

2003年7月の北半球ダブルジェット

前田修平、佐藤均、小林ちあき
気象庁気候情報課

1. はじめに

2003年夏の北半球帯状平均場では、平年に比べ寒帯前線ジェットが明瞭で亜熱帯ジェットも強かった。このいわゆるダブルジェットの状態は、特に7月の東半球側で明瞭で、1979年以後では最も顕著であった。また、寒帯前線ジェットの南側の北緯60~70度付近ではロシア西部と東シベリアで気圧の尾根が持続した。このうち、東シベリアの気圧の尾根は、日本に冷夏をもたらしたオホーツク海高気圧の持続と密接に関係している。本報告では、7月に東半球で卓越したこのダブルジェットと、関連する擾乱の振る舞いについて述べる。使用するデータは特に断らない限りNCEP/NCARの再解析データ (Kalnay et al., 1996))とそれに引き続く気候監視用解析データ(合わせてCDASと呼ぶ)である。

2. ダブルジェット

図1は、2003年7月の200hPa東西風である。平年(ここでは1979~2003年の25年平均値)に比べ、北緯40度付近を中心に亜熱帯ジェットが、北緯70度付近を中心に寒帯前線ジェットがそれぞれ東半球側で強く、また、これらのジェットに挟まれた緯度帯で北緯50度を中心に弱風域となっている。東半球で平均した200hPa東西風の緯度分布(図2)を見ると、ダブルジェットが明瞭である。図3は東半球で平均した200hPa東西風の時間緯度断面図である。このダブルジェットの状態は7月初めから8月半ばごろまで持続したことがわかる。

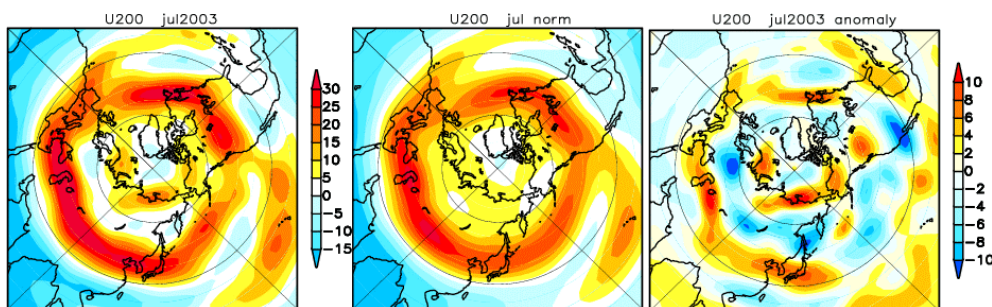


図1 200hPa 東西風
左：2003年7月 中：平年値(1979~2003年) 右：2003年7月平年偏差

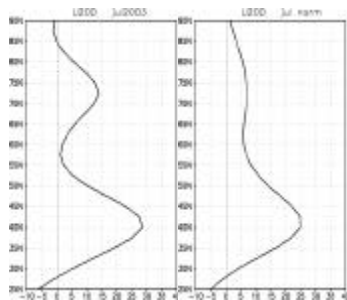


図2 東半球で平均した200hPa東西風
北緯20~90度。
左：2003年7月 右：平年値

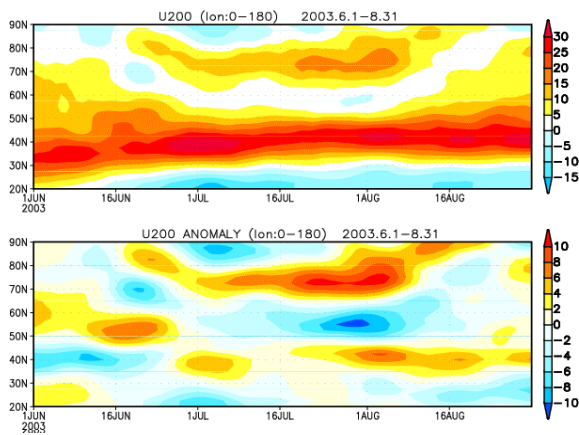


図3 東半球で平均した200hPa東西風の時間緯度断面図。北緯20～90度。
上：2003年6月1日～8月31日。7日移動平均。
下：上と同じ、但し平年偏差

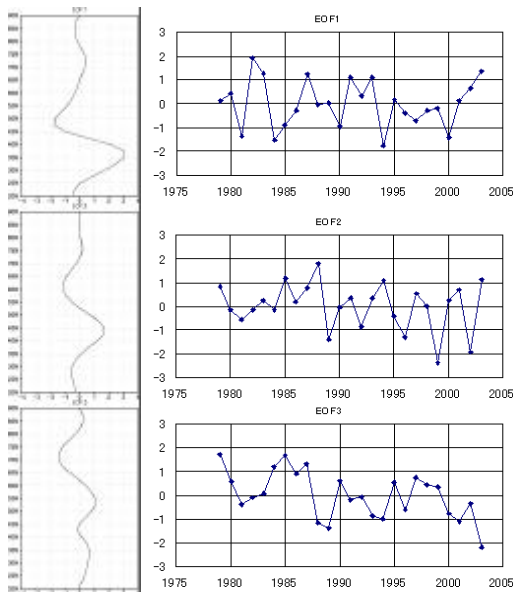


図4 東半球で平均した7月の200hPa東西風の主成分分析。上から第1主成分（寄与率48%）、第2主成分（18%）、第3主成分（16%）
左：因子負荷量
右：規格化した主成分スコア（1979～2002年）

月上旬にはそれぞれ東経60度、100度、160度付近に達した。この偏差パターンは、30日で約30度と非常にゆっくりと東進する準定常擾乱であることがわかる。この擾乱のう

図2で示した東西風の緯度分布を過去の7月と比較するために、東半球で平均した200hPa東西風を主成分分析した。主成分分析の対象とした期間は、1979～2003年の25年間で、北緯25～87.5度の2.5度毎のデータに面積重みをつけた共分散行列を用いた。図4に第3主成分までの因子負荷量と規格化した主成分スコアを示す。2003年は各主成分ともに絶対値が大きく、25年間で第1と第2主成分は正の上から2番目、第3主成分は負で最も小さい。因子負荷量の分布から、第1主成分は主に亜熱帯ジェットの変動、第3主成分は主に寒帯前線ジェットの変動を表していると考えられるが、そのどちらの絶対値も大きいことから、2003年の7月の東半球の東西風分布は特異であったということがわかる。実際、各年の図を見ても、この25年間で2003年ほどダブルジェットが明瞭な年はない（図略）。

次に、擾乱の水平構造について見る。図5は、2003年7月の500hPa高度と平年偏差である。寒帯前線ジェットを中心から南側の北緯60～70度ではロシア西部と東シベリアに気圧の尾根が、中央シベリアでは気圧の谷が見られる。図6は、これらの擾乱を含む北緯60～75度で平均した500hPa高度の平年偏差の経度時間断面図である。7月の中旬初めに東経30度付近に見られる正偏差、80度付近に見られる負偏差、および130度付近に見られる正偏差が東進し、8

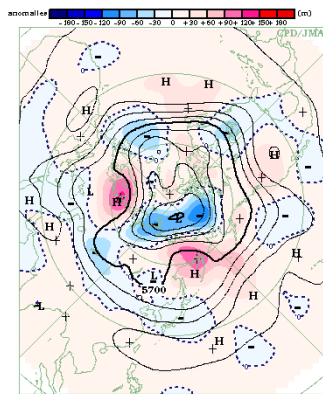


図5 2003年7月の500hPa高度と
 平年偏差。実線が高度、陰が平
 年偏差。気象庁(2003)より転
 載。他の図と異なり平年値は気
 象庁の季節予報作業用平年値
 で1971~2000年の30年平均
 (気象庁、2001)。

ち、東シベリアの気圧の尾根は、日本
 に冷夏をもたらしたオホーツク海高気
 圧の持続と密接にしている。

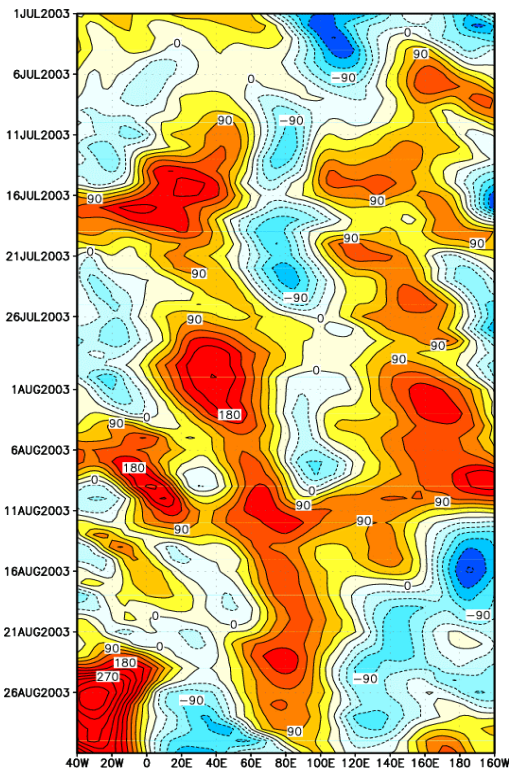


図6 北緯60~75度で平均した500hPa高
 度平年偏差の経度時間断面図。2003年
 6月1日~8月31日の7日移動平均西
 経40~0~140度。等値線間隔は30m。

3. 寒帯前線ジェットと擾乱との関係

ジェットの構造は、ロスビー波の伝播方向や順圧・傾圧不安定による擾乱の成長など、
 ジェットと関連して活動する擾乱の振る舞いに大きな影響を与える。たとえば、東西方
 向に一様な東西風 $U(y)$ を基本場として考えると、基本場の絶対渦度の南北方向の微

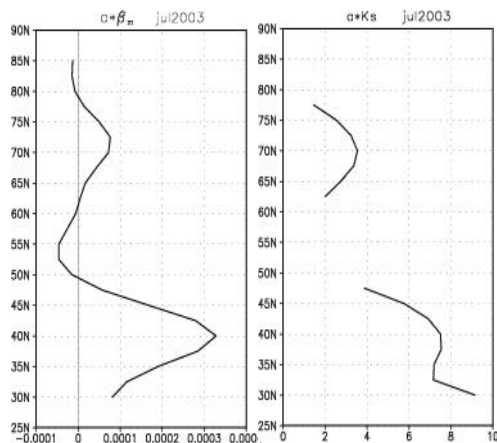


図7 左：絶対渦度の南北傾度 ($m^{-1}s^{-1}$)
 と右：定常ロスビー波の全波数 $a \times$
 K_s (右)。aは地球の半径。2003年7
 月の東半球平均200hPa東西風より
 計算。

分 $-U_{yy}$ が符号を変えることが順圧不安
 定の必要条件であるし、定常順圧ロスビー
 波の全波数 K_s は $\{(-U_{yy})/U\}$ で与
 えられる。 K_s はロスビー波の屈折率にも対
 応し、 K_s の大きい方向にロスビー波は屈折
 する。 K_s の極大域はロスビー波の導波管と
 なる(Hoskins and Karoly, 1981)。図7に
 は、2003年7月について東半球平均した
 200hPaのUから計算した $-U_{yy}$ と K_s
 を示す。東半球で平均したUを基本場と考
 えて、その基本場の性質を調べようとい
 うことである。線が欠けている北緯50度
 から60度にかけては、Uが正で $-U_{yy}$ が負の領

域、つまりロスビー波が波として存在できない外部波領域である。 $-U_{yy}$ が符号を変えるので、順圧不安定の必要条件を満たしている。また、寒帯前線ジェットを中心の南側の北緯70度付近で K_s が極大となり、寒帯前線ジェットがロスビー波の導波管となっている。 U の平年値で K_s を計算すると、導波管は見られるが寒帯前線ジェット南側の外部波領域は存在しない。過去25年間で2003年のように広い緯度帯で外部波領域が見られるのは、1988年と1993年のみである（図略）。

この特徴的なジェットの構造と、2. で示した擾乱はどのような関係があるのだろうか？ そこで、2. で行った主成分分析をもとに東半球での東西風の分布が2003年7月に近い12年間を選び出し（1980、82、83、88、89、91、92、93、95、2001、02、03年）その12年平均値を基本場とし、それからの偏差を擾乱と考え両者の対応関係を調べた。なお、以後の議論では、擾乱の振幅が最も大きい300hPaを解析し、基本場は東西方向の構造を持つこととする。図8は、東西方向に構造を持つように拡張した基本場の K_s

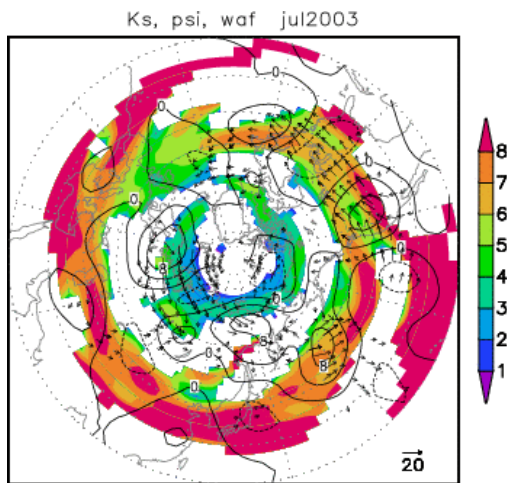


図8 2003年7月の300hPa流線関数偏差（等値線）、波活動度フラックスの水平成分（矢印）、 K_s （陰）。流線関数偏差の等値線間隔は $4 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ 、波活動度フラックスのスケールは図右下のとおりで単位は m^2/s^2 。

（Hoskins and Ambrizzi, 1993）、擾乱の流線関数、および波活動度フラックス（Takaya and Nakamura, 2001）の水平成分を示す。ユーラシア大陸上の高緯度に着目すると、前述したとおり西シベリア、中部シベリア、東シベリアに波列状で振幅の大きな擾乱がある。波活動度フラックスは、擾乱の振幅が大きい西シベリアで湧き出して K_s の大きな緯度に沿って東向きに伝播し、東シベリアで沈みこんでいる。この湧き出しは基本場からの順圧エネルギー変換量（Tsuyuki and Kurihara, 1989）の大きな領域と、沈み込みは基本場への順圧エネルギー変換量の大きな領域（図略）と対応している。

図7で示したように東西流は順圧不安定の必要条件を満たしているし、図8で示したように基本場からの順圧的エネルギー変換の過程が擾乱の発達に関わっている。これらのことから、観測された波列状の擾乱が基本場からの順圧エネルギー変換で発達する順圧不安定モードと関連していることが考えられる。そこで、この基本場の周りに線形化した非発散順圧渦度方程式の固有モード（Tsuyuki and Kurihara, 1989）を計算した。その結果、成長率の2番目に大きな順圧不安定モード（線形摩擦なしで13.6日でe倍に成長する）として、周期が67.4日と長くユーラシア大陸上の寒帯前線ジェット近傍で大きな振幅を持つモードが得られた。このモードはユーラシア大陸上ではゆっくり東に動

EIGEN MODE N=2 PR=67.4day GR=13.6day

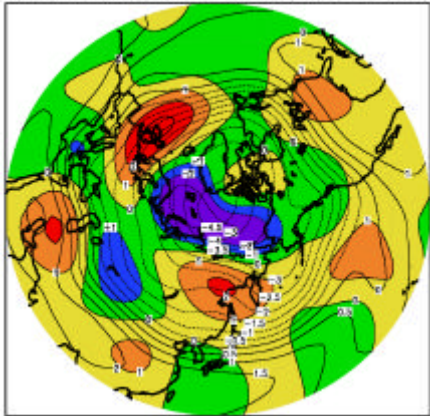


図9 基本場（等値線）と順圧不安定モード（陰）。どちらも無次元化した流線関数。この順圧不安定モードは13.6日でe倍となる。周期は67.4日で、ある位相を表示。

き、図9に示すある位相では図4や図8で示した擾乱と水平構造が良く似ている。固有モードは基本場の選び方に敏感なので、この結果をもって観測された擾乱が順圧不安定モードであるとは結論できないが、観測された擾乱の発達と維持に基本場からの順圧エネルギー変換が重要な過程となっていることは間違いないであろう。なお、この固有モードは周期が長いので、定常強制に対する応答として卓越しやすい特異モードとともに対応していると考えられる(例えば、Maeda et al., 2000)。

図10は、北緯70度における擾乱の流線関数と波活動度フラックスの経度高度断面図である。東経30度付近、対流圏上部の300hPa付近で波活動度フラックスが湧き出し、東向きに伝播しつつ、

下向きにも伝播している様子がわかる。波活動度フラックスが下向きということは、おおざっぱに言えば、この擾乱が南向きに熱輸送を行っているということである。このことは、基本場の南北の温度傾度の維持に、すなわち寒帯前線ジェットの維持にこの波列状の擾乱が寄与している可能性を示している。

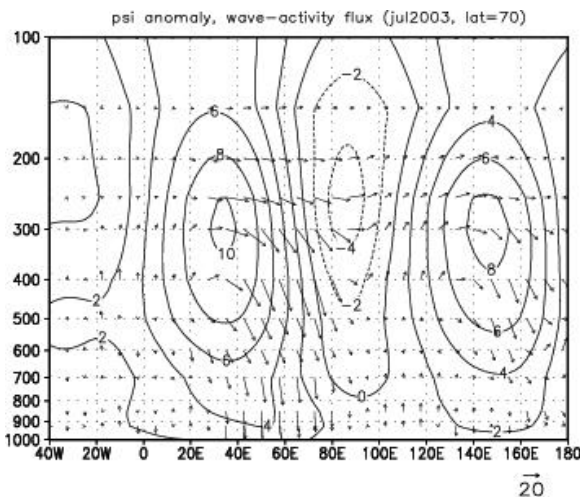


図10 2003年7月の北緯70度における流線関数偏差（実線）と波活動度の東西・鉛直成分（矢印）。流線関数偏差の等値線間隔は $2 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ 、波活動度フラックスのスケリングは図右下のとおりで単位は東西方向が m^2/s^2 、鉛直方向が $\text{Pa m}/\text{s}^2$ 。但し、鉛直方向は100倍してある。

4. まとめと議論

2003年夏の北半球帯状平均場では、平年に比べ寒帯前線ジェットが明瞭で亜熱帯ジェットも強かった。このダブルジェットの状態は、特に7月の東半球側で明瞭で、1979年以

後では最も顕著であった。また、ユーラシア大陸上の寒帯前線ジェットの南側では、波列状の循環パターンが卓越し、ゆっくりと東進した。この擾乱のうち、東シベリアの気圧の尾根は、日本に冷夏をもたらしたオホーツク海高気圧の持続と密接に関係している。この擾乱の発達には、基本場（気候平均場）からの順圧エネルギー変換が一定の役割を果たしている。ダブルジェットの持続メカニズムはよくわからない。但し、寒帯前線ジ

エット南側の擾乱が、寒帯前線ジェットの持続に関係している可能性がある。

図4で示した200hPa東西風の第3主成分スコア - が負の年は、寒帯前線ジェットが強く、その南の緯度帯の東西風が弱い年に対応する。このスコア - の時系列図を見ると、負のトレンドが明瞭である。すなわち、長期的にはダブルジェットになりやすくなっていることを示している。現時点では、このトレンドが何によってもたらされているのかはわからないが、近年のシベリアの高温化、それに伴うシベリアと北極海との南北温度傾度の強化と対応していることを考慮すると、地球温暖化と関連している可能性もあり興味深い。地球温暖化時に表れやすい空間パターンとの関係など、今後、詳しく調べたい。

2003年7月は、熱帯の対流活動がインド洋の中部～西部で活発でアジアモンスーン域では不活発であった。すなわち、平年に比べ対流活動の活発域が南西にシフトしており、これに対応してハドレー循環も南にシフトしていた(図略)。ハドレー循環の変動に伴う運動量輸送の変動は、亜熱帯ジェットの変動に大きな影響を及ぼすし、寒帯前線ジェットの変動に影響を与える可能性もある(Lee and Kim, 2003)。熱帯の対流活動とダブルジェットの持続との関係についても調べたい。

参考文献

- Hoskins, B. J., and T. Ambrizzi, 1993: Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow. *J. Atmos. Sci.*, 50, 1661-1671.
- Hoskins, B. J., and D. J. Karoly, 1981: The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J. Atmos. Sci.*, 38, 1179-1196.
- Kalnay, E., and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- Lee S., and H.-K. Kim, 2003: The dynamical relationship between subtropical and eddy-driven jets. *J. Atmos. Sci.*, 60, 1490-1503.
- Maeda, S., C. Kobayashi, K. Takano, and T. Tsuyuki, 2000: Relationship between singular modes of blocking flow and high-frequency eddies. *J. Met. Soc. Japan*, 78, 631-646.
- Tsuyuki, T., and K. Kurihara, 1989: Impact of convective activity in the western tropical Pacific on the East Asian summer circulation. *J. Met. Soc. Japan*, 67, 231-247.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2001: A formation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally-varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, 58, 608-627.