

成層圏でのプラネタリー波の反射と関連する帯状風構造

向川均・佐治憲介*・小寺邦彦**

* 京都大学大学院理学研究科

** 名古屋大学太陽地球環境研究所

要 旨

近年の観測的研究によって、成層圏から対流圏へ下方伝播するプラネタリー波が異常気象の発生に重要な役割を果たしていることが明らかになった。ここでは、JRA-25/JCDAS再解析データと気象庁より提供された1ヶ月アンサンブル予報データを用いて、プラネタリー波の下方伝播が生じるときの、帯状風構造の特徴について詳しい解析を行った。その結果、下方伝播が生じるときの帯状風構造は、成層圏上層の西風鉛直シアアの大きさと、成層圏中層の西風の強さによって3つのタイプに分類できることがわかった。また、これらの帯状風構造について、成層圏における反射面の存在がプラネタリー波の下方伝播と関連していることがわかった。

キーワード: プラネタリー波, 成層圏, 反射

1. はじめに

近年、成層圏循環の変動が対流圏に及ぼす影響について数多くの研究が行われている。例えば、Perlwitz and Harnik (2003) は統計的な解析により、成層圏で反射した東西波数1のプラネタリー波が約6日後に対流圏に影響を及ぼすことを示している。さらに、Kodera et al. (2008) は、2007年2月下旬から3月上旬にかけて生じた成層圏突然昇温後のプラネタリー波の顕著な下方伝播イベントについて事例解析を行い、ユーラシア域で上方伝播した惑星波が成層圏で反射し、北米東岸域で対流圏へ下方伝播し、そこで異常低温を引き起こした様子を3次元的に記述することに成功した。しかしながら、このようなプラネタリー波の下方伝播がどのような条件やメカニズムで生じるかは明らかになっていない。

そこで本研究では、北半球冬季における成層圏でのプラネタリー波の下方伝播と帯状風構造との関連を明らかにするために、以下の解析を行った。まず、JRA-25/JCDAS再解析データを用いて、過去の顕著な下方伝播イベントに見られる特徴を、特に帯状風構造に着目して合成図解析により統計的に調べた。その結果、プラネタリー波の下方伝播は、Kodera et al. (2008) で見られたような中部成層圏で西風が極大

となる帯状風構造を含む3つの特徴的な帯状風構造のときに生じることが示された。次に、これら3つの特徴的な帯状風構造とプラネタリー波の下方伝播との関連を調べるために、それぞれの帯状風構造が見られた典型事例について、JRA-25/JCDAS再解析データ及び気象庁1ヶ月アンサンブル予報データを用いて詳細に解析した。

2. 使用データと解析手法

本研究では、解析値としてJRA-25/JCDAS再解析データセットを用いた。このデータの水平解像度は1.25度、鉛直層数は1000hPaから0.4hPaまでの23層である。また、予報データとして気象庁1ヶ月アンサンブル予報データを用いた。この1ヶ月予報では、毎週水曜日と木曜日の12UTCを初期値として、1つのコントロールランと24個の摂動ランが、34日間にわたり時間積分されている。気象庁より提供された1ヶ月アンサンブル予報データの水平解像度は2.5度、鉛直層数は1000hPaから1hPaまでの22層である。解析値、予報値ともに6時間毎のデータを日平均して解析を行った。

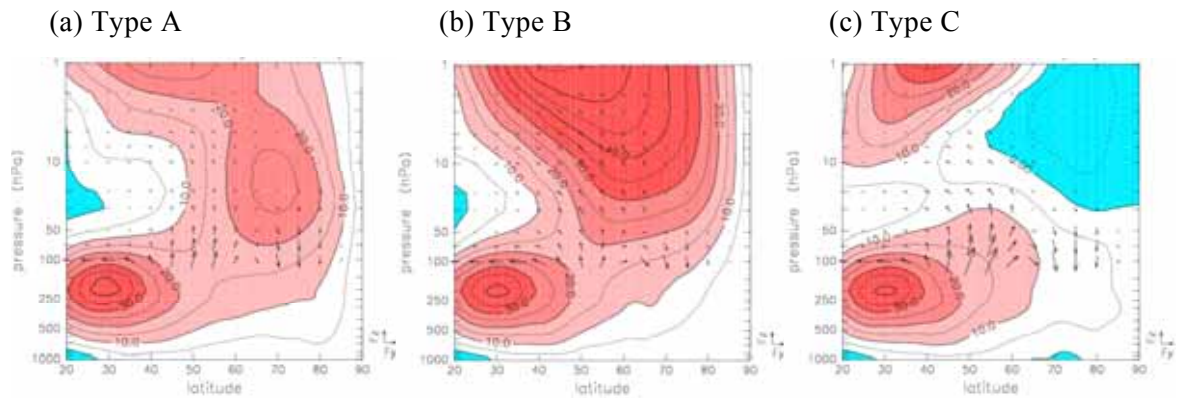


Fig. 1 Composited zonal-mean zonal wind (contours) and E-P flux vector (arrows) for Type A (a), Type B (b), and Type C (c) in latitude-height cross section. Easterly regions are shaded by cool color. Contour interval is 5 m/s, and arrows at the right bottom of each panel indicate E-P flux vector with the magnitude of $(5.4 \times 10^4 \text{ kg/s}^2, 1.0 \times 10^7 \text{ kg/s}^2)$.

3. 結果

3.1 プラネタリー波の下方伝播イベントの統計的特徴

過去のプラネタリー波の顕著な下方伝播時に、どのような帯状風構造が見られるかを調べた。期間は1979/80年から2008/09年の冬季(11月-4月)とし、100 hPa-30 hPa, 60°N - 80°N で平均したE-P fluxの鉛直成分 \bar{F}_z が負となるイベントをプラネタリー波の下方伝播イベントとした。

次に、上位30事例の下方伝播イベントについて、 60°N - 80°N で平均した上部成層圏での帯状風 U の鉛直シアー ($U_{2\text{hPa}} - U_{10\text{hPa}}$) と、 60°N - 80°N で平均した30 hPaにおける帯状風 ($U_{30\text{hPa}}$) に着目して、以下の3つの帯状風構造に分類した。Fig. 1に各々のタイプで \bar{F}_z が最初に負となった日で合成したE-P fluxと帯状風の子午面分布を示す。

(a) Type A: 中部成層圏で西風が極大となる帯状風構造 ($U_{2\text{hPa}} - U_{10\text{hPa}} < 0, U_{30\text{hPa}} > 10 \text{ m/s}$)。

(b) Type B: 成層圏で強い正の西風鉛直シアーをもつ帯状風構造 ($U_{2\text{hPa}} - U_{10\text{hPa}} > 0, U_{30\text{hPa}} > 10 \text{ m/s}$)。

(c) Type C: Type A, B以外で、高緯度成層圏の帯状風が概ね東風となる帯状風構造 ($U_{30\text{hPa}} < 10 \text{ m/s}$)。

各事例数は、Type Aが15事例、Type Bが6事例、Type Cが9事例であった。

3.2 事例解析

前節で述べた3つの特徴的な帯状風構造のそれぞれの典型例について、再解析データおよび気象庁1

ヶ月アンサンブル予報データを用いて、プラネタリー波の下方伝播の大きさと、帯状風構造の特徴に関して詳しい解析を行った。以下では、中部成層圏で西風が極大となる構造が見られたType Aの典型例として、2007年3月上旬の事例についての解析結果を記述する。

3.2.1 再解析データを用いた解析

まず、Fig. 2に顕著な下方伝播が生じた2007年3月4日における帯状風とE-P fluxの子午面分布を示す。帯状風は中部成層圏で極大となり、上部成層圏では負の鉛直シアーが存在している。このように、この事例は、Type Aの典型的な帯状風構造をしていることがわかる。また、全波数E-P fluxベクトルは、成層圏下部の 60°N 以北で大きな負の成分を持っており、プラネタリー波の強い下方伝播が生じている。

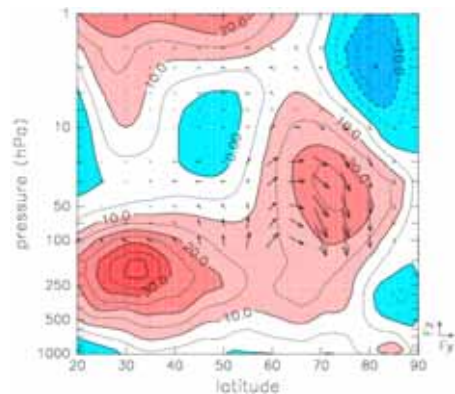


Fig. 2 Latitude-height cross section of zonal-mean zonal wind (contours) and the total E-P flux (arrows) on March 4, 2007. Contour interval is 5 m/s. Arrows at the right bottom indicate the E-P flux vector with the same magnitude of those in Fig. 1.

次に、Fig. 2で示された帯状風構造がプラネタリー波の下方伝播と関連していることを示すために、以下のように定義される東西波数 k の定在波($c_x = 0$)に対する屈折率 n_k (Andrews et al., 1987)を計算した。

$$n_k^2(y, z) = \frac{1}{U - c_x} \frac{\partial \bar{q}}{\partial y} - k^2 - \frac{f_0^2}{4H^2 N^2}. \quad (1)$$

ただし、帯状平均場の準地衡風渦位の南北勾配は、

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial y} = \beta - \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_0 f_0^2}{N^2} \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (2)$$

であり、 H はスケールハイト、 N は浮力振動数、 f_0 はコリオリパラメータ、 ρ_0 は密度、バーは帯状平均を表す。

式(1)で示される屈折率 n_k は、帯状風 $U(y, z)$ 中でのプラネタリー波の伝播特性を表す指標であり、波は屈折率が正で大きい領域に向かい、負の領域を避けるように伝播する傾向がある。また、この屈折率がなめらかに正から負になるところで、 $n_k = 0$ で定義される反射面が形成される。この反射面では、波の等位相線は反射面と垂直となり、そこで波は伝播の向きを変え反射する。

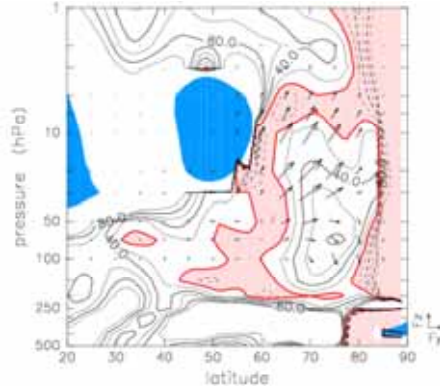
さらに、定在波($C_x = 0$)の伝播特性について次のような考察ができる。式(1)からもわかるように、 U が南北、鉛直方向に変化するとき、式(2)より U の南北、鉛直方向の2階微分が波の伝播に影響を与える。例えば、西風ジェットを中心付近では U の分布が凸となるため、 n_k はジェットの軸に沿って極大となり、ジェットの周縁部では n_k は小さくなる。

2007年3月上旬の事例を見ると、3月3日では反射面は10hPaと60°N付近に存在し、3月4日では上層の反射面はなくなっているが、波は屈折率の大きな領域に存在している (Fig. 3)。Fig. 2を見ると、この反射面は中部成層圏に存在する西風の極大域の周縁部に存在していることがわかる。一方、E-P fluxの分布から、西風の極大域に沿って対流圏から上方伝播した波が、60°N-80°Nの狭い領域に捕捉され、10hPa付近に形成された反射面により反射され、下方伝播していることがわかる。

このように、屈折率を用いた考察により、中部成層圏で西風が極大となる帯状風構造は、その曲率の効果により、プラネタリー波を下方伝播させていることが示唆される。

さらに、この事例においてプラネタリー波の3次元的な伝播の様子を示すために、Fig. 4に2007年3月4日の再解析データを用いて計算したPlumb (1985) の3次元波活動度fluxと、60°N-70°Nで平均した高度場の東西平均からの偏差を示す。この図から、東(西)

(a) March 3, 2007



(b) March 4, 2007

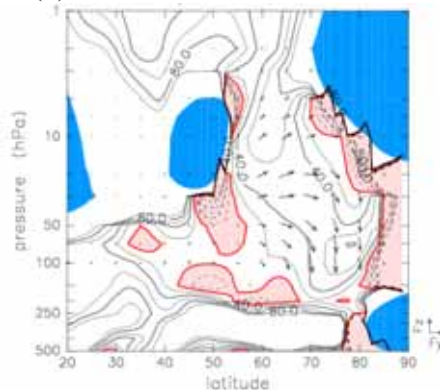


Fig. 3 Latitude-height cross section of E-P flux associated with zonal wave number 1 (WN1) component (arrows) and refractive index squared given by Eq. (1) for stationary WN1 component multiplied by the square radius of the earth (contours). Red lines show the contour of $n_k = 0$. Negative values are shaded by warm color, while easterly regions are shaded by cool color. Arrows at the right bottom indicate the E-P flux vector with the same magnitude of those in Fig. 1. (a) March 3, 2007, (b) March 4, 2007.

半球側では、等位相線が高さとともに西(東)に傾き、波活動度fluxの鉛直成分も正(負)となっていることがわかる。このことから、プラネタリー波は東半球側で対流圏から成層圏に上方伝播し、成層圏で反射されて、西半球側で成層圏から対流圏へ下方伝播していることがわかる。

3.2.2 予報データを用いた解析

次に、前節の再解析データを用いた解析より得られた、プラネタリー波の下方伝播と帯状風構造との関連をより詳細に調べるために、2007年2月21日、22日を初期日とする1ヶ月アンサンブル予報データを用いた解析結果を示す。特にアンサンブル予報の各メンバーにおけるプラネタリー波の下方伝播の強さ

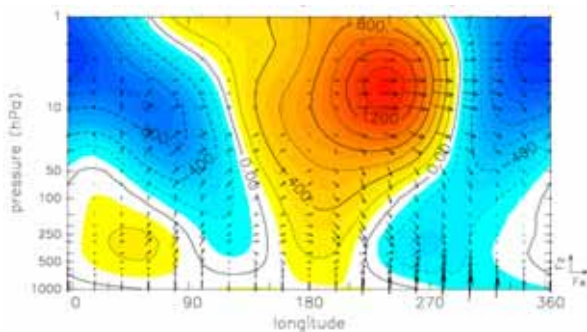


Fig. 4 Longitude-height sections of eddy geopotential height (contour interval: 200 m), and zonal and vertical components of the 3-D Plumb flux (arrows) calculated from WN1 to WN3 components averaged over the latitudes from 60°N to 70°N on March 4, 2007. Arrows at the right bottom indicate zonal and vertical components of the 3-D Plumb flux with a magnitude of (100 m²/s², 0.5 m²/s²).

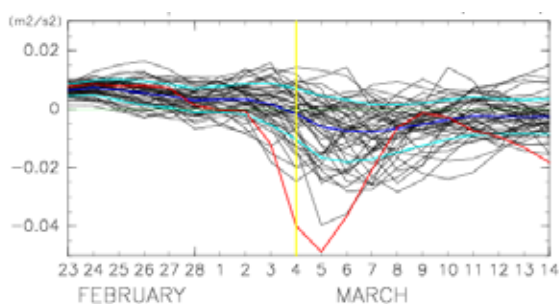
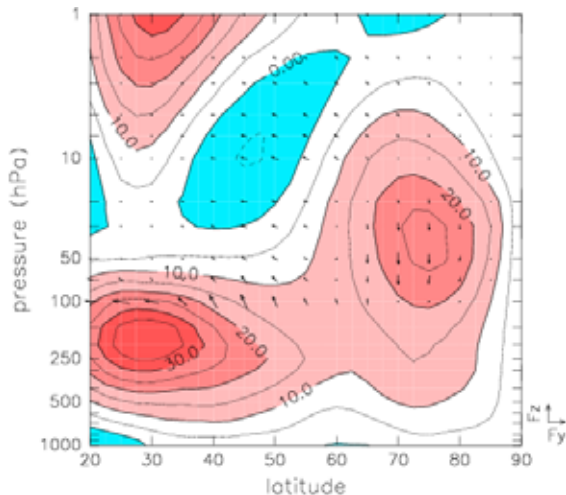


Fig. 5 Time variation of the minimum value of the predicted F_2^{180} for 1-month ensemble forecasts starting from February 21 and 22, 2007. The abscissa denotes the verification date. The black line shows the prediction of each ensemble member, the blue line indicates the ensemble average of 50 members, and the light blue lines denote the value of ensemble average ± 1 std. deviation. The red line is the analysis.

と帯状風構造との関連について詳しく調べることを目的とした。このため、アンサンブル予報データの各メンバーについてPlumb (1985) の3次元波活動度fluxを用いて、プラネタリー波の「下方伝播強度」を以下のように定義した。まず、Fig. 4より、この事例においては、成層圏では波数1の下方伝播が顕著であったことがわかる。このため、まず、100hPa–30hPa、60°N–70°Nで平均したPlumb (1985) の3次元波活動度fluxの鉛直成分 F_z を、経度方向の180度範囲で平均

(a) Group S



(b) Group F

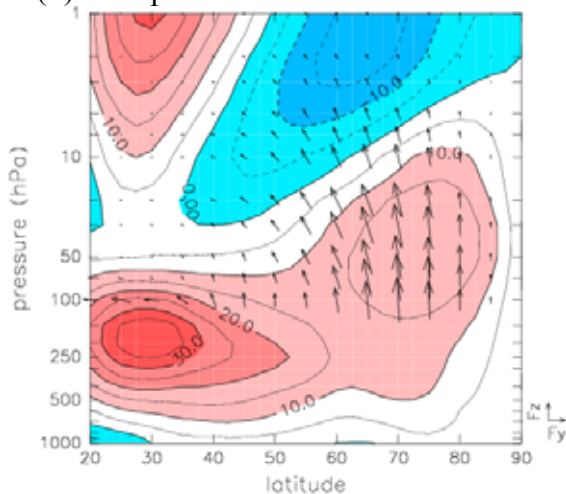
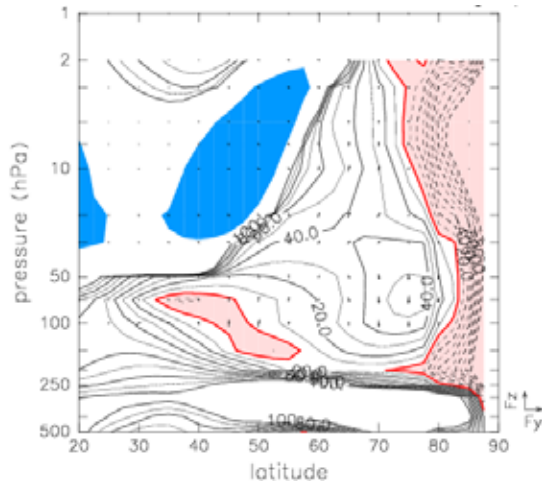


Fig. 6 Latitude-height cross section of the composited zonal-mean zonal wind (contours) and total E-P flux (arrows) on March 4, 2007 for group S (a) and group F (b). Contour interval is 5 m/s. Arrows at the right bottom indicate the E-P flux vector with the same magnitude of those in Fig. 1.

した値 F_2^{180} を求めた。次に、各メンバーでプラネタリー波が下方に伝播する経度範囲が異なることを考慮して、平均する経度範囲を変えることにより F_2^{180} の最小値を求め、その値を下方伝播強度と定義した。

さらに、以下に示すように、各アンサンブルメンバーについて、下方伝播をうまく予測できたメンバーと予測できなかったメンバーにグループ分けを行った。Fig. 5は2007年2月21日、22日を初期日とする1ヶ月アンサンブル予報における F_2^{180} の予測値の時系列を示す。黒線が各メンバーの予測値、青線が全50メンバーのアンサンブル平均値、水色線がアンサンブル平均値 ± 1 標準偏差、赤線がJRA-25/JCDASデータに基づく解析値である。この図から、解析値では、

(a) Group S



(b) Group F

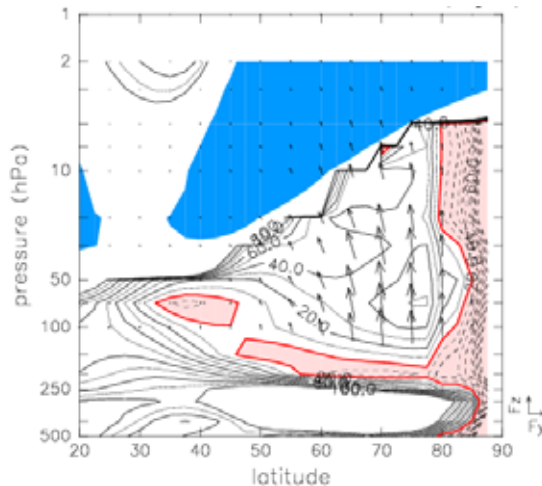


Fig. 7 As in Fig. 3, but for the composited zonal-mean zonal wind of group S (a) and group F (b) on March 4, 2007.

F_2^{80} は3月3日から3月4日にかけて大きく減少し、3月5日に最小となることがわかる。このため、 F_2^{80} の1日あたりの減少量が最も大きかった3月4日を基準として、 F_2^{80} の予測値が全50メンバーのアンサンブル平均値 - (+) 1標準偏差を下 (上) 回るメンバーを、下方伝播を予測できた (予測できなかった) グループに分類した。その結果、下方伝播を予測できたグループ (以下、グループS)、予測できなかったグループ (以下、グループF) のメンバー数は、ともに8メンバーであった。以下、この2つのグループの帯状風構造や屈折率の違いを比較することにより、成層圏で帯状風がどのような子午面構造を持つときにプラネタリー波の下方伝播が生じるのかを解析した。

Fig. 6は2007年3月4日の予測値について、グループ

SとグループFで合成した、帯状風とE-P fluxの子午面断面図である。この図から、グループS (Fig. 6a) ではグループF (Fig. 6b) に比べ、中部成層圏で比較的強い西風が維持されていることがわかる。次に、これらの帯状風構造に対応する東西波数1の定在波に対する屈折率を計算した (Fig. 7)。この図から、グループS (Fig. 7a) ではグループF (Fig. 7b) に比べ、70°N-80°N、30hPa-5hPa付近の反射面の存在が明瞭であり、波数1成分のプラネタリー波は、上方伝播が抑制され下方に伝播している。この反射面の形成は、帯状風が高緯度の中部から上部成層圏で、比較的強い鉛直方向及び南北方向の正の曲率をもっていることに対応している。

以上より、グループSではグループFに比べ、中部成層圏での西風極大域がより明瞭であり、その曲率の効果により、反射面が形成されやすい帯状風構造であることがわかった。

4. まとめ

本研究では、北半球冬季における成層圏でのプラネタリー波の下方伝播と帯状風構造との関連を明らかにするために、JRA-25/JCDAS再解析データ及び気象庁1ヶ月アンサンブル予報データを用いて詳細に解析を行った。

まず、再解析データを用いて、過去の顕著なプラネタリー波の下方伝播イベントに見られる特徴を、特に帯状風構造に着目して合成図解析により調べた。その結果、成層圏上層の西風鉛直シアーの強さと、成層圏中層での西風の強さをもとにすると、下方伝播イベントが発生するときの帯状風構造は以下の3つに分類できることがわかった。Type A: 中部成層圏で西風が極大となる帯状風構造、Type B: 成層圏で強い正の西風鉛直シアーをもつ帯状風構造、Type C: 高緯度成層圏の帯状風が概ね東風となる帯状風構造。

次に、Type Aの典型例として、2007年3月上旬の事例について、再解析データ及び予報データを用いて解析を行った。その結果、このような事例では、帯状風の南北、鉛直方向の曲率の効果により成層圏中で反射面が形成されやすいために、通常は上方に伝播するプラネタリー波が下方伝播した可能性があることが示唆された。

謝 辞

本研究で使用した気象庁1ヶ月アンサンブル予報データは、気象庁と (社) 日本気象学会の研究協力の枠組みである「気象研究コンソーシアム」を通じ

て提供された。図の作成には地球流体電脳ライブラリを用いた。

参考文献

- Andrews, D. G., Holton, J. R. and Leovy, C. B. (1987): Middle atmosphere dynamics, Academic Press, 489 pp.
- Kodera, K., Mukougawa, H. and Itoh, S. (2008): Tropospheric impact of reflected planetary waves from the stratosphere. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 35, L16806, doi:10.1029/2008GL034575.
- Perlwitz, J. and Harnik, N. (2003): Observational evidence of stratospheric influence on the troposphere by planetary wave reflection. *J. Clim.*, Vol. 16, pp. 3011-3026.
- Plumb, R. A. (1985): On three dimensional propagation of stationary waves. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 42, pp. 217-229.

Characteristics of Zonal-Mean Zonal Winds Related to the Reflection of Planetary Waves in the Stratosphere

Hitoshi MUKOUGAWA, Kensuke SAJI* and Kunihiro KODERA**

* Graduate School of Science, Kyoto University

** Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

Synopsis

Recent observational studies have revealed an important role of downward propagation of planetary waves from the stratosphere for the occurrence of anomalous weather. In this study, the meridional profile of zonal-mean zonal winds which is preferable for the downward propagation of planetary waves is examined using JRA-25/JCDAS dataset and 1-month ensemble forecast dataset provided by the Japan Meteorological Agency. It is found that the meridional profile is classified into three groups by the strength of westerly shear in the upper stratosphere and zonal-mean zonal winds in the middle stratosphere. It is also revealed that the existence of the reflection surface in the stratosphere is related to the downward propagation of planetary waves for these three groups.

Keywords: planetary wave, stratosphere, reflection