

初冬におけるブロッキングと成層圏突然昇温との関連

風本 圭佑*・向川 均

*京都大学大学院理学研究科

要 旨

初冬における対流圏ブロッキングと成層圏突然昇温(SSW)との力学的関係を明らかにするため、JRA-25再解析/JCDASデータセットを用いて、複数の事例について解析を行った。また、2001年12月に生じたSSWについて、気象研究所/気象庁統一大気大循環モデルを用いた予報実験結果についても解析した。その結果、初冬のSSW発生と、予め気候場に比べ振幅の大きな波数1成分が存在するときに北大西洋域で発生する顕著なブロッキングとが力学的に関連することが示された。それは、惑星規模波とブロッキングとの干渉効果により、波数1に伴う波活動度の上向きフラックスがある閾値を超えて増大するためである。

キーワード：ブロッキング，成層圏突然昇温，惑星規模波

1. はじめに

冬の成層圏循環における最も顕著な現象である成層圏突然昇温 (Stratospheric Sudden Warming; SSW) は、Matsuno (1971) により、対流圏から上方伝播する大振幅の惑星規模波と成層圏帯状流との相互作用で基本的には理解できることが示されている。しかしながら、SSW の発生時にしばしば観測される、対流圏における惑星規模波の増幅メカニズムを矛盾なく説明する理論は依然として存在しない (Andrews et al., 1987)。しかし、SSW 発生時にしばしば対流圏においてブロッキングが出現することや、ブロッキングが惑星規模波の励起に関連する(e.g. Andrews et al., 1987) ため、ブロッキングは、対流圏における惑星規模波の増幅と関連していると考えられている。

Quiroz (1986) は、1981/82 年から 1984/85 年の 11 月から 3 月に発生したブロッキングと SSW とを比較し、統計的にブロッキングは、SSW に平均して約 3.5 日先行して出現することを示している。Mukougawa et al. (2005, 2007) (以下では M05, M07) は、気象庁一ヶ月予報結果及び大気大循環モデルを用いた予報実験結果を用いた 2001 年 12 月末に発生した波数 1 型の SSW の解析から、北大西洋域のブロッキングに伴う帯状風偏差や高度場偏差が有意に SSW と関連していることを示

している。一方、Taguchi (2008) は、統計的手法を用いて、過去約 50 年間に発生した北半球のブロッキングの発生時期と SSW の発生時期との間には統計的に有意な関係がないことを示している。

このように、Quiroz (1986) や Taguchi (2008) は、ブロッキングと SSW との関係を統計的に解析しているが、個々のブロッキングと SSW との関係については詳しく解析されていない。また、ブロッキングと SSW との間に関連が有るとしても、SSW を伴うブロッキングと、伴わないブロッキングに相異点があるのかどうか不明である。さらに、ブロッキングが惑星規模波の励起とどのように関係しているのかも依然として不明である。

そこで、本研究では、個々のブロッキングと SSW との関係を事例解析により調べ、対流圏ブロッキングと SSW との力学的関係を明らかにすることを目的とした。また、以下では初冬 (11 月, 12 月) の事例について解析を行う。これは、初冬では対流圏から成層圏への惑星規模波の伝播は 1 月以降に比べて少なく、成層圏における波活動度も小さいため、対流圏ブロッキングが成層圏循環に及ぼす影響を解析することが、1 月以降と比べ容易になると考えられるためである。具体的には、以下の 3 事例について詳細な解析を行った。

事例 a：2001 年 12 月に北大西洋域で顕著な対流圏ブロッキングが発生した直後に波数 1 型の SSW が発生した。

事例 b：1998 年 12 月に事例 a と同じ経度で弱いブロッキングが発生後、波数 1 型の SSW が発生した。

事例 c：1989 年 12 月の事例で、事例 a と同様に北大西洋域で顕著なブロッキングが発生したが SSW は生じなかった。

また、上記 3 事例の解析結果を検証するために、1983 年 12 月末に北太平洋域で顕著なブロッキングが発生したが、SSW は生じなかった事例 d の解析も行った。さらに、M07 で示されている、事例 a についての一ヶ月アンサンブル予報実験結果の解析も行った。

2. データと解析手法

2.1 データ

JRA-25 再解析/JCDAS データセットの日平均値を用いた。期間は 1979 年から 2006 年までの 11 月から 1 月、データは $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ の緯度 - 経度格子点上で与えられる。また、鉛直層数は 1000hPa から 0.4hPa までの 23 層である。気候値には、1979 年 1 月から 2006 年 12 月の日々の平均値に対し、60 日をカットオフ周期とする Lanczos low-pass filter (121 項) (Duchon, 1979) を施した値を使用した。移動性擾乱の影響を取り除くため、以下では、8 日をカットオフ周期とする Lanczos low-pass filter (17 項) を施した値を用いた。

また、気象研究所／気象庁統一大気大循環モデルを用いた一ヶ月アンサンブル予報実験結果についても解析を行った(M05, M07)。2001/2002 年の冬季には、気象庁一ヶ月アンサンブル予報は毎週水曜日と木曜日の 2 回、摂動を加えない初期値と、12 個の初期摂動を含む初期値を用いて実施された(水曜と木曜それぞれ 13 メンバー)。予報実験結果の検証には、JRA-25 再解析/JCDA データセットの 1200UTC の値を使用した。

2.2 ブロッキングイベントの検出

ブロッキングの定義として Barriopedro et al. (2006) (以下では B06) の定義を用いた。B06 に従い、ブロッキングの検出のみ $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 緯度 - 経度格子点値を用いた。まず、北半球の 500hPa 高度場を用いて、以下のように定義される高度場の南北勾配 GHGS(中緯度)と GHGN(高緯度)を毎日、各経度で計算する：

$$GHGS = \frac{Z(\lambda, \phi_0) - Z(\lambda, \phi_S)}{\phi_0 - \phi_S}, \quad (1)$$

$$GHGN = \frac{Z(\lambda, \phi_N) - Z(\lambda, \phi_0)}{\phi_N - \phi_0}, \quad (2)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \phi_N &= 77.5^\circ N + \Delta, \\ \phi_0 &= 60.0^\circ N + \Delta, \\ \phi_S &= 40.0^\circ N + \Delta, \\ \Delta &= -5.0^\circ, -2.5^\circ, 0^\circ, 2.5^\circ, 5.0^\circ, \end{aligned} \quad (3)$$

である。 $Z(\lambda, \phi)$ は緯度 ϕ と経度 λ における 500hPa 高度を示す。ここではまず、

$$\begin{aligned} GHGS &> 0, \\ GHGN &< -10 \text{ (m/deg.)}, \\ Z(\lambda, \phi_0) - [Z(\phi_0)] &> 0, \end{aligned} \quad (4)$$

で与えられる条件が、少なくとも一つの Δ について満たされたならば、毎日、各経度でブロッキングが発生していると判断した。式(4)で、 $[Z(\phi_0)]$ は緯度 ϕ_0 で帯状平均した 500hPa 高度である。

次に、ブロッキングの出現頻度の高い領域である西経 80 度から東経 40 度の北大西洋域と、東経 140 度から西経 100 度の北太平洋域 (Lupo and Smith, 1995) のそれぞれの領域において、連続する経度 12.5 度以上で条件(4)を満たしながら、5 日以上持続したブロッキングを、ブロッキングイベントと定義した。また、各領域でブロッキングではない日が 3 日間続けばブロッキングイベントが終了したと判断した (B06)。

それぞれのブロッキングイベントの強さの指標として、各ブロッキングイベント期間中の各領域における 500hPa 高度場の気候値からの偏差の極大値を用いた (Nakamura et al., 1997)。このようにして、1979 年から 2005 年までの 11 月と 12 月で、北大西洋域で 35 イベント、北太平洋域で 20 イベント検出した。

2.3 SSW イベントの検出

本研究では、WMO の定義を用いて、SSW イベントの検出を行った。この WMO の定義では、10hPa の東西平均場から得られる次の 4 つの条件を用いる (e.g. Inatsu et al., 2007; McGuirk and Douglas, 1988)。(A) 北緯 85 度の帯状平均温度 (T) が北緯 60 度の T よりも高い日が 5 日以上持続する。(B) 北緯 85 度の T が一週間以内に 25K 以上昇温する。(C) 北緯 65 度の帯状平均風 (U) が西風から東風に逆転する。(D) 30 日以内に、その U が東風からもとの西風 (ただし 2 m/s 以上) に戻る。これら (A), (B), (C), (D) のすべての条件を満たすイベントを

大規模昇温 (major warming), (A)のみ満たし, (B), (C), (D)のすべてを満たさないイベントを小規模昇温 (minor warming), (A), (B), (C)を満たし, (D)を満たさないイベントを最終昇温 (final warming) と定義する。

本研究では, 初冬(11月, 12月)に発生した大規模昇温のみを解析対象とした。その結果, 1979年から2005年までの11月と12月で3つのSSWイベントを検出した(1987年12月, 1989年12月, 2001年12月)。

3. 解析結果

3.1 事例の抽出

SSW イベントの検出を行った結果, 1998年と2001年のイベントは静穏な状態から昇温していたのに対し, 1987年のイベントでは, 昇温直前に小規模な昇温を伴っていた(図略)。このため, 対流圏から上方伝播してきた惑星規模波が成層圏循環に与える影響を解析することが容易になると考えられる事例a(2001年)と事例b(1998年)のSSWイベントについて詳細に解析を行った。

2001年の事例aでは, SSW発生前に, 持続期間が32日(11/25~12/26; 35イベント中2番目の長さ), 強さが480m(12/20に極大; 35イベント中3番目の強さ)という顕著なブロッキングが北大西洋域で発生していた。一方, 1998年の事例bでは, SSW発生前に, 持続期間5日(11/28~12/2), 強さ290m(12/2に極大: 35イベント中32番目)の弱いブロッキングが北大西洋域で発生していた。

また, SSWを伴うブロッキングと, 伴わないブロッキングの違いについて詳しく調べるため, 事例aと事例bと同様に北大西洋域でブロッキングが発生したが, SSWは発生しなかった事例についても解析を行った。この事例として, 事例aのブロッキングイベントと同程度の持続期間と強さを持つ, 1989年12月に北大西洋域で発生したブロッキングイベント(事例c)について解析を行った。1989年の事例cでは, 北大西洋域で発生したブロッキングイベントの持続期間は36日(11/13~12/18)で, 強さは400m(11/23に極大; 35イベント中16番目)であった。このブロッキングイベントの持続期間は, 北大西洋域で発生した全ブロッキングイベントの中では最長である。

3.2 事例の比較

まず, 3事例の概観を示す。Fig. 1は10hPa, 北緯80度におけるTの時間変動を示す。SSWが発生した事例a(実線)と事例b(一点鎖線)では, ブロッキング発生後,

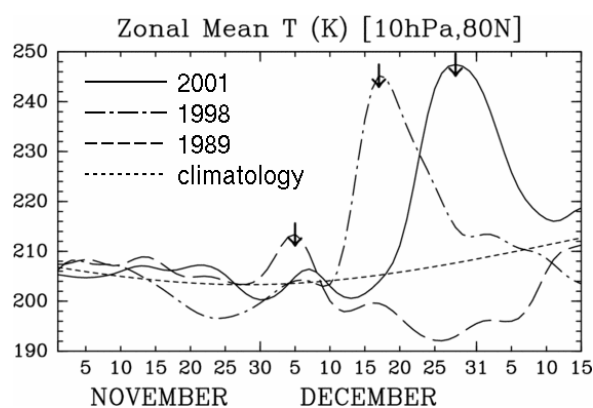


Fig. 1 Time variation of 10hPa T at 80N from 1 Nov through 15 Jan for Case a (solid line), Case b (dash-dotted line), Case c (broken line), and the climatology (dotted line). Arrows denote the peak day when T attains maximum.

数日の間に温度が約40度上昇し, 2001年12月28日, 1998年12月17日に温度が極大となった。しかし, 1989年の事例c(破線)では事例aやbのような顕著な昇温は生じない。Fig. 2に, この10hPa, 北緯80度のTのピーク時(Fig. 1の↓)における10hPa高度場を示す。事例a(Fig. 2a)と事例b(Fig. 2b)では, 波数1の増幅によって, 波数1型のSSWが発生していることがわかる。但し, 波数1の位相は両者で異なっている。一方, 事例c(Fig. 2c)では, 低気圧性の極渦が依然として強く, 極域の温度も低いままである。Fig. 2で示されたようにSSWが発生した事例aやbと, SSWが発生しなかった事例cとでは, 対流圏における波数1成分の増幅に明瞭な違いがあることが予期される。

次に, SSW発生重要な要因である対流圏から成層圏への波活動度の鉛直伝播の違いを調べる。Fig. 3に, 北緯50度から70度で平均した, 300hPaにおける波数1に伴う波活動度の鉛直伝播を表現するE-P fluxの鉛直成分(F_z)の時間変動を示す。SSWが発生した事例a(実線)と事例b(一点鎖線)では, SSWの発生前に, F_z が, その標準偏差の2倍を大きく越える日が約10日持続していることがわかる。この特徴は100hPaでも同様に認められた(図略)。このことは, Polvani and Waugh (2004)の結果と整合的である。一方, SSWが発生しなかった事例c(破線)では, このような特徴はない。

次に, 11月1日から12月31日の期間で, 北緯50度から70度で平均した100hPaにおける波数1に伴う F_z のピーク期(事例aは2001年12月16日, 事例bは1998年12月2日, 事例cは1989年11月20日)付近に注目して, 3事例の振舞いの違いを比較する。

Fig. 4は, このピーク期の300hPa高度場を示す。3事例とも北大西洋域にブロッキングが存在している。事例a(Fig. 4a)では, 明瞭なΩ型のブロッキングがイ

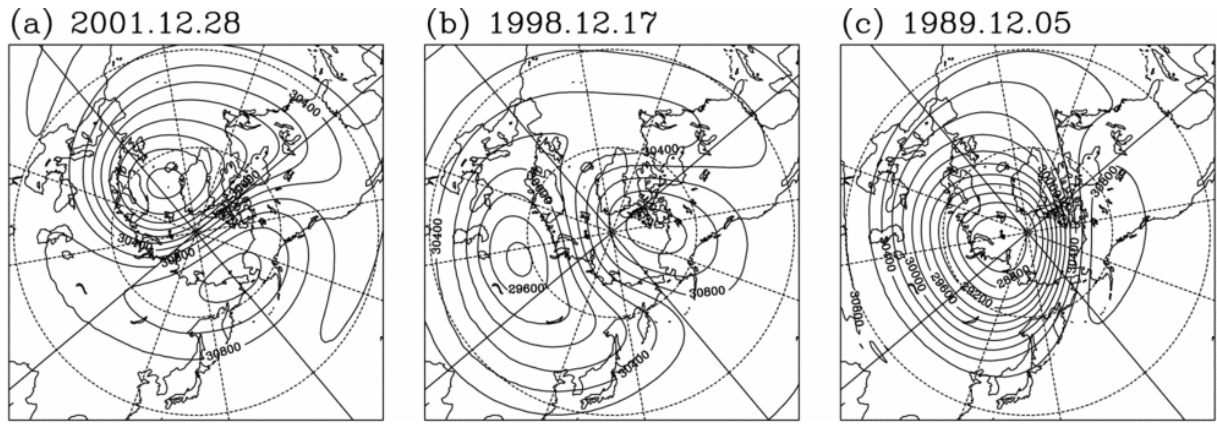


Fig. 2 10-hPa height field (m) on the peak day of 10hPa T at 80N for (a) 2001, (b) 1998, and (c) 1989. Contour interval is 200 m.

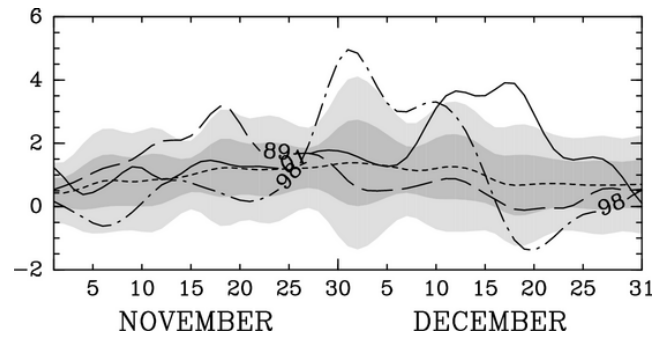


Fig. 3 Time variation of zonal wave number 1 (WN1) E-P flux ($\times 10^5 \text{ kg/s}^2$) at 300hPa averaged from 50N through 70N for Case a (solid line), Case b (dash-dotted line), Case c (broken line), and climatology (dotted line). The heavy (light) shades indicate ± 1 (± 2) standard deviation.

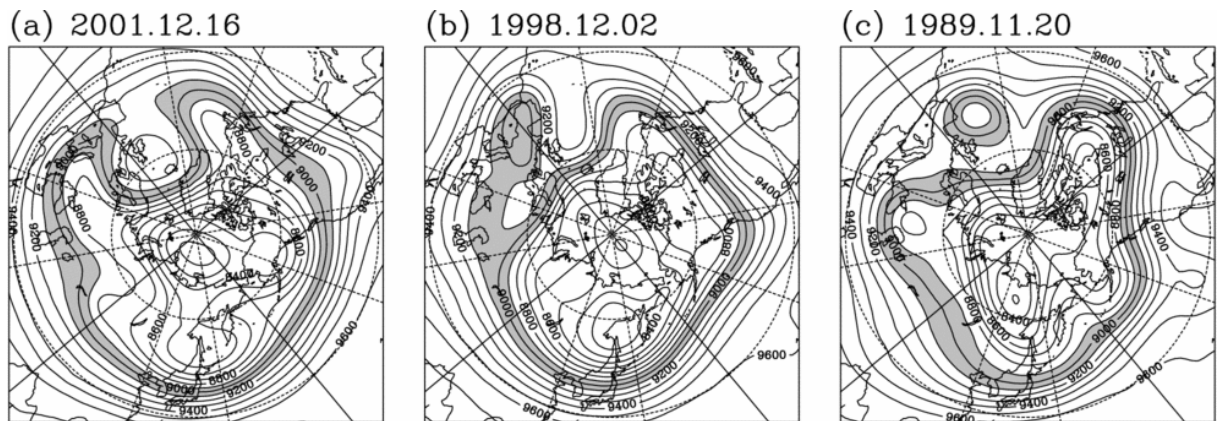


Fig. 4 300-hPa height field (m) on the peak day when F_z associated with WN1 component at 100hPa averaged from 50N through 70N attains maximum for (a) 2001, (b) 1998, and (c) 1989. Contour interval is 100 m.

ギリス付近に存在する。事例 b (Fig. 4b) のブロッキングは、他の事例に比べかなり弱く、持続期間も短い。一方、SSW が発生した事例 a と b では、波数 1 成分が卓越している (Fig. 4a,b)。SSW が発生しなかった事例 c では、アメリカ東岸でリッジが張り出し、北緯 60 度付近の緯度円に沿って波数 2 成分が卓越していることがわかる (Fig. 4c)。

以上のことは、Fig. 5 から確認できる。Fig. 5 は、北緯 50 度から 70 度で平均した東西平均からの高度場偏差の経度-高度断面を示す。事例 a (Fig. 5a) と事例 b (Fig. 5b) では、対流圏から成層圏まで波数 1 成分が卓越し、その位相は高度とともに西に傾いている。これは、惑星規模波が上向きに伝播していることを示している。また、対流圏ではブロッキングに対応する正の高度場偏差が北大西洋域に存在する。しかし事例 c (Fig. 5c) では、対流圏で波数 2 成分が卓越し、位相は鉛直に立っている。このため、1989 年の事例では惑星規模波の上向き伝播が弱く、SSW が発生しなかったと考えられる。以上の比較から、SSW の発生には波数 1 成分が増幅し、その位相が西傾することが重要と考えられる。

一方、惑星規模波の伝播は U の分布にも依存するため、 U の分布は SSW の発生に重要な影響を与えている可能性がある。そこで各事例について、300hPa、北緯 50 度から 70 度で平均した波数 1 に伴う F_z のピーク期付近における U 、及び波数 1 に対する refractive index の子午面分布を調べた。しかしながら、3 事例に大きな違いはみられなかった (図略)。この比較から、SSW の発生には、波の伝播特性の違いよりも、対流圏での波数 1 成分の持続的な励起が重要であることが示唆される。

3.3 ブロッキングと波の励起

次に、ブロッキングと波数 1 の励起との関係性を調べるために、8 日の low-pass filter を施した場 Z を、60 日の low-pass filter を施した場 Z_B とそれからの偏差場 $Z_A (= Z - Z_B)$ に分けて事例 a について解析を行った (Fig. 6)。ブロッキングは長期間の平均操作を伴う Z_B では不明瞭 (Fig. 6b) であるため、 Z_B はブロッキングにとっての「基本場」と考えることができる。一方、 Z_A ではイギリス付近に明瞭な高気圧性偏差が存在するため、 Z_A はブロッキングに伴う偏差場を表現していると考えられる (Fig. 6c)。

Fig. 7 に、北緯 50 度から 70 度で平均した東西平均からの高度場偏差の経度-高度断面を示す。Fig. 7 上、7 中、7 下は、それぞれ、300hPa における波数 1 に伴う F_z が標準偏差の 2 倍を越えた日 (2001 年 12 月 11 日)、 F_z のピーク期 (2001 年 12 月 17 日)、ピーク期の 6 日後の高度場偏差を示す。まず、Fig. 7 右の等値線で示さ

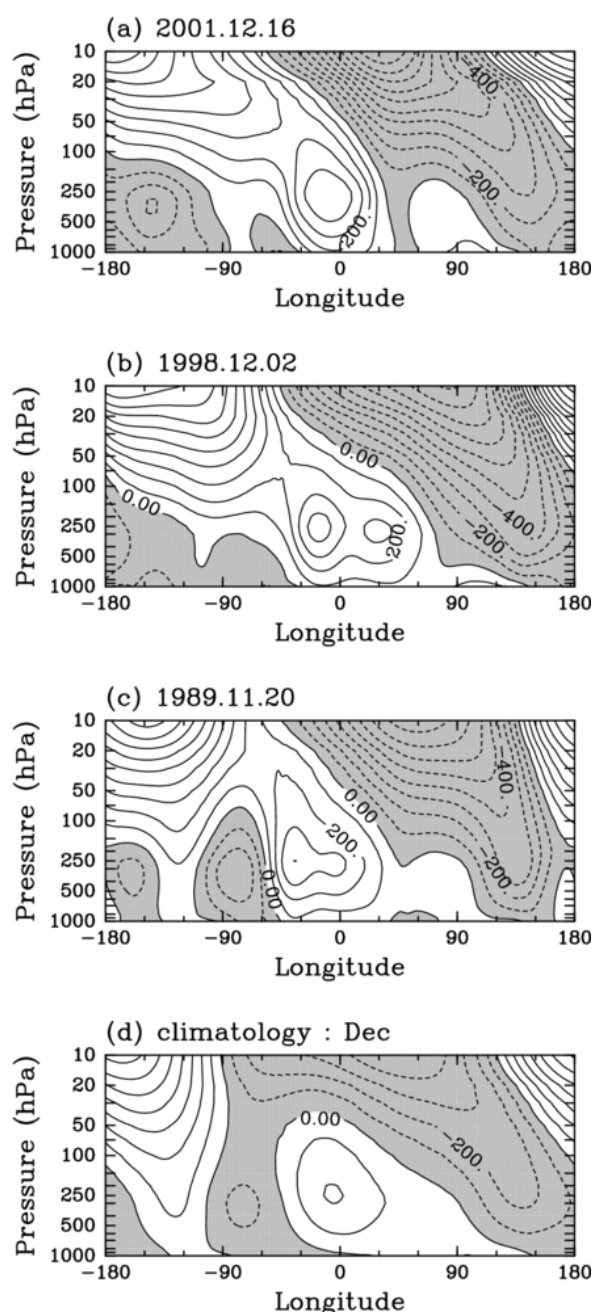


Fig. 5 Longitude-height cross section of eddy geopotential height averaged from 50N through 70N on peak day when F_z associated with WN1 component attains maximum. (a) 2001, (b) 1998, (c) 1989, and (d) climatology. Contour interval is 100 m.

れた Z_B の波数 1 成分の位相は高度とともに西に傾いていることがわかる。一方、300hPa における Z_A の北大西洋域でのリッジは、11 日には、基本場 Z_B のリッジの東側に位置している (Fig. 7 右上)。さらに、ピーク期の 17 日には、 Z_B のリッジとほぼ同位相かやや西側に Z_A のリッジが存在する (Fig. 7 右中)。この 11 日から 17 日にみられたブロッキングの西進と対応するように、

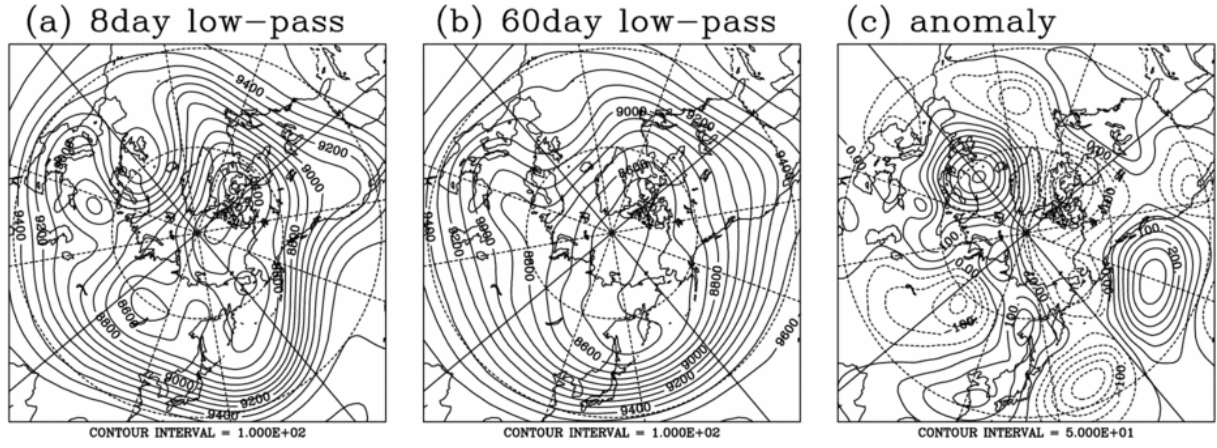


Fig. 6 300-hPa height field of Z (a), Z_B (b), and Z_A (c) on the first day when WN1 F_z at 300hPa exceeds +2 standard deviation. Contour intervals are 100m for (a) and (b), 50m for (c).

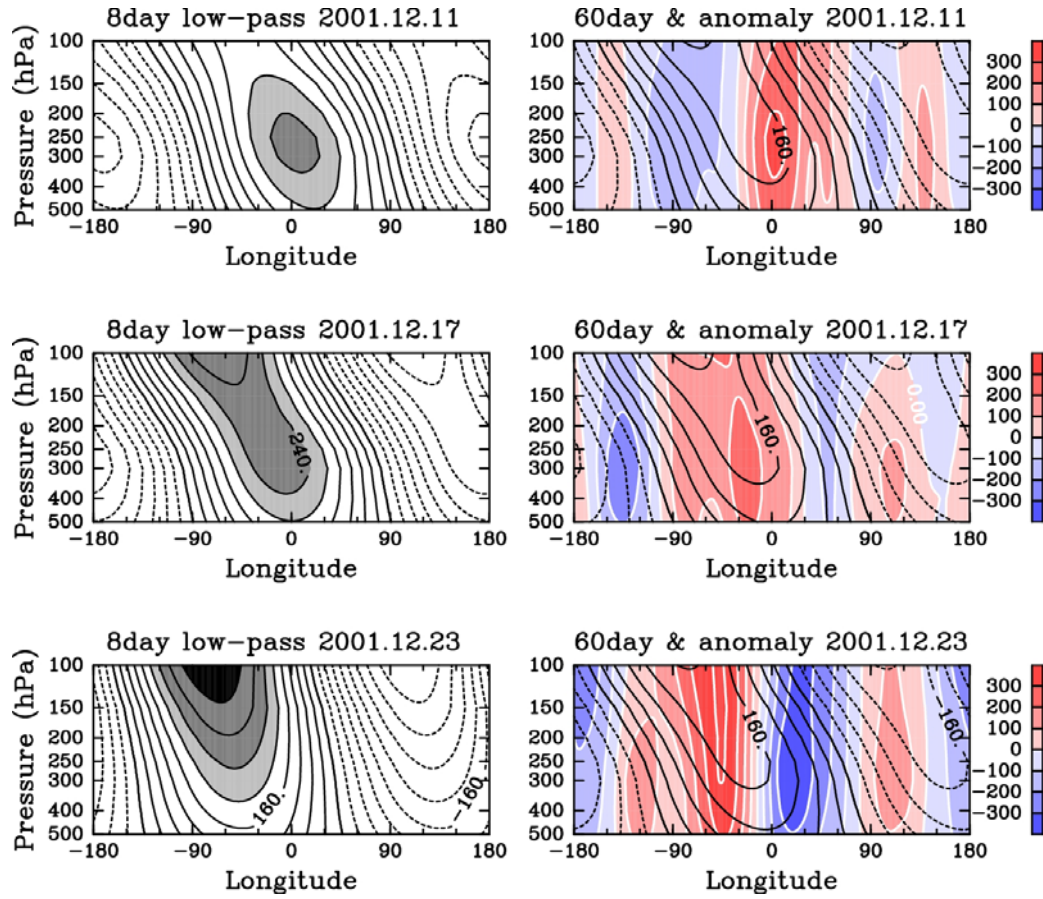


Fig. 7 Longitude-height cross section of eddy geopotential height field averaged from 50N through 70N on 11 Dec 2001 (top), 17 Dec. 2001 (middle), and 23 Dec. 2001 (bottom). Left panels show Z field of WN 1 component (contour interval is 40 m and region larger than 200m is shaded). Right panels indicate Z_B of WN1 component by contours with an interval of 40m, and Z_A by shades as shown by the convention to the right.

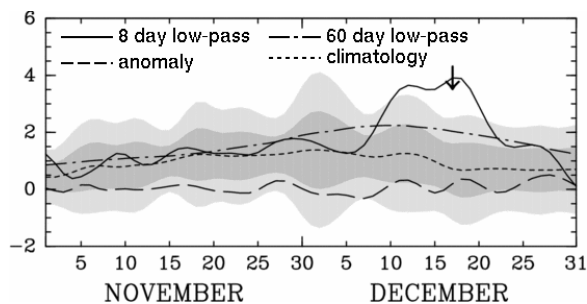


Fig. 8 Time variation of WN1 Fz ($\times 10^5 \text{ kg/s}^2$) at 300hPa averaged from 50N through 70N associated with Z (solid line), Z_B (dash-dotted line), Z_A (broken line), and climatology (dotted line). The heavy (light) shades indicate ± 1 (2) standard deviation. Arrow denotes the peak day when WN1 Fz with Z attains maximum.

Zの波数1成分が増幅している(Fig.7左)。このことは、波数1の停滞性擾乱に対してブロッキングが西進することで、波数1のFzが増大し、成層圏への波活動度の伝播が強化したことを意味している。一方、ピーク6日後の23日には、 Z_A でみた北大西洋域のリッジは、さらに西進して西経50度付近に位置し、波数1の位相は鉛直に立つ(Fig.7左下)。このとき、波数1の波活動度の上方伝播も弱くなる。以上のことは、波数1の停滞性擾乱の振幅や位相の傾きの時間発展は、波数1の停滞性擾乱とブロッキングとの相対的位置関係によって決まっていることを示唆している。

次に、Fig.8に、Z、 Z_B 、 Z_A それぞれの、300hPaにおける北緯50度から70度で平均した波数1に伴うFzの時間変動を示す。Z(実線)のピーク日(12月17日)において、 Z_B に伴うFz(一点鎖線)の大きさはZに伴うその52%を説明するのに対し、ブロッキングと対応する Z_A に伴うFz(破線)の大きさはZの5%しかない。このため、両者の合計は、もとの場であるZ($=Z_B+Z_A$)に伴うFzよりも43%も小さい。このことは、 Z_B と Z_A とが重なり干渉する線型干渉効果が、波数1に伴うFzの増大に大変重要であることを示唆している。

以上のことは、事例bにおいても示される。一方、事例cでは、基本場の波数1成分の振幅が事例aやbと比べ小さいため、北大西洋域でブロッキングが発生してもFzは増大しない。このため、事例cではSSWが生じなかったと考えられる。従って、初冬におけるSSWの発生には、対流圏において、ある程度増幅した波数1成分が存在するときに、北大西洋域で持続性の高い顕著なブロッキングが発生し、波数1成分のリッジの下流側から上流側へゆっくりブロッキングが西進することが重要と考えられる。

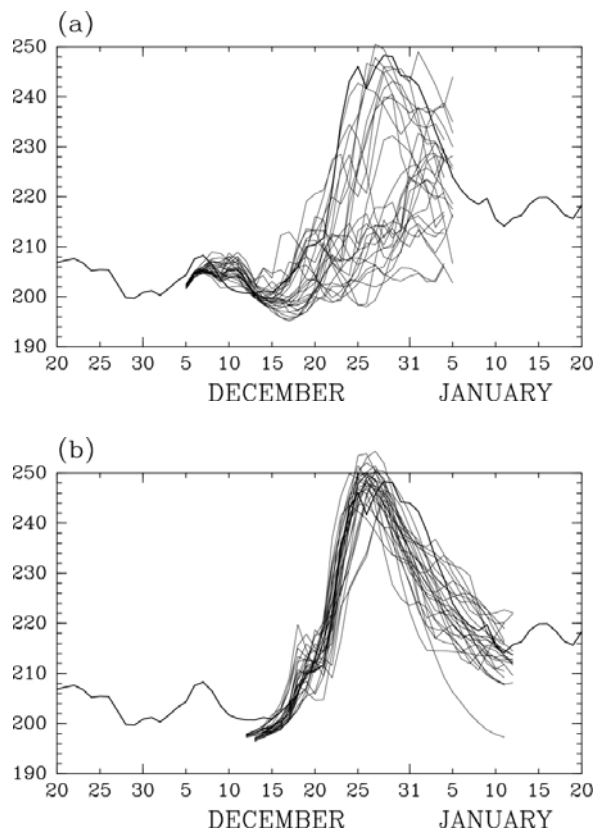


Fig. 9 Time variation of 10hPa T at 80N from 20 Nov. 2001 through 20 Jan. 2002 for the analysis (thick solid lines), and for MRI/JMA GCM hindcast (thin solid lines) starting from 5 and 6 Dec. 2001 (a), and 12 and 13 Dec. 2001 (b).

3.4 予報実験結果を用いた解析

ここでは事例解析から得られたSSWとブロッキングとの関係を吟味するため、M07で実施された気象研究所/気象庁統一大気大循環モデル(MRI/JMA-GCM)を用いた事例aの一月アンサンブル予報実験結果について詳しく解析した。

Fig.9の太実線は、10hPa、北緯80度における観測されたTの時間変動である。Fig.9の細実線は、12月5日と6日(Fig.9a)、12月12日と13日(Fig.9b)の気象庁一月アンサンブル予報の初期値を用いてMRI/JMA-GCMを30日間積分した結果を示している(M07のFig.1と同じ)。12月5日と6日を初期値とする実験結果では、いくつかのメンバーが観測されたSSWの発生をうまく再現しているが、再現していないメンバーも多い。一方、12月13日と14日を初期値とする全てのメンバーはSSWの発生を再現している。

Fig.10は、12月5日と6日を初期値とする各アンサンブルメンバーについて、100hPaにおける北緯50度から70度で平均した波数1成分に伴うFzを初期日(12

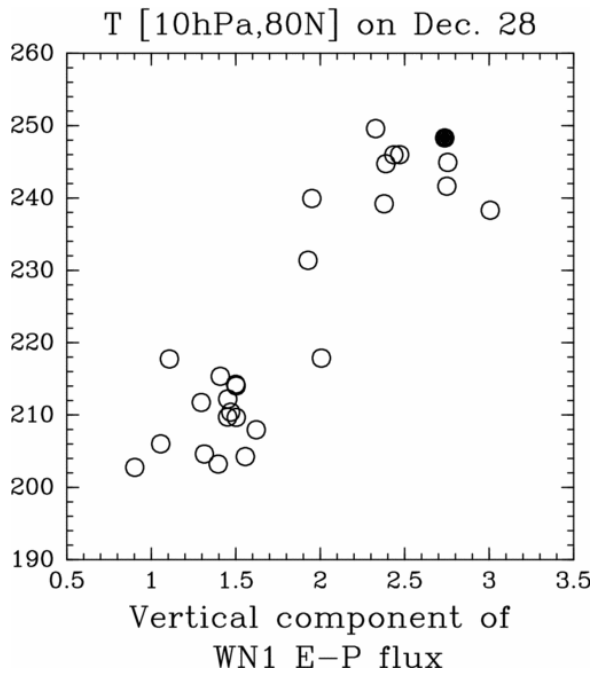


Fig. 10 Relationship between 10hPa T (K) at 80N on 28 Dec. and the cumulative Fz ($\times 10^6 \text{ Kg s}^{-2} \text{ day}$) of WN1 at 100hPa averaged from 50N through 70N. Open circles are ensemble experiments starting from 5 and 6 Dec. Closed circle is the analysis. The cumulative Fz is computed during the period from the initial time of the hindcast (5 Dec. or 6 Dec.) to 28 Dec., and from 5 Dec. to 28 Dec. for the analysis.

月5日を初期値とするメンバーは5日、12月6日を初期値とするメンバーは6日)から12月28日までの期間で積分した値(横軸)と、12月28日の10hPa、北緯80度でのT(縦軸)との関係を示す。図で、○は12月5日、6日を初期値とするアンサンブルメンバー、●は観測値を示す。観測値については、Fzを12月5日から12月28日までの期間で積分した。この図から、Fzの時間積分値と12月28日のTとの間には正の相関があることがわかる。さらに、Fzの積分値が $2.0 \times 10^6 \text{ Kg s}^{-2} \text{ day}$ 以上(以下)では、Tは240(210)K付近に集中していることがわかる。このことは、SSWが発生するのに必要なFzの時間積分値にある閾値が存在することを示唆している。

以上の解析結果から、成層圏極域のTはFzの時間積分値に対して非線形的に応答することが示唆される。このため、初冬にSSWが発生するためには、事例解析で示されたように、対流圏で波数1成分の波活動度がある程度以上持続して励起される必要があることが確認できた。

4. 考察とまとめ

本研究では、ブロッキングとSSWとの力学的関係を調べるためJRA-25再解析/JCDASデータセットを用いて、初冬(11月、12月)に発生したブロッキングとSSWの事例について解析を行った。まず、初冬に発生したSSWとブロッキングの検出を行った結果、北太平洋域のブロッキング発生直後には、SSWは生じないことが示された。そこで、北大西洋域で発生したブロッキングとSSWとの関連を明らかにするため、以下の3事例を比較して詳しい解析を行った。事例a: SSWの直前に北大西洋域でブロッキングが発生した(2001年12月)。事例b: SSWの直前に事例aと同じ経度で弱いブロッキングが発生した(1998年12月)。事例c: 北大西洋域で顕著なブロッキングが発生したが、SSWは発生しなかった(1989年12月)。

事例a, b, cの比較から、初冬のSSW発生には、対流圏における波数1に伴う波活動度フラックスの持続的な励起が重要であることが示された。一方、惑星規模波の鉛直伝播に影響を与える成層圏での帯状平均風分布は、初冬におけるSSWの発生に対して大きな役割を果たしていないことが示された。

次に、ブロッキングと波数1成分の励起との関係について詳細に調べるため、事例aについて、60日のLanczos low-pass filter (Duchon, 1979)を施した場として定義した基本場と、それからの偏差場に分離して解析を行った。その結果、事例aの基本場では波数1成分が卓越し、その位相は西傾していたことが明らかになった。さらに、SSW発生前に、基本場の波数1成分の振幅が、その気候学的標準偏差を大きく超える程度まで増幅していた。一方、偏差場は、北大西洋域の顕著なブロッキングを孤立した正の高度場偏差としてうまく表現していた。また、基本場の波数1成分のリッジの東側、あるいはほぼ同じ経度にブロッキングに伴う正の高度場偏差の中心が存在するとき、偏差場と基本場との線型干渉効果によって波数1に伴うFzが増大することが示された。

この線形干渉効果の重要性は事例bにおいても確認できた。一方、SSWが発生しなかった事例cでは、基本場の波数1成分の振幅が他の事例に比べ小さくFzは増大しなかった。従って、初冬にSSWが発生するためには、予め対流圏で気候場に比べ振幅の大きな波数1成分が存在するとき、北大西洋域で顕著なブロッキングが発生する必要があると考えられる。

一方、1983年12月末に北太平洋域で発生したブロッキングについても解析を行った結果、北太平洋域でブロッキングが発生した場合には、北太平洋域から成層圏へ上方伝播する惑星規模波の波活動度は極めて弱

いことが示された。このため初冬の北太平洋域で発生するブロッキングは SSW を励起しにくいことが予期される。これは、北太平洋域でブロッキングが発生すると、成層圏での気候場のリッジ(Fig. 5d)と対流圏ブロッキングに伴う高気圧性偏差とがほぼ同位相となり、惑星規模波の位相の傾きが鉛直方向に大変小さくなり、Fz も小さくなるためと考えられる。以上のことから、初冬における波数 1 型の SSW は、北太平洋域ではなく北大西洋域で発生するブロッキングと関連することが理解される。また、この結果は、SSW と関連するブロッキングは、そのほとんどが北大西洋域で SSW に先行して発生するブロッキングであることを統計的に示した Quiroz (1986)の結果と矛盾しない。

最後に、M07で行われた気象研究所/気象庁統一大気大循環モデルを用いた事例aに関する一ヶ月アンサンブル予報実験結果について解析を行った。その結果、SSWが発生する場合には、対流圏から成層圏に流入する波数1に伴う波活動度フラックスの時間積分値がある閾値以上に大きくなっていることが示された。この結果は、対流圏で一時的に波活動度が増大しただけではSSWは発生しないことを示唆している。従って、この解析からも、SSWの発生には、対流圏での惑星規模波の持続的な励起が重要であることがわかる。

Taguchi (2008)は、統計的手法を用いて過去約 50 年間の冬季(11 月から 3 月)に発生した北半球のブロッキングの発生時期と SSW の発生時期との間には統計的に有意な関係がないことを示している。一方、本研究では、初冬に生じたブロッキングと SSW との間には、力学的に有意な関連があることが示された。これは、初冬では成層圏に存在する惑星規模波の活動度が比較的小さいため、対流圏が成層圏に及ぼす影響を明らかにしやすいためであると考えられる。Taguchi (2008)のように、全ての冬季のデータを使用すると、特に、晩冬では成層圏での波活動度が常に大きくなるため、個々のブロッキングと SSW との因果関係を明らかにすることは難しいと考えられる。

謝 辞

本研究では、JRA-25/JCDAS 再解析データセットを使用しました。このデータセットは気象庁及び電力中央研究所による JRA-25 長期再解析プロジェクトにより提供されたものです。また、本研究では、一ヶ月アンサンブル予報データを使用しました。データを提供して頂いた、気象庁数値予報課ならびに気候情報課の皆様深く感謝します。図の作成には、地球流体電脳ライブラリを使用しました。

参考文献

- Andrews, D. G., Holton, J. R. and Leovy, C. B. (1987): *Middle Atmosphere Dynamics*, Academic Press. 489 pp.
- Barriopedro, D., Herrera, R. G., Lupo, A. R. and Hernandez, E. (2006): A climatology of Northern Hemisphere blocking, *J. Clim.*, Vol. 19, pp. 1042-1063.
- Duchon, C. E. (1979): Lanczos filtering in one and two dimensions, *J. Applied. Met.*, Vol. 18, pp. 1016-1022.
- Inatsu, M., Kimoto, M. and Sumi, A. (2007): Stratospheric sudden warming with projected global warming and related tropospheric wave activity, *SOLA*, Vol. 31, pp. 105-108.
- Limpasuvan, V., Thompson, D. J. and Hartmann, D. L. (2004): The life cycle of the Northern Hemisphere sudden stratospheric warming, *J. Clim.*, Vol. 17, pp. 2584-2596.
- Lupo, A. R. and Smith, P. J., (1995): Climatological features of blocking anticyclones in the Northern Hemisphere, *Tellus*, Vol. 47A, pp. 439-456.
- Matsuno, T. (1971): A dynamical model of stratospheric sudden warming, *J. Atmos., Sci.*, Vol. 28, pp. 1479-1494.
- Mcguirk, J. P. and Douglas, D. A. (1988): Sudden stratospheric warming and anomalous U.S. weather, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 116, pp. 162-174.
- Mukougawa, H. and Hirooka, T. (2004): Predictability of stratospheric sudden warming: A case study for 1998/99 winter, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 132, pp. 1764-1776.
- 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, T., Ichimaru, T. and Kuroda, Y. (2007): Hindcast AGCM experiments on the predictability of stratospheric sudden warming, *Nonlinear Dynamics in Geosciences*, Springer-Verlag, pp. 221-234.
- Nakamura, H., Nakamura, M. and Anderson, J. L. (1997): The role of high- and low-frequency dynamics in blocking formation, *Mon. Weather. Rev.*, Vol. 125, pp. 2074-2093.
- Plumb, R.A. (1985): On the three-dimensional propagation of stationary waves, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 42, pp. 217-229.
- Polvani, L. M. and Waugh, D. W. (2004): Upward wave activity flux as a precursor to extreme stratospheric events and subsequent anomalous surface weather regimes. *J. Clim.*, Vol. 17, pp. 3548-3554.
- Quiroz, R. S. (1986): The association of stratospheric warming with tropospheric blocking, *J. Geophys. Res.*, Vol. 91, pp. 5277-5285.

- 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.

Relationship between Tropospheric Blocking and Stratospheric Sudden Warming in Early Winter

Keisuke KAZAMOTO* and Hitoshi MUKOUGAWA

* Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

The dynamical relationship between tropospheric blocking events and major stratospheric sudden warming (SSW) events in early winter is examined using JRA-25/JCDAS data set. A series of hindcast experiments by an atmospheric general circulation model is also utilized to elucidate the detailed mechanism of a SSW occurring in December 2001. It is found that the following two factors are inevitable for the occurrence of the SSW events. One is anomalous amplification of zonal wave number 1 (WN1) component compared with its climatological value in advance. The other is an occurrence of blocking over the Euro-Atlantic sector. The upward propagation of WN1 wave activity is enhanced by the interference between the WN1 component and the blocking, which in turn causes the SSW event in early winter.

Keywords: blocking, stratospheric sudden warming, planetary wave