

# SMILES 観測で明らかになった中層大気オゾンの日変動

○坂崎貴俊・藤原正智（北大環境科学院）・塩谷雅人（京大生存圏研）・鈴木睦（ISAS/JAXA）・秋吉英治（国立環境研究所）・Douglas Kinnison (National Center for Atmospheric Research)

## 1. はじめに

中層大気オゾンの日変動は力学/光化学の両過程に支配されている。そのグローバルな描像の理解は、異なる観測ローカル時刻(LT)を持つ衛星間のデータ比較、オゾンに係る放射計算の精緻化、化学気候モデルの検証等にとって不可欠である。過去には地上リモセン観測（ライダー）による研究(e.g., Schneider et al., 2005; Haefele et al., 2008)が多くなされてきた半面、グローバルなオゾン日変動の観測は太陽”非”同期衛星である UARS/MLS (e.g., Huang et al., 1997)、TIMED/SABER (e.g., Huang et al., 2010)によるものに限られる。しかも、特に成層圏領域においては UARS と SABER で一致した結果が得られていない。つまり、未だにオゾン日変動のグローバルな描像は得られていないと言える。

その折、2009 年—2010 年の半年間に渡り、太陽”非”同期衛星である SMILES（超伝導サブミリ波リム放射サウンダ: Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder）が大気微量成分を高精度でグローバルに観測することに成功した(Kikuchi et al., 2010)。本研究では SMILES データを中心に、他の衛星観測/化学気候モデルデータと併せて統合的に解析し、中層大気オゾン日変化の全体像を把握することを目的とする。

## 2. 使用データ・解析手法

まず衛星観測データとして以下の二種類のデータを使用した。

1. SMILES 観測データ (Version 2.0)
2. SABER 9.6 $\mu$ m 観測データ(Version 1.07)

このうち SABER データについては、特に低高度（20-30 km）において異常値が多数含まれることが報告されており(Rong et al., 2010)、中央値からのずれ（標準偏差）の 3 倍を閾値としてスクリーニングを行ったものを解析に使用した（Imai et al., in preparation）。

その他に、化学気候モデル二種類および再解析データのオゾンも解析した。

3. SD-WACCM モデルアウトプットデータ
4. CCSR/NIES Nudging CTM モデルアウトプットデータ
5. MERRA 再解析データ

ここで、SD-WACCM は GEOS-5 解析データを、CCSR/NIES CTM は ERA-Interim データを、それぞれモデルにナudgingさせて計算したものであり、現実場を反映したデータセットとなっている。これらのデータについては、SMILES 観測が行われた観測時刻/場所のデータを用意して使用した。

SMILES は 30 日の観測で 24 LT をカバーする。背景場の変化によるサンプリング問題を軽減するため、以下の手法を用いて日変動成分を抽出した。まず、ascending node、descending node それぞれに対して、各高度レベル、緯度 5 度ごとに 1 日のデータを平均する。続いてこれらのデータについて 30 日移動平均（これを日平均と見なす）を計算し、元の時系列から取り除く。最後に、得られた残差時系列データを用いてローカルタイムコンジットを行い、日変化成分を抽出した。以下では、各緯度・高度における期間平均値（気候値）で規格化した日変動成分を用いて議論を行う。

### 3. 結果と議論

図1には各データで得られた赤道上のオゾン日変動(気候値に対する割合)のローカル時刻—高度断面図を示す。まず、SMILESとCCMs(SD-WACCM, CCSR/NIES CTM)の結果は全高度領域において定量的にも極めて良い一致を示すことがわかる。一方で、SABERは成層圏内で定量的にやや異なる挙動を示している。これらの結果から、SMILESおよびCCMsで得られた結果が、現実場のオゾン日変動を忠実に反映しているものと考えられる。中層大気オゾン日変化のグローバルかつ正確な観測的描写が、SMILESによって世界で初めて実現したと言っても過言ではないだろう。別の見方をすれば、化学気候モデル中のオゾン日変動が初めて正当に評価されたとも言える。

図2は特徴的な高度レベルにおける日変動のローカル時刻—緯度断面図を示す。各高度において、オゾン日変動の特徴は以下のように解釈される。高度50 km以上の領域(図2a)では、オゾンは日中に最小、夜間に最大となる日変化を示す(振幅最大100%)。これは、夜間のオゾンが日の出後急速に光解離し( $O_3 + hv \rightarrow O + O_2$ )、日没後に再結合し、オゾンが再生成することによる。これより下層の領域でもこの機構は存在するが、 $[O]/[O_3]$ 比が小さいために他の反応に比べて目立たない。高度30 km—45 kmでは日の出後に極小、午後には極大をとる日変化を示す(図2c)が、高度45—50 kmの領域ではこれに加えて真昼に極小をとる(図2b)。これらの日変化はPallister and Tuck (1983)による光化学のモデル計算でも再現されており、彼らによれば、日の出後の極小は $NO_x$ によるオゾン破壊、午後の極大は $O_2$ の光解離による $O_3$ 増加、真昼の極小は $HO_x$ によるオゾン破壊によると考えられる。つまりこの高度領域においても光化学によってオゾンの日変化が生じている。最後に高度20—30 kmの領域では熱帯において振幅2—3%の一日周期成分が卓越している(図2d)。この領域ではオゾンの光化学寿命は十分に長いいためトレーサ的に振る舞い、力学的な輸送によって支配される。図3aにはMERRAで得られた高度22 kmにおける日変動を示す。この領域においてはMERRAもSMILESの結果をよく再現している。図3bにはオゾンが鉛直移流によってのみ生じていると仮定して推定したオゾンの日変化である。つまり、

$$\frac{\partial [O_3]'}{\partial t} = -w' \frac{\partial [O_3]}{\partial z} \quad (1)$$

によって推定を行った。ここで $[O_3]'$ は推定されるオゾン混合比の日変化成分、 $w'$ は鉛直風の日変化成分(つまり大気潮汐に伴う潮汐風)、 $[O_3]$ はオゾン混合比の気候値を示す。図3bと3aを比較すると、鉛直輸送が日変化を支配していることがわかる。

### 4. まとめ

SMILESデータおよび、現実場データにナッジングした化学気候モデルデータを用いて、高度20—80 km領域における中層大気オゾンの日変動の描像を明らかにした。SMILESと化学気候モデルデータの結果は定量的にも非常に良く一致し、この結果は光化学と力学の重ね合わせとして理解できた。一方SABERの結果は高度20—40 kmの領域で定量的に異なる様相を示していた。これらの結果から、SMILESとCCMsで得られた結果が真の値に近いと考えられ、SMILESによって世界で初めてオゾン日変化を正確に観測することに成功したと言える。これらの結果は、放射計算の精緻化、異なる観測時刻(LT)を持つ衛星のデータ比較等に有益な情報となるだろう。また、化学気候モデルが”準観測データ”として扱えることを示唆している。

### 参考文献

- [1] Haefele, A., K. Hocke, N. Kampfer, P. Keckhut, M. Marchand, S. Bekki, B. Morel, T. Egorova, and E. Rozanov (2008), Diurnal changes in middle atmospheric  $H_2O$  and  $O_3$ : Observations in the Alpine region and climate models, *J. Geophys. Res.*, 113, D17303, doi:10.1029/2008JD009892.

- [2] Huang F. T., C. A. Reber, and J. Austin (1997), Ozone diurnal variations observed by UARS and their model simulation, *J. Geophys. Res.*, 102(D11), 12,971—12,985.
- [3] Huang F. T., H. G. Mayr, and J. M. Russell III, and M. G. Mlynczak (2010), Ozone diurnal variations in the stratosphere and lower mesosphere, based on measurements from SABER on TIMED, *J. Geophys. Res.*, 115, D24308, doi:10.1029/2010JD014484.
- [4] Kikuchi, K. et al. (2010), Overview and early results of the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES), *J. Geophys. Res.*, 115, D23306, doi:10.1029/2010JD014379.
- [5] Pallister, R. C., and A. F. Tuck (1983), The diurnal variation of ozone in the upper stratosphere as a test of photochemical theory, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 109, 271—284.
- [6] Ricaud, P., J. de La Noe, B. J. Connor, L. Froidevaux, J. W. Waters, R. S. Harwood, I. A. Mackenzie, and G. E. Peckham (1996), Diurnal variability of mesospheric ozone as measured by the UARS microwave limb sounder instrument, *J. Geophys. Res.*, 101, 10,077—10,089.
- [7] Rong, P. P., Russell III, J. M., Mlynczak, M. G., Remsberg, E. E., Marshall, B. T., Gordley, L. L., and Lopez-Puertas, M.: Validation of TIMED/SABER v1.07 ozone at 9.6  $\mu\text{m}$  in the altitude 5 range 15–70 km, *J. Geophys. Res.*, D04306, 114, doi:10.1029/2008JD010073, 2008. 2010
- [8] Schneider, N., F. Selsis, J. Urban, O. Lezeaux, J. De La Noe, and P. Ricaud (2005), Seasonal and diurnal ozone variations: Observations and modeling, *J. Atmos. Chem.*, 50, 25—47.

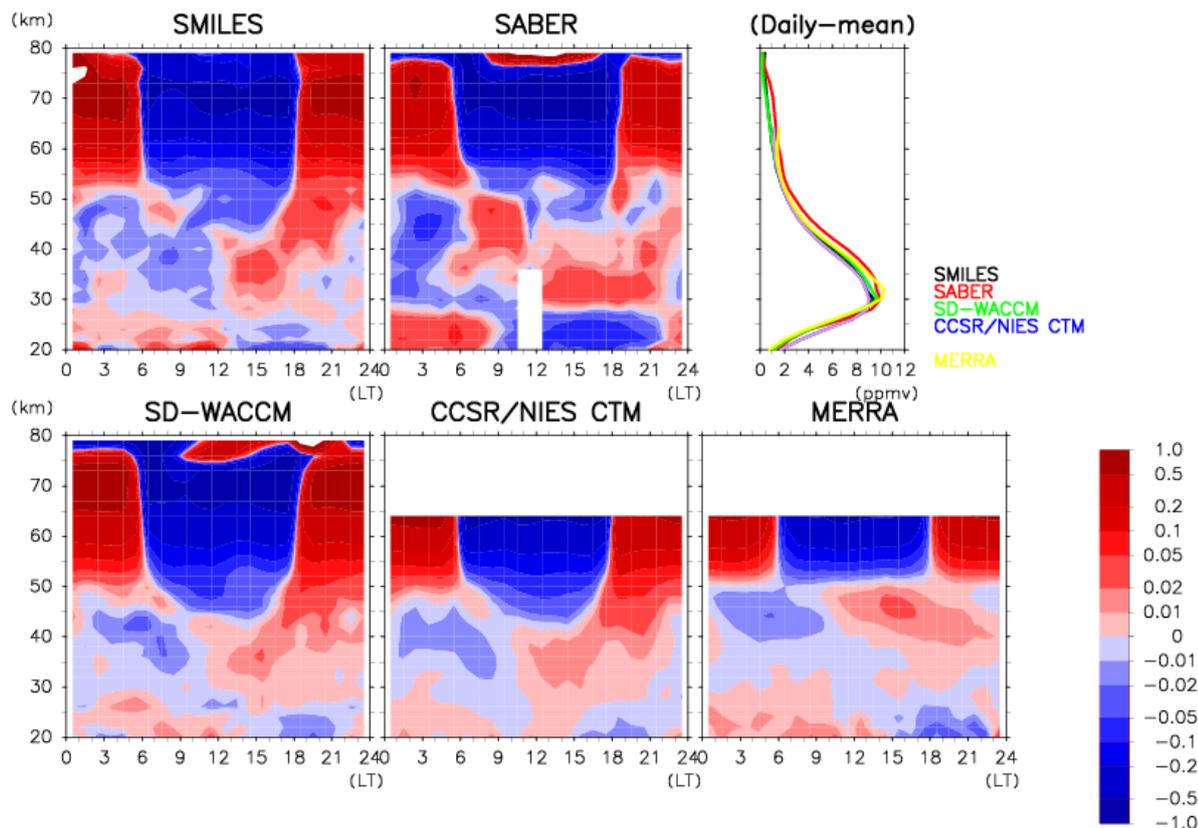


図 1: 各々のデータセットで得られたオゾン日変化成分 (日平均値で規格化) の時刻(LT)—高度断面図 (10°S-10°N 平均)。カラーバーは図の右側に示す (対数スケールであることに注意)。図中の実線はゼロの値を示す。(右上図) は日平均値の高度プロファイルを示す。

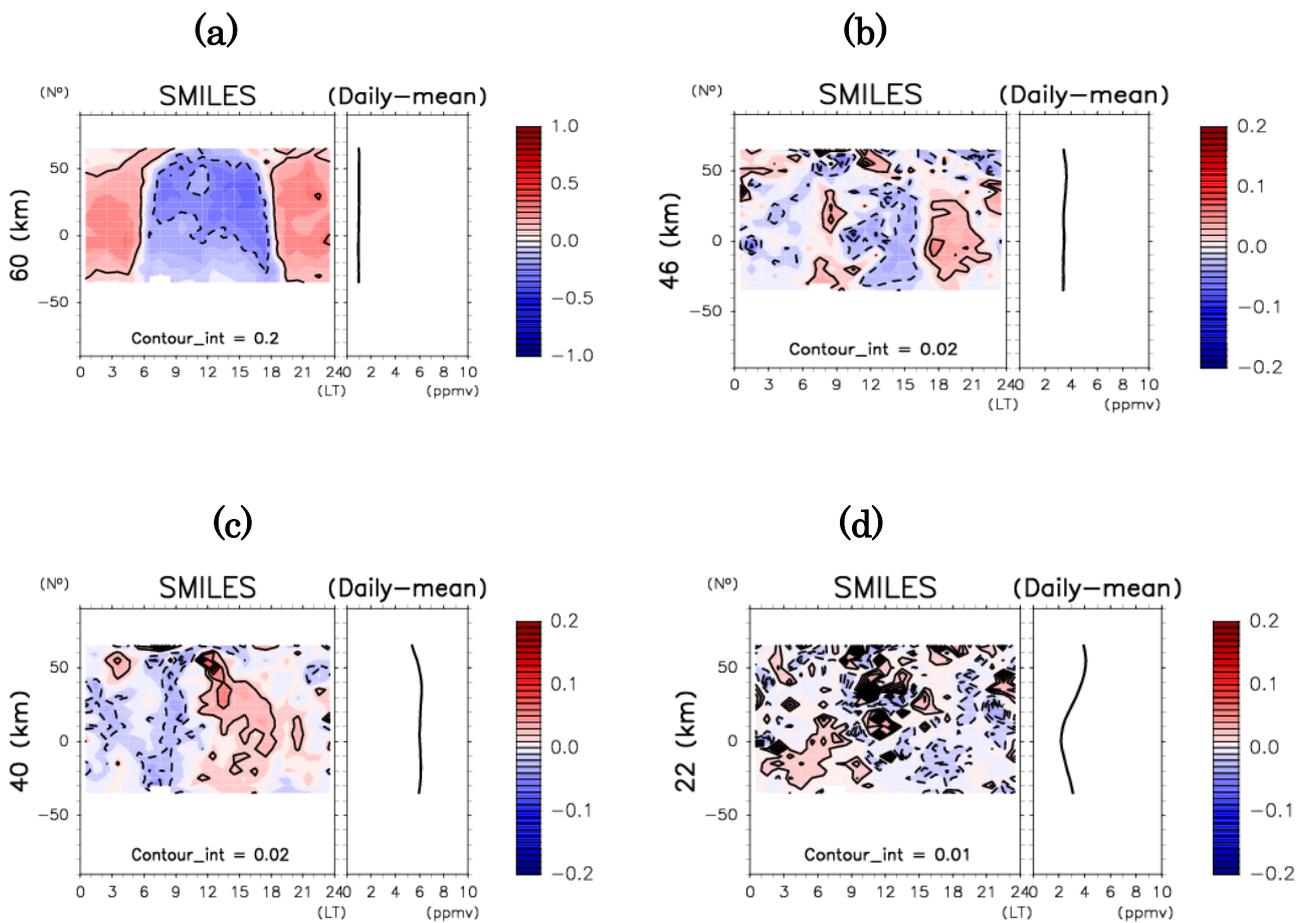


Figure 2: SMILES で得られた各高度(60 km, 46 km, 40 km, 22 km)におけるオゾン日変化成分(平均値で規格化)の時刻(LT)—緯度断面図。右パネルは平均値を示す。カラーバーは図の右側に示す。コンター間隔は図中に示す。

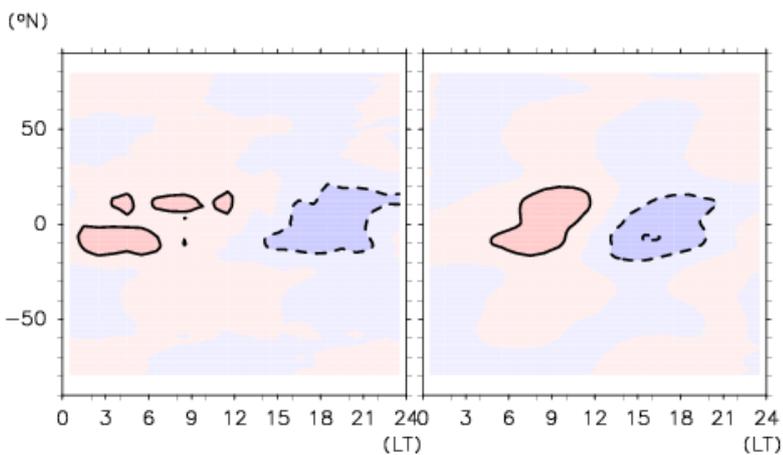


図 3: (左) MERRA で得られた高度 22 km における日変化成分の時刻—緯度断面図。(右) 左図と同じ。ただし、鉛直移流の日変化成分によって引き起こされる成分。コンター間隔は 0.01。