

地上衛星間レーザー長光路吸収法による 大気微量ガス測定

杉本 伸夫*

国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

Earth-to-satellite laser long-path absorption method
for measuring atmospheric trace gases

Nobuo Sugimoto*

National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

*Corresponding author

(Received May 25, 2023, Revised July 20, 2023, Accepted July 28, 2023)

Atmospheric trace gas measurement methods using earth-to-satellite laser long-path absorption are reviewed. An experiment using a retroreflector on a polar orbit satellite was performed in the Retroreflector In Space Experiment in 1996. Absorption spectrum of ozone in 9- μm region was successfully measured using TEA CO₂ lasers. However, the optical efficiency and the efficiency of operation were low as an observation system. One way long-path absorption to a receiver on a geosynchronous satellite is much efficient. Multiplexing of the measurements from multiple ground stations is also possible using time sharing of pulsed integrated path differential absorption (IPDA) method. The use of dual comb spectroscopy would be also possible, though multiplexing of ground stations is not possible. The geosynchronous satellite system can provide continuous column concentration data over the ground stations. The data will be complementary to space borne IPDA lidars and passive sensors, and also useful for validation of passive sensors.

キーワード：レーザー長光路吸収, 大気微量ガス, 人工衛星, 長光路差分吸収, デュアルコム分光

Key Words: Laser Long-Path Absorption, Atmospheric Trace Gases, Satellite, Integrated Path Differential Absorption, Dual Comb Spectroscopy

1. はじめに

本文では、地上から人工衛星に送信したレーザー光を用いて大気微量ガスの分光測定を行う地上衛星間レーザー長光路吸収法について解説する。地上衛星間レーザー長光路吸収測定の方法は、1976年に出版された E. D. Hinkley 編の書籍“Laser Monitoring of the Atmosphere”の第6章で提示されているものがおそらく最初であろう¹⁾。そこでは分光手法や測定対象の具体的な検討については記述されていないが、太陽光や大気放射を光源とする衛星搭載受動センサーに比べて高感度の測定の可能性を予感させるものであった。筆者はこれに触発されて、静止軌道衛星を用いた地上衛星間レーザー長光路吸収による計測システムの概念を提案した²⁾。これは地上に配置した多数のレーザー局と静止軌道衛星に搭載した検出器で観測システムを構成するもので、多数の地上局を区別するためにアダマール変換光学を用いるものであった。この手法は、光源をアダマールコードで変調する能動アダマール変換分光法^{3,4)}の拡張として考案したものであった。なお、能動アダマール変換光学は、疑似ランダム変調ライダー⁵⁾と類似した手法でもあった。しかしながら、静止

衛星へのセンサーの搭載は現実的には極めて困難であったため、レトロリフレクター Retroreflector in Space (RIS) を ADEOS (Advanced Earth Observation Satellite) に搭載して往復の光路で分光測定実験を行うことを提案することとなった。

静止軌道衛星への片道のレーザー長光路吸収測定と低軌道衛星搭載リフレクターによる地上衛星間の往復の測定では、レーザー送受信システムも、分光測定手法も大きく異なる。低軌道衛星搭載レトロリフレクターを用いた測定では、衛星が高速で移動するために生じる反射光のドップラーシフトが大きく、ドップラーシフトは地上局から見た衛星の位置に依存して変化するため、これを考慮した分光測定手法が必要である。また、地上局には大口径で高速高精度の衛星追尾システムが必要である。RIS 実験では、東京都小金井市にある通信総合研究所 (CRL) (現情報通信研究機構 (NICT)) の口径 1.5 m の衛星追尾望遠鏡を利用し、単一縦モードパルス炭酸ガスレーザーを光源とする送受信システムを新たに開発して分光測定実験を行った⁶⁾。反射光のドップラーシフトを利用して波長掃引する手法によりオゾンの吸収線の測定に成功した。ADEOS 衛星は、太陽電池パドルの破断のため約 10 ヶ月で運用停止となったため当初計画した実験の一部分しか実施できなかったが、技術実証としては成功したと言える。しかしながら、レトロリフレクターを用いる大気微量ガスの測定は、測定系の光学的効率、運用効率 (測定可能時間/衛星の運用時間) とともに非常に低いため、実用的な観測システムとは言い難いものであった。一方、衛星側で地上からのレーザー光を受信する方法ではレトロリフレクターを用いる方法に比べて送受信の光学的な効率が高く、地上局に大規模な衛星追尾望遠鏡を必要としない。静止軌道衛星で受信する方法は運用効率が高く、また、多数の地上局との間の測定を多重化して同時に行うことも可能である。

RIS 実験以降、筆者らの研究を除くと、地上衛星間、あるいは衛星・衛星間のレーザー長光路吸収に関する研究の報告は少ないが、Hoffmann ら⁷⁾は、衛星間でレトロリフレクターを用いたレーザー長光路吸収による上層大気の水蒸気の測定の可能性を検討している。また、Satoh ら⁸⁾は装置の観点から、衛星から地表面反射を用いて往復で測定する方式 (衛星搭載長光路差分吸収ライダー: Integrated Path Differential Absorption (IPDA) lidar)、地上から衛星搭載レトロリフレクターを用いて測定する方式、地上からのレーザー光を衛星で受信する方式を考察し、衛星搭載 IPDA ライダーとともに、地上から衛星への片道の測定方式の妥当性を示している。

現在、衛星搭載受動センサーによって、多くの大気微量ガスが測定されている。例えば JAXA の GOSAT、GOSAT-2⁹⁾、NASA の OCO2¹⁰⁾、EUMETSAT の GOME-2¹¹⁾、Sentinel-5P の TROPOMI¹²⁾、Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) 衛星搭載の Cross-track Infrared Sounder (CrIS)¹³⁾、静止軌道衛星では韓国の Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer (GEMS)¹⁴⁾、最近打ち上げられた米国の Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution (TEMPO)¹⁵⁾ などである。また、衛星搭載 IPDA ライダーについては、2022 年 4 月に炭酸ガス観測 IPDA ライダーが搭載された中国の Daqi 1 (大気 1) 英語名 Atmospheric Environment Monitoring Satellite 1 (AEMS 1) が打ち上げられた他¹⁶⁾、2028 年には欧州のメタン観測ミッション Methane Remote Sensing Lidar Mission (MERLIN) が計画されている¹⁷⁾。地上衛星間のレーザー長光路吸収法を考えるにあたっては、これらの受動センサーや衛星搭載 IPDA ライダーとの連携を考えることが重要である。

太陽光を光源とする受動方式に対するレーザー長光路吸収法の利点は、原理的に高感度の測定が可能であること、昼夜を問わずほぼ同じ条件で測定が可能であること、大気微量ガスの導出において複雑な放射伝達の解析を必要としないこと、部分的に雲があるような状況や光学的に厚いエアロゾルがある場合にも測定の可能性があること等である。一方、地上衛星間レーザー長光路吸収法の欠点は測定が地上局の上空のみで行えないことであるが、静止軌道衛星を用いるシステムでは受動センサーや衛星搭載 IPDA ライダーとは異なる切り口で時間的に連続したデータが得られる。また、多数の地上局の測定を多重化すれば、都市や発生源近傍などの局所的なスケールの現象の観測や監視にも応用できる。また、受動方式の衛星センサーの検証にレーザー長光路吸収法を用いることも意義が大きいと考えられる。

本文では、まず第 2 節で ADEOS 搭載レトロリフレクター RIS を用いた実験の概要と成果を紹介する。次に第 3 節で衛星に検出器を搭載する地上衛星間レーザー長光路吸収法について光学的な効率を考察する。また、様々な大気微量ガスの測定の可能性の検討結果を紹介する。第 4 節では静止軌道衛星に検出器を搭載したシステムにおける分光手法について考察する。ここでは、複数の波長のレーザーを用いる差分吸収方式を

中心に考察するが、光周波数コムの利用の可能性についても触れる。第5節で今後の課題と展望を述べる。

2. RIS 実験の概要と成果

RIS 実験は、軌道高度約 800 km の極軌道衛星 ADEOS (「みどり」1996 年 8 月 17 日打ち上げ) に搭載したレトロリフレクター RIS に地上からレーザーを送信し、反射光を受信することによって、大気中の微量ガスの濃度を測定する実験であった⁶⁾。Fig. 1 に RIS 実験の概念を示す。これを実現するためには以下のような課題があった。

- 1) 高速高精度の大口径の衛星追尾システムが必要 (そこで CRL (現 NICT) の口径 1.5 m の衛星追尾望遠鏡 (Contraves 社) を利用した。)
- 2) 衛星搭載レトロリフレクターの最適化 (衛星が約 7 km/s の速度で進行するため、地上局から送信したレーザーの反射光の光行差が大きく、最大約 60 μ rad となる。このため完全なレトロリフレクターでは反射光が地上局に戻らない。そこで衛星までの距離が 800 km の場合反射ビームは約 50 m ずれる。そこで曲面の入ったコーナーキューブを新たに開発した。)
- 3) 反射光のドップラーシフトを考慮した分光手法の開発 (衛星の移動速度が速いので反射光のドップラーシフトも大きい。そこでレーザー波長は固定し、衛星の進行に伴って変化するドップラーシフトを利用して吸収線を掃引する手法を考案した。)

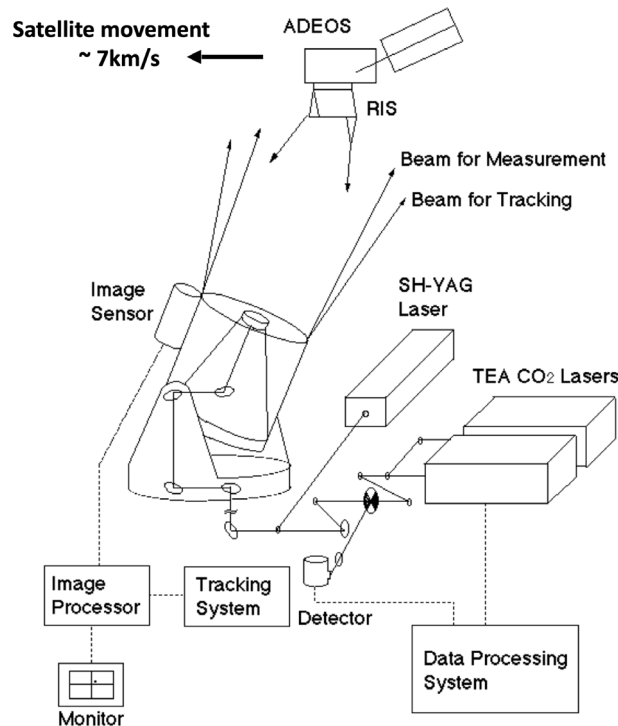


Fig. 1 Concept of the Retroreflector in Space Experiment.

2.1 RIS の光学設計

反射光の地上パターンを最適化するために RIS のコーナーキューブのひとつの面にわずかな曲面を入れた¹⁸⁾。Fig. 2 に (a) ADEOS 衛星上の RIS の配置、(b) RIS を正面から見た反射光の波面、(c) RIS の反射光の地上パターンを示す。反射光の遠距離における強度パターンは進行方向の前後 2 つに別れ、後のピークが地上局に戻るよう最適化した。正面から見た RIS の有効径は約 50 cm である。RIS は ADEOS の前方に配置され、ADEOS 搭載の受動センサーへのレーザー光の干渉を避けるため光軸を傾けて取り付けられた。地上局から見て ADEOS が向かって左側を通過するパスにおいて、低仰角で RIS を捕捉した後、地上局を通過するまでの間 (約 3 分間) に分光測定が行われた。Fig. 3 に、RIS に 10 μ m のレーザーを送受信する場合の光学的効率 (後述) のシミュレーション結果を地上局に対する衛星の位置の関数として表示した。効率は衛

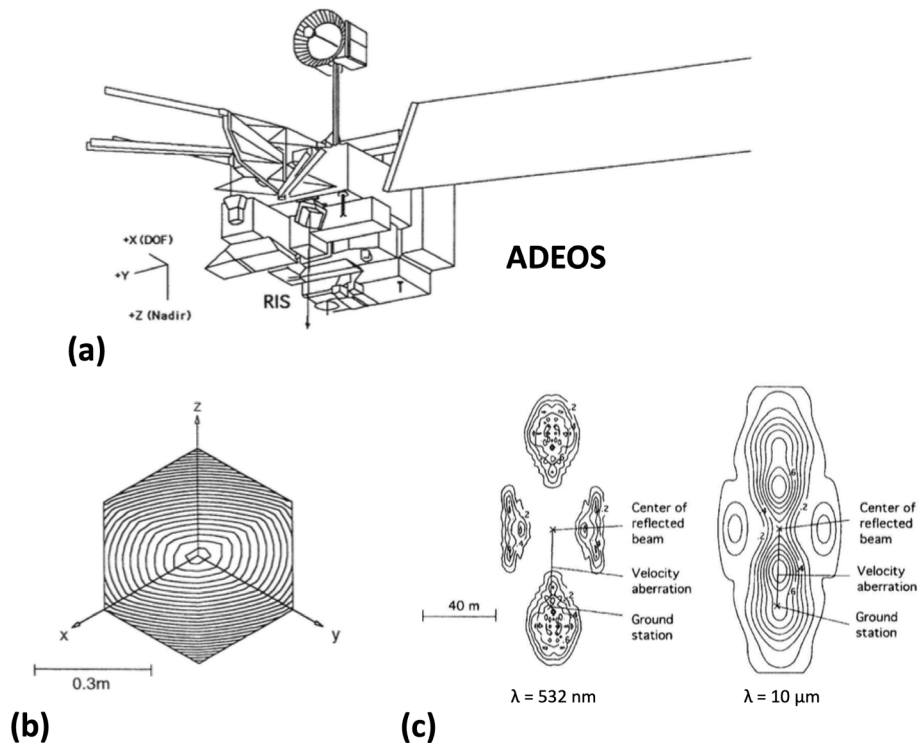


Fig. 2 (a) Configuration of RIS on ADEOS, (b) near-field wave front of the reflected beam from RIS (interferogram at 632 nm), and (c) ground patterns of the reflected beam intensity at 532 nm and 10 μm ⁶⁾.

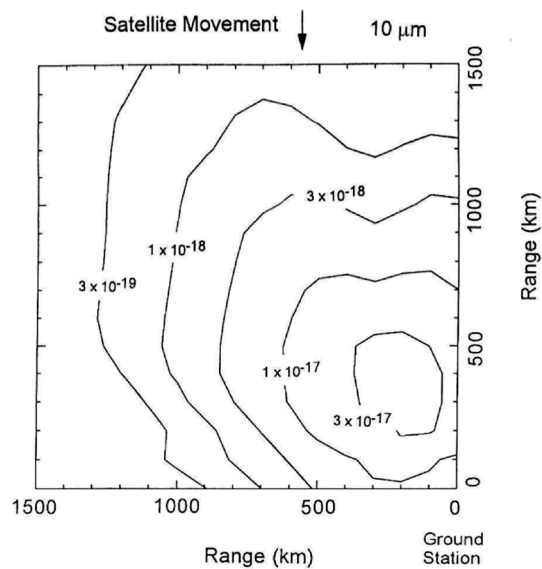


Fig. 3 Simulated efficiency of the reflection of RIS at 10 μm as a function of the horizontal position of ADEOS in orbit relative to the ground station¹⁹⁾.

星の位置に依存して2桁程度変化する。RISはホロー型のキューブコーナーレトロリフレクターで、軽量構造の3枚のミラーが接着され一体化されている。製作は米国PLX社で行われた。3枚のうちの進行方向を向いたミラーにわずかな球面が入っている。

2.2 反射光のドップラーシフトを利用した吸収分光手法

衛星の進行速度が速いため反射光のドップラーシフトも大きく、その大きさは衛星から見た地上局の方向と進行方向のなす角度の余弦におよそ比例して変化する。RIS 実験の場合、波長 $10\ \mu\text{m}$ において、最大でおよそ $1.3\ \text{GHz}$ である。これは、例えば成層圏オゾンの孤立した吸収線のドップラー幅に比べてずっと大きい(オゾン分子の運動速度が $\sim 400\ \text{m/s}$ に対して衛星の速度は $\sim 7\ \text{km/s}$)。そこで RIS 実験では、レーザー波長は固定して、衛星の進行に伴う反射光のドップラーシフトの変化を利用して吸収スペクトル測定を行う方法を採用した¹⁹⁾。レーザーには単一縦モードの TEA (Transversely Excited Atmospheric pressure) CO_2 レーザーを2台用いた。1台(primary レーザー)は測定対象分子の吸収スペクトルがドップラーシフトの波長範囲に入る発振線に同調し、もう一台(reference レーザー)は参照信号として吸収の小さい発振線に同調した。Fig. 4 に成層圏オゾンの測定に用いた発振線と大気のスเปクトルの例を示す。ドップラーシフトの範囲を点線で示す。Fig. 4 左が吸収測定用、右が参照用の発振線である。Fig. 4 左の $1043.18\ \text{cm}^{-1}$ 付近の鋭い吸収線が成層圏オゾンによるもので、背景に CO_2 の吸収が重なっている。 CO_2 は地上付近に分布するので大きな圧力広がり(数 GHz)を持つ。圧力広がり(数 GHz)は衛星の速度によるドップラーシフトと比べても大きい。なお、レーザーはゲインセルを用いたハイブリッド型の単一縦モードの TEA CO_2 レーザーで、パルス動作時以外はゲインセルのゲインを上げて CW 発振させて共振器を制御し、パルス動作時はゲインを下げてピークパワーの大きなパルスが得られるようにした。CW 発振を利用した共振器制御により、発振線をすばやく切り替えることが可能であった²⁰⁾。このレーザーは米国 Laser Science 社で製作された。なお、Laser Science 社は 1960 年に He-Ne レーザーの連続発振に最初に成功した Ali Javan が 1981 年に設立した会社である。

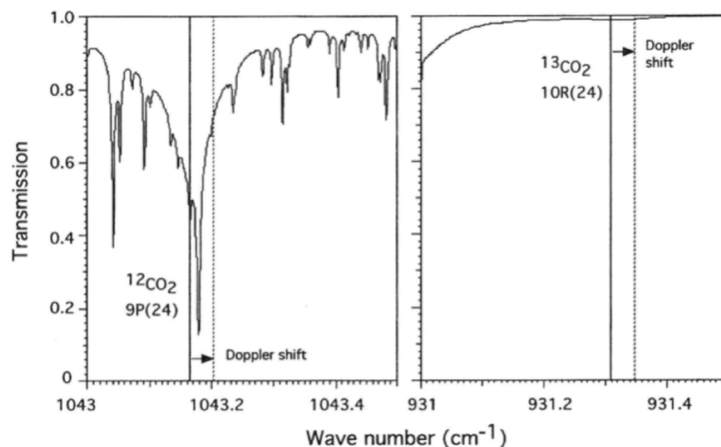


Fig. 4 The CO_2 laser lines used for the ozone measurement and the atmospheric absorption spectrum calculated with HITRAN⁶⁾.

2.3 RIS 実験システム

CRL (現 NICT) 光センターの口径 $1.5\ \text{m}$ の衛星追尾望遠鏡のクーデ室に設置したレーザー送受信部のブロック図を Fig. 5 に示す。RIS の能動追尾(および測距)用の $532\ \text{nm}$ のレーザー送受信部と分光計測用の2台の TEA CO_2 レーザーの送受信部から構成された。能動追尾では追尾望遠鏡の主鏡脇に取り付けられたガイド望遠鏡も併用した^{6,21)}。Fig. 6 に ADEOS 搭載 RIS のフライトモデル、CRL の $1.5\ \text{m}$ 追尾望遠鏡、レーザー送受信部の写真を示す。

2台の CO_2 レーザーからのパルスは $200\ \mu\text{s}$ の間隔を開けて送信され、衛星の捕捉から測定終了まで(約 200 秒)の間、繰り返し数 $50\ \text{Hz}$ で送受信パルスをショット毎に記録した。記録にはトランジェントデジタルイザ(デジタルオシロスコープ LeCroy 9310L)をメモリー分割モードで使い、パルス毎に $10\ \mu\text{s}$ の波形($50\ \text{MHz}$ で 512 ワード、精度 8 bit)を記録した。必要な時間領域を記録するために衛星軌道要素から受信パルスのタイミングを予測してトリガ信号を与えた。また、全てのパルス信号を逃さず記録するために、デジタルイザ2台を交互に切り替えて用いることによってコンピュータへのデータ転送によるデッドタイムが生じないようにした。レーザーの制御とデータ収集にはそれぞれコンピュータ(Macintosh IIVX)を用い、ソフト

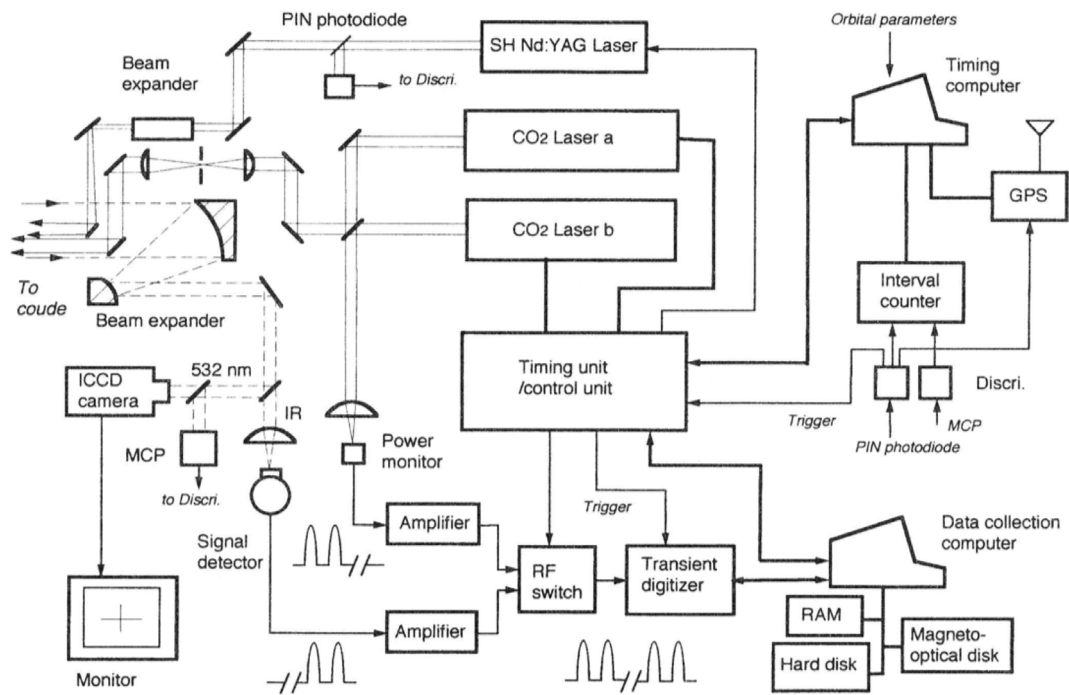
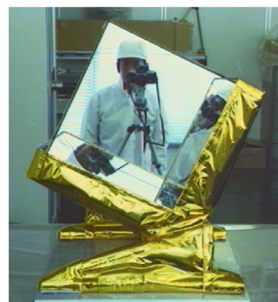


Fig. 5 Block diagram of the laser transmitter/receiver system⁶⁾.



RIS



1.5-m tracking system at CRL



Laser transmitter/receiver system

Fig. 6 Photograph of RIS, 1.5 m tracking telescope at CRL, and the laser transmitter/receiver system for the RIS experiment⁶⁾.

ウェアは LabView を用いて作成された。

2.4 RIS 実験の成果

RIS 実験の主要な成果は、(1) 球面の入った大口径レトロリフレクター RIS を ADEOS に搭載し、地上から送信したレーザー光の反射の受信に成功、(2) 軌道要素に基づく追尾に加えて 532 nm レーザー光の RIS による反射を用いた能動追尾を行い、追尾精度 30 μrad 以上を達成、(3) ADEOS 衛星の多数のパスについて、532 nm の反射光の強度を恒星の明るさと比較して評価し、設計値とほぼ一致する反射光が得られることを確認、(4) CO₂ レーザーを用いてオゾンの差分吸収測定を行い、ドップラーシフトを利用して吸収スペクトルが測定できることを実証、などである。

Fig. 7 に追尾望遠鏡のガイド望遠鏡の ICCD カメラおよびクーデ室の ICCD カメラで捉えた RIS からの 532 nm の反射画像を示す。ガイド望遠鏡の画像の視野は約 12 mrad、クーデ室の画像の視野は約 200 μrad である。

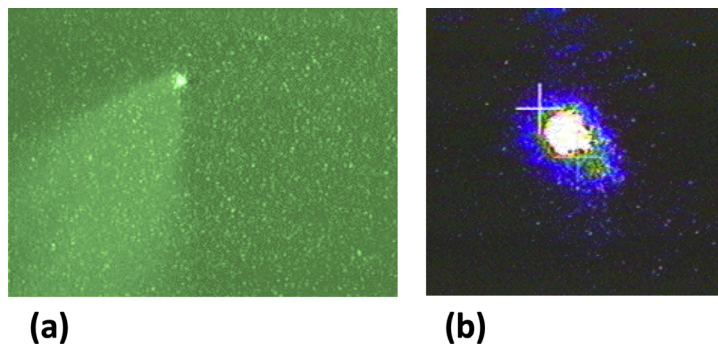


Fig. 7 Image of reflection from RIS at 532 nm taken by the ICCD cameras (a) on the guide telescope and (b) in the coude system.

ガイド望遠鏡で捉えた RIS の ICCD 画像を用いて、軌道上の RIS からの反射光の強度を評価した。予め明るさ(等級)の異なる恒星の画像を取得しておき、これと比較することによって測定された RIS の反射がどの等級に分類されるかを調べた。等級から受信光強度に換算して RIS の反射光の受信効率を求めた。効率 η (m^{-2}) は次式で定義された。

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

ここに、 P は受信光強度、 P_0 は送信光強度、 θ_t は送信ビーム広がり(全角)、 T は大気透過率、 η_{RIS} は RIS のミラーの(3回反射の)反射率、 A_r は受信望遠鏡の面積、 η_{sys} は受信系の光学的な効率である。RIS 実験の場合、532 nm において、 $P_0 = 3 \text{ W}$ (30 mJ, 10 Hz)、 $\theta_t = 0.5 \text{ mrad}$ 、 $A_r = 314 \text{ cm}^2$ (口径 20 cm のガイド望遠鏡) である。また、 $\eta_{RIS} = 0.8$ 、 $T = 0.7$ とした。ガイド鏡の光学系の η_{sys} は恒星の強度測定時と共通なので 1 である。

Fig. 8 に軌道上の RIS の反射光の受信効率 η を RIS の位置(時間)に対してグレースケールで示す。左図が測定値、右図が理論値である。位置は軌道毎の測定終了時刻を原点とする時間で表されている。測定終了時刻は RIS の進行方向と RIS から見た地上局の方向が成す角度が 90 度になる時刻で、図中の最大仰角がこのパスにおける地上局から見た RIS の仰角の最大値である。真上を通過するパスではこれが 90 度になる。RIS の速度は約 7 km/s であるので、真上を通過する軌道の場合、例えば図の横軸の時間が -200 s のとき、地上距離で約 1400 km 離れた位置に RIS があることを意味する。

Fig. 8 に示すように測定結果は、部分的に雲の影響や追尾エラーによる効率の低下が見られるが、ほぼ理論と整合する結果が得られた。

10 μm 帯の TEA CO₂ レーザーによる分光測定実験の結果の例を Fig. 9 に示す。この例では、primary レーザーは ¹²CO₂ 9P (24)、reference レーザーは ¹³CO₂ 10R (24) に同調した。Fig. 9 (a) は 2 台の TEA CO₂ レーザーからの送信パルス波形と対応する受信信号パルスの一例である。Fig. 9 (b) にショット毎に送信パ

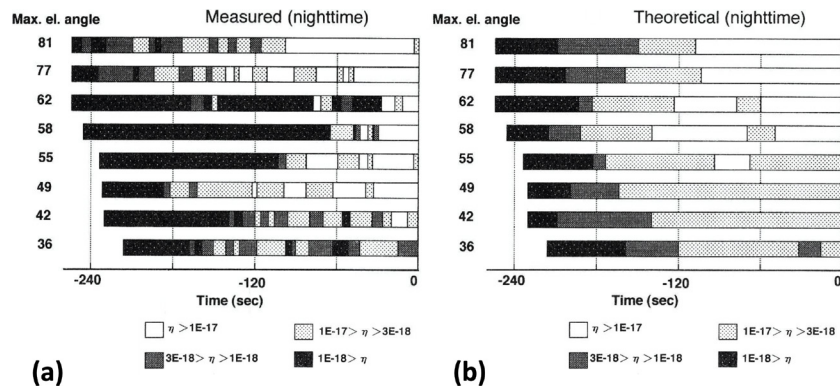


Fig. 8 (left) Measured and (right) theoretical efficiency of reflection of the RIS for nighttime paths⁶⁾.

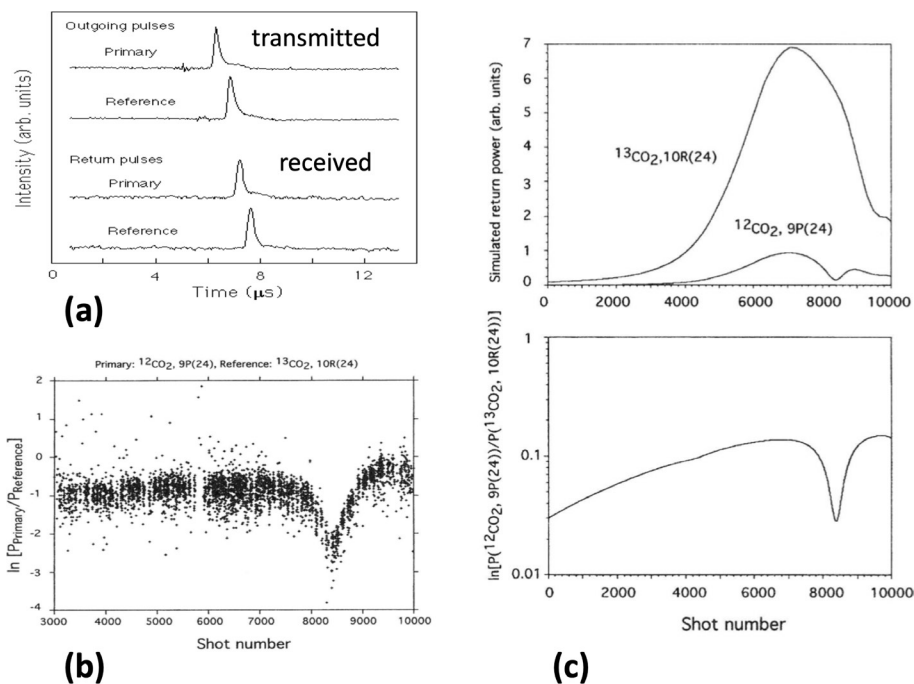


Fig. 9 (a) Example of the recorded waveforms of a pair of transmitted and received CO₂ laser pulses in the measurement with the RIS at 10 μm, (b) Spectrum of ozone measured with RIS (Dec. 23, 1996), (c) Simulated signals for the RIS measurement.⁶⁾.

ルス強度で規格化した受信信号強度の primary と reference の比をショット数の関数として示した。反射光は RIS が移動することによるドップラーシフトを受け、その大きさは RIS の位置に依存して変化する。RIS を低仰角で補足した時にドップラーシフトは最大 (約 0.04 cm⁻¹) で、地上局に近づくにしたがって小さくなる。測定時間は、この例では 140 秒である。

Fig. 9 (c) に、Fig. 4 に示した大気透過スペクトルと衛星の位置による RIS の効率の変化を考慮した受信信号のシミュレーション結果を示す。(上) は primary および reference レーザーの受信信号強度、(下) はそれらの比である。Fig. 9 (c) (下) が測定結果 Fig. 9 (b) に対応する。両者は良く一致した。

RIS 実験の当初の計画では、TEA CO₂ レーザーを用いてオゾンその他、CO₂、HNO₃、CFC12、TEA CO₂ レーザーの第二高調波を用いて、CO、N₂O、第三高調波を用いて CH₄ の測定実験が計画されていた¹⁹⁾。しかしながら、ADEOS が太陽電池パドルの破断のため 1997 年 6 月 30 日に運用停止となったため計画の多くは実施することができなかった。

この節の最後に、RIS 実験におけるレーザー光の送受信の全体としての効率についてまとめておく。Fig.

3に示したRISの効率と、送信TEA CO₂レーザーのビーム広がり(100 μrad)、受信望遠鏡口径(1.5 m)を用いて、レーザー送受信の効率(受信信号パワー/送信レーザーパワー)を評価すると、10⁻¹¹~3×10⁻⁹となる。効率は最大値でも3×10⁻⁹と小さな値である。しかしこの値は、後方散乱ライダーで1 km離れた反射率1のハードターゲットのランバート反射を口径10 cmの望遠鏡で受信するのと同程度の効率であるので、一般的な後方散乱ライダー測定と比較するならば小さな値ではない。RISを用いた長光路吸収測定を計測システムと考える時の最大の問題点は運用効率の低さである。測定が可能なのは衛星が地上局付近を通過する数分間のみで、また晴天である必要がある。さらに、衛星の進行に伴うドップラーシフトの変化を利用して分光測定を行うため、部分的に雲がある場合にも測定条件は完全ではない。

3. 衛星に検出器を搭載する地上衛星間レーザー長光路吸収法

衛星側に検出器を搭載してレーザー光を受信する地上衛星間レーザー長光路吸収法では、送信レーザー光の受信効率はレトロリフレクターを用いる場合に比べて格段に高い。Table 1に衛星までの距離が36,000 kmの静止衛星の場合と1,000 kmの低軌道衛星の場合の送受信の光学的効率の評価結果を掲げる。ここで静止衛星については搭載受信システムの受光望遠鏡口径を20 cm、低軌道衛星については10 cmとした。また、地上からの送信ビームの広がりはいずれも100 μradとした。光学的効率は静止衛星の場合でもRIS実験の効率の最大値と同等の3×10⁻⁹である。低軌道衛星では1×10⁻⁶である。これらを後方散乱ライダーの光学的効率と比較すると、受信望遠鏡口径10 cmのライダーで、前者では距離1 km、後者では距離50 mの反射率1のハードターゲットのランバート反射を受信するのと同様である。なお、この他に準天頂衛星も考えられるが、軌道高度は遠点高度で約39,000 kmで静止軌道の高度とほぼ同じであるので光学的な効率について大差はない。

Table 1 Optical efficiency of ground-to-satellite laser transmission.

Distance to Satellite	Transmitted Beam Divergence (full angle), and Diameter of Receiver on Satellite	Optical Efficiency
36,000 km	100 μrad, 20 cm	~ 3 × 10 ⁻⁹
1,000 km	100 μrad, 10 cm	~ 1 × 10 ⁻⁶

衛星で地上から送信するレーザー光を受信する方法のもうひとつの大きな利点は、地上に大口径の追尾システムが不要であることである。送信ビーム広がり100 μradとすると、波長10 μmでも(回折限界の場合)送信ビームの口径は15 cm程度で良い。静止軌道衛星の場合は高速の追尾は必要なく、追尾の角度範囲も狭くて良い。しかしながら、低軌道衛星では、高速の衛星追尾が必要であるだけでなく、衛星側の受信系でも地上局を追尾する必要がある。また、RIS実験と同様に、衛星が地上局上空を通過する限られた時間にしか測定ができないという欠点があり、運用効率が非常に低い。これに対して静止軌道の場合は常時運用が可能であり測定システムとして格段に優れていると言える。静止軌道衛星の問題は、1基でカバーできる領域が全球の3分の1以下であること、高緯度では地上局から見た衛星の仰角が低くなることである。地上から送信するレーザー光を衛星側の検出器で受信する方法では、いずれの衛星軌道でも測定対象ガスを透過するレーザー光が衛星の移動によるドップラーシフトを受けないことではないので、レーザー光の波長を掃引する、あるいは切り替えるような分光手法が必要となる。

地上衛星間レーザー長光路吸収法で大気中のどの分子が測定できるかについては、筆者らの1995年の論文で考察された²²⁾。そこでは、大気微量分子の吸収線データベース HITRAN92 と吸収スペクトル計算プログラム FASCOD を用いて、地上衛星間の光路で、1~20 μm の波長領域において、大気中の分子毎に強い吸収線を探し、干渉となる分子の吸収も考慮して、それぞれの測定可能性を評価した。測定にはパルスの単一波長レーザーを用い、測定対象分子の吸収線のまわりの波長領域を掃引する方法を想定した。

吸収の大きい H₂O, CO₂, O₃, CH₄, N₂O, CO については、測定に適する強さの吸収線を選ぶことによってカラム量の測定が可能である。またオゾンのように高高度まで分布する分子では吸収線幅の圧力広が

りを利用して高度プロファイルを推定することも可能である。また、 NO_2 , HNO_3 , HF , HCl , OCS , C_2H_2 , NH_3 , NO , C_2H_2 , H_2CO , HOCl についてはカラム量の測定が可能であるが、 HCN , SO_2 などについては波長1~20 μm では測定は不可能である²²⁾。一方、この文献では検討されていないが、ブロードな吸収を持つCFCについても、やや広い波長領域をカバーする分光手法を用いて測定が可能である。RIS実験でも、918.7-923.1 cm^{-1} の領域で、 CO_2 レーザーの10R(6)-10R(12)を切替えてCFC12を測定することが検討されていた¹⁹⁾。この他、測定領域を可視紫外に広げると、 NO_2 , SO_2 , O_3 , BrO , HCHO などの測定の可能性がある^{11, 15)}。

4. 静止軌道衛星に検出器を搭載したレーザー長光路吸収測定における分光手法

本節では地上から静止軌道衛星へのレーザー長光路吸収測定のための分光測定手法について考察する。分光測定手法は測定対象ガスに依存するが、ここでは、単一の吸収線が測定できる CO_2 や CH_4 などの測定を想定する。

4.1 IPDAの応用

測定対象ガスの吸収線の波長と吸収のない参照波長の2波長（あるいは吸収線のまわりの複数の波長）のレーザーを切り替えて測定する手法が最も簡単であると考えられる。これは、航空機や衛星からの CO_2 やメタンの測定手法として開発されているIPDAライダー^{16, 17, 23, 24)}に用いられる手法を、受信系を静止軌道衛星に搭載して片道のパスで行うものである。なお、RIS実験も、反射光のドップラーシフトによる波長掃引を除けば、往復のIPDAである。太陽光による背景光雑音の観点からパルスレーザーを用いる方法が有利である。吸収のon, offのパルスペア（あるいは吸収線のまわりの複数のパルス）を短い時間内にあらかじめ設定したタイミングで送信する。受信系では波形を記録し、それぞれの波長の受信信号強度を測定して地上に伝送する。この手法の利点は、衛星側の受信光学系を（背景光雑音や検出器雑音の許す限り）広角にできること（従って、衛星側での地上局のポインティングは不要であること）、またタイミングを割り当てることで受信視野内の複数の地上局の測定を多重化できることである。例えば、パルスペアの送信を100 μs 以内に行い、繰り返し数が100 Hzである場合、ひとつの受信視野内の100の地上局を多重化できる。測定の多重化は、局所スケールから都市スケールの現象への応用を考える上で非常に有用であると考えられる。

4.2 光周波数コムの利用

RIS実験の検討段階で、極単パルスレーザーのスペクトル広がりを利用した分光手法を検討したことがあった²⁵⁾。測定対象分子のスペクトル幅が数GHzであるので、ヘテロダイン信号の帯域は10GHz程度が必要で、検出系にもその帯域が要求されるため現実的ではなかった。1990年代前半であったので光周波数コムには考えが至らなかったわけであるが、現在ではDual comb spectroscopy (DCS)の利用が考えられる²⁶⁾。DCSは周波数間隔のわずかに異なる（時間領域ではパルスの間隔がわずかに異なる）2つの光周波数コム干渉を利用した分光法である。DCSにはsymmetricとasymmetricの2つの方式がある。違いは吸収測定の対象が光学系のどこに入るかである。Fig. 10に地上衛星間長光路吸収に利用する場合の概念を示す²⁷⁾。Symmetric DCSの場合は、2つの光周波数コムが地上局にあるが、asymmetricでは衛星の受信系に独立の光周波数コムを用いる。

Fig. 10 (b)に示すasymmetric DCSは、ヘテロダイン検波を複数の波長に多重化したものと考えられることができる。コムモード毎にビート周波数が少しずつシフトするようにローカル光のコムを設定することによって、光の波長帯の分光をビート周波数であるラジオ波の帯域に変換して行なうことができる。ヘテロダイン検波ではローカル光強度が十分に強いことが必要であるので、ローカル光用の光周波数コムは衛星に搭載することになる。この場合、ヘテロダイン検波のローカル光として周波数領域で用いるのみで、また測定対象分子のスペクトルはあらかじめ分かっているため、衛星搭載光コムに要求される精度は高くはない。なお、コム波長帯は測定対象分子の吸収線の測定に必要な波長領域に制限し、不必要な波長のローカル光によるショット雑音をできるだけ抑えることが望まれる。Asymmetric DCS方式は、高感度が期待されるが、衛星側から地上局の精密なポインティングが必要なのが難点である。また、複数の地上局からの測定を多重化することは不可能で、地上局を順次、精密にポインティングして測定を行う必要がある。

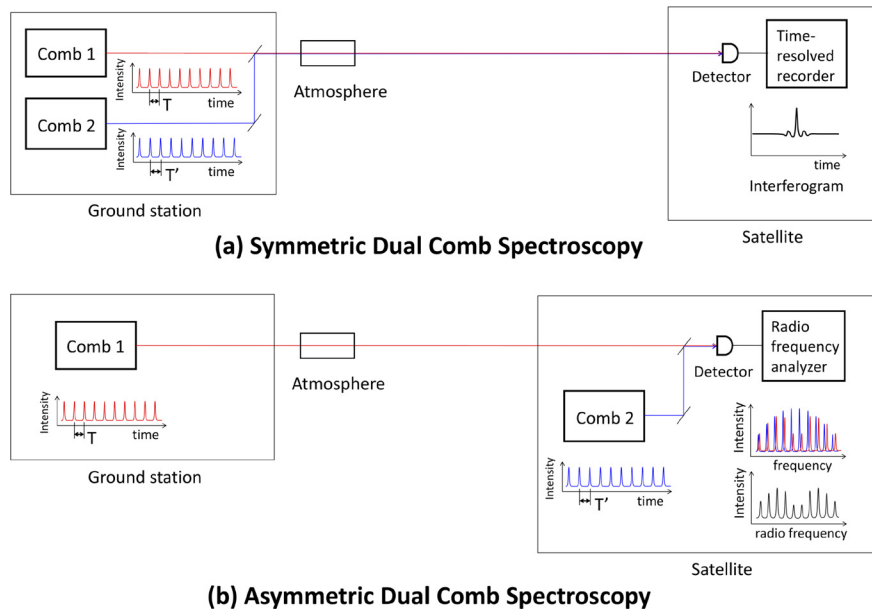


Fig. 10 Concept of applying dual comb spectroscopy to earth-to-satellite long-path absorption measurement²⁷⁾.

Fig. 10 (a) に示す symmetric DCS の場合は 2 つの光周波数コムは地上局にあり、衛星側の受信系は検出器と波形記録装置のみで構成される。2 つのコムの特徴が等しく、パルス間隔がわずかに異なるのみであるとすると、symmetric DCS は、時間領域で見ると、一つの光コムと干渉計を用いて、干渉計の片方のアームを連続的に掃引するフーリエ変換分光法 (FTS) と同等であることが分かる。すなわち、interferogram が繰り返し測定されることになる。光コムの特長が広いと想定して FTS との類似性を考えるならば、コムモード間隔 (パルス列の周期の逆数) でスペクトル測定の分解能が決まり、2 つのコムのパルス列が復帰するまでのパルス数 (すなわち interferogram 測定の分解能) からスペクトル測定の最短波長が決まることになる。衛星での受信光強度が低い場合、測定感度は asymmetric DCS よりも低いと考えられるが、衛星側の受信系に必要なのは、コムのパルス列の周波数程度の応答速度を持つ検出器と波形記録装置で比較的簡単である。また、この方法では、ヘテロダイン検波ほどの精度は要求されないと考えられるが、やはり衛星側から地上局のポインティングが必要である。

5. 今後の課題と展望

静止軌道衛星を用いて、IPDA 方式の地上局を用いる地上衛星間レーザー長光路吸収方法が、測定の多重化の観点から有効であると考えられる。測定対象を CO₂ とメタンに限っても、衛星搭載受動センサーや衛星搭載 IPDA を補完し、領域スケール、局所スケールの詳細な情報を得るための有用な手法となると期待される。

Fig. 11 は、筆者の 1987 年の論文²⁾に掲載された概念図である。当初の提案は CW レーザーでアダマール変換光学を使って多数の地上局からの測定を多重化するというものであったが、パルスレーザーで時間分割により多重化する方法がより簡単で、SN 比の観点からも有利である。詳細については今後の検討が必要であるが、受光システムでは、例えば広い視野をカバーする 2 次元アレイを用いて、素子毎に高速で時間分解測定を行う。地上局は IPDA 方式の送信システムで、地上局毎にタイミングを割り当ててレーザーパルスペアを送信する。これによって、一つの素子の受信視野内の複数の地上局からの測定を多重化する。測定波長が近赤外であれば、送信ビームの口径は数 cm で十分である。静止軌道衛星は大きく移動することはないが、高精度の追尾が必要であるので、追尾のためのマーカー信号などの方法を検討することも必要である。

受動センサーの検証やグローバルな大気環境の監視などの目的などでは、地上局の数は限られるが、symmetric DCS の利用が有用であるかもしれない。ある程度の広いスペクトル領域で、時間を問わず能動的な FTS 測定ができるのは非常に魅力的であろう。この場合、背景光雑音が測定感度を制限する可能性があり、

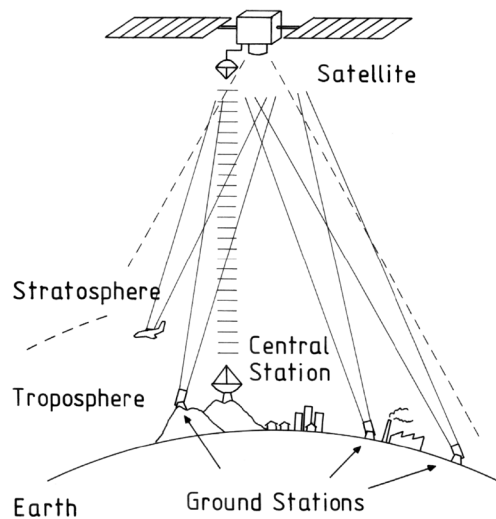


Fig. 11 Concept of earth-to-satellite laser long-path absorption system using a detection system on a geosynchronous satellite²⁾.

地上から送信する光周波数コムのパワーが十分に大きいことが必要となる。今後、具体的に測定対象や波長領域を設定して検討する必要がある。3節で述べたように送受信の光学的効率は、受信望遠鏡口径10cmの後方散乱ライダーで距離1kmの反射率1のハードターゲットのランバート反射を受信するのと同様であるので、ハードターゲットを用いて基礎実験を行うことが有用であると考えられる。

IPDA方式の地上局を多数配置する場合、地上局の小型化や低コスト化が課題である。この場合もハードターゲットを用いたライダーによる基礎研究が有用であろう。また、曇天時に雲底の散乱を利用したIPDA測定の可能性の検討なども有用である。最近、ドローン搭載レトロリフレクターを用いた長光路吸収法による漏洩ガスのマッピングが報告されている²⁸⁾。この論文では、IPDAではなく波長が高速で変化する半導体レーザーを用いた分光方式が用いられているが、IPDAでも同様の応用が可能であろう。

RIS実験から既に27年が経つ。この間にレーザーやIPDAライダーの技術には大きな進歩があり、静止軌道衛星を用いた測定システムも技術的には実現可能であると考えられる。また、現在既に静止軌道衛星からの受動センサーによる大気微量ガスの観測が行われている他、将来に向けたセンサーの開発も進められている。このような中で、地上静止軌道衛星間レーザー長光路吸収法が果たすべき役割は大きいと考えられる。今後、具体的な検討が進められることを期待する。

引用文献

- 1) E. D. Hinkley (ed.), "Laser Monitoring of the Atmosphere," Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (1976).
- 2) N. Sugimoto, "Atmospheric environment monitoring system based on an earth-to-satellite Hadamard transform laser long-path absorption spectrometer: a proposal," *App. Opt.*, **26**, 763-764 (1987).
- 3) N. Sugimoto, "Hadamard transform active long-path absorption spectrometer system for measurements of atmospheric trace species," *Appl. Opt.*, **26** (6), 863-865 (1986).
- 4) 杉本伸夫, "大気中微量分子測定用アダマール変換能動型長光路吸収分光計: 室内実験と測定感度の評価," *分光研究*, **36** (2), 112-122 (1987).
- 5) N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba, and K. Sakurai, "Random modulation CW lidar," *Appl. Opt.*, **22**, 1382-1386 (1983).
- 6) N. Sugimoto, N. Koga, I. Matsui, Y. Sasano, A. Minato, K. Ozawa, Y. Saito, A. Nomura, T. Aoki, T. Itabe, H. Kunimori, I. Murata, and H. Fukunishi, "Earth-Satellite-Earth Laser Long-Path Absorption Experiment Using the Retroreflector in Space (RIS) on the Advanced Earth Observing Satellite (ADEOS)," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **1**, 201-209 (1999).
- 7) A. Hoffmann, D. Clifford, J. Aulinas, J. G. Carton, F. Deconinck, B. Esen, J. Hüsing, K. Kern, S. Kox, D. Krejci, T. Krings, S. Lohrey, P. Romano, R. Topham, and C. Weitnauer, "A Novel Satellite Mission Concept for Upper Air Water Vapour, Aerosol and Cloud Observations Using Integrated Path Differential Absorption LiDAR Limb Sounding," *Remote Sens.*, **4**, 867-910 (2012).
- 8) Y. Satoh, Y. Chishiki, D. Sakaizawa, and S. Yamakawa, "Mission Study of Up-link Laser Differential Absorption Sensing,"

- International Conference on Space Optics (ICOS), Proc. SPIE, **105564**, 1056433, (2012).
- 9) S. Noël, M. Reuter, M. Buchwitz, et al., "XCO₂ retrieval for GOSAT and GOSAT-2 based on the FOCAL algorithm," *Atmos. Meas. Tech.*, **14**, 3837–3869 (2021).
 - 10) D. Crisp, H. R. Pollock, R. Rosenberg, L. Chapsky, R. A. M. Lee, F. A. Oyafuso, C. Frankenberg, C. W. O'Dell, C. J. Bruegge, G. B. Doran, A. Eldering, B. M. Fisher, D. Fu, M. R. Gunson, L. Mandrake, G. B. Osterman, F. M. Schwandner, K. Sun, T. E. Taylor, P. O. Wennberg, and D. Wunch, "The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products," *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 59–81 (2017).
 - 11) K. L. Chan, P. Valks, K.-P. Heue, et al., "Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2) Daily and Monthly Level 3 Products of Atmospheric Trace Gas Columns," *Earth Sys. Sci. Data*, **15**, 1831–1870 (2023).
 - 12) Arnoud, A., Mattia, P., Maarten, S., Veeffkind, J. P., Loyola, D., and Wang, P.: Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual KNMI level 2 support products, Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), De Bilt, the Netherlands, ATBD (2017).
 - 13) D. Fu, D. B. Millet, K. C. Wells, V. H. Payne, S. Yu, A. Guenther, and A. Eldering, "Direct retrieval of isoprene from satellite-based infrared measurements," *Nat. Commun.*, **10**, 3811 (2019).
 - 14) Jhoon Kim, et al., "New Era of Air Quality Monitoring from Space: Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS), *Bulletin of the American Meteorological Society*," **101** (1), E1-E22 (2020).
 - 15) P. Zoogman, X. Liu, R. M. Suleiman, et al., "Tropospheric emissions: Monitoring of pollution (TEMPO)," *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **186**, 17–39 (2017).
 - 16) S. Wang, J. Ke, S. Chen, Z. Zheng, C. Cheng, B. Tong, J. Liu, D. Liu, and W. Chen, "Performance Evaluation of Spaceborne Integrated Path Differential Absorption Lidar for Carbon Dioxide Detection at 1572 nm," *Remote Sens.*, **12**, 2527 (2020).
 - 17) G. Ehret, et al., "MERLIN: A French-German Space Lidar Mission Dedicated to Atmospheric Methane," *Remote Sens.*, **9**, 1052 (2017).
 - 18) A. Minato, N. Sugimoto, and Y. Sasano, "Optical design of cube-corner retroreflectors having curved mirror surfaces," *Appl. Opt.*, **31**, 6015–6020 (1992).
 - 19) 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).
 - 20) 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 transverse, electric, atmospheric CO₂ laser," *Rev. Sci. Instrum.*, **64** (6), 1663–1664 (1993).
 - 21) K. Ozawa, N. Koga, N. Sugimoto, T. Aoki, T. Itabe, H. Kunimori, A. Minato, Y. Kubota, Y. Saito, and A. Nomura, "Optical characteristics of the Retroreflector in Space (RIS) on the ADEOS satellite," *Proc. SPIE*, **3218**, 2–9 (1997).
 - 22) 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.*, **34** (5R), 2329–2334 (1995).
 - 23) S. Kameyama, M. Imaki, Y. Hirano, S. Ueno, S. Kawakami, D. Sakaizawa, and M. Nakajima, "Development of 1.6 μm continuous-wave modulation hard-target differential absorption lidar system for CO₂ sensing," *Opt. Lett.*, **34** (10), 1513–1515 (2009).
 - 24) X. Sun, J. B. Abshire, A. Ramanathan, S. R. Kawa, and J. Mao, "Retrieval algorithm for the column CO₂ mixing ratio from pulsed multi-wavelength lidar measurements," *Atmos. Meas. Tech.*, **14**, 3909–3922 (2021).
 - 25) N. Sugimoto, A. Minato, Y. Saito, and A. Nomura, "Heterodyne spectroscopy using spectral spread of short laser pulse," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** (11B), L1602-L1603 (1994).
 - 26) I. Coddington, N. Newbury, and W. Swann, "Dual-comb spectroscopy," *Optica*, **3** (4), 414–426 (2016).
 - 27) N. Sugimoto, "A comb heterodyne receiver on a geosynchronous satellite? for long-path absorption measurements of atmospheric trace gases: a feasibility study," 19th Coherent Laser Radar Conference, CLRC (2018).
 - 28) M. G. Soskind, N. P. Li, D. P. Moore, Y. Chen, L. P. Wendt, J. McSpurr, M. A. Zondlo, and G. Wosocki, "Stationary and drone-assisted methane plume localization with dispersion spectroscopy," *Remote Sens. Environ.*, **289**, 113513 (2023).

杉本伸夫

1978年大阪大学大学院基礎工学研究科修士終了。1979年国立公害研究所(現国立環境研究所)入所。1985年理学博士(東京大学理学系研究科)。レーザーを用いた能動遠隔計測手法の開発と大気の大気観測研究に従事。大気汚染NO₂の差分吸収ライダー、成層圏オゾンライダーの開発、ADEOS衛星搭載レトロリフレクター(RIS)を用いた地上衛星間レーザー長光路吸収実験などを手掛けた。また、対流圏エアロゾル観測ライダーネットワーク(AD-Net)を構築し、黄砂や越境大気汚染エアロゾルの研究を推進した。2014年に定年退職後、2019年3月までフェローとして国立環境研究所に勤務。現在は、国立環境研究所客員研究員および名古屋大学宇宙地球環境研究所客員教授。日本気象学会、日本エアロゾル学会、日本リモートセンシング学会会員、OPTICA シニア会員、SPIE シニア会員。