SMILES で観測された成層圏オゾンの日変動

坂崎貴俊¹•藤原正智¹•光田千紘²•今井功二³•眞子直弘⁴•

内藤陽子⁵·中村哲¹·秋吉英治⁶·Douglas Kinnison⁷·佐野琢己⁸·鈴木睦⁸·塩谷雅人⁵

¹北大,²富士通 FIP,³とめ研究所,⁴千葉大,⁵京大,⁶国立環境研,⁷NCAR,⁸ISAS/JAXA

1. はじめに

成層圏オゾンは放射過程を通じて、成層圏の気候形成に重要な役割を果たす。これまで様々なスケー ルのオゾン変動が研究されてきたが (e.g., WMO 2003)、日変動の描像は未だにほとんど得られていない と言って良い。事実、数少ない先行研究において地上ミリ波観測 (Haefele et al., 2008)や衛星観測(Huang et al., 1997, 2008)による結果が示されているものの、特にオゾン全量への寄与が大きい下部成層圏では 使用する測器によって結果が大きく異なっており、信頼に足る結果が得られていないのが現状である。 ただし理論的には、オゾンの光化学寿命が十分に長い (~1ヶ月)下部成層圏では力学(輸送)過程の 寄与が大きく、寿命が一日と同程度かやや短い中一上部成層圏では力学過程に加えて光化学過程も日変 動に寄与していると推察される。

このような背景のもと、Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES; 超伝導サブミリ波放射リムサウンダ)が約半年(2009年10月12日-2010年4月21日)にわたって過 去に類を見ない高精度の中層大気観測を行った(Kikuchi et al., 2008)。さらに、SMILES が搭載されて いる国際宇宙ステーションが太陽非同期の軌道をとる(60日で軌道面が一周; ascending/descending nodes を用いれば 30日で24ローカル時刻をカバー)ため、各種大気微量成分の日変動が抽出できると いう特徴を持つ。

そこで本研究では SMILES のデータを用いて、世界で初めて成層圏オゾン日変動のグローバルな描像 を明らかにすることを目的とする。また、併せて二種類の化学輸送モデル(Chemical Transport Model: 以下、CTM と呼ぶ)を用いて、(1)「SMILES 観測に伴う非均一サンプリング」が抽出された日変動に 与える影響の評価、および、(2)オゾン日変動メカニズムの解明、を行う。

2. データと解析手法

半年にわたる SMILES の観測期間における SMILES データおよび二種類の CTM データを解析した。 以下に詳細を示す。

SMILES データとしては、ver2.0 のレベル2データ(Takahashi et al., 2010, 2011; Mitsuda et al., 2011; <u>http://smiles.isas.jaxa.jp/access/indexe)</u>を使用した。鉛直解像度は 2-3 km である。

CTM は、化学気候モデル(Chemistry Climate Model: CCM)の力学場を(再)解析データにナッジ ングさせながら計算を行ったものである。本研究では、国立環境研究所が開発した MIROC-3.2 CTM、 および、米国大気科学研究所が開発した SD-WACCM の二種類を使用した。前者は ERA-Interim データ に、後者は GEOS-5 データにナッジングを行っている。時間分解能は前者が 0.5 hour、後者が 3 hour である。

これらのデータを用いて、SMILES 観測期間平均の日変動を抽出した。CTM に関しては、SMILES の非均一サンプリングが結果に与える影響を見るため、SMILES の観測時刻/場所のデータのみを用いた 結果(CTM-SMILES)、および、全時刻・グリッドのデータを用いた結果(CTM-ALL)の二種類を抽出し、 比較した。SMILES および CTM-SMILES データについては、緯度 5 度/高度 2-3 km のグリッドにおけ る時系列を作成し、予め 30 日移動平均値で定義される日平均値(注:SMILES 観測は 30 日で 24 ロー カル時刻をカバーする)を取り除いた"残差"をローカル時刻でコンポジットして日変動成分を抽出し た。

3. 成層圏オゾンの日変動

図1は、熱帯におけるオゾン混合比の日変動成分をローカル時刻-高度断面に示したものである。中 間圏の振幅にはデータ間で差が見られるものの、成層圏内では SMILES の結果は CTM でも極めて良く 再現されている。さらに、CTM-SMILES と CTM-ALL の結果にほとんど差が見られないことから、 SMILES の非均一サンプリングの影響は無視できると言って良い。これらのことから、SMILES は世界 で初めて成層圏全域における日変動の描像を抽出したと言えよう。特徴を整理すれば、下部成層圏 (20-30 km) では午前中に極大・午後に極小となる変動、中部成層圏では日の出後に極小・午後に極大となる変 動、上部成層圏では夕方に極大となる変動、をそれぞれ示している。日平均値に対する割合で言えば、 上部成層圏では peak-to-peak 値にして 8%程度に達する変動であることがわかった。



図 1: (a—e) 熱帯 (10°S-10°N) におけるオゾン混合比日変動のローカル時刻-高度断面図。コン ター間隔: 0.05 ppmv。(a) SMILES, (b) MIROC3.2-CTM (SMILES の観測時刻/場所におけるデ ータのみ使用), (c) SD-WACCM (SMILES の観測時刻/場所におけるデータのみ使用), (d) MIROC3.2-CTM (全時刻・グリッドのデータ使用), (e) SD-WACCM (全時刻・グリッドのデータ使 用)。(f) 熱帯 (10°S-10°N) におけるオゾン混合比の日平均値の鉛直プロファイル。

続いて図2は、オゾン混合比日変動のローカル時刻-緯度断面図を示す。成層圏日変動の緯度構造に 着目すると、下部成層圏(高度24 km)と上部成層圏(44 km)では熱帯付近に局在化した構造が見られるの に対し、中部成層圏(34 km)では緯度方向に一様な構造を示していることが特徴的である。



図 2: (上段) SMILES、(中段) MIROC3.2-CTM、(下段) SD-WACCM で得られたオゾン混合
 比日変動のローカル時刻-緯度断面図。CTM はいずれも全時刻・グリッドのデータを用いた結果
 (CTM-ALL)。左から、高度 24 km(コンター間隔: 0.02 ppmv)、34 km(コンター間隔: 0.04 ppmv)、
 44 km (コンター間隔: 0.04 ppmv)、54 km (コンター間隔: 0.04 ppmv)の結果。最右図は日平均
 値を示す。

4. 成層圏オゾン日変動のメカニズム

続いて3章で明らかにした日変動のメカニズムを力学・光化学の両視点から議論する。3章で CTM の 再現性が確かめられたので以下では CTM、うち MIROC3.2-CTM を用いる。

まず、成層圏オゾンの変動が(1) 奇数酸素族 ($O_x = O + O_3$) 全体の変動によって生ずるのか、(2) O_x 内 の O と O_3 の分配比によって生ずるのかを調べた。図 3 a は熱帯成層圏における Ox の日変動を示す。 O_3 の日変動 (図 1 d) と比較すると、成層圏内においては両者がよく一致しており、 O_3 の日変動は O_x 全体の変動 (つまり、上記(1)のメカニズム) によって生じていることがわかる。

続いて成層圏内のOxの変動要因を調べた。まず、その変動は理論的に以下の式で表せる。

$$\frac{\partial [O_x]}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla [O_x] + S \tag{1}$$

ここで $[O_x]$ は O_x の混合比を表し、*t*, *u*, *S*はそれぞれ時間、三次元風速、光化学による生成/消滅項、を表 す。CTM で出力されている *S*項の日変動成分を抽出し、式(1)の右辺第 2 項のみによって引き起こされ る日変動(つまり、光化学のみによって生じる変動)を見積もった(図 3 b)。図 3 b を見ると、光化学は 高度 30 km より上空で重要であることがわかる。この結果は、一次元光化学モデルを用いた先行研究 (Pallister and Tuck, 1983)の結果と整合的である。彼らは、Chapman メカニズムに加えて、NO_x, HO_x による反応が光化学による変動に寄与すると結論づけている。続いて、図 3 c は "図 3 a と図 3 b の差"、 つまり、力学(輸送)効果によって生じる日変動を示す。輸送項は、式(1)の右辺第一項に見られるよう に三次元移流の形で表せるが、実際には以下の式で定義される鉛直輸送による変動項($[O_x] '$ *D_VT*)が最 も重要であることがわかった。

$$\frac{\partial [O_x]'_{D_v T}}{\partial t} = -w' \frac{\partial [\overline{O_x}]}{\partial z}$$
(2)

つまり、 $[O_x] D_v r$ は背景(日平均)場の $O_x(\bar{O}_x)$ が鉛直流の日変動成分(w)によって移流される成分を示 す。実際に CTM データから得られた \bar{O}_x とwを用いて計算した $[O_x] D_v r$ を図3dに示す。図3cと図3 dは概ねよく一致しており、先に述べたように鉛直輸送が全輸送項の中で卓越していることが確認できる。 図3eには \bar{O}_x およびwの振幅の鉛直プロファイルを示す。図3dと見比べると、鉛直輸送は \bar{O}_x の鉛直 勾配が大きい下部成層圈(20-30 km)と上部成層圈(40-50 km)で重要であることがわかる。

まとめると、高度 20-30 km では力学(鉛直輸送)、高度 30-40 km では光化学、高度 40-50 km は力学(鉛直輸送)と光化学の両方、がオゾン($\sim O_x$)の日変動に寄与していることが明らかになった。以上の結果を踏まえて図2を見れば、力学が効いている高度(高度 24 km, 44 km)では、その原因となる鉛直流変動が熱帯域で大きいためにオゾン変動も熱帯に局在化したものとなる一方、光化学が効いている高度(高度 34 km)では緯度方向に一様な変動を示すことがわかる。



図3:(a-d) 図2と同じ。ただし、MIROC3.2-CTM データから得られた(a) O_xの日変動、(b) 光化 学過程のみによって生じる O_xの日変動、(c) 力学過程のみによって生じる O_xの日変動(a と b の差)、
(d) 鉛直流の日変動によって背景(日変動)場の O_xが輸送されることによって生じる O_xの日変動。
(e) 背景(日変動)場の O_x、鉛直流の一日周期成分(実線)および半日周期成分(点線)の鉛直プロ ファイル。

5. オゾン全量の変動

最後にカラムオゾンの日変動について調べた。図4は各データから得られたカラムオゾンの日変動の ローカル時刻ー緯度断面図を示す。図4aと図4bcの比較から、SMILESの結果はCTMでよく再現さ れていることがわかると同時に、図4bcと図4deの比較から、非均一サンプリングの影響は熱帯域(< 40°)では無視できることがわかる。ここで、熱帯域において、Peak-to-peak値にして2DU(日平均値 に対して1%程度)に達する半日周期変動が見られることが興味深い。図5はMIROC3.2-CTMで得られ た熱帯におけるオゾン数密度のローカル時刻一高度断面図を示す。これを見ると、カラムオゾン(オゾ ン全量)に見られる半日周期変動は、(1)20-30 kmにおける変動(力学によって生じる変動)と(2)30-40 kmにおける変動(光化学によって生じる変動)が重なった結果として生じていることがわかる。つま り、上記二つの変動の位相がうまい具合にずれていることによって"半日"周期変動が生じていること になる。



図4: (a—e) カラムオゾン量の日変動のローカル時刻—緯度断面図。(a) SMILES データから得 られた 20–64 km におけるカラム量, (b) MIROC3.2-CTM から得られた 20–64 km におけるカラ ム量 (SMILES の観測時刻・場所のデータのみ使用), (c) SD-WACCM から得られた 20–64 km に おけるカラム量 (SMILES の観測時刻・場所のデータのみ使用), (d) MIROC3.2-CTM から得られ たオゾン全量, (e) SD-WACMM から得られたオゾン全量。コンター間隔: 0.5DU。(a)—(c)は成層 圏内のカラム量変動であるが、(d—e)と比較してもわかるように、およそオゾン全量の変動とみな せる。(f) 各種データにおけるカラムオゾンの日平均値。



図5: MIROC3.2-CTM データから得られた、熱帯(10°S—10°N)におけるオゾン数密度日変動のロ ーカル時刻—高度断面図。

5. まとめ

SMILES はその高精度観測により、世界で初めて成層圏オゾン日変動のグローバルな描像を示すこと に成功した。これらの結果は二つの CTM の結果によっても強力に支持される。その変動の大きさは、成 層圏プロファイル値で 8%、オゾン全量で 1%(いずれも peak-to-peak 値)に達する。さらに CTM を用 いた解析により、これらの変動は力学過程(特に、鉛直流の日変動成分による輸送過程)と光化学過程 の重ねあわせによって生じていることがわかった。

これら一連の結果は、成層圏オゾンにかかる放射過程の理解の精緻化に繋がる他、最近特にオゾント レンド解析の視点から注目されている。図6はオゾントレンドの解析に用いられる測器の一つである SBUV(/2)(代々の NOAA 衛星に搭載)について、赤道を観測するローカル時刻の変遷を示したもので ある(DeLand et al., 2012)。これを見るとローカル時刻が10 hour/decade 程度変化しており、これは日 変動に換算すれば5%/decade になる。つまり、これらのデータからトレンド/年々変動を抽出する際には 日変動による偽のシグナルを注意深く取り除く必要がある。また、一方で、太陽掩蔽観測による SAGEII のオゾンデータに見られる sunset-sunrise bias (McLinden et al., 2009)(日の出観測値と日の入観測 値で最大10%程度の差が見られる)の半分程度は日変動によって説明できることも明らかになった。

なお本研究の詳細については Sakazaki et al. (in press, Journal of Geophysical Research)も参照されたい。



図 6 : NOAA 衛星に搭載された SBUV(/2)が赤道を横切る(観測する)ローカル時刻。異なる色は 異なる NOAA 衛星を示す。DeLand et al. (2012)より転載。

参考文献

- Akiyoshi, H., L. B. Zhou, Y. Yamashita, K. Sakamoto, M. Yoshiki, T. Nagashima, M. Takahashi, J. Kurokawa, M. Takigawa, and T. Imamura (2009), A CCM simulation of the breakup of the Antarctic polar vortex in the years 1980-2004 under the CCMVal scenarios, J. Geophys. Res. 114, D03103, doi:10.1029/2007JD009261.
- Brasseur, G. P., and S. Solomon (2005), *Aeronomy of the middle atmosphere*, Springer, Netherlands.
- DeLand, M. T., S. L. Taylor, L. K. Huang, and B. L. Fisher (2012), Calibration of the SBUV version 8.6 ozone data product, Atmos. Meas. Tech., **5**, 2951–2967.
- Haefele, A., K. Hocke, N. Kämpfer, P. Keckhut, M. Marchand, S. Bekki, B. Morel, T. Egorova, and E. Rozanov (2008), Diurnal changes in middle atmospheric H₂O and O₃: Observations in the Alpine region and climate models, *J. Geophys. Res.*, 113, D17303, doi:10.1029/2008JD009892.
- 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)**, 12971-12985.
- Huang, F. T., H. G. Mayr, 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.
- 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.
- Kunz, A., L. L. Pan, P. Konopka, D. E. Kinnision, and S. Tilmes (2011), Chemical and dynamical discontinuity at the extratropical tropopause based on START08 and WACCM analyses, J. Geophys. Res. 116, D24302, doi:10.1029/2011JD016686.
- McLinden, C. A., S. Tegtmeier, and V. Fioletov (2009), Technical Note: A SAGE-corrected SBUV zonal-mean ozone data set, *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 7963-7972.
- Mitsuda, C., et al. (2011), Current status of level 2 product of Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES), *Proc. SPIE 8176*, 81760M.
- 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.
- Sakazaki, T., M. Fujiwara, X. Zhang, M. E. Hagan, and J. M. Forbes (2012), Diurnal tides from the troposphere to the lower mesosphere as deduced with TIMED/SABER satellite data and six global reanalysis data sets, *J. Geophys. Res.*,

117, D13108, doi:10.1029/2011JD017117.

Takahashi, C., et al. (2011), Capability for ozone high-precision retrieval on JEM/SMILES observation, *Advances in Space Research*, **48**, 1076-1085.

World Meteorological Organization (2011), Scientific assessment of ozone depletion:

2010, Report 52, Global Ozone Research and Monitoring Project.