

オゾンと同化した初期値を用いた化学気候モデルによる 春季南半球オゾン場および力学場の予測可能性について

中村東奈（九大院理）、廣岡俊彦（九大院理）、秋吉英治（環境研）

1. 研究背景

南半球春季において、オゾンホールが南米上空を通過することや南米上空に停滞することは、チリやアルゼンチンの高緯度地域に住む人々にとって、紫外線を多く浴びるリスクとなる。

2009年11月に南米で3週間程度に渡って南米にオゾンホールが接近し、停滞したことで長期間のオゾン全量の低下が起これ、それに伴って紫外線の増加も確認された（[1] de Laat et al. 2010）。図 1.1 にアルゼンチンのリオ・ガジェゴス（51.5° S, 69.3° W）における 2009 年春季のオゾン全量の時系列を示す。11月中旬から下旬にかけて、OMI オゾン全量が 250DU を下回る期間が継続していた。

同様の事例の有無について、1980年～2010年の約30年間のリオ・ガジェゴスにおける春季のオゾン全量および、南半球のオゾン全量の変動を調査したところ、2009年と同様に、ある経度側にオゾンホールが停滞した事例は見られたが、2009年のように南米でオゾン全量低下が継続した年は他になかった。

Akiyoshi et al. (2018) [2] ではこの事例について解析を行い、2009年11月に南半球太平洋上の対流圏で blocking が持続していたこと、オゾン全量低下が起きる直前に対流圏の blocking 高気圧付近から成層圏に向かって上向きの wave activity flux が見られたことを示した。

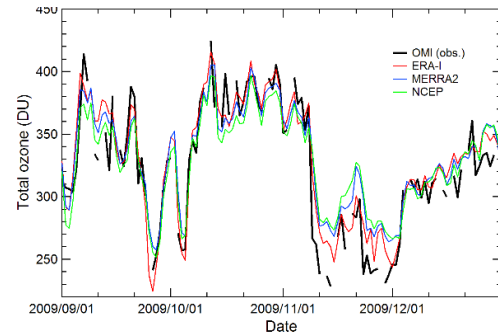


図 1.1 アルゼンチン リオ・ガジェゴス（51.5° S, 69.3° W）におけるオゾン全量の時系列。黒線が OMI オゾン全量。赤、青、緑線はそれぞれ MIROC3.2 CTM に ERA-Interim、MERRA-2、NCEP Reanalysis をナッジングした結果。単位 [DU]。

2. 目的

南半球春季は冬季に南極上空で発達した極渦が崩壊する時期にあたり、成層圏の気象場が大きく変動する時期である。このような極渦崩壊時期のオゾン分布の変動の予測が可能となれば、オゾンホールが南米上空に停滞することを事前に検知し、南米地域に向けて紫外線リスクの警告を発信する手助けになることが期待される。本研究では以下を通じて南半球春季オゾン分布の予測可能性について明らかにすることを目的とする。

化学気候モデルを用いた 2 事例のオゾン全量予測実験の予測精度、力学場およびオゾン場の特徴の比較を行い、オゾンの予測可能性を調査する。

(1) 2009年9月末に楕円状に変形した極渦が

南米上空を通過したことにより南米オゾン全量が一時的に低下した事例 (図 2. 1a)

(2)2009 年 11 月に南米上空にオゾンホールが停滞したことによるオゾン全量低下事例 (図 2. 1b)

予測実験を行う化学気候モデルの化学モジュールは国立環境研究所にて独自に開発されたものであり、放射を含む力学場とオゾン場 (化学場) の相互作用を陽に組み込んでいる。そのため、オゾン分布の変化が力学場に及ぼす影響を表現でき、力学場の予測可能性が改善することも期待される。

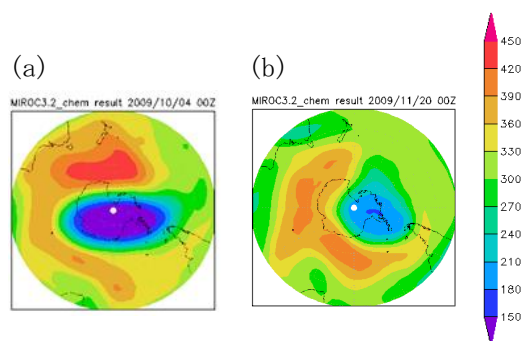


図 2.1 化学輸送モデル MIROC3.2 CTM のオゾン全量分布 (カラー)。単位 [DU]。

(a)2009 年 10 月 4 日 00UTC

(b)2009 年 11 月 20 日 00UTC

3. 南半球春季のオゾン予測実験

本研究では化学気候モデル MIROC3.2 CCM のフリーラン (同化なし、ナッジングなし) により南半球春季のオゾン予測実験を行った。初期値は同化版化学気候モデル ([3] Nakamura et al. 2013) により力学場およびオゾン場を同化して作成した。力学場として MERRA-2 東西風、南北風、気温、オゾン場として OMI オゾン全量、Aura/MLS オゾンプロファイルを使用した。また、同化手法は LETKF (Ensemble Kalman Filter) であり、1

日分の Forecast 計算と同化計算を繰り返し実施した。アンサンブルメンバは 32 メンバとした。

予測実験は LETKF で得た 32 本の初期値から各 10 日間実施した。さらに、予測開始日を 1 日ずつずらしてそれぞれに対しての予測実験を実施した。

4. 結果

(a) オゾン場の予測結果

アルゼンチンのリオ・ガジェゴス (51.6° S, 69.3° W) におけるオゾン全量の予測結果を OMI オゾン全量と比較した。(1)楕円状の極渦通過事例ではオゾン全量の低下をよく再現していたが、(2)極渦停滞事例では予測開始日によって予測がうまくいったりいかなかったりした。図 4.1 にリオ・ガジェゴスにおける予測がうまくいった 2009 年 11 月 6 日初期値 (4. 1a)、うまくいかなかった 8 日初期値の予測実験結果の 2009 年 11 月 14 日のオゾン全量 (4. 1b) と OMI オゾン全量を示す (4. 1c)。図 4. 1a と c は楕円状に変形した極渦の形状や位置がよく一致しているが、図 4. 1b は極渦の変形が小さく、変形した極渦が南米の南端にかかるかの微妙な違いによってリオ・ガジェゴスにおける予測結果に差が生じていたと考えられる。

(b) 予測精度の検証

予測の精度検証のため、力学場およびオゾン場の PCC 解析を行った。PCC は予測値と再解析値の間の水平パターン相関 (Pattern Correlation Coefficient) であり、1 に近いほど予測と再解析がよく一致していることを表す。フリーラン 1 本 1 本の予測結果について、 20° S \sim 90° S の予測結果と再解析値

の PCC を計算し、その時系列を確認した。

オゾン場の PCC 結果について、図 4.2 に示す。図 4.2a の楕円状の極渦通過事例については時間とともに PCC が低下している。PCC が 0.6 以上の期間を予測可能期間とすると、その期間は 7~10 日程度と見られる。図 4.2b の極渦停滞事例については、オゾン全量の低下前は予測精度が高く、アンサンブル間のばらつきも小さい。オゾン全量の低下とともに PCC が低下しているが、その後回復し、予測可能期間は 10 日以上と見積もられる。

ジオポテンシャル高度の PCC についてはいずれも予測可能性は 10 日以上であった(図は省略)。また、極渦停滞事例においてオゾン全量のような明瞭な傾向は見られなかった。

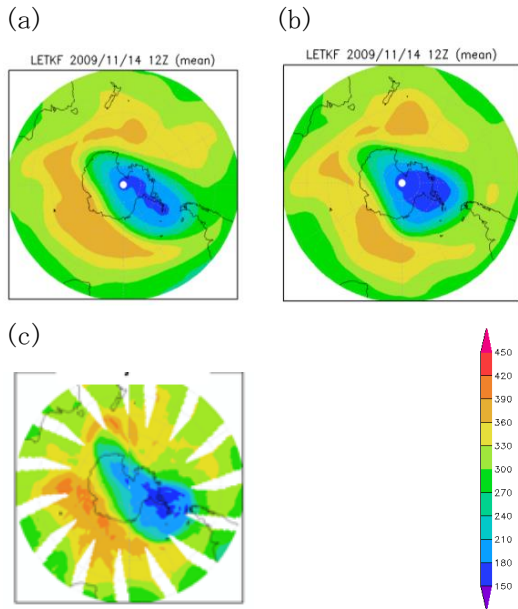
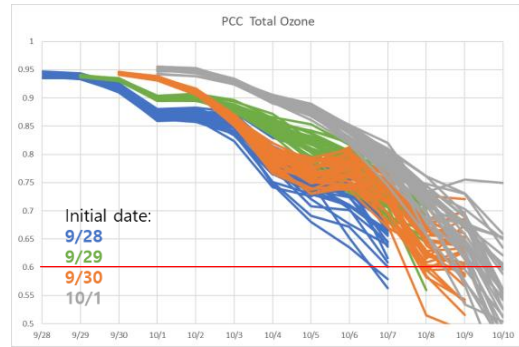


図 4.1 (a)2009 年 11 月 6 日初期値の予測実験における 11 月 14 日の予測結果のアンサンブル平均のオゾン全量分布(カラー)。単位[DU]。(b)(a)と同様。ただし、2009 年 11 月 8 日初期値。(c)2009 年 11 月 14 日の OMI オゾン全量。

(a)



(b)

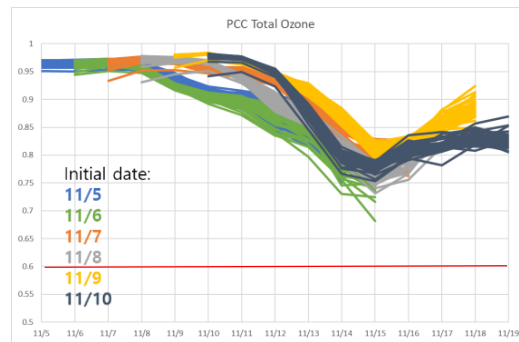


図 4.2 予測実験結果と再解析の $20^{\circ} S \sim 90^{\circ} S$ におけるオゾン全量の水平パターン相関(PCC)の時系列。各時系列がフリーランの予測 1 本 1 本に対応している。赤線が PCC=0.6 の位置を示す。(a) 2009 年 9 月末の楕円状の極渦通過事例。(b)2009 年 11 月の極渦停滞事例。

(c)波活動との関係

予測期間の波数 1、波数 2 の波活動から、予測可能性と波活動の関係を考察した。2009 年 11 月 6 日初期値の予測実験結果のオゾン全量の波数 1、波数 2 成分の緯度時間断面図を図 4.3 に示す。2009 年 11 月の極渦停滞によるオゾン全量低下は 11 月 10 日頃からのオゾン場の波数 1、波数 2 成分が強まった時期に対応しており、この時期にオゾン場の予測精度(PCC)が低下していた。その後、11

月 15 日以降に波数 1、波数 2 の波活動が弱まる時期に対応して、オゾン場の予測精度 (PCC) も回復したことがわかる。以上から、PCC の低下および回復は波数 1、波数 2 の波活動の強まりおよび弱まりと対応していると考えられる。

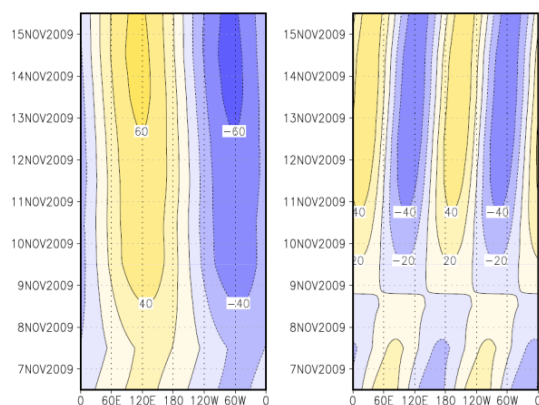


図 4.3 2009 年 11 月 6 日初期値の予測実験のアンサンブル平均のオゾン全量の 60° S における波数 1 (左)、波数 2 (右) 成分の経度時間断面図。横軸が経度、縦軸が時間。

5. まとめと今後の課題

化学気候モデルを用いたオゾン全量予測の予測精度検証のため、春季南米でのオゾン全量低下イベントについて 2 つの予測実験を比較し、以下の結果が得られた。

(1)2009 年 9 月の楕円状の極渦が南米上空を通過したことによるオゾン全量低下事例では、リオ・ガジェゴスにおける予測結果は期間を通じて OMI とよく一致していた。南半球全体で見た予測精度 (PCC) は時間とともに低下し、オゾン場の予測可能期間は 7~10 日間であった。

(2)2009 年 11 月に南米上空にオゾンホールが停滞したことによるオゾン全量低下事例では、リオ・ガジェゴスにおける予測結果は予測開始日によって極渦の変形の予測に差

が生じ、結果として予測がうまくいく場合といかない場合があった。南半球全体ではオゾン全量低下イベント前は予測精度が高く、アンサンブルメンバー間のばらつきが小さかった。予測精度が惑星波波数 1、2 成分の強まりとともに低下し、波活動が弱まるにつれて回復した。期間を通じた予測可能期間は 9 月末のイベントに比べて高く、10 日以上であった。

予測を成功させるための現象のプロセスの理解のため、詳細な解析を行うことが今後の課題である。さらに他事例における南半球オゾンの予測精度の評価のため、成層圏突然昇温時の予測実験の評価も行いたい。

謝辞

化学輸送モデル、化学気候モデルの計算には国立環境研究所のスーパーコンピュータを利用した。本研究は、JSPS 科研費 JP20H01973 および JP18KK0289 の助成を受けた。

参考文献

- [1] de Laat, A. T. J., van der A, R. J., Allaart, M. A. F., van Weele, M., Benitez, G. C., Casiccia, C., et al. (2010). Extreme sunbathing: Three weeks of small total O_3 columns and high UV radiation over the southern tip of South America during the 2009 Antarctic O_3 hole season. *Geophysical Research Letters*, 37, L14805. <https://doi.org/10.1029/2010GL043699>
- [2] Akiyoshi, K., Kadowaki, M., Nakamura, H., Sugita, T., Hirooka, T., Harada, Y., Mizuno, A. (2018), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 12,523–12,542. <https://doi.org/10.1029/2017JD028096>.
- [3] Nakamura, T., Akiyoshi, H., Deushi, M., Miyazaki, K., Kobayashi, C., Shibata, K., Iwasaki, T. (2013), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 3848–3868. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50338>.