

成層圏におけるプラネタリー波束の下方伝播について

九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻 松山裕矢
九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門 廣岡俊彦

1. 序論

惑星規模の大気波動であるプラネタリー波は、通常は対流圏から成層圏へと上方伝播する。一方、成層圏から対流圏へと下方伝播する事例があることも報告されている。Kodera et al. (2008)では、2007年3月の下方伝播事例を解析し、北米上空で下方伝播が発生していることや、それが対流圏での気温低下を引き起こしていることを明らかにした。また、松山・廣岡(気象学会春季大会 B158)では、JRA55 再解析データを用いて下方伝播を統計解析し、下方伝播発生の経度分布や発生時の高度場の特徴などを明らかにした。一方、波束の下方伝播が対流圏に影響を及ぼす際の力学過程や、定量的な理解は不十分である。

本研究では、下方伝播時の対流圏循環の特徴と、対流圏の寒波発生時の波束伝播の特徴の両方を解析することで、波束の下方伝播と対流圏での寒波事例の関係性を明らかにすることを目的とする。なお、今回は特に北米上空についての解析結果を報告する。

2. 使用データと解析手法

本研究では、JRA55 再解析データ(Kobayashi et al., 2015)を使用した。解析期間は1958年12月から2019年2月の北半球冬季であり、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、Wave Activity flux(Plumb, 1985; 以下 WAF)を用いた。

3. 結果

3.1 下方伝播発生時の対流圏循環の特徴

まず、成層圏内で強い下方伝播が起きている事例を抽出する。30hPa 面において WAF の鉛直成分(WAFz)を135W-90Wの45度で経度平均、60N-80Nで緯度平均し、その値が $-1.4 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{s}^{-2}$ を下回る事例を抽出することで、北米上空の強い下方伝播事例(北米下方伝播事例)を152事例得た。この閾値は、負の WAFz の平均値一標準偏差に相当する。これら152事例の合成図解析の結果を、WAFと等圧面高度の帯状平均偏差についての経度高度断面を用いて図1に示す。陰影で示す WAFz の強い負の領域より、135W-90Wのおおよそ200hPaから10hPaにおいて下方伝播が起きていることがわかる。

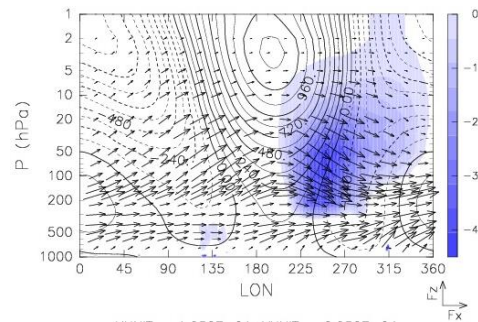


図1 135W-90W で発生した強い下方伝播事例に関する合成図解析の60N-80N平均経度高度断面図。等値線は等圧面高度(m)の帯状平均偏差を、ベクトルはWAF($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)のx,z成分を、陰影はWAFz($\times 10^4$)の負の領域を示す。単位ベクトルは、 $F_x=1.25 \times 10^{-1} \text{m}^2 \text{s}^{-2}$ 、 $F_z=6.25 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{s}^{-2}$ である。

次に、成層圏で強い下方伝播が起きているときの対流圏循環の様子を調べる。北米下方伝播事例日の合成図解析の結果を、対流圏(250hPa

面)の等圧面高度の水平断面図により図 2 に示す。北米上空において強い低気圧偏差が存在し、成層圏内で下方伝播が起きているのと同じ経度帯において、ジェットが強化されている様子が見られる。また、このときの対流圏(850hPa面)の気温変化を調べると、下方伝播事例日に向けての気温低下が見られ、平年値よりも約 2 度低いことがわかった。これらの結果から、成層圏内での波の下方伝播が対流圏循環に影響を及ぼしている可能性が示唆される。

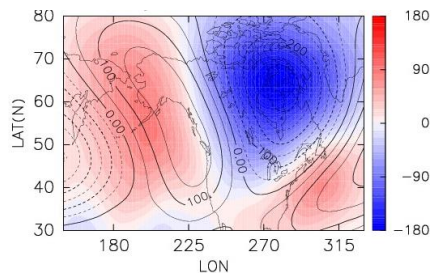


図 2 135W-90W で発生した強い下方伝播事例に関する合成図解析の、北米上空 250hPa 面における経度緯度断面。等値線は等圧面高度(m)の帯状平均偏差を、陰影は等圧面高度(m)の気候値偏差を示す。

3.2 シカゴ寒波時の波束伝播の特徴

ここでは、対流圏において気温が低いとき(寒波)の波束の伝播の様子を解析する。北米の代表的な都市であるシカゴ(経度 90W、緯度 40N とする)上空の 850hPa 面の気温が、 -19°C 以下の事例を抽出することで、シカゴ上空の寒波事例(シカゴ寒波事例)を 57 事例得た。この閾値は、気温の極小値の平均値 -2 倍の標準偏差に相当する。これら 57 事例のラグ合成図解析の結果を、等圧面高度と WAF の北米上空の 250hPa 面水平断面図により図 3 に示す。等圧面高度に着目すると、ジェットが蛇行している様子が明瞭に見られる。また、WAF を見ると下方伝播が起きている様子が明瞭で、中でも事例日より 2 日前に、特に下方伝

播が顕著となっている。このことより、波束の下方伝播と対流圏での気温変化に重要な関係があることが示唆される。

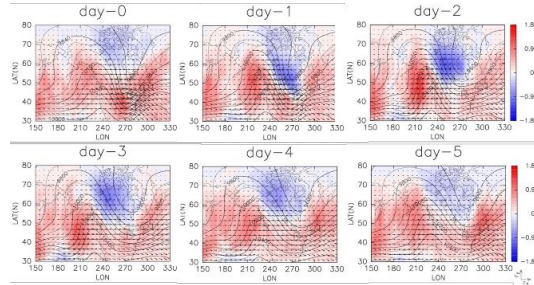


図 3 シカゴ寒波事例の事例日から事例日から 6 日前のラグ合成図解析の経度緯度断面。等値線は等圧面高度(m)、ベクトルは WAF(m^2s^{-2})の水平成分、陰影は WAFz を示す。単位ベクトルは $F_x=F_y=1.67 \times 10^0 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ であり、WAFz は 10^4 倍している。

次に、下方伝播の鉛直分布を見るために、合成図解析の結果を 150W-60W の 90 度で経度平均した、緯度高度断面で描く(図 4)。左側の図の等値線と陰影は東西風の気候値からの偏差を示しており、成層圏では西風偏差であることがわかる。このことから、シカゴ寒波時には成層圏内では SSW 生起時の東風は存在しておらず、SSW と寒波の直接的な関係は見られないと考えられる。一方、対流圏では東風偏差が見られる。これは、対流圏においてジェットの蛇行が明瞭になったことを反映していると考えられる。右図では、波束の収束を陰影で示している。この波束の収束は、ローパスフィルター(Duchon, 1980)で抽出した東西波数 8 までの等圧面高度から計算した WAF について、以下の式で計算した。

$$DWAF = \frac{1}{p \cos \phi} \nabla \cdot \mathbf{F}$$

p : pressure/1000hPa, ϕ : latitude, \mathbf{F} : WAF
図より、下方伝播が起きている領域付近では、強い収束が見られる。これは、下方伝播と、その下に存在する上方伝播の双方があることによって生じて

いると考えられ、この上下の波束の相互作用がジェットの蛇行に寄与している可能性がある。

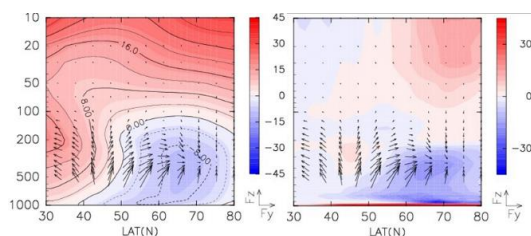


図4 シカゴ寒波事例の合成図解析における、事例日から二日前の 150W-60W 経度平均緯度高度断面。ベクトルは WAF の y、z 成分を示す。(左)等値線と陰影は東西風(ms^{-1})の気候値偏差を、(右)波の収束発散($\text{ms}^{-1}\text{day}^{-1}$)を示す。単位ベクトルは $F_y=1.67 \times 10^{-1} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 、 $F_z=8.33 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ である。

3.3 下方伝播事例とシカゴ寒波事例の関係

ここまで、北米下方伝播事例やシカゴ寒波事例を抽出して、合成図解析を行ってきた。ここでは、それぞれで抽出した事例の関係を調べる。30hPa 面の北米上空(135W-90W)で発生した強い下方伝播事例は 152 事例、シカゴ寒波事例は 57 事例抽出した。それらの事例日の重複を調べると、ぴったり事例日が一致するものはなかったが、 ± 5 日の範囲を設けると、16 事例の重複があることがわかった。この関係は、成層圏での下方伝播は必ずしも強いシカゴ寒波をもたらさないことを示していると考えられる。従って、成層圏での下方伝播の強さそのものが、対流圏への影響の大きさを決定するわけではないと考えられる。

そこで、北米下方伝播事例とシカゴ寒波事例の各々について、下方伝播の鉛直分布を比較する。図 5 は、それぞれについての合成図解析の結果を、150W-60W 経度平均の緯度高度断面で示したもので、陰影は WAFz のうち負の領域のみを示している。左図の成層圏での下方伝播事例に着目すると、WAFz の負のピークが 100hPa から 50hPa にあることがわかり、それに比べると上部対

流圏での下方伝播はあまり強くないことがわかる。一方シカゴ寒波事例では、成層圏においては強い下方伝播は発生しておらず、上部対流圏に WAFz の強い負のピークが存在している。これらの比較から、対流圏での顕著な気温低下や循環の変化には、上部対流圏での強い下方伝播が必要だと考えられる。つまり、成層圏での下方伝播の強さそのものは対流圏への影響を考える上で重要ではなく、その下方伝播が対流圏まで届いているかどうか重要である。実際に二つのグループの事例で重複している事例を見ると、成層圏から対流圏まで強い下方伝播が存在していることがわかった(図は省略)。

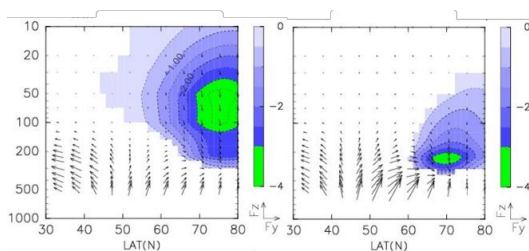


図5 北米寒波事例の合成図解析における事例日(左)とシカゴ寒波事例の合成図解析における事例日から二日前(右)の 150W-60W 経度平均緯度高度断面。ベクトルは WAF の y、z 成分を、陰影と等値線は WAFz の負の領域を示す。単位ベクトルは図 4 と同様で、WAFz は 10^4 倍している。

3.4 下方伝播と寒波の強さの関係

前節で、上部対流圏での下方伝播の強度が対流圏での寒波や循環に対して重要であることを示した。その関係をさらに解析するために、シカゴ寒波事例ほどは強くないが、比較的強い寒波事例を抽出し、合成図解析を行う。シカゴ上空 850hPa 面の気温が -16.4°C 以下 -19.0°C 以上の事例を抽出し、シカゴ'弱'寒波事例とし、79 事例を得た。シカゴ弱寒波事例とシカゴ寒波事例の事例日から 2 日前についての合成図解析の結果を水平断面図で示したものが図 6 の左側で、比較と

して右側にシカゴ寒波事例についての同様の合成図解析の結果を示す。両者を比べると、シカゴ弱寒波事例の方が下方伝播は弱い。このことより、上部対流圏での下方伝播の強度が強いほど、対流圏では強い寒波が発生すると考えられる。

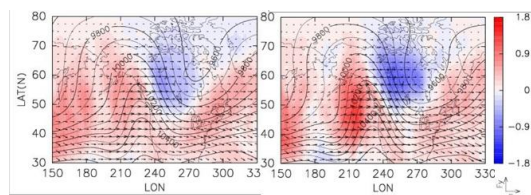


図6 シカゴ弱寒波事例(左)とシカゴ寒波事例(右)の合成図解析について、事例日から2日前の合成図解析の経度緯度断面。描いている物理量と単位ベクトルは図3と同様である。

4. まとめ

本研究では、成層圏での下方伝播とそれが及ぼす対流圏への影響の関係を解明すべく、解析を行った。

まず、成層圏で強い下方伝播が発生している事例日を抽出して合成図解析を行い、そのときの対流圏の様子を調べた。今回抽出した事例では、上部対流圏から成層圏までの広い領域で下方伝播が発生していることが確認された。下方伝播生起時の対流圏の様子を見ると、成層圏内での下方伝播とほぼ同じ経度領域において、低気圧性循環やジェットのスラックスの強化が見られた。また、下方伝播の事例日に向け、対流圏において気温が低下している様子も確認された。

次に、北米上空の対流圏で寒波が発生している事例を抽出し、そのときの波束の伝播の様子を調べた。合成図解析の結果、寒波事例の二日前に、強い下方伝播が上部対流圏において見られた。また、その下方伝播の下方には波束の上方伝播が存在しており、上下の波束が相互作用し、それがジェットのスラックスや寒波を引き起こしている可能性が示唆された。

二つの条件で抽出された各事例集団を比較すると、±5日の範囲で16事例のみの重複が存在した。この事実に加えて、二つの事例グループの下方伝播の鉛直分布を比較すると、下方伝播の発生高度域(WAFの鉛直成分)の分布が異なることが示され、上部対流圏における強い下方伝播の存在が、対流圏における寒波発生に寄与しているものと推測される。加えて、強い寒波と比較的に弱い寒波の事例を比較すると、強い寒波の時には、より強い下方伝播が発生していることがわかり、上部対流圏での下方伝播の強さが寒波発生に寄与するという主張を支持する結果であった。

なお、本研究では北米上空での下方伝播と寒波についての解析を行ったが、ヨーロッパ上空においても同様な結果が得られた。

参考文献

- [1] Duchon, C. E., 1979: Lanczos filtering in one and two dimensions. *J. Applied Meteor.*, 18(8), 1016–1022. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<1016:LFI0AT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<1016:LFI0AT>2.0.CO;2)
- [2] Kobayashi, S., et al., 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>
- [3] 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.
- [4] 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:OTDPO>2.0.CO;2.