

冬季極東域における寒暖で分類した El Niño 発生時の中高緯度大気の応答

The Mid-latitude Responses Categorized by the Winter Climate in the Far East during El Niño

塩崎 公大⁽¹⁾・榎本 剛・高谷 康太郎⁽²⁾

Masahiro SHIOZAKI⁽¹⁾, Takeshi ENOMOTO and Kotaro TAKAYA⁽¹⁾

(1) 京都大学大学院 理学研究科

(2) 京都産業大学 理学部

(1) Graduate School of Science, Kyoto University, Japan

(2) Department of Science, Kyoto Sangyo University, Japan

Synopsis

It is well-known that El Niño typically brings warm winter in the Far East and that Western Pacific (WP) and Pacific/North American (PNA) often appear. However, significant events have opposite tendencies. To understand the cause of the difference, composite analysis has been conducted using long-term reanalysis datasets. Our analysis shows that about 63% of El Niño events occurred from 1948 are classified as the warm and about 37% as the cold events. Furthermore, the WP and PNA seem to be mutually exclusive and are dominant during warm and cold winters, respectively. The SST anomaly in the Philippine Sea is negative more than that during cold winter. The SST anomaly distribution is corresponding to the Walker circulation anomaly. These differences are appeared from the fall and developed to the winter. Therefore, it is suggested that the disparate mid-latitude responses are associated with SST and the Walker circulation variations in the western Pacific Ocean.

キーワード : El Niño, 年々変動, テレコネクション, 冬季気候

Keywords : El Niño, Annual variability, Teleconnection, Winter climate

1. はじめに

熱帯太平洋における顕著な海面水温 (sea surface temperature, SST) と大気循環の変動現象である El Niño/南方振動 (El Niño/ Southern Oscillation, 以下 ENSO) は大気と海洋の相互作用により引き起こされ, 全球規模での異常気象の原因のひとつとして知られる. ENSO には東太平洋赤道域の SST が例年より高い状態が続く El Niño と低い状態が続く La Niña という位相がある. 熱帯の SST は熱帯大気対流活動を通して, 全球の大気循環に大きな影響を及ぼしているため, 熱帯における SST 変動による大気への影響は熱帯大気だけにとどまらず中高緯度大気にまで及ぶ. このように遠く離れた複数地点に影

響が伝播することをテレコネクションと呼ぶ.

ENSO による大気循環場への影響の中でも特に, Pacific/North American (PNA) パターンと呼ばれるテレコネクションパターンが現れやすいことが知られている. また, 気温場への影響も熱帯だけでなく全球規模で現れることが分かっている (Halpert and Ropelewski, 1992). その中で極東域に注目してみると, 冬 (12~2 月) の気候は El Niño 時なら暖冬に, La Niña 時なら寒冬になる傾向がある. しかしながら, 全事例でその傾向に当てはまるわけではなく, いくつかの事例では El Niño 時であるが寒冬に, La Niña 時であるが暖冬になっている.

冬季極東域の天候と大循環パターンの関係がすで

Table 1: Datasets

variables	data (monthly)	grid	period
temperature-height-SLP-wind	NCEP Reanalysis-1 (Kalnay et al., 1996)	2.5°×2.5°	1948~2017/18
SST	Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) v5 (Huang et al., 2017)	2.0°×2.0°	1918~2017/18
heating	JRA-55 (Kobayashi et al., 2015)	1.25°×1.25°	1958~2017/18

に指摘されており、極東域の天候が変化するときには2つの大循環パターンがある (Takaya and Nakamura, 2013)。それらは極東域上層に南北双極子構造を持った Western Pacific (WP)-like パターンが位置するパターンと、ユーラシア大陸上層に波列を持った Eurasian (EU)-like パターンが位置するパターンである。しかしながら、それら2つの大循環パターンと ENSO との関係については詳しく言及されていない。

一方で、El Niño 時に現れるフィリピン海における負の SST 偏差と正の海面気圧 (sea level pressure, SLP) 偏差が冬季極東域の暖冬傾向に重要であることが指摘されている (Wang et al., 2000)。このフィリピン海における気圧偏差は秋頃から正偏差となり春頃まで持続し、それに伴う南風偏差が極東域付近にまで卓越する。それゆえ、El Niño 時の極東域における暖冬傾向には西太平洋における SST 偏差と SLP 偏差が重要である。また、塩崎ら (2018) は El Niño 時における熱帯 SST 分布の変動に伴う熱帯対流圏上層の発散風偏差の卓越する位置によって、異なるテレコネクションを励起し、それが El Niño 時における日本の冬の寒暖に重要であることを示唆している。しかしながら、極東域の寒暖に対応する El Niño の発達における違いについては未解明である。そこで本研究では、冬季極東域が暖冬となる時と寒冬となる時の El Niño の発達とその特徴を明らかにし、さらに両者の違いから極東域へ異なる影響をもたらすメカニズムを考える。

第2章では本研究で用いた解析方法とデータセットを紹介する。次に第3章では El Niño を暖冬事例と寒冬事例に分類した結果および分類ごとの特徴について明らかにする。最後に第4章で本研究をまとめる。

2. 解析手法

本研究で用いたデータセットは Table 1 の通りである。解析手順は、まず 1948 年以降に発生した冬の El Niño を抽出する。ENSO に対する世界共通の定義はないが、本研究では気象庁の定義に準拠した。

次に、抽出された各事例を極東域 (25°–40°N, 100°–140°E) の 850hPa 面における気温偏差の符号を基準に暖冬事例と寒冬事例に分類する。本研究で用いる極東域の領域は冬季東アジアモンスーンの活動度をよく捉えられると知られており、先行研究 (Takaya and Nakamura, 2013) においても極東域として指定された領域である。最後に、その2つの分類ごとに気温場・高度場・SST などのコンボジット解析を行う。その際、データ期間において線形最小二乗法により算出した温暖化トレンドからのずれを偏差とした。さらに分類ごとのコンボジットに対する統計的有意性の検定には t-検定を用いた。また、暖冬事例と寒冬事例との間に統計的有意性を持つ差があるかに対しては、暖冬事例および寒冬事例それぞれの分散は未知であるため、ウェルチの検定で格子点ごとに検定統計量 T を求めた。検定統計量 T は次の通り求められる。

$$T(\bar{x}_w, \bar{x}_c, s_w^2, s_c^2) = \frac{\bar{x}_w - \bar{x}_c}{\sqrt{\frac{s_w^2}{N_w} + \frac{s_c^2}{N_c}}}.$$

ただし、 s_w^2, s_c^2 はそれぞれ

$$s_w^2 = \frac{\sum_i (x_{wi} - \bar{x}_w)^2}{N_w - 1}, \quad s_c^2 = \frac{\sum_i (x_{ci} - \bar{x}_c)^2}{N_c - 1}.$$

である。ここで、添字 w, c はそれぞれ暖冬事例、寒冬事例を表し、 x はサンプル、上線は平均、 s^2 は分散、 N はサンプル数を示す。この検定統計量 $T(\bar{x}_w, \bar{x}_c, s_w^2, s_c^2)$ は自由度 m で t 分布に従う。 m は格子点ごとに次の通り導出され、最も近い整数値に近似される。

$$m = \frac{\left(\frac{s_w^2}{N_w} + \frac{s_c^2}{N_c}\right)^2}{\frac{s_w^4}{N_w^2(N_w - 1)} + \frac{s_c^4}{N_c^2(N_c - 1)}}.$$

3. 結果

1948 年以降に発生した El Niño の分類結果は Table 2 の通りである。1948 年以降に発生した El Niño 全

Table 2: Classification

	winter climate	events	year (based on Jan)
El Niño	warm	12	52, 54, 58, 66, 69, 73, 87, 88, 92, 98, 03, 10
	cold	7	64, 70, 77, 80, 83, 15, 16

19 事例のうち 12 事例が暖冬事例に分類され、7 事例が寒冬事例に分類された。分類ごとの解析結果として、大気応答や SST 偏差分布に異なる特徴があることがわかった。

3.1 大気応答

全事例における高度場と気温場のコンボジット解析の結果は Fig. 1a, b の通りである。極東域における気温偏差を見ると、有意な暖冬傾向である。また、500 hPa 面における高度偏差を見ると PNA パターンが卓越している。これらの結果はこれまで一般的に知られていた影響に矛盾しない。一方で、暖冬事例のコンボジット解析の結果は Fig. 1c, d の通りである。高度偏差に注目すると、日本の東側とその北側に作用中心を持つ WP-like パターンが卓越している。これは上層の偏西風が北にずれることに一致する。これらの高度偏差はおおよそ順圧的な構造をしているため、日本付近の天候は日本の東側の高気圧性偏差により南風成分が卓越する。そのため、冬季東アジアモンスーンは弱くなり、日本付近は暖冬傾向となる。この結果は Takaya and Nakamura (2013) の結果に整合的である一方で、ENSO 時によく現れる PNA パターンは不明瞭である。次に、寒冬事例の高度偏差と気温偏差のコンボジット解析の結果は Fig. 1e, f の通りである。極東域付近における気温偏差を見ると有意ではないが、中国から北太平洋にかけて負偏差が位置している。高度偏差に注目すると、暖冬事例と異なり WP パターンは見られない一方で、PNA パターンが卓越している。有意ではないが EU-like なユーラシア大陸上の波列の一部である中国上の負偏差が位置していることにより、東アジアモンスーンの活動度が強化されている。

3.2 SST, SLP, 下層風

分類ごとの El Niño 時における熱帯の特徴を明らかにするため、熱帯 SST および対流圏下層の循環における変動に注目した。SST, SLP, 対流圏下層風の偏差のコンボジット解析の結果を Fig. 2 に示す。全事例 [Fig. 2a] を見ると、東太平洋赤道域に正の SST 偏差、その周囲に馬蹄形をした負偏差が位置している。また、海洋大陸付近における SST も正偏差となっており、El Niño 時における特徴に一致する。SLP と風の偏差に注目すると、フィリピン海から日

本の東側に正の SLP 偏差が位置していおり、日本付近にまで南風偏差が卓越している。これは Wang et al., (2000) で指摘されたことに整合的である。

次に、典型事例 [Fig. 2b] を見ると、全事例で見られた特徴が強められている。そのため、日本付近に向かう南風偏差がより強くなっており、暖冬傾向に矛盾しない。さらに、インド洋海盆昇温も見られる。

一方で、非典型事例 [Fig. 2c] では東太平洋赤道域における正の SST 偏差の中心は東よりになっている。また、馬蹄形の負偏差や海洋大陸周辺における偏差の振幅も弱くなっている。それに伴って、SLP 偏差および有意な風の偏差はほとんど見られない。南インド洋において振幅の大きな正の SST 偏差が見られるが、海盆全体ではその昇温傾向は有意ではない。すでにインド洋海盆昇温がフィリピン海における正の SLP 偏差の強化に寄与することが指摘されている (Watanabe and Jin, 2002)。したがって、このインド洋における SST 偏差に振幅の違いも冬季極東域の天候に重要であることが示唆される。

3.3 加熱偏差分布

WP や PNA を励起しうる加熱偏差とその分布を明らかにするため、JRA-55 を用いた熱帯大気加熱偏差分布を解析した結果を Fig. 3a, b, c に示す。暖冬事例、寒冬事例ともに顕著な加熱偏差は太平洋に分布している。暖冬事例では赤道に沿って分布する正偏差の振幅が大きく、10°N に沿って分布する負偏差はフィリピン海上で振幅が大きく、また 170°E から 160°W では見られない。3.2 節で述べたフィリピン海における正の SLP 偏差はこの負の加熱偏差に対する Gill 応答 (Gill, 1980) と解釈できる。SST 偏差に伴って対流活動が東側に移動することによって、西太平洋における対流活動に伴う水蒸気凝結時の潜熱解放が減少する。つまり、これを負の加熱偏差と考え、その冷源に対する大気応答が正の SLP 偏差となっている。

一方で寒冬事例では、赤道に沿って分布する正偏差の振幅は暖冬事例より小さく、フィリピン海における負偏差はほとんど見られない。しかし、暖冬事例では見られなかった負偏差が日付変更線付近にも分布している。これらの分布の違いは、SST 偏差分布に伴う熱帯対流活動の変化によって、海面からの

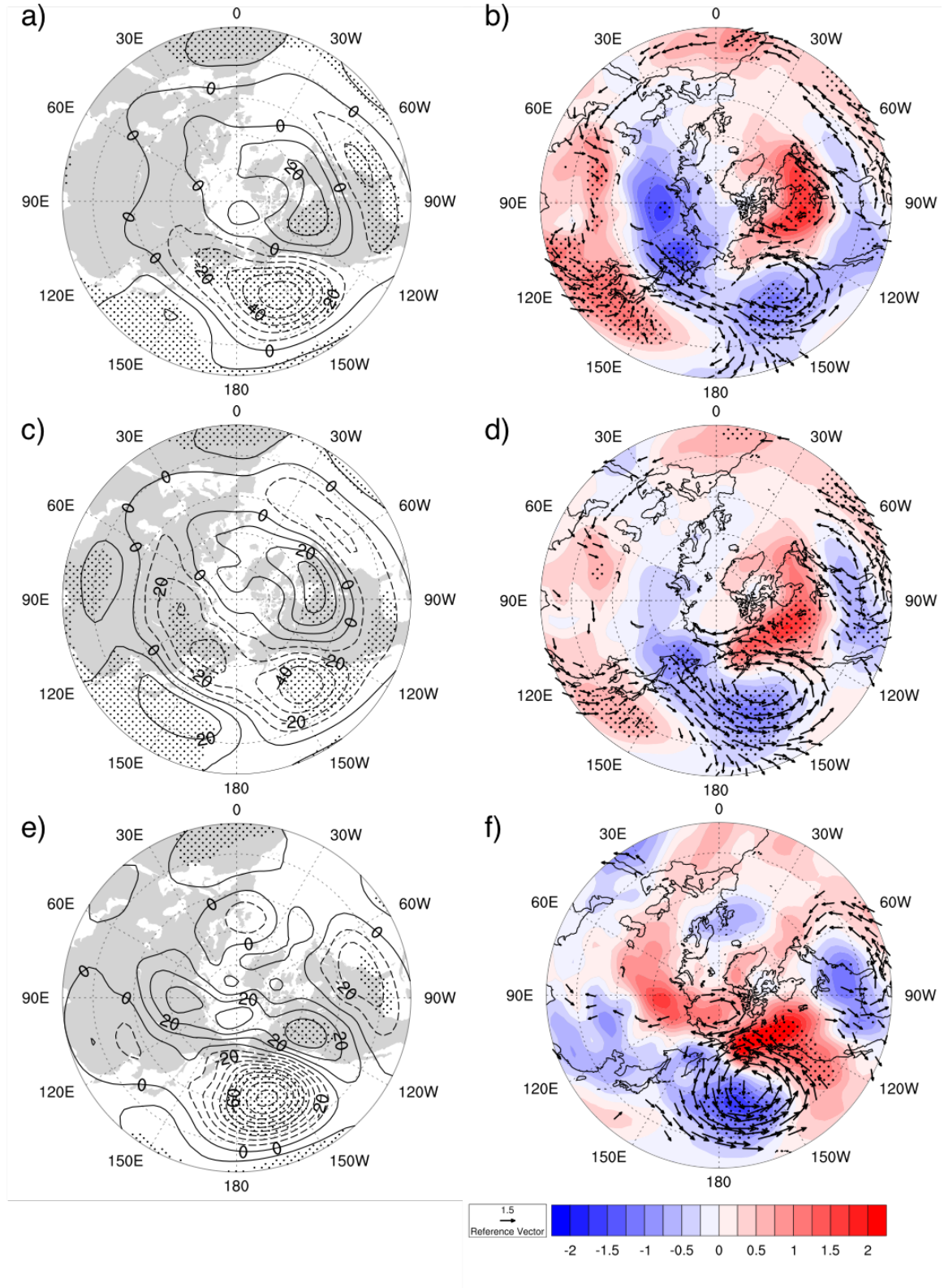


Fig. 1: The height anomalies in 500 hPa (contour, m, (a, b, c)) and the temperature anomalies (shades, K, (d, e, f)) and the wind anomalies (arrow, m/s) in the 850 hPa during all El Niño events (a, d), warm winter (b, e), cold winter (c, f), respectively. The arrows and hatches show anomalies with statistic significant (90%).

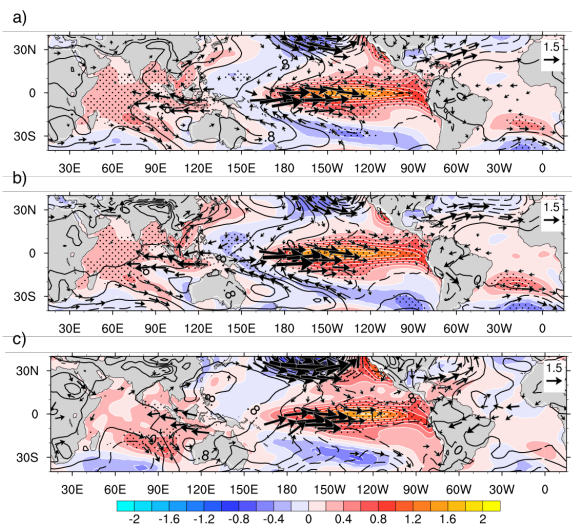


Fig. 2: Sea-surface temperature (K, color shades), sea-level pressure (hPa, contours), and wind (m/s, arrows) anomalies for during El Niño in (a) all, (b) warm, and (c) cold winters at the 850 hPa surface, respectively.

水蒸気供給とその凝結に伴う潜熱解放や雲量の変化に伴う放射量の変化によってもたらされる。暖冬事例と寒冬事例における大気加熱偏差の差を Fig. 3d に示す。SST における差の分布とよく似た分布をしており、ウォーカー循環が暖冬事例の方が寒冬事例よりも弱化していることに矛盾しない。

3.4 暖冬事例と寒冬事例における SST の差とその時間変化

これら暖冬事例と寒冬事例における SST と対流圏下層の循環の違いを明確にするため、暖冬事例から寒冬事例を差し引いた結果を Fig. 4 に示す。熱帯域では中央太平洋、フィリピン海、およびピスマルク、ソロモン海に有意な差が見られた。つまり、暖冬事例では西～中央太平洋における SST 偏差勾配が大きく、寒冬事例では小さいことを意味する。これはウォーカー循環が暖冬事例の方が寒冬事例よりも弱化していることに一致する。さらに、これらの海域における SST 偏差に明瞭な違いがいつから現れるのか明らかにするために、海域ごとの SST 偏差を調査した結果を Fig. 5 に示す。どの海域においても秋頃から差が大きくなり冬頃にその差のピークを迎えていることが分かった。

秋 (SON) における SST 偏差と対流圏下層の循環偏差を Fig. 6 に示す。暖冬事例では、東西双極子状の SST 偏差分布となるインド洋ダイポールモード (IOD) に似た SST 偏差分布をしている。また、中央太平洋における SST 偏差は有意な正偏差をして

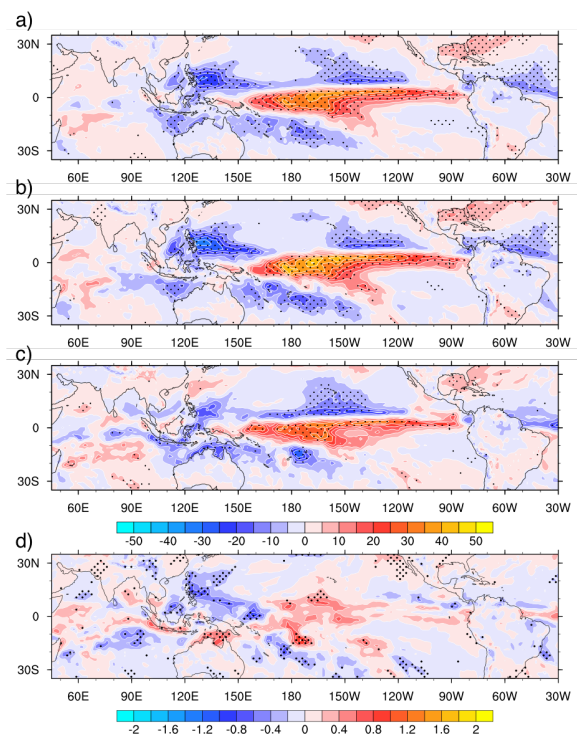


Fig. 3: Panels a-c are same as Fig. 2 but for vertical integrated heating (K/day, color shades) and Panel d is the difference between warm and cold winters (b-c).

いる。一方で寒冬事例では、インド洋において IOD に似た SST 偏差分布ではなく、赤道から離れた海域で昇温傾向が見られる。このような SST 偏差に一致するように、ウォーカー循環偏差に対応する対流圏下層風偏差が海洋大陸から東西に向かって分布している。この対流圏下層風偏差は暖冬事例の方が大きく、その中心は寒冬事例より約 15° 西にずれている。

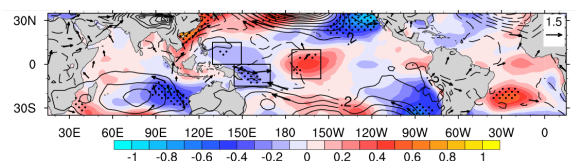


Fig. 4: Same as Fig. 3d but for the differences of sea-surface temperature (K, color shades), sea-level pressure (hPa, contours), and wind (m/s, arrows) anomalies between warm and cold winter events. Rectangles represent areas of the Philippine Sea (left), the Bismarck and Solomon Sea (middle), and the central Pacific Ocean (right).

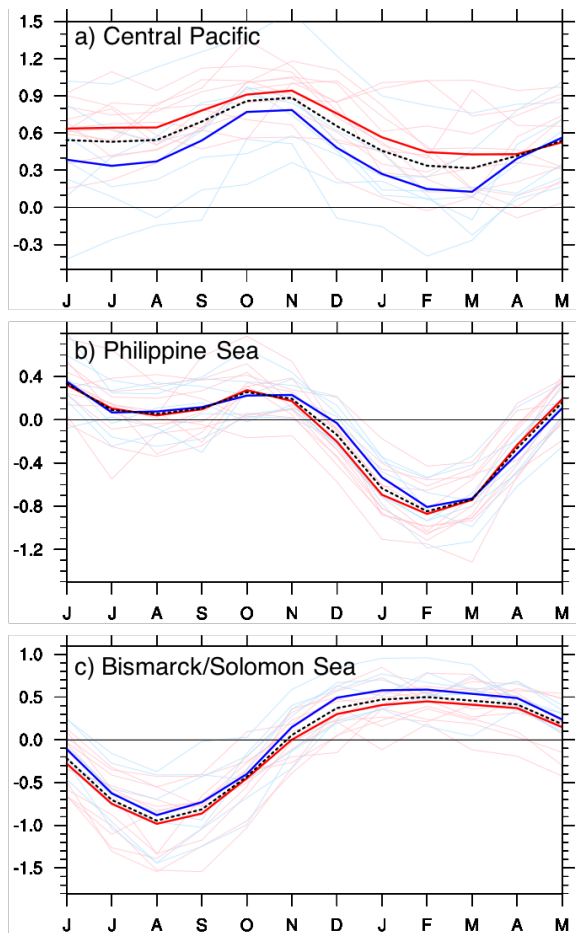


Fig. 5: Time series of the SST anomaly (K) in the boxes shown in Fig. 4. The red and blue lines are warm winter and cold winter events mean, respectively. The pink and sly blue lines are individuals in warm and cold winters. The broken line is all-mean.

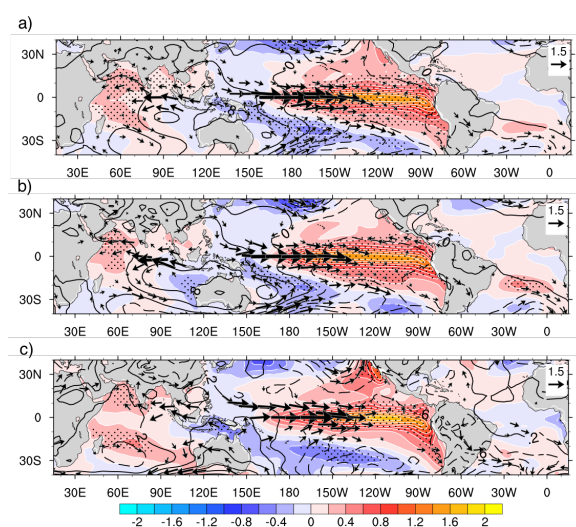


Fig. 6: Same as Fig. 2 for fall (Septemer, October, and November).

4. まとめ

これまでの知見では, El Niño 発生時には東太平洋赤道域において顕著な正の SST 偏差が分布し, その大気応答として PNA が卓越し, 極東域の天候は暖冬傾向にあると言われていた. 本研究では El Niño 時における冬季極東域の天候が必ずしも暖冬になるわけではない点に注目し, El Niño 時における冬季極東域の寒暖に対応する大気および海洋の特徴を明らかにした.

本研究の解析により, El Niño 時における極東域の暖冬事例では WP が卓越しており, 寒冬事例では PNA が卓越していることが明らかとなった [Fig. 1]. また, 全 19 事例のうち暖冬事例は 12 事例, 寒冬事例は 7 事例であり [Table 2], PNA は事例数が少ないものの高度偏差の振幅が大きいため, 全事例平均でも現れることが分かった. El Niño には WP が卓越するタイプと PNA が卓越するタイプがあり, この 2 つのタイプの SST 偏差の差は中央太平洋で 0.6K 程異なっていることがすでに指摘されている (Kodera, 1998). この WP タイプおよび PNA タイプは本研究における暖冬事例および寒冬事例に対応する.

一方で本研究では, 熱帯 SST 偏差分布の差において中央太平洋に加え西太平洋で有意な差として見られた [Fig. 4]. これは統計解析に用いたサンプル数が増加したことに起因すると考えられる.

さらに, 暖冬事例では中央太平洋における正偏差と西太平洋における負偏差の振幅が大きく, 寒冬事例では小さい. これに伴い, フィリピン海における高気圧性循環は暖冬事例において強く, 極東域に向かう南風偏差が卓越している [Fig. 2].

暖冬事例における西太平洋の特徴は Wang et al, (2000) において指摘された El Niño 時における西太平洋の特徴に一致する. この西太平洋における高気圧性循環の発達にはインド洋海盆昇温が寄与していることが Watanabe and Jin (2002) で指摘されている.

インド洋における SST 偏差分布の違いは南インド洋に限定されているが, 暖冬事例ではインド洋全体で有意な昇温傾向が見られることから, これに矛盾しない. このようなインド洋, 西/中央太平洋における SST 偏差における差異は秋頃から見られるようになる [Fig. 5]. 暖冬事例では寒冬事例より早くからウォーカー循環の弱化が見られ, さらに対流偏差の中心が西にずれている. そのため, フィリピン海における SST は Wind-Evaporation-SST (WES) フィードバックにより低下することで, 暖冬事例におけるフィリピン海の SST 偏差は寒冬事例より強い負偏

差となり高気圧性循環を卓越させる。

したがって、El Niño 時の寒暖には WP, PNA が対応し、西/中央太平洋における SST 偏差および西太平洋における対流偏差が異なっていることが明らかとなった。しかし、WP や PNA の励起メカニズムやウォーカー循環偏差の弱化和位置が異なることについては未解明であるため今後の調査が必要である。

参考文献

- 塩崎公大・榎本剛・高谷康太郎 (2018): エル・ニーニョ時の対流圏上層の大気応答と日本の冬の寒暖の関係。京都大学防災研究所年報 第 61 号 B, pp.372–379.
- Gill, A. E. (1980): Some simple solutions for heat-induced tropical circulation, *Q. J. Roy. Met. Soc.*, **106**, 447–462.
- Halpert, M. S., and C. F. Ropelewski, 1992: Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation. *J. Climate*, **5**, 577–593.
- Huang, B., Thorne, P. W., Banzon, V. F., Boyer, T., Chepurin, G., Lawrimore, J. H., Menne, M. J., Smith, T. M., Vose, R. S., and Zhang, H. -M. (2017): NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST), Version 5.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., R. Kistler, Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Roy Jenne, and Dennis Joseph (1996), The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437–470.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi (2015): The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Met. oc. Jap.*, 93(1), 5–48.
- Takaya, K. and Nakamura, H. (2013): Interannual variability of the East Asian winter monsoon and related modulations of the planetary waves. *J. Climate*, **26**, 9445–9461.
- Wallace, J. M. and Gutzler, D. S. (1981): Teleconnection in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 784–812.
- Wang, B., Wu, R., and Fu, X. (2000): Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J. Climate*, **13**, 1517–1536.
- Watanabe, M., and F-F., Jin. (2002): Role of Indian Ocean warming in the development of Philippine Sea anticyclone during ENSO *Geophysical Research Letters*, **29**, 116-1–116-4.
- Yuan, Y., and S. Yang (2012): Impacts of different types of El Niño on the East Asian Climate: Focus on ENSO cycles. *J. Climate*, **25**, 7702–7722.

(論文受理日: 2019 年 6 月 13 日)