

# 衛星搭載 1.6 $\mu$ m 帯 CW 変調 CO<sub>2</sub> 計測 LAS における エアロゾルエコーの影響に関する検討

Study on influence of aerosol echo in 1.6 mm CW modulation LAS system for satellite-borne CO<sub>2</sub> sensing

亀山俊平、今城勝治、平野嘉仁、上野信一（三菱電機）、  
境澤大亮、川上修司、中島正勝（宇宙航空研究開発機構）

Shumpei Kameyama, Masaharu Imaki, Yoshihito Hirano, Shinichi Ueno (Mitsubishi Electric Corporation)  
Daisuke Sakaizawa, Shuji Kawakami, and Masakatsu Nakajima (Japan Aerospace Exploration Agency)

## Abstract

According to the recent increasing of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, the need for global CO<sub>2</sub> sensing LAS system is getting increasing. Recently, we invented the CW modulation method and demonstrated a compact, reliable, and high performance CO<sub>2</sub> sensing using the ground-based model. Here, we study on the influence of aerosol echo in the case of satellite-borne sensing using this method, for the future application.

## 1. まえがき

衛星からの地球規模 CO<sub>2</sub> 計測用アクティブセンサとして、LAS(Laser Absorption Spectrometer)への期待が高まっている。これに関し我々は、小型、高信頼、かつ高速・高精度計測を実現可能な 1.6  $\mu$  m 帯 CW 変調方式を新規開発し、地上にて性能を実証した（文献[1]）。ここでは、この LAS を衛星搭載センサ化した際のエアロゾルエコーの影響について検討したので報告する。

## 2. エアロゾル散乱の影響に関する概念説明

エアロゾルからの不要散乱光が地表からの所望散乱光に重畳されると、この不要光に関する DAOD(Differential Absorption Optical Depth)は所望光のそれと異なるため、DAOD 計測誤差、さらには CO<sub>2</sub> 濃度計測誤差の要因となる。本 CW 変調方式では、連続波を変調信号として使用する。したがって、上記不要光の影響を理想的に回避することは困難である。さらにこの不要光の強度波形の位相は、所望光のそれと異なるため、測距誤差の要因ともなる。しかし、本方式における不要光の影響は、無変調光を送受するシンプルな LAS (Laser Absorption Spectrometer)やフーリエ分光計におけるものとは異なる。レーザ光が変調を受けている場合、大気各層からの散乱光の強度は DC であり、これらに相当する相受信信号は同相で足しあわされる。これに対し CW 変調方式では、各層に対応する受信信号の位相は衛星からの距離に応じて変化する。結果的に、エアロゾルからの散乱光の変調度およびこれらの影響は低減されることがある。この変調効果の模式図を図 1 に示す。図では 2 波長のうち 1 波長成分について示している。上述した変調効果は、変調周波数、アルベド、エアロゾルの後方散乱係数等に依存する。さらに、例えばダスト層のような層状構造の場合、上記効果は、層厚およびその中心高度にも依存する。

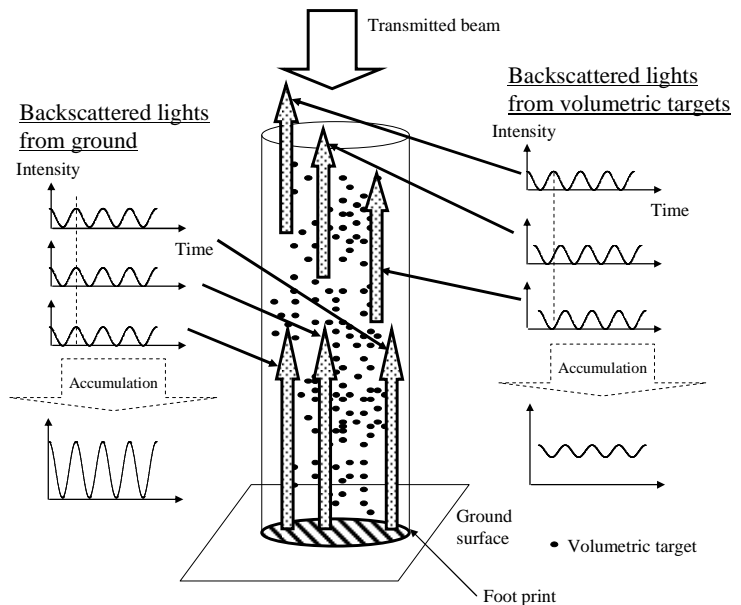


Fig. 1. Schematic of backscattered lights from the ground surface and aerosols.

この変調効果の模式図を図 1 に示す。図では 2 波長のうち 1 波長成分について示している。上述した変調効果は、変調周波数、アルベド、エアロゾルの後方散乱係数等に依存する。さらに、例えばダスト層のような層状構造の場合、上記効果は、層厚およびその中心高度にも依存する。

### 3. 計算結果

エアロゾル散乱による DAOD および距離計測誤差について検討する。計算式および計算条件の詳細は文献[2]を参照されたい。想定した条件により求めたバックグラウンドエアロゾルによる DAOD 計測誤差の変調周波数依存性を図2に示す。低周波数帯での誤差は 0.4% に漸近していることが分かるが、これが変調を用いない場合の誤差に相当する。図2において、7kHz以上の領域で誤差 0.18% (濃度 1ppm 相当) 以下である。これは、本システムの特徴の一つである変調効果によるものである。考慮しているエアロゾル後方散乱係数の高度依存性が特定高度でピークを持つ分布でないため、上記変調効果は比較的容易に生じる。距離計測誤差を図2の第二縦軸に示す。変調周波数が上記 7kHz 以上の領域では、距離計測誤差は 10m 以下であり、これは DAOD 計測誤差 0.16% 以下に相当している。次に、ダスト層の影響について検討する。本検討では、ダスト層の後方散乱係数が、中心高度、後方散乱係数、層厚で定義され、高度に対しガウシアン分布を有する形でモデル化した。DAOD 計測誤差および測距誤差の層厚依存性計算結果を図3、4に示す。アルベドに関しては、ダスト層が砂漠領域外に漂流することを想定し、海洋および植生に相当する 0.08 および 0.31 とした。層高度に関しては、5km および 6km の場合について計算した。変調周波数は 200kHz に設定した。これは 1/2 波長が 750m の場合に相当している。図における DAOD 計測誤差は、層厚が薄い領域では増加し、厚くなるにつれて減少する傾向が見られる。層厚が上記 1/2 波長に近づくと誤差は急激に低下する。図において、層厚 0.7km 以上での誤差は DAOD: 0.18%, 距離: 1m 以下である。

### 3. まとめ

CO2 計測用 1.6  $\mu\text{m}$  帯 CW 変調方式 LAS を衛星搭載センサ化した際のエアロゾルエコーの影響について検討した。本方式の変調効果を生かすことで、バックグラウンドエアロゾル散乱により生じる誤差に関しては、比較的容易に 1ppm 以下相当に抑圧できる。ダスト層散乱に関しても、後方散乱係数や層厚の条件にもよるが上記誤差抑圧を実現可能である。

### 参考文献

- [1] S. Kameyama et al., Opt. Lett., 34, 1513, 2009.
- [2] S. Kameyama et al., Appl. Opt., 50, 2055, 2011.

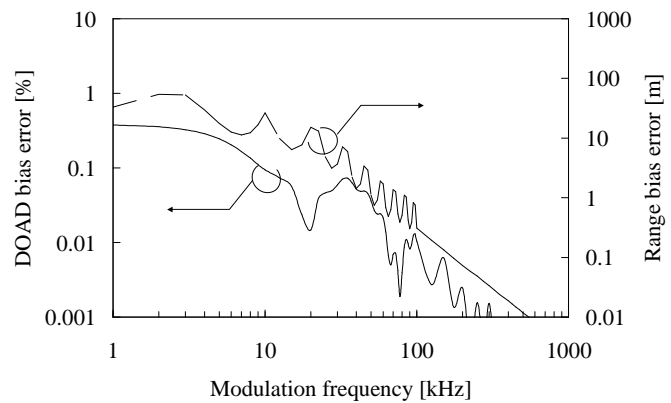


Fig. 2. Plot of modulation frequency against systematic DAOD s error (solid line) and systematic range error (dashed line) caused by background aerosol scattering.

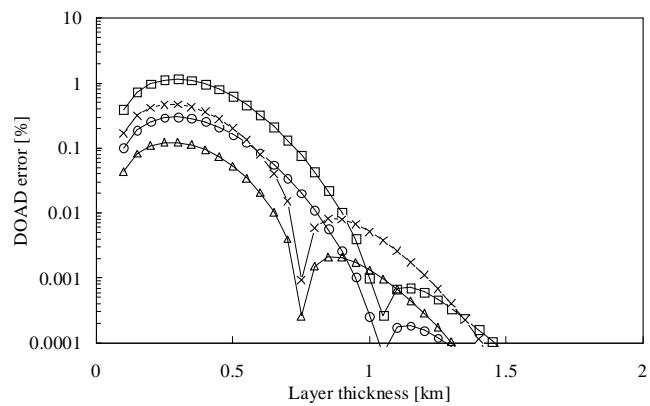


Fig. 3. Plot of layer thickness versus systematic DAOD error caused by scattering from dust aerosols. Layer altitudes and albedo conditions are as follows. (O):  $z_C = 6$  km,  $\rho = 0.31$ ; (□):  $z_C = 6$  km,  $\rho = 0.08$ ; (Δ)  $z_C = 5$  km,  $\rho = 0.31$ ; (×)  $z_C = 5$  km,  $\rho = 0.08$ .

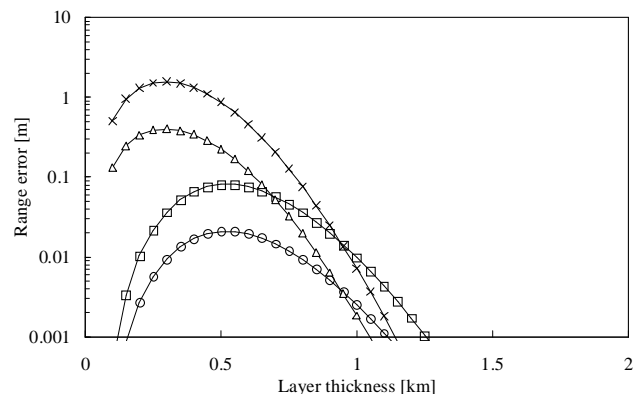


Fig. 4. Plot of layer thickness versus systematic range error caused by scattering from dust aerosols for the same layer altitudes and albedo conditions shown in Fig. 3.