

1.6 μm CO₂ 吸収線への高安定波長同調システムの開発

Development of laser wavelength tuning system for 1.6 μm CO₂ absorption line

柴田泰邦、長澤親生、阿保 真

Yasukuni Shibata, Chikao Nagasawa and Makoto Abo

首都大学東京システムデザイン研究科

Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University

Abstract

We developed the OPO laser system with $\pm 24\text{MHz}$ stabilization of a seed laser for 1.6 μm CO₂ DIAL in 2007. The development of the frequency stabilization laser system for the next generation 1.6 μm CO₂ DIAL has been conducted. The wavelength stabilization feedback system using the transmission rate of the absorption cell is proposed and frequency stability of the seed laser obtained $\pm 9\text{MHz}$ at absorption peak wavelength. This stabilization system of the laser frequency is reported.

1. はじめに

我々は、大気中の CO₂ 濃度の空間分布を測定するための 1.6 μm 帯 CO₂ 吸収線を利用した差分吸収ライダー (DIAL) を開発している。CO₂ 吸収線のスペクトル形状は、気温・気圧によって変動するが、気温によって吸収強度が不変となる波長 (気圧不動点) が存在する。CO₂ 濃度の測定の際、吸収線の中心波長と裾 (吸収の少ない波長) に加え、この気圧不動点の波長を追加し、他の波長と強度を比較することで気温の測定が可能である。さらに、密度測定とは異なる吸収線を追加することで気圧の測定が可能となり、ライダー観測で得られる密度、気温、気圧のデータを用いて反復計算させることにより、密度の測定精度を高める。一方、システム誤差の一つとして、CO₂ 吸収線の中心波長や気圧不動点へのレーザー一周波数同調精度があげられる。レーザー一周波数の揺らぎに起因する密度誤差を 0.1% にする場合、 $\pm 45\text{MHz}$ での同調精度が必要であるが、吸収線傾き部分である気圧不動点へのレーザー一周波数同調はより高い精度が要求される。本講演では、現在開発中のレーザー波長安定化装置について報告する。

2. 波長同調システム

DIAL の光源には LD 励起 Nd:YAG 励起 OPO を用い、インジェクションによりスペクトルの狭帯域化を図り、レーザー波長を制御する。よって、シード光源波長の同調精度が測定精度向上の鍵となる。吸収セルを用いた一般的な波長同調の方法として、吸収波形の 1 次微分を用いる方法がある。吸収波形を波長に関して 1 次微分すると、吸収ピーク波長でゼロ値をとり、その前後で正負反転する特徴を持つことを利用し、1 次微分値が常にゼロになるよう帰還制御する。ゼロ値からの差は、吸収ピークからの周波数差に相当するため誤差信号と呼ぶ。1.6 μm 帯 CO₂ 吸収線は吸収量が少ないため誤差信号が小さく、安定的な帰還制御が行えない。そこで、先行研究では波長同調システムに CO₂ セルを挿入したファブリーペロー (FP) 共振器を用いた。この FP 共振器の透過光はフリースペクトルレンジ (FSR) 周波数間隔で共振し、透過光強度がピークをとる。吸収セルを FP 共振器内に挿入すると吸収線帯域内に FSR 間隔で複数のスペクトルがたつ。この透過光強度を 1 次微分した誤差信号は Fig.1 に示すように吸収セル単体の場合と比較して周波数分解能が飛躍的に向上するが、吸収ピーク波長に FP 共振器の透過光ピークを合わせるために、PZT 素子を用いて FP 共振器長を制御した。我々は、この制御方式により 30 分間で $\pm 24\text{MHz}$ の安定度を得た¹。

さらなる測定精度の向上のため、CO₂ セル透過光と参照光の強度比を一定に保つ帰還制御方式を採用した。Fig.1 に制御系のブロック図を示す。シード光源の DFB-LD 出力の 10% が CO₂ セルを通るセル透過光 P_t と参照光 P_r に分けられ、レーザー一周波数安定化装置 (TOPTICA LaseLock) に入力される。比 P_t/P_r が Fig.2 に示すように吸収ピークに相当する電圧 V_p になるよう、PID 制御によって LD ドライバーの LD 電流に誤差信号が帰還される。この方式の利点は、比の値だけでロックするレーザー一周波数を決定でき、特に吸収線の傾き部分の誤差信号は吸収ピーク付近より大きく取れ

る。Fig.3にDFB-LD周波数の55分間の揺らぎと1分間の揺らぎを示す。標準偏差は30分間で9.0MHzと先行研究の約1/3に軽減された。気圧不動点へのレーザー周波数同調精度については、高分解能計測が可能なヘテロダイン検波を用いて安定度を評価する予定である。

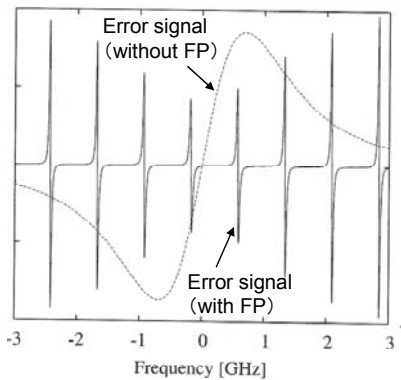


Fig.1 Error signals with / without Fabry-Perot.

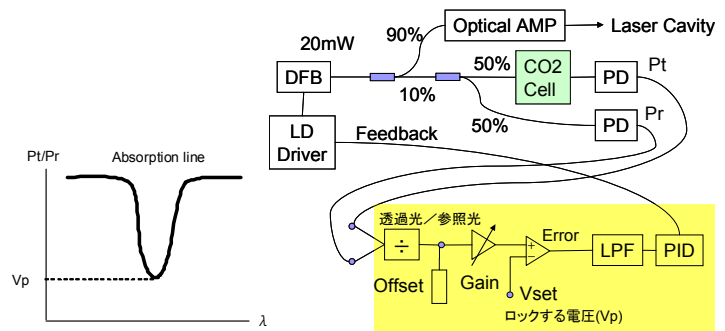


Fig.2 Block diagram of the wavelength stabilization system using the transmission rate of the absorption cell.

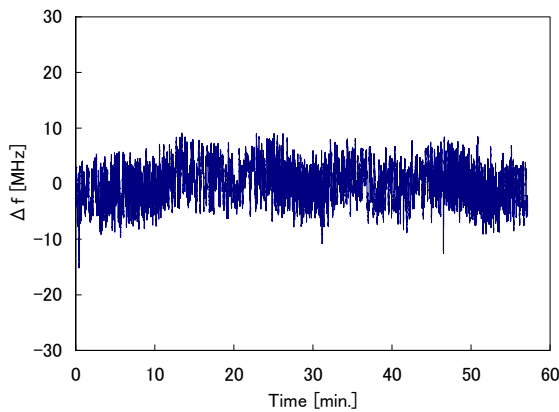


Fig.3 Fluctuation of the DFB-LD wavelength.

3. まとめ

DIALによるCO₂鉛直分布を高精度で行うため、レーザ周波数の高安定化を行った。先行研究では吸収セルを内挿したFP共振器を用いることで±24MHzの安定度(30分間)を実現したが、吸収セルの吸収ピークとFP共振器の透過光ピークとの同調が必要であった。本研究では、吸収セルの透過光と参照光の強度比が常に一定になるような帰還制御を行う方式を採用し、30分間の安定度を±9MHzに向上させることに成功した。また、気圧不動点における周波数安定度はヘテロダイン検波にて測定する予定である。

<謝辞>

本研究は科学技術振興機構「先端計測分析技術・機器開発事業」により行われている。

参考文献

1. D. Sakaizawa, C. Nagasawa, T. Nagai, M. Abo, Y. Shibata, M. Nakazato, T. Sakai, Development of a 1.6μm differential absorption lidar with a quasi phase matching OPO and photon-counting detector for the vertical CO₂ profile, Applied Optics, 48(4), 748, 2009.