

# 地上静止衛星間レーザー長光路吸収による大気微量ガス測定システムの考察

杉本 伸夫<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

## Earth to Geosynchronous Satellite Laser Long-Path Absorption System for Measuring Atmospheric Trace Gases

Nobuo SUGIMOTO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

**Abstract:** Laser long-path absorption system using a detection system on a geosynchronous satellite is discussed based on the results obtained in the Retroreflector in Space experiment performed with RIS on ADEOS in 1996. One way long-path absorption method to a receiver on a geosynchronous satellite is highly efficient compared to the RIS experiment. It does not require a large aperture high-speed satellite-tracking telescope, and the laser power required is much lower. The laser transmitters similar to pulsed Integrated Path Differential Absorption (IPDA) lidars can be used for the ground stations. Multiplexing of the measurements from multiple ground stations is possible using time sharing. It would be also possible to apply dual comb spectroscopy. The system will be useful for observing atmospheric trace gases (such as carbon dioxide and methane) that complement passive satellite sensors and spaceborne IPDA lidars. It will be also useful for calibration and validation of passive satellite sensors.

**Key Words:** Laser long-path absorption method, Atmospheric trace gases, Geosynchronous satellite

### 1. はじめに

近年、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。また、衛星搭載の長光路差分吸収 (IPDA) ライダーの計画も進められている。地上から送信するレーザー光を静止軌道衛星に搭載した検出系で受信する長光路吸収システムは、これらの受動センサーや衛星搭載 IPDA ライダーによる観測を補完するデータを得るための有効な手法であると考えられる。また、受動センサーの検証や校正のための極めて有用な手法となる可能性がある。

地上衛星間のレーザー長光路吸収測定のご概念は、1976年のHinkley編の書籍の中で提示されたものが最初であると思われる<sup>1)</sup>。筆者らは、これに触発されて、地上衛星間のレーザー長光路吸収システムを提案した<sup>2)</sup>。しかしながら、静止軌道衛星へのセンサーの搭載は非常に困難であったため、1996年打ち上げのADEOS衛星にレトロリフレクターRISを搭載して往復の光路でレーザー長光路吸収測定を行うことを提案した。ADEOSは太陽電池パドルの問題のため短期間で運用停止となってしまったが、RIS実験では9 $\mu$ m帯のパルス炭酸ガスレーザーを用いてオゾンの吸収測定を行い、原理検証実験としては成功であったと言える<sup>3)</sup>。ただし、測定は衛星が地上局近傍を通過する数分間のみ可能で、頻度は非常に低く、観測システムとして実用的なものとは言い難いものであった。これに対して、静止軌道衛星に受信系を搭載する方法は、常時測定が可能で、複数の地上局からの測定の多重化も可能で運用効率が非常に高い。また、RIS実験が必要であった大口径の高速高精度の衛星追尾システムは必要なく、測定に必要なレーザーパワーも格段に小さい<sup>4)</sup>。

ここでは、RIS実験の概要について紹介するとともに、その成果に基づいて考察した静止軌道衛星を用いた片道のレーザー長光路吸収システムの有用性や実現性について報告する。

### 2. RIS実験の概要

RIS実験では、東京小金井にある通信総合研究所(現NICT)の口径1.5mの衛星追尾望遠鏡を利用し、ADEOS(軌道高度800km)に搭載されたレトロリフレクターRIS(有効口径約50cm)にパルス炭酸ガスレーザーを送受信して、往復の光路で長光路吸収測定を行った。RISは地上局に対して高速(約7km/s)で移動するため、反射光の光行差もドップラーシフトも大きい。そこで、RISでは1面に曲面の入ったキューブコーナリフレクターを新たに設計し反射ビームパターンを最適化した。また、反射光のドップラーシフトを利用した分光手法を考案した。基本的にはパルス炭酸ガスレーザーを2台用いた長光路差分吸収(IPDA)ライダーであるが、反射光が衛星の位置に依存するドップラーシフトで変化することを利用して吸収線の掃引測定を行った。RIS実験では、1043.18 $\text{cm}^{-1}$ 付近のオゾンの吸収線の測定に成功した。

RISの追尾では、532nmのパルスレーザーの反射画像を用いて、軌道要素に基づく追尾の誤差を能動的に補正した。

これによって、 $30\mu\text{rad}$ 以上の追尾精度を得た（なお、分光測定用の炭酸ガスレーザーのビーム広がりには $100\mu\text{rad}$ であった）。 $532\text{nm}$ の反射光の強度を複数の恒星の画像と比較することによってRISの反射光の強度を推定し、シミュレーション結果と比較して、設計通りの結果が得られていることを確認した。口径 $1.5\text{m}$ の望遠鏡を用いた往復の光路の光学的な効率、衛星の位置に依存し、最大で $3\times 10^{-9}$ であった。これは後方散乱ライダーと比べると、距離 $1\text{km}$ の反射率1のハードターゲットのランバート反射を口径 $10\text{cm}$ の受信望遠鏡で受信するのと同様であるので小さな値ではない。

#### 4. 衛星に受信系を搭載する地上衛星間レーザー長光路吸収システム

衛星側に受信システムを搭載するレーザー長光路吸収システムでは、送受信の光学的効率は、レトロリフレクターを用いる方式よりも格段に高い。軌道高度 $36000\text{km}$ の静止軌道の場合、地上からの送信ビーム広がりを $100\mu\text{rad}$ 、衛星側の受信望遠鏡の口径を $20\text{cm}$ とすると、効率は約 $3\times 10^{-9}$ となる。これは偶然にもRISの効率の最大値と同様である。衛星側に受信系を搭載する場合、送信ビームの口径は、仮に波長が $10\mu\text{m}$ としても $10\text{cm}$ 程度で十分である。精密な衛星の追尾は必要であるが、静止軌道衛星では移動速度は極めて遅く、追尾の範囲も狭いので、追尾は比較的容易である。また、静止軌道衛星を用いたシステムは、ほぼ同じ条件で常時測定が可能であり運用効率が高い。

低軌道衛星の場合は、衛星までの距離は $1000\text{km}$ 程度であるので、光学的な効率は、静止軌道衛星に比べて $1000$ 倍程度大きい。しかし、地上局に高速の衛星追尾装置が必要である他、衛星側の受光系でも地上局を追尾する必要がある。また、測定は衛星が地上局近傍を通過する短時間（1日に数分）のみ可能であるので、運用効率は非常に低い。以上のことから、静止軌道衛星に受信系を搭載するシステムが格段に優れていると言える。

地上静止衛星間レーザー長光路吸収システムの分光測定手法として、最も簡単で有用なのはパルス長光路差分吸収(IPDA)方式である。測定の波長帯域にも依存するが、パルス光を用いることで昼間の背景光の影響が小さい。また、地上局毎に測定のタイミングを割り当てることで、静止衛星搭載受信システムのひとつの視野内の複数の地上局からの測定を多重化することも容易である。

今後の検討が期待される分光手法として、Dual Comb Spectroscopy (DCS)の利用も考えられる<sup>5)</sup>。2つの光コムを地上局に設置するsymmetricな方式と、一方を衛星に搭載するasymmetricな方式が考えられる。受動センサーの検証を主目的とすれば、DCSである程度広い波長帯でスペクトルが測定できれば有用であると考えられるが、symmetricな方式の場合、背景光雑音の影響を受けやすいと予想される。測定対象や波長領域を設定した上で、具体的に測定に必要な光コムの出力などの検討を行うことが必要である。上に述べたように、静止軌道までの光伝送の効率は、距離 $1\text{km}$ のハードターゲットの後方散乱と同様（口径 $10\text{cm}$ の望遠鏡）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。

#### 参考文献

- 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** (1987) 763-764.
- 3) 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**, (1999) 201-209.
- 4) 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) (1995) 2329-2334.
- 5) I. Coddington, N. Newbury, and W. Swann, "Dual-comb spectroscopy," *Optica*, **3**(4) (2016) 414-426.