

# リモートセンシングによる下部対流圏オゾン導出 ～アルベド推定～

#山口裕樹[2]、福寿旅人[2]、北和之[1]、板橋良平[2]、木名瀬健[2]、谷中郁哉[1]、入江仁士[3]、齋藤尚子[3]、野口克行[4]、中山智喜[5]、松見豊[5]、永井智広[6]、酒井哲[6]、財前祐二[6]、内山明博[6]、山崎明宏[6]、森野 勇[7]、田中智章[8]  
1.茨城大学理学部 2.茨城大理工学研究所 3.千葉大CeRES 4.奈良女子大理学部 5.名古屋大STE 研 6.気象研究所 7.国立環境研 8.JAXA/EORC

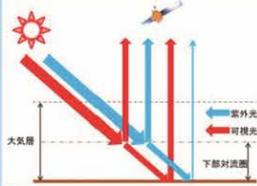
## 背景・研究目的

対流圏下部のオゾンは、大気汚染物質として人体の健康や農作物・生態系にとって重要である。その増加傾向は北半球で広く認められており、中国など新興国からの越境汚染が原因の一つであると示唆されているが、その実態はまだ良くわかっていない。越境汚染など広域的な分布を観測するためには、衛星等からのリモートセンシングが有効であると考えられるが、下部対流圏オゾンについては従来困難であった。そこで本研究では、衛星リモートセンシングによる下部対流圏オゾン観測の実現に向けて、多波長同時分光観測ならびに紫外光マルチアングル観測の2つの手法を提案し、その検証のため航空機観測を実施した。

## リモートセンシングによるオゾン観測方法

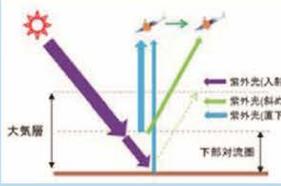
### 多波長同時分光観測(UV-Vis)

紫外光ではレイリー散乱断面積が大きく、後方散乱光中に大気密度の濃い下部対流圏を透過し衛星まで届くものの割合が極端に減少する。一方、可視光では地表まで透過し散乱する光の割合が多く、両者で平均光路長に差が生じる。2波長域で同時に観測することで、下部対流圏での光路長差からそのオゾン濃度が導出可能。



### 紫外光マルチアングル観測

レイリー散乱断面積が大きい紫外光では、斜め下方からの散乱光は、鉛直下方からの比、下部対流圏を透過して衛星まで届くものの割合がさらに小さくなるため、両者で平均光路長に差が生じる。この2つの角度からの散乱光を連続的に観測することにより、下部対流圏オゾン量を導出可能。



## 観測概要

2012年9月10日、13日につくば上空にて航空機観測を行った。2つの高度(25000ft,2500ft)で飛行し、紫外・可視散乱光スペクトルの分光観測とオゾンの直接観測を行った。分光観測は二台の分光器Maya2000Pro(OceanOptics、波長分解能0.5nm)を使用しており、可視(波長374.52~816.24nm)と紫外(波長374.52~816.24nm)の波長域で天頂散乱光、鉛直下方およびそこから20°斜め方向からの散乱光を観測している。

特に可視光では、地表反射光が下方からの散乱光に大きな割合を占めるため、オゾン導出精度を向上するためには地表反射スペクトルを推定する必要がある。今回、高度の低い2500ft(760m)にて、水田、森林、市街地など地表状態が異なる地表反射スペクトルを測定した。CCDカメラによる地表撮像も同時に行うことで、両者を対応付けする。

航空機観測と同時に、その検証のために必要なオゾン濃度及びエアロゾル光学特性について、つくばの気象研他において地上観測を行った。

オゾンに関しては、地上での直接測定、オゾンライダーおよびオゾンゾンデによる成層圏(高度約30km)までのオゾン濃度計測を行った。

エアロゾルに関しては、ライダー観測による後方散乱係数、PSAP・PASSによる地上吸収係数、CRDSによる地上消散係数、スカイラジオメーターによるAOT(光学的厚さ)などの観測を行った。

これらの観測値を基に、放射伝達モデルSCIATRAN(Rozanov et al. 2005)で計算したAMFおよび直接観測されたオゾン鉛直分布から求めたDSCDと、航空機分光観測によるDSCDの比較で検証を行う。

## 後方散乱光によるオゾン導出

観測される太陽後方散乱光強度は、入射光強度・散乱高度までの透過率・その高度での散乱確率・散乱後観測装置到達までの透過率の積を高度積分したものであるが、各高度での実効光路長 $L_j$ を用いて以下のように簡略化して書ける。

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left\{-\sum_j \sigma_j(\lambda) SCD_j\right\} \quad SCD_j = \sum_{j=1}^n n_j^t L_j = \sum_{j=1}^n n_j^t AMF_j \cdot H$$

$I(\lambda)$ : 大気で減光された太陽光スペクトル強度  $I_0(\lambda)$ : 大気入射前の太陽光スペクトル強度  $\sigma(\lambda)$ : 吸収断面積 SCD: 傾斜カラム密度  $n$ : 数密度  $AMF=L \cdot H$   $H$ : 大気層の厚さ

航空機観測では $I_0(\lambda)$ を測定できない。天頂方向との比をとることで $I_0(\lambda)$ を除去する。

$$\frac{I_{Nadir}}{I_{Zenith}} = \exp\left\{-\sum_j \sigma_j(\lambda) DSCD_j\right\} \quad DSCD_j = \sum_j (AMF_{Nadir}^j - AMF_{Zenith}^j) \cdot n_j^t \cdot H$$

$$DSCD_{O_3}^{1,2} = a^{1,2} n_{O_3}^{下部} - b^{1,2} n_{O_3}^{上部} \quad a, b \text{はAMF他で決まる係数}$$

$$n_{O_3}^{下部} = \frac{b^2 DSCD^1 - b^1 DSCD^2}{a^1 b^2 - a^2 b^1}$$

	多波長	マルチアングル
1	紫外光(UV)	直下
2	可視光(Vis)	斜め

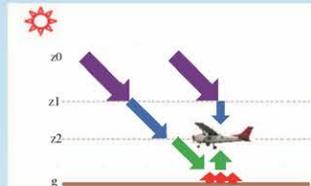
DSCDは、気体に特徴的な吸収スペクトル構造を利用して、観測スペクトルに差分吸収(DOAS)フィッティングを行うことで、対象気体ごとに求める。

## アルベド推定法

正確な下部対流圏オゾン導出のためには、観測されたスペクトルからのオゾン導出および光路長のモデル計算をともに精度よく行う必要がある。地表面アルベドは、この両方にとって大きな不確定要因となり得る。本研究では、高度2500ftで観測した天頂方向・鉛直下方方向それぞれのスペクトルを用いて、実測に基づき様々な地表状態における地表面アルベドを推定した。観測されたスペクトルには、航空機周囲やその下方での散乱の影響を含んでいるため、本研究では、観測時の幾何学条件およびエアロゾルの条件を設定し、放射伝達モデルSCIATRAN(Rozanov et al. 2005)にて天頂方向・鉛直下方方向それぞれのスペクトル強度を計算し、観測されたスペクトルからエアロゾル散乱を考慮してアルベドを求めている。

### 天頂スペクトル強度

$$I_z = I_0 \int_{z_0}^{z_1} -\exp(-\sigma_R n_R^t L z) \times \{P_R(\cos\theta^t) \sigma_R n_R^t + P_{3R}(\cos\theta^t) \sigma_{3R} n_{3R}^t\} \times \int_{z_1}^{z_2} -\exp(-\sigma_R n_R^t L z)$$



### 鉛直下方スペクトル強度

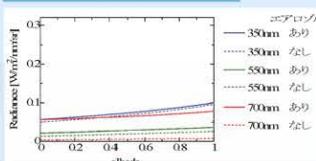
$$I_n = I_0 \int_{z_0}^{z_1} -\exp(-\sigma_R n_R^t L z) \times \int_{z_1}^{z_2} -\exp(-\sigma_R n_R^t L z) \times \int_{z_2}^g -\exp(-\sigma_R n_R^t L z) \times \{P_R(\cos\theta^t) \sigma_R n_R^t + P_{3R}(\cos\theta^t) \sigma_{3R} n_{3R}^t + P_R(\cos\theta^t) \cdot A\} \times \int_{z_2}^g -\exp(-\sigma_R n_R^t L z)$$

## 結果

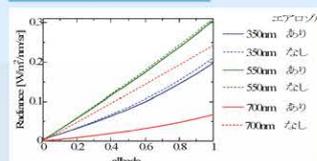
350nm、550nm、700nmの3波長において、アルベドを0~1(0.1毎)で変化させ、鉛直下方および天頂方向それぞれがどのように変化するか、エアロゾルが無い場合と、各波長ごとにエアロゾルを計算に盛り込んだ場合で比較を行った。

第3フライトの2500ft飛行時を想定し、9月13日14時45分筑波山付近上空をジオメトリ条件に設定した。また、エアロゾルについては国立環境研究所清水氏のエアロゾルライダーの解析結果を用いて、各波長ごとに消散係数を計算し、SCIATRANに導入した。

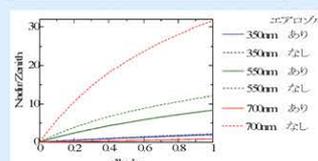
### 鉛直下方のスペクトル強度



### 天頂のスペクトル強度



### 鉛直下方/天頂スペクトル強度比



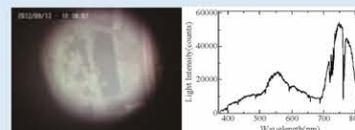
波長の短い350nmでは大気分子のレイリー散乱の寄与が大きいのでエアロゾルの有無による差が小さく、エアロゾルによるミー散乱の寄与が相対的に大きい700nmでは差が大きくなる。

鉛直下方、天頂両方向ともに、アルベドの増大に伴って、スペクトル強度は大きくなる。鉛直下方からの後方散乱光は、散乱による地表に届く光が減るためエアロゾルにより減衰する。

天頂方向からの散乱光もアルベドによって強度が変化するのは、地表で反射した光が、多重散乱によって一部が再び下向きの光となるためと考えられ、エアロゾルにより多重散乱が増えると強度が増大する。

### 観測スペクトルへの適用

求めたアルベドとスペクトル強度の関係を利用して、観測されたスペクトル強度から、各地表面状態のアルベドを推定する。



謝辞: 本研究は、科学研究費補助金「可視紫外同時分光観測による地表境界層オゾンのリモートセンシング手法の開発」によるものです。また、計算条件として設定したエアロゾル確係数データは、国立環境研究所清水氏らによるものを使用させていただきました。ここに感謝いたします。