

西太平洋 (WP) パターンの特徴と形成メカニズム

田中 翔 (東大先端研)・中村 尚・西井和晃・宮坂貴文

1. 研究背景

昭和 38 年豪雪や平成 18 年豪雪などの寒冬には、しばしば西太平洋上の対流圏中上層高度場偏差に南北双極子構造が観測される。このテレコネクションパターンは、Wallace and Gutzler (1981: 以下 WG81) によって西太平洋 (Western Pacific: WP) パターンと命名されている。WP は、Pacific North American (PNA) パターン (WG81) と比較してあまり注目されてこなかったが、寒波をもたらす要因として近年注目されている。しかし、WP パターンの形成メカニズムに関する先行研究はほとんどされていない。

Walker and Bliss (1932) はアリューシャンとハワイの間の気圧に負の相関をもたらすテレコネクションパターンを見だし、北太平洋振動 (NPO) と命名した。これは北太平洋のストームトラック南北変動を伴うため、北米の西岸域に異常気象をもたらす。また、Linkin and Nigam (2008) は冬季北太平洋 SLP の EOF 第 2 モードに現れるパターンを WP パターンと NPO を同一のパターンと見做し、NPO/WP パターンと呼んだ。しかしながら、彼らの論文で指摘しているように、NPO/WP パターンに伴う海水変動は WG81 の定義に基づく WP パターンに伴う海水変動と異なるため、WP パターンと NPO は別の変動の

可能性がある。このように WP パターンに関する議論が続いていることは、我々の WP パターンの理解が不十分なためと考えられる。本研究は、WP パターンの 3 次元構造を明らかにし、形成メカニズムの解明を目的とする。

2. データと解析手法

NCEP-NCAR 再解析データ (Kalnay et al. 1996) の 1948/49 – 2010/11 年の冬季 (DJF) を解析に用いた。水平解像度は $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ で、鉛直層数は 17 層である。

3. 長期再解析データにおける WP の同定

ある基点との高度場などに関する相関が最も大きな負の値の絶対値をテレコネクティビティと呼ぶ (WG81)。この値を基点の値とする操作を北半球の格子点全てに對し行うことにより、北半球で卓越するテレコネクションを半球で検出することができる。1948/49–2010/11 年のデータに基づくテレコネクティビティマップ (図 1a) において、太平洋上の PNA パターンと、大西洋上の NAO または 西大西洋 (Western Atlantic) パターン (WG81) が確認できる。WG81 が定義した WP パターンの作用中心 (図の緑点) ではテレコネクティビティの値が大きいものの、より短期間のデ

ータに基づく WG81 の結果と比べ WP に伴う明瞭な極大が見られない。これはすぐ近くの PNA パターンが WP パターンより卓越していることが原因と考えられる。そこで PNA パターンの影響を取り除くため、PNA 指数を除去した偏相関を用いてテレコネクティビティマップを作成した (図 1 b)。北太平洋上には WP パターンに伴う双極子構造とともに、その東に別の極大が現れる。この東の南北双極子構造は NPO と考えられ、WP パターンは NPO とは別の

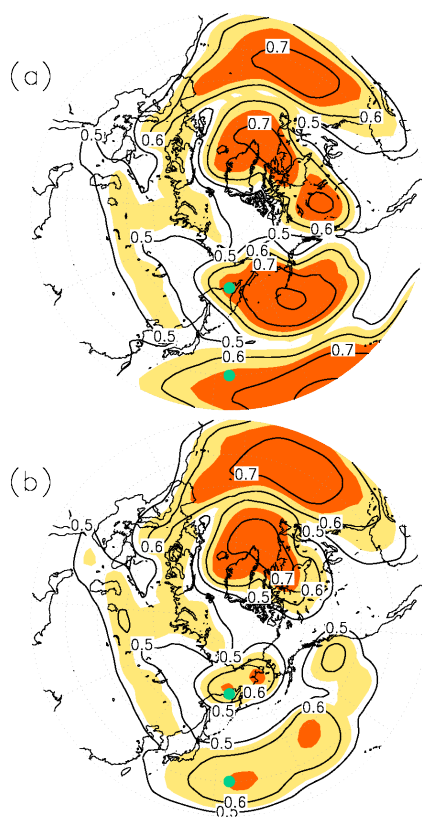


図 1. (a) 1948/49 - 2010/11 年冬季 (DJF) Z500 のテレコネクティビティマップ. (b) (a) と同じ期間において PNA の影響を取り除いたテレコネクティビティマップ. 線、陰影はテレコネクティビティを表している. 線は 0.5 より 0.1 間隔. 陰影の間隔は 0.55, 0.65. 緑点は WG81 の WP 定義点 (155°E , 60°N), (155°E , 30°N).

変動の可能性を示唆する。これは NPO と WP パターンを同一視した Linkin and Nigam (2008) を否定する。彼らが行った EO) ため、互いに重複部分が多い空間パターンを持つ WP と NPO とが分離できず、第 1 モードである PNA の次の第 2 モードとして、WP と NPO の結合モードが検出されたと考えられる。

次に 45 年間で 3 つの期間に分け、各 15 年間に関するテレコネクティビティマップを作成した (図 2 (2)-(4)). 1960-75 年は WP が卓越するが、76-90 年は WP が弱まり、再び 91-05 年は卓越傾向にあった。この結果は WP パターンの長期変動を示唆しているが、その原因については、今後の課題である。

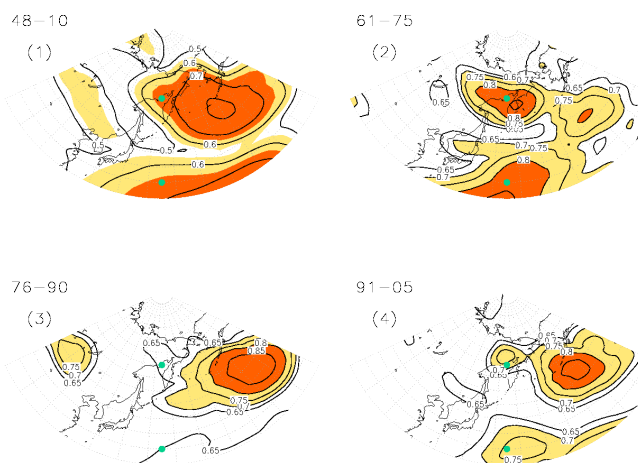


図 2. (1) 1948/49 - 2010/11 年, (2) 1961/62-75/76 年, (3) 1976/77-90/91 年, (4) 1991/92-2005/06 年に冬季 (DJF) Z500 のテレコネクティビティマップ. (1)線は 0.5 より 0.1 間隔. 陰影の間隔は 0.55, 0.65. (1)以外: 線は 0.65 より 0.05 間隔. 陰影の間隔は 0.7, 0.8. 緑点は WG81 の WP 定義点 (155°E , 60°N), (155°E , 30°N).

4. 合成図解析

WP パターンの 3 次元構造を明らかにするため、合成図解析を行った。WG81 で定義された WP index が 1 標準偏差を超える 32 ヶ月の偏差場を用いて合成図を作成した (図 3)。

この各作用中心の緯度における東西、南北鉛直断面図は図 3 の下の図になる。従来、テレコネクションパターンは等価順圧的な構造を伴うと考えられてきたが、WP パターンは高さと共に南西へ傾く傾圧構造をしている。次節で示すようにこの傾圧構造が WP パターンの維持・形成に大きく寄与している。

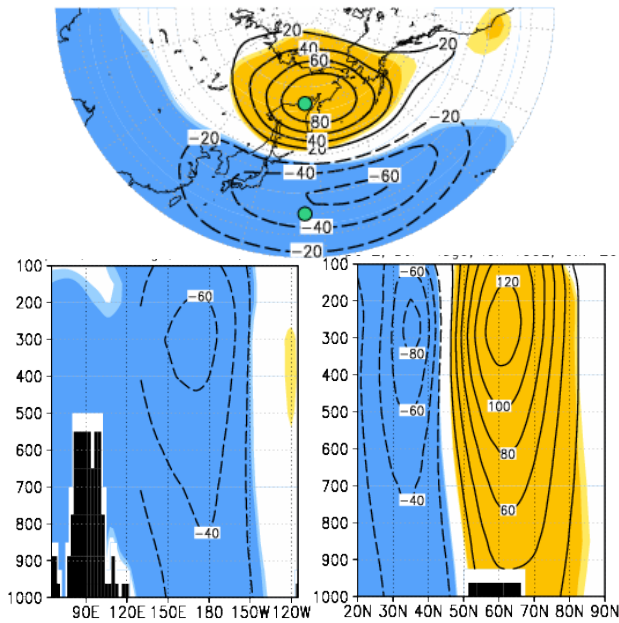


図 3. (上) Z500 の合成図. (左下) 南の作用中心緯度 (30°N), (右下) 南北の作用中心経度 (155°E) における鉛直断面図 (縦軸: 気圧 (hPa)). 線は偏差の値. 濃い (薄い) 陰影は 95% (90%) 有意性を表す. 上図の緑点は WG81 の WP 定義点.

5. エネルギー変換

WP パターンの維持・形成メカニズムを調べるため、WP に伴う偏差場と気候平均場の間のエネルギー変換を調べた (Hoskins et al. 1983; Simmons et al. 1983; Kosaka and Nakamura 2006)。

$$CK = \frac{v'^2 - u'^2}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) - u'v' \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)$$

$$CP = \frac{R}{pS_p} (-u'T' \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} - v'T' \frac{\partial \bar{T}}{\partial y})$$

$$CQ = \frac{R}{C_p} \left(\frac{T'Q'}{pS} \right)$$

それぞれ、順圧エネルギー変換 (CK), 傾圧エネルギー変換 (CP), 非断熱加熱によるエネルギー生成 (CQ) である。()' は WP に伴う偏差で、over bar は冬季気候平均を表す。CK は上部対流圏で最も大きく、冬季気候平均の jet 中心の南北で極大を示す (図 4 上)。これは jet の出口付近 (気候平均 u の東西傾度が著しい領域) において南北風偏差より東西風偏差が卓越し (CK の第二項に対応)、また jet の極大付近 (気候平均の u の南北傾度が顕著な領域) の北側で北東風、南側で北西風偏差であるため (CK 第一項に対応) 効率的に気候平均場から偏差場へ運動エネルギーが変換されている。また、CP は下層で卓越している。北の作用中心の南側で気候平均 500hPa 気温の東西傾度が顕著であり、また高度偏差場が高さとともに南へ傾くことに伴う西向き熱フラックスが存在するため効率的に偏差場へ有効位置エネルギーが変換されている。南の作用中心の西に位置する CP

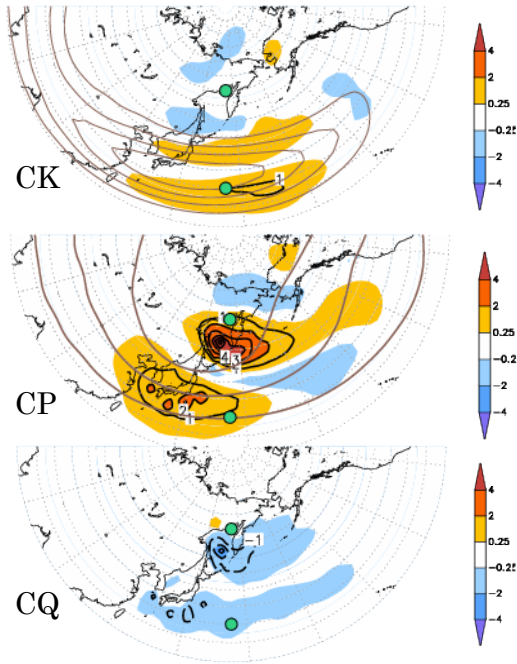


図 4. (上図)順圧エネルギー変換量 (CK), (中央図) 傾圧エネルギー変換量 (CP), (下図)非断熱加熱によるエネルギー生成量 (CQ)の鉛直積算図. 線、陰影ともに変換量 (W/m^2). コンター間隔は $1 \text{ W}/\text{m}^2$. 上図 (中央図)の茶線は U250 (T500)の DJF 気候平均場. 緑点は WG81 による WP の定義位置.

の極大は、気候平均 500hPa 気温場の顕著な南北傾度上に、偏差に伴う北向き熱フラックス存在することから効率的に気候平均場から偏差場へ有効位置エネルギーが変換されている。非断熱加熱の影響は対流圏下層に限定されている。北の作用中心の南側では大陸からの寒気吹きだしが平年より抑えられ、顕熱フラックスが弱まるため、下層で非断熱加熱の負偏差となる。この負偏差は、WP に伴う高温偏差を弱化させようとするため、WP の有効位置エネルギー

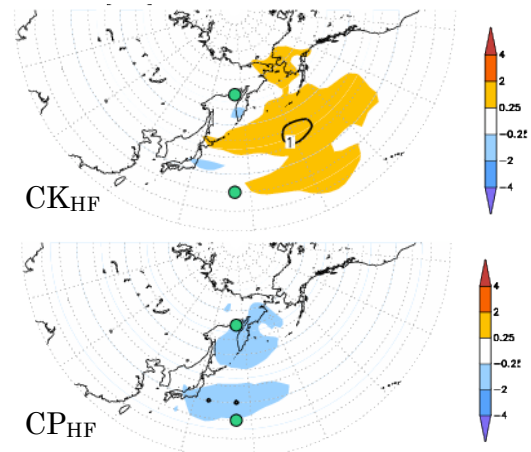


図 5. (上図)移動性擾乱に伴う順圧エネルギー変換量 (CK_{HF}), (下図)移動性擾乱に伴う傾圧エネルギー変換量 (CP_{HF})の鉛直積算図. 線、陰影ともに変換量 (W/m^2). 上図. 緑点は WG81 による WP の定義位置.

ギーを減少させる。南の作用中心付近に東西に伸びる負の CQ では、北の作用中心と逆の現象が起きている。

冬季には、移動性擾乱活動が活発なため、この WP による変調に伴うエネルギー変換が無視できない。移動性擾乱の変動による偏差場への順圧エネルギー変換 (CK_{HF}) と傾圧エネルギー変換 (CP_{HF}) は以下のように表される。

$$\text{CK}_{\text{HF}} = u' \left(-\frac{\partial}{\partial x} (u''u'') - \frac{\partial}{\partial y} (u''v'') \right) + v' \left(-\frac{\partial}{\partial x} (u''v'') - \frac{\partial}{\partial y} (v''v'') \right)$$

$$\text{CP}_{\text{HF}} = \frac{RT'}{pS_p} \left(-\frac{\partial}{\partial x} (u''T'') - \frac{\partial}{\partial y} (v''T'') \right) - \left(\frac{p}{p_s} \right)^{\kappa} \frac{\partial}{\partial p} (\theta''\omega'')$$

ここで ()'' は短周期擾乱であり、8 日間の高周波フィルタを施した場を用いる。

対流圏上層では移動性擾乱に伴う西風運

表 1. 北半球対流圏全体の偏差場の運動、有効位置エネルギーの和を、それぞれの領域で積分したエネルギー変換、生成で生成するのにかかる時間（日）。各変換項は、地表から 100hPa まで鉛直積算したものから領域積分している。東太平洋は $20^{\circ}\text{N} - 70^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E} - 180^{\circ}\text{E}$, 西太平洋は $20^{\circ}\text{N} - 70^{\circ}\text{N}$, $180^{\circ}\text{E} - 120^{\circ}\text{W}$ と定義した。

	北半球対流圏	西太平洋	東太平洋
CK	22.7 日	20.3 日	234.6 日
CP	3.9 日	4.8 日	83.8 日
CQ	-7.9 日	-12.0 日	-31.0 日
CK _{HF}	5.6 日	39.0 日	7.8 日
CP _{HF}	-9.6 日	-12.0 日	-117.0 日

動量運動量フラックスの発散が東風偏差を強化するため、WP に伴う運動エネルギーを増加させようとしている(図 5 上図)。また、対流圏下層では北の作用中心付近の高温偏差と南の作用中心付近の低温偏差が、それぞれ移動性擾乱に伴う極向き熱輸送の発散と収束に対応し、偏差場の有効位置エネルギーを減少させるように働く(図 5 下)。

各変換項の定量的に評価するため、変換効率を求めた(表 1)。これは各領域における各エネルギー変換項だけで、WP パターンに伴う偏差場の運動エネルギーと有効位置エネルギーの和(以下全エネルギー)を賄うのにかかる日数を表している。負の値はダンピングを表している。北半球対流圏では傾圧エネルギー変換が卓越し、4 日間

程度で全エネルギーを賄い得ることがわかる。Nakamura et al (1987)等の先行研究では、テレコネクションパターンの維持・形成に CK が重要であると考えられてきたが、本研究結果は WP パターンの維持・形成には傾圧エネルギー変換が重要であることを示した。また、CK_{HF} も重要であり、5.6 日間で全エネルギーが賄い得ることがわかる。領域ごとのエネルギー変換の寄与を考えると、西太平洋では CP_{HF} によって偏差場の有効位置エネルギーが奪われ、東太平洋では CK_{HF} により偏差場の運動エネルギーが増大している。

6. まとめ

本研究は、長期再解析データを用いて WP パターンを同定し、その 3 次元的構造と維持・形成メカニズムについて調べた。WG81 で解析に用いられたものより長い期間では PNA パターンが北太平洋上で卓越していた。しかし、PNA の影響を取り除くことで明瞭な WP と NPO の南北双極子構造をそれぞれ確認できた。これは WP と NPO を同一の現象とした先行研究を支持しない結果となった。また、WG81 が解析した期間では WP が明瞭なテレコネクティビティの極大域を持つ一方、他の期間では極大域を持たないことから WP の長期変調を見いだした。

合成図解析により、WP パターンは傾圧的な構造を持つことが明らかになった。これに伴う南北および東西方向の熱フラックスが、それぞれ気候平均気温場の南北・

東西温度勾配を横切ることにより、傾圧エネルギーを気候平均場から得ている。これがWPの維持・形成に大きく寄与していることが定量的に確かめられた。また、移動性擾乱による運動エネルギーの増加もWPの維持・形成に大きく寄与している。以上のことから、WPパターンが特定の外部強制によって励起されるテレコネクションパターンではなく、大気の内部分力学によって維持・形成される現象であることが示唆される。

本研究では月平均場に見られるWPパターンを解析した。しかし、しばしばWPパターンは1ヶ月よりも短い時間スケールの変動を示すため、今後は日毎データに基づいたWPパターンの時間発展を解析することが今後の課題である。

参考文献

- Kalnay, E., and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Monthly Weather Review*, **124**, 1224-1237.
- Kosaka Y., and H. Nakamura, 2006: Structure and dynamics of the summertime Pacific - Japan teleconnection pattern. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **132**, 2009-2030.
- Hoskins, B. J., I. N. James, and G. H. White, 1983: The shape, propagation and mean-flow interaction of large-scale weather systems. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1595-1612.
- Linkin M. E., and S. Nigam, 2008: The North Pacific Oscillation-West Pacific Teleconnection Pattern: Mature - Phase Structure and Winter Impacts. *J. Climate*, **21**, 1979-1997.
- Nakamura, H., M. Tanaka, and J. M. Wallace (1987), Horizontal structure and energetics of Northern Hemisphere wintertime teleconnection patterns, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 3377-3391.
- Simmons, A. J., J. M. Wallace., and G. W. Branstator, 1983: Barotropic wave propagation and instability, and atmospheric teleconnection patterns. *J. Atmos. Sci.* **40**, 1363-1392.
- Walker and Bliss, 1932: Walker, G. T., and E. W. Bliss, 1932: World weather V. *Mem. Roy. Meteor. Soc.*, **4**, 53-84.
- Wallace, J. M., and D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.* **109**, 784-812.