

温暖化による夏季極東域ブロッキング高気圧の変化について

荒井美紀・木本昌秀（東京大学気候システム研究センター）

1. はじめに

夏季極東域に多く観測されるブロッキング高気圧は、その下層にオホーツク海高気圧を伴い、日本の冷夏や梅雨前線の強化など東アジア域の夏季の天候に大きな影響を及ぼすことが知られている(Ninomiya and Mizuno 1987; Wang 1992; Kodama 1997)。大循環モデルによるブロッキング高気圧の再現には、解像度依存性があり、これまで主に使われてきた T42 程度の水平解像度でのオホーツク海高気圧の表現も不完全であった。本研究では、比較的高解像度の大気大循環モデルを用いて、東アジア域の天候を再現し、その年々変動の特性を探り、温暖化による変化について調べることを目的とする。

2. 用いた数値モデルと観測データ

本研究で使用した大気大循環モデルは、CCSR/NIES/FRCGC MIROC (K-1 model developer 2004) の大気・陸面部分である。解像度は水平方向にT106、鉛直方向は56層取っている。現在気候の再現実験としては(以下、現在気候実験と表記)、1979年1月1日から1998年12月31日の期間の観測された海面水温を与えた積分を、初期値を変えて5種類のアンサンブル実験を行った。また、解像度の違いを議論するため、水平方向T42鉛直20層のモデルでも3メンバーのアンサンブル実験を行った。比較する観測データは、主にECMWF ERA-40、降水量のみCMAP(Xie and Arkin 1997)の同期間を用いた。さらに、二酸化炭素倍増実験として、解像度T106L56の実験については7種類の研究機関が二酸化炭

素倍増条件下で行った、大気海洋結合モデルによる気候値の増分を1979年1月1日から1998年12月31日の観測値に加えた海面水温を与えて、現在気候の2倍の二酸化炭素を与えて20年分の積分を行った。

3. 夏季東アジア域の主変動パターン

まず、モデルがどの程度現実の夏季(JJA)の東アジア域の気候の年々変動を再現しているのか調べるため、夏季平均の500hPaジオポテンシャル高度場の東アジアから北西太平洋上にかけての領域(80°E-180°E, 20°N-70°N)に着目してEOF解析を行った。観測は20夏分、現在気候実験は20x5夏分(T106)及び20x3夏分(T42)に対して計算した。第1主成分(PC1)の500hPaジオポテンシャル高度場及び降水量への線形回帰図によって示される水平パターンが図1である。観測(図1上図左)、T106の現在気候実験(図1上図中)で得られた最も卓越するモードは、共通して130°E付近で南北3極構造を持つ。さらに、このモードは順圧的な構造をしており、正符号のときに低圧部にあたる、中国南部から西太平洋に伸びる降雨帯の強化を伴う(図1上図、陰影)。また、PC1の時系列も観測とT106の現在気候実験とで非常に良く似ており、アンサンブル平均と観測との相関係数は0.65であった。しかし、現在気候T42の実験では、500hPa高度場に回帰した主変動パターンにおいて北の作用中心が東に流れており、また、バンド状の降水帯も見られない(図1上図右)。PC1の観測との相関も0.32とそれほど高くない。

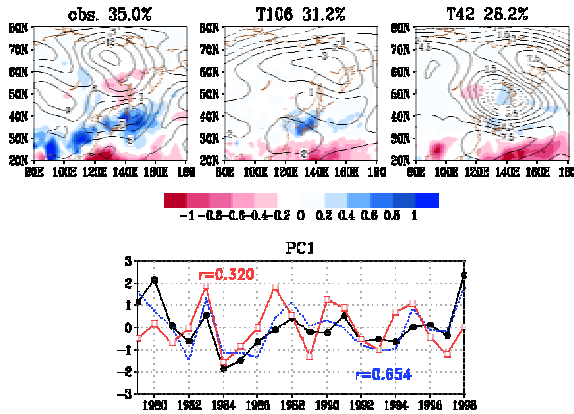


図1：500hPa面高度偏差のEOF1成分．上図左から観測，T106，T42の現在気候実験の空間パターン（Z500に回帰：コンター，降水量に回帰：陰影）．下図はPC1の時系列．黒線は観測，青線はT106，赤線はT42の現在気候実験の結果．

同様に第2主成分PC2の500hPa高度場及び降水量への回帰図を図2に示した．観測と現在気候実験とはよく似た空間パターンを示している（図2上図）．このモードにおいては，ジオポテンシャル高度場は第1モードと比較して東西方向に広がった南北双極子構造をしており，この二つの波のコントラストが大きい．観測と現在気候実験（T106）のアンサンブル平均のPC2の時系列の相関は0.50と高い値を示したが，T42の現在気候実験では-0.19と弱い逆相関を示す．

以上により，この大気大循環モデルでは，少なくともT106の水平解像度であった場合，東アジア域の夏季の天候の年々変動が現実的に表現されていることが分かった．また，特に第1主成分の時系列は，メンバー毎のばらつきも少なく，アンサンブル平均でも観測と良く似た年々変動を示すことから，海面水温のような下部境界条件に大きく影響を受けたモードであると考えられる．

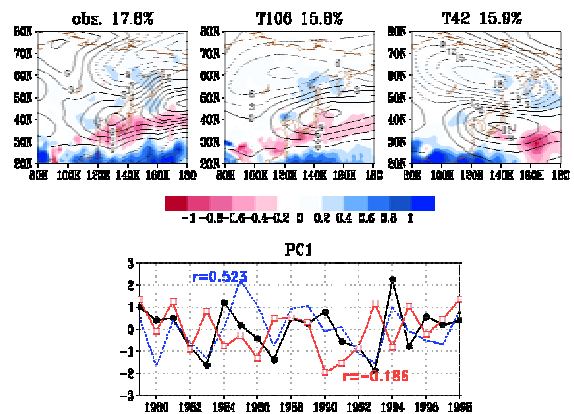


図2：図1に同じ，但しEOF2に対応する空間パターン及びPC1の時系列．

4. 下部境界条件との関係

現在気候実験のEOF第1モードにおいて見られた南北三極構造のうち，北緯45度以南の水平構造は，夏季東アジアの主要変動パターンとしてよく知られているPJパターン（Nitta 1987）とも似ている．実際に，PJパターンの励起源である亜熱帯西部太平洋の対流活動（140°E-150°E, 15°N-20°Nの領域平均したOLR）とPC1との相関係数は，観測で0.52，現在気候実験T106で0.39と有意な値を示す．EOF第1モードの本質がPJパターンであるならば，下部境界条件との強い関係も熱帯域の励起源に対する応答として解釈可能である．そこで，現在気候実験と関連している地表面の境界条件を探るため，観測及び現在気候実験のPC1と2m気温との相関を計算した（図3）．現在気候実験では観測のそれと比較して正符号の領域が大きいが，相関パターンには共通点が多い．共通する特徴を持つ，95%の有意水準を越えた部分は，熱帯太平洋域の西の正の偏差，中央-東の負の偏差，大西洋の亜熱帯と極域に存在している．最初に挙げた西部太平洋域のSST偏差は，梅雨前線や東アジアモンスーンとの関係が示唆されている（Nitta 1987; Lau et al. 2000）．

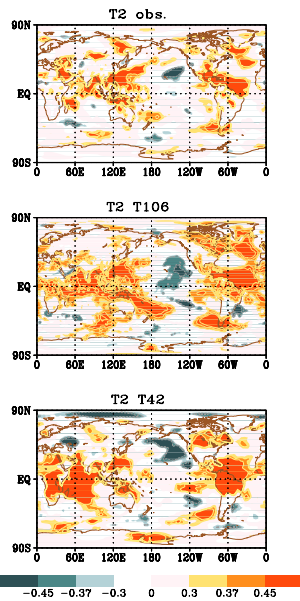


図3：PC1と2m気温との相関。陰影をつけたところはそれぞれ，90%，95%，98%以上有意な場所。

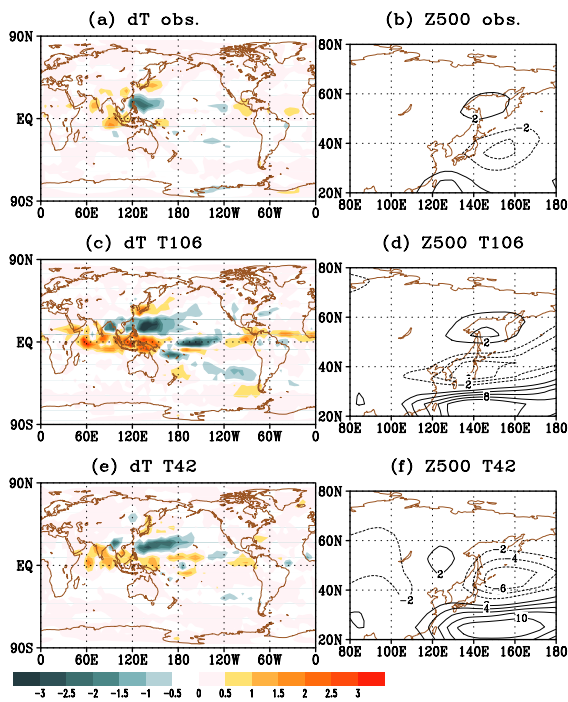


図4：LBMに与えた熱強制の鉛直積分 (a), (c), (e) .[K/day]) と計算された線形応答のZ500 (b), (d), (f) .

そこで，こうしたSST偏差によって生じる積雲対流活動がロスビー波の北への伝播に

よって中高緯度まで影響を及ぼしている可能性 (Nitta 1987) を考える。すなわち，PC1に回帰した大気加熱を強制源としてその応答を調べた。ここで，線形応答を調べるために Watabane and Kimoto (2000, 2001) の Linear baroclinic model (LBM) を用いた。水平，鉛直解像度は T42L20 で，基本場はそれぞれの JJA 平均 (現在気候実験についてはアンサンブル平均の JJA 平均) ，強制として観測には降水量から大気加熱率を見積もり，鉛直分布は経験的に求められた値 (Reed and Recker 1971) を用いている。図4左図に強制として与えた大気加熱率を鉛直積分したものを示した。図4の右図がそれぞれ求められた線形応答の500hPa面高度である。観測及びT106では，PJパターンに良く似た西太平洋域熱帯，亜熱帯のシーソー構造に加えて，高緯度にも作用中心を持つ三極構造が見られる。但し，T42の応答パターンにはこの北の作用中心が見られない。また，線形応答パターンとして得られた北の作用中心はいずれも，EOF第1モードの水平パターンと比較して南偏し，振幅も弱い。

5. 地球温暖化時の東アジア域の年々変動

地球温暖化時の夏季東アジア域の気候の変化は，二酸化炭素倍増条件下での7メンバーアンサンブル実験と現在気候実験の結果とを比較することにより得られる。二酸化炭素倍増条件下では，2m気温は北東シベリア域で特に増加し，500hPa面ジオポテンシャル高度場は北東シベリア域からオホーツク海にかけて特に増大していた。また，この強化された高気圧の南端で降水が帯状に増えている。これらの空間的な構造は，前節の現在気候のEOF第1モードに似ている。

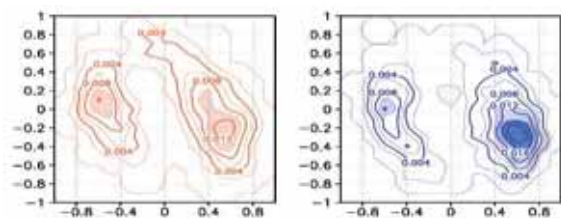


図5：現在気候の主変動パターンEOF1（横軸）とEOF2（縦軸）に射影した年々変動．右：現在気候，左：二酸化炭素倍増実験．

次に，二酸化炭素倍増実験と現在気候の年々変動を比較するため，前節で得たEOFの各モードに二酸化炭素倍増実験の年々変動を投影した．図5はJJA 各月の各アンサンブルの結果を，現在気候のEOF1,EOF2で張られた二次元空間上に投影した確率密度関数である．現在気候のジオポテンシャル場の年々変動（図5左）は，EOF1への射影の符号による2つのレジームに分かれている．EOF1への正の投影の大きいレジームでは，気圧配置では東シベリアから南へ三極構造を持ち，梅雨前線は強化され日本は冷夏となる．負の投影の大きいレジームはその逆となる．但し，観測値のこれと同様の確率密度関数では，データ数が少ないために，このような明瞭な2つのレジームは現れなかった．一方で，二酸化炭素倍増実験の確率密度関数はEOF1への正の投影の大きいレジームに多く現れた（図5右）．これは，地球温暖化により日本で冷夏となるような気圧パターンの頻度が増すことを示している．気候値で見た温暖化による気圧配置の変化もこの年々変動の変化によって生じているものと考えられる．

6. 長周期波動によるフィードバック効果

こうした選択的に現れる2つのレジームの存在は，システムに非線形的な効果が働いているものと考えられる．そこで，EOF1へ

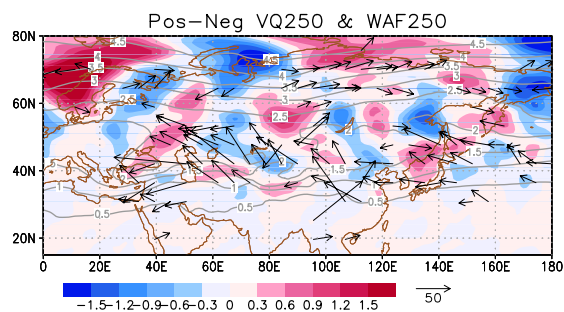


図6：冷夏型18例と暑夏型16例のコンポジットの差．陰影はポテンシャル渦度フラックス，矢印はwave activity flux．灰色線はポテンシャル渦度の気候値を示した．

の射影が正であるレジームを冷夏型，負であるレジームを暑夏型と名付け，それぞれのカテゴリーに属する年でコンポジットを作成し比較した．冷夏型は18例，暑夏型は16例取った．図6に示したwave activity fluxの冷夏型と暑夏型との差（矢印）を見ると，80°E以東で極前線ジェット的位置に相当する70°N付近にwave activity fluxの東向き成分が大きくなっていることが分かる．さらに，ポテンシャル渦度フラックスの南北成分（ $v'q'$ ，陰影）は極東域で50°Nを中心とする負の領域が見られる．これは，基本場に対して南向きの渦度フラックスが存在することを意味し，分流のある基本場に対して正のフィードバック効果を示す（Shutts 1983）．図7はそれを模式的に示したものである．基本場に分流があり，その中心付近に波による負のポテンシャル渦度フラックスが存在するということは，正のポテンシャル渦度を南に，負のポテンシャル渦度を北に運ぶことを意味する．すなわち，分流のある基本場はより波のフィードバック効果によって強調される．これが二者択一的な年々変動が数値実験において生じた一因ではないかと思われる．

7. 議論と今後の課題

二酸化炭素倍増時のジオポテンシャル高度場や降水量の気候値の変化は、Palmer (1999) や Corti et al. (1999) で議論されたように、このレジームの出現頻度の変化に拠っている。ただし、本研究で議論に用いているのは、Palmer (1999) で述べられているような大気のみ内部変動モードではなく、海面水温などの境界条件との相関の高い「強制」モードである。また、Palmer (1999) や Corti et al. (1999) では、こうしたレジームの出現頻度の地球温暖化による変化を北半球の冬季において議論していたが、本研究ではこれと似た現象が、大気大循環モデルによって再現された夏季の東アジアの気候変化においても起こり得ることを示した。これは、主変動モードの年々変動はPJパターンに見られるようなSSTなど下部境界条件に対する応答であるためと考えられる。熱帯の高緯度への影響は比較的小さいが、長周期の波によるフィードバック効果により、高緯度のブロッキングを促進し南北3極構造を形成していると考えられる。こうした基本場と波との相互作用に関してはさらに詳しく調べたい。一般には夏季の東アジア域の天候の予測可能性は低いと言われている (Brankovic and Palmer 1997, 2000) が、こうした東アジア域の年々変動に影響を及ぼす境界条件を詳しく解析し要因の特定を行うことで、今後の気候モデルの改良に対し貢献出来る可能性がある。

また、境界条件として与えた海面気温だけではなく、積分計算の結果である地表面上の気温においても、東シベリア域に共通して高温偏差が見られた。この東シベリア域の高温偏差は、オホーツク海高気圧に伴うブロッキング高気圧と関係していることが示唆され

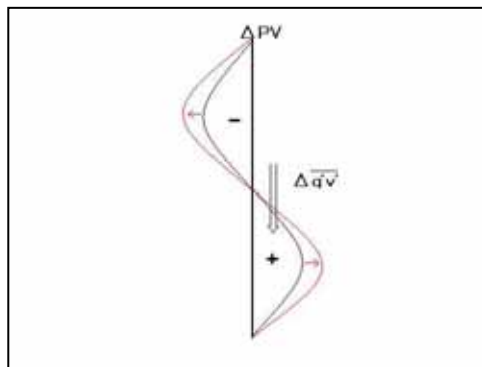


図7：波によるフィードバック効果を示した概念図。

ている (Nakamura and Fukamachi 2004; Tachibana et al. 2005; Arai and Kimoto 2005)。この関係は、二酸化炭素倍増による東シベリア域の高温化と高気圧偏差の増大と一致している。これらの境界条件がどのように東アジア域の気候に影響を及ぼすのかについては、今後さらに解析を進め明らかにしたい。

参考文献

- Arai, M. and M. Kimoto, 2005: Relationship between springtime surface temperature and early summer blocking activity over Siberia. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 261-267.
- Brankovic, C. and T. N. Palmer, 1997: Atmospheric seasonal predictability and estimates of ensemble size, *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 859-874.
- and -----, 2000: Seasonal skill and predictability of ECMWF PROVOST ensembles. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 2035-2067.
- Corti S., F. Molteni, T. N. Palmer, 1999: Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes. *Nature*, **398**, 799-801.
- K-1 model developers, 2004: K-1 coupled

- GCM (MIROC) description, edited by H. Hasumi and S. Emori, K-1 *Technical Report*, **1**, 34pp. (available from the Center for Climate System Research, University of Tokyo)
- Kodama, Y.-M., 1997: Airmass transformation of the Yamase air-flow in the summer of 1993. *Meteor. Soc. Japan*, **75**, 737-751.
- Lau K.-M., K.-M. Kim and S. Yang, 2000: Dynamical and boundary forcing characteristics of regional components of the Asian summer monsoon. *J. Climate*, **13**, 2461-2482.
- Nakamura, H. and T. Fukamachi, 2004: Evolution and dynamics of summertime blocking over the Far East and the associated surface Okhotsk high. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 1213-1234.
- Ninomiya, K. and H. Mizuno, 1985: Anomalously cold spell in summer over Northeastern Japan caused by northeasterly wind from polar maritime airmass. *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 845-871.
- Nitta, T., 1987: Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 373-390.
- Palmer T. N., 1999: A nonlinear dynamical perspective on climate prediction. *J. Climate*, **12**, 575-591.
- Reed, R. J. and E. E. Recker, 1971: Structure and properties of synoptic-scale wave disturbances in the equatorial western Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **28**: 1117-1133.
- Shutts, G. J., 1983: The propagation of eddies in diffluent jetstreams: eddy vorticity forcing of 'blocking' flow fields. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **109**, 737-761.
- Tachibana, Y., T. Iwamoto, M. Ogi, Y. Watanabe, 2004: Abnormal meridional temperature gradient and its relation to the Okhotsk high. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1399-1415.
- Wang, Y., 1992: Effects of blocking anticyclones in Eurasia in the rainy season (Meiyu/Baiu season). *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 929-951.
- Wang, Y. and T. Yasunari, 1994: A diagnostic analysis of the wave train propagating from high-latitudes to low-latitudes in early summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 269-279.
- Watanabe, M. and M. Kimoto, 2000: Atmosphere-ocean thermal coupling in the North Atlantic: A positive feedback. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **126**, 733-734.
- and ----- 2001: Corrigendum, *Quart. J. R. Met. Soc.*, **127**, 929-951.
- Xie, P. and P. A. Arkin, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **78**, 2539-2558.