

# 盛夏期におけるオホーツク海高気圧の 出現に関連する内部力学過程

東大・気候システム 佐藤 尚毅 高橋 正明

## 1. はじめに

盛夏期に出現するオホーツク海高気圧によって、北日本にしばしば顕著な冷夏がもたらされる (Ninomiya and Mizuno, 1985). このため以前からオホーツク海高気圧が日本の天候に与える影響については多くの研究がなされてきた (例えば、倉嶋, 1969). しかし、今なお、長期予報における盛夏期の天候の予測には十分な精度があるとはいえず、また、将来の気候変動によるオホーツク海高気圧を含む盛夏期の東アジア域の気候の変動について十分に信頼できる予測ができていないのが現状である. 近年では力学的な観点からの研究により、盛夏期のオホーツク海高気圧の形成には、シベリア上の上部対流圏における高気圧性偏差が本質的な役割を果たしていることが分かってきた (Nakamura and Fukamachi, 2003). また著者らによるこれまでの研究により、この高気圧性偏差は基本場から偏差場への順圧的運動エネルギー変換によって強化されることも明らかにされてきた (Sato and Takahashi, 2003). 本研究では、シベリア上の高気圧性偏差を線形順圧モデルにおける定常応答問題の解のひとつとして抽出し、北半球全域に無作為に置かれた渦度強制によって励起された偏差パターンが基本場からエネルギーを受けとることによって自分自身を維持する作用に着目して議論する.

## 2. 偏差パターンの抽出

ここでは、各年の盛夏期におけるオホーツク海高気圧の平均的な強弱に対応した気圧偏差パターンの抽出を行う. オホーツク海高気圧は地表付近で見られる背の低い寒冷高気圧であるが、前節で指摘した通り、オホーツク海高気圧の形成には上部対流圏における気圧偏差

が本質的に重要であり、本研究でも次節以下では上層での偏差パターンに注目する. そこで本節では、海面気圧に注目したオホーツク海高気圧の指標化と、上層での気圧偏差パターンに着目した指標化の両方を試みる. 解析期間は 1979 ~ 1995 年の盛夏期 (7 月 20 日 ~ 8 月 18 日) とし、NCEP/NCAR による再解析データの海面気圧と 250 hPa 面高度を用いる. この時期は、亜熱帯ジェットが最も北上して弱くなっている時期である (図は省略). 以下の解析では 30 日間で平均した場を解析の対象とする.

海面気圧を用いた指標化においては、北日本とオホーツク海高気圧の北部との南北方向の気圧勾配に注目して、オホーツク海を中心とした東経  $130^{\circ}$  ~  $160^{\circ}$  の範囲で平均した北緯  $60^{\circ}$  と  $40^{\circ}$  との間の海面気圧差を指標とする. 指標は 17 年間の平均が 0, 分散が 1 になるように規格化する. 規格化された指標に対する、海面気圧と 250 hPa 面高度の回帰を計算したところ、それぞれ、オホーツク海付近における高気圧偏差とシベリア上空での高気圧偏差が見られ (図は省略), 本研究において対象としているオホーツク海高気圧とよく対応していると思われる.

次に、250 hPa 面高度を用いた指標化を行う. オホーツク海高気圧に対応した上層の高度偏差場はオホーツク海周辺の領域において卓越した変動であることを期待して、オホーツク海周辺 (北緯  $60^{\circ}$  ~  $90^{\circ}$ , 東経  $90^{\circ}$  ~ 西経  $150^{\circ}$ ) の 250 hPa 面高度偏差について主成分解析を行う. 第 1 主成分に対する海面気圧と 250 hPa 面高度の回帰を計算したところ、それぞれ、オホーツク海付近における高気圧偏差とシベリア上空での高気圧偏差が見られ (図 1, 2), この指標も本研究において対象としているオホーツク海高気圧とよく対応していることが確か

められた。前段落での解析結果と比較して、回帰のパターンも類似しており、時系列もよく相関している。以下の解析では 250 hPa 面における解析を行うので、後者の主成分解析におけるこの第 1 主成分をオホーツク海高気圧の指標として用いることにする。

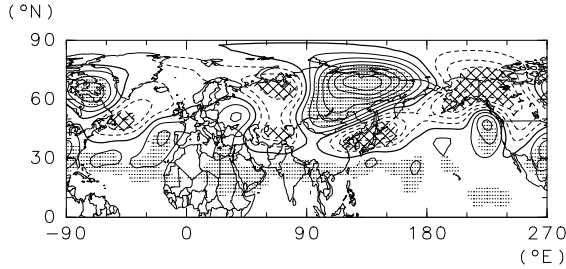


図 1: 第 1 主成分に対する 250 hPa 面高度の回帰。等値線間隔は 10 m。負の等値線は点線。95% 有意な正と負の偏差にそれぞれ影つけと網かけ。

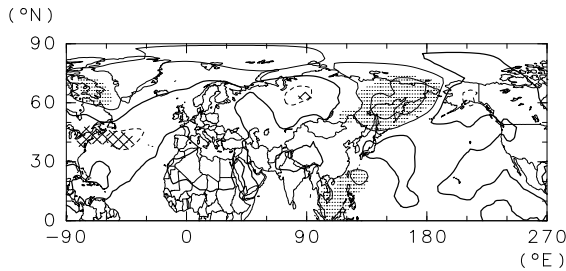


図 2: 第 1 主成分に対する海面気圧の回帰。等値線間隔は 1 hPa。負の等値線は点線。95% 有意な正と負の偏差にそれぞれ影つけと網かけ。

この指標と 30 日平均した北日本の気温偏差の年々変動を図 3, 4 に示す。両者には明瞭な負の相関があることが分かる (相関係数は  $-0.871$ )。また、この指標は、北日本だけでなく東日本、西日本の気温偏差とも有意に相関している (相関係数はそれぞれ  $-0.717$ ,  $-0.563$ )。これらの相関は、オホーツク海高気圧が出現すると、「やませ」のような冷たい北東流が流入して、冷夏がもたらされることと対応していると考えられる。

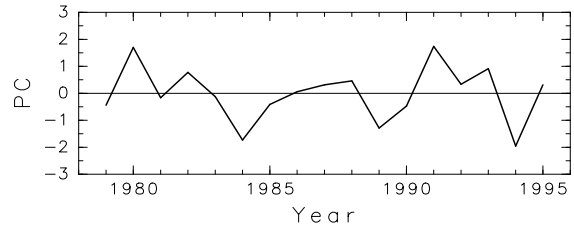


図 3: 250 hPa 面高度場における第 1 主成分。

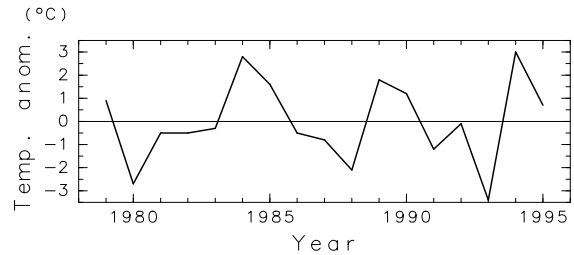


図 4: 7 月 20 日～8 月 18 日の北日本における気温偏差。

### 3. 順圧的運動エネルギー変換

図 1 に示した偏差パターンは、地表付近ではオホーツク海上での気温偏差に対応して大きな傾圧性があるが、700 hPa より上層ではほとんど傾圧性が見られず、図 1 と類似した形をしている (図は省略)。また、偏差の振幅は圏界面付近で最大になっている (図は省略)。こうした事実から、図 1 に示したようなオホーツク海高気圧に対応した偏差パターンは、対流圏の長期変動で見られる他のパターンと同様、等価順圧的な構造をしていると考えられる。以下では、250 hPa 面において等価順圧を仮定した解析を行う。

ここでは、図 1 で示されたような偏差場 (回帰場) が基本場 (解析期間における平均場) との関連で特に現われやすいパターンである可能性を定量的に評価するため、250 hPa 面において順圧的運動エネルギー変換を評価する。局所直交座標を用いると、基本場と偏差場との間の順圧的運動エネルギー変換は次のように書ける。

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \right) \left( \frac{u'^2 + v'^2}{2} \right) \\ &= -u'^2 \frac{\partial}{\partial x} \bar{u} - u'v' \frac{\partial}{\partial y} \bar{u} - u'v' \frac{\partial}{\partial x} \bar{v} - v'^2 \frac{\partial}{\partial y} \bar{v} \end{aligned}$$

上式によって得られたエネルギー変換を北緯  $20^\circ$  以北の全経度で積分したところ、 $CK =$

$2.61 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^3$  が得られた. 一方, 運動エネルギーの積分は,  $KE = 2.07 \text{ m}^2/\text{s}^2$  である. エネルギー変換によって偏差場がエネルギーを得る時間スケールを評価すると約 8 日となる. オホーツク海高気圧の代表的な時間スケールが 7 ~ 10 日程度であることや, 本解析では 30 日平均場を解析していることを考えると, このエネルギー変換は図 1 に示したような偏差パターンの形成に有意に寄与していると考えられる. 以上に示した値は北半球中高緯度での積分値であるが, 積分する前の各地点での値の分布を示すと図 5 のようになる. ユーラシア大陸上での亜熱帯ジェットが強くなっている部分, つまりアジアジェットの入口付近 (黒海付近) と出口付近 (中国東北部からオホーツク海にかけての領域, さらに北極海沿岸の分流したジェットが強くなっている領域で正のエネルギー変換が見られる. これらは, 基本場の絶対渦度場に顕著な歪みの見られる領域である (図 6). 運動エネルギー変換が基本場の歪みと関係していることが確かめられる.

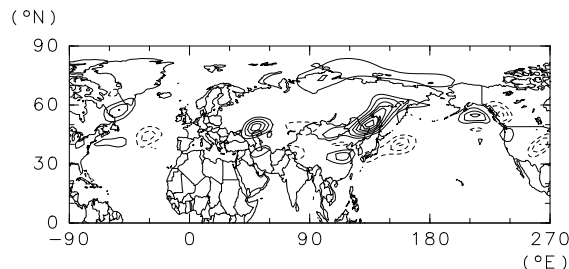


図 5: 基本場と偏差場との間の順圧的運動エネルギー変換. ゼロの等値線は省略し, 負の等値線は点線. 等値線間隔は  $25 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^3$ .

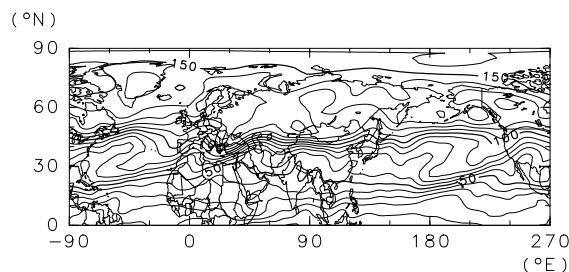


図 6: 基本場における 250 hPa 面絶対渦度. 等値線間隔は  $10 \times 10^6 /\text{s}$ .

#### 4. 線形順圧モデルにおける定常応答

前節での結果に対応して, 特別な空間分布を持たない様な強制に対しても, 基本場との関連によって図 1 のような偏差パターンが現われやすいかどうか検討する. ここでは 250 hPa 面において以下のような線形順圧モデルを用いる.

$$\frac{\partial}{\partial t} \xi' + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \xi' + \mathbf{u}' \cdot \nabla (f + \bar{\xi}) + \nu \nabla^4 \xi' + \frac{1}{\tau} \xi' = F$$

外部強制  $F$  は, 北半球の北緯  $30^\circ$  以南の低緯度域の全経度においてほぼ均等に分布した 108 地点を中心とした局所的な負の渦度強制として与える. こうして得られた 108 個の定常応答解を流線関数偏差として表した上で, 図 1 において 250 hPa 面高度偏差に対して行ったのと同様の方法で統計的に処理し第 1 主成分を求める. 本節における解析の基本的な考え方は線形演算子に対する SVD 解析と同じである. ここでは, 実験結果に対する解析を比較のため観測データに対する解析と同様に限られた領域で行い, また低緯度と中高緯度の渦度強制を分けて考えるため, このような方法を用いている. こうして求めた第 1 主成分に対する, 流線関数偏差の回帰を計算した (図 7). 日本周辺では図 1 と類似したパターンになっている. 外部強制  $F$  を北緯  $30^\circ$  以北の中高緯度に均等に置いた場合においても (図 8), 第 1 主成分に対する回帰は, オホーツク海周辺では図 1 と類似する. こうした結果は, 仮に外部強制が一様に分布していたとしても基本場との間の力学的な相互作用によって図 1 のような偏差パターンが現れやすいことを意味する. ただし, 同じ強さの強制を与えた場合の振幅は, 低緯度においた場合のほうが, かなり小さい (5 分の 1 程度). 一方で, 実際の気象における渦度強制に関しては, 夏季においては冬季に比べて中高緯度での移動性じょう乱からのフィードバックが小さいと考えられる. このため, 低緯度での対流活動による渦度強制の重要性が夏季には相対的に大きくなると期待される. このため, 中高緯度と低緯度からの強制に対する応答の定量的な比較には注意が必要である.

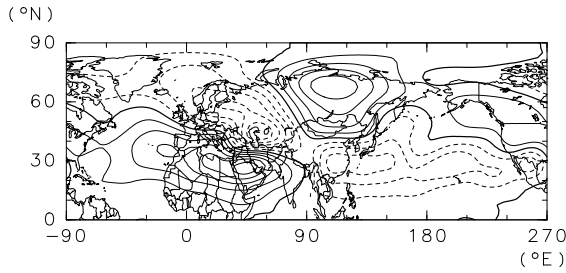


図7: 定常応答問題における第1主成分に対する流線関数の回帰. 強制は低緯度に与えた. 等値線間隔は  $0.1 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ . 負の等値線は点線.

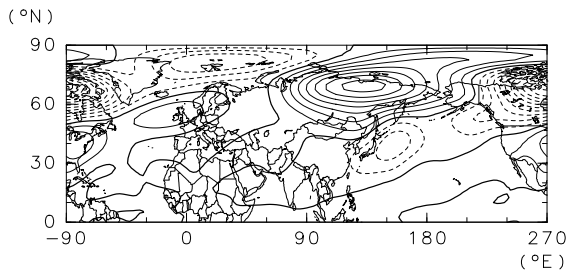


図8: 図7と同じ. ただし強制は中高緯度に与えた. 等値線間隔は  $0.5 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ .

以上の実験においては、減衰の時間スケール  $\tau$  を、 $\tau = 5 \text{ days}$  としたが、 $\tau = 10 \text{ days}$  とした場合、図7の結果はわずかに図1により近くなる(図は省略). このとき図8の結果は高緯度域に波数1の偏差パターンがより強く見られるようになり、図1とはかなり違ったパターンになる(図は省略). 低緯度からの応答に限れば、実験結果のパラメータ依存性は小さく、本実験の仮定のもとで観測と似た結果が得られているといえる. なお、 $\tau = 5 \text{ days}$  の場合、この系には不安定モードは存在しない.  $\tau = 10 \text{ days}$  の場合には、亜熱帯ジェット上での波列と見られる形をした不安定モードが現われるが、偏差の中心は中緯度にあり、第7, 8のパターンとは対応しないようである.

図7, 8の結果は図1に示した観測データの解析と比べて空間スケールがやや大きくなっている. これは南北風に対応する伸縮渦度の効果が含まれていないためと考えられる.

上記の実験において、第1主成分に対応する偏差パターンを特に効率的に励起できる渦度強制は、例えば、 $(65^\circ\text{N}, 30^\circ\text{E})$ ,  $(65^\circ\text{N}, 150^\circ\text{E})$ ,  $(25^\circ\text{N}, 45^\circ\text{E})$  などに置かれた強制である. こ

れらの強制に対する個別の応答パターンは、シベリア付近に極大がある点では共通するものの、全体的な形はそれぞれに大きく異なっている(図は省略). これは、図1のような偏差パターンはあくまで、複数の異なるパターンの重ね合わせであることを意味する. 言い換えれば、北半球全体で見ればオホーツク海高気圧の出現に関連するパターンは唯一のものがあるわけではないことを示している. 実際に、オホーツク海高気圧の強かった年の偏差パターンを半球スケールで見れば、年ごとにかなり異なった形状をしていて、共通点を見出すことは難しい(図は省略).

本研究の結果は、長期予報や気候変動の予測において盛夏期のオホーツク海高気圧の強さの変動特性を正確に予報するためには、基本場から偏差場へのエネルギー変換をもたらす基本場の歪みの正確な再現と、北半球全域での渦度強制を正しく与えることが本質的に重要であることを示唆している.

#### 参考文献

- 倉嶋厚, 1969: オホーツク海高気圧について—昭和41年度全国予報技術検討会報告—, 研究時報, **21**, 170-193.
- Nakamura, H. and T. Fukamachi, 2003: Evolution and dynamics of summertime blocking over the Far East and the associated surface Okhotsk high, *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, submitted.
- Ninomiya, K. and H. Mizuno, 1985: Anomalous cold spell in summer over northeastern Japan caused by northeasterly wind from polar maritime air mass Part 2. Structure of the northeasterly flow from polar maritime air mass, *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 859-871.
- Sato, N. and M. Takahashi, 2003: Properties of the Okhotsk high as a dynamical mode in northeast Asia in midsummer, *Tohoku Geophys. Journ.*, **36**, 505-509