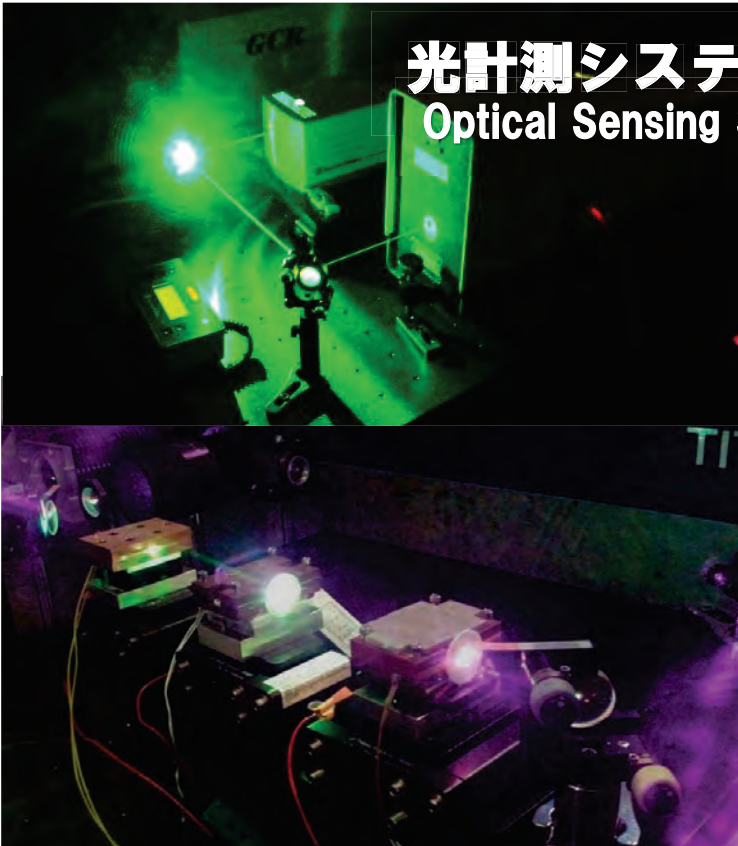


LIDARによる大気中CO₂分布測定

東京都立大学 システムデザイン学部
准教授 柴田 泰邦

日本学術会議学術フォーラム 2021. 11. 11
「カーボンニュートラル社会を支える最先端分析技術」

The image shows the interior of the Optical Sensing Systems Engineering Laboratory. It features various optical components, including lenses, mirrors, and light sources, arranged on a table. A bright green laser beam is visible, illuminating the setup. The text '光計測システム工学研究室 (柴田研)' and 'Optical Sensing Systems Engineering Laboratory' is overlaid on the image.

光計測システム工学研究室（柴田研） Optical Sensing Systems Engineering Laboratory

通信・計測に関する最先端の応用技術を開
展させた電磁波（光）によるリモートセン
シング（遠隔計測）、可視化、データ情報
処理法などについて研究しています。



講演内容



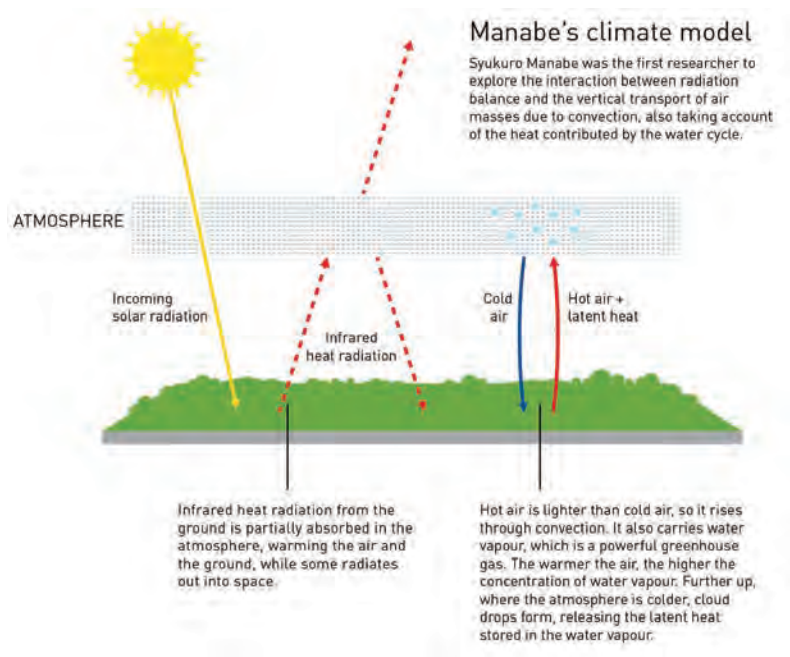
- **CO₂分布計測の必要性**
- CO₂分布計測用ライダーについて
- ライダーによるCO₂分布観測事例
- 将来計画

2021年 ノーベル物理学賞

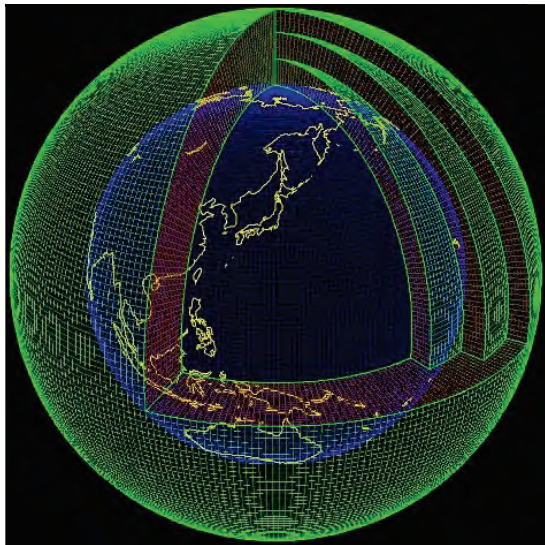


プリンストン大学
真鍋淑郎 上級研究員

- 大気と海洋を結合した物質の循環モデルを提唱
- 二酸化炭素濃度の上昇が地球温暖化に影響するという予測モデルを世界に先駆けて発表



数値予報モデル



天気予報（全球モデルGSM）

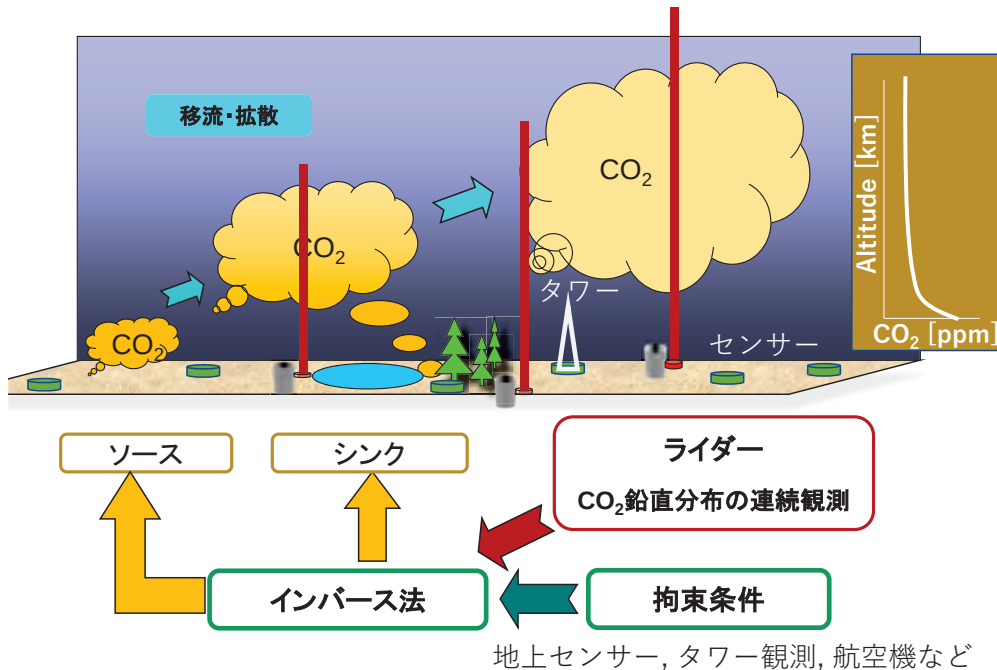
- 地表を約20km四方の格子に区切り、高度100層にわたって分割
- 気温、水蒸気量、風などの観測値を各格子点に入力し、雲や降水の変化を計算
- 海上は推定値

温暖化予測

- 温暖化ガス（CO₂, CH₄, 水蒸気など）の輸送モデルを構築
- 観測値を各格子点に入力し、ガス濃度の変化を計算
- 上空の観測データは少ないので推定値を利用



ライダーによるCO₂鉛直分布観測への期待 1



対流圏のCO₂鉛直分布測定は、航空機によるキャンペーン観測や商用航空機の離着陸に限定

ライダー

航空機に代わるCO₂鉛直分布の観測機器

- 数値予測の検証
- モデルの高精度化
- モデル計算の誤差軽減

ライダーによるCO₂鉛直分布観測への期待 2



長時間連続観測によるCO₂鉛直分布の観測

- 下部対流圏内でのCO₂濃度変動の実態把握

局所的な空間でのCO₂の実態把握

- 森林を含む上空、周辺地域の濃度観測
- 都市大気中のCO₂濃度変動観測

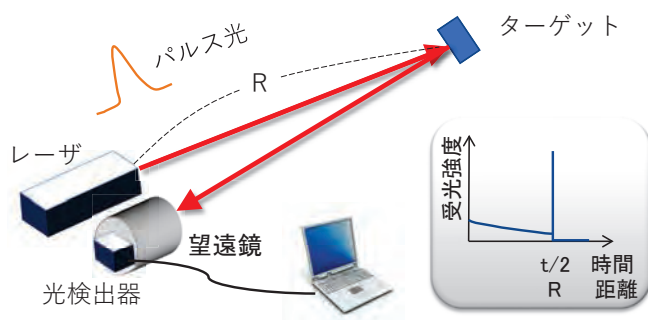


講演内容



- CO₂分布計測の必要性
- **CO₂分布計測用ライダーについて**
- ライダーによるCO₂分布観測事例
- 将来計画

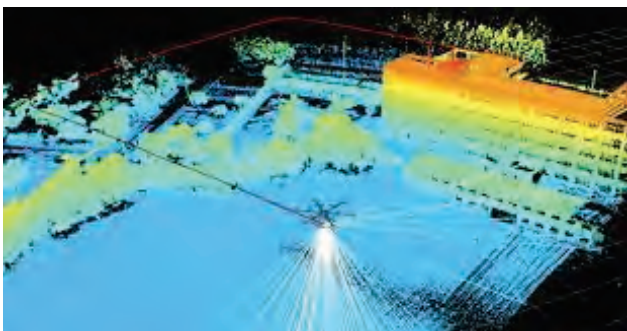
ライダー (LIDAR : Light detection and ranging)



測距、マッピング

パルス光の往復時間 t を計測し、距離 R を算出

$$R = \frac{ct}{2} \quad c : \text{光速}$$

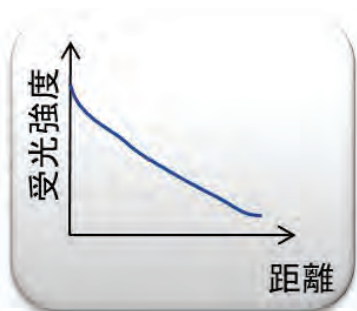
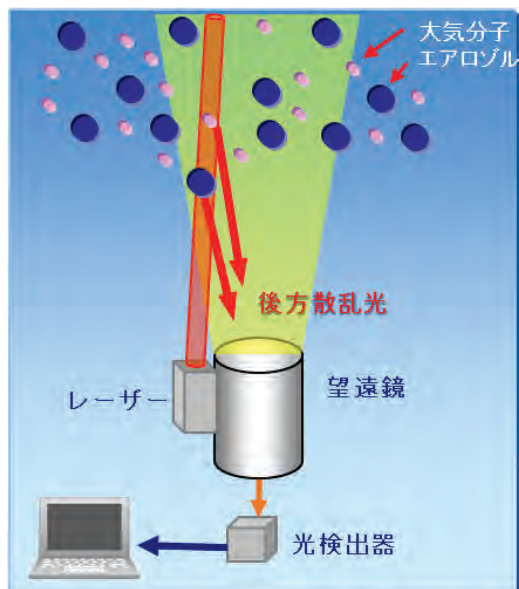


ライダー (LIDAR : Light detection and ranging)



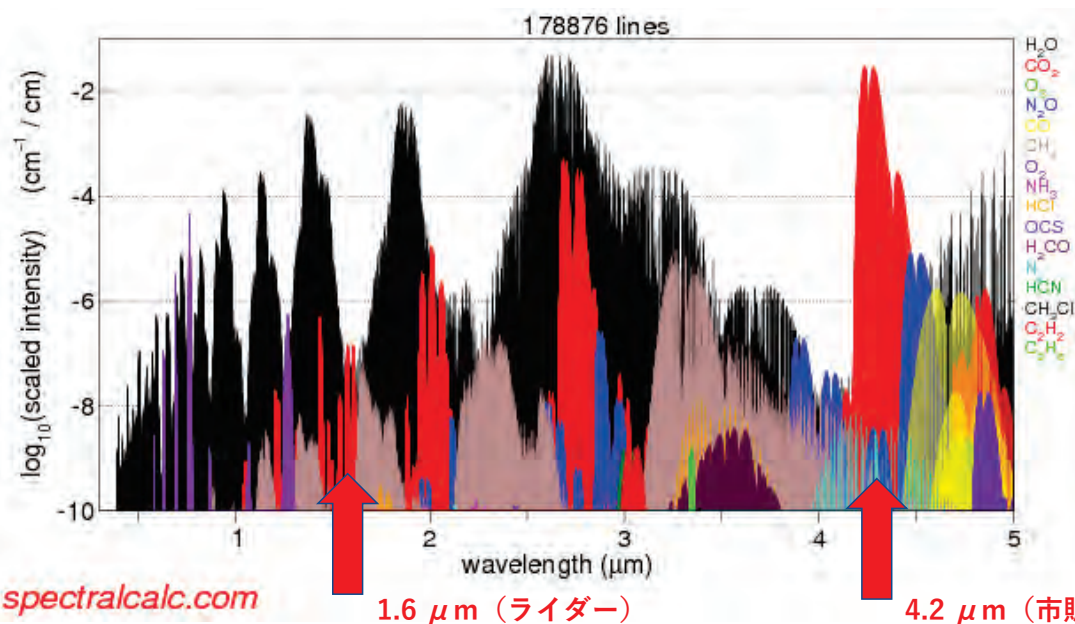
大気環境計測用

- レーザー視線方向のあらゆる位置にあるエアロゾルや大気分子からの微弱な散乱光を受光
- 強度、波長、偏光などの物理量から、上空の環境情報を計測



様々な位置から散乱光が戻ってくる

CO₂濃度計測の基本原則



気体分子は種類ごとに特定波長の光を吸収

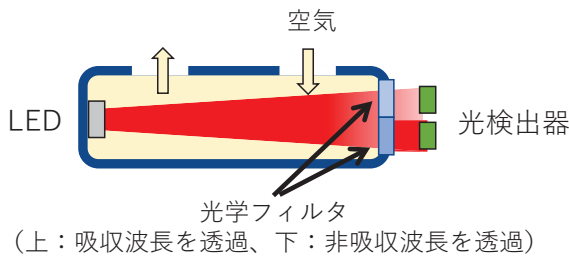


特定波長の光の強度情報から、対象気体の濃度が分かる

市販のCO₂センサーには4.2μm付近の吸収が使われる



CO₂センサーの原理



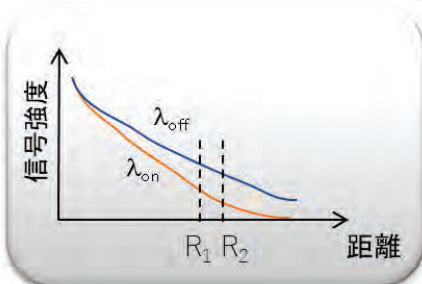
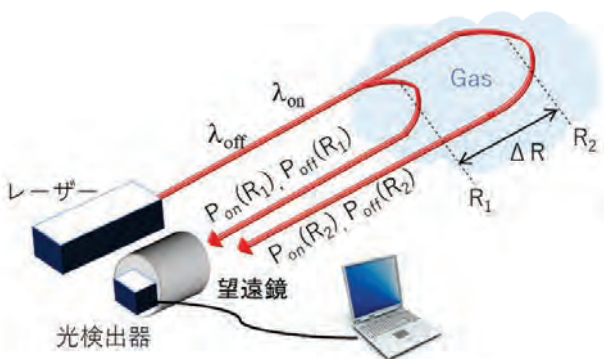
SCD30
Grove CO₂ & Temperature & Humidity Sensor for Arduino

CO₂を含んだ空気を取り込み、LED光を照射

吸収波長と非吸収波長を透過するフィルタを用い、受光強度の違いから濃度を計測

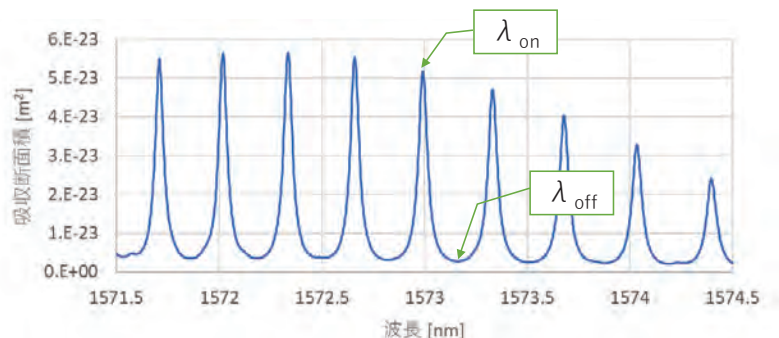
- CO₂濃度が濃い
4.2 μmの光が多く吸収される
- CO₂濃度が薄い
4.2 μmの光があまり吸収されない

差分吸収ライダー (DIAL: Differential Absorption Lidar)



CO₂以外にも
オゾン
水蒸気
メタンなど

- 大気中の微量ガス濃度の分布計測に利用
- 対象気体分子の吸収が強い波長 λ_{on} と弱い波長 λ_{off} の2波長レーザーを用いる
- この2波長による受信光強度の吸収差から対象気体分子の濃度を測定



CO₂吸収スペクトル

DIALによるCO₂濃度観測への要求

- 観測可能高度：地上付近 ～ 高度 3 km
- 時間分解能：～ 1 時間
- 高さ分解能：～ 500 m
- 測定精度：～ 1 % （400 ppmに対し 4 ppm）

他の微量ガスを対象とするDIAL観測の要求精度

水蒸気：10%

成層圏オゾン：20 ～ 30%

SO₂（火山ガス）：20 ～ 30%



CO₂観測の要求精度は
1桁違う

温度情報の必要性

- 光の吸収量は対象ガスの吸収係数 α_g [/m] で決まる。

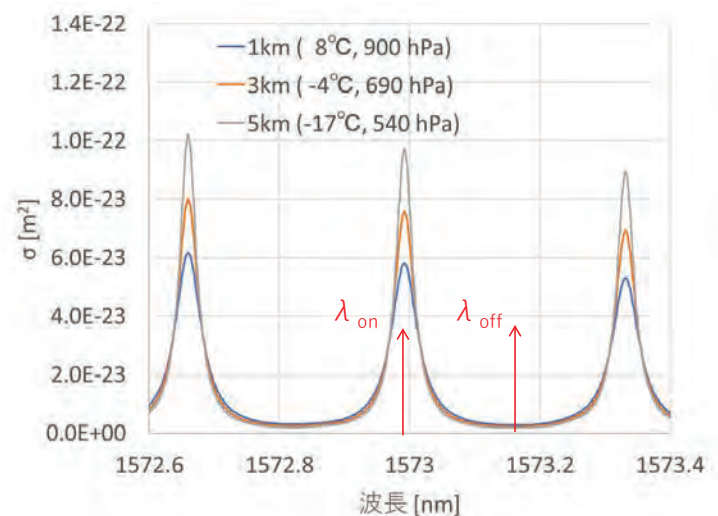
$$\alpha_g(R, \lambda) = N_g(R) \sigma_g(R, \lambda)$$

R ：距離[m]

N_g ：対象気体の濃度[/m³]

σ_g ：対象気体の吸収断面積[m²]

N_g を知りたいので、 σ_g を決める必要がある。

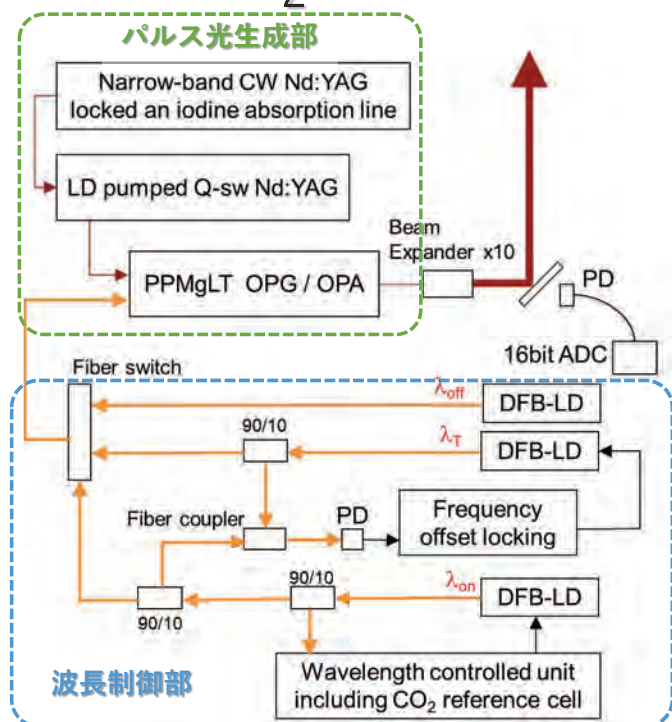


問題点： σ_g は温度 T と気圧 p の関数

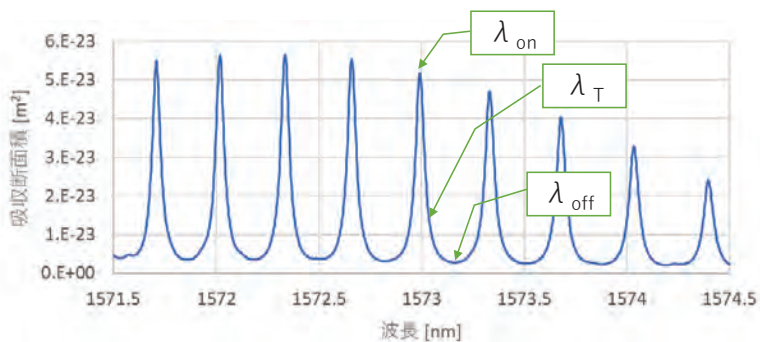
- 上空の気圧 p の推定精度 $\Rightarrow$ 0.5 hPa以下 **OK**
- 上空の気温 T の推定精度 $\Rightarrow$ 5 °C以下 **NG**

上空の気温を同時に観測

3波長CO₂-DIAL

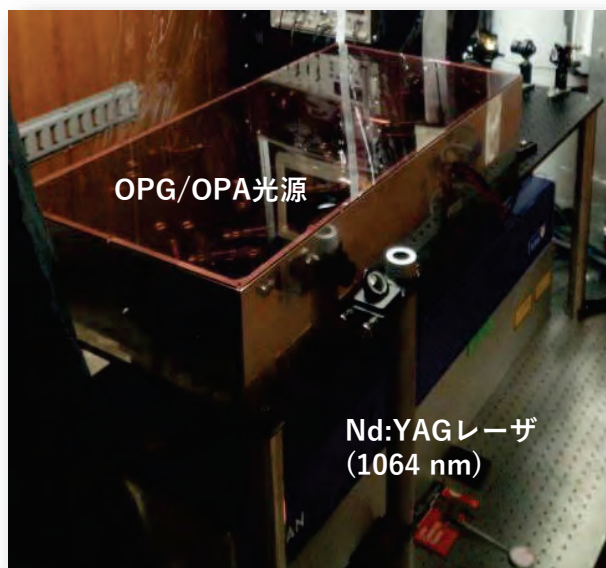


- 気温を同時観測するための第3波長 λ_T を追加
- 3波長の吸収量の違いからCO₂密度と気温を計測
- 大気変化の影響を抑えるため、パルスごとに波長を切り替え（1秒間に500パルス）
- λ_{on} と λ_T は精密に波長を制御
(波長安定度：0.08 pm以下) *pmは 10^{-12} m

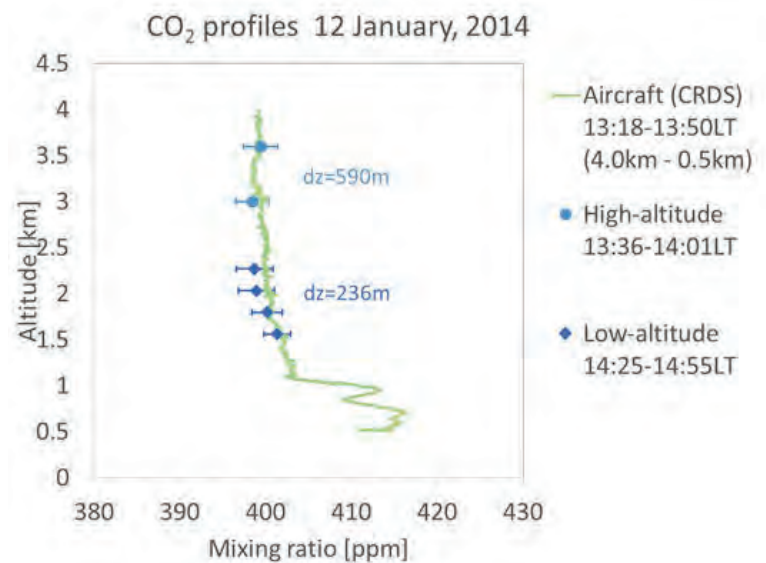
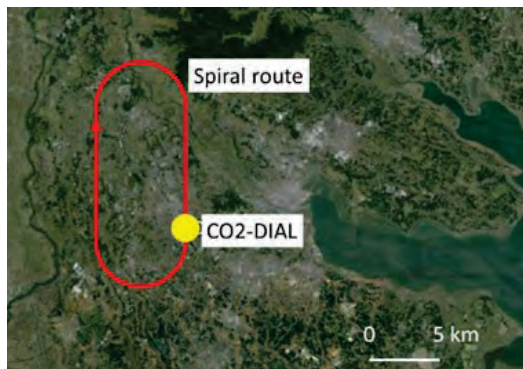


CO₂吸収スペクトル

3波長CO₂-DIAL



精度検証実験



つくば上空でのスパイラル観測との比較実験
Y. Shibata et al., Sensors (2018)

講演内容



- CO₂分布計測の必要性
- CO₂分布計測用ライダーについて
- **ライダーによるCO₂分布観測事例**
- 将来計画

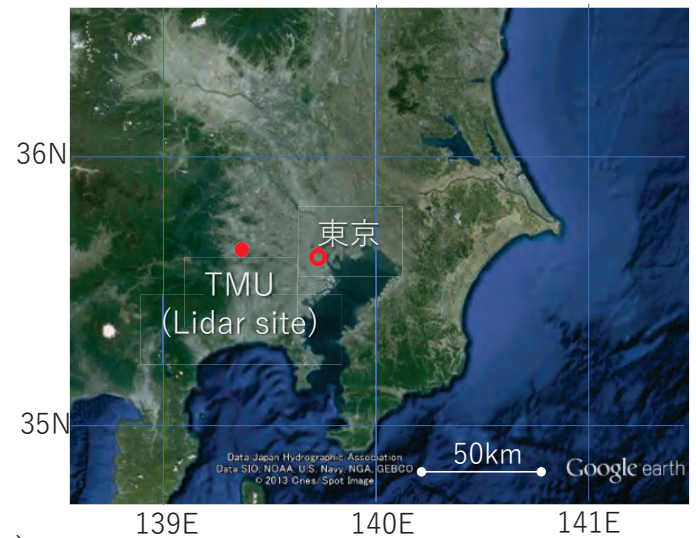
CO₂-DIALによるCO₂混合比と気温の同時観測

CO₂-DIAL仕様

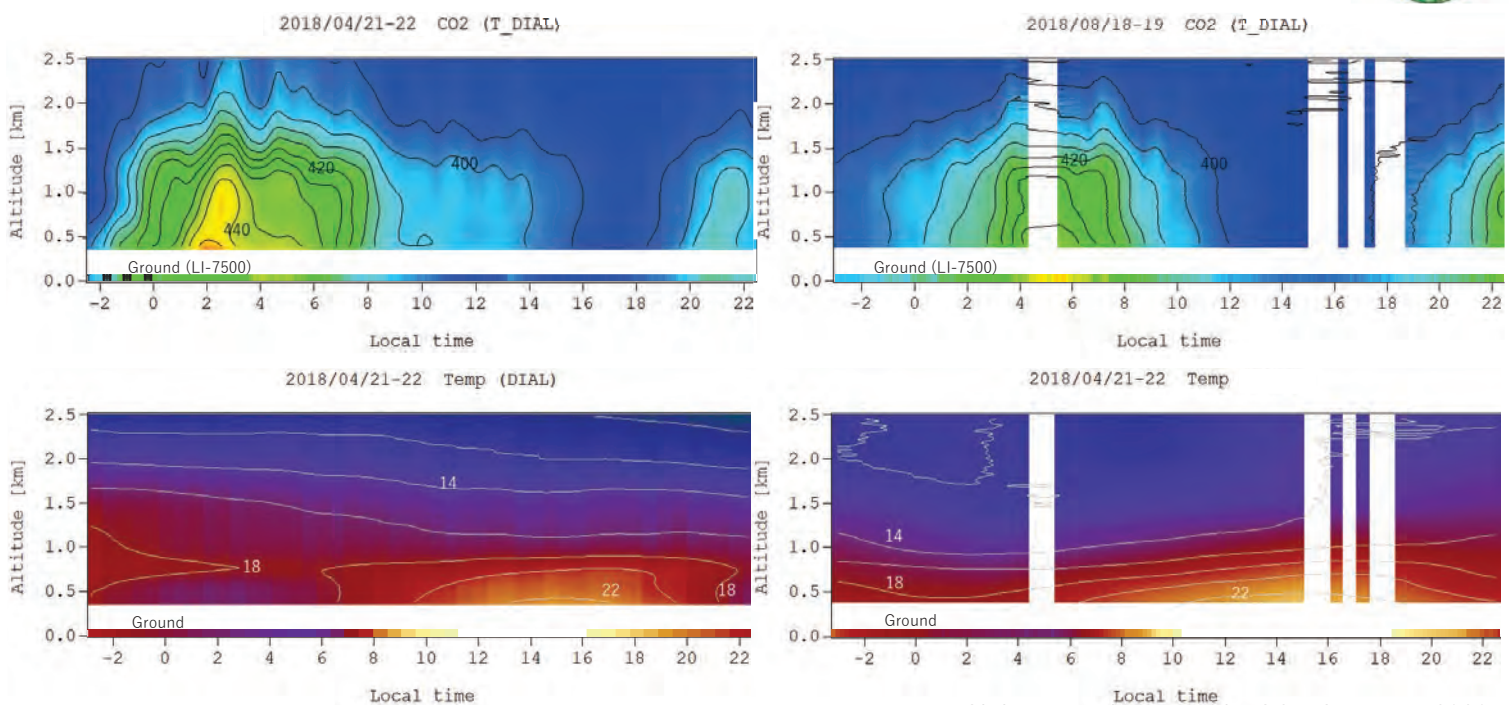
- 測定可能高度：0.4～6 km
- 鉛直分解能：300 m (高度2.5 km以下)
600 m (高度2.5 km以上)
- 時間分解能：30分
- 測定精度：1% (4 ppm) 以下

観測場所

東京都立大学 日野キャンパス (東京都日野市)



CO₂-DIAL観測例 2018/04/21-22, 2018/08/18-19



Y. Shibata et. al., EPJ Web of Conferences, 2020.

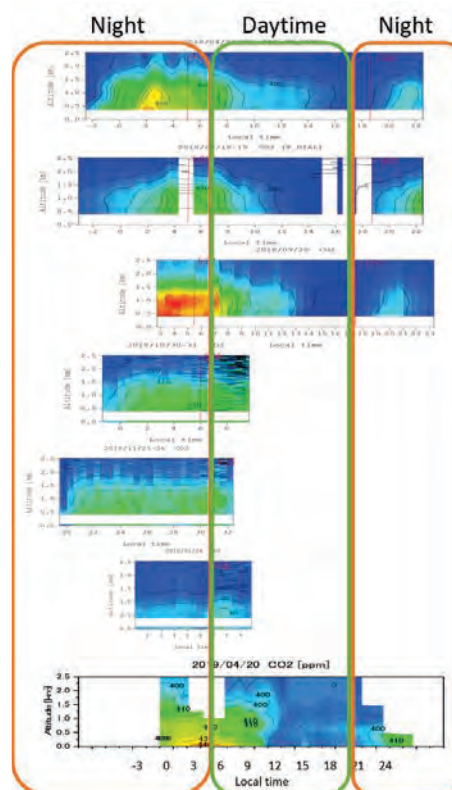
CO₂鉛直分布観測例

夜間

高度2.5 km以下でCO₂混合比が増加
増加が始まるタイミングに規則性は見られない

日中

高度2.5 km以下のCO₂混合比は日出から2~3時間後に減少



講演内容

- CO₂分布計測の必要性
- CO₂分布計測用ライダーについて
- ライダーによるCO₂分布観測事例
- 将来計画



将来計画

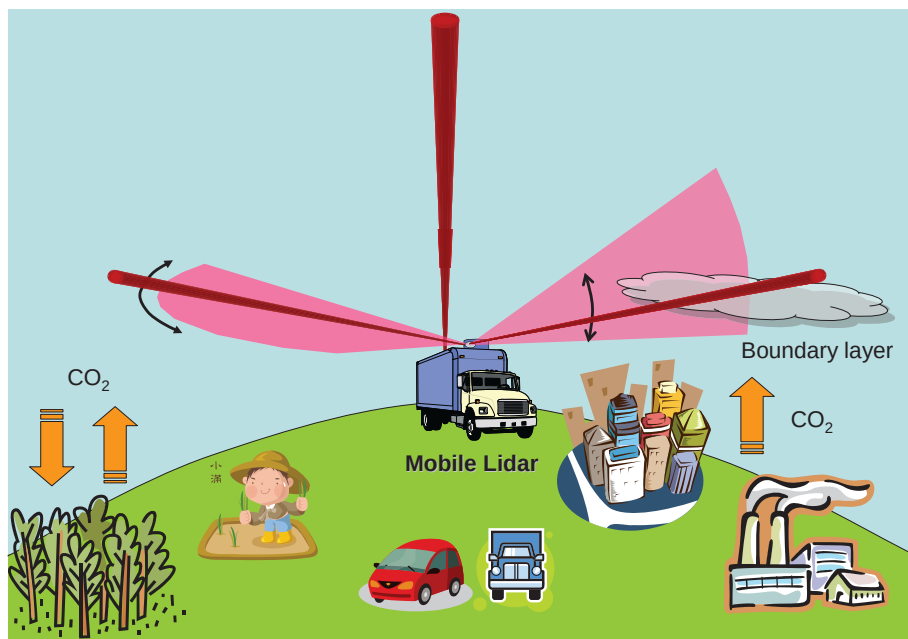


局所的な空間でのCO₂の実態把握

- 森林を含む上空、周辺地域の濃度観測
- 都市大気中のCO₂濃度変動観測

他の微量ガスのライダー観測

- 水蒸気（進行中）
- メタン



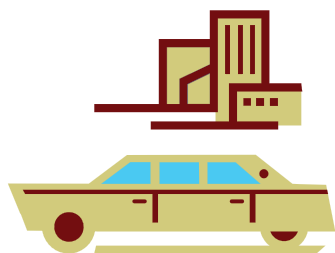
活用・普及



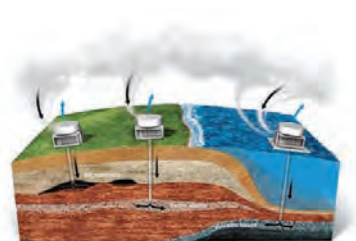
森林におけるCO₂フラックス



火力発電所、工場などからのCO₂排出



社会経済活動に起因するCO₂排出



地中貯留されたCO₂の漏洩検知

まとめ

- 地球温暖化予測精度を向上させるには、温暖化ガスの空間分布計測が重要
現状：地上ネットワーク、キャンペーン的な航空機観測に限定
- CO₂濃度の空間分布を高精度で測定するライダー装置を開発
測定可能高度 0.4～6 km、高度分解能 300 ～ 600m
測定時間30分、精度 1% (4 ppm)以下
- 東京都立大学 日野キャンパス（東京都日野市）におけるライダー観測結果
夜間、高度2.5 km付近までCO₂濃度が数十ppm増加し、日出2～3時間後に減少に転じる
大陸由来と思われるCO₂の増加（高度5km付近）を初めて捉えた
- 将来計画
局所的なCO₂の実態把握のためのスキャン観測
他の微量ガスへの応用