

南半球対流圏の気候トレンドに対する中緯度海洋前線帯の潜在的重要性 —水惑星実験から—

小川 史明¹, 西井 和晃¹, 中村 尚^{1,2}, N.-E. Omrani^{3,4}, N. Keenlyside^{4,5}

1. 東京大学先端科学技術研究センター, 2. 海洋研究開発機構地球環境変動領域 3. キール大学ヘルムホルツ海洋研究所 4. ベルゲン大学地球物理研究所 5. 気候研究ビャークネスセンター

1. はじめに

南半球中高緯度の地表においては、20世紀終盤に数十年の時間規模で、偏西風帯や降水帯が次第に高緯度側へシフトする気候トレンドが観測された。この気候変化は、南半球環状モード変動(SAM)の極性変化を伴うものと考えられる(Thompson and Solomon 2002)。また、この気候トレンドは、成層圏オゾン減少に伴う極域の冷却と極渦の強化の影響が、成層圏内にとどまらず地表まで及んだものとして注目されてきた。また別の研究では、成層圏循環異常が対流圏に影響するためには対流圏における擾乱活動を通じた西風運動量輸送や水平熱輸送が重要であることが指摘されている(例えばSong and Robinson 2004)。その一方で、対流圏における移動性擾乱活動とPFJの維持、さらにその卓越変動であるSAMの振幅と南北構造にとって、中緯度海洋前線帯が重要であることが近年明らかになりつつある。これは、中緯度海洋前線帯が、成層圏で生じた循環変化の情報を地表まで伝えることに影響を与える可能性を示唆する。そこで本研究では、観測されたオゾン減少を擬似的に理想化モデル実験において与え、その応答として現れる対流圏の循環変化が、下方境界条件として与える海面水温

(特にその中緯度における勾配)に対してどのように依存するのか、調査を進めている。

2. 実験設定

本研究では、大気大循環モデル(AGCM)において与えるオゾン濃度と水温分布を変化させ、対流圏における循環場の応答について比較考察する。用いたAGCMはECHAM5(Roeckner et al. 2003)で、鉛直層を0.01hPaまで有し、水平解像度はT63(180km格子相当)である。水平解像度は比較的粗いものの、後述のように中緯度の強いSST勾配が解像可能である。与えるSSTはOI-SST(Reynolds et al. 1994)で、1982年から2007年まで26年間平均の気候値を用い、南インド洋[緯度60度]の南北分布を東西一様に与えた(水惑星実験)。季節進行も考慮するが、 $2[^\circ\text{C} / \text{deg}]$ 近くに達する強い水温勾配が、緯度 45° 付近に1年を通じて存在する(図1ab, 黒線)。このSSTのもとで2通りの東西一様なオゾン分布を与えて実験を行った。与えるオゾンには、JRA25で与えられた値を使用した(Onogi et al. 2007, Shibata et al. 2005)。一方はオゾン減少が進行する前の期間(1979~1981)、他方はオゾン減少後のオゾン濃度極小期(1999~2001)の3年平均気候値である。2つの期間のオゾン濃度を比較すると、春季にオゾン減少が著しく、

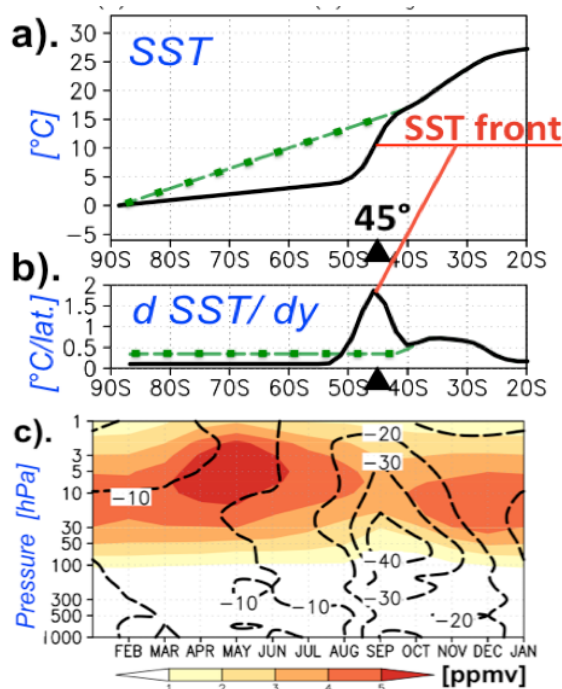


図1. AGCMの下方境界条件として与えた、モデル南半球(冬半球)における(a) SST, (b) SST南北勾配の緯度分布の1月の月平均値。黒線(緑線)は、海洋前線あり(なし)実験で用いたもの。(c) モデルに与えた2通りのオゾン分布のうち、低い方の濃度(陰影)と、高い方からの濃度減少率(%)。

その減少率は50%近くに達する(図1c)。これらのオゾン濃度を与えた2つの実験における気候値の差は、オゾン減少に対する(中緯度海洋前線帯が存在する場合の)大気大循環の応答と解釈できる。次に、その応答に対して中緯度海洋前線帯が与える影響を評価することを目的に、与えるSSTを変更して2つのオゾン濃度に対する実験を行なった。SSTの変更は、上記で用いたSST分布から中緯度の海洋前線に伴う水温勾配を著しく緩和することで行なった(図1ab, 緑線)。この実験設定により、与えられたオゾン減少に対する(中緯度海洋前線帯が存在しない場合の)大気大循環の応答が評価できる。以上の合計4つの実験を通じて、オゾン減少に対する対流

圏の大循環応答について、海洋前線の有無によって比較する。各実験ともスピンアップの後、49年間積分を行なった。

3. 水惑星実験の結果

3-1. 初夏の気候平均場

実験結果には、実験設定を反映した、平均循環場の高い東西一様性があるので、東西平均統計量を示す。図2は、モデルの11月~1月で3ヶ月平均した東西平均東西風の気候平均値で、高オゾン、低オゾン実験の結果を平均したものである。中緯度海洋前線は、地表付近の傾圧性を強め、気移動性擾乱活動の活発化に寄与する(Nakamura et al. 2008, Ogawa et al. 2012)。それに伴い、渦駆動の中緯度海上偏西風は、海洋前線が存在する場合それとほぼ同じ緯度に形成される(図2a)。それに対し、海洋前線がない場合擾乱活動が弱まるだけでなく、海上偏西風が弱まって低緯度側にずれて形成される(図2b)。海洋前線帯は環状モード変動にも影響し(Nakamura et al. 2008, Sampe et al. 2013)、本実験で現れた環状モードは、海洋前線帯が存在すると、観測事実と整合的に中緯度極前線ジェットの南北振動を示すが(図2a)、海洋前線がない場合には振幅が弱まるだけでなく南北構造も現実とは異なり、亜熱帯ジェットの南北振動を示すようになる(図2b)。さらに、成層圏における西風変動との鉛直結合も、海洋前線帯がないと大きく弱まることが示唆される(図2b)。

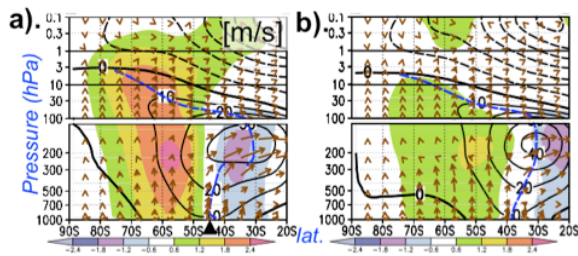


図2. モデルの11~1月で3ヶ月平均した東西平均東西風(黒実線), EP-flux (Andrews et al. 1987, 矢印)の気候平均値, 陰影は, 11~1月の276hPaにおける東西平均東西風の中高緯度(緯度 20~90°)における経年変動の卓越モード(EOF1)に対する, 東西平均東西風の線形回帰係数. 図aの▲印は, 海洋前線帯の緯度を示す. (a): 海洋前線が有る場合, (b): 無い場合.

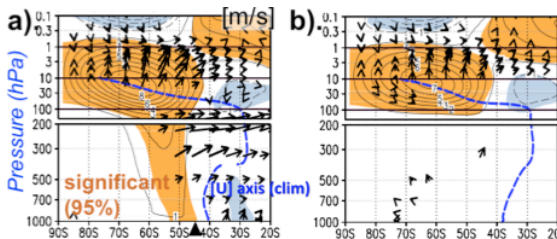


図3. モデルの11月28日を中央として31日平均した東西平均東西風の, 与えられたオゾン減少に対する応答(実線). 影は 95%応答が有意な領域. 青線はその気候値の軸の緯度を示す. ベクトルは, 11月22日から28日まで7日平均したEPフラックスの, オゾン減少に対する応答(95%有意な領域のみ示す). (a): 海洋前線が有る場合, (b): 無い場合.

3-2. オゾン減少に対する西風応答

オゾン減少に対する初夏の西風応答について, 海洋前線帯の有無で比較する. 図3は, モデルの11月28日を中央として31日平均した東西平均西風風速の, オゾン減少に対する応答を示す.

海洋前線帯がある場合, 地表まで及ぶ西風変化が見られ, 南北構造は観測された気候トレンドとSAMの構造によく対応しており(図3a). 対流圏内での擾乱活動の応答によるフィードバック強制が対流圏の西風応答を維持強化する傾向も明瞭である. それとは対照的に, 海洋前線がない場合には対流圏で循環

変化が殆ど起きず, 擾乱活動の応答も弱い(図3b). 地表付近における西風応答は, 海上偏西風のやや高緯度側における西風強化として特に顕著に現れる. この緯度帯で平均した西風応答の季節進行を図4に示す. 海洋前線帯がある場合は, 成層圏で西風強化が生じた後に, 同様の変化が地表まで達する一方(図4a), 海洋前線がない場合は対象的に, 季節を通じて対流圏の西風強化が有意とならないことが分かる(図4b).

3-3. 環状モード変動の鉛直結合

3-1節の議論から示唆されるように, 中緯度海洋前線帯は, 対流圏の環状モードの振幅や南北構造に顕著な影響を与えるだけでなく, 成層圏の変動との結合に対しても少なからず影響すると考えられる. そこで, オゾン減少で強制された成層圏の西風強化が, 環状モードの鉛直結合を通じて海上偏西風にどれほど影響を与え得るのかについて考える. 図5は, 海洋前線が有る場合と無い場合の夫々について, オゾン減少に対する13hPaの西風応答が最大となる日における, 中高緯度の西風経年変動の卓越成分をEOF解析によって抽出し, 図4と同じ緯度帯で平均した各日の西風の経年変動に対する回帰係数を示したものである. 海洋前線帯が存在する場合, オゾンによって極渦が強化される春季には, その内部変動が初夏の対流圏の西風変動と結合する性質を持つことが分かる(図5a). この場合, 極渦変動と結合して対流圏に西風偏差が現れる季節とその典型的な振幅は, いずれもオゾン減少による成層圏の西風強制に結合

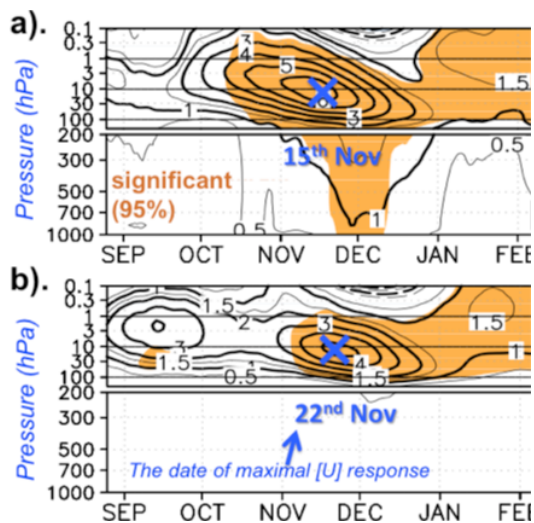


図4. モデルで与えたオゾン減少に対する、31日平均した西風応答の季節進行。対流圏下層の応答が顕著である、緯度45~60°で平均した東西平均東西風について示す。影は95%応答が有意な領域。(a):海洋前線が有る場合、(b):無い場合。×印は、13hPaにおける西風応答が最大となる日を示す。

して対流圏に西風応答が現れる季節とその振幅とその振幅(図4a)に対して非常によく対応する。すなわち、オゾン減少によって成層圏の極渦が強化されると、(海洋前線が存在する場合には)環状モード変動の鉛直結合を通じて地表の西風が強化されることが示唆される。それに対し、海洋前線帯がない場合には、極渦の経年変動に対する海上偏西風の結合が大きく弱まり、その925hPaにおける振幅は約55%減少する(図5b)。オゾン減少に対する対流圏の西風応答が現れる(現れようとする)季節及びその振幅(図4b)と比較すると、成層圏のオゾン減少で現れる西風強化は、環状モードの鉛直結合を通じて対流圏にまで影響が及ぼされようとはするものの、その結合変動の振幅が対流圏で小さく、また対流圏の西風変動が結合する期間そのものが短いために、対流圏内への有意な下方侵出が起きなかったものと解釈できる。

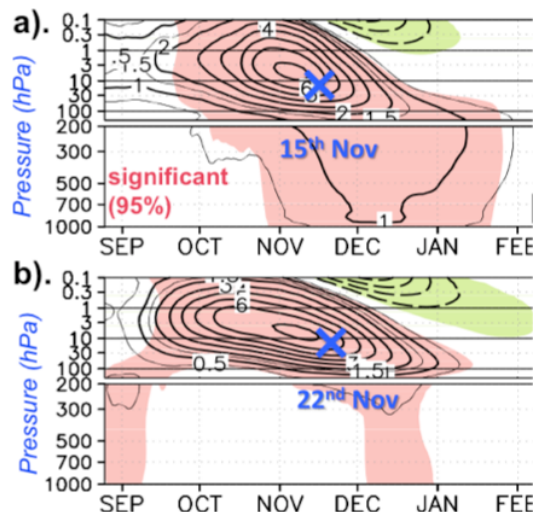


図5. モデル13hPaにおいて、緯度45~60°で平均した東西平均東西風のオゾン減少に対する応答が最大となる日(×印、図4の×印にも対応)における東西平均西風の、中高緯度(20~90°)における経年変動の卓越モード(EOF1)を抽出し、31日移動平均した各日の西風経年変動の経年変動の時系列を、上で求めたPC1の単位標準偏差に対して線形回帰したもの(黒実線、単位:m/s)。影は95%応答が有意な領域。(a):海洋前線が有る場合、(b):無い場合。

4. まとめ

水惑星実験の結果、オゾン減少に伴う対流圏の有意な循環変化は、海洋前線がないと現れないことが分かった(図3, 4)。そこでは、オゾンによって極渦が強化された場合に、その季節の極渦の内部変動が対流圏の西風変動と鉛直結合していることが、オゾン減少によって海上偏西風に変化が及ぶ為に重要となることが示唆される(図5)。中緯度海洋前線帯は地表付近の傾圧帯として、移動性擾乱活動の活発化と海上偏西風の緯度の固定と強化に寄与し、その卓越変動として現れる対流圏の環状モード変動の振幅と南北構造の規定に大きく寄与する(図2)。海洋前線帯を有する水惑星実験で現れる対流圏の環状モードは南北構造と振幅が共に現実とよく対

応することから、極渦の変動との結合が再現されることを通じて、オゾン減少に対する地表の西風の応答が現実と整合的に現れたと考えられる。一方、海洋前線がない水惑星実験においては対照的に、ストームトラックが固定されにくいことを反映して海上偏西風が弱まって緯度もずれ(図2b)、それに伴って環状モードの南北構造や振幅は非現実的となり(図2b)、成層圏の極渦変動との結合も著しく弱まる結果(図5b)、オゾン減少に対する西風の応答が地表で現れなくなったと解釈できる。

本研究から、20世紀終盤にオゾン減少に伴って南半球の地表で観測された気候変化に対しても、海洋前線帯が根源的に重要であったことが示唆される。さらに、今後数十年は、南半球成層圏におけるオゾン濃度の回復が予想されており、その影響が地表の循環に及ぶこと(Son et al. 2008)に対する海洋前線帯の重要性も示唆される。

なお、本研究では単一の大気大循環モデルのみによる理想化実験の結果を示したが、オゾン減少に伴う地表付近の気候変化に対する中緯度海面水温勾配の存在の重要性は、CMIPモデルを用いた研究でも示されつつある。そちらについては本研究集会の西井和晃氏の講演要旨を参照されたい。

5. 参考文献

Andrews, D, J.R.Holton, and C.B.Leovy, 1987. *Middle Atmosphere Dynamics*, 489pp, Academic Press.

Nakamura, H., T. Sampe, A. Goto, Ohfuchi, W. & Xie, S.-P. On the importance of midlatitude oceanic frontal zones for the mean state and dominant variability in the tropospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.* **35**, L15709 (2008).

Ogawa, F., Nakamura, H., Nishii, K., Miyasaka, T. & Kuwano-Yoshida, A. Dependence of the climatological axial latitudes of the tropospheric westerlies and storm tracks on the latitude of an extratropical oceanic front. *Geophys. Res. Lett.* **39**, L05804 (2012).

Onogi, K. et al. The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan* **85**, 369-432 (2007). Brayshaw, D., B. J. Hoskins, and M. J. Blackburn (2008), The storm track response to idealised SST perturbations in an aquaplanet GCM, *J. Atmos. Sci.*, **65**, 2842-2860.

Roeckner, E. et al. The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description. *Max Planck Institute for Meteorology Rep.* **349**, 127 pp. (2003)

Reynolds, R. W. & Smith, T. M. Improved global sea surface temperature analysis using optimum interpolation. *J. Clim.* **7**, 929-948 (1994).

Sampe, T., Nakamura, H., Goto, A., Potential influence of a midlatitude oceanic frontal zone on the annular variability in the extratropical atmosphere as revealed by aqua-planet experiments. *J. Meteorol. Soc. Jpn.* **91A**, 243-267 (2013).

- Son, S-W. *et al.* The impact of stratospheric ozone recovery on the Southern Hemisphere westerly jet. *Science* **320**, 1486–1489 (2008).
- Song, Y. & Robinson, W. A. Dynamical mechanisms for stratospheric influences on the troposphere. *J. Atmos. Sci.* **61**, 1711–1725 (2004).
- Shibata, K., M. Deushi, Sekiyama, T. T. & Yoshimura, H. Development of an MRI chemical transport model for the study of stratospheric chemistry. *Papers in Meteorology and Geophysics* **55**, 75-119 (2005).
- Thompson, D. W. J. & Solomon, S. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science* **296**, 895–899 (2002).