

CO₂鉛直分布観測用 DIAL のための 1.6 μ m 用受信系の開発Development of the Receiving System for 1.6 μ m CO₂ DIAL

永井 智広, 長澤 親生*, 中里 真久, 酒井 哲, 阿保 真*, 柴田 泰邦*, 境澤 大亮*
Tomohiro NAGAI, Chikao NAGASAWA*, Masahisa NAKAZATO, Tetsu SAKAI,
Makoto ABO*, Yasukuni SHIBATA*, Daisuke SAKAIZAWA*

気象研究所 気象衛星・観測システム研究部

* 首都大学東京 システムデザイン学部

Meteorological Research Institute, * Tokyo Metropolitan University

Abstract

The receiving system of the CO₂ DIAL system using the 1.6 μ m carbon dioxide (CO₂) absorption band is designed and the test system is developed. The short focus 200mm diameter mirror is used for correcting the backscattered laser light. 200 μ m diameter high efficiency InGaAs APD is employed for the detector, interference filter with high transmittance and optical components including fibers with low reflectance coating for the end faces are used. Highly stable supporting system is designed to stabilize the relative positioning between the mirror and the fiber input. Total efficiency of the system is about 55% and the 6 mirror system is needed to take the data with accuracy of 1% up to 10km altitude.

1. はじめに

地球温暖化に対する有効な対策を立てるため、温室効果気体の分布の予測精度を高めることが重要と考えられている。温室効果気体のうち、フロン (CFC、HCFC) や六フッ化硫黄 (SF₆) などは先進国での工業的生産が主であるため、主に統計的な手法を用いて排出量を見積もることが可能である。しかしながら、温暖化に最も大きなインパクトを持つ二酸化炭素については、人工的な排出のみでなく自然界のソース・シンクが複雑なため、現状把握に関してすら大きな不確定性があり、将来の予測の信頼性の低下につながっている。

二酸化炭素などの温暖化気体の実態の把握のためには、観測データが地上観測に偏在していることもあり、上空の分布の把握のためには、全球大気輸送モデルを併用して分布を推定することが必要になる。また、ソース・シンクを把握する方法として、地上を含めた大気中の分布の測定結果から全球大気輸送モデルを用いて、その強度を推定する方法 (インバース法、あるいは逆解法) が開発されてきている。全球大気輸送モデルによって推定された二酸化炭素の分布の検証や、インバース法によるソース・シンクの推定には、大気中の二酸化炭素の空間分布を高頻度・広域・高精度で測定する必要があるが、現状では地上観測が主となっており、鉛直分布の検証やインバース法の拘束条件に不可欠な鉛直方向の情報が決定的に不足している。二酸化炭素の鉛直分布の観測は、商用航空機やバルーン、高地観測所で行われているが、商用航空機やバルーンによる観測は観測頻度が低く、また、高地観測所の観測は、高度方向の観測が1点に限られる。このように、既存の観測は、観測頻度が低く観測領域が限定されており、モデルの拘束条件としては十分でないと考えられているが、一方で、商用航空機による観測データが、インバース法によるソース・シンクの推定にインパクトを与える事が報告されている。このことから、より高密度の観測が大きなインパクトを与えることは確実であると考えられている。

ライダーによる観測は、地上からの遠隔測定により、二酸化炭素の鉛直分布を他の手法では得られない高分解能で時間的に連続して観測することが可能であり、数値モデルの検証やインバース法によるソース・シンクの推定の際、地上観測や現在行われている鉛直分布観測に加えることで、モデルの検証・高度化による現状把握やソース・シンクの推定精度の向上に極めて有効に働くと考えられ、緊急に開発を行う事が求められている。

ここで開発する差分吸収法ライダー (DIAL: Differential Absorption Lidar) 全体の設計については、長澤 他、2005、Nagai et. al., 2006 等で発表した。ここでは、 $1.6\mu\text{m}$ 付近の二酸化炭素の吸収線を選択し、レーザーをはじめとする送信部や受信部を開発している。送信部については、レーザーの開発を中心として長澤らが本シンポジウムで報告している。本報告では、受信部の開発状況について報告する。

2. 受信部の設計と開発

2.1 受信部に求められる条件

ライダーの受信部では、高高度から散乱されてくる微弱な光を検出するため、高感度の検出器と大口径の受信望遠鏡が必要になる。また、受信光学系も高効率とする必要がある。受信望遠鏡の主鏡の製作については、現実的には面精度を犠牲にすることなく製作できる主鏡の口径比 (F : 主鏡の焦点距離 \div 主鏡の直径) に限界があるため、受信望遠鏡の主鏡を大口径にするに従い焦点距離も長くなる。一方、送信レーザー光を受信視野内に収めるためには、ある程度の大きさの視野角 (通常は 1.0mrad 程度以上) を確保する必要があり、焦点距離に比例して検出器の受光面も大きくする必要がある。本研究で使用する $1.57\mu\text{m}$ 帯でもそうであるが、光電子増倍管のような大口径の受光面を持つ検出器を使用することの出来ない波長帯で使用する固体検出素子の受光面は狭いため、ライダー受信部に使用するためには、受信鏡との関係を十分に考慮して設計を行う必要がある。

2.2 検出器

今回使用する近赤外域の $1.57\mu\text{m}$ 帯は、光通信で使用されている $1.55\mu\text{m}$ 帯に近く、検出器を初めとする素子類が流用できることを期待した。この波長帯では、高感度の検出器として、InGaAs アバランシェフォトダイオード (Avalanche Photodiode: APD) が広く使われてきている。通信用に使われている InGaAs APD について調査した結果、感度が高く使い勝手もよい検出器が複数あることがわかった。しかしながら、光通信用の APD の受光面は、光通信用に広く使われる直径 $50\mu\text{m}$ や $62.5\mu\text{m}$ の光ファイバーに合わせて設計されるため、最大でも直径 $80\mu\text{m}$ と狭く、ライダーの受光用には適さない。より広い受光面を持つ検出器について調査した結果、受光径 $200\mu\text{m}$ のものが開発されていることがわかった。受光径 $300\mu\text{m}$ の素子も同時に開発されているが、感度などの特性データが発表されておらず、入手も困難であったため、今回は受光径 $200\mu\text{m}$ の APD を用いて光学系を設計した。

2.3 受信光学系の設計と製作

受信望遠鏡の主鏡は、検出器の狭い受光面に効率良く受信光を導入するため、主鏡の口径比を小さくする必要がある。現実的に製作が可能な口径比は、口径 $200\text{mm}\sim 300\text{mm}$ の場合で $1.0\sim 1.2$ 程度までであり、これより大口径でも小口径でも製作可能な口径比は大きくなる。

Figure 1 に、受光径 $200\mu\text{m}$ の検出器を使用した場合に得られる視野角を、望遠鏡の口径 100mm から 500mm について示した。ライダー受信部として必要とする視野角として 1mrad 程度を考えると、直径 200mm の主鏡を使用した場合で $F: 1.0$ 程度で、これ以上の口径の場合は十分な視野が確保出来ない。また、図には焦点深度 (焦点位置の光軸方向の許容範囲) も合わせて示しているが、 $F: 1.0$ の場合 $3.1\mu\text{m}$ 、 $F: 1.2$ の場合でも $4.5\mu\text{m}$ 程度になる。光ファイバーに受信光を導入する際には、一定以下の入射角に納める必要があるが、通常の光ファイバーの場合 $F: 1.2$ (開口数 NA 0.42) より小さい場合はロスが大きくなる。このような条件を勘案し、受信望遠鏡の主鏡は 200mm 、 $F: 1.2$ とし、直径 $200\mu\text{m}$ の受光面を持つ検出器を用いて視野角が約 0.8mrad の受光系とした。

受信系 1 系統の構成図を Fig. 2 に示す。ファイバー 1 の入射端を主鏡の焦点に配置し、出射端から出た受信光をレンズで一旦平行光とし、受信帯域を制限して受信時の信号対雑音比を向上させるための狭帯域フィルターを通過させる。狭帯域フィルターを通過した光は、再度レンズにて集光し、ファイバー 2 へ入射する。ファイバー 2 の出射端は、2.2 に示した受光素子 (InGaAs APD) と一体化してモジュール化され、効率よく受信光を導いている。

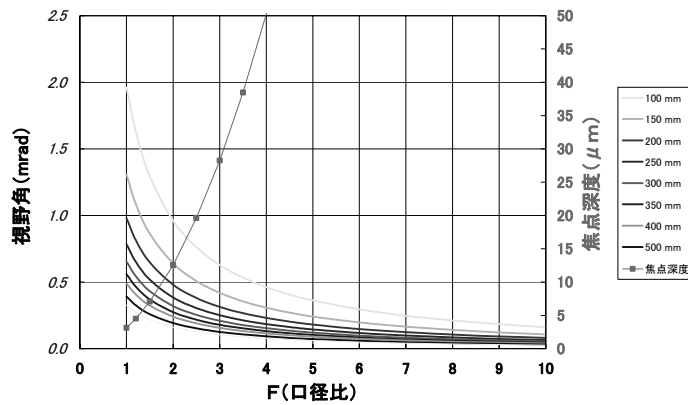


Fig. 1 Field of view of the receiver using a 200mm aperture detector. The diameter of the telescope from 100mm to 500mm is shown. The focal depth versus focal ratio (F) is also shown.

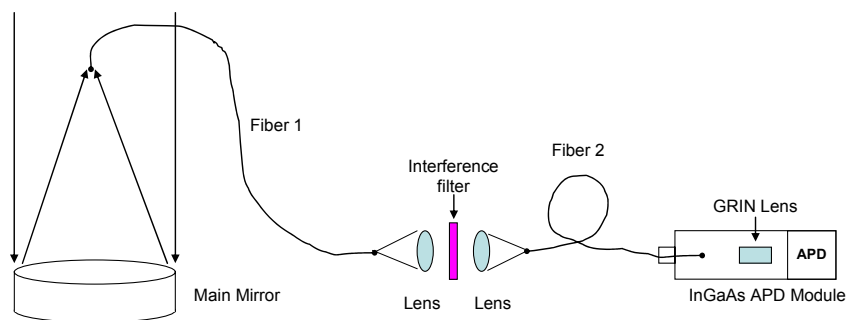


Fig. 2 Schematic diagram of one receiver of the system. One of the end face of the optical fiber is put at the focal point the main mirror. Output light coming out from the other end is collimated once by a collimation lens, pass thru the narrow band interference filter and condensed again to introduce the second optical fiber. The output end of the second optical fiber is integrated with InGaAs APD detector and GRIN lens.

本開発で目標とする高度範囲（地上付近～約 10km）をカバーするためには、受信望遠鏡の口径は 500mm 程度が必要である。また、観測可能な高度範囲を広くするためには、観測高度域を分割して複数の受信系を使用する必要がある。本研究では、低高度用に主鏡を 1 枚使い、高高度用には 6 枚主鏡を使ったシステムとすることとした (Fig. 3)。それぞれの主鏡の焦点位置に光ファイバーの一端を固定して受信光を導入し、デジタルデータとした後に合算することで、必要とする受信望遠鏡の面積を確保することとした。

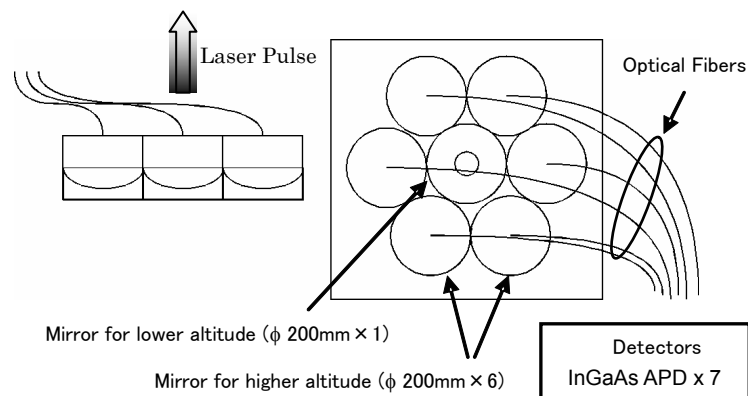


Fig. 3 Optical layout of the receiving system. 6 mirrors are used for higher altitude and one mirror is used for lower altitude to expand the observable altitude range.

高効率の光学系とするため、必要最小限の光学部品を使用し、光ファイバーやレンズなどの光学

部品の端面には無反射コーティングを施し、透過率の高い干渉フィルターを用いたりすることで効率を向上させ、光学系の効率として 93%程度を確保した。また、ファイバーサポートの遮蔽、検出器の量子効率を考えた総合的な効率で、55%程度が確保できた (Table 1)。また、光学部品を減らすため、主鏡の焦点に光ファイバー (NA 0.48) 端を直接置いた。焦点深度が狭い (4.5 μm) ため、望遠鏡サポートについて、熱変化に対して伸縮がほとんどないスーパーインバーを要所に用い、また、ファイバー端の位置調整のために使用する 3 軸ステージの熱膨張がキャンセルされるよう、構成部材を組み合わせた。製作した受信系の 1 系統を Fig. 4 に示す。

Table 1. Optical efficiency of the receiving system.

	efficiency	No. of pcs
Reflectance of the main mirrors	0.98	1
Transmittance of the end face of the optical fibers	0.999	4
Transmittance of the optical fibers	0.993	2
Transmittance of the lenses	0.999	6
Transmittance of the interference filters	0.97	1
Sub total of the optical efficiency	0.928	
Masking of the main mirror	0.1427	
Quantum Efficiency of the Detector (InGaAs APD)	0.7	
Total efficiency	0.557	

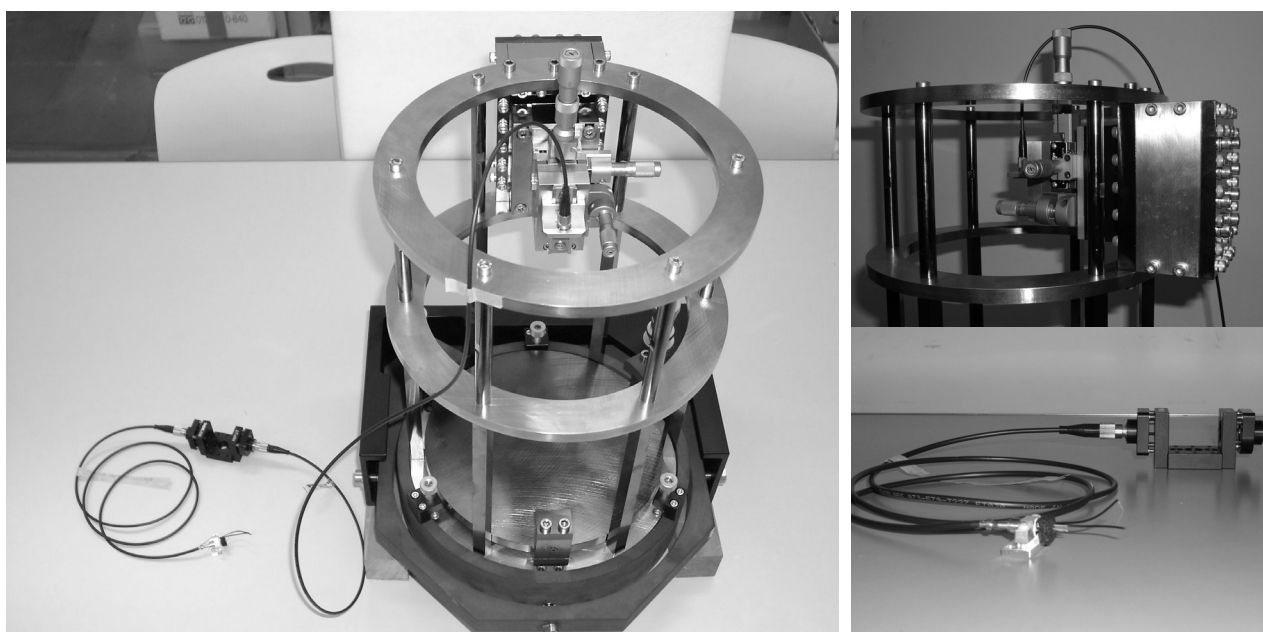


Fig. 4 One of the receiver of the receiving system (left panel), optical fiber supporting mechanism above the main receiving mirror (upper right) and fiber coupler for installing the interference filter and detector (APD) module (lower right) integrated with the GRIN lens and Peltier cooler are shown.

3. おわりに

ここで開発した装置は、送信系と組み合わせて DIAL を完成させ、実際の観測を行うことを予定している。観測結果については、地上 (鉄塔) 観測や商用航空機を利用した観測等と比較し、観測精度などの確認を予定している。

<謝辞> 本研究開発は、文部科学省「地球観測システム構築推進プラン」により実施されている。

参考文献

長澤 親生、永井 智広、阿保 真、柴田 泰邦、中里 真久 (2005)、日本気象学会 2005 年度秋季大会、講演予稿集 C351。

Tomohiro Nagai, Chikao Nagasawa, Makoto Abo, Yasukuni Shibata, Jun Ono, Daisuke Sakaizawa, Masahisa Nakazato (2006), Proceedings of ILRC 23, pp541-544.