

ブロッキング高気圧と成層圏突然昇温に関する事例解析

風本 圭佑 (京大・理)・向川 均 (京大・防災研)

1. はじめに

成層圏突然昇温 (Stratospheric Sudden Warming; SSW) は、冬季の成層圏における低気圧性周極渦が崩壊し、極域の気温が数日の間に約 40 度上昇する現象である。SSW の基本的なメカニズムは、Matsuno (1971) により、対流圏から鉛直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) と考えられていることから、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ことが考えられる。

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 を比較し、統計的にブロッキングは、SSW よりも平均して約 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、2001 年 12 月末に発生した波数 1 型の SSW についての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解析から、2001 年 12 月末に発生した SSW に関して、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 (2007) 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。

しかしながら、Quiroz (1986) や Taguchi (2007) は、ブロッキングと SSW との関係を統計的に解析した研究であり、事例解析によって個々のブロッキングと SSW との関係について詳しい解析は行われていない。また、M05 と M07 で示されているように、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/伴わないブロッキングの相異点や、ブロッキングと惑星規模波の励起

の関係については依然として明らかではない。

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って調べ、対流圏ブロッキングと SSW との関係を力学的に明らかにすることを目的とする。また、以下では初冬 (11 月, 12 月) の事例について解析をおこなった。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、少なく、成層圏における波活動度も小さいため、ブロッキングの成層圏への影響の解析が容易になると考えたためである。具体的には、以下の 3 事例について解析を行った。

(a) 2001 年 12 月の事例：

M05 と M07 が解析した事例で、対流圏で顕著な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

(b) 1998 年 12 月の事例：

Naujokat *et al.* (2002) や Mukougawa and Hirooka (2004) が解析を行った、波数 1 型の SSW が発生した

(c) 1989 年 12 月の事例：

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

2. データと解析方法

2.1 データ

JRA-25 再解析/JCDAS の日平均データを用いた。期間は 1979 年から 2006 年の 11 月から 1 月、水平解像度は 1.25 度、鉛直レベルは 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) を施したものをを使用した。移動性擾乱の影響を取り除くため解析する各変数には、8 日をカットオフ周期とする Lanczos low-pass filter (17 項) を施した。

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 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ grid で行った。まず、北半球 500hPa の高度場を用いて、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) を各日、各経度で計算する:

$$\begin{aligned} GHGS &= \frac{Z(\lambda, \phi_0) - Z(\lambda, \phi_s)}{(\phi_0 - \phi_s)}, \\ GHGN &= \frac{Z(\lambda, \phi_n) - Z(\lambda, \phi_0)}{(\phi_n - \phi_0)}. \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \phi_n &= 77.5^\circ N + \Delta, \\ \phi_0 &= 60.0^\circ N + \Delta, \\ \phi_s &= 40.0^\circ N + \Delta, \\ \Delta &= -5.0^\circ, -2.5^\circ, 0^\circ, 2.5^\circ, 5.0^\circ, \end{aligned} \quad (2)$$

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、もし以下の条件 (3) が、少なくとも一つの Δ について満たされたならば、各日、各経度でブロッキングイベントが発生していると判断する。

$$\begin{aligned} GHGS &> 0, \\ GHGN &< -10 \text{ (m/deg)}, \\ Z(\lambda, \phi_0) - \overline{Z(\phi_0)} &> 0. \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\overline{Z(\phi_0)}$ 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 (3) を満たしながら、5 日以上持続したブロッキングイベントを、ここではブロッキングと定義する。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が終了したと判断した (B06)。ブロッキングの強さの指標として、ブロッキング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 年の 11、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。

3. 解析結果

3.1 事例の比較

ブロッキングの検出を行なった結果、2001 年の事例 (a) では、北大西洋域で発生したブロッキング

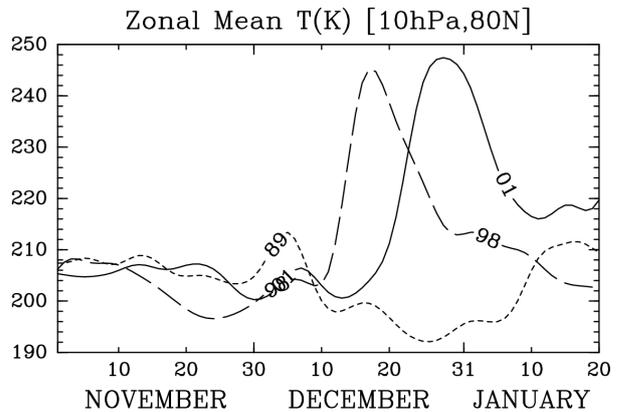


図 1: 11 月 1 日から 1 月 20 日の 10hPa、北緯 80 度における帯状平均温度 (K) の時間変動。実線は 2001 年、破線は 1998 年、点線は 1989 年を示す。

は、持続期間が 32 日 (11/25 ~ 12/26); (35 イベント中 2 番目)、強さが 480m (12/20 に極大); (35 イベント中 3 番目) という顕著なブロッキングであった。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。1989 年の事例 (c) では、北大西洋域で発生したブロッキングの持続期間は 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。このブロッキングの持続期間は、北大西洋域で発生した全ブロッキング中で最長である。

まず、3 事例の概観を示す。図 1 は 10hPa、北緯 80 度で平均した帯状平均温度を示す。SSW が発生した 2001 年の事例 (a) (実線) と 1998 年の事例 (b) (破線) では、ブロッキング発生後、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 日に温度が最高になる。しかし、1989 年の事例 (c) (点線) では 2001 年や 1998 年のような顕著な昇温は生じない。この 10hPa、北緯 80 度の帯状平均温度のピーク時の 10hPa 高度場を示したのが図 2 である。事例 (a) (図 2a) と事例 (b) (図 2b) 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) (図 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。図 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) では、対流圏における波数 1 成分の増幅に違いが明瞭になることが予期される。

一方、3 事例について、11 月 1 日から 12 月 31 日までの期間で、北緯 50 度から 70 度で平均し

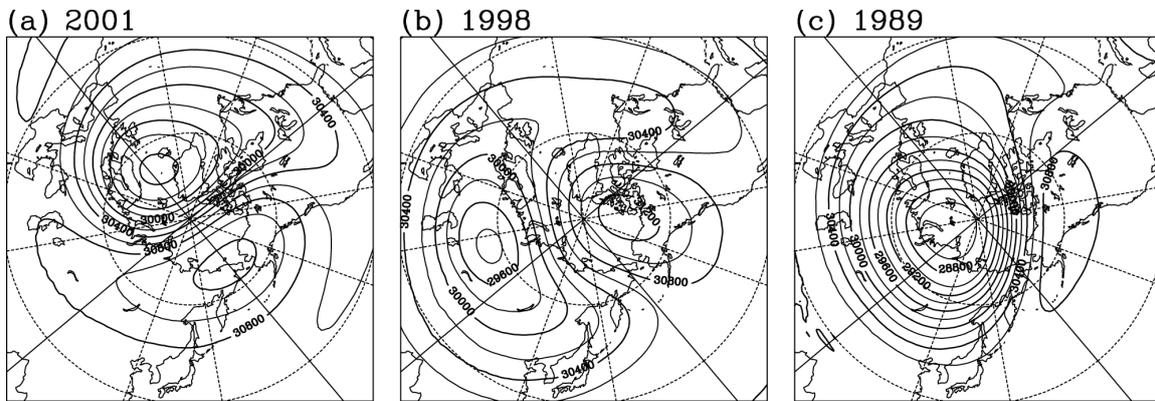


図 2: 北緯 80 度, 10hPa における帯状平均温度のピーク期の 10hPa 高度場 . 等値線間隔は 200m . (a)2001 年 12 月 28 日, (b)1998 年 12 月 17 日, (c)1989 年 12 月 5 日 .

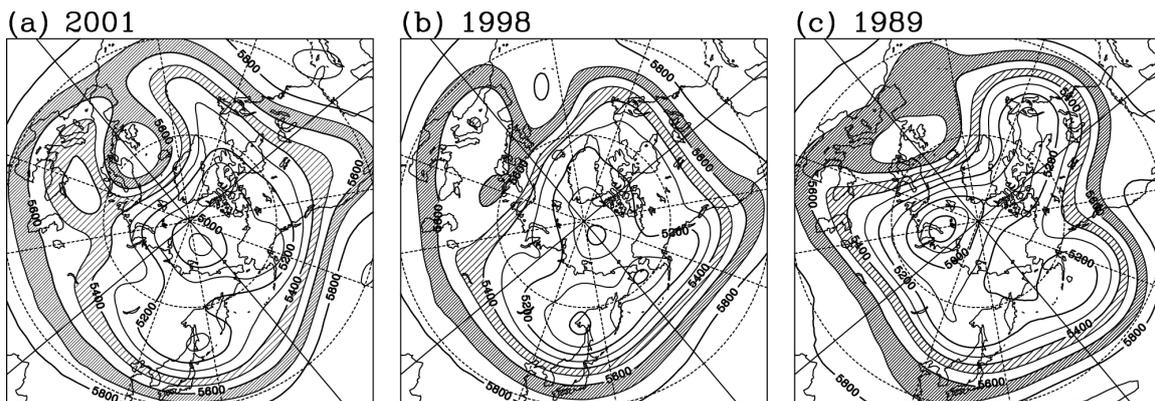


図 3: 波数 1 の振幅のピーク期の 500hPa 高度場 . 等値線間隔は 100m . 5400m から 5500m の領域に淡い陰影, 5600m から 5700m の領域に濃い陰影を付けた . (a)2001 年 12 月 14 日, (b)1998 年 11 月 30 日, (c)1989 年 12 月 3 日 .

た 500hPa における波数 1 成分の振幅のピーク期 (2001 年 12 月 14 日, 1998 年 11 月 30 日, 1989 年 12 月 3 日) 前後に注目し 3 事例の振舞いの違いを比較する . 図 3 は, このピーク期の 500hPa 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) (図 3a) では, 明瞭な Ω 型のブロッキングがイギリス付近に存在する . 事例 (b) (図 3b) 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) は, 波数 1 成分が卓越していることも見てとれる (図 3a,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 (図 3c) . 以上のことは, 図 4 から確認できる . 図 4 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) (図 4a) と事例 (b) (図 4b) 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 (波活動度) の上向き伝播と整合的である . また, 対流圏ではブロッキングに対応する高度場偏差が北大西洋域に見てとれる . しかし事例 (c) (図 4c) では, 対流圏で波数 2 成分が卓越し, 位相が鉛直に立っている . 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 . 以上の比較からは, SSW の発生には波数 1 成分の増幅及び, その位相の西傾が重要であることを示唆している .

次に, SSW 発生の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 . 図 5 に, 北緯 50 度から 70 度で平均した 300hPa における波数 1 の波活動度の鉛直伝播を表現する E-P flux の鉛直成分の時間変動を示す . SSW が発生した事例 (a) (赤線) と事例 (b) (青線) は, SSW の発生前に, E-P flux の鉛直成分が, その標準偏

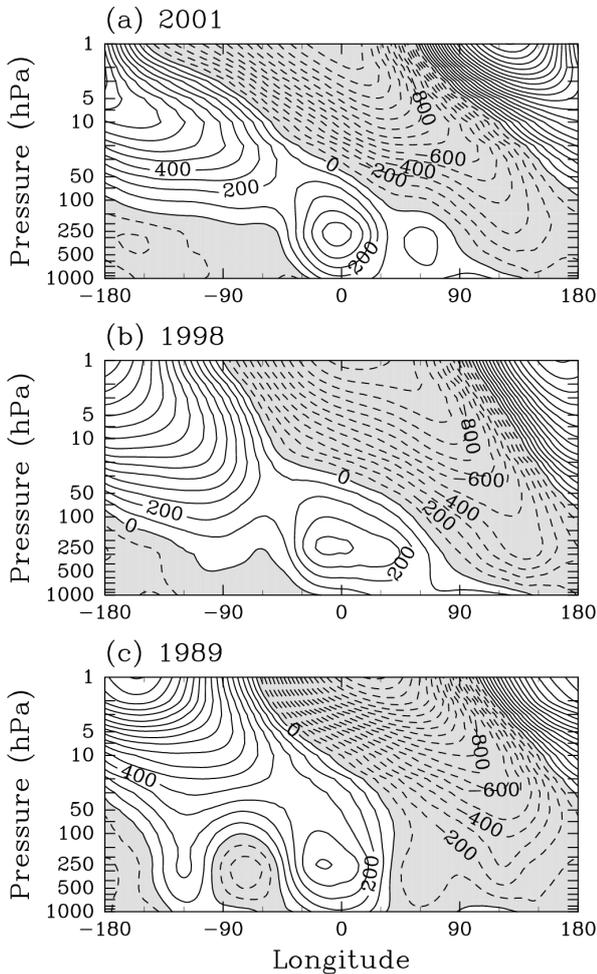


図 4: 北緯 50 度から 70 度で平均した帯状平均からの高度場偏差の経度 - 高度断面．等値線間隔は 100m．陰影は低気圧性偏差を示す．(a)2001 年 12 月 14 日, (b)1998 年 11 月 30 日, (c)1989 年 12 月 3 日．

差の 2 倍を大きく越える日が約 10 日持続している．100hPa においても同様な特徴があった (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) (黒線) では, このような特徴は見い出せない．一方, 惑星規模波の伝播は帯状平均東西風 (\bar{U}) の分布に大きく影響されるので, SSW の発生に, \bar{U} の分布は重要な影響を与えている要因の一つである可能性がある．そこで各事例の波数 1 成分の振幅のピーク期付近における \bar{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)．この比較からは, SSW の発生には \bar{U} の分布 (波の伝播特性) よりも対流圏における波数 1 成分の励起が重要であることを示唆している．

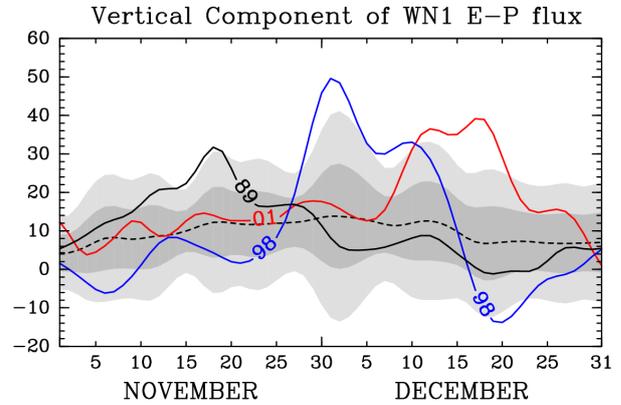


図 5: 北緯 50 度から 70 度で平均した 300hPa における波数 1 の E-P flux の鉛直成分 ($\times 10^4 \text{kg/s}^2$) の時間変動．赤線: 2001 年, 青線: 1998 年, 黒線: 1989 年, 点線: 1979 年から 2005 年の平均, 濃い (薄い) 陰影は ± 2 (標準偏差) の領域である．

3.2 ブロッキングと波の励起

次に, ブロッキングと波数 1 の励起の関係を調べるために, 8 日の low-pass filter を施した場 (Z) を, 31 日移動平均を施した場 (\bar{Z}) とそれからの偏差場 ($Z' = Z - \bar{Z}$) に分ける．ブロッキングは長期間の平均操作を伴う \bar{Z} の場では明瞭ではなくなる (図略) ので, \bar{Z} 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' はブロッキングに伴う変動に対応している．ここでは事例 (a) について, \bar{Z} と Z' の関係を詳しく調べ, ブロッキングと波数 1 成分の励起との関係を明瞭にすることを目的として解析を行った．

図 6 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．図 6a, b は, それぞれ 300hPa における波数 1 の E-P flux の鉛直成分が標準偏差の 2 倍を越えた日 (2001 年 12 月 11 日) の高度場, 図 6c, d はそのピーク時 (2001 年 12 月 17 日) の高度場を示す．図 6b と 6d の等値線より, \bar{Z} は波数 1 が卓越し, 位相は高度とともに西に傾いていることがわかる．また, 基本場 (\bar{Z}) の 300hPa の北大西洋域でのリッジは, 11 日には西経 7.5 度, Z' でみたブロッキングのリッジは東経 1.25 度に存在する．このため, 基本場のリッジの東側にブロッキングのリッジが存在する (図 6b)．ピーク期の 17 日には, 基本場のリッジは西経 16.25 度, ブロッキングのリッジは西経 28.75 度であり, 基本場のリッジの西側へブロッキングのリッジが西進している (図 6d)．この 11 日から 17 日にみられたブロッキングの西進に伴い, 波数 1 成分が増幅し, しかも位相の西傾をさらに大き

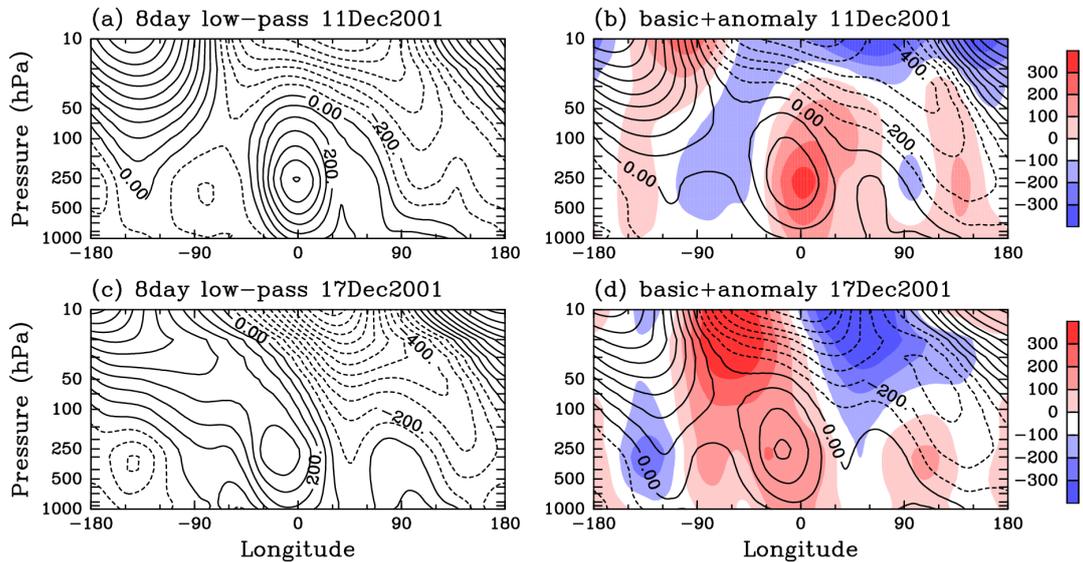


図 6: 北緯 50 度から 70 度で平均した東西平均からの高度場偏差の経度 - 高度断面．等値線 (カラ -) 間隔は 100m . 300hPa の E-P flux の鉛直成分が標準偏差の 2 倍を越えた 2001 年 12 月 11 日における (a) 8 日の low-pass filter を施した場 (等値線), (b) 基本場 (等値線) と基本場からの偏差場 (カラー) . (c) は (a), (d) は (b) と同様, 但しピーク期の 2001 年 12 月 17 日 .

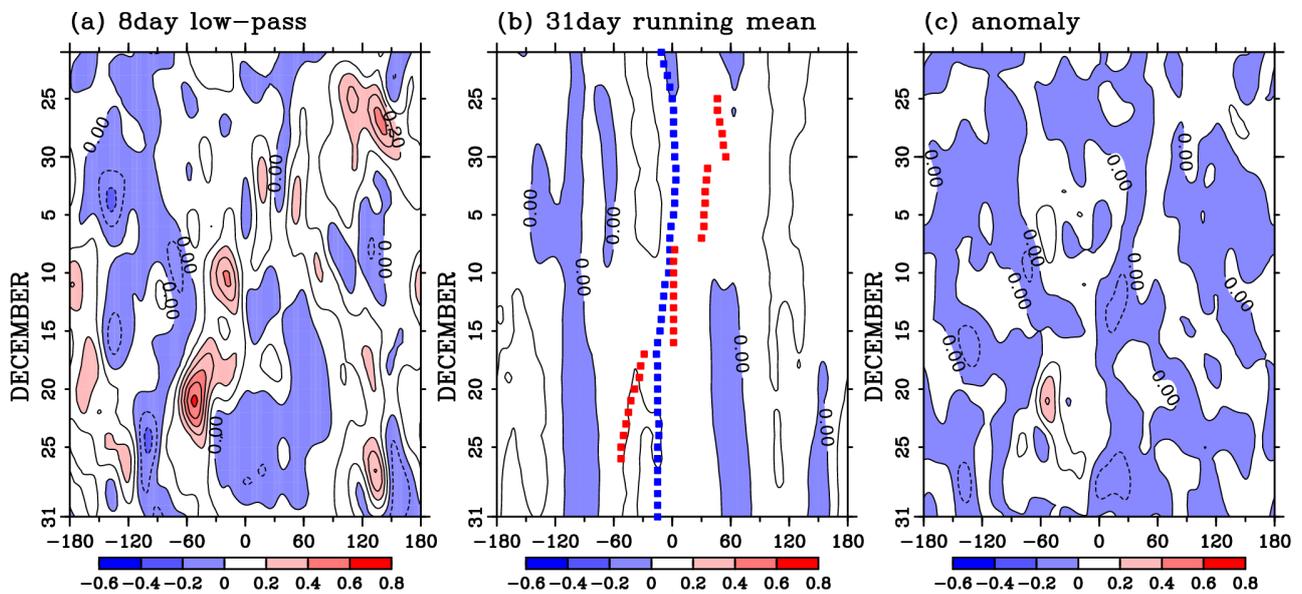


図 7: 北緯 50 度から 70 度で平均した 300hPa における 3 次元の波活動度フラックス (Plumb, 1985) の鉛直成分の経度 - 時間断面．期間は 2001 年 11 月 21 日から 12 月 31 日である . (a) 8 日の low-pass filter を施した場, (b) 基本場 (31 日移動平均場), (c) 偏差場 . 等値線間隔は $0.1\text{m}^2\text{s}^{-2}$. 上向き成分 ($>0.2\text{m}^2\text{s}^{-2}$ 以上) に赤色, 下向き成分 ($<0\text{m}^2\text{s}^{-2}$) に青色を付けた . (b) の赤い (青い) はブロッキング (基本場) のリッジの位置を示す .

くしている (図 6c) . このことは, 波数 1 の準停滞性の波 (\bar{Z}) に対するブロッキング (Z') の西進が, 波数 1 の E-P flux の鉛直成分を増大させ, 成層圏への波活動度の流入を強化したことを意味している .

さらに, このことは図 7 から確認できる . 図 7 は, 北緯 50 度から 70 度で平均した 300hPa における 3 次元の波活動度フラックス (Plumb, 1985)

の鉛直成分の経度 - 時間断面 (Hovmöller 図) を示す . 図 7b に青い で示した \bar{Z} のリッジは全期間を通して経度 0 度付近に存在する . このことから, \bar{Z} は波数 1 の準停滞性の波動に対応することがわかる . 一方, 赤い で示したブロッキング (Z') のリッジは西に移動している . このブロッキングのリッジが \bar{Z} のリッジとほぼ重なった 12 月 10 日前後から, 北大西洋域で波活動度フラックスの鉛直

成分が増大し始め、さらに、12月17日以降のブロッキングのリッジの西進に伴い急激に増大していることが明瞭に示される(図7a)。このことから、2001年の事例(a)では、波数1が卓越し位相が高度とともに西に傾いていた基本場中をブロッキングが西進したため、波数1成分が増幅し、かつその鉛直伝播が強化されたと考えられる。

一方、波数1のE-P fluxの鉛直成分が標準偏差の2倍を越えた12月11日から21日(図5青線)の期間で、北大西洋域(西経80度-東経40度)において、基本場(\bar{Z})に伴う鉛直フラックス(図7b)と、ブロッキング(Z')に伴う鉛直フラックス(図7c)の合計は、もとの場である $Z(=\bar{Z}+Z')$ に伴う鉛直フラックス(図7a)よりも約50%も小さい。このことは、 \bar{Z} と Z' との線型相互作用が波数1の励起に重要であることを示している。

4. まとめ

ブロッキングとSSWとの、力学的な関係を調べるため、JRA-25/JCDAS再解析データセットを用いて、以下の3つの事例を比較した。SSWと、その直前に北大西洋域でブロッキングが発生した事例(a)(2001年12月)、SSWと、その直前に事例(a)と同じ経度で弱いブロッキングが発生した事例(b)(1998年12月)、北大西洋域で顕著なブロッキングのみ発生した事例(c)(1989年12月)。まず、3事例の比較から、SSWの発生には、帯状平均東西風分布(波数1の伝播特性)よりも、対流圏での波数1成分の増幅と、対流圏界面付近での波活動度の上向きフラックスの増大が重要であることが示された。

そこで、事例(a)について、高度場を31日移動平均で定義される基本場と、それからの偏差場に分離することにより、ブロッキングと波数1の励起との関係について詳しく調べた。ここで、基本場では波数1成分が卓越し、偏差場で北大西洋域に顕著なブロッキングを表現することができることに注意する。その結果、波数1成分が増幅するとき、偏差場で表現されるブロッキングは、基本場のリッジ付近に存在し、しかも西進することが示された。この両者の線型足し合わせにより、波数1成分は増幅し、その位相の西傾も大きくなる。また、ブロッキングと基本場に伴う波活動度の鉛直フラックスの合計は、両者を足し合わせた場に伴う鉛直フラックスよりもかなり小さいため、波数1の鉛直伝播にとって、基本場と偏差場との線型的な相互作用が大変重要であることが示された。

一方、他の事例について、事例(a)との比較から以下のことが考察できる。事例(b)では、波数1の波活動度の鉛直成分のピーク期に、ブロッキングが発生していた北大西洋域以外に、北太平洋域でも、この波活動度フラックスの鉛直成分の極大域が存在していた。このことは、事例(b)では、事例(a)と異なり、アリューシャン低気圧の増幅がSSWの発生に重要であることを示唆している。2006年1月中旬に生じたSSWでも、その発生前に、このような波活動度の強化がみられたことを西井・中村(2007)は示している。また、事例(c)では、基本場は対流圏で順圧的な構造であったため、ブロッキングが発生しても波活動度フラックスの鉛直成分が増幅しなかったことが、SSWが発生しなかった原因であると考えられる(図4c)。

ただし、これらの事例解析では定量的な解析が不十分である。このため、今後、M07で示された事例(a)についての予報実験結果について詳しい解析を行なう予定である。この予報実験結果を解析することで、本稿で示した事例解析結果の定量的な検証を行うことができる。このようにして、ブロッキングと波の励起の関係等の対流圏ブロッキングとSSWとの力学的関係について、さらに詳しい解析を実施する予定である。

謝 辞

図の作成には地球流体電脳ライブラリを用いました。

参考文献

- Andrews, D. G., J. R. Holton, and C. B. Leovy, 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press. pp. 489.
- Barriopedro, D., R. G. Herrera, and A. R. Lupo, and E. Hernández, 2006: A Climatology of Northern Hemisphere Blocking. *J. Clim.*, **19**, 1042-1063.
- Duchon, C. E., 1979: Lanczos filtering in one and two dimensions. *J. Applied. Met.*, **18**, 1016-1022.
- Lupo, A. R., and P. J. Smith, 1995: Climatological features of blocking anticyclones in the Northern Hemisphere. *Tellus*, **47A**, 439-456.
- Matsuno, T., 1971: A dynamical model of stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 871-883.

- Mukougawa, H. and T. Hirooka, 2004: Predictability of Stratospheric Sudden Warming: A Case Study for 1998/99 Winter. *Mon. Weather Rev.*, **132**, 1764-1776.
- Mukougawa, H., T. Hirooka, and T. Ichimaru, and Y. Kuroda, 2007: Hindcast AGCM Experiments on the Predictability of Stratospheric Sudden Warming. *Nonlinear Dynamics in Geosciences*. Springer, doi:10.1007/978-0-387-34918-3, 221-233.
- 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**, L17806, doi:10.1029/2005GL022909.
- Nakamura, H., M. Nakamura, and J. L. Anderson, 1997: The Role of High- and Low-Frequency Dynamics in Blocking Formation. *Mon. Weather Rev.*, **125**, 2074-2093.
- Naujokat, B., K. Krüger and K. Matthes and J. Hoffmann and M. Kunze and K. Labitzke, 2002: The early major warming in December 2001 - exceptional? *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi:10.1029/2002GL015316
- 西井和晃, 中村尚, 2007: 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. グローสบレッタ - . **45** (7月), 70-86.
- Plumb, R. A., 1985: On the Three-Dimensional Propagation of Stationary Waves. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 217-229.
- Polvani, L. M. and D. W. Waugh, 2004: Upward Wave Activity Flux as a Precursor to Extreme Stratospheric Events and Subsequent Anomalous Surface Weather Regimes. *J. Clim.*, **17**, 3548-3554.
- Quiroz, R. S., 1986: The Association of Stratospheric Warming With Tropospheric Blocking. *J. Geophys. Res.*, **91**, 5277-5285.
- Taguchi, M., 2007: Is There a Statistical Connection between Stratospheric Sudden Warming and Tropospheric Blocking Events? *J. Atmos. Sci.*, in press.