

地上送信部と衛星を用いた海上の水蒸気差分吸収計測の提案

阿保 真, 長澤 親生, 柴田 泰邦

東京都立大学システムデザイン学部 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Proposal on differential absorption measurement of water vapor over the sea using ground transmitters and a satellite receiver

Makoto ABO, Chikao NAGASAWA, and Yasukuni SHIBATA

Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: Water vapor data would lead to benefits in numerical weather prediction such as localized heavy rainfall events and typhoon forecasting. We propose a differential absorption lidar (DIAL) using ground transmitters and a satellite receiver for water vapor measurement over the sea to prevent disasters caused by heavy rain. An error simulation is performed assuming that the platform altitude is 250km, the receiver diameter is 0.8m, the laser energy is 200mJ, and the repetition rate of the laser shot pair (on-off) is 500Hz using the absorption line of the 1300nm band. It is shown that water vapor profile measurement relative error of less than 10% is possible between 0-2km altitudes with spatial resolutions of 300m vertically and 40km horizontally for the subtropical water vapor model.

Key Words: DIAL, water vapor, heavy rain, disaster prevention

1. はじめに

近年気候変動の影響により日本では線状降水帯による豪雨の発生や、台風の大型化による自然災害の頻発化や激甚化が防災面から大きな社会問題となっている。これらの災害は事前の予測精度を上げることにより減災が可能であるが、これらの現象予測には、特に海上の下部対流圏の水蒸気分布情報が重要であることが指摘されている。衛星搭載水蒸気ライダーではゾンデや GPS などの観測では不可能な日本周辺の海上での水蒸気観測が可能であり、衛星観測データを数値予報モデルに同化することにより予測精度の向上が期待できる。

我々は豪雨災害の減災に寄与することを目標とし、特に日本周辺海洋上の水蒸気測定を重点的に行うための 2 ビーム方式衛星搭載水蒸気ライダーの提案を行っているが¹⁾、この実現には衛星搭載レーザの開発が必須であり、実際の運用までには時間がかかる。しかし豪雨災害は毎年のように発生しており、海洋上の水蒸気測定は防災上緊急性が高い。そこで、衛星搭載 DIAL (Differential Absorption Lidar) 実現の前段階のシステムとして、レーザ送信部は地上に置き、受信部のみを衛星に搭載するシステムの実現可能性について検討した。

2. システム

2.1 概要

衛星にレーザを搭載しないアクティブセンシング法としては、衛星にリトロフレクターを搭載し、地上局からレーザを衛星に向けて照射し、戻ってきた光を同じ場所で受信するレーザ長光路差分吸収計測が ADEOUS により行われた²⁾。この方式を水蒸気測定に適用した場合、高度分解能が得られないため、赤外線やマイクロ波のパッシブリモートセンシングにくらべてメリットが無い。そこで、Fig.1 に示すように、地上局から衛星に対してレーザを照射し、衛星側ではレーザ光を真下に反射させ、衛星に搭載した受信系を用いてライダー観測を行う方法を提案する。これは、レーザ送信部だけが地上にある衛星搭載ライダーと考えられる。本方式は、地上局から衛星にレーザが届く範囲しか測定ができないが、日本周辺の海上の水蒸気測定に目的を限定するのであれば、十分意味があると考えられる。

2.2 地上局

地上局にはレーザと送信望遠鏡並びに衛星追尾機構を用意する。レーザは比較的出力の大きいパルス光源が必要であるが、衛星搭載用水蒸気測定用 DIAL で提案している QPM (Quasi Phase Matching) 結晶を用いた OPG/OPA (Optical Parametric Generator /Amplifier) システム³⁾を用いることができる。衛星追尾機構については ADEOUS や衛星レーザ測距システム⁴⁾などの運用実績がすでにある。

2.3 衛星受信システム

衛星受信システムには、ビーム反射ミラーと受信系を搭載する。ビーム反射ミラーは照射されたビーム光を受信系の視野と同じ方向（地面・海面方向）に反射するように、能動的に制御する機構を搭載する。受信系は基本的に衛星搭載 DIAL と同じ仕様である。

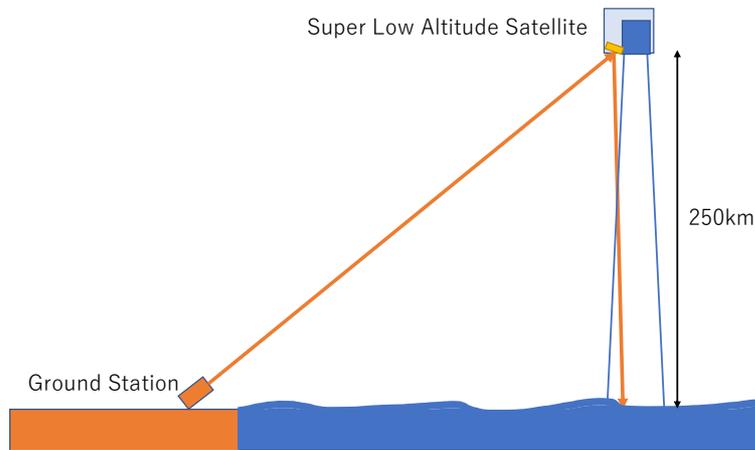


Fig. 1. Schematics of the proposed water vapor DIAL system using a ground transmitter and a satellite.

3. シミュレーション

3.1 観測可能領域

衛星高度が高くなると送信ビームが広がり折り返し反射効率が下がるため、衛星は超低高度軌道衛星を想定し、衛星軌道高度 250km、軌道傾斜角 35° とした。日本付近の 1 日のフットプリントの軌跡と種子島と長崎に地上局を設置したと仮定した場合の半径 200km の円を Fig.2 に示す。円内の赤い点線で表した衛星軌跡が実際に観測可能なフットプリントとなる。衛星 1 機、地上局 2 カ所では観測頻度は高くないが、特に線状降水帯の風上側にあたる海洋上空の水蒸気が観測可能であることがわかる。観測頻度は衛星数を増やすことにより上げることが可能である。

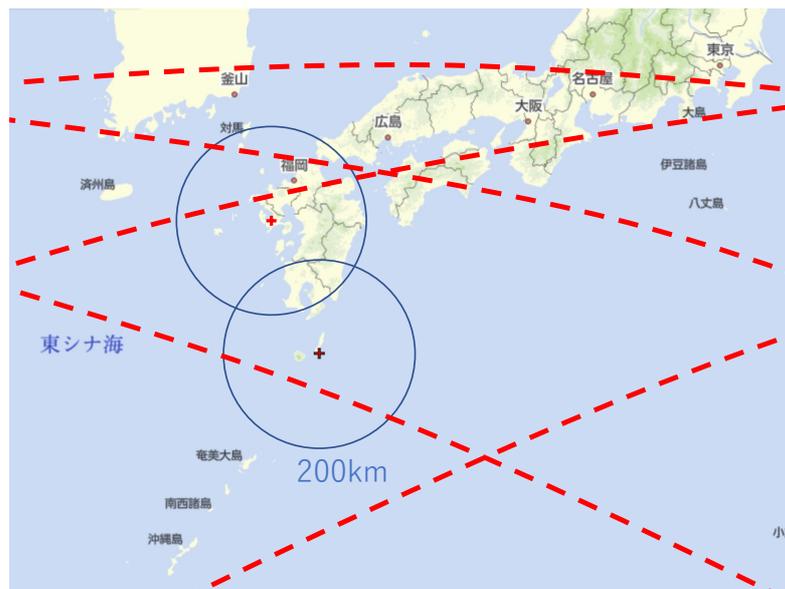


Fig. 2. One-day orbit footprints (red) of the satellite and coverage area of two ground stations (Nagasaki and Tanegashima). Orbit altitude is 250km and orbit inclination is 35° .

3.2 誤差シミュレーション

Table 1 に設定したシステムのパラメータを示す。提案している衛星搭載 DIAL と異なるのは、レーザエネルギーと水平分解能である。地上からのビーム反射効率は、送信レーザのビーム拡がり大気揺らぎを考慮した $10\ \mu\text{rad}$ とし、これを口径 50cm 相当の反射鏡で折り返すことを想定し 2.8% とした。なお、実際の反射ミラーは大きい口径である必要は無く、小さなミラーを個別に制御することでも実現できる。

これらのパラメータを用い、高度 250km の低高度衛星から軌道直下の測定を行う衛星反射型水蒸気 DIAL により、水平分解能を 40km、高度分解能を 300m、600m、1000m とした場合の統計誤差のシミュレーション結果を Fig.3 に示す。水蒸気モデルは亜熱帯モデルを用いている。衛星搭載 DIAL とほぼ同等の高い高度分解能で水蒸気の測定が可能であることが分かった。

Table 1. Parameters of the water vapor DIAL using a ground transmitter and satellite.

Pulse energy	200 mJ
Repetition rate	500 Hz (on/off pair)
Wavelength	1336 nm
Absorption cross section (On)	$1 \times 10^{-27}\ \text{m}^2$
Receiver effective area	$0.5\ \text{m}^2$
Beam reflector effective area	$0.2\ \text{m}^2$
Beam reflect efficiency	2.8%
Detector quantum efficiency	50% (APD)
Satellite altitude	250 km
Ground speed	7.8 km/s
Vertical resolution	300 m
Horizontal resolution	40 km

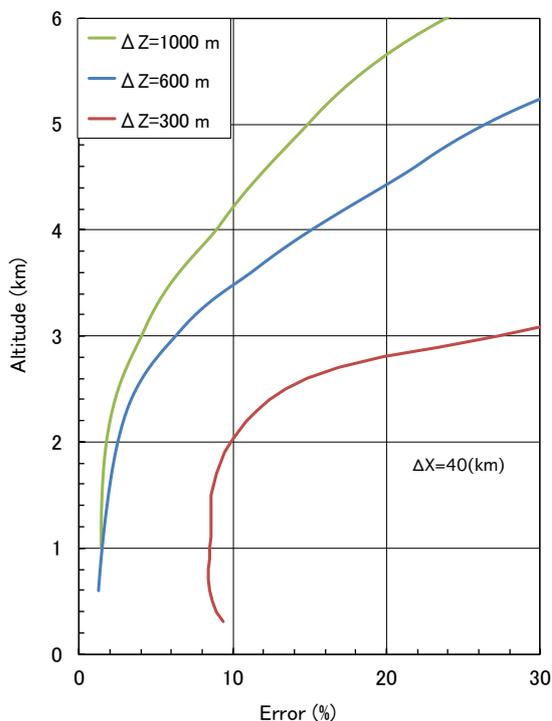


Fig. 3. Random error for the water vapor DIAL using a ground transmitter and satellite with spatial resolutions of 300m/600m/1000m vertically and 40km horizontally for the subtropical water vapor model.

4. おわりに

豪雨災害の減災に寄与することを目標とし、特に日本周辺海洋上の水蒸気測定を重点的に行うための2ビーム方式衛星搭載水蒸気 DIAL 実現の前段階のシステムとして、レーザ送信部を地上に設置し、受信部のみを衛星に搭載するシステムの実現可能性について検討した。その結果、地上局が少ない場合には観測頻度が低いが、衛星搭載 DIAL とほぼ同等の高い高度分解能で水蒸気の測定が可能であることが分かった。

開発要素としては、地上局からの送信ビーム制御や、衛星搭載の反射ミラー制御があるが、これらは現在行われている光衛星通信技術の成果の応用により、それほど困難なく実現できることが期待できる。

参考文献

- 1) 阿保 真他：レーザセンシング学会誌, **1** (2020) 72.
- 2) 杉本伸夫：日本リモートセンシング学会誌, **13** (1994) 78.
- 3) Y. Shibata, et al.: Appl. Opt., **56** (2017) 1194.
- 4) 内村孝志他：LSS24 (2005) P-40.