

306 (大気海洋相互作用；モンスーン；異常気象)

3. 熱帯大気海洋結合変動がもたらす東アジアへの遠隔影響

小坂 優*

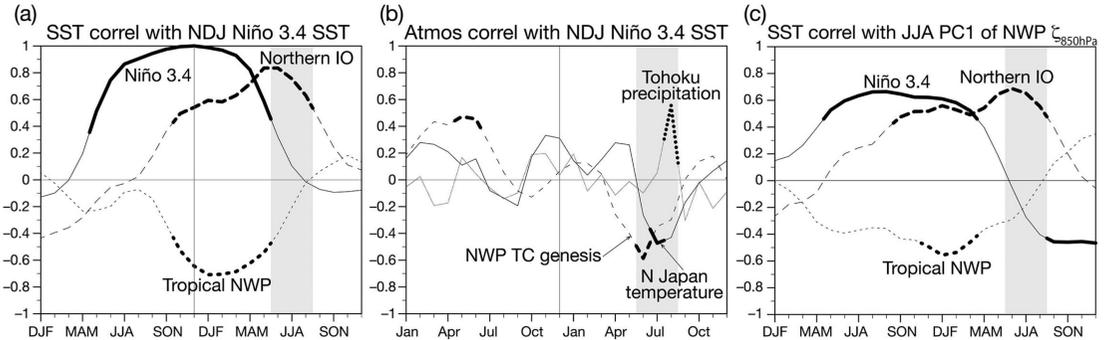
1. はじめに

エルニーニョ・南方振動 (El Niño-Southern Oscillation ; ENSO) は気候システムにおいて最も顕著な大気海洋結合変動現象である。ENSO の正位相であるエルニーニョ現象は、世界中に異常気象をもたらすものとしてその名が一般にも広く知られるようになった。ENSO の発達・維持に関わる基本的なメカニズムは太平洋赤道域に内在するが、その影響は大気循環の変化を介して世界各地に広がる。この「遠隔影響」により ENSO が各地に異常気象を引き起こす一方で、ENSO は発生から衰退まで 1 年ほどをかけてゆっくりと時間発展するため、各地の天候を数ヶ月先

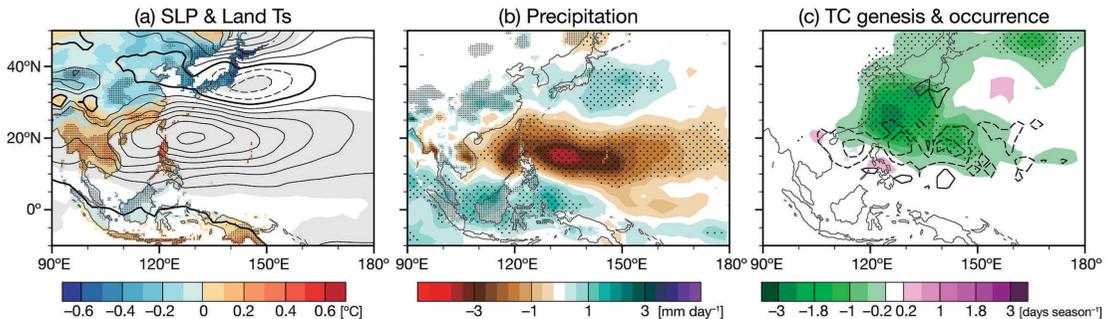
まで予測するための最も重要な要素でもある。特に、太平洋-北米 (Pacific-North America ; PNA) 遠隔影響パターンを介した ENSO の北米への強い影響とその季節予測可能性のため、1980年代にこの熱帯-中緯度遠隔影響の研究が一気に花開いた。一方、ENSO からアジアへの遠隔影響の研究は1990年代になって活発化してきた。

典型的な ENSO に伴う赤道東太平洋海面水温偏差は北半球の初夏に顕在化し、初冬に極大に達したのち、翌夏には消失する (第 1 図 a ; 以下、季節は北半球のものとする)。ENSO が衰退した直後の夏、太平洋-日本 (Pacific-Japan ; 以下 PJ) 遠隔影響パターンが発達し東アジア・北西太平洋域に顕著な気候偏差をもたらすことが見いだされ (第 1 図 b ; Huang *et al.* 2004), 以来この遅延遠隔影響のメカニズムと予測可能性が ENSO-アジアモンスーン変動研究の主要な

* 東京大学先端科学技術研究センター。
ykosaka@atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp
© 2019 日本気象学会



第1図 (a, b) ENSO 指数 (11~1月 Niño3.4海面水温) に対するラグ相関。(a) Niño3.4 (実線), 北インド洋 ($5^{\circ}\text{--}25^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\text{--}100^{\circ}\text{E}$; 破線), 熱帯北西太平洋 ($10^{\circ}\text{--}20^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{--}170^{\circ}\text{E}$; 点線) における3ヶ月移動平均海面水温。(b) 北日本 ($37^{\circ}\text{--}46^{\circ}\text{N}$, $138^{\circ}\text{--}146^{\circ}\text{E}$) 月平均気温 (実線), 北西太平洋台風発生数の3ヶ月移動平均 (破線), 東北地方 ($37^{\circ}\text{--}42^{\circ}\text{N}$, $138^{\circ}\text{--}142^{\circ}\text{E}$) 月間降水量 (点線)。(c) aと同様。ただし6~8月平均PJ指数 (北西太平洋域における850 hPa 渦度の第1主成分時系列) に対するラグ相関。太線は t 検定で95%信頼限界を超える相関を表す。



第2図 正位相のPJパターンの水平構造と気候影響。(a) 海面気圧偏差 (等値線, 0.2 hPa 毎) と陸面気温偏差 (陰影), (b) 降水偏差。(c) 半径500 km 以内の台風発生数偏差 (等値線, $0.2\text{ 個 season}^{-1}\text{ 毎}$) 及び通過頻度偏差 (陰影)。(a, b) は6~8月における月々の偏差, (c) は3ヶ月積算偏差。点描・灰色の影はそれぞれ陰影及び等値線で示した偏差について, t 検定で95%信頼限界を超えることを表す。

研究トピックの一つになった。大気循環偏差が対流圏内のプロセスだけで一ヶ月以上持続するとは考えにくい。この遅延影響をもたらすメモリがどこにあり、それがどのように大気偏差を励起するかが研究の焦点である。本講演は、近年大きく進展したこの問題に関する研究をレビューする。

2. PJ パターン

Nitta (1987) は夏季の月々の高層雲量変動にフィリピン東沖と中緯度北西太平洋域 (本州を含む) に極大を持つダイポール構造が卓越することを発見し、この遠隔影響をPJパターンと名付けた。南シナ海~フィリピン沖で対流活動が平年よりも不活発なとき (これを本講演では正位相と定義する), PJパターン

は小笠原高気圧を南偏させて沖縄・奄美を除く日本に冷夏・多雨をもたらすとともに、夏の台風襲来を抑制する傾向がある (第2図)。反対にフィリピン沖で対流活動が平年よりも活発なとき、PJパターンは九州以北の日本に暑夏・空梅雨と夏台風の頻繁な襲来をもたらしやすい。

PJパターンは、熱帯北西太平洋 (フィリピン付近) の積雲対流活動変動に伴う非断熱加熱偏差が励起するロスビー波列 (Huang and Sun 1992), あるいはそれが背景の大気循環や梅雨前線と相互作用する大気内部変動モード (Lu and Lin 2009; Kosaka and Nakamura 2010; Hirota and Takahashi 2012) と概ね考えられている。いずれにせよ、熱帯太平洋域の積雲対流活動偏差が主要なエネルギー源である点は一致して

いる。

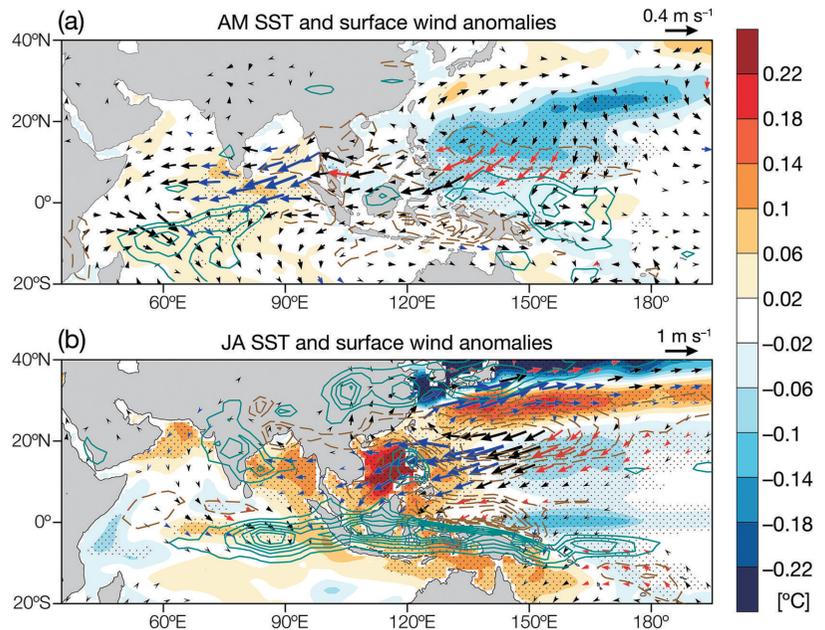
Nitta (1987) の有名な模式図では、負位相のPJパターンを励起する熱帯対流活動強化が、その直下の海面水温上昇によってもたらされるように描かれている。今世紀に至るまで、熱帯では一般に対流活動の経年変動はその直下の海面水温変動によって駆動されると考えられており、Nitta (1987) の模式図もこのイメージと合致する。しかし今世紀に入って、対流活動と海面水温の経年変動は夏季熱帯北西太平洋・南シナ海の広い範囲で負の局所相関を持つことが示された (Wang *et al.* 2005)。これは熱帯北西太平洋において海洋が大気に受動的に変動する可能性を示唆し、あたかもPJパターンに季節予測可能性 (一ヶ月以上先の予測可能性) がないことを意味するように思われる。しかし実際には、PJパターンはその直前のENSOと有意な相関を持ち (第1図c)、エルニーニョ現象の翌夏には正のPJパターンが発達しやすい。そしてこの関係こそが、夏季東アジアにおける季節予測可能性の主要因の一つである。

3. 大気海洋相互作用

ENSO 衰退後にPJパターンを励起するメカニズムとして、Xie *et al.* (2009) が提示した「インド洋キャパシター (コンデンサ) 効果」がよく知られている。エルニーニョ現象はその最盛期にウォーカー循環の変化を介して熱帯インド洋を加熱し、これに応答して熱帯インド洋全体で海面水温が上昇し、翌春に極大を迎える (第1図a)。このときすでに赤道太平洋の海面水温偏差は減衰を始めており、夏を迎える頃には消失する。しかしインド洋の暖かい状態は続いており、大気に暖かい赤道ケルビン波が励起され西太平洋に伝播する。(海面水温偏差は南北非対称だが、大気の背景場も非対称な

め赤道対称な応答が励起される。) 西太平洋では、ケルビン波に伴う赤道低圧部に向かって収束する海上風がその南北に海上発散を作り出し、対流を抑制する。あるいは、ケルビン波に伴う赤道下の下層東風偏差がその南北に作り出す高気圧性シアーが熱帯擾乱の発達を抑制する (Terao and Kubota 2005)。いずれにせよ、対流抑制は熱帯収束帯が位置する北半球側で対流フィードバックにより強化され、正位相のPJパターンを励起する。このメカニズムでは、ENSO 衰退後の夏季に現れるPJパターンはインド洋海面水温偏差によって遠隔強制される受動応答である。

近年、このキャパシターメカニズムからさらに一歩踏み込み、PJパターンとインド洋-熱帯北西太平洋が相互作用する大気海洋結合モードが提示されている (第3図)。その主要なメカニズムとして、上のキャパシターメカニズムを拡張した海盆間フィードバックと、熱帯北西太平洋での風-蒸発-海面水温 (wind-evaporation-sea surface temperature; WES) フィードバックが考えられる。正のPJパターンに伴



第3図 ENSO を人為的に抑制した大気海洋結合モデル実験におけるPJパターンに伴う海面水温偏差 (陰影)、海上風偏差 (矢印; 赤と青の矢印はスカラー風速偏差がそれぞれ+0.1, -0.1 ms^{-1} を超えることを示す)、降水偏差 (等値線, 0.1 mm day^{-1} 毎)。夏季のPJパターンに伴う (a) 4~5月, (b) 7~8月の偏差。点描は海面水温偏差が t 検定で95%信頼限界を超えることを表す。Xie *et al.* (2016) より一部改変。

い、南シナ海～フィリピン沖の対流抑制に強制された冷たい大気ロスビー波が西向きに位相伝播し、その南縁に沿う海上東風偏差が北インド洋で夏季モンスーンに伴う西風を弱め海洋を暖める。暖かい北インド洋はキャパシターメカニズムと同様に熱帯北西太平洋で対流を抑制する（海盆間フィードバック；Kosaka *et al.* 2013）。他方、熱帯北西太平洋の北東貿易風域では、対流抑制がその北西側に励起する冷たい大気ロスビー応答に伴い、その南東縁に沿った海上北東風偏差が海上貿易風を強め蒸発を促進し、海面水温を低下させて対流をさらに抑制する（WES フィードバック；Wang *et al.* 2003, 2013）。

これら2つのフィードバックの鍵となるのは背景の海上風である。即ち、対流活動偏差の東側で卓越する偏東貿易風がWESフィードバックを、西方で卓越する偏西季節風が海盆間フィードバックを可能にする。この貿易風と季節風の合流域は、春から夏にかけてインドシナ半島からフィリピン東沖へと東進する。Xie *et al.* (2016) は大気海洋結合モデル中で熱帯東太平洋の海面水温変動をモデル気候値へと緩和しENSOを抑制したNoENSO実験において、春から夏にかけて対流活動偏差がこの背景風の合流域とともに東進し、夏にPJパターンを励起するインド洋-西太平洋キャパシター (Indo-western Pacific Ocean capacitor ; IPOC) モードを提示した。季節風域の東進と貿易風域の後退に伴い、IPOCモードを維持する主要なプロセスはWESフィードバックから海盆間フィードバックへと季節変化する（第3図）。IPOCモードはENSOなしでも存在する内部モードであるが、ENSOはその衰退期にIPOCモードを励起し、その大気側の顕れであるPJパターンが夏季東アジアに影響すると考えられる。

4. 十年規模変調

ENSO衰退後の夏季に熱帯インド洋～北西太平洋に現れる気候偏差とそのメカニズムは、衛星データが得られる1970年代末からの観測に基づいて研究が進められた。のちの研究で、この統計関係は数十年規模で変調し、1950年代～70年代にかけては弱く（Xie *et al.* 2010）、それ以前も関係が強い時代と弱い時代を繰り返してきたことが発見された（Chowdary *et al.* 2012；Kubota *et al.* 2016）。今世紀に入り、このENSOの翌夏への影響が再び弱い時代に入ったようにも見える。ENSOとフィリピン付近の気圧・降水偏差と

の関係が熱帯インド洋海面水温偏差との関係と同期して変調することは、ENSOが翌夏の北西太平洋にもたらす気候影響に熱帯インド洋が関与していることを実証する一方で、この長期変調自体のメカニズムはまだ研究の途上である。

5. おわりに

夏季熱帯北西太平洋はその西方の偏西季節風と東方の偏東貿易風の合流域にあたり、これが2つの大気海洋相互作用を介して対流活動偏差を維持する。さらに合流した下層風は南西風となって中緯度北西太平洋に向かい、この背景循環がPJ大気循環偏差パターンの存在を可能にする。これらのメカニズムは、PJパターンを伴う顕著な変動がなぜ夏季北西太平洋域に存在するのかを説明する。加えてENSOがその衰退期にこの大気海洋結合変動を励起するため、ENSOの一生の最後のシグナルはその主舞台である東太平洋を離れてインド洋-北西太平洋で発達すると言える。

2015年冬季に極大を迎えたエルニーニョ現象は観測史上でも特に強い事例の一つとなり、その衰退直後に当たった2016年夏は正のPJパターンの発達が統計的に予想される。実際に、6～7月は南シナ海・フィリピン海で降水が少なく下層で高気圧偏差となり、長江流域では多雨により洪水が起きた。しかし日本では第2図aとは逆に全国的に暑夏となった。PJパターンの励起源はENSOだけではなく、また言うまでもなくPJパターンは夏の日本の天候に影響する様々な大気変動現象の一つに過ぎない（Wakabayashi and Kawamura 2004）。多様な変動現象の影響を定量化することは一筋縄では行かないが、異常気象研究における今後の重要な挑戦と言えるだろう。

参考文献

- Chowdary, J. S., S.-P. Xie, H. Tokinaga, Y. M. Okumura, H. Kubota, N. Johnson and X.-T. Zheng, 2012: Interdecadal variations in ENSO teleconnection to the Indo-Western Pacific for 1870-2007. *J. Climate*, 25, 1722-1744.
- Hirota, N. and M. Takahashi, 2012: A tripolar pattern as an internal mode of the East Asian summer monsoon. *Clim. Dyn.*, 39, 2219-2238.
- Huang, R. and F. Sun, 1992: Impact of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70, 213-256.
- Huang, R., W. Chen, B. Yang and R. Zhang, 2004: Recent

- advances in studies of the interaction between the East Asian winter and summer monsoons and ENSO cycle. *Adv. Atmos. Sci.*, **21**, 407-424.
- Kosaka, Y. and H. Nakamura, 2010: Mechanisms of meridional teleconnection observed between a summer monsoon system and a subtropical anticyclone. Part I: The Pacific-Japan pattern. *J. Climate*, **23**, 5085-5108.
- Kosaka, Y., S.-P. Xie, N.-C. Lau and G. A. Vecchi, 2013: Origin of seasonal predictability for summer climate over the Northwestern Pacific. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **110**, 7574-7579.
- Kubota, H., Y. Kosaka and S.-P. Xie, 2016: A 117-year long index of the Pacific-Japan pattern with application to interdecadal variability. *Int. J. Climatol.*, **36**, 1575-1589.
- Lu, R. and Z. Lin, 2009: Role of subtropical precipitation anomalies in maintaining the summertime meridional teleconnection over the western North Pacific and East Asia. *J. Climate*, **22**, 2058-2072.
- 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.
- Terao, T. and T. Kubota, 2005: East-west SST contrast over the tropical oceans and the post El Niño western North Pacific summer monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L15706, doi:10.1029/2005GL023010.
- Wakabayashi, S. and R. Kawamura, 2004: Extraction of major teleconnection patterns possibly associated with the anomalous summer climate in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1577-1588.
- Wang, B., R. Wu and X. Fu, 2000: Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J. Climate*, **13**, 1517-1536.
- Wang, B., R. Wu and T. Li, 2003: Atmosphere-warm ocean interaction and its impacts on Asian-Australian monsoon variation. *J. Climate*, **16**, 1195-1211.
- Wang, B., B. Xiang and J.-Y. Lee, 2013: Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **110**, 2718-2722.
- Wang, B., Q. Ding, X. Fu, I.-S. Kang, K. Jin, J. Shukla and F. Doblas-Reyes, 2005: Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L15711, doi:10.1029/2005GL022734.
- Xie, S.-P., K. Hu, J. Hafner, H. Tokinaga, Y. Du, G. Huang and T. Sampe, 2009: Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. *J. Climate*, **22**, 730-747.
- Xie, S.-P., Y. Du, G. Huang, X.-T. Zheng, H. Tokinaga, K. Hu and Q. Liu, 2010: Decadal shift in El Niño influences on Indo-Western Pacific and East Asian climate in the 1970s. *J. Climate*, **23**, 3352-3368.
- Xie, S.-P., Y. Kosaka, Y. Du, K. Hu, J. S. Chowdary and G. Huang, 2016: Indo-Western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review. *Adv. Atmos. Sci.*, **33**, 411-432.