

成層圏惑星規模波の下方伝播が北太平洋ブロッキングの形成に及ぼす影響

向川 均（京大・防災研）・小寺 邦彦（名大・太陽地球環境研）・藤井 晶（京大・院理）

1. はじめに

対流圏ブロッキングと成層圏突然昇温（SSW）との関連性について、メカニズムが解明される以前から指摘されてはいた（Labitzke, 1965）が、Matsuno（1971）によって、SSWは惑星規模波の対流圏からの伝播が促進されることにより発生することが初めて明らかにされた。一方、対流圏ブロッキングは一般的に惑星規模波を増幅させると考えられている（Tung and Lindzen, 1979）。実際、Mukougawa et al.（2005, 2007）は、予報実験により、北大西洋ブロッキングを模した循環偏差を初期条件に加えた場合、惑星規模波が増幅しSSWが発生することを示している。また、最近の統計的解析も、ブロッキングとSSW発生との間には有意な関係があることが示されている（e.g., Martius et al., 2009; Castanheira and Barriopedro, 2010; Woollings et al., 2010; Bancelá et al., 2011）。しかしながら、ブロッキングとSSWとの間の因果関係は完全に理解されたわけではないことも確かである（Taguchi, 2008）。それは、いくつかのブロッキングはSSWが発生した後に出現するためである。特に、北太平洋域でのブロッキングはSSWの発生後に生じる傾向があることが知られている。

対流圏ブロッキングは、通常、成層圏惑星規模波の増幅をもたらす。しかし、Nishii et al.（2010）は、北西太平洋域でブロッキングが発生すると、成層圏で惑星規模波が減衰する傾向となることを示した。これは、ブロッキングと成層圏惑星規模波の活動度との関係は、ブロッキングの発生位置に依存するためと考えられている（Castanheira and Barriopedro, 2010; Woolings, 2010; Nishii et al., 2011）。また、これまでの研究では、この依存性は、気候学的な惑星規模波とブロッキングに伴うロスビー波との干渉効果がブロッキングの発生場所に依存するためであると説明している。

一方、成層圏循環変動が間接的に対流圏ブロッキングを引き起こす可能性も指摘されている。Shaw

and Perlwitz（2010）は、数値実験により、ブロッキングの発生頻度が成層圏における惑星規模波の伝播条件に依存することを示唆している。本研究では、成層圏が対流圏に及ぼす影響を明らかにするため、成層圏惑星規模波の鉛直構造の変化がブロッキング発生に及ぼす直接的影響に着目した解析を実施する。より具体的には、北太平洋ブロッキングの発生と成層圏惑星規模波の反射との関係をいくつかの事例解析により詳細に検討する。

2. データ

本研究では、JRA-25/JCDAS 再解析データセット（Onogi et al., 2007）を用いた。気候値は、1979年から2006年までの28年間の平均値で定義した。

ブロッキングを定義するため、以下のblocking index（Tibaldi and Molteni, 1990）を用いた。まず、各経度で、ブロッキングが発生しやすい緯度（ ϕ_0 ）の低緯度側と高緯度側の500 hPa 高度場傾度であるGHGLとGHGHを求める。それぞれは、

$$\text{GHGL} = Z(\phi_0) - Z(\phi_L) / (\phi_0 - \phi_L) \quad (1)$$

$$\text{GHGH} = Z(\phi_H) - Z(\phi_0) / (\phi_H - \phi_0) \quad (2)$$

と定義した。また、ここで

$$\phi_H = 80^\circ + \Delta,$$

$$\phi_0 = 60^\circ + \Delta,$$

$$\phi_L = 40^\circ + \Delta$$

であり、

$$\Delta = -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ.$$

のそれぞれの Δ についてGHGLとGHGSを求め、少なくとも一つの Δ について、

$$\text{GHGL} > 0 \quad (3)$$

かつ、

$$\text{GHGH} < -5\text{m / degree latitude} \quad (4)$$

となるとき、その経度でブロッキングが存在すると定義した。また、ブロッキングの強度を、NOAA Climate Prediction Center に従い、式（1）のGHGLで定義した。

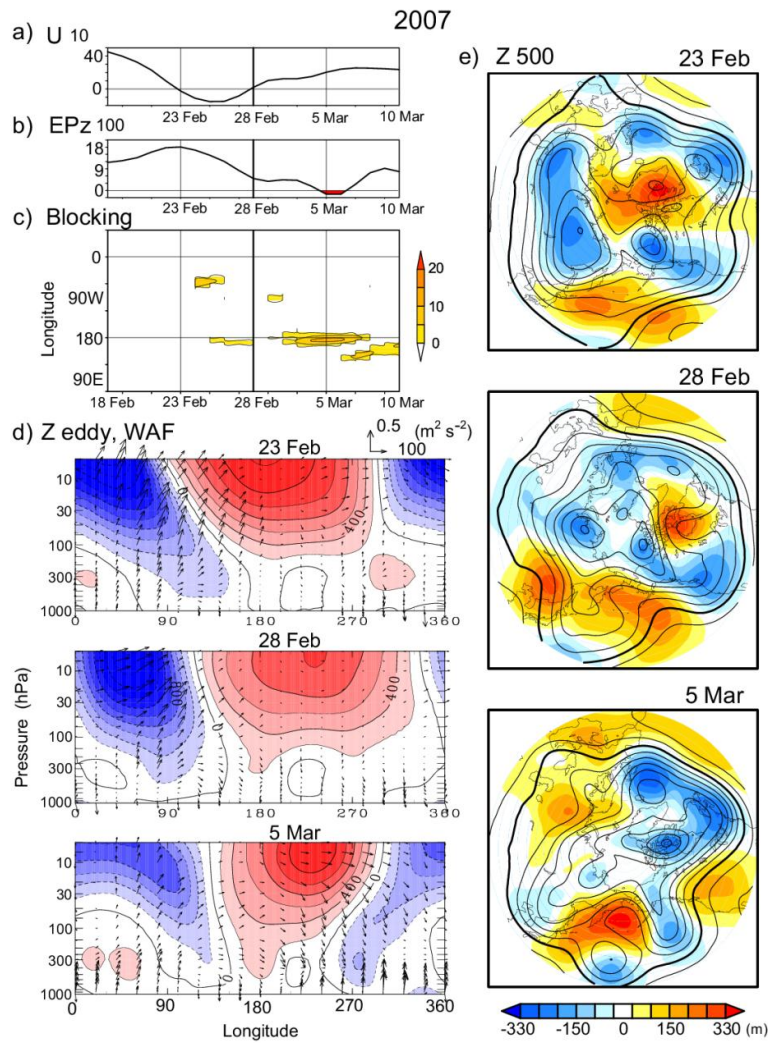


Fig. 1 (a) Time series of zonal-mean zonal wind at 10 hPa averaged over 60–70°N (unit: m s^{-1}). (b) Vertical component of E-P flux averaged over 45–75°N at 100 hPa (unit: 10^4 kg s^{-2}). Shading indicates negative values. (c) Longitude–time section of daily blocking strength (unit: m). (d) Height–longitude sections of three-day mean eddy geopotential height averaged over 60–70°N (contours, unit: m), and wave activity flux for wave 1 to 3 components (Plumb, 1985) for 23 February, 28 March, and 5 March 2007. The magnitude of Plumb’s flux is scaled by the inverse of the square root of the pressure. Flux scales are indicated by arrows near the right-hand top. Vertical lines in panels (a), (b), and (c) indicate the dates illustrated in (d). (e) Same as in (d), except for polar stereographic 500-hPa geopotential heights in the NH (contours are every 100 m with thick lines indicating 5600 m) and their anomalies from the climatology (color shading).

3. 結果

3.1 2007年3月の事例

この事例を用いて、Kodera et al. (2008) は成層圏で反射した惑星規模波が対流圏に与える影響を明らかにした。但し、彼らは波数1から3の惑星規模波成分のみについて吟味しているため、ブロッキングのような総観規模スケールの現象は解析されていない。以下では、全波数成分について解析を実施し、この事例において太平洋域でブロッキングが発生していたことを記述する。

まず、2007年3月において成層圏惑星規模波の伝播

と対流圏ブロッキングとの関連性を調べるため、Fig. 1aとFig. 1bに、北緯60度から70度で平均した10 hPa帯状風と、北緯45度から75度で平均した100 hPaにおけるE-Pフラックスの鉛直成分の時間変動を示す。一方、Fig. 1cに、北半球でのブロッキング強度の経度-時間変動を示す。これらの図より、成層圏の西風は、惑星規模波の上向き伝播が増大すると減速し、2月24日頃に北緯60度、10 hPaの帯状風は東風となり大規模SSWが発生したことが分かる。その後、成層圏惑星規模波の活動度は減衰し、2月28日頃に西風が回復する。そして、3月3日頃に日付変更線付近で北太平洋ブロッキングが発生する。すると、E-Pフラッ

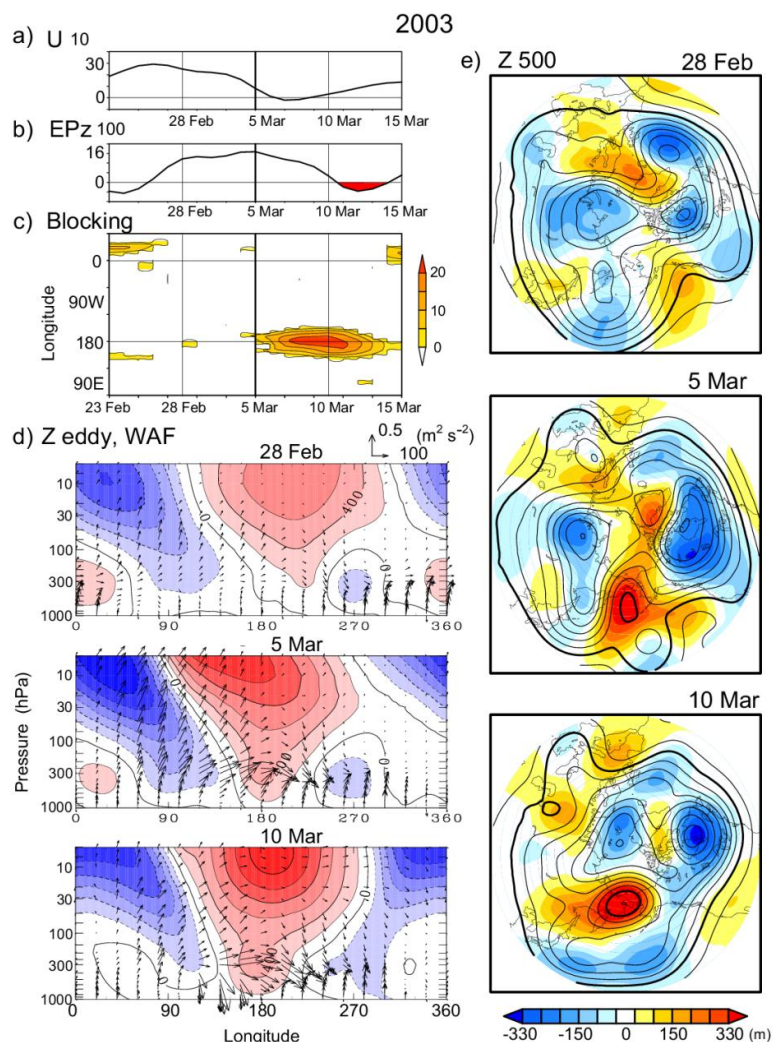


Fig. 2 Same as in Fig. 1, except for a blocking event in 2003. Panels (d) and (e) are for 28 February, 5 March, and 10 March 2003.

クスの鉛直成分は減少して、3月5日頃に負の値となる。

Fig. 1dに、北緯60度から70度で平均した3日平均の惑星規模波に伴う高度場偏差（東西非一様成分）を経度－高度断面で示す。また、惑星規模波の鉛直・東西伝播をPlumb (1985) の3次元E-Pフラックスを用いて示す。この図から、惑星規模波束はユーラシア大陸上を東向き、かつ上向きに伝播し、成層圏で反射され下方伝播していることが分かる。2月23日頃の、ユーラシア大陸上での上向き伝播の強化は、波の位相が西傾していることと対応している。一方、アメリカ大陸上での下向き伝播は3月5日頃に顕著となり、位相は高さとともに東に傾く。

500 hPa 高度場分布からこの期間における対流圏循環の時間変化を記述する (Fig. 1e)。2月23日頃に、気圧の峰がグリーンランド付近の北大西洋域に存在

するが、同じ頃、北太平洋域には明瞭な気圧の峰は存在しない。2月末から、北太平洋域において成層圏の気圧の峰は、西半球で惑星規模波の上方伝播が抑制されるのに伴って、対流圏へ下向きに延伸し始める。このことは、対流圏における北太平洋域での気圧の峰と、東部北アメリカ大陸上での気圧の谷の発達と対応している。3月初旬に、双極子型のブロッキングが北太平洋域の気圧の峰から発達し始める。但し、次節で示すように、北太平洋域でブロッキングが発達するには、高周波移動性擾乱との相互作用が重要な役割を果たしている (Nakamura et al., 1997)。一方、Fig. 1dより、日付変更線付近で発達するブロッキング高気圧は成層圏でのアリューシャン高気圧へと接続していることが分かる。このアリューシャン高気圧は、ヨーロッパ域で対流圏から上方伝播する惑星規模波束によって形成されることが知られて

いる (Hayashi, 1981)。この事例から、北太平洋域のブロッキングは、増幅する惑星規模波の峰と移動性の総観規模渦との相互作用により形成されると考えられる。次節では、この作業仮説を別の事例から検証していく。

3.2 2003年3月の事例

ここでは、Yamazaki and Itoh (2009) が、ブロッキングの維持に関する新しい力学理論である選択的渦吸収メカズム (Selective Absorption Mechanism; SAM) を実証するために解析した、2003年3月に発生した典型的な北太平洋ブロッキングイベントを調べることに、前節で提起した作業仮説の妥当性を吟味する。なお、彼らが提示したSAMでは、ブロッキング高気圧は、上流から移流してくる総観規模擾乱に伴う高気圧性循環のみを選択的に引き寄せ、吸収することにより、維持されると説明する。Fig. 1と同様の図表を用いて、Fig. 2にこの事例の時間発展を示す。

2002年/03年の冬季には、2003年1月17日に大規模SSWが発生している。このSSWの後、成層圏極渦は回復するが、2月末以降、惑星規模波の上方伝播によって、再び成層圏西風は減速し始める。3月初旬に、この上方伝播が抑制され始めると、北太平洋域でブロッキングが形成され始める。

Fig. 2dで示された高度場東西非一様成分の経度-緯度断面図でも、2007年の事例と同様の時間変化が見て取れる。すなわち、2月28日にユーラシア域で惑星規模波の上方伝播が増大し、3月初旬には成層圏極域が東風となる。この小規模SSWの後、惑星規模波は下部成層圏と対流圏内に捕捉されて東向きに伝播し、3月5日から10日にかけて、北アメリカ大陸上で下向きに伝播する。そして、成層圏で反射された波成分が支配的となり、3月11日には、E-Pフラックスの鉛直成分も負となる (Fig. 2b)。この事例においても2007年の事例と同様に、惑星規模波に伴う太平洋域の峰は発達しながら下方に延伸し、カナダ上空での谷の発達を伴いながら、それまで西傾していた北アメリカ大陸上の気圧の峰の位相は高さとともに東に傾くようになる。しかしながら、2007年の事例と比較すると、惑星規模波はより低高度で捕捉されている。ブロッキングが形成され始めると (Fig. 2e)、ブロッキングはYamazaki and Itoh (2009) が示したように、総観規模擾乱との相互作用を通じ維持されるようになる。

3.3 北西太平洋ブロッキング事例 (1995年)

Nishii et al. (2010) は、北西太平洋 (WP) ブロッキングが発生すると、気候学的惑星規模波とWPブロッキングで生じたロスビー波束とが干渉して、成層

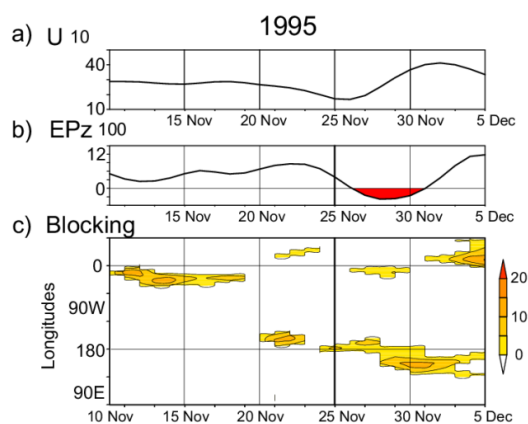


Fig. 3 Same as in Fig. 1a, 1b, and 1c, except for a blocking event in 1995. (a) Zonal-mean zonal wind. (b) Vertical component of E-P flux at 100 hPa averaged over 45–75°N. (c) Longitude-time section of daily blocking strength (unit: m). Vertical lines indicate the dates illustrated in Fig. 4.

圏惑星規模波が弱まるため、成層圏極域が寒冷化すると論じている。ここでは、彼らがその典型例として解析した1995年11月に発生した WP ブロッキング事例について、成層圏惑星規模波の反射という本論文で提示した文脈に従って解析を進める。

Fig. 3に、1995年11月10日から12月5日までの (a) 10 hPa での帯状風と (b) 100 hPaでのE-P フラックスの鉛直成分の時間変化と、(c) ブロッキング強度の経度-時間変化を示す。この図から、11月15日頃から、北大西洋域でのブロッキングに伴い、惑星規模波の上方伝播が徐々に増大することが分かる。そして、11月25日付近で惑星規模波の上方伝播が弱まるに従い、成層圏極域ジェットは強化する。その後、11月末に、E-Pフラックスの鉛直成分は負になり、惑星規模波が成層圏で反射していることが分かる。しかも、この時期に日付変更線付近でブロッキングが形成し始める。さらにその後、ブロッキングは次第に西進し、北西太平洋域で増幅する。このような過程により、ブロッキング発生領域が北大西洋域から北太平洋域へと遷移するのである。また、これに伴い、惑星規模波の上方伝播は、2003年や2007年の事例と同様に抑制される。

惑星規模波の反射と北太平洋でのブロッキング発生との関係はFig. 4からも確かめることができる。まず、500 hPa高度場 (Fig. 4b) を見ると、11月15日に北大西洋域でブロッキングが発達していることが分かる。このブロッキングは、ユーラシア・北大西洋域で上方伝播する惑星規模波束を形成する。11月20日頃には、上方伝播領域は主にシベリア域に存在する。そして、11月25日から30日にかけて、西半球側での位相線が高さとともに東に傾くようになり、

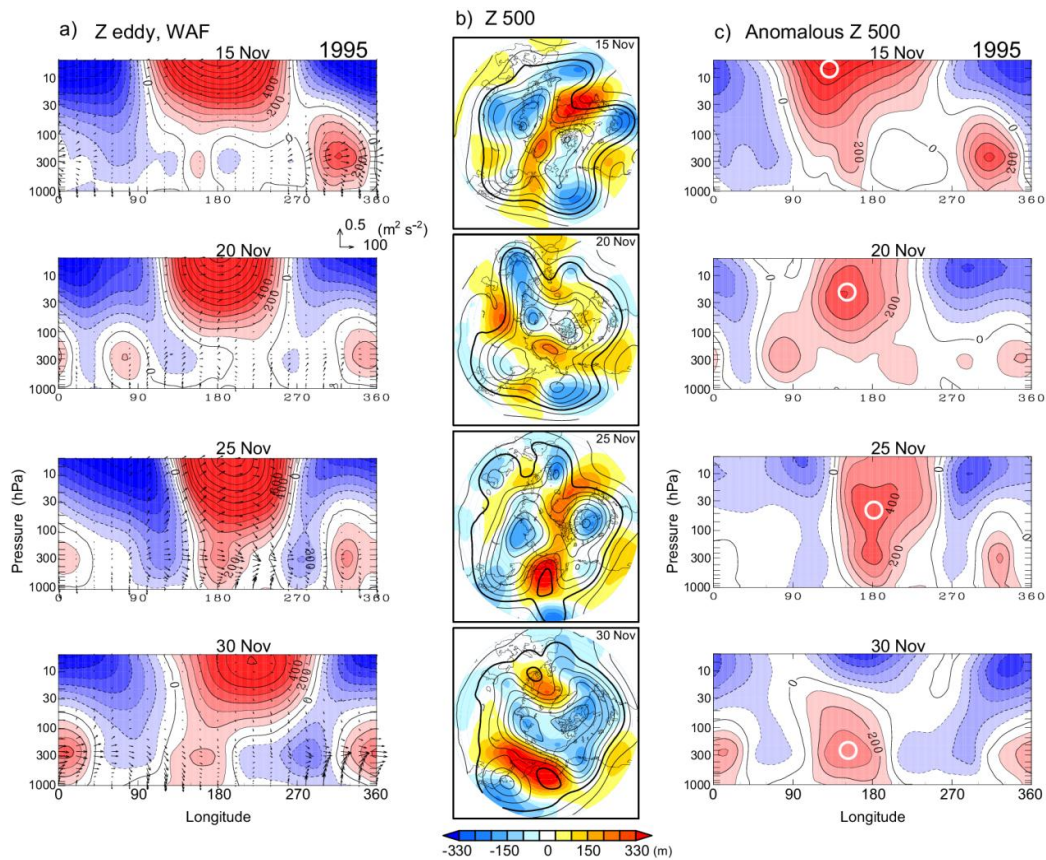


Fig. 4 (a) Height–longitude sections of three-day mean zonally asymmetric component of geopotential height (contours, unit: m) and Plumb’s wave activity flux of planetary waves averaged over 60–70°N for 15, 20, 25, and 30 November 1995, from top to bottom. (b) Same as in (a), except for 500-hPa geopotential heights (contours every 100 m) and their anomalies from the climatology (color shading). (c) Same as in (a), except for anomalous geopotential height from the climatology.

成層圏下層での鉛直伝播方向も下向きになる (Fig. 4a)。一方、成層圏から下方に延伸する北太平洋域の峰は、日付変更線付近で発達するブロッキングへと繋がっている。その後、このブロッキングは惑星規模波の構造の変化に伴い、シベリア域へと西進する。このように、このWP ブロッキングは、前節までで記載した2つの事例と同様に、惑星規模波の成層圏での反射と下部成層圏での捕捉に伴って形成し始めたことが確かめられる。

なお、同様の解析を2010年/11年の北半球冬季、2010年6月の南半球冬季についても行い、成層圏で反射した惑星規模波が対流圏ブロッキングの契機となっている事実を確認した。

4. 議論

最近の研究で、ブロッキングが発生する地域によって、ブロッキングと惑星規模波の活動度との関係に違いがあることが示されている。すなわち、北大

西洋–ヨーロッパ域でブロッキングが発達すると成層圏惑星規模波の振幅は増大するが、北太平洋域でブロッキングが出現すると、逆に減衰してしまう。この一見矛盾する関係は、これまで気候学的惑星規模波とブロッキングに伴い形成されるロスビー波束との干渉効果により説明されてきた (Nishii et al., 2010, 2011; Woolings, 2010)。但し、この枠組みでは、波束は気候場からの偏差として定義されることに注意すべきである。

しかしながら、この干渉という枠組みでは循環場の時間発展におけるいくつかの特徴を説明することが難しい。例えば、1995年11月の事例について、気候場からの偏差場の時間発展を見ると (Fig. 4c)、ブロッキングが北大西洋–ヨーロッパ域に位置するときには (11月15日頃)、偏差場は気候場とほぼ同じ鉛直構造を持っているが、ブロッキングが北太平洋域に出現し西進する11月末には、偏差場の鉛直構造は、気候場とは全く異なるだけでなく、その正偏差の中心は見かけ上、成層圏から対流圏に下方伝

播するように表現される (Fig. 4cでの白丸印)。一方、ブロッキングに対応する気圧の峰は、高さとともに西傾することから (11月30日)、偏差は上向きに伝播すると予期される。このため、見かけ上現れる偏差場の下向き伝播を説明するのは困難である。他方、11月末にE-Pフラックスの鉛直成分が負となる事実 (Fig. 3b) も干渉という枠組みでは説明が困難である。これは、気候場の惑星規模波とブロッキングで生ずるロスビー波束はどちらも上向き伝播することを考慮すると、両者の干渉によって、全E-Pフラックスが減少することは説明可能であるが、負の値となることを直感的に理解するのは大変困難なためである。さらに、干渉の枠組みでは、11月末に (Figs. 4a, 4b) 北太平洋域のブロッキングと同時に、カナダ上空で惑星規模の気圧の谷が発達することを説明するのは困難である。このカナダ域の気圧の谷の存在は、成層圏で惑星規模波が反射していることを示すもう一つの証拠である。このように、成層圏極域が昇温した後、北太平洋域でブロッキングが発生する事象を理解するには、成層圏での惑星規模波の反射と捕捉という枠組みがより適切であると考えられる。

5. まとめ

本研究において、成層圏惑星規模波の鉛直構造の変化を契機として北太平洋域でブロッキングが出現する事例のいくつかを解析した。その結果、成層圏惑星規模波の反射とブロッキング形成の関係は以下のようにまとめられる。

(1) 北大西洋-ヨーロッパ域でのブロッキングの発達によって、ユーラシア域から惑星規模波束の鉛直伝播の強化が生じる。この上向き伝播に伴い、成層圏でシベリア上空に気圧の谷と、アリューシャン上空に気圧の峰が形成される。

(2) 惑星規模波が増幅すると成層圏の帯状風分布が変化し、それによって、惑星規模波が対流圏から上向きに伝播する傾向が抑制される。特に、波数2, 3成分は成層圏下部と対流圏に捕捉される。この上向き伝播の抑制によって、惑星規模波の位相はより順圧的となる。この鉛直構造の変化は、アリューシャン高気圧の下方への延伸、及び、シベリア上空の気圧の谷の西進によって実現される。一方、アリューシャン上空での気圧の峰の発達は、その地域でブロッキングが形成するきっかけを与え、その後、移動性総観規模擾乱の活動性が高いと、両者の相互作用によりブロッキングが発達する。

(3) さらに、惑星規模波の上方伝播が抑制されると、惑星規模波は下方へと伝播する傾向を持つ。特に、北アメリカ大陸上でその傾向は顕著となる。この傾

向は、カナダ上空での気圧の谷の発達と、シベリア上空での低気圧性偏差、さらに北太平洋域での高気圧性偏差の西進と対応する。

(4) もし、惑星規模波の上方伝播が抑制されたために、極域成層圏が寒冷化し西風が再構築されると、惑星規模波は再び成層圏へ上向きに伝播できるようになり、上記の一連のプロセスが繰り返される。このようにして、2010年/11年の冬季のように、成層圏バッシレーションサイクルが出現する。

参考文献

- Bancalá, S., Krüger, K. and Giorgetta, M. (2012): The preconditioning of major sudden stratospheric warmings. *J. Geophys. Res.*, Vol. 117, D04101, doi:10.1029/2011JD016769.
- Castanheira, J. M., and Barriopedro, D. (2010): Dynamical connection between tropospheric blockings and stratospheric polar vortex. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 37, L13809, doi:10.1029/2010GL043819.
- Hayashi, Y. (1981): Vertical-zonal propagation of a stationary planetary wave packet. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 38, pp. 1197–1205.
- 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.
- Labitzke, K. (1965): On the mutual relation between stratosphere and troposphere during periods of stratospheric warmings in winter. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 4, pp. 91–99.
- Martius, O., Polvani, L. M. and Davies, H. C. (2009): Blocking precursors to stratospheric sudden warming events. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 36, L14806, doi:10.1029/2009GL038776.
- Mukougawa, H., Sakai, H. and Hirooka, T. (2005): High sensitivity to the initial condition for the prediction of stratospheric sudden warming. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, L17806, doi:10.1029/2005GL022909.
- Mukougawa, H., Hirooka, Y., Ichimaru, T. and Kuroda, Y. (2007): Hindcast AGCM experiments on the predictability of stratospheric sudden warming. *Nonlinear Dynamics in Geosciences*, Tsonis, A. A. and Elsner, J. B., eds., Springer-Verlag, New York, pp. 221–233.
- Nishii, K., Nakamura, H. and Orsolini, Y. J. (2010): Cooling of the wintertime Arctic stratosphere induced by the Western Pacific teleconnection pattern. *Geophys.*

- Res. Lett., Vol. 37, L13805,
doi:10.1029/2010GL043551.
- Nishii, K., Nakamura, H. and Orsolini, Y. J. (2011): Geographical dependence observed in blocking high influence on the stratospheric variability through enhancement and suppression of upward planetary-wave propagation. *J. Climate*, Vol. 24, pp. 6408–6423.
- Plumb, R. A. (1985): On the three dimensional propagation of stationary waves. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 42, pp. 217– 229.
- Onogi, K., et al. (2007): The JRA-25 reanalysis. *J. Meteorol. Soc. Japan*, Vol. 85, pp. 369– 432.
- Shaw, T. A. and Perlwitz, J. (2010): The impact of stratospheric model configuration on planetary scale waves in northern hemisphere winter. *J. Climate*, Vol. 23, pp. 3369–3389.
- Taguchi, M. (2008): Is there a statistical connection between stratospheric sudden warming and tropospheric blocking events? *J. Atmos. Sci.*, Vol. 65, pp. 1442– 1454.
- Tibaldi, S. and Molteni, F. (1990): On the operational predictability of blocking. *Tellus*, Vol. 42A, pp. 343– 365.
- Tung, K. K., and Lindzen, R. S. (1979): A theory of stationary long waves. Part I: A simple theory of blocking. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 107, pp. 714–734.
- Yamazaki, A., and Itoh, H. (2009): Selective absorption mechanism for the maintenance of blocking. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 36, L05803,
doi:10.1029/2008GL036770.
- Woollings, T., Charlton-Perez, A. J., Ineson, S., Marshall, A. G. and Masato, G. (2010): Associations between stratospheric variability and tropospheric blocking. *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, D06108,
doi:10.1029/2009JD012742.