

成層圏におけるプラネタリー波の下方伝播について

松山裕矢、廣岡俊彦 (九大院理)

1 はじめに

プラネタリー波は、成層圏で碎波、あるいは減衰することによって平均場に影響を及ぼす一方、平均場が波に影響を及ぼす。一例として、変化した平均場により波の下方伝播が起きることが挙げられる。

下方伝播の事例解析を行った先行研究は多く存在する。例えば、Kodera et al.(2008) は、2007年3月に、成層圏突然昇温生起後の西半球で下方伝播が生じ、対流圏の気候に影響を及ぼしたことを報告している。また、Harada and Hirooka(2017) では、2013/2014の冬季は東西波数(以下波数)2成分が卓越したにもかかわらず成層圏突然昇温が起きていないのは、西半球における下方伝播が原因の一つであるとされている。

一方、下方伝播がどこで起きているかを示した統計的研究は少ない。そこで、本研究では、下方伝播の発生領域やそのときの背景場の条件を統計的に明らかにすることを目的として解析を行った。

2 使用データと解析

本研究では、JRA55再解析データ(Kobayashi et al., 2015)を使用した。このデータの水平解像度は1.25度、鉛直層数は1000hPaから1hPaの37層である。6時間毎のデータを日平均して、解析を行った。

プラネタリー波の伝播を示すフラックスとして、Eliassen-Palm flux(Andrews et al., 1987; 以下EPF)とWave Activity flux(Plumb, 1985; 以下WAF)の二つを用いた。EPFは経度平均を用いているので、帯状平均場での波動伝播の議論に用いる。一方、WAFには経度成分があり、三次元場での波の伝播について議論ができる。

3 結果

3.1 事例の抽出

プラネタリー波の強い下方伝播の事例を、条件を設定して抽出した。今回設定した条件は二種類あり、一つは、60N-80Nで緯度平均をした30hPa面でのEPFのz成分(EPFz)が、 $-4 \times 10^4 \text{kg s}^{-2}$ を下回る

ことである。この条件をEPF条件と名付けた。この条件は、EPFzの全波数成分に対して、また、フーリエ級数展開を用いて、EPFzの波数1成分、波数2成分に対してもそれぞれ適用した。一方、もう一つの条件は、緯度平均や高度の設定はEPF条件と同様だが、経度方向に45度ずつに区切った8つの領域を作り(図1左参照)、各領域内で経度平均をしたWAFのz成分(WAFz)が $-1.6 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{s}^{-2}$ を下回ることとした。この条件をWAF条件と名付けた。

どちらの条件においても、z成分が極小の時を事例日とした。また、EPF条件においては、全波数と波数1、あるいは全波数と波数2で共通する事例は、全波数の事例には含まないようにした。一方、WAF条件では、隣り合う経度領域で共通する事例については、平均したz成分が大きい方の経度領域の事例として抽出を行った。

EPF条件とWAF条件で抽出した事例数を図1に示す。EPF条件(図1右)では、波数1の事例が多かった。全波数の12事例は、波数1と2のEPFzが単独では条件を満たさないが、和が条件を満たしていたものである。WAF条件(図1左)では、西半球での事例が多い一方、東半球での事例も抽出することができた。

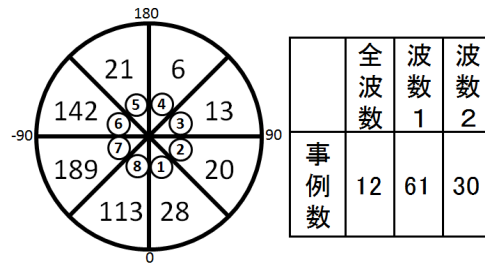


図1: (左)北半球の経度領域とWAF条件によって抽出した事例数を示した図。経度方向に45度ずつ分け、1~8の名前を付けた。(右)EPF条件によって抽出した事例数。

3.2 EPF 条件を用いた解析

まず、EPF 条件のうち、波数 1、2 で抽出した事例についてラグコンポジット解析を行う。波数 1 コンポジットについて、事例日当日から 5 日前までの、EPF とその収束 (DF)、東西風の緯度高度断面図を図 2 に、波数 2 コンポジットについての同様の図を図 3 に示す。30hPa 面での F_z の正負に着目すると、どちらの波数においても、事例日の 2 日前から 3 日前に下方伝播が始まっていることがわかる。また、波数 1 に着目すると、EPF の収束が起きて西風が弱まり、その後下方伝播が発生していることがわかる。一方、波数 2 については、波数 1 に比べて、収束があまり著しくなく、大きな東西風構造の変化は見られない。

次に、EPF 条件の波数 1、波数 2 で抽出した事例を、WAF を用いてコンポジット解析を行う。各条件の事例日における WAF とジオポテンシャルハイトの帯状平均からのずれの 30hPa 面北半球での分布を図 4 に示す。ジオポテンシャルハイトの帯状平均からのずれに着目すると、両者の違いはあまり顕著でなく、波数 2 のコンポジットの方が明確に波数 2 の構造が卓越しているというわけでもないことがわかる。また、どちらの波数においても、コンポジットの結果では、主に西半球で下方伝播が起きている。

3.3 WAF 条件を用いた解析

3.3.1 経度領域コンポジットの解析

次に、WAF 条件を用いて各経度領域で抽出した事例について、コンポジット解析を行う。

各経度領域コンポジットの、30hPa 面のジオポテンシャルハイトの帯状平均からのずれに着目すると、波数 1 が卓越しているグループと、波数 2 が卓越しているグループに分けることができた。前者には、下方伝播経度領域②、③以外の事例が当てはまり、後者には下方伝播領域②と③の事例が当てはまる。それぞれのグループの一例として、経度領域⑦、②におけるコンポジットの、北半球 30hPa 面における WAF とジオポテンシャルハイトの帯状平均からのずれの様子を図 5 に示す。このコンポジットの結果から、波数 2 が卓越していると、東半球で下方伝播が起りやすいことが示唆される。

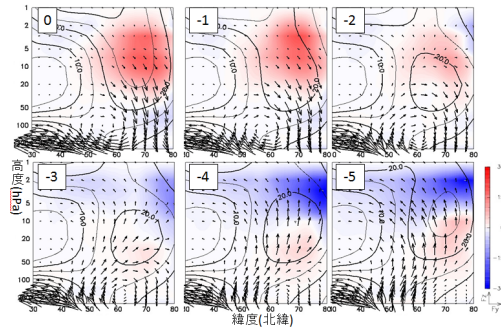


図 2: 波数 1 の EPF 条件のラグコンポジット解析の緯度高度断面図。波数 1 成分 EPF(kgs^{-2}) をベクトル、東西風 (ms^{-1}) を等値線、DF($\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{day}^{-1}$) を陰影で表す。各図の左上の数字は、事例日から何日前かを表す。カラーバーの下の単位ベクトルは $F_y = 8.3 \times 10^6 \text{kgs}^{-2}$ 、 $F_z = 8.3 \times 10^4 \text{kgs}^{-2}$ である。

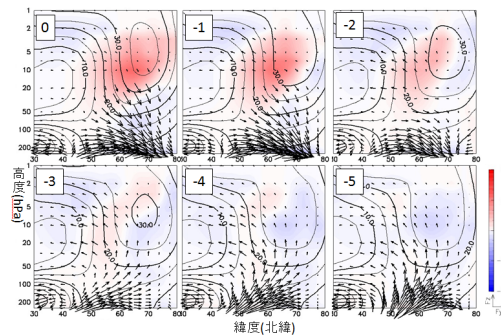


図 3: 波数 2 の EPF 条件のラグコンポジット解析についての、図 2 と同様の緯度高度断面図。

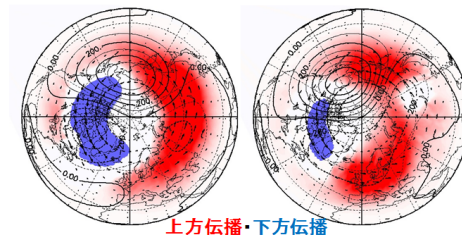


図 4: (左) 波数 1、(右) 波数 2 コンポジットについての 30hPa 面北半球の様子。WAF(m^2s^{-2}) をベクトル (x, y 成分) と陰影 (z 成分; 赤が上方伝播、青が下方伝播) で、ジオポテンシャルハイトの帯状平均からのずれ (m) を等値線で表す。

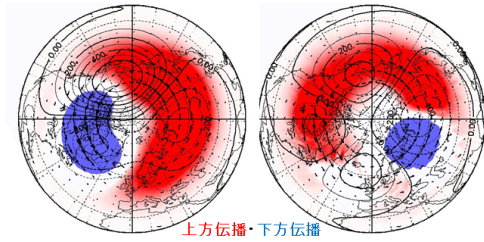


図 5: (左) 下方伝播経度領域⑦、(右) 同経度領域②のコンポジットの北半球 30hPa 面における様子。WAF(m^2s^{-2}) をベクトルと陰影で、ジオポテンシャルハイトの帯状平均からのずれ (m) を等値線で表す。

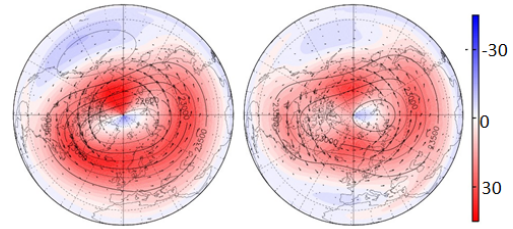


図 6: (左) 下方伝播経度領域⑦、(右) 同経度領域②コンポジットについての北半球 30hPa 面における様子。WAF(m^2s^{-2}) の x, y 成分をベクトルで、ジオポテンシャルハイト (m) を等値線で、東西風 (ms^{-1}) を陰影で表す。

3.3.2 経度領域⑦、②の比較

卓越している波数の違いを比較するために、それぞれの代表として、経度領域⑦と②のコンポジット解析の比較を行う。

下方伝播経度領域⑦、②のコンポジットについて、北半球 30hPa 面における WAF と東西風とジオポテンシャルハイトの様子を図 6 に、WAF とジオポテンシャルハイトの帯状平均からのずれと屈折率 K_s^2 (Karoly, 1983) の緯度高度断面図を図 7 に示す。波動は、屈折率が負の領域を避けるように伝播することに注意し、経度領域⑦についての二つの図に着目すると、アリューシャン高気圧が発達している、それに対応し屈折率が負の領域が広がっていることがわかる。また、高気圧の東側では、位相が高度と共に東傾しており、下方伝播が発生している領域となっている。以上より、高気圧の発達には下方伝播と密接に関係があると考えられる。

次に、経度領域②の二つの図に着目すると、経度領域⑦に比べて、アリューシャン高気圧に加え、それと対になる高気圧が 0E 付近に存在している。そして、その高気圧と対応して屈折率が負の領域があり、その東側で位相が東傾、あるいは順圧的になっていて、下方伝播が発生している。このことから、東半球に下方伝播が発生するのは、波数 2 が卓越することで、0E 付近に高気圧が存在するからだと考えられる。

次に、経度領域⑦と②において抽出された事例について、下方伝播と高気圧の強度の関係に着目する。下方伝播と関係していると考えられる高気圧の面積と下方伝播の強度の関係の散布図を、図 8 に示す。

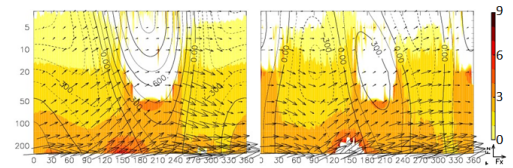


図 7: (左) 下方伝播経度領域⑦、(右) 同経度領域②コンポジットについての、50N-70N 緯度平均した経度高度断面図。WAF(m^2s^{-2}) の x, z 成分をベクトルで、ジオポテンシャルハイトの帯状平均からのずれ (m) を等値線で、 K_s^2 を陰影で表す。単位ベクトルは、 $F_x = 1.25 \times 10^{-1} \text{m}^2\text{s}^{-2}$ 、 $F_z = 6.25 \times 10^{-4} \text{m}^2\text{s}^{-2}$ である。

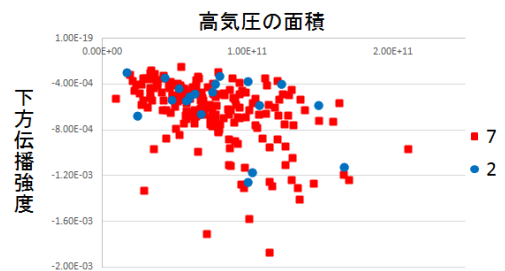


図 8: (左) 下方伝播経度領域⑦、(右) 同経度領域②の抽出事例についての、高気圧の面積と下方伝播強度の関係。高気圧の面積は、事例日の 3 日前の 10hPa 面において、ジオポテンシャルハイトが 23600(m) 以上の面積を計算している。下方伝播の強度は、事例日における、WAF の z 成分の最小値としている。

どちらの経度領域についても、相関係数は約-0.46で、高気圧強度と下方伝播に負の相関があることがわかる。

さらに、下方伝播の時間経過を見るために、経度領域⑦と②についてラグコンポジット解析を行った。各経度領域の3日前と6日前のWAFとジオポテンシャルハイトの帯状平均からのずれと屈折率 K_s^2 の緯度高度断面図を図9に示す。下方伝播が起きる領域の位相に着目すると、どちらの経度領域コンポジットにおいても、下方伝播の事例日に近づくとともに、位相が西傾から東傾、あるいは順圧的な構造へと変化している様子が見られる。このことから、波の伝播に対応して、位相構造は刻々と変化していることがわかる。

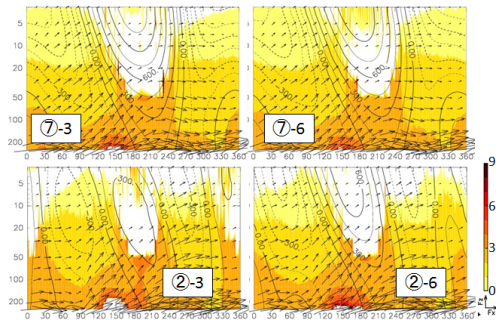


図9: (左) 下方伝播経度領域⑦、(右) 同経度領域②のコンポジットについての経度高度断面図。左列が事例日から3日前、右列が事例日から6日前を表す。

4 まとめ

EPFとWAFの両方を用いて、下方伝播の抽出を行い、コンポジット解析等を用いて、下方伝播や背景の様子を解析した。EPF条件を用いた解析では、波数1の下方伝播が起こる前に、上方伝播したプラネタリー波が収束することによって、下方伝播が起こりやすい東西風構造を形成されるという特徴が見られた。しかしながら、波数2ではそのような様子が見られなかったため、波数1と2の下方伝播は、発生要因が異なる可能性が示唆される。

WAF条件を用いた解析では、経度平均を工夫することで、東半球において局所的に起こる下方伝播を抽出することができた。また、西半球で発生した事例の代表として経度領域⑦で起きた事例のコンポ

ジットと、東半球で発生した事例の代表として経度領域②で起きた事例のコンポジットを比較した。

経度領域⑦の事例では、アリューシャン高気圧が下方伝播の条件の一つであると考えられた。一方、経度領域②の事例は、⑦のコンポジットに比べて波数2が卓越しており、その結果生じたアリューシャン高気圧と対となる高気圧が、下方伝播と関係していると考えられた。このことは、高気圧の面積と下方伝播強度の相関からも示唆された。

ラグコンポジット解析を用いると、波の位相が西傾から東傾(あるいは順圧的)に変化する様子を観察できた。しかし、この変化と波の下方伝播の関係において、どちらが原因となっているのかを判断するには、より詳細な解析が必要である。

参考文献

- [1] Anrews, D., Holton, J. R., and Leovy, C. B., 1987: Middle atmosphere dynamics, Academic Press, Orland.
- [2] Harada, Y., and Hirooka, T., 2017: Extraordinary features of the planetary wave propagation during the boreal winter 2013/2014 and the zonal wave number two predominance. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122,11,374-11,387. doi:10.1002/2017JD027053.
- [3] Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., ... Takahashi, K., 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93(1), 5-48, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>
- [4] Karoly, D. J., 1983: Rossby-wave propagation in a barotropic atmosphere. *Dyn. Atmos. Oceans*, 7, 111-125, doi:10.1016/0377-0265(83)90013-1.
- [5] Kodera, K., H. Mukougawa, and S. Itoh, 2008: Tropospheric impact of reflected planetary wave from the stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L16806, doi:10.1029/2008GL034575.
- [6] Plumb, R. A., 1985: On the three dimensional propagation of stationary waves. *J. Atmos. Sci.*, 42, 217-229, doi:10.1175/1520-0469(1985)042<0217:OTTDPO>2.0.CO;2.