

可視/紫外分光観測による下部対流圏オゾンリモートセンシングの試みと問題点

北 和之[1]、山口裕樹[2]、福寿旅人[2]、板橋良平[2]、木名瀬健[2]、谷中郁哉[1]、入江仁志[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、山崎 明宏、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

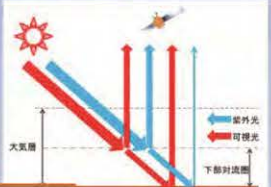
背景・研究目的

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変化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、可視紫外同時分光観測による手法を提案し、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が強いいため、散乱光中で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。しかし、可視光では地表まで透過し散乱する光の割合が多く、両方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さからそこでのオゾン濃度が導出可能。



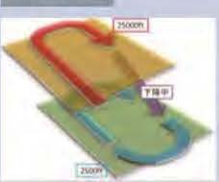
観測概要

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影響を及ぼすため、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、両者を対応付ける。



航空機観測と同時に、その検証のためオゾン濃度高度分布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。

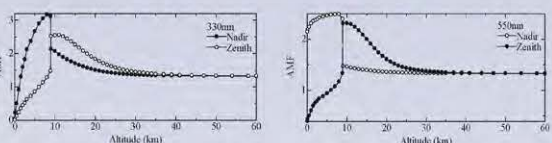


オゾンに関しては、地上での直接測定、オゾンライダーおよびオゾンゾンデによる成層圏(高度約30km)までの高度分布の観測を行った。

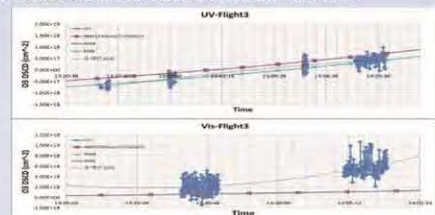
エアロゾルに関しては、ライダー観測による後方散乱係数、PSAP・PASSIによる地上吸収係数、CRDSによる地上消光係数、スカイラジオメーターによるAOT(光学的厚さ)などの観測を行った。

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。

航空機観測の観測上の問題点



上図は、紫外および可視域において実際の航空機観測時の条件下で観測される散乱光の、各高度での光路長を示す Air Mass Factor を計算した結果である。両波長域で、航空機高度以下の対流圏で大きくAMFが異なることは異なることを利用して対流圏オゾン検出を行う。ところが、航空機高度より上でもAMFは両波長域で異なり、その大小が逆転していることから、DSCDの差が打ち消されてしまい、対流圏のオゾン推定精度が大きく損なわれることがわかった。



上図は、紫外域、可視域において実際に航空機から観測されたスペクトルに、DOAS fittingを行った結果を示す。紫外域では、観測から求めたオゾンDSCDと、直接測定されたオゾン濃度および放射伝達計算で求めたAMFから計算したオゾンDSCDとがよく一致しているが、可視域では一致しない時がある。これは、オゾンの吸収断面積の波長変化と、収穫後の水田の地表アルベド(反射率)の波長変化の類似から、DOAS fitting結果が安定しないためであると考えている。本手法による下部対流圏オゾン推定における最大の誤差要因は、可視域でのDOAS fittingによるオゾンカラム推定の誤差、特に地表面反射スペクトルの不確定によるものである。

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。

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left\{-\sum_i \sigma_i(\lambda) SCD_i\right\} \quad SCD_i = \sum_{j=1}^n n_j^i L_j = \sum_{j=1}^n n_j^i \cdot AMF_j \cdot H$$

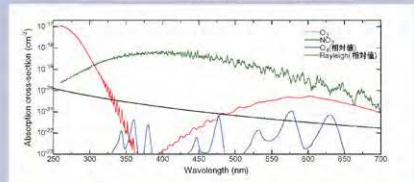
$I(\lambda)$: 大気で減光された太陽光スペクトル強度 $I_0(\lambda)$: 大気入射前の太陽光スペクトル強度 $\sigma(\lambda)$: 吸収断面積 SCD: 傾斜カラム密度 n : 数密度 AMF=L/H H: 大気層の厚さ
 航空機観測では $I_0(\lambda)$ を測定できない。天頂方向との比をとることで $I_0(\lambda)$ を除去する。

$$\frac{I_{Zenith}}{I_{Nadir}} = \exp\left\{-\sum_i \sigma_i(\lambda) DSCD_i\right\} \quad DSCD_i = \sum_j (AMF_{Nadir}^j - AMF_{Zenith}^j) \cdot n_j^i \cdot H$$

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

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

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

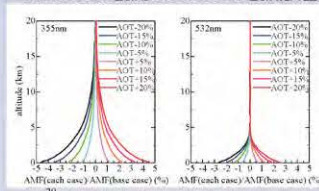


DSCDは、気体に特徴的な吸収スペクトル構造を利用して、観測スペクトルに差分吸収(DOAS)フィッティングを行うことで、対象気体ごとに求める。

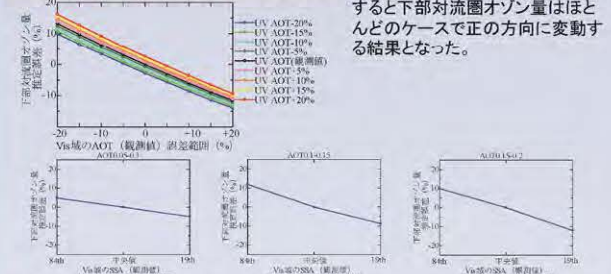
エアロゾルの影響

UV・Vis同時分光観測では O_3 の吸収帯を利用することでAOTを導出することが可能であるが、観測値には系統ランダム誤差をもっている。誤差の範囲内で放射伝達条件のAOTが変わった際の下部対流圏オゾン導出の誤差影響を推定した。

AOT導出の誤差が与える下部対流圏オゾン導出の誤差影響をrealなケースで検証するため、エアロゾル消光係数の高度分布を国立環境研究所によるつくばでのLIDAR観測から導出されたエアロゾル消光係数の高度分布データより3月、4月の消光係数を高度ごとに中央値のデータと、これをつくばでの2012年春季における平均的なエアロゾル消光係数の高度分布とし、そこからAOTの誤差範囲内で Aerosol Optical Thickness(AOT)を変えた場合のAMFを計算し、それぞれのケースで導出された下部対流圏オゾン量を比較することで、下部対流圏オゾン導出への影響の見積もりをした。AOTの誤差範囲は(Tie et al., 2012)のMAXDOAS観測によるAOTの観測誤差から20%と決定した。



> AOTの観測誤差を20%と仮定した時、下部対流圏オゾン量推定誤差は最大で15%程度となった。Vis域のAOTが観測値に対して正の方向に変動すると下部対流圏オゾン量はほとんどのケースで負の方向に変動し、一方でVis域のAOTが観測値に対して負の方向に変動すると下部対流圏オゾン量はほとんどのケースで正の方向に変動する結果となった。



また、UV/VIS同時分光観測からは推定することが難しいエアロゾルのSingle Scattering Albedo (SSA)が、オゾン指定に与える影響を推定するため、つくばの skyradiometerで観測されたAOTが0.05-0.1 0.1-0.15 0.15-0.2の範囲でのSSAデータの中央値で計算したAMFから導出した下部対流圏オゾン量とSSAデータの中央66パーセンタイルの範囲でSSAを変えて計算したAMFから導出した下部対流圏オゾン量を比較すると、下部対流圏オゾン量推定誤差は最大で12%程度となる。Vis域のSSAが中央値に対して正の方向に変動すると下部対流圏オゾン量は負の方向に変動し、一方でVis域のSSAが中央値に対して負の方向に変動すると下部対流圏オゾン量は正の方向に変動する結果となった。エアロゾルの影響による下部対流圏オゾン推定誤差は、DOASによるカラム量推定に比べ大きくないと考えられる。