

リモートセンシングによる下部対流圏オゾン量導出のための検証観測

#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]、田中智策[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

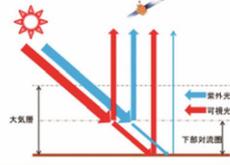
背景・研究目的

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、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。そのため、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。並びにオゾンリターンアルゴリズムの精度検証として、太陽直達光観測によるオゾンカラム量導出を試みた。

リモートセンシングによるオゾン観測方法

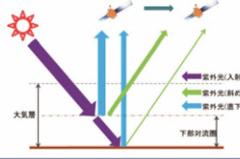
多波長同時分光観測(UV-Vis)

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。



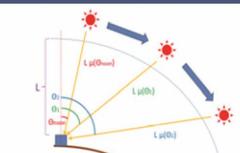
紫外光マルチアングル観測

レイリー散乱断面積が大きい紫外光では、斜め下方からの後方散乱光では、鉛直下方からに比べ、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。



直達光観測

直達光の光路長は幾何学条件にのみ依存し、散乱光による影響が十分小さい。そのため紫外・可視同波長の光路長は等しくなり、得られる傾斜オゾンカラム量も等しくなると期待される。UV、Visで導出されるカラム量を比較する。



後方散乱光によるオゾン導出方法

衛星では大気分子による減光を受けた後方散乱光を観測する。しかし、航空機観測では大気入射前の太陽光スペクトル強度を測定できないため、天頂方向との比をとることでこれを除去する。

$$\frac{I_{\text{Nadir}}(\lambda)}{I_{\text{Zenith}}(\lambda)} = \exp\left\{-\sum_i \sigma_i(\lambda) DSCD_i\right\}$$

$$DSCD_i = \sum_j (AMF_j^{\text{Nadir}} - AMF_j^{\text{Zenith}}) \cdot n_i \cdot H$$

$I(\lambda)$: 大気で減光された太陽光スペクトル強度

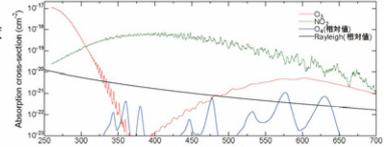
$\sigma(\lambda)$: 吸収断面積

DSCD: 差分傾斜カラム密度

n : 数密度

AMF: エアマスファクター

H : 大気層の厚さ



気体に特徴的な吸収スペクトル構造を利用して、観測スペクトルとフィッティング(DOAS法)を行うことで対象気体濃度(ここではDSCD)を推定する。

直達光によるオゾン導出方法

航空機観測同様、大気入射前の太陽光スペクトル強度を測定できないため、正午前後の測定値との比をとることでこれを除去する。地球を完全球体とし、大気中の微量物質濃度が一様と仮定する。

$$\frac{I_{\theta}(\lambda)}{I_{\mu}(\lambda)} = \exp\left\{-\sum_i \sigma_i(\lambda) DSCD_i\right\}$$

$$DSCD_i = \sum_j (\mu(\theta_j) - \mu(\theta_{noon})) \cdot \bar{n}_i \cdot L$$

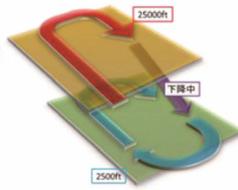
\bar{n} : 大気中で一様な数密度 L : 大気全体の厚さ μ : 大気曲率

観測概要

航空機観測

2012年9月10日、13日につば上空にて実施

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(Ocean Optics 波長分解能約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カメラによる地表画像も同時に行うことで、両者を対応付けする。



直達光観測

2012年11月16日茨城大学構内に実施

航空機観測と同じ装置を使用し、太陽追尾装置(工房でんとうむし製 TM-2DX)に減光フィルターを装着して分光観測を行った。観測太陽高度を右に示す。

*は各高度の測定値と比をとるための正午頃の測定値

太陽高度(度)	Vis	UV
	33.3*	32.6*
	33.1	29.9
	30.8	25.6
	27	20.6
	22.5	15.1
	17.8	10.1
	12	

初期結果

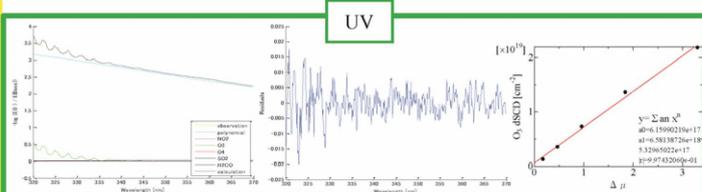
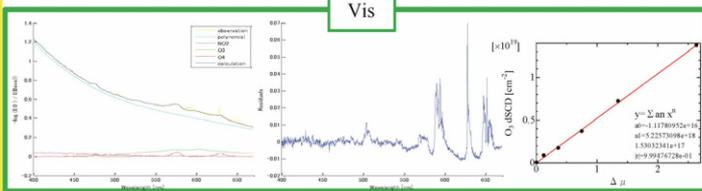
直達光データ解析

DOASフィッティングの計算条件

Vis: 320~370nm(O₃, NO₂, O₄, SO₂, H₂CO) UV: 400~670nm(O₃, NO₂, O₄, SO₂, H₂CO)

$$-\ln\left(\frac{I_{\theta}(\lambda)}{I_{\mu}(\lambda)}\right) = \sum_i \sigma_i(\lambda) DSCD_i + p(\lambda) + \frac{r}{\lambda^4} + \frac{m}{\lambda}$$

$P(\lambda)$: 5次関数
 r : レイリー項係数
 m : ミー項係数



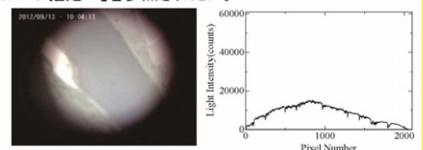
最低の太陽高度測定値との比で行ったDOASフィッティングの例(左)、残差(中)、各太陽高度での測定値より得られたO₃DSCDのラングラープロット(右)

求められたO₃DSCDはVis = 5.23 × 10¹⁸cm⁻²、UV = 6.58 × 10¹⁸cm⁻²となった。当日、つばに於けるオゾン全量観測結果は286DU = 7.66 × 10¹⁸cm⁻²であるから、今回の結果は過小評価といえる。残差が大きくなった原因は、装置関数の推定の不十分さに起因する畳み込み積分のずれと若干の波長シフトだと考えられる。今後はアルゴリズム中の誤差を小さく抑え込み、導出精度の向上に努めたい。加えて、Visは残差に水蒸気の吸収構造が目立つので、それも今後考慮していく。

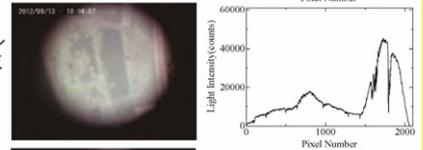
散乱光データ解析

測定される散乱光は、一部地表で反射されている。地表反射率が波長で大きく異なるため、DOASフィッティングによりDSCDを求める際、Ring-Effect同様に、反射率スペクトル強度からフィッティングによりその影響も考慮する必要がある。アルベド推定の詳細は、同研究者福寿旅人による「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～」を参照されたい。

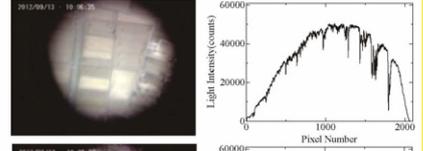
・川の反射スペクトル反射スペクトル強度が全地表状態の中で最も低い。



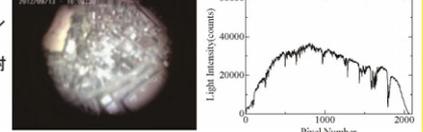
・緑地帯の反射スペクトル葉のクロロフィルによる反射が顕著。



・刈田の反射スペクトル反射スペクトル強度はとも高い。黄～橙色波長域の強度が増加。



・住宅地の反射スペクトル反射スペクトルは太陽光スペクトルをそのまま反射したような形。



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。ご尽力いただいた皆様に深く感謝いたします。