

3 波長 DIAL のための 1.6 μm トリプルパルス OPG 光源の開発

柴田 泰邦¹, 長澤 親生¹, 阿保 真¹

¹東京都立大学 (〒191-0064 東京都日野市旭が丘 6-6)

1.6 μm Triple-Pulse OPG transmitter for three-wavelength DIAL

Yasukuni SHIBATA¹, Chikao NAGASAWA¹, and Makoto ABO¹

¹Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: We propose a compact Triple-Pulse Differential Absorption Lidar (DIAL) system using a burst pulse mode 1.6 μm Optical Parametric Generator (OPG) for simultaneous measurements of CO₂ concentration and atmospheric temperature profiles. The pumping source of the previous system consisted of a Nd:YAG laser with a high repetition rate (400Hz) and operated with the single pulse mode. The single pulse mode laser generates pulses by a constant repetition frequency for all pulses, whereas the burst pulse mode laser is operated by the lower repetition rate for the cluster with the multiple pulses. In order to reduce the error factor of DIAL measurement caused by aerosol fluctuations over the LIDAR site, the CO₂ DIAL requires the three-wavelength laser with the pulse intervals of a few ms, unlike other gas (water vapor and ozone) observations. The development of the triple-pulse OPG operated by the burst pulse mode will contribute to the realization of the multi-point, mobile and airborne observations by constructing the compact CO₂ DIAL system with the low repetition rate and the low power consumption.

Key Words: CO₂, Temperature, OPG, DIAL, Triple-pulse

1. はじめに

我々は、パルス繰り返し 400 Hz の 1.6 μm OPG (Optical Parametric Generator) を光源とする 3 波長差分吸収ライダー (DIAL: Differential Absorption Lidar) を開発し、二酸化炭素 (CO₂) と気温の鉛直分布観測を行っている^{1,2)}。DIAL 観測結果から、晴天時の風が比較的弱い夜間において、高度 1.5 km 付近まで CO₂ 濃度が数十 ppm 上昇する傾向を示すことが分かっている。独自開発した CO₂ 拡散解析シミュレーターを用い、DIAL 観測結果と比較すると、高度 1 km より高い高度は関東西部の山地の植生を主なソースとする CO₂ が、それより低い高度では都市部の社会活動を主なソースとする CO₂ が、それぞれ風によって東京都西部に吹き寄せられることが明らかとなった³⁾。現行の DIAL システムより汎用的で可搬型のシステムを開発し、様々な場所で DIAL 観測することで、この解析シミュレーターの実効性を検証することができる。また、工場や火力発電所など、局所的に CO₂ を多く排出する場所でのモニタリングにも活用が期待できる。そこで、我々は小型で低消費電力の低繰り返しのパルス OPG 光源の開発を検討している。DIAL による CO₂ 観測において、エアロゾル分布の変動が測定精度に影響するため、波長間のインターバルを極力短くしたバーストモードで発振するトリプルパルス OPG を実現する。本講演では、OPG 光源の開発状況について報告する。

2. トリプルパルス OPG 光源

2.1 波長切替速度の違いによる DIAL 測定精度への影響

DIAL は対象ガスの濃度 (m^{-3}) を計測するライダー手法である。一般的な DIAL は光吸収が強い波長 (λ_{on}) と、近傍の光吸収が弱い波長 (λ_{off}) の 2 波長を用い、両波長での光吸収量の差がガスの濃度と吸収断面積に依存することを利用する。両波長間隔を 1 nm 以下にすることで、エアロゾル後方散乱係数の波長依存性を無視できる利点がある。一方で、2 波長同時に出射すると受光系での波長分離が難しいため、一定間隔ごとやパルスごとに波長を切替えて出射しなければならない。この波長切替の間でエアロゾルが変動してしまうと、光吸収による信号強度の変化と見分けがつかず、測定誤差要因となる。オゾンや水蒸気を観測対象とする場合、トータルの測定誤差は 10% 程度が目安となるため、ごく短時間でのエアロゾル変動による信号強度の変化は無視できる程度である。しかし、トータルの測定誤差が 1% 以下を要求される CO₂ の場合

はエアロゾル変動の影響が無視できない。

Fig.1(a)~(d)は 500 Hz の Nd:YAG レーザ励起 1.6 μm OPG 光源を用いて、概ね 30 分間積算した DIAL 信号 $P(\lambda_{\text{on}})$, $P(\lambda_{\text{off}})$ (λ_{on} : 1572.992 nm, λ_{off} : 1573.137 nm) と、信号強度比 $P(\lambda_{\text{on}}) / P(\lambda_{\text{off}})$ を示す。(a), (b) は 2 波長の切替頻度が 30 Hz (波長切替間隔 33 ms) の場合、(c), (d) は切替頻度が 500 Hz (波長切替間隔 2 ms; パルスごとに波長を切替) の場合をそれぞれ示す。高度 1.5 km 以上では、 CO_2 濃度が概ね 400 ppm で一定であるため、通常、 $P(\lambda_{\text{on}}) / P(\lambda_{\text{off}})$ は高度に対して滑らかな線を描く。切替速度が 33ms の場合、高度 2.5 km や 4.7 km 付近のエアロゾル層の境界部分で、On/Off に変曲点がみられる。これは、33ms の波長切替の間でエアロゾル境界が変動していることを示す。一方、切替速度が 2 ms の場合、高度 3.8 km 付近のエアロゾル層の境界部分で On/Off に変曲点は見られず、エアロゾル変動の影響が無視できていることを示す。以上のことから、DIAL によって CO_2 濃度を計測する場合、2 波長の切替速度は 2 ms 程度が必要となる。

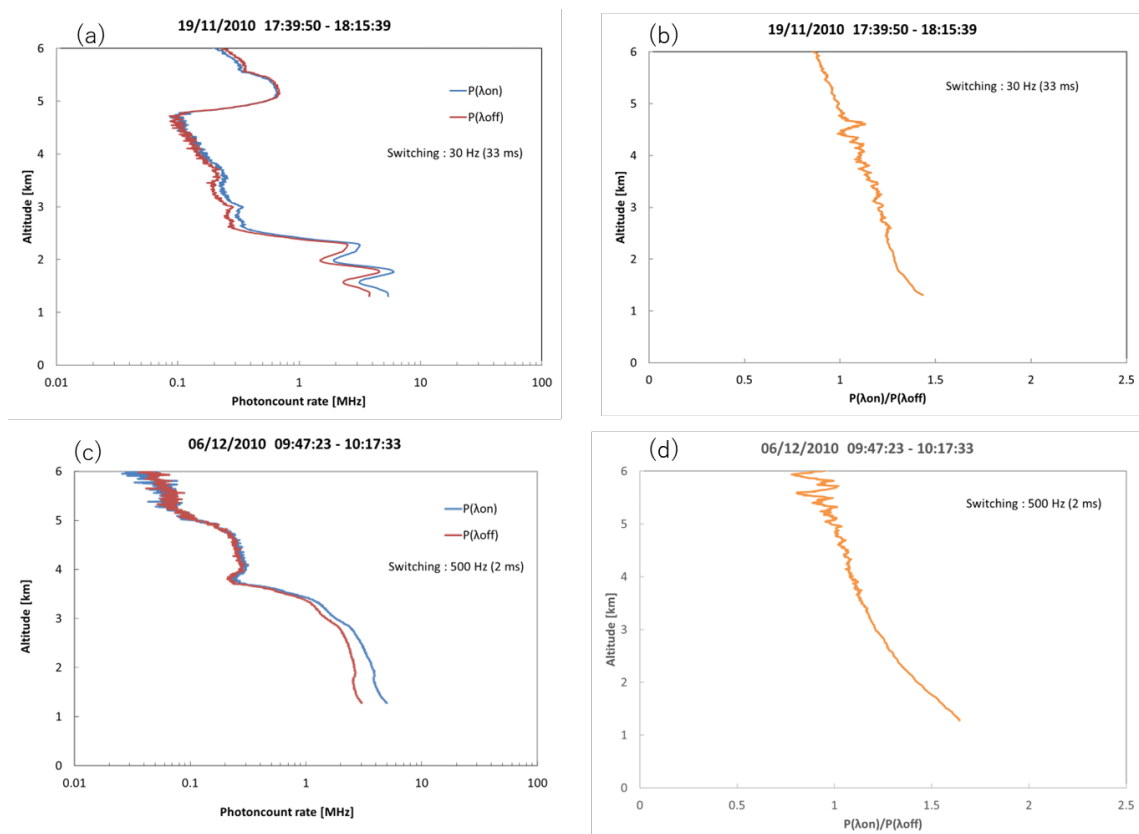


Fig.1 (a)(b): DIAL signals $P(\lambda_{\text{on}})$ and $P(\lambda_{\text{off}})$ at a wavelength switching frequency of 30Hz, and the signal intensity ratio $P(\lambda_{\text{on}})/P(\lambda_{\text{off}})$. (c)(d): DIAL signals $P(\lambda_{\text{on}})$ and $P(\lambda_{\text{off}})$ at a wavelength switching frequency of 500Hz, and the signal intensity ratio $P(\lambda_{\text{on}})/P(\lambda_{\text{off}})$.

2.2 トリプルパルス OPG 光源の開発状況

一般に、パルスレーザーの繰り返し速度を上げる場合、冷却機構の強化が必須となるため装置の小型化・低消費電力化が難しい。そこで、OPG 励起用の Nd:YAG レーザの励起タイミングを工夫することで、エアロゾル変動の影響を受けない低繰り返しのパルスモードパルス光源を開発することとした。通常のレーザーは一定の繰り返し周波数でパルスを発生させるが、パルスモードレーザーは繰り返し周波数が低く、その代わりにパルス（一括）として複数のパルスをまとめて発生させる。我々は吸収断面積の温度依存性による測定誤差を抑制するため、第 3 の波長 λ_T (1573.040 nm) を追加することで、 CO_2 濃度と気温分布を同時観測する 3 波長 DIAL を開発している。Fig.2 に 3 波長 DIAL のブロック図を示す。波長安定化のため、ヨウ素ロック機構を備えたパルス Nd:YAG を OPG の励起光としている。DIAL 観測用の各波長は、 CO_2 セルを用いて CO_2 吸収スペクトルの吸収ピーク波長にロックした λ_{on} と、 λ_{on} との差周波を正確にコントロールすることで得られる λ_T 、および吸収の弱い λ_{off} の 3 つの DFB レーザによってインジェクションされた OPG によって得る。シード光は光スイッチにより選択される。

以下に、100 Hz 程度の LD 励起 Nd:YAG レーザを励起光源とする 1.6 μm DIAL 用 OPG 光源開発のコンセ

プトを紹介する。エアロゾル変動の影響を抑えるため、3つの波長は2 ms 間隔で発振させる。つまり、2 ms 間隔で3発連続するパルス列を生成する。Fig.3はレーザ繰り返し100 HzのLD励起Nd:YAGレーザのLD電流とQ-SW、OPGパルス光発振の各タイミングを模式的に示したものである。LD電流は200 μ s 注入し、適度なQ-SWディレイによって短パルス発振させる。これを2 ms ごとに2回繰り返し、3発連続するパルス群を生成する。さらに30 ms ごとにパルス群を発振させることで100 Hzの光源で波長切替2 ms を実現する。懸念材料として、パルス間隔が不均一になるので励起過程に伴う熱が短時間に集中する一方、パルス群のインターバルで冷却が進むことによって、共振器内に熱的なひずみが起きやすくなることが想定される。この点について実験的に確認するとともに対応策を適宜講じていく。

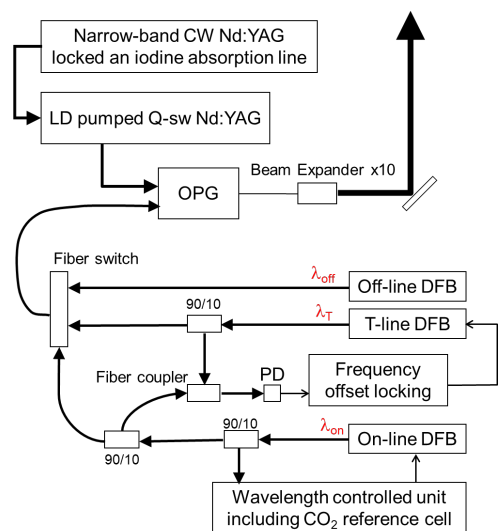


Fig.2 Block diagram of the OPG transmitter for the three-wavelength DIAL.

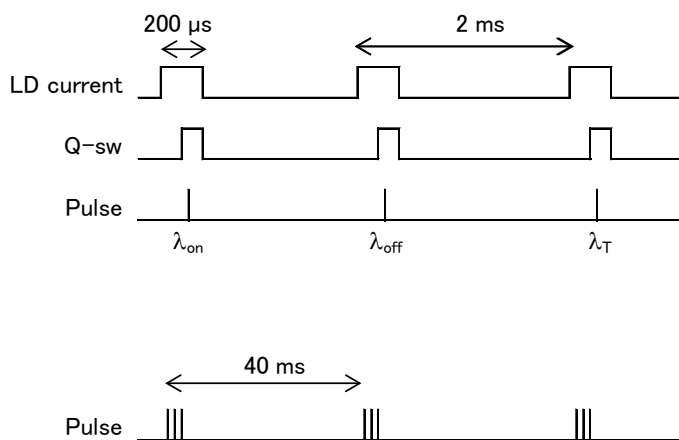


Fig.3 Schematic representation for LD current, Q-sw, and OPG output pulses of burst-mode with 3 bursts.

3. まとめ

我々は、CO₂と気温の鉛直分布観測に使用するために開発した現行の3波長DIALシステムよりも汎用性と可搬性に優れたシステムを検討している。特に、エアロゾル変動が測定精度に与える影響を抑えることを目的に、2 ms以下の波長切替速度を実現するバーストモード・トリプルパルス光源の開発に注力している。この小型で低消費電力のDIALシステムは、工場や火力発電所などの局所的なCO₂排出源のモニタリングにも応用可能で、より環境調査に貢献する可能性を有している。

参考文献

- 1) Y. Shibata, C. Nagasawa, and M. Abo: Appl. Opt. **56**(4) (2017) 1194-1201.
- 2) Y. Shibata, C. Nagasawa, M. Abo, M. Inoue, I. Morino, and O. Uchino: Sensors, **18**(11) (2018) 4064.
- 3) 阿保真、柴田泰邦、長澤親生：第41回レーザセンシングシンポジウム (2023).