

赤外 CO₂ ライダーシステムの提案と誤差評価 A proposal and error analysis of the CO₂ lidar system using infrared lasers

小野 純¹、長澤 親生¹、柴田 泰邦¹、永井 智広²

¹ 東京都立大学大学院、² 気象研究所

Jun ONO¹, Chikao NAGASAWA¹, Yasukuni SHIBATA¹, Tomohiro NAGAI²

¹Tokyo Metropolitan University, ²Meteorological Research Institute

Abstract: The groundbased CO₂ differential absorption lidar (DIAL) is useful for understanding the mechanism of global greenhouse effect. Some absorption bands of CO₂ exist around 1.5-2.2μm wavelength in the infrared region. The error analysis was performed for the determination of suitable wavelength of the groundbased CO₂ DIAL. The result shows that the CO₂ absorption band of 1.565-1.590μm is more suitable than that of 2.05-2.08μm for the groundbased CO₂ DIAL.

1. はじめに

地球温暖化に寄与する温室効果ガスの内、CO₂が最も影響が大きく、その割合は約60%と見られている。2005年2月にCO₂などの温室効果ガスの排出削減義務などを定めた京都議定書が発行され、その中で、各国の数値目標を達成するための仕組みとして、市場原理を活用する京都メカニズム(共同実施、クリーン開発メカニズム、排出権取引)と呼ばれる制度が導入された。このことにより、CO₂のソースとシンクを解明することが重要となった。最近、CO₂のソースやシンクを推定するモデル計算手法の研究が進み、その入力データのために精度の高いCO₂の垂直分布の観測の重要性が指摘されている。

本研究では赤外レーザーを用いたCO₂測定のための地上設置型インコヒーレント方式のDIAL(Differential Absorption LIDARs)システムを提案し、計算機シミュレーションによる最適波長の決定と誤差評価を行った。

2. 提案するシステム

DIALは2波長のライダー信号の測定対象気体による減衰の差を利用し、濃度の鉛直分布を求めるシステムである。用いるレーザーの2つの波長はそれぞれ測定対象気体の吸収の強い波長と弱い波長に一致させる必要がある。

図1に赤外領域でのCO₂とH₂Oの波長ごとの吸収率を示す。いくつか吸収帯が存在するが、CO₂DIALでは、H₂Oの吸収による干渉を考慮すると1.57-1.62μmと2.05-2.08μmの吸収帯が測定に利用できる。2.05-2.08μm帯を利用した衛星搭載型DIALはすでに提案されている¹。衛星搭載型の場合、全地球的に測定が可能であるが、信頼性、精度や高出力化などクリアすべき多くの問題がある。一方、地上設置型DIALを用いることにより局地的にCO₂

濃度を精度良く測定し、その情報を初期値としてインバース法によりCO₂のシンクとソースを把握することは、地球温暖化メカニズムを研究する上では、重要な意味をもつ。

1.57-1.62μm帯を利用する場合、送信レーザーは1.064μmのNd:YAGレーザー励起の1.580μmラマンレーザー(C₆H₆)を用いるか、1.350μmのNd:KGW励起の1.572μmラマンレーザー(Ba(NO₃)₂)を用いる方法などが考えられる。インジェクションレーザーには、通信用の半導体DFBレーザーを用いることが可能である。また受信光検出器には、量子効率0.8のアバランシェフォトダイオード(APD)を用いる。

また、2.05-2.08μm帯を利用する場合、送信レーザーは半導体レーザー励起Ho:Tm:YLFレーザーを用いて、インジェクションレーザーはマイクロチップHo:Tm:YLFレーザーを用い、受信光検出器には、量子効率0.55のAPDを用いる方法¹が報告されている。

我々の目標とする本システムの仕様は、1.565-1.590μmの水蒸気の吸収線を利用し、地上設置型インコヒーレント方式、高度10kmまで誤差1%以内で測定とする。以下で測定誤差について検討し、2μm帯を利用する場合と比較を行う。

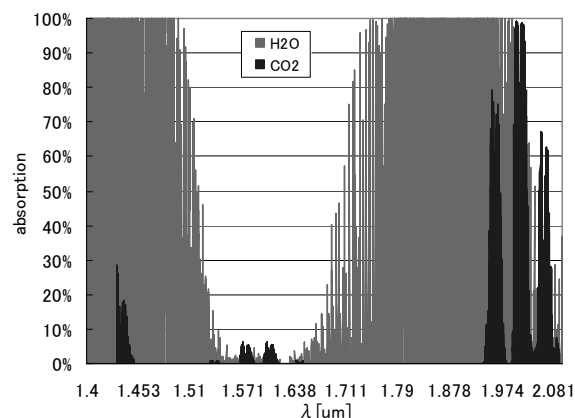


Fig.1 absorption of CO₂ and H₂O(pathlength:1000m)

3. 測定誤差の評価方法

DIALにおけるCO₂濃度測定誤差要因のうち、信号強度に起因する統計誤差は次の式で求められる。

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \left\{ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left[\frac{(P_{ij} + B_j)F + D}{P_{ij}^2} \right] \right\}^{1/2} \quad (1)^2$$

ここで、P_{ij}は受信光子数、Δσは差分吸収断面積、nは測定気体濃度、Fはディテクタの雑音指数、Dはダークカウント、Bは背景光雑音光子数である。またi=1,2はそれぞれ距離R1、R2に、j=1,2はそれぞれ吸収波長と非吸収波長に対応する。本研究では夜間での測定を想定しているため背景光は無視する。(1)式より濃度の測定誤差は受信信号が大きいほど小さいこと、差分吸収断面積が大きいほど小さいことが分かるが、実際には受信信号強度は吸収断面積に依存するので測定する距離に応じて最適な波長が存在することになる。また、エアロゾル、大気分子のon波長とoff波長の差から生じる散乱、及び消散係数の違いによる系統誤差はon波長とoff波長の差が極めて小さいことから無視できる。

4. 誤差評価

大気分子モデルに水蒸気量の多い北緯45度(夏)のモデル³を用いて、(1)式の測定誤差を評価した。CO₂の濃度は高度によらず330ppmvと仮定した。表1にシミュレーションで用いた各種パラメータを示す。図2は1.565um-1.590umでのCO₂の吸収断面積とそのピークの波長をon波長としたときの誤差が最大となる高度10kmでのCO₂測定誤差を示している。図3は同じく2.045um-2.080umでの吸収断面積と高度10kmでの誤差を示している。なお、いずれの場合も高度が高くなるほど誤差は大きくなる。これより、1.565um-1.590um帯を利用した場合、1.572um近傍及び、1.580um近傍で測定誤差を1%以内に行うことができる。一方2.045-2.080um帯を利用した場合、測定誤差は小さくても約2%を超えてしまう。1.565-1.590um帯では光通信システムで多用され開発が進んでいる高感度(量子効率0.8)の検出器を用いることができるため、受信信号が2.045-2.080um帯を利用した場合の測定(量子効

表1 シミュレーションで用いたDIALパラメータ

レーザ	送信出力	100mJ
	繰り返し	100Hz
受信系	望遠鏡直径	50cm
	APD量子効率	0.8(1.6um) 0.55(2.0um)
	光学系の効率	0.8
	等価雑音電力	2 × 10 ⁻¹⁴ WHz ^{-1/2}
	過剰雑音指数	2.5
	高度分解能	1000m
	積算回数	360000shot

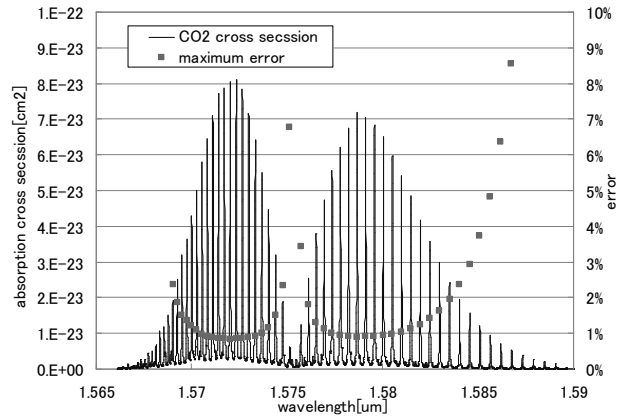


Fig.2 Absorption cross section of CO₂ and maximum CO₂ measurement error. (1.565um-1.590um)

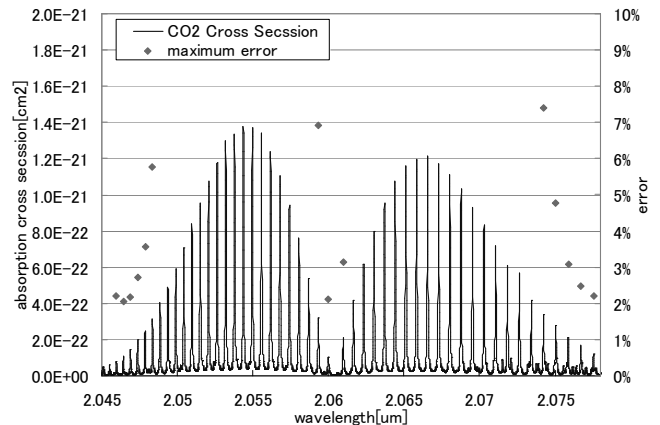


Fig.3 Absorption cross section of CO₂ and maximum CO₂ measurement error. (2.045um-2.080um)

率0.55)と比較して大きく、SN比が良いため誤差が小さい。また、2.045-2.080um帯では、長波長になるほど大気中のエアロゾル、分子による後方散乱が小さくなるのでSN比が悪化すると考えられる。

5. まとめ

本研究では、高度10kmまでを測定範囲とするCO₂濃度測定DIALを提案し、計算機シミュレーションにより誤差評価を行った。誤差評価より、2.045-2.080umの吸収帯を用いるよりも1.565-1.590umの吸収帯を用いるほうが誤差が小さく、提案したシステムの波長を用いた場合、我々の目標を達成することができることがわかった。今後は、システムを開発し、実験結果との比較を行う予定である。

参考文献

- G.J.Koch et al, "Frequency stabilization of a Ho:Tm:YLF laser to absorption lines of carbon dioxide," Appl. Opt. 39, 3664-3669,2000.
- S. Ismail et al, "Airborne and spaceborne lidar measurements of water vapor profiles: a sensitive analysis," Appl. Opt. 28, 3603-3615,1989.
- L. S. Rothman, USF HITRAN-PC, Version 2.3(Ontar Corporation, North Andover, Mass.), 1993.