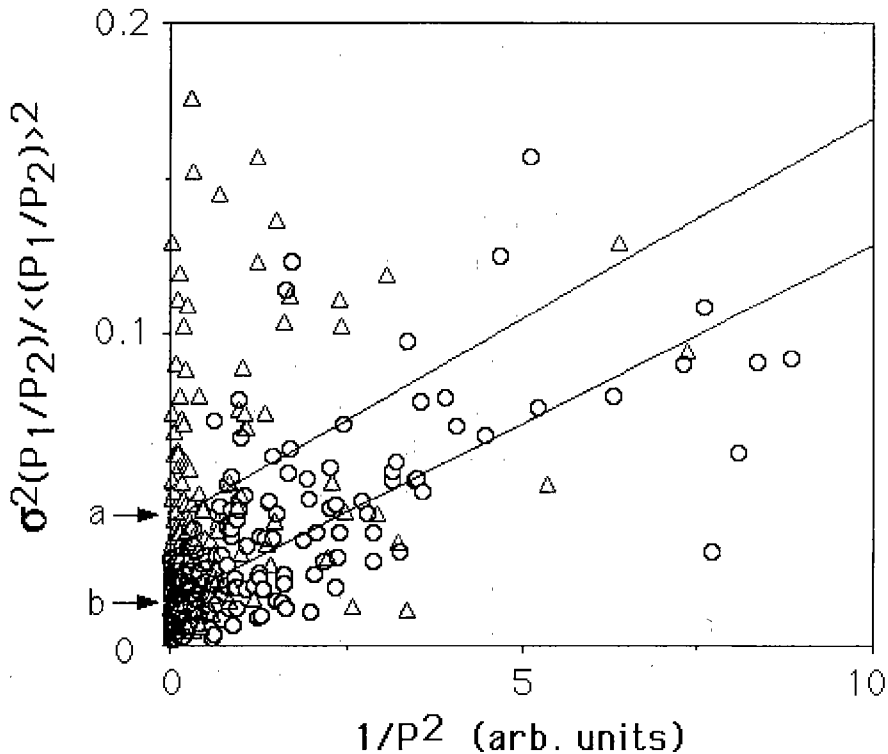
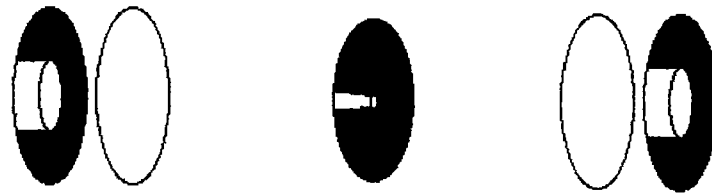


図3-5-1 スペクトルの誤差の受信信号強度（の逆数の2乗）に対する依存性

信号強度に比例する誤差のうち、大気揺らぎは、ビームパターンが2つのレーザーで同じであれば受信強度を割り算することによって打ち消されるはずである。このことから誤差の主要因は2台のレーザーのビームパターンの違いによるものと推定された。

これを改良するためにレーザー送信系の出力部の2つのビームを結合した後に、空間フィルターを追加し、追尾光学系に送信光を導入する前にビームを整形した。空間フィルターは図3-5-2に示すように2つのレンズとピンホール、それに絞りから構成される。



Spatial Filter

図3-5-2 送信系に追加した空間フィルターの構造

レンズの焦点面は入射面のフーリエ変換面になるため理想的なガウシアンビームはレンズの焦点面でガウス型のプロファイルを持つスポットとなる。入射ビーム内に強度分布の構造がある場合、その成分は焦点面では理想的なスポットよりも大きなパターンを持つことになる。従って、焦点面で理想的なスポットサイズのピンホールを通すことによって、ビーム内の構造を取り除くことができる。

空間フィルターを追加した後にRISの反射を用いた試験観測における誤差を図3-5-1 (b)に示す。信号強度に比例する誤差は約1/5に低減された。(図の傾き、すなわち信号強度に依存しない誤差の方は、横軸が絶対値ではないのでこの図からは評価できない。) この結果、受信信号の比のSN比として約10が得られた。

誤差が改善された結果、それまで雑音に埋もれていた別の誤差要因も明らかになった。空間フィルターによる改良によって、割り算を取る前の1波長の受信信号の変化において、追尾の誤差と考えられる1ヘルツ程度の周期の変動が見られるようになった。RISからの受信信号に含まれる雑音の周波数解析の結果を図3-5-3に示す。受信パルスに欠測がある場合もあるため通常の高速フーリエ変換が使えないため、Lombの方法を用いた(Lomb 1976)。この方法はサンプリングが一定時間間隔でない場合の周波数解析の方法として知られている。

図3-5-3の上は受信信号(吸収の無い波長)のパワースペクトル、下は同じ波長に同調した2台のレーザーの受信信号の比のパワースペクトルである。図中のaで示したものは空間フィルターを入れる前のパワースペクトル、bは空間フィルターを入れた後のパワースペクトルである。cはさらに、追尾系に改良を加えた後のパワースペクトルである。

受信信号の比のパワースペクトルaとbを比較すると空間フィルターを入れた場合、追尾誤差が打ち消されているのに対して、空間フィルターを入れない場合は追尾誤差が比を取った後も残っていることがわかる。このことから、ビームパタンの違いが誤差要因であったことがわかる。追尾系に改良を行った後のパワースペクトルcでは、比を取る前

もで追尾誤差に相当する 1 ヘルツ程度の成分は見られなくなった。

いずれの場合もパワースペクトルに周波数の高い成分は見られない。測地衛星に用いられるレトロリフレクターアレイの場合は素子間の干渉による雑音が高い周波数成分を持つが、RIS ではこのような成分は見られずRISが単一素子であることの特長が表れている。

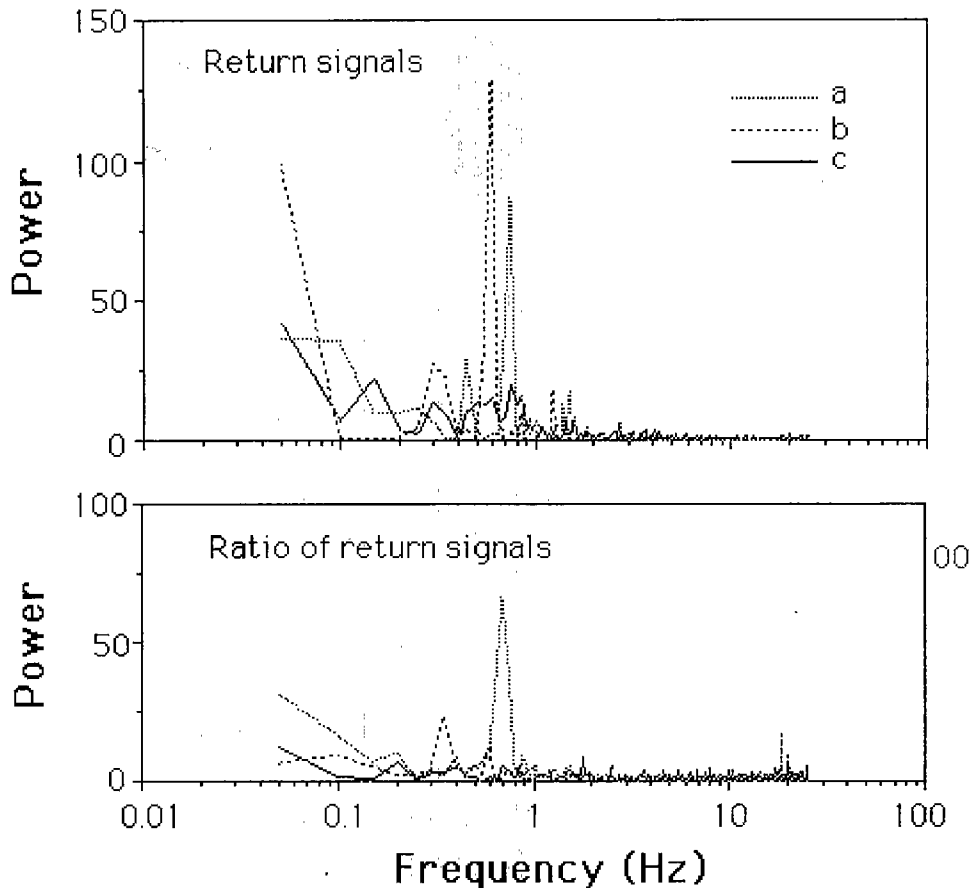


図 3-5-3 RIS 受信信号の時間変化のパワースペクトル、下は 2 台のレーザー (同じ波長に同調) の受信信号の比のパワースペクトル。

このように空間フィルターによる送信ビーム形状の改良、追尾システムの改良を行うことによって、1ショットあたりのスペクトル測定において信号対雑音比 (SN比) 10以上を測定時間の間、安定して得られる技術が確立された。

RIS 測定システムにおいては信号強度に依存しない誤差として最も大きな要因はAD変換器による量子化誤差であった。RIS からの信号の変化が大きいため、測定時には信号処理系のゲインを途中で切り替えたが、信号の小さい領域で、8 bit のAD変換精度は必ずしも十分ではなかった。また、信号の大きい場合に飽和する場合もあった。飽和の問題は記録された波形からエネルギーを求める際の波形フィッティングの方法を改良することで改善した。

測定されたオゾンのスペクトルから高度分布を求めるアルゴリズムの雑音に対する影響を検討した結果、雑音が信号強度に依存する場合と、信号強度よらない成分が大きい場合では状況が異なることが示された。後者の場合は、信号強度の小さい測定対象の吸収のピ

ーク付近で誤差が相対的に大きくなるため影響が大きいことがわかった。信号強度に比例する誤差の場合はSN比が10以上あれば、高度分布の導出も可能である。

一方、地上衛星間の光路と地上の光路の長光路測定の違いを調べるために、地上の鉄塔上の小型の単一素子レトロリフレクターを用いた測定との比較を行った。その結果、追尾誤差とそれに伴って現れるビーム形状による誤差などの他は、大気揺らぎ等の性質は地上衛星間の光路と地上光路では大きな違いはないことが示された。

4. 本研究により得られた成果

RISによる地上衛星間レーザー長光路吸収測定実験によって得られた以下にまとめる。

1) RIS 搭載システムの評価

RISの反射光と恒星の明るさとの比較により、RISの反射効率が設計値とよく一致することを確認した。さらに、赤外レーザーを用いて赤外領域の反射効率が設計値と一致することを確認した。また、これによって、球面を含むレトロリフレクターの設計技術が実証された。

2) 低軌道衛星の光能動追尾技術の確立

RISの反射光を画像として捉えて能動的に追尾する技術を確立した。昼夜ともに追尾精度 0.03 mrad を得た。

3) 地上衛星間レーザー長光路吸収による計測技術の実証

炭酸ガスレーザーを用いてRISによるオゾンの測定を行い、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、地上衛星間レーザー長光路吸収による世界初のスペクトル測定に成功した。また、このスペクトルよりオゾンのカラム量を求めた。得られたカラム量は、ヘテロダイン分光計およびTOMSの結果とよく一致した。これによってRISによる計測技術を実証した。

4) RIS測定の誤差の解析とシステムの改良

測定データの誤差解析を行い、誤差要因を特定した。主要な誤差は、2台の炭酸ガスレーザーのビームパタンの違いであることが判明し、送信光学系を改良した。また、周波数解析等により追尾系の誤差を改良した。受信信号強度の比におけるSN比として、1ショットあたり10を達成した。

5) レーザー測距によるADEOSの軌道予報の改良

世界の約15のレーザー測距局の協力を得て、RISを利用したADEOSのレーザー測距を行ない、NASDAつくば中央追跡管制センターにおいてレーザー測距データを用いた軌道予報の研究が行われた。この結果、レーザー測距により従来の軌道決定精度に比べて一桁高い精度が得られた。

これらの他、NASA/Goddard Space Flight Centerによりピコ秒レーザーを用いた2波長レーザー測距の実験が行われ、355 nmと532 nmで良好な反射波形が得られた。実験期間が短くレーザー測距のための大気モデルの改良への利用は困難であると思われるが、衛星測距の分野でも単一素子であるRISの利点を実証することができた。

5. RIS の評価と今後の展望

以上のように、技術的な観点からはRISを用いた研究の成果が得られた。しかしながら、予期しないADEOSの運用停止のため、大気環境研究のための十分なデータを得るこ

とはできなかった。RISについては残念ながら当初から ADEOS II への搭載を計画しておらず、現在のところ RIS に続く具体的な計画は無い。

RIS のような地上衛星間のレーザー長光路吸収法の最も重要な特徴は原理的に感度のもっとも高い手法であるという点である。その反面、通常の衛星搭載センサーと違って、空間的に連続したグローバルな情報が得られる訳ではなく、むしろ地上観測の概念の延長にある観測手法である。また、観測が天気によって左右されるという問題もある。

地上衛星間のレーザー長光路吸収法の将来を考える上で、受動方式の遠隔計測技術の進歩も考慮しなくてはならない。例えば、太陽光を光源とするフーリエ変換赤外分光計 (FTIR) の性能向上は著しい。現在、FTIR はほぼ原理的な限界に近いところまで完成されたといえる。レーザー長光路吸収法の方はまだ完成された技術ではない。RIS 計測システムの場合もレーザーをはじめとして技術的な制約が多くあった。逆に、新しい可能性が残されているとも言えわけであるが、観測研究のための装置としての今後を考える上では、コストの面からの有効性の検討が必要となる。

一般的に、成層圏の大気微量成分の測定においては、衛星からの受動型の光学領域およびミリ波領域の遠隔計測技術がほぼ十分な性能を持っていると言える。特殊な観測対象、例えば極夜の測定などでは RIS のような手法の独自の利点が考えられるが、その場合は、地上局の整備の困難さなどの問題を伴う。

これに対して、対流圏の大気微量分子については、一般に受動方式の遠隔計測は困難である。これは、物理的には気圧が高くスペクトル拡がりが多いことと、雲があることなどによる。地上衛星間レーザー長光路吸収分光法の利点が期待されるのは対流圏の測定である。この手法は他の手法で得られない高い感度が期待される。地上の FTIR ネットワークとの比較においても、測定感度と測定頻度の観点からレーザー長光路吸収法が有利である。

地上衛星間レーザー長光路吸収分光法には、RIS のように低軌道衛星に搭載したリフレクターを用いる方法と、衛星に検出器システムを搭載する方法がある。前者は搭載機器が簡単である利点があるが、反射光を地上で受信するための大口径の追尾望遠鏡が必要となる。これに対して、衛星に検出器を搭載する方法では、レーザー光を衛星上で受信し、データを電波で地上に伝送するため、地上局には口径の小さい送信システムのみで良く、静止軌道衛星を利用すれば衛星の追尾も簡単になる。また、レーザーパワーも小さくできる。これによって、地上のシステムは大幅に小型化される。

運用の効率観点からも静止衛星システムは格段に効率が高い。光学的測定手法である限り、天気の制約はあるものの測定時間の制約はなく長時間の積算による高感度測定も可能である。複数の地上局からのレーザー光を同時に受信できるシステムとすることによって、運用効率の極めて高い観測システムを構築することができる。

静止衛星を利用したレーザー長光路吸収法では、ドップラーシフトを利用したスペクトル測定ができないため、連続的に波長可変の赤外レーザーを必要とする。従って、赤外波長可変レーザーが技術的な鍵となる。最近、PPLN (Periodically polarized lithium niobate) を用いた光パラメトリック発振器や波長変換などの技術の新しい展開があり、静止衛星搭載検出システムも十分に現実的なものとなってきている。RIS で実証された基礎技術に基づいて、静止軌道衛星を利用した地上衛星間レーザー長光路吸収による大気微量分子観測システムを目指して研究を推進すべきであると考えられる。

一方、上の方向からは外れるが、RIS で開発したレトロリフレクター技術の意義は大きい。RIS により単一素子の大口径レトロリフレクターの利点が示されたが、単一素子のためにレトロリフレクターとして機能する視野範囲に限られる欠点もあった。これを改善するために、例えば4つのホローレトロリフレクターを視野の重なりが小さくなるように組み合わせることにより理想的なリフレクターを設計が可能である(4eleRetro)。将来の低高度の地球観測衛星の測距用レトロリフレクターとしてこのようなリフレクターが搭載されることが期待される。

6. 引用文献

- Fukunishi, H., Okano, S., Taguchi, M. and Ohnuma, T. (1990), "Laser heterodyne spectrometer using a liquid nitrogen cooled tunable diode laser for remote measurements of atmospheric O₃ and N₂O," *Appl. Opt.* **29**, 2722-2728
- Hinkley, E.D. ed. (1976), *Laser Monitoring of the Atmosphere* (Springer-Verlag) Chap. 6
- Lomb, N.R. (1976), "Least-squares frequency analysis of unequally spaced data," *Astrophysics and Space Science*, **39**, 447-462.
- Minato, A., N. Sugimoto, and Y. Sasano (1992), "Optical Design of Cubo-Corner Retroreflectors Having Curved Mirror Surfaces," *Appl. Opt.* **31**, 6015-6020.
- Minato, A., Sugimoto, N., Bleier, Z., Hunter, G.C. and Paul, J. (1995), "Measurement of Dihedral Angle Errors of a Large-Aperture Space Retroreflector: Separation of the Effect of Sag Due to Gravity," *Opt. Rev.* **2** (4) 319-322.
- Minato, A. and Sugimoto, N. (1998), "Design of a four-element, hollow-cube corner retroreflector for satellites by use of a genetic algorithm," *Appl. Opt.* **37** (3) 438-442
- Nordstrom, R.J., L.J. Berg, A.F. DeSimone, and N. Sugimoto (1993a), "Time-Gated Gain Cell for Frequency-Stable, Single-Longitudinal-Mode Operation of a Transverse, Electric, Atmospheric CO₂ Laser," *Rev. Sci. Instrum.* **64** (6), 1663-1664.
- Nordstrom, R.J., L.J. Berg, A.F. DeSimone, and N. Sugimoto, "Single-Longitudinal-Mode Operation of a TEA CO₂ Laser Using a Time-Gated Gain Cell," *Rev. Laser Engineering* **22** (2) 132-139 (1993b).
- Ozawa, K., N. Sugimoto, N. Koga, Y. Kubota, Y. Saito, A. Nomura, A. Minato, T. Aoki, T. Itabe, and H. Kunimori (1997a): "Optical Characteristics of the Retroreflector in Space (RIS) on the ADEOS Satellite in Orbit," *Opt. Rev.* **4**, No.4.
- Ozawa, K., N. Koga, N. Sugimoto, Y. Saito, A. Nomura, T. Aoki, T. Itabe, and H. Kunimori (1997b), "Laser Transmitter/Receiver System for Earth-Satellite-Earth Long-Path Absorption Measurements of Atmospheric Trace Species Using the Retroreflector In Space," *Opt. Engineering* **36** (12) 3235-3241.
- Sugimoto, N. (1987) "Atmospheric environment monitoring system based on an earth-to-satellite Hadamard transform laser long-path absorption spectrometer: a

proposal, " *Appl. Opt.* 26 763-764.

Sugimoto N, Minato A and Sasano Y 1991 *Conference on Lasers and Electro-Optics Technical Digest Series*, vol. 10 (Washington DC., 1991) p 450

杉本伸夫 (1994a) : 地上衛星間レーザー長光路測定用リトロリフレクター, 日本リモートセンシング学会誌, 13, 376-380.

Sugimoto, N. and Minato, A. (1994b), "Method for measuring dihedral angles of a cube-corner retroreflector having curved mirror surfaces," *Opt. Eng.* 33 (4) 1187-1192.

Sugimoto, N. , A. Minato, I. Matsui, Y. Sasano, T. Itabe, T. Aoki, M. Takabe, N. Hiromoto, H. Kunimori (1995a), "Plan for the Experiment with the Retroreflector in Space (RIS) on ADEOS, SPIE Vol. 2583, 217-227.

Sugimoto, N. and A. Minato (1995b), "Data Reduction Method for the Laser Long-Path Absorption Measurement of Atmospheric Trace Species Using the Retroreflector in Space," *IEICE Trans. Commun.*, E78-B (12), 1585-1590.

Sugimoto N, Minato A, Ozawa K, Saito Y, Nomura A (1995c), "Theoretical evaluation of earth-to-satellite laser long-path absorption measurement of atmospheric trace species in the infrared region," *Jpn. J. Appl. Phys.* 34 2329-2334.

Sugimoto, N. and A. Minato (1996), "Optical Characteristic of the Retroreflector in Space (RIS) for the ADEOS Satellite," *Opt. Rev.* 3, 62-64.

[国際共同研究等の状況]

環境庁と宇宙開発事業団が発出したADEOSリサーチアナウンスメントのRIS関連の課題が、NASA/GSFC、ミュンヘン工科大学、トムスク州立大学で実施された。ADEOS運用停止によりまとまった成果が得られなかったが、技術的な成果は得られた。

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

平成7-9年 (1995-97年) 度

1) N. Sugimoto, A. Minato, I. Matsui, Y. Sasano, T. Itabe, T. Aoki, M. Takabe, N. Hiromoto, H. Kunimori, "Laser Long-Path Absorption Experiments Using the Retroreflector in Space (RIS)," Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, Chiba, 1995.

2) N. Sugimoto, A. Minato, I. Matsui, Y. Sasano, T. Itabe, T. Aoki, M. Takabe, N. Hiromoto, H. Kunimori, "Plan for the Experiment with the Retroreflector in Space (RIS) on ADEOS," European Symposium on Satellite Remote Sensing II, Paris, 1995.

3) 小澤健一、杉本伸夫、板部敏和、R. Nordstrom、齊藤保典、野村彰夫、RIS長光路吸収用炭酸ガスレーザーの特性評価、第17回レーザーセンシングシンポジウム、蒲郡、1995.

4) 杉本伸夫、笹野泰弘、湊 淳、板部敏和、青木哲郎、R. Nordstrom、ADEOS搭載リフレクタ (RIS) を用いたレーザー長光路吸収システムの開発、第17回レーザーセンシング

シンポジウム、蒲郡、1995.

- 5) 小澤健一、杉本伸夫、松井一郎、青木哲郎、板部敏和、湊 淳、廣本宣久、北原司、斉藤保典、野村彰夫、ADEOS搭載レーザーリフレクタRISを用いた大気観測実験用CO₂レーザー送受信システムの性能評価、レーザー学会第16回年次大会、25pI6, 横浜、1996.
- 6) N. Sugimoto, I. Matsui, Y. Sasano, A. Minato, K. Ozawa, Y. Saito, T. Itabe, T. Aoki, N. Hiromoto, H. Kunimori, "Laser Transmitter/Receiver System for the Retroreflector in Space Experiment," 18th International Laser Radar Conference, Berlin, 1996.
- 7) 湊 淳、杉本伸夫、遺伝的アルゴリズムを用いた衛星搭載レトロリフレクターの最適化、第57回応用物理学会学術講演会、福岡、1996.
- 8) N.Sugimoto, RIS program report, 2nd ADEOS Symposium/Workshop, Yokohama, 1997.
- 9) 古閑信彦 他, R I S測定における分光用炭酸ガスレーザーの開発, レーザー学会第17回年次大会, 23aII2, 京都, 1997.
- 10) 小澤, 古閑 他, 衛星搭載リフレクタR I Sを用いた大気レーザー長光路吸収測定用レーザー送受信システムの評価, レーザー学会第17回年次大会, 23aII3, 京都, 1997.
- 11) 杉本, ADEOS搭載R I Sの初期データの報告, 第4回大気ライダー観測研究会, 名古屋, 1997.
- 12) B.Greene, B.J.Rye, and N. Sugimoto, "Single Ended Coherent Remote Sensing with RIS," 9th Conference on Coherent Laser Radar, Linköping, Sweden 1997.
- 13) 古閑信彦、小澤健一、杉本伸夫、斉藤保典、野村彰夫、青木哲郎、板部敏和、国森裕生、ADEOS搭載RISの光学特性および長光路吸収測定誤差の評価、第18回レーザセンシングシンポジウム、陸別、1997.
- 14) 小澤健一、古閑信彦、杉本伸夫、斉藤保典、野村彰夫、青木哲郎、板部敏和、湊 淳、大島裕之、ADEOS搭載RISを用いた大気微量分子の測定、第18回レーザセンシングシンポジウム、陸別、1997.
- 15) 青木哲郎、小澤健一、古閑信彦、杉本伸夫、板部敏和、CRL 1.5 m 望遠鏡によるRIS追尾の性能評価、第18回レーザセンシングシンポジウム、陸別、1997.
- 16) N. Sugimoto, N. Koga, K. Ozawa, Y. Saito, A. Minato, T. Aoki, T. Itabe, H. Kunimori, "Laser Long-Path Absorption Experiments Using the Retroreflector in Space (RIS) on the ADEOS Satellite," Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, Chiba, 1997.
- 17) K.Ozawa, N.Koga, N.Sugimoto, T.Aoki, T.Itabe, H.Kunimori, A.Minato, Y. Kubota, Y.Saito, A.Nomura, "Optical Characteristics of the Retroreflector in Space(RIS) on the ADEOS Satellite, European Symposium on Aerospace Remote Sensing, London, 1997.
- 18) N.Koga, N.Sugimoto, K.Ozawa, Y.Saito, A.Nomura, A.Minato, T.Aoki, T.Itabe, and H.Kunimori, "Laser Long-Path Absorption Experiment Using the Retroreflector in Space (RIS) on the ADEOS Satellitr," European Symposium on Aerospace Remote Sewnsing, London, 1997.

- 19) A.Minato and N.Sugimoto,"Optical Design of Hollow Cube-Corner Retroreflector for Space" European Symposium on Aerospace Remote Sensing, London, 1997.
- 20) 古閑信彦、杉本伸夫、小澤健一、伊藤隆志、篠田健司、斉藤保典、野村彰夫、青木哲郎、板部敏和、パルス炭酸ガスレーザー長光路吸収法によるフロン12の測定、レーザー学会学術講演会第18回年次大会、つくば、1998.
- 21) 杉本伸夫、古閑信彦、小澤健一、斉藤保典、板部敏和、青木哲郎、国森裕生、ADEOS搭載レトロリフレクター(RIS)を用いた大気微量分子の地上衛星間レーザー長光路吸収測定実験、レーザー学会学術講演会第18回年次大会、つくば、1998.
- 22) N.Sugimoto, RIS program report, 3rd ADEOS Symposium/Workshop, Sendai, 1998.

(2) 誌上発表 (○は査読誌)

平成7-9年 (1995-97年) 度

- 1) N. Sugimoto, A. Minato, I. Matsui, Y. Sasano, T. Itabe, T. Aoki, M. Takabe, N. Hiromoto, H. Kunimori, "Plan for the Experiment with the Retroreflector in Space (RIS) on ADEOS," SPIE Vol. 2583, 217-227 (1995).
- 2)○ N. Sugimoto and A. Minato,"Data Reduction Method for the Laser Long-Path Absorption Measurement of Atmospheric Trace Species Using the Retroreflector in Space," IEICE Trans. Commun., E78-B (12),1585-1590 (1995).
- 3)○ 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," *Opt. Rev.* 2 (4) 319-322 (1995).
- 4)○ N. Sugimoto N, Minato A, Ozawa K, Saito Y, Nomura A, "Theoretical evaluation of earth-to-satellite laser long-path absorption measurement of atmospheric trace species in the infrared region," *Jpn. J. Appl. Phys.* 34 2329-2334 (1995).
- 5)○ N.Sugimoto, A.Minato: Optical Characteristic of the Retroreflector in Space (RIS) for the ADEOS Satellite, *Opt. Rev.* 3, 62-64 (1996).
- 6)○ K.Ozawa, N.Sugimoto, N.Koga, Y.Kubota, Y.Saito, A.Nomura, A.Minato, T.Aoki, T.Itabe, and H.Kunimori : Optical Characteristics of the Retroreflector in Space(RIS) on the ADEOS Satellite in Orbit, *Opt. Rev.* 4, No.4 (1997).
- 7)○ K. Ozawa, N. Koga, N. Sugimoto, Y. Saito, A. Nomura, T. Aoki, T. Itabe, and H. Kunimori, "Laser Transmitter/Receiver System for Earth-Satellite-Earth Long-Path Absorption Measurements of Atmospheric Trace Species Using the Retroreflector In Space," *Opt. Engineering* 36 (12) 3235-3241 (1997).
- 8)○ A. Minato and N. Sugimoto,"Design of a four-element, hollow-cube corner retroreflector for satellites by use of a genetic algorithm," *Appl. Opt.* 37 (3) 438-442 (1998).
- 9)○ N. Sugimoto, "Retroreflector in Space," *Geocarto International* 12 (4) 69-74 (1997).

- 10)○ A. Minato and N. Sugimoto, "New Method for Calculating Reflected Wave Fronts of Acute Retroreflectors with Tuned Dihedral Angle," *Opt. Rev.* 4 (16) 191-194 (1997).
- 11) K.Ozawa, N.Koga, N.Sugimoto, T.Aoki, T.Itabe, H.Kunimori, A.Minato, Y. Kubota, Y.Saito, A.Nomura, "Optical Characteristics of the Retroreflector in Space(RIS) on the ADEOS Satellite, SPIE 3218, 2-9 (1997).
- 12) N.Koga, N.Sugimoto, K.Ozawa, Y.Saito, A.Nomura, A.Minato, T.Aoki, T.Itabe, and H.Kunimori, "Laser Long-Path Absorption Experiment Using the Retroreflector in Space (RIS) on the ADEOS Satellitr," SPIE 3218, 10-18 (1997).
- 13) A.Minato and N.Sugimoto, "Optical Design of Hollow Cube-Corner Retroreflector for Space" SPIE 3218, 55-62 (1997).

(3) 出願特許

- 1) 杉本伸夫、湊 淳 ; 「キューブコーナーリトロリフレクター」、特許2045819、平成8年4月25日
- 2) 杉本伸夫、湊 淳 ; 「鋭角後方反射装置」、特願5-325477、平成5年12月22日