

南半球成層圏最終昇温の年々変動における大気波動の役割に関する3次元解析

平野 創一朗 [1]; 高麗 正史 [2]; 佐藤 薫 [2]
[1] 東大・理・地惑; [2] 東大・理

A 3D analysis on the role of atmospheric waves in the interannual variability of stratospheric final warming in SH

Soichiro Hirano[1]; Masashi Kohma[2]; Kaoru Sato[2]
[1] Earth and Planetary Science, Univ of Tokyo; [2] Graduate School of Science, Univ. of Tokyo

Material circulation of the middle atmosphere has often been studied in the two-dimensional (2D) meridional cross section using the transformed Eulerian mean (TEM) framework (e.g., Plumb 2002). There are, however, increasing evidences that the circulation has zonally asymmetric structures (e.g., Sato et al. 2009; Hitchman and Rogal 2010). These facts suggest the necessity of examining and quantifying three-dimensional (3D) material circulation. The formulae of residual mean flows applicable both to Rossby waves and to gravity waves derived by Kinoshita and Sato (2013) should be a powerful tool for the examination.

In the middle and high latitudes of the stratosphere, each winter terminates with a breakdown of the polar vortex, called the stratospheric final warming (SFW). This drastic change is accompanied by a transition of the circumpolar flow from westerlies to easterlies. Significant relation between ozone depletion and persistence of the Antarctic polar vortex during austral spring has been shown by many studies (e.g., Haigh and Roscoe 2009). On the other hand, wave activity can influence the timing of SFW in the Southern Hemisphere (SH), although there are few studies from this view point. Moreover, SFW can affect tropospheric circulation and the tropospheric responses to SFW have zonally asymmetric structures (Black and McDaniel 2007).

In the present study, we perform a 3D analysis as well as a zonal mean, i.e., 2D one regarding the role of wave-driven circulation in the interannual variability of SFW in SH using recently-published reanalysis data, JRA55 over 35 years from 1979 to 2013.

We first focused on the relation between wave activity and SFW date in SH in zonal mean field. It was shown that the vertical component of EP flux at 100 hPa during austral spring is significantly related with SFW date. In order to clarify the role of wave-induced residual mean flow in the interannual variability of SFW date, we categorized SFWs into early and late SFW groups according to the SFW date and examined differences between them. There is a rapid increase of polar temperature difference in early October, although the difference is insignificant until September. In order to examine what causes the sudden increase of temperature difference, we calculated differences in time derivative of potential temperature, potential temperature advection by meridional and vertical component of residual mean flow, and diabatic heating by long and short wave radiation. Significant positive differences in potential temperature tendency in the middle stratosphere correspond well to those in potential temperature advection by the vertical component of residual mean flow, which is partly cancelled by negative differences in diabatic heating by long wave radiation. Differences in diabatic heating by short wave radiation are minor. This result suggests the importance of adiabatic heating associated with wave-induced residual mean flow in determining polar stratospheric temperature during austral spring, and hence SFW date.

This analysis is then extended to three dimensions to investigate the longitudinally dependent structures, which cannot be seen in the TEM framework. Although basic characteristics are similar to the results by the 2D analysis, zonally asymmetric structures are revealed: significant positive differences in potential temperature tendency and vertical potential temperature advection by residual mean flow are dominant in the south of Atlantic Ocean.

Furthermore, the influence of SFW on tropospheric circulation is examined. Downward residual mean flow is continuously observed around SFW both in the lower stratosphere and troposphere in East Antarctica, where significant temperature increase is observed in the troposphere. This result indicates that the wave-induced downward residual mean flow in the stratosphere penetrates into underlying troposphere and raises the tropospheric temperature.

中層大気の物質循環は変形オイラー平均系（以下 TEM 系）などの東西平均の場で議論されることが多かった。しかし、最近の研究でその循環に東西非一様性があることが指摘され始めている (Sato et al 2009; Hitchman and Rogal 2010 など)。したがって、成層圏の物質循環を定量的に把握するためには、循環の3次元的な構造を調べる必要がある。Kinoshita and Sato (2013) は、その解析に必要な、ロスビー波・重力波両方に適用可能な3次元残差平均流の式を導出している。この式を用いた解析手法の提案を行い、Sato et al. (2013) は重力波解像大気大循環モデルデータに適用して中層大気の残差平均流の3次元的な描像を示し、波強制を反映した残差平均流の顕著な経度依存性を明らかにした。本研究はこの手法を現実大気データに適用したものである。

極域成層圏では、最終昇温と呼ばれる極渦の消滅により冬から夏へと季節が移行する。この大きな変化は極を中心とする西風循環から東風循環への移行を伴う。一方、成層圏の変動が下方に伝播し、対流圏の循環に大きな影響を与えることが示唆されている (Baldwin and Dunkerton 2001; Thompson et al. 2005 など)。最終昇温に伴う成層圏の変動も対流圏に反映されることが指摘されている (Black and McDaniel 2007 など)。

南半球春季にはオゾンホールに象徴される大規模なオゾン破壊が起こり、そのオゾン量の低下と最終昇温のタイミングの遅れが大きく関係していることが多くの研究により示されている。しかしながら、最終昇温のタイミングには波活

動に関連する断熱的な温度変化も無視できないはずである。ところが、南半球においてこの視点に立った研究は少ない。

本研究では、南半球の最終昇温の年々変動に対し、波強制により駆動される循環の役割の解明を目的とする。Kinoshita and Sato で導出された理論式を用いて、東西平均場と 3 次元構造の解析を行う。再解析データとして JRA55 を用いた。解析期間は 1979 年から 2013 年の 35 年間である。

まず、南半球における最終昇温日と波活動との関係を東西平均で調べた。Black and McDaniel (2007) の基準に従って、最終昇温日を 60S、50 hPa の東西平均東西風に基づいて定義した。100 hPa における EP フラックスの鉛直成分は最終昇温日と強く関係していることがわかった。最終昇温日にオゾンと強い関係があることは Haigh and Roscoe (2009) などで指摘されていたが、本研究により波活動とも関係することがわかった。最終昇温日の年々変動における波が駆動する循環の役割を調べるために、最終昇温を早く起こった年と遅く起こった年に分け、その差を計算した。極域の温度の差を計算すると、9 月までは有意な差は見られないが、10 月になるとその差は急激に上昇する。この急激な温度上昇の原因を探るために、温位の時間変化、残差平均流の南北成分及び東西成分による温位の移流、長波および短波による非断熱加熱の差を計算した。中部成層圏の温位の時間変化の差が正である領域が、残差平均流の鉛直成分による温位の移流が強化される領域とよく一致した。一方、短波による加熱の差は小さかった。これは、南半球春季の温度、すなわち最終昇温日の年々変動に対する下降流に伴う断熱加熱の重要性を示唆する。次に、TEM 系では見ることのできない経度方向の構造を調べるために 3 次元解析を行った。基本的な特徴は 2 次元における解析結果と同様だが、東西方向の非一様性を明らかにすることができた。すなわち、大西洋南部で、温位の時間変化及び残差平均流の東西成分による温位の移流が強化される領域が見られた。

最後に、最終昇温に対する対流圏の応答の東西非一様性を、最終昇温日に関するコンポジット解析によって調べた。下部成層圏と対流圏では、東南極で下向きの残差平均流が、最終昇温日の 44 日前から 14 日後まで連続して見られた。東南極では、成層圏の波強制により駆動された下向きの循環が対流圏にまで達しており、正の温度偏差を形成している可能性が示唆された。