

2006年1月の成層圏突然昇温期間中の対流圏循環偏差場の特徴

西井和晃・中村尚(東京大学大学院理学系研究科)

1. はじめに

2005年12月から2006年1月上旬にかけて大寒波が日本を襲い、各地で被害をもたらした。一方成層圏においては12月の終わりから極夜ジェットが減速し始め、翌年1月中旬から下旬にかけて中部成層圏での東西平均風速が西風から東風へと反転した(図1)。この減速は大規模突然昇温に伴っており極渦内の温度の上昇が同時に観測された。この極夜ジェットの減速している期間には対流圏から成層圏へと伝播するプラネタリー波の活動を示す100hPa気圧面での南北熱輸送が顕著であった(図1)。これは顕著なプラネタリー波の対流圏から成層圏への連続的な伝播が成層圏突然昇温を引き起こしたことを示している。

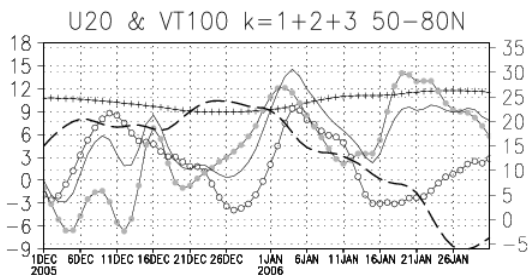


図1 マーク無し破線; 20hPa気圧面の北緯50度から80度で平均した東西平均東西風(目盛りは右軸[m/s])。マーク無し実線; 100hPa気圧面の北緯50度から80度で平均し、東西波数1-3成分で構成した東西平均南北熱フラックス(目盛りは右軸[Km/s])。白丸付き実線; 気候平均場と偏差場のクロスタームによる熱フラックス(以下目盛りは左軸[Km/s])。黒丸付き実線; 偏差場のみによる熱フラックス。十字付き実線; 気候平均場による熱フラックス。これらはすべて5日間の移動平均を施した風速場、温度場から求めている。

従来、対流圏から成層圏へ伝播する波動は東西方向にフーリエ展開された各東西波数成分ごとに議論されることが多く、東西方向に限定された局所的な波源は議論され得ない。しかし Nakamura and Honda(2002)では晩冬に観測されるアリューシャン・アイスランド低気圧シーソー現象において、アイスランド低気圧を波源としてプラネタリー波が

波束的に上方伝播し、成層圏の波動を変調させることを示した。また、南半球で2002年9月に観測された成層圏突然昇温においては南大西洋上で発達したブロッキング高気圧が成層圏へ伝播する波束の波源となり、成層圏プラネタリー波を増幅させたことが指摘されている(Nishii and Nakamura 2004)。この研究では極夜ジェットが西風から東風に反転した2006年1月に、対流圏と成層圏のプラネタリー波の強化に寄与したロスビー波束の対流圏起源とその発達過程を明らかにすることを目的とする。

2. 解析手法

用いたデータは米国国立環境予測センター(NCEP)の再解析データであり、気候値は1979年から2003年の平均値とした。また移動性擾乱を取り除くために10日間平均を施した。この研究で着目する、3次元的に非一様な基本場中に依存し東西方向に局在化した波束伝播を診断するために Takaya and Nakamura (2001、以下 TN01) で定義された波活動度フラックスを用いた。ここでは10日間平均場の気候値からのずれを偏差場と定義し気候値を基本場とした。この波活動度フラックスは対流圏から成層圏へ伝播する波活動度の一部であることに注意されたい。今、例えばある気圧面上の南北風の東西平均を[V]で、東西平均場からのずれをV*で表す。

また気候平均場を \bar{V} 、気候平均場からのずれ(偏差場)をV'で表すとすると、EPフラックス(Andrews and McIntyre 1976)の上向き成分に対応する南北熱フラックスの東西平均は以下のように分解される。

$$[V^*T^*] = [\bar{V}\bar{T}] + [\bar{V}^*T'^* + V'^*T^*] + [V'^*T'^*]$$

右辺第1項は気候平均場による寄与、第2項は気候平均場と偏差場との相互作用による寄与、第3項は偏差場による寄与と解釈され、図1中に解析期間中の値がそれぞれ示されている。12

月終わりから1月初めに極夜ジェットが減速を始めるときには第2、3項がそれぞれ増幅し、全体のEPフラックスの鉛直成分の増加に寄与しているが、南北風に反転する直前の1月20日前後には第3項の寄与のみが大きくなっている。偏差場の東西平均場による寄与は無視できる程小さいため、本解析において着目する波束伝播は第3項に対応する。成層圏へ流入する波活動度全体を議論する際にはPlumb(1985)で定義された波活動度が有用であり、これの東西平均場はEPフラックスに帰着される。

また、移動性擾乱の活動 Z_e とその高度偏差場への寄与 $(\partial Z/\partial t)_{HFT}$ を見積もるために、それぞれ以下で定義される量の気候値からの偏差を用いた(Nakamura et al. 1997)。ここでプライム(バー)をつけた量は8日間の高(低)周波フィルタを施した場である。後者は移動性擾乱による渦度フラックスの収束に伴う高度場変化傾向を見積もった量である。なお移動性擾乱は同時に熱フラックスの収束も伴い、渦度フラックスの収束による高度場変化効果を部分的に打ち消すように働くので、見積もられる量は過大評価されていることに注意されたい。

$$Z_e = \sqrt{2z'^2}$$

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial t}\right)_{HFT} = \frac{f_0}{g} \nabla^{-2} \left[-\bar{\nabla} \cdot (\bar{v}'\zeta' + \bar{v}'\zeta' + \bar{v}'\zeta') \right]$$

3-1. 1月上旬の偏差場

対流圏からの上向きEPフラックスの極大を示す1月上旬の下部成層圏の偏差場(図2a)では、北米大陸上の高気圧性偏差が顕著である。またユーラシア大陸上に低気圧性偏差のピークが見られる。これらの領域で東向きに伝播する波活動度フラックスが存在し、そのやや下流側では対流圏からの波活動度が流入している。一方対流圏(図2d)では上記で述べた成層圏の偏差の逆の符号の高度場偏差がそれぞれやや上流側に存在している(北欧上の高気圧性偏差と北東太平洋の低気圧性偏差)。このような成層圏の高(低)気圧性偏差とやや上流側の対流圏の低(高)気圧性偏差、及びそれらの間の波活動度フラックスの顕著な上向き成分の存在は対流圏から成層圏へ伝播するロスビー波束に伴っ

てしばしば観測される。実際東西鉛直断面図では波束的な構造を示しており、位相線が高さと共に西に傾くことから定常ロスビー波の上方伝播と整合的である(図2g)。以上のことから成層圏の2つの高度場偏差はそれぞれ対流圏からの波活動度の流入に伴って形成されたと考えられる。北欧上の高気圧性偏差はその南側に低気圧性偏差を伴っており典型的なブロッキング高気圧である。またユーラシア大陸から太平洋にかけて、波活動度フラックスの東向き成分を伴った波列構造が顕著であり、北東太平洋の低気圧性偏差はこの波列構造の一部として発達したと考えられる。

3-2. 1月中旬の偏差場

成層圏極夜ジェットが東風に反転する直前の1月中旬には、対流圏から成層圏への波束伝播は北米大陸及び北西大西洋で上旬に引き続いて顕著である(図1)。これに対応して成層圏下部では北米大陸北東で高気圧性偏差が発達している(図2b)。また対流圏には北東太平洋と北米大陸上に低・高気圧性偏差が存在している(図2e)。北緯50度での東西高度断面図ではこれらの成層圏対流圏の偏差場が上及び東向きに伝播する波列構造を形成しており、波活動度フラックスの分布も上方波束伝播と整合的である(図2h)。対流圏の低・高気圧性偏差の上流側の太平洋上には上旬から引き続いて波列構造が顕著である。この期間の移動性擾乱、つまりストームトラックの活動を見積もると、太平洋中部から北米大陸上にかけて例年より活発化している(図3a)。このストームトラックの活発化に伴って長周期変動側、つまりこの研究で定義する低・高気圧性偏差の増幅効果が、先の低高気圧性偏差に対応する領域で顕著である。以上のことにより、対流圏側の低・高気圧性偏差は太平洋からの波束伝播の下流側で増幅し、それらが移動性擾乱からの高度場強制を受けて維持発達したと考えられる。

3-3. 1月下旬の偏差場

成層圏極夜ジェットが東風に反転した1月下旬の対流圏の偏差場の特徴は欧州北の

高気圧性偏差の存在である（図 2f）。上旬の場合と同様に南側に低気圧性偏差を伴っており、これもブロッキング高気圧に伴うものである。またアラスカ上空に低気圧性偏差が存在している。これらの高・低気圧性偏差の周囲で成層圏へ波活動度が顕著であり、下

部成層圏での北米大陸上及び欧州上の低高気圧性偏差を維持していると考えられる（図 2c）。これらの偏差場の位相線は東西断面図ではそれぞれ高さと共に西に傾く構造を持っており、波束伝播の上方伝播と整合的である。対流圏の欧州北の高気圧性偏差の周辺で

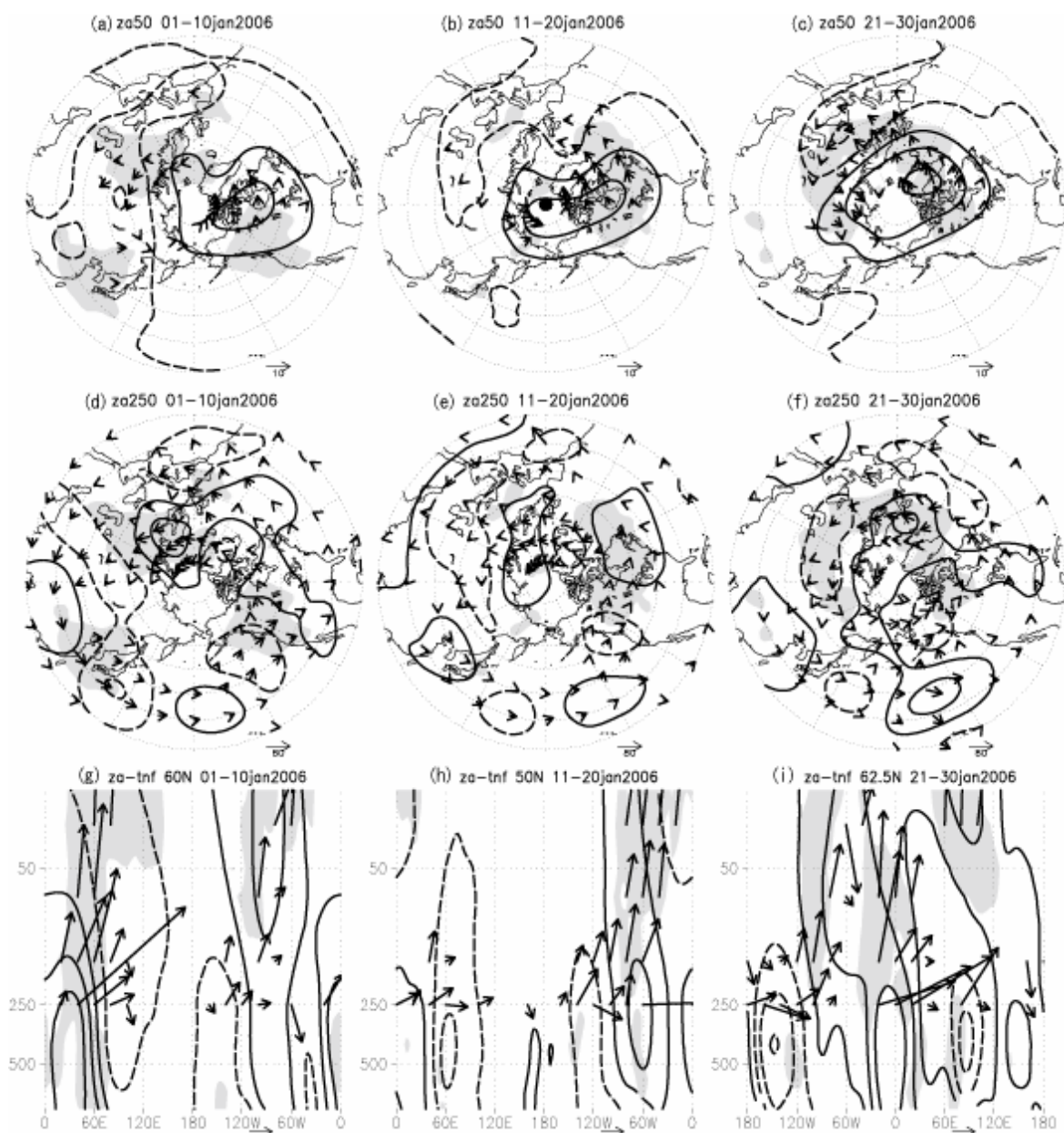


図 2 1 月上旬 (a, d, g) 中 (b, e, h) 下旬 (c, f, i) の高度場偏差場。(a-c) 50hPa 気圧面での偏差場。流線関数に似せるために $\sin(45^\circ)/\sin(\text{緯度})$ をかけてある。実線が高気圧、点線が低気圧性偏差 [$\pm 100, \pm 300\text{m}$]。矢印は同気圧面で定義される波活動度フラックスの水平成分 [m^2/s^2]。影は波活動度フラックスの 100hPa 気圧面での鉛直成分が $0.01[\text{m}^2/\text{s}^2]$ を超える領域。(d-f) 250hPa 気圧面での偏差場。線は $\pm 80, 240[\text{m}]$ を示す。(g-i) 北緯 60 度、50 度 62.5 度における東西高度断面図。矢印は TN01 定義の波活動度フラックスの東西鉛直成分。気圧の逆数をかけ、さらに鉛直成分には 100 をかけている。影は鉛直成分で $0.2[\text{m}^2/\text{s}^2]$ を超える領域。特に (i) は中心経度が 0 度である事に注意。

は移動性擾乱からの高気圧性渦度強制が顕著であり、この高気圧性偏差の維持に寄与していたことを示唆している(図2b)。また、アラスカ上の低気圧性偏差の周囲では逆に高気圧性の渦度強制が見られるが、南西の高気圧性偏差からの波束伝播に伴う増幅効果が勝っていたと考えられる。

4. まとめ

2006年1月下旬に観測された成層圏突然昇温の発生の前には対流圏から成層圏へのプラネタリー波の連続的な上方伝播が観測された。本研究ではこの増幅に寄与した対流圏からの東西方向に局所的なロスビー波束伝播に着目し、これらの波束の対流圏起源の特定とその形成過程の解析を行った。この研究で波源として特定された対流圏循環偏差はそれぞれ例年に比べて特に強いものではなく、こういった対流圏循環偏差の発生が直ちに成層圏突然昇温に結びつくものではない。なぜ2006年に突然昇温が発生したのかについてはさらに研究が必要である。また、今回着目した対流圏循環偏差が本当に突然昇温に必要なであったのかを数値予報モデルを利用することにより検証しなければならない。

参考文献

- Andrews, D.G. and M.E. McIntyre, 1976: Planetary waves in horizontal and vertical shear: The generalized Eliassen-Palm relation and the mean zonal acceleration. *J. Atmos. Sci.*, 33, 2031-2048.
- Mukougawa, H., H. Sakai and T. Hirooka, 2005: High sensitivity to the initial condition for the prediction of stratospheric sudden warming. *Geophys. Res. Lett.*, 32. doi: 10.1029/2005GL022909
- Nakamura, H. and M. Honda, 2002: Interannual seesaw between the Aleutian and Icelandic lows. Part III: Its influence upon the stratospheric variability. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80 1051-1067.
- Nishii, K. and H. Nakamura 2004: Tropospheric influence on the diminished Antarctic ozone hole in September 2002. *Geophys. Res. Lett.*, 31. doi:10.1029/2004GL019532
- Plumb, R. A., 1985: On the three-dimensional propagation of stationary waves, *J. Atmos. Sci.*, 42, 217-229.
- Takaya, K. and H. Nakamura, 2001: A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasi-geostrophic eddies on a zonally varying basic flow, *J. Atmos. Sci.*, 58, 608-627.

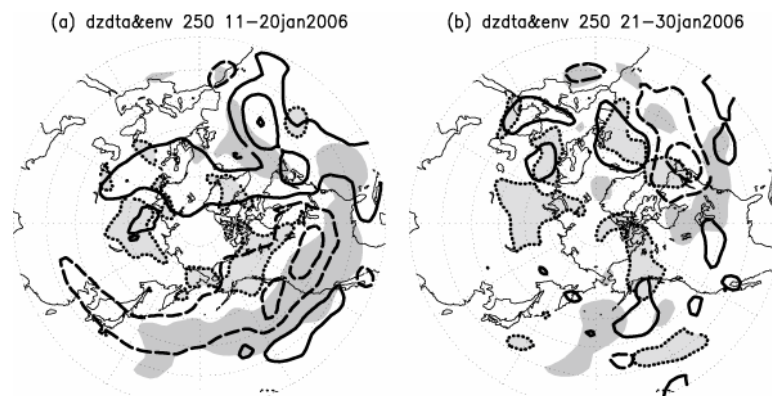


図7 1月中旬(a)及び下旬(b)平均の250hPa気圧面での移動性擾乱の活動度(影)と、移動性擾乱に伴う渦度輸送による高度場変化傾向(線)の気候平均からの偏差場。前者は30[m]以上を濃い影、-30[m]以下を薄い影及び点線で示す。また後者の線は±30, 90, 150[m/day]を示す。