

# 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

佐治 憲介 (京大院理), 向川 均 (京大防災研), 小寺 邦彦 (名大 STE 研/気象研)

## 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, プラネタリー波の反射の時間経過を三次元的に記述した (図 1). しかしながら, このようなプラネタリー波の反射がどのような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, まず, 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, 顕著な下方伝播が生じる際の帯状風構造は, Kodera et al. (2008) で見られた中部成層圏に西風極大域をもつ帯状風構造 (図 2) を含む 3 つの特徴的な帯状風構造に分類できることが分かった. 次に, この 3 つの特徴的な帯状風構造のうち, 中部成層圏に西風極大域をもつ構造とプラネタリー波の反射との関連を調べるために, Kodera et al. (2008) と同じ 2007 年 3 月上旬の事例について, 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.

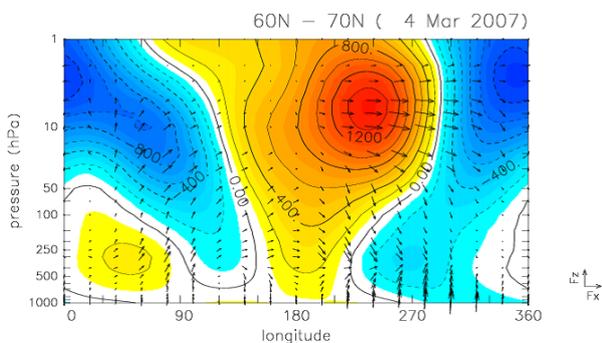


図 1: 2007 年 3 月 4 日において, 60N-70N で平均した Plumb (1985) の 3 次元波活動度 flux (ベクトル) とジオポテンシャル高度偏差 (等値線) の経度高度断面図. 等値線間隔は 100(gpm). 図右下のベクトルは東西成分が  $100(\text{m}^2/\text{s}^2)$ , 鉛直成分が  $0.5(\text{m}^2/\text{s}^2)$ . ただし, flux は  $\rho^{1/2}$  で割った.

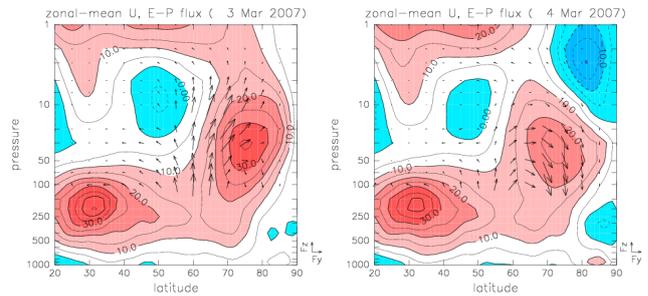


図 2: 2007 年 3 月 3 日, 4 日の帯状風と E-P flux の子午面断面図. 等値線間隔は  $5.0(\text{m}/\text{s})$ . 図右下のベクトルの大きさは南北成分が  $1.0 \times 10^7(\text{kg}/\text{s}^2)$ , 鉛直成分が  $5.4 \times 10^4(\text{kg}/\text{s}^2)$ .

## 2 使用データ

本研究では, 解析値として JRA-25 再解析/JC-DAS データセットを用いた. データの水平解像度は  $1.25$  度, 鉛直層数は  $1000\text{hPa}$  から  $0.4\text{hPa}$  までの 23 層である. また, 予報データとしては気象庁 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. データの水平解像度は  $2.5$  度, 鉛直層数は  $1000\text{hPa}$  から  $1\text{hPa}$  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.

## 3 結果

### 3.1 過去のプラネタリー波の下方伝播イベントの特徴

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,  $100\text{hPa} - 30\text{hPa}$ ,  $60\text{N} - 80\text{N}$  で平均した E-P flux の鉛直成分 ( $\overline{F_z}$ ) 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.

上位 30 事例の下方伝播イベントについて帯状風構造を調べた結果,  $60\text{N} - 80\text{N}$  で平均した上部成層圏での帯状風  $\overline{U}$  の鉛直シア ( $\overline{U}_{2\text{hPa}} - \overline{U}_{10\text{hPa}}$ ) と,  $60\text{N} - 80\text{N}$  で平均した  $30\text{hPa}$  における帯状風  $\overline{U}_{30\text{hPa}}$  に着目すると, 以下の 3 つの帯状風構造に分

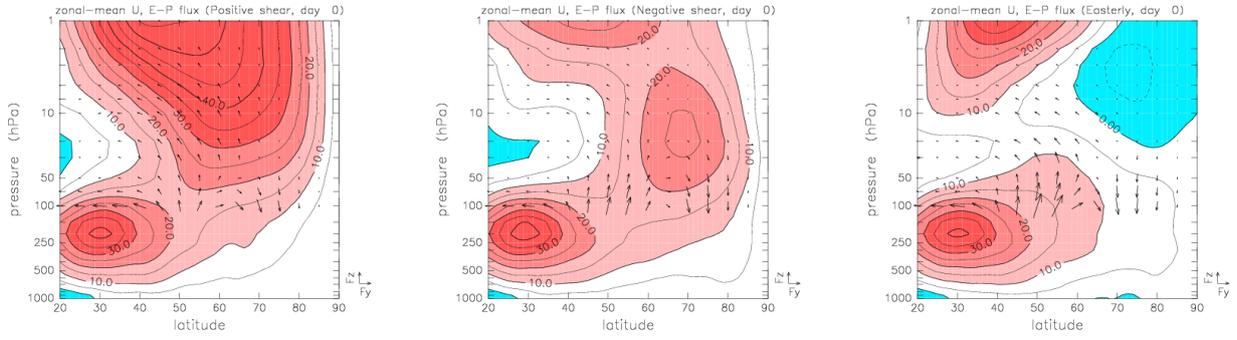


図 3: 過去の顕著なプラネタリー波の下方伝播イベント上位 30 事例について,  $(\bar{U}_{2\text{hPa}} - \bar{U}_{10\text{hPa}})$ ,  $\bar{U}_{30\text{hPa}}$  により分類した帯状風と E-P flux の合成図. 各事例とも,  $\bar{F}_z$  が最初に負になる日を基準に合成した. 等値線間隔, 図右下のベクトルの大きさは図 2 と同じ.

類できることが分かった. 図 3 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 と帯状風を示す.

- Type A (図 3 左):  
 $\bar{U}_{2\text{hPa}} - \bar{U}_{10\text{hPa}} > 0$ ,  $\bar{U}_{30\text{hPa}} > 10(\text{m/s})$ . 成層圏で強い西風シアをもつ帯状風構造.
- Type B (図 3 中):  
 $\bar{U}_{2\text{hPa}} - \bar{U}_{10\text{hPa}} < 0$ ,  $\bar{U}_{30\text{hPa}} > 10(\text{m/s})$ . 中部成層圏で西風の極大域をもつ帯状風構造.
- Type C (図 3 右):  
 Type A, B 以外で, 高緯度成層圏の帯状風は概ね東風となる帯状風構造.

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

### 3.2 事例解析 (2007 年 3 月上旬の事例)

前節で述べた 3 つの特徴的な帯状風構造のうち, 中部成層圏に西風極大域をもつ構造がみられた Type B の定型例として 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詳細に解析を行った.

#### 3.2.1 再解析データを用いた解析

図 2 で示された帯状風構造がプラネタリー波の下方伝播に重要であることを示すために, 以下のように定義される東西波数  $k$  をもつ定在波 ( $c_x = 0$ ) に対する屈折率  $n_k$  を計算した.

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

ただし, 帯状平均場の準地衡風渦位の南北勾配は,

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

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,  $\rho_0$  は密度,  $\bar{A}$  はある物理量  $A$  の帯状平均を表す.

式 (1) で示される屈折率  $n_k$  は, 帯状風  $\bar{U}(y, z)$  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に  $n_k = 0$  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) から分かるように,  $\bar{U}$  が南北, 鉛直方向に変化するとき, 式 (2) より  $\bar{U}$  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, 子午面内のジェットを中心では  $\bar{U}$  の分布が凸となり,  $n_k$  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 月上旬の事例をみると, 3 月 3 日では反射面は 10hPa と 60N 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 (図 4). 図 2 をみると, 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分かる. 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, 60N - 80N 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, 下方伝播に転じていることが分かる.

このように, 屈折率を用いた考察により, 中部成層圏に西風極大域をもつ帯状風構造は, その曲率の効果によりプラネタリー波の反射を反射させていることが示唆される.

#### 3.2.2 予報データを用いた解析

ここでは, 前節の再解析データを用いた解析より得られた, プラネタリー波の反射と帯状風構造との

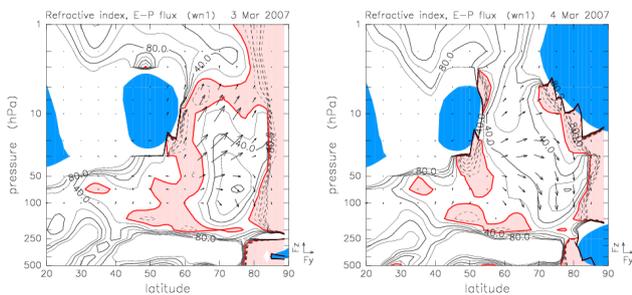


図 4: 2007 年 3 月 3 日, 4 日の東西波数 1 の定在波に対する屈折率の子午面断面図. 等値線は屈折率の 2 乗に地球半径の 2 乗をかけた値 ( $n_k^2 \times a_0^2$ ), ベクトルは E-P flux. 等値線間隔は 20. 赤実線は  $n_k = 0$  で定義される反射面, 赤色領域は  $n_k$  が負の領域, 青色領域は東風領域を示す. 図右下のベクトルの大きさは図 2 と同じ.

関係をより詳細に調べるため, 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反射の強さと帯状風構造との関係についてを詳しく調べた. このため, アンサンブル予報データの各 50 メンバーについて Plumb (1985) の 3 次元波活動度 flux を用いて, プラネタリー波の反射の強度を以下のように定義した. まず図 1 の結果より, この事例においては, 成層圏では波数 1 のプラネタリー波の反射が顕著であったため, 100hPa - 30hPa, 60N - 80N 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 度の範囲で平均した値  $F_z^{180}$  を指標とした. 次に,  $F_z^{180}$  が最小となる経度領域を求め, その  $F_z^{180}$  の最小値を反射強度と定義した. これは, 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するためである.

次に, 以下のように, 2007 年 3 月 4 日における反射強度をもとに, 反射を予測できたメンバーと, できなかったメンバーにグループ分けを行った. すなわち, 反射強度の予測値が全 50 メンバーのアンサンブル平均値  $\pm 1$  標準偏差 (図 5, 水色線) を下 (上) 回るメンバーを, 反射を予測できた (できなかった) メンバーとした. その結果, 反射を予測できたメンバーと, できなかったメンバーの数は, とともに 8 メンバーであった.

図 6 は, それぞれのグループについて, 合成した帯状風と E-P flux の子午面断面図である. 反射を予測できたグループ (図 6 上) では, 反射を予測できなかったグループ (図 6 下) 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分かる. 次に, これらの帯状風構造に対応する東西波数 1 の波に対する屈折率を計算した (図 7). この図から, 反射を予測できたグループ (図 7 上) では, 反射を予測できなかったグループ (図 7 下) に比べ, 70N - 80N,

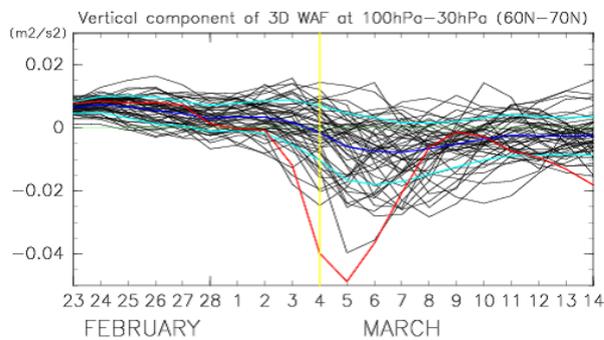


図 5: Plumb (1985) の 3 次元波活動度 flux を用いて定義した反射強度の予測値の時系列. 横軸は予測日. 黒線が各メンバーの予測値, 青線が全 50 メンバーのアンサンブル平均値, 水色線がアンサンブル平均値  $\pm 1$  標準偏差, 赤線が解析値.

30hPa - 5hPa 付近の反射面の存在が明瞭であることが分かる. これは, 反射を予測できたグループでは, 帯状風が高緯度の中部から上部成層圏に強い正の曲率をもっている (図 6 上) ことに対応している.

以上より, 中部成層圏に西風極大域をもつ帯状風構造は, その曲率の効果により, 反射面が形成されやすい構造であることが分かった.

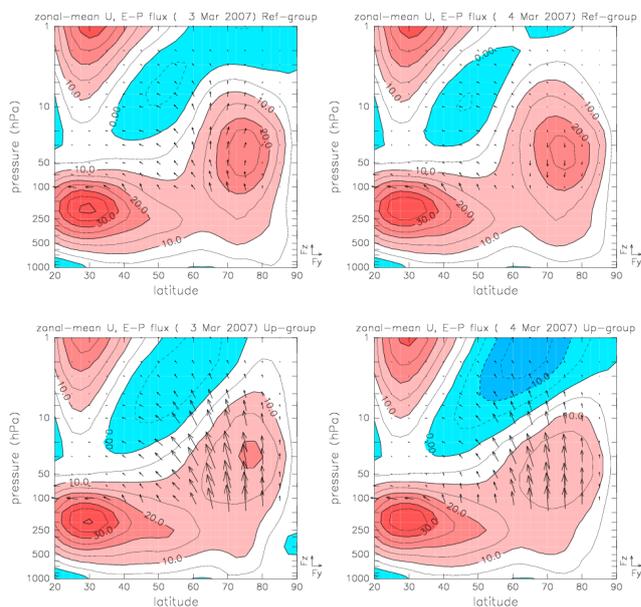


図 6: 2007 年 3 月 3 日 (左), 4 日 (右) の帯状風と E-P flux の予測値の子午面断面図. 上段が反射を予測できたグループの合成図. 下段が反射を予測できなかったグループの合成図. 等値線間隔, 図右下のベクトルの大きさは図 2 と同じ.

#### 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について再解析データ及び予報データを用いて調べた.

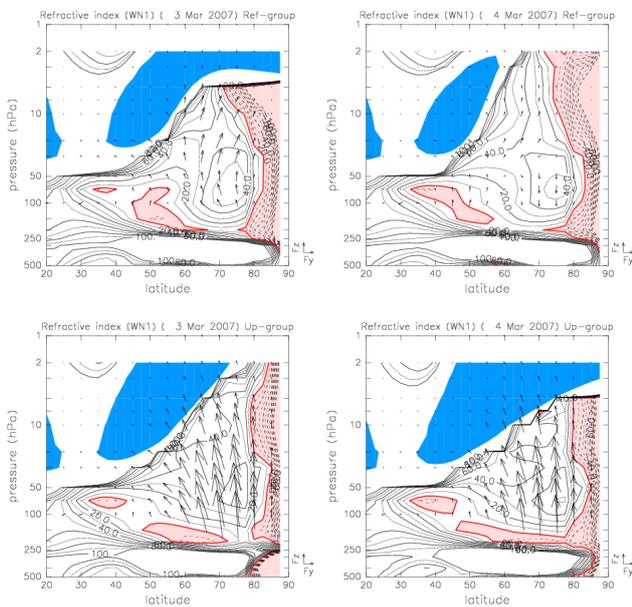


図 7: 図 6 の带状風分布について求めた, 東西波数 1 の定在波に対する屈折率の子午面断面図. 上段が反射を予測できたグループの合成図. 下段が反射を予測できなかったグループの合成図. 等値線間隔は 10. 図右下のベクトルの大きさは図 6 の 1/2.

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時における带状風構造の特徴について統計的に調べた. その結果, 顕著な下方伝播イベントが発生するときの带状風構造は, (1) 成層圏中高緯度に強い西風シアーをもつ場合 (Type A), (2) 中部成層圏高緯度で西風が極大となる場合 (Type B), (3) 成層圏が概ね東風に覆われる場合 (Type C) のいずれかに分類できることが分かった.

次に, 中部成層圏に西風極大域をもつ場合 (Type B) におけるプラネタリー波の下方伝播の典型例として, 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詳細に解析を行った. その結果, このような事例では, 带状風の南北, 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された.

## 謝辞

図の作成には地球流体電脳ライブラリを使用した.

## 参考文献

[1] Kodera, K., H. Mukougawa, and S. Itoh (2008): Tropospheric impact of reflected planetary waves from the stratosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L16806, doi:10.1029/2008GL034575

[2] Perlwitz, J., and N. Harnik (2003): Observational Evidence of Stratospheric Influence on the Troposphere by Planetary Wave Reflection. *J. Clim.*, **16**, 3011-3026.

[3] Plumb, R. A. (1985): On the three dimensional propagation of stationary waves. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 217-229.